

Efeitos quânticos na gravitação e em análogos gravitacionais

Lucas Tobias de Paula, Murillo Spadin Domingues e Maurício Richartz

Universidade Federal do ABC

Resumo

A física moderna revela que o vácuo quântico, longe de ser um espaço absolutamente vazio, apresenta propriedades peculiares quando analisado em um espaço-tempo curvo, como na vizinhança de buracos negros. A interação entre campos quânticos e a geometria do espaço-tempo é formalmente descrita pela Teoria Quântica de Campos em Espaços Curvos, que considera os efeitos gravitacionais como manifestações clássicas da curvatura do espaço-tempo, conforme estabelecido pela Relatividade Geral. A radiação Hawking, por exemplo, descreve como flutuações quânticas próximas a um buraco negro resultam em uma emissão térmica para o espaço exterior, causando sua evaporação. Já o efeito Unruh prevê que um observador acelerado percebe um banho de radiação em uma região na qual um observador em repouso veria apenas o vácuo de partículas. Todavia, esses fenômenos são difíceis de detectar diretamente, devido às escalas extremas envolvidas, que resultam em emissões térmicas com temperaturas extremamente pequenas. Para contornar isso, cientistas desenvolveram modelos análogos de gravitação. Esses modelos análogos de gravitação são sistemas (por exemplo, fluidos em movimento e gases ultrafrios) que imitam, em laboratório, condições equivalentes a espaços-tempos curvos. Experimentos que usam esses modelos tornam possível estudar como a estrutura do espaço-tempo influencia o comportamento quântico do vácuo, aproximando teoria e observação e ampliando o entendimento sobre as fronteiras entre a gravitação e a mecânica quântica.

Abstract

Modern physics reveals that the quantum vacuum, far from being an absolutely empty space, exhibits peculiar properties when analyzed in a curved spacetime, such as in the vicinity of black holes. The interaction between quantum fields and spacetime geometry is formally described by Quantum Field Theory in Curved Spacetimes, which treats gravitational effects as classical manifestations of spacetime curvature, as established by General Relativity. Hawking radiation, for instance, describes how quantum fluctuations near a black hole lead to thermal emission to the exterior, resulting in its gradual evaporation. Another example is the Unruh effect, which predicts that an accelerated observer perceives a thermal bath of radiation in a region where an inertial observer would see only the particle vacuum. However, these phenomena are difficult to detect directly due to the extreme scales involved, which result in thermal emissions of extremely low temperatures. To overcome this limitation, scientists have developed analogue models of gravity. These analogue models are systems (for example, fluid flows and ultracold gases) that reproduce, in the laboratory, conditions equivalent to curved spacetimes. Experiments based on these models allow us to study how spacetime structure influences the quantum behavior of the vacuum, bridging theory and observation and deepening our understanding of the interface between gravity and quantum mechanics.

Palavras-chave: teoria quântica de campos em espaços-tempo curvos; relatividade geral; radiação Hawking; efeito Unruh; modelos análogos de gravitação.

Keywords: quantum field theory in curved spacetimes; general relativity; Hawking radiation; Unruh effect; analogue models of gravity.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v6n2.49451](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v6n2.49451)

1 O conceito de vácuo

O conceito de vácuo (ou seja, a noção do “nada”) sofreu diversas mudanças no decorrer dos anos, tanto no contexto filosófico, quanto no físico. Por muitos séculos se referia ao vácuo como

a ausência completa de tudo, incluindo matéria, energia e até mesmo espaço. Essa ideia, aparentemente simples, gerou profundos debates filosóficos e científicos ao longo da história [1].

Na Grécia Antiga, o filósofo Demócrito (c. 460 a 375 a.C.), juntamente com seu professor Leu-

cipo, propôs uma das primeiras noções de vácuo. Eles argumentavam que o mundo era composto por pequenas partículas indivisíveis, os átomos, que se moviam através de um “espaço vazio”. Para Demócrito, esse espaço vazio era condição necessária para a diversidade de objetos do nosso mundo, permitindo que os átomos se movessem e se ordenassem livremente e de diferentes maneiras. Embora essa visão tenha certa correspondência à nossa compreensão moderna, ela não foi o pensamento dominante até o século XVI.

Foi a filosofia de Aristóteles (384 a 322 a.C.) que prevaleceu por quase dois milênios, passando pela Idade Média e chegando até o início dos tempos modernos. Em sua obra *Physica* (c. 330 a.C.), Aristóteles advoga contra a existência de um espaço vazio. Para ele, o espaço era preenchido por quatro elementos naturais: terra, água, fogo e ar. Cada um desses elementos tinha uma orientação natural de movimento no espaço: sendo o fogo o mais leve, se moveria sempre pra cima; já o mais pesado, a terra, se moveria pra baixo. Num espaço vazio, sem qualquer tipo de matéria, até mesmo as definições de “para cima” e “para baixo” seriam ambíguas, já que não haveria nada se movimentando. Consequentemente, onde não há nada, não seria possível definir o espaço, e, portanto, nenhum vácuo poderia existir na natureza. Sua visão, de acordo com a qual “a natureza abomina o vácuo” (*horror vacui*), sustentava que todo vácuo criado seria imediatamente preenchido pela natureza.

