



Instituto de Física
Universidade de São Paulo

**A ORIGEM DO UNIVERSO E OS
FUNDAMENTOS DA FÍSICA TEÓRICA E
DA MATEMÁTICA**

FERNANDES, NORMANDO CELSO

Publicação IF - 1321/98

PUBLICAÇÕES

IFUSP/P-1321

**A ORIGEM DO UNIVERSO E OS FUNDAMENTOS DA FÍSICA
TEÓRICA E DA MATEMÁTICA**

NORMANDO CELSO FERNANDES
Instituto de Física, Universidade de São Paulo

Novembro/1998

A ORIGEM DO UNIVERSO E OS FUNDAMENTOS DA FÍSICA TEÓRICA E DA MATEMÁTICA

NORMANDO CELSO FERNANDES

IFUSP

“ Nel mezzo del cammin di nostra vita
Mi ritrovai per una selva oscura...”

“ La Divina Commedia “
Inferno , c.1, v. 1 e
Bibl. Class. Illustrata

§ 1 – INTRODUÇÃO

Este pretende ser um trabalho de indagação e de proposições. Algumas das questões levantadas encontrarão justificativas plausíveis, enquanto que outras permanecerão sob o véu da dúvida, aptas para discussões posteriores. Dada a amplitude dos temas escolhidos para debates e críticas; iremos tentar dividir, do modo mais simples possível, os capítulos de cada assunto. Com a nossa formação de físico teórico, iremos pedir a indulgência do leitor quando, por obrigação, tivermos de fazer incursões em campos tão vastos e profundos como a matemática, a filosofia, a psicologia e a metafísica. Como não se trata de um trabalho histórico, as idéias e eventos citados aqui podem não apresentar uma sequência cronológica. Sobre todos os assuntos sobre os quais iremos tecer considerações existem inúmeras publicações mais especializadas, de modo que seria fastidioso citar uma bibliografia razoável. Como no decorrer do trabalho iremos abordar temas sobre a origem do Universo como um todo, faz-se mister que elucidemos claramente alguns dos enfoques que iremos utilizar no estudo de problema tão difícil. Em primeiro lugar, devemos notar que o método experimental da física usual não se aplica plenamente em astronomia e astrofísica, devido ao fato de não podermos interferir diretamente sobre os fenômenos que se apresentam diante de nós. Consequentemente, não podemos, como fazemos em física, repetir, controlar e planejar um experimento. Por esse motivo, consideramos a astronomia, de um modo geral, como uma ciência observacional e não experimental. Do ponto de vista teórico, também temos de extrapolar o nosso conhecimento, admitindo a universalidade das leis científicas válidas na terra, impondo sua validade para outros sítios galáticos, extra-galáticos e mais além. Por outro lado, não podemos deixar de reconhecer que os grandes avanços conquistados ultimamente pela ciência, tanto no campo da física, como na matemática, fazem com que efetueemos uma revisão drástica nos modelos cosmológicos vigentes, abrindo assim vários campos extremamente fascinantes para a ciência do século XXI. Esse fato deve estimular cada vez mais a curiosidade investigatória das novas gerações. Sempre foi um fato corriqueiro das ciências a verificação de desabamentos de teorias até então bem estabelecidas, com a necessidade de revisões e amplificações. Mas isso jamais se deu com a velocidade que constatamos neste fim de século. E é desejável que isso aconteça para o crescimento do nosso

conhecimento científico e, às vezes, para a reafirmação de certas teorias e idéias bem mais antigas que retornam mais revigoradas.

Finalmente, queremos deixar bem claro para o leitor que o título do trabalho não é pretensioso, como pode parecer. Na verdade, questionar a origem do Universo no qual vivemos, de um ponto de vista científico, exige a revisão de leis básicas da astronomia, da física e da matemática. As obras citadas por nós serão sempre as que estiveram em nossas mãos durante a elaboração de cada item. Outras opiniões relevantes nos foram, muitas vezes, comunicadas de forma verbal por mestres que muito contribuíram para nossa formação. Muito agradecemos a alunos e colegas. Mas, por um senso de justiça e gratidão, não poderíamos deixar de rememorar os ensinamentos fundamentais que recebemos de alguns grandes mestres e amigos como Mário Schoenberg, nosso físico teórico maior, com o qual tivemos a satisfação de conviver por mais de três décadas, sempre o considerando como a pessoa que mais nos influenciou em vida; como David Bohm que, com suas visões contraditórias da ciência e do mundo, nos incitou a buscar sempre os fundamentos da ciência; como César Lattes, que aprofundou em nós o desejo de sempre extrair mais de qualquer experimento científico e José Leite Lopes, o amigo que jamais deixou de nos encorajar a manter a garra que devemos sustentar diante de um problema. Da saudosa Faculdade de Filosofia da rua Maria Antônia, jamais deixaremos de mencionar os amigos, Florestan Fernandes, Fernando Azevedo, Sérgio Buarque de Holanda, Dante Moreira Leite, que fizeram o possível para alargar o nosso restrito horizonte intelectual.

§ 2 – IDÉIAS GERAIS SOBRE O UNIVERSO

“ Muitas vezes o certo é errado
e o errado é certo “

Mário Schoenberg – 1984
Simpósio – IFUSP

Existe uma confusão terminológica e conceitual sobre o nome da ciência que estuda o Universo de modo global. Talvez a definição mais simples e, por ser simples, é bastante rica, é a que encontramos no dicionário Aurélio [1] : COSMOGONIA - Sistema hipotético da formação do Universo. No decorrer deste trabalho o leitor vai verificar como é importante a presença do adjetivo hipotético nessa definição. Por outro lado podemos indagar como é formado esse sistema. Para tentar responder essa pergunta, consultamos a mesma página do dicionário e lemos : COSMOLOGIA – Ciência das leis gerais que regem o mundo físico. Se não nos satisfizemos com essas definições podemos, por exemplo, procurar em qualquer edição da Enciclopédia Britânica e encontraremos : COSMOLOGIA – Ramo do saber que estuda o Universo como um sistema ordenado.

Talvez o leitor, como nós, não fique satisfeito com essas definições e conceituações. Se isso ocorrer, podemos nos socorrer de diversos livros, de revistas, da Internet, etc., para tentar ampliar a nossa visão sobre o problema em questão. Depois de muito ler e pesquisar, nós, em especial, preferimos ficar com a introdução crítica do eminente astrofísico L. Gratton [2], publicada há cerca de trinta anos. Ele admite a ciência como uma atividade que cataloga os fatos e os descreve num esquema racional. Dessa maneira, podemos também fazer uma previsão dos fatos. Assim, tanto a cosmologia como a cosmogonia seriam partes da astronomia, que é a ciência mais vasta, aquela que estuda o maior sistema que as observações nos fornecem : o Universo no qual vivemos.

Prosseguindo nesse encadeamento de idéias, vemos que o Universo pode ser concebido como um imenso processo histórico do qual queremos apenas apreender as relações espaciais e temporais. Isso explica a denominação de HISTORIA UNIVERSALIS, adotada pelo autor. Fica claro que, desse estudo, fica excluída a história da vida, porque seu método de abordagem é de natureza diversa da utilizada aqui [3].

Considerada como Historia Universalis, vemos a grande importância religiosa e mística, desde tempos imemoriais, que variam de séculos a milênios, dentro da cosmologia. É difícil de localizar com precisão, os primeiros registros escritos das preocupações das antigas civilizações sobre a natureza do espaço, do tempo, dos objetos celestes, do vazio e de suas influências sobre a humanidade. Por conveniência, talvez nos fixemos na antiga civilização dos vedas, por haverem deixado, escritos em sânscrito, as suas reflexões, crenças e a consciência do Eu, do Universo e do Supremo [4]. Como continuação, podemos citar os Upanishads [5] que, por constituírem a parte final védica, acabaram exercendo grande influência sobre a filosofia grega, sobre o Judaísmo e sobre o Cristianismo dos primeiros tempos. A título de esclarecimento, citamos um trecho muito interessante dos Upanishads, que encontramos na página 94 :

“ No início havia a Existência, apenas Um, sem segundo. Alguns dizem que no início havia apenas a não-existência, e que dela nasceu o Universo. Porém, como poderia ser tal coisa? Como poderia a existência nascer da não-existência? Não, meu filho, no início havia apenas a existência – somente Um, sem que houvesse outro. Ele, o Uno, pensou : Serei muitos, expandir-me-hei. Assim, projetou o Universo a partir de si mesmo, e entrou dentro de cada ser e de tudo “

Pode parecer estranho que citemos esse trecho do texto. Mas ele é profundo e expressa uma preocupação com a não-existência, com o vazio e o nada. Pode ser que, com o passar do tempo e a evolução das idéias, tenha surgido na Índia um conceito que está ausente na cultura grega e nas subsequentes, que é a idéia do vazio e a correlata expressão aritmética do número zero [6] [7]. E o leitor já pode perceber a nossa intenção ao mencionar essas idéias, que podem representar um prenúncio, ao que iremos abordar mais tarde, de forma explícita, quando da análise dos fundamentos da ciência moderna [8].

Em especial, na teoria quântica de hoje, o vácuo (equivalente ao vazio comum) desempenha um papel fundamental, com a mais rica exploração conceitual.

E não é por acaso que recorremos a alguns textos de natureza mística e teológica. As mais recentes conquistas tecnológicas levaram os mais conceituados centros observacionais e os mais eminentes cosmólogos do mundo todo a reverem de forma radical os modelos mais tradicionais descritivos do Universo observável. O próprio conceito do nada reaparece nas modernas teorias de universos inflacionários dos dias de hoje, juntamente com a confirmação de novos objetos cósmicos [9].

Voltando à referência [8], podemos dizer que temos nesse livro uma discussão muito mais completa e competente do que a nossa, em especial, no relato da influência do pensamento chinês ou de outro povo oriental sobre a física, de modo geral. A importância desse livro é enorme, especialmente quando Capra discute a evolução dos conceitos da física moderna convencional. A nossa restrição a essa obra reside no apego do autor a certos conceitos muito ligados ao que se convencionou chamar de “ linha principal “ (é o que em língua inglesa se chama de *mainstream*) da física. Essa linha de trabalho, para nós, além de representar um resquício do pensamento escolástico, impede o surgimento de outras idéias altamente criativas e abrangentes, no que concerne aos fundamentos das ciências. É bom que fique bem claro que não fazemos uma crítica geral ao livro de Capra : apenas não concordamos com algumas afirmações categóricas como as encontradas, por exemplo, no capítulo 14, onde o autor nos passa a impressão de que as teorias quânticas de campos e a teoria da relatividade generalizada podem se combinar e nos fornecer uma descrição bastante aceitável do mundo físico, sem profundas modificações. É óbvio que admiramos e louvamos o trabalho de todos que colaboraram e continuam trabalhando na construção de teorias unificadoras. Só não as aceitamos como verdades absolutas, por achar que essa não é a mais correta posição científica. Mesmo a teoria einsteniana, considerada por nós como uma das mais belas concepções do pensamento humano, merece um severo reparo por não se tratar de uma teoria quântica. O próprio Einstein sempre defendia a revisão das teorias.

Dessa maneira, a nossa concepção do Universo no qual vivemos vai mudando bruscamente e nos leva a ampliar a noção mais arraigada que tínhamos acerca dos astros (ASTRO – Designação comum a todos os corpos celestes, ref. [1]). Mesmo na descrição simples do que seja um astro, já encontramos uma conotação teológica, que assume o céu como equivalente ao Universo, ainda que o céu seja entendido como um espaço limitado, o que pode não ser verdade.

Por falar em espaço limitado ou não, temos obrigatoriamente de retornar à grande polêmica científica existente entre o desmesuradamente grande e o desmesuradamente pequeno. Esse assunto, importantíssimo para a abordagem que iremos fazer no capítulo seguinte, dedicado às matemáticas, dará o ritmo do contexto desta obra.

Deste modo, para podermos encerrar este pequeno e incompleto capítulo, iremos enumerar alguns dos objetos que hoje constituem o cerne do campo de estudos voltados para o entendimento do Universo como um todo. Esse número de objetos excede muito o que conhecíamos há poucas décadas e representa bem o esforço de inúmeros investigadores na tentativa de catalogar o que pode ser observado. Além dos planetas, das estrelas, das galáxias, das super galáxias, das super novas, das anãs brancas, das gigantes azuis e vermelhas, dos pulsares, dos quasares, das magnetostars, etc., temos de incluir os buracos negros, a matéria faltante, as hiper super novas, as colisões galácticas, as imensas fontes de radiação X e energia e o que mais vem sendo observado e será observado em grandes descobertas. Diuturnamente novos big-bangs são detectados e as poeiras cósmicas e materiais são percebidos nas grandes imensidões. As grandes descobertas observacionais e experimentais são devidas à introdução de novas tecnologias e ao aperfeiçoamento das já existentes; a evolução da interpretação científica da natureza demonstra uma extraordinária continuidade que vem da época dos primeiros racionalistas gregos, chegando a Einstein e aos cosmólogos contemporâneos. Nos capítulos subsequentes, além dos fundamentos da matemática e da física, iremos analisar alguns modelos teóricos propostos para a formação do Universo, com as objeções e confirmações existentes. Como defensores de uma idéia de permanência, tanto no espaço como no tempo, iremos tentar precisar e apresentar ao leitor, a nossa própria concepção cosmogônica. Claro que os nossos conceitos não são definitivos. Como veremos, o nosso modelo tenta apresentar uma possibilidade de conciliação entre as tendências mais bem aceitas para a explicação do Universo: a teoria explosiva do Big-Bang e a teoria estacionária do “ sempre existiu, existe e existirá “. À guisa de amenizar um pouco a leitura do capítulo seguinte (e dos outros também), adaptamos, para o nosso estudo, a citação espirituosa do humorista russo Averchenko : “ A história do Universo pode ser dividida em três etapas : da Primeira, nada sabemos. A Segunda, estudando a Primeira, permaneceu no desconhecimento. A Terceira classifica os resultados obtidos nas duas primeiras “.

É claro que essa citação cômico-pessimista do ensaísta russo não se aplica integralmente à cosmogonia. Ela se refere, antes, ao modo de se ensinar a história da Rússia, na era czarista. De um modo

geral, a história costuma registrar sempre o que for de interesse da classe dominante da época. Nesse contexto, como iremos ver na sequência, há uma analogia sutil com o pensamento da comunidade científica internacional. Muitas vezes, um trabalho de suma importância permanece ignorado por muitos anos, pelo fato de se opor a certos preconceitos cientificistas (o cientificismo é uma doutrina filosófica que considera os conhecimentos científicos como definitivos e é oriunda do neo-positivismo), vigerantes na época de seu lançamento.

§ 3 – UM POUCO DE MATEMÁTICA

“ A matemática é o alfabeto com o qual
Deus escreveu o Universo “

Galileo Galilei - Opere

Para tecer alguns comentários sobre a matemática, iremos partir de uma idéia filosófica helênica da maior importância [6] : a teoria atômica de Leucipo e Demócrito. A idéia de Demócrito sobre os átomos não foi, em geral, muito aceita entre os gregos. A eles repugnava a idéia do vazio e, justamente Demócrito, supunha átomos movendo-se no vazio. Como já dissemos, a idéia do vazio faz pensar mais na Índia do que na Grécia. E a idéia desse vazio levaria ao nada que, posteriormente conduziria aos algarismos arábicos, contendo o número zero. Tudo isso é muito controverso, pois os gregos já eram possuidores do conhecimento da geometria e, com ela, das idéias babilônicas de medidas. Usando idéias geométricas básicas, é fácil introduzir o zero. Por exemplo : qual é o tamanho de um ponto ? Admitindo uma forma esférica, é claro que o raio da esfera deve ser nulo para um ponto ideal. E se tomarmos dois pontos e traçarmos um segmento de reta entre eles ? Qual deve ser a distância entre dois pontos adjacentes desse segmento de reta ? Aqui também fica claro que a distância é nula. Mas nesse caso, com dois pontos e um segmento de reta entre eles, começa a aparecer um problema fundamental de consequências incríveis. Poderíamos perguntar : quantos pontos constituem esse segmento de reta ? Qual seria a resposta ? Haveria um número que pudesse exprimir essa quantidade ? Teria sentido formular essa pergunta ?

A verdade é que mais de vinte séculos se passaram até que alguém, com postura matemática científica, já impregnado do espírito galileano de ciência, pudesse arguir sobre esse problema. O padre tcheco Bernhard Bolzano (1781 – 1848), por volta de 1840 publicava um trabalho onde percebia que havia tantos números reais entre 0 e 1 como entre 0 e 2. Ou ,o que é equivalente : há tantos pontos num segmento de 1 cm quanto num de 2 cm. Ou seja, esse número é infinito. Mas o que significaria o infinito ? Como citado por Boyer [10], o padre filósofo da Boêmia chegou mais perto de partes da matemática moderna do que seus contemporâneos mais ilustres como Gauss e Cauchy. Estes dois últimos eminentes matemáticos exibiam um autêntico “ horror infiniti “, insistindo em que não podia haver algo como um infinito completado na matemática. Talvez eles estivessem com a razão pois somente muito mais tarde, em outro contexto, as idéias de Bolzano foram redescobertas. Pôr muitos anos esse “ horror infiniti “ predominou e influenciou os mais importantes matemáticos e físicos e, por que não dizer, ainda influencia e persiste em trabalhos recentes.

Vindo de outro lado, mais obstáculos se opunham à concretização de uma definição do infinito : a filosofia de Kant e o idealismo germânico. Kant [11], na sua estética transcendental parte da pergunta : “ como é possível a matemática pura ? “ Forma-se assim a doutrina das formas puras ou condições a priori do conhecimento sensível : tais formas são as intuições puras do tempo e do espaço. Sendo intuições a priori, isto é, universais e necessárias, também a priori, isto é, universal e necessária, é a matemática, que estuda as relações temporais (aritmética) e espaciais (geometria). Além disso, o tempo é a forma de todos os fenômenos, em particular, internos; o espaço é a forma dos fenômenos externos : uns e outros subjetivos. O material coordenado pela intuição nas formas do tempo e do espaço deve ser unificado pelo intelecto : somente então poderemos formular juízos e afirmar que aquilo que representamos existe “.

