

# ANOMALIAS E PARADOXOS DA TEORIA NEWTONIANA DA GRAVITAÇÃO

JOSÉ LOURENÇO CINDRA

*RESUMO* - Neste trabalho, procura-se, partindo de um ponto de vista histórico, abordar alguns dos paradoxos mais famosos da teoria da gravitação newtoniana, quando aplicada a um universo infinito, tais como o paradoxo cosmológico ou paradoxo de Olbers, como também o paradoxo gravitacional, mais conhecido como paradoxo de Seeliger.

Discute-se também o problema das anomalias planetárias, destacando-se o desvio secular do periélio de Mercúrio, como também as alternativas que foram propostas para eliminar estas anomalias e os paradoxos da teoria newtoniana. Finalmente, ainda no âmbito desta problemática, é feito um comentário geral sobre o problema da propagação da interação gravitacional, mostrando as tentativas que foram feitas para levar em conta este possível aspecto da gravitação e a sua correlação com os paradoxos e anomalias gravitacionais. Mostra-se, por outro lado, que todas estas tentativas, de um modo ou de outro, falharam, até que com o surgimento da Relatividade Geral, houve uma profunda mudança conceitual, e um novo enfoque foi dado a estas questões.

*ABSTRACT* - In this paper, an attempt is made in order to present from an historical point of view some famous paradoxes of the Newtonian theory of gravitation, when it is applied to an infinite universe, such as the cosmological paradox or Olbers' paradox and the gravitational paradox or Seeliger's paradox.

A discussion is also made presented concerning the planetary anomalies, in particular the secular shift of the perihelion of Mercury, as well as the solutions that were proposed in order to eliminate the anomalies and overcome the paradoxes of the theory. Finally, a general survey is presented of the question concerning the propagation of the gravitation. Several attempts were made to take care of this possible aspect of the gravitation, modifying the Newtonian theory, so that at same time the anomalies and paradoxes should be overcome. On the other hand, it is showed that all these attempts failed, until the appearance of the General Theory of Relativity, which gave another treatment to these questions.

## INTRODUÇÃO

O primeiro grande triunfo da teoria newtoniana se deu com a confirmação da periodicidade do cometa de Halley. Edmond Halley (1656-1742) havia mostrado que as aparições dos cometas em 1531, 1607 e 1682 eram na realidade aparecimentos periódicos de um mesmo objeto. Sendo assim, ele deveria reaparecer por

Revista da SBHC, n. 16, p. 53-60, 1996

volta de 1758. De fato, ainda que com um pequeno atraso, o cometa voltou a ser visto, em 1759. O aparecimento deste cometa já havia sido motivo de pânico para as populações da Europa medieval.

No entanto, como afirma Vizguin, a teoria newtoniana da gravitação, durante aproximadamente um século, permaneceu no nível de uma hipótese verossímil. Anomalias no movimento de Júpiter e Saturno, como também algumas discrepâncias nos movimentos da Lua, dificultavam a aceitação da teoria. Lakatos assevera que no decorrer desse primeiro período de existência da teoria, ela se viu mergulhada num oceano de anomalias. Mas, que devido à insistência dos newtonianos, as dificuldades acabaram sendo vencidas. Euler e Lagrange conseguiram demonstrar que as variações observadas nas órbitas de Júpiter e Saturno não eram seculares. Elas, na realidade, eram periódicas, mas com grandes períodos de duração. E Laplace, fazendo uso da teoria das perturbações (1787) conseguiu apresentar uma explicação matemática completa para a aceleração anômala da Lua. Em meados do século XIX, a teoria newtoniana da gravitação demonstrava convincentemente sua efetividade, principalmente após os trabalhos de Le Verrier e Adams, levando à descoberta do planeta Netuno (1845-1846).

No entanto, o momento de seu maior triunfo foi também quando ela começou a mostrar uma certa vulnerabilidade. O mesmo Le Verrier acabava de descobrir um desvio secular anômalo no periélio do planeta Mercúrio.

