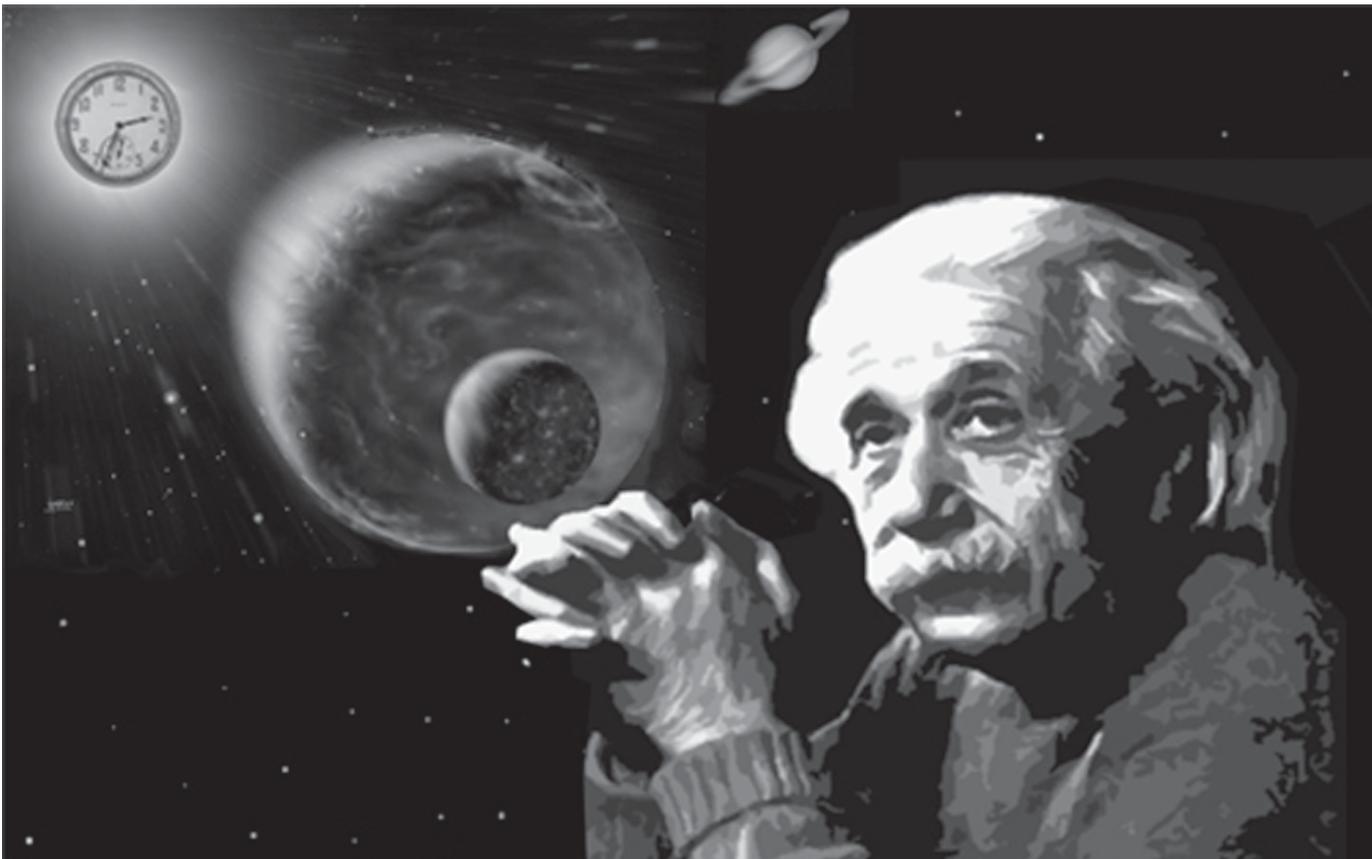


EINSTEIN E A COSMOLOGIA



Saulo Carneiro

Ao contrário do que às vezes se pensa, a atividade científica não é uma seqüência lógica de idéias e descobertas, dispendo um a um os tijolos do conhecimento. A história da cosmologia é um belo exemplo do fazer, desfazer e refazer contínuo da ciência. É bastante conhecida a influência que exerceram sobre o trabalho de Einstein as concepções de Mach acerca da origem da inércia, influência manifesta na teoria geral da relatividade e no primeiro modelo cosmológico moderno. Mais fascinante é compreender as razões de tal concepção ter sido, afinal, abandonada. Como abandonada foi, para ressurgir mais tarde, a famosa constante cosmológica.

