

# Ilustríssima Física

O CBPF na Folha de S. Paulo



# *Ilustríssima Física*

**O CBPF na *Folha de S. Paulo***

Rio de Janeiro, 2019

1ª edição



*celebrando o passado  
realizando o presente  
construindo o futuro*

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA

Jair Messias Bolsonaro

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA,  
INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES

Marcos Cesar Pontes

SECRETARIA EXECUTIVA

Júlio Francisco Semeghini Neto

SUBSECRETARIA DE UNIDADES VINCULADAS

Gerson Nogueira Machado de Oliveira

DIRETORIA DO CENTRO BRASILEIRO

DE PESQUISAS FÍSICAS

Ronald Cintra Shellard

REVISÃO

Alicia Ivanissevich

CAPA, PROJETO GRÁFICO E DIAGRAMAÇÃO

Ana Luisa Videira

# Sumário

Apresentação.....	5
Prefácio.....	7
100 anos da cosmologia.....	8
70 anos do méson pi.....	17
O céu das mais altas energias.....	23
Computadores quânticos.....	29
À memória de um mineral.....	39
Do que é feito o universo?.....	46
Magnetismo contra o câncer.....	52
Mecânica quântica e pós-verdade.....	58
Elétron: um secular ainda misterioso.....	67
Um quarto neutrino?.....	73
Nós, as estrelas e o universo.....	79



# Apresentação

Nos últimos quase três anos, o CBPF manteve um convênio com a *Folha de S. Paulo*, um dos maiores e mais respeitados jornais do Brasil.

Este livro reúne os textos preparados para essa iniciativa de divulgação científica. São todos escritos em linguagem para o grande público, abrangem diversas áreas da física e dão uma ideia da pesquisa que é hoje feita em nossa instituição. Mais: relatam grandes questões em aberto da física - muitas das quais tópicos estudados por pesquisadores desta casa.

Divulgar ciência sempre foi uma preocupação do CBPF, ganhador do Prêmio José Reis de 2006, um dos mais prestigiosos deste país na área de popularização do conhecimento científico.

Esperamos que esta publicação sirva de modelo e incentivo às novas gerações de físicas e físicos, para que elas não só mantenham esse importantíssimo diálogo com o grande público, mas também o ampliem - afinal, essa comunicação é uma forma de prestar contas à sociedade, que, em grande parte, subsidia a pesquisa científica no Brasil.

Boa leitura!

*Ronald Cintra Shellard*

Diretor do CBPF





# Prefácio

Em sua edição de 1<sup>o</sup> de janeiro de 2017, ‘Ilustríssima’ (caderno cultural da *Folha de S. Paulo*) trazia, em duas páginas internas e com destaque na capa, artigo sobre os 100 anos de um trabalho do físico de origem alemã Albert Einstein (1879-1955) que inauguraria a cosmologia científica (ou moderna).

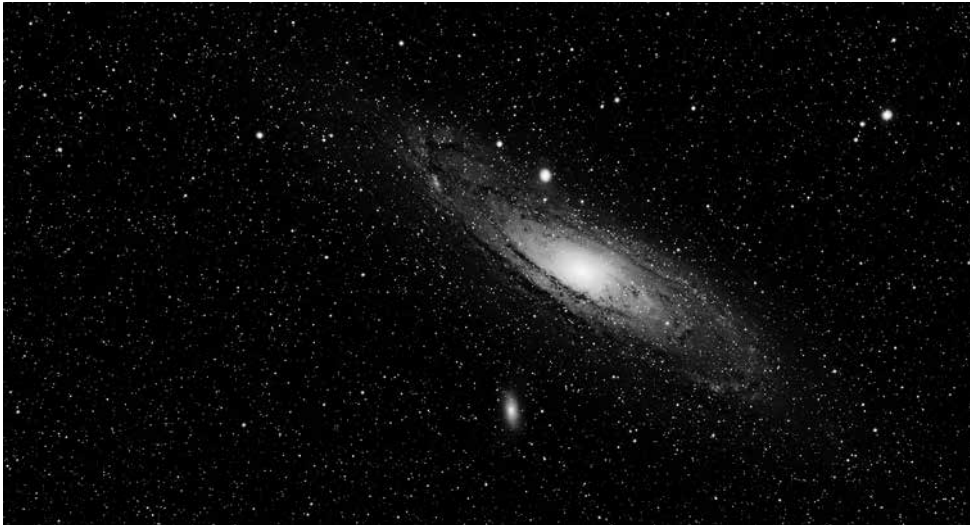
Começava, assim, o acordo CBPF-*Folha* para a publicação de textos sobre temas atuais da física escritos por pesquisadores desta instituição. A ideia era mostrar para o público daquele jornal diário - um dos mais importantes e respeitados do Brasil - que questões atuais e de fronteira da ciência podem ser apresentadas - com precisão - em linguagem simples.

Nestes quase três anos de colaboração, mais oito artigos - todos de autoria de pesquisadores do CBPF, escrevendo sobre suas áreas de pesquisa - foram publicados em ‘Ilustríssima’. Também presentes nesta coletânea, dois deles (um sobre neutrinos, outro sobre estrelas) aguardam na fila.

Por questões técnicas e de praticidade, as versões aqui apresentadas são as enviadas para os editores de ‘Ilustríssima’, que, não raramente, as aprimoraram com sugestões, críticas, inclusões ou cortes. Portanto, são ligeiramente distintas das publicadas no jornal.

Por fim, esperamos que este seja o primeiro de outros volumes de uma colaboração que acreditamos frutífera não só para o CBPF e a *Folha*, mas também (e principalmente) para o grande público.

Cássio Leite Vieira (org.)  
Núcleo de Comunicação Social  
CBPF



## 100 ANOS DA COSMOLOGIA

Há 100 anos, era publicado artigo que trazia a primeira descrição matemática do universo como um todo. Nascia, assim, a cosmologia relativística, como resultado das ideias apresentadas pelo físico de origem alemã Albert Einstein (1879-1955). Arrancada da filosofia do século anterior, a então nova área do conhecimento passaria por um período de profunda interpretação matemática, retomaria para si questões filosóficas, para, finalmente, chegar a um tipo de maturidade baseada em observações astronômicas feitas a partir da década de 1960. Hoje, a cosmologia é o campo que detém as talvez mais profundas perguntas científicas (e filosóficas) da atualidade: do que é feita a esmagadora maioria do universo?

Antonio Augusto Passos Videira  
Cássio Leite Vieira

“Vou conduzir o leitor por uma estrada que eu mesmo percorri, a qual é árdua e sinuosa”. A frase – que tem algo da essência do hoje clássico ‘A estrada não percorrida’ (1916), do poeta norte-americano Robert Frost (1874-1963) – está em um artigo científico publicado há 100 anos. Seu conteúdo tem todos os ingredientes para declarar aquelas 11 páginas marco histórico da civilização: pela primeira vez, a humanidade – cerca de 50 mil anos depois de o *Homo sapiens* deixar uma mão com tinta estampada em uma pedra – era capaz de descrever matematicamente a maior estrutura conhecida. O autor de tamanho trabalho intelectual: o físico de origem alemã Albert Einstein (1879-1955).

Ao terminar aquele artigo de 1917, Einstein escreveu a um colega dizendo que aquilo que havia produzido o habilitaria a ser “internado em um hospício”. Mais tarde, referiu-se àquele mundo teórico que havia construído como um “castelo alto no ar”.

O universo que saltou dos cálculos (e, sim, das idiosincrasias científicas e filosóficas) de Einstein tinha basicamente três características: era finito, sem fronteiras e estático – esta última característica alimentaria debates e traria arrependimento a Einstein nas décadas seguintes.

Em ‘Considerações cosmológicas na teoria da relatividade geral’, publicado em fevereiro de 1917, nos *Anais da Academia Real Prussiana de Ciências*, Einstein construiu (de modo muito visual) seu castelo, usando as ferramentas que ele havia forjado pouco antes: a teoria da relatividade geral, finalizada em 1915, arcabouço teórico já classificado como a maior contribuição intelectual de uma só pessoa à cultura humana.

Classificações subjetivas à parte, o fato é que aquele ferramental matemático impenetrável (mesmo para físicos) nada mais é do que uma teoria que explica os fenômenos gravitacionais. Por exemplo, por que a Terra gira em torno do Sol ou um buraco negro devora avidamente luz e matéria.

Com a relatividade geral, a teoria da gravitação do físico britânico Isaac Newton (1642-1727) – aquela que se aprende no ensino médio – passou a ser um caso específico da primeira, para situações em que massas são bem menores do que as das estrelas e a velocidade dos corpos muito inferior à da luz no vácuo (300 mil km/s).

Entre essas duas obras de respeito (1915 e 1917), impressiona o fato de Einstein ter achado tempo para escrever uma pequena joia: ‘Teoria

da relatividade especial e geral' (Rio de Janeiro: Contraponto), na qual populariza suas duas teorias, incluindo a de 1905 (especial), em que mostrou que, em certas condições, o espaço pode encurtar e o tempo dilatar.

Tamanho esforço intelectual e total entrega ao raciocínio cobraram seu pedágio: Einstein adoeceu, com problemas no fígado, icterícia e úlcera. Permaneceu debilitado até o final daquela década.

Se deslocado de sua época, Einstein e sua cosmologia podem ser facilmente vistos como um ponto fora da reta. Porém, a historiadora da ciência britânica Patricia Fara lembra que aqueles eram tempos de “cosmologias”, de visões globais sobre temas científicos. Ela cita, por exemplo, a teoria da deriva dos continentes, do geólogo alemão Alfred Wegener (1880-1930), marcada por uma visão cosmológica da Terra.

Fara dá a entender que várias áreas de ciência, naquele início de século, passaram a olhar seus objetos de pesquisa em cenário mais amplo, como um todo, buscando dados e hipóteses em outros campos do conhecimento.

## **A menos percorrida**

Em seu clássico de 1916, Frost escreveu: “Escolhi a [estrada] menos percorrida. Isso fez toda a diferença”. Einstein fez também uma opção (não sem consequências): simplicidade. Ele construiu o modelo mais simples possível que explicasse os (poucos) dados observacionais da astronomia sobre o universo – este, à época, era praticamente sinônimo de Via Láctea (nossa galáxia).

Construir um modelo de universo significa achar uma solução para um conjunto de 10 equações matemáticas complexas, ‘coração’ da relatividade geral. Mas, para isso, é preciso partir de certas premissas. É aqui que a visão de mundo (com seus preconceitos e suas idiossincrasias) de Einstein subiu ao palco.

Primeiramente, por questões físicas (e estéticas), livrou-se do infinito que amaldiçoava o universo newtoniano. Para isso, fez com que o espaço se dobrasse sobre si mesmo, dando origem a uma geometria que pode ser imaginada como superfície de uma esfera, objeto matemático finito e sem fronteiras.

Einstein também imaginou que, em larga escala, a distribuição de massa de seu universo fosse homogênea, mesmo que aqui e ali haja ‘cálculos’ (estrelas, galáxias etc.). Outra premissa bem razoável: o universo seria isotrópico, ou seja, sem uma direção privilegiada.

Talvez, por preconceito filosófico, Einstein tenha tornado seu universo estático. O principal motivo aqui é algo que já era questão polêmica desde os tempos de Newton: a matéria do universo se atrairia mutuamente, e o universo colapsaria. Para o físico britânico, Deus evitaria essa catástrofe cósmica.

Einstein livrou-se desse inconveniente ao injetar um termo adicional em suas equações. A constante cosmológica – como ficaria conhecida – agiria como uma antigravidade, repelindo, em vez de atrair a matéria. Desse modo, puxão gravitacional e repulsão estariam em equilíbrio, e o universo seria estático.

A publicação desses resultados deu novos rumos a uma área que, ainda em 1913, havia sido classificada como prolixa, pretensiosa, confusa e com total falta de controle sobre o aparato matemático.

Nascia a cosmologia relativística, na forma da primeira visão matemática do universo como um todo. Sem dúvida, um marco cultural.

## Origem da inércia

Einstein não estava interessado em descrever a (ou uma) arquitetura do universo – por sinal, um programa que a recém-nascida astrofísica havia se incumbido no final do século 19 –, o que o levou, então, ao artigo de 1917?

Não há muito consenso entre historiadores da área. Há quem defenda, como Christopher Smeenk, da Universidade Western (EUA), que os resultados de 1917 são, todos eles, subprodutos de certa obsessão de Einstein em saber se era válido ou não, no contexto da relatividade geral, o chamado princípio de Mach, referência ao físico-filósofo austríaco Ernst Mach (1838-1916), para quem a inércia era resultado da interação de um corpo com a totalidade de matéria do universo (e não com o espaço absoluto newtoniano).

Parece, no entanto, haver uma certeza em relação à visão de mundo de Einstein naquele momento: sua aversão por modelos dinâmicos,

ou seja, universos que se expandem ou se contraem. Por ironia do destino, a pessoa que o convenceu a adentrar o terreno da cosmologia foi a que arrancou das equações da relatividade, ainda em 1917, um modelo de universo não estático.

O universo do holandês Willem de Sitter (1872-1934) – talvez, seu mais importante parceiro na caminhada em direção à cosmologia relativística – era, no mínimo, exótico. Não tinha massa alguma, mas o espaço se expandia, por conta de uma constante cosmológica diferente de zero. Além da expansão, outro dissabor de Einstein: o princípio de Mach parecia não valer no universo de seu colega astrofísico.

Para historiadores da área, a cosmologia do século passado orbitou em torno de um só tema: entender os universos de Einstein e De Sitter, bem como as posteriores variações desses modelos.

## **Matemática e expansão**

Para a cosmologia relativística, a década de 1920 foi, em essência, marcada: i) pelas tentativas de extrair realidade plausível da abstração matemática que embasava os modelos de universo; ii) pela descoberta, em 1923, de que o universo era não só muito mais do que simplesmente a Via Láctea, mas também (para certo espanto generalizado) que estava em expansão (1929), dois resultados obtidos pelo astrônomo norte-americano Edwin Hubble (1889-1953).

Ao tomar conhecimento dos resultados de Hubble, Einstein abriu mão do termo matemático que ele havia incluído à força em suas equações para frear o universo. Classificou a constante cosmológica como “o maior erro” de sua carreira.

Poucos anos antes, Einstein havia sido rígido ao atacar – com argumentos totalmente equivocados – resultados do início da década de 1920 obtidos por Alexander Friedmann (1888-1925). Neles, esse matemático russo detalhava modelos em que o universo ou se expandia, ou se contraía, sem a necessidade da constante cosmológica.

Ironicamente, em 1930, um resultado mostraria que o modelo de Einstein era instável: bastaria um diminuto desvio da tal uniformidade para que o universo passasse a se contrair ou expandir.

A expansão do universo de De Sitter foi levada a sério por Georges Lemaître (1894-1966). Em 1927, esse padre belga criou um universo que não só se expandia, mas, por conta disso, tivera um início, que ele denominou “átomo primordial”, conclusão que reforçava um argumento teológico: “No princípio, Deus criou os céus e a terra”.

A primeira reação de Einstein a essas ideias foi repetir o que ele já dizia há alguns anos: sua pouca confiança em extrapolar suas equações da relatividade para situações extremas – como as daquele então suposto início do universo.

Com sua chegada aos EUA, em 1933, Einstein publicaria seu último artigo com um modelo cosmológico. A partir daí, enfatizaria outro programa científico (a unificação da gravitação com o eletromagnetismo), e abraçaria causas como paz mundial, defesa das liberdades individuais e luta contra o racismo nos EUA.

## Filosofia, a revanche

O artigo de 1917 arrancou a cosmologia da seara da filosofia – à qual ela pertencia –, para arrastá-la aos domínios da física. Na década de 1930, a primeira ensaiaria um tipo de resgate e revanche. Basta lembrar que o alemão Immanuel Kant (1724-1804) havia dado contribuições importantes – mas esquecidas – para a concepção evolutiva do universo.

A filosofia penetrou a cosmologia pelas raízes. O caso mais célebre é o do cosmólogo britânico Edward Milne (1896-1950), cujas ideias incluíam o chamado ‘princípio cosmológico’: o universo teria que necessariamente ser homogêneo e isotrópico. A cosmologia de Milne – classificada como ‘metateórica’ – não teve grande aceitação à época, mas deixou descendentes indiretos na década seguinte, na forma de um modelo de universo sem início no tempo.

A questão na década de 1930 – e, de certo modo, nas seguintes – pode ser resumida assim: para a cosmologia, esse embasamento filosófico era uma questão de ‘boa saúde’ do campo ou uma ‘maldição’ para uma cultura (ciência) que havia, a muito custo, se desvencilhado da filosofia?

Esses debates filosóficos ganharam contornos mais amplos. E passou-se a discutir se a própria cosmologia era (ou não) ciência. Muitos (inclusive, cosmólogos) a classificavam como “pseudociência” ou “quase-ciência”. Impressiona ver que essas dúvidas, de certo modo, persistiram, com certa força, até o final do século passado.

Na cosmologia, a partir da década de 1930 e com alguma ‘inércia’ nas seguintes, repetia-se um fato que já havia marcado – ou amaldiçoado, para alguns –, na década anterior, a física quântica, teoria que lida com o universo atômico e subatômico. Patricia Fara sintetiza essa visão de mundo assim: “as equações descrevem, e a filosofia explica”.

Na década de 1930, foram os próprios cosmólogos (e não os filósofos) que trataram de dar roupagem metafísica a um arcabouço matemático que se tornava cada vez mais amplo e sólido.

## Universo estacionário

A cosmologia adentrou a segunda metade do século passado com uma estrutura matemática madura, mas ainda impregnada de metafísica (princípios *a priori*, conceitos escolhidos por julgamento estético ou teológico etc.) e empobrecida por pouquíssimos dados observacionais.

Como apontou o físico e historiador da ciência holandês Abraham Pais (1918-2000), o campo estava minado por um tipo de especulação aristotélica, mesclada com princípios que pareciam vir mais de uma experiência artística do que científica.

As reverberações das ideias de Milne podem ser captadas, por exemplo, no modelo apresentado em 1948 pelos austríacos Herman Bondi (1919-2005) e Thomas Gold (1920-2004), em coautoria com o britânico Fred Hoyle (1915-2001): um universo sem início, eterno. Uma estrutura que não se altera no tempo e que sempre existiu e existirá. Era o universo do estado estacionário.

De certa forma, esse modelo era uma tentativa de dar uma resposta a um grande problema da cosmologia à época: a idade extraída dos modelos era muito menor que aquela apontada pelos dados experimentais (radioatividade, por exemplo). Esse problema só seria resolvido na década de 1960, quando a equação de Hubble, que media a expansão do universo, sofreria um aprimoramento.



