

fôrça de atração física que age à distância(13), concedendo que não podia dar uma explicação da gravitação. Para êle as fôrças distantes são realidades físicas que por enquanto não se podem explicar, mas que produzem movimentos reais de impulso.

Ora, o desenvolvimento ulterior tão intenso da física nos séculos XVIII e XIX tomou seu ponto de partida desta base, conceitualmente tão pouco clara. As "qualidades primárias" de número, extensão, forma, movimento (que somente tornavam possível uma descrição cinematográfica da natureza) foram completadas pela nova qualidade da inércia e foram acrescentadas como princípios explicativos ulteriores algumas fôrças que agiam à distância mas que dependiam de um lugar. Sobre esta base foi possível desenvolver durante os séculos XVIII e XIX as teorias do potencial, do turbilhão, etc. (Lagrange, Laplace, Poisson) e a elaborar não só a mecânica celeste mas também a teoria das fôrças de atração elétricas e magnéticas (Coulomb, Green, Gauss e outros).

Mais tarde foi necessário abandonar na eletrodinâmica a teoria das fôrças centrais à distância e fazer depender a fôrça existente entre duas cargas elétricas, em movimento não só de sua distância mas também de sua velocidade e aceleração (Leis de Weber). É verdade que o conceito de fôrça à distância ainda se conservou, mas foi necessário aceitar a limitação da velocidade de dispersão da ação dinâmica. Isto obrigou finalmente a uma modificação radical: volta à teoria do efeito próximo no campo elétrico (Faraday, Maxwell). Com isto se originou um novo desenvolvimento muito

(13) Nama, carta a Richard Bentley (L. T. More, Isaac Newton. A Biography. New York-London 1924), pág. 370; *Dijksterhuis*, l.c. p. 595.

importante na física teórica e prática que também colocou, novamente, o problema da realidade. Chegamos assim aos umbrais da física moderna no sentido próprio do termo.

6. A física moderna e o problema da realidade

Costuma-se datar do ano de 1900 o nascimento da física moderna, quando M. Planck propôs a teoria dos quanta e quando um pouco mais tarde (1905) A. Einstein formulou a teoria da relatividade restrita; passo decisivo para nova orientação é considerado o aparecimento de concepções paradoxais e contrárias às idéias costumeiras sobre a realidade física. Muito conhecida neste sentido é a relatividade da simultaneidade na teoria da relatividade restrita (1905) e o dualismo de onda e corpúsculo na teoria dos quanta (1927). À consciência pré-científica parece contraditório o fato que dois acontecimentos distantes devam ser considerados como simultâneos de um posto de observação, e não-simultâneos de outro posto. Parece igualmente uma contradição a afirmação que uma "partícula elementar", conforme o processo com que a observamos, ora deva ser concebida como onda, ora como corpúsculo.

Esta evolução da física no século XX já foi preparada bem antes nos pontos essenciais. Vimos como o simples sistema de Newton sobre as fôrças centrais, que só dependem do lugar, teve que ser abandonado na eletrodinâmica e reduzido a uma teoria de ação de contacto. Isto constituía aparentemente uma volta à opinião pré-newtoniana, "cartesiana", do século XVII (Huygens). Mas as aparências enganam. A nova época da ação de con-

tacto — começando pela eletrodinâmica — não significa uma volta a concepções anteriores, mas algo de inteiramente novo.

Quando J. Cl. Maxwell empreendeu a análise matemática da teoria das linhas de força de Faraday (a partir de 1855), empregou em uma de suas exposições decisivas de 1862(14), na qual estabeleceu a assim chamada “corrente de deslocamento”, um modelo mecânico para demonstrar suas equações mais importantes e no qual aparecia o estado de tensão do campo elétrico. Esse modelo tinha uma função heurística, mas não podia ser considerado como probativo e o próprio Maxwell mais tarde o abandonou (em seu manual completo de 1873). Ora, sucedeu o seguinte: Maxwell chegou a formular um sistema de equações de campo altamente simétricas (o que sucedeu sobretudo depois que Hertz o completou em 1890), o qual, embora não fôsse interpretado mecanicamente(15), por si mesmo e por causa de seu caráter harmônico e quase estético, tinha uma patente evidência interna. Tais são as célebres equações das quais Hertz disse que eram mais inteligentes que os homens que as descobriram.

O grande significado da aceitação das equações de Maxwell está em que a mecânica clássica perdeu seu caráter de base única da física e que a eletrodinâmica foi estabelecida independentemente sobre as bases daquelas equações. A evolução ulterior (que não podemos descrever pormenorizadamente) chegou ao ponto de deduzir a mecânica da teoria

(14) Philos. Magazin (4) 23 (1862) n.º 12. Vid. M. v. Lane, Geschiehts der Physik. (Bonn 1947) n.ºs. 53-54.

(15) É sabido que das equações de Maxwell se segue a existência das ondas elétricas; também as ondas luminosas podem ser assim compreendidas. A inafidélia das concepções mecanísticas já se manifestava anteriormente no terreno da ótica. Em 1817 Th. Young com o auxílio de luz polarizada reconheceu a transversalidade das ondas luminosas, enquanto que as ondas luminosas de Huygens eram longitudinais. Esse fato era inexplicável mecanicamente, pois ondas transversais elásticas só podem aparecer em corpos sólidos.

da relatividade restrita da eletrodinâmica, pelo fato de que a velocidade da luz, uma grandeza deduzida da eletrodinâmica, foi estabelecida como velocidade limite de *todos* os movimentos. Isto tem consequências muito importantes no terreno da cinemática pura: a regra clássica e quase evidente da adição e subtração das velocidades de mesma direção já não valia, embora isto só se fizesse notar em velocidades muito altas, comparáveis à luz.