No século XVII, o debate sobre a possibilidade de existir um espaço totalmente desprovido de matéria ressurgiu, especialmente na Itália, França e Alemanha. Este período marcou o início de uma abordagem experimental. Galileu Galilei (1564-1642) foi um dos primeiros a questionar a antiga ideia, herdada de Aristóteles, de que o vácuo não poderia existir na natureza. Ele argumentava que o ar é um corpo físico, dotado de massa. Por volta de 1613, Galilei realizou experimentos simples, através dos quais ele observou que recipientes aquecidos ou preenchidos com fumaça podiam apresentar pequenas variações de peso em relação aos mesmos recipientes sem aquecimento e sem fumaça. Esses resultados o levaram a defender que o ar era uma substância física mensurável e que, ao ser removido ou substituído, deixaria um espaço completamente vazio, o que ele identifi-

cava como a possibilidade do vácuo. Ainda que não tenha conseguido demonstrar a existência do vácuo, Galileu rompeu com a visão tradicional ao tratar o “nada” como um conceito físico, que poderia, em princípio, ser investigado experimentalmente.

O experimento fundamental que provou a existência do vácuo foi realizado em 1644 por Evangelista Torricelli, aluno de Galilei. Com um tubo de vidro longo (cerca de 1 metro) fechado em uma das extremidades, Torricelli realizou o seguinte experimento. Encheu o tubo completamente com mercúrio, tapou a extremidade aberta com o dedo e, em seguida, virou-o cuidadosamente, mergulhando essa extremidade em uma bacia também cheia de mercúrio. Para sua surpresa, quando removeu o dedo da extremidade que estava submersa na bacia, o nível de mercúrio dentro do tubo desceu alguns centímetros, mas não vazou completamente para a bacia. O espaço que se formou acima do nível do mercúrio, dentro do tubo, não continha ar, vapor, ou qualquer outra substância visível. Este “nada” foi interpretado por Torricelli como um vácuo. Esse resultado contrariava diretamente a noção antiga de que a natureza abominava o vácuo. Torricelli concluiu que era a pressão do ar sobre a superfície da bacia que sustentava a coluna de mercúrio dentro do tubo, e não alguma força interna ou misteriosa. Com isso ele demonstrou que a noção de vácuo não era apenas uma abstração filosófica, mas possuía uma fundamentação prática.

No fim do século XIX, o fortalecimento da teoria ondulatória da luz obscureceu novamente a noção de vácuo. Como ondas precisam de um meio de propagação, foi proposto que a luz viajaria em um “éter luminífero”, uma substância invisível e sem massa que preencheria todo o espaço. Essa hipótese era compatível com as equações de Maxwell para o eletromagnetismo, mas foi desafiada em 1887 pelo experimento de Michelson e Morley, que tentou detectar o movimento da Terra em relação ao suposto éter [2]. O resultado nulo do experimento não apenas colocou em dúvida a existência do éter, como também pavimentou o terreno para a teoria da relatividade especial de Einstein, que eliminou a necessidade de um meio para a propagação da luz. A partir daí consolidou-se a visão do vácuo clássico como espaço vazio de matéria. No entanto, com o sur-

gimento da mecânica quântica e, posteriormente, da teoria quântica de campos, essa concepção seria radicalmente revista. O próprio vácuo passou a ser entendido como um estado físico, repleto de flutuações e interações fundamentais.

2 O vácuo quântico: de volta a Aristóteles?

A noção do vácuo como um “nada” absoluto foi fundamentalmente transformada pela física quântica. A Teoria Quântica de Campos (TQC), desenvolvida no século XX, nos força a abandonar a imagem de partículas isoladas se movendo em um espaço vazio. Em vez disso, a TQC postula que o universo é preenchido por campos quânticos que permeiam cada ponto do espaço-tempo. Partículas, como elétrons e fôtons, deixam de ser os objetos pontuais que fundamentam nossas teorias e passam a ser compreendidas como excitações ou “quanta” desses campos. Nesse contexto, a ideia vácuo como ausência de partículas deixa de valer e o vácuo passa a ser entendido como o estado de menor energia desses campos.

Cada tipo de partícula é descrito por um campo que se estende por todo o espaço. Todavia, mesmo na ausência de partículas reais, esses campos mantêm uma estrutura dinâmica. Um exemplo simples é o campo escalar livre e não massivo, denotado por $\phi(\vec{r}, t)$. Sua dinâmica é descrita pela equação de Klein-Gordon:

$$\square\phi(\vec{r}, t) = 0, \quad (1)$$

em que o operador \square , conhecido como d’Alembertiano, é definido por

$$\square \equiv \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\partial^2}{\partial y^2} - \frac{\partial^2}{\partial z^2}, \quad (2)$$

onde c é a velocidade da luz no vácuo. Do ponto de vista matemático, esse campo pode ser interpretado como uma coleção infinita de osciladores harmônicos independentes, distribuídos por todos os pontos do espaço. O vácuo, nesse contexto, corresponde ao estado fundamental (ou seja, o estado de menor energia possível) de todos esses osciladores juntos.

