

Um prémio Nobel para a Universalidade da Física

Carlos A. R. Herdeiro

Grupo de Geometria e Dinâmica Gravitacional, Departamento de Matemática e Centro de Investigação e Desenvolvimento em Matemática e Aplicações (CIDMA), Universidade de Aveiro

Resumo

Metade do prémio Nobel da Física de 2019 foi atribuído a James Peebles “por descobertas teóricas em Cosmologia Física” (fig. 1). Este é um prémio para a Universalidade das leis da Física que, na Cosmologia, encontraram uma aplicação no entendimento do maior dos sistemas físicos: o Universo como um todo.

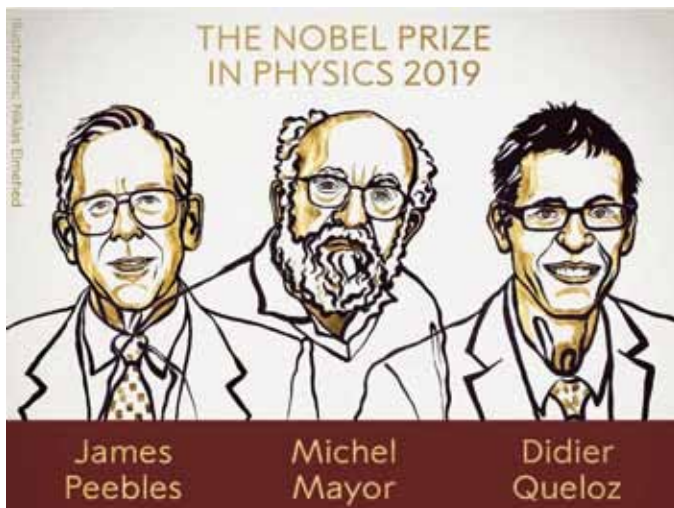


Figura 1 - Os laureados com o prémio Nobel da Física 2019

1- O início da Cosmologia Moderna

O entendimento científico moderno do Universo em larga escala baseia-se na teoria da relatividade geral (RG), formulada em 1915 por Albert Einstein [1]. A RG descreve a interação gravítica como deformações dinâmicas do espaço-tempo. O Universo é todo o espaço e todo o tempo. De acordo com a teoria de Einstein, portanto, o Universo como um todo pode ser dinâmico, pode evoluir, pode eventualmente ter tido um princípio e pode eventualmente vir a ter um fim.

Einstein, em 1917 [2], foi pioneiro a elaborar um modelo do Cosmos baseado na sua RG. Em primeira aproximação, um tal modelo *Cosmológico*, abdica de “detalhes” locais, como a existência de estruturas distintas (galáxias, estrelas, planetas, pessoas...) em alguns sítios do Universo e essencialmente nada (um quase vácuo) em muitos outros. O modelo preocupa-se apenas com a geometria do espaço em larga escala e com a dinâmica

do fluir do tempo. A estratégia de ignorar “detalhes” é estruturante em modelos físicos. É usada, por exemplo, quando calculamos a trajetória da Terra em torno do Sol, considerando ambos como massas pontuais. Esta aproximação é suficiente para perceber a duração do ano. Mas para compreender a precessão dos equinócios, por exemplo, é necessário considerar mais detalhes.

Ignorando os detalhes locais, Einstein debateu-se com um problema. De acordo com a RG, um Universo com uma distribuição (homogénea) de matéria é forçado a evoluir: o espaço é obrigado a expandir ou a contrair. Isto incomodou Einstein, pois implicaria que, ou no passado ou no futuro, o Universo seria infinitesimalmente pequeno, e as equações da RG não seriam capazes de o descrever. Haveria uma *singularidade Cosmológica*.

