

Freqüentemente, os grandes avanços da ciência estão ligados ao desenvolvimento de novas técnicas experimentais de observação. A astronomia, por exemplo, muito se desenvolveu com a invenção dos telescópios, que possibilitaram enxergar melhor, mais longe, perscrutar a abóbada celeste e, assim, encontrar novos planetas, satélites e galáxias. Essas descobertas mudaram nossa imagem do universo, possibilitando-nos passar de uma visão divina para uma visão científica. Coisa semelhante se dá hoje com a cosmologia, uma das áreas da ciência que mais se desenvolvem neste início de século. Esse avanço está sendo possível, em grande parte, com o desenvolvimento de potentes telescópios e sondas espaciais, especialmente construídos para examinar sinais vindos de todas as partes do universo, não somente na faixa da luz visível, mas também do infravermelho, das ondas de rádio e dos raios X.

Esses novos instrumentos de observação do universo estão permitindo testar modelos cosmológicos com precisão inédita. E, com isso, mostrar que a cosmologia é uma ciência possível de verificação experimental em muitos de seus aspectos.

Neste folder, mais um da série *Desafios da Física*, mostramos os mais recentes avanços da cosmologia, que teve seu grande impulso, no século passado, com o desenvolvimento, por Einstein, da teoria da relatividade geral, uma das maiores obras intelectuais de todos os tempos.

Aqui, começa nossa jornada rumo aos confins do universo, uma viagem guiada por mais de um século de conhecimento científico. Esperamos que você, leitor, se divirta com essas excitantes idéias e descobertas!

João dos Anjos

COORDENADOR DO PROJETO DESAFIOS DA FÍSICA

PRESIDENTE DA REPÚBLICA
Luiz Inácio Lula da Silva

MINISTRO DE ESTADO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
Sergio Machado Rezende

SUBSECRETÁRIO DE COORDENAÇÃO DAS UNIDADES DE PESQUISA
Avílio Antônio Franco

DIRETOR DO CBPF
Ricardo Magnus Osório Galvão

EDITORES CIENTÍFICOS
Martín Makler (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas/MCT)
Thyrso Villela Neto (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais/MCT)

APOIO FINANCEIRO
Vitae

REDAÇÃO E EDIÇÃO
Cássio Leite Vieira

PROJETO GRÁFICO
Ampersand Comunicação Gráfica
(www.amperdesign.com.br)

CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS
Rua Dr. Xavier Sigaud, 150
22290-180 - Rio de Janeiro - RJ
Tel: (0xx21) 2141-7100
Fax: (0xx21) 2141-7400
Internet: <http://www.cbpf.br>

Para receber gratuitamente pelo correio um exemplar deste folder, envie pedido com seu nome e endereço para iva@cbpf.br. Este e outros folders da série *Desafios da Física*, bem como a revista *CBPF – Na Vanguarda da Pesquisa*, estão disponíveis em formato PDF em <http://www.cbpf.br/Publicacoes.html>

Vitae não compartilha necessariamente dos conceitos e opiniões expressos neste trabalho, que são da exclusiva responsabilidade dos autores.



Ministério da
Ciência e Tecnologia



CBPF

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

2005

Cosmologia

A busca pela origem, evolução
e estrutura do universo

Sumário

COSMOGONIAS
De onde viemos?
Pedra fundamental

**NASCIMENTO
DA COSMOLOGIA**
Primeiro modelo
Um termo extra

ALÉM DA VIA LÁCTEA
Expansão e contração
Dois pioneiros
Ponto insignificante
Como um balão de festas

MODELO DO BIG BANG
Átomo primordial
Estrondo colossal
Dois significados

ECO PRIMORDIAL
Ruído tênue
Radiação de fundo

**BREVE HISTÓRIA
DO UNIVERSO**
Três pilares
Teorias alternativas
Teoria da inflação
Alguns momentos
da história do universo

**DESDOBRAMENTOS
RECENTES**
Diminutas perturbações
Revolução cósmica
Mistérios escuros
Destino do universo
A primeira geração
Conflitos, dúvidas
e certezas