Introdução

Ilustração de abertura

Bruno V. Thurner

Dado seu papel na fundação da física moderna, seria surpreendente se o nome de Einstein não guardasse relação com a moderna cosmologia. Na verdade, foi quem estabeleceu seus princípios. Foi o criador da teoria geral da relatividade, base dos modelos cosmológicos contemporâneos. A generalização da teoria especial da relatividade surgiu da necessidade de compatibilizá-la com a descrição da gravidade. A gravitação newtoniana fazia uso da interação à distância, instantânea, entre os corpos, enquanto que o princípio da relatividade exigia sua intermediação por campos, nos quais qualquer processo se desse em velocidade finita, não superior à velocidade da luz no vácuo. A teoria eletromagnética não só era compatível com essa exigência, como já a continha em seus fundamentos. A gravitação, no entanto, havia que ser generalizada, o que só foi possível com a generalização da própria relatividade. A teoria resultante coincide com a de Newton no limite de baixas velocidades e campos gravitacionais fracos. Por outro lado, leva a novas previsões quando em presença de grandes massas ou grandes densidades, e é portanto necessária se queremos descrever a evolução do universo em larga escala.

Foi Einstein também quem propôs, em 1917, o primeiro modelo cosmológico relativístico, caracterizado por um espaço finito, porém ilimitado, no qual a matéria é distribuída uniformemente. Nesse modelo, solução das equações da relatividade geral, a densidade da matéria não varia no tempo, o que levou a seu posterior abandono, após o estabelecimento definitivo por Hubble, em 1929, do afastamento das galáxias. No entanto, o modelo de Einstein não foi apenas prototípico dos demais modelos relativistas. Através dele estabeleceu-se a possibilidade de uma definição moderna de cosmos. Pois uma definição razoável de universo – ou ao menos de um universo estático, no qual o movimento médio da matéria é nulo em larga escala, como se acreditava então – não era possível nos marcos da gravitação newtoniana. Em Newton, um universo estático era necessariamente infinito, com matéria uniformemente distribuída em todo o espaço, caso contrário colapsaria sobre si mesmo. Tal cenário continha dificuldades insolúveis, entre as quais o célebre paradoxo de Olber, segundo o qual o céu noturno de um cosmos infinito e homogêneo deveria ser totalmente luminoso.

A definição apropriada do que chamamos universo, e sua consistência com a física que temos em mãos, é condição

básica para qualquer cosmologia. Essa condição era bem satisfeita, por exemplo, na cosmologia medieval, onde o cosmos era o conjunto das esferas etéreas, cada qual girando ao redor da Terra, carregando consigo os corpos celestes. A imobilidade da Terra no centro desse universo estava de acordo com a física aristotélica, segundo a qual os elementos pesados buscavam naturalmente o centro. Além disso, se a Terra se movesse, seu movimento seria perceptível em experiências simples, como soltar um peso do alto de uma torre e vê-lo cair a grande distância da mesma. Foi para dar credibilidade ao modelo heliocêntrico que Galileu desenvolveu sua nova física, em que os conceitos de inércia e de relatividade do movimento desempenham um papel central. Assim, uma longa via de duas mãos foi traçada: da cosmologia aristotélica à física galileana, a qual, aprofundada e ampliada por Newton, não admitia em si uma cosmologia consistente; e da física newtoniana à cosmologia moderna, passando pela nova física relativística.

