UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA

O PAPEL DA EXPLICAÇÃO CAUSAL NO ENSINO DE FÍSICA

RODINEI LOURENÇO ROVIGATTI

Dissertação de Mestrado em Ensino de Ciências (modalidade: Física) Instituto de Física e Faculdade de Educação da USP.

Orientador:
Prof. Dr. ALBERTO VILLANI

SBI-IFUSP
305M81UT1045

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
SERVIÇO DE BIBLIOTECA E INFORMAÇÃO
1045
e.2
INSTITUTO DE FÍSICA

SÃO PAULO
1987

Data da defesa 26/11/87

530.07
R875p
M
c.2

FICHA CATALOGRÁFICA

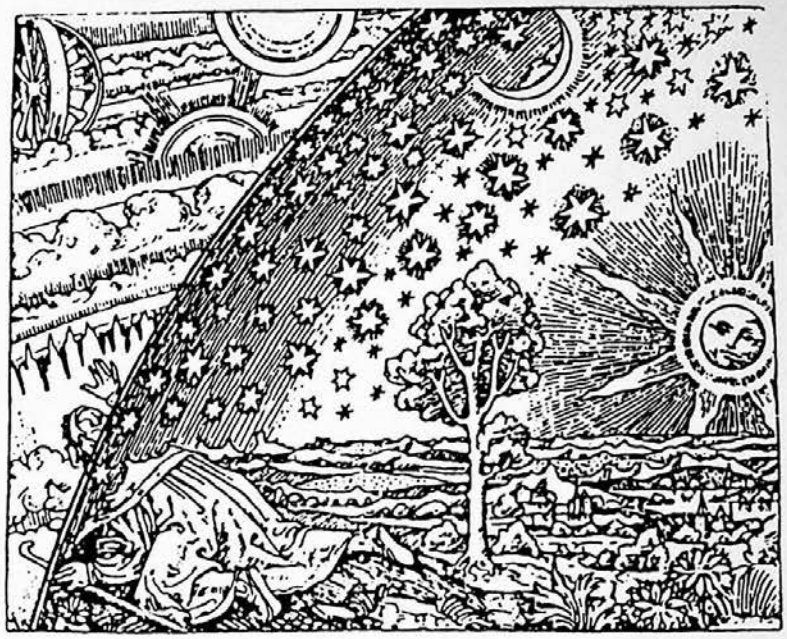
Preparada pelo Serviço de Biblioteca e Informação
do Instituto de Física da Universidade de São Paulo

Rovigatti, Rodinei Lourenço
O papel da explicação causal no ensino de física.
São Paulo, 1987.

Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo. Instituto de Física. Departamento de Física Experimental.
Área de Concentração: Ensino de Ciências (Modalidade Física)
Orientador: Prof. Dr. Alberto Villani

Unitermos: 1.Explicação causal; 2.Positivismo e empirismo; 3.Causalidade na epistemologia Piagetiana.

USP/IF/SBI - 44/87



O Sistema do Mundo segundo as idéias imperantes na Idade Média. Sobre a Terra plana o céu forma uma abóboda, através da qual o intrépido viajante enfia a cabeça para descobrir o complicado mecanismo que remove as estrelas.

ÍNDICE

pg.

RESUMO..... 1

0 - INTRODUÇÃO..... 3

1 - A INFLUÊNCIA DA FILOSOFIA NO ENSINO
1.1 Análise do Ensino..... 6
1.2 O Significado de Explicação Científica..... 11
1.3 Referências Bibliográficas..... 13

2 - O FORTALECIMENTO DO POSITIVISMO NA CIÊNCIA
2.1 O Problema da Gravidade..... 14
2.2 O Problema da Causalidade..... 18
2.3 Referências Bibliográficas..... 26

3 - CRÍTICAS AO POSITIVISMO, EMPIRISMO E INDUTIVISMO
3.1 Análise Histórica do Positivismo..... 28
3.2 Crítica Epistemológica..... 32
3.3 Referências Bibliográficas..... 35

4 - DISCUSSÃO SOBRE OS SIGNIFICADOS DE CAUSALIDADE..... 37
4.1 Referências Bibliográficas..... 44

5 - A CAUSALIDADE NA EPISTEMOLOGIA PIAGETIANA..... 45
5.1 A Psicogênese da Causalidade..... 46
5.2 A Evolução da Explicação Causal na Ciência..... 53
5.3 As Correspondências entre a Evolução do Pensamento no Indivíduo e na Ciência..... 58
5.4 A Explicação em Física..... 64
5.5 Referências Bibliográficas..... 69

6 - CONCLUSÃO

6.1 A Causalidade no Ensino de Física..... 74

6.2 A Causalidade na Microfísica..... 84

6.3 Sobre o Propósito do Trabalho..... 90

6.4 Referências Bibliográficas..... 92

ANEXO A - O PROBLEMA DO MOVIMENTO NA HISTÓRIA DA CIÊNCIA

SUMÁRIO

A predominância no ensino de Física nos vários níveis do formalismo matemático desvinculado da procura e da discussão do significado físico subjacente, revela fortes analogias como o programa empirista e positivista de limitar o papel da ciência a busca de leis físico-matemática, desprezando a tendência a procurar as causas mais profundas dos fenômenos.

Este trabalho pretende fornecer subsídios para a compreensão da problemática do ensino de física e para o encaminhamento de propostas alternativas; parte-se da análise histórica do debate sobre o papel da causalidade em física, e chega-se a discussão da natureza da explicação científica. Em particular é dada ênfase à análise epistemológica piagetiana da causalidade no desenvolvimento do conhecimento, desde as elaborações precoces das crianças até as formas mais sofisticadas do pensamento científico; a partir dela são sugeridas mudanças na prática didática.

ABSTRACT

The dominance in Physics teaching at various levels, of mathematical formalism unrelated to a discussion of underlying physical meaning, reveals a great analogy with the empiristic and positivistic vew of limiting the goal of science to the search of physico-mathematical laws, discrediting the tendency to look for deepest causes of phenomena.

This work gives subsides to a comprehension of physics teaching's problematic and to a elaboration of alternatives proposals. It starts from a historical exposition of the debate about the causality and the meaning of scientific explication; after giving a particular emphasis to the piagetian epistemological analysis about the function of causality in the development of physical knowledge (from the precocious elaborations in children to the most sophisticated forms of causal attributions in scientific thinking) some suggestions are given in view of a better practice of physics teaching.

0 - INTRODUÇÃO

A visão epistemológica predominante no meio escolar, ainda que implicitamente, baseia-se na idéia de que a relação ensino-aprendizado, isto é, a relação entre o que o professor ensina e o que o aluno aprende, é uma ligação direta e instantânea. Em outras palavras, o que o professor expõe pode ser captado automaticamente pelo aluno como se este fosse uma película fotográfica que registra os objetos que estão na frente da câmera.

Uma frase frequentemente citada por professores: "matéria dada é matéria aprendida", revela esta visão epistemológica.

Esta concepção de que possa haver uma transmissão e fixação automática do conhecimento é vista por muitos educadores como algo evidente, a qual não cabe questionamento. Deste modo, o ensino não deve preocupar-se com esta questão e as atenções devem voltar-se inteiramente para o conteúdo a ser ensinado.

No processo de ensino a questão epistemológica geralmente passa desapercebida e as referências a ela são feitas quase sempre de modo implícito.

Na formação de professores exige-se que o pretendente ao magistério tenha conhecimentos de conteúdo na área que pretende lecionar, acrescidos de conhecimentos pedagógicos geralmente voltados a aspectos psicológicos do comportamento humano. No ensino tradicional não observa-se preocupações efetivas com o processo do conhecimento. No Brasil, praticamente, não existem disciplinas referentes ao estudo das teorias do conhecimento.

O que falamos do ensino em geral, aplica-se ao ensino de ciências, em particular. No ensino tradicional raramente são evidenciadas preocupações de abordar o conhecimento científico enquanto um processo de conhecimento, mas apenas enquanto um conteúdo físico, como

se a escolha do conteúdo a ser ensinado não tivesse alguma ligação com uma determinada teoria epistemológica.

Neste trabalho pretendemos questionar a visão epistemológica vigente e mostrar que o processo de ensino e o conteúdo ensinado são determinados por esta visão.

No primeiro capítulo, procuramos caracterizar o ensino de física no que diz respeito ao conteúdo e mostrar que tais características têm implícitas o pensamento dos princípios da epistemologia empirista-indutivista. Tal visão do processo do conhecimento científico reforça uma concepção positivista da ciência, isto é, os fenômenos devem ser tratados apenas matematicamente, deixando-se de lado, o modo causal de produção do fenômeno, ou seja, da explicitação de significados a eles associados.

Uma das características mais marcantes do ensino de física é justamente esta, o professor geralmente aborda o conteúdo físico do ponto de vista formal, sem falar do modo causal do fenômeno.

No segundo capítulo procuramos mostrar as razões de se adotar uma postura positivista. Fazemos isto de modo particular, analisando a história do problema da explicação do fenômeno gravitacional, e também fazemos um relato das visões dos filósofos empiristas acerca da relação causal.

No terceiro capítulo fazemos algumas críticas de carater histórico e epistemológicos às doutrinas positivista, empirista e indutivista.

No quarto capítulo discutimos algumas concepções sobre a causalidade, procurando mostrar que do ponto de vista epistemológico há divergências quanto ao seu significado.

No quinto capítulo apresentamos uma visão epistemológica alternativa baseada na teoria piagetiana do conhecimento, com o objetivo de mostrar que a explicação em física utiliza-se da causalidade.

Finalmente, na conclusão, voltamos a tratar da questão do ensino, procurando ressaltar que a abordagem causal da física é importante para o aluno.

No final deste trabalho, anexamos um texto sobre a história da evolução das explicações dos movimentos terrestres e celestes, desde os gregos até Newton.

A leitura deste texto histórico fornece mais detalhes sobre o estudo do fortalecimento do positivismo na ciência (cap. 2), onde procuramos mostrar que o fortalecimento desta doutrina, em parte, provém das dificuldades de explicação do fenômeno gravitacional; como também fornece elementos para o estudo comparativo (cap. 5) entre a evolução da física pré-newtoniana e a evolução da física "espontânea" elaborado pelo indivíduo em sua relação com a natureza.

1 - A INFLUÊNCIA DA FILOSOFIA NO ENSINO

1.1 - Análise do Ensino

Ao analisarmos o ensino de física do ponto de vista do conteúdo, não é difícil constatarmos que este, em geral caracteriza-se pela predominância do formalismo matemático: definição funcional/operacional das leis e dos conceitos físicos. Podemos notar tal fato folheando os livros texto adotados no ensino, nos quais quase invariavelmente encontramos a física dividida em tópicos (mêcanica, calor, óptica, acústica, eletricidade e magnetismo) onde em cada qual apresentam-se as fórmulas correspondentes - àquele ram
o particular da física com exemplos ilustrativos. Em seguida resolvem-se alguns problemas, aplicando-se as fórmulas e no final são sugeridos ao leitor outros problemas que possam ser resolvidos usando-se como modelo aquele resolvido no livro.

Nas aulas expositivas o professor geralmente repete os mesmos esquemas dos livros texto, i.é., preenche o quadro negro com as fórmulas, faz passagens lógicas entre uma fórmula e outra e depois fornece exemplos aos alunos, onde aplica as fórmulas correspondentes àquele tópico. Cabe ao aluno a tarefa de resolver listas de exercícios para que possa ter sucesso nas provas, onde terá que resolver alguns exercícios semelhantes.

Já nas aulas de laboratório, que ocorre quase que somente em escolas mais abastadas que possuem laboratórios equipados, o esquema de apresentação da física ao aluno em geral acontece da seguinte maneira: o aluno realiza alguns experimentos donde deve tirar como conclusão as leis da física. Normalmente pede-se ao aluno que faça gráficos com as medidas obtidas, de modo a obter uma curva que represente uma função matemática que corresponda a uma lei física.

A grosso modo este é o esquema básico de funcionamento do ensino de física em nossas escolas, nos seus vários níveis: segundo grau, graduação e até pós-graduação, seja a escola pública ou particular, com professores bem ou mal preparados.

Por outro lado, ao estudarmos a história das ciências em particular a da física, temos a oportunidade de notar que sua evolução é algo bem diferente do processo de ensino. Primeiro a investigação científica é mais complexa do que ir ao laboratório tirar medidas e, deste modo obter leis naturais por meio da experiência. Segundo, o conteúdo da pesquisa científica não se reduz somente à leis. A ciência aborda a natureza não somente pelo seu aspecto quantitativo, relacionando grandezas físicas em fórmulas (funções) matemáticas. Existe também o lado qualitativo da pesquisa, onde o cientista constrõe modelos físicos que possam dar uma possível interpretação da realidade, modelos esses que não são dados diretamente pela experiência, mas são também conjecturas da mente, com as quais o cientista procura formar um quadro representativo do mundo real.

O ensino de física em geral não faz referências aos modelos físicos explicativos. Por exemplo: a suposição da existência do éter, foi uma idéia que permaneceu à tona durante trezentos anos, do século XVII ao XIX. Muitos modelos de éter foram feitos para explicar os fenômenos: coesão, gravidade, eletricidade, luz. Essa suposição foi importante no desenvolvimento do conceito ondulatório da luz, como também para a elaboração do conceito de campo eletromagnético, onde os fenômenos de atração e repulsão foram explicados pela ação do meio - o éter. Também no caso da idéia da contração dos corpos materiais em movimento, uma consequência dos postulados da teoria da relatividade especial, o éter teve um papel importante. Tal idéia fora concebida por Lorentz e introduzida em sua teoria para explicar o resultado nulo da experiência de Michelson-Morley, que tinha por objetivo verificar o efeito do

movimento dos corpos através do éter. Apesar da idéia do éter ter sido importante na evolução da física, a grande maioria dos alunos passam por todos os estágios do ensino de física sem ouvir falar deste conceito.

A história nos mostra um outro aspecto importante da ciência, desprezado pelo ensino, que é o da gênese dos conceitos físicos. Tradicionalmente aprendemos um conceito por meio da sua definição operacional. O significado do conceito fica prejudicado pois, só conseguimos pensá-lo em termos da relação formal entre grandezas físicas. O estudo genético permite que consigamos compreender melhor o seu significado, pois mostra as circunstância - a problemática - em que o conceito surgiu, permitindo, assim, ao aluno vislumbrar também uma situação física. Pelo menos nos principais conceitos da física deveria-se recorrer à gênese histórica.

Analisando o ensino de física constatamos então a predominência do formalismo matemático e dos exemplos esteriotipados na apresentação das leis e conceitos na forma funcional e ou operacional, desvincilados dos modelos que procuram fornecer imagens representativas do mundo e explicar os fenômenos que observamos. Ao mesmo tempo notamos a valorização do aspecto experimental como gerador direto de conhecimentos e a relegação a um segundo plano do aspecto racional, tomado sempre como hipótese fantasiosa ou como pura metafísica. Por outro lado, é possível notar que esta forma de ensino é determinada, ainda que implicitamente, por algumas doutrinas filosóficas, que parecem caracterizar boa parte do ambiente científico.

Mario Burge caracteriza o pensamento filosófico reinante no ambiente científico que ele chama de "Credo do Físico inocente".(1) Para ele o físico contemporâneo adota, quase sempre inconscientemente e de forma dogmática, um conjunto de normas, as quais transcrevemos a seguir:

(I) a observação é a fonte e a função do conhecimento físico.

(II) Nada é real a menos que se torne parte da experiência humana. A totalidade da física diz respeito à experi\éncia mais do que a uma realidade independente. Por isso, a realidade física é um sector da experiência humana.

(III) As hipóteses e teorias da física não passam de experiências condensadas, i.é, sínteses indutivas de ítens experimentais.

(IV) As teorias físicas não são criadas, mas descorbertas: podem ser descobertas em conjuntos de dados empíricos, tal como tabelas laboratoriais. A especulação e a invenção dificilmente desempenham qualquer papel na física.

(V) O objetivo do estabelecimento de hipóteses e da teorização é sistematizar uma parte do fundo crescente da experiência humana e prever possíveis novas experiências. Em caso algum se deve tentar explicar a realidade. Nunca deveremos tentar apreender o essencial.

(VI) As hipóteses e teorias que incluem conceitos não observacionais como os de electron e de campo, não têm conteúdo físico: são meras pontes matemáticas entre observações reais ou possíveis.

Estes conceitos transempíricos não referem, portanto, objectos reais, apesar de imperceptíveis, mas apenas são auxiliares desprovidos de referência.

(VII) As hipóteses e teorias da física não são mais ou menos verdadeiras ou adequadas; visto que correspondem a ítens que não existem de forma independente, apenas são modos mais ou menos simples e efectivos de sistematizar e enriquecer, e não componentes de uma imagem do mundo.

(VIII) Todo o conceito importante tem de ser definido. Consequentemente, qualquer discurso bem

organizado deve começar por definir os termos-chave.

(IX) O que atribui significado é a definição: um símbolo indefinido não tem significado físico e, por conseguinte, só pode ocorrer em física como um auxiliar matemático.

(X) Um símbolo adquire um significado físico através de uma definição operacional. Qualquer coisa que não seja definida em termos de possíveis operações empíricas é, fisicamente, sem sentido e deveria portanto rejeitar-se.

A base desse "credo" é formada pelos princípios das filosofias empirista e indutivista: 1) A observação e a experiência são a origem do conhecimento; 2) Os conhecimentos científicos são obtidos por meio da indução a partir de dados da experiência. A adoção desses princípios propicia posturas como a de querer eliminar da ciência tudo aquilo que não é observável, passível de ser medido ou comprovado pela experiência; havendo então por partes dos adeptos destes princípios, grande aversão pela metafísica, pela pesquisa a partir de hipóteses que não tenham origem na experiência. Propicia também a crença de que os conhecimentos científicos são "descobertos". O termo descoberta tem aqui o sentido de encontrado, da mesma forma que, por exemplo, encontramos petróleo no subsolo. Segundo esta visão, o conhecimento científico adquire um caráter de realidade - verdade objetiva sem conjecturas e criações da mente.

Gostaríamos de ressaltar também que a aceitação dos princípios das doutrinas empiristas e indutivista conduz a uma visão positivista da ciência que vê na busca das leis da natureza a principal ou a única função da investigação científica.

Essa visão de que o conhecimento científico é sustentado principalmente por sólidas bases experimentais, isento de especulações ou hipóteses e por isso verdadeiro e

real, é uma apologia do conhecimento objetivo. Entretanto, a atitude de querer

> "Reduzir o conhecimento da Física às suas fórmulas auto-explicativas é uma maneira elegante de escapar ao debate sobre a própria natureza do conhecimento, e, simultaneamente, realizar o sonho do conhecimento objetivo, claro e sem sombras de dúvidas, independente da maneira de pensar dos homens, fiel à própria natureza. Enfim, é o ideal "científico" que o ensino tenta reproduzir."(2)

1.2 - O significado de Explicação Científica.

Em nosso trabalho pretendemos explorar a questão do significado de EXPLICAÇÃO CIENTÍFICA, pois, ensinar e lecionar são sinônimos de explicar(3) e, no caso do ensino de física, usualmente a explicação tem uma conotação particular, tal qual a filosofia positivista que entende que um fenômeno físico está explicado quando fornecemos a lei que o rege.

O positivismo tem como fundamento que o objetivo da investigação científica é a descoberta de leis que regem os fenômenos da natureza, ao mesmo tempo em que renuncia à investigação das causas: os mecanismos de produção do fenômeno. Deste modo, o positivismo reduz a explicação científica à descrição dos fatos ou fenômenos por meio de leis. Ao descrever a natureza da filosofia positivista, Augusto Comte recorre ao exemplo da gravitação newtoniana para expor seu pensamento. Vejamos o que ele diz:

> "Assim, para citar o exemplo mais admirável, dizemos que os fenômenos gerais do universo são <u>explicados</u>, tanto quanto podem ser, pela lei de gravitação newtoniana; porque, de um lado, essa bela teoria nos mostra toda a imensa variedade dos fatos astronômicos, como constituindo apenas um único e mesmo fato considerado de diversos pontos

de vista: a tendência constante de todas as moléculas umas em relação as outras, na razão direta de suas massas e na razão inversa do quadrado das distâncias.....Quanto a determinar o que são nelas próprias essa atração e essa gravidade, quais são suas causas, são questões que consideramos insolúveis, não pertencendo mais ao domínio da filosofia positiva, e que abandonamos com razão à imaginação dos teólogos ou à sutileza dos metafísicos...."(4)

Abrindo os livros texto de física nos capítulos sobre gravitação, notamos uma postura positivista no tratamento do fenômeno da gravidade. Os livros texto, em geral, apresentam a teoria da gravitação, enunciando a lei de atração gravitacional universal fórmulada por Newton: $F=G\frac{m_1M}{r^2}$. Não notamos nesses livros uma discussão sobre as causas e os modelos atribuidos à gravidade, sobre o significado da atração à distância entre corpos. Sabemos, pela história, que estas questões foram muito debatidas e polêmicas.

A explicação newtoniana da queda dos corpos por meio da ação de uma força atrativa é uma explicação causal na medida em que diz que algo externo ao corpo muda seu estado de repouso ou de movimento. Discutir sobre o que possa ser essa coisa que conseque atuar à distância é o que o positivismo recusa-se a fazer, alegando ser tal tarefa inascessível e inútil. A história nos mostra que houve uma vasta e rica discussão em torno desta questão, uma vez que a idéia de ação à distância é algo dificilmente inteligível. O ensino, por sua vez, adota a mesma postura do positivismo, omitindo totalmente essa discussão, o que implica em algumas consequências para o aprendizado.

O fortalecimento do positivismo no meio científico, em parte, começa ocorrer já na época de Galileu em função da dificuldade da explicação da gravidade e também

das análises empiristas (observacionais) do fenômeno gravitacional. No próximo capítulo vamos abordar esta questão, pois ela é importante para entendermos a proposta positivista.

1.3 - Referência Bibliográficas

(1) Mario Bunge, "A Filosofia da Física", Ed. Edições 70, p.12 e 13

(2) Alberto Villani, Tese de Livre Docência, "Conteúdo Científico e Problemática Educacional na Formação do Professor de Ciências", IFUSP, 1986, p.17

(3) Aurélio B.H. Ferreira, "Novo Dicionário da Língua Portuguesa", Ed. Nova Fronteira.

(4) Augusto Comte, "Curso de Filosofia Positiva", Ed. Abril Cultural, São Paulo. 1973, p.13

2 - O FORTALECIMENTO DO POSITIVISMO NA CIÊNCIA

A concepção positivista da ciência começou a fortalecer-se no meio científico com a introdução, de forma definitiva, da linguagem quantitativa (matemática) na física. Tanto Galileu como Newton procuraram dar um tratamento matemático ao fenômeno gravitacional sem preocuparem-se com a questão das causas da gravidade. Newton chega a justificar sua atitude positivista, recorrendo a filosofia empirista. Por outro lado, as análises da relação causal feitas pelos filósofos empiristas (Locke, Berkeley e Hume) também ajudaram a consolidar a visão positivista da física.

2.1 - O Problema da Gravidade

Conforme Aristóteles, para conhecermos a natureza física devemos indagar sobre as causas e princípios primeiros das coisas. Esta visão manteve-se ao longo dos séculos. Com Galileu, surge uma nova forma de questionamento. Ele deixa de querer saber a causa ou os princípios da gravidade, ou o porque um corpo cai, para somente se preocupar com o como um corpo cai. Ele não pergunta sobre as causas, mas pergunta sobre as quantidades envolvidas no fenômeno de queda, procurando uma razão matemática entre elas.

Dizer que um corpo cai por causa da gravidade ou do seu pêso não tem significado para Galileu, mas consiste apenas nomear o desconhecido. A experiência cotidiana nos mostra que os corpos caem, mas Galileu recusa-se a ver a gravidade como uma fonte ou causa do movimento, simplesmente por não saber o que ele seja. Ele vê a gravidade como uma tendência dos corpos de dirigirem-se para o centro da terra e para por aí.

O fato de encará-lo como uma tendência não significa para Galileu que ela seja uma qualidade

"essencial" dos corpos. Para ele, tais qualidade são somente aquelas que não podemos separar do corpo ao pensá-lo, como a figura, o tamanho e a condição de movimento, isto é, as propriedades matemáticas da: forma, número e movimento.

Essas propriedades essenciais, das quais a gravidade ou o pêso não fazem parte, constituem o objeto de estudo de Galileu.

Galileu procurou saber (quaisquer que fossem as causas) as propriedades do movimento acelerado da queda dos corpos, relacionando as proporções das grandezas variáveis no fenômeno, chegando ao seguinte resultado:

> "...um móvel, que cai a partir do repouso, percorre em tempos iguais espaços que mantêm entre si a proporção que tem os números ímpares sucessivos a partir da unidade...."(1)

Em outros termos, este enunciado diz que os corpos em queda percorrem o espaço na proporção do quadrado do tempo, que corresponde à lei de queda livre dos corpos.

O pensamento de Galileu e de seus sucessores foi dominado pela idéia de que o Mundo complexo dos sentidos (irreal) tem por trás um Mundo simples (real), regido por leis naturais que podem ser traduzidas na linguagem matemática por meio de cálculos e medidas obtidos através da experiência. Nestas circunstâncias começou a prevalecer a concepção positivista da ciência, que propõe que o objetivo desta seja somente o da investigação das leis matemáticas, renunciando à investigação das causas.

Newton aprendeu com Galileu que para estudar os fenômenos e tratá-los matematicamente não era necessário saber claramente como os efeitos são produzidos. No caso do fenômeno de queda dos corpos e do movimento orbital dos planetas em torno do Sol, ele supôs que entre os corpos materiais haveria uma força de natureza atrativa que seria responsável pela queda livre na superfície terrestre e, que equilibraria a força centrífuga no movimento orbital. Fossem essas forças físicas ou metafísicas, deixou de lado essa

questão e procurou determinar as intensidades das forças, primeiro da centrífuga e depois da centrípeta, chegando então à seguinte lei: os planetas são "atraídos" pelo Sol na razão inversa do quadrado das suas distâncias ao Sol. Além disso, supondo que pudessem ser da mesma natureza, a gravidade terrestre e a atração celeste, procurou, por meio de cálculos baseados em dados experimentais confirmar tal identificação. Os resultados confirmaram suas suposições e assim propôs que a força atrativa tivesse validade universal.

Na primeira edição (1687) dos "Princípios Matemáticos", Newton não se preocupou em fazer esclarecimentos sobre a natureza da força atrativa. E como no discorrer da obra usasse expressões como, "atração mútua entre corpos", e ainda, sendo o vazio possível dentro de sua teoria e, existindo entre os planetas, os leitores da primeira edição foram levados a supor que Newton estivesse propondo haver uma ação à distância entre corpos.

Sabemos por declarações(2) de Newton que ele negava veementemente a idéia de ação à distância. Na segunda edição (1713) do "Princípios Matemáticos", Newton anexou um tratado filosófico, onde procurou fazer alguns esclarecimentos sobre o significado da atração, dizendo que se fosse resultado da ação de espíritos, do éter ou do ar, ou de qualquer outro agente, deixou a questão para os seus leitores resolverem, procurou somente dar um tratamento matemático ao assunto.

Os opositores de Newton são se deram por satisfeitos com a sua saída que apelava para uma atitude positivista. Criticaram-no, dizendo que a atração gravitacional era uma qualidade oculta, uma causa mágica agindo à distância e, até, um efeito milagroso, pois, a idéia de atração à distância era algo ininteligível que não poderia ser explicada naturalmente, e a explicação por meio de agentes incorpóreos, imateriais ou espirituais, constituiria-se em um milagre.

Newton procurou defender-se das críticas de seus opositores, apelando para o caráter experimental da ciência. No esclarecimento final do tratado filosófico acrescentado à segunda edição dos "Principia", ele diz o seguinte:

> "Até aqui explicamos os fenômenos dos céus e de nosso mar pelo poder da gravidade, mas ainda não determinamos a causa desse poder. É certo que ele deve proceder de uma causa que penetra até os próprios centros do Sol e dos planetas, sem sofrer a menor diminuição de sua força; que atua não segundo a quantidade das superfícies das partículas sobre as quais age (como causas mecânicas), mas segundo a quantidade da matéria sólida que contém, e propaga sua virtude para todos os lados, até distâncias imensas, diminuindo sempre na razão inversa do quadrado das distâncias....Mas até aqui não fui capaz de descobrir nos fenômenos a causa dessas propriedades da gravidade, e eu não imagino hipóteses; pois tudo quanto não é deduzido dos fenômenos deve ser chamado de hipótese; e as hipóteses, quer metafísicas, quer físicas, quer mecânicas, quer de qualidades ocultas, não têm lugar na filosofia experimental. Nessa filosofia, as proposições são inferidas dos fenômenos, e depois generalizadas por indução. Foi assim que se descobriram a impenetrabilidade, a mobilidade e a força impulsiva dos corpos, bem como as leis do movimento e da gravitação. E para nós basta que a gravidade realmente exista, e que atue segundo as leis que acabamos de expor, e que ela seja capaz de explicar à sociedade todos os movimentos dos corpos celestes, e os de nosso mar".(3)

Nesta passagem, Newton procurou justificar sua atitude positivista de não esclarecer a natureza da atração gravitacional, recorrendo a uma argumentação empirista: 1) A

observação não revela nada da causa da gravidade; 2) Imaginar hipóteses que não são deduzidas dos fenômenos é pura especulação; 3) O físico deve prender-se aos fenômenos observados e, 4) A indução permite que cheguemos a leis gerais. Vemos nesta passagem como a filosofia empirista dá sustentação à postura positivista na ciência.