É interessante ressaltar que desde o princípio, Kant distingue dois tipos de método científico fundamentalmente divergentes, que podem ser chamados de método sintético e método analítico. Também é de se notar a provável gênese de ambos métodos. Diversos autores afirmam que o filósofo de Königsberg apoiou-se no trabalho pioneiro de Nieuwentyt [12] sobre a teoria da ciência, pois o método sintético corresponderia ao método ideal de Nieuwentyt, enquanto que o método analítico corresponderia ao método real do pensador holandês. A pergunta formulada por Kant na sua Estética Transcendental só pode ser respondida pelo método sintético. A matemática pura só conteria conceitos sintéticos. O próprio Kant critica outros autores por usarem métodos analíticos na matemática (pura ou aplicada ?).

Ainda que o tema – física – seja o conteúdo do nosso próximo capítulo, achamos oportuno citarmos aqui a 2ª pergunta kantiana, que julgamos pertinente ao nosso trabalho como um todo : a Analítica Transcendental.

“ A analítica transcendental parte da pergunta : como é possível a Física pura ? Se pensar é julgar, no juízo, as afirmações tornam-se possíveis pelas categorias ou conceitos, que não podem ser tirados da experiência. Esses conceitos são puros ou transcendentais e subjetivos, mas universalmente humanos (isto é, cada um de nós, enquanto pensa, não pode pensar senão conforme essas formas, constitutivas da mente humana ou da razão).

Entre as categorias fundamentais, que tornam possíveis os juízos, há as de substâncias e de causa : teremos, assim, um mundo de objetos, conexos entre si por causalidade, e que constituem o mundo da experiência, da natureza e, portanto, da ciência “.

Agora surge a nossa pergunta : aonde Kant achou aplicações reais do método sintético e do método analítico ? A resposta é óbvia : ele achou o método sintético na matemática (em especial, no cálculo infinitesimal de Newton) e o método analítico na mecânica de Newton [13].

Na verdade, para podermos melhor entender o pensamento kantiano, não podemos nos ater somente à leitura da Crítica da Razão Pura. Toda obra de Kant , com suas mudanças e adendos, deve ser examinada. Para isso, recomendamos o trabalho clássico de Brunschvicg [14].

Em vista disso, as primeiras páginas da “ Disciplina da razão pura no uso dogmático “ são explícitas e decisivas : se “ as matemáticas fornecem o mais retumbante exemplo duma razão pura, que extrapola a si mesma, sem se ancorar na experiência “, é que “ o conhecimento matemático é o conhecimento racional pela construção de conceitos “. Aqui vemos, com efeito, a grave dificuldade que é inerente às fórmulas de Kant : se o número é o esquema da quantidade em geral, como conceber a relação do finito e do descontínuo (que são as características aparentes do número), com o infinito e o contínuo (que são as características da quantidade) ? A pergunta não é questionada por ele mesmo na Crítica ; as indicações que podemos recolher indiretamente testemunham, ou uma grande incerteza, ou uma grande indiferença.

Neste momento, encontramos uma verdadeira interrupção na corrente da reflexão crítica : as categorias da quantidade que são a unidade, a pluralidade e a totalidade, corresponderiam a espécies diferentes da quantidade lógica : julgamentos gerais, particulares, singulares. Ficaria difícil de perceber entre essas duas idéias da quantidade, outra ligação, que não uma simples coincidência verbal. Para Kant, a questão essencial seria, aliás, não a determinação dos modos de unificação real, mas estabelecer a objetividade.

Para tentar contornar a situação, Kant introduz uma função intermediária à qual comunica a possibilidade de unificação intelectual. Essa função, que, por sua vez, participa da atividade a priori que pertence à inteligência e da intuitividade, que pertence à sensibilidade, é a própria imaginação. Para isso, ele passa do plano da psicologia empírica ao plano da lógica transcendental. Nesta etapa, vemos a influência dos psicólogos alemães como Georg Friedrich Meier e Tetens [15] [16], sobre o papel da imaginação na produção de conceitos científicos. Explicitando melhor, as dificuldades encontradas por Kant o fizeram dar a luz à realidade matemática a partir duma função pura da imaginação produtora, recorrendo a um procedimento pouco comum para o tempo : o uso da teoria psicológica emergente.

Na nossa modesta opinião, esse procedimento não foi inédito e, talvez, seja um dos caminhos mais favoráveis na árdua tentativa de procurar unificar o pensamento científico [17]. Entretanto, esse caminho foi e deverá continuar sendo uma trilha extremamente difícil, como fica muito bem explicitado no excelente trabalho de Beth [18], onde o leitor poderá satisfazer sua curiosidade sobre quase todos os fundamentos da matemática. Nesse livro, encontraremos as objeções ao psicologismo e as razões, do ponto de vista do matemático, das tentativas infrutíferas de matematizar a psicologia. Contudo, no espírito desta monografia, encontramos algumas pistas que podem nos levar a algumas conclusões fecundas no futuro.

Continuando a leitura de Beth [18], encontramos na página 636, algumas afirmações que podem se tornar úteis :

“ Como objeto primordial de qualquer reflexão matemática devemos, sem dúvida, considerar o mundo total da nossa experiência. Entretanto, na sua expansão posterior a matemática não se restringe à consideração do seu objeto primordial. Ela tende a abarcar também um objeto secundário, isto é, a sua própria estrutura até o ponto onde ela é explicitamente expressa por meio da linguagem matemática. Agora podemos entender porque uma investigação psicológica mais profunda sobre a estrutura do pensamento matemático não pode nos ajudar : os elementos estruturais que são matematicamente significativos são aqueles que, mais cedo ou mais tarde, se expressam explicitamente por meio da linguagem matemática; desse modo, eles podem ser compreendidos por uma análise muito superficial “. Na sequência, lemos :

“ Além do objeto primordial do pensamento matemático, e do seu elemento secundário que tende a se mesclar com o primordial, existe ainda um terceiro objeto que não pode ser reduzido aos dois primeiros, ou seja, o infinito, que deve ser considerado como um objeto matemático sui generis . “

Com a colocação de Beth sobre a psicologia, não podemos concordar. Ao que tudo indica, esse autor se filia à corrente dos cientistas das mais diversas áreas do saber que se mostra a mais preconceituosa a respeito da aceitação da Psicologia como ciência. É claro que se nos fixamos, de maneira rígida, à definição usual de ciência como o estudo quantitativo das qualidades, em oposição à posição pré-galileana que enfatizava o estudo qualitativo das quantidades, não podemos classificar a Psicologia como uma ciência totalmente delimitada. Mas, aqui, cabe a pergunta : e qual ciência, estudada nos seus mais importantes fundamentos, pode ser considerada como totalmente estruturada ? Para dizer a verdade, se uma ciência atingisse esse estágio, ela deixaria de ser uma ciência para se tornar um catálogo ou manual. Em qualquer hipótese, seria estéril ou sem vida. No nosso modo de pensar, Beth se contradiz ao colocar o infinito numa categoria *sui generis* da estrutura matemática, negando paralelamente um eventual auxílio que poderia ser prestado pela Psicologia na elucidação desse problema e, eventualmente, na sua compreensão e formulação precisa. Na história inicial de uma questão científica [19], “ a origem das idéias é frequentemente atribuída a categorias tais como o palpite, a intuição, o espírito em voga na época (*Zeitgeist* ou *Mainstream*), o inconsciente, uma vaga sensação de descontentamento, etc. Com o desenvolvimento posterior da questão, a origem da investigação pode ser mais facilmente atribuída, de um modo explícito, à necessidade de esclarecer ambiguidades ou imprecisões nas explicações existentes, de preencher lacunas do acervo corrente de informações, de comprovar a propriedade de uma teoria proposta, de resolver contradições evidentes entre os dados e a teoria, etc. “

Como podemos ver, as idéias possuem antecedentes culturais e o processo de investigação pode ser considerado uma atividade contínua para tentar assimilar novas observações aos conceitos e expectativas existentes. Como as novas observações são efetuadas no decurso da pesquisa, não conduzem, por si mesmas, a novas idéias ou hipóteses. Pelo contrário, servem de catalisadores ou reforços que despertam ou robustecem associações existentes, mas adormecidas. O despertar se dá pelas influências mútuas de ramos científicos e culturais que, muitas vezes, são apoiados pelas tendências filosóficas predominantes. Como o amadurecimento de idéias filosóficas e a conseqüente absorção pelos intelectuais demora um certo tempo, a história nos ensina com inúmeros exemplos que uma idéia valiosa nem sempre é totalmente compreendida e expandida de imediato. Assim, Claude Bernard enunciou claramente a idéia do reflexo condicionado, cerca de 50 anos antes de Pavlov ter feito dela a base do seu programa de pesquisa. Provavelmente isso se deu ao fato de a soma de influências desse período de 50 anos não haver pendido para o lado dessa idéia.

Mas o investigador com verdadeiro espírito científico não deve, nem desistir nem enfraquecer seu entusiasmo diante de uma provável indiferença da comunidade científica. Se uma idéia tem valor, um dia esse valor surgirá. Pôr esse motivo, achamos prematura a crítica do grande fundamentalista Beth, quanto ao poder potencial de qualquer idéia oriunda da , ainda jovem, Psicologia. No decorrer do texto, iremos expor com clareza, o socorro que uma escola encabeçada por um psicólogo de profissão, forneceu aos matemáticos sobre o problema do infinito.

Como dissemos acima, o que pretendemos é entender um pouco da HISTORIA UNIVERSALIS. Logo, para nós, o infinito e sua possibilidade de colocação e definição na ciência não podem estar contidos na restrição do enunciado de algo *sui generis*. Entretanto, neste ponto, surgem duas perguntas muito importantes embutidas nas interrogações : seria possível caracterizar, pelo menos, uma definição de infinito e, sendo isso possível, seria de utilidade para os fundamentos da matemática ?

A idéia do infinito parece ter atravessado os tempos e, até em Zenon, encontramos expressões equivalentes. O que nos intriga é que apesar de existir no espírito humano a inclinação de se servir do infinitamente grande para examinar o que é finito [20] [21] [22], encontramos um quase mutismo em Kant e, em seu principal herdeiro, Augusto Comte. Um exemplo do que afirmamos é que o cálculo infinitesimal foi inventado para facilitar a pesquisa sobre objetos finitos : para calcular o volume de um corpo nós o decomparamos, no cálculo integral, numa infinidade de partes infinitamente pequenas e isso, resolve o problema.

Verdadeiramente, mesmo no século XIX, apareciam frequentemente discussões sobre o infinito, mas ninguém dizia exatamente o que entendia sobre esse assunto. Excepcionalmente, alguns geômetras, nos primórdios da geometria projetiva, eram mais precisos. Mesmo os grandes matemáticos da época, como Cauchy e Weierstrass só viam paradoxos nas tentativas de identificar um infinito “ bem caracterizado “, na matemática. Julgavam que o infinitamente grande e o infinitamente pequeno apenas indicavam o que Aristóteles tinha chamado de potencialidade, ou seja, um dado incompleto do processo em questão. Mas dois alunos de Weierstrass não viam a situação tão tranquila. Dedekind e Georg Cantor reconheciam que os paradoxos do padre Bolzano não eram uma anomalia e, sim, uma propriedade universal dos conjuntos infinitos. Além do mais, Georg Cantor percebia que os conjuntos infinitos não são todos iguais.

Ele chegou mesmo a construir uma hierarquia de conjuntos infinitos, estabelecendo o que ele chamou de "potência" (*Mächtigkeit*) do conjunto. A idéia da introdução do conceito de potência de um conjunto qualquer, era tão ousada, que o próprio Cantor estremeceu, ao apresentar um resultado novo. Como exemplo, podemos citar o fato de que a potência do conjunto de pontos sobre um segmento de reta é a mesma que a do conjunto de todos os pontos do espaço tri-dimensional. De relance, nos lembramos de uma conversa que tivemos, certa noite, na casa de Mário Schoenberg. Nas entrelinhas de um debate sobre o ensino da matemática moderna, Schoenberg, enfático, nos diz: "você sabe o que eu vejo de importante no trabalho de Cantor? Pode ser que arrumem até outra definição de potência, ou mesmo, de número cardinal; mas, trabalhar com conjuntos infinitos como uma costureira lida com uma agulha, eu acho que é a sua grande contribuição. Depois dele, só Gödel mesmo. Como o infinito é intrigante. O pior é que ele acarreta o nada..."

Depois dessa importante pausa, retornamos para a nossa pequena sinopse cultural da metade do século XIX até a metade do século XX. Havia um declínio das idéias racionalistas de Kant [23] e surgia, especialmente na matemática, um movimento denominado irracionalismo que viria a conter uma das mais importantes escolas matemáticas do século XX: o intuicionismo de Brouwer, na Holanda. É claro que o ambiente era propício para mudanças radicais pois, vindo essencialmente da Dinamarca, florescia o existencialismo de Kierkegaard, seguido de Hartmann, de Heidegger até Jean Paul Sartre [24]. Também surgiam os trabalhos em Psicologia de Freud e de Jung. Usando uma terminologia kantiana, diríamos que Freud criava a psico-síntese e Jung a psico-análise (métodos sintético e analítico) [25]. Na aplicação clínica, a psicanálise havia se firmado. Também há 150 anos era lançado o Manifesto Comunista de Karl Marx, autor de "O Capital". O materialismo dialético ganhava força e iria desencadear, mais tarde, a grande revolução bolchevique.

Apesar de Marx escrever sobre catástrofes econômicas, jamais conseguiu oferecer uma explicação abrangente sobre os motivos pelos quais estas catástrofes acontecem ou exibiu qualquer alternativa sobre o que fazer a respeito delas (exceto abolir o capitalismo). John Maynard Keynes parece ter algum êxito nessa empreitada. Mas a economia não nos parece um campo que ofereça soluções matemáticas mais precisas e foge do foco de atenção desta monografia [26].

Se citamos tantos assuntos e autores ao redor da virada do século XX, tínhamos e temos um propósito em mente: a matemática, como as outras ciências, se desenvolve num certo ambiente cultural. Algumas idéias surgem e viram moda, se são fecundas. Se realmente são valiosas, ultrapassam o modismo e entram para o acervo crescente do conhecimento humano. E quem julga se elas são valiosas? A comunidade, os críticos, os filósofos e o próprio tempo. A história tem nos ensinado que o que é bom, fica. Mas existe também, o caso de aparecimento de idéias excepcionalmente geniais que não são entendidas tanto no lugar, como na época em que são lançadas. É o caso mais comum. Entretanto, o fator que mais inibe o aparecimento de concepções mais arrojadas, talvez seja a tradição. Como tradição, entendemos o imenso conjunto de concepções metafísicas, teológicas, filosóficas, científicas, artísticas, morais, éticas, etc., que, secularmente se acumulam e formam o próprio modo de vida das populações. Assim, a influência helênica na cultura ocidental se cristalizou e, em especial na matemática, foi muito difícil, como ainda o é, raciocinar diferentemente de Aristóteles, no domínio da lógica. Dessa forma, nos parece que foi na Holanda que, no começo do século XX, L. E. J. Brouwer, lançava em 1907, em Amsterdã, o germe da oposição ao logicismo de Bertrand Russell que se baseava em Aristóteles, ao negar a terceira lei de Aristóteles do terceiro excluído. Essa lei afirma que A ou é B, ou não é B (sim ou não). Em vários exemplos, Brouwer exibia casos onde não se pode afirmar com certeza que uma proposição, ou é verdadeira, ou é falsa. para ele, a linguagem e a lógica não são pressupostos para a matemática, a qual tem sua origem na intuição, fator que torna seus conceitos e inferências imediatamente claros para nós. Estava criada a escola intuicionista [10]. Brouwer não estava só. Seu companheiro em Amsterdã era G. Mannoury que, além de matemático, era um psicólogo também empenhado em problemas sociais, políticos e educacionais. Mannoury, além de introduzir o estudo dos fundamentos da matemática na Holanda, ainda fundou a linha de pesquisa denominada significa [27]. Esse nome, traduzido para o inglês, leva o nome de significs. Preferimos não traduzir para o português. Existe a revista SYNTHESE, que é o órgão representativo da Sociedade Internacional de Significs. A crítica a essa linha de pesquisa é que ela se fundamenta na antiga psicologia dos anos 10 e trabalha no estilo de 1920. Mas essa situação mudou e continua mudando. Mas, por mais incrível que pareça, as idéias mais importantes para o nosso desiderato, estão no repositório antigo da significs.

Utilizando análises agudas e penetrantes, características da sua alta formação humanística e científica, Mannoury distinguia duas formas de negação na linguagem corrente: a negação por escolha e a negação por exclusão. Sobre essa colocação não basta tentarmos uma leitura superficial. O argumento usado por Mannoury é bastante sutil. É claro que a negação por escolha pressupõe um dilema: a negação de um

membro desse dilema acarreta, imediatamente, a escolha do outro membro. A negação por exclusão não encontra tal dilema e, ao contrário da negação por escolha, não temos para ela uma interpretação positiva. Para Mannoury, a negação por exclusão em linguagem comum tem, principalmente, um caráter emocional.

Em matemática, tem um caráter puramente formal.

O interessante é que, usando a negação por exclusão na matemática, podemos introduzir termos e afirmações que não encontram nada correlato na intuição. Como exemplos, termos como "infinito" e "paralelo" dependem essencialmente da negação por exclusão e não têm correspondentes adequados na intuição.

Apesar da simpatia com a qual pretendemos apresentar os primórdios do intuicionismo (vindo do irracionalismo), a situação não era confortável para os iniciadores da nova escola. Além da oposição dos logicistas, havia a contenda com os chamados formalistas. E, entre esses últimos, havia a figura grandiosa do eminente matemático de Göttingen, David Hilbert. No famoso 2º Congresso Internacional de Matemáticos [28], Hilbert expunha de um modo claro e objetivo, as predições para os futuros desenvolvimentos da matemática, usando as tendências da época. Isso ele fez, propondo 23 problemas que ele acreditava que estariam, ou deveriam estar, no foco da atenção dos matemáticos do século iniciante. O interessante, é que o primeiro problema era o do contínuo aritmético, que vinha sendo um dos maiores sucessos de século precedente. Hilbert também achava que não era somente a aritmética que podia ser tratada por métodos rigorosos. Mas (existe sempre um mas), Hilbert era um finitista, como podemos concluir de suas próprias palavras :

" Examinemos, ainda que rapidamente, as exigências e as condições gerais que devem satisfazer a solução de um problema matemático. Antes de tudo, eu colocarei a exatidão da solução que deve ser obtida por meio de um número finito de conclusões e que deve se apoiar num número finito de hipóteses fornecidas pelo próprio problema e formuladas, em cada caso, com precisão. Ora, esta condição da dedução lógica por meio dum número finito de conclusões, não é outra coisa, senão o rigor das demonstrações [29].

