

Uma visão do espaço na mecânica newtoniana e na teoria da relatividade de Einstein

(*A space view in newtonian mechanics and Einstein's theory of relativity*)

C.M. Porto¹ e M.B.D.S.M. Porto²

¹*Departamento de Física, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, Brasil*

²*Instituto de Aplicação Fernando Rodrigues da Silveira, Universidade do Estado do Rio de Janeiro,
Rio de Janeiro, RJ, Brasil*

Recebido em 15/11/2007; Aceito em 3/1/2008

Esse trabalho apresenta uma exposição conceitual, sem qualquer recurso ao formalismo matemático, das idéias de espaço e de tempo, desde a mecânica newtoniana, que se fundamenta no conceito de espaço absoluto, até as grandes transformações introduzidas pela teoria da relatividade de Einstein. Enfatizamos as críticas filosóficas à noção desse espaço absoluto, completamente objetivo e anterior a toda experiência, bem como de que maneira as objeções físicas à idéia de movimento absoluto levaram à formulação da teoria da relatividade restrita e da teoria da relatividade geral.

Palavras-chave: espaço absoluto, espaço-tempo, mecânica, relatividade.

This work presents a conceptual exposition, with no reference to mathematical formalism, on the ideas of space and time, from Newtonian mechanics, which rests on the concept of an absolute space, up to the great transformations brought by Einstein's theory of relativity. We emphasize the philosophical critics upon the notion of this completely objective absolute space, prior to any experience, as well as how physical objections against the idea of absolute movement have led to the formulation of the special and the general relativity.

Keywords: absolute space, space-time, mechanics, relativity.

1. Introdução

Existe atualmente uma tendência crescente de se inserirem nos programas de física do ensino médio temas relacionados à física moderna [1], desenvolvidos no início do século XX. Tal tendência se baseia na idéia de universalização dos avanços do conhecimento, para que a sociedade não seja alijada da posse de patrimônios culturais já estabelecidos, que lhe permitirão compreender os progressos tecnológicos alcançados e, mais do que isso, ter acesso ao conhecimento científico que transformou a nossa visão do mundo.

No entanto, embora a física que chamamos de moderna tenha sido desenvolvida há mais de um século, as tentativas de sua inserção nos programas escolares se defrontam muitas vezes com obstáculos associados à dificuldade de se transmitirem de forma clara conceitos bastante complexos e desenvolvidos em linguagem matemática avançada. Assim sendo, torna-se de extrema importância a elaboração de textos, com caráter de divulgação científica rigorosa, que forneçam instrumentos de apoio à superação das dificuldades mencionadas.

Dentro desta perspectiva, este artigo apresenta uma exposição conceitual, sem recurso aos formalismos matemáticos, sobre o pensamento que se desenvolveu a respeito do espaço e do tempo, desde a mecânica de Newton até a teoria da relatividade de Einstein. Escolhemos abordar esta questão central da história da física em vista de nossa experiência docente, onde testemunhamos um grande interesse pelas profundas transformações em relação às nossas concepções intuitivas do espaço e do tempo, introduzidas pela teoria de Einstein.

Deste modo, iniciamos nossa exposição pelo surgimento da mecânica newtoniana e pelo seu impacto no desenvolvimento da ciência e na história do pensamento. Abordamos na seção seguinte o conceito de espaço na teoria newtoniana do movimento, ressaltando os debates de natureza filosófica a que essa concepção deu lugar. Em seguida, passamos à apresentação da teoria da relatividade de Einstein, tanto na sua forma restrita, formulada em 1905 [2, 3], quanto na sua forma geral, de 1915 [3, 4]. Procuramos fazer um breve, porém didático, desenvolvimento de ambas as teorias, centrando-nos em suas implicações a respeito

²E-mail: beatrizrj@mail.com.

dos conceitos de espaço e de tempo. Finalizamos esta exposição tratando das relações entre a teoria da gravitação de Einstein e o chamado princípio de Mach, com as conseqüências que daí decorrem no que tange ao conceito de um espaço-tempo absoluto, em certa medida ontologicamente assemelhado à concepção newtoniana. Por último, apresentamos na seção sete uma síntese de nossa exposição.

2. O nascimento da mecânica newtoniana

Em sua obra intitulada *Princípios Matemáticos da Filosofia Natural*, publicada em 1687, Isaac Newton enunciou um conjunto de três leis fundamentais que regeriam todos os fenômenos da mecânica [5]. Através dessas leis chegamos à solução do problema básico desta ciência, a saber, a obtenção da trajetória de qualquer corpo em movimento, uma vez conhecidas as forças sobre ele atuantes.

