

MÁRIO NOVELLO



O QUE É COSMOLOGIA?
A REVOLUÇÃO DO PENSAMENTO COSMOLÓGICO

JORGE ZAHAR EDITOR
Rio de Janeiro

Copyright © 2006, Mário Novello

Copyright desta edição © 2006:
Jorge Zahar Editor Ltda
rua México 31 sobreloja
20031-144 Rio de Janeiro, RJ
tel.: (21) 2240-0226 / fax: (21) 2262-5123
e-mail: jze@zahar.com.br
site: www.zahar.com.br

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo
ou em parte, constitui violação de direitos autorais. (Lei 9.610/98)

Revisão: Maria Helena Torres e Michele Sudoh
Projeto gráfico e composição: Victoria Rabello
Ilustrações: Érico Goulart
Capa: Dupla Design

CIP-Brasil. Catalogação-na-fonte
Sindicato Nacional dos Editores de Livros, RJ.

N83o Novello, Mário, 1942-
O que é cosmologia?: A revolução do pensamento cosmológico / Mário
Novello. — Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 2006

il.

Inclui bibliografia
ISBN 85-7110-912-5

1. Cosmologia. I. Título.

06-0930

CDD 523.1
CDU 524.8

Advertência

Durante o segundo semestre de 2003, meu curso sobre questões cosmológicas, no Instituto de Cosmologia, Relatividade e Astrofísica (ICRA), no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), rua Doutor Xavier Sigaud, nº 150, constituiu-se de 36 horas de aulas. Na verdade, eu deveria dizer que esse número de horas representa somente a metade das aulas que dei naquele período. Explico por quê: às segundas e quintas, das 14 às 16 horas, eu apresentava um curso regular, técnico, sobre cosmologia relativista para estudantes de mestrado e doutorado que se dedicavam a seguir estudos avançados nessa área. Às terças e quintas, das 18 às 20 horas, repetia a mesma seqüência do curso para estudantes de psicologia e filosofia, abstenho-me de entrar nos detalhes técnicos apresentados no curso do CBPF. Este livro é um resumo das aulas para não-especialistas. Quanto às outras, a versão técnica, boa parte delas está disponível no site do CBPF – www.cbpf.br –, em Escolas Brasileiras de Cosmologia e Gravitação.

Agradecimentos

A Cristina Zahar, que pacientemente me provocou durante o último ano para que este livro viesse à tona; a meus alunos e colaboradores, com quem tenho dialogado de modo cotidiano, sobretudo quanto às questões técnicas; a meus amigos e colaboradores José Martins Salim e Luis Alberto de Oliveira, pelas conversas e discussões ao longo dos anos; ao professor Amaral Vieira, que me tem feito inúmeras indagações sobre o Universo; ao professor Edgar Elbaz, pelos diálogos infindáveis que tivemos nos últimos anos, em sua casa de campo, nos arredores de Lyon. Remo Ruffini me convidou a passar um mês de 2005 – e usar toda a sua infra-estrutura – no Internacional Center for Relativistic Astrophysics, sede da ICRANet, em Pescara, dando-me condições para que eu tivesse liberdade e tempo para terminar os comentários finais deste livro. Foi precisamente o que fiz, tendo a beleza do mar Adriático bem à minha frente.

Sumário

Prólogo	13
Prefácio	19
Introdução	23
1. Cosmologia segundo Einstein	
As diferentes forças do mundo	34
O objeto da cosmologia	37
O Programa Cosmológico de Einstein	38
Gravitação: geometria ou campo?	40
2. O modelo cosmológico de Einstein	
Deixando as estruturas absolutas para trás?	46
Propriedades básicas do Universo de Einstein	49
O mundo é fechado?	54
3. Algumas definições	
Cosmologia física	61
4. A fundação da física	
Fundação regional	64
Refundação global	68
Três períodos da cosmologia moderna	69
Unificação, conteúdo e forma: refundação regional	71
Por que a cosmologia é a refundação da física?	73
5. O estado fundamental	
As diferentes formas de matéria e a simetria fundamental do espaço-tempo	76
Hádrons e léptons, mésons, fótons e grávitons	77
Observadores inerciais e o grupo de Poincaré	78

