

Sobre a evolução conceitual acerca da formação de buracos negros

Rafael Fernandes Aranha

Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Resumo

O desenvolvimento intelectual acerca da formação de buracos negros possui uma história muito rica, pois não envolve apenas questões técnicas particulares à teoria da relatividade geral. O pleno entendimento do colapso gravitacional tanto discorre sobre diversos temas da astrofísica relativística, assim como evidencia a participação de muitos dos maiores físicos da história da ciência. Este artigo visa tratar, de forma introdutória e conceitual, as principais características da formação dos buracos negros, numa linha cronológica de inicial rejeição, seguida de sua inevitável aceitação.

Abstract

The intellectual development around the formation of black holes has a very rich history, as it does not only involve technical issues particular to the theory of general relativity. The full understanding of gravitational collapse both discusses various topics of relativistic astrophysics, as well as evidences the participation of many of the greatest physicists in the history of science. This article aims to address, in an introductory and conceptual way, the main characteristics of the formation of black holes, in a chronological line of initial rejection, followed by their inevitable acceptance.

Palavras-chave: buracos negros, colapso gravitacional, astrofísica relativística, gravitação.

Keywords: black holes, gravitational collapse, relativistic astrophysics, gravitation.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v4n1.40191](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v4n1.40191)

1 Introdução

Atualmente, o termo *buraco negro* é bastante aceito, tanto pela comunidade científica quanto pela cultura popular. Do ponto de vista da academia, isto se deve ao fato de que, nos últimos anos, descobertas fundamentais foram realizadas. Pode-se considerar, como exemplos principais, dois casos vencedores de Prêmios Nobel.¹ O primeiro, vencedor em 2017, pela detecção de sinais de ondas gravitacionais a partir da colisão de buracos negros [2] e o segundo, ganhador de 2020, tanto pela demonstração teórica da previsão de buracos negros pela teoria einsteiniana da gravitação, além da comprovação observacional da presença de um buraco negro supermassivo no centro de nossa galáxia [3]. Com relação à cultura *pop*, diversos filmes, séries e livros de ficção científica abordam buracos negros de forma misteriosa

e instigante. Como exemplos, tem-se o filme *Interstellar* [4], a série *Star Trek* [5] e o livro *A Hole in Space* [6]. Porém, esta aceitação não fez parte por praticamente seis décadas dentro da comunidade científica. Como veremos adiante, mesmo Albert Einstein duvidava da existência de buracos negros.

Este texto tem o propósito de evidenciar, num contexto histórico/conceitual, a construção intelectual do processo de formação dos buracos negros. Isto, desde questões astrofísicas envolvendo outros objetos compactos (anãs brancas e estrelas de nêutrons) até elementos histórico-sociais da época. Este texto não busca ser uma referência completa de todas as técnicas existentes na literatura. O teor do manuscrito concentra-se na construção das ideias, muitas vezes apoiada na tensão entre pessoas e suas visões, tanto contraditórias quanto complementares. O conteúdo do texto pode ser resumido da seguinte maneira: na Seção 2, discute-se a concepção de buracos negros e sua rejeição inicial; A Seção 3 apresenta uma

¹Outro caso recente e importante é o da imagem da sombra do buraco negro supermassivo localizado no centro da Via Láctea e obtida pelo consórcio *Event Horizon Telescope* ou EHT [1]

maior profundidade no processo do colapso gravitacional através do estudo das estrelas de nêutrons e a necessidade da introdução de conceitos da física nuclear; A Seção 4 concretiza a aceitação dos buracos negros pela comunidade científica e dá início à chamada *era de ouro* da relatividade geral; Já, na Seção 5 apresenta-se, de forma bastante resumida, uma classificação dos diversos tipos de formação dos objetos compactos. Após isto, segue-se a seção de agradecimentos, além da bibliografia, com todas as referências técnicas postas ao longo do texto.

2 A resistência aos buracos negros: Einstein e o embate Eddington versus Chandrasekhar

A discussão sobre a existência de um objeto capaz de aprisionar gravitacionalmente sinais luminosos possui suas raízes no século XVIII, muito baseada na interpretação corpuscular da luz. Pois, se esta se comporta como partícula, podemos aplicar as leis da mecânica newtoniana e deduzir, por exemplo, a velocidade de escape que essa partícula luminosa adotaria para não ficar confinada ao objeto gerador de gravidade. No caso do Sol, a velocidade de escape para este modelo é de, aproximadamente, $v_{esc} = 0,002c$, onde c é a velocidade da luz (no vácuo) como conhecemos hoje ($c = 3 \times 10^8$ m/s). O primeiro a investigar essa ideia foi John Michell, com seu trabalho publicado em 1784 [7], onde associou o aprisionamento da luz a um raio crítico de um objeto esférico, gerador de gravidade. Ainda considerando o caso do Sol, o trabalho de Michell indica que o raio crítico é da ordem de 3 km. Tal objeto ficou conhecido por *estrela escura*, pois o aprisionamento da luz impediria qualquer detecção por um observador distante. Pode-se dizer que estas estrelas escuras do século XVIII foram a primeira versão de buracos negros. Além de Michell, Pierre Laplace, também no mesmo século, estudou as estrelas escuras nas duas primeiras edições do seu trabalho *Exposition du Système du Monde*, de 1796 [8]. O estudo de Laplace possui duas curiosidades importantes: a primeira é que não há citação sobre o trabalho de Michell. Já, a segunda, está relacionada diretamente ao estudo do comportamento ondulatório da luz, como apontado por Christiaan Huygens e evidenciado pelos experimentos de interferência da luz de Thomas

Young. Assim, houve a necessidade de conciliar tanto a descrição corpuscular quanto a ondulatória numa teoria de gravitação, com o propósito de que a descrição das estrelas escuras fizesse sentido. Esta incompatibilidade fez com que Laplace abandonasse a ideia das estrelas escuras a partir da terceira edição de seu trabalho. Assim, o estudo destes objetos ficou comprometido até que se pudesse descrever o comportamento ondulatório da luz no contexto de uma teoria de gravitação mais abrangente que a newtoniana.

A incorporação das características ondulatórias da luz na teoria de gravitação foi realizada em 1911, através do trabalho seminal de Albert Einstein [9], onde o *redshift* gravitacional de um sinal luminoso, ao passar de um potencial gravitacional mais baixo para um mais elevado, é discutido e calculado. Com a publicação de sua teoria da relatividade geral em 1915 [10], Einstein abre novas possibilidades de soluções matemáticas, cujas interpretações poderiam representar objetos astrofísicos dos mais diversos. Porém, nem toda interpretação das soluções obtidas agradava a Einstein. Em 1916, Einstein apresenta à comunidade científica o trabalho de Karl Schwarzschild [11] sobre a solução exterior de uma distribuição massiva com simetria esférica. Cinco meses depois Schwarzschild morreria devido a sua atuação na Primeira Guerra Mundial. Porém o seu legado perdura até hoje, com sua solução tornando-se um *benchmark* da relatividade geral. Todo curso de gravitação einsteiniana utiliza a solução de Schwarzschild como um exemplo de exploração das principais características da teoria, tanto do ponto de vista teórico, quanto do ponto de vista observacional. Uma das principais características da solução de Schwarzschild está no fato de que a distribuição massiva possui um raio crítico cujo valor é dado por