Na verdade, a obtenção da trajetória de um corpo em movimento depende, não apenas do conhecimento das forças às quais está submetido, mas também de certas condições a respeito de sua posição e sua velocidade. Com efeito, a Segunda Lei de Newton estabelece que a aceleração adquirida por uma partícula é proporcional à resultante das forças que atuam sobre ela, sendo o fator de proporcionalidade dado pelo inverso de sua chamada massa inercial. Em termos mais elaborados, a Segunda Lei de Newton relaciona a aceleração, derivada segunda da função posição em relação ao tempo, à soma vetorial das forças que atuam sobre o corpo. Equações que envolvem derivadas de uma função são chamadas de equações diferenciais. Solucionar estas equações consiste em encontrar a função cujas derivadas obedecem à relação dada. Na verdade, na solução da equação não encontramos de imediato uma única função, mas um conjunto de funções. Para individualizarmos essa solução é necessário especificar as chamadas condições iniciais; no caso da Segunda Lei de Newton, a posição e a velocidade do móvel em algum instante qualquer. De fato, somente uma dentre o conjunto de funções cujas derivadas obedecem à relação dada satisfaz às condições iniciais estabelecidas; esta função representará a trajetória do movimento.

O impacto da teoria newtoniana sobre a ciência, com seu caráter de universalidade e previsibilidade, constitui um dos episódios mais profundos da história do pensamento humano, conduzindo a um imenso otimismo, relacionado à capacidade aparentemente ilimitada do Homem de compreender o mundo a sua volta, e cujo melhor exemplo nos é fornecido pela proclamação do grande matemático francês Pierre Simon de Laplace de que, para uma Inteligência capaz de conhecer as posições e velocidades de todas as partículas materiais, bem como as forças que atuam sobre cada uma delas, todo o futuro e todo o passado do Universo seriam da-

dos [6]. Em outros termos, nada seria incerto para essa Inteligência que conhecesse o estado mecânico de todas as partículas do Universo e as forças sobre elas atuantes. Este pensamento constitui a mais completa síntese do determinismo mecânico, introduzido na ciência pela teoria de Newton.

Na verdade, com Newton podemos falar da conclusão de um processo, iniciado na Revolução Científica, de descrição do Universo por meio de leis matemáticas, e ao mesmo tempo, do início de uma nova fase da ciência, dominada agora pelo paradigma da previsibilidade determinística, trazida pela mecânica newtoniana. Galileu e Kepler já haviam concebido a idéia de lei natural empírica, expressa por relações matemáticas, com toda a sua importância metodológica [7]. A missão a ser cumprida seria a de identificar, sob a desordem aparente dos dados experimentais imediatos, uma unidade ordenada e inteligível através das formas matemáticas. No entanto, ambos formularam suas leis de modo fenomenológico, como solução de um conjunto restrito de problemas: o movimento dos corpos sob a ação do campo gravitacional, nas proximidades da superfície terrestre, e os movimentos planetários em torno do Sol. Somente com a lei da gravitação universal, somada às leis fundamentais do movimento, encontramos a explicação universalizante para as duas questões centrais: o que move os planetas e o que move os projéteis? Segundo Koyré, “pode-se dizer que a ciência moderna, união da física terrestre com a física celeste, nasceu no dia em que a mesma resposta pode ser dada a essas duas perguntas” [8]. Muito mais amplamente, com a obra de Newton se realizava a meta de reduzir a totalidade dos fenômenos mecânicos a um conjunto de poucos e primeiros princípios. Tratava-se, nas palavras do filósofo Ernst Cassirer, “de remontar destes eventos aos princípios; ora, estes só se encontram nas leis universais do movimento. Portanto, assim que estas leis foram descobertas e se lhes deu uma expressão matemática exata, está traçado o caminho para todo o conhecimento ulterior” [7].

3. A concepção de espaço na teoria de Newton

Façamos agora uma análise a respeito da concepção newtoniana de espaço. A física newtoniana não só é coerente, mas é estruturalmente dependente da idéia de um espaço absoluto, na medida em que distingue dois tipos de observadores: aqueles para os quais são válidas as três leis fundamentais da mecânica, chamados de inerciais, e os não inerciais, para quem os fenômenos mecânicos não obedecem às Leis de Newton. De fato, se formos capazes de identificar um observador para quem as Leis de Newton constituem uma verdade física, todos aqueles que se movam com velocidade constante em relação a ele também serão inerciais, ao passo que aqueles que se moverem com aceleração não nula em

relação ao primeiro serão não inerciais. Note-se, porém, que poderíamos inverter a afirmação anterior e legitimamente afirmar que é o primeiro observador que está acelerado em relação a esses últimos. No entanto, segundo a física newtoniana, aparentemente a Natureza possui um critério absoluto de distinção entre as duas afirmações, um caráter absoluto da aceleração dos corpos, não em relação uns aos outros, mas com referência a um suposto espaço absoluto. A existência completamente objetiva deste espaço absoluto se torna, portanto, um elemento fundamental à consistência lógica da teoria newtoniana do movimento.