## **TENTATIVAS PARA EXPLICAR O DESVIO ANÔMALO DO PERIÉLIO DE MERCÚRIO**

Em 1859, Urbain Le Verrier (1811-1877) publicava novos cálculos sobre a órbita de Mercúrio, não encontrando explicação para um excesso secular de 39" de desvio no periélio deste planeta (ver Bergmann, 1992, p. 118). Diversas tentativas foram feitas no sentido de explicar esta anomalia. A princípio, Le Verrier propôs duas explicações alternativas: O desvio seria causado pela existência de um planeta entre a órbita de Mercúrio, e o Sol. Este planeta hipotético chegou a ser chamado por ele de Vulcano, não sendo, contudo, observado pelos astrônomos. Outra hipótese seria um anel de asteróides também entre a órbita de Mercúrio e o Sol. Outros astrônomos chegaram a propor a hipótese da não esfericidade do Sol. Por um motivo ou outro, todas essas tentativas falhavam (ver Roseveare, 1982 e Will, 1987).

Segundo Roseveare, em 1872, Felix Tisserand torna-se sucessor de Le Verrier, no observatório de Paris, e em 1882, publica um longo trabalho sobre o de Mercúrio, dando preferência pela hipótese dos asteróides. Outra alternativa apresentada consistia na possibilidade de alterar a teoria newtoniana. Tisserand (1872) supôs que a lei da gravitação tivesse a mesma forma da lei de Weber anteriormente proposta para a eletrodinâmica:

$$F = GmM/r^2[1 - (1/h^2)(dr/dt)^2 + (2r/h^2)d^2r/dt^2],$$

sendo G a constante gravitacional, m a massa do planeta, M a massa do sol, r a distância do planeta até o Sol e h a velocidade de propagação da gravitação (ver Whittaker, *op. cit.* p. 201-208, 1989). Esta lei de força pode ser obtida a partir do potencial

$$U = GM/r[1 - 1/h^2(dr/dt)^2].$$

Tisserand, supondo h igual à velocidade da luz, encontrou apenas 14", para o desvio anômalo do periélio de Mercúrio. A. Hall (1894) diz que Le Verrier havia achado um valor de 38" no periélio de Mercúrio, mas que medições posteriores mais precisas feitas por Newcomb mostraram ser o desvio de 43" por século. Neste artigo, ele discute a questão das três hipóteses alternativas para a explicação do fenômeno: explicação planetária, hipótese de Tisserand (lei de Weber) e hipótese da não esfericidade do sol. No caso da hipótese de um planeta intramercurial, ele cita as supostas descobertas de Dr. Lescarbault - 1859

**Revista da SBHC, n. 16, p. 53-60, 1996**

(período de 20 dias), planetas previa descobertos pelo Prof. Watson e Swift (1878). Nenhuma delas foi confirmada. Quanto à hipótese de Tisserand (lei de Weber), ela só dá conta de uma parte do desvio observado. Por outro lado, as observações astronômicas pareciam comprovar que o Sol é praticamente esférico. Considerando todos estes fatos, Hall mostrou estar propenso a aceitar a sugestão de Bertrand (1873) de modificar a lei de Newton, do inverso do quadrado da distância:  $F = G m_1 m_2 / r^2$ . Introduzir uma expressão mais geral, da forma

$$F = G m_1 m_2 r^n.$$

No caso de pequena excentricidade da órbita do planeta, o ângulo entre o raio mínimo e o máximo seria  $\theta = \pi / (n+3)^{1/2}$ . Para  $n = -2$ , correspondendo à lei de Newton, teríamos  $\theta = \pi$ .

Hall diz que, tomando o valor do desvio do periélio igual a 43", encontraríamos  $n = -2,00000016$ . E que a questão seria examinar o efeito desta mudança da lei da gravitação nos outros elementos da órbita.