$$R_{critico} \sim 3 \text{ km} \frac{M_{\bullet}}{M_{\odot}}, \quad (1)$$

onde M_{\bullet} é a massa do objeto e M_{\odot} é a massa do Sol. Isto mostra que, para uma distribuição com a massa do Sol, o raio crítico é de aproximadamente 3 km, o mesmo raio crítico obtido por Michell e Laplace há mais de um século. Este resultado foi, assim, interpretado como a de um objeto onde sinais luminosos, emitidos internamente ou sobre este raio crítico, ficam aprisionados e não chegam a observadores longínquos. Por esta razão, o *redshift* de um sinal luminoso, emi-

tido a partir deste raio, tende ao infinito. Mesmo com o valor equivalente aos trabalhos das estrelas escuras, a solução de Schwarzschild possui mecanismos totalmente distintos. Pode-se destacar que, no caso das estrelas escuras, a luz escapa da superfície do objeto massivo, mas retorna após algum tempo. Um observador logo acima da superfície veria a emissão, logo a estrela não é, de fato, escura. Já, no caso da distribuição de Schwarzschild, o raio crítico delimita a região conhecida como *horizonte de eventos*, onde a luz não escapa de forma alguma, um quectômetro que seja. O que hoje conhecemos como *buracos negros* é exatamente a região delimitada pelo horizonte. Em qualquer ponto externo à distribuição, nenhuma emissão proveniente do horizonte pode ser observada. Porém o termo buraco negro somente seria adotado muitos anos depois (Seção 4). Neste contexto inicial, adotaremos o termo *estrela crítica* ou *estrela de Schwarzschild*.

A ideia da existência das estrelas de Schwarzschild foi bastante criticada pelos maiores especialistas em relatividade geral da época: Arthur Eddington e o próprio Einstein. Na década de 1920, Einstein coloca esta questão de lado e foca sua atenção às questões fundamentais da mecânica quântica, década de seu prêmio Nobel sobre o efeito fotoelétrico (1922).² Coube a Eddington tomar a posição de contestador mais árduo da existência das estrelas críticas. Em 1926, ele publica em seu livro [13] que estrelas não poderiam alcançar o raio (circunferência) crítico de Schwarzschild, excluindo a possibilidade de sua existência. Segundo o modelo padrão de evolução estelar, ao longo da vida, as estrelas queimam seus elementos mais leves e expulsam parte de sua massa, perdendo pressão interna e iniciando um processo de colapso gravitacional. A gravidade e a pressão interna lutam entre si pela manutenção da estrela ou pela sua implosão. Ao final do processo, as estrelas entrariam no estágio de uma anã branca.³ Para Eddington, todas as estrelas teriam este destino em comum, sem

a possibilidade de continuar um eventual colapso gravitacional de forma espontânea. Contudo, no ano de 1931, Subrahmanyan Chandrasekhar publica seu artigo sobre a massa máxima que uma anã branca poderia adquirir [14]. Este trabalho causou uma disputa de praticamente uma década entre Chandrasekhar e Eddington. De fato, se este limite fosse verdadeiro, estrelas mais massivas poderiam jamais alcançar o estágio final de sua vida na forma de uma anã branca. E isto era o esperado por toda a comunidade astronômica, cujo maior expoente, à época, era Eddington. Seguindo um raciocínio lógico, se este estágio final fosse reservado apenas a estrelas menos massivas, qual seria o destino das demais estrelas? Caso o colapso continuasse até que o raio crítico fosse alcançado, abriria-se a possibilidade da existência de estrelas críticas? Do ponto de vista da aceitação da academia, ainda não. Porém, o trabalho de Chandrasekhar aumentou essa possibilidade e a ideia passou a não ser considerada por muitos absurda. Pelo contrário, ao final dos anos 1930, a maior parte dos astrônomos já considerava que Chandrasekhar estava correto, porém, não de forma pública. O poder de influência de Eddington impedia que seus colegas declarassem apoio a Chandrasekhar. Esta disputa fez com que Einstein retornasse ao problema e criasse um modelo o qual vetaria a existência das estrelas críticas [15]. O modelo considerava uma estrela composta por um aglomerado de partículas auto gravitantes e orbitando um centro comum. Na situação em que esta estrela diminuísse seu raio, as partículas deveriam aumentar sua velocidade, a fim de evitar o colapso terminal em uma estrela crítica. Einstein obtém que, ao se aproximar do raio crítico, a velocidade das partículas ultrapassariam a velocidade da luz, limite superior da velocidade de qualquer objeto. Assim, as estrelas críticas nunca poderiam ser alcançadas. Os efeitos centrífugos das partículas compensariam a força gravitacional, assim como o gradiente de pressão das estrelas usuais. O grande problema, tanto de Einstein, quanto de Eddington é que ambos consideravam que a gravidade, de alguma forma, poderia ser impedida. Seja pela pressão interna das estrelas ou por outras forças possíveis, como no caso do aglomerado de partículas. Porém, como analisaremos nas próximas seções, o *colapso gravitacional é inevitável*, o que irá proporcionar a existência das estrelas de Schwarzs-

²Apesar do Nobel ser de 1922, seu trabalho original é de 1905 [12].

³As anãs brancas são modeladas como um gás de elétrons muito denso. A partir de densidades centrais da ordem de $10^5 \text{ cm}^3/\text{g}^3$, todos os elétrons estão comprimidos de tal forma que estes não permitem (devido ao *princípio de exclusão de Pauli*) a continuidade do colapso gravitacional. A pressão final deste estágio (dito degenerado) é conhecida como *pressão de Fermi*.

child, segundo a teoria da relatividade, de Einstein.

3 Estrelas de nêutrons: mais um passo para o entendimento do colapso gravitacional

Os anos da década de 1930 também foram importantes para a concepção e o desenvolvimento de outro objeto astrofísico envolvido no colapso estelar: a estrela de nêutrons. Na primeira metade da década, Walter Baade e Fritz Zwicky estudaram a super luminosidade ($L \sim 10^{10}L_{\odot}$)⁴ de estrelas que, com o passar do tempo, diminuía sua intensidade e variabilidade para um estado quiescente. Tais estrelas super luminosas foram denominadas por eles de *supernovas* [17, 18].⁵ Consequentemente, surge o questionamento do processo físico do qual se originam estas supernovas. A explicação dada por Zwicky foi responsável por conceber a ideia de uma *estrela de nêutrons*. Em 1932, James Chadwick descobre o nêutron ao bombardear núcleos atômicos com radiação altamente energética, comprovando experimentalmente a hipótese da existência do nêutron por Ernest Rutherford [19]. E isto tudo ocorreu ao mesmo tempo em que Baade e Zwicky investigavam e buscavam entender as supernovas. Zwicky enxergou no nêutron uma possibilidade explicá-las e construiu o seguinte modelo: o núcleo estelar passaria por uma implosão até alcançar, em um estágio final da evolução estelar, densidades próximas dos núcleos atômicos ($\sim 10^{14} \text{ g/cm}^3$), a ponto de se transformar em uma espécie de gás de nêutrons ou, como denominado por Zwicky, uma estrela de nêutrons. Neste estágio, a implosão do núcleo comportaria aproximadamente 90% da massa original da estrela. O restante seria ejetado para o meio interestelar com altíssima energia e luminosidade. Assim, teríamos dois objetos bem definidos, a supernova e a estrela de nêutrons. Ou seja, a existência destas estrelas seria fundamental para explicar as até então recentes descobertas das supernovas. Porém, o processo de implosão do núcleo estelar e a pró-

pria explosão da supernova não foram explicadas por Zwicky, mantendo as dúvidas se tais estrelas de nêutrons poderiam, de fato, existir na natureza. Outro ponto importante é de que Zwicky vincula as supernovas à física de raios cósmicos, sendo esta ideia tratada como altamente especulativa pela comunidade astronômica da década de 1930.

