

# Buracos negros: mais de 100 anos de história

Carla Rodrigues Almeida

*Institute for Advanced Studies in Humanities, Essen, Alemanha*

---

## Resumo

A existência de buracos negros é uma das consequências mais contraintuitivas da teoria da relatividade geral de Einstein. A descoberta destes enigmáticos objetos não aconteceu em uma data específica, nem por uma pessoa em particular. O desenvolvimento teórico do conceito moderno de buracos negros se estende por um período de mais de cem anos de estudos, marcado por controvérsias e avanços impressionantes, que se inicia com o nascimento da relatividade geral em 1915 e com marcos recentes, sendo o último o reconhecimento do comitê do Prêmio Nobel de Física em 2020. Este artigo sumariza essa história, apontando os principais eventos e pincelando o contexto de cada conquista. Esta é uma prévia de um livro em andamento da autora.

## Abstract

The existence of black holes is the most counter-intuitive consequence of the theory of general relativity. The theoretical discovery of those mysterious objects did not happen in a specific date, nor by a specific person. The development of the modern concept of black holes spans over a time frame of a hundred years and it was peppered with controversies and impressive breakthroughs. This history starts with the birth of general relativity in 1915 and it has recent achievements, the last one being the recognition of the Nobel Prize Committee in 2020. This paper summarizes this history, pointing to its main events and skimming through the context of each accomplishment. This is a preview of a book in progress by the author.

---

**Palavras-chave:** buracos negros, história da ciência, astrofísica, relatividade geral

**Keywords:** black holes, history of science, astrophysics, general relativity

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v2n1.33499](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v2n1.33499)

## 1 Introdução

Buracos negros são um marco da física do Século XX. Poucas outras previsões teóricas capturaram o imaginário das pessoas tanto quanto a ideia de que existem obscuros objetos no universo que aprisionam tudo aquilo que entra em seu domínio. Nos últimos cem anos, a ciência em si passou por uma transformação significativa, impulsionando um progresso tecnológico nunca antes visto na história da humanidade. O estudo dos buracos negros acompanha essa evolução de forma íntima e as recentes conquistas na área — como a detecção das ondas gravitacionais pela equipe do LIGO,<sup>1</sup> a publicação da imagem obtida pelo time do Telescópio *Event Horizon* em março de 2019 e o Prêmio Nobel de 2020, cujo laureados foram centrais para o avanço teórico e

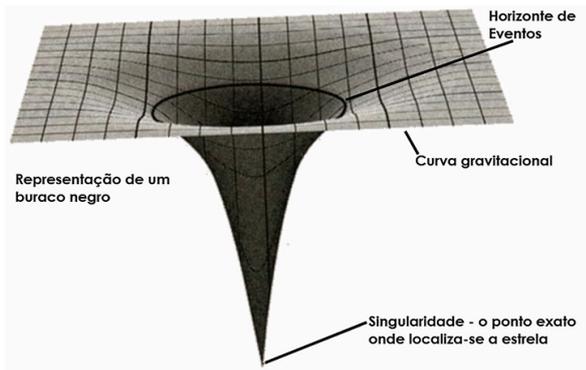
observacional desta teoria — nos mostram que este continua a ser um tema cientificamente relevante e popularmente intrigante.

Para acompanhar essa história, é preciso antes entender o que é um buraco negro.

O físico alemão Albert Einstein propôs, no começo do século passado, duas hipóteses que revolucionaram a física. A primeira, formulada em 1905 e posteriormente batizada de *relatividade restrita*, diz que o tempo é relativo, ou seja, observadores diferentes percebem o passar do tempo de forma diferente. A segunda, proposta em 1915, se refere à natureza do Cosmo. O nosso Universo é descrito por um tecido quadridimensional chamado *espaço-tempo*. Ele é formado pelas três dimensões espaciais que percebemos no nosso cotidiano: largura, altura, profundidade; em conjunto com o tempo. Einstein conjecturou que a matéria curva o espaço-tempo, alterando a trajetória de objetos que passam próximo a corpos

---

<sup>1</sup>Sigla em inglês para Observatório de Ondas Gravitacionais por Interferômetro Laser.



**Figura 1:** Estrutura básica de um buraco negro em sua representação topológica, apresentando a distorção do espaço-tempo. Crédito: Gaturamo Observatório Astronômico (GOA - UFES).

massivos. Essa foi a interpretação dele do que é a gravidade e essa teoria foi batizada de *relatividade geral* (RG). Matematicamente, a RG é descrita por um conjunto de equações, apropriadamente denominadas *Equações de Einstein*.

Segundo a relatividade geral, a formação de buraco negro é mais do que possível, é comum. A RG prevê a existência destes objetos super densos que distorcem drasticamente o espaço-tempo, criando um campo gravitacional tão forte que aprisiona tudo que está em seu interior, inclusive a luz. Por causa dessa curvatura extrema, eles são chamados de *buracos*. Porque não emitem luz, eles são *negros*. A vizinhança da qual nada consegue escapar é delimitada por uma membrana fictícia a qual chamamos de *horizonte de eventos*. Ela esconde uma *singularidade* em seu interior, ou seja, ponto de densidade infinita, um furo no tecido do espaço-tempo (Figura 1). Cálculos indicam que, eventualmente, toda matéria que entra no buraco negro acaba eventualmente “caindo” nesta singularidade.

A história da descoberta dos buracos negros pode ser dividida em quatro fases distintas, mas que se sobrepõem na linha do tempo. Cada uma destas fases é caracterizada pelo status da ideia por trás dos buracos negros e, conseqüentemente, pelos questionamentos científicos que marcaram cada período. Esta jornada se inicia em 1916, quando a primeira solução das Equações de Einstein foi obtida. A princípio, a existência de tais objetos foi considerada absurda. Demorou décadas até que a ideia fosse levada a sério, ainda mais alguns anos até que fosse aceita pela comunidade científica em geral e mais quarenta anos até a captura da imagem de um buraco negro.

Neste trabalho, vamos expor cada uma destas fases, levando em consideração o cenário filosófico, político e sociológico da ciência, com o entendimento de que a relação entre pesquisa e o contexto ao qual ela está inserida não é causal, mas que este último deve ser tomado como condição de contorno para os avanços científicos.

Este artigo engloba e expande [1] e [2]. É um trabalho original que retrata a história a partir de artigos de pesquisas, relatos pessoais e outros documentos históricos, apresentando uma análise geral dos acontecimentos. Este artigo se divide de acordo com as fases mencionadas anteriormente. Cada seção apresenta a evolução histórica dos estudos dos buracos negros, assim como a exposição do contexto de cada época, as características de cada fase e o gatilho para a mudança de paradigma que levou ao próximo período.