Enquanto a mecânica galileico-newtoniana continha um princípio de relatividade segundo o qual as transformações que deixam invariáveis as leis mecânicas (translações uniformes) não modificavam as acelerações, mas sim as velocidades, e onde o tempo não era igualmente transformado, a teoria da relatividade restrita tem como postulado fundamental a constância da *velocidade* da luz (e não só a aceleração). Isto tem como consequência a transformação simultânea da coordenada do tempo, isto é, a relatividade da simultaneidade do posto do observador (tratando-se de dois pontos que se movem em direções opostas), bem como a redução das dimensões do espaço na direção do movimento e o alongamento do tempo para corpos que se movem na direção do observador.

A transformação de que se fala nesta teoria, a assim chamada “transformação de Lorentz”, é do ponto de vista matemático de grande simplicidade e simetria: no fundo nada mais é que a rotação do sistema das coordenadas quádriplas da “união quadridimensional de espaço e tempo” (Minkowski, 1908). Neste processo a coordenada “tempo” deve ser acrescentada imaginariamente, ou então é necessário, se se quer ficar dentro da realidade, recorrer a uma transformação a fim, análoga à rotação, só que em lugar da esfera inva-

riante entra um hiperbolóide de duas folhas(16). Nesta "métrica indefinida" ou "geometria pseud-euclidiana" aparece o papel especial do tempo ao lado das dimensões do espaço, que não podem ser identificados inteiramente. De fato, nada de semelhante ao duplo aspecto de passado e futuro encontramos nas extensões espaciais.

Não se deve deixar de apontar para o fato que o esquema relativístico das relações entre espaço e tempo — onde desaparece a simultaneidade que se estende através de todo o espaço, i. é. a onipresença fenomenal do espaço (que aparece como *omnipraesentia phaenomenon*) para ser substituída pelos campos separados do passado passivo e do futuro ativo (na representação de Minkowski dois cones que só se tocam em seus vértices, que representam o presente) — corresponde melhor ao fenómeno concreto da vida real do que a concepção newtoniana clássica de espaço-tempo. O "passado passivo" abrange todos os acontecimentos que agem sobre mim e dos quais posso receber alguma coisa, enquanto que o "futuro ativo" contém os fatos sobre que posso influir ainda, ou mais tarde. Os primeiros correspondem, portanto, ao "mundo da observação" (Merkwel), o segundo ao "mundo da ação" (Wirkwel) de um ente vivo, na teoria do ambiente de von Weizsäcker; de fato, o processo de um estímulo nos nervos sensoriais e de um impulso nos nervos motores se verifica com uma velocidade determinada e não muito grande. O mesmo aparece mais claramente ainda na situação em que se achava um general antigo quando as notícias de e para o front levavam muito tempo. A admissão de uma onipresença instantânea vale

(16) Estas expressões se limitam a duas dimensões espaciais e ao tempo. Quando entra a terceira dimensão espacial, elas devem ser estendidas analogamente a uma variedade quadridimensional.

para um observador, mas não para um homem ativo.

Esta concepção de Minkowski, que pretende substituir o tempo e o espaço por uma "união" quadridimensional de ambos, leva a um novo problema a respeito da realidade. Surge a questão do que é real no mundo físico: a união quadridimensional de espaço-tempo, ou suas "projeções" espaciais tridimensionais, isto é, sua divisão em "aspectos" espaço-temporais, dos quais a cada instante aparece um só deles, enquanto nós "vivemos" arrastando-nos ao longo de nossa "estrada da vida"(17). Em outras palavras: A "união" (ou o "mundo") de Minkowski nada mais é que um artifício; um modo elegante de exprimir por meio da teoria da relatividade fatos reais? Ou esconde-se atrás dela algo de mais profundo, como seja a substância mesma de todo acontecimento? Os vetores quádruplos e sêxtuplos do "mundo" quadridimensional representam a descrição adequada do fato físico? Representam eles a realidade invariável, assim como um corpo real tridimensional em suas perspectivas bidimensionais ("sombras", como diz Husserl) constitui aquilo que é real e se mantém na "corrente dos fenômenos"? E finalmente: esta nova física relativista fala em favor de uma teoria do conhecimento realista ou idealista?

Não cremos que a teoria da relatividade res-trita nos obrigue a aderir a uma concepção gnoseológica determinada. Pode ser compreendida tanto idealística (no sentido neo-kantiano de E. Cas-

(17) É preciso notar que o "fluxus temporis" não entra na imagem quadridimensional do mundo espaço-tempo de Minkowski, apesar do lugar que o tempo ocupa como coordenada imaginária. Mesmo uma geometria quadridimensional com uma métrica indefinida não é capaz de incluir o fenómeno fundamental do "agora" e do "não mais".

sirer(18), como realisticamente. Pode-se dizer que no processo do conhecimento que se verifica durante o "fieri" de uma teoria física são formados pelo intellecto os objetos quadridimensionais; mas pode-se também dizer que sempre existiram independentes do saber humano, embora nunca se tenha conseguido compreendê-los no passado. O que é decisivo e absolutamente não depende de qualquer posição gnoseológica é a parte matemática na teoria física, isto é, a exigência de invariabilidade, que é o que há de mais importante em cada teoria, numa palavra a simetria demonstrada pelas fórmulas matemáticas empregadas.

O velho princípio da relatividade de Galileu aparece como um caso-limite, um caso "especializado" ou "degenerado" (como dizem os matemáticos) que entra em questão quando a velocidade de transmissão dos sinais mais rápidos se torna infinita. Portanto, a velha teoria se torna mais compreensível através da nova. Também aí aparece o papel dominante da matemática.