O universo do estado estacionário livra-se de um incômodo: a discussão sobre uma origem – que muitos cosmólogos e filósofos consideravam sem sentido. Mas carregava consigo problemas sérios: propunha que haveria fontes de criação de matéria no universo, para compensar a ‘diluição’ sofrida por esta com a expansão do espaço. Onde estariam esses ‘criadouros’? Como funcionariam? Perguntas nunca respondidas satisfatoriamente pelos autores e seguidores do modelo.

E aqui há um aspecto social interessante. Apesar de os dados observacionais enfraqueceram bastante o universo de estado estacionário, a teoria ganhou muito apelo popular – o que mostra que a divulgação científica nem sempre serve a bons propósitos. Principal razão: a capacidade de Hoyle em transmitir, em linguagem simples, por meio de livros, artigos ou programas de rádio, as características de seu modelo eterno e as impropriedades do concorrente, a teoria do universo com um início (*Big Bang*) – por sinal, termo que ele cunhou, não sem ironia.

Nesse mesmo período, a cosmologia começou a ganhar o reforço de outras áreas, como foi o caso da física nuclear e seu estudo sobre como se formaram os elementos químicos em um universo muito jovem. O caso emblemático aqui é o físico ucraniano George Gamow (1904-1968), que teorizou sobre os primeiros três minutos depois do *Big Bang* – teoria para a qual ele, por sinal, deu contribuições apreciáveis.

## Mistérios escuros

Hoje, a cosmologia científica é, sem dúvida, uma área científica. No entanto, há quem levante o dedo acusatório para o modo como a filosofia (sub-repticiamente) segue se embrenhando na área. Casos sempre citados: a teoria dos universos paralelos e hipóteses sobre a natureza (ainda enigmática) da matéria e da energia escuras, as quais respondem por cerca de 95% do conteúdo do universo. Do que o universo é formado? Essa, talvez, seja a pergunta científica (e filosófica) mais profunda da atualidade.

Por sua vez, a relatividade geral ganhou vitalidade com resultados teóricos – como os do matemático britânico Roger Penrose – e experimentais (quasares, pulsares, buracos negros etc.) obtidos na década de 1960. De certa forma, essa teoria (complexa e intrincada) começava a sair de um isolamento imposto a ela ainda na década de 1920.

Dois fatos experimentais foram marcantes para a cosmologia do século passado: em 1965, descobriu-se um ‘eco’ do *Big Bang*, ‘ruído’ que se manifesta na forma de uma radiação extremamente tênue, mas uni-presente no universo. A dita radiação cósmica de fundo em micro-on-das (RCFM) deu suporte para a assumida uniformidade do universo adotada nos modelos e trouxe maturidade e robustez à cosmologia – a partir daí, também uma ciência experimental. Para muitos, a RCFM foi o “último prego no caixão” da teoria do estado estacionário.

O segundo marco (dito revolucionário): em 1998, constatou-se, com base na observação da luz de estrelas explosivas (supernovas do tipo 1A), que o universo não só se expandia, mas fazia isso aceleradamente.

E como explicar essa misteriosa aceleração? A ironia é que a resposta mais aceitável é o “maior erro” de Einstein: a constante cosmológica seria a ‘antigravidade’ que aceleraria o universo.

Hoje, a maioria dos cosmólogos aceita que o universo tem cerca de 13,8 bilhões de anos; nasceu de uma ‘explosão’ (*Big Bang*); e sofreu uma expansão vertiginosa nos primeiros instantes ( $10^{-35}$  s) de vida, fenômeno que explicaria a impressionante uniformidade de temperatura em todas as direções.

Com aceleradores cada vez mais potentes, hoje a física de partículas dá contribuições seminais à cosmologia, ao reproduzir, em diminutos volumes de espaço, aqueles instantes iniciais do universo em laboratório, com densidades e temperaturas altíssimas.

A ironia (mais uma!) é que o universo está em expansão, e a constante cosmológica voltou. O “castelo no ar” assentou-se sobre rocha sólida; mas a tal “estrada árdua e sinuosa”, percorrida há 100 anos por Einstein, parece ter destinos enigmáticos.

**ANTONIO AUGUSTO PASSOS VIDEIRA** é professor do Departamento de Filosofia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, colaborador do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), no Rio de Janeiro (RJ), e pesquisador do CNPq.

**CÁSSIO LEITE VIEIRA** trabalha no Núcleo de Comunicação Social do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), no Rio de Janeiro (RJ).

Imagem de abertura: Galáxia Andromeda

Crédito imagem de abertura: Adam Evans / creativecommons.org



## 70 ANOS DO MÉSON PI

Há 70 anos, o jovem físico brasileiro César Lattes teve participação decisiva em uma das descobertas mais importantes da física do século passado: a detecção da partícula méson pi, responsável por manter o núcleo atômico coeso. Lattes tornou-se "Nosso Herói da Era Nuclear", e seu nome e feitos alavancaram a criação da estrutura político-administrativa da área científica no Brasil. Naquele momento, ciência era parte de um projeto de nação.

**Antonio Augusto Passos Videira**  
**Cássio Leite Vieira**

Há 70 anos, a descoberta de uma nova partícula subatômica causou sensação na comunidade internacional e está na origem do gesto contido do jovem mostrado na foto, recepcionado pela imprensa ao desembarcar. A imagem é emblemática de um período em que ciência – alavancada por ideais desenvolvimentistas e ligados à segurança nacional – passou a integrar um projeto de nação para o Brasil.

Aos 24 anos de idade, Cesare Mansueto Giulio Lattes (ou César Lattes) retornava ao país no auge de sua fama, incensada por seus feitos científicos recentes na Inglaterra e nos EUA. Aquele curitibano – único físico formado na turma de 1943 da Universidade de São Paulo – havia chegado mais longe do que seus planos iniciais: ser professor secundário. Lattes, agora, era “Nosso Herói da Era Nuclear”.

A revista *Nature* de 24 de maio de 1947, em poucas páginas, detalhava a detecção de um novo fragmento de matéria: a partícula méson pi (hoje, píon), responsável por manter prótons e nêutrons ‘colados’ no núcleo atômico. O feito era do Laboratório H. H. Wills, da Universidade de Bristol, onde Lattes havia chegado no início de 1946, a convite de integrantes daquela equipe, seu ex-professor na USP, Giuseppe Occhialini (1907-1993), e Cecil Powell (1903-1969), chefe do grupo.

A equipe de Bristol usava placas fotográficas especiais para capturar a trajetória e a desintegração de partículas subatômicas. Quando Lattes chegou a Bristol, essas chapas haviam ganhado melhorias técnicas da indústria fotográfica e estavam em fase de calibração. Lattes pôde pôr em prática um plano que havia traçado ainda no Brasil: usar aquelas placas para estudar os raios cósmicos, núcleos atômicos que, a todo instante, penetram a Terra e, ao se chocarem com moléculas da atmosfera, geram uma chuva de partículas.

A esperança dos físicos era a de que um desses nacos de matéria fosse uma partícula ainda desconhecida. Para melhorar as chances dessa ‘captura’, as chapas eram expostas em montanhas. No final de 1946, Lattes pediu a Occhialini que deixasse, no Pic du Midi, nos Pirineus franceses (2,5 km de altitude), algumas caixas de placas.

Parte dessas chapas tinha algo novo: Lattes havia pedido ao fabricante que incluísse, na composição das placas, o elemento químico boro. Essa inovação facilitou a visualização das trajetórias dos dois mésons pi que ilustram o artigo de 24 de maio.

Entusiasmado, Lattes apostou que, no monte Chacaltaya, na Bolívia, com o dobro da altura do Pic du Midi, ele poderia capturar mais mésons pi. O H. H. Wills pagou a passagem até o Rio de Janeiro. “E, de lá, eu me viraria para chegar a Chacaltaya”. Montanhas, neve, cavernas, fundos de lago etc. Física experimental tinha algo de aventura à época.

Do pico andino, Lattes trouxe centenas de mésons. Esses resultados foram publicados em outubro de 1947 também em *Nature*, revelando mais detalhes sobre essas partículas.

## Califórnia: verdadeiro carnaval

Ao final de 1947, o H. H. Wills já ganhava ares de ‘Meca’ da técnica fotográfica aplicada à física. E a notícia da detecção do méson pi espalhou-se. Do norte da Europa, veio o convite para Lattes dar palestras.

Em Copenhague, Lattes encontrou-se com Niels Bohr (1885-1962), Nobel de Física de 1922. O dinamarquês ficou surpreso ao saber que o brasileiro pretendia deixar Bristol e seguir para os EUA. Missão: detectar mésons no então mais potente acelerador de partículas do mundo, o sincrociclótron de 184 polegadas, na Universidade de Berkeley.

Essa máquina, que havia começado a funcionar há mais de um ano, tinha um propósito: produzir mésons. Mas, para o constrangimento geral, as partículas não haviam ainda sido detectadas. Lattes chegou no início de 1948 e, dez dias depois, com a ajuda do colega norte-americano Eugene Gardner (1913-1950), visualizou os mésons nas chapas fotográficas expostas ao feixe de partículas gerado por aquele equipamento.

Pela primeira vez, partículas detectadas apenas na radiação cósmica haviam sido produzidas artificialmente. Mais: a detecção dos mésons pi por Lattes e Gardner mostrava que um avanço técnico implementado naquele sincrociclótron funcionava. Estavam, assim, lançadas as sementes para uma nova forma de fazer física: a ‘Era das Máquinas’, que faria dos EUA o centro mundial dessa disciplina pelo próximo meio século.

A produção artificial do méson pi foi capa da revista *Science News Times*; ocupou as páginas de duas edições da revista *Time-Life*; mereceu coletiva de imprensa, publicada pela revista *Nucleonics*; rendeu reportagens no jornal *New York Times*, cuja editoria de ciência elegeu aquela detecção como o feito mais importante da física daquele ano,

comparando-o à fissão do núcleo atômico. “Foi um verdadeiro carnaval”, resumiu Lattes décadas mais tarde.

## **Dois ‘Brasis’: o embate**

No Brasil, a repercussão dos feitos de Lattes também ganhou a mídia. Jornais, revistas e suplementos começaram a moldar o ‘Nosso Herói da Era Nuclear’. Lattes era o representante brasileiro de uma nova ordem mundial: o reconhecimento de que conhecimento é sinônimo de poder (político e econômico).

No mundo, naquele momento, nascia uma aliança (até hoje duradoura) entre ciência, tecnologia, capital e estado. Eram as raízes do complexo militar-tecnológico dos EUA.

O Brasil reagiu a esse novo cenário mundial. Cevada por uma mentalidade desenvolvimentista, uma campanha centrada na então capital Rio de Janeiro reuniu formadores de opinião de vários setores: ciência, indústria, artes, forças armadas, imprensa etc. O pleito era a fundação de um instituto no qual se fizesse, em período integral, pesquisa em física. Por sua parte, militares nacionalistas viram aí a chance de obter o ciclo completo da energia nuclear – algo até hoje de extrema importância geopolítica.

O pleito do movimento se concretizou em 1949, quando foi criado o Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), no Rio de Janeiro, como uma sociedade civil. Lattes era seu diretor científico.

Nos anos seguintes, essa primeira aliança entre físicos e militares criou dois projetos distintos – ambos incluíam ciência – para o país. O primeiro deles, de um ‘Brasil grande’, capitaneado pelo físico-químico e almirante Álvaro Alberto (1889-1976), tinha como frente principal a construção de um acelerador ainda mais potente que o de Berkeley. No outro, o do ‘Brasil realista’, defendido por Lattes, propunha-se algo mais modesto: um acelerador de pequeno porte para treinamento de estudantes.

O acelerador do almirante Álvaro Alberto naufragou fragorosamente. O país nem mesmo tinha os equipamentos para a usinagem dos ímãs gigantescos usados nessas máquinas.

Mas o cenário ‘Brasil grande’ evaporou por conta de um escândalo: o diretor financeiro do CBPF gastou a verba do acelerador em corridas de cavalo. Mesmo desaconselhado por colegas, Lattes foi à mídia, e o jornalista Carlos Lacerda (1914-1977) usou a história para atacar o governo Vargas, seu rival. Lacerda publicou na capa de seu jornal, *Tribuna da Imprensa*, uma carta de Lattes. O que deveria ser caso de polícia virou de política.

Lattes, aos 30 anos, por conta das pressões, teve um surto psiquiátrico. Viajou para os EUA, em busca de isolamento e tratamento. Passou um tempo em Chicago e Minneapolis. Voltou ao Brasil em 1957 – talvez, para tentar finalizar o que havia construído.

Crise no CBPF, salários baixos, inflação, família numerosa e quadro mental instável. Esse somatório fez com que ele voltasse para a USP, em 1959, onde seguiu com projetos experimentais envolvendo o uso das placas fotográficas e o estudo dos raios cósmicos. Em 1967, Lattes transfere-se para a então recém-inaugurada Universidade Estadual de Campinas (SP), onde se aposentaria.

## **Ecos benignos**

Para o Brasil, o méson foi muito mais que o méson. E Lattes, muito mais que ele mesmo. Seus feitos impulsionaram o início da construção da estrutura político-administrativa de ciência no país. Os atuais Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) são frutos de um projeto de nação que elencou um cientista como seu herói nacional; são produtos de um país que percebeu que conhecimento era a ordem do dia para uma nova geopolítica.

Até a década de 1920, praticamente tudo que havia de física experimental no Brasil era um laboratório didático na Escola Politécnica do Rio de Janeiro. Lattes elevou a física experimental a novos patamares para um país como o Brasil: na década de 1950, construiu, em Chacaltaya, um laboratório para estudar radiação cósmica. Nesse mesmo período, a Europa, recuperando-se da guerra, dava início ao Centro Europeu de Pesquisas Nucleares (CERN). Aquele era um Brasil – pelo menos, em ciência – protagonista da história.

Aquelas trajetórias de partículas na forma de ‘risquinhos pontilhados’ que aparecem no artigo de 24 de maio mudaram a ciência brasileira. E esta, nas décadas seguintes, mudaria a cara do país. Lattes poderia ter feito carreira lá fora. Mas, como muitos de sua geração, optou pelo Brasil. “Prefiro ajudar a construir a ciência no Brasil do que ganhar um Nobel”, escreveu, na década de 1940, ao colega físico José Leite Lopes (1918-2006).

Mesmo depois de 70 anos, o nome ‘Lattes’ e o termo ‘méson pi’ ainda ressoam. São ecos benignos de um país que havia elegido ciência como prioridade, como uma das forças motrizes de um projeto de nação. Com um pouco de esforço, será possível não só capturar aquela mensagem, mas – como certamente aprovaria Lattes – amplificá-la e pô-la hoje em prática.

**ANTONIO AUGUSTO PASSOS VIDEIRA** é professor do Departamento de Filosofia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, colaborador do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), no Rio de Janeiro (RJ), e pesquisador do CNPq.

**CÁSSIO LEITE VIEIRA** trabalha no Núcleo de Comunicação Social do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), no Rio de Janeiro (RJ).

Imagem de abertura: O físico César Lattes em 1948, ao regressar de temporada em Berkeley

Crédito: C. Lattes/ arquivo pessoal





## O CÉU DAS MAIS ALTAS ENERGIAS

Uma colaboração científica internacional – com a participação do Brasil – está construindo o que será o maior observatório para detectar raios gama da história. No início da próxima década, quando estiver em pleno funcionamento, seus 100 telescópios deverão elevar para alguns milhares o número de fontes conhecidas dessa radiação, responsável pelos fenômenos mais energéticos do universo e que pode inclusive ter afetado o curso da evolução e da vida na Terra milhões de anos atrás.

Ulisses Barres de Almeida

A *Noite Estrelada* do pintor holandês Vicent Van Gogh (1853-1890) – talvez, a mais famosa representação artística do céu noturno – mostra uma natureza em convulsão. Seu aspecto revoltado, porém, diz respeito mais ao estado interior do artista do que à visão pacífica do firmamento, familiar a cada um de nós. Os antigos referiam-se a ela como a “esfera das estrelas fixas”, em alusão à sua imutabilidade secular. A realidade, no entanto, tal como a conhecemos hoje, não poderia ser mais diferente.

Longe do aparente marasmo que o leitor pode escrutinar cada noite a olho nu, as dezenas de satélites astronômicos e observatórios terrestres que varrem o céu a todo instante registram, diariamente, explosões celestes cuja duração pode ser breve como um piscar de olhos, mas emitir, nessa diminuta fração de tempo, mais energia do que o Sol produzirá em todos os seus 10 bilhões de anos de existência.

Essa imagem moderna do cosmo é resultado do desenvolvimento tecnológico dos telescópios e detectores, que fornecem uma visão cada vez mais profunda do céu. Cada ano-luz equivale a 9,5 trilhões de km (distância percorrida pela luz em um ano), e a imensa maioria dessas explosões que os astrônomos registram diariamente ocorrem a bilhões de anos-luz da Terra, longe demais para serem percebidas pelo olho humano. A mais distante delas já registrada foi a GRB 090423 – sigla, em inglês, para Explosão de Raios Gama, seguida da data em que foi observada (23 de abril de 2009). Esse cataclismo cósmico ocorreu a mais de 13 bilhões de anos-luz de distância, em um passado longínquo, quando o universo tinha menos de 10% de sua idade atual.

A evolução da astronomia no século passado permitiu não apenas um olhar mais profundo, mas também uma visão mais abrangente do universo. Desde o final da Segunda Guerra, a astrofísica vem conquistando, paulatinamente, novas janelas antes opacas à inspeção humana, passando da estreita faixa observacional correspondente à luz visível, para conquistar todo o espectro eletromagnético – das ondas de rádio até as formas de radiação mais energéticas, como os raios X e raios gama.

Do mesmo modo que a fotografia de uma paisagem tirada com uma câmera comum e uma infravermelha são diferentes, o céu visto em

cada uma dessas bandas de observação (micro-ondas, luz visível, raios X etc.) aparece totalmente novo .

Passar a energias cada vez mais altas significa observar o ‘universo extremo’. Enquanto as observações em ondas de rádio nos mostram a emissão do gás frio armazenado em nuvens entre as estrelas, aquelas em raios gama revelam os fenômenos mais energéticos e cataclísmicos do cosmo – como explosões estelares e a atividade de buracos negros devorando nuvens de gás e estrelas vizinhas e liberando, no processo, quantidades enormes de energia.