O interesse primeiro de Einstein não era cosmológico, tendo ele percorrido um caminho inverso ao de Galileu: enquanto este se inspirou em problemas astronômicos para a construção de uma física terrestre, Einstein tinha, em primeiro lugar, interesses eminentemente físicos, que o levaram da eletrodinâmica à relatividade restrita, e desta à relatividade geral. A obtenção de um modelo cosmológico relativístico, assim como a explicação de fenômenos astronômicos antes inexplicados, como a precessão do perihélio de Mercúrio, ou a predição de novos, como a deflexão da luz de estrelas pelo Sol, foram conseqüências da nova teoria, cujo único laboratório à época – e o melhor ainda hoje – são os céus, com suas grandes massas e distâncias.

Isso não significa que, na criação de sua teoria da gravitação, Einstein não tenha tido qualquer inspiração de cunho cosmológico. Ao contrário, ele foi bastante influenciado pela crítica do físico e filósofo Ernst Mach à física newtoniana, crítica na qual um modelo de cosmos era imprescindível. Veremos a seguir que as idéias de Mach não influenciaram apenas o desenvolvimento dado por Einstein à sua nova física, mas influenciaram também o primeiro modelo cosmológico de nossa era.

Einstein e o Princípio de Mach

A grande contribuição de Galileu à defesa do modelo heliocêntrico, posta em forma final pela mecânica newtoniana, consistiu em mostrar que todo movimento uniforme é relativo. Não é possível saber, através de nenhuma experiência,

se um sistema físico está em repouso ou em movimento uniforme em relação a um sistema de referência inercial. O que significa que quaisquer sistemas de referência em movimento uniforme em relação a um sistema inercial são também inerciais, e que as leis físicas devem se expressar da mesma forma em todos eles. É assim que explicamos como a pedra, solta do alto da torre, cairá ao pé da mesma, apesar de a torre, arrastada pela terra, estar em rápido movimento. Como diferentes observadores medem, para um mesmo objeto, diferentes posições e velocidades, seria o mesmo dizer que espaço e velocidade são grandezas relativas, o que conhecemos como princípio da relatividade de Galileu (o princípio da relatividade de Einstein acabaria ainda com o caráter absoluto do tempo).

A primeira crítica que se pode fazer aqui é a respeito do conceito de sistema inercial, que não está previamente definido. Poderíamos defini-lo através da segunda lei de Newton, como aquele em que um corpo livre da ação de forças permanece em movimento uniforme. Mas para isso teríamos que definir força, ou estabelecer as condições em que um corpo é considerado livre, o que só é possível fazendo-se referência a um sistema inercial. A alternativa era simplesmente identificar os sistemas inerciais como aqueles em movimento uniforme em relação às estrelas fixas, ou distantes, identificação que, além de puramente empírica, era mera coincidência.

Outra característica da axiomática newtoniana criticada por Mach, cinco décadas antes do advento da relatividade geral, era o caráter absoluto das acelerações. Ao contrário dos movimentos uniformes, os movimentos acelerados são detectáveis através de experiências. Se no interior de um trem vemos um pêndulo em posição vertical, não saberemos dizer se o trem está em repouso ou em movimento uniforme em relação à estação. Mas, se o mesmo acelera, o pêndulo inclina-se imediatamente. Trata-se aqui do que Newton chamaria aceleração absoluta, ou seja, aceleração em relação a um sistema inercial, em contraposição à aceleração relativa. Por exemplo, se na mesma estação é outro trem que acelera, a aceleração relativa entre os dois não ocasionará qualquer efeito observável sobre o pêndulo.

Para Mach os conceitos de espaço e tempo não são mais que construções do espírito humano, construções secundárias e sempre relativas ao conceito primário de matéria. Para ele, espaço e tempo não podiam ter existência e propriedades independentes da matéria, e qualquer movimento, acelerado ou não, era portanto sempre relativo à

matéria. Quando o trem acelera na estação, ele acelera em relação ao conjunto de toda a matéria do universo, considerada em seu estado médio de movimento, e o desvio do pêndulo seria conseqüência dessa aceleração relativa. Se o trem ao lado tivesse massa suficientemente grande, sua aceleração relativa ao primeiro ocasionaria efeito semelhante. Aí residiria, por outro lado, a explicação para a aparente coincidência entre um sistema inercial e o sistema das estrelas distantes.