Simon Newcomb (1895) afirmava que o periélio de Mercúrio não era o único elemento, cuja variação secular não podia ser satisfatoriamente representado pela teoria existente. O movimento dos nós de Vênus também se incluía na categoria de efeitos que não podiam ser explicados pela teoria. E que nem planeta intramercurial, nem luz zodiacal, nem o desvio da gravitação de sua lei usual poderia explicar o desvio secular do periélio de Mercúrio. Ele então dizia ser favorável à existência de um anel de asteróides entre as órbitas de Mercúrio e de Vênus. Segundo Roseveare, a princípio Newcomb chegou a se interessar pela hipótese de Hall, mas foi forçado a abandoná-la, devido à sua incapacidade de fornecer o movimento correto da Lua. E que o astrônomo que mais convenceu os cientistas da época foi Seeliger com sua hipótese de luz zodiacal. O astrônomo italiano J. D. Cassini, comentou sobre a chamada luz zodiacal em 1683. Para explicação do fenômeno, ele sugeriu em 1730 a existência de um grande número de pequenas partículas em volta do Sol. A hipótese de luz zodiacal foi apresentada por Seeliger em 1906. Anteriormente (1895), Seeliger havia proposto uma alteração da lei de Newton, que seria capaz de explicar o avanço do periélio de Mercúrio. Esta alternativa proposta por Seeliger será discutida na próxima seção deste artigo.

## PARADOXOS COSMOLÓGICOS DA TEORIA NEWTONIANA

O modelo de universo predominante ao longo do século XIX era um modelo baseado na idéia de um universo infinito e homogêneo no espaço e invariável no tempo (modelo estacionário). A geometria deste universo era suposta ser a geometria euclidiana. Vamos chamar este modelo cosmológico de modelo estacionário homogêneo euclidiano (EHE). À primeira vista, parecia ser este modelo do universo um modelo razoável e compatível com as observações astronômicas, que vinham sendo realizadas desde os dias de Galileu. A infinitude do universo, embora não estivesse de acordo com o bom senso da astronomia antiga, passou a tornar-se de acordo com o bom senso dos tempos modernos, visto que o senso comum depois de Copérnico foi sendo reeducado. Quanto à invariância temporal do universo, ela já era aceita desde Aristóteles. Como escreveram Misner et ali. (1973, p. 707): "*A permanência do Universo era uma questão de fé da filosofia ocidental. Os céus duram de uma eternidade a outra*",

No entanto, este modelo de universo passou a deparar com uma série de dificuldades. Uma delas era o chamado paradoxo de Olbers-Cheseaux. Este paradoxo foi formulado em 1744 pelo astrônomo suíço J. P. L. Cheseaux e independentemente em 1826, pelo astrônomo alemão Heinrich Wilhelm Matthias Olbers (1758-1840). Ele é atualmente conhecido como paradoxo de Olbers-Cheseaux. O paradoxo resultava da contradição aparente entre o modelo EHE e o fato astronômico mais antigo já observado: o céu se torna escuro quando o Sol se põe. A infinitude do universo e a homogeneidade da distribuição espacial das estrelas levaria a supor que o céu noturno fosse tão iluminado quanto a superfície do Sol. Exatamente o contrário do que comumente se observa.

De fato, representando por  $L$  a luminosidade absoluta de uma estrela e por  $l = L/4\pi r^2$ , a sua

luminosidade aparente a uma distância  $r$ , e sendo  $n$  a densidade média de estrelas neste universo homogêneo e infinito, teríamos necessariamente uma divergência de energia. Pois, considerando uma casca esférica com centro em um ponto arbitrário, com raio interno  $r$  e espessura  $dr$ , seu volume  $4r^2dr$  deveria ser suficientemente grande para que a luz emitida pelas estrelas contidas neste volume pudesse ser representada por  $u4r^2dr$ , onde  $u$  é o número médio de estrelas por unidade de volume  $n$  multiplicado pela luminosidade média  $L$  das estrelas:  $u = nL$ . De modo que  $dQ = nL4\pi r^2dr$  seria a energia correspondente. Sendo assim, temos a luminosidade aparente das estrelas contidas na casca esférica expressa sob a forma

$$dU = dQ/4\pi r^2 dr = nLdV = (L/4\pi r^2)4\pi nr^2dr = Lndr.$$

Integrando  $dU$ , quando  $dr$ , varia de um ponto arbitrário  $r_0$  até o infinito, a grandeza  $U$  diverge

necessariamente:  $\int_0^{\infty} dU = \int_0^{\infty} nLdr$  diverge. Quer dizer que o fluxo de energia luminosa cresce indefinidamente. A luminosidade total do universo em um ponto qualquer seria infinita. Nisto consiste o paradoxo cosmológico.