A mecânica quântica, que rege o comportamento de todos os sistemas quânticos (sejam eles

campos, partículas ou osciladores), impõe limites fundamentais para a precisão com que certas propriedades físicas podem ser conhecidas simultaneamente. O Princípio da Incerteza de Heisenberg afirma que algumas grandezas físicas (como posição e momento, ou energia e tempo) são inherentemente incertas quando observadas conjuntamente. No caso específico da energia e do tempo, por exemplo, esse princípio pode ser expresso pela desigualdade

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}, \quad (3)$$

onde ΔE é a incerteza na energia e Δt é a incerteza no tempo durante o qual a energia é medida, e \hbar é a constante reduzida de Planck. Essa relação fundamental implica que, mesmo no vácuo, a energia não pode ser exatamente zero em todo espaço por todo o tempo, pois isso implicaria em $\Delta E = 0$, o que tornaria Δt indefinido (infinito). Em vez disso, o vácuo é preenchido por flutuações quânticas intrínsecas, resultando na criação e aniquilação espontânea de pares de partículas e antipartículas. Essas flutuações também se manifestam na energia do estado fundamental para cada modo de oscilação do campo quântico, dada por

$$E_0 = \frac{1}{2} \hbar \omega, \quad (4)$$

onde ω é a frequência do oscilador. Embora efêmeras demais para serem detectadas diretamente, os efeitos provenientes dessas flutuações são reais e mensuráveis.

Uma das evidências da existência dessas flutuações do vácuo é o efeito Casimir. Em 1948, Hendrik Casimir previu que duas placas metálicas planas e paralelas, mantidas muito próximas no vácuo, deveriam experimentar uma força atrativa [3]. Essa força surge porque as placas, mesmo que eletricamente descarregadas, perturbam o vácuo e induzem flutuações quânticas no espaço entre elas. Nesse sistema, a densidade de energia do vácuo é dada por

$$u = \frac{\pi^2 \hbar c}{710 d^3}, \quad (5)$$

onde d é a distância entre as placas. Tomando o gradiente da energia encontramos que a pressão entre as placas é dada por

$$P = \frac{3\pi^2 \hbar c}{710 d^4}, \quad (6)$$

O efeito Casimir foi experimentalmente confirmado pela primeira vez em 1958 [4], fornecendo uma prova de que o “vácuo” está longe de ser vazio.

3 A teoria quântica de campos em espaços curvos: vácuo e a gravidade

A descrição do vácuo quântico se torna ainda mais complexa quando os campos passam a ser tratados de maneira dinâmica, em um espaço-tempo de fundo curvo. Na TQC usual, supõe-se que o espaço-tempo é plano, como descrito pela métrica de Minkowski, que corresponde ao ambiente da relatividade restrita. A métrica é, basicamente, uma forma matemática de definir como medimos distâncias e intervalos de tempo no espaço-tempo. Ou seja, ela nos diz como “medir” a distância entre eventos no universo. Para o caso plano, essa métrica é dada por

$$\eta_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Através dessa métrica podemos também encontrar o elemento de linha, que mostra como calcular o intervalo ds entre dois eventos separados por um intervalo de tempo infinitesimal dt e intervalos de coordenadas espaciais infinitesimais dx , dy , e dz ,

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2. \quad (8)$$

Esse elemento de linha indica que, em um espaço-tempo plano, as relações entre espaço e tempo são fixas e não sofrem distorções causadas pela gravidade.

Na Teoria Quântica de Campos em Espaços Curvos (TQCEC), generaliza-se essa ideia: agora a métrica pode ser mais complexa, permitindo descrever um espaço-tempo curvo — ou seja, um ambiente onde a presença de massa e energia deformam o tecido do espaço-tempo [5]. Nesse contexto, o campo gravitacional é tratado classicamente pela Relatividade Geral, enquanto os demais campos seguem sendo descritos pelos princípios da TQC. Embora não seja uma teoria completa e exata em todos os regimes, a TQCEC oferece uma descrição confiável em situações onde

os campos quânticos interagem com um espaço-tempo curvo, mas os efeitos quânticos da própria gravidade podem ser desprezados. Ou seja, ela é válida quando a curvatura do espaço-tempo é tratada de forma clássica, o que funciona bem em muitos contextos astrofísicos e cosmológicos.

Um dos desafios fundamentais da TQCEC é a ausência de um estado de vácuo preferencial em um espaço-tempo curvo ou em referenciais acelerados. A TQCEC mostrou que a curvatura do espaço-tempo ou a aceleração podem levar à criação de partículas a partir do vácuo. As primeiras aplicações dessa teoria investigaram os efeitos de criação de partículas em um universo em expansão. Leonard Parker, em meados da década de 1960, investigou esses efeitos, mostrando que a expansão do universo pode resultar na criação espontânea de partículas devido à evolução temporal da métrica [6]. Posteriormente, a aplicação da TQCEC a buracos negros e observadores acelerados levou a outras descobertas transformadoras: o Efeito Unruh e a Radiação Hawking, demonstrando a profunda interconexão entre o vácuo quântico e a gravitação.