Quanto à teoria da relatividade *geral*, não nos é possível entrar nos pormenores dos problemas que ela envolve (como a questão da estrutura especial da medida e da volta aparente ao "movimento natural" dos corpos celestes e dos corpos que caem livremente, no sentido aristotélico). Queremos contudo notar que precisamente nesta teoria, em que a invariabilidade das leis da natureza desempenha um papel muito importante para um muito grande grupo de transformações (todas as transformações *contínuas*), o elemento matemático tem absoluta predominância. Isto aparece muito claramente da exposição autobiográfica que o

próprio Einstein fez sobre a origem de sua teoria(19). Einstein, para poder abranger igualmente a gravitação dentro da nova imagem da natureza oferecida pela teoria da relatividade restrita, se viu forçado a elaborar uma teoria da ação de contacto, isto é, uma teoria do campo da gravitação. Se uma teoria não só devia abranger o campo vazio mas também as massas gravitacionais (que deviam aparecer como as singularidades do campo), então as equações diferenciais do campo não mais podiam ser lineares. Ora, para descobrir na imensa massa das equações possíveis as que eram certas, era necessário aplicar um princípio de seleção muito severo. Tal princípio foi encontrado na exigência de invariância para *todas* as transformações contínuas; ora, temos aí um grupo que é muito mais amplo que o grupo das transformações de Lorentz que estava na base da teoria da relatividade restrita.

Queremos lembrar mais um ponto da teoria da relatividade geral, que foi muitas vezes discutido em amplos círculos; trata-se da aplicação da geometria não-euclidiana (de Riemann) à física para descrever a estrutura real do espaço físico real. Os matemáticos sabiam desde Gauss, Bolyai, Lobatchevski e Riemann que do ponto de vista puramente matemático é possível imaginar muitas formas de espaço, das quais a forma antiga e tradicional, a euclidiana, é somente uma das possibilidades. Já em 1854 Riemann afirmara que uma estrutura espacial de métrica contínua devia ser procurada em "forças que sobre elle agem e influem". Segundo H. Poincaré a geometria de um espaço físico é optativa até um certo grau,

(18) Vid. *E. Casirer, Zur Einsteinschen Relativitätstheorie. Erkenntnistheoretische Betrachtungen* (Berlín 1921).

(19) No livro: "Albert Einstein. Philosopho-Scientist", ed. por P. A. Schilpp (New York 1949), pág. 62 ss.

mas a escolha deve ser feita por motivos racionais, dentre os quais a simplicidade e a conservação das simetrias que aparecem nos fenômenos físicos, são os mais importantes. Assim, não é arbitrário mas racional conceber os raios luminosos e as trajetórias da inércia como as linhas mais curtas (geodésicas), isto é, como "as trajetórias mais retas". Isto levou Einstein em sua teoria da relatividade geral a conceber o campo das forças inerciais e gravitacionais como "campo métrico", pela consideração da igualdade entre massa inerte e pesada; e este "campo métrico" determina a geometria do espaço, respectivamente da variedade quadridimensional espaço-tempo. Daí resulta que o espaço é "curvo", usando de uma expressão não muito exata, tirada da analogia com uma superfície curva.

Do ponto de vista matemático puro não há nisto a mínima dificuldade; pois a maneira de exprimir, um pouco paradoxal, pode ser compreendida como meramente simbólica e daí se passa a calcular algébrica e analiticamente naquela variedade quadridimensional. Mas concebida como realidade física, aquela teoria nos obriga a abandonar concepções tradicionais e aparentemente evidentes a priori. É certo que é possível oferecer algumas analogias com os espaços não-euclidianos, como as que se veritavam sobre superfícies curvas (p. ex. sobre a curvatura da terra), mas tais analogias não nos levam a compreender realmente um espaço tridimensional não-euclidiano, como é, por ex., o globo terrestre. Pode-se descrever os fenômenos (como já Helmholtz o demonstrou), tais como eles se apresentariam óticamente num espaço "curvo" (segundo Helmholtz se assimilariam ao "mundo" que se imagina contemplar refletido "dentro" de uma bola de metal), mas tais fenômenos seriam

considerados como distorções do espaço "normal" e se estaria tentado a explicá-los não geométrica mas fisicamente. De fato, existe uma norma para nossa *concepção* do espaço, por mais incômoda que tal afirmação possa parecer aos físicos e filósofos empiristas. Mas por outro lado, a norma euclidiana de nosso espaço intuitivo não nos obriga a afirmar que o espaço físico é igualmente euclidiano. Pois o espaço intuitivo pode ser explicado como espaço tangencial do espaço físico "curvo", cujo ponto de contacto talvez coincida com o posto ocupado pelo observador(20). Assim o homem simples de antigamente julgava a terra curva como sendo uma superfície plana.

O fundamento da norma espacial euclidiana parece ser a seguinte: em nossa observação concreta do espaço, estamos (qualquer observador) no centro do espaço cujo sistema natural de coordenadas não é o conhecido sistema cartesiano de três eixos perpendiculares e as coordenadas x, Y, z (três segmentos), mas um sistema de coordenadas polares em cujo ponto-origem estamos nós. Temos assim as coordenadas r, ϕ, θ ; onde r designa o raio, a distância de um ponto à origem, enquanto que ϕ e θ representam os ângulos de uma direção zero-convenção com um eixo e com a direção da origem ao ponto visado.

Isto quer dizer que não temos três coordenadas do mesmo gênero (x, Y, z), (todos segmentos mas dois gêneros de coordenadas das quais a primeira (r) designa um segmento que dá a profundidade espacial (i. é, a distância), enquanto que as outras duas, os ângulos ϕ e θ , são coordenadas de

(20) O espaço portanto aparece como uma hipersuperfície, ou mais exatamente: o "mundo" quadridimensional se torna uma hipersuperfície quadridimensional, que se pode representar como contida dentro de um espaço euclidiano de dimensão superior.

direção. Ora, do ponto de vista do observador, esses dois gêneros de coordenadas podem variar *independentemente* um dos outros, pois do ponto de vista fenomenológico eles são *qualitativamente* distintos, como altura de tom e intensidade. Daí se origina uma "independência da direção quanto ao lugar" (como se exprime Riemann) e tal é a característica do espaço euclidiano(21).