Apesar de Mach não propor uma realização física concreta para sua idéias, seria natural que os efeitos inerciais advindos da aceleração relativa entre um corpo e a totalidade do universo resultasse de uma interação gravitacional (alguma correção à gravitação newtoniana?). A gravidade, além de ser de longo alcance, é universal, existindo entre quaisquer corpos. Isto daria às forças de inércia, como a força centrífuga, surgidas em sistemas de referência acelerados, uma origem gravitacional, e justificaria outra curiosa coincidência: aquela observada entre a massa inercial de um corpo, presente na segunda lei de Newton, e sua massa gravitacional, presente na lei da gravitação universal. É esta coincidência que faz massas diferentes caírem com mesma aceleração na superfície da Terra.

Não é difícil perceber a influência dessas idéias sobre Einstein, que, em 1907, teria a inspiração inicial para o desenvolvimento da teoria geral da relatividade. Seu *insight* consistiu em estabelecer uma equivalência entre sistemas uniformemente acelerados e campos gravitacionais uniformes. Considere um cosmonauta no interior de uma pequena espaçonave. Ele não poderá discernir, através de experiências mecânicas, se a espaçonave está uniformemente acelerada “para cima”, ou se se encontra em repouso em um campo gravitacional uniforme que aponta “para baixo”. A razão disto está na já referida coincidência entre as massas inercial e gravitacional, o que faz todos os corpos caírem com mesma aceleração num campo gravitacional uniforme. Einstein postulou que essa equivalência é válida para qualquer experiência física, e não apenas as mecânicas. Em seguida a generalizou para campos não-uniformes, o que só foi possível através de uma formulação local: numa região suficientemente pequena do espaço, qualquer campo gravitacional é fisicamente equivalente a um campo de forças inerciais, ou seja, pode ser localmente “desligado” por uma mudança de sistema de referência. Esse “princípio da equivalência” seria a base da relatividade geral, teoria que só viria à luz em sua forma definitiva em 1916. Do ponto de

vista geométrico, dizemos que um campo gravitacional é equivalente a um espaço-tempo curvo, ao passo que o espaço-tempo plano da relatividade restrita corresponde à ausência de campo.

Inicialmente, Einstein acreditava que a nova teoria seria uma realização das idéias de Mach: se campos gravitacionais são localmente equivalentes a campos inerciais, seria o mesmo dizer que as forças de inércia, presentes em sistemas acelerados, e portanto a própria inércia, têm origem gravitacional. Entretanto, para isso faz-se necessário um modelo cosmológico adequado. Em primeiro lugar, a distribuição de matéria deve ser isotrópica, caso contrário a massa inercial de um corpo poderá depender da direção em que este é acelerado. Como não ocupamos uma posição central no universo (sequer ocupamos uma posição central em nossa própria galáxia), a distribuição da matéria deve ser isotrópica em torno de qualquer ponto, e portanto ela é também homogênea (a isso se chama princípio cosmológico).

Em segundo lugar, a matéria deve estar em repouso em relação a algum sistema localmente inercial (nos referimos ao movimento médio da matéria, tomado em escala cosmológica). Para entendermos o que isso significa, consideremos novamente nosso cosmonauta em sua pequena espaçonave, distante de qualquer corpo celeste. Com as cortinas das janelas fechadas, ele faz algumas experiências para se assegurar de que sua nave é um sistema inercial. Solta uma fruta em repouso, e, percebendo que ela acelera numa certa direção, aciona os retrofoguetes de forma a compensar o efeito. Mas nota ainda que a fruta adquire um movimento de rotação, e novamente o compensa, fazendo com que a nave gire também. Por fim consegue que a fruta permaneça em repouso, e, como sobre a mesma não age qualquer força, conclui que sua nave é agora um sistema inercial. Finalmente, abre as cortinas e observa as estrelas distantes. Segundo Mach, elas deverão estar em repouso (ou em movimento uniforme).