Os trabalhos de Baade e Zwicky possuem aspectos diretamente ligados à questão de Chandrasekhar e do limite superior da massa das anãs brancas, além da possível formação de estrelas críticas. Porém, Chandrasekhar recebeu muitas críticas da comunidade astronômica, a qual seguia a visão de Eddington. Isto fez com que, inclusive, Chandrasekhar abandonasse seus estudos sobre as anãs brancas por décadas. Seguindo a forma de pensar de Eddington, as estrelas de nêutrons poderiam até ser uma opção válida para a total exclusão da ideia do colapso gravitacional até o estágio das estrelas críticas. Ou seja, estrelas muito massivas poderiam até não alcançariam o estágio final das anãs brancas, mas, ainda assim, de uma configuração estelar possível. Claro, como a comunidade astronômica também via o trabalho de Baade e Zwicky como especulativo (assim como o de Chandrasekhar), definitivamente não foi a atitude tomada. Se o limite de Chandrasekhar fosse comumente aceito pela comunidade científica em geral, a extensão deste limite para estrelas de nêutrons poderia ter sido deduzida, mesmo que somente como uma ideia.

Como uma consequência lógica (levando em conta o limite de Chandrasekhar), estrelas ainda mais massivas colapsariam para que outro objeto? Teríamos uma estrela de nêutrons (e com subsequente limite de massa superior?) ou realmente o colapso às estrelas críticas são inevitáveis? Além disso, a física nuclear e a relatividade geral não eram compreendidas por Baade e Zwicky. Eles não tinham o entendimento de todo o processo do colapso gravitacional, passando por todos os estágios possíveis, inclusive o das estrelas críticas. Esta análise, envolvendo detalhes da física nuclear e da relatividade geral somente foi realizada a partir de 1938, com o trabalho de Lev Landau e o subsequente interesse de Richard Tolman e Robert Oppenheimer.

Em 1938, Landau apresenta um processo astrofísico o qual explicaria a energia produzida para manter constante a temperatura de estrelas como

⁴À época, Baade e Zwicky subestimaram o valor da luminosidade em duas ordens de grandeza, $L \sim 10^8L_{\odot}$. A correção ao valor citado no texto viria em um trabalho de Baade em 1952 [16]

⁵Em muitos textos, as supernovas são escritas com seu plural em latim, *supernovae*.

o Sol [20]. A emissão sucessiva de radiação resfriaria a estrela e, conseqüentemente, seu raio diminuiria devido à maior influência da gravidade. Porém não é isto que, de fato, ocorre. Por exemplo, na Terra, recebemos energia do Sol por mais de 1 bilhão de anos e sua temperatura é praticamente da mesma ordem. Desta forma, Landau sugere que as estrelas deveriam possuir *núcleos de nêutrons*.⁶ Átomos externos a este núcleo seriam capturados e, desta forma, emitiriam a energia necessária para manter a estrela aquecida, contrabalanceando a gravidade. Ou seja, o núcleo de nêutrons serviria como uma espécie de motor das estrelas. O modelo de Landau, apesar de conceitualmente distinto, é equivalente às estrelas de nêutrons de Zwicky. As diferenças estão no período da evolução estelar, além de que Zwicky não explicou quais seriam os processos, tanto para a liberação de energia via supernovas quanto do colapso gravitacional à estrela de nêutrons.

A produção de energia nas estrelas já possuía uma argumentação diferente da apresentada por Landau e seus núcleos de nêutrons. Eddington [13] e grande parte dos astrônomos da época acreditavam que a produção de energia viria de reações nucleares no interior estelar. Porém, à época, não havia um entendimento pleno da física nuclear, além de que, na presença de muitas partículas (como no interior estrelas) e em altas densidades, a gravidade alcança elevados níveis energéticos. Isto tornaria a produção através da fusão nuclear um processo pouco eficiente comparado com a gravidade capturando os átomos próximos, favorecendo o modelo de Landau.

No entanto, o modelo de Landau também não foi convincente para mantê-lo intocável. No mesmo ano de publicação dos núcleos de nêutrons, Oppenheimer e seu aluno Robert Serber publicam um trabalho analisando a massa mínima que um núcleo de nêutrons deveria ter a fim de manter a estrela estável [22]. Caso a massa do núcleo fosse muito alta, o raio da estrela (como o Sol, por exemplo) deveria ser muito menor do que de fato é. E, na situação em que a massa fosse muito menor, a estrela não conseguiria manter as camadas externas por muito tempo. O resultado deles foi de que a massa mínima para o núcleo de nêutrons deveria ser de, aproximada-

mente, $0,1M_{\odot}$.

Hans Bethe e Charles Critchfield, também em 1938, publicam um artigo [23] o qual utiliza cálculos mais precisos de física nuclear e revelam que o mecanismo apontado por Eddington estava correto sobre a produção de energia solar através de reações nucleares na produção de deutério. O modelo de Landau estava incorreto para o funcionamento das estrelas convencionais, apesar do conceito do seu núcleo de nêutrons não estar totalmente equivocado.

Então, se o mecanismo de produção de energia se dá pelas reações nucleares no interior das estrelas, conforme esta energia for liberada, qual é o estágio final da evolução estelar? Para estrelas com massas menores que $1,4M_{\odot}$, o estágio de anãs brancas é alcançado (segundo Chandrasekhar). Mas e para os demais casos? Se as estrelas de nêutrons previstas por Zwicky são realmente um objeto a ser observado, elas também possuiriam massa máxima? Na situação em que as estrelas de nêutrons adotassem valores arbitrariamente elevados, o colapso gravitacional não poderia prosseguir para uma configuração de uma estrela crítica. Teríamos uma espécie de barreira a impedir o prosseguimento do colapso.

Tolman, Oppenheimer e seu estudante de doutorado, George Volkoff (hoje conhecidos como o trio TOV) desenvolveram as equações de estrutura da estrela de nêutrons e verificaram que existia um valor máximo de sua massa [24, 25]. Este valor foi estimado em $0,7M_{\odot}$, na completa ausência de forças nucleares. Para tal, a utilização de uma equação de estado (relação pressão x densidade) mais realística era fundamental. Apesar do valor baixo para a massa, ficou claro que um valor máximo deveria existir. Cálculos mais precisos de física nuclear aumentariam este valor para algumas massas solares, acreditava o trio TOV. E, conseqüentemente, isto abriria ainda mais a discussão sobre a existência das estrelas críticas. Hoje sabemos que o limite máximo da massa das estrelas de nêutrons é em torno de $3M_{\odot}$ e que existe um considerável número de equações de estado, incluindo todas as características das interações nucleares [26].

