

O Valor da Ciência¹

J. Leite Lopes

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas - CBPF
Rua Dr. Xavier Sigaud, 150
22290-180 - Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Professor Emérito CBPF, UFRJ
ULP – Strasbourg

Que vale a ciência? Que contribuição nos dá ela para a compreensão do mundo em que vivemos? Além de gerar tecnologias, é a ciência parte da cultura?

Qual foi a sua evolução ao longo da história?

★ ★ ★ ★

No mundo atual, é difícil reconstituir as sensações, as impressões dos primeiros homens em contato com a natureza.

No estado de repouso e de movimento dos objetos que nos envolvem – a minha casa, esta mesa, aquela árvore, o Sol, a Lua no céu, uma pedra que atiramos e que termina por cair – está a origem de conceitos de *lugar* que ocupam sucessivamente os corpos – de *espaço*, de *tempo*.

O espanto dos primeiros homens diante do universo, o medo das tempestades, do trovão, dos elementos, a contemplação das estrelas, a admiração do céu, geraram a *noção* de seres superiores, de deuses, que seriam responsáveis pelo mundo, seus criadores, estruturaram as religiões, os modelos cosmogônicos e finalmente os sistemas filosóficos.

¹Conferência para a SBPC jovem na 47^a Reunião Anual da SBPC, São Luis, Maranhão, 9-15 de julho de 1995.

Surgiram as mitologias das civilizações antigas, a súbita eclosão da civilização e da cultura na Grécia clássica. Antes dos Gregos, os Babilônios, os Egípcios, já tinham feito observações do movimento do Sol e da Lua em relação às estrelas fixas e sabiam como prever eclipses lunares e solares. Enquanto os Gregos assimilavam os corpos celestes a deuses, Anaxágoras afirmava que o Sol era como pedra aquecida ao vermelho e que a Lua era feita como a Terra. Os discípulos de Pitágoras, no fim do quinto século antes de Cristo, afirmavam que a Terra era esférica.

Tales, o fundador de uma escola de pensadores, a Escola de Mileto, emitiu a idéia de que todas as coisas são feitas a partir de uma *substância primordial*, que ele identificou com a água, por influência dos egípcios (para os quais o rio Nilo teve e tem importância fundamental). Já Anaximandro, também de Mileto, afirmava que todas as coisas são feitas de uma substância fundamental que não é nem a água nem nenhum dos corpos que conhecemos: ela é infinita, eterna e é a matéria de todos os mundos.

Para Pitágoras, *todas as coisas são números* – um precursor dos físicos contemporâneos que descrevem a natureza segundo teorias matemáticas.

Segundo Heráclito, que não era da Escola de Mileto, existe unidade no mundo, mas esta unidade é o resultado de uma combinação de contrários: “*o um é formado de todas as coisas, e todas as coisas provêm de um*”.

Duas contribuições, pelo menos, foram importantes para a evolução do pensamento, oriundas dos filósofos gregos: a física de Aristóteles (que depois de dominar a Idade Média foi derrubada por Galileo) e a teoria atômica de Leucipo e de Demócrito (cerca de 420 anos antes de Cristo) que foi retomada no século XVIII.

Aristóteles propôs um modelo para o Universo, um Cosmo finito, constituído de esferas concêntricas, com a Terra, imóvel, no centro, as esferas da Lua, de Mercúrio, de Vênus, do Sol, de Marte, de Júpiter, de Saturno – os planetas então conhecidos – e além dessas esferas existia a das estrelas fixas, o *Primum Mobile*. Além do *Primum Mobile* não haveria movimento, nem tempo, nem lugar. Deus, o Motor Primordial, impulsionaria rotação no *Primum Mobile*, o qual transmitiria seu movimento às outras esferas. Tudo o que se encontrasse na Terra, abaixo da Lua, seria submetido ao envelhecimento, à desintegração, os movimentos terrestres obedeceriam a leis teleológicas (com uma finalidade), cada corpo

devendo ocupar uma posição privilegiada, em repouso. Cessada uma força, uma violência, os corpos voltariam ao repouso. Os corpos celestes, ao contrário, teriam movimentos regulares, produzidos pela vontade de um Deus.

