UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE EDUCAÇÃO

OS MODELOS DE INTERAÇÃO DA FÍSICA E DOS ESTUDANTES

Maria Inês Nobre Ota

Tese apresentada à Faculdade de Educação da USP como exigência parcial à obtenção do título de doutor em Educação, na área de concentração: Didática, sob a orientação da **D^{ra} Yassuko Hosoume**.

SÃO PAULO
Julho/97

A Laura, Nádia, Iuri e Iara.

AGRADECIMENTOS

À CAPES, pelo apoio financeiro.

À Universidade Estadual de Londrina, pelo apoio institucional.

Aos colegas do Departamento de Física da UEL, pelo apoio pessoal.

A minha mãe, meus irmãos e minhas cunhadas, pelo incentivo e pela cooperação.

Ao André, pelo companheirismo.

Aos amigos do corredor do ensino, pelo prazer da convivência.

Ao André e ao Renato, pelos bons momentos na nossa sala.

À Yonne, a amiga que está sempre disposta a ler o original.

À Beth, por sua prestatividade constante.

À Isilda, à Rebeca, à Rita, à Sandra e ao Sérgio, pelas críticas e sugestões e, também, pelas profícuas discussões das quartas-feiras.

À Sandra, por estar sempre disposta a pensar em inglês.

Ao Celso e à Hercília, pelas proveitosas considerações no exame de qualificação.

Aos estudantes que gentilmente participaram das entrevistas.

Ao Mané, por continuar a ser meu mestre.

À Yassuko, por ter me incentivado e, principalmente, por ter construído comigo este trabalho.

Às minhas filhas Laura, Nádia e Iara e ao meu filho Iuri, por todo amor que recebi.

RESUMO

Na tentativa de compreender o processo de ensino-aprendizagem no curso de graduação em Física buscaram-se elementos que fossem significativos para a elaboração de uma síntese que estabelecesse, com alguma abrangência, as principais características desse processo. Dentre várias alternativas, optou-se por uma análise do conteúdo que é estudado no curso de graduação. Para isso, foram consideradas as **interações físicas,** pois as investigações relativas aos vários modelos construídos pela Física para interpretá-las são muito freqüentes nas diversas atividades desenvolvidas no curso de graduação.

Os pressupostos teóricos, que condicionaram a escolha dos elementos para as análises do processo de ensino-aprendizagem, baseiam-se na concepção de que o conhecimento físico corresponde a construções intelectuais elaboradas por seres humanos em vários momentos históricos. Estas construções estão inscritas numa cultura, numa sociedade e numa história. A elas estão associadas diferentes visões de mundo.

Os modelos para a interpretação das interações físicas foram apresentados segundo diferentes visões de mundo. A investigação das várias imagens relativas a eles fornece elementos significativos para um distanciamento de várias teorias estudadas durante o curso de graduação, possibilitando a percepção de suas totalidades e, também, da complexidade existente no conhecimento construído pela Física.

Durante o curso de graduação os estudantes entram em contato com diferentes concepções sobre a natureza física através de conteúdos estudados nas várias disciplinas e estes conteúdos são reconstruídos por eles. As investigações sobre os modelos de interação construídos pelos estudantes indicaram a existência de diversas concepções que contêm os elementos estudados no curso de graduação, mas são articuladas de formas peculiares, através de composições híbridas dos conceitos aprendidos.

Estes resultados indicam que, no curso de graduação em Física, faltam discussões que explicitem as significações dos conceitos e, também, as articulações existentes nas diferentes teorias.

ABSTRACT

Intending to understand the process of teaching and learning in the graduation course of Physics, we have searched for significant elements to elaborate an abstract in order to establish the principals characters at this process with some enlargement. These were many alternatives so we chose to analysis the content in the graduation course. So, we have considered the physics interactions because the investigations about many models constructed by Physics to interpret they are very frequent on the several activities that are developed in the graduation course.

The elements that stipulated our choice to analysis the process of teaching and learning have its theoreticians presuppositions based in the consider that physics knowledge correspond to intellectuals constructions elaborated by human beings in many historic moments. And associated with them, there are different visions of world.

The models in order to make an interpretation of the physics interactions were presented by different visions of world and the investigation about many images related with these models give us significant elements in order to keep on distance from many theories that were studied during the graduation course which make possible the perception of its totalities and also the complexity that exists in the knowledge that was constructed by Physics.

During the graduation course, the students become in touch with different conceptions about the nature of Physics through contents that were studied in many subjects and they reconstruct these contents. The investigations about the interaction models constructed by students the existence of several conceptions, which content the studied elements on the graduation course, but they are articulated in peculiars forms through hybrids compositions of the learned concepts.

These results indicate that in the graduation course of Physics, discussions that show the signification of concepts and also the articulations existing in different theories, are lacked.

ÍNDICE

INTRODUÇÃO 1

I - CONSTRUÇÃO DO CONHECIMENTO 13

I-1. CONSTRUÇÃO DIALÉTICA DO CONHECIMENTO FÍSICO 14

I-2. CONSTRUÇÃO INDIVIDUAL DO CONHECIMENTO FÍSICO 25

I-2.1. Construção das significações 26

I-2.2. Construção das representações 30

I-3. INTERAÇÃO COM O CONHECIMENTO FÍSICO 37

II - OS MODELOS DE INTERAÇÃO NA FÍSICA 57

II-1. MODELOS CLÁSSICOS PARA A INTERAÇÃO 60

II-1.1. Interação através de forças de ação a distância 60

II-1.2. Interação mediada por campo 63

II-2. AS CONCEPÇÕES DE INTERAÇÃO NA RELATIVIDADE 72

II-2.1. A interação eletromagnética no mundo relativístico 74

II-2.2. A gravitação na relatividade 81

II-3. A INTERAÇÃO NA MECÂNICA QUÂNTICA 82

II-4. A INTERAÇÃO MEDIADA PELA TROCA DE PARTÍCULAS. 87

II-4.1. A interação eletro-fraca 87

II-4.2. Processos que envolvem quarks 98

II-4.3. Modelos de interação na teoria quântica de campos 100

II-5. SÍNTESE DOS MODELOS DE INTERAÇÃO 101

III - OS MODELOS DE INTERAÇÃO CONSTRUÍDOS PELOS ESTUDANTES 103

III-1. A COLETA DOS DADOS 104

III-2. ELABORAÇÃO DO INSTRUMENTO DE ANÁLISE 108

III-3. RESULTADOS 120

III-4. ALGUNS MODELOS CONSTRUÍDOS SOBRE INTERAÇÃO 124

III-4.1. Representação Cinemática 125

III-4.2. Representação Dinâmica 130

III-4.3. Representação Conservativa 132

OS MODELOS DE INTERAÇÃO DA FÍSICA E DOS ESTUDANTES: subsídios para a conscientização do processo de ensino-aprendizagem no curso de graduação em Física 137

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 143

INTRODUÇÃO

Logo após terminar o curso de graduação em Física, comecei a dar aulas para estudantes de segundo grau. Naquela época, eu sentia muita segurança para exercer aquela profissão, pois acreditava que tinha conseguido alcançar uma boa formação em meu curso superior. Eu havia estudado em uma Universidade bem conceituada e, para os padrões de avaliação daquela Instituição, eu tinha tido um bom desempenho. Meu primeiro ano como professora foi muito gratificante não só devido às relações fascinantes que se estabelecem na escola entre professores e estudantes, mas, principalmente, porque sentia que estava aprendendo. É claro que eu tinha muito que aprender sobre a prática educativa. Disto eu tinha consciência, pois eu não havia aprendido a ser educadora nos bancos da Universidade. Lá eu apenas havia tido contato com o pensamento de alguns educadores. Houve discussões, reflexões, planejamentos, mas a prática da sala de aula era por mim experimentada pela primeira vez. Aprendi, portanto, muito com meus alunos e também com meus colegas de profissão.

Comecei a dar aulas consciente do quanto ainda tinha que aprender, mas deparei-me com algumas surpresas, através de situações que não imaginava que pudessem acontecer. Algumas vezes, durante a aula, eu estabelecia algumas relações entre alguns conceitos que eu estava ensinando, com outros que me vinham à mente e com estas conexões eu sentia que de repente havia entendido o que estava ensinando. Embora tivesse estudado aquilo na Universidade e, também, estudado novamente para preparar minhas aulas, a sensação que eu tinha é que só naqueles instantes havia me apropriado daquele conhecimento. Esta sensação era muito gratificante, pois considerava que havia aprendido um pouco mais em relação ao que já sabia.

Com o passar do tempo, eu fui perdendo a segurança que tinha em relação ao meu aprendizado durante a graduação e fui percebendo o quanto aquele conhecimento não me pertencia e que, muito daquilo que eu ensinava durante as aulas, não fazia parte da minha vida. Estes sentimentos não estavam tão claros naquele momento, mas manifestavam-se na forma de insatisfação relativa à minha atuação enquanto professora. Eu que comecei a dar aulas acreditando que iria resolver o problema do ensino da Física porque havia estudado Física, descobri que também não sabia Física. Por causa disto, fui à procura de um curso de pós-graduação. Como ainda almejava ser uma educadora, escolhi a área de ensino de Física.

Foi durante o mestrado que comecei a tomar consciência de que aquela sensação de não ser proprietária do conhecimento estudado durante a graduação era compartilhada por mais pessoas. E mais ainda, foi ali que eu percebi algumas das causas que fazem com que os estudantes, após ter realizado com êxito as atividades propostas durante o curso de graduação, sintam que o conhecimento da Física não lhes pertence. O meu trabalho de mestrado desenvolveu-se na direção de buscar alternativa no ensino de graduação em Física que contemplasse algumas condições necessárias à apropriação do conhecimento em Física. Uma parte deste trabalho é um texto de apoio para ensino de um conteúdo que é estudado no curso de graduação referente à relação da relatividade com o eletromagnetismo.

Foi através das discussões de que participei durante o mestrado que percebi, também, a natureza da aprendizagem durante a graduação. Ao invés de ter me formado, como eu imaginava, eu havia me informado sobre o conhecimento físico. Realmente eu tinha muitas informações sobre este conhecimento, mas eram informações que não estavam estruturadas. E, por estarem fragmentadas, dava a impressão, no seu conjunto, de que constituíam um conhecimento amplo. Por isso, logo após terminar o curso de graduação, eu tinha a impressão de que havia aprendido muita Física. Realmente eu aprendi muitos conceitos novos durante a graduação. O que eu não aprendi foi que estes conceitos faziam parte de um *corpo* de conhecimento denominado *Física.* A imagem que tenho atualmente referente ao meu conhecimento da Física, após terminar o curso de graduação, é como se os conceitos estivessem boiando em uma piscina e cada vez que eu precisasse de algum deles, aproximava-me da borda, procurava-o e recolhia-o. Por não estarem ligados, os conceitos movimentavam-se aleatoriamente. Assim, os conceitos podiam formar qualquer configuração na superfície da água. Não existia qualquer espécie de organização que determinasse alguma totalidade relativa à Física, por mais restrita que fosse. Era uma espécie de conhecimento completamente desorganizado. Eu só reconhecia suas partes e por mais que tentasse afastar-me dele para percebê-lo como um todo, eu não conseguia reconhecê-lo, pois os conceitos estavam em contínuo movimento, de tal forma que podiam compor-se em infinitas totalidades independentes entre si. Era a desordem absoluta! Quando fui discutir sobre o tema da minha pesquisa no mestrado, lembro-me que comentei: - eu tenho que estudar tudo isso? E meu orientador pegou um livro sobre aquele assunto, abriu-o na página em que começava o sumário, leu os títulos de cerca de vinte capítulos e mostrou-me que tudo aquilo se reduzia a quatro leis fundamentais e uma relação

de interação. Foi assim que surgiu uma dúvida específica sobre a natureza do conhecimento físico, ou seja, sobre o que é a Física.

Foi durante o mestrado que o conhecimento que eu tinha sobre a Física deixou de ser operativo, para tornar-se um obstáculo. Isto me deu condições para problematizar aquele conhecimento que tinha sobre a Física e, recusando-o, pude transformá-lo. Minha atuação como professora no ensino superior e pesquisadora em ensino de Física tem propiciado a investigação das articulações entre os elementos que compõem o conhecimento físico, procurando contextualizá-los de tal forma que isto permita um afastamento crítico em relação a ele. Realizar um afastamento crítico em relação ao conhecimento físico significa *ser capaz de sair de seu contexto, de "distanciar-se" dele para ficar com ele; capaz de admirá-lo para, objetivando-o transformá-lo e, transformando-o, saber-se transformado pela sua própria criação.*[1]

Assim, o exercício da profissão de professora de Física ensinando diferentes conteúdos, sem que houvesse alguém que me orientasse, levou-me à conscientização do meu conhecimento quando precisei decidir sozinha sobre o que fazer com o que havia aprendido na Universidade. E com esta nova forma de interação com o conhecimento físico, com esta necessidade de manipular o objeto de conhecimento com que estava envolvida é que surge a questão: - **como é esta Física que é estudada na graduação?**

Esta tese foi elaborada com a intenção de procurar uma resposta a esta questão, tendo como referência o curso de bacharelado em Física. Entretanto, esse curso pode ser analisado através de vários pontos de vista e em cada um encontra-se uma "faceta" deste curso. Por isso, para começar a pesquisa é necessário fazer uma opção relativa ao recorte segundo o qual pretende-se "olhar" esse curso. Pode-se escolher um recorte sociológico e investigar as relações institucionais que existem nesse curso.[2] Ou, então, escolher um recorte psicológico e analisar, por exemplo, o comportamento dos estudantes perante o conteúdo estudado[3]. Poderia, também, investigar a natureza das atividades que existem durante o processo de ensino-aprendizagem[4]. A escolha de algum recorte depende do objetivo que o pesquisador pretende atingir.

---

[1] Freire, Paulo, *Educação e Mudança,* Rio de Janeiro, Paz e Terra, 1984, p. 17.
[2] como foi investigado por Roberto Isao Kishinami em *Análise das relações institucionais em um curso básico de física,* dissertação de mestrado, IFUSP/FEUSP, 1982.
[3] Realizado por Yassuko Hosoume em *Instrumento e método de análise para um curso de física básica: uma proposta,* dissertação de mestrado, IFUSP/FEUSP, 1978.
[4] Ver Soares, Vera Lúcia Lemos, *Laboratório didático de física no ciclo básico da universidade,* dissertação de mestrado, IFUSP/FEUSP, 1977.

Para este trabalho de pesquisa, a opção foi no sentido de investigar o **conteúdo** que é estudado durante o curso de graduação em Física, pois é sob este recorte que podemos responder a questão relativa à Física que é estudada no curso de graduação. E para atingir este objetivo, é necessário elaborar uma síntese do conteúdo ensinado no curso de graduação. Entretanto, este conteúdo, além de ser muito amplo, é muito diversificado. Para mim, é impossível imaginar que seja possível realizar alguma síntese sobre a Física, onde sua multidimensionalidade seja contemplada. O que pode ser possível de serem realizadas são sínteses parciais conforme recortes previamente determinados.

Alguns recortes já existem. Um deles é o currículo do curso de graduação. O currículo é composto por um conjunto de disciplinas e cada disciplina possui uma ementa que resume seu conteúdo programático. Portanto, o conjunto das ementas das disciplinas propostas para o curso de bacharelado em Física é uma síntese do conteúdo estudado durante a graduação. Neste caso a síntese tem o sentido estrito de resumo, ou seja, trata-se de exposições abreviadas do conteúdo das disciplinas apresentadas na forma de itens. O texto em si é frio e estático, pois é constituído, basicamente, por substantivos e adjetivos. Não contêm verbos que manifestam ações, qualidades, estados, existências. Mesmo apresentado desta forma, a sua leitura tem significado para a comunidade envolvida com o curso de graduação.

As ementas das disciplinas que compõem o currículo do curso de Física fazem parte do manual correspondente a este curso. Normalmente, os estudantes recebem este manual, uma vez que dele precisam para organizar as disciplinas a serem cursadas em cada semestre e preencher o formulário da matrícula. É no manual que estão contidas as siglas referentes a cada uma das disciplinas, o número de créditos e as propostas de distribuição das disciplinas nos vários períodos letivos. As ementas são colocadas no manual do curso de graduação para documentar e tornar público qual é o compromisso da Instituição de Ensino para com os estudantes, no que diz respeito ao conteúdo previsto para ser explorado durante o curso. Haja vista que, além dos currículos propostos para o curso de graduação e das ementas, há também a transcrição de parte do regimento da Instituição de Ensino Superior relativa ao ensino de graduação. Nestas condições o manual de graduação pode ser reduzido a um documento que contém as regras do curso de graduação.

Poder-se-ia pensar que as ementas seriam meios através dos quais os estudantes fariam opções sobre as disciplinas que deveriam cursar, uma vez que elas têm mais

detalhes em relação aos nomes das disciplinas. Mas não creio que isto aconteça por dois motivos: primeiro, porque cerca de 70% dos créditos que devem ser cumpridos são obrigatórios e segundo, porque para quem ainda não entrou em contato com o conteúdo que está resumido na ementa, a ementa pode ter um significado tão vago quanto o nome da disciplina.

Se para os estudantes que ainda vão cursar alguma disciplina, a ementa pode significar apenas uma série de palavras, algumas conhecidas e outras não, para os professores, responsáveis por aquela disciplina, a ementa tem outro significado. Para o docente aquela ementa representa um conteúdo que deve ser desenvolvido, que vai ser programado conforme suas concepções, isto é, segundo uma determinada visão de mundo. Pode-se esperar que o professor, ao ler a ementa, encha-a de significado, mas também é de se esperar que professores diferentes atribuam significados diferentes ao mesmo rol de palavras. Embora exista uma certa racionalidade, que permite alguma homogeneidade de significações, há também a singularidade de cada interpretante.

A singularidade não existe apenas devido a cada interpretante, mas está relacionada ao conteúdo das ementas, pois o professor do curso de graduação interage com os vários conteúdos da Física através de diferentes graus de significação. Normalmente, este professor especializa-se em alguma área específica durante a pós-graduação e, por isso, tem muito mais intimidade com os conteúdos das disciplinas relacionados à sua área de pesquisa. Os diferentes níveis de intimidade refletem-se nas significações do conteúdo. Em disciplinas de conteúdo mais geral, tais como mecânica clássica, termodinâmica, eletromagnetismo, mecânica quântica, a influência da área de pesquisa sobre a significação do conteúdo existe, mas pode não ser marcante. Entretanto para disciplinas de conteúdo mais específico como, por exemplo, técnicas experimentais em física nuclear ou efeitos biológicos das radiações, a relação entre significação e área de pesquisa é determinante.

Nestas condições, volto a afirmar que o conjunto de ementas das disciplinas do curso de Física só é uma síntese do conteúdo estudado no sentido estrito de resumo, pois além de ser possível extrair do mesmo conjunto diferentes sínteses, ou seja, sínteses com significados diferentes, também, dificilmente, uma única pessoa reconstruiria, de uma única forma, o conteúdo proposto no currículo do curso de graduação em elementos que tivessem o mesmo grau de significação.

Uma síntese do conteúdo, diferente do rol de disciplinas e ementas, que fosse mais significativa para o curso de graduação auxiliaria a percepção de alguma totali-

dade relativa ao conhecimento físico estudado. Seria um meio de possibilitar o afastamento crítico do curso de graduação em Física, percebendo-o em sua totalidade. Entretanto, a procura de uma síntese absoluta e geral seria uma tentativa reducionista da multidimensionalidade do conhecimento físico. Por outro lado, se não houver uma busca de totalidades relativas a este conhecimento, isto também se constitui num reducionismo, numa tentativa de compreender o todo a partir apenas das qualidades das partes. Seria como se o conhecimento da Física estudado no curso de graduação pudesse ser reduzido à soma das suas várias disciplinas.

Em todas as sínteses, existem pressupostos teóricos e ideológicos que condicionam a escolha dos temas, a separação entre aquilo que é essencial e aquilo que é secundário e os resultados que são apresentados, pois sempre há alguma visão de mundo que seleciona e interpreta os dados. Na elaboração de qualquer síntese há necessariamente a escolha de um recorte metodológico. Uma síntese é uma reconstituição do objeto investigado e está relacionada à exposição deste objeto. *Marx distingue formalmente "método de exposição" de "método de pesquisa". A exposição é conseqüência de uma pesquisa anterior das "formas de desenvolvimento" e das "conexões" existentes entre elas.*[5] Para Marx, este tipo de processo é o fundamento materialista do seu método e, conforme apresentou no posfácio da segunda edição alemã de *O Capital*(1873):

> *A investigação tem de apoderar-se da matéria, em seus pormenores, de analisar suas diferentes formas de desenvolvimento, e de perquirir a conexão íntima que há entre elas. Só depois de concluído esse trabalho, é que se pode descrever, adequadamente, o movimento real. Se isto se consegue, ficará espelhada, no plano ideal, a vida da realidade pesquisada, o que pode dar a impressão de uma construção a priori.*[6]

Uma síntese é uma composição que resulta da reunião de elementos particulares de uma investigação, ou seja, das partes de um todo. Uma síntese é uma exposição destes elementos em uma determinada ordem refletindo uma certa totalidade na qual todos os elementos se ligam e ganham significados. É uma unidade da diversidade. Para elaborar uma síntese sobre o processo de ensino-aprendizagem da Física no curso de bacharelado procurei elementos que, relacionados, refletissem alguma realidade concreta deste processo. Esta síntese deve refletir a construção dialética do conhecimento físico e também servir de referência à construção individual dos estudantes de

[5] Gadotti, M. *Concepção Dialética da Educação*, 9ª edição, São Paulo, Cortez, 1995, p. 30

graduação. Deve ter elementos que propicie a conscientização do processo de ensino-aprendizagem do curso de bacharelado no sentido proposto por Paulo Freire, ou seja, que possibilite a consciência deste processo e, também, forneça meios para uma ação sobre este processo, pois conscientização realiza-se na práxis.

Para selecionar os elementos da síntese a ser elaborada, buscou-se algum conceito da Física que estivesse presente em boa parte do curso de bacharelado ou, equivalentemente, um conceito presente em várias teorias estudadas neste curso. O conceito de **interação** atendeu a estes requisitos e representará a unidade da diversidade do processo de ensino-aprendizagem no curso de graduação em Física.

Na Física, o conceito de interação também é um elemento de síntese, aliás, uma grande síntese, pois todas as interações que acontecem no universo são reduzidas a três:

- Interação gravitacional;
- Interação eletro-fraca;
- Interação forte.

Estas são as interações fundamentais da natureza e são elas as responsáveis pelos aglomerados que constituem o universo físico. Estes aglomerados são classificados em três grupos determinados pelas três interações fundamentais.

A **interação gravitacional** é responsável pela formação das galáxias, dos planetas etc. Devido à **interação eletro-fraca** existem átomos, moléculas, sólidos, líquidos, gases etc. Em estados de baixas energias a interação eletro-fraca é separada em duas: interação eletromagnética e interação fraca. No começo do universo, quando a energia era alta, estas duas interações estavam unidas. No estado de evolução em que o universo se encontra atualmente, estas interações aparecem separadas. Isto não quer dizer que se trata de dois tipos de interação, mas de duas manifestações relativas a um único efeito. Na separação existe a interação eletromagnética que é responsável, por exemplo, pela formação do átomo, devido à interação entre os elétrons e os prótons existentes no núcleo atômico e a interação fraca relativa, dentre outros eventos, a *uma forma de radioactividade que acontece devagar – a espécie que as pessoas temem que se escape dos reactores – chamada "desintegração beta"*[7] que envolve o decaimento do nêutron em próton através da emissão de um elétron e um neutrino. O neutrino faz

---

[6] Marx, Karl, *O Capital,* Rio de Janeiro, Civilização Brasileira, vol. I, p. 16, citado em *Concepção Dialética da Educação,* **op. cit.**

[7] Feynman, R.P. *QED A Estranha Teoria da Luz e da Matéria,* trad. Ana Maria Ovídio Baptista, Lisboa, Gradiva, 1992, p. 167.

parte de uma família de partículas elementares que participam das reações que envolvem as interações fracas. Ele não participa da interação eletromagnética, que é uma interação entre partículas eletricamente carregadas, porque é eletricamente neutro. A **interação forte** é responsável pela formação dos hádrons, partículas da família daquelas que constituem o núcleo atômico, como por exemplo, o próton e o nêutron. Os hádrons são aglomerados constituídos por quarks. Todas as partículas compostas por quarks são de duas classes: algumas, como o próton e o nêutron, são constituídas por três quarks: os bárions; outras, como os píons, são formadas por um quark e um antiquark: os mésons.

Essas interações são interpretadas por várias teorias da Física. Cada teoria em particular propõe modelos para interação e procura adaptá-los a cada interação em particular, isto é, há concepções gerais sobre o processo de interação que se aplicam a casos particulares como a interação propriamente dita. Em cada teoria pode haver também diferentes modelos que não são incomensuráveis entre si, ou seja, estão relacionados através de relações lógico-matemáticas. Em diferentes teorias, os modelos para uma determinada interação são incomensuráveis, pois eles são constituídos segundo visões de mundo incompatíveis entre si. Não há modelos para as três interações fundamentais em todas as teorias da Física. As razões disto são variadas. Há teorias cujo objeto de investigação não é relativo às interações fundamentais e por isso não propõem modelos para interpretá-las. Há outras teorias que foram articuladas antes de serem descobertas algumas das interações e, por isso, é de se esperar que nelas também não haja modelos para o desconhecido. Há também teorias que, pelas próprias condições em que foram articuladas, têm modelos específicos para determinadas interações. Essas e outras características estão apresentadas no quadro abaixo que indica o espaço de comparecimento dos vários modelos teóricos referentes às interações fundamentais nas várias teorias da Física. Neste quadro, só estão relacionadas as teorias que efetivamente propõem modelos para interpretar as interações fundamentais.

Na primeira linha deste quadro, estão relacionadas as várias teorias que propõem modelos para as interações que estão apresentadas na primeira coluna. A leitura é realizada através da relação entre linhas e colunas, como por exemplo: na mecânica clássica (MC) há três modelos para a interação gravitacional (G), denominados força, campo e potencial. Os espaços que foram deixados em branco indicam a ausência de modelo equivalente como, por exemplo, a mecânica quântica (MQ) não propõe mode-

lo para interpretar a interação gravitacional e a força fraca e para a interação eletromagnética há apenas o modelo de potencial.

	MC	TRR	TRG	MQ	TQC
G	Força				Grávitons
	Campo		Campo		
	Potencial		Potencial		
EM	Força				Fótons
	Campo	Campo			
	Potencial	Potencial		Potencial	
Fraca					W, Z
Forte efetiva				Potencial	Mésons
Forte					Glúons

Legenda:

MC: mecânica clássica
TRR: teoria da relatividade restrita
TRG: teoria da relatividade geral
MQ: mecânica quântica
TQC: teoria quântica de campos

G: interação gravitacional
EM: interação eletromagnética
Fraca: interação fraca
Forte efetiva: interação forte efetiva
Forte: interação forte

Os termos utilizados para nomear os modelos para as interações são relativos aos "mediadores da interação". Neste quadro não foram colocadas as partículas que estão interagindo. Há também a separação intencional da interação eletro-fraca para indicar que há apenas uma teoria que interpreta a interação fraca. Por razão similar, a interação forte está subdividida, pois a mecânica quântica interpreta apenas a interação entre nucleons (prótons e neutrons) do núcleo atômico enquanto que na teoria quântica de campos, os nucleons são aglomerados constituídos de quarks. A interação entre eles é a fundamental, ou seja, a interação forte.

O quadro que indica o espaço de comparecimento dos vários modelos para as interações em várias teorias da Física mostra também a diversidade de interpretações que há na Física para as interações fundamentais, pois embora estejam sendo utilizados os mesmos termos para denominar os modelos em teorias diferentes, estes são incomensuráveis entre si. Neste quadro, linha dupla indica descontinuidade conceitual e linha simples denota continuidade como, por exemplo, existem relações matemáticas que transformam o campo gravitacional no potencial gravitacional ou vice-versa, mas nas teorias da mecânica clássica e relatividade geral não há nada em comum entre a visão de mundo clássica do campo gravitacional e aquela concebida através da rela-

tividade geral. A partir destes dois modelos, dá para imaginar dois mundos diferentes. Outra continuidade representada no quadro é aquela existente na teoria da relatividade, isto é, a teoria da relatividade restrita é uma subestrutura da teoria da relatividade geral. Ela é válida quando o campo gravitacional está "desligado" ou, mais precisamente, quando este campo pode ser desprezado. Para fenômenos que ocorrem nas dimensões em que vivemos, esta aproximação é perfeitamente válida, pois a interação gravitacional é pouco intensa quando comparada com a eletromagnética, que é a outra interação interpretada pela teoria da relatividade.

Uma outra característica indicada no quadro de comparecimento dos modelos teóricos é que a interação eletromagnética comparece em todas as teorias. Isto é um indicativo de que os vários modelos que existem para a interação eletromagnética podem constituir-se em representantes dos modelos de interação construídos pela Física. Em cada teoria, a diferença que há entre modelos para interações diferentes está no tipo de partícula que interage e no mediador da interação e não na visão de mundo ou na interpretação de como acontece a interação. Por exemplo, na teoria quântica de campos a interação eletromagnética é interpretada como troca de fótons entre elétrons (ou partículas eletricamente carregadas) e a interação forte é devido à troca de glúons entre quarks. Embora as partículas que participam das interações sejam diferentes, o mecanismo pelo qual se processam estas interações é o mesmo. De forma idêntica, na mecânica quântica a interação entre o elétron e o próton do átomo de hidrogênio é interpretada como a interação de um elétron com um campo escalar denominado potencial eletrostático e a interação entre os prótons e neutrons do núcleo atômico é devido à interação de um nucleon com o campo escalar denominado potencial de Yukawa. Estes dois potenciais têm origens diferentes, mas características em comum.

Considerando, agora, o quadro que organiza os vários modelos para as interações relativamente às teorias físicas é possível verificar a abrangência da síntese, elaborada a partir do conceito de interação. Para isto, tomamos como referência o curso de bacharelado em Física do Instituto de Física da USP e procuramos no currículo proposto onde o conceito de interação não comparece. As disciplinas oferecidas pelo IFUSP têm siglas que se iniciam com a letra **F**. Nestas disciplinas o conceito de interação não é estudado em Termodinâmica, pois esta teoria, por investigar sistemas termodinâmicos, não considera diretamente a interação entre partículas individuais. Há outras disciplinas que também podem não se referir explicitamente a algum tipo de

interação porque são relativas a estudos específicos de métodos ou técnicas, teóricos ou experimentais, como é o caso das disciplinas de física matemática e algumas do bloco composto por disciplinas com ênfase na física experimental. Na maioria das disciplinas obrigatórias e das optativas que compõem os blocos constituídos por disciplinas relativas à física contemporânea e por disciplinas de caráter mais teórico, sempre há alguma referência a algum dos modelos de interação. O conceito de interação está sempre presente no curso de bacharelado em Física e, por isso, ele pode ser escolhido como uma diretriz para a elaboração de uma síntese referente ao conteúdo estudado neste curso.

Todo trabalho de síntese pressupõe uma análise e esta análise é realizada conforme alguma concepção, ou seja, toda síntese *supõe um ótica de análise que é revelada pelas questões que o autor coloca, pelo seu roteiro de trabalho.*[8] A síntese relativa ao conteúdo da Física estudado no curso de graduação foi elaborada segundo a concepção de que o conhecimento físico é resultado de uma construção e de que os estudantes constróem seus próprios conhecimentos. As reflexões sobre estas construções constituem o capítulo I desta tese. Neste capítulo, são apresentadas algumas características do conhecimento físico tais como sua construção, a existência de visões de mundo, a ambigüidade dos significados dos conceitos, as contradições internas e outras. Além de reflexões relativas à construção do conhecimento físico, há referências à construção individual do conhecimento, ao interpretante do conhecimento físico, aos graus de significação deste conhecimento para os indivíduos que trabalham com Física, aos tipos de consciência sobre este conhecimento. O capítulo é encerrado com considerações sobre relações que existem entre as pessoas que estudam Física e o conhecimento construído tais como a problematização do conteúdo, a complexidade, a práxis da Física, as várias formas de raciocínio, a intuição. São considerações gerais sobre o saber-fazer da Física, elaboradas segundo uma concepção dialética do conhecimento. Estas considerações fundamentam a análise sobre o conteúdo ensinado e aprendido no curso de graduação.

Esta análise está apresentada em duas partes. Na primeira parte – capítulo II, há imagens de natureza relativas aos vários modelos para interação construídos na Física. Na segunda parte – capítulo III, são apresentados os resultados da investigação realizada com bacharéis recém-formados sobre os modelos de interação construídos

[8] Gadotti, M. *Pensamento Pedagógico Brasileiro,* 6ª edição, São Paulo, Ática, 1995, p. 24.

por eles. Os três capítulos referem-se ao conteúdo de Física, estudado no curso de graduação, analisado sob aspectos diferentes. O primeiro refere-se a **como é** este conteúdo, o segundo, a **o que é** este conteúdo e o terceiro, à **apreensão** deste conteúdo. São três esboços relativos ao mesmo quadro, são três formas de perceber o mesmo objeto. A percepção deste objeto fornece elementos para a conscientização do processo de ensino-aprendizagem do curso de graduação em Física. As considerações relativas a este processo encerram a apresentação desta tese.

I - CONSTRUÇÃO DO CONHECIMENTO

Uma síntese nunca é neutra e objetiva, pois a escolha dos elementos investigados e a interpretação dos resultados sempre estão condicionadas por pressupostos teóricos-ideológicos. A análise sobre o conteúdo ensinado e aprendido no curso de graduação em Física, feita neste trabalho de tese, pressupõe que o conhecimento da Física é construído pelas pessoas que com ela estão envolvidas. A própria Física constitui-se em um corpo de conhecimentos que foi construído ao longo da história. E os estudantes, ao entrarem em contato com este conhecimento, também constróem modelos para interpretar a natureza Física.

Por ser um conhecimento construído, a Física tem características que refletem o momento histórico em que suas teorias foram elaboradas. A concepção de ciência tem se modificado com o tempo. A Filosofia considera que o início da ciência moderna ocorreu no século XVII com Galileu, Descartes e Newton. A Física considera que o período que se inicia com a ciência moderna e termina no fim do século passado é relativo à Física Clássica. A Física Moderna tem início neste século, entretanto a concepção de ciência moderna está presente na Física Clássica. Na Física Moderna, existe outra concepção de ciência. *O século 20 tem sido um século fecundo para a ciência, no qual novos desafios são colocados à competência explicativa das teorias, hipóteses, premissas e leis fundadoras do pensamento moderno. A relatividade de Einstein, a microfísica, a termodinâmica, a microbiologia têm ampliado o universo das indagações dos cientistas, que cada vez mais se vêem confrontados com novas verdades e com incertezas sobre algumas verdades há muito estabelecidas.* [9] A concepção de ciência aceita no século passado transformou-se neste século e a Física ocupa um papel fundamental nesta transformação. Então, antes de expor os resultados da investigação sobre o conteúdo ensinado e aprendido durante o curso de graduação, neste capítulo são apresentadas considerações sobre o caráter da construção do conhecimento na Física e das pessoas que estão envolvidas com ela. Estas considerações estão separadas em três.

[9] Elias de Castro, Iná, *Apresentação do livro Ciência e Consciência* de Edgard Morin, Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 1996.

I-1. CONSTRUÇÃO DIALÉTICA DO CONHECIMENTO FÍSICO

> *A grande idéia básica de que o mundo não deve ser visto como um complexo de objetos completamente acabados, mas sim como um complexo de processos no qual objetos aparentemente estáveis, nada menos do que suas imagens em nossas cabeças (nossos conceitos), estão em incessante processo de transformação...*[10]
>
> (FRIEDRICH ENGELS, Ludwig Feuerbach)

O conhecimento físico corresponde a um conjunto de resultados relativos a construções elaboradas por seres humanos em vários momentos históricos. Por isso, é preciso reconhecer que este conhecimento tem história, isto é, não é um conhecimento natural, absoluto e, também, que a sua historicidade é uma conseqüência da historicidade do método utilizado pelos seres humanos que o fazem. Segundo Álvaro Vieira Pinto, (...) *a ciência, e portanto o método, e portanto a razão, são produtos do homem real e concreto, isto é, existente em coletividade social, em luta pela solução de sua contradição básica com a natureza, e por isso necessariamente ostentam os mesmos caracteres lógicos da realidade do ser biológico que os produz*[11]. Se o conhecimento científico é um produto do ser humano real, então, ele reflete os momentos culturais de sua construção. Por isso, para se ter acesso ao conhecimento científico é preciso comportar-se como um antropólogo que, ao pesquisar alguma população ainda não examinada, se introduz no seio do grupo, convive com ele, procura inserir-se nos seus costumes e, através de uma experiência humana, procura conhecer a sua cultura. É preciso ter consciência de que o "conhecimento" depende da cultura em que nasce e, também, que é o resultado de uma interação constante com o objeto que se pretende conhecer através da ação do sujeito que quer compreendê-lo.

O ser humano, portanto, constrói o seu conhecimento através da interação com o conhecimento construído pela humanidade. A construção do conhecimento individual é significativa quando nesta interação existe tanto a ação, através de uma aproximação com o objeto a ser conhecido, como também a consciência daquele conhecimento, através de um distanciamento crítico desse objeto. Conhecer é uma relação

---

[10]Citado em Vigostsky, L. S. *A Formação Social da Mente: o desenvolvimento dos processos psicológicos superiores;* organizadores Michael Cole ... |et al.|; tradução José Cipolla Neto, Luís Silveira Menna Barreto, Solange Castro Afeche; 4ª edição, São Paulo, Martins Fontes, 1991, p. 135.
[11]Vieira Pinto, Álvaro; *Ciência e Existência;* Rio de Janeiro, Paz e Terra, 1969, p. 100.

dialética entre ação e reflexão. É um movimento de se envolver com o conhecimento e, ao mesmo tempo, de se afastar dele para compreendê-lo. Através do afastamento é possível perceber o objeto de conhecimento na sua totalidade e, mesmo que esta percepção não aconteça na forma estritamente visual (de algo que se tem ante os olhos), é por intermédio da totalidade que é possível construir a visão de mundo daquele conhecimento. A visão de mundo, que é um "olhar" sobre a natureza, determina o contexto em que as partes do conhecimento científico estão inseridas assim como sua unidade, garantindo que qualquer perturbação em algum lugar, propague-se por todas as suas partes.

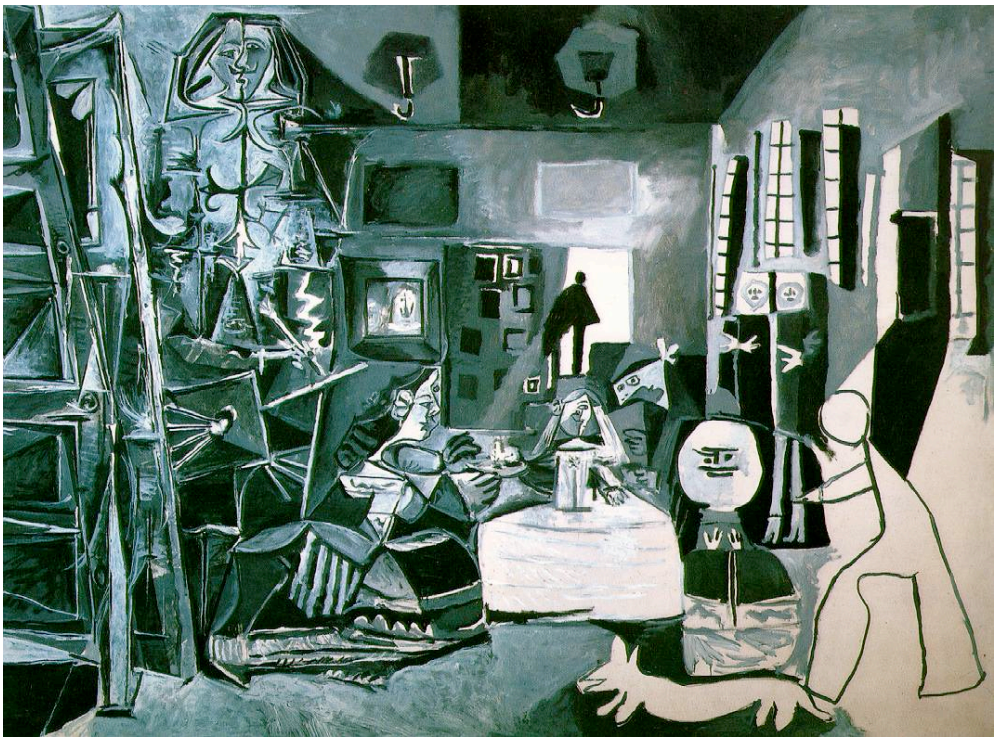
Se o conhecimento físico fosse a verdade sobre a natureza, existiria apenas uma visão de mundo, conforme acreditavam os positivistas do século passado. Entretanto, no início do século XX houve a eclosão de duas visões de mundo diferentes daquela da Física clássica: visão de mundo relativística e visão de mundo quântica. Atualmente, admite-se que na Física existam diversas visões de mundo sobre a natureza material e, segundo os trabalhos de Bachelard, Feyerabend, Kuhn, estas visões são incomensuráveis entre si. A visão de mundo é relativa a um conjunto de idéias e não de resultados numéricos e, por isso, a incomensurabilidade entre elas se justifica. É uma prática na Física "extrapolar para o limite clássico" para verificar se os resultados obtidos em uma teoria não-clássica são válidos nos limites da Física clássica, mas esta mensurabilidade entre diferentes teorias acontece apenas numericamente, pois conceitualmente não há parâmetros que possam ser comparados, há uma descontinuidade conceitual entre teorias diferentes. Embora o mundo seja o mesmo em relação a qualquer teoria da Física, o cientista que trabalha, por exemplo, com a Física Clássica vive num mundo diferente daquele que convive com a Relatividade Geral. Se para aquele, os planetas movimentam-se em torno do Sol devido a forças gravitacionais, para esse isto acontece porque o espaço é curvo e as trajetórias dos planetas estão relacionadas a movimentos naturais ou inerciais.

As várias visões de mundo relativas às diversas teorias da Física, muitas vezes, são interpretações diferentes da mesma realidade. Isto acontece com teorias que pertencem às grandes áreas da Física, tais como: Física Clássica e Física Quântica, ou Física relativística e não-relativística. A incomensurabilidade entre as visões de mundo existe entre as grandes áreas da Física e não no interior de cada uma. Dentro de cada área, há diversas teorias que são relativas a "pedaços de natureza" diferentes e

que utilizam vários conceitos que têm exatamente os mesmos significados em todas elas. Entre estas teorias há continuidade que é determinada pela concepção de natureza, seja ela clássica, quântica, relativística, ...

Uma analogia sobre a existência de diferentes interpretações da mesma realidade na Física é conseguida através de algumas obras de Picasso que reconstrói alguns quadros pintados por outros artistas em diferentes épocas como, por exemplo, *Las Meninas,* 1656 de Velázquez; *Girls by the Seine,* 1857 de Courbert e *Le Déjeuner sur l'herbe,* 1863 de Manet. As duas versões de *As Meninas* estão apresentadas na figura 1. A realidade pintada por Velázquez está mediada por valores que são diferentes dos retratados por Picasso. Velázquez expressa através de sua pintura a hierarquia da vida da corte quando coloca a princesa na posição de destaque e com maior luminosidade e o pintor em uma posição marginal à esquerda e na sombra. Em Picasso, ao contrário, o pintor ocupa um terço da largura do quadro e toda a sua altura. Deliberadamente, ele retrata o contraste de seu estilo com aquele do século XVII, retratado por Velázquez. A pintura de Velázquez é um retrato de relações sociais expressas através das posturas e atitudes representadas na tela e, também, da colocação dos personagens hierarquicamente secundários na sombra ou os principais em regiões iluminadas. A graduação das cores é utilizada para reforçar a mensagem da hierarquia da corte no século XVII. Em Picasso, a luminosidade está mais distribuída na tela, as figuras estão posicionadas frontalmente ou de perfil e são figuras secundárias relativamente ao pintor. É o estilo livre de Picasso que reconstrói a pintura no século XX, cujos valores culturais são diferentes daqueles retratados por Velázquez. Embora pareça a mesma realidade, na verdade trata-se de mundos diferentes.