Fontes

BERNSTEIN, J. *Albert Einstein and the frontiers of physics* (Oxford University Press, Oxford, 1996)
BRAZILIAN SCHOOL FOR COSMOLOGY AND GRAVITATION. Disponível em www.cbpf.br/~cosmogra/Escolas/indice_ingles.html
CHAVES, A. e SHELLARD, R. C. *Física para o Brasil – pensando o futuro* (Sociedade Brasileira de Física, São Paulo, 2005)
CIÊNCIA & AMBIENTE. *Einstein* (Universidade Federal de Santa Maria, vol. 30, 2005)
EINSTEIN, A. *Teoria da relatividade especial e geral* (Contraponto, Rio de Janeiro, 1999)
GLEISER, M. *A dança do universo – dos mitos da criação ao Big Bang* (Companhia das Letras, São Paulo, 1999)
GUTH, A. *O universo inflacionário* (Editora Campus, Rio de Janeiro, 1997)
LIVIO, M. e REES, M. J. 'Anthropic Reasoning' in *Science*, vol. 309, 12/08/05, pp. 1.022-1023
MAKLER, M. et al. 'Observational Constraints on Chaplygin Quasitessence: Background Results' in *Phys. Rev. D* 68, 123521 (2003)
NOVELLO, M. *Os jogos da natureza* (Elsevier, Rio de Janeiro, 2004)
OLIVEIRA FILHO, K. de S. *O universo como um todo*. Disponível em astro.if.ufrgs.br/univ/univ.htm

PAIS, A. *Sutil é o senhor – A ciência e a vida de Albert Einstein* (Nova Fronteira, Rio de Janeiro, 1995)
REES, M. J. 'Exploring our universe and others' in *Scientific American*, dezembro de 1999, pp. 44-49
REVISTA USP. *Cosmologia*, número 62, junho / julho / agosto de 2004.
SCHWARZ, P. *The official string theory web site* (superstring theory.com)
SOUZA, C. A. W. de. 'O retrato do universo quando jovem' in *Ciência Hoje* vol. 32, n. 192, abril de 2003, pp. 6-7
SOUZA, R. E. *Introdução à cosmologia*. Disponível em www.astro.iag.usp.br/~ronaldo/introscm
VIDEIRA, A. A. P. 'Cosmologia e filosofia' (apresentada no Seminário 'Einstein para além de seu tempo', ocorrido no MAST, Rio de Janeiro, 01 e 02/09/05).
VILLELA, T. 'Cosmologia – a aventura espetacular da descoberta do cosmo' in *Ciência Hoje*, vol. 36, n. 216 (julho de 2005), pp. 20-28. Outros textos disponíveis em www.das.inpe.br/~cosmo
WAGA, I. 'Cem anos de descobertas em cosmologia e novos desafios para o século XXI' in *Revista Brasileira de Ensino de Física. Edição especial dedicada a Einstein no Ano Internacional da Física*, vol. 27, n. 1 (Sociedade Brasileira de Física, São Paulo, 2005)

Cosmologia
A busca pela origem, evolução
e estrutura do universo

COSMOGONIAS

DE ONDE VIEMOS? • Não se sabe quando o homem iniciou seus questionamentos sobre o cosmo. Mas praticamente todos os povos e culturas têm suas versões para a origem do universo. Em algumas dessas cosmogonias, ele é criado por entidades sobre-humanas ou seres divinos. De certo modo, todas são respostas à talvez mais penetrante pergunta filosófica que o homem já fez a si mesmo: “De onde viemos?”

PEDRA FUNDAMENTAL • Apesar de a busca por respostas sobre o cosmo ter permeado praticamente toda a história do homem moderno, a cosmologia – definida como o estudo da origem, da evolução, do conteúdo e da estrutura do universo – é uma ciência recente, com pouco menos de 100 anos. Até o século 19, ela se entrelaçava, de modo quase indissociável, com a filosofia, a metafísica e a religião. Só conseguiu se desvencilhar dessas áreas e ganhar autonomia como um ramo da ciência em 1917. É aí que reside, para muitos historiadores da ciência, sua pedra fundamental.