Para ultrapassar este incómodo, Einstein forçou o Universo a ser estático, introduzindo um novo termo nas suas equações de campo. Assim nasceu a célebre “constante Cosmológica”, um parâmetro que surge no novo termo e determina uma densidade de energia constante, independente da expansão/contração do Universo. O modelo resultante descreve um Universo que é esférico (uma esfera três dimensional) e estático, devido a um equilíbrio cuidadosamente afinado entre a atração gravítica da matéria que enche o Universo e uma exótica repulsão gravítica causada pela constante Cosmológica. Este modelo, que posteriormente foi demonstrado ser instável, é denominado por *Universo estático de Einstein*.

Sem a (improvável) afinação de parâmetros cozinhada por Einstein, os modelos Cosmológicos mais genéricos baseados na RG descrevem um Universo dinâmico, que tanto pode estar numa fase de expansão como numa fase de contração. Estes modelos foram estudados por Willem de Sitter [3], Alexander Friedman [4] e Georges Lemaître [5], na segunda e terceira década do Sec. XX. A realidade da expansão do Universo foi reconhecida após a publicação das observações de Edwin Hubble em 1929 [6]. Estabeleceu-se a partir daí o cenário de um Universo mais “pequeno” no passado, ainda que possivelmente infinito! Extrapolando, surge uma singularidade Cosmológica no passado, precisamente do género que

Einstein quis evitar. A esta quebra da teoria da RG chama-se o Big Bang, termo jocoso cunhado por Fred Hoyle em 1949 [7], um antagonista do modelo. O cenário de um Universo em expansão, com um possível início no Big Bang, passou posteriormente a ser conhecido como *modelo do Big Bang*.

2 - A Radiação Cósmica de Fundo

Após a segunda guerra mundial, como consequência do primeiro uso bélico da energia atômica, aumenta o interesse na Física Nuclear. A nível do estudo do Cosmos, perguntava-se a origem dos elementos do Universo, isto é, como foi feita a nucleossíntese.

A abundância de certos elementos leves teria de ter origem na fornalha nuclear do Universo primordial, quando este era “menor” e, como tal, mais quente. Vários físicos, como George Gamow [8], formularam modelos do “Big Bang quente” para explicar estes elementos. Em particular, alguns sugeriram que, no presente, uma relíquia deste Universo quente deveria existir, na forma de uma radiação em equilíbrio térmico (radiação de corpo negro) enchendo todo o Cosmos: a *radiação Cósmica de fundo* (RCF). Ralph Alpher e Robert Herman estimaram que esta radiação, no presente, teria uma temperatura de cerca de 5 K [9]. Mas a comunidade científica, no global, permanecia cética relativamente à possibilidade de observar esta RCF, ou mesmo da sua existência. Em simultâneo, Gamow [10] e outros começaram a tentar descrever os “detalhes” da estrutura do Universo, como a formação das galáxias.

A revolução aconteceu na primavera de 1965 com a descoberta acidental dessa RCF por Penzias e Wilson [11], cuja interpretação só foi possível pelo contacto com o grupo da Universidade de Princeton, composto por Robert Dicke, James Peebles, Peter Roll and David Wilkinson [12]. Dois artigos científicos, um primeiro sobre os aspetos teóricos da radiação Cósmica de corpo negro, e um segundo sobre a deteção de Penzias e Wilson, foram publicados juntos, no mesmo volume do *The Astrophysical Journal Letters*, em 1965 [11,12].

3 - A Cosmologia Física

Os artigos [11,12] iniciam uma nova era na Cosmologia e marcam o início das importantes contribuições de Peebles. No mesmo ano, Peebles sugere o potencial impacto da RCF na formação de galáxias [13]. Nasce, com este trabalho, a *Cosmologia Física*. De uma maneira concreta, esta associação traça um caminho para aplicar as leis da Física que descrevem o comportamento da matéria, radiação e interação entre elas, para inferir a história e composição do Universo. A Cosmologia começa o caminho que a irá tornar uma ciência de precisão. No ano seguinte, 1966, Peebles tem também uma abordagem inovadora para estimar a abundância de Hélio no Universo, devido à nucleossíntese primordial [14].