No mesmo Congresso, outro dos mais eminentes cientistas e filósofos franceses, Henri Poincaré, afirmava :

" Ora, na Análise de hoje, quando queremos ser rigorosos, somente temos de usar silogismos ou apelos a esta intuição de número puro, a única que não nos engana. Podemos dizer que, hoje, atingimos o rigor absoluto " [30].

Não há dúvida de que esse Congresso e a posição firme dos mais destacados matemáticos da virada do século, como Hilbert e Poincaré, motivaram tanto a mudança do ensino da matemática em todo o mundo, bem como incentivaram a redação do monumental tratado do " Principia Mathematica ", por Russell e Whitehead [31]. Numa linguagem comum, podemos dizer que esta obra, cuja 1ª edição apareceu por volta de 1910, procurava construir a lógica e a matemática, admitindo como axiomas, certas sentenças evidentes e deduzia, a partir delas, os teoremas da lógica e da matemática dum modo puramente formal (isto é, sem fazer uso do significado dos símbolos), mas, seguindo sempre alguns princípios de inferência, formulados precisamente.

Assim, no começo do século XX, podíamos distinguir, quase que de maneira nítida, três escolas abrangentes do pensamento matemático :

- A) a formalista (método axiomático), liderada por David Hilbert
- B) a lógica, liderada por Bertrand Russell
- C) a intuicionista (vinda do irracionalismo existencialista), formulada por Brouwer.

Repentinamente, quando tudo parecia " correr bem ", com a interpenetração das três linhas principais de pesquisa, surge na Áustria, pelo trabalho de um jovem nascido em Bruno (antigamente da Áustria, depois da Checoslováquia e hoje, da República Checa), o que podemos chamar da maior revolução do pensamento, depois de Aristóteles.

Esse jovem foi Kurt Gödel (1906 – 1978), cujos trabalhos ascenderam a uma fama quase mística e se estenderam sobre a totalidade da lógica e da matemática [32] [33] [34].

Como tudo que Gödel nos legou em sua obra é de fundamental importância, iremos nos restringir àquilo que julgamos ser mais pertinente para o seguimento da presente monografia.

Em 1931, Gödel provava que todo sistema formal que contenha um pouco de aritmética, necessariamente é incompleto e que a sua consistência interna não pode ser provada por seus próprios métodos.

Vamos explicitar um pouco o que se entende por sistema formal. Se estudamos uma ciência dedutiva T , partindo do ponto de vista lógico, temos de lidar com dois temas :

- a) O conjunto de axiomas (ou postulados, ou hipóteses) da teoria T
- b) Os procedimentos de inferência lógica que permitem a demonstração dos teoremas de

T .

A parte a) do sistema formal (ou teoria T), apresenta sempre um caráter bastante especializado e só serve para cada teoria T . Por outro lado, o estudo da inferência lógica é de natureza geral e pode mesmo ser considerado como parte da lógica.

Como um exemplo diz mais que inúmeras teorias, vamos citar o processo de criação dos números naturais como sendo uma das teorias T . Para tanto, tomamos como conjunto de axiomas (ou postulados) os seguintes (formulados por Peano), que constituem a parte a)

I - 1 é um número

II - Todo número tem um sucessor, que é um número.

III - 1 não é sucessor de nenhum número

IV - Números distintos têm sucessores distintos

V - Se um conjunto de números contém o número 1 e se, do fato dele conter um número n , se deduz que ele contém o sucessor de n , esse conjunto contém todos os números. Este axioma é chamado de princípio de indução.

Esses cinco axiomas formam a parte a) da teoria T [35] que pode ter um número finito ou infinito de números.

Para estabelecer a parte b) da teoria T , introduzimos as operações fundamentais e a desigualdade : para a introdução das operações entre os números naturais, como a soma ou o produto de dois números a e b quaisquer, pomos

$a + 1 =$ sucessor de a

$a + (b + 1) =$ sucessor de $a + b$

Pelo postulado V, vemos que estas duas definições permitem definir a soma.

Para definir a desigualdade dizemos que, quando, dados dois números a e b , existe um terceiro número c tal que $a = b + c$, vemos que a é maior que b ($a > b$), ou que b é menor que a ($b < a$).

E que c é a diferença entre a e b :

$c = a - b$

Se $a = b$, temos $c = 0$.

De modo análogo, pode-se definir o produto $a \cdot b$ ou ab , de dois números naturais, pondo :

$a \cdot 1 = a$

$a (b + 1) = a \cdot b + a$

Poderíamos enunciar todas as propriedades decorrentes dessas definições e conclusões para os números naturais mas, como isso é evidente, preferimos sugerir a referência [36].

O importante é que aqui temos um sistema formal contendo um pouco de aritmética (ou a aritmética dos números naturais). O que Gödel fez, foi mostrar que um sistema como esse é incompleto, ou seja, existem proposições (ou teoremas) indecidíveis dentro desse sistema, que não podem ser respondidas dentro do próprio sistema. Além do mais, ele provou que a consistência interna (não haver absurdos) não pode ser provada pelos próprios métodos do sistema formal. E o que fazer, então ? Talvez introduzir outros axiomas " mais fortes ". Isso foi feito e o próprio Gödel demonstrava que o novo sistema formal assim " fortalecido ", também apresentava os mesmos sintomas do sistema anterior : indecidibilidade e falta de consistência interna. Para remediar a situação, poder-se-ia " fortalecer " ainda mais o sistema. Isso foi feito e o fracasso da tentativa só veio a robustecer o trabalho de Gödel. Na verdade, precisaríamos de infinitos axiomas, cada vez mais " fortes", para tentar resolver o problema da decidibilidade e da consistência interna. Mas o infinito é sui generis !

Mais interessante ainda : o teorema de Gödel respondia negativamente ao segundo problema proposto por Hilbert em 1900 : pode o continuum numérico ser considerado um conjunto ordenado ? É claro que para responder a isso, Gödel teve de usar a teoria de conjuntos e repensar um axioma clássico de Zermelo, que é o chamado axioma da escolha. Em 1940, Gödel demonstrava que o axioma de Zermelo era consistente com outros axiomas da teoria dos conjuntos. Entretanto, 23 anos depois, Cohen [37] mostrava que o axioma da escolha é independente dos outros axiomas, num certo sistema de teoria dos conjuntos, o que demonstra que o axioma da escolha não pode ser provado dentro desse sistema. Isso exclui uma solução definida para o

primeiro problema de Hilbert. Com esse fato, também, a hipótese do contínuo (o infinito) ganhava novo status dentro da matemática e o antigo problema do padre Bolzano ressurgia, de forma muito mais sofisticada.

Com os problemas surgidos desde 1931, o espanto aparecia entre os matemáticos. Em suas implicações, a descoberta por Gödel de proposições indecidíveis é, por demais perturbadora, pois parece (se é que não o faz) eliminar a esperança de certeza matemática pelo uso dos métodos óbvios. Talvez [10] também, esteja condenado o ideal da ciência – inventar uma coleção de axiomas dos quais todos os fenômenos do mundo natural possam ser deduzidos [38]. O curioso e encorajador aspecto dessa descoberta é que os matemáticos e lógicos, aparentemente, se refizeram do golpe e continuaram e continuam a produzir teorias e teoremas ainda em maior número. Grandes desenvolvimentos se encontram na metamatemática, nas lógicas para-consistentes, etc.

Contudo, o infinito, um ente não matemático penetrava a matemática e a ciência. Nós, pessoalmente, preferimos manter a imagem do infinito, dentro do sentimento poético :

“ Eu possa me dizer do amor (que tive) :
 Que não seja imortal posto que é chama
 Mas que seja infinito enquanto dure “

Estoril, outubro, 1939 [39]

Gödel, além do que já citamos, também provou a consistência relativa da lógica e da aritmética clássicas com relação à escola intuicionista, chegando mesmo a reforçar a tese de Brouwer sobre o terceiro não excluído. Em Princeton, ainda conheceu Einstein e desenvolveu uma solução surpreendente das equações da Relatividade Geral, onde o tempo perde seu significado habitual.

Além disso, Gödel também propôs e desenvolveu uma identificação da noção de sistema formal com noção usada na máquina de Turing, especificando bem claramente, que as formalizações mecânicas descobertas por ele, não implicam necessariamente em limitações correspondentes da razão humana [40] [41].

§ 4 - A DIFERENÇA ENTRE FÍSICA CLÁSSICA E MODERNA

“ a divisão convencional do mundo em sujeito e objeto, em mundo interior e mundo exterior, em corpo e alma, não pode mais se aplicar “.

Werner Heisenberg [42]

Inicialmente, neste capítulo, deveríamos pedir desculpas ao leitor que conseguiu passar pelos atropelos históricos do capítulo anterior e, que, agora, poderia esperar um capítulo bem tradicional, com as nomenclaturas usuais de física clássica e física moderna. Acontece que, tanto o classicismo, como o modernismo, ficariam muito difíceis de serem caracterizados em física. Pode ser que, do ponto de vista dos livros didáticos, essa divisão apareça como sendo natural e óbvia. Contudo, nós mesmos, sempre relutamos em aceitar classificações simplistas que, invariavelmente, nos conduzem a contradições e explicações insuficientes. Como consideramos as transformações dos fundamentos da ciência como um sintoma das mudanças de base da nossa existência, existência que não é unidirecionada, temos de ser cuidadosos ao estabelecermos comparações entre os diversos desenvolvimentos científicos.

A ciência, como a aceitamos hoje, parece ter suas raízes históricas realmente assentadas sobre os gênios pós-renascentistas de Galileu Galilei e Isaac Newton. Esses dois ilustres sábios traziam como herança da Idade Média a idéia de que a natureza era a obra de Deus. Não havia sentido em interrogar, independente de Deus, alguma coisa sobre o mundo material.

No começo, com Galilei e, depois com Newton [43], essas concepções começaram a ser radicalmente mudadas. “Pequenos “ problemas resolvidos, novas situações empíricas formuladas, conceitos profícuos introduzidos e, tijolo a tijolo, o edifício científico era construído. Percebia-se que alguns aspectos sutis da natureza podiam ser entendidos sem a interferência direta de Deus. Newton [43], apesar de manter a fé inabalável em Deus, começava a perceber que o Universo não era mais, simplesmente a obra de Deus, concebido holísticamente. Alguns aspectos da natureza podiam ser estudados e, dentro de campos limitados, o conhecimento científico matematizado podia ser adquirido e ampliado. Como decorrência normal, surgia a sua mecânica, nos “ *Philosophiae naturalis principia mathematica* “, que viria transformar o pensamento científico posterior. Também surgia a sua versão da óptica e mais de quarenta obras que, somente agora, estão sendo escrutinadas. No escólio do seu “ *Principia* “, encontramos algo de espantoso: Newton definia dois tipos de massa ;

a) a primeira massa seria a quantidade de matéria contida nela e seria algo inerente à ela.

b) a outra massa, dependeria da velocidade do corpo.

Depois do advento da Teoria da Relatividade Restrita de Einstein, em 1905, que introduzia a sua famosa variação da massa com a velocidade, alguns historiadores mais entusiastas, descreviam as duas definições newtonianas de massa como uma premonição da Relatividade, que ocorreria quase trezentos anos depois. Na sua Óptica, Newton admitia também que a luz poderia apresentar um caráter corpuscular e, também, um caráter ondulatório. Seria uma previsão da teoria quântica do começo do século XX, baseada no Princípio da Complementaridade de Bohr ? Não nos arriscaremos a defender essa idéia. Segundo outros relatos deixados por Newton, verificou-se que, além dos magníficos trabalhos matemáticos sobre análise matemática, cálculo combinatório, álgebra, geometria, etc., vemos em sua obra, contribuições à teoria do calor, teoria dos fluidos e outras, tidas como misteriosas. Segundo pesquisas mais recentes, a fama de Newton como alquimista se deve ao fato dele realizar experiências com fenômenos elétricos, ciência totalmente deslocada no tempo, que iria se consolidar bem mais tarde [44].

Neste momento, tentaremos esclarecer o conceito de campo, no sentido restrito, como o estudado por Newton, na chamada física clássica.

Com muita propriedade, Schoenberg [6] enfatiza o fato de que nem sempre o surgimento de idéias importantes em ciência segue um caminho rigorosamente lógico. Esse fenômeno tornou-se particularmente relevante na elaboração newtoniana da mecânica. O grande filósofo grego Empédocles,

admitia a existência de quatro elementos : terra, água, ar e fogo. Entre esses elementos havia duas formas de interação denominadas por amor e ódio. Newton, partindo desse modelo, interpretou o amor como força de atração e o ódio como força de repulsão. A força de atração não seria necessariamente a gravitação, pois poderiam haver outras forças atrativas. O intrigante dessa colocação é que, apesar de Newton criar a Mecânica Clássica, com separação nítida entre espaço e tempo, a sua teoria não era uma teoria de campos [45]. Entretanto, curiosamente, Newton dizia que a atração entre dois planetas se dava através de Jeová. Jeová funcionava como um campo de força. O campo seria um agente intermediário que transmitia a força de uma parte da matéria para outra. Para ele, o espaço era o sensorio de Deus e, portanto, poderia bem ser, por seu caráter Divino, o agente transmissor de forças. E essa transmissão era instantânea, ou seja, a ação era transmitida com velocidade infinita. É o que os físicos costumam chamar de ação à distância. Quase trezentos anos depois, Einstein negava essa possibilidade, ao mostrar que nenhum sinal pode se propagar com velocidade superior à da luz no vácuo. O notável dessa inserção que fazemos da Teoria da Relatividade Restrita de Einstein é que, dentro da Teoria Quântica, notáveis cientistas tentaram restaurar a ação à distância dentro das teorias físicas e, não temos ainda, uma resposta definitiva sobre a questão.

Dentro da nossa linha de exposição, um leitor arguto poderia indagar : após Newton houve uma lacuna no desenvolvimento científico ? A nossa resposta é negativa. Há um tempo de plantio e um tempo de colheita. Nos duzentos anos subsequentes a Newton, houve intenso e profícuo desenvolvimento na ciência, na filosofia, na técnica, nas aplicações, na matemática, etc. Kant, como já dissemos, por ser filósofo e físico, viria justificar e afirmar definitivamente o trabalho de Newton. O século XVIII estabelecia , solidamente, a validade da mecânica newtoniana. O procedimento experimental ganhava contornos firmes e continuava sua marcha progressiva.

Seguindo essa tendência, na primeira metade do século XIX ocorreu um grande desenvolvimento da eletricidade, especialmente nas mãos de Ampère. O caminho a seguir era o já traçado por Newton. Aliás, o modelo mecânico de Newton dominava o pensamento científico da época. O modelo de Ampère também se baseava no conceito de pontos materiais e de interações entre eles. Mas esse modelo se mostrava impróprio para explicar os fenômenos eletromagnéticos já conhecidos. Naturalmente se impunha a inclusão de algo, no espaço existente entre os corpos em interação. Surgiria a primeira noção mais clara do conceito de campo, pelo pensamento intuitivo de Faraday. Este, que não era muito versado em matemáticas, apresentava uma genialidade científica incomum e, com isso, conseguiu introduzir , qualitativamente, as idéias de campo e linhas de força.

A idéia prevalente era a de que existia um meio extremamente tênue, mas com propriedades físicas notáveis, que permeava tudo. Esse meio (ou material) que fazia o papel de campo, foi chamado de éter (talvez, por analogia com o composto químico éter sulfúrico, extremamente volátil). A luz, o calor, o som, etc., propagavam-se nesse meio. O éter era o suporte de todas ondulações e propagações.

Nas décadas seguintes, surge a teoria matemática do eletromagnetismo, com Maxwell. Porém, o próprio Maxwell ainda não se desembaraçara completamente da herança newtoniana e confundia certas noções oriundas da mecânica e da eletricidade. Finalmente, surge Lorentz que, baseado nas ainda tidas como divinas, equações de Maxwell , desenvolve a primeira explicação moderna e mais precisa de campo, admitindo a localização direta da energia eletromagnética no espaço, sem qualquer meio mecânico de suporte.

Ainda não acreditando muito nessas idéias emergentes de " campo ", dois grandes cientistas americanos, Michelson e Morley, viriam a efetuar uma série importantíssima de experimentos, com o objetivo de detectar o éter classico . Paradoxalmente, esses experimentos, que tinham por objetivo a identificação do espaço como o repositório de energia com o meio mecânico especial chamado de éter, levaram a uma conclusão negativa. Era o indício de que a idéia do éter clássico não passava de uma ilusão conceitual. Tudo isso ocorreu no final do século XIX [46]. Até este ponto não havíamos nos referido explicitamente ao termo " clássico ", como acabamos de mencionar. No caso da música , como vemos na referência [46], encontramos três acepções para o tema Música Clássica :

1) Música " séria ", por oposição à música popular, música folclórica, música ligeira ou de jazz.

2) Qualquer música em que a atração estética resida principalmente na clareza, no equilíbrio, na austeridade e na objetividade da estrutura formal, em lugar da subjetividade, do emocionalismo exagerado ou da falta de limites da linguagem musical.

3) Música do período 1750 - 1830, em especial a de Haydn, Mozart e Beethoven. É a chamada Escola Clássica Vienense.

Muitos autores preferem também colocar qualquer música erudita como música clássica. Os limites são um tanto difusos e a colocação na época, também.

O mesmo não ocorre com a física. Alguns autores (a grande maioria) define a física clássica como a desenvolvida antes das teorias da relatividade e da teoria quântica. Para nós, toda física que não é quântica, é clássica. Convém lembrar que essa não é apenas uma questão de nomenclatura. Como já dissemos no início do presente capítulo, não nos agrada os termos : física clássica e física moderna. Se fôssemos obrigados a tornar clara uma divisão, talvez adotássemos a seguinte : física anterior `teoria quântica e física posterior à teoria quântica. Isso, com a ressalva que, mesmo nos dias de hoje, grande parte de física de alta qualidade é construída sem se basear nos princípios quânticos. Na matemática, também ousaríamos classificar duas matemáticas : uma anterior a Gödel e uma posterior a Gödel, com a mesma ressalva feita para a física.