Com o avanço da Segunda Guerra Mundial, Oppenheimer passa a fazer parte do principal programa nuclear americano (projeto Manhattan). Assim, a questão da formação de estrelas de nêutrons e estrelas críticas foi adiada por mais de

⁶Em 1932, Landau já havia construído e publicado um modelo de núcleos de nêutrons [21], porém, à época, o *neutron* ainda não havia sido descoberto, o que o inviabilizou de chegar a uma conclusão correta.

uma década, cabendo a outro grande expoente da física desvendar o processo do colapso gravitacional em meados dos anos 1950: John Wheeler. A partir de 1956, Wheeler revisou os trabalhos de Chandrasekhar, Landau, Tolman, Oppenheimer e Volkoff.⁷ Wheeler era um grande especialista da física nuclear e, diferentemente do trio TOV, considerou equações de estado com ingredientes da física dos núcleos atômicos. Ele, inclusive, desenvolveu as leis da fissão nuclear juntamente com Niels Bohr [27]. A caracterização do comportamento da matéria, nas diversas fases da evolução estelar, deveria ser levada em conta, a fim de obter-se uma descrição precisa do processo. Wheeler sabia que a condição *sine qua non* para a estrutura das estrelas de nêutrons e anãs brancas é a de que estas deveriam ser frias, ou seja, sem qualquer produção de energia através de reações nucleares (final da evolução termonuclear). Com seu estudante de doutorado, Kent Harrison, construiu uma equação de estado para a matéria fria que envolvia todas as possíveis fases, incluindo os casos de Chandrasekhar (anãs brancas) e de TOV (estrelas de nêutrons) [28, 29]. De forma geral, o modelo de Harrison-Wheeler considerava dois setores de comportamento da equação de estado (como é adotado até hoje): baixas e altas densidades centrais. Estrelas com densidades centrais de até $4 \times 10^{11} \text{ g/cm}^3$ teriam o comportamento esperado para o colapso até a formação de anãs brancas.⁸ Porém, para densidades maiores do que este valor, os elétrons seriam comprimidos cada vez mais e forçados a se combinar com os prótons dos núcleos atômicos, formando assim, nêutrons. Hoje denominamos este processo como *gotejamento de nêutrons* ou *neutron drip*. Isto faria com que a matéria fosse constituída praticamente de nêutrons. A partir deste ponto, a matéria se comportaria como no caso TOV. Hoje sabemos que, ao incluirmos cálculos mais recentes de física nuclear, existe uma repulsão nuclear mais intensa que a proposta pelo trio TOV, o que não muda qualitativamente o processo. O máximo desta repulsão seria em densidades da

ordem de 10^{15} g/cm^3 . Para densidades maiores, haveria uma pequena diminuição na resistência à compressão gravitacional. Para valores acima de 10^{16} g/cm^3 , não há uma descrição viável para o comportamento da matéria devido à instabilidade das estrelas. Além de Harrison, Wheeler recorreu à Masami Wakano que, utilizando a equação de estado recém obtida, resolve as equações da relatividade geral de Einstein para estrelas esféricas utilizando cálculos numéricos acelerados por um dos primeiros computadores digitais da época (anos 1950) [28, 29]. O resultado obtido foi o primeiro a considerar uma descrição completa da estrutura das estrelas, de acordo com o comportamento da matéria em diferentes relações de massa, raio (circunferência) e densidade central. De forma geral, pode-se descrever o resultado de Wheeler, Harrison e Wakano através de cinco classes de possibilidades: i) *regime planetário*. Objetos com densidades centrais abaixo de 10^5 g/cm^3 formam planetas, em geral, feitos de ferro. ii) *regime das anãs brancas*. O intervalo de densidades centrais para estes objetos seria da ordem de $(10^5 - 10^9) \text{ g/cm}^3$; iii) *primeiro regime de instabilidade*. Aqui, as estrelas com densidades centrais entre 10^9 g/cm^3 e 10^{14} g/cm^3 , não alcançariam um regime estável. Estas implodiriam para uma estrela de nêutrons, no aumento de sua densidade ou explodiriam para a região das anãs brancas; iv) *regime das estrelas de nêutrons*. Para densidades acima de $(10^{14}) \text{ g/cm}^3$, as estrelas encontrariam sua estabilidade no ramo das estrelas de nêutrons e permaneceriam ali para sempre. Frias e sem nenhuma atividade termonuclear, com massas entre $0,1M_{\odot}$ e $2M_{\odot}$.⁹ Claro, as densidades das estrelas de nêutrons também possuem um limite superior, baseado no valor máximo de sua massa. Porém, até os dias de hoje não sabemos exatamente a equação de estado para as estrelas de nêutrons e, conseqüentemente, o valor máximo de sua massa. De fato, este tópico é um dos maiores desafios da física contemporânea e reúne esforços de diversos pesquisadores, de diversas áreas correlatas (física nuclear, teoria de campos, gravitação, cosmologia e astronomia). Atualmente, este valor está em torno de $3M_{\odot}$. Mas, com diversos candidatos à equação de estado das estrelas de nêutrons, não é possível

⁷Os trabalhos de Baade e Zwicky não foram considerados, possivelmente, pelo fato de que Oppenheimer não os citava. Landau foi comumente referenciado como o pioneiro na concepção das estrelas de nêutrons, o que não condiz com a história.

⁸Este valor leva em consideração regimes de instabilidade da estrela. A região de plena estabilidade possui valor de densidade central máxima da ordem de 10^9 g/cm^3

⁹O limite inferior de densidades e o seu respectivo valor de massa coincide com o valor mínimo de um núcleo de nêutrons, como avaliado por Oppenheimer e Sorber sobre o estudo de Landau.

vel definir o seu valor de maneira acurada [26]. v) *segundo regime de instabilidade*. Após o limite máximo das estrelas de nêutrons, as estrelas mais densas encontram outro ponto de equilíbrio instável, na mesma forma do caso iii). Porém, a instabilidade associada à explosão alcançaria o regime iv), enquanto a instabilidade de implosão manteria o colapso até alcançar o raio crítico. O trabalho de Wheeler, Wakano e Harrison exclui a possibilidade de um terceiro objeto astrofísico. A gravidade, juntamente com as leis da física nuclear, impedem que haja objetos sem atividade termonuclear diferentes das anãs brancas ou das estrelas de nêutrons. A única outra possibilidade está associada à existência de estrelas críticas. Porém, esta última opção não foi considerada por Wheeler. Ele tinha convicção (de forma similar ao caso Eddington-Chandrasekhar) de que a natureza evitaria a formação de estrelas críticas. Mas como seria este processo? Considerando que as estrelas perdem massa ao longo de suas vidas,¹⁰ talvez esta redução convergisse para um valor final o qual estaria sempre abaixo do limite superior das estrelas de nêutrons. Até a década de 1960, os astrônomos mantiam esta hipótese e descartavam a possibilidade da existência de estrelas críticas. E esta também foi a atitude tomada por Wheeler, o que acarretou em um embate direto com Oppenheimer, cuja convicção era de que as estrelas críticas seriam o destino inevitável dos objetos estelares muito massivos (acima de $\sim 20M_{\odot}$).

4 Oppenheimer, Wheeler, Penrose e a aceitação dos buracos negros

A convicção de Oppenheimer vinha a partir de seu trabalho (ainda em 1939) com outro de seus alunos: Hartland Snyder [31]. Neste trabalho, foi desenvolvido um modelo dinâmico para o colapso de uma estrela em um objeto crítico (buraco negro). Assim, Oppenheimer não somente estabelece a estrutura de objetos compactos (juntamente com Tolman e Volkoff), mas também o mecanismo de sua formação. E a habilidade matemática de Snyder foi crucial para a conclusão do estudo. O grande problema do modelo (o qual ficou conhecido na literatura como o *colapso de*

Oppenheimer-Snyder) está no fato de ser um caso idealizado de colapso. A caracterização da estrela progenitora não incluía diversos processos físicos importantes. De maneira geral, as estrelas possuem rotação, as densidades variam ao longo do raio estelar, há emissão de radiação (térmica, eletromagnética, gravitacional e neutrinos) e possuem ondas de choque as quais ejetam matéria ao meio interestelar. O modelo considerado excluía todas estas questões. A estrela não possuía rotação, nem pressão interna (fluido de poeira), densidade constante¹¹ e sem ejeção de matéria/energia. A evolução dinâmica era realizada através de sucessivas configurações esféricas estáticas, pois era a característica exterior da estrela (esfericamente simétrica), vista por um observador longínquo. Assim, um colapso idealizado deveria ser composto por seqüências de esferas cada vez menores, mas representadas qualitativamente pela mesma solução. Ou seja, Oppenheimer, apesar das simplificações, sabia que a solução final deveria ser a de uma estrela crítica, pois a própria estrela progenitora já era, por construção, representada por uma solução exterior de Schwarzschild. Além disso, estrelas com rotações lentas poderiam ser aproximadamente similares ao caso ideal, assim como estrelas de pressão nula. Se a gravidade em altas densidades supera qualquer tipo de força nuclear, considerar pressão nula, neste caso, não seria de todo um absurdo, pois, em algum momento a gravidade seria tão intensa que qualquer gradiente de pressão seria desprezado.

