



UM DIFÍCIL LEGADO CARLOS ESCOBAR

Físico da Unicamp mostra como
Einstein construiu seus conceitos

Uma das características notáveis de Albert Einstein é a liberdade, ressaltou Carlos Escobar, físico e professor da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) ao abrir a apresentação “O difícil legado de Einstein” e o ciclo de palestras promovido pela revista *Pesquisa FAPESP* em paralelo à exposição *Einstein*. As palestras dele e de Peter Schulz (*página 34*), também físico e professor da Unicamp, no dia 11 de outubro, contaram com a mediação do jornalista Marcelo Leite, que lançou o livro *Ciência – Use com cuidado*, segundo volume da coleção Meio de Cultura (Editora da Unicamp), após as apresentações.

Mesmo pensando com liberdade, Einstein não chegou sozinho aos conceitos que criaram novos rumos para a física. Ele se apoiou na obra de outros cientistas, como o físico e matemático italiano Galileu Galilei, que Escobar chamou de “um dos pais da física”, por ter iniciado a construção do pensamento científico moderno. “O cientista de hoje se afastou do cuidado literário da apresentação das ideias”, alertou Escobar. Quatro séculos atrás, Galileu fez as primeiras observações das luas de Júpiter e das montanhas da Lua e as apresentou com esmero em um livro que pode ser lido com prazer ainda hoje, *O mensageiro das estrelas*.

“Era óbvio que o que Galileu via não era o que os antigos pensavam”, observou Escobar. “Não era o perfeito.” Galileu é chamado de pai da ciência moderna e do método experimental justamente por “ter confrontado teorias com resultados experimentais e condições sob controle”. Foi Galileu quem detectou um princípio unificador das leis do Universo: as leis da natureza que valem nas imediações da Terra valem também em qualquer outro lugar.

O físico inglês Isaac Newton, que também ajudaria a embasar o trabalho de Einstein, completou a revolução galileana ao propor novos métodos matemáticos que davam mais precisão aos conceitos de espaço e tempo. Depois o físico escocês James Clerk Maxwell unificou a eletricidade, o magnetismo e a óptica em uma só força, o eletromagnetismo. Maxwell morreu aos 48 anos e não pôde avançar nas implicações mais profundas das quatro equações que criou, mostrando como cargas elétricas produzem campos elétricos, como a corrente elétrica produz campo magnético e como variações de campo magnético formam campos elétricos. Einstein, porém, percebeu que o eletromagnetismo, a força que explicava esses fenômenos, começava a mudar também os con-

ceitos de espaço e de tempo, abalando profundamente o Universo mecânico de Newton.

“Para Newton, não havia campos de força”, contou Escobar. Newton se sentia incomodado com essa limitação conceitual, mas não conseguiu avançar. Einstein seguiu adiante, entre outras razões, porque amava a liberdade, “a qualidade mais importante do ser humano”, dizia. Escobar mostrou uma foto de Einstein já cinquentão e pediu para a plateia atenta e ampla, de cerca de 90 pessoas, observar o mesmo olhar amigo da liberdade que já expressava quando era menino e desde cedo incomodava alguns professores.

Einstein selecionou da obra de Newton o que lhe servia. “Para Newton, o tempo fluía de modo igual para todos os observadores”, disse Escobar. “Einstein não gostava de tempo e espaço absolutos, ele os queira dinâmicos!” Com esse propósito, começou a trabalhar experiências mentais que se assemelhavam ao que Galileu já havia feito, ao imaginar um barco em movimento no mar tranquilo. Ele se perguntava onde cairia uma pequena bola que um marujo soltasse do alto do mastro. Os pensadores antigos diriam que a bola cairia para trás do pé do mastro, em direção à popa, mas na verdade a bola cai ao pé do mastro, como se o barco estivesse parado.

Quem primeiro chegou perto do conceito de relatividade, que explica esses fenômenos, porém, não foi Einstein, mas o físico e matemático francês Henri Poincaré. Poincaré lançou o conceito de relatividade no início do século XX, ao afirmar que o observador não é capaz de perceber se está em movimento sem olhar para fora. O caminho foi o mesmo de Galileu: as experiências de pensamento ou, em alemão, *Gedankenexperimente*. “Einstein era um mestre das experiências mentais, que mostravam as contradições com os quadros teóricos, que aos poucos ele abandonava. A primeira ele fez aos 16 anos, perseguindo um feixe de luz, como um surfista seguindo uma onda”, comentou Escobar. De acordo com os conceitos tradicionais da época, ele veria fenômenos – ondas eletromagnéticas – que oscilam no tempo, mas não no espaço, em contradição com os conceitos de Maxwell sobre eletromagnetismo. “Maxwell afirmava que, se um campo eletromagnético varia no tempo, deveria variar também no espaço.” Como resultado, em 1905 Einstein apresentou a teoria da relatividade especial, mostrando o que Poincaré e o físico holandês Hendrik Lorentz não haviam visto: a simultaneidade – o próprio tempo – depende do observador.

O difícil legado de Einstein

CARLOS OURÍVIO ESCOBAR, físico e professor titular do Instituto de Física Gleb Wataghin da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), membro recém-eleito da Academia Brasileira de Ciências (ABC)



Escobar: revendo a história

“Einstein disse então que estava pronto para atacar a segunda coisa de que não gostava na teoria de Newton, o espaço absoluto, sobre o qual não se podia atuar”, disse Escobar. A empreitada lhe consumiu muita energia e muito tempo, mais do que qualquer outra anterior. O matemático lituano Hermann Minkowski também contribuiu, não só ensinando matemática a Einstein na Escola Politécnica de Zurique, como também oferecendo conceitos novos sobre espaço.

Depois de estudar e pensar muito, Einstein uniu duas entidades físicas antes tratadas separadamente, o espaço e o tempo, em uma só, o espaçotempo. “Em 1907, ele contou que teve o pensamento mais feliz da sua vida, imaginando-se em queda livre do teto da casa e soltando chaves e bolinhas que tinha no bolso e ficavam ao lado dele. Assim, ele conseguia anular o campo gravitacional”, disse Escobar. “A geometria do espaçotempo, ele concluiu, deveria ser local, curva e capaz de anular o campo gravitacional.” Essa era a resposta a perguntas que ele havia feito 17 anos antes e lhe custara, como disse Escobar, “longos momentos de desespero”. Einstein, porém, não acalentou apenas a angústia – e de 1907 a 1915 escreveu 67 trabalhos científicos.