## 2 Fase I: Negação

### 2.1 A Pré-história dos Buracos Negros

Apenas com a relatividade geral é possível explicar teoricamente a existência dos buracos negros, mas isso não quer dizer que objetos similares não tenham sido considerados no passado. No final Século XVIII, o filósofo natural inglês John Michell sugeriu a existência de *estrelas negras*, um precursor do conceito de buracos negros [3]. Sabendo que a luz tem uma velocidade finita  $c$ , ele calculou, usando a mecânica newtoniana, qual seria a massa limite que uma estrela deveria ter para que a *velocidade de escape* dela, ou seja, a velocidade necessária para fugir de seu campo gravitacional, fosse maior do que  $c$ . Numa estrela com massa maior do que este limite, a luz ficaria aprisionada em sua atmosfera, justificando o seu nome.

O filósofo natural francês Pierre-Simon Laplace chegou à mesma conclusão alguns anos após Michell [4] e sugeriu que as estrelas negras seriam mais comuns do que o esperado. Naturalmente, ambos usaram a física newtoniana para seus cálculos, o que exige duas condições para que eles fossem válidos: que a luz fosse corpuscular e que tivesse massa. Em 1801, porém, o médico e matemático britânico Thomas Young descobriu a natureza ondulatória da luz [5], o que fez com que os cálculos que previam a existência de estrelas negras se tornassem obsoletos e, então, a ideia

caiu por terra.

Foi apenas com o nascimento da relatividade geral em 1915 que conseguiu-se explicar como a gravidade afeta ondas e, portanto, como afeta a luz. No ano seguinte, o físico alemão Karl Schwarzschild descobriu a primeira solução das Equações de Einstein [6, 7]. A *Solução de Schwarzschild* descreve o campo gravitacional de uma partícula pontual de massa  $M$ , ou *Massenpunktes*, em alemão. Esta apresentava uma região problemática ao redor da partícula, a uma distância  $r = 2MG$ , onde  $G$  é a constante gravitacional. Este ficou conhecido como *Raio de Schwarzschild* e ele parecia delimitar uma região inalcançável para quem está no exterior da esfera. Na época, acreditava-se que um observador numa trajetória radial indo em direção a tal objeto demoraria um tempo infinito para cruzar este raio. E também, algo que estivesse dentro desta esfera nunca conseguiria sair. Interessante notar que o raio de Schwarzschild coincide com o maior raio que uma estrela deveria ter para se tornar negra de acordo com a teoria newtoniana.

Logo depois, uma solução para uma massa pontual carregada foi encontrada. Esta ficou conhecida como *Solução de Reissner-Nordström*, em homenagem a duas das quatro pessoas que a encontraram de forma independente: H. Reissner em 1916 [8], H. Weyl em 1917 [9], G. Nordström em 1918 [10] e G.B. Jeffery em 1921 [11]. Em 1923, G.D. Birkhoff provou que o campo gravitacional de todo corpo esfericamente simétrico é descrito pela Solução de Schwarzschild [12], ou seja, não apenas os de partículas sem dimensão, mas também os de estrelas pulsando, por exemplo. Segue o análogo para um corpo esférico carregado e a Solução de Reissner-Nordström.

Foi então que surgiu a pergunta: o que aconteceria se houvesse uma estrela com o raio menor do que o raio de Schwarzschild? Isso implicaria numa densidade enorme, muito maior do que qualquer outra observada até aquele momento. Na época, os objetos mais densos conhecidos eram as *anãs brancas* e a densidade estimada delas já era motivo de descrença. A título de comparação, a água tem densidade de  $997 \text{ kg/m}^3$ , uma anã branca do tamanho da Terra tem densidade de  $10^9 \text{ kg/m}^3$ . Já uma estrela comprimida além do raio de Schwarzschild deveria ter densidade maior do que  $2 \times 10^{19} \text{ kg/m}^3$ , ou seja, mais de 10 bilhões de vezes mais denso do que o objeto

mais denso conhecido na época.

## 2.2 As Primeiras Evidências Teóricas

Na década de 1930, alguns avanços teóricos começavam a apontar para a existência de estrelas colapsadas, isto é, que cedem sob seu próprio peso e contraem-se além do raio de Schwarzschild devido a sua força gravitacional. Foi também nessa década que estes corpos receberam o nome de *objetos colapsados pela gravidade*.<sup>2</sup> O cosmólogo belga Georges Lemaître descobriu que o raio de Schwarzschild não era intransponível [13]. Se calculado no tempo próprio do objeto indo em direção ao centro de massa, ao invés do tempo cosmológico de um observador externo, é sim possível ultrapassar tal raio em tempo finito.

O resultado de Lemaître se refere a uma partícula colidindo com um estrela que tenha um raio menor que o de Schwarzschild. Restava saber se realmente existira tal estrela. O astrônomo e astrofísico britânico Arthur S. Eddington achava que não. Ele foi um dos primeiros a propor um modelo mais elaborado para descrever o interior de uma estrela [14]. No modelo de Eddington, estrelas poderiam ser descritas por um fluido perfeito, que apresentavam uma pressão interna de cunho elétrico, térmico e químico. Essa pressão, de acordo com Eddington, contrabalançaria a pressão da gravidade e manteria a estrela em equilíbrio com um raio sempre maior do que o de Schwarzschild [15, p. 321].

O modelo estelar de Eddington começou a ser questionado na década de 1930, com o advento de técnicas estatísticas para estudar a constituição das estrelas [16]. Usando relatividade restrita ao invés da RG, o físico indiano Subrahmanyan Chandrasekhar, então doutorando em Cambridge, Inglaterra, e o físico soviético Lev Landau descobriram que havia uma densidade máxima para anãs brancas e estrelas de nêutron, respectivamente [17, 18].<sup>3</sup> Isso implicaria que estrelas supermassivas colapsariam sob a influência do próprio campo gravitacional, porém nenhum dos dois sugeriu essa conclusão. Enquanto Chandrasekhar preferiu se abster de comentar sobre os

<sup>2</sup>Tradução do inglês *gravitationally collapsed objects*. Historicamente, não há um termo equivalente em português, por isso escolhi usar a tradução literal.

<sup>3</sup>Curiosamente, o resultado de Landau precede em um ano à descoberta do nêutron. Essa conexão foi feita *a posteriori*.

destinos das estrelas com massas maiores ao limite encontrado por ele, Landau postulou que as conhecidas leis da física não valeriam mais em tais casos, argumentando que estrelas não demonstravam essa “tendência ridícula” de se contraírem até um ponto.

Em 1934, do outro lado do Atlântico, o químico e cosmólogo Richard Tolman escreveu um importante tratado descrevendo a termodinâmica usando relatividade geral [19], o que influenciou seu amigo, o físico John Robert Oppenheimer, a revisitar o resultado de Landau usando essa descrição da termodinâmica. Ele escreveu três artigos com colaboradores que mudaram a compreensão do fenômeno. Com Robert Serber, Oppenheimer publicou em 1938 uma comunicação com uma correção aos cálculos de Landau [20]. No mesmo ano, com G.M. Volkoff, ele expandiu esses cálculos, encontrando as condições para a estabilidade de estrelas de nêutron [21]. Com Hartland Snyder, ele concluiu que estrelas supermassivas, com massas superiores as das estrelas de nêutron, se contrairiam indefinidamente e em tempo finito até um ponto, prevendo a existência de *objetos completamente colapsados pela gravidade* [22].

