



CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo
www.bassalo.com.br



As Primeiras Teorias da Gravitação Não-Newtoniana.

Uma primeira ideia de uma **gravitação não-newtoniana** (GN-N) foi proposta pelo físico irlandês George Francis FitzGerald (1851-1901) em seus **Scientific Writings** (“Trabalhos Científicos”) de 1894, ao afirmar que: - *A gravidade é provavelmente devido à mudança da estrutura do éter, produzida pela presença da matéria.* Uma outra ideia sobre uma GN-N foi apresentada, em 1900 (*Koninklijke Akademie von Wetenschappen te Amsterdam Proceedings 2*, p. 559) pelo físico holandês Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928; PNF, 1902). Ora, raciocinou Lorentz, a matéria é formada de cargas elétricas positivas e negativas, e se a força de repulsão entre essas cargas de mesmo sinal for ligeiramente mais fraca que às de atração entre as cargas de sinais contrários, tal diferença seria responsável pela atração gravitacional. Para comprovar essa sua conjectura, Lorentz afirmou que a precessão do periélio do planeta Mercúrio seria um teste experimental desse seu modelo. É oportuno destacar que o avanço do periélio do Mercúrio havia sido medido pelo astrônomo francês Urbain Jean Joseph Le Verrier (1811-1877), em 1859 (*Comptes Rendus de l'Academie des Sciences de Paris 49*, p. 379), como sendo de 38 segundos de arco (38”) a mais por século, em relação ao previsto pela Teoria da Gravitação Newtoniana (TGN), de 1687. Tal avanço, segundo Le Verrier, se devia a “alguma razão desconhecida”. Provavelmente, afirmou Le Verrier, tal anomalia decorria da presença de um planeta entre o Sol e Mercúrio, denominado por ele de Vulcano, com um diâmetro de $1,6 \times 10^6$ km e a 30×10^6 km do Sol. Nesse trabalho, apresentado no dia 12 de setembro de 1859 à *Academia de Ciências de Paris*, Le Verrier chegou a apresentar as datas de sua passagem (trânsito) pelo Sol. Note que essa precessão foi de novo medida, em 1882 (*Astronomical Papers of the American Ephemerides 1*, p. 472), pelo astrônomo norte-americano Simon Newcomb, para a qual encontrou 43”.

Por sua vez, em 1905 (*Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Academie des Sciences de Paris 140*, p. 1504), o filósofo e matemático francês Jules Henri Poincaré (1854-1912) propôs que a gravitação se propagava com velocidade finita, e que a lei da gravitação universal newtoniana, que varia com o inverso do quadrado da distância, deveria também ter um fator que dependesse da velocidade. Contudo, foi também em 1905, que começou a ser esboçada uma nova Teoria da Gravitação (TG). Vejamos como.

Naquele ano de 1905 (*Annalen der Physik 17*, p. 891), o físico germano-norte-americano Albert Einstein (1879-1955; PNF, 1921) formulou a Teoria da Relatividade Restrita (TRR) segundo a qual as leis físicas não se alteram quando examinadas em referenciais inerciais em repouso ou em movimento retilíneo uniforme, tendo como base as **Transformações de Lorentz** (TL). É interessante registrar que a formulação da TRR, de certo modo, resolveu o paradoxo do eletromagnetismo maxwelliano (1687) examinado por Einstein, em 1895, quando tinha 16 anos de idade: - *Se um raio luminoso for perseguido a uma velocidade da luz no vácuo, observamos esse raio de luz como um campo eletromagnético em repouso, porém com oscilação espacial. Entretanto, aparentemente não existe tal coisa, quer com base na experiência, quer de acordo com as equações de Maxwell.* [Albert Einstein, **Notas Autobiográficas** (Nova Fronteira, 1982)]. Para resolver esse paradoxo, Einstein postulou que as leis da física não dependiam da posição do observador: em repouso ou em movimento uniforme, conforme registramos acima.