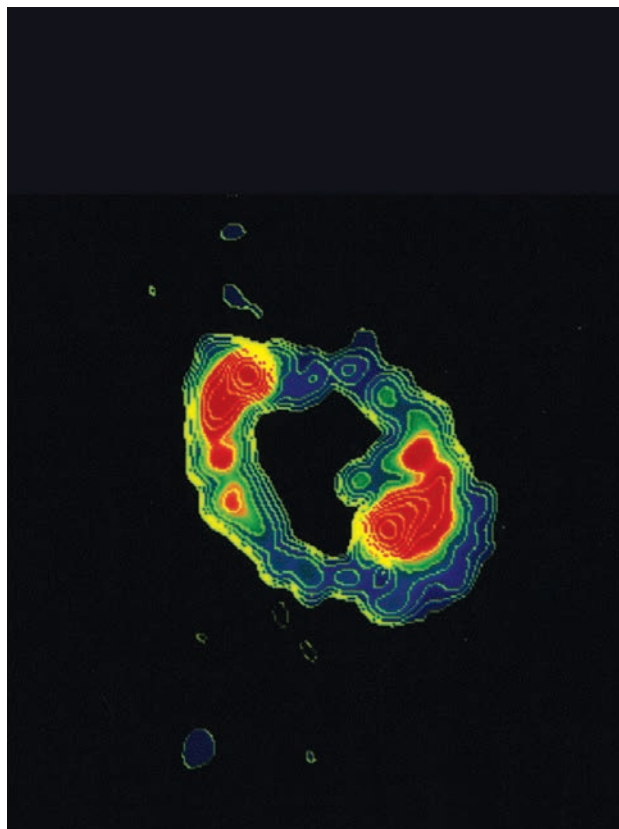
Em 1913, um amigo e colega de Einstein, o matemático Marcel Grossmann, recomendou a ele que estudasse o trabalho de livre-docência de outro matemático alemão, Georg Riemann, sobre espaços em dimensões generalizadas. “Riemann já dizia, 70 anos antes, que geometria é física, e física é geometria”, lembrou Escobar. “Einstein concluiu então que matéria e energia dizem ao espaçotempo como se curvar e o espaçotempo diz à matéria e à luz como se propagar.” Esse raciocínio implicava que não havia gravidade, mas espaçotempo, que determina a massa. Era

uma forma de explicar o desvio da luz por corpos de massa elevada, como os buracos negros e galáxias massivas. “Os corpos massivos curvam o espaço-tempo, forçando a luz a seguir uma trajetória curva”, disse Escobar. Esse fenômeno, conhecido como lentes gravitacionais, é hoje uma ferramenta indispensável para estudar objetos celestes, por permitirem análise da curvatura da trajetória da luz.

“É notável em Einstein o pensamento intuitivo, o uso de imagens, os experimentos mentais e a simplicidade baseada na matemática”, comentou Escobar. “Os trabalhos que ele publicou em 1905 podem e devem ser lidos por qualquer estudante de graduação em física.” Escobar ressaltou a dimensão moral de Einstein citando o poeta grego Yannis Ritsos, que dizia: “A verdadeira estatura do homem é medida com o metro da liberdade”.

Mesmo antes de se tornar uma celebridade mundial em 1919, quando um eclipse observado em Sobral, no Ceará, confirmou a teoria da relatividade geral, Einstein não se escondeu, lembrou Escobar. Einstein logo percebeu que poderia usar seu prestígio científico contra injustiças sociais, como em manifesto contra a guerra, que ele assinou em 1917. Mais tarde, em 1954, em uma palestra ao receber um prêmio sobre direitos humanos em Chicago, comentou que “os direitos humanos não estavam escritos nas estrelas, cabe aos homens construí-los”.

“Nenhuma biografia lembra que Einstein era socialista”, observou Escobar, que mostrou a página inicial de um artigo publicado em maio de 1949 da revista norte-americana



Lentes gravitacionais: legado de Einstein

NASA

Monthly Review em que Einstein, o autor desse trabalho, defendia o socialismo. Em outro artigo, chamou o racismo de “a doença mais profunda da sociedade dos Estados Unidos”. Escobar lembrou que hoje ainda existe discriminação racial não só nos Estados Unidos, mas em todo o mundo.

● CARLOS FIORAVANTI

A LUZ E A MATÉRIA

LUÍZ DAVIDOVICH

Físico descreve os conflitos de Einstein com a física quântica, que ele ajudou a criar

Além de ter formulado a teoria da relatividade, Albert Einstein investigou durante muitos anos as propriedades da luz. A conclusão a que chegou, de que a luz poderia se comportar como se fosse um corpúsculo, ajudou a embasar a então nascente física quântica, mas contrariava os pressupostos da física clássica, segundo a qual a luz era tão-somente onda. Isso o incomodava profundamente. “Havia vários conflitos de Einstein com a teoria que ele ajudou a criar”, disse o físico Luiz Davidovich, professor do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro, na palestra do dia 7 de dezembro, “Einstein, a luz e a matéria”.

Davidovich apresentou inicialmente Pierre Laplace (1749-1827), matemático francês que reforçou o determinismo da física clássica com raciocínios como este: “Uma

inteligência que em determinado instante pudesse conhecer todas as forças que governam o mundo natural, que pudesse conhecer as posições respectivas das entidades que o compõem e que fosse capaz de analisar todas essas informações teria como abranger em uma única fórmula os movimentos dos maiores corpos do Universo e dos seus menores átomos. Para essa inteligência, nada seria incerto. Tanto o passado quanto o futuro estariam presentes aos seus olhos”. Como o futuro poderia ser conhecido desde que o passado fosse conhecido, não havia espaço para incertezas que logo começariam a brotar.

Einstein, a luz e a matéria

LUÍZ DAVIDOVICH, físico e professor titular do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), membro da Academia Brasileira de Ciências (ABC), da Academia de Ciências do Mundo em Desenvolvimento (TWAS) e da National Academy of Sciences (NAS, Estados Unidos)

Até o início do século XX as partículas atômicas eram caracterizadas por sua posição e velocidade, e a luz era apenas onda, com propriedades já bem estabelecidas. As leis do eletromagnetismo criadas pelo físico escocês James Clerk Maxwell relacionavam a frequência de oscilação – a cor da luz – com a velocidade da luz e o comprimento de onda. “A luz que atinge nossos olhos, se vibra muito, transmite a cor violeta; se vibra menos, transmite o vermelho”, exemplificou Davidovich. Também já era conhecido, ele lembrou, o fenômeno de interferência de ondas como as provocadas por duas pedras atiradas em um lago. “Quando o máximo de uma onda encontra o mínimo de outra, as ondas se anulam; quando dois máximos ou dois mínimos se encontram, se reforçam.”

