

O Universo Dinâmico

A visão Cosmológica

José Pedro Mimoso¹, Nelson J. Nunes²

¹Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

²Instituto de Astrofísica e Ciências do Espaço

Resumo

Neste texto abordamos a forma como a teoria da Relatividade Geral (RG) introduziu não só uma nova concepção da gravitação, ao passar a ser interpretada como a curvatura do espaço-tempo, mas também como esta descrição implicou que as leis da Física passassem literalmente a ter um carácter universal. Resumimos aqui as etapas essenciais da aplicação da teoria de Einstein ao Universo como um todo, decorridos agora 102 anos desde que esse exercício foi tentado pela primeira vez. Procuramos partilhar a ideia de que a gravitação das grandes escalas e as teorias quânticas das pequenas, concorrem para o nosso atual entendimento do Universo. Queremos deixar claro que este programa da cosmologia moderna se foi robustecendo durante este século, alicerçando-se em observações cosmológicas cada vez mais precisas.

1. Da Relatividade Geral à expansão do Universo

Quando Einstein introduziu a teoria da Relatividade Geral (RG) a gravitação foi surpreendentemente reinterpretada como a curvatura do espaço-tempo, tal como se comprovou nas observações da ilha de Príncipe de que agora se comemora o 1.º centenário. Porém, mais inesperada ainda, foi a constatação de que o Universo está sujeito às leis da Física e que não é apenas o cenário onde elas se aplicam.

As famosas equações de Einstein da RG (ver os outros textos deste número da Gazeta de Física) revelam-nos que a curvatura do espaço-tempo é determinada pela distribuição de matéria e energia. Assim, Einstein apercebeu-se logo em 1917 [1], que se tornava possível, para não dizer tentador, refletir sobre a maneira como se poderia descrever o campo de gravitação criado pelas aglomerações de estrelas à nossa volta.

Recorde-se que nesta época a Via Láctea era essencialmente tudo o que preenchia o nosso Universo e que só em 1924 Edwin Hubble mostraria que as inúmeras nebulosas que se observavam eram, na sua esmagadora maioria, outras galáxias como a

nossa e independentes desta. Einstein estava preocupado com a caracterização do campo gravitacional a grandes distâncias das concentrações de massa, onde deveria ser fraco. Nesse limite espacial do Universo, a gravitação Newtoniana deveria ser recuperada, mas Einstein debatia-se com a instabilidade da configuração definida pela aglomeração espacialmente limitada da matéria. Era extremamente difícil definir condições adequadas para o campo gravitacional nas fronteiras desse Universo.

A solução que adoptou foi a de considerar um universo homogéneo em média, onde a tendência para o seu colapso fosse contrariada por uma modificação da equação Newtoniana de Poisson no limite do campo fraco. Para esse fim incluiu uma distribuição de matéria que produzisse um efeito repulsivo e que se opusesse dessa maneira ao colapso do Universo. Mas surgia novamente o problema da definição das condições fronteira que decorria de ter essa componente repulsiva por todo o lado, incluindo a fronteira do espaço onde não deveriam existir fontes do campo. Para evitar esta dificuldade, admitiu que o universo curvo seria espacialmente fechado sobre si próprio e portanto sem fronteira. Tudo isto se consubstanciou numa generalização das suas equações, incluindo agora um termo adicional envolvendo uma constante cosmológica que permitia um universo estático e com curvatura positiva.

Alguns meses depois, no mesmo ano de 1917, Willem de Sitter mostrava que um universo com uma constante cosmológica mas sem matéria, exibia desvios espectrais e não era afinal necessariamente estático. Isso suscitou o comentário irónico que o Universo de Einstein era “matéria sem movimento” e o de de Sitter “movimento sem matéria”.

Nos anos seguintes começou a ser aceite que o Universo tinha de ser de facto dinâmico. Primeiro pelo meteorologista russo (na época, soviético) Aleksander Friedmann que em 1922 retomou a hipótese de uma distribuição uniforme de matéria inerte (sem pressão) tal como no modelo concebido por Einstein, mas agora sem a constante cosmológica. Friedmann obteve soluções que descrevem um universo em expansão indefinida se o Universo for aberto ou plano. No caso de o universo ser fechado, este expandiria até uma dimensão máxima a que se seguiria o seu colapso. A mesma conclusão foi encontrada pouco tempo depois,

em 1927, pelo abade belga Georges Lemaître que foi, tudo indica, o primeiro a compreender em toda a sua dimensão as novidades físicas deste modelo para o Universo. Foi ele aliás quem mostrou que a solução estática obtida por Einstein era instável e que o seu universo estático se transmutaria num universo em expansão (ou em colapso) quando sujeito a uma ligeira perturbação.