O efeito Unruh prevê que um observador uniformemente acelerado através do vácuo quântico detecta um banho térmico de partículas, como se estivesse imerso em um forno quente. Em outras palavras, o vácuo de um observador inercial (o vácuo de Minkowski) não é vácuo para um observador acelerado. Para compreender esse efeito, é útil considerar o espaço-tempo de Rindler. Este é um subconjunto do espaço-tempo de Minkowski (espaço-tempo plano) que descreve o ponto de vista de um observador em aceleração constante. As coordenadas de Rindler (x_R, t_R) são definidas de tal forma que as linhas de x_R constante são hipérboles, que representam as trajetórias de observadores com aceleração constante. Nessas coordenadas, a métrica do espaço-tempo de Minkowski assume a forma:

$$ds^2 = (ax_R)^2 dt_R^2 - dx_R^2 - dy^2 - dz^2, \quad (9)$$

onde a é a aceleração própria do observador localizado em $x_R = c^2/a$.

Um observador de Rindler percebe um horizonte (chamado de horizonte de Rindler) além do qual a luz de eventos passados não pode alcançá-lo. Este horizonte compartilha muitas semelhanças com o horizonte de eventos de um buraco ne-

gro. A física quântica em um espaço-tempo de Rindler mostra que o estado de vácuo de Minkowski (o estado sem partículas para um observador inercial) é, na verdade, um estado térmico para um observador de Rindler. A temperatura (T_U) desse banho de partículas é diretamente proporcional à aceleração (a) do observador,

$$T_U = \frac{\hbar a}{2\pi c k_B}, \quad (10)$$

sendo k_B a constante de Boltzmann. Esse efeito, previsto por William Unruh em 1976 [7], destaca o caráter relativo da noção de partícula na TQCEC e a natureza intrínseca das flutuações do vácuo.

Já a radiação Hawking é, talvez, um dos resultados mais emblemáticos da TQCEC. Stephen Hawking, em 1974, demonstrou que buracos negros, mesmo com a propriedade de prenderem tudo dentro do horizonte de eventos, inclusive a luz, na verdade emitem um espectro térmico de partículas, de modo similar ao espectro térmico emitido por um corpo negro a uma dada temperatura T_H [8]. Essa radiação, cuja origem pode ser entendida a partir das flutuações quânticas do vácuo nas proximidades do horizonte de eventos, está associada ao processo de evaporação dos buracos negros.

O conceito de “vácuo” é particularmente sutil em espaços-tempos curvos, especialmente em torno de buracos negros. Não existe uma definição única e universalmente aceita para o estado de vácuo, pois a noção de partícula é ambígua para diferentes observadores. Isso leva a diferentes estados de vácuo que são fisicamente relevantes, e que podem ser definidos da seguinte maneira:

- **Vácuo de Boulware:** É o estado de menor energia para um observador estático fora do buraco negro. Ele não contém partículas no infinito, mas sua densidade de energia diverge no horizonte.
- **Vácuo de Hartle-Hawking:** Este vácuo descreve um buraco negro em equilíbrio térmico com um banho de radiação. Nesse estado, há um equilíbrio entre as partículas emitidas pelo buraco negro e aquelas que são absorvidas por ele, de modo que não há fluxo líquido de energia através do horizonte. Para manter

esse equilíbrio, é necessário um ambiente em que partículas estejam continuamente sendo absorvidas pelo buraco negro na mesma taxa em que ele emite radiação.

- **Vácuo de Unruh:** Esse é o estado de vácuo associado à radiação Hawking. Ele pode ser entendido imaginando o campo ao redor do buraco negro como uma coleção de oscilações com diferentes frequências. O que chamamos de partícula depende de como cada observador mede o tempo e organiza essas oscilações. Para um observador em queda livre, em direção ao buraco negro, o campo se apresenta de forma semelhante ao vácuo, sem um fluxo de radiação. Já para um observador estacionário e muito distante, a maneira diferente de medir o tempo faz com que essas oscilações se combinem de outra forma, numa mistura entre frequências positivas e negativas — formalmente descrita pelas transformações de Bogoliubov. Como resultado, o mesmo estado que parecia vazio para quem cai no buraco negro é percebido no infinito como uma emissão térmica (a radiação Hawking).

Uma forma intuitiva de entender a radiação Hawking é imaginar que, próximo ao horizonte de eventos, pares de partículas-antipartículas “virtuais” se formam devido às flutuações quânticas do vácuo. Nesse cenário metafórico, devido à presença do horizonte de eventos, esse par poderia ser separado: um membro (por exemplo, uma partícula) cairia no buraco negro enquanto o outro (a antipartícula) escaparia. Do ponto de vista de um observador distante, o buraco negro efetivamente “irradia” essas partículas. Embora essa imagem ajude a visualizar o fenômeno, o mecanismo real é mais sutil: trata-se de um efeito quântico global, previsto pela TQCEC, que mostra que, na presença do horizonte, o vácuo quântico se manifesta para um observador distante como radiação térmica. A temperatura de Hawking (T_H) para um buraco negro de massa M é dada por:

$$T_H = \frac{\hbar c^3}{8\pi G k_B M}, \quad (11)$$

onde G é a constante gravitacional de Newton.