O resultado dessas afirmações é que no final do século XIX os cientistas pensavam que não haveria mais nada a fazer na física; tudo parecia resolvido. Davidovich lembrou de um comentário do físico irlandês William Thomson (1824-1907), mais tarde conhecido como Lord Kelvin: “A física é um céu azul com pequenas nuvens no horizonte”. As pequenas nuvens representavam os problemas ainda abertos, que talvez pudessem ser resolvidos com técnicas matemáticas mais refinadas. “Mas de repente as pequenas nuvens no horizonte se juntaram e formaram uma imensa tempestade”, disse Davidovich. Os dois principais causadores dessa tempestade foram o físico alemão Max Planck, que publicou um estudo em 1900 mostrando que a produção de luz por um corpo aquecido, como um forno de uma siderúrgica, se dava através de pacotes de energia, e Einstein, que afirmou em um artigo de 1905 que a luz poderia se comportar como se fosse constituída de corpúsculos chamados fótons.

Einstein hesitante

O físico inglês Thomas Young já havia estudado bastante a luz e a caracterizado como fenômeno ondulatório em um dos experimentos que fez em 1800: a luz passava por fendas e formava regiões claras e escuras sobre uma superfície colocada depois das fendas, mas essas interferências

desapareciam quando ele cobria uma das fendas. “Essa experiência explica a reticência de Einstein em dizer que a luz era constituída de corpúsculos”, comentou Davidovich. Mesmo hesitante, Einstein estudou intensamente a luz nos anos seguintes e em 1909 publicou um artigo em que mostrava, com base em argumentos estatísticos, que as flutuações de energia de radiação tinham um caráter ambíguo, exibindo características de partícula e de onda. “Notem a visão de longo alcance de Einstein, que disse que deveria haver uma teoria que juntasse esses dois aspectos da luz como onda e partícula”, ressaltou.

Em 1911, no I Congresso de Solvay, que reuniu os principais físicos do mundo em Bruxelas, na Bélgica, Einstein, o mais jovem dos participantes, insistiu no conceito provisório de *quanta*, que apresentava a luz como pacotes de energia, emitida em pequenas quantidades a cada vez, e colidia com “as consequências experimentalmente verificadas da teoria ondulatória”, nas palavras do próprio físico alemão. Mesmo resistente à teoria quântica que começava a emergir, Einstein continuou a estudar a absorção e a emissão da luz.

Por fim, em um trabalho publicado em 1919, demonstrou teoricamente que havia duas maneiras distintas de um átomo passar de um estado com maior energia para um de menor energia emitindo radiação: ele pode emitir um fóton espontaneamente ou então, se estimulado por um fóton, emitir outro fóton idêntico ao que estimulou a emissão. “Nesse caso, da emissão estimulada, chega um fóton e saem dois fótons idênticos”, sintetizou Davidovich. “Os físicos estavam tão obcecados em entender a natureza que não viam aplicação nessa descoberta.” Só em 1960, 43 anos depois, valendo-se desse conceito sobre a emissão de radiação, o físico norte-americano Theodore Maiman construiu o primeiro aparelho emissor de raios laser.

Einstein continuava resistente às suas próprias conclusões de que, no processo de emissão espontânea, seria impossível determinar o instante e a direção em que o átomo liberaria o fóton. Em uma carta que enviou em 1920 a um amigo, o físico dinamarquês Niels Bohr, Einstein

FOTOS MARCIA MINILLO



Davidovich: a luz no horizonte



Conhecimento global não implica conhecimento individual das partículas. Se não entendem, podem ficar tranquilos. Ninguém entende

mais um ente físico, como uma onda de água, mas um ente abstrato, que descreve uma probabilidade”, disse o físico da UFRJ. “Se essa ideia é difícil para nós hoje, imaginem naquela época.” Einstein não se conformava e, em outra carta a um amigo, o físico alemão Max Born, reconheceu que a mecânica quântica se impunha, embora, para ele, não fosse a última palavra. Seu argumento: “Deus não joga dados”. Pouco depois, em 1927, o físico alemão Werner Heisenberg anunciou o que se tornaria conhecido como princípio da incerteza de Heisenberg, que reforçava o desconforto de Einstein: era impossível conhecer com precisão a velocidade e a posição de uma partícula ao mesmo tempo: aumentar a precisão de uma variável implica reduzir a de outra. A determinação precisa da posição ou do momento envolve experimentos diferentes e complementares. Da mesma forma, a luz comporta-se como onda ou como partícula dependendo do experimento que a examina. “Heisenberg dizia que só havia sentido falar da posição de uma partícula dentro de um contexto experimental projetado para medir essa posição”, disse Davidovich. “Fora desse contexto, a posição não teria uma realidade física.”

Em uma reportagem publicada em 3 de maio de 1935 o jornal norte-americano *The New York Times* destacou que Einstein atacava a teoria quântica, chamando-a de “incompleta, embora correta”, em um artigo que seria publicado duas semanas depois na revista *Physical Review* com outros dois físicos, o russo Boris Podolsky e o norte-americano Nathan Rosen. Os três examinavam um fenômeno do mundo quântico conhecido como emaranhamento, considerando duas partículas que se separam após uma colisão e para as quais, segundo a física quântica, é possível conhecer apenas a soma de suas velocidades e a diferença de posição entre elas, mas nem a velocidade nem a posição de cada uma individualmente. “Em um estado

declarou que “ficaria muito infeliz se tivesse que renunciar à causalidade completa”. “Os resultados entravam em choque com o determinismo da física clássica”, observou Davidovich. Poucos anos depois outro físico, o francês Louis de Broglie, propôs que não só a luz, mas também partículas elementares da matéria como elétrons e prótons poderiam comportar-se como ondas.

Aos poucos o determinismo de Laplace era enfraquecido e a ideia de que átomos e fótons pudessem se comportar como onda ou partículas ganhava força. “Onda não é

emaranhado, o conhecimento global não implica conhecimento individual das partículas”, disse Davidovich para a plateia, que tranquilizou em seguida: “Se não entendem, podem ficar tranquilos. Estão em excelente companhia. Ninguém entende direito”.

“Einstein, Podolski e Rosen argumentaram que, medindo a posição ou a velocidade de uma das partículas, poderíamos inferir a posição ou velocidade da outra, mesmo estando distante, a partir do conhecimento da soma das velocidades e da diferença de posições”, comentou o físico do Rio. “Assim, a posição e a velocidade dessa outra partícula deveriam ter uma realidade física, pois essas quantidades poderiam ser determinadas sem interagir diretamente com essa partícula. Desenvolvimentos posteriores da física quântica mostraram, no entanto, que de fato não se pode atribuir uma realidade física simultaneamente à posição e à velocidade de uma partícula.”