As origens geométricas das simetrias	81
Observadores acelerados	83
O grupo de simetrias do espaço-tempo de deSitter	84
Estado fundamental	85
Minkowski ou deSitter?	88
6. O Grande Lambda	
Grande Lambda como um fluido perfeito?	92
Grande Lambda como energia do vácuo dos campos da física? . . .	94
Grande Lambda e o vácuo dos campos físicos	97
Grande Lambda e a massa do gráviton	99
Teoria do alcance de Yukawa	100
7. Cosmologias	
Cosmologia segundo deSitter	103
Cosmologia segundo Friedmann	106
Três momentos da cosmologia	112
Cosmologia segundo Dirac	113
8. Mitos cosmogônicos	
Mito científico de criação	118
Hipótese do big-bang como começo do mundo	120
Pequeno histórico	121
Os teoremas da singularidade	123
Da aceleração do Universo à singularidade	125
9. Cosmologia segundo Gödel	
Tempo no Universo de Gödel	129
Revolução dentro da revolução	130
Pequena descrição do Universo de Gödel	131
Uma breve comparação dos modelos de Universo de Einstein e Gödel	138
10. Do vazio com Lambda ao vazio sem Lambda	
O vazio	140
Cosmologia segundo Kasner	141
Belinsky, Khalatnikov e Lifshitz	143

11. Modos de criação do Universo	
Modos de criação	147
Universo eterno ou big-bang?	148
Criação espontânea: Universo quântico	149
Cenários de Universo eterno	153
A eternidade é instável?	157
12. A irresistível atração para existir	
O mundo linear e não linear	162
Pequeno <i>intermezzo</i> matemático	165
Conclusão	169
Reflexão final	172
Bibliografia	175

1. Cosmologia segundo Einstein

O primeiro movimento que permitiu, no início do século XX, o estabelecimento de uma nova cosmologia é simbólico: Einstein argumenta que a aplicação da então recém-construída teoria da gravitação ao Universo deve ser modificada. Interessam-nos menos aqui as razões que listava em apoio a essa alteração e mais a própria forma que utilizou para realizá-la. Pois o que estava em jogo – e o que estará constantemente em jogo, desde então – era saber se a cosmologia gera uma novidade tão completa a ponto de impor a alteração das leis da física quando aplicadas ao Universo. Essa é a questão que os primeiros cosmólogos colocaram e que ficou desde então pendente. Qualquer resposta que lhe seja dada marca, sem dúvida, uma decisão sobre a natureza do olhar da ciência sobre o mundo.

Antes de emprendermos essa análise, é necessário fazer um pequeno desvio para nos armarmos de instrumentos necessários para compreender a questão. Precisamos responder a algumas indagações que estão em nosso caminho e que não podemos evitar. A primeira delas pode ser formulada diretamente, a propósito de uma afirmação que fizemos antes. Assim, é colocada a questão: *por que podemos afirmar que uma teoria da gravitação fundamenta uma cosmologia?*

Antes de levar adiante a análise das idéias cosmológicas de Einstein, de entender as propriedades dessa modificação e as conseqüências que ela provocou, cabe também perguntar: por que teve ele o direito de fazer isso? Por que pôde construir um modelo capaz de descrever a totalidade a partir de sua nova teoria da gravitação? Ou por que somos levados a aceitar que uma modificação da descrição dos fenômenos gravitacionais, que a construção de uma nova teoria da gravitação, permite fundar uma cosmologia? Por que não podemos dizer, por exemplo, que uma modificação na descrição de fenômenos eletromagnéticos cria uma nova cosmologia? Por que o conhecimento das forças nucleares não cria uma cosmologia?

Essas perguntas admitem uma mesma resposta simples que, contudo, não as esgota completamente. Vamos aqui tratar somente de uma resposta imediata, deixando para outra oportunidade uma análise mais completa. Encontra-

remos essa resposta simples na própria caracterização e divisão das forças que existem na natureza.

As diferentes forças do mundo

Um dos grandes sucessos da física no século XX foi a unificação de todos os processos, da dinâmica de todos os fenômenos a partir de uma combinação de apenas quatro forças fundamentais. Não deixa de ser notável a eficiência dos físicos na demonstração de que todos os processos do mundo observável que fazem parte de seu território de competência podem ser explicados como consequência da luta entre quatro e somente quatro forças fundamentais: a força eletromagnética, a força gravitacional, a força nuclear fraca e a força nuclear forte.

Há vários modos de distinguir essas forças e classificá-las. Vamos nos limitar aqui a dois modos de classificação, suficientes para responder à pergunta que nos interessa. Para realizar essa divisão devemos nos concentrar em duas propriedades: o alcance e as respectivas intensidades dessas diferentes forças.