Quanto mais extremo um processo, mais breve ele tende a ser. E o céu em raios gama, diferentemente daquele observado a olho nu, parece mais uma árvore de Natal, com luzes piscando diariamente em todas as direções, como mostra essa simulação feita para o satélite Fermi, da NASA (agência espacial dos EUA), disponível no Youtube (<https://youtu.be/HGeUpJOCRdw>).

## **Chuveiro atmosférico**

Os raios gama cósmicos são tão energéticos – até um bilhão de vezes mais energéticos que a luz visível – que não conseguem chegar ao solo, sendo absorvidos pouco depois de adentrar a atmosfera terrestre, entre 10 km e 15 km de altitude. Visto que essa radiação é danosa para os tecidos vivos e o material genético, essa blindagem atmosférica é uma condição para a existência da vida na Terra – e um problema para a colonização do espaço. Ela significa também que a detecção direta dessa radiação deve ser feita por satélites, dos quais o mais importante é o satélite Fermi.

Não obstante essa limitação, os raios gama podem ser observados indiretamente por telescópios instalados na superfície da Terra. Ao serem absorvidos no alto da atmosfera, os raios gama carregam energia que não desaparece, mas que se transforma em uma enorme cascata de partículas secundárias (essencialmente, elétrons e sua antimatéria, os pósitrons), resultado da interação da radiação gama com as moléculas do ar. Centenas de milhares de partículas secundárias são criadas em cada um desses ‘chuveiros’, e cada uma delas produz um pequeno fecho

de luz azul ao atravessar a atmosfera, em velocidades próximas à velocidade da luz (300 mil km/s). A todo segundo, sem que notemos, nossos corpos são atravessados por essas partículas.

Essa luz azulada, fraca e breve – dura apenas bilionésimos de segundo – é chamada luz Cherenkov, homenagem ao físico russo Pavel Cherenkov (1904-1990), ganhador do Nobel de 1958 por sua descoberta. Imperceptível ao olho humano, ela pode, no entanto, ser observada pelos astrônomos com a ajuda de equipamentos sofisticados e ultrasensíveis denominados telescópios Cherenkov, que lembram grandes antenas parabólicas, mas formadas de espelhos.

O maior observatório gama do mundo, o CTA (sigla, em inglês, para Rede de Telescópios Cherenkov), começou a ser construído este ano em La Palma, nas Ilhas Canárias (Espanha). O Brasil, um dos 32 países-membros do consórcio internacional do CTA, está participando da construção do primeiro telescópio-protótipo em instalação em La Palma, por meio de projeto desenvolvido no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), instituto de pesquisas do governo federal no Rio de Janeiro (RJ).

Depois de La Palma, o CTA irá instalar telescópios também nos Andes chilenos, em um total de cerca de 100 desses equipamentos nos hemisférios Norte e Sul. Seu objetivo é varrer de maneira completa o céu, nas energias mais altas em que este já foi observado. O CTA deverá ser concluído no início da próxima década, e a significativa participação brasileira no projeto conta ainda com instituições nos estados de São Paulo, Paraná e Minas Gerais.

Quando estiver completamente operacional, o CTA será 10 vezes mais potente do que qualquer observatório gama já existente e deverá expandir o catálogo de objetos emissores desse tipo de radiação das aproximadamente 200 fontes hoje conhecidas para mais de mil, dentro e fora da Via Láctea.

## **Diamantes e outras gemas**

Mais de mil cientistas e engenheiros trabalham no projeto CTA em todo o mundo, e há razões suficientes para justificar o entusiasmo

da comunidade astronômica pela área. Na última década, a astronomia de raios gama atingiu sua maturidade definitiva e foi protagonista de importantes descobertas da astrofísica de altas energias. Um rápido *tour* por alguns resultados ilustra o impressionante céu tal como visto nesse campo extremo da astronomia.

Talvez, a primeira dessas descobertas surpreendentes tenha sido o registro da explosão do blazar PKS 2155-304, em 28 de julho de 2006 – à época, eu estava prestes a iniciar meu doutorado e participava, pela primeira vez, de observações nos telescópios H.E.S.S., em meio ao deserto da Namíbia. Blazares estão entre os corpos mais energéticos do cosmo, e o PKS 2155, em particular, é um dos mais brilhantes blazares conhecidos.

Os núcleos desses objetos são formados por um enorme buraco negro central, cuja massa é equivalente a centenas de milhões de estrelas como o Sol, toda ela concentrada em uma região de mais ou menos o tamanho do Sistema Solar. Ao devorar a matéria que o circunda, em forma de gás ou estrelas vizinhas, essa máquina infernal produz uma quantidade de luz tão intensa que seu brilho é similar ao de todas as estrelas da Via Láctea somadas.

Tudo isso, por si só, é impressionante. Mas aquele evento registrado na noite de 28 de julho superou o que se imaginava possível para essas fontes: em menos de cinco minutos, a radiação gama daquele blazar aumentou em quase 30 vezes, o que equivale à liberação da energia de mais de 100 mil Sóis nesse curto espaço de tempo – e em uma região relativamente diminuta do cosmo, inferior ao tamanho do Sistema Solar. Mais de 10 anos depois desse evento cataclísmico, especialistas ainda debatem qual mecanismo seria responsável por tamanha produção de energia.

No entanto, de lá para cá, o registro de eventos como o PKS 2155-304 tornou-se comum, a ponto de o recorde de brilho ser batido: em dezembro de 2009, o blazar 3C 454.3 – batizado ‘Crazy Diamond’, em alusão à música da banda de rock britânica Pink Floyd – tornou-se, por breve período, o objeto mais brilhante do céu em raios gama.

Diariamente, satélites como o Fermi, detectam explosões de raios gama de brilho semelhante, cuja origem, porém, são estrelas em vias de

morrer. Esses eventos deixam como resultado a criação de um novo buraco negro. Em termos de energia, esses fenômenos são os mais intensos do cosmo desde o *Big Bang*, o ‘nascimento’ do universo ocorrido há 13,8 bilhões de anos.

O mesmo satélite Fermi fez recentemente uma descoberta surpreendente: duas estruturas gigantes, localizadas diretamente ao norte e ao sul do centro da Via Láctea. Batizadas de ‘bolhas de Fermi’, elas emitem intensa radiação gama, sendo, porém, praticamente invisíveis em outras faixas do espectro eletromagnético. A teoria mais provável é que esses objetos sejam enormes reservatórios de raios cósmicos (prótons e núcleos atômicos ultraenergéticos), o registro ‘fóssil’ de um período, dezenas de milhões de anos atrás, no qual o buraco negro no centro de nossa galáxia estava ativo.

A energia liberada em eventos como esse tem o potencial de influenciar e alterar a evolução da galáxia e do cosmo ao seu redor, mostrando-nos uma nova face do universo. Cientistas especulam inclusive que os raios gama e raios cósmicos podem ter sido importantes para o surgimento e a evolução da vida em nosso planeta, ao fornecer, por certo intervalo de tempo, uma dose extra de energia que pode ter favorecido a bioquímica primordial e as mutações genéticas que levam à biodiversidade.

Essa hipótese é ainda muito especulativa, mas se tal conexão tiver existido, seus sinais estarão escondidos precisamente nas mais energéticas fontes de raios gama do cosmo.

**ULISSES BARRES DE ALMEIDA**, doutor em astrofísica pela Universidade de Durham (Reino Unido), é pesquisador do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), no Rio de Janeiro (RJ), e membro do consórcio internacional para o CTA (Cherenkov Telescope Array).

Figura de abertura: Concepção artística da rede de telescópios Cherenkov (CTA), que buscará por novas fontes emissoras de raios gama no universo

Crédito: Consórcio CTA



## COMPUTADORES QUÂNTICOS

Muito tem se falado sobre os chamados computadores quânticos, que poderiam resolver em segundos problemas que levariam até bilhões de anos para o mais veloz dos super-computadores atuais. O 'coração' desses equipamentos são os fenômenos (alguns estranhíssimos) do diminuto universo atômico e subatômico. Essas máquinas se tornarão realidade? Se sim, quando? E quais seriam as consequências dessa mudança de paradigma?

Ivan dos Santos Oliveira Júnior

Há 70 anos, cientistas dos laboratórios da *Bell Telephone* (EUA) inventavam o dispositivo que iria revolucionar a informática, desde então e até os dias atuais, os meios de comunicação e a forma com a qual a informação é processada e transmitida: o transistor – talvez, o mais conhecido componente eletrônico da história.

Esse dispositivo – cujo desenvolvimento rendeu o Nobel de Física de 1956 a seus inventores, os físicos norte-americanos John Bardeen (1908-1991), Walter Brattain (1902-1987) e William Shockley (1910-1989) – substituiu as volumosas válvulas nos computadores, iniciando, assim, o processo de miniaturização da eletrônica – Bardeen ainda ganharia mais um Nobel de Física, o de 1972, pela formulação da teoria sobre como certos materiais (supercondutores) conduzem eletricidade sem dissipar calor, dividindo o prêmio com outros dois colegas também norte-americanos, Leon Cooper e John Schrieffer.

Curiosamente, os materiais supercondutores despontam como uma das tecnologias mais promissoras para uma das áreas mais ‘quentes’ da atualidade na pesquisa científica: a construção dos chamados *chips* quânticos, que são o ‘cérebro’ de um novo tipo de computador que, tudo indica, será capaz de resolver em segundos problemas que levariam até bilhões de anos para o mais potente dos supercomputadores atuais. Isso faz de Bardeen, por conta dessas duas contribuições seminais, um protagonista da história que nos leva ao desenvolvimento vertiginoso da computação e da comunicação.

## Apenas um!

O ano agora é 1985. O físico norte-americano Richard Feynman (1918-1988) – também Nobel de Física (1965) – afirma em um artigo que “as leis da física não impedem que o tamanho dos *bits* dos computadores chegue a dimensões atômicas, região em que a mecânica quântica detém o controle”. Esmiuçando a fala desse ex-professor visitante, na década de 1950, do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), no Rio de Janeiro (RJ): *bit* é a chamada unidade mínima de informação, expressa na forma de zeros e uns nos computadores atuais; e a mecânica quântica é a teoria – considerada a mais precisa da história – que lida com os fenômenos nas dimensões moleculares, atômicas e subatômicas.



Feynman estava muito interessado no que se passou a chamar ‘computação quântica’, e aquela observação feita no artigo fazia referência a uma lei empírica descoberta em 1965 pelo engenheiro norte-americano Gordon Moore. A lei de Moore, como ficou conhecida, determina que os transistores que representam os *bits* nos computadores têm sua dimensão reduzida à metade a cada ano e meio aproximadamente.

Em termos práticos, a lei de Moore explica por que os microprocessadores, ao longo das últimas quatro décadas, têm aumentado tanto sua capacidade de processar informação. Um desses dispositivos da década de 1960 tinha algo como 10 mil transistores. Hoje, esse número bate na casa dos bilhões.

Infere-se dessa evolução vertiginosa a implicação mais impressionante de tal lei: por volta de 2020, cada *bit* terá a dimensão de um único átomo! – é quase irresistível não acrescentar este último ponto de exclamação. Para dar uma ideia do que isso representa em termos de miniaturização de transistores, em meados da década de 1960, o tamanho de um *bit* era de 10.000.000.000.000.000 átomos (dez mil quatrilhões de átomos). No início da próxima década, será de apenas um.

Há outra consequência de extrema importância nessa redução: a física que empregamos em nosso cotidiano, para estudar objetos macroscópicos deve obrigatoriamente sair de cena, para dar lugar à mecânica quântica quando o assunto é lidar com objetos com dimensões atômicas, como será o caso de um transistor formado por um só átomo – decorre daí os termos *bit* quântico e computador quântico.

Essa mudança será um tremendo salto para a humanidade: um *bit* de informação que, na Antiguidade, era representado por objetos macroscópicos (pedrinhas, nós em cordas, riscos em ossos etc.) passará ao domínio nanoscópico, ou seja, atômico. E, revalidando as ideias de Feynman, nada impede que um *bit* futuro tenha a representação de ordem subatômica.

## Resposta inequívoca

Agora, nosso diário de bordo marca um novo ano: 2016. Um grupo de cientistas do Laboratório Nacional Lawrence em Berkeley (EUA)

reporta, na revista *Science*, a construção de um transistor medindo menos que 7 bilionésimos de metro (7 nanômetros), um objeto cerca de 10 mil vezes menor que o diâmetro médio de um fio de cabelo.

Mas o que chama atenção vem agora: seu controle de corrente (parte essencial do funcionamento de um transistor) é feito por um nanotubo de carbono com apenas 1 nanômetro de diâmetro – dimensão típica de espaços atômicos. Esse nanodispositivo eletrônico é construído com dissulfeto de molibdênio, em substituição aos tradicionais semicondutores da indústria de informática.

Possível conclusão: tudo indica que a lei de Moore irá cumprir sua promessa.

Retrocedamos, agora, apenas alguns meses em relação à data que consta nesta edição da ‘Ilustríssima’. A gigante da computação IBM anuncia que está disponibilizando ‘na nuvem’ um protótipo de computador quântico baseado em tecnologia de supercondutores e que pode ser acessado por usuários do mundo todo. A Google e a Microsoft, outras duas gigantes, reportam investimentos volumosos na área da computação quântica. Na Europa, um megaprojeto com investimentos de 1 bilhão de euros é também anunciado nessa área.

Empresas de tecnologia quântica começam a ‘pipocar’ por toda parte: a norte-americana Magic-Q comercializa sistemas de criptografia quântica desde 2002, competindo com a suíça ID Quantique, que faz a mesma coisa desde 2001. Em 1999, a canadense D-Wave anunciou o primeiro modelo de computador que usa tecnologia quântica em sua forma de processamento.

A também norte-americana Ion-Q, fundada em 2015, explora tecnologia de aprisionamento de átomos para a computação quântica. China e Austrália são outros dois países que estão investindo pesado na tecnologia. Estima-se que até 2024 o mercado mundial para a computação quântica alcance os US\$ 10,7 bilhões.

É possível que o parágrafo acima responda de maneira inequívoca à pergunta feita no título deste artigo. A computação e a comunicação quânticas não são mais promessas vagas e nem cálculos matemáticos abstratos feitos pelos físicos teóricos, mas realidades tecnológicas e comerciais que brevemente irão interferir diretamente nos nossos

costumes e essencialmente em todos os ramos da atividade humana, da mesma forma que o fizeram os computadores que passamos a conhecer a partir de 1947.

## **Faz o quê?**

A esta altura, cabe perguntar: o que os computadores quânticos podem fazer de diferente? Resposta: tudo.

Computadores são ferramentas essenciais para o avanço científico e tecnológico, com aplicações praticamente ilimitadas. Exemplo: computadores controlam o espaço aéreo e o fluxo de aeronaves nos aeroportos; ajudam nos projetos para a construção de novos modelos de aviões; e até na arquitetura das novas gerações de computadores que irão realizar essas mesmas tarefas com mais rapidez e eficiência. Mais: fazem previsões das condições meteorológicas ao longo das rotas e monitoram inúmeros sensores espalhados pela aeronave, que dão segurança ao voo.

Mais? São responsáveis pelas detalhadas imagens tomográficas produzidas em equipamentos de ressonância magnética nuclear e em outros tipos de tomógrafos durante um exame médico. Talvez, o mais cotidiano dos exemplos: olhe para seu telefone celular, que, caso seja relativamente moderno, faz um computador da década de 1990 parecer uma ‘carroça velha’ quando o assunto é velocidade de processamento de informação.

Somem-se a isso os efeitos especiais na indústria do cinema; os sofisticadíssimos programas de tratamento acústico na indústria da música; os projetos de veículos na indústria automotiva; as análises de volumes imensos de dados para traçar o perfil de poços na indústria do petróleo. A lista é quase infundável.

## **Missão impossível**

Certo, deu para entender que é impossível imaginar a sociedade destes dias sem essa máquina maravilhosa. Mas existe um tipo de tarefa que é extremamente difícil – de fato, impossível – para os computadores com a tecnologia em uso atualmente, mesmo para os mais avançados: simular a própria natureza.

Os cientistas estão muito interessados em simular o comportamento de sistemas naturais, como uma reação química de uma molécula em um fármaco ou as possíveis mudanças no movimento das correntes marítimas e atmosféricas causadas pelo aquecimento global. Nesse contexto, ‘simular’ significa reproduzir no computador – exatamente! – o comportamento natural do fenômeno, com o maior número possível de detalhes. Isso é importante porque permite aos cientistas fazerem previsões de fenômenos ao longo do tempo, projetar novos medicamentos etc.

O problema com esses exemplos (apenas dois entre muitos outros) é que, se todos os detalhes forem levados em conta, a simulação se torna tão complexa que ultrapassa todas as capacidades de processamento e armazenamento dos computadores existentes – mesmo a dos supercomputadores.

A saída usada pelos cientistas e engenheiros é simplificar o problema ou, como se diz no jargão da ciência, fazer aproximações. E, com aproximações, parte importante da informação se perde.

Um computador quântico é capaz de fazer simulações de sistemas naturais sem aproximações. Feynman (ele de novo!) considerava que a própria natureza é um computador quântico simulando os fenômenos que observamos – inclusive, para dar toques filosóficos à discussão, nós, seres humanos.

Normalmente, se associam fenômenos quânticos exclusivamente ao mundo microscópico, dos átomos, das moléculas e partículas elementares. Isso é um erro. Os fenômenos quânticos estão por toda parte e, de fato, a própria estrutura da matéria, como a vemos e sentimos no cotidiano, é o resultado direto e palpável das leis que regem o mundo quântico. Sem usar a física quântica, é impossível explicar por que o cobre conduz eletricidade, e o diamante não.

Da mesma forma, sem lançar mão daquelas leis, é impossível explicar a estrutura das ligações químicas que dão origem às moléculas – e, em última análise, a tudo que existe no mundo físico, seja animal, vegetal ou mineral.

Porém, para usar os fenômenos quânticos com fins de computação e comunicação, é preciso exercer um controle sobre alguns deles que

mais se parecem a truques de mágica – e é aqui que as coisas passam a ficar ainda mais interessantes (e estranhas).

## Parece mágica

E de onde vem esta mágica? O conceito mais importante para entendermos como os computadores quânticos funcionam é, na verdade, um que os estatísticos usam muito: correlação. Ele se aplica a problemas envolvendo probabilidades. Quando dois objetos estão correlacionados, a observação de uma propriedade de um deles fornece informação sobre uma propriedade do outro – e não importa a distância entre os dois.

Exemplo simples de correlação: suponha que tenhamos uma bola de bilhar branca em uma caixa opaca fechada e uma bola preta em outra caixa idêntica, também fechada. Não se sabe em qual caixa está a bola branca ou a preta. Uma das caixas é entregue ao sujeito A, e a outra ao sujeito B.