As diferentes visões de mundo incomensuráveis da Física comportam-se como na figura 2 que pode parecer uma mulher jovem, mas pode transformar-se em uma velha. Os traços que compõem o desenho são os mesmos tanto para a moça quanto para a velha, mas dependendo do que está sendo visto (moça ou velha), eles têm significados completamente diferentes, como é o caso das linhas que contornam o queixo da jovem ou o nariz da velha. Na Física também são utilizadas as mesmas palavras que, quando consideradas em teorias antagônicas, são conceitualmente diferentes. Os conceitos de espaço, de tempo, de massa, de carga são típicos exemplos desta condição. Outra característica da figura 2 é que a ambigüidade não é percebida simultaneamente, isto é, a figura é uma moça **ou** uma velha. Não é possível reconhecer a moça



Las Meninas (após Velázquez)
Cannes, 17 de agosto de 1957
Óleo sobre tela, 194 x 260 cm
Barcelona, Museu Picasso

Las Meninas, 1656
Óleo sobre tela, 318 x 276 cm
Madrid, Museo Nacional del Prado

Figura 1

e a velha ao mesmo tempo. A transformação de uma para a outra acontece através de uma ruptura. Muitas vezes, é necessário fechar os olhos, esquecer de uma delas, para então ver a outra. Não há possibilidade de uma transformação gradativa entre as duas figuras. Do mesmo modo, na Física ou se pensa num mundo quântico, ou se pensa num mundo clássico ou, ainda, num mundo relativístico. Não se pensa simultaneamente em todos eles.

Os conceitos da Física são ambíguos e os seus significados são determinados pelo contexto em que estão inseridos. Para compreendê-los é preciso que haja um envolvimento com as idéias que os determinam, ou seja, o conceito não é um elemento, mas como escreveu Einstein em suas notas autobiográficas, *a interseção de várias seqüências*[12], seqüências estas percorridas no interior do mundo determinado por uma certa concepção de natureza.

Fig. 2 – Moça/Velha[13]

A ambigüidade não existe apenas entre as teorias rivais, mas também dentro delas. A mecânica clássica, por exemplo, comporta, entre outras, as interpretações de Newton, de Lagrange, de Hamilton-Jacobi que, embora, tenham sido formuladas dentro do contexto clássico, têm elementos com *status* diferentes, cada uma destas formulações privilegiam mais umas relações que outras. Na mecânica de Newton, as suas três leis são axiomas fundamentais e as conservações dos momentos e da energia são derivadas das leis como teoremas. Na mecânica analítica de Lagrange e também de Hamilton-Jacobi, as simetrias e as correspondentes conservações são fundamentais e

[12] Einstein, Albert - *Notas Autobiográficas,* Rio de Janeiro, Nova Fronteira, 1982, p. 17

as leis de Newton são as equações de movimento derivadas do princípio da mínima ação. O que é fundamental em uma, é derivada na outra. Na mecânica analítica também há ambigüidade entre a formulação de Lagrange e de Hamilton-Jacobi, enquanto a primeira utiliza a "lagrangeana" expressa em função das coordenadas, a segunda expressa a "hamiltoniana" em função das energias.

Nessas três diferentes formulações há algo que é comum entre elas que é a visão clássica de mundo caracterizada pelo determinismo, pela causalidade, pela organização, pelo conceito absoluto de espaço-tempo; mas também há algo que as diferencia que é a forma de descrever este mundo clássico. É como se um mesmo episódio fosse narrado de formas distintas como fez Raymond Queneau que escreveu 99 textos de estilos diferentes sobre um mesmo episódio, tais como os dois transcritos a seguir:

> *"Um dia, por volta do meio dia, ao lado do parque Monceau, na plataforma traseira de um ônibus lotado da linha S (hoje 84), avistei um personagem de pescoço comprido, que usava um chapéu de feltro circundado por um galão entrelaçado no lugar da fita. Aquele indivíduo interpela de repente seu vizinho afirmando que ele pisava de propósito sobre seus pés cada vez que subiam ou desciam passageiros. Ele abandona rapidamente a discussão para sentar em um lugar que ficou livre.*
>
> *Duas horas mais tarde, revi-o na frente da estação Saint-Lazare conversando com um amigo que lhe aconselhava diminuir a chanfradura de seu sobretudo através da elevação do botão superior, por um alfaiate competente."* [14]

Este mesmo episódio contado em estilo exclamativo tem a seguinte forma:

> *"Olhe! Meio dia! hora de pegar o ônibus! quanta gente! quanta gente! está apertado! engraçado! este cara aí! que fuça! e que pescoço! setenta e cinco centímetros! pelo menos! e o galão! é o mais engraçado! aquilo! o galão! ao redor de seu chapéu! Um galão! engraçado! absolutamente engraçado! pronto está ali a reclamar! o tipo de galão! contra um vizinho! o que é que ele diz! O outro! ele pisaria nos pés! Eles vão se dar tapas! por cima! mas não! mas sim! vai lá! vai lá! morde a orelha dele! avance! bata! droga! mas não! tirou o corpo fora! o tipo! de pescoço comprido! de galão! está em um lugar vazio que ele avançou ! sim! o cara!*
>
> *Nossa! verdade! não! eu não me engano! é ele! lá embaixo! na Côte de Rome! na frente da estação Saint-Lazare! que passeia de um lado para outro! com um outro tipo! o que é que o outro lhe diz! que ele deveria acrescentar um botão! sim! um botão de seu sobretudo! De seu sobretudo!"*[15]

---

[13] Esta figura foi reproduzida do livro de Feyerabend, P. *Diálogo sobre o Método,* trad. António Guerreiro, Lisboa, Editorial Presença, 1991.

[14] Queneau, Raymond , *Exercices de style*, Paris, Gallimard, 1995, pág,.27. Ed. Orig. 1947. Trecho original em francês.

[15] *Exercices de style,* **Op. Cit.** , p. 59

Estes dois textos referem-se sem dúvida ao mesmo episódio, entretanto, são descrições com juízos de valor diferentes. No primeiro, o autor apenas descreve aquilo que lhe chamou a atenção, ele assume o papel de espectador, enquanto que, no segundo, o narrador é um torcedor que se envolve emocionalmente na trama. São formas diferentes de interpretar o mesmo evento.

Na Física quântica o que há de comum é o estilo quântico de interpretar a natureza, mas existe uma grande variedade de interpretações não só porque há diversas teorias mas também porque há diferentes escolas de pensamento. Feyerabend ao questionar sobre a lógica da Física Quântica que é praticada pelos físicos escreve:

> *"Poderá não existir uma teoria só, uma 'teoria quântica', que seja utilizada da mesma maneira por todos os físicos. A diferença entre Bohr e, por exemplo, Von Neumann sugere que estamos na circunstância perante algo mais do que uma possibilidade remota. Para verificarmos a possibilidade, quer dizer, ou para a eliminarmos, ou para lhe darmos forma, teremos que examinar os casos concretos. Este exame dos casos concretos poderá então levar o resultado segundo o qual os teóricos dos quanta diferem uns dos outros como de um modo geral os católicos e os diversos tipos de protestantes: pode ser que utilizem os mesmos textos (embora também isso seja duvidoso – compare-se Dirac com Von Neumann), mas fazendo por certo com eles coisas diferentes."*[16]

O conhecimento físico comporta contradições internas tanto em relação às várias visões de mundo antagônicas, quanto às dicotomias internas à mesma visão de mundo. A Física Quântica é um exemplo típico desta segunda situação. A dualidade onda-partícula, admitida na forma de princípio da complementaridade, é uma declaração da necessidade de se aceitar a contradição entre a concepção ondulatória e a concepção corpuscular da partícula porque as experiências levam a esta contradição. No curso de graduação em Física, as contradições existem, pois são estudadas teorias da Física Clássica e da Física Quântica, dentro da Física Clássica a Termodinâmica apóia-se em alguns pressupostos que são contraditórios aos correspondentes na Mecânica e no Eletromagnetismo, na Mecânica Quântica a dualidade onda-partícula está sempre presente.

[16]Feyerabend, P. *Contra o Método,* trad. Miguel Serras Pereira, Lisboa, Relógio d'Água. 1993, p. 252

Os pressupostos básicos sobre a construção do conhecimento físico podem ser sintetizados em quatro princípios. [17] São eles:

- *princípio da totalidade;*
- *princípio do movimento;*
- *princípio da mudança qualitativa;*
- *princípio da contradição.*

O **princípio da totalidade** está relacionado ao pressuposto de que na natureza, e também no conhecimento que a Física tem sobre ela, tudo se relaciona. As várias teorias da Física apresentam-se como um todo coerente onde seus elementos estão relacionados entre si, reciprocamente condicionados. O conhecimento físico é composto por totalidades concretas. *A compreensão dialética da totalidade significa não só que as partes se encontram em relação de interna interação e conexão entre si e com o todo, mas também que o todo não pode ser petrificado na abstração situada por cima das partes, visto que o todo se cria a si mesmo na interação das partes.*[18] As visões de mundo presentes nas teorias da Física são as totalidades concretas que contextualizam os conceitos, e estes dão significado à visão de mundo relativa ao todo em que fazem parte. *O ponto de vista da totalidade concreta nada tem de comum com a totalidade holística, organicista ou neo-romântica, que hipostasia o todo antes das partes e efetua a mitolização do todo.*[19] As teorias da Física possuem suas próprias estruturas conceituais e, portanto, não são caóticas e nem resultados de um acréscimo sistemático de conceitos a outros conceitos ou de noções a outras noções. São produtos resultantes de processos que se concretizam em movimentos do todo para as partes e das partes para o todo, em movimentos recíprocos cujas sistematizações não se processam por soma, mas através de processos em espiral de compenetração mútua dos conceitos.

O **princípio do movimento** está associado ao pressuposto que tanto na natureza como no conhecimento físico tudo se transforma. Não há estruturas teóricas acabadas no conhecimento da Física, e sim em constante transformação. Estas transformações são causadas por espécies de lutas internas a um todo que se desenvolve e que vai se criando. A Física Clássica, por exemplo, que surgiu no século XVII com Gali-

---

[17]São "*alguns princípios gerais ou características da Dialética hoje aceitas como ponto de partida, por muitos autores que depois de Marx e Engels empreenderam a difícil tarefa de explicitar o que neles estava apenas de forma embrionária.*" Concepção Dialética da Educação, **op. cit. ,** p.24.
[18]Kosik, Karel, *Dialética do Concreto,* Rio de Janeiro, Paz e Terra, 1969, p. 42.
[19]*Dialética do concreto*, **op. cit.,** p. 49

leu e Newton, ainda hoje está sendo investigada, mesmo após às revoluções relativística e quântica. A lei da gravitação universal proposta por Newton, em 1687, tem ainda hoje sua validade questionada.[20] Na segunda metade de nosso século, do estudo de fenômenos não-lineares surgiu o "caos determinístico" que modifica a crença de que uma pequena variação nas condições iniciais propaga-se por todo o sistema sem perturbá-lo. Ao contrário do que se acreditava, os estudos sobre caos indicam que, em sentido figurado, *o movimento das asas de uma borboleta no Brasil pode provocar uma nevasca no estado do Texas, nos Estados Unidos*[21].

O **princípio da mudança qualitativa** está relacionado à incomensurabilidade entre as visões de mundo, ou seja, uma transformação não se realiza num processo circular, mas através de rupturas, de mudanças qualitativas. Uma mudança qualitativa acontece através do acúmulo de elementos quantitativos que, em um certo momento, produz um elemento qualitativamente novo. Na Física, isto é denominado por transição de fase e uma das teorias que interpreta este fenômeno é a Termodinâmica. A transição de fase é a passagem de um estado organizado para outro estado organizado através de uma desorganização. Kuhn denomina a transição entre diferentes concepções de natureza por "revoluções científicas" e Bachelard por "cortes epistemológicos". Kuhn considera que as revoluções científicas são provocadas por crises internas à atividade científica que, como na natureza, ocorrem desordenadamente e por isso é difícil interpretá-las. Menezes utiliza o seguinte exemplo de transição de fase para fazer uma analogia para a crise de compreensão: *quando a água vai "virar gelo" ela perde a transparência que tinha como líquido e que voltará a ter quando tornar-se cristal; a instabilidade das correlações de longo alcance, que definirão a ordem no futuro cristal e que começam a se formar, tornam a água "leitosa", opalescente. Assim são as situações de crise, na natureza e na sociedade; é difícil enxergar através*

---

[20]Uma alternativa à formulação de Newton foi proposta por Erwin Schrödinger em 1925 que se baseou no princípio de Mach [1960] (que, no século passado, fez críticas ao trabalho de Newton) conforme:
Assis, A.K.T., *On Mach's principle,* Foundations of Physics Letters 2, 301-18, 1989.
Mach, E., *The Science of Mechanics-A Critical and Historical account of its Development,* La Salle, Open Court, 1960 (org.1883).
Schrödinger, E., *O cumprimento do postulado de relatividade na mecânica clássica,* tradução comentada de A.L.Xavier e A.K.T.Assis, Revista da Sociedade Brasileira de História da Ciência 12,3-18 (orig.1925)

[21]metáfora apresenta em Gleick, James - *Caos: a criação de uma nova ciência,* tradução: Waltensir Dutra; Rio de Janeiro, Campus, 1991.

delas, enquanto não "assentar a poeira", não se instalar a nova fase." [22] Sobre a forma em que se processa a mudança qualitativa na Física, referindo-se à revolução relativística, Bachelard escreveu:

> *Do ponto de vista astronômico, a refundição do sistema einsteiniano é total. A astronomia relativista não sai de modo algum da astronomia newtoniana. O sistema de Newton era um sistema acabado. (...) Vivíamos, aliás, no mundo newtoniano como numa residência espaçosa e clara. O pensamento newtoniano era de saída um tipo maravilhosamente transparente de pensamento fechado; dele não se podia sair a não ser por arrombamento.*[23]

O **princípio da contradição** está relacionado à suposição de que *a transformação das coisas só é possível porque no seu próprio interior coexistem forças opostas tendendo simultaneamente à unidade e à oposição.*[24] Na concepção clássica de verdade absoluta do conhecimento não se admite a existência de contradições. Nesta concepção, contradição é uma espécie de alarme que indica a ocorrência de algum erro. Já na Física Quântica a contradição é admitida como princípio, o princípio da complementaridade proposto por Bohr. Outra contradição presente na Física Quântica é que não se pode separar, como propôs Descartes, o sujeito da natureza, pois o sujeito é observador e agente, à medida que ele age, ele altera. Não se admite mais a tradição platônica de "contemplar a natureza, para ver como ela é", de conhecer sem alterar, pelo contrário, é necessário intervir para ver como é. *A ciência, sendo a forma mais elevada do conhecimento, participa das mesmas condições gerais que caracterizam a este, isto é, pertence ao complexo de relações que se estabelecem entre o ser vivo, no caso o homem, e a realidade circunstante. Não é produto arbitrário do pensamento, não é especulação por natureza, mas representa a forma mais completa em que se realiza a integração, a adaptação do homem na realidade. Constitui-se simultaneamente como possibilidade de transposição do mundo para o interior do homem, pelo reflexo dos processos exteriores que determinam o pensamento, e pela imersão do homem no mundo, mediante a capacidade de ação sobre as coisas.*[25]

Os indutivistas acreditavam que a ciência é um tipo de conhecimento seguro porque se baseia em experimentos que são objetivos, ou seja, são observações diretas

---

[22]Menezes, Luís Carlos, *CRISE, COSMOS, VIDA HUMANA - Física para uma Educação humanista*, tese de livre-docência, IFUSP, 1988, p. 8.
[23]Bachelard, Gaston. *O novo espírito científico,* Rio de Janeiro, Tempo Brasileiro, 1985. p.43
[24]*Concepção Dialética da Educação*, **Op. Cit.** p. 26
[25]*Ciência e Existência,* **Op. Cit.** p. 83

da natureza. Na Física Quântica, à medida que se aproximou da matéria sub-atômica, a ciência descobriu (ou inventou?) que a luz com a qual poderia ser visto o elétron, interfere com ele e, ao invés do elétron ser observado como ele é, o que se observa é o resultado da interação do observador com ele. "O que é a luz? O que é o elétron?" Resposta quântica: -Depende do que está sendo medido. A luz, que classicamente é uma onda eletromagnética, revela seu caráter corpuscular quando é absorvida pela folha de uma planta no processo de fotossíntese. No entanto, no seu caminho do sol até aquela folha ela comporta-se como onda. O elétron, que classicamente é uma partícula, revela seu caráter ondulatório quando é difratado por um anteparo de dimensões subatômicas e comporta-se como uma onda. Os microscópios eletrônicos baseiam-se no comportamento ondulatório dos elétrons. Em suma, no mundo quântico tudo é partícula e onda, tudo obedece ao princípio da complementaridade de Bohr.

Deixando de focalizar a Física quântica, será que é possível extrapolar que as características quânticas revelam algo que não está restrito aos domínios subatômicos, mas a toda a natureza? Segundo Gadotti a contradição *é universal, inerente a todas as coisas materiais e espirituais. A contradição é a essência ou a lei fundamental da dialética.*[26] A nossa relação com o mundo, enquanto seres humanos, manifesta-se na forma de contradição. Uma das faces desta contradição é a dicotomia indivíduo-sociedade, onde na relação do indivíduo com a sociedade ele se quebra em dois: o eu e o mim[27]. O eu é o indivíduo ativo, pensando nele mesmo. O mim é usado de modo passivo, é o indivíduo pensando pelo outro. Eu representa o indivíduo no seu mundo interior, mim representa o indivíduo no seu mundo social. Outra face dessa contradição é a dualidade pensamento-ação. O pensamento é algo que ocorre no mundo interior, a ação é uma relação com o mundo exterior. No aprendizado da Física esta contradição manifesta-se através da dicotomia formal-conceitual. A dimensão formal está associada à operacionalização do formalismo matemático e a dimensão conceitual é relativa à interpretação dos resultados, à transcendência do formalismo.

O conhecimento construído pela Física é estudado no curso de graduação nas várias atividades que existem. A participação nestas várias atividades possibilita aos

---

[26] *Concepção Dialética da Educação,* **Op. Cit.** p. 26

[27] dicotomia proposta por Robilotta, M.R. no curso de pós graduação *Construção e Realidade no Ensino de Física,* IFUSP, 1994.

estudantes construírem seus conhecimentos sobre a natureza Física. Na próxima seção serão discutidas algumas características desta construção.

I-2. CONSTRUÇÃO INDIVIDUAL DO CONHECIMENTO FÍSICO

> *Os conceitos e proposições adquirem "sentido" e "conteúdo" apenas através das suas conexões com as experiências sensoriais. A conexão destas últimas com os primeiros é puramente intuitiva, e não de natureza lógica em si mesma.*[28]
>
> (Albert Einstein)

Quando estava pensando sobre o que escrever nesta seção, dois episódios que aconteceram comigo afloraram na minha memória. Um deles aconteceu durante minha adolescência quando me deparei com uma questão de química que pedia para calcular a massa de um determinado gás. Aquela questão era, para mim, insolúvel, pois não conseguia imaginar como um gás poderia ser pesado em uma balança. Mais tarde eu aprendi que massa e peso são conceitos diferentes e que a balança registra a compressão na balança devido à força peso e não a massa do corpo que está sendo pesado. Muito tempo depois, já como professora de Física, quando estes conceitos já haviam sido incorporados, estava em uma padaria à procura de *baguetes.* Como naquele momento não havia aquela *baguete* que costumava adquirir, o balconista ofereceu-me um outro pão, que tinha o mesmo formato, mas era mais curto. Na dúvida em decidir quantos daqueles pães eu precisaria, tentei compará-los com aquele que eu costumava comprar, e perguntei qual era a massa daquele pão. De pronto, o rapaz respondeu-me: - *massa de pão*. Ao ouvir esta resposta, percebi o quanto minha pergunta havia sido inútil. Por outro lado, o balconista nem percebeu que eu estava me referindo a outro conceito. No cotidiano dele, massa tinha um significado bastante preciso e único e no meu, o conceito de massa tem, pelo menos, dois significados que, por conviver normalmente com eles, me parecem extremamente naturais, já estão tão incorporados a tal ponto que aquele problema encontrado na questão de química não existiria, caso me deparasse com ela atualmente. Na verdade, eu incorporei alguns conceitos que são restritos a uma linguagem específica: a linguagem da Física.

Aprender Física é equivalente a aprender uma língua estrangeira e não se aprende a falar uma língua estrangeira através do estudo das regras gramaticais for-

muladas explicitamente. Aprende-se uma língua estrangeira participando de alguma determinada prática e assimilando-a. A assimilação de uma língua significa compreender e utilizar certas regras, mesmo que elas não estejam explicitadas. É um processo que é muito mais intuitivo que racional. O aprendizado de uma língua estrangeira torna-se efetivo quando o aprendiz, além de ler, ouvir e falar, consegue pensar nesta língua sem que necessite recorrer às regras gramaticais. Não é por acaso que a maneira mais eficiente de aprender uma língua estrangeira é conviver com ela, na região onde é falada.

A linguagem oral é apenas uma das dimensões da comunicação. Há uma outra dimensão relativa à escrita que é uma dimensão mais visual. A escrita exige mais a dimensão racional que a fala, a consciência de como aquela língua é estruturada. Para escrever sobre alguma "coisa" é necessário que esta "coisa" esteja estruturada no pensamento, esteja pelo menos parcialmente consciente. Para falar, isto também é necessário. É difícil falar daquilo que não se conhece, mas é muito mais fácil "pegar o fio da meada" no discurso falado que no escrito. No discurso oral, há o predomínio da ação, da intuição, enquanto que na escrita há o predomínio da reflexão, da razão, embora estas duas dimensões estejam presentes em ambas.

Na seção anterior, fiz comentários que se originaram das considerações realizadas a respeito da natureza do conhecimento. Naquele momento, a atenção foi direcionada à construção do conhecimento físico. Embora o sujeito que constrói este conhecimento estivesse sempre presente, o foco da atenção estava dirigido ao conhecimento que é construído. Nesta seção, a atenção estará voltada para a construção individual do conhecimento da Física, ou seja, o aprendizado da Física ou a construção dos significados dos conceitos. Esta construção é subjetiva, está associada à relação do estudante com o objeto do conhecimento e, por isso, é *puramente intuitiva, e não de natureza lógica em si mesma*. Embora seja mais difícil racionalizar aquilo que é intuitivo, tentarei refletir sobre o processo de aprendizagem a seguir.

I-2.1. Construção das significações

Retomando o ensino de língua estrangeira em comparação com o ensino de Física, vou procurar algumas referências nos estudos de semiótica, em estudos de processos de formação de significações, para apresentar algumas reflexões sobre a construção individual do conhecimento físico. Nestes estudos, um signo é algo que está no

---

[28]*Notas Autobiográficas,* **Op. Cit.** p. 21

lugar de uma "coisa", é aquilo que representa alguma coisa para alguém e, por isso, é uma representação que depende tanto do objeto a que se refere, quanto da pessoa que o interpreta. E é justamente isto que acontece no ensino-aprendizagem da Física, pois os conceitos que são ensinados são resultantes da interpretação de quem os ensina e, por outro lado, os conceitos que são aprendidos também são interpretações daquele objeto que foi ensinado, que é uma interpretação...

Apesar do aprendizado do conhecimento físico ser interpretação de interpretações que são interpretações da natureza, que por isso estão impregnados por valores culturais, existe uma certa racionalidade que possibilita a comunicação entre os interpretantes, como acontece com o aprendizado de uma língua estrangeira, pois as pessoas buscam este conhecimento para comunicar-se. A comunicação acontece mesmo entre indivíduos que pertencem a culturas diferentes, pois mesmo que os significados específicos de algumas expressões sejam caracterizados por costumes culturais, a estrutura global da língua garante que haja a racionalidade necessária à comunicação. O significado do conceito, portanto, é construído através de uma relação dialética entre aquilo que é racional e aquilo que é intuitivo.

Para Peirce, *um Signo é um Cognoscível que, por um lado é determinado (i.e. especializado, "bestimmt") por algo que não ele mesmo, denominado de seu Objeto, enquanto, por outro lado, determina alguma Mente concreta ou potencial, determinação esta que denomino de Interpretante criado pelo Signo, de tal forma que essa Mente Interpretante é assim determinada mediatamente pelo Objeto.*[29] Quando se refere ao Objeto, Peirce coloca entre parênteses: *ou, em alguns casos, como no caso de o signo ser a sentença 'Caim matou Abel' na qual Caim e Abel são igualmente Objetos Parciais, pode ser mais conveniente dizer que aquilo que determina o Signo é o Complexo, ou Totalidade, de Objetos Parciais. E em todos os casos, o Objeto é precisamente o Universo do qual o Objeto Especial é membro, ou parte.* Com esta conceituação, Peirce considera que a relação entre Signo, Objeto e Interpretante é uma trindade[30] e não um dos elementos de uma tríade, uma das pontas de um triângulo, um dos membros de uma relação. O signo é a totalização dos três vértices de um triângulo, a relação toda e completa.

---

[29]Peirce, Charles Sanders - *Semiótica,* tradução de José Teixeira Coelho Neto, São Paulo, Perspectiva, 1977. p. 160

[30]**Trindade.** [Do lat. ecles. *trinitate*] **1.** Na doutrina cristã, dogma da união de três pessoas distintas (o Pai, o Filho e o Espírito Santo) em um só Deus ... **2.** Divindade tríplice, nas religiões pagãs ... **5.** *Fig.* Grupo de três pessoas ou coisas análogas [Aurélio, 1975]

Só é signo aquilo que tem uma relação triádica e completa. Um objeto só é signo se ele cria um interpretante. Um fóssil, por exemplo, existe independente dos seres humanos, mas ele transforma-se em signo quando um arqueólogo, ao encontrá-lo, admira suas partes e interpreta-o como um dinossauro. O signo não se separa em partes. Concretamente, o signo é um todo. Somente num processo analítico que o signo pode ser considerado como parte de uma relação. Por isso, as considerações apresentadas a seguir são relativas a uma forma didática de escrever sobre o signo e não uma tentativa de separação do signo em três partes.

O **Objeto** da relação triádica do signo é uma "coisa". A palavra coisa foi aqui colocada na intenção de destacar que o objeto pode ser muita coisa, pode ser material ou não-material, um objeto ou um acontecimento, qualquer coisa que se pode imaginar. Qualquer signo tem que ter um objeto, entendido em sua concepção mais ampla possível. Peirce distingue entre o **objeto imediato** e o **objeto real** (que não quer dizer que não possa ser fictício). O objeto imediato está associado à aparência, a uma sensação, a aquilo que se supõe que o objeto é, por isso ele é imediato. O objeto real ou dinâmico, pois *pela natureza das coisas, o signo não pode exprimir, que ele pode apenas indicar, deixando ao intérprete a tarefa de descobri-lo por experiência colateral*[31], é uma representação real do objeto, tal como é possível obtê-la através de uma investigação sobre a natureza do objeto. Por exemplo, se o objeto "o pôr-do-Sol é vermelho" significa que ao olhar para o pôr-do-Sol tem-se a sensação da cor vermelha, ele é um objeto imediato. Se a intenção for significar que devido à inclinação dos raios de Sol em relação ao horizonte, os fótons que atingem nossa retina são os de comprimentos mais longos: os vermelhos, pois os outros foram espalhados pelas moléculas de ar, este é um objeto dinâmico. Em princípio não se pode falar de uma realidade que não se pode conhecer, isto é, o objeto dinâmico não existe sem o objeto imediato. Por outro lado, o objeto dinâmico não corresponde apenas à interpretação que as ciências fazem sobre o objeto, como poderia ser intuído do exemplo apresentado, mas a qualquer interpretação sobre o objeto, sobre a sua condição real, seja ela qual for. Por isso, há uma fusão entre o objeto imediato e o objeto dinâmico que equivale a uma identificação entre aquilo que se pensa sobre o que o objeto é e aquilo que realmente ele é para cada interpretante. Embora estes dois objetos estejam fundidos, a

[31] *Semiótica,* **Op. Cit.,** p. 168

percepção de suas existências é necessária à compreensão sobre o que é o Objeto e para estabelecer a devida distinção entre objeto imediato e objeto dinâmico.

O **Interpretante** também comporta uma divisão. Peirce apresenta uma divisão parecida com a do objeto, mas acrescenta a interpretação final, que é relativa à inteira identificação entre o interpretante imediato e o interpretante dinâmico. Também faz referências aos estudos de *significs*, que ele descreve como o estudo das relações do signo com seus interpretantes, realizados por Lady Welby, num verbere para a *Enciclopaedia Britannica,* que propõe três divisões para a interpretação e denomina-os: **sentido, significado** e **significação.**

- ***Sentido*** *é o efeito total que o signo foi calculado para produzir e que ele produz imediatamente na mente, sem qualquer reflexão prévia; é a Interpretabilidade peculiar ao signo, antes de qualquer intérprete.*
- ***Significado*** *é o efeito direto realmente produzido no intérprete pelo signo; é aquilo que é concretamente experimentado em cada ato de interpretação, dependendo portanto do intérprete e da condição do ato e sendo diferente de outra interpretação.*
- ***Significação*** *é o efeito produzido pelo signo sobre o intérprete em condições que permitissem ao signo exercitar seu efeito total; é o resultado interpretativo a que todo e qualquer intérprete está destinado a chegar, se o signo receber a suficiente consideração.*[32]

Peirce faz referência a estas divisões ao interpretante ora elogiando o trabalho de sua amiga Lady Welby, ora comentando que é uma concepção tão imperfeita quanto à sua. Mesmo imperfeitas, estas descrições chamam a atenção que pode existir alguma hierarquia na interpretação de um signo, ou que a profundidade com que aprendemos através de nossa relação com o mundo varia em relação a cada indivíduo, pois há signos que apreendemos mais profundamente, com mais significação, outros mais superficialmente. Além disso, para cada interpretante o signo pode produzir um efeito diferente mesmo quando todos estão sujeitos às mesmas condições.

Se houver alguma pesquisa sobre "como se conhece Física" que envolva tanto estudantes de graduação, como de pós-graduação e até os pesquisadores, provavel-

[32]extraído de Coelho Netto, J. Teixeira - *Semiótica, Informação e Comunicação,* São Paulo, Perspectiva, 1990. p. 71-72.

mente poderão ser organizados mais que os três níveis propostos por Peirce e Lady Welby. Cada pessoa em particular convive com diferentes níveis, pois há conceitos ou teorias da Física que o contato pode ter sido muito vago uma vez que embora o curso de graduação pretende ser extenso ele não é tão abrangente e na pós-graduação a tendência é para a especialização.

I-2.2. Construção das representações.

Mortimer propõe a noção de "perfil conceitual"[33] para construir um modelo para descrever a evolução das idéias como conseqüência do processo de ensino. O "perfil conceitual" é composto por várias zonas que são diferentes umas das outras, tanto epistemologicamente como ontologicamente. Baseado no "perfil epistemológico" proposto por Bachelard, no "perfil conceitual" de cada indivíduo as alturas das diversas zonas são diferentes. Algumas zonas podem corresponder aos conhecimentos científicos que são estudados na escola. Todas elas são fortemente influenciadas pela cultura a que indivíduo está inserido, consequentemente, a escola também influi no "perfil conceitual" relativo aos vários conceitos científicos independentemente, ou seja, para cada conceito haveria um "perfil conceitual" como um *sistema supra-individual de formas de pensamento que pode ser atribuído a qualquer indivíduo dentro de uma mesma cultura* [34] e relativo a este perfil cada indivíduo teria um com alturas características. Mortimer considera que as pessoas podem exibir diferentes formas de ver e representar a realidade com que convivem e que estas formas são qualitativamente diferentes e, além disso, um mesmo indivíduo pode "mover-se" de uma forma a outra em diferentes ocasiões. O curso de graduação em Física exige, muitas vezes, este tipo de movimento, pois os estudantes cursam simultaneamente disciplinas da Física Clássica e da Física Quântica, ou Física Clássica e Relatividade, ou Mecânica e Termodinâmica, e se os estudantes realmente conseguissem acompanhar as idéias que são discutidas, eles teriam que, ao mudar de sala de aula, "desligar" uma das formas de ver e representar a realidade e "ligar" a outra. No curso de graduação em Física os alunos deveriam, literalmente, sintonizar cada uma das aulas. Além de cada aula "emitir numa banda de freqüências" diferente, existe mais um agravante, pois nenhu-

[33]Mortimer, E. F. - *Construtivismo, Mudança Conceitual e Ensino de Ciências: para onde vamos?* Investigações em Ensino de Ciências, 1(1), 20-39, 1996.
[34]*Construtivismo, Mudança Conceitual e Ensino de Ciências: para onde vamos?* p. 22

ma destas "bandas" corresponde ao senso comum. Com o passar do tempo, os alunos sintonizam-se em algumas das faixas de freqüência e podem até abandonar algumas idéias do senso comum que tinham por ocasião do ingresso no curso de graduação. Muito provavelmente, eles constróem seus "perfis conceituais", cujas zonas são maneiras de representar internamente o mundo externo, contendo alguns elementos e relações dos modelos conceituais estudados durante a graduação, mas não necessariamente correspondem a estes modelos conceituais.

Sobre a diferença entre os modelos construídos por estudantes e os modelos conceituais ensinados na escola, Moreira[35] apresenta a diferença entre modelos mentais e modelos conceituais segundo Norman[36]:

- ***Modelos conceituais*** *são inventados por professores, pesquisadores, engenheiros, arquitetos, para facilitar a compreensão ou o ensino de sistemas físicos. São projetados como ferramentas para o entendimento ou para o ensino de sistemas físicos.*

- ***Modelos mentais*** *são modelos que as pessoas constróem para representar estados físicos (assim como estados de coisas abstratos). Esses modelos não precisam ser tecnicamente acurados (e geralmente não são), mas devem ser funcionais. Eles evoluem naturalmente. Interagindo com o sistema, a pessoa continuamente modifica seu modelo mental a fim de chegar a uma funcionalidade que lhe satisfaça. É claro que os modelos mentais de uma pessoa são limitados por fatores tais como seu conhecimento e sua experiência prévia com sistemas similares e pela própria estrutura do sistema de processamento de informação humano.*

Se os modelos conceituais são aqueles ensinados e os modelos mentais são aqueles construídos pelos estudantes, poderia se esperar que houvesse uma relação direta entre eles. Na prática, o que se percebe que esta relação não é tão direta como é esperada. E os motivos disto são bem variados, vão desde o fato de que os modelos conceituais são apresentados fragmentadamente, até que os modelos mentais são frutos de interpretações subjetivas que buscam uma funcionalidade satisfatória. Estes são alguns motivos que podem justificar, mas não explicam porque os modelos mentais

[35]Moreira, Marco Antonio - *Modelos Mentais,* Investigações em Ensino de Ciências, 1(3), 1-36, 1997
[36]Norman, D. A. *Some observations on mental models.* In Gentner, D. and Stevens, A.L. (Eds.) Mental Models. Hillsdalle, NJ:Lawrence Erlbaum Associates, 1983. p. 6-14

são diferentes dos modelos conceituais ensinados. Aliás, não há uma organização lógica que interprete a construção dos modelos mentais, pois *o pensamento deve ser mais complexo que qualquer teoria sobre ele: por mais complexa a teoria, um estratagema inventado para ela deve ser ainda mais complexo*[37], mas há estudos sobre modelos mentais tanto em psicologia cognitiva como entre pesquisadores em ensino de ciências.[38] *Na pesquisa em ensino de ciências, a década de setenta foi a das concepções alternativas e a de oitenta, a da mudança conceitual. É bem possível que estejamos hoje, nos anos noventa, vivendo a década das representações mentais, em particular dos modelos mentais*[39].

Norman considera que as pessoas modificam seus modelos mentais para que funcionem satisfatoriamente. Peirce considera que todo o processo de interpretação do signo tende ao estado final que é a busca da "verdade". Na sua concepção, "verdade" é a mudança de um estado de insatisfação para outro de satisfação baseado no conhecimento. Snyders[40] considera que há culturas capazes de dar satisfação e que a caminhada em direção à verdade, à apreensão do real provoca alegria. Entretanto, a "funcionalidade", a "verdade", a "alegria" dependem da relação do aprendiz com o conhecimento, ou com a cultura elaborada. O estado de satisfação está relacionado com o contato que se tem com o conhecimento e a consciência do quanto é possível apreendê-lo. No curso de graduação em Física, a satisfação com o conhecimento aprendido se estabelece em níveis diferentes e podem se modificar no decorrer do curso.

Manoel Robilotta[41], refletindo sobre como se conhece Física, identificou sete níveis de conhecimento que possuem a seguinte hierarquia:

1. nada;
2. palavras vazias;
3. palavras cheias;
4. conexões vazias;
5. conexões com significado interno e com significados interno e externo;
6. tem opiniões;

---

[37]citado por Moreira [1997], **Op. Cit.** p. 1
[38]Moreira [1997] aborda a visão de vários autores sobre modelos mentais, enfoca a metodologia de pesquisa em modelos mentais e apresenta alguns exemplos neste artigo que tem a intenção de servir como introdução a este assunto.
[39]*Modelos Mentais,* **Op. Cit.** p. 33
[40]Snyders, Georges - *A Alegria na Escola*- São Paulo, Manole, 1988.
[41]Curso de pós-graduação do IFUSP: *Construção e Realidade no Ensino de Física,* 1994.

7. tem um grande barato!

Dificilmente um estudante não sabe **nada** sobre um assunto, mas pode acontecer que ele ainda não tenha tido nenhum contato, nunca tenha ouvido falar.

O segundo nível é composto de **palavras vazias** como, por exemplo, no episódio que presenciei onde um monitor da "prateleira de demonstrações" do IFUSP, ao conversar com uma estudante secundarista visitante, queria mostrar o que era a Física e, então, ele disse: -Você já ouviu falar que o *gradiente de e é igual a rô sobre epsilon zero?* Este é um típico exemplo de palavras vazias, pois este rapaz não tinha a mínima idéia sobre o significado de gradiente, um operador que, aplicado sobre uma função escalar, resulta em uma função vetorial, o que não corresponde à afirmação acima.

O nível seguinte, de **palavras cheias,** corresponderia a dizer que *o divergente de* $\boldsymbol{E}$ *é igual a* $\frac{\rho}{\varepsilon_0}$, onde $\boldsymbol{E}$ é o campo elétrico, ρ é a densidade volumétrica de cargas e ε_0 é a permissividade elétrica no vácuo. Além disso, o operador divergente aplicado sobre o vetor campo elétrico equivale ao produto escalar entre dois vetores e, por isso, resulta em um escalar que é $\frac{\rho}{\varepsilon_0}$.

No nível de **conexões vazias** poderia se pensar em dois tipos de conexões: uma delas seria associar o operador divergente ao conceito de fluxo e outro seria reconhecer esta expressão como uma das equações de Maxwell.

Estes dois tipos de conexões vazias podem transformar-se em **conexões com significado**. Com significado interno seria imaginar o campo elétrico como um campo vetorial e visualizar o seu fluxo, através de uma superfície fechada infinitesimal em torno de cada ponto do espaço. Nos pontos em que o número de vetores que entram no volume delimitado por esta superfície é o mesmo que o que saem, o fluxo do campo elétrico é zero e, consequentemente, não há cargas neste ponto. Uma das variáveis da expressão é a densidade volumétrica de carga e não a carga elétrica, pois o divergente não corresponde ao fluxo, mas ao fluxo por unidade de volume, ou seja, os dois lados da expressão, cujos significados foram apresentados acima relativo ao fluxo e à carga, estão divididos pelo volume infinitesimal considerado. A interpretação das conexões internas desta expressão é que *a fonte do campo elétrico é a carga elétrica.*

A outra conexão possível seria imaginar que o campo elétrico criado pela carga elétrica é um campo radial e que a carga está no ponto de descontinuidade deste campo e, por isso, existem pontos no espaço onde o fluxo através de uma superfície

fechada infinitesimal é diferente de zero. Além disso, o fato do fluxo do campo elétrico através de qualquer superfície fechada depender apenas do valor da carga elétrica dá significado (no sentido proposto por Lady Welby) à dependência entre a intensidade do campo elétrico e o inverso do quadrado da distância de um ponto à carga elétrica, pois a dependência da área da superfície com o quadrado do seu "raio" é compensada com a dependência inversa da intensidade do campo elétrico. Isto ainda é uma questão geométrica, a significação (Lady Welby) é que o espaço é eletricamente neutro, ou seja, ele não absorve nem emite campo elétrico.

A esta conexão com significado interno pode ser associado outro significado externo à relação investigada. Ao considerá-la como uma das equações de Maxwell[42], percebe-se que não existe apenas o campo elétrico criado por carga elétrica mas há também o campo elétrico que é gerado por campos magnéticos que variam no tempo. Este campo elétrico tem outra configuração espacial, ele não é radial como o criado por carga e nem é descontínuo. A sua direção varia de ponto a ponto como se estivesse girando. Na Física, campos com estas características são denominados rotacionais. A conexão estende-se ao perceber que o campo magnético tem apenas uma configuração espacial, que ele é rotacional, não existindo um análogo magnético para a carga elétrica, pois o divergente do campo magnético é sempre zero. Outras conexões com significado externo seriam, por exemplo, visualizar os campos elétricos gerados na bateria e no alternador do automóvel e, em geral, utilizá-lo para interpretar o funcionamento dos aparelhos elétricos.

O nível seguinte seria **ter uma opinião** sobre o campo elétrico. Seria refletir sobre a sua existência. Seria questionar se as equações de Maxwell referem-se a entidades reais, se os campos são realidades concretas ou se estas equações são apenas relações matemáticas que permitem calcular intensidades que possibilitam calcular as forças aplicadas sobre cargas elétricas. Seria fazer uma opção entre acreditar ou não na existência do campo.

O nível final de **ter um grande barato** seria a êxtase de um surfista na crista da onda, de sentir que o conhecimento pertence a si próprio, ... Algo que não se traduz em palavras. É um saber que a gente sente e que dá prazer. É isso aí!

Esta hierarquia de significados reflete uma hierarquia dimensional crescente, pois os primeiros níveis são pontuais ou adimensionais; as conexões podem ser linea-

[42]São as equações fundamentais da teoria eletromagnética.

res ou unidimensionais, superficiais ou bidimensionais e, também, volumétricas ou tridimensionais. O grau de significação é aprofundado à medida que o número de dimensões aumenta. A apreensão do conhecimento seria, portanto, multidimensional, pois incorpora todas as outras dimensões.

Um análogo a esta formulação é proposto por Barthes[43] que considera três tipos de consciência: a **simbólica**, a **paradigmática** e a **sintagmática**. Um sintagma está associado a uma seqüência de signos linear e irreversível. É a relação estabelecida entre palavras de um discurso, é a combinação entre elas onde uma aparece após a outra em virtude do caráter linear da linguagem oral ou escrita, pois os signos são pronunciados um de cada vez. Este tipo de consciência não existe isoladamente. A ele estão relacionadas significações, que são frutos de relações associativas ou paradigmáticas cujos elementos não obedecem a uma ordem determinada, não são em número definido, podem existir simultaneamente, são estruturados em multidimensões. Enquanto o sintagma tem características orais, o paradigma é visual, pois seus elementos são sincrônicos. O sintagma está associado à ação e o paradigma ao pensamento. E a relação dialética entre as consciências sintagmática e paradigmática equivaleria à consciência simbólica.