Existe também um argumento de ordem totalmente inversa em favor do espaço euclidiano que vem já de F. A. Taurinus (1825)(22). Recordemo-lo aqui, já que é de natureza claramente filosófica. Taurinus parte da tese kantiana que o espaço é uma simples forma de percepção a priori, "a simples forma dos sentidos externos". Observa então que em razão dessa aprioridade a forma não pode ter uma constante empírica determinada. Ora, *sómente* o espaço euclidiano (entre todas as formas de espaço que poderiam concorrer com ele) está totalmente livre de tais constantes que não podem ser matematicamente determinadas a priori, isto é, que poderiam ser deduzidas da observação empírica. (A medida de sua curvatura é zero em qualquer ponto). Também nas formas espaciais mais próximas da euclidiana, as que afirmam uma medida constante de curvatura, esta medida de curvatura (o "raio espacial" recíproco) não está determinada a priori, mas deve ser deduzida do mundo real por meio de observações ou a partir de hipóteses físicas; muitos físicos admitem hoje em dia um raio espacial de três bilhões de anos-luz(23).

(21) Uma explicação mais detalhada pode ser encontrada em O. Becker, Beiträge zur phänomenologischen Begründung der Geometrie und ihrer physikalischen Anwendungen, em: Jahrbuch für Philosophie und phänomenologische Forschung (ed. por H. Husserl), VI (1923), págs. 386 ss; Becker, Die apriorische Struktur des Anschauungsraumes, em: Philosophischer Anzeiger, IV (1930) págs. 129-162.

(22) Vid. GM, pág. 183 ss.

(23) Vid. F. von Weizsäcker, Die Geschichte der Natur (Goettingen, 1955), pág. 180.

O argumento de Taurinus, na forma que lhe deu, só é aceitável para os seguidores da concepção kantiana de espaço. Mas é possível generalizá-lo e dizer: se o espaço é totalmente "indiferente" a seu conteúdo, sendo uma simples forma (quer se a entenda no sentido do idealismo transcendental, quer não), não pode existir uma constante espacial empírica. Novamente podemos ver que do ponto de vista da matemática e da ciência exata da natureza não se pode decidir sobre a verdade do idealismo ou do realismo.

Estamos portanto diante da escolha: admitiremos um espaço real não-euclidiano ou um campo métrico universal, isto é, de uma realidade física na qual as medidas estão tão distorcidas, em que as linhas mais curtas estão tão curvas, que suas relações de medida correspondem a uma geometria não-euclidiana? Tal campo métrico poderia ser imaginado como contido num espaço euclidiano comum. Como ilustração pense-se na "métrica" que resulta quando se dá a distância entre dois pontos *A* e *B* numa região montanhosa não por uma linha aérea, mas pelo tempo que se necessita em terra para chegar de *A* a *B*. A "geometria" que resultaria de tais "medidas" seria tudo, menos euclidiana. Talvez se dirá que isto não é culpa do espaço, mas da matéria distribuída pelo espaço, isto é, das montanhas e vales, das estradas de ferro e dos caminhos, etc.

Enquanto neste exemplo é fácil a distinção entre espaço vazio e conteúdo material do espaço, a questão fica aparentemente insolúvel quando aplicada ao espaço universal; ou então se lhe dará uma solução arbitrária. Conceder-se-á ao espaço o caráter absoluto que lhe deu Newton, e ainda assim defender sua realidade? Ou então se verá, nêle nada mais que uma espécie de ordem simul-

tânea(24) e se o terá simplesmente por "phaenomen bene fundatum", como Leibnitz? Ou uma simples forma de percepção a priori, como Kant? Ou se retornará a Aristóteles se e atribuirá ao espaço "determinada força" (*dynamis*) que faz cair os corpos pesados?

Todas essas questões não se podem responder clara e inofismavelmente do ponto de vista da física matemática. Pode-se explicar a teoria da relatividade geral partindo de concepções filosóficas totalmente diferentes. Decisiva e fundamental, mais uma vez, é a possibilidade da precisão matemática, e nada mais. Pode-se afirmar neste sentido que certamente devemos contar com uma *geometria* não-euclidiana, mas não incondicionalmente com um *espaço* não-euclidiano.

E aqui aparece que a descontinuidade decisiva na história da física (não tanto da astronomia) se encontra entre a física antigo-medieval, especialmente aristotélica, e a ciência matemática do século XVII, e não entre a física "clássica" do século XIX e a física "moderna" do século XX. De fato, por maior que seja a diferença entre a física clássica e moderna, ambas se empenham por penetrar nos mistérios da natureza por meios *matemáticos* e renunciam aos conhecimentos qualitativos e metafísicos, que tendem a alcançar a "essência" da natureza.

Este quadro não se modifica essencialmente se ainda lançarmos um olhar sobre a teoria dos quanta e sobre os problemas que suscita no campo filosófico. Nesta questão não podemos entrar em pormenores, ainda menos quando tratamos da teoria da relatividade geral de Einstein.

(24) Esta formulação deveria hoje ser modificada em razão da realidade da simultaneidade.

O ponto decisivo é o dualismo corpúsculo-onda e a questão do influxo do "observador" sobre os processos físicos "reais" e "objetivos". É sabido que o lugar e o impulso de uma partícula não podem ser simultaneamente, isto é, pela mesma experiência, medidos com exatidão. Quando se consegue medir exatamente uma das duas grandezas "complementares" (lugar e impulso, tempo e energia), a outra desaparece; no caso extremo da máxima exatidão na medição da primeira grandeza, a segunda não pode ser absolutamente medida. Tal é o conteúdo essencial das "relações de indeterminação" de Heisenberg.

Niels Bohr elaborou em 1927, depois de longas discussões, o conceito fundamental de *complementaridade*, que há pouco empregamos. Introduziu duas concepções inteiramente distintas para os processos quânticos, que são complementares no sentido que só podem existir lado a lado sem contradição quando seu alcance é limitado de tal modo que nunca são utilizadas ao mesmo tempo. Segundo a experiência, a "partícula elementar" se mostra ora como corpúsculo, ora como onda.