2.2 - O Problema da Causalidade

Uma outra forma de sustentação do positivismo vem da parte dos filósofos empiristas com suas análises sobre o conceito de causalidade, partindo de uma abordagem experimental dos fenômenos.

Numa relação de causa e efeito, sensorialmente falando, percebemos a causa e percebemos o efeito, mas não percebemos o vínculo causal. Por exemplo, a chama de uma vela que provoca queimaduras na pele. Os fenômenos: chama (causa) e queimadura (efeito) ocorrem sempre que próximos e numa ordem temporal, o efeito nunca ocorre antes da causa. A impressão que fica em nossa mente é a de que os fenômenos chama e queimadura têm alguma ligação - conexão necessária - , algo que está na chama provoca a lesão na pele. Entretanto, não percebemos sensorialmente essa coisa que passa da chama para a pele, o vínculo entre a causa e o efeito.

Tendo como objetivo o estudo de como se processa o conhecimento, John Locke (1632-1704), procurou saber como as idéias são produzidas no homem em virtude da ação de objetos materiais sobre os sentidos.

A experiência da mudança da matéria nos induz à idéia de haver algo: poder, força ou energia que provoque a mudança. O primeiro interesse de Locke não foi o de saber o que é este poder, ou como é originado na natureza, mas o de saber como o homem "chegou a idéia dele".

Para Locke, a mente produz uma "idéia clara e distinta" de poder ativo, mas para ele a única fonte fora da

mente, possível de ser concebida como geradora de tal idéia, é o movimento mecânico. Entretanto, não reconhece que o movimento das partículas seja suficiente para explicar o poder ativo da matéria. Além do mais, para ele as explicações mecanicistas da comunicação do movimento são tão obscuras quanto as explicações por meio de agentes imateriais. Deste modo, acaba vendo toda tentativa de explicação como "incompreensível" e "ininteligível".

Analisando a relação entre a causa e o efeito, Locke admite que o vínculo causal tem que ser concebido como uma substância "que começa a existir pela operação de alguma outra", mas "sem conhecermos a maneira daquela operação".(4) Locke não nega a existência da atividade causal, mas quando trata de explicar a "maneira" da operação causal, ele torna-se agnóstico, aparentemente é atraido pela filosofia mecanicista, mas não vê nenhum modo de atribuir alguma convicção às suas explicações detalhadas. Nós sabemos da existência de causas e efeitos e, de fato as observamos diariamente, mas ele conclui que a simples existência de causas e efeitos não podem ser produtoras de conhecimento.

Por sua vez, George Berkeley (1685-1753) questionando as explicações causais de Newton por meio de poderes ativos; força, gravitação e atração, tira a conclusão que por meio da experiência não é possível chegar a algum resultado. Da observação dos fenômenos de queda dos corpos inferimos "que há alguma causa ou princípio desse fenômeno.....propriamente chamado gravidade", mas nosso conhecimento empírico sobre a gravidade não é suficiente para identificar a causa dos movimentos de queda e,

> "Desde que a causa da queda dos corpos pesados é inobservável e desconhecida, gravidade nesse sentido não pode ser chamada de uma qualidade sensível. Ela é, portanto, uma qualidade oculta. Mas o que é uma qualidade oculta, e como alguma qualidade aculta pode agir ou fazer alguma coisa mal podemos conceber - de fato não podemos

conceber -. O melhor que o homem pode fazer é dispensar a qualidade oculta, e observar somente os efeitos sensíveis".(5)

Em relação ao significado de "força", Berkeley continua:

"Força do mesmo modo é atribuida aos corpos, e esta palavra é usada como se significasse uma qualidade conhecida, algo distinto do movimento, figura, e toda coisa sensível, ...Mas examine o assunto mais cuidadosamente e você concordará que tal força não é mais que uma qualidade oculta".(6)

Para Berkeley "o que é oculto não explica nada". E a explicação desses agentes: gravitação, atração, força, por meio da ação do éter consiste em querer explicar o desconhecido através do mais desconhecido (ignotum per ignotius). O emprego desses termos (força, atração, gravidade...) serve para "abreviar a palavra", e podem ser empregadas "com propósitos instrumentais" como "hipóteses matemáticas", mas não como qualidades físicas. Desta maneira:

"Não é, de fato, ocupação da física ou da mecânica estabelecer causas eficientes, mas somente, as regras de impulsão ou atração, e, numa palavra, as leis do movimento, e a partir de leis estabelecidas apontar a solução, não a causa eficiente, do fenômeno particular".(7)

Como o conhecimento da natureza dos agentes causais não é alcançado pelos nossos sentidos, Berkeley propôe que esta tarefa não seja executada pela física, mas, pela metafísica, a qual se interessa "com coisas incorporais", com causas, verdades, e a existência das coisas"(8)

A dispensa da investigação das causas leva Berkeley a um conceito de explicação científica bastante diferente de seus predecessores. Por causa da ênfase que dá ao papel das leis do movimento e outras regras referentes a

um fenômeno, ele é visto como um precursor da visão reducionista da explicação científica, na qual os conceitos teóricos usados pelo físico são eles próprios redutíveis à leis individuais do fenômeno.

Berkeley também é visto como precursor da visão instrumentalista, na qual os conceitos teóricos não têm status ontológico no mundo físico. Para ele, estes conceitos só têm interesse prático, como instrumentos de cálculo.

Essa postura de Berkeley, quer como reducionista, quer como instrumentalista influenciou outros pensadores. Notemos que o pensamento de Comte é muito próximo ao de Berkeley, nas doutrinas de ambos não há lugar para explicações causais na ciência.

Uma vez que os agentes físicos não podem ser explicados por meio dos termos: força, gravitação, atração, movimento de partículas invisíveis, o melhor que o físico pode esperar são explicações em termos de leis. O poder da natureza deve ser entendido pela eficácia e desejo do "Autor da Natureza".

Seguindo os passos de Berkeley, David Hume (1711-1776) reconhecendo que somos inábeis para compreender os conceitos da matafísica, diz:

> "Entre as idéias que ocorrem na metafísica, nenhuma é mais obscura e incerta do que as de poder , força, energia ou conexão necessária, com que somos forçados a lidar a cada instante em todas nossas investigações".(9)

Procurando pelo significado destes termos, chega à conclusão que: "Foi em vão buscarmos uma idéia de poder e conexão necessária, em todas as fontes das quais se poderia supor que ela derivasse. Parece que em casos de operação de corpos, por mais que aprofundemos o nosso exame, nunca podemos descobrir coisa alguma senão um acontecimento seguir-se a outro, somos incapazes de compreender qualquer força ou poder que seja instrumento de operação da causa, ou

mesmo qualquer conexão entre ela e o seu suposto efeito".(10)

Hume observa que os fenômenos se sucedem sem que consigamos observar e perceber alguma ligação entre eles, a não ser uma proximidade e sucessão. Ele diz:

> "Um acontecimento sucede a outro, mas nunca podemos observar qualquer laço entre eles. Parecem ser juntados uns aos outros, porém não conexos".(11)

Na presença de um objeto ou fenômeno qualquer, sem ter havido uma primeira experiência, é impossível descobrir ou conjecturar o acontecimento que dele decorrerá. A criança que não conhece o fogo não infere que este provoca queimaduras. Só depois de uma primeira experiência é que podemos fazer alguma previsão do efeito a partir da causa. A repetição, onde uma espécie de conhecimento acompanha sempre em todos os casos a um outro, leva-nos ao estabelecimento da relação de causa e efeito, e aí pensamos haver alguma <u>conexão</u> entre eles. Para Hume, o estabelecimento da relação causal se dá pelo hábito criado pela repetição invariável dos mesmos fatos.

A idéia de <u>conexão necessária</u> - a suposição da existência de poderes ativos: força, energia, etc, ligando fenômenos na relação causal, conforme Hume nasce da repetição e nunca de um exemplo isolado. A partir disto Hume acaba considerando a conexão necessária como sendo algo apenas psicológico, algo que está apenas em nossa mente. Vamos reproduzir a argumentação de Hume para termos uma melhor idéia:

> "Mas um número qualquer de exemplos em nada difere de um exemplo isolado que lhe supomos igual, a não ser o fato de que, após uma repetição de exemplos semelhantes, o intelecto é levado pelo hábito a prever, da manifestação de um dos acontecimentos, o seu acompanhante usual, e acreditar que ele existirá. Essa conexão, pois, que <u>sentimos</u> na

mente, essa transição costumeira da imaginação passando de um objeto para o seu acompanhante usual, é o sentimento ou impressão que nos leva a formar a idéia ou conexão necessária. Nada mais há que descobrir aí. Considerai o assunto sob todas as faces, e jamais encontrareis qualquer outra origem de tal idéia. É essa a única diferença entre um único exemplo, que nunca nos parece dar a idéia de conexão, e um certo número de exemplos, pelos quais a idéia é sugerida. A primeira vez que um homem viu a comunicação do movimento pelo impulso, como pelo choque de duas bolas de bilhar, não podia afirmar que havia conexão, mas apenas conjunção entre um acontecimento e outro. Após observar vários exemplos da mesma natureza, declara-os conexos e pode predizer logo a existência de um deles, ao se lhe apresentar o outro. Quando dizemos, portanto, que um objeto está ligado a outro, queremos significar que se estabeleceu uma conexão entre ambos apenas no nosso pensamento."(12)

Assim a origem da idéia de conexão necessária seria uma projeção da mente sobre os acontecimentos reais sucessivos. Sendo que na realidade, para Hume, há apenas uma conjunção, uma simples sucessão de fatos. Deste modo, Hume nega o carater ontológico do vínculo causal, considerando-o apenas psicológico. E assim vai além de Berkeley, pois, não sendo o vínculo algo real, as explicações causais são dispensáveis tanto na filosofia natural quanto na metafísica.

Negar o carater ontológico do vínculo causal foi uma saida que a filosofia empirista encontrou para contornar o problema da explicação do modo de produção dos fenômenos, pois, sendo o vínculo apenas psicológico, não faz sentido querer estudar os fenômenos pelo aspecto causal. Deste modo a filosofia empirista justifica a atitude positivista de

negar a importância da investigação causal, substituindo-a pela descrição dos fenômenos por meio de leis matemáticas.

Em sua obra "Curso de Filosofia Positiva", Augusto Comte faz considerações sobre a natureza e importância da filosofia positiva. Ele começa sua exposição a partir de uma análise histórica sobre a marcha progressiva do espírito humano em relação as explicações dos fenômenos naturais, estabelecendo então, uma primeira lei fundamental, onde diz que a mentalidade humana passa por três estágios:

> "Essa lei consiste em que cada uma de nossas concepções principais, cada ramo de nossos conhecimentos, passa sucessivamente por três estados históricos diferentes: estado teológico ou fictício, estado metafísico ou abstrato, estado científico ou positivo".(13)

No primeiro estado - teológico - o espírito humano explica os fenômenos naturais por meio de causas sobrenaturais. No segundo estado - metafísico - há uma substituição dos agentes sobrenaturais por agentes naturais: forças abstratas e inerentes ao corpo. Nesses dois estados o conhecimento é absoluto. Finalmente, no estado positivo, o espírito humano, "reconhecendo a impossibilidade de obter noções absolutas, renuncia procurar a origem e o destino do universo, e conhecer as causas íntimas dos fenômenos, para preocupar-se unicamente em descobrir, graças ao uso bem combinado do raciocínio e da observação, suas leis definitivas, a saber suas relações invariáveis de sucessão e similitude. A explicação dos fatos, reduzida então a seus termos reais, se resume de agora em diante na ligação estabelecida entre os diversos fenômenos particulares e alguns fatos gerais, cujo o número, o progresso da ciência tende cada vez mais a diminuir".(14)

O Positivismo enquanto movimento filosófico caracteriza-se pela proposta de que a pesquisa científica tenha a tarefa unicamente de descobrir as leis naturais, as relações de sucessão invariável, ao mesmo tempo que nega a

importância da investigação causal. Comte descreve a natureza de sua filosofia nas seguintes palavras:

> "...o carater fundamental da filosofia positiva, é tomar todos os fenômenos como sujeitos a leis naturais invariáveis,.....considerando como absolutamente inacessível e vazia de sentido para nós a investigação das chamadas causas, sejam primeiras, sejam finais. É unútil insistir muito sobre um princípio, hoje tão familiar a todos aqueles que fizeram um estudo um pouco aprofundado das ciências de observação. Cada um sabe que, em nossas explicações positivas, até mesmo as mais perfeitas,não temos de modo algum a pretensão de expor as causas geradoras dos fenômenos,..."(15)

A doutrina positivista chegou a ser tão intransigente nesta questão da investigação das causas, que em alguns momentos propos que conceitos como: o de eletron, de campo, da luz como fenômeno ondulatório no éter, que não foram obtidos diretamente da observação, fossem eliminados da ciência. Esses conceitos são produtos da atividade racional e dedutiva e, na medida que o positivismo nega esses aspectos, promovendo os aspectos experimental e indutivo, ele reforça a visão empirista.

As filosofias empirista e positivista se engrenam e se completam. São filosofias afins que tiveram grande receptividade no meio científico. Encontramos vários cientistas que se tornaram filósofos, defendendo o pensamento positivista-empirista. Por exemplo: para Kirchoff a ciência deveria negar a explicação do "por-que" as coisas sucedem. Ele mantinha a tese de que para o cientista todo "porque" é um "como". Em sua tarefa o cientista descreve novas conexões entre os fenômenos sem passar pelas "razões subjacentes" que estão além dos fenômenos. Para Mack na natureza não há causas nem efeitos, a natureza simplesmente "segue sua marcha". Uma ciência desenvolvida expressa suas conclusões como relações funcionais e, assim fórmulas

ascépticas substituem os "vínculos causais" da metafísica. Para W. K. Clifford a oração "por-que sucedem as coisas" é uma pseudo pergunta, não resulta numa autêntica busca de informação. Para Karl Pearson a lei científica descreve de forma breve a ordem de nossas percepções e, quando um físico diz, por exemplo, que chegou a uma "explicação mecânica" de um fenômeno, isto significa que "descreveu na linguagem da mecânica certas rotinas da experiência ".(16)

2.3 - Referências Bibliográficas

(1) Galileu Galilei, "Duas Novas Ciências", Ed. Nova Stella, São Paulo, p. 121.

(2) Citado em A.Koyré, "Do Mundo Fechado ao Universo Infinito", Ed. Univ. São Paulo, São Paulo, 1979, p.170.

(3) ref. 2, p.214.

(4) citado em W.A.Wallace, "Causality and Scientific Explanation", Ed. the University of Michigan, p.24.

(5) ref. 4, p.31.

(6) ref. 4, p.31.

(7) ref. 4, p.33.

(8) ref. 4, p.35.

(9) David Hume, "Investigação Sobre o Entendimento Humano", Coleção "Os pensadores", Ed. Abril Cultural, São Paulo, 1973, p.153.

(10) ref. 9, p.159.

(11) ref. 9, p.159.

(12) ref. 9, p.159 e 160.

(13) Augusto Comte, "Curso de Filosofia Positiva", Coleção: "Os Pensadores", Ed. Abril Cultural, São Paulo, 1973, p.10.

(14) ref. 13, p.10.

(15) ref. 13, p.13.

(16) John Passmore, "100 anos de filosofia", Ed. Aliança Editorial, Madrid, 1981, cap. 14.

3 - CRÍTICAS AO POSITIVISMO, EMPIRISMO E INDUTIVISMO

Neste segmento pretendemos fazer uma análise histórica do fortalecimento do positivismo na ciência, e também uma análise epistemológica da concepção empirista-indutivista da aquisição do conhecimento, em particular o conhecimento científico. Observamos que em nossas críticas à essas doutrinas não temos a pretensão de negar o papel da experiência na investigação científica, mas a de defender o papel da racionalidade e da dedução na busca de explicações.

3.1 - Análise Histórica do Positivismo

O fato de Galileu ter tomado uma atitude positivista ao deixar de lado a questão da natureza da gravidade, buscando somente a lei do movimento de queda livre, é justificável no contexto histórico daquela época, pois, até então o estudo da natureza era predominantemente racional e metafísico. Como uma forma de defesa da importância da experiência e da introdução da linguagem matemática na investigação da natureza sua postura é plenamente justificável.

Embora Galileu não admitisse a gravidade como uma fonte de movimento, na prática "na física galileana, a gravidade continua,...,a ser, apesar de tudo, uma fonte de movimento"·(1) Apesar de sua atitude positivista de deixar de lado a investigação das causas da gravidade, tomando-a apenas como uma tendência natural, de certa forma ele está atribuindo uma propriedade ao corpo, a qual carrega-o para baixo, e deste modo, a física de Galileu não está isenta de uma causalidade interna ao corpo.

Os historiadores positivistas costumam falar de Galileu como um realizador de experiências e caracterizar a revolução científica dos séculos XVII e XVIII como resultante da introdução do método experimental na ciência. Enquanto que, na verdade, sabemos que o trabalho

experimental de Galileu foi pequeno e que ele realizou predominantemente experiências imaginárias, fazeno o uso de hipóteses e modelos prévios. Quanto ao método, a revolução científica daquela época caracterizou-se pela predominância da razão sobre a experiência ingênua(2), o que pode-se notar na elaboração do conceito de inércia: as observações do cotidiano nos mostram que o movimento tende ao repouso e que ele necessita de uma força para continuar; a especulação do movimento inercial só é atingida mentalmente.

Com respeito a Newton e suas atitudes positivistas, é fato que ele agindo da mesma maneira que Galileu, chegou à lei de atração gravitacional universal, sem explicar o significado da atração mútua; entretanto, antes de formular a razão matemática, Newton fez hipóteses. Seu estudo parte da suposição de que o movimento orbital dos planetas em torno do Sol acontece em virtude da força atrativa equilibrar exatamente a força centrífuga. Isto não foi dado a ele pela observação. Ele utilizou esta hipótese e não deixou de fazer especulações ao pensar que a ação mútua entre corpos distantes seria semelhante a ação de puxar um corpo através de uma corda.

Não podemos enquadrar Newton como um positivista, pois, sua renúncia à explicação do significado de atração é apenas circunstancial, ele não chega a negar a importância da determinação da natureza da ação gravitacional, como faz a doutrina positivista, mas apenas deixou a questão em suspenso, para consideração de seus leitores.(3) Além do mais, encontramos na obra de Newton, nos tratados filosóficos que adicionou nas sugundas edições do "Princípios Matemáticos" e do "Otica", explicações causais de carater teológico. Newton explicou as forças da natureza como resultantes da ação de Deus permeando o espaço.(4)

Comte em seu "Curso de Filosofia Positiva", diz que a lei dos três estados: teológico, metafísico e positivo também se verifica individualmente:

"Cada um de nós, contemplando sua própria história, não se lembra de que foi sucessivamente, no que concerne as noções mais importantes, teológico em sua infância, metafísico em sua juventude e físico em sua virilidade?".(5)

No caso de Newton, em particular, podemos notar que tal concepção não é adequada, pois quando ele faz a explicação da atividade do Universo pela ação de Deus no espaço, ele já está em final de carreira. Também do ponto de vista histórico a lei dos estados não se verifica, pois, se assim fosse era de se esperar que após a descoberta da lei de atração, os cientistas deixariam de se preocupar com as causas da gravitação. Vejamos, então, como foi o desfecho da história sobre o problema de explicação da atração gravitacional.

Apesar de Newton não aceitar a idéia de ação à distância, por influência de seus discípulos e seguidores, ela acabou sendo aceita como explicação do fenômeno gravitacional. A comunidade científica européia se dividiu quanto à maneira de explicar a ação entre corpos distantes. De um lado, os newtonianos, baseados na metafísica atomista das partículas separadas pelo vazio, aceitavam haver uma ação à distância e, por outro lado, os defensores da concepção do mundo cheio de matéria, e portanto da inexistência do vazio; os cartesianos que explicavam a ação entre corpos pelo contacto e pelo choque, tomando a "extensão" como essência da matéria; ou ainda os seguidores da metafísica de Leibnitz que supôs a matéria divisível ao infinito de modo a formar um contínuo e, tomou a "força" como sua essência fundamental, explicando a ação entre corpos por meio de um intensivo contínuo de forças.

O conflito entre essas metafísicas rivais, conjuntamente com as novas descobertas da interação entre a eletricidade e o magnetismo, levaram Faraday a conceber uma nova maneira de explicar a ação entre corpos distantes, isto é, a noção de <u>campo</u>. W. Berkson numa análise sobre a gênese

do conceito de campo, diz que Faraday foi diretamente influenciado por Boscovich e Kant, sendo que ambos aceitaram a idéia de ação à distância, e que ambos "tentaram uma síntese de Newton e Leibnitz.....Enfatizarei que nem Boscovich nem Kant prosseguiram na linha de Descartes e Leibnitz. Eles abandonaram a idéia de que o mundo é cheio , constituindo-se num campo de matéria ou força. Entretanto, foi através de suas influências que Faraday foi guiado para inventar sua teoria de campos de força."(6)

Pela nocão de campo, explicamos a ação entre corpos, por meio da interação entre o corpo e o meio. Lorentz, tomando o éter e a carga elétrica como entidades fundamentais de seu mundo, dizia que o deslocamento de uma partícula carregada no éter, provoca em suas proximidades uma mudança na estrutura do éter e, este éter modificado - o campo - atuava em outras partículas carregadas, mudando seu estado inercial. A noção de campo gravitacional concebida por Einstein na Teoria da Relatividade Geral também é vista como uma interação entre a matéria e o espaço: a matéria age no espaço próximo a ela provocando-lhe o que Einstein chama de "curvatura do espaço" e, este espaço encurvado é responsável pela aproximação dos corpos.

As explicações por meio do conceito de campo têm vantagens sobre as explicações por contatos e choques mecânicos que são complicados e pouco eficientes, como também sobre a explicação pela ação à distância que é ininteligível, pois, como podem corpos separados agirem um sobre o outro, se agem é porque deve haver alguma forma de ligação ou mediação. Dete modo o surgimento da noção de campo na ciência depõe contra o pensamento de Comte que considera a investigação das causas ou do modo de ação entre corpos, como inacessíveis e sem sentido. Atualmente ninguém nega a importância do conceito de campo na Física.

Para finalizar esta análise histórica vamos apelar para a autoridade do historiador Alexandre Koyré,

transcrevendo parte de sua conclusão a respeito das origens da ciência moderna:

> "...não creio na interpretação positivista da ciência - nem mesmo na de Newton -, ...o empirismo puro - e mesmo a "filosofia experimental" - não conduz a parte alguma. E não é renunciando ao objetivo aparentemente inacessível e inútil do conhecimento do real, mas, pelo contrário, é perseguindo-o com ousadia que a ciência progride na via infinita que leva à verdade. Por conseguinte, a história dessa progressão da ciência moderna deveria ser dedicada a seu aspecto teórico, pelo menos tanto quanto a seu aspecto experimental".(7)

3.2 - Crítica Epistemológica

E.Meyerson(8) ao criticar o positivismo, comenta que do fato desta doutrina privar a investigação do que há por de trás dos "fenômenos", ao renunciar a pesquisa das causas, o termo "fenômeno" passa a ser sinônimo do termo "Sensação". É a partir dessas sensações, tidas como pura - "dados imediatos da consciência" - que estabelecemos as relações de sucessão invariável. Esta é uma concepção empirista do conhecimento.

A doutrina empirista vê o sujeito cognoscente como uma "tábua rasa" (antes da experiência) na qual se inscrevem as impressões procedentes do "mundo exterior". Os empiristas ingleses (Locke, Berkeley e Hume) concebem o sujeito cognoscente como um "receptáculo" dos dados do mundo exterior, transmitidos pelos sentidos mediante a percepção. A percepção dos dados - as "sensações" - formam a base do conhecimento. De posse dos dados "acumulados" a mente trabalha fazendo ligações entre - eles, chegando então ao conhecimento.

O ponto questionável da doutrina empirista reside no aspecto de tomar o observador como uma tábua rasa: o oservador neutro, registrando "dados puros". Nesta questão, Russel Hanson foi bastante feliz ao cunhar a expressão: "Toda experiência está carregada de teoria".(9) Os conhecimentos adquiridos anteriormente interferem na observação, de modo que não há observador neutro nem dados puros. Pessoas diferentes observam diferentemente os mesmos fatos. Por exemplo, olhando chapas fotográficas expostas aos raios cósmicos, um leigo registra somente riscos, quando um físico de partículas registra um choque entre partículas. Deste modo, os dados que mente trabalha não são puros, mas produtos de uma interação entre a informação exterior com a bagagem intelectual existente na mente de quem observa. Assim sendo:

> "conhecer significa estabelecer relações em uma matéria prima que sem dúvidas é fornecida pela experiência, porém cuja organização depende do sujeito cognoscente. Isto exclue que o conhecimento da realidade se gere por observações e por generalizações indutivas a partir daquelas. Isto não significa, entretanto, cair em alguma forma de apriorismo, nem idealismo. Tampouco implica sustentar o subjetivismo em nenhuma de suas variantes, em se considerando o conhecimento como fenômeno social e, por conseguinte, intersubjetivo."(10)

No caso específico do conhecimento científico são levantados alguns pontos que evidenciam a influência do conteúo teórico na obtenção de dados experimentais, que contrariam a afirmação empirista a cerca dos dados puros. A realização de uma nova experiência não é uma tarefa súbita e expontânea: 1) a sua realização ocorre a partir de uma problemática teórica, 2) a mensuração dos dados requer aparelhos cuja construção pressupõe alguma teoria, 3) a precisão das medidas depende do avanço tecnológico que por

sua vez é baseado no sucesso de alguma teoria, 4) a tradução dos dados em "enunciados de observação" envolve convicções teóricas. 5) o valor científico do experimento somente pode ser definido a partir de uma teoria mais ou menos articulada.(11)

Uma outra crítica que se faz à teoria do conhecimento empirista reside na influência da matemática na doscoberta de novos conhecimentos físicos.

É fato conhecido que a ciência empírica exerce influência no desenvolvimento da matemática. Só para citar um exemplo, temos o caso de Newton que desenvolveu o cálculo infinitesimal para tratar da questão da velocidade instantânea, como também, desenvolveu o cálculo diferencial-integral para resolver o problema da atração exercida por um corpo esférico, sobre um corpo próximo.

A análise da história da ciência revela que o inverso também é verdadeiro, isto é, a matemática influencia o desenvolvimento da física, o seu papel na ciência não restringe-se apenas à função de um instrumento com uma linguagem precisa, mas também a de permitir a elaboração de novos conhecimentos e descobertas na física.

A matemática contribui de duas formas na descoberta em física. Uma delas consiste na ampliação do conteúdo físico quando traduzimos um conceito numa certa linguagem matemática. Por exemplo, Fresnel concebeu a luz como um fenômeno ondulatório propagando-se através do éter. Este conceito tornou-se mais abrangente quando ele assumiu que a onda poderia ser representada pela função sen $(\frac{2\pi t}{T})$, pois desta maneira suas propriedades poderiam ser exploradas. Um outro caso é o do conceito de espaço-tempo da relatividade restrita. A tradução deste conceito na linguagem da geometria quadrimensional de Minkowski deu a este conceito um sentido mais amplo, pois permitiu a ligação entre as idéias físicas relativísticas e os recursos formais da linguagem tensorial com todas as suas propriedades.

A outra forma na qual a matemática joga um papel importante na descoberta da física vem da interpretação realista de entidades matemáticas, que à primeira vista parecem vazias de significado físico, mas que podem levar o cientista a uma conjectura. Por exemplo, a existência do positron foi predita por Dirac quando ele interpretou as soluções negativas da equação relativista do elétron. À primeira vista tais soluções pareciam sem algum significado físico, mas insistindo na interpretação, ele concebeu uma partícula de carga oposta ao elétron: o positron, "a ausência de um elétron de carga -e e energia -E foi interpretada como a presença de um positron, isto é, de uma partícula de carga +e e energia +E". (12)

Um caso semelhante se deu na descoberta das transformações de Lorentz. A transformação referente ao tempo, $t' = \left[t - \frac{vx}{c^2}\right] \Big/ \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ foi considerada inicialmente por Lorentz, que a inventou, como um puro artifício matemático para tornar invariantes as equações de Maxwell em referenciais diferentes; em seguida foi interpretada por Poincaré como indicativa de uma simultaneidade "efetiva" relativa para fenômenos distantes e finalmente, por Einstein, como uma decorrência natural da sincronização de relógios mediante pulsos de luz com velocidades invariantes.

Estes fatos constituem um argumento a mais contra a doutrina empirista de que o conhecimento, em particular o conhecimento científico, tenha suas origens exclusivamante na experiência

A afirmação indutivista de que o conhecimento cientifico é gerado a partir de fatos particulares por meio da indução, também é questionável. Em primeiro lugar, não havendo dados puros, estes não vão sendo simplesmente acumulados e sim acomodados: há aí uma atividade intelectual que consiste na confrontação entre a informação exterior e a bagagem de informações interiores que resulta numa acomodação e, este não é um processo simplesmente indutivo.