A física anterior ao século XX, que, genericamente, se costuma chamar de física clássica (querendo com essa terminologia explicitar que ela é não relativista e não quântica), conhecia somente forças de longo alcance: as forças gravitacionais e as eletromagnéticas. Com isso, entende-se que seus efeitos se estendem por todo o espaço conhecido, uma região tão grande que se tende a afirmar, simplificada, que ela possui alcance infinito, ou melhor, sem limite sensível. Não há evidência alguma de que exista uma distância-limite, um raio crítico para além do qual essas forças não se fariam sentir, a partir do qual não teriam mais ação efetiva sobre os corpos.

Além dessas duas, no interior da matéria, no nível atômico e mesmo mais intimamente, no nível intra-atômico, duas novas forças foram reconhecidas e receberam os nomes de forças nucleares fraca e forte. A primeira é responsável pela desintegração da matéria, e a segunda por sua estabilidade e persistência. Essas são forças de curto alcance, de dimensões extraordinariamente pequenas, imperceptíveis para nossos sentidos; se fazem sentir apenas no mundo microscópico, no interior dos átomos. Essa propriedade das forças nucleares está relacionada ao fato de que as partículas que servem como intermediárias nessas interações possuem massa diferente de zero. Em verdade, pode-se mos-

trar que o alcance de uma interação é inversamente proporcional à massa da partícula trocada.

Segundo o modo moderno, ou melhor, quântico, de interpretar e/ou explicar o fenômeno da interação – aquilo que, tradicionalmente, chamávamos de “força” entre dois corpos –, tudo se passa como se os corpos trocassem partículas muito leves e típicas de cada interação ou força. O caráter misterioso que revestia o conceito de “força” foi, assim, substituído pela nova forma encontrada para descrever a interação: a troca de um número de agentes ativos, os “emissários da interação”, ou os *quanta*, isto é, os grãos de energia da “força” correspondente. Para quem não é físico, isso pode parecer igualmente misterioso, mas devemos reconhecer que foi um progresso na descrição de como se dá de fato a interação, ao se visualizar, por meio da troca energética dos quanta da interação, o efeito da ação de uma força sobre um dado corpo.

Essa construção levaria a se esperar, por exemplo, que o fóton, encarregado de transmitir a interação eletromagnética, tivesse massa nula. Quanto à gravitação, a situação é um pouco mais complexa. Em um primeiro momento, e de modo simplista, poderíamos afirmar que, dado seu caráter de força de longo alcance, como a eletromagnética, os grãos elementares (que chamamos de “grávitons”) também deveriam ter massa nula. Deixaremos essa questão para examinar adiante, quando analisarmos as propriedades da constante cosmológica. Do que vimos, podemos fazer o seguinte quadro representativo da hierarquia das forças:

Forças de longo alcance	Forças de curto alcance
Eletromagnética Gravitacional	Nuclear forte Nuclear fraca

Outro modo de caracterizar e realizar um ordenamento das forças é lançar mão do conceito de intensidade. Em situações semelhantes essas forças produzem, como resultado de suas respectivas ações, respostas distintas. É possível identificá-las por certas constantes fundamentais que constituem a impressão digital de cada uma delas. Para cada força existe um correspondente valor da constante que determina a diferença de suas intensidades. Com esse critério pode-se elaborar uma segunda ordem hierárquica que vai da mais

forte para a mais fraca: nuclear forte – nuclear fraca – eletromagnética – gravitacional.¹

Universalidade da força gravitacional

A força gravitacional é a mais fraca interação conhecida. Só para dar uma idéia disso, entre duas partículas de mesma carga e mesma massa – por exemplo, dois elétrons –, a força gravitacional é, aproximadamente, da ordem de 10^{-40} vezes mais fraca que a eletromagnética. Por que, então, ao tratarmos da questão cosmológica, é por essa força que começamos a análise, é a partir dela que estruturamos um modelo cosmológico? Por que podemos afirmar que uma nova teoria da gravitação funda uma cosmologia?