Agora, A e B se afastam um do outro, de tal modo que não haja qualquer contato entre eles. O sujeito A recebe, então, a instrução de abrir sua caixa e verificar a cor da bola que está com ele. Obviamente, antes de ele fazer essa operação, a única informação que ele tem é a de que há 50% de chance de a bola ser preta e o mesmo percentual de ser branca. Ele, então, abre a caixa e verifica que a cor da bola é branca.

Nesse momento, ele ganha informação sobre a bola que está com B, que, com sua caixa ainda fechada, não sabe a cor de sua bola. Não há qualquer interação entre A e B, mas a correlação entre as cores das bolas permitiu que A obtivesse informação sobre a bola de B.

Façamos, agora, uma pequena variação desse experimento imaginário. Dessa vez, cada caixa tem um par de bolas, isto é, uma branca e uma preta. Novamente, A se afasta de B e recebe a instrução de, sem olhar para dentro da caixa, pegar uma das bolas. Como antes, ele tem 50% de chance de pegar a preta e 50% de pegar a branca. Ele pega uma delas e verifica que é a preta.

Mas, dessa vez, ele não pode concluir nada sobre que bola B pegará em sua caixa. Dizemos que a correlação estatística que existia antes se perdeu.

## Emaranhamento

Pois bem, se as bolas fossem objetos quânticos (átomos, por exemplo), seria possível criar uma situação especial na qual todas as vezes em que A retirasse o ‘átomo preto’ de sua caixa, B retiraria o ‘átomo branco’, não importando quantos átomos estivessem nas caixas, nem a distância entre elas.

É como se o resultado da ação feita por A definisse o resultado daquela a ser feita por B, que poderia estar a milhares de quilômetros de distância de A. Esse tipo de correlação estatística só existe em sistemas quânticos e se chama emaranhamento.

Não raramente, o emaranhamento tem sido classificado como o fenômeno mais estranho da natureza: afinal, como algo que está aqui pode interferir – instantaneamente! – no estado de algo que está, digamos, a bilhões de km? Não por menos que o físico de origem alemã Albert Einstein (1879-1955) tenha apelidado esse fenômeno como “fantasmagórico”.

Em uma interpretação apressada (e errônea), diz-se que o emaranhamento viola o principal resultado da teoria da relatividade: informação não pode ser transmitida com velocidade maior do que a da luz no vácuo (300 mil km/s). No entanto, no emaranhamento, não há transferência de informação clássica (física, digamos), como ocorre com os dados da internet, por exemplo. O que se transmite é o que os físicos denominam informação quântica, algo impalpável, que não carrega nem matéria, nem energia!

Apesar de toda sua esquisitice, o emaranhamento é o ingrediente mais importante para a computação e comunicação quânticas. E já foi demonstrado inúmeras vezes em laboratórios pelo mundo todo – inclusive, no Brasil.

Em 2017, os chineses fizeram experimentos que demonstram as correlações quânticas (ou seja, o emaranhamento) entre fótons (partículas de luz) separados por 1,2 mil km de altura usando um satélite! Ou seja, é a esquisitice do mundo quântico posta em prática.

## Teleporte

O emaranhamento é o fenômeno responsável pelo processamento paralelo colossal de um processador quântico. Não se trata de um mero aumento de velocidade em comparação aos computadores usuais, mas de um novo paradigma de computação.

Este novo paradigma é capaz de resolver problemas matemáticos em minutos ou mesmo segundos, tarefa custaria bilhões de anos ao mais veloz dos supercomputadores atuais. Ele também é o responsável pelo fenômeno conhecido como teleporte, no qual a informação quântica desaparece de um lugar e instantaneamente reaparece em outro, sem atravessar o espaço que os separa. É ainda o fenômeno capaz de estabelecer comunicações absolutamente seguras, à prova de *hackers*, em uma rede de comunicação de computadores.

Há ainda um rol de aplicações dos chamados sensores quânticos, capazes de realizar medidas de quantidades físicas com precisão inalcançável para os melhores métodos clássicos (isto é, da física que empregamos em objetos macroscópicos). O funcionamento pleno de um computador quântico irá revelar soluções até aqui desconhecidas de problemas de matemática, física, química, biologia e engenharias, com potencial de produzir uma nova revolução científica e tecnológica, ainda maior do que aquela que ocorreu no início do século passado, com a descoberta da teoria da relatividade e da mecânica quântica.

E a história tem nos ensinado, repetidas vezes, que conhecimento é riqueza, cultura e poder.

Saltemos para 2027. No mundo desenvolvido, computadores quânticos são corriqueiramente usados para encontrar poços de petróleo, projetar fármacos, desenvolver novos materiais, resolver problemas muito complexos de engenharia e de matemática, bem como manter a internet à prova de *hackers*, desenvolver a defesa nacional etc.

O Brasil, no entanto, mais uma vez, ficou de fora de mais um novo cenário científico-tecnológico (e geopolítico): não tem uma marca de computador quântico, e os poucos que existem no país foram comprados dos EUA, da China, Inglaterra ou Austrália a preços exorbitantes. Continuamos dependentes da tecnologia produzida nos países que compreenderam que a ciência deve ser um projeto de estado.

Mantidos os famigerados contingenciamentos para a C&T no Brasil, por aqui, naquele 2027, nossos cientistas – trabalhando nos envelhecidos e sucateados institutos de pesquisa que ainda restaram –, certamente, estão implorando, mais uma vez, por verbas para pagarem a conta da energia elétrica usada para manter seus velhos computadores ligados.

E, assim, mais uma revolução tecnológica – e esta já está mostrando seus contornos – passará longe de nosso país.

**IVAN DOS SANTOS OLIVEIRA JÚNIOR** é doutor em física pela Universidade de Oxford (Reino Unido) e pesquisador titular do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), no Rio de Janeiro (RJ).

Crédito imagem de abertura: Argonne National Laboratory's Flickr page [CC BY-SA 2.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0>)]





## À MEMÓRIA DE UM MINERAL

Uma classe de minerais escuros e quebradiços, conhecidos há milhares de anos, deveria receber uma justa homenagem de nossa sociedade, global e digitalizada. Afinal, seus átomos – dotados de uma propriedade que até hoje causa perplexidade nos que a presenciam – armazenam a quase totalidade da informação do mundo atual, de vídeos e música a fotos e textos (inclusive este).

João Paulo Sinnecker

Quais as 100 descobertas mais importantes da ciência? Certamente, pergunta não só subjetiva, mas também difícil de responder – afinal, são quase 2,5 mil anos de contribuições relevantes dessa cultura. Mas vai aqui uma sugestão de item que, talvez, poucos – até mesmo especialistas – incluiriam nessa lista: minerais formados por óxidos de ferro.

Do ponto de vista da sociedade contemporânea, dita global e digital, esses minerais – em geral, duros, quebradiços, de cor escura e, por vezes, dotados naturalmente da curiosa propriedade do magnetismo – merecem, sem dúvida, lugar de destaque. Razão principal: essas substâncias, formadas por átomos de ferro e oxigênio – cujas fórmulas químicas mais comuns são  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – foram fundamentais para o desenvolvimento de sistemas que hoje armazenam praticamente toda a informação (dados financeiros, textos, filmes, fotos, músicas etc.) gerada pela humanidade. E isso inclui tudo que está também na chamada ‘nuvem’ – que nada mais é, como diz uma piada recorrente na internet, um conjunto de computadores ‘de outra pessoa’.

Memória física de nossa sociedade, os óxidos de ferro (entre eles, os ímãs naturais) são aquelas substâncias amarronzadas que, por décadas, recobriram os discos rígidos dos computadores – caso o(a) leitor(a) já tenha tido a chance de ver um desses equipamentos desmontados – e também dos hoje praticamente extintos disquetes e fitas cassete. Ou seja, qualquer equipamento que empregasse o processo chamado gravação magnética.

Praticamente, todos os cidadãos do planeta fazem uso direto e indireto de sistemas de armazenamento de informação em mídia magnética. Ainda em 2003, estudo da Escola de Gestão de Informação e Sistemas, da Universidade da Califórnia em Berkeley (EUA), estimou que 87% de toda a informação armazenada no mundo estavam sob a forma de gravação magnética (discos rígidos, fitas magnéticas, etc.). O restante estava dividido em papel (livros, jornais, revistas etc.) e meios ópticos (filmes, microfichas etc.).

O relatório ainda estimava que 92% de toda informação nova gerada já estavam sendo armazenados em meios magnéticos. Hoje, certamente, esses percentuais devem ser ainda mais impressionantes.

## História e fábula

Mas o que é o armazenamento magnético de informação? O processamento de informação em computadores se dá por meio das unidades mínimas de informação, os *bits*, que podem assumir o valor '0' ou '1'. Ou seja, informação digitalizada. Exemplo simples e corriqueiro: ao captar o som de uma voz, o gravador de um celular transforma a informação presente nas ondas sonoras originais (dita analógica) em uma sequência desses dois algarismos. Essa longa 'fila' de '0s' e '1s' é o processo conhecido como digitalização. Hoje, grande parte da informação do mundo é digital.

Mas a estrada que levou do analógico ao digital é longa e pavimentada de invenções e descobertas. Então, do começo. O livro *A pedra com alma* (Civilização Brasileira, 2011), de Alberto Passos Guimarães, pesquisador emérito do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), no Rio de Janeiro (RJ), descreve relatos de poetas gregos, datados de 2000 a.C., sobre minerais naturais que se atraíam ou repeliam mutuamente.

Há também registros de comportamentos semelhantes em tábuas antigas da Mesopotâmia, bem como entre os chineses, que desenvolveram um sistema de navegação e orientação baseado na bússola – basicamente, uma agulha imantada que se orienta segundo as linhas do campo magnético terrestre –, invenção fundamental para as grandes navegações do século 16 e suas consequências para o comércio e a distribuição demográfica no planeta. Eis, portanto, outra contribuição que deve constar do currículo desses minerais, presentes em nosso cotidiano, desde ímãs de geladeira até peças de equipamentos ultrassofisticados para a indústria e medicina.

Isso é história. Mas fica tentador contar aqui uma fábula antiga – popular por ter sido repetida à exaustão, inclusive em livros didáticos. Um pastor chamado Magnes defrontou-se por acaso com tais pedras e achou seu comportamento interessante. Daí, segundo a lenda, a origem ao termo 'magneto', usado para descrever ímãs. Há, porém, nesse mito um fio de realidade: é provável que o termo tenha sido cunhado por conta da região onde as primeiras amostras de magnetita foram encontradas, a Magnésia, ao norte da Grécia.

## Agulhas de bússola

Não é de se estranhar que muito da tecnologia atual esteja baseada não só no ferro (Fe) e oxigênio (O) dos minerais à base de óxidos de ferro, mas também no silício (Si) – matéria-prima dos ‘cérebros’ (microprocessadores) dos computadores. Esses elementos químicos estão entre os mais abundantes da crosta terrestre (32% Fe, 30% O e 15% Si).

O comportamento magnético desses minerais e de outras substâncias que apresentam essa propriedade foi mais bem compreendido no início do século passado, por meio de pesquisas de físicos, como os franceses Pierre Curie (1859-1906), Pierre Weiss (1865-1940) e Louis Néel (1904-2000) – este último ganhador do Nobel de Física de 1970 pela descrição das propriedades magnéticas dos óxidos de ferro em particular. Mas foi apenas a partir da década de 1920, com o início da mecânica quântica – teoria que lida com os fenômenos no diminuto universo atômico e subatômico – que foi possível entender em detalhe o comportamento magnético dos materiais.

Materiais magnéticos – como a magnetita e, por exemplo, sua ‘prima’ menos famosa, a maguemita – têm uma propriedade intrínseca chamada magnetização, que pode ser entendida como a capacidade de o material gerar um sem-número de ‘agulhas de bússolas’ subatômicas, apontando em direções bem definidas.

Ao aplicarmos campos magnéticos sobre um material (metal, por exemplo), é possível forçar essas ‘agulhas’ a se alinharem com uma direção escolhida. Assim, criamos um ímã. Mas, em geral, ao desligarmos esse campo, o material perde a magnetização. Na magnetita, por exemplo, essa é uma propriedade permanente.

A principal vantagem do processo de magnetização – e no qual está baseado praticamente todo o armazenamento da informação no mundo atual – é que as direções das ‘bússolas’ podem ser medidas e recuperadas, sem que, nesse processo, haja perda da informação gravada. E essa recuperação pode ser repetida inúmeras vezes.

Esse é um processo ao qual a humanidade deve muito. Foi ele que levou aos primeiros sistemas de gravação magnética, já no final do século 19, da voz humana – sem dúvida, um feito tecnológico. É ele que,

neste momento, dá a segurança a este signatário de que cada letra deste texto poderá ser recuperada a qualquer momento.

Os primeiros grandes sistemas de armazenamento magnético, com a finalidade específica de gravar informações, surgiram na Alemanha, no final da década de 1920, usando uma fita de plástico recoberta com uma fina camada de óxido de ferro. Fitas semelhantes foram usadas para gravação sonora entre as décadas de 1950 e 1990. Desse período, vale citar o ‘Walkman’, da empresa japonesa Sony, o primeiro reproduzidor de fitas de áudio portátil, febre mundial a partir do final da década de 1970.

Também nessa época surgiram os primeiros sistemas populares de reprodução e gravação de vídeo, os VHS e os Betamax, igualmente à base de fitas magnéticas. Talvez, os mais velhos se lembrem de que, no seriado *O Túnel do Tempo*, ainda na década de 1960, havia uma sala de controle sofisticada na qual se podia ver um enorme computador cujas unidades de armazenamento eram fitas magnéticas em constante movimento.

Em paralelo, foram desenvolvidos os primeiros sistemas de gravação digital, nos quais a informação analógica era transformada em *bits* (‘0s’ e ‘1s’). Era o início da Era Digital.

## Discos rígidos

Alguns leitores desta ‘Ilustríssima’ talvez se recordem de como era enfadonho rebobinar fitas de áudio e vídeo para acessar uma cena ou faixa musical. A gigante norte-americana IBM resolveu esse problema: criou um sistema no qual a informação ganhou ‘endereço’ e, assim, podia ser acessada com muito mais rapidez. O dispositivo era formado por vários discos metálicos – recobertos por fina camada de óxido de ferro – que podiam girar em alta velocidade.

Nasciam, assim, os primeiros discos rígidos, que até hoje habitam o interior de nossos computadores. O primeiro deles foi fabricado em 1956 e tinha 50 discos magnéticos de 24 polegadas, com capacidade total de armazenamento risível para padrões atuais: de 3,75 megabytes – menor que o tamanho do arquivo atual, em formato mp3, da canção *Saudosa Maloca*, do compositor paulista Adoniran Barbosa (1910-1982).

De lá para cá, pesquisa básica, desenvolvimento tecnológico e inovação fariam daquele trambolho volumoso um dispositivo bem menor e com capacidade de armazenamento cerca de um milhão de vezes maior. Um dos marcos nesse processo ocorreu no final da década de 1980, em pesquisa feita pelo francês Albert Fert, em colaboração com o brasileiro Mario Baibich, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e paralelamente pelo alemão Peter Grünberg.

Esses físicos observaram e explicaram um fenômeno novo que ocorre em dispositivos fabricados com várias camadas magnéticas: a magnetorresistência gigante, que permitiu enorme aumento da densidade de gravação magnética, elevando em muito a capacidade dos discos rígidos, por exemplo. Essa descoberta deu a Fert e Grünberg o Nobel de Física de 2007.

## Ocaso de uma heroína?

Atualmente, o império dos óxidos de ferro começa a esmaecer: discos rígidos modernos já não são mais fabricados com essa substância. Mais: há limites, impostos por leis da física quântica, que impedem gravar informação para além de certo número de *bits* por unidade de área – e já estamos bem perto desse patamar.

Nos últimos anos, entraram em cena os *pendrives*, ou seja, memórias portáteis que empregam um fenômeno elétrico (e não magnético) para gravar e recuperar a informação. E esses dispositivos, conhecidos pela sigla SSD, já substituem discos rígidos, com a vantagem de não precisarem da parte mecânica para gravação/recuperação de dados e gastarem mesmo energia nesses processos. Há também propostas recentes, resultados dos avanços em nanociência e nanotecnologia, para o uso, como memória, de materiais híbridos, dotados de propriedades tanto elétricas quanto magnéticas.

Hoje, os paradigmas de armazenamento de informação estão mudando. Mas o ocaso dos óxidos de ferro será lento, pois demandará um longo tempo (anos, décadas?) até que toda a informação contida neles seja transferida para outras mídias.

Mesmo sem o charme e a publicidade da lâmpada elétrica, os minerais à base de óxidos de ferro, certamente, merecem um lugar naquela

lista proposta no início deste texto. Afinal, o mundo atual é uma vasta Biblioteca de Alexandria assentada em átomos de ferro e oxigênio.

**JOÃO PAULO SINNECKER**, doutor em física pela Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), é pesquisador titular do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), no Rio de Janeiro (RJ), e membro da Sociedade Brasileira de Física e da IEEE Magnetic Society (EUA).

Imagem de abertura: Óxidos de ferro

Crédito imagem de abertura: [creativecommons.org](https://creativecommons.org/)



## DO QUE É FEITO O UNIVERSO?

A composição do cosmo é ainda um grande mistério. Cerca de 95% do universo são formados por algo cuja natureza desconhecemos. Essa aparente ignorância é, na verdade, resultado de um feito de grandes proporções da ciência e, para alguns, sinal de uma nova e profunda revolução em nossa visão do mundo.

Felipe Tovar Falciano



Em conversas informais com amigos, a pergunta mais frequente que me fazem, quando descobrem que sou físico e trabalho em cosmologia, é se o homem realmente já pisou na Lua. Descontado o fascínio que ela exerce, o que me diverte é ver a incredulidade das pessoas derramar sobre o próprio ser humano. Imagino que ninguém duvide que o avião voe. Então, por que seria tão absurdo uma espaçonave viajar até a Lua?

Talvez, a raiz de tal ceticismo seja o fato de o homem ter conseguido ‘tocar’ o divino. Mas o céu, embora divino, também é acessível à ciência. Hoje, com o uso de telescópios e satélites, pesquisadores conseguem não só entender o universo, mas também desvendar sua forma e constituição.

Quem mora em uma cidade grande, talvez, desconheça o deslumbramento de uma noite estrelada. É fascinante a intensidade do breu entre a infinidade de singelos pontos luminosos. Imaginar que alguns desses pontinhos de luz sejam aglomerados com, literalmente, milhares de galáxias - as quais podem abrigar uma massa trilhões de vezes maior que a do Sol - chega a causar angústia.