Em 1905, Einstein, com sua Teoria da Relatividade Especial, viria pôr uma pá de cal sobre a hipótese do éter (por enquanto). Neste ponto, é conveniente fazermos um chamamento ao leitor : com as famosas equações de Maxwell, já vinha embutida a idéia de um novo tipo de cenário (como um palco), no qual os fenômenos ocorriam. Partia-se da concepção newtoniana, na qual o espaço e o tempo (tido como absoluto) eram separados (ver Kant), não tendo nada em comum, para a concepção de um espaço-tempo quadridimensional, no qual o tempo era incluído como outra dimensão ordinária, no mesmo pé de igualdade com as dimensões espaciais. A formulação matemático-geométrica precisa desse novo conceito, foi feita por Minkowski. Estava criado o espaço-tempo plano e universal. Quando dizemos plano é para fazer uma distinção em relação ao espaço curvo da Relatividade Geral. [47].

É importante ressaltar que, apesar da Teoria da Relatividade Especial utilizar o novo espaço-tempo como o formalismo apropriado para o estabelecimento de novas regras e conceitos, como os de medidas, de contrações e de dilatações de distâncias e tempos, concepções fundamentais da física newtoniana ainda eram mantidas. O determinismo, a causalidade e a forma de observação dos fenômenos, mantinham a herança tradicional anterior. A relatividade restrita aparecia como uma generalização da teoria newtoniana. Para corpos se movendo com velocidades bem inferiores à da luz, como ocorre no dia a dia, as leis de Newton continuavam a funcionar bem. As equações de Maxwell do eletromagnetismo se ajustavam perfeitamente à quadridimensionalidade do espaço-tempo de Minkowski e vários problemas foram resolvidos dentro desse formalismo.

Na nossa opinião, apesar da beleza e harmonia conseguidas por Einstein, ao elaborar a relatividade, a grande revolução na física do século XX viria de outro lado : da teoria do calor.

No final do século passado, os físicos estavam intrigados com um problema, aparentemente sem importância, que eles não conseguia explicar. Se tomamos uma barra de ferro, por exemplo, vemos que ao aquecê-la com um maçarico, ela vai se avermelhando, depois se torna alaranjada, tende para o azul, embranquece e se derrete. Usando aparelhos chamados espectrógrafos, constatamos que no processo do aquecimento, para cada cor, temos uma intensidade correspondente. Para uma determinada temperatura, podemos desenhar um gráfico (papel quadriculado), onde num eixo anotamos a intensidade e, em outro, a frequência da luz emitida. Como o calor é energia, e esta era tida como sendo emitida continuamente, as teorias vigentes não conseguiam, de forma alguma, um ajuste com o gráfico experimental. Se, ao invés da barra de ferro, imaginamos um corpo com a propriedade de poder emitir todas as frequências possíveis e, também, absorver essas frequências, chamamos esse objeto de " corpo negro " [48]. Obtemos um exemplo bem simples dum corpo negro, se observamos o seguinte : num dia ensolarado, olhamos para um edifício pintado com uma cor clara. As janelas abertas vão aparecer pretas para nós. A luz do Sol que entra, não sai. É a imagem simplificada dum corpo negro.

Em 1900, Max Planck encontra a solução do mistério, admitindo que a energia não era emitida continuamente mas, sim, em pacotes distintos de energia. Cada pacote individual era um " quantum " de energia (plural - quanta). Com isso, teoria e dados experimentais entravam em acordo perfeito. Em 1905, Einstein usava o quantum de Planck como sendo um corpúsculo de luz, o fóton, para explicar o efeito foto-elétrico, trabalho que lhe valeu o Prêmio Nobel em física. Nascia o que hoje chamamos de " Teoria quântica antiga ".

Os dados experimentais obtidos por espectroscopistas, levavam a indagações mais profundas sobre os antigos modelos atômicos. Assim, para Thomson, o átomo seria algo como um pudim de ameixas, a massa sendo constituída por cargas positivas, as ameixas sendo as cargas negativas, o que manteria o átomo eletricamente neutro. As famosas experiências de Rutherford viriam contradizer esse modelo. Rutherford proporia e confirmaria experimentalmente um modelo planetário para o átomo. O núcleo (colocado no lugar do Sol) seria a carga positiva e os elétrons (seriam os planetas) teriam cargas negativas. O átomo continuaria

eletricamente neutro. Acontece que esse modelo, apesar de ser bastante sugestivo e, aparentemente, bem confirmado por experiências, acarretava dificuldades conceituais imensas. Como uma carga elétrica, como a do elétron, poderia descrever uma órbita circular ao redor do núcleo, sem irradiar energia. Não cairia ele dentro do núcleo? A matéria, constituída de átomos, devia entrar em colapso, o que não acontece. Como as teorias que davam suporte ao modelo planetário eram a mecânica de Newton e o eletromagnetismo clássico, chegou-se a um impasse.

O físico dinamarquês Niels Bohr teve a coragem intelectual de analisar o problema e propor uma solução drástica: teríamos de abandonar o eletromagnetismo tradicional e postular que o elétron só poderia descrever certas órbitas absolutamente estáveis. Para simplificar, vamos dar como exemplo o átomo menos complexo, o de hidrogênio. O elétron só poderia efetuar transições de uma órbita bem definida para outra também definida, efetuando o que chamamos de um "salto quântico". Surgia, assim, o átomo de Bohr, onde cada órbita eletrônica era definida pela sua energia bem fixada. É importante ressaltar que todos os conceitos utilizados (com a exceção da modificação do eletromagnetismo), ainda eram oriundos da física tradicional, como corpúsculos, trajetórias, determinismo, causalidade, etc.

E como um determinado átomo emitiria luz? A resposta de Bohr foi imediata: quando um elétron dum átomo se encontra numa órbita com energia superior a uma outra, ele salta do estado de maior energia para o de menor energia, emitindo um fóton, ou quantum de luz. E situação inversa também é válida: o elétron pode receber um fóton conveniente do exterior e saltar de um estado de energia menor para um de energia maior, absorvendo o fóton. Chamamos esse novo estado do átomo de "estado excitado". Víamos, desse modo, que essa maneira de considerar a luz como constituída por quanta (partículas) energéticos, conseguia conviver bem com a descrição ondulatória da luz, também comprovada experimentalmente. A emergente teoria quântica conseguia, aparentemente, conciliar a dualidade onda-partícula para a luz. A hipótese mais arrojada sobre a dualidade surgiria em 1924, quando Louis de Broglie estendia a dualidade ao elétron e às outras partículas constituintes da matéria. A sua tese de que, mesmo um elétron poderia exibir um caráter ondulatório, veio encontrar, no mesmo ano, a plena confirmação experimental nos Estados Unidos.

O ano de 1925 marca o surgimento da moderna teoria quântica, pelos trabalhos independentes dos físicos Werner Heisenberg na Alemanha, Erwin Schrödinger na Áustria e Paul Dirac na Inglaterra. Com formulações totalmente distintas, os três abriam o caminho para o que consideramos a grande transformação da física do século XX.

Algumas conquistas fundamentais já haviam sido feitas por Niels Bohr: o Princípio da Correspondência, que fixava um modo de como efetuar a transição da sua fórmula quântica para a fórmula newtoniana e o consagrado Princípio da Complementaridade, cujas implicações epistemológicas e práticas foram mais profundas do que ele próprio imaginava.

Em linhas gerais, o princípio da complementaridade afirma que, ao planejarmos uma dada experiência, só poderemos detectar um dos aspectos de uma partícula: ou o aspecto corpuscular ou o aspecto ondulatório. Não é possível, numa única experiência, detectarmos simultaneamente, os dois aspectos. Eles são complementares, um ao outro. Na nossa interpretação, que iremos detalhar no que se segue, o princípio da complementaridade é a expressão, em física, de uma das consequências geométricas mais fundamentais, advindas da abrangente formulação da geometria projetiva [49], onde a dualidade ponto-plano é realçada. É lamentável que o estudo da geometria projetiva não tenha permanecido em qualquer curriculum de cursos de física do século XX.

Também nos primórdios da evolução da nascitura teoria quântica, Werner Heisenberg enunciava o fundamental Princípio da Incerteza, que vinha jogar um balde de água fria na esperança de podermos conhecer com a precisão ilimitada, grandezas conjugadas, como a posição e a velocidade duma partícula. O princípio da incerteza é a expressão do que podemos esperar de uma cinemática quântica e, representa também um limite das medidas físicas que podemos efetuar, das grandezas relevantes, no mundo microfísico.

Ao mencionarmos o Princípio da Incerteza de Heisenberg, estamos perfeitamente cômicos de que estamos penetrando na polêmica mais excitante, travada entre os maiores físicos deste século. Na verdade, o Princípio da Incerteza pode ser considerado como o foco gerador das mais proficuas discussões sobre os fundamentos da Teoria Quântica.

Historicamente, podemos dizer que o modo polêmico de encarar a descrição dos fenômenos que ocorrem a nível atômico e sub-atômico, nasceu das primeiras discussões entre Albert Einstein e Niels Bohr. Com Niels Bohr, nascia a escola interpretativa da teoria quântica, posteriormente denominada Escola de Copenhague. O grande físico que se incorporou a essa linha de pensamento foi Heisenberg, criador da forma algébrica-matricial da teoria quântica [50]. Outro grande cientista que aderiu, até certo ponto, ao modo de

pensar de Bohr, foi o grande psiquiatra Carl Jung, de quem iremos citar algumas analogias e colocações [51], juntamente com as do seu companheiro e amigo, o físico Wolfgang Pauli. Também o Professor Max Born, que apoiava a postura de Bohr e Heisenberg, ao receber o Prêmio Nobel, lembrou os desapontamentos que dividiam, em 1954, célebres teóricos quânticos em dois campos [17] :

“ Quando eu disse que os físicos aceitaram o modo de pensar desenvolvido por nós nas nossas pesquisas, eu não me expressei corretamente : existem algumas, mas muito importantes exceções, ou seja, aqueles pesquisadores mais contribuíram para a construção da teoria quântica. O próprio Planck ficou do lado dos céticos até sua morte. Einstein, de Broglie e Schrödinger não cessaram de enfatizar os aspectos insatisfatórios da mecânica quântica ... “ .

Segundo Selleri [52], esse desacordo dramático está centrado em algumas das perguntas mais fundamentais de toda a ciência : será que os objetos atômicos existem, independentemente, das observações humanas e , se isso ocorre, será possível para o homem compreender corretamente seu comportamento ? Pode-se dizer que a escola de Copenhague, liderada por Bohr, Heisenberg e Born, deram respostas mais ou menos pessimistas a essas perguntas. Para entender bem as idéias dos defensores, como também dos opositores, da formulação final da teoria quântica, uma análise “ interna “ da física, não é suficiente. Serão também importantes para essa compreensão, elementos “ externos “, tais como biografias individuais, a história da cultura, preconceitos filosóficos e, talvez, um estudo profundo da biologia e da psicologia.

Para esclarecer o leitor, sobre os pontos principais que constituem o cerne das interpretações discrepantes dos fundamentos da teoria quântica, iremos expor os argumentos mais relevantes sustentados pela Escola de Copenhague. Para tanto, iremos tentar resumir, neste capítulo, os argumentos apontados por Heisenberg, nos livros da referência [50]. É relevante citar que o grande teórico dos fundamentos da Mecânica Quântica, David Bohm [53], costumava apontar dois posicionamentos, aparentemente antagônicos, do próprio Heisenberg : o primeiro aparecia antes da influência exercida por Niels Bohr, quando o jovem Heisenberg parecia querer formular uma teoria totalmente explicativa dos fenômenos microscópicos e o segundo, seria a sua adesão completa à filosofia de Bohr. Com sua grande honestidade em todos os sentidos, Bohm também comentava o quanto Einstein e, depois Schoenberg, tinham contribuído para que ele, Bohm , também alterasse seu próprio modo de ver o mundo.

Heisenberg escrevia que, com o advento da teoria da relatividade restrita de Einstein, foi necessário, pela primeira vez, reconhecer que o mundo físico, difere do mundo ideal, concebido em bases do dia a dia. Tornava-se aparente que, os conceitos ordinários, somente podiam ser aplicados a processos para os quais, a velocidade da luz podia ser imaginada como praticamente infinita. O material experimental, resultante dos refinamentos modernos da técnica experimental, requiritava a revisão de idéias antigas e a aquisição de idéias novas, mas como a mente sempre é lenta ao se ajustar a um domínio extenso de experiências e conceitos, a teoria da relatividade parecia, , no primeiro relance, algo repelentemente abstrata. Não obstante, a simplicidade de solução para um incômodo problema simples, fez com que a relatividade especial ganhasse aceitação universal. Como fica claro com que dissemos, a resolução dos paradoxos da física atômica pode ser conseguida somente com a renúncia de idéias antigas e queridas. A mais importante destas é a idéia de que fenômenos naturais obedecem leis exatas – o princípio da causalidade. De fato, nossa descrição ordinária da natureza, e a idéia de leis exatas, se baseia na hipótese de que é possível observar os fenômenos, sem influenciá-los apreciavelmente. Na atribuição de uma causa definida a um efeito definido, somente encontramos sentido, quando ambos (causa e efeito), podem ser observados sem a introdução de um elemento estranho que perturbe sua inter-relação. A lei da causalidade, pela sua própria natureza, só pode ser definida para sistemas isolados e, em física atômica, mesmo sistemas aproximadamente isolados, não podem ser observados. Isto deve ser pressuposto, pois em física atômica, estamos lidando com entidades que são (até o ponto que sabemos) [54], elementares e indivisíveis. Não existem elementos infinitesimais que possam nos ajudar a fazer uma observação, sem uma perturbação apreciável.

A segunda, entre as exigências tradicionalmente impostas a uma teoria física, é que ela deve explicar todos os fenômenos, como relações entre objetos existentes no espaço e no tempo. Essa exigência tem sofrido um relaxamento gradual no desenvolvimento da física. Agora, como uma descrição geométrica ou cinemática de um processo, implica em observação, segue-se que uma tal descrição de um processo atômico, necessariamente impede a validade exata da lei da causalidade – e vice-versa. Bohr [55] afirma que é, portanto, impossível ordenar que ambas exigências sejam cumpridas pela teoria quântica. Elas representam aspectos complementares e mutuamente excludentes de processos atômicos. Essa situação está claramente refletida na teoria quântica. Existe um conjunto de leis matemáticas exatas, mas estas não podem ser interpretadas como a expressão simples de relações entre objetos que existem no espaço e no tempo. As predições observáveis dessa teoria, podem,

aproximadamente, ser descritas por essas teorias, mas, não de modo único – o aspecto ondulatório e o aspecto corpuscular possuem a mesma validade aproximada. Essa indeterminação da representação do processo é um resultado direto da indeterminação do conceito “ observação ” – não é possível decidir, a não ser de modo arbitrário, quais objetos devem ser considerados como partes do sistema observado, e quais as partes que pertencem ao aparelho do observador.

Nas fórmulas da teoria, essa arbitrariedade, frequentemente, torna possível o uso de métodos analíticos bem diferentes, para o estudo de um experimento físico simples. Mesmo quando levamos em conta essa arbitrariedade, vemos que o conceito “ observação ” pertence, estritamente falando, à classe de idéias emprestadas da experiência cotidiana [56]. Ela somente pode ser estendida aos fenômenos atômicos, quando prestamos toda a atenção nas limitações, colocadas sobre todas as descrições espaço-temporais, pelo princípio de incerteza.

Bohr, na referência [55], expõe de forma sintética, o que acabamos de transcrever :

- 1) Na teoria clássica, temos relações causais dos fenômenos descritos em termos do espaço e do tempo.
- 2) Na teoria quântica, temos duas alternativas relacionadas estatisticamente:
 - a) Os fenômenos são descritos em termos do espaço e do tempo, mas sempre obedecendo o Princípio de Incerteza.
 - b) Ou temos relações causais expressas por leis matemáticas, o que torna impossível uma descrição física no espaço e no tempo.

Retomando Heisenberg, podemos dizer que, somente depois de tentarmos colocar no nosso sistema conceitual, essa complementaridade fundamental entre descrição espaço-temporal e causalidade, é que ficamos em condição de julgar o grau de consistência dos métodos da teoria quântica. Moldar os nossos pensamentos e a nossa linguagem, para estar em concordância com os fatos observados da física atômica, é uma tarefa muito difícil, do mesmo modo que o foi, no caso da relatividade restrita. No caso da relatividade, o procedimento de retornar às antigas discussões filosóficas sobre o problema do espaço e do tempo, acabou mostrando-se útil. Da mesma maneira, agora é altamente vantajoso rever as discussões fundamentais, tão importantes para a epistemologia, sobre a dificuldade de separação entre os aspectos objetivos e subjetivos do mundo. Muitas das abstrações que são características da física teórica moderna, já estavam sendo discutidas na filosofias dos séculos passados. Nessas épocas, essas abstrações podiam ser desprezadas, por serem consideradas como meros exercícios mentais, pelos cientistas que tinham por única finalidade, encontrar a realidade. Mas hoje, somos compelidos, pelos refinamentos da arte experimental, a levá-los em conta, seriamente.