A física de Aristóteles prevaleceu até os anos 1600 – durou cerca de 2000 anos (como é lenta a evolução do pensamento). Adotada por São Tomás de Aquino, tornou-se dogma. Só a partir de filósofos da Escola dos Nominalistas de Paris, no século XIV, surgiram críticas às idéias de Aristóteles até que surgiu Galileo Galilei em 1609.

Enquanto a tradição dos filósofos gregos era o raciocínio lógico, os diálogos, as concepções teóricas, Galileo recorreu à observação, à experiência, para encontrar as leis de movimento dos corpos em queda livre, construiu um telescópio, inventado pelos holandeses, para observar os corpos celestes e assim descobriu os satélites de Júpiter, as montanhas lunares. Contrariou, pois o dogma da Igreja Católica, adotando a idéia de Copernico de que a Terra não era o centro do mundo – assim como as leis de Kepler sobre o movimento dos planetas em torno do Sol. Fazendo um grande número de experimentos para saber como pequenas esferas rolam sobre um plano inclinado, como se movimentam os pêndulos, Galileo descobriu o princípio da inércia que diz: *se um corpo se deslocar em linha reta com uma certa velocidade, ele continuará indefinidamente em movimento na mesma direção e com a mesma velocidade*, se nenhuma força agir sobre ele. Este princípio contrariava frontalmente a idéia de Aristóteles segundo o qual o corpo terminaria por ficar em repouso.

Isaac Newton completou o trabalho de Galileo e abriu verdadeiramente o caminho para a ciência moderna.

Ao descobrir a lei da queda livre dos corpos e o princípio da inércia, Galileo afirmou que do mesmo modo que o repouso não precisa de uma causa para se manter, o estado de movimento retilíneo uniforme também não precisa de causa e dele o repouso é um caso particular. Verificou que a aceleração da gravidade não depende da natureza do corpo que cai nem de sua massa e esta descoberta – uma bola de chumbo e uma pena de pavão levam o mesmo tempo para cair no vácuo – foi importante para o chamado princípio da equivalência de Newton em 1687 e de Einstein em 1968.

Nos anos (admiráveis, assim os qualificam os historiadores) 1666 e 1667, houve a peste

na Inglaterra, fecharam-se as universidades e, em casa, Newton elaborou os fundamentos das suas descobertas: o cálculo infinitesimal, as leis de movimento, que descrevem como se pode calcular o movimento de uma partícula uma vez dada a força que sobre ela se exerce, e a gravitação universal. Sua intuição genial é traduzida pela metáfora: *maçã que cai da árvore é a mesma coisa que*” *uma pedra lançada e que cai após descrever uma parábola e que é a mesma coisa que*” *Lua que se move no céu e que cai constantemente para a Terra sem cair*. Propôs a idéia de que existe uma força de atração universal que atua sobre uma partícula material, onde quer que ele esteja no universo e esta força é determinada pela distribuição de toda a matéria no universo. A teoria da gravitação permitiu a descrição quantitativa do sistema solar, das leis de Kepler, desenvolveram-se assim nos séculos XVIII e XIX a mecânica clássica, a mecânica celeste, a mecânica estatística; a equação de Newton diz que há uma força toda vez que há uma mudança da velocidade de um corpúsculo. O êxito dos trabalhos de Newton foi extraordinário e os físicos em geral o consideram como o maior dentre eles na história. Atualmente, a física no espaço baseia-se na mecânica de Newton, que determina as trajetórias dos foguetes e satélites espaciais. Determina-se experimentalmente que os objetos se atraem realmente segundo a lei de Newton e as forças gravitacionais se exercem entre as estrelas mesmo as grandes distâncias. A força de gravitação é a responsável pelo colapso das estrelas assim como pelo aparecimento das reações nucleares a altas temperaturas.

