

A Física Quântica na Astrofísica e no Cosmos

Carlos A. R. Herdeiro

Dept. Matemática e Centro de Investigação em Matemática e Aplicações (CIDMA), Universidade de Aveiro

herdeiro@ua.pt

A Física Quântica descreve o microcosmos — o mundo das partículas, dos átomos e das forças fundamentais. A Astrofísica e a Cosmologia descrevem o macrocosmos — o Universo das estrelas, das galáxias e do espaço-tempo. Uma das inferências mais fascinantes da ciência do século XX foi que a Física do infinitamente pequeno desempenha um papel decisivo na dinâmica e nas propriedades do infinitamente grande. É a Quântica que explica o brilho e a longevidade das estrelas, a origem dos elementos e até a evolução do próprio Universo. E alguns dos maiores mistérios que hoje persistem sobre o cosmos — desde a matéria escura à natureza do espaço-tempo — residem, precisamente, no domínio quântico.

1. Duas revoluções que mudaram o mundo

No virar do século XX, duas teorias emergiram quase simultaneamente, cada uma derrubando os pilares clássicos da Física. Em 1900, Max Planck propôs que a energia do campo eletromagnético não é contínua, mas quantizada [1]. Foi a primeira cena de uma peça dramática que levaria ao estabelecimento da Mecânica Quântica (MQ), há 100 anos atrás. Cinco [2] e quinze [3] anos depois da observação de Planck, Albert Einstein apresentou as suas teorias da Relatividade Restrita e Relatividade Geral (RG), respetivamente, onde o espaço e o tempo deixaram de ser um palco passivo para se tornarem atores dinâmicos. Estes atores e a sua dinâmica explicam a gravidade, dando-lhe novas facetas e tornando a RG fundamental para o estudo do Universo.

Estas duas revoluções nasceram de problemas distintos — o problema do corpo negro e a questão do éter — mas acabaram por se entrelaçar profundamente. A RG descreve o Cosmos macroscópico: o movimento das galáxias, o colapso das estrelas, a expansão do Universo. A MQ domina o micromundo: átomos, partículas e campos fundamentais. A Astrofísica moderna vive precisamente na sobreposição entre ambas. A luz das estrelas, a origem da energia solar, a formação de buracos negros e até a radiação cósmica de fundo são fenómenos cuja compreensão exige a união — às vezes tensa, outras vezes harmoniosa — destas duas linguagens da Natureza.

2. A Quântica entra na Astrofísica

O primeiro elo entre a MQ e a Astrofísica reside na observação mais elementar das propriedades dos astros: as estrelas emitem

luz. Este elo foi revelado pela espectroscopia, criada muito antes da MQ por Joseph von Fraunhofer, no início do século XIX, que revelou a existência de linhas misteriosas nos espectros solares [4]. Na década de 1910, dois pioneiros da MQ, Niels Bohr [5] e Arnold Sommerfeld [6], perceberam que essas linhas eram as assinaturas quânticas dos átomos que compõem as estrelas. Cada risca no espectro é um testemunho da quantização da energia atômica. A astrofísica moderna nasceu, assim, de uma leitura quântica da luz.

O segundo passo foi compreender como se gera essa luz. O enigma da energia estelar intrigou gerações. Hermann von Helmholtz [7] e Lord Kelvin [8] propuseram, no século XIX, que as estrelas brilhassem pela contração gravitacional — mas isso só explicaria algumas dezenas de milhões de anos de vida, em claro conflito com a geologia e a biologia.

Foi a MQ, e o seu uso na Física Nuclear, que permitiu resolver o enigma. George Gamow mostrou que partículas podiam atravessar barreiras de potencial por efeito túnel [9] e Hans Bethe aplicou esse princípio para descrever a fusão nuclear como fonte da energia estelar [10]. Os núcleos atômicos podiam fundir-se apesar da repulsão coulombiana, porque as partículas, regidas pelo princípio de incerteza de Heisenberg [11], podem penetrar barreiras de potencial aparentemente intransponíveis. Assim nasceu a astrofísica nuclear.