Vamos, agora, estabelecer um parêntese nessa exposição sobre os fundamentos da teoria quântica, e tentar estabelecer uma analogia com o problema enfrentado por um psicólogo profissional (psiquiatra, psicanalista, etc.), diante de uma situação apresentada por um paciente. Aqui, aparentemente, o psicólogo exerce o papel de observador [57]. O paciente, o de objeto observado. Uma situação bem parecida também encontramos numa pesquisa em psicologia animal (ver próximo capítulo). Suponhamos, como ocorre frequentemente, que o paciente apresente ao psicólogo um problema que requer um aconselhamento. O aconselhamento pode ser de natureza muito ampla, abrangendo distúrbios, angústias, ansiedades, etc. O psicólogo, por melhor formação que tenha, por mais que pretenda manter uma atitude profissional, por mais que procure se afastar conscientemente do problema, para elaborar um vaticínio justo e competente, também é um ser humano. Tem suas qualidades e seus defeitos e, não é invulnerável diante de qualquer situação. Se o problema apresentado pelo cliente encontrar ressonância com um dos problemas do psicólogo, certamente, pelo menos no íntimo de ambos, formar-se-á uma região nebulosa de idéias, que torna difícil estabelecer uma divisão entre observador e observado. O observador (psicólogo), tenta induzir uma idéia no oceano de idéias do observado (paciente). Qualquer contestação advinda do paciente, já não será a mesma que ele proferiria, se já não tivesse sido solicitado pelo psicólogo. A interação entre ambos é inevitável e salutar. É dela que vem o equilíbrio. É claro que estamos supondo um paciente dotado de inteligência suficiente para manter um diálogo. Se tiver uma razoável formação cultural, a exemplificação ainda se torna mais sugestiva.

É óbvio que simplificamos a situação assim simulada e não entramos em particularidades específicas. O que procuramos mostrar, de modo sumário, é que nesse tipo de relacionamento, podem entrar argumentos de ordem objetiva e de ordem subjetiva. E não é por esse motivo que estamos deixando de fazer ciência. Argumentações como a nossa e outras muito mais elaboradas, levaram C. G. Jung a fazer a sua famosa assertiva : “ o psicólogo e o físico quântico estão no mesmo mundo de idéias ” [51].

Deixando para trás esse parêntese, voltamos a nos fixar na visão de Heisenberg sobre o que é essencial para prosseguirmos no uso frutífero da teoria quântica. Como vimos acima, ele e Bohr tinham sempre em mente o conteúdo que se poderia extrair de uma observação. Alguns físicos eminentes, chegaram a criticar duramente essa ênfase sobre o procedimento empírico. Como Heisenberg sempre procurava a interpretação das

leis em termos das imagens mentais formadas, a analogia com a física cotidiana só podia ser feita com o auxílio de outro princípio devido a Bohr: o Princípio da Correspondência, já mencionado acima.

Além disso, o grande físico alemão, baseado no extremo empirismo, recusava aceitar quaisquer das imagens e modelos da física da época. No exemplo do modelo atômico de Bohr, os físicos se refriam à posição e ao período de revolução de um dos elétrons do átomo. Essas noções eram uma herança da mecânica newtoniana e, em relação aos elétrons atômicos, eram classificadas como " não observáveis ". Heisenberg considerou essas " noções imaginárias " como sendo algo sem sentido, desprovidas de qualquer fundamento. Sugeriu o desenvolvimento duma mecânica quântica teórica, análoga à mecânica clássica, na qual apareciam apenas relações entre quantidades observáveis.

Estava fundada a teoria filosófica básica que iria nortear todas as explicações da mecânica quântica, segundo a escola de Copenhague. A maioria dos físicos aceitou essa postura e grandes aplicações e desenvolvimentos práticos começaram a se concretizar. Essa atitude pragmática, que considerava serem desprovidos de sentido os fenômenos não observáveis, mostrou-se e continua se mostrando bastante profícua.

Mesmo os físicos que adotavam outros métodos matemáticos, distintos do matricial de Heisenberg, quando da interpretação dos resultados experimentais, aderiram à filosofia de Copenhague. Entretanto, como já dissemos acima, ao citar Max Born, a unanimidade não era geral

Einstein [58], por exemplo, jamais aceitou esse posicionamento e dizia explicitamente :

" ... no que se segue eu quero mostrar as razões que me impedem de ter a mesma opinião de quase todos os físicos contemporâneos... O que não me satisfaz na Mecânica Quântica, numa **questão de princípio**, é a sua atitude em relação ao que me parece ser a meta programática de toda a física : a **descrição completa de qualquer situação (individual) real** (como se supões existir independentemente de qualquer ato de observação) ... "

Mais adiante :

" ... Consideremos como sistema físico um átomo radioativo com vida média bem definida, que praticamente está exatamente **localizado num ponto** de um sistema de coordenadas (essa localização não viola o Princípio de Incerteza). O processo radioativo consiste na emissão de uma partícula, descrita (no sentido da mecânica quântica elementar) por uma função de onda de Schrödinger em três dimensões... De outro lado, essa função de onda não implica nenhuma afirmação acerca do tempo de desintegração do átomo radioativo ... "

Prosseguindo :

" ... Então, levantamos a questão : pode essa descrição teórica (mecânica quântica) ser tomada como a **descrição completa** da desintegração de um átomo individual ? A resposta plausível imediata é - não ! - Isso porque, antes de mais nada, nós nos **inclinamos a assumir** que o átomo individual decai num instante bem definido ; todavia, esse tempo de valor bem definido, não está implícito na descrição pela função de onda. Portanto, se o átomo **individual** tem um instante de desintegração bem definido, então a descrição do átomo **individual** por meio da função de onda deve ser olhada como uma **descrição incompleta** ... "

Adiante :

" ... A isto, o teórico-quântico responderá : " ... essas considerações permanecem ou desaparecem junto com a afirmação de que **factualmente existe** uma coisa tal como um **instante definido** de desintegração de um átomo individual (um instante que **existe** independente de qualquer observação ! " Mas essa afirmação, do meu ponto de vista, é não somente arbitrária, mas, também, sem sentido. Essa afirmação só faz sentido se, **em princípio, eu posso determinar** o instante de tempo **empiricamente**. Mas isso envolve uma perturbação definitiva no sistema em que estamos interessados, de modo que o resultado da determinação não nos permite admitir nenhuma conclusão referente ao sistema **não-perturbado**. Portanto, a **suposição de que um átomo radioativo** tem um tempo de desintegração definido não é de modo algum justificável... A suposta dificuldade, provém do fato de postular algo **inobservável** como sendo algo **real** (essa é a resposta do teórico quântico) "

Depois,

" ... Essa discussão teve a finalidade de mostrar o seguinte : chegamos a concepções teóricas muito implausíveis, quando se tenta manter a tese de que a teoria quântica estatística é, em princípio, capaz de representar uma **descrição completa** de um sistema físico individual. Com outra visão, essas dificuldades de interpretação desaparecem, se olhamos a descrição quântica como uma **descrição de um conjunto de sistema**... Eu atingi essa conclusão após examinar vários tipos diferentes de considerações. Eu estou convencido de que qualquer um que se dê ao trabalho de levar a cabo tais reflexões conscientemente, se verá arrastado para essa interpretação da descrição da Mecânica quântica "

Terminando :

" ... Pois se a teoria quântica estatística não pretende descrever o sistema individual (e o seu desenvolvimento no tempo) **completamente**, então parece inevitável buscar em outro lugar uma **descrição**

completa do sistema individual... Eu estou firmemente convencido de que o desenvolvimento da Física Teórica será desse tipo, mas o caminho será, longo e difícil. Eu, agora, imagino um teórico quântico argumentar assim : “ Verdade. Eu admito que a descrição quântica seja uma **descrição incompleta** do sistema individual. Eu admito mesmo, que uma descrição teórica **completa** seja, em princípio, imaginável. Porém, eu considero demonstrado que a procura por uma tal descrição completa seria inútil. Pois a regularidade da natureza é constituída de tal forma que as leis podem ser **completa e adequadamente** formuladas, dentro do arcabouço de nossa **descrição incompleta** “... Então, eu só posso responder : seu ponto de vista é incontestável... mas a formulação envolvendo todos os elementos conceituais é mais natural... e é provável que as leis ... nada tenham a ver com estatísticas ... “

Talvez, essas críticas de Einstein à postura da Escola de Copenhague, tenham se constituído na maior fonte inspiradora para os trabalhos de outros físicos, que, também, se mostravam inconformados com essa quebra evidente dos conceitos clássicos de determinismo e causalidade. Entre esses cientistas, colocava-se o grande físico francês Louis de Broglie que, ao reexaminar o átomo de Bohr com seus saltos quânticos, chegou à conclusão de que a nova mecânica podia ser válida para explicar as chamadas órbitas estacionárias (ou estáveis) do elétron, ao redor do núcleo. Quando nos defrontamos com problemas transientes (abruptos no tempo), a mecânica quântica não nos oferece uma descrição (determinista) [59]. De Broglie trabalhou intensamente durante sua vida, para fornecer uma formulação alternativa para o problema interpretativo das formulações quânticas [60] [61]. O livro da referência [60] é um prenúncio do trabalho posterior de David Bohm sobre o potencial quântico, assunto que iremos abordar, na sequência. O livro da referência [61] é uma revisão fundamental sobre a posição do autor e, além de explicitar paradoxos e contradições da Mecânica Quântica, expõe, de modo claro, o caminho seguido até se chegar a uma das mais importantes componentes da física moderna : a equação de Dirac.

Antes de prosseguirmos na crítica dos fundamentos interpretativos da teoria quântica, achamos importante fazer uma análise da posição dos teóricos quânticos, em relação ao aspecto onda-partícula, introduzido acima.

Retornando a Heisenberg [42] [50], notamos que a insuficiência de uma linguagem apropriada para a expressão de fenômenos quânticos, tem raízes mais profundas do que se pode supor. De um modo geral, ao tentarmos fixar uma imagem mental dum fenômeno em observação, remontamos às figuras que fazem parte da nossa vida cotidiana. A forma de expressarmos o que observamos, também faz parte do nosso vocabulário do dia a dia. Quando nos defrontamos com fenômenos novos, como os advindos da dualidade onda-partícula, fica mais fácil recorrermos às imagens mais comuns. Assim, é natural que a imagem de uma partícula nos surja, imediatamente, como sendo a de uma esfera tremendamente pequena. De início, podemos partir de uma bola de futebol, depois pensamos numa bola de tênis e daí, para uma bolinha de gude e, assim por diante. A idéia de uma partícula é mais facilmente cristalizável dentro do nosso repertório intelectual do que o conceito de uma onda (iremos exibir um exemplo material, mais adiante). Uma onda, de um modo geral, pressupõe a existência de um meio, por exemplo, um lago no qual jogamos uma pedra. Aí, vemos as ondas circulares. Mesmo em ciência, quando se trata da luz, entendemos bem, por exemplo, as franjas de uma foto de difração, de interferência, etc. E, então, arriscamos formular uma pergunta, um tanto arrojada :

“ Qual motivo, tanto na física teórica como na experimental, quando estudamos os entes atômicos, sub-atômicos, nucleares e sub-nucleares, nos leva a criar a chamada “ Física das partículas elementares “, tanto para baixas como para altas energias ? Não sabemos, porque não existe, para os mesmos fenômenos, uma “ Física das ondas elementares “ ? As eventuais respostas virão a seguir [62].

O próprio Heisenberg sempre clamou pela indivisibilidade, mesmo sintática, entre partícula e onda. Um objeto quântico é um ente só. Somente a observação pode decidir qual o aspecto que está sob escrutínio. Para sermos mais precisos, devemos afirmar que a maioria esmagadora de projetos experimentais, foi desenvolvida para estudar as propriedades de “ partícula “ dos objetos quânticos.

É forçoso reconhecer que, do ponto de vista intuitivo, fica mais fácil imaginarmos uma minúscula esferazinha do que a representação de uma onda. Uma partícula elementar, no sentido ondulatório, corresponde, ao se movimentar livremente, a um plano que se estende ao infinito, nas suas duas dimensões. É o que chamamos de **onda plana**. Convenhamos que a visualização de tal situação não é óbvia. E, para evitar confusões, é conveniente ressaltar que uma tal onda de matéria se propaga no espaço comum, tri-dimensional (no caso não relativístico). A outra onda, a função de Schrödinger, é algo muito mais complicado e abstrato. Ela existe num espaço chamado de espaço de Hilbert e, depende do chamado espaço de fase (que corresponde às três coordenadas espaciais, mais as três coordenadas da quantidade de movimento) e, além do mais, ela se expressa por meio de um número complexo.

Também fica difícil imaginarmos um espaço no qual ignoramos a noção de ponto e adotamos como elemento fundamental, o plano. Talvez, a analogia mais próxima, seja a de um livro como as bíblias usuais,

confeccionadas com papel de mínima espessura, onde os elementos fundamentais são as folhas. Esses espaços podem formar o objeto de uma geometria mais ampla, citada acima, a geometria projetiva [63] [64].

O que nos chama mais a atenção é que, uma ciência tão antiga, como a geometria projetiva, cujas origens remontam ao início do século XIX, não tenha influído decisivamente nos desenvolvimentos das grandes teorias físicas que revolucionaram este século, como as relatividades e a teoria quântica. Lembremos que a idéia de admitirmos elementos situados no infinito (que será importante na sequência), é bastante antiga. Mas colocar os elementos no infinito e elementos ordinários em pé de igualdade, o que é natural, do ponto de vista projetivo, permanece como uma ilusão, até que as propriedades projetivas das figuras foram investigadas pelos métodos da geometria elementar, devido ao fato desses métodos serem baseados em medidas. A noção métrica, necessariamente, distingue a diferença entre imagens infinitas e imagens finitas. Para poder definir precisamente a noção de espaço projetivo, torna-se necessário **omitir totalmente** da geometria projetiva, tudo que estiver relacionado com a **medida**. Esse é o procedimento inverso do usado pelo físico, que, sempre parte da medida para construir suas teorias. É claro que este último procedimento é legítimo, pois o mundo no qual vivemos é imerso num espaço euclidiano. Mas não podemos nos esquecer dum princípio fundamental das teorias geométricas : “ quando partimos de uma geometria ampla, no sentido de não oferecer grandes restrições sobre os conceitos envolvidos, temos como resultado que, introduzindo gradativamente constrictões sobre as hipóteses básicas, iremos obtendo esquemas geométricos subordinados à geometria original “ [49]. É o que chamamos de hierarquia de geometrias. Podemos considerar as geometrias decorrentes, como sub-geometrias da geometria original. Essa idéia fundamental, devida a Felix Klein [49], permite que, em ordem decrescente de complexidade se possa, esquematicamente, estabelecer a ordem : geometria projetiva, geometria afim, geometria unimodular e geometria ortogonal (métrica). Também é fácil de ver [63], que as geometrias de Lobachevsky, de Riemann e de Euclides são englobadas como sub-geometrias da geometria projetiva. Também a geometria do espaço de Minkowski da relatividade restrita está compreendida na geometria projetiva. No entanto, quanto mais ampla (democrática) for uma geometria, menor será o número de objetos geométricos que permanecem invariantes, quando da efetivação duma mudança geométrica (uma transformação). Ao contrário, quanto mais ditatoriais forem as restrições impostas às sub-geometrias, maior será a riqueza de objetos geométricos inalterados. Só para dar um exemplo, tomemos uma geometria métrica (a medida de distâncias é uma restrição séria), como a de Riemann. Ela pode ser definida de modo autônomo [21], como pode ser obtida dos axiomas da geometria projetiva [64 b e c]. Além do mais, temos de citar uma hipótese que pode se tornar relevante para a interpretação de fenômenos no domínio quântico : o fato de que as propriedades e figuras que permanecem invariantes sob as transformações de uma geometria mais geral, são mais estáveis que as propriedades das figuras e quantidades que são invariantes numa geometria subalterna. A geometria superior é mais estável que uma das suas sub-geometrias [65].

Do ponto de vista dos fundamentos da geometria projetiva e, que também são relevantes para o presente trabalho, destacamos os seguintes :

- 1) As relações métricas (medidas) são estranhas aos fundamentos da geometria projetiva, apesar delas poderem ser incorporadas à geometria, com a ressalva que essas relações não são vistas como propriedades dos entes em si, mas como relações entre esses entes e uma forma fundamental, o círculo imaginário no infinito (ver referência [63], em especial, Efimov, pag. 167 e seguintes). Essa característica não métrica da geometria projetiva pode estar relacionada (como veremos adiante) com a interpretação do paradoxo de Einstein, Rosen e Podolsky e do Princípio da Indistinguibilidade.
- 2) O mais notável aspecto da geometria projetiva é o fato dela conter o chamado Princípio da Dualidade. No espaço projetivo, onde definimos pontos, linhas e planos como elementos fundamentais, se ao invés das expressões “ um ponto está num plano “ ou “ um plano passa por um ponto “, como afirmamos na geometria visual, dissermos “ um ponto pertence a um plano “ ou “ um plano pertence a um ponto “ ; ao invés de dizermos “ um ponto está numa linha “ ou “ uma linha passa por um ponto “, dissermos “ um ponto pertence a uma linha “ ou “ uma linha pertence a um ponto “ e, ao invés de “ uma linha está num plano “ ou “ um plano passa por uma linha “, dissermos “ uma linha pertence a um plano “ ou “ um plano pertence a uma linha “, poderemos aplicar os axiomas fundamentais da geometria projetiva e concluir que :

“ Podemos associar aos axiomas uma proposição válida. Sempre haverá outra proposição associada a esta, com a propriedade de que se trocarmos na primeira proposição a palavra “ ponto “ pela palavra “ plano “, ela se reduzirá à 2ª proposição “.

Existe, portanto, uma **dualidade** entre pontos e planos nas proposições (teoremas). A palavra “ linha “, permanece imutável.

Esse é o Princípio de Dualidade no espaço projetivo. E é esse princípio, mencionado no início deste parágrafo, que acreditamos estar nas raízes do Princípio de Complementaridade de Bohr.

Sabemos que ao anunciarmos essas analogias entre Teoria Quântica e Fundamentos da Geometria Projetiva, estamos iniciando uma discussão ousada e não usual, fato que pode gerar polêmicas e discussões. No entanto, como afirmava Einstein : “ a física é uma aventura do pensamento “, cremos que, com nossas afirmações, estamos abrindo uma nova forma de encarar as alternativas de discussão das interpretações da teoria quântica, o que, por si só, já compensa o esforço.

A verdade é que a posição de um cientista é difícil ; ele não tem defesa. A sua defesa é o seu próprio trabalho. Para terminar este capítulo, gostaríamos de citar as palavras de Tennessee Williams:

“ o trabalho de um poeta é a sua vida e, vice-versa, a sua vida é o seu trabalho “

“ Suddenly last summer “

Penguin Books, England (1957) pg. 114

§ 5 – O JOGO COPENHAGUE VERSUS EINSTEIN, DE BROGLIE & S. A.

