

COSMOLOGIA

OS EFEITOS DA BIZARRA TEMPERATURA NEGATIVA ABSOLUTA

Sempre se acreditou ser impossível avançar além da mais baixa temperatura dada por $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$, o zero absoluto ou zero Kelvin. O mais intrigante é que os átomos a temperaturas negativas absolutas são os sistemas mais quentes possíveis.

Por Cláudio Nassif

A ESTRUTURA SIMÉTRICA

da Nebulosa do Bumerangue foi gerada por vento de uma antiga estrela à velocidade de 600 mil km/hora sobre gás e poeira. Essa rápida expansão resfriou a estrutura a uma temperatura de apenas 1 K acima do zero absoluto. A nebulosa fica no interior da constelação do Centaurus, a 5 mil anos-luz

A

TEMPERATURA É UMA MEDIDA RELACIONADA ao movimento ou energia cinética média das moléculas de uma substância. Esfriar um corpo ou um gás é diminuir a energia cinética média interna ou agitação térmica, reduzindo a temperatura. Portanto, aumentar a temperatura é fazer crescer a agitação térmica ou a energia cinética média por molécula, levando ao aumento da energia interna do sistema.

O zero absoluto era, até o experimento da equipe alemã liderada por Schneider no final do ano passado e divulgada no início de janeiro, uma temperatura hipotética e faria com que toda a energia térmica de um material ou ambiente desaparecesse por completo. Assim, por definição, nada pode ser mais frio que o zero absoluto, estabelecido em $T=0\text{K}$ (Kelvin) ou $T=-273,15\text{ }^\circ\text{C}$, medido na escala Celsius. Esse seria o limite inferior de temperatura absoluta e inatingível, perto da qual a energia cinética média das partículas iria para zero.

O físico britânico William Thomson, mais conhecido como Lord Kelvin (1824-1907), definiu a escala de temperatura ab-

soluta em meados do século 19, propondo que nada poderia ser mais frio que o zero absoluto. Essa conclusão passou a ser denominada terceira lei da termodinâmica, área fenomenológica da física que lida basicamente com os conceitos de temperatura, calor e entropia. A terceira lei proíbe exatamente atingir o zero absoluto ao retirarmos calor (energia térmica) de um material ou ambiente, pois não se pode retirar indefinidamente calor de uma dada substância sem a interferência do próprio dispositivo de extração. Assim, os átomos ou moléculas da substância não podem perder totalmente suas energias e o zero absoluto corresponde ao estado hi-

potético em que as partículas não têm qualquer energia.

ENTROPIA

A temperatura é definida pela forma como a adição ou a remoção de energia afeta a quantidade de desordem, ou a chamada entropia de um sistema. Para os sistemas nas temperaturas absolutas positivas ($T>0\text{K}$) com que estamos familiarizados o acréscimo de energia aumenta a desordem. Assim, por exemplo, ao aquecermos um cristal de gelo, fazemos com que ele derreta em um líquido mais desordenado, já que o aumento da temperatura eleva a entropia, tendo em vista que as moléculas na água

Cláudio Nassif, doutor em física pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e pós-doutor pelo Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), colaborador de **Scientific American Brasil**, atua como pesquisador em cosmologia e relatividade modificada com uma velocidade mínima. Atualmente é professor da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

em estado líquido passam a ter um maior grau de liberdade, ocupando um maior número possível de estados de energia do que seria no caso da água sólida (gelo).

Continue a remover energia e chegaremos cada vez mais próximo do zero na escala absoluta (Kelvin), estabelecido em $-273,15\text{ }^\circ\text{C}$, onde a entropia estará no mínimo; ou seja, o zero absoluto implicaria entropia nula, pois todas as partículas do sistema estariam totalmente acomodadas num mesmo nível fundamental.

