UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO INTERUNIDADES EM ENSINO DE
CIÊNCIAS

RENAN MILNITSKY

**Epistemologia e Currículo: reflexões sobre a Ciência
Contemporânea em busca de um outro olhar para a
Física de Partículas Elementares**

São Paulo

2018

RENAN MILNITSKY

**Epistemologia e Currículo: reflexões sobre a Ciência
Contemporânea em busca de um outro olhar para a
Física de Partículas Elementares**

Versão Corrigida

(Versão original encontra-se disponível tanto na Biblioteca da Unidade que aloja o Programa de Pós-Graduação quanto na Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP (BDTD))

Dissertação apresentada ao Instituto de Física, Instituto de Química, Instituto de Biociências e à Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Ensino de Física

Orientador: Prof. Dr. Ivã Gurgel

Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Gameiro Munhoz

São Paulo

2018

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo ou pesquisa, desde que citada a fonte

FICHA CATALOGRÁFICA
Preparada pelo Serviço de Biblioteca e Informação
do Instituto de Física da Universidade de São Paulo

Milnitsky, Renan

Epistemologia e Currículo: reflexões sobre a Ciência Contemporânea em busca de um outro olhar para a Física de Partículas Elementares. São Paulo, 2018.

Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo. Faculdade de Educação, Instituto de Física, Instituto de Química e Instituto de Biociências.

Orientador: Prof. Dr. Ivã Gurgel

Área de Concentração: Ensino de Física

Unitermos: 1. Física – Estudo e ensino; 2. Física moderna e contemporânea; 3. Bachelard, Gaston, 1884-1962; 4. Teorias de currículo; 5. Física de partículas - Física nuclear; 6. Epistemologia da ciência

USP/IF/SBI-108/2018

Nome: MILNITSKY, Renan

Título: Epistemologia e currículo: reflexões sobre a Ciência Contemporânea em busca de um outro olhar para a Física de Partículas Elementares. São Paulo, 2018.

Dissertação apresentada ao Instituto de Física,
Instituto de Química, Instituto de Biociências e
à Faculdade de Educação da Universidade de
São Paulo para obtenção do título de Mestre
em Ciências.

Área de Concentração: Ensino de Física

Orientador: Prof. Dr. Ivã Gurgel

Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Gameiro
Munhoz

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

AGRADECIMENTOS

O processo de escrita desta dissertação poderia ser descrito em termos de uma narrativa de muitos espaços, muitos tempos e, principalmente, de muitos personagens. Seu projeto nunca foi linear, sempre foi se desenvolvendo a partir das conversas que tive, das relações que cultivei, das discussões que travei e das mais diversas formas de aprender que se possa imaginar. É por este motivo que os agradecimentos, mais do que uma seção, ou uma burocracia a ser cumprida para a finalização deste texto, são verdadeiras de minimamente expressar minha gratidão por todos aqueles que contribuíram de alguma forma para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos professores Ivã Gurgel e Marcelo Munhoz por todo empenho, toda paciência, toda compreensão e por toda serenidade durante os vários momentos passados ao longo destes anos. Expresso minha imensa admiração pela leveza e complexidade nos comentários; pela criação de espaços formativos pelos quais sou imensamente agradecido; pela introdução ao belo, crítico e amável mundo da história e filosofia da ciência, e também ao complexo e intrigante mundo das partículas elementares; pela luta que travam todos os dias por uma educação mais crítica, politizada, humanizada e acessível e pelo acolhimento que sempre demonstraram no decorrer de todo este tempo em que trabalhamos juntos fazendo com que eu continuamente possa me tornar uma pessoa melhor.

Aos diversos palcos de docência nos quais tive o privilégio de atuar. Aos colégios Giordano Bruno, See-Saw Panamby e Nossa Senhora das Graças pela confiança, pelo acolhimento e pelos ensinamentos dos processos de construção de autonomia e na luta por uma educação cada vez politizada, conscientizada e inclusiva. Agradeço, principalmente, nestes palcos da docência, aos educandos que tornam a cada dia, a cada aula e a cada discussão travada em sala de aula um aprendizado constante e de intenso cunho reflexivo.

Aos meus queridos amigos e companheiros de graduação, Fabíola, Yuri, Rafael, Walquíria, Priscila e Gilberto pela amizade, companheirismo e intensas discussões que fizeram de minha estadia na licenciatura um caminho agradável de ser trilhado. A distância existirá, mas o tempo sempre me lembrará dos incríveis momentos que vivi com vocês ao longo destes anos.

Aos meus queridos colegas do Grupo de Teoria e História do Conhecimento Científico e Escolar pelo imenso companheirismo e preocupação que demonstraram ao longo de todos estes anos. Pelas ferrenhas e profundas discussões que possibilitaram nos corredores, nas salas e nas reuniões de grupo. Pelas divertidas saídas e momentos de alegria e descontração que trouxeram em todo este tempo de convivência

A minha mãe Sônia por toda a luta que travou sozinha ao longo de todos estes anos. Pela preocupação constante e incondicional. Por confiança e admiração que sempre demonstrou.

Por fim, àquela que é razão a tudo e que dá razão a tudo. Amiga, namorada, noiva e esposa Caroline.

Mesmo na mente lúcida, há zonas obscuras, cavernas onde ainda vivem sombras. Mesmo no novo homem, permanecem vestígios do homem velho. Em nós, o século XVIII prossegue sua vida latente; infelizmente, pode até voltar. Não vemos nisso uma prova da permanência e da fixidez da razão humana, mas antes uma prova da sonolência do saber, prova da avareza do homem erudito que vive ruminando o mesmo conhecimento adquirido, a mesma cultura, e que se torna, como todo avarento, vítima do ouro acariciado.

Gaston Bachelard

RESUMO

MILNITSKY, R. **Epistemologia e currículo:** reflexões sobre a Ciência Contemporânea em busca de um outro olhar para a Física de Partículas Elementares. São Paulo, 2018. 248p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Física, Instituto de Química, Instituto de Biociências e Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

O ensino da Física Moderna e Contemporânea (FMC) vem sendo palco para uma ampla discussão nas últimas décadas. No entanto, a realidade escolar ainda se encontra profundamente afastada de uma prática sistematizada do ensino de tópicos relativos a este período de construção do conhecimento científico. Ao contrário dos argumentos apresentados nos documentos educacionais e nas pesquisas acadêmico-científicas, o que ainda se enxerga é uma prática dominada por tópicos associados à física clássica e enviesada por uma visão de ciência profundamente comprometida com o caráter empírico-indutivista de apreensão da realidade. Neste contexto, esta pesquisa buscou promover uma reflexão sobre a dimensão epistemológica do problema de renovação curricular. Para isto, baseou-se em referenciais das denominadas teorias de currículos, compreendendo a constituição dos saberes escolares segundo as reflexões do sociólogo da educação francês Jean-Claude Forquin, e no trabalho epistemológico do filósofo da ciência francês Gaston Bachelard, acerca da novidade essencial do pensamento científico contemporâneo. Coloca-se como hipótese central que a concepção positivista de ciência, dominante na educação científica, vem exercendo enorme influência sobre a forma como discussões e propostas sobre o ensino da FMC tem sido conduzidas – ocasionando um afastamento cada vez maior entre os estudantes e as formas próprias de pensar deste período de extrema importância para a ciência. Para materialização destas reflexões, foram analisadas diversas propostas para o ensino e divulgação da Física de Partículas Elementares no nível médio, apontando que grande parcela delas vem se concentrando em disseminar uma visão reduzida à enunciação da composição da matéria por quarks e da classificação e organização das espécies de partículas. Apontamos para a necessidade de encontrar alternativas para o ensino de física de partículas, tomando seu desenvolvimento histórico como parâmetro de análise.

Palavras-chave: Física Moderna e Contemporânea. Jean-Claude Forquin. Gaston Bachelard. Física de Partículas Elementares. Epistemologia da Ciência.

ABSTRACT

MILNITSKY, R. **Curriculum and Epistemology**: reflections on the Contemporary Science in search for another at Elementary Particle Physics. São Paulo, 2018. 248p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Física, Instituto de Química, Instituto de Biociências e Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

The teaching of Contemporary and Modern Physics (CMP) have been the stage for a wide discussion in the past few decades. However, the actual school is far away from a systematized practices on teaching topics related to this period of scientific development of knowledge. Contrary to the arguments presented in the educational documents and academic researches, what we've been seen is a practice dominated by topics of classical physics e skewed by a deeply committed view of Science with an empirical-inductive character of apprehension of reality. In this context, this research sought to promote a reflection on the epistemological dimension of the curriculum renewal problem. For this, it was based on references of the curriculum theories, understating the constitution of scholarly knowledge, according to the work of the French sociologist Jean-Claude Forquin, and on the epistemological work of the French philosopher of Science Gaston Bachelard, on the essential novelty of the contemporary scientific thought. The central hypothesis is that the positivist conception of Science, dominant in the scientific education, has been exerting a strong influence in discussions and proposals about on teaching of the CMP – leading to a great distance between the students and the own ways of thinking of this period of for science. In order to materialize these reflections, several proposals for the teaching and dissemination of Elementary Particle Physics in the middle level were analyzed, pointing out that a large number of them have been concentrating on disseminate a view of particle physics reduced as a composition of matter by quarks and the classification and organization of particles species. We're pointing to a necessity of finding alternative looks for particle physics teaching, taking its historical development as a parameter of analysis.

Keywords: Contemporary and Moderna Physics. Jean-Claude Forquin. Gaston Bachelard. Elementary Particle Physics. Epistemology of Science.

Sumário

1	Introdução	16
1.1	Uma visão de Ciência e um papel para a Educação Científica	19
1.2	Panorama da pesquisa e adequações metodológicas	23
2	Construção do cenário: um problema de ordem epistemológica	27
2.1	A Física Moderna e Contemporânea e o cenário educacional brasileiro	27
2.2	As incoerências com o cotidiano escolar	32
2.3	Teorias de currículo: currículo para além de seleção de conteúdos	38
2.4	Cultura escolar e a constituição do saber escolar	40
2.5	Caricaturando a Física Escolar	47
2.6	Um problema de ordem epistemológica	55
3	A epistemologia de Gaston Bachelard	59
3.1	O mundo em descrição e a natureza do conhecimento aproximado	63
3.2	O embate com as filosofias de sua época	67
3.3	Ciência como construção e a noção de Obstáculo Epistemológico	77
4	Em busca de um outro olhar para a Física de Partículas Elementares	86
4.1	Atomismo e visão de mundo: da antiguidade à modernidade	94
4.2	Revelando a existência do universo atômico	109
4.3	O átomo como estrutura complexa e o modelo orbital e nuclear	125
4.4	A descoberta do pósitron e o complexo mundo das partículas elementares	149
4.5	A descoberta do nêutron e a simetria no núcleo atômico	159
4.6	A formulação teórica de Yukawa e as descobertas do múon e do píon	169
4.7	Partículas estranhas e a era dos grandes laboratórios	185
4.8	Simetrias e a proposição da existência do Quark	198
4.9	O diálogo razão e experimentação no desenvolvimento da Física de Partículas	210
5	Considerações finais	225
	Referências bibliográficas	232

1 Introdução

É bastante comum, na Física, situar a ocorrência de eventos no espaço e no tempo. Na História da Ciência, identificar o contexto histórico que foi palco da construção de uma ideia científica. Na Filosofia da Ciência, compreender os movimentos epistemológicos que levaram ao nascimento de determinadas ideias por determinadas comunidades científicas.¹

Esta dissertação, como se propõe a realizar uma reflexão que tem como intuito incorporar o grande universo de ideias presentes na área de pesquisa em ensino de física, também possui uma sequência de eventos espaço-temporais, situadas e influenciadas por determinados contextos históricos e profundamente incorporada em determinadas correntes epistemológicas. Não haveria sentido construí-la sem explicar a origem de seus alicerces fundamentais e é isto que será feito nesta (não tão) breve introdução, na qual pretendo ilustrar que, mais do que uma dissertação de Mestrado, este trabalho se propôs a enfrentar determinadas indagações, questionamentos e conflitos pessoais construídos ao longo do tempo e de toda minha trajetória escolar – em suma, fazer de meus anseios e devaneios, conhecimento.

Minha aproximação com a física se deu de uma forma um tanto quanto inusitada. Tendo uma trajetória escolar no ensino básico fortemente marcada por idas e vindas em dezenas de colégios das mais diversas regiões da cidade de São Paulo, acabei por não construir qualquer vinculação ou identidade com qualquer ambiente escolar e, principalmente, com qualquer disciplina ou área do conhecimento associada a ela. Neste percurso, sempre enxerguei o colégio como o cumprimento de uma série de funções burocráticas, fragmentadas em disciplinas isoladas umas das outras. Nem Matemática, nem Física, nem Filosofia, nem História (áreas do conhecimento que hoje fazem parte de meu cotidiano como docente) – nenhuma disciplina alcançou sequer um mínimo de minha atenção.

¹ Claramente temos ciência e reconhecemos que há muito mais envolvido nas investigações científicas da Física e nas reflexões e pesquisas realizadas na História e Filosofia da Ciência do que o caricato realizado neste parágrafo, sabendo que jamais poderíamos reduzi-las a isso. Reflexões sobre a natureza das áreas explicitadas serão desenvolvidas com mais propriedade nos capítulos posteriores deste trabalho, uma vez que compõe o tripé da reflexão que nos propomos a realizar.

No primeiro semestre do ano de 2008, um grande “acidente” me colocou de frente com a Física e me fez iniciar uma série de questionamentos sobre minha vida escolar que me encaminharam para a Física, para a docência e, enfim para a reflexão que proponho nesta dissertação de Mestrado. Neste ano estava programada a ativação da maior máquina até então já construída pelo homem. A mídia construía um batalhão de divulgação e nenhum detalhe passava despercebido – se tratava do grande acelerador de partículas conhecido como *LHC* (sigla em inglês para O Grande Colisor de Hádrons), abrigado pelo *CERN* (sigla em francês para Organização Européia para Pesquisas Nucleares). Neste meio tempo, tive acesso a uma obra de ficção científica bastante divulgada paralelamente à ativação do acelerador. Se tratava do livro *Anjos e Demônios*, escrito por Dan Brown, que retratava uma série de assassinatos envolvendo uma bomba construída a base de antimatéria que havia sido produzida dentro do acelerador abrigado pelo laboratório franco-suíço. O ponto em questão não era nem a obra de Dan Brown, pois nem cheguei ao final dela, mas o fato de seus primeiros capítulos descreverem com bastante detalhe grande parte da estrutura do laboratório e as pesquisas que supostamente eram realizadas ali. Apesar de ser uma obra de ficção, soube, em meio à leitura, que Dan Brown era conhecido por fazer de suas construções, campos bastantes fiéis aos palcos que utilizava – o que acabou criando uma estranha aproximação entre mim e as notícias que eram a todo tempo divulgadas sobre o acelerador e a forma como o CERN era organizado.

Este caminho me trilhou em direção a pesquisas sobre antimatéria, conceito central explorado na ficção, me colocando à frente do conhecido Modelo Padrão da Física de Partículas e que acabou, conseqüentemente, me encaminhando a grande parte do desenvolvimento da ciência na contemporaneidade – passando pelas teorias da Relatividade, a Mecânica Quântica, a Física Nuclear, a Física do Estado Sólido e as demais áreas que nasceram e se desenvolveram no decorrer de todo o século XX.

Na escola, nunca fui um aluno brilhante, mas também não era problemático, eu seria aquilo que eu mesmo denomino como “aluno burocrático”, sempre soube jogar o jogo do “Fazer Escola”². A essa altura havia acabado de terminar o 3º ano do Ensino Médio e não havia mais nenhuma vinculação com a instituição escolar, mas lá estava eu, fuçando meus antigos cadernos a procura de qualquer informação que tivesse aprendido, anotado ou

² Comentário feito em alusão aos termos utilizados em Jiménez Aleixandre, Bugallo Rodríguez A. e Duschl R.A. (2000) “Doing the Lesson” or “Doing Science”: Argument in High School genetics. Science Education.

estudado sobre essas temáticas. O que se observava era apenas um amontado de apresentações teóricas, fórmulas e exercícios resolvidos. Nada sobre a curvatura do espaço-tempo, sobre a constituição mais elementar do universo ou sobre o avanço tecnológico tanto pregado nos jornais da época e que defendiam ser viabilizados com tal avanço científico. Não havia nada no colégio que me rememorava estes assuntos, também nada havia nas lembranças de meus colegas e pouquíssimo eu encontrava nos livros didáticos que supostamente eram utilizados nas escolas.

Para mim, naquele momento, era claro que havia uma física ensinada na escola e outra completamente diferente fora dela. Que física era essa que aprendemos na escola? Por que tanta fórmula e tanta teoria junta e desconexa? Por que a única coisa que a física trazia era um conjunto de problemas e gabaritos de checagem? Onde estava aquela beleza na explicação do universo que, em menos de 3 meses, havia me encantando? Não alongarei mais nesta história pois mais detalhes dela não elucidarão nada além do que gostaria de explicitar. Depois deste momento desenvolvi um interesse bastante particular na ciência contemporânea, em especial na Física de Partículas, e ingressei, seis meses depois no curso de Licenciatura em Física. Apesar de ser profundamente grato pela formação, a graduação agravou minha percepção sobre o distanciamento cada vez maior entre a ciência contemporânea e a ciência que usualmente somos apresentados nas escolas e na própria universidade, me tornando cada vez mais crítico com relação a isto, fazendo dele a problemática central desta dissertação de Mestrado.

Seguirei adiante, agora com base mais firme que meus anseios pessoais, levantando uma discussão sobre a visão de ciência e de educação científica que fui levado a construir ao longo destes anos e que nortearam não só a condução e a problematização desta pesquisa, mas também minha postura como docente, como pensador da educação e como pensador da ciência.

1.1 Uma visão de Ciência e um papel para a Educação Científica

A própria essência da reflexão, é compreender que não se compreendera. Os pensamentos não-baconianos, não-euclidianos, não-cartesianos estão resumidos nestas dialéticas históricas que apresentam a retificação de um erro, a extensão de um sistema, o complemento de um pensamento.

Gaston Bachelard

É notadamente sabido que o final do século XIX deixa uma marca na história da ciência ao provocar mudanças drásticas nas estruturas mais fundamentais do pensamento científico. Convivemos hoje com a herança de uma ruptura epistemológica marcada pela revolução científica vivenciada na virada deste século. Conceitos fundamentais que alicerçavam grande parte das teorias científicas construídas até então, passam por retificações que reestruturam a forma como interpretamos o funcionamento do mundo físico. Segundo Albert Einstein,

Os desenvolvimentos posteriores destruíram os velhos conceitos e criaram outros novos. O tempo absoluto e o sistema coordenado inercial foram abandonados pela teoria da relatividade. O cenário de todos os acontecimentos não mais era o tempo unidimensional e o contínuo tridimensional do espaço-tempo, mas o contínuo quadridimensional de espaço-tempo, outra invenção livre, com novas propriedades de transformação. [...] A teoria quântica criou também particularidades novas e essenciais de nossa realidade. A descontinuidade substituiu a continuidade. Em vez de leis governando indivíduos, apareceram leis de probabilidade. (EINSTEIN, 2008, p.242)

Viver a ciência no século XX exigiu uma reconstrução do pensamento e uma vigilância epistemológica constante, uma vez que novos conceitos estavam sendo criados e novos objetos de estudo emergiam da escuridão causada pela impregnação na qual estava imerso todo arcabouço teórico que estruturava a Física Clássica. Ainda segundo Einstein (2008, p.243), podemos dizer que "a realidade criada pela física moderna, está, na verdade, muito afastada da realidade dos tempos idos".

É preciso dar a esse momento da história sua devida importância, pois, como Thomas Kuhn (1962) defende, as revoluções científicas exigem mudanças não apenas no âmbito científico, é preciso reconstruir a forma como enxergamos o mundo:

[...] **quando mudam os paradigmas, muda com eles o próprio mundo.** Guiados por um novo paradigma, os cientistas adotam novos instrumentos e orientam seu olhar em novas direções. E o que é ainda mais importante: durante as revoluções, os cientistas veem coisas novas e diferentes quando, empregando instrumentos familiares, olham para os mesmos pontos examinados anteriormente. É como se a comunidade profissional tivesse sido subitamente transportada para um novo planeta, onde objetos familiares são vistos sob uma luz diferente e a eles se apegam objetos desconhecidos." (KUHN, 2010, p.147, grifo nosso)

A sociedade contemporânea herda e vivencia diversas construções que foram trazidas com essa nova visão de mundo. Como um grande paradoxo, a maior máquina já construída pelo homem é utilizada para investigar o menor objeto já conhecido por ele. Vivemos em um mundo sistematizado onde é extremamente comum e cotidiano que informações sejam trocadas à velocidade da luz diversas vezes a cada segundo. Os mundos micro e nano, que antes nada mais eram que frutos de abstrações construídas a partir de modelos, se tornaram uma realidade tecnológica cada vez mais dominada pelo homem.

Neste cenário, nos vemos numa bifurcação de possibilidades: alienar-se à nova realidade construída pela física moderna e andar de olhos fechados para o mundo natural ou reconhecer que existem obstáculos que precisam ser superados e seguir em frente acompanhando a evolução que se encontra por trás do conhecimento científico contemporâneo.

O segundo caminho, nos parece, é claro, mais sugestivo, uma vez que é ele quem defenderemos aqui. No entanto, para elucidá-lo e começar a traçar reflexões sobre a educação científica, podemos retomar a estrada a partir de reflexões sobre a própria ciência. Em *Um discurso pronunciado por ocasião no sexagésimo aniversário de Max Planck*, Einstein discorre sobre o que leva um homem ao templo da Ciência:

O homem procura formar, de qualquer maneira, mas segundo a própria lógica, uma imagem simples e clara do mundo. Para isso, ultrapassa o universo de sua vivência, porque se esforça em certa medida por substituí-lo por essa imagem. **A seu modo é esse o procedimento de cada um, quer se trate de um pintor, de um poeta, de um filósofo ou de um físico.** A essa imagem e à sua realização consagra o máximo de sua vida afetiva para assim alcançar a paz e a força que não pode obter nos excessivos limites da experiência agitada e subjetiva. [...] A extrema nitidez, a clareza e a certeza só se adquirem à custa de um imenso sacrifício: a perda de visão de conjunto. [...] O resultado de uma prática tão resignada ousaria ostentar o audacioso nome de "Imagem do mundo"? Penso ser muito bem merecido este nome." (EINSTEIN, 2011, p.134, grifo nosso)

Este discurso nos leva a crer que, para Einstein, fazer ciência é mais do que uma profissão, que um esporte, que um dom ou que uma atividade lucrativa – fazer ciência é uma condição de existência no mundo. É a ação de não se deixar alienar pelas primeiras impressões que a experiência imediata e cotidiana nos passa e construir contínuos movimentos de retificação e de novas formas de conceber a realidade, sendo capaz de lidar com elas – de enxergar o mundo através dos óculos moldados por nossa visão de mundo.

Se, em certa medida, podemos considerar que esta é uma das dimensões do fazer ciência, e que o ser humano tenta, mesmo que em diferentes medidas, compreender e construir uma visão sobre o mundo no qual está inserido, deve ser responsabilidade da educação científica construir possibilidades para não o alienar dos fenômenos naturais e das discussões que envolvem questões científicas. Nessa perspectiva que acreditamos ser essencial uma formação que explore os diversos momentos da ciência, **inclusive, sua contemporaneidade**. A educação científica, assim como toda a educação, deve estar voltada para a formação do cidadão, viabilizando sua inserção no mundo e capacitando-o a reconhecer como as questões científicas podem ser compreendidas nas mais diferentes dimensões da sociedade e até mesmo nos mais diversos dilemas do intelecto humano. No entanto, essa forma de conceber a educação, direciona a reflexão a uma formação de natureza crítica, que permeie relações entre o sujeito, a sociedade e o **conhecimento**, sendo este último o instrumento emancipador que possibilita uma compreensão mais profunda da realidade que o cerca.

Portanto, pensar a educação científica sobre essa perspectiva não se restringe somente a apreensão de conceitos e teorias, deve-se situar a ciência em sua história, identificar nela os aspectos que a constituí como construção humana, impregnada de visões de mundo e de influências que, muitas vezes, extrapolam os muros da comunidade científica. É preciso mais do que nomear as fórmulas, é imprescindível reconhecer as linguagens específicas que estruturam cada área do conhecimento científico em cada período de seu desenvolvimento e refletir sobre as questões epistemológicas que a todo momento se colocam no interior de determinada ideia.

Debruçado sobre estas reflexões nos propomos a pensar sobre a natureza do conhecimento na Física Moderna e Contemporânea e também sobre os obstáculos envolvidos em sua inserção no ensino básico, tendo como fio condutor da reflexão a Física

de Partículas Elementares. Seguiremos, enfim, para a apresentação geral da proposta desta pesquisa e das adequações metodológicas que foram ajustadas para sua realização.

1.2 Panorama da pesquisa e adequações metodológicas

O processo de elaboração da pesquisa e de suas problemáticas norteadoras foi mais conturbado do que sua própria condução. Duas preocupações paralelas guiaram as reflexões iniciais deste trabalho.

A primeira delas foi a aparente contradição que identificamos entre o consenso curricular que existe sobre a introdução de Física Moderna e Contemporânea (FMC) na educação básica e as práticas escolares propriamente ditas. Nas últimas décadas, essa posição vem sendo amplamente defendida nos mais diferentes campos da pesquisa e da prática educacional. No entanto, enxerga-se ainda um forte movimento de resistência a este processo de renovação curricular, de forma que a presença de propostas com relação a esta temática no ensino básico ainda é profundamente reduzida se comparado ao cenário global da educação científica.

Nos deparamos com a segunda preocupação em meio a uma análise da primeira. No universo das propostas e materiais referentes a FMC, percebemos um conjunto de propostas que se relacionam à inserção de tópicos relacionados à Física de Partículas Elementares (FPE). Apesar de amplas e dos mais diferentes tipos de abordagem, foi possível perceber, em sua grande maioria, a apresentação do conhecimento da FPE reduzido à apresentação de um zoológico de partículas, discutindo muito pouco sua própria estrutura e história de construção e desenvolvimento.

Costuma-se apresentar de forma clara e objetiva a estrutura da matéria composta por quarks, enquanto que várias questões fundamentais são completamente negligenciadas. Por que algumas estruturas são formadas por conjuntos de 3 quarks e outras por 2? O que são as tais cores e por que existem 3? Por que existem 3 famílias de 2 quarks e não 2 de 3? Por que algumas forças podem ser unificadas e outras não? Qual o papel das simetrias? Das diversas áreas que constituem a física atual, a física de partículas é com certeza uma das que mais possuem problemas em aberto. Grande parte destas propostas, por focar em produtos passíveis de afirmação, tem levado a entendê-la como um conhecimento encerrado.

Num movimento que se iniciou nas últimas décadas, reivindicando a discussão de tópicos de FMC na educação básica, percebemos que um imenso conjunto destas propostas contribuiu para que a Física de Partículas conquistasse um espaço de discussão

na educação básica. No entanto, os anos se passaram, mas a física de partículas ainda tem sido pensada dentro deste núcleo pedagógico e epistemológico construído ao longo dos últimos anos. Será que esta é a única forma de abordar o ensino da FPE? Como pretendemos defender nesta pesquisa, a física de partículas representa muito mais do que uma área do conhecimento da física do século XX – ela traz consigo a convergência de reflexões teórico-experimentais que constituem a verdadeira dinâmica do pensamento na física contemporânea, tanto em suas construções e implicações no sentido matemático, quanto em suas realizações experimentais, sendo profundamente permeada por questões filosóficas, como colocada por Murray Gell-Mann em sua reticência de propor a existência de partículas que só existem em estados de confinamento e que jamais poderiam ser observadas isoladas diretamente na natureza:

“Eu não queria chamar tais quarks de “reais”, pois procurei evitar dolorosas discussões com os filósofos sobre a realidade de objetos permanentemente confinados.” (GELL, MANN, 2009, p.627³)

Ao refletir sobre estas duas preocupações, o problema curricular da inserção da FMC e a apresentação taxonômica da Física de Partículas, percebemos que ambas exigiam uma investigação e uma peculiar reflexão, levando-nos a construção de dois grandes problemas norteadores que formaram o fio condutor da pesquisa.

Problema 1:

Contexto: *Apesar de haver uma tendência tão bem argumentada e consolidada com relação a inserção de discussões referentes à Física Moderna e Contemporânea na educação básica, há ainda um grande movimento de resistência a este processo de renovação curricular.*

Problema: *De que forma a diferença epistemológica entre a Física Clássica e a Física Contemporânea podem auxiliar na compreensão deste movimento de resistência ao processo de renovação curricular?*

Problema 2:

³ Trecho extraído do texto *Quarks, Color and QCD* presente no terceiro volume da obra *The Rise of The Standard Model: Particle Physics in the 1960s and 1970s*. Esta obra pertence a uma coleção de 3 volumes que reúne uma série de artigos extraídos de comunicações apresentadas por físicos, historiadores, filósofos, sociólogos entre uma série de outros personagens que, em uma série de conferências que ocorreram entre as décadas de 70 e 90, procuram discutir, entender, organizar, sistematizar e problematizar o desenvolvimento histórico da física de partículas.

Contexto: *As propostas para o ensino de física de partículas vêm se concentrando em um núcleo comum de apresentação associado à realização de um tabelamento de partículas e leis de conservação sem problematizar aspectos próprios de pensamento da física contemporânea.*

Problema: *Que aspectos da física de partículas podem ser explorados para possibilitar uma compreensão das formas próprias de pensar a física do século XX e que potenciais educacionais podemos explorar a partir deles?*

Dentre as diversas estradas que se mostraram viáveis na construção metodológica deste processo de pesquisa, decidimos por seguir a via teórico-bibliográfica construindo uma intersecção entre Teorias de Currículo, Filosofia da Ciência e História da Física.

Desta forma, esta dissertação teve seu desenvolvimento organizado em 3 capítulos.

No Capítulo 2 **“A Construção do cenário: um problema de ordem Epistemológica”** realizamos uma ampla revisão sobre as ações e propostas envolvidas na incorporação da FMC na educação básica e procuramos construir um entendimento apurado sobre o problema da renovação curricular, apontando para a necessidade de investigar a dimensão epistemológica na construção dos saberes escolares dos currículos de Física, tomando como base os trabalhos do sociólogo da educação francês Jean-Claude Forquin.

O Capítulo 3 **“Ruptura Epistemológica e Conhecimento Escolar”** pretende redirecionar a reflexão do nível educacional ao nível filosófico e epistemológico, trazendo ao desenvolvimento da pesquisa as reflexões da principal fundamentação teórico-filosófica deste trabalho, o filósofo francês Gaston Bachelard, contribuindo para um entendimento da novidade essencial do pensamento científico contemporâneo e das suas relações com os problemas educacionais enfrentados no processo de renovação curricular.

O quarto e último capítulo **“Em busca de um outro olhar para a Física de Partículas Elementares”** é destinado à construção de uma investigação histórica e epistemológica sobre a construção da ideia de quark, tomando como base as reflexões educacionais, curriculares e filosóficas levantadas nos capítulos anteriores. Buscaremos neste último capítulo apontar em direção a novos alicerces sobre as discussões relativas a física de partículas no ensino básico, tomando como perspectiva, principalmente, a natureza da ciência contemporânea, uma vez que, como defenderemos no decorrer do trabalho, à física de partículas não é enxergada como um simples conteúdo a “ser adicionado” no currículo, mas representa um fio condutor por meio do qual será conduzida uma corrente

de reflexão sobre a construção da ciência no século XX, possibilitando, desta forma, um entendimento mais profundo do desenvolvimento científico atual e apresentando novas diretrizes para que as propostas para a FPE possam ser pensadas.

2 Construção do cenário: um problema de ordem epistemológica

Sabe-se, por um efeito de desconhecimento estrutural próprio de todo empreendimento de transmissão simbólica, que aquilo que pode haver de contingente, de arbitrário, de “socialmente construído” ou ideologicamente enviesado nos conteúdos de ensino, está destinado o mais das vezes a permanecer despercebido; a “naturalização” da coisa ensinada estando no coração da legitimação profissional docente.

Jean-Claude Forquín

2.1 A Física Moderna e Contemporânea e o cenário educacional brasileiro

O que se pretende com a educação no contexto brasileiro? Dentro desta pretensão, qual o papel a ser desempenhado pela educação científica? Pode-se dizer com certa convicção que não tem sido pequeno os esforços para construir respostas para estas perguntas. Subsídios para respondê-las tiveram seu forte início há 20 anos atrás, em 1996, quando nascia o documento que fundamentaria os princípios e fins da educação no Brasil: a Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional (LDB). Alicerçado sobre estas reflexões viriam, nos anos seguintes, uma série de documentos materializando a ideia da base educacional brasileira. Dentre eles, relacionados mais especificamente à educação científica em nível médio, florescem, em 1998, os Parâmetros Curriculares para o Ensino Médio (PCNEM), em 2002, as Orientações Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN+) e, mais contemporâneo à realização deste trabalho, as Diretrizes Curriculares Nacionais da Educação Básica (DCN), em 2013, e a Base Nacional Comum Curricular (BNC), em 2015 e ainda em processo de elaboração. (BRASIL, 1996, 1998, 2002, 2013, 2015; KAWAMURA e HOUSOME, 2003). Este pequeno resumo histórico sintetiza as ações, a nível de políticas educacionais, sobre as reflexões da educação no Brasil, mas o que estes documentos dizem com relação a formação de nível médio?

A instauração da LDB marca a construção de um movimento crítico opondo-se ao caráter unicamente propedêutico fortemente incidente sobre a formação de nível médio, que exprimia, e ainda hoje exprime e representa, a realidade de uma parcela significativamente pequena da população brasileira. Na visão do documento, a escolaridade média não deveria se restringir a um processo de preparação para o nível superior, mas sim construir um suporte para que o estudante tenha a capacidade de ser inserido no mundo, exercendo sua cidadania em sua forma mais plena, conforme explicitam Kawamura e Housume:

O objetivo da escola média deve, assim, estar voltado para a formação de jovens, independentemente de sua escolaridade futura. Jovens que adquiram instrumentos para a vida, para raciocinar, para compreender as causas e as razões das coisas, para exercer seus direitos, para cuidar de sua saúde, para participar das discussões em que estão envolvidos seus destinos, para atuar, para transformar, enfim, para realizar-se, para viver. Essa é, portanto, nossa compreensão do que seja uma educação para a cidadania e sobre o objetivo do ensino. (KAWAMURA e HOUSUME, 2003, p.22)

Formalmente, as finalidades do que viria a ser o ensino médio estão destacadas no artigo 35 da seção IV da nova LDB, que apontam para “a compreensão dos fundamentos científico-tecnológicos dos processos produtivos, relacionando a teoria com a prática, no ensino de cada disciplina.” (BRASIL, 2017, ed. 11, p.24). Enquanto forma, as diretrizes norteadoras de sua construção deveriam seguir as orientações explicitadas no artigo 36 da mesma seção, destacando “a educação tecnológica básica, a compreensão do significado da ciência, das letras e das artes; o processo histórico de transformação da sociedade e da cultura; a língua portuguesa como instrumento de comunicação, acesso ao conhecimento e exercício da cidadania” (BRASIL, 2017, ed. 11, p. 25, grifo nosso). Ao citar a compreensão dos fundamentos e princípios científicos-tecnológicos na produção moderna, o entendimento das áreas do conhecimento como instrumentos de comunicação, de acesso à cidadania e das formas contemporâneas de linguagem, nos parece bastante claro afirmar que há uma preocupação em tornar a formação escolar de nível médio um palco para reflexões fundamentalmente pautadas na compreensão e inserção crítica do sujeito na sociedade contemporânea. Dentro desta perspectiva mais ampla, do ponto de vista da Física, e das Ciências da Natureza como um todo, começa a se delinear uma forma bastante particular de enxergar o papel da educação científica em nível médio.

Na visão apresentada pelos PCN+, vemos uma preocupação voltada para a construção de uma visão de física voltada para a formação de um cidadão contemporâneo, construindo instrumentos que o possibilite a realizar intervenções, compreensões e participações na realidade. A física deve apresentar-se

“como um conjunto de competências específicas que permitam perceber e lidar com os fenômenos naturais e tecnológicos, presentes tanto no cotidiano mais imediato quanto na compreensão do universo distante, a partir de princípios, leis e modelos por ela construídos. [...] ao mesmo tempo, a Física deve vir a ser reconhecida como um processo cuja construção ocorreu ao longo da história da humanidade, impregnado de contribuições culturais, econômicas e sociais, que vem resultando no desenvolvimento de diferentes tecnologias e, por sua vez, por elas sendo impulsionado.” (BRASIL, 2002, p.59)

Mais próximo de discussões curriculares a nível de políticas educacionais atuais, a BNCC defende a importância não só da Física, mas de todas as Ciências da Natureza uma vez que “a vida humana seria impensável sem essas Ciências na sociedade contemporânea, por sua presença na cultura e por sua relação com produtos e processos tecnológicos.” (BRASIL, 2015, p. 184, grifo nosso)

Essa perspectiva curricular exige um olhar apurado para o conhecimento físico, não se restringindo mais a um encadeamento lógico de conteúdos que geralmente são observados em grande parte dos currículos tradicionais de Física. É preciso extrapolar os muros da segregação conceitual delimitada pelo conjunto Mecânica, Termodinâmica, Óptica e Eletromagnetismo. O ensino deve deixar de se concentrar na simples memorização de fórmulas ou repetição automatizada de procedimentos, para se tornar contemporâneo, levando em consideração o contexto no qual o aluno está inserido e as problemáticas pertencentes a ele. Mais do que isso, precisa-se reconhecer que existe uma física para antes da Revolução Copernicana e uma outra para além do século XIX, esta última que, por sinal, é responsável por fundamentar as bases científico-tecnológicas da sociedade em que vivemos e por construir novos fios condutores filosóficos de enxergar e interpretar a forma como o conhecimento científico é construído, sendo responsável por uma das maiores revoluções de pensamento da história da humanidade. Verifica-se, portanto, que a nível de documentos curriculares oficiais, vem se delineando, nas últimas duas décadas, a construção de uma perspectiva mais ampla para educação científica, uma perspectiva que exige do estudante, em sua formação, um olhar crítico para o mundo atual.

Paralelamente À construção dessa nova visão, dentro do âmbito acadêmico-científico das pesquisas realizadas na área de Ensino de Ciências, e, mais especificamente, na área de Ensino de Física, vem se intensificando, aliado às preocupações curriculares colocadas acima, um movimento que defende a incorporação de discussões referentes a Física Moderna e Contemporânea no ensino básico. Terrazan (1992), já alertava para o fato de estarmos sendo simples receptáculos e reprodutores de materiais e sequências curriculares estrangeiras que nada mais são do que adaptações dos manuais didáticos utilizados para a formação de nível superior em física – daí a origem do bloco Mecânica, Termodinâmica, Óptica e Eletromagnetismo – salientando o fato de que, em nosso currículo escolar, *“a grande concentração de tópicos se dá na física desenvolvida aproximadamente entre 1600 e 1850.”* (TERRAZAN, 1992, p.210). Nota-se que o emergir do trabalho de Terrazan, um dos pioneiros e principais trabalhos que sai em defesa da renovação curricular por meio da inserção de tópicos de FMC, precede a própria LDB e os demais documentos discutidos anteriormente, indicando que discussões relativas às reflexões curriculares já estavam efervescentes antes mesmo dos documentos serem oficializados no campo das políticas educacionais.

Nas décadas que se seguiram, até os dias atuais, a constituição deste movimento se materializa, ganhando mais espaço e argumentos cada vez mais diversos. Ostermann e Moreira (2000) e Pereira e Ostermann (2009), realizaram, ao final das duas últimas décadas, uma revisão bibliográfica reunindo e organizando trabalhos das mais diferentes naturezas que discutem a inserção de FMC no ensino básico. As justificativas para este processo de renovação se mostram decorrente da crescente influência que o desenvolvimento científico-tecnológico exerce no entendimento do mundo criado pelo homem atual, que, em concordância com os PCN+ e a BNC, argumenta em favor desta abordagem como elemento crucial para a formação de um cidadão consciente e participativo na sociedade. Além do mais, os autores indicam que levantamentos feitos com estudantes dos ensinos básico e superior tem demonstrado que uma parcela significativa manifesta grande interesse por tópicos referentes a FMC como a Física de Partículas, Cosmologia, Mecânica Quântica e Relatividade Geral e Especial e que, ao mesmo tempo, se mostram insatisfeitos por não os ver sendo abordados no ambiente escolar, tendo sua investigação pautada por materiais de divulgação científica, filmes de ficção, entre outros. Não reduzindo-se somente as décadas de 90 e 2000, verifica-se ainda

uma grande diversidade de trabalhos avaliando a concepção de professores estudantes (COELHO & BORGES, 2010; ROCHA & RICARDO, 2010, 2015; SILVA, ALMEIRDA & HALLACK, 2015), propostas didáticas (CANZIAN, 2012, 2012, 2015; TENFEN & TENFEN, 2017; SILVA & ASSIS, 2012; SANTOS, SANTOS & SANTANA, 2015, SANTANA & SANTOS, 2014), natureza da ciência (GUERRA, REIS & BRAGA, 2010; PEDUZZI, TENFEN & CORDEIRO, 2012; PEREIRA, CAVALCANTI, PESSOA JR, & OSTERMANN, 2012; SILVA & GUERRA, 2015; FERNANDES, PIRES & CYRINO, 2017) e reflexões das mais diversas dimensões referindo-se a FMC na educação básica. Caminhando desde documentos oficiais até às pesquisas envolvidas na área de pesquisa de Ensino de Física, é possível identificar a existência de um conjunto sólido de argumentos que justificam a inserção de FMC, mostrando que há um consenso bem firmado de que é preciso, pelos diversos motivos explícitos e implícitos já discutidos, incorporá-la nos currículos de Física da educação básica.

Dentro deste universo de ensino e pesquisa da FMC, existem um conjunto de trabalhos preocupados com discussões de cunho histórico, filosófico e epistemológico pautados pela revolução de pensamento físico na virada do século XIX e início do século XX – é neste amplo universo de reflexões que esta pesquisa se localiza. Como apontado na apresentação inicial, enxergamos na ciência formas próprias de entender e se relacionar com o mundo. Entendemos que, no sentido da formação educacional, a pluralidade filosófica da epistemologia científica contribui para a construção da identidade do educando e de suas visões de mundo. Para isto, o pensamento científico precisa ser considerado em sua completude, opondo-se e complementando-se às diferentes visões de ciência que permeiam o ambiente escolar. Neste cenário, a FMC apresenta características filosóficas e epistemológicas que a distinguem de qualquer outro momento da história da ciência e que podem ser utilizadas para confrontar a tradição epistemológica que tem tomado conta da educação científica.

2.2 As incoerências com o cotidiano escolar

Qualquer processo de reestruturação curricular está envolvido em diversas dimensões. Sabe-se que em uma dimensão deste processo estão as demandas e discussões realizadas a nível de políticas educacionais e pesquisas acadêmicas, e outra, completamente diferente, corresponde à realidade escolar, o cotidiano da sala de aula. Sacristán (2013) identifica que o processo de constituição de uma ação curricular passa essencialmente por três planos que vão desde o plano oficial curricular ao currículo real desenvolvido no interior das escolas. Em um **primeiro plano**, se encontram os fins, objetivos e discursos que fundamentam a visão curricular. Num **segundo plano**, o discurso se materializa em forma de ações, atividades, estruturação de materiais e metodologia de realização. Mas é apenas em um **terceiro plano** onde encontramos a assimilação do currículo pelos envolvidos no processo: sejam eles agentes escolares ou estudantes e comunidade escolar. A problemática de condução do currículo, caminhando do plano oficial ao currículo real, é expressa na Figura 1, onde pode-se perceber a existência de um longo caminho entre o projeto de educação propriamente dito, exposto no documento curricular, e os efeitos de sua realização.

Figura 1 - Esquema de concepção do currículo como processo e práxis.

Fonte: SACRISTÁN, 2013, p.26

Colocamos, neste panorama, algumas questões para reflexão. Como tem sido as práticas efetivas no que se refere à instauração de discussões referentes a FMC no ensino médio brasileiro? Que ações têm sido promovidas para sua realização? Como os materiais didáticos absorveram estas discussões? Como os professores tem lidado com isso? Questões desta natureza são fundamentais para entender de que forma o cenário da educação científica brasileira tem reagido a essa consensual tendência de renovação e atualização curricular.

Verificamos, na tradição educacional brasileira, uma forte influência que livros didáticos e grades de conteúdos de vestibulares exercem sobre a constituição do currículo real aplicado em nossas escolas (MONTEIRO, 2010; MARTINS, 2015). Mesmo que os dois aspectos incidam fortemente sobre a rede privada de ensino, a rede pública ainda é profundamente dependente do primeiro, principalmente após a criação do Programa Nacional do Livro Didático para o Ensino Médio que, no ano de 2015, conta com uma lista de 14 livros aprovados

Com relação à composição dos livros didáticos, os autores Sanchez (2006), em sua dissertação de mestrado, Monteiro (2010), em sua tese de doutorado, e Dominguini (2012), em um artigo publicado na Revista Brasileira de Ensino de Física, discutem e identificam, em diálogo com diversas produções contemporâneas da mesma temática, a presença de tópicos destinados à FMC nos materiais para o ensino médio. Os livros didáticos analisados, em sua grande maioria, apresentam tópicos como Teoria da Relatividade, Efeito fotoelétrico, Modelos Atômicos, Dualidade onda-partícula e Física Nuclear, enquanto que tópicos como Cosmologia, Astrofísica e Física de Partículas tem uma presença consideravelmente reduzida, ressaltando ainda que, num universo de 12 coleções didáticas presentes nos três trabalhos analisados, duas delas não apresentavam qualquer discussão sobre a FMC. A menção da presença dos temas nos materiais, no entanto, pode passar a impressão de que realmente há uma efetiva realização de discussões sobre FMC. No entanto, a realidade aparenta ser completamente diferente. A título de exemplo, apresentamos na Tabela 1, de forma resumida, os dados obtidos por Sanchez (2006, p.54) acerca da relação páginas totais/páginas destinadas à FMC em livros pertencentes ao PNLD:

Tabela 1 - A presença de FMC em 6 livros didáticos do PNLD.

Fonte: (Sanchez, 2006, p.54)

Livro	Total páginas	Páginas destinadas a FMC	Porcentagem destinada a FMC
<i>Física.</i> Alberto Gaspar. Ed. Ática, 2002	384 (1.º Vol.) 416 (2.º Vol.) 448 (3.º Vol.)	112 (FMC no 3.º Vol.)	9%
<i>Imagens da Física.</i> Ugo Amaldi. Ed. Scipione, 1995.	540	34	6,3%
<i>Física ciência e tecnologia.</i> Nicolau Ferraro et al. Ed. Moderna, 2001.	666	66	9,9%
<i>Física.</i> Autores: Wilson Carron et al. Ed. Moderna, 2003.	338	20	5,9%
<i>Física: História & Cotidiano.</i> José R. Bonjorno et al. Ed. FTD, 2004.	672	23	3,4%
<i>Física</i> Paulo Ueno. Ed. Ática, 2005.	416	10	2,4%

Essa reflexão aponta para o fato de que ainda há uma presença significativa, praticamente hegemônica, de tópicos pertencentes à física clássica, com a participação da FMC contribuindo com 2,4 % a 9,9% na constituição das 6 obras analisadas a título de exemplo. Há de se ressaltar que, apesar de serem edições antigas, pois a referida pesquisa trata das obras em 2006, grande parte dos livros destacados ainda estão presentes na lista de livros aprovados no PNLD 2015 e contam com edições atuais com a proporção apresentada sendo aproximadamente a mesma⁴. Outro ponto interessante destacado por Domingui (2012), também analisando obras do PNLD, é que os capítulos destinados a FMC costumam aparecer, quando volume único, aglomerado em um único capítulo, sendo este sempre o último que compõe o livro. Quando se tratam de obras seriadas, as discussões aparecem, novamente, diluídas no último capítulo do último volume o que acaba, em termos práticos, diminuindo a possibilidade de ser efetivamente realizada. É importante ressaltar que, apesar desta ser a característica da grande maioria dos livros, há exceções, como é o caso da obra *Quanta Física*, que traz a FMC diluída nos 3 volumes. Percebemos, desta forma, que, apesar de grande parte dos materiais didáticos destinados ao ensino médio contarem com discussões sobre FMC em sua estrutura, há ainda uma

⁴ Cf. em (BRASIL, 2015) <<http://www.fnnde.gov.br/arquivos/category/125-guias?download=9003:pnld-2015-fisica>> Acesso em: 09/02/2015

incidência forte da chamada física clássica, além do fato de sua discussão estar aglomerada em um único capítulo contido sempre ao final dos livros didáticos.

No que se refere às práticas escolares desenvolvidas em nossas salas de aula, como efetivamente vem se constituindo a realização de propostas e um ensino programático destes tópicos? Será que elas ocorrem de forma pontual, com propostas particulares e em determinados contextos, ou há uma corrente bem firmada dessas discussões como vemos com o grande bloco de física clássica predominante nas salas de aula de física? Para elucidar estes questionamentos, faremos uma breve análise das atividades realizadas pelo Núcleo de Pesquisa em Inovação Curricular (NUPIC). O NUPIC é um grupo de pesquisa coordenado pelo Prof. Dr. Maurício Pietrocola, da Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo, e conta com pesquisadores associados a diversas instituições de ensino.

Na última década, o grupo construiu, de forma ampla e sistematizada, ações e reflexões sobre a introdução de conteúdos de FMC na educação básica agindo em diversos campos, indo desde a formação de professores, oferecendo cursos de formação continuada, passando pela elaboração de material e de propostas aplicadas em conjunto com professores. Agiram também sobre o campo mais amplo das políticas educacionais, auxiliando na construção da proposta Curricular de Física do Estado de São Paulo, sendo responsável pela presença de grande parte das discussões sobre a FMC nos materiais desenvolvidos e direcionados ao 3º ano do ensino médio. (PIETROCOLA, 2010) Segundo Pietrocola,

Introduzir conteúdos de FMC não é resultado unicamente da vontade ou do desejo de atualização curricular, mas sim um problema complexo a ser tratado em um contexto de pesquisa educacional aplicada. O pano de fundo adotado nas pesquisas que passei a desenvolver desde 2002 no meu grupo de pesquisa - NUPIC - **foi tratar a introdução da FMC como um processo de inovação onde se pretende romper com o estabelecido pela experiência e pela tradição didática.** Nos últimos anos desenvolvemos várias pesquisas cujo objetivo principal era estudar os limites e possibilidades na introdução destes conteúdos no Ensino Médio. (PIETROCOLA, 2010, p.26, grifo nosso)

O trecho grifado na citação mostra o caráter de desafio na tarefa de incorporação da FMC na educação científica, no sentido de não ser encarado como a simples inserção de conteúdos no currículo, mas sim como uma ação de romper com uma tradição bem estabelecida durante séculos no ensino de física. Tradição esta que não envolve apenas o âmbito pedagógico, referente a construção de metodologias e práticas que possibilitem a

inovação, mas também no sentido epistemológico, uma vez que é preciso entender e refletir sobre a própria forma de conceber a ciência que está por trás da física que ensinamos em nossas escolas. É, aliás, debruçado sobre estes dois sentidos que surgem os maiores obstáculos que o grupo identifica em um período de quase 10 anos de pesquisas:

Em termos de resultados teóricos, algumas hipóteses de trabalho emergiram dessa primeira fase das pesquisas (2002 a 2008). Acreditamos que os problemas enfrentados na atualização/modernização dos conteúdos de Física escolar podem ser entendidos em termos de obstáculos de duas naturezas diferentes, mas complementares, que passamos a definir como: **obstáculos didático-epistemológicos** e **obstáculos didático-pedagógicos**. (PIETROCOLA, 2010, p.27, grifo do autor)

É interessante notar, primeiro de tudo, que os dois pontos destacados se referem à natureza dos dois problemas de pesquisa levantados neste trabalho – um primeiro associado a uma ruptura com tradições pedagógicas e curriculares e um segundo associado a uma superação de formas de pensar a ciência instaurados com a tradição clássica da física. Outro ponto interessante de se destacar, é que a discussão do processo é pautada em termos de obstáculos, o que mostra que, apesar dos esforços depreendidos na década de pesquisa, os envolvidos no processo esbarraram com um forte movimento de resistência, tanto por parte dos professores em formação, quanto dos próprios pesquisadores envolvidos no processo, que precisaram reconhecer a existência de tais obstáculos para dar continuidade nos trabalhos desenvolvidos.

A propósito, noção de obstáculo, para o autor, tem origem nos fundamentos da epistemologia bachelardiana, no sentido de que o conhecimento é construído como superação e retificação de si mesmo – é na identificação e construção dos obstáculos que se dá seu desenvolvimento. Os obstáculos didático-epistemológicos estão associados à incompatibilidade epistemológica entre a natureza do conhecimento científico na física clássica e na física moderna, profundamente defendida por Bachelard em suas obras. Já os obstáculos didático-pedagógicos estão associados às formas como definimos os condicionantes didáticos, principalmente pelo fato de esbarrarmos com uma tradição de condicionantes

forjados ao longo de mais de 200 anos de história de ensino de Física, colaborando para que a Física Clássica esteja tão bem sedimentada e estabelecida nas salas de aula de nossas escolas. (PIETROCOLA, 2010)

Nas discussões apresentadas até o momento, verificamos a existência de um grande descompasso entre os discursos e esforços construídos e depreendidos nas discussões realizadas no âmbito das pesquisas em ensino de Física e as práticas desenvolvidas no cotidiano escolar, no interior de nossas escolas. De um lado, defende-se arduamente uma abordagem contemporânea que forme um sujeito ético, crítico e autônomo, capaz de lidar e se posicionar perante questões atuais. Do outro, constroem-se práticas e materiais didáticos que, majoritariamente, levam em consideração temas que compõe um corpo de conhecimento referente a física clássica, levando o aluno a ter conhecimento dessa ciência até meados do século XIX. Neste sentido, ao invés de aproximá-lo, acabamos por causar um distanciamento cada vez maior de uma compreensão do desenvolvimento científico atual. Este é nosso cenário, um cenário de grandes argumentos e propostas e de grandes esforços e ações, mas que ainda não se configura completamente consolidado. Se de fato há uma tendência de renovação curricular tão bem argumentada e consolidada, o que traduz a hegemonia que a física clássica exerce nos currículos escolares do ensino médio? Qual a razão de ainda haver este grande descompasso com as práticas escolares? Qual a natureza deste movimento de resistência e de que forma podemos agir contrapondo-se a ele? Nos dedicaremos agora a construir uma reflexão teórica a partir das reflexões do sociólogo da educação Jean-Claude-Forquin, para tentar elucidar a natureza destes problemas.

2.3 Teorias de currículo: currículo para além de seleção de conteúdos

Até o momento, a palavra “currículo” foi designada aos mais diferentes predicados, sem preocupação de associar a ela qualquer significado ou explicitar o que ela representa. O que, então, significa pensar em currículo e o que essencialmente queremos quando utilizamos a conotação “atualização curricular”? Ingenuamente, vê-se preocupações associadas a constituição do currículo restritas à sua redução como elemento seletor de conteúdos e explicitador de objetivos associados à sua apreensão. As próprias estruturas de grande parte de nossos livros didáticos refletem essa posição, no sentido de que traduzem estritamente relações lógicas entre diversos conteúdos. Essa forma de conceber o currículo, trata o conhecimento de forma neutra e a-histórica, tendo em vista que as implicações de, por exemplo, ensinar “Eletromagnetismo” e não ensinar “Física Moderna e Contemporânea”, remetem a um nível superficial de conhecer ou não os conteúdos pertencentes aos dois tópicos, não exercendo impacto algum na formação mais ampla daquele sujeito que os aprende.

Será este o motivo pelo qual trazemos ao trabalho as chamadas Teorias de Currículo, para dar um significado à reflexão curricular? Sim. E também por elas definirem diretrizes e significados atribuídos para a construção de um Currículo? Não, até porque, Silva (2011) explicita que a ideia de Teoria de Currículo não está associada à noção tradicional de teoria como conjunto ou pressupostos gerais que “[...] representa, reflete, espelha a realidade [...] A teoria [em seu sentido tradicional] é uma representação, uma imagem, um reflexo, um signo de uma realidade que – cronologicamente, ontologicamente – a precede.” (SILVA, 2011, p.11). Desta forma, não podemos afirmar que há uma noção ontológica de currículo para ser descoberta, para ter suas propriedades e diretrizes definidas e por meio da qual guiaremos todos os trabalhos curriculares de forma fundamentalmente objetiva. A teoria de currículo é na realidade uma atividade construtiva essencialmente pautada na elaboração de um discurso, na defesa de uma realidade a ser criada, trabalhando em um imaginário não necessariamente existente e com potencialidades de ser explorado. Assim, ao deslocar o significado da teoria para a construção de um discurso, pretende-se

[...] destacar precisamente o envolvimento das descrições linguísticas da “realidade” em sua produção. Uma teoria supostamente descobre e descreve um objeto que tem uma existência independente relativamente à teoria. Um discurso, em troca, produz seu próprio: a existência do objeto é inseparável da trama linguística que supostamente o descreve. (Silva, 2011, p.12)

Em suma, quando tratarmos de teorias de currículo não estaremos lidando com um conjunto de pressupostos teóricos que definem as diretrizes para construção de um currículo, mas sim de um conjunto de reflexões enviesadas e preocupadas com determinadas questões educacionais que fazem emergir, a partir delas, uma noção ou uma visão do que significa currículo e que ações estão por trás de determinadas construções curriculares. É interessante salientar que, do ponto de vista de Silva, toda pesquisa educacional tem uma dimensão curricular, uma vez que defende, mesmo que de forma implícita, uma visão mais ampla sobre a educação. Conforme explicitam Moreira e Silva (2000)

O currículo não é um elemento inocente e neutro de transmissão desinteressada do conhecimento social. O currículo está implicado em relações de poder, o currículo transmite visões sociais particulares e interessadas, o currículo produz identidades individuais e sociais particulares. O currículo não é um elemento transcendente e atemporal – ele tem uma história, vinculada a formas específicas e contingentes de organização da sociedade e da educação” (MOREIRA e SILVA, 2000, p. 14)

Como nos parece claro o diagnóstico de que o ensino de física atualmente se encontra profundamente impregnado com determinado período da física e com determinadas formas de conceber a ciência e a própria educação científica, procuraremos entender os mecanismos por meio dos quais se constituem os saberes escolares, a partir das reflexões do sociólogo francês Jean-Claude Forquin.