### 2.3 A Hipótese do Equilíbrio

No primeiro terço do século XX, a *mecânica quântica* (MQ) — a teoria que descreve o mundo das partículas subatômicas — estava se desenvolvendo muito mais rápida e com mais credibilidade do que a relatividade geral. Apesar de muito mais contraintuitiva, a teoria quântica era bem mais fácil de se verificar do que a RG, cujos testes eram escassos e impraticáveis com a tecnologia da época. Sem evidências observacionais e argumentando que as forças nucleares contrabalançariam a força gravitacional, concluiu-se que as estrelas permaneceriam em equilíbrio hidrodinâmico, nunca colapsando. Este postulado implícito tinha um forte cunho filosófico e fazia sentido dentro da teoria conhecida na época [1].

Entre os anos de 1916 e 1930, havia bons motivos para acreditar que corpos colapsados não existiam. Além da falta de evidências observacionais, também havia muitas incertezas teóricas sobre a hipótese do colapso gravitacional. Como vimos, o Raio de Schwarzschild era uma barreira intransponível e a possibilidade que reações nucleares mantivessem a estrela em equilíbrio, de forma a evitar o colapso, era plausível. Além disso, a pró-

pria relatividade geral estava em sua infância e sua validade ainda era questionada. A RG era matematicamente desafiadora e a sua comprovação observacional ainda era rasa [23].

Porém, mesmo após os mal-entendidos da teoria se dissolverem e a possibilidade do colapso gravitacional se tornar teoricamente relevante, ainda houve uma forte resistência à ideia. Isso porque ela desafiava não apenas as observações da época, mas também a filosofia da ciência do começo do Século XX. Em particular, as visões empiristas da época são relevantes para a negação da existência de objetos colapsados. O empirismo consiste na visão que o conhecimento é produzido apenas pela experiência sensorial de um fenômeno. Com esta visão, uma região colapsada que se fecha para medidas externas parecia ser um absurdo.

O renomado astrofísico inglês Arthur S. Eddington foi uma das poucas pessoas no primeiro quarto do século XX que realmente entendiam a teoria de Einstein e suas consequências. Responsável pelas expedições no final da década de 1910 para observar o eclipse que comprovou as previsões de Einstein para a deflexão da luz pelo campo gravitacional do Sol, Eddington foi um grande entusiasta da nova teoria da relatividade geral. Ele, porém, era descrente da possibilidade de colapso gravitacional. Sobre o tema, ele comentou em 1926 que “É bem interessante observar o que a teoria da gravitação de Einstein diz sobre esse ponto. De acordo com ela, uma estrela de 250 milhões de quilômetros de raio não poderia ter uma densidade como a do sol. Primeiro porque a força gravitacional seria tão grande que a luz seria incapaz de escapar dela, os raios cairiam de volta assim como uma pedra cai na Terra. (...) a massa produziria tanta curvatura que o espaço-tempo se fecharia ao redor da estrela, nos deixando do lado de fora (isto é, em lugar nenhum)”. [24, p. 6] Como a nota entre parênteses indica, ele considerava esta hipótese ilógica. Eddington acreditava que, “ao considerar um mundo cuja existência se dá à parte de medições e do que fazemos com elas, eu estava ultrapassando os limites do que chamamos de realidade física. Eu não vou desviar da visão de que uma ideia que pela sua própria natureza não pode ser medida não tem o direito a uma existência física” [25, p. 152]. Eddington foi particularmente assertivo contra Chandrasekhar [26] e sua proposta de que

havia um limite máximo para a massa de anãs brancas. Ele chamou atenção para o fato de que isso significava que estrelas supermassivas colapsariam sobre seu próprio peso e proferiu que “deve haver algo na natureza que previna isso de acontecer!” [27, p. 160]

Albert Einstein também repreendia a ideia, porém argumentando contra a ideia da existência de singularidades no espaço-tempo. Num artigo com o físico Natan Rosen publicado em 1935, ele justifica sua descrença dizendo que singularidades são tão arbitrárias que anulariam as leis da física [28, p. 73]. Einstein publicou um artigo poucos meses após a publicação de Oppenheimer e Snyder com a conclusão oposta: o colapso gravitacional – e portanto o aparecimento de singularidades na solução de Schwarzschild – era impossível [29]. Seu erro foi considerar apenas órbitas circulares de partículas ao redor do objeto e ignorar trajetórias instáveis e radiais.

Em face ao surgimento de evidências teóricas apontando para a ocorrência do colapso gravitacional, a comunidade astrofísica da época tentou responder à pergunta de como evitar o colapso gravitacional, ao invés de por que ele acontece. Essa resistência das autoridades na área se justifica pela filosofia predominante na época, em especial na Europa, o centro científico e de pensadores até então. Para entendermos a transição para a próxima fase, vamos apontar as mudanças filosóficas, sociais e políticas que se seguiram.

### 3 Fase II: Plausibilidade

#### 3.1 A Transição

Na década de 1930, além das primeiras evidências teóricas indicando que o colapso gravitacional de estrelas superdensas era plausível, surgiu também um questionamento filosófico sobre o que é ciência. Em 1934, o filósofo Karl Popper publicou, originalmente em alemão, *A Lógica da Descoberta Científica*, um contraponto à visão filosófica da época. Esta obra ficou famosa por descrever o método científico que posteriormente se tornou padrão na ciência ocidental. Popper introduziu o conceito de falseabilidade, afirmando que uma ciência empírica não pode nunca ser demonstrada, apenas testada. A verificação se dá através de observação e experimentos e, de acordo com Popper, uma teoria científica deve ser fal-

seável, ou seja, deve apresentar meios para que seja testada. O popperianismo, como ficou conhecido, não teve reconhecimento imediato, ganhando força apenas na década de 1950.<sup>4</sup> Porém, ele é um indício que a filosofia do primeiro quarto do século estava sendo ativamente questionada durante os anos 1930.

Outro fator relevante para entender essa transição entre a negação e a plausibilidade do conceito de buracos negros é de cunho sociológico. Na época, o centro filosófico e científico do mundo era a Europa. Liderados por Eddington, a comunidade astrofísica de Cambridge focou mais em teorias quânticas para tentar entender a estabilidade de estrelas. Enquanto isso, Albert Einstein tinha acabado de se mudar da Alemanha e se estabelecer em Princeton, nos Estados Unidos, iniciando o que no futuro seria uma forte escola em relatividade geral. Ambas as comunidades lidaram com novas descobertas teóricas que apontavam para o colapso gravitacional, mas rejeitaram a ideia. Enquanto isso, a Califórnia, bem afastada do centro científico da época, se estabelecia como uma forte comunidade em cosmologia, com as atividades no Observatório do Monte Wilson e o importante trabalho de Edwin Hubble [31]. Por causa disso, eles foram mais receptivos à relatividade geral e menos influenciados pela filosofia prevalente na Europa. Em particular, um dos maiores críticos das filosofias de Eddington e de Einstein [32, 33], Herbert Dingle, passou um ano na Califórnia, onde teve discussões frequentes com Richard Tolman, que, por sua vez, tinha conversas frutíferas com Oppenheimer.