Em segundo lugar, existe a dificuldade de justificação desse método como infalível: o que garante que a análise de um número finito de casos nos leve a uma lei universal?. O que nos assegura que o passado e o futuro serão iguais?. A argumentação indutivista parte da crença na uniformidade da Natureza. A esse respeito o próprio Hume colocou o seguinte:

> "Todas as inferências vindas da experiência supõem, como seu fundamento, que o futuro se assemelhará ao passado e que poderes semelhantes serão unidos a semelhantes qualidades sensíveis. Se houvesse alguma suspeita de que o curso da natureza pudesse mudar e de que o passado não servisse de regra para o futuro, toda experiência se tornaria inútil e não poderia dar origem a nenhuma inferência ou conclusão. É impossível portanto que argumentos extraídos da experiência possam provar a semelhança do passado com o futuro: visto que todos os argumentos assim feitos se fundam na suposição daquela semelhança. Admitindo-se que o curso das coisas foi sempre regular: este sozinho, sem argumento ou inferência nova não prova que o futuro continuará assim."(13)

Questionamentos de ordem histórica também são feitos contra a visão indutivista da ciência: Por que a maioria das generalizações importantes não sairam de uma análise de todos os exemplos possíveis?. Por que os cientistas tendem a generalizar após poucos exemplos?. Por que influências sócio culturais tem um papel importante na determinação e aceitação de leis e teorias?.(14)

A concepção empirista-indutivista do conhecimento científico, como vimos, não resiste a um exame mais minucioso. E nas visões mais atuais da ciência, atitudes como as de: formular hipóteses com ou sem ligação com a experiência, generalizar rapidamente, trabalhar com dados não muito precisos, não abandonar teorias ou hipóteses

contraditas por alguma experiência, são aceitas uma vez que essas atividades também abrem novos horizontes na pesquisa científica. Ao não enquadrar a ciência aos limites da exigência empirista, abandonamos a distinção rígida: observável e não observável, mesmo porque esta distinção não é algo tão evidente, e ainda depende do contexto, que varia de uma época para outra. Nas visões mais atuais, valoriza-se também o lado criativo da elaboração de "quadros da realidade" que dão possíveis explicações e nos guiam através do emarenhado de fatos observados. Einstein e Infeld na conclusão da obra "A Evolução da Física" dizem:

> "A ciência não é apenas uma coleção de leis, um catálogo de fatos não relacionados entre si. É uma criação da mente humana, com seus conceitos e idéias livremente inventados. As teorias físicas tentam formar um quadro da realidade e estabelecer sua conexão com o amplo mundo das impressões sensoriais."(15)

3.3 - Referências Bibliográficas

(1) A. Koyré, "Estudos Galilaicos", Publicações Dom Quixote, Lisboa, 1986, p.306.

(2) A. Koyré, "Estudos de História do Pensamento Científico", Ed. Univ. Brasília, Brasília, 1982, p.74.

(3) A. Koyré, "Do Mundo Fechado ao Universo Infinito", Ed. Univ. São Paulo, São Paulo, 1979, p.170.

(4) ref. 3, cap. IX.

(5) Augusto Comte, "Curso de Filosofia Positiva", Coleção: "Os Pensadores", Ed. Abril Cultural, São Paulo, 1973, p.13.

(6) W. Berkson , "Fields of Force", John Willey - sons, New York, 1974, p.25.

(7) ref. 2, p.77.

(8) E. Meyerson, "Le Explication Dans Les Sciences", Payot, Paris, 1927.

(9) citado em R. Garcia, "Los Problemas del Conocimiento", Enrique Leff, Editor, Siglo XXL, 1986.

(10) ref. 9, capítulo: "Conceptos Basicos Para el Estudio de Sistemas Complejos".

(11) A. Villani, Tese de Livre Docência: "Conteúdo Científico e Problemática Educacional", Instituto de Física da USP, 1987, p.30.

(12) E. Zahar, "Einstein, Meyerson and the Role of Mathematics in Physical Discovery", Brit. Jour. Phil. Sc 31 (1980), p. 8.

(13) citado em Nicola Abbagnano, "Dicionário de Filosofia", Ed. Mestre Jou, São Paulo, 1962, Verberte Indução.

(14) ref. 11, p. 36.

(15) A. Einstein, "A Evolução da Física", Zahar Editores, Rio de janeiro, 1980, p.235.

4 - DISCUSSÃO SOBRE OS SIGNIFICADOS DE CAUSALIDADE

O termo "causalidade" no seu significado mais geral, pode ser entendido como a conexão entre duas coisas, dois fenômenos ou dois fatos, na qual um deles (o efeito) é univocamente previsível a partir da constatação do outro (causa). Do ponto de vista epistemológico, isto é, dependendo da interpretação do como conhecemos ou como chegamos ao conhecimento causal, surgiram, historicamente dois significados de causalidade que nos levam a conceber a explicação em física de dois modos diferentes.

Um dos significados é o clássico, que já vem desde Platão, no qual concebe-se a conexão causal como uma dedução, isto é, a causa e o efeito são ligados por meio do raciocínio dedutivo (conexão racional); o outro, introduzido por Hume, no qual entendemos que a vinculação entre a causa e o efeito seja dada pelas observações (conexão empírica) de sucessões regulares repetitivas, que fazem nascer o hábito de crer que essas sucessões ocorrerão no futuro.

O conceito de explicação de Comte está baseado na noção de causalidade de Hume. Um fenômeno está explicado quando apresentamos a relação de sucessão invariável, isto é, a lei que regula o fenômeno.

Meyerson, por sua vez, concebe a causalidade do ponto de vista dedutivo. Em sua obra: "Le Explication dans les Sciences", critica a visão empirista-positivista da ciência, firmando posição que a ciência é essencialmente ontológica, isto é, o conhecimento científico afirma algo sobre a realidade, não sendo apenas mero instrumento de cálculo; e ainda que o cientista não se satisfaz apenas com o conhecimento de uma lei, pois para ele, o ser humano tem um desejo natural de buscar as razões ou causas que explicam os fenômenos.

> "Todo mundo sabe que o que o sábio procura além da lei é frequentemente designado pelo vocábulo <u>causa</u>, que torna-se neste sentido, um sinônimo do

termo <u>explicação</u>: quando alguém conhece além da lei ou as causas do fenômeno, se declara satisfeito."(1)

Em seguida, Meyerson observa que o termo "causa" empregado "como sendo qualquer coisa que é anterior, no tempo, ao fenômeno que ela explicará ou ao seu efeito", não correspondente ao sentido próprio da explicação científica. Para ele a causalidade tem um sentido dedutivo.

"Devemos, em virtude da causa ou razão e com a ajuda de uma pura operação de raciocínio, poder concluir o fenômeno. É o que se chama uma dedução. A causa, então pode ser definida como sendo o ponto de partida de uma dedução da qual o fenômeno é o ponto de chegada."(2)

A experiência ou a observação direta da natureza nos revela que certos acontecimentos sempre são acompanhados de outros e que sempre se repetem do mesmo modo. Para Hume, conforme vimos, nós só conectamos causalmente os dois acontecimentos depois de alguma experiência, antes disto nós não conseguimos prever o efeito a partir da constatação da causa. O hábito leva-nos a uma idéia de conexão necessária entre os acontecimentos, isto é, imaginamos a existência de algum poder ou força que está num objeto que provoca mudanças no outro. Para Hume dois objetos são conectados de forma necessária apenas na nossa mente, sendo que na realidade não existem esses poderes ou forças que imaginamos, daí surge o positivista dizendo que não devemos ir além daquilo que a observação nos fornece.

Uma postura discordante desta consiste em crer que existe algo físico conectando de forma necessária dois objetos, e que podemos fazer interpretações ou construir modelos representativos sobre esses poderes que não são dados diretamente pela observação. Meyerson procura mostrar que esta posição é a adotada pelos cientista em geral, e a prova disto estaria nos modelos explicativos que a ciência constrói. Poe exemplo, no início do século XIX, a respeito

dos fenômenos térmicos, surgiu uma explicação por meio da idéia do "calórico", uma substância física que passaria dos corpos mais quentes para os mais frios. Tal explicação tornou-se inadequada, frente às observações do conde Rumford, ao notar que nas perfurações, isto é, no vazamento de cano dos canhões parecia haver ali uma fonte inexaurível de calórico. A partir disto começou a surgir a idéia de transformação de energia, isto é, uma forma de energia pode transformar-se em outra forma. Voltando ao exemplo apresentado no segmento 2.2, da chama da vela e o ardor causado na pele, podemos explicar causalmente esta relação, deduzindo mentalmente que a energia química da cera transforma-se em energia térmica, que pode ser entendida como a energia cinética que aumenta a velocidade das partículas do ar próximo à chama; o choque destas com a pele nos causa a sensação de calor. Deste modo, a explicação de um fenômeno consiste em considerar uma certa teoria que permite vincular dedutivamente a causa (ponto de partida) com o efeito (ponto de chegada).

Bunge em sua obra: "EL Principio de Causalidad em la Ciencia Moderna", discorda do positivismo de que a causalidade deva ser reduzida à legalidade, mas também não chega a concordar inteiramente com a posição de Meyerson no tocante à validez universal do principio causal: a causa sempre produz o mesmo efeito. Há domínios da física onde não aplica-se este princípio.

> "Os positivistas têm exigido que o conceito de causalidade seja substituído pelo de lei; intimaram a ciência a abandonar o que Comte chamou "la vaine recherche des causes",....Alguns antipositivistas, em troca, tem sustentado que a legalidade é insuficiente e que deve buscar-se "detrás" de cada lei uma conexão causal. Sem embargo, o exame da natureza da lei científica nos há revelado que a ciência não tem seguido nenhum desses conselhos, pois contém tanto leis causais

como não causais e também leis nas quais concorrem várias categorias de determinação."(3)

Na natureza nem sempre podemos prever um determinado efeito a partir de uma dada causa, isto é, prever um determinado fenômeno a partir da ocorrência de outro. Existem casos em que a partir de uma causa vários efeitos são possíveis e a ocorrência de um deles pode ser dada apenas em termos de probabilidades. Como é o caso, por exemplo, de um jogo de dados: não podemos prever exatamente qual face cairá para cima ao lançarmos o dado, mas apenas afirmar a probabilidade de acontecer um dos eventos possíveis.

Para delimitar o domínio de aplicação da causalidade na ciência, Bunge levantou uma série de condições que devem ocorrer para que possamos classificar fatos ou fenômenos como causais:

"I) Que as principais mudanças em consideração sejam produzidas por fatores externos.

II) Que o processo em questão possa ser considerado como isolado.

III) Que as interações possam aproximar-se por relações agente-paciente.

IV) Que o antecedente e o consequente estejam vinculados entre si de maneira unívoca."(4)

Todas essas condições precisam ocorrer para que possamos fazer hipóteses causais, nenhuma por si só é suficiente e, como nenhuma dessas condições pode ser cumprida exatamente em casos reais, Bunge conclui o seguinte sobre o domínio da causalidade:

"A causalidade estrita e pura não se dá nunca, em nenhuma parte. A causação age de modo aproximado em certos processos limitados tanto no espaço como no tempo, e ainda assim, só em aspectos particulares. As hipóteses causais são nada mais (e nada menos) que reconstruções toscas, aproximadas, unilaterais da determinação: são com

frequência completamente prescindíveis, porém às vezes adequadas e indispensáveis."(5)

Bunge participou de um símpósio no Centro de Epistemologia Genética da Universidade de Genébra, do qual participaram cientistas de várias áreas do conhecimento e de vários países. O tema do simpósio foi o da epistemologia da causalidade física e Bunge expôs suas idéias sobre as limitações da causalidade na ciência.

F.Halbwachs(6) fez um relato do simpósio, procurando precisar as reflexões que surgiram durante as discussões. Houve de início uma divisão de opinião entre os participantes a respeito da extensão e compreensão do conceito de causalidade, que Halbwachs aglutinou em dois grupos. De um lado, os defensores da idéia que a causalidade adquire formas múltiplas e reina sobre o conjunto do mundo físico. De outro lado, os defensores da idéia que a causalidade é um conceito muito preciso e limitado que não representa mais que um caso particular de relação entre acontecimentos. A primeira concepção, da causalidade adquirindo formas múltiplas, é muito ampla, imprecisa e vaga, tornando-se necessário precisar o seu significado; deste modo, os participantes do simpósio chegaram ao conceito de causalidade estrito, defendido, em especial, por Bunge, como um tipo particular da determinação geral.

Este conceito estrito ou limitado de causalidade corresponde ao conceito de causalidade dos filósofos clássicos. Hume, por exemplo, quando trata da causalidade fala da bola de bilhar colocada em movimento pelo choque de outra. Corresponde também ao conceito que os leigos em geral fazem, ao falarem em termos de causa e efeito, conforme comprova as experiências dos psicólogos da percepção.

Considerando o conceito estrito de causalidade e as condições necessárias para a sua aplicabilidade, levantadas por Bunge, os participantes do simpósio chegaram à inesperada conclusão: a causalidade, em realidade, não joga algum papel na física, uma vez que não são observadas

na natureza as condições de aplicabilidade. Por exemplo: a condição de univocidade em geral não é observada, uma vez que existe a reação do paciente sobre o corpo agente.

Essa conclusão levantou problemas que foram largamente debatidos de diversas maneiras: Qual é o estatuto da causalidade estrita ou limitada na física?. Por que os físicos, de fato se servem dela, ainda que geralmente não falem explicitamente de causa e efeito?. Que lugar ocupa este conceito simples diante da "conexão física", que em último termo é a correta?.

A discussão no simpósio chegou a um consenso quanto ao seguinte. Geralmente as situações físicas não são situações que possam ser explicadas por meio de uma causalidade estrita, são situações que envolvem uma causalidade ampla, a qual nos aparece como algo vago e impreciso. Entretanto, a causalidade estrita nos apresenta-se como algo cheio de inteligibilidade, e se procuramos entender a causalidade ampla como uma composição de causalidades simples, como um conjunto de ações unívocas, conseguimos assim precisar o significado da causalidade ampla. Deste modo, a causalidade estrita

> "Constitui uma etapa necessária, um instrumento para edificar e compreender a causalidade real que opera sobre o real. Não podemos compreender diretamente a causalidade múltipla...., porém podemos começar a compreender a ação isolada de cada uma das causas simples, e logo construir um conceito que as compõe, conservando seu carater explicativo. Do mesmo modo, o feedback ou ação recíproca, só pode compreender-se através de uma composição intelectual que considera, primeiro por separado, e logo um atrás do outro, os dois momentos unilaterais.....Consegue-se assim edificar progressivamente, a partir de uma causalidade abstrata, uma causalidade dialética real - e isto pode estudar-se geneticamente na

história das ciências como na história individual da formação do conhecimento."(7)

Vamos a um exemplo para explicar melhor esta conclusão. No choque de uma bola A que coloca em movimento uma bola B, um sujeito pode numa primeira etapa conceber a causalidade na sua forma estrita, isto é, ele entende que A exerce uma ação sobre B, mas não leva em consideração a reação de B sobre A, a qual atenua o movimento desta última. Entretanto, desta etapa o sujeito pode chegar a construir, numa outra etapa posterior, um outro modo causal de ação recíproca, passando a considerar que A age sobre B e B reage sobre A, fornecendo então uma descrição mais completa do fenômeno. Esta edificação da causalidade, feita de modo progressivo pode ser verificada tanto na evolução da ciência como na evolução do pensamento de um indivíduo. No próximo capítulo falaremos da gênese do conhecimento causal nesses dois campos.

A causalidade, entendida no significado amplo como um conjunto de causalidades estritas, compreende vários modos de ação: simples (unívoca), interação (biunívoca), estrutural (do todo para a parte), estatística (conjunto das partes determinando o todo),... Neste sentido amplo podemos dizer que a causalidade aplica-se a um amplo domínio da física. Por exemplo, no caso do dado, se consideramos todos os fatores que influenciam seu movimento, pelo menos em princípio, podemos fazer previsões exatas. No caso da microfísica devemos fazer uma excessão, pois conforme a teoria quântica, nem em princípio podemos fazer previsões exatas. Faremos considerações a este respeito na conclusão deste trabalho.

Esta estratégia de levar-se em conta a gênese do conhecimento é uma das principais características da epistemologia da Escola de Genebra. No próximo capítulo faremos uma análise de alguns fundamentos desta teoria do conhecimento, conhecida como epistemologia genética.

4.1 Referências Bibliográficas

(1) E. Meyerson, "Le Explication dans les Sciences", Payot, Paris, 1927, p. 65

(2) ref. 1, p. 66

(3) M.Bunge, "Causalidad - El Principio de Causalidad em la Ciencia Moderna", Ed. Universitária de Buenos Aires, 1972, p. 294.

(4) ref. 3, p. 350

(5) ref. 3, p. 351

(6) F. Halbwachs: "Sobre los Problemas de la Causalidad Física", Epistemologia y Marxismo, M. Godelis, J.Monod, N.Mouland - Novo Curso - Ed. Martins Roca.

(7) ref. 6, p. 56

5 - A CAUSALIDADE NA EPISTEMOLOGIA PIAGETIANA

A doutrina positivista, seja na versão original de Comte, seja na nova versão do neopositivismo ou positivismo lógico, pretende que o conhecimento científico fique reduzido a uma simples descrição da realidade, pois, vê o conhecimento causal sem qualquer valor para a ciência. Por outro lado, a história da ciência nos revela a preocupação do cientista de buscar além das leis, a explicação causal do modo de produção dos fenômenos. Diante deste dilema: acatamos a proposta positivista que conforme vimos, se respalda na concepção empirista do conhecimento, ou tomamos o papel da explicação causal como importante para a ciência, buscando uma nova base epistemológica?

No nosso trabalho optamos pelo segundo caminho. Os estudos da Escola de Genebra, a Escola de Piaget e colaboradores, baseados em experiências que procuram acompanhar a evolução do conhecimento no indivíduo, desde os primeiros anos até a fase adulta, fornece uma nova base epistemológica capaz de explicar como o indivíduo elabora o conhecimento causal, e também nos fornece elementos para entender a relação deste conhecimento com o desenvolvimento de conhecimento científico.

No primeiro segmento deste capítulo fazemos um breve relato da evolução do conhecimento causal no indivíduo, com o intuito de mostrar como a causalidade é construída passo a passo e de forma interdependente com as operações lógico-matemáticas.

Os resultados dos estudos psicogenéticos permitiram uma releitura da evolução histórica da ciência, diferente da que prevalece entre os historiadores, mostrando que nela a causalidade vai sendo construída passo a passo, e que tal evolução está relacionada com a evolução do conhecimento matemático.

No segundo segmento deste capítulo, procuramos evidenciar este aspecto tomando como exemplo a história das explicações do fenômeno gravitacional.

No terceiro segmento fazemos um breve relato do estudo comparativo entre a evolução do conhecimento físico no indivíduo e a evolução do conhecimento na ciência, pois nele revela-se uma semelhança entre os dois desenvolvimentos, a qual é explicada por Piaget e colaboradores como resultado do emprego de um mesmo esquema cognitivo; tanto o cientista como as crianças fazem uso dos mesmos instrumentos, mecanismos e processos para obterem conhecimentos. A explicitação desse mecanismo cognitivo permite precisar o significado de esplicação científica.

Finalmente, tomando por base os estudos dos três primeiros segmentos, no quarto segmento focalizamos a questão do significado de explicação científica dentro da teoria piagentina do conhecimento.

5.1 - A Psicogênese da Causalidade

O estudo da evolução do conhecimento (psicogênese) no sujeito evidencia o quanto os aspectos lógico-matemático e causal estão intimamente ligados. O ponto de partida deste estudo é a criança em seu primeiro estágio egocêntrico, quando "o universo está centrado sobre o eu, e sobre um eu que se ignora como tal".(1) Neste estágio a criança não distingue o que é sujeito e o que é objeto, o mundo exterior é uma continuação dela e, assim, atribui aos objetos formas próprias de sua atividade.

Para Piaget o ponto de partida e o motor do conhecimento residem na ação do sujeito e, na criança no primeiro estágio, a ação se reduz à ação sensório-motora. Esta ação já comporta componentes causais: tempo, espaço e esforço muscular, como também apresenta componentes lógicos: relações de seriação e correspondências. Neste começo do desenvolvimento cognitivo as relações lógicas e as relações

causais estão completamente indiferenciadas, pois constituem caracterísiticas implícitas da ação sensório-motora.

A evolução do pensamento passa por um processo de diferenciação entre o que é objeto e que é sujeito. Há uma progressiva descentralização "caracterizada pela construção do objeto independente do sujeito, que implica na construção do espaço físico, enquanto o lugar onde se produzem as mudanças dos objetos permanentes".(2) A partir deste marco começa a edificação de uma primeira forma de causalidade: a causalidade contínua ligada à ação sensório-motora. Por exemplo, quando a criança quer brincar com um objeto que está atado a um fio que está ao seu alcance, sabe que puxando o fio alcançará seu objetivo. Ao mesmo tempo em que chega a este tipo de causalidade, ela desenvolve uma consciência da transitividade das ações: a ação exercida sobre um objeto pode ser retransmitida a outros objetos.(A)

No processo do desenvolvimento cognitivo o sujeito constroe tanto relações causais como relações lógicas. E estas relações, que no começo estão indiferenciadas, começam progressivamente a se diferenciar. A hipótese que Piaget formula é que a causalidade e as operações lógico-matemáticas desenvolvem-se em interação, quer dizer, o desenvolvimento de uma favorece o desenvolvimento de outra sem que haja uma ação de sentido único, ou seja, que uma sempre determine a outra.(3)

Aceitando que as operações lógico-matemáticas determinem a causalidade, teríamos esta última como uma espécie de réplica das estruturas operatórias, mas, permaneceria o problema de explicar a origem das operações

---

(A) Algumas experiências sobre transmissão de calor revelam que as crianças conseguem explicar fenômenos desse tipo muito mais tardiamente que as transmissões de movimento. Piaget explica que em virtude do calor não ter sua origem na ação do sujeito, a compreensão da causalidade, neste caso, é consideravelmente mais lenta que em uma experiência mecânica. Ao falar o ponto de partida egocêntrico não se formam facilmente as noções de transformação e conservação.

lógicas. Por outro lado, aceitando a primazia da causalidade objetiva sobre as operações teríamos que aceitar a causalidade como dado direto da observação, mas deste modo, só chegaríamos à causalidade como uma simples sucessão regulares, o que para Piaget significa apenas legalidade, uma relação que não contém necessidade lógica. A hipótese da interação sem que haja ação de sentido único é evidenciada pelos estudos psicogenéticos.

O processo de diferenciação progressiva entre as estruturas operatórias e a causalidade, pode ser caracterizado por estágios; de um primeiro estágio da indiferenciação completa, a criança passa para um segundo estágio de diferenciação parcial, quando o sujeito não consegue dissociar completamente a operação lógica do objeto, isto é, consegue aplicar a operação somente a determinados conteúdos empíricos. Por exemplo, na experiência da dissolução do açúcar na água, os sujeitos mencionam que os pequenos grãos após tornarem-se invisíveis a olho nú se fossem novamente reunidos, resultariam na mesma quantidade inicial. As operações envolvidas neste raciocínio: partição, deslocamento e adição, não são aplicadas pelas crianças a experiência como o derretimento da vela, ou evaporação da água. As suas respostas, nestes casos, evidenciam a dificuldade de aceitar a identidade, com a mudança de estado. As partes da vela ou da água estão num nível microscópico, não preceptível a olho nú, o que já não ocorre com os grãos de açúcar. Este estágio, Piaget chama de "operatório-concreto".(4)

No terceiro estágio da diferenciação total, o sujeito dissocia as operações lógico-matemáticas do conteúdo empírico. Neste estágio, o seu pensamento consegue transcender a temporalidade do real e pensar as formas independentemente do conteúdo, como também fazer relações lógicas entre elas, isto é, operar formalmente. Este estágio é chamado por Piaget, de "estágio formal". Nele o sujeito já

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
SERVIÇO DE BIBLIOTECA E INFORMAÇÃO
1045

consegue realizar deduções lógicas, uma característica do pensamento científico.

A diferenciação progressiva entre as operações lógicas e a causalidade conduz o sujeito à dissociação progressiva entre o plano da realidade (ontológico): dos objetos e das relações entre eles, e o plano do conhecimento (epistêmico): das operações lógico-matemáticas que escapam das condições do real em suas relações atemporais e reversíveis. O sujeito considera de modo consciente ou inconsciente haver um mundo físico dos objetos reais que interagem entre si e se transformam independentemente, salvo nas situações em que ele prórpio, o sujeito que conhece é um objeto, que age sobre outros. Das interações entre o sujeito e o objeto, ou entre o homem e o mundo físico, surge na sua consciência um contínuo de sensações elaboradas pela mente, que constituem uma representação do mundo físico. A representação da realidade quando se trata de situações dinâmicas, é uma representação de conteúdo causal.

Conforme já vimos, a observação empírica não nos revela nada além de uma sucessão invariável de fatos. Diante disto, Hume toma a vinculação causal de dois fatos sucessivos como uma ingerência da mente, sendo que na realidade teríamos apenas simples sucessão de fatos. A aceitação desta interpretação nos leva a posturas instrumentalistas e positivistas em relação ao conhecimento da realidade. Piaget, diferentemente de Hume, vê a causalidade como um elemento essencial e necessário no conhecimento da realidade. Para ele o vínculo causal, embora não observável, é real. O sujeito constrõe mentalmente o vínculo, isto é, no plano epistemológico ele constrõe uma representação possível que liga de modo causal (uma produção genética) dois objetos ou dois fatos que se sucedem de forma invariável no plano do real.

Esta posição de Piaget é semelhante a de Meyerson, que conforme vimos já pensava a causalidade como uma dedução racional. Entretanto, a grande contribuição de Piaget vem da

sua explicação de como o sujeito constrói o vínculo causal. Sua tese é a de que o sujeito, para elaborar uma certa causalidade faz uso das operações lógico-matemáticas. Vamos explicar isto por meio de exemplos.(5)

Em algumas das experiências da psicogênese as crianças observam choques mecânicos entre objetos. Numa destas experiências, uma bola choca-se com uma fileira de bolas; enquanto as intermediárias permanecem imóveis, a última é deslocada. Pede-se às crianças a explicação do movimento da última bola. No acompanhamento da evolução das explicações, nota-se que a criança lança mão no decorrer do tempo de vários tipos de causalidade.

Num primeiro nível I A (4 - 5 anos) as crianças explicam o fenômeno por meio da idéia de ação imediata à distância, na qual as bolas intermediárias não exercem nenhum papel no movimento da última bola. As crianças desta idade costumam dizer que a bola ativa passa por detrás das bolas intermediárias para empurrar a última. Na experiência onde colocamos um cubo de madeira como intermediário, as crianças explicam que a bola passiva parte em função de uma espécie de contágio e por sua própria força, como um animal que foge com a aproximação de outro.

Nas explicações do nível I B (6 anos) a transmissão do movimento é por contato mas imediata, há um encadeamento de transmissões imediatas: a primeira empurra a segunda,etc, sem que nada atravesse as bolinhas.

No estágio II (7 - 8 anos), a transmissão do movimento já é mediata, porém na forma semi-interna (o esforço, passa através das bolas) e semi-externa (as bolas avançam um pouco).

Somente no estágio III a transmissão mediata torna-se puramente interna devido às vibrações das bolas intermediárias.

É importante notar que a explicação por transmissào mediata semi-interna surge na mesma época (7 - 8 anos) em que observa-se o aparecimento do conceito

operatório da transitividade. Como vimos, para Piaget, a construção da transitividade operatória e da transmissão mediata acontecem de forma interdependente, assim como o desenvolvimento da causalidade em geral e das operações em geral.(6)

Sem nos atermos às situações anteriores, vamos partir do momento da evolução em que ambas: a transitividade operatória e a causalidade de transmissões mediatas estão em vias de serem adquiridas pelo sujeito. Uma criança pode interessar-se em seriar por seriar, classificar por classificar, mas, em geral, é na ocasião de acontecimentos ou fenômenos que necessitam de explicação a ser alcançada por uma disposição causal, que as operações serão elaboradas. No caso da construção da transitividade operatória esta será favorecida por situações causais, onde as relações de sequência sucessiva e temporal se impõem, como por exemplo, a observação da criança de que o movimento passa sucessivamente de uma bola à outra de forma imediata. Este tipo de abstração empírica, feita a partir de um certo número de fatos causais, favorece a abstração reflexiva que permitirá a elaboração da transitividade operatória, havendo então em um primeiro momento a ação de um conteúdo físico sobre a elaboração de uma forma. Numa segunda etapa, de posse da operação lógica (a transitividade), o sujeito atribui ao real transmissões causais mediatas (quando antes atribuía transmissões causais imediatas) com passagens de movimento, ou força de uma bola sobre a outra.