A principal conclusão do trabalho de Oppenheimer e Snyder está justamente no fato de que o ingrediente mais importante do colapso é a gravidade. As equações da relatividade geral no regime de campo forte da gravitação, mesmo em situações mais realísticas, ditam as regras da implosão, indicando que a formação de estrelas críticas é inevitável. Ou seja, as propriedades internas da matéria estelar não impediriam o processo do colapso.

Mas toda a convicção de Oppenheimer não foi compartilhada por seus pares. O trabalho foi recebido com bastante ceticismo, principalmente por Wheeler. Durante um evento em Bruxelas,

¹⁰A perda de massa é causada pelo fenômeno de *ventos solares*. O conteúdo ejetado depende diretamente da metalicidade da estrela progenitora [30].

¹¹A região interna da estrela é composta por uma solução das equações da relatividade geral (Friedmann-Robertson-Walker-Lemaître ou FRWL) a qual descreve um espaço-tempo homogêneo e isotrópico, justificando a densidade constante ao longo do raio estelar [32].

no ano de 1958, o confronto entre os dois mostrou claramente a divisão de pensamento a qual já possuía um histórico de tensão desde os tempos do programa nuclear americano [33]. O nível de conhecimento da física nuclear e suas consequências para a estrutura e evolução estelar, fez com que Wheeler combatesse a idealização do modelo de Oppenheimer e Snyder. Além disso, a relatividade geral (à época) possuía testes observacionais apenas no regime de campo fraco da gravitação (próximos aos limites newtonianos). O principal nome a considerar correto (e importante) o trabalho de Oppenheimer foi Landau.

Segundo Wheeler, a implosão estelar chegaria a um ponto onde a alta densidade na região do núcleo converteria os nêutrons em radiação. Desta forma, parte da massa da estrela diminuiria ao longo do processo até chegar a um valor abaixo do limite máximo das estrelas (como discutido anteriormente sobre ventos solares). E, ainda segundo Wheeler, justamente todas as grandezas físicas mais realísticas (e desconsideradas por Oppenheimer) seriam fundamentais para a diminuição da massa. Por exemplo, cálculos de fenômenos de transporte via radiação. Isto envolveria equações da hidrodinâmica (até mesmo da magnetohidrodinâmica) que não foram contabilizadas no caso ideal. E, soluções mais realísticas exigem alto nível computacional para a produção de simulações avançadas. Hoje o quadro é bastante favorável, porém, em 1939, isto era totalmente impensável.

De fato, tanto Oppenheimer quanto Wheeler tinham argumentos fortes para a defesa de suas posições. No entanto, as reivindicações de Wheeler sobre inclusão de ingredientes mais realísticos foram atendidas por especialistas em simulações de explosões de bombas atômicas. Todo o aparato computacional do pós-guerra foi importante para a compreensão do colapso gravitacional. Stirling Colgate, Richard White e Michael May eram especialistas em simulações computacionais de explosões de bombas de hidrogênio. Este estudo era importante para prever eventos altamente energéticos (e perigosos), com o intuito de controlar testes nucleares considerados estratégicos. Afinal, a guerra fria aumentava a sua tensão ano após ano e todo domínio intelectual acerca da energia nuclear era crucial. O trio Colgate-White-May, começou a ter bastante interesse na física da implosão gravitacional e, em uma série de trabalhos nos anos 1960 [34–37], simulam o

colapso de estrelas massivas. Excetuando a rotação da estrela (a qual retira a simetria esférica da mesma), todos os outros ingredientes apontados por Wheeler como importantes foram considerados.¹² O resultado das simulações revelaram a formação de estrelas de nêutrons como produtos de supernovas, assim como previsto por Zwicky trinta anos antes. Para massas muito maiores que $2M_{\odot}$, a implosão gerava estrelas críticas, de forma similar ao modelo de Oppenheimer-Snyder.

Além deste estudo americano, de forma independente, grupos de soviéticos também obtiveram resultados similares. Aliás, a União Soviética possuía sua versão de Wheeler: Yakov Zel'dovich, grande especialista da física nuclear e desenvolvedor da teoria de reações em cadeia na fissão nuclear (em parceria com Yuli Khariton [39]). Zel'dovich foi responsável por estimular vários de seus colegas a simularem o mesmo problema da implosão estelar como feito nos Estados Unidos. Tal tarefa foi realizada por Dmitri Nadezhin, Vladimir Imshennik e Mikhail Podurets [40, 41]. A junção dos trabalhos americanos e soviéticos, convergindo para o mesmo resultado, foi fundamental para que não houvesse mais dúvidas: *o colapso gravitacional de estrelas muito massivas em estrelas críticas era inevitável*.

Em 1967, Wheeler passa a adotar, de forma mais corriqueira o termo *buraco negro*, referindo-se às estrelas críticas. Inclusive, isto está registrado em uma palestra ministrada por ele e publicada na forma escrita em 1968 [42]. A partir dessa época, a comunidade científica também passa a adotá-lo em definitivo (assim como o autor deste texto o fará daqui em diante.)

Apesar de estar convencido da existência de buracos negros, segundo a dinâmica da relatividade geral, Wheeler reservava dúvidas para uma característica importante da implosão. O modelo de Oppenheimer-Snyder demonstrava que a estrela, de acordo com um observador externo e longínquo, passaria por uma espécie de congelamento.¹³ Isto se deve ao fato de que o valor do *redshift* gravitacional, no limite do horizonte, tende ao infinito, impedindo que os raios luminosos escapem para o exterior. Desta forma, a última visão da estrela seria exatamente na imi-

¹²O primeiro trabalho a considerar pequenos desvios da simetria esférica foi o de Andrei Doroshkevich, Yakov Zel'dovich e Igor Novikov [38].