O modelo cosmológico de Einstein cumpre as condições acima: a matéria é distribuída de forma homogênea e isotrópica; e está em repouso num sistema de referência apropriado, que, na vizinhança de um ponto qualquer do espaço, é localmente inercial. Além disso, sendo o espaço finito (porém ilimitado, numa geometria curva isso é possível, pense por exemplo na superfície de um globo), o paradoxo de Olber fica naturalmente resolvido, pois o número de estrelas no céu é finito. Apesar de tudo, a recepção de Mach à teoria da relatividade, mesmo em sua forma

restrita, evoluiu para uma clara rejeição. Einstein atribuiu tal atitude a uma diminuição da capacidade de compreensão do velho filósofo. Veremos que não foi necessariamente assim, e que as razões de Mach foram, provavelmente, as mesmas que levaram Einstein – e a maioria dos cosmólogos modernos – a, paulatinamente, abandonar o “princípio de Mach”.

Antes, chamemos a atenção para outro importante ingrediente do modelo. Para obter uma solução estática, Einstein foi obrigado a adicionar às equações originais da relatividade geral um novo termo, por ele denominado termo cosmológico (também conhecido por constante cosmológica). A presença desse termo fazia, ademais, com que o espaço-tempo plano, vazio de matéria, não fosse solução das equações da teoria. Para Einstein, isto indicava a impossibilidade de soluções na ausência de matéria, em acordo com as expectativas de Mach. Neste ponto, porém, ele não podia estar mais enganado.

Os novos modelos

Suponha que você se encontre em um veículo em movimento. Se o veículo freia bruscamente, você é atirado para a frente, como se uma força real o empurrasse. Na verdade você simplesmente seguiu em movimento uniforme em relação ao referencial – aproximadamente inercial – da terra. Mas, visto do referencial do veículo, você foi retirado do repouso por uma força inercial, a qual, segundo Mach, tem sua origem em uma interação com o conjunto do universo. Note contudo que essa força aparece instantaneamente, assim que os freios do veículo são acionados. Surge então uma incômoda pergunta: como as galáxias distantes “percebem”, instantaneamente, a aceleração (frenagem) do veículo? Há duas possíveis respostas. A primeira nos diz que a interação entre você e o restante do universo se dá à distância, como na teoria newtoniana. Mas isso é contraditório com os princípios da relatividade restrita, segundo os quais nenhuma informação se pode propagar com velocidade superior à da luz.

A segunda alternativa é introduzir um campo que transmita a interação entre você e as galáxias distantes. Na relatividade geral esse papel é desempenhado pelo próprio espaço (na verdade, pelo espaço-tempo). A distribuição de matéria determina a curvatura do espaço em cada ponto, curvatura que, por sua vez, determina a inércia dos corpos em movimento. Mais precisamente, a curvatura determina a trajetória (a geodésica) percorrida por um corpo “livre”, ou

seja, na ausência de outras forças que não a gravidade. Foi esta a solução adotada por Einstein. Mas aqui surgem dois problemas, relacionados entre si. O primeiro é a introdução de uma entidade física, o espaço-tempo, com existência e propriedades intrínsecas, violando a concepção original de Mach sobre a primazia da matéria. O espaço-tempo já não é apenas um palco inerte onde as coisas acontecem, mas participa ele mesmo do desenrolar dos acontecimentos. Segundo, ao representar graus de liberdade independentes, a curvatura do espaço-tempo – e portanto a inércia dos corpos – não é determinada completa e univocamente pela distribuição de matéria.

De fato, no mesmo ano de 1917 veio à luz uma nova solução cosmológica das equações da relatividade geral, devida a de Sitter. Esse universo tinha a surpreendente propriedade de ser vazio, ou seja, de ser uma solução com ausência de matéria, porém com curvatura não nula, o que era possível devido, ironicamente, ao termo cosmológico introduzido por Einstein. Essa curvatura determina as linhas geodésicas seguidas por uma massa de prova, seu movimento inercial, apesar de não haver qualquer outra matéria nesse universo.