O espaço absoluto, por sua própria natureza, sem relação com qualquer coisa que seja exterior, permanece sempre semelhante e imóvel. [5, p. 5]

Esta concepção newtoniana de um espaço absoluto, cuja existência seria independente da matéria, sofreu críticas severas por parte dos filósofos Leibniz, com o qual Samuel Clarke, discípulo de Newton, estabeleceu uma notória polêmica [9], registrada como um dos grandes debates sobre o tema, e Berkeley [10]. O ataque de Berkeley se dirigiu contra a introdução na ciência de idéias “vagas” e estranhas às bases empíricas do conhecimento científico:

Imaginemos que todos os corpos tenham sido destruídos e reduzidos a nada: desse modo, daremos àquilo que resta, onde, juntamente com os corpos, fica suspensa toda relação de situação e de distância entre eles, o nome de espaço absoluto. Este espaço é, então, infinito, imóvel, indivisível e não constitui objeto algum de percepção, desde o momento em que cessou em relação a ele toda possibilidade de relação e de distinção. Todos os atributos são, dito em outras palavras, privativos ou negativos; não parece significar, portanto, mais do que o simples nada. A única dificuldade estriba em que é algo extenso e que a extensão representa, apesar de tudo, uma qualidade positiva. Porém que classe de extensão é esta que não se pode medir nem dividir e na qual não há uma só parte que se possa perceber por meio dos sentidos ou captar-se por meio da representação? Se examinarmos a fundo semelhante idéia - supondo que podemos chamá-la assim - vemos que é a mais perfeita representação do nada que podemos imaginar. [10, p. 53]

Na realidade, a crítica de Berkeley pôs em relevo uma contradição epistemológica presente nos alicerces da mecânica de Newton: um dos princípios metodológicos da ciência newtoniana é a inferência das leis

da Natureza diretamente a partir da experiência, a qual determina os limites dentro dos quais se estabelece o conhecimento científico. No entanto, a coerência lógica de sua teoria se apoiava na existência de um espaço absoluto, independente da matéria e anterior à experiência, deste modo, não perceptível nem verificável por seu intermédio. Segundo Ernst Cassirer,

Com efeito, que significam o espaço, o tempo e o movimento se se pretende manter com todo o rigor o postulado da pura descrição dos fatos, tal como havia sido formulado por Newton e sua escola? A observação não nos oferece nunca a observação de pontos ou instantes do espaço puro ou do tempo puro, senão somente conteúdos físicos situados dentro das relações de espaço ou do tempo. De onde, tudo o que sabemos a respeito das determinabilidades de lugar e de tempo se reduz absolutamente a uma série de relações. Parece estar-nos vedada toda indagação acerca de um ser do espaço à margem destas relações perceptíveis dos corpos. [11, p. 397]

Diríamos que o empirismo newtoniano fundamentava-se em um elemento situado além da realidade sensível, e, por conseguinte, metafísico [11].

Contudo, apesar das críticas filosóficas de que foi alvo, a concepção newtoniana do espaço absoluto, parte estruturalmente integrante de seu sistema mecânico, foi gradativamente se consolidando na física nascente. Em sua obra *Reflexões sobre o Espaço e o Tempo*, Leonhard Euler enfatizou a necessidade da existência de um espaço absoluto, como um substrato indispensável à determinação do movimento:

Deve-se antes concluir que tanto o espaço absoluto como o tempo, tal como os matemáticos os representam, são coisas reais, que subsistem mesmo fora de nossa imaginação. [12]

Em relação às objeções filosóficas à mecânica, Euler responde o problema invertendo as posições: não se trata mais de submeter a validade dos fundamentos dessa ciência ao exame e ao julgamento por critérios filosóficos. O caráter incerto das nossas representações e dos nossos conceitos metafísicos torna-os frágeis perante a certeza característica do conhecimento científico. O espaço e o tempo absolutos conquistam assim seu status em razão da função lógica que desempenham na estrutura da física newtoniana. Novamente, conforme Cassirer, “ambos os conceitos encerram uma verdade inegável, não porque lhes dêem crédito nossas sensações, mas por algo muito mais importante: porque são indispensáveis para a totalidade de nossa concepção científica do mundo” [11, p. 441].