Para realizar o potencial de tornar a Cosmologia Física uma ciência de precisão, contudo, era necessário ter mais e melhores dados observacionais, em particular revelando mais estrutura, mais detalhes, para comparar te-

oria e observação. Rainer Sachs e Arthur Wolfe em 1967 [15], foram os primeiros a fazer uma sugestão concreta sobre como a RCF poderia armazenar mais informação valiosa. Esta ideia, aprofundada por muitos outros, irá ter uma importância fundamental. Vejamos o porquê dessa informação adicional.

A RCF é a radiação eletromagnética mais antiga do Universo. Enquanto o Universo primordial é suficientemente quente para os eletrões e os prótons estarem dissociados, a radiação eletromagnética não é livre. Os fótons são espalhados muito eficientemente por um processo chamado espalhamento de Thomson: são constantemente absorvidos e emitidos pelas partículas carregadas. Quando o Universo expande e arrefece o suficiente para os eletrões e os prótons se juntarem em átomos de hidrogénio neutro (processo denominado *recombinação*), este espalhamento deixa de ocorrer e os fótons tornam-se livres. Podem então propagar-se sem interações significativas e, alguns, chegam hoje aos nossos detetores. Estima-se que a liberdade dos fótons da RCF chegou cerca de 380 000 anos depois do *Big Bang*.

Antes da recombinação, portanto, os fótons estão acoplados à matéria. A distribuição da matéria, apesar de ser essencialmente homogénea, já apresenta nessa época pequenas heterogeneidades: há zonas onde há um pouco mais de matéria e zonas onde há um pouco menos de matéria. Estas assimetrias deixam uma marca nos fótons, que estão acoplados à matéria, em particular no momento em que se tornam livres. Por isso, a RCF não deverá ser exatamente isotrópica, isto é, igual em todas as direções do céu. Pequenas *anisotropias* são esperadas, que manifestam as heterogeneidades na distribuição da matéria na altura da recombinação. Estas últimas são as sementes da formação de estruturas cósmicas, como galáxias e grupos de galáxias. Ou seja, a formação das estruturas cósmicas está impressa nos detalhes da RCF. Esta é uma ideia que vale a pena reter: a RCF é uma ecografia do Universo primordial, onde as protoestruturas do Universo podem ser diagnosticadas, qual bebé em formação.

Peebles, juntamente com Jer Yu, em 1970 [16], foi pioneiro a prever a potencialmente observável estrutura detalhada destas anisotropias. Peebles e Yu previram a existência de uma curiosa estrutura de *picos acústicos*, quando se representa a intensidade das anisotropias da RCF em função da escala angular no céu – figura 2.

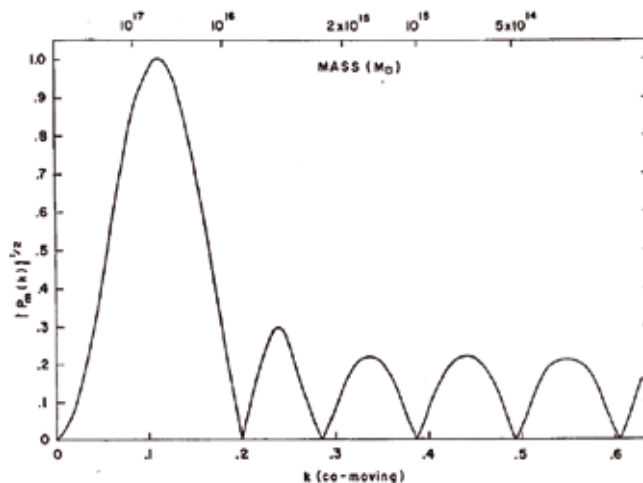


Figura 2 - A estrutura de picos acústicos prevista por Peebles e Yu (Fig.5 de [16]). A posição do primeiro pico (mais à esquerda), por exemplo, é determinada pelo horizonte sonoro na altura da recombinação.