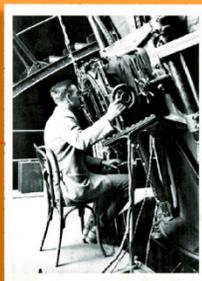


ALÉM DA VIA LÁCTEA

EXPANSÃO E CONTRAÇÃO • Foi só em 1922 e em 1924 que modelos de universo não estáticos chamaram a atenção da ainda incipiente comunidade de cosmólogos. Naqueles anos, o matemático russo Aleksandr Friedmann (1888-1925) apresentou universos que se expandiam ou se contraíam. Einstein, inicialmente, não gostou desses resultados. E chegou a escrever uma nota para uma revista científica alegando que Friedmann havia se enganado nos cálculos. Posteriormente, percebeu o próprio erro, aceitando os modelos.

DOIS PIONEIROS • Quando se fala de um universo em expansão, é preciso se lembrar dos trabalhos de pelo menos dois pioneiros: os norte-americanos Henrietta Leavitt (1868-1921) e Vesto Slipher (1875-1969). Em 1912, Leavitt, uma das primeiras mulheres astrônomas, mostrou que a variação periódica do brilho das estrelas cefeidas podia ser um método para medir distâncias acima de centenas de anos-luz (cada ano-luz equivale a 9,5 trilhões de km). Já Slipher, ainda em 1915, dispunha de dados que mostravam que galáxias – apesar de esses objetos celestes não serem então reconhecidos como tais – estavam se afastando da Terra com velocidades que variavam de 300 km/s a 1.100 km/s, o que indicava que elas poderiam ser objetos extragalácticos.

PONTO INSIGNIFICANTE • Em meados da década de 1920, o astrônomo norte-americano Edwin Hubble (1889-1953) empregou a luminosidade



THE HUNTINGTON LIBRARY, SAN MARINO, CALIFORNIA

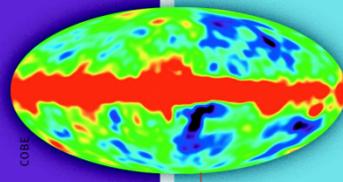
das cefeidas para medir a distância de uma classe de nebulosas. Ele chegou a uma conclusão surpreendente: essas ‘nuvens’ estavam fora da Via Láctea. Com isso, as fronteiras do universo se alargaram. A Via Láctea, com seus bilhões de estrelas, não ocupava uma posição privilegiada nesse novo cenário cósmico. Éramos um ponto insignificante num vasto universo.

COMO UM BALÃO DE FESTAS • Em 1929, Hubble obteve a distância de dezenas de galáxias utilizando como padrão estrelas cefeidas e, com base em dados observacionais de Slipher, mostrou que a velocidade com que as galáxias se afastavam umas das outras era proporcional à distância entre elas, o que ocorre justamente num universo em expansão. A analogia mais usual para descrever esse fenômeno é a de um balão de festas sendo inflado, com as galáxias representando pontinhos pintados na superfície, porém é preciso lembrar que o universo, nesse caso, se restringiria apenas à superfície de borracha do balão. Assim, Hubble, talvez sem ter consciência do fato, descobriu a expansão do universo. Segundo o russo George Gamow (1904-1968), Einstein teria dito que a constante cosmológica havia sido o maior erro científico de sua vida. Mas a história, meio século depois, mostraria que esse termo ainda teria um papel a desempenhar na cosmologia.

ECO PRIMORDIAL

RUIÍDO TÊNUE • O modelo do Big Bang chegou à década de 1960 sob críticas severas. Faltava ainda a ele uma comprovação observacional de peso. E isso se deu em 1964, quando, por acaso, os físicos norte-americanos Arno Penzias e Robert Wilson, pesquisadores dos Laboratórios Bell (Estados Unidos), detectaram, com o auxílio de uma antena de rádio, um ‘ruído’ extremamente tênue, porém persistente em todas as direções do céu. Quatro outros físicos norte-americanos, Robert Dicke (1916-1997), James Peebles, Peter Roll e David Wilkinson (1935-2002), que se preparavam para tentar medir a mesma radiação, logo perceberam do que se tratava: um ‘eco’ do Big Bang.