2.4 Cultura escolar e a constituição do saber escolar

A presença da Física na grande maioria das salas de aula de nossas escolas tem se pautado, exclusivamente, não apenas por conteúdos referentes à física clássica, mas também por modos bastante peculiares de conduzir seu ensino. Sabemos também que a questão das condições de trabalho e de formação do professor tem sido alvo de uma série de discussões realizadas pelas mais diversas pesquisas em educação e, além disso, tem sido objeto de crítica por parte dos próprios professores e dos sindicatos envolvidos em sua representação (GASPARINI, BARRETO e ASSUNÇÃO, 2005; CRUZ, LEMOS, WELTER E GUISSO, 2010; ALVES e PINTO, 2011). Essas condições, tanto de trabalho, quanto de formação, são pontos cruciais a serem considerados quando se constrói uma reflexão sobre renovação curricular. A investigação deste problema em um sentido mais amplo, no entanto, foge do escopo deste trabalho, mas, por outro lado, não a deixando de lado ou minimizando sua importância, ela nos traz um ponto de reflexão bastante peculiar.

Apesar das suas condições, sejam elas de trabalho ou de formação, o professor ainda, efetivamente, entra na sala de aula e conduz um processo de ensino. O que delimita como ele vai agir, o que ele vai ensinar e como ele vai ensinar? Será que sua formação inicial explicita quais devem ser suas ações e conduções? Será que quem realiza esse papel são os documentos curriculares agindo a nível de políticas educacionais? Como a estrutura escolar, vista sobre uma perspectiva mais ampla, influencia em sua postura como docente? Colocamos estas questões pois temos a percepção de haver um consenso tácito que parece guiar de forma uniforme o ensino da física – temos uma concepção única de física que vem se disseminando pelas diversas salas de aula de escolas ao redor do Brasil. Identificamos nisso um grande problema a ser investigado, pois deve haver por detrás dele um processo bem consolidado e cristalizado sobre como devem ser conduzidas discussões de física no ensino médio. Este processo muitas vezes não é coerente nem com a trajetória de formação do docente, nem com os documentos curriculares que, em tese, deveriam guiar o processo educacional. Dedicaremos esta seção a explicitar e investigar este problema. É importante ressaltar que não estamos generalizando este cenário, mas não podemos negar que ele é um cenário bastante representativo da educação científica brasileira, principalmente no que se refere ao ensino da física.

A forma como estes questionamentos surgem e o caráter global desta situação, remetem a uma reflexão que se instaura em um âmbito muito maior do que o cotidiano escolar, e que pode ser compreendida a partir de uma análise da cultura escolar que se instaura por trás de todo processo educativo. Faria Filho (2004) aponta que um entendimento da cultura escolar vem sendo utilizado como campo de investigação.

Nossa análise tem um objetivo muito claro: identificar as características que definem essa hegemonia epistemológica e metodológica que a física clássica vem exercendo nos currículos escolares da educação básica. Neste sentido, dentre as diversas dimensões existentes no problema de renovação curricular, buscamos investigar a dimensão epistemológica com o intuito de avaliar os impactos que a diferença epistemológica existente entre estes dois períodos da física, a clássica e a contemporânea, exercem neste movimento de resistência caracterizado nas seções anteriores. Para isto, traremos as reflexões do sociólogo da educação francês Jean-Claude Forquin sobre a constituição dos saberes escolares.

Ao tratar o ambiente escolar como um ambiente cultural, Forquin interpreta a escola como micro sociedades, entendendo-a como um local “por excelência nas sociedades modernas – de gestão e de transmissão de saberes e de símbolos.” (FORQUIN, 1992, p. 28). O entendimento dessa cultura passa, por entre diversas dimensões, pela dimensão curricular, pelo entendimento do currículo como ferramenta institucionalizada de seleção de conteúdos, mas que também remete à necessidade de um entendimento profundo sobre como esses conteúdos são selecionados e o que se pretende com essas seleções.

A questão da escolha dos conteúdos de ensino foi objeto de reflexão de Forquin que, em 1992, ao publicar, na revista *Teoria & Educação*, o trabalho *Saberes escolares, Imperativos didático e dinâmicas sociais* elucida uma nova forma de enxergar o problema curricular da escolha de conteúdos e um entendimento mais amplo sobre a constituição da cultura escolar.

A educação vem exercendo, conforme defende o autor, a função de conservar e transmitir determinada herança cultural do passado. Essa herança, contudo, jamais representará toda a cultura de determinada sociedade, é preciso admitir que essa reprodução ocasiona no esquecimento ou na omissão de determinados valores culturais, enquanto que seleciona e reinterpreta outros.

Uma primeira evidência que se deve sublinhar é que se a conservação e a transmissão da herança cultural do passado constituem inegavelmente uma função essencial da educação em todas as sociedades [...] **é preciso prontamente admitir também que esta reprodução se efetua ao preço de uma enorme perda** ao mesmo tempo que de uma reinterpretação e de uma reavaliação contínua daquilo que é conservado. (FORQUIN, 1992, p.29, grifo nosso)

Ao pontuar que o processo educacional vem exercendo um papel de transmissor da cultura, Forquin defende que todo conhecimento que se constitui no interior da escola passa por um processo de seleção cultural. Mas como procede essa seleção? Que critérios ela utiliza para privilegiar determinados valores culturais em detrimento de outros? Para os defensores de uma tradição humanista clássica

Esta seletividade opera principalmente no sentido de uma “decantação” e de uma “cristalização”: o trivial e o medíocre caem no esquecimento, enquanto que perdura vindo a enriquecer o tesouro comum dos homens, aquilo que as gerações produzem de mais forte, de mais original e de mais incontestável, que a escola e a universidade têm justamente por papel identificar, consagrar e transmitir. (FORQUIN, 1992, p.29)

Há, portanto, nesta tradição, a visão de que a seleção deve ser uma representação das conquistas, das construções artísticas e intelectuais do ser humano, parafraseando Arnold, é preciso conhecer “tudo que foi pensado e dito de melhor no mundo” (1869, apud FORQUIN, 1992, p.29). No entanto, é preciso reconhecer que o que se ensina na escola representa apenas uma ínfima parte da experiência e da cultura humana, de forma que determinar aquilo que deve ser considerado como culturalmente importante, historicamente marcante ou artisticamente relevante em uma sociedade passa por um julgamento de valores que ultrapassam a simples transmissão de conteúdos no interior da escola. Para investigar este problema, Forquin traz reflexões sobre a sociologia da cultura desenvolvida por Raymond Williams (1961). Williams aponta que tais processos de decantação e cristalização estão longe de operar sobre uma ontologia da cultura – é preciso reconhecer que não existem motivações intrínsecas ou universais, todo processo de seleção e manutenção de valores culturais estão associados a fatores de natureza social, política e ideológica. Toda seleção comporta um fundo de arbitrário e subjetivo, de forma que se deve pressupor, na natureza da reflexão educacional, um questionamento contínuo da escola feita pelos ancestrais, não se tratando apenas de aceitar as estruturas já sedimentadas. Além do mais, trabalhos mais próximos da sociologia da educação, como

as reflexões de Durkheim, vêm demonstrando que o processo de seleção cultural se encontra imerso no interior de um amplo sistema de conflitos, que buscam deter a transmissão e manutenção de determinadas visões e valores de educação, ciência e sociedade. (FORQUIN, 1992)

Desta forma, verificamos que a escolha dos conteúdos passa por um processo de seleção no interior da cultura e que esse processo não é ditado por nenhuma diretriz ou parâmetro universal, pelo contrário, se encontra em meio a um amplo embate entre os mais diferentes campos de interesse. A questão é que, apesar do embate, uma seleção, seja qual for sua natureza, é necessária. Sendo assim, diferentes escolas fazem diferentes tipos de seleções no interior da cultura e é dentro desta perspectiva que Forquin constrói um significado para o currículo:

Os docentes podem ter hierarquias de prioridades divergentes, mas todos os docentes e todas as escolas fazem seleções de um tipo ou de outro no interior da cultura. **Proponho utilizar o termo currículo para designar essas seleções.** (FORQUIN, 1992, p.31)

Como apontamos no início desta seção, sejam quais forem suas condições de trabalho ou formação, o professor entra em sala de aula e coloca em prática um currículo em um sentido mais amplo – de forma consciente ou não, uma seleção é realizada. No entanto, cabe ressaltar que essas seleções não são simples seleções de conteúdo, mas, conforme explicitamos nas discussões realizadas até o momento, se tratam de seleções compromissadas com interesses das mais diversas naturezas – estão à busca da legitimação de determinada concepção de mundo e de educação. A educação, por sua vez, não se limita a selecionar os conteúdos, mas é responsável também por criar as condições para que eles efetivamente permeiem o ambiente escolar. Por este motivo, Forquin aponta que a instauração de determinada seleção no interior da cultura passa por três Imperativos Didáticos que se impõe à própria tarefa de tornar os saberes selecionados essencialmente escolares em todas suas dimensões.

O primeiro imperativo, **Imperativo de Transposição**, está associado à necessidade de tornar os saberes escolares “efetivamente transmissíveis e efetivamente assimiláveis para as jovens gerações” (FORQUIN, 1992, p.32). Por este motivo, ele deve “se entregar a um imenso trabalho de reorganização, de reestruturação, de “transposição didática”” (ibid, p.32). A transposição didática a qual se refere Forquin está associada às investigações de Chevallard (1991) sobre a transformação do conhecimento escolar,

partindo de sua natureza erudita, também denominada pelo autor como Saber Sábio. O processo passa ao conhecimento pertencente a comunidades puramente científicas, permeando as propostas de reinvenção criadas pelos docentes, instituições, materiais e documentos educacionais, denominada como Saber a Ensinar. Encerrando o processo no conhecimento efetivamente trabalhado em sala de aula, denominado pelo autor como Saber Ensinado. (FORQUIN, 1992; CHEVALARD, 1991).

Associada à própria natureza da transposição, o segundo imperativo, **Imperativo de Interiorização**, está relacionado com a tarefa de incorporar o saber “ao indivíduo sob a forma de esquemas operatórios ou de *habitus*” (FORQUIN, 1992, p.33). Vemos aqui a preocupação com a interiorização dos saberes e com o desenvolvimento práticas que possibilitem não somente a repetição, mas também a disseminação destes conhecimentos. Forquin ainda afirma que “é esta a razão pela qual toda pedagogia supõe sempre a repetição” (ibid, p.93) em alusão aos procedimentos repetitivos tais como os métodos de resolução de problemas em física ou até mesmo a repetição da verificação empírica em busca da afirmação e validação de uma lei científica que comumente encontramos no cotidiano escolar das salas de aula de física. (FORQUIN, 1992)

Por fim, associados à permanência e manutenção dos dois últimos, se encontra o **Imperativo de Institucionalização**, associado às formas de organização da escola como instituição, uma vez que, como aponta o autor,

[...] os saberes escolares são fortemente marcados pelo modo propriamente escolar de escansão do tempo, a organização dos estudos por anos e a repartição das atividades no interior do ano, a duração dada às sequências de curso, o ritmo de exercícios e de controles, etc. (FORQUIN, 1992, p.33)

No entendimento de Forquin, a constituição dos saberes escolares passa por estes três imperativos didáticos e define assim o nascimento de uma cultura essencialmente escolar que, no entanto, se trata de uma cultura segunda⁵, uma vez que é derivada de uma cultura de criação que extrapola os muros da instituição escolar.

⁵ É importante notar que a interpretação de Forquin para a cultura escolar entra em conflito com a concepção de diversos outros autores. Para Forquin, a cultura escolar é entendida como uma cultura segunda pois é derivada de uma cultura de criação, que extrapola os muros da escola. Por outro lado, para o francês Dominique Julia a cultura escolar é entendida essencialmente como um produto histórico,

[...] uma “cultura segunda” com relação à cultura de criação ou invenção, uma cultura derivada e transposta, subordinada inteiramente a uma função de mediação didática e determinada pelos imperativos que decorrem desta função. (FORQUIN, 1992, p.33)

A reflexão trazida por Forquin nos atenta para o fato de que os processos pelos quais passam a constituição dos saberes escolares, cria, ao longo do tempo, pela própria natureza de sua função, um conservadorismo: uma vez que ele é construído com o intuito de se manter na sociedade, é um projeto que se espera ver em pleno funcionamento. Este conservadorismo, no entanto, se choca intensamente com qualquer proposta de renovação e atualização, uma vez que esbarra, muitas vezes até de forma inconsciente, em defesa da manutenção de determinada visão (FORQUIN, 1992). É extremamente comum observarmos professores afirmando que “cinemática deve, obviamente, ser ensinada!” ou “a física estudada deve ser a física do ponto material!”. Mas por que? De que forma estes conteúdos foram parar no currículo e por que eles não poderiam ser extraídos dele? Vemos aí uma manifestação dos imperativos didáticos agindo sobre a legitimação dos saberes escolares, criando um processo comumente conhecido como **naturalização dos saberes escolares**. Neste cenário, somos alertados para o fato de que o passado precisa, urgentemente, tornar-se objeto de constante reflexão, uma vez que

[...] nos ensinos onde o passado não se torna o objeto de uma atenção ou de uma tematização explícita, [...] **o passado pode permanecer presente, mas sob forma implícita ou latente, incorporada em habitus intelectuais, em modelos de pensamento, em procedimentos operatórios considerados como naturais e evidentes, em tradições pedagógicas.** (FORQUIN, 1992, p.30, grifo nosso)

Construímos nesta seção uma reflexão sobre a constituição dos saberes escolares entendidos como seleções no interior da cultura e sujeita a imperativos didáticos para sua afirmação. Tendo em vista que trouxemos esta discussão para ter uma noção mais apurada sobre o problema de renovação curricular e que colocamos em investigação a natureza hegemônica exercida pela física clássica em nossos currículos, cabe a nós fazer

enquanto que para Chervel a escola cria sua própria cultura. Para reflexões mais detalhadas sobre os trabalhos citados ver FARIA FILHO, L.M. "A cultura escolar como categoria de análise e como campo de investigação na história da educação brasileira" Educação e Pesquisa, São Paulo, v.30, n.1, p. 139-159, 2004

neste momento os seguintes questionamentos: se a constituição dos saberes passa efetivamente por uma seleção no interior da cultura, que tipo de seleção está por trás dessa presença hegemônica da física clássica? O que se pretende legitimar com essa seleção e por que ela cria um movimento de resistência tão intenso quando discussões referentes à física moderna tentam se colocar no interior de nossas escolas? Não poderíamos jamais responder estas perguntas sem entender como a Física tem sido concebida no cotidiano de nossas salas de aula. Por este motivo, tentaremos construir, na próxima seção, uma caricatura da Física Escolar para compreender melhor as características dos processos de seleção explicitados por Forquin.

2.5 Caricaturando⁶ a Física Escolar

Entender a construção dos saberes escolares associados a seleções no interior da cultura nos leva a questionar quais interesses podem estar por trás de determinadas seleções e o que se pretende legitimar com elas. Apontamos até o momento para dois pontos fundamentais:

- a existência de um forte movimento de resistência à incorporação da FMC na educação básica;
- a presença hegemônica de conhecimentos pertencentes à Física Clássica nos currículos reais da educação básica;

Tendo em vista a necessidade de investigação e os apontamentos colocados, tentaremos, neste momento, construir uma *caricatura* da Física Escolar, buscando identificar a visão de física que tem sido passada aos estudantes para que, então, possamos analisar o que está por trás dela. A ideia do caricato é interessante pois sabemos que não seremos fiéis a todos os contextos e nem conduziremos a discussão a qualquer patamar de generalização, apenas a utilizaremos para ilustrar a natureza do problema que estamos nos propondo a investigar e a que níveis as ações necessárias podem ser conduzidas. Julgamos por bem dividir esta análise em dois momentos; o primeiro destinado a um entendimento sobre a física dos livros didáticos, baseado nos levantamentos feitos na seção 2.2, enquanto que o segundo será destinado a fazer uma análise de trabalhos que nos permita avaliar as concepções de física que docentes e discentes vem constituindo em seu processo escolar, seja ela de formação básica, superior ou continuada.

Aparentamos enxergar a existência de um compromisso tácito com o ensino de tópicos de física clássica, como a cinemática, a dinâmica, a termodinâmica, a óptica geométrica e o eletromagnetismo. Este compromisso afirma que eles devem, obrigatoriamente, fazer

⁶ A ideia de caricatura vem em associada a uma preocupação de não construir uma ideia de “generalização” no ensino da Física. Utilizamos a ideia de caricatura como uma forma de “representar” o ensino de Física ressaltando que há ainda algumas dimensões não exploradas – a caricatura vem em consonância com a representação características marcantes do ensino de Física que, como defenderemos, tem sido demarcado por uma clara defesa de uma visão positivista de ciência. A ideia de demarcar uma não generalização vem de encontro com o reconhecimento dos diversos esforços realizados para explorar visões cada vez mais amplas da atividade científica não reduzidas ao caráter empírico-indutivista de apreensão da realidade.

parte do processo de formação de qualquer aluno de nível médio. Em consonância com essa necessidade, os livros didáticos seguem, em sua grande maioria, a estrutura: mecânica nas primeiras séries; termologia, termodinâmica, óptica e ondulatória nas segundas séries e Eletromagnetismo nas terceiras séries.

No que concerne ao estudo da mecânica, dilui-se todos os estudos sobre movimento referenciando-os fundamentalmente a Newton, por meio de Leis que levam seu nome, e Galileu, pelas caracterizações dos movimentos. Segue-se a lógica de iniciá-la a partir do estudo sobre os movimentos e suas características, definindo grandezas como espaço, tempo, velocidade e aceleração para então partir para um estudo efetivo de suas causas, partindo em direção a um entendimento que remete à relação descrição-causa. Segue-se então para o estudo dos princípios de conservação iniciando a partir da conservação da quantidade de movimento e encerrando na conservação da energia mecânica.

Já os estudos de Termologia e Termodinâmica são promovidos por uma ascensão que vai desde a definição de conceitos como temperatura e calor, passando pelo comportamento de termômetros, dilatação térmica e calorimetria, para então discutir as propriedades dos gases e apresentar as Leis de Termodinâmica – referenciando nomes como Joule, Boyle, Carnot, entre outros que, de acordo com os materiais, contribuíram para o sucesso e consolidação da compreensão dos fenômenos térmicos.

Os estudos de óptica e ondulatória ocorrem de forma segregada, mesmo tratando de fenômenos como reflexão, refração e interferência. Ressalta-se que a lógica da óptica geométrica segue a linha de estudos iniciando por espelhos planos, depois convexos, para então discutir o comportamento de lentes e, enfim, os instrumentos ópticos.

O Eletromagnetismo é tratado peculiarmente pela apresentação dos conceitos de Força, Campo e Potencial elétrico referenciados principalmente nos experimentos de Coulomb, segregando a discussão dos campos da discussão de campos magnéticos, discutida somente após a abordagem da Eletrodinâmica.

O que se pode afirmar com certa convicção, portanto, é de que há um compromisso com determinado período da história da física, no que se refere aos séculos XVII ao XIX, e que representa, para a ciência, após um grande período de embates, sua consolidação como um empreendimento filosófico autônomo e desvinculado de instituições religiosas. A legitimação deste papel passa pelo auge do mecanicismo e do sucesso conquistado pelo movimento Iluminista após, principalmente, os trabalhos de Isaac Newton sobre a

gravitação e o movimento dos corpos celestes; de James Clerk Maxwell com relação a teoria de campos para fenômenos eletromagnéticos e sua unificação com fenômenos ópticos e ondulatórios; e daqueles diversos estudiosos que contribuíram, em meio à revolução industrial, para uma compreensão mais ampla da relação entre fenômenos térmicos e mecânicos que culminaram na consolidação da Termodinâmica. Em síntese, cada um dos temas da forma como são abordados - Mecânica, Termodinâmica e Eletromagnetismo - estão associados a períodos da ciência que demonstram seu sucesso como atividade intelectual, em detrimento de diversos outros momentos no qual ela se encontrava em crise ou enfrentando dificuldades intrínsecas de sua natureza⁷.

Gostaríamos de, no que se refere à estrutura dos materiais⁸, levantar dois pontos interessantes. O primeiro deles está relacionado com o fato de que a organização leva em consideração estritamente uma relação lógica entre os conteúdos apresentados – o currículo real é costurado por teias essencialmente lógicas, justificadas por uma necessidade de didatização, que ligam áreas que tratam de propriedades semelhantes do mundo físico: propriedades do movimento, propriedades térmicas, propriedades ópticas e ondulatórias e propriedades elétricas e magnéticas. O segundo, que acaba sendo consequência da visão construída pelo primeiro, é o fato de o conhecimento físico estar classificado em blocos fechados e encerrados, parecendo ter o intuito de informar as verdades do mundo de forma organizada. Nesta perspectiva, a forma que o conhecimento da Física se materializou nos manuais didáticos, parece ser tratado:

- **De forma a-histórica:** no sentido que não se sabe em que momento e contexto da história certos conceitos foram desenvolvidos e por que se desenvolveram nesta época e não em outra;
- **De caráter a-cultural:** no sentido de que dá a entender que a ciência pertence à “comunidade científica”, uma entidade abstrata que se encontra isolada da sociedade e que produz conhecimentos sobre o mundo natural independente do

⁷ Os períodos citados aqui, da forma como foram colocados, privilegiam uma concepção positivista da história e da epistemologia da ciência. No entanto, é importante notar que diversos embates, dentro da história e filosofia da ciência tentam demonstrar o caráter conflituoso da produção do conhecimento científico e vêm evidenciando cada vez mais formas alternativas de interpretar o mesmo período de desenvolvimento citado aqui.

⁸ Novamente, como já apontamos na seção 2.2, existem obras que não seguem este padrão nem privilegiam a visão de ciência que caricaturamos aqui. No entanto, a grande maioria dos materiais didáticos tem demonstrado uma organização desta natureza.

momento histórico no qual está inserido, criando uma barreira que faz com que nossos estudantes acreditem que a cultura científica está em uma dimensão bem afastada da cultura na qual eles poderiam estar inseridos;

- **De caráter desumanizado e mitificado:** no sentido que pouco, ou quase nada, se discute sobre seu processo de construção. Associando sua elaboração a um ou outro personagem de forma bastante caricaturada, e passando a impressão de que a ciência se desenvolve em um patamar intelectual completamente fora da realidade humana e realizado por pessoas (os cientistas) com habilidades intelectuais únicas e diferentes de quaisquer outros seres humanos (criando a caricatura do gênio);
- **De forma neutra e objetiva:** no sentido de que os blocos apresentados consistem de afirmações objetivas e reproduzíveis sobre o mundo natural e nada além disso.

Esta caricatura construída a partir dos livros nos fez perceber que o emprego da palavra “Manual didático” pareceu bastante apropriada. Geralmente a encontramos sendo associada, no senso comum do termo, ao conjunto condensado de instruções, orientações e informações desinteressadas sobre os mais diferentes produtos. A impressão que temos é que os “manuais de física” representam a ciência condensada em um *compêndio* sem vida, sem interesse e sem personalidade – e é nessa dimensão que a Física tem sido aparentemente concebida em nossas salas de aula: uma atividade desinteressada e sem personalidade para o aluno e muitas vezes até para o próprio docente. Quiséramos nós ser este apenas um anseio particular, da mesma forma como Fourez (2002) aponta em sua polêmica publicação *Crise no Ensino de Ciências?*:

Há uns quinze anos, eu não ousaria dizer que o ensino de Ciências estava em crise. Contentava-me por dizer que era a minha opinião. Hoje quando todo mundo em meu país o afirma como evidente [...] eu me sinto menos ridículo dizendo a mesma coisa. E, como os especialistas do O.C.D.E. dizem a mesma coisa, creio que se pode razoavelmente afirmar que esta é a situação no mundo industrializado. (FOUREZ, 2002, p. 109)

Fourez aponta várias dimensões para o entendimento desta crise e ressalta que todos os pontos levantados em seu trabalho ainda não são capazes de lidar com as diversas controvérsias que a educação científica se encontra imersa. Uma indicação significativa colocada pelo autor é a diminuição drástica pela procura de cursos de ciências nas universidades, apontando para o fato de que talvez nossos estudantes estejam manifestando uma rejeição pelas áreas científicas (FOUREZ, 2002). Trazendo a reflexão

para o panorama brasileiro, diversas pesquisas têm apontado que, além dos cursos de áreas associadas às ciências naturais e exatas terem uma baixa procura com relação aos demais, os cursos de física e matemática, por exemplo, tem de lidar com o grande problema da evasão, principalmente nas licenciaturas (ARRUDA, CARVALHO, PASSOS e SILVEIRA, 2006; FILHO, MONTEJUNAS, HIPÓLITO e LOBO, 2007; ADACHI, 2009; SILVA e FRANCO, 2014). É interessante notar que Matthews⁹, já em 1988, apontava um cenário bastante semelhante, identificando um alto índice de evasão de alunos e professores, além de apontar também elevado índice de analfabetismo científico. Fato este que leva o autor, em 1995¹⁰, em defesa de uma prática que incorpore discussões da história e filosofia da ciência no ensino, a enfrentar o “mar de falta de significação que se diz ter inundado as salas de aula de ciências, onde fórmulas e equações são recitadas sem que muitos cheguem a saber o que significam.” (MATTHEWS, 1994, p.165).

Fourez aponta para o fato de que **“os alunos teriam a impressão de que se quer obriga-los a ver o mundo com os olhos de cientistas.”** (FOUREZ, 2002, grifo nosso). Mas que olhos são esses e que visão é essa? Nos parece ficar cada vez mais claro que, por trás dessa crise apontada por Fourez, fomentada por Matthews e do cenário que estamos construindo desde o início deste trabalho, tem agido inconscientemente a legitimação de uma visão. A persistência disso no cotidiano escolar dá dois indícios importantes: o primeiro é a existência de um mecanismo de manutenção de determinada concepção científica e o segundo é que este processo se encontra cristalizado o suficiente para considera-lo naturalizado.

Gil Perez e colaboradores (2001)¹¹ elaboraram uma análise bastante detalhada sobre as concepções e visões deformadas sobre trabalho científico que vem se disseminando no interior de nossas escolas. Os autores organizam 7 posturas definidas a partir de uma análise sistemática de concepções apresentadas nas pesquisas produzidas nas últimas décadas. Algumas delas apresentam consonância com as perspectivas que apontamos no final da seção anterior, relacionando a forma como o conhecimento aparenta ser

⁹ MATTHEWS, M. R.: 1988, A Role for History and Philosophy in Science , Teaching', Educational Philosophy and Theory 20(2), 67-81.

¹⁰ MATTHEWS, M. R.: 1995, História, filosofia e ensino de ciências: a tendencial atual de reaproximação. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, vol. 12 (3), pp. 164-214. Trad. Claudia Mesquita de Andrade.

¹¹ Para mais detalhes sobre a abordagem metodológica dos autores consultar GIL PEREZ et al. “Para uma imagem não deformada do trabalho científico”. *Ciência & Educação*, v.7, n.2, p.125-153, 2001. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/ciedu/v7n2/01.pdf>.

concebido com a estrutura dos manuais didáticos utilizados no ensino. Faremos uma breve análise de cada uma delas e, posteriormente, a resumiremos na tabela 2 inserida após sua apresentação.

A primeira posição apresentada pelos autores e considerada como amplamente e hegemonicamente difundida se trata de uma **concepção empírico-indutivista e ateórica**. Ela vem para desempenhar o papel de destacar o caráter neutro tanto da observação e experimentação, quanto dos desenvolvimentos teóricos construídos no interior da ciência, no sentido que expressam nada mais do que as verdades contidas no mundo e descobertas pelos cientistas ao longo do tempo, em síntese, é a ciência reduzida a apreensão da realidade a partir da observação e reprodução de seus fatos observáveis.

A segunda posição, também considerada como amplamente e hegemonicamente difundida, trata-se da **visão rígida (algorítmica, exata, infalível, ...)** associada, em relação à primeira, a disseminação de um método científico único e universal interpretado à luz de sequências rigorosamente planejadas e mecanicamente construídas e que, se conduzidas de forma adequada, podem levar à validação ou negação de determinada hipótese sobre o comportamento do mundo natural. Percebe-se que não se trata de negar a dimensão experimental do trabalho científico, mas sim de atentar para o fato de que tem sido difundida a existência de uma forma universal de conduzi-la.

Associada à visão rígida, a terceira posição apontada pelos autores é a **visão aproblemática e ahistórica**, no sentido de ressaltar que o conhecimento é apresentado como acabado, dogmático e fechado. Não se tem noção de quais problemas levaram sua formulação, quais as dificuldades encontradas em sua realização e nem em que contexto ele foi desenvolvido.

Uma quarta posição apontada, mas minimamente investigada pelos autores, se trata da **visão exclusivamente analítica**, que destaca a necessidade de fragmentar o conhecimento em blocos fechados para melhor conduzir seu processo de transmissão. Perde-se aí o caráter global, uma vez que se entende que a própria natureza dos conhecimentos é fragmentada e alimentada por um movimento contínuo de investigação.

A quinta posição trata da transmissão de uma **visão cumulativa de crescimento linear** associando a ciência a um ideal de progresso, bastante calcado no ideal positivista da sociedade em August Comte. Uma vez que não se apresentam as controvérsias do desenvolvimento científico e se divide sua apresentação em blocos encerrados, passa-se

a impressão de que a ciência se desenvolve a partir de um progresso cumulativo e contínuo de conhecimentos sobre a natureza.

A sexta posição, bastante assinalada pelos autores, remete à transmissão de uma **visão individualista e elitista da ciência**, uma vez que exclui o conhecimento do contexto, do panorama global, e atribui sua construção a obras de gênios isolados, ignorando a própria natureza coletiva e social do trabalho científico.

Por último, mas não menos importante, a sétima posição associa o desenvolvimento científico a uma **visão socialmente neutra da ciência**, pautada no ideal de progresso do conhecimento, desvinculando-a dos contextos no qual estão inseridas as problemáticas científicas e minimizando, para não dizer negligenciando, as complexas relações entre a Ciência, a Tecnologia e a Sociedade.

Esse conjunto, que denominaremos como posições epistemológicas, reflete de forma clara o retrato de como a ciência tem sido vista e constrói uma bela caricatura da Física Escolar. Para fins de estruturação e sistematização, organizamos as posições na tabela 2, para melhor conduzir sua discussão nas seções posteriores, uma vez que nos remeteremos atentamente e continuamente a esta caricatura ao longo do trabalho.

Tabela 2 - Posições epistemológicas presentes na educação científica classificadas conforme a análise de Gil Perez e colaboradores (2001)

Posição epistemológica	Características
Empírico-indutivista e ateórica	Redução da ciência, em suas dimensões teórica e experimental, a apreensão e observação de fatos observáveis na natureza.
Rígida	Disseminação de um método científico único e universal interpretado à luz de sequências rigorosamente planejadas e mecanicamente construídas.
Aproblemática e ahistórica	Apresentação das ideias científicas sob formas acabadas, desconectadas dos problemas que a originaram e do contexto no qual foram produzidas
Exclusivamente analítica	Fragmentação do conhecimento em blocos fechados e encerrados, impossibilitando uma visão global e relacional de sua estrutura e desenvolvimento.
Acumulativa de crescimento linear	Associada a manutenção de um ideal de progresso na ciência, entendendo-a como um processo cumulativo e contínuo de aquisição de conhecimentos sobre a natureza.

Individualista e elitista	Exclui o conhecimento do panorama global e atribui sua construção a produções de obras escritas por gênios isolados de contextos e problemas.
Socialmente neutra	Desvincula o desenvolvimento científico do contexto no qual está inserido, negligenciando as relações entre Ciência, Tecnologia e Sociedade, agindo em defesa da manutenção do ideal de progresso.

Iniciamos esta seção com o intuito de identificar que tipo de seleção está por trás da física escolar e o que se pretende legitimar com ela. Com base na análise dos manuais didáticos e das concepções que a literatura apresenta com relação a posição de professores e alunos sobre o desenvolvimento científico, nos parece bastante claro a evidência apontada por Apple (2006) de que toda seleção cultural e condução das hegemônicas atividades curriculares de física, está em busca da manutenção de uma visão positivista da ciência¹². De acordo com Apple

"O que se encontra nas escolas, contudo, é uma perspectiva semelhante ao que se tem chamado de *ideal positivista*. [...] **Pelo fato de o consenso científico ser continuamente demonstrado, não se permite que os alunos vejam que, sem desacordo e controvérsia, a ciência não progrediria ou progrediria muito pouco.**" (APPLE, 2006, p.132, grifo nosso)

¹² Pretendemos deixar claro no Capítulo 3, que trata sobre a ruptura epistemológica e seu papel na constituição do conhecimento escolar, o que estamos chamando de ideal positivista. Mas, para adiantar a discussão e situar o leitor, iremos fazer menção ao positivismo caricaturado e criticado por Bachelard na constituição de sua empreitada epistemológica no embate com as posturas filosóficas correntes em sua época.

2.6 Um problema de ordem epistemológica

Realizaremos agora uma síntese das análises, reflexões e conclusões tiradas neste primeiro eixo desta dissertação. Esta pesquisa foi realizada com o intuito claro de avaliar de que forma as diferenças epistemológicas entre a física clássica e a física contemporânea poderiam nos ajudar a entender este movimento de resistência que encontramos neste processo de renovação curricular. É importante reconhecer que esta tarefa de reestruturação, como já explicitado anteriormente, é composta por diversas faces – na própria análise do trabalho de Forquin verificamos imperativos didáticos que agem sobre diferentes dimensões da instituição dos saberes escolares, de forma que, como foco central desta dissertação, buscamos avaliar a dimensão epistemológica deste problema de renovação curricular.

Passamos inicialmente pelos discursos envolvidos nos mais diferentes documentos do campo da política educacional enxergando, dentre eles, um consenso claro e conciso sobre a necessidade de uma abordagem contemporânea. Em comparação a este discurso, investigamos as práticas escolares nas suas diversas dimensões, indo desde o currículo real transposto em sala de aula, passando pela constituição dos materiais que auxiliam sua realização e olhando também para o campo de ações realizadas pela pesquisa educacional aplicada e associadas à tarefa de atualização curricular. Verificamos que, apesar de existirem propostas realizadas nas diferentes dimensões explicitadas, ainda não há, no cotidiano escolar, uma prática sistematizada, organizada e consensual no que se refere a discussão de tópicos de FMC na educação básica. Nos intrigou o fato de as práticas escolares se mostrarem bastante distantes dos discursos manifestados pelos mais diversos documentos educacionais e indicados pelas mais diversas pesquisas acadêmico-científicas, nos fazendo perceber a existência de um movimento de resistência a esse processo de renovação curricular.

A investigação da natureza deste movimento de resistência foi realizada a partir de investigações sobre o processo de constituição dos saberes escolares, entendido por intermédio de uma leitura das reflexões realizadas pelo sociólogo da educação Jean-Claude Forquin (1992). Nos atentamos para o fato, apontando por Forquin, de que a constituição dos saberes escolares enfrenta dois grandes processos: a **seleção no interior da cultura** e a **incorporação dos saberes na instituição escolar**, passando por

aquilo que o autor denomina como imperativos didáticos. Ao compreender a constituição dos saberes escolares como associados a um processo de seleção no interior da cultura, percebemos que por trás de determinadas seleções se encontra a defesa da legitimação e manutenção de certas visões de conhecimento, de sociedade e de ciência, sendo esta última de extrema importância para a dimensão epistemológica escolhida para o desenvolvimento desta pesquisa.

Debruçado nas reflexões de Forquin e de posse de um entendimento mais amplo sobre a constituição dos saberes escolares, procuramos entender que tipo de seleção cultural está por trás da Física Escolar e o que se pretende legitimar com ela. Compreender elementos associados a este processo de seleção nos remete a uma dimensão crucial que envolve o cerne deste movimento de resistência de inovação curricular e permite um olhar sobre que possibilidades de ações podem ser tomadas para agir contrapondo-se a ele – mais do que propriamente as ações, acreditamos que ficaria mais claro como a dimensão epistemológica age neste processo de resistência.

Caricaturando a física escolar, identificamos uma forma bastante peculiar de entender por que os conteúdos de ensino são organizados da maneira como estão e como se encontram cada vez mais cristalizados na perpetuação do currículo escolar. Ao enxergar o conhecimento escolar que representa a física organizado em blocos isolados de conhecimentos encerrados, determinados por relações estritamente lógicas, tratados de forma ahistórica, neutra, objetiva e que privilegiam a elevação do caráter empírico-indutivista de apreensão da realidade, **percebemos que aparenta-se estar defendendo a manutenção de uma visão da ciência como um conhecimento perfeitamente organizado sobre o mundo e em constante progresso em sua tarefa de apreensão do real – bastante próximo do ideal de progresso presente na doutrina positivista da sociedade elaborada por August Comte.** De acordo com JUNIOR (1994), este ideal está associado tanto ao descobrimento e demonstração das leis que possibilitam o progresso, quanto da instauração de instituições que contribuam para a verdadeira reforma da sociedade, se tratando, portanto, de

[...] uma tentativa de síntese geral dos conhecimentos de seu tempo, cujo programa fundamental era unificar as duas culturas – a humanística e a científica – num novo humanismo, fundado na ciência; **uma ciência capaz de redescobrir e reavaliar a exigência humana, conferindo-lhe um significado de valor universal.** (JUNIOR, 1994, p.10, grifo nosso)

A doutrina positivista, dentro da filosofia da ciência, é entendida como a busca das bases universais por meio das quais a ciência progride em sua plenitude, dissociando-a de quaisquer valores metafísicos, subjetivos e incognoscíveis, pautado, coincidentemente (ou não), nos pontos levantados anteriormente e que caracterizam as posições epistemológicas que frequentemente observamos no conhecimento escolar.

Nos parece coerente afirmar que, nesta perspectiva, a seleção cultural está associada à manutenção de uma visão positivista da ciência que tem como intuito legitimar um ideal de progresso, pautado em conhecimentos absolutos e universais que negligenciam todo e qualquer conflito possível em seu entendimento. Desta forma, percebemos evidências que nos permitem afirmar que a epistemologia do conhecimento escolar se encontra polarizada sobre uma perspectiva positivista da ciência, o que remete uma das dimensões do problema de renovação curricular a um problema de ordem epistemológica.

Neste sentido, não acreditamos que a busca pela FMC na educação básica deva se pautar diretamente na elaboração e revisão de metodologias educacionais, é preciso, antes disso, reconhecer o problema epistemológico por trás dessa forma de interpretar o conhecimento, para que então as práticas possam ser efetivamente refletidas – daí a importância da constituição de uma autonomia em sentido epistemológico, uma autonomia que seja capaz de identificar as contradições presentes nas suas mais diferentes faces, e que seja capaz de agir sobre elas no sentido de problematizá-las e, partir disso, superá-las.

É importante salientar que não adotamos aqui nenhuma perspectiva salvacionista sobre o problema da renovação curricular. As evidências e os argumentos aqui construídos não englobam toda a complexidade do problema de renovação curricular, mas tem como intuito contribuir para um entendimento mais apurado da dimensão epistemológica de sua investigação. Neste sentido, essa forma de observá-lo, se deu a partir do rumo metodológico e das fundamentações teóricas que utilizamos para guiar nosso olhar sobre a natureza do problema.

Neste momento, redirecionaremos as reflexões do plano educacional para o plano filosófico e epistemológico, com o intuito de refletir sobre as ações que podem ser

realizadas para enfrentar esse movimento de resistência instaurado neste processo de renovação curricular, uma vez que nos propomos a lidar com um confronto de ordem epistemológica.

3 A epistemologia de Gaston Bachelard

Quando alguém pergunta para que serve a filosofia, a resposta deve ser agressiva, visto que a pergunta pretende-se irônica e mordaz. [...] A filosofia serve para entristecer. Uma filosofia que não entristece a ninguém e não contraria ninguém, não é uma filosofia. A filosofia serve para prejudicar a tolice, faz da tolice algo vergonhoso. Não tem outra serventia a não ser a seguinte: denunciar a baixeza do pensamento sob todas as suas formas.

Gilles Deleuze

Como apontamos ao final do Capítulo 2, nos parece coerente afirmar que por trás dessa forma bem estabelecida de conceber a Física Escolar encontra-se, no pano oculto do currículo, a legitimação de uma visão positivista da ciência. Uma visão que coloca descrença no incognoscível e no inobservável, que procura se constituir única e exclusivamente nos fatos obtidos a partir da experimentação científica. A Física Clássica, por mais que venha representar posturas filosóficas muito mais ricas e profundas do que a simples apreensão do real pela experimentação, lida com elementos que encontram correspondência com uma realidade interferível mais facilmente. Construir uma perspectiva da física clássica, dando a ilusão de que todos seus constructos se pautaram exclusivamente em uma observação rigorosa da natureza e de sua posterior generalização não somente pode ser feita, como foi muito bem arquitetada nos currículos tradicionais de física – tanto é que reflexões sobre a constituição das noções de espaço e tempo absoluto na mecânica newtoniana, a realidade dos campos elétricos e magnéticos, do meio mecânico responsável por sua propagação e até mesmo os debates sobre a natureza do calor são profundamente renegados com o intuito de mostrar a física como um corpo sólido, consensual e regido por um princípio último associado aos fatos objetivos do mundo físico – apresentando, reconhecidamente, a perspectiva histórica adotada no positivismo científico.

A naturalização de determinados hábitos intelectuais e modelos de pensamento nas tradições pedagógicas, se configuram como elementos cruciais no conflito que se instaura no interior das salas de aulas de ciências quando discussões referentes à contemporaneidade científica tentam se colocar. Como possui uma estrutura

epistemológica distinta desta visão positivista concedida à física clássica, não se consegue perceber a novidade essencial do pensamento científico contemporâneo, uma vez que determinadas formas de agir e de pensar a ciência já se encontram bem estabelecidas. Essa ação faz com que se tente, continuamente, conceber a FMC à luz da epistemologia positivista tão bem legitimada no decorrer de todo processo educativo. Assim a discussão nunca avança, pois exige uma reestruturação do pensamento – uma ruptura em nível epistemológico agindo diretamente sobre o cerne do conhecimento escolar.

Com o intuito de elevar a dimensão da reflexão indo do nível educacional ao nível filosófico, este capítulo pretende refletir sobre as condições de ação envolvidas nessa ruptura epistemológica. Para isto, trataremos da principal fundamentação teórico-filosófica deste trabalho: as reflexões do filósofo francês Gaston Bachelard (1884 – 1962) acerca da natureza da ciência contemporânea. Protagonista de um feroz embate com as correntes filosóficas de sua época, Bachelard inaugura uma nova forma de enxergar a Ciência dando um novo papel à sua filosofia e à sua investigação histórica. Veremos que o embate travado por Bachelard com as filosofias de sua época tem natureza muito semelhante àquela que estamos nos propondo a realizar.

É bem conhecida a postura acadêmica de escrita de teses e dissertações, no qual o autor se mantém longe o suficiente para não se mostrar em sua primeira personalidade, mas também perto o suficiente para transparecer na escrita aspectos de sua própria construção. Quebrarei por um instante os muros da personalidade para dizer que a aproximação com a epistemologia bachelardiana foi extremamente importante nesta empreitada intelectual. Mais do que uma fundamentação teórica, as conversas intensas com as obras de Bachelard permanecerão, como cita Bulcão (2013, p. 82), “enraizadas em nosso eu mais profundo”. Percebe-se nas leituras de Bachelard a coerência entre uma postura filosófica e a prática da vida como uma constante ação pedagógica de se fazer entender. Mas, como um bom pensamento bachelardiano, não se fazer entender pela simplicidade da explicação, e sim pela coerência dos discursos, pela inesgotável ação do desconfiar, do deixar em aberto, do apresentar soluções transparecendo que ainda há muito a solucionar. É essa sensação de incompletude, de densidade reflexiva, de carga filosófica diversa que encontramos na obra bachelardiana e que agora devo transpor, de forma materializada, como fio condutor da reflexão que pretendemos desenvolver para abordar os problemas levantados.

Primeiro, por uma questão de tempo, e, segundo, por uma questão de adequação metodológica, planejamos estrategicamente como seria conduzido o estudo das obras de Bachelard. Michel Vadée, intérprete do pensamento do filósofo francês, afirma que se pode entrar na epistemologia bachelardiana por vários caminhos (BULCÃO, 2009), uma vez que não se trata de uma obra de significado único, ou de um conjunto de pressupostos e conceitos fixos e delimitados para a compreensão. Se trata de uma obra onde acompanhamos o pensamento em seu dinamismo mais profundo.

Tendo em vista que nosso intuito era construir uma reflexão sobre a noção de ruptura epistemológica a fim de agir sobre posições epistemológicas bem estabelecidas na Física Escolar, seguimos uma linha histórica de compreensão da construção do pensamento bachelardiano. Nosso objetivo era compreender como se constitui o dinamismo do pensamento em seu embate contra correntes filosóficas pré-estabelecidas. Realizamos um estudo da obra *Ensaio sobre o Conhecimento Aproximado* (1928) em busca dos fundamentos filosóficos que guiaram a construção de sua postura epistemológica. Seguimos para o estudo de um conjunto de artigos publicados entre 1931-1934, contemplados na obra *Estudos*, para acompanhar como suas ideias se articularam a medidas que os problemas científicos de seu tempo foram se colocando. Chegamos então à sua primeira grande obra, *O Novo Espírito Científico* (1934), onde se encontra o conjunto das primeiras reflexões sistematizadas sobre a novidade essencial do pensamento científico contemporâneo. Finalizamos o estudo com uma análise da obra mais conhecida do filósofo francês, *A formação do espírito científico* (1937), onde aparece de forma organizada a noção de Obstáculo Epistemológico – bastante referenciada e difundida nas pesquisas em ensino de Ciências.

Tentaremos organizar o conjunto das reflexões bachelardianas em algumas seções que auxiliem tanto a compreensão das dimensões educacionais, referentes à própria natureza da ruptura epistemológica que estamos nos propondo a realizar, quanto científicas, no que se refere a um entendimento sobre a natureza da ciência contemporânea e a apreensão do novo espírito científico. Nossa tarefa mais desafiadora, é encontrar dentro da epistemologia bachelardiana, condições para agir contra correntes de pensamento bem estabelecidas na constituição do conhecimento escolar.

3.1 O mundo em descrição e a natureza do conhecimento aproximado

É um erro conferir ao conhecimento real um único sentido. Para apreendê-lo em sua função dinâmica, é preciso ter a coragem de colocá-lo no seu ponto de oscilação, no qual se mesclam o espírito de refinamento e o espírito geométrico. [...] Para resistir à tendência de sistematizar, tão sedutora ao filósofo, devemos conferir todo o sentido à descrição inicial e não esquecer que a descrição é a finalidade da ciência. É dela que se parte. É a ela que se volta.

Gaston Bachelard

“Conhecer é descrever para re-conhecer”¹³. Esta é a frase que abre a tese de doutoramento do filósofo francês Gaston Bachelard. Pequena em tamanho e densa em significado, essa pequena representação perpassa toda a defesa da tese do conhecimento aproximado e a veremos presente como pano de fundo de toda a epistemologia bachelardiana. Uma primeira análise desta frase nos indica que remeter o processo de produção do conhecimento à descrição para um posterior (re)conhecimento manifesta a ideia de um movimento de aproximação e afastamento. O ato de descrição aproxima o racional do real, que, por sua vez, devolve ao racional suas impressões do mundo e que permite uma ordem de aproximação mais profunda quanto mais fecundo for seu processo de realização¹⁴.

O processo de descrição, no entanto, não é entendido nem como uma simples leitura do mundo em sua manifestação imediata, nem nas conjecturas amplas da idealização, afastado completamente da relação com o real. Em traços muito comuns da tradição

¹³ (BACHELARD, 2004, p. 13)

¹⁴ Como discutiremos mais adiante, BULCÃO (2009) aponta que a epistemologia de Bachelard defende que o próprio objeto de estudo da ciência contemporânea não é um dado da natureza – mas sim fruto de um processo de construção. Neste sentido, o processo de “realização” aqui mencionado, se trata de uma a materialização do pensamento, que será manifestado pelos processos constitutivos da construção científica. A obra Estudos (2008), reúne um conjunto de trabalhos publicados onde Bachelard constrói um termo denominado como fenomenotécnica, fazendo alusão à ausência da fenomenologia na ciência contemporânea – os fenômenos, assim como os objetos de estudo, são produzidos pelas técnicas científicas associadas a materialização do pensamento, sendo assim, não há mais a “logos” dos fenômenos naturais – a ciência contemporânea não lida com a análise dos fenômenos naturais, mas sim com a arte de produzir fenômenos. Esta postura epistemológica fica muito clara na posição filosófica denominada como Materialismo Técnico, bastante discutida em na obra Racionalismo Aplicado.

científica, o ato da descrição vem comumente associado a um conjunto de definições que, certas de dar conta de todas as propriedades do objeto, acreditam que por uma inferência de ordem lógica seja capaz de apreender todas as qualidades dos seres estudados. Segundo Bachelard,

[...] há ciências em que as noções se entrelaçam com tal força que a descrição pode ser restrita e bastam definições sumárias, certo que se está de encontrar no devido lugar [...] as diversas e sucessivas qualidades dos seres definidos. (BACHELARD, 2004, p.14)

Já quando avaliamos o conhecimento em sua tarefa de assimilação, verifica-se, na tradicional oposição entre dado e razão, a existência de um conflito que jamais poderá ser resolvido, pois a perfeita descrição reúne duas condições opostas: a minúcia e a clareza – “O conhecimento [...] se for simultaneamente adequado e intuitivo, será perfeitíssimo.” (LEIBNIZ, apud. BACHELARD, 2004, p.14). Se por um lado as definições de ordem lógica trazem um sentimento de clareza, por outro, um saber dedutivo partindo delas se trataria apenas de uma relação esquemática não minuciosa de suas estruturas mais fundamentais.

Bachelard aponta para o fato de que é preciso trabalhar o conhecimento sobre seu ponto de oscilação analisando sua função dinâmica, destacando, neste sentido, a existência de um problema epistemológico no pensamento a partir de definições, uma vez que elas atribuem ao conhecimento um significado único. Ao priorizar somente a generalização, o conhecimento se torna cada vez mais idealizado e afastado do real. Por outro lado, ao priorizar a verificação, que se deve reconhecer nunca ser total, constituímos um conhecimento essencialmente fragmentado. Não se trata, portanto, de polarizar-se em nenhum dos lados, mas sim de reconhecer a existência de uma via dupla, de um movimento, como já explicitado, de afastamento e aproximação do real. (BACHELARD, 2004)

Outro ponto destacado pelo filósofo com relação às definições, mora no fato de confundir o conhecimento tal como é transmitido com o conhecimento tal como é criado. Comumente dá-se ao signo mais importância do que à própria *coisa* significada, constituindo assim blocos encerrados sobre a descrição dos objetos. Desta forma, a tarefa da descrição mostra-se sempre imperfeita, cedo ou tarde ela precisará se voltar ao real. Em alusão a essa falta de significação, Bachelard faz menção à citação de um cientista francês que comentava com Poincaré seu entendimento sobre a obra de Maxwell:

“Compreendo tudo no livro dele, exceto o que é uma esfera eletrizada.” (POINCARÉ, apud. BACHELARD, 2004, p.15).

Ao fazer uma crítica à polarização no pensamento idealista, Bachelard afirma que nele se cria uma série de categorias *a priori* para se construir juízos sobre o mundo. Sua descrição constrói um conhecimento que é fechado sobre si mesmo, que não consegue se apropriar de seu progresso, uma vez que se pretende estático e impenetrável. Ora ou outra, cita o filósofo francês, essas estruturas se abrem para reconciliação com determinados postulados, mas logo voltam a se fechar. Seria preciso considerar a permanência de sua abertura, mas nessa ação moraria o maior pesadelo dos idealistas – “a existência inegável de um erro que não pode, por natureza, ser totalmente eliminado e que obriga a nos contentarmos com aproximações.” (BACHELARD, 2004, p.16). Portanto, para esclarecer as condições do progresso do conhecimento, o idealismo mostra-se como hipótese fecunda e ilusória (BACHELARD, 2004). Poderíamos como saída pensar, como Meyerson, que a ciência costuma postular uma realidade, mas nesse sentido o conhecimento sobre ela jamais poderia ser esgotado, o que suscita uma pesquisa sem fim – aí mora, para Bachelard, o fundamento da epistemologia, o princípio último do ato de conhecer:

A essência da realidade reside na resistência ao conhecimento.
Vamos, pois, adotar como postulado da epistemologia o caráter sempre inacabado do conhecimento. (BACHELARD, 2004, p.17, grifo nosso)

Ao voltar-se para a resistência da realidade sobre o ato de conhecer, redirecionamos nossa reflexão para a relação do ser com o mundo, para um entendimento profundo de uma noção que a ciência tem feito uso abusivo: a noção de “Dado”. Não nos referimos aqui ao dado como simplesmente o resultado de uma experiência, mas interpretando-o no próprio sentido etimológico da palavra – aquilo que nos é dado por nossa relação com o mundo, como o real manifestando-se àquele que lhe atribuí significado. Nesse sentido, o ato de colher um dado deveria ser considerado muito mais como uma *Realização* do pensamento, no sentido de torna-lo real, do que propriamente o recolhimento de uma informação neutra e sem significado no mundo. É neste sentido que muito comumente se confunde *dado primordial* com *dado imediato*. Percebendo o dado como a realização do pensamento, o que é imediato para um pode não ser para outros – o dado é a projeção do

espírito no mundo, está associado a ação do ser de atribuir significado ao mundo e colher dele uma resposta. Segundo Hoeffding,

O conceito de dado imediato é [...] formado pela reflexão. Se não existisse nada além do dado imediato, nenhum conceito, fosse qual fosse, poderia ser formado; por conseguinte, o conceito de dado imediato não poderia existir. Ele é formado em oposição à reflexão, e pela própria reflexão quando ela se torna consciente de sua atividade e do que pressupõe. (HOEFFDING, apud. BACHELARD, 2004, p.18)

É nesse sentido que o espírito que conhece tem um passado, um conjunto de pré-disposições e de imagens formadas sobre o mundo. Ao reviver esse impulso ele pode escrever “a equação diferencial do movimento epistemológico” (BACHELARD, 2014, p.19). A solução dessa equação, que representaria as condições de existência do movimento epistemológico, tem natureza na aproximação e no afastamento com relação ao real e tem sua ação intermediada pela retificação epistemológica – entendendo a retificação não como a simples realização de uma observação malsucedida, mas como o próprio motor do movimento epistemológico – é a partir dela que o pensamento se realiza e nesse processo incessante se encontra a base do entendimento de Bachelard sobre o ato de conhecer: sua natureza fundamentalmente aproximada. (BACHELARD, 2004)

É interessante observar que na obra *Ensaio sobre o Conhecimento Aproximado* aparecem, ainda que de forma implícita, noções que fundamentam a epistemologia bachelardiana. Começa a se delinear uma crítica sobre juízos a priori, absolutos, estáticos e formas pré-estabelecidas de pensamento. A tese do conhecimento aproximado tira o conhecimento de seu estado estático e explora sua natureza dinâmica, problematizando a polarização epistemológica e colocando entre dois polos opostos o idealismo e o realismo, afirmando que nenhuma das posições tem condições de constituir universalmente o ato de conhecer. Por fim, identifica-se a retificação como o motor condutor do conhecimento – ato que futuramente virá a formular um de seus principais conceitos, o conceito de Obstáculo Epistemológico. Veremos agora como estas posturas entram em conflito com o ambiente intelectual francês na época de suas reflexões e como elas se materializarão em uma forma mais madura de sua teoria do conhecimento.

3.2 O embate com as filosofias de sua época

O projeto epistemológico de Bachelard que irá instaurar novas formas de ver não só a própria ciência, mas sua filosofia e sua história, não se restringe somente a tal formulação. Ele é construído para situar o filósofo francês como o protagonista de um intenso embate com as filosofias correntes no ambiente intelectual francês de sua época. Vindo do campo, Bachelard entra em confronto com as mentes formadas pelos grandes centros de formação parisienses e é citado por Bourdieu como um autor, dentre outros poucos autores como Canguilhem, Koyré e Weil, que se apresentavam na contramão de pensamentos de tradição bem estabelecidos:

Por vezes de origem popular e provinciana ou, então, estrangeiros na França e alheios às suas tradições escolares, vinculados a instituições universitárias excêntricas, como a Escola de Altos Estudos ou o Collège de France, e ocultos à percepção comum pelo estardalhaço dos dominantes, **esses autores marginais e destituídos de poder temporal ofereciam um recurso aos que, por razões diversas, pretendiam reagir contra a imagem ao mesmo tempo fascinante e rechaçada do intelectual total, que se fazia presente em todas as frentes do pensamento [...]** (BOURDIEU, 2004, p. 46, grifo nosso).

Irônico em suas menções e publicações, Bachelard não chega a mencionar diretamente a quem se destinava sua filosofia do não e para quais posturas ele se mostrava em negação. No entanto, o próprio cenário das universidades francesas ao final do século XIX, denunciam a quem se direcionava suas reflexões. As perspectivas filosóficas em voga na época podem, conforme Barbosa e Bulcão (2004) e Bulcão (2009), ser organizadas em três grandes frentes. A primeira delas, de grande influência tanto sobre as demais, quanto sobre a sociedade francesa em todas suas camadas, era a doutrina positivista inaugurada por August Comte. Como caricaturamos ao final do último capítulo, o positivismo não se trata de uma doutrina destinada propriamente à ciência, mas busca definir, a partir do sucesso científico, os instrumentos universais para o progresso da sociedade. Outras duas posturas filosóficas, bastante influenciadas pelo positivismo, lidavam com duas posturas opostas e intensamente criticadas por Bachelard no decorrer de sua obra: o espiritualismo e o pensamento epistemológico de Émile Meyerson. O espiritualismo, doutrina voltada para uma postura idealista e de celebração da existência do ser no mundo, privilegiava que a compreensão se dá de forma contínua, construída a partir da relação do ser com suas experiências cotidianas, defendendo que a partir delas poderia se

construir todo o entendimento possível sobre o funcionamento do universo. Já o pensamento de Émile Meyerson era fundado em um realismo que buscava trabalhar sobre uma ontologia do trabalho científico, trabalhando na identificação das bases absolutas que fundamentam seu progresso e os elementos reais que estão por trás de sua descrição.

Faremos agora uma descrição mais profunda sobre cada um dos pensamentos apresentados, para salientar dois pontos fundamentais de interesse ao desenvolvimento deste trabalho. O primeiro deles se trata obviamente de situar a quem se direciona as críticas de Bachelard para melhor compreender a consolidação de seu pensamento, enquanto que o segundo se trata de uma pretensão nossa em associar essas posturas epistemológicas com as posturas existentes na epistemologia do conhecimento escolar que caracterizamos neste trabalho. Neste sentido, tentaremos realizar uma aproximação entre a epistemologia da ciência proposta por Bachelard e uma epistemologia do conhecimento escolar.

O Positivismo de August Comte e a doutrina positivista

Auguste Comte é considerado o fundador do pensamento positivista. Tendo em sua formação apresentado posições ultrademocráticas e socialistas, a preocupação de Comte se volta para a construção de um sistema que possibilite uma regeneração da humanidade. As grandes épocas de seu trabalho estão entre 1830 a 1860, sendo quase um século anterior aos trabalhos de Bachelard. Em suas duas primeiras obras *Curso de Filosofia Positiva* (1842) e *Discurso preliminar sobre o espírito positivo* (1844), Comte estabelece leis sociais com o intuito de descobrir e demonstrar o progresso. Enquanto que sua terceira obra *Sistema de política positiva* (1854) instaura as bases do sistema político-religioso que pensa ser capaz de reformar a sociedade (JUNIOR, 1994). É interessante perceber que a palavra espírito, bastante utilizada nas conotações de Bachelard sobre o estado que se coloca o ato de conhecer, tem origem nas obras de Comte.