No fim de sua vida, Newton recebeu todas as homenagens pois compreendeu-se que com a física por ele construída *era possível para a humanidade ter uma compreensão quantitativa e precisa de todo o universo*. Com a experiência que realizou decompondo um raio de luz branca em suas componentes monocromáticas e em seguida submetendo um desses raios monocromáticos ao prisma para saber se ele também era uma superposição de outras cores ou se era irreduzível, revestiu-se do caráter de uma experiência moderna. A teoria corpuscular da luz, que adotou, antecedeu em mais de dois séculos a noção de fóton de Einstein. Assim, após dois mil anos, a partir da Grécia antiga – onde se haviam fundado a filosofia, as especulações sobre o mundo, a matéria, a vida, a morte, os diálogos poéticos, começou a *ciência moderna*, segundo a qual as leis de movimento são universais, e que dessacraliza o céu e ao mesmo tempo retira da Terra o caráter de centro do mundo.

Foi uma verdadeira revolução intelectual que mudou a mentalidade dos homens, sua visão do universo e a visão deles próprios no mundo físico.

Mais de dois séculos depois da publicação dos *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (1687), com a descoberta das leis que regem os fenômenos elétricos e magnéticos – as leis do eletro-magnetismo – da teoria ondulatória da luz e de que as ondas de luz são ondas eletromagnéticas, a idéia de espaço absoluto era idêntica à da existência de uma substância translúcida – o éter – que preencheria todo o espaço e cujas moléculas vibrariam para propagar as ondas luminosas – como as de ar fazem propagar as ondas sonoras – mas sem opor resistência ao movimento dos corpos celestes, em especial, dos planetas ao redor do sol. Esta idéia foi abandonada depois que os trabalhos de Einstein, e de Lorentz e Poincaré, fundaram a teoria da relatividade. Nesta, admitem-se como postulado os resultados da observação de que a velocidade da luz não depende do estado de movimento da fonte luminosa. E o princípio da relatividade – que afirma que *as leis da física não dependem do estado de movimento retilíneo uniforme do laboratório*; elas são as mesmas qualquer que seja o sistema inercial (no qual é válido o princípio da inércia) que se tomar como referencial.

Enquanto, segundo Newton, dois acontecimento simultâneos para um observador são também simultâneos para qualquer outro observador, segundo Einstein o tempo depende do referencial: *se dois acontecimentos são simultâneos para um observador num laboratório L, não são mais simultâneos para um observador de outro laboratório L', em movimento retilíneo e uniforme em relação ao primeiro*. A distância que separa os dois acontecimentos em L gera uma diferença de instantes em que acontecem para o observador de L'. O espaço se transforma em tempo e vice-versa, é a metáfora que podemos usar para traduzir este resultado. Daí a idéia que o tempo é uma dimensão a mais de um espaço cujas três dimensões são as usuais – o *espaço-tempo*, o espaço quadri-dimensional.

A mecânica de Newton teve de reformular-se para se adaptar à teoria da relatividade, que engloba a eletrodinâmica de Maxwell. Nessa adaptação, Einstein foi levado à idéia de que *a massa de uma partícula* não é uma constante, mas *depende de sua velocidade*, cresce com esta e se tornaria infinita se a partícula pudesse atingir a velocidade da luz c . Só os fótons e os neutrinos (se tiverem massa nula) podem ter a velocidade da luz. Resultado

importante na teoria de Einstein foi a predição teórica que fez: uma *partícula em repouso com massa m_0 tem uma energia intrínseca dada pela fórmula célebre: $E = m_0 c^2$* . Assim, uma pessoa com massa igual a 70kg=70.000g, tem uma energia de repouso igual a $E = 70.000g \times \left(3 \times 10^{10} \frac{cm}{s}\right)^2 = 63 \times 10^{24} \text{erg} = 63 \times 10^{17} \text{joules}$. Outro gigante na história da física, Albert Einstein completou a obra de Newton formulando a física relativista em 1905. E em 1915, descobriu as equações que descrevem o campo de gravitação. Ela mostrou que a matéria torna a geometria do espaço físico diferente da geometria euclidiana. A geometria do espaço, gerada pela presença de matéria e energia, é a geometria do espaço curvo de Riemann e Einstein teve a intuição de descobrir que o potencial do campo de gravitação é descrito pelo tensor da métrica, $g_{\mu\nu}(x)$, desse espaço.