RADIAÇÃO DE FUNDO • A radiação cósmica de fundo havia sido prevista ainda em 1948 por Gamow, Ralph Alpher e Robert Herman (1914-1997) como sendo um resquício de uma fase extremamente quente pela qual passou o universo, um ‘eco’ de uma época em que as partículas de luz (fótons) passaram a viajar livremente, sem interagir com a matéria. Essa radiação fóssil tem hoje a temperatura de 2,725 kelvin (cerca de 270 graus celsius negativos) e é um ‘retrato’ do universo 380 mil anos depois do Big Bang. Penzias e Wilson ganharam o Nobel de física de 1978 pela descoberta, mas o prêmio injustamente esqueceu a primazia das idéias de Gamow, Alpher e Herman.



COBE

BREVE HISTÓRIA DO UNIVERSO

TRÊS PILARES • A descoberta da radiação cósmica de fundo deu extremo vigor científico ao modelo do Big Bang, que já contava com mais dois pilares a seu favor: explicava tanto a expansão do universo quanto a abundância atual dos elementos químicos leves (hidrogênio, deutério, hélio e lítio). Porém, mesmo sustentado por três colunas robustas, o modelo não estava isento de problemas.

TEORIAS ALTERNATIVAS • Várias teorias alternativas ao Big Bang foram propostas. A que ganhou mais repercussão foi a chamada teoria do estado estacionário, segundo a qual o universo não teve início ou fim, mas sempre existiu no tempo, daí o nome do modelo. Para explicar a expansão do universo, seus três idealizadores – Hoyle e os austríacos Thomas Gold (1920-2004) e Herman Bondi (1919-2005) – alegavam que havia criação contínua de matéria no universo. Há hoje outros modelos propostos e estudados por cosmólogos e que podem ser divididos em duas

classes: aqueles em que há um início bem definido para o universo e os sem início, em que o universo é eterno.

TEORIA DA INFLAÇÃO • Um dos problemas com o modelo do Big Bang era explicar por que a temperatura da radiação de fundo é praticamente a mesma em qualquer direção do espaço. Uma maneira de justificar essa homogeneidade é imaginar que o universo, ainda muito quente e denso, tenha se expandido violentamente por um curtíssimo período de sua história. Essa é basicamente a propriedade que norteia a chamada teoria inflacionária, idealizada por pesquisadores russos e norte-americanos na década de 1970. Segundo ela, entre 10⁻³⁵ s e 10⁻³² s de vida, o universo se expandiu exponencialmente. Esse mecanismo inflacionário fez com que regiões do céu hoje muito separadas tivessem estado em contato no passado, o que teria permitido que tivessem trocado calor e igualado suas temperaturas. Além disso, um dos grandes sucessos da teoria da inflação foi prever,

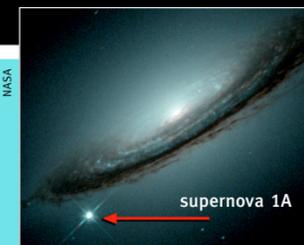
DESDOBRAMENTOS RECENTES

DIMINUTAS PERTURBAÇÕES • O satélite COBE (sigla, em inglês, para Explorador do Ruído Cósmico) é considerado por muitos o mais importante experimento da cosmologia. Seus dados, divulgados no início da década de 1990, ajudaram a determinar com precisão a temperatura da radiação cósmica de fundo e a detectar, pela primeira vez, a existência de diminutas perturbações – da ordem de centésimos de milésimos de kelvin (10⁻⁵ kelvin) – na temperatura dessa radiação. Essas flutuações foram essenciais para se compreender como ocorreu o processo de formação das grandes estruturas no universo (aglomerados de galáxias, grandes filamentos, paredes e vazios).