UM LAÇO TÉRMICO

Para começarmos a compreender as paradoxais temperaturas negativas podemos pensar na temperatura como existindo em uma escala que, na verdade, é um ciclo ou um “laço” e, portanto, é não linear. Temperaturas positivas ($T > 0\text{K}$) são uma parte do ciclo, enquanto as bizarras temperaturas negativas absolutas ($T < 0\text{K}$) formam a outra, sendo que há entre as duas partes, positiva e negativa, um laço circular ou intervalo aberto com o ponto do zero absoluto no centro. Por isso, o zero absoluto não é ultrapassado diretamente e pode ser apenas contornado ao longo do laço. Quando as temperaturas saltam para baixo do zero absoluto ou ainda estão acima da região positiva dessa escala, é como se estivessem além do infinitamente

positivo, e, assim, acabam em território negativo. Nesse sentido, paradoxalmente, as temperaturas negativas absolutas se comportam como as mais elevadas, ou seja, ficam acima de qualquer temperatura positiva absoluta que conhecemos.

O significado de uma temperatura absoluta negativa pode ser ilustrado considerando esferinhas rolando em um terreno montanhoso, onde os vales representam uma baixa energia potencial e os topos uma alta energia. Quanto mais rapidamente as esferinhas se moverem, mais elevadas serão suas energias cinéticas. Assim, se começarmos com uma temperatura absoluta positiva e aumentarmos a energia cinética das esferinhas aquecendo-as, elas irão se espalhar, cada vez mais, pelas regiões de mais alta energia, representadas pelos pontos mais próximos dos topos.

Se fosse possível aquecer as esferinhas a uma temperatura infinita, haveria uma probabilidade igual de as encontrarmos em qualquer ponto do terreno, tanto no pico quanto no vale, pois elas estariam igualmente distribuídas em todos os estados de energia e, portanto, a entropia do sistema seria infinita.

Agora, imagine a possibilidade de adicionar ainda mais energia e aquecer as esferinhas para além do infinito. O que aconteceria? Elas tenderiam a se reunir apenas em estados de alta energia e ficariam ainda mais quentes que quaisquer temperaturas positivas; ou seja, não haveria quase nenhuma ou pouca probabilidade de encontrá-las nos estados de energia mais baixa, já que todas elas saltariam para os topos das montanhas, com uma súbita inversão de população. Esse efeito bizarro, ainda pouco explorado, é atribuído à temperatura absoluta negativa. Nesse regime, a estatística de distribuição das partículas com a temperatura se torna o inverso do que aconteceria nas proximidades positivas do zero absoluto, já que todas as partículas (“esferinhas”) se encontrariam praticamente nos topos, em vez de uniformemente distribuídas, ou mesmo próximas dos vales. Nas temperaturas negativas, os átomos ocupam mais estados de alta energia que os de

baixa, o que leva a uma distribuição estatística de Boltzmann invertida como sendo a marca registrada de uma temperatura negativa absoluta.

A natureza paradoxal das temperaturas negativas, por corresponderem a sistemas extremamente quentes, tem estranhas consequências, como seria de esperar. Sabemos, por exemplo, que a energia flui tipicamente de objetos com temperatura positiva mais alta para aqueles com temperatura positiva mais baixa, ou seja, objetos mais quentes aquecem os mais frios, até chegarem a uma temperatura em equilíbrio. No entanto, a energia irá sempre fluir a partir de sistemas com temperaturas negativas para aqueles com temperaturas positivas. Nesse sentido, os sistemas com temperaturas negativas são sempre muito mais quentes que aqueles com temperaturas positivas, sendo que a entropia dos sistemas com temperatura negativa se comporta de maneira bizarra ou inversa, pois, à medida que perdem energia para o ambiente com temperatura positiva, a entropia aumenta e, portanto, diminui quando se injeta energia, um comportamento inverso ao da matéria-energia convencional. Mais adiante, voltaremos a esse ponto, já que esses sistemas se assemelham à energia escura do Universo, devido aos seus efeitos antigravitacionais ou repulsivos.