Esta consciência está associada a uma dimensão "profunda" do signo, algo maior que a superposição das outras duas consciências, algo do tipo do distanciamento brechtiano que substitui a questão: "*o que é?"* pela pergunta: "*o que é este objeto na realidade? ele é reflexo do que?"* Este tipo de questão é uma busca à visão de mundo oferecida pelos signos, por isso é um tipo de consciência simbólica.

Este tipo de consciência é privilegiado por Richard Demarcy[44] em *La lecture transversale* que, se referindo ao teatro, questiona sobre como o espectador pode passar para o plano do significado. A leitura transversal é *oposta ao modo tradicional de leitura, o horizontal, no qual o espectador se entrega à obra, fica preso ao desenrolar da ação, aguarda com impaciência o desenlace final. Fugindo ao universo fechado da obra, a extração do signo é seguida pelo relacionamento deste com a cultura e a sociedade que o engendraram, examinando-se o lugar e a função por ambas atribuídas ao signo*.[45] Nesta concepção de leitura, o signo só tem significado através dos va-

[43] Barthes, R. *L'imagination du signe,* in Essais critiques, citado por Coelho Netto(1990)
[44] In *Elements d'une sociologie du spectable,* Paris, UGE, 10-18, 1973, citado por Coelho Netto (1990)
[45] *Semiótica, Informação e Comunicação,* **Op. Cit.** , p.

lores culturais e sociais e de sua história, ou seja, através da visão de mundo que geralmente aparece encoberta.

Ao fazer considerações sobre a concepção de signo; admitindo que o signo é uma construção individual influenciada por traços culturais; que os indivíduos podem construir diferentes significados de um mesmo objeto e adaptá-los para que sejam funcionais; que os modelos mentais construídos a partir de experiências vivenciadas na escola nem sempre coincidem com os modelos conceituais ensinados e que há diferentes níveis de conhecimento ou tipos de consciência, o foco da atenção estava no conhecimento aprendido, aquilo que, de alguma forma, foi elaborado e adquiriu algum significado. Além de "olhar" para o signo construído é possível, também, considerar o processo de sua construção, ou seja, como as pessoas aprendem. Uma tentativa de interpretar a mente humana em ação é realizada pela psicologia cognitiva, que surgiu como alternativa aos behavioristas e a concepção clássica de ciência.[46] Atualmente podem ser identificados pelo menos três ramos da psicologia cognitiva. Em um deles os psicólogos experimentais envolvem-se em pesquisas empíricas com sujeitos normais. Em outro, os psicólogos utilizam modelos computacionais da cognição para fazerem suas pesquisas. O outro ramo é composto pelos neuropsicólogos que fazem suas pesquisas comparando pacientes que tenham lesões cerebrais com aqueles que são considerados normais. Com certeza há resultados importantes, há modelos interpretativos e muita coisa relativa ao processo de aprendizagem. Entretanto, não pretendo investigar a aprendizagem sob este enfoque. Meu objetivo não é investigar sobre como as pessoas aprendem, ou explicar a complexidade dos processos mentais. Minha intenção é apenas refletir sobre algumas relações que o indivíduo que aprende tem com o conhecimento que está sendo aprendido e isto será apresentado na próxima seção. Para encerrar esta, vou considerar os princípios da dialética para tentar fazer uma síntese das reflexões sobre a construção individual do conhecimento.

O signo é a relação triádica entre signo, objeto e interpretante, é uma relação de interação interna destas três partes com o todo e uma **totalidade** que se cria a si mesma na interação entre as três partes. Esta interação acontece entre elementos que são **contraditórios**, ou seja, objeto-interpretante, sintagma-paradigma que tendem simultaneamente à unidade e à oposição. Os significados podem ter várias dimensões que são **qualitativamente** diferentes, isto é, os modelos mentais são estruturados e

[46] Eysenck, Michael W. *Psicologia cognitiva: um manual introdutório* / Michael W. Eysenck & Mark T. Keane; trad. Wagner Gesser e Maria Helena Fenalti Gesser – Porto Alegre, 1994, p. 7-42

reestruturados, as zonas do perfil conceitual são epistemologicamente antagônicas. E o conhecimento individual nunca está acabado, ele está em contínua transformação, em **movimento**.

I-3. INTERAÇÃO COM O CONHECIMENTO FÍSICO

Ninguém que achar natural que "dois e dois são quatro" poderá ser um matemático, nem alguém que não consiga compreendê-lo.

(Bertold Brecht)

O curso de Física reflete, em parte, as contradições, a incompletude, a complexidade que existem no conhecimento da Física. Os estudantes, por sua vez, entram em contato tanto com o conhecimento que é organizado para ser estudado, como com a complexidade decorrente do fato de que nem todo conhecimento da Física pode ser racionalizado e estruturado na forma de um curso bem organizado. E nesta convivência, na relação que os estudantes têm com o conhecimento físico através das atividades do curso de Física, cada um deles constrói o seu conhecimento. É sobre esta relação, sobre a interação que professores e estudantes têm com o conhecimento físico que farei algumas reflexões.

Uma das idéias que está sempre implícita no ensino da Física é a crença de que existe uma regularidade no mundo físico, que os fenômenos físicos são repetitivos, tanto espacial como temporalmente. Acredita-se na constância e na estabilidade dos acontecimentos naturais e, por isso, os físicos procuram interpretar as várias regularidades construindo modelos interpretativos. As limitações dos modelos construídos, a provisoriedade destas construções, a existência de várias interpretações antagônicas são admitidas às vezes explícita e muitas vezes implicitamente no ensino da física, mas as idéias de regularidade, estabilidade, constância, repetição dos fenômenos naturais dificilmente são questionadas em quaisquer que sejam as atividades do curso de Física. O ensino da Física é fundamentado em um princípio básico: existe ordem na natureza.

A noção de ordem na natureza não é nem ao menos discutida nos cursos de física, pois ela parece tão natural quanto o próprio universo. Entretanto, a idéia de ordem não é tão natural quanto parece. É uma noção que foi construída no mundo ocidental e tem origem teológica. *Whitehead disse o seguinte: "A ordem do universo é um conceito derivado da crença religiosa, na racionalidade do Deus, que pôs em mo-*

vimento um universo perfeito para demonstrar sua onisciência.[47] Está relacionada com a crença de um deus que interfere sem se deixar interferir, algo externo ao universo. À origem teológica para a idéia de ordem, Whitehead acrescenta outra de origem mágica: *A crença na redução dessa ordem numa fórmula matemática deriva da visão pitagórica de que o mistério do universo é revelado através dos números.*[48] Além destas origens, Morin considera que há também uma origem política associada à *soberania das monarquias de direito divino.*[49] Ele acredita que a ordem política que se desenvolveu no ocidente foi propícia à formação da noção de ordem física.

A idéia de ordem foi construída há tanto tempo e está tão arraigada no pensamento ocidental que não é à toa que ela nos parece tão natural. Entretanto, ela é fruto de condicionamentos culturais, é um código como todos os outros que existem no conhecimento físico. Quando um código construído é admitido como natural, ele nunca é questionado, ele é simplesmente aceito. E este tipo de comportamento muitas vezes está incutido no curso de Física. Deste modo, os conceitos, as leis, os princípios são apresentados como se fossem óbvios, como se todas as pessoas fossem capazes de perceber a mesma coisa. E ao aluno resta apenas a função de engoli-las, sem cheirá-las e nem mastigá-las e, por isso, não as problematizam. Se não há problematização, se os estudantes não questionam aquilo que está sendo estudado, não há aprendizado. Para Bachelard aprender significa desaprender, *pensar é assumir o contra ou o não, questionar os pontos fixos.*[50] Uma boa forma de aprender é desconfiar daquilo que está sendo ensinado. Brecht escreveu:

> *Ninguém que achar natural que "dois e dois são quatro" poderá ser um matemático, nem alguém que não consiga compreendê-lo.*[51]

Brecht em sua proposta de teatro dialético terminava suas peças sempre com uma questão e sua intenção era fazer com que os espectadores fossem procurar a resposta na sociedade em que viviam. Para Brecht, e também para Bachelard, é preciso dialetizar o pensamento em relação ao sujeito quando se coloca uma dúvida específica e ao objeto no sentido de precisar (tornar precisa) a experiência. Portanto, se no processo de aprendizagem é necessário não aceitar o conhecimento como natural, como aquilo que não pode ser modificado, é também preciso (de necessidade) que aquele conhe-

---

[47] Citado por Morin, *Ciência e Consciência,* **Op. Cit.** , p. 208
[48] Citado por Morin, *Ciência e Consciência,* **Op. Cit.** , p. 208
[49] *Ciência e Consciência,* **Op. Cit.** , p. 208
[50] Seminário de Vera Lúcia G. Felício, *Bachelard: um determinismo às avessas,* IFUSP, 1997.
[51] Brecht, B. *Teatro Dialético,* Rio de Janeiro, Civilização Brasileira, 1967, p.111

cimento torne-se preciso (de precisão) e, para isto, este conhecimento deve ser investigado profundamente.

O processo de **codificação-problematização-descodificação** proposto por Paulo Freire também vai à direção do que foi apontado sobre a aprendizagem. Segundo Paulo Freire *a aproximação preliminar à "estrutura de superfície" é seguida pela problematização da situação codificada, com que se chega ao segundo e fundamental momento da descodificação. É neste momento que se pode alcançar a compreensão da "estrutura profunda" da codificação, que abre possibilidades à análise crítica em torno da realidade codificada.*[52] O que se propõe com este processo é a superação da "consciência real efetiva" da situação codificada para se atingir a "consciência máxima possível" onde é possível perceber a estrutura do código construído e, portanto, descodificá-lo. Desta forma *a descodificação promove o surgimento de nova percepção e o desenvolvimento de novo conhecimento.*[53]

Na perspectiva de Paulo Freire, este processo visa mudanças político-sociais dado o caráter de consciência que este modelo se propõe a estabelecer. Paulo Freire vincula a educação à luta e organização de classe do oprimido e *no contexto da luta de classes, o saber mais importante, mais necessário para a libertação do oprimido, é a descoberta de sua situação de oprimido (dominação política e exploração econômica) para, então, elaborar sua "consciência crítica" passo a passo com sua organização de classe.*[54] No entanto, além desta perspectiva, é possível articular o processo de codificação-problematização-descodificação para utilizá-lo em situações mais específicas, como no ensino-aprendizagem em Física. Neste processo em particular, a "consciência real efetiva" a ser superada está relacionada às concepções prévias sobre os temas estudados, que devem ser problematizadas. Estas concepções prévias existem tanto em relação aos estudantes, que interpretam a natureza conforme suas concepções que foram construídas e estão relacionadas aos valores culturais da sociedade em que vivem, como em relação aos conceitos científicos que também são construções elaboradas em um contexto cultural. Em suma, estudantes e professores deveriam conscientizar-se dos "modelos" construídos pelos estudantes e também dos "modelos" construídos pelos cientistas.

---

[52] Freire, Paulo – *Pedagogia do Oprimido,* Rio de Janeiro, Paz e Terra, 1975, p.52
[53] *Pedagogia do Oprimido,* **Op. Cit.** p. 129
[54] *Pensamento Pedagógico Brasileiro,* **op. cit.**, p.31

Snyders, citando Bachelard, reconhece também a necessidade de "uma reforma do ser conhecedor que está em jogo", uma "catharsis"[55] e escreve:

> *O simples bom senso, a observação comum constituem "obstáculos" ao conhecimento – e isso porque o erro é "primário, normal, comum", responde a uma estrutura, possui consistência, essas ilusões correspondem a uma lógica, são "solidárias" umas com as outras e portanto "tenazes". Daí a necessidade de uma espécie de "psicanálise dos erros iniciais".*[56]

Snyders considera que a apreensão do conhecimento acontece através de rupturas entre a "cultura primeira" e a "cultura elaborada" que é análogo à descodificação proposta por Paulo Freire, ou a catarse proposta por Bachelard. Todos colocam a necessidade da problematização no processo de ensino-aprendizagem, de se questionar o conteúdo daquilo que é recebido. Entretanto, só é possível questionar um conceito quando ele deixa de ser operativo para se tornar um obstáculo. Se o conceito é aceito com naturalidade, não há como questioná-lo.

Para se perceber que um tipo de comportamento é resultado de condicionamentos sociais é necessário que haja uma referência externa a ele. É só através de comparações com outros padrões de comportamento que é possível perceber o código construído. E se este tipo de comportamento é, então, reconhecido como não-natural, ele pode ser transformado. Neste processo não deve acontecer simplesmente a tomada de consciência do código construído. É um processo que vai além disso, é um processo de conscientização no sentido proposto por Paulo Freire e entendido como *consciência de e ação sobre a realidade.*[57] A consciência de que no conhecimento existe um código de comportamento construído possibilita o reconhecimento da existência de alternativas a ele. Este reconhecimento desenvolve uma postura crítica em relação a este comportamento e leva a pessoa que as reconhece a optar por alguma das alternativas existentes. Para se fazer uma opção é preciso que haja critérios. Se os critérios não são únicos, torna-se necessário que sejam comparados entre si, que se decida entre um e outro, que se posicione em relação àquele conhecimento, enfim, que seja um agente e não um espectador do processo de ensino-aprendizagem.

Para fazer a comparação entre os "objetos" da Física é necessário considerá-los em suas totalidades e, ao mesmo tempo, reconhecer cada uma de suas partes. O

---

[55] citado por Snyders, *A Alegria na Escola,* **op. cit.** p.104
[56] *A Alegria na Escola,* **op. cit.** p.104
[57] citado por Gadotti, *Pensamento Pedagógico Brasileiro,* p. 33

processo de comparação acontece quando existe uma relação dialética de inserir cada parte dentro de seu contexto e de reconhecer o todo através da compreensão das partes. O todo ou a parte quando considerados sozinhos não são suficientes à comparação dos objetos. Por exemplo, se quisermos investigar a diversidade de árvores da mata atlântica, esta investigação não pode ser realizada observando-a da praia, pois de lá percebe-se uma floresta homogênea. E nem através da observação de alguma coleção de folhas das árvores da mata atlântica, pois o máximo que pode ser percebido é relativo à forma das folhas e quem olha folha não vê árvore.

Se proponho a comparação de totalidades e o reconhecimento das partes é porque considero que os "objetos" da Física são conceitos que têm estruturas, formados de elementos que estão relacionados entre si e cujas relações dão significados a cada um e ao conjunto em que estão inseridos. Não são somente os conceitos da Física que são estruturados, os nossos conceitos também são estruturas. Por isso não conseguimos definir através de atributos característicos os conceitos que utilizamos no nosso dia-a-dia ou, então, explicar uma palavra por meio de outras palavras. Sobre esta propriedade do conceito, Einstein escreveu:

> *O que, exatamente, é o pensamento? Quando, na percepção das impressões sensoriais, emergem figuras da memória, isto ainda não é "pensar". E quando esses quadros formam seqüências, cada membro criando o outro, isto também ainda não é "pensar". Porém, quando uma certa figura aparece em várias seqüências, nesse caso – precisamente devido a essa recorrência – torna-se um elemento de organização para tais seqüências, no sentido de unir seqüências que por si mesmas não se relacionam entre si. Esse elemento vem a ser um instrumento, um conceito.*[58]

Um conceito só tem significado se estiver contextualizado e para isto ele deve ser percebido na sua totalidade, enquanto objeto estruturado.

A este movimento de reconhecer as partes no todo e compreender o todo como interação das partes está associada outra dicotomia. Pois como é possível realizar este movimento? – Através de outro movimento. O movimento de se aproximar do objeto, ter um contato íntimo com ele, conhecer as suas partes e, em seguida, distanciar-se dele, deixar de se envolver com ele e percebê-lo em sua totalidade. Com este distanciamento, tem-se uma nova percepção do objeto. Suas partes articuladas dão significado ao todo, mas também ganham significados. Este movimento é constante, não se limita apenas em aproximação-distanciamento ou em distanciamento-aproximação, mas

[58] *Notas Autobiográficas,* **op. cit.** p. 17

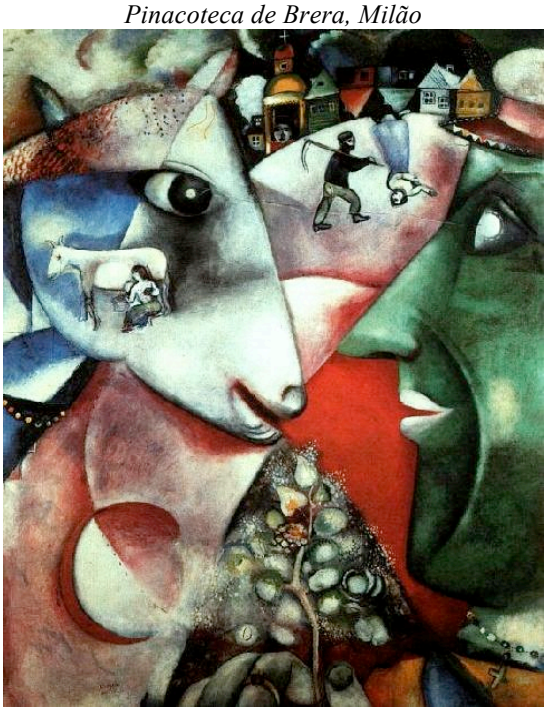
num movimento dialético. Para se compreender o todo é preciso aproximar-se dele e conhecer suas partes e distanciar-se dele para entender suas partes num todo. Na aproximação seguinte, o contato com as partes é diferenciado da anterior e, conseqüentemente, há uma nova percepção delas.

Se o objeto é visual, uma pintura por exemplo, o primeiro contato é com a totalidade da obra que é interpretada através das relações entre as partes, que têm significados dentro do contexto, mas também dão significado ao todo. Isto não quer dizer que todos os quadros têm um todo uno. Há quadros que realmente são assim, mas há outros que são mais locais que globais, que são constituídos por várias totalidades. Independente de qual seja a obra, sempre existe alguma totalidade. Os quadros da figura 3 representam estes dois tipos de pinturas. O quadro de Rafael é global e o de Chagall é local.[59] Mesmo com características nitidamente locais, Chagall possui totalidades que estão relacionadas. A Física também tem representantes para estas diferentes totalidades. As teorias que constituem a Física Clássica são do tipo do quadro de Rafael e a Física Moderna se parece mais com o quadro de Chagall.

Diferente de uma pintura, cuja impressão primeira é visual, a Física só pode ser visualizada, isto é, seus conceitos abstratos podem ser transformados em imagens mentalmente visíveis. Vale a pena destacar que esta visualização não é trivial e, também, que não são todos os físicos que acreditam que esta visualização faz parte da Física. Mas independente disto, o fato é que o conhecimento físico está nas pessoas que trabalham com ele e também escrito nos livros e, portanto, é um conjunto de obras com características diferentes de, por exemplo, o acervo de um museu. O acesso ao conhecimento da Física acontece inicialmente através de aproximações com suas partes e só após alguns destes contatos que é possível afastar-se e perceber alguma totalidade, mesmo que seja parcial. A relação com o conhecimento físico é parecida com aquela que o leitor tem quando lê um romance, cujo enredo vai sendo construído durante a leitura e, normalmente, no final é que ele realmente é compreendido. Mesmo quando ele aparece no início, ele só ganha significado após ter reconhecido cada uma de suas partes e as relações entre elas. O livro Benjamim, de Chico Buarque, ilustra

[59] estes quadros foram propostos por M.R.Robilotta, no curso *Construção & Realidade no Ensino de Física.*

O Casamento da Virgem
Rafael, *1504*
Pinacoteca de Brera, Milão



Eu e minha Aldeia
Chagall, 1911

Figura 3

esta situação. Na primeira cena, um evento é narrado com muita clareza, isto é, é perfeitamente possível imaginar a cena em si, mas ela não tem nenhum significado, não dá para entender o porquê daquele evento. Após esta narração, a estória desenvolve-se. De início parece que não há relação entre os vários personagens. Algumas das relações vão sendo construídas ao longo do texto e, conseqüentemente, a personalidade de cada personagem vai se esboçando. Na última página a cena inicial, agora contextualizada, explica o tema narrado. É impressionante como de repente os vários pedaços se estruturam e transformam-se em algo extremamente significativo.

Diferente do romance do Chico Buarque que se refere a situações do cotidiano, os conceitos da Física nem sempre fazem parte deste cotidiano e quando fazem, podem ter significados diferentes daqueles utilizados no dia-a-dia. Os estudos realizados sobre "concepções alternativas*" revelaram que as idéias alternativas de crianças e adolescentes são pessoais, fortemente influenciadas pelo contexto do problema e bastante estáveis e resistentes à mudança, de modo que é possível encontrá-las mesmo entre estudantes universitários.*[60] Por isso, dificilmente seria possível iniciar um curso de Física apresentando-se um quadro que representaria a teoria que está por começar a ser estudada. Uma das dificuldades para fazer isto é a construção do quadro e a outra, que é mais relevante, é a sua descrição de modo que tenha algum significado para o ouvinte ou o leitor.

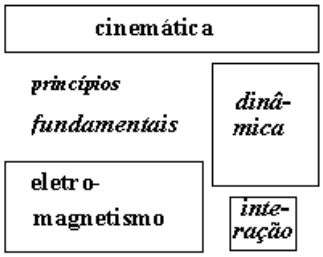
Quanto à construção do quadro, já existem algumas tentativas na direção de representar algumas teorias da Física Clássica como um objeto. Partindo do pressuposto que uma teoria física é um tipo de conhecimento que possui uma estrutura e que uma estrutura permite a construção de um desenho, já foram elaborados **mapas conceituais** de algumas teorias. Um mapa conceitual representa a estrutura conceitual de uma teoria que se constitui em um saber espacial. Este tipo de representação através de mapas conceituais evidencia a existência de relações simultâneas, sincrônicas e estáveis no interior da estrutura. Por meio do mapa conceitual, apreendemos, como objeto, o conjunto de relações que constitui o "esqueleto" estrutural da teoria.

O mapa conceitual pode representar diferentes totalidades que dependem do grau de detalhamento que se pretende atingir com ele. É como o mapa de uma cidade

[60] Viennot, L. *Spontaneous Reasoning in elementary dynamics.* European Journal of Science Education 1(2):205-221, 1979. Citado por Mortimer (1996).

que pode ser dividido em regiões, em bairros e até em "retângulos" como aqueles apresentados nos guias. O mapa da cidade fornece uma visão panorâmica que não tem muitos detalhes, ele apresenta a disposição dos bairros e os principais logradouros e sua análise permite macro-localizações. Através deste mapa dá para descobrir que "rumo tomar" mas não dá para descobrir exatamente quais ruas que devem ser percorridas para atingir um determinado destino. Neste caso, o mapa a ser consultado deve ser aquele recortado em retângulos apresentados nos guias. Mas há também processos intermediários que não correspondem nem ao equivalente a andar com uma bússola quando se sabe apenas a direção a seguir e nem a ter certeza de todas as ruas que devem ser trafegadas. As diferentes totalidades que o mapa de uma cidade pode representar correspondem para o cidadão, morador desta cidade, diferentes graus de conhecimento dela. A cidade como um todo é um conhecimento vago, o bairro em que mora é mais estruturado e tem relações com as outras partes da cidade, e a região onde fica sua casa é conhecida em detalhes. Além disso, os elementos e relações desta região são bem determinados enquanto que, quanto maior for o afastamento desta região, em um mapa mais abrangente, menor é a resolução. As relações entre as partes tornam-se cada vez mais imprecisas, pois estas relações correspondem a subestruturas que não foram representadas devido às limitações existentes na elaboração daquele determinado mapa.

Exemplos destes diferentes graus de totalidades são os mapas conceituais da teoria da relatividade restrita,[61] do eletromagnetismo clássico[62] e da eletrostática.[63] Os elementos do mapa conceitual da teoria da relatividade restrita podem ser agrupados em subestruturas apresentadas no diagrama abaixo:



[61] em Ota, M.I.N. *Um texto de Eletromagnetismo e Relatividade baseado no conhecimento estrutural,* dissertação de mestrado IFUSP/FEUSP, 1985 e Ota, M.I.N. *Estrutura Conceitual do Eletromagnetismo,* Pro-Posições, vol.7, 1[19], 67-75, 1996.
[62] Em Del Carlo, Sandra; Ota, M.I.N.; Hosoume, Y. *Uma análise de propostas de ensino de 2º grau através da estrutura conceitual do eletromagnetismo,* atas XII SNEF, Belo Horizonte, 1997.
[63] Em Salém, Sônia, *Estruturas conceituais no ensino de física: uma aplicação à eletrostática,* dissertação de mestrado IFUSP/FEUSP, São Paulo, 1986.

O eletromagnetismo corresponde a uma destas subestruturas que quando considerada isoladamente, isto é, fora da estrutura da teoria da relatividade restrita, admite uma interpretação não-relativística que corresponde a uma visão de mundo diferente. Esta interpretação pode ser realizada a partir da estrutura conceitual da teoria da relatividade restrita quando não são consideradas algumas relações. Se a parte do mapa conceitual da teoria da relatividade restrita referente ao eletromagnetismo (Ota, 1985) for comparada ao mapa conceitual do eletromagnetismo clássico (Del Carlo, 1997) é possível verificar a quantidade maior de elementos e relações existentes na segunda pois trata-se de uma totalidade mais reduzida ou, então, de um distanciamento mais próximo. Este distanciamento é ainda mais reduzido na representação da estrutura conceitual da eletrostática (Salém, 1986) cujo mapa apresenta muito mais detalhes ainda.

Estes diferentes graus de totalidade deveriam ser percebidos durante o curso de Física. No caso específico do exemplo apresentado, a eletrostática corresponde mais ou menos a um mês de aula do curso de Física III e o eletromagnetismo como um todo corresponde a um semestre, onde existem outras subestruturas que, ou são parcialmente independentes da eletrostática como, por exemplo, a magnetostática, ou têm uma relação mais direta com ela, como é o caso da indução eletromagnética. No curso de eletromagnetismo (Física III) podem ser trabalhadas várias totalidades, onde a eletrostática é um exemplo, que quando articuladas permite a visão global da teoria eletromagnética. Quanto à outra totalidade, em que o eletromagnetismo é uma subestrutura, é atingida em cursos especialmente planejados para a teoria da relatividade restrita. No curso de graduação em Física do IFUSP, a teoria da relatividade restrita é dividida: uma parte dela é programada para a disciplina Física II e outra parte para a Física IV. Neste caso, as totalidades podem ser percebidas parcialmente, ou então, fazendo esforço e recuperando aquilo que foi estudado um ano antes. Neste caso é um processo diferente daquele que ocorre na Física III onde um único todo pode ser construído a partir de totalidades parciais. Para se construir a estrutura da teoria da relatividade a partir das disciplinas propostas no IFUSP é necessário filtrar os elementos desta teoria dentre tudo que foi estudado nos primeiros semestres do curso de graduação. É complicado, mas é possível.

Estas considerações sobre a estrutura conceitual de uma teoria e sua representação através de mapas conceituais foram feitas com o intuito de refletir sobre a existência de diferentes totalidades existentes nas teorias da Física e foram colocadas a

partir da questão se seria possível iniciar uma disciplina do curso de graduação em Física apresentando-se o quadro a ser estudado. A resposta que eu daria a esta questão é a seguinte: - depende da disciplina. Se os estudantes já estudaram o conteúdo a ser abordado na disciplina que está iniciando, uma síntese torna-se significativa. Isto é possível de fazer na graduação em Física, pois várias teorias são retomadas durante o curso. Entretanto, se for a primeira vez que aquele conteúdo será investigado de forma sistemática, eu acredito que começar com a apresentação de algum esquema, que representa alguma totalidade, relativa exclusivamente à teoria a ser estudada, é inútil pois, para os estudantes, este esquema teria um efeito parecido com alguns desenhos que tem um passarinho em uma árvore que só é percebido após muito esforço, ou o quadro que está escrito "quem tem fé, vê o rosto de Cristo". No caso em que o desenho é um mapa conceitual de alguma teoria da Física que nunca foi estudada, é mais difícil ainda ver alguma coisa, por mais esforço que o estudante faça ou por mais fé que ele tenha.

Uma outra questão a ser colocada é sobre o grau de totalidade que pode ser atingido nas várias teorias. Ou então, o que foi feito para a teoria da relatividade e o eletromagnetismo pode ser extrapolado para todas as teorias da Física? Será que todas as teorias da Física são estruturáveis?

Quando comecei a expor sobre os diversos tipos de totalidades que podem existir referi-me aos quadros de Rafael e Chagall, sendo o primeiro global e o segundo local e, ainda, comentei que a Física Clássica apresenta totalidades mais parecidas com a de Rafael e a Física Moderna, com Chagall. O quadro de Rafael é global, pois ele é extremamente organizado. A pintura retrata O CASAMENTO DA VIRGEM através de um cenário constituído por uma construção na forma de templo e escadarias na frente e personagens posicionados em diferentes posições. Os personagens principais são os noivos e o sacerdote e estão no centro em relação aos demais. Os personagens coadjuvantes são as testemunhas: mulheres ao lado da noiva e homens ao lado do noivo. Há também figurantes que são pessoas dispersas, tanto espacialmente em alguns pontos da escadaria como pela não participação no ato. A posição das mãos dos personagens principais e o ponto para o qual convergem os olhares dos personagens coadjuvantes caracterizam o tema da pintura: um casamento. Esta forma de retratar a realidade está estritamente relacionada com a concepção de ciência moderna onde há o predomínio da racionalidade, da organização, da causalidade. Em Rafael há o em-

prego da perspectiva, onde os personagens principais ocupam o primeiro plano e o templo com escadaria representa o ambiente. As testemunhas da noiva, do sexo feminino e do noivo, do sexo masculino representam um padrão de valor da época. Somente os personagens que participam da cena, os noivos, o sacerdote e as testemunhas têm seus rostos pintados e expressam um sentimento que é comum. Todos olham para o mesmo ponto: as alianças e suas expressões faciais também são características das pinturas renascentistas.

Em Chagall, a realidade é retratada sob outra perspectiva, não há uma ordem que direciona todas as partes como em Rafael, o tema EU E MINHA ALDEIA está representado em várias partes. Há uma divisão através das linhas diametrais de um retângulo que separam as diversas partes, isto é, EU está ocupando o lado direito e em sua volta estão os integrantes de MINHA ALDEIA. No lado esquerdo, na frente da figura sobre EU estão os animais; na parte superior estão pintadas as casas da aldeia e no mesmo triângulo na região mais próxima ao vértice estão os aldeões, representados por um homem e uma mulher. Na parte inferior encontra-se uma árvore representando a vegetação. O todo EU E MINHA ALDEIA é a justaposição destas partes. Não há uma cena principal, entretanto, há a evidência de duas cabeças (eu e um animal) através de proporção maior e olhares mútuos.

Em Chagall há uma divisão geométrica que separa os elementos que compõem a aldeia. Cada um destes elementos tem um grau de relevância que se reflete através de diferentes proporções dentro do quadro. Há um juízo de valor expresso através do destaque de duas cabeças (eu e um animal) que interagem entre si através do olhar e das expressões labiais. Além disso, o aldeão que trabalha está com os pés no chão e a mulher que dança está com os pés no céu. Em outro destaque, apenas uma árvore ocupa uma parte proporcionalmente maior que as casas da aldeia, o que sugere que a vegetação é mais fundamental que a habitação.

Em Rafael, o casamento determina o ambiente e a emoção dos participantes do ato e o pintor não participa do quadro, apenas retrata um episódio. Em Chagall, um critério de valor pessoal destaca que a interação com um animal é a relação mais fundamental do pintor. O pintor participa do quadro e demonstra seu sentimento não só através desta relação como também através das diferentes posições e proporções de cada elemento.

O quadro de Rafael tem características nitidamente global e racional enquanto que em Chagall predominam as características local e intuitiva. A análise de Rafael foi realizada levando-se em consideração o conjunto que justifica as funções, as posições e as relações entre as partes. Para analisar Chagall, foram consideradas inicialmente as partes que representam valores diferenciados e o conjunto foi interpretado através da percepção de cada destaque atribuído a cada elemento.

Em síntese, em Rafael, a percepção do todo uno dá os significados das partes, ou seja, do tipo de cenário, posição e olhar dos personagens; em Chagall, o todo é a justaposição das partes. Em Rafael, há apenas uma cena principal que possibilita a percepção global; em Chagall, não há cena única e a percepção das partes é prioritária. Para descrever o quadro de Rafael há um caminho mais relevante em relação à distribuição dos personagens e um pano de fundo que representa o ambiente. A descrição de Chagall é aleatória da relação entre as partes porque não há uma cena central para determinar o ponto de partida.

O quadro de Rafael permite várias interpretações, que dependem da subjetividade do interpretante, mas que são determinadas pelo significado limitado do significante (a mensagem do quadro em si). Ao contrário, o quadro de Chagall é ambíguo, equivale àquilo que Umberto Eco chamou de "obra aberta"[64], aquilo que não possui uma organização rígida e delimitada e sim uma *pluralidade de significados que coexistem num único significante*[65]. Análogo a estes dois quadros, na Física também há teorias mais "fechadas" e outras mais "abertas". As teorias da Física Clássica são mais organizadas, mais delimitadas, suas partes remetem a si próprias, permitem uma certa variedade de interpretações que são determinadas por uma coerência interna às próprias teorias. As teorias da Física Quântica, ao contrário, não têm uma organização rígida e delimitada, é como se elas fossem mais esvaziadas de significados evidentes, por isso, elas permitem diferentes formas de organização e, conseqüentemente, interpretações que podem ser antagônicas. Como já foi citado, *os teóricos dos 'quanta' diferem uns dos outros como os católicos e os diversos protestantes.*[66] Como na Física Moderna coexistem várias interpretações sobre a natureza, podem existir, também, diferentes versões de mapas conceituais de cada uma de suas teorias. Embora um mapa conceitual reflita a subjetividade do sujeito que o construiu, no caso da Física Clás-

[64] Eco, Umberto, *Obra Aberta,* São Paulo, Perspectiva, 1976.
[65] Eco, Umberto, *Obra Aberta*, citado por Coelho Netto, J. T., *Semiótica, Informação e Comunicação*, **op. cit.** , p. 156.

sica esta subjetividade é "cerceada" pelo racionalismo, o que não existe na Física Quântica. Por isso, devido à complexidade inerente da Física Quântica, creio que não é possível construir algum mapa conceitual sobre alguma de suas teorias que seja tão bem organizado, delimitado e, principalmente, que reuna em um único conjunto as várias interpretações da teoria, como foi possível fazer com as teorias da relatividade e eletromagnética.

Para Morin, a concepção predominante nas ciências físicas, no século XX, está associada ao "pensamento complexo" e *a aspiração à complexidade tende para o conhecimento multidimensional. Ela não quer dar todas as informações sobre um fenômeno estudado, mas respeitar suas diversas dimensões... Ao aspirar a multidimensionalidade, o pensamento complexo comporta em seu interior um princípio de incompletude e de incerteza.*[67] Por isso que é difícil tecer considerações sobre as características da Física Moderna, pois os elementos para a racionalização não existem mais. Morin indica *as avenidas que conduzem ao "desafio da complexidade"*[68] e tenta apresentá-las de um modo não-complexo. Nestas avenidas há o caminho da irredutibilidade, do acaso e da desordem; há a transgressão dos limites da abstração universalista que elimina a singularidade, a localidade e a temporalidade; há a complicação; há a relação misteriosa entre a ordem, a desordem e a organização; há a organização que constitui, ao mesmo tempo, uma unidade e uma multiplicidade; há o princípio hologramático ou a rejeição do reducionismo e, também, do holismo; há a crise da clareza e da separação nas explicações; há a volta do observador na sua observação. E Morin acrescenta que *a complexidade está na origem das teorias científicas ou, como estabeleceram, de formas diferentes, Popper, Holton, Kuhn, Lakatos, Feyerabend, existe um núcleo não-científico em toda teoria científica.*[69] Neste sentido existe uma outra racionalidade no pensamento científico, o pensar de forma organizacional necessita de um pensamento complexo extremamente elaborado e não do pensamento simplificante que permeava o pensar científico até o século passado, pois como disse Bachelard *não há nada simples na natureza, só há o simplificado.*[70] E embora na Física Moderna não sejam almejadas totalidades racionalizadas, ainda existem totalidades. Só que nestas totalidades, a igualdade é tratada na diferença, existe eqüidade e, ao invés da valo-

---

[66] Feyerabend, P. *Contra o Método,* **op. cit.** , p. 252
[67] Morin, *Ciência e consciência,* **op. cit.** p. 177.
[68] Morin, *Ciência e consciência,* **op. cit.** p. 177-185.
[69] Morin, *Ciência e consciência,* **op. cit.** p. 186.
[70] citado por Morin, *Ciência e consciência,* **op. cit.** p. 175.

rização do conhecimento como acontecia na ciência no século passado, há a valorização da cultura. Nestas condições, o ensino de Física também deveria caminhar na direção de uma educação multicultural, aquela que não se restringe a um determinado "olhar" para o conhecimento, ou seja, uma teoria da Física não é apenas um conjunto de elementos e relações que interpretam uma parte da natureza material, mas é também história, filosofia, epistemologia, sociologia, etc. relativas a este conhecimento.

A interação com o conhecimento físico acontece em um movimento dialético de aproximação e distanciamento daquilo que está sendo investigado. O distanciamento propicia a percepção de totalidades, a contextualização, o saber em extensão. A aproximação permite um contato íntimo com as partes, um saber em profundidade. E este saber é do tipo de um saber-sentir, um saber-fazer, é ter a sensação de "pôr a mão na massa para fazer o pão". As atividades relacionadas a esta forma de interação com o conhecimento físico além de serem extremamente relevantes, também são as mais freqüentes tanto no aprendizado, como na pesquisa em Física. Há um chavão que vez ou outra é repetido entre estudantes e físicos, que é o seguinte: *no trabalho da Física há 5% de inspiração e 95% de transpiração.* E esta transpiração consiste em procurar solucionar problemas colocados pela própria comunidade. A solução para os problemas é buscada tanto experimental como teoricamente. Estes métodos são complementares entre si, mas não são necessariamente inclusivos, isto é, há soluções que são obtidas apenas teoricamente e outras apenas através de medidas experimentais. Independente qual seja a estratégia utilizada, sempre há algum modelo teórico que subsidia o procedimento adotado.

Esta ação não se limita a uma prática simplesmente, mas a uma "praxis", a uma unidade entre teoria e prática. *Como Marx adverte em sua Tese VIII sobre Feuerbach, há a prática e a compreensão dessa prática. Sem a sua compreensão, a prática tem sua racionalidade, mas esta permanece oculta. Ou seja, sua racionalidade não transparece diretamente, e sim apenas a quem tem olhos para ela. Assim, por exemplo, a prática experimental científica só é reveladora para o homem de ciência que a pode ler conhecendo a linguagem conceitual correspondente. A ciência proporciona a chave para entender e interpretar sua própria prática experimental.*[71] Neste exemplo, eu incluiria também a "prática teórica", isto é, aquela que ao invés de se desenvolver através da utilização da mais variada gama de equipamentos, desenvolve-se

[71] Vázquez, Adolfo Sánchez, *Filosofia da Praxis,* 3ª edição, Rio de Janeiro, Paz e Terra, 1986, p. 235

com a utilização exclusiva de instrumentos matemáticos, mas que inclui o computador que executa os cálculos numéricos.

A praxis da Física tem características parecidas com a "resolução de quebra-cabeças"[72], ou seja, existe a certeza que um dado problema tem solução, é como se fosse a garantia do fabricante do quebra-cabeças e o trabalho dos estudantes e, também dos físicos, é para solucionar o problema, isto é, encaixar as peças umas nas outras e montar o quebra-cabeças. É um tipo de ação onde os princípios gerais da teoria são aplicados em situações concretas e esta aplicação implica na utilização de regras pré-estabelecidas. Aprender Física implica em aprender as regras e saber aplicá-las. Este tipo de conhecimento só se aprende quando se pratica. O processo de aprendizagem na Física acontece através da reprodução de procedimentos necessários à resolução de problemas, que já foram resolvidos pela Física, mas que têm que ser solucionados pelos estudantes individualmente.

Algumas vezes no ensino da Física, há a diferenciação entre questões e problemas. Nesta separação, as questões são entendidas como "questões teóricas" e os problemas como "problemas matemáticos", isto é, as questões são interpretadas e solucionadas apenas através de considerações teóricas e os problemas são resolvidos através do uso da matemática e se reduzem a exercícios mecânicos de aplicação de regras decoradas. Estes não são os problemas da Física, embora muitas vezes sejam seus representantes no ensino da Física, principalmente no ensino de segundo grau. A esta conotação do problema que os estudantes têm aversão, pois problemas mecânicos não se constituem em desafios. Por isso, deve haver um cuidado especial na escolha dos problemas a serem propostos aos estudantes de Física para que eles se constituam realmente em uma resolução de um quebra-cabeça. Os problemas não devem ter a função de treinar os estudantes a resolvê-los e sim de tornar possível a inserção destes estudantes no saber-fazer dos físicos, deixar que eles sintam o equivalente a

> Debulhar o trigo
> Recolher cada bago do trigo
> Forjar do trigo o milagre do pão
> E se fartar de pão.
>
> (Milton Nascimento, Chico Buarque e Jim Webb)

[72] Kuhn, Thomas S., *A Estrutura das Revoluções Científicas,* **op. cit.**

As estratégias utilizadas na Física para a resolução de seus problemas são variadas. Não há nenhum método especial para a investigação científica, algo parecido com o "método científico" almejado pelos indutivistas e criticado, cada um da sua maneira, por Popper, Lakatos, Kuhn, Feyerabend e outros. Os indutivistas foram criticados porque acreditavam que através da indução seria possível justificar a objetividade da ciência. Entretanto, se a concepção indutivista não se sustenta na ciência, a indução, pelo contrário, é um processo muito importante para o desenvolvimento tanto do pensamento científico como do pensamento humano em geral. No pensamento humano, a indução tem um comportamento diferente daquele concebido na abordagem indutivista, que considerava que a observação de um número grande de fenômenos possibilita uma percepção objetiva de regularidades na natureza, pois, para nós, seres humanos, bastam duas ou três recorrências para formularmos uma lei geral. É assim que construímos nossos conceitos de classe como, por exemplo, não precisamos conhecer muitos tipos de cadeira para identificarmos qualquer cadeira, por mais diferente que seja seu *design.*

Na atividade dos físicos há diferentes formas de raciocínios. São feitas induções, trabalha-se com deduções lógico-matemáticas e deixa-se a intuição funcionar. Estes raciocínios acontecem em processos que não têm métodos pré-estabelecidos. Há quem diga que a matemática é o sétimo sentido dos físicos. Nesta afirmação está embutido que a intuição se constitui em um dos sentidos importantes para a prática científica e que a matemática pode ser considerada o "sétimo sentido".