A resposta vem das propriedades das forças. As forças nucleares são de curto alcance, da ordem das dimensões do átomo. É razoável aceitar que, qualquer que seja a definição de cosmologia que consideremos, ela deve tratar de grandes dimensões de espaço e de tempo. Assim, forças localizadas certamente não deveriam desempenhar papel importante ao longo de sua história.²

Sobram as duas forças de longo alcance. O eletromagnetismo tem a propriedade de admitir forças de sinais opostos, isto é, que podem ser atrativas ou repulsivas, dependendo das características dos corpos que interagem segundo esse modo. Em um Universo composto de corpos neutros, como átomos e radiação, as diferentes ações eletromagnéticas se cancelam, eliminando qualquer papel importante que a força poderia desempenhar, pelo menos em condições convencionais, no Universo.³

Embora seja a mais fraca de todas, a força gravitacional é universal, ou seja, tudo que existe sente a força gravitacional. Não existe nenhum corpo

¹ Na década de 1990, sugeriu-se a possibilidade de haver uma quinta força. Até hoje, quando escrevo estas notas, não existe indício convincente de que ela exista. Assim, há fortes evidências de que devemos aceitar o modelo padrão de que só existem essas quatro forças.

² Embora elas certamente devessem ser incorporadas em uma discussão completa da cosmologia, em particular na cosmogonia, isto é, do exame da substância material existente no Universo.

³ O campo eletromagnético tem um importante papel na cosmologia pelos efeitos gravitacionais que a distribuição de energia transportada por esse campo exerce sobre a curvatura do espaço-tempo, isto é, sobre a evolução da gravitação. Ele pode estar na origem das alterações de comportamento do Universo na vizinhança do ponto de condensação máxima e ser o principal responsável pela ausência de uma singularidade inicial (ver curso que ministrei na V Escola Brasileira de Cosmologia e Gravitação, em www.icra.cbpf.br).

material ou energia que não seja influenciado por um campo gravitacional – nem mesmo a própria energia gravitacional. Ademais, ela tem outra propriedade notável, a chave para entender a questão que colocamos: ela é somente atrativa. Não existe repulsão gravitacional, não existe massa negativa na natureza. Assim, mesmo sendo a mais fraca, essas duas propriedades – universalidade e atração sempre positiva – determinam a importância maior da força gravitacional sobre as demais quando se trata de pensar grandes porções de espaço-tempo ou até mesmo a totalidade do mundo que chamamos de Universo. Torna-se então compreensível a afirmação de que uma teoria da gravitação funda uma cosmologia.

Teremos oportunidade de nos deter mais longamente nessa questão, mas, para uma primeira compreensão do problema, é preciso esclarecer desde logo as razões que levaram ao afastamento da cosmologia newtoniana. Para isso precisamos entender por que, ao produzir uma aplicação formal de sua nova teoria da gravitação, Einstein se voltou para o Universo. Há aí um duplo movimento de idéias que devemos entender. Por um lado, a aplicação de uma teoria da gravitação ao Universo aparece como natural e necessária. Natural, posto que não se conhece nada que escape a essa força; e necessária, para evidenciar a coerência interna da nova teoria, a relatividade geral, e seu contato com o resto da física.

O objeto da cosmologia

A cosmologia aparece, para Einstein, como a aplicação formal necessária de sua teoria da gravitação a uma *totalidade* que parecia (e para sempre) inobservável. Essa questão impediu, durante um longo tempo, a caracterização da cosmologia como ciência. Embora a descoberta de Hubble, de que o Universo está em expansão, date do final dos anos 1920, foi somente em 1964, graças à descoberta da radiação de 2,7 graus Kelvin a preencher todo o Universo, que a cosmologia passou efetivamente a ser considerada ciência. Até essa data, prevalecia na comunidade científica a argumentação de que o objeto da cosmologia – o Universo – não era observável. Como se poderia medir alguma propriedade do *todo*? Qualquer experiência, toda observação, é sempre limitada no espaço e no tempo, argumentava-se. Assim, não poderíamos nunca observar esta totalidade que chamamos de Universo.

Curiosamente, mesmo depois da aceitação de que a observação feita por Hubble, em 1929, de que certas medidas astronômicas garantiam a afirmação de que o Universo estava em expansão, os cientistas ainda não consideravam suficiente a experiência de Hubble para concordar que a totalidade Universo poderia fazer parte de observações convencionais. Em verdade, foi somente quando a *cosmologia física* se institucionalizou, nos anos 1960, que a cosmologia passou a ser considerada ciência por parte do *establishment* científico.