Depois de formular a TRR, Einstein percebeu que havia duas grandes dificuldades nela. Primeira, ela se baseava em referenciais inerciais, aqueles que se movimentam sem aceleração, ou seja, com velocidade constante, e que não existem no mundo real. A segunda, era a de que sua teoria não incluía a TGN. Desse modo, seu próximo passo foi o de representar a gravitação newtoniana dentro da estrutura da TRR. Registre que ao comentar com seu amigo, o físico alemão Max Karl Ernest Planck (1858-1947; PNF, 1918) sobre seu ambicioso projeto, Planck o advertiu: - *Como um amigo mais velho, devo aconselhá-lo negativamente, pois, primeiro, você não terá sucesso, e, ainda que tenha, ninguém acreditará em você. ... Porém, se você conseguir, será considerado um novo Copérnico.* Apesar dessa advertência, Einstein começou a pensar no ajuste da TGN com a TRR. [Michio Kaku, **O Cosmo de Einstein** (Companhia das Letras, 2005)].

O pensamento básico daquele ajuste ocorreu a Einstein, em 1907, quando ele estava ainda trabalhando no *Escritório de Patentes*, em Berna, na Suíça. Segundo suas próprias palavras: - *Eu estava sentado numa cadeira no escritório de patentes de Berna, quando, de repente, um pensamento me ocorreu: uma pessoa em queda livre não sentirá seu próprio peso. Fiquei surpreso. Esse pensamento simples impressionou-*

me profundamente. Impeliu-me para uma teoria da gravitação. Note que o próprio Einstein afirmou que esse foi “o pensamento mais feliz da vida dele”. (Einstein, op. cit.; Kaku, op. cit.).

Naquele mesmo ano de 1907 (*Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik* 4, 411), Einstein publicou um artigo no qual discutiu, pela primeira vez, a equivalência entre a **massa inercial** (MI) e a **massa gravitacional** (MG). Note que, em 1905, na formulação da TRR, Einstein demonstrou que a massa de um corpo cresce com a sua velocidade, razão pela qual a interpretou como uma MI. Aliás, essa interpretação ele já havia considerado quando, ainda em 1905, e um pouco antes de apresentar a TRR, partindo da **teoria quântica de Planck** (a energia varia discretamente), de 1900, Einstein explicou o **efeito fotoelétrico** (emissão de elétron de um átomo pela incidência de luz), considerando que a luz (de frequência ν) era um **pacote de energia quântica** ($h\nu$) dotado de massa. Com essa interpretação da luz, Einstein questionou se a gravidade influenciava a propagação da luz, tendo em vista sua conjectura: $MI = MG$. Continuando em busca de uma TG que contivesse a TRR, em 1909 (*Physikalische Zeitschrift* 10, p. 185), Einstein usou a quantização de Planck para estudar o comportamento de uma radiação presa em um corpo de paredes completamente espelhantes (**corpo negro**). Nesse estudo, ele mostrou que a luz apresentava um comportamento dual: ora partícula, ora onda.

Em 1911 (*Annalen der Physik* 35, p. 898), Einstein voltou a estudar a influência da gravidade newtoniana sobre a luz, ocasião em que fez as seguintes afirmações: 1) *Um raio de luz passando próximo de um campo gravitacional potente, tal como o Sol, deve se encurvar*, 2) *A velocidade da luz deve depender do campo gravitacional*. A partir dessas afirmações, Einstein usou a TGN para calcular o encurvamento (*bending*) (α) de um raio luminoso ao tangenciar o bordo do Sol e encontrou que: $\alpha = (2GM)/(\Delta c^2) = 0''{,}83$, onde M é a massa do Sol, G é a **constante de gravitação universal de Newton-Cavendish**, c é a velocidade da luz no vácuo, e Δ é a menor distância entre o raio de luz e o disco do Sol. É interessante destacar que, em 1801 [publicado em 1804 (*Berliner Astronomisch Jahrbuch*, p. 161)], o astrônomo alemão Johann George von Soldner (1776-1833), usando a teoria corpuscular newtoniana da luz e a TGN, obteve o valor para α o valor de $0''{,}84$, valor esse que parece haver também sido calculado pelo próprio Sir Isaac Newton (1642-1727). [Sir Edmund Taylor Whittaker, **A History of the Theories of Aether and Electricity - The Modern Theories: 1900-1926** (Thomas Nelson and Sons, Ltd., 1953); Steven Weinberg, **Gravitation and Cosmology: Principles and Applications of the General Theory of Relativity** (John Wiley and Sons, Inc., 1972); Abraham Pais, **Subtle is the Lord...: The Science and the Life of Albert Einstein** (Oxford University Press, 1982); Michel Paty, **Einstein Philosophe** (Presses Universitaires de France, 1993)].