Num determinado estágio o sujeito observa que a bola A age sobre a bola B, a bola B sobre a bola C, e assim por diante até a bola F. Para Piaget, o sujeito só consegue fazer este tipo de observação quando consegue fazer o raciocínio do tipo: se $A \Rightarrow B$, $B \Rightarrow C$,...$E \Rightarrow F$, então $A \Rightarrow F$. Neste caso, o sujeito faz uso da operação lógica para descrever o fenômeno, este seria o primeiro momento de <u>aplicação</u> de uma operação lógica. No segundo momento, o sujeito passa a considerar o modo operatório transitivo como sendo próprio

da natureza exterior a ele, quer dizer, o sujeito atribui à realidade uma operação lógica - os objetos da realidade interagem efetivamente entre si de modo transitivo: o movimento ou o esforço passa da primeira bola à segunda, da segunda à terceira, e assim por diante até a última. Quando o sujeito constrói uma operação lógica a partir de situações causais, não há diferença entre o momento da aplicação e o momento da atribuição, pois nestes casos ele aplica e atribui ao mesmo tempo. Sempre que o sujeito atribui também aplica, entretanto, a recíproca não é verdadeira, o sujeito pode aplicar a operação sem atribuir.(7)

A atribuição da operação permite ao sujeito ligar o objeto A ao objeto F de forma necessária, quando que observacionalmente só verificamos A independentemente de F numa certa sequência temporal. O vínculo causal (inobservável) entre A e F é uma réplica do vínculo lógico elaborado na mente do sujeito. Normalmente o sujeito (psicológico) não suspeita que é ele que está impondo à realidade de um vínculo baseado nas suas operações lógicas. A impressão que o sujeito tem é que a experiência lhe favorece o vínculo de forma direta.

Quando Hume diz que a nossa mente projeta na realidade uma conexão necessária, ele está correto, e conforme Piaget nós fazemos isto atribuindo operações lógicas à realidade. entretanto, Hume não está correto quando diz que a relação causal é obtida da experiência. Conforme vimos no exemplo acima, o sujeito nem sempre explica um mesmo fenômeno com um mesmo tipo de causalidade, pois esta pode modificar-se com o tempo. O que podemos tirar da realidade por meio da experiência é uma relação legal e não causal.

A imposição do modelo causal à realidade não acontece de forma passiva. Normalmente, há contradições entre o modelo representativo e os fatos observados. Diante disto, a tendência do sujeito será a de construir novas operações que atribuirá aos objetos, o que implica num novo

modelo representativo que deverá superar as contradições verificadas no modelo anterior.

No exemplo das bolas enfileiradas, as crianças do estágio II (7 - 10 anos) constróem por meio da transitividade o modelo de transmissão mediata de forma semi-interna (o esforço passa através das bolas) e semi-externa (as bolas avançam, com certeza, um pouco). Este modelo de transmissão é substituído pelo modelo causal de transmissão mediata puramente interna no estágio III (11 - 12 anos), quando o sujeito começa a construir operações quantificantes.

Este exemplo é um bom exemplo para evidenciar a crítica que se faz ao empirismo de que os dados observacionais estão impregnados de teoria. As crianças do estágio II insistem em dizer que há um deslocamento das bolas, intermediárias embora pequeno. Diante de experiências onde apoia-se os dedos sobre moedas enfileiradas, ou faz-se o choque instantâneo de bolas em cada um dos extremos da fileira de bolas, mesmo assim as crianças insistem no deslocamento dos intermediários. Isto evidencia a influência da teoria na observação.

O mecanismo de atribuição das operações possibilita a conexão do plano epistêmico com o plano da realidade, permitindo ao sujeito a inteligibilidade do real. Deste modo, o conhecimento lógico-matemático não deve ser entendido apenas como instrumento sem significado físico, como querem os instrumentalistas e, diante das contradições entre o modelo representativo e os fenômenos, o sujeito não toma uma atitude positivista, de negar o papel da investigação das causas que se escondem atrás dos fenômenos. A explicação causal se faz necessária para o conhecimento da realidade e, quando o modelo não é adequado, o sujeito busca outro modelo e assim vai refinando suas explicações.

Na história da ciência verificamos a mesma coisa, o cientista não renuncia à busca do que há por detrás do

fenômeno. Na ciência as teorias vão sendo substituídas por outras superiores.

5.2 - A Evolução da Explicação Causal na Ciência

Pretendemos mostrar neste segmento que a construção passo a passo da causalidade, que se observa na psicogênese, também é verificada na evolução do pensamento científico. Ilustraremos este fato através de um breve estudo da evolução das explicações sobre o fenômeno da gravidade.(A)

Tomaremos como ponto inicial a ciência grega, com a qual podemos fazer um paralelo com o desenvolvimento da criança no seu estágio inicial, quando devido à indiferenciação entre o "eu" e o mundo exterior, atribui aos objetos formas próprias de sua atividade motora. Os primeiros pensadores do período áureo grego não diferenciavam a matéria mineral da matéria viva e, deste modo, explicavam o movimento dos corpos em geral como resultantes da atividade animal. As crianças do primeiro estágio, como vimos na experiência das bolas enfileiradas, explicam o movimento da última bola por meio de uma causa interna e viva.

A física aristotélica contém um certo grau de biomorfismo, pois, a causa final por ele classificado como uma das possíveis causas do movimento, pressupõe uma certa intensão do corpo que se move, característica própria dos seres vivos. A explicação de Aristóteles para a gravidade é feita por meio da causalidade formal: o movimento de queda é próprio do elemento terra - um motor interno que carrega o corpo para o centro do universo.

(A) Halbwachs em seu artigo "História da Explicação em Física", faz um estudo geral da evolução da explicação na física, fornecendo uma classificação para os diferentes tipos de explicação que surgiram ao longo da história.

Em kepler já encontramos um outro tipo de causalidade para a gravidade; ele admite a ação de um corpo sobre outro - uma atração mútua. Entretanto, no caso do movimento planetário há uma mistura de atração e ação motora: a ação magnética do Sol não puxa os planetas, mas carrega-os em torno dele. Em Galileu, ainda temos a gravidade como uma tendência interna do corpo que o carrega para o centro da Terra.

A mudança definitiva de uma causalidade interna ao corpo (homogênea) para uma causalidade externa (heterogênea), ocorre com Descartes, para quem os fenômenos físicos devem ser explicados por meio de ações inteligíveis, isto é, pelo contato e pelo choque. Para Newton um corpo material tem seu estado de movimento e direção mudados quando um outro corpo exerce sobre ele uma força, comunicando-lhe uma aceleração e uma direção. A comunicação pode ser por contato, ou por uma ação à distância, como no caso da gravitação.

A atração gravitacional entre os astros celestes, agindo instantaneamente através de amplos espaços vazios é uma concepção difícil de ser admitida. Entretanto, a causalidade à distância da física newtoniana foi sustentada, pela primeira vez, por uma forma matemática que permite previsões de grande exatidão, o que lhe garantiu a aceitação pela comunidade científica, tornando-lhe então o próprio modelo de explicação da época.(8)

A causalidade à distância foi estendida à ótica, à eletricidade e ao magnetismo. Entretanto, tal concepção apresentava dificuldades, pois para um corpo agir sobre outro, estando separado por uma certa distância, seria necessário haver entre eles um meio portador da ação.

O século XIX foi em grande parte dedicado ao estudo das propriedades e características desse meio: o éter. Várias teorias foram propostas, ora supondo diferentes tipos de éter, um para cada tipo de fenômeno: luminoso, elétrico, magnético,...; ora supondo um único meio para

todos eles. Várias propriedades lhe foram atribuidas: solidez, fluidez, elasticidade,...; ou então uma mistura delas: sólido, elástico. As questões que então se levantavam eram muitas: se a Terra era permeável ou não ao éter; se o éter era arrastado ou não pelo movimento da Terra, se os movimentos do éter próximo a superfície eram rotacionais ou irrotacionais.

No século XIX surgiu um novo tipo de explicação, a partir de 1830 começou-se a desenvolver a teoria dos campos. Nesta teoria a ação à distância deveria ser explicada por uma série de ações intermediárias, tendo por suporte um meio contínuo com propriedades bem definidas de ação contígua. Este modelo foi desenvolvido em primeiro lugar por Faraday e depois por Maxwell até a síntese do eletrosmagnetismo com a ótica, tomando por base as concepções da mecânica dos meios contínuos, em particular a dos fluidos. As características da hidrodinâmica permitiram o retorno à causalidade contígua, em virtude do aperfeiçoamento do instrumento matemático apropriado: as equações diferenciais. Vejamos o exemplo da equação de Helmholtz para a propagação de pequenos movimentos nos fluidos perfeitos:

> "consideramos um pequeno volume de fluido dv recortado "pelo pensamento" e escrevemos que a força total que é exercida sobre o fluido contíguo determina um movimento seguindo a lei clássica da dinâmica. Isto dá para uma magnitude Ψ característica do estado (potencial das velocidades), a equação:
>
> $$\frac{\delta v}{x} \Delta\Psi = \rho_o \, \delta v \frac{\delta^2\Psi}{\delta t^2}$$
>
> (x é a complexibilidade, ρ_o a massa volumétrica. $\Delta\Psi$ indica uma expressão que contém as derivadas segundas dos espaços e $\delta^2\Psi/\delta t^2$ (designa a derivada segunda do tempo). Esta relação é tipicamente causal. O membro da esquerda designa a

> ação (força) do agente (fluido) sobre o elemento considerado (paciente), o membro da direita, o movimento que resulta, quer dizer, o efeito. O agente é contíguo, porém exterior, a explicação é heterogênea."(9)

Uma das preocupações do século XIX foi a de detetar as caracterísiticas do suposto éter. Uma das experiências feitas com este intuito foi a de Michelson-Morley mediante interferômetro de luz, cujo resultado negativo gerou um impasse. Este fato acabou levando Lorentz a formular a hipótese da contração dos corpos ao se movimentarem no éter, o que explicava o resultado da experiência. No século XX, na teoria da Relatividade Especial de 1905, a concepção da contração surgiu como uma consequência dos postulados de Eisntein, se bem que com um significado diferente do de Lorentz. Na teoria da Relatividade Geral de 1915, a gravitação é explicada por meio do conceito de campo, incorporando a idéia da deformação do meio (o espaço) entre os corpos materiais: o corpo material age sobre o espaço provocando-lhe uma curvatura a qual, por sua vez, é responsável pela aproximação dos corpos.

Assistimos, assim, no século XX, o surgimento de um novo modelo explicativo para o fenômeno gravitacional, substituindo a ação à distância que aos olhos da ciência de hoje já não explica nada, pois,

> "Se um corpo pode atrair outro, quer dizer que estão ligados que suas naturezas se interpenetram e são idênticas sob certos pontos de vista, que são modificações distintas de uma mesma substância. E neste momento a investigação se dirige de novo para uma explicação interna e monista, tal é a síntese de Einstein: a força e a aceleração são unificadas no conceito de campo de gravitação ligado a uma curvatura do universo espaço-temporal; logo a matéria que produz o campo

passando a construir relevos, deformações particulares deste. Chega então a uma concepção unitária cuja a única determinação é a equação de gravitação de Einstein, que explica todos os efeitos em outras épocas relacionados com os conceitos de matéria, força e movimento."(10)

Halbwachs entende a explicação einsteniana da gravitação como sendo uma causalidade homogênea (interna), pois, não somente o espaço e o tempo são unificados no espaço-tempo, também a matéria e o espaço passam a ser considerados sob certos pontos de vista idênticos. A teoria unitária de Einstein-Infeld toma como hipótese que "um ponto material não é um objeto de uma natureza especial, heterogênea ao espaço-tempo, senão que também constitui um relevo do espaço-tempo, um relevo reduzido a um ponto, ou seja uma função de singularidade."(11)

A causalidade da explicação de Einstein corresponde à causalidade que Aristóteles chama de formal: a essência define a natureza do corpo e suas propriedades. Trata-se de uma causalidade interna como na física aristotélica. Entretanto, a explicação de Einstein é bem mais elaborada e tem um significado mais profundo que a de Aristóteles. Halbwachs chama este tipo de explicação de Batigena (do grego bathus: profundo) pois, em relação às explicações anteriores ela apela para transformações que ocorrem em um nível mais profundo.

Vemos, deste modo que na evolução da ciência também há uma edificação progressiva da causalidade.

5.3 - As Correspondências entre a Evolução do Pensamento no Indivíduo e na Ciência.

Neste segmento fazemos um breve relato da "Psicogênese e História da Ciência", de Piaget e Garcia, onde apresentam um estudo comparativo entre a evolução do

pensamento no indivíduo e a evolução do pensamento na história da ciência.

O indivíduo na sua relação com a natureza, desenvolve de forma espontânea conceitos sobre esta natureza e, esta física espontânea que, aliás, se faz presente na mente de nossos alunos, mesmo depois de terem frequentado os bancos escolares, tem correspondências estreitas com a física pré-newtoniana.

> "Em um caso particular, que corresponde à evolução da física entre Aristóteles e as últimas etapas da física pré-newtoniana, foi possível estabelecer uma correspondência realmente estreita entre as fases históricas (os motores aristotélicos, o recurso a um só motor externo, o descobrimento do ímpeto e da aceleração) e as etapas da psicogênese.
>
> Em particular, temos observado uma surpreendente analogia entre os conceitos de Buridan e Oresme, e a construção e generalização que faz uma criança, aos 7 ou 8 anos, da idéia de "élan". Em um caso como esse, o paralelismo entre a evolução das noções do curso de história e no desenvolvimento psicogenético se refere mesmo ao conteúdo das noções sucessivas, o que é compreensível posto que se trata de conceitos que são de certa maneira pré-científicos".(12)

Piaget e Garcia observam que o paralelismo entre o desenvolvimento psicogenético e a evolução da física pré-newtoniana diz respeito ao conteúdo das noções sucessivas, e aos instrumentos e mecanismos de conhecimento presentes em ambos os desenvolvimentos. Entretanto, não devemos generalizar o paralelismo para a ciência propriamente dita. Neste caso, a correspondência refere-se somente aos mecanismos de conhecimento.

O desenvolvimento da física pré-newtoniana como o da física "espontânea" pode ser entendido como um processo

de diferenciação numa primeira etapa e de integração numa etapa posterior. No que diz respeito ao indivíduo temos no começo o sujeito egocêntrico que não distingue o "eu" do mundo exterior e por isso atribui aos corpos características suas, toma os corpos como vivos e assim estes se auto movem, o que equivale dizer que há uma atividade ou causa interna. Na ciência, para os primeiros pensadores gregos também não há distinção entre o ser vivente e o ser inerte - corpo mineral. Conforme relato de Aristóteles, Tales atribuia vida aos corpos em virtude da natureza do imã e do âmbar. A física de Aristóteles explica o movimento natural em virtude de uma causa interna.

Desta fese que podemos considerar como um máximo de indiferenciação caracterizado por biomorfismo generalizado, observa-se a passagem para uma segunda fase com a eliminação do motor interno. No exemplo, que vimos no item 5.1, da fileira de bolinhas, trata-se do momento em que o sujeito passa a explicar o movimento da última bola como resultado da ação da bola ativa, que se transmite de modo imediato e instantâneo.

Na terceira fase observa-se a explicação pela transmissão mediante o deslocamento das bolas e o impulso que passa internamente a elas. Nesta fase o sujeito já distingue entre velocidade e impulso, assim como entre este e a força: o impulso é intermediário causal.

O apelo ao impulso como um intermediário causal necessário entre o empurrão e o movimento da bola passiva tem correspondência na história da ciência com as explicações de Buridan, para quem o ímpeto é o intermediário indispensável entre a força do motor externo e as translações que surgem deste impulso.

Na quarta fase da psicogênese o fato decisivo consiste na descoberta da aceleração e na atribuição de conservações: o sujeito toma o impulso como o incremento da velocidade, sendo que esta conclusão resulta de análises quantitativas. Sem recorrer a uma métrica propriamente dita,

quer dizer a medidas de espaços e tempos, somente fazendo análises em termos de "mais" ou "menos", "o sujeito indica de maneira inequívoca os intervalos espaciais crescentes que percorre o móvel na descida, sobreentendendo-se que se trata dos mesmos tempos, é este incremento quantificativo da velocidade o que caracteriza em cada caso as relações, ainda que mal definidas verbalmente, entre o movimento e o impulso".(13)

O processo de diferenciação gradual das variáveis, que ocorre durante as fases I e III, culmina na fase IV, numa integração quantitativa que implica na construção de novas estruturas necessárias para a integração coerente das variáveis diferenciadas nas três primeiras fases.

A respeito da evolução da ciência observa-se uma passagem de Buridan para Galileu. Para o primeiro o "ímpeto" é a causa ou o motor do movimento, já para o segundo o "ímpeto impresso indelevelmente num corpo" é entendido como sendo o próprio movimento, que não requer nenhuma causa para existir. A ação sobre um corpo não produz movimento mas a alteração do estado de movimento, isto é uma aceleração. E com respeito à integração quantitativa encontramos em Galileu,pela primeira vez, o equacionamento de forma correta, relacionando as veriáveis do movimento de queda livre dos corpos.

Verificando um certo paralelismo entre a psicogênese e a evolução da física pré-newtoniana, perguntamos então qual a razão dessas semelhanças?

A resposta de Piaget e Garcia passam por considerações sobre a evolução do conhecimento. Na opinião deles "não só os estágios sucessivos da construção das diferentes formas de saber são sequênciais - quer dizer, que cada um é por sua vez resultado das possibilidades abertas pelo precedente e condição necessária à formação do seguinte - se não, que, cada novo estágio começa por uma reorganização, a outro nível, das principais aquisições logradas nos precedentes. Daqui resulta uma integração até

os estágios superiores, de certos vínculos cuja natureza não se explica senão através de uma análise dos estágios elementares".(14)

Esta opinião de que o conhecimento é construído por estágios levando-se em conta a importância e necessidade dos estágios elementares nos conduz a um ponto de vista contrário à crença de que um cientista pensa de uma forma totalmente diferente de uma criança. Na opinião de Piaget o processo cognitivo tem as mesmas características de um extremo ao outro de escala. "Para nós trata-se de um mesmo processo dividido em etapas... Isto é certo tanto para crianças como para o físico quântico".(15)

A explicação de Piaget e Garcia para o paralelismo entre a psicogênese e a física pré-newtoniana reside na opiniaõ de que em qualquer estágio do desenvolvimento do pensamento, seja na história do indivíduo, seja na história da ciência, são empregados instrumentos, mecanismos e processos cognitivos comuns a ambos desenvolvimentos.

Vamos então fazer um relato muito breve dos principais instrumentos, processos e mecanismos de conhecimento. No que diz respeito aos instrumentos e em se tratando do conhecimento físico há uma alternância entre duas formas de abstração: a "empírica" ligada ao conteúdo físico que resulta na extração de informações dos objetos e, a "reflexiva" que é puramente inferencial e resulta nas operações lógico-matemáticas.

Estes instrumentos fundamentais de conhecimento desencadeiam processos existentes desde as construções sensório-motrizes até formas superiores do pensamento científico. Um destes processos consiste na dupla atividade da diferenciação das variáveis e na posterior integração quantitativa destes. Há um outro tipo de processo, o mais importante conforme Piaget e Garcia, que é o da "busca de razões" para as generalizações resultantes das abstrações. No caso do conhecimento físico verifica-se tanto na psicogênese como na história da ciência, ao contrário do que

pretende o positivismo, a busca de explicações causais, pois, "a generalidade de uma lei não é suficiente para satisfazer a mente pois esta tem uma necessidade de descobrir razões subjacentes".(16)

Intimamente relacionado aos instrumentos e processos cognitivos existe um mecanismo comum ao desenvolvimento do pensamento científico e da psicogênese, de natureza completamente geral: "é o processo que conduz do intra-objetal (análise dos objetos), ao inter-objetal (o estudo das relações e transformações) e daí para o trans-objetal (construção de estruturas). O fato de que esta tríada dialética se encontra em todos os domínios e em todos os níveis, nos parece a principal aquisição que alcançamos com nosso esforço comparativo. Com efeito a generalidade desta triada intra, inter e trans, e o fato de que se a encontre tanto no seio de sucessões globais como nas subetapas que as integram constitui, sem dúvida, o melhor argumento em favor de uma epistemologia construtivista".(17)

A fase intra objetal ou intra-factual é a etapa da evolução do conhecimento em que o sujeito abstrai as propriedades dos objetos ou eventos sem contudo fazer relação entre elas. Tal relacionamento ocorre na segunda etapa inter-objetal ou factual quando o sujeito estabelece relações entre as propriedades do objeto ou evento. Uma vez descobertas estas relações o sujeito passa para a etapa trans-objetal ou factual quando estabelece vínculos entre as relações, construindo então uma estrutura ou um sistema. A passagem dos estágios intra ao inter e daí ao trans, é um mecanismo que resulta da integração dos instrumentos e processos de conhecimento. Assim, a fase intra corresponde ao momento das abstrações empíricas que fornece os primeiros dados obtidos de forma isolada. É claro, estes dados são observáveis condicionados por um conteúdo teórico de um nível ou estágio anterior, que permite a diferenciação de coisas: propriedades ou variáveis que antes não estavam distinguidas. Na fase inter aparecem as construções

inferenciais à base de abstrações reflexivas, quando os dados são integrados ou inter relacionados numa operação lógico-matemático, isto é, o sujeito aplica uma determinada operação lógico-matemática que relaciona as variáveis diferenciadas ou dados isolados. E na fase trans o sujeito atribui a operação à realidade e, deste modo, transfere a necessidade da relação lógica para as relações factuais, como também procura integrar tal relação numa estrutura ou sistema de transformações, o que garante uma necessidade suficiente, obtendo, deste modo, as razões subjacentes que explicam a generalidade da relação. A fase trans representa um novo nível ou estágio da evolução, o que leverá o sujeito à abstração de novos observáveis.

A presença deste mecanismo de passagem das etapas intra, inter e trans, pode ser verificada tanto na construção de conceitos como os de pressão, velocidade e peso na psicogênese(18), como também pode caracterizar as grandes etapas da evolução da ciência, como é o caso, da evolução da mecânica:"...a evolução da mecânica passou, em grandes linhas, de uma etapa que poderíamos chamar "intra-factual" com Newton, a etapa "inter-factual" de Lagrange e Hamilton, e daí a etapa "trans-factual" das álgebras microfísicas.(19)

5.4 - A Explicação em Física

Conforme vimos no segmento 1.2, Comte entende que um fenômeno físico está explicado quando enunciamos a lei física que o rege. Piaget discorda de tal ponto de vista, pois, do fato de aplicarmos uma forma lógico-matemática a um conteúdo empírico não fazemos mais que uma simples descrição dos fatos ou fenômenos. A explicação de um fenômeno ou de uma sequência invariável de fatos consiste em estabelecer uma conexão necessária entre os fatos sucessivos. A necessidade não se reduz à generalidade e, "quando se fala de leis causais para designar sequências simplesmente

regulares (portanto já gerais), há um abuso de linguagem: a causalidade não expressa somente o "fato" de que B segue "sempre" A, senão que pretende desvendar o modo de transformação que conduz de A a B".(20)

Não devemos, pois, confundir uma descrição com uma explicação de um fenômeno físico, a primeira relaciona-se com a lei, enquanto que a segunda relaciona-se com a causa. Então vamos precisar as diferenças entre lei e causa:

1) as leis expressam relações repetíveis e podem ser obtidas por constatações dos fatos. A legalidade está diretamente relacionada com o observável. A causalidade, ao contrário, ultrapassa os fatos.

2) Os enunciados legais só expressam relações gerais enquanto que a causalidade envolve relações necessárias.

3) Podemos nos referir às leis como afirmações isoladas sobre fatos particulares (por exemplo: o calor dilata metais), já um enunciado causal só tem significado relativamente a um modelo e ou teoria.

4) A legalidade só se refere à aplicação de operações aos objetos; a causalidade exige uma atribuição das operações aos objetos.

A descrição de um fenômeno é feita a partir das observações. As observações só permitem a constatação de regularidades legais, isto é, a repetição de forma invariável de certos fatos. Por meio de generalização indutiva estabelecemos as leis. Por meio da legalidade só fazemos uma descrição da realidade.

A descrição é então um tipo de conhecimento da realidade que expressa relações gerais. Entretando, o conhecimento decritivo não fornece as razões de uma tal regularidade, nem diz porque tal regularidade tem que ser necessariamente assim. Para tanto, e é da natureza humana buscar as razões necessárias, o sujeito recorre ao conhecimento explicativo.

A explicação de um fenômeno físico, conforme Piaget, consiste em desvendar um "modo de produção". Na explicação do modo de produção recorremos à causalidade onde procuramos mostrar que um certo efeito resulta de uma situação inicial que se transforma com o tempo. A explicação causal deve evidenciar os elementos novos que não estavam presentes no início, como também os elementos que se conservaram durante a transformação.

A causalidade diz respeito a transformações reais, mas como da observação só obtemos regularidade e não causalidade, temos que esta última é construída mentalmente. As características de transformação e conservação que encontramos na causalidade física - plano do real - também são características das operações lógicas - plano epistemológico. Os estudos psicogenéticos evidenciam uma relação entre o conhecimento lógico e o conhecimento causal. Piaget adota como hipótese (psicológica) que os dois tipos de conhecimento: lógico e causal se desenvolvem em interação, isto é, o desenvolvimento de um favorece o desenvolvimento de outro, sem que haja uma ação de sentido único.

Perguntamos, então, qual é a relação entre as operações lógicas e a causalidade. Para responder esta questão Piaget formula uma outra hipótese (epistemológica): o sujeito <u>atribui</u> as operações lógicas à realidade. Deste modo, temos a causalidade como sendo uma operação ou um sistema de operações atribuídas aos objetos reais, assim as operações que são elas próprias transformações, dizem respeito a transformações de uma estrutura racional, estão ligadas às transformações do real pelo mecanismo de atribuição de operações. Quando as operações materiais entre os objetos se poem de acordo com as operações mentais do sujeito, este se dá por satisfeito, considerando o fenômeno explicado.

Tomando como válidas as teses de Piaget, vamos tentar precisar a noção de explicação em física. Garcia diz

que: "uma explicação física consiste simplesmente em demonstrar que um fenômeno dado é consequência de leis aceitas. A força da explicação causal descança sobre dois pontos essenciais: A) a necessidade inerente a todo esquema explicativo na medida em que trata de uma dedução lógica. B) a aceitabilidade da teoria total, da qual fazem parte as leis utilizadas no esquema explicativo."(21)

Em outras palavras:

A) A explicação causal consiste numa dedução que vincula dois objetos de modo necessário. Conforme Piaget, fazemos isto, quer dizer, conectamos dois objetos de modo necessário por meio de uma operação lógica que atribuímos à realidade. Por exemplo, no caso do choque de uma bola, numa fileira de bolas, que faz a última delas partir, dizemos que a conexão entre a bola (A) incidente e a última bola (F) é uma conexão necessária, porque "algo" que estava em A provocou o movimento de F. O modo que um sujeito conclui que o movimento da bola F está necessariamente vinculado ao movimento da bola A, é deduzindo que o movimento de A passou para bola B, da bola B para a bola C,....., finalmente da bola E para bola F, deste modo, A transmitiu movimento para F. O sujeito realizou um raciocínio baseado na operação de transitividade.

B) Uma conexão causal tomada de forma isolada permite que façamos uma explicação que fornece razões necessárias, mas nem sempre suficientes. A segunda condição é alcançada quando integramos tal conexão causal num sistema de transformações fechado e autônomo. A este respeito Piaget diz:

> "Se, por exemplo, uma lei, cujo domínio é relativamente particular, é englobada em uma lei mais geral, pode-se deduzir a primeira da segunda. Mas esta dedução não juntará qualquer necessidade à primeira senão sob uma forma hipotética: se a segunda lei se verifica, então a primeira é necessária, o que significa um progresso mínimo.

A razão é que uma tal dedução é, por assim dizer, inclusiva ou silogística e não alguma estrutura eficaz de composição senão pela transferência de uma verdade mais geral à mais particular que engloba por antecipação.

Pelo contrário, logo que a composição dedutiva deixa de ser simplesmente silogística e conduz a estrutura susceptíveis de se fecharem sobre elas mesmas, a necessidade que se prende ao fechamento da estrutura constitui, então, o princípio da explicação causal das leis assim agrupadas, porque este fechamento fornece condições necessárias e suficientes".(22)

Deste modo a força da explicação causal descança sobre a necessidade e aceitação da teoria total (sistema fechado). Uma explicação em física pressupõe sempre alguma teoria, de cujos princípios se deduz leis ou enunciados particulares. A explicação de um fenômeno particular corresponde a uma dedução onde os princípios são tomados como a causa, a conclusão da dedução será o efeito, isto é, o fenômeno a ser explicado. Garcia diz o seguinte:

"Um modelo físico é um sistema de relações com, uma interpretação precisa dos termos que fazem parte dele. No modelo há funções que unem variáveis por meio de operações lógico-matemáticas, as quais contém certas constantes; há também, esquemas dedutivos que nos permitem transformar as funções, uní-las e calcular seus valores. As constantes e as variáveis no modelo, correspondem, no plano físico, às propriedades dos objetos; as funções, correspondem as uniões "reais" entre essas propriedades; e os esquemas dedutivos, correspondem às relações causais".(23)

O modelo enquanto tal é uma representação da realidade, pertencendo ao plano epistemológico e, da sua confrontação com a realidade não se trata de comparar, como

diz Garcia, os traços do sujeito com traços da fotografia do passaporte, como faz o fiscal da alfândega, o que o físico faz é comparar um enunciado de sua teoria com uma observação experimental. Os resultados contrários de uma experiência não falsificam o modelo representativo, pois a ele só devemos nos referir como a um bom ou mal modelo.