4. A teoria da relatividade restrita de Einstein

Em que pese o grande avanço da física, iniciado com a mecânica de Newton, a idéia de movimento absoluto, solidamente estabelecido na teoria newtoniana, permaneceu objeto de contestação por parte de cientistas e pensadores como Ernst Mach [13] e Henri Poincaré [14]. No entanto, se a mecânica newtoniana distinguia observadores inerciais de não inerciais, manifestando a idéia de uma aceleração absoluta, a teoria eletromagnética de Maxwell parecia estabelecer uma distinção até mesmo entre dois observadores inerciais, implicando o reconhecimento de uma aparente velocidade absoluta. Segundo a teoria, as equações que governam os fenômenos eletromagnéticos seriam diferentes, conforme os observadores estivessem parados ou em movimento com velocidade constante. Entretanto, as experiências realizadas com o objetivo de detectar a possível influência do movimento uniforme sobre os fenômenos eletromagnéticos apresentaram resultados negativos, indicando a presença de um elemento contraditório no seio da física clássica.

Foi assim que, em 1905, a física sofreu uma profunda transformação, com a formulação da teoria da relatividade restrita [2, 3], de Albert Einstein. Para Einstein, todos os fenômenos físicos observados apontavam para a conclusão de que a Natureza não possuía um critério de distinção entre dois observadores inerciais, ou seja, não atribuía uma condição privilegiada a qualquer referencial inercial. Assim, o primeiro postulado da teoria da relatividade restrita proposta por Einstein afirma a equivalência entre todos os observadores inerciais, isto é, as equações que governam todos os fenômenos físicos têm, forçosamente, a mesma forma matemática para qualquer observador inercial. Assim, desde que as experiências fossem realizadas sob as mesmas condições, todos os fenômenos físicos transcorreriam da mesma forma para todos esses observadores. Este princípio foi chamado de princípio da relatividade. Além do princípio da relatividade, Einstein postulou que a velocidade com que a luz se propaga no vácuo, c , é a mesma independentemente da velocidade da fonte que a emite ou daquele que observa.

Estabelecidos os seus dois postulados, Einstein deduziu as conseqüências que deles advinham. Primeiramente, concluiu que a simultaneidade de dois eventos é uma noção relativa, dependente do observador. Com base em seus princípios, Einstein verificou que, se dois eventos são simultâneos para um certo observador O , isto é, ocorrem no mesmo instante de tempo, não serão simultâneos para um segundo observador, O' , que se mova com velocidade constante em relação ao primeiro. Uma conseqüência imediata deste fato consiste em que, se para um observador dois relógios estão sincronizados, isto é, apontam uma determinada hora no mesmo instante, para outro observador, que se mova com velocidade constante em relação ao primeiro, os

dois não apontarão esta mesma hora simultaneamente. Em outras palavras, relógios que estejam sincronizados segundo o ponto de vista do primeiro observador, não o estarão para o segundo observador.

Assim, Einstein concluiu que o intervalo de tempo decorrido entre dois eventos determinados varia de um observador inercial para outro. Portanto, de maneira frontalmente contrária às nossas concepções intuitivas, não existe um tempo absoluto, único, medido por todos os observadores. Em especial, o intervalo de tempo medido pelo observador para o qual os dois eventos ocorrem no mesmo local, chamado tempo próprio, é menor do que o intervalo medido por qualquer outro observador. No entanto, Einstein mostrou que a diferença entre esses intervalos é da ordem do quadrado da razão entre a velocidade v de um observador em relação ao outro e a velocidade da luz no vácuo, v^2/c^2 , de tal maneira que, como em todos os fenômenos vivenciados em nosso cotidiano as velocidades dos objetos envolvidos são muitíssimo menores do que c , esse efeito de dilatação do tempo é, para nós, imperceptível.

Prosseguindo em sua análise, Einstein deduziu que medidas de comprimento também podem ser afetadas pela condição de movimento. Mais especificamente, medidas efetuadas ao longo da direção em que um observador inercial se move em relação a outro são diferentes para ambos. Em outras palavras, as dimensões dos objetos podem variar de um observador inercial para um outro que se mova em relação a ele. Assim sendo, se um observador O utilizasse uma régua para medir a distância entre dois pontos quaisquer e encontrasse como resposta, por exemplo, a medida de um metro, para um segundo observador, O' , a distância entre esses mesmos pontos poderia ser diferente, conforme O e O' se movessem um em relação ao outro.