Peirce associa à intuição um tipo de raciocínio denominado **abdução**, que é o processo de formação de hipóteses. *É a única operação lógica que apresenta uma idéia nova, pois a indução nada faz além de determinar um valor, e a dedução meramente desenvolve as conseqüências necessárias de uma hipótese pura.*[73] Para Peirce, o processo da abdução sugere como alguma coisa deve ser. Interpretada desta forma, a abdução aparece nas descontinuidades do pensamento científico como, por exemplo, nos princípios da relatividade ou da mecânica quântica. É um tipo de raciocínio lógico que não surge no processo onde há a "resolução do quebra-cabeça" mas na crise deste processo, quando surgem anomalias, isto é, *com o reconhecimento de que, de alguma*

[73] *Semiótica,* **op. cit.** p. 220

maneira, a natureza violou as expectativas paradigmáticas que governam a ciência normal.[74]

Desta forma, a abdução é resultado de elementos que são externos aos paradigmas. Einstein quando escreve sobre o princípio de que a velocidade da luz é um absoluto (um dos princípios da teoria da relatividade restrita), relata como surgiu esta proposição e sua intuição:

> *Esse tipo de raciocínio levou-me a concluir, há muito tempo, pouco depois de 1900, ou seja, depois do trabalho pioneiro de Planck, que nem a mecânica e nem a eletrodinâmica podiam (exceto nos casos limites) reivindicar validade exata. Gradualmente perdi a esperança de descobrir as leis verdadeiras através de esforços construtivos, baseados em fatos conhecidos. Quanto mais me dedicava a esse objetivo, mais me convencia de que só a descoberta de um princípio formal universal poderia levar a resultados seguros e positivos.*[75]

Einstein escreve ainda que a idéia sobre a velocidade da luz surgiu após dez anos de estudo e que é resultado de um paradoxo que se defrontara quando tinha dezesseis anos. O surgimento de novos princípios sobre a natureza está relacionado, portanto, a crises internas e tentativas à sua solução e como já foi citado, durante uma crise há uma certa "opalescência", é difícil enxergar através dela. Além disso, é difícil também reproduzi-las, pois elas dependem do contexto cultural, social, histórico de onde e quando surgiram.

Aí está uma interação com o conhecimento físico, que deve estar explícita para estudantes e professores, na medida que as teorias da Física são formadas por um certo número de leis ou princípios cujas causas não estão contidas nelas mesmas, não são naturais, não são adquiridas através de uma lógica crítica e autocontrolada e, por isso, os estudantes não conseguem "descobri-las" sozinhos, pois tratam-se de <u>invenções</u> e não de <u>descobertas</u> sobre a natureza. Como escreveu Morin:

> *Vocês têm problemas de estratégia na pesquisa e na descoberta que apelam aos recursos organizadores da mente, e um dos problemas é que o inventor é imprevisível e relativamente autônomo em relação ao próprio meio científico. Isso foi verdade no passado e continuará sendo verdade no futuro; no dia em que a invenção for programada, não haverá mais invenção.*[76]

Além de não haver "ensino por descoberta" das leis fundamentais das teorias, não creio que haja estratégias para reproduzir o processo de invenção destas leis uma vez

---

[74] Kuhn, T.S., *A Estrutura das Revoluções Científicas***,** trad. Beatriz Vianna Boeira e Nelson Boeira, 2ª ed., São Paulo, Perspectiva, 1987, p. 78
[75] *Notas Autobiográficas,* **op. cit.** , p. 54
[76] *Ciência e Consciência,* **op. cit.** , p. 49

que ele aconteceu em um determinado momento histórico que não pode ser simplesmente reproduzido numa sala de aula. Por isso, desconfio de certas metodologias de ensino-aprendizagem que buscam eventos na história da ciência para utilizá-los como ferramentas para promover a construção dos conhecimentos científicos em sala de aula porque a impressão que me dá é que, nas estratégias elaboradas, acredita-se que seja possível fazer com que os estudantes também vivenciem as anomalias e percebam os obstáculos epistemológicos que surgiram em um contexto completamente diferente daquele que estão vivendo. É nisso que eu não acredito. Para mim, os estudos em história da ciência são extremamente importantes para se perceber a existência de crises no pensamento científico e não para reproduzi-las. A investigação histórica de algum momento de crise na ciência consiste de uma interpretação realizada depois que a "poeira baixou" e, por isso, acontece externamente ao episódio. Trata-se de um distanciamento do problema, de um momento em que "dá para ver" o que aconteceu.

Todas estas considerações sobre o processo de abdução são para indicar o quanto o ensino-aprendizagem da Física não pode ser reduzido a uma simples transmissão ou a uma construção cumulativa do conhecimento. Não há regras e métodos para ensinar e aprender Física. Há apenas processos, que não são minuciosamente programados, mas que acontecem e não dá para descrevê-los detalhadamente. Sobre processos de abdução há várias colocações que transcreverei a seguir:

- *Se perguntarem a um pesquisador por que não tenta esta ou aquela teoria estranha, ele dirá: "Não parece razoável". É curioso que raramente usemos esta palavra ali onde a lógica estrita de nosso procedimento é claramente divisada. Não dizemos que um erro matemático não é razoável. Só chamamos de razoável aquela opinião que se baseia apenas no instinto...*[77]
- *Einstein ficou com ódio, até da própria Alemanha, por causa do ginásio alemão, que era tão opressivo. Fez todas as coisas dele sozinho, não foi bom aluno, não assistia às aulas e procurava respeitar muito sua própria personalidade, suas intuições. Não era uma preocupação dele estar muito bem informado sobre as idéias, mas procurava desenvolver as que tinha, e se fossem as mesmas, ótimo, não tinha importância.*[78]
- *Eu não me guio pelo raciocínio. O raciocínio é importante para provar as coisas, mas é a intuição que mostra a solução dos problemas.*[79]

---

[77] Peirce. C. S. *Semiótica,* **op. cit.**, p. 221
[78] Ginsburg, G.K. e Goldfarb, J.L., *Mário Schemberg: Entre-Vistas,* São Paulo, Perspectiva e IFUSP, 1984, p. 149
[79] *Mário Schemberg: Entre-Vistas*, **op. cit.**, p. 160

Estas citações servem como referências de como podem ser as interações entre estudantes e professores com o conhecimento físico. São interações que não são racionalizáveis embora tenham uma certa racionalidade.

A síntese desta seção vai à direção de que no ensino-aprendizagem da Física deve ser considerada toda a complexidade deste conhecimento e que a concepção de que a ciência pode ser organizada, racionalizada, neutra, absoluta não é mais predominante no conhecimento da Física. Levando isto em consideração, a interação com o conhecimento físico deveria acontecer a partir de problematizações das concepções que os estudantes e professores têm sobre os conceitos que são estudados. A problematização pode efetivamente acontecer através de dicotomias que se opõem e se complementam em uma relação dialética que envolve o todo e a parte, o racional e o intuitivo, a aproximação e o distanciamento, a ação e a reflexão.

II - OS MODELOS DE INTERAÇÃO NA FÍSICA

Um modelo físico é uma espécie de conhecimento que, apesar de estar dentro de uma teoria da física, não está explícito na sua estrutura conceitual. É algo que ao mesmo tempo é menor e maior que a teoria. É menor porque é constituído por uma parte dos elementos que compõem a estrutura conceitual da teoria e é maior porque seus elementos são articulados e interpretados de tal forma que adquire um significado que não está em nenhuma parte da estrutura da teoria.

Kneller[80] distingue os modelos em três tipos: representacionais, teóricos e imaginários e resume-os como:

> *"O primeiro modelo é uma representação física de um objeto; o segundo, um conjunto de pressupostos acerca de um objeto ou domínio; e o terceiro, um conjunto de pressupostos sobre como um objeto ou domínio seria sob determinadas condições"*[81].

Sob esta distinção, o tipo de modelo que tem sido mencionado neste trabalho é o modelo teórico, o segundo tipo apresentado por Kneller. O que se pretende é apresentar imagens de natureza associadas às interações físicas. São alguns exemplos de modelos teóricos:

> *Um **modelo teórico** é um conjunto de pressupostos sobre um objeto ou um sistema. (...) São exemplos o modelo de bola de bilhar (partícula esférica) de um gás (proposto originalmente pelo físico escocês John James Waterston, um exímio jogador de bilhar!), o modelo corpuscular da luz (segundo o qual a luz consiste em partículas em movimento) e o modelo helicoidal da molécula de DNA de Watson-Crick. Um modelo teórico pode expressar-se na forma de equações matemáticas, mas deve ser distinguido de quaisquer diagramas, desenhos ou construções físicas usadas para ilustrá-lo. Assim, o modelo teórico de Watson-Crick é distinto dos modelos representacionais que os dois cientistas construíram no decurso da realização do primeiro. Um modelo teórico atribui ao objeto ou sistema que descreve uma estrutura ou mecanismo interno que é responsável por certas propriedades desse objeto ou sistema. Por exemplo, o modelo corpuscular da luz atribui uma estrutura particulada à luz a fim de explicar propriedades tais como a reflexão e a refração da luz. As propriedades explicadas pelo modelo podem ser macroscópicas, como no caso do modelo do gás, ou microscópicas, como no caso do modelo atômico de Bohr. O mecanismo ou estrutura que o modelo propõe também pode ser microscópico, como nos modelos atômico ou do gás, ou macroscópico, como nos modelos astronômicos da origem do universo. Os modelos teóricos são o tipo mais importante de modelo usado em Ciência.*[82]

---

[80]no livro *A Ciência como Atividade Humana*, G. F. Kneller apresenta uma classificação dos modelos proposta por Peter Achinstein, *Concepts of Science* nos cap. 7 e 8

[81]Kneller G. F. *A Ciência como Atividade Humana* Zahar/Edusp, RJ/SP, 1980, pág. 153.

[82]*A Ciência como Atividade Humana*, **op. cit.,** p. 139-140

O modelo caracteriza-se como um conhecimento que estabelece uma relação entre a teoria física e o mundo formado por coisas. O modelo é um elemento híbrido, pois refere-se a um fenômeno natural que é interpretado segundo uma determinada visão de mundo que está incorporada na teoria. Os exemplos que Kneller apresentou refletem exatamente esta propriedade. É através dos modelos que os cientistas interpretam os fenômenos. Para Harré *"a atividade fundamental da ciência é a busca e elaboração de modelos"*[83] e cita alguns exemplos que caracterizam esta atividade:

> *"Os químicos descobrem reações e, ao descreverem a interação e a permutação de íons, explicam-nas. Os geneticistas descobrem padrões não randômicos na distribuição de características de animais e plantas de geração para geração (por exemplo, os padrões descritos nas Leis de Mendel) e explicam a existência e persistência desses padrões pelos mecanismos de transferência, dominância e recessividade de genes, etc. A evolução é explicada pela mutação randômica e seleção natural; a difração pela interferência entre ondas; a aurora pelos mecanismos de formação iônica nas regiões elevadas e rarefeitas da atmosfera, pelos elétrons provenientes do Sol que são atraídos para os pólos pelo campo magnético da Terra etc."*[84]

Os modelos são construídos conforme a visão de mundo da teoria correspondente. Um modelo é uma forma de olhar o mundo com os óculos da teoria. Independentemente de haver teorias explícitas ou não, teorizar é natural do ser humano. Isto é, os nossos conceitos são construções teóricas que articulados formam nossos modelos sobre a natureza em geral.

Os modelos que estão apresentados neste capítulo são reconstruções dos modelos de interação propostos pelas várias teorias da física. São resultados de processos de investigação formal (busca de solução através do instrumental matemático) e, também, da transcendência deste formalismo através da interpretação dos resultados matemáticos *(uma forma de encher o formalismo de significado)*[85]. Esta forma de exposição é fruto de uma opção: de ir além do formalismo no ensino da física, de estabelecer uma relação rica entre o mundo dos símbolos e o mundo formado por objetos. Ao fazer reflexões sobre a importância da transcendência do formalismo, Robilotta aponta dois caminhos para ensinar física: um em uma forma mais precisa, restrito às possibilidades oferecidas apenas pelo instrumental matemático e outro na forma mais rica

---

[83]Harré, R. M. *The Principles of Scientific Thinking,* Macmillan, Londres, 1970. cap. 2. Citado em *A Ciência como Atividade Humana*, **op. cit.**

[84]Harré, R. M. e Secord, P. F. *The Explanation of Social Behavior*, Blackwell, Oxford, 1972. pág. 70. *A Ciência como Atividade Humana*, **op. cit.**

[85] Robilotta, M. R. *Construção e Realidade no Ensino de Física, São Paulo,* IFUSP, 1985. P. II-14.

em significado, que envolve interpretações dos resultados matemáticos. Sobre este segundo caminho, ele escreve:

> *No segundo caminho, não se faz esforço para tolher a subjetividade humana, cabendo à matemática o papel de instrumento fundamental mas não o de fim último do conhecimento. Neste caso, a matemática é vista como a mão da física, com a qual ela toca a natureza. Sobre o uso dos dedos dessa mão, cabe o que foi dito num provérbio chinês: "o dedo serve para apontar a lua, o sábio olha para a lua, o ignorante para o dedo".*[86]

Os modelos teóricos que são apresentados a seguir foram construídos a partir da investigação formal de cada modelo nas várias teorias da física. Isto é, para cada exposição existe uma solução matemática correspondente que não é apresentada em todo o seu detalhe porque o objetivo deste trabalho é *olhar para a Lua e não para o dedo.* A apresentação integral da solução matemática seria necessária caso algum dos modelos fosse original para a Física. Como se tratam de modelos que podem ser ensinados no curso de graduação, com certeza a solução formal de cada um deles já está publicada em algum livro-texto. Entretanto, o mesmo não se pode afirmar quanto à interpretação do formalismo uma vez que muitos livros restringem-se exclusivamente à apresentação dos aspectos matemáticos.

Não há alguma seqüência predeterminada para a apresentação dos modelos de interação, pois não há qualquer conexão entre eles uma vez que são conceitualmente descontínuos. Tradicionalmente, no curso de Física as teorias são estudadas em ordem cronológica e a razão disto é puramente tradicional. Nada impede que as teorias contemporâneas sejam as primeiras a serem exploradas. Há quem argumente que os conceitos clássicos estão mais próximos do senso comum e, por isso, podem servir como referências iniciais no ensino-aprendizagem da Física. Ao invés de estarem mais próximos do senso comum, eu diria que os conceitos clássicos foram estabelecidos há mais tempo na Física e por isso dão-nos a impressão de que são mais naturais. A visão de mundo clássica é tão artificial quanto as outras concepções de natureza que foram construídas mais recentemente. A diferença que há entre elas é que estamos um pouco mais acostumados com o pensamento clássico do que com o contemporâneo. Além disso, poderia se pensar em uma seqüência de apresentação, se a Física fosse um conjunto de conhecimento cumulativo, como uma construção que tivesse sido construída com *tijolo por tijolo num desenho mágico* e por causa disto sua aprendizagem só seria possível de ser realizada a partir do alicerce. Mas isto também não se sustenta na evo-

lução do conhecimento físico. Segundo Kuhn (1987) a ciência se desenvolve através de estruturações e reestruturações de paradigmas. Uma reestruturação pressupõe uma nova ordem que se estabelece a partir de uma ruptura com a ordem anterior e, por isso, não há qualquer relação interna às teorias que possa determinar a existência de alguma seqüência de apresentação.

Para seguir a tradição, os modelos são apresentados na ordem cronológica em que as teorias correspondentes foram construídas, ou seja:

1. Mecânica clássica;
2. Teoria da relatividade;
3. Mecânica quântica;
4. Teoria quântica de campos.

A seqüência de apresentação é relativa às teorias e não às interações fundamentais, pois os modelos são característicos das teorias. Isto é, a concepção de natureza é determinada pela teoria que contém a sua compreensão particular de interação.

II-1. MODELOS CLÁSSICOS PARA A INTERAÇÃO

A Mecânica Clássica interpreta que a interação acontece entre partículas. Esta interação manifesta-se através de uma força que atua sobre cada partícula ou através da energia do sistema constituído pelas partículas. Os mediadores desta interação podem ser:

- Forças de ação à distância;
- Campos;
- Potenciais.

II-1.1. Interação através de forças de ação a distância

Duas partículas separadas por uma certa distância interagem entre si através da ação de forças que atuam em cada uma das partículas. Estas forças têm o mesmo módulo, a mesma direção e sentidos contrários.

Quando estas partículas são massas, a força que atua nelas é a força gravitacional; quando são cargas elétricas é a força elétrica e quando são cargas elétricas em movimento é a força magnética. Em uma mesma partícula pode atuar simultaneamente estas três forças, cuja soma vetorial constitui-se na força resultante que atua sobre a partícula. Se a força resultante não for nula, a partícula será acelerada, isto é, sua velocidade variará no tempo.

---

[86] *Construção & Realidade no Ensino de Física,* **op. cit.,** p. II-15.

Esta concepção de interação é descrita com as seguintes frases:

- *Massa atrai massa.*
- *Cargas de mesmo sinal se repelem e de sinais contrários se atraem.*
- *Correntes elétricas*[87] *de mesmo sentido se atraem e de sentidos contrários se repelem.*

Estas frases expressam que a interação acontece diretamente entre as partículas, que não há intermediários. Por isso, a interação acontece à distância. Um exemplo para este modelo de interação é a lei da gravitação universal expressa por:

> *Dois corpos se atraem na razão direta de suas massas e na razão inversa do quadrado da distância entre eles.*

E outros exemplos análogos são: a lei de Coulomb para a interação entre cargas elétricas e a lei de Biot-Savart para a interação entre elementos de corrente elétrica. Além de permitirem a interpretação da interação através de forças de ação à distância, estas três leis têm algumas características em comum tais como: dependência com o inverso da distância entre as partículas interagentes e a relação direta com o produto das massas, das cargas ou das intensidades de corrente.

A lei da gravitação universal vale tanto para pequenos pedaços de matéria como para grandes aglomerados. A interação entre nós, seres humanos, com o planeta Terra é a responsável por ficarmos presos na superfície do planeta. Parte desta interação é a responsável por manter os corpos da superfície da Terra em movimento de rotação juntamente com o planeta. A intensidade da força necessária para manter o movimento circular depende da latitude do lugar que cada corpo está na Terra, pois a velocidade linear devida à rotação da Terra é máxima no equador e diminui até que se reduz a zero nos pólos.

A intensidade da força gravitacional é bem maior que a necessária para manter os objetos da superfície da Terra em movimento de rotação, ou seja, uma parte da força gravitacional sobre os objetos terrestres é utilizada como força centrípeta que mantém o movimento circular e o restante da força comprime a superfície da Terra. A esta compressão existe uma reação da superfície, cuja sensação é o "peso do nosso corpo", que é devida a interações eletromagnéticas, principalmente à interação descrita pela lei de Coulomb. Todas as nossas sensações são devidas às interações eletromagnéticas. Aquilo que a balança mede é denominado por "peso aparente" e é relativo à inte-

[87] Correntes elétricas são relativas a cargas em movimento.

ração eletromagnética. Nosso peso aparente depende do lugar da Terra em que estamos, mas a variação da sua intensidade é de menos de quatro partes em mil entre o equador e os pólos. Por ser tão pequena, esta diferença pode não ser percebida pelas pessoas ao se deslocarem entre latitudes diferentes.

As forças gravitacional e eletrostática (dada pela lei de Coulomb) são forças centrais. A palavra *central* está relacionada à existência de um centro de forças. O estudo das forças centrais é importante no ensino de Física e os resultados que se obtém a partir deles são muito interessantes. Os problemas de dois corpos que interagem através de forças centrais são reduzidos à forma de problemas de um corpo cuja solução depende apenas da coordenada relativa entre as duas partículas. A solução geral da equação de movimento é a equação da trajetória de uma partícula que se movimenta em relação à outra. A forma da trajetória depende da força de interação e da energia do sistema.

Se a força de interação for atrativa (que é o caso da força gravitacional e da força eletrostática entre cargas de sinais opostos), a órbita é uma elipse, se a energia total for negativa; é uma parábola, se a energia total for igual a zero e é uma hipérbole, se a energia total for positiva. Quando a força de interação é repulsiva (força eletrostática entre cargas de mesmo sinal), a equação de movimento só tem solução para energia positiva e a trajetória é sempre hiperbólica. A elipse é uma órbita fechada enquanto que a parábola e a hipérbole são órbitas abertas. Isto significa que em interações com força atrativa e energia total negativa, a partícula não pode escapar mesmo para uma distância infinita e em interações com força repulsiva não há captura, não é possível prender a partícula em uma órbita. Nestas interações há apenas espalhamento.

O espalhamento acontece quando partículas com energia total positiva interagem com um alvo. Independentemente se a força for atrativa ou repulsiva, a trajetória da partícula espalhada é hiperbólica. Entretanto, se a força for atrativa e, durante a interação, a partícula perder energia o suficiente para que sua energia total fique negativa, a sua órbita hiperbólica se transformará em elíptica, ou seja, a partícula será capturada. Em princípio, um átomo de hidrogênio pode ser formado a partir da perda de energia de um elétron que é espalhado por um próton e, também, a Terra pode ganhar satélites naturais, que venham de fora e, por algum motivo, percam energia e sejam capturados. Se isto não acontece normalmente é porque as condições para espalhamento com suficiente perda de energia não são muito favoráveis.

Nas disciplinas referentes à Mecânica Clássica do curso de graduação são investigadas as mais variadas situações que envolvem forças, desde as leis fundamentais até as soluções de casos específicos relativos às forças gravitacional e eletromagnética. Nestes estudos, as forças são dados iniciais e são procuradas as soluções para os movimentos correspondentes. Embora existam reflexões sobre a forma da interação, a ênfase nas análises é deslocada para as conseqüências da interação, ou seja, para o movimento das partículas interagentes. A preocupação central do curso de mecânica é resolver as equações de movimento, é descrever as trajetórias das partículas que interagem. Embora a descrição do movimento seja extremamente necessária, ela pode não ser suficiente à compreensão do processo de interação. A idéia de força de ação à distância pode ser muito estranha. É razoável imaginar que exista algo que seja mediador da interação, que uma partícula não sinta a outra à distância, que a interação é devida a alguma "coisa" que existe no ponto em que a partícula está. A estas idéias está associado o conceito de campo, concebido como o mediador da interação.

II-1.2. Interação mediada por campo

O conceito de campo tem um papel muito importante na Física. Ele é considerado o responsável pelas interações que ocorrem na natureza. Ao invés de se pensar que duas partículas interagem entre si sem que haja alguma coisa que seja mediadora desta interação, na concepção contemporânea de interação o campo está sempre presente. Nesta concepção, uma partícula interage, em algum ponto do espaço, com outra partícula através da mediação do campo criado pela outra partícula. O campo é, portanto, mediador da interação entre partículas. Estas, por sua vez, são as fontes dos campos, o que evidencia que existe uma conexão profunda entre as partículas e os campos.

A Mecânica Clássica interpreta apenas as interações gravitacional e eletromagnética e utiliza os conceitos de campo gravitacional, campo elétrico e campo magnético. Estes campos são criados, respectivamente, pela massa, pela carga elétrica e pela carga elétrica em movimento. O campo elétrico também pode ser gerado a partir da variação temporal do campo magnético (indução eletromagnética) e o campo magnético pode ser induzido a partir de campos elétricos que variam no tempo. Admitida a concepção de campo, não é possível imaginar uma partícula sem campo como no caso das interações através de força de ação à distância.

Na Mecânica Clássica o campo é apenas um meio de descrever o fenômeno físico – a interação das partículas.[88] Com esta afirmação Landau inicia as considerações que o levam a afirmar que o campo se torna uma realidade física com o advento da teoria da relatividade. Antes da relatividade o conceito de campo era utilizado na Mecânica Clássica apenas para descrever a interação, como algo necessário para justificar que a interação só pode ocorrer entre pontos vizinhos do espaço e, para isso, deve haver um campo que seja mediador. Se na mecânica clássica o campo pode ser um conceito descartável, isto não acontece no Eletromagnetismo Clássico, na teoria que interpreta a interação eletromagnética, pois nesta teoria o campo já se apresenta como uma entidade imprescindível à interpretação dos fenômenos eletromagnéticos, mesmo antes da relatividade. Sob um olhar contemporâneo, na Mecânica Clássica o campo é tão real quanto a cadeira que sentamos.

O que caracteriza cada campo é a interação em que ele participa. A Mecânica Clássica interpreta duas interações: a gravitacional e a eletromagnética. A interação gravitacional acontece entre massas e é mediada pelo campo gravitacional e a interação eletromagnética é devida à interação entre cargas elétricas, mediada pelo campo eletromagnético. A interação eletromagnética é dividida em duas, também conforme as características da partícula que interage. A interação elétrica acontece entre a cargas elétricas e é mediada pelo campo elétrico. A interação magnética existe entre cargas elétricas em movimento e é mediada pelo campo magnético. Há, portanto, três interações independentes na Mecânica Clássica. A unificação da eletricidade com o magnetismo é mais explícita quando se considera a origem dos campos elétrico e magnético e não ao nível das interações. Embora haja três campos, há apenas duas imagens de natureza associadas a eles. Uma delas é relativa aos campos gravitacional e eletrostático e a outra é referente aos campos magnético e elétrico induzido.

II-1.2.1. Imagens de natureza dos campos gravitacional e eletrostático

O campo gravitacional é criado pela massa e o campo eletrostático é criado pela carga elétrica. A imagem de natureza associada é que tanto a massa como a carga tem uma espécie de *aura*[89] que as envolve e que ocupa todo o espaço. O Sol, por exemplo, é uma estrela constituída por uma massa, que está concentrada em uma certa região do espaço dentro do sistema solar, e por um campo que o envolve e que preen-

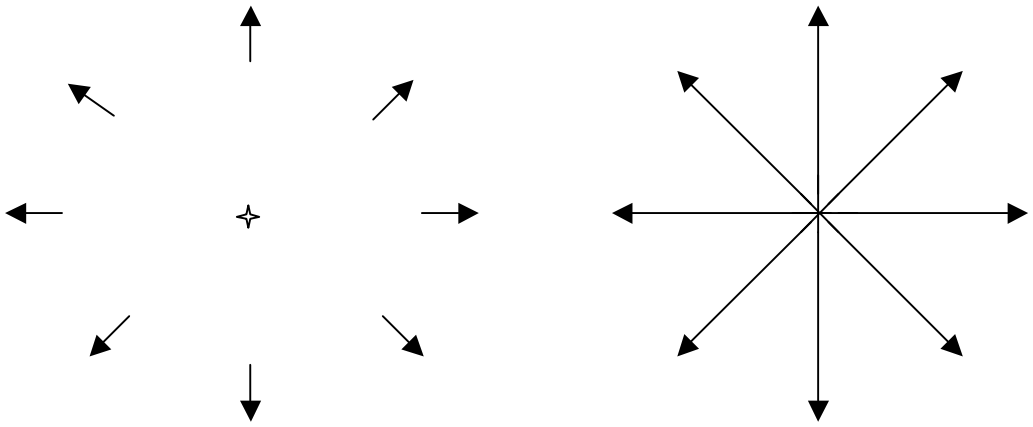
[88] Landau, L e Lifshitz, E. *Teoria do Campo,* trad. José Lourenço Cintra e José Nicodemos T. Rabelo, Moscou, MIR, 1980, p.67
[89] conforme Robilotta, M.R. *Construção e Realidade no Ensino de Física,* **op. cit.,** p.II-6

che todo o universo. A intensidade deste campo varia com a distância ao Sol. O campo é tanto mais intenso, quanto mais próximo estiver o Sol. O Sol é o ponto de descontinuidade do seu campo gravitacional. Os planetas estão imersos no campo gravitacional do Sol e a massa de cada um interage com o Sol, mediado por este campo. A conseqüência desta interação manifesta-se através do movimento dos planetas em torno do Sol. A Lua também interage com o Sol, entretanto, ela não está presa exclusivamente a ele, como os planetas. A Lua interage com a Terra, sendo o campo gravitacional terrestre o mediador e esta interação é a responsável por seu movimento de rotação em torno da Terra. A Lua, por sua vez, também tem campo gravitacional e a Terra interage com a Lua, através da mediação deste campo. Esta interação manifesta-se visivelmente no movimento das marés. O movimento das marés é devido à interação da água com a Lua, através do campo gravitacional da Lua. A Terra está interagindo com todos os corpos celestes. Como a intensidade do campo gravitacional é diretamente proporcional à massa do corpo que o cria e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre o corpo que o cria e o ponto do espaço onde o outro corpo que interage está, a Terra movimenta-se principalmente segundo a força devida ao campo gravitacional do Sol, mas sua trajetória sofre algumas perturbações devido aos outros campos gravitacionais que existem, criados pelos outros planetas do sistema solar.

O campo é uma espécie de aura que envolve a partícula. Esta aura tem simetria esférica, isto é, ela é simétrica por rotações em torno de um ponto onde se encontra a massa ou a carga. A força gravitacional é atrativa e isto corresponde a uma imagem de que o "campo gravitacional converge para a massa". Já a força eletrostática pode ser atrativa ou repulsiva, pois há dois tipos de carga elétrica e, conseqüentemente, há dois tipos de campos elétricos. O campo da carga positiva é divergente e o da carga negativa é convergente. O campo converge para ou diverge de um ponto. Este ponto é o ponto de descontinuidade do campo, é o ponto onde o campo é infinito. Neste ponto está a massa ou a carga. Os termos *converge* ou *diverge* podem induzir a uma interpretação equivocada sobre o campo, de que há algum movimento na direção da massa ou da carga, de que o campo é absorvido ou emitido. Esta interpretação não tem fundamento na Mecânica Clássica, pois o campo é eterno. Ele está no espaço desde que a massa ou a carga surgiram. *De acordo com esse modo de ver as coisas, o campo é*

uma propriedade da partícula: ela sempre traz o campo consigo, sendo impossível separar um do outro.[90]

Este campo pode ser descrito matematicamente de duas formas: por uma função vetorial denominada por **campo** e por uma função escalar denominada por **potencial**. O campo vetorial indica a intensidade, a direção e o sentido do campo em cada ponto do espaço. A força sobre uma partícula em algum ponto no campo é calculada através do produto da massa ou da carga pelo o campo correspondente. A força gravitacional ou eletrostática tem a mesma direção do campo. O sentido da força gravitacional coincide com o sentido do campo gravitacional e o da força eletrostática depende do sinal da carga elétrica que interage com o campo. Se a carga for positiva, força e campo têm o mesmo sentido e se a carga for negativa, eles têm sentidos opostos. O campo vetorial é tradicionalmente representado por meio de linhas de campo. Estas linhas são paralelas ao vetor campo e são orientadas conforme o sentido do campo. A figura 4 mostra as duas formas de representação do campo vetorial de uma carga positiva.



Vetor campo elétrico **Linhas de campo elétrico**

Fig. 4: representações do campo eletrostático

As limitações da figuras não permitem representar que o campo só é nulo no infinito e, por isso, parece que as linhas de campo estão limitadas a uma região do espaço. Por outro lado, esta figura evidencia que as linhas de campo estão isotropicamente distribuídas em todas as regiões do espaço. Isto representa a simetria esférica deste campo. Outra característica importante é que as linhas de campo "nascem" na carga e só "morrem" no infinito, o que representa que as linhas de campo só são descontínuas na carga. As linhas de campo são mais concentradas quanto mais próximas estiverem da

[90] Robilotta, M.R. *Processos Mesônicos em Física Nuclear,* notas de aula da III Escola de Verão Jorge André Swieca, Petrópolis, 1987, p.3

carga. Como a intensidade do campo depende da proximidade à carga, a concentração das linhas está diretamente associada à intensidade do campo. Quanto maior for a densidade das linhas de campo, maior é a intensidade do campo.

A outra descrição matemática associada a estes campos é relativa ao **potencial**. O potencial é uma função escalar e está associado à energia potencial. A energia potencial de um sistema (de cargas ou de massas) é o trabalho total necessário para formar este sistema. O sistema pode ser, por exemplo, a Terra mais um corpo próximo à sua superfície. O potencial gravitacional, no ponto onde o corpo está, seria o trabalho por unidade de massa necessário para trazer o corpo do infinito até este ponto no campo gravitacional terrestre. O potencial é calculado em relação a um ponto de referência, ou seja, o potencial em um ponto do espaço é definido a menos de uma constante que pode ser escolhida arbitrariamente. Apenas a **diferença de potencial** entre dois pontos é que tem significado físico. Em muitos problemas um dos pontos é tomado no infinito e o potencial no infinito é definido como zero. A diferença de potencial entre dois pontos quaisquer do campo é a integral de linha do campo entre os dois pontos considerados, ao longo de algum trajeto.

Dados os campos gravitacional ou eletrostático é possível determinar o potencial correspondente. Mas também pode ser feito o contrário: obtém-se o potencial e a partir dele calcula-se o campo. Como o potencial está relacionado ao campo através de uma integral, a função inversa da integral é a derivada e, portanto, o campo, de alguma forma, é a derivada do potencial. O campo tem a direção de crescimento mais rápido da função potencial. De acordo com este modo de ver, os potenciais gravitacional e eletrostático crescem na direção radial e têm a mesma magnitude para pontos eqüidistantes da massa ou carga. Estes pontos formam superfícies eqüipotenciais que são superfícies esféricas concêntricas em cujos centros está a massa ou a carga. Na figura 5, estão representadas as superfícies eqüipotenciais e as linhas de campo elétrico de uma carga puntiforme. Em cada ponto do espaço, a linha de campo é sempre perpendicular à superfície eqüipotencial *tal como num mapa topográfico de um terreno montanhoso, a inclinação é maior nas direções perpendiculares às linhas de nível desse mapa.*[91]

[91] Purcell, E.M. *Curso de Física de Berkeley, Eletricidade e Magnetismo*, vol.2, trad. Wiktor Wajntal e outros, São Paulo, Egard Blücher, 1973.

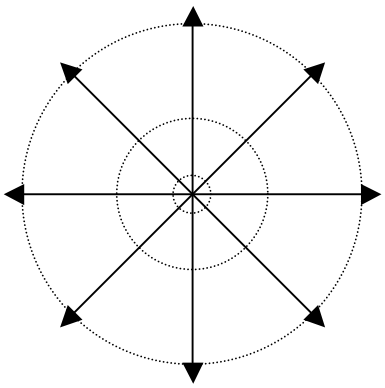


Fig. 5: representação das superfícies eqüipotenciais

A diferença de potencial só pode ser definida para campos irrotacionais como são o gravitacional e o eletrostático. Mas no eletromagnetismo clássico não existem apenas estes campos. Há, também, campos rotacionais que são os campos magnético e elétrico induzido. Estes campos, por serem rotacionais, têm imagens de natureza diferenciadas em relação aos anteriores.

II-1.2.2. Imagem de natureza dos campos magnético e elétrico induzido.

A diferença fundamental entre o campo magnético e o eletrostático ou o gravitacional é que não há uma partícula que cria este campo que tenha características da carga ou da massa, algo do tipo de uma "carga magnética" que seja a responsável pela descontinuidade do campo magnético. Não existe para a interação magnética um campo análogo ao eletrostático ou o gravitacional. Na Mecânica Clássica, a força magnética tem características diferentes das forças eletrostática e gravitacional. Estas diferenças existem tanto ao nível da interação da carga elétrica com o campo magnético, como relativas às características do campo magnético.

A força magnética existe apenas quando cargas elétricas movimentam-se em direções que não sejam paralelas ao campo magnético. Isto significa que nem sempre existe interação entre cargas elétricas em movimento e o campo magnético. A força magnética depende da carga, da sua velocidade, da intensidade do campo magnético e do ângulo entre o vetor velocidade e a direção do campo magnético. Relativamente a este ângulo, a força é máxima quando a direção da velocidade da carga é perpendicular à direção do campo e é nula para a direção paralela. A força magnética é simultaneamente perpendicular ao campo magnético e à velocidade da carga. A perpendicularidade entre a força magnética e o movimento da carga implica que esta força não realiza trabalho e, por isso, ela é conservativa. Diferente das forças eletrostática ou

gravitacional que são conservativas porque os campos correspondentes são irrotacionais, a força magnética é conservativa porque em cada ponto o produto escalar entre a força e o deslocamento da partícula é nulo e não porque o campo magnético seja irrotacional.

O campo magnético pode ser criado por cargas elétricas em movimento e/ou por variações temporais do campo elétrico. Estas são as fontes do campo magnético e a ambas está associada uma direção no espaço, isto é, as cargas elétricas movimentam-se e o campo elétrico varia segundo alguma direção. A direção do campo magnético é, em todos os pontos, perpendicular a estas direções. Se o campo magnético é criado por um fio retilíneo de corrente, ele tem simetria cilíndrica; se for criado por um anel de corrente, sua simetria é toroidal; se for gerado por um campo elétrico de direção constante e com variação temporal na intensidade e sentido, sua simetria é cilíndrica. A simetria do campo magnético é sempre relativa a um eixo e não a um ponto como são os campos gravitacional e eletrostático. O campo magnético não converge ou diverge, ele é sempre contínuo. Um exemplo de campo magnético está esboçado na figura 5. Trata-se do campo de um fio retilíneo com corrente, representado através de linhas de campo.

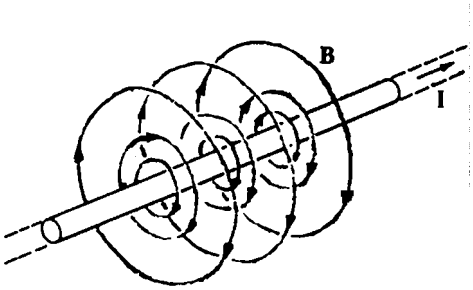


Fig.5 Linhas de campo magnético de um fio retilíneo com corrente

As linhas do campo magnético são sempre fechadas. Isto implica que pode haver algum trajeto fechado em que a integral de linha do campo seja diferente de zero, por exemplo, aquele que coincide com uma linha de campo. A integral de linha do campo magnético para trajetos fechados é diferente de zero quando a curva envolve a corrente elétrica e/ou delimita uma superfície onde há variação temporal de campo elétrico.

Analogamente ao campo magnético, o campo elétrico também pode ser gerado a partir da variação temporal do campo magnético. Este campo induzido tem as mesmas características do campo magnético, ou seja, não possui simetria esférica, suas linhas de campo são fechadas e é um campo rotacional. Além disso, é um campo de

forças não conservativas, pois diferente da força magnética que não realiza trabalho, o trabalho da força elétrica que atua sobre uma carga neste campo, em um trajeto fechado, é diferente de zero.

Como o campo magnético é rotacional, não é possível associar a ele um potencial escalar, como é feito para os campos eletrostático e gravitacional. Entretanto, o campo magnético tem outra propriedade que, devido a ela, pode associar a ele uma outra função derivada, diferente daquela associada aos campos irrotacionais. O campo magnético não é descontínuo, suas linhas de campo são sempre fechadas. Isto implica que o fluxo deste campo através de qualquer superfície fechada é sempre nulo, pois a quantidade de linhas de campo que entram nesta superfície é igual à quantidade de linhas que saem. Para funções que têm esta característica associa-se uma espécie de derivada vetorial denominada de rotacional de uma função vetorial. O campo magnético, portanto, é representado como o rotacional de uma função que, por analogia, é denominada por **potencial vetor**. Da mesma forma que o potencial escalar, o potencial vetor também é uma função arbitrária, ou seja, não existe uma única função que pode ser definida como potencial vetor para cada campo magnético em particular.

O potencial vetor está relacionado ao campo magnético através do operador rotacional. O rotacional de uma função vetorial é um vetor que é perpendicular ao plano onde a integral de linha sob um circuito fechado (circuitação) é máxima. A circuitação é máxima quando a trajetória da integral é paralela à função vetorial e, portanto, o campo magnético é sempre perpendicular ao potencial vetor.

O campo elétrico induzido é gerado através da variação temporal do campo magnético e, por isso, este campo também pode ser representado por meio do potencial vetor. O campo elétrico está relacionado à variação temporal do potencial vetor.

Campos vetoriais e potenciais são duas formas de representar os campos na mecânica clássica. A opção por alguma das representações depende do contexto do problema. Muitas vezes, a opção é definida através da "lei do mínimo esforço", ou seja, algumas vezes é mais fácil calcular os potenciais e outras vezes, os campos. E como estas funções estão relacionadas, uma vez que uma delas é calculada, a outra correspondente é diretamente encontrada. A diferença que existe entre a representação através de campos vetoriais e potenciais é que os primeiros são funções bem definidas, enquanto que os segundos são arbitrários. Por isso, os campos vetoriais têm mais realidade física, enquanto que os potenciais são artifícios matemáticos utilizados para

calcular os campos. Em muitas situações os potenciais são extremamente úteis, pois é a partir deles que os campos vetoriais são calculados e não diretamente.

Os campos vetoriais são utilizados para calcular a interação e representá-la através da força que atua na partícula. A equação de movimento, proposta por Newton, é expressa em função desta força. Entretanto, na Mecânica Clássica não existe apenas este formalismo para descrever o movimento. Há uma outra formulação, denominada por Mecânica Analítica, que ao invés de utilizar a força para descrever a interação, utiliza a energia do sistema de partículas interagentes. Nesta formulação, a interpretação das interações através de potenciais é fundamental, pois é através dela que pode ser calculada a energia do sistema.

Na Mecânica Clássica a interação é interpretada através de forças que atuam sobre as partículas interagentes ou através da energia do sistema formado por estas partículas. As forças podem ser obtidas diretamente, ou seja, podem depender apenas das partículas envolvidas na interação e a esta interpretação é dado o nome de interação através de forças de ação a distância.

Existe outra forma de conceber a interação que considera que a interação ocorre localmente, entre pontos vizinhos do espaço e não entre pontos que estão separados. Nesta concepção é incorporado o conceito de campo e a interação acontece entre partículas mediada pelo campo e não diretamente entre as partículas.

O campo – mediador da interação entre partículas – é uma grandeza tão real quanto a partícula. O campo está no espaço e cada partícula sente o campo que é correspondente, ou seja, a massa sente o campo gravitacional e a carga sente o campo eletromagnético.

O campo é descrito através de duas funções que estão relacionadas entre si: por campos vetoriais e por potenciais. As imagens de natureza associadas a estes dois tipos de descrição são mais bem definidas para os campos gravitacional e eletrostático, pois estes campos são criados por um elemento que é fisicamente isolado, é um ponto. Para o campo magnético a situação é bem diferente, pois a contribuição de parte de um circuito não é fisicamente identificável. Um pedaço de um fio percorrido por corrente não é um objeto independente que possa ser fisicamente isolado. Não se pode determinar o campo magnético de uma parte do circuito. Se o resto o circuito não estiver presente, não há corrente. Por isso, a imagem de natureza do campo magnético é particular para cada circuito. Ela tem algumas características gerais, mas não existe

uma imagem bem caracterizada como aquela relativa ao campo da carga ou massa puntiforme.

A Mecânica Clássica interpreta duas das interações fundamentais: a gravitacional e a eletromagnética. Na interação eletromagnética são consideradas duas interações independentes: a elétrica e a magnética. Esta distinção deixa de existir na Teoria da Relatividade e na Teoria Quântica de Campos, mas ainda permanece na Mecânica Quântica. A Mecânica Quântica adota o formalismo da Mecânica Analítica para interpretar as interações a nível microscópico.

II-2. AS CONCEPÇÕES DE INTERAÇÃO NA RELATIVIDADE.

Na Mecânica Clássica, a interação de partículas é descrita por meio de forças que são funções das coordenadas das partículas que interagem e esta interação mútua pode ser descrita através da noção de campo. Como as forças dependem, em cada instante, da posição das partículas, uma mudança de posição de qualquer uma das partículas interagentes reflete-se instantaneamente nas demais partículas. Este modo de descrição implica na instantaneidade de propagação da informação.