Na teoria da relatividade geral, inventada por Einstein, a matéria produz curvatura no espaço e é esta curvatura que determina a ação da gravitação. A mecânica da gravitação de Newton é uma aproximação da teoria de Einstein que dá correções para os resultados Newtonianos. Estes são importantes para a cosmologia, para a física das grandes massas no Universo. Segundo Einstein, a luz transmitindo energia e esta sendo equivalente a uma certa massa, ela é afetada e desviada por um campo de gravitação que a atrai – como é o caso da luz emitida por uma estrela e que antes de chegar a nós passa tangenciando o sol.

A relatividade geral é fundamental para a cosmologia – que estuda a origem, a evolução e a estrutura do Universo. Nesses processos cosmológicos são fundamentais as partículas elementares e suas interações mútuas. Ao longo dos anos, a partir do século XVIII, aprendeu-se que os átomos, de que é constituída a matéria, são formados por elétrons (as partículas da corrente elétrica) e por núcleos. Os núcleos atômicos são constituídos por prótons e nêutrons (aproximadamente 1830 vezes mais pesados que o elétron). Descobriu-se, nos últimos anos, que prótons e nêutrons não são irredutíveis, são formados de partículas, chamadas *quarks* e pensamos que existem seis espécies de quarks designadas pelas letras u, d, c, s, t, b e cada espécie pode existir em três estados diferentes que se designa como estados de três “cores” diferentes.

Além disso, o elétron descoberto há cerca de um século (1897) é apenas uma partícula de uma família de seis partículas que são:

- *neutrino eletrônico*, ν_e
- *eletron*, e
- *neutrino muônico*, ν_μ
- *muon* (cerca de 200 vezes mais pesado que e)
- *neutrino tauônico*, ν_τ
- *tauon*, τ (cerca de 2000 vezes mais pesado que e)

Estas últimas partículas constituem a família dos *leptons* e têm *interação gravitacional*, a *interação* chamada *fraca* e a *interação eletromagnética*. Já os quarks:

quarks u

quark d

quark c

quark s

quark t

quark b

que podem existir em três estados com um certo número quântico, chamado “cor”, diferente em cada estado se exercem as interações acima e mais uma *interação forte* devida à existência desse número quântico.

As interações fortes são transmitidas por partículas sem massa chamadas *gluons*. As interações eletromagnéticas são transmitidas por *fótons* que são os *quanta* de luz. As interações fracas são transmitidas por quanta chamadas *bosons vetoriais* W^+, W^-, Z^0 . As interações gravitacionais seriam transmitidas por *gravitons*. No Brasil, contribuiu à descoberta do *pion* que é uma estrutura particular de quarks, o físico Cesar Lattes (1948). Enquanto que o boson Z^0 foi predito pelo autor desta Conferência em 1958. Os quarks e os gluons são confinados e não podem ser vistos nas condições atuais.

Nas estrelas, predomina entre suas partes uma forte atração gravitacional que as faz entrar em contração. O aquecimento daí resultante (~ 100 milhões de graus) dá lugar a reações nucleares que transformam hidrogênio em hélio e que dão lugar a uma pressão

que contrabalança a contração gravitacional e faz as estrelas brilharem como estrelas. Quando se esgota o combustível nuclear as estrelas se contraem por efeito da gravitação e dependendo da massa elas explodem e expõem partes dela (as *supernovae*) ou continuam a entrar em contração dando lugar a estruturas compactas ou *estrelas de neutrons*. Quando a repulsão devida ao princípio de Pauli para os elétrons e para os neutrons é vencida pela força de atração gravitacional, há o colapso da estrela dando lugar a uma estrutura de campo gravitacional intenso do qual nem mesmo a luz não pode sair – é o chamado *buraco negro*.

O estudo dessas partículas e dessas interações desenvolveu-se a partir de 1925 com a descoberta da *mecânica quântica*.