¹³Inclusive, os cientistas soviéticos, à época, se referiam aos buracos negros como *estrelas congeladas* [33].

nência da formação do buraco negro. Matematicamente isto está relacionado ao fato de que a circunferência crítica é uma *singularidade* (uma patologia nas equações). A dinâmica do colapso é interrompida assim que a singularidade é alcançada. Ou seja, qual o destino da matéria estelar ao chegar neste ponto? Se um observador externo não a vê, como saber o que ocorre internamente? A resposta já havia sido parcialmente respondida por um trabalho de 1958 de David Finkelstein [43], onde uma mudança de referencial¹⁴ remove a singularidade no horizonte, permitindo que a descrição do colapso continue no interior do buraco negro. Esta continuação do colapso é vista por um referencial comóvel ao material imergente. Assim, a singularidade do horizonte estava resolvida. Porém, os buracos negros possuem outra singularidade no centro da configuração. Esta singularidade é muito mais crítica que a do horizonte, pois não pode ser removida através da passagem de um referencial a outro, como o caso solucionado por Finkelstein. Roger Penrose, em 1965, demonstrou que a singularidade central é inerente ao colapso e à conseqüente formação de buracos negros [44]. Este trabalho foi revolucionário pelo fato de que Penrose era versado em métodos de topologia, os quais eliminavam qualquer questão sobre o tipo de objeto colapsante. O resultado de seu trabalho, conhecido como o *teorema da singularidade de Penrose*, era global. Por mais deformada que fosse a distribuição de matéria, esta, após o colapso, geraria uma singularidade central.¹⁵ O ingrediente fundamental da descrição do colapso está na formação de um *horizonte aparente* [45]. Horizontes aparentes são, de forma rudimentar, o contorno de uma superfície bidimensional formada por todas as *superfícies de aprisionamento*. Uma superfície de aprisionamento é uma região, (obviamente bidimensional) na qual todos os raios luminosos convergem ao atravessá-la. Ou seja, o horizonte aparente é a fronteira da composição de todas as regiões de aprisionamento da luz. O horizonte aparente

também pode ser pensado como a versão de um horizonte de eventos para situações não estáticas ou estacionárias. Sistemas emissores de radiação gravitacional, por exemplo, localizam buracos negros através de horizontes aparentes. Ao fim da emissão de radiação, o horizonte aparente converge para o horizonte de eventos. Um exemplo clássico desta diferença entre os conceitos de horizonte está no estudo da solução de Vaidya [45]. Estas diferentes definições de horizontes são importantes para caracterizar, de forma inequívoca, a localização de buracos negros do ponto de vista teórico.¹⁶ É importante salientar que o trabalho de Penrose foi contestado por Isaac Khalatinikov e Evgeny Lifshitz, outros dos grandes nomes da física soviética. Em 1963 [47], eles publicam um artigo onde consideram que soluções da relatividade geral com deformações genéricas não levariam à formação de uma singularidade central. Penrose estaria correto, caso fosse encontrada uma solução com deformidades gerais e que produzisse a singularidade. Em 1970, Khalatinikov e Lifshitz, juntamente com Vladimir Belinsky, publicam um trabalho onde encontram uma solução com deformações gerais e que, após o colapso, forma uma singularidade central.¹⁷ Neste trabalho, os autores reconhecem que Penrose estava correto. Contudo, a questão da implosão do conteúdo material da estrela à singularidade central ainda permanecia como um problema. Pois, definitivamente, toda a matéria estelar colapsa em direção à singularidade, sem possibilidade de retorno. Este fato incomodou demasiadamente Wheeler que, mesmo convencido da formação de estrelas críticas, não se contentava com dezenas de massas solares concentradas em um único ponto do espaço.¹⁸ Wheeler via nas leis da mecânica quântica uma possível solução para o problema, pois efeitos desta natureza ocorreriam em uma concentração (densidade) tão alta de matéria em um volume muito pequeno. Novas leis impediriam a implosão da matéria na singularidade, através da conversão de matéria em radiação. Tal radiação produzida

¹⁴A teoria da relatividade geral não é modificada quando muda-se de um referencial para outros. Isto inclusive é considerado um princípio fundamental da teoria: o princípio da covariância geral. Além disso, esta mudança de referencial já havia sido pensada (mas não concretizada) por Eddington, tornando-a conhecida na literatura como *referencial de Eddington-Finkelstein* [32].

¹⁵do ponto de vista topológico, uma distribuição com uma deformação generalizada teria uma equivalência com o caso esfericamente simétrico de Oppenheimer-Snyder.

¹⁶Uma área de estudo da relatividade geral a qual aborda esse tipo de análise é a relatividade numérica, onde simulações computacionais de formação de objetos astrofísicos (principalmente buracos negros e estrelas de nêutrons) são construídas periodicamente [46].

¹⁷Esta singularidade é conhecida na literatura como *singularidade Belinsky-Khalatinikov-Lifshitz* ou, simplesmente, BKL.

¹⁸A densidade média de um buraco negro é de $\sim 10^{18} (M_{bn}/M_{\odot})^{-2} \text{ g/cm}^3$.

escaparia do buraco negro, a fim de evitar o colapso. Mas como a radiação poderia escapar se o buraco negro impede fluxo de energia (e momento) emergindo de seu horizonte? Wheeler foi convencido a desistir da ideia, apesar de estar correto [33]. De fato, a mecânica quântica permite que o buraco negro emita radiação térmica. Este fenômeno é conhecido como *evaporação* e a radiação emitida no processo como *radiação Hawking*, devido ao trabalho de Stephen Hawking de 1974 [48].¹⁹ A temperatura da radiação é de $\sim 10^{-7}(M_{\odot}/M_{bn})$ K e o tempo de evaporação $\sim 10^{64}(M_{bn}/M_{\odot})^3$ anos. Desta forma, quanto menor a massa do buraco negro, mais rápida seria sua evaporação. Massas da ordem de 10^{15} g ($10^{-18}M_{\odot}$) ou menores teriam evaporado dentro do período da idade do Universo (da ordem de 10^{10} anos) [50].

Duas conclusões podem ser tiradas a partir deste ponto. Primeiro, mesmo que a visão de Wheeler estivesse correta acerca dos efeitos quânticos e que o trabalho de Hawking corroborasse com sua visão, a evaporação é praticamente desprezível quando leva-se em conta buracos negros provenientes do colapso estelar (buracos negros ditos astrofísicos). Como visto acima, um buraco negro com uma massa solar emitiria radiação Hawking numa temperatura de 10^{-7} K. A segunda conclusão (e diretamente ligada à primeira) é a possibilidade da existência de buracos negros muito menos massivos que os considerados até então. E a época mais propícia para a formação destes objetos está nos primórdios do universo, segundo o modelo padrão da cosmologia (teoria do Big Bang). Esta hipótese de buracos negros primordiais foi sugerida por Zel'dovich e Novikov [51] em 1967 e independentemente por Hawking em 1971 [52]. No universo primordial, as regiões do espaço são muito densas e quentes. Suas altas energias, quando concentradas em um volume delimitado pela rotação de um aro de raio crítico, permitiriam a formação de buracos negros. Este é o fundamento da chamada *conjectura do aro*, criada por Kip Thorne em 1972 [53]. Esta conjectura leva em conta qualquer formato

da distribuição de energia colapsante, desde que esteja totalmente contida no volume considerado.

Por fim, a produção de buracos negros (similares aos primordiais), segundo a conjectura do aro, poderia ser capaz de ocorrer em aceleradores de partículas. Este é um ponto mais especulativo e necessita da unificação de duas teorias hoje incompatíveis, a relatividade geral e a mecânica quântica. Uma teoria de gravitação quântica descreveria buracos negros próximos ao regime de Planck²⁰ e estes poderiam ser produzidos através da colisões de partículas, uma vez que fosse localizado um horizonte aparente [55]. A produção de buracos negros em laboratório não representaria um risco à humanidade, pois, quanto mais próximo do regime planckiano, a evaporação do buraco negro levaria um tempo extremamente curto para ocorrer (10^{-42} s).