Bondi comenta que Olbers chegou ao paradoxo cosmológico, com base nas seguintes asserções:

1. A densidade média de estrelas e sua luminosidade não varia através do espaço.
2. As mesmas quantidades não variam com o tempo.
3. Não há movimento apreciável das estrelas.
4. O espaço é euclidiano.
5. As leis conhecidas da física são aplicáveis.

Ele ainda comenta que praticamente nenhuma das teorias atuais é capaz de continuar considerando a validade do ponto 3. Na realidade, as observações de objetos mais afastados da Terra parecem indicar que há movimento em larga escala das estrelas distantes. Muitas teorias não aceitam a validade do ponto 2, no entanto, a teoria baseada no perfeito princípio cosmológico está firmemente baseada em 1) e 2).

Tanto Cheseaux como Olbers, tentando remover o paradoxo cosmológico, postularam a existência de um meio interestelar, que absorvesse a luz das estrelas distantes. Mesmo assim, esta hipótese mostrou não ser totalmente satisfatória. A eternidade do universo e as leis da Termodinâmica indicavam que, neste caso, o tempo transcorrido desde a mais remota antiguidade seria suficiente para que o universo atingisse um estado de equilíbrio térmico. De modo que, mesmo em presença de um meio absorvente interestelar, a luminosidade do céu noturno deveria ser da ordem de grandeza da superfície das estrelas. E o paradoxo permanecia sem solução.

Bondi comenta que, rejeitando o postulado 3, o paradoxo de Olbers poderia ser superado. O efeito Doppler devido ao afastamento das galáxias poderia contribuir para que a densidade de radiação das estrelas distantes caísse muito abaixo dos valores estimados por Olbers<sup>1)</sup>.

Um sério paradoxo cosmológico, também resultante da incompatibilidade entre a homogeneidade e infinitude do universo, por um lado, e os fatos observados, por outro, ficou mais tarde conhecido como paradoxo de Seeliger. Em 1895, o astrônomo Hugo Seeliger (1849-1924) mostrava que se tomarmos a densidade média da matéria no universo como uma constante, ao aplicarmos a lei newtoniana da gravitação a este universo infinito, teríamos uma divergência no potencial gravitacional. O potencial seria infinito em cada ponto, enquanto algumas grandezas derivadas deste potencial ficariam indeterminadas. Seeliger comenta que havia duas possibilidades de remover o paradoxo:

1 Soluções cosmológicas das equações da Relatividade Geral, baseadas no princípio cosmológico (item n. 1, citado por Bondi), indicam que o Universo está em expansão (modelo de Friedmann). Por outro lado, observações astronômicas feitas por Hubble em 1929, parecem indicar que os espectros das galáxias distantes do Universo tendem a desviar-se para o vermelho. Indicando que o Universo pode estar em estado de expansão.

1. A massa total do universo é infinita, mas a lei gravitacional newtoniana não é matematicamente exata.
2. A lei newtoniana é absolutamente certa, então a matéria total do universo deve ser finita.