O universo em expansão implicava que, no passado, ele tinha sido mais pequeno e, extrapolando até ao extremo, teria partido de uma inimaginável concentração de matéria inicial, que Lemaître, em 1931, designou por Átomo Primordial. Lemaître percebeu também que o fenómeno da instabilidade gravitacional poderia estar na origem da formação de concentrações localizadas de matéria que podiam ser assim relacionadas com as galáxias.

Entretanto, em 1929, o astrónomo norte-americano Edwin Hubble, que em 1924 tinha demonstrado a natureza extragaláctica das nebulosas, fazia a fantástica descoberta de que a maior parte dessas galáxias se estavam a afastar de nós de acordo com a lei

$$v = H d,$$

que nos revelava que as velocidades de recessão, v , eram proporcionais às distâncias, d , a que as galáxias estavam da nossa (Figura 1). Nesta relação, H é uma constante de proporcionalidade que veio a tornar-se conhecida por *constante de Hubble*. Seguindo o caminho iniciado anos antes por Vesto Slipher, Hubble tinha analisado a luz proveniente das galáxias cujas distâncias havia determinado e registou, caso a caso, as posições das riscas dos espectros característicos de elementos químicos nessas galáxias. A conclusão foi de que na larga maioria dos casos, as riscas estavam desviadas no sentido dos maiores comprimentos de onda, i.e., exibiam o que se designa de “desvio para o vermelho”, ou na expressão inglesa, “redshift”, e que esse era maior quanto maior fosse a distância à galáxia fonte.

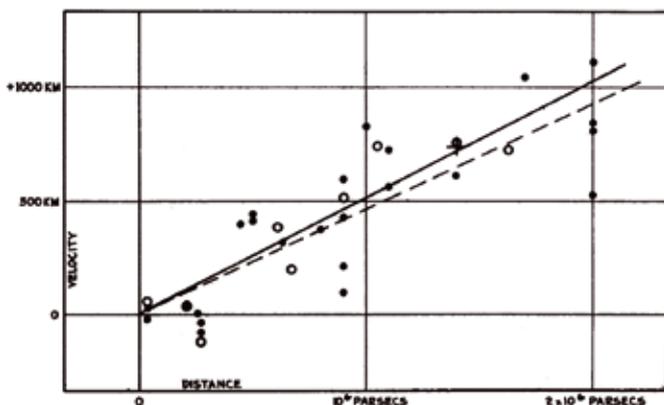


Fig. 1 - O diagrama de Hubble - Reproduzido de Hubble, E. P. (1929) *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 15, 168 -173. [pmid:16577160](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16577160/)

A interpretação mais simples da lei de Hubble e que vinha ao encontro dos modelos de Friedmann e de Lemaître, era de que as fontes se estão a afastar de nós, numa manifestação do famoso efeito Doppler bem familiar em fenómenos sonoros. Admitindo que a nossa localização no universo não é especial e tomando as galáxias como marcos geodésicos do Universo, esta lei conduz à extrapolação de que a maior

parte das galáxias no Universo se afastam umas das outras e que este se expande como a superfície de um balão.

Curiosamente Lemaître tinha publicado essa mesma lei de recessão das galáxias dois anos antes de Hubble, em 1927, num artigo que por ter sido publicado em francês não teve impacto. Também não ajudou particularmente a circunstância de a tradução para inglês (impulsionada por Eddington) ter sido amputada da parte que referia essa lei, o que tem sido objeto de especulações sobre a acidentalidade e motivação para esse corte. Importa no entanto referir que Lemaître terá usado dados observacionais sobre os “redshifts” das galáxias cedidos por Slipher e por Hubble, o que pode explicar porque não reclamou na altura a sua quota parte na descoberta. Recentemente, em 2018, a União Astronómica Internacional (IAU) votou e aprovou a recomendação de que se passe a designar a lei de recessão das galáxias por lei de Hubble-Lemaître.