Para terminar este capítulo, gostaria de transcrever uma passagem de Garcia, falando da relevância do entendimento do significado de explicação em física para o ensino de ciências:

> "Que consequências podem ser extraídas daqui para a pedagogia, quer dizer, para o ensino dos fenômenos físicos? Em primeiro lugar, é importante que o professor distinga entre a simples "regularidade legal" que surge da generalização indutiva, a partir da repetição dos fatos, por uma parte, e as explicações causais associadas sempre a um sistema de transformações, por outra parte. Sem uma idéia clara de "em que consiste dar uma explicação causal", quem pretende ensinar as ciências naturais tropeçará com obstáculos insolúveis".

5.5 - Referências Bibliográficas

(1) F. Halbwachs, "Sobre los Problemas de la Causalidad Fisica.", Epistemologia y Marxixmo; M. Godelis, J.Monod, N.Mouland - Novo Curso - Ed. Martins Roca, p. 67.

(2) ref. 1, p. 68.

(3) J.Piaget. R. Garcia, "Las Explicationes Causales", Barral Edition, Barcelona, 1971, p. 23.

(4) D.C. de Dominguez , "A Formação do Conhecimento Físico - um estudo da causalidade em J. Piaget", tese de mestrado, ISEPP-FGV, Rio de Janeiro, 1987, p.105.

(5) ref. 3, p.28.

(6) ref. 3, p. 27.

(7) ref. 3, p. 38.

(8) F. Halbwachs, "História de la Explication en Fisica", encontra-se em: Jean Piaget, "La Explicacion en las ciencias", Ediciones Martinez Roca S/A, 1977, Espanã, p. 87.

(9) ref. 8, p. 88.

(10) ref. 1, p. 65.

(11) ref. 8, p. 93.

(12) J. Piaget, R.Garcia, "Psicogénesis e História de la Ciencia", Siglo Veinteuno Editor, México, 1982, p.11

(13) ref. 12, p. 76.

(14) ref. 12, p. 9.

(15) ref. 12, p. 191.

(16) ref. 12, p. 249.

(17) ref. 12, p. 16.

(18) ref. 12, cap. VIII, p. 195.

(19) ref. 12, p. 18.

(20) ref. 12, p. 26.

(21) R. Garcia, "La Explication en Física", encontra-se em: Jean Piaget, "La Explicacion en las ciencias", Ediciones Martinz Roca S/A, 1977, Espanã, p. 112.

(22) citado em J.A.F.Saravaira, "A Teoria de Piaget como Sistema de Referência para a Compreensão da "Física Intuitiva" - tese de Mestrado, IF e FE - USP, São Paulo, 86, p.56.

(23) ref. 21, p. 112.

(24) R. Garcia, "El Dessarrollo Del Sistema Cognitivo y la Ensenanza de las Ciencias", p. 38.

6 - CONCLUSÃO

Tendo apresentado esta discussão centrada nos conceitos de causalidade e explicação científica, vamos novamente tratar do problema do ensino de física.

6.1 - A Causalidade no Ensino de Física

A análise do ensino de física, no que diz respeito ao conteúdo ensinado nos leva à constatação de uma característica presente nos vários níveis de ensino, que consiste na apresentação do formalismo matemático de forma isolada, sem haver uma preocupação de discutir seu significado físico por meio de um modelo representativo da realidade.

Procuramos mostrar que esta característica do ensino em parte resulta da influência do pensamento positivista, com sua postura de abordar os fenômenos físicos apenas pelo aspecto legal, desprezando o conhecimento causal ou o modo de produção do fenômeno.

Vamos agora discutir alguns resultados que são obtidos por um ensino de física com essa característica. Faremos isto, recorrendo ao exemplo da gravitação e, para tanto, transcrevemos um comentário de Halbwachs sobre a explicação newtoniana do fenômeno por meio do conceito de ação à distância, onde ele diz que este tipo de explicação foi aceito pelos sábios da época de Newton, mas rechaçada pelos da época seguinte, sendo que hoje em dia lhe negam qualquer caráter explicativo. No entanto, Halbwachs assinala que o conceito de ação à distância continua satisfazendo

> "a massa de nossos contemporâneos e os candidatos ao título de bacharel. A atração lhes parece uma explicação real da caída dos corpos; a atração pelo sol parece-lhes que explica o movimento dos planetas, e chega-se a fazer-lhes compreender que nos dois casos é a mesma força que atua; a

explicação lhes parece tão luminosa como era para os contemporâneos de Newton."(1)

Os livros textos adotados e também os professores quando abordam o tema da gravitação, em geral, o fazem de modo positivista, isto é, apresentam a lei de atração de Newton, omitindo qualquer discussão sobre o modo de produção do fenômeno. A história sobre a discussão que ocorreu em torno do conceito de ação à distância é praticamente desconhecida nos meios escolares.

Verifica-se entre os estudantes uma tendência de acreditarem que Newton deu uma explicação definitiva do fenômeno gravitacional. E quanto ao significado de atração - ação instantânea à distância - é algo que lhes parece ser real e sem nenhum problema de inteligibilidade.

Conforme vimos, a "busca de razões" que expliquem as regularidades gerais (as Leis) é algo presente tanto na psicogênese como na evolução da ciência. Na medida em que o ensino deixa esta questão de lado, restringindo-se à apresentação da lei, perguntamos então, que tipo de aprendizado poderá ocorrer?

A "busca de razões" é algo natural do pensamento e, assim sendo, a tendência do aluno será a de buscar razões, mas em se tratando de conhecimento científico, tal tarefa em geral é difícil, podendo então ocorrer dois tipos de aprendizado deficientes: 1) o aluno associa ao formalismo um modelo explicativo que não corresponde aos modelos dos físicos. No exemplo da gravitação: o aluno pode conceber a força de atração como uma força interna ao corpo (causalidade homogênea) que o carrega para baixo; 2) o aluno não associa o formalismo a algum modelo físico ou, usando a linguagem piagentiana, diríamos que ele não consegue atribuir a operação matemática à realidade, e neste caso o conceito físico não chega a ter mais que um significado operacional. O aluno só consegue pensar o conceito ou a lei em termos de relação entre grandezas físicas por meio de uma equação matemática, sem algum significado físico. Este fato

é comum no ensino de física e um dos principais fatores de desmotivação dos alunos.

Esta característica marcante do ensino de física de apresentar o formalismo despojado do seu significado físico, de outro modo, desvinculado do modelo representativo da realidade, tem sido motivo de atenção de educadores preocupados em melhorar o ensino de física. M. Robilotta é da opinião que:

> "seria extremamente útil se os professores se esforçassem para passar aos seus alunos uma visão do mundo físico, uma imagem da natureza. Um conhecimento formulado em termos de símbolos e coisas é muito mais acessível aos estudantes do que aquele puramente formal".(2)

Uma das maneiras de fazermos isto é abordarmos o problema do modo de produção do fenômeno, que conforme vimos consiste numa explicação causal. É justamente através da causalidade, a qual devemos entender como uma dedução resultante da atribuição de operações lógicas à realidade, que o sujeito relaciona o pensamento matemático com o mundo físico. De outra forma, o pensamento causal permite ao sujeito atribuir algum significado físico ao formalismo. Na opinião de Halbwachs:

> "O conhecimento causal não só constitui uma etapa intermediária essencial - poderíamos inclusive dizer indispensável - na construção de modelos da física, como também constata-se que até nas etapas mais avançadas da adolescência as explicações causais são as explicações por excelência, as que satistazem a criança acima de qualquer outra. Quando coloca-se as crianças diante de uma afirmação "estrutural" (por exemplo, a direção da luz se aproxima da normal quando deixa o ar e penetra a água), ou frente à evidência experimental (por exemplo, os corpos submersos na água pesam menos), não ficam satisfeitos nem são

capazes de assimilar e manejar a relação introduzida pelo enunciado até que se lhes responda aos "por-quês" que fazem imediatamente (sempre que estejam em condições de poder exteriorizar espontaneamente suas reações). Agora bem, estes "por-quês" podem significar aproximadamente: por que causa? Se se lhes respondem que "é "assim" porque podem constatar eles mesmos fazendo e repetindo as experiências, ficam insatisfeitos e a relação não penetra efetivamente em seu sitema cognitivo, não é assimilada como um componente novo de seu conhecimento."(3)

Uma das evidências mais marcantes desta dicotomia é dada pelos resultados das pesquisas sobre concepções espontâneas. Os estudantes, frente a testes ou entrevistas que exigem um raciocínio qualitativo, abandonam rapidamente a utilização do formalismo matemático e expressam suas idéias voltando a explicações e a modelos primitivos, bem distantes do estágio newtoniano ou moderno e incompatíveis com ele.(4)

Se nossa interpretação for correta, podemos dizer que o aluno, frente a um fenômeno físico, sente necessidade de uma explicação causal, mas não tendo à disposição um modelo causal, adequado à física aprendida na escola, mesmo em se tratando unicamente de fazer previsões nas quais as fórmulas poderiam ser úteis, sente-se mais à vontade recorrendo a explicações e modelos que ele construiu espontaneamente a partir de sua interação com a natureza.

Esta tendência é tão duradoura que mesmo estudantes de pós-graduação em física, certamente capazes de utilizar todos os recursos lógicos e matemáticos, e com eles mais do que familiarizados; frente a situações um pouco diferentes da rotina de estudo, tendem a voltar aos modelos espontâneos que tem, para eles, uma capacidade de explicação mais satisfatória.(5)

Quando um estudante, interrogado sobre o movimento de uma bola incidente que se choca elasticamente com um alvo parado maior, afirma que este último irá para frente após ter recebido toda a quantidade de movimento daquela, está mostrando preferir um modelo causal simplificado (a passagem de "algo" de uma bola ativa para outra passiva) à utilização de fórmulas abstratas como a conservação da quantidade de movimento (vetorial) e da energia cinética (escalar), pois não conseguiu traduzir este conjunto formal num modelo físico adequado (como seria, por exemplo, pensar o choque e a transmissão de movimento mediante deformações elásticas dos objetos interagentes).

Analogamente, quando um estudante explica, um choque elástico entre uma bola incidente e um alvo parado, afirmando que a bola incidente continuará, parará ou inverterá seu movimento se ela for respectivamente maior, igual ou menor que o alvo, em virtude da "ação" da bola incidente ser maior, igual ou menor do que a "reação" do alvo, parece fazer uso de uma causalidade interna transformando uma fórmula (abstrata) newtoniana (a lei de ação e reação) num modelo mais primitivo onde ação e reação são propriedades internas das bolas, constituindo sua "força" de ação.

Somos da opinião que é necessário adotarmos um ensino de física que leve em conta não somente o aspecto descritivo, mas também o aspecto explicativo do conhecimento da realidade. Assim, devemos proporcionar um ensino que aborde a natureza tanto descritivamente, apontando as relações de sucessão invariável (as leis) dadas pela observação, como também, de modo explicativo, apontando as razões necessárias (as causas) dessas relações, conhecimento este que ultrapassa as fronteiras do observável, sendo portanto, deduzido.

A concretização de um ensino de física que também seja explicativo deverá levar em conta o que entende-se por explicação em física. A teoria piagetiana do conhecimento

nos mostra que a força de uma explicação repousa na necessidade, a qual é obtida pela atribuição das operações à realidade, e na aceitação de uma teoria total, ou seja, de um sistema fechado e autônomo que garanta as condições de suficiência, pois, é deste modo que a explicação causal torna-se um conhecimento que pode satisfazer aos "por-quês" das pessoas diante de um fenômeno.

Uma outra característica marcante do ensino de física é aquela que verificamos ao olharmos o índice de matérias dos livros texto adotados nos cursos. Geralmente, o conteúdo vem dividido em tópicos: mecânica clássica, ótica, calor, eletricidade, ..., e em cada tópico é fornecido o formalismo matemático correspondente a àquele ramo do conhecimento físico. Esta característica leva o aluno a uma visão fragmentada da física, na qual os conhecimentos são sempre considerados de forma isolada. A idéia de um sistema teórico, onde as leis e conceitos estão integrados num todo e têm seus significados atribuídos em relação a esse todo, é passada de forma muito implícita, de modo que o aluno tende a organizar o conhecimento físico em tópicos e a considerar as leis e conceitos como entidades isoladas, reais e verdadeiras, independentemente de qualquer sistema teórico.

Este tipo de visão, em parte, é sustentado pelas doutrinas empirista e indutivista, pois, para estas, o sujeito independentemente de qualquer conteúdo teórico, portanto, um observador neutro, retira da experiência dados puros e por meio da indução chega a relações gerais (leis) de validade universal.

O conhecimento físico é um conhecimento organizado em estruturas ou sistemas de transformações. Este aspecto da organização do conhecimento em sistemas é visto pela epistemologia piagetiana como uma das etapas da evolução do conhecimento. Conforme vimos (segmento 5.3), na "etapa trans" o sujeito preocupa-se em situar o conhecimento das relações gerais (leis) num sistema de transformações (modelo teórico), e é também nesta etapa que ocorre a atribuição das

operações lógicas à realidade. Estas duas atividades cognitivas: atribuição de operação e estruturação do conhecimento estão relacionadas no sentido de que elas cumprem o objetivo de explicar a realidade. A atribuição de uma estrutura legal permite ao sujeito elaborar relações necessárias e suficientes que explicam os fenômenos.

Deste modo, se pretendemos realizar um ensino de física que não seja meramente descritivo, mas também explicativo, deveremos abrir espaço para o aspecto causal do conhecimento físico, e para tanto, assumir o caráter estrutural do conhecimento físico, procurando transmitir ao aluno, de forma explícita, a idéia do modelo teórico. Não devemos deixar ao aluno essa difícil tarefa da construção do sistema teórico.

Vamos agora colocar em termos práticos como poderíamos realizar um ensino de características como as que estamos propondo. Tomaremos como exemplo as leis de inércia e gravitação, da mecânica newtoniana.

A lei de inércia, via de regra é ensinada de dois modos: um deles chamaremos de dogmático e outro de experimental. O modo dogmático consiste em apresentar as leis naturais como descobertas da ciência, e, portanto, como conhecimentos verdadeiros da realidade que os alunos deverão reter em suas mentes se quiserem aprender física. Já no modo experimental procura-se passar ao aluno a idéia de que a inércia é um fato evidente facilmente verificado pela experiência.

Pesquisas realizadas entre estudantes que já tiveram a oportunidade de aprender os conceitos da mecânica newtoniana, e que sabem enunciar corretamente a lei de inérica, revelam que grande parte destes continuam considerando a ocorrência do movimento necessariamente ligada a alguma causa motora. Tal causa pode ser evidente, como no caso do motor para um carro em movimento ou, a "força muscular", para um nadador. Mas também pode ser imaginária como no caso da "força armazenada" ou da "força

do movimento" no lançamento de projéteis. A necessidade de uma causa motora para qualquer tipo de movimento, mesmo inercial é tão forte que os estudantes precisam objetivar o nexo causal mediante uma "força" interna inventada. Uma vez extinta a força cessa o movimento.(6)

Notemos que estas noções sobre o movimento são próximas às da física aristotélica, que parte do seguinte princípio: cessada a causa, cessa o efeito. Também nota-se semelhança com o conceito do ímpeto de Buridam, como no caso da "força ou energia armazenada".

No ensino tradicional não leva-se em conta os conhecimentos físicos que as pessoas aprenderam por si só em sua relação com a natureza. E ao limitar-se a enunciar a lei de inércia, ou mesmo a realizar experimentos onde diminui-se o atrito entre o corpo e a superfície, o ensino escolar não consegue demover o aluno de seus conceitos espontâneos.

Ao mostrar por meio de experiências que diminuindo o atrito o corpo vai mais longe, ou tende a continuar o movimento, só tocamos nas causas que fazem um movimento parar, mas não tocamos no ponto crucial para o aluno que é o da causa do movimento.

As experiências de diminuir o atrito são válidas, pois o aluno pode ter a oportunidade de observar que com um leve empurrão um corpo continua em movimento por um largo período de tempo, se comparado com o tempo do movimento em condições normais de atrito. Esta observação encaminha-o a pensar que o movimento independe da força externa. Entretanto, a experiência mostra também que o corpo não começou a movimentar por si próprio, é necessário o empurrão inicial, além de que, depois de algum tempo o corpo para. Soma-se a isso o fato de que a idéia espontânea: "não existe movimento sem força", é sustentada pela experiência cotidiana. Para deslocarmos um objeto ou a nós mesmos, é necessário fazer esforço. Deste modo, grande parte dos alunos continua vendo o movimento como sendo causado, ou então, convive com os dois conceitos.

A idéia de que o movimento tende a continuar idefinidamente corresponde ao conceito de inércia na sua forma restrita já concebido desde Galileu. A forma ampla pressupõe a consideração do referencial, um outro fator que impede os alunos de conceber corretamente o movimento inercial. Na física intuitiva, tal qual na de Aristóteles, o movimento é tido como absoluto, e, por isso, um processo que começa existir num certo ponto do espaço, acabando em outro. Não leva-se em conta que o movimento depende do observador e que pode acontecer de um corpo estar parado para um observador e em movimento para outro.

O conceito de referencial absoluto é outra idéia da física intuitiva, fortemente enraizada devido à experiência cotidiana. A percepção sensorial da Terra parada leva o sujeito a considerar a existência do movimento em relação a este referencial absoluto. Um corpo está em processo de movimento somente se variar sua posição em relação a um referencial fixo na Terra, independentemente de qualquer observador.

A descrição da relatividade do movimento é importante para o entendimento de que o movimento uniforme não tem uma causa. Por exemplo, um observador na Terra observa com seu telescópio um satélite (estacionário) parado, já o observador da Lua observa que este se movimenta. De acordo com a visão intuitiva da física, se um corpo se movimenta então deve haver uma causa, enquanto que o corpo em repouso não exige algum esforço para se manter neste estado. Deste modo, chega-se a uma conclusão contraditória, para um observador o satélite está sofrendo a ação de uma causa e para o outro não.

Uma das coisas que devemos fazer é possibilitar ao aluno a compreensão de que o repouso ou o movimento uniforme de um corpo não são diferentes na sua essência, que o movimento tanto quanto o repouso são estados em que um corpo pode permanecer indefinidamente sem realizar esforço ou gastar energia armazenada.

A idéia de que o movimento tende a continuar idefinidamente corresponde ao conceito de inércia na sua forma restrita já concebido desde Galileu. A forma ampla pressupõe a consideração do referencial, um outro fator que impede os alunos de conceber corretamente o movimento inercial. Na física intuitiva, tal qual na de Aristóteles, o movimento é tido como absoluto, e, por isso, um processo que começa existir num certo ponto do espaço, acabando em outro. Não leva-se em conta que o movimento depende do observador e que pode acontecer de um corpo estar parado para um observador e em movimento para outro.

O conceito de referencial absoluto é outra idéia da física intuitiva, fortemente enraizada devido à experiência cotidiana. A percepção sensorial da Terra parada leva o sujeito a considerar a existência do movimento em relação a este referencial absoluto. Um corpo está em processo de movimento somente se variar sua posição em relação a um referencial fixo na Terra, independentemente de qualquer observador.

A descrição da relatividade do movimento é importante para o entendimento de que o movimento uniforme não tem uma causa. Por exemplo, um observador na Terra observa com seu telescópio um satélite (estacionário) parado, já o observador da Lua observa que este se movimenta. De acordo com a visão intuitiva da física, se um corpo se movimenta então deve haver uma causa, enquanto que o corpo em repouso não exige algum esforço para se manter neste estado. Deste modo, chega-se a uma conclusão contraditória, para um observador o satélite está sofrendo a ação de uma causa e para o outro não.

Uma das coisas que devemos fazer é possibilitar ao aluno a compreensão de que o repouso ou o movimento uniforme de um corpo não são diferentes na sua essência, que o movimento tanto quanto o repouso são estados em que um corpo pode permanecer indefinidamente sem realizar esforço ou gastar energia armazenada.

Dizer que um movimento retilíneo e uniforme constitui um estado, e não um processo, equivale a dizer que não tem necessidade de um motor. Tal concepção de movimento inercial foi elaborada por Descartes. Entretanto, este conceito ainda não contém todos os elementos tal qual entende-se a inércia atualmente. Newton acrescentou-lhe um sentido quantitativo, tornando-o preciso - o estado de movimento (repouso ou movimento retilíneo uniforme) é caracterizado por um valor preciso de uma quantidade bem definida: m v -. E a segunda lei, a da força, indica como esse estado se modifica.

A contribuição de Newton nos leva a uma outra questão pedagógica de que não devemos fornecer ao aluno a lei de inércia de forma isolada. É necessário integrá-la no sistema teórico newtoniano. "Se tomamos as duas primeiras leis simultaneamente se vê claramente em que sentido Newton transforma a concepção de Decartes".(7)

As questões levantadas aqui são necessárias para levar o aluno a perceber a relação correta entre força e movimento e questionar sua concepção de que não existe movimento sem existir uma causa. É necessário fazer o aluno compreender que a pergunta sobre causa do movimento é uma falsa pergunta, e que o correto consiste em perguntar sobre a causa que modifica o estado de movimento de um corpo.

Newton considera haver forças de várias naturezas (percussão, pressão, forças centrífugas e gravidade). A causa da mudança de estado de um corpo pode ser explicada pela constituição material dos corpos. Por exemplo, a força de uma mola residiria no arranjo de suas moléculas, ou então, a força magnética estaria relacionada com a orientação dos spins das partículas que constituem a barra de ferro.

No caso do fenômeno gravitacional, a explicação da teoria newtoniana diz que a força depende da massa e das distâncias relativas dos corpos e que a força gravitacional atua à distância. Conforme vimos, a questão da ação à

distância não foi bem aceita e a polêmica em torno dela resultou no conceito de campo, no qual considera-se também a natureza ou as propriedades do meio entre os corpos para explicar o fenômeno.

Deste modo, não basta fornecer a fórmula de força de atração gravitacional e aplicá-la em alguns problemas, desconhecendo o problema da ação à distância. Os resultados de um ensino deste tipo nós acabamos de mostrar. É necessário, portanto, levantarmos a discussão do modelo gravitacional newtoniano e deste modo prepararmos melhor o aluno para entender o significado do conceito de campo e não apenas concebê-lo como uma definição operacional.

6.2 - A Causalidade na Microfísica

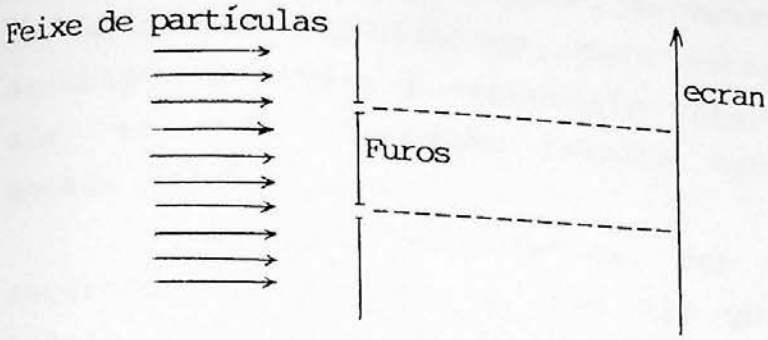
Após ter analisado o problema da causalidade na explicação dos fenômenos clássicos gostaríamos de retomar uma questão que deixamos pendente no final do capítulo 4, sobre o domínio de aplicação da causalidade.

Lá dissemos que a causalidade entendida em sentido amplo abrange um largo domínio da física, entretanto, no caso da microfísica, o princípio causal entendido como: a mesma causa sempre produz o mesmo efeito, ou então, tudo tem uma causa, ou ainda, nada acontece sem causa, encontra dificuldades colocadas pela teoria quântica. Vamos agora, de forma breve, falar dos problemas que surgem com a aceitação do princípio causal na microfísica.

Uma das objeções que se faz ao princípio causal diz respeito ao seu caráter determinista, quer dizer, a partir da causa podemos prever o efeito. Entretanto, na natureza uma causa pode levar a um entre vários efeitos possíveis, e assim sendo, não podemos fazer previsões exatas. No caso da microfísica estes fatos ganham conotações peculiares. Vamos a um exemplo.

Imaginemos um feixe de fótons ou elétrons de características bem definidas - paralelismo da direção e

valor da energia ou da frequência - sujeitos a atravessarem um dispositivo de interferência (dois pequenos orifícios em um diafragma) antes de chocarem-se numa tela ecran recoberta por uma película fotográfica, ou matéria cintilante.(8)



Se reduzimos a intensidade do feixe de modo a realizar a experiência com uma só partícula, e repetimos a experiência nas mesmas condições, isto é, mesma direção e energia, encontramos que os efeitos não são idênticos. O ponto de impacto na tela ecran nos indica que os fótons ou elétrons passam ora por um, ora por outro orifício.

Este resultado está de acordo com a mecânica quântica, segundo a qual as partículas passam aleatoriamente pelo orifício de cima ou pelo de baixo, e que chegam à tela ecran ao acaso. Assim sendo, não é possível prever exatamente o efeito, mas apenas probabilisticamente.

A defesa que se faz da causalidade é que pode-se falar em determinação causal em um sentido estatístico. É necessário fazermos a distinção entre probabilidade e estatística. Quando consideramos vários resultados conjuntamente, o que podemos fazer realizando a experiência com uma só partícula várias vezes, ou então, realizando uma só experiência com muitas partículas, temos que as frequências das probabilidades seguem leis rigorosas. Por exemplo, a retirada de bolas iguais no tamanho e diferentes na cor, de uma urna, é fixada por fórmulas matemáticas precisas, desde que realizemos um grande número de experiências. Isto é válido também para fenômenos aleatórios

de natureza quântica. Deste modo, podemos continuar falando em determinação causal, desde que subentenda-se um sentido estatístico.

Entretanto, outras objeções são feitas à causalidade quanto ao aspecto da mensuração. Em se tratando de fenômenos microfísicos, para obtermos alguma informação do objeto quântico é necessário interagir materialmente com ele, mas tal interação resulta numa mudança radical do estado da partícula.

A mecânica quântica, por meio do princípio de incerteza de Heisenberg, nos diz que não podemos efetuar medidas simultâneas de duas variáveis conjugadas, por exemplo, posição e momento de uma partícula, uma vez que a incerteza na medida é maior que o próprio valor da medida.

As impossibilidades de se fazer previsões exatas e de se efetuar duas medidas simultâneas sobre uma partícula favoreceram uma interpretação positivista da mecânica quântica. Muitos físicos adotaram este ponto de vista, dentre os quais encontramos alguns dos fundadores da teoria quântica, como Bohr e Heisenberg. De acordo com esta visão, o formalismo da mecânica quântica é tomado como um esquema apenas matemático abstrato que não permite interpretações de significado físico. Bohr disse:

> "Devido ao caráter de tais abstrações matemáticas, o formalismo não permite interpretações intuitivas sob as formas habituais: ele tem por fim único estabelecer relações entre observações obtidas em condições experimentais bem definidas"(9)

Esta visão usual da mecânica quântica é conhecida como a interpretação da Escola de Copenhagen, escola neo-positivista ou neo-empirista. Entretanto apesar da grande aceitação desta interpretação, ela não foi unânime. Einstein, que também colaborou para a formulação da teoria quântica, sustentou uma posição diferente, que podemos chamar de "realismo clássico".(10) Ele agiu de forma a reestabelecer para o mundo quântico a velha causalidade

unívoca. Tomou o problema da indeterminação como resultante da nossa ignorância sobre o mundo microfísico. Para ele, a mecânica quântica seria uma teoria imcompleta.

Em 1935, Einstein juntamente com Boris Podolski e Nathan Rosen, propuseram um critério seguinte: "Se, sem perturbar de forma alguma um sistema, nós podemos prever com certeza (quer dizer com uma probabilidade igual a um) o valor de uma quantidade física, nesse caso existe um elemento da realidade física correspondente a esta quantidade física".(11) Eles imaginaram uma experiência onde seria possível conhecer uma medida de uma partícula sem pertubá-la. Se tal experiência fosse possível, implicaria em que a mecânica quântica seria uma teoria incompleta.

O experimento de Einstein, Podolski e Rosen consiste em considerarmos uma molécula M de spin zero, constituída de dois átomos idênticos a e b, tendo cada qual um spin semi-inteiro. Imaginemos que tal molécula fraciona-se espontaneamente em seus dois átomos que se afastam em direções opostas. Teoricamente, sabemos que se as duas partículas têm a mesma massa e movem-se com a mesma velocidade em sentidos contrários, pela lei da conservação do momento angular temos que seus spins tem orientações opostas. Assim sendo, bastaria fazer uma medida sobre o átomo a para saber automaticamente o valor correspondente para o átomo b. Deste modo, sem interagir com o átomo b, teríamos uma medida exata sobre seu movimento. E ainda mais, posteriormente, poderia-se interagir com o átomo b e obter-se a medida da outra variável conjugada, e assim conseguiríamos duas medidas sobre uma mesma partícula, com pequena margem de erro.

Uma outra forma de argumentação que surgiu em defesa do determinismo, consiste na consideração de que se levarmos em conta as variáveis ocultas, poderíamos eliminar o aspecto indeterminista e probabilista da mecânica quântica. A hipótese das variáveis ocultas foi sugerida por

Louis de Broglie nos anos trinta e retomada nos anos cinquenta por David Bohm.

