SENTIDO DA GRAVITAÇÃO SEGUNDO EINSTEIN: DA FÍSICA À FILOSOFIA

GRAVITATION SENSE ACCORDING TO EINSTEIN: FROM PHYSICS TO PHILOSOPHY

Ramiro Délio Borges de Meneses
Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Saúde do Norte – Gandra e Famalicão
dr.ramiro@sapo.pt

Abstract: The Newtonian theory of gravitation predicts, and the experiment confirms, that a small laboratory considers, in free fall, without communication with the outside world, such as a satellite. Within the laboratory gnoseologically nothing will tell us that any of the bodies inside it is acted upon by the gravitational field, as they all fell the same gravitational acceleration. This gravitation theory is founded to the force sense of attractions of mass.

It is possible to generalise the equations for the gravitational field, and to make up a new philosophical foundations according to the Einstein's thinking. However, this generalization is not satisfying. Such a theory would not explain the equality of inertial and gravitational masses. Precession is indeed observed, but the theoretical predictions do not account for more than a small fraction of the observed effect by the very important gnoseological and ontological formulations. The gravitation according to Einstein carries out about the space and time curving.

Clearly a new theory of Gravitation of Einstein which would embody directly answers to these questions without the introduction of *ad hoc* assumptions would constitute progress. Meanwhile, the first satisfactory theory of this type was Einstein's general relativity that is a generalized gravitation theory, with a new metric to the space, time, and matter.

KEYWORDS: Gravitation according to Newton, new gravitation theory from Einstein, space, time and matter, gnoseological and ontological determinations.

RESUMO: Segundo a Teoria da Gravitação de Newton, o princípio da equivalência da massa tem um sentido definido no respaço, dado que o espaço é independente do tempo.

Na verdade, o verdadeiro sentido da gravitação segundo Newton radica numa intracção de forças, dependentes das massas em causa. Assim, a gravitação, segundo esta teoria, apresenta-se como causa. Entretanto, segundo Einstein, a gravitação será o efeito da curvatura do espaço-tempo. Desta feita, esta posição esteve dependente da generalização do princípio da equivalência.

Naturalmente, temos duas teorias diferentes, sendo a de Einstein mais extensiva e generalizada, englobando como caso particular a de Newton, tal como se poderá ler neste artigo, em virtude do cálculo tensorial. A nova teoria será referida nos seus fundamentos gnoseológicos e ontológicos, tal como se pretende ao longo deste artigo de orientação filosófica da Teoria da Gravitação de Einstein.

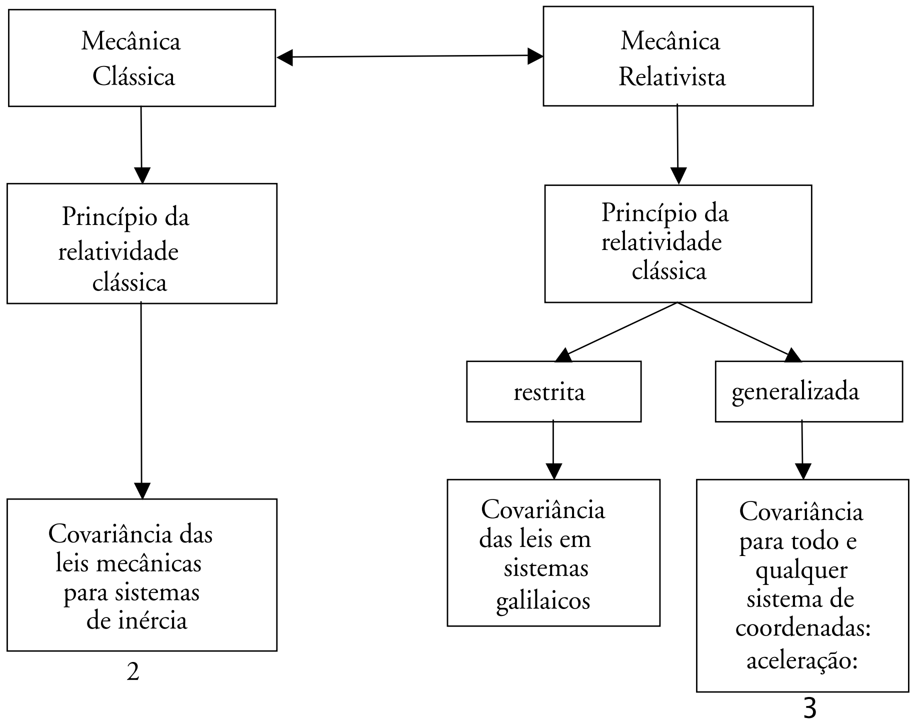
Dado que a Gravitação deixa de ser uma interacção de n-forças, causada pela relação directa das massas e inversa do quadrado da distância, segundo os fundamentos newtonianos, então passará a ser um efeito de efeito no sentido filosófico, sendo referida como um efeito da curvatura do espaço e do tempo.

