

As Universidades e Centros de Pesquisa no Brasil têm a cada ano se destacado cada vez mais na área de pesquisa científica, gerando inovação e conhecimento. No entanto, acreditamos que este conhecimento não deve ficar restrito ao ambiente acadêmico, pois entendemos que é direito da sociedade ter acesso, em linguagem acessível, àquilo que é produzido na Academia por cientistas e professores. Ressaltamos também que congressos e seminários são encontros corriqueiros na Academia, mas são raros aqueles eventos que têm como objetivo atingir diretamente a população em geral e particularmente a estudantes do Ensino Básico. Pensando em suprir esta lacuna, o Centro de Ciências da Universidade Federal de Juiz de Fora promoveu em 2009 sua 1ª Jornada de Divulgação Científica, tendo como público alvo especialmente esta parcela da população. O evento se mostrou um sucesso e motivou a equipe organizadora a colocar no horizonte a continuação desta atividade. Assim, em 2015 completamos nossa 4ª Jornada, todas realizadas durante a Semana Nacional de Ciência e Tecnologia e contando com o apoio da FAPEMIG, da CAPES e do CNPQ. Neste livro, reunimos alguns textos sobre diversas temáticas tratadas em nossas três primeiras Jornadas, com o objetivo de permitir o registro das palestras e oficinas apresentadas, além de propiciar o acesso àqueles que, por algum motivo, não puderam participar dos encontros. Pretendemos que o presente livro, *Ciência em Dia: Jornadas de Divulgação Científica*, torne-se uma publicação regular do Centro de Ciências, com a divulgação de outros textos tão importantes e motivadores quanto os da atual edição, extraídos das quatro Jornadas já realizadas e daquelas que certamente ainda estão por acontecer, possibilitando assim a ampliação de nossas atividades de Divulgação e Popularização da Ciência.

Eloi Teixeira César
Diretor Geral do Centro de Ciências



Ciência em dia: Jornadas de divulgação científica

Thales Costa Soares
Eloi Teixeira César
Edson E. Reinehr
(Organização)

Ciência em dia:

Jornadas de divulgação científica



Ciência em dia:

Jornadas de divulgação científica





Thales Costa Soares
Eloi Teixeira César
Edson E. Reinehr
(Organizadores)

Ciência em dia:

Jornadas de divulgação científica



Copyright © 2016 Editora Livraria da Física
1ª Edição

Direção editorial: José Roberto Marinho

Revisão: Professora Teresa Maria Videira Rocha

Capa: Fabrício Ribeiro

Projeto gráfico e diagramação: Fabrício Ribeiro

Edição revisada segundo o Novo Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa

Dados Internacionais de Catalogação na publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Ciência em dia: jornadas de divulgação científica / Thales Costa Soares, Elói Teixeira Cesar,
Edson E. Reinehr, (organizadores). – São Paulo: Editora Livraria da Física, 2016.

Vários autores.
ISBN 978-85-7861-378-5

1. Ciência e tecnologia 2. Ciências - Divulgação 3. Universidade Federal de Juiz de Fora - Minas Gerais I. Soares, Thales Costa. II. Cesar, Elói Teixeira. III. Reinehr, Edson E.

16-00108

CDD-501

Índices para catálogo sistemático:

1. Ciências : Divulgação 501
2. Divulgação científica 501

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta obra poderá ser reproduzida
sejam quais forem os meios empregados sem a permissão da Editora.

Aos infratores aplicam-se as sanções previstas nos artigos 102, 104, 106 e 107
da Lei Nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998



Editora Livraria da Física
www.livrariadafisica.com.br

À todas as crianças, em especial: Anita, Antônio e Isabela.



Ao CNPQ, CAPES e FAPEMIG pelo apoio financeiro.



Prefácio

O presente volume intitulado *Ciência em Dia: Jornadas de Divulgação Científica* é a primeira publicação do Centro de Ciências referente a uma de suas atividades regulares: as Jornadas de Divulgação Científica do Centro de Ciências da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), que em 2015 estarão em sua quarta edição. Trata-se de um evento de divulgação científica que integra o Calendário Nacional, através da Semana Nacional de Ciência e Tecnologia (SNCT), promovida pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), na sua divisão de Popularização da Ciência. Em cada uma das edições das Jornadas do Centro de Ciências foram realizadas muitas atividades.

Estas atividades de divulgação foram de amplo espectro e cobriram desde observações astronômicas, quando tínhamos a sorte de contar com um céu não encoberto, nem sempre possível no mês de outubro, período em que se realiza tradicionalmente a SNCT, como também oficinas, com utilização de softwares voltados para o Ensino de Ciências e Astronomia, e atividades interativas envolvendo a criação e exploração didática de experimentos de baixo custo. Outras atividades desenvolvidas foram as visitas mediadas ao salão de exposições científicas, onde os mediadores são licenciaturas em diversas áreas da Universidade. Também foram realizados concursos, como o de montagens de pontes de papelão, dirigidas a estudantes de Ensino Médio de escolas da cidade e região. Além disto foram desenvolvidos minicursos voltados aos professores de Ciências da Educação Básica e estudantes de licenciaturas. Todas estas atividades aconteciam paralelamente às palestras de divulgação científica.

A atividade de palestras de divulgação sempre foi o eixo organizador das demais atividades. Essas palestras buscaram sempre a aproximação de pesquisadores atuantes em suas respectivas áreas e ativos na produção do conhecimento. Objetivavam convidar pesquisadores excelentes em suas áreas mas que também dominassem a linguagem informal própria dos adolescentes e que fossem capazes de mesclar a experiência com a linguagem informal, próxima do falar popular e juvenil. Além disto, a programação dessas palestras

sempre teve uma característica muito peculiar, que reflete também nossa visão da prática da divulgação científica, buscando integrar nas palestras temas de interesse das Ciências da Natureza com as Humanidades, tentando estreitar o espaço entre as “duas culturas”.

Esse livro reflete bem a atividade de palestras de divulgação presente nas jornadas. Infelizmente não foi possível fazer uma publicação individual para cada uma delas. Isto se deve a várias razões: Por não termos na ocasião vislumbrado essa possibilidade, não havíamos previsto recursos em nossos projetos para este tipo de publicação. Além disto, não imaginávamos, em nossas primeiras jornadas, que um evento dessa natureza se consolidaria como uma atividade recorrente, como de fato veio a ocorrer.

Nas últimas edições da SNCT, buscamos por meio das agências de fomento, CAPES, CNPq e FAPEMIG, recursos que puderam viabilizar tanto as jornadas como esta publicação. Nunca é demais reforçar o agradecimento a estes órgãos sem os quais esta iniciativa não se viabilizaria. O fato de termos conseguido organizar algumas palestras no livro, permitirá que outras pessoas que não puderam participar das atividades possam conhecer um pouco do trabalho excelente dos autores, palestrantes dos eventos por nós organizados a quem somos imensamente gratos.

Temos também a esperança de que os textos possam ser usados em cursos de Licenciatura e também em salas de aula do Ensino Médio. Nossa expectativa é que esta possa ser uma publicação também regular do Centro de Ciências.

Desejamos a todos vocês, agradável e profícua leitura.

Os organizadores:
Thales Costa Soares
Eloi Teixeira César
Edson Eduardo Reinehr

Sumário

O experimento de Michelson-Morley.....	13
<i>Beto Pimentel</i>	
A Surpreendente História do Universo: Astronomia para entender o Mundo Natural, o Cosmos e a Vida	31
<i>João Rodrigo de Souza Leão</i>	
Materialidade e Imaterialidade na Física Moderna	63
<i>Frederico Firmo de Souza Cruz</i>	
O que mantém prótons e nêutrons juntos no núcleo	87
<i>Sebastião Alves Dias</i>	
Quebra Espontânea de Simetria e a Transição de Fase Ferromagnética.....	97
<i>Humberto Belich, Thales Costa Soares, Thiago Prudêncio</i>	
Refrigeração Magnética.....	103
<i>Lucas S. Paixão, Clebson dos Santos Cruz, Thales Costa Soares</i>	
A divulgação da física nuclear no Brasil.....	113
<i>Jayme Fernandes Ribeiro</i>	
Simetrias, Ciências Naturais e Humanidades	123
<i>J. A. Helayël-Neto</i>	
Educação e Neurociência: o diálogo necessário	129
<i>Teresa Maria Videira Rocha</i>	
O observador: uma incursão inóspita sobre os escombros da razão	139
<i>Ricardo Sibanto Simões</i>	



O experimento de Michelson-Morley

Beto Pimentel – Colégio de Aplicação – UFRJ

Como todo velejador sabe, o vento é relativo. O vento percebido a bordo de um barco é, de fato, uma combinação de dois movimentos: o do ar em relação à Terra e o do barco em relação à Terra. Mesmo que o ar esteja perfeitamente parado em relação à Terra, o movimento do barco nos faz perceber um “vento” com velocidade igual à do barco, no sentido oposto. O conceito não poderia ser estranho ao físico estadunidense Albert A. Michelson (1852-1931), cuja experiência como navegador e oficial da Marinha de seu país pode ter sido relevante como inspiração para a criação de seu mais famoso instrumento e experimento.

Ondas acústicas têm sua velocidade determinada pelas características físicas (densidade etc.) do meio em que se propagam. A intensidade e a direção da velocidade do som, por exemplo, são afetadas pela velocidade *do meio* (vento, no caso do ar) em relação ao observador, mas não pela velocidade *da fonte* sonora em relação ao observador¹. Por que isso não se aplicaria também à luz, que, no século dezenove, era compreendida como uma perturbação do éter luminífero, um meio ubíquo que se espalhava por todo o espaço e embebia os interstícios da matéria? Como toda velocidade é definida em relação a um referencial, é razoável supor, dada a onipresença do éter luminífero, que a velocidade das ondas eletromagnéticas (que constituem a luz) no vácuo fosse dada em relação ao referencial desse éter.

De acordo com a hipótese que era mais aceita à época, a do éter estacionário, a Terra, ao girar em grande velocidade em torno do Sol (~30 km/s), atravessava o éter sem perturbá-lo. Sopraria, então, em qualquer laboratório, um “vento de éter”, que teria precisamente a mesma velocidade em sentido

1 Embora a frequência seja, no que é conhecido como *efeito Doppler*.

oposto. Assim, se chamarmos de c a velocidade da luz medida num referencial em repouso em relação ao éter, e v a velocidade da Terra em relação ao éter, a velocidade da luz medida por um observador terrestre deveria variar, portanto, entre $c + v$, quando o observador estivesse se movendo a favor do “vento de éter”, e $c - v$, quando contra.

Por volta do final da década de 1870, já havia sido demonstrado que era impossível detectar, através de experimentos ópticos, o movimento de um observador em relação ao éter em primeira ordem – isto é, em medições em que o fator sensível era a razão v/c . Em março de 1879, numa carta ao astrônomo estadunidense David Peck Todd (1855-1939), postumamente publicada tanto na revista *Nature* quanto nos *Proceedings* da *Royal Society* no ano seguinte, o físico escocês James Clerk Maxwell (1831-1879) sugeriu que efeitos de segunda ordem² em v/c poderiam, em tese, ser medidos, porém seriam diminutos demais (da ordem de 10^{-8}) para serem detectados com a tecnologia da época.

Nesse ínterim, um então ainda desconhecido Michelson terminava seu período de formação como oficial da Marinha estadunidense e retornava de um período embarcado para lecionar Física na própria Academia da Marinha, em Anápolis³. Interessado pela medição da velocidade da luz, Michelson, em 1878, realizou a 4ª determinação dessa constante, incrementando ainda mais sua exatidão.

Muitos cientistas estadunidenses, à época, eram estimulados a cumprir um período de treinamento nos melhores institutos e laboratórios da Europa, onde se expandia uma cultura de precisão experimental que logo se espalharia pelo mundo desenvolvido. Assim, Michelson, eventualmente, conseguiu uma licença da Marinha estadunidense e viajou com a família para um período de dois anos de estudos na Europa, em particular na França⁴ e na Alemanha.

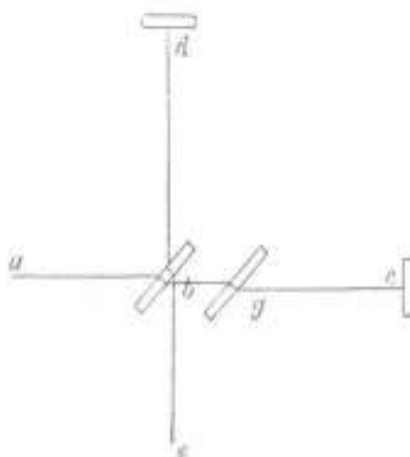
2 Isto é, dependendo da razão v^2/c^2 .

3 A história de como Michelson foi parar lá em primeiro lugar, fazendo uma das primeiras viagens de trem transcontinentais, por si só, é digna do tomo 2 de um romance. O tomo 1 seria fartamente preenchido pela aventura de sua família ao emigrar da Europa para o “faroeste” estadunidense, passando pelo recém-aberto canal do Panamá e participando diretamente da corrida do ouro.

4 O nome de Michelson já era famoso na comunidade científica internacional graças à sua determinação da velocidade da luz em Anápolis, mas praticamente ninguém fora dos Estados Unidos o conhecia pessoalmente, de forma que, quando ele foi primeiramente apresentado aos membros da *Académie des Sciences* em Paris, muitos perguntaram se ele não era “o filho do famoso Michelson”.

É possível que a observação de Maxwell a respeito da impossibilidade de se medir efeitos de segunda ordem tenha atingido os brios de experimentador detalhista de Michelson que, enquanto em Berlim, em 1881, ousou propor um experimento em que um efeito de segunda ordem poderia ser observado e medido “com facilidade”. O princípio do experimento era semelhante à ideia proposta por Maxwell: dois sinais luminosos seriam enviados em direções ortogonais, um ao longo da direção do (suposto) movimento da Terra em relação ao éter, e outro perpendicular a este. Espelhos refletiriam de volta ambos os sinais, que retornariam, portanto, defasados um do outro de uma maneira que dependeria do quadrado da razão das velocidades (ver Figura 1 a seguir).

Figura 1 – Esquema geral do aparelho que passou à história como o *interferômetro de Michelson*, no desenho de seu artigo original



A luz oriunda de uma fonte em a era parcialmente refletida pela placa de faces paralelas b , produzindo os feixes perpendiculares bc e bd . Espelhos em c e d refletiam os feixes de volta à placa b , produzindo uma superposição ao longo de be^5 onde se podiam observar padrões de interferência. Uma segunda placa de faces paralelas, g , semelhante à primeira, era colocada ao longo do braço bc do interferômetro para compensar a diferença de caminho óptico entre os

5 Também ao longo de ba , incidentalmente.

braços⁶. Os dois feixes recombinam-se então em e , de modo que onde as ondas de um e outro feixe chegarem em fase o observador verá uma região brilhante, pois aí os efeitos das duas ondas serão somados, e onde as ondas chegarem em oposição de fase o observador verá uma região escura, pois aí o efeito de uma onda é anulado pelo da outra. Isso dá origem a regiões claras e escuras que se repetem periodicamente, as chamadas *franjas de interferência*.

Para mostrar a defasagem entre os dois feixes introduzida pelo movimento da Terra (e do interferômetro) em relação ao éter, Michelson computou o tempo gasto pela luz em cada parcela do trajeto. Ele supôs que um dos feixes estivesse alinhado com o movimento da Terra em relação ao éter, e, portanto, os tempos gastos nos trajetos de ida e volta entre a placa semiespelhada e o espelho seriam, respectivamente⁷,

$$T_1 = \frac{D}{c+v} \text{ e } T_2 = \frac{D}{c-v}$$

onde D é o tamanho do braço do interferômetro, c a velocidade da luz em relação ao éter e v a velocidade com que a Terra (e o interferômetro) se desloca em relação ao éter. Isso levaria a um tempo total de percurso de ida e volta igual a

$$T_1 + T_2 = \frac{D}{c+v} + \frac{D}{c-v} = 2D \frac{c}{c^2 - v^2}$$

Enquanto isso, o outro feixe, propagando-se numa direção perpendicular ao movimento relativo entre a Terra e o éter, “seria inteiramente não afetado” por esse movimento, tendo seu tempo de trajeto de ida e volta calculado por Michelson como simplesmente⁸

$$2T_0 = 2 \frac{D}{c}$$

6 Repare-se que a superfície semiespelhada, sendo a face posterior da placa b , o feixe por ela refletido na direção bd terá atravessado a espessura da placa duas vezes a mais do que o feixe transmitido na direção bc , e, portanto, a introdução da placa g , atravessada na ida e na volta do feixe, compensa perfeitamente a diferença de percurso, desde que sua espessura e material sejam idênticos aos da placa b .

7 Ou vice-versa, dependendo de se o braço está orientado no mesmo sentido do movimento da Terra em relação ao éter ou no sentido contrário.

8 Na suposição de contato óptico, *i. e.*, de que os braços do interferômetro tivessem exatamente o mesmo tamanho.

A diferença no tempo de percurso entre um e outro feixe seria, portanto, de

$$\tau = T_1 + T_2 - 2T_0 = 2D \frac{c}{c^2 - v^2} - 2 \frac{D}{c} = 2Dc \left(\frac{1}{c^2 - v^2} - \frac{1}{c^2} \right) = 2Dc \left(\frac{v^2}{c^2(c^2 - v^2)} \right)$$

o que corresponderia, aproximadamente, a

$$\tau \approx 2T_0 \frac{v^2}{c^2}$$

Embora pequena, essa diferença de tempo de percurso seria suficiente para a luz percorrer uma distância igual a

$$c\tau \approx 2cT_0 \frac{v^2}{c^2} = 2D \frac{v^2}{c^2}$$

Aproximando a velocidade relativa entre a Terra e o éter para a velocidade orbital da Terra, Michelson estimou a razão v/c em 1/10.000. Considerando ainda um comprimento para os braços do interferômetro de cerca de 1,2 m, isto é, aproximadamente 2 milhões de vezes o comprimento de onda da luz amarela (média da luz visível), Michelson pôde computar a defasagem esperada em termos do comprimento de onda da luz como

$$2D \frac{v^2}{c^2} \approx 2 \times 1,2 \times \frac{2.000.000}{100.000.000} \approx \frac{4}{100}$$

isto é,

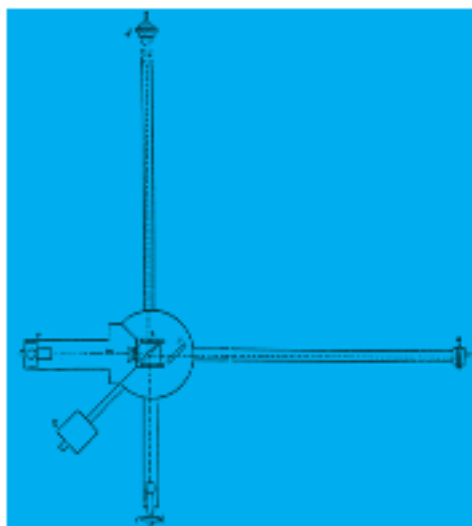
[...], o feixe que tiver viajado na direção do movimento da Terra terá na realidade viajado 4/100 de um comprimento de onda mais do que teria viajado se a Terra estivesse em repouso [em relação ao éter]. O outro feixe, estando em ângulo reto com o movimento, não seria afetado.

Se, agora, o aparato for girado em 90° de modo a que o segundo feixe seja trazido à direção do movimento da Terra, seu caminho terá sido aumentado de 4/100 de comprimentos de onda.

A variação total na posição das franjas de interferência seria de 8/100 da distância entre as franjas, uma quantidade facilmente mensurável⁹.

Michelson realizou o experimento utilizando um lampião como fonte de luz branca, com a chama filtrada por uma tela opaca com um pequeno furo posicionado no foco de uma lente colimadora, e também cobriu os braços do interferômetro com longas caixas de papel para protegê-los de variações de temperatura que pudessem introduzir erros devido a uma refração diferenciada do ar num e noutra feixe¹⁰.

Figura 2 – Vista superior do interferômetro de Michelson original



Os espelhos *c* e *d* (nas extremidades direita e superior, respectivamente) podiam mover-se ao longo dos braços maiores, enquanto as placas estavam

-
- 9 Michelson considerava a resolução de um interferômetro com essas configurações da ordem de 1/100 de franja.
- 10 Para efeitos de cálculo, Michelson considerou a velocidade da luz no ar como muito próxima da velocidade da luz no vácuo, isto é, no éter livre de matéria, porém ele estava ciente das dificuldades que poderiam advir de variações na uniformidade da propagação real da luz no ar do laboratório. Por exemplo, Michelson calculou que, sendo de latão, os braços do interferômetro poderiam, ao se dilatar desigualmente por uma diferença de temperatura da ordem de um *centésimo* de grau, causar um efeito no deslocamento das franjas *três vezes maior* que o esperado pela rotação dos braços.

posicionadas sobre a base circular central. À esquerda, em *a*, era posicionado o lampião, e abaixo, em *e*, a lupa de observação.

A observação das franjas era feita com uma luneta focalizada na superfície dos espelhos, “onde as franjas eram mais distintas”.

A extrema sensibilidade do aparelho a vibrações mecânicas, como as devidas ao tráfego de carruagens na rua ou ao caminhar das pessoas no assoalho do prédio, impediu que ele pudesse ser usado em Berlim, mesmo à noite, quando, com os espelhos colocados

[...] a meio caminho nos braços, as franjas eram visíveis, mas sua posição não podia ser medida senão depois da meia-noite, e mesmo assim apenas em intervalos. Quando os espelhos eram movidos para as extremidades dos braços, as franjas eram visíveis apenas ocasionalmente.

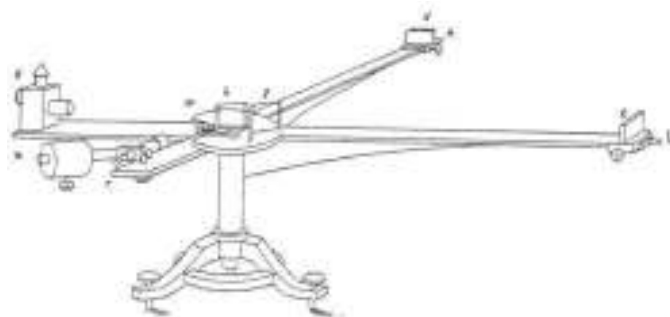
Por causa disso, Michelson conseguiu que o experimento fosse transferido para o campus do *Astrophysicalisches Observatorium*, em Potsdam, pequena cidade próxima a Berlim. Porém, mesmo na tranquilidade de Potsdam, as bancadas de pedra comuns não foram suficientes para impedir que as vibrações prejudicassem a nitidez das franjas, e o aparelho precisou ser finalmente albergado num porão de paredes circulares que constituía as fundações da cúpula de um telescópio equatorial¹¹, levando Michelson a comentar que

[...] aqui [em Potsdam], as franjas, em circunstâncias ordinárias, ficavam suficientemente quietas para medir, porém o instrumento era tão extraordinariamente sensível que batidas no calçamento, a cerca de 100 metros do observatório, faziam as franjas desaparecer completamente!

Se este era o caso com um instrumento construído com o objetivo de evitar sensibilidade, o que não se poderia esperar de um feito tão sensível quanto possível!

11 Onde, a propósito, hoje repousa uma réplica do aparelho de Michelson, em mostruário.

Figura 3 – Vista em perspectiva do interferômetro de Michelson original, construído em latão¹²



Pode-se ver à esquerda o contrapeso que mantinha o equilíbrio mecânico do aparelho. O interferômetro como um todo também podia ser nivelado e girado em torno de um eixo vertical.

De fato, a sensibilidade do aparelho era tão grande que o parafuso micrométrico de ajuste da mira de fio da luneta não pôde ser empregado, e, em seu lugar, foi utilizada uma placa de vidro com uma escala graduada, contra a qual eram estimadas as posições das franjas.

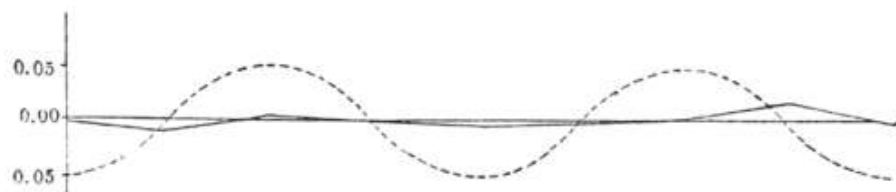
Considerando, ainda, que, na época em que realizou as medições, o movimento estimado do sistema solar na direção da constelação de Hércules coincidia grosseiramente com a direção do movimento orbital da Terra, e que ambas as componentes tinham mais ou menos o mesmo valor, Michelson estimou que o efeito sobre o deslocamento das franjas seria ainda maior, da ordem de um décimo da distância entre as franjas¹³.

No entanto, após quatro séries bem-sucedidas de medidas, com cinco voltas do aparelho cada, e eliminação de uma deriva sistemática nas medidas, a análise dos resultados da variação da posição da franja escura central com o azimute revelou-se desapontadoramente pequena, com valores máximos de $-0,004$ quando a luneta apontava na direção nordeste, e $-0,015$ quando na direção sudoeste, contra variações esperadas de $\pm 0,050$ (ver Figura 4).

12 Pago graças ao crédito mantido em nome de Michelson por ninguém menos que Alexander Graham Bell (1847-1922), o inventor do telefone, mostrando a importância de patrocinar projetos científicos.

13 Evidentemente, isto implicava a suposição adicional de que não apenas a Terra, mas todo o sistema solar se movia em relação ao éter.

Figura 4 – Gráfico comparando os valores esperados para a variação da posição da franja central do padrão de interferência em função do azimute (senoide tracejada) com os valores medidos (linha contínua).



Michelson considerou os resultados obtidos como indistinguíveis de erros de leitura do aparelho, o que o levou a afirmar, um tanto categoricamente, que

A interpretação destes resultados é a de que não há deslocamento das franjas de interferência. O resultado da hipótese de um éter estacionário está, portanto, mostrada como sendo incorreta, e a conclusão necessária se segue de que a hipótese é errônea. Esta conclusão contradiz diretamente a explicação do fenômeno da aberração que tem sido até agora geralmente aceita, e que pressupõe que a Terra se move através do éter, este último permanecendo em repouso.

No penúltimo parágrafo de seu artigo, Michelson sugeria que o resultado de seu experimento favorecia a ideia, proposta anos antes pelo físico britânico George G. Stokes (1819-1903), de que a Terra arrastava o éter do espaço ao se mover através dele, de modo que, nas proximidades de sua superfície, não havia o vento de éter, e o éter estava praticamente em repouso em relação à Terra. No entanto, a teoria de Stokes não vingou porque, mais tarde, mostrou-se que ela levava a contradições.

Por si só, no entanto, os resultados obtidos por Michelson em Potsdam, em 1881, talvez não tivessem sido capazes de gerar a confusão que acabaram causando. Ainda que não pesasse o fato de Michelson ter apenas 28 anos, pois ele já havia sido internacionalmente reconhecido em função da exatidão de suas medições da velocidade da luz poucos anos antes, a sensibilidade de seu método podia ser colocada em questão, dada a ignorância quanto às

reais composições de movimentos da Terra em relação ao éter e do fato de Michelson ter negligenciado o deslocamento do interferômetro no cálculo do tempo de voo da luz no braço perpendicular ao movimento, que causava uma redução por um fator de 2 na dimensão do efeito esperado¹⁴. Não se pode pleitear muito espanto, portanto, ao se tomar conhecimento de que o famoso físico inglês lorde Rayleigh (1842-1919) teria, durante a reunião de 1884 da Associação Britânica para o Avanço da Ciência (BAAS, da sigla em inglês), instado Michelson a repetir o experimento de 1881¹⁵.

Michelson formou, então, a parceria com seu colega de universidade, o químico Edward Morley (1838-1923), e, ao cabo de três anos, a dupla já teria testado experimentalmente, com exatidão amplificada, as duas hipóteses do modelo mais aceito para o éter: a de que o éter do espaço é livre, e a Terra o atravessa incólume (e portanto há um vento de éter); e a de que o éter presente no interior da matéria ordinária é parcialmente arrastado junto com a matéria quando esta se move em relação ao éter do espaço livre (esse efeito era chamado de arrasto parcial do éter).

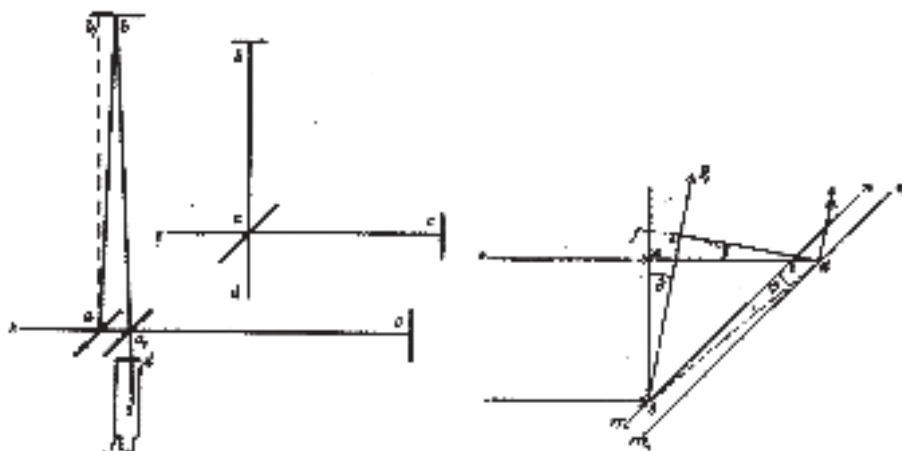
Em 1886, Michelson e Morley reproduziram um experimento feito pelo físico francês Hippolyte Fizeau (1819-1896) em 1850, cujo resultado corroborava a hipótese do arrasto parcial. Michelson e Morley encontraram resultados semelhantes.

No ano seguinte, em 1887, a dupla se concentrou no vento de éter, reproduzindo o experimento de Michelson de 1881, em Potsdam, mas com algumas novidades. Em primeiro lugar, Michelson e Morley refizeram as estimativas dos deslocamentos das franjas, corrigindo a geometria do experimento:

14 O erro foi primeiro apontado pelo polímata francês Alfred Potier (1840-1905) ainda em 1881, e reanalisado, juntamente com todo o experimento, pelo físico neerlandês Hendrik Lorentz (1853-1928) em 1886.

15 A reunião foi realizada excepcionalmente em Montréal, no domínio britânico do Canadá, e atraiu, portanto, muitos cientistas norte-americanos, entre os quais Michelson e Morley.

Figura 5 – À esq., diagrama do experimento de Michelson-Morley com o percurso (corretamente) triangular para o feixe que se deslocava ao longo do braço perpendicular (agora rotulado ab).



À direita, demonstração do desvio da frente de onda pela superfície refletora em movimento. A parte inferior da frente de onda é refletida pela superfície em b , quando a superfície está na posição mn , porém a parte superior da frente só a atinge, em d , quando ela já está na posição m_1n_1 .

Agora o percurso no braço perpendicular era recalculado como:

$$2D\sqrt{1+\frac{v^2}{c^2}} \approx 2D\left(1+\frac{v^2}{2c^2}\right)$$

e a diferença entre os percursos seria, então, duas vezes menor que o calculado em 1881, isto é,

$$D\frac{v^2}{c^2}$$

um valor perigosamente próximo da resolução do aparelho, conforme desenhado originalmente por Michelson.

Era necessário, portanto, estender o comprimento D dos braços do interferômetro, porém sem comprometer a sua estabilidade mecânica. Michelson e Morley resolveram a questão através de um sistema de reflexões múltiplas que “alongavam” os caminhos ópticos muitas vezes sem implicar um

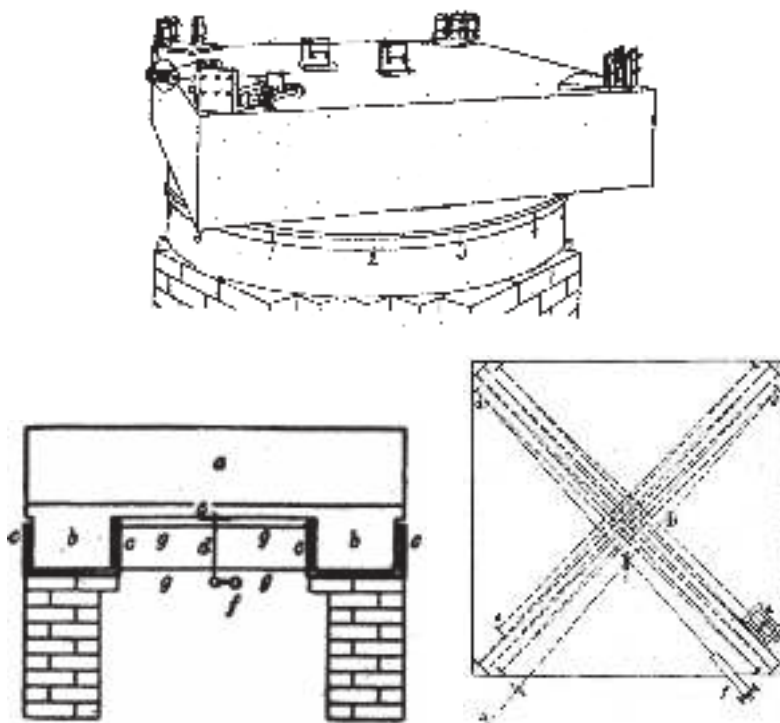
braço mecânico maior¹⁶. Além disso, o problema das vibrações ocasionado pelos braços de latão do aparelho foi resolvido, colocando-se o interferômetro sobre uma pedra massiva que flutuava sobre mercúrio líquido¹⁷, contido por uma calha circular de ferro apoiada sobre uma base octogonal oca de tijolos maciços. A base tinha dezesseis marcações equidistantes, e todo o aparato era girado tão suavemente (uma volta completa a cada 6 min.) que era possível ajustar a mira de fio da luneta de observação para cada marcação da base. A posição do micrômetro de ajuste era anotada ao passar por cada marcação, ao longo de seis voltas completas¹⁸ (ver Figura 7.8 a seguir).

16 Os espelhos e outros componentes ópticos do interferômetro foram providenciados pelo astrônomo e fabricante de lentes e espelhos John Alfred Brashear, (1840-1920) de Pittsburgh, um artesão de equipamentos ópticos reconhecido como um ás em seu métier.

17 Cerca de 100 kg, cuja compra consumiu a maior parte dos recursos conseguidos para o experimento.

18 Michelson e Morley perceberam que era mais fácil fazer isso com o interferômetro em movimento uniforme do que tentar pará-lo a cada marca, o que introduzia tensões que acabavam por prejudicar a visibilidade das franjas.

Figura 6 – Desenho em perspectiva da montagem de Michelson e Morley de 1887, sem a cobertura de madeira utilizada durante os procedimentos de observação para controle da temperatura (à esq.) e diagrama em vista superior com o caminho óptico dos feixes ao longo das múltiplas reflexões desde a fonte *a* até a luneta de observação *f*. O uso de quatro espelhos em cada extremidade permitiu estender os braços do interferômetro para um comprimento *D* efetivo da ordem de 11 m (centro). À direita, corte transversal da estrutura da base, em que a pedra *a* mostra-se apoiada sobre uma base de madeira *b* que “vestia” na calha de ferro *c* com uma pequena folga, preenchida por mercúrio, permitindo pivotá-la em torno de um eixo *d* praticamente sem resistência.