Na teoria da relatividade, qualquer alteração no sistema vai se refletir apenas após um certo intervalo de tempo, pois existe uma velocidade limite para a propagação da informação sobre qualquer modificação. Conseqüentemente, as forças que atuam sobre uma partícula num certo instante não são relativas às posições das outras partículas naquele mesmo instante. Qualquer modificação na velocidade de uma partícula implica numa alteração do seu campo. Esta alteração propaga-se com a velocidade limite, simetricamente em relação ao ponto em que a velocidade da partícula foi modificada. *A respeito da interação que se transmite de uma partícula à outra, freqüentemente fala-se de um "sinal" emitido pela primeira partícula e que "dá a conhecer" à segunda sobre a alteração que sofreu a primeira. Da velocidade de propagação das interações diz-se então "velocidade do sinal".*[92] Na Relatividade, esta velocidade de propagação das interações é igual em todos os referenciais inerciais. Esta velocidade é uma constante universal e corresponde à velocidade de propagação da luz no vácuo. Por isso, ela é chamada de *velocidade da luz.*

A velocidade finita de propagação das interações é decorrente do princípio da relatividade de Einstein segundo o qual todos os referenciais inerciais são equivalen-

[92] *Teoria do Campo,* ***op. cit.,*** p. 14

tes. O pressuposto que a velocidade da luz é a mesma em todos os referenciais inerciais está em contradição com a noção de tempo absoluto da mecânica clássica, pois baseada nesta noção existe a lei da composição das velocidades que implica que todas as velocidades, inclusive a da luz, dependem de algum referencial inercial.

O princípio da relatividade conduz ao resultado que o tempo não é absoluto, que em diferentes referenciais o tempo flui de maneira diferente. A Relatividade reconstrói a concepção de espaço e tempo da Mecânica Clássica. Na Mecânica Clássica o espaço é euclidiano e o tempo é absoluto. Se o tempo é o mesmo para todos os referenciais, dois fenômenos quaisquer que ocorrem simultaneamente em um referencial, são simultâneos em todos os outros referenciais. Na Relatividade, a distância entre dois pontos, o intervalo de tempo e a simultaneidade dependem do referencial. Num sistema de referência em movimento, o espaço se contrai, o tempo dilata e a simultaneidade é relativa. Por exemplo, se em um laboratório existe uma partícula em movimento uniforme, no referencial da partícula o espaço está contraído e os relógios estão atrasados e não-sincronizados. Por outro lado, o espaço do laboratório também está contraído e seus relógios não estão sincronizados e, além disso, estão atrasados relativamente ao referencial de repouso da partícula. Este é o significado do princípio da relatividade: todos os referenciais inerciais são equivalentes. Não é possível detectar movimento absoluto.

O universo físico pode ser imaginado como um palco em que existem atores contracenando[93]. O palco seria o espaço e o tempo. Os atores seriam as coisas em interação (partículas e campos). As leis que relacionam os atores com o palco são determinadas pela dinâmica do movimento. O palco da Mecânica Clássica é formado pelo espaço plano tridimensional e pelo tempo absoluto. O palco da Relatividade é o espaço-tempo quadridimensional que não é plano, pois a massa, ao invés de ser um dos atores como na Mecânica Clássica, faz parte do palco e "deforma" o espaço-tempo no mundo relativístico. Se o palco é diferente, é de se esperar que os atores também tenham comportamentos diferentes. No palco da Relatividade existem apenas dois atores: a carga elétrica e o campo eletromagnético. A dinâmica de movimento destes atores é investigada pela Teoria da Relatividade Restrita, que é restrita porque não considera os efeitos gravitacionais. A gravitação é interpretada pela Relatividade

[93] idéia proposta por M.R.Robilotta.

Geral. Nesta seção, a interação eletromagnética também está separada da gravitacional nas próximas subseções.

II-2.1. A interação eletromagnética no mundo relativístico.

Num mundo quadridimensional, as grandezas tridimensionais são projeções de objetos quadrimensionais. Na Mecânica Clássica, a interação eletromagnética acontece entre cargas mediada pelos campos elétrico e magnético. A carga é um escalar, é adimensional, não tem componentes e, por isso, ela também se constitui em um objeto no espaço quadrimensional. Já os campos elétrico e magnético não são entidades independentes, como na Mecânica Clássica. Os campos clássicos são projeções de um campo quadrimensional, o campo eletromagnético. Na Relatividade há apenas este campo cujas componentes elétrica e magnética dependem do sistema de referência em que este campo é descrito.

Num referencial em que a carga está em repouso, existe apenas a componente elétrica. Este mesmo campo, quando observado em outro referencial em que a carga movimenta-se, tem componentes elétrica e magnética. A magnitude das componentes do campo eletromagnético depende do referencial em que é observado, portanto, a componente elétrica no referencial de repouso da carga é diferente daquela observada no referencial em que a carga está em movimento. Isto não é característico apenas do campo eletromagnético, mas de todos os objetos multidimensionais, cujas projeções dependem dos eixos do sistema em que são observados. A carga elétrica, que é uma grandeza adimensional, tem a mesma magnitude em todos os referenciais. Ela é um dos invariantes do mundo relativístico. Como a velocidade da luz, a carga não varia por mudança de referencial.

Na Relatividade, a carga elétrica é a única fonte do campo eletromagnético. Nesta teoria não há o conceito de campo induzido pela variação temporal do outro, como existe na Mecânica Clássica. Este conceito não existe porque o tempo não é independente do espaço na Relatividade. Não se consideram variações temporais isoladas de variações espaciais. Enquanto que na Mecânica Clássica a indução eletromagnética é uma lei relativa a uma das fontes do campo elétrico, na Relatividade a indução eletromagnética e a lei relativa à inexistência da "carga magnética" são componentes de uma expressão que indicam que o campo eletromagnético é irrotacional no espaço quadrimensional.

Na Relatividade, a imagem de natureza relativa ao campo eletromagnético é de uma aura que envolve a carga. Esta aura tem componentes polares (relativas ao

campo elétrico clássico) e componentes axiais (relativas ao campo magnético clássico). O campo eletromagnético está no espaço e, portanto, modifica-se com ele. Isto é, o campo acompanha a contração do espaço em referenciais em movimento.

No referencial de repouso da carga, o campo eletromagnético tem apenas as componentes elétricas. Sua configuração é aquela do campo eletrostático apresentado na seção anterior. Num outro referencial, em que a carga move-se com velocidade constante, o campo tem configuração diferente. Esta diferença deve-se à contração relativística do espaço na direção da velocidade que carrega consigo as linhas de campo. Além disso, este campo tem componentes elétricas e magnéticas. No referencial em movimento o espaço está contraído na direção da velocidade. Por exemplo[94], considerando que o espaço contém, no referencial de repouso da carga, um retículo semelhante àquele existente em um papel quadriculado, no referencial em que a carga está em movimento, este retículo está contraído na direção da velocidade. As linhas de campo elétrico acompanham esta contração como mostra a figura 7.

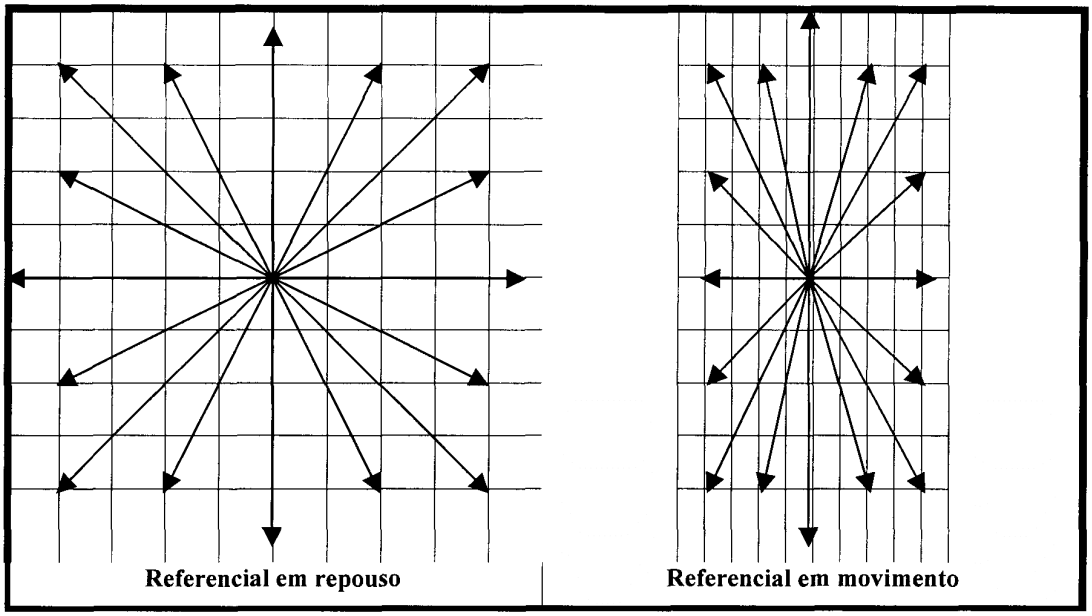


Fig. 7: Linhas de campo em dois referenciais

No referencial da carga em movimento, as linhas de campo estão mais concentradas em torno do plano que contém a carga e é perpendicular ao movimento. Isto indica que neste referencial as componentes elétricas do campo não têm simetria esférica como no referencial de repouso da carga. Neste referencial, o campo elétrico apresenta uma simetria cilíndrica relativa à direção da velocidade que corresponde a uma intensidade maior que o campo eletrostático na direção perpendicular à velocidade da

partícula e menor na direção do movimento. Além do campo elétrico, há também um campo magnético cujas linhas de campo são circunferências concêntricas em relação à direção do movimento da partícula. Na figura 8 estão representados os campos elétrico e magnético de uma carga em movimento uniforme.[95]

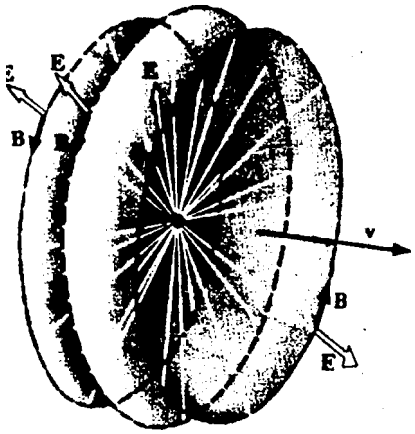


Fig. 8: campo eletromagnético de uma carga em movimento uniforme

Cada carga elétrica encontra-se dentro dos campos de todas as outras cargas. As intensidades destes campos dependem da proximidade das cargas. Os campos daquelas que estão mais longe são menos intensos que daquelas que estão mais próximas da referida carga. Cada carga interage com todas as outras cargas no ponto em que ela se encontra, com a mediação do campo resultante. Esta interação provoca uma mudança na velocidade da partícula, uma aceleração. Portanto, normalmente as cargas são aceleradas o tempo todo o que significa que não há referenciais inerciais onde a carga esteja sempre em repouso ou com uma velocidade constante. Conseqüentemente, o campo eletromagnético não pode ser descrito como nos dois casos anteriores, isto é, como um campo eletrostático ou como um campo de uma carga com velocidade constante.

O campo de uma carga acelerada pode ser inferido a partir dos campos eletrostático e de uma carga em movimento uniforme. Para fazer isto, é suficiente considerar apenas um caso simplificado onde uma partícula eletricamente carregada, que se move com velocidade constante, pára instantaneamente. Devido à velocidade limite de propagação da informação, o espaço fica dividido em duas regiões: uma onde a in-

---

[94] exemplo apresentado por Robilotta em *Processos Mesônicos em Física Nuclear,* **op.cit.**
[95] figura extraída de *Curso de Física de Berkeley, Eletricidade e Magnetismo,* **op. cif.**, *p.199*

formação formação que a partícula parou já chegou e a outra onde essa informação ainda não chegou. Estas duas regiões são delimitadas por uma superfície esférica, cujo centro é o ponto onde a partícula parou, cuja espessura depende do intervalo de tempo que durou a aceleração e cujo raio aumenta com a velocidade da luz.

No interior desta superfície o campo é o eletrostático, pois esta região já foi atingida pela informação de que a carga parou e fora da superfície o campo é aquele da carga em movimento uniforme, pois a informação ainda não chegou lá. Nesta região, o campo comporta-se como se a carga ainda estivesse em movimento. As linhas de campo apontam para o ponto que a carga deveria estar, caso ela não tivesse parado. Assim quando uma carga é acelerada, o campo dela permanece como era antes da aceleração até que chegue a informação sobre a modificação de sua velocidade.

Nas duas regiões o campo tem configuração diferente. No interior existe um campo eletrostático de simetria esférica e no exterior um campo eletromagnético de simetria cilíndrica. Na separação destas duas regiões há a transição para estes dois campos. As linhas de campo só são descontínuas na carga elétrica, portanto, as linhas do campo desta carga devem "nascer" nela e perder-se no infinito. Dentro da superfície de transição elas entortam-se e têm componentes ortogonais à direção radial. O raio desta superfície cresce com a velocidade da luz, portanto com a expansão da região de transição ocorre a propagação radial de um campo elétrico transversal a esta direção. Além deste campo, há também um campo magnético – perpendicular ao elétrico – que tem intensidade nula na superfície interna da região de transição e intensidade máxima na superfície externa. Quanto menor for o intervalo de tempo em que ocorre a aceleração, menor é a espessura da região de transição e o campo elétrico no interior desta região é praticamente ortogonal à direção radial. Associado a este campo há um campo magnético transversal. Existe, portanto, um campo eletromagnético propagando-se com a velocidade da luz, ou seja, um campo característico das radiações eletromagnéticas. Interpretada desta forma, a radiação corresponde a deformações nas linhas de campo causadas pela variação da velocidade de uma carga elétrica.
Na interpretação relativística, cada carga tem em torno de si um campo eletromagnético que se estende até o infinito, cujas linhas têm componentes radiais e ortogonais. Nestas linhas está o registro de tudo o que aconteceu com a carga. A cada aceleração há uma componente transversal correspondente que depende do tempo em que se propaga. A cada intervalo de velocidade constante há uma componente radial que depende da distância à carga, da velocidade que ela tinha no instante retardado, cuja dife-

rença com o atual é dado pela razão entre a distância e a velocidade da luz, que não depende do tempo e não se propaga. Na figura 9, há um exemplo bastante simplificado de um campo eletromagnético clássico. Estão representadas as linhas do campo elétrico de uma partícula, num determinado intervalo de tempo, cuja velocidade aumenta em saltos de 0,2c (6×10^7 m/s) por segundo.

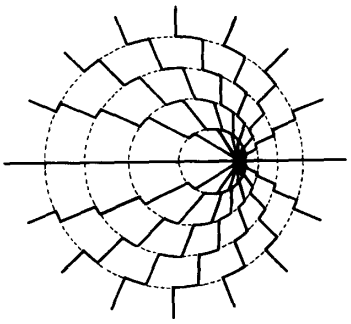


Fig. 9: campo de um carga acelerada em saltos de 0,2c/s

Na figura 10, está representado o campo elétrico de uma partícula em movimento uniformemente acelerado[96]. As linhas de campo elétrico curvas são resultantes de infinitas combinações de componentes radiais e componentes transversais radiantes.

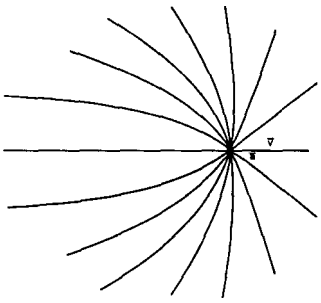


Fig. 10: campo de uma carga uniformemente acelerada

As componentes transversais do campo são as responsáveis pela emissão da radiação como, por exemplo, os elétrons livres no interior de um condutor descrevem um movimento aleatório devido às interações destes com a rede cristalina constituída por íons. Quando não há corrente elétrica, este movimento existe e o condutor encon-

[96] figuras extraídas de Ota, M.I.N. *Um texto de eletromagnetismo e relatividade baseado no conhecimento estrutural,* dissertação de mestrado, IFUSP/FEUSP, 1985.

tra-se à temperatura ambiente, ou seja, há radiação correspondente à temperatura ambiente. Quando há corrente no circuito elétrico, a velocidade dos elétrons livres aumenta devido à interação com um campo de uma fonte externa e as interações dos elétrons com os íons da rede cristalina resultam em acelerações que podem ser detectadas por meio da elevação da temperatura no circuito como um todo. Outro exemplo é o tubo de raios-X, onde elétrons com alta velocidade colidem com um alvo e emitem radiação.

Nossas sensações também são resultantes de interações eletromagnéticas. Por exemplo, o tato é devido a interações eletrostáticas dos elétrons de nossa mão com os elétrons da superfície do objeto que tocamos. A visão é devido às interações dos elétrons de nossa retina com as ondas de luz que são campos eletromagnéticos transversais.

II-2.1.l. Os mediadores da interação eletromagnética na relatividade.

> *Na mecânica clássica o campo é apenas um meio de descrever o fenômeno físico – a interação das partículas. Na teoria da relatividade, ao contrário, graças ao fato da velocidade de propagação das interações ser finita, a situação muda radicalmente. As forças que em um dado instante agem sobre uma partícula, não são determinadas pela sua posição naquele instante. A mudança de posição de uma das partículas reflete nas demais partículas somente depois de transcorrer um intervalo de tempo. Isso significa que o próprio campo se torna uma realidade física. Não podemos falar de uma interação direta das partículas que se encontram a certa distância umas das outras.*[97]

Nesta citação, Landau destaca a importância do conceito de campo na Relatividade e a impossibilidade de interpretar a interação através de forças de ação à distância. Por isso, na Relatividade a interação é sempre mediada por campo. A força eletromagnética continua existindo na concepção de que a interação ocorre entre cargas elétricas, mediada pelo campo eletromagnético. Na Relatividade, a força eletromagnética clássica é componente de um quadrivetor. Pelo mesmo motivo que o espaço e o tempo são uma única entidade, o momento e a energia também estão integrados. Espaço-tempo e momento-energia são dois conjuntos de quatro componentes cada um, denominados por quadrivetor. Na Relatividade todos os objetos são quadridimensionais. Por esta razão, a força sobre uma partícula (que é a variação do momento em função do tempo) está integrada ao trabalho (que é a variação da energia cinética em função do tempo). Em três dimensões, o trabalho é um escalar e a força é um vetor

[97] Teoria do Campo, op. cit., p. 67

que tem três componentes. Estas quatro componentes formam o quadrivetor força eletromagnética.

O campo eletromagnético também é descrito através de duas funções análogas ao campo vetorial e ao potencial clássicos. O campo eletromagnético é representado por um quadritensor de segunda ordem[98] antissimétrico. As componentes deste quadritensor são as componentes tridimensionais dos campos elétrico e magnético. O campo eletromagnético é representado também através do quadripotencial, denominado por *campo* A^{μ}*,* que é um quadrivetor constituído pelo potencial escalar mais as três componentes do potencial vetor. Conforme o princípio da relatividade, as leis da Física devem ser válidas em todos os referenciais inerciais. Expressos na forma tensorial, os elementos da teoria eletromagnética são covariantes por mudança de referencial, isto é, suas componentes variam de tal forma que, independente do referencial, o objeto que está sendo descrito é o mesmo.

A formulação quadridimensional da teoria eletromagnética é contínua em relação à formulação tridimensional, isto é, os elementos tridimensionais são componentes dos quadridimensionais. Se do ponto de vista formal existe continuidade, o mesmo não acontece do ponto de vista conceitual. Conceitualmente não há continuidade entre as formulações clássica e relativística, pois referem-se a interpretações da mesma realidade em mundos diferentes. O mundo clássico é completamente diferente do mundo relativístico e, por isso, os objetos dos dois mundos são diferentes. Como escreveu Kuhn, *aquilo que antes da revolução aparece como pato no mundo do cientista transforma-se posteriormente num coelho.*[99] Embora o pato e o coelho sejam constituídos por elementos que têm a mesma função para ambos, como coração, pernas, cabeça, ..., eles são animais distintos. O mesmo acontece com o campo eletromagnético e os campos elétrico e magnético. Embora tenham as mesmas componentes, imaginar o campo eletromagnético é diferente de imaginar o campo elétrico e o campo magnético separadamente. Na Relatividade as componentes elétrica e magnética transformam-se uma na outra e na Mecânica Clássica os campos são independentes. Da mesma forma, na Mecânica Clássica a interação é interpretada através da força ou energia, na relatividade estas grandezas estão relacionadas a um quadrivetor.

---

[98] um quadritensor de segunda ordem é um conjunto de 16 grandezas e é representado na forma de uma matriz 4x4.

[99] *A Estrutura das Revoluções Científicas,* **op. cit.,** p. 146

II-2.2. A gravitação na relatividade.

A interpretação da interação gravitacional na relatividade não tem nenhum paralelo com a correspondente na Mecânica Clássica. Aquela interpretação de que a interação gravitacional provoca a variação do movimento como, por exemplo, "os planetas movimentam-se em tomo do Sol em trajetórias elípticas e, portanto, estão acelerados devido à interação gravitacional, pois se não estivessem, deveriam movimentar-se em linha reta", não existe na Relatividade. Nesta teoria as massas estão sempre em movimento retilíneo e uniforme no espaço-tempo *curvo.*

O espaço-tempo na gravitação é denominado de *curvo* para distinguir do *plano* da Mecânica Clássica. Num campo gravitacional a geometria deixa de ser euclidiana, pois o espaço-tempo é *encurvado.* A responsável pela curvatura do espaço-tempo é a massa. O Sol encurva o espaço-tempo e os planetas movimentam-se neste espaço-tempo curvo em geodésicas e com velocidade constante. O deslocamento dos planetas no sistema solar é equivalente ao nosso na superfície da Terra, pois, embora a Terra seja redonda, nosso movimento no referencial da Terra é plano.

A Terra também deforma o espaço-tempo. O movimento dos corpos na direção do centro da Terra é devido ao espaço-tempo encurvado cuja "densidade" depende da distância à superfície. O espaço poderia ser imaginado como composto por grânulos distribuídos isotropicamente em relação à Terra, cuja concentração varia na direção perpendicular à superfície e decresce no sentido de afastamento desta superfície. Na figura 11 há uma tentativa de ilustrar esta imagem para o campo gravitacional próximo à superfície da Terra.

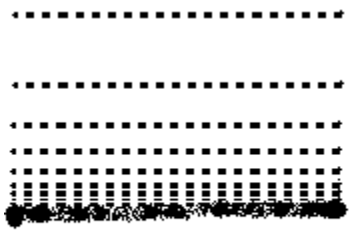


Fig. 11: granulação de um campo gravitacional

Os corpos movimentam-se com velocidade constante neste espaço granulado, isto é, o número de grânulos que percorrem por unidade de tempo é constante. Por isso que a Mecânica Clássica interpreta que um corpo em queda livre está acelerado, pois no espaço plano a velocidade é tão maior quanto mais concentrados estiverem os grânulos. Em outras palavras, no espaço curvo os grânulos são eqüidistantes e o corpo percorre um determinado número de grânulos por unidade de tempo. No espaço plano, a dis-

tância entre os grânulos depende da proximidade à Terra. Quanto mais próxima estiver a Terra, menor é esta distância. Então, durante a queda, o corpo encontra os grânulos cada vez mais próximos entre si e precisa de intervalos de tempo cada vez menores para percorrer a mesma distância, conseqüentemente, sua velocidade fica cada vez maior.

A luz também se movimenta em geodésicas no espaço-tempo curvo. Em cosmologia fala-se de *lentes gravitacionais* que mudam a trajetória da luz. O campo gravitacional comporta-se como as lentes dos óculos que, para corrigir algum defeito da visão, modifica a direção da luz que chega dos objetos. A evidência experimental da Teoria da Relatividade geral foi conseguida através da observação da deflexão da trajetória da luz pelo campo gravitacional do Sol. Em um hipertexto publicado pela Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência sobre *Einstein e o Brasil* há o destaque para este evento:

> *A história da relatividade geral está ligada à pequena cidade de Sobral, no Ceará. Nesse local, a expedição inglesa, formada pelos astrônomos ingleses Crommelin e Davidson, obteve as placas fotográficas que possibilitaram o cálculo da deflexão da trajetória de um raio luminoso, emitido por um grupo de estrelas (as Hyades), e causada pela ação gravitacional do Sol.*[100]

O espaço-tempo é encurvado pela massa, é por isso que a massa faz parte do palco do mundo relativístico. A elaboração formal desta concepção é realizada através do campo gravitacional ou do potencial gravitacional. Embora sejam utilizados os mesmos termos, os significados destes dois conceitos na Relatividade são completamente diferentes daqueles clássicos. Segundo Landau, *todo campo gravitacional não é outra coisa senão uma variação da métrica do espaço-tempo, (...). Este fato importantíssimo significa, que as propriedades geométricas do espaço-tempo (sua métrica) são determinadas pelos fenômenos físicos, e não são propriedades imutáveis do espaço e do tempo.*[101]

II-3. A INTERAÇÃO NA MECÂNICA QUÂNTICA.

A concepção determinista que existe na Mecânica Clássica e na Relatividade deixa de existir com o advento da Física Quântica. Devido a isto há uma divisão da Física em dois domínios que correspondem à Física Clássica e à Física Quântica. To-

---

[100] Ciência Hoje Hipertexto, *Especial "Einstein e o Brasil",* SBPC, Rio de Janeiro.
[101] *Teoria do Campo,* **op. cit.** P. 300.

das as teorias deterministas fazem parte da Física Clássica e as indeterministas integram a Física Quântica. Das teorias que estão sendo investigadas os modelos de interação, duas são clássicas – Mecânica Clássica e Teoria da Relatividade, e duas são quânticas – Mecânica Quântica e Teoria Quântica de Campos.

Na concepção de mundo determinista, dadas as condições iniciais, é possível determinar ponto-a-ponto a evolução de algum sistema. Por exemplo, se são conhecidas a posição e a velocidade iniciais e a força que atua sobre uma partícula, é possível determinar a trajetória desta partícula no espaço e no tempo. E possível prever onde a partícula estará em cada instante.

O determinismo clássico está relacionado ao pressuposto, que existe na Física Clássica, de que o tempo é contínuo. Tanto na Mecânica Clássica como na Relatividade o tempo flui sem interrupções e de forma homogênea. Entre dois instantes existem outros instantes e por isso é possível fazer previsões sobre o que acontece em qualquer instante e também na sua vizinhança.

Na Física Quântica o tempo é descontínuo e corresponde a "irrupções de instantes". O tempo é análogo ao tempo do cinema, pois o filme cinematográfico é constituído por uma seqüência de quadros que são projetados um a um. São configurações que irrompem na tela do cinema.

O indeterminismo quântico relativo ao movimento apresenta-se da seguinte maneira: se o momento de uma partícula estiver determinado, isto é, se é possível saber exatamente qual é a velocidade desta partícula sem que haja qualquer incerteza, a posição da partícula é indeterminada, não é possível localizar a partícula. Na Física Clássica a trajetória é determinada pela posição e pela velocidade da partícula em cada instante. Na Física Quântica não é possível determinar simultaneamente posição e velocidade. Conseqüentemente, na Física Quântica não há trajetória. Não é possível descrever o movimento de uma partícula. Na Física Quântica, a evolução de algum sistema é interpretada como configurações que irrompem, como na tela do cinema.

Nesta concepção, o conceito de força responsável pela aceleração de uma partícula deixa de existir pelos mesmos motivos que não se concebe mais a trajetória. A força também deixa de ter significado na Mecânica Quântica, pois, na Física clássica, é o resultado da interação de uma partícula com o campo vetorial. Isto não quer dizer que o conceito de campo não exista mais e sim que a sua formulação através de uma função vetorial não é mais necessária.

A Mecânica Quântica investiga a evolução dos sistemas onde há interação. O formalismo que se adapta a este tipo de interpretação é aquele desenvolvido na Física Clássica através da Mecânica Analítica, que utiliza o conceito de energia de um sistema de partículas em interação. E para representar a interação através da energia utiliza-se a formulação relativa ao potencial. Por isso, na Mecânica Quântica só existe um modelo para descrever a interação onde o potencial é mediador.

A Mecânica Quântica interpreta apenas duas interações: a eletromagnética e a forte efetiva. A interação eletromagnética tem a mesma interpretação que aquela da Mecânica Clássica no que diz respeito à interação de uma partícula com um campo eletrostático em ponto do espaço. Nesta interação, a Mecânica Quântica não modifica a concepção de interação clássica. A ruptura com a Física Clássica existe em relação às conseqüências desta interação. Além de não ser possível descrever a evolução do sistema através das trajetórias das partículas interagentes, a própria evolução do sistema fica restrita a algumas condições. Estas restrições manifestam-se através da energia das partículas que interagem. Estas não podem ter qualquer energia, mas sim determinados valores. A energia das partículas é quantizada. O sistema não pode evoluir de qualquer forma; ele evolui para estados com energias bem definidas e permitidas. Por isso que a evolução acontece através de estados de configurações que irrompem a cada instante.

O domínio de investigação da Mecânica Quântica é o atômico. Ela investiga a estrutura da matéria e constrói modelos para os átomos, moléculas, redes cristalinas etc. O modelo para o átomo de hidrogênio é construído através da investigação da interação entre um próton e um elétron. O próton cria um campo eletrostático que é descrito pelo potencial escalar clássico e este sistema só pode ter alguns valores de energias bem determinados. O elétron pode ocupar alguns níveis de energia bem definidos e também pode ser encontrado com maior probabilidade em algumas regiões. Não se fala em movimento do elétron em torno do próton, pois o elétron não tem trajetória. O que se imagina são algumas regiões em que é mais provável que o elétron esteja, conforme a energia que ele tenha. Aquela imagem do átomo com elétrons orbitando em torno de um núcleo em órbitas elípticas não existe na Mecânica Quântica.

A Mecânica Quântica interpreta, através da interação eletromagnética, a estabilidade dos átomos, a diversidade dos elementos químicos, as várias propriedades das substâncias químicas e faz muito sucesso por isso. Em uma boa parte da pesquisa em Física utiliza-se a Mecânica Quântica para interpretar os fenômenos, principalmente

na *chamada física da matéria condensada.* Através da Mecânica Quântica também procura-se interpretar a interação entre os constituintes do núcleo atômico. No quadro de comparecimento dos modelos de interação nas várias teorias da Física, a interação forte foi dividida por causa da Mecânica Quântica e à interação que é interpretada pela Mecânica Quântica foi dado o nome *de forte efetiva.* Esta interação acontece entre prótons e nêutrons do núcleo atômico que são considerados como partículas elementares. O modelo de interação é equivalente ao eletrostático. Investiga-se a interação entre dois nucleons (prótons e nêutrons) mediada por um campo cuja intensidade diminui exponencialmente com a distância. A função que descreve este campo é conhecida por *potencial de Yukawa* entre dois nucleons. A solução deste problema de interação indica também a quantização da energia dos nucleons.

A Mecânica Quântica também introduz o conceito de fóton que é uma *partícula de luz,* embora não seja necessariamente uma partícula. Na Mecânica Quântica, os objetos comportam-se de alguma forma como ondas e também como partículas e estes dois comportamentos não se excluem e sim complementam-se. É o princípio da complementaridade da Mecânica Quântica. Da mesma forma que na Mecânica Clássica, as cargas elétricas interagem entre si, por meio da mediação do campo eletrostático e também do campo transversal das cargas aceleradas; na Mecânica Quântica, o elétron interage com prótons e elétrons, por meio da mediação do campo eletrostático, e com os fótons que são os campos de radiação.

Mas o elétron não interage com qualquer fóton. A interação ocorre apenas se a energia do fóton corresponder à diferença entre dois níveis de energia quaisquer permitidos ao elétron, que são característicos do átomo em que o elétron faz parte. Quando esta condição é obedecida, o elétron absorve o fóton e muda sua energia. O elétron fica em um estado excitado que possui uma determinada *vida média,* ou seja, este estado não é estável e por isso o elétron não permanece indefinitivamente nele. Para retornar ao estado de menor energia, o elétron emite um fóton de energia equivalente à diferença entre os dois níveis. Os fótons que não têm energia que satisfaça à condição relativa às energias, não interagem com os elétrons. O vidro transparente exemplifica este processo. Os fótons da luz visível não são absorvidos pelo vidro, pois suas energias não correspondem a qualquer diferença entre energias permitidas dos elétrons do vidro. Por isso, estes fótons atravessam o vidro sem interagir com nenhum elétron. Os fótons que têm energia correspondente às diferenças entre as energias permitidas aos elétrons do vidro são os fótons de ultra-violeta. Desta forma, o vidro é um filtro para a

luz ultra-violeta. Os vários filtros coloridos são interpretados da mesma maneira: são transparentes aos fótons cujas energias correspondem à cor do filtro. Por exemplo, o filtro verde absorve todos os fótons diferentes de verde e não interage com os fótons verdes.

Com este modelo de interação dos elétrons existentes nos átomos com os fótons, a Mecânica Quântica interpreta os efeitos relativos à luz que a Mecânica Clássica não consegue. As restrições impostas à energia dos fótons absorvidos e emitidos pelos elétrons possibilitam interpretar as cores dos objetos, as fontes de luz e a emissão e absorção de qualquer radiação. Além disso, com este modelo também é explicada a condutividade elétrica e térmica dos materiais e, especialmente, os dispositivos semicondutores que surgiram na era da eletrônica, que existem graças à Mecânica Quântica.

Na Mecânica Quântica coexistem dois modelos para a interação eletromagnética:

1. Interação entre os elétrons com os prótons do núcleo atômico e os elétrons entre si, mediada por um campo eletrostático contínuo.
2. Interação de elétrons com fótons, através da emissão ou absorção de fótons pelos elétrons.

Nestas duas formas de interação, há variação da energia dos elétrons com a condição de que a energia é quantizada. Os momentos linear e angular também são quantizados. Para um determinado nível de energia permitido, pode haver diferentes estados para o elétron, que são devidos à quantização do momento angular.

Além do momento angular devido ao movimento do elétron no átomo, há também o momento angular intrínseco do elétron denominado por *spin,* que é um conceito que foi introduzido com a Mecânica Quântica. Não existe análogo clássico do spin. É um conceito essencialmente quântico. Durante a interação, a energia, os momento linear e angular e o spin de cada partícula interagente podem sofrer variação.

Na Física Clássica, o campo eletromagnético tem componentes radial e transversal que são contínuas. Na Mecânica Quântica, a componente radial corresponde ao campo contínuo mediador da interação entre cargas elétricas e a componente transversal é quantizada na forma de fótons que, durante a interação, são absorvidos ou emitidos pelos elétrons. A quantização irrestrita existe ao nível das propriedades da partícula, isto é, energia, momentos e spin são quantizados. Na Teoria Quântica de Campos não há separação entre campo contínuo e campo quantizado. Nesta teoria há a "se-

gunda quantização": a quantização do campo. Os modelos para as interações segundo esta concepção estão apresentados na seção que encerra este capítulo.

II-4. A INTERAÇÃO MEDIADA PELA TROCA DE PARTÍCULAS.

A Teoria Quântica de Campos é um conjunto de várias teorias que concebem a interação como troca de partículas. Cada uma das teorias é relativa a uma interação fundamental. A interação eletro-fraca é interpretada pela eletrodinâmica quântica – QED e a interação forte pela cromodinâmica quântica – QCD. A interação gravitacional não está "resolvida" dentro desta concepção. Na Teoria do Campo Unificado há tentativas de se encontrar um modelo análogo àqueles que existem em QED e QCD.

Em QED, as partículas elétricas interagem através da troca de fótons durante a interação eletromagnética e através da troca de partículas W e Z na interação fraca. Em QCD, a interação ocorre através da troca de glúons entre quarks. Analogamente a estes modelos, na interação gravitacional deveria haver a troca de grávitons. Os modelos para a interação eletro-fraca e forte estão mais elaborados em relação àquele para o campo gravitacional. Por isso, nesta seção há considerações apenas sobre as interações eletro-fraca e forte que estão apresentadas nas próximas subseções.

II-4.1. A interação eletro-fraca.

A concepção básica na Teoria Quântica de Campos é que as partículas emitem e absorvem outras partículas, que são trocadas durante a interação. O elétron emite ou absorve fótons e na interação fraca há a emissão ou absorção de partículas W e Z. Tanto a emissão como a absorção são fenômenos indiferentes, ou seja, a probabilidade de haver emissão é a mesma de haver absorção. A ação relativa à emissão/absorção é denominada por *acoplamento.* A interação eletro-fraca é considerada uma única interação porque para altas energias o *acoplamento* da interação eletromagnética coincide com o *acoplamento* da interação fraca. Segundo o modelo de formação do universo, no início a energia era muito alta e estas duas interações estavam unidas. Na evolução, a energia do universo foi diminuindo e, na condição atual de energia, estas interações aparecem separadamente e existem duas interpretações, parcialmente independentes, para elas. Uma delas envolve elétrons e fótons e a outra envolve os quarks (que são os constituintes dos prótons e nêutrons), elétrons, múons, taus, os respectivos neutrinos e as partículas W e Z. Por estarem separadas a baixas energias, nesta subse-

ção inicialmente é interpretada a interação entre elétrons e fótons e depois a interação fraca.

II-4.1.1. Elétrons e fótons.

Tanto elétrons como fótons têm caráter dual de onda-partícula, isto é, comportam-se de alguma forma como ondas e também como partículas. Fótons e elétrons são partículas que possuem **amplitudes de probabilidades** para deslocarem-se entre dois pontos quaisquer do espaço-tempo que são resultantes de todas as possibilidades de caminhos que eles podem percorrer para sair de um ponto do espaço-tempo e chegar num outro.

A amplitude de probabilidade para um fóton que está no ponto A do espaço-tempo chegar ao ponto B depende do intervalo entre A e B, onde o intervalo é definido como o quadrado da distância entre dois pontos no espaço quadridimensional. Esta distância é calculada a partir da diferença entre o quadrado do intervalo de tempo e o quadrado da distância espacial. Há uma diferença fundamental na regra de formação desta grandeza em comparação com a regra da geometria euclidiana, pois na formação do quadrado da distância, os quadrados das diferenças das coordenadas nos diferentes eixos não se somam com os mesmos sinais, mas com sinais opostos.

A escala de tempo é representada pela distância que a luz percorre em um intervalo de tempo. Por exemplo, se uma partícula movimenta-se com a velocidade da luz, a distância espacial que ela percorre é a mesma que a distância temporal. Este movimento é representado no diagrama espaço-tempo por uma linha que forma um ângulo de 45° com os eixos. Neste caso o intervalo entre dois pontos quaisquer do espaço-tempo é nulo. A figura 12 indica que a luz deslocou-se entre os pontos A e B, mas não representa a sua trajetória pois os fótons podem caminhar para qualquer direção.

A maior contribuição para a amplitude de probabilidade para um fóton deslocar-se de um ponto a outro do espaço-tempo ocorre à velocidade da luz convencional c, com intervalo igual a zero. Mas há também uma amplitude para os fótons andarem mais depressa, com velocidades maiores que a velocidade convencional ou mais devagar, com velocidades menores que a convencional. Estas amplitudes correspondem a intervalos diferentes de zero, negativos e positivos[102] respectivamente e são muito

[102] O intervalo é definido como $I = (T_2^2 - T_1^2) - (x_2^2 - x_1^2) - (y_2^2 - y_1^2) - (z_2^2 - z_1^2)$

pequenas quando comparadas com a contribuição da velocidade c. Quando os fótons viajam distâncias longas, estas amplitudes anulam-se e sobram apenas os fótons que se deslocam com a velocidade da luz. Entretanto, para pequenas distâncias, as probabilidades de haver fótons com velocidades diferentes da velocidade *c* são muito importantes e devem ser consideradas. Portanto, na Eletrodinâmica Quântica, os fótons não se deslocam apenas com a velocidade da luz!

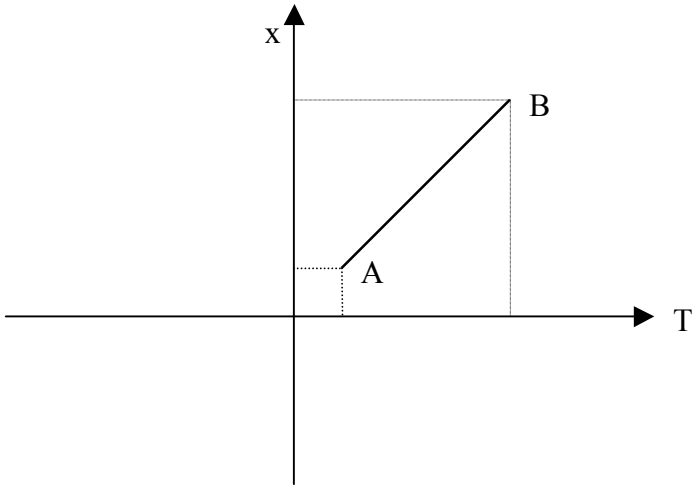


Fig. 12: linha de universo da luz no espaço-tempo

Estas diferentes amplitudes de probabilidade implicam na existência de duas qualidades dos fótons: reais e virtuais. A origem da diferença entre fótons reais e virtuais pode ser entendida através da relação para a energia da Teoria da Relatividade que afirma que a massa de repouso *m,* a energia *E* e o momento *p* de uma partícula estão relacionadas por

$$E^2 = p^2c^2 + m^2c^4.$$

Na mecânica quântica, uma partícula é real se esta relação é obedecida. Entretanto, a obediência a esta relação não é obrigatória e pode haver situações em que a energia da partícula não esteja em harmonia com a sua massa e seu momento. Nestas situações a energia pode ser maior ou menor que aquela prevista pela relação e esta diferença é escrita como ΔE. Na Mecânica Quântica existe a relação de incerteza para a energia que é equivalente àquela relativa à posição e ao momento da partícula, ou seja,

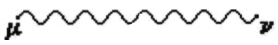
$$\Delta E \Delta t \approx h,$$

onde *h é* a constante de Planck dada por $h = 6{,}626.10^{-34}$ J.s . Se ΔE for nulo, Δt *é* infinito e a partícula existe indefinidamente. Por isso ela é "real". Qualquer desequilíbrio na relação da energia faz com que a partícula não possa existir indefinidamente e, por

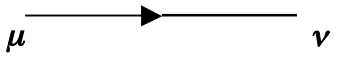
isso, esta partícula é chamada de "virtual". Os fótons têm massa de repouso nula, então, a energia dos fótons reais é dada por $E = pc$, dos fótons virtuais que se movimentam com velocidades maiores que c, $E > pc$ e para aqueles que se propagam com velocidades menores que c, $E < pc$.

Os fótons também se distinguem em reais e virtuais conforme a sua polarização. Classicamente, a luz é um campo de radiação denominado por onda eletromagnética. Esta onda é formada por dois campos perpendiculares entre si que são chamados de fótons transversais e são eles que se propagam por longas distâncias. Estes fótons também são denominados por fótons reais. Mas os fótons não precisam propagar-se unicamente com este tipo de polarização. Eles podem, também, estar polarizados nas outras duas direções do espaço-tempo, ou seja, na direção de propagação e na direção temporal. Fótons polarizados nestas direções são denominados de longitudinal e escalar respectivamente. Para grandes distâncias, as amplitudes destes fótons cancelam-se, mas a pequenas distâncias eles existem e são muito importantes para a interação, principalmente os fótons escalares.

A amplitude de probabilidade para um fóton, que está num ponto do espaço-tempo, chegar a outro ponto é representada por uma linha ondulada cujos extremos são os dois pontos,



e a amplitude de um elétron sair do ponto μ, e chegar no ponto ν é representada por um segmento de reta orientado que "sai" de μ e "chega" em ν.



Na eletrodinâmica quântica, considera-se que os elétrons emitem e reabsorvem fótons. Os pontos de emissão e reabsorção podem ser, por exemplo, os dois pontos do espaço-tempo considerados na amplitude de probabilidade de um fóton. As amplitudes de emissão ou absorção de um fóton por um elétron são iguais. Esta amplitude está relacionada com a carga do elétron.