Ainda naquele artigo de 1911, ao assumir que $MI = MG$, Einstein estudou o comportamento de relógios em dois referenciais, sendo um em repouso e um segundo com a aceleração vertical (γ) em relação ao primeiro. Em vista disso, demonstrou que a diferença entre os instantes de tempo registrados por esses relógios dependeria da diferença de energia potencial gravitacional entre os pontos em que eles estivessem situados. Em consequência desse resultado, concluiu que a luz (de frequência ν_0) gerada por certo material na superfície solar teria uma frequência menor que a frequência (ν) da luz gerada por esse mesmo material na superfície terrestre, uma vez que os potenciais solar e terrestre são diferentes. A esse efeito, Einstein denominou de **red shift** (“deslocamento para o vermelho”), calculado por: $(\nu_0 - \nu)/\nu_0 = \Phi/c^2 = 2 \times 10^{-6}$ onde Φ é a diferença (negativa) de potencial gravitacional entre as superfícies do Sol e da Terra. Para detalhes do cálculo de α e do **red shift**, ver: Stephen William Hawking, **Os Gênios da Ciência: Sobre os Ombros de Gigantes** (Campus/Elsevier, 2005).

A dependência da velocidade da luz com o potencial gravitacional foi também discutida pelo físico alemão Max Abraham (1875-1922) em um trabalho publicado em 1912 (*Physikalische Zeitschrift* 13, p. 1; 4; 310), quando afirmou: 1) – *A velocidade da luz c depende do potencial gravitacional*; 2) – *O gradiente (Δ) negativo de c indica a direção da força gravitacional (\mathbf{F}_G): $\Delta c = -\mathbf{F}_G$* . Logo depois desse trabalho de Abraham e, também, em 1912, a identidade entre MI e MG foi finalmente postulada como o **Princípio da Equivalência** (PE) ($MI = MG$), independentemente, por Einstein (*Annalen der Physik* 38, p. 355; 443; 1059) e por Abraham (*Annalen der Physik* 38, p. 1056), em trabalhos por eles realizados. Einstein, por exemplo, sugeriu que uma teoria dinâmica da gravitação poderia mostrar que a MI de um corpo é inteiramente devida à interação gravitacional com todos os demais corpos do Universo. Por sua vez, ainda em 1912 (*Physikalische Zeitschrift* 13, p. 1126), o físico finlandês Gunnar Nordström (1881-1923) propôs que m (MI) dependia do potencial gravitacional Φ , por intermédio da seguinte relação: $m = m_0 \exp(\Phi/c^2)$, sendo m_0 a massa no espaço sem gravitação ($\Phi = 0$).

Entre 1912 (*Annalen der Physik* 37, p. 511) e 1913 (*Annalen der Physik* 39; 40, p. 1; 1), o físico alemão Gustav Mie (1868-1957) publicou trabalhos nos quais discutiu a possibilidade de que um **princípio variacional** envolvendo cargas e correntes elétricas, e seus respectivos campos elétrico e magnético, eram suficientes para descrever todas as leis físicas envolvendo o mundo material. Contudo, esse seu princípio contradizia o PE, uma vez que a relação MI/MG dependia de parâmetros físicos, tais como a velocidade e a temperatura.

Em 1913, Abraham (*Physikalische Zeitschrift* **13**, p. 793) e Einstein (*Physikalische Zeitschrift* **14**, p. 1249) voltaram a discutir uma nova Teoria da Gravitação (TG) baseada no PE. Por exemplo, Abraham propôs uma TG que usava, conjuntamente, a invariância lorentziana (TL) e um sistema de referência absoluto. Também, em 1913 (*Zeitschrift für Mathematik und Physik* **62**, p. 225), Einstein e o físico alemão Marcel Grossmann (1878-1936) desenvolveram uma TG usando a geometria riemanniana (não-euclidiana) no contexto da teoria dos invariantes. Ainda nesse trabalho, eles discutiram pela primeira vez o resultado das experiências realizadas pelo físico húngaro Roland (Lorand), Barão Eötvös von Vásárosnamény (1848-1919), em 1890 (*Mathematische und Naturwissenschaftliche Berichte aus Ungarn* **8**, p. 65), nas quais usou uma espécie de balança de torção e encontrou que a variação relativa entre MI e MG, dada pela expressão: $VR = |MI-MG|/MG$ de vários materiais (latão, vidro e cortiça), era da ordem 10^{-10} . Ao analisarem essas experiências, Einstein e Grossmann concluíram que: - *A identidade física entre a massa inercial e a massa gravitacional ... apresenta um alto grau de possibilidade*. Em 1913 (*Annalen der Physik* **40**; **42**, p. 856; 533), Nordström voltou a trabalhar com sua teoria do campo escalar gravitacional, rival da teoria einsteiniana baseada na PE.