Usando uma fonte de luz amarela¹⁹, a diferença de fase correspondente seria dada por

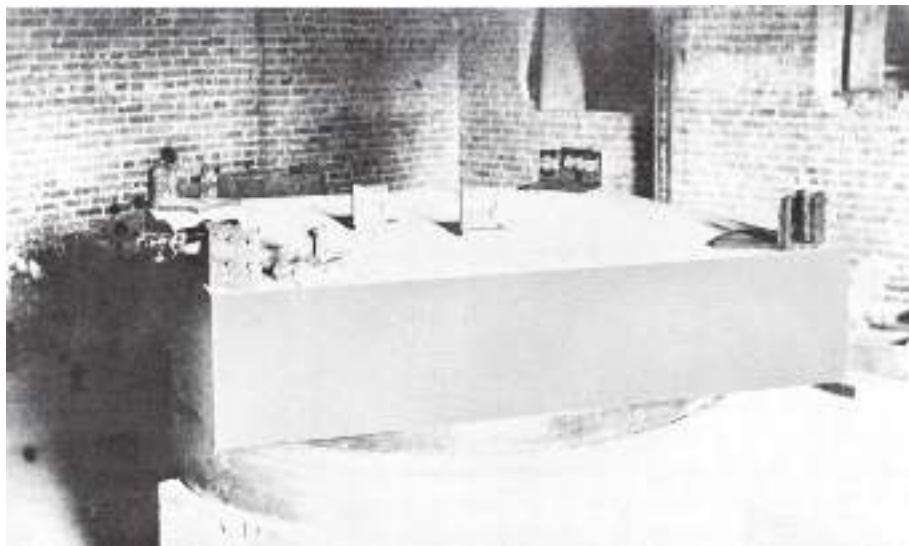
$$2D \frac{v^2}{c^2} \approx 2 \times 11 \times \frac{2.000.000}{100.000.000} \approx \frac{4}{100}$$

ou seja, 40% da largura de uma franja – portanto plenamente observável.

19 De comprimento de onda médio $\lambda = 589 \text{ nm}$ (amarelo). Michelson e Morley usaram uma lâmpada de Argand especialmente projetada para queimar sal como fonte luminosa, e, portanto, a luz amarela do dupletto de sódio era a principal componente do padrão de franjas.

Michelson e Morley perfizeram uma sequência, totalizando seis séries de observações, nos dias 8, 9 e 11 de julho²⁰.

Figura 7 – Fotografia da montagem de Michelson e Morley de 1887, albergada no porão do Adelbert Hall, na Western Reserve University²¹.



Evidentemente, essa foto, descoberta apenas muitos anos depois, serviu de modelo para a confecção do desenho em perspectiva da esquerda da Figura 6.

O resultado do experimento foi de que os deslocamentos observados não ultrapassaram 1% da largura das franjas, equivalendo à resolução do aparelho e, portanto, da ordem do erro experimental. Isto é, para todos os efeitos, o resultado obtido por Michelson e Morley era *compatível* com um resultado nulo. Porém não foi exatamente essa a conclusão dos autores ao encerrar seu artigo. Em vez disso, eles escreveram esperançosamente que

20 Em cada dia, era feita uma observação próxima ao meio-dia, girando o interferômetro no sentido anti-horário, e outra perto das seis horas da tarde, quando o sentido de giro era revertido. A última medição das 18h foi feita no dia 12, e não no dia 11, no entanto.

21 O prédio principal da vizinha Case School of Applied Science, onde ficava o laboratório de Michelson, foi vítima de um incêndio logo antes da realização do experimento.

[...], a velocidade da Terra com relação ao éter é provavelmente menor que um sexto da velocidade orbital da Terra, e certamente menor que um quarto. [...] O experimento será repetido, portanto, em intervalos de três meses, e assim toda a incerteza será evitada²².

Pois havia ainda a questão da composição dos movimentos da Terra e do sistema solar em relação ao éter, uma eterna incógnita. Os resultados obtidos por Michelson e Morley permitiram algumas possíveis interpretações, de naturezas muito diferentes.

Na primeira delas, a Terra “arrastaria” o éter consigo em seu movimento, e, portanto, localmente não seria possível determinar, de sua superfície, a velocidade da Terra em relação ao éter do espaço; essa interpretação, é claro, significava um retorno ao arrasto total do éter proposto por Stokes. Essa havia sido a hipótese favorecida por Michelson na conclusão de seu artigo de 1881, porém, agora, ele e Morley pareciam mais cautelosos em suas conclusões, pois lembravam que

Stokes havia dado uma teoria da aberração que supõe o éter na superfície da Terra em repouso em relação a ela, requerendo apenas, suplementarmente, que a velocidade relativa tenha um potencial; mas Lorentz mostra que essas condições são incompatíveis.

Michelson e Morley sugerem, ao final do artigo, no entanto, que talvez o efeito do vento de éter pudesse começar a ser sentido a uma certa distância da superfície da Terra, e que talvez uma repetição do experimento no alto de uma montanha já produzisse resultados distintos dos obtidos pela dupla em Cleveland:

22 O que, aliás, nunca foi realizado a contento. As razões para o abandono do programa podem estar relacionadas de um lado à crença dos autores de que o estudo preliminar (que acabou se transformando no trabalho “integral”) já era suficientemente concludente por não encontrar o efeito esperado, e, de outro, talvez mais relevante, ao interesse despertado em ambos, e especialmente em Michelson, pela ideia do uso metrológico do interferômetro, projeto para o qual se voltaram praticamente imediatamente após o “fim” dos trabalhos com o experimento do vento de éter. Some-se a isso o envolvimento de ambos com a organização do encontro da Associação Estadunidense para o Avanço da Ciência (AAAS, da sigla em inglês), a se realizar justamente em Cleveland no ano seguinte.

[...] não é impossível que mesmo a distâncias moderadas acima do nível do mar, por exemplo no cume de uma montanha isolada, o movimento relativo [entre o éter e a Terra] seja perceptível em um aparato como o utilizado neste experimento. Talvez se o experimento for algum dia tentado nestas circunstâncias a cobertura deva ser de vidro, ou deva ser removida²³.

Posteriormente surgiram outras hipóteses para explicar os resultados “nulos” do experimento. Uma delas, na contramão de décadas de domínio da teoria ondulatória da luz²⁴, foi a hipótese de emissão (isto é, corpuscular) de 1908 do jovem físico suíço Walther Ritz (1878-1909), segundo a qual a velocidade da luz dependeria da velocidade da fonte.

No entanto, talvez a mais controversa interpretação dos resultados de Michelson e Morley tenha sido a da *contração de FitzGerald-Lorentz*, de que os instrumentos de medição se contrairiam (isto é, se deformariam) no sentido do movimento *exatamente* na proporção necessária para compensar o efeito do movimento sobre a propagação do sinal. Embora proposta em 1892²⁵, apenas a partir de 1895, com a teoria do elétron de Lorentz, ela se inseriria matematicamente num quadro conceitual coerente, e talvez por isso tenha sido considerada tradicionalmente uma hipótese *ad hoc*.

Finalmente, em 1905, Einstein propôs a teoria da relatividade restrita, para a qual o resultado do experimento de Michelson e Morley era uma consequência natural do postulado da constância da velocidade da luz para todos os referenciais inerciais, o que configurava uma nova e radical interpretação.

Diante dessas dificuldades, torna-se mais fácil compreender a analogia proposta pelo físico britânico Lorde Kelvin (1824-1907), pela qual o fracasso das teorias clássicas do éter em explicar o resultado do experimento de Michelson-Morley era comparado a uma “nuvem negra” no céu da Física. Incidentalmente, a única outra “nuvem negra” que Lorde Kelvin via no céu azul da Física tinha a ver com as previsões teóricas para a emissão de radiação por

23 Programa que seria eventualmente levado a cabo pelo físico estadunidense Dayton Miller (1866-1941) décadas depois.

24 Porém num indício claro de que um modelo corpuscular da luz nunca saiu de cena completamente, permitindo compreender como a abordagem corpuscular de Einstein para o efeito fotoelétrico em 1905, não sendo o único precedente, pôde encontrar respaldo heurístico.

25 E depois se soube, previamente em 1889 por FitzGerald, numa carta ao editor da revista *Science*.

um corpo negro para frequências na faixa do ultravioleta, que iam de encontro a alguns resultados experimentais. Da mesma maneira que as tentativas de explicar o resultado nulo do experimento de Michelson-Morley estiveram relacionadas ao desenvolvimento da teoria da relatividade, o estudo desse problema levaria, no devido tempo, à mecânica quântica. Muitas pessoas ridicularizam a análise de Lorde Kelvin, mas fariam melhor admirando a clareza com que o cientista britânico percebia, “em tempo real” e no olho do furacão, o conjunto das grandes questões teóricas e experimentais da Física de sua época e suas inter-relações. Não se deve acreditar, no entanto, que os experimentos a respeito do vento de éter formaram o único lastro experimental da teoria da relatividade, que também é devedora de uma série de experimentos relacionados às variações de massa das partículas previstas pela teoria.



A Surpreendente História do Universo: Astronomia para entender o Mundo Natural, o Cosmos e a Vida

João Rodrigo de Souza Leão – UFRN

Prólogo

Embora as espécies arcaicas que deram origem aos humanos atuais tenham entre 3 e 4 milhões de anos, os primeiros seres humanos anatomicamente modernos, os *Homo Sapiens Sapiens*, são relativamente recentes e surgiram como uma evolução dos *Homo Sapiens*, na era paleolítica, há pelo menos 200.000 anos. Esses humanos não praticavam a agricultura, não conheciam técnicas de criação de animais e não conheciam o que modernamente chamamos de ciência. Eram caçadores-coletores e, para sobreviver, conviviam em pequenos grupos, empregavam a caça, a coleta de frutos e técnicas rudimentares de conservação de alimentos. De noite, à beira de uma fogueira, reunidos para se aquecerem, podemos imaginar que eles conversavam sobre todos os aspectos de suas vidas: a caça e a coleta de alimentos, a construção de armas de caça mais eficazes e sobre a armazenagem de água. Nas noites sem lua, podemos imaginar que eles olharam para o céu e viram a imensa faixa branca repleta de estrelas. Certamente, ao olharem para os infinitos pontos brancos cintilantes, eles se perguntaram o que eles seriam e, possivelmente, indagaram sobre suas distâncias e consistências. Talvez tenham formulado suas próprias teorias para explicá-las, possivelmente mesclando crenças e mitos nessas teorias primitivas. A curiosidade humana, por fim, havia levado esses indivíduos para além das fronteiras de nosso planeta. Ao fazerem essas perguntas e ao tentar respondê-las, esses grupos tornaram-se, também, os primeiros astrônomos,

pois estenderam sua curiosidade para além das questões essenciais à sua sobrevivência. Essas questões conduziram a humanidade a profundos questionamentos sobre Física, Química, Biologia, sobre a origem dos elementos químicos e sobre a origem da própria vida. Essas perguntas abriram as janelas do universo para toda a humanidade.

Introdução

O que a janela aberta por nossos antepassados pode nos revelar? O que sabemos sobre a origem e a evolução do universo? De onde viemos? O que vai acontecer com as estrelas e com o cosmos? As perguntas são fascinantes, e as repostas são ainda mais surpreendentes. Este capítulo tem o objetivo de mostrar o que conhecemos sobre o universo, os desafios da Astronomia contemporânea e um pouco de sua história. Vamos mostrar que essa área da ciência deixou de ser marcada por mitos e crenças para se transformar em um campo do conhecimento humano prolífico e interessante. Se, na antiguidade, a Astronomia era uma curiosidade, posteriormente, essa ciência passou a ser utilizada na agricultura e nas navegações. Atualmente, com o encontro da Astronomia com as teorias físicas mais modernas, fala-se em Astrofísica¹. Vamos discutir os planetas, as estrelas, a origem da vida, a formação de galáxias e ainda a origem e a expansão do universo.

Ao olharmos para o céu e o seu grande conjunto de estrelas, os físicos e astrônomos supõem que a Física que estudamos na Terra pode ser aplicada ao vasto cosmos que observamos. Essa é uma hipótese audaciosa pois, em princípio, não sabemos se isso é verdade. Entretanto, físicos, como Isaac Newton², mostraram que a mesma força que mantém a Terra na órbita do Sol é também responsável pela queda de um objeto nas vizinhanças da Terra. Foi através dessa e de outras descobertas que aprendemos a confiar na uni-

1 Neste capítulo, utilizaremos sem distinção os termos Astronomia (estudo do céu) e Astrofísica (aplicação das leis da Física ao estudo de planetas, estrelas e galáxias). Apesar de diferentes em sua origem e significado, modernamente os dois termos referem-se à mesma área de estudo. Tecnicamente falando, Astronomia pura não existe mais, pois todos os astrônomos aplicam conceitos de Física em seus estudos. Na prática, todo astrônomo é um astrofísico.

2 Isaac Newton (1643-1727) foi um físico e matemático Inglês que fez inúmeras contribuições à Matemática, inventando o cálculo diferencial integral e ainda à Física, estabelecendo as leis do movimento e a lei da gravitação universal. Newton foi, sem dúvida, um dos maiores gênios que a humanidade já conheceu.

versalidade das leis físicas. Modernamente, esse princípio é parte de um conjunto de ideias ainda mais gerais e recebe o nome de **Princípio Cosmológico** (SCHOMBERT, 2009).

É natural perguntarmos a razão de estudar a ciência, e por que ela é interessante. Por que alguns cientistas gostam de Matemática? Por que outros se dedicam à Física? E por que outros ainda estudam a Medicina e a Biologia? Os cientistas afirmam que estudar o universo é uma incessante busca por entender a natureza e compreender a razão das coisas, sendo a **curiosidade** a principal ferramenta do cientista. Podemos, ainda, afirmar que as perguntas são mais importantes do que as respostas. Embora seja a busca por respostas que norteia a ciência, os cientistas não amam as respostas que eles encontram, pois elas podem mudar a qualquer momento. **Os cientistas amam as perguntas!** Isso ocorre porque são as perguntas que continuamos a fazer que nos motivam a seguir estudando.

Podemos agora questionar quais temas norteiam nossa motivação para estudar Astrofísica. Em outras palavras, o que gostaríamos de descobrir? O que a Astronomia pode nos ensinar? A primeira questão que vem em nossas cabeças é como e por que a humanidade começou a se interessar por Astrofísica. Vamos tentar responder a essa pergunta na **parte 2**, na qual faremos um breve histórico dessa ciência e de seus pioneiros. Veremos quais questões nortearam os primeiros astrônomos e matemáticos em suas tentativas de descrever o cosmos. Outra questão fundamental que tentaremos responder é sobre a Física do nosso sistema solar, as órbitas dos planetas e o que causa esses movimentos. Essas questões serão vistas na **parte 3**, na qual descreveremos a busca pelas leis que descrevem os movimentos planetários. Abordaremos, ainda nessa mesma parte, a razão de a Terra ser o único planeta que abriga a vida em nosso sistema solar.

A origem dos elementos químicos, inclusive o carbono, essencial às estruturas orgânicas que permitem a vida, só pode ser completamente entendida através do estudo das **reações termonucleares** que ocorrem no interior das estrelas. A origem, a formação e a evolução das estrelas serão tratadas na **parte 4**.

Outra questão bastante interessante é a explicação sobre a origem das galáxias, descobertas por astrônomos do século XX. Eles notaram que os movimentos de rotação de estrelas em galáxias não podem ser explicados apenas

com a quantidade de estrelas observadas. Essa discrepância deu origem ao problema da **matéria escura**. Outra descoberta interessante aponta que, quanto mais distante de nosso planeta encontra-se uma galáxia, mais velozmente ela se afasta de nós. Isso conduz à ideia de um universo em expansão, também chamada de **Teoria do Big Bang**, a explosão que deu origem ao universo. A moderna visão da expansão do universo inclui um elemento novo, a chamada **expansão acelerada**, descoberta em 1998, cuja causa parece ser um novo tipo de “força” ou interação, chamada de **energia escura**. Esses importantes resultados serão também abordados na **parte 5**.

Finalmente, na **parte 6**, faremos nossas conclusões a respeito do que conhecemos a respeito do universo e a respeito da ciência de um modo geral. Vamos mostrar que toda pesquisa e todo estudo conduz a humanidade ao conhecimento. Veremos que, ao sondar a natureza e seus mistérios, sondamos e entendemos a nós mesmos como seres humanos.

Prepare-se para essa jornada pelo universo e pelo conhecimento humano. Visitaremos estrelas e galáxias distantes. Conheceremos os segredos do movimento dos planetas e as leis que governam a evolução estelar. Entenderemos a expansão do universo e suas consequências, mas, sobretudo, conheceremos a própria natureza humana, nossa relação com o vasto universo que habitamos e ainda o universo dentro de cada um de nós.

Descobrimo a Astronomia

Seria impossível descrever a Astronomia moderna sem falar nos resultados e nas questões que guiaram os cientistas antigos a respeito dessa ciência. Não podemos contar a história completa neste capítulo, mas faremos uma breve passagem pelos resultados mais interessantes e pelos cientistas mais inspirados que se dedicaram ao estudo da Astronomia na antiguidade.

Na medida que as sociedades se desenvolveram, os grupos humanos passaram a se organizar em cidades ao invés de em pequenos grupos ou vilas. Essa nova organização social possibilitou a existência de estudiosos em diversas áreas, inclusive na ciência e nas artes. Dessa forma, os primeiros registros do estudo da Astronomia são justamente das primeiras civilizações que construíram cidades e referem-se aos povos da Mesopotâmia (atual Iraque), Índia,

China e Egito. Esses registros mostram que as primeiras observações, relatos e estudos aconteceram por volta de 5000 anos antes de Cristo.

Um dos mais impressionantes avanços na Astronomia foi dado pelos Egípcios, cujos estudos dos céus começaram no período pré-dinástico (ou seja, que precede aos faraós), pelo menos 5000 anos antes de Cristo. Aquela civilização investiu tanto em estudos astronômicos que, por volta de 3000 anos antes de Cristo, o calendário egípcio já contava com um ano composto por 365 dias! Incrivelmente preciso, visto que, modernamente, sabe-se que a duração do ano é de aproximadamente 365,25 dias (sendo que a cada 4 anos temos um dia extra, nos chamados anos bissextos). Esse calendário permitiu ao povo egípcio entender as estações do ano, compreender os períodos de seca e de cheia do rio Nilo e, com isso, planejar os períodos de pesca, plantio e colheita.

Esse conhecimento permitiu uma vantagem sobre outros povos, pois através do conhecimento em Astronomia os egípcios aprenderam a controlar melhor a produção de alimentos e, com isso, desenvolver uma população mais bem alimentada, permitindo um exército mais forte. Essa vantagem tecnológica garantiu o domínio da civilização egípcia sobre outros povos durante vários séculos. Bem mais tarde, por volta do ano 300 antes de Cristo, o Egito, influenciado por outras culturas, em especial a Grega, constituiu um grande império que promoveu estudos de Matemática, Filosofia, Ciências Naturais e Astronomia. Esse império tinha como centro cultural a cidade de Alexandria (que existe até hoje no moderno Egito), onde grandes sábios estudaram Filosofia, Artes, Matemática, Física e Astronomia. Entre eles, destacou-se Erastóstenes (276 a.C. - 194 a.C.), que mediu a circunferência da Terra (e por consequência o seu raio) através de conhecimentos de geometria e chegou a um valor bastante próximo do valor modernamente aceito (OLIVEIRA; SARAIVA, 2014).

Entretanto, o maior sábio da antiguidade foi Claudius Ptolomeu (90 d.C. - 168 d.C.), matemático, geógrafo e astrônomo que deixou como legado a obra **Almagesto**, que contém um catálogo de estrelas conhecidas e observações astronômicas. A obra traz ainda um modelo de universo bastante interessante e capaz de explicar, pelo menos em parte, as observações astronômicas da época. Para entender o movimento retrógrado dos planetas, Ptolomeu recorreu

aos **epiciclos**³, um modelo que parcialmente explica os movimentos observados, mas que não corresponde à realidade (OLIVEIRA; SARAIVA, 2014). Ptolomeu descreve em sua obra um universo geocêntrico (com a Terra no centro ao invés do Sol), sendo que, a partir da Terra, existiam esferas concêntricas que continham os planetas, a Lua e esferas ainda mais externas contendo as constelações de estrelas. Esse modelo de universo permitiu estimar que a distância até a esfera que continha o Sol era de aproximadamente 1200 raios terrestres, enquanto que a esfera mais excêntrica, que continha as estrelas, teria um raio de 20000 raios terrestres.

Embora baseada, segundo o próprio Ptolomeu, em observações dos planetas conhecidos realizadas durante 800 anos, a obra é marcada por erros que só seriam corrigidos muitos séculos depois. Por exemplo, a distância média entre a Terra e o Sol é de 150 milhões de km e não de 1200 raios terrestres, o que daria $1200 \times 6371 \text{ km} = 7.645.200 \text{ km}$. Além disso, o modelo Ptolomaico assume a Terra como o centro do universo conhecido, o que é um equívoco. As tais esferas que contêm os planetas, a Lua, o Sol e as demais estrelas também não existem. Ainda assim é notável que, na antiguidade, alguns sábios tenham tentado levantar hipóteses e construir modelos para explicar o universo.

Durante os primeiros séculos da era Cristã e entrando pela idade média, a Astronomia não teve grandes avanços, exceto no mundo islâmico. Entretanto, a partir do século XIII, alguns reinos europeus e a igreja católica passaram a estimular o estudo da Astronomia. O *Almagesto* de Ptolomeu continuou sendo a principal obra durante a idade média, com poucos cientistas ousando desafiar seus méritos e conclusões. Porém, tudo muda quando Nicolaus Copérnico (1473-1543) desenvolve e defende a ideia de que a Terra gira em torno do Sol, a sua revolucionária **teoria heliocêntrica**. Observe que entre a morte de Ptolomeu e o nascimento de Copérnico existem quase 1300 anos de história da Astronomia que estamos omitindo, pois os desenvolvimentos na área foram escassos nesse período (MCCLUSKEY, 1999).

3 Os planetas descrevem caminhos no céu, parecem avançar e depois voltar, do ponto de vista de um observador na Terra. Hoje sabemos que esse comportamento é, na verdade, uma composição dos movimentos da Terra e do planeta sendo observado. Como Ptolomeu assumia uma Terra estática em seu modelo de universo, ele precisou explicar os movimentos retrógrados observados através dos epiciclos. Não vamos aqui explicar como funcionam os epiciclos, mas o leitor interessado pode consultar a seguinte página para uma simples explicação a esse respeito: <<http://astro.if.ufrgs.br/p1/p1.htm>>. Acesso em: 30 mar. 2015.

A teoria de Copérnico foi desenvolvida ao longo de sua vida, mas foi apenas no ano de sua morte (1543) que sua obra *De Revolutionibus Orbium Coelestium*⁴ foi publicada (REPCHECK, 2011). Essa obra inclui vastas modificações em relação ao modelo Ptolomaico. A mais notável, a colocação da Terra como apenas outro planeta que se move em torno do Sol, e não o centro do universo como no modelo Ptolomaico. Isso deu origem à chamada **Revolução Copernicana**, uma das revoluções mais importantes da Astronomia, da ciência e do pensamento humano de modo geral. A teoria heliocêntrica foi capaz de explicar o movimento retrógrado dos planetas através do movimento da própria Terra e assim os complicados epiciclos de Ptolomeu ficaram desnecessários (KUHN, 1957).

Foi muito difícil para Copérnico desenvolver sua teoria em um mundo dominado pelas ideias de Ptolomeu. Entretanto a história da ciência é marcada por resistências às novas ideias, e os cientistas têm aprendido a conviver com esse fato. Outras obras foram escritas baseando-se no modelo copernicano, conferindo reputação instantânea a Copérnico, ainda que postumamente. A obra de Copérnico, com a revolução que ela causou, pode ser comparada à **Revolução Darwiniana**⁵ do século XIX. Podemos dizer que a Astronomia até a época de Copérnico ainda era confundida com a Astrologia que ligava a vida das pessoas aos eventos celestes através de mapas astrais e presságios. Aos poucos, descobriu-se que a Astronomia servia para organizar calendários, regular o tempo de colheita, prever estações do ano, as marés e ainda auxiliar a navegação de grandes naus. Copérnico colocou a Terra em seu devido lugar e nos ajudou a entender o universo de forma mais precisa.

4 Do Latim: *Das revoluções das esferas celestes*.

5 A Revolução Darwiniana foi a mudança no pensamento científico promovida pela publicação da obra *A Origem das Espécies* (1859), de Charles Darwin (1809-1882), na qual o autor expõe o fato de que as espécies vegetais e animais (a humana inclusive) evoluem através do processo de seleção natural e adaptação, desbancando a visão criacionista da origem da espécie humana e das demais espécies vivas do planeta. A Revolução Darwiniana pode ser considerada um dos maiores feitos da humanidade, do ponto de vista científico.

A Física do Sistema Solar

Modernamente sabemos que a Terra é um dos planetas de um conjunto de 8 planetas mais um planeta anão (Plutão)⁶ e várias Luas e corpos menores que orbitam nossa estrela, o Sol. Sabemos também que a Terra é o terceiro desses planetas a partir do Sol e que, como os demais, descreve **órbitas elípticas**⁷ ao redor de nossa estrela. Essa compreensão do nosso sistema solar nem sempre foi tão clara, pois até o início do século XVII não compreendíamos o movimento planetário e tampouco conhecíamos as leis que governavam esses movimentos.

Após a morte de Copérnico, havia a necessidade de serem feitas observações sistemáticas e precisas das órbitas e posições dos planetas, duração de eclipses, fases da nossa lua e das luas conhecidas de outros planetas. Tudo isso a fim de verificar e validar o modelo Copernicano. Se ninguém se apresentasse ao trabalho, a Astronomia de ponta que estava sendo feita naquela época iria morrer. Foi preciso o aparecimento de Tycho Brahe (1546-1601), para que observações astronômicas metódicas fossem realizadas. Tycho foi um astrônomo privilegiado, pois estudou em algumas das melhores universidades da Europa e especializou-se em observações astronômicas. Utilizando o sucesso obtido logo no início de sua carreira (e um pouco de política), ele conseguiu persuadir o rei da Dinamarca a construir um observatório astronômico que, entre 1576 e 1597, foi utilizado por Tycho e seus assistentes.

O legado de Tycho Brahe foi enorme, pois além da habilidade para conseguir recursos ele foi capaz de construir instrumentos e reunir estudantes e técnicos. Entretanto, o mais importante foi que ele era um exímio observador dos céus e realizou meticulosas observações, registrando-as em tabelas de maneira clara e organizada. Tycho chegou a publicar a obra *Sobre o novo Fenômeno do Mundo Etéreo* (1588), no qual descreve seu próprio modelo de universo, mesclando as visões Ptolomaicas e Copernicanas. Mas, sem o rigor matemático, essas ideias nunca foram capazes de explicar suas próprias observações (REPCHECK, 2011).

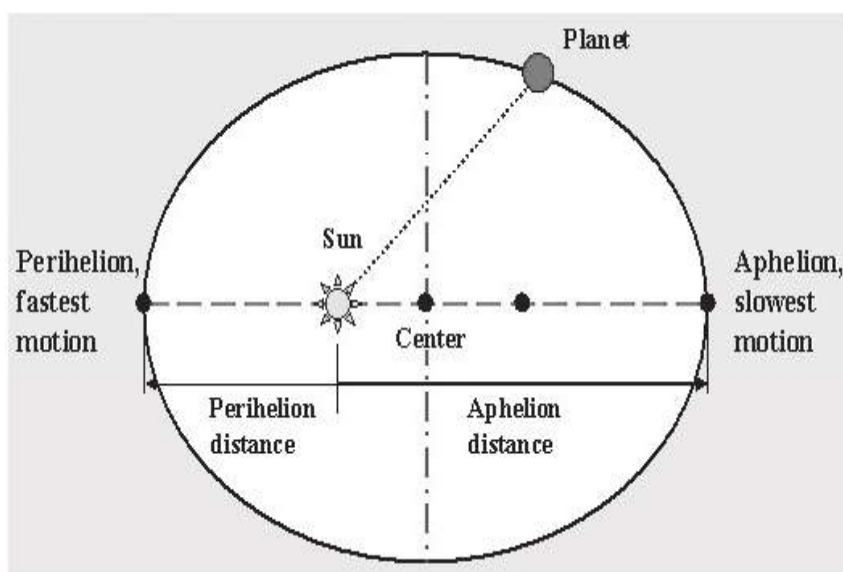
6 Em 2006, Plutão foi reclassificado pela União Astronômica Internacional como um planeta anão, seguindo novos critérios de classificação, principalmente tamanho, conforme descreve Lazzaro (2009).

7 Em Matemática, uma elipse é uma curva em um plano, de tal maneira que, para qualquer ponto dessa curva, a soma das distâncias até os focos seja constante. Para maiores detalhes: <<http://astro.if.ufrgs.br/movplan2/movplan2.htm>>. Acesso em: 13 abr. 2015.

Felizmente, um ano antes de falecer no ano de 1600, Tycho contrata como assistente de pesquisas o jovem e talentoso Johannes Kepler (1571-1630). Kepler herdou as tabelas contendo as observações de Tycho e, após anos de pesquisa tentando ajustar círculos e esferas aos dados, encontrava apenas discrepâncias e erros. A insistência em esferas e círculos era guiada pelo misticismo, mas Kepler finalmente agiu como um verdadeiro cientista e abandonou tais ideias. Ele sabia ainda que os erros encontrados não eram de origem experimental, pois Tycho Brahe era meticuloso e preciso em suas observações. Assim, em 1605, Kepler teve uma ideia que deu certo: ajustar elipses às órbitas observadas. Esse *insight* deu a Kepler a janela que ele precisava para vislumbrar a verdade por trás dos dados de Tycho Brahe. Agora, ajustando as elipses, os erros não existiam mais, e todos os dados de Tycho, repentinamente, faziam sentido. Assim Kepler chegou a 3 leis básicas que explicavam as observações de maneira muito simples.

A **Primeira Lei de Kepler** afirma que os planetas descrevem órbitas elípticas ao redor do Sol, com o Sol ocupando um dos focos da elipse. Isso significa que a velocidade do planeta varia ao longo da órbita, pois a distância entre o planeta e o Sol varia ao longo da órbita. Essa lei foi publicada em 1609, e é bem fácil entendê-la. Conforme podemos ver na **Figura 1**, o Sol (sun) ocupa um dos focos, sendo que existem dois focos, um à esquerda e outro à direita do centro (center). O planeta (planet) descreve órbitas elípticas, descrevendo revoluções em torno do Sol. Existem dois pontos interessantes, que correspondem à máxima aproximação e ao máximo afastamento do planeta em relação ao Sol, chamados, respectivamente, de periélio (perihelion) e de afélio (aphelion). No periélio, devido à proximidade do Sol, é máxima a velocidade do planeta, devido à maior atração gravitacional nesse ponto da órbita. O exato oposto ocorre no afélio.

Figura 1 – Ilustração da primeira lei de Kepler mostrando um planeta (planet) descrevendo uma órbita elíptica em torno do Sol (sun)



Fonte: <<http://www.ustudy.in/node/10026>>. Acesso em: 13 abr. 2015.

Existem dois pontos de interesse que correspondem à máxima aproximação do planeta em relação ao Sol e ao máximo afastamento. Esses pontos são chamados, respectivamente, de periélio (perihelion) e afélio (aphelion).

A **Segunda Lei de Kepler** afirma que a reta que une o planeta ao Sol varre áreas iguais em tempos iguais. Fisicamente, isso significa que, embora a velocidade orbital não seja uniforme, como afirma a primeira lei, a sua variação ocorre de forma regular: quanto mais distante o planeta está do Sol, mais devagar ele se move. Dizendo de outra maneira, essa lei estabelece que a velocidade areal é constante. Essa lei foi publicada juntamente com a primeira, também em 1609. Se a velocidade areal é constante, isso significa que dados dois intervalos de tempo iguais, a reta que une o planeta ao Sol varrerá áreas iguais. Tal lei também é uma consequência da lei da Gravitação universal de Newton.

Por fim, os estudos de Kepler o levaram à **Terceira Lei de Kepler**, que afirma que o período de uma órbita planetária é proporcional ao cubo da

separação média entre o planeta e o Sol. Essa terceira lei só foi publicada em 1919. A prova dessa lei exige mais matemática do que estamos interessados neste texto, mas, como regra geral, podemos entendê-la, sabendo que os planetas mais distantes sofrem menos atração gravitacional do que planetas mais próximos do Sol. Isso faz com que eles se movam mais devagar, e, portanto, levem mais tempo para completar suas órbitas. Chamando a separação média de a e o período (tempo) para completar uma órbita inteira de T , temos a seguinte equação matemática para expressar a terceira lei de Kepler: $T^2 = K a^3$. Se a separação orbital média é dada em Unidades Astronômicas (UA)⁸ e o período é dado em anos, pode-se mostrar que a constante se torna $k = 1$ e assim: $T^2 = a^3$.

As três leis de Kepler resumem tudo o que Tycho registrou a respeito do movimento planetário em suas meticolosas observações. Após a morte de Kepler, em 1630, a Astronomia passou a ocupar uma posição de destaque entre as ciências, pois ganhara suporte observacional e era capaz de gerar **predições testáveis**. Novas observações poderiam ser feitas e comparadas às de Tycho, aplicando-se as leis de Kepler, com rigor matemático. Isso é um trunfo da Astronomia e da ciência em geral.

Kepler não sabia nada a respeito da **Lei da Gravitação Universal** de Isaac Newton (1643-1727) que, modernamente, explica as Leis de Kepler de maneira ainda mais consistente. Entretanto, as observações de Tycho haviam detectado seus efeitos observacionais. A explicação física do movimento planetário só veio em 1687 com os estudos de Newton que, baseado em observações da época, postulou a existência de uma força atrativa que atua a distância. O módulo dessa força entre dois corpos é proporcional ao produto de suas massas dividido pelo quadrado da distância que os separa. A Lei da Gravitação Universal de Newton pode ser utilizada juntamente com as leis do movimento (conhecidas como as 3 leis de Newton) para deduzir as 3 leis de Kepler como uma consequência natural das leis do movimento de Newton⁹.

8 A unidade astronômica (UA) é uma unidade de distância bastante útil e muito utilizada em Astronomia e é definida como a distância média da Terra ao Sol. O valor atual e mais aceito dessa unidade é 1 UA = 149.597.871 km, ou aproximadamente 1 UA = 150 milhões de km.

9 A partir de 1905, Albert Einstein (1879-1955) mostrou ao mundo que, para altas velocidades, as leis de Newton têm que sofrer uma correção. Quanto mais a velocidade de um corpo se aproxima da velocidade da luz, maior deve ser o fator de correção aplicado. Essa generalização das leis do movimento chama-se Teoria da Relatividade, que deve ser utilizada para tratar movimentos em altas velocidades.

Por fim, agora que já entendemos por que os planetas se movem em torno do Sol e como eles se movem, podemos tentar entender por que, no sistema solar, apenas a Terra abriga a vida. Existe alguma razão lógica para a ausência de vida em outras partes do nosso sistema solar? A resposta para essa pergunta é longa e complexa e envolve argumentos de Biologia, Química e de muita Física. Entretanto, a ideia central consiste em entender o papel da água (H_2O) na Química e na Biologia. Esse composto é um solvente natural para muitas substâncias e facilitadora de variadas reações químicas. De maneira simplificada, o papel da água é participar de diversas reações químicas responsáveis por sustentar a vida em nível celular e molecular.

A vida, como a conhecemos na Terra, tem como elementos principais o carbono (C), o hidrogênio (H), o oxigênio (O) e o nitrogênio (N). Esses são os chamados **elementos orgânicos**. Todas as estruturas que compõem os seres vivos, incluindo órgãos, tecidos, células, organelas citoplasmáticas e ossos, contêm cadeias moleculares longas compostas por esses elementos químicos. O carbono desempenha um papel central devido à enorme variedade de compostos de cadeia longa que ele é capaz de formar.