Em sua estrada, Comte procura renegar o incognoscível que se encontrava comumente explorado nas concepções filosóficas. O ontologismo Aristotélico construía verdades a partir de argumentos lógicos que apresentavam coerências internas em suas proposições, constituindo verdades sintáticas sobre o mundo. O pensamento racionalista moderno, permeando de Descartes a Kant, abstraía completamente de realidade imediata e construía uma interpretação para o mundo a partir do ato racional. A crítica de Comte

se volta, portanto, a tentativa de construir, a partir da razão humana, verdades absolutas sobre o mundo. (JUNIOR, 1994)

Em contraposição, a postura de Comte volta-se para a realidade e coloca que os fenômenos devem ser apreendidos por suas relações, e não em sua essência, em sua natureza última. A intimidade da natureza é considerada por Comte como impenetrável, desta forma não devemos nos prender à sua descrição, uma vez que jamais conseguiremos identificar se elementos da criação abstrata tem correspondência direta com a ela. Daí a postura de compreender a natureza de forma **positiva**, que consiste em construir afirmações sobre o mundo restringindo-se apenas nas relações que podemos estabelecer com os fenômenos que pertencem a ele. O trabalho de Comte tenta produzir uma síntese e uma articulação entre uma perspectiva humanista e científica, tendo como intuito construir bases para uma reforma da sociedade. (JUNIOR, 1994)

O contexto no qual Comte realiza suas reflexões se trata da França do século XIX marcada pelo liberalismo europeu que defende o ideal da liberdade do indivíduo como um direito natural. Esta seria a verdadeira realidade e função do homem no mundo e na sociedade, constituindo uma crença que se volta à institucionalização do indivíduo em detrimento até mesmo do Estado. O auge e a importância adquirida pelas posturas filosóficas empiristas e materialistas ocasionaram um movimento de transformações do pensamento liberal o que faz, em contraposição a esse movimento, constituir-se o cientificismo. (JUNIOR, 1994)

O caminho para a consolidação do cientificismo, buscando instaurar uma forma de ver o mundo pautado na experiência sensível explorada por Bacon, mantém ceticismo à teologia e à metafísica. O sucesso do universo mecânico instaurado por Newton e do sucesso empírico e metódico colocado por Bacon e Galileu instaura as bases do positivismo, tanto como metodologia, quanto como doutrina. O positivismo enquanto metodologia defendia que os fatos rigorosos retirados da experiência devem servir de base para a construção de teorias. Já como doutrina, defendia que a ciência, tendo em vista sua retrospectiva, apresenta as características universais de representação da realidade positiva, substituindo todos os *a priori* por posturas *aposteriori*. Deve-se, portanto, restringir-se a verdades positivas e negar que se possa, em qualquer instância, alcançar a essência metafísica por trás da realidade dos objetos. Segundo Junior,

“O positivismo é, portanto, uma filosofia determinista que professa, de um lado, o experimentalismo sistemático e, do outro, considera anticientífico todo estudo das causas finais” (JUNIOR, 1994, p.16)

As bases do positivismo estão instauradas na obra *Filosofia Positiva*, sendo a Filosofia, vista por Comte, como o sistema universal de organização do conhecimento humano e o termo Positivo a contraposição entre o utópico/inacessível e o real. A negação de generalizações de origem metafísicas ou teológicas realoca a metodologia positivista a um extremo de experimentações rigorosas por meio das quais podem-se deduzir, a partir de comportamentos particulares, generalizações que tomam formas de leis de representação da realidade física. Para Comte, esse conjunto de ações constitui um método objetivo, que envolve processos como dedução, indução, observação, experimentação, nomenclatura, comparação e analogia. (JUNIOR, 1994)

Em Comte, seguindo uma filiação histórica, o desenvolvimento do espírito humano passa por três etapas, fazendo-o construir uma lei por meio da qual o ser humano se constitui, denominando-a como *lei dos três estados*. O espírito, de acordo com Comte, se desenvolveria passando por três estados: o **teológico-fictício**, o **metafísico-abstrato** e o **positivo**. (JUNIOR, 1994)

O estado **teológico-fictício** está relacionado ao estado de espírito do ser no qual as representações do mundo são dadas a partir de divindades ou explicações transcendentais, associando, por exemplo, a constituição da cultura mitológica nas sociedades antigas ou ao posicionamento estritamente religioso bastante influente na Europa ocidental renascentista. (JUNIOR, 1994)

O progresso do primeiro estado leva a constituição do segundo, o estado **metafísico-abstrato**, no qual as explicações tomam forma em um corpo de afirmações abstratas explicadas por forças ocultas. A título de exemplo, Comte explicita as explicações envolvendo a ação da gravidade, o mecanismo de força vital que mantém os seres vivos, entre outros exemplos que fazem menção a construções científicas que ainda preveem a existência de mecanismos abstratos para explicar sua ação e existência. (JUNIOR, 1994)

O último estado de espírito do ser humano, que representaria sua criticidade intelectual em nível mais apurado, seria o estado **positivo**. Neste momento, o espírito encontra seu estado de maior criticidade com relação ao mundo, no qual a rigorosidade e as dúvidas com relação à essência da natureza, defendem que as explicações dos fenômenos devem se restringir a observações rigorosas de fatos e experimentações bem

realizadas, por meio das quais podem-se encontrar leis gerais a partir de um conjunto de casos particulares. (JUNIOR, 1994)

É interessante notar que obras historiográficas que fazem referência à grande revolução científica pelo qual passou a ciência na virada do século XIX, costumam ressaltar que para intelectuais da ciência desta época a física estava resolvida, tudo o que precisava se conhecer sobre o mundo natural estava consolidado nos mais diversos blocos de conhecimento que passam pela Mecânica, a Termodinâmica e o Eletromagnetismo (que havia incorporado em si a óptica a partir da descoberta de Maxwell sobre a natureza das ondas eletromagnéticas). A frase de Laplace em *Théorie Analytique des Probabilités*, expressa o nível de determinismo e certeza delimitado por influência do espírito positivo apontado por Comte:

[...] se imaginarmos uma inteligência capaz de conhecer todas as forças que animam a Natureza e conhecer o estado de todas as partes da qual ela é composta [...] então ela seria capaz de numa fórmula expressar o movimento dos maiores corpos do universo, bem como o dos menores átomos. Para tal inteligência nada seria incerto e o futuro, bem como o passado, estariam abertos a seus olhos. (LAPLACE, 1812)

A negação da natureza de entidades metafísicas na doutrina positivista pode ser percebida na ciência na própria postura de Mach em seu princípio de economia de pensamento, materializado em sua posição antiatomista, bem elucidado por Fitas em sua análise sobre a relação entre o pensamento de Mach e o Positivismo,

Segundo o princípio da economia de pensamento, **uma boa teoria científica é aquela que permite a classificação e previsão dos fenômenos sem o recurso a um excessivo número de ideias sem correspondência com o que é observado pelos sentidos**, a lei científica corresponde a um enunciado econômico, formulado na linguagem matemática (a mais econômica e geral), dos resultados experimentais. Esta lei não se preocupa com a constituição da natureza nem com a explicação causal dos fenômenos observados. Para Mach a hipótese atomista, supondo o átomo como entidade real, constitui uma teoria física muito complicada; um átomo nunca se observara, era impossível a sua comprovação experimental, logo esta teoria não teria sentido. (FITAS, 1998, p.8, grifo nosso)

A polêmica comum x científico com o Espiritualismo

O pensamento espiritualista se caracteriza como uma das correntes que defendiam uma doutrina idealista, mas que tinha como objetivo principal combater o materialismo cientificista dos filósofos iluministas. Para os defensores da posição filosófica, valores

como a moral, a ética e a religião haviam se desvinculado do ser humano com o sucesso das ciências, que passou a ocupar o lugar das crenças nos valores subjetivos do ser. O jargão Espiritualismo foi colocado, segundo COSTA (2009), por Victor Cousin:

O termo "espiritualismo" foi colocado no jargão filosófico no século XIX, por Victor Cousin, quando elaborou o programa dessa filosofia no prefácio de sua obra "Du vrai, du beau e du bien". Ele assim se expressou: "A nossa verdadeira doutrina, a nossa verdadeira bandeira é o Espiritualismo, essa filosofia tão sólida como generosa, que começou em Sócrates e Platão, que o Evangelho difundiu no mundo, que Descartes colocou nas formas severas do gênio moderno [...] que no princípio deste século (XIX) Royer Collard veio reabilitar no ensino público ao passo que Chateaubriand e Madame de Staël a transportaram para a literatura e para a arte ... Essa filosofia ensina a espiritualidade da alma, a liberdade e a responsabilidade das ações humanas, as obrigações morais, a virtude desinteressada, a dignidade da justiça, a beleza da caridade; além dos limites desse mundo, ela mostra um Deus, autor e modelo da humanidade [...] Essa filosofia é a aliada natural de todas as causas justas. (COUSIN, apud. COSTA, 2009, p.50)

Bastante excêntrica e diversa entre seus pensadores, o idealismo filosófico presente nas doutrinas espiritualista pretendia resgatar os valores morais e as liberdades humanas e de espírito a partir da ação plena do ser no mundo, procurando encontrar no ato da consciência um acesso aos absolutos do universo. Voltava-se para uma celebração das criações do espírito, fossem elas científicas, éticas, morais ou religiosas, fazendo uma releitura da tradição dos *cogitos* cartesiano e husserliano, mas voltando-se para a apreensão do real, acreditando que se podia chegar ao conhecimento do universo a partir da intuição e da experiência cotidiana. (BARBOSA e BULCÃO, 2004)

As principais críticas da epistemologia bachelardiana com relação à corrente do espiritualismo francês se colocam na ruptura defendida pelo filósofo francês entre conhecimento comum, proveniente da realidade imediata e as experiências cotidianas, e o conhecimento científico, proveniente de uma atividade profunda de aproximação e afastamento do real, rompendo com as primeiras impressões que provém dele. Para Bachelard, é um equívoco compreender que a novidade essencial do pensamento científico contemporâneo possa se dar por uma simples extensão de suas primeiras impressões. (BARBOSA e BULCÃO, 2004)

A polêmica entre as epistemologias de Émile Meyerson e Gaston Bachelard

Émile Meyerson foi um epistemólogo francês contemporâneo das publicações de Bachelard e com quem travou intensos debates sobre a natureza do conhecimento

científico. A atitude polêmica de divergência entre os pensadores se releva até mesmo pela escolha de alguns de seus títulos de publicação – Meyerson publica em 1925 uma obra intitulada *La **deduction** relativiste* e em 1929 Bachelard publica a obra *La valeur **inductive** de la relativité*. Enquanto a obra de Meyerson procurava ilustrar como a relatividade apresenta um verdadeiro progresso contínuo da física newtoniana, a obra de Bachelard defende que a ciência einsteiniana se coloca como uma ruptura não só com a mecânica newtoniana, mas com a física dos tempos idos, se tratando, portanto, de uma teoria cujos princípios são retificações dos princípios da física clássica. (BARBOSA e BULCÃO, 2004; BULCÃO, 2009)

Quando, em *O Ensaio sobre o Conhecimento Aproximado*, Bachelard cita que Meyerson afirma que a ciência postula uma realidade, está se referindo ao fato de que, na epistemologia meyersoniana, ciência é, em última instância, ontologia, tratando da realidade do mundo em sua forma absoluta e fiel. Nesse sentido alguns pontos implícitos da visão de Meyerson podem ser extraídos. Como a ciência trata a realidade em sua forma mais fiel e plena, epistemologia e filosofia se traduzem numa mesma tarefa, não havendo distinção entre ambas, uma vez que a filosofia trataria de analisar os resultados produzidos pela ciência, partindo do pressuposto que seus métodos são objetivos o suficiente para crer na existência real das entidades estudadas, encontrando aí suporte na doutrina positivista. Vale ressaltar que, por influência da doutrina positivista, o verdadeiro conhecimento somente é apreendido pelos métodos rigorosos construídos pela ciência. Além de não haver distinção entre epistemologia e filosofia, não há a necessidade de postular uma epistemologia da ciência, ou uma filosofia da ciência, já que é na própria ciência que se encontram as bases necessárias para cumprir a tarefa de construir conhecimento sobre o mundo – à metafísica e à teologia restavam apenas os devaneios. (BARBOSA e BULCÃO, 2004; BULCÃO, 2009)

Nesse sentido a tarefa da epistemologia, para Meyerson, está na identificação das bases epistemológicas do pensamento científico – o filósofo procura instituir a ontologia da razão científica, uma vez que a ciência lida com a realidade em seu sentido ontológico. Por este motivo, constrói os absolutos da razão (BARBOSA e BULCÃO, 2004; BULCÃO, 2009). Uma vez identificados os processos absolutos por meio dos quais a ciência se constitui, é possível entender seu progresso de forma contínua e tornar a atividade científica mais eficiente do ponto de vista de produção de conhecimento sobre o mundo.

Qualquer ação malsucedida no interior da ciência estaria associada não a uma dificuldade intrínseca da natureza em ser conhecida, mas sim de uma má apropriação ou realização do cientista com relação às bases que constituem a apreensão rigorosa da realidade física. Meyerson não nega a existência de erros na ciência, mas os erros seriam provenientes de métodos poucos rigorosos, falta de apropriação da verdadeira constituição do pensamento científico ou até mesmo ausência de noções epistemológicas mais profundas sobre a base do conhecimento racional, sendo este último, tarefa do epistemólogo realizar uma investigação precisa sobre a natureza última do ato de conhecer. Neste sentido, a atividade científica seria cumulativa e de progresso contínuo seguindo as bases absolutas do pensamento. Uma vez apreendidas as bases absolutas da razão, e da construção de uma metodologia rigorosa o suficiente para compreender o real, não há como a ciência falhar pois lida com uma ontologia pré-estabelecida – os objetos e os conhecimentos são *dados imediatos* da natureza, a tarefa da ciência é conseguir extrair dela as verdades absolutas sobre sua composição.

Síntese e reflexão: a dimensão epistemológica do confronto

Após fazer uma análise das posturas epistemológicas que permeavam o ambiente intelectual francês, podemos ter uma noção ampla sobre contra quais posturas se coloca a filosofia bachelardiana da negação. A nosso ver, a negação, apesar de se colocar em diferentes dimensões nas diferentes formas de pensamento discutidas, apresenta um ponto em comum que é a negação de bases estabelecidas e sedimentadas sobre o processo de pensamento.

Na doutrina positivista de Comte, que tenta instituir, a partir do sucesso das ciências, as bases para o progresso de uma sociedade, Bachelard nega o fato de o pensamento ter atingido seu auge, no **estado positivo**, e constituído todas as bases necessárias para sua compreensão e progresso. Como veremos mais adiante, Bachelard, de forma irônica, instaura também três estados do espírito iniciando a partir do estado **concreto**, que bastante se assemelha com o estado positivo. O avanço aos estados seguintes passaria por um ato de exorcizar o espírito positivo, mostrando novamente ironia com pensamento comteano (BULCÃO, 2009). Para Bachelard, é inegável a aceitação de um progresso de aproximação com o conhecimento promovido por um pensamento estático, é preciso reconhecer e trabalhar em cima de sua natureza dinâmica.

Na doutrina espiritualista, Bachelard nega que o conhecimento científico proceda sobre uma simples extensão do conhecimento comum, atentando para o fato de que as bases da construção do conhecimento não estão na relação direta com a experiência cotidiana. Será preciso romper com o imediato para entender a novidade essencial do pensamento científico contemporâneo (BULCÃO, 2009).

Na doutrina epistemológica de Émile Meyerson, a contraposição de Bachelard se manifesta em confronto direto com a existência de bases absolutas da razão. Para Bachelard, o conhecimento é construído a partir de processos incessantes de retificação, mostrando diversidade de ação de acordo com a natureza da ciência que a pratica. Outro ponto fundamental da crítica de Bachelard com relação a Meyerson, se dá pela negação de uma realidade preexistente à ciência. Para o filósofo em sua reflexão sobre a ciência contemporânea, não faz sentido admitir a existência de um real que antecede o ato de conhecer com o intuito de descrevê-lo em sua completude, a ciência contemporânea constituiu seu objeto no decorrer do ato cognoscente. Assim, constitui-se um rompimento com uma objetividade dada por bases absolutas, abrindo caminho para o entendimento de uma objetividade construída a partir de incessantes retificações que possibilitem um movimento de aproximação e afastamento do real, argumento central da tese do conhecimento aproximado.

É interessante notar que o conflito de Bachelard com bases estabelecidas, em grande maioria influenciada pelo pensamento positivista, encontra semelhança com o conflito ocasionado também sobre bases estabelecidas no conhecimento escolar devido à legitimação de uma visão positivista que vem se instaurando em nossas salas de aula. Por este motivo, apesar de distintas em suas áreas, Bachelard tratando da epistemologia do conhecimento científico e nós da epistemologia do conhecimento escolar, a natureza de nossos problemas são fundamentalmente semelhantes, por este motivo, entender os fundamentos da epistemologia bachelardiana auxiliará, a nosso ver, na construção de movimentos que contribuam para o exercício de uma ruptura epistemológica com as tradições bem estabelecidas do conhecimento escolar.

3.3 Ciência como construção e a noção de Obstáculo Epistemológico

Não se trata, portanto, de adquirir uma cultura experimental, mas sim de mudar de cultura experimental, de derrubar os obstáculos já sedimentados pela vida cotidiana. [...] Toda cultura científica deve começar por uma catarse intelectual e afetiva. Resta, então, a tarefa mais difícil: colocar a cultura científica em estado de mobilização permanente, substituir o saber fechado e estático por um conhecimento aberto e dinâmico, dialetizar todas as variáveis experimentais, oferecer enfim à razão razões para evoluir.

Gaston Bachelard

O grande embate travado por Bachelard com as filosofias de seu tempo se dá pela sua tarefa em compreender a ciência que emergia em sua época – para ele, na função de epistemólogo, a ciência contemporânea representava o nascimento de um novo espírito científico. A função dos pensamentos nos tempos que o antecederam era, na perspectiva do filósofo, “tornar geométrica a representação” (BACHELARD, 1996, p.7), no sentido de firmar as estruturas arquitetônicas do pensamento racional, vivendo sempre na intermediação entre o concreto e o abstrato, em busca de conciliar matemática e experiência, leis e fatos. Segundo Bachelard,

Essa tarefa de geometrização que muitas vezes pareceu realizada – seja após o sucesso do cartesianismo, seja após o sucesso da mecânica newtoniana, seja com a óptica de Fresnel – **acaba sempre por revelar-se insuficiente** [...] é forçoso constatar que essa primeira representação geométrica, fundada num realismo ingênuo das propriedades espaciais, implica ligações mais ocultas, leis topológicas menos nitidamente solidárias [...] em resumo, vínculos essencialmente mais profundos do que os que se costuma encontrar na representação geométrica. (BACHELARD, 1996, p.7)

Os desenvolvimentos das ciências contemporâneas, como as teorias da relatividade e a mecânica quântica, elevam o patamar de abstração para espaços complexos de configurações, com estruturas mais metafóricas do que reais, onde as relações não são diretas e o espaço sensível não passa de um pobre exemplo tridimensional, onde relações causais dominam diretamente a grande diversidade dos fenômenos observados. Nesse domínio, a matemática supera o simples papel da descrição geométrica e da

caracterização das propriedades de conjuntos pré-definidos no espaço euclidiano – ela deixa de ser descritiva e passa a ter o papel de criadora, de construtora e de formadora do real. A ciência da realidade já não se pauta mais na explicação do fenomenológico, ela procura o porquê matemático e dele emergem objetos de criação, que produzirão novos espaços de configuração. Já não aceitamos muito bem as estruturas do pensamento geométrico que o concreto nos proporciona? Se o concreto é analisado pelo pensamento abstrato, por que não aceitar as imagens produzidas pelo abstrato? Estamos num momento onde a ordem de aproximação do real não se trata de uma ordem achada ou descoberta pela experiência, mas sim de uma ordem construída, produzida pela dinamização do pensamento (BACHELARD, 1996). Segundo Bachelard, a função da obra *O novo espírito científico* se trata de

Apreender o pensamento científico contemporâneo em sua dialética e dele assim mostrar a novidade essencial, essa é a finalidade filosófica deste pequeno livro. (BACHELARD, 2000, p.20)

A fim de ilustrar as diferenças entre as formas de pensamento, Bachelard, organiza “de modo grosseiro, as diferentes etapas históricas do pensamento científico [...] [em] três grandes períodos” (BACHELARD, 1996, p.9). O primeiro período, denominado pelo filósofo como **pré-científico**, compreende a antiguidade clássica, a Idade Média, o Renascimento e os séculos XVI a XVIII, quando novos esforços de construção do pensamento científico se mostram mais evidentes. O segundo período, denominado como **científico**, tendo início na segunda metade do século XVIII, atravessando todo o século XIX, até o início do século XX, onde grande parte das construções arquitetônicas da geometria científica foram elaboradas. O terceiro período, denominado como **novo espírito científico**, teria, para o filósofo, o ano de 1905 como o marco do nascimento de uma nova era, uma vez que

A partir dessa data, a razão multiplica suas objeções, dissocia e religa as noções fundamentais, propõe as abstrações mais audaciosas. Ideias, das quais uma única bastaria para tornar célebre um século, aparecem em apenas vinte e cinco anos, sinal de espantosa maturidade espiritual. (BACHELARD, 1996, p.9)

Para exemplificar o nascimento da nova era do pensamento científico, Bachelard cita o emergir da mecânica ondulatória de Schroedinger e da mecânica matricial de Heisenberg e Dirac, indicando que são formulações que se distinguem completamente da proposta filosófica e científica da tradicional mecânica newtoniana e que ganharam, em um

intervalo de tempo de menos de 10 anos, uma maturidade que o trabalho de Newton demorou décadas para se tornar assimilado. Talvez em correspondência irônica com Comte, Bachelard elabora

uma espécie de **lei dos três estados para o espírito científico**. Em sua formação individual, o espírito passaria necessariamente pelos três estados seguintes, muito mais exatos e específicos que as formas propostas por Comte. (BACHELARD, 1996, p.11, grifo nosso)

No primeiro estado, o **estado concreto**, o espírito se encontra vinculado à suas primeiras imagens do mundo e constrói explicações associados exclusivamente a elas.

No segundo estado, o **estado concreto-abstrato**, o espírito acrescenta esquemas geométricos as suas primeiras impressões do mundo, mas se encontra numa situação paradoxal, mais seguro ele estará de sua abstração quanto mais claramente ela for representada por uma intuição sensível – ele quer se afastar do mundo, mas ainda se encontra preso a ele.

O terceiro e último estado seria o **estado abstrato**, no qual o espírito se desconecta completamente de suas primeiras impressões do mundo e alcança racionalizações que contradizem a realidade espontânea e imediata (BACHELARD, 1996; BULCÃO, 2009). Segundo Bachelard, o último estado estaria envolvido com uma consciência dolorosa. No arriscado jogo do pensamento sem o suporte experimental sensível e estável, o espírito seria

[...] perturbado a todo momento pelas objeções da razão, pondo sempre em dúvida o direito particular à abstração, mas absolutamente segura de que a abstração é um dever, o dever científico, a posse enfim purificada do pensamento do mundo! (BACHELARD, 1996, p.13)

Recorrendo à história e avaliando esse movimento incessante de construção do espírito científico, Bachelard defende que afirmar uma continuidade na construção do conhecimento é negar a dialética do pensamento e isolar-se num sistema imóvel. As ciências contemporâneas deixam de ser simples mecanismos de reprodução do real e passam a realizar um projeto de construção objetiva da razão. Nesse sentido, Bulcão afirma que Bachelard enxerga a Ciência como Construção em todos seus níveis, inclusive, no plano instrumental e experimental de coleta de dados do mundo. (BULCÃO, 2009)

Para Bulcão (2009), a perspectiva bachelardiana de objeto científico tem seu valor epistemológico invertido. Na doutrina positivista, bem como no pensamento epistemológico de Meyerson, os objetos sobre os quais a ciência se debruça em seu estudo

são dados pela própria natureza, uma vez que a ela está associada uma ontologia e por meio dela devem ser retiradas as verdades sobre ele. Nesse sentido, o cientista é visto como um simples receptáculo das informações do mundo, ele lida com um objeto dado pela natureza e por ações pré-estabelecidas do pensamento racional: as tais bases da razão em Meyerson. A existência de tais bases, extrapolam quaisquer elementos de subjetividade do ato de conhecer – não importa quem o realiza, o conhecimento está no mundo e é a partir de sua apreensão rigorosa que se constitui a atividade científica. (BULCÃO, 2009)

Em Bachelard, a ideia de **Objeto Dado** cede lugar à de **Objeto Construído**. Não há sentido em delimitar objetos pré-existentes na natureza, os objetos são construídos nas relações de abstração que o ato de conhecer apresenta, e seu estudo se dá por sua **realização**: a ação de torna-lo real por intermédio da prática experimental – em suma, a relação sujeito-objeto se transforma. (BULCÃO, 2009)

Poderíamos, para ilustrar essa ideia, citar como exemplo alguns constructos como o modelo atômico quântico de Bohr e o próprio quark concebido por Gell-Mann. Os dois objetos se tratam de imagens do mundo construídas a partir de abstrações da realidade imediata e tem as características dadas pela própria interpretação que seus autores deram em suas formalizações – não havia um átomo com níveis de energia para ser estudado antes da abstração de Bohr, por mais que houvessem espectros de emissão e absorção mal interpretados, a imagem de um átomo com níveis de energias quantizados que emitem radiação eletromagnética com uma energia bem definida na transição de camadas foi uma construção exclusiva de Bohr e que se realizou, no sentido de materializar-se tecnicamente, a partir de experimentos guiados por essa visão. O mesmo poderíamos falar sobre os quarks. Não havia uma estrutura mais fundamental dos *nucleóns* associadas a quebras de simetrias do grupo SU(3) devido as interações estruturais quando partículas estranhas começaram a ser produzidas em raios cósmicos ou quando os aceleradores produziram partículas associadas. Antes da abstração de Gell-Mann, lidávamos com a produção massiva de radiação provinda de raios cósmicos ou aceleradores ao invés de lidar com interações promovidas pela existência dos quarks, provocadas por quebras de simetrias fundamentais da natureza. A ciência contemporânea faz mais do que simplesmente coletar e interpretar dados sobre o real, ela deve se dar ao

trabalho de construir imagens abstratas do mundo e fazê-las se manifestar em suas realizações experimentais.

Uma vez que o próprio objeto de estudo da ciência é construído, Bachelard sinaliza que é preciso reconstruir a própria noção que temos de objetividade. Ela deve deixar de ser considerada como dada e pré-existente nos *a priori* da razão estabelecidos pela ontologia do mundo natural. A objetividade passa a ser entendida como uma construção entre o sujeito cognoscente, o ato de conhecer e o objeto a ser dado significado. Da mesma forma como Bachelard nega a noção de **Objeto Dado**, em detrimento da ideia de **Objeto Construído**, a própria tarefa da ciência não se restringe mais a lidar com uma **Objetividade Dada**, mas de fazer um esforço fecundo na compreensão de uma **Objetividade Construída**. (BULCÃO, 2009)

Obviamente, ao inverter o vetor de entendimento da objetividade, Bachelard prega que em sua construção deve haver uma vigilância epistemológica constante a fim de identificar as contradições que a epistemologia do sujeito no ato de conhecer apresenta no sentido de superá-las. Isso exige um movimento de retificação constante, associado a essa aproximação e afastamento do real. Sobre a retificação, objetivação e sua tarefa de racionalização, Bachelard assinala que

A retificação é uma realidade, ou melhor é a verdadeira realidade epistemológica, pois é o pensamento em seu ato, em sua dinâmica mais profunda. Não se explica o pensamento por meio de uma listagem de suas aquisições: uma força o percorre, e é ela que devemos conhecer. E uma força só é explicada por seu sentido, por sua finalidade. O fim para o qual tendem as determinações experimentais pode ser afirmado quando essas determinações se aplicam ao esquema de uma aproximação. **A aproximação é a objetivação inacabada, mas é a objetivação prudente, fecunda, verdadeiramente racional, pois é, ao mesmo tempo, consciente de sua insuficiência e de seu progresso** (BACHELARD, 2004, p.300. Grifo nosso.)

Fica evidente o motivo de termos iniciado a discussão bachelardiana por sua tese do conhecimento aproximado – a construção da objetividade estabelece uma ordem de aproximação, quanto mais fecunda for a abstração e sua realização no sentido experimental, maior será sua aproximação com o real. Como nosso conhecimento sobre o mundo é aproximado, o ato de conhecer deve ser caracterizado por um dinamismo constante. Nesse movimento incessante de aproximação, no qual se dá o ato de conhecer, nasce aquilo que Bachelard vai denominar como **Obstáculo Epistemológico**, associado a

própria essência do real de resistir ao ato de conhecer, explicitando a importância da ideia de ruptura. Segundo Bulcão,

Daí a importância do conceito de obstáculo epistemológico que está ligado a essa noção de “ruptura” [...] Se a ciência cria seus objetos, rompendo com o saber do passado, ela não pode fixar-se em um determinado momento, caracterizando-se pela mobilidade e progresso constante (BULCÃO, 2009, p.56).

É importante salientar que o conceito de Obstáculo Epistemológico construído por Bachelard, como uma série de outros conceitos em sua obra, não tem função única e universal e apresenta uma ambiguidade de interpretações. Por ora, salientemos os “obstáculos epistemológicos como perturbações que se incrustam no próprio ato de conhecer e que constituem retardos ou causas de inércia do pensamento”¹⁵, uma vez que, “no fundo, o ato de conhecer dá-se contra um conhecimento anterior, destruindo conhecimentos mal estabelecidos, superando o que, no próprio espírito, é obstáculo à espiritualização”¹⁶, destacando que “é em termos de obstáculos que o problema do conhecimento científico deve ser colocado”¹⁷. Acreditamos estar sendo coerentes com o pensamento bachelardiano não apresentando uma definição para o conceito de obstáculo epistemológico, uma vez que, como defende em *Ensaio sobre o Conhecimento Aproximado*, a definição é um sofisma que maquia o significado múltiplo do conceito. (BACHELARD, 1996, 2004; BULCÃO, 2009).

Compreendendo o ato de conhecer sobre a perspectiva dos Obstáculos Epistemológicos, entendemos que certas posturas apresentam contradições das mais diversas naturezas e é preciso reconhecê-las no sentido de iniciar um movimento de superação. Ao contrário do que pode se pensar inicialmente, os obstáculos não devem ser evitados, mas sim construídos, é em termos da sua superação que está a evolução no entendimento de uma ideia científica. Bachelard aponta a existência de dois tipos de obstáculos; os gerais e os particulares, trataremos mais especificamente dos primeiros, os obstáculos gerais, que apresentam fundamentalmente duas grandes dimensões de ação: o conhecimento ou experiência primeira e a tendência prematura à generalização.

¹⁵ BULCÃO, 2009, p.57

¹⁶ BACHELARD, 1996, p.17

¹⁷ ibid, p.17

Entendemos, na leitura da obra bachelardiana, que o conhecimento ou experiência primeira pode apresentar-se de duas formas. Em uma dimensão mais simples, ele representaria as primeiras imagens do mundo, aquelas associadas à realidade imediata e as experiências cotidianas como, por exemplo, o movimento do sol em torno da Terra, a necessidade da força para a manutenção do movimento, entre uma série de outras concepções que na educação tem ganhado a conotação de concepções espontâneas ou concepções primeiras. Elas estariam no estado do espírito que Bachelard denominou como concreto. Uma dimensão mais complexa do conhecimento primeiro seria uma estrutura teórica bem sedimentada na epistemologia do sujeito como, por exemplo, a noção de espaço e tempo como entidades absolutas ou a noção do átomo como corpúsculo, como coisa, como miniatura do mundo e regido pelas mesmas leis que o mundo macroscópico oferece. Ela pode se referir não somente a estruturas teóricas e conceituais, mas também a posturas filosóficas como a crença na causalidade e no determinismo científico. Nesse nível mais complexo, quando se tem uma visão do mundo arquitetada de forma mais profunda, a ruptura se torna mais intensa, como é o caso das teorias presentes na física contemporânea em contraposição à física clássica. Essa dimensão se encontraria no estado que Bachelard denominou como concreto-abstrato. (BACHELARD, 1996)

O obstáculo da generalização está associado a uma postura bastante comum não só na atividade empírica como também na sua formulação didática. Bachelard sinaliza para o fato de que se busca prematuramente a construção de leis e generalizações sobre o comportamento do mundo natural. Recorrendo à doutrina empirista de Bacon, Bachelard faz referência ao fato que vem se destinando a realizar observações exageradas do mundo buscando identificar leis universais para explicar seu comportamento. Essa tendência que tem se alocado na universalização, vai construindo um obstáculo cada vez maior ao conhecimento científico, pois bloqueia o dinamismo não só do próprio conhecimento como da própria atividade científica, passando uma clareza falsa e enganadora sobre os fenômenos, uma vez que um conhecimento geral, ao mesmo tempo que se configura universal, configura-se também como estático e fechado sobre si mesmo. Jamais se chegaria, por exemplo, à teoria da relatividade formulada por Einstein medindo a distância entre dois objetos ou o tempo entre dois eventos em referenciais com determinada velocidade relativa. (BACHELARD, 1996; BULCÃO, 2009)

Os dois obstáculos gerais supracitados referem-se aos polos do tradicional confronto na filosofia das ciências: racionalismo e empirismo. O obstáculo da generalização levado ao extremo conduz a uma espécie de idealismo, onde os pressupostos gerais sobre as bases do conhecimento exercem importância maior do que qualquer referência empírica. Enquanto que o obstáculo das experiências primeiras, quando levados ao extremo, podem conduzir a um realismo ingênuo, onde as verdadeiras fontes do conhecimento encontram-se somente na realidade empírica. Nem racional, nem empírica, segundo Bachelard,

Acompanhando a atividade da Física Contemporânea com atenção, ou melhor, com interesse apaixonado, vemos entabular-se um diálogo filosófico que tem o mérito de excepcional: **o diálogo entre o experimentador dotado de instrumentos rigorosos e o matemático que ambiciona informar de perto a experiência.** (BACHELARD, 1977, p.7, grifo nosso)

A novidade essencial do pensamento científico contemporâneo não se dá somente pela formulação de novas teorias ou pela inovação na constituição de novas técnicas, estes processos se encontram dentro de um ainda maior: uma nova era epistemológica no pensamento científico. A apresentação dos obstáculos epistemológicos nos leva a crer que o intuito de Bachelard era alertar para os problemas da polarização epistemológica – a ciência deve lidar com o abstrato e o real, com o racional e o empírico numa relação dialética. O tradicional embate da filosofia moderna não tem lugar nas atividades científicas da Física Contemporânea, é preciso reconhecer que nem o mais ambicioso racionalista e nem o mais rigoroso empirista estão aptos a apreender a novidade do pensamento científico contemporâneo se caminharem solitariamente por suas estradas. A ciência contemporânea trata de uma “realização” do pensamento abstrato. Ela busca tornar o racionalismo: aplicável; e o materialismo: técnico. Neste sentido,

A Física [Contemporânea] [...] tem dois polos filosóficos. Ela é um verdadeiro *campo de pensamento* que **se especializa em matemáticas e na experimentação, ganhando o máximo de vigor na conjunção de ambas.** (BACHELARD, 1977, p.7)

As Matemáticas ganham um novo estatuto na ciência contemporânea. Mais do que meios de expressão das leis físicas ou formas de caracterização dos fenômenos naturais, a matemática adquire uma dimensão criadora. É a partir das matemáticas que se constroem novos objetos de estudos para serem investigados e é com o auxílio dela que a

caracterização de novas evidências experimentais se tornam cada vez mais lúcidas. O físico contemporâneo está submetido à uma dupla certeza:

1º A certeza de que o real está em conexão direta com a racionalidade, merecendo, por isso mesmo, o nome de real científico.

2º A certeza de que os argumentos racionais referentes à experiência constituem já momentos dessa experiência.

(BACHELARD, 1977, p.10)

Estas certezas pontuam uma necessidade de complementaridade entre o racional e o técnico. Enquanto nas concepções tradicionais, a atividade empírica se inicia com o ato da medida, na ciência contemporânea os primeiros traços da realidade experimental aparecem na própria construção racional, na própria imaginação que leva a uma concepção técnica e conduz à realização do fenômeno. É neste sentido que Bachelard afirma que a ciência contemporânea não é *fenomenológica*, que trata da compreensão dos fenômenos naturais, mas sim *fenomenotécnica* – tratando da produção e compreensão técnica dos fenômenos construídos no âmbito da razão.

[...] nada de racionalidade no vazio; nada de empirismo desconexo: eis as duas obrigações filosóficas que fundamentam a estreita e rigorosa síntese da teoria com a experiência [...] se faltar um dos termos, é certo que se pode fazer experiências, pode-se fazer matemáticas, mas não se participa da atividade científica da Ciência Física Contemporânea. (BACHELARD, 1977, p.10)

É, portanto, nesta espécie de dualidade entre o racionalismo e o experimentalismo que se encontra a solução da equação diferencial do pensamento na ciência contemporânea.

4 Em busca de um outro olhar para a Física de Partículas Elementares

É curioso pensar que das diversas abordagens possíveis para os tópicos da física clássica, temos privilegiado em nosso currículo uma interpretação essencialmente positivista. É importante perceber que não se trata de reconhecer que as áreas de conhecimento da chamada física clássica são, de fato, positivistas. Sabemos que trabalhos como os de Galileu e Newton, explorados em quase 50% do currículo real de nossas escolas, estão enraizados por uma série de posturas filosóficas distintas. Diversos trabalhos vêm apontando nesta direção, como é o caso das diferentes faces de Galileu¹⁸, que problematiza a postura empirista comumente explorada em sala de aula, ou até mesmo das próprias implicações filosóficas por trás do trabalho de Newton¹⁹ acerca das naturezas do espaço e tempo absoluto e suas influências na interpretação de suas leis do movimento. Outro caso bastante peculiar e comumente não discutido, são questões de ordem filosófica travadas entre grandes nomes do eletromagnetismo como Faraday, Maxwell, Poincaré e Lorentz sobre a natureza e realidade dos campos elétricos e magnéticos e da suposta existência de um meio mecânico-material que serviria como rede para sua propagação²⁰. Portanto, não se trata de fazer uma defesa da física clássica como sendo positivista para justificar a caricatura construída e legitimar a polarização epistemológica que comumente vemos em nossas salas de aula. Os trabalhos desenvolvidos na área da Filosofia da Ciência vêm demonstrando cada vez mais a multiplicidade de correntes filosóficas que impregnam esse período de desenvolvimento da física. Vale relembrar o forte movimento de embates ocorrido em meados da década de 60 do século passado e travado por Kuhn, Popper, Lakatos, Feyerabend entre uma série de outros nomes após a publicação de a Estrutura das Revoluções Científicas. Houve, nesse momento, uma tentativa intensa de elucidar que a natureza do fazer científico está

¹⁸ ZYLBERSZTAJN, A. Galileu – um cientista e várias versões. Caderno Catarinense de Ensino de Física, v. 5, número especial, p. 36-48, 1988.

¹⁹ ROCHA, M. N. **A necessidade do pensamento filosófico para a compreensão da Física: um estudo inspirado em Wittgenstein no contexto da mecânica newtoniana**. 2015. 156 f. Dissertação (mestrado) – Instituto de Física, Instituto de Química, Instituto de Biociências, Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

²⁰ BEZERRA, V. A. Maxwell, a teoria do campo e a desmecanização da física. *Scientiaestudia*, São Paulo, v.4, n.2, p.177-220, 2006.

longe de encontrar uma postura consensual e única. Aliado a isto, como bem elucida Matthews (2014)²¹, parte das pesquisas na área de História e Filosofia da Ciência no Ensino vem pensando nas últimas décadas formas de confrontar essa hegemonia da interpretação empírico-indutivista que vem sendo dada à física clássica.

Devido a estrutura cristalizada de pensamento na educação científica, percebemos que propostas para o ensino da FMC vem sendo construídas dentro do ideal positivista apontado nos capítulos anteriores, isto é:

- Explorando-a em relação lógica com algum conteúdo pré-discutido;
- Construindo um conjunto sólido de verdades sobre o mundo a serem propagadas aos estudantes, tais como, propriedades, leis, validações empíricas e equações;
- Trazendo, obviamente, um conjunto de problemas associados de forma que o aluno consiga assimilar e compreender, por meio das técnicas de resolução, o corpo de conhecimento como encerrado, aceito e validado.

Neste sentido, vemos a presença, por exemplo, de propostas para o ensino da Teoria da Relatividade restritas a um tratamento puramente matemático de fenômenos como a dilatação do tempo, contração espacial e equivalência massa-energia. Apesar de tratarem de um conjunto de equações que, de fato, pertencem à visão de Einstein sobre a teoria, nega-se, muitas vezes, discussões filosóficas sobre a natureza do espaço e do tempo ou até mesmo sobre o enorme valor atribuído à ruptura de pensamento promovida neste período²² - sendo estes dois fatores profundamente importantes para uma compreensão mais ampla da teoria da relatividade. Conforme apontamos no capítulo anterior, apoiado nas reflexões de Bachelard, o tratamento da ciência contemporânea sob uma perspectiva filosófica única, que apontamos aqui se tratar da perspectiva positivista, torna irreconhecível aspectos essenciais do pensamento científico em sua contemporaneidade. Sendo assim, ele é visto como um conjunto de conteúdos que podem ou não ser adicionados ao currículo.

²¹ Matthews, M.R. (2014). International handbook of research in history, philosophy and science teaching (3 volumes). Amsterdam: Springer.

²² Muitas vezes restringe-se essa discussão ao famoso “box” ou “flash” histórico, situando, por exemplo, que “Newton estava errado e o espaço não é absoluto”. No entanto, esta ação desconsidera posturas como aquela presente no idealismo de Minkowski referente a geometrização do espaço-tempo. O físico alemão defendia a existência de uma quadri-distância invariante. Talvez o espaço a que Newton se referia não seja de fato absoluto, mas não podemos negar o fato de que há um invariante no interior da teoria e que ele se relaciona diretamente com a permanência de certa entidade espaço-temporal. Discussões desta natureza acabam sendo perdidos quando o contexto histórico e os valores epistemológicos e filosóficos das teorias não são colocados em discussão. (NORONHA, 2014; CARDOSO, 2015).

Assim como a Relatividade, a Física de Partículas vem ganhando espaço nas propostas de incorporação da FMC na educação básica e nos parece que também vem atendendo, talvez de forma inconsciente, aos aspectos supracitados. No entanto, enquanto a Teoria da Relatividade tem encontrado imenso respaldo crítico com relação à forma como suas propostas tem sido elaboradas (GUERRA, BRAGA E REIS, 2007, 2010; NORONHA 2014; CARDOSO, 2015), a Física de Partículas ainda carece de uma reflexão profunda sobre suas propostas, uma vez que sua grande maioria aparenta nadar numa mesma direção. No processo de realização desta pesquisa, e também como parte da atividade docente, foi possível ter contato com uma ampla gama de propostas de ensino, materiais didáticos e de divulgação científica referentes à física de partículas, nos fazendo perceber o quanto o ensino e a divulgação desta área do conhecimento tem se concentrado em uma única função: transmitir um conjunto sólido de conhecimentos sobre o Modelo Padrão e utilizá-lo para organizar, classificar e caracterizar as partículas e suas interações. Abaixo apresentamos citações e esquemas de três trabalhos bastante referenciados nas pesquisas acadêmico-científicas e na elaboração de propostas didáticas.

“O esquema central [...] mostra **como as partículas fundamentais podem ser classificadas**. Primeiramente foram agrupadas as partículas sem estrutura interna: quarks, léptons e partículas mediadoras. Os quarks formam os hádrons, os quais se dividem em bárions (constituídos por três quarks) e os mésons (constituídos por um par quark-antiquark). [...] Essas partículas são classificadas como férmions, por possuírem spin semi-inteiro e são divididas em três gerações.” (OSTERMANN, 1999, grifo nosso)

“De acordo com o Modelo Padrão, **léptons e quarks são partículas verdadeiramente elementares**, no sentido de não possuírem estrutura interna. Partículas que têm estrutura interna são chamadas de hádrons; são constituídas de quarks: bárions quando formadas por três quarks ou três antiquarks, ou mésons quando constituídas por um quark e um antiquark. Há seis léptons elétron, múon, tau, neutrino do elétron, neutrino do múon e neutrino do tau) e seis quarks [quark up (u) quark down (d), quark charme (c), quark estranho (s), quark bottom (b) e quark top (t)]. Porém, os quarks têm uma propriedade chamada cor e podem, cada um, apresentar três cores (vermelho, verde e azul). **Há, portanto, 18 quarks. Contudo, como a cada partícula corresponde uma antipartícula, existiriam no total 12 léptons e 36 quarks.**” (MOREIRA, 2009, grifo nosso)

Estes trechos são comumente no início destes e de uma série de outros trabalhos analisados reafirmando a positividade da teoria (Balthazar, 2008; Calheiro, 2014; Losada, 2007; Maia, 2011; Marques Filho, 2011; Martin, 2005; Neto, 2011; Pereira, 1997; Pessanha, 2014; Saran, 2012; Silva, 2002; Silva, 2011; Valente, 2009;). Percebe-se neles, o entendimento da física de partículas restrito à apresentação de um conjunto de partículas (quarks e léptons) que interagem por meio de partículas mediadoras (bósons) e que quando combinadas entre si dão origem à existência de um verdadeiro zoológico de partículas. Além da identificação das partículas, listam-se propriedades tais como carga elétrica, spin e massa, e explicitam-se os princípios de conservação que devem ser seguidos para que as colisões e decaimentos possam ser analisados.

Estas características não são exclusivas de trabalhos acadêmicos e das propostas didáticas, mas se repetem também nos materiais de divulgação científica. A obra “O Discreto Charme das Partículas Elementares” (ABDALLA, 2016), intensamente referenciada nos trabalhos brasileiros, constrói uma interpretação semelhante, como mostram a figura e as tabelas abaixo, que ilustram a organização e as propriedades fundamentais das partículas elementares. A figura 3 é uma adaptação didática de um

feitos corretamente. Mas a linguagem – que, ao mesmo tempo que menciona a seu propósito a teoria dos campos, evita fazer referências às concepções quânticas, que mudam assim mesmo a aceção da palavra “partícula” – não seguiu, nesses casos, a utilização do instrumento teórico. Esse traço é manifesto em muitas obras de divulgação.” (PATY, 1995, p.80)

Não se trata, obviamente, de transformar a divulgação ou o ensino da física de partículas fiel a um conjunto complexo de conceitos matemáticos que se encontram na teoria quântica de campos, mas sua discussão deve possibilitar o entendimento de aspectos essenciais da ciência do século XX. Reconhecemos o papel que as propostas de ensino e divulgação da física de partículas têm desempenhando para que ela seja reconhecida como um tópico a ser discutido na educação básica, no entanto, propomos uma reflexão mais ampla sobre o que vem sendo proposto: o que queremos com a física de partículas? Será que ela deve ser considerada apenas como um conteúdo a ser incorporado ao currículo? Será que esta abordagem tem contribuído para que tenhamos um conhecimento mais profundo da natureza da ciência do século XX? De que forma ela poderia contribuir para um entendimento mais profundo da ciência contemporânea? Certamente acreditamos que restringir a física de partículas a um tabelamento de partículas e leis de conservação não deva ser a única abordagem possível e, considerando seu contexto histórico, deve haver potencialidades epistemológicas ainda não exploradas que nos levem a um entendimento mais aprimorado sobre a revolução científica do século XX.

Neste sentido, buscaremos, neste capítulo, realizar uma análise epistemológica da física de partículas recorrendo à história da ciência em diversos períodos. Pretendemos apontar para elementos que podem ser levados em consideração na elaboração de futuras propostas didáticas desta área, tendo como objetivo principal elucidar características próprias de pensamento da ciência contemporânea e auxiliar à compreensão de uma nova visão de mundo.

Iniciaremos esta tarefa buscando reconhecer a intuição atomista como algo além de uma hipótese científica, explorando-a como uma forma de ver e avaliar as concepções de mundo presentes em diferentes momentos da história da ciência. Para isto, nas seções 4.1 e 4.2, demarcaremos as características do pensamento atômico antes do século XX com o intuito de identificar de as formas o estudo do átomo na ciência contemporânea se apresentam profundo afastamento com relação as concepções anteriores.

Para avaliar a concepção de átomo na ciência contemporânea, procuramos problematizar um conceito bastante difundido nas propostas e nos materiais de divulgação: o *quark*. Recorrendo a história, buscamos entender como a concepção de quark foi formulada, explorando a dialética entre o racional e o real apontada por Bachelard como sendo o motor da produção de conhecimento na ciência contemporânea.

Como fruto da análise histórica da física de partículas, organizada das seções **4.3 a 4.8**, construímos um grande diagrama ilustrando os movimentos epistemológicos essenciais que levaram a constituição do quark como concepção teórica e objeto de estudo experimental. Buscamos representar a interação entre o racional (que didaticamente denominamos como **Teórico**) e o real (que didaticamente denominamos como **Experimental**), objeto central do diálogo filosófico proposto por Bachelard para compreender a ciência contemporânea. Estas relações permeiam o mapa como um todo levando às regiões de interação mais intensas representadas por vértices, utilizando-os com função análoga àquela encontrada nos famosos diagramas de Feynman. A localização espacial dos vértices no diagrama foi construída de forma a elucidar sua proximidade com as perspectivas – quanto mais ao centro mais equilibrado foram as contribuições teóricas e experimentais, enquanto que quanto mais afastado do centro e mais próximo da esquerda, por exemplo, maior foi a contribuição teórica, ou mais próximo da direita, maior foi a contribuição experimental. Ele poderia ser entendido como um grande plano cartesiano no qual o eixo “x” representaria posições no espectro filosófico e o eixo “y” representaria sua evolução temporal.

Para que a construção do diagrama seja compreendida, organizamos cada seção da análise histórica da seguinte forma:

- Iniciando com a problematização/contextualização da temática.
- Desenvolvendo uma narrativa histórica, não necessariamente cronológica, privilegiando um encadeamento de eventos que possibilitem um entendimento mais amplo da temática escolhida para ser tratada na seção.

Ao final da narrativa histórica, apresentaremos, na seção 4.9, uma análise histórica, filosófica e epistemológica deste processo, enfatizando o diálogo razão e experimentação no processo de construção da Física de Partículas Elementares.

Figura 5 - Quadro histórico construído para possibilitar a compreensão do nascimento da concepção de quark.

4.1 Atomismo e visão de mundo: da antiguidade à modernidade

A formulação do quark decorre de um aprofundamento da concepção atômica no decorrer do século XX. No entanto, a intuição atomista é notadamente reconhecida como uma das mais antigas hipóteses da história da humanidade, remontando a antiguidade com Demócrito, Leucipo, Epicuro e Lucrécio, permeando a modernidade com Gassendi, Boyle, Newton e Dalton até chegar na revolução científica que molda o final do século XIX e o início do século XX.

É muito comum, nas discussões de física de partículas, situar a intuição atomista, de Demócrito a Gell-Mann, como o desenrolar de uma única problematização bimilenar: De que toda matéria é feita? Esta problematização, da forma como usualmente é colocada, passa uma noção de unicidade de pensamento e continuidade nas investigações sobre a natureza atômica da matéria, aparentando que a ciência, nos seus diferentes momentos históricos, sempre buscou objetivamente compreender seu constituinte mais fundamental. Feynman apontava que os físicos, na realidade, “jamais estiveram em busca de um constituinte último, [...] [apenas] tentam descobrir como se comporta a natureza “. Enquanto Bachelard reafirma que

“seria um erro doravante considerar a atomística como o estudo analítico de um elemento fundamental encontrado na base de uma intuição. Uma atomística, ao contrário, é uma construção inteiramente sintética que deve apoiar-se num corpo de suposições”. (BACHELARD, APUD PATY 1995, p. 144)

Neste sentido, podemos ir além e enxergar a intuição atômica num sentido muito mais amplo do que uma resposta a uma pergunta ou como um objeto de estudo científico. Percebemos no atomismo a possibilidade de construir uma ferramenta de análise epistemológica riquíssima para compreender como diferentes formas de pensar permearam contextos na história da ciência. Tendo isto em vista, o objetivo desta seção é revelar características da intuição atômica como concepção de mundo na antiguidade e na modernidade, com o propósito de evidenciar como o atomismo no século XX rompeu com tradições filosóficas e epistemológicas de seus contextos anteriores.

O nascimento da concepção atômica na antiguidade está associado à construção de uma perspectiva cosmológica em oposição à cosmogonia presente à época. É muito

comum associar este movimento a perspectivas dos filósofos pré-socráticos que buscavam “uma explicação racional sobre a ordem, origem e transformação do mundo” (ZATERKA, 2006, p.330). É neste contexto que surgem os primeiros traços do atomismo. Paty aponta que ele “originou-se da necessidade de conciliar a concepção parmediana da permanência e da unidade com a evidência da mudança e da diversidade.” (1995, p.74). Esta conciliação é fruto de um embate de extrema importância para a filosofia antiga e remonta um conflito entre a posição da transformação de Heráclito e a permanência de Parmênides.

Em Heráclito vemos o famoso fragmento: “Nos mesmos rios entramos e não entramos, somos e não somos”, representando um entendimento do mundo com um fluxo eterno e sujeito a constantes mudanças. De acordo com o filósofo, nossa percepção nos indica que ao nosso redor as coisas nascem, crescem, envelhecem e morrem; o dia virando noite; o tempo úmido virando seco; o quente virando frio – a verdadeira realidade é a mudança. Por outro lado, Parmênides aponta que a concepção de Heráclito é erroneamente baseada nos sentidos, sendo fruto da via da ficção, da opinião e da ilusão provocada por eles. A verdadeira filosofia deve se basear no pensamento, uma vez que “necessário é dizer e pensar que o ente é; pois é ser. E nada não é, pois é não ser.” (Parmênides, apud Chauí 2002, p.89). Parmênides coloca um problema fundamental para a filosofia de sua época: se o universo é tudo o que existe, pois então tudo o que existe é; no entanto como conceber um nascimento do universo a partir do nada? Uma vez que nada é o não ser e tudo é o ser? Como pode o tudo, que por definição é ser, ter sido originado a partir do nada, que por definição é o não ser? Fica bastante claro em Parmênides a exposição de duas vias: a via da opinião e a via da verdade, sendo que o conhecimento se constitui a partir da segunda, de um entendimento da verdadeira essência do mundo ao nosso redor. (ZATERKA, 2006)

O atomismo surge em meio a este dilema e tem como função conciliar a existência de uma realidade única, um único ser (presente na concepção de Parmênides) e as transformações constante da natureza (presente na concepção de Heráclito). Segundo Demócrito, um dos fundadores do pensamento atomista,

“Por convenção existe o quente, **por convenção** existe o frio, **por convenção** existe a cor, o doce e o amargo; **segundo a verdade**, existe apenas o que é indivisível e o vazio.” (Demócrito de Abdera, apud Zaterka 2006, p. 338)

O nascimento da concepção de átomo na escola atomista vem em concordância com duas naturezas permanentes, distantes de serem enganadas pela sensibilidade humana: os **átomos** e o **vazio**. No entanto, o remanejamento e a organização dos átomos explicariam as mudanças sofridas no mundo sensível. É curioso notar como Demócrito faz uso dos termos “por convenção” e “segundo a verdade”, diferenciando a via opinião da via do conhecimento. A noção do indivisível, em oposição àquilo que é divisível, faz referência à existência de átomos, etimologicamente originado do grego *ἄ-τομος* (á-tomo, sendo tomo divisível e átomos a negação), interpretado pela escola atomista como sendo o menor constituinte da matéria macroscópica.

É importante perceber que para Demócrito, além dos átomos, há a necessidade de outro conceito de profunda importância histórica e que permeará a ciência até sua contemporaneidade: o conceito de vazio. Para que as mudanças sejam possíveis, os átomos precisam ter movimento, e só podem se houver um espaço vazio para que ele seja realizado. Na escola atomista, a imagem de um mundo constituído de átomos e vazio são suficientes para explicar a diversidade da realidade física, uma vez que, para Demócrito “Estas partículas movem-se no vazio (pois o vazio existe), e quando se juntam, dão origem ao nascimento, e quando se separam, causam destruição.” (apud ZATERKA 2006, p.339). Complementando a concepção de Demócrito, Leucipo reitera que a natureza não tem suas mudanças e transformações regidas por uma aleatoriedade do mundo, pelo contrário, “nenhuma coisa se engendra ao acaso, mas todas a partir de razão e necessidade” (apud ZATERKA 2006, p.340). A razão e a necessidade estão por trás de uma lógica que envolve a forma e a organização dos átomos no espaço vazio. Uma análise mais detalhada das características dos átomos aparece em Epicuro,

(...) estes átomos movem-se no vazio infinito, separados uns dos outros e diferentes no formato, tamanho, posição e disposição; Ao ultrapassarem uns aos outros, colidem, e alguns são sacudidos ao acaso, em qualquer direção; Ao passo que outros, entrelaçando-se segundo suas formas, tamanhos, posições e disposições, permanecem unidos e assim dão origem ao nascimento de corpos compostos.” (Epicuro, apud ZATERKA 2006, p.341)

A tradição filosófica considera o pensamento atomista profundamente associado a uma filosofia materialista, uma vez que, se os átomos de fato existem, todos os fenômenos devem ser concebidos, conforme aponta Lucrécio, como consequência deles, isto é “de

acidentes da matéria e da extensão na qual as coisas se realizam” (Lucrecio, apud Paty, 1996, p.75).

Por mais que tenha muita semelhança com a perspectiva atomista que veremos mais adiante nos trabalhos de Boyle, Gassendi e Dalton, aparentando dar um sentido de continuidade de ideias e complementação de pensamentos na transição entre a antiguidade e a modernidade, a escola atomista foi duramente criticada pelo próprio Aristóteles na obra *Metafísica*,

“Leucipo e seu companheiro Demócrito sustentam que os elementos são o cheio e o vazio, aos quais são o nome de que é e o que não é, respectivamente. O que é, é cheio solido; o que não é, é vazio e sutil. **Visto o vazio existir em não menor grau que o corpo, segue-se que o que não é não existe menos do que o que é.**” (ARISTÓTELES, apud Zaterka 2006, p. 338, grifo nosso)

A crítica de Aristóteles vai em duas direções e explora os principais eixos de pensamento da escola atomista: os átomos e o vazio. Como ilustra o trecho grifado acima, Demócrito e Leucipo afirmam que os átomos e o vazio existem sem que nenhum esteja em menor grau que o outro nos corpos, além do mais, para que o movimento dos átomos exista é imprescindível a existência do vazio. Se de fato o vazio existe, como não o percebemos? Nem no ar, onde a matéria é mais rarefeita, é possível perceber sua presença, uma vez que ao tentarmos deslocá-lo as matérias ao redor logo ocupam seu lugar. Como poderia num universo como este em que vivemos, onde a natureza tem horror ao vazio, haver uma equivalência entre o vazio e o cheio? Onde se encontra este vazio que tanto defendem os atomistas?