W. Heisenberg(25) encara a questão de outro lado, o que é de particular importância para o nosso problema sobre o papel da matemática. Parte da hipótese que só se verificam em a natureza, ou só podem ser processados experimentalmente, processos que se deixam representar como vetores (ou mistura de vetores) no espaço de Hilbert de muitas dimensões, numericamente infinitas. Modelo para Heisenberg era a teoria da relatividade restrita, que igualmente representa a realidade física por vetores em meio ao "mundo" quadridimensional. Mas um vector num espaço

(25) Vid. W. Heisenberg, Die Entwicklung der Quantenmechanik, Physikalische Blätter, 12 (1955), fasc. 7, pag. 292.

de Hilbert de dimensão infinita (ou na matriz hermitiana correspondente) não é intuitivo; não o é tampouco a equivalente representação por uma onda no espaço de configuração segundo Schroedinger; pois o espaço-configuração tem 3n dimensões para n partículas. Trata-se de uma simples analogia para uma onda intuitivamente tridimensional. A tentativa de uma interpretação intuitiva leva-nos novamente às duas imagens complementares (corpúsculo e onda) de Bohr.

Em meio a todas essas complexas tentativas de solução pergunta-se: o que dizer sobre a realidade física dos processos quânticos? N. Bohr fala de "impossibilidade de uma distinção exata entre o comportamento de objetos atômicos e a influência sobre eles exercida pelos instrumentos medidores, que servem para determinar as condições em que os fenômenos se manifestam"(26).

C. F. von Weizsäcker formulou o seguinte princípio:(27) "Nem em pensamento se pode realisar a distinção total entre sujeito observador e objeto observado." Este fato é por ele ulteriormente interpretado no sentido que tanto o ato físico da influência, exercida pelos aparelhos de observação (os quais em razão da natureza quântica da energia não podem ser reduzidos à vontade), como o ato intelectual da leitura do aparelho medidor constituem a "observação" no sentido quântico-mecânico; a "unidade de ação" de ambos é o essencial. E chega a acrescentar: "... 'observação é uma influência física recíproca que é ao mesmo tempo um ato de consciência. A compreensão disto só será possível depois de se renunciar

de certo modo à distinção cartesiana entre *res extensa* e *res cogitans*".

Estes pensamentos de von Weizsäcker são expressos no espírito de uma certa teoria do conhecimento idealista. Pois, pelo menos parece que, em razão da "unidade de ação" da influência exercida pelo aparelho (pela comunicação de energia por meio do aparelho, como seja pela iluminação) e do ato de conhecimento que é a leitura do instrumento, a simples percepção cognoscitiva tem influência no estado do objeto. Disto entretanto se pode duvidar. Considere-se o seguinte: a "observação" com os modernos instrumentos de medida (por ex., o contador de Geiger, ou uma chapa fotográfica), geralmente se processa de maneira que o instrumento registra a presença de um elétron mesmo que não esteja presente um observador entendido. Somente mais tarde, o que pode suceder depois de semanas ou meses, a indicação automática do aparelho será lida no indicador ou na chapa. Somente então se verifica o ato espiritual do conhecimento, separado temporalmente da influência física exercida pelo aparelho sobre o objeto, o qual, enquanto funciona automaticamente, é ele também um objeto, e não "sujeito" de qualquer espécie. Como então se pode falar de "unidade de ação" entre a parte física do processo mensurativo e o ato perfeito de conhecimento? É certo que existe uma unidade sensível entre os dois fatos separados pelo tempo, entre a influência física e o ato de percepção. Talvez von Weizsäcker quis dizer isto mesmo com o termo "unidade de ação"; mas sua maneira de exprimir não é muito clara.

W. Heisenberg, de seu lado, se exprime de modo algo diferente em resposta a uma observação do

(26) Vid. N. Bohr, Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics, em: A. Einstein: Philosophar-Wissenschaft, ed. Schupp (New York 1949) pág. 210.

(27) C. F. v. Weizsäcker, Physik der Gegenwart (Goettingen 1935), pág. 84 s.

cientista soviético A. Alexandrov(28). Este afirma que por "resultado da medição" na teoria quântica se devia entender somente o efeito objetivo da influência recíproca entre electrón e objecto (o instrumento de medição); não se deve mencionar o observador. Uma grandeza física qualquer é um fenómeno de carácter objectivo e não o resultado de uma observação subjectiva. Heisenberg respondeu(29): se o aparelho medidor e seu sistema de observação devem ser considerados totalmente separados do resto do mundo, seria impossível chegar a determinado resultado nas medições, como seja a impressão de uma chapa fotográfica até certo grau de intensidade. E se alguém disser que "na realidade" a chapa ficaria de qualquer modo com aquela impressão, então elle não applica a mecânica quântica ao sistema "eléctron-chapa". O carácter "factual" de um processo da realidade na vida "factual" não está, sem mais, contido nas fórmulas matemáticas da teoria dos quanta. Esta entra em questão somente quando intervém um observador.

Ora, segundo Heisenberg, pela intervenção de um observador não se introduz qualquer traço subjectivístico na descrição da natureza, o que não deixa de ser muito importante do ponto de vista "filosófico". Segundo elle, o observador tem simplesmente a função de registrar fatos que se verificaram no tempo e no espaço, pouco importando que o "observador" seja um aparelho que funciona automaticamente ou um ser vivo (de modo especial um homem que entende do assunto). O que entretanto é absolutamente necessário é a

(28) Vid. A. Alexandrov, Dokl. Akad. Nauk 84, N.º 2 (1952). O cientista soviético rejeita conforme a doutrina do materialismo dialéctico todo pensamento idealístico na interpretação da Teoria dos Quanta, ao passo que aceita a interpretação do físico de Copenhague.

(29) Physical Blätter 12 (1950), fasc. 7, pág. 298 f.

passagem do possível ao "factual" dentro do processo *actual* do registro. Este último ponto de Heisenberg se relaciona — o que elle mesmo nota — com a seguinte consideração de von Weizsäcker: somente fatos futuros são ainda possíveis, os passados são simples fatos. Não tem sentido perguntar sobre a probabilidade (isto é, sobre a possibilidade quantitativamente determinável) de sua realização, pois já são reais. O que de fato já aconteceu não pode ser objecto de indagação quanto à possibilidade ou probabilidade de sua realização.(30) Assim um fato histórico, como a do registro de um electrón pelo contador de Geiger, não entra numa teoria como a mecânica quântica que se occupa de possibilidades (probabilidades).