A explicação deste fato está associada ao caráter relativo do tempo. Com efeito, para efetuarmos uma medida do comprimento de algum objeto é necessário que comparemos as marcações simultâneas de suas extremidades em uma régua dotada de escala; o comprimento do objeto será igual à diferença entre essas marcações (desde que simultâneas). No entanto, se para o observador O as marcações correspondentes às posições das extremidades são simultâneas, para O' as duas marcações corresponderão às posições das extremidades em instantes diferentes. Desta maneira, a diferença entre elas não corresponderá ao comprimento do objeto, discordando, pois, da medida efetuada pelo primeiro.

Estabelecido o caráter relativo das medidas temporais e espaciais, Einstein obteve as regras através das quais se relacionam as medidas feitas por dois observadores inerciais, O e O' . Suponhamos que, de acordo com O , um dado evento ocorra no instante t e no ponto caracterizado pelas coordenadas x , y e z . Einstein deduziu, a partir dos princípios de sua teoria, o conjunto de transformações matemáticas que permitem determinar as coordenadas x' , y' , z' e t' em que, de acordo com

O', este evento ocorreu. Este conjunto recebe o nome de Transformações de Lorentz, pois historicamente surgiu pela primeira vez pelas mãos do físico holandês Hendrik Lorentz [15]. Lorentz, porém, havia proposto suas transformações de forma fenomenológica, como uma tentativa de solucionar certas inconsistências da teoria eletromagnética de Maxwell, e sem lhes atribuir interpretação sistemática. Esse mérito coube a Einstein, incorporando-a a um amplo quadro dedutivo, fundamentado em seus postulados.

Um elemento marcante desse conjunto de transformações consiste em que as coordenadas x' , y' , z' e t' se escrevem como combinações matemáticas das coordenadas x , y , z e t . Assim, aquilo que para um observador é uma quantidade associada a uma localização espacial, para outro será uma mistura de coordenadas temporal e espaciais. Em outras palavras, as transformações de Lorentz misturam coordenadas temporais e espaciais, rompendo a separação radical entre os conceitos de tempo e espaço. Espaço e tempo passam a formar na teoria da relatividade restrita um continuum quadridimensional. Nas palavras do matemático polonês Hermann Minkowski:

Daqui em diante, o espaço, por si só, e o tempo, por si só, estão condenados a desvanecer-se em meras sombras, e apenas um tipo de união dos dois conservará uma realidade independente. [16]

5. A teoria da relatividade geral

Apesar dos enormes êxitos e da profunda transformação promovida pela teoria da relatividade, a permanência de uma classe especial de observadores (inerciais) contrariava um dos elementos centrais da teoria, a saber, a negação da realidade física do movimento absoluto. Assim sendo, Einstein prosseguiu em seu pensamento, chegando, em 1907, à formulação do chamado princípio da equivalência [3, 17], que estabelece, como o nome já indica, a equivalência física, não mais dos observadores inerciais apenas, mas de todos os observadores. Einstein estabeleceu essa equivalência ao perceber que é fisicamente impossível distinguir o ponto de vista de um observador não-inercial do ponto de vista de um observador inercial que esteja submetido a um campo gravitacional apropriado. Em outras palavras, jamais poderíamos ter certeza de estarmos tratando com um observador inercial, porém submetido à ação de um campo gravitacional, e não com um observador não inercial. Portanto, dada essa indistinguibilidade física entre eles, as leis físicas deveriam ser válidas da mesma maneira para ambos.

Com base nessa equivalência, Einstein passou a aplicar os resultados cinemáticos da teoria da relatividade restrita à descrição dos fenômenos, tal como feita por observadores não-inerciais, concluindo que, para esses

observadores, o espaço deveria se apresentar encurvado, isto é, não mais obedecendo a uma geometria euclidiana, mas a uma nova geometria, formulada no século XIX pelo matemático alemão Bernhard Riemann [18]. Como esse ponto de vista era equivalente ao de um observador inercial, porém sob a ação de um campo gravitacional, Einstein concluiu que uma teoria do campo gravitacional devia, forçosamente, se expressar por meio dessas novas características geométricas. Mais ainda, pelo mesmo tipo de analogia com observadores não inerciais, Einstein concluiu que o tempo flui de maneira diferente para dois observadores submetidos a campos gravitacionais de intensidades distintas, mesmo que esses observadores estejam em repouso um em relação ao outro. Assim, não só o espaço obedece a uma outra geometria, diferente da euclidiana, mas também o tempo se apresenta “encurvado” pela presença do campo gravitacional. Einstein associou então as propriedades geométricas de seu espaço-tempo ao comportamento do próprio campo gravitacional.