“Seguindo este ponto de vista, a matéria não somente é penetrável, mas cada átomo se estende, se podemos assim dizer, pelo todo do sistema solar, ainda que mantendo seu próprio centro de força”.

Michael Faraday

London & Edinb., Philosophical Magazine, 1844

Vol. XXIV, pg. 136

Desde o início da formulação da moderna teoria quântica, em 1925, das três alternativas propostas, citadas acima, a que mais parecia estar envolvida com a realidade discreta do mundo sub-atômico, era a matricial, proposta por Heisenberg [50]. Também, por partir dum ponto de vista algébrico, sempre foi a forma mais aceita pelo Prof. Mário Schoenberg que, mais tarde, viria estabelecer laços de amizade com o físico alemão. Na fase inicial, Heisenberg mostrava-se altamente inclinado a aceitar a possibilidade de encontrar a teoria mais explicativa possível. Porém, no decurso de suas investigações, ele acaba descobrindo, por meio duma análise mais profunda dos dados experimentais, tanto do aspecto corpuscular quanto do aspecto ondulatório, o seu famoso Princípio da Incerteza. Como esse princípio era inerente às limitações contidas nas observações experimentais, Heisenberg, já conhecendo a postura de Bohr sobre questões correlatas, passa a aceitar e incorporar na sua teoria, algumas sugestões e ponderações do notável cientista dinamarquês, com quem passa a ter contatos mais frequentes. Também Heisenberg coloca-se a par das discussões mais pessoais, sempre levadas a efeito com o maior espírito de amizade e respeito mútuo, entre Niels Bohr e Albert Einstein. Cada um desses gênios tinha suas próprias convicções a respeito da filosofia das ciências. De um lado, Bohr, influenciado pela corrente existencialista cristã, criada por seu compatriota Sören Kierkegaard, aceitava a idéia da renúncia de um conhecimento completo da natureza. Mas essa renúncia não deve ser entendida como arbitraria [66]. Citando o próprio Bohr, na página 83 da referência [66], temos :

“Na minha opinião, só existem dois modos de provar que um formalismo matemático, logicamente coerente, é inadequado : demonstrando que suas consequências não estão de acordo com a experiência, ou provando que suas previsões não esgotam as possibilidades de observação”.

Ora, dentro da concepção de Bohr – Heisenberg, como efeito da Complementaridade e da Incerteza, as possibilidades experimentais se deparam com um limite. Ultrapassar esse limite é procurar o que possibilidades experimentais se deparam com um limite. Ultrapassar esse limite é procurar o que foi denominado por eles de “ não observável “.

Na outra posição, Einstein procurava manter a postura firme, já cristalizada epistemologicamente, que é a de estabelecer como meta programática de toda a física, a obtenção de uma descrição completa de qualquer situação. Para ele, a realidade deveria existir em si, independentemente de qualquer ato de observação. Assim, Einstein não se conformava com as afirmações de Bohr e Heisenberg, como citamos no capítulo anterior, e exprime a Bohr o sentimento de desconforto que ele sentia, diante de uma quebra aparente de certos princípios solidamente estabelecidos, na explicação da natureza, princípios sobre os quais deveria haver um acordo geral. Bohr respondia que, dentro do objetivo de levar a ordem para dentro dum domínio da experiência, totalmente novo, não seria mais possível ter confiança em princípios ancorados no hábito, quaisquer que eles fossem e qualquer que fosse sua generalidade : somente uma exigência subsiste, a de evitar as inconsistências lógicas. Desse modo, continuava a persistir entre os pontos de vista e a linguagem dos dois cientistas, um obstáculo intransponível. Esse desacordo permaneceu até o desaparecimento de ambos.

Essas atitudes científicas, totalmente opostas em relação à interpretação da teoria quântica, ao invés de bloquearem novas argumentações, foram e continuam sendo altamente estimulantes, para o surgimento de outras alternativas. Assim, Louis de Broglie, que assumia sua preferência pela posição einsteniana, publicava sua teoria da onda piloto [60] que, anos mais tarde, seria reformulada por David Bohm, como iremos ver adiante, ao tratar da sua teoria das variáveis escondidas. Paul Dirac [67], outro fundador da teoria quântica, admitindo a existência de fenômenos que só podemos prever estatisticamente, afirmava que isso se devia a uma escolha feita pela natureza, mantendo uma atitude cautelosa, mas sempre preferindo a versão da Escola de Copenhague.

Apesar dessas polêmicas monumentais, a teoria rapidamente ganhava crescente prestígio e abria o caminho para descobertas e unificações jamais obtidas pela ciência. Como consta da citação do Prof. Max Born, a quase totalidade da comunidade científica, aceitava e adotava o arsenal matemático e conceitual da nova teoria, obtendo resultados notáveis, como a incorporação da química como uma sub-disciplina da teoria quântica, ao empregar as equações de Dirac. Os inumeráveis outros sucessos da teoria quântica, como a descoberta dos semi-condutores, dos elementos dos computadores, dos lasers, da supercondutividade, etc., são por demais conhecidos, para continuarmos sua classificação.

Como o título deste capítulo sugere, além da Escola de Copenhague, somente uma tentativa, a de de Broglie [60] procurou, de forma explícita e operacional, restaurar a causalidade clássica dentro do esquema da teoria quântica. Mas essa teoria, denominada teoria da solução dupla ou teoria da onda piloto, acabou sendo abandonada pelo próprio autor. De modo equivocado, alguns autores atribuem esse abandono às objeções feitas por Wolfgang Pauli, acerca de discrepâncias obtidas no cálculo das energias e quantidades de movimento, no problema da colisão partícula – rotor. Na verdade, de Broglie conseguiu refutar essas críticas. As razões para esse abandono eram mais profundas:

- 1) Tentando usar a função de onda de Schrödinger como um guia para a partícula, de Broglie acabou percebendo que essa função era somente uma representação de probabilidades, sem que se pudesse atribuir uma realidade física a ela. Portanto, ela não pode ser um agente físico que guia o movimento da partícula [68].
- 2) A outra e, certamente, a mais poderosa objeção contra a teoria da onda piloto, viria por parte de Francis Perrin, em 1928. Se consideramos a onda esférica divergente, que representa a emissão isotrópica de corpúsculos por uma fonte, sabemos que sua amplitude decresce com o inverso da distância à fonte. A função de probabilidade decresce, então, com o inverso do quadrado da distância à fonte. A uma distância muito grande da fonte, a onda terá uma amplitude extremamente pequena. Entretanto, se ela penetra num dispositivo que mede interferências, a teoria da onda piloto nos afirma que o movimento do corpúsculo nesse aparelho é gerado pela propagação duma onda, cuja amplitude é infinitesimal : isso é muito chocante, do ponto de vista físico. Perrin mostrava, claramente, que a função de onda de Schrödinger (função de probabilidade), não podia ser o agente físico que guiava o corpúsculo.

Agora, por uma questão de justiça, citamos o próprio de Broglie, na página 178 da referência [60] :

“ Tais são as considerações que me levaram, em 1928, a abandonar, por ser insustentável, a teoria da onda piloto. A forma primitiva das minhas idéias... eu não havia chegado à convicção sobre uma justificativa matemática e, se isso fosse possível, estaria acima das minhas forças. Responsável pelo ensino na Faculdade de Ciências de Paris, a partir de novembro de 1928, eu acreditava que não tinha o direito de ensinar um modo de ver que eu não conseguia justificar. Eu, então, aderi à interpretação puramente probabilística formulada por Born, Bohr e Heisenberg. Apesar das críticas de alguns sábios isolados como Einstein e Schrödinger, essa interpretação probabilística foi adotada, em seguida, por quase todos os teóricos da física. Ela se tornou, então, a interpretação “ ortodoxa “ da Mecânica Quântica. Segundo meu conhecimento, entre 1928 e 1951, nenhuma tentativa séria foi feita para tentar construir, efetivamente, uma outra interpretação bastante ligada às concepções clássicas.

Depois nos chegam os dois trabalhos publicados em janeiro de 1952, por David Bohm [69] .

Iremos analisá-los nas suas linhas gerais.

O desgosto de de Broglie de 1928, logo cedeu lugar a um novo de Broglie, ao escrever o livro da referência [61], em 1934. Quando de Broglie afirma que entre 1928 e 1951 nada realmente construtivo foi feito, ele tem razão. Mas do ponto de vista crítico, dois paradoxos marcaram época : o primeiro, devido a O. B. Klein [70] que mostrava que, quando a energia potencial (força) aumentava com a distância, maior a probabilidade duma partícula sujeita a essa força, escapar. Esse era um efeito verdadeiramente quântico. Classicamente, a situação é impossível. A explicação se encontra em [70]. O segundo, realmente muito mais importante, aparecia, novamente, com Einstein [71] e se intitulava "A descrição da realidade física pela mecânica quântica, pode ela, ser considerada como completa ?". Este, realmente, pode ser considerado como um dos grandes trabalhos críticos sobre a teoria quântica.

Nesse artigo, Einstein e seus colaboradores, imaginam um experimento mental, no qual duas partes dum sistema atômico se separam. Eles questionam se uma medida feita sobre uma das partes, influencia a outra parte, segundo a teoria quântica. Mas, se isso ocorre, como é óbvio, esse fato deveria corresponder a alguma coisa como ação à distância, isto é, algo como um efeito não - local ; ou, talvez, a propagação de um sinal com velocidade superior à da luz, violando a relatividade restrita. É bom lembrar que uma parte do sistema pode estar num laboratório terrestre e a outra parte, em outro extremo da galáxia.

É útil lembrar que a objeção levantada por Francis Perrin contra o esquema de de Broglie da onda piloto já levava, de certa forma, à idéia de que efeitos não - locais poderiam ser relevantes, no caso de propagações com velocidades finitas. Também na década de 30, o físico russo Gleb Wataghin tentava reformular, em diversos trabalhos, a teoria quântica introduzindo, explicitamente, o conceito de não localidade.

Voltando à questão levantada pelo paradoxo de Einstein, Rosen e Podolsky, podemos dizer que a primeira explicação do fato foi um excelente artigo do próprio Niels Bohr [72], que procuraremos resumir, usando as próprias palavras do autor :

" Segundo nosso ponto de vista, vemos agora que o critério de realidade física proposto por EPR (siglas dos autores), contém uma ambiguidade relativa, quando usam a expressão " sem perturbar o sistema, de modo algum ". Evidentemente, não se trata, nesse caso, duma perturbação mecânica do sistema estudado, quando do último estágio crítico do processo de medida. Mas, mesmo nesse estágio, a questão essencial é aquela **duma influência sobre as próprias condições que definem os tipos possíveis de predições relativas ao comportamento futuro do sistema**. Como essas condições constituem um elemento inerente à descrição de todo fenômeno, ao qual o termo " realidade física " pode ser associado de modo correto, nós vemos que a argumentação dos autores não fornece a eles o direito de concluir que a descrição, pela mecânica quântica, é, essencialmente, incompleta. Pelo contrário, esta descrição, como se vê pela discussão precedente, pode ser caracterizada como uma utilização racional de todas as possibilidades de uma interpretação, não ambígua, das medidas que são compatíveis, na teoria quântica, com a interação finita e incontrolável entre objetos e instrumentos de medida. De fato, somente porque dois dispositivos experimentais quaisquer, permitindo definir, sem ambiguidade, grandezas físicas complementares, se excluem mutuamente, é que podemos abrir espaço para novas leis físicas, cuja coexistência poderia, à primeira vista, parecer irreconciliável com os princípios fundamentais da ciência. É justamente esta situação inteiramente nova, encontrada na descrição dos fenômenos físicos, que a noção de **complementaridade** procura tornar precisa ".

As próprias idéias de Einstein dessa época, já resumidas, em parte, no capítulo anterior, são expostas no artigo " Physique et Réalité " [73]. Sua atitude em relação às pessoas que sempre defenderam a idéia de que a mecânica quântica pudesse oferecer uma descrição exaustiva dos fenômenos individuais, é expressa na frase :

" Essa crença é logicamente possível e sem contradições, mas ela é tão contrária ao meu instinto científico que eu não posso abandonar a procura dum sistema mais completo de conceitos ".

Não iremos continuar a discutir os aspectos fundamentais dessa discordância de posições, pois as referências citadas esclarecem mais do que tudo que pudéssemos resumir. Somente sobre a palavra conceito, teríamos muito mais a dizer. Também não nos aprofundaremos aqui, na parte referente ao paradoxo EPR. Dela, apenas destacaremos o aspecto mais relevante para o que exporemos mais tarde : a possibilidade, já mencionada, da existência de efeitos não localizados no espaço - os chamados efeitos não-locais.

Como afirmava de Broglie em 1956 [60], provavelmente a primeira tentativa séria de restauração da causalidade clássica em física quântica, seria a desenvolvida por David Bohm [69]. Efetivamente, para levar adiante seu novo programa de interpretação da teoria quântica, Bohm teve de admitir alguns novos elementos, dentro do quadro já estabelecido. Para estabelecer a dinâmica de um corpúsculo,

dentro da teoria causal [74], Bohm parte das equações de Lagrange e de Hamilton, usuais. Transcreve facilmente os resultados obtidos para o formalismo métrico da Teoria da Relatividade Generalizada (confessamos que nunca chegamos a entender o porquê disso) e chega, admitindo uma função de onda usual, à definição de uma função Q , por ele denominada de Potencial Quântico.

Como diz de Broglie, na sequência :

“ Podemos, então, ser tentados a definir o potencial quântico, unicamente, a partir da função de onda contínua. Voltamos, assim, à teoria da onda piloto que eu expus no Conselho Solvay de 1927 e que Bohm retoma no seu artigo de 1952.

Mas nós sabemos que este ponto de vista não parece muito aceitável : se queremos voltar a uma teoria causal, seria necessário, para poder definir o potencial quântico pelas variações do módulo da função de onda, atribuir a essa função de onda uma realidade física como Bohm tentou fazer e vimos que isso é impossível (como veremos no capítulo seguinte, essa impossibilidade estava ligada ao uso da função de onda.; a verdade viria de outro ente matemático). A reação da onda sobre o corpúsculo, representada analiticamente pelo potencial quântico, não pode, realmente, ser advinda da função de onda, que é fictícia : essa reação deve ser proveniente da onda ψ , que representa o fenômeno físico de natureza ondulatória e, sendo assim, o corpúsculo se incorpora no esquema, se o consideramos como uma pequena região singular. A verdadeira expressão física do potencial quântico deve ser aquela que faz aparecer a variação da onda pilotada e não aquela que faz intervir a onda piloto. Essa ilusão de que o potencial quântico provém da função de onda vem de uma condição restritiva imposta pela hipótese da dupla solução “

Como o trabalho de Bohm se intitulava “ Uma interpretação sugerida da teoria quântica em termos de variáveis “ escondidas “ ”, a primeira parte, ou seja, a introdução do possível potencial quântico, não apresentava nada de escondido. Como ele defendia que partículas eram sempre partículas – sempre, não somente quando são observadas (fato esse que nunca rebateu a teoria de Bohr e Heisenberg exposta acima, na qual os aspectos ondulatórios e corpusculares formam uma entidade única), ele tinha de explicar como o comportamento dessas partículas era afetado pelo potencial quântico. Esse comportamento é determinado por um campo incomum, ou onda, que consiste tanto de versões clássicas do eletromagnetismo e da gravitação, como de uma força inteiramente nova, que seria responsável por efeitos não clássicos. As variáveis escondidas seriam as posições iniciais das partículas que determinariam a natureza da onda piloto. Seriam escondidas pois uma medida delas, antes de entrarem no aparelho experimental, acarretaria uma mudança radical de seus valores, o que invalidaria sua hipótese [75].

O que nos fascina, ao escrever este capítulo, é o fato da década de 50 nos ter oferecido a oportunidade de participar da história da física, não mais como espectador distante do espetáculo, mas como figurante, ainda que secundário, da grande encenação. Ao contrário do que está escrito nas referências [53] e [75], a passagem de quatro anos de David Bohm na USP, não foi tão inexpressiva, como esses jornalistas escrevem. Em primeiro lugar, devemos nos perguntar por qual motivo Bohm veio para o Brasil e, em especial, para a USP. São Paulo não tinha praias e, na época, seu carnaval era sofrível. Se o salário seria alto ou baixo, esse fator não influenciaria Bohm, dado seu desprendimento. Um dos motivos foi de ordem científica. A presença do Prof. Mário Schoenberg na direção do Departamento de Física da USP foi decisiva na escolha, isto dito pelo próprio Bohm. A possibilidade de poder continuar seus trabalhos de modo livre, a chance de poder dar sequência aos seus contatos com cientistas do exterior e, sobretudo, enfrentar uma situação totalmente nova, foram fatores determinantes da sua vinda e permanência entre nós.

Cientificamente, Bohm chegava à USP sobrecarregado de sérias dúvidas. Em 1951, via seu livro “Quantum Theory “ [76], escrito inteiramente dentro da filosofia da Escola de Copenhague, publicado. Nele, Bohm, com extrema lucidez, mostrava que havia absorvido totalmente o modo de Bohr ver a teoria quântica. Mas, paradoxalmente, não era o seu próprio modo de entender a teoria quântica. Isso ele demonstra claramente ao publicar, em 1952, os trabalhos da referência [69], ano de sua chegada à USP. Na USP, além de Schoenberg, Bohm estabelece um contato maior com pesquisadores mais jovens, como Walter Schützer e Jayme Tiomno. Com Schützer, em especial, Bohm publica trabalhos sobre o paradoxo EPR e sobre sua teoria de variáveis escondidas. No entanto, segundo relato do Prof. Guido Beck, do CBPF, Bohm sempre teve de se defrontar com a oposição de Schoenberg às variáveis escondidas. Em teoria quântica, Schoenberg sempre deu preferência à formulação algébrica-matricial de Heisenberg, achando que a formulação analítica de Schrödinger, apesar de ser de mais fácil aplicabilidade e de alcançar resultados espetaculares, mascarava por demais os fundamentos da teoria. Além disso, apesar das duas versões (de Heisenberg e de Schrödinger) serem equivalentes, quando as energias envolvidas eram relativamente pequenas, havia uma total discordância para altas energias. No caminho relativístico para a teoria de campos quantizados , a versão de

Heisenberg ia se desenvolvendo e ganhando maior aceitação, enquanto que a de Schrödinger, apesar de ser a antecessora das equações de Klein-Gordon, de Pauli e de Dirac, perdia seu sentido previsivo. Isso, Schoenberg exibiu numa série de trabalhos [77] que culminava com sua obra "Quantum Mechanics and Geometry", onde temos uma formulação da teoria quântica alicerçada numa série de álgebras geométricas, trabalho que continua sendo um marco na história da teoria quântica. Um exame mais profundo e, ao mesmo tempo, escrito em linguagem mais elementar, foi levado a efeito pelo presente autor [38].