O Programa Cosmológico de Einstein

A tradição científica exige que as observações sejam descritas como uma luta contínua entre diferentes processos inertes que restariam como tal, eternamente, no mesmo estado, não fosse a presença de forças que destroem o equilíbrio. O princípio de inércia possui grande força formal e marcou profundamente o pensamento da física. Processos e eventos, a realidade não trivial, sua diferenciação do vazio têm sido acompanhados pelos físicos com uma racionalidade que torna indispensável algum tipo de força na origem de uma ação, de qualquer processo físico. Devemos então prever uma força universal que, agindo sobre tudo o que existe, ou melhor, sobre tudo aquilo que caracterizamos como “o Universo físico”, produz, organiza, direciona esse Universo. Na caracterização das forças conhecidas, esse papel é desempenhado pela força gravitacional. Desse modo, pela universalidade dessa força, foi-se levado a identificar o Universo como Universo gravitacional.

O Programa Cosmológico de Einstein se baseia fundamentalmente em dois princípios. Há também, associada a eles, uma orientação, um quase-princípio menor, não identificado como tal, mas que possui a aparência de uma indagação sub-reptícia que está na origem de toda questão cosmológica. Vamos enunciar esses elementos não do modo como foram originalmente apresentados, mas como, ao longo do tempo, adquiriram seu significado atual e são descritos hoje.

Princípio da universalidade

O primeiro princípio, talvez o mais fundamental, consiste na afirmação de que o ator fundamental no cenário cosmológico é a força gravitacional. Isso

nos leva a descrever o Universo gravitacional como simplesmente o *Universo*. As razões da hierarquia das forças da natureza servem de apoio a essa hipótese, e, por isso, não iremos nos estender mais nesse tema. Precisamos então passar à etapa de organização de sua descrição, o que é garantido por outro princípio fundamental.

Antes de enunciarmos esse princípio e passarmos à sua análise, podemos perguntar por que vamos buscar em um princípio – e de interação – o terreno sobre o qual construir uma cosmologia. A razão tem natureza histórica, mas é importante fazer dois ou três comentários a respeito.

Desde a época em que Newton elaborou a universalidade do conceito de força gravitacional, os físicos reconheceram sua associação a uma ação instantânea e universal. Essa descrição só pôde ser sustentada até o começo do século XX, antes da revolução produzida por Poincaré, Lorentz, Einstein e outros, pois tal propriedade é incompatível com a relatividade especial, que não admite propagação maior que a da luz. A incompatibilidade entre essa teoria, por um lado, e, por outro, a existência de processos gravitacionais foi resolvida por Einstein ao instituir a hipótese de que a característica da força gravitacional permite sua identificação com a geometria do espaço-tempo, e sua dinâmica é dada pelas equações contidas na teoria da relatividade geral. Essa sentença contém duas afirmativas. A primeira diz respeito à identificação da gravitação com a geometria do mundo; e a segunda trata da dinâmica que deve ser atribuída a essa geometria.

A universalidade da gravitação é uma condição básica indispensável para uma descrição em termos geométricos. Com efeito, como poderíamos falar da associação da gravitação a uma estrutura única – o espaço-tempo – se a geometria do mundo não fosse única e universal? Mas podemos nos perguntar se a interpretação geométrica não é somente isso, uma interpretação. Em outros termos, seria possível descrever os processos gravitacionais sem fazer apelo à geometrização?

Antes de responder, vamos refletir um pouco sobre as conseqüências que podemos atribuir à resposta. Consideremos o caso em que ela é positiva. A geometria do mundo não seria determinada pela força gravitacional. Mas, se a gravitação é a mais universal das forças, então, quem determinaria a geometria do mundo? Ou não haveria uma só geometria no mundo? Seria possível imaginar que a geometria do mundo estivesse associada a cada processo em particular, e não impressa, cunhada na estrutura fundamental do espaço-tempo?

E, se isso fosse verdade, que sentido poderíamos atribuir à geometrização da gravitação? Ela não seria mais, então, que um modo conveniente e especial para descrever propriedades especiais dessa força – nada mais que isso.