*Sobre a Contração Gravitacional Continuada*, o artigo de Oppenheimer e Snyder, foi publicado na edição de primeiro de setembro de 1939 na revista *Physical Review*. Tragicamente, neste dia o exército nazista de Adolf Hitler invadiu a Polônia, dando início à Segunda Guerra Mundial. A guerra mudou permanentemente o cenário científico mundial. Entre 1939 e 1945, basicamente todas as pesquisas na física de largas escalas, isto é, astrofísica, astronomia, cosmologia e gravitação, cessaram. A atenção se voltou para áreas cujas aplicações eram mais imediatas, como física nuclear. Oppenheimer foi recrutado como chefe do projeto Manhattan, responsável pela bomba atômica americana. Ele nunca mais voltou a trabalhar em astrofísica [34].

<sup>4</sup>Em 1959, o livro ganhou uma versão em inglês [30].

### 3.2 O Renascimento da Relatividade Geral

O desenvolvimento de tecnologias nucleares foi corrompido num cenário de guerra e os bombardeios de Hiroshima e Nagasaki se tornaram uns dos ataques mais aterrorizantes da história mundial. O investimento militar americano em pesquisas físicas teve uma contribuição decisiva para a vitória dos aliados e o perigo iminente de uma guerra nuclear justificou a continuidade do financiamento destinado para a ciência nos Estados Unidos. Após o fim da guerra, a primeira contribuição significativa no estudo do Universo foi a formulação da hipótese da nucleossíntese dos elementos por Fred Hoyle em 1946 [35] e Ralph Alpher e George Gamow em 1948 [36]. Em 1939, o mecanismo de fusão nuclear foi desvendado [37] e só então foi possível compreender melhor o que se passava no interior das estrelas. Elas produzem energia através de processos de fusão. Hoyle sugeriu que os elementos mais pesados, como ouro e ferro, foram formados por este processo no interior de estrelas. Alpher e Gamow argumentaram que os elementos mais leves, como o hidrogênio e o hélio, foram formados nos primórdios do universo, no que chamamos hoje de sopa primordial. Esse foi o ponto de partida da Teoria do Big Bang e do Modelo Padrão da Cosmologia, uma das primeiras teorias a se basear em relatividade geral, que permanecia pouco valorizada. Mas isso mudou em meados da década de 1950, quando a injeção de dinheiro, o aumento do número de pesquisadores pós-doutorandos e a tentativa explícita de criar uma forte comunidade científica causaram uma nova onda de interesse pela relatividade geral [38].

O renascimento da relatividade geral inicialmente se refletiu no estudo aprofundado das soluções de *Massenpunktes*, que descrevem buracos negros. Entre 1958 e 1960, extensões analíticas da solução de Schwarzschild foram desvendadas por D. Finkelstein [39], C. Fronsdal [40], M.D. Kruskal [41] e Gy. Szekeres [42], expondo a complexidade topológica desta solução. Também iniciou-se uma discussão sobre o significado de uma singularidade no espaço-tempo [43]. Essa ideia já não era mais considerada tão absurda. Apesar do interesse dos relativistas no tema, os astrofísicos, por sua vez, demoraram um pouco mais para aceitar a ideia do colapso gravitacional.

O físico John Archibald Wheeler foi um dos pi-

oneiros na pesquisa da fissão nuclear, com seu trabalho em coautoria com Niels Bohr em 1939 [44]. Em Princeton, no final da década de 1950, o interesse de Wheeler pela relatividade geral começou a crescer, mas ele ainda se questionava sobre o colapso gravitacional. Em 1958, na Conferência de Solvay daquele ano, Wheeler confrontou os resultados de Oppenheimer, afirmando que ainda poderiam existir mecanismos escondidos no interior das estrelas que preveniriam o colapso de corpos supermassivos [45]. Oppenheimer não se impressionou e argumentou que seria muito mais simples se Wheeler admitisse a possibilidade, ao invés de se apoiar em uma física desconhecida.

Com os resultados teóricos de seus colegas de Princeton, Finklestein e Kruskal, e com avanços tecnológicos de simulações computacionais, Wheeler gradualmente mudou seu posicionamento com relação ao colapso gravitacional, formando uma melhor imagem mental do fenômeno.<sup>5</sup> Mas o que sedimentou sua aceitação da existência dos objetos completamente gravitacionalmente colapsados foram as descobertas dos *pulsares* e a observação dos *quasares* na década de 1960. Gradualmente, Wheeler se tornou um dos maiores entusiastas sobre buracos negros, se não o maior. Ele ativamente instigou vários de seus alunos a pesquisarem sobre o assunto. Um deles, Kip Thorne, veio a se tornar um dos ganhadores do Nobel de Física décadas depois, em 2017, por sua contribuição na detecção das ondas gravitacionais geradas por um sistema binário de buracos negros.

### 3.3 As Primeiras Evidências Observacionais

Com a predição teórica de Oppenheimer no final dos anos 1930 e o crescimento da relatividade geral na década de 1950, a hipótese que objetos gravitacionalmente completamente colapsados existem se fortaleceu, mas ainda havia algumas lacunas que causavam dúvida. O modelo de colapso de Oppenheimer foi acusado de ser muito idealizado por considerar uma estrela com perfeita simetria esférica e, como Wheeler bem apontou em sua palestra na Conferência de Solvay, o interior das estrelas ainda poderia esconder mecanismos físicos ainda desconhecidos que con-

<sup>5</sup>A mudança de postura do Wheeler com respeito ao colapso gravitacional é parte do trabalho em andamento de Stefano Furlan, com quem tive o prazer de discutir o tema.

trabalhavam as forças gravitacionais. Mas a descoberta e estudos de objetos superdensos no início da década de 1960, a possível existência de estrelas colapsadas se tornou uma curiosidade difícil de ignorar.

Batizados de faróis do Universo, pulsares são estrelas de nêutrons em rotação que emitem pulsos eletromagnéticos a um intervalo de tempo constante. Já os quasares são fontes extragalácticas de rádio quase-estelares, isto é, que se parecem com a de estrelas, mas que indicam uma densidade bem maior. Essas detecções são os primeiros indícios observacionais de que buracos negros existem, provando que há objetos bem mais densos do que anãs brancas.

Foi também no início da década de 1960 que o físico e filósofo Tomas Khun publicou sua obra *Estrutura das Revoluções Científicas* [46], sugerindo que tais revoluções acontecem através de mudanças de paradigmas na ciência, num ciclo recorrente que se inicia com observações anômalas, seguido da crise do modelo que acarreta numa mudança de paradigma, há então o aceite da nova proposta até que haja uma nova observação anômala, reiniciando o ciclo. É interessante observar a correlação entre as mudanças de posturas filosóficas e a evolução das pesquisas sobre objetos colapsados. Se antes a filosofia de Popper nasce no mesmo contexto em que surgem as primeiras evidências teóricas, a filosofia de Khun acontece em paralelo ao surgimento das primeiras evidências observacionais.