PALAVAS-CHAVE: Teoria da Gravitação de Newton, nova teoria da Gravitação de Einstein, espaço,tempo e matéria. Fundamentos gnoseológicos e ontológicos da gravitação.

1. Introdução

A generalização operada por A. Einstein atingiu tal significado que chegou à formulação seguinte: as leis da física devem ter uma estrutura tal que a sua validade permanece, em sistemas de referência animadas, para qualquer movimento[1].

A extensão verificou-se na teoria da relatividade general para sistemas de inércia:



[1] SANTAVY, I. «Newton's first law», in: *European Journal of Physics*, 7, Bristol, 1986, 133.
[2] KACZER, C. *Introduction to the Special Theory of Relativity*, Prentice-Hall, New York, 1967, 6-12.
[3] KITTEL, C. *et alii*. *Mecânica, curso de física de Berkeley*, volume I, traduzido do inglês, E. Bluecherec, S. Paulo, 1970, 357-358.

Havendo uma reformulação e generalização da covariância, para os sistemas inerciais, teremos, pela teoria da relatividade generalizada, uma nova extensão métrica do espaço-tempo, através de um invariante absoluto tensorial:

$$ds^2 = g_{ik} \cdot dx_i \cdot dx_k$$

Na lei da gravitação de Newton, a quantidade (G) era uma constante fixa e universal, dado que o Universo, muito para além do sistema solar, era conhecido por ser uniforme[4].

A relatividade generalizada afirma que a «constante de gravitação» é verdadeiramente uma «constante».

Uma das experiências fundamentais para interpretar os fenómenos gravíticos fora apresentado por Eœtvœs, segundo o qual o fio de uma barra não está pendurado exactamente na vertical, devido à força centrifuga, causada pela rotação da terra de modo que a força gravitacional, no sentido descendente, actuando sobre as esferas, não será paralela à fibra. Se a gravidade atrai um dos corpos materiais, com mais intensidade do que outra, então a barra rodará em torno do eixo da fibra.

Porém, todo o instrumento é rodado de maneira que as esferas (massas) trocam de lugar, sendo a rotação resultante em sentido oposto.

A rotação é detectada, através da observação da luz, reflectida por um espelho fixo na fibra de suspensão da barra.

A validade lógica destas experiências, fundamentais para a gravitação, resulta do princípio da equivalência:

$$G \cdot m \cdot m' / r^2 \cdot x' / r$$
$$G \cdot m \cdot m' / r^2 \cdot y' / r$$
$$G \cdot m \cdot m' / r^2 \cdot z' / r$$
$$F = -grad\left(k \cdot m \cdot m' / r\right) = -grad \cdot S^5$$

[4] NEWTON, I. *Principia della Filosofia Naturale*, a cura di A Pala, Unione Tipografico Editrice, Torino, s/d, 67.

A força, que actua no campo com massa *m*, é um gradiente negativo do potencial gravitacional.

Daqui que será $\gamma n = -GM/r$. A energia potencial do campo gravítico apresenta-se da forma seguinte:

$$\phi = m \cdot \gamma M = m \cdot G \cdot M / r = -G \cdot m \cdot M / r$$

A força, agindo sobre uma massa pontual, num mesmo instante, está determinada pela distância de todas as outras massas e pela própria massa.

Na verdade, a distância das duas massas pontuais possui um significado invariante. A teoria mecânica da gravitação, como teoria do campo electromagnético da física pré-relativista, baseia-se numa conjunção uniforme do espaço-tempo.

Para Newton, o fenómeno gravítico resulta do influxo interactivo de dois ou n-corpos, como se assevera pelopróprio texto *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*[6].