2. Da expansão ao Big-Bang

A ideia de um universo dinâmico e em expansão era tão inesperada e incrível que suscitou desconfiança na comunidade científica. Acrescia que se verificava a existência de uma debilidade importante. O inverso da constante H tem as dimensões de tempo o que por conseguinte serve de estimativa para a idade do Universo. Ora as medições realizadas por Hubble indicavam que $H \approx 500 \text{ Km /s Mpc}^{-1}$, o que significava que a idade do Universo seria da ordem de 2000 milhões de anos, valor inferior à idade geológica da Terra.

Verificou-se mais tarde que as razões para esta inconsistência tinham a ver com alguns erros sistemáticos nas observações de Hubble. Corrigindo esses aspectos e aliando uma melhoria dos métodos de medição das distâncias intergalácticas, Sandage e Mayall obtinham $H \approx 180 \text{ km /s Mpc}^{-1}$ em 1952 e nos anos sessenta os valores obtidos por vários grupos oscilavam já entre $H \approx 50 \text{ km /s Mpc}^{-1}$ e $H \approx 100 \text{ km /s Mpc}^{-1}$. Estes valores correspondem a idades do Universo da ordem da dezena de milhares de milhões de anos consistentes com as datações geológicas. Actualmente, o valor de H obtido por intermédio da missão Planck da agência ESA é de $H \approx 67,8 \text{ km /s Mpc}^{-1}$ ainda com uma incerteza de aproximadamente 2-3 %.

Tal como foi entendido por Lemaître, se recuarmos no tempo o Universo tem dimensões progressivamente mais pequenas, a densidade da energia da matéria é cada vez maior e, portanto, também aumenta a sua temperatura. Levando este processo conceptual até às suas últimas consequências, atinge-se uma situação extrema em que as leis da Física deixam de ser válidas e em que se torna necessária uma descrição quântica da gravitação de que ainda não dispomos. Esta fase designa-se por época de Planck e corresponde a temperaturas da ordem de

$T \approx 10^{32}$ K. Porém o mais importante é que ao nos aproximarmos desta fase primordial se torna claro que as leis quânticas da Física se tornam necessárias para entendermos o Universo. O Universo é não só gravítico, mas também regido pelas leis da Física Nuclear e de Partículas, comprovando pois de maneira enfática a afirmação que fizemos no início deste texto de que a partir do advento da teoria da RG as leis da Física passaram a reger a totalidade do Universo.

O primeiro físico a analisar esta questão cuidadosamente foi George Gamow que, logo em 1935, começou a estudar as reações nucleares que se produziriam quando a matéria no universo estivesse a temperaturas pelo menos tão elevadas como aquelas que se encontram no interior das estrelas. Esses seus estudos prosseguiram, depois da Segunda Guerra Mundial, em colaboração com Ralph Alpher e depois com Robert Herman. Deram-se conta que, se o universo fosse inicialmente um fluido constituído unicamente por prótons, acabaria por dar origem à formação de átomos de hélio numa proporção por eles prevista de um átomo de hélio para oito de hidrogénio. Também previram que após milhares de milhões de anos, o banho térmico em que as reações se davam, arrefeceria até uma temperatura de 5 kelvins.

Esta radiação foi descoberta em 1965 em circunstâncias algo rocambolescas, já que foi detectada acidentalmente na sequência da tarefa de calibração de uma antena de um radio-telescópio da companhia BELL por Arno Penzias e Robert Wilson e foi capital para que vingasse a ideia de um universo dinâmico e em expansão. Esta radiação surgia como uma radiação de corpo negro com uma temperatura que em 1965 era estimada em cerca de 3 K e nenhum modelo alternativo para o universo a conseguia prever cabalmente (Penzias e Wilson receberam o prémio Nobel da Física em 1978 por esta descoberta).

O modelo do Universo em expansão, entretanto designado de forma depreciativa por Fred Hoyle como modelo do “Big-Bang”, propunha que quando o Universo arrefecesse até à temperatura de ionização dos átomos de hidrogénio deveria, no que se seguia, permitir que os núcleos desse elemento capturassem electrões e que o caminho livre médio dos fótons passasse a ser muito maior do que a distancia inter-atómica. Isso tornaria o Universo transparente, mas originaria também um banho de radiação térmica com uma temperatura de aproximadamente 3000 K. O elevado grau de isotropia da radiação detectada por Penzias e Wilson conferia credibilidade ao princípio cosmológico e indicavamos que inequivocamente, no passado, a matéria e radiação estiveram num elevadíssimo estado de equilíbrio térmico.