Surgiu então a pergunta: o que são esses objetos colapsados? Até então, eles não eram realmente bem entendidos.

Até o começo dos anos 1960, a descrição dos objetos completamente colapsados pela gravidade era derivada das soluções de *Massenpunktes* e a década de 1960 foi decisiva para o aperfeiçoamento e entendimento deste conceito. Como vimos, as soluções conhecidas eram as de Schwarzschild e Reissner-Nordstöm, para objetos massivos com e sem carga, respectivamente. Em 1963, o matemático neozelandês Roy Kerr descobriu a solução para uma *Massenpunktes* em rotação [47]. Esta ficou conhecida como *Solução de Kerr*. No caso do objeto massivo ter rotação e carga, ele é descrito pela *Solução de Kerr-Newman* [48, 49]. Surgiu então a conjectura de que tais objetos seriam completamente descritos por três componentes clássicas: massa, carga e momento angu-

lar. John Wheeler batizou esta conjectura como o *Teorema No-hair*, argumentando que um buraco negro não tem cabelo, ou seja, não possui outras características que os distinguem [50].

Ainda nesta década, alguns outros mistérios foram desvendados, como a questão do colapso gravitacional em casos em que há desvio de simetria esférica [51, 52] e sobre a ocorrência de singularidades após o colapso [51, 53], resultados que renderam o Nobel de Física a Roger Penrose décadas depois, em 2020. Em 1967, tais objetos foram batizados com o familiar nome que os conhecemos atualmente, quando Wheeler adotou a recomendação de um membro da plateia em uma de suas palestras e começou a usar o termo “buracos negros” para se referir aos objetos completamente gravitacionalmente colapsados. A membrana que delimita o buraco negro recebeu o nome de *horizonte de eventos* [54]. Os físicos soviéticos Yakov B. Zel’dovich e Igor Novikov foram instrumentais para a descoberta de novas peças-chave da teoria, como a formação de discos de acreção ao redor dos buracos negros [55] e outros mecanismos de formação de origem cosmológica [56], isto é, que não pelo colapso gravitacional de estrelas. Os buracos negros de origem cosmológica formados nos primórdios do universo são chamados de *buracos negros primordiais*.

Dentre as várias descobertas sobre a física de buracos negros, uma em especial levou as pesquisas sobre o tema para um novo patamar. Em 1969, Roger Penrose propôs um mecanismo de extração de energia de um buraco negro em rotação que ficou conhecido como o *Processo de Penrose* e que foi um passo necessário para a formulação da termodinâmica dos buracos negros na década seguinte. [57]

## 4 Fase III: Aceitação

### 4.1 Popularizando o Conceito

Buracos negros são objetos superdensos caracterizados pela sua massa, carga e momento angular, que apresentam um forte campo gravitacional e é delimitado por um horizonte de eventos que permite a entrada, mas não a saída de matéria. Com o conceito sedimentado e a crescente confiança de que alguns quasares são, de fato, buracos negros, a pesquisa sobre o assunto mudou de foco. Na primeira fase, o objetivo era encontrar

mecanismos que poderiam evitar o colapso gravitacional. Na segunda fase, a pergunta passou a ser o que são esses objetos e quais são suas propriedades. Nessa terceira fase, a questão principal era como podemos verificar que eles existem.

O contexto em que este questionamento acontece é simbólico. A Guerra Fria foi uma constante ameaça de guerra nuclear e empurrou uma disputa tecnológica sem precedentes entre os Estados Unidos e a União Soviética. Isto fica bem representado pela corrida espacial que se deu entre as duas potências, numa tentativa de explorar o espaço. A União Soviética foi responsável pela primeira viagem espacial tripulada por um ser humano em 1961, quando o cosmonauta Yuri Gagarin entrou em órbita ao redor da Terra a bordo da espaçonave Vostok 1. Em contrapartida, os Estados Unidos foram os primeiros a enviarem humanos para a Lua em 1969 com a Apollo 11. Neil Armstrong and Buzz Aldrin se tornaram as primeiras pessoas a pisarem em solo lunar. Com o interesse voltado para o céu, especulações sobre o espaço se intensificaram. Existe vida fora da Terra? Podemos explorar a energia das estrelas de forma mais eficiente? Para responder a essas perguntas, Freeman Dyson idealizou em 1960 uma construção para a extração de energia das estrelas [58], conhecida como *Esfera de Dyson*. Anos depois, Penrose fez uma sugestão similar para buracos negros.

Em 1969, Penrose apresentou uma palestra no congresso inaugural da Sociedade Europeia de Física, em Florença, Itália, em que ele fez uma revisão detalhada sobre o colapso gravitacional. Além de expor os principais resultados obtidos até então, Penrose também propôs um mecanismo para extrair energia rotacional de um buraco negro [59]. Da forma como ele idealizou inicialmente, o procedimento envolveria uma civilização avançada e uma estrutura refinada ao redor do buraco negro, similar à esfera de Dyson. Posteriormente, ele encontrou uma explicação mais simples usando balística para o processo, que hoje leva seu nome. Da forma como Penrose o idealizou, o mecanismo para extração dessa energia era complicado e nada prático, mas ele esperava que essa ideia pudesse ser desenvolvida e usada como um subterfúgio para encontrar um buraco negro no espaço.

Em 1971, Remo Ruffini e John Wheeler seguiram o exemplo de Penrose e fizeram uma revisão

do conceito porém desta vez para uma audiência mais ampla. O artigo *Introdução aos Buracos Negros* foi publicado na revista popular *Physics Today* e é o primeiro escrito por físicos que carrega o termo buraco negro em seu título. Depois dessa publicação, esse nome se tornou popular e os buracos negros permearam o imaginário das pessoas.

#### 4.2 A Termodinâmica dos Buracos Negros

O processo de Penrose consiste na aceleração de uma partícula em fuga da vizinhança de um buraco negro devido a rotação deste, retardando-o no processo. Em outras palavras, tal partícula “rouba” energia rotacional do buraco negro de Kerr para fugir para o infinito. Essa ideia gerou um avanço teórico interessante, que levou a paradoxos ainda hoje não resolvidos.

Em Princeton, por influência de seu orientador, os alunos de Wheeler estavam preocupados com as conhecidas leis de conservação na vizinhança dos buracos negros. Se uma estrela que colapsou e se tornou um buraco negro passa a ser descrita por apenas três medidas, massa, carga e momento angular, o que acontece com as outras medidas que caracterizavam a estrela, como número de bárions e entropia? Wheeler apresentou a questão para seu grupo de pesquisa em 1969 [60], na esperança de conectar buracos negros à termodinâmica. Essa conexão veio com a formulação do Processo de Penrose. Baseando-se neste, o físico grego Demetrios Christodoulou propôs que uma componente da massa do buraco negro seria irreduzível [61]. Isso influenciou seu colega, Jacob Bekenstein, a sugerir que buracos negros seriam entidades com propriedades termodinâmicas, com uma entropia bem definida proporcional a essa massa irreduzível [62].