REVOLUÇÃO CÓSMICA • Em 1998, ocorreu uma das descobertas mais marcantes da cosmologia do século passado. Dados coletados sobre a luminosidade de supernovas (estrelas que explodem ao final de suas vidas) permitiram concluir que universo não só se expande, mas faz isso de forma acelerada. A descoberta foi classificada como uma revolução. Porém, o que estaria causando essa aceleração inesperada? O candidato mais cota-



WMAP



NASA

por exemplo, a geometria do espaço como sendo quase plana e as propriedades das diminutas flutuações na temperatura da radiação cósmica de fundo. Essas previsões foram recentemente confirmadas por dados coletados por experimentos a bordo de sondas espaciais, em balões e no solo.

ALGUNS MOMENTOS DA HISTÓRIA DO UNIVERSO • Há hoje vários modelos para o que ocorreu nos primórdios do universo. Porém, o modelo do Big Bang, acoplado ao cenário inflacionário, tem obtido excelente respaldo observacional. Com base nesse modelo, é possível contar – com alguns números que ainda carregam grandes incertezas – alguns dos principais momentos da história de 13,7 bilhões de anos do universo (ver quadro ao lado).

conhece-se a natureza dos dois primeiros e principais ingredientes, apesar de a matéria escura já ter sido apontada como um componente dos aglomerados de galáxias ainda 1932 pelo astrônomo suíço Fritz Zwicky (1898-1974).

DESTINO DO UNIVERSO • Na maioria dos modelos atuais, é a energia escura que dita o destino do universo. Numa visão moderna, há três destinos para o universo: i) ele cessa a expansão, pára e passa a colapsar, fenômeno denominado Big Crunch (Grande Esmagamento); ii) caso a energia escura seja mais ou menos constante, ele continua a se acelerar para sempre, tendo um fim gelado e escuro; iii) sofre uma expansão acelerada tão violenta que ‘rasgaria’ até os átomos, cenário denominado Big Rip (Grande Rasgo).

A PRIMEIRA GERAÇÃO • Somos a primeira geração a ter um modelo científico do universo. E, por isso, devemos nos sentir privilegiados. O modelo padrão da cosmologia (Big Bang mais inflação) tem sido verificado com precisão cada vez maior pelas observações astronômicas, graças aos novos telescópios e sondas – por sinal, o desenvolvimento desses e de outros equipamentos ligados à pesquisa em cosmologia apri-



SOAR

Evidências indiretas e cenário baseado em física desconhecida	• 10 ⁻⁴³ s: era de Planck • 10 ⁻³⁵ s: universo se expande violentamente (era da inflação) • 10 ⁻³² s: fim da inflação.
Evidências indiretas, mas cenário baseado em física conhecida	• 10 ⁻¹⁰ s: o universo se torna uma sopa quentíssima de radiação e partículas elementares (quarks, glúons, elétrons, fótons, neutrinos etc.) • 10 ⁻⁶ s: formam-se mésons (um quark e um antiquark) e bárions (três quarks)
Evidências observacionais mais diretas	• 10 ² s: prótons e nêutrons, ambos bárions, formam núcleos de átomos leves • 380 mil anos: formam-se os primeiros átomos (núcleo mais elétrons), e os fótons da radiação cósmica de fundo passam a caminhar livremente, tornando o universo transparente • 200 milhões de anos: formam-se as primeiras estrelas e galáxias • 9 bilhões de anos: formação do Sistema Solar • 10 bilhões de anos depois do Big Bang: início da vida na Terra.

rou, por exemplo, sistemas atuais de comunicações por microondas. O Big Bang tem fragilidades e lacunas fundamentais, mas é testável – daí vem sua força – e tem descrito bastante bem o universo observado. Dados astronômicos parecem corroborar a teoria dos dias de hoje até 380 mil anos depois do ‘nascimento’ do universo. Para tempos anteriores, extrapolações nos permitem ter idéia de vários cenários possíveis.

CONFLITOS, DÚVIDAS E CERTEZAS • A física por volta da época da inflação é ainda desconhecida. Para entender o universo primordial, os físicos buscam a unificação dos fenômenos gravitacionais, regidos pela teoria da relatividade geral, e daqueles do microuniverso dos átomos e suas partículas, domínio da teoria quântica. É uma tarefa difícil. Além dos questionamentos sobre os primórdios do universo, a descoberta da expansão acelerada levantou perguntas extremamente excitantes e que deram novo fôlego à cosmologia. Será que esses desafios do macrocosmo nos levarão a uma

nova física? São tempos de conflitos e dúvidas, mas também de várias certezas. São tempos de extremo entusiasmo para os cosmólogos e também para a humanidade. Ou, afinal, o leitor consegue pensar em perguntas mais instigantes e profundas do que “De onde viemos? Para onde vamos?”