Na termodinâmica trabalha-se com as variáveis: pressão, volume e temperatura. A teoria cinética explica a variação dessas grandezas como resultantes dos movimentos moleculares, deste modo, a temperatura é o efeito médio das energias em jogo e a pressão resulta das forças de impacto das moléculas sobre as paredes. Fazendo um paralelo da quântica com a termodinâmica, podemos tomar as quantidades calculadas pela teoria quântica - funções de onda, observáveis, etc - como a média dos efeitos resultantes dos movimentos internos dos sistemas, mais finos que os fenômenos observados.(12)

A partir de 1965, John Bell fez algumas considerações que tornaram possíveis, a partir de 1970, experiências do tipo proposto pelo trio Einstein, Podolski e Rosen, nas quais levou-se em conta possíveis efeitos ligados a variáveis ocultas. Os resultados dessas experiências mostram que ao interagirmos com uma das partículas, perturbamos automaticamente também a outra, não sendo, portanto, possível determinar o valor de uma variável sem interagir com a partícula.

Esses resultados favorecem uma interpretação positiva da mecânica quântica, pois parece não ser possível falar do "objeto real" independentemente do observador. Além disso, tais resultados parecem preconizar a morte da causalidade, pois haveira nestes casos um efeito sem causa, ou então, haveriam "influências instântaneas" que transmitiriam-se da partícula a para a partícula b, invalidando então a teoria da relatividade, pois seria algo que caminharia mais depressa que a luz.

Os partidários do determinismo causal contra-argumentaram que esses resultados não invalidam a causalidade física e sim a concepção de separabilidade, isto é, a idéia de que podemos, no mundo microfísico, considerar separadamente ou localmente as partículas após o

fracionamento. "Assim o problema não é o da causalidade, mas o da definição de tais objetos separados".(13) As partículas a e b, mesmo depois do fracionamento da molécula M, continuam formando um mesmo corpo, apesar de estarem distantes.

A polêmica entre determinismo e indeterminismo, como também entre o realismo e o positivismo não está encerrada, o debate continua e está sendo importante para os novos desenvolvimentos da microfísica.

Tendo feito este estudo da causalidade na microfísica, vamos falar deste problema relativamente ao ensino de física.

A relutância dos físicos deste século com o conceito de causalidade provém principalmente pelos obstáculos colocados pela mecânica quântica e pela interpretação da Escola de Copenhagen desta teoria.

A influência destes fatores no ensino de ciências provocou a expulsão da causalidade dos conteúdos de física ensinados nas escolas. A este respeito, Halbwachs faz a seguinte ponderação:

> "Os modelos atuais da física têm suprimido geralmente a noção de "causa" considerando-se, com justiça, um resíduo antropomórfico. As explicações próprias destes modelos referem-se a leis de conservação ou evolução (termodinâmica), a princípios de otimização (condições de integral estacionária), a relações de interação (eletromagnetismo) ou a relações de estruturas de natureza ainda mais abstrata que repousam em último termo em uma axiomática (relatividade, mecânica quântica). A confusão já assinalada entre modernização do ensino de física e o ensino de física moderna produz uma tendência a expulsar a causalidade do campo do ensino. As novas propostas para o ensino da mecânica no secundário obedecem a

esta idéia e se baseiam essencialmente nas relações de conservação."(14)

A confusão que se faz entre modernização do ensino e ensino de física moderna, provocando o afastamento do conhecimento causal de qualquer conteúdo físico, deve ser repensada, pois, a física ensinada no secundário e mesmo na graduação está em grande parte relacionada ao pensamento causal, além de que, não podemos esquecer um fator importante: o aluno está acostumado a pensar a natureza física em termos de relação causal. Consequentemente ele tenderá a interpretar de maneira causal "espontânea", caso não haja esclarecimentos e discussões a respeito. No caso da física clássica, a interpretação causal é legítima e necessária para tornar significativa sua aprendizagem.

No caso do ensino de física moderna, no ensino da mecânica quântica, a causalidade deve ser colocada no seu devido lugar. Queremos dizer com isso que a apresentação do formalismo quântico deve ser acompanhada de uma discussão sobre as limitações da causalidade, pois o formalismo quântico, constituindo um determinismo probabilista, torna-se inteligível enquanto contraposto ao determinismo causal; tomando isoladamente ele é de difícil compreensão. Analogamente o ensino da física moderna levanta o problema da especificação do "objeto" quântico; mais uma vez a função de onda adquire um significado físico inteligível quando associada à idéia de que no mundo quântico existe uma inseparabilidade básica; a função de onda definida em todo o espaço seria exatamente a expressão matemática dessa inseparabilidade quântica.

6.3 - Sobre o Propósito do Trabalho

Para finalizar vamos falar do propósito deste trabalho.

No currículo do ensino de física não existem cursos destinados à discussão das influências da filosofia

na ciência e no ensino. E, na medida em que não fala-se abertamente dos princípios filosóficos adotados, a tendência do aluno será a de incorporar de modo acrítico e muitas vezes de modo inconsciente, um conjunto de princípios filosóficos, os quais pairam por cima da comunidade científica e da comunidade de ensino, que conforme vimos, Bunge resumiu no seu "Decálogo do Físico Inocente".

O professor de física, portanto um ex-aluno, em geral tende a realizar um ensino nos moldes de seus ex-professores, e quando procura questionar a forma de ensino, o pouco conhecimento pedagógico ou o pouco domínio da filosofia não permitem que ele avance muito e, deste modo, acaba reproduzindo os velhos métodos de ensino.

O trabalho que aqui realizamos tem o propósito de fornecer ao professor de física subsídios para que ele tome conhecimento de forma mais efetiva de uma das orientações filosóficas que determinam uma das principais características, diríamos negativas, do ensino de física tradicional, que é a da predominância do formalismo desvinculado do seu significado físico. Por isso, tivemos a preocupação de mostrar, historicamente, a vinculação do positivismo com o empirismo, e apontar algumas críticas que são feitas a estas doutrinas filosóficas.

Em ciência, não basta apontar as falhas de uma teoria para que ele seja descartada, é preciso substituí-la por outra que de melhores respostas para os mesmos problemas. Neste trabalho procuramos tomar uma atitude semelhante, procurando apresentar uma outra teoria do conhecimento, a teoria piagetiana, que achamos fornecer melhores respostas para muitas questões, e em particular para o problema do significado do conhecimento científico.

As respostas empiristas, seja a instrumentalista de que o conhecimento formal não tem significado físico, sendo mero instrumento de cálculo, utilizado na descrição e transformação da natureza; ou então a resposta positivista de que a física deva restringir-se somente ao conhecimento

legal, deixando de lado o conhecimento causal, não estão de acordo com a evolução da ciência, pois verificamos nesta última, a busca das razões para explicar as sucessões regulares. A teoria piagetiana não somente adequa-se à evolução da ciência, como consegue dar uma explicação da relação do conhecimento matemático com a realidade física, por meio de sua hipótese epistemológica da atribuição das operações lógico-matemáticas à realidade, o que permite ao sujeito elaborar o conhecimento causal.

Deste modo, achamos ser importante que essa discussão, a nível epistemológico, sobre a causalidade, faça parte da formação do professor de física, para que ele possa entender o significado e a importância do papel da explicação causal no ensino de física.

6.4 - Referências Bibliográficas

(1) F. Halbwachs, "Sobre los Problemas de la Causalidad Física", Epistemologia y Marxismo, M. Godelis, J. Monod, N. Mouland, Novo Curso, Ed. Martins Roca, p. 59.

(2) M.R. Robilotta, "Construção & Realidade no Ensino de Física", I,F. - USP, janeiro 1985, p. IV-6

(3) F.Halbwachs, "La physique du Maitre entre la du physicien e la physique de l'éleve", Revue Française de Pédagogie, 1975, 33, 19-29, p. 162

(4) M.C. Mariani, "A Evolução sas Concepções Espontâneas Sobre Colisões", Tese de Mestrado, IF e FE - USP, Sào Paulo 1987.

(5) A. Villani, "Conteúdo Científico e Problemática Educacional", Tese de Livre Docência, IF - USP, São Paulo, 1987.

(6) A. Villani, J.L.A. Pacca, Y. Hossoume, "Concepção Espontânea Sobre Movimento", revista de ensino de física, vol. 7, nº 1, jan/1985.

(7) J. Piaget, R. Garcia, "Psicogénesis e História de la Ciência", Siglo Veinteuno Editores, México 1982, p. 179.

(8) B. Hoffmann, M. Paty, "L'étrange histoire des quanta", Éditions du Seuil, 1981, p. 237.

(9) J.M. Jauch, "Sào os Quantas Reais?", Nova Stella, 1986, citado na introdução de J. David M. Vianna, p. 17.

(10) ref. 6, p. 208.

(11) ref. 6, p. 215.

(12) ref. 6, p. 221.

(13) ref. 6, p. 241.

(14) ref. 3, p. 162.

ANEXO A

O PROBLEMA DO MOVIMENTO NA HISTÓRIA DA CIÊNCIA

A atividade do Universo, o movimento e a transformação dos corpos, são problemas que intrigaram a razão humana e impulsionaram os contempladores da Natureza a buscar explicações sobre os poderes ativos que fazem o Universo dinâmico.

A história dessas explicações é algo interessante e importante, pois a física moderna surge, também, desse tipo de questionamento. "A quo moventur planetae?" e, "A quo moventur projecta?", foram questões que os filósofos naturais se fizeram em várias épocas. As diferentes explicacões que surgiram abriram caminho para se chegar ao conceito de "inércia", como também à idéia de "força de atração" entre corpos.

O estudo histórico sobre as causas dos movimentos é importante para nós, também pelo fato de que no seu desfecho, começa um questionamento sobre a explicação causal. Com a física moderna (Galileana-Newtoniana) cresce o movimento de negação do papel da explicação. A lei de inércia tornou falso o problema da causa do movimento: para existir, o movimento não requer causa. Quanto à natureza do conceito de força surgem propostas de substituição da investigação das causas pela investigação quantitativa da procura de leis matemáticas.

Começaremos nosso estudo do Problema do Movimento pelos pensadores gregos do século VI (a.C). A causa do movimento de translação, não era um problema para os pensadores dessa época, na medida em que acreditavam serem os corpos minerais dotados de vida. Conforme relato de Aristóteles, Tales também atribuia alma aos corpos minerais, em virtude da natureza do imã e do âmbar(1). A preocupaçao constituia-se na busca de explicações da tranformação dos corpos, as quais influenciaram

posteriormente as explicações sobre o movimento de translação.

1 - OS GREGOS

1.1 - O Uno

No século VI (a.C), na cidade de Mileto na Grécia, começa um movimento filosófico buscando explicações sobre a transformação dos corpos. Este movimento foi dominado pela idéia da existência de uma substância primordial - o UNO - matéria cósmica universal da qual as coisas emergem e para qual retornam. Tales (640-546 a.C.) o fundador da Escola de Mileto, identificou como substância primordial a água, vital tanto para os animais quanto para os vegetais, que se transforma em vapor e forma as nuvens e retorna à Terra pela chuva. Anaximandro (610-546 a.C) discípulo de Tales, também propos haver uma substância primordial, mas não identificou-a a alguma substância observada na natureza. Para ele, tal substância seria complexa e indefinida. Deu-lhe o nome de Apeiron. Anaximenes (585-528 a.C), por sua vez propos ser o ar a substância primordial, em virtude de suas propriedades de condensação e rarefação.

A proposta da existência do Uno traz algumas dificuldades, tais como: pode uma única coisa transformar-se na multidão de coisas do universo?

Heráclito de Efeso (540-475 a.C) toma então como substância primordial aquela que traz em si a própria mudança - o fogo: a mudança imperecível que renova o mundo. Para ele, o mundo é, ao mesmo tempo, Um e Muitos e é justamente "a tensão oposta" dos contrários que constitue a unidade do Um. Apesar da aparência estável das coisas, estas são campos de batalha de forças antagônicas, onde tudo está em constante mudança.

Na colônia grega de Eléia, sul da Itália, Parmenides (cerca de 500 a.C) propõe uma explicação oposta

de Heráclito, que contém aspectos epistemológicos. Para ele as informações vindas dos sentidos são ilusórias e, assim sendo, a constante transformação, o mundo da multiplicidade que observamos é apenas aparente, sendo que o mundo real é imóvel e uno. Segundo Parmenides só existe o Ser Uno, e não tem sentido afirmar que as coisas transformam-se no seu contrário, no Não Ser. Ele nega a existência do vazio. O Ser de Parmenides é uno, indivisível, eterno, indefinido e imutável: "nada mais que uma massa absolutamente uniforme; desprovida de toda diferenciação". (2)

Por sua vez, Empedocles de Agrigento (cerca de 490 a.C) manteve a realidade da mudança, apontando para uma solução que passa do monismo para o pluralismo. Propõe quatro elementos primordiais: o fogo, o ar, a terra e a água, que se combinam originando as múltiplas coisas. Além desses quatro elementos, propõe ainda mais duas entidades para assegurar a mudança e a transformação: o "Amor" e o "Conflito". Os elementos combinam-se pela ação do "Amor" e separaram-se pela ação do "Conflito".

Anaxágoras de Clemezona (cerca de 500 a.C) também propõe uma solução pluralista. Para ele, há uma quantidade incontável de elementos, aos quais chamou de "sementes", que se combinam dando origem às múltiplas coisas e fenômenos. Ele também considera a existência de um agente o "Nous" - algo semelhante ao espírito, causa do movimento e da ordem no Mundo.

Notemos que a doutrina de Anaxágoras considera também o fator quantitativo, pois, as diferentes sementes podem variar em número e posição relativa, originando desse modo a multiplicidade(3). A idéia da quantidade já havia sido lançada pelos pitagóricos.

1.2 - Os Pitagóricos

Pitágoras nasceu em Samos, próximo de Mileto, foi contemporâneo de Tales e Anaximandro. Fundou a Escola

Pitagórica que tinha como pensamento central o princípio de que todas as coisas são números. A essência e a ordem do universo deveriam ser explicada por relações de números inteiros. A música enquadra-se bem neste pensamento. Se fixamos um dos extremos de uma corda e a fazemos vibrar, ela emite o som de um tom. Se vibramos a metade da corda, o tom aumentará em um oitavo e, se vibrarmos dois terços, ela emitirá um som cujo tom estará um quinto acima do tom da corda inteira. Os pitagóricos extrapolaram seus conhecimentos musicais ao campo da astronomia. As distâncias entre os planetas e suas velocidades guardariam relações de números inteiros, os movimentos dos astros produziriam sons compondo uma harmonia celestial.(4)

A grande descoberta de Pitágoras, a asserção de que a soma dos quadrados dos lados de um triângulo retângulo é igual ao quadrado da hipotenusa tornou-se fatal para a sua doutrina, pois dela decorreu a descoberta dos números irracionais. No caso de um quadrado de lado n, temos pelo teorema de pitágoras que $m^2=2n^2$, onde m é a diagonal do quadrado. O número m^2 deve ser par por ser o dobro de outro número inteiro. Mas o quadrado de um número inteiro par é divisível por 4, logo n^2 que é metade de m^2, deve ser par. Logo n deve ser par. Mas desde que m é par e m e n não possuem fatores comuns, n deve ser impar. Assim, n deve ser ao mesmo tempo par e ímpar, o que é impossível e, em consequência, a diagonal e o lado do quadrado não podem ser relacionados por uma razão de números inteiros.(5)

A afirmação dos pitagóricos de que as coisas são números inteiros teria implícita a idéia de que a matéria é constituida de partes indivisíveis - átomos - separados pelo vazio. Uma linha de dois metros teria o dobro de átomos de uma linha de um metro. A descoberta da irracionalidade foi fatal para a doutrina dos pitagóricos, pois, para eles a existência de razões numéricas irracionais colocava por terra a idéia de que as coisas são números ou razões de

números inteiros. Segundo alguns autores os pitagóricos resolveram manter segredo sobre esta descoberta.(6)

1.3 - O Atomismo

Zenão de Eléia (cerca 500 a.C), discípulo de Parmenides é conhecido pelos seus argumentos contra a possibilidade do movimento, afim de defender a doutrina de Parmenides do mundo real imutável. Ele argumentou que uma certa distância contendo um número infinito de pontos não poderia ser percorrida num tempo finito. O "Ser" de Zenão é um todo contínuo, que pode ser recortado por um número infinito de divisões e essas divisões são tão estreitas que não contém vazio algum entre elas.(7)

Leucipo (cerca 490 a.C), a partir do contínuo de Zenão contargumentou que se o número de divisões do contínuo fosse infinito, então a realidade teria que se constituir apenas de divisões e, deste modo teríamos somente o vazio. Para ele a matéria existiria entre espaços vazios. Só podemos separar e dividir os corpos porque eles - constituidos de ínfimas partículas homogêneas - já estão divididos pelo vazio existente entre essas partículas.(8)

Demócrito de Abdera (460-370 a.C), discípulo de Leucipo, tinha como problema básico entender racionalmente a <u>mudança</u>. Ele procurou contrapor-se aos seguintes argumentos de Parmenides: 1) Somente o que é, é; 2) O que não é, não existe; 3) O Não Ser, i.é, o vazio, não existe; 4) O Mundo é cheio; 5) O Mundo não tem partes, é um imenso bloco; 6) O movimento é impossível. Demócrito argumentou que as proposições 5) e 6) são contraditas pelos fatos e, assim sendo, temos: 6) Há movimento; 5) O Mundo tem partes, ele não é único, mas vários; 4') Portanto o Mundo não pode ser cheio; 3') O vazio - o Não Ser - existe.(9)

As partes - os átomos - seriam blocos cheios, indivisíveis, eternos e imutáveis feitos de uma substância abstrata tal como o Ser de Parmenides. A combinação desses

átomos originaria a diversidade e multiplicidade do Mundo. Para Demócrito, os átomos eram dotados de movimento eterno e caminhavam pelo vazio, o Não Ser.

1.4 - Platão

Em sua doutrina sobre a matéria, Platão (427-347 a.C) combinou idéias do atomismo com a doutrina da escola pitagórica e os ensinamentos de Empédocles. Ao que se sabe ele tinha conhecimento dos irracionais e compreendeu que a tentativa de explicar a natureza por meio de uma teoria puramente aritmética, baseada na contagem de partículas, resultaria em fracasso e, deste modo procurou modificar o pitagorismo e o atomismo por meio de métodos geométricos.(10)

Platão sabia da descoberta dos sólidos regulares feita pelos pitagóricos. São somente cinco: o cubo, o tetraedro, o octaedro, o icosaedro e o dodecaedro. Ele os associou aos elementos de Empédocles: à Terra atribuiu a forma cúbica, ao fogo o tetraedro, ao ar o octaedro e à água o icosaedro. Haveria ainda um quinto elemento correspondente ao dodecaedro com o qual Deus serviu-se para delinear o Universo.

> "E agora, devo me esforçar por vos desvelar, por um arrazoado assaz insólido, a maneira pela qual foi disposto e nasceu cada um dos elementos....
> De início, que o fogo, a terra, o ar e a água sejam corpos, isso é sem dúvida evidente para qualquer um. Ora, a essência do corpo possui sempre uma espessura. Mas toda espessura envolve necessariamente a natureza da superfície. E toda superfície formada retilineamente é composta de triângulos."(11)

A partir dos triângulos isósceles e escaleno construimos os cinco poliedros regulares. Os elementos, uma vez associados aos poliédros, seriam determinados a partir

desses triângulos básicos, podendo assim ser decompostos nesses últimos, os quais recompostos dariam origem a um outro elemento.

"A água dividida pelo fogo, ou pelo ar pode, se recompondo, fornecer quer um corpúsculo de fogo, quer dois corpúsculos de ar."(12)

De outra forma, um tetraedro e dois octaedros podem ser desfeitos em vinte triângulos equiláteros, com os quais podemos construir um icosaedro. Isto significa que com um elemento do fogo e dois do ar poderiam transmutar e fornecer um elemento de água.(13)

Os triângulos básicos sozinhos não podem ser considerados corpos, pois, não possuem volume, somente quando eles se unem e formam figuras no espaço é que os corpos são criados. Os elementos são determinados, em última instância, não pela matéria, mas pela forma geométrica. A matéria seria algo amorfo, indeterminado e comum a todos os elementos; a forma, por sua vez, diferencia-os dando-lhes caracterísiticas próprias.

Para Platão os corpos possuem não só uma figura ou forma visível como também uma forma invisível, captada somente pela mente: as "idéias". O Mundo de Platão tem duas realidades:

"Sendo assim, convir-se-á quanto a uma primeira realidade, a que tem forma imutável, que não nasce e não perece, que não admite em si nenhum elemento extrínseco, que não é perceptível nem pela vista, nem por outro sentido, aquilo que só se é dado ao intelecto contemplar. Uma segunda realidade leva o mesmo nome: semelhante à primeira, mas submete-se aos sentidos, nasce, está sempre em movimento, nasce num lugar determinado, para em seguida desaparecer, é acessível à opinião unida à sensação."(14)

Em sua doutrina, Platão concilia a filosofia de Parmenides, do imutável, com a filosofia de Heráclito, do

mutável. A primeira associada ao mundo das "Idéias" e a segunda, ao nosso mundo sensível em constante transformação.

Em Platão notamos uma preocupação com o movimento de translação. Ele distingue o movimento em duas espécies: 1) a modificação dos corpos, 2) a mudança de posição. A respeito da explicação da causa do movimento de translação, em sua obra "As Leis", Platão considera a matéria como um organismo vivo e, assim sendo, explica os movimentos pela natureza da alma. Na descrição sobre a criação do Mundo, ele diz que o Deus criador:

> "...após ter colocado o Intelecto na Alma, a Alma no Corpo, formou o Cosmos, para dele executar uma obra que essencialmente fosse a mais bela e a melhor. Assim pois, nos termos de um arrazoado provável, deve-se dizer que o Cosmos, que é verdadeiramente um ser vivo provido de Alma e Intelecto, é assim gerado pela ação da providência de um Deus."(15)

O Mundo de Platão é um grande animal, animado pela "Alma do Mundo". A tese da alma como causa dos movimentos aplica-se mais aos movimentos eternos dos corpos celestes. No caso dos movimentos terrestres Platão os explica por meio de idéias como: 1) os elementos semelhantes se atraem; 2) os elementos distribuem-se no espaço conforme o lugar que lhe é próprio. A segunda idéia foi empregada por Aristóteles; enquanto que a primeira ligada ao conceito de atração, acabou sendo esquecida por vários séculos.

1.5 - Aristóteles

Aristóteles (382-322) inicia sua obra "Physica" com as seguintes palavras:

> "Conhecimento e ciência se produzem, em todas ordens de indagações sobre os princípios, causas ou elementos (em efeito nós não pensamos ter compreendido uma coisa senão quando penetramos as

causas primeiras, os princípios primeiros e inclusive os elementos), portanto é claro que, na ciência da natureza, é necessário definir logo o que concerne os princípios."(16)

Tendo definido o objetivo da ciência natural ele faz uma análise dos pensadores que lhe precederam. O mesmo procedimento encontramos na sua obra "Metafísica", onde comenta e critica as concepções dos filósofos a respeito das causas.

Nesta análise, Aristóteles diz que a maior parte deles considerou a causa material: admitiram como princípio, a matéria.

Além da causa material, alguns ainda admitiram uma segunda: a causa motora ou eficiente, o princípio do movimento dos corpos. Os primeiros pensadores: Tales e Anaximenes ao explicarem a geração e corrupção dos corpos, confundiram a causa material com a causa motora; tentaram explicar a mudança pelo princípio material. Entretanto, Empédocles e Anaxágoras consideraram além do princípio material, agentes causadores do movimento e da ordem no Mundo

Aristóteles considera também um terceiro tipo de causa: substancial ou formal. Quem mais aproximou-se dela foi Platão, com sua doutrina das "Idéias". A substância ou a forma corresponde à essência necessária que define as características de cada ser.

Aristóteles distingue ainda um quarto tipo de causa: final, isto é, o fim ou a finalidade pelo qual um ser existe ou se modifica. Num certo sentido foi admitida por Anaxágoras e por Platão, ao tornarem a "Inteligência" como causa organizadora do Mundo. Entretanto, tomaram a causa "Inteligente" em função do melhor, do mais apto e não em função do fim ou finalidade pela qual os seres existem.

Perguntar sobre as causas de algo, para Aristóteles, significa perguntar o <u>porque</u> de uma coisa, e esse porque pode ser feito de maneiras diferentes, o que

implica haver mais de uma causa e, deste modo, na produção de algo pode haver o concurso de várias causas. Na citação abaixo, temos uma síntese da sua classificação dos quatro tipos de causas possíveis:

> " um dos tipos é a causa material, aquilo de que uma coisa é feita e que permanece na coisa, por exemplo: o bronze é causa da estátua. Num segundo tipo, a causa é a forma ou modelo, isto é, a essência necessária ou substância de uma coisa. Nesse sentido é causa do homem sua natureza racional que define. Um terceiro tipo, a causa eficiente, o que dá início ao movimento ou ao repouso, por exemplo, o pai é causa do filho, e em geral o que produz a mudança é causa da mudança. Um quarto tipo, a causa final, por exemplo: a saúde é a causa por que se passeia."(17)

Aristóteles distingue também quatro tipos de movimento: o <u>substancial</u>, que corresponde à geração e corrupção dos corpos; o <u>qualitativo</u> que corresponde à mutação dos corpos; o <u>quantitativo</u> que corresponde ao aumento e diminuição dos corpos e o <u>movimento local</u> que corresponde à translação dos corpos. Os três primeiros movimentos podem ser reduzidos ao movimento local que é primeiro e mais fundamental.(18)

Em Aristóteles, explicações para o movimento de translação são bem mais completas do que em seus antecessores; sua teoria do movimento é bastante elaborada e perfeitamente coerente do ponto de vista lógico, estando em grande parte de acôrdo com a experiência cotidiana. Tais características farão com suas idéias tenham aceitação por vários séculos.

A sua teoria do movimento parte de alguns pressupostos. Um deles está relacionado à organização do Cosmos. O Cosmos aristotélico tem um centro no qual a Terra encontra-se imóvel. A cosmologia prevalecente em sua época é a geocêntrica. Aristóteles, à maneira de Eudoxo, concebe o

Universo finito, formado por esferas cristalinas centradas na região onde se encontra a Terra. É importante ressaltar que a Terra ocupa o centro do Universo, o lugar natural dos corpos graves. Na sua obra "Tratado do Céu", ele diz:

> "Mas podemos perguntar, pois, se o centro da Terra e o centro do Universo se confundem, para qual dos dois centros se dirigem naturalmente os corpos pesados e as partes da Terra: é porque ele é o centro do Universo, ou porque ele é o centro da Terra? É necessário que este seja o centro do Universo, pois, os corpos leves e o fogo se dirigem em sentidos contrários aos corpos pesados, extremo do lugar que contém a Terra... Assim esses corpos se movem para o centro da Terra, é neste sentido que o centro da Terra é o centro do Universo."(19)

O espaço do Universo aristotélico é dividido em regiões e a tese fundamental de sua teoria do movimento consiste em que os corpos dotados de movimento natural dirigem-se espontaneamente para o seu lugar natural, deste modo os corpos feitos dos elementos da terra e da água dirigem-se para o centro do Universo, enquanto que o fogo e o ar sendo corpos leves dirigem-se para o alto em direção contrária ao centro. Um corpo fora de seu lugar natural dirige-se espontaneamente para este.

Aristóteles entende por movimento natural o movimento espontâneo como o da queda de um corpo ou o da subida do fogo. Os movimentos provocados pelo homem, tais como os de lançamento de projéteis, são movimentos forçados ou violentos.

O movimento natural depende da natureza do corpo e pode ser de três tipos: o movimento em direção ao centro, dos corpos graves (terra e água); o movimento centrífugo, dos corpos leves (fogo e ar) e o movimento circular, dos corpos celestes.

Para Aristóteles, do mesmo modo que para Platão, há um quinto elemento ou quinta essência que ocupa o espaço celeste e que por condensação formou os astros. Ele chamou esse quinto elemento de ÉTER que teria o movimento circular inerente a si.

Um segundo pressuposto na física aristotélica é a divisão do Cosmo em duas regiões distintas: o mundo supralunar - os céus - lugar das coisas perfeitas, por isso imutáveis e eternas, onde ocorre o movimento dos astros; e o mundo sublunar - a Terra - lugar das coisas imperfeitas e mutáveis que nascem e morrem, onde tudo tem seu contrário; o movimento para cima é o contrário do movimento para baixo, o fogo é o contrário da água. A teoria do movimento de Aristóteles contém duas físicas distintas: uma válida só para os céus e outra válida só para a terra.

No tocante à causa dos movimentos, o traço marcante da doutrina aristotélica consiste na afirmação de que todo movimento tem uma causa motriz que deve estar em contato com o corpo móvel durante todo o processo de movimento.

No caso do movimento natural dos astros, Aristóteles considera haver um primeiro motor, de origem divina, situado além da última esfera das estrelas fixas que comunica o movimento para as outras esferas dos planetas. Para Aristóteles, o vazio é impossível, e assim o movimento é transmitido por atrito através do éter existente entre as esferas, até a esfera mais baixa - a da lua. O movimento desta última esfera causaria o movimento das nuvens e dos ventos acima da superfície terrestre.