Tal similaridade apontada por Bekenstein foi bem recebida pela comunidade científica da época e quatro leis da mecânica dos buracos negros foram formuladas em comparação às três leis da termodinâmica, mais a lei zero [63]. Mas a ideia de Bekenstein de que esta seria mais do que uma analogia e que buracos negros teriam de fato propriedades termodinâmicas foi duramente criticada. Um dos motivos dessa rejeição é que, se buracos negros tivessem realmente uma entropia bem definida, como afirmava Bekenstein, eles deveriam ter também uma temperatura bem definida, o que significa que eles deveriam irradiar.

Isso contradizia o fato de que nada pode escapar de um buraco negro. Um dos maiores críticos da ideia de Bekenstein foi Stephen Hawking, que já era reconhecido na época por seus trabalhos sobre singularidades no espaço-tempo.

Enquanto essa discussão acontecia no ocidente, os físicos soviéticos estavam olhando para o processo de Penrose de um ponto de vista diferenciado. Ao invés de partículas roubando energia e fugindo para o infinito, o Academicista<sup>6</sup> Yakob Zel'dovich usou a descrição ondulatória de partículas da teoria quântica e concluiu que o mecanismo de Penrose se tratava de amplificação de ondas [64]. Ele sugeriu que buracos negros em rotação deveriam, dessa forma, irradiar. Em 1973, Alexei Starobinsky, então pós-doutorando de Zel'dovich, apresentou este resultado a Hawking, que estava visitando Moscou pela primeira vez. Descrente, Hawking seguiu a sugestão dos colegas soviéticos e usou a teoria quântica de campos para analisar o problema da criação de partículas na vizinhança de buracos negros. Para surpresa de Hawking, ele descobriu que não apenas os de Kerr, mas todos os buracos negros irradiam. Mais ainda, os buracos negros eventualmente evaporam [65]. Hawking não ficou feliz ao perceber seu erro de julgamento, se declarando desapontado com os resultados. Mas, diante das evidências, admitiu que Bekenstein estava certo, afinal.

A radiação de Hawking acontece por causa da flutuação quântica do vácuo próximo ao horizonte de eventos do buraco negro. Hawking calculou o número de partículas que eram criadas e emitidas para o infinito nessa região e percebeu que era maior do que o número de partículas absorvidas pelo buraco negro. Esse descompasso é chamado de *radiação de Hawking* e ela determina a temperatura do buraco negro, a mesma esperada para um corpo negro.<sup>7</sup> Esse resultado era a evidência que faltava para a teoria da termodinâmica dos buracos negros ser amplamente aceita, perdendo o caráter de analogia. O uso de sistemas análogos para estudar um fenômeno físico é uma prática comum, mas apresenta limitações sobre o tipo de informações que podemos aprender com tal analogia. E então, ao identificar os buracos negros como corpos negros, o problema de ter que trans-

ferir o conhecimento de uma área da física para o outra foi resolvido.

### 4.3 O Paradoxo da Informação

O trabalho de Bekenstein sobre a termodinâmica dos buracos negros foi revolucionário de mais de uma forma [66]. Até então, a intuição sobre entropia era intrinsecamente conectada ao calor, interpretado como grau de agitação de partículas. Bekenstein, no entanto, usou teoria da informação para explicar este conceito, uma teoria que até aquele momento tinha aplicação latente. Em 1950, L. Brillouin sugeriu uma conexão entre teoria da informação e termodinâmica, argumentando de forma estatística que o aumento da entropia está relacionado à diminuição da informação de um sistema [67]. Como ilustração, considere um gás sendo aquecido. A medida que a entropia do gás cresce, o movimento das partículas se torna mais caótico e menos informação temos sobre a disposição das moléculas. Brillouin define, então, entropia como o inverso de informação. Em outras palavras, informação é equivalente à *negentropia*, a entropia negativa.

Depois que Christodoulou indicou que há uma massa irreduzível que cresce à medida que o buraco negro agrega mais matéria, Bekenstein sugeriu que tal estaria associada à perda de informação sobre o interior do buraco negro, por ser uma região a qual não temos acesso. Usando a definição de Brillouin, Bekenstein conclui que a massa irreduzível é proporcional à entropia do buraco negro. Essa associação acabou impulsionando não apenas a física dos buracos negros, mas também um novo ramo de pesquisa, chamado teoria quântica da informação.

Nos anos de 1990, o físico americano Leonard Susskind apontou um paradoxo derivado da afirmação de Hawking de que buracos negros evaporam. Se não temos acesso ao interior do buraco negro (nada nunca escapa dele) e se ele eventualmente evapora e some, o que acontece com a informação que estava em seu interior? Um dos princípios básicos da física é a de que a informação não se perde, ela se transforma. A evaporação do buraco negro parece não obedecer a essa regra. Este paradoxo continua em aberto.

<sup>6</sup>Do inglês *Academicist*, o maior ranking da Academia de Ciências Soviética.

<sup>7</sup>Um corpo negro é um objeto ideal que absorve toda a radiação eletromagnética incidente em sua superfície.

## 5 Fase IV: A Busca

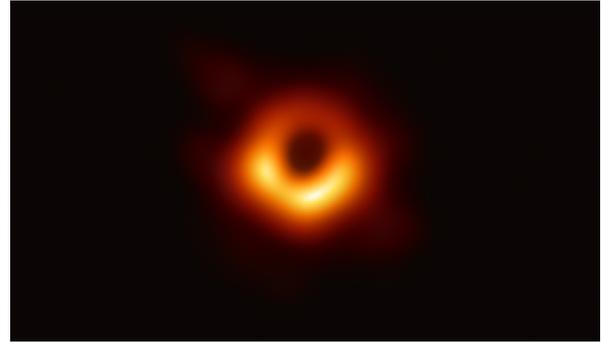
A investigação dos quasares, como vimos, teve um pico na década de 1960. A primeira sugestão de que estes objetos quase-estelares fossem regiões colapsadas foi feita em 1964 [68], sendo o microquasar Cygnus X-1 o primeiro candidato a ser um buraco negro. Porém essa afirmação ainda era incerta. Quasares se encaixavam na descrição de buracos negros, mas não era possível descartar outras possibilidades. Em 1970, Stephen Hawking e Kip Thorne fizeram uma aposta amistosa e jocosa sobre essa identificação, apostando anos de assinatura de revistas sensacionalistas não relacionadas à ciência. Se Cygnus X-1 fosse de fato um buraco negro, Thorne venceria. A aposta foi considerada encerrada apenas em meados de 1990, quando os astrônomos assumiram que a probabilidade dele ser um buraco negro era muito alta. Hawking não se entristeceu ao assumir a derrota.

Quando Penrose apresentou o mecanismo de extração de energia de um buraco negro em rotação, ele também fez um apelo à comunidade astronômica: procurar um buraco negro no espaço. Apesar dos quasares serem bons candidatos, era preciso uma detecção precisa para sedimentar a teoria. Em 1970, Bruce Partridge e Remo Ruffini propuseram que um sistema binário de buracos negros produziria ondas gravitacionais distintas [69]. Foi apenas em 2015 que a equipe do LIGO conseguiu medir tais ondas, detectando assim de forma mais direta não um, mas dois buracos negros. Em 2019, depois de mais de 20 anos de pesquisa, o time do Telescópio *Event Horizon* produziu uma imagem de um buraco negro, mesclando dados astronômicos com técnicas avançadas de *machine learning* para capturar o arco de luz distorcida ao redor de um buraco negro (Figura 2).