3. A morte quântica das estrelas

A mesma física que “faz” brilhar as estrelas explica também a sua morte. Quando o combustível nuclear se esgota, a pressão exercida pela luz, gerada no interior da estrela, na sua fuga até à superfície, cessa. Resta apenas o peso da própria estrela que a quer fazer implodir — a gravidade torna-se o carrasco final da estrela. O colapso começa, mas a MQ pode intervir uma vez mais, sob a forma do princípio de exclusão de Pauli [12]. Wolfgang Pauli, em 1925, impôs uma regra aparentemente estranha, mas crucial para explicar a estrutura dos átomos: dois eletrões não podem ocupar o mesmo estado quântico. Ora, quando milhões de eletrões são comprimidos num volume minúsculo, como quando uma estrela implode, essa regra transforma-se numa força colossal — a pressão de degenerescência eletrónica. É ela que sustém as anãs brancas, os cadáveres das estrelas de baixa massa.

Subrahmanyan Chandrasekhar, com apenas 19 anos, calculou em 1930 que essa força tem limites [13]. Acima de 1,4 massas solares, a degenerescência eletrônica não basta para equilibrar a gravidade. Surge então uma nova classe de objetos: as estrelas de neutrões, sustentadas pela degenerescência de neutrões que resultam da “fusão” de prótons com elétrons. O centro sobrevivente da estrela torna-se um autêntico núcleo atômico gigante. Esta é uma escala onde a MQ e a RG já não se podem ignorar mutuamente.

Mas mesmo esta pressão não consegue contrariar a gravidade se a estrela inicial for demasiado massiva. Estima-se que acima de um valor da massa (deste núcleo) entre 2 e 3 massas solares, a estrela de neutrões não é viável e o que resta da estrela colapsa para um objeto ainda mais misterioso: um buraco negro. O valor preciso ainda se encontra em debate, sendo estas estimativas resultado do trabalho de Richard Tolman [14], Robert Oppenheimer e George Volkoff [15].

Entre o colapso e a resistência, a Natureza revela-se minimalista: três possíveis destinos estelares — anã branca, estrela de neutrões ou buraco negro — todos determinados por leis quânticas.

4. O misterioso lado quântico dos buracos negros

O terceiro dos possíveis destinos de uma estrela — o buraco negro — leva a relação entre a RG e a MQ a um extremo. Sabemos hoje, por observações de raios X, ondas rádio, órbitas estelares, ondas gravitacionais e até imagiologia direta, que os buracos negros são extremamente abundantes no Universo. Teoricamente, os buracos negros são descritos pela RG, que é uma teoria clássica (isto é, não quântica). E de acordo com a RG, são mesmo negros: absorvem matéria/energia e nunca a libertam. Por isso só podem crescer em tamanho. Contudo, Stephen Hawking demonstrou, em 1974 [16], que a descrição quântica dos buracos negros prevê que estes sejam apenas “cinzentos”: emitem radiação térmica e afinal os buracos negros podem decrescer, evaporando-se.

A ideia foi revolucionária, no âmbito da gravitação. Conceptualmente, o vácuo quântico não é vazio — é um mar em ebulição de partículas virtuais que se criam e se destroem incessantemente. Próximo do horizonte, uma dessas partículas pode escapar, levando energia para o exterior, enquanto a sua parceira antipartícula cai no buraco negro. O resultado é uma radiação com temperatura inversamente proporcional à massa do buraco negro. Por isso os buracos negros mais pequenos são os mais quentes.

Essa descoberta originou um paradoxo profundo. Na sua descrição clássica, os buracos negros aparentam não preservar a maior parte da informação do que os criou, sendo apenas descritos pela sua massa e pela sua rotação (e talvez a carga elétrica, que se pensa não ser muito relevante nos buracos negros astrofísicos). Mas talvez informação adicional estivesse de alguma forma escondida no buraco negro, em propriedades mais subtis. Contudo, se o buraco negro se evapora em radiação térmica, que tem a propriedade de não transportar essa informação, parece mesmo existir uma perda de informação. O resultante “paradoxo da informação” [17] tornou-se uma das maiores questões da física teórica, criando tensão entre uma

propriedade fundamental da MQ (a unitariedade, ou conservação de probabilidade) e o destino dos buracos negros previstos pela RG. Esta observação, ainda não totalmente resolvida, mostrou que o encontro entre a Quântica e a Gravidade, previsto por Einstein e Planck, ainda aguarda uma teoria completa — a tão procurada gravitação quântica.