TEMPERATURA SUB-KELVIN

O físico Simon Braun e sua equipe sob a coordenação de Ulrich Schneider trabalharam com um sistema artificial, composto por cerca de 100 mil átomos de potássio em uma câmara de vácuo, o que os torna perfeitamente isolados do ambiente externo. Os átomos foram resfriados a uma temperatura de alguns bilionésimos de um Kelvin, uma das mais baixas que se obtém em laboratório. Os átomos no gás ultrafrio foram então capturados por armadilhas ópticas, com feixes de raios laser, e dispostos em uma matriz perfeitamente ordenada. Cada átomo pode mover-se do seu local na matriz óptica para o local vizinho por efeito de tunelamento, mas sem perder algo que é fun-

EM SÍNTESE

Os sistemas com temperatura negativa absoluta são os mais organizados e quentes que existem, com efeitos similares à energia escura, responsável pela expansão cósmica acelerada ou antigravidade.

A energia escura é a energia do vácuo ou um novo “éter”, cujo referencial se torna inalcançável pela matéria convencional, já que ela é bloqueada por uma barreira de velocidade mínima, que surge quando se unem as forças gravitacionais e eletromagnéticas.

damental para o experimento: ao contrário dos sistemas naturais, as partículas da matriz óptica têm um limite superior de energia, o que possibilita a inversão dos seus estados de energia em um sistema ultrafrio, e consequentemente uma temperatura ligeiramente abaixo do zero absoluto ou “infinitamente” quente. Assim, a temperatura do sistema não depende apenas da energia cinética, mas da energia total das partículas, o que inclui as energias potencial e de interação, ambas com um limite superior impostas pelo experimento.