Certo. Cosmólogos têm esse hábito: exagerar na grandiosidade dos assuntos. Mas pense em todas as coisas que você conhece, como árvores, baleias, *chips* de computador, livros, montanhas, cometas, estrelas, planetas, bactérias, vírus... Tudo isso é feito do que chamamos matéria ‘comum’ (ou bariônica) e - pasme! - representa só 5% da massa do universo. O restante é formado por algo cuja substância desconhecemos.

Esses dois elementos misteriosos - nunca detectados em experimentos na Terra - são fundamentais na evolução do universo. Eles são denominados matéria escura e energia escura. ‘Escura’ porque não emitem luz como o faz a matéria comum. E isso torna sua detecção muito difícil.

A existência da matéria e energia escuras é consequência direta das observações cosmológicas. Mas, em cosmologia - área que estuda a estrutura e a evolução do universo -, até questões corriqueiras são complicadas. Por isso, antes de falarmos sobre o cosmo, visitemos nossa vizinhança.

Você já pensou como os astrônomos sabem do que o Sol é feito?

## Impressões digitais

O Sol está a míseros 150 milhões de km da Terra, o que, em astronomia, é tão perto quanto algo ao alcance das mãos. Por sinal, este ano, a NASA (agência espacial dos EUA) planeja lançar a sonda solar Parker, com a qual espera ‘tocar’ a atmosfera solar. Mas não é esse o procedimento de investigação mais usado em astronomia e cosmologia.

O conhecimento da constituição do Sol só foi possível porque os elementos químicos têm ‘impressões digitais’. Cada um deles possui uma forma muito específica de absorver luz e devolvê-la ao meio. Esse ‘CPF luminoso’ permite que os astrônomos possam dizer que o Sol é composto basicamente por hidrogênio (cerca de 75%), hélio (24%) e uma pequena quantidade de elementos (incluindo metais) mais pesados.

Parece fácil, não? Na verdade, é um pouco mais difícil. A luz que chega até nós vem apenas da superfície do Sol. Para conhecer seu interior, precisamos de boas teorias científicas para modelar tanto os fenômenos que ocorrem no interior de uma estrela quanto o que se passa com sua luz no longo caminho até nós. Por exemplo, o que os telescópios terrestres detectam é a mistura (convolução): i) do que acontece no Sol; ii) do que ocorre com sua luz viajando até nós; iii) dos efeitos da atmosfera sobre esta última.

O estudo do universo segue mais ou menos esse mesmo tipo de técnica: a partir da detecção da radiação eletromagnética (luz), conseguimos extrair informações sobre os objetos astrofísicos.

## Modelo padrão

Na década de 1920, o astrônomo norte-americano Edwin Hubble (1889-1953) observou que certas galáxias se afastavam da Terra. Isso era uma indicação da expansão do universo - uma das maiores descobertas da ciência. Com a expansão, o universo vem se resfriando, o que, a partir de certa temperatura, permitiu à atração gravitacional moldar as estruturas que observamos.

Hoje, sabemos que os objetos astrofísicos organizam-se de forma hierárquica. Os planetas giram em torno de estrelas; estas se movem ao redor das galáxias, as quais se agrupam em arranjos ainda maiores

(aglomerados). E assim sucessivamente, até as grandes estruturas, como os chamados filamentos, que se estendem por quintilhões de km e separam regiões de uma vastidão quase vazia.

Em astronomia, há uma relação íntima entre o micro e o macro. Assim, para entender a proporção de elementos químicos do Sol, precisamos conhecer a história térmica do universo. Cientistas em todo o mundo - como o grupo de pesquisa Cosmo, do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, no Rio de Janeiro (RJ) - desenvolvem conjuntamente pesquisas para ampliar nosso conhecimento nessa área.

Os resultados desse esforço internacional têm sido muito positivos. Nas últimas cinco décadas, essa comunidade estabeleceu o chamado modelo padrão da cosmologia. Isso significa que a maioria dos cosmólogos concorda em adotar uma única descrição do universo.

Segundo esse modelo, os elementos químicos mais leves, como o hidrogênio e o hélio, foram formados no universo primordial, ou seja, o período mais longínquo que conhecemos da história do cosmo: cerca de 13,7 bilhões de anos no passado.

O que aconteceu antes disto? Não sabemos; é uma incógnita. Até o momento, a ciência não tem dados suficientes para afirmar se o universo foi criado em um dado instante ou se é eterno.

## **Restos de estrelas**

A parte da história que conhecemos começa com um universo extremamente quente e com altíssima densidade, como um 'caldeirão' de partículas elementares (elétrons, quarks, fótons, neutrinos etc.). Em seguida, temos a formação dos elementos químicos leves (do hidrogênio até o berílio), fase denominada nucleossíntese primordial.

Todos os outros elementos químicos da natureza - mais de cem, como mostra a Tabela Periódica - formaram-se em reações nucleares nas estrelas. Por isso, o astrônomo norte-americano Carl Sagan (1934-1996) costumava dizer que nós, humanos, somos restos mortais de estrelas, por sermos constituídos de vários elementos pesados, como o carbono e o ferro.

O fato de encontrarmos na Terra essa diversidade de elementos químicos nos diz que o Sol é uma estrela de segunda geração. Ou seja,

antes dele, houve uma estrela que se desenvolveu por milhares de anos e explodiu, ejetando material para o espaço sideral. A partir da nuvem de detritos, por um processo parecido com a sedimentação, formaram-se tanto o Sol quanto nosso Sistema Solar (planetas, asteroides, luas etc.).

Mas vale lembrar: galáxias, aglomerados, buracos negros, Sol, Terra, animais, plantas... Tudo isso representa só 5% da massa do universo. O restante é matéria e energia escuras.

Mas, se não podemos vê-las, como os cosmólogos sabem que elas existem?

## **Matéria e energia escuras**

Quando um astrônomo aponta seu telescópio ou outro equipamento para o céu, a única coisa que consegue observar é a luz que emana dos objetos astrofísicos. Ou seja, só consegue ver o que está 'aceso', como o Sol, ou o que reflete a luz de outro objeto, como a Lua.

Mas a matéria escura não emite luz própria e, por isso, escapa à observação direta. Entretanto, um astrônomo atento é capaz de identificá-la por meio do único modo com que ela interage com a matéria comum: atração gravitacional.

Ao estudar o movimento das estrelas, o astrônomo percebe que a quantidade de matéria produzindo atração gravitacional é maior que a esperada. Por algum tempo, achou-se que essa massa faltante poderia ser formada de pequenos planetas ou mesmo buracos negros. Porém, ao combinar aquelas observações com dados cosmológicos, conclui-se que essa matéria invisível não podia ser feita de algo que conhecemos. Conclusão inevitável: matéria escura existe, mas não sabemos do que é feita.

Se a matéria escura já produz certa surpresa, a energia escura é ainda mais instigante. Como a matéria escura, ela interage apenas gravitacionalmente, mas, ao contrário daquela, produz um tipo de repulsão gravitacional.

Até pouco tempo atrás, acreditava-se que tudo que existia produzia atração gravitacional. Mas a energia escura produz o efeito contrário: sua 'antigravidade' é responsável por fazer o universo se expandir de forma acelerada - fenômeno descoberto em 1998.

A existência da matéria e da energia escura é, sem dúvida, uma ideia revolucionária. E, como tal, é tratada com cuidado pela comunidade científica.

## Nova janela

Hoje, a observação do céu - uma das práticas mais antigas da humanidade - é uma área de intensa renovação. Inclusive, há quem diga que a matéria e energia escuras são sinais de uma nova revolução em nossa visão de mundo. Algo tão profundo quanto foram a mecânica quântica - teoria que lida com os fenômenos atômicos e subatômicos - e a relatividade geral, formulada pelo físico de origem alemã Albert Einstein (1879-1955) e que trata da gravitação.

Recentemente, abriu-se uma nova janela para o universo, com a detecção das ondas gravitacionais ('oscilações' do espaço). Embora seu uso em cosmologia ainda seja embrionário, essa ferramenta promete a possibilidade de estudarmos o universo por uma perspectiva nova e independente dos dados observacionais que temos atualmente.

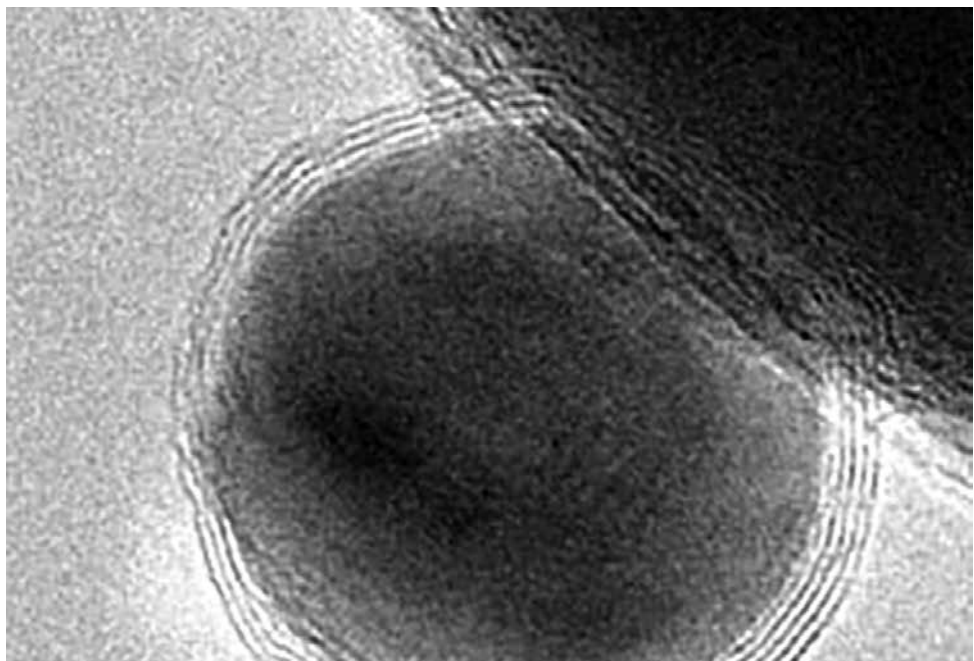
A ciência evita ideias preconcebidas sobre a natureza. Uma de suas tarefas é perguntar o que ela é por meio de experimentos. Até o momento, todas as evidências apontam para o fortalecimento da concepção de um universo com matéria e energia escuras.

A história tem nos ensinado a não subestimar ideias científicas, por mais inovadoras que sejam. Portanto, cabe agora a nós desvelar os segredos por trás das respostas que a natureza está nos oferecendo.

**FELIPE TOVAR FALCIANO** é doutor em física pelo Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), no Rio de Janeiro (RJ), onde, desde 2009, é pesquisador na área de cosmologia e gravitação.

Imagem de abertura: Imagem de Smiley - aglomerado de galáxias (SDSS J1038+4849) & lente gravitacional (um anel de Einstein) (Hubble)

Crédito: NASA / ESA - [http://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/15861603283\\_3579db3fc6\\_o.jpg](http://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/15861603283_3579db3fc6_o.jpg)



## MAGNETISMO CONTRA O CÂNCER

Há poucas décadas, se alguém dissesse que uma célula cancerosa poderia ser morta pelo calor gerado por uma diminuta partícula magnética que ela havia engolido, isso soaria, certamente, como ficção. Hoje, porém, a hipertermia magnética é uma vigorosa linha de pesquisa que avança em vários países do mundo (inclusive no Brasil), buscando não só novos tratamentos, mas também diagnósticos mais precisos para o câncer. E os resultados desses estudos já estão sendo postos em prática, em clínicas especializadas.

Flávio Garcia

A luta contra o câncer não se dá só em hospitais e no campo da medicina. Inúmeros cientistas ao redor do mundo, de áreas diversas, dedicam suas pesquisas ao desenvolvimento de novos tratamentos. O foco desses trabalhos são terapias que, em termos simples, devem matar o câncer sem causar efeitos colaterais graves no paciente.

Tratamentos convencionais, por vezes, agem no organismo como um todo. Um quimioterápico, em geral, também ataca células saudáveis. Sua dose deve ser cuidadosamente avaliada: se pequena, corre-se o risco de não ser eficaz contra a doença; se grande, pode comprometer a vida do paciente.

O medicamento ideal é aquele que vai direto ao alvo, atuando só ali, eliminando de forma definitiva o câncer. Esse ‘super-remédio’ tem sido a busca incessante de vários cientistas, ao longo de décadas, em diversos países.

Uma das linhas dessas pesquisas é criar dispositivos capazes de carregar um medicamento para o interior da célula tumoral, liberando-o lá dentro, de forma controlada. Estratégia semelhante poderia servir para criar um dispositivo para diagnosticar o tipo de câncer e as áreas do corpo onde ele se instalou.

## **Morrer pela boca**

Uma das abordagens para criar esse dispositivo multifuncional (medicamento ou diagnóstico) tem sido por meio do uso das chamadas nanopartículas, cujas dimensões estão na casa dos bilionésimos de metro (algo 50 mil vezes menor que o diâmetro de um fio de cabelo).

Essas partículas devem ter basicamente duas propriedades: i) ser ‘venenosas’ para as células cancerosas (e só para estas); ii) atrativas (só) para as células doentes. Para cumprir esta última tarefa, elas podem ser recobertas com algo de que a célula doente ‘goste’ ou precise para viver.

Nessa linha, exemplo interessante é o trabalho contemplado com o Nobel de Química de 2016. Os três ganhadores - o francês Jean-Pierre Sauvage, o britânico Fraser Stoddart e o holandês Bernard Feringa - desenvolveram o conceito de máquinas moleculares, que são capazes de entregar drogas diretamente ao tecido tumoral.

Outra possibilidade: o uso de nanopartículas magnéticas, que podem ser facilmente guiadas até o tumor por meio de ímãs. Vantagem adicional: são fáceis de recobrir com algo 'saboroso' para as células cancerosas. E, uma vez em seu destino (interior da célula), entra em cena sua 'arma' principal: um campo eletromagnético intenso (ondas de rádio, na verdade) aplicado sobre o paciente (e inofensivo para este), as faz esquentar muito, causando, por consequência, a morte celular por excesso de calor.

Essa tática conta com a ajuda de uma diferença crucial entre células cancerosas e sadias: as primeiras suportam até 40° celsius; as últimas, até 45° celsius. Portanto, ao se controlar a intensidade do campo eletromagnético, é possível fazer com que a região afetada pelo tumor atinja uma temperatura intermediária (42°, digamos), destruindo-se apenas o tecido tumoral. Esse é basicamente o conceito da hipertermia magnética, campo que começou a ser delineado ainda no final da década de 1950, por cirurgiões e engenheiros eletrônicos, para destruir o câncer que havia se espalhado pelo corpo de pacientes.

Com o que sabemos, podemos, então, traçar uma estratégia para criarmos um dispositivo de múltiplas funções para a terapia tumoral. Este seria formado por nanopartículas magnéticas, recobertas por uma ou mais moléculas que as tornem atrativas para células tumorais (e desinteressantes para as sadias). Esse conjunto poderia ainda servir como elemento de contraste para diagnóstico ou ainda armazenar um remédio antitumoral.

Desenvolvido esse dispositivo multifuncional, o próximo passo seria injetar uma dose dele na corrente sanguínea do paciente e, com o auxílio de ímãs, guia-los até o tumor, cujas células irão 'comê-los' (tecnicamente, endocitá-los) em profusão, gerando considerável concentração desses dispositivos dentro das células doentes.

Inicialmente, poderíamos fazer imagens com a ajuda de um exame médico bem popular: a ressonância magnética. Isso analisaria mais detalhadamente o tumor. Depois, duas frentes de combate se abririam. A primeira seria aplicar as tais ondas de rádio na região tumoral, o que faria as nanopartículas magnéticas se aquecerem, matando, de dentro para fora, as células malignas. Segunda frente: os dispositivos libera-



riam, no interior das células, o remédio armazenado neles, dose milimetricamente ajustada para matar o câncer.

Nos dois casos, as células ‘morreriam pela boca’, como no dito popular.

## Da teoria à prática

Ponto importante sobre esses dispositivos multifuncionais: no interior do corpo, eles não devem, como fazem os ímãs, se atrair mutuamente, pois isso poderia causar entupimentos de veias ou coágulos.

Entre os materiais magnéticos mais empregados para essas finalidades, estão os spions (lê-se, ‘spáions’), sigla, em inglês, para nanopartículas superparamagnéticas de óxido de ferro. Nome complicado para algo simples: nanoesferas de óxido de ferro, com cerca de 10 bilionésimos de metro (10 nanômetros) de diâmetro.

A principal razão para tal empregabilidade é que os spions não só são seguros para o organismo – há muito óxido de ferro em nosso corpo –, mas também se combinam facilmente com outras substâncias (revestimentos, medicamentos, contrastes etc.).

Outra vantagem dos spions está no termo mais complexo de sua definição: superparamagnetismo. Traduzindo: quando não estão na presença de um campo magnético, eles comportam-se como um material qualquer.

No entanto, os spions têm um revés: não são capazes de absorver a energia do campo eletromagnético e liberá-la na forma de calor – essa capacidade é chamada histerese magnética. O único efeito do campo sobre essas nanopartículas é torná-las agitadas. Ao fazer isso, elas geram calor por atrito – do mesmo modo que esquentamos as mãos esfregando uma contra a outra. Esse calor por atrito, no entanto, não é tão intenso quanto aquele gerado pela histerese.

Tudo até aqui pode soar como aquela futurologia que os novos campos de pesquisa – que é o caso da aplicação de magnetismo ao câncer – gostam de alardear sobre si mesmos para parecerem promissores. No entanto, parte do que foi dito até agora já deixou as bancadas dos laboratórios e chegou à aplicação clínica. Na Alemanha, por exemplo, já há uma empresa que usa a hipertermia magnética como terapia contra o câncer. Essa técnica pode ser ainda combinada a outras, como a radioterapia.

## Encontro com VIPs

O Brasil não está alheio a essas pesquisas. Por exemplo, nosso grupo no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), no Rio de Janeiro (RJ), investiga, por exemplo, partículas de óxido de ferro cuja estrutura - cerca de 10 vezes maior que a dos spions - é a de um anel.

Esses anéis são formados por diminutos ímãs, que se comportam como 'redemoinhos' (no jargão da física, vórtices magnéticos). Por isso, nós batizamos essas partículas VIPs (em inglês, partículas de óxido de ferro com vórtices).

Esse tamanho e forma peculiares conferem às VIPs, quando comparadas aos spions, vantagens: i) aquecem cerca de 10 vezes mais sob a influência de um campo eletromagnético, por conta dos vórtices; ii) são mais 'saborosas' para as células cancerosas quando comparadas a outras nanopartículas.