Simplificando um pouco a Física envolvida, antes da recombinação pode-se considerar o Universo como cheio de um fluido de matéria e radiação. As flutuações de densidade neste fluido produzem oscilações acústicas que se propagam com a velocidade do som (no fluido). Num certo instante, existe uma estrutura de sobre-densidades e sub-densidades, em função da escala. Isto é verdade, em particular, na recombinação, altura em que esta estrutura de flutuações de densidade fica impressa, como flutuações de temperatura, na RCF. Por exemplo, o primeiro pico acústico (mais à esquerda), determina a escala angular do *horizonte sonoro*. Esta é a distância que pôde ser viajada, à velocidade do som, durante o tempo de vida do Universo à altura da recombinação. Esta escala, por sua vez, dependendo fortemente da geometria do Universo. Poderia esta estrutura de picos acústicos, posteriormente trabalhada e aprofundada por muitos outros físicos, ser observada?

4 – Os ingredientes cosmológicos em falta

Ao modelo estudado por Peebles e Yu [16] faltavam, contudo, dois ingredientes fundamentais.

A evidência para um tipo de matéria que interage fracamente com a radiação eletromagnética, mas que deixa uma marca gravitacional na formação de estruturas - *matéria escura* - acumulava-se desde a década de 1930. As medições de curvas de rotação galácticas feitas por Vera Rubin e Keneth Ford, publicadas em 1970 [17] deram uma nova força a este problema. Peebles também contribuiu para este esforço. Em 1973, com Jeremiah Ostriker [18], Peebles mostrou que para o disco da nossa galáxia se manter estável, a Via Láctea terá de possuir um “halo” com uma grande quantidade de matéria escura.

A natureza desta matéria escura permanecia (e permanece!), contudo, uma incógnita. Na década de 1970 considerava-se que a matéria escura poderia ser constituída por partículas já conhecidas, com interação muito fraca, como os neutrinos. Os neutrinos são muito leves - na altura nem se sabia se tinham massa - e deslocam-se a velocidades relativistas; por isso, matéria escura deste tipo foi denominada como *matéria escura quente*.

Na década de 1980, contudo, constataram-se contradições entre os modelos de matéria escura quente e as observações. Em mais uma importante contribuição, Peebles foi pioneiro a sugerir que a matéria escura deveria ser *fria*, isto é, constituída por partículas não relativistas [19]. Considerando o seu efeito na formação de estrutura e nas anisotropias da RCF, Peebles obteve que estas anisotropias corresponderiam a flutuações da temperatura da radiação de corpo negro na ordem de uma parte num milhão. Esta estimativa é consistente com as medições atuais.

O segundo ingrediente que Peebles (re)introduziu foi a constante cosmológica. Em 1984 [20] Peebles observou que a introdução de uma constante cosmológica, posta de parte pela comunidade desde a publicação das observações de Hubble, poderia ajudar a compatibilizar teoria e observações, em particular relativamente à formação de estrutura e idade do Universo. Também aqui, Peebles foi visionário, pois apenas 14 anos depois observações de supernovas longínquas iriam evidenciar a necessidade de uma constante Cosmológica.

5 - Cosmologia: uma ciência observacional de precisão

A década de 1990 marca o início das experiências de precisão. Em 1992, as anisotropias da RCF foram finalmente

observadas pelo satélite *Cosmic Background Explorer* (COBE) [21]. Estas medições estiveram na origem do prémio Nobel da Física de 2006 a John Mather e George Smoot. Em 1998 a expansão acelerada do Universo foi descoberta por duas equipas distintas observando supernovas [22]. Esta descoberta esteve na origem do prémio Nobel da Física de 2011 a Saul Perlmutter, Brian Schmidt e Adam Riess.