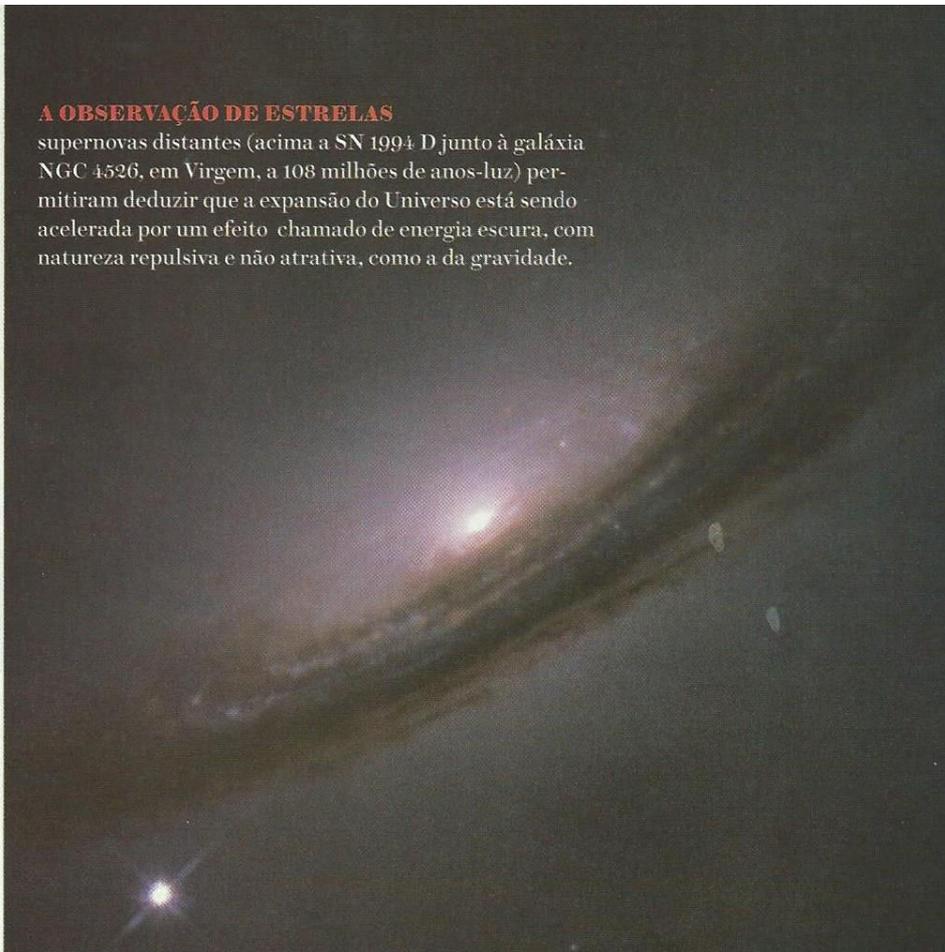
ÁTOMOS ORDENADOS

Em condições normais, os átomos tenderiam a escapar da rede óptica, colapsando e aglomerando-se novamente em uma nuvem disforme, sugada pela gravidade. Mas os cientistas fizeram ajustes na rede óptica para que fosse energeticamente mais favorável aos átomos permanecerem em suas posições ordenadas. Então, os pesquisadores levaram os átomos até seu nível superior de energia total, materializando uma temperatura absoluta negativa, de alguns bilionésimos de -K, em um sistema que se manteve estável. Assim, a grade óptica funciona como uma série de fendas ao longo da montanha, travando a “descida” dos átomos (“esferinhas”) montanha abaixo. Neste caso ocorre então um efeito antigravitacional que impede o colapso do sistema, numa similaridade com os efeitos bizarros da energia escura, responsável pela aceleração da expansão cósmica, como foi previsto pelo físico teórico Achim Rosch, da Universidade de Colônia, na Alemanha. Ele mostrou que, em um sistema como esse, os átomos abaixo do zero absoluto passam a flutuar em vez de serem atraídos pela gravidade, comportando-se de maneira semelhante aos efeitos repulsivos gerados pela energia escura.

Na verdade, não é possível criar temperaturas absolutamente negativas de maneira suave e contínua, sempre baixando a temperatura, já que não será possível romper a barreira do zero absoluto da maneira usual. Então, é importante enfatizar que o zero absoluto continua sendo intransponível se pensarmos na condição usual de uma escala linear de temperatura. Dessa forma, não existe um prolongamento direto ou contínuo dessa escala para abaixo da barreira do zero absoluto. Mas foi possível “saltar” sobre

A OBSERVAÇÃO DE ESTRELAS

supernovas distantes (acima a SN 1994 D junto à galáxia NGC 4526, em Virgem, a 108 milhões de anos-luz) permitiram deduzir que a expansão do Universo está sendo acelerada por um efeito chamado de energia escura, com natureza repulsiva e não atrativa, como a da gravidade.



essa barreira, passando diretamente de uma determinada temperatura absoluta positiva – acima do zero absoluto – para uma temperatura absoluta negativa – abaixo do zero absoluto – onde predomina um reino de estranhos efeitos que buscaremos compreender com base em uma nova física fundamentada numa nova noção de espaço-tempo dominado pela energia escura.

A ENERGIA ESCURA DO VÁCUO

Em um artigo de minha autoria publicado na edição de janeiro passado (128) de **Scientific American Brasil**, anunciei uma nova abordagem para a energia escura como resultado da energia de vácuo ou fundo cósmico associado a um referencial de fundo privilegiado, em relação ao qual todas as partículas se movem, mas, sobre o qual nenhuma matéria convencional pode repousar, pois há uma barreira inferior e intransponível de velocidade, dada por uma velocidade mínima não nula e inatingível. Assim, essa barreira da velocidade mínima proíbe a qualquer partícula saltar para o campo de fundo ou estado de repouso absoluto.

A barreira da velocidade mínima funciona de maneira similar à barreira da velocidade máxima ou velocidade da luz c , porém é um bloqueio para baixas energias, o inverso do que temos para as altas energias, próximas à velocidade da luz no “vácuo”. Nesse sentido, a velocidade mínima tem o mesmo status da velocidade da luz, sendo uma nova constante da Natureza, cujo valor foi rigorosamente obtido ($V \sim 10^{-15}$ m/s), a partir de outras constantes fundamentais, como a constante de gravitação universal (G) e a constante de Planck (h) da física quântica, entre outras.