Seeliger opta pela primeira opção, considerando que a lei newtoniana da gravitação representa uma fórmula puramente empírica, cuja validade não é absoluta. Ele ainda ressaltava que já não era aceitável supor que a gravitação fosse uma força agindo à distância. E como fizeram antes Cheseaux e Olbers, Seeliger também supôs a existência de um meio interestelar, capaz de amortecer o efeito das massas distantes sobre o potencial local. A forma mais simples, que ele propôs para levar em conta este efeito, acrescentar o fator  $e^{-\lambda r}$  ao potencial newtoniano. O novo potencial passa a ser  $F = G(m/r)e^{-\lambda r}$ . Com isso desapareceria a infinitude do potencial e a indeterminação de grandezas derivadas deste potencial, a força gravitacional, por exemplo. Em outras palavras, na opinião de Seeliger, o estado e o movimento da matéria, no fundamental, não seriam mais determinados pelas partes do universo infinitamente distantes. Por outro lado, seria preciso que  $\lambda$  fosse pequeno, tendo em vista que, no âmbito do sistema solar, a teoria newtoniana da gravitação é praticamente válida. Além disso, o critério para a escolha do parâmetro deveria ser a exigência do novo potencial gravitacional poder explicar o desvio anômalo do perélio de Mercúrio. Neste caso, como Seeliger mostrou,  $\lambda = 0,00000038$ . O que, entretanto, implicaria desvios anômalos de 29", 24", 20", 11", 8", 5", para Vênus, Terra, Marte, Júpiter, Saturno e Netuno, respectivamente.

Antes de Seeliger, Carl Neumann já havia, por volta de 1874, estudado a questão do paradoxo gravitacional. O potencial indicado por Seeliger já fôra proposto por Neumann. Inclusive Neumann mostrou que este potencial satisfazia a equação de Poisson generalizada

$$\nabla^2\Phi - \lambda^2\Phi = 4\pi G\rho.$$

## TENTATIVAS NO SENTIDO DE ENCONTRAR UMA EXPLICAÇÃO PARA A PROPAGAÇÃO DA GRAVITAÇÃO

Na segunda metade do século XIX, depois dos trabalhos de Faraday e Maxwell, em eletrodinâmica, forças locais, atuando através de contato, passaram a serem vistas como mais adequadas que as forças agindo à distância. Era natural a procura de uma explicação análoga para o fenômeno da gravitação. Laplace (1805) já havia tentado relacionar a velocidade de propagação da gravitação com a velocidade orbital do planeta em torno do Sol. Como se sabe, entre os fenômenos físicos, a gravitação ocupa uma posição especial. Fenômenos de natureza eletromagnética são suscetíveis de sofrerem blindagem. Surge então a questão de saber se existem meios capazes de exercer blindagem para a interação gravitacional. Contudo, inúmeras observações levam a crer que é impossível blindar esta interação. Laplace concluiu que havia neste sentido uma diferença de comportamento entre a luz e a gravitação. Esta última não pode ser eclipsada, como acontece com a luz. O fenômeno da aberração da luz já era conhecido desde 1728. Gerber (1917, p. 427) comenta que este fenômeno serviu de modelo (*ein Vorbild*) para a procura de uma possível velocidade de propagação da gravitação. Laplace supôs que a atração de um planeta - devido à velocidade de seu movimento orbital, combinada com a hipotética velocidade de propagação da gravitação - não deveria ocorrer ao longo da linha que o liga ao Sol, mas seria deslocado para a frente, no sentido do seu movimento. Seja  $V$  a suposta velocidade de propagação da gravitação e  $v$  a velocidade orbital do planeta, logo o ângulo de aberração gravitacional será dado por  $v/V$ .

No entanto, Laplace não chegou a resultados satisfatórios, quanto ao cálculo da velocidade de propagação da gravitação. Pareceu-lhe que ela seria no mínimo igual a  $15 \cdot 10^{12}$  km/s. Portanto, da ordem de  $10^8$  vezes maior que a velocidade da luz.