Além da crítica ao vazio, a existência de um movimento infinito dos átomos também era inconcebível por um argumento de mesma ordem. De acordo com Aristóteles, os movimentos seriam naturais ou violentos e ambos tendem ao mesmo estado: o repouso. Como conceber um conjunto de átomos se movimentando infinitamente se nada do que observamos realiza um movimento análogo a isto? Aponta ainda, conforme mostrado abaixo, que a existência do vazio entra em contradição com a existência de um movimento infinito.

Enquanto alguns afirmam a existência do vácuo como condição necessária para o movimento, o que acontece é exatamente o contrário: que nada poderia se mover se existisse o vácuo. Porque assim como alguns afirmam que a Terra está em repouso pela sua homogeneidade, assim também no vácuo seria inevitável que um corpo

estivesse em repouso, pois não haveria um mais ou um menos para o qual as coisas se movessem, já que no vácuo não existem diferenças. Além disso, todo movimento é ou por violência ou por natureza. Mas se há um movimento violento, então tem que haver também um movimento natural (porque o movimento violento é contrário à natureza e o movimento contrário a natureza é posterior aquele segundo a natureza, de modo que, se não houvesse um movimento segundo a natureza em todos os corpos naturais, não haveria tampouco nenhum dos outros movimentos). Mas como poderia haver um movimento natural se não existe nenhuma diferença no vácuo e no infinito? Porque no infinito não há acima nem abaixo nem centro, e no vácuo, o acima não difere em nada do abaixo (porque assim como no nada não há diferenças, tampouco há no vácuo, pois se pensa que o vácuo é um certo não ser e uma privação). Mas o deslocamento natural é diferente, de modo que há diferenças nas coisas questão por natureza. Assim, pois, ou não há nenhum deslocamento natural em nenhuma parte e para coisa nenhuma, ou, se há, o vácuo não existe. (ARISTÓTELES, Física, Tradução e notas: GUILHERMO R. DE ECHANDÍA-p.138-139, grifo nosso)

Um último ponto importante referente à crítica aristotélica se refere à realidade dos átomos. A escola atomista, por mais que dote os átomos de uma imensa variedade de qualidades como forma, disposição e organização, não traz objetivamente argumentos que evidenciem a existência dos átomos no mundo físico, pelo contrário, são construídos de forma que exista coerência lógica principalmente na dinâmica do mundo atômico. Para Aristóteles, um argumento lógico bem construído não passa somente por sua estrutura, mas também por sua correspondência com sua realidade primeira – com a observação imediata. Os átomos de Demócrito, Leucipo e Epicuro têm profunda característica imagética e abstrata, sendo considerados apenas como um suporte para a interpretação da realidade física e sendo encarados como entidades muito afastadas dela.

Na passagem da antiguidade à modernidade, o atomismo, rendido às críticas, praticamente não foi discutido de forma sistemática, tendo a concepção aristotélica sido considerada como base para a interpretação de fenômenos naturais. Lucrécio realiza uma síntese deste pensamento cerca de 200 anos após a morte de seus criadores. No entanto, é apenas em meados dos séculos XVI e XVII que concepções associadas a natureza última da matéria retornam ao palco científico com grande força. Todavia, o contexto, as motivações e as interpretações se apresentam formas distintas apesar de demonstrarem similaridades de apresentação.

Zaterka (2006) aponta que Gassendi retoma os textos de Lucrécio pontuando algumas críticas muito próximas daquelas colocadas por Aristóteles, referenciando-se

principalmente às características afastadas dos átomos com relação à realidade física. Dentro deste movimento de resgate, surge um novo conceito que, conforme veremos, apresenta muita similaridade filosófica com a ideia de átomo, no entanto, diferencia-se enquanto origem e forma de representação do mundo.

O novo conceito é proposto por Robert Boyle e publicado, em 1666, em uma obra intitulada *A Origem das formas e qualidade*. Nesta obra, Boyle tenta construir uma ponte ligando o mundo físico a um mundo inacessível aos sentidos com o intuito de defender que as formas e qualidades que vemos no mundo macroscópico são manifestações em grande escala deste mundo microscópico, construindo assim sua teoria sobre a composição da matéria. Inserido dentro de um contexto histórico profundamente influenciado pela cultura experimental, característica do período renascentista, Boyle se torna um grande adepto da nova filosofia experimental, de modo que, sua preocupação central era a de explicar diversos efeitos observados em seu laboratório, como a resistência do ar; a produção de calor e frio; transformações sofridas por gases; análise de substâncias químicas; respiração animal e uma série de diversos outros fenômenos produzidos com o intuito de alterar e controlar o curso da natureza. (ZATERKA, 2006)

Na perspectiva de Boyle, principalmente devido a experimentos envolvendo dissociações químicas, a matéria deveria ser composta por pedaços menores que podem ser decompostos utilizando os métodos adequados da nova filosofia experimental. No entanto, diferentemente das concepções da escola atomista na antiguidade, Boyle não dota estes pequenos pedaços de matéria de propriedades e formas geométricas complexas, reconhece apenas que seriam pequenos pedaços da natureza que teriam características semelhantes àquilo que vimos numa escala macroscópica. Embora esteja lidando com um mundo inacessível aos sentidos, as propriedades estão a todo momento conectadas com a realidade macroscópica. Boyle denomina estas pequenas partes de matéria que compõe os corpos como *mínima naturalia*, pontuando que,

“Embora sejam, por onipotência divina, divisíveis, em razão de sua pequenez e de sua natureza sólida é de fato quase impossível dividi-las; elas podem, neste sentido, ser chamadas de *mínima naturalia*”. (BOYLE, apud ZATERKA 2006, p. 346)

Fica evidente que a preocupação de Boyle não é lidar com nenhuma concepção filosófica sobre o constituinte último da matéria – se há ou não possibilidade de dividi-los

em pedaços menores do que aqueles que estão a seu alcance, somente por onipotência divina conseguiríamos fazê-lo. Ele reconhece que, de fato, em sua prática laboratorial, se torna impossível dividi-las com os métodos disponíveis, é neste sentido que os denomina como mínimos pedaços de natureza – as *mínima naturalia*. Estas, ao se aglomerarem, dão origem a corpúsculos, no sentido de representarem os corpos do mundo manifesto em todas suas qualidades, mas em uma escala consideravelmente menor. Há, portanto, uma hierarquia de organização no mundo natural: as *minima naturalia* compondo os corpúsculos e estes, enfim, a realidade física, sendo importante para Boyle que se reconheça,

“que existem multidões de corpúsculos que são feitos da união de alguns *minima naturalia* e, dos quais o tamanho é tão pequeno e sua adesão tão próxima e completa, que cada uma destas pequenas concreções primitivas ou agrupamentos de partículas está isoladamente abaixo do discernimento dos sentidos e, entretanto, não é absolutamente indivisível pela natureza que o compõe em *prima naturalia*, ou talvez, em outros pequenos fragmentos; no entanto, pelas razões que acabo de sugerir, eles muito raramente acontecem de serem realmente dissolvidos ou quebrados, permanecendo inteiro numa grande variedade de corpos sensíveis e sob várias formas ou disfarces” (BOYLE, apud ZATERKA 2006, p.347)

A noção de corpúsculo construirá uma nova face para a concepção atomista que a distingue das posições filosóficas puramente materialistas citadas anteriormente. O corpúsculo demarcará a instauração de uma filosofia materialista mecanicista, de um entendimento do mundo como uma grande engrenagem explicada a partir de uma relação causal das pequenas peças que as constituem (Paty, 1995). No entanto, apesar de diferir filosoficamente do atomismo antigo, as diferenças neste momento ainda não são significativas, sendo o átomo, tanto para Boyle, quanto para Leucipo e Demócrito, uma espécie de suporte para o entendimento do mundo – uma representação imagética dele. Há ainda um distanciamento entre a abstração do mundo e seus objetos de estudo – o átomo, ou o corpúsculo, não entram como aporte à teoria, sendo considerado apenas na periferia dela. Para Paty (1995), a verdadeira história do átomo começa quando ele passa a ser considerado dentro da teoria e sua abstração passa a ter uma capacidade preditiva.

“O atomismo de Boyle [...] retomado ao de Leucipo e Demócrito, não diferia dele de maneira fundamental, sendo apenas uma hipótese – e até mesmo uma imagem – para formulações qualitativas, e, no máximo, um suporte para a utilização do cálculo infinitesimal. A história do átomo só começou verdadeiramente quando esse conceito foi empregado numa

representação teórica, capaz de reunir fenômenos que ela expunha quantitativamente, e dotada de valor preditivo. **É, pois, essencialmente, com a química posterior a Dalton, depois com a teoria cinética dos gases e enfim com as diversas manifestações elétricas e radiativas da estrutura íntima da matéria que o átomo se torna um conceito físico.**" (PATY, 2006, p. 81)

O primeiro passo dado em direção a uma concepção de átomo incorporado dentro da teoria foi dado pelo químico John Dalton. O trabalho de Dalton é reconhecidamente famoso por construir os alicerces da teoria atômica moderna. Ele se baseará em duas perspectivas bastante influentes em sua época: o mecanicismo dos corpúsculos em Newton e a concepção de afinidade química que encontraremos, principalmente, nos trabalhos de Lavoisier.

Em Newton, veremos o auge do mecanicismo sendo atingido com sua teoria da gravidade. O sucesso preditivo de suas leis de movimento, levaram Newton a saltar das dinâmicas planetárias para os demais campos de estudo da física. Nas obras *Principia* (1687) e *Óptica* (1704), Newton utiliza do conceito de corpúsculo, em vários momentos, tanto para referenciar o movimento de objetos sob ação da força da gravidade, quanto para explicar o comportamento de fenômenos luminosos. Esta pretensão adotada por Newton para interpretar os fenômenos também a nível microscópico marca uma grande face do mecanicismo e será bastante utilizada por Dalton. No entanto, o mecanicismo newtoniano não aborda a natureza da constituição das substâncias. Por mais que enfatize a dinâmica física dos fenômenos, as mudanças, transformações e composições da matéria não são exploradas, sendo que esta ênfase será encontrada nos trabalhos de Lavoisier. Na grande obra escrita por Dalton, *Um Novo Sistema para a Filosofia Química* (1808), a teoria atômica é apresentada junto a uma citação de Lavoisier, no qual, ao mesmo tempo que percebemos uma epistemologia característica da filosofia atômica, há um receio em aceita-la como fundante da realidade física.

"A química caminha em direção a seu objetivo e em direção à perfeição, **dividindo, subdividindo e ainda resubdividindo. Não podemos assegurar que aquilo que consideramos hoje como simples o seja de fato;** tudo que podemos dizer é que tal substância é o termo atual ao qual chega a análise química, e que ela não pode mais se subdividir no estado atual de nossos conhecimentos" (LAVOISIER, apud FIGUEIRAS, 2004, p.40)

Figura 6 - Obra de John Dalton onde é representada formalmente sua teoria atômica da matéria. Um Novo Sistema para a Filosofia Química (1808). (Fonte: FIGUEIRAS, 2004)

Dalton tinha um interesse peculiar em fenômenos meteorológicos, sendo este o campo de investigação que o levou a sua teoria atômica, de acordo com Figueiras:

“Dalton desenvolveu desde cedo uma paixão pela meteorologia. Por 46 anos tomou medidas diárias do tempo e das condições atmosféricas, registrando no papel mais de duzentas mil observações. [...] **Esse interesse [...] levou-o a debruçar-se sobre o estudo dos gases, concentrando-se, numa fase inicial, naqueles que constituem a atmosfera**” (FIGUEIRAS, 2004, p.38)

A preocupação central do trabalho de Dalton era entender a composição da atmosfera. Até aquele momento na história, se sabia, principalmente devido às contribuições de Lavoisier, que a atmosfera era composta essencialmente por oxigênio e nitrogênio, contendo também pequenas porções de vapor de água e gás carbônico. Mas como eles estavam dispostos na atmosfera? Formavam uma mistura, como água e sal, que poderia

ser separada utilizando métodos de separação química ou seria um composto único que poderia ser desfragmentado em suas diferentes composições? As primeiras concepções da atmosfera, a partir dos elementos citados acima, estão representadas na Figura 7.

Figura 7 - Primeiras concepções da atmosfera ilustrada por Dalton em *O Novo Sistema*. (Fonte: *New System of Chemical Philosophy*)

Percebemos, num primeiro momento, Dalton fazendo uso de uma representação bastante simplória da constituição microscópica da atmosfera. Não enxergamos, nestas representações, nenhuma indicação de interação entre os constituintes, eles aparentam ter uma organização causal puramente mecânica, sendo estas primeiras imagens uma aproximação bastante coerente com a concepção de Boyle e Newton. É importante notar que há, neste primeiro momento, a predominância de uma representação ainda imagética dos corpúsculos. Mesmo que agora suas imagens sejam meramente representativas, essa concepção evoluirá para uma outra bastante correlacionada com suas formulações teóricas. Realizando uma análise mais precisa sobre a dinâmica da atmosfera, Dalton postula, em 1801, o que ficaria conhecido como lei das pressões parciais.

Quando a mistura de quaisquer dois ou mais gases atinge o equilíbrio, a energia elástica de cada um deles sobre a superfície do recipiente ou de qualquer líquido é precisamente a mesma como se ele fosse o único gás presente ocupando todo o espaço, e todos os outros tivessem sido retirados. (DALTON, apud FIGUEIRAS, 2004, p.41)

Esta mecanicidade das interações, associadas às suas pesquisas sobre a composição química das substâncias, o aproxima cada vez mais de uma perspectiva de átomo como entidades que interagem entre si a partir de suas propriedades características, fazendo-o

se afastar cada vez mais da noção clássica de corpúsculo e o aproximando de uma perspectiva atômica associada à afinidade química dos elementos.

A partir de suas investigações sobre os pesos e as composições dos elementos químicos, Dalton elabora uma representação imagética do átomo profundamente associada a suas práticas experimentais e suas intuições teóricas. A figura 8 ilustra as representações de Dalton para os elementos e seus compostos.

Figura 8 - Representação dos elementos e seus compostos. A esquerda temos a representação original de Dalton e a esquerda a tradução realizada por Figueira. (Fonte: FIGUEIRAS, 2004)

Com esta representação, mais do que simplesmente uma representação imagética do mundo atômico, Dalton constrói uma ponte que une sua concepção de mundo atômico com a realidade. Mas não apenas isto, é possível notar nelas, pela primeira vez, uma perspectiva atômica associada a uma concepção teórica de poder preditivo e experimental. Esta concepção possibilitou identificação de novas substâncias, estimativas e medidas com maior precisão de propriedades de substâncias já conhecidas. A figura 9 ilustra como evoluíram as medidas sobre os pesos atômicos entre 1805 e 1808, fruto das investigações e formulações teóricas e experimentais de Dalton neste período.

Espécie química	Pesos atômicos (<i>sic</i>)	
	1805	1808
Hidrogênio	1	1
Azoto	4,2	5
Carbono	4,3	5
Amônia	5,2	6
Oxigênio	5,5	7
Água	6,5	8
Fósforo	7,2	9
Hidrogênio fosforetado (PH ₃)	8,2	-
Gás nitroso (NO)	9,3	12
Éter	9,6	-
Óxido gasoso de carbono (CO)	9,8	12
Óxido nitroso (N ₂ O)	13,7	17
Enxofre	14,4	13
Ácido nítrico (NO ₂)	15,2	19
Hidrogênio sulfuretado (H ₂ S)	15,4	16
Ácido carbônico (CO ₂)	15,3	19
Álcool	15,1	16
Ácido sulfuroso (SO ₂)	19,9	-
Ácido sulfúrico (SO ₃)	25,4	34
Hidrogênio carburetado da água estagnada (CH ₄)	6,3	7
Gás olefiante (C ₂ H ₄)	5,3	6

Figura 9 - Pesos atômico entre 1805 e 1808. (FIGUEIRAS, 2004, P.42)

Segundo Figueiras (2004), a articulação entre a concepção atômica e sua formulação teórica sobre a composição da matéria fica bastante clara em sua obra. Expondo de forma bastante explícita e implícitas as teses que organizamos na tabela abaixo:

Tabela 4 - Organização da teoria atômica de Dalton segundo Figueiras (2004).

Concepção	Formulação teórica
A matéria é constituída por partículas últimas ou átomos	Conceito de átomo
Os átomos são indivisíveis e não podem ser criados nem destruídos	Princípio de Conservação da Matéria (Lei de Lavoisier)
Todos os átomos de um mesmo elemento são idênticos e apresentam o mesmo peso	Conceito de elemento químico
Átomos diferentes tem pesos diferentes	
Os compostos são formados por um número fixo de átomos de seus elementos constituintes	Lei das proporções fixas (Lei de Proust)
se existir mais de um composto formado, por dois elementos diferentes, os números dos átomos de cada elemento nos compostos guardam entre si uma razão de números inteiros	Lei das proporções múltiplas (Lei de Dalton)
o peso1 do átomo de um elemento é constante em seus compostos - se <i>a</i> reagir com <i>b</i> para formar <i>ab</i> e <i>c</i> reagir com <i>d</i> para formar <i>cd</i> , então se <i>ab</i> reagir com <i>cd</i> os produtos serão <i>ad</i> e <i>cb</i> .	Lei das Proporções Recíprocas (Lei de Richter)

É curioso notar como sua visão de mundo se desenvolve em seu trabalho. Ao final dele, sua concepção sobre as interações a nível atômico já se encontra muito afastadas da noção clássica de corpúsculo formuladas por Boyle e Newton. Na figura 10 observamos representações muito mais detalhadas sobre as interações do que a ilustrada na figura 7. Essa perspectiva traz à tona um novo problema sobre a estabilidade, organização e interação dos compostos químicos, principalmente dos gasosos. Devido à sua baixa densidade e alta mobilidade e elasticidade, se torna um grande mistério compreender como a região de interação no entorno de cada um dos elementos influencia na forma como eles se organizam – mais ainda, é um grande mistério compreender quais propriedades dão origem a esta região de interação.

Figura 10 - Representação dos gases que compõe a atmosfera dando uma ênfase maior nas formas interação que deve haver entre eles para que a formação do composto seja possível é importante que ela seja comparada a Figura 7 onde as primeiras concepções de Dalton são apresentadas. (Fonte: *New System of Chemical Philosophy*)

Entre a antiguidade e a modernidade vemos na hipótese atômica, como J. Perrin, a ideia de “explicar o visível complicado, pelo invisível simples” (1913, p.14). Neste sentido, apesar de dotar os corpúsculos de propriedades complexas e empiricamente difíceis de serem mensuradas, sendo esta a grande tarefa da química na modernidade, eles ainda são enxergados na simplicidade: esferas rígidas inacessíveis aos sentidos, dotadas de pesos diferentes que as distinguem umas das outras; vagando pelo vazio geométrico e interagindo entre si dando origem à matéria nos diversos estados físicos que observamos.

Ainda que tenha ganhado terreno na modernidade, há ainda um grande abismo entre o átomo como hipótese e sua realidade demonstrada. O invisível simples, como citado acima por Perrin, nem sempre foi muito bem recebido. Este caminho da abstração, de dotá-lo de qualidades inobserváveis e trabalhar sobre ele em cima de analogias sem que nada pudesse ser constatado sobre a entidade em si foi uma característica marcante do atomismo entre a antiguidade e a modernidade, como aponta Paty:

“Pois os átomos, desde de suas primeiras formulações, são uma abstração fora das aparências e da sensível, testemunhado, por exemplo, pela ausência, num Lucrécio, de qualificação dos átomos pela cor, ou o odor, ou o som, ou o gosto, ou o calor, grandezas mutáveis e perecíveis que a divisão dos corpos modifica ou anula. **Os átomos são caracterizados, segundo ele, por sua duração infinita, sua forma, e uma propriedade aleatória de declinação [...]. Essas qualidades, como as regras igualmente abstratas de movimento de choques, são inferidas por analogia – daí seus limites, na ausência de qualquer procedimento “indutivo” mais elaborado.** Pois, se o emprego da analogia é, em toda circunstância, requerido pelo processo de conhecimento, ele se encontra submetido a limitações, determinadas pela possibilidade de colocar à prova suas conclusões.” (Paty, 1996, p.76, grifo nosso)

O emprego da analogia, da extensão da realidade micro a macro a partir da abstração, rendeu ao atomismo na modernidade as críticas mais duras de seu período de vida. Vemos, por exemplo, em Alain (1936, apud Paty, p. 74) que “o atomismo é um fato para os tolos; aos olhos dos grandes gênios, ele não passa de uma convenção” ou em Bergson (1889, apud Paty, p. 74), que afirma que “estaríamos bastante inclinados, a ver no átomo, não uma coisa real, mas o resíduo materializado das explicações mecânicas”. Ao final do século XIX, com o auge da tradição positivista em voga, Mach enuncia o princípio de economia de pensamento para a elaboração de teorias científicas, segundo ele, o objetivo da ciência é “clarificar ideias, expor o significado real do assunto e expurgar as

obscuridades metafísicas” (Mach, apud Fitas, 1998, p.7). Neste sentido, o atomismo não é uma intuição bem recebida, pois segundo a análise de Fitas sobre o princípio de Mach,

“uma boa teoria científica [ao final do século XIX] é aquela que permite a classificação e previsão de fenômenos sem o recurso a um excessivo número de ideias sem correspondência com o que é observado pelos sentidos, a lei científica corresponde a um enunciado econômico, formulado na linguagem matemática dos resultados experimentais. [...] a hipótese atomista, supondo o átomo como entidade real, constitui uma teoria física muito complicada; **um átomo nunca se observara [...] logo esta teoria não teria sentido.**” (Fitas, 1998, p.8)

4.2 Revelando a existência do universo atômico

Antes de entrar propriamente na intuição atômica do século XX, gostaríamos de, inicialmente, como se diz na linguagem informal, “preparar o terreno”. Realizamos uma tarefa árdua na última seção que foi a de indicar características de pensamento do atomismo na antiguidade e na modernidade, passando por quase dois milênios da história do pensamento humano. Ressaltamos características e problemas essenciais que fizeram com que o atomismo se colocasse como concepção de mundo, mas percebemos também que, principalmente devido à corrente positivista ao final do século XX, o átomo era considerado como conceito metafísico e desnecessário para compreensão da natureza.

Como afirma Paty, a intuição atomista em toda sua complexidade pode ser profundamente pensada em decorrência de duas etapas importantes ocorridas na transição do século XIX ao XX, sendo a primeira delas “marcada pela **aceitação sem retorno da realidade dos átomos**” (PATY, 1995, p.74). A segunda deixaremos para explicitar na próxima seção desta dissertação. A afirmação “aceitação sem retorno” é forte do ponto de vista filosófico pois se compromete, quase que de forma ontológica, com a realidade física do mundo – no entanto, é exatamente essa a percepção que temos quando a análise histórica nos mostra a evidência de tal postura. Os últimos anos do século XIX e primeiros do século XX reservaram surpresas para o mundo atômico que nem os maiores críticos positivistas souberam reagir às evidências que estes momentos trouxeram. Segundo Melzer & Aires (2009), as grandes áreas e os grandes nomes que levaram o atomismo a outra dimensão epistemológica tem contribuições desde a

a **radioatividade** com os trabalhos de E. Rutherford, F. Soddy, P. Curie, M. Curie, A. H. Becquerel, A. S. Eve, W. Bragg, H. Geiger, E. Marsden e H. Moseley. Nos **raios X**, temos os trabalhos de W. Röntgen e todas as outras pesquisas que foram possibilitadas por essa descoberta. A **eletricidade** representada nos trabalhos de M. Faraday, G. J. Stony, J. J. Thomson e W. Crookes. Na área de **espectroscopia** desde trabalhos assinados por J. Melvin, J. Draper, D. Alter, A. Angström, G. Stokes, B. Stewart, J. L. Foulcault, G. R. Kirchhoff, R. W. Bunsen, John Tyndall, J. Balmer, J. Evershed, J. Rydberg, H. Kaysen, Carl Runge, A. Fowler, W. Ritz, G. J. Stoney e Pieter Zeeman. E na química com **Moléculas, ligação química e valência** representada por S. Arrhenius, R. Abegg, G. Lewis e W. Kossel. Junto a outros trabalhos de **Tabela Periódica** (Melzer & Aires, 2015. p. 4)

A aceitação sem retorno da realidade dos átomos se inicia com o reconhecimento de um vasto universo subatômico desconhecido que, em menos de 10 anos, mostrou as caras aos cientistas desafiando-os a mergulhar em seu entendimento. Achamos por certo

contextualizar este momento, uma vez que grande parte dos confrontos epistemológicos travados no decorrer do século XX tomarão como base as contradições, as incoerências e as novidades que este momento apresentou à época.

A década de 90 do século XIX foi movida por reviravoltas e discussões efervescentes. Ao fazer uma análise de “Como Becquerel não descobriu a radioatividade”²³, Martins (1998) defende que, ao contrário do que se dissemina erroneamente, a emissão de radiação natural de elementos não foi uma descoberta ao acaso, mas sim fruto de um contexto profundamente preocupado com a distinção e caracterização de radiações das mais diversas naturezas – os **raios**, como denominados à época. A nomenclatura raio vem em alusão aos raios de luz, e está associada à descoberta das mais diferentes formas de propagação semelhantes a ela, mas com propriedades curiosas e completamente distintas.

O contexto do trabalho de Becquerel é permeado pelas pesquisas com eletricidade, principalmente aquelas voltadas para análise das luzes emitidas por gases quando submetidos a descargas elétricas. O Laboratório de Cavendish, conforme explicitam Martins (1990) e Melzer & Aires (2016), foi o centro experimental de caracterização destas radiações. Desde o início do século XIX, devido aos trabalhos desenvolvidos por Ritter sobre produtos de reações num papel de cloreto de prata (AgCl) a partir da incidência de luz solar, sabia-se da existência de uma fonte de luz não visível denominada como **raios ultravioleta**, tendo sido profundamente pesquisada por Victor Schumann em 1893. A partir do desenvolvimento dos tubos de Crookes para investigação de descargas elétricas em gases de baixa pressão, J.J. Thomson anuncia a descoberta de feixes retilíneos capazes de serem defletidos por campos elétricos e magnéticos, denominando-os como **raios catódicos**.

A investigação dos raios catódicos e seus efeitos levaram Roentgen a perceber um fenômeno curioso. Sabia-se à época que esses materiais fluorescentes precisam de estímulos para produzir luminescência, sabia-se também que esses catódicos colocados diretamente sobre estes materiais poderiam produzir tais estímulos, no entanto, Roentgen percebeu que, mesmo envolvendo o tubo sobre um papel opaco, impedindo a

²³ “Como Bequerel não descobriu a radioatividade”. Martins R. A. Cad. Cat. Ens. Fís., Florianópolis, 7 (Número Especial): 27-45, jun. 1990.

dispersão dos raios catódicos, era possível observar luminescência em materiais fluorescentes colocados externamente ao tubo, mesmo mantendo-os afastados dele.

Ao contrário do que possa se pensar, esta manifestação não poderia ser provocada pelos raios catódicos, uma vez que já se sabia que eles não atravessavam vidros e nem corpos minimamente espessos. Mesmo o ar os absorve fortemente fazendo-os sumir após percorrer apenas alguns centímetros de distâncias. Então, qual a origem deste estímulo à luminescência? Alguma coisa era produzida no tubo sendo capaz de atravessar não apenas o papel opaco, mas também grandes distâncias no ar. Tratava-se de uma radiação não visível capaz de estimular luminescência em materiais fluorescentes e também sensibilizar chapas fotográficas como se fossem feixes de luz solar. Tinham uma capacidade de penetração imensa: atravessavam madeira, livros com mais de mil páginas e até placas metálicas. Por suas propriedades semelhantes à da luz, Roentgen acreditou inicialmente se tratar de **raios ultravioleta de altíssimas** energias, no entanto, era algo completamente diferente de qualquer coisa já vista à época, sugerindo para estes o nome de **raios X**, em alusão à incógnita de sua existência (Martins, 1990).

Figura 11 - Aparato original utilizado por Roentgen para produzir os raios X (acima) e uma representação esquemática do fenômeno observado. (Fonte: teslaresearch.com)

A descoberta dos raios X provocou uma imensa reação de curiosidade na comunidade científica. Em 1896, Poincaré pontua a novidade essencial deste mundo ainda não revelado:

Seja o que for, estamos diante de um agente novo, tão novo quanto o eram a eletricidade no tempo de Gilbert, ou o galvanismo no tempo de Volta. Todas as vezes que uma revelação semelhante nos surpreende, ela desperta em nós o sentimento do mistério que nos envolve, sensação perturbadora que se havia dissipado à medida que se dissolvera a admiração para com as maravilhas anteriores. (POINCARÉ, 1896 apud MARTINS 1990, p. 29)

As perspectivas de análise se voltaram para tentar compreender uma relação entre a produção de raios X, a luminescência dos materiais e a sensibilização de chapas fotográficas. Explorando estes 3 aspectos, em 1896 será feita uma constatação de extrema importância para o trabalho desenvolvido por Becquerel, Gaston Niewenglowski constrói um experimento para avaliar a relação dos materiais fosforescentes com a produção de raios X e a sensibilização de chapas fotográficas.

Em seu experimento, envolve uma folha fotográfica com diversos papéis negros com o intuito de impedir sua exposição direta à radiação solar e sua consequente sensibilização. Dividindo a chapa em duas regiões semelhantes, coloca uma moeda sobre cada uma delas e, acima de uma destas regiões, coloca uma placa de vidro contendo material fosforescente, como mostra a figura 12. (MARTINS, 1990)

Figura 12 - Ilustração da condição inicial da folha fotográfica no experimento conduzido por Niewenglowski (1896). As duas regiões contêm moedas e papel negro, mas apenas uma delas (a da direita na ilustração) é recoberta por material fosforescente. (MARTINS, 1990)

Segundo as concepções da época, Niewenglowski hipotetizava que, quando estimulado pela radiação solar, o material fosforescente produziria²⁴ raios X que penetrariam a folha de papel negro, mas não a moeda. Sendo assim, a metade da placa fotográfica coberta por material fosforescente deveria apresentar a silhueta da moeda e seu entorno

²⁴ Segundo Martins, (1990), na época, imaginava-se que haveria uma relação direta entre produção de luminescência por fluorescência ou fosforência e raios X. No entanto, hoje sabemos que as luminescências citadas são produzidas por transições eletrônicas que podem, mas não necessariamente devem, emitir feixes de luz cujos comprimentos de onda pertencem ao espectro de raios X.

completamente sensibilizado pelos raios X, enquanto a outra metade deveria permanecer intacta, como mostra a figura abaixo.

*Figura 13 - Expectativa de Niewenglowski para o estado final da placa após horas de exposição à radiação solar.
(Fonte: Martins, 1990)*

Segundo Niewenglowski,

Depois de quatro ou cinco horas de exposição ao Sol, a metade do papel sensível que havia recebido diretamente as radiações solares havia permanecido intacta e não apresentava nenhum sinal da moeda colocada acima dela, indicando assim que o papel negro ou vermelho não havia sido atravessado pela luz. A metade que só recebia os raios solares através da placa fosforescente estava completamente enegrecida, exceto pela porção correspondente a uma das moedas da qual foi produzida silhueta branca sobre [um fundo] negro. (NIEWENGLOWSKI apud MARTINS, 1990, p.31)

Outra observação curiosa, e que também evidencia a relação entre luminescência e raios X, se baseia no fato de que, mesmo após ficar horas longe da exposição ao solar, a placa fosforescente ainda produzia enegrecimento na placa fotográfica encoberta pelo papel negro.

É na investigação destas relações que aparecem as contribuições de Becquerel. Grande parte de suas investigações científicas foram pautadas sobre a propriedades de materiais fosforescentes e na sua constatação de que eles seriam capazes de emitir, além de radiações na faixa do visível, infravermelho, ultravioleta e, principalmente, os raios X. Suas primeiras atividades consistiram em reproduzir os experimentos de Niewenglowski testando a capacidade de sensibilização de diferentes tipos de substâncias fosforescentes, com interesse particular nos sais de urânio, apontando que:

Esse comportamento se estende a várias substâncias fosforescentes e, em particular, aos sais de urânio, cuja fosforescência tem uma duração muito curta. [...] Pode-se concluir dessas experiências que a substância fosforescente em questão emite radiações que penetram um papel opaco à luz e reduzem sais de prata. (BEQUEREL, apud MARTINS, 1990, p.33)

Becquerel percebe, no entanto, uma distinção curiosa no comportamento dos sais de urânio, apontando que a radiação emitida pela fosforescência emitida por eles tem uma

penetrabilidade menor do que os raios X comuns e estudados anteriormente por Roentgen e Niewenglowski. Além do mais, a emissão desta radiação penetrante nos sais de urânio não é produzida somente por incidência de radiação solar, mas também por luzes refletidas ou refratadas. No final de 1896 divulga uma constatação surpreendente sobre a radiação emitida pelos sais de Urânio baseado na observação curiosa relatada abaixo:

dentre as experiências precedentes, algumas foram preparadas na quarta-feira, 26, e na quinta-feira, 27 de fevereiro; e como, nesses dias, o Sol apareceu apenas de modo intermitente, **conservei as experiências que havia preparado e coloquei as placas com seus envoltórios na obscuridade de uma gaveta de um móvel**, deixando as lâminas do sal de urânio em seu lugar. Como o Sol não apareceu de novo nos dias seguintes, revelei as placas fotográficas a 1º de março, esperando encontrar imagens muito fracas. Ao contrário, as silhuetas apareceram com grande intensidade. (BEQUEREL apud MARTINS, 1990, p.34)

Neste trecho é possível perceber que ele preparou as amostras de sais de urânio junto às placas fotográficas para que pudessem ser estimuladas pela radiação solar. No entanto, pela baixa disponibilidade de luminosidade, não realizou os experimentos por dias, deixando-os no interior de uma gaveta isolados de qualquer fonte de iluminação ou estímulo à fosforescência. Eis que quando revelou as fotos, as percebeu muito mais intensas e sensibilizadas do que deveriam estar, atribuindo este efeito a alguma fonte de radiação proveniente dos próprios sais de urânio. Para avaliar se haveria influência de uma fonte de radiação própria dos sais de urânio, Becquerel repetiu o experimento da seguinte maneira:

No fundo de uma caixa de cartão opaco coloquei uma placa fotográfica; depois, sobre o lado sensível, coloquei uma lamela do sal de urânio[...]; então, ao lado, na mesma placa, coloquei outra lâmina do mesmo sal, separada da gelatina por uma fina lâmina de vidro. Após realizar essa operação, na sala escura, a caixa foi fechada, então colocada dentro de outra caixa de papelão e por fim dentro de uma gaveta. (BECQUEREL apud MARTINS, 1990, p.35)

Neste segundo relato, percebemos que, para identificar se a amostra de urânio possuía fonte de radiação própria, Becquerel separou duas amostras deixando uma delas separada da folha de papel fotográfico por uma pequena lâmina de vidro. A presença da lâmina de vidro atenuaria a emissão de radiação pelo urânio, uma vez que absorveria parte de sua energia, e provocaria uma sensibilização menor na placa; e é exatamente isto que observa,

Em relação à lamela colocada diretamente sobre a gelatina, praticamente não havia diferença entre os efeitos nos pontos de contato e das partes da lamela que estavam separadas da gelatina por cerca de um milímetro; a diferença pode ser atribuída às diferentes distâncias das fontes das radiações ativas. A ação da lamela colocada sobre o vidro estava um pouco enfraquecida, mas a forma da lamela foi muito bem reproduzida. (BECQUEREL apud Martins, 1990, p.36)

Muito confuso sobre sua constatação, Becquerel faz uma distinção entre estes raios e aqueles produzidos por fosforescência, postulando inicialmente tratar-se de uma fosforescência mais duradoura que, no entanto, jamais teria sido observada em outro material, deixando as hipóteses sobre sua natureza sem resolução.

É importante notar que este fenômeno não parece dever ser atribuído a radiações luminosas emitidas por fosforescência, já que após 1/100 de segundo estas radiações se tornam tão fracas que são quase imperceptíveis. Uma hipótese que surge muito naturalmente ao espírito seria a suposição de que essas radiações [...] poderiam ser radiações invisíveis emitidas por fosforescência, cuja duração de persistência fosse infinitamente maior do que a das radiações luminosas emitidas por essas substâncias. **No entanto, as experiências presentes, sem serem contrárias a essa hipótese, não permitem formulá-la.** (BECQUEREL apud MARTINS, 1990, p.36)

Estes raios emitidos pelo urânio ficaram à época conhecidos como **raios Becquerel** ou **raios Urânio**, no entanto, não tiveram atenção suficiente da comunidade científica, que estava profundamente preocupada com uma compreensão apurada dos raios X. Desta forma, vemos que Becquerel apontou para a existência de substâncias que possuem capacidade natural de emitir radiação, mas delimitando um conjunto de conceitos claros sobre elas, mas quem realizará um estudo sistemático sobre as propriedades das radiações naturais é Marie Curie. No entanto, ao contrário do que pode se pensar, Curie não tinha interesse explícito em estudar as propriedades da radiação natural explicitadas por Becquerel – suas investigações surgiram em decorrência da investigação de outro problema: **a ionização residual do ar atmosférico.** (MARTINS, 1990)

Ainda em meio à década de 90 do século XIX, J.J. Thomson e E. Rutherford realizaram um cuidadoso estudo quantitativo dos efeitos de ionização que os raios X provocavam nos gases da atmosfera. Ambos cientistas propuseram para este fenômeno uma explicação que ainda é coerente com aquela que utilizamos atualmente: “os raios X rompem as moléculas neutras do ar e produzem íons positivos e negativos, capazes de conduzir eletricidade” (Martins, 2003, p.33). Devido ao grande avanço de instrumentos de medidas

elétricas, a investigação deste fenômeno poderia ser realizada por meio medidas de corrente elétrica produzida pelas ionizações, baseando-se na quantidade de cargas elétricas criadas na interação dos raios X com a matéria gasosa. Este estudo se mostrava bastante promissor, uma vez que os estudos de Becquerel utilizavam de análises qualitativas baseadas na sensibilização das placas fotográficas, o que o tornava bastante impreciso do ponto de vista de quantificação da radiação. Com o estudo das placas era possível fazer uma análise comparativa de fontes radioativas, mas não conseguia se caracterizar quantitativamente a intensidade da radiação incidente – um estudo baseado em correntes elétricas poderia aferir medidas quantitativas sobre a radiação. Neste contexto, o desenvolvimento de métodos apurados para medidas de correntes elétricas produzida na ionização de gases atmosféricos era um tema de bastante influência. (MARTINS, 2003)

Em meio a esta problemática Marie Curie decide investigar, para defender sua tese de doutoramento, métodos precisos para medir correntes elétricas produzidas pelos **raios Becquerel**. Este estudo tinha dois principais objetivos: contribuir para o desenvolvimento de métodos precisos de medidas de correntes elétricas produzidas por efeitos de ionização e compreender melhor a natureza e as propriedades da recém descoberta radiação emitida pelo urânio. Segundo Curie,

“Em geral, utilizou-se nesses estudos o método elétrico, quer dizer, o método que consiste em medir a condutibilidade do ar sob influência dos raios que se estuda. Este método possui, de fato, a vantagem de ser rápido e de fornecer números que podem ser comparados entre si.” (Curie apud Martins 2003, p. 35)

Segundo Martins (2003), os primeiros meses de trabalho de Curie a levaram a alguns resultados importantes, apontando que a intensidade da radiação natural emitida pelo urânio não depende da temperatura e que a iluminação ou irradiação com raios X também não possui nenhum efeito amplificador sobre a substância. Mais adiante em sua pesquisa, ao realizar estudos sobre a ionização provocada por substâncias que tenham urânio em sua composição, notou que duas delas apresentavam um comportamento anômalo: emitiam radiação com mais intensidade que o próprio urânio,

Todos os minerais que se mostraram ativos contêm os elementos ativos. Dois minerais de urânio – a pechblenda (óxido de urânio) e a calcolita (fosfato de cobre e uranila) são muito mais ativos do que o próprio urânio. Esse fato é muito notável e leva a crer que esses minerais podem conter

um elemento muito mais ativo do que o próprio urânio. (CURIE apud MARTINS 1990, p. 39)

A primeira reação de Curie foi a de realizar novamente os experimentos imaginando que seus resultados estivessem equivocados. O caderno de laboratório da cientista mostra que “ela examinou a aparelhagem, fez testes, refez as medidas – e confirmou os resultados iniciais” (Martins, 2003, p. 36). Curiosa com este comportamento, Curie começou a avaliar diversos compostos de urânio conhecidos à época, como óxido de urânio e o uranato de amônio. Constatou que todos eles eram menos ativos que o próprio urânio – enquanto a *pechblenda* insistia em se mostrar mais ativa. Como explicar esta anomalia? A explicação mais plausível era de que esta substância teria em sua composição elementos mais ativos que o próprio urânio, passando a realizar testes de ionização com as substâncias que a compunham. O comportamento da *pechblenda* e da *calcolita* a levaram a questionar se o urânio seria o único elemento capaz de produzir radiação natural. Segundo Martins (2003),

Talvez por causa disso Marie tenha examinado em seguida um mineral de tório e nióbio, que não contém urânio (24 de fevereiro), e logo notou que ele emitia radiação ionizante. Examinou então minerais que continham nióbio e notou que não mostravam atividade. Testando separadamente os elementos presentes nesse mineral, observou que apenas o tório emitia radiações (26 de fevereiro). **Analizando em seguida diversos minerais de urânio e de tório, notou que todos eles emitiam radiação ionizante, e testando várias outras substâncias, não encontrou nenhuma outra ativa (2 de março).** (MARTINS, 2003, p.37)

Neste momento, estava constatado que o urânio não era o único elemento dotado de propriedades de emissão de radiação natural, levando ao nascimento de um importante conceito para o estudo das radiações: o de substâncias radioativas. Segundo Curie,

Os raios urânicos foram frequentemente chamados raios de Becquerel. Pode-se generalizar esse nome, aplicando-o não apenas aos raios urânicos, mas também aos raios tóricos e a todas as radiações semelhantes. **Chamarei de radioativas as substâncias que emitem raios de Becquerel.** (CURIE apud MARTINS 1990, p. 40)

Fica evidente, para Curie, que a radiação natural é uma propriedade de determinados elementos. Após essa constatação, Curie e seu marido, Pierre, partem para investigações de química analítica buscando isolar os elementos que constituem a *pechblenda*. Neste processo, formam um conjunto de precipitados bastante ativos, sendo eles o tório e o urânio como já se previa, no entanto, havia a presença de mais um unido fortemente ao

bismuto e com propriedades químicas muito semelhantes a ele. Através de uma série de processos de sublimação fracionada obteve um material que, ainda unido ao bismuto, era 400 mais ativo que o urânio puro.

Cremos, portanto, que a substância que retiramos da pechblenda contém um metal ainda não identificado, vizinho ao bismuto por suas propriedades analíticas. Se a existência desse novo metal for confirmada, propomos dar-lhe o nome de polônio, nome do país de origem de um de nós. (CURIE & CURIE apud MARTINS 1990, p.41)

A noção mais ampla das propriedades radioativas das substâncias leva Curie a postular que este efeito é provocado por aspectos da estrutura interna das substâncias. O universo de fenômenos para além dos sentidos se tornam cada vez mais complexos e apontam cada vez mais a necessidade de não restringir o olhar apenas ao macroscópico, ao observável ou ao empiricamente testável. Tanto as diversas radiações apontadas até aqui, quanto a própria estrutura dos materiais que emitem naturalmente algumas destas radiações, remetem à ideia de um universo microscópico e inobservável profundamente complexo para que essa diversidade de fenômenos possa acontecer. Neste momento não se trata de negar a hipótese metafísica de um mundo atômico – há uma complexidade no universo inobservável que precisa ser entendida – e a complexidade não se encerra aqui.

Como apontamos anteriormente, o que leva Curie aos fenômenos radioativos é um problema notadamente conhecido como ionização residual do ar. Os trabalhos de Becquerel e Curie apontaram para a existência de radiações ionizantes emitidas naturalmente de materiais e que estas teriam a capacidade de provocar ionização do ar atmosférico. C.T.R Wilson percebe, em 1900, que um eletroscópio é descarregado rapidamente quando colocado em contato com a atmosfera e identifica também que seu tempo de descarga depende de diversos fatores meteorológicos.

Figura 14 - Ilustração de um eletroscópio, instrumento comumente utilizado desde o século XIX para avaliar a presença de cargas elétricas. A parte superior é colocada em contato com diversos materiais para avaliar seu estado elétrico. Ao ser eletrizada ela provoca a eletrização das duas folhas de ouro no interior do bulbo isolado a vácuo que se repelem enquanto elas estiverem presentes. Já se sabia que radiação ultravioleta e raios X eram capazes de descarregar eletroscópios. Em 1900 Wilson percebe que diferentes regiões da atmosfera ou diferentes condições meteorológicas afetam no tempo de descarga do aparato. (Fonte: Bustamante, 2013)

A importância da observação de Wilson reside no fato de que há na atmosfera efeitos que produzem uma capacidade de condução elétrica. Neste sentido, devemos nos perguntar: o que provoca essa condução, de que forma ela poderia se tornar naturalmente eletrizada? Segundo Bustamante (2013), haviam duas explicações plausíveis à época.

A primeira explicação era de que o ar atmosférico sofria uma ionização espontânea fruto do atrito proveniente das colisões de suas moléculas. Esta hipótese, no entanto, era muito criticada e nunca foi muito bem recebida, pois, como pontuou Pierre Auger, fenômenos espontâneos teriam quase que um atestado de impotência. Já a segunda explicação se mostrava bastante coerente com o avanço nos estudos sobre a radiação desenvolvidos até aquele momento. Ela afirmava que o ar atmosférico sofria uma ionização estimulada pelas radiações provenientes das diversas substâncias que existem na Terra. Essa produção poderia se dar por algum estímulo ou por uma capacidade natural das substâncias radioativas. O estímulo seria o caso, por exemplo, das substâncias fosforescentes e fluorescentes que, como demonstrado por Niewengloski, Bequerel, Roetgen e outros, emitem raios X e ultravioleta que podem ionizar o ar atmosférico, enquanto que a capacidade natural se trata das radiações emitidas pelas substâncias radioativas e também teriam a mesma capacidade (Bustamante, 2013).

A segunda hipótese fundamentou uma série de estudos que foram realizados entre 1900 e 1910. A concepção de que a matéria terrestre provocaria emissão de radiação que

provocaria ionização da atmosfera seria coerente com a ideia de que essa ionização diminuísse com a altitude, uma vez que grande parte da matéria terrestre se concentra próximo à crosta terrestre.

Um destes estudos foi desenvolvido por Wulf, que comparou a ionização produzida na superfície terrestre, com aquelas produzidas a 80 m e a 300 m, realizando suas medidas na torre Eiffel. Wulf imaginava que sua intensidade fosse baixa a 80 m e praticamente nula a 300 m, no entanto, apesar de constatar uma diminuição, percebeu uma intensidade ainda elevada a 300 m, o levando a postular que talvez haja uma fonte de radiação acima da crosta terrestre ou que o coeficiente de absorção da radiação seja menor do que as concepções construídas até então. (BUSTAMANTE, 2013)

Paralelamente, Domenico Pacini realizava estudos sobre a condutibilidade do ar e foi uma das principais referências nos estudos sobre coeficiente de absorção das radiações ionizantes. Realizou medidas em ambientes dos mais diferentes tipos: montanhas, marés, lagos e até mesmo em profundidades marítimas. Em um de seus mais relevantes estudos, realizados nas águas do Golfo de Gênova a bordo de um barco da marinha italiana, utilizou um eletrômetro disposto no interior de uma caixa de cobre para comparar as medidas de descarregamento na superfície terrestre e no fundo do mar. Como o coeficiente de absorção de radiação na água é altíssimo, esperava-se observar decréscimos exponenciais à medida que se direcionava a maiores profundidades. No entanto, contrariando novamente as concepções da época, percebeu-se uma redução, mas não significativa, sendo as medidas debaixo d'água cerca de 20% menores do que na superfície – concluiu logo que essa radiação não poderia ser nenhuma daquelas emitidas na superfície terrestre e, devido a toda experiência da história da humanidade com navegações, não poderia ser emitida pela própria água. Estava se tornando cada vez mais claro que as fontes de radiação na Terra não poderiam provocar os efeitos que observamos. (BUSTAMANTE, 2013)

Os mais significativos passos com relação a este problema foram dados por Viktor Hess e Albert Gockel. Hess tomou conhecimento do método de investigação que Gockel vinha desenvolvendo desde o início do século XX: soltar balões até altitudes elevadas para avaliar a produção de ionização na atmosfera. Após 3 anos de investigação, Gockel constata um comportamento inesperado. Esperando detectar alguma região no qual deveria ocorrer uma diminuição na ionização da atmosfera, percebeu que, após uma

determinada altitude, a ionização começava a crescer bruscamente. Sobre este comportamento, Hess aponta que,

No último ano tive a oportunidade de investigar a radiação penetrante durante dois voos de balões. Reportei a primeira destas viagens no encontro de Karlsruhe. Nas duas viagens nenhuma variação relevante na radiação foi possível de ser observada até altitudes de 1.100 m. Gockel, também, em dois voos de balão, não foi capaz de detectar a esperada diminuição na intensidade da radiação com relação à altitude. Disso, foi concluído que além da radiação gama produzida por elementos radioativos na crosta terrestre, deve haver outra fonte de radiação penetrante. (HESS, 1913, p.1)

Segundo Bustamante (2013), Hess realizou estudos sistemáticos baseados na ascensão de balões – sendo quase uma centena de voos apenas no ano de 1912. Suas principais conclusões foram as de que:

- Até 1000 m de altitude a radiação era absorvida devido à presença de grandes massas de ar, percebendo uma diminuição da ionização com relação à altitude.
- Acima de 1000 m, mais especificamente entre 1000 m e 5000 m, havia um aumento significativo que não podia ser explicado nem pelas fontes radioativas terrestres, nem por substâncias presentes na atmosfera e muito menos por variações meteorológicas.
- Reforçando as observações de Hess, Kolhoerster, um ano depois, atingiu altitudes de 9.300 m e constatou uma ionização 10 vezes mais intensa do que a observada no solo.

Não havia alternativa plausível: os comportamentos observados nas altitudes elevadas só poderiam ser explicados pela existência de uma radiação penetrante provinda do espaço e que alcançava a atmosfera terrestre pela sua extremidade superior – denominada como **radiação cósmica**. Na perspectiva de Hess, estes raios interagiriam com a atmosfera produzindo uma cascata de raios que atingiria a terra nas suas mais diferentes localidades, fenômeno que ficou conhecido como chuva cósmica, ilustrado na figura 15.

Figura 15 - Representação da radiação cósmica penetrando a atmosfera. Até 1914 era notável a percepção de sua intensidade decrescendo até 1000 m devido a presença de grandes massas de ar, mas sofrendo um aumento brusco acima desta altura. (Fonte: physics.purdue.edu)

Mas que radiação é esta? Quais são suas propriedades? São semelhantes a estas que identificamos na Terra? O que a produz? É na investigação das diversas questões apresentadas nesta seção que se encontrará imersa grande parte da intuição atômica do século XX e que dará origem a física de partículas e à física nuclear. As respostas serão buscadas inicialmente na radiação cósmica, proveniente do espaço e, em meados da década de 50, nos grandes laboratórios de pesquisa com a utilização de aceleradores e detectores de partículas.

É importante notar que até este momento destacamos uma característica importante dos movimentos epistemológicos entre o final do século XIX e início do século XX. Cada vez mais se manifestavam indícios de radiações não visíveis com propriedades completamente distintas:

- raios pouco penetráveis que sofriam reflexão e refração **(radiação ultravioleta)**
- raios eletricamente carregados de pouca penetrabilidade que sofrem deflexão por campos elétricos e magnéticos **(raios catódicos)**
- raios de alta penetrabilidade e capacidade de estímulo de luminosidade e sensibilização de chapas fotográficas **(raios X)**
- raios de diferentes penetrabilidades, dotados de comportamentos distintos e emitidos naturalmente por substâncias radioativas **(raios Becquerel no início e posteriormente denominados como radiação natural)**
- raios de altíssima energia e penetrabilidade provindos do espaço cósmico e responsáveis pela ionização residual da atmosfera **(raios cósmicos)**

Essa diversidade de comportamentos aponta a possibilidade de haver um mundo para além do mundo sensível com propriedades muito mais complexas do que se aparenta. A imagem de matéria como espelho microscópico do mundo macroscópico reduzido a menores escalas talvez não seja a melhor caricatura a ser construída. Além do mais, renegar o universo atômico já não era mais uma possibilidade, sua aceitação sem retorno passou a se tornar uma realidade da física contemporânea e os esforços realizados na física deste século giram em torno de desvendar e caracterizar os mistérios sobre ele.

Na próxima seção daremos atenção às primeiras imagens construídas no atomismo do século XX. Perceberemos o quanto elas se distanciam das concepções atômicas da

antiguidade e da modernidade e como elas se relacionam cada vez mais com a caracterização deste mundo completamente desconhecido até o início do século.

4.3 O átomo como estrutura complexa e o modelo orbital e nuclear

As evidências colocadas pela existência das radiações ionizantes levaram a intuição atômica a outro patamar. No entanto, uma imagem mais clara do mundo atômico ainda não havia se consolidado. Como pontuado por Paty (1995), a consolidação da intuição atômica como posição epistemológica fundamental para a ciência é decorrente de dois grandes processos. O primeiro deles, pontuado ao início da seção 2.4, foi a aceitação sem retorno da realidade do mundo atômico, enquanto que a segunda, que exploraremos em detalhe aqui, é marcada pelo “caráter físico da descontinuidade da energia e da radiação, isto é, de seu caráter corpuscular – em outros termos, atômico igualmente.” (Paty, 1995, p.3). A estrada para um entendimento materializado das partículas elementares ainda carecia de uma imagem mais objetiva e dotada de características próprias que nos possibilitassem seu entendimento dentro de uma estrutura teórica mais ampla, estes primeiros passos foram dados por Ernest Rutherford e J.J. Thomson.

O comportamento dos raios catódicos deixava Thomson intrigado: como era possível um feixe luminoso ser defletido por campos elétricos e magnéticos? Que propriedades se escondem por trás do véu inobservável que nos separa do mundo microscópico? Em busca destas respostas, Thomson entra em uma estrada que o levará a uma das estruturas mais complexas do mundo atômico. Segundo o cientista,

Como os raios catódicos carregam uma carga elétrica negativa, sofrem deflexão pela ação de forças elétricas [...], sofrem ação de uma força magnética da mesma forma que seria se essa força agisse sobre um corpo negativamente eletrizado em movimento [...] não consigo escapar da conclusão de que eles são cargas elétricas negativas **carregadas por partículas de matéria**. É natural que as perguntas a seguir se apareçam: o que são estas partículas? São elas **átomos, moléculas ou matéria em um fino estado de subdivisão**? Para tentar dar uma luz a estes questionamentos, realizei uma série de estudos com o objetivo de medir a razão entre a massa e a carga das partículas carregada por eles. (Thomson, 1897, p. 303, tradução nossa)

Thomson se rendeu as evidências e percebeu que talvez estas propriedades dos raios catódicos pudessem ser explicadas pela existência de entidades inobserváveis dotadas de propriedades muito mais complexas do que se imaginava. O rumo tomado por Thomson tem uma coerência bastante significativa, uma vez que, se realmente estivesse lidando

com partículas dotadas de propriedades bem definidas, nem sua massa, nem sua carga elétrica deveriam sofrer alterações. Neste sentido, se observasse a produção de raios catódicos em interação com os mais diversos materiais, não deveria constatar mudança na razão entre estas propriedades. Mais adiante, faz uma proposição bastante interessante que seria a manifestação teórica da hipótese atômica.

Suponha que consideramos um feixe homogêneo de raios catódicos. Seja “m” a massa de cada uma das partículas que o compõe e “e” a carga carregada por cada uma delas. Seja N o número de partículas passando sobre qualquer seção do feixe em um certo tempo; portanto, Q, a quantidade de eletricidade carregada por estas partículas, é dada pela seguinte equação: $Q = N \cdot e$ (THOMSON, 1897, p.303, tradução nossa)

Sendo N um número inteiro, Thomson está implicitamente propondo tanto a quantização da matéria, quanto a quantização da eletricidade. Neste sentido, a matéria poderia ser entendida como composta por cada uma destas “N” partículas e as eletricidades que observamos no mundo seriam provenientes de múltiplos de quantidades individuais “e” que cada uma delas possuem. Mais do que atomizar a matéria, Thomson estava propondo a intuição atômica para a própria eletricidade.

É importante perceber que a construção deste método de investigação parte do pressuposto da existência de tais partículas, uma vez que a relação com elas sempre será mediada pelos aparatos experimentais. Não há a possibilidade de interagir diretamente com ela, mas controlar seu movimento utilizando a ação de campos elétricos e magnéticos – e é exatamente isto que Thomson faz. Suas investigações se basearam em essencialmente dois métodos, interagir com o mundo atômico a partir de campos elétricos e depois com campos magnéticos. Através de sua interação com a matéria, poderia deduzir a relação entre a carga “e” e a massa “m” de cada partícula e correlacionar estas propriedades do inobservável com as propriedades controláveis de seu aparato experimental. A figura 2 mostra o primeiro ajuste realizado no tubo de Crookes para realização do experimento, a explicação está contida na legenda.

Figura 16 - Tubo de Crookes utilizado para a produção de raios catódicos nos experimentos de determinação da razão m/e . Os raios catódicos são produzidos em C. Entre A e B é aplicada uma diferença de potencial de modo que possa se saber a velocidade com que são inseridos no interior do tubo. Um conjunto de placas paralelas D e E aplica um campo elétrico uniforme cuja intensidade podia ser controlada por Thomson. Na extremidade direita da imagem percebemos a presença de uma fita milimetrada utilizada para medir o deslocamento vertical das partículas de raios catódicos. (Fonte: THOMSON, 1897)

Observando o arranjo experimental, vemos a percepção cuidadosa de Thomson com relação a estas partículas de eletricidade, como se pudesse imaginar o movimento realizado por elas em cada instante do experimento:

- Há uma região de aceleração supondo que elas se movimentem seguindo as leis usuais da mecânica e da eletrostática;
- Há uma região de colimação supondo que estas partículas sigam princípios mecânicos da inércia e se propagem naturalmente em movimento retilíneo e uniforme sobre a ausência de forças;
- Há uma região de aplicação de forças verticais para alterar a direção de movimento das partículas.