Este modo de ver não só é importante para a mecânica quântica (onde, por ex., elle entra na assim chamada "redução dos feixes de ondas"), mas também para a termodinâmica estatística clássica (quando, por ex., se quer compreender os processos macroscópicos numa massa de gás segundo a teoria cinética dos gases de Boltzmann-Gibbs, como uma perpétua passagem de macro-estados menos prováveis para mais prováveis). Quando se tem diante de si um estado muito improvável segundo as regras do cálculo das probabilidades, não só o estado imediatamente subsequente deve ser encarado como o mais provável, mas também o imediatamente antecedente. Mas isto contradiz aos fatos, já que na realidade a

(30) Physik der Gegenwart, pág. 41; *Wid. Geschichte der Natur*, pág. 143.

Apontamos ainda para as notáveis afirmações de Charles Sanders Peirce (Oxford 1957 — págs. 112-116 — *Time and Modality*). O pensamento mais notável de Peirce é que a realidade do futuro em contraste com a do presente e do passado não é individualizada de nenhuma forma. Um conjunto de elementos possíveis no futuro não mostra a identidade individual de seus elementos. Igualmente acontece, como é sabido, com as partículas elementares na Estatística de Bose-Einstein, em contraste com a estatística clássica de Boltzmann.

probabilidade dos macro-estados já realizados aumenta sempre mais conforme o segundo princípio da termodinâmica (aproximação assintótica da "morte do calor"). Portanto a conclusão para a probabilidade do que passou não é legítima. Este fato é contornado por von Weizsäcker, que afirma que não tem sentido perguntar pela possibilidade, ou probabilidade, de um fato passado, que já se tornou histórico.

Qualquer sistema quântico separado do mundo exterior só tem um caráter potencial, não "factual", por isto, segundo N. Bohr, ele não pode ser descrito por conceitos da física clássica. O estado representado por um vector de Hilbert (não por uma combinação estatística de vectores), aplicado a um sistema fechado, é segundo Heisenberg "objetivo", mas não "real", pois nele não se pode verificar um fato historicamente constatável em nosso mundo macroscópico (tais como a revelação de uma chapa fotográfica, a indicação de um instrumento, e semelhantes aparelhos de que nossas salas de física estão cheias). Portanto a concepção clássica de "objetivo-real" deve ser abandonada.

A caracterização do sistema atômico por um vector de Hilbert é complementar às descrições por meio de conceitos clássicos, da mesma forma que na termodinâmica estatística o micro-estado da massa gasosa é complementar à temperatura.

Aqui a temperatura é o conceito clássico; ela pode ser diretamente lida num instrumento macroscópico, o termómetro, pelo "observador". Pode igualmente ser registrada por um autómato sem que esteja presente um observador humano. A temperatura portanto é "real", mas não é "objetiva". Portanto, devemos admitir como "objetiva".

ivamente presente" sómente o micro-estado não observável do gás.

O conhecimento do que é "factual", isto é, do macroscópico, é, por conseguinte, sempre um conhecimento imperfeito tanto na mecânica quântica como termodinâmica.

Vemos que, à luz da "interpretação de Kopenhagen", da teoria dos quanta, a oposição tradicional entre "realismo" e "idealismo" não pode mais ser empregada e as teorias tradicionais do conhecimento fracassam.

As objeções que foram levantadas contra a interpretação aqui dada da teoria dos quanta podem ser assim resumidas(31): Quase todas as críticas contra a "interpretação de Kopenhagen" tem por objeto antes de tudo o fato que sómente uma parte do dualismo "onda e corpúsculo" é considerada como real; em geral os corpúsculos. Em segundo lugar fala-se de "parâmetros ocultos" que não conhecemos, mas que, apesar disto, determinaríamos na "realidade transcendente" o curso de cada partícula (com mais exactidão que uma previsão estatística). A objeção de Heisenberg — que para nós é muito digna de nota — contra todas as explicações que entram em concorrência com a de Kopenhagen é que nelas se destrói a simetria da linguagem da teoria dos quanta, aquela entre a coordenada local e a coordenada de impulso p ; $|\psi(q)|^2$ é ainda efetivamente a quantidade de variação na coordenada local, mas $|\psi(p)|^2$ não é mais a do espaço-impulso. Portanto, também aqui o pensamento "pitagórico" é decisivo.

Os adversários temem que o conceito fundamental da "realidade objetivo-real" fique perdido

(31) W. Heisenberg, *Physical Blaetter* 12 (1956) fasc. 7, pág. 204 ss.

para a física. Mas tal temor é injustificado. Os processos que se verificam no tempo e no espaço de nosso ambiente diário são propriamente o real e d'elles é feita a realidade de nossa vida concreta. "Quando se tenta, diz Heisenberg(32), penetrar nos pormenores dos processos atômicos que se ocultam atrás desta realidade, os contornos do mundo "objeivo-real" se dissolvem, não nas névoas de uma nova imagem obscura da realidade mas na clareza difana de uma *matemática*, que conecta o possível, e não o "factual", por meio de suas leis".

Este pensamento se relaciona com a observação feita por Heisenberg a respeito da teoria pitagorizante de Platão no "Timeu" sobre os quatro elementos, de que falamos no primeiro capítulo. Já Platão dissolve em princípio a matéria em formas matemáticas (embora nêle a probabilidade não desempenhe papel algum). Os elementos platônicos são (conforme a terminologia acima empregada) "objeivos" mas não "reais", isto é, não perceptíveis pelos sentidos. É verdade que Platão atribui o ser propriamente dito à matemática invisível de suas partículas elementares, em opposição à nossa identificação "existencialista" entre "realidade" e "factualidade" (que era por êle desprezada). Contudo tanto Platão como os "Kopenhagenses" têm em comum o fato de reusarem aplicar as qualidades essenciais ("primárias") dos corpos microscópicos "reais" às partes elementares da matéria, como o fizeram Anaxágoras e Demócrito e como o fizeram os materialistas de todos os tempos até hoje(33).