Segundo Beck, Schoenberg chegou mesmo a sugerir a Bohm que abandonasse a sua formulação original das variáveis escondidas pois, se para Bohm a formulação de Bohr e Heisenberg parecia uma ilusão, a formulação de Bohm, na forma apresentada em 1952, iria se diluir, quando do confronto com experiências futuras. Seria necessário penetrar mais fundo nessas questões tão englobantes. Talvez a idéia de um potencial quântico seria frutífera, mas a introdução de variáveis escondidas, não. Mais uma vez, uma "premonição" de Schoenberg se materializava : no seguimento de sua carreira científica brilhante, Bohm continuou a desenvolver e a aperfeiçoar suas idéias sobre o potencial quântico, mesmo quando partiu do Brasil, foi para Israel e se fixou na Inglaterra. Nesse país, juntamente com Basil Hiley, continuou essa linha de pesquisa, até o fim de suas atividades. Em 1959, juntamente com Y. Aharonov [78], propunha uma experiência simples, mas engenhosa, admitindo, a nível quântico, que uma grandeza puramente matemática, o potencial vetor, poderia ter efeitos observáveis. Isso parecia um escândalo. Como obter efeitos eletromagnéticos, onde não há campo eletromagnético? A resposta experimental foi positiva [79], com os resultados confirmando os cálculos de Bohm. É claro que o efeito Bohm-Aharonov deveria provocar debates, mas a conclusão de toda a situação pode ser tirada das palavras de Feynman [80] :

"É interessante, como algo igual a isso possa ter ficado circulando durante 30 anos, talvez devido a certos preconceitos sobre o que é e o que não é significativo, e permaneça ignorado". Também é estranho como esse trabalho fundamental possa ter ganho uma relevância quase nula na entrevista da referência [75]. A verdade é que o próprio Prof. Bohm, em 1988, desviou desse assunto quando nós o indagamos, em Londres, fora da Universidade. Não era bem o que ele queria discutir no momento.

Relembrando os anos 50, é imperioso citarmos que na USP, Bohm ministrou vários cursos e seminários notáveis. Entre esses, o Curso de Física Teórica, corrigido e mimeografado pelo Prof. Paulo Saraiva de Toledo e o Curso de Mecânica Estatística, do qual ainda guardamos o original, escrito a lápis.

Nós, como estudante, tivemos oportunidade de assistir alguns seminários proferidos por Bohm. O Prof. Schoenberg sempre manteve a idéia de que um jovem se torna pesquisador, se estiver ao lado dum pesquisador. Num desses seminários sobre Mecânica Estatística, ousamos fazer uma pergunta a Bohm :

"Professor, o seu potencial quântico seria o mesmo que pensamos supor existir, e que é responsável pela atração entre bósons (partículas que seguem a estatística de Bose - Einstein) e pela repulsão entre férmions (partículas que obedecem a estatística de Fermi - Dirac) ?

Bohm respondeu :

" Não sei. Se eu conseguir desenvolver satisfatoriamente o que estou pensando, talvez eu possa responder a essa pergunta. Como palpite, posso dizer que não coincidem. Mas é cedo para tirar qualquer conclusão. Aguarde ". Depois disso, conversamos bastante e ele nos forneceu uma bibliografia imensa, para ler. Encontramo-nos mais algumas vezes e a pergunta continuava indefinida. Conversávamos sobre seu livro de 1951 e, ele se mostrava reticente. Aconselhava-nos a seguir os estudos sobre os plasmas, campo que parecia ser de muito futuro. Em seguida, o tímido e simpático Professor Bohm, se despedia com um sorriso. Na época, não podíamos prever que esse homem tão simples, iria se tornar tão famoso, e que alcançaria o renome internacional do qual se fez merecedor. Tornamos a nos ver em 1966 e, pela última vez, em 1988. Em 1992, ele desaparecia.

E as variáveis escondidas ? Seu destino é descrito, de forma claríssima, num livro de John Brockman [81]. A Escola de Copenhague ganhava mais um round, mas não a luta definitiva.

Em 1960, éramos encarregados pelo Prof. Schoenberg de ministrar o Curso de Mecânica Quântica.

Como existiam dois períodos, o diurno e o noturno, o número de aulas era bastante elevado. Como, também tínhamos de ministrar o Curso de Teoria da Relatividade, tivemos de dividir as tarefas com um colega. A escolha do livro texto de Mecânica Quântica era problemática, pois havia uma proliferação imensa de autores. Como na nossa formação havíamos seguido, mais de perto, os livros de Dirac [82], o de Schiff e o de Bohm, acabamos ficando com o de David Bohm, como base. O de Dirac era bastante sofisticado para uma primeira abordagem, enquanto o de Schiff, apesar de correto, era bem da moda e nada crítico. Dele, aproveitamos os problemas e exercícios. Quando havia uma dúvida matemática mais ampla, recorriamos ao clássico de von Neumann [83].

Hoje, no final de 1998, terminando o século XX, paramos para pensar e perguntamos :

“ Será que para a descrição de tantos fenômenos descobertos e, em especial, para descrição do mundo sub-atômico (domínio da teoria quântica), devemos nos deter somente em medir distâncias, massas, tempos, velocidades, etc. ? “

Acompanhando Dirac [82], “ vemos que a tradução clássica sempre foi considerar o mundo como uma associação de objetos observáveis, se movendo de acordo com leis de forças definidas, de modo a podermos formar uma imagem mental no espaço e no tempo, do esquema total. Isso conduz a uma física cuja finalidade é fazer hipóteses, é fazer hipóteses sobre o mecanismo e as forças que interligam esses objetos observáveis, para explicar seu comportamento da maneira mais simples. Nos anos recentes, tornou-se crescentemente evidente, entretanto, que a natureza trabalha num plano diferente. Suas leis fundamentais não governam o mundo como ele aparece na nossa imagem mental, por nenhum modo direto mas, pelo contrário, suas leis controlam um substratum do qual não podemos formar um quadro mental sem introduzir irrelevâncias...”.

Retornamos à pergunta : será que, entre essas irrelevâncias, não podemos identificar o desejo desmesurado de obter um número, como resultado de uma medida ? Será que não perdemos muito do conteúdo desse substratum, quando só pensamos em fazer observações imediatas, e, tentamos encontrar um número ?

Pode ser que, na metade do caminho, paremos para pensar num novo conceito e que, após analisarmos bem a situação, verificamos que esse conceito, ao invés de atrapalhar nota meta inicial, acaba até aperfeiçoando - a. Essa, também, é uma trilha científica sólida.

Será que a meta programática de toda a física é, como afirmava Einstein, a descrição completa de qualquer situação (individual) real ? O próprio Einstein, nas suas grandes teorias, deixou algumas lacunas como, o sentido da flecha do tempo na Relatividade Restrita, e o fracasso da tentativa de unir o campo gravitacional ao campo eletromagnético, na sua Teoria do Campo Unificado. Esses vazios de suas teorias, ao invés de paralisarem a ciência, fizeram com que um número, cada vez maior, de pesquisadores, viesse a tratar desses problemas. O acervo científico só teve a ganhar com isso.

Suas críticas à interpretação da Escola de Copenhague, bem como os trabalhos de David Bohm, levaram, pelo menos, a uma descoberta extraordinária, além de outras :

“ A teoria quântica deve estar assentada sobre um substratum que admite que as interações sejam não-locais, ou seja, uma vez definido o que seja um sistema quântico, esse sistema reage como um todo a qualquer perturbação (ou medida) externa “. A distância espacial passa a ser um dado irrelevante e, até estranho, ao sistema quântico. Convém lembrarmos que outro princípio básico da teoria quântica, também leva os físicos quânticos a aceitarem a não-localização : o Princípio da Indistinguibilidade. A teoria quântica se apóia sobre o fato básico de que a matéria é composta de algumas poucas partículas elementares (elétrons, pósitrons, prótons, nêutrons, etc.). Cada tipo de partícula é caracterizado por umas poucas propriedades, tais como massa, carga, spin, que entram nas equações da teoria, como parâmetros invariáveis. Dentro dos limites do nosso conhecimento, esses parâmetros são exatamente os mesmos, para cada partícula de um dado tipo. Todos os elétrons, por exemplo, são intrinsecamente idênticos, em relação a esses parâmetros. Daí se segue que a substituição de um elétron por outro, na descrição teórica de um sistema, não pode afetar quaisquer predições, assim como seus movimentos. Na descrição de Schrödinger, por exemplo, esse Princípio de Indistinguibilidade, implica que a equação para qualquer sistema, não é afetada por uma troca dos símbolos que atribuem quantidades dinâmicas a um ou outro membro de qualquer par de partículas idênticas.

Em teoria quântica, essa insensibilidade das equações básicas à permutação de partículas idênticas, tem um efeito muito importante. É ela a responsável pela distribuição das partículas quânticas em três categorias : bósons (seguem a estatística de Bose – Einstein), férmions (seguem a estatística de Fermi – Dirac) e gentileons (seguem a estatística de Gentile) [84].

Mas o que significa essa substituição, ou troca de símbolos que representam variáveis dinâmicas ? Na realidade, é a aplicação de uma permutação sobre as duas partículas. É o reflexo de uma questão elementar que lembramos do colegial : de quantas maneiras podemos dispor 6 pessoas ao redor de uma mesa, trocando-as de lugar ? Esse é um problema de permutação. Nele, não entra nem o tamanho da mesa, nem o nome das pessoas. O fato de não entrarem os nomes, é irrelevante, por ora. O importante, do ponto de vista do físico quântico, é que na solução desse problema, não aparece nenhuma distância mencionada. O que isso acarreta para a teoria quântica, é o aparecimento de um efeito não local. Num sistema quântico, um par de elétrons, por exemplo, podem estar tão próximos como os que pertencem a um átomo, como podem se situar, um num extremo da galáxia e o outro, no outro extremo. Na permutação, a distância não faz sentido. Esse problema nos preocupou tanto, que tivemos de redescobrir os trabalhos de Giovanni Gentile Jr., da década de 40 [84] e aplicá-los, pelo menos na explicação da estrutura dos componentes nucleares. Em 1992, chegávamos à prova matemática rigorosa, dentro dos princípios firmados pela Escola de Copenhague, de um teorema que exclui a observabilidade dos quarks (partículas mais elementares que os nêutrons e os prótons, sugeridas por Gell Mann) [85].

Dentro do espírito que conduz a presente monografia, podemos concluir que o Princípio da Indistinguibilidade, já contém em seu bojo, o germe de uma contradição inerente à descrição clássica do fenômeno : a ausência de uma definição precisa do conceito de medida de distâncias. Esse fato acabou sendo explicitado pelos argumentos de Einstein, Rosen e Podolsky, na sua formulação do paradoxo já citado. Também nos leva a meditar sobre o que poderia ser uma distância e, sua consequente medida, dentro dos cânones quânticos. Se uma teoria pretende ter um conteúdo que, em qualquer parte do seu desenvolvimento, pretende ser quântico, ela deve conter a constante h de Planck. Com essa constante e mais algumas outras, características do mundo atômico e sub – atômico, podemos formar algumas grandezas mais familiares ao nosso conhecimento. Só para termos uma idéia sobre as ordens de grandeza que representam os limites impostos pela quantificação das grandezas, extraímos do livro clássico Gravitation [86], os valores:

$$\text{Distância de Planck : } L = 1,616 \times 10^{-33} \text{ cm}$$

$$\text{Tempo de Planck : } T = 5,391 \times 10^{-44} \text{ sec}$$

$$\text{Massa de Planck : } M = 2,177 \times 10^{-5} \text{ g}$$

É claro que esses valores tão pequenos são impossíveis de serem medidos experimentalmente. Somente extrapolações teóricas são admitidas, para dar uma idéia de como deve ser formado o “ substratum “, referido por Dirac, que deve servir como cenário para o desenrolar das comédias, tragédias e realidades da física quântica. Raciocinando de outro modo, podemos ver que, geometricamente, esses números tão pequenos nos fornecem um modo conveniente para encontrar visualizações mentais, especialmente na vida cotidiana. Assim, se ao invés de considerarmos um elétron, por exemplo, como um ponto (volume zero), considerarmos essa partícula como sendo uma esferulazinha com um raio igual a L , teremos a nossa

intuição mais aclarada, do elétron. Mas para a teoria quântica, essas considerações são quimeras [87].

Podem, no entanto, se tornarem argumentos teóricos importantes, na construção de formulações geométricas usadas em certas teorias concernentes ao micro cosmos. Saber que o número de pontos contidos num segmento de reta é um número absurdamente grande, mas não infinito, acarreta grandes transtornos na definição de uma regra de medida baseada na continuidade. Acarretam, também, grandes problemas para os fundamentos de outra teoria matemática abstrata : a topologia [88]. Acreditamos que os grandes avanços obtidos na teoria dos fractais possam, em breve, se incorporar e superar os inconvenientes vindos dessas elaborações limitativas.

Acreditamos que esses inconvenientes conceituais, decorrentes de existir a constante h de Planck, não devem nos impedir de extrair do conteúdo básico da teoria quântica, conclusões efetivamente fundamentais, para o estudo do substratum de Dirac.

Se as leis da natureza, mais gerais, parece ser as que regem a teoria quântica e, se essas leis se expressam matematicamente, a partir do que está contido no substratum de Dirac, nada mais natural supor que esse substratum é constituído por uma geometria, por mais abstrata que ela seja. Essa é a imagem mental que fazemos. É claro que o conceito de geometria tem evoluído, rapidamente, nesses dois últimos séculos. Somente para nos situarmos (ainda que imperfeitamente) na história dessa evolução, partimos da geometria projetiva (as referências são as do capítulo anterior), iniciada por J. V. Poncelet, que chamou algumas propriedades das figuras, de projetivas. Essa ciência seguiu um desenvolvimento autônomo. Depois, viriam Lobatchevsky e Riemann [89], começando a desmoranar o reino absoluto de Euclides. No seu Programa de Erlangen [49], Felix Klein mudava os rumos e a definição do que seria uma geometria. Henri Poincaré e Élie Cartan [64] [89], viriam a efetuar novas revoluções na geometria, criando a chamada geometria diferencial [90] [91]. Surgia, também, a teoria dos espaços fibrados [92] [93] e suas aplicações à física. E assim por diante [94], até chegarmos ao ano de 1954, no qual ocorreu, para a física teórica, outra descoberta notável : o advento da teoria de " gauge " de Yang - Mills [80] que, do ponto de vista geométrico, criou uma nova visão da possibilidade de unir geometrias, campos, partículas, etc.

No seu livro já citado, Dirac afirmava que a ferramenta matemática mais apropriada para a formulação das leis quânticas, era a teoria das transformações.

Para descrever, do modo mais simples, o que é uma transformação, tomemos um exemplo simples.

Se estamos em São Paulo, o nosso sistema de referência estará situado aqui.

Convencionalmente, podemos adotar a Praça da Sé, como origem. A partir dela, medimos nossas distâncias, em quilômetros. Se mudamos para o Rio de Janeiro, nosso sistema de referência será essa cidade. A origem do sistema pode ser, por exemplo, a Candelária. Mas, o Rio dista de cerca de 400 quilômetros de São Paulo. Para descrevermos, aqui em São Paulo, algum evento ocorrendo no Rio, temos de adicionar 400 quilômetros. Há uma translação do sistema de referência. Essa translação, perfeitamente traduzível em linguagem matemática, é uma transformação.

Outro exemplo : se estamos olhando para um espelho e viramos as costas para ele, rodamos nosso corpo de 180 graus. Essa rotação, também é uma transformação, que pode ser descrita por uma fórmula matemática. O exemplo da viagem São Paulo - Rio, pode ser transportado para o caso Terra - Lua. Aqui, existe uma complicação : entre a Terra e a Lua, a gravidade pode mudar. Nossa lei de transformação pode mudar e, mesmo, não existir. Essa dificuldade de obter uma regra de transformação, quase sempre acarreta uma nova geometria e, conseqüentemente, uma nova física.

Agora, fica fácil estender e generalizar o papel das transformações, nas interpretações físicas. Se, após efetuarmos uma transformação num dado espaço (que quase sempre é algo abstrato), alguns objetos e quantidades permanecem imutáveis ou, dizemos que eles formam os invariantes dessa

transformação.

Voltemos ao caso Rio – São Paulo. Se após uma transformação feita a partir de São Paulo (translação), chegamos ao Rio. Se do Rio, partimos para Belo Horizonte, teremos outra transformação. Será, que no mesmo esquema matemático, poderíamos ter uma transformação que nos levasse de São Paulo até Belo Horizonte? A resposta é afirmativa e corresponde à composição de duas transformações. E se do Rio, tivéssemos a vontade de retornar a São Paulo, haveria uma transformação? Sim. Essa seria a transformação inversa da feita, quando fomos de São Paulo para o Rio. E se fôssemos partir para o Rio, o carro quebrasse e ficássemos em São Paulo. Haveria uma transformação? Claro. Essa, seria a transformação neutra ou unidade. O conjunto de transformações, assim especificado, tem um nome especial: dizemos que elas formam um grupo de transformações. Esse, é um grupo simples e bastante visualizável. No caso da rotação efetuada diante do espelho, aplica-se um raciocínio análogo e chegamos ao grupo das rotações.

Felix Klein, no seu Programa de Erlangen [49], classificava cada geometria pelo grupo associado a ela.

O espaço euclidiano, no qual desenvolvemos nossa vida diária, é, sob esse ponto de vista, bastante simples. O grupo de transformações associado a esse espaço, fornece a geometria euclidiana. Ele é chamado de grupo ortogonal e é um caso simplificado do grupo unimodular. No espaço euclidiano, podemos ter um imenso número de invariantes, pois sabemos medir distâncias, ângulos e até dilatações e contrações. Temos a noção de tamanho. A mecânica de Newton nos fornece, no espaço euclidiano, várias noções que são invariantes, associadas ao grupo ortogonal, como: força, energia (que é mais ligada ao grupo afim), quantidade de movimento, etc.