Einstein dedicou-se também ao estudo da matéria. Seus trabalhos nessa área, publicados entre 1907 e 1911, mostraram novas propriedades térmicas dos sólidos. Em 1925 Einstein caracterizou teoricamente um novo estado da matéria, o chamado condensado Bose-Einstein, em que todos os átomos estão no estado de mais baixa energia. Esses trabalhos permitiram a construção de lasers de átomos, análogos ao laser de luz criado por Maiman. “A física quântica, apesar de seus aspectos contraintuitivos, teve um profundo impacto em nosso cotidiano”, ressaltou Davidovich. O laser, lembrou ele, é usado como base para tratamentos de pele, correção de visão e CDs. A ressonância magnética nuclear, outra aplicação da física quântica, facilita a observação do cérebro humano em funcionamento. Outras aplicações incluem os transistores, que deram origem aos computadores modernos, e os relógios atômicos, com uma precisão de um segundo em 10 milhões de anos.

Hoje a física quântica, que Einstein morreu sem aceitar, cobre fenômenos envolvendo distâncias que diferem de 60 ordens de grandeza (cada ordem de grandeza equivale a um fator 10). Serve para estudar fenômenos que vão de uma escala de 10-35 metros, como as supercordas, estruturas elementares hipotéticas do Universo, até 1.026 metros, como o mapa de flutuações da radiação térmica de micro-ondas do Universo. Para dizer que em boa parte a física quântica ainda é misteriosa, Davidovich valeu-se de um comentário de Niels Bohr: “Quem não fica chocado com a física quântica não a entendeu”. O físico da UFRJ encerrou a apresentação com o seguinte comentário: “Parece estranho e parece estranho e parece muito estranho; mas de repente não parece mais estranho, e não conseguimos entender o que fez parecer tão estranho para começar”. Dessa vez a frase não era de um cientista, mas da escritora norte-americana Gertrude Stein sobre a arte moderna do início do século XX.

● CARLOS FIORAVANTI

PATERNIDADE ENCOBERTA

SILVIO CHIBENI

Professor da Unicamp apresenta Einstein como um dos pais da mecânica quântica

Da perspectiva de um físico filósofo – ou um filósofo da física – o pensamento de Einstein ganha ainda mais profundidade. Na palestra “As contribuições e críticas de Einstein à física quântica”, no dia 8 de novembro, Silvio Chibeni, do Departamento de Filosofia da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), mostrou que a contribuição do renomado físico alemão vai muito além da teoria da relatividade com que o público leigo o identifica. Ele não só foi pioneiro em formular os princípios da mecânica quântica, como também buscou melhorá-los discutindo as limitações da teoria.

Como boa parte dos avanços científicos, a teoria da relatividade foi formulada de maneira incremental por vários pesquisadores que trabalhavam no problema. “A relatividade restrita era algo que já estava mais ou menos no ar, na época. A contribuição de Einstein foi principalmente no sentido de fechar esse conhecimento, de dar uma finalização e sobretudo um enfoque filosófico diferente, que modificou a forma pela qual os assuntos estavam sendo discutidos”, contou Chibeni. Mas a partir daí o cientista alemão passou adiante do que outros pen-

savam e deu o pulo para explicar a relatividade geral, que tem a ver com gravitação. “Nesse caso a contribuição dele foi mais individual, quase tudo dependeu dele.”

Em termos de ideias originais, a contribuição de Einstein também foi decisiva na criação do segundo dos grandes pilares da física contemporânea, a mecânica quântica, cuja formulação final foi proposta em meados da década 1920 por dois físicos independentemente: o alemão Werner Heisenberg e o austríaco Erwin Schrödinger. Foram esses nomes que entraram para a história da ciência mais fortemente associados à mecânica quântica, mas foi o trabalho precursor de outro alemão que estabeleceu os fundamentos da teoria. “Há pouca dúvida de que sem a contribuição de Einstein esse desenvolvimento importante na física teria demorado muito mais para acontecer”, disse o filósofo paulista.

Quantização

Ele explica que é comum considerar-se que a física quântica nasceu em um artigo publicado por Max Planck em 1900, em que propôs uma fórmula na qual considerava que o processo de produção de luz fosse quantizado – em pacotes em vez de gradual. Mas na verdade a quantização só foi proposta como um aspecto físico real em 1905, num trabalho em que Einstein explicou como elétrons se desprendem de placas metálicas sobre as quais incide luz, um fenômeno conhecido como efeito fotoelétrico. Para dar conta das observações desse fenômeno feitas no final do século XIX, o físico alemão propôs que a luz tinha uma natureza granular: o que atinge o metal são pequenos pacotes de luz. Uma proposta revolucionária diante da teoria sedimentada, até aquele momento, de que a luz tinha natureza ondulatória. Só dez anos depois o norte-americano Robert Andrews Millikan conseguiu mostrar, com uma série de experimentos, que a equação proposta por Einstein para descrever aspectos quantitativos do fenômeno estava correta.

A ideia dos *quanta* de luz foi muito contestada entre os físicos – e continuou contestada mesmo depois que Einstein ganhou o Prêmio Nobel em 1921. “Einstein foi solitário na defesa dessa perspectiva durante muito tempo.”

Chibeni mostrou que a quantização de propriedades físicas também foi aplicada por Einstein na explicação de diversos outros fenômenos. Em 1905 ele usou a teoria para

As contribuições e críticas de Einstein à física quântica

SILVIO SENO CHIBENI, físico e professor livre-docente do Instituto de Filosofia e Ciências Humanas (IFCH) da Unicamp



Chibeni: justiça à mecânica quântica

MARCIA MINILLO

explicar o curioso fenômeno do movimento browniano, que tinha sido descrito a partir de como grãos de pólen se movem num fluido. A confirmação experimental de suas equações nos anos subsequentes foi fator decisivo para que a teoria dos átomos fosse definitivamente aceita. Usando os mesmos princípios teóricos, em 1906 ele explicou certas anomalias no comportamento de sólidos a baixas temperaturas. Em 1924 adotou e desenvolveu a proposta de uma estatística quântica, feita pelo então desconhecido físico indiano Satyendra Bose. E por fim apoiou, nessa mesma época, a ideia bizarra – porém fundamental para a mecânica quântica – das “ondas de matéria”, formulada pelo jovem Louis de Broglie.

Mas o próprio Einstein não ficou completamente convencido com todo esse trabalho precursor. Quando a teoria final foi formulada, ele se tornou, até o fim da vida, o seu principal crítico. Embora achasse a teoria correta, afirmava que ela era incompleta. “Um indício dessa incompletude é que as previsões quânticas em geral têm um caráter probabilístico e, em geral, não especificam algumas propriedades dos objetos individuais”, explicou Chibeni. Fazendo uma comparação, é como se alguém informasse a média de idade de um grupo de pessoas, mas não a idade de cada uma. O mais importante argumento apresentado por Einstein para a tese da incompletude da mecânica quântica foi publicado em 1935, em colaboração com Boris Podolsky e Nathan Rosen. Eles estudaram certos pares de objetos que foram criados juntos e compartilham propriedades físicas, mesmo se transportados para locais distantes. Se a mecânica quântica estivesse completa, qualquer ação sobre um deles afetaria instantaneamente o outro. “Para Einstein isso era inaceitável, por violar aquilo que ele chamava de princípio da localidade

ou princípio da ação local, segundo o qual as ações físicas não podem ser instantâneas e atingir imediatamente objetos remotos no espaço.”