Um elétron real, observado no laboratório através da determinação experimental de sua massa, é um elétron cercado por um campo quântico constituído por uma "nuvem" de fótons e outras partículas. A este elétron costuma-se dar o nome de "elétron vestido". Existem muitas possibilidades para a geração da "nuvem" que envolve o elétron, cada uma com uma amplitude de probabilidade característica. O elétron vesti-

do é a soma de todas as amplitudes. Existe uma probabilidade do elétron mover-se de um ponto a outro sem emitir e nem absorver nada. Ele pode também gerar uma nuvem de fótons em torno de si emitindo fótons e reabsorvendo-os. Além disto, ele pode também emitir dois fótons e depois absorvê-los. Há uma amplitude também para ele emitir um fóton que decai num par elétron-pósitron, que se aniquila emitindo um outro fóton, que é absorvido pelo elétron original. Estas amplitudes estão representadas na figura 13 na seqüência em que foram enunciadas. Na figura há representações de outras possibilidades.

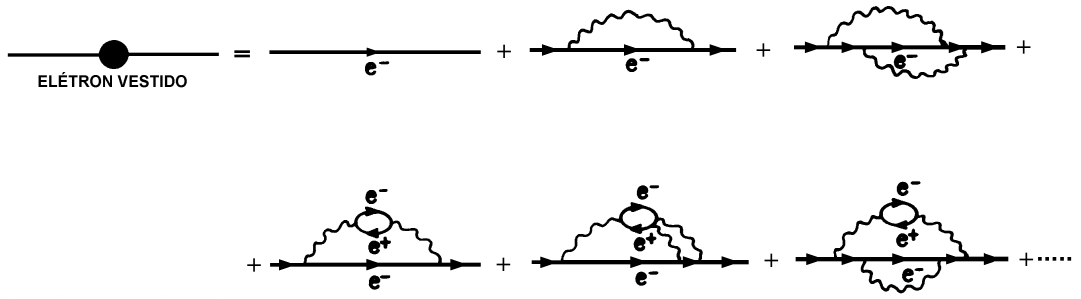


Fig. 13: representação do elétron

A massa do elétron é calculada a partir de uma série de termos: o primeiro é relativo à amplitude de probabilidade de um elétron propagar-se sem emitir e absorver nenhum fóton, um termo que não tem nenhum vértice (também chamado de elétron nu). O segundo termo tem dois vértices e representa a emissão e reabsorção de um fóton. Vem, então, os outros termos com quatro, seis, oito vértices e assim por diante.

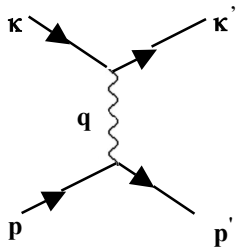
Estas várias amplitudes estão relacionadas entre si através do número de vértices de cada possibilidade. Quanto menor for o número de vértices, maior é a probabilidade de existência do estado. Isto é, a maior amplitude de probabilidade é para o elétron que se propaga sem emitir e absorver fótons, a segunda maior amplitude é para o elétron que emite e reabsorve um fóton e assim por diante. A amplitude para um elétron emitir ou absorver um fóton é cerca de 0,08542455 que equivale ao quadrado da constante de estrutura fina

$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137{,}03597}.$$

A eletrodinâmica quântica descreve a interação através da troca de fótons entre partículas carregadas que são aquelas que emitem e absorvem fótons. As várias inte-

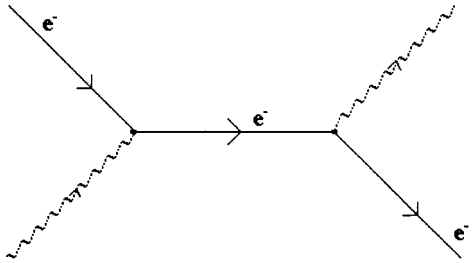
rações são representadas através de diagramas denominados por *diagramas de Feynman.* Alguns deles estão representados a seguir:

- **O espalhamento elástico** entre duas partículas de quadrimomento κ e p é representado como:

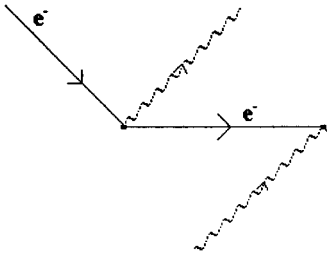


onde κ e p representam os quadrimomentos da partícula antes da interação e κ' e p' os quadrimomentos após a troca do fóton. A variação no quadrimomento de cada partícula é equivalente ao quadrimomento do fóton trocado.

- O **espalhamento da luz por elétrons** pode ocorrer de várias formas, cada uma com uma amplitude. Há uma possibilidade de um fóton ser absorvido por um elétron num ponto do espaço-tempo, este elétron propagar-se até um outro ponto e, então, emitir um fóton como representado no diagrama abaixo:

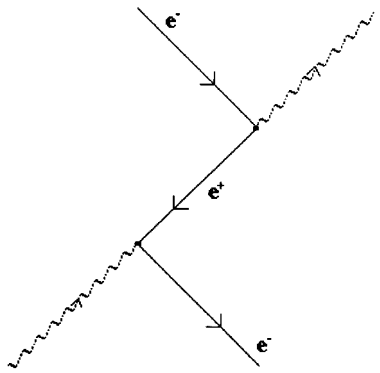


Uma outra probabilidade é de um elétron emitir um fóton, propagar-se e depois absorver um fóton, como representado no diagrama abaixo:

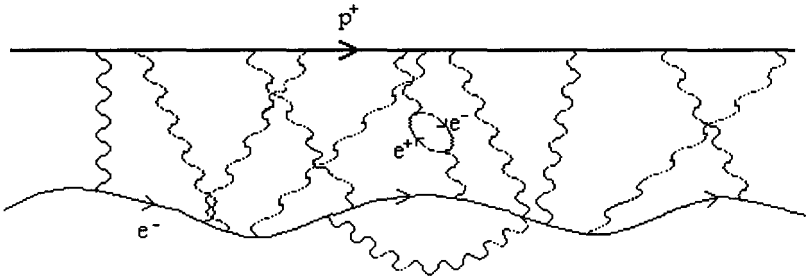


Há mais uma probabilidade, onde um fóton desintegra-se em um par elétron-pósitron. O pósitron encontra-se com um elétron, aniquilam-se e produzem um fóton. O pósitron está representado pelo símbolo e^+ pois corresponde à antipartícula do elétron e^-. Enquanto que o elétron "sai" do ponto que foi criado, o pósitron "entra" neste ponto. Esta representação corresponde a "um elétron que anda para trás no tempo".

> *O elétron que anda para trás, quando visto com o tempo a andar para a frente, parece igual a um electrão vulgar, excepto que é atraído para electrões normais - diz-se que tem uma "carga positiva". Por esta razão se chama "positrão". O positrão é uma partícula irmã do electrão e constitui um exemplo de uma "antipartícula".*[103]



- **O elétron em um átomo** pode ser explicado com este modelo. O átomo de hidrogênio, por exemplo, é formado por um próton e um elétron próximos entre si e esta proximidade é garantida pela troca de fótons entre eles. Em um átomo de hidrogênio em repouso, como o próton é muito mais pesado que o elétron, esse permanece num mesmo lugar do espaço enquanto se move no tempo e o elétron movimenta-se em volta dele, como está representado no diagrama abaixo:



[103] QED—A Estranha Teoria da Luz e da Matéria, **op. cit,** p. 122

Se um fóton, vindo do exterior deste átomo atinge o elétron, ele pode ser absorvido. Após isto, o elétron pode emitir um novo fóton. Esta é uma interpretação do espalhamento da luz pelo átomo de hidrogênio. A amplitude de espalhamento da luz por um átomo é a soma de todas as probabilidades de como um elétron pode espalhar um fóton. Esta amplitude depende do núcleo e do arranjo dos elétrons nos átomos e difere de material para material.

Na interação atômica há uma outra propriedade das partículas que, através dela, é possível interpretar a origem da grande variedade de propriedades-químicas dos átomos. Tanto fótons como elétrons existem em quatro variedades diferentes relacionadas geometricamente com as direções do espaço-tempo e são chamadas de "polarizações". Devido às polarizações os fótons podem ser escalar, transversal e longitudinal. A polarização dos elétrons determina as diferentes propriedades dos átomos através do "princípio de exclusão" que estabelece que dois elétrons com a mesma polarização não podem estar no mesmo ponto do espaço-tempo. Em função disto, o átomo de hidrogênio corresponde a um próton que troca fótons com um elétron e o átomo de hélio é constituído por dois prótons no mesmo núcleo que trocam fótons com dois elétrons polarizados em direções opostas. Como há apenas dois estados de polarização disponíveis aos elétrons, designados por spin $+\frac{1}{2}$ e spin $-\frac{1}{2}$, num átomo que possui três prótons no núcleo e troca fótons com três elétrons, o terceiro elétron não pode estar no mesmo ponto do espaço-tempo que os outros dois, por isso este elétron encontra-se mais longe dos prótons, troca menos fótons com eles e fica menos ligado ao núcleo que os outros dois elétrons e pode "escapar" deste núcleo por influência de fótons de outros átomos. Este átomo é chamado de lítio. Se os elétrons não fossem polarizados, todos os elétrons dos átomos encontrar-se-iam juntos, num mesmo ponto próximo ao núcleo. Os átomos teriam propriedades semelhantes, os elétrons de um átomo não seriam facilmente atraídos para outros átomos, não existiriam, portanto, reações químicas.

A eletrodinâmica quântica interpreta a interação através da troca de fótons por elétrons. A carga elétrica está relacionada à emissão/absorção de fótons. Os diagramas de Feynman que representam as interações possibilitam os cálculos das amplitudes de probabilidade nos processos eletrodinâmicos através das regras de Feynman. Estas regras são utilizadas para o cálculo de amplitudes relativísticas de processos quânticos. A leitura de cada um dos diagramas que foram apresentados permite a construção

da amplitude correspondente a cada processo investigado através das regras de Feynman, que são um conjunto de prescrições que associam cada elemento de um diagrama a uma função matemática que o representa. Assim se calcula a probabilidade de ocorrer o evento.

Os diagramas de Feynman representam as amplitudes relativas aos processos quânticos e não as trajetórias dos elétrons e dos fótons. A forma em que são desenhadas podem levar a uma leitura equivocada dos processos quânticos, pois são muito parecidas com a representação clássica de deslocamento. A imagem de natureza associada à emissão/absorção de um fóton por um elétron é quântica, isto é, são estados de configuração que irrompem: em um instante existe apenas um elétron, em outro instante há um elétron e um fóton e em outro instante há apenas um elétron. Não há continuidade entre estes instantes, são três configurações. Na figura 14 está representado o processo de emissão e absorção de um fóton. Tanto o elétron como o fóton são imaginados como ondas planas que estão representadas por linhas paralelas.[104]

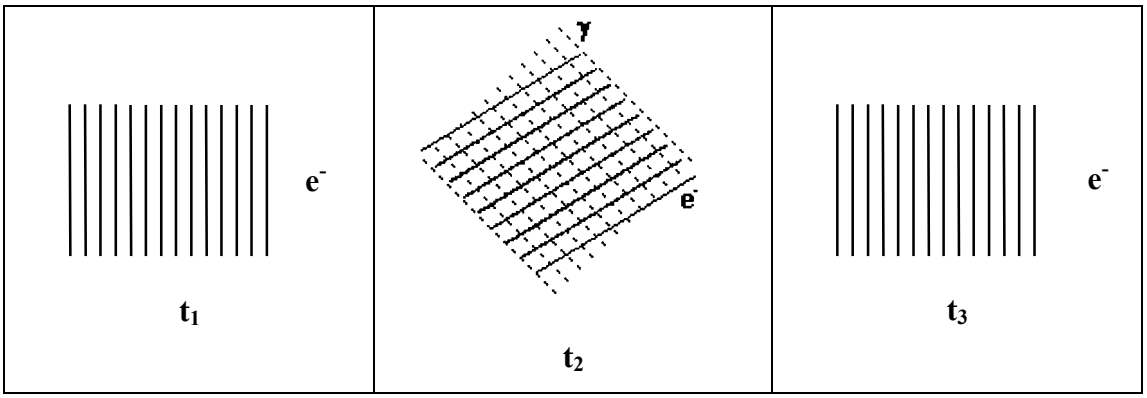


Fig. 14: configurações relativas à emissão e absorção de um fóton

Nos diagramas da figura 13 são desenhadas linhas onduladas contínuas relativas ao fóton que representam a amplitude de um elétron emitir e reabsorver um fóton e não a direção do momento deste fóton.

A imagem associada ao espalhamento elástico elétron-elétron está representada na figura 15. Neste processo há a emissão de um fóton por um dos elétrons e a absorção deste fóton pelo outro. A emissão e absorção não são simultâneas, por isso este processo está dividido em três instantes: t_1 – dois elétrons incidentes; t_2 – emissão de um fóton por um dos elétrons; t_3 – absorção do fóton pelo outro elétron.

[104] A forma usual de representar uma onda é através da configuração das frentes de onda que correspondem a planos de amplitude constante. Uma onda plana é representada por planos paralelos que, no papel, transformam-se em linhas.

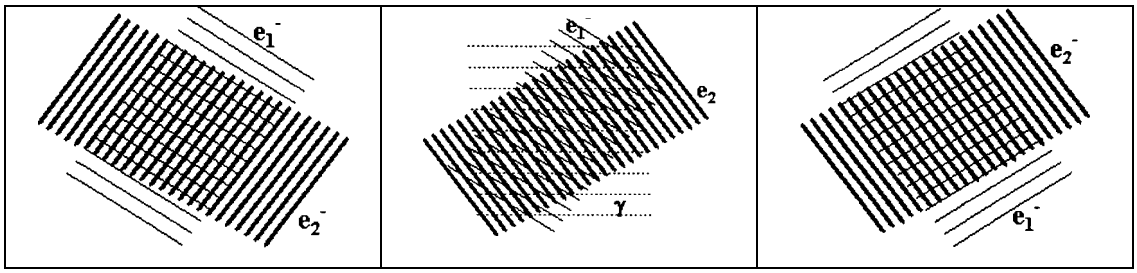


Fig. 15: configurações relativas ao espalhamento elástico entre elétrons

Quando as regras de Feynman são aplicadas ao diagrama que representa este espalhamento elástico obtém-se a amplitude deste evento ocorrer em função do ângulo de espalhamento. Há duas amplitudes relativas a este tipo de espalhamento:

1. espalhamento sem modificação do spin das partículas;
2. espalhamento com *flip* no spin das partículas.

A amplitude para cada uma destas situações está representada, em escala logarítmica, nos gráficos da figura 16.

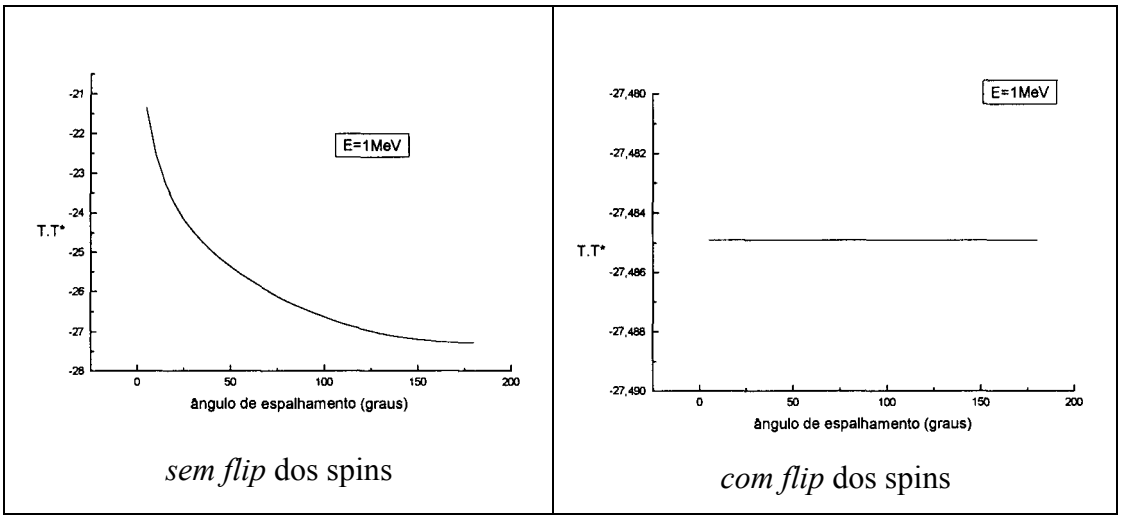


Fig. 16: amplitudes de espalhamento

Comparando estes dois processos, nota-se que a amplitude com *flip* dos spins é bastante reduzida se comparada ao espalhamento sem *flip* dos spins. Isto indica que aquele tipo de espalhamento é bem pouco provável. Além disso, a amplitude independe do ângulo de espalhamento quando há *flip* dos spins, diferente daquela onde os spins não se modificam. Amplitude de espalhamento muito reduzida e independência com o ângulo de espalhamento indicam que para ocorrer esta interação é necessário que as partículas estejam muito próximas e, por isso, é a posição relativa entre as duas partícu-

las, no instante da interação, que determina o ângulo de espalhamento. Como esta posição é igualmente provável em todas as direções, a amplitude não depende do ângulo de espalhamento. Esta é uma típica interação de curto alcance e, por isso, apresenta simetria esférica.

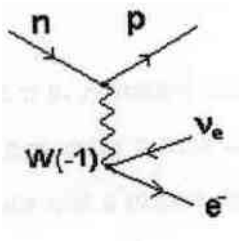
As polarizações dos fótons trocados durante a interação também são diferentes para os dois tipos de espalhamento. O processo onde não há *flip* dos spins das partículas é equivalente à interação eletrostática clássica e nesta interação os fótons que participam da interação são fótons temporais, ou seja, estão polarizados na direção da coordenada temporal. As polarizações transversais contribuem à interação equivalente à interação magnética clássica. Quando há *flip* dos spins os fótons que participam do espalhamento são polarizados longitudinalmente, pois só estes fótons têm spin[105] na mesma direção dos spins das partículas e, por isso, conseguem modificá-los.

Este modelo apresentado para o espalhamento elástico elétron-elétron foi construído a partir da aplicação das regras de Feynman. Estas regras são utilizadas para calcular amplitudes relativísticas de outros processos quânticos também. Para utilizar estas regras, parte-se de um desenho – o diagrama de Feynman – que descreve o processo que se deseja estudar. Os processos quânticos tornam-se extremamente significativos quando analisados através dos diagramas de Feynman pois, conhecendo suas regras, dá para compreender cada fenômeno em um nível relativamente profundo. A partir das regras de Feynman dá para construir um modelo para cada processo quântico.

II-4.1.2. Desintegração Beta

A desintegração beta[106] é um processo que envolve a transformação de um nêutron em um próton e é uma interação característica do grupo das interações fracas. Neste processo um nêutron se transforma em um próton através da emissão de uma partícula chamada **W,** que tem massa muito grande (cerca de 80.000MeV) e carga igual à do elétron. A partícula **W** tem um acoplamento com um elétron e com uma outra partícula denominada por "antineutrino" (ν_e). Este processo está representado no diagrama seguinte:

[105] O spin do fóton é perpendicular ao plano de polarização. Por exemplo, um fóton transversal está polarizado perpendicularmente à direção de propagação e a direção de seu spin é paralela a ela.
[106] Comentários baseados no livro *QED - A Estranha Teoria da Luz e da Matéria,* **op. cit.,** p. 167.



Nos processos que envolvem a interação fraca há outras partículas além do elétron e o antineutrino. *Uma dessas partículas é o muão, que é, de todas as formas, exactamente o mesmo que o electrão, excepto que sua massa é muito mais elevada – 105,8MeV, comparada com 0,511 MeV para o electrão, ou seja, cerca de 206 vezes mais pesada. É como se Deus tivesse querido experimentar um número diferente para a massa!*[107]

A família do elétron tem mais um membro, que é uma partícula ainda mais pesada, denominado por "tau" com a massa de cerca de 1.800MeV. Também existe o "neutrino do tau".

A partícula **W** que participa da desintegração beta tem carga –1. Existem, também, outras partículas que participam da interação fraca. Uma delas é a antipartícula do $\mathbf{W}_-$ que é $\mathbf{W}_+$ e tem carga +1 e uma outra seria um **W** neutro, denominada por $\mathbf{Z_0}$.

Embora os processos de desintegração beta sejam interpretados como a transformação de um nêutron em um próton e outras partículas, estes processos não são interpretados de "fora" dos nucleons e sim a partir de seus constituintes que são os quarks. Por isso, a desintegração beta é interpretada como a transformação de um tipo de quark em outro, o que acarreta na transformação de um nêutron em um próton. As partículas que são consideradas elementares são as pertencentes à família dos elétrons e aquelas que constituem os nucleons, que são os quarks. Por isso, todas as interações que envolvem nucleons são interpretadas como interações entre quarks. Os processos que envolvem os quarks existem na interação fraca, na interação entre os nucleons (forte efetiva) e na própria interação forte que é a interação entre quarks.

II-4.2. Processos que envolvem quarks.

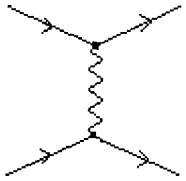
As partículas compostas por quarks são de dois tipos: aquelas como o próton e o nêutron que são constituídas por três quarks e outras como os píons, que são consti-

[107] QED - A Estranha Teoria da Luz e da Matéria, **op. cit.,** p. 170

tuídas por um quark e um antiquark. As primeiras são chamadas de bárions e as segundas de mésons.

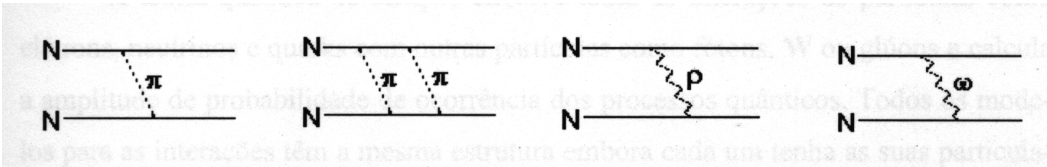
Há dois tipos de quarks: o **d** e o **u**. A massa destes quarks é cerca de 20MeV e há indicativos (relacionados à diferença entre a massa do nêutron e do próton) que a massa do quark **d** seja um pouco maior que a massa do quark **u**. A carga do quark **d** é $-\frac{1}{3}$ e do quark **u** é de $+\frac{2}{3}$. Como a carga do próton é +1 e é formado por três quarks, o próton deve ser formado por dois quarks **u** e um quark **d** pois $\frac{2}{3}+\frac{2}{3}-\frac{1}{3}=1$. O nêutron tem carga igual a zero e a combinação de quarks que formam o nêutron deve ser constituída por dois quarks **d** e um quark **u**.

Os quarks são mantidos juntos através da troca de glúons. Os diagramas de Feynman para esta interação são semelhantes aos desenhados para a interação eletromagnética e são do tipo:



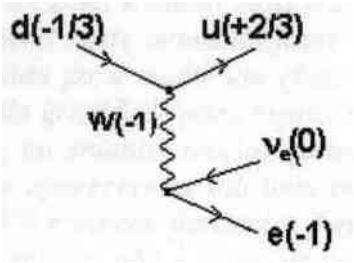
As linhas contínuas representam os quarks e a linha ondulada representa o glúon.

A interação entre dois nucleons ocorre através da troca de mésons como o píon(π), o rô(ρ) e o ômega(ω) que são os *quanta* ou mediadores desta interação forte. *Segundo a concepção quântica do mundo microscópico, um elétron está sempre envolto por uma nuvem de fótons e um nucleon sempre envolto por uma nuvem de mésons. Na faixa de energias relativamente baixas, característica da física nuclear (E~300MeV), a interação entre dois nucleons ocorre quando um interage com a nuvem de mésons do outro.*[108] Os diagramas que representam a interação entre nucleons são do tipo:

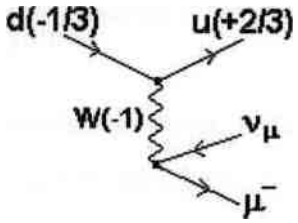


A interação fraca que ocorre na desintegração beta consiste na transformação de um quark **d** em um quark **u**. Assim um nêutron transforma-se em um próton. O diagrama de Feynman desta interação é o seguinte:

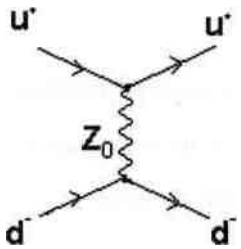
[108] Robilotta, M.R. e Coelho, H.T. *Forças Nucleares,* Ciência Hoje, 11(63):23-30, 1990.

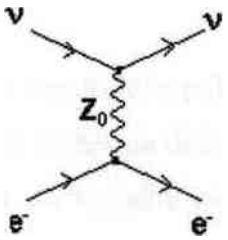


Neste processo pode estar envolvido um múon ao invés de um elétron e o diagrama que o representa é o seguinte:



Há interação fraca também entre quarks e também entre elétrons e neutrinos onde não há variação da carga. Nestes processos, a partícula **W** trocada é neutra e é denominada por $\mathbf{Z_0}$. Dois destes processos estão representados nos diagramas abaixo:





II-4.3. Modelos de interação na teoria quântica de campos.

A teoria quântica de campos envolve todas as interações de partículas como elétrons, neutrinos e quarks com outras partículas como fótons, **W** ou glúons e calcula a amplitude de probabilidade de ocorrência dos processos quânticos. Todos os modelos para as interações têm a mesma estrutura embora cada um tenha as suas particularidades.

Das interações fundamentais, foram apresentados modelos para duas delas: a eletro-fraca e a forte. Resta ainda a interação gravitacional. Sobre a busca de um modelo para interpretar esta interação, Feynman escreveu:

Porque a força gravitacional é muito mais fraca do que qualquer das outras interacções, é impossível neste momento fazer qualquer experiência que seja suficientemente delicada para medir um efeito que necessite da precisão de uma teoria quântica da gravidade para explicar. Ainda que não haja maneira de as comprovar, há, no entanto, teorias quânticas da gravidade que envolvem "gravitões" (que apareceriam sob uma nova categoria de polarizações denominadas "spin 2") e outras partículas fundamentais (algumas com spin 3/2). A melhor destas teorias não é capaz de incluir as partículas que, de facto, achamos e inventa uma data de partículas que não encontramos. As teorias quânticas da gravidade, também têm infinitos nos números com acopulamentos, mas o "processo obscuro", que tem resultado quando nos queremos ver livres dos infinitos na electrodinâmica quântica, não consegue ver-se livre deles na gravidade. Portanto, não apenas não temos experiências com as quais verificar uma teoria quântica da gravidade, como também não possuímos uma teoria razoável.[109]

E continuando seus comentários sobre a interação gravitacional, Feynman destaca o problema com a conceituação da massa.

Através de toda esta história mostra-se um aspecto especialmente insatisfatório: as massas observadas das partículas, m. Não há nenhuma teoria que explique adequadamente estes números. Usamos os números em todas as nossas teorias, mas não os percebemos – o que eles são ou donde vêm. Acredito que, de um ponto de vista fundamental, este é um problema muito interessante e sério.

II-5. SÍNTESE DOS MODELOS DE INTERAÇÃO.

Após ter apresentado os vários modelos de interação construídos pelas teorias da Física, vale a pena retomar o quadro de comparecimento destes modelos nas teorias para sintetizá-los. Aquele quadro foi construído a partir do trabalho de análise dos modelos teóricos apresentados neste capítulo e foi apresentado anteriormente com a intenção de mostrar uma possível organização dos modelos de interação na Física. Como a exposição segue o caminho inverso da investigação, pode dar a impressão de que se trata de uma construção *a prior,i* mas, na verdade, trata-se de uma estratégia do método de exposição. A retomada daquele quadro neste momento tem outro objetivo em relação à sua apresentação anterior, pois agora este quadro representa uma síntese dos modelos de interação discutidos ao longo deste capítulo pois, além destes modelos estarem organizados, cada "campo" do quadro está cheio de significado.

[109] *QED - A Estranha Teoria da Luz e da Matéria,* **op. cif,** p. 179

	MC	TRR	TRG	MQ	TQC
G	Força				Grávitons
	Campo		Campo		
	Potencial		Potencial		
EM	Força				Fótons
	Campo	Campo			
	Potencial	Potencial		Potencial	
Fraca					W, Z
Forte efetiva				Potencial	Mésons
Forte					Glúons

Este quadro mostra os modelos utilizados pelas várias teorias. Os espaços em branco indicam a inexistência de modelos análogos. Existem modelos paralelos nas teorias da Mecânica Clássica, Relatividade e Mecânica Quântica, mas não para a Teoria Quântica de Campos. A interação eletro-fraca está separada em eletromagnética e fraca e a interação forte dividida em forte efetiva e forte porque apenas a Teoria Quântica de Campos interpreta as interações fraca e forte. A ausência de subdivisões na coluna da Teoria Quântica de Campos deve ser destacada. Isto significa que nesta teoria não há modelos análogos aos das outras teorias, não há paralelos entre os modelos construídos pelas outras teorias com aquele construído pela Teoria Quântica de Campos. Esta teoria adota a concepção, introduzida na Mecânica Quântica, relativa à absorção e emissão de fótons pelos elétrons e difunde para todas as interações fundamentais.

III – OS MODELOS DE INTERAÇÃO CONSTRUÍDOS PELOS ESTUDANTES

A investigação sobre os modelos teóricos de interação construídos pela Física permitiu uma visão relativamente ampla daquilo que é ensinado no curso de graduação, pois estes modelos estão, de uma forma ou de outra, sempre presentes nos conteúdos estudados neste curso. Algumas vezes estes modelos são estudados diretamente como, por exemplo, no estudo da dinâmica ou da eletrostática e, outras vezes, eles estão implícitos em algum outro modelo como, por exemplo, o modelo clássico para a condutividade elétrica pressupõe a interação entre os elétrons livres e os íons da rede cristalina que compõem o condutor e entre os elétrons livres com um campo externo. Os modelos de interação estão ainda mais implícitos no estudo da óptica geométrica que investiga o comportamento da luz em interação com a matéria representada por espelhos, lentes, etc. Na termodinâmica são construídos modelos microscópicos para interpretar grandezas macroscópicas tais como pressão, temperatura. Nestes modelos as partículas microscópicas estão em interação entre si e com as paredes do recipiente que as contém e são estas interações que explicam os conceitos macroscópicos. Estes são alguns exemplos que ilustram como os modelos de interação comparecem no curso de graduação: às vezes com o objetivo de investigá-los diretamente e em outras muitas vezes são espécies de pressupostos, são utilizados como conceitos necessários à investigação de outros conceitos, ou fenômenos, ou modelos. Quando surgem como pressupostos, os modelos de interação não são discutidos, são considerados dados pré-estabelecidos.

Convivendo neste ambiente, os estudantes de graduação constróem seus modelos sobre a natureza dos fenômenos físicos e, em particular, das interações físicas. Os elementos, que eles utilizam para estas construções, aparecem algumas vezes explicitamente nas aulas e outras vezes são "captados" do ambiente cultural do curso de graduação. Neste ambiente cultural estão incluídas tanto as atividades internas e externas às aulas, o contato pessoal com a comunidade composta por estudantes e professores, o intercâmbio de informações através de material de divulgação científica ou da mídia.

Todo modelo é resultado de uma teorização sobre a natureza e esta é fruto de reflexão individual. O curso de Física oferece elementos para que os estudantes cons-

truam seus próprios modelos, mas estes elementos nem sempre são exaustivamente discutidos. Aliás, não é somente através de uma discussão exaustiva sobre um determinado assunto que se constrói um conhecimento. O conceito é algo abstraído a partir de várias recorrências que surgem de formas diferentes, por diversas seqüências como é o caso do conceito de interação que aparece em várias discussões sobre os fenômenos físicos.

Levando isto em conta, foram investigados os modelos de interação construídos pelos bacharéis em Física, pois estas construções refletem uma parte significativa do aprendizado destes estudantes durante o curso de graduação em Física. As avaliações realizadas no curso de graduação estão localizadas em cada disciplina e, por isso, são parciais. Nesta investigação sobre os modelos construídos pelos estudantes, há elementos que articulados fornecem uma percepção mais abrangente da aprendizagem no curso de graduação. Por não estarem localizados em uma determinada parte do curso, mas sim distribuídos por praticamente todas as suas disciplinas, os modelos de interação possibilitam a elaboração de uma síntese sobre o aprendizado em Física. Síntese significa "composição". Em qualquer síntese há a reunião de elementos particulares em um todo. Mas síntese também significa "resumo", ou seja, nem todos os elementos relativos ao objeto investigado aparecem na síntese. Uma síntese é o resultado de uma escolha relativa aos dados analisados, é um determinado "olhar" para o objeto. Por isso, pode haver diferentes sínteses sobre o aprendizado da Física na graduação. Neste capítulo é apresentada uma das várias possíveis.

III-1. A COLETA DOS DADOS

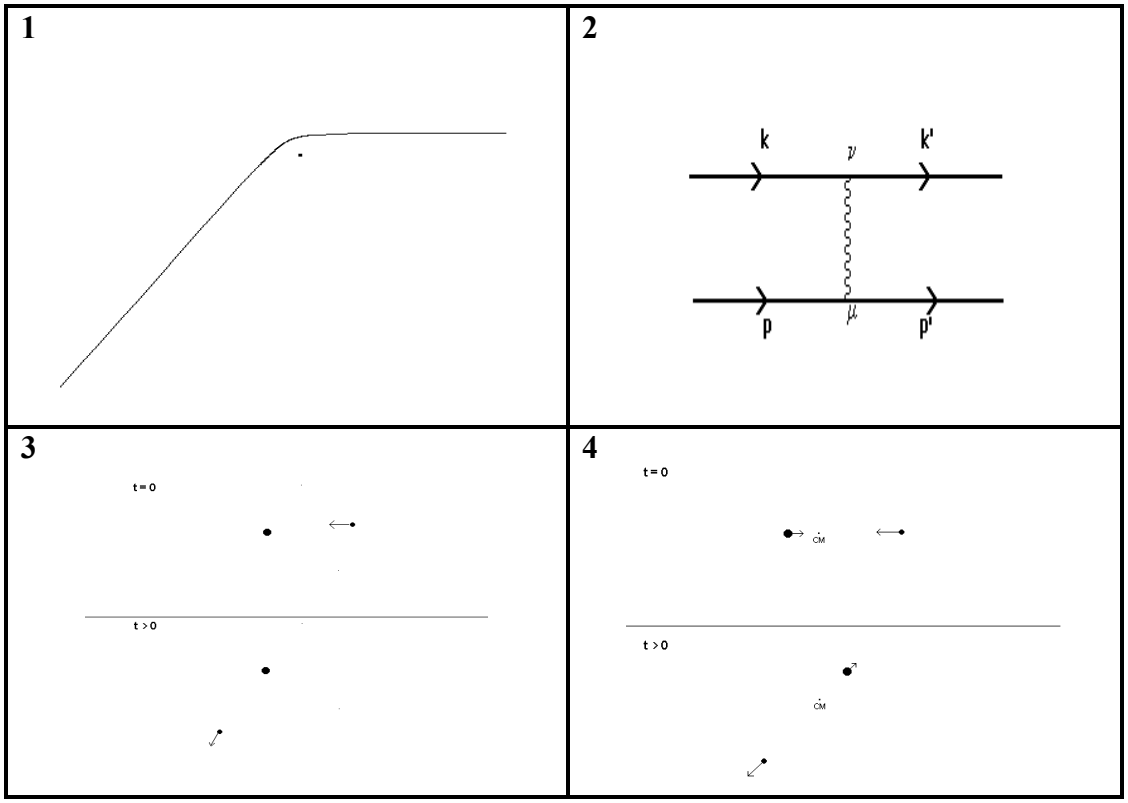
Para investigar sobre os modelos de interação construídos pelos estudantes durante o curso de graduação em Física foram realizadas entrevistas com bacharéis recém graduados em Física. Para elaborar um instrumento para coleta de material de análise foi escolhida a interação eletromagnética por apresentar uma característica peculiar que é aquela de apresentar modelos de explicação em todas as teorias. Procuramos analisar como os estudantes interpretam a interação entre partículas atômicas sem tentar enquadrá-la em algum modelo teórico construído e aceito pelos físicos. Muitos termos, que usualmente são utilizados pela Física, comparecem também nos discursos dos estudantes, mas os significados destes termos, que dependem de como estão inse-

ridos nas estruturas, podem ser conceitualmente diferentes daqueles construídos pela Física e, também, diferentes entre as várias construções elaboradas pelos estudantes.

Nossa amostra é constituída por entrevistas com nove bacharéis recém graduados em Física (que estão identificados por letras maiúsculas de **A** a **I**). São estudantes que atualmente fazem parte de algum programa de mestrado e a origem destes estudantes, relativa ao curso de graduação, é diversificada. Cinco estudantes fizeram o curso de graduação na USP e os outros estudaram na Universidade Estadual de Campinas, Universidade Estadual de Londrina, Universidade Estadual de Maringá e Universidade Federal do Paraná. As condições de contorno para a escolha da pessoa entrevistada foi a obrigatoriedade de ter cursado bacharelado e estar formado há pouco tempo. A exigência que os estudantes sejam recém graduados é uma forma de controle para que a especificidade da pós-graduação não se superponha à formação geral da graduação.

As entrevistas foram realizadas na seguinte seqüência:

a) As quatro figuras abaixo foram apresentadas ao estudante, inicialmente, na seqüência em que estão enumeradas.



Estas figuras são representações distintas de um espalhamento elástico entre um próton e um elétron. A primeira representa a trajetória descrita por um elétron quando é espalhado por um próton, uma representação clássica. A segunda é o diagrama de

Feynman referente ao espalhamento elástico elétron-próton, uma representação da eletrodinâmica quântica. A terceira e a quarta apresentam as velocidades das partículas, antes e depois da interação, no sistema de referência do laboratório e em relação ao centro de massa, respectivamente. Trata-se também de representações clássicas que comumente aparecem nos estudos de choques entre partículas.

Nosso procedimento ao iniciar as entrevistas foi de apresentar uma figura por vez e perguntar sobre o seu significado. Neste primeiro momento estas figuras serviram de introdução para o tema que queríamos que fosse desenvolvido no transcorrer das entrevistas. Esta estratégia de introduzir o assunto através de figuras e não de discurso é devido ao fato de que uma figura é global e o discurso é seqüencial. A figura tem uma representação estrutural, no discurso o aluno precisa compor as partes e assim não tem estrutura na apresentação. Uma figura apresenta muito mais elementos e permite muito mais interpretações que um discurso.

b) Após este primeiro reconhecimento, propusemos que fossem associados eventos que pudessem ser explicados por intermédio das figuras apresentadas. Perguntamos também se duas ou mais figuras podiam representar um único evento para que não houvesse restrições a nenhuma tentativa de interpretação. Enfatizamos que o fato das figuras serem apresentadas em separado e numa determinada ordem não deveria implicar *a priori* que houvesse ou não relação entre elas.

c) Finalmente, solicitamos que fossem consideradas duas partículas em particular, um elétron e um próton em qualquer uma das figuras e, então, fosse elaborada uma descrição detalhada, ponto a ponto, do evento representado por cada uma delas. Nesta parte também havia a possibilidade de se fazer associação ou não das quatro representações. Durante este contato, nossa intervenção foi no sentido de explorar mais profundamente algumas colocações que consideramos relevantes aos nossos objetivos. Procuramos sempre nos colocar solidária às opiniões que estavam sendo apresentadas e elaborar questões que estivessem contextualizadas nas representações que iam surgindo.

As entrevistas tiveram duração média de uma hora com variação de mais ou menos quinze minutos. Houve três tipos de comportamento durante as entrevistas que podem ser destacados:

1. estudantes que responderam as questões de forma direta e objetiva. Estas foram as entrevistas de menor duração;

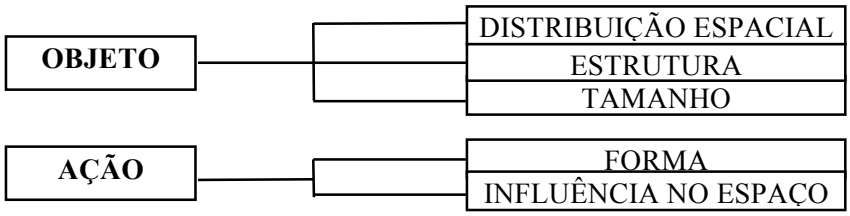
2. outros estudantes consideraram interessantes as questões que foram colocadas e aproveitaram a oportunidade para especular. Ao tentar construir imagens sobre a natureza das situações que estavam sendo apreciadas, surgiram várias dúvidas que foram estimulantes a aquele exercício de pensar com palavras. Estas foram as entrevistas mais longas.

3. e um terceiro tipo em que os estudantes consideraram estranha a forma de pensar que estava sendo proposta. Foi uma oportunidade de utilizar o formalismo, que foi muito explorado no curso de graduação, e transcender a ele, isto é, interpretar alguns resultados já conhecidos. Esta possibilidade de encher o formalismo de significado foi considerada por algumas pessoas entrevistadas uma oportunidade, que ainda não haviam experimentado, de estabelecer uma relação entre o mundo dos símbolos e o mundo formado por coisas. Estas entrevistas também foram mais demoradas, entretanto, suas transcrições não são tão longas, pois houve vários trechos de silêncio durante os quais os entrevistados "paravam para pensar".

Além de comportamentos diferentes em relação à própria entrevista, nossa expectativa era de obter resultados que envolvessem elementos subjetivos. Se estivermos procurando investigar algumas representações construídas por estudantes de Física é de se esperar que sempre que se interpreta algo há um elemento de arbitrariedade, pois interpretações envolvem julgamentos subjetivos por quem as faz e, por isso, não são únicas. Entretanto, ao lado desta subjetividade existe também uma objetividade devido ao meio social em que as pessoas vivem. No caso especial que estamos investigando, o meio está delimitado pela comunidade dos físicos, cujo acesso a ela é conseguido através do curso de graduação em Física. O contato com a comunidade dos físicos através dos cursos permite que haja um convívio com as idéias e opiniões sobre a natureza material. Como há uma certa hegemonia que caracteriza a comunidade, há também um elemento objetivo na construção das representações da natureza do universo físico que é evidenciado através da existência de padrões de respostas.

III-2. ELABORAÇÃO DO INSTRUMENTO DE ANÁLISE.

Utilizando a metodologia de análise de conteúdo elaboramos duas dimensões e suas categorias. Estas dimensões foram identificadas a partir de uma análise global de todas as entrevistas cujo objetivo foi a identificação de uma estrutura que pudesse incorporar todos elementos representativos das várias representações do conceito de interação identificadas. Nesta primeira análise, o conteúdo das entrevistas foi apreciado extensivamente, ou seja, consideramos todas as entrevistas simultaneamente e procuramos identificar suas regularidades. O resultado desta análise está esquematizado no diagrama apresentado abaixo que são as categorias de análise.