Então por que a Terra é tão importante uma vez que já foram encontradas evidências de água em Marte, Vênus e até mesmo na Lua? Ocorre que, nesses corpos celestes, a água não pode ser encontrada em seus três estados físicos (sólido, líquido e gasoso). A distância que a Terra se encontra do Sol é o fator determinante para a existência de água em seus três estados físicos pois, perto demais, ela evapora e, longe demais do Sol, a água congela. A água na forma de vapor, combinada com uma atmosfera estável e com concentrações importantes de oxigênio (O_2), dióxido de carbono (CO_2) e nitrogênio (N_2), ajuda a manter a vida de animais de grande porte, de plantas e também de uma variedade de insetos, fungos e seres unicelulares. Conclui-se, portanto, que, em nosso sistema solar, apenas a Terra possui todas as condições necessárias à vida como a conhecemos¹⁰.

Entretanto, para baixas velocidades, as leis de Newton são uma excelente aproximação e continuam a ser utilizadas até hoje para quase todos os problemas de Física e Engenharia.

- 10 Referimo-nos ao termo “vida como a conhecemos” porque, tecnicamente falando, podem existir outras formas de vida que não dependam exclusivamente dos elementos orgânicos, da água e de reações químicas baseadas no carbono e seus compostos. Pode ser que existam, embora ainda não tenham sido observadas, formas de vida baseadas em outros elementos químicos, como o silício, tendo como

Como funcionam as estrelas?

O Sol é a nossa fonte primária de energia que aquece o solo e os oceanos, fornecendo energia luminosa para nós humanos e para os animais e vegetais. Com a ajuda de nossa atmosfera e dos oceanos, o calor é uniformemente distribuído por toda a Terra. Mas de onde vem a energia do Sol? Como pode uma estrela que está a 150.000.000 km da Terra aquecer nosso planeta de maneira tão eficiente e constante durante tanto tempo?

A energia do Sol é gerada através de reações químicas especiais que só ocorrem em condições extremamente específicas no interior de estrelas. E tudo depende da massa da estrela. O Sol, por exemplo, tem uma massa de aproximadamente $1,99 \times 10^{30}$ kg, que comprime suas camadas interiores. Essas enormes pressões fazem com que a distância entre os abundantes átomos de hidrogênio seja a menor possível, comprimindo os átomos de modo que a força de repulsão mútua entre eles (de origem elétrica) possa ser vencida. Quando isso ocorre, acontece um processo chamado **fusão nuclear** , que combina átomos de elementos mais leves para formar átomos maiores. Esse processo não apenas origina outro elemento químico, mas gera também energia luminosa, pois quando átomos se fundem para formar um outro átomo, as **energias de ligação** desses átomos originais são liberadas.

Um dos elementos mais abundantes em estrelas é o hidrogênio, e a fusão desse elemento é a mais comum na maior parte dos tipos de estrelas. O processo de fusão ocorre para vários outros átomos, incluindo hélio, carbono, oxigênio e muitos outros. Por exemplo, a fusão do hidrogênio em hélio tem várias etapas, mas, resumidamente, ela pode ser representada da seguinte forma: **$4\text{H} \rightarrow \text{He} + \text{Energia Liberada}$** . A energia liberada corresponde à energia de ligação dos 4 átomos originais de hidrogênio. Nessa reação específica, sabe-se que uma quantidade de 27 Mev é liberada, ou seja, 27 milhões de elétron-volts¹¹ de energia.

As reações de fusão ocorrem em altíssimas temperaturas e em diversas camadas das estrelas. Geralmente a temperatura de uma estrela aumenta em

principal solvente outras substâncias diferentes da água. Ver, por exemplo: <http://www.dailygalaxy.com/my_weblog/2011/05/stephen-hawking-on-non-carbon-based-alien-life.html>.

11 O elétron-volt é uma medida de energia e é definido como a energia cinética ganha por um elétron quando submetido a uma diferença de potencial de 1 volt, no vácuo. Um elétron-volt (ev) equivale a $1,6 \times 10^{-19}$ Joules.

direção ao seu núcleo, de forma que as altas temperaturas do centro propiciam um maior número de reações nucleares e liberam quantidades maiores de energia. Essas reações de fusão recebem também o nome de **reações termonucleares** porque ocorrem em altas temperaturas entre núcleos de diferentes elementos químicos.

A energia liberada pelas reações termonucleares tem dois efeitos principais. Um é suportar o peso da estrela através da energia liberada pelas reações termonucleares que suportam o peso da estrela com uma pressão contrária de dentro para fora, proporcionando uma condição de equilíbrio. Esse equilíbrio pode ser mantido, para a maioria das estrelas, durante bilhões de anos, pois é enorme a reserva de elementos que podem ser combinados para formar outros mais pesados e no processo liberar energia. A outra função da energia liberada pelas reações termonucleares é responder pela luminosidade da estrela. Isso ocorre porque nem toda a energia liberada por essas reações é utilizada para suportar o peso da estrela, sendo que parte da energia liberada vem na forma de fótons, que são partículas de luz.

Os fótons são gerados em altíssimas quantidades, e eles, eventualmente, escapam das camadas interiores das estrelas e chegam até suas superfícies, de onde se propagam para fora da estrela. Ou seja, as mesmas reações nucleares que suportam o peso da estrela respondem também pela luminosidade observada desses astros. A maior parte das estrelas emite fótons no ótico (a luz visível) e também em outras frequências ou comprimentos de onda correspondentes ao ultravioleta e ao infravermelho. Nem sempre a maior parte da energia luminosa emitida por uma estrela está no ótico, sendo necessário investigar diversas bandas para mapear completamente o espectro das estrelas.

A Terra está a 8 minutos-luz do Sol, pois as partículas de luz levam apenas 8 minutos para cobrir os 150.000.000 km que separam nosso planeta de nossa estrela, propagando-se na velocidade da luz que é igual a 300.000 km/s. Entretanto, os fótons que chegam a cada segundo até nós foram gerados há mais tempo nas camadas interiores do Sol. As estimativas apontam que os fótons levam dezenas de milhares de anos ricocheteando aleatoriamente entre as camadas internas da estrela até chegar à sua superfície. Isso ocorre porque as camadas interiores são **densas e opacas**. Conhecimentos de Física avançados nos permitem afirmar essa incrível curiosidade. Ou seja, a luz que ilumina

nossos dias foi gerada por reações termonucleares muito antes das primeiras grandes civilizações da Terra surgirem.

Como o hidrogênio é o elemento mais abundante na vasta maioria das estrelas, é justamente a fusão desse elemento que suporta grande parte das estrelas durante a maior parte de suas vidas. Como vimos, 4 átomos de hidrogênio se fundem para formar um átomo de hélio e liberar energia. Diz-se que uma estrela está na **sequência principal** quando se encontra nessa fase, transformando hidrogênio em hélio. É a fase mais estável da vida de uma estrela, pois o hidrogênio leva bilhões de anos para se extinguir na maioria das estrelas. Após essa fase de estabilidade, algumas estrelas evoluem para outras fases, experimentando variações de brilho, massa, raio, densidade e muitos outros parâmetros físicos. Outras reações de fusão podem ocorrer, como a fusão de hélio em carbono e de carbono em nitrogênio, pois diferentes reações termonucleares podem ocorrer em diferentes etapas da vida de uma estrela e em diferentes camadas a partir do núcleo.

São muitos os detalhes do processo de geração de energia em estrelas, e todo o processo é complexo, sendo ainda um estudo em progresso na Astrofísica moderna através da **Teoria da Evolução Estelar**. Sabe-se que a **massa inicial** de uma estrela é inversamente proporcional ao seu tempo de vida, sendo que, quanto mais massa possui uma estrela, mais eficientemente ela comprime suas camadas interiores e o seu núcleo. Isso causa um aumento da temperatura nuclear e o consequente aumento das taxas de reações termonucleares. Dessa forma, estrelas mais massivas consomem mais rapidamente seus combustíveis nucleares e vivem menos.

Na Física moderna, através da Teoria da Relatividade de Einstein, sabe-se que existe uma **equivalência entre massa e energia**, sendo que a massa é uma forma de energia. Isso é expresso através da relação $E=mc^2$, na qual **m** é a massa e **E** é a energia. Como a constante c tem um valor muito alto ($c=300.000$ km/s), vemos que pequenas quantidades de matéria geram enormes quantidades de energia. Assim, ao liberar energia através de reações nucleares, as estrelas consomem seu combustível nuclear e **perdem massa no processo**. Essa perda de massa e a velocidade com que ela ocorre é que determina o destino das estrelas. De maneira simplificada, existem 3 maneiras de uma estrela atingir o estado final de sua evolução: **estrelas de nêutrons, anãs brancas e**

buracos negros. A **Tabela 1** mostra o final esperado de uma estrela em função de sua massa inicial.

Uma anã branca é o estágio final atingido por uma estrela com massa inicial de até 10 massas solares. Esse é o caso do Sol (ver **Tabela 1**). Após passar aproximadamente 10 bilhões de anos na sequência principal, nosso Sol deve expandir-se, aumentando seu raio e atingindo uma fase conhecida como **supergigante vermelha**. Nesse período, o raio do Sol será maior do que a distância entre a Terra e Sol. Isso significa que cessarão todas as condições de sobrevivência de qualquer espécie animal ou vegetal em nosso planeta. Nosso Sol já tem aproximadamente 5 bilhões de anos. Estima-se que restam ainda 5 bilhões até que o Sol atinja seu estado final, que consistirá na ejeção de suas camadas mais externas. O que restará será uma estrela ultracompacta com uma massa final muito pequena, mas com o tamanho da Terra, ou seja, uma estrela de alta densidade.

As anãs brancas suportam o seu peso através de um mecanismo chamado **pressão de degenerescência eletrônica** cujos detalhes não discutiremos neste texto. Entretanto, podemos dizer que o mecanismo tem sua origem na proximidade dos elétrons, que se encontram altamente comprimidos em seus interiores. Como não existe mais fusão para liberar energia extra, a tendência é que a anã-branca (inicialmente quente) gradualmente perca energia e se apague na vastidão do cosmos.

É curioso pensar por que as estrelas de até 10 massas solares terminam no máximo com 1,4 massas solares. Como é possível determinar esse valor tão precisamente? Esse resultado vem da mecânica quântica¹², uma das teorias físicas mais precisas que conhecemos. Essa massa de 1,4 massas solares é conhecida como o limite de Chandrasekhar, em homenagem ao cientista de origem indiana Subrahmanyan Chandrasekhar (1910-1995), que estudou esse tipo de estrela durante toda sua carreira. Chandrasekhar calculou que, acima dessa massa final, uma anã branca não pode se formar, e outros fenômenos ocorrem, dando origem a outro tipo de estágio final, que chamamos de estrela de nêutrons. O professor Chandrasekhar recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1983.

12 A mecânica quântica é uma área da Física que se propõe a descrever o microuniverso, da ordem de grandeza das partículas atômicas e subatômicas. Seu início foi no ano 1900 com os trabalhos de Max Planck (1858-1947) e, posteriormente, de Albert Einstein (1879-1955) e de outros tantos cientistas. Essa teoria e seus resultados são de fundamental importância para se descrever estrelas, pois sua fonte da energia vem de reações nucleares entre elementos químicos em seus núcleos.

Tabela 1 – Estágios finais esperados para estrelas de diferentes massas iniciais, expressas em massas solares

MASSA INICIAL	MASSA FINAL	ESTÁGIO FINAL
1 -10	0,5 – 1,4	Anã Branca
10 – 30	1,4 – 3	Estrela de Nêutrons
Acima de 30	Acima de 3	Buraco Negro

Devido à sua evolução e seus mecanismos de geração de energia, todas as estrelas perdem massa e eventualmente atingem uma massa final, ao fim de suas vidas. Essa massa final é quem determina o resultado de sua evolução e o estágio final atingido.

Se a massa inicial de uma estrela estiver compreendida entre 10 e 30 massas solares, então o estágio final esperado é uma estrela de nêutrons. Esse tipo de estrela é ainda mais compacto do que as anãs brancas, sendo que uma estrela de nêutrons típica tem o diâmetro aproximado de uma cidade grande, como São Paulo, ou Nova York. Entretanto uma enorme massa está compactada em seu interior. Uma colher de sopa do material de uma estrela de nêutrons pesa o mesmo que toda a humanidade. Se assumirmos que cada um dos 7 bilhões de indivíduos da Terra pesa em média 70 kg, podemos estimar a massa de toda humanidade como sendo igual a 490 bilhões de Kg! Uma única colher de sopa do material que forma uma estrela de nêutrons teria toda essa massa! É isso que ocorre quando 3 massas solares estão comprimidas em uma estrela de apenas 13 km de raio.

As pressões no interior das estrelas de nêutrons são tão gigantescas que a pressão de degenerescência eletrônica é vencida e outros processos ainda mais espetaculares ocorrem, como a quebra do átomo de ferro em partículas de alta energia e, finalmente, a combinação de elétron e prótons para a formação de nêutrons. Esses processos propiciam a consequente liberação de energia em várias formas, como fótons, partículas de alta energia e até raios gama, que são um tipo de radiação eletromagnética de altíssima energia.

Tanto as estrelas de nêutrons quanto as anãs brancas, antes de atingirem seus estados finais, podem dar origem ao fenômeno chamado **supernova**. Esse fenômeno pode ocorrer tanto por acreção de matéria, através de uma estrela

vizinha contida no mesmo sistema binário¹³, quanto pelo colapso do núcleo por conta da alta gravidade. Se um desses dois eventos ocorrerem, forma-se uma supernova, que é uma megaexplosão. Uma supernova pode liberar, em um curto intervalo de tempo (alguns dias ou semanas), tanta luminosidade quanto o Sol durante toda a sua existência. Após a explosão, sua luminosidade gradativamente diminui, e a estrela eventualmente se apaga, deixando no seu lugar uma anã-branca, no caso de ocorrer acreção de matéria através de uma companheira, ou uma estrela de nêutrons, caso ocorra o colapso do núcleo devido à gravidade.

Por fim, toda estrela cuja vida começa com uma massa acima de 30 massas solares, tipicamente, chega ao final de sua existência com apenas 3 massas solares. Elas podem potencialmente dar origem a um **buraco negro**. Esses objetos são os mais densos existentes no universo, e sua gravidade é tão intensa que nem mesmo a luz escapa e, por isso, não podem ser detectados através de nenhuma luz emitida. Sua observação fica restrita à investigação de seus efeitos gravitacionais.

Todos os elementos mais complexos do que o hidrogênio são formados em estrelas e ficam armazenados nas camadas mais interiores das estrelas. Algumas dessas estrelas, quando explodem em supernovas, acabam por liberar enormes quantidades de material quimicamente enriquecido no meio interestelar. Esse meio pode, com as condições certas, formar discos de acreção que darão origem aos planetas, luas e outros corpos menores presentes em diversos sistemas solares. Teoricamente, a vida pode se originar em alguns desses planetas nas condições corretas, como aconteceu com a Terra. Os átomos de ferro, que ajudam a hemoglobina de nosso sangue a transportar oxigênio em nossos organismos, foram, em um passado distante, sintetizados em uma explosão de supernova. Somos literalmente formados por elementos químicos que são produto da evolução estelar. Somos feitos de estrelas. Todos os aspectos que discutimos nesta parte do texto podem ser encontrados em mais detalhes em Oliveira e Saraiva (2015).

13 Muitas estrelas ocorrem em sistemas binários, nos quais acontece a interação gravitacional entre duas estrelas. Se a massa das duas estrelas for muito diferente, sendo uma delas de massa muito maior, pode ocorrer a transferência de matéria da de menor massa para a de maior massa, acelerando os processos evolutivos e propiciando, entre outros fenômenos, a formação de uma supernova.

As galáxias e a expansão acelerada do universo

Galáxias são sistemas gravitacionalmente ligados, compostos por milhares de estrelas (nas pequenas galáxias anãs), e contendo bilhões de estrelas nas galáxias maiores. Esses sistemas são bastante numerosos no universo, e estima-se que existam aproximadamente 170 bilhões de galáxias no universo. Atualmente acredita-se que existam buracos negros supermassivos¹⁴ no centro da vasta maioria das galáxias.

Até o início dos anos 20 do século XX, acreditava-se que todos os objetos observados no céu eram parte de nossa galáxia, a Via-Láctea. Entretanto, por volta de 1920, manchas brancas começaram a aparecer nas fotos feitas com os telescópios mais modernos. Passou-se a discutir se as manchas eram nebulosas que faziam parte da Via-Láctea ou se eram sistemas independentes ainda mais distantes. Coube a Edwin Hubble (1889-1953) calcular a distância até um desses sistemas e verificar que se tratava de fato de um sistema independente de nossa galáxia. A partir daí, inúmeras outras nebulosas foram estudadas e descobertas através de uma técnica que utiliza **estrelas variáveis cefeidas**¹⁵ para a determinação de **distâncias** no universo. Essa técnica é bastante confiável e é utilizada até hoje.

Os estudos de Hubble revelaram ainda a estrutura das galáxias e sua composição morfológica, sendo que algumas exibem braços espirais ricos em gás e poeira. Outras são elípticas e possuem menos reservas gasosas, existindo, portanto, uma enorme variedade de formas e tamanhos para as galáxias. A Via Láctea, por exemplo, é uma galáxia espiral que mede aproximadamente 100.000 anos luz de diâmetro. Existem galáxias bem maiores do que a nossa e com estruturas ainda mais complexas.

A **Figura 2** mostra uma foto da galáxia M83, fotografada por um dos telescópios do Observatório Europeu do Sul (ESO), focalizando seus braços

14 Não confundir buraco negro supermassivo com buraco negro estelar. O primeiro é o nome dado à enorme coleção de estrelas existente no centro da maioria das galáxias e que responde pelo seu comportamento observado, em termos de gravidade e luminosidade. O segundo é apenas uma estrela de alta densidade, cujas características discutimos na seção anterior.

15 São estrelas de brilho variável. Mede-se o período de variação do brilho e existe uma conhecida relação entre o período de variação do brilho e o brilho absoluto dessas estrelas. Com o brilho absoluto e a medida do brilho aparente, pode-se determinar a distância até a cefeida e, indiretamente, a distância até a galáxia que a hospeda. Essa técnica foi pioneiramente estudada pela astrônoma americana Henrietta Leavitt (1868-1921). Ela publicou esses resultados em 1912.

espirais e vários pontos luminosos que são berçários de estrelas jovens. Nota-se uma enorme concentração de estrelas no centro da galáxia. A tecnologia disponível nos anos 20 do século XX era bem diferente da que dispomos hoje, e as fotos modernas revelam estruturas e propriedades não disponíveis no início do século XX.

Edwin Hubble estudou ainda a luz emitida pelas galáxias e passou a analisar seus espectros. O espectro de uma galáxia nada mais é do que uma espécie de registro da intensidade da luz em função da frequência. Cada galáxia tem um espectro bastante particular que mostra as linhas de emissão correspondentes aos diversos elementos químicos presentes no gás que envolve as estrelas. Muitas das galáxias exibiam ainda um peculiar deslocamento em suas linhas de emissão. Ao medir o deslocamento¹⁶ dessas linhas de emissão com precisão, Hubble foi capaz de medir a velocidade de afastamento de diversas galáxias. Omitiremos os detalhes de como isso foi feito, mas o fato é que, ao medir o deslocamento, é possível medir a **velocidade** de afastamento. Hubble realizou essa medição meticulosa para dezenas de galáxias.

Estudos de espectroscopia revelam que o gás contido nas galáxias é composto principalmente de hidrogênio (H). Entretanto, existem, também, outros elementos químicos presentes, como o nitrogênio (N) e o enxofre (S). O gás pode ser comprimido devido a efeitos cinemáticos e gravitacionais, e isso pode acelerar a transformação de grandes quantidades de gás em estrelas. As estrelas jovens formadas nesses episódios de formação estelar emitem enormes quantidades de fótons que interagem com o gás que as envolve, modificando as suas propriedades físicas observadas.

16 O deslocamento das linhas espectrais é causado pelo afastamento (ou aproximação) de uma galáxia. Esse efeito é chamado de *redshift*, ou deslocamento para o vermelho. O que ocorre é que linhas espectrais das galáxias que se afastam deslocam-se para zonas de menor frequência no espectro, deslocando-se na direção da cor vermelha no espectro visível. O contrário ocorre com as galáxias que se aproximam. Esse efeito observado pela luz de galáxias distantes é similar ao efeito Doppler do som, observado quando uma fonte sonora se aproxima ou se afasta de nós, alterando, dessa forma, a frequência do som que ouvimos. Os astrônomos sabem medir o deslocamento das linhas e, com isso, determinar a velocidade de afastamento da galáxia que emite a referida linha.

Figura 2 – Galáxia M83 mostrando suas estruturas em espiral contendo bilhões de estrelas, muitas delas agrupadas em pontos de altas taxas de formação estelar



Crédito da imagem: Observatório Europeu do Sul (ESO). O telescópio utilizado foi o ESO/MPG de 2,2 metros, localizado em La Silla, Chile. Disponível em: <<http://annesastronomynews.com/annes-picture-of-the-day-spiral-galaxy-messier-83/>>. Acesso em: 11 maio 2015.

Muitas vezes, grandes quantidades de poeira e outros compostos, como óxido de silício (SiO_4), estão presentes e atrapalham a observação das estrelas em uma determinada região de uma galáxia. Isso ocorre porque a poeira interage com a luz emitida pelas estrelas. Ou seja, a poeira e o próprio gás atrapalham a observação das estrelas. Por outro lado, é o próprio gás compactado em pequenas regiões que as forma. A interação da luz das estrelas com a poeira interestelar e o gás é um dos problemas mais estudados na Astronomia contemporânea, mas a Física que descreve essa interação é tão complexa que somente modelos computacionais ajudam a elucidar os fenômenos observados.

Um dos problemas em aberto é a existência da **matéria escura**, cuja origem e propriedades ninguém conhece. Estudos da velocidade das estrelas em função do raio para diversas galáxias mostraram que as velocidades

observadas não podem ser explicadas pela matéria visível. As velocidades só podem ser explicadas quando se adiciona aos modelos uma enorme (gigantesca) quantidade de matéria, geralmente envolvendo as galáxias. Essa matéria que tem que ser prevista nos modelos não pode ser observada através de observações. Ou seja, as galáxias devem conter uma enorme quantidade de matéria que não emite luz, e, por isso, ela é chamada de matéria escura.

Esse problema da massa que interage gravitacionalmente, mas que não pode ser observada, foi notado primeiramente pelo astrônomo Fritz Zwicky em 1933. A origem e a constituição dessa matéria escura são alguns dos grandes mistérios atuais da Física, sendo que esse problema é notado para toda e qualquer galáxia observada. Ninguém sabe explicar por que a maior parte da massa contida nas galáxias interage gravitacionalmente, mas não emite luz.

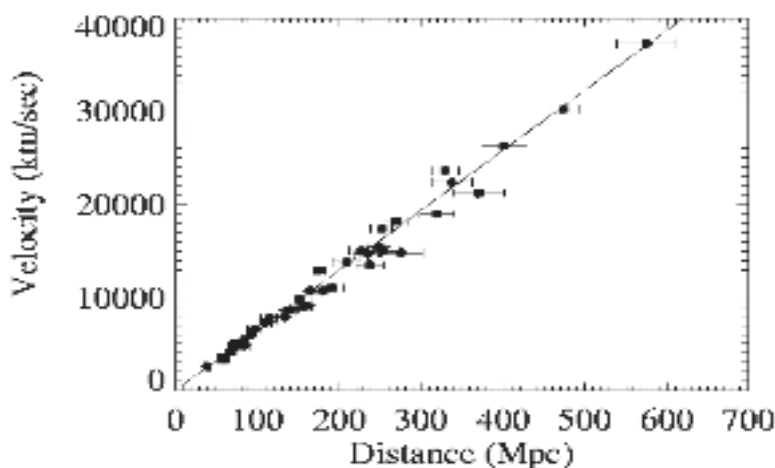
Voltando aos estudos de Hubble, uma vez conhecidas a distância e a velocidade de afastamento para cada galáxia, pode-se fazer um gráfico da distância (em megaparsecs¹⁷) pela velocidade (em km/s). A **Figura 3** mostra esse gráfico, no qual cada ponto representa uma galáxia e podem ser lidos os valores da velocidade (no eixo vertical) e da distância (no eixo horizontal). Pode-se ver que galáxias mais distantes têm maiores velocidades nesse diagrama que foi primeiramente obtido por Hubble, para menos galáxias e cobrindo galáxias menos distantes (HUBBLE, 1929). Esse diagrama recebe o nome de **Diagrama de Hubble** e, ao longo do século XX, os astrônomos estenderam esse gráfico para mais e mais galáxias, verificando a validade da mesma relação entre a velocidade e a distância.

A relação matemática que explica o gráfico é chamada de **Lei de Hubble** e estabelece uma relação linear entre a velocidade **V** e a distância **D**: $V = H_0 D$, sendo H_0 a chamada constante de Hubble que reflete a inclinação da reta que ajusta os dados observacionais. Pode-se inferir, através do gráfico, que o universo está em expansão, pois quanto mais distante está uma determinada galáxia, mais alta sua velocidade de afastamento. Isso sugere que, em um passado distante, as galáxias deveriam estar mais próximas umas das outras. Se levarmos essa ideia adiante, conclui-se que, no início do universo, toda a

17 O parsec é uma unidade de medida muito utilizada em Astrofísica, sendo que 1 parsec = $3,09 \times 10^{16}$ m. Um megaparsec é igual a um milhão de vezes esse valor. Assim 1 megaparsec = $3,09 \times 10^{22}$ m. Sim, as distâncias medidas através dessa unidade são muito grandes. Isso apenas reflete o tamanho do universo e as suas distâncias realmente astronômicas!

matéria estaria concentrada em um mesmo ponto. A teoria que investiga essa possibilidade é chamada de **Teoria do Big Bang**, e ela propõe que, em um passado remoto, precisamente há 14,44 bilhões de anos¹⁸, ocorreu uma enorme explosão (big bang) que deu origem aos elementos químicos, às primeiras estrelas e às primeiras galáxias. Essa teoria tenta explicar a origem do cosmos e dos seus elementos químicos, sendo a teoria mais aceita na atualidade e a que tem os maiores indícios teóricos e observacionais a seu favor.

Figura 3– Diagrama de Hubble para dados modernos, mostrando a distância (em megaparsecs) no eixo horizontal e a velocidade de afastamento no eixo vertical.



Fonte: FILIPENKO; RIESS, 1998.

Esse gráfico mostra dezenas de galáxias a mais do que o diagrama original de Hubble que cobria distância de até 2 megaparsecs apenas. Ao longo do século XX, novos estudos comprovaram e estenderam a validade da relação encontrada por Hubble.

Após verificarem que é real a possibilidade de ter ocorrido o Big Bang, os astrônomos passaram a pensar sobre o futuro ou o destino do universo. Pela lógica, como a força da gravidade atrai as galáxias, então a expansão deve estar

18 Este é o valor mais aceito atualmente. Novos estudos estão constantemente reavaliando esse número, que muda a cada nova contagem de galáxias e com novos diagramas de Hubble, que descobrem novos valores para H_0 e consequentemente para a idade do universo. Atualmente o valor da constante de Hubble vale $H_0 = 67.80 \pm 0.77$ km/s/Mpc (Missão Planck, Agência Espacial Europeia, 2013). A idade do universo é igual a $t=1/H_0$. Calculando-se esse valor, chegamos a $t=14,42$ bilhões de anos. Essa é a idade do universo, segundo os melhores dados de que dispomos.

sendo freada. Entretanto alguns astrônomos argumentaram que, se o número de galáxias no universo for muito pequeno, pode ser que a força da gravidade nunca seja capaz de frear a expansão observada. Entre os anos 20 e os anos 90 do século XX, a quantidade de galáxias no universo foi estudada para tentar estimar se elas seriam suficientes para frear a expansão do cosmos.

Entretanto dois times de astrônomos americanos descobriram, em 1998, que as galáxias mais distantes do universo também estão se expandindo. Ou seja, não há sinais de que a explosão causada pelo Big Bang esteja sendo freada pela força da gravidade. Mas esses astrônomos não descobriram apenas isso. Eles mostraram, através de avançadas técnicas de análise, que as galáxias mais distantes estão, na verdade, acelerando! Isso mesmo, além da gravidade não estar freando a expansão, existe ainda alguma força ou energia acelerando as galáxias. Isso é exatamente o oposto do esperado, pois as galáxias deveriam, ainda que minimamente, estar sendo freadas pela gravidade. No entanto, existe uma energia, de origem desconhecida, que acelera as galáxias! Essa energia que atua contra a gravidade recebeu o nome de **energia escura**, e esses astrônomos receberam o Prêmio Nobel de Física em 2011 por essa descoberta.

Como vemos, o estudo das galáxias levou a importantes conclusões a respeito do universo. Por um lado, descobrimos as propriedades morfológicas e as velocidades de expansão das galáxias, o que nos permitiu vislumbrar a origem do cosmos. Por outro, fica clara a nossa falta de compreensão a respeito de dois importantes componentes do **universo observável** que são a energia escura e a matéria escura, cujas propriedades desconhecemos. São muitas ainda as **perguntas sem respostas** e as **descobertas** que ainda estão por vir!

6. Conclusões

Segundo as evidências fósseis mais confiáveis, o *Homo Sapiens Sapiens* surgiu há pelo menos 200.000 anos (BRADSHAW, 2003; MATHEW, 1994; DIAMOND, 1997), e, ao longo de nossa aventura na Terra, nossa espécie levou bastante tempo para ter uma compreensão geral a respeito do universo em que vivemos. Nos primeiros 195 milênios, a humanidade se esforçou para sobreviver! E sobreviver foi tudo o que fizemos, colhendo frutas e raízes, caçando animais selvagens e lutando contra doenças e invernos terríveis.

Acredita-se que, há 70.000 anos, vários eventos quase levaram ao completo extermínio da espécie humana (DAWKINS, 2004 e referências lá citadas). Acredita-se que, nessa época, toda a humanidade era composta por apenas 2000 indivíduos. Ou seja, todos os seres humanos caberiam em apenas 6 Boeings 737 modernos. Mas, através da resiliência, da capacidade de adaptação e, sobretudo, devido à inteligência de nossos ancestrais, fomos capazes de vencer as dificuldades, sobreviver e evoluir. Após essas dificuldades iniciais de nossa espécie, ainda levamos muito tempo para fazer ciência de verdade, pois foi somente há 5000 anos que as primeiras civilizações começaram a construir cidades, desenvolver a escrita, empregar a Engenharia, a Matemática, a Arte e a Medicina. Foi somente há pouco mais de 500 anos que os primeiros europeus chegaram à América. Faz menos de 100 anos que descobrimos a penicilina¹⁹, e faz também menos de 100 anos que aprendemos como funcionam as estrelas e descobrimos as galáxias e a expansão do universo. Em suma, nossa aventura na Terra é antiga, mas nossa compreensão da ciência é recente.

Outro ponto interessante que deve ser salientado é o caráter religioso e mítico que várias civilizações atribuíram aos estudos de Astronomia, com a personificação de deuses, figuras míticas e heróis para caracterizar as constelações, os fenômenos celestes e eventos do calendário, como as colheitas, por exemplo. A mistura de conceitos religiosos com os procedimentos científicos perdurou pela antiguidade, entrou pela idade média e continuou, de certa forma, até os séculos XV, XVI e XVII. Foi gradativo o processo de separação da ciência e da religião, sendo essa questão da separação um dos pilares da ciência contemporânea.

Outra constatação espantosa vem ao descobrirmos que os astrônomos vencem as grandes distâncias do universo utilizando somente a luz emitida pelos astros. Isso ocorre porque a luz é capaz de atravessar grandes distâncias, e, através dela, pode-se concluir a respeito da velocidade, composição química e distância dos objetos emissores. Esse é um dos grandes trunfos da ciência moderna. A explicação de como a luz pode conter tantas informações a respeito dos objetos que a emitem ou refletem é um dos capítulos mais belos

19 Esse antibiótico descoberto por acaso em 1928 pelo escocês Alexander Flemming começou a ser utilizado comercialmente em 1941. Acredita-se que o seu uso tenha ajudado a salvar bilhões de vidas até os dias de hoje.

da **mecânica quântica**. Omitimos os detalhes, mas a explicação é realmente fascinante.

Como vimos, a Astrofísica moderna tem dois grandes enigmas. Por um lado, estudos do movimento de estrelas em galáxias levaram à conclusão de que grande parte do universo é feita de **matéria escura**. Por outro lado, estudos referentes à expansão do universo levaram à conclusão de que o universo se expande de maneira acelerada, implicando na existência da **energia escura**, que atua de forma contrária à gravidade (que deveria frear a expansão). Essas descobertas são fantásticas e indicam que, embora nosso conhecimento a respeito do universo seja enorme, ainda não temos uma total compreensão a respeito da matéria e da energia que o compõem. Modernos estudos mostram que até 95% do universo é formado por energia e matéria cuja origem e propriedades ainda desconhecemos.

Por isso, ainda há tanto trabalho para os futuros astrofísicos, e por isso é que as pesquisas continuam sempre, com sondas, telescópios, antenas e satélites, estudando incansavelmente a imensidão do universo. Muitas vezes, as descobertas observacionais são desconcertantes e desmotivadoras. Entretanto os verdadeiros cientistas não se abatem, e justamente nos momentos de dúvida e incerteza é que intensificam seus esforços de pesquisa. Muitas vezes, as observações conduzem a novas teorias a respeito do universo. O contrário também pode acontecer, com desenvolvimentos teóricos levando a novas e surpreendentes observações astronômicas.

No final da introdução deste capítulo, dissemos que o estudo em Astronomia pode nos levar a conhecer a natureza humana e o universo dentro de cada um de nós. Essa frase, que parece ser metafórica e poética, é, na verdade, real e literal. A composição química da nossa galáxia é de hidrogênio, hélio e oxigênio, seguidos do carbono, neônio, ferro e nitrogênio (CROSWELL, 1996). Já o nosso **sistema solar** é composto de hidrogênio, hélio, oxigênio e nitrogênio (ARNETT, 1996). Por comparação, no **Sol**, a composição é de hidrogênio, hélio, oxigênio e carbono (HYPERPHYSICS, 2015). Por fim, no **corpo humano**, são encontrados justamente oxigênio, carbono, hidrogênio e nitrogênio (OPENSTAX COLLEGE, 2013).

Como vemos, o corpo humano é formado, em sua maior parte, pelos elementos mais comuns no sistema solar e na Via Láctea, com exceção do carbono, que, embora seja bastante importante na composição do corpo humano,

aparece em pequenas proporções tanto no sistema solar quanto na galáxia. Apenas devemos lembrar que, devido às enormes massas da nossa galáxia e do sistema solar, as pequenas proporções de carbono se traduzem em enormes reservas, em massa, desse importante componente da matéria orgânica. Dessa forma, podemos concluir que o corpo humano replica o universo, tendo em sua composição alguns dos elementos mais comuns no cosmos.

Assim, fica a chocante conclusão de que **somos parte integrante do universo** em que vivemos, não apenas por estarmos fisicamente presentes nele, mas, sobretudo, por sermos formados por alguns dos elementos mais facilmente encontrados no universo e no planeta em que vivemos. Esse **amálgama** com a natureza e com o universo deve nos inspirar e alimentar o cuidado que devemos ter com o nosso planeta. Afinal, vivemos aqui e somos parte integrante e inseparável dele.

Toda a ciência, em especial a Astrofísica, convida-nos a uma importante reflexão a respeito da humanidade e do mundo natural. O que podemos e devemos fazer para continuar sobrevivendo? Será que a ciência tem nos ajudado? Será que o desenvolvimento das sociedades é sustentável a longo prazo? Se pensarmos bem, veremos que alguns avanços tecnológicos, como a fabricação em massa de produtos plásticos, por exemplo, têm prejudicado o planeta e a nós mesmos. Por outro lado, o uso indevido dos recursos hídricos e minerais tem comprometido o frágil equilíbrio em nosso planetinha azul, que vaga na imensidão do cosmos.