O aspecto espacial das coisas reais é então completamente representado por um campo, que depende de quatro parâmetros-coordenados; é uma qualidade desse campo. Se pensarmos no campo sendo removido, não há espaço que permaneça, uma vez que o espaço não possui uma existência independente. [19]

Já tendo estabelecido na teoria da relatividade restrita uma equivalência entre massa e energia [3, 20], Einstein concluiu que, da mesma forma que na teoria newtoniana clássica a matéria atrai gravitacionalmente outra matéria, e, deste modo, dizemos que é fonte de campo gravitacional, em uma teoria relativística da gravitação não só a matéria, mas qualquer forma de energia, produzirá campo gravitacional. Em particular, a própria energia gravitacional será fonte de campo gravitacional. Tal característica é necessariamente descrita por uma teoria matemática envolvendo equações não lineares. Portanto, Einstein concluiu que, ao contrário, por exemplo, da teoria elaborada por Maxwell, que descreve, através de equações lineares, todos os fenômenos de natureza eletromagnética, sua teoria gravitacional deveria ser uma teoria não linear [21]; a interação gravitacional possuiria características profundamente diferentes das interações eletromagnéticas.

A partir dessa compreensão, o trabalho de Einstein consistiu na obtenção de um conjunto de equações não lineares, conhecidas como equações de Einstein para o campo gravitacional, que relacionavam as propriedades de curvatura do espaço-tempo em cada ponto à quantidade de matéria e energia ali presentes. O espaço e o tempo na teoria de Einstein não eram mais domínios pré-existentes aos objetos e aos fenômenos e deles independentes, mas, pelo contrário, passavam a ser elementos dinâmicos da teoria, cujas características eram por

ela determinadas.

Na teoria da gravitação de Einstein não havia, no entanto, uma determinação unilateral da matéria (e energia) sobre o espaço, mas antes uma ação recíproca. Einstein estabeleceu o princípio de que um corpo se moveria de um ponto a outro no espaço-tempo descrevendo a curva de menor comprimento (geodésica) que os unisse. Em um espaço de geometria euclidiana, esta curva seria uma reta. No entanto, em um espaço encurvado, obedecendo a uma geometria não euclidiana, esta geodésica seria uma linha curva. Assim, podemos concluir que os desvios observados nas trajetórias dos corpos, antes atribuídos, conforme a concepção da mecânica newtoniana, à ação de uma força gravitacional, na verdade revelam apenas o caráter curvilíneo dos movimentos inerciais em um espaço encurvado pela ação das fontes gravitacionais.

Como agora o desvio da trajetória retilínea não é mais atribuído à ação de uma força de atração entre as massas, mas sim à conformação do próprio espaço-tempo, todos os objetos, ao percorrerem este espaço, poderiam descrever trajetórias curvilíneas. Assim, Einstein concluiu que mesmo a luz, que não possui uma natureza material (e não possui massa), não se propaga em linha reta no espaço-tempo curvado pelas fontes gravitacionais. Deste modo, por exemplo, a luz produzida por uma estrela se desvia de forma mensurável de sua trajetória retilínea ao passar pelas imediações de um corpo celeste, cuja massa seja suficientemente grande para produzir um campo gravitacional intenso, capaz de curvar significativamente o espaço a sua volta. A partir de seus pressupostos e conclusões, Einstein calculou o desvio sofrido pela luz de uma estrela ao passar pelas proximidades do Sol. Em 1919, aproveitando-se de um eclipse solar, duas expedições de astrônomos da Grã-Bretanha, uma instalada na ilha africana de Príncipe e chefiada pelo astrônomo britânico Arthur Eddington, e a outra localizada na cidade de Sobral, no Brasil, verificaram experimentalmente o desvio da luz proveniente de uma estrela situada atrás do Sol. A experiência foi ainda capaz de medir o desvio sofrido pelos raios luminosos, confirmando com excelente concordância as previsões de Einstein. A confirmação da trajetória curvilínea da luz se constituiu no mais formidável teste experimental da teoria da relatividade geral [22].

Em particular, entre os seus grandiosos desdobramentos, a teoria da relatividade geral levou os físicos a descobrirem a possibilidade de existência de corpos capazes de gerar campos gravitacionais tão intensos, e, assim, curvarem tão acentuadamente o espaço a sua volta, que a luz emitida por eles descreveria uma trajetória curva o bastante para não se afastar do próprio corpo. Assim, dada a impossibilidade de sermos atingidos pela luz por eles emitida e, conseqüentemente, de os vermos, esses corpos, caracterizados por suas altíssimas densidades, receberam o nome de buracos negros [23].