5. Ecos quânticos no Universo observável

Os buracos negros são um contexto astrofísico extremo, onde o casamento entre a RG e a MQ, ainda incompleto, será fundamental. Um outro exemplo será o universo primordial: compreender o chamado Big Bang implica um melhor entendimento da gravitação quântica, que ainda não temos. Mas mesmo sem ela, existem fenómenos quânticos no contexto astrofísico ou cosmológico que podemos compreender. De facto, a Astrofísica e Cosmologia modernas, são hoje um laboratório natural de fenómenos quânticos em larga escala. Eis alguns exemplos:

(a) Neutrinos cósmicos. Temos presentemente detetores subterráneos, como o Super-Kamiokande e o IceCube, que captam estas partículas quase sem massa e que atravessam planetas inteiros por interagir muito fracamente com a matéria. De acordo com o modelo padrão da física de partículas há 3 “sabores” de neutrinos. E um neutrino pode oscilar entre estes sabores. As oscilações de neutrinos foram previstas teoricamente por Bruno Pontecorvo [18] e, mais tarde, por Ziro Maki, Masami Nakagawa e Shoichi Sakata [19], e foram observadas pela primeira vez na década de 1990 pelo Super-Kamiokande [20] e confirmadas pelo observatório SNO – *Sudbury Neutrino Observatory*, no Canadá [21]. Este fenómeno puramente quântico, em que os neutrinos mudam de ‘sabor’ durante a sua propagação, demonstra que têm massa e que a Quântica continua a governar o cosmos em escalas astronómicas.

(b) Matéria escura e campos quânticos. A matéria escura continua um dos grandes mistérios da física moderna e do Universo, desde os primeiros estudos de Jan Oort [22] e Fritz Zwicky [23] que a sugeriram na década de 1930. Entre as hipóteses mais estudadas para a matéria escura estão partículas quânticas ultraleves [24], como os axiões ou os bosões escalares. Estes campos, se existirem, podem formar estruturas cósmicas ou astrofísicas coerentes, desde halos galácticos até “estrelas de bosões” [25,26] e podem deixar assinaturas distintas, por exemplo, em ondas gravitacionais [27].

(c) Formação de estruturas no Universo. De acordo com o modelo cosmológico padrão, as estruturas de larga escala do Universo, desde galáxias a enxames de galáxias, nasceram de flutuações quânticas. No Universo primordial, terá havido uma fase de expansão muito rápida (exponencial), denominada inflação, energizada por um campo (mal compreendido) denominado campo inflatónico [28]. Pequenas perturbações do campo inflatónico, de origem quântica, amplificadas pela expansão exponencial, são as sementes de todas as galáxias [29,30,31,32]. As impressões digitais destas sementes ficaram gravadas no fundo cósmico de micro-ondas previsto pela teoria do Big Bang e observado pela primeira vez em 1965 por Arno Penzias e Robert Wilson [33]. As pequenas perturbações (ou anisotropias) foram medidas pela primeira vez pelo satélite COBE na década de 1990 [34] e depois com maior precisão pelo satélite Planck

[35], nome bem apropriado, dada a origem quântica destas anisotropias. Reproduzir este espectro de perturbações é um teste fundamental para qualquer modelo cosmológico, hoje em dia.

(d) Astrofísica de alta energia. Num artigo clássico sobre eletrodinâmica quântica, Julian Schwinger deduzia que existe um limite crítico para um campo elétrico (ou magnético) constante, a partir do qual o vácuo se torna instável e se torna favorável a criação de pares elétron-positrão, tendo deduzido a taxa a que isso acontece [36]. Ora, sabemos hoje que em alguns tipos de estrelas de neutrões, nomeadamente pulsares e magnetars, os campos elétricos e magnéticos atingem valores próximos dos limites quânticos do vácuo definidos por Schwinger. Nestas condições, pares elétron-positrão podem ser criados espontaneamente, e processos de radiação são dominados pela física quântica de campos [37,38,39]. A astrofísica de alta energia tornou-se, assim, indispensável para compreender alguns sistemas astrofísicos identificados.

(e) Nucleossíntese primordial, estelar e em eventos cataclísmicos. A própria origem dos elementos químicos é um testemunho direto da física quântica. Nos primeiros minutos após o Big Bang, as reações nucleares entre prótons e neutrões — regidas pela MQ e pela força nuclear fraca — formaram o hélio e os elementos leves [40]. No interior das estrelas, a fusão quântica de núcleos constrói os elementos até ao ferro [41]. E nos eventos mais energéticos do cosmos — explosões de supernovas e fusões de estrelas de neutrões — as reações de captura rápida de neutrões (chamados processo r) sintetizam os elementos pesados, completando o inventário cósmico da matéria [42]. Esta última previsão foi espetacularmente confirmada em 2017, quando a deteção conjunta de ondas gravitacionais e radiação eletromagnética do evento GW170817 [43] — proveniente da fusão de duas estrelas de neutrões — revelou assinaturas químicas compatíveis com a síntese de elementos pesados pelo processo r [44]. Assim, o mesmo fenómeno que faz vibrar o espaço-tempo também fabrica o ouro e a platina: uma síntese cósmica que une a Relatividade, a Quântica e a origem da matéria no Universo.