Seguindo essa linha de pensamento – que logo foi considerada dissidente pela comunidade dos físicos –, em 1952, o norte-americano David Bohm, que na época estava no Brasil, trabalhando na Universidade de São Paulo, conseguiu formular uma teoria mais completa que a mecânica quântica. Ironicamente, porém, sua proposta tinha um aspecto indesejável: justamente violava o princípio da localidade. “Quando esse fato foi notado, naturalmente surgiu a questão de saber se essa ‘não-localidade’ seria uma particularidade da teoria de Bohm ou, ao contrário, uma propriedade intrínseca de qualquer teoria mais completa que a mecânica quântica”, disse Chibeni. A resposta foi dada pelo escocês John Bell, que em 1964 provou que qualquer teoria completa e local viola certas previsões estatísticas da mecânica quântica. De acordo com o filósofo da Unicamp, essas previsões foram inequivocamente confirmadas em diversos experimentos realizados desde então.

Esses resultados teóricos e experimentais tiveram como ponto de partida as críticas de Einstein, que apontou rumos de investigação, o que deixa claro que mesmo criticando ele contribuiu de maneira extremamente positiva – mesmo que a teoria tenha seguido um rumo contrário ao que ele imaginava. “Ele não viveu para ver que suas críticas à mecânica quântica desembocaram num resultado que ele detestaria, ou seja, para completar a teoria quântica é preciso abrir mão da localidade”, concluiu o filósofo da Unicamp.

● MARIA GUIMARÃES

MISTERIOSA ACELERAÇÃO

GARY STEIGMAN

A desestruturação completa de galáxias é um possível destino do Universo

O Universo pode ter um final melancólico, tornando-se mais escuro e solitário, ou mais dramático, com a desestruturação de átomos, estrelas e galáxias, entre outras possibilidades apresentadas pelo físico norte-americano Gary Steigman no dia 16 de novembro ao longo da palestra intitulada “O mistério do Universo em aceleração”. Ao apresentar Steigman, pesquisador da Universidade Estadual de Ohio, Estados Unidos, que ajudou a elucidar a formação de elementos químicos mais leves como

hidrogênio e hélio logo após o surgimento do Universo, o físico e professor da Universidade Estadual Paulista (Unesp) Rogério Rosenfeld lembrou: “Nossas concepções do Universo mudam com o tempo, em consequência de novos instrumentos e de novas teorias”.

As últimas grandes descobertas sobre o que Rosenfeld chamou de “comportamento inesperado” do Universo emergiram em 1998, contrariando as evidências sobre a possível expansão contínua do Universo, acumuladas nos 30 anos anteriores. “Pensava-se que a velocidade de expansão do Universo se reduzisse, em movimento desacelerado. Mas as evidências contrariaram as previsões e mostraram um Universo em expansão acelerada”, comentou Rosenfeld. Steigman abriu a palestra mostrando justamente a capa da revista *Science* de 18 de dezembro de 1998 que apresentava o trabalho sobre o Universo em aceleração como o grande salto científico daquele ano.

Nossas concepções do Universo mudam com o tempo, em consequência de novos instrumentos e de novas teorias

“À medida que o Universo se expande, torna-se mais frio, mais diluído e as ondas eletromagnéticas, mais longas”, contou Steigman, apoiado principalmente nos trabalhos de Albert Einstein. A teoria da gravitação de Einstein, conhecida como relatividade geral, generaliza a teoria de gravitação proposta pelo físico inglês Isaac Newton. Para ambos, a gravidade era “a força que determina a história e o futuro do Universo, além de manter a Terra na órbita ao redor do Sol”, lembrou Steigman.

Einstein pensou inicialmente que o Universo seria estático, sem nenhuma expansão. Para obter um Universo estático, o cientista alemão introduziu em suas equações a chamada constante cosmológica. Mais tarde, com a descoberta da expansão do Universo, considerou um erro a introdução da constante cosmológica. No entanto, justamente essa constante é que poderia explicar a expansão acelerada do Universo. Ou seja, Einstein estava certo. A energia do vácuo, uma variável apresentada pela mecânica quântica, uma vertente da física que emergia no início do século passado, também apontava para a aceleração do Universo. “Para a mecânica quântica”, disse Steigman, “o vácuo não é vazio, mas o estado da matéria com menor energia”.

Steigman olhou também para o passado do Universo, formado há cerca de 14 bilhões de anos e hoje com aproximadamente 1 bilhão de galáxias, cada uma com centenas de bilhões de estrelas. Em seguida, explorou detidamente o significado das expansões desaceleradas ou aceleradas do Universo. “Se a expansão desacelera, a gravidade é força atrativa”, disse. “Quanto maior a densidade (dos objetos), mais forte é a gravidade. E quanto mais rápida a expansão, maior a separação.” Ele apresentou dois cenários possíveis, ambos para daqui a dezenas de bilhões de anos. No primeiro, a expansão é que pode ganhar, como resultado da densidade menor. No segundo, a gravidade é que ganha, reduzindo a taxa de separação entre as galáxias, e o Universo para de expandir. “A expansão do Universo pode desacelerar sob influência da gravidade.”

O mistério do Universo em aceleração

GARY STEIGMAN, físico e professor da Universidade Estadual de Ohio, Estados Unidos



Gary Steigman: Universo em constante mudança

Energia escura

Nos últimos anos os físicos acrescentaram outro elemento para prever o futuro do Universo: a energia escura, um fluido ainda pouco conhecido, mas abundante no Universo. “Combinando constante cosmológica, energia do vácuo e energia escura, as galáxias podem se separar ainda mais rapidamente”, comentou Steigman. Em uma série de gráficos ele examinou as diversas possibilidades. Outra, a de expansão desacelerada, implica um Universo mais denso, além de mais jovem que os hoje estimados 14 bilhões de anos. Aplicada isoladamente, a constante cosmológica aponta para um Universo em expansão acelerada e também mais velho que os 14 bilhões de anos. Mais recentemente os físicos começaram a trabalhar também com a radiação de fundo, que representa sutis flutuações na temperatura do Universo.