6. O princípio de Mach e a teoria da gravitação de Einstein

Conforme dissemos, o filósofo austríaco Ernst Mach era frontalmente contrário à idéia de movimento absoluto, fundamentada, por sua vez, na de espaço absoluto, tal como concebida por Newton. Em seu livro, *As Origens da Mecânica*, Mach apresentou seu pensamento de que toda determinação do movimento deve ser feita em relação aos corpos existentes [13]. Em outras palavras, Mach rejeitava a noção presente na mecânica newtoniana de que a distinção entre as duas classes de observadores, inerciais e não inerciais, poderia se fundar no fato de os segundos se moverem com uma aceleração em relação ao espaço absoluto, enquanto os primeiros se moveriam com velocidade constante em relação a esse espaço. Como alternativa a essa concepção, Mach propunha que o caráter inercial (uniforme) ou não (acelerado) do movimento se definisse, não em relação a um espaço absoluto, inalcançável pela percepção direta, mas em relação a um referencial associado ao centro-de-massa de todas as partículas materiais existentes no Universo [13]. Este pensamento ficou conhecido na história da ciência como princípio de Mach.

Com o advento da teoria da relatividade geral de Einstein, a questão do movimento inercial dos corpos foi novamente suscitada. Como já mencionado, em sua teoria do campo gravitacional, Einstein adotou como princípio a idéia de que as trajetórias dos corpos livres da ação de forças seriam geodésicas. Ora, essas geodésicas seriam determinadas pelas características geométricas do espaço-tempo. Assim, para que a teoria da gravitação de Einstein fosse compatível com o princípio de Mach, seria necessário que a forma dos movimentos inerciais dos corpos, ou, em outros termos, as geodésicas, e, para tanto, a geometria do espaço-tempo, fosse determinada única e exclusivamente pela distribuição de massa e de energia presentes no Universo, distribuição essa representada por uma quantidade matemática chamada de tensor energia-momento. Deste modo, a pergunta decisiva seria: se, a título de hipótese, eliminássemos toda distribuição de massa e energia do Universo, fazendo a quantidade que lhes representa (tensor energia-momento) igual a zero, ainda assim seria possível encontrarmos soluções para as equações de Einstein, ou seja, encontrarmos as características geométricas de um tal espaço, completamente despojado? Se assim fosse, estaríamos aparentemente diante de uma situação em que as trajetórias inerciais não seriam determinadas por quantidades objetivamente existentes. Entretanto, a resposta a essa pergunta é afirmativa: as equações de Einstein para o campo gravitacional admitem solução, mesmo na ausência total de matéria e energia.

Einstein compartilhava do pensamento de Mach, a quem atribuiu em parte os méritos pelo seu despertar em relação ao problema da inércia, que lhe con-

duziu à teoria da relatividade geral [22]. Deste modo, Einstein propôs uma modificação em suas equações de campo gravitacional, através da introdução de um termo adicional, chamado de constante cosmológica, com o propósito, entre outros, de excluir a possibilidade de soluções dessas equações, uma vez eliminada toda a matéria e toda a energia do Universo. A tentativa foi, porém, infrutífera. Pouco tempo após a modificação proposta por Einstein, o físico holandês Willem de Sitter descobriu soluções para as equações do campo gravitacional, com a presença da constante cosmológica, mesmo na ausência de fontes [24]; seria possível a determinação das características geométricas e, conseqüentemente, das geodésicas, em um espaço-tempo completamente livre de matéria e de energia. Aparentemente, a teoria da relatividade geral de Einstein parecia recolocar em outros termos a idéia da realidade objetiva de um espaço-tempo ontologicamente independente da matéria.

7. Conclusão

A mecânica de Newton constituiu um dos maiores triunfos da história da ciência, atribuindo-lhe um caráter de previsibilidade determinística que representou durante alguns séculos o mais alto ideal do conhecimento humano. No entanto, a natureza absoluta do espaço newtoniano, manifesta na existência de uma classe especial de observadores (inerciais), foi objeto de crítica filosófica e do ceticismo de filósofos e cientistas como Leibniz, Berkeley, Mach, Poincaré e Einstein. A teoria da relatividade restrita de Einstein afirmou de forma categórica o caráter relativo de todo movimento uniforme, mantendo-se, entretanto, dentro dos limites da distinção newtoniana entre observadores inerciais e não inerciais. Com a formulação definitiva da teoria da relatividade geral, em 1915, Einstein enfim eliminou os derradeiros aspectos absolutos do movimento, através de uma teoria da gravitação que incorporava o espaço e o tempo, encurvados pela matéria e pela energia, como elementos dinâmicos de sua teoria. Se a teoria da relatividade restrita já havia produzido uma transformação radical em nossas idéias fundamentais acerca do espaço e do tempo, o “espaço-tempo” einsteiniano da relatividade geral distanciava-se profundamente das concepções intuitivas próprias do senso comum.