As duas dimensões são denominadas por objeto e ação. A dimensão objeto é relativa a aquilo que está interagindo e a dimensão ação está relacionada a como os objetos interagem. Estas dimensões estão estruturadas em categorias:

Na dimensão **OBJETO** há três categorias:

- DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL: relativa a como cada objeto está distribuído no espaço, isto é, se são extensos ou localizados, se são formados de partes distintas ou se são de um único tipo. Respostas que se enquadram nesta categoria são, por exemplo:

  (A)- *....Agora eu nunca tinha pensado, também nunca tive na aula, o caso que eu tenha só um próton e um elétron. Em princípio dá para aceitar isso, dá para aceitar o fato que o próton gera um campo normalmente como uma carga puntual e que o elétron é uma carga de prova que penetra neste campo e é defletido.*

  (D) - *... Daí você já imaginaria um elétron puntual, por exemplo, para fazer esta imagem. Não vejo como fazer esta imagem sem você criar um tipo de partícula, vamos dizer assim.*

- ESTRUTURA: nesta categoria identifica-se a composição dos objetos, se são homogêneos ou heterogêneos e se são rígidos ou maleáveis, identificados em respostas dos seguintes tipos:

(G) -*Olha para este tipo de coisa que a gente está discutindo, eu penso nele* (o elétron) *como uma bolinha mesmo. Penso nele classicamente. Agora, eu acho quando eu penso num elétron de um átomo, aí para mim é mais fácil imaginar o elétron como sendo uma nuvem de probabilidade, tem uma região aqui mais provável de você encontrar. Mas um elétron assim passeando por aí para mim é uma bolinha.*

(C) - *Não, acho que não. Mas.. não, acho que não. ... eu não concebo ele* (o elétron) *atravessar o próton ...*

(E) - *do elétron? O que vem na minha cabeça assim agora é uma partícula meio assim que é assim, então tem hora que você mede ela é uma partícula, tem hora que você mede é uma onda. É mais ou menos o que eu penso nela, é como se fosse um "packman" assim porque do jeito que você vai medir, ela abre numa onda e fecha numa partícula. Um pacote assim...*

(I) – *Eu acredito que seja onda. Quer dizer, todos eles têm energia, mas a onda a gente liga com a energia porque energia é uma coisa que a gente não tem ... é assim, a gente sente a presença, pode medir campo e ver que tem energia armazenada, essas coisas mas a gente não consegue ver. No caso do próton e do elétron eu acho que tudo a gente tem que considerar como onda, apesar de que em alguns cálculos é preciso fazer como partícula e tal. Mas como onda.*

- TAMANHO: relativa às dimensões de cada objeto, de caráter absoluto como pontual ou extenso e de caráter relativo como maior ou menor, como por exemplo:

(H) - *É isso. Esta é que é a pergunta. Mas na verdade eu acredito que não. Não têm* (o elétron e o próton) *tamanho definido. O pessoal deve estipular um tamanho, mas não tem tamanho definido.*

(D) - *O que eu consigo imaginar é uma região mais central, que tem uma simetria esférica, onde está lá o próton. Mas dizer o que eu imagino além disso? Eu não consigo imaginar. Mas, você pode falar, bom então o próton tem regiões lá dentro dele, tem lá os quarks.*

Na dimensão **AÇÃO** há duas categorias:

- FORMA como ocorre a interação, se há ou não mediadores da interação entre os objetos e, se houver, quais são eles. Algumas respostas que ilustram esta dimensão são as seguintes:

(B) - *... se esse tem carga negativa, ele vai ter um... a gente pode dizer que tem um campo elétrico né, que está ocupando todo espaço e que está nesta região. Então quando eu jogo esta partícula nesse outro, o elétron aqui, numa região próxima desse íon aqui, ele vai ... ele vai interagir justamente com este campo criado pelo íon né?*

(F) - *O problema é que você pode interpretar qualquer interação como uma troca de partículas ou um outro jeito que eu também penso é que essa partícula ela tem um campo em volta dela e quando chega perto é uma forma de ... os campos se superpõem você tem um efeito aí enfim no meio existe a superposição de dois potenciais. É muito louco pensar isso ... Acho que é isso.*

(I)– *Uma sente a presença da outra e aí falam que tem um campo entre as duas para acontecer esta interação. Agora como que tem, o que tem, como que faz, porque faz? Sei lá, porque tem uma densidade maior de energia, outro tem uma menor?*

- INFLUÊNCIA NO ESPAÇO é relativa ao tipo de interação nas várias regiões do espaço, ou seja, como ocorre a interação quando os objetos estão distantes, próximos e muito próximos, percebida em respostas do tipo:

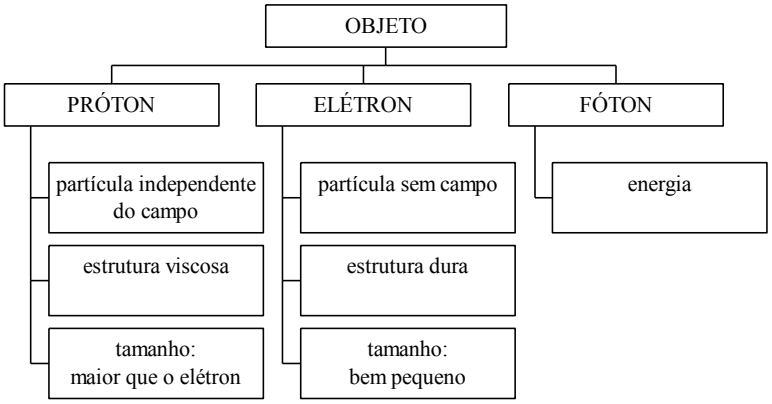
(A) - *força forte é a que mantêm unidos os nucleons no núcleo ... tá. Então seria a força mais forte da interação. A força fraca seria a interação entre o núcleo e os elétrons. A força eletromagnética seria entre os elétrons entre si ou a troca de fótons entre eles, ... Então se ele* (elétron) *entrasse no núcleo, no próton eu acho que ele estaria sujeito a forças mais fortes, ...*

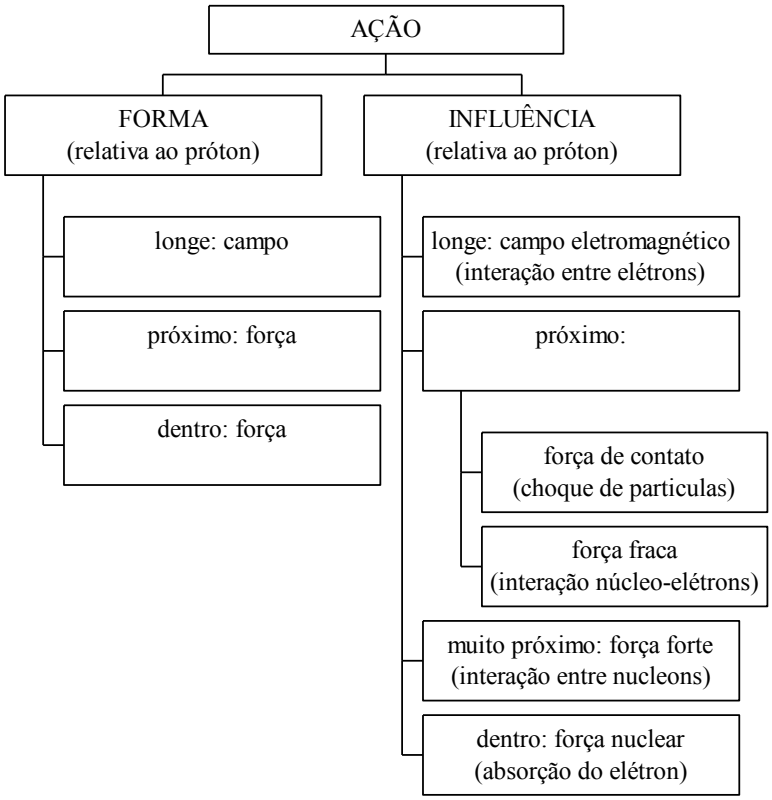
(D) - *Uma estorinha que me agradaria mais seria dizer esta, quer dizer: - o elétron está lá no infinito e sentiu de repente, dá um desejo de se aproximar do próton e estava sentindo uma força e essa força foi aumentando à medida que ele foi se aproximando até que, por exemplo, ele está se aproximando, tem uma coisa de atração. Quando ele chega aqui nesta região, ele começa ultrapassar, então, essa força vai mudar de direção e vai fazer com ele mesmo mude de direção, sofra um desvio, sofra um espalhamento.*

(F) - *Tá bom! É, eu não sei, essas coisas entre elas são apresentadas como um potencial que vai variando. É como se a partícula fosse uma partícula livre que tivesse aí passeando com uma velocidade tal e de repente ela se sente atraída, o campo de interação em torno dela muda, como se ela entrasse numa coisa que atrai ela mas ...*

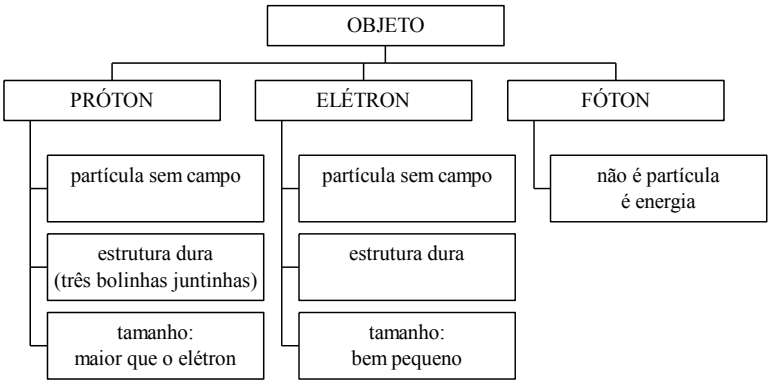
Considerando, então, estas dimensões e suas categorias, retomamos cada uma das entrevistas e classificamos segundo as dimensões de análise. A seguir apresentamos estas classificações, representadas na forma de organogramas, para cada entrevista em particular, identificados pelas letras A a I.

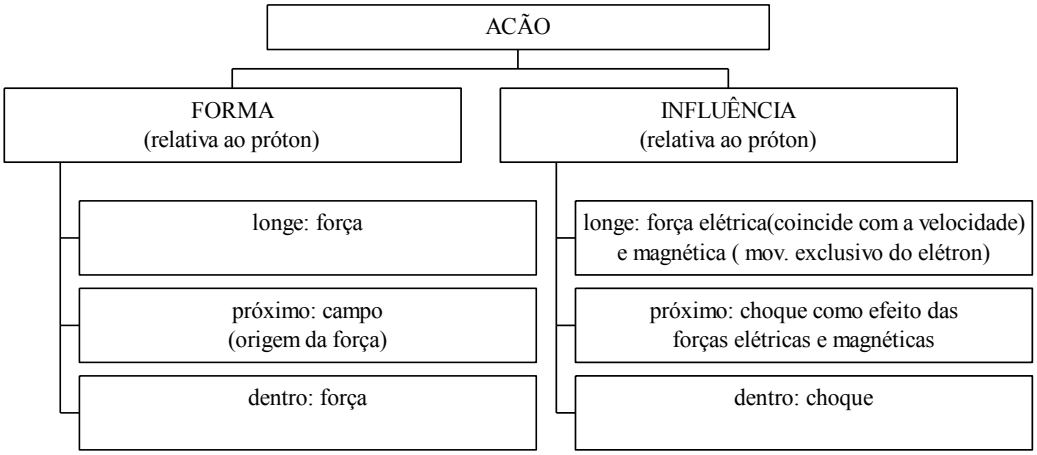
A


OBJETO
PRÓTON
ELÉTRON
FÓTON
partícula independente do campo
estrutura viscosa
tamanho: maior que o elétron
partícula sem campo
estrutura dura
tamanho: bem pequeno
energia

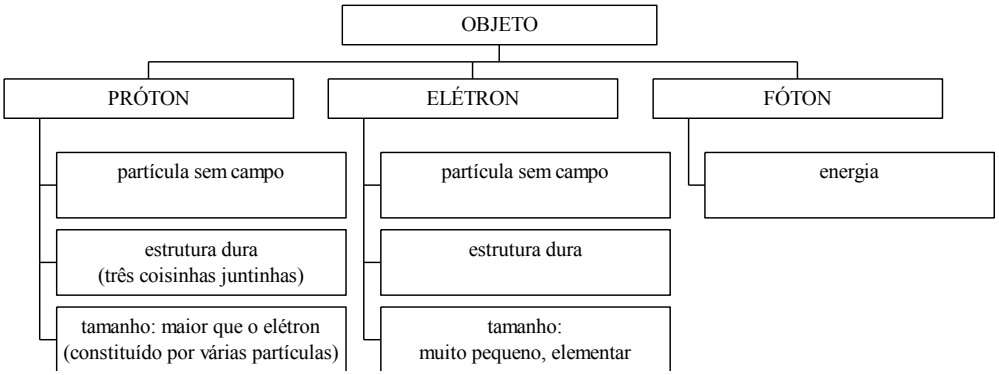

AÇÃO
FORMA (relativa ao próton)
INFLUÊNCIA (relativa ao próton)
longe: campo
próximo: força
dentro: força
longe: campo eletromagnético (interação entre elétrons)
próximo:
força de contato (choque de particulas)
força fraca (interação núcleo-elétrons)
muito próximo: força forte (interação entre nucleons)
dentro: força nuclear (absorção do elétron)

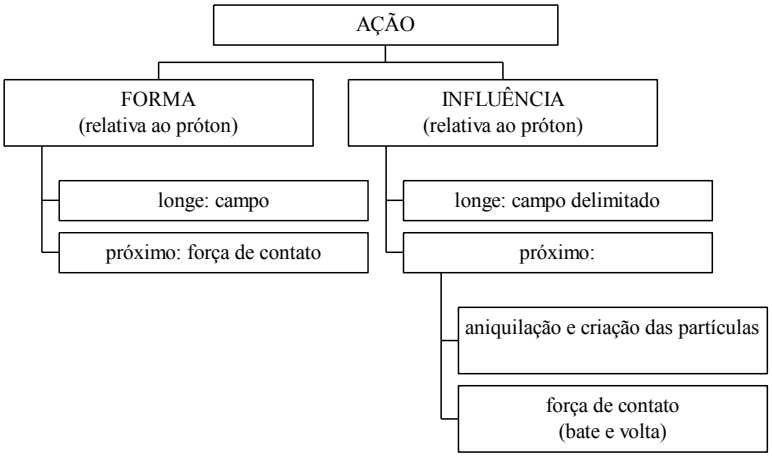
B


OBJETO
PRÓTON
ELÉTRON
FÓTON
partícula sem campo
estrutura dura
(três bolinhas juntinhas)
tamanho:
maior que o elétron
partícula sem campo
estrutura dura
tamanho:
bem pequeno
não é partícula
é energia

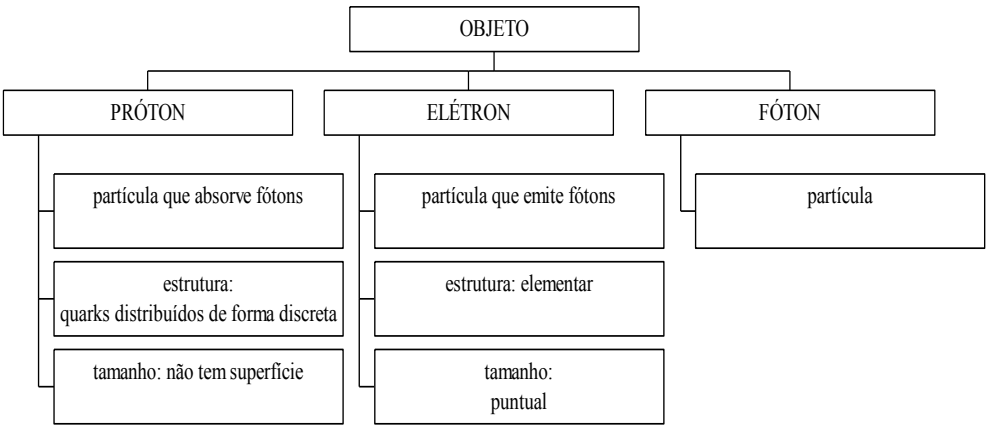

ACÃO
FORMA
(relativa ao próton)
INFLUÊNCIA
(relativa ao próton)
longe: força
próximo: campo
(origem da força)
dentro: força
longe: força elétrica(coincide com a velocidade)
e magnética (mov. exclusivo do elétron)
próximo: choque como efeito das
forças elétricas e magnéticas
dentro: choque

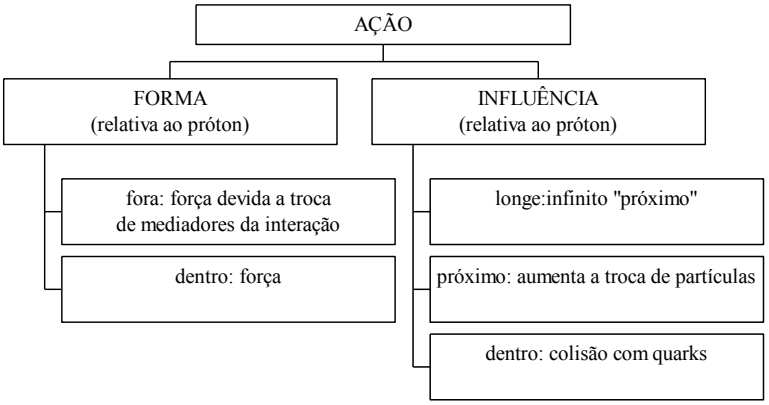
C


OBJETO
PRÓTON
ELÉTRON
FÓTON
partícula sem campo
estrutura dura
(três coisinhas juntinhas)
tamanho: maior que o elétron
(constituído por várias partículas)
partícula sem campo
estrutura dura
tamanho:
muito pequeno, elementar
energia

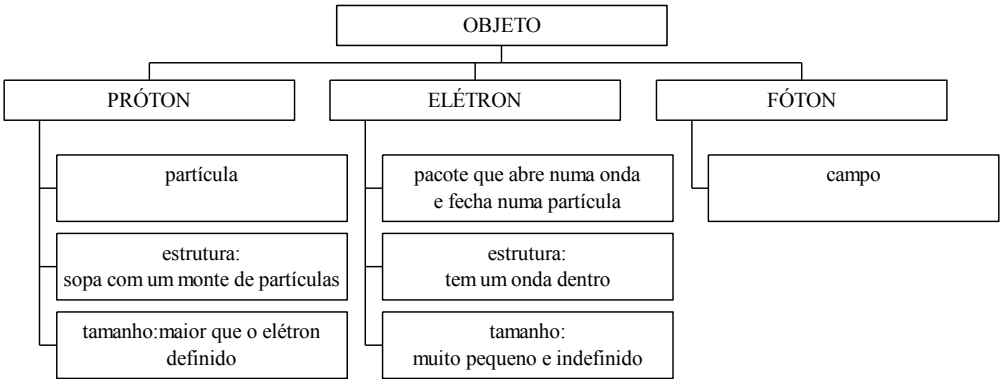

AÇÃO
FORMA
(relativa ao próton)
INFLUÊNCIA
(relativa ao próton)
longe: campo
próximo: força de contato
longe: campo delimitado
próximo:
aniquilação e criação das partículas
força de contato
(bate e volta)

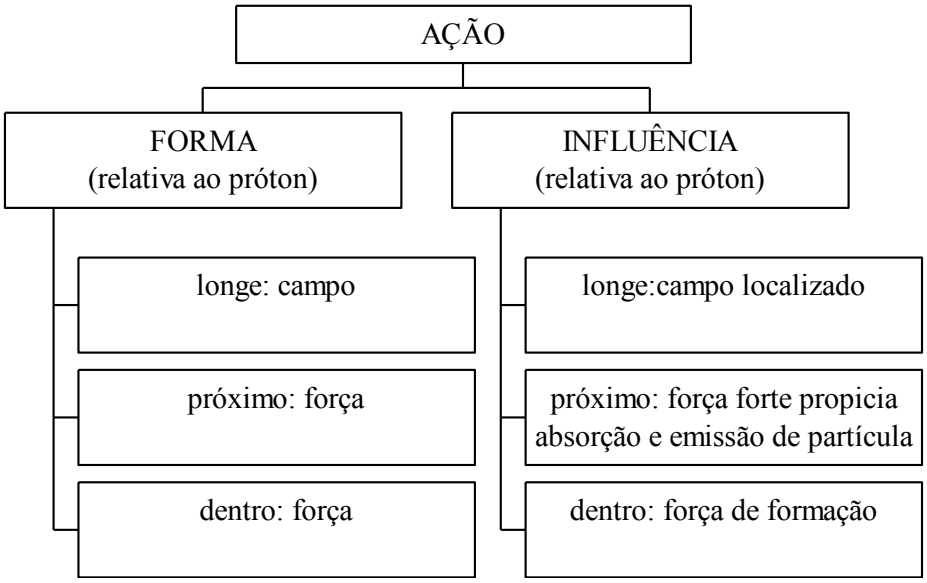
D


OBJETO
PRÓTON
ELÉTRON
FÓTON
partícula que absorve fótons
estrutura:
quarks distribuídos de forma discreta
tamanho: não tem superfície
partícula que emite fótons
estrutura: elementar
tamanho:
puntual
partícula

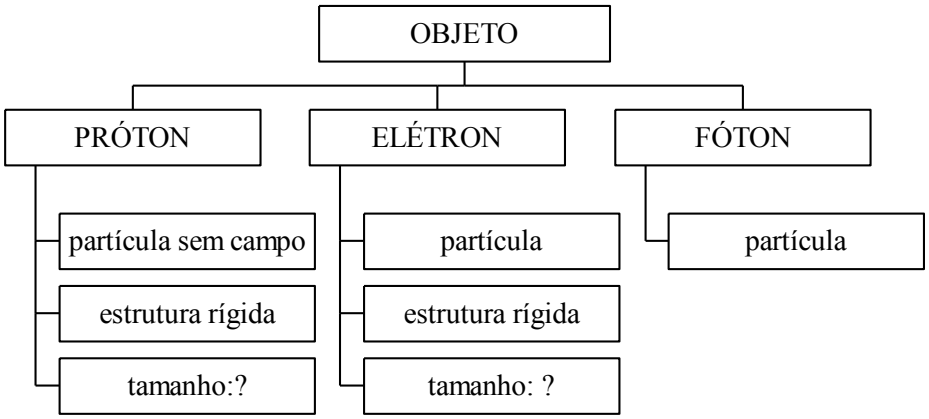

AÇÃO
FORMA
(relativa ao próton)
INFLUÊNCIA
(relativa ao próton)
fora: força devida a troca
de mediadores da interação
dentro: força
longe:infinito "próximo"
próximo: aumenta a troca de partículas
dentro: colisão com quarks

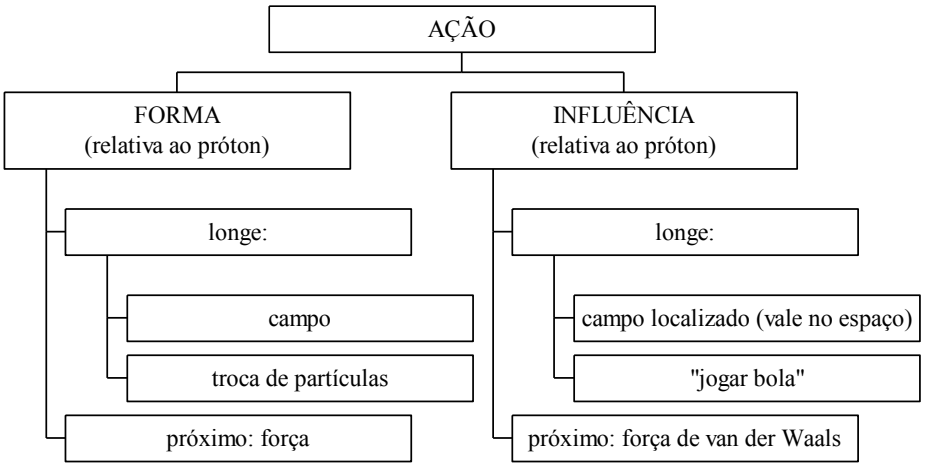
E


OBJETO
PRÓTON
ELÉTRON
FÓTON
partícula
estrutura:
sopa com um monte de partículas
tamanho:maior que o elétron
definido
pacote que abre numa onda
e fecha numa partícula
estrutura:
tem um onda dentro
tamanho:
muito pequeno e indefinido
campo

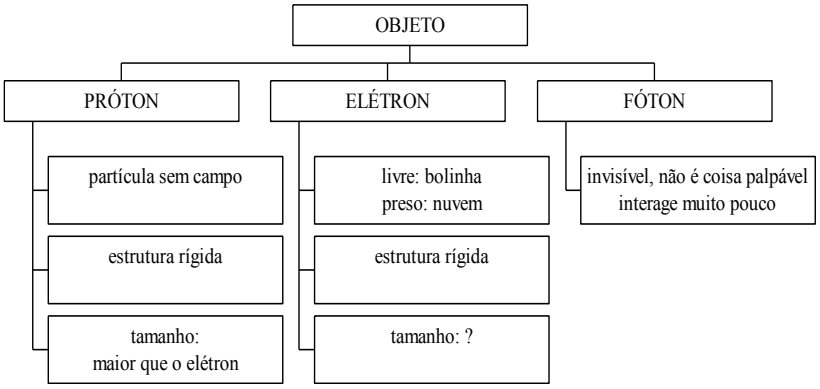

AÇÃO
FORMA
(relativa ao próton)
INFLUÊNCIA
(relativa ao próton)
longe: campo
próximo: força
dentro: força
longe:campo localizado
próximo: força forte propicia
absorção e emissão de partícula
dentro: força de formação

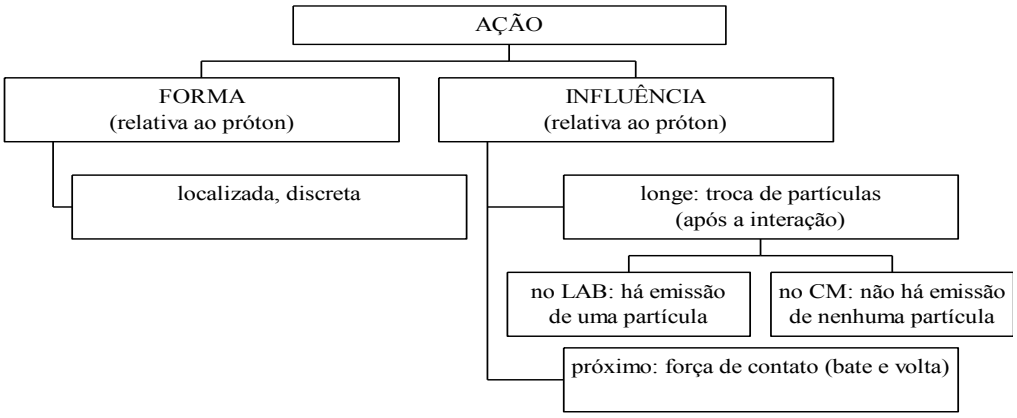
F


OBJETO
PRÓTON
ELÉTRON
FÓTON
partícula sem campo
estrutura rígida
tamanho:?
partícula
estrutura rígida
tamanho: ?
partícula

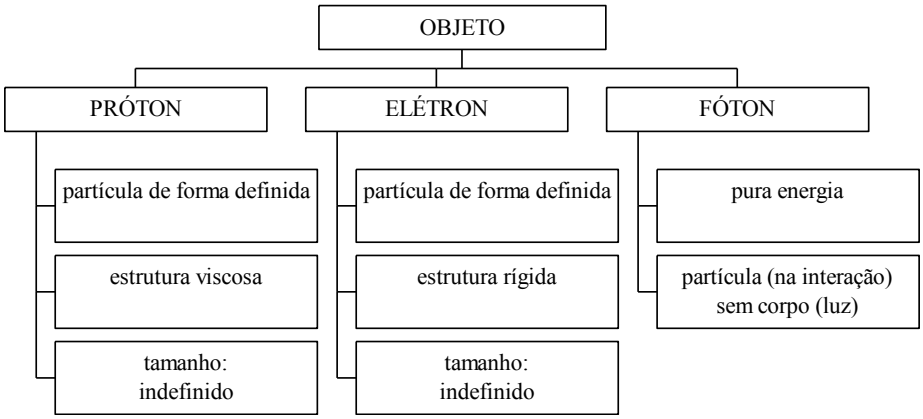

AÇÃO
FORMA
(relativa ao próton)
INFLUÊNCIA
(relativa ao próton)
longe:
campo
troca de partículas
próximo: força
longe:
campo localizado (vale no espaço)
"jogar bola"
próximo: força de van der Waals

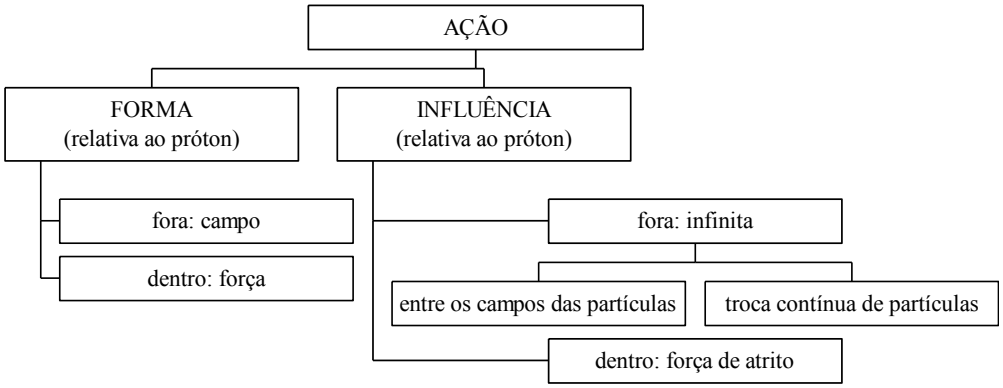
G


OBJETO
PRÓTON
ELÉTRON
FÓTON
partícula sem campo
estrutura rígida
tamanho:
maior que o elétron
livre: bolinha
preso: nuvem
estrutura rígida
tamanho: ?
invisível, não é coisa palpável
interage muito pouco

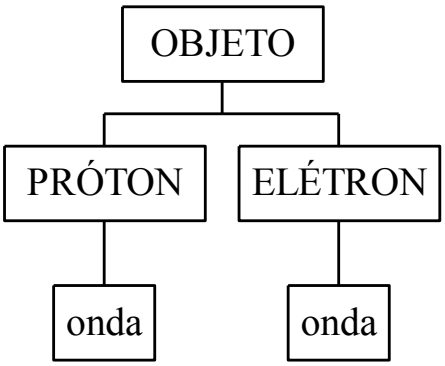

AÇÃO
FORMA
(relativa ao próton)
INFLUÊNCIA
(relativa ao próton)
localizada, discreta
longe: troca de partículas
(após a interação)
no LAB: há emissão
de uma partícula
no CM: não há emissão
de nenhuma partícula
próximo: força de contato (bate e volta)

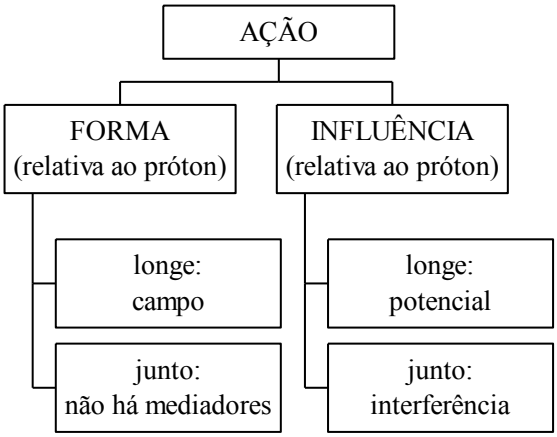
H


OBJETO
PRÓTON
ELÉTRON
FÓTON
partícula de forma definida
estrutura viscosa
tamanho: indefinido
partícula de forma definida
estrutura rígida
tamanho: indefinido
pura energia
partícula (na interação) sem corpo (luz)


AÇÃO
FORMA (relativa ao próton)
INFLUÊNCIA (relativa ao próton)
fora: campo
dentro: força
fora: infinita
entre os campos das partículas
troca contínua de partículas
dentro: força de atrito

I


OBJETO
PRÓTON
ELÉTRON
onda
onda

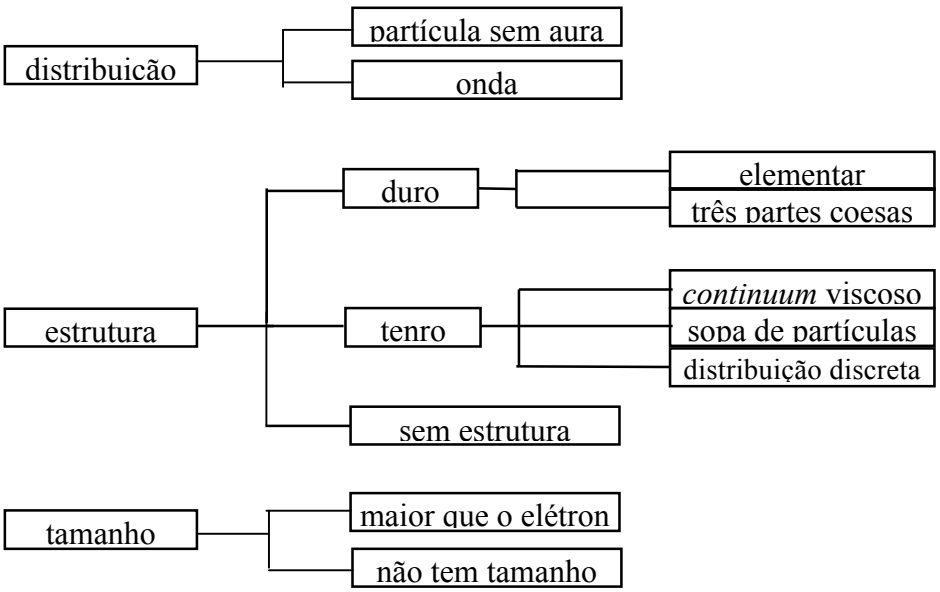

AÇÃO
FORMA
(relativa ao próton)
INFLUÊNCIA
(relativa ao próton)
longe:
campo
junto:
não há mediadores
longe:
potencial
junto:
interferência

Com estas classificações articulamos e sintetizamos os elementos de todas as entrevistas. Com as articulações das categorias de respostas pudemos perceber um conjunto de relações construídas por estudantes relativas ao conceito de interação entre prótons e elétrons. Os tipos de estruturas de conhecimento elaborados são resultados de uma percepção global de todos os nossos dados e, portanto, não reflete a totalidade de nenhuma entrevista em particular embora cada entrevista contenha alguns dos elementos e das relações presentes.

III-3. RESULTADOS

Na dimensão OBJETO há três elementos que participam da interação: o próton, o elétron e o fóton, cujas características estão nos diagramas correspondentes:

- **PRÓTON**

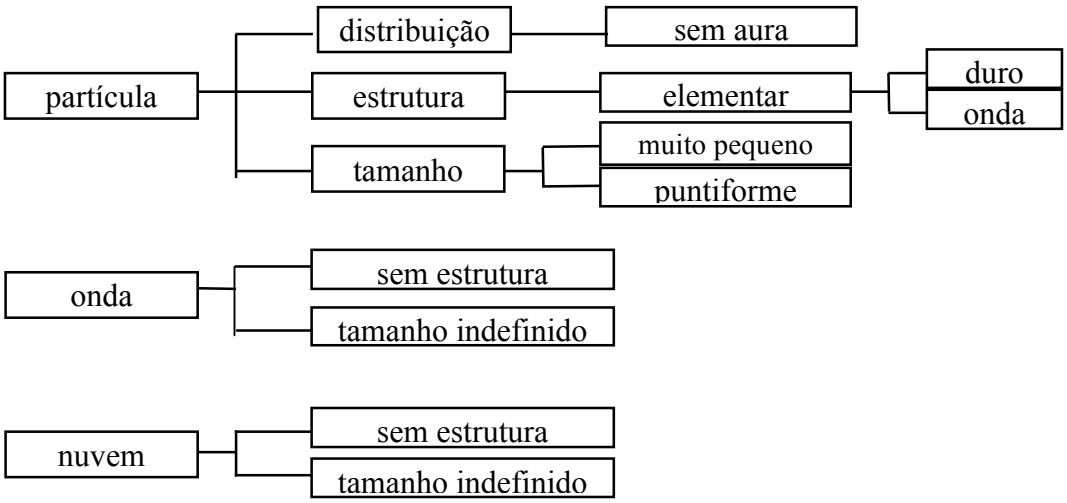


O próton é concebido como onda ou partícula. Como onda ele não tem estrutura e tamanho. Como partícula, ele tem um determinado tamanho, é maior que o elétron e não tem nenhuma aura ao redor. Nesta concepção, o que o diferencia é a sua estrutura.

Na concepção de partícula há dois tipos de prótons: duros ou tenros e cada um deles é constituído de "coisas" diferentes. O próton duro é um bloco rígido elementar ou é constituído por três elementos rígidos e coesos. Já o próton tenro é mole o suficiente para que um elétron possa penetrá-lo. Pode ser homogêneo e viscoso ou constitu-

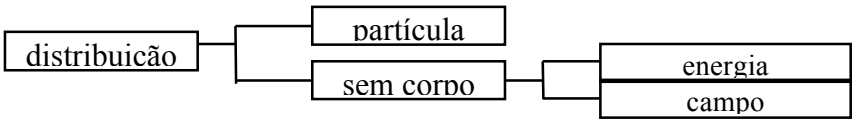
ído de diferentes tipos de partículas que formam uma espécie de sopa ou uma distribuição discreta de três partículas muito pequenas que guardam uma certa distância uma das outras.

- **ELÉTRON**



O conceito de elétron é mais homogêneo que o próton, pois as diferenças que existem são localizadas e pouco discrepantes. Três conceitos de elétron coexistem, dois relacionados ao elétron livre e outro ao elétron ligado. O elétron pode ser uma partícula, uma onda ou uma nuvem. Quando é partícula ele não tem nenhuma aura ao redor, pode ser uma bolinha dura ou um pacotinho que tem uma onda dentro e é muito pequeno, podendo ser um ponto. Como onda, o elétron não tem estrutura e tamanho. Ele pode ser partícula e estar ligado a um núcleo, mas neste estado ligado ele também pode ser uma nuvem. Nesta concepção ele tem uma distribuição espacial na forma de nuvem, não tem estrutura e seu tamanho é indefinido.

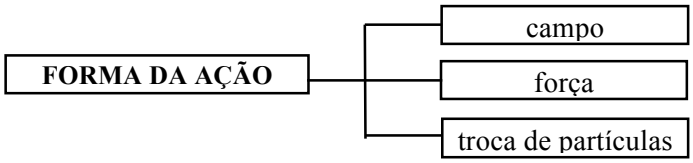
- **FÓTON**



O fóton é o objeto mais indefinido de todos. O conceito de fóton é muito vago e possui apenas um elemento. O fóton pode ser uma partícula ou pode não ser partícula, não ter corpo e neste caso ele é energia ou ele é campo. Para o fóton os conceitos

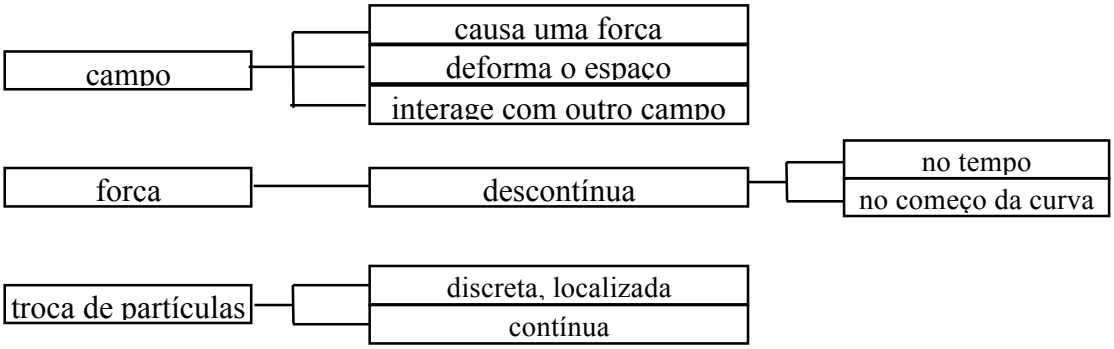
de partícula, energia e campo são utilizados como axiomas que se encerram em si mesmos.

Na dimensão AÇÃO há três formas, conforme mostra o diagrama abaixo:



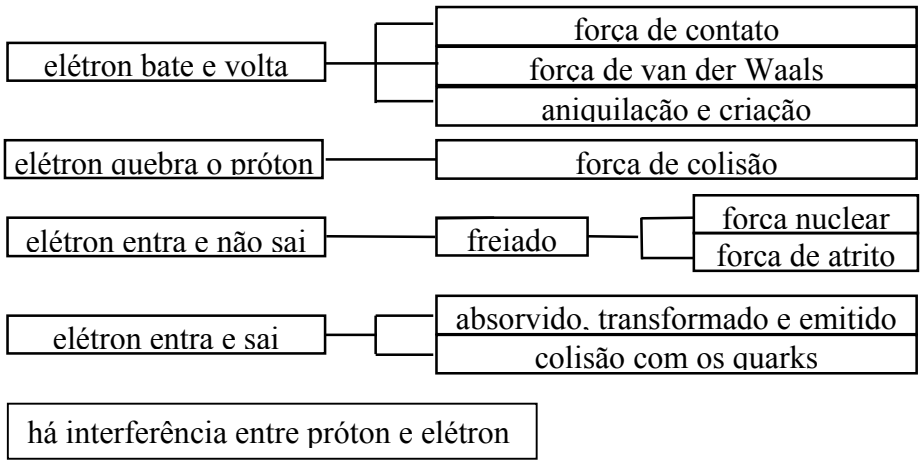
São formas independentes e incomensuráveis. Estas três formas sintetizam um conjunto maior ações que dependem da distância relativa elétron-próton.

Quando o elétron está longe do próton a INFLUÊNCIA da ação está relacionada à forma, conforme o diagrama abaixo:



- Quando um campo influencia a ação ele é de origem eletromagnética, é delimitado no espaço e sua ação tem as três propriedades indicadas no diagrama.
- Quando há apenas uma força influenciando a ação, esta força é de origem eletromagnética e descontínua. Os tipos de descontinuidade são: temporal – quando de repente o elétron começa a sentir a força ou espacial – localizada na região onde a mudança na velocidade do elétron é perceptível.
- Quando a ação ocorre através de troca de partículas, estas partículas são fótons e pode haver trocas discretas e localizadas na região onde a variação da velocidade do elétron é maior ou contínua em todos os pontos do espaço.

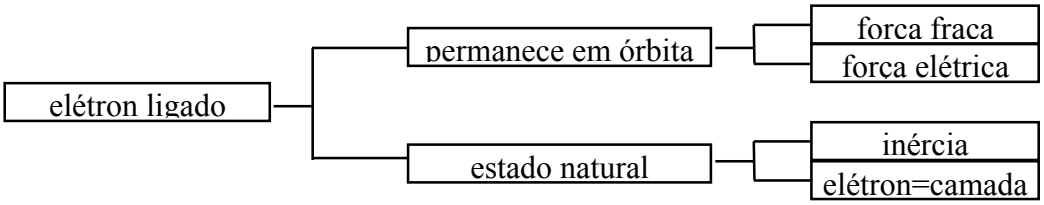
Quando o elétron está muito próximo do próton, o campo como forma de ação desaparece. Prevalecem, ainda, as formas de ação força e troca de partículas. A influência da ação, esquematizada no diagrama abaixo, depende do comportamento do elétron ao atingir frontalmente o próton.



- Ao atingir o próton, o elétron pode bater nele e voltar através da ação de duas forças de naturezas diferentes ou ser aniquilado e simultaneamente criado e reemitido.
- O elétron bate no próton e quebra-o através de forças de colisão.
- O elétron entra e não consegue sair do próton. É freado dentro do próton através de forças nucleares ou forças de atrito.
- O elétron atinge o próton, entra nele e sai por absorção, transformação e posterior emissão ou, então, ele pode atravessar o próton sem interagir a não ser que ele interaja com algum quark através de uma força de colisão, cujo resultado é a mudança na sua trajetória.
- Há interferência entre o próton e o elétron e eles mudam as direções de propagação

Vale a pena notar que as diferentes formas de ação no interior do próton não são de origem eletromagnética. As forças de contato, colisão e atrito têm o *status* de forças fundamentais.