6. Tecnologia quântica na astrofísica: presente e futuro

A MQ não influencia apenas a Astrofísica; em muitos casos também a possibilita. Por exemplo, sem o efeito fotoelétrico explicado por Einstein usando a teoria quântica [45], não haveria *Charge-Coupled Devices* (CCDs) [46], que hoje captam com precisão quântica a luz das estrelas; sem os lasers, desenvolvidos a partir da emissão estimulada prevista por Einstein e realizados experimentalmente por Theodore Maiman [47], não existiriam interferómetros como o *Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory* (LIGO), cuja precisão quântica permitiu detetar diretamente as ondas gravitacionais [48], vibrações do espaço-tempo menores do que o diâmetro de um próton; são os relógios atómicos [49], baseados em transições quânticas de célio e rubídio, que sincronizam telescópios espalhados pelo globo em observações de interferometria de base muito longa (VLBI) [50], como as que permitiram obter a primeira imagem de um buraco negro pela colaboração *Event Horizon Telescope* — uma conquista simultaneamente quântica e relativista [51]. E de facto, o futuro da Astrofísica será, provavelmente, cada vez mais quântico — não apenas por causa da física fundamental, mas

também pela tecnologia.

7. A herança e o futuro

No final do século XX, a Astrofísica tornou-se uma ciência quântica de campo aberto. Do brilho das estrelas à evaporação dos buracos negros, do ruído térmico dos detetores ao silêncio do vácuo, a Quântica revela-se em cada escala do Universo. Einstein, que tanto resistiu ao acaso quântico, deu-nos a equação do espaço-tempo; Planck, que iniciou tudo com um artifício matemático, abriu a porta a uma nova ontologia. Entre ambos, construiu-se uma visão do cosmos onde o infinitamente grande e o infinitamente pequeno já não são mundos separados, mas capítulos de uma mesma história.

O século XXI poderá ser o da sua unificação — em que o Universo se compreende como uma entidade quântica. Há desafios conceituais profundos: a reconciliação entre informação, entropia e causalidade no contexto quântico-gravitacional; a natureza das singularidades; a compreensão da matéria e energia escura, onde a MQ poderá ter um papel fundamental e até o papel da consciência no interface quântica-gravidade [52,53] — temas outrora considerados metafísicos, mas que talvez possam ter o



Figura 1 - Olhando para o Universo, vemos de facto uma manifestação da MQ e da Física de Partículas, que por sua vez, encontram nos sistemas astrofísicos e na descrição do Universo em Larga Escala um grande laboratório e teste experimental. Gera-se assim uma simbiose entre o muito grande e o muito pequeno. (Figura gerada com Inteligência Artificial).

seu lugar na discussão da física teórica.

Agradecimentos

Agradeço ao ChatGPT a elaboração da figura 1 e colaboração na coleção de referências relevantes. Este trabalho é suportado pelo CIDMA ao abrigo do Programa de Financiamento Plurianual de Unidades de I&D da Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT, <https://ror.org/00snfq58>), referências UID/4106/2025 e UID/PRR/4106/2025 e também pelos projetos Horizon Europe staff exchange HORIZON-MSCA2021-SE-01, NewFunFICO-101086251; 2022.04560.PTDC (<https://doi.org/10.54499/2022.04560.PTDC>) e 2024.05617.CERN (<https://doi.org/10.54499/2024.05617.CERN>).