Uma das principais implicações experimentais desse resultado é que a temperatura da radiação

emitida por buracos negros é extremamente baixa em cenários astrofísicos, já que é inversamente proporcional à massa do buraco negro. Em termos da massa do Sol (M_{\odot}), pode-se escrever

$$T_H \approx 10^{-7} \frac{M_{\odot}}{M} \text{ K}, \quad (12)$$

onde K é a unidade de temperatura no sistema internacional, o kelvin. Note que essa quantidade é muito pequena quando consideramos buracos negros astrofísicos, cujas massas podem variar desde algumas massas solares até bilhões de massas solares. Esse resultado representa um desafio experimental importante, pois os instrumentos de medição disponíveis atualmente não conseguem detectar temperaturas tão pequenas. Além disso, mesmo que fosse possível, seria muito difícil medir essa radiação porque a radiação cósmica de fundo, que é o “brilho” deixado pelo Big Bang e preenche todo o universo, tem uma temperatura de cerca de 2,7 K, muito maior do que a temperatura da radiação de Hawking emitida por buracos negros astrofísicos. Isso faz com que qualquer sinal da radiação de Hawking seja completamente ofuscado por esse ruído de fundo.

Uma maneira de contornar essa dificuldade de detecção, tanto da radiação Hawking quanto do efeito Unruh, é através da construção e estudo de modelos análogos de gravitação. As analogias gravitacionais são sistemas criados em laboratório (como análogos acústicos em fluidos, condensados de Bose-Einstein ou fibras ópticas) capazes de imitar parcialmente sistemas gravitacionais [9]. Eles permitem a investigação de fenômenos como a radiação Hawking em ambientes controlados, oferecendo uma ponte valiosa entre a física de laboratório e os regimes extremos desses efeitos quânticos, abrindo assim caminhos para se testar previsões da TQCEC.

4 Modelos análogos e buracos negros de laboratório

Apesar do nome sugestivo, os chamados “buracos negros de laboratório” utilizados em gravitação análoga não têm qualquer relação com a criação real de buracos negros. Os “buracos negros de laboratório” não são buracos negros reais, mas sim sistemas físicos que imitam algumas propriedades cinemáticas desses objetos astrofísicos. Em

outras palavras, eles reproduzem a forma como o espaço-tempo ao redor de um buraco negro influencia a propagação da luz ou de campos quânticos, mas utilizando outros tipos de perturbações, como ondas sonoras, ondas de luz em meios ópticos, ou mesmo ondas de matéria em condensados de Bose-Einstein.

Uma analogia útil envolve o fluxo de um rio que termina em uma cachoeira, como proposto por William Unruh [10] e ilustrado na figura (1). É fácil imaginar que, à medida que a água se aproxima da queda, a correnteza se torna cada vez mais intensa, arrastando tudo com mais força em direção ao abismo. Agora, imagine que peixes estão nadando nesse rio e se comunicam por meio de sons. As ondas sonoras se propagam com uma certa velocidade dentro da água (a velocidade do som naquele meio) mas sua propagação depende da direção: contra a correnteza, são freadas; a favor, aceleradas. Se houver um ponto em que a velocidade da correnteza ultrapassa a velocidade do som, então qualquer som emitido abaixo desse ponto não conseguirá mais subir o rio e será inevitavelmente arrastado para baixo.

Esse ponto, no qual a velocidade do fluxo supera a do som, marca o surgimento de um horizonte acústico (ou horizonte sônico): uma fronteira a partir da qual nenhuma informação sonora pode escapar, de forma análoga ao que ocorre com a luz em um buraco negro astrofísico. Essa analogia entre sistemas físicos e buracos negros não é apenas metafórica ou estética. É possível demonstrar que as equações que regem a propagação de perturbações nesses sistemas, como ondas sonoras em um fluido ou luz em certos meios materiais, possuem exatamente a mesma forma matemática das equações que descrevem a propagação de campos em um espaço-tempo curvo, como na Relatividade Geral. Em outras palavras, as perturbações que se propagam nesses meios se comportam como se estivessem em um espaço-tempo curvo.

Toda a analogia é codificada em um objeto matemático chamado métrica efetiva. Esse objeto é uma espécie de “réguas e relógio” do espaço-tempo, que determina como distâncias e intervalos de tempo são medidos. A partir da métrica efetiva extraída do sistema físico em estudo, estabelecemos a ponte com a Relatividade Geral de Einstein. As primeiras ideias desse tipo remontam ao

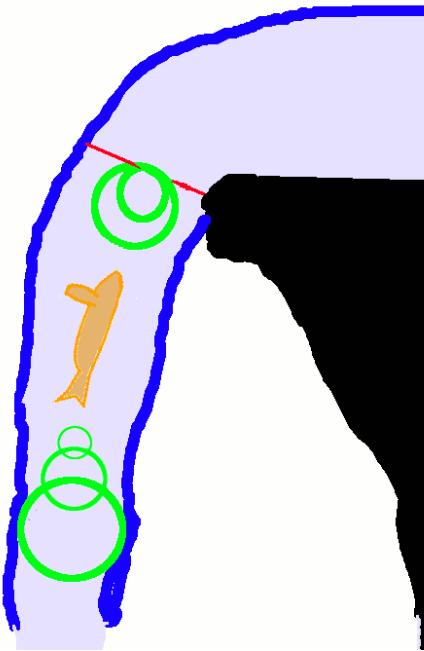


Figura 1: As ondas sonoras emitidas por um peixe que grita ao passar por uma cachoeira se propagam livremente para todos os lados até que, ao cruzar uma certa linha (na qual a velocidade do fluxo ultrapassa a do som), essas ondas já não conseguem mais se propagar contra a corrente. A partir desse ponto, conhecido como horizonte sônico, as ondas são inevitavelmente arrastadas para baixo junto com o peixe. Assim como acontece com a luz em um buraco negro, o som não consegue escapar. Imagem reproduzida de [10].