3. As sementes de estrutura

Em 1992 o satélite COBE fez uma descoberta adicional de extraordinária importância: a radiação cósmica de fundo contém, em proporções ínfimas, pequenas flutuações de temperatura (o termo é anisotropias) que são vestígios das condições anteriores à sua libertação. Os resultados não podiam ser mais satisfatórios para o modelo de Big-Bang. Não só as flutuações estavam lá, como as suas dimensões eram consistentes com os limites esperados, $\Delta T/T \sim 10^{-5}$. Se estas flutuações não existissem na radiação cósmica de fundo nesta gama de amplitudes, teríamos que procurar uma explicação alternativa rebuscada para o mecanismo de formação de galáxias e enxames de galáxias (George Smoot e John Mather receberam o Prémio Nobel da Física em 2006 por esta descoberta do COBE).

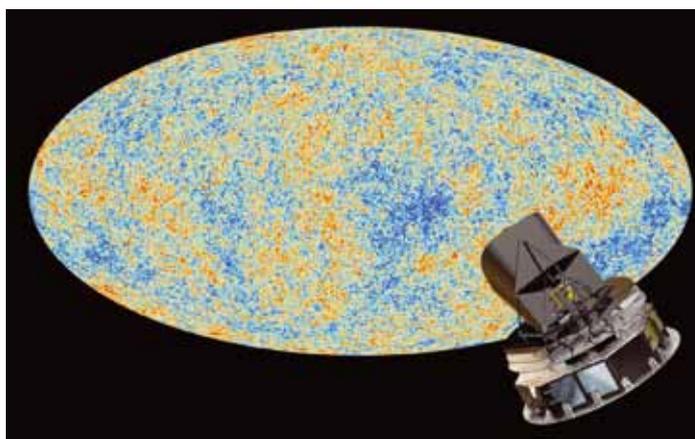


Fig. 2 - A radiação cósmica de fundo através dos olhos do satélite espacial Planck - Créditos ESA e colaboração do Planck - D. Ducros”

Tendo-se tornado aceite como o modelo cosmológico mais plausível, o modelo do Big-Bang suscitava ainda assim algumas questões importantes que, no final dos anos 70, foram expostas claramente por dois eminentes cosmólogos, Robert Dicke e James Peebles, no volume de comemoração do centenário do nascimento de Einstein. Não se percebia em particular porque é que a radiação de fundo é tão homogénea. Tendo a radiação sido libertada quando o universo tinha cerca de 300 000 anos, quaisquer zonas do céu distanciadas de mais do que o tamanho de 2 Luas no céu, deveriam estar causalmente separadas [2]. De facto, se o Universo tem uma idade finita, regiões mais espaçadas entre si do que 1° , não teriam tempo de interagir entre si, dado o carácter finito da velocidade de propagação da luz que limita o tempo de propagação das interações. Por outras palavras, a informação não pode viajar mais rápido do que a luz no vácuo.

A solução para todos estes problemas foi proposta nos dois anos que se seguiram ao artigo de Dicke and Peebles. Alan Guth propôs, em 1981, que um campo escalar, envolvido numa transição de fase de primeira ordem associada à plausível grande unificação das interações fundamentais no Universo primordial ficasse “preso” num mínimo não nulo do seu potencial e dessa forma induzisse o mesmo efeito repulsivo que uma constante cosmológica. Na prática, originaria uma pressão efectiva negativa e o universo expandiria aceleradamente, ao invés do que sucede quando as pres-

ções são positivas. Bastava que isso sucedesse durante um brevíssimo lapso de tempo (10^{-35} s), o suficiente para que o tamanho do universo aumentasse de um incrível factor de e^{60} vezes, para resolver todos os problemas enunciados por Dicke e Peebles.

Os cosmólogos deram-se rapidamente conta que este mecanismo tinha um atrativo adicional que era o de que, sendo o processo de natureza quântica, as correspondentes flutuações quânticas do campo escalar poderiam estar na origem das perturbações que estão, por sua vez, na base da formação de estrutura por instabilidade gravitacional. Ou seja, tornava-se possível relacionar a fase de expansão acelerada proposta por Guth com as flutuações da radiação de fundo e, subsequentemente, com a formação de estruturas. Este aspecto, de certa maneira, tornou-se num dos argumentos de maior peso na aceitação da existência da fase inflacionária na primeira fração de segundo do universo.