A conservação do planeta passa, necessariamente, pela utilização consciente dos recursos não renováveis e, sobretudo, pela conservação das águas, da fauna, da flora e do solo de nosso planeta. A Astrofísica nos dá uma dimensão da dificuldade em encontrar outro planeta e de colonizá-lo. Antes de perdermos o que já temos, não seria melhor zelar pelo que já construímos na Terra? Você é o cientista! Quais são suas ideias? O que você faria para salvar seu planeta?

Diante das curiosas descobertas da Astrofísica, podemos pensar novamente a respeito das janelas que os primeiros homens e mulheres abriram ao observarem o céu pela primeira vez. Se nos esforçarmos, veremos que todo o desenvolvimento humano é fruto de várias ciências que contribuíram para nossa compreensão a respeito do universo. A Engenharia, a Ótica e a Física ajudaram muito a Astronomia. Em contrapartida, a Astronomia moderna

ajuda muito essas ciências também. Essa compreensão da ciência como um **todo indivisível** é muito importante. Ninguém pensa sozinho. Ninguém descobre nada sozinho. As várias áreas da ciência se ajudam.

Por fim, podemos concluir que, ao olhar para planetas e estrelas distantes, galáxias longínquas e mundos tão diferentes do nosso, vemos que a Terra é especial. Até onde sabemos²⁰, ela é o único local que reúne as condições ideais de vida, com abundância de água nos estados líquido, sólido e gasoso, tão essenciais à vida. Portanto, as janelas da Astronomia são muitas. Algumas levam às **estrelas distantes**, cuja composição química aprendemos a estimar. Outras janelas nos conduzem às **galáxias distantes**, cujas luminosidades e dinâmica conseguimos medir e monitorar. As janelas mais recentes da Astronomia revelam que existem, possivelmente, **outros planetas habitáveis** em estrelas distantes, em sistemas solares longínquos, mas que, possivelmente, um dia alcançaremos.

Devido a todas as implicações dos estudos em Astronomia, fica evidente que a mais importante janela aberta é a janela que conduz à própria **humanidade**, às suas raízes e às suas origens. Essa importante janela nos convida, sobretudo, a uma reflexão importante sobre nossa **existência** e sobre nosso futuro enquanto espécie pensante e responsável por nosso destino e por nossa própria história.

Epílogo

No século XXXXV, mais precisamente no ano 4510, a humanidade precisou deixar a Terra. Uma enorme nave vaga solitariamente pelo espaço, em direção a uma estrela distante. Dentro dela, sementes de todas as espécies vegetais conhecidas pelos cientistas. Existem também minúsculos tubos armazenados criogenicamente, contendo o material genético de todas as espécies animais e de todos os fungos do planeta Terra. Armazenadas em compartimentos selados, existem variadas quantidades de todos os elementos químicos encontrados naturalmente na Terra. As fórmulas de compostos especiais

20 Estudos bastante recentes realizados pelas sondas Kepler (<<http://kepler.nasa.gov/>>) e COROT (<<http://smc.cnes.fr/COROT/>>) têm mostrado que existem muitos planetas em outros sistemas solares. Alguns desses planetas apresentam condições de sustentar a vida. Alguns dos planetas encontrados podem ser muito parecidos com a Terra e, em um futuro distante, poderão abrigar a humanidade, caso algo venha a acontecer com a Terra.

e de remédios revolucionários também estão cuidadosamente armazenadas em memórias biocompatíveis. Todo o conhecimento humano de Engenharia, Ciências em geral, Artes, História, Geografia, Geologia, Física, Química e Biologia também está armazenado em memórias ainda mais modernas. Existem, também, devidamente guardadas, as sequências genéticas de centenas de milhares de indivíduos que pagaram para serem clonados no destino. Suas memórias e lembranças estão armazenadas em *biochips* de selênio-carbono, combinados com neurônios adaptados. Essas memórias e lembranças serão implantadas nos corpos clonados ao chegarem ao novo planeta que os humanos esperam encontrar. Centenas de computadores-autômatos pilotam a nave, guiando-a vagarosamente para fora do sistema solar, em direção a uma estrela parecida com o velho Sol. Em órbita dessa nova estrela, encontra-se um planeta, com raio similar ao da Terra e com a exata gravidade de nosso velho planeta. Esse novo lar é uma cópia quase exata da Terra, pois existe uma atmosfera rica em nitrogênio e oxigênio, em concentrações similares. Uma densa floresta cobre todo o novo planeta, que contém dois oceanos extensos e três continentes habitáveis, além de um continente gelado similar à Antártida em seu polo sul. Os humanos do século XXXXV sofreram as consequências da utilização indiscriminada dos recursos da Terra, da poluição dos oceanos e das reservas naturais de água doce. Todos os minerais foram usados, e as fontes de energia renováveis foram pouco exploradas. Poucos tiveram condições de comprar a chance de serem clonados por máquinas em um futuro distante. No total, a viagem levará aproximadamente 300 anos, pois o novo lar fica a 60 anos luz da Terra, e a nave desloca-se a meros 20% da velocidade da luz. Todo o conhecimento da Terra e todo o seu patrimônio genético seguem em uma única nave. Autômatos estão no controle. Os humanos não passam de sequências de DNA armazenadas em soluções aquosas biossustentáveis. Ironicamente, as mesmas estrelas que guiaram, há vários séculos, os primeiros navegadores dos oceanos da Terra, guiam agora os sistemas de navegação da nave, contendo toda a esperança da humanidade de voltar a existir. De certa forma, a humanidade venceu porque utilizou a tecnologia para fugir da destruição do planeta. Mas ficam questões e perguntas ainda mais importantes. Será que, no novo lar, seremos capazes de construir uma sociedade mais justa? Será que vamos usar o novo planeta de forma mais cautelosa? É possível usar a ciência para impedir

a destruição do novo planeta? E no novo lar, sobreviveremos a nós mesmos? Somente a ciência poderá nos ajudar.

Referências

ARNETT, D. *Supernovae and Nucleosynthesis: An Investigation of the History of Matter, from the Big Bang to the Present*. Princeton: University Press, 1996.

BRADSHAW, J. L. *Human Evolution: A Neuropsychological Perspective*. New York: Psychology Press, 2003.

CROSWELL, K. *The Alchemy of the Heavens: Searching for Meaning in the Milky Way*. New York: Anchor, 1996.

DAWKINS, R. *The Ancestors Tale*. Boston: Houghton Mifflin Company, 2004.

DIAMOND, J. *Guns, Germs and Steel: The Fate of Human Societies*. New York: W. W. Norton & Company, Inc., 1997.

FILIPENKO, A.; RIESS, A. *Results from the High-Z Supernova Search Team*, Phys. Rept, 307, 1998.

HUBBLE, E. *A Relation between distance and radial velocity among extragalactic nebulae*. PNAS USA, v. 15, n. 3, 1929.

McCLUSKEY, S. C. *Astronomies and Cultures in Early Medieval Europe*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.

LAZZARO, D. O Sistema Solar e corpos extraordinários. *Ciência Hoje*. 43 (258), pg. 40-45, 2009.

MATHEW, H.; NITECKI, D. V. *Origins of Anatomically Modern Humans*. Berlin: Springer, 1994.

OLIVEIRA, K.; SARAIVA, M. F. *Astronomia e Astrofísica*, terceira edição, São Paulo: Editora Livraria da Física, 2014. Disponível em: <<http://astro.if.ufrgs.br/>>. Acesso em: 30 mar. 2015.

Página da OpenStax College com hipertexto intitulado *Anatomy & Physiology*. Disponível em: <<http://cnx.org/content/col11496/1.6/>>. Acesso em: 9 abr. 2015.

Página do canal HyperPhysics com tabelas e informações sobre o Sol: Disponível em <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/tables/suncomp.html>>. Acesso em: 10 abr. 2015.

REPCHECK, J. *O Segredo de Copérnico*. São Paulo: Record, 2011.

SCHOMBERT, J. Página do professor Schombert da Universidade do Oregon, 2009, com uma simples e ao mesmo tempo completa explicação a respeito do princípio cosmológico: <http://abyss.uoregon.edu/~js/cosmo/lectures/lec05.html>. Disponível em 30 mar. 2015.

KUHN, T. *The Copernican Revolution*. Cambridge: Harvard University Press, 1957.



Materialidade e Imaterialidade na Física Moderna

Frederico Firmo de Souza Cruz – Depto. de Física – UFSC

Introdução

Em nosso cotidiano, a nossa relação com o mundo se dá a princípio pelas sensações e pela percepção que delas temos. A visão, o olfato, a audição e o tato nos dão a percepção de objetos concretos, bem definidos espacialmente e constituídos de alguma coisa que chamamos genericamente matéria. A nossa crença na realidade do mundo e das coisas que nele estão está muito associada a essa noção de matéria. De fato, a nossa relação com o mundo não é apenas sensorial; a imaginação, a reflexão e a criação são ingredientes essenciais para a sobrevivência. Dar sentido e significado às coisas do mundo e criar objetos e pensamentos para lidar com o mundo é mais do que uma ação humana, é uma necessidade. Os pensamentos fazem parte da vida de cada indivíduo e da vida social. Nesse sentido, podemos dizer que os pensamentos existem no mundo, mas são imateriais, existem apenas no mundo das ideias. A dicotomia corpo, mente, matéria, espírito é sempre baseada na oposição entre materialidade e imaterialidade. Essa dicotomia está presente nas crenças, nas religiões e nas várias interpretações do senso comum, e, obviamente, tem implicações na forma como os conhecimentos científicos são recebidos e significados pela sociedade.

Como seres sociais, criamos concepções, crenças, hábitos, que, através de mecanismos sociais e culturais se enraízam em nossos pensamentos. Eles se tornam tão “naturais” e óbvios que não merecem sequer uma reflexão, tornam-se senso comum. O senso comum é um mecanismo prático de sobrevivência, social e individual. Nenhum ser humano seria capaz de sobreviver sem assumir

como pressuposto um conjunto de conhecimentos, de crenças, receitas, técnicas que considera verdadeiros.

Por outro lado, é a consciência das limitações dos sentidos e do senso comum que fez a humanidade transformar o questionamento em uma atividade social, a ciência. Em busca de um conhecimento sobre o mundo, a ciência se afasta tanto do senso comum quanto das limitações dos sentidos. Como seres humanos, nossa experiência cotidiana se baseia fortemente nas percepções mais diretas, e quando fenômenos ou novos conhecimentos conflitam com essas percepções, ou com saberes arraigados, isso causa perplexidade e desconforto. Essa perplexidade tem um papel crucial na compreensão pública da ciência e nas formas como especialistas e não especialistas lidam com um conhecimento novo e dele se apropriam. No mundo atual, um dos conhecimentos científicos que foi objeto das apropriações mais diversas é a Mecânica Quântica. O adjetivo “quântica” aparece nas mais diversas áreas, terapia quântica, psicologia quântica etc. Isso não deixa de ser surpreendente, pois é um dos conhecimentos que mais perplexidade geram, tanto para leigos quanto para especialistas. Como veremos ao longo do texto, os fenômenos quânticos questionam os velhos conceitos de matéria. A nova concepção de matéria é o foco deste texto, que não pretende resolver a perplexidade, mas apenas deixar o mais vívido possível alguns aspectos que exibem as dificuldades de interpretação que a Mecânica Quântica nos apresenta.

Sentidos, percepções e as teorias clássicas

Ao longo da história, num processo lento e penoso, criamos uma ciência sofisticada, abstrata, que vai muito além dos sentidos e das concepções primeiras, a Física Clássica. Apesar da sofisticação e do distanciamento do senso comum, muitos desses conhecimentos foram tão difundidos na sociedade e na cultura, que se tornaram familiares, e até nos parecem em total harmonia com os nossos sentidos, intuições e expectativas.

Essa sensação de familiaridade é intrigante, pois nossa interação direta com o mundo nos dá apenas sensações que associamos a qualidades secundárias dos objetos. Nós as chamamos de secundárias porque dizem respeito à sensação que se manifesta na interação entre sujeito e objeto. Essas qualidades dizem respeito à interação e não ao objeto. Quando falamos da cor verde de

um objeto, estamos falando de uma percepção subjetiva sobre a luz que se refletiu no objeto e chegou aos nossos olhos. Mas, de forma coloquial, costumamos falar da cor como uma propriedade do objeto. Já na ciência, a cor da luz dá lugar à frequência, que é considerada uma qualidade objetiva que não depende da sensação de um sujeito. A frequência é uma qualidade abstrata que tem sentido no contexto de toda uma teorização sobre o caráter ondulatório da luz. Mas, apesar desse caráter abstrato, o conceito de frequência é compreensível para a maioria das pessoas, pois tem correlatos nas sensações e percepções. Isso é, apesar desse caráter mais abstrato, as teorias clássicas e suas explicações parecem, ao final, se harmonizar com nossas sensações e percepções. A ciência clássica e seus fenômenos parecem cumprir a máxima: A ciência nos provê de teorias que tornam inteligíveis e óbvios fenômenos que de outra forma seriam incompreensivelmente misteriosos.

Segundo a visão clássica de Newton,

é por meio dos sentidos que chegamos a estabelecer as qualidades fundamentais dos corpos, os quais são formados por partes menores, também elas extensas, duras, impenetráveis, móveis e dotadas de sua própria inércia”. Para o físico, “O mundo material é constituído de corpos que têm volume ocupados por uma quantidade de “matéria” impenetrável.

Essa é a concepção do corpuscularismo que define a materialidade a partir do conceito de partícula. Nessa concepção, o universo físico é basicamente povoado pela matéria, pois as forças emanam da matéria e só ganham realidade quando os corpos materiais interagem. O que não é matéria é vazio. Com base nessa visão corpuscular, a Física Clássica avançou no tratamento dos sistemas formados pela agregação das partículas, criando teorias e modelos para tratar sistemas contínuos. O estudo dos sólidos nos permitiu criar uma teoria da elasticidade, o dos líquidos nos levou aos desenvolvimentos da hidrodinâmica e de uma sofisticada teoria dos fluídos, e os gases pavimentaram o caminho para a termodinâmica e a mecânica estatística.

Ao longo do século XIX, o conceito de energia ganha um papel de relevo na compreensão do mundo físico. A energia não é material, mas é uma grandeza através da qual se pode quantificar as transformações de sistemas

materiais. Todo sistema tem configurações cujas mudanças se dão através de seus graus de liberdade. Essas mudanças de configuração podem ser quantificadas através da energia.

Os trabalhos desenvolvidos com as máquinas térmicas mostraram que o aumento de temperatura de um gás por uma fonte quente estava associado ao aumento da velocidade média das partículas, quantificado pela energia cinética. Joule, através da agitação mecânica do gás, estabeleceu quantitativamente equivalência entre quantidade de calor e variação da energia mecânica. Por outro lado, os trabalhos de Faraday demonstraram a transformação da energia mecânica em energia elétrica através da geração de eletricidade. Com a construção de um pequeno motor elétrico, Faraday também mostrou que a energia elétrica pode se transformar em energia mecânica. Experiências de eletrólise e de dissociação mostraram que energia química de ligação das moléculas dissociadas na eletrólise se transforma em energia elétrica, e que a eletricidade pode causar a dissociação de moléculas. Assim, em todos esses processos de transformação, a energia é a grandeza que se conserva. Esses estudos foram sintetizados no princípio da conservação da energia que se tornou um poderoso guia na investigação de processos físicos.

Na análise de sistemas físicos e dos processos de transformação, a conservação da energia nos leva com frequência a utilizar uma terminologia em que falamos sobre fluxo de energia, sobre energia transferida etc. Essa terminologia, às vezes, confunde o senso comum, e, frequentemente, as pessoas pensam que a energia é ela mesma uma “coisa” que pode ser passada adiante. Às vezes, essa coisa tem algo de “material” – o chute transferiu muita energia para a bola, mas, às vezes, é uma coisa “imaterial” – fulano passa uma energia positiva para todos.

Na natureza, existem muitas formas de transferência de energia, o calor, as colisões entre partículas, as reações químicas etc., mas, entre todas, uma ganha um especial relevo, as ondas. Existe até um clichê – “as ondas não transportam matéria apenas energia”. Para o que segue, é importante analisar em mais detalhes o que é uma onda num meio. Usualmente, sistemas físicos têm configurações de equilíbrio estáveis. Quando esses sistemas são levemente perturbados e retirados dessa configuração de equilíbrio, é comum que eles tenham mecanismos de restauração que buscam fazê-los retornar à configuração de equilíbrio. Porém, ao ser perturbado e retirado de sua configuração de

equilíbrio, o sistema aumenta sua energia, assim ele não pode simplesmente voltar a sua configuração de equilíbrio, e isso o faz oscilar em torno dela. Como num pêndulo que você levanta até uma certa altura e o solta. Ele tende a voltar para a sua posição de equilíbrio, porém, devido a sua energia, ele continua se movimentando até uma dada altura e oscila em torno da posição de equilíbrio. Para entender as ondas num meio, podemos, por exemplo, tomar um cubo de gelatina. Uma pequena compressão num dos lados faz com que a gelatina comece a oscilar em torno da forma de equilíbrio. E pode-se observar que a deformação se propaga como uma onda na gelatina. Esse comportamento se estende a sólidos de forma geral. Se dividirmos mentalmente um cubo sólido em fatias, ao pressionar a fatia mais externa, ela se deforma, diminuindo seu volume; as forças elásticas internas fazem com que ela se expanda, buscando restaurar sua forma de equilíbrio. Na expansão, devido à energia adquirida pela compressão, ela se expande além da forma de equilíbrio, comprimindo a fatia adjacente que, através do mesmo processo, se comprime e se expande, fazendo com que esse processo se propague adiante. Isto é, através da compressão e expansão do meio, a onda se propaga, transferindo energia para as regiões seguintes. Portanto, a onda não é um ente material, mas sim uma forma peculiar de transferência de energia. E isso nos leva a uma das grandes controvérsias da história da Física. A luz é corpúsculo ou onda?

A materialidade da luz. A luz é corpuscular ou ondulatória?

Com a ajuda da luz, enxergamos o mundo, mas, embora percebida pela visão, a luz não pode ser tocada. A luz pode atravessar vidros, pode penetrar na água. A luz é um objeto aparentemente intangível que se espalha no espaço sem uma extensão definida, não é dura nem impenetrável. Em diversas culturas, ela é um símbolo da imaterialidade e, para muitas crenças, está associada à espiritualidade. Os mistérios da luz foram objeto de reflexão por pensadores como Descartes, Huyghens e Newton. Huyghens, um seguidor de Descartes, concebia a luz como um movimento ondulatório de um meio de matéria sutil, o éter. Newton, ao contrário, interpreta a luz como um ente material e consistente com sua concepção corpuscular e a concebe como um feixe de partículas. Interessante notar que Newton também acreditava na existência do éter,

porém, diferentemente de Descartes, considerava que certos efeitos ópticos poderiam ser explicados pela interação das partículas de luz com o éter.

Nas palavras de Augustin Fresnel [2],

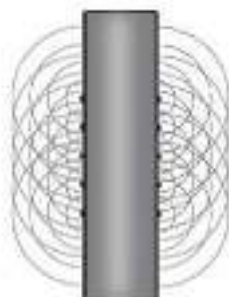
[...] os físicos, durante longo tempo, estão divididos quanto a natureza da luz. Alguns supõem que ela é lançada pelos corpos luminosos, outros pensam que ela resulta das vibrações de um fluido elástico extremamente sutil que se espalha pelo espaço, análogo às vibrações sonoras no ar. O sistema de ondulações é devido ao gênio de Descartes e Huyghens que, com muita habilidade, desenvolveu as consequências e que foi também adotado por Euler e, mais recentemente, pelo célebre doutor Thomas Young.

Com essas palavras, Fresnel inicia o seu Tratado da Luz [2], no qual vai defender e construir as bases de uma teoria ondulatória da luz. Fresnel se concentra, primeiramente, na difração, que são efeitos que a luz sofre ao passar nas extremidades de corpos. Segundo a teoria corpuscular da emissão, os raios de luz podem ser interpretados como trajetórias das partículas de luz. Esse modelo explicava, com sucesso, a reflexão e a refração, mas, para tratar a difração, tinha que apelar para hipóteses adicionais sobre a interação das partículas de luz com as bordas do objeto difrativo ou sobre efeitos do meio circundante. Sem hipóteses adicionais, a visão corpuscular da luz prevê que, ao passar por um orifício ou obstáculo, ela gera uma sombra cuja forma é dada pela projeção geométrica desse orifício ou obstáculo. No entanto, observa-se que a luz, ao passar por um orifício, espalha-se, alcançando regiões muito além da projeção geométrica. Por outro lado, quando passa por um objeto como uma agulha, ela forma padrões de franjas claras e escuras que se formam junto à sombra geométrica. A seguir, temos a figura de difração formada quando a luz passa por uma agulha estreita. Observem as franjas claras e escuras formadas próximas à sombra geométrica.



Fresnel vai se concentrar sobre esse fenômeno para explicar os padrões de claro e escuro das franjas. Para tanto, vai utilizar o princípio de superposição de Young e o princípio de Huyghens.

O princípio de superposição de Young diz que a soma de duas ou mais ondas é também uma onda. Ou seja, uma onda qualquer pode ser escrita como superposição de outras ondas. Uma onda num meio pode ser vista como a propagação de uma certa perturbação desse meio. Por exemplo, numa corda, a perturbação é o deslocamento vertical dos pontos da corda. Num ponto onde se vê a crista da onda, temos o deslocamento máximo, também chamado de amplitude da onda. No vale da onda, o deslocamento é também máximo, porém negativo. Quando duas ondas se superpõem numa corda, a perturbação, no caso o deslocamento vertical, é dado pela soma dos deslocamentos verticais das ondas que a formaram. Por exemplo, se gerarmos duas ondas numa mesma corda. A passagem da primeira onda num ponto está associada a um deslocamento vertical do ponto da corda de uma distância y e, da segunda onda, um deslocamento y' ; a passagem simultânea das duas leva a um deslocamento dado pela soma dos deslocamentos $y+y'$. Se ambos os deslocamentos estão no mesmo sentido, o deslocamento aumenta, e se diz que a superposição é construtiva. Se os deslocamentos são opostos, um para cima, y , e o outro para baixo, $-y'$, devido aos sinais opostos, o deslocamento resultante seria $y-y'$, e, nesse caso, temos uma superposição destrutiva. Esse efeito de superposição é válido não apenas para ondas numa corda, mas para ondas em geral. No caso da luz difratada pela agulha, a presença de franjas claras indica que a intensidade da luz se tornou maior devido a uma superposição construtiva. Nas franjas escuras, a superposição é destrutiva. Na literatura, superposição é também denominada de interferência.

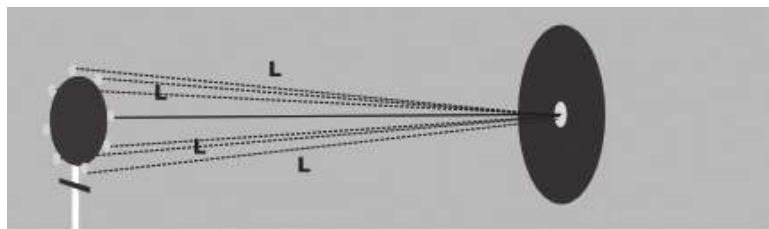


Fontes Virtuais

Os pontos pretos representam as fontes *virtuais* na *borda da agulha*.

As ondas criadas se superpõem, criando as franjas das figuras anteriores. Além do princípio da superposição, Fresnel utiliza o princípio de Huyghens, que afirma que a onda resultante, que descreve a luz gerada pelos efeitos da passagem pela borda de objetos, é igual a onda formada pela superposição de ondas geradas por fontes pontuais localizadas ao longo da borda. Essas fontes são chamadas fontes virtuais. Na figura a seguir, vemos as fontes virtuais como pontos pretos, emitindo ondas esféricas que se superpõem. A superposição das ondas geradas por essas fontes forma as franjas claras e escuras, correspondentes a regiões de interferência construtiva e destrutiva respectivamente.

Ao apresentar sua teoria sobre a difração na Academia Francesa, Fresnel foi desafiado por Poisson, que se opunha à teoria ondulatória. Analisando a teoria de Fresnel, Poisson observou que, se a teoria ondulatória é verdadeira, dela decorre que a luz, ao passar por um obstáculo circular, gera um ponto mais brilhante no centro da sombra geométrica. De fato, segundo o trabalho de Fresnel, a luz difratada é igual à onda gerada por fontes virtuais na borda do objeto circular. Nesse caso, se tomarmos fontes virtuais representadas por pontos em amarelo na figura a seguir, pode-se ver que todas estão equidistantes do ponto central da sombra, a uma distância L .



Portanto, as ondas geradas pelas fontes secundárias caminharão a mesma distância L , até o ponto central da sombra e chegarão em fase, isto é, crista com crista e vale com vale. Isso indica que os efeitos se somam construtivamente no ponto central da sombra, gerando um ponto central (mancha) mais brilhante (vide figura anterior). Essa previsão da teoria ondulatória poderia ser então testada experimentalmente. Poisson a considerava tão absurda que acreditava assim demonstrar a falsidade da teoria ondulatória. Entretanto, contrariando as expectativas de Poisson, Arago realizou o experimento e mostrou a existência da mancha. Esse resultado experimental teve um grande impacto e abriu o caminho para a aceitação da teoria ondulatória da luz. A luz, nessa concepção, era o efeito da ondulação num meio de matéria sutil, o éter.

A luz sobre os campos

Ao longo do século XIX, os trabalhos de Faraday, Maxwell e Hertz sobre os fenômenos elétricos e magnéticos culminaram com a formulação de uma nova teoria que, abandonando a concepção de forças agindo a distância instantaneamente, introduziu o conceito de campo. O conceito de campo foi desenvolvido por Faraday ao longo de décadas. Inicialmente, ele concebeu o campo como uma perturbação gerada pela ação contígua, isto é, interação entre vizinhos num meio material. Um exemplo paradigmático dessa ideia são as linhas formadas por limalhas de ferro colocadas na presença de um ímã. A limalhas vizinhas ao ímã se polarizam, (se imantam) e se orientam, apontando a extremidade com polaridade oposta à do ímã na direção do ímã. Por sua vez, a limalha imantada polariza a limalha vizinha, que polariza a limalha subsequente, gerando uma série de linhas ao longo das quais as limalhas estão orientadas. Essas linhas geradas no espaço são interpretadas como linhas do campo de forças. Observem que, nessa primeira interpretação de Faraday, o campo é um efeito no meio, gerado a partir da interação de contato entre vizinhos.

Ao longo de anos, Faraday investigou esses campos e linhas através de experimentos com cargas, ímãs, fios e em diferentes meios. Aos poucos, ele foi modificando sua interpretação original e, finalmente, passou a conceber o campo não como um efeito num meio, mas como uma entidade física que se estende no espaço, independente do meio. As linhas de campo seriam, então, uma forma de representar uma entidade real. Embora não tenha demonstrado,

Faraday sugere que a luz seria a propagação de vibrações ao longo das linhas de campo, análoga a uma onda em uma corda. Para Faraday, a velocidade finita dessa onda indicaria que o campo teria uma inércia e uma elasticidade, o que seria uma prova da sua materialidade. Faraday, em seus trabalhos, defende uma visão de matéria diferente da visão corpuscularista de Newton. Para ele, os campos de força são o fundamento da matéria e as partículas são singularidades dos campos. Numa imagem pictórica, as partículas seriam nós nas linhas de força. Essas ideias sobre as relações entre campo e partículas foram apresentadas por Faraday apenas como conjecturas que necessitavam de uma maior investigação.

Os trabalhos de Faraday se notabilizaram pela profundidade conceitual, pela argumentação fenomenológica e pelo rigor experimental, porém faltava a eles a formalização matemática. Notando a importância desses trabalhos, Maxwell se debruça sobre os resultados e constrói uma teoria matematizada para os fenômenos elétricos e magnéticos. A síntese dessa sua teoria encontra-se no conjunto das equações que levam o seu nome. Nelas, as relações dinâmicas entre os campos elétricos e magnéticos investigados por Faraday ganham corpo teórico e são qualitativa e quantitativamente estabelecidas.

A previsão mais importante da teoria de Maxwell foi que as conexões dinâmicas entre os campos elétrico e magnético criavam um ciclo restaurador que permitia a geração de uma onda eletromagnética. De suas equações, ele deduziu a velocidade da onda eletromagnética que foi identificada com a velocidade da luz. Essa previsão teórica foi confirmada pelos trabalhos de Hertz e, ao final do século XIX, tinha-se finalmente uma teoria ondulatória para a luz. Diferentemente de Faraday, Maxwell acreditava na existência do éter e concebia os campos como perturbações no éter.

Trabalhos experimentais e teóricos posteriores sepultaram a hipótese de existência do éter. A inexistência de um meio para propagação da onda luminosa implica que, no processo ondulatório, a energia é transferida através das variações das amplitudes dos campos elétricos e magnéticos e não através de oscilações de um meio. Isso dá aos campos o status de entidades físicas com existência própria, independente do meio e da matéria, corroborando as conjecturas de Faraday. Essa noção de campo nos coloca diante de uma entidade física que não é matéria no sentido Newtoniano, afinal não tem massa, nem é formado de partículas. Isso nos deixa numa situação delicada, pois ou damos

um status ontológico de ente físico a um objeto imaterial, ou então devemos questionar o conceito de materialidade newtoniano.

Observem que dar materialidade a algo, sem os atributos corpusculares, é um rompimento com uma visão clássica de materialidade, e podemos dizer de realidade. A teoria de campos de Maxwell Faraday, embora considerada clássica, mostra-se uma teoria física *que torna inteligível fenômenos que não nos parecem tão óbvios, mas que ainda assim permanecem misteriosos*.

Essa intangibilidade e “imaterialidade” dos campos eletromagnéticos repercutiu socialmente. Quando Landell de Moura, no Brasil, em 1893, e Marconi, na Europa, em 1896, fizeram as primeiras transmissões de rádio, muitos acharam que isso seria a justificativa científica da telepatia. Isso até levou alguns cientistas a proporem experimentos científicos para investigar a transmissão de pensamento através de ondas e também deu margem a várias atividades não tão científicas assim.

De volta à dualidade

Apesar do sucesso da teoria eletromagnética, a luz continuou a gerar surpresas. No mesmo experimento em que Hertz (1887) demonstra que a luz é uma onda eletromagnética, ele nota um fenômeno que viria abalar mais uma vez a teoria para a luz. No experimento, Hertz utiliza um circuito que funciona como gerador das ondas. Para sinalizar a geração da onda, o circuito foi aberto, e duas esferas de latão foram colocadas nas extremidades da abertura. A pequena distância e a alta tensão entre as duas extremidades permitiam a criação de faísca gerada pelo movimento de partículas carregadas entre as extremidades. No processo de geração da onda, as oscilações no circuito fonte geram oscilações nas cargas, causando faíscas entre as duas extremidades. A visualização da luz das faíscas serve para sinalizar que ondas estão sendo geradas. Por outro lado, o circuito receptor, isto é, a antena, é simplesmente um aro de cobre no qual, de forma similar, também foi feita uma pequena abertura com esferas de latão em cada extremidade. Como no circuito gerador, as esferas são separadas por uma distância pequena e mantidas à alta tensão. Quando as ondas são captadas, fazem com que as cargas na antena oscilem e gerem uma faísca entre esses terminais. A visualização da faísca sinaliza a captação da onda. Um dos problemas experimentais encontrados por Hertz era a pequena

intensidade da faísca, o que dificultava a observação. Para melhorar a visualização, Hertz tentou cobrir a região da faísca com uma caixa escura. Porém, ao invés de melhorar a visualização, notou-se uma diminuição na intensidade. A intensidade da faísca depende da quantidade de cargas entre os dois terminais de latão. Investigando esse resultado, Hertz observou que a faísca no circuito da antena diminuía sua intensidade quando a luz emitida pela faísca do circuito gerador era de alguma forma bloqueada. Para analisar a luz emitida pela faísca do gerador, Hertz interpôs um prisma de quartzo, decompondo a luz.

Analisando componente a componente, ele observou que a diminuição da intensidade ocorria quando a radiação luminosa na região do ultravioleta era bloqueada. Isto é, quanto mais ultravioleta, mais cargas são geradas entre as extremidades e maior a intensidade da faísca. Hertz fica intrigado com a dependência da intensidade com a frequência da luz incidente, porém não consegue obter uma explicação teórica e deixa o problema em aberto. Em 1897, J.J. Thomson investigava raios catódicos emitidos por placas metálicas (catodos) submetidos à alta tensão no interior de um tubo a vácuo. Analisando esses raios, Thomson concluiu que se tratavam de partículas carregadas que foram identificadas com elétrons. Em experimento posterior, Thomson modifica o experimento e incide luz ultravioleta sobre um cátodo metálico no interior do tubo de descargas, e observa que partículas eram emitidas do metal. Observando que tinha as mesmas propriedades dos raios catódicos, ele conclui que a luz ultravioleta era capaz de liberar elétrons de um metal.

Dando continuidade a essa linha de pesquisa, Philippe Lenard, ex-assistente de Hertz, montou um experimento específico para investigar esse efeito. Variando de forma controlada a intensidade e a frequência da luz incidente, Lenard analisou a quantidade de elétrons gerados pela incidência da luz.

Num metal, os elétrons estão aprisionados por um potencial cujo valor é denominado função trabalho. Para serem ejetados, os elétrons devem vencer essa barreira. Do ponto de vista clássico, a energia de uma onda, isto é, sua intensidade, é proporcional ao quadrado da amplitude da onda. Isso implica que o eletromagnetismo clássico prevê que o aumento do número de elétrons ejetados deveria ser proporcional ao aumento da intensidade da onda incidente e não deveria depender da frequência. Com intensidades muito baixas, as energias seriam insuficientes para o elétron vencer a energia da barreira. Porém, se os elétrons absorvessem energia contínua e gradualmente, após algum tempo,

teriam energia suficiente para escapar do metal. Ou seja, para um feixe de baixa intensidade, os elétrons só seriam emitidos após um certo tempo de retardo.

Variando as frequências e as intensidades da luz incidente, Lenard estudou a ejeção dos elétrons e mostrou que as previsões clássicas não eram confirmadas. Um dos resultados mais significativos mostra que, mesmo com uma intensidade muito baixa, mas com luz de frequências superiores a uma certa frequência crítica, os elétrons são ejetados sem nenhum retardo. Por outro lado, luzes com frequências inferiores à frequência crítica, mesmo com grandes intensidades, não causam ejeção de elétrons. Os resultados indicavam que a energia da luz parecia depender da frequência.

Em trabalhos anteriores sobre a radiação de corpo negro, Planck havia concluído que os átomos nas paredes de uma cavidade, a uma dada temperatura, absorviam e emitiam luz de forma quantizada, isto é, em múltiplos de uma quantidade fixa de energia, proporcional à frequência da luz. Essa conclusão de Planck indicava que os corpos materiais absorviam energia não continuamente, mas sim em pacotes de energia.

Ao interpretar os resultados do experimento de Lenard, Einstein vai estender as conclusões de Planck. Se, por analogia, pensarmos numa corda, a energia é absorvida pela corda através da formação de ondas de diferentes frequências. Por exemplo, a energia pode ser dada à corda através de um pulso que se propaga ondulatoriamente. Da mesma forma, pode-se pensar que, se uma das formas de campos eletromagnéticos se excitar, isto é, absorver energia, isso se dá através de um pulso.

Estendendo a ideia de Planck aos campos, Einstein vai propor que as excitações de um campo são também quantizadas. Isto é, o pulso, excitação elementar do campo eletromagnético, tem energia discreta e proporcional à frequência.