No ano 2000, uma série de outras experiências (TOCO [23], BOOMERanG [24] e Maxima [25]) conseguiram medir as anisotropias em pequenas escalas e detetaram o primeiro pico acústico, previsto por Peebles e Yu. No ano seguinte foi lançado o satélite *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* (WMAP) [26], que numa missão de nove anos fez um mapa detalhado da RCF com uma resolução significativamente superior à do COBE. Esta resolução foi ainda melhorada pelo satélite Planck, lançado em 2009 [27]. As anisotropias da RCF, vistas pelo satélite Planck, encontram-se na figura 3. Apesar das diferenças quantitativas, observe-se a notável semelhança da estrutura de picos acústicos com a previsão de Peebles e Yu, quase meio século antes (figura 3).

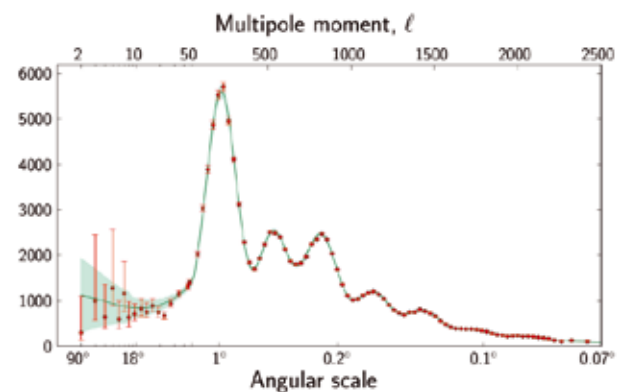


Figura 3 - A estrutura de picos acústicos, usando as mais recentes medições cosmológicas. Extraído de [28].

6 - A sinergia entre a teoria e a observação

As contribuições de Peebles foram variadas, inovadoras e apontaram o caminho à comunidade científica desde a década de 1960. Peebles valorizou a sinergia entre teoria e observação, numa área científica - Cosmologia - onde as observações pareciam difíceis ou impossíveis. Do lado teórico, mostrou como poderíamos perceber a Física da Cosmologia, ou a Cosmologia Física, com as leis da Física estabelecidas. No contacto com a observação, deu prioridade a encaminhar os modelos para fazerem previsões observacionais concretas, apontando assim o caminho às prioridades observacionais e experimentais. Tendo em conta o tremendamente bem-sucedido modelo Cosmológico atual, esta sinergia mostra a Universalidade das leis da Física de um modo esplendoroso.

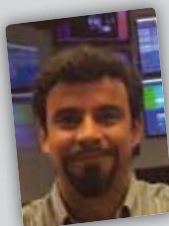
Com o trabalho pioneiro de Peebles, seguido por muitos outros, a Cosmologia deixou de ser um campo de especulação filosófica para se tornar num modelo

científico preciso, guiado por uma teoria sólida e observações que eliminam uns modelos e apoiam outros. Os desenvolvimentos da Cosmologia do Sec. XX e XXI, mostraram ser possível um entendimento científico do Universo como um todo, baseado em leis empíricas, algo que há pouco mais de um século não pareceria mais do que uma lunática fantasia.