A ideia simples de explicar a formação de grandes concentrações de matéria, as galáxias ou os enxames de galáxias, como o resultado do colapso de excessos de densidade de matéria/energia relativamente à média é, na essência, a mesma que foi proposta por Lemaître. As sobre-densidades atraem a matéria à sua volta, agregando-a e formando concentrações maiores. Porém, no Universo em expansão o colapso das concentrações de matéria/energia torna-se mais difícil do que num universo estático. De facto, a expansão está permanentemente a contrariar esse colapso promovendo a separação e conseqüente diluição da matéria. Por outro lado, antes da libertação da radiação cósmica de fundo, quando o universo está ainda suficientemente quente para que a matéria e a radiação estejam unidas num plasma radiativo, os fótons estão também constantemente a transportar energia de um lado para outro contribuindo também efetivamente para homogeneizar a distribuição de matéria (a este propósito registre-se que existem cerca de 3 mil milhões de fótons por cada barião).

Só a partir da libertação da radiação de fundo é que o colapso passa a ter hipóteses de se iniciar e de ser bem sucedido porque a expansão do universo se torna mais lenta e porque a radiação deixa de ser bem sucedida no seu efeito uniformizador. No entanto, este mecanismo depende do balanço entre as amplitudes das flutuações de matéria/energia relativamente à densidade média do universo, da taxa de expansão, bem como da natureza das componentes materiais envolvidas no processo. De facto, verifica-se que o crescimento que os modelos prevêm para as sobre-densidades de matéria bariónica (neutrões e prótons) não é suficientemente rápido para poder criar, desde a libertação da radiação cósmica de fundo, a estrutura de galáxias e agregados de galáxias que se observa se só existir esse tipo de matéria. Nesta fase do processo a radiação deixa de desempenhar um papel relevante, uma vez que não se conseguem agregar os fótons. O mecanismo de instabilidade gravitacional só pode frutificar se existir alguma componente, para além da *matéria bariónica*, que estimule o colapso gravitacional, por um lado, amplificando as flutuações iniciais e, por outro lado, contribuindo para o seu crescimento. Trata-se de uma componente misteriosa de matéria que por só ser detectada pelos seus efeitos gravitacionais foi de-

signada como *matéria escura* e que corresponde a uma proporção cerca de 5 vezes maior do que a da *matéria bariónica*.

Note-se que estas inferências são consistentes com os argumentos, independentes delas, que decorrem da nucleosíntese primordial e da provável existência de uma fase inflacionária no Universo primitivo. A nucleosíntese dos elementos leves só é bem sucedida se a percentagem de matéria bariónica não ultrapassar 4 % da densidade total dos constituintes do Universo. A inflação favorece por seu turno que o universo seja espacialmente plano, de modo que 96 % do conteúdo do Universo é escuro.

4. A aceleração do Universo e outras questões

Entretanto nos anos 1990, os cosmólogos deram-se conta que as supernovas de uma determinada classe podiam ser usadas como indicadores de distância. De facto, libertam sempre aproximadamente a mesma quantidade de energia e exibem um processo de crescimento e decaimento da luminosidade com uma curva bem característica. Dado libertarem enormes quantidades de radiação, permitem estender as nossas medições de distâncias a escalas verdadeiramente cosmológicas (são facilmente detectáveis a distâncias superiores a 100 Mpc).

Este facto deu origem a uma verdadeira caça às supernovas. Em cada galáxia ocorre, em média, apenas uma supernova por século, mas existem tantas galáxias que foi possível criar uma rede de observações que estivesse permanentemente atenta ao maior número possível de galáxias e que desencadeasse um conjunto de procedimentos observacionais adequado à identificação do seu tipo e ao registo das suas características mais significativas. Este processo foi mesmo levado a um enorme nível de sofisticação tecnológica graças à evolução



Fig. 3 - imagem da Supernova 1994D (SN1994D) na galáxia NGC 4526 (SN 1994D é o ponto brilhante no canto inferior esquerdo) obtida pelo Telescópio Espacial Hubble - Créditos NASA/ESA"

dos telescópios e dos detectores, chegando até a ter uma ampla automatização.

Dois consórcios internacionais que desenvolveram este rastreio obtiveram resultados verdadeiramente notáveis. Descobriram que o universo parece estar em expansão acelerada e que tudo indica que é espacialmente plano com $\Omega_M + \Omega_\Lambda = 1$ que sugere de novo que uma energia repulsiva do género da constante cosmológica sempre parece existir. Afinal Einstein não terá cometido um erro tão grande assim quando a introduziu, há cerca de 90 anos...! Saul Perlmutter, Brian Schmit e Adam Riess receberam o Prémio Nobel da Física em 2011 por esta descoberta [3].