5 Tipos de formação de buracos negros

De acordo com o que foi explorado no texto, pode-se resumir os diversos tipos de formação de objetos compactos (anãs brancas, estrelas de nêutron e buracos negros),²¹ através da classificação de sua massa e do mecanismo de formação [55]:

- a) *Objetos supermassivos* ($M \geq 10^5 M_{\odot}$). Buracos negros supermassivos poderiam ser formados inclusive antes mesmo da queima de hidrogênio. Também podem ser formados através de acreção de matéria em buracos negros de massa intermediária (IMBHs) ou através de colisões entre IMBHs.
- b) *Objetos muito massivos*. Para valores de massa entre $200M_{\odot}$ e $10^5 M_{\odot}$, ocorre o colapso para IMBHs, a partir da instabilidade elétron-pósitron durante a queima de oxigênio. Para massas entre $100M_{\odot}$ e $200M_{\odot}$, tal instabilidade não permite a formação de objetos compactos.
- c) *Objetos massivos*. Entre $25M_{\odot}$ e $100M_{\odot}$, formação de buracos negros com dezenas de

¹⁹Zel'dovich, em 1971, já havia estudado objetos girantes e emissores de radiação [49]. Em analogia com buracos negros com rotação, estes irradiam até que toda a energia rotacional seja transferida, cessando o processo. Os cálculos de Hawking mostraram que, numa abordagem semi clássica da gravitação, os buracos negros evaporariam mesmo após a ausência de rotação [48].

²⁰O regime de Planck ou planckiano possui comprimentos da ordem de 10^{-33} cm, tempos de 10^{-44} s, massas de 10^{-5} g e temperaturas de 10^{32} K [54].

²¹Aqui considera-se apenas o caso da formação de estrelas isoladas, sem uma estrela companheira. Casos de estrelas binárias, por exemplo, são brevemente comentados na seção de considerações finais (seção 6)

massas solares (SBHs), resultado da queima de combustível nuclear. Para massas entre $1M_{\odot}$ e $25M_{\odot}$, formam-se anãs brancas, estrelas de nêutrons (nos limites superiores de $1,4M_{\odot}$ e $3M_{\odot}$, respectivamente) ou total ruptura na fase de ignição de carbono.

- d) *Buracos negros primordiais*. Entre $10^{-18}M_{\odot}$ e $1M_{\odot}$, Formação através do colapso de flutuações primordiais. Para massas no intervalo de $10^{-38}M_{\odot}$ e $10^{-18}M_{\odot}$, ocorre o mesmo que no caso anterior, porém com evaporação. Radiação Hawking possível de ser detectada atualmente; Finalmente, para massas de até $10^{-38}M_{\odot}$, os buracos negros seriam remanescentes da evaporação de objetos mais massivos ou remanescentes da fase planckiana do universo.

é possível de ser analisado através de técnicas perturbativas e de relatividade numérica [46].

- ii) *Binárias de estrelas massivas*. Outro possível tipo de formação de binárias de buracos negros está associado a binárias de estrelas progenitoras massivas, onde, na fase de núcleo de hélio, um envelope é formado em ambas as estrelas. Além disso, binárias de buracos negros são formadas no final do processo [58].
- iii) *Fenômeno crítico*. Ao colapsarem, distribuições de matéria apresentam característica similar ao que ocorre em transições de fase na matéria condensada. Choptuik [59] descobre este fenômeno e vincula o parâmetro crítico à amplitude da distribuição inicial da matéria.

6 Considerações finais

Apesar de haver uma infinidade de resultados teóricos e, principalmente observacionais (fontes de raios-x e ondas gravitacionais), decidiu-se encerrar o contexto histórico da formação de buracos negros a partir deste ponto. Pode ser que, para o leitor, esta conclusão tenha sido um tanto abrupta. Porém, esta escolha do autor é baseada na ideia de expor, como dito na introdução do texto, o caráter de rejeição e aceitação dos buracos negros numa linha cronológica. O que se sucede historicamente é a busca por estes objetos no universo, além do desenvolvimento de técnicas teóricas no intuito de classificar suas características de maneira precisa [33]. Certamente, os demais textos deste volume do *Cadernos de Astronomia* versam sobre estes temas e seria redundante descrevê-los aqui.

Como considerações finais, serão apontados, a seguir e brevemente, algumas características adicionais e fundamentais sobre a formação de buracos negros. Para os mais interessados, as referências proporcionam um estudo mais aprofundado.

- i) *Formação de sistemas binários*. Buracos negros também são encontrados na natureza em pares. A detecção de ondas gravitacionais [56] proporcionou uma inauguração de buscas por estes objetos e dezenas de binárias já foram detectadas [57]. Do ponto de vista teórico, este processo de formação só

Agradecimentos

Primeiro, gostaria de agradecer aos professores Júlio Fabris e Junior Toniato pelo convite em fazer parte desta edição do *Cadernos de Astronomia* sobre buracos negros. Este é um tema muito instigante e é sempre prazeroso escrever ou discutir a respeito. Também gostaria de utilizar este espaço para prestar uma pequena homenagem ao professor Ivano Damião Soares, um dos principais investigadores de buracos negros do Brasil. Tive a oportunidade de ser orientado por ele no programa de doutorado do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF) e, grande parte do que sei, é graças ao seu empenho na minha formação científica. É uma honra não somente ter sido seu aluno, mas, principalmente, ainda continuar trabalhando com o professor Ivano. Mesmo no regime de colaborador, sigo aprendendo com ele detalhes e técnicas da gravitação einsteiniana.

Sobre o autor

Rafael Fernandes Aranha (rafael.aranha@uerj.br) possui Bacharelado em Física pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) e Doutorado em Ciências Físicas pelo Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF). Também realizou pós-doutorado na Georgia Institute of Technology (Georgia Tech), associado ao Center for Relativistic Astrophysics.

Hoje atua como professor adjunto no grupo de gravitação e cosmologia da UERJ (GravCosmo-UERJ). Trabalha majoritariamente na área de relatividade numérica, onde obtém soluções das equações da relatividade geral através de métodos de cálculo numérico, além da utilização de diversas ferramentas computacionais. Os tópicos mais abordados de sua pesquisa versam sobre formação de buracos negros no colapso gravitacional, emissão de radiação gravitacional em sistemas compostos por buracos negros e técnicas numéricas via métodos espectrais aplicados à gravitação einsteiniana.

Referências

- [1] K. Akiyama et al., *First m87 event horizon telescope results. i. the shadow of the supermassive black hole*, [The Astrophysical Journal Letters](#) **875**, 1 (2019).
- [2] *The laser interferometer gravitational-wave observatory and the first direct observation of gravitational waves*, The Royal Swedish Academy of Sciences (2017).
- [3] *Theoretical foundation for black holes and the supermassive compact object at the galactic centre*, The Royal Swedish Academy of Sciences (2020).
- [4] *Interstellar*, Diretor: Christopher Nolan (Paramount Pictures, Estados Unidos, 2014).
- [5] *Star Trek The Original Series*, Criador: Gene Roddenberry (Hollywood, Estados Unidos, 1969).
- [6] L. Niven, *A Hole in Space* (Ballantine Books, Estados Unidos, 1974).
- [7] J. Michell, *On the means of discovering the distance, magnitude, etc., of the fixed stars, in consequence of the diminution 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 further necessary for that purpose.*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London **74**, 35 (1784). Disponível em <http://www.jstor.org/stable/106576>, acesso em fev. 2023.
- [8] P. S. Laplace, *Exposition du Système du Monde, Volume II: Des Mouvements Réels des Corps Célestes* (Paris, 1796).
- [9] A. Einstein, *On the influence of gravity on the propagation of light*, [Annalen der Physik](#) **35**, 898 (1911).
- [10] A. Einstein, *The field equations for gravitation*, Sitzungberichte der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Klasse für Mathematik, Physik, und Technik **1915**, 844 (1915).
- [11] K. Schwarzschild, *Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie*, Sitzungberichte der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Klasse für Mathematik, Physik, und Technik **1916**, 424 (1916).
- [12] A. Einstein, *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*, [Annalen der Physik](#) **322**, 132 (1905).
- [13] A. S. Eddington, *The Internal Constitution of the Stars* (Cambridge University Press, Inglaterra, 1926).
- [14] S. Chandrasekhar, *The maximum mass of ideal white dwarfs*, [Astrophysical Journal](#) **52**, 81 (1931).
- [15] A. Einstein, *On a stationary system with spherical symmetry consisting of many gravitating masses*, [Annals of Mathematics](#) **40**, 922 (1939).
- [16] *28. Commission des nébuleuses extragalactiques*, [Transactions of the International Astronomical Union](#) **8**, 397–399 (1954).
- [17] W. Baade e F. Zwicky, *Remarks on Supernovae and Cosmic Rays*, [Physical Review](#) **46**(1), 76 (1934).
- [18] W. Baade e F. Zwicky, *On super-novae*, [Proceedings of the National Academy of Sciences](#) **20**, 254 (1934).
- [19] J. Chadwick, *The existence of a neutron*, [Proceedings of the Royal Society of London](#) **136**, 692 (1932).