O último item acima fica comprovado com imagens feitas com microscópios superpotentes que mostram que as células tumorais engolem as VIPs com voracidade. E, assim como os spions, guardam propriedades indispensáveis para aplicações biomédicas: não tóxicas para as células saudáveis e sem a presença de um campo magnético, comportam-se como um material ordinário - ou seja, não se aglomeram e entopem vasos e veias.

As VIPs foram tema de uma tese de doutorado recente, cujos resultados foram publicados em uma prestigiosa revista científica *Scientific Reports*, do grupo *Nature*.

Qual a chance de as VIPs serem usadas para tratar o câncer em humanos? Permita-me aqui, leitor(a), um depoimento pessoal. Sou físico especializado em magnetismo. Ou seja, não tenho a pretensão de desenvolver nem medicamentos, nem curar doenças. Tenho trabalhado com assuntos muito fundamentais, como magnetismo topológico, vórtices, skyrmions e outros assuntos intangíveis sobre os quais colegas - e, especialmente, minha filha de 12 anos, Clara - reiteradamente me perguntam: "Para que serve isso?". Em geral, minha resposta é: "Serve para que a gente conheça mais a fundo a natureza".

No entanto, se há meio século alguém dissesse que uma nanopartícula magnética poderia fazer um tumor "morrer pela boca", certamente,

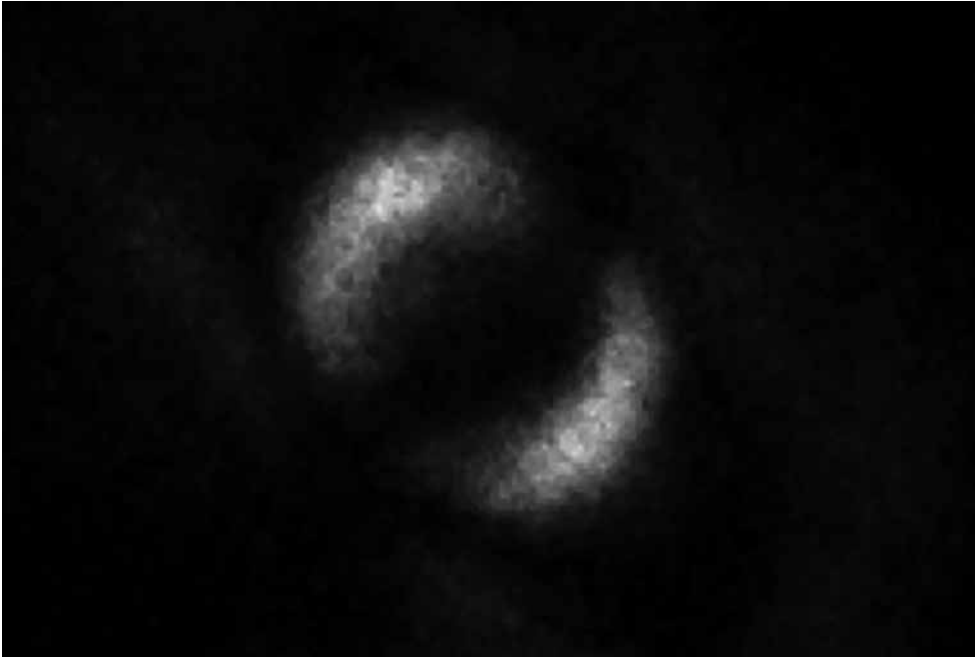
soaria como ficção científica. Hoje, porém, isso é realidade, o que mostra o quão importante é fazer pesquisa básica (sem compromisso com aplicações), pois é justamente daquilo que aparentemente ‘não servia para nada’ - como os vórtices magnéticos - é que nasceu grande parte das tecnologias que, atualmente, trazem bem-estar para as populações e riqueza para as nações.

Muito provavelmente, será a pesquisa básica que, mais uma vez, irá indicar rumo a um novo tratamento, uma vacina ou a tão esperada cura do câncer. Daí a necessidade premente de considerá-la não gasto, mas, sim, investimento.

**FLÁVIO GARCIA** é doutor em física pelo Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), no Rio de Janeiro (RJ), onde é pesquisador. Trabalha com propriedades magnéticas da matéria.

Imagem de abertura: A nanopartícula de cobalto, revestida com grafeno, é um dos tipos de nanopartículas magnéticas atualmente usadas em química magnética

Crédito: Supermaster2011 [CC BY-SA 3.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0>)]



## MECÂNICA QUÂNTICA E PÓS-VERDADE

A mecânica quântica – a melhor teoria que temos até hoje para explicar fenômenos na escala atômica e subatômica – é a base de tecnologias que vão do *laser* a computadores supervelozes. Mais do que isso, essa área da física mudou a forma como compreendemos o mundo. A história de todo esse desenvolvimento guarda, porém, outro ensinamento que pode ser bastante valioso em tempos de pós-verdade: a atitude científica.

**Fernando de Melo**

Em 2016, o departamento da Universidade de Oxford responsável por editar o renomado dicionário Oxford de inglês escolheu o vocábulo ‘pós-verdade’ (*post-truth*) como a palavra do ano. Pós-verdade é definida, segundo essa obra, como um termo que “se relaciona ou denota circunstâncias em que fatos objetivos são menos importantes na formação da opinião pública do que apelos à emoção e às crenças pessoais”.

Pós-verdades têm tido maior repercussão no cenário político, mas questões de cunho científico não escaparam ilesas. Negação do aquecimento global, criacionismo e, mais recentemente, terraplanismo são exemplos marcantes em que os fatos científicos são ignorados e substituídos por crenças ou modismos.

Talvez, os cientistas tenhamos uma parcela de culpa nisso. Muitas vezes, passamos ao público uma imagem dogmática do fazer científico: é tudo preto no branco; não existe espaço para questionamentos ou erros. Dessa forma, a ciência fica parecendo só outra crença. E crença por crença, cada um prefere a sua.

O dia a dia do cientista é bastante diferente, porém. Não tenha dúvida: cientistas somos humanas e humanos, temos nossas paixões, vieses, cometemos erros e somos influenciados por questões que vão das mais mundanas possíveis até questões socioeconômicas.

Mas um aspecto da prática científica é crucial: não podemos ignorar os resultados de experimentos. Mais do que isso: quando propomos uma nova ideia ou teoria, temos que buscar convencer os que discordam da gente. Isso não se dá no grito, na força ou por argumentos de autoridade.

Para convencer os demais cientistas de nossas ideias, procuramos realizar experimentos que podem nos provar errados! Se tal experimento não cumpre essa tarefa, nossa teoria ganha força; se o experimento mostra nosso equívoco, temos que modificar nossa teoria ou até mesmo abandoná-la. É esse aspecto fundamental que faz com que os resultados científicos sejam confiáveis.

Possivelmente, uma das melhores ilustrações dessa prática científica venha da história da mecânica quântica e, em especial, das discussões sobre seu fenômeno mais controverso: o emaranhamento quântico.

## Uma nova mecânica

A mecânica quântica tem sua origem por volta de 1900. Naquele momento, três dos grandes pilares da física moderna – a mecânica newtoniana, o eletromagnetismo e a termodinâmica – já estavam bem desenvolvidos e foram de grande influência, por exemplo, na Revolução Industrial e nas telecomunicações à época (máquinas térmicas, telégrafo etc.). No entanto, resultados experimentais teimavam em balançar esses pilares.

Quando fazemos uma fogueira para nos aquecer do frio, podemos observar que a madeira fica avermelhada. A cor que vemos ser irradiada por um objeto incandescente (madeira, metal etc.) é composta de várias cores fundamentais, e a distribuição delas nessa composição é relacionada à temperatura do objeto.

Essa radiação emitida pelo objeto vem da vibração de seus átomos, e as teorias vigentes no começo do século passado falhavam em explicar a distribuição das cores observadas – de fato, nem mesmo a ideia da existência dos átomos era bem aceita à época.

Para explicar tal distribuição de cores fundamentais para uma dada temperatura, Max Planck (1858-1947) fez, ainda que de modo relutante, uma excêntrica suposição: a energia emitida pela vibração dos átomos só pode se dar em múltiplos inteiros de um valor mínimo, o chamado *quantum* de energia. Estava assim proposta que a energia é quantizada e, como tal, só pode ser gerada ou absorvida em pacotes de *quanta* (plural de *quantum*).

O valor de um *quantum* é muito pequeno, o que faz com que não observemos os efeitos dessa quantização da energia em nosso dia a dia. No entanto, a suposição de Planck explicou perfeitamente a distribuição de cores de um objeto incandescente. Mais tarde, comentando sua atitude, ele disse: “[foi] um ato de desespero... Eu estava pronto para sacrificar todas as minhas convicções sobre física”.

Por esse “ato de desespero”, Planck recebeu o Nobel de Física de 1918. Sua atitude de se despir de ideias preconcebidas guiou todo o desenvolvimento da mecânica quântica. O mundo das partículas subatômicas é tão diferente de nosso cotidiano que temos que nos guiar

inteiramente pelos resultados experimentais. O senso comum do mundo macroscópico que habitamos tem que ser abandonado se quisermos verdadeiramente entender o âmbito das partículas subatômicas.

Uma vez que uma ideia explica os resultados de um experimento, temos que ver se ela é consistente com os resultados anteriores e devemos explorar suas consequências. Essa tarefa foi desempenhada por um grupo de cientistas – Albert Einstein (1879-1955), Marie Curie (1867-1934), Niels Bohr (1885-1962), Erwin Schrödinger (1887-1961), Werner Heisenberg (1901-1976), entre outros – e culminou com as bases do que hoje chamamos a teoria da mecânica quântica.

A teoria proposta por esses cientistas esclareceu vários resultados experimentais à época, bem como tornou possível entender a estrutura atômica e sua interação com a luz. Esses desenvolvimentos acabariam por levar à invenção do *laser*, do transistor, dos aparelhos de ressonância magnética... e da bomba atômica.

## Emaranhamento quântico

Antes da Segunda Guerra Mundial eclodir, uma consequência direta da recente teoria da mecânica quântica já causava estrondo. Em 1935, Einstein, juntamente com Boris Podolsky (1896-1966) e Nathan Rosen (1909-1995), percebeu que a teoria quântica leva a um tipo de ‘conexão’ (tecnicamente, correlação) entre partículas subatômicas que pode ser mais forte do que as correlações observadas entre sistemas macroscópicos. Esse tipo de correlação entre partículas subatômicas foi batizado emaranhamento quântico, por Schrödinger, em 1935.

Em princípio, correlações não têm nada de misterioso. Considere, por exemplo, a situação em que dois carros se afastam um do outro em linha reta com velocidades idênticas, porém, inicialmente desconhecidas para nós. Quando medimos a velocidade de um dos carros, descobrimos imediatamente a velocidade do outro.

Da mesma forma, se os dois carros partiram do mesmo ponto, quando medimos a posição de um deles em relação ao ponto inicial, descobrimos imediatamente a posição do outro. Portanto, as posições e velocidades dos dois carros estão correlacionadas. No entanto, quan-

do transportamos esse cenário para o mundo quântico, as correlações quânticas parecem desafiar ora a mecânica quântica, ora a teoria da relatividade – ambas muito caras a Einstein.

Einstein, Podolsky e Rosen (EPR) imaginaram uma situação experimental semelhante à dos carros acima, mas com partículas subatômicas. Eles consideraram um experimento mental no qual duas partículas (que denotaremos por A e B) são preparadas de tal forma que suas posições e velocidades são quanticamente emaranhadas, ou seja, dotadas daquela ‘conexão’ que só ocorre no mundo atômico e subatômico.

Depois que as duas partículas estão bem distantes uma da outra, EPR argumentam que, assim como para os carros, se realizássemos uma medição da posição de A, poderíamos inferir a posição de B. E, se medíssemos a velocidade de A, poderíamos descobrir a velocidade de B. Como, no ato das medições, as partículas já estão muito distantes entre si, os três autores supõem que a medição de A não interfere em nada nos valores da posição e velocidade de B. Aqui, temos um possível dilema.

Alguns anos antes, em 1927, Heisenberg havia demonstrado que, segundo a mecânica quântica, não podemos ter um sistema subatômico que tenha, ao mesmo tempo, valores bem definidos para posição e velocidade. Se um sistema subatômico tem, por exemplo, um valor bem definido para sua posição, quando medimos a sua velocidade encontramos valores aleatórios. Esse é o conteúdo da famosa relação de incerteza de Heisenberg.

No entanto, no experimento pensado por EPR, caso decidíssemos medir a posição de A, descobriríamos que B tem posição bem definida; se resolvéssemos medir a velocidade de A, descobriríamos que B tem velocidade bem definida. Mas, como as partículas estão separadas por uma grande distância, a decisão de qual medição será feita em A não pode influenciar os valores de posição e velocidade da partícula B. Ou seja, B teria que ter, em princípio, posição e velocidade bem definidas ao mesmo tempo.

Essa argumentação leva a uma contradição com o princípio da incerteza. Portanto, os autores alegam que a mecânica quântica não seria uma teoria completa, uma vez que essa não conseguiria estabelecer os



valores de grandezas físicas que estão de fato presentes no sistema que está sendo medido.

Na concepção dos três físicos, o único modo de salvar a mecânica quântica seria relaxando a hipótese de que a medição de A não pode interferir instantaneamente nas propriedades de B. Por exemplo, se decidíssemos medir a posição de A - o que, por consequência, nos permitiria dizer que B teria posição bem definida -, isso perturbaria de forma aleatória a velocidade da partícula B, e, portanto, essa partícula não teria velocidade bem definida.

Essa solução, porém, sugere que a informação do que foi medido em A teria que ser transmitida instantaneamente para B. Mas, segundo a teoria da relatividade de Einstein, nenhum sinal que carrega informação pode ser transmitido mais rápido do que a luz (300 mil km/s). Mais uma vez, parecemos chegar a uma contradição. Einstein deu nome para essa possível transmissão instantânea: “ação fantasmagórica a distância”.

## Dialogando com a oposição

As ideias que levaram ao ‘paradoxo EPR’ foram grandemente influenciadas pelas várias discussões que Einstein teve com Bohr. Einstein ganhou o Nobel de Física em 1921 por mostrar o efeito da quantização da luz; Bohr recebeu o Nobel de Física no ano seguinte por descrever a quantização da matéria. Apesar de os dois cientistas terem participado de forma crucial da construção da mecânica quântica, eles discordavam fortemente sobre aspectos mais filosóficos da teoria.

Einstein acreditava que, ao contrário do que dizia a mecânica quântica, todas as grandezas físicas de um sistema devem ter um valor bem definido o tempo todo, independentemente de estarem ou não sendo medidas. Ou seja, existe uma realidade intrínseca, e medições só a descobrem.

Bohr, em contrapartida, postulou o princípio da complementariedade, o qual diz que, para os sistemas na escala atômica, não existe um valor pré-definido para as grandezas físicas: são as medições que criam a realidade.

Apesar dessa discordância - ou até mesmo por causa dela -, os dois cientistas se admiravam mutuamente. A discussão de ideias, especial-

mente com os que não concordam com elas, é parte fundamental da atitude científica.

### ***Fact checking***

Na esteira dessa construtiva discussão entre dois dos maiores cientistas do século passado, Bohr, ainda em 1935, escreveu um artigo no qual abordava o tal ‘paradoxo EPR’. A resposta, porém, não convenceu. Einstein morreu em 1955; Bohr, em 1962. A teoria da mecânica quântica se transformou em uma das mais precisas e mais bem testadas de todos os tempos. Até hoje, nenhum experimento pôs em questão sua validade. Apesar de todo esse sucesso, aquelas questões de 1935 ainda incomodavam.

Foram necessários quase 30 anos e um até então desconhecido físico, John Stewart Bell (1928-1990), para que, em 1964, a resposta ao ‘paradoxo EPR’ começasse a se desenhar. Bell percebeu que, se realizamos um experimento somente uma vez, nada podemos falar sobre correlações ou transferência de informação. Para tal, é preciso repeti-lo muitas vezes e, assim, obter a probabilidade de cada resultado possível.

A estratégia de Bell foi, então, a de relacionar os conceitos de realismo – o qual diz que os valores das grandezas físicas estão definidos a todo instante – e o de localidade – que diz que não pode haver interação a distância instantânea – com as probabilidades dos resultados de medições nas partículas A e B. Com isso, ele transformou conceitos, a princípio, de cunho filosófico em grandezas que podem ser acessadas por experimentos.

Também com essa formulação probabilística podemos estabelecer critérios para verificar se uma teoria permite transmissão de informação instantaneamente – e fica claro que a mecânica quântica não o permite. A contradição com a teoria da relatividade, então, de fato, não existe, mas ainda resta a possibilidade de interação a distância instantânea sem a transmissão de informação.

Partindo das ideias de Bell, é possível construir uma relação entre as probabilidades dos resultados de um experimento a qual deve ser satisfeita por todas as teorias que supõem realismo e localidade. Essa relação é conhecida hoje em dia como desigualdade de Bell. Experimen-

tos para testar tal desigualdade começaram no início da década de 1980, tendo sua versão mais sofisticada realizada em 2015. Em todos esses experimentos, a conclusão é sempre a mesma: a mecânica quântica não está de acordo com a desigualdade de Bell.

Os resultados desses experimentos mostram, mais uma vez, que ideias que tomamos como absolutamente triviais no mundo macroscópico não podem ser tomadas como verdadeiras no mundo das partículas subatômicas. Na arena quântica, ou não temos realismo, ou não temos localidade, ou não temos nenhuma das duas coisas.

Portanto, uma teoria sem interação a distância e com valores bem definidos a todo tempo para as grandezas físicas – como, talvez, desejasse Einstein – não é possível. Uma teoria sem interação a distância na qual medições geram a realidade – como argumentava Bohr – ainda não foi refutada e segue, portanto, como uma das possíveis descrições da natureza. Mesmo em uma discussão entre gigantes da ciência, os fatos dão a última palavra.

## **Antídoto contra pós-verdade**

Desde seu nascimento, a mecânica quântica tem mudado nossa sociedade de uma forma radical. Aquela discussão filosófica de 1935, que mudou a forma como entendemos a natureza a partir de 1964, é hoje o combustível de surpreendentes tecnologias quânticas. Computadores quânticos – que permitem resolver problemas intratáveis para os computadores atuais – e criptografia quântica – que permite comunicações intrinsecamente seguras – são alguns dos desenvolvimentos tecnológicos que prometem mudar drasticamente a forma como vivemos em um futuro não muito distante. Crucial para esses desenvolvimentos foi – e ainda é – a atitude científica.