Quando o elétron está próximo do próton ele pode estar em dois estados: livre ou ligado. As considerações anteriores foram relativas ao elétron livre. Se ele está ligado, há também diferentes formas de ação que o liga ao núcleo. Quando o elétron está ligado não há forma de ação por troca de partículas. Existe apenas a ação na forma de força. Por outro lado, há uma outra concepção, relacionada especialmente ao estado ligado, onde não há interação entre o elétron e o núcleo, conforme está esquematizado no diagrama abaixo:



O elétron no estado ligado pode permanecer em órbita através da ação da força fraca ou força elétrica ou o estado ligado é considerado um "estado natural" do elétron. Nesta concepção, o elétron fica em órbita por inércia ou porque ele tem o formato da camada relativa a cada estado.

As categorias de respostas apresentadas nesta seção fornecem-nos elementos que articulados permitem a elaboração de modelos de interação, pois o conceito de interação depende dos conceitos de objeto e de ação entre eles. A articulação entre as categorias de respostas é apresentada a seguir através do destaque de alguns conceitos e relações das representações construídas por estudantes sobre a interação entre um elétron e um próton.

III-4. ALGUNS MODELOS CONSTRUÍDOS SOBRE INTERAÇÃO.

As representações sobre a natureza da interação percebidas através da articulação entre as categorias de respostas indicam que as categorias relativas à FORMA e INFLUÊNCIA NO ESPAÇO estão intimamente relacionadas aos conceitos dos OBJETOS que participam da interação. O modelo de interação depende da estrutura do próton, do estado de ligação do elétron e da distância entre o elétron e o próton.

Uma característica comum a todas as representações é que na interação entre um elétron e um próton existem diferentes tipos de ação. Não há restrições quanto à natureza da interação que o elétron experimenta. Numa interpretação animista diríamos que *o elétron não tem nenhum preconceito, interage com tudo e com todos* e o tipo de interação depende apenas da ocasião. A idéia disseminada pelos físicos que o elétron participa apenas das interações eletro-fraca e gravitacional é insustentável nos modelos construídos pelos estudantes.

A ação através de campo só existe quando as partículas interagentes estão distantes uma da outra. Isto indica que esta forma de intermediação só é útil quando é necessária. É uma forma de “resolver” o problema da interação à distância e, por isso,

não existe quando as partículas estão próximas. Outro conceito que tem esta função é a troca de partícula como mediadora da interação. Esta troca existe também apenas quando as partículas estão distantes, pois quando elas estão próximas esta forma de ação modifica-se para um processo de absorção e reemissão que não envolve uma terceira partícula.

A natureza da interação entre partículas muito próximas está intimamente relacionada aos conceitos de próton e de ação, ou seja, se o próton é duro o elétron bate nele e volta ou, então, quebra-o devido à ação de forças ou a um processo de aniquilação e posterior criação e emissão do elétron pelo próton. Se o próton é tenro, o elétron pode entrar no seu interior e seu percurso depende da interação nesta região, cujas formas de ação estão relacionadas ao meio que o elétron está, ou seja, dentro do próton. Por isso, há forças nucleares, de atrito, de colisão com quarks ou, então, absorção, transformação e emissão de elétrons pelo próton. Estas formas de ação são diferentes daquelas relativas ao próton duro. Se o próton é onda, não há interação; há interferência.

O conceito de elétron também determina o tipo de interação que existe. Se ele é considerado uma partícula, ele pode interagir com um próton e entrar em órbita, mas, também, ele pode passar por um certo ponto, que é a distância natural da órbita e ficar orbitando por inércia. Este estado natural do elétron ligado também existe quando o elétron é considerado como uma nuvem.

Há, portanto, diferentes modelos sobre interação construídos por estudantes e, também, há diferentes conceitos de próton e elétron. A seguir apresentamos algumas representações que construímos a partir das categorias de respostas das dimensões de análise elaboradas para investigar os modelos de interação construídos pelos bacharéis em Física.

III-4.1. Representação Cinemática.

A representação cinemática é essencialmente descritiva. Ela não tem o mesmo significado que aquele adotado na Física onde a cinemática estuda os movimentos sem se referir às forças que os produzem, mas é muito parecida. Nesta representação, os agentes causadores da variação do movimento não necessitam de uma causa. O comparecimento destes agentes em diversas situações é tido como fundamental. Eles

existem porque esta existência é natural e "ponto final". Não há necessidade de justificá-los. Sob este aspecto, é que há paralelo com a cinemática.

Para descrever esta representação, vamos considerar três situações:

1. um elétron aproximando-se de um próton;
2. um elétron colidindo com um próton;
3. um elétron ligado a um próton: o átomo de hidrogênio.

Embora na Física estes eventos sejam resultados diferentes de um único tipo de interação, que é a eletromagnética, na representação construída pelos estudantes estas três situações são completamente independentes, pois se referem a "situações naturais".

Colocamos as aspas para deixar evidente que não há relação destas interpretações com aquelas aceitas pela Física, pois enquanto que na Física estes eventos representam interações, nesta representação não há interação e sim comportamentos naturais que são característicos destas situações. Acontecem assim porque são procedimentos da natureza.

Embora se trata de uma representação que se caracteriza pela existência de "estados naturais", estes estados possuem particularidades que os diferenciam em cada uma das três situações que consideramos anteriormente.

1. Quando um elétron aproxima-se de um próton, isto acontece porque há uma força responsável por esta aproximação. Esta força existe sobre o elétron porque a uma certa distância dele há um próton que o atrai. Se o próton atrai o elétron, é natural que haja uma força sobre este elétron. É um evento chamado de *interação à distância* que ao invés de ser o resultado de alguma interação, é um estado natural. Como, por exemplo, o movimento da Lua ao redor da Terra é considerado como natural. Se alguém perguntar sobre a sua causa, a resposta, coerente com esta visão, é a força gravitacional. A força não é responsável pela modificação do movimento, como é interpretada na Mecânica Clássica, e sim é aquela que conserva o movimento, seja ele de rotação como no caso da Lua, seja ele de atração, como no caso de cargas de sinais opostos.

Esta força que existe junto à partícula possui duas formas diferentes de descontinuidade. Ela é descontínua no espaço ou no tempo. Quando ela apresenta descontinuidade espacial, simultaneamente existe uma descontinuidade temporal. A afirmação recíproca não é verdadeira, ou seja, quando há descontinuidade temporal, ela não está associada a uma descontinuidade espacial.

Nos dois casos a força começa a existir **de repente**, o que corresponde à descontinuidade temporal. No caso de haver apenas a descontinuidade temporal, ela acontece no infinito e em algum instante a força passa a existir na partícula. Este instante está relacionado ao início da descrição do movimento, isto quer dizer que a existência da força depende apenas do observador. Não há referências que o início do movimento pode ser provocado por equipamentos presentes em um laboratório.

No caso de haver uma força descontínua no espaço, há dois pontos de descontinuidade. Um deles encontra-se onde a variação na trajetória do elétron é perceptível, isto é, quando a reta que representa a trajetória inicial começa a tornar-se curva e o outro, onde esta curva transforma-se em reta novamente. Portanto, há uma região em torno do próton onde existe força. Por isso há dois pontos de descontinuidade, quando o elétron entra na região e quando ele sai. Neste caso a descontinuidade temporal é apenas uma contingência das propriedades espaciais da força.

As características que sintetizam esta representação são:

• a existência da força sobre a partícula é considerada natural quando há atração devido à outra partícula;
• a força possui descontinuidade temporal, isto é, ela começa a existir em algum instante;
• este instante está relacionado ao início da descrição do movimento ou à entrada da partícula em uma região que contém o próton no centro e onde o elétron descreve uma trajetória curva.

2. Quando um elétron colide com um próton, o comportamento deste elétron depende da concepção de próton. O próton pode ser duro ou tenro e em cada uma destas concepções existem duas estruturas de próton diferentes. Para descrever esta representação vamos considerar inicialmente o próton duro e, em seguida, o tenro.

Quando o próton é duro, o elétron, ao chocar-se com ele, pode "bater e voltar" ou pode quebrá-lo. O comportamento do elétron devido a um choque frontal com o próton tem sempre a mesma característica, que é o contato direto

com a superfície do próton. Se ele volta para trás ou, então, quebra o próton, estes tipos de comportamento não dependem da forma em que ocorre o contato e sim da estrutura do próton. Se o próton é rígido e elementar, o elétron, ao colidir com ele, volta para trás porque o elétron é muito menor que o próton. Mas se o próton é rígido e constituído por três partículas elementares, o elétron pode, ao bater nele, separar suas partes e, então, continuar a sua trajetória para frente, com algum desvio provocado pelo contato com as partes quebradas do próton.

Quando o próton é tenro, o elétron pode chocar-se com ele, penetrar dentro ele e parar ou, então, pode atravessá-lo livremente sendo que há uma pequena possibilidade de chocar-se com algum quark. O contato direto com o próton ou com as partículas que o constituem é que justifica estes movimentos. As diferenças, novamente, estão relacionadas às estruturas do próton. Se o próton é concebido com um objeto constituído por uma substância homogênea e viscosa, um elétron, ao colidir frontalmente com ele, consegue penetrar nesta substância, mas o contato com ela faz com que ele vá perdendo velocidade até parar e, assim, ele fica dentro do próton. Na outra concepção de um próton constituído por três partículas que são os quarks, bastante separadas entre si de tal forma que o próton seja praticamente um vazio onde há três quarks, um elétron não colide com ele, pois o próton não tem superfície; o elétron entra nesta região imaginária, mais ou menos delimitada, que contém três quarks e atravessa-a livremente no vazio a menos que ele encontre algum quark pela frente (que é muito improvável) e, então, colida com ele e o resultado desta colisão é um pequeno desvio na sua trajetória. Não há possibilidade do elétron voltar para trás, pois ele é maior que o quark e, por isso, uma colisão pouco provável com um quark provoca a mudança da trajetória de um elétron que se movimentava livremente "dentro" do próton.

Nesta representação existe apenas uma característica:

- ao colidir frontalmente com um próton, um elétron modifica ou não sua trajetória devido ao seu **contato** com a estrutura do próton.

3. A situação em que um elétron está ligado a um próton corresponde à representação do átomo de hidrogênio, cuja visão de mundo associada é de um próton rodeado pelo elétron. O que a caracteriza como representação cinemática é o fato de que este estado é considerado natural no sentido de que não há nenhuma causa para a existência deste átomo. Ele é um elemento que contém duas partes, existe em abundância na natureza, todos os seus pares são idênticos – um elemento fundamental. Enfim, o átomo de hidrogênio não é considerado como um sistema resultante da interação eletromagnética entre um próton e um elétron, mas, ao contrário, como um elemento composto por um próton e um elétron. Portanto, não há interação entre um próton e um elétron quando eles formam o átomo de hidrogênio.

Há duas representações relativas ao átomo de hidrogênio que estão relacionadas à visão de mundo associada ao elétron ligado: o elétron é uma partícula localizada no espaço ou, então, é uma nuvem distribuída em torno do próton. Se o elétron é partícula, ele está em movimento ao redor do próton e isto ocorre por inércia, isto é, é um movimento natural que não necessita da atuação de nenhuma força ou algo equivalente. E se o elétron é nuvem, nesta representação não há movimento, pois o elétron é a própria nuvem. A imagem de natureza associada a esta representação corresponde a uma partícula – que é o próton – envolvida por uma nuvem – que é o elétron.

Esta representação é sintetizada por apenas uma propriedade fundamental relativa ao átomo:

- um estado ligado é um estado natural; não há interação entre os elementos que o compõe.

Estas três representações guardam entre si continuidades e rupturas. As rupturas são relativas às causas naturais do movimento que é representada pela força, quando há atração entre as partículas; pelo contato, quando há colisão e pela ausência de interação no estado ligado. A continuidade que caracteriza esta representação como cinemática está relacionada ao caráter natural das três situações e que, portanto, não necessitam de explicações.

III-4.2. Representação Dinâmica.

Na representação dinâmica o movimento está sempre relacionado às causas que o produzem. Diferente da representação cinemática que apenas descreve os agentes causadores do movimento, nesta representação a origem e as características destes agentes são relevantes à interpretação do evento. Para descrever esta representação vamos considerar separadamente as três situações apresentadas na descrição anterior:

1. Se um elétron é atraído por um próton distante pode haver três motivos diferentes que causam esta atração. Um deles é devido à interação do elétron com um campo que existe devido ao próton. O resultado desta interação manifesta-se na forma de uma força elétrica sobre o elétron e é a responsável pelo movimento de atração. O elétron, portanto, interage com o próton por intermédio de um campo. Este campo é sempre descontínuo e a superfície de descontinuidade pode estar longe do próton ou, então, entre os pontos onde a trajetória do elétron é curva. Trata-se sempre de um campo delimitado e o elétron, em algum momento, entra nele e, dentro da região em que há campo, interage com ele.

A outra causa para a interação também está relacionada ao campo, mas, diferente da anterior, a interação acontece entre os campos das duas partículas. A atração é devido a um acoplamento dos campos do elétron e do próton, uma espécie de entrelaçamento entre os dois campos que provoca a aproximação das partículas.

O terceiro tipo de interação não é causada por nenhum campo, mas sim pela forma do espaço onde o elétron está em movimento. Nesta representação o espaço é encurvado pelo próton. Este encurvamento é uma depressão no espaço, é como se próton *afundasse* o espaço. Imagine uma superfície elástica e um corpo denso e pesado – uma bola de chumbo, por exemplo – que esteja parado em algum ponto dela. Esta superfície é plana longe do corpo e ao redor dele é encurvada para baixo. É esta imagem que é associada ao espaço plano encurvado pelo próton e a atração é causada por esta depressão. A curva que o elétron faz ao passar perto do próton é devida ao fato deste elétron entrar num buraco e como ele já vinha com uma certa velocidade, ele consegue sair dele. Para o elétron, é como se ele estivesse em uma montanha russa, cujo número

de vales é determinado pela quantidade de prótons que existem na região em que ele está em movimento.

Nesta situação em que há um elétron sendo atraído por um próton podemos sintetizar três modelos que interpretam a atração:

• existe um campo devido ao próton e o elétron interage com este campo em cada ponto;
• os campos das duas partículas interagem entre si;
• o próton encurva o espaço e o elétron modifica sua velocidade ao passar pela região encurvada. Neste modelo não há interação.

2. A outra situação analisada é relativa à colisão frontal de um elétron com um próton. Os agentes responsáveis pelo comportamento do elétron dependem da concepção de próton, que nesta representação são três: próton elementar e duro, próton tenro e homogêneo ou onda. O elétron comporta-se basicamente da mesma forma que na representação cinemática, mas na representação dinâmica há uma causa para cada tipo de comportamento.

Se o próton é duro, o elétron volta para trás após a colisão e isto ocorre porque quando o elétron está muito próximo ao núcleo, começa a atuar uma força, mais intensa que a força de atração, que o faz mudar de direção, isto é, virar de um ângulo de 180°. A força que atua no elétron, contra a força de atração, é de curta distância, mas suficientemente intensa para inverter sua velocidade antes que haja o contato do elétron com a superfície do próton. Além disso, esta força provoca um aumento da velocidade após a inversão, suficiente para o elétron conseguir sair da região de atração do próton.

Se o próton é macio, o elétron consegue atravessar sua superfície e entrar nele, mas fica preso dentro dele. Isto ocorre porque quando o elétron entra dentro do próton, atua sobre ele uma força que só existe dentro do próton e que o aprisiona. Esta força é identificada por força nuclear, ou seja, aquela que existe dentro do núcleo.

Se o próton e o elétron são ondas, elas encontram-se e interfere uma na outra, provocando a mudança nas direções de propagação das duas.

Para sintetizar esta situação há duas representações para a interação:

• Quando um elétron está junto ao próton (próximo à superfície de um próton duro ou dentro de um próton mole) atua sobre ele uma força "nuclear".
• Quando estão juntos, elétron e próton interferem entre si como ondas.

3. Quando o elétron está ligado ao próton, ele movimenta-se ao redor do próton devido à atuação de uma força sobre ele que o faz ficar em órbita. Esta força é devida ao próton e pode ser aquela denominada por força elétrica ou, então, uma força conhecida por força fraca. Esta representação é bem sintética:

• o elétron orbita em torno de um próton devido à existência de uma força que atua sobre ele e é devida ao próton.

Se analisarmos a representação dinâmica, considerando as causas da interação entre o elétron e o próton, observamos que ela está fragmentada em três partes, pois em cada uma das situações que discutimos, o agente causador da interação é diferente. Mas se, ao invés de considerarmos que há fragmentação, procurarmos uma unidade que pode caracterizar esta representação, poderemos reverter esta interpretação e verificar que se trata de uma representação estruturada. Para isto, basta considerar – diferente da Física – que o próton pode ser responsável por diferentes tipos de influências sobre o elétron ou, no reverso, o elétron é influenciado de diferentes formas pelo próton.

III-4.3. Representação Conservativa.

Esta representação caracteriza-se pela necessidade de conservação do movimento, da energia, da quantidade de partículas, enfim, refere-se a movimentos acoplados onde a conservação é garantida por alguma transferência ou transformação entre as partículas que compõem o sistema. Quando há modificação no movimento das partículas, pode surgir uma outra partícula que justifica tal efeito. Como nas outras representações, a natureza das partículas que surgem durante a interação depende da situação e, também, da concepção de próton e de estado ligado, como é descrito a seguir:

1. Se um elétron é espalhado por um próton, no sistema de referência do laboratório, o próton está inicialmente em repouso e após a interação ele permanece praticamente em repouso. Esta é a descrição do evento que pode ser observado, entretanto, esta observação depende da interpretação que é associada

a ela. Quando neste espalhamento "observa-se", após a interação, um próton com uma velocidade muito pequena, porém não nula, o momento total do sistema é conservado mas a trajetória, principalmente do elétron, modifica-se. A esta modificação associa-se a transferência de uma outra partícula do próton para o elétron, que muitas vezes é denominada por fóton. Em outras palavras, o próton "joga" uma partícula para o elétron e este, ao recebê-la, modifica sua velocidade, ou seja, a nova velocidade do elétron é a resultante da sua velocidade anterior ao recebimento da partícula com a velocidade da partícula recebida. O próton, por sua vez, ao se desfazer desta partícula, recua muito pouco, pois ela é muito pequena quando comparada a ele. Neste modelo há duas vertentes onde a transferência é discreta ou contínua. Quando esta transferência é discreta, o próton transfere apenas uma partícula para o elétron e no instante em que o elétron a recebe, há uma mudança radical na sua velocidade. Na transferência contínua, o próton emite várias partículas em instantes subseqüentes e o elétron recebe uma de cada vez e vai modificando sua velocidade gradativamente.

Há uma outra representação que interpreta o espalhamento quando se considera que o próton permanece em repouso após a interação. Se o sistema for constituído apenas das duas partículas, não há conservação do momento total durante a interação e, por isso, deve haver a reemissão da partícula recebida pelo elétron de tal forma que compense a variação do seu momento. Nesta representação, esta reemissão existe apenas no referencial do laboratório, onde o próton permanece parado durante a interação. Se este mesmo espalhamento for analisado no sistema de referência do centro de massa, onde as duas partículas estão em movimento antes e após a interação, o momento é conservado sem que haja necessidade de emissão de uma outra partícula pelo sistema.

Estas duas representações não são diferentes na interpretação da interação entre duas partículas, mas sim nas características relativas ao movimento das partículas que compõem o sistema. Nestas representações não há preocupação em interpretar a emissão e absorção de partículas pelo próton e elétron tal como: se o próton emitiu uma partícula, ela já existia antes de ser emitida? Ou como fica o elétron após ter absorvido uma partícula? Estas questões não chegam a serem formuladas, pois esta troca de partículas existe apenas para

justificar a interação que é algo externo a cada uma das partículas. Portanto, estas representações podem ser sintetizadas por apenas uma interpretação:

- a interação entre as duas partículas ocorre através da intermediação de uma terceira partícula.

2. Quando o elétron colide frontalmente com o próton, a conservação manifesta-se através da transformação das partículas interagentes. Esta transformação está associada à concepção de próton. Se o próton é duro, um elétron, após uma colisão frontal, volta para trás. A interação responsável por este movimento é interpretada como: o elétron colide com o próton e durante a colisão ocorre uma aniquilação elétron-próton seguida de uma criação deste mesmo par. A aniquilação e a criação são instantâneas. Após a criação, o próton, por ter massa muito grande, permanece em repouso e o elétron adquire uma velocidade contrária a que ele tinha antes da aniquilação.

Quando o próton é tenro, o elétron, ao colidir com ele, é absorvido. No interior do próton, o elétron é transformado na mesma substância que compõe o próton e, para que haja conservação da energia do sistema, um elétron é emitido pelo próton que permanece em repouso. Nesta interpretação há a preocupação com a conservação da energia apenas e não do momento também. A necessidade de o próton emitir um elétron, após ter absorvido outro, deve-se ao fato de que o elétron antes da colisão tinha uma determinada velocidade e o próton estava parado, durante a absorção e transformação do elétron, o próton continua em repouso e neste instante a energia não está sendo conservada, mas como este intervalo de tempo é suficientemente pequeno, a conservação da energia pode ser violada. Logo após a transformação, então, um elétron é emitido pelo próton, com velocidade suficiente para conservar a energia. Esta emissão estimulada pela absorção de um elétron é igualmente provável em qualquer direção.

A interação devido a uma colisão frontal de um elétron com um próton é essencialmente a mesma para as duas concepções de próton. As diferenças que há entre elas são acidentais. Portanto, esta interação é interpretada como:

- Na colisão entre um próton e um elétron há uma transformação destas partículas e, em seguida, uma emissão deste par novamente.

3. Na representação conservativa, o estado ligado pode ser também um estado resultante da obrigatoriedade da conservação. Neste caso, a grandeza que é conservada está relacionada ao movimento de rotação. O átomo é considerado um estado estacionário, que sempre existiu desta forma, mas, também, ele pode ser criado a partir da interação entre as partículas que o compõe. O átomo de hidrogênio, por exemplo, pode surgir de uma colisão lateral de um elétron com um próton. Ao atingir um ponto lateral do próton, o elétron provoca um movimento de rotação neste próton e, para que haja conservação da energia do sistema, o elétron também começa a girar em torno do próton. Assim, forma-se o átomo de hidrogênio. Há uma transferência da velocidade linear do elétron para o próton na forma de velocidade angular e isto transforma o movimento de translação do elétron em movimento de rotação. Em síntese:

- um átomo de hidrogênio pode ter origem em uma colisão lateral de um elétron com um próton através da transferência da velocidade do elétron para o próton e da transformação de uma translação para uma rotação.

Como os modelos de interação na Física, os modelos construídos pelos estudantes também estão sintetizados no formato de quadro:

<table>
<tr><td></td><td>LONGE DO PRÓTON</td><td colspan="3">COLISÃO COM O PRÓTON</td><td>ESTADO LIGADO</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td>Próton duro</td><td>Próton tenro</td><td>Próton onda</td><td></td></tr>
<tr><td>CINEMÁTICA</td><td>força descontínua</td><td>contato</td><td>c/ ou s/ contato</td><td></td><td>Estado natural</td></tr>
<tr><td rowspan="3">DINÂMICA</td><td>interação partícula-campo</td><td rowspan="3">força devido ao núcleo</td><td rowspan="3">força nuclear</td><td rowspan="3">Interfe-rência</td><td rowspan="3">força fraca ou força elétrica</td></tr>
<tr><td>interação campo-campo</td></tr>
<tr><td>deformação do espaço</td></tr>
<tr><td>CONSERVATIVA</td><td>intermediação de outra partícula</td><td>aniquila-ção/ criação</td><td>absorção transf. emissão</td><td></td><td>surge de colisão lateral</td></tr>
</table>

A comparação deste quadro com aquele relativo ao comparecimento dos modelos de interação nas várias teorias da Física indica que, quando considerados estruturalmente, os modelos de interação construídos pelos estudantes ao longo do curso de

bacharelado em Física não correspondem a qualquer dos vários modelos construídos pela Física.

Analisados segundo suas estruturas, os modelos dos estudantes são diferentes dos modelos da Física. Entretanto, se ao invés de considerarmos os modelos enquanto totalidades, focalizarmos nossa atenção às suas partes, encontraremos os conceitos estudados durante o curso de graduação que são integrantes dos modelos da Física.

Vários dos conceitos utilizados pelos estudantes para construir seus modelos correspondem a interpretações construídas pela Física, o que indica que os estudantes aprenderam estes conceitos. Só que esta aprendizagem manifesta-se através de fragmentos, como por exemplo, a existência de quarks, interação através de troca de partículas, natureza ondulatória das partículas etc. A variedade dos conceitos da Física presente nos modelos dos estudantes mostra a extensão do aprendizado durante o curso de graduação, pois, durante este curso, os estudantes entraram em contato com muitos conceitos que eles não conheciam e, de uma forma ou de outra, eles aprenderam vários deles.

Se esta investigação indica que o curso de graduação pode ter contribuído para o aumento do repertório dos estudantes relativo aos conceitos da Física, ela indica também que estes conceitos não estão sendo inseridos nos contextos das várias teorias da Física, pois os estudantes misturam as interações e concebem o próton através de várias formas diferentes, dentre outros exemplos. Os estudantes não estão aplicando estes conceitos na concepção em que foram construídos. E isto faz com que as visões de mundo que eles construíram não correspondam àquelas construídas pela Física. Os estudantes construíram seus modelos "pegando um pedaço daqui, outro pedaço dali, inventando outro pedaço" e, muito provavelmente, articulou-os sozinhos, sem a orientação de qualquer pessoa.

OS MODELOS DE INTERAÇÃO DA FÍSICA E DOS ESTUDANTES: subsídios para a conscientização do processo de ensino-aprendizagem no curso de graduação em Física

A comparação entre os modelos para as interações construídos pela Física e os modelos construídos pelos estudantes durante o curso de graduação fornece elementos que podem subsidiar uma análise sobre as características do processo de ensino-aprendizagem no curso de Física. Na introdução deste trabalho foi argumentado que, embora seja difícil contemplar a muldimensionalidade da Física ensinada/aprendida no curso de graduação, há recortes que são suficientemente abrangentes. Um destes recortes está relacionado ao conteúdo que comparece com freqüência no processo de ensino-aprendizagem: os modelos para as interações físicas.

Os modelos apresentados no capítulo II são apenas os relativos às interações fundamentais. Estes modelos não são os únicos estudados durante o curso de graduação. Há outros que não estão relacionados diretamente às interações fundamentais e que são bastante explorados, principalmente, no início do curso, nos estudos da dinâmica na Mecânica Clássica. Na dinâmica são investigadas as causas do movimento analisando-se as forças que atuam sobre um corpo e, uma vez que os valores das forças são conhecidos, calcula-se a resultante de todas as forças que atuam sobre o corpo e, assim, é possível fazer previsões sobre o movimento deste corpo. Nesta análise não há a distinção entre as forças, ou seja, consideram-se tanto as forças eletromagnética e gravitacional, como outras que têm origem eletromagnética, mas manifestam-se no corpo macroscópico. Estas forças são relativas àquelas aplicadas pelo plano de apoio, à tração em fios, ao contato dos corpos durante as colisões e outras. Ao invés de considerar cada força que atua em cada elétron do corpo, considera-se a resultante sobre todos eles. Em corpos macroscópicos não tem sentido analisar o movimento das partículas microscópicas. Estas investigações das interações entre corpos macroscópicos, através de forças que são derivadas, existem apenas nos estudos da Mecânica Clássica. Nas outras teorias, ou se considera apenas a interação fundamental, como no Eletromagnetismo, na Teoria Quântica de Campos e na Relatividade, ou se considera apenas a interação relativa a corpos microscópicos, como na Mecânica Quântica.

Não foram apresentados modelos para interações que são analisadas através das forças derivadas, pois estas não têm imagens de natureza particulares, elas são apenas resultantes das interações fundamentais. Entretanto, nos modelos dos estudan-

tes a força de contato é considerada como interação fundamental. Esta interação é extremamente significativa para os estudantes que concebem o próton como uma partícula dura. Para estes estudantes, tanto o próton como o elétron são partículas duras e em uma colisão frontal, um sente o contato devido ao choque do outro. Este contato pode fazer com que o elétron "volte para trás" quando colidir com o próton, pois o elétron é muito menor que o próton ou, então, que o elétron pode "quebrar" o próton em três pedaços, pois, neste caso, o próton não é considerado uma partícula elementar e sim constituído por três partículas duras e coesas. Independentemente de o próton ser uma partícula constituinte do núcleo atômico e ser eletricamente carregada, a interação fundamental, durante a colisão de um elétron, é o **contato**.

Outra concepção que existe nos modelos dos estudantes e não foi discutida no capítulo II é relativa à estrutura do próton. Nos modelos dos estudantes há várias concepções associadas ao próton: ele pode ser uma partícula elementar e dura; pode ser constituído por três partículas duras e coesas; pode ser mole e homogêneo; pode ser uma sopa de partículas; pode ser constituído por três partículas puntiformes e separadas entre si e pode ser uma onda. A cada concepção de próton há um modelo associado para a interação com um elétron que colide frontalmente. O interessante destes modelos é que não há restrição quanto à natureza da interação em que o elétron participa. Na Física, para cada interação está associada uma partícula, ou seja, quem participa da interação gravitacional é a massa; da interação eletromagnética são as partículas eletricamente carregadas e da interação forte são os quarks. Embora o elétron, por exemplo, tenha massa e carga, as interações em que ele participa são analisadas independentemente. Como a interação gravitacional é muito menos intensa que a eletromagnética, normalmente, dentre as duas, considera-se apenas a interação eletromagnética pois a interação gravitacional pode ser desprezada.

Na Física, o elétron não tem estrutura. Ele é o ponto de descontinuidade do campo, é uma partícula elementar. O próton não é uma partícula elementar, é constituído por três quarks. A carga elétrica do próton está distribuída exponencialmente no espaço e o raio quadrático médio da distribuição elétrica, medido experimentalmente, é de cerca de 0,72 fm^2 (fm é o símbolo da unidade fermi e $1fm=10^{-15}$ m). Uma distribuição exponencial não tem limites, pois, matematicamente, ela só é nula no infinito. O raio quadrático médio da distribuição elétrica do próton está relacionado à região onde a densidade de carga é mais significativa. Isto significa que a carga do próton existe substancialmente numa região de raio próximo a 1fm. Em cada colisão frontal,

um elétron interage com o campo elétrico criado pela distribuição de carga do próton e "atravessa" o próton. No gráfico da figura 17 são mostradas duas trajetórias para um elétron que é espalhado por um próton. Uma delas foi calculada considerando-se toda a carga do próton concentrada em um ponto. A outra foi calculada considerando a distribuição exponencial de carga do próton.

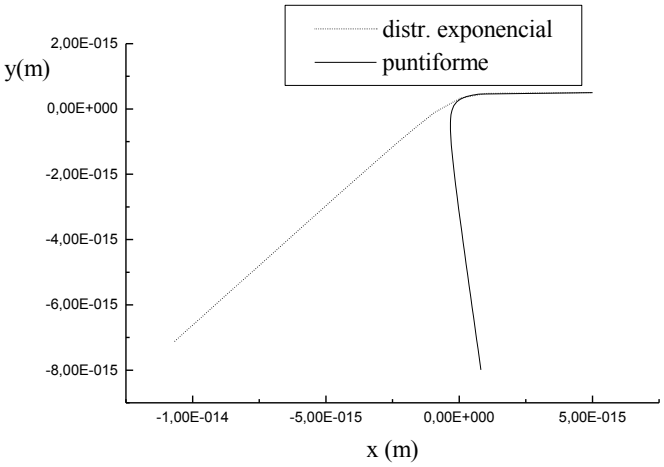


Fig. 17: espalhamento de um elétron devido a duas distribuições de carga do próton

A posição inicial dos dois elétrons é a mesma, mas eles são espalhados com ângulos diferentes. Na interação com o próton puntiforme, o ângulo de espalhamento é maior que na interação com o próton que tem a carga distribuída exponencialmente. Como a carga do próton está distribuída, o campo elétrico próximo ao seu centro é menos intenso daquele em que a carga está concentrada em um único ponto e, por isso, o ângulo de espalhamento é menor.

Várias das entrevistas mostram que o problema da interação entre prótons e elétrons constitui-se em novidade para os estudantes. Alguns deles declararam que nunca tinham estudado isto durante o curso de graduação. Entretanto, a interação eletromagnética é a que mais comparece nas várias teorias que são estudadas. Em algumas destas teorias, o próton e o elétron aparecem explicitamente como é o caso da Mecânica Quântica e a Teoria Quântica de Campos e em outras, são feitas referências a cargas e não a qualquer partícula em particular. O conceito de próton e de elétron é sistematicamente utilizado nas aulas de Física, mas, dificilmente, a imagem de natureza relativa a eles é discutida. Por isso, os estudantes construíram as mais variadas imagens que não correspondem a alguma construída na Física. Isto indica que no cur-

so de Física estão faltando discussões conceituais, pois são através delas que as imagens de natureza podem ser explicitadas.

A falta de discussões conceituais também justifica as articulações que os estudantes realizaram, onde conceitos de diferentes teorias foram associados e, destas articulações, surgiram composições híbridas. Estes modelos são constituídos por elementos que fazem parte do conteúdo ensinado no curso de graduação. Isto indica que os estudantes aprenderam estes conteúdos, mas, muito provavelmente, a interação com estes elementos aconteceu através da manipulação do formalismo matemático que, embora seja uma atividade muito importante para o aprendizado em Física, não é suficiente. A Física é estruturada em termos matemáticos e é praticamente impossível saber Física sem dominar seu formalismo. Mas restringindo-se apenas ao instrumental matemático, não é possível utilizar todas as possibilidades que ele propicia.

Os resultados relativos aos modelos construídos pelos estudantes indicam que eles transcendem ao formalismo matemático e interpretam os conceitos que são estudados. Mas estas interpretações não correspondem às construídas pela Física. Isto pode ser compreendido, pois os modelos da Física não são óbvios e nem simples. A Física é uma construção e não a tradução da natureza e esta construção está ligada a um momento histórico-cultural. Existem visões de mundo que foram construídas e não fazem parte do senso comum. Se no curso de Física não são enfatizadas as discussões sobre as visões de mundo que determinam os significados dos conceitos em cada teoria, os estudantes por si só não conseguem fazer isso. Não é só através de deduções lógicas que se constrói o conhecimento sobre a Física. Na Física utiliza-se tanto a razão como a intuição. Racional e intuitivo são duas dimensões que se complementam no aprendizado da Física, só que no curso de Física a razão é muito mais exigida que a intuição. Muitas vezes no curso de Física, a matemática exerce o papel de fim último do conhecimento e isto se caracteriza em uma forma precisa de ensinar Física, em um ensino onde existe o certo e o errado, onde não há incertezas. Mas há um caminho alternativo ao ensino da Física, um caminho em que o formalismo é interpretado. Neste caso, o ensino deixa de ser tão preciso, pois a interpretação do formalismo envolve elementos subjetivos e, com isso, introduz-se a dúvida, a incerteza, a incompletude que faz parte da subjetividade humana, mas torna-se muito mais significativo.

Os resultados deste trabalho, sejam de ordem teórica como dos resultados obtidos sobre os modelos construídos pelos bacharéis ou sejam de ordem prática como aqueles obtidos sobre os modelos construídos pelos estudantes, se constituem em al-

guns elementos que podem subsidiar uma mudança nos caminhos para a ação no processo de ensino-aprendizagem no curso de graduação em Física. As pessoas envolvidas neste processo devem estar conscientes da complexidade do conhecimento da Física e, principalmente, os docentes devem procurar meios para superar esta complexidade e dar condições para que os estudantes compreendam a construção do conhecimento da Física. É preciso planejar o conteúdo a ser ensinado em cada disciplina de tal forma que, além daquilo que normalmente é explorado, haja discussões, problematizações, contextualizações, enfim, é preciso ensinar Física em uma forma mais rica em significado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- **Assis, A.K.T.,** *On Mach's principle,* Foundations of Physics Letters 2, 301-18, 1989.
- **Bachelard, G.,** *O novo espírito científico,* Rio de Janeiro, Tempo Brasileiro, 1985.
- **Brecht, B**. *Teatro Dialético,* Rio de Janeiro, Civilização Brasileira, 1967.
- Ciência Hoje Hipertexto, *Especial "Einstein e o Brasil",* SBPC, Rio de Janeiro
- **Coelho Netto, J. Teixeira** - *Semiótica, Informação e Comunicação,* São Paulo, Perspectiva, 1990.
- **Demarcy, R**. *La Lecture transversale,* In *Elements d'une sociologie du spectable,* Paris, UGE, 10-18, 1973.
- **Del Carlo, S.; Ota, M.I.N.; Hosoume, Y**. *Uma análise de propostas de ensino de 2º grau através da estrutura conceitual do eletromagnetismo,* atas XII SNEF, Belo Horizonte, 1997.
- **Eco, U.,** *Obra Aberta,* São Paulo, Perspectiva, 1977
- **Einstein, A.**, *Notas Autobiográficas,* Rio de Janeiro, Nova Fronteira, 1982.
- **Eysenck, M. W**., *Psicologia cognitiva: um manual introdutório* / M. W. Eysenck & M. T. Keane; trad. Wagner Gesser e Maria Helena Fenalti Gesser – Porto Alegre, 1994.
- **Felício, V. L**., G. *Bachelard: um determinismo às avessas,* IFUSP, 1997.
- **Feyerabend, P.** *Diálogo sobre o Método***,** trad. António Guerreiro, Lisboa, Editorial Presença, 1991.
- **Feyerabend, P.** *Contra o Método,* trad. Miguel Serras Pereira, Lisboa, Relógio d'Água. 1993.
- **Feynman, R.P**. *QED A Estranha Teoria da Luz e da Matéria,* trad. Ana Maria Ovídio Baptista, Lisboa, Gradiva, 1992.
- **Freire P.**, *Educação e Mudança,* Rio de Janeiro, Paz e Terra, 1984
- **Freire, P.,** *Pedagogia do Oprimido,* Rio de Janeiro, Paz e Terra, 1975.
- **Gadotti, M**., *Concepção Dialética da Educação*, 9ª edição, São Paulo, Cortez, 1995

- **Gadotti, M**., *Pensamento Pedagógico Brasileiro,* 6ª edição, São Paulo, Ática, 1995.
- **Ginsburg, G.K. e Goldfarb, J.L.,** *Mário Schemberg: Entre-Vistas,* São Paulo, Perspectiva e IFUSP, 1984
- **Gleick, J**., *Caos: a criação de uma nova ciência,* tradução: Waltensir Dutra; Rio de Janeiro, Campus, 1991.
- **Harré, R. M**. *The Principles of Scientific Thinking,* Macmillan, Londres, 970.
- **Harré, R. M.** e **Secord, P. F**. *The Explanation of Social Behavior*, Blackwell, Oxford, 1972.
- **Hosoume, Y.,** *Instrumento e método de análise para um curso de física básica: uma proposta,* dissertação de mestrado, IFUSP/FEUSP, 1978.
- **Kuhn, T. S.,** *A Estrutura das Revoluções Científicas,* trad. Beatriz Vianna Boeira e Nelson Boeira, 2ª ed., São Paulo, Perspectiva, 1987.
- **Kishinami, R. I.,** *Análise das relações institucionais em um curso básico de física,* dissertação de mestrado, IFUSP/FEUSP, 1982.
- **Kneller G. F**. *A Ciência como Atividade Humana* Zahar/Edusp, RJ/SP, 1980.
- **Kosik, K**., *Dialética do Concreto,* Rio de Janeiro, Paz e Terra, 1969.
- **Landau, L e Lifshitz, E.** *Teoria do Campo,* trad. José Lourenço Cintra e José Nicodemos T. Rabelo, Moscou, MIR, 1980.
- **Mach, E.,** *The Science of Mechanics-A Critical and Historical account of its Development,* La Salle, Open Court, 1960 (org.1883).
- **Marx, K**., *O Capital,* Rio de Janeiro, Civilização Brasileira, vol. I.
- **Menezes, L.C.,** *CRISE, COSMOS, VIDA HUMANA - Física para uma Educação humanista,* tese de livre-docência, IFUSP, 1988.
- **Moreira, M. A.** *Modelos Mentais,* Investigações em Ensino de Ciências, 1(3), 1-36, 1997
- **Morin, E**., *Ciência e Consciência* Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 1996.
- **Mortimer, E. F**., *Construtivismo, Mudança Conceitual e Ensino de Ciências: para onde vamos?* Investigações em Ensino de Ciências, 1(1), 20-39, 1996.
- **Norman, D. A**. *Some observations on mental models.* In **Gentner, D**. and **Stevens, A.L.** (Eds.) Mental Models. Hillsdalle, NJ:Lawrence Erlbaum Associates, 1983. p. 6-14

- **Ota, M.I.N**., *Um texto de Eletromagnetismo e Relatividade baseado no conhecimento estrutural,* dissertação de mestrado IFUSP/FEUSP, 1985
- **Ota, M.I.N**. *Estrutura Conceitual do Eletromagnetismo,* Pro-Posições, vol.7, 1[19], 67-75, 1996.
- **Peirce, C. S.** - *Semiótica,* tradução de José Teixeira Coelho Neto, São Paulo, Perspectiva, 1977.
- **Purcell, E. M. –** *Curso de Física de Berkeley – vol.2- eletrocidade e magnetismo;* tradutores: Wiktor Wajntal e outros, São Paulo, Edgard Blücher, 1973.
- **Queneau, R**. , *Exercices de style*, Paris, Gallimard, 1995, Ed. Orig. 1947
- **Robilotta, M. R.** *Construção e Realidade no Ensino de Física, São Paulo,* IFUSP, 1985.
- **Robilotta, M.R.** *Processos Mesônicos em Física Nuclear,* notas de aula da III Escola de Verão Jorge André Swieca, Petrópolis, 1987.
- **Robilotta, M.R. e Coelho, H.T.** *Forças Nucleares,* Ciência Hoje, 11(63):23-30, 1990.
- **Salém, S**., *Estruturas conceituais no ensino de física: uma aplicação à eletrostática,* dissertação de mestrado IFUSP/FEUSP, São Paulo, 1986.
- **Schrödinger, E**., *O cumprimento do postulado de relatividade na mecânica clássica,* tradução comentada de A.L.Xavier e A.K.T.Assis, Revista da Sociedade Brasileira de História da Ciência 12,3-18 (orig.1925)
- **Snyders, G.** - *A Alegria na Escola*- São Paulo, Manole, 1988
- **Soares, V. L. L.,** *Laboratório didático de física no ciclo básico da universidade,* dissertação de mestrado, IFUSP/FEUSP, 1977.
- **USP – IF**, Manual do Curso de Bacharelado-1997
- **Vázquez, A. S.,** *Filosofia da Praxis,* 3ª edição, Rio de Janeiro, Paz e Terra, 1986.
- **Vieira Pinto, A**., *Ciência e Existência;* Rio de Janeiro, Paz e Terra, 1969.
- **Viennot, L**. *Spontaneous Reasoning in elementary dynamics.* European Journal of Science Education 1(2):205-221, 1979.
- **Vigostsky, L. S**. *A Formação Social da Mente: o desenvolvimento dos processos psicológicos superiores;* organizadores Michael Cole ... |et al.|; tradução José Cipolla Neto e outros; 4ª edição, São Paulo, Martins Fontes, 1991.