Einstein julgou que a solução de de Sitter, apesar de matematicamente correta, continha inconsistências físicas, devido à presença de uma singularidade, ou seja, de uma região do espaço na qual as equações da teoria se tornavam indefinidas. Mas logo ficou claro que esse problema se devia à escolha do sistema de referência utilizado. Para isso foi importante a contribuição, entre outros, do padre belga George Lemaître. Através de uma transformação adequada de coordenadas ele mostrou, em 1925, durante seu doutoramento, que o universo de de Sitter é um universo homogêneo e isotrópico em expansão, e usou em favor deste modelo as observações do afastamento das galáxias, que surgiam à época. Dois anos depois ele proporia um universo que evolui da solução estática de Einstein, com matéria e termo cosmológico, para a solução de de Sitter, na qual a matéria se encontra totalmente diluída, um cenário sugerido originalmente por Eddington, em 1923. Ao mesmo tempo, entre 1922 e 1924, de forma totalmente independente, o matemático russo Alexander Friedmann apresentava soluções cosmológicas não-estáticas das equações de Einstein da gravitação, nas quais o espaço se encontra em expansão. Após o estabelecimento definitivo do afastamento das galáxias, essas soluções se tornaram o paradigma da cosmologia moderna.

Bibliografia Recomendada

- EINSTEIN, Albert. *O Significado da Relatividade*. Coimbra: Armênio Amado, 1984.
- PAIS, Abraham. *Sutil é o Senhor.... A Ciência e a Vida de Albert Einstein*. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1995.
- KRAGH, Helge. *Quantum Generations. A History of Physics in the Twentieth Century*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1999. cap. 7 e 23.
- EISENSTAEDT, Jean. Lemaître and the Schwarzschild Solution. In: EARMAN, J.; JANSSEN, M. & NORTON, J. D. (org.). *The Attraction of Gravitation: New Studies in the History of General Relativity*. Boston: Birkhäuser, 1994. p. 353-389.
- GÖDEL, Kurt. A Remark About the Relationship Between Relativity Theory and Idealistic Philosophy. In: SCHILPP, P. A. (org.). *Albert Einstein. Philosopher-Scientist*. La Salle, Illinois: Open Court, 1949. p. 555-562. Ver também *Einstein's reply*, *Idem*, p. 684-688.

Saulo Carneiro é graduado e doutor em Física e professor do Instituto de Física da Universidade Federal da Bahia. Foi pesquisador visitante do Consejo Superior de Investigaciones Científicas, em Madri, Espanha.
saulo@fis.ufba.br

Apesar de pouco estudado pelos historiadores da ciência, um outro tipo de modelo, surgido várias décadas mais tarde, tornaria ainda mais claro o insucesso da relatividade geral em realizar a concepção de Mach da relatividade de todo movimento. Em 1949, o matemático Kurt Gödel demonstrou a existência de soluções cosmológicas das equações de Einstein nas quais a matéria está em rotação em relação a um sistema localmente inercial. Os sistemas inerciais não coincidem com o das estrelas distantes, cuja rotação é, neste sentido, absoluta. A solução original de Gödel era estacionária (sem expansão) e necessitava de uma constante cosmológica de sinal oposto à introduzida por Einstein. No entanto, não tardou muito para que ele demonstrasse a existência de soluções com rotação e expansão, com ou sem constante cosmológica (curiosamente, nenhuma dessas soluções foi explicitamente encontrada). Outra intrigante característica das soluções de Gödel é a possibilidade de trajetórias espaço-temporais que retornam ao instante de partida, colocando em questão nossa concepção de causalidade, tão cara a Einstein. Com exceção de um pequeno e pouco esclarecedor comentário, não sabemos como este, colega e amigo de Gödel, reagiu a tais resultados.

Para concluir, uma breve nota sobre a constante cosmológica. Após a descoberta da recessão das galáxias, essa constante já não era necessária, pois foi introduzida de forma a possibilitar uma solução estática. Einstein sugere então seu abandono definitivo (ao contrário de Lemaître, que a manteve por toda a vida). O termo cosmológico está presente, contudo, nas versões mais modernas do modelo padrão de evolução do universo, presença corroborada por observações recentes. É surpreendente que o maior erro de Einstein, como teria dito ele próprio, tenha sido afinal mais um brilhante acerto. Essa, porém, é uma outra história.