Em retrospecto, essas detecções estão entre as maiores conquistas científicas da última década, mostrando mais uma vez a importância e a beleza da teoria e do estudo dos buracos negros.

## 6 Conclusão

O conceito de buracos negros como o conhecemos hoje é uma construção teórica de mais de cem anos de pesquisa e observação, marcada por importantes questionamentos e revoluções que acompanharam a evolução científica do Século



**Figura 2:** Imagem do buraco negro no centro da galáxia Messier 87 (M87), uma galáxia elíptica a aproximadamente 55 milhões de anos-luz da Terra. Esse buraco negro possui uma massa cerca de 6,5 bilhões de vezes maior que a do nosso Sol. Crédito: Event Horizon Telescope Collaboration.

XX. Porém ideias similares foram consideradas e descartadas no Século XVIII e foram reconsideradas apenas após a formulação da relatividade geral.

A primeira reação à ideia foi descrença. A falta de evidências teóricas, observacionais e a falta de confiança na teoria de Einstein tornavam improvável a existência de objetos mais densos do que anãs brancas. A existência de buracos negros, apesar de contraintuitiva, se tornou plausível a partir de resultados teóricos obtidos na década de 1930, porém a comunidade científica só se convenceu dessa possibilidade depois do fim da Segunda Guerra Mundial, mais precisamente na década de 1960. A aceitação de que buracos negros existem de fato só veio após a década de 1970, enquanto a busca por um buraco negro no espaço se resolveu em definitivo apenas em 2015.

A nomenclatura acompanhou essa evolução teórica. No século XVIII, eles foram chamados de estrelas negras. Como solução das Equações de Einstein, eles eram chamados de *Massenpunktes*, ou massas pontuais. Em 1930, o termo colapso foi introduzido e esses objetos se tornaram estrelas colapsadas. Com maior entendimento sobre esses objetos, eles ganharam mais adjetivos e se tornaram objetos completamente gravitacionalmente colapsados. Os russos se referiam a eles por um breve período como estrelas congeladas. Até se tornarem buracos negros no final da década de 1960.

A descoberta dos buracos negros é uma história de sucesso para a ciência. Ela nos mostra o quão demorado o aprendizado pode ser, já que é preciso bastante cuidado ao fazer afirmações ex-

traordinárias e também para verificá-las. As ferramentas fundamentais para entender e aceitar a existência de buracos negros no espaço foram desenvolvidas há pouco mais de cem anos, com o surgimento da relatividade geral, da mecânica quântica e o avanço tecnológico sem precedentes dos últimos 70 anos. A ciência do Século XX nos possibilitou entender um dos objetos mais misteriosos do nosso universo e obter uma das imagens mais intrigantes deste novo milênio, a foto de um buraco negro.

Este artigo resume mais de cem anos de história e, por isso, não se propõe a ser um relato definitivo, mas sim uma prévia dos futuros trabalhos da autora no tema.

---

### Sobre a autora

C.R. Almeida ([cralmeida00@gmail.com](mailto:cralmeida00@gmail.com)) é Pesquisadora Internacional no Instituto para Estudos Avançados em Ciências Humanas, situado na cidade de Essen, Alemanha. Possui uma formação interdisciplinar, com mestrado em matemática, doutorado em física e treinamento pós-doutorado em história da ciência. Atualmente, está pesquisando sobre a história da descoberta teórica dos buracos negros.

### Referências

- [1] C. R. Almeida, *Stellar Equilibrium vs. Gravitational Collapse*, European Physical Journal H **45**, 25 (2020).
- [2] C. R. Almeida, *A Pré-história dos Buracos Negros*, Revista Brasileira de Ensino de Física **42** (2020), epub 17-Ago-2020.
- [3] J. Michell, *On the means of discovering the distance, magnitude, &c. of the fixed stars, in consequence of the diminution of the velocity of their light, in case such a diminution should be found to take place in any of them, and such other data should be procured from observations, as would be farther necessary for that purpose*, Letter to Henry Cavendish, Esq. F.R.S. and A.S. Philos. Trans. Royal Society **LXXIV**, 35 (1783).
- [4] P.-S. Laplace, *Exposition du Système du Monde* (De l'Imprimerie du Cercle-Social, 1796).
- [5] T. Young, *On the Theory of Light and Colours*, The Bakerian Lecture. Phil. Trans. R. Soc. **92**, 12 (1802).
- [6] K. Schwarzschild, *Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie*, Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, phy.-math. Klasse **42**, 189 (1916).
- [7] K. Schwarzschild, *Über das Gravitationsfeld einer Kugel aus inkompressibler Flüssigkeit nach der Einsteinschen Theorie*, Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, phy.-math. Klasse **24**, 424 (1916).
- [8] H. Reissner, *Über die Eigengravitation des Elektrischen Feldes nach der Einsteinschen Theorie*, Annalen der Physik **355**, 106 (1916).
- [9] H. Weyl, *Zur Gravitationstheorie*, Annalen der Physik **359**, 117 (1917).
- [10] G. Nordström, *On the Energy of the Gravitation Field in Einstein's Theory*, Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen, Proceedings Series B Physical Sciences **20**, 1238 (1918).
- [11] G. B. Jeffery, *The Field of an Electron on Einstein's Theory of Gravitation*, Proceedings of the Royal Society of London Series A **99**, 123 (1921).
- [12] G. D. Birkhoff, *Relativity and Modern Physics* (Harvard University Press, 1923).
- [13] G. Lemaître, *The Expanding Universe*, General Relativity and Gravitation **9** (5), 641 (1997), translated by M.A.H. MacCallum.
- [14] A. S. Eddington, *Space Time and Gravitation* (Cambridge University Press, 1920).
- [15] A. S. Eddington, *On the Relation Between the Masses and Luminosities of Stars*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **84**, 308 (1924).
- [16] L. Bonolis, *Stellar Structure and Compact Objects Before 1940 : Towards Relativistic Astrophysics*, European Physical Journal H **42**, 311 (2017).

