



Surge a Teoria Relativística da Gravitação

Einstein e a gravitação

A teoria da gravitação universal apresentada por Isaac Newton funcionava extremamente bem nos problemas apresentados pela mecânica clássica. Havia muito pouco motivo para questioná-la. Num entanto uma pergunta permanecia na mente dos cientistas: no processo de interação gravitacional entre dois corpos como podemos explicar que cada um deles saiba que o outro está presente?



Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928)

Além disso, qual seria o comportamento das equações que descrevem os fenômenos físicos da natureza se o processo descrito estivesse ocorrendo não em um sistema inercial mas sim num sistema arbitrário de coordenadas? Como vimos acima, as leis da física conhecidas até agora, e que eram descritas tanto pela física Newtoniana como pela teoria da relatividade especial somente eram válidas em um conjunto restrito de sistemas de coordenadas conhecido como sistemas de referência inerciais.

Em 1900 **Hendrik Antoon Lorentz** conjecturou que a gravitação poderia ser atribuída a ações que se propagavam com a velocidade da luz. **Henri Poincaré**, em

um artigo de julho de 1905 enviado para a revista alguns dias antes do trabalho de Einstein sobre a relatividade restrita, sugeriu que todas as forças deviam se transformar de acordo com as chamadas "transformações de Lorentz-Fitzgerald". Ele também afirmou que, se essa regra é verdade, a lei de Newton da Gravitação não é mais válida pois ela não a obedece. Poincaré também propôs a existência de ondas gravitacionais que se propagavam com a velocidade da luz.



Jules Henri Poincaré (1854-1912)

Em 1907, dois anos após ter apresentado sua teoria da relatividade restrita, Einstein estava preparando um artigo de revisão sobre essa teoria. Durante esse trabalho ele ficou curioso em saber como a gravitação Newtoniana teria que ser modificada para se ajustar dentro da estrutura da sua teoria da relatividade especial. Neste momento ocorreu a Einstein o que ele mesmo descreveu como "o mais feliz pensamento de minha vida" ou seja, que um observador que está caindo do telhado de uma casa não sente o campo gravitacional. Como consequência disso ele propôs então o chamado **princípio da equivalência**:

Existe uma completa equivalência física entre um campo gravitacional e a correspondente aceleração do sistema de referência. Esta suposição estende o princípio da relatividade para o caso de movimento uniformemente acelerado do sistema de referência.

O princípio da equivalência é o responsável pela sensação que temos quando estamos dentro de um elevador que desce em grande velocidade. Todos sentimos como se estivessemos sendo puxados para cima, como se fossemos ser tirados do chão do elevador. Na verdade, se o elevador romper seus cabos e despencar em queda livre por uma distância suficientemente longa, a pessoa irá flutuar dentro dele e, no final, irá cair com violência no poço do elevador.



Marcel Grossmann (1878-1936)

Depois de criar o princípio da equivalência em 1907, um importante passo, Einstein não publicou nada mais sobre gravitação até 1911. Ele sabia desde 1907 que um raio luminoso se curvaria na presença de um campo gravitacional forte. Esse encurvamento da luz era uma consequência do princípio da equivalência mas era difícil fazer uma verificação experimental disso por meio de observações terrestres.



Georg Friedrich Bernhard Riemann (1826 - 1866)

Em 1911 Einstein compreendeu que a curvatura do raio luminoso em um campo gravitacional poderia ser verificada por meio de observações astronômicas.

Também foi discutido nessa época o deslocamento para o vermelho gravitacional, o "redshift" gravitacional, que ocorre quando o comprimento de onda da luz que sai de um corpo de grande massa (uma estrela por exemplo) é deslocado na direção do vermelho devido à perda de energia necessária para escapar do campo gravitacional do corpo.



Elwin Christoffel (1829-1900)

Einstein publicou outros artigos sobre gravitação em 1912. Nestes ele compreendeu que as transformações de Lorentz não se aplicariam na estrutura mais geral que ele estava desenvolvendo. Ele também notou que as equações do campo gravitacional estavam limitadas a ser não lineares e o princípio da equivalência parecia ocorrer somente localmente.