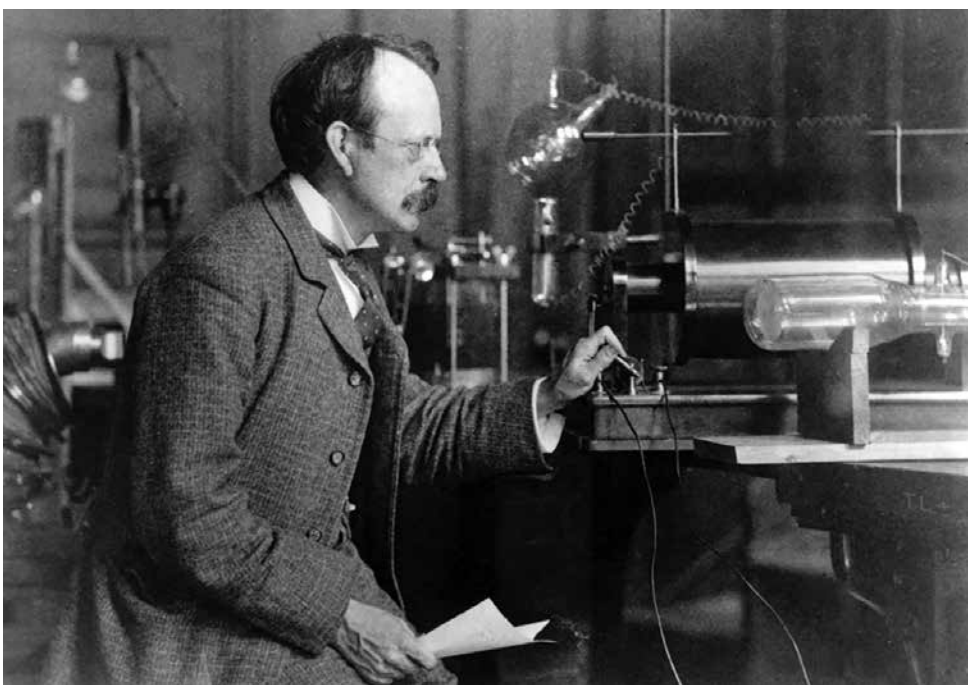
Em uma sociedade onde pós-verdades são disseminadas frequentemente pelas mídias e nas redes sociais – fazendo com que analistas cheguem a afirmar que vivemos a era da pós-verdade –, talvez, a atitude científica seja a mais importante das lições da história da mecânica quântica. Mais do que gerar inovações tecnológicas, o papel das ciências é o de mudar a sociedade pela forma que compreendemos o mundo.

Fica, então, uma possível sugestão para estes tempos modernos: interpretações, erros, vieses e dúvidas vão sempre estar presentes, mas fatos não podem ser ignorados.

**FERNANDO DE MELO** é doutor em física pela Universidade Federal do Rio de Janeiro e pesquisador do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), no Rio de Janeiro (RJ). Sua área de pesquisa é informação quântica.

Imagem de abertura: forte forma de entrelaçamento quântico

Crédito: <https://www.bbc.com/news/uk-scotland-glasgow-west-48971538>



## ELÉTRON: UM SECULAR AINDA MISTERIOSO

Há pouco mais de 100 anos, a física tornava a palavra 'átomo' (não divisível) uma contradição semântica: era descoberto o elétron, a primeira partícula subatômica. Desde então, esse fragmento de matéria – certamente, o mais popular da história – tem prestado serviços inestimáveis à ciência e à humanidade. Há 90 anos, uma equação começava a desvendar seu comportamento, ainda hoje um desafio para a física.

José Abdalla Helayël-Neto

Para entender por que o elétron – partícula que deu nome à eletricidade, tida como a maior invenção da humanidade – é ainda um desafio para a física, é preciso fazer aqui um panorama simples e sucinto do que esse ramo da ciência sabe sobre a matéria, energia e as forças da natureza.

A física contemporânea descreve os fenômenos naturais em termos de quatro interações fundamentais, as quais, para nossos propósitos aqui, podem ser entendidas como forças. Duas delas (gravitacional e eletromagnética) são perceptíveis em nosso cotidiano. As outras duas (nuclear fraca e nuclear forte) agem apenas no âmbito subatômico, a distâncias inimagináveis: em torno do décimo do trilionésimo do centímetro.

A força gravitacional é a responsável pelos movimentos planetários e pela organização da estrutura em larga escala de nosso universo. A eletromagnética responde pela formação dos átomos, pelas ligações moleculares e pelos processos biológicos fundamentais – e até mesmo pelo atrito entre a sola de nossos calçados e o chão. A nuclear forte faz a coesão dos prótons e nêutrons e a própria formação das estruturas dessas partículas nucleares. Finalmente, a nuclear fraca está por trás da radioatividade, fenômeno em que núcleos atômicos expõem partículas e radiação, transformando-se uns em outros.

Cada uma dessas forças é descrita por uma teoria. A gravitacional, nas dimensões de nosso dia a dia, é descrita pela mecânica proposta pelo físico e matemático britânico Isaac Newton (1642-1727), caso as velocidades envolvidas sejam baixas se comparadas à da luz no vácuo (300 mil km/s). Se essas velocidades atingirem valores quase luminares, entra, então, em cena a teoria da relatividade, proposta, no início do século passado, pelo físico de origem alemã Albert Einstein (1879-1955).

A descrição microscópica (isto é, quântica) da gravitação – denominada gravitação quântica – é um campo de investigação com várias questões em aberto. Há vários candidatos para se chegar a essa abordagem. Os mais populares são as chamadas teorias de supercordas, nas quais partículas elementares (elétrons, neutrinos, quarks etc.) são tratadas não como ‘pontos sem dimensão’, mas, sim, como diminutas estruturas extensas (cordas).

A eletrodinâmica quântica descreve os fenômenos que envolvem a força eletromagnética, como um ímã atraindo um pedaço de ferro ou uma

corrente passando por um fio elétrico. Essa teoria, desenvolvida a partir do início da década de 1940, ajudou a entender o mundo das chamadas partículas elementares – ou seja, partículas ‘indivisíveis’ – à medida que elas iam sendo descobertas – hoje, mais de cem delas são conhecidas.

Trabalhos publicados entre 1961 e 1968 ajudaram a formular a teoria eletrofraca, que, como o nome indica, unifica os fenômenos eletromagnéticos e aqueles regidos pela força nuclear fraca. Esse ferramental teórico mostrou que essas duas forças – apesar de suas características muito diferentes – têm uma origem comum. Portanto, radioatividade e atrito, por exemplo, são fenômenos aparentados.

Estabelecida em 1973, a cromodinâmica quântica (QCD, em inglês) – teoria que descreve os fenômenos que envolvem a força forte – ainda apresenta desafios estimulantes. Por exemplo, por que quarks (‘tijolos’ constituintes dos prótons e nêutrons) não são encontrados isoladamente na natureza?

A união da teoria eletrofraca e da cromodinâmica quântica está contemplada no que os físicos denominam Modelo Padrão, um ‘quadro geral’ que reúne as partículas que os físicos conhecem hoje e três das quatro forças da natureza (eletromagnética, fraca e forte). A inclusão da gravidade – muitos acreditam que isso seja possível – tem que esperar por uma teoria de gravidade quântica.

## A antimatéria

Uma vez estabelecido esse cenário geral, voltemos, então, nossa atenção para o protagonista desta história: o elétron. Breve currículo: tem massa, não é divisível (elementar); tem carga elétrica negativa; e orbita o núcleo atômico, quando não está correndo pelos fios elétricos do planeta.

Descoberto em 1897, o elétron mostrou que o átomo era divisível e teve papel preponderante no desenvolvimento da física do século passado. Nesse sentido, vale destacar que, em 1925, descobriu-se que, além de sua massa e carga elétrica, o elétron exibia outra propriedade: o *spin*, que podemos entender como um atributo que transforma essa partícula em um diminuto ímã – ou seja, o elétron é dotado de magnetismo.

Nos anos seguintes, a descoberta do *spin* foi fundamental para o estabelecimento de uma nova área da física: a mecânica quântica, que lida com os fenômenos nas dimensões atômicas e subatômicas. Essa teoria – considerada a mais precisa da história da ciência – deixou claro que o elétron era protagonista em um fenômeno corriqueiro em nossas cozinhas, mas mal compreendido à época: quando deixamos cair sal no fogo, surge uma linda chama amarela. Essa cor é gerada pelos elétrons, ao absorverem freneticamente a energia (calor) do fogo e devolvê-la na forma de luz.

Esse fenômeno ajudou os físicos a identificar os elementos químicos, pois cada um deles tem uma ‘assinatura colorida’ bem característica – o amarelo do sal de cozinha é do sódio. Esse conhecimento foi essencial para que os astrofísicos determinassem a composição de objetos celestes, estrelas, galáxias, gases interestelares etc.

Em 1928 – portanto, há 90 anos –, Paul Dirac (1902-1984) propôs uma teoria que revolucionou a física da época. Esse físico britânico, para compreender mais profundamente o comportamento do elétron, unificou duas teorias físicas até então independentes: a mecânica quântica e da relatividade. A entrada desta última se fazia necessário: afinal, o elétron se move ao redor do núcleo quase à velocidade da luz – e isso é assunto para a relatividade einsteiniana.

A célebre equação de Dirac – que trata, portanto, o elétron do ponto de vista quântico relativístico – rendeu frutos para o entendimento das partículas de matéria. Vale lembrar que, naquele momento, o ‘cárdpio subatômico’ era restrito: elétron (1897) e próton (1919), com o nêutron detectado só em 1932. No entanto, o mais importante desses desdobramentos foi a predição, em 1931, por Dirac, de uma nova forma de matéria: a antimatéria. Ele anteviu, com base em argumentações teóricas, a existência do pósitron, ‘réplica’ do elétron, mas com carga elétrica oposta (positiva).

Em 1932, o pósitron foi detectado em laboratório, coroando os profundos estudos de Dirac sobre o elétron. Mas os resultados de Dirac permitiram mais: o antipróton (antimatéria do próton) e uma nova categoria de carga, a chamada carga magnética, ainda hoje procurada, mas até agora não encontrada.



## Instância elementar

Com base na descrição quântica dos fenômenos microscópicos, foi possível uma ampla e precisa compreensão dos processos eletrônicos, tanto do ponto de vista da teoria e da experimentação quanto do ponto de vista das aplicações tecnológicas, com a elaboração de novos materiais que revolucionaram o século passado. O exemplo clássico aqui: a invenção do transistor, componente eletrônico que permitiu a miniaturização de rádios, TVs, computadores etc.

Ao longo de sua carreira, Dirac perseguiu o elétron, pois, para ele, essa partícula era enigmática e desafiadora. Em 1963, ele propõe a possibilidade de esse fragmento de matéria ser uma estrutura composta, formada por objetos ainda mais elementares, que ele denominou *singletons* – na década seguinte, rebatizados de *préons*. Aquele trabalho de 1963 – ainda muito desconhecido da comunidade física – relaciona essa composição com a existência de uma possível dimensão extra, uma quarta dimensão de espaço. Essa é uma questão ainda em aberto e tratada por concepções teóricas mais atuais, como as teorias de supercordas.

Na visão diraqueana, a natureza é uma espécie de sítio arqueológico reminescente de uma ‘civilização’ com bilhões de anos (o universo), e o elétron é como um achado arqueológico que nos permitiria descobrir e compreender novas formas de matéria. De fato, aceleradores que produziram colisões entre elétrons e pósitrons levaram à descoberta de novas partículas elementares, as quais, por sua vez, mostraram, por exemplo, que a força eletromagnética e fraca eram faces de uma mesma moeda.

O elétron ainda nos desafia. Estudos recentes buscam compreender como sua carga se distribui em torno dele. A compreensão desse ponto pode indicar novos caminhos para um entendimento mais profundo das forças fundamentais da natureza.

Aquele minúsculo, quase pontinho, com carga e magnetismo, poderá nos ajudar a elucidar grandes questões que desafiam a física atual em sua tentativa de compreender, no final das contas, o cosmo em sua instância mais elementar – o que, de certa forma, nos inclui também. Ou seja, a partícula mais popular e útil da história ainda é um desafio. E isso deve ser comemorado – principalmente, nestes 90 anos da equação que começou a domar a primeira porção subatômica da matéria.

**JOSÉ ABDALLA HELAYĚL-NETO** é pesquisador titular do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), no Rio de Janeiro (RJ), atuando na Coordenação de Astrofísica, Cosmologia e Interações Fundamentais (Cosmo). É mestre e doutor em física pelo Centro Internacional de Física Teórica Abdus Salam, em Trieste (Itália).

Imagem de abertura: Dr. JJ Thomson (1856-1940)

Crédito: Cambridge University, Cavendish Laboratory



## UM QUARTO NEUTRINO?

A física atual conhece três tipos de neutrinos, as partículas mais ariscas do universo subatômico. Entretanto, resultados recentes sugerem a existência de um quarto neutrino. Se comprovado, esse intruso destruiria a simetria existente no modelo que descreve os componentes básicos que formam a matéria.

Hélio da Motta Filho

Quando compramos um pote de sorvete de creme no supermercado, esperamos encontrar sorvete daquele sabor quando chegamos em casa. Imagine a surpresa se, ao abrímos o pote, percebamos que parte do sorvete é de... chocolate. Colocamos o pote de volta no congelador e, mais tarde, ao abri-lo novamente, encontramos sorvete de... creme, chocolate e morango! Acharíamos que algo está errado. Muito errado.

Pois é exatamente isso o que ocorre ao observarmos neutrinos, considerados a mais arisca das partículas subatômicas conhecidas hoje. Primeiramente, o óbvio: não, neutrinos não são feitos de creme, chocolate ou morango. Eles se apresentam em três tipos (ou sabores, no vocabulário da física) diferentes: neutrino do elétron (ou eletrônico), neutrino do múon (ou muônico) e neutrino do tau (ou tauônico).

O múon e tau, para nossos propósitos aqui, podem ser considerados ‘primos’ mais pesados do elétron. Estas últimas três partículas, mais os três tipos de neutrinos correspondentes, formam um grupo que os físicos chamam léptons (termo, em grego, para leve).

Nosso caso com os neutrinos começou há cerca de 100 anos, quando concebemos a existência dessas partículas para salvar um dos princípios mais importantes da física (e da ciência): a conservação da energia. Essas partículas - cuja existência foi efetivamente comprovada só na década de 1950, cerca de 25 anos depois de propostas teoricamente - não têm carga elétrica, quase nenhuma massa e praticamente não interagem com outras formas de matéria. Por conta deste último atributo, são capazes de passar incólumes por planetas, estrelas ou qualquer corpo celeste que lhes apareça pela frente. Poderiam viajar através de uma parede de chumbo com um ano-luz de espessura (9,5 trilhões de km) sem se ‘chocarem’ (interagirem) com nada.

Neutrinos são a partícula de matéria mais abundante no universo, mas pouco os percebemos. Eles passam, em quantidades astronômicas, pelos nossos corpos a cada segundo, sem provocar qualquer efeito. No momento em que você, leitor(a), está lendo este texto, cerca de 300 trilhões de neutrinos vindos do Sol atravessam seu corpo a cada segundo. Acrescente a isso, no mesmo intervalo de tempo, mais 50 bilhões deles vindos da radioatividade natural da Terra e outros cerca de 100 bilhões provenientes dos reatores nucleares ao redor do planeta. Mais: elementos

radioativos em nossos corpos (20 mg de potássio 40) geram mais milhões de neutrinos a cada segundo.

Após muito esforço de investigação, descobrimos que os neutrinos aparecem em três tipos. Cada um deles tendo uma partícula eletricamente carregada (elétron, múon e tau) como parceira.

Um problema, entretanto, ocorreu décadas atrás: mediu-se a quantidade de neutrinos eletrônicos vindos do Sol e encontraram-se apenas 30% da quantidade esperada, segundo cálculos baseados no modelo mais aceito sobre o mecanismo solar de geração de energia. Cerca de dois terços dos neutrinos havia desaparecido. Uma possibilidade, claro, era a explicação mais simples: não estávamos medindo os neutrinos corretamente. Outra possível: nossa ideia de quantos neutrinos eletrônicos eram emitidos pelo Sol estava errada.

Porém, uma grande surpresa nos aguardava. Ao aprimorarmos a observação dos neutrinos vindos do Sol, encontramos finalmente os dois terços que faltavam. Para certo espanto (e alívio) da comunidade planetária de físicos, essas partículas apareciam na forma de neutrinos muônicos e neutrinos tauônicos!

De alguma forma, parte dos neutrinos eletrônicos que vinham do Sol mudava de sabor ao longo do caminho.

## **Junto e misturado**

Como podíamos entender isso? Coisas estranhas como essa podem ser explicadas pela mecânica quântica, que descreve o comportamento e as propriedades de partículas subatômicas, como os neutrinos. Segundo essa teoria - desenvolvida principalmente nas primeiras décadas do século passado -, uma partícula elementar (elétron, próton, nêutron, neutrino, fóton etc.) pode se comportar tanto como corpúsculo quanto como onda - mas nunca apresenta esse 'dupla personalidade' simultaneamente.

Com base nesse fenômeno, a explicação para o 'sumiço' dos neutrinos eletrônicos consiste em entendermos que cada um dos três sabores é formado por uma combinação de três estados de neutrinos - para nossos objetivos aqui, podemos entender o termo 'estado' como onda.

E, admitindo certa falta de charme (e criatividade), vamos chamar cada um desses estados neutrino 1, neutrino 2 e neutrino 3.

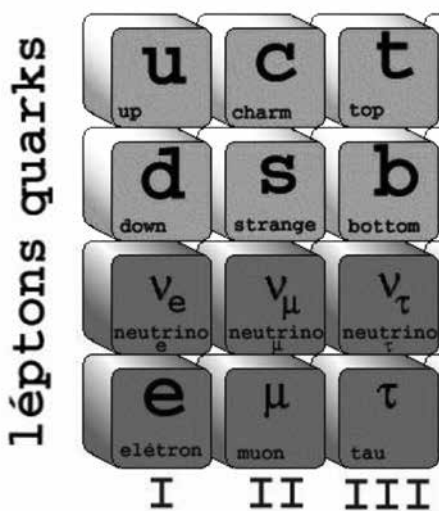
Nessa descrição, cada um dos neutrinos que observamos (eletrônico, muônico e tauônico) é uma mistura dos estados 1, 2 e 3 em proporções diferentes. Como esses estados são ondas, com ‘vibrações’ (frequências) diferentes, o resultado da mistura varia à medida que as ondas se propagam. E o que começa como neutrino eletrônico eventualmente aparecerá como neutrino muônico ou neutrino tauônico e assim por diante.