NASCIMENTO DA COSMOLOGIA

PRIMEIRO MODELO • Em 1917, o físico alemão Albert Einstein (1879-1955) apresentou ao mundo o primeiro modelo cosmológico com base científica. Foi resultado da aplicação, ao universo como um todo, de sua teoria da relatividade geral, de 1915, que substituiria a gravitação do inglês Isaac Newton (1642-1727), ainda válida, para muitos propósitos, para velocidades bem menores que a da luz no vácuo (300 mil km/s) e campos gravitacionais fracos, como o da Terra. Na relatividade geral, as três dimensões espaciais (comprimento, altura e largura) formam um único indissociável com a quarta dimensão, o tempo. Além disso, o chamado espaço-tempo pode ser comparado a um ‘tecido’ elástico que se deforma na presença de corpos com massa ou, de forma mais genérica, na presença de energia. Essa noção geométrica substituiu o conceito newtoniano de uma força gravitacional que age a distância entre os corpos.

UM TERMO EXTRA • Einstein, partindo de uma idéia bela e matematicamente tratável – a de um universo finito (‘esférico’) e ilimitado –, se viu forçado a ‘frear’ o universo



que brotava de seus cálculos, pois ele apresentava um comportamento dinâmico – por exemplo, expandia-se com o passar do tempo. Na época, isso conflitava com a noção de universo, para o qual não havia evidências de mudança no tempo nem mesmo uma medida do tamanho. Para muitos, o cosmo então se reduzia ao que hoje sabemos ser a Via Láctea (galáxia que abriga o Sistema Solar). Para tornar o universo estático, Einstein incluiu em suas equações um termo extra cuja função era evitar que o universo colapsasse sob a ação da gravidade. A constante cosmológica, como o termo é hoje conhecido, pode ser comparada a uma antigravidade.

O MODELO DO BIG BANG

ÁTOMO PRIMORDIAL • Em 1927 – e independentemente de Friedmann –, o astrônomo e padre belga Georges Lemaître (1894-1966) chegou a resultados teóricos que mostravam um universo que se expandia. Porém, foi além. Alegou que, se as galáxias hoje se afastam, isso significa que, no passado, estiveram mais próximas. Lemaître conjecturou que toda a massa do universo esteve reunida num único ponto. Em 1933, ele deu a isso o nome de átomo primordial, que, para criar o universo, teria se partido em inúmeros pedaços.

ESTRONDOSO COLOSSAL • A idéia de um universo que evoluiu de um estado impensavelmente condensado e quente da matéria não agradou a todos. Pejorativamente, o modelo foi denominado Big Bang (grande estrondo), em 1949, por um de seus mais ferrenhos opositores, o cosmólogo britânico Fred Hoyle (1915-2001), numa entrevista para uma rádio. Ironicamente, o nome se tornou popular, passando, desde então, a se referir ao modelo.



DOIS SIGNIFICADOS • Quando se fala de Big Bang, é preciso distinguir entre dois significados para o termo. No primeiro, aceito pela ampla maioria dos cosmólogos e sustentado em sólidas bases observacionais, o universo está em expansão e passou por uma fase extremamente quente no passado. Esse modelo é baseado na relatividade geral, bem como no que se conhece hoje sobre a interação entre as partículas subatômicas, ambas teorias bastante testadas. No segundo, o universo teve um início bem definido no tempo, e houve uma ‘singularidade’ (concentração infinita de matéria), onde a física perde o seu sentido. Nesse modelo, juntamente com o nascimento do universo, teriam surgido o espaço e o tempo. Como é baseado numa extrapolação da física conhecida para escalas de energia totalmente inatingíveis neste momento, ele não tem uma base firme e ainda é assunto de intenso debate.