Nessa época Einstein verificou que se todos os sistemas acelerados são equivalentes então a geometria Euclidiana não pode ser usada em todos eles. Lembrando o estudo da teoria das superfícies de Gauss que havia feito quando estudante, Einstein logo compreendeu que os fundamentos da geometria tinham significado físico. Ele consultou



Marius Sophus Lie (1842-1899)

seu amigo, o grande matemático húngaro **Marcell Grossmann**, que prontamente lhe mostrou os importantes desenvolvimentos que haviam sido feitos em geometria pelos alemães **Bernhard Riemann** e **Elwin Christoffel**, o norueguês **Sophus Lie** e os italianos **Gregorio Ricci-Curbastro** e **Tullio Levi-Civita**, alguns dos nomes mais importantes da matemática naquela época. Pode-se dizer que foi Marcell Grossmann quem descobriu a importância que o cálculo tensorial desenvolvido por esses matemáticos teria para a futura teoria da relatividade geral de Einstein.

Em 1913 Einstein e Grossmann publicaram um artigo juntos ("Entwurf einer verallgemeinerten Relativitätstheorie und der Theorie der Gravitation", *Zs. Math. und Phys.*, **62**, 225 (1913)) onde o cálculo tensorial desenvolvido por Ricci e Levi-Civita é empregado. Grossmann mostrou a Einstein o tensor de Riemann-Christoffel, ou tensor de curvatura, que junto com o tensor de Ricci, que é deduzido a partir dele, iriam se tornar ferramentas importantes na futura teoria relativística da gravitação. Embora a teoria apresentada estivesse ainda errada, pela primeira vez a gravitação era descrita por um tensor métrico, o que significava um grande avanço.



Gregorio Ricci-Curbastro (1853-1925)



Tullio Levi-Civita (1873-1941)

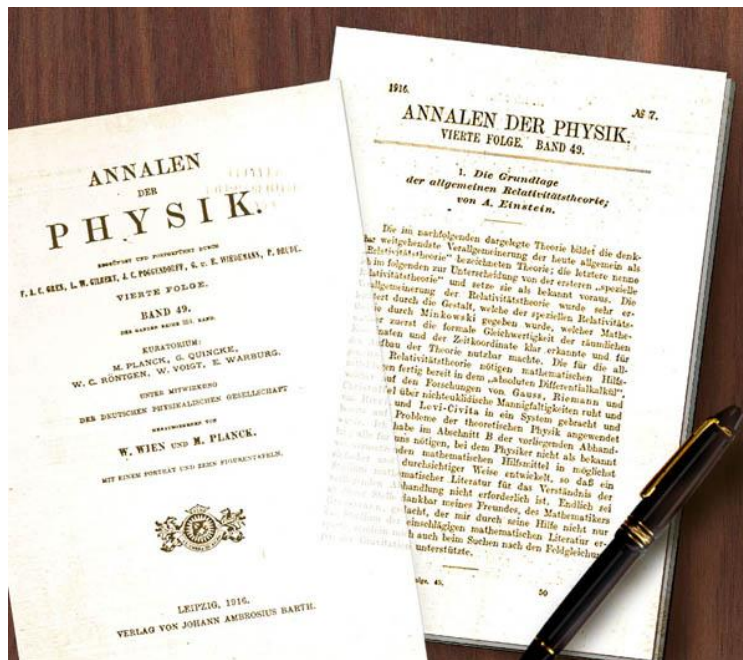
Em outubro de 1914 Einstein escreveu um artigo em que metade dele é um tratado sobre análise tensorial e geometria diferencial. Esse artigo fez com que fosse iniciada uma correspondência entre Einstein e Levi-Civita na qual o grande matemático italiano apontou erros técnicos no trabalho sobre tensores apresentado por Einstein. Einstein estava maravilhado em ser capaz de trocar idéias com Levi-Civita, um matemático muito mais receptivo às suas idéias sobre a relatividade do que um grande número de seus colegas físicos.

Na segunda metade de 1915 Einstein finalmente aprontou sua teoria. Entretanto, o passo final para a teoria da relatividade geral foi tomado por Einstein e **David Hilbert** quase ao mesmo tempo. Ambos haviam reconhecido falhas no trabalho de Einstein publicado em outubro de 1914. Uma correspondência entre estes dois cientistas ocorreu em novembro de 1915. É difícil saber quanto um deles aprendeu com o outro mas o fato de ambos descobrirem a mesma forma final das equações do campo gravitacional e publicarem seus artigos com um intervalo de apenas alguns dias certamente indica que a troca de idéias entre eles foi valiosa.