Falar de uma geometria deveria corresponder a determinar a estrutura causal do mundo. Tal associação, iniciada pela relatividade especial e ampliada pela relatividade geral, parecia uma certeza fundamental da física. Entretanto, ao final do século XX, a interdependência entre geometria e estrutura causal começou a ser posta em questão. A razão é simples e está ligada a análises de processos não lineares referentes a teorias de campo – em particular, ao campo eletromagnético – que permitem estabelecer novidades na propagação causal, aspectos ausentes das teorias lineares. A partir dessa mudança causal, é possível associar uma multiplicidade de geometrias ao mundo, pon-do por terra aquela univocidade que tanto atraiu os cientistas ao longo do século XX. É bem verdade que há uma diferença de gradação nas diversas formas de atribuir uma geometria ao mundo. De qualquer modo, a perda do caráter unívoco e universal da geometria do espaço-tempo, ao ceder lugar para uma miríade de geometrias de diferentes ordens e regimes, parece estar levando para um lugar menos nobre da ciência a própria idéia de univocidade do mundo, ou, para ser mais rigoroso, sua estrutura causal.⁴ Mas essa não é nossa questão. Devemos aqui voltar à pergunta: ao identificar a gravitação com a geometria, Einstein encontrou o único modo de representar essa força? A resposta é técnica e envolve um longo caminho que iremos descrever muito brevemente. Para o que nos interessa, é suficiente nos limitarmos às considerações feitas por vários cientistas ao longo dos anos 1950.

Gravitação: geometria ou campo?

A relatividade geral foi construída a partir de um enfoque geométrico. Uma intuição e um conhecimento profundo de alguns fundamentos que servem de base aos processos gravitacionais conduziram Einstein, na segunda década do século XX, à teoria na qual a gravitação se identifica com a geometria do espaço-tempo. Quarenta anos depois, diferentes cientistas – Sen Gupta, Richard Feynmann e outros – mostraram como é possível seguir um caminho alterna-

⁴ Ver, em particular, Mário Novello *et al.*, *Physical Review D*, 2000.

tivo na descrição dos mesmos processos, sem fazer apelo direto a modificações na geometria. Mostrou-se que a geometrização da força gravitacional é uma representação dessa força, mas não a única.

Seguindo a argumentação apresentada pelo físico indiano Sen Gupta, podemos resumir a descrição alternativa, não geométrica, da teoria de Einstein. Começamos por notar que todas as demais interações – exceto a gravitação – são descritas tendo como arena o espaço-tempo plano, sem qualquer curvatura, chamado espaço de Minkowski. Assim, por que não tentar uma descrição semelhante, isto é, pensar também a força gravitacional como um campo de interação que se propaga sobre o mesmo espaço? A fonte do campo seria a matéria sob qualquer forma – matéria ponderada, radiação –, e a intensidade da força dependeria da distribuição de energia da fonte.

Ora, a gravitação também contém energia. E como toda forma de energia produz gravitação, a própria energia gravitacional deve ser fonte de gravitação, modificando as propriedades desse campo de interação, suas características e intensidade, em nada se assemelhando às outras forças, como a eletromagnética, por exemplo. A fonte do campo eletromagnético é formada por cargas elétricas em repouso ou em movimento. O campo eletromagnético possui energia (pois existe!), mas não possui carga elétrica. Conseqüentemente, é possível dizer que o campo eletromagnético é linear. Não há nenhuma inconsistência de princípio entre a existência do campo eletromagnético e sua incapacidade de interagir consigo mesmo.

O caso gravitacional é positivamente diferente. É fácil entender a razão da distinção examinando suas fontes, isto é, o modo pelo qual esses campos são criados. Como o campo gravitacional tem por fonte qualquer forma de energia, é fácil compreender que a energia do próprio campo gravitacional – precisamente a que lhe dá existência, realidade – deve ser também causa de geração de campo gravitacional. O processo que garante que a força gravitacional seja determinada pela energia presente em uma dada região do espaço-tempo leva à necessidade de incluir a própria energia gravitacional como fonte de si mesma. Chega-se, assim, a um processo em cascata: a gravitação gerada por uma dada energia – sob qualquer forma – possui também energia que gera gravitação, que também possui energia, que gera gravitação, e assim sucessivamente.

Vários físicos, entre os quais, em particular, Sen Gupta e Richard Feynman, mostraram que é possível entender essa série infinita de auto-

processos, de auto-excitação continuada de energias que se sobrepõem, por meio de uma propriedade notável: a de ser somável. Ela admite um tratamento matemático capaz de compactar toda a infinitude em um formalismo único. Quando se soma essa série, aparece um resultado maravilhoso: a soma total tem um efeito formal, matemático, equivalente ao que se obteria se admitíssemos *a priori* que a força gravitacional tem a propriedade de modificar a estrutura da geometria do espaço-tempo! E mais: como a gravitação não pode ser *desligada*, a geometria do espaço-tempo plano, sem curvatura, a estrutura métrica de Minkowski, se torna, dessa maneira, inobservável. Ou, no melhor dos casos, é uma aproximação da verdadeira geometria do mundo naquelas situações particulares em que a intensidade da força gravitacional é muito fraca.