A construção desta abstração é crucial para a condução do experimento, uma vez que vemos, como afirmava Bachelard, a “realização” do pensamento. Mais do que simplesmente verificar a presença de elétrons na natureza, Thomson construiu, no âmbito do racional, uma imagem de um feixe constituído por pequenos corpúsculos dotados de propriedades que o associassem a sua concepção teórica. A realização do elétron, no sentido bachelardiano, passa por uma construção técnica na qual seu arranjo experimental é construído partindo do pressuposto que as entidades são reais – mais do que isso, o arranjo só existe devido a imagem construída – antes mesmo de realizar o experimento, Thomson consegue imaginar as características gerais do comportamento que seria obtido. Um dos primeiros registros do comportamento do feixe de partículas é mostrado na figura 17.

Figura 17 - Registro da deflexão sofrida pelo feixe de raios catódicos. (Fonte: Thomson, 1897)

A segunda versão do experimento possibilitaria uma análise mais precisa uma vez que se baseava em um movimento circular uniforme realizado pelas partículas sobre a ação de um campo magnético constante. Nesta segunda versão, Thomson retira as placas paralelas eletricamente carregadas e insere uma bobina sobre a qual são induzidos campos magnéticos devido a passagem de uma corrente elétrica, ilustrado na figura 18 com explicação detalhada na legenda.

Figura 18- Segunda abordagem experimental. O feixe de raios catódicos é produzido e viaja em direção as placas colimadoras A. Sobre estas placas uma bobina C produz um campo magnético constante que curva o feixe em direção ao ponto E, que é utilizado para determinar o raio de curvatura. (Fonte: Thomson, 1897)

Segundo Thomson, a relação entre as propriedades controladas e as inobserváveis, deduzidas a partir da dinâmica do movimento circular realizado de corpos eletricamente carregados sob a ação de um campo magnético uniforme, segue a relação matemática:

$$\frac{m}{e} = \frac{I^2 Q}{2W} \quad (1)$$

Onde I é a corrente elétrica que percorre a bobina, Q a quantidade de carga elétrica presente no feixe e W a energia cinética das partículas que compõe o feixe. Os primeiros resultados para a investigação de Thomson são apresentados na figura 19.

Gas	Value of W/Q	I	m/e	v
Tube 1.				
Air	4.6×10^{11}	230	0.57×10^{-7}	4×10^9
Air	1.8×10^{12}	350	0.34×10^{-7}	1×10^{10}
Air	6.1×10^{11}	230	0.43×10^{-7}	5.4×10^9
Air	2.5×10^{12}	400	0.32×10^{-7}	1.2×10^{10}
Air	5.5×10^{11}	230	0.48×10^{-7}	4.8×10^9
Air	1×10^{12}	285	0.4×10^{-7}	7×10^9
Air	1×10^{12}	285	0.4×10^{-7}	7×10^9
Hydrogen	6×10^{12}	205	0.35×10^{-7}	6×10^9
Hydrogen	2.1×10^{12}	460	0.5×10^{-7}	9.2×10^9
Carbonic acid	8.4×10^{11}	260	0.4×10^{-7}	7.5×10^9
Carbonic acid	1.47×10^{12}	340	0.4×10^{-7}	8.5×10^9
Carbonic acid	3.0×10^{12}	480	0.39×10^{-7}	1.3×10^{10}
Tube 2.				
Air	2.8×10^{11}	175	0.53×10^{-7}	3.3×10^9
Air	2.8×10^{11}	175	0.53×10^{-7}	4.1×10^9
Air	3.5×10^{11}	181	0.47×10^{-7}	3.8×10^9
Hydrogen	2.8×10^{11}	175	0.53×10^{-7}	3.3×10^9
Air	2.5×10^{11}	160	0.51×10^{-7}	3.1×10^9
Carbonic acid	2×10^{11}	148	0.54×10^{-7}	2.5×10^9
Air	1.8×10^{11}	151	0.63×10^{-7}	2.3×10^9
Hydrogen	2.8×10^{11}	175	0.53×10^{-7}	3.3×10^9
Hydrogen	4.4×10^{11}	201	0.46×10^{-7}	4.4×10^9
Air	2.5×10^{11}	176	0.61×10^{-7}	2.8×10^9
Air	4.2×10^{11}	200	0.48×10^{-7}	4.1×10^9
Tube 3.				
Air	2.5×10^{11}	220	0.9×10^{-7}	2.4×10^9
Air	3.5×10^{11}	225	0.7×10^{-7}	3.2×10^9
Hydrogen	3×10^{11}	250	1.0×10^{-7}	2.5×10^9

Figura 19 - Resultados das primeiras obtenções para a razão m/e em 3 diferentes tubos contendo diferentes gases em seu interior. (Fonte: Thomson, 1897)

É importante notar que os valores obtidos nos primeiros resultados de Thomson variam entre $0,32 \times 10^{-7}$ e $1,0 \times 10^{-7}$. Apesar da flutuação, as diversas medidas apontam para a mesma ordem de grandeza. Realizando experimentos com condições ainda mais controladas, Thomson consegue aferir uma constância na relação entre a massa e a carga do feixe de raios catódicos, o levando a concluir que eles são compostos pelas entidades inobserváveis que atualmente chamamos de **elétron**, dotada da unidade base de eletricidade que observamos na realidade física.

Após essa investigação, Thomson auxiliou uma série de trabalhos investigando a natureza das radiações descobertas no século XIX. Um de interesse para o desenvolvimento da concepção atômica foi o desenvolvido em parceria com Ernest Rutherford anos após a constatação da existência do elétron. Neste trabalho, Rutherford procurava caracterizar de forma mais precisa as radiações emitidas pelo urânio, apontando para o fato de que Becquerel havia percebido que essa radiação se distinguia daquelas observadas por Roentgen.

Os resultados de Becquerel mostraram que os raios Roentgen e os raios urânio são muito similares em seu poder de penetração e produção de condutividade elétrica nos gases expostos a eles; **mas há ainda uma diferença essencial entre estes dois tipos de radiação.** (RUTHERFORD, 1899, p.109, tradução nossa)

Um dos métodos de investigação utilizados por Rutherford, era analisar precisamente o poder de penetração das radiações emitidas pelo urânio. Para isto, ele colocava pequenas folhas de diferentes materiais metálicos e comparava a penetração em diferentes espessuras. O primeiro resultado significativo na caracterização desta radiação apontou para o fato de que ela seria muito mais complexa do que um único tipo de raio a ser investigado, segundo Rutherford,

Estes experimentos demonstraram que a radiação do urânio é complexa, e atestamos a presença de, no mínimo, dois tipos distintos de radiação: uma que é rapidamente absorvida, a qual nomearemos por conveniência de **radiação α** , e outra de maior poder de penetração, que denominaremos como **radiação β** . (RUTHERFORD, 1899, p.110, tradução nossa)

Segundo Martins (1990), esta constatação movimentou cientistas da época. O casal Curie, assim como Becquerel e E. Dorn posteriormente, comprovaram que a radiação β poderia ser defletida por campos magnéticos e que possuíam propriedades de deflexão características dos raios catódicos – supondo que ambas fossem compostas das mesmas partículas eletrizadas negativamente propostas por Thomson. Após a identificação desta radiação eletricamente carregada, Vilarde conseguiram distingui-la de outra radiação também de alto poder de penetração, mas que não era defletida por campos magnéticos. Ela era dotada de propriedades muito próximas dos raios X e, seguindo a lógica de Rutherford, a denominou como radiação γ . Após este conjunto de pesquisas, Rutherford atesta nos anos seguintes que a radiação α poderia também ser defletida por campos

magnéticos. No entanto, sofria deflexões opostas à radiação β , sendo, portanto, eletrizada positivamente.

Em um trabalho publicado em 1903, Rutherford resume as propriedades das radiações emitidas pelo elemento radioativo Rádio, mas não somente por ele, e sim todas as substâncias definidas por Curie como substâncias radioativas

- (1) **A radiação α** , [eletrizada positivamente] e que é facilmente absorvida por pequenas espessuras de matéria, responsável por grande parte da ionização produzidas nos gases e observadas nas condições experimentais usuais;
- (2) **A radiação β** , que consiste de cargas negativamente carregadas projetadas com altas velocidades e que são similares em todos os aspectos com os raios catódicos emitidos nos tubos de vácuo;
- (3) **A radiação γ** , que não pode ser desviada por campos magnéticos e tem uma característica de ser muito penetrante.

(RUTHERFORD, 1903, p.177, tradução nossa)

Os poderes de penetração medidos por Rutherford no trabalho são ilustrados na figura 20.

Radiation.	Thickness of Aluminium.
α rays	0.0005 cm.
β rays	0.5 cm.
γ rays	8 cms.

Figura 20 - Poder de penetração dos três tipos de radiação emitidos pelo elemento radioativo rádio. (Fonte: RUTHERFORD, 1903)

Cada vez mais as características destas radiações se tornavam claras. Algumas eram partículas de matéria dotadas de cargas positivas, outras de cargas negativas, enquanto que haviam também aquelas que não possuíam carga elétrica e, ao que se parecia, também não eram dotadas de massa. Mas de onde surgem todas estas cargas positivas e negativas? O que acontece no interior dos elementos radioativos que possibilita a emissão de cargas positivas e negativas? Como já vinha sendo apontado por Rutherford no mesmo artigo de 1903, após um tempo emitindo radiação, os elementos se tornavam mais leves e mudavam suas características, sendo assim, era natural pensar que esta radiação era proveniente da estrutura interna deles.

Em meio a estas reflexões, Thomson propõe a composição da matéria por átomos e elabora detalhes sobre sua estrutura. Este modelo ficou didaticamente conhecido no ensino de ciências e na divulgação científica como modelo de “Pudim de passas”, no qual partículas de carga negativa que compõe os raios catódicos estariam incrustadas em uma

massa homogênea de carga elétrica positiva, explicando a neutralidade elétrica da matéria.

Figura 21 - Representação do modelo atômico de Thomson, denotado comumente como modelo de Pudim de passas. Onde as "passas", cargas elétricas negativas, estariam dispostas no interior de um "pudim", massa homogênea eletrizada positivamente. (Fonte: Jemremovic, 2009)

Curiosamente, ele é tratado como um modelo errado e ultrapassado, no entanto, avaliando as concepções presentes em seu artigo publicado em 1904, percebemos algumas semelhanças com o complexo imaginário do modelo de Bohr. Neste artigo, Thomson de fato propõe um modelo com as características apresentadas acima, mas se dedica a resolver um problema que será ponto de discussão pelas próximas duas décadas: a estabilidade de cargas elétricas negativas no interior de um átomo eletrizado positivamente. Para que a radiação pudesse ser emitida por elementos, os elétrons não poderiam simplesmente estar parados no interior dos átomos, mas deveriam realizar movimentos que seriam responsáveis pela emissão das radiações observadas. Segundo Thomson,

A imagem de que os átomos dos elementos consistem de um número de corpúsculos negativamente carregados enclausurados em uma esfera uniformemente eletrizada positivamente, sugere, além de diversos outros problemas matemáticos interessantes, o que será discutido neste artigo, que trata sobre o movimento de um anel contendo "n" partículas eletricamente carregadas colocadas no interior da esfera uniformemente eletrizada. (THOMSON, 1904, p.237, tradução nossa)

Ainda segundo o físico, além de os elétrons não estarem simplesmente parados nos átomos, eles não poderiam estar dispostos de forma aleatória em seu interior.

Supomos aqui que o átomo consiste de um número de corpúsculos movendo-se sobre uma esfera eletrizada uniformemente com carga positiva. [...] A solução para quando os corpúsculos são forçados a se movimentar sobre um plano da esfera estão indicadas pelos resultados que acabamos de obter – **os corpúsculos irão se arranjar sobre uma série de anéis concêntricos**. Este arranjo é necessário pelo fato de haver um grande número de corpúsculos que não podem adquirir estabilidade em um único anel, enquanto que **este anel se tornará estável colocando em seu interior o número apropriado de corpúsculos**. (THOMSON, 1904, p.255, grifo e tradução nossa)

Neste trecho, percebemos que os elétrons realizam movimentos orbitais no interior do átomo! A imagem de Thomson, no entanto, é bastante afastada da imagem de Bohr das órbitas quantizadas que perceberemos mais adiante. Ela apresenta muita proximidade, sem qualquer compromisso com as concepções teóricas dos antigos, com a imagem da órbita dos planetas em Aristóteles em seu universo de duas esferas – na esfera celeste os planetas estariam incrustados em orbes de cristais, como mostra a figura 21.

Figura 22 - O universo de duas esferas de Aristóteles. A esfera celeste é dividida em pequenos anéis no qual onde os corpos celestes se movimento - bastante análogo à imagem de Thomson sobre o átomo. (Fonte: <https://roughlydaily.com>)

Mais adiante, Thomson apresenta a disposição de elétrons nos diferentes anéis orbitais para átomos contendo diferentes números de elétrons.

Number of corpuscles	60.	55.	50.	45.	40.	35.
Number in successive rings...	20 16 13 8 3	19 16 12 7 1	18 15 11 5 1	17 14 10 4	16 13 8 3	16 12 6 1
Number of corpuscles	30.	25.	20.	15.	10.	5.
Number in successive rings...	15 10 5	13 9 3	12 7 1	10 5	8 2	5

Figura 23 - Distribuição dos elétrons em átomos de diferentes composições atômicas. (Fonte: Thomson, 1904)

Mas de onde vem essa ideia? De que forma Thomson apresenta o movimento orbital? Como já explicitamos, era preciso que os elétrons se movimentassem no interior do átomo para que a emissão de radiação pudesse ser explicada – a grande tarefa de Thomson era explicar como era este movimento e quais suas condições de estabilidade. Na resolução matemática deste problema, que ocupa quase 20 páginas de desenvolvimento de cálculos, Thomson considera que os elétrons estão dentro de uma esfera uniformemente eletrizada com carga positiva e analisa a dinâmica do movimento circular provocado pela força elétrica criada por ela. Em seu desenvolvimento, obtém várias soluções para a velocidade de rotação em função do raio e percebe que várias delas coincidem, podendo representar diferentes movimentos de rotação em uma trajetória de mesmo raio orbital. Apenas a título de exemplo, sem que haja necessidade de compreensão sobre o que será ilustrado, apresentamos um dos conjuntos de soluções que Thomson fornece para a estabilidade de um átomo contendo 6 elétrons, “a” é o raio da esfera homogeneamente eletrizada. As várias soluções apresentadas representem diferentes posições para ocupação dos elétrons no interior do átomo.

Case of six corpuscles.
When $n=6$,

$$S_0 = 5 + \frac{4}{\sqrt{3}}, T_0 = 17 + \frac{16}{3\sqrt{3}}, U_0 = 0, L_0 = \left(22 + \frac{28}{3\sqrt{3}}\right) \frac{e^2}{8a^3},$$

$$N_0 = \left(29 + \frac{20}{3\sqrt{3}}\right) \frac{e^2}{8a^3}, M_0 = 0, P_0 = \left(17 + \frac{16}{3\sqrt{3}}\right) \frac{e^2}{8a^3},$$

$$S_1 = 1 - \frac{2}{\sqrt{3}}, T_1 = 7 - \frac{8}{3\sqrt{3}}, U_1 = 6 + \frac{2}{\sqrt{3}}, L_1 = \left(8 - \frac{14}{3\sqrt{3}}\right) \frac{e^2}{8a^3},$$

$$N_1 = \left(13 - \frac{10}{3\sqrt{3}}\right) \frac{e^2}{8a^3}, M_1 = \left(7 - \frac{8}{3\sqrt{3}}\right) \frac{e^2}{8a^3}, P_1 = \left(7 - \frac{8}{3\sqrt{3}}\right) \frac{e^2}{8a^3},$$

$$S_2 = -1 - \frac{2}{\sqrt{3}}, T_2 = -7 - \frac{8}{3\sqrt{3}}, U_2 = 6 - \frac{2}{\sqrt{3}}, L_2 = \left(-8 - \frac{14}{3\sqrt{3}}\right) \frac{e^2}{8a^3},$$

$$N_2 = \left(-13 - \frac{10}{3\sqrt{3}}\right) \frac{e^2}{8a^3}, M_2 = \left(6 - \frac{2}{\sqrt{3}}\right) \frac{e^2}{8a^3}, P_2 = \left(-7 - \frac{8}{3\sqrt{3}}\right) \frac{e^2}{8a^3},$$

$$S_3 = -5 + \frac{4}{\sqrt{3}}, T_3 = -17 + \frac{16}{3\sqrt{3}}, U_3 = 0, L_3 = \left(-22 + \frac{28}{3\sqrt{3}}\right) \frac{e^2}{8a^3},$$

$$N_3 = \left(-29 + \frac{20}{3\sqrt{3}}\right) \frac{e^2}{8a^3}, M_3 = 0, P_3 = \left(-17 + \frac{16}{3\sqrt{3}}\right) \frac{e^2}{8a^3}.$$

Figura 24 - Ilustração, apenas a título de exemplo, dos resultados matemáticos obtidos para a estabilidade de 6 elétrons. (Fonte: Thomson, 1904)

Gostaríamos de evidenciar que Thomson demarca um passo importantíssimo para a evolução da intuição atômica. De onde surgiram as evidências da existência de anéis ou movimentos circulares com os elétrons dispostos em órbitas e que cada órbita poderia ser ocupada por um número máximo de elétrons? Nenhuma evidência experimental ou fato objetivo do mundo levava a isto, o que colocou Thomson de frente a esta imagem do átomo foi a matemática, a racionalização do pensamento, o afastamento do real. Pela primeira vez na história, o átomo estava sendo considerado como um próprio objeto de estudo, não apenas uma imagem auxiliar para o entendimento dos fenômenos. Mais do que isso, era um objeto de estudo que não estava no mundo para ser observado, ele precisou ser construído no âmbito da racionalização para ser avaliado! Veremos que esta característica perpassa grande parte da ciência contemporânea, uma vez que grande parte de seus objetos de estudo não serão mais dados pela natureza, mas sim fruto da racionalização de um pensamento sobre o real – esta, como aponta Bachelard, é uma das principais características da ciência contemporânea.

Ainda como aponta Bachelard, o racional deve se confrontar com o real, e o embate entre o átomo construído por Thomson e a realidade física estava intenso. Apesar de o problema da estabilidade estar resolvido, era impossível conciliá-la com os espectros de emissão e absorção dos elementos. A figura 25 ilustra estes espectros para o átomo de hidrogênio – nenhum aspecto teórico até o momento previa um espectro descontínuo de emissão de radiação, muito menos para elétrons em movimento, visto que de acordo com a eletrodinâmica clássica, ele deveria irradiar um espectro contínuo.

(a)

(b)

Figura 25 - Espectro de Absorção (a) e Emissão (b) do hidrogênio. (Fonte: Jemremovic, 2009)

Além do problema do espectro, Geiger e Marsden, trabalhando conjuntamente com Rutherford, apontam para outro incidente bastante curioso percebido ao analisar o espalhamento sofrido por partículas α ao penetrar alvos constituídos a partir de finas folhas de diferentes materiais. As partículas α haviam sido recentemente descobertas segundo estudos de Rutherford e Thomson. À época, o entendimento de suas propriedades era de extrema importância. Pensando nisto, Rutherford decidiu avaliar o comportamento da imagem de átomo construída por Thomson. A partir das concepções teóricas de Thomson, deduziu o que poderia ser obtido em uma interação direta entre as partículas α e a matéria, sugerindo uma série de experimentos que foram realizados sob sua supervisão em seu laboratório, sendo Geiger e Marsden os principais responsáveis por grande parte deles.

No arranjo experimental proposto pelos físicos, ilustrado na figura 26, um feixe de partículas α , proveniente de uma fonte do elemento radioativo polônio, era construído de forma que elas fossem arremessadas em direção a um alvo constituído por uma folha de um determinado material dotada de uma pequena espessura. Ao passar pelo alvo e interagir com sua estrutura atômica, as partículas α sofrem deflexões e viajam em direção a uma tela fluorescente, onde um microscópio estaria posicionado para contar a quantidade de cintilações estimulada pela incidência desta radiação.

Figura 26 - Arranjo experimental do experimento conduzido por Geiger e Marsden. (Fonte: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/rutsca.html#c1>)

O experimento tinha como intuito avaliar as previsões propostas pelo modelo de Thomson. Segundo Rutherford, esperava-se que não seria possível obter deflexões acima de $0,02^\circ$ com relação à orientação inicial do movimento, uma vez que a carga elétrica positiva do núcleo, responsável pela interação com a partícula α , não deveria provocar deflexões intensidade suficiente por estar homogeneamente distribuída pelo volume atômico. As figuras 27 e 28 demonstram aspectos essenciais das expectativas com relação ao modelo de Thomson.

Figura 27 - Expectativa para o espalhamento de partículas α sobre os átomos de uma fina folha de ouro. (Fonte: Jemremovic, 2009)

Figura 28 - Aspectos conceituais envolvidos nas expectativas do espalhamento seguindo o modelo atômico proposto por Thomson. (Fonte: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/rutsca.html#c1>)

Os resultados obtidos surpreenderam a todos. Ao contrário do que se esperava, Geiger e Marsden observaram não só espalhamentos acima de $0,02^\circ$, como constataram, inclusive, que algumas partículas α recuavam (eram espalhadas a ângulos acima de 90°) após a colisão com o alvo. Na figura 29 estão representados os dados coletados nos espalhamentos sobre as folhas de ouro e de prata. É importante notar que o espalhamento nas pequenas angulações é mais frequente. No entanto, é possível perceber partículas α recuando, chegando a espalhamentos de 150° com relação a direção inicial do movimento.

I.	II.	III.	IV.	V.	VI.
Angle of deflexion, ϕ	1 $\sin^4 \alpha / 2$	SILVER.		GOLD.	
		Number of scintillations, N	N $\sin^4 \phi / 2$	Number of scintillations, N	N $\sin^4 \phi / 2$
150	1.15	22.2	19.3	33.1	28.8
135	1.38	27.4	19.8	43.0	31.2
120	1.79	33.0	18.4	51.9	29.0
105	2.53	47.3	18.7	69.5	27.5
75	7.25	136	18.8	211	29.1
60	16.0	320	20.0	477	29.8
45	46.6	989	21.2	1435	30.8
37.5	93.7	1760	18.8	3300	35.3
30	223	5260	23.6	7800	35.0
22.5	690	20300	29.4	27300	39.6
15	3445	105400	30.6	132000	38.4

Figura 29 - Número de cintilações provocadas na tela de detecção para os experimentos conduzidos com alvos de ouro e prata. (GEIGER & MARSDEN, 1911)

Curioso com este comportamento, Rutherford publica dois artigos, um em 1913 e outro em 1914, tendo reação imediata da comunidade científica. Nestes artigos conceitua uma nova proposta de modelo atômico, apontando para uma nova característica de sua estrutura. Segundo Rutherford, o fenômeno observado contrariava todas e quaisquer concepções intuitivas sobre a interação entre dois corpúsculos com as características apontadas por Thomson. Era como se jogássemos um objeto pesado, como uma bala de canhão, sobre um fino tecido, como uma fina folha de seda, e esta folha ser capaz de refletir a bala. A única forma de explicar espalhamentos de angulações elevadas, como é o caso das partículas ejetadas para trás, era supor que a carga elétrica positiva do átomo, assim como sua massa, que antes era considerada como uma distribuição homogênea, está concentrada em um único local do espaço. Com esta suposição, Rutherford imaginava que a intensidade da força elétrica poderia ser suficiente para provocar o recuo das partículas incidentes. Denominou esta região de concentração de carga elétrica positiva como sendo o núcleo atômico. A comparação entre os espalhamentos nas concepções de Thomson e Rutherford estão mostradas na figura 29.

Figura 30 - Espalhamento das partículas α segundo modelo de Thomson (à esquerda) e Rutherford (à direita).
(Fonte: Jemremovic, 2009)

Há neste passo dado por Rutherford, um exímio diálogo entre o matemático e o experimentador, entre o teórico e experimental. Não se trata de um diálogo entre Rutherford e Thomson, apesar de haver, de fato, um diálogo entre eles na condução de seus trabalhos. Estamos reiterando a posição de dialogicidade entre o Rutherford teórico e o Rutherford experimentador, o Thomson teórico e o Thomson experimentador. A racionalização que levou Thomson ao real, o levou a constituir uma imagem de constituição da matéria que, na racionalização de Rutherford, encontrou contradições ao se confrontar com a realidade experimental. O movimento de Rutherford não vem como simples à posição de Thomson, mas sim como complementaridade, dando origem a uma

nova imagem para a constituição da matéria que seja coerente com a realização da teoria no sentido bachelardiano.

O comportamento teórico deduzido por Rutherford segue as mesmas bases teóricas daquele construído por Thomson, a partir da mecânica e eletrostática clássicas, diferenciando a imagem que toma de base para construção. As diferentes angulações de espalhamento estão associadas às diferentes centralidades na colisão, denotada como parâmetro de impacto " b " na figura 31. Quanto mais próxima a partícula α estiver do núcleo atômico, maior será a intensidade da força e maior será o espalhamento sofrido por ela.

Figura 31 - Trajetórias das partículas α devido a diferentes parâmetros de impacto na colisão com o núcleo atômico. (Fonte: Wikipedia)

Figura 32 - Comparação entre as perspectivas teóricas de Thomson (curva verde suave indo a 0 a 20°) e Rutherford (assíntota vermelha mostrando espalhamentos até 150°). (Fonte: <http://sampa.if.usp.br/~suaide/blog/?e=257>)

As relações matemáticas para os espalhamentos de Thomson e Rutherford, bem como os dados experimentais obtidos por Geiger & Marsden, são apresentados na figura 32. Nota-se que para Thomson, espalhamentos a menores ângulos são predominantes, cessando a partir de um ângulo limite, enquanto que na fórmula deduzida por Rutherford

há também predominância em menores ângulos, no entanto, há espalhamentos em todas angulações possíveis. Segundo Rutherford,

Mais considerações sobre a aplicação desta teoria a estas e outras questões estarão reservadas para um próximo artigo, onde as deduções principais da teoria já terão sido testadas experimentalmente. Experimentos nesta direção já estão em processo de realização por Geiger e Marsden. (RUTHERFORD, 1911. p. 42, tradução nossa)

Geiger & Marsden repetiram o experimento do espalhamento sucessivas vezes para comparar os dados experimentais com a curva teórica obtida por Rutherford. Controlaram todas as variáveis possíveis, aumentando e diminuindo a energia do feixe incidente, a espessura do alvo, a densidade do alvo, entre outros fatores julgados importantes no espalhamento (a figura 33 mostra os resultados).

Figura 33 - Comparação entre os pontos experimentados obtidos por Geiger e Marsden e a formulação teórica de Rutherford. (Fonte: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu>)

Ao final de seu artigo em 1914, Rutherford aponta para o fato de que as evidências da existência do núcleo são fortes demais para serem desconsideradas. É importante denotar aqui, novamente, o caráter matemático da construção do pensamento. Ainda que as evidências experimentais apontassem para a existência de um núcleo, sua imagem foi verdadeiramente formada a partir de uma racionalização de seu pensamento que, neste caso, ao contrário de Thomson, foi de encontro ao real de forma sincrônica. A imagem do núcleo atômico redirecionou o problema da teoria atômica a outro patamar, sendo que dois problemas fundamentais precisavam ser resolvidos com ela:

- I.** *Qual a condição de estabilidade dos elétrons em volta deste núcleo e como conciliar isto com o espectro descontínuo de emissão e absorção dos elementos?*
- II.** *Em que consiste o núcleo atômico?*

A estabilidade dos elétrons em torno do núcleo, apesar de ser um problema reconhecido por Rutherford, não foi explorado por ele, que buscou entender em mais detalhe a estrutura do núcleo atômico. No entanto, ao final de seu artigo de 1914, aponta para uma postura extremamente importante tomada por Bohr,

Bohr chamou a atenção para as dificuldades em construir átomos nesta teoria nuclear, e demonstrou que as posições estáveis dos elétrons em seu entorno **jamais poderiam ser deduzidas a partir da mecânica clássica.** (RUTHERFORD, 1914, p. 491, grifo e tradução nossa)

Este trecho é interessante pois ele demarca, em concordância com Bohr, a necessidade de reestruturação do pensamento. Novamente, não se trata aqui de encontrarmos métodos experimentais mais precisos para que o conhecimento atômico seja elucidado, é preciso mudar a perspectiva teórica, romper com a tradição estabelecida, para que uma nova imagem de átomo possa surgir – uma imagem coerente com tempos de revolução de pensamento. Mais adianta explicita,

Com a introdução de um conceito conectado com o *quantum* de Planck, **ele demonstrou que, a partir de certas suposições, é possível construir átomos e moléculas simples [...]** que se comportam, em vários aspectos, com os verdadeiros átomos e moléculas. (RUTHERFORD, 1914, p. 491, grifo e tradução nossa)

Assim, percebemos a necessidade de recorrência a um aspecto teórico utilizado por Planck para explicar a radiação emitida por corpos negros. Assim como Planck afirmou em sua, formulação inicial, não entender muito bem ainda as implicações físicas de seus postulados, eles devem ser considerados uma vez que tornam coerentes as representações teóricas da física com a realidade do mundo físico, Rutherford pontua que a ação de Bohr deve ser considerada na mesma dimensão.

Enquanto deverá haver dissensos sobre a validade e o significado físico das suposições feitas por Bohr, não há dúvidas de que as teorias de Bohr são de grande interesse e importância para todos os físicos como a primeira tentativa sucedida de construir átomos e moléculas simples e explicar seus espectros de emissão e absorção. (RUTHERFORD, 1914, p. 491, tradução nossa)

Niels Bohr buscou resolver o problema da estabilidade atômica por uma abordagem inicial semelhante à de Thomson, tomando como base o átomo nuclear proposto por Rutherford,

Em uma tentativa de explicar algumas propriedades da matéria baseando-se neste modelo atômico, todavia, com sérias dificuldades

nascendo da aparente instabilidade do sistema de elétrons. (BOHR, 1914, p.1, tradução nossa)

O problema apontado por Bohr se refere a um resultado fundamental da eletrodinâmica clássica, no qual elétrons em movimento irradiam um espectro de emissão contínuo – estando os elétrons em torno do núcleo eles deveriam irradiar continuamente até dissipar toda sua energia e ser capturado pelo núcleo atômico. Aparentemente, isto não pode acontecer, uma vez que os espectros de emissão de elementos químicos apresentam uma característica discreta, emitindo somente algumas frequências de radiação eletromagnética. Para resolver este problema, Bohr recorre à solução apresentada por Planck na década anterior

O ponto essencial da teoria da radiação de Planck é que a energia radioativa de um sistema atômico não ocorre de forma contínua como assumida na eletrodinâmica clássica, mas, ao contrário, ocorre emissões distintas e separadas. A quantidade de energia irradiada por um sistema atômico vibrando com frequência ν em uma emissão singular é igual a $nh\nu$, onde n é um número inteiro e h a constante universal. (BOHR, 1913, p.4, tradução nossa)

Na resolução matemática do problema, Bohr inicia com uma abordagem clássica, explicitando que o movimento do elétron é regido pela ação da força central coulombiana e tem sua energia composta pelo hamiltoniano clássico. No entanto, no momento da solução em que a energia cinética naturalmente tenderia a zero, devido às suposições teóricas da eletrodinâmica clássica, Bohr afirma que a alteração da energia cinética do sistema seguiria a seguinte equação:

$$W = \tau h \frac{\omega}{2} \quad (2)$$

Sendo τ um número inteiro, ela se daria de forma descontínua e apenas em múltiplos de $h \frac{\omega}{2}$, onde ω representa a velocidade. Sendo a velocidade de rotação profundamente dependente do raio orbital, Bohr chega a uma imagem de átomo que possui um conjunto de órbitas permitidas. Cada τ representaria uma órbita em torno do núcleo e os elétrons se movimentariam em apenas uma delas, podendo transitar entre as demais. Como a energia de cada órbita também depende da energia cinética, ela se daria apenas em múltiplos de τ , assim, a transição entre estes níveis de energia necessitaria emissão ou absorção de energia, que é feito de forma estimulada pela incidência ou emissão de radiação eletromagnética. Uma imagem ilustrando o átomo proposta por Bohr é apresentada na figura 34.

Figura 34 - Representação ilustrativa do modelo de átomo construído por Bohr. (Fonte: Jemremovic, 2009)

Para $\tau = 1$, denominado estado fundamental dos elétrons no átomo, Bohr obtém, a partir dos parâmetros experimentais já disponíveis à época para a constante de Planck e a carga elétrica e massa dos elétrons, os seguintes resultados:

$$2a = 1,1 \cdot 10^{-8} \text{ cm}, \quad \omega = 6,2 \cdot 10^{15} \frac{1}{\text{sec}}, \quad \frac{W}{e} = 13 \text{ volt} \quad (3)$$

Percebemos que estes valores são de ordem de grandeza as dimensões lineares do átomo, das frequências ópticas emitidas e os potenciais de ionização. (BOHR, 1913, p.5, tradução nossa)

Novamente a dialogicidade entre o teórico e o experimentador vem à tona. Uma perspectiva teórica voltada para uma racionalização do real, possibilitou a construção de uma imagem sobre a constituição de átomo que se encontrava em contradição com a realidade experimental. Esta imagem, ainda bastante útil para entendimento da estrutura de átomos simples, como o átomo de hidrogênio, não estava disponível para ser visualizada no interior de algum aparato experimental – teve de ser construída no âmbito da racionalidade aplicada à apreensão da realidade. O problema da estabilidade estava resolvido trazendo à tona um conceito que se afasta completamente dos princípios norteadores da física clássica. Na finalização de seu artigo de 1913, Bohr afirma que,

Em qualquer sistema molecular que consiste de um núcleo positivo e elétrons no qual o núcleo está em repouso relativo a eles e os elétrons se movem em órbitas circulares, o momento angular de cada elétron sobre o centro de sua órbita estará em estado permanente de estabilidade com valor igual a $h/2\pi$, onde h é a constante de Planck. (BOHR, 1913, p.23, tradução nossa)

A imagem de Bohr, no entanto, ainda representa um passo incerto, uma vez que constrói uma visão clássica de átomo, com movimentos orbitais contínuos em torno de objetos com massa, dotado de propriedades quânticas, no qual nem todas as órbitas são permitidas, somente aquelas que seguem o princípio de quantização de emissão de energia proposto por Planck. Um afastamento das visões clássicas se tornava cada vez mais necessário. É neste contexto de incerteza, que aparece a proposição da natureza dual para o elétron, proposto por de Broglie. Partindo de uma analogia com o quantum de luz, de Broglie demonstra que é possível, matematicamente a partir dos trabalhos de Bohr, obter equação semelhante, mas para o movimento do elétron, supondo talvez que ele também tenha natureza ondulatória. G.P. Thomson, filho de J.J. Thomson, realiza então um experimento para demonstrar as características ondulatórias do elétron,

M.L Broglie introduziu uma nova teoria mecânica na qual partículas em movimento se comportam como um conjunto de ondas onde sua velocidade e comprimento de onda são governados pela velocidade e massa da partícula. (THOMSON, G.P., 1927, p. 600, tradução nossa)

A proposta de G.P. Thomson era demonstrar a natureza ondulatória do elétron realizando experimentos de difração e interferência, evidenciando que seria possível que os elétrons realizassem estes dois fenômenos. Utilizando um aparato semelhante ao de seu pai, G.P. Thomson incide um feixe de raios catódicos sobre alvos cuja distância atômica fosse menor que o tamanho estipulado do elétron para que a difração pudesse acontecer. Testando em alvos compostos por diversos materiais, consegue obter a difração de forma intensa em alvos de ouro e perceptível em alvos de celulose, como mostra a figura 34.

FIG. 4.—Gold.

FIG. 5.—Celluloid.

Figura 35 - Difração de elétrons observada ao colidi-lo com alvos de ouro e celulose. (THOMSON, G.P., 1927)

Percebe-se na imagem um comportamento semelhante àquele que Young utilizou para demonstrar o caráter ondulatório da luz – padrões de interferência provocado pela difração sobre fendas. Este, como aponta Compton, é um importante marco para a revolução de pensamento do século XX, que vem do pai com a tradição do século XIX, que descobriu o elétron considerando-o como uma partícula, passando para o filho com a exigência de uma nova tradição do pensamento demonstrando o caráter ondulatório do mesmo.

É verdadeiramente dramático ver o grande homem de ciência, que passou os melhores anos de sua vida argumentando que o elétron é uma partícula, cheio de entusiasmo pelo trabalho de seu filho, que revelava que os elétrons em movimento são, na realidade, ondas. (COMPTON apud BACHELARD, p. 173)

Sobre este episódio, Bachelard comenta que,

A distância traçada do pai ao filho é uma medida da revolução filosófica exigida pelo abandono da noção do elétron como uma coisa [...] Físicos vem sendo obrigado não simplesmente a mudar suas mentes, mas, intelectualmente falando, recomeçar sua vida científica. (BACHELARD, 2000, p.173)

A revolução filosófica citada por Bachelard, tem um de seus episódios marcados pela natureza ondulatória do elétron, junto a todo o debate sobre o caráter dual da matéria e da radiação no universo quântico. Obviamente a imagem clássica de Bohr de um átomo corpuscular regido pela mecânica newtoniana com adendos do princípio de quantização da radiação não seria mais adequada. Como conciliar a imagem elétrons se movendo como ondas em órbitas circulares no interior de um átomo? Era claro que uma mudança brusca de perspectiva teórica se fazia necessária, e é neste momento que surgem as bases matemáticas da mecânica quântica iniciadas por Erwin Schroedinger, inaugurando aquilo que o autor denomina, em seu artigo de 1926, como mecânica ondulatória.

Neste artigo gostaria de considerar, primeiro, o simples caso do átomo de hidrogênio (não relativístico e não perturbado), e mostrar que as usuais condições quânticas podem ser substituídas por outro postulado, no qual a noção de “áreas não permitidas”, não precisam ser introduzidas. Ao contrário [...] ela surge da mesma forma natural como é o caso do número de nós em uma corda vibrante. Esta nova concepção é capaz de produzir generalizações e atinge diretamente, acredito eu, profundamente na verdadeira natureza das regras quânticas. (SCHROEDINGER, 1926, p. 300, tradução nossa)

Schroedinger apresenta uma proposta epistemológica similar às leis de Newton para o movimento: um conjunto de equações por meio das quais é possível deduzir a dinâmica de movimento do mundo quântico. No entanto, ao contrário da concepção newtoniana, que é baseada na física dos pontos materiais de cunho determinista, a mecânica de Schroedinger é baseada numa dinâmica ondulatória rodeada por probabilidades de cunho indeterminista por natureza – baseada no estudo das funções de onda dos objetos quânticos. A equação de Schroedinger não relativística baseia-se no hamiltoniano da física clássica, composto pela energia cinética e potencial do sistema:

$$E = K + V = \frac{p^2}{2m} + V(x) \quad (4)$$

A novidade é que se aplicam aos termos da equação, a função de onda que descreve a entidade quântica, por exemplo, o elétron. No entanto, propriedades como momento e energia são encarados como operadores matemáticos que agem sobre a função de onda $\psi(x)$ com o intuito de dar forma a ela:

$$\frac{\hat{p}^2}{2m} \psi(x) + V(x)\psi(x) = \hat{E}\psi(x) \quad (5)$$

A cada uma das grandezas, momento linear e energia, Schroedinger apresenta operadores matemáticos de correlação para sua concepção teórica, sendo eles:

$$\hat{E} = i\hbar \frac{\partial}{\partial t}; \quad \hat{p} = -i\hbar \frac{\partial}{\partial x} \quad (6)$$

Deduzindo uma versão para a equação que fica da seguinte forma:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + V(x)\psi(x) = i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (7)$$

Como apontado no trecho citado acima, Schroedinger utiliza sua equação para deduzir a função de onda do elétron no átomo de hidrogênio e chega aos mesmos resultados obtidos por Bohr para o estado fundamental e os estados excitados.

O formalismo estava cada vez mais se afinando, no entanto, as representações imagéticas se tornaram cada vez mais complexas. Se realizarmos uma recapitulação, saímos de Dalton, Boyle e Newton com um átomo representado por uma esfera rígida. Dalton o dota de algumas propriedades complexas, como a carga elétrica, e constrói uma representação no qual a esfera rígida está eletrizada positivamente e é composta por pequenos corpúsculos com carga elétrica negativa. Rutherford propõe o modelo nuclear

e Bohr delimita uma concepção orbital planetária clássica, com traços quânticos, no qual elétrons se movimentam em órbitas permitidas ao redor do núcleo. De Broglie, por sua vez, traz uma imagem de átomo no qual elétrons em movimento não se comportam como partículas, mas sim, como ondas, enquanto que Schroedinger, influenciado pela concepção ondulatória, demonstra que, na realidade, os elétrons se encontram ao redor do átomo em diversos locais com diferentes probabilidades de serem reconhecidos. A figura 36 ilustra as diferentes imagens citadas, demonstrando como a concepção de átomo passou de uma estrutura mecânica rígida com movimentos bem determinados para uma estrutura complexa, dotada de entidades quânticas e sujeitos a indeterminações próprias do mundo quântico.

Os movimentos epistemológicos discutidos na narrativa construída nesta seção, nos permitem evidenciar a intuição atômica rumando para uma concepção teórica que navega em direção à complexidade. Percebemos cada vez mais aspectos internos de sua estrutura que ainda não foram completamente explicados, como a natureza de seus constituintes (corpuscular ou ondulatório), a composição de seu núcleo e sua estabilidade. Veremos que deste momento em diante, ficará latente aquilo que se denomina como física das partículas elementares e se constituirá uma relação muito intensa entre as concepções teóricas e as evidências experimentais, tomando como um traço muito característico aquilo que apontamos aqui: a construção dos objetos de estudo como uma racionalização matemática da realidade física.

Corpúsculos de Boyle,
Newton e Dalton

Esfera homogeneamente
eletrizada de Dalton

O núcleo atômico de
Rutherford

As órbitas
quantizadas de Bohr

A órbita ondulatória de
De Broglie

A nuvem de probabilidade
de Schrodinger

Figura 36 - A natureza atômica da matéria rumo à complexidade da física contemporânea.

4.4 A descoberta do pósitron e o complexo mundo das partículas elementares

A formulação da mecânica ondulatória foi o estopim para um conjunto de reflexões sobre as bases teóricas da mecânica quântica. Nos anos que se seguiram, muito se discutiu sobre as grandezas e as implicações da teoria, as diferentes formas de expressar seu formalismo e, principalmente, o significado das entidades que eram deduzidas e/ou observadas à medida que sua estrutura se consolidava. Podemos dizer que, de certo modo, a teoria quântica abriu as possibilidades para um mundo inimaginável e colocou a teoria atômica frente a uma complexidade jamais vista antes. Enquanto em outros tempos as concepções atômicas eram consideradas periféricas às suposições teóricas e experimentais, no universo quântico o átomo ganha *status* próprio.

Quando Schroedinger formulou as bases da mecânica quântica e construiu sua teoria não relativística, buscou não adentrar aos problemas que a recente teoria da relatividade especial traria para a compreensão do mundo quântico. Paul M. Dirac, no entanto, não se esquivou destas problemáticas. Considerado o “Isaac Newton do século XX”, Dirac buscou investigar as bases matemáticas fundantes da física contemporânea. Em seu trabalho publicado no início de 1931, pontua que é natural de se esperar que um desenvolvimento teórico da física seja seguido por uma matemática cada vez mais avançada. No entanto, acredita que este período da física se mostra distinto de qualquer outro em sua história, uma vez que,

O que, de todo modo, não era esperado pelos cientistas do último século, foi a forma particular de avanço que a matemática teria [...] era esperado que a matemática se tornasse cada vez mais complicada, mas estruturada em uma base permanente de definições e axiomas, enquanto que, na realidade, os desenvolvimentos da física moderna exigiram uma matemática que alterasse continuamente seus fundamentos e se tornasse cada vez mais abstrata. (DIRAC, 1931, p.60, tradução nossa)

Para Dirac, a apreensão do mundo quântico exige uma reconceituação profunda não só nas bases físicas de nossas teorias, mas também nos fundamentos matemáticos que as sustentam. Enquanto que a denominada física clássica é estruturada e baseada inteiramente na geometria euclidiana e na álgebra comutativa, a física contemporânea

estrutura seu pensamento pautado em princípios da geometria não euclidiana e da álgebra não comutativa, como se fosse construída em negação a suas bases anteriores.

A geometria não-euclidiana e a álgebra não-comutativa, que eram certo tempo atrás consideradas como puramente ficções da mente e passatempo para pensadores da lógica, se encontram agora como fundamentalmente necessárias para a descrição de fatos gerais do mundo físico. (DIRAC, 1931, p.60, grifo e tradução nossa)

Há uma questão curiosa a ser apontada antes que de adentrar as reflexões sobre o formalismo de Dirac. Há uma dupla anotação interessante aqui. A primeira delas se deve ao fato de que as grandes teóricas da física contemporânea, como a teoria quântica e a teoria da relatividade, tem bases firmemente sustentadas por elas. Neste sentido, podemos ver a racionalização do real agindo sobre o cerne da ciência do século XX, uma vez que, como Dirac aponta, são fundamentalmente necessárias para a descrição dos fatos gerais do mundo físico – as novas faces da realidade estão sendo reveladas pela matemática. A segunda anotação é um adendo reflexivo sobre este processo de construção histórico do pensamento matemático: as bases das geometrias não-euclidianas foram fundadas no século anterior sem que houvesse qualquer conexão com a realidade física, como aponta Dirac em sua situação. Como apontamos acima, elas são elementos fundantes da física do século XX. Neste momento podemos nos questionar se há alguma correlação ontológica entre o modo como construímos os formalismos matemáticos e as formas como concebemos a realidade física? O Eletromagnetismo se mostrou um exímio exemplo no qual esta relação se mostra fecunda para as geometrias euclidianas e a física do século XX para as não-euclidianas, a princípio, todas as bases matemáticas que temos em nosso formalismo tem correspondência com a realidade, seria este um princípio geral? Que talvez a matemática, como dizia Galileu, seja, de fato, o dicionário com o qual o mundo deve ser lido? Essa perspectiva filosófica se colocava como centro da epistemologia de Dirac. Sua proposta era construir um formalismo quântico relativístico tomando como base as geometrias não-euclidianas e as álgebras não comutativas como formalismo matemático e as recentes teorias quânticas para a descrição do elétron como formalismo físico.

A teoria quântica não relativística possibilitou um entendimento da dinâmica dos elétrons nos átomos de uma forma que nenhuma teoria antes pode conceber. Dirac imaginava que, um formalismo relativístico poderia revelar aspectos sobre o elétron que

não teriam sido observados até o momento. A tarefa, no entanto, não era nada simples. O formalismo de Schroedinger toma como base a energia total de uma partícula clássica e não relativística: a energia cinética e seu potencial de interação. A abordagem relativística torna o problema mais complicado, pois a energia relativística é composta por termos matemáticos de segundo grau

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4 \quad (8)$$

Dirac reescreve a equação em termos dos operadores e a aplica na função de onda que representa o elétron, ficando como

$$\left(\frac{\hat{E}^2}{c} - \hat{p}^2 c - m^2 c^2 \right) \psi = 0 \quad (9)$$

Neste momento, utiliza um argumento teórico, afirmando que para que a função ψ represente de fato uma onda, esta equação, assim como a equação não relativística, deve expressa de forma linear, sem a dependência com os termos de segundo grau, reescrevendo-a como

$$\left(\frac{\hat{E}}{c} - \hat{\alpha} \hat{p} - \alpha_0 m c \right) \psi = 0 \quad (10)$$

Segundo Dirac, α são operadores de 4 dimensões que agem sobre o momento, a energia de repouso da partícula e, em consequência, na função de onda que representa o elétron. É importante notar que a introdução de α tem justificativa puramente matemática para tornar a equação relativística linear, no entanto, o que se extrairá dele tem um significado físico que vinha esperando por uma resposta teórica há anos. Ao resolver o problema matemático, ele nota que os operadores α tem estrutura semelhante a operadores que Pauli utilizou em 1925 para enunciar o princípio de exclusão e explicar de que forma, no estado fundamental, era possível encontrar apenas dois elétrons.

Na base destes resultados, um deles leva a uma classificação geral de elétrons no átomo a partir de um número quântico principal “n” e dois números quânticos auxiliares “k1” e “k1’”, por meio do qual é adicionado outro número quântico “m1” na presença de um campo magnético externo. (PAULI, 1925, p.184, tradução nossa)

Estes dois números ao qual Pauli se refere foram inseridos sem qualquer referência teórica para explicar as duas possíveis orientações espaciais que os elétrons adquirem quando submetidos a campos magnéticos. A questão é que quando Dirac aplica estes

operadores α à equação relativística que deduziu inicialmente, obtém para o elétron, ao invés de uma, duas soluções que representam sua dinâmica de movimento. Segundo Dirac,

Estas novas variáveis α , que tivemos que introduzir para conseguir uma onda relativística linear, nos leva ao spin do elétron. A partir dos princípios gerais da mecânica quântica, podemos facilmente ver que essas variáveis α dotam o elétron de um spin de momento angular correspondente a metade de um *quantum* e um momento magnético de Bohr na direção reversa de seu momento angular. Estes resultados estão em completo acordo com os experimentos. Eles foram, de fato, primeiramente obtidos a partir de evidências experimentais fornecidas por espectroscopia e agora confirmadas pela teoria. (DIRAC, 1933, p.322, tradução nossa)

Novamente, uma nova face da concepção atômica é posta em jogo: o spin. Podemos interpretá-lo como uma espécie de dipolo magnético (ímã), que faz com que tenha determinadas orientações sobre a ação de campos magnéticos – segundo Dirac e as evidências experimentais da época, haveriam dois estados possíveis de spin responsáveis pelas duas orientações usualmente percebidas em experimentos envolvendo campos magnéticos, como é o caso do experimento de Stern-Gerlach.

Figura 37 - Representação do experimento de Stern-Gerlach. Classicamente esperava-se uma distribuição homogênea de átomos após passar por um gradiente de campo magnético, no entanto, percebem-se apenas duas regiões de detecção, apontando para o fato de haver alguma propriedade intrínseca do mundo atômico que se manifesta sobre a presença de campos magnéticos. (Fonte: NTT Technical Review)

Após construir teoricamente o conceito de spin, Dirac volta sua atenção para outro fato curioso, este mais simples do ponto de vista matemático, no entanto, bastante complexo do ponto de vista físico e filosófico. A equação relativística $E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$, por admitir um termo de segundo grau na energia, tem, matematicamente, duas soluções, sendo elas:

$$E = \pm \sqrt{p^2c^2 + m^2c^4}$$

Considerando partículas em repouso, isto é, cuja quantidade de movimento é $p = 0$, a equação se reduz simplesmente a:

$$E = \pm mc^2$$

Como energias negativas nunca foram dotadas de sentido na física clássica, este fato passou despercebido por muitos teóricos que buscavam a construção de uma teoria quântica relativística. Estes fatos, no entanto, não ficaram de lado para Dirac, que buscou a resolução da equação quando $E = -mc^2$ e encontrou, novamente, duas soluções simétricas à solução positiva. Nas primeiras abordagens, acreditou se tratar dos prótons, mas nenhuma evidência até então apontava para reações entre elétrons e prótons com a energia prevista por sua equação. Foi então que, em 1932, Carl D. Anderson publicou um estudo que surpreendeu toda a comunidade científica.

Anderson estava muito atento aos trabalhos desenvolvidos por Skobelzyn utilizando as câmaras de nuvem desenvolvidas por C.T.R Wilson para observar os traços deixados por partículas carregadas proveniente de raios cósmicos. Após a constatação da existência dos raios cósmicos por Hess, conforme discutimos ao final da seção 4.2, muitos trabalhos se voltaram para a identificação e caracterização desta radiação. O aparato desenvolvido por Wilson consistia em uma câmara contendo um gás supersaturado. Quando partículas eletrizadas passam e, ionizam o gás, esta perturbação faz com que o gás entre em processo de condensação – formando gotas. Desta forma, por todo local onde as partículas eletrizadas passem, são deixados traços de sua ionização que poderiam ser vistos por gotículas formadas no interior das câmaras.

Utilizando este princípio, Anderson e diversos outros grupos começaram a fazer intensos estudos sobre as características dos raios cósmicos. Para realizar estes estudos, utilizavam campos magnéticos intensos, da ordem de milhares de Gauss, para curvar a trajetória das partículas e, a partir do raio de curvatura observado, estimar sua massa e velocidade. Os primeiros estudos apontavam para energias incidentes da ordem de 15 milhões de elétron-volts (MeV), sendo que as maiores medidas indicavam 5 bilhões de elétron-volt (GeV). Além de verificar ionizações pontuais provocadas pela incidência de radiação eletromagnética, grande parte das trajetórias identificadas se tratavam de partículas eletrizadas com uma unidade de carga positiva (+e) e negativa (-e). Segundo Anderson,

Medidas da ionização específica de ambas as partículas positivas e negativas, realizadas a partir da contagem do número de gotas por unidade de comprimento no decorrer da trajetória, mostraram que a grande maioria de ambas as partículas positivas e negativas possuíam uma unidade de carga elétrica. As partículas de carga negativa foram prontamente interpretadas como elétrons, enquanto que aquelas dotadas de carga positiva foram, num primeiro momento, identificadas como prótons, a única partícula conhecida contendo uma unidade de carga positiva. (Anderson, 1936, p.365, tradução nossa)

Neste momento da história, não havia nenhuma evidência experimental da existência de outras partículas além de elétrons e prótons, por este motivo, grande parte dos estudos apontavam para uma composição de raios cósmicos baseada exclusivamente em radiação eletromagnética de altas energias (raios gama), prótons e elétrons. No entanto, como o próton é cerca de 2.000 vezes mais pesado que o elétron, esperava-se que ele provocasse um traço de ionização maior do que o dos elétrons e, além disso, sofresse uma deflexão muito menor sobre a ação de campos magnéticos. Como as energias incidentes eram muito grandes, ficaria difícil curvar as partículas e diferenciá-las, por este motivo, Anderson resolveu adotar um novo método de identificação.

Para diferenciar com certa margem de confiança, partículas de carga positivas e negativas, era necessário somente determinar, sem ambiguidade, sua direção de movimento [sob ação do campo magnético]. Para alcançar este objetivo, uma placa de chumbo foi inserida cruzando o diâmetro horizontal da câmara. A direção do movimento das partículas poderia, então, ser facilmente verificada, devido à baixa energia e, por consequência, o menor raio de curvatura das partículas no campo magnético depois de terem atravessado a placa de chumbo e terem sofrido uma perda de energia. (Anderson, 1936, p.366, tradução nossa)

A ideia era frear as partículas, a partir de sua interação com os átomos de chumbo, para que a visualização da curvatura provocada por ela no interior da câmara se tornasse mais visível. O que acontece é que os resultados se mostraram coerentes apenas com partículas de carga positiva e massa correspondente àquela verificada no movimento dos elétrons. A figura 38 ilustra uma imagem comumente divulgada na qual Anderson analisa a entrada de uma partícula positivamente carregada que, ao interagir com a placa de 6 mm de espessura, sofre uma redução de energia percebida pela alteração no raio de curvatura de seu movimento.

Figura 38 - Trajetória do pósitron analisada por Anderson em uma câmara de nuvem. A diminuição no raio de curvatura da trajetória é possibilidade pela interação da partícula com a placa de chumbo. (Fonte: Anderson, 1936)

Sobre este comportamento, Anderson afirma,

Se a massa de um elétron for atribuída a esta partícula, sua energia antes de atravessar a placa seria de 63 MeV e depois de atravessar seria de 23 MeV. A possibilidade de que esta partícula positivamente carregada represente um próton está fora de cogitação com base no alcance e na curvatura. Um próton com a curvatura mostrada depois de sair da placa deveria ter uma energia de 200 keV, e, de acordo com dados experimentais previamente realizados e bem estabelecidos, teria um alcance de apenas 5 mm enquanto que o observado na imagem é maior do que 50 mm. (ANDERSON, 1936, p. 366, tradução nossa)

Anderson aponta para as observações já feitas sobre absorção de radiação sobre a matéria. Rutherford já pontuava que a radiação β , composta por elétrons, tem alto poder de penetração sendo pouco freada. Uma placa de 6 mm de espessura jamais possibilitaria um alcance da ordem de 50 mm para uma partícula com a massa do próton, de forma que é inevitável afirmar que a partícula em questão se trata de um elétron dotado de carga positiva.

A única conclusão possível era de que esta trajetória, de fato, era a trajetória de um elétron carregado positivamente. (ANDERSON, 1936, p. 366, tradução nossa)

Este elétron positivamente carregado foi denominado por Anderson como “pósitron”. Paralelamente aos trabalhos de Anderson, Blackett e Occhialini observaram a produção de pósitrons não somente em raios cósmicos, mas também em decaimentos radioativos de certas substâncias como é o caso, por exemplo, do Berílio. Outro fenômeno curioso observado pelos três cientistas, é a capacidade de produção de um par elétron-pósitron a

partir da incidência de radiação gama. Como a massa individual de cada uma das partículas é da ordem de $500 \text{ keV}/c^2$, seria preciso uma radiação gama da ordem de 1 MeV para que o efeito pudesse ser produzido. A figura 39 ilustra a produção de dois pares devido a incidência de dois fótons, um de baixa energia, mostrado na extremidade superior da imagem, e outro de alta energia, mostrado na região mediana. Esta produção se dá, principalmente, devido a consequências da equivalência massa-energia proposta por Albert Einstein na teoria da relatividade especial.

Figura 39 - Produção de pares elétron-pósitron. (Fonte: <https://www.nuclear-power.net>)

Após a descoberta do pósitron, os olhares se voltaram para os raios cósmicos e para a possibilidade de existência de uma diversidade de partículas. Em sua *Nobel Lecture*, Dirac faz uma ponderação sobre esta perspectiva.