Na física terrestre, o movimento natural dos corpos simples - fogo, ar, terra e água - é devido a uma causa interna, motora , que os transporta a seus lugares naturais. No seu lugar natural um corpo permanece em estado de repouso absoluto, sendo o movimento apenas um processo transitório. No caso dos movimentos forçados existe uma ação externa, que deve estar constantemente em contato com o

corpo móvel. No lançamento de uma pedra, por exemplo Aristóteles explica que a ação motora passa, da mão que lança a pedra para o ar, e os movimentos do ar carregam a pedra. Cessada a ação motora, cessa o movimento violento e o corpo volta ao seu lugar natural.

2 - IDADE MÉDIA

2.1 - O Esquecimento

A dominação romana sobre a Grécia não resulta em algum progresso além daquilo que os gregos já haviam pensado. Os romanos interessam-se mais pelo conhecimento prático das artes bélicas e da arquitetura do que pela filosofia.

O enfraquecimento do império romano e o florescimento da igreja católica também não resultam em algum incentivo à pesquisa; o homem é levado a refletir sobre si mesmo. Santo Agostinho (354-430 d.C) dizia:

> " Não saia de ti, retoma a ti mesmo, no interior do homem habita a verdade, e se achares mutável a tua natureza, transcende a ti mesmo."(20)

Santo agostinho condena a curiosodade de querer conhecer os segredos da natureza. Para saciar a curiosidade o homem deve buscar respostas nas sagradas escrituras. Nestas épocas prevalece uma explicação predominantemente teológica, como as do monge Kosmos (século VI d.C), segundo o qual o Universo teria a forma de um tabernáculo que Deus mandara construir no deserto. Fechado por grandes paredes verticais, o teto do Universo era um semi cilindro. Os anjos, criaturas incorpóreas intermediárias entre Deus e os homens, encarregavam-se de empurrar diariamente os astros. Atrás uma enorme montanha no extremo da Terra que era considerada plana, os anjos ocultavam os astros das vistas dos homens.

Algo importante nesta época surge da parte de um dos comentadores de Aristóteles: João Filoponos (século VI d.C). Ele rejeita a explicação de Aristóteles sobre o lançamento dos projéteis, pois, segundo o qual três movimentos seriam necessários: primeiro o projétil deveria empurrar o ar para frente, num segundo momento o ar voltaria para trás do projétil para em seguida, empurrar o projétil. Discordando de Aristóteles, Filoponos fornece uma explicação que aproxima-se muito mais da concepção moderna:

" Quem lança o projétil infunde nesse projétil certa ação, certa potência que é incorpórea."(21)

Em sua época suas idéias não tiveram muita repercussão, sendo retomadas somente no século XIV, com a teoria do ímpeto.

A partir do século VII d.C. começa a dominação árabe na região do mediterrâneo. Diferente dos romanos, os árabes interessam-se muito pela ciência grega, entretanto não chegam a acrescentar-lhe algo substancial.

Com as invasões árabes na Espanha e com as cruzadas cristãs em direção ao oriente a cultura grega chega à Europa, restringindo-se inicialmente aos mosteiros.

2.2 - A Retomada

Com a retomada da cultura grega na Europa, também foi retomado o conceito de movimento de Filoponos na teoria do Ímpeto. Para Francisco de Marchia (século XIII) no lançamento de um projétil é comunicado a este um "ímpeto" o qual sustenta o movimento até se exaurir. O ímpeto exaure-se pelo fato de estar separado da fonte. João Buridan (1295-1358), por sua vez, propõe uma "natureza permanente", ao ímpeto, que permanece imutável e mantém o corpo em movimento indefinidamente, caso não fosse diminuido por forças contrárias ou resistentes.

São Tomás de Aquino argumenta que os movimentos eternos dos astros necessitam do concurso de causas

infinitas, pois, tais causas não podem residir num corpo de dimensões finitas, e assim ele conclue que o primeiro motor aristotélico não é outra coisa senão Deus. Buridan dá uma explicação diferente para os movimentos celestes:

> " Em nenhuma parte alguém lê na Bíblia que existe inteligências encarregadas de comunicar às esferas celestes seu próprio movimento; é permitido mostrar que não há a necessidade de tais inteligências. Podemos dizer que Deus, quando criou o Mundo, moveu como ele quis cada uma das órbitas celestes, e ele deu a cada uma delas um ímpeto, o qual as mantém até então... Assim ele pôde descansar no sétimo dia, do trabalho que realizara."(22)

Buridan abre uma brecha na concepção aristotélica do Mundo dividido em duas regiões distintas: sub e supra lunar. Com o conceito do ímpeto ele explica tanto os movimentos celestes como os movimentos terrestres. Quanto ao movimento de queda dos corpos graves, ele também dá um avanço. Para Aristóteles esse movimento é uniforme, entretanto, é fato comprovado que durante a queda a velocidade aumenta. Buridan explica que o motor da gravidade coloca o corpo em um movimento uniforme. Estando em movimento o corpo adquire um certo ímpeto que atuando conjuntamente com a gravidade faz aumentar a velocidade.

3 - RENASCENTISMO

3.1 - Heliocentrismo de Copérnico

Aos poucos vão surgindo novas idéias que enfraquecem o aristotelismo. A proposta do heliocentrismo de Nicolau Copérnico (1473-1543) toca no calcanhar de Aquiles da física aristotélica, invalidando suas explicações para os movimentos, pois, a partir da consideração de que a Terra gira em torno do Sol, não faz mais sentido falar que o

centro do Universo é o lugar natural dos corpos graves, n
que o movimento das esferas dos planetas é resultado
movimento comunicado pelo primeiro motor, pois, no mode
heliocêntrico a esfera das estrelas fixas está parada.

Novas explicações fazem-se necessárias. Segun
Copérnico os corpos graves caem não porque possuem
movimento natural que os carrega para o centro do Mund
conforme explica Aristóteles, e sim porque há u
necessidade das partes separadas do Todo reuniram-se no To
(um pedaço da Terra tenderá reunir-se à Terra, um pedaço
Lua à Lua). Ele diz:

> " Quanto a mim considero que a gravidade não
> nada mais que um certo desejo natural que
> providência divina do artesão de todas as cois
> implantou nas partes para que elas se encaminhem
> totalidade, na unidade, unindo-se na forma
> globo. É verdadeiro que esta disposição encontr
> se no Sol, na Lua e nos outros planet
> brilhantes."(23)

O Universo de Copérnico é finito, contido pe
esfera das estrelas fixas. Os corpos celestes são esférico
Para ele, a forma esférica é a mais perfeita de todas
teria inerente a si o movimento circular. Ele diz:

> " o movimento dos corpos celestes é circular,
> mobilidade (própria) da esfera é a de girar: p
> este ato, ao mover uniformemente em torno de
> mesma, expressa sua forma, a do corpo simples
> que não pode encontrar começo nem fim, n
> distinguir um do outro."(24)

Contra os tradicionais argumentos da imobilida
da Terra, Copérnico argumenta também recorrendo a valor
tradicionais: "a condição de estar em repouso é considera
mais nobre e mais divina do que aquela de mudança
inconsistência, a última, portanto, é mais apropriada
Terra do que ao Universo".(25) Sendo a mudança indício
imperfeição, o movimento é mais apropriado à Terra do q

aos lugares das coisas perfeitas , os céus, o que parece mais coerente.

Quanto ao tradicional argumento da pedra lançada na vertical que volta ao ponto de lançamento, usado para provar a imobilidade da Terra, Copérnico explica que tal fato ocorre devido aos corpos terrestres possuirem um movimento natural no sentido do oriente.(26)

3.2 - Kepler e as Órbitas Elípticas

A crença no movimento circular dos astros foi alimentada por pseudo-necessidades como: sendo o círculo uma forma perfeita, o movimento dos corpos celestes, corpos perfeitos, necessitam ser circulares.

Para Johannes Kepler (1571-1630) chegar à conclusão que as órbitas são elípticas, dois fatores foram muito importantes, além de muito trabalho exaustivo: 1) a influência das doutrinas pitagórica e platônica em seu pensamento, 2) o apego à informação empírica.

Kepler teve uma certa obcessão pelas idéias dos pitagóricos sobre a harmonia do Universo. Acreditou haver uma razão, para as distâncias e velocidades dos planetas em relação ao Sol, serem tal como são. Em sua primeira obra: "O Mistério Cosmográfico", Kepler relacionou os seis planetas conhecidos até aquela época com os cinco poliedros regulares. Ele encaixou as órbitas dos planetas dentro desses poliedros, uns dentro dos outros desde Mercúrio até Saturno. Esta tentativa não deu muito certo, no caso da medida da distância entre Marte e Júpiter feita por Copérnico, esta não se encaixava adequadamente na configuração. Kepler tomou os dados de Copérnico simplesmente como errados.

Na segunda parte do "Mistério Cosmográfico", Kepler procurou fornecer uma explicação para as diferentes velocidades dos planetas. Quanto mais distante do Sol, menor é a velocidade do planeta, pois existiria no centro do

Universo - no Sol - uma "alma motriz" que atuaria sobre os planetas, empurrando-os e, esta ação diminuiria com a distância da mesma maneira que a intensidade da luz, o que explicaria a menor velocidade dos planetas mais distantes.

Mais tarde, trabalhando no observatório de Tycho Brahe (século XVI) Kepler tentou determinar a órbita de Marte. Numa das posições obtidas por Tycho encontrou uma diferença de oito minutos de arco entre a posição observada e a calculada. Curiosamente, o mesmo Kepler do "Mistério Cosmográfico", resolveu não desprezar essa pequena diferença, tomando-a por erro de medida, preferiu acreditar na observação de Tycho. Sobre isso, ele diz:

> "Se a divina bondade nos deu um observador como Tycho Brahe, devemos agradecer essa dádiva e fazer bom uso dela."(27)

Essa atitude de Kepler levou-o a considerar que a órbita não deveria ser circular. Por fim acaba chegando à sua primeira lei:

> "Os planetas giram ao redor do Sol em elípses, com o Sol ocupando um de seus focos."

A explicação que Kepler fornece ao movimento elíptico agora deixa de ter um caráter teológico ou espiritual, pois, para ele, uma alma poderia causar o movimento circular, mas não um movimento elíptico, onde a cada instante as "inteligências" seriam obrigadas a calcular a velocidade e a direção que deveriam imprimir ao astro. Era necessário encontrar uma causa física que seguisse leis estritamentes matemáticas. Sua explicação foi influenciada pela obra "De Magnete" de Gilberte, publicada em 1600, e pela descoberta de Galileu de que o Sol gira em torno de seu eixo. Para ele, a rotação do Sol criaria um imenso vórtice magnético no éter espacial, gerando uma força que:

> "...segura o planeta, ora atraindo-o, ora repelindo-o, ou hesitando entre as duas ações...., obrigando o planeta, a girar com ele

(Sol) e, junto com o planeta, talvez todo o éter que o circunda."(28)

Essa ação não tem o mesmo significado que a atração gravitacional newtoniana, que equilibra a força centrífuga. Kepler não considera haver um efeito centrífugo. A ação magnética criada pela rotação solar funcionaria como um motor que carregaria os planetas em trajetórias elípticas.

No caso do movimento de queda dos graves, no prefácio do "Astronomia Nova" de 1609, Kepler explica a gravidade pela idéia de atração entre corpos semelhantes. Para ele duas pedras atraem-se mutuamente, sendo a força de atração proporcional à grandeza dos corpos. Ele ainda diz que a ação gravitacional da Terra se estenderia até a Lua. Kepler não afirma haver atração mútua entre a Terra e os planetas, muito menos entre a Terra e o Sol, justamente por serem corpos de naturezas diferentes.

Em algumas passagens de sua obra, Kepler sugere algumas imagens de como deveria ser a atração entre a Terra e os corpos próximos a sua superfície:

> "Como os graves buscam o corpo da Terra em tanto que tal e são buscados por esta, eles movem-se mais fortemente para as partes mais próximas da Terra do que para as mais afastadas.... Como se eles estivessem atados ao lugar acima do qual encontram-se pela perpendicular, assim por uma infinidade de linhas ou nervos oblíquos,... que pouco a pouco contraem-se em si mesmo."(29)

Haveria uma distribuição simétrica de "nervos oblíquos" em torno do ponto onde se encontra o corpo, sendo que as componentes horizontais anulariam-se, enquanto que na direção perpendicular à superfície da Terra somariam-se.

3.3 - Giordano Bruno e a Relativização do Movimento

O mundo de Copérnico continuava limitado pela esfera das estrelas fixas e centrado no Sol. Tycho Brahe havia eliminado as esferas cristalinas. Giordano Bruno (1548-1600), por sua vez, rompeu a esfera que limitava o Mundo, tornando-o infinito e sem qualquer centro. No seu Universo não existe posição previlegiada nem para Terra nem para o Sol. Não há posições absolutas, mas relativas. É a partir desta concepção relativista do Universo que ele concebeu o movimento.

Bruno estava preocupado em provar a existência do movimento da Terra. Para os Aristotélicos, o fato de uma pedra lançada na vertical voltar ao ponto de lançamento constituia uma prova de que a Terra estava parada. Bruno, então, imaginou alguns experimentos a bordo de um navio movendo-se uniformemente:

> "Imaginemos dois homens: um no navio em movimento, o outro fora do navio, que ambos tenham a mão no mesmo ponto do ar, e que desse ponto, no mesmo instante, cada um deles deixe cair uma pedra sem dar-lhe nenhum impulso: a pedra do primeiro....sem se desviar de sua linha (vertical) irá para o lugar fixado de antemão; enquanto que a do segundo será desviada para ré. E isto é devido ao fato de que a pedra que sai da mão do homem levado pelo navio, e consequentemente se move com o mesmo movimento que este, possui uma certa força interna que a outra pedra não possui, a que sai da mão do homem que se encontra fora do navio,...(de modo que) as coisas que estão ligadas ao navio (por se encontrarem a bordo dele) se movem em ele; uma das pedras, a que se move com o navio, leva consigo a força do motor, enquanto que a outra não tem nenhuma participação (nessa força)."(30)

Do mesmo modo, os corpos na superfície da Terra participariam do movimento da Terra. O fato da pedra lançada na vertical voltar ao mesmo ponto explicaria-se por ela participar do movimento da Terra, que não interfere no movimento de queda. Tudo se passaria como se a Terra estivesse parada. Mesmo depois de lançada, a pedra continuaria com o mesmo movimento do conjunto da Terra. (em torno de si e do Sol).

3.4 - Galileu Galilei

3.4.1 - A Inércia Circular

Galileu Galilei (1564-1642) foi antes de tudo um grande defensor do sistema heliocêntrico. Em defesa dessa causa entrou em muitas polêmicas com os aristotélicos de sua época, que acabaram conseguindo levá-lo ao tribunal da inquisição em 1632.

Na sua defesa do heliocentrismo contra o geocentrismo, Galileu teve duas tarefas pela frente: construir uma nova mecânica, compatível com o sistema heliocêntrico, e destruir os velhos hábitos mentais contidos na doutrina tradicional. Ele tinha consciência de que a aceitação dos novos conceitos dependia da concomitante destruição dos velhos hábitos de pensar, baseados na experiência ingênua e na concepção absoluta do universo aristotélico. Para tanto, escreveu a sua obra, "Diálogo Sobre os Dois Principais Sistemas do Mundo" por meio de diálogos entre três interlocutores: Salviati, defensor das posições de Galileu; Simplício, um aristotélico convícto; e Sagredo de posição neutra, porém, progressista. Desta maneira, Galileu expõe uma nova concepção do Universo, considerando detalhadamente casos particulares, e assim vai destruindo um a um os argumentos contrários, com Salviati fazendo Simplício reconhecer a falácia da doutrina aristotélica. Assim num processo maiêutico, Galileu ajuda o

leitor do "Diálogo" no difícil caminho da mudança dos velhos para os novos conceitos. Vamos reproduzir aqui uma parte desses diálogos, onde trata da questão do movimento permanente:

Salviati:...Pero ditemi: quando voi aveste una superficie piana, pulitissima come uno specchio e di materia dura come l'acciaio, e che fusse non parallela all'orizzonte, ma alquando inclinata, e che sopra di essa voi poneste una palla perfettamente sferica e di materia grave e duríssima, come verbigrazia, di bronzo, lasciata in sua libertà che credete voi che ella facesse? non credete voi (si come credo io) che ella stesse ferma?

Simplicio: Se quella superficie fusse inclinata?

Sal.: Si, che cosi già ho supposto.

Sim.: Io non credo che ella si fermasse altrimente, anzi pur son sicuro ch'ella si muoverebbe verso il declive spontaneamente...

Sal.: E quando durerebbe a muoversi questa palla e con che velocità? E avvertite che io ho nominata una pallia perfettissimamente rotonda ed un piano squisitamente pulito, per rimuover tutti gli impedimenti esterni ed accidentarii: e cosi voglio che voi astragghiate dall'impedimento dell'aria, mediante la sua resistenza all'essere aperta, e tutti gli altri ostacoli accidentarii, se altri ve ne potessero essere.

Sim.: Ho compreso il tutto benissimo: e quanto alla vostra domanda, rispondo che ella continuerebbe a muoversi in infinito, se tanto durasse la inclinazione del piano; e con movimento accelerato continuamente; che tale e la natura de i mobili gravi, che vires acquirant cundo: e quanto maggior fusse la declività, maggior sarebbe la velocità.

Sal.: Ma quand'altri volesse che quella palla si movesse all'insu sopra quella medesima superficie, credete voi che ella vi andasse?
Sim.: Spontaneamente no, ma ben strascinatavi o con violenza gettatavi.
Sal.: E quando da qualche impeto violentemente impressole ella fusse spinta, quale e quanto sarebbe il suo moto?
Sim.: Il moto andrebbe sempre languendo e ritardandosi, per esser contro a natura, e sarebbe piu lungo o piu breve secondo il maggiore o minore impulso e secondo la maggiore o minore acclività.
Sal.: Parmi dunque sin qui che voi mi abbiate esplicati gli accidenti di un mobile sopra due diversi piani; e che nel piano inclinato il mobile grave spontaneamente descende e va continuamente accelerandosi, e che a ritenervelo in quiete bisogna usarvi forza; ma sul piano ascendente ci vuol forza a spignervelo ed anco a fermarvelo, e che 'l moto impressogli va continuamente scemando, si che finalmente si annichila. Dite ancora di piu che nell'un caso e nell'altro nasce diversità dall'esser la declività o acclività del piano, maggiore o minore; si che alla maggiore inclinazione segue maggiore velocità, e, per l'opposito, sopra il piano acclive il medesimo mobile cacciato dalla medesima forza in maggior distanza si muove quanto l'elevazine e minore. Ora ditemi quel che accadrebbe del medesimo mobile sopra una superficie che non fusse ne acclive ne declive.
Sim.: Qui bisogna ch'io pensi un poco alla risposta. Non vi essendo declività, non vi puo essere inclinazione naturale al moto, e non vi essendo acclività, non vi puo esser resistenza all'esser mosso, talché verrebbe ad essere

indifferente tra la propensione e la resistenza al moto: parme dunque che e' dovrebbe restarvi naturalmente fermo. Ma io sono smemorato, perche non e molto che il signor Sagredo mi fece intender che cosi seguirebbe.

Sal.: Cosi credo, quando altri ve lo posasse fermo; ma se gli fusse dato impeto verso qualche parte, che seguirebbe?

Sim.: Seguirebbe il muoversi verso quella parte.

Sal.: Ma di che sorte di movimento? di continuamente accelerato, come ne' piani declivi, o di successivamente ritardato, come negli acclivi?

Sim.: Io non ci so scorgere causa di accelerazione ne di ritardamento, non vi essendo ne declività ne acclività.

Sal.: Si. Ma se non vi fusse causa di ritardamento, molto meno vi dovrebbe esser di quiete: quanto dunque vorreste voi che il mobile durasse a muoversi?

Sim.: Tanto quanto durasse la lunghezza di quella superficie ne erta ne china.

Sal.: Adunque se tale spazio fusse interminato, il moto in esso sarebbe parimente senza termine, cioe perpetuo?

Sim.: Parmi di si, quando il mobile fusse di materia da durare.(31)

Nesta passagem está contida aquela que é considerada a formulação restrita do princípio de inércia: o princípio da persistência eterna do movimento à mesma velocidade. Neste ponto, Galileu não foi além da idéia de movimento que Buridan já havia concebido: a virtude impressa carregaria os corpos indefinidamente, removidos todos os impecílios. O passo adiante que Galileu dá em relação a Buridan, consiste na concepção do movimento como algo

incausado, isto é, o movimento não requer causa: motor ou força.

A concepção dessa nova idéia está ligada a relativização do movimento. Neste sentido Galileu realizou algumas experiências imaginárias, sendo uma delas a da pedra abandonada do mastro do navio, já idealizada por Bruno. A pedra cai ao pé do mastro estando o navio parado ou em movimento, pois,

> "o ímpeto com que se move o navio fica impresso indelevelmente na pedra, depois que ela é separada do mastro."(32)

O termo ímpeto não deve ser entendido aqui do mesmo modo que na teoria de Buridan, como a força que causa o movimento, mas como o próprio movimento que passa de um corpo a outro. O movimento é algo que persiste no ser <u>in se</u> e <u>per se</u> e não exige alguma causa ou força para tal persistência.

Para Galileu o que acontece no navio em movimento uniforme, também acontece na suferfície da Terra. A pedra volta ao ponto de lançamento, não conforme a concepção de Copérnico, por possuir um movimento natural em direção ao oriente, mas porque participa do movimento da Terra que fica indelevelmente na pedra, não enquanto movimento natural, mas simplesmente enquanto movimento.

Ainda, segundo Galileu a natureza do corpo não define a natureza do movimento. Um corpo pode ter vários movimentos independentes ao mesmo tempo. (Para Aristóteles, no lançamento de um projétil: primeiro acontece o movimento violento, na horizontal e depois o movimento natural, na queda). O movimento da Terra que fica impresso na pedra não interfere no movimento de queda, os dois acontecem ao mesmo tempo e, tudo se passa como se a Terra estivesse parada. A Terra e a pedra ou o navio e a pedra formam um mesmo sistema fisico, cujo movimento comum é indiferente aos movimentos relativos dos corpos que participam do sistema.

O princípio de inércia compreende o conceito de persistência do movimento - conservação do movimento a mesma velocidade e direção - e que necessita da definição rigorosa de sistema de referência e torna significativo os termos: repouso, trajetória retilínea e movimento uniforme. O conceito de relatividade para Galileu está ligado à independência dos movimentos dos corpos de um mesmo sistema. Ele não chega a explorar a idéia de que o estado de repouso como o estado de movimento são dependentes do referencial. Essa idéia foi explorada posteriormente por Descartes. Por exemplo: um homem pode estar parado no sistema do navio e em movimento em relação ao porto. Deste modo fica mais fácil entender que o movimento uniforme não requer causa, assim como o repouso, para acontecer, não necessita da ação de forças. O homem sentado na proa do navio em movimento uniforme em relação à Terra não está sob a ação de alguma força que seja responsável pelo seu movimento.

Além do conceito de relatividade do movimento de Galileu estar relacionado somente ao conceito da independência dos movimentos , temos ainda que para ele o movimento inercial é circular: um corpo tende a permanecer em estado de movimento em uma superfície que tenha pontos equidistantes do centro da Terra, como a superfície de um mar tranquilo. Deste modo:

> "um navio... tendo recebido um impulso sobre um mar tranquilo, mover-se-ia em torno do nosso globo sem parar,... se todos os obstáculos ou impedimentos pudessem ser removidos."(33)

Segundo a visão atual num campo gravitacional o movimento inercial acontece em linhas geodesicas devido a força de atração gravitacional. Galileu não consegue livrar-se da experiência do senso comum e conceber o movimento inercial em linha reta. Ele teve motivos para pensar assim. O dogma da circularidade fazia-se presente em seu pensamento. Mesmo tendo conhecimento das leis de Kepler,

ele tomou os movimentos orbitais como circulares. No primeiro dia de diálogo, Salviati diz o seguinte:

> "Podemos concluir racionalmente, parece-me, que a condição suficiente para manter uma ordem perfeita entre as partes do Mundo é a de que os corpos móveis se movam circularmente... pois somente o repouso e o movimento circular são aptos a conservação da ordem."(34)

3.4.2 - A Causa da Gravidade e a Lei de Queda Livre

Galileu, assim como Aristóteles, dividiu os movimentos em "natural " e "violento", no entanto, atribuindo-lhes significados diferentes dos aristotélicos. Esta divisão está baseada na experiência imediata, o movimento natural é o movimento espontâneo como o da queda livre de uma pedra, já no movimento violento ou forçado o corpo recebe uma ação externa, como o lançamento de projéteis. O significado de "natural" não está ligado a natureza ou a essência do corpo, o corpo não tem qualidades como leveza ou gravidade. Para o jovem Galileu, o peso ou a gravidade era uma fonte de movimento, entretanto, na física do "Diálogo" tal não acontece. Galileu se recusa a ver na gravidade uma qualidade "natural" dos corpos, e se recusa igualmente a ver a gravidade como uma fonte , ou causa do movimento para baixo, simplesmente pelo motivo de não saber o que ela é. Para ele a gravidade não é outra coisa que a tendência dos corpos se dirigirem para o centro da Terra.

A experiência cotidiana nos mostra que os corpos caem. Galileu para por aí. A causa desse movimento não é conhecida. Dizer que tal causa é a gravidade, o peso, ou uma tendência para o centro da Terra, consiste apenas em dar um nome ao desconhecido, não é uma explicação. Assim, diante da objeção de Simplício de que todos sabem que a causa da gravidade é o peso, Salvarati responde:

"Vós errais... Sr. Simplício, vós disseste que todo mundo sabe que a chamamos pêso. Ora eu não pedi o nome, mas a essência da coisa: desta essência você não sabe, mais que você sabe sobre a essência do princípio do movimento circular das estrelas, salvo o nome que lhe damos."(35)

Para Galileu a qualidade "essencial" ou "natural" de um corpo corresponde às coisas que sem as quais o corpo não pode ser pensado. Ele diz:

"Ao conceber uma matéria ou substância corporal, eu me sinto impelido pela necessidade de conceber ao mesmo tempo que ela é finita e figurada desta ou daquela figura, que ela é em comparação com outras, grande ou pequena, que está neste ou naquele lugar, que ela se move ou está parada,que ela toca ou não outro corpo, que ela é uma, poucas ou muitas e, qualquer que seja o esforço de imaginação não consigo separá-las dessa condição..."(36)

Para Galileu as propriedades essenciais de um corpo são as propriedades matemáticas: forma, número e movimento. O objeto de estudo de Galileu são essas propriedades essenciais, das quais a "gravidade" ou o "peso" não fazem parte; neste sentido a busca da essência da gravidade, do peso ou da causa do movimento de queda não fazem parte de seu estudo.

Na sua obra: "Discursos Sobre Duas Novas Ciências" (1638), também escrita na forma de diálogos entre os mesmos interlocutores, Sagredo levanta a questão sobre a causa da aceleração do movimento natural dos graves, e Salvati responde da seguinte maneira:

"Não me parece ser este o momento oportuno para empreender a investigação da causa da aceleração do movimento natural, a respeito da qual vários filósofos apresentaram diferentes opiniões, alguns reduzindo-a à aproximação do centro; outros, à

redução progressiva das partes do meio que falta a serem atravessadas; outros ainda, a certa extrusão do meio ambiente o qual, ao fechar-se por detrás do móvel, vai pressionando e projetando o móvel continuamente. Estas fantasias, e muitas outras, conviria serem examinadas e resolvidas com pouco proveito. Por ora, é suficiente ao nosso autor que entendamos que ele quis investigar e demonstrar algumas propriedades de um movimento acelerado (qualquer que seja a causa da aceleração)"(37)

Galileu não questiona sobre a causa da gravidade, ele não pretende saber "porque" os corpos caem, mas somente busca saber "como" caem, procurando comparar as proporções das grandezas matemáticas envolvidas no fenômeno de queda. No início da Terceira Jornada de conversação do "Discurso", onde trata do movimento, Galileu esclarece a nova forma de tratamento que dará ao movimento:

"Vamos expor nova ciência a respeito de um tema muito antigo. Não existe na natureza nada anterior ao MOVIMENTO e, com referência a ele, não poucos e pequenos volumes foram escritos pelos filósofos; apesar disso muitas propriedades dignas de serem conhecidas não foram até o momento nem observadas nem demonstradas. Observaram-se algumas mais simples, como, por exemplo, que o movimento natural dos graves em queda livre se acelera continuamente; porém, não foi demonstrado até o momento a proporção segundo a qual se produz sua aceleraão. Também não foi demonstrado, que eu saiba, que um móvel, que cai a partir do repouso, percorre em tempos iguais espaços que mantém entre si a mesma proporção que têm os números ímpares sucessivos a partir da unidade."(38)

Relacionar a variação das grandezas físicas envolvidas no fenômeno, tal como vemos acima na formulação da lei de queda livre, é o objetivo da nova ciência de

Galileu. Deixando de lado a investigação das causas ele procura descobrir as leis matemáticas que regem os fenômenos.