Steigman contou que os físicos medem as distâncias entre galáxias e inferem sobre a expansão do Universo por meio do brilho dos objetos celestes. “Quanto mais brilhantes, mais próximos; quanto mais tênues, mais distantes.” Os padrões de luminosidade mais usados são as supernovas, raras explosões de estrelas que podem ser mais brilhantes que toda uma galáxia. Em março de 1997, depois de anos observando e comparando a mesma região do céu, os fí-

sicos encontraram a supernova, a SN 1994D, afastando-se tenuamente, “como uma luz na estrada”, comparou Steigman. Seu comportamento só poderia ser explicado por meio da expansão acelerada do Universo.

“Com a expansão do Universo, as galáxias desaparecerão do campo de visão e o Universo será mais frio, mais escuro e mais vazio, um lugar muito solitário”, sintetizou Steigman. “Se a taxa de expansão aumentar com o tempo,

os átomos, as estrelas e as galáxias vão se separar violentamente.” Neste caso a Terra explode, o Sol se desfaz, tudo se desfaz; restariam apenas partículas subatômicas dispersas, sem nenhuma coesão ou energia: é o Big Rip (literalmente, Grande Rasgo). O que acontecerá? “Só o tempo dirá”, disse Steigman. “Mas será o fim, não outro começo.”

● CARLOS FIORAVANTI

PARA ALÉM DA FICÇÃO GEORGE MATSAS

Equações de Einstein permitiram supor a existência de buracos negros

Pouco depois de ter completado 76 anos, Albert Einstein morreu em 18 de abril de 1955 em Princeton, nos Estados Unidos. Deixou o mundo possivelmente duvidando da existência de um dos objetos celestes mais fascinantes e misteriosos hoje conhecidos pela astrofísica: os buracos negros. Ironicamente, a presença de corpos extremamente densos e compactos, dotados de um campo gravitacional descomunal capaz de atrair toda a matéria ao seu redor, inclusive a luz, estava codificada na teoria da relatividade geral, formulada por Einstein em 1915. “Tanto quanto eu saiba, Einstein morreu não acreditando que buracos negros existiriam na natureza”, disse George Matsas, professor do Instituto de Física Teórica da Universidade Estadual Paulista (Unesp), na palestra do dia 23 de novembro intitulada “Buracos negros: rompendo os limites da ficção”, mesmo nome do livro que escreveu ao lado de Daniel Vanzella, professor do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (USP) de São Carlos. Ao que tudo indica, o gênio, nesse caso, estava errado. Embora não haja ainda provas diretas da existência de buracos negros, surgiram, a partir dos anos 1960, evidências observacionais consistentes de que esses grandes sugadouros de matéria não são apenas frutos de cálculos matemáticos ou da imaginação de físicos. “Hoje é impossível falar em astrofísica sem considerar a

existência dos buracos negros. A ciência moderna superou a ficção e isso é maravilhoso.”

Matsas deu uma pequena aula sobre buracos negros. Explicou o que eles são, como se formam e qual a influência que exercem sobre corpos vizinhos no Cosmos. Como o nome indica, buracos negros não emitem luz e não podem ser vistos de forma direta. Sua presença é inferida pelas perturbações que sua enorme força gravitacional provoca na vizinhança. O físico tranquilizou a plateia. Disse que não há risco de se produzir um buraco negro no Sistema Solar – a massa do Sol não permite que, ao morrer, ele vire um buraco negro – ou na Terra devido a algum acidente. “Experimentos realizados em aceleradores de partículas como o Large Hadron Collider (LHC), do Centro Europeu de Pesquisas Nucleares (Cern), em Genebra, não têm condições de criar buracos negros capazes de destruir a Terra. Aliás é muito improvável que venham a ser criados buracos negros no LHC.” Tipicamente os buracos negros se

Buracos negros: rompendo os limites da ficção

GEORGE EMANUEL AVRAAM MATSAS, físico e professor titular do Instituto de Física Teórica (IFT) da Universidade Estadual Paulista (Unesp), coautor, com Daniel Vanzella, de *Buracos negros: rompendo os limites da ficção* (Vieira e Lent)



MARCIA MINILLO

Matsas: a ciência moderna superou a ficção

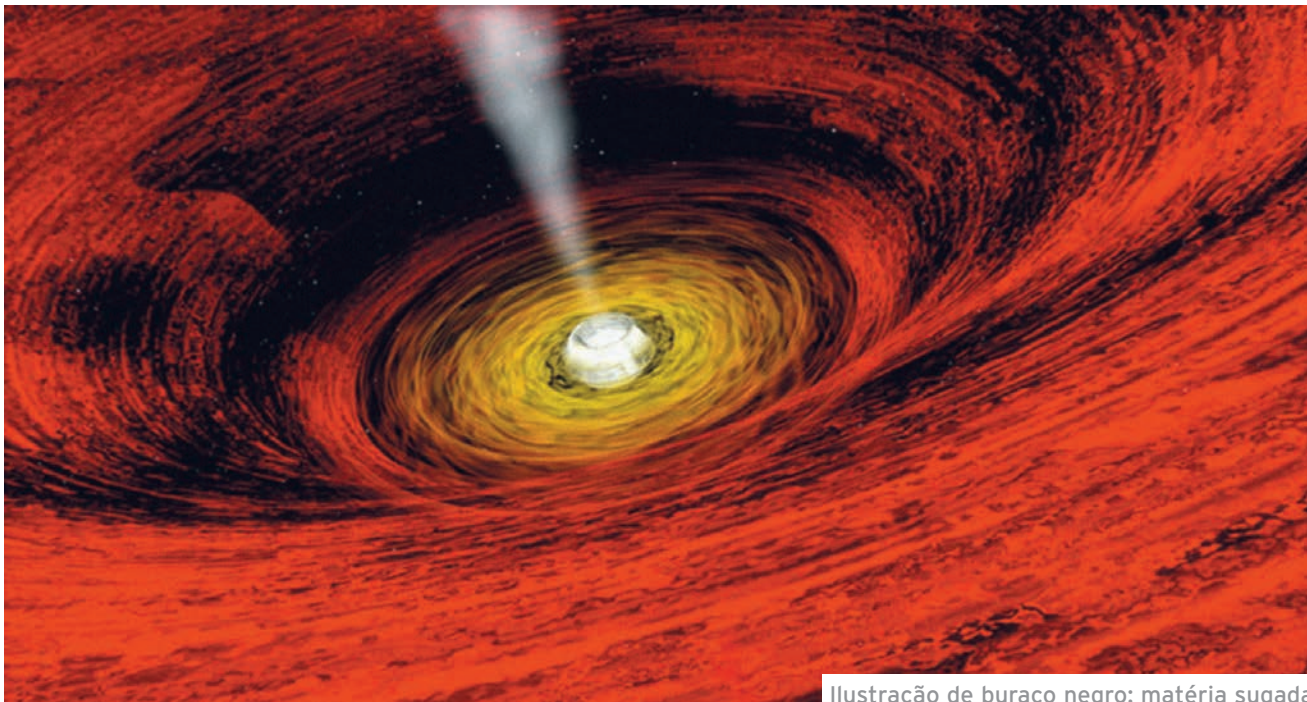


Ilustração de buraco negro: matéria sugada

formam a partir da morte de estrelas com massas enormes. O que faz uma estrela se manter estável é o equilíbrio entre duas forças opostas: uma que exerce pressão de dentro para fora do astro (o processo de fusão nuclear a partir da qual há geração da luz que vemos) e outra de sentido contrário (a gravidade). Quando acaba o combustível que sustenta a fusão nuclear, basicamente o hidrogênio e outros elementos leves, a força gravitacional passa a prevalecer. “A estrela então começa a colapsar”, afirmou.