(32) *Loc. cit.*, pág. 304.

(33) Neste sentido também as objeções de Aristóteles contra os triângulos elementares de Platão (cf. De Coelo III, 1) são "materialistas". O "realismo crítico" de hoje procura ser menos primitivo, embora não

7. Visão de conjunto

Já é tempo de resumir e completar as observações acumuladas nos capítulos anteriores. Partindo da tese, hoje tão espalhada, de que a técnica é o objeivo e ao mesmo tempo o motivo secreto da ciência exata da natureza, refutamos, ou pelo menos limitamos, esta afirmação apontando para a ciência exata mais antiga, a *astronomia*, a qual, só pelo fato de subsistir através dos séculos, refuta a tese do primado da técnica. Mostramos que somente o século XVII com a introdução do método matemático exato na investigação do "mundo debaixo da lua" trouxe o devotamento à técnica, sendo testemunha disto as descobertas precursoras do telescópio e microscópio, do relógio de pêndulo e da bomba de ar, embora a máquina a vapor, como primeira fonte técnica de energia em grande quantidade (mais do que os tradicionais moinhos de água e de vento), pertença aos fins do século XVIII.

O ponto decisivo é constituído pela *experimentação analítica*, desconhecida da Antiguidade e da Idade Média. Somente ela permitiu desvendar as complexas causas que agem em a natureza e estabelecer leis naturais exatas e a partir delas dominar as forças da natureza.

O fato de a astronomia se ter adiantado tanto às outras ciências exatas da natureza se deve ao fato que no movimento das enormes massas extraterrestres, observáveis regularmente a olho nu, num universo praticamente vazio, já existiam "casos puros" que não precisavam ser restabele-

escapa à tendência de introduzir novas concepções da realidade, pouco claras. Vid. W. Buechel, *Quantenphysik und kritischer Realismus*, em: *Philosophia naturalis*, V (1953), fasc. I, págs. 3-54.

cidos experimentalmente. A isto acresce a feliz circunstância nos movimentos dos planetas de o nosso sistema solar ter somente um corpo central. Se o sol fôsse uma estrela dupla, as circunstâncias seriam bem diferentes e muito mais complexas. Na realidade as trajetórias dos planetas e das luas (também da nossa lua terrestre) são quase círculos e pertencem assim aos fenômenos que são facilmente calculáveis; ao mesmo tempo, em razão da perspectiva distorcida oferecida da terra e por causa de leves anomalias que provêm das trajetórias, levemente elípticas e excêntricas, punham-se alguns problemas nada triviais(34) que desde tempos imemoriais suscitaram a curiosidade dos homens que observavam o céu.

Tudo isto favoreceu o aparecimento precoce da ciência dos fenômenos celestes e teve como resultado a opinião, nunca seriamente contestada na Antiguidade e na Idade Média, de que as leis exatas da natureza valiam somente para os fenômenos celestes e não para os terrestres. Isto, por sua vez, teve por consequência uma certa aversão contra uma concepção quantitativa dos fenômenos terrestres, tão característica para a consideração aristotélico-escolástica da natureza, mesmo quando apregoava métodos empíricos (como por ex. Alberto Magno). Tal maneira de considerar a natureza só foi rompido (apesar de algumas tentativas dos terministas de Paris no século XIV) no tempo do barroco incipiente, por Galileu, Kepler, Descartes, Pascal, Huygens, Newton, só para nomear os mais importantes. Que "o livro do universo está escrito em linguagem matemática" (Galileu(35), eis o ponto decisivo. O mesmo pensamento é expresso de forma

mais clara por outras palavras ousadas de Galileu, tais como a que afirma que o conhecimento matemático se distingue *extensivè*, em amplitude, do conhecimento de Deus, mas que *intensivè*, qualitativamente, lhe é igual(36). Leibniz e Newton não estão tão longe desta mesma idéia. Para Leibniz as "mônadas", sob cujo conceito caem tanto Deus como o homem e tódas as criaturas, só se distinguem gradualmente, segundo a clareza e evidência com que "representam" o universo. Foi Kant, com sua religiosidade profunda haurida no pietismo, que mostrou de novo a intrinsecamente limitada do homem e sua finitude.

Durante o desenvolvimento ulterior da ciência exata foi ridicularizada a atitude científica dos séculos XVII e XVIII, que fazia de Deus um "engenheiro em repouso", o qual criou o mundo num longínquo passado, entregando-o depois a si mesmo. Conforme uma anedota conhecida, Laplace, o célebre astrônomo e matemático, teria respondido a Napoleão, quando este lhe perguntou pelo lugar ocupado por Deus em seu sistema cosmogônico: "Sire, je n'avais pas besoin de cette hypothèse-là".

Em todos esses variáveis e peripécias das opiniões científico-filosóficas o papel predominante da matemática permanece imutável. Não se descobrem nem sequer indícios da vontade de voltar à contemplação qualitativo-metafísica pré-galileica, empregada pela escolástica. É verdade que o romantismo alemão, e na filosofia o idealismo alemão, nada tem de matemático; é de estranhar, por ex., o pouco conhecimento matemático do tão erudito Hegel, o qual mostrou a penetrante força de seu gênio especulativo em tantos terrenos do conhecimento humano, sendo, no entanto, fácil de notar

(34) *Viá. O Neugebauer*, The Exact Sciences in Antiquity (Providence, Rhode Island, 21957), págs. 152 s.
(35) *Galilei*, Il Saggiatore, Ediz. Nat. VI, 232.