Gerber comenta também que 40 anos mais tarde, com base na teoria eletrodinâmica de Weber, novas tentativas foram feitas com o objetivo de determinar a velocidade de propagação da gravitação. Ele cita os trabalhos de Riemann (1868), C. Neumann (1868), Holzmüller (1870), Tisserand (1872), Servus e Lehmann-Filhés (1885), Hepperger (1888), Lévy (1890). Novamente, Gerber, *op. cit.* p. 433, comenta que todas estas tentativas falharam. Ainda mais porque as teorias mecânicas não podem resolver o problema da velocidade da gravitação: “Übrigens können die mekanischen Theorien das Problem der Gravitationsgeschwindigkeit überhaupt nicht lösen”. De fato, como diz Vizguin (*op. cit.* p. 256-57), leis do tipo de Weber, Riemann e Gauss não eram essencialmente de ação local, não eram teoria de campo. Em segundo lugar, não explicavam o desvio anômalo do periélio de Mercúrio (a lei de Weber explicava apenas 14”, a lei de Gauss 28”). Em terceiro lugar, elas relacionavam a gravitação com a eletrodinâmica, indicando a possibilidade de, no futuro, se construir alguma teoria unificada da gravitação e do eletromagnetismo. Por outro lado, segundo ele, teorias mecânicas das gravitação remontando ao tempo de Hooke, como foi em 1897 exposta por Drude, e a teoria eletrônica de Lorentz (1900), em parte não toca a questão da propagação da gravitação, em parte a toma desde o começo como sendo igual à velocidade da luz.

Quanto à teoria de Gerber, pelo menos como declaração do autor, ela pressupõe a existência de campo gravitacional e uma modificação da lei newtoniana, de tal modo que se as massas estiverem em repouso, a nova fórmula para o potencial se reduz à newtoniana. Gerber, partindo da análise da interação entre duas massas puntiformes  $m$  e  $m'$ , movendo-se com a velocidade relativa  $dr/dt$ , deduziu o potencial

$$\Phi = \frac{Gm}{r[1 - (1/c)dr/dt]^2},$$

em substituição ao potencial clássico da teoria newtoniana. Desenvolvendo  $\Phi$  até termos de segunda ordem (segunda potência de  $dr/dt$ ), obtém-se

$$\Phi = \mu/r[1 + (2/c)dr/dt + (3/c^2)(dr/dt)^2].$$

Ele argumenta que é precisamente ao potencial e não à força que se deve atribuir velocidade. Com esta abordagem, no caso do desvio do periélio de Mercúrio, supondo o valor deste desvio igual a 43” - valor já confirmado experimentalmente -, ele encontra  $c = 305500$  km/s para a velocidade de propagação da gravitação. Um valor praticamente coincidente com a velocidade da luz, parecia ser bastante razoável, contribuindo para dar um certo crédito à teoria de Gerber. Ele inclusive concluiu que só crê numa teoria que não dê uma explicação mecanicista dos fenômenos, mas que estabelece uma relação da gravitação com outros fenômenos físicos. Mas, a sua teoria não satisfazia estas condições.

É chegado o momento de lembrar que Laue criticou as idéias de Gerber, notando que a expressão matemática para o seu potencial não era correta. Ela não levava em conta aquilo que Gerber queria achar, ou seja, não levava em conta o tempo necessário para a perturbação se propagar. Laue, com base nas equações da eletrodinâmica, propôs um potencial retardado, para expressar a propagação das perturbações gravitacionais. Laue asseverava, que, embora a forma do potencial de Gerber tenha um fator, representando a velocidade de propagação da gravitação, esta expressão não tem nada a ver com o problema proposto. Laue, como também Vizguin, comentam que, apesar de Gerber haver conseguido uma confirmação do desvio observado na órbita de Mercúrio, ao fazer uso de uma lei do tipo de Weber, ele não resolvia satisfatoriamente a questão da ação à distância. Além disso, Vizguin comenta que depois do reconhecimento total da teoria de Maxwell, uma abordagem do problema da gravitação na base da eletrodinâmica de Weber e Neumann seria um anacronismo. Ele ainda acrescenta que, Mach, na sua 4ª edição da *Mecânica* (1909) se referia favoravelmente ao trabalho de Gerber. Por outro lado, Roseveare diz em *op. cit.* p. 141, que a teoria de Gerber é apenas mais uma teoria da gravitação e nada diz fora deste domínio (*Gerber's theory is*

a *gravitational theory and says nothing outside that sphere*). Este é um dos motivos dela ser refutada, diz ele.