Muitos mistérios

Em estrelas grandes com massas de umas dez vezes a do Sol ou mais, o resultado desse desequilíbrio provoca uma enorme explosão denominada supernova. O evento cataclísmico expelle grande parte da massa da estrela. Se a estrela tiver umas 30 vezes a massa do Sol, após a explosão a fração restante de matéria se concentra numa região de densidade infinita, com um descomunal campo gravitacional, onde, de acordo com a relatividade de Einstein, a curvatura do espaço-tempo é infinita (ou seja, a noção de tempo e espaço não existe mais). Essa região é denominada singularidade. É o coração do buraco negro. A circunferência que determina os limites do buraco negro recebe o nome de horizonte de eventos. Qualquer tipo de matéria ou energia que entre no horizonte de eventos, como um barco que cai num redemoinho, é sugado pelo buraco negro. “As mesmas equações de Einstein que usamos para garantir o funcionamento do GPS são empregadas para estudar o interior dos buracos negros”, comentou Matsas.

A primeira evidência científica mais confiável da presença de buracos negros no Universo data de 1964 (e até hoje é estudada). Nesse ano, os astrofísicos começaram a observar uma estrela gigante, de 30 massas solares, da constelação de Cisne, que parecia orbitar em torno do nada, ou melhor, de uma fonte de raios X invisível a olho

nu. A melhor explicação para a formação desse aparente sistema binário é a presença de um buraco negro, o Cygnus-X1, com massa equivalente a dez sóis, na vizinhança da estrela. Acredita-se que o buraco negro esteja engolindo paulatinamente a massa da estrela e crie, fora de seus limites, mas em torno de si, um disco de acréscimo de matéria. Uma das assinaturas físicas desse processo é a emissão de raios X ainda antes de a matéria ser engolida pelo buraco negro. Com o auxílio de potentes equipamentos enviados ao espaço pelo homem, como o telescópio Hubble (que opera no espectro da luz visível) e sobretudo o Observatório de Raios X Chandra, lançado pela Nasa em 1999, os astrofísicos passaram a contar com meios mais eficazes de observar indiretamente os efeitos causados (provavelmente) pela presença desses sugadores de matéria em algumas regiões do Universo.

Hoje os astrofísicos afirmam que há vários tipos de buraco negro, inclusive no centro de muitas galáxias, como a nossa Via Láctea. “Uma parte significativa da matéria de uma galáxia, talvez até 1%, está na forma de um buraco negro”, disse Matsas. Há muitos mistérios ainda em torno desses objetos invisíveis que sugam matéria. Em 1974, o famoso físico inglês Stephen Hawking propôs que os buracos negros emitem uma forma de radiação que pode levar à sua evaporação. Essa teoria, ainda não comprovada, é hoje conhecida como efeito Hawking. Alguns pesquisadores acreditam que o estudo dos buracos negros levará a uma melhor compreensão das relações entre o espaço e o tempo e possa ser importante para formular a teoria da gravitação quântica, que fundiria os preceitos da mecânica quântica com a relatividade geral de Einstein. “Os buracos negros podem ser a porta de entrada para compreender a gravitação quântica”, disse Matsas.

● MARCOS PIVETTA

SUTIS CONEXÕES

CARMEN PRADO

Física da USP relaciona movimento browniano, fractais e teoria do caos

Movimento browniano, fractais e caos têm tudo a ver, embora cada um desses conceitos da física pareça desconectado e de difícil entendimento para leigos. O primeiro conceito vem do início do século XIX. Os fractais só aparecem com esse nome em meados da década de 1970. E a teoria do caos passou a receber atenção maior apenas no final do século XX. “O tempo da ciência não é um tempo com passado, presente e futuro muito bem definidos porque, para que as ideias floresçam, ou assumam um significado, precisam estar num contexto, e este muda, mudando a percepção que temos delas”, disse a pesquisadora Carmen Pimentel Prado, professora do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (USP), durante a palestra “Movimento browniano, caos e fractais”, no dia 22 de novembro. A palestra tentou mostrar que os três conceitos estão ligados, e entendê-los não é tão difícil assim.

Albert Einstein descreveu o movimento browniano em um dos quatro famosos artigos de 1905. Antes dele, outros

cientistas já haviam tentado explicar o movimento incessante de partículas em meio líquido (no caso, grãos de pólen), observadas no microscópio pelo botânico escocês Robert Brown em 1827. Quase 80 anos depois, Einstein teve êxito: tratava-se da consequência dos choques das moléculas do fluido com as partículas de pólen, uma evidência experimental da existência dos átomos. Mas por que se levou tanto tempo para descrever um simples movimento? “Na mecânica

clássica, bem conhecida já antes de Einstein, o conceito de velocidade instantânea é fundamental para descrever os movimentos”, disse Carmen. “Ocorre que não existe velocidade instantânea no movimento browniano. Não dá para descrever sua trajetória com as técnicas, as teorias e a matemática que fizeram o sucesso da mecânica clássica e que permitiram e permitem até hoje descrever quase todos os outros movimentos a nossa volta, do movimento de um trem à órbita dos planetas, que são contínuos, e têm uma velocidade bem definida.” Einstein, observa a professora, percebeu isso: viu que o conceito-chave para a descrição desse tipo de movimento eram as flutuações da posição e criou uma equação específica para isso, unindo conceitos de estatística com argumentos de mecânica.

A trajetória de um movimento browniano é um exemplo real de um tipo de curva que já tinha sido proposto por matemáticos bem antes de Einstein, uma curva sem tangentes em nenhum ponto (tangente é uma linha reta que toca num único ponto de uma curva). “Ou seja, a trajetória de um movimento browniano é o que hoje chamamos de fractal, algo que se pensava existir apenas na imaginação criativa de alguns matemáticos, mas que para surpresa de muitos está presente na natureza.” O nome fractal só foi criado em 1975 pelo francês Benoît Mandelbrot, para descrever curvas com esse tipo de propriedade. Fractal vem do grego *fractus*, que significa quebrado, fracionado, representa uma curva contínua, mas inteiramente quebrada. É nada mais do que um objeto geométrico, como um cubo, um cone, um paralelepípedo, um losango, mas com uma dimensão fracionária. Carmen mostrou o que isso significa e como essa dimensão pode ser calculada.