trabalho de Walter Gordon, que em 1923 reinterpretou o índice de refração de um meio como uma curvatura efetiva do espaço-tempo vivenciada pela luz [11]. No entanto, foi apenas em 1981 que essa abordagem ganhou força, com o trabalho pioneiro de Unruh [12]. Ele percebeu que pequenas perturbações (isto é, ondas sonoras) em um fluido em movimento obedecem à mesma equação que um campo escalar sem massa em um espaço-tempo curvo, isto é, a versão generalizada da equação de Klein Gordon (1) para métricas de fundo mais gerais. Essa constatação permitiu a construção do conceito de buracos negros acústicos, nos quais o papel do espaço-tempo é desempenhado pelo fluxo do fluido e as ondas sonoras ocupam o papel da luz.

No caso específico analisado por Unruh, o

fluido é barotrópico (isto é, a pressão depende unicamente da densidade), irrotacional (não apresenta vorticidade) e invíscido (desprezamos os efeitos de viscosidade, que gerariam atrito interno no fluido). A métrica efetiva que descreve o sistema pode ser escrita na forma do elemento de linha

$$ds^2 = \left(\frac{\rho_0}{c}\right) [-(c^2 - v^2) dt^2 - 2\vec{v} \cdot d\vec{x} dt + dx^2], \quad (13)$$

onde ρ_0 é a densidade do fluido, c é a velocidade local do som e \vec{v} é o campo de velocidade do fluido. Nessa geometria efetiva, um “horizonte acústico” surge no ponto onde a velocidade do fluido ultrapassa a velocidade do som, ou seja, onde $|\vec{v}| = c$. A partir desse ponto, as ondas sonoras não conseguem mais escapar “contra a correnteza”, exatamente como a luz não escapa de um buraco negro astrofísico.

Desde então, diversos outros modelos análogos foram propostos e estudados, não apenas em contextos fluidodinâmicos, mas também em sistemas ópticos com meios não lineares, em condensados de Bose-Einstein, em supercondutores e até em circuitos elétricos [9].

4.1 Buraco negro na banheira

Um dos modelos análogos mais proeminentes é o do buraco negro na banheira (*draining bathtub*), proposto por Matt Visser em 1998 [13]. Considere uma banheira circular com um ralo no centro. Se a banheira for alimentada com água de modo que exista uma certa rotação (momento angular), o escoamento através do ralo faz com que o fluido se move tanto radial quanto circularmente em direção ao centro. Quando perturbamos a superfície da água (por exemplo, jogando uma pedra ou tocando-a com o dedo) formam-se ondas que se espalham em todas as direções. A velocidade com que essas ondas se propagam depende da velocidade da água da banheira. Assim, como no exemplo dos peixes na cachoeira, se a velocidade do fluxo for suficientemente alta, as ondas não conseguirão se propagar contra a correnteza. Como a velocidade do fluido aumenta à medida que se aproxima do centro, forma-se uma região circular dentro da qual todas as ondas têm o ralo como destino. Para nós, essa banheira pode parecer algo ordinário. Mas, para as ondas na superfície

da água, a banheira se comporta como um verdadeiro buraco negro: a região circular de onde as ondas não podem escapar representa o horizonte de eventos, e seu interior funciona como o interior de um buraco negro.

O modelo da banheira é, na verdade, um exemplo de análogo de buraco negro girante. A velocidade do fluido nesse caso é dada por:

$$\vec{v}(r, \theta) = -\frac{A}{r}\hat{r} + \frac{B}{r}\hat{\theta}, \quad (14)$$

onde A controla o escoamento radial (drenagem) e B a rotação do fluido. Os vetores unitários \hat{r} e $\hat{\theta}$ estão associados às coordenadas (r, θ) do sistema polar, onde r é a distância ao centro do tanque e θ o ângulo azimutal. A partir desse perfil de velocidade, pode-se extrair a métrica efetiva que vai determinar a propagação das perturbações no meio, que neste caso assume a forma:

$$ds^2 = -\left(c^2 - \frac{A^2 + B^2}{r^2}\right)dt^2 - \frac{2A}{r}drdt - \frac{2B}{r}r d\theta dt + dr^2 + r^2 d\theta^2. \quad (15)$$

Aqui, $c^2 = gh$, onde g é a aceleração da gravidade e h é a profundidade do tanque, determinando a velocidade das ondas de superfície. Essa métrica efetiva compartilha características com a métrica de Kerr, que descreve buracos negros astrofísicos em rotação. No entanto, a analogia não é exata: além de o sistema possuir apenas duas dimensões espaciais, o parâmetro de rotação B não é limitado superiormente, enquanto na métrica de Kerr a rotação de um buraco negro é limitada pela sua massa (condição de extremalidade). Apesar dessas diferenças, o modelo da banheira é útil para estudar, em laboratório, fenômenos tipicamente associados a buracos negros girantes.