Referências

- [1] M. Planck, Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum, Annalen der Physik, 1901.
- [2] A. Einstein, Zur Elektrodynamik bewegter Körper, in Annalen der Physik, 17 (1905) 891.
- [3] A. Einstein, Die Feldgleichungen der Gravitation, Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften (Berlin), (1915) 844-847.
- [4] J. von Fraunhofer, Bestimmung des Brechungs- und des Farbenzerstreuungs-Vermögens verschiedener Glasarten, in Bezug auf die Vervollkommenung achromatischer Fernrohre, Denkschr. Königl. Akad. Wiss. München, 5 (1814-1815) 193-226.
- [5] N. Bohr, On the Constitution of Atoms and Molecules, Phil. Mag. 26 (1913).
- [6] A. Sommerfeld, Zur Quantentheorie der Spektrallinien, Ann. Phys. 51 (1916) 1-94.
- [7] H. von Helmholtz, Über die Erhaltung der Kraft, Ann. Phys. Chem. 89 (1847) 53.
- [8] W. Thomson (Lord Kelvin), On the Age of the Sun's Heat, Macmillan's Magazine 5 (1862) 288.
- [9] G. Gamow, Zur Quantentheorie des Atomkernes, Z. Phys. 51 (1928) 204.
- [10] H. A. Bethe, Energy Production in Stars, Phys. Rev. 55 (1939) 434.
- [11] W. Heisenberg, Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik, Z. Phys. 43 (1927) 172.
- [12] W. Pauli, Über den Zusammenhang des Abschlusses der Elektronengruppen im Atom mit der Komplexstruktur der Spektren, Z. Phys. 31 (1925) 765.
- [13] S. Chandrasekhar, The Maximum Mass of Ideal White Dwarfs, Astrophys. J. 74 (1931) 81.
- [14] R. C. Tolman, Static Solutions of Einstein's Field Equations for Spheres of Fluid, Phys. Rev. 55 (1939) 364.
- [15] J. R. Oppenheimer, G. M. Volkoff, On Massive Neutron Cores, Phys. Rev. 55 (1939) 374.
- [16] S. W. Hawking, Black hole explosions?, Nature 248 (1974) 30-31.
- [17] S. W. Hawking, Breakdown of predictability in gravitational collapse, Phys. Rev. D 14 (1976) 2460-2473.
- [18] B. Pontecorvo, Mesonium and Antimesonium, Sov. Phys. JETP 6 (1957) 429; Inverse Beta Processes and Nonconservation of Lepton Charge, Sov. Phys. JETP 7 (1958) 172.
- [19] Z. Maki, M. Nakagawa, S. Sakata, Remarks on the Unified Model of Elementary Particles, Prog. Theor. Phys. 28 (1962) 870.
- [20] Y. Fukuda et al. (Super-Kamiokande Collaboration), Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos, Phys. Rev. Lett. 81 (1998) 1562.
- [21] Q. R. Ahmad et al. (SNO Collaboration), Direct Evidence for Neutrino Flavor Transformation from Neutral-Current Interactions in the Sudbury Neutrino Observatory, Phys. Rev. Lett. 89 (2002) 011301.
- [22] J. H. Oort, The force exerted by the stellar system in the direction perpendicular to the galactic plane and some related problems, Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands 6 (1932) 249.
- [23] F. Zwicky, Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln, Helvetica Physica Acta 6 (1933) 110-127.
- [24] L. Hui, J. P. Ostriker, S. Tremaine, E. Witten, Ultralight scalars as cosmological dark matter, Phys. Rev. D 95 (2017) 043541.
- [25] F. E. Schunck, E. W. Mielke, Relativistic boson stars, Classical and Quantum Gravity 20 (2003) R301-R356.
- [26] R. Brito, V. Cardoso, C. A. R. Herdeiro, E. Radu, Proca stars: Gravitating Bose-Einstein condensates of massive spin-1 particles, Phys. Lett. B 752 (2016) 291.
- [27] J. C. Bustillo, N. Sanchis-Gual, A. Torres-Forné, J. A. Font, A. Vajpeyi, R. Smith, C. A. R. Herdeiro, E. Radu, S. H. W. Leong, GW190521 as a Merger of Proca Stars: A Potential New Vector Boson of 8.7×10^{-13} eV, Phys. Rev. Lett. 126 (2021) 081101.
- [28] A. H. Guth, Inflationary universe: A possible solution to the horizon and flatness problems, Phys. Rev. D 23 (1981) 347.
- [29] A. A. Starobinsky, Dynamics of phase transition in the new inflationary universe scenario and generation of perturbations, Phys. Lett. B 117 (1982) 175.
- [30] A. H. Guth, S.-Y. Pi, Fluctuations in the new inflationary universe, Phys. Rev. Lett. 49 (1982) 1110.
- [31] S. W. Hawking, The development of irregularities in a single bubble inflationary universe, Phys. Lett. B 115 (1982) 295.
- [32] J. M. Bardeen, P. J. Steinhardt, M. S. Turner, Spontaneous creation of almost scale-free density perturbations in an inflationary universe, Phys. Rev. D 28 (1983) 679.
- [33] A. A. Penzias, R. W. Wilson, A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s, Astrophys. J. 142 (1965) 419.