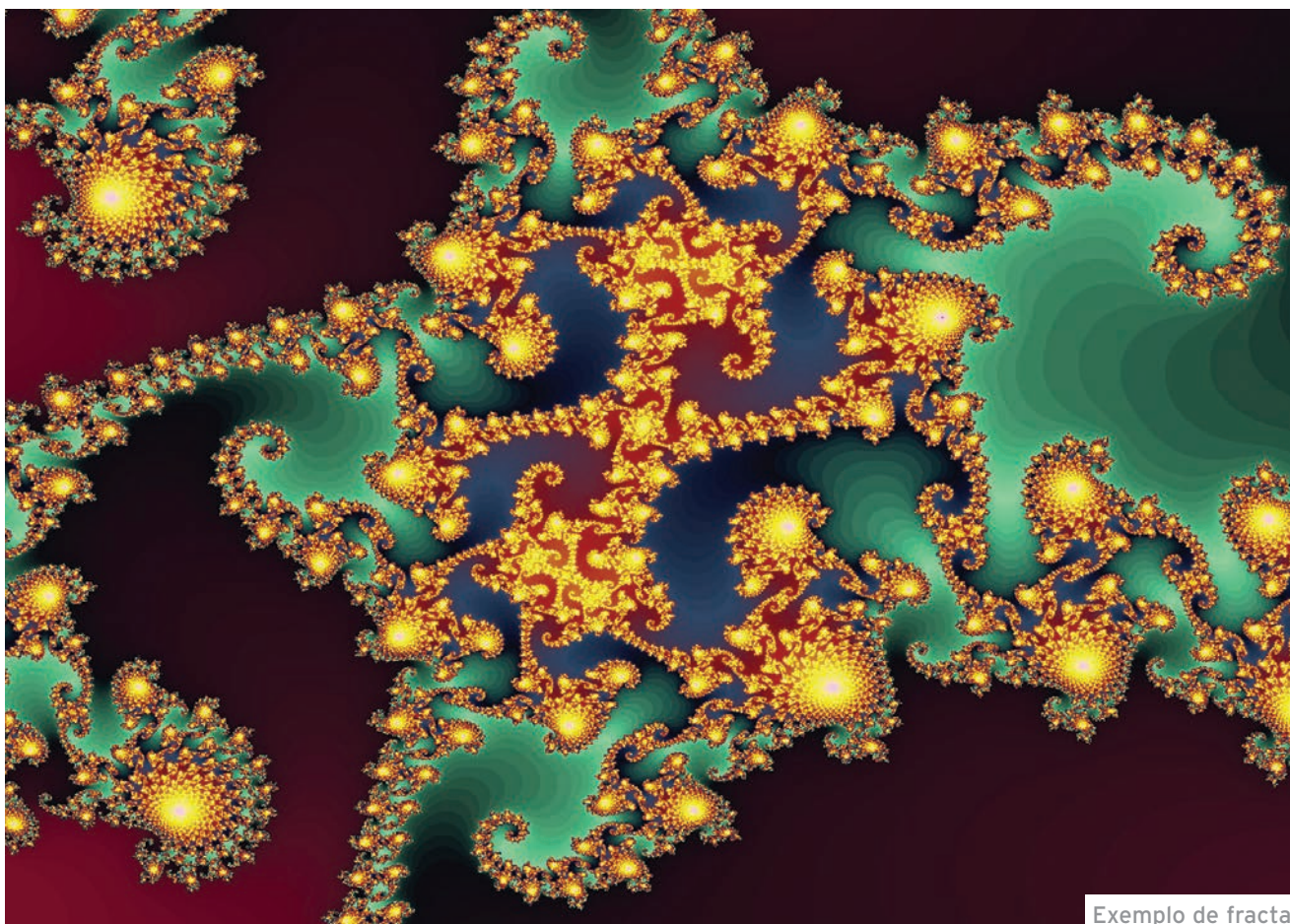
Sistemas dinâmicos

A professora explicou ainda durante a palestra como é gerado o belo conjunto de Mandelbrot, que está ligado tanto com a ideia de fractal como com a arte. “Para fazer essas figuras bonitas, que encontramos hoje aos montes na internet, temos de imaginar cores e pensar não só nas equações, mas nas atividades visuais”, contou. “Os astrônomos fazem isso muitas vezes quando colorem as figuras e imagens interplanetárias e os biólogos também, quando põem corantes diferentes nas células que fotografam.” O conjunto de Mandelbrot é um dos fractais mais famosos e estudados, porque é uma das primeiras obras de arte geradas por computador, e Mandelbrot

MARCIA MINILLO



Carmen: conceitos ligados



UNIVERSIDADE DE ROCHESTER

Exemplo de fractal

popularizou várias ideias suas em cima desse conjunto (*ver imagem acima*). Esse trabalho do cientista francês contém a ideia central do conceito de fractal e reflete a dificuldade conceitual que estava por trás da descrição do movimento browniano.

A pesquisadora explicou rapidamente ainda o que a teoria do caos tem a ver com os fractais. “Foram as descobertas da teoria do caos que trouxeram à baila e deram importância ao conceito de fractal de novo, no final do século XX”, disse. Normalmente, usamos a palavra caos como sinônimo de bagunça. Em física, o termo tem um significado bem preciso. Um sistema caótico não é tão desorganizado assim. “Existem várias causas para a imprevisibilidade, caos é o nome de uma delas. Sistemas caóticos são sistemas dinâmicos que

têm uma regra de evolução temporal bem definida e ainda assim se tornam imprevisíveis com o tempo.”

Na verdade, foi preciso esperar o final do século XX para que essas relações da matemática e da física, com a arte, viessem à tona, porque muitos desses estudos só podem ser feitos com computador – são inalcançáveis com o cálculo à mão. “Foi preciso o desenvolvimento da computação, de um conjunto de técnicas de simulação, para que fosse possível um acúmulo de dados, de observações, que permitissem desenvolver essas teorias.” Os sistemas caóticos estão relacionados com processos não-lineares. Muitos desses processos já haviam sido objeto de pesquisa, por exemplo, de economistas, de biólogos e de várias outras áreas diferentes da física. “A física talvez tenha sido a última área da ciência a realmente se debruçar sobre o problema do caos, da irregularidade e não-linearidade das coisas”, observou Carmen. “Existe uma forma de representar todos os movimentos em um diagrama, e quando um movimento caótico é representado dessa forma a figura que se forma é um fractal.”

Movimento browniano, caos e fractais

CARMEN PIMENTEL CINTRA DO PRADO, física e professora associada do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (USP)

● FABRÍCIO MARQUES