Essa interpretação de Einstein leva a uma outra conclusão surpreendente: como as ondas eletromagnéticas são capazes de transferir energia, momento e momento angular para outros corpos materiais, a excitação elementar do campo também o é. Dessa forma, esse quantum de excitação do campo interage com uma partícula material num determinado ponto do espaço e transfere momento linear e momento angular. Essas propriedades, usualmente associadas a partículas, dão aos quanta de excitação do campo uma

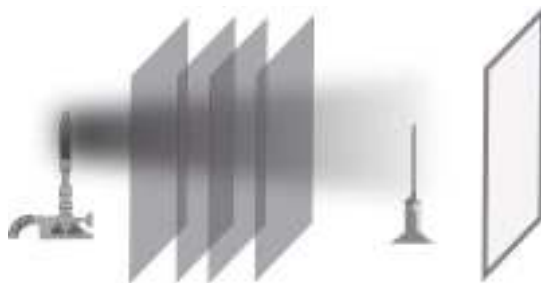
certa característica similar a das partículas, e assim foram interpretados como “partículas”, fótons. Mas será que essa interpretação faz do fóton uma partícula no sentido newtoniano do termo?

Essa interpretação não foi bem recebida pela comunidade científica pois, ao longo do século anterior, haviam-se acumulado evidências muito sólidas a favor da teoria ondulatória da luz. O respeitado J. J. Thomson, surpreso com esse resultado, lançou a seguinte questão:

[...] o que ocorreria com uma figura de difração se tivéssemos um feixe de luz com uma intensidade tão baixa que seria constituído por um número muito pequeno de fótons? Neste caso será que fenômenos como difração e interferência surgiriam ou apenas os aspectos corpusculares dos fótons seriam importantes?

Para responder experimentalmente a essa pergunta, Geoffrey I. Taylor, um respeitado pesquisador da época, escolheu, como objeto difrator, uma agulha fina, que interpôs entre a luz de uma chama de gás e uma placa fotográfica. Para calibrar seus resultados, ele, primeiramente, usou uma fonte, isto é, uma chama padrão, obtendo uma figura de difração com franjas claras e escuras idênticas às obtidas por Fresnel. Essa figura de difração foi tomada como figura padrão.

Para obter um feixe de baixa intensidade, Taylor tomou a mesma chama padrão utilizada anteriormente e interpôs telas sucessivas de material semiopaco entre a chama e a agulha.

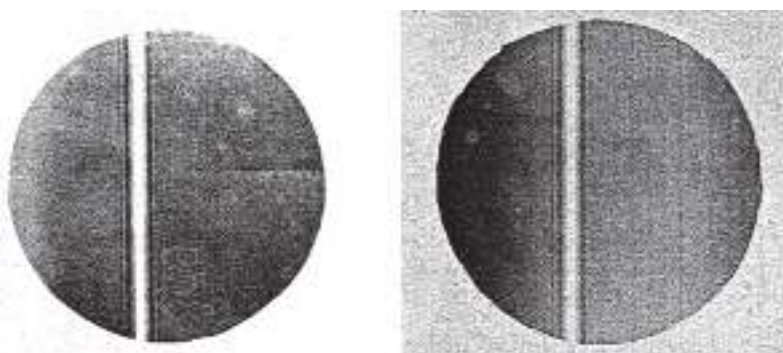


Esse material opaco deixa passar apenas parte da luz, diminuindo a sua intensidade. A luz de baixa intensidade incide sobre a agulha e gera uma figura na chapa fotográfica.

Para poder comparar essa com a figura padrão, Taylor é obrigado a compensar a perda da intensidade com um aumento do tempo de exposição. Em um dos experimentos, a intensidade do feixe era tão baixa que, para obter uma figura comparável com a figura padrão, Taylor fez uma exposição que durou 2000 horas, ou seja, três meses aproximadamente.

Na fotografia a seguir, temos o aparato utilizado por Taylor (*ref. 1 e 2*).

A fonte e as telas semiopacas, a agulha e tela fotográfica estão na parte interna do aparato. Na figura a seguir, temos os resultados de dois tempos de exposição.



Observem, na fotografia, uma faixa clara mais larga que corresponde aproximadamente à projeção da sombra geométrica da agulha. Lateralmente, na proximidade da extremidade dessa sombra, várias franjas claras e escuras verticais, similares as obtidas por Fresnel. Esse resultado é surpreendente, se analisarmos as condições do experimento. Para calibrar o experimento, Taylor utilizou uma chama padrão que, quando colocada a uma distância de 2 metros da placa fotográfica, gerava uma imagem bem definida em 10 segundos. A

nitidez de outras imagens, comparadas com a padrão, indica, aproximadamente, se a quantidade de energia absorvida pela placa fotográfica é a mesma. Como a intensidade de um feixe cai com o inverso do quadrado da distância, Taylor estimou que a intensidade do feixe mais atenuado é equivalente a colocar a chama padrão a uma distância de aproximadamente 1600 m. Utilizando dados sobre a intensidade de chamas padrão, Taylor estimou que o fluxo de energia, incidindo sobre uma área de 1 cm^2 , era de $5 \times 10^{-13} \text{ J/s}$. Com esse fluxo, ele estimou a densidade de energia na região entre as placas semiopacas e a placa fotográfica, no caso da exposição mais longa, 2000 horas. Para estimar o número de fótons por unidade de volume, Taylor supôs o comprimento de onda do feixe de luz por um valor intermediário $\lambda = 500 \text{ nm}$, entre 400 e 700 nm, que corresponde à luz visível. Com esse comprimento de onda, a energia do fóton como $E = hc/\lambda \approx 4 \times 10^{-19} \text{ J}$. Dividindo a densidade de energia pela energia de cada fóton, pode-se calcular o número de fótons por cm^3 $\rho_{\text{fótons}} = 4 \times 10^{-5} \text{ fótons/cm}^3$. Com um número tão pequeno de fótons, andando à velocidade da luz, numa distância de aproximadamente 1m entre as placas semiopacas e a placa fotográfica, pode-se concluir que eles chegam praticamente um a um à chapa fotográfica. O acompanhamento do experimento mostra que, lentamente, os fótons vão deixando marcas ao chegar na chapa fotográfica. Primeiramente essas marcas vão aparecendo em pontos aparentemente aleatórios da chapa. Só com o passar do tempo vai se formando a imagem de difração com suas franjas claras e escuras. Em outras palavras, se vistas isoladas, as marcas na chapa parecem ser a *signatura* de um feixe aleatório de partículas colidindo com a placa corpuscular. Porém o resultado final indica que essas “partículas” jamais alcançam os pontos de interferência destrutiva e tendem, com maior probabilidade, a marcar a tela nos pontos de interferência construtiva. Em resumo, cada um dos fótons se comporta como se obedecesse a uma dinâmica ondulatória. **Portanto**, não podemos dissociar o fóton da onda. Isto é, o quantum de excitação do campo que chamamos de fóton não é nem onda nem partícula, é um quanton.

Em resumo, se o pilar básico da materialidade newtoniana é a noção de partícula como algo extenso, duro, com massa e impenetrável, essa nova partícula, associada à excitação de um campo, nos obriga a repensar o conceito de partícula e conseqüentemente de matéria.

Ondas de matéria

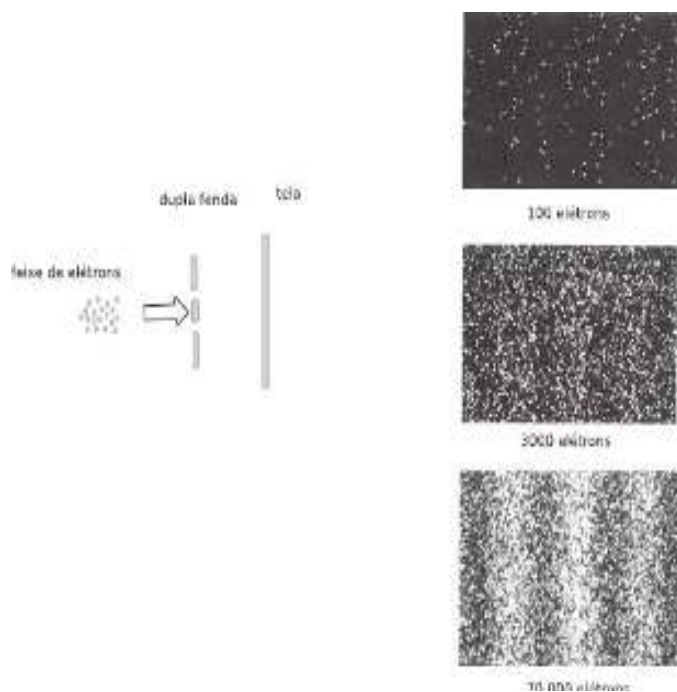
Não bastasse a perplexidade diante da luz, outros fenômenos iriam abalar de vez as concepções sobre a matéria. Ao longo dos primeiros anos do século XX, aprendeu-se que existiam objetos na natureza que não absorviam nem liberavam energia de forma contínua. As discrepâncias que haviam aparecido no estudo da radiação do corpo negro, ou no calor específico dos sólidos, e as evidências espectroscópicas indicaram que a quantização da energia era algo fundamental. A quantização, no caso do efeito fotoelétrico, levou a interpretar o fóton como uma entidade dual, isto é, uma excitação quantizada do campo que, ao mesmo tempo, tem propriedades comum às partículas.

Porém, De Broglie, em 1923, conjecturou que a dualidade deveria ser uma propriedade fundamental da natureza, e que mesmo as partículas massivas como elétrons e átomos deveriam ser duais. Essa conjectura, corroborada pelos experimentos de Davidsson e Germer, mostrou que, de maneira similar ao feixe de fótons, um feixe de elétrons, ao incidir sobre um cristal, gera um padrão de difração. Esse resultado contraria a concepção de elétron como uma partícula com características newtonianas. Embora fosse considerado uma partícula massiva, sua dinâmica não segue as leis da mecânica.

A difração de elétrons mostra que as trajetórias dos elétrons não são governadas pelas leis de Newton. Os resultados de difração indicavam que o seu percurso, passando pelo cristal e chegando até o detector, era ditado pela superposição de ondas. Mais recentemente, com o avanço tecnológico, foi possível planejar experimentos mais simples e controlados com elétrons. Em 1989, Tonomura *et al* [8] realizaram uma experiência que era uma mistura de duas experiências famosas feitas com a luz. A primeira, a experiência de interferência em duas fendas de Thomas Young, e a segunda, a experiência de Taylor, que descrevemos anteriormente. Tonomura, de forma similar a Taylor, utiliza um feixe de baixíssima intensidade, e, através de aparelhos adequados, cria um sistema que funciona como duas fendas que se interpõem entre a fonte de elétrons e uma placa de detecção. A fonte lança elétrons numa taxa tão baixa que, quando um elétron é detectado, o elétron seguinte ainda não foi sequer emitido. Isso garante que os elétrons cheguem um a um à placa de detecção.

Na figura a seguir, vemos do lado direito um retrato da placa de detecção em diferentes instantes, com diferentes números de elétrons detectados.

Na placa superior à direita, vemos o resultado após 100 elétrons serem detectados. Observem que, um a um, os elétrons vão marcando a tela em pontos aparentemente aleatórios.



Com 3000 elétrons, a tela começa a ser preenchida, e um certo padrão começa a se manifestar. Com 70 000 elétrons, vê-se, claramente, um padrão com regiões mais claras e outras mais escuras. A experiência de duas fendas de Young, com luz monocromática, já havia demonstrado que as superposições construtivas e destrutivas das ondas eram responsáveis pelas regiões claras escuras. O resultado obtido por Tonomura exhibe, na placa, esse mesmo padrão de interferência.

Observem que, inicialmente, a aleatoriedade aparente das marcas nas telas mostra que o elétron não tem uma trajetória definida e previsível, mas que, com o aumento do tempo, os pontos onde o elétron foi detectado correspondem a configurações que respeitam o padrão de interferência. Isto é, os elétrons obedecem a uma dinâmica ondulatória. Perde-se a noção de trajetória e de localização bem definida. O elétron assim descrito é quase uma definição de uma não partícula, apesar de ser um objeto massivo. Embora, na literatura,

seja usual dizer que o elétron é um objeto que ora é onda, ora é um corpúsculo, talvez devamos concebê-lo como um quanton. Aliás, afirmar que o elétron é uma onda é um certo contrassenso, afinal uma onda é apenas uma forma de transportar energia, o que lhe dá um status ontológico distinto do de uma partícula.

Por analogia ao fóton, podemos conjecturar se o elétron não seria a excitação de um campo, mas essa discussão foge do nosso escopo e vamos deixar essa questão em aberto.

Já que os corpos, em nosso dia a dia, não exibem esse tipo de comportamento, podemos nos perguntar se essa dualidade se restringe aos objetos mais simples e menores. Será que apenas os objetos simples, como os elétrons, prótons e nêutrons, são quanta? Mais recentemente, a fim de testar os limites da Mecânica Quântica, alguns grupos fizeram experimentos de difração e interferometria com macromoléculas. Essas moléculas são tão grandes que alguns imaginavam que elas se comportariam classicamente.

O grupo de Anton Zeilinger, da Universidade de Viena [6,7], criou feixes de moléculas como o Fulereno, constituído de 60 átomos de Carbono, e a porfirina, uma macromolécula orgânica.



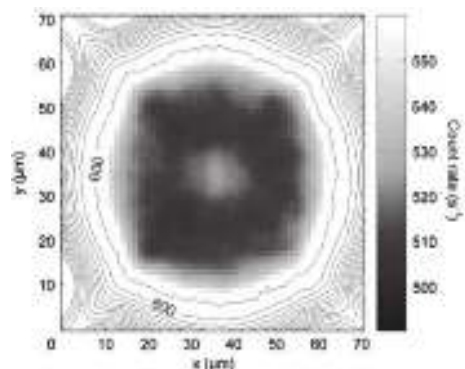
Fulereno



Porfirina

Conseguiram criar feixes de baixa intensidade e incidiram esses feixes sobre redes de difração nanoscópicas, obtendo padrões de interferência similares ao de Tonomura. Em 2009, T. Reisinger *et al.* [9] realizaram um

experimento similar ao de Arago para a mancha de Poisson, utilizando um feixe de deutério molecular. Os resultados de Reisinger estão na figura a seguir. A mancha branca no centro da placa de detecção exhibe o mesmo padrão encontrado no experimento de Arago.



Se esse experimento serviu de base para questionar a teoria corpuscular da luz, ele também, de forma bastante contundente, indica que conceito de partícula newtoniano não pode ser aplicado a objetos massivos como moléculas de deutério e, sem dúvida, nos faz questionar o conceito de matéria como agregado de partículas’.

À guisa de inconclusão

A materialidade é comumente associada àquilo que é percebido pelo conjunto de nossos sentidos. Corpos com fronteiras bem definidas, delimitando a extensão no espaço, notados pela visão ou pelo tato. Através dos sentidos, criamos a noção de concretude, isto é, as coisas se diferenciam do vazio porque são extensas, duras e impenetráveis, preenchidas por uma coisa concreta a que chamamos genericamente de matéria.

Essa concepção está associada à Física Clássica, porém, para não recairmos num simplismo, tem-se que frisar que a Física Clássica foi muito além do senso comum e da intuição cotidiana. As teorias clássicas representam o mundo numa linguagem matemática sofisticada e abstrata, e utilizam conceitos que vão além das explicações sensoriais. Apesar disso, as explicações e previsões da ciência clássica parecem se harmonizar com as nossas percepções. Não há conflito em conceber corpos se movendo e se chocando, sendo

aprisionados ou liberados. Podemos, com facilidade, conceber uma onda como um movimento periódico de um meio material, afinal, percebemos o subir e o descer da superfície do mar. Podemos, com facilidade, aceitar, numa generalização intuitiva, que os corpos contínuos, gases, líquidos e sólidos são formados por partículas menores, mesmo que não as vejamos. Às vezes, as concepções de senso comum entram em conflito com as visões científicas clássicas, mas, vencendo certas barreiras criadas pelas sensações e intuições e ou crenças sociais, os resultados da Física Clássica nos trazem explicações que tornam óbvios muitos fenômenos misteriosos. Em grande parte, essa aceitação e a harmonização entre explicações de senso comum e científicas têm como base comum o conceito tradicional de realidade material baseada na ideia de matéria como agregado de partículas.

É essa concepção que é questionada quando se constata que o espaço que percebemos como vazio é, de fato, preenchido por campos elétricos e magnéticos invisíveis, intangíveis. Os campos não são agregados de partículas que podemos tocar, eles nos parecem entidades imateriais, mas que, apesar disso, interagem com a matéria, carregando e transferindo energia. Por outro lado, aquelas entidades fundamentais, chamadas partículas, têm que ser ressignificadas. Quando chamamos um objeto sem massa, gerado por um campo, o fóton, de partícula, estamos muito longe da noção de partícula newtoniana. Talvez, apenas por hábito, nós o chamamos de partícula.

Na continuidade, nós nos deparamos com algo mais surpreendente, isto é, objetos massivos, usualmente interpretados como partículas newtonianas como elétrons, átomos e moléculas, que, ao passarem por obstáculos, não se comportam como tal. Se seguirmos a mesma linha de pensamento que nos levou aos fótons, podemos nos perguntar se as partículas não seriam excitações de um campo de matéria. Nesse caso, os campos e não as partículas formariam a base de toda a matéria.

Neste texto, não vim apresentar conclusões, mas sim tentar mostrar que, ao falarmos sobre esses objetos quânticos, estamos implicitamente questionando conceitos de materialidade e imaterialidade, e que esses conceitos entram em conflito com os nossos pensamentos mais arraigados, originados tanto do senso comum quanto na ciência clássica. Esse conflito gera interpretações e conjecturas que mobilizam a comunidade dos físicos, dos filósofos e, também, várias comunidades não acadêmicas. Os resultados científicos

conflitantes com crenças arraigadas e com intuições do senso comum criam, muitas vezes, obstáculos para o entendimento mais profundo e para o ensino e aprendizagem dessa área.

As questões envolvendo a concepção de materialidade e imaterialidade nos fenômenos físicos são, frequentemente, associadas aos velhos debates sobre corpo e mente, matéria e espírito, e isso faz crescer o interesse sobre o assunto. Diferentes comunidades interpretam e ressignificam, bem como se apropriam desses conceitos segundo seus próprios padrões. Um exemplo disso é a enorme penetração social da Mecânica Quântica. Reconhecidamente, um dos temas científicos mais abstratos e de difícil entendimento se tornou um verdadeiro fenômeno cultural. Artistas, místicos, religiosos, psicólogos, médicos e até economistas têm se apropriado de conceitos quânticos. Historicamente, grupos sociais mais diversos sempre se apropriaram do conhecimento científico, e não podemos evitar, mas devemos, sem dúvida, tentar entender que ele tem implicações sociais que nem sempre são positivas. Nesse caldeirão de interpretações, a concepção de matéria e materialidade é, sem dúvida, uma questão central.

Os resultados da Física Moderna nos levam a explicações e teorias que tornam fenômenos inteligíveis, mas nem por isso os tornam óbvios, e nem os tornam menos misteriosos.

Referências

- [1] GREENSTEIN G.; ZAJONC, A. G. *The Quantum Challenge*. United States of America: Jones And Bartlett Publ, 2006, 224p, ISBN 13:978-0763724702.
- [2] SENARMONT, H. H.; VERDET, E.; FRESNEL, L. *Oeuvres Complètes D'Augustin Fresnel*- Editeur Imprimerie Imperiale-1866. Disponível em: <<https://books.google.fr>> Acesso em: 15 jul. 2015.
- [3] DE SOUZA CRUZ, F.F. *Faraday& Maxwell: Luz sobre os campos*. São Paulo: Odysseus Editora, 236 p, 2005- ISBN 978-85880223376.
- [4] TAYLOR, G.I. *Interference fringes of feeble light-Proceedings of Cambridge Philosophical Society*. Vol XV, p.114 -115. 1909.
- [5] ZEILINGER, A; GAHLER, R.; SHULL, C. G.; TREIMER, W.; MAMPE, W. "Single- and double-dlit diffraction of neutrons". *Rev. Mod. Phys.* 60, p.1067-1073, 1988.

[6] NAIRZ, O.; ARNDT, M.; ZEILINGER, A. “Quantum interference experiments with large molecules”. *Am. J. Phys.* 71, 319: 2003. doi: 10.1119/1.1531580.

[7] TONOMURA, A.; ENDO, J.; MATSUDA, T.; KAWASAKI, T. “Demonstration of single Electron Build up of an interference pattern”. *Am. J. Phys.* 57, p.17-120,1989.

[8] REISINGER, T. “Poisson’s Spot with molecules”. *Phys. Rev. A* 79, p.053823, 2009.



O que mantém prótons e nêutrons juntos no núcleo

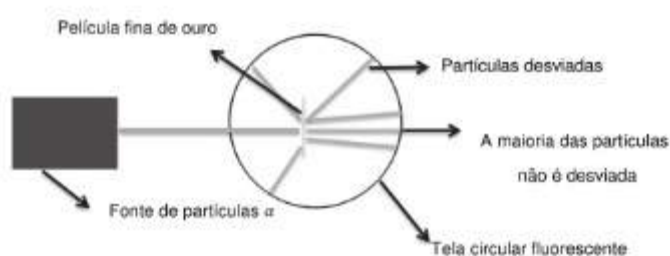
Sebastião Alves Dias (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, CBPF/MCTI)

Resumo

Uma das interações conhecidas como “fundamentais” é a interação forte, responsável pela coesão do núcleo atômico. Nesta palestra, vamos percorrer, de maneira informal, o caminho histórico que levou à atual concepção da Cromodinâmica Quântica, a teoria que atualmente pretende descrever a interação forte.

I. O núcleo atômico, esse mistério...

Em 1909, os físicos Ernest Rutherford, Hans Geiger e Ernest Marsden enviaram partículas α (núcleos de Hélio) para colidir com átomos de ouro e obtiveram resultados surpreendentes, levando em conta o modelo vigente para a estrutura atômica. Pensava-se, então, que a carga positiva do átomo encontrava-se diluída pelo seu volume, com os elétrons incrustados como passas num bolo. Esperava-se, então, que essa carga positiva diluída acarretasse pequenos desvios de trajetória das partículas α . Não foi isso o que se viu. Ao contrário, quando havia desvios, eles eram imensos e indicavam que a colisão se realizara em pontos isolados e não aos poucos dentro de um volume. Após análises exaustivas, em 1911, os físicos ficaram convencidos de que os átomos eram compostos de elétrons (carga negativa) orbitando uma região pequena onde se concentrava a carga positiva. Essa região ficou conhecida como núcleo atômico. O volume ocupado pelo átomo era, principalmente, espaço vazio.



Experimento de Geiger-Marsden-Rutherford

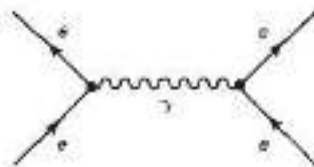
Vários anos depois, em 1932, James Chadwick descobriu o nêutron e pavimentou o caminho para um modelo do núcleo atômico que o considerava formado por essas partículas e por prótons. Conforme lembra o nome, os nêutrons não possuem carga elétrica e, portanto, não são atraídos ou repelidos eletromagneticamente pelo próton. Os prótons, por serem todos de carga positiva, têm a tendência de se repelirem entre si. Um cálculo simples também mostra que a interação gravitacional (atrativa!) é fraca demais para conseguir mantê-los juntos. Assim, vemos que a pergunta que dá título à palestra surge naturalmente: o que mantém prótons e nêutrons juntos no núcleo?

Vale lembrar qual era o panorama da Física daquela época. Na virada do século, Max Planck deu origem à revolução quântica, propondo que a energia contida no campo eletromagnético se manifestava em múltiplos de quantidades bem definidas, chamadas por ele de *quanta*. Nos anos que se seguiram, foi ficando cada vez mais claro que era necessário modificar as noções da Física Clássica quando se tratava de sistemas de dimensões atômicas. O conjunto de novos princípios e postulados que foi construído por diversos físicos como Niels Bohr, Louis De Broglie, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger e muitos outros foi denominado Mecânica Quântica.

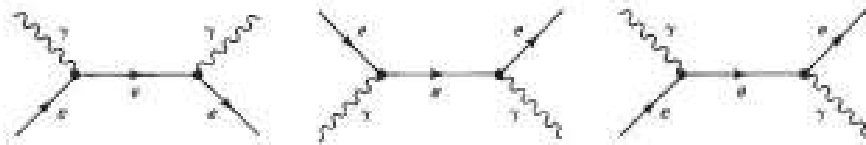
Por outro lado, em 1905, Einstein propôs outro tipo de modificação nos fundamentos da Física, ao alterar as leis que conectavam referenciais inerciais, estabelecendo a constância da velocidade da luz para quaisquer observadores em movimento relativo uniforme. Tais mudanças deveriam ocorrer sempre que o fenômeno sob estudo envolvesse velocidades comparáveis à velocidade da luz. As consequências das novas leis eram tremendas: mudança de

comprimentos e do ritmo da passagem do tempo, dependendo do observador, massa dependente da velocidade, nova relação entre energia e velocidade etc. A nova teoria recebeu o nome de Relatividade Especial.

Ambas as propostas já eram bem aceitas no início da década de 1930. Elas forneceram explicações teóricas (quantitativas!) para fenômenos que não tinham descrição pela Física do século anterior, alcançando enorme legitimação. De fato, nessa época, a Mecânica Quântica e a Relatividade Especial tiveram que ser trazidas para a mesma arena, pela necessidade de uma descrição consistente da Eletrodinâmica (cujos efeitos se propagam à velocidade da luz) em sistemas de dimensões atômicas ou menores. As grandes contribuições dessa época foram de Paul Dirac, cuja teoria, ao juntar os princípios das duas outras, introduziu a visão da interação eletromagnética como se dando através da troca de partículas intermediárias (no caso, o fóton), fez a previsão da existência de antipartículas (partículas de mesma massa e carga elétrica oposta à de suas contrapartes) e previu processos de criação e aniquilação de partículas. A teoria resultante foi chamada de Eletrodinâmica Quântica (cuja abreviação, em inglês, é QED) e produziu uma descrição extremamente precisa das interações eletromagnéticas em escalas atômicas¹.



Elétrons interagindo através da troca de um fóton



Processos de interação entre elétron e fóton

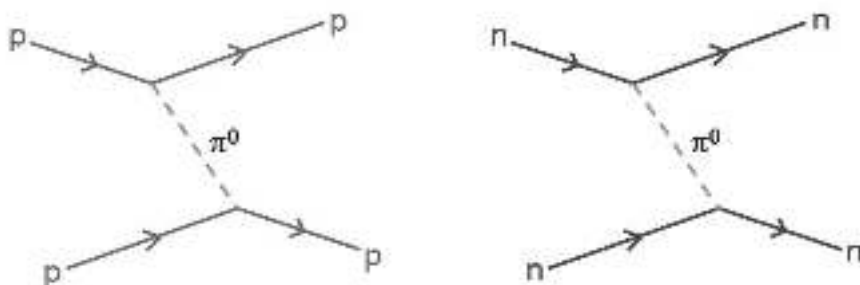
1 Richard Feynman, um dos físicos que mais contribuiu para o desenvolvimento da QED, usa a seguinte imagem para ilustrar o grau de precisão atingido com esta teoria: “se fosse medida a distância de Los Angeles a Nova Iorque com esta precisão, o erro não seria superior à espessura de um cabelo humano” (em seu livro *QED: a estranha teoria da luz e da matéria*. Lisboa: Gradiva, 1988).

II. Mensageiros da interação

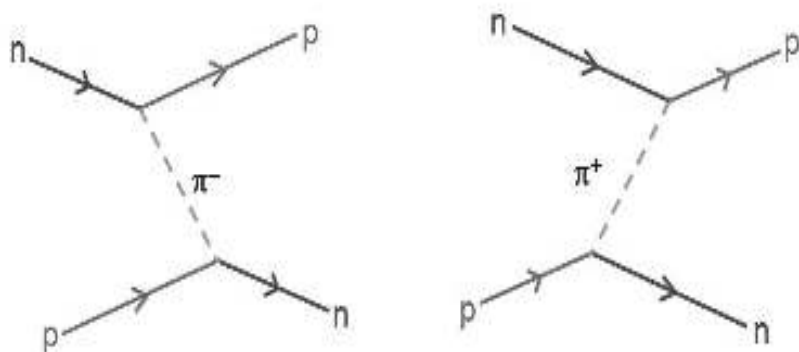
O sucesso da QED na descrição da interação eletromagnética no domínio quântico-relativístico fez com que as primeiras tentativas de entender a situação dos prótons e nêutrons fossem nela inspiradas. Particularmente atraente era a perspectiva de que, na QED, a interação fosse explicada pela troca de fótons, movendo-se à velocidade da luz, emitidos e absorvidos pelas cargas elétricas em interação. Esse quadro acabava com o fantasma da “ação à distância”, que tanto perturbou os físicos, desde Isaac Newton. Assim, já em 1935, Hideki Yukawa propunha uma explicação para o que mantinha juntos prótons e nêutrons: haveria novas partículas, chamadas por ele de mésons, que desempenhavam um papel similar ao do fóton na QED, intermediando a interação e sendo emitidos e absorvidos pelos prótons e nêutrons. A interação propiciada por esses mésons ficou conhecida como interação nuclear forte, devido à sua magnitude, quase 100 vezes mais intensa que a eletromagnética.

Havia algumas diferenças importantes, no entanto. O fato de nêutrons poderem se transformar em prótons (emitindo um méson de carga negativa, para manter a conservação da carga elétrica) e vice-versa (o que requeria mésons de carga positiva, pela mesma razão), além das interações normais entre nêutrons e prótons, fazia com que devessem existir três tipos de mésons (positiva e negativamente carregados e neutros). O curto alcance da interação entre os nucleons (nome genérico para prótons e nêutrons, já que, descontada a carga elétrica, eles pareciam diferentes estados da mesma partícula) foi tratado com a previsão de que os mésons tivessem massa, o que representava outra diferença marcante em relação ao fóton.

Os mésons previstos por Yukawa (chamados mais tarde de mésons π^0 , π^+ e π^-) foram descobertos em 1947 por César Lattes, Cecil Powell e Giuseppe Occhialini, capturando raios cósmicos no alto do monte Chacaltaya, na Bolívia. A descoberta foi muito importante para reforçar a visão das interações fundamentais como mediadas por partículas, seguindo o modelo da QED.



Interação forte entre prótons e entre nêutrons

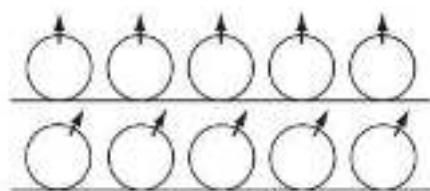


interações fortes mudando nêutrons em prótons e vice-versa

III. Uma tentativa geométrica: as teorias de Yang-Mills

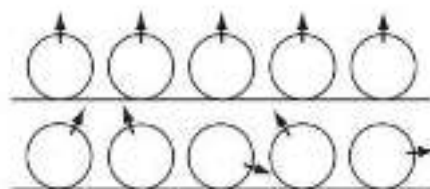
Embora Yukawa tenha usado argumentos fisicamente sólidos e elegantes para propor os mésons π , não havia uma teoria dinâmica completa, baseada em princípios universais, que pudesse prever suas interações e efetuar cálculos diretos de suas propriedades. Como prótons se transformavam em nêutrons e vice-versa, Heisenberg, já nos anos 1930, havia proposto que o ente fundamental da teoria não deveria ser uma partícula ou a outra e sim o nucleon. Este, graças às características da Mecânica Quântica, podia ser visto como uma mistura de um próton e um nêutron. Os pesos com que prótons e nêutrons entravam nessa combinação poderiam ser quaisquer, o que impunha que a teoria fosse simétrica pela troca desses pesos. O resultado foi a generalização do conceito de *spin* (rotações num espaço interno da partícula, misturando

spin *up* com spin *down*) para o conceito de *isospin* (rotações no espaço interno do nucleon, misturando próton e nêutron). Essas rotações aconteceriam globalmente (os espaços internos dos nucleons rodariam pela mesma quantidade, independente do ponto do espaço-tempo onde o nucleon estivesse localizado). A presença dessa simetria de rotações internas global foi importante para descrever diversos aspectos das interações nucleares conhecidos à época. No entanto, restava a questão de qual seria a maneira matematicamente correta e fisicamente consistente de propor a interação entre os nucleons.



Rotações globais do isospin dos nucleons

Em 1954, Chen Ning Yang e Robert Mills deram um passo além. Eles propuseram que a simetria de isospin global fosse transformada em local (ou seja, que as rotações do espaço interno pudessem ocorrer independentemente em cada ponto do espaço-tempo). O requerimento de que a simetria fosse local levava à previsão de tipos específicos de interações entre os nucleons, mediadas pelos mésons π e entre eles mesmos. A QED possuía uma simetria local mais simples, que não levava à interação entre fótons. Portanto, a interação entre os píons era uma proposta nova e ousada para descrever as características da interação nuclear forte.



Rotações locais do isospin dos nucleons

Embora a proposta de Yang e Mills fosse muito atraente, do ponto de vista teórico, ela tinha um problema imediato. Para que a simetria de isospin

local não fosse quebrada, era necessário que os píons fossem partículas sem massa, em flagrante desacordo com o que tinha sido medido a respeito deles. Os píons também pertencem a uma classe de partículas chamadas de pseudoescalares, enquanto a teoria de Yang-Mills previa que eles fossem vetores (segundo mudanças de referencial inercial, implementadas pela Relatividade Especial). Tudo isso fez com que essa teoria fosse colocada de lado nos anos 1950, sendo retomada, no entanto, no final dos anos 1960, como veremos.

IV. Quarks

Desde a descoberta dos mésons π , começaram a ser descobertas mais e mais partículas, com massas e spins cada vez maiores e novas propriedades misteriosas. Elas receberam a denominação coletiva de hádrons. Dentre os hádrons, aqueles com spin inteiro (0, 1, 2,...) foram denominados mésons. Os de spin semi-inteiro ($1/2, 3/2, 5/2, \dots$) foram chamados de bárions (o próton e o nêutron são bárions de spin $1/2$). O fato de o spin ser inteiro ou semi-inteiro tem consequências profundas sobre o comportamento dessas partículas. Partículas de spin semi-inteiro não ficam juntas no mesmo nível de energia, devido ao princípio de exclusão de Pauli (que ajuda a entender a estrutura eletrônica dos átomos, por exemplo). As de spin inteiro admitem compartilhar níveis de energia e podem se organizar em novos estados da matéria, chamados de condensados de Bose-Einstein.

Essa multidão de partículas tornou o problema de formular uma descrição teórica das interações fortes crescentemente complexo. No início dos anos de 1960, estava bastante claro, para todos os que acompanhavam as descobertas, que essas novas partículas não podiam ser todas elementares.

Novamente foram chamadas à cena as simetrias, para ajudar a organizar o cenário. Muitas propriedades das interações fortes foram descobertas como consequência das simetrias, mas faltava ainda uma teoria que explicasse a dinâmica dessas interações e o porquê da profusão de partículas interagindo fortemente. Usando técnicas matemáticas relacionadas à classificação de simetrias, Murray Gell-Mann e George Zweig, em 1964, mostraram que todos os hádrons podiam ser pensados como constituídos por partículas elementares (não constituídas de outras partículas): os quarks. Suas ideias foram

espetacularmente confirmadas ao ser encontrada uma partícula, a Ω^- , prevista pelo modelo de quarks, com a massa, o spin e o isospin esperados.