De acordo com a relatividade modificada pela existência de um referencial de fundo inatingível, devido à barreira da velocidade mínima, uma partícula tenderia a perder toda sua energia quando se aproximasse da velocidade mínima que, se fosse alcançada, anularia por completo a sua energia, levando-a para o fundo. No entanto, isso não ocorre, pois, quando a energia da partícula começa a tender a zero nesse regime de baixíssimas velocidades bem próximo ao fundo (dominado pela energia de vácuo), surge paradoxalmente uma bar-



SAUL PERLMUTTER, BRIAN P. SCHMIDT E ADAM G. RIESS ganhadores do prêmio Nobel de Física de 2011 pela descoberta da aceleração da expansão do Universo, considerada a notícia científica mais importante de 1998. Na foto, eles concedem entrevista coletiva à imprensa na Royal Swedish Academy of Sciences, em 7 de dezembro de 2011.

reira de energia infinita sem qualquer relação com a própria partícula, mas com a energia externa do vácuo que começa a agir sobre ela, funcionando de forma análoga a um “fluido altamente viscoso” que se acopla fortemente à partícula aumentando efetivamente a sua massa para o infinito, e com isso impossibilitando-a de atingir a velocidade mínima e o referencial de fundo. Neste caso, dizemos que a barreira da velocidade mínima para uma partícula tem origem nesse efeito dinâmico devido à energia de vácuo, impedindo-a de atingir o fundo, pois sua massa “adere” fortemente o vácuo e o resultado é algo que tende a ser infinitamente massivo ou com energia infinita, já que a massa (m) e energia (E) se equivalem pela equação de Einstein $E=mc^2$.

Considerando agora um gás de muitas partículas que, na média, tendem para a velocidade mínima V , a barreira do vácuo impossibilitaria atingir V e, assim, fica justificado que não se pode atravessar diretamente ou romper a barreira do zero absoluto, um limite inferior imposto pelo próprio vácuo. Nesse regime, próximo da velocidade V , do ponto de vista de cada partícula (átomo) individual teríamos uma energia média por partícula que tenderia a zero e, portanto, estaríamos cada vez mais próximos do zero absoluto num gás ultrarresfriado.

É importante perceber, no entanto, que esse mesmo regime de baixas energias que

acabamos de expor passa a assumir um comportamento bizarro quando observamos o gás, levando em conta a interação de cada partícula com o vácuo e o aparecimento de massa ou energia efetiva que tende ao infinito no limite de V , o que acarretaria uma temperatura infinitamente grande associada ao efeito de vácuo sobre as partículas, visto que, do ponto de vista local das partículas individuais, a temperatura estaria bem próxima do zero absoluto.

PARADOXO APARENTE

O aparente efeito paradoxal da temperatura para baixas energias emerge devido exclusivamente à barreira da velocidade mínima V , dando-nos o indicativo de que o vácuo do zero absoluto tem entropia nula, mas é, ao mesmo tempo, infinitamente quente, um efeito bizarro similar ao que ocorre na inversão de estados do gás com átomos de potássio que saltam para o topo de energia, mantendo a entropia baixa, embora, nessa experiência, tenhamos apenas contornado o zero absoluto pela nova escala não linear de temperatura, através de técnicas sofisticadas para formar as grades ópticas.

A energia mais fundamental de vácuo estaria associada à velocidade mínima e a entropia nula do zero absoluto, porém com uma temperatura infinita do ponto de vista coletivo ou global. Portanto, o vácuo ligado à velocidade mínima é um sistema alta-

mente coerente (organizado), muito mais quente que qualquer temperatura positiva, funcionando como temperatura negativa absoluta. Assim, esse “vácuo” seria fonte de energia e calor para qualquer matéria convencional, o que já nos levaria a fazer conjecturas sobre a construção de motores com mais de 100% de eficiência.