Do ponto de vista filosófico geral, à primeira vista, seria interessante ter o menor número de tipos de partículas elementares possível, digamos apenas um tipo, ou no máximo dois, e ter toda a matéria acumulada desses tipos elementares. Porém, de acordo com os resultados experimentais, parece que deve haver mais do que isso. De fato, o número de tipos de partículas elementares se mostrou alarmante e com uma tendência a aumentar durante os anos que se seguem. (DIRAC, 1933, p. 322, tradução nossa)

Dirac coloca em pauta perspectivas filosóficas que envolvem visões de mundo, mas não de qualquer mundo – do mundo elementar. Historicamente a concepção atômica aparece como uma concepção simples que busca entender a complexidade do mundo macroscópico como a consequência de uma uniformidade, harmonia e simplicidade de

propriedades microscópicas. Vemos estas marcas na filosofia antiga, reduzindo a ocorrência dos mais diversos fenômenos à elementos da natureza, ou até mesmo à constituição por pequenas partículas indivisíveis que guardam, em menor escala, as mesmas propriedades daquelas na maior escala. Na modernidade, com Boyle, Newton e Dalton, vemos a constituição da matéria vista sobre a perspectiva de esfera rígidas interagindo mecanicamente. É natural que esperemos, devido à recorrência histórica, o argumento de um universo microscópico o mais simples possível, assim como Dirac coloca na citação. No entanto, apropriando-se à dinamicidade do pensamento característico da física contemporânea, Dirac aponta para a existência de um complexo universo elementar composto por partículas de diversas naturezas. Apesar da natureza complexa nos constituintes, sua diversidade talvez possa ser explicada por um grande princípio teórico unificador: os princípios de simetria. Ao comentar a possível²⁵ existência de prótons carregados negativamente, Dirac afirma que,

[...] é provável que prótons negativos existam, uma vez que, na teoria que está definida, existe uma simetria completa e perfeita entre cargas elétricas positivas e negativas, e se esta simetria é realmente fundamental na natureza, deve ser possível reverter a carga de qualquer tipo de partícula. (DIRAC, 1933, p.324, tradução nossa)

Percebendo a dinamicidade de pensamento da física contemporânea, Dirac consegue estabelecer novas bases teóricas que levaram a racionalização do elétron a outro patamar, enxergando uma simetria que, nos anos seguintes, Anderson traz à tona em experimentos envolvendo câmaras de nuvem: o pósitron. Em 1933, momento em que a fala da citação acima é proferida, são reconhecidos no mundo elementar apenas prótons, elétrons e pósitrons. No entanto, Dirac aponta, quase que de forma profética, para a existência de um desconhecido universo de partículas. Nos 20 anos que se seguiam a profecia de Dirac se tornaria realidade e um imenso mundo de partículas elementares se revelaria. Há uma correlação entre a percepção de Dirac e a realidade da física de partículas na década de 50 do século XX ou foi apenas um “palpite” bem-sucedido? Enxergamos que a década de 50 é um processo de “realização”, no sentido bachelardiano, da racionalização proposta por Dirac ao final da década de 30. Devido ao poder da racionalização e dos princípios

²⁵ No contexto é importante ressaltar que havia se descoberto apenas o pósitron, o par simétrico do elétron. Quando Dirac faz esta fala está comentando a possibilidade de, futuramente, presenciarmos prótons simetricamente negativos.

teóricos da física do século XX, as teorias da física contemporânea não são simplesmente bases para a experimentação do mundo, elas é quem ditam a realidade do mundo e com ela se constroem novos objetos de estudo.

4.5 A descoberta do nêutron e a simetria no núcleo atômico

Após a evidência de existência do núcleo atômico na segunda década do século XX as reflexões seguiram dois caminhos delimitados pela linha que separa a parte interna e externa do núcleo. Uma parte das investigações buscaram entender como os elétrons se comportavam externamente ao núcleo e isto levou aos desenvolvimentos levantados no final da seção 4.3, como a formulação do modelo orbital e a mecânica ondulatória para o átomo de hidrogênio. Outra parte natural de investigação é buscar compreender as características e a constituição do núcleo atômico.

Mesmo após a confirmação de existência do núcleo atômico, Geiger e Marsden continuaram realizando experimentos buscando avaliar o papel desempenhado por cada uma das grandezas pontuadas por Rutherford em sua teoria de espalhamento. Nas investigações sobre a dependência do espalhamento com a energia dos feixes incidentes, obtiveram um comportamento curioso que apontou para um novo problema de investigação. A figura 40 ilustra o comportamento experimental obtido para uma análise de feixes de partículas α espalhados a 60° em função de sua energia incidente.

Figura 40 - Espalhamento de partículas α sobre um ângulo de 60° em função da energia incidente das partículas α . Detalhe para a região intermediária 27,5V onde o comportamento dos dados experimentais segue uma tendência diferente da esperada teoricamente por Rutherford. (Fonte: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Nuclear/rutsca3.html#c4>)

Antes de avaliar este resultado, é importante retomar alguns aspectos importantes da teoria de espalhamento formulada por Rutherford. Na formulação original, o núcleo atômico de Rutherford não é dotado de estrutura, é considerado como um ponto material de carga elétrica $+Ze$ e de massa equivalente ao dobro de sua carga eletrônica. Não há menção sobre a dimensão do núcleo ou sobre sua estrutura interna. O que Geiger e Marsden apontam nos resultados apresentados na figura 40 é que, após uma certa quantidade de energia, as partículas α deixam de seguir o comportamento teórico elaborado por Rutherford, o que pode implicar que atingiram uma região onde a interação coulombiana não se restringe simplesmente a um ponto de carga $+Ze$ – o resultado indica que após uma certa quantidade de energia, as partículas α entram em uma região própria do núcleo atômico, demonstrando que a carga elétrica ali tem uma distribuição mais complexa do que uma homogênea – isto é, que o núcleo atômico tem uma estrutura.

Apesar de o resultado ser surpreendente, Rutherford já considerava isto como hipótese antes mesmo dele ser apresentado. No final de seu artigo de 1914, avalia os decaimentos sofridos por uma amostra de Urânio, avaliando as mudanças verificadas em sua massa atômica e na carga elétrica do núcleo. Seus resultados estão mostrados na tabela contida na figura 41.

Successive Elements	Ur ₁ →	Ur X ₁ →	Ur X ₂ →	U r ₂ →	Io →	Ra
Atomic weights	238.5	234.5	234.5	234.5	230.5	226.5
Charge on nucleus	100	98	99	100	98	96

Figura 41 - Decaimentos radioativos sofridos pelo Urânio.

É interessante notar que há estágios em que os produtos do decaimento possuem a mesma massa atômica, mas carga elétrica diferente, como é o caso dos elementos UrX₁, UrX₂, Ur₂. Em outros possuem a mesma carga elétrica, mas massas atômicas diferentes, como é o caso dos elementos Ur₁ e Ur₂ ou os elementos UrX₁ e Io. Considerando que os resultados apresentados por Rutherford representam uma cronologia do núcleo atômico nos sucessivos decaimentos, é natural se perguntar como o núcleo poderia sofrer alterações de carga e massa se não tivesse uma estrutura complexa. Se tomamos como parâmetro a teoria das radiações emitidas pelos elementos, a interpretação se torna mais clara. A radiação α consiste na emissão de um núcleo de hélio, carga $+2$ e massa 4, enquanto que a radiação β consiste na emissão de elétrons, carga -1 e massa desprezível. As alterações onde há mudança significativa de massa e carga elétrica podem ser

classificadas como decaimento α , enquanto que as que sofrem mudança em uma unidade de carga elétrica são classificadas como decaimento β . Como poderia o núcleo atômico emitir núcleos de hélio se não fosse dotado de uma estrutura mais complexa? As mudanças nos elementos radioativos davam um indício extremamente importante de que o núcleo possui uma estrutura mais complexa do que se imaginava. Mas que estrutura é esta?

Como já era notado na época, “verificou-se que a carga elétrica no núcleo é aproximadamente igual a $e \cdot \frac{A}{2}$ [metade da massa atômica].” (Rutherford, 1914, p.497). Rutherford propõe então, em 1920, a existência de uma partícula eletricamente carregada com carga positiva responsável por uma unidade de massa atômica nuclear, que seria futuramente conhecida como **próton**. Baseando-se no comportamento dos decaimentos radioativos, Rutherford acredita que para que ele possa acontecer, é preciso que haja prótons e elétrons no interior do núcleo, para que os decaimentos α e β sejam possíveis. Ele começa a fazer combinações nucleares com a existência de cargas positivas e negativas, sendo algumas mostradas na figura 42.

Figura 42 - Proposição de constituição dos núcleos atômicos segundo Rutherford. (Fonte: Rutherford, 1914)

A proposta de elétrons no núcleo, no entanto, encontrava vários problemas. Um deles, apresentado por Heisenberg no qual, utilizando o princípio da incerteza, demonstrou que

elétrons no interior do núcleo deveriam ter energias por volta de 100 MeV. Como esta energia é muito maior do que sua energia de repouso, 0,5 MeV, os efeitos radiativos deveriam ser profundamente intensos e manter uma órbita estável no interior do núcleo seria um problema.

Um passo importante foi dado por Chadwick em 1921, quando realizou estudo de espalhamento de partículas α sobre núcleos de Hidrogênio. Sua motivação inicial é baseada em observações realizadas por Rutherford em anos anteriores

Seus resultados indicam que o campo de força entre as partículas α e núcleos de hidrogênio sofrem rápidas mudanças em magnitude, e provavelmente também em direção, quando os núcleos se aproximam cerca de $3,5 \times 10^{-13}$ cm um do outro. (CHADWICK, 1921, p.923, tradução nossa)

Nos experimentos desenvolvidos por Chadwick, a colisão era feita em materiais que continham hidrogênio em sua composição como um fino alvo de parafina. Os resultados de Chadwick evidenciam um comportamento importante sobre as interações nucleares:

A conclusão que chegamos é que as partículas α se comportam, nestas colisões, com um esferoide elástico de semieixo entre 4×10^{-13} e 8×10^{-13} cm [...] Fora desta superfície, a força varia aproximadamente com o inverso do quadrado da distância do centro do esferoide. (CHADWICK, 1921, p.940, tradução nossa)

Os apontamentos de Chadwick indicam que há duas regiões de interações no entorno do núcleo atômico. Fora dele, predomina a interação coulombiana que varia com o inverso do quadrado da distância e, entre duas partículas de mesma carga elétrica, tem caráter repulsivo. Já dentro dele, há a predominância de uma força de atração intensa entre os constituintes dos núcleos, sendo que, seu comportamento não se assemelha a nenhuma força vista até então – devido à intensidade, ela foi denominada como **força forte**. Até a década de 30, os problemas envolvendo a estrutura do núcleo atômico não tiveram nenhum avanço significativo. No entanto, experimentos avaliando colisões de partículas α se tornaram bastante comuns. Em 1930, Bothe & Becker perceberam a emissão de uma radiação misteriosa ao atingir um alvo de Berílio com partículas α provenientes de uma amostra de Polônio. A radiação não era eletricamente carregada e tinha altíssimo poder de penetração, logo assumiram, pela natureza radioativa da emissão, se tratar de radiação γ . No entanto, experimentos conduzidos por Curie e Joliot

no ano seguinte, colocaram um mistério ainda maior sobre a natureza desta radiação neutra. Chadwick pontua que,

Recentemente, Curie & Joliot descobriram, ao medir a ionização produzida por esta radiação de berílio [...] aumentou quando uma matéria contendo hidrogênio foi colocada a sua frente. O efeito pareceu ser devido à ejeção de prótons com velocidades até um máximo de quase 3×10^9 cm/s. Eles sugeriram que a transferência de energia para o próton era por um processo semelhante ao efeito Compton e estimou que a radiação do berílio tinha 50×10^6 elétrons volts. (CHADWICK, 1932, p.311, tradução nossa)

As observações de Curie & Joliot deixaram Chadwick intrigado com este comportamento, ele não acreditava que ela poderia se tratar de radiação γ . Para avaliar suas concepções sobre a natureza misteriosa desta radiação, Chadwick conduziu um experimento baseado no aparato experimental mostrado na figura 43.

Figura 43 - Aparato experimental utilizado por Chadwick para investigar a radiação emitida pelo Berílio. (Fonte: Wikipedia)

A misteriosa radiação era produzida a partir da colisão de partículas α , emitidas de uma amostra de Polônio, com uma amostra de Berílio, ambas inseridas no interior de uma câmara isolada a vácuo. A radiação era emitida em direção a um pequeno alvo de parafina, contendo os átomos de hidrogênio exigidos para observar o efeito evidenciado por Curie & Joliot. Ao colidir com o alvo, prótons de alta velocidade eram ejetados e direcionados a uma câmara de expansão, com comportamento semelhante às câmaras de nuvem, com o intuito de observar a trajetória dos prótons ao colidir com os átomos de nitrogênio em seu interior, e contar o número de ionizações produzidas para aferir sua energia incidente. Chadwick afirmava de forma categórica que, se desejássemos manter intactos os princípios de conservação da energia e do momento linear, a radiação misteriosa não poderia ser radiação γ , uma vez que:

Se atribuirmos a ejeção do próton a um espalhamento Compton devido a interação com um *quantum* de 52×10^6 eV, então o recuo do átomo de nitrogênio resultante de um processo similar deveria ter uma energia não superior a cerca de 400.000 eV, deveria produzir não mais do que cerca de 10.000 ionizações e ter um alcance no ar de cerca de 1,3 mm. Na realidade, alguns dos átomos de nitrogênio produzem pelo menos 30 mil ionizações. Em colaboração com o Dr. Feather, observei os átomos de recuo em uma câmara de expansão, e seu alcance, estimado visualmente, era às vezes de até 3 mm [...] Esses resultados e outros que obtive no decorrer do trabalho são muito difíceis de explicar com base no pressuposto de que a radiação do berílio é uma radiação quântica se desejarmos que a energia e o momento sejam conservados nas colisões. (Chadwick, 1932, p.312, tradução nossa)

Como poderia o feixe de prótons adquirir mais energia para além daquela que a radiação γ poderia lhe fornecer? Estava claro para Chadwick que esta radiação neutra não se trata de radiação γ . Neste momento, ele propõe uma solução que se baseia na existência de uma partícula neutra dotada de massa semelhante à massa do próton. Segundo Chadwick,

As dificuldades desaparecem, no entanto, se supusermos que a radiação consiste em partículas de massa 1 e carga 0, ou **nêutrons**. A captura da partícula α pelo núcleo Be^9 resultaria na formação de um núcleo C^{12} e na emissão do nêutron. A partir das relações de energia deste processo, a velocidade do nêutron emitido pode ser de cerca de 3×10^9 cm/s. As colisões do nêutron com os átomos através das quais ele passa dão origem aos átomos do recuo, e as energias observadas dos átomos estão em concordância justa com essa visão. (CHADWICK, 1932, p.312, tradução nossa)

Nesta perspectiva, a existência de uma partícula de carga elétrica 0 e massa 1, faria com que todas as concepções teóricas das colisões entrassem em sintonia com a realidade física.

Devemos concluir que a radiação do berílio consiste, de fato, em partículas e que essas partículas têm uma massa semelhante a de um próton. Os experimentos mostram ainda que essas partículas podem passar facilmente através de grandes espessuras de matéria, e.g. 10 ou até mesmo 20 cm de chumbo. Mas um próton com a mesma velocidade que esta partícula é parado por uma espessura de menos de 1/4 mm de chumbo. (CHADWICK, 1935, p.342)

Chadwick pontua que mesmo possuindo a mesma massa, ambas partículas interagem de forma completamente diferente com a matéria. Enquanto um próton é carregado eletricamente e interage através da força eletromagnética, o nêutron não é dotado de carga elétrica e não sofre ação da interação coulombiana, evidenciando a existência de

outra força responsável pelo freamento dos nêutrons nos materiais. Além do mais, a existência do nêutron coloca um novo passo para a resolução de um problema envolvendo os decaimentos β e excluindo de vez a possibilidade de existirem elétrons no interior do núcleo atômico, considerando-o composto exclusivamente por prótons e nêutrons:

Na visão atual dos decaimentos β , a hipótese é que um nêutron no núcleo pode se transformar em um próton com a emissão de um elétron negativo ou, inversamente, um próton no núcleo pode se transformar em um nêutron com a emissão de um pósitron. (CHADWICK, 1935, p. 343)

A ideia de prótons se transformando em nêutrons é de grande valia para o entendimento dos decaimentos radioativos e, de fato, resolvem uma série de problemas, encaminhando para outros novos. Como pode uma partícula se transformar em outra? Que tipo de interação rege esta transformação? Não há identidade definida no mundo subatômico? Será que todas partículas podem passar pelo mesmo processo de transformação ou será que só acontecem entre os casos semelhantes? Em busca de uma resolução para este problema, Heisenberg propõe uma formulação teórica na qual o próton e o nêutron não seriam partículas diferentes, mas sim diferentes estados de uma mesma partícula: o *núcleon*. Neste sentido, assim como todas as partículas descobertas até o momento tem dois estados de spin, Heisenberg postula a existência de uma nova propriedade, denominada como spin isotrópico, que define o estado de identidade de partícula – a forma como ela se manifestará no mundo físico. Segundo Cassen & Condon, estas novas propriedades,

[...] foram introduzidas pela primeira vez por Heisenberg e também desempenham um papel fundamental na teoria Fermi-Konopinski-Uhlenbeck da desintegração β . Suponhamos que cada partícula pesada (próton ou nêutron) seja descrita por cinco coordenadas. [...] Três para a sua posição no espaço, uma coordenada de rotação dando uma componente de seu momento angular ao longo de alguma direção espacial, e uma quinta coordenada, que pode ter os valores $\pm 1/2$. Se o valor é $+1/2$ a partícula é um próton, enquanto o valor $-1/2$ indica que é um nêutron. (CASSEN & CONDON, 1936, p. 846)

Neste sentido, o estado quântico de toda partícula é dado pelas 5 coordenadas apontadas por Cassen & Condon, sendo 3 coordenadas espaciais, 1 coordenada de spin e 1 coordenada de spin isotrópico. Como o núcleo atômico é considerado um sistema quântico, a distribuição das partículas nos níveis de energia nuclear deveria seguir a mesma lógica do princípio de exclusão de Pauli para a distribuição de elétrons nas órbitas

eletrônicas. A diferença crucial é que as órbitas eletrônicas são regidas pelo potencial coulombiano enquanto que a estabilidade nuclear é regida pela forte interação entre os constituintes do núcleo atômico. Pensando nesta abordagem, Wigner elabora um método teórico para explicar e organizar a constituição de núcleos atômicos. A abordagem de Wigner se baseia em 4 considerações:

- (1)** Levar em conta somente forças dependentes das coordenadas espaciais.
- (2)** Levar em conta forças dependentes da posição espacial e das coordenadas de spin, assumindo, no entanto, que as interações entre todos os tipos de pares são iguais.
- (3)** Negligenciar as forças de spin e levar em conta as forças dependentes das coordenadas espaciais e do spin isotrópico, i.e., discriminando próton-próton, nêutron-próton ou nêutron-nêutron.
- (4)** Levar todas as interações em conta.

O primeiro é o método mais grosso, o último é o mais exato e é provável que (2) é mais preciso para elementos mais leves e (3) para elementos pesados. Por outro lado, é claro, pode-se obter a maioria dos resultados de considerações de simetria para 1, menos para 4. (WIGNER, 1937, p. 106)

Baseado nesta ideia, Wigner começa a construir níveis de energias do núcleo atômico e preenche-los segundo as 4 considerações acima, comparando-as com as evidências experimentais sobre o comportamento dos núcleos construídos. A figura 43 ilustra algumas combinações presentes em seu artigo de 1937.

Figura 44 - Constituições dos núcleos atômicos seguindo a abordagem de Wigner aplicando o princípio de exclusão de Pauli aos nucleons. (Fonte: Wigner, 1937)

Nesta primeira aproximação, construímos uma visão de mundo subatômico muito mais complexa do que jamais se imaginaria. Além da natureza dual pontuada por De Broglie, a proposta de Heisenberg é que as próprias identidades dos constituintes elementares não são bem definidas, como é visto na relação de simetria entre o próton e o nêutron.

4.6 A formulação teórica de Yukawa e as descobertas do múon e do pión

Após a descoberta do nêutron e as proposições sobre as relações entre os constituintes do núcleo atômico, um novo caminho estava sendo aberto e girava em torno de um entendimento mais apurado de como essa força forte vista no núcleo atômico age. As propostas de Heisenberg e Wigner deram uma luz para uma compreensão mais apurada de como os nucleons se transformam uns nos outros e como, segundo o princípio de exclusão de Pauli, eles são distribuídos nos níveis de energia do núcleo atômico. No entanto, a explicação sobre a causa das transformações e a força que é responsável pela estabilidade do núcleo atômico ainda era um grande mistério – é sobre estas problematizações que lidaremos nesta seção. Ela, no entanto, levará a revelações surpreendentes sobre a natureza do mundo subatômico.

Até este momento da história, sabia-se que o mundo microscópico era regido essencialmente pela presença de interações eletromagnéticas – já havia sido demonstrado no século anterior que a ação da força gravidade é consideravelmente menor do que a eletromagnética, sendo desprezível nas interações atômicas. O fato de prótons estarem dispostos no núcleo, junto a outros prótons e também a nêutrons, apontava para o fato de que a força intensa de atração que havia entre os nucleons era superior à repulsão coulombiana. Mas que força é essa? Como ela age?

Na teoria clássica de campos, forças de ação a distância, como a gravidade e a eletromagnética, são mediadas pela ação de campos, no entanto, a física quântica, trouxe uma nova perspectiva denominada como teoria quântica de campos. Nesta teoria, a ação dos campos é mediada pela troca de um *quantum*, que, no caso do eletromagnetismo, é o fóton. Pensando nesta perspectiva, Hideki Yukawa acreditou que esta força nuclear, denominada à época como **força forte**, poderia ser explicada utilizando as bases da teoria quântica de campos. Como as formulações sobre a teoria ainda estavam em desenvolvimento e bastante obsoleta neste momento da história, Yukawa adotou uma abordagem que se baseava na interpretação de que a força forte tem o mesmo mecanismo de ação da força eletromagnética, isto é, é mediada por uma partícula semelhante ao fóton.

[...] tais interações entre as partículas elementares podem ser descritas em termos de um campo de força, assim como a interação entre partículas carregadas é descrita pelo campo eletromagnético. As considerações [...] mostram que a interação de partículas pesadas com este campo [da força forte] é muito maior do que as mais leves [como é o caso dos elétrons e do pósitron]. **Na teoria quântica de campos, este campo deve ser acompanhado por um novo tipo de *quantum*, assim como o campo eletromagnético é acompanhado pelo fóton.** [...] a natureza deste campo e do *quantum* que o acompanha serão brevemente discutidos e também sua estrutura nuclear será considerada. (YUKAWA, 1935, p. 49, grifo e tradução nossa)

O formalismo de base da teoria quântica de campos à época era construído utilizando as abordagens de Dirac, explorada na seção 4.4, e de Klein Gordon. Em ambas, considera-se a energia relativística de uma partícula e, ao invés de trabalhar sobre a álgebra convencional, utilizam-se os operadores de álgebra não comutativa da mecânica quântica – trata-se de uma ruptura com as abordagens teóricas da física clássica. A energia relativística do *quantum* é dada por:

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4 \rightarrow E^2 - p^2 c^2 + m^2 c^4 = 0 \quad (11)$$

As energias e o momentos, como explicitado ao final da seção 4.3, são representados por operadores matemáticos que tem a forma:

$$E \rightarrow i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \quad \text{e} \quad p = i\hbar \nabla \quad (12)$$

Operando sobre a função de onda que representa o *quantum* da interação, obtém-se:

$$\nabla^2 \psi - \frac{m^2 c^2}{\hbar^2} \psi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0 \quad (13)$$

Que tem estrutura semelhante à equação de Schroedinger, no entanto, construída com base na energia relativística. Segundo Endler (2004), como o *quantum* da interação é uma manifestação do campo em si, na teoria quântica de campos, ψ representa um campo escalar associado à sua partícula mediadora. A equação deduzida apresenta uma estrutura interessante e, ao explorá-la, Yukawa aponta que para um *quantum* de massa $m = 0$ a equação se reduz a:

$$\nabla^2 \psi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0 \quad (14)$$

Que é exatamente a equação da onda eletromagnética deduzida por Maxwell a partir das equações do eletromagnetismo. A coerência é tão profunda, que se pensarmos nas

ondas eletromagnéticas como uma manifestação dos campos eletromagnéticos, sua interpretação quântica se dará exatamente pelo fóton, o *quantum* da interação eletromagnética, que possui massa 0. No entanto, a teoria construída por Yukawa busca compreender interações mediadas por um *quantum* com massa $m \neq 0$. Sua primeira abordagem é resolver a equação independente do tempo, chegando a uma solução para o campo escalar da forma:

$$\psi = \frac{g}{r} e^{-\left(\frac{mcr}{\hbar}\right)} \quad (15)$$

Na equação deduzida por Yukawa, “g” é denominada como constante de acoplamento das interações. A interação mediada por este campo, tem sua força expressa, em primeira ordem de aproximação, como é o caso das interações nucleares de alcance muito pequeno, como:

$$F = -\nabla\psi = \frac{g}{r^2} \left(1 - \left(\frac{mcr}{\hbar}\right)^2\right) \quad (16)$$

O alcance da interação é dado para as regiões onde a força é $F \neq 0$, sendo assim, o *quantum* de interação dotado de massa terá alcance até a distância “r” onde $F = 0$. Denominando r_0 este alcance máximo das interações, ele será dado por:

$$r_0 = \frac{\hbar}{mc} \quad (17)$$

Um resultado importante que podemos demonstrar a partir desta solução, é que se a massa tende a 0 ($m \rightarrow 0$), temos que o alcance da interação tende a ∞ ($r_0 \rightarrow \infty$). O significado disto é que a interação eletromagnética tem alcance infinito, que é o primeiro resultado significativo da abordagem de Yukawa, apontando que ele se encontrava na direção certa. Com relação às interações nucleares, apontamos na seção 4.5 que seu alcance é da ordem de 10^{-13} cm. Sendo assim, utilizando a equação deduzida por Yukawa, ele estimou que a massa do *quantum* que media uma interação com este alcance deveria ser da ordem de 10^2 MeV/c², equivalente a 200 vezes a massa dos elétrons. Apontou também que ele deve obedecer à estatística de Bose uma vez que tem estados de spin inteiro, o que já era esperado por assemelhar-se ao fóton que também obedece a mesma estatística. Décadas após sua formulação, Yukawa apresenta suas impressões sobre a teoria do *quantum* mediador das interações nucleares, apontando que,

Perguntava por que esta partícula permanecia desconhecida? [...] Me senti autoconfiante e falei sobre a nova teoria baseada nesta ideia no Laboratório de Kikuchi na Universidade de Osaka. Prof. Kikuchi afirmou “se for uma partícula carregada, então deverá ser pega nas câmaras de nuvem” e respondi “Sim, talvez poderia ser encontrada nos raios cósmicos”. [...] Depois disso, **diversas pessoas descobriram mésons experimentalmente nos raios cósmicos**. A primeira informação que recebi foi a descoberta de Anderson, pela qual fui informada por uma carta enviada por ele antes mesmo que pudesse ver seu artigo. (YUKAWA, 1985, p.132, tradução nossa)

Neste trecho, percebemos que Yukawa faz referência as descobertas de Anderson, o mesmo cientista que anos antes à publicação do artigo de Yukawa evidenciava a existência de elétrons dotados de carga positiva. Nos anos que seguiram as evidências que comprovavam a previsão teórica de Dirac, Anderson continuou a investigar as partículas provenientes de raios cósmicos, identificando-as como portadoras de altas energias e sendo, sumariamente, elétrons de cargas positivas e negativas. A descoberta do méson, ao contrário da do pósitron, não foi inesperado, pelo contrário, ela se mostrava necessária com uma série de paradoxos que se formavam na interpretação da constituição dos raios cósmicos. Segundo Anderson, após a descoberta do pósitron,

Neddermeyer e eu continuamos a estudar os raios cósmicos usando a mesma câmara de nuvem magnético na qual o pósitron foi descoberto. Nestes experimentos, encontramos que a maioria das partículas de raios cósmicos a nível do mar eram altamente penetrante no sentido de que podiam atravessar altas espessuras de materiais pesados como o chumbo e perder energia somente pela ionização direta produzida que contávamos ser algo em torno de 20 MeV por cm de chumbo. (ANDERSON, 1985, p.123)

Nas investigações conduzidas por ele e Neddermeyer, começaram a ser identificadas radiações de alto poder de penetração, sendo o principal objetivo de suas investigações determinar sua natureza. Algumas delas possuíam uma unidade de carga elétrica positiva e outras uma unidade de carga negativa. A princípio, acreditaram se tratar de prótons e elétrons, as únicas partículas de matéria eletricamente carregadas conhecidas até o momento. No entanto, começaram a aparecer dificuldades em interpretar os resultados segundo o comportamento das duas partículas. Elas não poderiam ser consideradas como elétrons ou pósitrons por três principais motivos:

Primeiramente, cálculos teóricos de Hans, Bethe, Walter, Heitler e Fritz Sauter sobre a perda de energia de elétrons levaram à conclusão de que elétrons de alta energia deveriam perder grandes quantidades de energia pela produção de radiação, enquanto que as partículas em questão não

apresentaram este comportamento. **Em segundo lugar**, encontramos casos individuais nos quais elétrons, de fato, apresentaram grande perda de energia por radiação, em alguns casos se tratando de 100 MeV ou mais por cm de chumbo. No entanto, claramente, apresentaram comportamento completamente diferente em relação às partículas penetrantes. E, **em terceiro lugar**, o chamado componente altamente absorvível dos raios cósmicos e a existência de chuviros de elétrons poderia encontrar uma explicação atraente em termos de elétrons se os elétrons, de fato, sofressem grandes perdas radiativas em altas energias como exigido pela teoria mencionada acima. (ANDERSON, 1985, p.124, grifo e tradução nossa)

Como a incidência de partículas providas de raios cósmicos é muito diversa, Anderson e Neddermeyer precisaram fazer uma distinção entre as partículas que incidiam individualmente e aquelas produzidas a partir de chuviros de partículas. O objetivo central era, inicialmente, identificar como se originava a partícula desconhecida – se era uma incidência singular provida diretamente do espaço ou se era produção secundária de um chuviro cósmico. Para fazer esta caracterização realizaram um estudo sobre a perda de energia das partículas individuais e dos chuviros formados no interior da câmara de nuvem. Os resultados foram organizados no gráfico mostrada na figura 45

Figura 45 - Gráfico da perda de energia por cm de penetração na camada de chumbo com relação a energia inicial dos feixes incidentes. (Fonte: Neddermeyer & Anderson, 1937)

De acordo com a legenda, podemos ver que os pontos vazados são partículas do chuveiro cósmico e os pontos preenchidos são partículas individuais. É possível perceber no gráfico que as partículas do chuveiro estão muito próximas da região na qual a perda de energia é total ($\Delta E/E = 1$), evidenciado que elas depositam praticamente toda sua energia no aparato experimentalmente. Por outro lado, as partículas individuais estão numa região afastada e abaixo da região de perda total, depositando sua energia parcialmente na passagem pela câmara. Neddermayer e Anderson interpretaram estas duas regiões como sendo duas partículas diferentes, sendo a primeira delas, composta pelo chuveiro, caracterizadas como elétrons pela semelhança do comportamento teórico previsto Bethe e Heitler. Restava saber se as partículas individuais poderiam ser classificadas como prótons, possibilidade que também foi excluída:

A objeção mais importante à interpretação residia no fato de que os elétrons secundários produzidos no impacto direto com a câmara produziam outros secundários de energias altas demais para se corresponder com o espectro conhecido se partículas como prótons fossem responsáveis pela produção. [...] Por outro lado, o espectro seria o esperado se as partículas produzindo este secundários fossem muito mais leves do que o próton. (ANDERSON, 1985, p.123)

Neste sentido, o espectro de energia das produções secundárias observadas na câmara era contraditório com os espectros esperado se a incidência fossem feixes de prótons. Além do mais, como esta radiação se tratava de partículas eletrizadas com ambas as cargas, positiva e negativa, era preciso se admitir a existência de prótons eletrizados negativamente, o que não havia se observado até então. Segundo Street & Stevenson, os resultados de Anderson e Neddermayer apontam para o fato de que:

as partículas do chuveiro são elétrons, a teoria que descreve suas perdas de energia é satisfatória. Já as partículas que ocorrem isoladamente não são elétrons. Os experimentos citados acima mostraram a partir da consideração da ionização específica que os raios penetrantes também não são prótons. (Street & Stevenson, 1937, p.1003)

Estava claro para Anderson e Neddermayer que as partículas em questão não poderiam se tratar nem de prótons, uma vez que seus espectros de emissão de partículas eram coerentes com partículas mais leves do que ele, nem de elétrons, uma que vez era previsto uma grande perda radiativa que não se percebia nas observações, levando-os a trabalhar em cima da hipótese de que se tratava de uma partícula nova. Em experimentos realizados no topo do monte Pikes, perceberam a ejeção de diversos prótons e também

da ejeção de tais partículas onde, devido às ionizações e os raios de curvaturas medidos, constatou-se se tratar de uma espécie mais leve do que o próton e mais pesada que o elétron. Tendo uma massa intermediária, ela foi denominada por Anderson e Neddermayer como *mesotron*. A questão da nomenclatura traz também um conflito irônico entre seus descobridores e Milikan, segundo Anderson,

Um dia, eu e Neddermayer encaminhamos uma nota para a *Nature* sugerindo o nome *mesotron* (*meso* para intermediário). Nesta época, Milikan estava fora, e depois de seu retorno mostramos a ele uma cópia da nota enviada à *Nature*. Ele se mostrou imediatamente não favorável e disse que o nome deveria ser *mesotron*, disse para considerar eletron e nêutron. Eu disse: considere próton. (ANDERSON, 1985, p. 126)

Nomenclaturas a parte, as evidências para uma nova partícula estavam estabelecidas. Street & Stevenson realizaram estudos para determinar sua massa. O aparato experimental utilizado por eles consistia de um conjunto de *counter-telescopes* que direcionavam o feixe de raios cósmicos em direção a uma camada longa de chumbo com o intuito de retirar os chuveciros de partículas incidentes. As partículas que passavam pela camada de chumbo eram encaminhadas para uma câmara de nuvens “C” contendo uma fina camada de chumbo utilizada para frear os feixes e avaliar suas curvaturas devido a ação de um campo magnético de 3.500 Gauss. O arranjo é mostrado na figura 46.

Figura 46 - Arranjo experimental utilizado por Street e Stevenson para medir a massa do méson. 1, 2, 3 e 4 são *counter-telescopes*. L é a camada de chumbo que impede a passagem de partículas do chuveciro cósmico e C é a câmara de nuvem submetida a um campo magnético e composta por uma fina camada de chumbo para frear as partículas incidentes. (Street & Stevenson, 1937)

O método construído foi bastante eficiente e possibilitou que mais de 1000 fotos com grande potencial de análise fossem retiradas. Ilustramos na figura 47 imagens, mostradas no artigo de 1937, onde aparecem as trajetórias de um feixe de partículas A e outro de partículas B.

Track A.

Track B.

Figura 47 - Trajetórias de duas partículas A e B. À esquerda temos um feixe que produz uma grande quantidade de ionizações e é pouco curvado pela ação do campo magnético. À direita temos um feixe que produz menos ionizações e é mais curvado que o feixe produzido em A. (Fonte: Street & Stevenson, 1937)

O feixe A produz uma grande quantidade de ionizações e é pouco curvado pela ação do campo magnético. Já o feixe B tem uma quantidade de ionizações menores e uma curvatura maior. Estando o campo magnético apontando para fora da folha de leitura e considerando a direção de incidência das partículas, pode-se concluir, a partir de suas curvaturas, que ambas estão carregadas positivamente. No entanto, a partícula A possui uma massa consideravelmente maior do que B, uma vez que seu raio de curvatura é menor. Segundo Street & Stevenson,

Temos duas trajetórias interessantes obtidas, uma vez que apresentam densidade de ionização maiores que o usual: uma em A, acreditamos ser devido a passagem de um próton e a outra em B de uma partícula com massa de aproximadamente 130 vezes a massa de repouso de um elétron. (Street & Stevenson, 1937, p. 1006)

As proposições teóricas de Yukawa e as investigações experimentais que levaram à descoberta deste méson, que futuramente ficaria conhecido como **méson- μ** ou **múon**, ocorreram de forma paralela e independente. Os autores de ambas investigações estabeleceram contato somente após a evidência da existência desta partícula. Devido à presença da massa próxima ao previsto teoricamente por Yukawa, era natural que ela fosse apontada como o *quantum* da interação nuclear. Segundo Williams,

Certas propriedades desta partícula são notavelmente semelhantes às da partícula hipotética assumida por Yukawa em sua teoria das forças nucleares e da desintegração β , o que levou à visão de que as duas podem ser idênticas. [...] elas têm a mesma massa, e ambos são instáveis no estado livre, tendo uma vida média da ordem de 10^{-6} segundos. (WILLIAMS, 1940, p. 102)

Havia um comportamento crucial para que ela se adequasse ao *quantum* de Yukawa – ela precisava interagir fortemente com a matéria. Segundo Endler (2004), o méson μ negativo, ao ser levado ao repouso num material, seria atraído em direção ao seu núcleo atômico e cairia na órbita de Bohr de menor raio. Esta órbita, para elementos muito pesados, se encontra muito próxima dos núcleos, em alguns casos até dentro dele, fazendo com que o méson interagisse fortemente com seus constituintes e não sofresse decaimento. No entanto, os experimentos indicavam também a presença de um méson positivo. Neste contexto, Tomonaga e Araki propuseram uma teoria na qual os mésons negativos seriam predominantemente capturados pelos núcleos atômicos dos materiais, enquanto que os positivos seriam repelidos e sofreriam decaimentos – nesta suposição, acreditava-se que o múon se tratava da partícula de Yukawa e interagia fortemente com a matéria. Segundo os físicos,

Como consequência da atração coulombiana, a probabilidade de captura para mésons negativos irá crescer, enquanto que para positivos ela será profundamente reduzida pela barreira de potencial. A competição entre a captura nuclear e a desintegração espontânea deverá, desta forma, ser diferente para mésons de diferentes sinais. Uma vez que a probabilidade de mésons negativos serem capturados sempre será maior que a probabilidade de desintegração [...] os mésons negativos serão muito mais capturados pelo núcleo do que se desintegrando espontaneamente.

Sendo assim, uma das formas de testar a proximidade do múon com a partícula de Yukawa, era comparar a abundância de comportamento de suas espécies negativas e positivas ao penetrar os mais diferentes materiais. Foi exatamente isto que Conversi, Pancini e Piccioni (1946) fizeram. Utilizando um conjunto de eletroímãs, construíram um

método para selecionar os mésons positivos e negativos provenientes dos raios cósmicos, ilustrado na figura 48. O aparato consistia de grandes blocos de ferro com campos magnéticos que possibilitam que partículas positivas e negativas realizem diferentes movimentos convergindo ou divergindo – podendo assim selecionar e contar um determinado tipo de partículas, encaminhá-la para uma câmara onde seria capturada e identificado se ela decairia espontaneamente ou se seria capturada pelo núcleo.

Figura 48 - Aparato utilizado entre 1940 e 1945 para comparar a produção de múons positivos e negativos. A orientação dos campos magnéticos era pensada de tal forma que, a curvatura realizada provocaria a convergência de uma carga elétrica e a divergência da oposta. (Conversi, Pancini e Piccioni, 1946)

Os dados coletados pelo grupo italiano foram cruciais para apontar que o múon não se tratava, de fato, da partícula de Yukawa. Comparando as desintegrações produzidas em camadas de Ferro e Carbono, ilustradas na figura 49, perceberam que no Ferro a quantidade de desintegrações espontâneas eram realmente menores, sendo praticamente zero para camadas de ferro de 6 cm de espessura. No entanto, ao comparar as desintegrações produzidas nas amostras de carbono perceberam uma pequena diferença demonstrando que os múons não interagiam fortemente com o núcleo atômico – atribuíram a diferença apontada por Tomonaga e Araki como sendo fruto da interação coulombiana, não sofrendo influência da interação forte com o núcleo atômico.

carica dei muoni fermati	assorbitore	frequenza di disintegrazione (eventi / 10 ore)
positiva	5 cm Fe	6.7 ± 0.65
negativa	5 cm Fe	0.3 ± 0.25
positiva	4 cm C	3.6 ± 0.45
negativa	4 cm C + 5 cm Fe	2.7 ± 0.35
negativa	6.2 cm Fe	0

Figura 49 - Resultado do grupo italiano para a comparação das desintegrações observadas em múons positivos e negativos. (Conversi, Pancini e Piccioni, 1946)

Todas as evidências apontavam para que o múon fosse a partícula de Yukawa, mas ela não interagia fortemente com a matéria e este era o requisito crucial para que ela se adequasse ao cargo. Pensando neste problema, Marshak e Bethe (1947) publicaram um artigo intitulado *On the Two Meson Hypothesis* (Sobre a Hipótese dos Dois Mésons) no qual afirmavam que o múon, de fato, não era a partícula prevista, no entanto, estava correlacionada com ela por meio de um decaimento. Nesta proposta, o méson de Yukawa sofreria um decaimento produzindo um múon e as similaridades que enxergamos nele até agora seriam provenientes disso – nesta perspectiva, o múon seria um méson secundário proveniente de um méson primário que seria aquele previsto por Yukawa. A hipótese trazia um grande problema, uma vez que, se os múons eram detectados na superfície terrestre, os mésons primários seriam produzidos somente em altitudes elevadas e teriam um tempo de meia vida consideravelmente menor. O método usual de investigação dos raios cósmicos tornaria difícil a detecção destes mésons primários, é por este motivo que ele acontece sob outra perspectiva.

Paralelamente aos trabalhos com as câmaras de nuvem, um grupo de Bristol investia em outro método de investigação baseado na utilização de placas fotográficas. Nestas placas, uma substância é inserida no interior de uma placa gelatinosa disposta sobre um papel e uma fina camada de vidro. A passagem de radiação ionizante provoca uma reação química que deixa os traços delimitados no papel provocados por um processo de emulsão nuclear.

Figura 50 - Composição básicas de placas fotográficas utilizadas em processos de emulsão nuclear. (Fonte: <http://www.if.ufrgs.br/tex/fis01043/20032/Eloir/eloir.html>)

Nesta época, as placas de emulsão apresentavam problemas que dificultavam sua utilização como método de identificação e caracterização de partículas, sendo o maior empecilho o fato de apresentarem uma sensibilidade baixa para a ionização. Como a vida

média deste méson primário era muito baixa, sua passagem não duraria muito tempo, sendo que sem sensibilidade suficiente ele não poderia ser detectado.

É neste momento que entram as contribuições de um brasileiro que até 1947 trabalhava com técnicas de detecção de partículas com câmaras de nuvem. Percebendo a utilização das novas técnicas de emulsão, Lattes solicitou a Occhialini, até então trabalhando conjuntamente no Instituto de Física da Universidade de São Paulo, que pudesse trabalhar neste grupo para ajudar no aprimoramento das técnicas de emulsão nuclear. Lattes utilizou das técnicas que Chadwick havia utilizado na década anterior para estudar e evidenciar a existência do nêutron. Curie e Joliot haviam demonstrado que alvos de Berílio, quando bombardeado de partículas α , emitiam uma radiação neutra misteriosa que mais tarde Chadwick evidenciou sendo o nêutron. Lattes utilizou a mesma reação para produzir nêutrons a partir do Berílio, e utilizava a energia destes nêutrons para bombardear uma substância contendo Boro, chamado de Bórax.

No mesmo experimento, coloquei placas tratadas com bórax, que Ilford tinha preparado a meu pedido, na direção do feixe de nêutrons produzidos na reação:

que dá um pico de nêutrons em aproximadamente 13 MeV. A ideia, que funcionou bem, era obter a energia e o momento dos nêutrons, independentemente de sua direção de chegada (que não era conhecida), pela reação

(LATTES, 1984, p.2)

A ideia de Lattes era intensificar as reações de emulsão nuclear para tornar mais visível a passagem das partículas sobre a placa. Buscando avaliar o comportamento de suas placas, Lattes e Occhialini levaram chapas para o monte Pic-du-Midi, sendo algumas delas contendo o bórax e outras chapas normais. As chapas normais serviriam para estudar raios cósmicos de baixa energia, enquanto que as chapas de Bórax serviram para, inicialmente, buscar a existência de nêutrons em raios cósmicos e, também, para comparar sua eficiência de produção de imagem com as demais placas. Ao voltar para Bristol, analisaram as placas e se surpreenderam com a potencialidade do Bórax:

Quando Occhialini revelou a emulsão depois de sua recuperação, na mesma noite em que foram recebidas em Bristol, tornou-se claro que as emulsões tratadas com bórax tinham muito mais eventos do que as sem bórax; de alguma forma, o bórax impedia a imagem latente de se esvanecer; as placas normais tinham um forte esvanecimento.

Além da potencialidade do bórax, Lattes percebeu uma imensa quantidade de traços que justificavam esforços na investigação de raios cósmicos de baixas energias incidindo sobre altitudes elevadas. Após dias de investigação sobre as placas, encontraram casos de decaimentos duplos com três partículas participando, sendo dois deles identificados por mésons e o outro como o elétron. Lattes aponta que possível os mésons eram facilmente discerníveis de prótons “por causa de seu espalhamento muito maior e sua variação de densidade de grãos com o alcance.” (1984, p.3). A figura 51 ilustra os decaimentos apontados por Lattes, afirmando que o primeiro na cascata, vista de baixo para cima, se tratava da partícula prevista por Yukawa denominada como méson π , o segundo era o meson μ descoberto por Anderson na década passada e o último seria o elétron, proveniente dos decaimentos avaliados.

Figura 51 - Cadeia de decaimento $\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$ (Fonte: Powell, 1947)

Na figura 52 mostramos em mais detalhe um decaimento $\pi \rightarrow \mu$, a bifurcação formada na trajetória, no qual só uma delas pode ser vista, deve ao fato de que junto ao múon um neutrino é emitido, da mesma forma que, na figura anterior, após o múon é formada outra bifurcação, mas nesta temos um elétron e , saindo pela trajetória não visível, outro neutrino.

Figura 52 – Decaimento $\pi \rightarrow \mu$ (Fonte: Lattes, 1947)

As fotografias possibilitaram ainda a identificação de nêutron provenientes de raios cósmicos, assim como também de núcleos como o de nitrogênio (as figuras 53 e 54 ilustram tais evidências).

Figura 53 - Desintegrações provocadas por nêutrons de altas energias provenientes de raios cósmicos. (Fonte: Powell, 1947)

Figura 54 - Chuveiro de desintegrações provocadas pela incidência de um núcleo de nitrogênio proveniente de raios cósmicos.

Marcando o início de uma nova era, que partiu das investigações a partir de raios cósmicos, Lattes parte da Europa em direção à América do Norte e junto com Gardner realiza a primeira produção artificial de mésons μ e π

No final de 1947, deixei Bristol com uma bolsa de estudos Rockefeller com a intenção de tentar detectar píons produzidos artificialmente no ciclotron de 184 polegadas que havia começado a funcionar em Berkeley, na Califórnia. O feixe de partículas alfa era de apenas 380 MeV, uma energia insuficiente para produzir píons. Arrisquei a possibilidade de colisões "favoráveis", nas quais o momento interno de um núcleon da partícula alfa e o momento do feixe proporcionassem energia suficiente no sistema de centro-de-massa. Os resultados mostraram que de fato estavam sendo produzidos mésons. Dois artigos descrevem o método de detecção e os resultados, o primeiro se referindo a mésons negativos, e o segundo a positivos (5). Utilizando o alcance dos píons e sua curvatura em um campo magnético, foi possível estimar as massas como aproximadamente 300 massas do elétron. (LATTES, 1984, p.4)

Figura 55 - Lattes e Gardner no Cíclotron onde foram produzidos artificialmente os primeiros píons positivos e negativos. (Fonte: Fineart America)

Este conjunto de proposições teóricas e investigações experimentais tomou grande parte das atividades realizadas entre 1935 e 1947. Parte dos desenvolvimentos foram interrompidos devido à segunda grande guerra que foi um marco importantíssimo do ponto de vista de desenvolvimento tecnológico e que possibilitou a construção de aceleradores, detectores e computadores com alto poder de processamento que serão o motor do desenvolvimento da década mais movimentada da física de partículas: a década de 50.

Estes 10 anos entre as décadas de 30 e 50 possibilitaram uma imagem cada vez mais clara das partículas que constituem os raios cósmicos. Da imagem colocada por Hess no início do século XX, baseada na invasão de partículas eletricamente carregadas sem qualquer tipo de identidade, a evidência da existência dos píons e dos múons levaram a explicação de grande parte dos chuvers cósmicos que ainda são estudados até hoje.

Figura 56 - Chuveiro cósmico explicado a partir da existência de píons e múons. (Fonte: <http://inspirehep.net/record/1478572>)

4.7 Partículas estranhas e a era dos grandes laboratórios

As evidências que levaram as descobertas do pión e do múon exigiram um esforço coletivo de investigação sobre a natureza dos raios cósmicos. Bruno Rossi, no entanto, denomina esta época como “os anos da inocência”, uma vez que se acreditava estar muito perto de desvendar os mistérios do mundo elementar ao solucionar o quebra cabeça dos mésons. O méson π , ou pión, de fato se apresentava como a partícula de Yukawa, no entanto, sua ideia como mediador das interações nucleares se mostraria muito simples perante o complexo universo que se constituirá na década de 50. Wróblewski (2004) apresenta um mapa correlacionando diversos acontecimentos entre os anos de 1947 e 1956, ele está ilustrado na figura 57.

Figura 57 - Cronologia dos surpreendentes acontecimentos que revolucionaram a física de partículas elementares. (Fonte: Wróblewski, 2004)

O mapa construído por Wróblewski aponta para ideias (concepções teóricas) e fatos (evidências experimentais) que trouxeram uma verdadeira revolução para as ideias sobre a constituição da matéria. Até o final da década de 40, acreditava-se que a constituição da matéria se dava pela composição de **elétrons (e^-)**, **prótons (p)** e **nêutrons (n)**. Além destas, os decaimentos radioativos e os raios cósmicos apresentavam também **neutrinos (ν)**, **múons ($\mu^\pm$)**, **píons ($\pi^0, \pi^\pm$)**, **pósitrons (e^+)** e **fótons (γ)**. A intuição atômica da

matéria, neste momento, já se encontrava afastada da ideia de um mundo atômico representando apenas a composição da matéria. Os raios cósmicos mostraram que, ao contrário do que se pensava, o mundo subatômico reserva uma grande diversidade de partículas. Ao final da década de 40, no entanto, apenas uma pequena parcela delas havia se manifestado.

Logo após a descoberta dos píons, Rochester & Butler apontaram para fotografias curiosas de partículas provenientes de raios cósmicos. Segundo os físicos,

[...] obtivemos durante o ano passado, como parte de uma investigação da natureza das partículas penetrantes que ocorrem em chuviros de raios cósmicos [...] duas fotografias contendo trajetórias bifurcadas de uma característica impressionante. Estas fotografias foram selecionadas dentro de cinco mil fotografias tiradas em um horário efetivo de operação de 1.500 horas. (Rochester & Butler, 1947, p. 855, tradução nossa)

O comportamento intrigante visto por Rochester & Butler se tratava de trajetórias bifurcadas em forma de “V” que não era produzido devido a colisões de raios cósmicos com partículas da atmosfera – a impressão que ambos tiveram é que eram partículas produzidas pelo decaimento de duas partículas desconhecidas até então. Devido ao formato da trajetória das partículas no decaimento, elas foram denominadas por Anderson, Blackett e Bohr como “*V particles*”. No artigo publicado em 1947, Rochester & Butler apresentaram apenas duas fotografias com uma análise completa de suas características, elas estão ilustradas nas figuras 58 e 59.

Figura 58 - Decaimento de uma partícula em duas partículas “a” e “b” formando uma trajetória V. (Fonte: Rochester & Butler, 1947)

Figura 59 - Decaimento de uma partícula em duas partículas "a" e "b" formando uma trajetória V. (Fonte: Rochester & Butler, 1947)

Analizando a curvatura sofrida por cada uma das partículas, puderam afirmar que a trajetória vista na figura 58 é devido a uma partícula neutra, uma vez que "a" e "b" são, respectivamente, carregadas positivamente e negativamente. Já a trajetória vista na figura 59 é devido a uma partícula positivamente carregada, uma vez que "a" e "b" possuem cargas elétricas positivas. Os resultados de suas medições iniciais estão apresentados na figura 60.

Photograph	H (gauss)	α (deg.)	Track	p (eV./c.)	Δp (eV./c.)	Sign
1	3500	66.6	a	3.4×10^8	1.0×10^8	+
			b	3.5×10^8	1.5×10^8	-
2	7200	161.1	a	6.0×10^8	3.0×10^8	+
			b	7.7×10^8	1.0×10^8	+

Figura 60 - Dados das trajetórias "V" mostradas nas figuras 59 e 60. (Fonte: Rochester & Butler, 1947)

Esta apresentação foi bastante protocolar, uma vez que os próprios autores acreditaram se tratar de raros eventos que possivelmente poderiam ser provenientes de má interpretação das imagens. No entanto, Anderson e Blackett (1950) escreveram uma carta aos autores afirmando que as "*V-particles* de fato existiam", tendo registrado cerca de 30 casos nas câmaras de nuvem.

Rochester & Butler ficaram contentes em ouvir que temos cerca de 30 casos de trajetórias bifurcadas similares como aquelas descritas em seu artigo na *Nature* cerca de dois anos atrás. Até agora, pudemos ver que a

interpretação de que esses eventos são causados por novas partículas instáveis parecem ser corroboradas por nossas experiências" (ANDERSON & BLACKETT, 1949, tradução nossa)

Para tornar o cenário ainda mais estranho, o grupo de Bristol publica, também em 1949, evidências para um modo de decaimento mais complexo do que as “V-particles” – o decaimento de uma partícula em três píons, denominado como méson- τ e ilustrado na figura 61.

Figura 61 - Modo de decaimento de três mésons evidenciado pelo grupo de Bristol. (Fonte: Powell, 1949)

Em 1951, Leighton e Anderson fizeram um vasto estudo sobre as “V-particles”, utilizando denominações para classificá-las conforme sua carga: V^0 (partículas neutras), V^+ (partículas carregadas positivamente) e V^- (partículas carregadas negativamente). Várias fotografias são apresentadas, evidenciando a existência de tais partículas e discutindo em detalhe seus modos de decaimento. Neste estudo, estabelecem a existência de dois modos de decaimento das V^0 , sendo um deles produzindo $p + \pi^-$ e outro produzindo $\pi^+ + \pi^-$, denominando o primeiro como $V_1^0 \rightarrow p + \pi^-$ e o segundo como $V_2^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ e suas massas como sendo, respectivamente, cerca de 2200 e 800 vezes maiores que a massa do elétron. O histograma ilustrado na figura 62 avalia os modos de decaimento da V_1^0 .

Figura 62 - Partículas produzidas no decaimento das V_1^0 (Fonte: Leighton e Anderson, 1951)

Um fato importante de ser reiterado sobre o comportamento das “*V-particles*”, é que elas são produzidas apenas em colisões de altas energias, dando a entender que sua produção está associada a uma forte interação com a matéria. No entanto, seu decaimento não parece seguir a mesma forma de interação. Tendo observado valores da ordem de 10^{-10} s, muito longo para partículas que interagem fortemente com a matéria, quando se espera um valor próximo a 10^{-21} . Este comportamento é parecido com o decaimento do píon, observado na década anterior, que também é produzido em colisões entre núcleos atômicos, devido a uma forte interação entre eles. Estas partículas tem tempo de meia vida da ordem de 10^{-10} segundos, enquanto que o múon, partícula produzida a partir de seu decaimento, tem tempo de meia vida mais longo, da ordem de 10^{-6} comparado a sua partícula mãe. Este fato é intrigante uma vez que aponta para o fato de que as partículas são produzidas via interação forte, no entanto, seu modo de decaimento é regido por uma interação fraca com a matéria, como apontavam Yukawa em sua teoria de mésons discutida na seção anterior.

Neste tempo de assimilação das evidências experimentais, um conjunto de encontros internacionais ocorreram, sendo os mais relevantes o *Tokyo Meeting* em julho de 1951 e os *Rochesters Conferences on Meson Physics* em julho e depois em dezembro de 1952. Em ambos os encontros se discutiu bastante sobre a natureza das “*V-particles*”, a consensualidade dos resultados experimentais obtidos e, principalmente, as concepções teóricas que poderiam ser elaboradas para lidar com estes desenvolvimentos.

Do ponto de vista teórico, poucas abordagens em termos de fundamento foram realizadas. No entanto, Pais, em 1952, propõe uma regra para avaliar que tipos de decaimentos podem ser possíveis de observar. Para isto, organiza as partículas em dois grandes grupos, as velhas e conhecidas (píons, nucleons, elétrons e múons) e as novas e estranhas (*V-particles*, o misterioso méson de decaimento triplo τ -meson, e quaisquer - que vierem após esse desenvolvimento). Ele atribui números pares **às partículas conhecidas** e números ímpares **às partículas estranhas** e afirma que “Na verdade, qualquer reação [eletromagnética ou forte] só é possível se as somas dos “números de massa” em ambos os lados forem ímpares ou pares simultaneamente.” (PAIS, 1952, p.666). Neste caso, por exemplo, a reação $V_1^0 \rightarrow p + \pi^-$, terá, em seu lado esquerdo, total ímpar (pois é composta apenas por partículas estranhas) e seu lado direito par, não sendo possível do ponto de vista da interação forte, mas sim pela interação fraca. Por mais

estranha e curiosa que seja a regra, prevendo reações que jamais foram observadas, ela pontua a necessidade de distinguir estas partículas estranhas das partículas já conhecidas, indicando que talvez haja alguma propriedade nelas que as dote de tal estranheza. Percebemos também que, ao afirmar que os números iniciais e finais devem se manter ímpares ou pares, está propondo uma espécie de conservação associada à estranheza de tais partículas.

Se a discussão teórica não desenrolava bem, na ala experimental não era muito diferente. A tabela ilustrada na figura 62 mostra o estado de conhecimento sobre as partículas estranhas nesta época. Apenas se conheciam bem os modos de decaimentos das partículas V_1^0 , V_2^0 e o méson- τ de decaimentos em 3 partículas, sendo importante notar a proximidade de massa entre a partícula V_2^0 e o méson- τ . O restante delas eram consideradas incógnitas mal resolvidas, erros experimentais, evidências inconclusivas, enfim, uma verdadeira falta de entendimento do mundo elementar. Nesta ocasião, Oppenheimer faz um comentário irônico afirmando que,

Espero que nossos netos, quando estiverem na conferência de 2038 em Rochester, deem por certo de que entendam estas coisas que estamos discutindo aqui. (OPPENHEIMER, 1953, tradução nossa)

V-particles and heavy mesons (December 1952)				
Particle	lifetime (s)	Q (MeV)	Mass (m_e)	Spin
$?V_1^\pm \rightarrow p + \pi^-$ $\rightarrow (n + \pi^\pm)?$				half integral
$V_1^0 \rightarrow p + \pi^-$	3×10^{-10}	40 ± 3	2190 ± 5	half integral
$?S^\pm, \chi^\pm, V^\pm \rightarrow \pi^\pm + ?$	$10^{-8} - 10^{-10}$		900-1500	—
$?S^\pm, \kappa^\pm, V^\pm \rightarrow \mu^\pm + (\gamma + \nu)?$	$10^{-8} - 10^{-10}$		1100	integral
$\tau^\pm \rightarrow \pi^\pm + \pi^+ + \pi^-$	$> 10^{-9}$	75.8	977 ± 6	integral
$?V^\pm \rightarrow \pi^\pm + \pi^0 + \pi^0$				integral
$V_2^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ $\rightarrow (\pi^+ + \pi^- + ?^0)?$ $\rightarrow (\pi^\pm + \tau^\pm \text{ or } \zeta^0)?$	2×10^{-10}		950	integral
$? \zeta^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$			500?	
$? \zeta^\pm$			500?	