Os bárions seriam compostos por três quarks, e os mésons, por um quark e um antiquark. Eles teriam massa, spin $1/2$ e carga elétrica fracionária. Além disso, os quarks deveriam ter ainda um novo atributo, que foi chamado arbitrariamente de cor. Cada quark poderia se apresentar em três cores (vermelho, verde e azul)², mas os hádrons não mostram cor alguma. Isso introduz uma nova simetria nas interações fortes: a simetria por misturas de cores entre os quarks. As cores se constituem num espaço interno dos quarks, e podemos fazer rotações arbitrárias nesse espaço, da mesma maneira como fazíamos no caso do isospin.

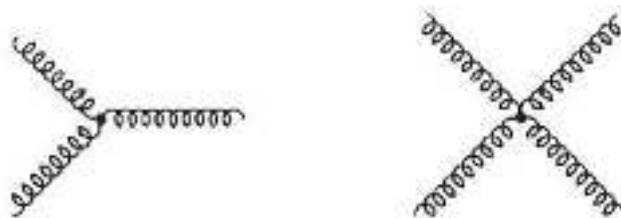
O fato experimental de que não existem partículas “coloridas” é impressionante. É estranho pensar que os hádrons são todos montados a partir de quarks e que nenhum deles possui cor. Parece existir algum princípio fundamental por trás desse fato, e os físicos expressaram isso dizendo que a cor está confinada dentro dos hádrons. O confinamento se juntou aos mistérios aguardando solução na Física de Partículas Elementares.

V. A volta das teorias de Yang-Mills

Embora o modelo de quarks tivesse representado um grande progresso para o entendimento dos hádrons, ainda era necessário propor a forma pela qual os quarks interagiam. Isso foi levado adiante por vários físicos, independentemente e em cooperação, dentre os quais o próprio Gell-Mann. A tentativa mais bem-sucedida foi baseada numa retomada das teorias de Yang-Mills. Para isso, a simetria associada à cor foi promovida de global a local, da mesma forma que havia sido proposta para o isospin. No entanto, como agora temos três cores (ao invés dos dois estados de isospin da teoria original de Yang-Mills), a simetria a ser imposta requererá a presença de oito partículas intermediárias análogas ao fóton (e não três, como anteriormente). Essas oito partículas foram chamadas de glúons. A função dos glúons no modelo é fazer

2 É preciso destacar que não estamos falando de cor no sentido usual, da óptica. Tudo funcionaria igualmente bem se o atributo em questão fosse chamado de “atributo X” e os valores possíveis desse atributo fossem x_1 , x_2 e x_3 .

a comunicação entre os quarks, mas eles também interagem diretamente entre si (mais uma vez, diferente do que acontece com os fótons).



Glúons interagindo diretamente entre si

A teoria resultante foi chamada Cromodinâmica Quântica (em referência à cor como ponto de partida para a proposição da interação). Sua sigla, em inglês, é QCD. Em 1973, David Gross e Frank Wilczek, num trabalho conjunto, e David Politzer, independentemente, mostraram que a QCD tinha uma propriedade muito interessante: a intensidade da interação diminuía à medida que a escala de distâncias do processo considerado diminuía (e aumentava à medida que as distâncias aumentavam). Essa propriedade foi chamada de liberdade assintótica e representou a possibilidade de incorporar o confinamento na descrição teórica das interações fortes. Uma analogia para entender como isso pode acontecer é imaginar a interação forte como uma mola com dois quarks presos em cada ponta: quanto menos você a puxa, menos forte ela puxa de volta (os quarks estão aproximadamente livres); se a puxamos para longe da posição de equilíbrio, ela puxa de volta cada vez mais forte (a interação vai aumentando). Se forçássemos muito mais a mola, tentando retirar os quarks de suas extremidades, ela se partiria em duas, com pares quark-antiquark sendo criados nas novas extremidades de cada uma das novas molas. Dessa maneira, continuaríamos a ver estados compostos de quarks e não observaríamos a cor diretamente.

A QCD continua a ser testada nos dias atuais, até o momento, com enorme sucesso. No entanto, há muitos desafios, tanto teóricos quanto experimentais, a serem superados por essa teoria. Ainda está distante o dia em que nos daremos por satisfeitos com a resposta que ela oferece à pergunta que motivou esta palestra.

Para aprender mais sobre partículas elementares e suas interações, uma boa leitura é o livro *O discreto charme das partículas elementares*, de Maria Cristina Batoni Abdalla (Ed. UNESP, 2006, São Paulo).

VI. Agradecimentos

Agradeço a todos do Centro de Ciências da Universidade Federal de Juiz de Fora pela calorosa recepção e pelo ambiente muito agradável proporcionado durante minha estadia. Em especial, agradeço ao professor Thales Costa Soares, pelo convite para dar esta palestra e pelo incentivo e amizade, em tantos anos de luta conjunta em prol da melhoria do Ensino de Física em nosso País.

Quebra Espontânea de Simetria e a Transição de Fase Ferromagnética

Humberto Belich¹
Thales Costa Soares²
Thiago Prudêncio³

Resumo

Simetrias e leis de conservação são excelentes guias na formulação de modelos físicos em diversas escalas de energia. A violação de simetrias por transição de fase (violação espontânea de simetria) consegue descrever sistemas que vão desde a Matéria Condensada até a Física de Altas Energias. Nessas notas iremos apresentar um desenvolvimento conceitual dessas ideias e como elas evoluem para a formulação do Mecanismo de Anderson-Higgs que unifica o Eletromagnetismo e a interação Fraca, e contextualizar os campos de Higgs, cuja excitação acaba de ser verificada no LHC.

I. Introdução

É notável o desenvolvimento que a ciência e a tecnologia tiveram nas últimas décadas. Particularmente em Física, ao longo do século passado, vimos o nascimento e consolidação da Mecânica Quântica, com notáveis aplicações que deram um impulso ao desenvolvimento econômico como nunca visto

-
- 1 Departamento de Física e Química – Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, Av. Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras, 29060-900, Vitória, ES, Brasil.
 - 2 IF Sudeste MG – Juiz de Fora; Centro de Ciências UFJF; GFT/JLL e Grupo de Física Aplicada IF Sudeste MG
 - 3 Coordenação Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia - CCCT – Universidade Federal do Maranhão – UFMA, Av. dos Portugueses, 1966, Bacanga, 65080-805, São Luís - MA

antes. Em 1956, com as pesquisas em semicondutores e a descoberta do transistor, por John Bardeen [1], William Bradford Shockley e Walter Houser Brattain possibilitaram novas perspectivas teóricas e desenvolvimento de dispositivos eletrônicos.

Essa nova visão dos processos do mundo microscópico, gerado pela Mecânica Quântica, demorou a se estabelecer na área relacionada aos processos com maior energia, tais como a Física de Partículas, e a teoria que se propõe a explicá-la de maneira unificada, a Teoria Quântica de Campos. O iniciador desses métodos, de maneira consistente, em Física de Altas Energias, foi P. A. M. Dirac.

Em sua tese, concluída em 1926, Dirac desenvolveu uma versão da Mecânica Quântica, incorporando a Mecânica Matricial de Werner Heisenberg com a Mecânica Ondulatória de Erwin Schrödinger a partir de um único formalismo matemático [2]. No período de 1927 a 1931, Dirac inicia uma série de estudos que estão interligados e que vão da quantização do campo eletromagnético à formulação de uma equação relativística para o spin do elétron, o acoplamento do elétron ao campo eletromagnético e considerações sobre uma possível estrutura do elétron, o que influenciou toda a Física do século XX.

Até Dirac, toda a contribuição relativística do elétron, em uma descrição quântica, como na descrição das raias espectrais do átomo de hidrogênio, era realizada como contribuições perturbativas ao tratamento não relativístico. Mas Dirac acreditava que a Relatividade Restrita, por ser um fundamento, devesse estar presente em uma formulação *a priori*, e não entrar como correções de uma teoria. Deveríamos partir da simetria relativística do espaço-tempo na própria formulação da mecânica quântica.

Dirac foi o primeiro a formular, de forma apropriada, a quantização do campo eletromagnético e a realizar o acoplamento do campo eletromagnético ao elétron. Desse modo, ele propõe o que chamamos de simetria de calibre; no caso do acoplamento com o elétron, o grupo de simetria é chamado $U(1)$, e são lançadas as bases para uma nova Física. Sua teoria trazia alguns resultados embaraçosos que depois passaram a ser o seu sucesso. A descoberta da existência de antipartículas, previstas pela equação quântico relativista de Dirac,

$$\beta mc^2\Psi + \alpha_1 p_1 c\Psi + \alpha_2 p_2 c\Psi + \alpha_3 p_3 c\Psi - i\hbar\partial\Psi/\partial t=0,$$

foi um dos grandes feitos de sua teoria, estendendo e mantendo a compatibilidade com a equação de Klein-Gordon e resolvendo os problemas que esta apresentava. A previsão do pósitron, a antipartícula do elétron, e a sua confirmação experimental em 1932, foi uma das maiores descobertas de toda a história da Física, fazendo com que nossa própria visão do que seja a matéria tenha que ser revista. Além disso, justifica-se o fator giromagnético do elétron e, ainda no contexto do spin, sua formulação permite a compreensão teórica de sua origem.

As partículas são identificadas como representações unitárias do grupo de Poincaré. Com Dirac, ficou claro que o spin das partículas vem da representação unitária desse grupo. Essa identificação fornece dois números quânticos para as partículas: massa e spin. Como o objetivo não é se estender em estudo de Teoria de Grupos, vamos usar um conceito que, apesar de não ser correto, fornece-nos uma visão clássica do que seria o spin, uma propriedade decorrente da rotação do elétron em torno de seu próprio eixo, como encontramos na maioria dos livros didáticos. Mas chamamos a atenção que também poderíamos apenas dizer: trata-se de um campo magnético intrínseco ao elétron, cuja origem remonta às propriedades do espaço-tempo.

A circulação de corrente em um caminho qualquer, pela lei de Ampère, gera campo magnético. Uma grandeza que nos auxilia a fazer uma estimativa do campo magnético gerado por uma corrente que circula em torno de uma determinada área é o momento de dipolo magnético. Um dos exemplos mais simples de momento magnético é o de uma espiral condutora da eletricidade, com intensidade I e vetor área $\mathbf{A} = \mathbf{a} \cdot n$, para a qual [3]: $\mu = I\mathbf{A}$. Supondo que o elétron seja uma pequena esfera carregada, e que o giro desta gera um momento magnético que chamamos de spin (rotação em inglês), então podemos supor que um elétron girando em torno de um núcleo atômico contribui para o campo magnético gerado, além do giro em torno do núcleo atômico, com o giro em torno de si mesmo. De fato, a contribuição de spin é mais significativa do que a do giro em torno do centro do átomo.

A transição de fase gerando o ferromagnetismo resulta do alinhamento de spins dos elétrons nos materiais. Imantar um material é alinhar os spins que estão desalinhados no metal. Na próxima seção, vamos discutir o efeito macroscópico gerado pelo alinhamento desses spins.

II. Quebra espontânea de simetria e ferromagnetismo

Simetrias e leis de conservação são excelentes guias na formulação de modelos físicos em diversas escalas de energia. Se um sistema físico se caracteriza por estados definidos, determinadas simetrias permitem que o sistema evolua sem mudar seu estado. Existem quantidades conservadas nesses sistemas que chamamos de cargas conservadas. Se o sistema apresenta uma lei de movimento independente do tempo, a carga conservada é a Energia. Se um sistema apresenta lei de movimento independente de ângulo, a quantidade conservada é o momento angular. Com essa noção, poderíamos questionar se haveria algum processo no qual essa simetria seria perdida? Uma visão intuitiva desse processo é a quebra de simetria espacial quando tomamos uma vareta em pé e pressionamos no sentido de comprimi-la. Não podemos prever em que direção a vareta irá dobrar, então dizemos que essa quebra da simetria de rotação ocorre de forma espontânea. Um outro exemplo menos intuitivo, relacionado com a quebra de isotropia espacial, é a transição de fase do ferromagnetismo, em que o estado de mínima energia viola a simetria de rotação. A medição da transição de fase em laboratório é dada pelo gráfico a seguir da resposta magnética (magnetização) em função do campo magnético aplicado.

Conforme mostra o gráfico da Figura 1, para temperatura $T > T_c$, quando o campo magnético é invertido, a magnetização imediatamente acompanha o campo. Para $T < T_c$, esse comportamento muda. Passa a existir uma resistência pelo sistema à inversão do campo (chamada de histerese magnética). Pelo modelo de Ising, que modela uma cadeia linear de spins, podemos entender microscopicamente o que está ocorrendo. Temos, antes da transição, uma cadeia linear de spins com movimento térmico aleatório, sem correlação. À medida que o sistema é resfriado, os spins ficam correlacionados e começam a esboçar uma resistência à inversão do campo magnético externo. Quando retiramos o campo magnético externo, fica uma magnetização residual, que caracteriza um novo estado mínimo de energia do sistema.

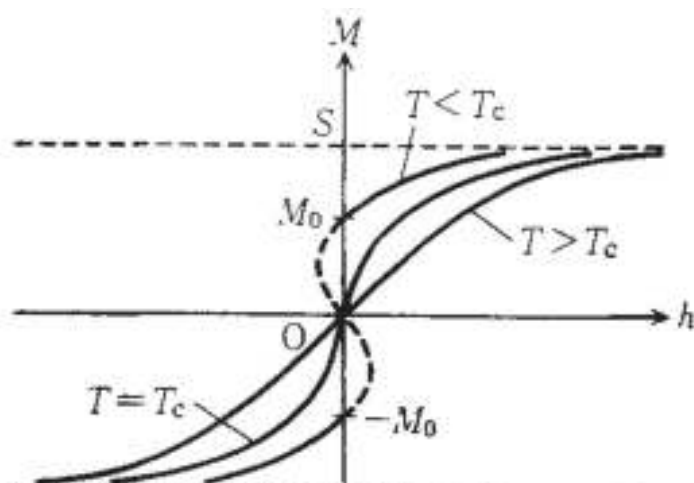
Partindo da energia livre, G , em função da magnetização, podemos explicar o comportamento macroscópico do sistema:

$$G(M) = aM^2 + bM^4, \quad (b > 0),$$

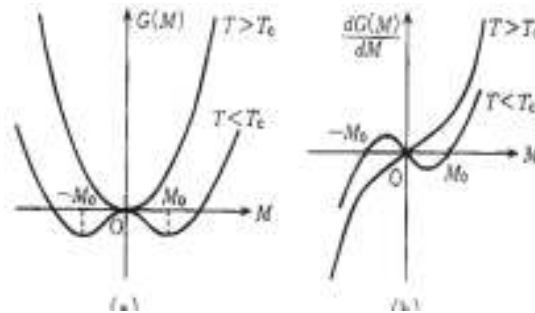
sendo $a = a_0(T - T_c)$. Portanto o sinal de a muda quando o sistema passa pela temperatura T_c . Em temperaturas acima de T_c , a energia livre do sistema apresenta um único mínimo (que é nulo). Quando o sistema tem sua energia térmica diminuída para uma temperatura abaixo de T_c , a energia livre apresenta dois mínimos, conforme mostra a Figura 2 (a). Lembrando que o campo magnético externo é obtido por:

$$dG/dM = h,$$

pelo estudo do comportamento da derivada da energia livre em função da magnetização, obtemos o gráfico rodado da Figura 1.



Para explicar a transição ferromagnética, concluímos, então, que a energia livre proposta descreve o comportamento observado em laboratório. Na transição, vindo de temperaturas acima de T_c , o mínimo da energia livre, que é nulo, transiciona para dois novos mínimos. O sistema é pensado, então, como uma cadeia linear de spins caindo num desses mínimos, com os spins correlacionados apontando em uma única direção, com o mínimo violando a simetria de rotacional de partida, de modo espontâneo [5] (mínimo ψ_0 da figura a seguir).



Fazendo uma pequena perturbação $g(x)$ em torno desse mínimo, vemos que esta se propaga ao longo da cadeia. Provocamos uma perturbação de alcance infinito (comprimento de onda da excitação λ infinito). Como temos pelo princípio de Broglie $p = h/\lambda$, dizemos que estes são modos zero de excitação. Goldstone estabeleceu um teorema que afirma que a cada simetria global violada espontaneamente deve surgir um modo zero associado à quebra. Como consequência desse estudo, esses modos ficaram conhecidos como excitações de Goldstone.

Referências

- [1] <http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1956/>.
- [2] DIRAC, P. A. M. *The Principles of Quantum Mechanics* (International Series of Monographs on Physics). Oxford: Oxford Science Publications, 1982.
- [3] COSTA, Maria Margarida Ramalho R.; ALMEIDA, Maria Jose B. Marques de. *Os Fundamentos da Física*. São Paulo: Almedina-Coimbra, 2003.
- [4] NAGAOSA, N.; HEUSLER, S. *Quantum Field Theory in Condensed Matter Physics* (Theoretical and Mathematical Physics). New York City: Springer-Verlag, 2010.
- [5] ALTLAND, A.; SIMON, B. D. *Condensed Matter Field Theory*, second edition. Cambridge: University Press, 2010.
- [6] HUANG, K. *Fundamental Forces of Nature: The Story of Gauge Fields*. Singapore: World Scientific, 2007.
- [7] BARDEEN, J, COOPER, L. N.; SCHRIEFER, J. R. Schrieffer, *Microscopic Theory of Superconductivity*, Phys. Rev. 106, 162 – 164. New York City: 1957.

Refrigeração Magnética

*Lucas S. Paixão¹
Clebson dos Santos Cruz²
Thales Costa Soares³*

Resumo

Neste trabalho, usaremos a refrigeração magnética como a motivação para discutir uma Física Contemporânea com forte ligação com a inovação tecnológica. Acredita-se que a refrigeração magnética, já utilizada em laboratórios de pesquisa, possa se tornar o próximo paradigma da refrigeração, sendo uma tecnologia mais limpa do ponto de vista ambiental quando comparada à refrigeração nos moldes atuais. Nosso objetivo não é de discutir uma abordagem de ensino de Física sob essa perspectiva, pois foge muito da nossa atuação. Mas produzir um texto que possa ser utilizado em cursos de formação de professores cujos conceitos e fenomenologia sejam importantes para a construção de um plano de trabalho no nível médio, que englobe essa discussão. Para entender como ocorre a refrigeração magnética, é preciso entender, primeiramente, como podemos definir a entropia magnética, a partir da qual poderemos mostrar o que é o efeito magnetocalórico. A segunda seção do nosso trabalho define o que é entropia, para, na terceira seção, explicarmos e calcularmos o efeito magnetocalórico. Na quarta seção, explicamos como pode ocorrer a refrigeração magnética. Por fim, apresentamos as nossas conclusões. Todo o texto é escrito buscando contribuir com os cursos de formação de professores, sendo um material atual e com a linguagem apropriada a esse público.

1 Universidade Federal Fluminense/Instituto de Física

2 Universidade Federal Fluminense/Instituto de Física

3 IF Sudeste MG, Centro de Ciências – UFJF e GFT/JLL, tcsoares@gmail.com

Palavras-chave: Refrigeração Magnética, Efeito Magnetocalórico, Entropia Magnética, Magnetismo

1 Introdução

A renovação do ensino de Física deve passar, necessariamente, por uma atualização curricular e metodológica, aproximando-a de uma Física mais viva, mais próxima dos problemas atuais, tanto no que diz respeito à sua natureza quanto aos seus aspectos aplicados. A Física do cotidiano deve ser trabalhada em uma perspectiva que aproxime alunos e professores, tornando-os sujeitos do conhecimento, de um cotidiano atual e atualizado, em sintonia com as grandes questões contemporâneas da ciência e da tecnologia.

Nessa perspectiva, aproximar as novas teorias do século XX e XXI, sobretudo conectadas ao desenvolvimento tecnológico, torna-se não apenas uma alternativa de renovação do ensino de Física, mas uma necessidade, já amplamente discutida nos tópicos de inserção de Física Moderna e Contemporânea no ensino médio, mas ainda tão longe de se tornar realidade.

Parte dessa dificuldade está atrelada, na formação de professores, a livros didáticos com abordagens ainda muito voltadas à formação de bacharéis, cujos conceitos e fenômenos físicos dão espaço a abordagens excessivamente matematizadas, que refletem posteriormente na prática profissional dos futuros professores.

Nossa contribuição reside nesse aspecto, que associa a nossa formação em Física com a busca em se produzir textos que sirvam de complemento, de material auxiliar, a ser utilizado em cursos de formação de professores. Especificamente, discutiremos o efeito magnetocalórico, em uma linguagem apropriada aos cursos de graduação e com forte impacto tecnológico, que mobiliza uma grande comunidade de pesquisadores desenvolvendo novos materiais, cuja expectativa seja a do desenvolvimento de uma nova tecnologia de refrigeração.

Além dos aspectos de uma área de pesquisa viva, em construção, essa questão abre ainda a possibilidade de uma abordagem cujos aspectos de financiamento científico, da aproximação da pesquisa com a indústria, e o seu desenvolvimento tecnológico, são questões que naturalmente surgem.

2 Entropia

Imagine que temos quatro moedas não viciadas, e jogamos todas para o alto, o que pode resultar, por exemplo, em: 1ª moeda cara e demais coroa; 2ª moeda cara e demais coroa; 3ª moeda cara e demais coroa; 4ª moeda cara e demais coroa. Essas quatro configurações diferentes representam o mesmo estado, que é uma moeda cara e três coroas. Como cada moeda possui dois resultados possíveis e estamos considerando quatro moedas, o número total de configurações é $2^4 = 16$. A seguir temos todas as configurações representadas, em que o sinal + significa cara e - significa coroa.

Tabela 1 – Configurações de um conjunto de quatro moedas

Estado	Configuração
4 caras, 0 coroa	++++
3 caras, 1 coroa	+++-, ++-+, +---, -+++
2 caras, 2 coroas	++--, +-+-, -+--, +--+, -+--, ----
1 cara, 3 coroas	+---, -+--, --+-, ----
0 cara, 4 coroas	----

Podemos dizer que o estado com quatro caras e o estado com quatro coroas são ordenados. Estados com mistura de cara e coroa são desordenados, sendo o estado mais desordenado aquele com metade das moedas cara e metade coroa. O estado ordenado sempre corresponde a um número de configurações menor e, por isso, tem uma probabilidade menor de ocorrer. Na natureza, processos de transformação tendem ao estado mais desordenado, pois este tem maior probabilidade de ocorrer.

Vamos pensar em um sistema mais interessante que moedas como, por exemplo, um gás. Seu estado é caracterizado pelo seu volume, pressão e temperatura. As configurações microscópicas desse gás são descritas pela posição e velocidade das moléculas que o constituem. Um gás tem um número de moléculas da ordem do número de Avogadro $6,022 \times 10^{23}$. Imagine se tivermos essa quantidade de moedas (além de ficarmos ricos), o estado mais desordenado teria uma probabilidade muito maior que qualquer outro.

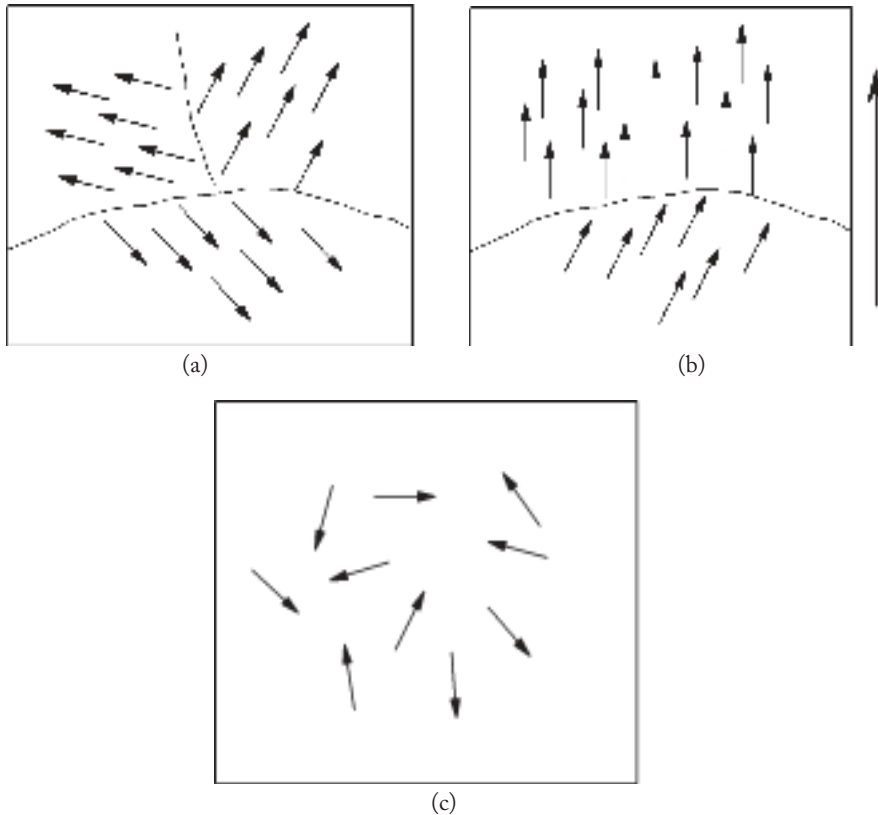
Existe uma grandeza física relacionada com essa ideia de estados ordenados e desordenados, que é a entropia. Quando um sistema (como o gás mencionado acima) está em uma temperatura T e troca uma quantidade de calor Q , ele vai mudar seu estado. Se essa mudança ocorrer de forma reversível (se

for possível voltar para o estado inicial, passando pelos mesmos estados intermediários), estará ligada a uma variação de entropia dada por

$$\Delta S = Q/T .$$

Como a troca de calor está associada a uma mudança de estado, a entropia está relacionada com o nível de desordem do sistema. Ao passar para um estado mais desordenado, a entropia do sistema aumenta; enquanto que a passagem para um estado mais ordenado diminui a entropia.

Figura 1 – Estrutura de domínios de um material ferromagnético. (a) Sem campo magnético. (b) Com campo magnético. (c) Em altas temperaturas.



A entropia é alterada por diversos fatores. Um campo magnético, por exemplo, altera a entropia de materiais magnéticos. Muitos materiais possuem

pequenas unidades magnéticas, como ímãs microscópicos, chamados momentos magnéticos. Existem materiais nos quais os momentos magnéticos formam domínios, em que, dentro de cada domínio, os momentos apontam na mesma direção (Figura 1a). Esses são chamados de materiais ferromagnéticos ou ferromagnetos, os ímãs são materiais desse tipo. Existem ainda materiais onde os momentos magnéticos apresentam outros tipos de ordenamento, porém o objetivo aqui não é uma discussão dos possíveis ordenamentos magnéticos. Ao aplicarmos um campo magnético em um ferromagneto, os domínios tendem a se alinhar com o campo (Figura 1b), e isso faz os momentos magnéticos se ordenarem, o que diminui a entropia do material. Por outro lado, se aumentarmos a temperatura do material, seus momentos magnéticos podem apontar em direções diferentes em relação à direção do campo aplicado. Em temperaturas suficientemente altas, os momentos magnéticos se comportam como na Figura 1c. Portanto, em altas temperaturas, o material se torna magneticamente desordenado, o que aumenta sua entropia.

O Efeito Magnetocalórico

Durante a discussão sobre entropia na seção anterior, vimos que o campo magnético aumenta o ordenamento dos momentos magnéticos e, portanto, diminui a entropia de um material ferromagnético. Por outro lado, a temperatura tem o efeito inverso, fazendo os momentos se desordenarem, aumentando a entropia. Logo, a entropia se comporta como mostrado na Figura 2.

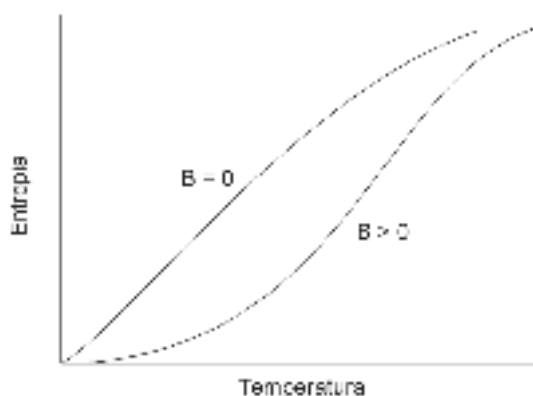


Figura 2 – Entropia de um ferromagneto em função da temperatura e do campo magnético

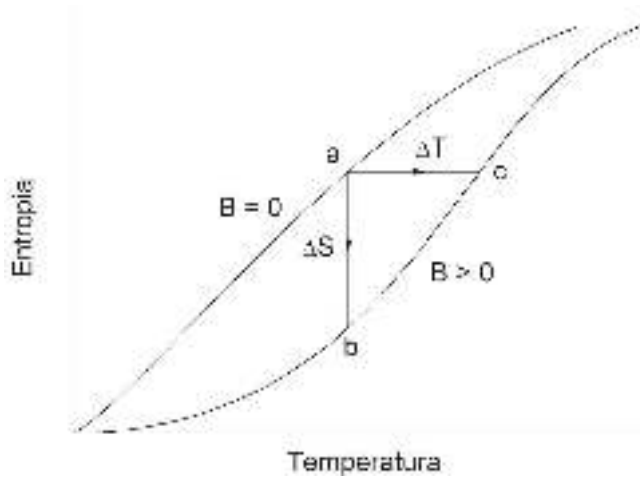


Figura 3 – Processos isotérmico ($a \rightarrow b$) e adiabático ($a \rightarrow c$).

Podemos pensar no efeito magnetocalórico através de dois tipos de processo: isotérmico e adiabático. Um processo isotérmico (aquele em que a temperatura não varia) é representado no gráfico entropia vs temperatura por linhas verticais (Figura 3). Repare que, ao aplicar o campo magnético, passamos do ponto a para o ponto b , entre os quais existe uma variação de entropia ΔS . Assim, em um processo isotérmico, o ferromagneto troca calor com o ambiente a sua volta.

Por outro lado, um processo adiabático se caracteriza pela ausência de trocas de calor. Consequentemente, não existe variação de entropia nesse tipo de processo, que pode, então, ser representado no gráfico entropia vs temperatura por linhas horizontais. Portanto, todo processo adiabático estará associado a uma variação de temperatura ΔT .

A quantidade de calor trocada e a variação de temperatura dependem da intensidade do campo magnético aplicado. Quanto mais intenso for o campo, maior a distância entre os gráficos para $B = 0$ e $B > 0$ na Figura 3. Logo, tanto a troca de calor, em um processo isotérmico, quanto a variação de temperatura, em um processo adiabático, serão maiores à medida que o campo magnético aplicado fica mais intenso.

Refrigeração Magnética

Desde muito tempo, a humanidade compreende a necessidade da refrigeração, por exemplo, para preservar alimentos. Foi em 1834 que o americano Jacob Perkins (1766 - 1849) construiu uma máquina que utilizava ciclos de compressão e expansão de vapor para fins de refrigeração. O princípio básico de funcionamento dessa máquina é o mesmo utilizado nos aparelhos de refrigeração atuais, seja na geladeira, no freezer ou no ar condicionado. Embora o processo seja mais eficiente nos dias de hoje, ele não é perfeito. Ao longo das décadas, diversos gases foram utilizados, incluindo substâncias tóxicas ou nocivas ao meio ambiente. Os mais conhecidos são os gases CFC e HFC, nocivos à camada de ozônio, que nos protege da radiação ultravioleta do sol.

A crescente conscientização ambiental, durante as décadas de 1980 e 1990, inspirou uma busca por novos processos de refrigeração. Uma das alternativas é a refrigeração magnética, que utiliza o efeito magnetocalórico. Na refrigeração convencional, as trocas de calor são feitas com a compressão e expansão de um gás. Na refrigeração magnética, as trocas de calor são feitas variando o campo magnético aplicado a um material magnético, por meio do efeito magnetocalórico. A grande vantagem é a eliminação de qualquer material nocivo ao meio ambiente. Processos como aqueles mostrados na Figura 3 são utilizados na refrigeração magnética, porém para garantir um funcionamento contínuo, o processo de refrigeração deve operar em um ciclo fechado.

O primeiro protótipo acadêmico de um refrigerador magnético operando na temperatura ambiente foi construído em 1976 por G. Brown, pesquisador da NASA. Esse protótipo consistia de um material magnético (o metal gadolínio) imerso em uma coluna de líquido (mistura de água e álcool). O líquido, chamado de regenerador, realiza as trocas de calor com o metal, e cria uma diferença de temperatura entre o volume a ser resfriado e o ambiente. Ao aplicar e remover o campo magnético em sincronia com o movimento do metal através do regenerador cria-se uma diferença de temperatura entre as extremidades inferior e superior.

O protótipo de Brown utilizava um ciclo com dois processos isotérmicos e dois processos isocampo. O funcionamento desse protótipo e o ciclo estão esquematizados na Figura 4. O ciclo começa ao se aplicar o campo de forma isotérmica com o metal no topo da coluna de líquido regenerador, onde

o metal libera calor para o mesmo. Com o campo constante, o metal é movido para baixo, cedendo calor para o regenerador durante o movimento. O campo é então removido, fazendo com que o material absorva calor do líquido a sua volta, que por sua vez está em contato térmico com o volume a ser resfriado. Na última etapa do ciclo, o metal é movido de volta para o topo da coluna, absorvendo calor enquanto é deslocado. O ciclo então recomeça, repetindo os passos descritos.

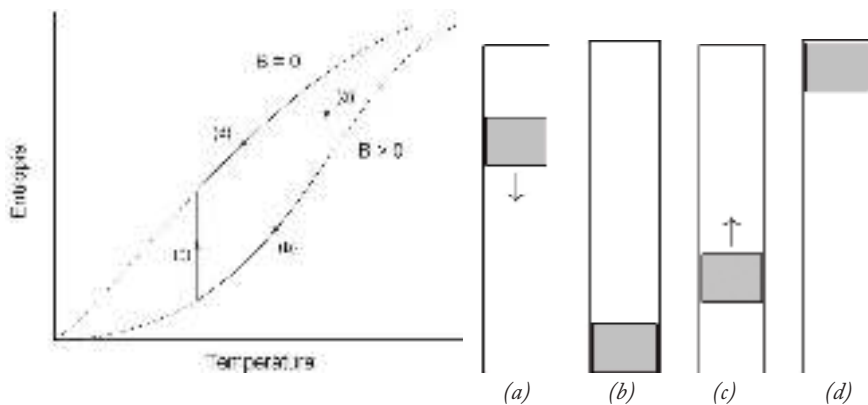


Figura 4 – Ciclo de refrigeração magnética do protótipo de Brown.

Outro ciclo utilizado em protótipos, representado na Figura 5, é composto por dois processos adiabáticos e dois processos isocampo. A primeira etapa (processo a) consiste na aplicação adiabática de um campo magnético, nessa etapa o material magnético aquece até uma temperatura superior à temperatura ambiente. No processo b, o material magnético libera calor até chegar à temperatura ambiente. No processo seguinte, o campo é removido e a temperatura do material magnético diminui, se tornando mais frio que o volume a ser resfriado. Na última etapa, o material magnético absorve calor do volume a ser resfriado, e assim o ciclo recomeça com uma nova aplicação do campo magnético.