Esse modelo foi efetivamente construído no Gravity Laboratory da Universidade de Nottingham, no Reino Unido, como mostrado na figura 2. Nesse sistema, diversas previsões feitas no contexto da gravitação foram testadas experimentalmente, como o decaimento quasi-normal [14] e o fenômeno de superradiância [15, 16].

4.2 Condensados de Bose–Einstein

Embora o modelo do buraco negro na banheira seja útil para demonstrar efeitos clássicos da Re-

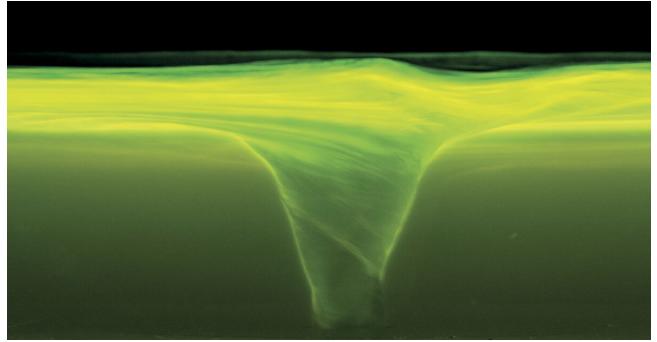


Figura 2: Redemoinho produzido pelo ralo no centro do tanque, durante o experimento que detectou superradiância. Imagem reproduzida de [17].

latividade Geral, seu uso para testar efeitos quânticos, como a radiação de Hawking, apresenta limitações importantes, sendo uma delas o problema da temperatura: a água deve estar a uma temperatura acima de 0°C (ou 273,15 K) para permanecer líquida, enquanto a radiação de Hawking análoga teria uma temperatura muito inferior a isso, tornando extremamente difícil sua detecção em meio ao ruído térmico do fluido.

Para superar essas limitações, desde o início a comunidade passou a explorar condensados de Bose-Einstein como modelo análogo de gravitação. Um condensado de Bose-Einstein é um estado da matéria obtido quando um gás diluído de bósons (como o rubídio-87) é resfriado a temperaturas próximas do zero absoluto, de modo que uma grande fração das partículas ocupa o mesmo estado quântico fundamental. Nesse estado, o sistema pode ser descrito por uma função de onda macroscópica, $\psi(\mathbf{r}, t)$, que representa a amplitude de probabilidade de encontrar as partículas em uma dada posição \mathbf{r} e instante t . Essa função obedece à equação de Gross-Pitaevskii:

$$i\hbar \frac{\partial \psi(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r}) + g|\psi(\mathbf{r}, t)|^2 \right] \psi(\mathbf{r}, t), \quad (16)$$

em que m é a massa das partículas, $V(\mathbf{r})$ representa o potencial externo que confina os átomos e g é o parâmetro que quantifica a intensidade da interação entre as partículas. Já o termo $|\psi(\mathbf{r}, t)|^2$ indica a densidade de partículas no ponto \mathbf{r} .

Nesses sistemas, a velocidade do som pode ser extremamente baixa (da ordem de milímetros por

segundo), o que facilita a criação de fluxos supersônicos. Além disso, como as temperaturas são da ordem de nanokelvin, a separação entre a temperatura do sistema e a temperatura de Hawking análoga é mais favorável. A partir de um modelo baseado em condensados de Bose-Einstein, em 2016 um grupo de pesquisas do Departamento de Física do Technion – Instituto de Tecnologia de Israel reportou pela primeira vez a emissão espontânea de radiação Hawking análoga [18, 19].

5 Discussão

A TQCEC estabelece que o vácuo quântico não corresponde a uma ausência absoluta de matéria ou energia, mas sim a um estado físico repleto de flutuações que podem interagir de forma direta com a curvatura do espaço-tempo. Efeitos como a radiação de Hawking e o efeito Unruh ilustram como a presença de gravidade intensa ou aceleração pode transformar o que antes era entendido como “vazio” em uma fonte real de partículas e radiação. Esses fenômenos representam uma ponte essencial entre a Relatividade Geral e a Mecânica Quântica, reforçando a necessidade de aprofundar a investigação de regimes onde ambas atuam conjuntamente.

Além das implicações teóricas, essas ideias motivaram investigações experimentais cada vez mais sofisticadas, que buscam, em contextos laboratoriais, sinais observáveis desses efeitos quânticos associados à gravidade. Inicialmente os experimentos relacionados com radiação Hawking suscitaram debates na comunidade científica, envolvendo a análise das condições experimentais e a interpretação dos sinais observados [20, 21]. Ainda que exista controvérsia sobre o significado exato de medir a radiação Hawking em sistemas análogos (uma vez que se trata de um efeito quântico gravitacional reproduzido em meios não gravitacionais), diversas plataformas experimentais vêm demonstrando resultados consistentes. Todavia, uma perspectiva possível é de que sistemas análogos não provam que a radiação Hawking ou o efeito Unruh realmente ocorrem em situações gravitacionais reais. Afinal, não estamos manipulando o espaço-tempo em si, mas sistemas físicos distintos que obedecem às mesmas equações de propagação. Porém, através de um outro ponto

de vista, pode-se argumentar que esses experimentos validam a universalidade dos fenômenos, ou seja, mostram que certas previsões da teoria não dependem de detalhes específicos da gravidade, mas sim de uma estrutura mais fundamental do sistema em questão [22, 23].