Figura 63 - Estado de conhecimento sobre as partículas estranhas na terceira conferência Rochester realizada em dezembro de 1952. (Fonte: Wróblewski, 2004)

As confusões eram tão intensas, que uma organização e sistematização destes conhecimentos eram necessárias. Por este motivo, neste contexto, acontece um dos mais importantes encontros da história da física de partículas – o *Internacional Cosmic Ray Conference of 1953* (Conferência Internacional de Raios Cósmicos de 1953) Segundo Wrobléwski.

Haviam 185 participantes de 22 países (França - 43; UK - 42, Itália -27; USA - 20; Alemanha - 12; Bélgica – 8; Índia, Irlanda e Suíça - 4; Canada, Dinamarca, Israel, Japão, Suécia e Turquia - 2; Brasil, Hungria, México, Holanda, Noruega, Espanha e Iugoslávia – 1. (Wrobléwski, 2004, p.5, tradução nossa)

O primeiro passo importante foi a organização das partículas em grandes grupos e a denominação de símbolos para partículas já estabelecidas. Organizaram as partículas em dois grupos:

- Híperons: partículas mais pesadas que os núcleons
- Káons: partículas mais pesadas que os píons e mais leves que os núcleons

Novos símbolos foram adotados para as “*V-particles*”:

- V_1^0 foi denominado como Λ
- V_2^0 como θ^0 .

Após a realização da conferência, as atividades científicas seguiram de forma mais organizada e um resultado significativo marcaria o início de uma nova era nas investigações sobre o mundo das partículas elementares: a era das pesquisas com aceleradores de partículas nos grandes laboratórios. Como eventos de produção destas partículas estranhas exigiam energias e colisões muito específicas entre partículas elementares, contar com a aleatoriedade dos raios cósmicos não era o melhor caminho. O desenvolvimento de radares na segunda guerra mundial possibilitou o desenvolvimento de tecnologias de fontes de alta frequência e possibilitaram a construção de aceleradores do tipo sincrotron, como o Bevatron e o Cosmotron, ambos nos Estados Unidos da América. A proposta do sincrotron foi idealizada por Marcus Oliphant,

“Partículas poderiam ser forçadas a se mover em um círculo de raio constante permitida pela aplicação de um campo magnético que deveria ser variado de acordo com seu ganho de energia, de maneira que o raio de sua trajetória permanecesse constante enquanto ela é acelerada por um campo elétrico variável aplicado nos terminais de eletrodos coaxialmente conectados.” (OLIPHANT, apud SESSLER, 2007, tradução nossa)

O mecanismo proposto por Oliphant consistia, basicamente, em manter a partícula confinada em uma determinada região enquanto é acelerada. Ele gostaria que as partículas permanecessem em um anel e que o raio de sua trajetória não fosse aumentado, desta maneira, a partícula poderia ser acelerada continuamente apenas percorrendo o círculo, sendo que quanto mais voltas fossem percorridas, maior seria energia que ela ganharia. Mas esse mecanismo é possível de ser criado? Uma partícula carregada sob a ação de um campo magnético realiza uma trajetória circular cujo raio é dado pela seguinte expressão:

$$R = \frac{mv}{qB} \quad (18)$$

O numerador da expressão consiste de dois parâmetros que mudam quando a partícula é acelerada: a velocidade e a massa, uma vez que ao atingir velocidades próximas a da luz toda a energia fornecida é convertida em massa. Já se observarmos o denominador, verificaremos o parâmetro que é responsável por alterar sua trajetória: o campo magnético. O desejo de Oliphant é manter o raio R constante enquanto a partícula é acelerada, o único modo de fazer isso é variar o campo magnético junto com os parâmetros que variam na aceleração. Se em um período de aceleração a velocidade for dobrada, dobrarmos também o campo magnético que desvia a partícula, compensaremos o aumento na velocidade com o aumento no campo magnético e o raio da trajetória permanecerá constante, mantendo a partícula continuará no anel. O mesmo raciocínio vale para o aumento da massa. Então, o mecanismo funciona desde que a mudança na energia da partícula esteja em sincronia exata com a mudança no campo magnético - exatamente por este princípio de funcionamento que ele foi nomeado de Síncrotron.

Figura 64 - Cósmotron construído no Laboratório de Brookhaven. (Fonte: Wikipedia)

Figura 65 - Acelerador Bevatron construído no Laboratório de Berkeley. (Fonte: Wikipedia)

Com a construção de aceleradores de partículas, métodos de investigação mais detalhados sobre reações produzidas na colisão de partículas puderam ser efetivados. Por exemplo, a produção de Λ^0 foi profundamente investigada, como é mostrado na figura 66.

Search for Λ^0 production				
Authors	Reaction	Energy (MeV)	Result	
Cocconi & Silverman [28] (1951)	$\gamma + C$	≤ 310	negative	
Schein <i>et al.</i> [23] (1952)	$\pi^- + C$	227	positive	
Hildebrand & Leith [29] (1953)	$p + C$	345	negative	
Garwin [30] (1953)	$p + C$	450	negative	
Rosenfeld & Treiman [31] (1953)	$p + CH_2$	430	negative	
Schein <i>et al.</i> [27] (1953)	$\pi^- + C$	227	positive	
Bernardini & Segrè [32] (1954)	$\gamma + Al$	≤ 330	negative	
Balandin <i>et al.</i> [33] (1955)	$N + N$	670	negative	

Figura 66 - Tentativas de produção de Λ^0 . (Fonte: Wróblewski, 2004)

Um estudo marcante para a física e partículas na década de 50, foi realizado por Thompson (1956) e baseou-se na comparação das trajetórias “V” produzidas pelos $V^+(K^+) \rightarrow \pi^+ + \pi^0$ e o decaimento triplo do méson- $\tau \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$. Seu trabalho consistiu em realizar medidas precisas da massa e do tempo de vida média destas partículas, apontando para o fato de que ambos possuem exatamente o mesmo valor para estas duas grandezas – sugerindo ao final do artigo que ambas poderiam ser as mesmas

partículas. No entanto, nenhuma partícula até este momento da história havia demonstrado modos de decaimentos diferentes. Além disso, sistemas físicos deveriam obedecer a uma série de princípios de conservação sob diferentes operações de modificação do sistema, que revelam suas propriedades de simetria. Uma das operações possíveis de mudança do sistema corresponde à paridade, que se refere a uma operação de inversão das coordenadas espaciais do sistema como, por exemplo, apontar um relógio em direção a um espelho, como mostra a figura 67. Se invertemos espacialmente as coordenadas de um relógio, colocando-o de frente a um espelho, ele manterá o mesmo comportamento fenomenológico, isto é, movimentando-se do ponteiro inicial 12 para o ponteiro final 3, no entanto, para a pessoa que observa terá impressão de que houve uma inversão de seu movimento de rotação.

Figura 67 - Simetria de paridade observada no relógio: invertendo as coordenadas espaciais ele mantém o mesmo comportamento fenomenológico, indo do 12 ao 3. (Fonte: Wikipedia)

Já se o sistema sofre uma espécie de quebra da simetria de paridade, ele não apresentará o mesmo comportamento fenomenológico. Ao inverter as posições espaciais, observaremos um comportamento inverso, com os ponteiros indo de 12 para o 6, como mostra a figura 68.

Figura 68 - Quebra de simetria da paridade: invertendo as coordenadas espaciais o comportamento fenomenológico é alterado, fazendo o ponteiro ir do 12 ao 6. (Fonte: Wikipedia)

Da mesma forma que jamais observaríamos o relógio realizar uma quebra da simetria de paridade, esperava-se que os fenômenos naturais também não sofressem tal efeito. Pois é exatamente isto que aconteceria se uma mesma partícula fosse dotada de modos de decaimento fenomenologicamente diferentes com relação a paridade – ou os decaimentos são de partículas que diferem umas das outras, de modo que não há

correlação de paridade entre elas, ou são dois modos de decaimento de uma mesma partícula, partindo do pressuposto que há quebra na simetria de paridade. Nessa perspectiva, Lee e Yang propuseram que a paridade sofresse uma quebra de simetria nas situações de decaimento regidas pela interação fraca.

Experimentos recentes indicam massas e tempos de vida idênticos para os mésons $\theta^+(K_{\pi 2}^+)$ e $\tau^+(K_{\pi 3}^+)$. Por outro lado, análises dos produtos do decaimento do τ^+ sugerem fortemente, no campo do momento angular e da conservação da paridade, que o τ^+ e o θ^+ não são as mesmas partículas. Isso nos coloca numa situação bastante desconcertante que vem sendo amplamente discutida. Uma forma de escapar desta dificuldade é assumir que a paridade não é estritamente conservada, então τ^+ e o θ^+ são diferentes modos de decaimentos da mesma partícula, que possuem singularmente a mesma massa e o mesmo tempo de vida. (Lee & Yang, 1956, p.254, tradução nossa)

A proposição da quebra de simetria de paridade foi realizada de forma cuidadosa, uma vez que já havia sido demonstrado, dentro de concepções teóricas e verificações experimentais, de que a paridade é conservada tanto nas interações eletromagnéticas, quanto nas interações fortes. No entanto, para as interações fracas, a “conservação da paridade se trata apenas de uma hipótese extrapolada não embasada por evidências experimentais” (Lee & Yang, 1956, p.254). Apontam, então, para a necessidade de realizar experimentos evidenciando a quebra de simetria de paridade nas interações fracas e afirmam que se ela for comprovada, ficará claro que partículas que decaem sob o efeito desta interação poderão não conservar a paridade e, em consequência disto, apresentar diferentes modos de decaimentos.

Baseado nas preocupações de Lee & Yang, e também por pedido de ambos, Madame Wu realiza experimentos buscando comprovar a quebra de simetria de paridade em interações fracas e, para demonstrar que não se trata de efeitos provocados pelas partículas estranhas, avalia a distribuição angular de elétrons no decaimento β do elemento radioativo cobalto 60.

Em artigo recentemente publicado sobre a questão da conservação da paridade nas interações fracas, Lee & Yang examinaram criteriosamente as informações experimentais sobre esta questão e chegaram à conclusão de que não há evidência da existência, seja para apoiar, seja para refutar, da conservação da paridade em interações fracas. [...] Nos decaimentos β , pode-se medir a distribuição angular de elétrons vindo de decaimentos β de núcleos polarizados. Se uma assimetria na distribuição entre θ e 180° (onde θ é o ângulo entre a orientação do núcleo mãe e o momento dos elétrons) for observada, ela fornecerá uma prova inequívoca de que a

paridade não é conservada em decaimentos β . (WU, 1957, p.1413, tradução nossa)

No experimento realizado por Wu, cujo aparato está apresentado na figura 70, a amostra de cobalto é colocada sob a ação de um campo magnético que tem como intuito dotar o decaimento com uma orientação privilegiada para a emissão de elétrons. O decaimento β do cobalto forma átomos de Níquel, seguido pela emissão de elétrons, provocado pela interação fraca, e raios γ , decorrente da interação eletromagnética.

Figura 69 - Decaimento do Cobalto 60. (Fonte: Wikipedia)

A presença dos raios γ no experimento é crucial, uma vez que se sabe que eles são emitidos a partir da interação eletromagnética, processo regido pela conservação da paridade, portanto e ele é o parâmetro para avaliar se há, de fato, quebra de simetria nas interações fracas. O experimento consiste em comparar a distribuição angular de raios γ e de elétrons, se ambos forem emitidos na mesma direção e na mesma proporção, a paridade será conservada também nas interações fracas. Por outro lado, qualquer assimetria observada indicará o contrário.

Figura 70 - Arranjo experimental utilizado por Wu. A amostra de Cobalto é inserida no interior de uma câmara na qual é aplicado sobre ela campos magnéticos que apontam na direção superior ou na direção interior do tubo. (Fonte: WU, 1957)

Os resultados experimentais obtidos por Wu são apresentados na figura 71. No gráfico à esquerda temos a distribuição angular de detecção dos fótons e, do lado direito, dos elétrons. Os dados foram coletados enquanto o campo magnético é orientado para cima e para baixo, distinguindo os pontos experimentais por x e o.

O comportamento dos gráficos evidência claramente uma assimetria entre a emissão de fótons e a emissão de elétrons, indicando que fótons tem um comportamento sobre a inversão de paridade, enquanto elétrons tem outro.

Figura 71 - Resultados obtidos por Madame Wu. (Fonte: Wu, 1957)

Para Wu, o experimento evidencia a quebra de simetria de paridade nas interações fracas, percebendo também uma quebra na simetria de conjugação de carga.

Segundo Lee & Wang, este experimento indica não só que a conservação da paridade foi violada, mas também a invariância sobre a conjugação de carga também foi violada. (WU, 1957, p.1414, tradução nossa)

A comprovação de quebra da paridade trouxe à tona discussões fundamentais sobre o papel das simetrias na física de partículas. Como Lee & Yang previram, deveria ser possível observar diferentes modos de decaimento em interações regidas pela força fraca, no entanto, o decaimento β sempre apresentava as mesmas estruturas, enquanto que os decaimentos das partículas "V" se mostravam cada vez mais complexos.

4.8 Simetrias e a proposição da existência do Quark

A descoberta das partículas estranhas virou o mundo da física de partículas elementares de cabeça para baixo. Para lidar com essa complexidade, Gell-Mann (1953) resgata o conceito de spin isotrópico formulado por Heisenberg duas décadas antes, e passa a entender as diversas partículas descobertas na década de 50 como uma pequena parcela de partículas se manifestando em diferentes estados.

Vamos supor que estas novas partículas instáveis sejam férmions de spin isotrópico inteiro e bósons de spin isotrópico semi-inteiro. Por exemplo, as partículas V formariam um tripleto, consistindo de V^+ , V^0 e V^- . (GELL-MANN, 1953, p.833, tradução nossa)

Na visão de Gell-Mann, as “ V -particles” que, aparentemente, seriam 3 partículas diferentes, são na realidade 3 estados de isospin de uma mesma partícula. Afirma ainda, que as interações fundamentais podem ser organizadas em três grandes blocos:

- (i) Interações que conservam rigorosamente o spin isotrópico. (assumindo estas como sendo a forte);
- (ii) Interações eletromagnéticas;
- (iii) Outras interações dependentes da carga [ainda não identificada], que assumiremos como sendo a fraca.

Gell-Mann tinha uma capacidade de avaliação ampla dos resultados experimentais e dos avanços teóricos que vinham sendo feitos nesta época. Sua abordagem de retomar o conceito de Isospin, não apenas se mostrou eficaz para a explicação da diversidade de partículas que estavam sendo encontradas, como também possibilitou a previsão de comportamentos intrigantes de partículas já existentes. Em seu trabalho publicado em 1955, aponta para o fato de uma mesma partícula, que interage fracamente com a matéria, apresentar dois modos de decaimentos diferentes com distintos tempos de meia vida.

Para resumir, nossa imagem do θ^0 [K^0] que ela é uma mistura de partículas exigindo dois tempos de vida distintos, no qual cada tempo de vida está associado a diferentes modos de decaimento. (Gell-Mann, 1955, p. 1388, tradução nossa)

A existência de Káons com meia vida maior das obtidas até então, foi evidenciada por Alvarez em 1957. Não somente o decaimento previsto por Gell-Mann, mas diversos modos de decaimento se mostraram como pertencentes ao K^+ . A figura 72 compara as partículas

descobertas à época com os modos de decaimento e a identidade de cada partícula atualmente.

Old	Present
τ	$K_{\pi 3} : K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$
V_1^0	$\Lambda^0 \rightarrow p \pi^-$
$V_2^0(\theta^0)$	$K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$
κ	$K_{\mu 2} : K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$
	$K_{\mu 3} : K^+ \rightarrow \mu^+ \pi^0 \nu_\mu$
$\chi(\theta^+)$	$K_{\pi 2} : K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$
V^+, Λ^+	$\Sigma^+ \rightarrow p \pi^0, n \pi^+$

Figura 72 – Comparação entre as partículas identificadas na década de 50 e suas identidades e modos de decaimentos. É importante notar que aquilo que havia sido identificados como 7 partículas, são na realidade apenas 3 com diferentes modos de decaimentos e diferentes tempos de vida média. (GELL-MANN, 1957)

A abordagem do spin isotrópico, fez com que Gell-Mann percebesse algumas propriedades bastante peculiares sobre as características das interações fortes. Cada conjunto de estados de uma mesma partícula é denominado como multiplete. Por exemplo, o próton e o nêutron formam um dublete, enquanto os três píons formam um tripleto. Sua primeira tarefa foi compreender como as partículas descobertas até então podiam se organizar e o que podia ser deduzido desta organização. A figura 71 representa a organização preliminar formulada em 1957.

MASSES AND LIFETIMES OF ELEMENTARY PARTICLES					
Particle	Spin	Mass (Errors represent standard deviation) (Mev)	Mass difference (Mev)	Mean life (sec)	Decay rate (number per second)
γ	1	0		stable	0.0
$\nu, \bar{\nu}$	$\frac{1}{2}$	0		stable	0.0
e^-, e^+	$\frac{1}{2}$	0.510976*		stable	0.0
μ^-, μ^+	$\frac{1}{2}$	105.70 $\pm$ 0.06*		$(2.22 \pm 0.02) \times 10^{-6}$ *	0.45×10^8
$\pi^\pm$	0	139.63 $\pm$ 0.06*	4.6*	$(2.56 \pm 0.05) \times 10^{-8}$ *	0.39×10^8
π^0	0	135.04 $\pm$ 0.16*		$(0.0 < \tau < 0.4) \times 10^{-16}$ (O)	$> 2.5 \times 10^{18}$
$K^\pm$	0	494.0 $\pm$ 0.20 (a)		$(1.224 \pm .013) \times 10^{-8}$ (b)	0.815×10^8
K^0	0	493 $\pm$ 5 (Th)		$K_L: (0.95 \pm .08) \times 10^{-10}$ (P) $K_S: (3 < \tau < 100) \times 10^{-8}$ (L)(P)	1.05×10^{10} $(> 0.01 < 0.3) \times 10^8$
p	$\frac{1}{2}$	938.213 $\pm$ 0.01*	7.1 $\pm$ 0.4 7.6 $\pm$ 0.3	stable	0.0
n	$\frac{1}{2}$	939.506 $\pm$ 0.01*		$(1.04 \pm 0.13) \times 10^{-13}$ *	0.96×10^{-3}
Λ	$\frac{1}{2}$?	1115.2 $\pm$ 0.13 (B)		$(2.77 \pm 0.15) \times 10^{-10}$ (d)	0.36×10^{10}
Σ^+	$\frac{1}{2}$?	1189.3 $\pm$ 0.35 (B)		$(0.78 \pm 0.074) \times 10^{-10}$ (e)	1.28×10^{10}
Σ^-	$\frac{1}{2}$?	1196.4 $\pm$ 0.5 (B)		$(1.58 \pm 0.17) \times 10^{-10}$ (f)	0.64×10^{10}
Σ^0	$\frac{1}{2}$?	1188.8 $\pm$ 0.12 (g)		$< 0.1 \times 10^{-10}$ (A)	$> 10 \times 10^{10}$
				theoretically $\sim 10^{-19}$	theoretically $\sim 10^{19}$
Ξ^-	?	1321 $\pm$ 3.5*		$(4.6 < \tau < 200) \times 10^{-10}$ (Tr)	$(> 0.005, < 0.2) \times 10^{11}$
Ξ^0	?	?		?	

Figura 73 - Síntese de Gell-Mann organizando e apresentando as partículas elementares descobertas na década de 50. (Fonte: GELL-MANN, 1957)

Nesta sistematização preliminar, vemos as partículas organizadas em grupos semelhantes àqueles definidos na *International Cosmic Ray Conference*. Há um primeiro grupo composto pelo fóton, o *quantum* da interação eletromagnética. Um segundo grupo, denominado como **léptons**, formado pelas partículas leves ($e^\pm, \mu^\pm$). Um terceiro grupo, denominado como mésons, formado por partículas com massas intermediárias, isto é, mais leves que os núcleons e mais pesadas que os píons ($\pi^\pm, \pi^0, K^0, K^\pm$). Por último, um quarto grupo, denominado como bárions, composto por partículas tão ou mais pesadas que o núcleons ($p, n, \Lambda, \Sigma^0, \Sigma^\pm, \Xi^0, \Xi^\pm$). Neste sentido, os multipletos de Isospin seriam, a princípio, dados pelas seguintes proposições:

Tabela 5 - Multipletos de Isospin apresentados por Gell-Mann segundo a classificação de partículas apresentadas em 1957.

Multiplete	Estados de isospin
Triplete π	π^+, π^- e π^0
Triplete K	K^+, K^- e K^0
Dubleto nucleon	p e n
Singleto Λ	Λ
Triplete Σ	Σ^+, Σ^- e Σ^0
Dubleto Ξ	Ξ^- e Ξ^0

Segundo Gell-Mann, cada estado de Isospin estaria associado a uma multiplicidade $2I+1$, neste sentido, por exemplo, o núcleon, que possui isospin $\frac{1}{2}$, teria uma multiplicidade de $2 \times \frac{1}{2} + 1 = 2$, que é exatamente a quantidade de estados que vemos em seu estudo. Além de prever a quantidade de estados nos quais uma partícula pode se manifestar na realidade física, Gell-Mann afirma que o Isospin é estritamente conservado nas interações fortes, fruto de uma simetria interna das próprias partículas. No entanto, como também possuem carga elétrica, a força eletromagnética é responsável por violar esta simetria, ocasionando a diferença de massa entre os prótons e os nêutrons.

As interações eletromagnéticas são manifestamente dependentes da carga. Elas violam a conservação do spin isotópico ao remover a degenerescência dos multiplicadores de carga. Por exemplo, as forças n-n e p-p são idênticas enquanto as interações fortes são levadas em consideração, mas a força de Coulomb obviamente destrói a igualdade. Da mesma forma, os efeitos eletromagnéticos presumivelmente dão origem à diferença de massa entre os prótons e os nêutrons. (GELL-MANN, 1957, p.415)

Apesar disso, não há equidade na existência das partículas elementares. Os fótons, os elétrons e os núcleons são encontrados em abundância na natureza, enquanto que as partículas estranhas somente puderam ser encontradas a partir de um estudo de raios cósmicos de energias elevadas e, posteriormente, a partir do produto de colisões de altas energias entre partículas muito específicas. Há uma clara distinção entre estas partículas conhecidas e as partículas estranhas. Será que há alguma propriedade fundamental que nos permita distinguir umas das outras? Mais do que isso, será que há alguma propriedade que explique por que elas podem ser distinguidas umas das outras? Neste sentido, Gell-Mann constrói uma nova propriedade quântica denominada como **estranheza** para explicar a diferenciação entre as partículas usualmente vistas no mundo e estas que aparecem somente em condições especiais.

Gell-Mann pontua que, apesar de provocar quebra de simetria de Isospin, a interação eletromagnética mantém inalterada uma de suas componentes que denominaremos como I_z . Neste sentido, da mesma forma que o eletromagnetismo é acoplado devido a uma carga elétrica, as interações fortes deverão ser acopladas segundo uma carga que depende de sua estranheza e de sua natureza constitutiva. Esta carga é denominada por Gell-Mann como Hipercarga Y e depende da natureza Bariônica da partícula (B) e de sua estranheza (S), sendo matematicamente definida como:

$$Y = B + S \quad (19)$$

Paralelamente ao trabalho de Gell-Mann, e aparentemente de forma independente, o japonês Nijishima construía um formalismo parecido. Tanto Gell-Mann, quanto Nijishima, buscavam encontrar a relação entre a carga elétrica, a manifestação de Isospin da partícula e as características da interação forte baseadas na hipercarga. Avaliando a tabulação de partículas já existentes, constroem, independentemente, uma fórmula que até hoje é conhecida como fórmula de Gell-Mann-Nijishima:

$$Q = I_z + \frac{1}{2}Y = I_z + \frac{1}{2}(B + S) \quad (20)$$

A definição do conceito de estranheza, por mais que tenha sido realizada a partir de uma indução das intrigantes propriedades apresentadas por tais partículas, redimensiona a forma como encaramos a dinâmica do mundo elementar. Tendo definidas uma série de características das partículas, Gell-Mann procura organizar os multipletos em grupos de

partículas com propriedades semelhantes, como sua carga elétrica, estranheza, natureza bariônica e isospin. Uma organização preliminar é apresentada na figura 74.

Figura 74 - Organização das partículas segundo suas massas de repouso, sua carga elétrica e as novas propriedades delimitadas por Gell-Mann, como o número bariônico e a estranheza. (GELL-MANN, 1957)

Esta organização esquemática levou Gell-Mann a ter uma visão mais ampla do problema de multiplicidade das partículas elementares. Mais do que arranjados em grupos de isospin, é possível ver uma correlação entre eles demonstrando uma espécie de simetria geométrica visual que o auxiliou tanto na conceituação de partículas já existentes, como na previsão de novas partículas. Pensando na simetria de forma explícita, e que na estrutura elementar explicitada agem, essencialmente, as forças forte e a eletromagnética, constrói um esquema geométrica distribuindo a carga elétrica e a estranheza das partículas chegando ao **Caminho Octeto (Eightfold Way)**.

Uma primeira análise pode ser feita tomando como referência o grupo de bárions descobertos até 1957, ela está ilustrada na figura 75.

Figura 75 - Octeto de bárions formado pelas partículas conhecidas em 1957. Note que eles estão organizados segundo suas multiplicidades de Isospin, sua Estranheza e sua Carga elétrica. (Fonte: Wikipedia)

As partículas são organizadas ao longo dos vértices de um octógono de acordo com suas multiplicidades de isospin, sua estranheza (S) e sua carga elétrica Q. Segundo essa abordagem, elas podem ser organizadas perfeitamente nas diagonais do polígono, sendo seu centro pontuado pelas partículas de carga elétrica neutra. Perturbações envolvendo a interação eletromagnética (cargas elétricas) ou a interação forte (estranheza), provocam uma transformação no estado da partícula fazendo-a adquirir as propriedades de alguma das indicadas nas diagonais do polígono.

Analogamente a este octeto de Bárions, Gell-Mann também construiu um octeto de mésons e anti mésons, cujo centro aloca partículas de estranheza e carga elétrica neutra, ilustrado na figura 76.

Figura 76 - Octeto de mésons formado pelas partículas conhecidas em 1957. (Fonte: Wikipedia)

Note que as representações de simetria proposta por Gell-Mann ainda não lidam com todas as partículas descobertas até 1957. Era preciso contabilizar ainda as antipartículas dos bárions Σ e Ξ – e é exatamente nesta concepção que aparecerá o caráter preditivo de sua proposição. Como Σ e Ξ apresentam, respectivamente, um tripleto e um dubleto e estranhezas -1 e -2, sua organização preliminar ficaria como mostrado na figura 77:

Figura 77 - Organização preliminar dos bárions Σ e Ξ segundo a proposta do Eightfold Way de Gell-Mann. (Fonte: adaptado de Wikipedia)

Para que a simetria seja completa, assim como nos multipletos apresentados nas figuras anteriores, é preciso que haja a existência de mais uma partícula de estranheza -3 e carga elétrica -1 para que ela se complete – é baseado neste comportamento que Gell-Mann propõe a existência de uma nova partícula ainda não detectada em experimentos: o Ω^- .

Figura 78 - Previsão do Ω^- . (Gell-Mann, 1957) (Fonte: adaptado de Wikipedia)

A detecção do Ω^- seria crucial para aceitação da proposta de Gell-Mann para interpretação da organização das partículas elementares. Menos de 5 anos após a previsão, Barnes (1964) apresenta evidências experimentais da detecção de uma partícula com as características previstas por Gell-Mann, a partir da interação de um K^- com um próton no hidrogênio líquido de uma câmara de bolhas, conforme ilustrado na figura 79.

Figura 79 - Produção do omega minus detectada em uma câmara de bolhas. (Fonte: <http://www.hep.fsu.edu/~wahl/satmorn/history/Omega-minus.asp.htm>)

Na apresentação de seus dados, exalta a relevância da concepção teórica construída por Gell-Mann.

[...] relatamos evidências da existência de um novo hiperon carregado negativamente com estranheza $S = -3$ e massa $M = 1686 \pm 12 \text{ MeV} / c^2$ que decaiu fracamente em um Ξ^0 e π^- . Esta partícula foi identificada com o Ω^- previsto pelo esquema de simetria unitária das interações propostas por Gell-Mann e Ne'eman. Neste modelo, com base em uma representação de 8 dimensões de $SU(3)$, as partículas que interagem fortemente são identificadas com os vetores de base das representações irredutíveis no produto direto 8×8 . (Barnes, 1964, p.134)

O *Eightfold Way* funcionava e isso intrigava Gell-Mann. Algo deveria ser responsável pela simetria das imagens construídas com os múltiplos de partículas. Apresentamos aqui uma forma conceitual e qualitativa de encarar o sistema de simetria unitária conhecido como *Eightfold Way*. O verdadeiro problema de Gell-Mann era matemático e consistia em compreender de que forma as partículas de seu caminho octeto se

manifestariam na realidade física. A condução matemática de Gell-Mann seguia um pressuposto teórico na qual as partículas se manifestariam devido a uma quebra da simetria interna existente no octeto.

Se assumirmos que as interações entre os bárions e mésons são corretamente descritas em termos de uma quebra de simetria no “caminho octeto”, somos tentados a procurar por alguma explicação mais fundamental sobre a situação. (GELL-MANN, 1964, p.214)

Uma primeira abordagem que poderia ser adotada, segundo Gell-Mann, é propor uma estrutura teórica para a dinâmica das interações fortes na qual poderiam ser deduzidas todas as propriedades de isospin, conservação da estranheza e à quebra de simetria que daria origem a todas as partículas observadas nos experimentos e previstas pelo *Eightfold Way*. Mas será o *Eightfold Way* a forma correta de representar as quebras de simetria ou é apenas um formalismo análogo que levou à resultados semelhantes à realidade experimental? No *Eightfold Way*, o octeto de partículas pode ser pensado como estados ligados de um tripleto fundamental (p , n e Λ)²⁶. Além do mais, as partículas são representadas por dubletos. Por exemplo, o π^+ pode ser representado pelo dubleto ($n\bar{p}$) e o K^- pelo dubleto ($\bar{p}\Lambda$). O formalismo é colocado em dúvida por Zweig e pelo próprio Gell-Mann, uma vez que se torna cada vez mais complicado construir partículas mais complexas a partir deste tripleto. Ambos então propõem uma abordagem alternativa, na qual as partículas poderiam ser pensadas em termos de um tripleto fundamental e sua representação também deveria ser constituída pelo tripleto, denominado por Zweig como (p_0 , n_0 e Λ_0):

Se construirmos os bárions a partir de tripletos de partículas (p_0 , n_0 e Λ_0), (p_0 , n_0) tendo estranheza zero, dubleto de isospin [$I = \frac{1}{2}$] e Λ_0 tendo estranheza -1 e singleto de isospin [$I = 1$], encontraremos a possibilidade classificação dos bárions em grupos de 8 [...] (ZWEIG, 1964, p.4)

²⁶ A noção de tripleto fundamental está associada ao entendimento da produção da diversidade de partículas a partir de apenas algumas delas utilizando as propriedades base de sua constituição: carga elétrica, estranheza e isospin. O tripleto considerado é p , n e Λ por apresentar unidades das propriedades base citadas. “ p ” tem $Q = +1$, $S = 0$ e $I = \frac{1}{2}$. “ n ” tem $Q = 0$, $S = 0$ e $I = \frac{1}{2}$. “ Λ ” tem $Q = 0$ e $S = -1$ e $I = 1$. Nas respectivas anti-partículas as propriedades são opostas. Não é dito em nenhum momento desta formulação que p , n e Λ seriam as próprias entidades próton, nêutron e lambda. No entendimento que obtivemos da teoria, p , n e Λ são considerados apenas como operadores matemáticos dotados com os autovalores Q , S e I e utilizados como geradores para as demais partículas. Essa proposição fica clara quando o *quark* é formalmente proposto.

Apesar do formalismo diferente, ainda é possível construir os mesmos octetos obtidos no *Eightfold Way*, no entanto, torna mais simples a representação dos estados mais complexos. Por outro lado, a constituição tripla altera o número de bárion necessário para a formulação final. Para $B = 1$, constituição dupla apresenta $\frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$, enquanto que para a constituição tripla temos $\frac{1}{3} + \frac{1}{3} + \frac{1}{3} = 1$. Essa alteração puramente matemática no número de bárion, implica numa alteração paradoxal na carga elétrica. Segundo Zweig,

[...] ao assumirmos o número de bárion $\frac{1}{3}$ para cada membro do tripleto, somos conduzidos, a partir da fórmula de Gell-Mann-Nijishima, a cargas elétricas não inteiras para $(p_0, n_0$ e $\Lambda_0)$. [...] (p_0, n_0) contendo carga $Q = +\frac{2}{3}$ e $Q = -\frac{1}{3}$ [com $S = 0$], enquanto que Λ_0 tem uma carga $Q = -\frac{1}{3}$ [com $S = -1$]. Chamaremos p_0, n_0 ou Λ_0 de “ace”. [...] Trabalharemos com estes “aces” como unidades fundamentais no qual todos mésons e bárions são constituídos. (ZWEIG, 1964, p.4, tradução nossa)

A quantização da carga elétrica, em unidades múltiplas de “e”, era um fato aceito desde a descoberta do elétron e sua rigorosa medida por Milikan no início do século XX. A proposição de entidades com carga elétrica fracionada soava um tanto quanto estranha. Estranhamento este que levou Gell-Mann e Zweig a se manifestarem com dúvidas sobre a realidade de tal entidades:

É razoavelmente possível que os “aces” sejam completamente ficcionais, providenciando meramente uma forma conveniente de expressar a quebra de simetria no *Eightfold Way*. Por outro lado, como veremos, uma busca experimental pelos “aces” poderia ser profundamente vantajosa. (ZWEIG, 1964, p.4, tradução nossa)

Eu não gostaria de chamar estes “quarks” confinados como reais porque gostaria de evitar dolorosas discussões com filósofos sobre a realidade destes objetos permanentemente confinados. (GELL-MANN, 1969, p.693, tradução nossa)

Os “aces”, nomeados por Zweig, teriam sua nomenclatura proposta diferentemente por Gell-Mann, o termo quark havia sido cunhado. No entanto, independente de nomenclatura, há uma proposição clara sobre seu papel. A diversidade de partículas observadas nos aceleradores e nos raios cósmico nas últimas décadas não são, em sua totalidade, elementares – mas sim constituídas de estruturas ainda mais básicas: os *quarks*. A proposição do quark se mostrou como uma solução elegante para a diversidade de partículas – não se necessitava mais supor a existência de uma imensidão de partículas elementares, apenas 3 seriam o suficiente para que, a partir de suas combinações, todas as observações reunidas nas últimas 3 décadas poderiam ser compreendidas.

Apesar da elegância, ambos se mostram receosos sobre a realidade de tais entidades. No início do século Rutherford havia proposto que dentro do átomo havia um núcleo, é como se dentro do próprio núcleo houvessem partículas que também fossem dotadas de uma estrutura interna. Apesar dos receios, este é um momento profundamente importante pois é o marco de nascimento do quark como concepção racional e como princípio de busca experimental. O tripleto (p_0 , n_0 e Λ_0), seria futuramente renomeado como (u, d e s), *up*, *down* e *strange* – sendo *up* o quark dotado com carga elétrica fracionada e positiva, *down* o quark dotado com carga elétrica negativa e o *strange* dotado de estranheza. Este fundamento de base seria estendido: as partículas seriam constituídas por quarks obedecendo princípios de quebra de simetria explorados no *Eightfold Way*. A partir dos *quarks* o *Eightfold Way* é naturalmente reconstruído e outros esquemas de simetria podem ser previstos. Futuramente esta constituição levaria a estrutura de base do Modelo Padrão da Física de Partículas.

Example Baryons (qqq) and AntiBaryons ($\bar{q}\bar{q}\bar{q}$)					
Symbol	Name	Quark Content	Chg	Mass GeV/c ²	Spin
p	proton	uud	$+e$	0.938	1/2
$\bar{p}$	antiproton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	$-e$	0.938	1/2
n	neutron	udd	0	0.940	1/2
Λ	lambda	uds	0	1.116	1/2
Δ^{++}	delta++	uuu	$+2e$	1.232	3/2
Ω^-	omega-	sss	$-e$	1.672	3/2

Mesons $q\bar{q}$					
Mesons are bosonic hadrons					
These are a few of the many types of mesons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c ²	Spin
π^+	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
K^-	kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0

Figura 80 - Constituição dos mésons e bárions por quarks segundo a proposição de Gell-Mann e Zweig. (Fonte: <http://www.futura-sciences.us/>)

4.9 O diálogo razão e experimentação no desenvolvimento da Física de Partículas

As teorias são nossas invenções, nossas idéias – não se impõe a nós, são instrumentos que fabricamos. Os **idealistas** percebem muito bem. Algumas dessas teorias podem chocar-se com a realidade; quando isso acontece ficamos sabendo que há uma realidade: algo nos avisa que nossas idéias podem estar erradas. Por isso o **realista** pode ter razão.

Karl Popper

“Apreender o pensamento científico contemporâneo em sua dialética e dele assim mostrar a novidade essencial. Tal é a finalidade filosófica [...]”²⁷ desta dissertação. Uma relação de complementaridade entre o intuito da obra *O Novo Espírito Científico* e a realização desta pesquisa. Dentre todas as obras publicadas pelo filósofo francês, *O Novo Espírito Científico* é a que mais se aproxima do objetivo de demonstrar as características que demarcam o início de uma nova era no pensamento científico. Fazendo uma recapitulação histórica das concepções filosóficas e epistemológicas que nortearam a física ao longo de seu desenvolvimento, Bachelard busca demonstrar como a atividade científica contemporânea rompe uma tradição epistemológica consolidada há milênios. Tarefa semelhante a esta realizamos ao longo de todo o capítulo 4 desta dissertação. Nesta seção, tentaremos destacar as duas principais características que marcam a ciência contemporânea e como elas podem ser percebidas no desenvolvimento da física de partículas: a reestruturação dos fundamentos de base do conhecimento científico e o exímio diálogo entre racionalismo e o experimentalismo, de uma forma que jamais havia se visto em outro momento na história da ciência. Um diálogo onde a observação não parte da natureza, mas sim da construção matemática e da produção técnica dos fenômenos naturais.

Buscamos materializar a novidade essencial do pensamento científico contemporâneo utilizando a evolução da física de partículas elementares como ferramenta de análise, realizando aquilo que Dominique Lecourt, intérprete do pensamento Bachelardiano,

²⁷ (BACHELARD, 2000, p.20)

denominaria como epistemológica histórica. Para isto, dedicaremos esta última seção para clarear como esta novidade aparece no desenvolvimento da física de partículas.

Ao afirmar o nascimento de uma nova era, precisamos, como Bachelard, apontar as características que demarcaram o fim de uma última. Avaliar os traços de uma reformulação das bases que permearam à atividade científica ao longo de quase dois milênios, passando da antiguidade à modernidade, sendo ela o principal obstáculo epistemológico enfrentado na ciência contemporânea. Iniciaremos como Bachelard, rememorando a longa unidade que fundamentou o pensamento científico em quase 2000 anos de sua história: as geometrias euclidianas.

[...] a partir de Euclides, e durante dois mil anos, a geometria recebe, sem dúvida, acréscimos numerosos, mas o pensamento fundamental permanece o mesmo e pode-se crer que este pensamento geométrico fundamental é o fundo da razão humana. (BACHELARD, 1990, p.26)

As formas de construção dos argumentos em Aristóteles, que levaram a constituição do universo aristotélico-ptolomaico, seguem às formas de demonstração lógica semelhantes às presentes em *Os Elementos* de Euclides. Da mesma forma que para Platão, onde a verdadeira realidade está inacessível ao real imediato, os planos de construção no abstrato seguem às formas geométricas do euclidismo, sendo a essência da harmonia circular que reinou na antiguidade. Mesmo em Descartes, que busca o abandono completo de suas concepções em suas meditações, as formas de construir sua lógica de compreensão do mundo o conduzem naturalmente ao pensamento euclidiano, inaugurando sua epistemologia propriamente cartesiana. Enquanto em Bacon, a organização empírica passa essencialmente por uma organização geométrica, seja na forma de organizar a própria atividade empírica ou nos momentos de sistematização dos dados colhidos da experimentação.

Desde os silogismos de Aristóteles e as representações platônicas de universo de Platão; ao racionalismo cartesiano de Descartes e o empirismo fundado por Francis Bacon; perpassa uma grande linha de pensamento fundamental: o pensamento euclidiano em seus axiomas e suas formas de demonstração.

É nestas mesmas formas de demonstração que Galileu e Newton conduzem suas visões sobre o universo, ambos influenciados pelo cartesianismo, pelo empirismo de Bacon e até mesmo pelo idealismo de Platão. Do universo mecânico de Newton surgem os corpúsculos de Boyle e nas bases do atomismo de Demócrito os formatos geométricos dos euclidianos.

Perpassando a construção de todas as teorias da ciência moderna, sem exceção, enxergamos as bases euclidianas, em suas formas de representação e em suas estruturas de demonstração e validação – o atomismo antigo e o moderno não poderiam passar ilesos por essa construção epistemológica.

Desde os formatos circulares, aos potenciais de interação de simetria esférica às tendências naturais de movimento retilíneo e aos movimentos paralelos nunca se cruzando, a noção atomista clássica traz dentro de si características do pensamento euclidiano. É dentro dele que as primeiras concepções de átomo são concebidas e consideradas na periferia das teorias, como um suporte para visualização ou representação da realidade física, como apontado ao longo de toda seção 4.1.

Segundo Bachelard,

É preciso estudar a correspondência estabelecida entre estas geometrias. **É fazendo corresponder as geometrias que o pensamento matemático ganha uma realidade.** [...] como se sabe, a equivalência das diversas imagens geométricas foi definitivamente estabelecida quando se descobriu que umas e outras correspondiam a uma mesma forma algébrica. [...] em suma, a álgebra reúne todas as relações. (BACHELARD, 1990, p.31, grifo nosso)

Percebemos que é na correspondência entre as leis da física e o pensamento geométrico, que elas ganham um estatuto na representação da realidade na modernidade. As formas se tornam cada vez mais claras quanto maior forem as correspondências algébricas que ela cria. Assim se constituem as leis e teorias da ciência moderna, se tornando cada vez mais propositivas quanto maior seu caráter matemático de representação. Elevando ao máximo o papel das geometrias euclidianas na filosofia chegamos ao trabalho de Kant, arquitetando as bases fundamentais da razão humana. Mas chegamos também à paráfrase de Laplace, afirmando que dadas as condições de contorno de um fenômeno físico, nada seria incerto, e o futuro, bem como o passado, estariam abertos a seus olhos. É neste sentimento de determinismo bem fundamentado que a física chega ao século XIX. Bachelard aponta que Poincaré,

[...] afirmou que a geometria de Euclides permaneceria sempre a mais cômoda e que em caso de conflito desta geometria com a experiência a física, **preferir-se ia sempre modificar a teoria física do que mudar a geometria elementar.** (BACHELARD, 1990, P.37, grifo nosso)

Chegamos, finalmente, ao ponto crucial desta reflexão: a geometria euclidiana e a álgebra comutativa se tornaram historicamente o fundamento base do conhecimento

científico da modernidade. E é exatamente por este motivo que Poincaré aponta que as anomalias, quando surgem, não agem sobre as bases geométricas e algébricas que sustentam o pensamento físico, mas sim sobre a estrutura teórica que se construiu a partir delas. Não se questiona a forma de construção matemática da teoria, mas sim se as suposições teóricas que são utilizadas são as corretas para que a matemática forneça adequadamente o comportamento previsto. É nesta sensação que se passa toda a seção 4.2, quando novas faces da realidade são reveladas e o que se busca são adequações de suposições no interior da teoria – nem a própria teoria nem as bases matemáticas que a sustentam são reformuladas. Nos deparamos aqui com aquilo que Bachelard denomina como obstáculo da generalização, discutido ao final da seção 3.3. Havia um pressuposto de que o conhecimento matemático, provindo das bases supracitadas, era a linguagem **universal** para a construção e representação das teorias científicas.

Curiosamente, por mais que o obstáculo seja entendido como aquilo que se incrusta no conhecimento causando sobre ele uma espécie de inércia epistemológica, ele é necessário à superação – é preciso reconhecer contradições fundamentais na posição epistemológica caminhando rumo à superação. As revelações do final do século XIX, apontadas detalhadamente ao longo de toda a seção 4.2, apontavam para a necessidade de uma reestruturação de bases tanto do ponto de vista filosófico, como epistemológico. Neste espírito, Bachelard afirma que

É sobre o caráter imutável da arquitetura da geometria [euclidiana] que Kant funda a arquetônica da razão. **Se a geometria divide, o kantismo pode ser salvo se não inscrevendo os princípios da divisão na própria razão, senão abrindo o racionalismo.** (BACHELARD, 1990, p.26, grifo nosso)

Se a tarefa de Kant era estruturar a arquitetura do pensamento racional, ao abrir a geometria que serve como base para sua construção, será preciso reconstruí-la por completo, em outras palavras: será tornar o racionalismo permanente aberto, sendo estas uma das bases epistemológicas da filosofia bachelardiana apresentada em sua tese do conhecimento aproximado. É abrindo o racionalismo e construindo as teorias científicas contemporâneas sobre outras bases que a novidade essencial do pensamento científico contemporâneo será apreendida.

Chegamos assim a posturas como a de Dirac na proposição dos elétrons carregados positivamente, ao apontar que se esperava, de fato, que a matemática se tornasse cada vez

mais complicada, no entanto, que se estruturasse sempre na mesma base permanente de definições e axiomas. Por outro lado, os desenvolvimentos da física contemporânea exigiram uma matemática que alterasse continuamente seus fundamentos e se tornasse cada vez mais abstrata. É neste momento que entram os papéis desempenhados pelas geometrias não-euclidianas e as álgebras não-comutativas, que eram outrora consideradas puras ficções da mente humana. Elas são as verdadeiras produtoras de significado da realidade na ciência contemporânea.

As geometrias não-euclidianas foram formuladas por D’Lambert, Lobatchewsky e Bolyai em meados do século XIX. Segundo Bachelard, sua proposição epistemológica poderia ser exposta da seguinte maneira:

Pois que não se chega a demonstrar diretamente a proposição de Euclides [pois ela é um axioma], tomemo-la como uma verdade e [...] **substituamos, pois, esta proposição pela proposição contrária.** Tiremos conclusões do quadro dos postulados assim modificados. Estas conclusões não podem deixar de ser contraditórias [com relação ao primeiro esquema, o euclidiano] (BACHELARD, 1990, p.29)

Toda geometria euclidiana é baseada em 23 axiomas, pontos de partidas considerados verdadeiros para a construção de todo o seu sistema lógico. A proposição de Euclides à qual Bachelard se refere, é o axioma das retas paralelas que aparece na definição 23, no início da obra *Os Elementos*:

23. Paralelas são retas que, estando no mesmo plano, e sendo prolongadas ilimitadamente em cada um dos lados, em nenhum se encontram. (EUCLIDES, 2006, p. 98)

A inversão neste caso, se dá a partir da proposição contrária do axioma das paralelas: as retas paralelas se encontram em determinada região do espaço não-euclidiano e o resto do sistema lógico-matemático é deduzido a partir disso. Na geometria euclidiana, o encontro de retas forma planos que podem ser utilizados para representação de espaços geométricos. Da mesma forma, nas geometrias não-euclidianas, considera-se uma abordagem semelhante, no entanto, a instituição deste axioma contrário faz com que novos espaços geométricos possam ser concebidos. Ao contrário do que os fervorosos defensores da geometria euclidiana argumentavam à época, o intuito desta nova perspectiva não era negar a anterior, mas sim generalizá-la, abri-la para um campo de ação ainda maior. O axioma contrário das paralelas não nega o primeiro, uma vez que nenhum deles pode ser demonstrado, são pontos de partida distintos, sistemas lógicos

construídos sobre bases diferentes. A geometria não-euclidiana abre o racionalismo para novas possibilidades de representação que entram em ressonância com a realidade da física contemporânea.

Assim como em conjunto à geometria euclidiana deduziram-se todas propriedades da álgebra comutativa, as geometrias-não euclidianas inauguram uma nova era do pensamento matemático com as álgebras não-comutativas. Sendo assim, a tarefa central é demonstrar, de um lado, a desconcretização das noções de base euclidiana, e do outro, a concretização das novas relações que se estabelecem a partir da nova base não-euclidiana. As álgebras não-comutativas levaram a constituição de uma nova teoria grupos matemáticos. Segundo Bachelard,

Cada geometria é caracterizada por um grupo especial de transformações. Quando tomamos o exemplo da geometria euclidiana, encontramos-nos perante um grupo particularmente claro e simples. [...] este grupo é, como se sabe, o grupo dos deslocamentos. É pelo grupo dos deslocamentos que se define a igualdade de duas figuras, igualdade que é, com toda evidência, a base da geometria métrica.

As geometrias euclidianas lidam com um conjunto bastante específico de operações referentes a deslocamentos de translação e rotação no espaço tridimensional. Mas o que há para além? O que outros espaços geométricos reservam? É neste movimento que as seções **4.3 a 4.8** foram construídas, com o intuito de demonstrar que o nascimento e evolução da física de partículas são uma forma de materializar esta nova visão de mundo da ciência contemporânea. Caminhando desde a formulação do modelo atômico de Thompson e descoberta do núcleo atômico por Rutherford, ainda profundamente impregnado com as noções geométricas da epistemologia cartesiana e as bases de conhecimento da física clássica, chegamos à proposição do *Quark* a partir de construções racionais de grupos de simetrias bem afastados do espaço tridimensional euclidiano e realizados sobre a fenomenotécnica da ciência contemporânea.

A retificação de bases é a verdadeira realidade da ciência contemporânea, é o motor de uma nova era do pensamento científico. Para ilustrar esta característica epistemológica, realizamos uma organização dos fundamentos de base teórica e fenomenotécnica, associando-os às novas formulações teóricas e evidências experimentais presenciadas pelo desenvolvimento da física de partículas elementares do século XX. Essa organização se encontra representada na tabela 6, ilustrada na página seguinte, e tomou como base a análise histórica realizada entre as seções **4.3 a 4.8**.

Tabela 6 - Organização da análise histórica e epistemológica da Física de Partículas Elementares, com ênfase na narrativa que levou a construção do quark como concepção teórica e objeto

Fundamentos de base		Desenvolvimento da Física de Partículas Elementares		
Seção	Fundamento Teórico	Fundamento Fenomenotécnico	Formulações teóricas	Evidências experimentais
4.3	<ul style="list-style-type: none">Mecânica e eletrodinâmica clássicaPrincípios da quantizaçãoMecânica quântica ondulatória	<ul style="list-style-type: none">Detectores cintiladoresDecaimentos radioativos	<ul style="list-style-type: none">Modelo atômico de ThompsonModelo nuclear de RutherfordModelo nuclear e orbital de BohrComportamento dual do elétronIncerteza e probabilidade no mundo quântico e atômico	<ul style="list-style-type: none">Espalhamento de partículas α ocorre em diversas variabilidades angularesEmissão do espectro de radiação de elementos possuiu descontinuidades, indicando emissão quantizada nas transições atômicasElétrons sofrem difração, evidenciando sua natureza ondulatória
4.4	<ul style="list-style-type: none">Mecânica quântica matricialPrimórdios do formalismo de grupos	<ul style="list-style-type: none">Raios cósmicosCâmaras de nuvem	<ul style="list-style-type: none">Spin como propriedade quântica das partículas subatômicasProposição da existência do pósitron e da noção de antimatéria	<ul style="list-style-type: none">Distribuição angular de átomos espalhados por um gradiente de campo magnético é quantizadaEvidências da existência de elétrons carregados positivamente (pósitrons) em trajetórias de câmaras de nuvem
4.5	<ul style="list-style-type: none">Mecânica quântica matricialPrimórdios do formalismo de grupos	<ul style="list-style-type: none">Decaimentos radioativosCâmaras de nuvemCâmaras de ionização	<ul style="list-style-type: none">Formulação do spin isotrópicoProposição do próton e nêutron como dois estados de isospin de uma mesma partícula: o nucleon	<ul style="list-style-type: none">Evidências da existência de uma partícula neutra (nêutron) que possui massa muito próxima (quase equivalente) à massa de prótons e interage fortemente com núcleos atômicos
4.6	<ul style="list-style-type: none">Mecânica quântica ondulatóriaMecânica quântica matricial	<ul style="list-style-type: none">Raios cósmicosCâmaras de nuvemPlacas de emulsão nuclear	<ul style="list-style-type: none">Formulação de uma teoria quântica para as interações nuclearesProposição de um <i>méson</i> mediador das interações nucleares: o piónProposição da cadeia de decaimento de mésons: pión-núon (produção via interação forte e decaimento via interação fraca)	<ul style="list-style-type: none">Evidência da existência de partículas com características semelhantes (núon) à prevista por Yukawa observada em feixes de raios cósmicos em câmaras de nuvemEvidência da existência da partícula prevista por Yukawa (píon) observada em placas de emulsão nuclear posicionadas em altitudes elevadasEvidência apontando para um paradoxo na produção e decaimento dos mésons π e π
4.7	<ul style="list-style-type: none">Princípios de conservação e (quebras) de simetriaCaracterização de propriedades quânticas	<ul style="list-style-type: none">Raios cósmicosCâmaras de nuvemAceleradores de partículasCâmaras de bolha	<ul style="list-style-type: none">Formulação de novas propriedades quânticas e princípios de conservação associadosProposição de quebras de simetria nas interações fracasProposição de simetrias nas interações fortes	<ul style="list-style-type: none">Identificação da existência de estranhas partículas (<i>V-partículas</i>), produzidas em decaimentos que formam trajetórias em forma de V, observadas em câmaras de nuvem e proveniente de raios cósmicosEvidências da existência de quebra de simetria de paridade envolvendo interações fracas observado avaliando decaimentos radioativos em uma câmara de ionização
4.8	<ul style="list-style-type: none">Mecânica quântica matricialGrupos de Simetria	<ul style="list-style-type: none">Aceleradores de partículasCâmaras de bolha	<ul style="list-style-type: none">Formulação do conceito de estranhezaOrganização das partículas em grupos de simetria: <i>Eightfold Way</i>Proposição da existência do Ω^-Proposição da existência do quark	<ul style="list-style-type: none">Evidência da existência de partículas com as características da prevista por) Gell-Mann (Ω^-) detectadas em câmaras de bolha e produzidas a partir de colisões em aceleradores de partículasEvidência da existência de quarks observado a partir do espalhamento de elétrons de altas energias em núcleos atômicos

Os fundamentos de base teórica que tomamos como ponto inicial de análise foram os átomos orbital de Thompson e o nuclear de Rutherford. Ainda bastante impregnados com o arcabouço teórico da física clássica, constroem imagens de átomos segundo princípios da mecânica e da eletrodinâmica clássica. Mesmo que a proposta de Rutherford divirja de Thompson estruturalmente, ambos partem da mesma base teórica para suas formulações. No entanto, Rutherford percebe que há problemas, no que se refere a estabilidade de elétrons no entorno do núcleo atômico, e deixa o problema em aberto – exigindo assim uma nova abertura da racionalidade. Na proposição teórica de Bohr vemos as primeiras aproximações da abertura das concepções teóricas: não necessariamente a emissão de radiação deve se dar de forma contínua. Utilizando o princípio de quantização proposto por Planck na década anterior, Bohr constrói uma nova imagem de átomo sob contradições das suposições teóricas anteriores. Apesar disso, não se desprende completamente de suas bases matemáticas, utilizando ainda a mecânica clássica para avaliar o movimento orbital realizado em torno do núcleo. Para Bachelard,

De sua tese, o físico moderno fornece uma prova profunda, muito característica do novo pensamento, **a partícula elétrica não tem a forma essencial do sólido porque ela se deforma no movimento**. É considerada – como se deve fazê-lo – por uma transformação matemática, pelas transformações de Lorentz que não admite o grupo de deslocamentos característicos da Geometria Euclidiana. (BACHELARD, 1990)

Apesar de a imagem de Bohr encontrar mais coerências com a realidade física, alimentando novas propostas de investigação experimental, há ainda contradições que precisam ser resolvidas. Será o elétron considerado um corpo rígido, de massa m , realizando uma trajetória de raio R bem definida em torno do núcleo? A proposição da dualidade na natureza do elétron diz que talvez não seja, e aquilo que era considerado matéria, no sentido clássico de ponto material, pode não o ser. Nesta perspectiva surge um novo formalismo, um formalismo completamente diferente a qualquer outro construído até então. Seu objetivo era avaliar a dinâmica de uma entidade pertencente a este novo mundo quântico: a mecânica ondulatória proposta por Schroedinger. Ao contrário do mecanicismo clássico determinista, a mecânica ondulatória revela que a dinâmica não é regida pela determinação precisa da localização espacial e temporal dos objetos, mas sim por uma descrição sobre quais as probabilidades de que este objeto seja encontrado em determinados locais de espaço e em determinados instantes de tempo. E

quanto à sua dinâmica na realidade? Alguns, como Bohr, dizem que nada pode se afirmar enquanto uma medida for realizada. Outros, como De Broglie, afirmam que, por sua natureza ondulatória, os elétrons estão numa superposição de estados, ou seja, estão em todos os lugares ao mesmo tempo e a ação de medir colapsa esta onda de matéria em um ponto de detecção experimental. Seria esta incerteza, como para Einstein, fruto de uma incompletude na teoria, uma vez que a realidade precisa estar prontamente definida? Ou na realidade o mundo quântico, como para Heisenberg, não é regido pelas certezas do mundo macroscópico e à incerteza de sua localização espacial em movimento é de sua própria natureza? Assim, segundo Bachelard,

[...] em lugar de pensar primeiramente o sólido indeformável entrevisto pela experiência ociosa e grosseira e estudado na simples experiência dos deslocamentos euclidianos, a microfísica se exerce em pensar do comportamento do objeto elementar de acordo com a lei das transformações [dos grupos construídos a partir das geometrias não-euclidianas]. (BACHELARD, 1990, p.39)

E assim enxergamos uma mudança drástica nas concepções teóricas, matemáticas e experimentais da física no século XX. Parafraseando Bachelard, o físico contemporâneo foi obrigado três ou quatro vezes, em um período de 20 anos, a reconstruir suas bases racionais e, intelectualmente falando, a reconstruir uma vida.

Apesar de trazer uma perspectiva revolucionária à época, a mecânica ondulatória de Schroedinger lidava apenas com uma pequena parcela dos grupos da geometria não-euclidiana. Assim como a mecânica newtoniana, ela era um sistema submetido à lógica algébrica de um grupo muito específico, grupos que consideram, além do espaço euclidiano, o espaço imaginário dos números complexos em sua constituição. Dirac e Heisenberg, buscando um entendimento mais amplo, trazem novas faces da realidade ao construírem um outro formalismo conhecido historicamente como formalismo matricial. Nesta perspectiva, a dinâmica é regida por matrizes matemáticas e seus respectivos autovalores: propriedades das entidades quânticas que são invariantes. É este formalismo que faz com que Dirac enxergue a possibilidade da existência de elétrons carregados positivamente e que Heisenberg enxergue no próton e no nêutron estados simétricos de isospin de uma mesma partícula.