Ao mesmo tempo que Einstein construía a teoria da relatividade e a teoria relativista da gravitação, ele dava importantes contribuições à física das partículas. Introduzia o quantum de luz ou fóton dizendo que certos efeitos como o foto-elétrico (transformação da luz em corrente elétrica) e o efeito Compton (espalhamento de raios X por elétrons) só podem ser explicadas considerando a luz como uma propagação de corpúsculos ou quanta e não como uma propagação de ondas. Mas como as ondas são necessárias para explicar a difração, as interferências, surgiu aí a noção de um *comportamento dual da luz*, ora corpúsculos – o fóton – ora onda. Em 1923, Louis de Broglie teve a idéia de generalizar essa dualidade. Como a matéria é constituída de corpúsculos, elétrons, átomos, etc, não seriam estes também dualmente formados de ondas de um novo tipo, as ondas de De Broglie? Este trabalho inspirou Ervin Schrödinger a buscar a equação que deve determinar as ondas de De Broglie e daí surgiu uma nova física, a *mecânica ondulatória*. Werner Heisenberg, Max Born, Pascual Jordan, por outro lado, criticaram a introdução de noções clássicas como trajetória do elétron nos átomos, pois para ser observada uma tal trajetória devem empregar-se meios experimentais, como observação por radiação, que destroem o sistema. Foram assim levados a definir as grandezas físicas como matrizes e o valor dessas grandezas seria dado pelos valores próprios desses operadores. Construiu-se assim a *mecânica das matrizes*. E em seguida, com os trabalhos de Paul Dirac e Wolfgang Pauli, entre outros, demonstrou-se a equivalência da mecânica ondulatória com a mecânica das matrizes, aspectos diferentes da *mecânica quântica*, uma vez que o substrato da nova

teoria é a estrutura descontínua da energia, os *quanta de energia*, emissão ou absorção dos quais dá lugar à troca de energia na interação matéria-radiação.

O desenvolvimento da mecânica quântica marcou uma nova revolução na física. Enquanto que a teoria da relatividade de Einstein constituía o acabamento, o aperfeiçoamento do edifício da física clássica fundamental – mecânica, eletrodinâmica, teoria da gravitação – que não põe em dúvida o processo clássico de observação (que não perturba o sistema observado), a mecânica quântica admite novos postulados e entre eles o de que um estado físico é definido por uma amplitude de probabilidade, isto é, por uma função, cuja evolução no tempo é determinada pela equação de Schrödinger, e cujo quadrado absoluto de sua projeção sobre outro estado dá a probabilidade para que este último seja encontrado numa observação. Assim o *elétron*, não é uma partícula clássica nem uma onda clássica, *é um objeto quântico* com energia concentrada num ponto mas seu caráter ondulatório resulta de que só podemos conhecer a probabilidade para encontrá-lo num certo lugar e esta resulta da natureza ondulatória da amplitude de probabilidade.

Assim, a interferência da luz, como a interferência de elétrons, resulta de que um fóton (ou um elétron) pode ter dois estados de passagem por dois orifícios abertos num anteparo, e a soma dos dois estados correspondentes é que descreve esta situação. Ao elevarmos a soma dos dois estados ao quadrado absoluto, há um termo de interferência (o termo em ab no quadrado $(a + b)^2 = a^2 + b^2 + 2ab$) que descreve a interferência da luz ou de um feixe de elétrons.

Eis-nos pois, cerca de 2400 anos depois dos filósofos gregos que fundaram a arte de raciocinar logicamente e de discutir especulações, eis-nos de posse da ciência moderna que nos ensina de que são feitas as coisas, de onde nasceu o universo, como ele evolue no tempo.

A ciência contemporânea gera e alimenta todos os tipos de tecnologia responsáveis por transformações sociais, econômicas e políticas em nosso mundo: desde tecnologia da produção de alimentos e da cura das doenças àquelas envolvidas na produção de armas, as mais terríveis e destruidoras – estas últimas constituindo graves problemas da política internacional.

Mas a ciência é fundamental para a educação dos jovens em toda parte exatamente

por essas características: sua beleza intrínseca, a precisão das leis científicas que regem o universo e o desafio que apresenta o controle político das tecnologias.

Em última análise, desde a obra do grande Isaac Newton, a ciência nos dá os elementos para uma descrição racional e uma compreensão quantitativa do universo.

Ao buscar as raízes profundas das noções do espaço, de tempo, de matéria, ela nos revela um quadro de extraordinária beleza, comparável às cantatas de Johann Sebastian Bach, à obra literária dos grandes escritores e dramaturgos, às realizações plásticas dos grandes pintores, aos encantos das catedrais góticas.