Além disso, estes resultados são concordantes com os resultados da análise do espectro da radiação cósmica de fundo (realizadas por COBE e entretanto significativamente melhoradas pelas missões WMAP e Planck). No entanto, estes resultados também suscitam algumas perplexidades. Qual é a natureza e origem da energia repulsiva agora designada por *energia escura*? E, uma vez que se sabe que se a expansão do universo tiver começado a acelerar demasiado cedo isso compromete a formação das galáxias, porque é que o universo só começou a acelerar recentemente?

Existem assim importantes questões em aberto, nomeadamente, as que estão relacionadas com o esclarecimento da natureza das duas componentes de matéria/energia invisíveis. Serão mesmo necessárias ou devemos considerar extensões à RG dependentes da escala? Outras questões, mais especulativas, têm também suscitado muito interesse no âmbito do modelo do universo em expansão. Por exemplo, as questões relacionadas com o desenvolvimento de uma teoria que quantifique a gravitação e que, unindo-a com as outras interações fundamentais, seja capaz de nos explicar cabalmente o que se passou na época de Planck, na primeira fracção de segundo do universo. Ou também a possibilidade de as próprias leis da física evoluírem tal como o faz o Universo e, assim, não existirem constantes universais como a velocidade da luz no vazio ou a constante da gravitação de Newton.

Qualquer pequeno progresso que se possa realizar em qualquer uma destas questões será decerto um passo importante na Cosmologia, mas também, mais geralmente, na Física. A recente e extraordinária detecção de ondas gravitacionais feita pelo LIGO em 2015 (ver artigos neste número) para além de nos proporcionar uma maravilhosa confirmação da validade da RG, abre nesse sentido fundadas esperanças de que num futuro não muito afastado, i.e., nas próximas décadas, se possam detectar ondas gravitacionais de origem cosmológica que nos darão acesso directo ao Universo anterior à libertação da radiação cósmica de fundo e portanto ao Universo Primitivo.

Referências

- [1] Albert Einstein, "Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie", Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften (Berlin), Seite 142-152 (1917), Tradução Portuguesa: "Considerações cosmológicas sobre a Teoria da Relatividade Geral", em "O Princípio da Relatividade", pp. 225-241, Textos Fundamentais da Física Moderna, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa (1971).
- [2] José Pedro Mimoso, "Do Big Bang às Galáxias", Capítulo 3, em "O Código Secreto: A Descoberta dos Padrões da Natureza", Coord. Margarida Telo da Gama, pp. 81-108, nº 137 Coleção Ciência Aberta, Gradiva, Lisboa (2005)
- [3] Nelson J. Nunes, "O Prémio Nobel da Física 2011: Supernovas e a aceleração do Universo" em Nuclio . Portal do Astrónomo: <https://portaldoastronomo.org/2014/05/o-premio-nobel-da-fisica-de-2011-supernovas-e-a-aceleracao-do-universo/>



Nelson Nunes, é licenciado em Engenharia Física Tecnológica pelo Instituto Superior Técnico, e doutorado em Física pela Universidade de Sussex no Reino Unido. O Nelson foi investigador em Londres, Minnesota, Cambridge e Heidelberg. Em 1998 foi membro de uma das equipas que nesse ano descobriu que o Universo se encontra em expansão acelerada. Tem trabalhado na construção dos modelos teóricos que tentam explicar a natureza dessa aceleração. De momento é investigador no Instituto de Astrofísica e Ciências do Espaço e lecciona na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. É o director do Observatório do Lago Alqueva em Monsaraz.



José Pedro Mimoso, é doutorado em Astronomia e Astrofísica pela Universidade de Sussex, no Reino Unido (1994). Professor Associado no Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa e investigador do Instituto de Astrofísica e Ciências do Espaço (IA), trabalha em Cosmologia e Astrofísica

Relativista. Publicou algumas dezenas de artigos e é autor de um capítulo do livro de divulgação "O Código Secreto: À descoberta dos padrões da Natureza", editado pela Gradiva em 2005. É membro de várias sociedades científicas nacionais e internacionais, tendo sido membro da direcção *Sociedad Espanhola de Relatividad y Gravitación* até 2019. Foi distinguido como *Outstanding Referee* pela *American Physical Society* em 2017. É atualmente vice-presidente do Departamento de Física da FCUL.