- [17] S. Chandrasekhar, *The Highly Collapsed Configurations of Stellar Mass*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **91**, 456 (1931).
- [18] L. Landau, *On the Theory of Stars*, Physikalische Zeitschrift Sowjetunion **1**, 285 (1932).
- [19] R. C. Tolman, *Relativity, Thermodynamics and Cosmology* (Dover Publications, 1934).
- [20] J. R. Oppenheimer e R. Serber, *On the Stability of Stellar Neutron Cores*, Physical Review **54**, 540 (1938).
- [21] J. R. Oppenheimer e G. Volkoff, *On Massive Neutron Cores*, Physical Review **55**, 374 (1939).
- [22] J. R. Oppenheimer e H. Snyder, *On Continued Gravitational Contraction*, Physical Review **56**, 455 (1939).
- [23] J. Eisenstaedt, *Histoire et Singularités de la Solution de Schwarzschild (1915-1923)*, Archive for History of Exact Science **27**, 157 (1982).
- [24] A. S. Eddington, *On the Internal Constitution of the Stars* (Cambridge University Press, 1926).
- [25] A. S. Eddington, *The Nature of the Physical World* (Cambridge University Press, 1927).
- [26] A. S. Eddington, *Relativistic Degeneracy*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **95**, 194 (1935).
- [27] K. Thorne, *Black Holes & Time Warps: Einstein's outrageous legacy* (W.W. Norton & Company, 1994).
- [28] A. Einstein e N. Rosen, *The Particle Problem in the General Theory of Relativity*, Physical Review **48**, 73 (1935).
- [29] A. Einstein, *On a Stationary System with Spherical Symmetry Consisting of Many Gravitating Masses*, Annals of Mathematics **40** (4), 922 (1939).
- [30] K. Popper, *The Logic of Scientific Discovery* (Hutchinson & Co., 1959).
- [31] E. Hubble, *A Relation Between Distance and Radial Velocity Among Extra-Galactic Nebulae*, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America **15**, 168 (1929).
- [32] H. Dingle, *Modern Aristotelianism*, Nature **784-786** (1937).
- [33] H. Dingle, *Through Science to Philosophy* (The Clarendon Press, 1937).
- [34] K. Hufbauer, *J. Robert Oppenheimer's Path to Black Holes*, in *Reappraising Oppenheimer: Centennial Studies and Reflections* (Office Papers in History of Science, Vol.21, 2005), 31-47.
- [35] F. Hoyle, *The Synthesis of the Elements from Hydrogen*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **106**, 343 (1946).
- [36] R. A. Alpher, H. Bethe e G. Gamow, *The Origin of Chemical Elements*, Physical Review **73**, 803 (1948).
- [37] H. Bethe, *Energy Production in Stars*, Physical Review **55**, 434 (1939).
- [38] A. S. Blum, R. Lalli e J. Renn, *The Renaissance of General Relativity : How and Why it Happened*, Ann. Phys. **528** (5), 344 (2016).
- [39] D. Finkelstein, *Past-future Assymetry of the Gravitational Field of a Point Particle*, Physical Review **110**, 965 (1958).
- [40] C. Fronsdal, *Completion and Embedding of the Schwarzschild Solution*, Physical Review **116**, 778 (1959).
- [41] M. D. Kruskal, *Maximal Extension of Schwarzschild Metric*, Physical Review **119**, 1743 (1960).
- [42] G. Szekeres, *On the Singularities of a Riemannian Manifold*, Publicationes Mathematicae Debrecen **7**, 285 (1960), reprinted on General Relativity and Gravitation, Vol. 34, No. 11, 2002.
- [43] J. Earman, *The Penrose-Hawking Singularity Theorems: History and Implications* (1999), 235-267.

- [44] N. Bohr e J. A. Wheeler, *The Mechanism of Nuclear Fission*, *Physical Review* **56**, 426 (1939).
- [45] J. Adams, B. Harrison, L. Klauder, R. Mjolsness, M. Wakano, J. Wheeler e R. Wiley, *Some Implications of General Relativity for the Structure and Evolution of the Universe*, in *Solvay Conference 1958* (R. Stoops, 1958), 97–148.
- [46] T. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions* (The Chicago University Press, 1962).
- [47] R. Kerr, *Gravitational Field of a Spinning Mass as an Example of Algebraically Special Metrics*, *Physical Reviews Letters* **11** (5), 237 (1963).
- [48] E. Newman e A. Janis, *Note on Kerr Spinning-Particle Metric*, *Journal of Mathematical Physics* **6** (915), 915 (1965).
- [49] E. Newman, E. Couch, K. Chinnapared, A. Exton, A. Prakash e R. Torrence, *Metric of a Rotating, Charged Mass*, *Journal of Mathematical Physics* **6** (915), 915 (1965).
- [50] C. W. Misner, K. S. Thorne e J. A. Wheeler, *Gravitation*, *Gravitation* (W. H. Freeman, 1973).
- [51] R. Penrose, *Gravitational Collapse and Space-Time Singularities*, *Physical Review Letters* **14** (3), 57 (1965).
- [52] W. Israel, *Gravitational Collapse and Causality*, *Physical Review* **153** (5), 1388 (1967).
- [53] S. Hawking e R. Penrose, *The Singularities of Gravitational Collapse and Cosmology*, *Proc. Roy. Soc. Lond. A* (314), 529 (1970).
- [54] W. Israel, *Event Horizons in Static Vacuum Space-Times*, *Physical Review* **164** (5), 1776 (1967).
- [55] Y. B. Zel'dovich, *The Fate of a Star and the Evolution of Gravitational Energy upon Accretion*, *Soviet Physics ; Doklady* **9** (3), 195 (1964).
- [56] Y. B. Zel'dovich e I. D. Novikov, *The Hypothesis of Cores Retarded During Expansion and the Hot Cosmological Model*, *Soviet Astronomy – AJ* **10** (4), 602 (1967).
- [57] C. R. Almeida, *The Thermodynamic of Black Holes: from Penrose Process to Hawking Radiation* In Progress.
- [58] F. J. Dyson, *Search for Artificial Stellar Sources of Infrared Radiation*, *Science* **131** (3414), 1667 (1960).
- [59] R. Penrose, *Gravitational Collapse: the role of general relativity*, *Rivista del Nuovo Cimento* **1**, 252 (1969).
- [60] J. A. Wheeler, *Relativity Notebook #16* (1969).
- [61] D. Christodoulou, *Reversible and Irreversible Transformations in Black Hole Physics*, *Physical Review Letters* **25** (22), 1596 (1970).
- [62] J. Bekenstein, *Black Holes and the Second Law*, *Lett. Nuovo Cimento* **4**, 737 (1972).
- [63] J. Bardeen, B. Carter e S. Hawking, *The Four Laws of Black Hole Mechanics*, *Commun. Math. Phys.* **31**, 161.
- [64] Y. Zel'dovich, *Generation of Waves by a Rotating Body*, *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters* **14**, 180 (1971).
- [65] S. Hawking, *Particle Creation by Black Holes*, *Commun. Math. Phys.* **43**, 199 (1975).
- [66] I. Belfer, *Informing Physics: Jacob Bekenstein and the Informational Turn in Theoretical Physics*, *Phys. Perspect* **16**, 69 (2014).
- [67] L. Brillouin, *Thermodynamics and Information Theory*, *American Scientist* **38** (4), 594 (1950).
- [68] J. L. Greenstein e M. Schmidt, *The Quasistellar Radio Sources 3C 48 and 3C 273*, *The Astrophysical Journal* **140** (1), 1 (1964).
- [69] B. Partridge e R. Ruffini, *Gravitational Waves and a Search for Associated Microwave Electromagnetic Radiation*, *Award for Essays on Gravitation* 1–11 (1970).