Além disso, conforme explicito no artigo de janeiro passado de **Scientific American Brasil**, a velocidade mínima universal V é a barreira inatingível do vácuo (um novo “éter”) que, na escala cosmológica, se manifesta como uma antigravidade, gerando a surpreendente aceleração da expansão cósmica. Essa é a própria energia escura do vácuo que, quando explicada com base na ideia da velocidade mínima, permite prever comportamentos bizarros como a temperatura infinita com entropia zero e antigravidade, em concordância de ordem qualitativa com os efeitos obtidos na experiência dos alemães.

Um experimento que poderia ser usado para testar a existência da velocidade mínima universal V seria utilizar um feixe de laser atravessando um gás ultrarresfriado com temperaturas cada vez mais próximas do zero absoluto (condensado de Bose-Einstein). Como já observado em laboratório, a velocidade da luz é drasticamente reduzida num condensado. Assim, esperamos que a velocidade da luz nesse meio ultrafrio se aproxime do seu valor mínimo V .

A UNIFICAÇÃO DAS FORÇAS BÁSICAS

O espaço-tempo da teoria da relatividade simétrica, com dois limites de velocidade, a velocidade da luz c e a velocidade mínima V associada a um novo “éter” (energia de vácuo) ou o referencial de fundo inatingível pela matéria convencional, surge quando se unifica (acopla) a força gravitacional com a eletromagnética, seguindo a mesma linha de investigação de Einstein na busca da teoria do campo unificado.

Einstein acreditava que a teoria de unificação levava naturalmente à compreensão da mecânica quântica, inclusive o Princípio da Incerteza, que proíbe medir simultaneamente, com certeza, o momentum (velocidade) e a posição de uma partícula subatômica. Contra a interpretação probabilista da mecânica quântica, Einstein dizia: “*Deus não joga dados*”.

Em 1905, Einstein postulou a invariância da velocidade da luz para compatibilizar a mecânica com a eletrodinâmica. Para isso teve de preservar a simetria do eletromagnetismo (as equações de Maxwell), levando ao abandono do antigo conceito mecânico (convencional) de éter, a substância que preencheria o espaço e permitiria a propagação da onda luminosa. Agora, no entanto, o “éter” retorna sob uma nova roupagem não convencional através da invariância de uma velocidade mínima.

ACOPLAMENTOS CONSISTENTES

Ao buscarmos o acoplamento consistente entre a gravitação e o eletromagnetismo sabemos que a presença da gravidade (aceleração) de uma partícula num campo gravitacional é incompatível com os sistemas de referenciais inerciais (velocidade constante), nos quais o repouso se insere. Logo, nesse contexto, o aparecimento da gravitação cria a necessidade de haver uma barreira de velocidade mínima que proíbe a matéria convencional de atingir o estado do repouso absoluto, dado por um novo “éter”.

A invariância de uma velocidade mínima é a exigência que nos possibilita compatibilizar eletrodinâmica e efeitos gravitacionais. Se admitirmos a eliminação completa dos efeitos não inerciais da gravidade, ao considerarmos apenas sistemas inerciais, essa hipótese nos possibilitaria encontrar o repouso ou o estado de equilíbrio para, por exemplo, um elétron (partícula com carga negativa), anulando o seu campo magnéti-

co, que se origina do seu movimento. Como a carga elétrica se move com velocidade constante para um dado observador, ela cria para ele um campo magnético. Logo, seria possível anular o seu campo magnético se nos imaginarmos no mesmo referencial do elétron de forma que ele estaria em repouso para nós, ou seja, mediríamos apenas seu campo elétrico devido sua carga elétrica, que fica preservada com a mudança de referencial.