Isso significa que, ao contrário do que ocorre com a força eletromagnética, que é linear e possui dois sinais, a gravitação não é controlável e pode ser identificada com a alteração, ou melhor, com a determinação da geometria do espaço-tempo. Em resumo, o modo geométrico de representar a interação gravitacional é somente uma possível descrição da realidade, mas não a única.

Essa dualidade não é uma dificuldade, mas aponta no sentido da riqueza conceitual que possui, quer no que chamaríamos de modo geométrico de representação, quer no modo de representação de campo. Cada um deles possui vantagens formais que devem ser consideradas em cada caso, em cada análise. Notemos, entretanto, que eventuais alterações da dinâmica da gravitação tornam-se sem dúvida uma questão mais séria. Qualquer que seja nossa descrição – geométrica ou de campo –, a dinâmica deve estar determinada e deve ser a mesma.

Cabe reconhecer o começo da dificuldade já no próprio Einstein, pois ele produziu duas equações distintas para a gravitação, conforme estejamos tratando de processos na Terra, em nosso sistema solar e vizinhanças, ou queiramos descrever forças gravitacionais entre galáxias e mesmo além delas, no que chamamos de processos cosmológicos.

A essa dificuldade original vieram se juntar outras. A razão para isso está precisamente relacionada à fraqueza do campo gravitacional em nossa vizinhança e à necessidade de considerar campos fortes, muito intensos, para descrever processos de natureza cosmológicos e que estão fora do controle operacional. Para nossa análise, não precisamos entrar nos detalhes das propostas de alteração das equações da relatividade geral ainda hoje examinadas.

Princípio temporal

Einstein pensa o tempo como uma incógnita impossível de ser aprisionada dentro de um programa coerente da física. Desde seus primeiros estudos cosmológicos, está convencido de que a única possibilidade de produzir um modelo de Universo que não se envolvesse em dificuldades insuperáveis com questões conceituais do tempo requer – e, mais que isso, exige – a eliminação do tempo. Optou assim por produzir um Universo completamente homogêneo, no qual a aparência local é a mesma em todos os lugares. Ademais, à semelhança dessa estrutura espacial (que envolve igualmente a ausência de condições assintóticas), impôs a condição de que também não houvesse qualquer referência envolvendo o tempo. Tratava-se, por conseguinte, de eliminar, em sua descrição do Universo, qualquer dependência local, fosse ela espacial ou temporal.

Nesse primeiro momento de construção da nova ciência – a cosmologia –, era indispensável que a ela fosse atribuída uma função singular, uma posição privilegiada que a distinguisse claramente das descrições convencionais dos processos que a física está acostumada a fazer. O caráter especial da ciência então nascente deveria ter como função primeira e imediata a substituição dos absolutos newtonianos que haviam orientado a ciência dos últimos séculos. E, no entanto, não foi isso que sua prática exibiu.

Depois da tarefa grandiosa de ajudar a fazer uma revolução – a teoria da relatividade especial –, ao relativizar os processos físicos, propagando a universalização dos observadores inerciais e indo mesmo um passo além – com a relatividade geral – na tentativa de eliminar completamente qualquer especificidade de um observador em sua indagação, observação e descrição da realidade física, Einstein reconhece ter auxiliado na produção e elaboração de um movimento de idéias que havia culminado na eliminação dos absolutos newtonianos – em particular, o espaço e o tempo absolutos. Esse movimento, contudo, teve também como conseqüência importante a criação de um vazio no nosso imaginário, em nossa representação do mundo.

Para preencher esse vazio e produzir sentido integral e completo à teoria da gravitação, Einstein volta seu olhar para o Universo. Deixa de pensar as conseqüências dessa teoria sobre processos envolvendo o sistema solar; larga de lado, por momentos, a crítica comparativa com o sistema newtoniano, para a vizinhança da Terra, e se lança ao exame do Universo como um todo. É ali

que sua teoria deveria passar pelo teste de coerência interna, preparatório para a prova de compatibilidade observacional. Esse foi o teste de coerência que escolheu submeter sua teoria da relatividade geral.