A busca por uma nova TG continuou ainda na primeira metade da década de 1910. Em 1914, Einstein escreveu seis trabalhos sobre a teoria gravitacional que estava desenvolvendo. Em dois deles (*Sitzungsberichte Preussische Akademie der Wissenschaften* **2**, p. 1030; *Vierteljahrschrift der Naturforschenden Gesellschaft zu Zürich* **59**, p. 4), discutiu com mais detalhes o trabalho que fizera com Grossmann, em 1913. Porém, não conseguiu obter as equações do campo gravitacional por intermédio de um **princípio variacional**. No terceiro (*Annalen der Physik* **44**, p. 321), Einstein e o físico alemão Adriaan Daniel Fokker (1887-1968) encontraram uma TG na qual a invariância lorentziana (TL) é completamente obedecida. No quarto (*Scientia* **15**, p. 337), mostrou que o PE que havia postulado, em 1912, decorria de uma lei estatística. Nos dois últimos (*Zeitschrift für Physik* **15**, p. 108; 176), voltou a discutir a gravitação centrada no PE. Note que, nesse mesmo volume **15** da ZP, Nordström publicou dois artigos (p. 115; 169), nos quais trabalhou com sua teoria do campo escalar gravitacional. É interessante destacar que, também em 1914 (*Zeitschrift für Physik* **15**, p. 504), Nordström tentou, pela primeira vez, unificar o eletromagnetismo com a gravitação. A busca dessa unificação – a famosa **Teoria do Campo Unificado** - também foi objeto de pesquisa de Einstein, em 1922 (Pais, op. cit.).

Foi ainda em 1914, que Einstein tentou comprovar o *bending* da luz observando o eclipse total do Sol que ocorreria em 21 de agosto de 1914, na Sibéria. Para isso, falou com o astrônomo alemão Erwin Finlay Freundlich (1885-1964) que organizasse uma expedição para comprovar o que havia previsto em seu trabalho de 1911. Muito embora Einstein estivesse disposto a financiar tal expedição, graças a sua convicção da previsão que fizera, não houve necessidade dessa proposta (cerca de 2 mil marcos), pois um rico industrial resolveu bancar a expedição. Freundlich chegou à Sibéria um mês antes do eclipse. Porém, como a Alemanha havia declarado guerra à Rússia, todos componentes da expedição foram presos e os equipamentos confiscados (Kaku, op. cit.).

Por fim, em 1915, em trabalhos independentes, o matemático alemão David Hilbert (1862-1943) (*Königlich Gesellschafft der Wissenschaften zu Göttingen Nachrichten, Mathematisch-Physikalische Klasse* **1**, p. 395) e Einstein (*Sitzungsberichte Preussische Akademie der Wissenschaften* **2**, p. 778; 799) deduziram a então **Equação de Einstein da Relatividade Geral**:

$$R_{\mu\nu} - (1/2) g_{\mu\nu} R = - K T_{\mu\nu},$$

onde $R_{\mu\nu}$ é o **tensor geométrico de Ricci** [que é o **tensor de Riemann** ($R_{\mu\nu\gamma\tau}$) contraído], $g_{\mu\nu}$ (= $g^{\mu\nu}$) é o **tensor métrico**, $R = g^{\mu\nu} R_{\mu\nu}$, $K = 8\pi G/c^4$ é a **constante gravitacional de Einstein**, G é a **constante de gravitação universal de Newton-Cavendish**, c é a **velocidade da luz no vácuo**, e $T_{\mu\nu}$ é o **tensor energia-matéria**.



ANTERIOR

SEGUINTE