O pensamento galileano é permeado por um certo mito: que o Mundo complexo dos sentidos (irreal) tem por trás um Mundo simples, (real) regido por algumas leis físicas universais. Conhecer essas leis significa conhecer o Mundo. Essas leis naturais são passíveis de serem traduzidas na linguagem matemática por meio de cálculos, e medidas através da experiência. Ilya Prygogine, comentando sobre esse mito, diz o seguinte:

> "Galileu e seus secessores pensam a ciência como capaz de descobrir a verdade global da natureza. Não somente a natureza é escrita numa linguagem matemática decifrável pela experimentação, como essa linguagem é única; o mundo é homogêneo: a experimentação local descobre uma verdade geral. Os fenômenos simples que a ciência estuda podem desde logo entregar a chave do conjunto da natureza, cuja complexidade não é mais que aparente: o diverso reduz-se à verdade única das leis matemáticas do movimento."(39)

Diante desta concepção do Mundo simples: - das formas, dos números e dos movimentos - começa a crescer o pensamento de que a ciência não deve ter por objeto o mundo qualitativo: das essências e das causas, e começando a prevalecer uma postura positivista, da descrição do mundo unicamente por meio de leis matemáticas.

4 - Iluminismo

4.1 - Rene Descartes

Rene Descartes (1596-1650) não teve como Galileu preocupações em combater as doutrinas tradicionais, para ele tais doutrinas já estavam mortas e enterradas. Ele partiu

logo para construir uma nova física, mas, para tanto, teve a preocupação em elucidar o "método" de aquisição dos verdadeiros conhecimentos do Universo. Descartes preferiu não confiar nos sentidos, por considerá-los enganosos; é pelo uso da razão que devemos chegar aos princípios fundamentais do Universo. Ele construiu seu Mundo procedendo a priori, concebendo racionalmente as causas primeiras para depois chegar aos fenômenos (efeitos). Criticou Galileu com suas novas atitudes, dizendo:

> "sem ter feito considerações sobre a causa primeira da Natureza, (Galileu) procurou por razões para certos efeitos particulares, assim ele construiu sem fundação".(40)

O princípio fundamental do Universo cartesiano deriva da perfeição e imutabilidade divina: a lei de conservação. Deus quando criou o Mundo o fez por meio de duas substâncias: a matéria e o movimento que desde a criação têm suas quantidades conservadas, isto é, não aumentam nem diminuem.

A matéria tem como propriedade essencial somente a extensão, sobre isso Descartes afirma: "não é o peso, nem a dureza, nem a cor que constituem a natureza do corpo, mas somente a extensão".(41) Matéria e extensão são para Descartes a mesma coisa e, desta identificação concluiu que o vazio não existe. Para ele o vazio não só é fisicamente como também essencialmente impossível. O espaço não existe independentemente da matéria, do mesmo modo que não existe matéria sem extensão. Ele diz:

> "E como do fato simples de que um corpo estende-se em comprimento, largura e profundidade temos razão para concluir que ele é uma substância, porquanto concebemos não ser possível que aquilo que é nada tenha extensão, devemos concluir o mesmo do espaço que se supõe vazio: a saber, que como existe nele alguma extensão, existe também necessariamente alguma substância.(42)

Uma segunda consequência da identificação espaço-matéria consiste na rejeição da idéia de finitude do Universo, pois, ao atribuirmo-lhe fronteiras, pensamos além dela uma extensão e, "a idéia de tal extensão em tal espaço é obviamente idêntica à própria idéia que devemos ter do corpo."(43)

É neste Universo infinito (Descartes prefere chamar indefinido) e cheio de matéria que devemos compreender o MOVIMENTO, a outra substância primordial que Deus colocou no Mundo, mesmo antes de criar os corpos, pois, graças ao movimento as coisas existem, é ele que subdivide a matéria extensa ao infinito (o que "concebemos ser verdadeiro" sem poder "compreender", Princípios I, 34), e dessa atuação resulta a multidão de corpos e fenômenos no Universo.

Tendo o movimento uma realidade independente e, havendo uma quantidade de movimento constante no Mundo, Descartes não necessita deter-se nas causas dos movimentos dos corpos, assim ele se explica:

> "Eu não me detenho à procurar a causa de seus movimentos: basta pensar, que eles começaram movimentar-se no mesmo instante que o Mundo começou existir. E assim sendo, eu acho por minhas razões, que é impossível que seus movimentos cessem jamais, nem mesmo quando mudam de sujeito. Quero dizer que a virtude ou a potência de mover a si mesmo, que se encontra num corpo pode passar toda ou parte para um outro... Entretanto, vós podeis imaginar, se lhes parece, como fazem a maior parte dos doutores, que há um Primeiro Motor, rodando ao redor do Mundo com uma velocidade incompreensível, que é a origem e a fonte de todos outros movimentos que aí se encontram."(44)

O Primeiro Motor de Descartes tem um papel diferente do que tinha para Aristóteles, ele cessa sua

função no ato da criação do Mundo. Graças à conservação da quantidade de movimento colocada por Deus, no Mundo, este se mantém em movimento, obedecendo certas regras.

A primeira das regras corresponde ao movimento inercial: "cada parte da matéria, em particular, continua sempre em um mesmo estado de movimento, até que o encontro com outros a force mudar...".(45)

Um corpo num certo estado de movimento, só sai deste estado por meio de uma ação externa. Notemos bem, no Mundo Cartesiano não há a entidade força, como vemos no Mundo de Kepler e veremos no de Newton. Para Descartes as explicações têm que ser feitas por meio de ações compreensíveis e inteligíveis, como o contato e o choque. Assim, a mudança de estado de um corpo terá que ser explicada pelo contato e choque, respeitando a seguinte regra:

> "Quando um corpo empurra outro, ele não pode conferir ao outro algum movimento sem que ao mesmo tempo perca parte do seu, nem aquele tome dele mais que seu movimento é aumentado".(46)

A terceira regra trata da direção do movimento inercial. Para Descartes o movimento inercial, sem dúvida alguma, é retilíneo, entretanto, como o seu Mundo é cheio de matéria sem o vazio algum, quem define a direção do movimento é o conjunto das partes. Ele diz:

> "Eu acrescentei como terceira (regra): que quando um corpo se move, ainda que seu movimento aconteça mais frequentemente em linha curva, e não pode ser outro que circular em algum grau,..., entretanto, cada uma de suas partes tende a continuar o seu (movimento) em linha reta. E assim, sua ação, quer dizer a inclinação que eles possuem para mover-se é diferente de seu acontecimento".(47)

A partir dos princípios fundamentais e das regras do movimento, alcançados pela razão, Descartes concebe seu Mundo cheio de turbilhões ou vórtices no "plenum" de

matéria. O Sol estaria no centro de um desses turbilhões, com toda a matéria interplanetária girando em torno dele, permanentemente, em virtude da conservação do movimento, e conforme as regras acima.

Se a explicação do movimento planetário flui facilmente dos seus princípios, o mesmo não ocorre com o movimento de queda livre dos corpos na superfície da Terra. Logicamente a explicação não deve ser feita por meio de "Forças", mas por meio de contatos e choques devidos ao movimento vortical criado pela Terra. Descartes assim explica:

> "But I desire now that you consider what the gravity of this earth is, that is to say, the force wich unites all its parts, and wich makes them all tend toward its center, everyone more or less according as they are more or less large and solid; wich is nothing else and consists only in this, that the partes of the small heaven wich surrondes it, turning much more swiftly than its own do around its center, tend also wich much more force to withdraw themselves from it, and consequently push then back there".(48)

Segundo essa idéia, as partículas do limite do vórtice, girando a uma velocidade muito maior que as do centro, tendem a sair pela tangente, pressionando as partículas do éter externo ao vórtice. Esta pressão é retransmitida para dentro do vórtice, causando a queda dos corpos.

A explicação cartesiana sobre a gravidade suscita muitas dúvidas. No caso do fenômeno magnético torna-se ainda mais complicada, pois, além da aproximação, temos que explicar o afastamento através do meio que circunda os corpos.

4.2 - Isaac Newton (1642-1727)

4.2.1 - A Atração Gravitacional Universal

A idéia de atração entre corpos semelhantes tinha sido lançada por Platão e acabou sendo esquecida por vários séculos, quando então prevaleceu a tese do lugar natural para a explicação da queda dos corpos. Kepler, em sua teoria, retoma a idéia de atração entre semelhantes. Para ele duas pedras colocadas no espaço, fora do campo de ação de uma terceira, atraem-se mutuamente, com uma força proporcional à grandeza dos corpos respectivos. A Terra agiria sobre a Lua e vice-versa, devendo haver uma força "animal ou de uma outra natureza que se não a retivesse sobre sua órbita", a lua aproximaria-se da Terra, ou mais exatamente, se encontrariam a meio caminho.

Embora Kepler tenha conseguido a façanha de romper com o mito da circularidade, ele não conseguiu superar algumas idéias da doutrina tradicional. Para ele não havia atração gravitacional entre o Sol e os planetas, por serem corpos de natureza diferentes. Influenciado pela obra "De Magnete" de Gilbert ele propôs uma ação magnética do Sol sobre os planetas que não deve ser entendida como uma ação de puxar, uma atração. Notemos que Kepler desconhecia o conceito de inércia e não considerava o efeito centrífugo do movimento orbital, por isso, não pensou numa força centrípeta para contrabalançá-la. A ação magnética do vórtice formado pelo Sol compreende o sentido de transmissão de movimento. O Sol não era para ele um centro de gravitação.

Para Kepler a transmissão da ação fazia-se por meio de uma espécie imaterial, análoga à luz e a força magnética. A ação enfraquecia-se com a distância, o que explica o movimento mais lento dos planetas mais distantes do Sol. Kepler sabia que a intensidade da luz variava inversamente com o quadrado da distância da fonte.

Entretanto, não chegou a propor a mesma proporção para a força motriz, pois, preso ao conceito aristotélico de que a força produzia velocidade em vez de aceleração, e sabendo que as velocidades orbitais no afélio e no periélio eram inversamente proporcionais à distância, acabou propondo que a força motriz enfraqueçia-se nesta proporção, isto é, o inverso da distância, e não ao quadrado da distância.

Ismael Bouillaud(49) discordou de Kepler que espécie motriz se propagasse uniformemente e propôs que tal como a luz, ela seguisse a razão do inverso do quadrado da distância.

Por outro lado, Borelli(50) por volta de 1665, aceitando a lei de inércia, compreendeu que era necessário haver uma força centrípeta para contrabalançar a força centrífuga, mantendo o planeta em sua órbita. Borelli não fez consideração sobre a distância, pois como "bom Galileano", considerou a força centrípeta como uma tendência interna ao corpo e, assim sendo, independente da distância.

Por sua vez, Newton partiu do suposto que os planetas giram em torno do Sol e são retidos por forças centrípetas que contrabalançam exatamente as forças centrífugas geradas por seus movimentos. Newton não questionou a natureza dessas forças, somente procurou avaliar suas intensidades. Para tanto, primeiro procurou determinar as forças centrífugas e depois por meio das leis de Kepler, as forças centrípetas.

O cálculo resultou na lei de atração: os planetas são "atraidos" pelo Sol na razão inversa do quadrado das distâncias relativas ao Sol. Depois disto, procurou comparar a força necessária para reter a Lua em sua órbita com a força da gravidade sobre os corpos na superfície da Terra, chegando a conclusão que eram idênticas. Newton não tinha acabado a Universidade quando chegou a essas conclusões. Ele disse:

> "E no mesmo ano (1666), comecei a pensar que a gravidade se estenderia até a órbita da Lua....,

deduzi que as forças que conservam os planetas em suas órbitas deveriam (variar) reciprocamente com os quadrados de suas distâncias ao centro em redor dos quais giram e, então, comparei a força requerida para manter a Lua em sua órbita com a força da gravidade na superfície da Terra e encontrei que resultavam quase exatas".(51)

Em realidade a confirmação da identidade entre a gravidade e a atração celeste foi feita a grosso modo, pois, Newton não conhecia nesta época a lei de atração entre uma esfera e um corpo próximo a ela, nem o valor exato da aceleração (g), e nem mesmo as dimensões exatas da Terra. A concordância era de tal modo grosseira, que ele não excluiu a possibilidade de existir uma força de gravitação própria da Terra juntamente com a força de atração celeste.(52)

Newton não foi o único nesta época a pensar na força de atração entre o Sol e os planetas. Alguns contemporâneos seus: Wrem, Halley e Hook também chegaram à conclusão que a força de atração é proporcional ao inverso do quadrado da distância. Entretanto todos depararam-se diante de um problema: a dedução da trajetória elíptica a partir da lei de atração. A dedução da lei tinha sido feita tomando as órbitas dos planetas como sendo circulares.

Newton somente conseguiu solucionar este problema quinze anos depois de suas primeiras descobertas. Hooke enviou-lhe uma carta datada de 6 de janeiro de 1680, onde, entre outras coisas, fez a observação que a trajetória curva dos planetas devesse ser explicada como resultado de uma deflexão de um movimento inercial por uma força central (atrativa). Levando em consideração esta observação concluiu que a segunda lei de Kepler, a lei das áreas, caracterizava todo movimento inercial submetido a uma força central, e que se a força central fosse inversamente proporcional ao quadrado da distância, o movimento resultante poderia ser uma secção cônica, um círculo, uma parábola ou uma elípse. Nesse caso, a força seria dirigida para um dos focos e,

inversamente, se um corpo - assim como fazem os planetas - descrevesse uma elípse ele estaria submetido a uma força dirigida para um dos focos da mesma, e inversamente proporcional ao quadrado da distâcia.

No ano de 1685 conseguiu concluir a lei de atração de uma esfera (a Terra) sobre um corpo colocado fora dele, como se toda sua massa estivesse concentrada em um ponto no seu centro. Para chegar a esse resultado precisou desenvolver o cálculo diferencial integral. Feito isto, considerando medidas mais precisas da dimensão da Terra feitas por Picard e do valor da aceleração gravitacional na superfície terrestre feitas por Huygens, Newton, pode concluir de forma precisa pela identidade entre a gravitação terrestre e a atração cósmica.(53)

4.2.2 - O Significado da Força de Atração Gravitacional

O título da obra de Newton: "Princípios Matemáticos de Filosofia Natural", reflete a forma de tratamento que dá aos problemas físicos. Na primeira edição dessa obra, em vez de discutir a natureza dos fenômenos, o significado da força de atração, ele apenas deu um tratamento matemático ao assunto, deixando as questões filosóficas de lado. Newton inicia sua obra, dando definições de massa, tempo e espaço e, em seguida enuncia as três leis do movimento: 1)lei de inércia, 2) lei da força, 3) lei de ação e reação. Baseado nessas definições e leis passou a tratar os fenômenos matematicamente.

A lei de inércia tornou falso o problema, ou o questionamento sobre a causa do movimento, pois, um corpo pode permanecer em estado de movimento sem que haja necessidade de uma causa, força ou motor, para que continue indefinidamente. Entretanto, a física newtoniana continua sendo causal, pois, para modificar o estado de movimento variando a velocidade ou a direção, é necessário o concurso de forças, tornando-se cabível um questionamento sobre a

natureza da força ou sobre as causas de mudança do estado de movimento.

No caso da força de atração gravitacional, a coisa complica-se, pois, supõe-se que haja uma ação à distância entre os corpos e, pior ainda, ela transmitiria-se pelo vazio. Para Newton o vazio não somente é possível - o espaço sem matéria - como existe entre os planetas. A explicação da ação à distância é ininteligível. Racionalmente não podemos conceber que um corpo possa agir sobre outro, estando separados, alguma comunicação tem que haver entre eles.

Antes da publicação do "Princípios Matemáticos", Newton procurou explicar a gravidade através da ação do meio - o eter - circundante entre os corpos. Numa carta de 1678, destinada a Robert Boyle, ele fez algumas conjecturas sobre a natureza da gravidade:

> "Eu irei dar mais uma conjectura,... sobre a causa da gravidade....Para este propósito vou supor o éter consistir de partes diferentes em sutileza por infinitos graus: nos poros dos corpos há menos éter mais grosso em proporção ao éter mais fino nos espaços interiores, e consequentemente, num grande corpo como a Terra, a partir de sua superfície para o centro, o éter fica mais fino que nas regiões do ar. Imagine, agora, um corpo suspenso no ar, e o éter sendo mais grosso nos poros que estão na parte superior do corpo, que na parte inferior, então, sendo o éter grosso menos apto para ser alojado nesses poros, que o éter fino abaixo, o éter grosso esforçará para sair dando caminho ao éter fino abaixo, o que não pode acontecer sem que os corpos desçam".(54)

Nesta mesma carta, Newton fez o seguinte comentário sobre essas conjecturas:

> "...minhas noções sobre coisas desse tipo são tão indigestas, que eu não estou satisfeito com elas".

Newton sabia que as explicações mecanicistas à base do contato e choque criavam mais problemas do que solucionavam. Para ele o Universo cartesiano tenderia ao repouso. Por outro lado, não aceitava a explicação de ação à distância. Newton aprendeu com Galileu que para estudar os fenômenos e tratá-los matematicamente não era necessário saber claramente como certos efeitos são produzidos. Partiu da suposição que existiriam forças e que estas atuariam segundo leis matemáticas. Fossem físicas ou metafísicas as forças, deixou a questão de lado.

Usando expressões como "atração mutual" ou "atração mútua entre corpos", e não esclarecendo o significado de atração, Newton levou os leitores da primeira edição (1687) do "Princípios Matemáticos", ao entendimento de que estava propondo haver uma ação à distância entre os corpos e, que a gravidade fosse inerente aos corpos. A posição de Newton quanto a essa interpretação é clara. Em cartas a R.Bentley ele nega abertamente tais concepções:

> "Falais às vezes da gravidade como essencial e inerente à matéria. Rogo-vos não atribuir a mim essa noção, pois a causa da gravidade é coisa que não pretendo conhecer e portanto gostaria de considerar mais a fundo."(55)

Em outra carta:

> "É inconcebível que a matéria bruta inanimada, sem mediação de alguma outra coisa que não seja material, possa atuar sobre uma outra matéria e a afetar sem contacto mútuo, como deveria acontecer se a gravitação, no sentido de Epicuro, lhe fosse essencial e inerente. E essa é uma razão pela qual desejaria que não me atribuísseis a gravidade inata. Que a gravidade seja inata, inerente e essencial à matéria, de modo que um corpo possa agir sobre outro à distância através de um vácuo, sem a mediação de qualquer outra coisa pela qual essa ação e essa força seja comunicada de um a

outro, é para mim absurdo tão grande que creio que nenhum homem, por menos versado que seja em assunto de filosofia possa jamais sucumbir a ele. A gravidade deve ser causada por um agente que age continuamente, segundo certas leis, mas se esse agente é material ou imaterial é coisa que deixei à consideração de meus leitores."(56)

Na segunda edição (1713) dos "Princípios Matemáticos", Newton acrescentou alguns tratados filosóficos onde trata da questão da atração:

"Sirvo-me aqui da palavra atração para exprimir de maneira geral o esforço que fazem todos os corpos para se aproximar uns dos outros, quer esse esforço seja efeito da ação dos próprios corpos, que se procuram mutuamente, ou que se agitam uns aos outros por emanação de espíritos, quer seja efeito da ação do éter ou do ar, ou de qualquer outro meio, corpóreo ou incorpóreo, que de uma maneira qualquer impila uns aos outros corpos aí colocados. Emprego a palavra impulsão no mesmo sentido geral, não definido neste tratado a espécie ou as qualidades físicas das forças, mas investigando as quantidades e proporções matemáticas delas, como já observei nas definições. É pela matemática que devemos investigar as quantidades dessas forças e suas proporções, que seguem condições quaisquer que tenhamos suposto; em seguida, ao entrarmos na física, comparamos essas proporções com os fenômenos da Natureza, a fim de conhecer quais são as leis das forças que se relacionam a cada gênero de corpo atrativo. E tomada essa precaução, podemos argumentar com mais segurança a respeito das forças, suas causas e suas explicações físicas".(57)

Como vimos, Newton não fornece uma explicação física para o conceito de atração, eximindo-se de tal tarefa, mas nem por isso ficou sem ser duramente criticado pelos seus opositores, que consideraram a atração newtoniana uma qualidade oculta, uma causa mágica agindo à distância e até um efeito milagroso, pois, o que não pode ser explicado naturalmente, por meio de agentes físicos, mas por meio de agentes incorpóreos, imateriais e espirituais, constitue-se um milagre.

Uma das maneiras de Newton defender-se de seus opositores foi a de apelar ao carater experimental da ciência. Ele atacou a física cartesiana por imaginar hipóteses, como os turbilhões, sem o respaldo da experiência. Nestas críticas acabou cunhando uma frase que encontramos em várias partes de seus tratados filosóficos, e que tornou-se famosa: "Hypotheses non fingo" - que pode ser entendida como: "eu não imgino hipóteses". Queria dizer com isso que não fazia hipóteses que não estivessem ligadas à experiência. No esclarecimento final do tratado filosófico que acrescentou à segunda edição, Newton diz o seguinte:

> "Até aqui explicamos os fenômenos dos céus e de nosso mar pelo poder da gravidade, mas ainda não determinamos a causa desse poder. É certo que ele deve proceder de uma causa que penetra até os próprios centros do Sol e dos planetas, sem sofrer a menor diminuição de sua força; ...e propaga sua virtude para todos os lados, até distâncias imensas, diminuindo sempre na razão inversa do quadrado das distâncias... Mas até aqui não fui capaz de descobrir nos fenômenos a causa dessas propriedades da gravidade, e eu não imagino hipóteses; pois tudo quanto não é deduzido dos fenômenos deve ser chamado de hipótese; e as hipóteses, quer metafísicas, quer físicas, quer mecânicas, quer de qualidades ocultas, não têm lugar na filosofia experimental. Nessa filosofia,

as proposições são inferidas dos fenômenos, e depois generalizadas por indução. Foi assim que se descobriram a impenetrabilidade, a mobilidade e a força impulsiva dos corpos, bem como as leis do movimento e da gravitação. E para nós basta que a gravidade realmente exista, e que atue segundo as leis que acabamos de expor, e que ela seja capaz de explicar à sociedade todos os movimentos dos corpos celestes, e os de nosso mar."(58)

A filosofia a que Newton referia-se não foi por ele descoberta, como foi o caso do cálculo diferencial integral. Tão pouco foi uma invenção de Galileu, esta filosofia já havia sido elaborada no século XIII.(59)

Apelar para a filosofia experimental que adota como princípio fundamental que "as proposições são inferidas dos fenômenos, e depois generalizadas por indução", foi uma maneira que Newton encontrou para escapar do problema de explicar o significado da força de atração. Ele passou da defensiva para a ofensiva, dizendo que a física de seus opositores era feita em cima de hipóteses imaginadas, tais como supor fluidos sutis ocupando o espaço, cujo movimento seria responsável pelos fenômenos observados. Como da observação dos fenômenos não se pode inferir nada sobre a natureza da gravidade, e como não imaginava hipóteses, Newton adota uma atitude positivista, deixa de lado a investigação sobre o modo de produção do fenômeno, deixando de buscar uma explicação causal sobre a realidade, para adotar somente uma explicação positivista da natureza: a descrição por meio de leis matemáticas. Deste modo, Newton fez o casamento da filosofia experimental com o positivismo.

O sucesso da física newtoniana acabou carregando junto consigo esta filosofia e, em parte vem daí as influências que sofre nosso ensino de física. Mas, atentemos para a questão da descoberta da força de atração gravitacional universal. A lei de inércia não foi inferida de nenhuma experiência, ela foi produto da predominância da

razão sobre a experiência ingênua. A idéia de uma força centrípeta encurvando a trajetória dos planetas, tampouco foi algo tirado da experiência, conforme opinião da A.Koyré: "a suposição da existência nos corpos de uma certa força que lhes permita atuar sobre os outros corpos e atraí-los não é uma hipótese. Não é sequer uma hipótese que faça uso de qualidades ocultas. É um absurdo puro e simples."(60)

Convém ressaltar também que Newton não é um positivista tão convicto. Além de cientista genial, ele possui uma outra faceta de ser muito místico. Ele acreditava que Deus estivesse literalmente onipresente no espaço. Os filósofos neoplatônicos de sua época identificavam o espaço à Deus. Joseph Raphson, por exemplo, elaborou uma lista das propriedades do espaço: incorpóreo, imutável, uno, eterno, infinito, perfeito e outras qualidades que normalmente são consideradas características divinas. Por meio desta identificação podemos explicar a atividade da matéria pela onipresença de Deus. Ao comentar os fenômenos da natureza, Newton pergunta:

> "E sendo as essas coisas corretamente consideradas, não se deduzirá, devido aos Fenômenos, que existia um Ser incorpório, vivo, inteligente, onipresente, que está no Espaço infinito, como se estivesse em seu sensorium, vê as coisas intimamente, percebe-as inteiramente e as compreende perfeitamente pela presença imediata delas em si mesmo?(61)

Comentando a ordem na natureza, a qual não pode ser

> "...efeito de nada senão da Sabedoria e Conhecimento de um poderoso Agente eterno, que estando em todos os Lugares, é mais capaz de, por sua Vontade, mover os Corpos dentro de seu ilimitado Sensorium uniforme, e assim formar e reformar as Partes do Universo, que podemos nós,

por nossa Vontade, mover as partes de nossos próprios corpos."(62)

A explicação da gravitação pela ação de Deus, identificado ao espaço, apesar de teológica, apontava para o caminho certo, Einstein duzentos anos mais tarde explicou a gravidade como uma interação entre o espaço e a matéria.

5 - Referências Bibliográficas

(1) M. Jammer, "Concepts of Force", Harvard University Press, 1957, p. 24.

(2) M. Rocha e Silva , "A Evolução do Pensamento Científico", Ed. de Humanismo, Ciência e Tecnologia - Hucitec, São Paulo, 1972, p. 73.

(3) W. Heisenberg, "Física e Filosofia", Ed. Univ. de Brasília, 1981, p. 32.

(4) J.P. Collete, "História de las Matemáticas", Siglo Veinteuno Editores, México, 1986, p. 76.

(5) B. Russell, "Novo Conhecimento do Mundo Exterior", CIA Editora Nacional, São Paulo, 1966, p. 123.

(6) ref. 5, p. 124.

(7) R. Havemann, "Dialética Sem Dogma", Ed. Zahar, Rio de Janeiro, 1967, p. 64.

(8) ref. 7, p. 65.

(9) ref. 3, p. 33.

(10) K. Popper, "The Nature of Philosophical and Their Roots in Science", . 75.

(11) Platão, "Timeu e Crítias ou A Atlântida", Ed. Hemus, São Paulo, p. 119.

(12) ref. 11, p. 126.

(13) ref. 3, p. 35.

(14) ref. 11, p. 117.

(15) ref. 11, p. 81.

(16) Aristóteles, "Physique", Sociétê D'Edition Les Belles Lettres, Paris, 1952, p. 28, 184a, volume I.

(17) ref. 16, p. 65, 194 b 23.

(18) ref. 16, p. 125, Volumo II

(19) Aristóteles, "Traité Du Ciel", Librairie Philosophique J. Vein, paris, 1949, p. 113.

(20) J.F. Charon, "Cosmologia - Teorias Sobre o Universo", Ediciones Guadarrama S.A, Madrid, 1969, p. 51.

(21) J. Piaget e R. Garcia, "Psicogénesis e História de la Ciência", Siglo Veinteuno Editores, México, 1986, p. 52.

(22) ref. 1, p. 70.

(23) citado em P. Lucie, "A Gênese do Método Científico", Ed. Campus Rio de Janeiro, 1978, p. 79.

(24) ref. 23, p, 81.

(25) citado em A. Koiré, "Do Mundo Fechado ao Universo Infinito", Ed. Univ. de São Paulo, 1979, p. 38.

(26) G. Arcidiaco e outros, "Il Principio de Inércia Nella Mecanica Classica", Storia Della Física, Franco Angeli Editore, p. 95.

(27) ref. 23, p. 107.

(28) ref. 23, p. 111.

(29) citado em A. Koyré, "Études Galiléennes", Hermann Éditeurs, Paris, 1939, p. 191.

(30) ref. 23, p. 115.

(31) ref. 26, p. 92, 93, 94.

(32) ref. 26, p. 95.

(33) ref. 23, p. 133.

(34) ref. 23, p. 133.

(35) citado em A. Koyré, "Estudos Galilaicos", Publicação Dom Quixote, Lisboa, 1986, 302.

(36) ref. 35, p. 304.

(37) Galileu Galilei, "Duas Novas Ciências", Nova Stella Editorial, São Paulo, p. 131.

(38) ref. 37, p. 121.

(39) J. Prigogine e J. Stengers, "A Nova Aliança", Ed. Univ. de Brasília, 1984, p. 32.

(40) citado em W.A. Wallace, "Causality and Scientif Explanation", The University of Michigan Press, 1974, p. 6.

(41) ref. 25, p. 101.

(42) ref. 25, p. 103.

(43) ref. 25, p. 104.

(44) ref. 35, p. 400.

(45) ref. 35, p. 404.

(46) ref. 35, p. 405.

(47) ref. 35, p. 409.

(48) ref. 1, p. 105.

(49) A. Koyré, "Etudes Newtoniennes", p. 17.

(50) ref. 49, p. 17.

(51) Resnick e Halliday, "Física", Parte I, Ao Livro Técnico S.A., Rio de Janeiro, 1970, p. 406.

(52) ref. 49, p. 19.

(53) ref. 49, p. 22.

(54) ref, 1, p. 135.

(55) ref. 25, p. 170.

(56) ref, 25, p. 170.

(57) ref. 25, p. 169.

(58) ref. 25, p. 214.

(59) ref. 21, p. 61.

(60) ref. 25, p. 215.

(61) ref. 25, p. 197.

(62) ref. 25, p. 206.