Para realizar essa tarefa, precisa de um princípio que lhe sirva de guia, capaz de orientá-lo na busca de uma geometria para o Universo que satisfizesse suas equações de evolução do campo gravitacional. Começa por reconhecer no princípio de Copérnico, em seu sentido mais abrangente – *não ocupamos posição privilegiada no Universo* –, o único guia externo à sua teoria que não produzia efeitos indesejáveis. Curiosamente, o apelo ao princípio de Copérnico indica o lugar natural no arcabouço formal que Einstein organiza, por onde apareceriam novos absolutos que iriam substituir, no pensamento científico, o papel representado pelos apriorismos newtonianos. E quais são eles?

O primeiro passo na nova ordem demanda a descrição da geometria do mundo distinta da que fora estabelecida na relatividade especial, isto é, a geometria de Minkowski. Ora, para descrever a geometria do Universo, é necessária uma escolha antecipada de um sistema de coordenadas. Isso significa, de imediato, em termos práticos, uma escolha do tempo. Einstein decide que a escolha deve estar o mais próximo possível do cenário absoluto newtoniano, que o tempo devia ser universal, único para toda a classe de observadores privilegiados em repouso com a matéria existente no mundo. Essa escolha lhe parece indispensável, e ela substitui, no imaginário coletivo, a estrutura absoluta perdida.

Einstein postula, então, como princípio, que se deveria escolher uma classe particular de observadores privilegiados, possuindo relógios que exibissem uma sincronização absoluta de toda matéria do mundo, em todas as partes. De outro modo, como encontrar argumentos que explicassem um ritmo distinto, um passar dos tempos que dependesse do observador, que exibisse uma disritmia entre suas partes? Reconhecemos nessa escolha um bom princípio,⁵ que, embora apareça mascarado em seu modelo (por ser estático), iria constituir o elemento mais sólido, mais universalmente aceito de toda a cosmologia futura. A tal ponto isso é verdade que o único modelo cosmológico posterior que não admite uma sincronização absoluta, essa escolha universal de des-

⁵ Tal sistema de representação das coordenadas havia sido descrito no século XIX pelo matemático alemão Carl Friedrich Gauss. Teremos oportunidade, mais adiante, de comentar a origem e extensão desse sistema chamado gaussiano.

criação temporal – o modelo de Universo proposto e elaborado em 1949 pelo matemático austríaco Kurt Gödel –, foi tratado por todos, em particular pelo próprio Einstein, como uma curiosidade, um defeito mesmo da teoria da relatividade geral, capaz de permitir essa indesejável deformação formal do tempo.

O terceiro pilar sobre o qual Einstein ergue a cosmologia tem uma componente menos técnica, menos formal, um caráter apriorístico que a distingue das outras. A bem da verdade, não deveria sequer ser considerada como um verdadeiro princípio, mas sim como uma crença escondida. Curiosamente, ela pode ser formulada como uma questão e estará no centro de nossa discussão. Não somente é a mais fundamental de todas, é ainda extremamente atual. Assim, a questão que se coloca é: *a física é suficiente para explicar nosso Universo, ou existem propriedades novas, específicas da cosmologia?*

Essa é a pergunta com que se inaugura a cosmologia moderna, e é ainda a questão que temos pela frente. A que se deve tal persistência? Por que essa indagação pode, ainda hoje, resistir a uma resposta direta, pronta e definitiva?

Antes de entendermos o problema – que, como veremos, é fonte de uma definição aceitável do que é cosmologia –, devemos fazer um primeiro e breve balanço sobre seu status ao longo da história.

A primeira resposta dada por Einstein a essa pergunta é um sonoro não. A partir dessa resposta ele ergueu seu cenário cosmológico. Entretanto, quase em seguida, rejeitou essa solução. A rejeição tem uma componente técnica e outra ideológica. A primeira se apóia na instabilidade do modelo proposto por Einstein, enquanto a segunda está relacionada à descoberta do cientista russo Aleksandr Friedmann de que cenários cosmológicos mais estáveis, não estáticos, são permitidos pelas duas teorias da gravitação que Einstein havia proposto. Friedmann liberava os cientistas, assim, da obrigação de aceitar a hipótese de existência de novas forças de natureza global, capazes de serem observadas somente na cosmologia. Para examinar essas alternativas, contudo, é preciso entender um pouco melhor o primeiro modelo cosmológico.