(36) *Diálogo I*, ediz. Nat. VIII, 128 s.

as poucas anotações matemáticas que se encontram em sua "Ciência da Lógica" (37). Schelling não é diferente (38). Esta incapacidade dos românticos — exceção talvez feita de Novalis — para compreender o papel da matemática teve como consequência, na Alemanha, a separação completa e funesta entre ciências exatas e "ciências do espírito", de modo que aquelas se desenvolveram inteiramente alheias às segundas, assim que é difícil descobrir qualquer influxo da filosofia clássica nas mesmas (39). Este é certamente um dos motivos mais importantes da orientação empirista tomada pela epistemologia científica do fim do século XIX (Mach); tal é também a causa da interpretação "fisiológica" de Kant dada por Helmholtz. Em tôdas essas teorias a matemática sempre era deixada de lado.

O mesmo se dá no século XX. Nossas apreciações críticas do conceito de realidade nas ciências exatas mostraram êste fato muito claramente, como as relações existentes entre a experiência analítica e a "análise" matemática". As novas teorias da física "moderna", do século XX (teoria da relatividade e teoria dos quanta) não foram capazes de solucionar a velha polémica entre idealismo crítico e realismo crítico, que novamente surgiu, com tôda a violência, no século XIX. Os "modelos" da física clássica (não somente a concepção "mecanicista" no sentido de Descartes e Huygens, que há muito já se tornara obsoléta)

(37) Algumas vézas se tem a impressão que Hegel *hauriu* seus conhecimentos matemáticos do pequeno escripto polémico de Berkeley "The Analyst", escripto contra Newton.

(38) Lembramos aqui igualmente a falsa interpretação que Goethe dá de Newton na "doutrina das cores", esta distorção provém sem dúvida de aversão às experiências analíticas na investigação da natureza.

(39) B. Riemann foi influenciado até certo grau pelo "realista" Herbart, mas tal influência não foi longe.

apareceram como concepções ingênuas. Por pouco que seja aquilo que positivamente podemos afirmar sôbre a "essência" da natureza, temos suficientes conhecimentos negativos da mesma para podermos dizer que é impossível representar a natureza por modelos construídos mecanicamente. O conceito de modelo conserva, contudo, ainda hoje um valor "relativo". A física teórica de hoje constrói (*in abstracto*) tôda espécie de modelos, mas sabe muito bem que êstes só podem representar alguns traços da realidade observada e que são aproximações mais ou menos grosseiras de uma realidade infinitamente complexa e que seu valor é limitado. Descobriu-se ainda que muitas vézes é simplesmente impossível propor modelos intuitivos válidos. Assim, por ex., nem a estrutura não-euclidiana da variedade espaço-tempo da teoria da relatividade geral, nem o espaço de Hilbert na teoria dos quanta, pode ser representado por um modelo; êste último apenas por dois modelos que se excluem mutuamente (onda e corpúsculo).

O que em meio a tudo isto permanece inmutável é o aspecto matemático, com suas estruturas muitas vézes abstratas, mas sempre "simétricas"; nêle, parece que se traduz a essência mesma do cosmo. O mundo como um cristal, eis a visão hodierna do universo.

Podese perguntar se, frente a tal concepção "pitagórica" do mundo, ainda se pode falar de uma violação, de um "forçamento" da natureza pela ciência moderna restringindo-nos ao reino da teoria, da consideração abstrata da natureza). Explicamos acima que o progresso matemático das ciências naturais só foi possível pelo princípio da renúncia: "*naturam renuntiamo vincimus*" (ou melhor talvez "*cognoscimus*"). Tal renúncia diffe-

climmente se coaduna com a attitude de forçar. Significa antes um recuo. Recuo para onde? Para o mundo da matemática, à qual pela sua própria natureza pertence o possível. De fato, como já Leibnitz vira, o domínio da matemática são os "mundos possíveis". E hoje em dia quase impossível voltar a uma interpretação antropomórfica da natureza no sentido do Romantismo (embora se veja indícios cá e lá). Isto seria poesia e não ciência.

Parece que o avanço das ciências exatas com o auxílio da matemática não conhece limites e a conhecida palavra de Kant parece se verificar: "Em qualquer doutrina especial da natureza só pode haver tanta ciência verdadeira, quanta matemática nela se encontra".(40)

Não obstante, o emprégo da matemática nas ciências naturais tem seus limites, mas estes se encontram dentro da mesma matemática. Num capitulo posterior trataremos desta questão enquanto relacionada com a matemática. Quanto à sua utilização na física e na astronomia, já no tempo de Newton se descobriu que a matemática encontra certas limitações em solucionar problemas que lhe são propostos. Assim se verificou que o "problema dos dois corpos" na teoria da gravitação de Newton, isto é, o problema kepleriano do movimento de *um* planeta em redor do Sol, podia ser solucionado com os métodos matemáticos de então, mas não o "problema dos três corpos", isto é, o movimento simultâneo do Sol, Júpiter e Terra sob o influxo da gravitação, abstracto de certos casos especiais. (Pouco antes de 1900 H. Poincaré demonstrou que uma solução fechada do problema dos três corpos é absoluta-

mente impossível, sendo possível somente uma solução aproximativa pelo desenvolvimento em séries, o que já se fizera há muito). Aqui portanto, pela primeira vez, fracassou a nova matemática do século XVII e desde então tanto a matemática clássica como a moderna fracassaram diante de problemas propostos pela física teórica. Pode-se dizer que somente por excepção é possível dar solução cabal, do ponto de vista matemático, a um problema complicado da física; em geral é preciso contentar-se com aproximações e procurar contornar as dificuldades o melhor que se pode.

O que acabamos de dizer provém das limitações intrínsecas da própria matemática; mas existem também limites exteriores. Tais limites estão contidos não tanto na estrutura da matemática, mas na do objeto a que é aplicada. Até agora só se falou da natureza inanimada, nunca dos seres vivos. A vida existe numa escala infinita, comparada à imensidão do universo; a vida está para o universo como um milionésimo de cm para 100 m. Até que ponto a matemática esteja em condições de decifrar os fenômenos ditos "vitalis", não podemos agora expor. Não estamos em condições de decidir sobre a verdade ou não da tese dos platônicos pitagorizantes do século IV a. Cr.: "A Psyche (a "alma", no sentido de: princípio de vida) é um número que se move a si mesma".

(40) *Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft, Vorrede*