Quando o grupo de transformações cresce em complexidade, a sua geometria correspondente, vai apresentando um número menor de invariantes.

Esse raciocínio explica a hierarquia de geometrias, mencionada no capítulo anterior.

Na geometria afim, alguns objetos que eram invariantes, na geometria hierarquicamente inferior, já não o são, quando usamos o grupo afim. É o caso da distância, por exemplo. Nessa geometria, a distância não sendo invariante, não tem sentido. É uma geometria não métrica.

Se sofisticarmos ainda mais o grupo de transformações, podemos chegar ao grupo mais geral da hierarquia, que chamamos grupo projetivo. Esse grupo define a geometria projetiva. O valor da geometria projetiva está na sua generalidade. Essa generalidade permite que unamos vários sistemas geométricos, num único. Um fator importante no desenvolvimento da geometria projetiva, foi a incorporação de elementos geométricos situados no infinito.

Uma linha, à qual juntamos um ponto no infinito, é chamada de linha projetiva. Um plano, ao qual juntamos uma linha no infinito, chamamos de plano projetivo. Um espaço, ao qual juntamos um plano no infinito, é chamado de espaço projetivo. Ao contrário do sentido dado aos elementos no infinito na geometria elementar, esses elementos no infinito, em geometria projetiva, fazem parte orgânica do espaço projetivo e podem ser representados como elementos usuais quaisquer.

A razão para essa diferença aparece, claramente, se comparamos a geometria elementar (e a de Riemann) com a geometria projetiva. Dum modo amplo, a geometria elementar estuda as chamadas propriedades métricas das figuras, isto é, propriedades que estão ligadas com a medida de quantidades geométricas (comprimentos, ângulos e áreas). Um segmento AB, determinado por dois pontos ordinários, pode sempre ser medido e o resultado, é um número definido, que expressa o comprimento do segmento AB (no espaço de Minkowski da relatividade restrita, necessitamos de um cuidado especial, mas o problema é contornado). Mas, quando um dos pontos está no infinito, o processo de medida perde o seu sentido, pois, para um tal segmento, a unidade linear é aplicada um número infinito de vezes. Similarmente, um ângulo não pode ser medido se um dos seus lados está no infinito, e a técnica “ ingênua ” de medir áreas, é inaplicável às figuras que contenham elementos no infinito.

Assim, em geometria elementar, os elementos no infinito desempenham, naturalmente, um papel importante e diferem, consideravelmente, dos elementos geométricos ordinários, nas suas relações com esses últimos. Em contraste, na geometria projetiva, os aspectos mencionados acima, que distinguem elementos no infinito dos elementos ordinários, perdem seus sentidos, pois as propriedades métricas das figuras não estão entre seus objetivos. Ainda mais, como os elementos no infinito podem se tornar

elementos ordinários, por meio de projeções : eles não possuem quaisquer propriedades projetivas que os distinguem dos elementos ordinários. Segue-se que, em geometria projetiva, não há diferença entre elementos ordinários e elementos no infinito.

Para definir precisamente a noção de espaço projetivo, torna-se necessário omitir totalmente da geometria projetiva, qualquer coisa relacionada com a medida. A geometria projetiva, libertada da noção métrica, torna-se uma disciplina somente preocupada em estudar as propriedades de localização das figuras geométricas individuais.

Formulada dessa maneira, essa proposição fundamental da geometria projetiva pode, perfeitamente, se transformar no conceito mais importante para a explicação de algumas leis básicas da Física Quântica :

- 1) O Princípio da Indistinguibilidade Quântica, por não apresentar nenhuma noção métrica, pode, de modo natural, ser encarado como uma noção da geometria do espaço projetivo. Matematicamente, esse princípio básico é caracterizado pela aplicação do chamado grupo simétrico sobre um espaço constituído pelos diversos símbolos que representam as variáveis quânticas, relevantes para as partículas. Como um grupo define uma geometria, adotamos essa geometria como sendo a projetiva. É uma associação natural. Na referência [85], mostramos que, partindo desse ponto de vista, também encontramos diversas sub - geometrias, contidas na geometria projetiva, que dão uma idéia mais clara de como estudar, de modo abstrato, a ação do grupo. Uma dessas sub - geometrias, que está ligada ao formalismo lagrangiano da mecânica clássica, é a geometria simplética [95]. Como já citamos acima, a aplicação do grupo simétrico ao sistema formado por três partículas (quarks), nos levou a resultados extremamente importantes [84] [85], sobre a constituição da matéria. Do ponto de vista experimental, o fracasso das tentativas de observação de um quark isolado, continuam validando nossos resultados, sobre o confinamento permanente dessas entidades constituintes das partículas nucleares. Uma pergunta, bastante sutil, poderia embaraçar uma resposta, do ponto de vista projetivo :
 “ O que acontece quando as partículas envolvidas apresentam velocidades próximas à da luz ? O que aconteceria com a relatividade restrita ? “
 As respostas também devem ser sutis. A relatividade especial tem como cenário o espaço-tempo de Minkowski. Este é um espaço afim e, como tal, não possui a noção de medida. No entanto, no espaço-tempo de Minkowski, uma métrica especial é introduzida, como elemento estranho ao espaço. Essa métrica permite que definamos as distâncias entre dois pontos. Representada por uma matriz, vemos que ela, então, possui uma assinatura (soma aritmética dos números que compõem a diagonal principal da matriz). Em geometria projetiva, a assinatura é um invariante [96]. Entretanto, como já vimos [97], um grupo projetivo não tem nenhum invariante para um número de pontos igual ou inferior a três. É esse fato que faz com que a palavra distância (que só depende de dois pontos), não tenha sentido. O padrão de distância só pode ser invariante. A geometria projetiva também não apresenta invariantes para figuras formadas por quatro pontos, com uma única exceção : se os pontos forem colineares (estão contidos na mesma reta). Justamente essa exceção manifesta seu efeito numa sub - geometria da geometria projetiva : o espaço-tempo de Minkowski.
 Como este último espaço é quadridimensional, um evento nesse espaço é caracterizado por quatro números. O grupo que governa as transformações nesse espaço, é o chamado grupo de Lorentz. Por raciocínios físicos, Einstein, com a sua intuição incomum, mostrava que eventos físicos aceitáveis, só poderiam ocorrer, se as velocidades envolvidas fossem inferiores à da luz. Geometricamente, eles correspondem a retas interiores ao chamado cone da luz. As transformações de Lorentz, transformam retas em outras retas (colineação) [98], tornando a nova física possível.
 Einstein, além do gênio que sempre será, também era “ iluminado “. Como, uma única exceção encontrada nos fundamentos da geometria projetiva, iria tornar consistente, do ponto de vista rigoroso, a sua fantástica teoria da relatividade restrita ?

Para essa pergunta, não há resposta.

Para nós, essa brecha aberta pela exceção citada, também mantém compatível a nossa interpretação geométrica-projetiva do Princípio da Indistinguibilidade. Somente existe uma diferença : o modo de introduzir um algoritmo de medida, quando necessário. E isso é fácil de construir [63]. Também há uma diferença metodológica essencial entre as duas maneiras introduzidas para medir distâncias : o espaço-tempo de Minkowski, da Relatividade Restrita, já vem dotado " ab initio " da chamada métrica, adicionada a um espaço afim. No espaço projetivo, podemos, primeiramente, extrair vários conceitos geométricos valiosíssimos, antes de pensarmos em efetuar medidas. Em ambos casos, devemos lembrar que, em teoria quântica, como os dados físicos relevantes não podem ser considerados como eventos pontuais (princípios de incerteza e complementaridade), um cuidado maior deve ser tomado, quando das interpretações. Em todo caso, a teoria quântica, discutida até aqui, é não relativística. Se pensamos na dualidade partícula - onda, fica mais difícil ainda, visualizarmos mentalmente um espaço formado de planos (folheação), do que um espaço formado de pontos, mas o esforço compensa.

- 2) O paradoxo de Einstein, Rosen e Podolsky, fonte de inacabadas discussões e interpretações, quando visto do modo físico de encarar os experimentos mentais (mas coerentes), também encontra uma explicação simples e espontânea, se nos baseamos no que foi exposto acima. No espaço projetivo, como não há sentido em falarmos de medidas de distâncias, tanto faz se as duas partículas estão infinitamente próximas, ou cada uma, num extremo da galáxia. O importante é que elas constituam um sistema quântico. O modo convencional de definir um sistema, é afirmarmos que, depois das duas partículas (ondas) interagirem por algum tempo, elas se afastam, sempre mantendo a " memória " do que aconteceu, quando da interação. E elas permanecerão constituindo um sistema, a menos que haja um processo externo, cuja função é destruir esse sistema. Exemplificando, se temos um sistema formado por dois elétrons (não podem ser três, devido ao Princípio de Exclusão de Pauli [99]), o relevante é que eles tenham valores opostos da chamada variável de " spin ". É o caso do átomo de Hélio, no qual não sabemos, com exatidão, a posição dos dois elétrons constituintes do sistema atômico. É forçoso salientar que Einstein, também, tinha preferência em imaginar o elétron, mais como partícula, do que como onda. Se ele raciocinasse, mais em termos de ondas, talvez o EPR não tivesse alcançado tanta repercussão. Quando duas ondas interagem (disso podemos formar uma imagem, quando jogamos duas pedras, próximas uma da outra, na água numa piscina), elas se interferem, mutuamente. Se observamos as ondas, dum ponto bastante distante do lançamento das pedras, por exemplo, nossa visão já não distingue a interferência. É claro que as ondas são distintas no caso de lançarmos apenas uma pedra. Mas essa diferença é insignificante e, muitas vezes, indetectável experimentalmente.

Apesar da transparente imagem pictórica da descrição da interferência de ondas, não apresentamos um argumento que poderia convencer Einstein, sobre o aspecto não paradoxal do EPR. Essa empreitada é que tentaremos levar a cabo, deste ponto em diante, seguindo, o mais próximo possível, uma postura dialética materialista, desenvolvida por um dos mais importantes pesquisadores dos fundamentos da teoria quântica, que foi V. A. Fock [100].

A teoria quântica, para sua explanação, exige a introdução de idéias e conceitos físicos que diferem, substancialmente, dos utilizados em física clássica.

Quando descrevemos vários fenômenos, em termos da física clássica, admitimos que os processos físicos são independentes das condições de observação. Assim, quando observamos um sistema, estamos certos que nem interferimos nele e nem o influenciemos. Também sabemos que, usando diferentes sistemas de referência, o fenômeno pode se nos apresentar com aspectos diferentes. Como exemplo, a queda livre dum corpo pode se apresentar como retilínea, num dado sistema de referência e, como parabólica, noutro sistema de referência. Essa mudança de aspecto da descrição

pode ser levada em conta se, como sempre fazemos, mudamos de sistema de referência, por meio de uma transformação de coordenadas. Uma mudança como essa, nada introduz de novo para o próprio fenômeno. Devido a esse motivo, sempre podemos afirmar a independência de um fenômeno, com relação ao modo de observá-lo.

A mecânica quântica nos mostra que, nos microprocessos, essas afirmações não são válidas. No caso quântico, a própria possibilidade de observação, pressupõe condições físicas que estão relacionadas com a essência do processo de observação. É a especificação dessas condições que indica que não basta escolher um sistema de referência: precisamos de algo mais elaborado.

Se negamos essa consideração, chegamos a uma abstração que chamamos de absolutização do processo físico. Se aceitamos essa abstração, torna-se possível considerar processos físicos, ocorrendo por eles próprios, sem nos preocuparmos se existe uma possibilidade real de sua observação.

Para nós, esse é um ponto crucial. Será que podemos atribuir realidade a algo que não podemos observar? Quando nos referimos à observação, fazemos também referência à existência de condições físicas, para que possamos efetuar o reconhecimento do fenômeno. Na chamada física clássica, esse dilema não existe, pois, para fenômenos macroscópicos, o processo de medida exerce uma influência desprezível sobre o próprio objeto em estudo. A absolutização é tão natural que nem a mencionamos. Ela é uma das próprias características da física clássica [101].

Outra abstração permitida, classicamente, é a possibilidade de um aperfeiçoamento ilimitado do processo de observação. Também, quaisquer duas grandezas podem ser medidas simultaneamente, sem qualquer restrição. É o que Fock chama de particularização das medidas. Esses conceitos da física clássica, nos levam, imediatamente, à idéia de que é possível uma descrição absoluta e exaustiva de um sistema físico. Uma descrição exaustiva é atingida se temos uma particularização perfeita e, observações posteriores, nada acrescentam, de novo.

Apesar de sabermos que essa maneira de encarar uma observação, não se adapta à física quântica, nós não podemos rejeitá-la, por completo. Para descrever fenômenos, de modo objetivo, devemos nos basear, direta ou indiretamente, em algo que não nos impõe restrições sobre a maneira de observar. Essa objetividade está contida na absolutização da física clássica.

Quânticamente, para podermos aplicar esse modo absoluto de descrição clássica, temos, primeiramente, de estabelecer seu limite. Se admitimos que o ferramental matemático da teoria quântica é conhecido, as relações da física clássica derivam desse ferramental, na forma de uma aproximação, e os limites de aplicabilidade da maneira clássica de descrição, são as próprias condições de aplicabilidade dessa aproximação.

Como já vimos várias vezes, o Princípio de Incerteza de Heisenberg caracteriza o alcance da validade do modo clássico (absoluto) de descrever fenômenos. Mas esse princípio também se aplica aos instrumentos utilizados para estudar os objetos atômicos. Os experimentos, com objetivos clássicos ou quânticos, sempre são descritos pelo modo absoluto de descrição. Devemos ter sempre em mente, o projeto e a operação dos instrumentos que criam as condições às quais o objeto fica sujeito. Os instrumentos e as condições externas devem ser descritos do modo clássico, pela indicação de seus parâmetros. Esses parâmetros é que devem ser definidos com uma precisão que não pode ultrapassar a determinada pelo Princípio de Incerteza.

Ultrapassar esse limite, seria superestimar a potencialidade dos aparelhos e das condições físicas. Os resultados da interação entre um objeto atômico com um instrumento de medida (que é descrito classicamente), constituem os principais elementos experimentais. Sua sistematização, baseada nas hipóteses feitas sobre as propriedades do sistema, é o objetivo da teoria. Do estudo de tais interações, podemos deduzir as propriedades dos objetos microscópicos, e as predições da teoria são formuladas como os resultados esperados dessas interações.

É claro que, formulando o problema teoria-observação dessa forma, podemos permitir a introdução de quantidades que caracterizam o objeto, sem levarmos em conta o aparelho de medida.

Essas quantidades são a carga, a massa e, com o devido cuidado, algumas associadas com operadores da própria teoria quântica.

Esse novo modo de colocar o problema quântico, torna possível a consideração da situação na qual, vários aspectos e propriedades de um sistema, não se manifestam, simultaneamente, e, independentemente. Com isso, queremos dizer que a particularização do comportamento do sistema é impossível. É isso que impede que o mesmo aparelho de medida, e as mesmas condições físicas nos forneçam, ao mesmo tempo, o aspecto corpuscular e o ondulatório.

Considerando os resultados da interação de um micro-objeto com um aparelho de medição, como a base da descrição do processo, introduzimos um conceito importante : o de relatividade com respeito aos meios de observação, que generaliza o conceito de relatividade em relação ao sistema de referência.

Isso não significa que estamos atribuindo um menor valor de realidade ao micro-objeto, em comparação com o aparelho de medida. Também não significa que estejamos reduzindo as propriedades do micro-objeto às do aparelho. Pelo contrário, uma descrição baseada no conceito de relatividade em relação aos meios de observação, fornece uma imagem muito mais profunda, mais refinada e mais objetiva do que seria possível pelas idealizações da física clássica.

Chegamos, assim, à generalização do conceito de estado dum sistema, em base às concepções de probabilidades e possibilidades potenciais.

Com um estado inicial fixado para o objeto e, determinando as condições físicas externas, teremos uma série de interações que nos fornecem os dados estatísticos, a serem manipulados por uma determinada distribuição de probabilidades.

Consideremos um experimento sobre um sistema físico, que nos permitirá fazer previsões sobre os resultados de interações futuras entre o sistema e instrumentos de medida de várias espécies. Esse experimento, chamado de preparação do sistema, junto com a criação de condições sob as quais o sistema deverá passar, chamamos de experimento inicial. Concluimos :

“ O experimento inicial sempre estará voltado para o futuro “.

Ele é descrito em linguagem da física clássica, mas seus resultados requerem, para sua interpretação, formulações quânticas.

Depois de tudo realizado, temos de planejar o experimento final. É nele que as possibilidades potenciais se materializam. Assim, dado o experimento inicial, existe uma escolha de possíveis tipos de experimentos finais, dependendo do que se pretende medir. De qualquer maneira,

“ O experimento final sempre estará voltado para o passado “.

Ele pode ser chamado de experimento de verificação, pois ele nos permite verificar as predições do experimento inicial.

Um experimento total, que permite a comparação com a teoria, consiste dos experimentos inicial e de verificação, combinados. Uma série de medidas, feitas desse modo, nos fornecem os dados estatísticos finais.

Assim, uma teoria deve descrever o estado inicial de um sistema, tornando possível a obtenção de distribuições de probabilidades, para qualquer tipo de experimento final.

Como um experimento final deve ocorrer depois do experimento inicial, uma teoria também deve explicitar a dependência temporal das probabilidades e das possibilidades potenciais.

Para concluir este capítulo sobre o jogo ainda indefinido, citamos :

“ Terias a coragem de me dizer que estes objetos desordenados são realidade, ao passo que o cerimonial é ilusão ? O próprio objeto é cerimonial de suas partes. Queres-me tu dizer que o exército é menos real que uma pedra ? Mas eu chamei pedra, a um certo cerimonial da poeira de que ela se compõe. E, ao ano, chamei de cerimonial dos dias. Porventura, o ano havia de ser menos verdade do que a pedra ? “

Saint - Exupéry [102]