Outra inconveniência da teoria de Gerber<sup>2)</sup> é que um potencial do tipo introduzido por ele não elimina o paradoxo gravitacional (paradoxo de Seeliger). Ivanenko (1982), por outro lado, diz que é importante ressaltar que, já em seus primeiros trabalhos na formulação da teoria da relatividade restrita (1905 - 1906), Poincaré mostrando a universalidade do princípio de relatividade, procurou difundir-lo também na gravitação, realizando assim o primeiro passo criterioso no sentido de generalização da teoria newtoniana da gravitação (ao contrário dos potenciais de “ajuste” do tipo Weber-Gerber e outros). Poincaré em seu trabalho “*Sur la dynamique de l’électron*” (1905) disse, que de acordo com o trabalho de Lorentz (1904), fazia-se necessário completar sua hipótese, de modo que o postulado da relatividade tivesse lugar em presença de outras forças, além das de origem eletromagnéticas. Quais são as modificações a serem feitas na lei da gravitação? Em primeiro lugar, é preciso levar em conta que a gravitação não se propaga instantaneamente, mas com a velocidade da luz. Se a inércia da matéria tem origem exclusivamente eletromagnética, então como é atualmente aceito, depois das experiências de Kaufmann (1902), todas as forças têm origem eletromagnética, se quisermos que a força newtoniana se comporte do mesmo modo que as forças eletromagnéticas, então não podemos supor que esta força dependa apenas da posição relativa de dois corpos, num dado momento. Ela deve depender também da velocidade de ambos os corpos. Assim falava Poincaré.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

As questões enumeradas acima, preocuparam os físicos durante um período bastante longo. Todas as tentativas feitas para sanar as anomalias nas órbitas planetárias ou para superar os paradoxos da teoria newtoniana da gravitação, de um modo ou de outro, não foram bem sucedidas. Foi preciso surgir um novo paradigma, uma nova abordagem do fenômeno da gravitação, para que fossem superadas algumas deficiências da teoria newtoniana. Isso aconteceu através de duas etapas principais. Em 1905, surgia a Teoria da Relatividade Restrita, que dava uma nova interpretação aos conceitos de espaço e de tempo. A Relatividade Restrita serviu de ponto de partida para uma teoria ainda mais ambiciosa, a Teoria Geral da Relatividade, elaborada por Einstein no decorrer de vários anos, entre 1907 e 1915. Nesta teoria, a gravitação não seria mais explicada através de um potencial escalar do tipo newtoniano, nem de força de atração gravitacional, derivada deste potencial, mas sim como manifestação da curvatura do espaço-tempo oriunda da distribuição de matéria.

Com isso não apenas desaparecia os paradoxos gravitacionais decorrentes da infinitude do Universo, como também seria encontrada uma explicação para o desvio do periélio do planeta Mercúrio. Permanecem sem explicações algumas anomalias menores como, por exemplo, o movimento dos nós da órbita de Vênus. Mas, mesmo no caso do desvio do periélio de Mercúrio, o primeiro dos efeitos clássicos explicados no âmbito da Relatividade Geral, permanece, contudo, em aberto a questão da possível não esfericidade do Sol. Como assevera Will, *op. cit.* 1987, p. 102, desde 1967, tem havido controvérsias periódicas, sobre a questão de se saber se o desvio no periélio de Mercúrio confirma ou refuta a Relatividade Geral, devido a um aparente momento quadripolar do Sol. Mas a questão sobre o valor desse momento quadripolar permanece em aberto.

---

2 É necessário dizer que Gerber publicou seu trabalho, pela primeira vez, em 1898 e 1902. O trabalho acima referido é sua reimpressão em 1917, portanto, depois do aparecimento da Relatividade Geral, em 1916. Naquele momento inclusive a teoria de Gerber teve a pretensão de ser uma concorrente de certa importância com a Relatividade Geral. Mas foi naquele momento mesmo, no número seguinte dos *Annalen der Physik*, que Laue fazia uma crítica demolidora contra os fundamentos da teoria de Gerber. Com a popularidade crescente da Relatividade Geral, a teoria de Gerber rapidamente ia saindo de cena.