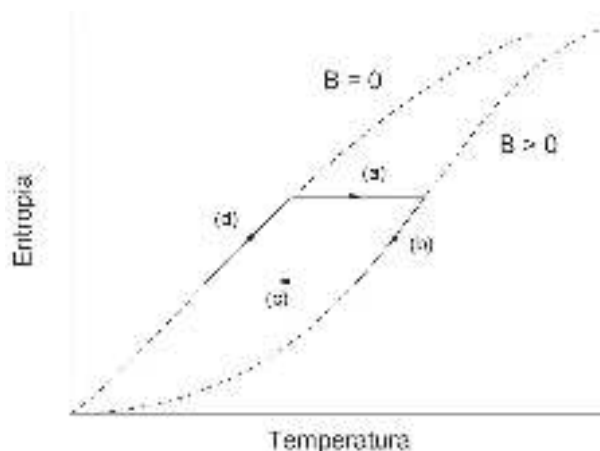


Figura 5 – Ciclo de Brayton magnético

Os refrigeradores magnéticos construídos até hoje são protótipos. O principal desafio ainda a ser superado é encontrar o material magnético ideal. Uma das características que o material deve possuir é uma boa condutividade térmica para realizar de forma eficiente as trocas de calor envolvidas nos ciclos magnéticos. Além disso, as variações de temperatura e de entropia devem ser suficientemente grandes em uma ampla faixa de temperatura onde o refrigerador deve operar, por exemplo, entre -10 °C e 40 °C . Entre os melhores materiais para aplicação na refrigeração em temperatura ambiente estão o gadolínio e suas ligas com outros metais. O gadolínio (símbolo Gd) é um metal da série dos lantanídeos, que também são conhecidos como terras raras. Os metais dessa série receberam esse nome por ser difícil sua extração da natureza. A complexidade do processo de extração das terras raras, em particular do gadolínio, faz com que seu preço seja elevado. O custo do material magnético é um fator determinante para que a refrigeração magnética venha a ser utilizada em larga escala no futuro. Um custo elevado impede a utilização desse processo de refrigeração em escala comercial.

Referências

2 BROWN, G. V. Magnetic heat pumping near room temperature. *Journal of Applied physics*, v. 47, n. 8, p. 3673-3680. 1976.

3 FERRIS, F. J. “The Perkins Family: A Short History about Four Generations of Engineers”. *Heritage Group Website for the Chartered Institution of Building Services Engineers*. Retrieved. 2007-08-14.

4 PANTOJA, G. C. F.; MOREIRA, M. A., HERSCOVITZ, V. E. Uma revisão da literatura sobre a pesquisa em ensino de Mecânica Quântica no período de 1999 a 2009. *Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia*, v. 4, p. 1-34, São Paulo 2011.

5 REIS, M.S. *Fundamentals of Magnetism*. 1. ed. New York: Elsevier, 2013, 297 p.

6 REIS, M.S.; MOREIRA DOS SANTOS, A. *Magnetismo molecular*. 1. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2010, 192p.

7 TERRAZZAN, E. A. A inserção da física moderna e contemporânea no ensino de física na escola de segundo grau. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*. Florianópolis, SC: Brasil, v. 9, n.3, p. 209-214, 1992.

A divulgação da física nuclear no Brasil

Jayme Fernandes Ribeiro¹

Desde o final da Segunda Guerra Mundial (1939-1945), a energia nuclear sacudiu o imaginário de milhares de pessoas ao redor do mundo. A bomba atômica e seus efeitos tornaram-se motivos de discussão em diferentes sociedades. As cidades de Hiroshima e Nagasaki, atingidas em 6 e 9 de agosto de 1945 respectivamente, mostraram a todos o poder de destruição de uma bomba nuclear. O mundo inteiro ficou assustado e perplexo com a novidade. O próprio Japão não sabia ao certo que arma era aquela. A manchete do jornal *Asahi Shimbun*, no dia 8 de agosto, foi: “Hiroshima atingida por um novo tipo de bomba”. Afinal, qual o poder de destruição de uma bomba atômica? Como a população brasileira ficou sabendo sobre os efeitos e as consequências de uma arma nuclear? Quem foi o responsável pela divulgação da Física Nuclear entre os trabalhadores do Brasil? O objetivo do capítulo é responder a essas questões.

Nas mesas de bar, nos restaurantes, nos almoços em família, no trabalho, nas escolas e nas ruas, pessoas do mundo inteiro procuravam entender como uma única bomba poderia destruir toda uma cidade. Com isso, as questões da Física Nuclear passaram a estar na ordem do dia, e a preocupação com uma nova guerra, utilizando armamentos nucleares, tornou-se tema de discussão em diversos países. Vale lembrar que, logo após o término do sangrento conflito mundial, em 1945, Estados Unidos (EUA) e União Soviética (URSS) iniciaram a Guerra Fria (1945-1991). Uma disputa política, ideológica e militar entre as duas grandes potências que alterou as bases das relações internacionais. O mundo foi marcado pela sombra de uma nova guerra mundial, que, em determinados momentos, pareceu realmente poder acontecer. Diversas

1 Doutor em História pela Universidade Federal Fluminense, professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro e pesquisador da Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro.

gerações foram criadas à sombra de batalhas nucleares globais que poderiam ocorrer a qualquer momento e devastar toda a humanidade. Toda uma série de crenças e imagens povoaram o imaginário das pessoas em todo o mundo. Daquele momento em diante, a paz deveria ser continuamente buscada.

Durante a Guerra Fria, campanhas em favor da paz surgiram em diversos países. Contudo, foi o Congresso Mundial dos Partidários da Paz, realizado em Paris e em Praga, de 20 a 25 de abril de 1949,² que lançou as bases para a luta pela paz em todo o mundo. Sendo, naquele momento, as armas atômicas a grande preocupação da humanidade, foi criado um Comitê Permanente do Congresso, presidido pelo cientista francês Frederic Joliot-Curie, a fim de que se pudesse organizar a luta pela paz.

Em março de 1950, em Estocolmo, na Suécia, o Comitê, em uma de suas reuniões, lançou a Campanha pela Proibição das Armas Atômicas, tornando-se conhecida pela expressão *Apelo de Estocolmo*. O objetivo era o de coletar 500 milhões de assinaturas, em diversos países, para serem enviadas à Organização das Nações Unidas (ONU), exigindo a proibição da utilização das armas atômicas por qualquer país e a eliminação dos arsenais atômicos existentes.³

Cada país tinha sua cota. A do Brasil era de quatro milhões. Diversas instituições do mundo inteiro foram chamadas a participar da campanha, divulgando, organizando e/ou coletando as assinaturas. Mas, na maioria dos países, foram os partidos comunistas os grandes responsáveis pelo desenvolvimento da campanha. Isso fazia parte da nova linha política estabelecida pelo líder da União Soviética (URSS), Stalin, a partir de 1947. A nova “Linha Geral”, como era chamada, consistia em formar uma ampla frente antinor-teamericana, visando impor aos Estados Unidos (EUA) um arranjo mundial

2 O Congresso Mundial dos Partidários da Paz foi realizado em dois locais diferentes porque o governo francês não permitiu a entrada das delegações vindas da União Soviética e dos países socialistas.

3 O Comitê Permanente do Congresso fazia parte do que se convencionou chamar de “Movimento Pela Paz”. O Movimento criou diversas campanhas. A primeira, e a mais importante, foi a “Campanha pela Proibição das Armas Atômicas”, de 1950. A partir dela, diversos apelos e protestos surgiram: contra a OTAN; contra a Guerra da Coreia (1950-53); pelo desarmamento geral; contra o envio de soldados brasileiros para a Coreia (1950-53); por um pacto de paz entre as cinco grandes potências – Estados Unidos, União Soviética, China, Inglaterra e França, chamado de “Apelo de Berlin” (1951-1953); contra a guerra atômica, chamado de “Apelo de Viena” (1955). No Brasil, os militantes comunistas, sob a orientação do Partido Comunista do Brasil (PCB), organizaram e propagandearam as campanhas, objetivando mobilizar a sociedade em busca de assinaturas aos seus apelos pacifistas e obter respaldo social às suas ações.

que fosse satisfatório aos interesses soviéticos e que permitisse, em maior amplitude, obter o controle da corrida armamentista.⁴ A campanha contra as armas atômicas passou a ser a tarefa central dos partidos comunistas de todo o mundo, ficando a cargo, sobretudo, da coleta de assinaturas.

A campanha não era obra do governo soviético. O Comitê do Congresso Mundial dos Partidários da Paz englobou diversas organizações e personalidades no mundo inteiro, muitas delas não comunistas,⁵ como a Cruz Vermelha Internacional. Mas, diante do clima difícil da Guerra Fria, Stalin apoiou as campanhas de acordo com os interesses da política externa soviética.

No Brasil, no início de 1950, foi criado o Movimento Nacional Pela Proibição das Armas Atômicas (MNPPAA), cujo presidente era o militante comunista Odilon Duarte Batista. A tarefa de colher quatro milhões de assinaturas deveria ser cumprida até novembro do mesmo ano – data de entrega das cotas de todos os países participantes, a fim de serem enviadas ao II Congresso Mundial da Paz, realizado entre os dias 16 e 23 de novembro, em Varsóvia, na Polônia.

Os comunistas brasileiros, na busca pelas assinaturas, lançaram mão de diversas estratégias, tais como: comícios, palestras, dramatizações, enterros simbólicos, jornais-murais, distribuição de panfletos e a utilização, sobretudo, de sua imprensa. Fazia-se necessário alertar às pessoas o que seria uma guerra atômica, o que era uma fissão nuclear, o que acontecia numa explosão da bomba atômica. Comícios eram realizados, “bônus” eram vendidos para ajudar no financiamento da Campanha (Figura 1), pichações nos muros eram feitas (Figura 2), centenas de panfletos eram distribuídos, cartazes eram espalhados nas ruas, comitês contra a bomba atômica eram criados, assembleias eram reunidas. Assim, acreditavam os comunistas, poderiam esclarecer às pessoas o que era uma arma nuclear e obter sucesso na campanha pela coleta de assinaturas.

4 Uma disputa pela supremacia militar e bélica durante a Guerra Fria. O objetivo era a produção em larga escala de armamentos a fim de, cada um dos lados, demonstrar superioridade e poder.

5 Inúmeras personalidades declaradamente não comunistas aderiram à Campanha Contra as Armas Atômicas, tais como o ex-presidente mexicano Lázaro Cárdenas, a rainha Elizabeth da Bélgica, o escritor Heinrich Mann, os pintores Marc Chagall e Henry Matisse, o físico Albert Einstein e o ator Charles Chaplin. Muitos desses documentos podem ser encontrados no Arquivo Público do Estado do Rio de Janeiro (APERJ) e na Biblioteca Nacional (BN).



Figura 1 (APERJ)



Figura 2 (APERJ)

A divulgação da Física Nuclear no Brasil está intimamente ligada à questão das armas atômicas. A partir dos episódios catastróficos ocorridos em Hiroshima e Nagasaki, os brasileiros, assim como pessoas do mundo inteiro, procuraram entender que tipo de arma era aquela e como a energia nuclear poderia causar tanta destruição.

No Brasil, foram os comunistas que fizeram o trabalho de divulgação da Física Nuclear junto à população, embora os estudos sobre o tema já viessem ocorrendo há algum tempo, sobretudo após a criação do Departamento de Física, de Filosofia, Ciências e Letras da Universidade de São Paulo e do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), ambos criados em 1949. Entretanto, é importante ressaltar que as discussões sobre a Física Nuclear ficavam no meio acadêmico. A população, de uma maneira geral, no final da década de 1940 e na década de 1950, não conhecia o que era a energia nuclear, a fissão do núcleo do átomo, como funcionava a bomba atômica ou simplesmente um motor atômico etc. Os comunistas, através de palestras, comícios, panfletos e, principalmente, por intermédio dos seus jornais, procuravam fazer esse trabalho de esclarecimento à população brasileira.

Em 16 de janeiro de 1955, o jornal *Imprensa Popular* publicou uma matéria de página inteira intitulada “O que é a Energia Nuclear?”. Um dos artigos, assinado pelo físico francês, Paul Langevin,⁶ explicava, com o auxílio de inúmeros desenhos, diversos assuntos que compunham a Física Nuclear, entre eles: o que é a energia nuclear, o que é o átomo, o isótopo, o que compõe a estrutura de um átomo e seu núcleo, o que é um próton, um nêutron, como

6 O artigo de Paul Langevin foi originalmente publicado na revista francesa *La Pensée*, e os comunistas o publicaram no jornal *Imprensa Popular*.

o nêutron se transforma em um agente de transmutação, a diferença entre um átomo de hidrogênio e um átomo de hélio, entre um átomo de hidrogênio pesado e extrapesado, entre um átomo de boro e um átomo de urânio, entre várias outras questões.

Langevin explicava que “cada espécie de átomo é caracterizada por dois números: antes de tudo pelo de prótons do núcleo, o número atômico, igual ao número de elétrons negativos exteriores ao núcleo do átomo neutro”. Para o físico francês “é este número que determina as propriedades químicas, e, por conseguinte, o lugar do átomo na classificação dos elementos”.

Na mesma página, o jornal apresentava um artigo do professor Dr. G. Pokrovski, mostrando como a energia nuclear poderia transformar o mundo, sendo utilizada para o bem da humanidade (Figura 3). O cientista explicava o que era e como funcionava um motor atômico, e como, a partir daquele tipo de energia, poderia funcionar um submarino e serem feitas obras hidrotécnicas (barragens, diques, canais de irrigação). Além disso, segundo Pokrovski, “a física nuclear ajudaria cada vez mais a medicina moderna, a agricultura e a indústria”. É importante destacar que os comunistas distribuíaam pelas cidades brasileiras muitos panfletos, folhetos e cartazes revelando situações de paz e de guerra, a fim de ensinarem sobre as armas nucleares e melhor convencerem as pessoas a assinarem seus apelos pacifistas (Figuras 4 e 5).

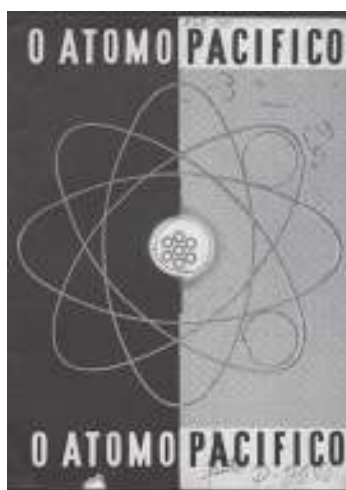


Figura 3 (APERJ)



Figura 4 (APERJ)



Figura 5 (APERJ)

Utilizando dados científicos e depoimentos de sobreviventes, os comunistas brasileiros produziam panfletos explicando o que era a bomba atômica, seus efeitos e suas consequências. Em um panfleto de 1950, encontrado no Arquivo Público do Estado do Rio de Janeiro (APERJ), os comunistas indagavam: “JÁ PENSOU BEM O QUE SIGNIFICA UMA GUERRA ATÔMICA? ENTÃO MEDITE NO SEGUINTE:”. Nele, procuravam esclarecer o poder de destruição de uma bomba nuclear e, comparando com cidades brasileiras, almejavam dar a melhor explicação, ao mesmo tempo que aproximava para o Brasil a realidade das cidades japonesas atingidas. Segundo o panfleto, “uma só bomba atômica, a que foi lançada sobre a cidade de Hiroshima, no Japão, matou 80 mil pessoas (número equivalente a toda a população de Maceió, capital de Alagoas) e estropiou mais de 200 mil pessoas (número equivalente a toda a população de Belo Horizonte, capital de Minas Gerais)”.

Os panfletos eram bastante simples e didáticos, baseados, em grande parte, num processo de perguntas e respostas. O objetivo era o de explicar os enormes danos causados pela bomba atômica e suas radiações, além de causar grande impacto nos leitores. Um grande número de panfletos retrata os efeitos destruidores das bombas atômicas jogadas nas cidades de Hiroshima e Nagasaki.

Outro panfleto, com o título de “A TRAGÉDIA DE HIROSHIMA”, mostrava-se bastante interessante. Nele, vinha o depoimento de um sobrevivente de Hiroshima. Shinso Hamai, que em 1950 era o prefeito da cidade atingida, fez um documentário revelando as consequências da bomba atômica jogada sobre sua cidade. Segundo Hamai, no momento da explosão, ocorreu “um clarão formidável! Dir-se-ia que um pedaço de sol havia desabado sobre a cidade! Em seguida, a tormenta escaldante da deflagração”. De acordo com ele, um “vento de fogo”, soprando a 300 quilômetros por hora, varreu as casas e os homens. Tonto e cambaleante, procurava levantar-se, mas estava ferido no pé e sangrava bastante. Depois de algum tempo, conseguiu levantar-se e verificou que tudo era silêncio, “um silêncio horrível, abafado, asfixiante, apenas perturbado pelo crepitar do telhado de palha a arder”. Procurou por sua mulher e notou que continuava ali, próxima a ele, quando do momento da explosão. Estava “ajoelhada, apertando o filhinho de encontro ao seio. A vizinha, na outra casa, desconjuntada como um bibelô quebrado, jazia sobre a esteira ensanguentada, enquanto a sua filha, ainda viva, continuava agarrada ao seio”.

Relatos como esses eram extremamente explorados e divulgados pela militância comunista encarregada da coleta de assinaturas. Tudo o que pudesse alertar as pessoas sobre os verdadeiros fatos e horrores que haviam ocorrido em Hiroshima e Nagasaki era de suma importância para o esclarecimento da população. É importante destacar que os comunistas não faltaram com a verdade. John Hersey, em seu livro sobre a tragédia de Hiroshima, relata a trajetória de seis sobreviventes da bomba atômica, um ano depois da explosão e quarenta anos mais tarde. Em seu trabalho, é possível encontrar depoimentos semelhantes, e até mesmo idênticos, aos narrados pelos comunistas durante a campanha em favor da proibição das bombas atômicas.

Dessa maneira, baseados em documentos sobre a bomba atômica e suas consequências, em depoimentos dos sobreviventes de Hiroshima e Nagasaki e, até mesmo, nas pesquisas soviéticas sobre armas nucleares, os comunistas informavam, de maneira simples e didática, o que era a energia nuclear usada para fins de guerra e os efeitos catastróficos das armas atômicas. Merece destacar que os jornais da grande imprensa não explicavam o que era a bomba atômica e seus efeitos. Os comunistas, nesse sentido, faziam um importante esclarecimento à população sobre uma forma de energia e de uma arma que, a

partir do final da Segunda Guerra Mundial, mudou o rumo das relações internacionais e pôs o mundo em constante alerta.

As campanhas de luta pela paz obtiveram apoio de diversos segmentos da sociedade (Figuras 6 e 7), tendo sido assinadas por parlamentares do Partido Trabalhista Brasileiro (PTB), do Partido Social Democrático (PSD), da União Democrática Nacional (UDN) e do Partido Social Progressista (PSP); por sacerdotes e por generais do Exército. Assinaram, também, personalidades conhecidas como o advogado Evandro Lins e Silva, o arquiteto Oscar Niemeyer, o escritor Jorge Amado, o sociólogo Caio Prado Júnior, o diplomata Osvaldo Aranha, os pintores Di Cavalcante e Candido Portinari, os artistas Oscarito, Vera Nunes, Dalva de Oliveira, Bibi Ferreira e Cacilda Becker, o cientista Cesar Lattes e o jogador de futebol Leônidas da Silva.



Figura 6 (APERJ)



Figura 7 (APERJ)

Para a população brasileira, repercutiram, com grande impacto, as assinaturas dos integrantes da Seleção Brasileira de Futebol de 1950. O técnico da equipe brasileira, Flávio Costa, ao ser abordado pela reportagem do jornal comunista *Imprensa Popular*, justificou a posição dos esportistas, relatando: “Assinarei o APELO DE ESTOCOLMO com muito prazer. [...] Acho que a guerra e o esporte são duas coisas antagônicas. A guerra só serve para dividir os povos. O esporte, ao contrário, serve para uni-los”. Após as palavras, o artigo

continuou confirmando que “seguinto o exemplo de Flávio, todos os titulares da Equipe Nacional, e mais o pessoal técnico que a acompanhava, assinaram entusiasticamente o Apelo de Estocolmo. Nenhum só deles se recusou ou sequer vacilou em dar sua assinatura em favor da Paz”. O jogador Danilo, dizia o repórter, resumia numa frase o sentimento de todos: “sob o signo da Paz marchamos para a vitória”.

A Campanha pela Proibição das Armas Atômicas não foi, oficialmente, considerada ilegal. Entretanto, como o Supremo Tribunal Eleitoral havia cassado o registro do Partido Comunista do Brasil (PCB), em maio de 1947, tornando-o ilegal, todas as organizações e movimentos por ele dirigidos ou filiados tornavam-se passíveis de perseguições. Assim, os órgãos de repressão passaram a combater a campanha contra a bomba atômica e as demais campanhas pacifistas.

Em 1949, dirigentes do PCB tentaram realizar o Congresso Brasileiro dos Partidários da Paz na sede da UNE, no Rio de Janeiro. A polícia interveio na intenção de dissolvê-lo. Diversas pessoas foram espancadas e baleadas. Ficaram gravemente feridos o deputado estadual do Partido Social Democrático (PSD) Paulo Cavalcanti, Luíza Ramos, filha de Graciliano Ramos, e o jornalista João Saldanha. No ano seguinte, no mês de agosto, a polícia invadiu o local onde se realizava a Conferência do Movimento Nacional Pela Proibição de Armas Atômicas e espancou os 40 delegados presentes – um deles, o operário Luiz Alba Sanches, sofreu fratura na coluna e ficou paraplégico.

Mesmo com a intensa repressão política e policial do governo do presidente Eurico Dutra (1946-1950), os comunistas continuaram firmes no propósito de colher assinaturas. Independente das cifras obtidas pelas campanhas, os comunistas, na clandestinidade, e sob forte repressão policial, conseguiram mobilizar diversos setores da sociedade e realizaram um importante trabalho de divulgação da física nuclear. A opinião pública, em sua maior parte, desconhecia os assuntos relativos àquele tipo de energia e às armas nucleares. Não era claro, por exemplo, o que era a bomba atômica e seus efeitos destrutivos. Vale lembrar que a discussão sobre a energia nuclear teve grande impulso no Brasil somente a partir da criação da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), em 1956. Assim, os comunistas brasileiros, desde o final da década de 1940, através de sua imprensa, dos comícios, dos congressos, dos panfletos distribuídos de casa em casa, das palestras, entre outros meios de divulgação,

saíram às ruas e contribuíram para que a população de diversas cidades brasileiras fosse esclarecida sobre o que eram as armas atômicas, energia nuclear e as consequências devastadoras de uma guerra daquele tipo.

Referências

HERSEY, John. *Hiroshima*. São Paulo: Companhia das Letras, 2002.

LOPES, José Leite. *Ciência e Desenvolvimento*. Rio de Janeiro: Tempo Brasileiro. Niterói: EdUFF, 1987.

RIBEIRO, Jayme Fernandes. *Combatentes da Paz: os comunistas brasileiros e as campanhas pacifistas dos anos 1950*. Rio de Janeiro: 7Letras, 2011.

STRATHERN, Paul. *Oppenheimer e a bomba atômica em 90 minutos*. Rio de Janeiro: Zahar, 1998.

THOMPSON, E. P. (Org.). *Exterminismo e Guerra Fria*. São Paulo: Brasiliense, 1985.

Simetrias, Ciências Naturais e Humanidades

J. A. Helayël-Neto¹

A ideia central deste texto é colocar uma proposta de como o conhecimento e a familiaridade com as Ciências Naturais, em particular a Física, podem contribuir para a reconstituição da motivação, do crescimento e até mesmo da consciência de dignidade do público de jovens e adultos que frequentam as classes dos cursos comunitários de pré-vestibular. Compreender os fenômenos naturais e sociais, modelá-los através de princípios e conceitos, e descrevê-los por meio de teorias coloca esses indivíduos diante da grandeza e majestade de nosso Universo, fazendo-os compreender a arquitetura da matéria e dos fatos e, assim, redimensiona a sua concepção de participação na sociedade. Esta tem sido, há 21 anos, a filosofia de trabalho frente ao Curso de Pré-Vestibular para Negros e Carentes no núcleo onde atuamos em Petrópolis: o conhecimento científico e a compreensão do micro e do macrocosmos como a alavanca para o interesse, para a inserção e para a redescoberta da grandeza do ser humano, catalisada pelo conhecimento naquela situação-limite em que se considera estar diante de um quadro de total marginalização dos processos e do progresso da sociedade da informação e da sociedade do conhecimento.

Em vista da situação socioeconômica e cultural das famílias de nossos jovens, compreendemos que é imprescindível trabalhar com eles o abstrato, o mundo dos conceitos e das ideias, o que, de forma geral, lhes é negado pelo dia a dia de suas vidas. Perceber os bastidores de uma realidade imaginável, conceber a criação de imaginários que podem, ou não, ser parte do natural, faz com que esses jovens estabeleçam uma nova forma de contato com a sociedade e mesmo com o Universo. Essa premissa em nossa metodologia é o ponto de partida para o nosso estímulo à compreensão e valorização do abstrato e da

¹ Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF/MCTI) – Grupo de Física Teórica José Leite Lopes (GFT – JLL)

estética na visão que tentamos passar de como descrever a Natureza, tendo sempre presente o mote Diraqueano de que “A Beleza é o Método”.

O conceito da Física Contemporânea que mais estimula essa busca e que mais motiva esse processo é o conceito de Simetria; essa ideia passa pela Geometria e pela Álgebra, é instrumento de investigação teórica na Física, chega à Filosofia e às Artes e pode ser convenientemente elaborada para tratar de situações e sistemas nas Ciências Humanas e Sociais.

A Física Contemporânea descreve os fenômenos naturais em termos de quatro interações fundamentais – para nossos propósitos aqui, podemos pensar nessas interações como sendo forças. A força gravitacional e a eletromagnética são as interações fundamentais que se fazem sentir no mundo macroscópico, em escala humana. As outras duas, a força nuclear forte e a força nuclear fraca, não se revelam em escala macroscópica. Aparecem apenas em escala subatômica – na verdade, como o nome indica, em escala nuclear, portanto a distâncias tão pequenas como o décimo do trilionésimo do centímetro, o que corresponde ao centésimo de milésimo da escala atômica ou à milionésima parte da nanoescala.

A força gravitacional é a responsável pelos movimentos planetários e pela organização da estrutura em larga escala de nosso universo. A força eletromagnética é a interação que responde pela formação dos átomos, pelas ligações moleculares e pelos processos biológicos fundamentais, por exemplo. Já a força nuclear forte responde pela coesão dos prótons e dos nêutrons no interior dos núcleos atômicos, e a nuclear fraca pelos processos radioativos, em que núcleos atômicos instáveis expõem partículas.

Cada uma dessas forças é descrita por uma teoria. A gravitacional é explicada pela teoria da relatividade geral publicada pelo físico alemão Albert Einstein (1879-1955) em 1916. Já a eletrodinâmica quântica descreve os fenômenos que envolvem a força eletromagnética. Foi desenvolvida no início da década de 1940 e ajudou a entender o mundo das chamadas partículas elementares – ou seja, partículas “indivisíveis”. Trabalhos publicados entre 1961 e 1968 ajudaram a formular a teoria que unificou tanto os fenômenos eletromagnéticos quanto aqueles regidos pela força nuclear fraca. A teoria eletrofraca – como ficou conhecida – mostrou, portanto, que essas duas forças têm uma origem comum.

Todos esses desenvolvimentos foram estruturados em cima do conceito de simetria. É oportuno, então, estabelecermos o entendimento dessa ideia. Diz-se que um sistema qualquer é simétrico sob uma certa operação quando este resulta inalterado, isto é, apresenta-se o mesmo, após ser realizada sobre ele uma dada operação ou intervenção. Isso ocorrendo, dizemos ter um sistema simétrico sob a operação considerada. O exemplo mais primário dessa ideia é a simetria apresentada por um círculo sob a operação de rotação: qualquer intervenção que faça uma rotação no círculo o deixará inalterado, imutável. Gira-se o círculo, mas, após tal operação, ninguém diria que este sofreu o efeito de uma rotação.

Tal ideia nos remete, imediatamente, à relação entre simetria e harmonia de formas: um sistema simétrico é um sistema que apresenta partes muito semelhantes e que reflete naturalmente uma beleza, por não ter descontinuidades e dissonâncias aparentes.

A Física, a partir da formulação da Teoria da Relatividade Restrita, no início do século XX, institucionalizou a simetria como uma forma de pensamento que responde a muitos aparentes questionamentos sobre a organização e a constituição da matéria. A simetria entre espaço e tempo da Relatividade Restrita é a base para essa proposta. A descrição da microestrutura da matéria através das chamadas teorias quânticas é também formalizada em termos das simetrias e suas consequências. À medida que o íntimo da matéria é perscrutado mais e mais a fundo, novos regimes de comportamento vão-se revelando através do aparecimento de novas simetrias. Entretanto, o vasto e variado mundo subnuclear apresenta uma grande diversidade de partículas, além de elétrons, pósitrons, prótons e nêutrons. O aparente impasse é conciliar um regime com tantas simetrias e, ao mesmo tempo, com tantas diversidades.

O mais interessante da forma de se trabalhar as simetrias é que justamente essas não só explicitam as harmonias, mas organizam a aparente arbitrariedade das diferenças. A base de partida são as igualdades: um regime simétrico impõe uma conjuntura em que as partes aparecem como indistinguíveis e participam dos processos todas da mesma forma. Porém, uma vez que a situação simétrica tenha sido estabelecida, a própria noção de simetria e seus possíveis mecanismos de violação – na linguagem formal também conhecidos como mecanismos de quebra de simetria – permitem-nos compreender as diferenças, ensinam-nos a organizá-las e nos fazem compreender

que, no aparente caos dos objetos que se nos apresentam tão distintos, existe uma ordem comum, uma origem única, e as diferenças que se veem no regime de simetria perdida passam a ser compreendidas, e podem ser sistematicamente previstas, pelos princípios contidos na própria simetria. Nesse sentido, é legítimo afirmar que certas simetrias, ainda que não diretamente percebidas e reveladas, asseguram a harmonização e a organização das diferenças. Esse pode ser considerado como um dos legados mais consequentes da noção de simetria: compreender a origem das diferenças a partir de um regime de plena igualdade.

O grande projeto de unificar os campos de força da Natureza, que é um dos grandes eixos de investigação da Física Teórica Contemporânea, parte e se fundamenta essencialmente no conceito de simetria: busca-se qual seria a simetria organizadora do Universo primordial.

Com essa motivação em mente, trabalhamos com os nossos jovens e adultos do núcleo de Petrópolis o ensino da Matemática e das Ciências Naturais, fazendo-os ver como a Física, a Matemática, a Química e a Biologia se completam; trazemos as ideias de simetrias, igualdades, harmonias e diferenças para o contexto da Educação e das Humanidades, mostrando-lhes como o conhecimento é unificado, buscando um princípio mais fundamental por trás de ciências e saberes aparentemente tão diversificados.

Quebrar preconceitos ligados à aprendizagem da Física e da Matemática, motivar tais ciências para uma melhor compreensão e avaliação mais precisa da própria sociedade e, sobretudo, retornar às origens e descobrir que a essência de nosso Cosmo está na busca da Simetria Primordial, desencadeia nos estudantes o sentido de que todos podemos compartilhar a compreensão do mundo, restaurando, mesmo naqueles mais à margem do processo do conhecimento, a dignidade de poder decifrar a Natureza. A percepção é de que, uma vez percebendo o quanto de humano e social a Física e a Matemática carregam – e o conceito de simetria é o elemento-chave nesse processo – as diferenças se atenuam, harmonizam-se, e todos se “simetizam” na busca do conhecimento como o único dispositivo para a inserção e para a mobilidade social.

Essas ideias devem ser constantemente construídas durante os cursos de Física e Matemática, exemplificando-se e ilustrando-se conceitos e discussões formais com questões sociais e humanísticas. Como é interessante

descobrir as leis matemáticas e os conceitos físicos que estão por trás de sistemas econômicos, biológicos, ecológicos ou atômicos! Ao perceber a grande simetria que há no conhecimento humano, o público-alvo se dá conta e se autoconverte de que a compartimentação em tantas diversas disciplinas é apenas uma forma de organizar a nossa marcha para a compreensão do mundo que nós mesmos construímos.

Este é, talvez, um dos grandes benefícios e dos mais eficazes dispositivos para a integração dos saberes: em todos os campos do conhecimento, estabelecemos regras e exceções, igualdades e diferenças; a grande questão, todavia, é a universalização. Esta última é o legado máximo de um dado princípio de simetria: encontrar padrões de comportamento compartilhados por uma multiplicidade de objetos distintos. Estabelecer as igualdades e mostrar que as próprias diferenças constatadas podem ser compreendidas a partir dessas igualdades é tarefa da simetria, que se cristaliza, dessa forma, como uma primeira forma de tratar todos os saberes de forma harmoniosa. Criar essa atitude em nosso público e fazê-lo participar desse debate faz das aulas de Física e Matemática o laboratório para a construção de uma nova postura frente ao conhecimento transmitido e compartilhado nas aulas de Ciências da Natureza. A partir destas, trasladamos a discussão para o campo da Linguística e para os campos humanísticos, procurando colocar em evidência e promover o debate em torno da simetria e mostrando, finalmente, a universalidade desse conceito.

Temas típicos da Física e das demais Ciências da Natureza e da Terra e conceitos emergentes das Humanidades são tratados sob a ótica de todas as disciplinas. A discussão do tempo, do espaço, da energia, da luz, da complementaridade, da racionalidade, da incerteza, dos símbolos e significados, das afinidades eletivas, da relação indivíduo-sociedade, da mais-valia, da acumulação, e muitos outros (esses são apenas exemplos dentro de um universo muito mais amplo) são abordados como temas das aulas de todas as disciplinas e nos eventos especiais que temos ao longo do ano, as nossas chamadas “Jornadas Abertas do PVNC”.

Concluindo essa argumentação, seria oportuno manifestar que os níveis de motivação para o estudo da Física e da Matemática crescem manifestamente dentro desse quadro integrador, quando a questão da simetria é enquadrada num contexto de Cultura e Cidadania e as diferenças culturais e sociais podem ser discutidas e modeladas sob a ótica desse conceito.



Educação e Neurociência: o diálogo necessário

Teresa Maria Videira Rocha¹

Esse menino sonhou tornar-se filósofo. Não conseguiu. Seus possíveis colegas eram sérios demais, levavam-se a sério demais, não sabiam rir. Descobriu, então, que eles não eram companheiros de brinquedo que desejava. Todos os brinquedos que sugeria (pois é isso o que é pensar brincar com as palavras, como se brinca com peteca, bolinhas de gude, quebra-cabeças...) eles diziam que era de criança. Para eles a verdade é coisa grave, sempre séria, de paletó e gravata, pesada e sem leveza (ALVES, 2010).

Em sua obra *Conversas com quem gosta de ensinar* (2010), Rubem Alves deixa explícito o público-alvo de suas reflexões: o professor que é o educador por excelência, aquele que ama sua profissão e busca, incessantemente, despertar no educando a curiosidade, a motivação, o prazer em aprender. O conhecimento das Ciências traz em seu bojo essa grande possibilidade: a de seduzir. Por isso, observamos, a cada dia, o crescimento das pesquisas, tendo como cenários salas de aula, laboratórios, espaços do entorno escolar, enfim, cada vez mais, principalmente por meio dos programas de iniciação científica, discentes jovens e adolescentes mergulham, maravilhados, sob orientação de seus docentes, no universo da pesquisa científica, para compreenderem melhor os fenômenos que os cercam.

Quando o educador, filósofo e psicanalista Rubem Alves nos lembra que a “leveza” (que nos remete ao escritor italiano Ítalo Calvino) não é incompatível com a verdade, o autor nos convida a uma reflexão sobre o papel do

1 Professora do Núcleo de Línguas do IFSUDESTE MG – JF Mestre em Educação.
E-mail: teresavideira@gmail.com.

educador enquanto transgressor de paradigmas no mundo das estruturas e de seus determinismos, bem como aquele que privilegia o sujeito na relação com o objeto.

[...] Para que as estruturas se revelem é necessário que se lhes arranque a crosta de pessoas que a cobrem, da mesma forma como se recupera uma peça arqueológica há muito submersa pela raspagem do limo e do lodo que sobre ela se depositaram. É justo que nos preocupemos com pessoas, mestres e aprendizes (ALVES, 2010, p. 23).