Referências

- [1] A. Einstein, "Die Feldgleichungen der Gravitation", Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Berlin (Math. Phys.), 1915, 844 (1915)
- [2] A. Einstein, "Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie", Sitzungsber. Preuss. Akad. 142 (1917)
- [3] W. de Sitter, "On the relativity of inertia: Remarks concerning Einstein's latest hypothesis", Proc. Kon. Ned. Acad. Wet., 19, 1217-1225 (1917); "On the curvature of space", Proc. Kon. Ned. Acad. Wet., 20, 229-243 (1917)
- [4] A. Friedman, "Über die Krümmung des Raumes", Z. Phys., 10, 377 (1922); "Über die Möglichkeit einer Welt mit konstanter negativer Krümmung des Raumes", Z. Phys. 21, 326 (1924)
- [5] G. Lemaître, "Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant, rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques", Ann. Soc. Sci. Bruxelles, 47A, 49 (1927)
- [6] E. Hubble, "A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae", Proc. Natl. Acad. Sci., 15, 168 (1929)
- [7] https://pt.wikipedia.org/wiki/FredHoyle#Rejeiçao_do_Big_Bang
- [8] G. Gamow, "Expanding universe and the origin of elements", Phys. Rev., 70, 572 (1946)
- [9] R. A. Alpher and R. C. Herman, "Evolution of the Universe", Nature, 162, 774 (1948)
- [10] G. Gamow, "The origin of elements and the separation of galaxies", Phys. Rev., 74, 505 (1948)
- [11] A.A. Penzias and R.W. Wilson, "A measurement of excess antenna temperature at 4080 Mc/s", Astrophys. J., 142, 419 (1965)
- [12] R.H. Dicke, P.J.E. Peebles, P.G. Roll and D.T. Wilkinson, "Cosmic black-body radiation", Astrophys. J., 142, 414 (1965)
- [13] P.J.E. Peebles, "The black-body radiation content of the Universe and the formation of galaxies", Astrophys. J., 142, 1317 (1965)
- [14] P.J.E. Peebles, "Primeval helium abundance and the primeval fireball", Phys. Rev. Lett. 16, 410 (1966); "Primordial helium abundance and the primordial fireball II", Astrophys. J., 146, 542 (1966)
- [15] R.K. Sachs and A.M. Wolfe, "Perturbations of a cosmological model and angular variations of the microwave background", Astrophys. J., 147, 73 (1967)
- [16] P.J.E. Peebles and J.T. Yu, "Primeval adiabatic perturbation in an expanding Universe", Astrophys. J., 162, 815 (1970)
- [17] V.C. Rubin and W.K. Ford, "Rotation of the Andromeda nebula from a spectroscopic survey of emission regions", Astrophys. J., 159, 379 (1970)

- [18] J.P. Ostriker and P.J.E. Peebles, "A numerical study of the stability of flattened galaxies: or, can cold galaxies survive?" Astrophys. J., 186, 467 (1973)
- [19] P.J.E. Peebles, "Large-scale background temperature and mass fluctuations due to scale invariant primeval perturbations", Astrophys. J., 263, L1 (1982)
- [20] P.J.E. Peebles, "Tests of cosmological models constrained by inflation", Astrophys. J., 284, 439 (1984)
- [21] G.F. Smoot et al., "Structure in the COBE differential microwave radiometer first-year maps", Astrophys. J. Lett., 396 L1 (1992)
- [22] A.G. Riess et al., "Observational evidence for supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant", Astron. J., 116, 1009 (1998); S. Perlmutter et al., "Measurements of Ω and Δ from 42 high-redshift supernovae", Astrophys. J., 517, 565 (1999)
- [23] L. Knox and L. Page, "Characterizing the Peak in the CMB Angular Power Spectrum", Phys. Rev. Lett., 85, 1366 (2000)
- [24] P. de Bernardis et al., "A flat Universe from high-resolution maps of the Cosmic Microwave Background radiation", Nature, 404, 955 (2000)
- [25] S. Hanany et al., "MAXIMA-1: A measurement of the Cosmic Microwave Background anisotropy on angular scales of 10^{-5} ", Astrophys. J., 545, L5 (2000)
- [26] C.L. Bennett et al., "Nine-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: Final maps and results", Astrophys. J. Supp., 208, 20 (2013)
- [27] Planck Collaboration, "Planck 2018 results, I. Overview and the cosmological legacy of Planck", arxiv:1807.06205
- [28] <https://www.nobelprize.org/uploads/2019/10/advanced-physicsprize2019-3.pdf>



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 150 artigos em revistas internacionais em vários temas nesta interface e dirigido duas 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 e vice-presidente em exercício da Sociedade Portuguesa de Relatividade e Gravitação.