Einstein usou o raciocínio similar ao que acabamos de fazer para o elétron, porém ele considerou essa hipótese para a luz, imaginando encontrar um referencial que anulasse a velocidade da onda eletromagnética (velocidade da luz). Ele se perguntou: “Se fosse possível viajar sobre um raio de luz, como eu veria o mundo?”. Com essa pergunta, ele questionou a validade dos referenciais inerciais (galileanos) da mecânica quando confrontados com o movimento de um raio luminoso, pois se a velocidade da luz obedecesse a noção galileana de repouso relativo surgiria uma quebra de simetria (coexistência) dos campos elétrico e magnético da onda luminosa que, no hipotético estado de repouso sobre a luz, seria formada apenas por campos estacionários, destruindo o seu aspecto dinâmico ou a dependência dos seus campos elétrico e magnético com o tempo. Assim, a teoria de Maxwell, que descreve a propagação da luz, falharia diante das transformações de referencial inercial da mecânica galileana e macroscópica, onde o repouso ocorre naturalmente.

A solução para a incompatibilidade entre o eletromagnetismo e a mecânica foi colocar a velocidade da luz num status privilegiado de limite superior de velocidade, tendo sempre o mesmo valor em relação ao movimento de qualquer objeto. Com isso, percebemos intuitivamente que a invariância da velocidade da luz é um aspecto não galileano de um novo status de referencial, onde a noção de repouso é eliminada até mesmo para as partículas de matéria convencional (elétron). Sendo assim, a luz (fóton) e a matéria no nível subatômico (elétron) ficariam em pé de igualdade por pertencerem a um sistema de referenciais sem a noção de repouso, ou seja, temos a existência de um limite inferior de velocidade absoluta, levando à impossibilidade de encontrar o repouso mesmo para o elétron, de forma a manter sempre a coexistência de

seus campos elétrico e magnético, em similitude com a luz.

A origem de uma velocidade mínima está na gravitação atuando no nível subatômico, pois os efeitos gravitacionais impossibilitam a existência de sistemas inerciais perfeitos e, com isso, surge uma impossibilidade de encontrarmos um campo magnético nulo para uma partícula carregada que se move com aceleração. Em síntese, a velocidade mínima universal foi deduzida a partir da investigação da eletrodinâmica das partículas movendo-se em campos gravitacionais.

Nas proximidades da velocidade mínima, a relatividade simétrica prevê efeitos que são avessos aos produzidos às velocidades próximas à da luz. Como exemplo disso, ocorre uma dilatação do espaço, manifestando-se como a perda de localização da partícula, que se “espalha” no fundo. A incerteza na posição emerge daí e, por isso, foi mostrado que a relatividade simétrica já traz em si efeitos quânticos.

Enfim, a busca por uma teoria consistente da gravidade-quântica deveria estar fundamentada no entendimento da energia escura como a fonte de aceleração da expansão do Universo e, até mesmo, talvez a fonte de geração de energia utilizável para inimagináveis tecnologias.

Esse é um cenário promissor, mas, por enquanto, parece estar situado um pouco abaixo da linha do horizonte e contemplá-lo com a definição desejável, talvez possa ser uma mera questão de tempo. ■

PARA CONHECER MAIS

Quantum gas goes below absolute zero, Zeeya Merali, *Nature*, 3 de janeiro, 2013.

A surpreendente aceleração da expansão cósmica, C. Nassif, *Scientific American Brasil*, nº 128, 74-81, janeiro de 2013.

Double special relativity with a minimum speed and the uncertainty principle, C. Nassif, *International Journal of Modern Physics D*, vol. 21, nº 2, 1-20, 2012.

Deformed special relativity with an energy barrier of a minimum speed, C. Nassif, *International Journal of Modern Physics D*, vol. 19, nº 5, 539-564, 2010.

Deformed special relativity with an invariant minimum speed and its cosmological implications, C. Nassif, *Pramana Journal of Physics* vol.71, nº 1, 1-13, 2008.

Negative absolute temperature for motional degrees of freedom, S. Braun, J. P. Ronzheimer, M. Schreiber, S. S. Hodgman, T. Rom, I. Bloch, U. Schneider, *Science* vol.339, 52-55, DOI: 10.1126/science.1227831.

Negative temperatures?, Lincoln D. Carr, *Science*, vol.339, 42-43, DOI: 10.1126/science.1232558.

On electrodynamics of moving particles in gravitational fields, C. Nassif, arXiv: physics/0702095.