- [34] G. F. Smoot et al. (COBE Collaboration), Structure in the COBE Differential Microwave Radiometer First-Year Maps, Astrophys. J. Lett. 396 (1992) L1.
- [35] Planck Collaboration, P. A. R. Ade et al., Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters, Astron. Astrophys. 571 (2014) A16.
- [36] J. Schwinger, On Gauge Invariance and Vacuum Polarization, Phys. Rev. 82 (1951) 664.
- [37] C. Thompson, R. C. Duncan, The soft gamma repeaters as very strongly magnetized neutron stars - I. Radiative mechanism for outbursts, Astrophys. J. 392 (1992) L9.
- [38] C. Thompson, R. C. Duncan, Neutron star dynamos and the origins of pulsar magnetism, Astrophys. J. 408 (1993) 194.
- [39] A. K. Harding, D. Lai, Physics of strongly magnetized neutron stars, Rep. Prog. Phys. 69 (2006) 2631.
- [40] R. V. Wagoner, W. A. Fowler, F. Hoyle, On the Synthesis of Elements at Very High Temperatures, Astrophys. J. 148 (1967) 3.
- [41] F. Hoyle, On Nuclear Reactions Occurring in Very Hot Stars. I. The Synthesis of Elements from Carbon to Nickel, Astrophys. J. Suppl. Ser. 1 (1954) 121.
- [42] E. M. Burbidge, G. R. Burbidge, W. A. Fowler, F. Hoyle, Synthesis of the Elements in Stars, Rev. Mod. Phys. 29 (1957) 547.
- [43] B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration), GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral, Phys. Rev. Lett. 119 (2017) 161101.
- [44] M. M. Kasliwal et al., Illuminating gravitational waves: A concordant picture of photons from a neutron star merger, Science 358 (2017) 1559.
- [45] A. Einstein, Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt, Annalen der Physik 17 (1905) 132.
- [46] W. S. Boyle, G. E. Smith, Charge Coupled Semiconductor Devices, Bell System Technical Journal 49 (1970) 587.
- [47] T. H. Maiman, Stimulated Optical Radiation in Ruby, Nature 187 (1960) 493.
- [48] B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration), Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger, Phys. Rev. Lett. 116 (2016) 061102.
- [49] L. Essen, J. V. L. Parry, An Atomic Standard of Frequency and Time Interval: A Caesium Resonator, Nature 176 (1955) 280.
- [50] M. I. Cohen, A. L. Yen, K. I. Kellermann, Very Long Baseline Interferometry, Science 178 (1972) 297.
- [51] The Event Horizon Telescope Collaboration, First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole, Astrophys. J. Lett. 875 (2019) L1.
- [52] S. Hameroff, R. Penrose, Conscious events as orchestrated space-time selections, J. Conscious. Stud. 3 (1996) 36.
- [53] R. Penrose, Consciousness, the brain, and spacetime geometry: an addendum, Ann. N.Y. Acad. Sci. 929 (2001) 105.



Carlos Herdeiro é licenciado em Física/Matemática Aplicada pela Universidade do Porto e doutorado em Física Teórica pela Universidade de Cambridge (2001), em Inglaterra. Trabalhou nos departamentos de Física: da Universidade de Stanford, EUA (2001-2002), da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (2002-2010), da Universidade de Aveiro (2010-2018) e do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa (2018-2019). É atualmente Investigador Coordenador de carreira no Departamento de Matemática da Universidade de Aveiro onde coordena o grupo de Geometria e Dinâmica Gravitacional do Centro de Investigação em

Matemática e Aplicações (CIDMA). A sua investigação centra-se na interface da gravitação, cosmologia, astrofísica, física-matemática e física de altas energias, tendo publicado mais de 230 artigos em revistas internacionais em vários temas nesta interface e dirigido três redes internacionais Marie Curie financiadas pela União Europeia. É também autor de um livro de texto Universitário de Mecânica Quântica. Foi presidente da delegação norte da SPF (2007-2010). É membro fundador, foi presidente e é vice-presidente em exercício da Sociedade Portuguesa de Relatividade e Gravitação.