Compreender estas transformações na visão científica de mundo e transmiti-las em linguagem didaticamente acessível a estudantes e interessados em geral constitui um desafio a ser enfrentado, sobretudo se desejarmos introduzir nos currículos escolares, a título de complementação, conceitos e formas de pensamento científicos que já constituem hoje patrimônio cultural do Homem. Julgamos que esta opção é válida e que este desafio deve ser enfrentado.

Referências

- [1] M.A. Moreira, Rev.Bras.Ens.Fís. **29**, 161 (2007).
- [2] A. Einstein, Annalen der Physik **17**, 891 (1905), incluído em J. Stachel, *O Ano Miraculoso de Einstein, Cinco artigos que mudaram a face da Física* (Ed. UFRJ, Rio de Janeiro, 2005).
- [3] A. Einstein, *A Teoria da Relatividade Especial e Geral* (Contraponto Editora, Rio de Janeiro, 1999).
- [4] A. Einstein, Koniglich Preussische Akademie für Wissenschaft 844 (1915); A. Einstein, Annalen der Physik **49**, 146 (1916), incluído em *O Princípio da Relatividade* (Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1958).
- [5] I. Newton, *Princípios Matemáticos da Filosofia Natural* (Nova Cultural, São Paulo, 2000).
- [6] P.S. Laplace, *Théorie Analytique des Probabilités*, (M^{me} Courcier Imprimeur-Librairie pour les Mathématiques, Paris, 1820).
- [7] E. Cassirer, *A Filosofia do Iluminismo* (Ed. Unicamp, Campinas, 1994).
- [8] Alexandre Koyré, *Études Newtoniennes* (Gallimard, Paris, 1968), p. 14.
- [9] H.G. Alexander (ed), *The Leibniz-Clarke Correspondence* (Manchester University Press, Manchester, 1998).
- [10] G. Berkeley, *De Motu*, (1721)
- [11] Ernst Cassirer, *El Problema del Conocimiento* (Fondo de Cultura Económica, México, 2000), v. II, p. 397
- [12] L. Euler, *Reflexions sur l'Espace et le Temps*, em *Histoire de l'Académie Royale des Sciences et des Belles-Lettres, 1748* (Berlin, 1750), v. 4, p. 324, citado por M. Jammer, *Concepts of Space* (Dover, Nova Iorque, 1993), p. 130.
- [13] Ernst Mach, *The Science of Mechanics* (Open Court Publishing Co., La Salle, 1960).
- [14] Henri Poincaré, *O Valor da Ciência* (Contraponto Editora, Rio de Janeiro, 1995).
- [15] H.A. Lorentz, *Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern* (Leiden, 1895).
- [16] H. Minkowski, Goett. Nachr. 53 (1908), reimpresso em *Gesammelte Abhandlungen von Hermann Minkowski* (Teubner, Leipzig, 1911), v. 2, p. 352, citado por A. Pais, Ref. [22], p. 175.
- [17] A. Einstein, Jahrb. Rad. Elektr. **4**, 411 (1907).
- [18] Hans Reichenbach, *The Philosophy of Space and Time* (Dover, Nova Iorque, 1957).
- [19] A. Einstein, *Generalization of Gravitation Theory*, reimpressão do apêndice II da 4^a ed. de *The Meaning of Relativity* (Princeton University Press, Princeton, 1953), p. 163, citado por M. Jammer, *Concepts of space* (Dover, Nova Iorque, 1988), p. 174.

- [20] A. Einstein, *Annalen der Physik* **18**, 639 (1905), incluído em J. Stachel, *O Ano Miraculoso de Einstein, Cinco artigos que mudaram a face da Física* (Ed. UFRJ, Rio de Janeiro, 2005).
- [21] A. Einstein, *Annalen der Physik* **38**, 443 (1912).
- [22] Abraham Pais, *Sutil é o Senhor..., a Ciência e a Vida de Albert Einstein* (Nova Fronteira, Rio de Janeiro, 1995).
- [23] Charles W. Misner, Kip S. Thorne e John A. Wheeler, *Gravitation* (W.H. Freeman & Company, Nova Iorque, 1973).
- [24] W. de Sitter, *Proc. K. Ak.*, **19**, 1217 (1917) e **20**, 229 (1917).