O grande filósofo da literatura Ítalo Calvino, em sua obra *Seis propostas para o próximo milênio* (1994), livro que é resultado de uma conferência que o autor havia preparado para ministrar na Universidade de Harvard, propõe a leveza como uma das grandes necessidades, em todas as áreas do conhecimento, para a entrada do século XXI.

[...] Cada ramo da ciência, em nossa época, parece querer nos demonstrar que o mundo repousa sobre entidades sutilíssimas – tais as mensagens do A.D.N., os impulsos neurônicos, os quarks, os neutrinos errando pelo espaço desde o começo dos tempos... [...] Em seguida vem a informática. É verdade que o *software* não poderia exercer seu poder de leveza senão mediante o peso do *hardware*, mas é o *software* que comanda, que age sobre o mundo exterior e sobre as máquinas, as quais existem apenas em função do *software*, desenvolvendo-se de modo a elaborar programas de complexidade cada vez mais crescente. A segunda revolução industrial, diferentemente da primeira, não oferece imagens esmagadoras como prensas de laminadores ou corridas de aço, mas se apresenta como *bits* de um fluxo de informação que corre pelos circuitos sob a forma de impulsos eletrônicos. As máquinas de metal continuam a existir, mas obedientes aos *bits* sem peso (CALVINO, 1994, p. 20).

Calvino, ao fazer uma breve viagem pelo mundo da ciência, convida-nos a resgatar um modo de ver o mundo a partir da filosofia e da ciência, pois,

para ele, “a leveza está associada à precisão e à determinação, nunca ao que é vago ou aleatório” (CALVINO, 1994, p. 28). Convida-nos, também, a repensar as diversas áreas do conhecimento e a enxergar o mundo que nos cerca de forma mais abrangente, extrapolando nossa visão limitada que nos torna mais pesados no que diz respeito a nosso pensamento, e nos sugere contemplar outros horizontes, outros conhecimentos que não somente os de nossas necessidades imediatas: “Quero dizer que preciso mudar de ponto de observação, que preciso considerar o mundo sob uma outra ótica, outra lógica, outros meios de conhecimento e controle” (CALVINO, 1994, p.19).

Este novo milênio traz grandes e rápidas mudanças propiciadas pela globalização e pela facilidade quanto ao acesso às informações e às interações sociais por meio das novas tecnologias de informação e comunicação. E a necessidade de se adequar a esse novo contexto social e de acompanhar essas transformações, felizmente, tem unido profissionais de áreas diversas como exatas, humanas, sociais, de saúde, dentre outras, que buscam conhecimentos que lhes faltam para responder às questões desafiadoras com que se deparam. A velocidade com que as notícias de novas descobertas chegam, por meio das redes midiáticas, derruba os antigos monopólios acadêmicos e democratiza o acesso às pesquisas que são realizadas em todo o mundo.

Esse é o cenário atual. E os setores que não se atualizam tornam-se obsoletos. Ideias novas surgem a cada momento, preconceitos de todos os matizes são combatidos, tais como de cor, culturais, étnicos, de gênero, e por que não dizer, acadêmicos. Questiona-se o que é imposto, o que carece de demonstração, o que é desprovido de argumentos científicos e persuasivos. O progresso, garantido principalmente pelas novas tecnologias, trouxe consigo o anseio de se conquistar a longevidade e a qualidade de vida. Consequentemente, as diferentes áreas de conhecimento voltam-se para pesquisas que buscam compreender o novo sujeito, mais crítico e instruído, que emerge desse contexto e atender às atuais necessidades que ele apresenta.

Surge, assim, um diferente perfil de estudante que é mais virtual, digital, um sujeito que interage o tempo todo com o meio, particularmente por meio das redes sociais, estabelecendo um outro tipo de relação com os objetos e exercendo, na visão de M. Hardy *et al.* (*apud* SILVA, 2010), o papel de coautor, ou seja, aquele que constrói o saber a partir da interação com o outro. Essa concepção de aprendizagem interacionista, sem dúvida, remete-nos a teóricos

como Piaget, Vygotsky, Paulo Freire, Wallon e muitos outros que, a partir de suas pesquisas, fomentaram discussões e propostas que revolucionaram as concepções de ensino tradicionais, que concebiam o sujeito como ente passivo diante do conhecimento. Yves de La Taille, grande estudioso das teorias psicogenéticas, defende que

[...] é estruturando o universo que o sujeito se estrutura. Dois conceitos descrevem o processo: a experiência física e a experiência lógico-matemática. Agindo sobre os objetos, e assim transformando-os, o sujeito abstrai conhecimento dos mesmos (experiência física relacionada à explicação). Ao agir e transformar os objetos, o sujeito também abstrai as qualidades de suas ações, toma consciência de suas coordenações (experiência lógico-matemática, relacionada às implicações, no sentido lógico da palavra). É deste duplo jogo de abstrações que o sujeito tanto constrói novas estruturas cada vez mais complexas, quanto elabora novas sínteses a respeito dos objetos de seu conhecimento (SILVA, 2010, p. 210-211).

Dentro dessa perspectiva, embora a concepção do autor privilegie a experiência lógico-matemática em detrimento de outras vivências, o que a torna relevante, sem dúvida, é a interdependência entre sujeito e objeto e a visão do quanto a atuação do sujeito diante da manipulação do conhecimento modifica sua relação com ele, permitindo-lhe, também, construir novas teorias, participando, ativamente e de forma intervencionista, das experiências que lhe são apresentadas. A respeito dessa discussão acerca da coautoria e sobre outras questões que perpassam as bases e possibilidades da interatividade, as novas tecnologias de informação e comunicação, dentre outros temas que interessam ao educador-pesquisador que busca a qualidade de sua prática docente, sugere-se buscar subsídios na obra *Sala de aula interativa*, do autor Marco Silva (2010), que traz uma vasta e rica análise de várias abordagens que discutem a urgência de uma pedagogia interativa frente aos sujeitos que se nos apresentam na sociedade contemporânea.

Face a essa mudança de paradigma, revela-se uma visão de mundo multifacetada, e diversas áreas do conhecimento têm buscado resgatar e entender o sujeito e suas relações com o mundo, de forma holística, integral, complexa.

Assim, diferentes setores acadêmicos e sociais vêm rompendo com o sentimento de castas que lhes impedia de compartilhar e construir coletivamente descobertas e ações em favor da sociedade que os financia, de certa forma, consumindo seus produtos e informações.

Como resultado, inúmeros pesquisadores vêm trabalhando cada vez mais em conjunto, e esse exercício democrático e solidário tem se estendido ao público leigo, sob forma de informações educativas que chegam, através de redes midiáticas diversas, contribuindo para uma mudança efetiva da sociedade como um todo. Esse “tecer em conjunto” remete-nos ao princípio básico da teoria da complexidade de Edgard Morin (1990), que propõe a interação entre as ciências por meio do diálogo, da recursividade (produtos e efeitos, ao mesmo tempo, seriam causa e efeitos daquilo que os produziu), da diversidade, das interferências, da multiplicidade de conhecimentos que interagem.

Por meio dessa democratização dos conhecimentos científicos, uma nova área vem despontando e se expandindo em subáreas, despertando o interesse e o respeito de vários setores sociais e acadêmicos, em virtude das descobertas recentes que, prontamente, têm sido divulgadas e discutidas não só em revistas especializadas, mas por meio das mídias de forma geral. Trata-se da Neurociência, que tem sido veiculada por neurocientistas de renome e credibilidade, tais como Suzana Herculano Houzel, Roberto Lent, Antônio Damásio, Dehaene, Ivan Isquierdo, dentre outros.

A Neurociência estuda o funcionamento do sistema nervoso e o desenvolvimento do cérebro humano nas diferentes faixas etárias, para a compreensão de como os indivíduos aprendem, como as emoções se processam, como lesões em determinadas áreas cerebrais influenciam ações e comportamentos, dentre outros aspectos que envolvem processos neurológicos. Buscar o conhecimento das características cerebrais dos indivíduos e dos mecanismos que interferem no processo de aprendizagem é tarefa de suma importância para todo aquele que trabalha com a Educação. No entanto, infelizmente, o que observamos na prática é que muitos de nós nos preocupamos com especializações que atendem tão somente aos interesses imediatos, despercebidos de que trabalhamos com seres humanos que possuem necessidades e particularidades diferentes uns dos outros em relação à aprendizagem.

Os conhecimentos de como o cérebro aprende, memoriza, e de como as emoções influenciam decisivamente nesse processo nos dão, certamente,

um suporte a mais para tornarmos nossa prática mais interessante e prazerosa. Temas como motivação, atenção, memória, transtornos e dificuldades de aprendizagem não devem interessar tão somente a docentes de ensino fundamental. São assuntos que dizem respeito a todos nós, mesmo porque somos nós mesmos, por nossa vez, também aprendizes, e seria interessante e produtivo começarmos por conhecermos nosso próprio processo de aprendizagem para que possamos lançar mão de muitos recursos cognitivos e emocionais que desconhecemos em nosso cérebro.

Do ponto de vista neurocientífico, aprendizagem, seja no âmbito físico ou mental, significa mudança no cérebro e, como resultado, mudança de comportamento, por meio de uma alteração da comunicação entre as células do cérebro, chamadas células neurais. Essa modificação pode ser, atualmente, comprovada e monitorada graças ao avanço de técnicas sofisticadas de Ressonância Magnética (RM). Para saber mais sobre o assunto, é interessante ler o artigo “Neuroimagem por Ressonância Magnética”, de Jorge Moll Neto e Ivanei E. Bramati.²

[...] As técnicas de neuroimagem permitem um estudo não invasivo in vivo do sistema nervoso humano em seu estado normal ou patológico. Dentre estes métodos, a ressonância magnética (RM) destaca-se pela flexibilidade, rapidez e resolução espacial. A geração do sinal de RM ocorre da seguinte forma: o indivíduo a ser estudado é submetido a um campo magnético homogêneo e de alta intensidade. Os núcleos dos átomos comportam-se como pequenos magnetos, e seus spins (relacionados com uma propriedade conhecida como momento magnético) alinham-se em uma direção paralela ao campo magnético gerado pelo aparelho. A aplicação de um pulso de ondas de radiofrequência fornece energia, que ao ser absorvida faz com que esses núcleos ampliem o ângulo com que eles giram em torno do eixo do campo. Quando o pulso de radiofrequência é interrompido, os núcleos retornam à sua posição original de menor energia, devolvendo a energia ao meio sob a forma de ondas de rádio. Essa energia pode então ser captada por sensores especiais, constituindo o sinal da RM.

2 O artigo foi publicado na obra: LENT, ROBERTO. *Cem bilhões de neurônios. Conceitos Fundamentais da Neurociência*. Rio de Janeiro: Atheneu, 2002, p. 484-485.

Através de manipulações complexas deste sinal por ferramentas computacionais, imagens anatômicas de alta resolução são formadas (LENT, 2002, p. 484-485.)

Segundo Roberto Lent (2002), o cérebro humano é composto, aproximadamente, por cem bilhões de neurônios. Essas células neurais agem como unidades processadoras de informações. A substância cinzenta ou massa cinzenta que constitui a camada externa do cérebro, o córtex, é formada pelo corpo celular desses neurônios. Os neurônios comunicam-se o tempo todo com outras células (“conversam entre si”) por meio de sinais que são transmitidos por regiões que estabelecem esse contato, chamadas sinapses. A sinapse, conforme explica Lent, seria comparada a um *chip*, pois é capaz de transmitir informações entre duas células, bloquear ou modificar essas mensagens, ou seja, é responsável por processamentos de informação. Esses sinais são encaminhados ao longo de extensões que recebem o nome de axônios. Mas de que forma esse processo de transmissão acontece?

O principal sinal de comunicação do neurônio realiza-se por um impulso nervoso. Seria, ainda segundo Lent, uma espécie de pulso elétrico produzido pela membrana de forma rápida e sem variação. Ao longo do axônio, esse pulso elétrico se propaga de forma extremamente rápida. Quando alcança a extremidade do axônio, o impulso nervoso gera a emissão de uma mensagem química que transmite a informação para a célula seguinte, íntegra ou modificada. Os axônios localizam-se abaixo do córtex e recebem o conhecido nome de substância branca. É graças a essa substância branca que os neurônios conseguem se ligar por longas distâncias, mantendo a comunicação com áreas muito diversas. Podemos, então, perguntar de onde vem a cor clara, já que uma boa parte do cérebro é revestida pela substância cinzenta.

O conjunto de células não neurais, os gliócitos, ocupa uma grande área do cérebro, assim como os neurônios. Esse conjunto também é conhecido como neuroglia. É a neuroglia, os gliócitos, que fornece a infraestrutura, podemos dizer, para o processamento das informações. Descobertas mais recentes têm apontado a importância da neuroglia para os neurônios. Uma de suas principais funções é a de sustentação mecânica na transmissão sináptica entre os neurônios. É ela que nutre, regula o metabolismo, ajuda a formar o tecido nervoso na fase de desenvolvimento dos neurônios, é responsável pela

estrutura imunitária das células neurais, quer dizer, ela é uma espécie de “mãe” dos neurônios, já que exerce um papel fundamental. A camada branca que envolve os axônios é chamada de bainha de mielina. Essa camada, na verdade, é formada por gordura, e, por ser isolante, facilita a aceleração dos sinais elétricos que permitem uma comunicação mais rápida, sem que haja perda de dados. Existem pequenas estruturas chamadas nódulos de Ranvier, presentes na bainha de mielina, que fazem com que os sinais praticamente saltem de um nódulo para outro, dando maior velocidade a esses sinais. Jan Scholz e Miriam Klein (2013, p. 19) explicam que, durante o “salto” dos sinais pelos nódulos, há a ação de corrente de íons que fluem através da membrana das fibras nervosas.

Desse modo, quanto mais grossa a camada isolante, ou seja, com uma mielinização mais intensa, maior será a velocidade dos dados transmitidos e o surgimento de novos axônios. Por isso, pesquisas em todo o mundo têm comprovado que, quando aprendemos, de fato, uma habilidade, após muitos treinos, como observado em relação ao malabarismo, música, xadrez, dentre outras, ocorrem alterações não só na substância branca, com o engrossamento da camada de mielina que envolve os neurônios, mas também em relação à massa cinzenta, que aumenta consideravelmente. Essas mudanças foram acompanhadas por meio de experiências realizadas com o auxílio da Ressonância Magnética.

O mais curioso é que os neurocientistas que empreenderam essas pesquisas observaram que, independentemente do fato de as pessoas pesquisadas terem se saído bem ou mal, com o treinamento, elas passaram a dominar a habilidade e sofreram alteração nessas regiões do cérebro. Segundo os neurocientistas Scholz e Klein (2013), quando aprendemos algo, não acontecem modificações apenas em nosso comportamento, mas também na anatomia do cérebro. Para eles, “Adquirir conhecimentos, portanto, significa renovar-se” (Biblioteca Mente e Cérebro, vol. 2, 2013, p. 11-26).

A neurobióloga e psicopedagoga Marta Relvas, na obra *Neurociência na prática pedagógica* (2012), a partir de uma abordagem multidisciplinar, apresenta as contribuições da Neurociência para a Educação, trazendo o estudo do “cérebro aprendente” de forma didática e esclarecedora para os profissionais da Educação que não dominam os conteúdos do campo da Biologia. Aproximando os conhecimentos neurocientíficos do trabalho com a aprendizagem, a autora esclarece:

[...] As experiências são as informações que chegam ao sistema nervoso central em forma de estímulos sensoriais. O encéfalo processa essas informações procurando compará-las com outras que já estejam previamente guardadas, reconhecendo-as ou não. Esse mecanismo não envolve apenas os aspectos físicos dessa informação (cor, forma, tamanho) mas também a relaciona com os aspectos diretamente ligados aos sentimentos e às emoções. Após seu processamento, um conjunto de sensações é memorizado com a informação recebida que pode ser agradável ou não (RELVAS, 2012, p. 44-45).

Segundo os esclarecimentos da autora, podemos supor, então, que a lembrança que surge à mente sobre determinada informação é desencadeada por um estímulo já conhecido pelo sistema nervoso. A novidade, que é representada por algo que estamos aprendendo, ou seja, por novos estímulos, entra no sistema nervoso. Se a aprendizagem acontece, de fato, e é guardada em nossa memória, ela provoca, indubitavelmente, uma mudança no cérebro.

Em suma, podemos perceber que nossa responsabilidade diante do trabalho com a aprendizagem de nossos discentes é grande. A busca de novos conhecimentos torna-se urgente. Se, da melhor forma possível, nós nos capacitamos, melhores metodologias de ensino poderemos aplicar em nossas práticas educativas. Se não queremos assistir às evasões crescentes em todas as modalidades de ensino, se desejamos alunos mais motivados e interessados, que aprendam, efetivamente, o conteúdo e não apenas alcancem um rendimento acadêmico avaliado por meio de notas, o que não garante o real aprendizado se não é incorporado durante toda a vida do indivíduo para ser acessado quando necessário; se, enfim, desejamos, incessantemente, manter nossa própria motivação e entusiasmo pela docência e pela pesquisa, temos um terreno fértil de exploração nos conhecimentos da Neurociência para que possamos conhecer melhor o processo de aprendizagem de nossos discentes e, por que não dizer, passarmos a conhecer um pouco mais sobre nós mesmos.

Referências

ALVES, Rubem. *Conversas com quem gosta de ensinar*. Campinas: Papirus, 2010.

CALVINO, Ítalo. *Seis propostas para o próximo milênio*. São Paulo: Companhia das Letras, 1994.

LENT, Roberto. *Cem bilhões de neurônios. Conceitos Fundamentais da Neurociência*. Rio de Janeiro: Atheneu, 2002.

MORIN, Edgar. *Introdução ao pensamento complexo*. Trad. Dulce Matos. 2. ed. Lisboa: Instituto Piaget, 1990.

RELVAS, Marta P. *Neurociência na prática pedagógica*. Rio de Janeiro: Wak, 2012.

SCHOLZ, Jan; KLEIN, Míriam. Em busca de novas conexões. *Biblioteca Mente e Cérebro*, v. 2. São Paulo: Duetto Editorial, 2013.

SILVA, Marco. *Sala de aula interativa: educação, comunicação, mídia clássica*. 5. ed. São Paulo: Edições Loyola, 2010.

O observador: uma incursão inóspita sobre os escombros da razão

Ricardo Sibanto Simões

Não falemos dos objetos atômicos e só usemos o formalismo para o que ele pode nos dar – números e probabilidades. Não falemos sobre eles e façamos, até, da interdição de falar sobre eles uma regra imperativa. Só falaremos do que vemos e tocamos, ou seja, no nosso caso, dos aparelhos com que fazemos física. Poremos entre parênteses a natureza atômica da matéria que constitui esses aparelhos, bem como as leis quânticas correspondentes. Reteremos apenas os fatos sem nenhum trauma. Sim, as coisas que vejo são como as vejo: são clássicas e proíbo que se fale delas de modo diferente. Saibam aqueles que violarem este interdito que se expõe aos piores reveses e ao estilhaçamento do pensamento (OMNÈS, 1995, p. 181).

O trecho citado é conhecido como a interdição de Bohr, um recurso necessário do ponto de vista utilitário da Física, porém ingênuo do ponto de vista do conhecimento da realidade.

Ao enunciar essa recomendação, Bohr, indiretamente, coloca-nos diante da fragilidade da nossa noção de conhecimento. A Física, em geral, organiza o conhecimento extraído das regularidades que percebemos no mundo através de leis matemáticas que descrevem um dado fenômeno¹. Essa

1 Fenômeno aqui tem o significado comum em Física, ou seja, qualquer evento que possa ser replicado por qualquer observador.

organização, posteriormente, ganha uma representação pictórica² para que possamos gerar um significado.

Toda a estrutura da Física clássica e moderna está alicerçada em três postulados gerais:

- A natureza possui regularidades.
- Essas regularidades podem ser observadas, aprendidas, generalizadas e previstas através de leis e teorias.

Esses postulados têm aspecto de certeza para o público leigo e suspeito para muitos físicos, possivelmente alimentados pela ilusão que se deriva do controle que a Física nos entregou sobre a realidade observada. Contudo, o que podemos afirmar, sem possibilidade de equívoco, é que os seres humanos conseguem interagir com a natureza dessa forma e não que ela é assim constituída, necessariamente.

Usarei um célebre fenômeno da história da chamada antiga mecânica quântica para defender esse ponto de vista, permeando minha apresentação com algum recurso da crítica que Hume faz ao conceito de causalidade, ainda que o faça de forma simplificada.

Por fim, tentarei apresentar, de forma sucinta, como a Física ainda é dependente da perspectiva do observador para além do projeto da ciência moderna.

O experimento da difração de elétrons

O estudo de três fenômenos contribui para o início da mecânica quântica: a radiação de corpo negro, o efeito-fotoelétrico e a experiência de difração de elétrons.

Para ajustar a teoria aos resultados experimentais da radiação de corpo negro, Plank se viu obrigado a postular que as frequências de radiação emitidas por um corpo negro eram discretas³ e não contínuas.

2 Representação pictórica aqui significa as construções imagéticas e as correspondências que conseguimos traçar entre a teoria física com os elementos e o fenômenos que nos são dados diretamente aos sentidos.

3 Isso significa dizer que apenas certas frequências de radiação são emitidas por um corpo negro e que você não encontra um espectro contínuo dessas. Essa radiação é, no jargão da mecânica quântica,

Einstein, por sua vez, para explicar alguns resultados experimentais do efeito-fotoelétrico que não se ajustavam às previsões clássicas, postulou que a luz não seria um conjunto de ondas eletromagnéticas, mas seria constituída por partículas chamadas fótons.

As interpretações teóricas exibidas por Einstein e Planck, apesar de se ajustarem aos fenômenos, obrigavam-nos a lançar um novo olhar sobre a estrutura das ondas eletromagnéticas. Contudo, até aqui nada de novo se colocava sobre a estrutura da matéria ou sobre o papel do observador na Física. A experiência de difração de elétrons seria o evento que se encarregaria disso.

No início do século XX, um canhão de elétrons foi colocado diante de um interferômetro de fenda dupla com uma chapa fotográfica do outro lado – caso queira ter uma visão pictórica do que estamos falando, acesse o *Youtube* e cole o link: <http://www.youtube.com/watch?v=lytd7BOWRM8>.

Ao acionarmos o mecanismo, como os elétrons têm igual probabilidade de serem lançados em qualquer direção, esperaríamos que a figura formada pelas partículas que conseguiram atravessar as fendas e colidir com a chapa fotográfica fosse constituída de dois borrões na forma de “linhas”, em um formato aproximado aos das fendas. Mas a figura observada era a imagem de uma típica interferência de ondas.

Esse inusitado resultado colocou a todos perplexos, mas ainda restava a hipótese confortável de assumir que existia um tipo de interação desconhecida entre os elétrons que, por coincidência, impedia que eles fossem lançados aleatoriamente e que produziria as trajetórias individuais que, somadas, constituiriam a figura formada.

O próximo passo foi tentar isolar a possível interação desconhecida, o que poderia ser facilmente conseguido lançando um elétron de cada vez. O que se esperava é que, ao final do processo, devido a não existência de uma direção privilegiada de emissão, a figura formada na chapa metálica fosse a correspondente aos dois borrões na forma de “linha”. Porém o resultado em nada se alterou.

O próximo passo foi colocar um detector em uma das fendas para determinar quantos elétrons passavam por ela durante o processo. O inesperado

quantizada. A ideia foi tão estranha que o próprio Planck levou cerca de 20 anos entre ter a ideia e encontrar coragem de publicá-la.

então se concretizou: as figuras que se formaram na chapa metálica foram os dois borrões em forma de disco, como era classicamente esperado.

A interpretação desse último resultado era ainda mais difícil de aceitar, pois ao que parecia o simples ato de medir alterava o resultado do experimento. Repare que o detector não interfere com o elétron, pois sua única ação é receber a radiação emitida pelos elétrons que passam pela fenda da qual ele se encontra mais próximo.

A primeira e a segunda parte dessa experiência indicavam que o elétron não seria uma partícula, mas sim uma onda. Contudo, o resultado da terceira parte desse experimento não pode ser explicado a menos que se aceite que a simples medida de um fenômeno o altera.

Apesar dos resultados descritos, no experimento de espalhamento, um elétron continua se comportando como se fosse uma partícula.

As questões levantadas pelos experimentos narrados aqui são tão desafiadoras à estrutura do nosso pensamento que levaram a “Interdição de Bohr”. Os historiadores creditam essa interdição ao fato de que Bohr e os demais físicos de sua época não conseguiam gerar uma estrutura teórica unívoca para a estrutura da matéria. Entretanto, nesse ponto, eu me permitirei conceder a um dos pais da mecânica quântica um pouco mais de crédito e peço que acompanhem o que exponho a seguir apenas com a qualidade de possibilidade.

Percebam que a citada interdição contém a seguinte afirmação: “[...] saibam aqueles que violarem este interdito que se expõe aos piores revezes e ao estilhaçamento do pensamento”.

Acaso, na regra enunciada, não houvesse menção ao “estilhaçamento do pensamento”, eu compreenderia que ela se limitava a nos impedir de tratar da dualidade onda-partícula. Afinal, essa incapacidade de ter uma representação unívoca da realidade é um contratempo desagradável do ponto de vista filosófico, mas em nada compromete a estrutura da Física como um todo. Em contrapartida, a influência da medida no resultado do experimento evidencia uma questão bem mais delicada para. Falamos de retirar do observador, fio condutor de toda e qualquer lei física já enunciada, a neutralidade de sua presença, ou seja, a sua característica fundamental para que a Física possa seguir tal como a conhecemos.

Queremos apresentar, através desse trabalho, a aparente impossibilidade da neutralidade da presença do Observador.

A crítica de Hume

Um homem observa o céu e percebe que um feixe de luz seguido de um estrondo tem alta probabilidade de ocorrer toda vez que o céu de uma determinada região do nosso planeta está coberto de nuvens acinzentadas. Rapidamente ele supõe existir uma relação entre as nuvens acinzentadas e a ocorrência do citado fenômeno, e toma o primeiro como causa do segundo.

A cada vez que esse homem observa esse fenômeno ocorrer, sempre precedido das nuvens acinzentadas, mais forte em seu espírito se faz a correlação entre os dois, e mais inclinado se torna ele em admitir que há uma relação de “causa-efeito” entre eles.

Esse mesmo homem olha o céu todos os dias e vê o Sol girar em torno da Terra, e a cada dia em que esse evento se repete, mais inclinado está ele em admitir que assim o é, até que, aos poucos, essa informação se converte em certeza, ainda que não seja necessariamente verdade.

A repetição de uma extensa coletânea de fenômenos com essas características no cotidiano dos homens, ao longo de milênios, levou-nos à crença razoável de que estamos cercados por um mundo preenchido de regularidades que podem ser compreendidas em termos de causa e efeito.

Com o tempo, aprendemos a relacionar vários desses fenômenos entre si dentro da perspectiva causal. Na verdade, fomos tão competentes nisso que conseguimos recobrir essas relações através do que Hume chamou de “termos gerais”. A possibilidade que temos de reconhecer que certos objetos distintos pertencem à mesma “espécie” ou “classe”, por exemplo, seria derivada dessa capacidade humana. Esse, na verdade, é o uso mais simples dos termos gerais⁴.

Por exemplo, temos a percepção de que uma pessoa tem extensão, cor, forma, produz sons etc. Quando imaginamos uma pessoa, temos um conceito que reúne diversas ideias por meio de associações.

4 Os termos gerais de Hume, quando aplicados à função de correlacionar elementos da mesma espécie, em muito se assemelham ao conceito de abstração de Aristóteles em sua crítica ao “mundo das ideias” de Platão. Contudo, distingue-se fortemente desse quando pretende explicar a ilusão das relações causais metafísicas.

Cada ideia se refere a um objeto em particular, porém é apenas quando usamos de termos gerais, como a linguagem e a palavra, que podemos nos referir a coisas particulares que tenham características semelhantes, e assim, através do hábito e da cultura, generalizá-los.

Imagine que a minha percepção mostra que estou diante de dez objetos que possuem encosto, assento e quatro apoios com o solo. Rapidamente digo que os dez são cadeiras. Contudo três delas são feitas de madeira, e o assento é de espuma; outras 5 são feitas de alumínio, inclusive o assento; e as duas últimas são feitas de alumínio, mas têm uma forma diferente das outras cinco.

Repare que, com a palavra, conseguimos identificá-las como objetos da mesma espécie, apesar das suas diferenças. O que estamos dizendo é que nós conhecemos um conceito de cadeira que foi generalizado, e isso só é possível porque existe a linguagem que nos permitiu criar um termo geral (cadeira) que pode ser aplicado a diferentes objetos particulares que possuem certas características básicas.

O que Hume está dizendo é que, sem os termos gerais, não poderíamos fazer referências e criar generalizações. Para ele, a base da universalização de um conceito nada mais é do que um hábito, um costume, ou seja, não existiriam, a princípio, características universais autocontidas em determinados seres capazes de reuni-los como sendo de uma mesma espécie.

A crítica de Hume se estende à metafísica dos conceitos com os quais dotamos a matéria. Pela experiência, sabemos que um copo é feito de um determinado material – vidro, por exemplo – reconhecemos que tem certa ductilidade, que é transparente, ou tem determinada cor etc. Todas essas características estão presentes na matéria que constitui esse objeto, estão na *physis* (matéria), são características físicas.

Da mesma forma, a experiência também mostra que a mão de um ser humano tem certas características como cor, certa ductilidade, certa aspereza etc. Contudo, quando a nossa mão esbarra em um copo de vidro e esse cai e quebra, temos por hábito dizer que a causa da queda do copo foi o empurrão.

Percebam que não é a mão a causa da queda do copo, mas o empurrão. Pergunta-se: o empurrão é uma característica presente na matéria de qual dos dois corpos? Sabemos que ele não está presente em nenhum dos dois. O

empurrão é o nome que damos a um tipo específico de relação entre esses dois corpos materiais. É algo que está para além da matéria que os constitui⁵, e por isso pode ser considerado um fenômeno metafísico.

Acreditamos que causa e efeito são leis presentes na regularidade dos fenômenos naturais. Nesse raciocínio, o empurrão ganha uma qualidade física através do conceito de força, permitindo que se construa inclusive a segunda Lei de Newton, que pode ser entendida da seguinte forma, dentro de uma perspectiva causal: a causa da aceleração de um corpo é uma determinada resultante de forças.

Hume diz que a experiência nos mostra que é possível estabelecer certas relações entre os corpos materiais a partir da nossa observação. No citado exemplo, somos capazes de enunciar que, toda vez que a mão de um humano interagir com um copo na forma como o indicamos no exemplo, o copo cairá. Nada, além disso, deveria ser enunciado.

A sentença: “a queda do corpo teve como causa uma força” se origina do nosso hábito e do nosso costume.

No seu livro *Iniciação à História da Filosofia*, Danilo Marcondes resume a ideia de causalidade em Hume da seguinte forma:

Para Hume a causalidade resulta apenas de uma regularidade ou repetição em nossa experiência de uma conjunção constante entre fenômenos, que, por força do hábito, acabamos por projetar na realidade, tratando-a como se fosse algo existente (MARCONDES, 2005, p. 182).

O projeto da ciência moderna e seus limites

Poucos seres humanos estão familiarizados com a teoria do conhecimento, e, como temos pouco espaço para uma apresentação formal, vou me limitar a usar uma das sínteses produzidas pela teoria: os seres humanos não possuem um critério de verdade.

Os teóricos do conhecimento não divergem muito do conceito de verdade, ou seja, verdade é quando a ideia que tenho sobre certa característica de

5 “Meta” significa para além de; “*physis*” significa matéria; logo metafísica é para além da matéria.

um objeto coincide com essa característica de fato. Por exemplo, um amigo me diz que uma cadeira é branca, e, para verificar se é verdade, eu olho para ela, e a minha visão confirma a informação: a cadeira é branca. Porém, quando eu olhei para a cadeira, ela estava iluminada por luz policromática. Se eu usar a minha visão para confirmar a informação sobre a cor da mesma cadeira, quando essa estiver iluminada por luz monocromática azul, eu a verei azul e pensarei que meu amigo mentira⁶.

Como vemos, a nossa visão não é um critério inequívoco para decidir sobre a veracidade de uma informação, pois é afetada pela intensidade luminosa, pela distância etc. Da mesma forma, nenhum dos meus sentidos pode ser usado como critério de verdade; todos podem me apresentar informações diferentes sobre um mesmo objeto, dependendo das condições em que esse objeto me é apresentado.

Nesse ponto, a crítica de Hume à regularidade dos fenômenos físicos e da causalidade ganha nova dimensão, pois se não há um critério que me permita decidir sobre a verdade, o máximo que podemos fazer é criar termos gerais sobre o mundo, ou seja, criar os conceitos que unificam os fenômenos ao entendimento geral dos homens. A ciência como produto da modernidade serviu a esse projeto da forma mais efetiva possível, ou seja, desocupou-se da verdade e se incumbiu de nos fornecer utilidade.

A interdição de Bohr é um exemplo disso, pois permitiu à Física desenvolver-se no âmbito do possível, do útil e nos ajudou a construir o computador, a TV, os satélites, os aparelhos de Ressonância Magnética, os smartphones, a internet, entre outras coisas. Mas não podemos seguir pensando que o que é cientificamente comprovado tem status de verdade. Precisamos compreender que a ciência é construída de ajustes contínuos entre teoria e experiência para nos entregar melhor controle sobre a nossa realidade, ainda que por vezes esse controle seja danoso.

Comprovações científicas lobotomizaram dezenas de pessoas em um passado não tão remoto, esterilizaram mulheres saudáveis, diagnosticaram milhões de crianças com TDAH e as entupiram de remédios, entre muitas outras coisas.

6 Isso, é claro, seu eu não tiver o menor conhecimento a respeito de óptica básica.

Assim como o homem que se acostuma a acreditar que o Sol gira em torno da Terra pela sua experiência cotidiana e aos poucos transforma a crença em certeza, diversas teorias são cientificamente comprovadas pelo mesmo método.

Ser cientificamente comprovado não passa disso, um evento que pode ser repetido por qualquer observador, desde que exposto às mesmas condições. Lembre-se que o Sol parecerá girar em torno da Terra para qualquer ser humano que esteja em nosso planeta, ainda que isso não seja necessariamente verdade.

Parece que Hume tinha razão, os seres humanos são criaturas de hábitos, e o observador carrega para todas as suas conclusões e observações a força dos seus hábitos e costumes. Nisso podemos ver, talvez, um problema a ser evitado pelos cientistas na sua contínua busca pela neutralidade. Mas, talvez, e apenas talvez, exista uma pista na experiência de difração de elétrons sobre a impossibilidade da nossa imparcialidade sobre o mundo. Somos seres que devem medir para conhecer, e, ao que parece, esse ato pode ser impossível para seres imparciais.

Referências

- CHALMERS, Alan. *A Fabricação da Ciência*. São Paulo: UNESP, 1994.
- COHEN, I. Bernard. *O Nascimento de uma Nova Física*. Lisboa: Trajectos, 1988.
- EISBERG, Robert; RESNICK, Robert. *Física Quântica*. Rio de Janeiro: Campus, 1994.
- HARRÉ, Rom. *As filosofias da ciência*. Lisboa: Edições 70, 1984.
- HENSSEN, Johannes. *Teoria do Conhecimento*. Coimbra: Martins Fontes, 1979.
- MARCONDES, Danilo. *Iniciação à História da Filosofia: dos pré-socráticos a Wittgenstein*. Rio de Janeiro: Zahar, 2005.
- OMNÈS, Roland. *Filosofia da Ciência Contemporânea*. São Paulo: UNESP, 1996.
- POINCARÉ, Henri. *O valor da ciência*. Rio de Janeiro: Contraponto, 1995.
- TIPLER, Paul A. *Física vol. 2B*. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1984.