- [20] L. D. Landau, *Origin of stellar energy*, *Nature* **141**, 333 (1938).
- [21] L. D. Landau, *On the theory of stars*, *Physicalische Zeitschrift Sowietunion* **1**, 285 (1932).
- [22] J. R. Oppenheimer e R. Serber, *On the stability of stellar neutron cores*, *Physical Review* **54**(7), 540 (1938).
- [23] H. A. Bethe e C. L. Critchfield, *The formation of deuterons by proton combination*, *Physical Review* **54**, 248 (1938).
- [24] J. R. Oppenheimer e G. M. Volkoff, *On massive neutron cores*, *Physical Review* **55**(4), 374 (1939).
- [25] R. C. Tolman, *Static solutions of einstein's field equations*, *Physical Review* **55**, 364 (1939).
- [26] J. Schaffner-Bielich, *Compact Star Physics* (Cambridge University Press, Estados Unidos, 2020).
- [27] N. Bohr e J. A. Wheeler, *The mechanism of nuclear fission*, *Physical Review* **56**, 426 (1939).
- [28] B. K. Harrison, M. Wakano e J. A. Wheeler, *Matter-Energy at High Density: End Point of Thermonuclear Evolution*, in *Onzième Conseil de Physique Solvay*, editado por Editores (Bruxelas, 1958), 124.
- [29] B. K. Harrison et al., *Gravitation Theory and Gravitational Collapse* (University of Chicago Press, Estados Unidos, 1965).
- [30] J. S. Vink, A. de Koter e H. J. Lamers, *Mass-loss predictions for o and b stars as a function of metallicity*, *Astron. Astrophys.* **369**, 574 (2001).
- [31] J. R. Oppenheimer e H. Snyder, *On continued gravitational contraction*, *Physical Review* **56**, 455 (1939).
- [32] C. W. Misner, K. S. Thorne e J. A. Wheeler, *Gravitation* (W. H. Freeman, Estados Unidos, 1973).
- [33] K. S. Thorne, *Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy* (W. W. Norton, Estados Unidos, 1994).
- [34] S. A. Colgate e R. H. White, *Dynamic of a supernova explosion*, *Bulletin of the American Physical Society* **8**, 306 (1963).
- [35] S. A. Colgate e R. H. White, *The hydrodynamic behavior of supernova explosions dynamic of a supernova explosion*, *Astrophysical Journal* **143**, 626 (1966).
- [36] M. M. M. Colgate e R. H. White, *Hydrodynamical calculations of general relativistic collapse*, *Bulletin of the American Physical Society* **10**, 15 (1965).
- [37] M. M. May e R. H. White, *Hydrodynamical calculations of general relativistic collapse*, *Physical Review* **141**, 1232 (1966).
- [38] A. D. Doroshkevich, Y. B. Zel'dovich e I. D. Novikov, *Gavitational collapse of nonsymmetric and rotating masses*, *Soviet Physics - JETP* **22**, 122 (1966). Disponível em <http://jetp.ras.ru/cgi-bin/e/index/e/22/1/p122?a=list>, acesso em fev. 2023.
- [39] Y. B. Zel'dovich e Y. B. Khariton, *On a issue of a chain reaction based on an isotope of uranium*, *Zhurnal Eksperimentalnoi i Teoreticheskoi Fiziki* **9**, 1425 (1939).
- [40] V. S. Imshennik e D. K. Nadezhin, *Gas dynamical model of a type ii supernova outburst*, *Soviet Astronomy* **8**, 664 (1965).
- [41] M. A. Podurets, *The collapse of a star with back pressure taken into account*, *Soviet Physics* **9**, 1 (1964).
- [42] J. A. Wheeler, *Our universe: the known and the unknown*, *American Scientist* **56**, 1 (1968).
- [43] D. Finkelstein, *Past-future asymmetry of the gravitational field of a point particle*, *Physical Review* **110**, 965 (1958).
- [44] R. Penrose, *Gravitational collapse and space-time singularities*, *Physical Review Letters* **14**(3), 57 (1965).
- [45] E. Poisson, *A Relativist's Toolkit – The Mathematics of Black Hole Mechanics* (Cambridge University Press, Reino Unido, 2004).

- [46] T. W. Baumgarte e S. L. Shapiro, *Numerical Relativity: Solving Einstein's Equation on the Computer* (Cambridge University Press, Reino Unido, 2010).
- [47] E. M. Lifshitz e I. M. Khalatnikov, *Investigations on relativistic cosmology*, *Advances in Physics* **12**, 185 (1963).
- [48] S. W. Hawking, *Black hole explosions?*, *Nature* **248**, 30 (1974).
- [49] Y. B. Zel'dovich, *The generation of waves by a rotating body*, *JETP Letters* **14**, 180 (1971).
- [50] D. N. Page, *Particle emission rates from a black hole. ii. massless particles from a rotating hole*, *Physical Review D* **14**, 3260 (1976).
- [51] Y. B. Zel'dovich e I. D. Novikov, *The hypothesis of cores retarded during expansion and the hot cosmological model*, *Soviet Ast* **10**, 602 (1967).
- [52] S. W. Hawking, *Gravitationally collapse objects of very low mass*, *MNRAS* **152**, 75 (1971).
- [53] K. S. Thorne, *Nonspherical Gravitational Collapse - A Short Review* (W H Freeman, Estados Unidos, 1972).
- [54] V. Mukhanov, *Physical Principles of Cosmology* (Cabridge University Press, Reino Unido, 2005).
- [55] X. Calmet, B. Carr e E. Winstanley, *Quantum Black Holes* (Springer, Alemanha, 2014).
- [56] B. P. Abbott e et al., *Observation of gravitational waves from a binary black hole merger*, *Physical Review Letters* **116**, 061102 (2016).
- [57] *Detection papers*, LIGO Caltech. Disponível em <https://www.ligo.caltech.edu/page/detection-companion-papers>, acesso em fev. 2023.
- [58] M. Mapelli, *Binary black hole mergers: Formation and populations*, *Front. Astron. Space Sci.* **7**, 38 (2020).
- [59] M. W. Choptuik, *Universality and scaling in gravitational collapse of a massless scalar field*, *Physical Review Letters* **70**, 9 (1993).