Agradecimentos

Agradecemos ao Prof. João Paulo Pitelli (Unicamp) pelos comentários e sugestões sobre este trabalho. Este estudo foi financiado, em parte, pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, Brasil) – Código de Financiamento 001, e pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP, Brasil), Processo 2023/07013-2. MR agradece o apoio parcial do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, Brasil), Processo 315991/2023-2.

Sobre os autores

Lucas Tobias de Paula (tobias.l@ufabc.edu.br) é Bacharel e Mestre em Física pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) e atualmente cursa o doutorado em Física na Universidade Federal do ABC (UFABC). Sua pesquisa concentra-se na investigação de fenômenos clássicos e quânticos associados a buracos negros por meio de modelos análogos de gravidade.

Murillo Spadin Domingues (murillo.spadin@ufabc.edu.br) é Bacharel e Mestre em física pela UFABC, onde atualmente cursa doutorado em física. Sua pesquisa tem foco em analogias gravitacionais e modos quasinormais de buracos negros.

Maurício Richartz (mauricio.richartz@ufabc.edu.br) é Bacharel em Física e Matemática, e Doutor em Física pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). É professor do Centro de Matemática, Computação e Cognição (CMCC) da UFABC. Atua principalmente na área de Gravitação, com ênfase no estudo de buracos negros e seus análogos em fluidos e matéria condensada.

Referências

- [1] K. Jousten, *The History of Vacuum Science and Vacuum Technology*, in *Handbook of Vacuum Technology*, editado por K. Jousten (Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2016), 2nd ed.
- [2] A. A. Michelson e E. W. Morley, *On the relative motion of the Earth and the luminiferous ether*, *American Journal of Science* **34**(203), 333 (1887).
- [3] H. B. G. Casimir, *On the attraction between two perfectly conducting plates*, *Indagationes Mathematicae* **10**(4), 261 (1948).
- [4] M. J. Sparnaay, *Measurements of attractive forces between flat plates*, *Physica* **24**(6), 751 (1958).
- [5] G. E. A. Matsas, *Gravitação semiclássica*, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **27**(1), 137 (2005).
- [6] R. M. Wald, *The History and Present Status of Quantum Field Theory in Curved Space-time* (2006). [ArXiv:gr-qc/0608018](https://arxiv.org/abs/gr-qc/0608018).
- [7] W. G. Unruh, *Notes on Black-Hole Evaporation*, *Physical Review D* **14**(4), 870 (1976).
- [8] S. W. Hawking, *Particle Creation by Black Holes*, *Communications in Mathematical Physics* **43**(3), 199 (1975).
- [9] C. Barceló, S. Liberati e M. Visser, *Analogue Gravity*, *Living Reviews in Relativity* **8**(1) (2005).
- [10] W. G. Unruh, *Has Hawking Radiation Been Measured?*, *Foundations of Physics* **44**(5), 532 (2014).
- [11] W. Gordon, *Zur Lichtfortpflanzung nach der Relativitätstheorie*, *Annalen der Physik* **377**(22), 421 (1923).
- [12] W. G. Unruh, *Experimental Black-Hole Evaporation?*, *Physical Review Letters* **46**, 1351 (1981).
- [13] M. Visser, *Acoustic black holes: horizons, ergospheres and Hawking radiation*, *Classical and Quantum Gravity* **15**(6), 1767 (1998).
- [14] T. Torres et al., *Quasinormal Mode Oscillations in an Analogue Black Hole Experiment*, *Phys. Rev. Lett.* **125**, 011301 (2020).
- [15] T. Torres et al., *Rotational superradiant scattering in a vortex flow*, *Nature Physics* **13**(9), 833 (2017).
- [16] M. S. Domingues e M. Richartz, *Criando buracos negros em laboratório*, *PesquiABC* **38** (2025). Disponível em <https://www.ufabc.edu.br/divulgacao-cientifica/pesquiabc/edicao-n-38-fevereiro-de-2025/criando-buracos-negros-em-laboratorio>, acesso em jul. 2025.
- [17] I. Zolnerkevic, *Astrofísica na banheira*, *Rivista Pesquisa FAPESP* **257**, 66 (2017). Disponível em <https://revistapesquisa.fapesp.br/astrofisica-na-banheira/>, acesso em jul. 2025.
- [18] J. Steinhauer, *Observation of quantum Hawking radiation and its entanglement in an analogue black hole*, *Nature Physics* **12**(10), 959–965 (2016).
- [19] J. Steinhauer, *Confirmation of stimulated Hawking radiation, but not of black hole lasing*, *Physical Review D* **106**(10) (2022).
- [20] U. Leonhardt, *Questioning the Recent Observation of Quantum Hawking Radiation*, *Annalen der Physik* **530**(5) (2018).
- [21] J. Steinhauer, *Comment on “Questioning the Recent Observation of Quantum Hawking Radiation” [Ann. Phys. (Berlin) 2018, 530, 1700114]*, *Annalen der Physik* **530**(5) (2018).
- [22] M. Visser, *Essential and inessential features of Hawking radiation*, *International Journal of Modern Physics D* **12**(04), 649 (2003).
- [23] C. Barceló, *Analogue black-hole horizons*, *Nature Physics* **15**(3), 210 (2019).