Qualquer que seja a visão que se tenha sobre estes fatos, não resta dúvida de que a Relatividade Geral representou um salto de qualidade nos programas de pesquisas sobre a gravitação e assuntos correlatos. Tentativas de interpretar a gravitação e os fenômenos eletromagnéticos como manifestação de curvatura do espaço existiram desde o século XIX (Riemann, Clifford e outros, ver Misner et ali., 1973, p. 33 e Martins, 1995). No entanto, ou se tratavam de conjecturas de caráter bastante especulativo ou se referiam apenas à curvatura do espaço, mas não à curvatura do espaço-tempo. Só a Relatividade Geral, apoiando sobre o conceito de um contínuo espaço-tempo quadridimensional pôde dar um novo enfoque ao problema da gravitação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BERGMANN, P.** *The Riddle of gravitation*. New York :Dover , 1992.
- BONDI, H.** *Cosmology*. 2.ed. Cambridge :Univ. Press, 1960. rep. 1968.
- HALL, A.** A Suggestion in the theory of Mercury. *Ast. Journal*, n. 319, p. 49 -51, 1894.
- GERBER, P.** Die fortpflanzungsgeschwindigkeit der gravitation. *Ann Phys*, p.415-444, 1917.
- IVANENKO.** Aktualnosti' teorii gravitacii Einchteina (Atualidade da teoria da gravitação de Einstein). In: *Problemi Fiziki: Klassika i Sovremenosti'*. Moscou: Editora Mir, 1982. p. 127 - 163.
- LAKATOS, I.** O Falseamento e a metodologia dos programas de pesquisa científica. In: *A Crítica e o desenvolvimento do conhecimento*. São Paulo:Ed. Cultrix, 1979, p.109 -243.
- LAUE, M.** von. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der gravitation. Bemerkung zur gleichnamigen Abhandlung von P. Gerber. *Ann. Phys*, p. 214 - 216, 1917.
- MARTINS, R. A.** A Influência das geometrias não-euclidianas no pensamento físico do século XIX. *Rev. Bras. Hist. Ciência*, n. 13, p. 67 - 79, 1995.
- MISNER, C. H.** et ali. *Gravitation*. San Francisco : W. H. Freeman , 1973.
- NEWCOMB, S.** Note on accounting for the secular variations of the orbits of Venus and Mercury. *Ast. Journ*, 327, p. 117-118, 1895.
- ROSEVERE, N. T.** *Mercury's perihelion from le verrier to Einstein*. Oxford: Clarendon Press , 1982.
- SEELIGER, H.** Über das newtonsche gravitationsgesetz. *Ast. Nachrichten*, 137, p. 129-136, 1895.
- VIZGUIN, V.** Teoria tiagotênia na rubiejé XIX i XIX vekov. In : *Einchteinovski Sbornik*, 1975-1976. Moscou: Naúka , 1978.
- WEINBERG, S.** *Gravitation and cosmology*. Ch: John Wiley & Sons, Inc., Ch. 16, 1972.
- WHITTAKER, E.** *A History of the theories of aether & electricity*. New York : Dover, 1989. v.1/2.
- WILL, Clifford M.** Experimental gravitation from Newton's principia to Einsteins's general relativity. In: *300 Years of Gravitation*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, p. 80-127, 1987.

**Artigo recebido em julho de 1996**

---

José Lourenço é Professor de Física, na Universidade Estadual Paulista,  
Endereço: Departamento de Física e Química, FEG - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá.  
Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333, Caixa Postal 205, CEP 12500-000 Guaratinguetá - SP- Brasil  
E-mail: lourenco@feg.unesp.br.

**Revista da SBHC, n. 16, p. 53-60, 1996**