No dia 20 de novembro de 1915 David Hilbert submeteu seu artigo, com o título "Os fundamentos da física", ("Die Grundlagen der Physik", *Nachr. Königl. Gesellsch. Wiss. Göttingen, math.-phys. Kl.* 1915, Heft 3, p. 395), a publicação. Nesse artigo Hilbert obtinha as equações de campo corretas para a gravitação. Cinco dias depois de Hilbert, no dia 25 de novembro de 1915, Albert Einstein submeteu seu artigo, "Die Feldgleichungen der Gravitation", sobre a teoria da gravitação. Em 1916 Einstein publicou outro artigo, "Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie" (*Ann. Phys. (Leipzig)*, **49**, 769, 1916), onde ampliava sua discussão sobre o assunto. A teoria relativística da gravitação era apresentada ao mundo científico em duas brilhantes versões.



David Hilbert (1862-1943)





Emmy Amalie Noether (1882-1935)

O artigo de Hilbert contém algumas importantes contribuições à relatividade não encontradas no artigo de Einstein. Hilbert aplicou o princípio variacional à gravitação e atribuiu a **Emmy Noether** a descoberta de um dos principais teoremas que dizem respeito a identidades que aparece no seu artigo.

Na verdade o teorema de Emmy Noether só foi publicado com uma demonstração em 1918 em um artigo que ela escreveu sob seu próprio nome (nessa época mulheres não tinham acesso à Academia de Ciências e Emmy Noether entregava seus artigos para serem lidos perante os acadêmicos por algum de seus colegas homens). O teorema proposto por Noether se tornou uma ferramenta vital na física teórica. Um caso especial do teorema de Noether foi escrito por **Hermann Weyl** (1885-1955) em 1917 quando o utilizou para deduzir identidades que, mais tarde foi verificado, já haviam sido independentemente descobertas por Ricci em 1889 e por **Luigi Bianchi**, aluno do matemático alemão **Felix Klein** (1849-1925), em 1902.



Luigi Bianchi (1856-1928)

Pensando além de Newton

Após dez anos de intenso trabalho intelectual Einstein conseguiu com sucesso traduzir sua intuição física sobre o comportamento da natureza em uma teoria matemática que nos descrevia o movimento livre em espaços-tempo curvos. Nascia então a **teoria da relatividade geral** que por ser na verdade uma teoria da gravitação iremos chamá-la de **teoria relativística da gravitação** (TRG).

Nosso "problema" em aceitar o conceito de espaço curvo é derivado do fato de que nossa vida diária está associada a uma geometria plana, a chamada "geometria Euclidiana". É ela que aprendemos nos cursos mais básicos e usamos na vida diária: quem não sabe que a soma dos ângulos internos de um triângulo é igual a 180° ? Um mestre de obras, sem qualquer formação escolar mais elaborada, dirá que isso é verdade, sem fazer qualquer menção à geometria Euclidiana. Ele sabe pela sua prática diária que "isso é verdade". Em uma geometria curva (ela existe e foi construída por Bolyai, Lobatchevsky, Riemann e outros geniais matemáticos) a soma dos ângulos de um triângulo pode ser maior ou menor que 180° !

Mas porque Einstein complicou a história? Porque ele não fez sua teoria usando a geometria Euclidiana? Esse é o ponto mais nobre da TRG. Para Einstein o espaço-tempo descrito pela TRG se torna **curvo** em resposta aos efeitos da matéria que existe no universo. Vamos usar como exemplo o nosso Sistema Solar. A TRG nos diz que um corpo com massa como, por exemplo, o nosso Sol, faz com que o espaço-tempo em torno dele se curve. Essa curvatura, por sua vez, afeta o movimento dos planetas obrigando-os a descrever órbitas em torno do Sol.