Esse fenômeno foi comprovado e é conhecido como oscilação de neutrinos, pois eles oscilam entre os três diferentes sabores. E, com essa comprovação, veio um bônus (e um ônus): para oscilarem, neutrinos têm que necessariamente ter massa diferente de zero. Desde sua proposição teórica, em 1930, essas partículas eram tidas como sem massa.

Cientistas têm se dedicado a medir todos os parâmetros dessa mistura de sabores e, nesse processo, têm se deparado com problemas – como se o fato de as partículas mudarem de tipo já não fosse problema bastante. Em ciência, devemos buscar a descrição mais simples possível. Uma consequência disso é que não devemos acrescentar complicações aos problemas.

Nesse espírito, consideramos a existência de três estados de neutrinos (os tais 1, 2 e 3) como necessária para descrever o comportamento dos três sabores de neutrinos. Não temos razão para considerar mais neutrinos. Afinal, três parece ser um número ‘mágico’ da ‘tabela’ (Modelo Padrão) na qual estão apresentados os ‘tijolos básicos’ que formam a estrutura subatômica da matéria.

O Modelo Padrão é dividido em três famílias de léptons (elétron e neutrino eletrônico;



Famílias de léptons e quarks do Modelo Padrão

múon e neutrino muônico; e tau e neutrino tauônico), bem como três famílias de quarks (componentes dos prótons e nêutrons, por exemplo): *up e down*; *charm e strange*; e *top e bottom* (figura 1).

Bem, talvez, não seja bem assim... E, talvez, essa simetria esteja ameaçada.

## Sorvete sem sabor

Experimentos têm observado mudanças de sabor entre os neutrinos que não estão de acordo com a existência de apenas três tipos dessas partículas, mas que estariam em consonância com a existência de um quarto neutrino. Ou seja, seria preciso haver mais uma dessas partículas para descrever corretamente essas oscilações ‘anômalas’ que vêm sendo observadas nos últimos anos. Um resultado nessa linha foi publicado recentemente em *Physical Review Letters* (v. 121, p. 221801, 2018), por pesquisadores dos EUA, do Reino Unido e México.

O principal problema dessa ideia é que, simplesmente, não encontramos esse quarto neutrino, pois ele, segundo certos modelos teóricos, interagiria muito menos que seus três companheiros – por isso, é chamado neutrino estéril. Mesmo assim, teria influência na oscilação dos outros tipos. Portanto, os neutrinos oscilariam entre quatro sabores, em vez de três, o que daria conta dos valores observados por experimentos – o principal deles é o MiniBooNE, no Fermilab, perto de Chicago (EUA), laboratório que se tornou atualmente o principal centro de investigações sobre neutrinos no mundo.

A hipótese de um quarto neutrino estéril, entretanto, ainda está longe de ser confirmada, pois os resultados desses experimentos ainda não são conclusivos. Vários fatores podem afetar seus dados, e as diferenças de valores observados podem ser por causa de deficiências nas medidas ou interferência de efeitos que as distorcem.

Um quarto neutrino quebraria a ‘simetria do três’ do Modelo Padrão. E isso, certamente, forçaria especialistas a redesenharem boa parte da história de quase 2,5 mil anos sobre como a matéria é constituída. Para usar uma imagem comum: o circo da física pegaria fogo. E isso, muitos acreditam, é bom de tempos em tempos, para dar uma chacoalhada nas estruturas daquilo que sabemos.

Se levarmos essas considerações para o sorvete de creme do início deste texto, nos depararíamos com um quarto tipo de sorvete sem qualquer sabor. Pior: que sequer poderíamos sentir. Seria como se parte do sorvete simplesmente... desaparecesse. Estranho... muito estranho.

**HÉLIO DA MOTTA FILHO** é doutor em física pelo Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), no Rio de Janeiro (RJ), onde é pesquisador na área de neutrinos.

Imagem de abertura: Interior do detector do MiniBooNE, no Fermilab (EUA)

Crédito: MiniBooNE Collaboration





## NÓS, AS ESTRELAS E O UNIVERSO

Assim como nós, as estrelas nascem, envelhecem e morrem. Entender a vida desses magníficos objetos cósmicos - principalmente, a do Sol, com o qual temos conexão íntima - ajuda-nos a responder a perguntas tão antigas quanto inquietantes como “de onde viemos?” e “por que habitamos a Terra?”. As estrelas são a prova de que somos parte indissociável do universo: afinal, nosso planeta se formou a partir da morte de uma delas, e nossos corpos estão repletos de ‘poeira estelar’.

Felipe Tovar Falciano

As ciências sempre foram fonte de deslumbramento com suas criações e descobertas, mas há também quem se assuste com elas. Suas descobertas nos forçam a rever constantemente nossa visão de mundo - o que, para alguns, pode ser insuportável. A astronomia, por exemplo, é uma ciência na qual o espanto já começa no tamanho das coisas: a galáxia mais perto da Via Láctea está a bilhões de bilhões de quilômetros, e cada galáxia tem bilhões de estrelas. Para os que já experimentaram esse arrebatamento, a imensidão do universo pode se tornar sufocante. Mas isso - acredite - é não só estimulante, mas também nos mostra o quanto ainda podemos caminhar.

Além disso, a vida na Terra está emaranhada com a história do universo. Somos parte integrante do universo. E o que acontece lá fora interfere diretamente em nossas vidas. Exemplos: o Sol é a fonte básica de energia da vida da qual não podemos pressentir. A extinção dos dinossauros se deu pela queda de um meteoro na península de Yucatán (México) - ou seja, uma intervenção direta dos céus abriu o caminho que possibilitou a história evolutiva dos humanos.

Temos conexão íntima com o Sol. Não é por acaso que nossos olhos são adaptados para captar luz na faixa do visível (do vermelho ao violeta). Explicando: como o espaço sideral é vazio, a única forma de a energia do Sol chegar à Terra é por radiação eletromagnética, cuja intensidade varia com sua frequência (número de oscilações por segundo).

O valor máximo da emissão de radiação de uma estrela está relacionado com sua temperatura, o que, no caso do Sol, encaixa-se bem na faixa do visível. Animais com hábitos noturnos são adaptados a detectar radiação eletromagnética em faixas não visíveis (infravermelho ou ultravioleta) para os humanos.

Conhecer a história evolutiva do universo revela detalhes sobre nossas origens e por que estamos em um planeta como a Terra - e não em outro lugar. Exemplo disso vem do conhecimento da vida e da morte das estrelas, ciclos que chamamos evolução estelar. Vejamos o caso do Sol. De onde ele retira sua energia?

A radiação que emana do Sol é um produto da reação nuclear que acontece em seu interior. A temperatura no núcleo solar é de 15 milhões de graus celsius, energia suficiente para fundir núcleos de hidrogênio e

produzir um novo elemento químico, o hélio - esse tipo de transformação foi o sonho dos alquimistas. Essa reação, uma fusão, é exotérmica: ao fim dela, sobra energia, liberada na forma de radiação.

Reações nucleares, como a fusão ou a fissão - 'quebra' de núcleos atômicos, como ocorre com a bomba atômica - produzem grandes quantidades de energia. A energia gerada por fusão no interior do Sol produz uma pressão de dentro para fora que é capaz de contrabalancear a contração da gravidade, a qual comprime toda a matéria em direção ao centro da estrela.

Porém, essa energia não fica armazenada na estrela. A todo instante, o produto da 'queima' de hidrogênio escapa sob a forma de radiação. Esse é o brilho do Sol, que, apesar de ser extremamente ativo, está em equilíbrio termodinâmico há 4,5 bilhões de anos e continuará assim por mais bilhões de anos, até consumir todo seu estoque de hidrogênio.

O processo de formação de uma estrela ocorre a partir da concentração de parte de uma nuvem de gás e poeira chamada nebulosa. Talvez, a nebulosa mais famosa seja a nebulosa de Órion - parte da Via Láctea (nossa galáxia) -, que pode ser vista a olho nu, apesar de estar a 1.340 anos-luz - cada ano-luz equivale a 9,5 trilhões de quilômetros.

Em uma nuvem fria e rarefeita (nebulosa de gás e poeira) em equilíbrio, a pressão interna do gás contrabalança a tendência de colapso da gravitação. Contudo, se, por algum motivo, uma região ficar mais densa, a atração gravitacional vence a disputa, e essa parcela da nuvem começa a se contrair.

A contração faz aumentar a densidade do gás e da poeira. Com isso, a temperatura também se eleva. A nuvem continua a se contrair, até chegar ao ponto de iniciar as reações nucleares de fusão, o que cria nova pressão de dentro para fora e produz novo equilíbrio termodinâmico. Nasce uma estrela.

## Fim da linha

O *Homo sapiens* tem apenas cerca de 200 mil anos. E cada um de nós viverá ridículas dezenas de anos - isso se não destruímos o planeta antes, por causa de guerras, poluição ou devastação da fauna e flora.

Nossa história é um fragmento temporal desprezível se comparada à idade do universo.

Mas o tempo de vida de uma estrela é medido em bilhões de anos. O Sol se formou há 4,5 bilhões de anos e deve durar mais uns 6 bilhões. O tempo de vida de uma estrela depende do quão 'pesada' ela é. Poderíamos imaginar que, quanto mais combustível ela tivesse, mais tempo conseguiria permanecer estável, queimando seu hidrogênio. Mas ocorre o oposto: estrelas com grande massa 'envelhecem' mais rapidamente, pois a temperatura e a densidade do núcleo dependem de sua massa total.

O Sol tem ciclos em pequenas escalas temporais. A produção das manchas solares (pontos escuros em sua superfície) aumenta e diminui a cada 11 anos. E há indícios de outros ciclos em escalas mais longas. Mas, apesar dessas pequenas variações, o Sol é bem estável e continuará assim até acabar de consumir seu combustível.

Depois de formada, uma estrela passa por três momentos distintos em sua vida. O primeiro é o do equilíbrio termodinâmico, no qual a estrela queima hidrogênio e produz hélio. Depois, vem a fase em que ela se torna uma gigante vermelha. Por fim, ocorre sua morte (pacata ou bem violenta).

Os elementos químicos leves (do hidrogênio até o lítio) foram formados na fase que chamamos universo primordial, há cerca de 13,7 bilhões de anos. Já os mais pesados vêm sendo constantemente formados no interior das estrelas, que agem como fornalhas.

Passada a primeira fase da vida de uma estrela, o hidrogênio diminui significativamente, e, a certa altura, sobrarão apenas o hélio no núcleo estelar. Nesse momento, a estrela começa a queimar o hidrogênio de fora do núcleo e, com isso, se expande, aumentando enormemente seu tamanho. Ao fazer isso, ela se torna uma gigante vermelha, cuja cor se deve à expansão, que faz a temperatura na superfície diminuir. A cor de uma estrela está relacionada com sua temperatura: as mais quentes tendem ao azul, enquanto as mais frias, ao vermelho.

Nosso Sol ainda está na primeira fase, mas, quando se tornar uma gigante vermelha, seu raio crescerá tanto que sua superfície chegará bem próxima à órbita da Terra, engolindo os planetas internos (Mercúrio e Vênus). Isso inviabilizará a vida na Terra.

Com a evolução até a fase de gigante vermelha, a estrela - caso tenha mais do que cinco massas solares - ainda é capaz de produzir carbono, oxigênio, neônio, magnésio, silício e ferro. Este último é o fim da linha na sequência de produção dos elementos químicos, pois sua fusão consome energia ao invés de produzi-la e, por isso, não serve como combustível para as estrelas.

## Densidade nuclear

Pergunta pertinente: se a produção cessa no ferro, como encontramos, na natureza, os outros elementos mais pesados da Tabela Periódica?

As estrelas massivas, ao atingirem essa fase, colapsam e, em seguida, explodem, em um processo chamado supernova, em que a energia disponível é alta o suficiente para produzir os elementos mais pesados. Aliás, o fato de termos esses elementos na Terra prova que nosso planeta se formou a partir da morte de uma estrela. Nossos corpos estão cheios desses átomos. Somos formados, como se costuma dizer, de 'poeira estelar'.

A supernova é um dos fenômenos mais violentos da natureza. Uma estrela, ao explodir, tem luminosidade maior do que a de uma galáxia inteira - com bilhões de outras estrelas. Esse brilho é tão intenso que podemos observá-lo a olho nu. Ele surge de uma hora para outra, como um ponto luminoso no céu onde antes não havia nada. E desaparece em meses.

O primeiro registro de uma supernova foi feito pelos chineses em 185. Eles registraram o aparecimento de um novo ponto luminoso no céu que perdurou por oito meses até se apagar. Outra supernova historicamente importante foi observada, em 1572, pelo astrônomo dinamarquês Tycho Brahe (1546-1601) e perdurou por cerca de 15 meses. A aparição dessa 'nova estrela' impulsionou uma reformulação da descrição do céu e o questionamento da visão aristotélica que considerava o céu como perfeito e imutável.

Questão cabível: se as estrelas explodem, o Sol também explodirá?

Uma coisa fundamental na vida de uma estrela é sua massa total, a qual determina a intensidade da gravitação e, assim, influencia propriedades internas, como densidade e temperatura. Isso faz com que a massa total da estrela determine sua história evolutiva.

O Sol tem  $10^{30}$  kg, ou seja, o número 1 seguido de 30 zeros. No fim da vida, estrelas com menos do que 10 massas solares tornam-se uma anã branca, objetos extremamente densos (1 milhão de vezes a densidade do Sol). Para se ter uma ideia, uma 'colher de chá' de anã branca equivaleria a cerca de 10 mil kg.

A origem do nome 'anã branca' advém de sua temperatura efetiva ser muito alta, ou seja, mais esbranquiçada, se comparada a uma estrela comum com mesmo brilho superficial. Mesmo assim, as anãs brancas não produzem energia por fusão em seu interior. Elas seguem perdendo energia para o meio interestelar e resfriando-se por um período em torno de 100 bilhões de anos.

Mas, sem a energia das reações nucleares, como a anã branca consegue frear a compressão da gravidade em direção ao centro da estrela? Para responder a isso, temos que apelar à mecânica quântica, teoria que lida com os fenômenos atômicos e subatômicos. Vejamos: os elétrons são partículas 'antissociais' (tecnicamente, fermiônicas). Isso implica dizer que eles não admitem dividir seu 'espaço' (estado quântico) com outros elétrons.

Essa insociabilidade funciona como uma força repulsiva entre elétrons, evitando que um se aproxime muito do outro. Por isso, no interior de uma anã branca, onde a densidade é alta, a intensidade dessa repulsão quântica entre elétrons é forte o suficiente para contrabalançar a atração gravitacional.

Para estrelas maiores (10 a 25 massas solares), a situação é mais violenta. Suas temperaturas são altas o bastante para produzir elementos químicos até o ferro. Quando chegam a esse ponto, explodem como uma supernova, cujo produto é um objeto ainda mais denso que as anãs brancas. Nasce, assim, as estrelas de nêutrons.

Aqui, mais uma vez, partículas fermiônicas fazem sua parte com a repulsão quântica. Porém, em vez de elétrons, os responsáveis agora por frear a compressão da gravidade são os nêutrons, que, juntamente com os prótons, formam os núcleos dos átomos.

Nas estrelas de nêutrons, os números são ainda mais impressionantes: a densidade é 100 trilhões de vezes maior que a do Sol, e seu raio é da ordem de míseros 10 km. Apenas o núcleo atômico tem densidade tão alta.

## Morte: novas vidas

Indagação congruente: haveria um objeto astrofísico com densidade maior que a de um núcleo do átomo?

A resposta não é simples. Estrelas com massas maiores que 25 massas solares também ‘morrem’ como supernovas. Mas há um detalhe: as partículas fermiônicas em seu interior (nêutrons e elétrons) não conseguem mais contrabalançar a atração gravitacional. Nasce um dos objetos cósmicos mais intrigantes: um buraco negro.

Buracos negros são tão compactos – o que implica gravidade impensavelmente alta – que nada consegue escapar de dentro deles – nem mesmo a luz. Isso faz com que não tenhamos dado observacional algum do interior deles e, portanto, não conhecemos bem sua estrutura interna. Mas o fato é que o universo está cheio desses sugadores insaciáveis de matéria e luz.

O tamanho de um buraco negro é proporcional à sua massa, a qual pode ser muito pequena ou muito grande. É possível que exista no universo microburacos negros – formados há cerca de 14 bilhões de anos – cuja massa seja apenas 1 trilhão de vezes menor que a massa da Terra. Há também buracos negros com massa comparável à das estrelas (de cinco a dezenas de massas solares). E, por fim, existem buracos negros supermassivos, cuja massa pode chegar a centenas de milhares de massas solares.

As galáxias costumam ter um buraco negro supermassivo em seu centro, como é o caso da nossa Via Láctea, na qual Sagitário A\* tem massa da ordem de quatro milhões de massas solares.

Uma das formas de confirmar a existência de buracos negros é por meio das chamadas ondas gravitacionais, oscilações no ‘tecido’ do espaço-tempo – estrutura na qual o tempo e espaço estão fundidos de modo inseparável. Em 2015, a colaboração científica LIGO detectou essas ondas – no caso, geradas pela colisão de dois buracos negros com massas da ordem de 30 massas solares. E, mais recentemente, pela comprovação direta, por fotografia, do buraco negro no centro da galáxia M87, realizada pela colaboração internacional EHT (sigla, em inglês, para Telescópio do Horizonte de Eventos).

Com esses avanços, abriu-se nova janela de observação que promete levar a descobertas inimagináveis sobre o universo.

E toda vez que você olhar para o Sol ou para o céu estrelado, lembre-se de que cada um de nós contém átomos que pertenceram a uma estrela que morreu. Isso parece ser uma máxima da natureza: a morte viabiliza novas vidas. Pode ser que estejamos sozinhos; pode ser que haja vida fora da Terra. Mas não há como negar que somos parte desse universo e que estamos intimamente ligados a ele e às estrelas.

**FELIPE TOVAR FALCIANO** é doutor em física pelo Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), no Rio de Janeiro (RJ), onde, desde 2009, é pesquisador na área de cosmologia e gravitação.

Crédito: <a href="https://pixabay.com/pt/users/Free-Photos-242387/?utm\_source=link-attribution&utm\_medium=referral&utm\_campaign=image&utm\_content=1023340">-Free-Photos</a> por <a href="https://pixabay.com/pt/?utm\_source=link-attribution&utm\_medium=referral&utm\_campaign=image&utm\_content=1023340">Pixabay</a>