Sem a abertura do racionalismo para bases não-euclidianas e não-comutativas, estes pedaços da realidade jamais poderiam ser acessados,

Eis então **o esforço poético dos matemáticos, o esforço criador, realizador**: subitamente, por uma inflexão reveladora, as sílabas associadas formam uma palavra, uma verdadeira palavra, que fala à Razão e encontra, na realidade, uma coisa a evocar. (BACHELARD, 1990, p.35, grifo nosso)

Se trata da realização do pensamento que tanto pontuamos ao longo da narrativa histórica: com Thompson, Rutherford e Bohr em suas imagens atômicas; com Schroedinger e de Broglie buscando desvendar o movimento de elétrons no interior de átomos de hidrogênio; com Dirac formulando a existência da antimatéria; com Yukawa formulando interações quantizadas para as interações nucleares e prevendo a existência partículas mediadores jamais vistas antes; com Heisenberg propondo que duas partículas são, na realidade, uma, simetricamente separada pela interação eletromagnética que age sobre uma (o próton) mas não sobre a outra (o nêutron). *A realização* é possibilitada pela invariância matemática de certas propriedades, seus autovalores, isto é, a capacidade que as entidades quânticas têm de permanecer com valores bem estabelecidos e que podem mensurados experimentalmente. É nessa busca de autovalores, criados e calculados no âmbito de um racionalismo bem edificado, que se constitui a produção técnica dos fenômenos físicos.

Se a axiomática assim edificada é a representação de um grupo cujos invariantes admitem por traduções, na realidade, as permanências que a experiência descobriu, a teoria física está isenta de contradições e é uma imagem da realidade. [...] **Há aí, ao mesmo tempo, um método [de investigação experimental] e uma explicação [construída no âmbito do racional]** (BACHELARD, 1990, p.36)

É neste diálogo que percebemos a essência do movimento epistemológico da física contemporânea. Um movimento que contempla, sem privilegiar lados, o racionalismo e o experimentalismo. Como apontado ao final da seção 3.3, para Bachelard é possível realizar construções racionais fora do âmbito da experimentação, da mesma forma que é possível constituir investigações empíricas fora de bases racionais, no entanto, não se participa da atividade científica do século XX. Sem racionalidade no vazio nem atividades empíricas desconexas, a física contemporânea trabalha em um diálogo constante entre o racional e o experimental. Um diálogo onde os movimentos de abstração matemática já constituem os primeiros momentos da experiência física que, por sua vez, retorna

imagens e contradições que contribuirão pela continuidade desta dialética. É neste sentido que vemos, na tabela 6, os fundamentos fenomenotécnicos mudando no decorrer da evolução histórica da física de partículas elementares, fruto de um diálogo intenso com mudanças de base decorrentes da abertura do racionalismo. Por este motivo, Bachelard aponta para o fato de,

A observação científica é sempre uma observação polêmica; ela confirma ou infirma uma tese anterior, um esquema prévio, um plano de observação; ela transcende o imediato; ela reconstrói o real após ter construído os seus esquemas. [...] **Ora, os instrumentos não são senão teorias materializadas, deles saem os fenômenos que trazem por todos os lados a marca teórica.** [...] A verdadeira fenomenologia científica é pois essencialmente uma fenomenotécnica. (BACHELARD, 1990, p.19, grifo nosso)

E segue dizendo que,

[...] com toda evidência, o cientista não pode mais ser realista ou racionalista à maneira dos filósofos que acreditavam em poder, sem dificuldade, se colocar perante o Ser apreendido [...] **Para o cientista, o Ser não é apreendido num bloco nem pela experiência nem pela razão. É preciso, portanto, que a epistemologia dê conta da síntese mais ou menos móvel da razão e da experiência, mesmo quando esta síntese se apresentasse filosoficamente como um problema desesperado.** (BACHELARD, 1990, P.18)

Foi com o intuito de representar este diálogo, que se encontra no coração da ciência contemporânea, que construímos o diagrama histórico demonstrando as interações entre o racional e o experimental ao longo do desenvolvimento da Física de Partículas Elementares, reproduzindo-o novamente na figura 81 para facilitar o acesso ao leitor. Síntese das informações apresentadas na tabela 6, percebe-se que nenhuma das seções 4.3 a 4.8 é discutida somente à luz de formulações teóricas ou desenvolvimentos experimentais. Ao contrário, para cada formulação teórica apresentada ao início de uma seção, há uma investigação experimental correspondente, e vice-versa. Desta forma podemos verificar no diagrama pontos de intensa interação do espectro filosófico a partir das quais emergem novas concepções teóricas e experimentais a serem investigadas, vértices estes, criados em analogia aos diagramas de Feynman para a representação da interação de partículas elementares. Um ponto interessante de observar no diagrama, é o fato de o primeiro e o último vértice de interação se encontrarem espacialmente na mesma posição do espectro filosófico. O primeiro representado pela conjunção dos avanços das formulações de bases na mecânica quântica, com o avanço de instrumentação

técnica coerente com a realização dos pensamentos que levam à evidência experimental da existência do pósitron e do nêutron, bem como das simetrias existentes entre matéria e antimatéria (no caso elétron-pósitron) e entre os constituintes do núcleo atômico (no caso próton-nêutron).

Figura 81 - Quadro histórico construído para possibilitar a compreensão do nascimento da concepção de quark

Já o último vértice é representado pela conjunção dos avanços generalizados de quebras de simetria, possibilitados sob uma abertura intensa do racionalismo nas geometrias não-euclidianas e de uma formulação mais precisas do conceito de grupos. Isto levou à proposição do quark como concepção teórica. Aliado a isto, fruto do intenso diálogo, o quark não é proposto como uma razão no vazio, ele leva a inovações instrumentais, como a construção de grandes aceleradores de partículas e novas versões de detectores de trajetórias de partículas, o que conduz naturalmente à aceitação dele como objeto de estudo experimental.

Os dois grandes vértices representam dois movimentos intensos de abertura do racionalismo e da inovação técnica, trazendo elementos novos a serem estudados na realidade física: o papel que as simetrias desempenham na dinâmica do mundo das partículas elementares.

É uma dinâmica diferente e que não é regida pela clássica abordagem da determinação espacial e temporal dos objetos. Não é uma dinâmica que tem como pano de fundo a causalidade no sentido clássico de interações e nem um determinismo no qual pode-se prever claramente de onde vêm e para onde vão as partículas. É possível que nas interações haja decaimento, reinando a interação fraca. Da mesma forma que há uma probabilidade que se formem novos estados ligados, reinando as interações fortes. Podendo ainda haver a possibilidade de não haver interação alguma, aliado ao fato de os modos de decaimento e os modos ligados nem sempre serem os mesmos.

Em reflexões mais atuais sobre a filosofia da ciência contemporânea, Paty afirma que

O conhecimento das leis de simetria é um dos aspectos mais importantes da teoria física em seu estado atual: pois com sua ajuda podemos formular as proposições da física, de maneira tão simples e unificante quanto possível. [...] A tendência da teoria física daqui para a frente parece até ser a de partir dos mais fundamentais princípios de simetria e tentar obter uma descrição das leis física como uma consequência deles. (PATY, 1995, p.224)

Mais adiante, Paty aponta que,

Generalizando a **simetria de Lorentz** e juntando-lhe o princípio de equivalência obtemos a teoria da **relatividade geral**. As **simetrias abelianas** nos conduzem ao **eletromagnetismo**; as **não-abelianas** às **interações fraca e forte**; as **supersimetrias** conduzem a teoria de **bósons e férmions**. A **supergravidade** representa, até o momento, a **última etapa desse engendramento** da forma dos campos por suas propriedades de simetria." (PATY, 1995, p.225)

Sem a abertura do racionalismo, sem a inovação técnica e sem o diálogo racional e experimental não se compreende a essência ciência contemporânea. Os grandes problemas da física atual se encontram dentro do formalismo de grupos e da análise de suas respectivas simetrias e, neste sentido, a física de partículas é um prato cheio para explorar a visão de mundo por trás da física contemporânea.

5 Considerações finais

É chegado o momento de pontuar objetivamente as diversas considerações, ponderações e conclusões que puderam ser tiradas das investigações realizadas nesta pesquisa. É importante, antes disso, recapitular pontos essenciais de seu processo de realização. Ela foi orientada em dois grandes momentos – a avaliação do problema de renovação curricular e a orientação de novos olhares para o ensino da física de partículas elementares dentro deste contexto de resistência à inovação curricular.

No início desta pesquisa, nos propomos a construir um outro olhar sobre o problema da renovação curricular associado à inserção de FMC na educação básica. Partindo das reflexões de Bachelard sobre a novidade essencial do pensamento científico contemporâneo, tomamos como hipótese inicial que as diferenças epistemológicas entre a física clássica e a física moderna poderiam exercer influências sobre a resistência que se apresenta à inserção destes tópicos na educação básica. Para avaliar esta influência, buscamos compreender a dimensão epistemológica do currículo vindo de um entendimento sobre a constituição dos saberes escolares a partir das reflexões de Jean-Claude Forquin. As reflexões do sociólogo francês possibilitaram o entendimento da construção dos saberes escolares associados a um processo de seleção no interior da cultura, que está profundamente comprometido com determinadas concepções de ciência, educação e sociedade. Buscamos relacionar os processos de seleção no interior da cultura e a constituição dos saberes escolares em física, com a distinção epistemológica colocada como hipótese central. A impressão que tínhamos inicialmente, é que os modos de pensar a ciência, cristalizados no decorrer de todo o processo educativo, entrariam em conflito direto com modos de pensar próprios da ciência contemporânea – criando resistências ao processo de renovação curricular.

Em um segundo momento, analisamos um conjunto de propostas para o ensino e a divulgação da física de partículas elementares, partindo de uma impressão baseada nas experiências docentes sobre sua estrutura. A percepção que tínhamos era que o estudo das partículas elementares estava reduzido a uma simples transmissão de informações sobre o modelo padrão – como a composição da matéria por quarks, os bósons mediadores das forças, a composição das diversas partículas produzidas em colisões. Questionamos se esta é a única abordagem possível para a física de partículas e buscamos,

a partir de uma análise histórica sobre o processo de desenvolvimento que levou à construção do quark, apontar novas direções e perspectivas que poderiam ser consideradas na elaboração de futuras propostas.

Em síntese, a elaboração desta pesquisa teve dois principais objetivos:

- Fornecer subsídios para um entendimento mais apurado da dimensão epistemológica do problema de renovação curricular.
- Evidenciar a necessidade de construir novos olhares para a física de partículas elementares, e, a partir de uma análise histórica, apontar para reflexões que possam ser elementos fundantes de futuras propostas didáticas sobre seu ensino.

Com base nas discussões realizadas em cada uma das seções, gostaríamos de pontuar certas considerações, com algumas explorando isoladamente cada um dos objetivos destacados acima e outras explorando as diferentes relações entre elas. Com este intuito, organizamos 3 pontos que serão discutidos adiante.

I. Sobre a seleção cultural do saber escolar em física

Forquin aponta para o fato da constituição dos saberes escolares estarem intimamente ligados a seleções no interior da cultura. Neste sentido, todo seu processo de construção passa por uma seleção de conhecimentos e visões de uma determinada sociedade. O currículo, neste sentido, não pode ser entendido como ferramenta neutra de seleção de conteúdos, mas como um conjunto de práticas que permita que determinados valores e concepções sejam transmitidos para as microsociedades que se constituem no interior das escolas. Este processo, obviamente, extrapola os muros da dimensão epistemológica, uma vez que tem inserido dentro dele uma série de conflitos de ordem política e ideológica. Forquin aponta que a instauração dos saberes na escola passa por três imperativos didáticos, sendo o primeiro e o segundo deles profundamente associados à dimensão epistemológica que nos propomos analisar.

No primeiro imperativo, denominado como imperativo de transposição, o saber passa por uma transformação didática que tem como intuito facilitar sua disseminação no ambiente escolar. Essa transformação, no entanto, não tem diretrizes absolutas, sendo que uma série de conceitos e conteúdos podem sofrer diferentes tipos de transposições.

Além do imperativo de transposição, identifica-se também o imperativo de interiorização, associado às formas de operacionalizar e assimilar os conhecimentos transmitidos.

Dentro desta perspectiva, o saber escolar é construído com o intuito de se instalar na cultura escolar, sendo uma de suas principais características a cristalização de habitus intelectuais, modelos de pensamento e de procedimentos operatórios considerados como naturais e evidentes em tradições pedagógicas – é na constituição e sedimentação dos processos da cultura escolar que o currículo se define. O ponto que gostaríamos de trazer sobre esta reflexão, se baseia no ponto que Forquin toca ao discutir as condições de existência da cultura escolar, afirmando que “[...] **nos ensinamos onde o passado não se torna o objeto de uma atenção ou de uma tematização explícita, [...] o passado pode permanecer presente, sob forma implícita ou latente.**”.

Neste sentido, o passado da física tem permanecido presente durante quase dois séculos de uma tradição pedagógica que o legitima. Mesmo diferentes documentos educacionais, ou pesquisas acadêmicas apontando para uma necessidade de reestruturação curricular ou, no caso de Fourez, uma crise instaurada no ensino de ciências, esse passado se manifesta ainda sob forma implícita e latente indicando uma possível falta de identidade com os realizadores do currículo (docentes) e os receptores do currículo (discentes). É preciso que se questione os currículos habitualmente colocados em documentos ou até mesmo apresentados em manuais didáticos, buscando identificar, principalmente, qual sua função e o que se pretende atingir com ele. Mesmo que se reconheça a importância cultural e epistemológica da física clássica, sua presença hegemônica nos currículos de física não é natural, mas fruto de uma escolha comprometida com certas ambições.

II. Sobre as concepções de ciência que permeiam o ambiente escolar e suas relações com as propostas de ensino de Física Moderna

O entendimento da não naturalização dos conteúdos no currículo, nos leva ao cerne do problema de renovação que nos propomos a investigar. Será que a presença hegemônica da física clássica é uma opção consciente do processo de constituição curricular? Sob a perspectiva de Forquin, entendemos que não. A física clássica se naturalizou nos currículos de ensino médio, sendo importante destacarmos que o problema não se trata

em excluir toda a física clássica e inserir toda a física moderna nos currículos da educação – não é um problema restrito a adição ou exclusão de conteúdo. O que apontamos é para o fato de que, talvez e de forma inconsciente, esteja ocorrendo a reprodução de um currículo que é considerado como natural – renovar o currículo é lutar contra uma tradição pedagógica bem estabelecida.

Será que, neste sentido, os problemas se encontram nos conteúdos de física clássica que comumente vemos em nosso currículo? Aparentemente acreditamos que também não. Como Forquin pontua, um dos processos de constituição dos saberes é a instauração de hábitos intelectuais e modelos de pensamento que estão associados à forma como este conhecimento é concebido no interior do currículo. A história e a filosofia da ciência vêm demonstrando cada vez mais uma multiplicidade de interpretações e abordagens para os mesmos conteúdos discutidos neste currículo tradicional de física. Percebemos na educação científica a instauração de uma concepção única de compreender o empreendimento científico. Conforme discutido na seção 2.5, acreditamos se tratar de uma concepção comprometida com uma visão positivista de ciência. É por este motivo que não acreditamos que uma das dimensões do problema da renovação curricular esteja nos próprios conteúdos da física clássica – reiterando novamente que o problema não se restringe à adição ou exclusão de conteúdos – mas sim na visão única sobre o qual eles foram construídos. Eles vêm sendo abordados seguindo uma narrativa positivista, e esta narrativa tem estabelecido um conflito epistemológico direto com a inserção de física moderna na educação básica.

Como apontamos nos estudos do capítulo 3, Bachelard considera o século XX como um período sobre o qual o desenvolvimento científico rompe com suas bases mais bem definidas. Bachelard pontua que conceitos básicos como espaço e tempo tem sua interpretação redefinida; a forma de apreensão da realidade adquire relações de outra ordem; a fenomenologia, como o estudo dos fenômenos naturais, deixa de existir para dar espaço a fenomenotécnica, com a ciência produzindo seus próprios fenômenos e objetos de estudo; o próprio ferramental matemático, que desde a antiguidade é baseado nas geometrias euclidianas e nas álgebras comutativas, se constrói tomando como base as geometrias não-euclidianas e álgebras não-comutativas. Não são poucas as evidências de que o pensamento científico contemporâneo se afasta completamente de qualquer movimento epistemológico da história da ciência.

O que vemos, neste contexto, são diversas propostas para o ensino de Física Moderna construídas à luz da epistemologia positivista tão bem legitimada no decorrer de todo processo educativo e formativo, criando, com isto, uma resistência à inserção destes tópicos na educação básica. Todavia, ressaltamos que o problema da renovação curricular jamais poderá se restringir ao conflito epistemológico apontado nesta pesquisa. Existem problemas de outras ordens e magnitudes que precisam ser levados em consideração neste processo. Gostaríamos, no entanto, de pontuar a necessidade de se construir um olhar cuidadoso sobre os conflitos epistemológicos envolvidos no processo de construção curricular, uma vez que acreditamos que ele seja de fundamental importância para que o problema seja enfrentado.

III. Sobre a necessidade de um outro olhar para a física de partículas elementares e aspectos levantados na análise histórica

Como explicitado no tópico anterior, tornou-se muito comum a produção de propostas para o ensino da física moderna aos moldes da visão que tem se concebido com a física clássica. No entanto, vemos também outro movimento bastante comum nas pesquisas acadêmicas, que são pesquisas que reagem à apresentação estritamente objetiva destes conteúdos. Citamos como exemplo no início do capítulo 4 o ensino da Relatividade Especial. Enquanto uma grande parte das propostas buscavam evidenciar aplicações matemáticas das equações de fenômenos como a dilatação temporal, a equivalência massa e energia e a contração espacial, construiu-se um movimento pontuando a necessidade de olhar para aspectos mais amplos desta teoria. Neste sentido, enxergamos uma série de trabalhos que buscam analisar a visão de Einstein e de outros importantes nomes para a formulação da teoria e entender de que forma a relatividade surge em plena virada do século XIX ao XX. Muitos destes trabalhos ampliaram olhares e hoje o ensino da Relatividade conta com uma série de reflexões sobre as mais diferentes dimensões e abordagens.

No entanto, o que vemos na física de partículas é um processo ainda embrionário que busca reduzir suas discussões à apresentação de informações objetivas sobre o modelo padrão. É muito comum apresentar a composição da matéria por quarks, as partículas que mediam as interações fundamentais, as combinações de quarks que formam a infinidade de partículas e uma contextualização de sua pesquisa centralizada somente na divulgação

do LHC. Será que é somente este tipo de discussão que pode ser feita no ensino da física de partículas? A impressão que temos, a exemplo do movimento percebido com o ensino a teoria da Relatividade, é que há potencialidades não exploradas na física de partículas elementares.

Realizamos uma análise histórica, com o intuito de levantar aspectos de desenvolvimento próprios da ciência contemporânea que podem ser percebidos no processo de construção de um dos principais conceitos divulgados no ensino da física de partículas: os *quarks*.

Um primeiro ponto fundante que gostaríamos de reiterar é a possibilidade de se discutir um entendimento mais profundo da hipótese atômica nos diferentes momentos da história da ciência. Pudemos perceber uma mudança clara de concepção que nada se assemelha à ingênua afirmação de que “Gell-Mann e Demócrito buscavam responder as mesmas perguntas”. A intuição atômica foi considerada sobre as mais diversas perspectivas na história da humanidade e é marcada exatamente por uma multiplicidade de interpretações. Este ponto pode auxiliar a um entendimento mais profundo sobre como a própria estrutura da matéria mudou no decorrer da história.

Um segundo ponto fundante que gostaríamos de reiterar, refere-se à precariedade de materiais históricos disponíveis tanto em língua portuguesa, quanto em língua inglesa, mas a situação é muito mais agravante na primeira. Nas 3 primeiras seções de nossa análise histórica, avaliamos períodos que vão da antiguidade à modernidade, permeando o início do século XX até a formulação inicial da mecânica quântica. Nestas seções, conseguimos obter com certa facilidade, nos grandes periódicos brasileiros, uma série de discussões sobre o experimento de Rutherford, a formulação teórica de Bohr, indo até à imagem de átomo em consequência da mecânica ondulatória de Schroedinger. No entanto, se o leitor observar atentamente, as seções 4.4 a 4.8 foram escritas baseadas quase exclusivamente em referências primárias ou em referências secundárias bastante distanciadas da área de ensino de física. Existem trabalhos que possibilitariam reflexões interessantíssimas, como a descoberta e a formulação do pósitron; a descoberta e a formulação dos mésons de Yukawa; a descrição detalhada de experimentos realizados em câmaras de nuvem, que foi o coração da física de partículas até meados da década de 50. No entanto, por se concentrar excessivamente na transmissão de informações objetivas

do modelo padrão, o ensino da física de partículas tem deixado de lado reflexões fundamentais sobre sua construção histórica.

Um terceiro ponto fundante que gostaríamos de reiterar é como a relação racional e real, teórico e experimental, se manifestaram de forma clara no desenvolvimento histórico da física de partículas. Em nenhuma das seções do capítulo 4, principalmente após a descoberta do núcleo atômico, encontrou-se investigações puramente teóricas ou puramente experimentais, pelo contrário, percebia-se uma dialética intensa entre elas. Na forma como as propostas tem sido colocadas, mesmo as conduções experimentais, que estão fortemente associadas a concepções teóricas de mundo, pouco se percebem sobre esse traço marcante da ciência contemporânea.

Um quarto ponto fundante que gostaríamos de reiterar é sobre o papel da matemática nas ciências contemporâneas. Muitos trabalhos vêm sendo publicados sobre a relação da matemática com a física, mas vem se restringindo, obviamente pela tradição já estabelecida, às geometrias euclidianas e álgebras convencionais. O poder preditivo da matemática na ciência contemporânea está no coração de seu desenvolvimento. Este caso é um pouco mais delicado quando se pensa a nível educacional, mas ele jamais poderia ser excluído dos apontamentos realizados.

Um quinto e último ponto fundante e de extrema importância está associado às imagens de átomo que constituímos na física de partículas elementares. Como afirmou Paty (1996), já nos encontramos em um estado muito afastado das imagens de átomo da antiguidade e na modernidade, no entanto, insistimos em criar ilusões baseadas em analogias clássicas para explicar o mundo quântico. Talvez a física de partículas possa auxiliar na construção de um entendimento de uma realidade abstrata.

Referências bibliográficas

- ABDALA, M. C. Sobre o discreto charme das partículas elementares. **Revista Física na Escola**, v. 6, n.1, p. 38.44, 2005.
- ABDALA, M. C. **O discreto charme das partículas elementares**. São Paulo: UNESP, 2006.
- ALVAREZ, L.W.; CRAWFORD, F.S.; GOOD, M.L.; STEVENSON, M.L.; Lifetime of K Mesons Phys. Rev. 101 (1956) 503;
- ALVES, I.A.A et al. Enfoque CTS para a inserção de partículas elementares no Ensino Médio: uma proposta de pesquisa a partir do LHC. In: Simpósio Nacional de Ensino de Física. 2015. São Paulo. **Anais**. Disponível em: <http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/snef/xxi/sys/resumos/T0549-1.pdf> Acesso em: 22/02/2016.
- ANDERSON, C.D.; The Apparent Existence of Easily Deflectable Positives Science 76 (1932) 238;
- _____ The production and properties of positrons. Nobel Lecture. Dez. 1936
- APPLE, M. O currículo oculto e a natureza do conflito. In: **Ideologia e Currículo**. Editora Artmed. Rio Grande do Sul. 2006.
- ARRUDA, S.M.A. et al. Dados comparativos sobre a evasão em Física, Matemática, Química e Biologia da Universidade Estadual de Londrina: 1996 a 2004. **Caderno Catarinense de Ensino de Física** v. 23. n.3. p.418-438, dez. 2006
- BACHELARD, G. **A Epistemologia** / Apresentação Dominique Lecourt /Tradução: Fátima Lourenço Godinho & Mário Carmino Oliveira. Lisboa: Edições 70. 2013.
- _____. **Estudos** / Apresentação Georges Canguilhem /Tradução: Estela dos Santos Abreu. Rio de Janeiro: Contraponto. 2008.
- _____. **O Novo Espírito Científico** / Tradução: Juvenal Hahne Júnior. Rio de Janeiro: Edições Tempo Brasileiro. 2000.

- _____. **A filosofia do não; O novo espírito científico; A poética do espaço** / Coleção os Pensadores / Tradução: Joaquim José Moura Ramos et al. São Paulo: Abril Cultural. 1978.
- _____. **A Formação do Espírito Científico: contribuição para uma psicanálise do conhecimento** / Tradução: Estela dos Santos Abreu. Rio de Janeiro: Contraponto. 1996.
- _____. **O racionalismo aplicado**. Rio de Janeiro: Zahar Editores. 1977.
- _____. **A experiência do espaço na física contemporânea** / Tradução: Estela dos Santos Abreu. Rio de Janeiro: Contraponto. 2010.
- _____. **Ensaio sobre o conhecimento aproximado** / Tradução: Estela dos Santos Abreu. Rio de Janeiro: Contraponto. 2004.
- BALTHAZAR, W. F. (2008). Partículas Elementares no Ensino Médio: uma abordagem a partir do LHC. 2008. 119f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro, Nilópolis.
- BARBOSA, E. & BULCÃO, M. **Bachelard: pedagogia da razão, pedagogia da imaginação**. 2 ed. Petrópolis: Vozes. 2011.
- BARNES, V.E. et al. Confirmation of the Existence of the Ω - Hyperon Phys. Lett. 12 (1964) 134;
- BARTOLOMEU SANTANA, Fábio; SENA DOS SANTOS, Paulo José. Espectroscopia e modelos atômicos: uma proposta para a discussão de conceitos de Física Moderna no Ensino Médio. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Florianópolis, v. 34, n. 2, p. 555-589, ago. 2017. ISSN 2175-7941.
- BEZERRA, V.A. Maxwell, a teoria do campo e a desmecanização da física. **Scientiae Studia**. v. 4. n.2. p.177-220. 2006.
- BRASIL. **Base Nacional Comum Curricular**. 2015.
- _____. **Diretrizes Curriculares Nacionais da Educação Básica**. 2013.
- _____. Ministério da Educação. **Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional**. Lei n. 9.394/96. Ed. 11. 2017.

_____. **Parâmetros Curriculares Nacionais**. 1998.

_____. **PCN+: Orientações Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais**. 2002

BECQUEREL, H.; Emission of New Radiation by Metallic Uranium Compt. Rend. 122 (1896) 1086;

BETHE, H.A.; The Electromagnetic Shift of Energy Levels Phys. Rev. 72 (1947) 339;

BOHR, N.; On the Constitution of Atoms and Molecules. I. Phil. Mag. 26 (1913) 1;

BROWN, L.M. & HODDESON, L. **The Birth of Particle Physics**. Londres: Cambridge University Press. Outubro, 1986.

BROWN, L.M. DRESDEN, M. & HODDESON, L. **Píons to Quarks: Particle Physics in the 1950s**. Londres: Cambridge University Press. Janeiro, 2009.

BUGELLI, G.B. et al. Concepções de racionalidades científicas numa perspectiva CTS: Análise de livros didáticos de Física, 2015. São Paulo. **Anais**. Disponível em: <http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/snef/xxi/sys/resumos/T0789-1.pdf> Acesso em: 22/02/2016.

BURFENING, J.; GARDNER, E.; LATTES, C.M.G.; Positive Mesons Produced by the 184-Inch Berkeley Cyclotron Phys. Rev. 75 (1949) 382;

BULCÃO, M. Meu encontro com Gaston Bachelard. **Ensaio Filosófico**. v. 7, p. 69-82, abr. 2013.

BULCÃO, M. **O racionalismo da ciência contemporânea: introdução ao pensamento de Gaston Bachelard**. São Paulo. Ideias & Letras. 2009.

BUSTAMANTE, M.C. A descoberta dos raios cósmicos ou o problema de ionização do ar atmosférico. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 35, n. 2, 2603 (2013)

CALHEIRO, L. B.(2014). Inserção de Tópicos de Física de Partículas de Forma Integrada aos Conteúdos Tradicionalmente Abordados no Ensino Médio. 188f. Dissertação (Mestrado em Educação em Ciências: Química da Vida e Saúde) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

CASSEN, B.; CONDON, E.U.; On Nuclear Forces Phys. Rev. 50 (1936) 846;

CARDOSO, D. **A Complementaridade dos pensamentos Narrativo e Matemática na Geração da Teoria da Relatividade Geral**. 2015. Dissertação (mestrado) – Instituto de Física, Instituto de Química, Instituto de Biociências, Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

CARDOSO, D. et al. Texto jornalístico sobre ciência: aproximação entre análise do discurso e natureza da ciência. In: Encontro de Pesquisa em Ensino de Física. 2013. São Paulo. **Anais**. Disponível em: <http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/epef/xv/programa/resumo.asp?insId=263&traId=1> Acesso em: 22/02/2016.

CARDOSO, D. et al. Uma proposta de atividade sobre o princípio de equivalência da Teoria da Relatividade Geral: colocando em prática um experimento de pensamento. In: Simpósio Nacional de Ensino de Física. 2015. São Paulo. **Anais**. Disponível em: <http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/snef/xxi/sys/resumos/T01/66-1.pdf> Acesso em: 22/02/2016.

CASTILHO, T. B. et al. O ensino de mecânica quântica em livros didáticos e em trabalhos publicados em eventos: encontros ou desencontros? In: Simpósio Nacional de Ensino de Física. 2015. São Paulo. **Anais**. Disponível em: <http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/snef/xxi/sys/resumos/T1044-1.pdf> Acesso em: 22/02/2016.

CATANI, A.M. Pierre Bourdieu e seu Esboço de auto-análise. EccoS – **Revista Científica**. v. 10, n. ESPECIAL, p. 45-65, 2008.

CHADWICK, J. Collisions of α Particles with Hydrogen Nuclei Phil. Mag. 42 (1921) 923;

_____ Possible Existence of a Neutron Nature 129 (1932) 312;

_____ The Existence of a Neutron Proc. Roy. Soc. A136 (1932) 692;

_____ The neutron and its properties. Nobel Lecture. Dez. 1935

COELHO, A.B. Possibilidades de utilização do legado de Mario Schenberg na educação. In: Simpósio Nacional de Ensino de Física. 2015. São Paulo. **Anais**. Disponível em: <http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/snef/xxi/sys/resumos/T1094-1.pdf> Acesso em: 22/02/2016.

- CONVERSI, M.; PANCINI, E.; PICCIONI, O.; On the Disintegration of Negative Mesons Phys. Rev. 71 (1947) 209;
- COSTA, C.L.F. **A Noção de Ciência e Educação no Espiritualismo**. Dissertação (Mestrado em Educação) – Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2009.
- DAMASIO, F.D. & PEDUZZI. L.O.Q. O Whihgismo na abordagem da teoria da relatividade restrita nos livros didáticos do PNLDEM 2012. In: Encontro de Pesquisa em Ensino de Física. 2013. São Paulo. **Anais**. Disponível em: <http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/epef/xv/programa/resumo.asp?insId=225&traId=1> Acesso em: 22/02/2016.
- DA SILVA, Nelson Canzian. Física Moderna e técnicas computacionais: como "ver" o átomo de Hidrogênio. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Florianópolis, v. 33, n. 2, p. 667-696, set. 2016. ISSN 2175-7941.
- DA SILVA, Nelson Canzian. Laboratório virtual de Física Moderna: atenuação da radiação pela matéria. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Florianópolis, v. 29, n. 3, p. 1206-1231, dez. 2012. ISSN 2175-7941.
- DA SILVA, Nelson Canzian. Laboratório virtual de física moderna: sistema para espectrometria gama. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Florianópolis, v. 32, n. 2, p. 542-562, mar. 2015. ISSN 2175-7941.
- DE BROGLIE, L.; Waves and Quanta Compt. Ren. 177 (1923) 507;
- DIRAC, P.A.M.; A Theory of Electrons and Protons Proc. Roy. Soc. A126 (1930) 360;
- _____ Quantized Singularities in the Electromagnetic Field Proc. Roy. Soc. A133 (1931) 60;
- _____ The Quantum Theory of the Electron Proc. Roy. Soc. A117 (1928) 610;
- _____ The Quantum Theory of the Electron. Pt II Proc. Roy. Soc. A118 (1928) 351;
- _____ The Quantum Theory of the Emission and Absorption of Radiation Proc. Roy. Soc. A114 (1927) 243;
- DOS SANTOS, Erick Santana; MENEZES JR., Roberto dos Santos; DA SILVA SANTANA, Victor Mancir. Determinação experimental da constante de Planck pela observação da

- corrente de descarga de um capacitor. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 32, n. 3, p. 824-836, jun. 2015. ISSN 2175-7941.
- DOMINGUINI, L. Física moderna no Ensino Médio: com a palavra os autores dos livros didáticos do PNLEM. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v.34, n.2, 2012.
- EINSTEIN, A. & INFELD, L. **A Evolução da Física**. São Paulo: Zahar. 2008.
- EINSTEIN, A. **Como vejo o Mundo**. São Paulo: Nova Fronteira. 2015
- FARIA FILHO, L.M. "A cultura escolar como categoria de análise e como campo de investigação na história da educação brasileira" *Educação e Pesquisa*, São Paulo, v.30, n.1, p. 139-159, 2004
- FERNANDES, Rúbia de Fátima Antunes Martins et al. Pinturas de Salvador Dalí para introduzir conceitos de Mecânica Quântica no Ensino Médio. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 34, n. 2, p. 509-529, ago. 2017. ISSN 2175-7941.
- FIGUEIRA, R. & PIERSON, A.H.C. Uma primeira aproximação entre a Abordagem Temática e a Inserção da Física Moderna e Contemporânea na Educação Básica. In: Simpósio Nacional de Ensino de Física. 2015. São Paulo. **Anais**. Disponível em: <http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/snef/xxi/sys/resumos/T1061-1.pdf> Acesso em: 22/02/2016.
- FITCH, V.L.; MOTLEY, R.; Mean Life of K⁺ Mesons Phys. Rev. 101 (1956) 496;
- FILHO, R.L.L.S. et al. Evasão no ensino superior brasileiro. **Caderno de Pesquisa**. v. 37. n.132. p.641-659, set./dez. 2007.
- FITAS, A.J.S, Mach: o positivismo e as reformulações da mecânica no séc. XIX. In: 3º Encontro de Évora sobre História e Filosofia da Ciência. Évora. 1996. **Atas**. Disponível em: <http://home.uevora.pt/~afitas/AJSFitas-1998a-Mach.pdf> Acesso em: 22/02/2016.
- FORATO, T. C. M.; PIETROCOLA, M.; MARTINS, R. A. Historiografia e natureza da ciência na sala de aula. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 28, n. 1, p. 27-59, abr. 2011.
- FORQUIN, J.C. Saberes escolares, Imperativos didáticos e dinâmicas sociais. **Teoria & Educação**. v. 5. p.28-49. 1992.

- FOUREZ, G. Crise no Ensino de Ciências? **Investigações em Ensino de Ciências** v. 8. n.2. p.109-123, 2003.
- FRANCO, M.A.C. Acesso à universidade – uma questão política e um problema metodológico. **Educação e Seleção**, v.2, n.12, 1985.
- FRY, W.F.; SCHNEPS, J.; SWAMI, M.S.; Evidence for a Long-Lived Neutral Unstable Particle Phys. Rev. 103 (1956) 1904;
- FUNG, S.; PEVSNER, A.; RITSON, D.M.; MOHLER, R.; $K^+ - \tau^+$ Mass Difference Phys. Rev. 101 (1956) 493;
- GELL-MANN, M. & NE'EMAN, Y. **The Eightfold Way**. California Institute of Technology. Pasadena: W.A. Benjamin Inc. Setembro. 1964
- GELL-MANN, M. **The Eightfold Way: A theory of Strong interaction Symmetry**. Synchrotron Laboratory. Pasadena. California. Março. 1961.
- GELL-MANN, M. **The quark and the jaguar: adventure in the simple and the complex**. New York: W.H. Freeman and Company. California. 2002.
- _____ A Schematic Model of Baryons and Mesons Phys. Lett. 8 (1964) 214;
- _____ Isotopic Spin and New Unstable Particles Phys. Rev. 92 (1953) 833;
- _____ Pais, A.; Behavior of Neutral Particles under Charge Conjugation Phys. Rev. 97 (1955) 1387;
- _____ Rosenfeld, A.H.; Hyperons and Heavy Mesons (Systematics and Decay) Ann. Rev. Nucl. Sci. 7 (1957) 407;
- _____ Symmetries of Baryons and Mesons Phys. Rev. 125 (1962) 1067;
- _____ The Interpretation of the New Particles as Displaced Charge Multiplets Nuovo Cim. Suppl. 4 (1956) 848;
- GIL PEREZ, D. et al. Para uma imagem não deformada do trabalho científico. **Ciência & Educação**. v. 7. n.2. p.125-153, 2001.
- GILMORE, R. **O Mágico dos Quarks**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2002. 218 p.
- GIRELLI, P.S. & SILVA, H.C. Análise discursiva de textos sobre nanotecnologia como subsídio para abordagens em sala de aula. In: Encontro de Pesquisa em Ensino de

Física. 2013. São Paulo. **Anais.** Disponível em:
<http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/epef/xv/programa/resumo.asp?insId=259&traId=1> Acesso em: 22/02/2016.

GROCH, T. & HIGA, I. Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio: Dificuldades e possibilidades para seu estabelecimento na cultura escolar em Física. In: Encontro de Pesquisa em Ensino de Física. 2013. São Paulo. **Anais.** Disponível em:
<http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/epef/xv/programa/resumo.asp?insId=317&traId=1> Acesso em: 22/02/2016.

GUERRA, A., BRAGA, M. & REIS, J. C. (2007). Teoria da relatividade restrita e geral no programa de mecânica do ensino médio: uma possível abordagem. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 29 (4), pp.575-583.

GUERRA, A., BRAGA, Marco & REIS, José C. (2010). Tempo, espaço e simultaneidade: uma questão para cientistas, artistas, engenheiros e matemáticos no século XIX. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, vol. 27 (3), pp.568-583.

HEISENBERG, W.; On the Structure of Atomic Nuclei. I. Z. Phys. 77 (1932) 1;

HESS, V.F.; Observation of Penetrating Radiation in Seven Balloon Flights Phys.Zeitschr. 13 (1912) 1084;

_____ On the Origin of Penetrating Radiation Phys.Zeitschr. 14 (1913) 610;

HODDESON, L., BROWN, L.M., RIORDAN, M. & DRESDEN, M. **The Rise of the Standard Model: A History of Particle Physics from 1964 to 1979**. Londres: Cambridge University Press. Novembro, 1997.

JEVREMOVIC T. Nuclear Principles in Engineering. 2009. XXII. 549 p. Hardcover

LANDE, K.; BOOTH, E.T.; IMPEDUGLIA, J.; LEDERMAN, L.M.; CHINOWSKY, W.; Observation of Long-Lived V Particles Phys. Rev. 103 (1956) 1901;

LATTES, C.M.G.; Muirhead, H.; Occhialini, G.P.S.; Powell, C.F.; Processes Involving Charged Mesons Nature 159 (1947) 694;

_____ Occhialini, G.P.S.; Powell, C.F.; Observation on the Tracks of Slow Mesons in Photographic Emulsions Nature 160 (1947) 453;

- LEE, T.D.; YANG, C.N.; Question of Parity Conservation in Weak Interactions Phys. Rev. 104 (1956) 254; Phys. Rev. 106 (1957) 1371;
- LEE T.D. Weak interactions and nonconservation of parity. Nobel Lecture. Dez. 1957.
- LOSADA, C. O. (2007). O essencial invisível aos olhos: uma viagem divertida e colorida pela estrutura da matéria através de uma sequência ensino-aprendizagem para a introdução de Física de Partículas Elementares na 8ª série do Ensino Fundamental. 424f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências e Matemática) – Universidade Cruzeiro do Sul, São Paulo.
- JERZEWSKI, V.B. & MACKENDANZ, L.F. Partículas elementares e interações: uma proposta para o ensino médio politécnico In: Simpósio Nacional de Ensino de Física. 2015. São Paulo. **Anais.** Disponível em: <http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/snef/xxi/sys/resumos/T0473-1.pdf> Acesso em: 22/02/2016.
- JULIA, D. "A cultura escolar como Objeto Histórico" **Revista Brasileira de História da Educação**, nº1, 2001.
- JUNIOR, J.R. **O que é Positivismo**. 2 ed. São Paulo: Brasiliense. 1994.
- JUNIOR, A.M.J. & GOBARA, S.T. Influências da pesquisa em ensino de Física para a inserção da Física Moderna nos livros didáticos. 2015. São Paulo. **Anais.** Disponível em: <http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/snef/xxi/sys/resumos/T0907-1.pdf> Acesso em: 22/02/2016.
- KAWAMURA, M.R. & HOUSOME, T. A Contribuição da Física para um novo Ensino Médio. **Física na Escola**, v.4, n.2, 2003.
- KUHN, T.S. **A Estrutura das Revoluções Científicas**. São Paulo: Perspectiva. 2010
- LECOURT, D. **L'épistémologie historique de Gaston Bachelard**. 4. ed., Paris: J. Vrin, 1970.
- LECOURT, D. **Marxism and Epistemology: Bachelard, Canguilhem and Foucault.** / Tradução Bem Brewster / Londres: NLB, 1975.
- LEDERMAN, N. G. Nature of science: past, present and future. In: ABELL, S. K.; LEDERMAN, N. G. (Eds.), **Handbook of Research on Science Education**, p. 831-880, 2007.

- LOPES, A. C **Currículo e epistemologia**. Ijuí: Editora UNIJUÍ, 2007.
- LOPES, A. C., MACEDO, E. **Teorias de Currículo**. São Paulo: Cortez Editora, 2011.
- MACKEDANZ, L. F.; NÓBREGA, F. K. O LHC (Large Hadron Collider) e a nossa física de cada dia. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 35, n. 1, 1301. 2013.
- MAIA, M. C. (2011). Uma Abordagem do Modelo Padrão da Física de Partículas acessível a alunos do Ensino Médio. 70f. Dissertação (Mestrado Profissional no Ensino de Ciências e Matemática) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- MARTINS, V.R. **O ensino da física moderna nos livros didáticos do início do século XX. Dissertação** (Mestrado em Ensino de Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.
- MARTINS R.A. As primeiras investigações de Marie Curie sobre elementos radioativos. **REVISTA DA SBHC I Nº I/2003** pp. 29-41
- _____. Como Becquerel não descobriu a radioatividade. **Cad. Cat. Ens. Fís.**, Florianópolis, 7 (Número Especial): 27-45, jun. 1990. 27
- MARTIN, G. F. S. M. (2005). A Física de Partículas Elementares nos cursos de Licenciatura em Física. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências e Educação Matemática) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina.
- MARQUES FILHO, E. C. (2011). Crenças de Futuros Professores em Física em contexto de inovação curricular: o caso de um curso de Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio. 418f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo.
- MARSHALL, F.; COLTMAN, J.W.; The Photo-Multiplier Radiation Detector *Phys. Rev.* 72 (1947) 528;
- MATTHEWWS, M. R. História, Filosofia e Ensino de Ciências: a tendência atual de reaproximação. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 12, n. 3: p. 164-214, dez. 1995.
- MELZER, E.E.M. & AIRES, J.A. A história da teoria atômica: uma análise fleckiana de Dalton a Bohr. *Ciência em tela*- Vol. 9 n.1 2016

- MONTEIRO, M.A. **Discursos de professores e de livros didáticos de Física do nível médio em abordagens sobre o ensino da Física Moderna e Contemporânea: algumas implicações educacionais**. Tese (Doutora em Educação para as Ciências) – Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho, Bauru, 2010.
- MOREIRA, A. F. e SILVA, T. T. **Currículo, Cultura e Sociedade** / Antonio Flávio Moreira e Tomaz Tadeu da Silva (orgs.); tradução de Maria Aparecida Baptista – 4. Ed. – São Paulo, Cortez, 2000.
- MOREIRA, M. A. O modelo padrão da física de partículas. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.31, n.1, p.1306-1306, 2009.
- NEDDERMEYER, S.H.; ANDERSON, C.D.; Note on the Nature of Cosmic-Ray Particles Phys. Rev. 51 (1937) 884;
- NETO, J. T. J & SILVA, H.C. A problemática da representação de partículas elementares: a construção de um átomo. In: Simpósio Nacional de Ensino de Física. 2015. São Paulo. **Anais**. Disponível em: <http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/snef/xxi/sys/resumos/T0499-1.pdf> Acesso em: 22/02/2016.
- NETO, J. L. S. (2011). Partículas Elementares no Ensino Médio. 95f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) – Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- NETO, J.T.J. A textualização da Física de Partículas em um livro de divulgação científica. In: Encontro de Pesquisa em Ensino de Física. 2013. São Paulo. **Anais**. Disponível em: <http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/epef/xv/programa/resumo.asp?insId=259&trId=2> Acesso em: 22/02/2016.
- NETO, J.T.J. A textualização da Física de Partículas em um livro de divulgação científica. In: Encontro de Pesquisa em Ensino de Física. 2013. São Paulo. **Anais**. Disponível em: <http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/epef/xv/programa/resumo.asp?insId=259&trId=2> Acesso em: 22/02/2016.
- NEWMAN, H.B. & YPSILANTIS, T. **History of original ideas and basic discoveries in particle physics**. Enrice: NATO Scientific Affair Division. Agosto. 1994.

- NORONHA, A.B.M. . **Interpretando a relatividade especial: discutindo o debate realismo e antirrealismo científicos no ensino de ciências**. 2015. Dissertação (mestrado) – Instituto de Física, Instituto de Química, Instituto de Biociências, Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.
- OSTERMANN, F. e CAVALCANTI, C. J. H. Física moderna e contemporânea no ensino médio: elaboração de material didático, em forma de pôster, sobre partículas elementares e interações fundamentais. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 16, n. 3. p. 267–286. 2008.
- OSTERMANN, F., MOREIRA, M. A. Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa "Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio". **Investigações em ensino de Ciências**, v.5, n.1, p. 23-48, 2000.
- PANSERA, F. C. et al. Proposta de ampliação do currículo escolar a partir da inserção de tópicos de física moderna no ensino médio. In: Simpósio Nacional de Ensino de Física. 2015. São Paulo. **Anais**. Disponível em: <http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/snef/xxi/sys/resumos/T1094-1.pdf> Acesso em: 22/02/2016.
- PATY, M. A **Matéria Roubada: a apropriação crítica do objeto da Física Contemporânea**. / Tradução Mary Amazonas Leite de Barros. 2 ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo. 1995.
- PEREIRA, A. P. P., OSTERMANN, F. Sobre o ensino de física moderna e contemporânea: uma revisão da produção acadêmica recente. **Investigações em ensino de Ciências**, v.14, n.3, p. 393-420, 2009.
- PEREIRA, J.G. & LONDERO, L. As pesquisas sobre o ensino da Relatividade Especial e Geral: Um estudo baseado em teses e dissertações. In: Encontro de Pesquisa em Ensino de Física. 2013. São Paulo. **Anais**. Disponível em: <http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/epf/xv/programa/resumo.asp?insId=67&rald=1> Acesso em: 22/02/2016.
- PEREIRA, L.S.P. & FREIRE JUNIOR, O. As doutrinas positivistas de August Comte e Ernest Mach: diferentes posturas em relação ao atomismo no século XIX. In: XVI Encontro Nacional de Ensino de Química. 2012. Bahia. **Anais**. Disponível em:

<http://www.portalseer.ufba.br/index.php/Anaiseneq2012/article/view/7569/5337>

Acesso em: 22/02/2016.

PIETROCOLA, MAURÍCIO PINTO DE OLIVEIRA. **Inovação Curricular e Gerenciamento de Riscos Didático-Pedagógicos: o ensino de conteúdos de Física Moderna e Contemporânea na escola média**. 2010. Erudição. Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo.

PINTO, A.C. & ZANETIC, J. É possível levar a física quântica para o ensino médio? **Caderno Catarinense de Ensino de Física** v. 16. n.1. p.7-34, abr. 1999

PAIS, A.; Some Remarks on the V-Particles Phys. Rev. 86 (1952) 663;

PAIVA, J. R. (2010). Representações pictóricas no ensino de física moderna: uma construção dos alunos. 209f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

PAULI, W.; On the Connexion between the Completion of Electron Groups in an Atom with the Complex Structure of Spectra Z. Phys. 31 (1925) 765;

_____. Zeeman-Effect and the Dependence of Electron-Mass on the Velocity Z. Phys. 31 (1925) 373;

PEREIRA, Alexsandro et al. Uma abordagem conceitual e fenomenológica dos postulados da física quântica. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, p. 831-863, ago. 2012. ISSN 2175-7941.

PEREIRA, O. S. (1997). Raios Cósmicos: introduzindo física moderna no 2o grau. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências) – Universidade de São Paulo.

PESSANHA, M. R. C. (2014). Estrutura da Matéria na Educação Secundária: obstáculos de aprendizagem e o uso de simulações computacionais. 231f. Tese (Doutorado em Ensino de Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo. Pinheiro, L. A. (2011). Partículas Elementares e Interações Fundamentais no Ensino Médio. 313f. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

- PINHEIRO, Lisiane Araujo. A câmara de nuvens: uma abordagem integrada entre a Física Clássica e a Física Moderna. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Florianópolis, v. 32, n. 2, p. 517-528, maio 2015. ISSN 2175-7941.
- RESQUETTI, S.O. et al. Radioatividade no Nível Médio: proposta de uma sequência didática com enfoque na história e filosofia da ciência e no movimento CTS. In: Simpósio Nacional de Ensino de Física. 2015. São Paulo. **Anais**. Disponível em: <http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/snef/xxi/sys/resumos/T0809-1.pdf> Acesso em: 22/02/2016.
- ROCHA, Diego Marcelli; RICARDO, Elio Carlos. As crenças de autoeficácia de professores de Física: um instrumento para aferição das crenças de autoeficácia ligadas a Física Moderna e Contemporânea. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Florianópolis, v. 31, n. 2, p. 333-364, dez. 2013. ISSN 2175-7941.
- ROCHA, Diego Marcelli; RICARDO, Elio Carlos. As crenças de autoeficácia e o ensino de Física Moderna e Contemporânea. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Florianópolis, v. 33, n. 1, p. 223-252, abr. 2016. ISSN 2175-7941.
- ROCHESTER, G.D.; BUTLER, C.C.; Evidence for the Existence of New Unstable Elementary Particles Nature 160 (1947) 855;
- ROSA COELHO, Geide; BORGES, Oto. O entendimento dos estudantes sobre a natureza da luz em um currículo recursivo. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Florianópolis, v. 27, n. 1, p. 63-87, jan. 2010. ISSN 2175-7941.
- ROSSI, B.; VAN NORMAN HILBERY, H.; HOAG, J.B.; The Disintegration of Mesotrons Phys. Rev. 56 (1939) 837;
- Rutherford, E.; Collision of α Particles with Light Atoms IV. An Anomalous Effect in Nitrogen Phil. Mag. 37 (1919) 581;
- _____ Nuclear Constitution of Atoms Proc. Roy. Soc. A97 (1920) 374;
- _____ The Magnetic and Electric Deviation of the easily absorbed Rays from Radium Phil. Mag. (6)5 (1903) 177;
- _____ The Scattering of α - and β - Particles by Matter and the Structure of the Atom Phil. Mag. 21 (1911) 669;

- _____ The Structure of the Atom Nature 92 (1913) 423; Phil. Mag. 27 (1914) 488;
- _____ Uranium Radiation and the Electrical Conduction Produced by it Phil. Mag. 47 (1899) 109;
- SACRISTÃN, J. G. O que significa currículo? In SACRISTÃN, J. G. (Orgs). **Saberes e incertezas sobre o currículo**. São Paulo: Penso. 2013.
- SANCHEZ, M.B. **Física Moderna e Contemporânea no ensino médio: qual sua presença em sala de aula?** Dissertação (Mestre em Educação para a Ciência e o Ensino de Matemática) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2006.
- SANTOS, A.G. Radiações ultravioleta em livros didáticos de Física do Ensino Médio. In: Encontro de Pesquisa em Ensino de Física. 2013. São Paulo. **Anais**. Disponível em: <http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/epef/xv/programa/resumo.asp?insId=113&traId=2> Acesso em: 22/02/2016.
- SARAN, M. C. B. (2012).Astrofísica de Partículas na Sala de Aula - Uma Sequência de Ensino e Aprendizagem sobre Raios Cósmicos para o Ensino Médio. 131f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências) – Universidade de São Paulo, São Carlos.
- SCHWEBER, S.S. **Quantum Field Theory: From QED to the Standard Model**. In: The Cambridge History of Science – Vol. 5 The Modern Physical and Mathematical Sciences. Mary Jo Nye (Orgs.). Londres: Cambridge University Press. 2002.
- SCHRÖDINGER, E.; Quantization as a Problem of Proper Values. Part I. Annalen der Physik. Leipzig 79 (1926) 361;
- SILVA, R.R.M.S et al. A energia nuclear em portais de notícias: elementos do discurso da divulgação científica em notícias políticas. 2015. São Paulo. **Anais**. Disponível em: <http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/snef/xxi/sys/resumos/T0789-1.pdf> Acesso em: 22/02/2016.
- SILVA, T.T. **Documentos de identidade: uma introdução as teorias do currículo**. 3 ed. Belo Horizonte: Autêntica, 2011.
- SILVA, A. C.; ALMEIDA, M. J. P. M. (2011). Física Quântica no ensino médio: o que dizem as pesquisas. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, 28(3), pp. 624-652.

- SILVA, ANDRÉ COELHO; ALMEIDA, MARIA JOSÉ PEREIRA MONTEIRO; HALLACK, MAIRA LAVALHEGAS. Fragmentos do paradoxo EPR em um trecho de divulgação científica: uma pesquisa de cunho exploratório com ingressantes na universidade. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Florianópolis, v. 32, n. 1, p. 53-75, set. 2014. ISSN 2175-7941.
- SILVA, HEBERT ROBERTO ARAUJO; MORAES, ANDREIA GUERRA. O estudo da espectroscopia no ensino médio através de uma abordagem histórico-filosófica: possibilidade de interseção entre as disciplinas de Química e Física. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Florianópolis, v. 32, n. 2, p. 378-406, mar. 2015. ISSN 2175-7941.
- SILVA, LUCIENE FERNANDA DA; ASSIS, Alice. Física Moderna no Ensino Médio: um experimento para abordar o efeito fotoelétrico. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Florianópolis, v. 29, n. 2, p. 313-324, ago. 2012. ISSN 2175-7941.
- Silva, W. R. (2002). Inserção de tópicos da nova física da estrutura da matéria no ensino médio: uma proposta. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências) – Universidade de São Paulo.
- Siqueira, M. R. P. (2006). Do Visível ao Indivisível: uma proposta de Física de Partículas Elementares para o Ensino Médio. 257f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo.
- SIQUEIRA, M. R. P. **Do Visível ao Indivisível: uma proposta de Física de Partículas Elementares para o Ensino Médio.** Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- SKOBELZYN, D.V.; A New Type of Very Fast Beta Rays Z. Phys. 54 (1929) 686;
- STREET, J.C.; STEVENSON, E.G.; New Evidence for the Existence of a Particle of Mass Intermediate Between the Proton and Electron Phys. Rev. 52 (1937) 1003;
- STREET, J.C.; STEVENSON, E.G.; Penetrating Corpuscular Component of the Cosmic Radiation Phys. Rev. 51 (1937) 1005;
- TENFEN, DANIELLE NICLODELLI; TENFEN, WAGNER. O modelo atômico de Bohr e as suas limitações na interpretação do espectro do átomo de hélio. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Florianópolis, v. 34, n. 1, p. 216-235, maio 2017. ISSN 2175-7941.

- TERRAZAN, E. A. **A inserção da física moderna e contemporânea no ensino de física na escola do 2º grau.** Caderno Catarinense de Ensino de Física, Florianópolis, v.9, n.2, dez. 1992.
- Thompson, R.W.; Buskirk, A.V.; Etter, L.R.; Karzmark, C.J.; Rediker, R.H.; An Unusual Example of Vo Decay Phys. Rev. 90 (1953) 1122;
- _____ The Disintegration of Vo Particles Phys. Rev. 90 (1953) 329;
- Thomson, G.P.; Experiments on Diffraction of Cathode Rays Proc. Roy. Soc. A117 (1928) 600;
- Thomson, J.J.; Cathode Rays Phil. Mag. 44 (1897) 293; Nature 55 (1897) 453;
- TOMONAGA - G. ARAKI, Effect of the Nuclear Coulomb Field on the Capture of Slow Mesons. Phys.Rev., 58, 1940, 90-91.
- VALENTE, L. (2009). A Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio: caminhos para a sala de aula. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo.
- VIANA, Hélio E. B. A Construção Atômica da Teoria de Dalton como Estudo de Caso e algumas reflexões para o ensino de química. Dissertação (Mestrado) - USP. Faculdade de Educação, São Paulo, 2007.
- WEINBERG, S. **The Making of the Standard Model.** Jan. 2004. Disponível em: arXiv:hep-ph/0401010. Acesso em: 22/02/2016
- WIGNER, E.P.; On the Consequences of the Symmetry of the Nuclear Hamiltonian on the Spectroscopy of Nuclei Phys. Rev. 51 (1937) 106;
- WILLIAMS, E.J.; ROBERTS, G.E.; Evidence for Transformation of Mesotrons into Electrons Nature 145 (1940) 102;
- WU, C.S.; Ambler, E.; Hayward, R.W.; Hoppes, D.D.; Hudson, R.P.; Experimental Test of Parity Conservation in Beta Decay Phys. Rev. 105 (1957) 1413;
- WRÓBLEWSKI, A.K. Hypernuclei (and strange particles) - How it all began? Acta Physica Polonica B. Vol. 35. n.3 2004

YUKAWA, H.; On the Interaction of Elementary Particles Proc.Phys.Math.Soc.Jap. 17 (1935) 48;

_____ Meson Theory in its developments. Nobel Lecture. Dez. 1949.

ZATERKA, L. . Alguns aspectos da teoria da matéria: atomismo, corpuscularismo e filosofia mecânica. In: Cibelle Celestino Silva. (Org.). Estudos de História e Filosofia das Ciências. 1 ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006, v. 1, p. 329-352.

ZANOTELLO, M. & FAGUNDES, M.B. Dualidade onda-partícula: discursos em manuais didáticos e de alunos ingressantes no ensino superior. In: Encontro de Pesquisa em Ensino de Física. 2013. São Paulo. **Anais.** Disponível em: <http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/epef/xv/programa/resumo.asp?insId=225&traId=1> Acesso em: 22/02/2016.

ZYLBERSZTAJN, A. Galileu – um cientista e várias versões. **Caderno Catarinense de Ensino de Física.** v. 5. p.35-48. 1988.