Essa é uma abordagem completamente diferente daquela usada por Isaac Newton para descrever os efeitos da gravitação universal e que foi aceita como verdadeira e única até o século XX. Newton descrevia a gravidade como uma força. Isso quer dizer que dois corpos massivos, independentes dos valores relativos de suas massas, por exemplo a Terra e uma maçã, exerciam uma ação mútua, um sobre o outro: a Terra atraía gravitacionalmente a maçã e essa atraía gravitacionalmente a Terra. Isso resultava da maneira como Newton apresentou sua lei da gravidade. Se a maçã estivesse em repouso no galho da macieira e, por um motivo qualquer esse equilíbrio fosse rompido ou seja, a maçã caísse, ela seria atraída na direção do centro da Terra e pararia na sua superfície. Ela só não atingiria o centro da Terra por ser impedida durante o seu percurso (a crosta e toda a estrutura interior do nosso planeta). Como já vimos as leis de Newton explicavam em detalhes não apenas a queda de maçãs mas também os movimentos dos planetas em torno do Sol e dos satélites em torno dos planetas.

Em resumo, a TRG é uma teoria que nos diz que o espaço e o tempo são quantidades dinâmicas que podem se curvar em resposta aos efeitos da matéria. Por outro lado, o espaço-tempo pode alterar o comportamento da matéria.

As primeiras soluções das equações relativísticas da gravitação

As leis da teoria relativística da gravitação são formuladas de uma maneira que as torna igualmente válidas em qualquer sistema de referência. Essas leis relativísticas gerais conectam matéria e energia com a estrutura geométrica do espaço-tempo. A TRG é uma teoria matematicamente muito mais complexa do que a teoria clássica da gravitação, aquela proposta por Isaac Newton e que permaneceu intocada por tanto tempo. Enquanto a teoria Newtoniana é descrita por uma única equação, a teoria relativística da gravitação, devido às suas características matemáticas, é descrita por um conjunto de 10 equações.

Apesar das dificuldades matemáticas, logo depois dos artigos de Einstein e Hilbert com as equações de campo corretas o físico alemão **Karl Schwarzschild** obteve, em 1916, uma solução matemática para as equações que corresponde ao campo gravitacional de um objeto compacto esfericamente simétrico. Pela primeira vez era obtida uma solução exata das equações de campo da gravitação relativística para surpresa de Einstein que não acreditava que isso pudesse ocorrer tão cedo.

Na época o resultado apresentado por Schwarzschild foi considerado como um exercício puramente teórico. No entanto, anos mais tarde, verificou-se que esta solução descrevia uma estrela relativística e, deste modo, inaugurava-se uma nova área de pesquisa em astrofísica, a **astrofísica relativística**. Todos os trabalhos que hoje vemos sobre estrelas de nêutrons, pulsares e buracos negros se apoiam inteiramente nas soluções obtidas por Karl Schwarzschild.



Karl Schwarzschild (1873-1916)

Hoje conhecemos muitas soluções das equações relativísticas do campo gravitacional. Algumas dessas soluções estão associadas a estranhos corpos celestes. Por exemplo, a própria solução obtida por Schwarzschild nos introduz o conceito de *buracos negros*. Uma outra solução, conhecida como "solução de Kerr" nos descreve buracos negros em rotação.

Logo os cientistas começaram também a investigar se a TRG poderia ser usada para descrever o universo. Haveria alguma solução das equações da TRG que pudessem ser cosmológicas ou seja, descrever a estrutura geométrica global do espaço-tempo? Muitas soluções das equações relativísticas do campo gravitacional nos dão as chamadas "soluções cosmológicas", ambiciosos resultados que descrevem possíveis estruturas geométricas para o Universo.

Teoria da Relatividade Geral = Teoria da Gravitação de Einstein = Teoria Relativística da Gravitação

A evolução do conhecimento sobre gravitação

Ao contrário do que muitos declaram, a teoria relativística da gravitação não surgiu do nada. Sua elaboração é uma longa história de erros e acertos que se alternaram até que, em um determinado momento, cientistas conseguiram estabelecer a forma correta final que ela deveria ter. Como qualquer outra teoria descoberta na física, a construção da teoria da relatividade geral se apoiou em conhecimentos previamente estabelecidos ou, como disse muito bem Isaac Newton, ela foi criada "sobre os ombros de gigantes". Isso de modo algum é uma tentativa de tirar o mérito científico de Albert Einstein mas é preciso desmistificar a história e aceitar que muitos outros grande nomes da física participaram do problema e contribuíram para a sua solução.