Porém, para Einstein, irá ser a gravitação um efeito da conexão mássico-energética, curvada geodesicamente, enquanto que, segundo Newton, o fenómeno da gravitação circunscreve-se à intersecção ou efeito de n-forças mecânicas, sendo resultante das referidas forças atractivas, não se aplicando ao domínio gravítico.

Newton determinou a intensidade do efeito gravítico entre as duas massas, mostrando que a força de gravitação é uma atracção e que a sua intensidade se define pela equação:

$$F = G \cdot m \cdot M / r^2 ;$$
$$G = 6{,}67 \cdot 10^{-8}\, dyne \cdot cm^2 \cdot g^{-2}$$

A teoria newtoniana da gravitação é «covariante», relativamente ao grupo de transformação de Galileu, fundando-se no princípio da relatividade clássica do movimento.

---

[5] *Idem, Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, Fromman-Verlag, Stuttgart, 1964, 120.
[6] *Idem, Ibidem*, 120-122.

2. Primórdios da Gravitação

O estudo dos começos da teoria de Newton, feito do ponto de vista da física do campo, colocou em evidência a necessidade de generalização da Relatividade Restrita, como teoria conhecida pelo nome de Relatividade Generalizada de Einstein.

A força gravítica distingue-se das demais forças na proporcionalidade da massa do corpo sobre o qual se exerce.

A lei ponderomotriz da Mecânica Clássica, $m \cdot \vec{r} = \vec{F}$, dada em sistemas de equações, referencia-se em coordenadas cartesianas.

As componentes da força, actuando num corpo, são proporcionais à massa desse corpo. Como mi é uma «constante», a aceleração de um corpo é independente da massa, porque no campo da electrostática $\vec{E}$, a força, que se exerce sobre uma carga eléctrica, será dependente do campo.

Tal como se passa no campo electrostático, assim sucede no domínio do peso: $m \cdot g$. A força, agindo sobre um corpo, será: $m \cdot g = P$. A carga da gravitação é independente do corpo e $\vec{g}$ do campo.

Logo, a aceleração é definida por:

$$m_i \vec{r} = m \cdot p \cdot \vec{g}$$

A massa pesada é igual à massa inerte, tal como no campo electrostático, devido à lei de Coulomb:

$$\vec{E} = \vec{E}r = -\delta\phi/\delta\vec{r} = \varepsilon^2 \cdot \vec{r}/4\pi \cdot \varepsilon \cdot \vec{r}^3;$$
$$\vec{E} = \varepsilon^2 \cdot \vec{r}/\varepsilon \cdot \vec{r}^3 \text{ [7]}$$

[7] WEYL, H. *Espace, Temps et Matiére, leçons sur la relativité générale*, traduites sur la 4.ª editions allemand, Librairie Scientifique, Paris, 1922, 197.

Daqui se conclui que a aceleração de um sistema de pontos materiais $\left(\sum P_i m_i\right)$, no campo gravitacional, é independente das duas massas (*m* · *gi*; *mi*), para as velocidades: (força) = (massa inerte) × (aceleração).

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

Se a força é o peso do corpo, então será:

[força] = [massa pesada] × [intensidade do campo gravítico]

Logo, considera-se a massa pesada como característica do corpo.

A experiência prova que, para um mesmo campo gravítico, a aceleração ($\vec{r}$) é independente do corpo e o quociente da massa gravítica, pela massa inerte, determina uma constante independente da natureza do corpo. Desta sorte, a massa gravítica é igual à massa inerte. A aceleração é, pois, igual à intensidade do campo ($\vec{r} = \vec{g}$). A teoria de Newton admite este facto sem o interpretar.

A massa activa dum sistema isolado, para uma entidade global, em repouso pelas coordenadas, liga-se à constante α.

Partindo de:

$$g_{ik} = \left(\varepsilon_1 + \alpha/r\right) \cdot \delta_{ik} + \delta_2 + \delta_3$$
$$g_{ik} = \left(1 + 2\alpha/r\right) + \delta_2 + \delta_3$$
$$g_{ik} = \left(\varepsilon_1 - \alpha/r\right) \cdot \delta_{ik} + \delta_2 + \delta_3$$

O valor da constante será:

$$\alpha = 2K \cdot M/c^2 \cdot K \cdot c^2 \cdot M/4\pi$$

Contudo, seguindo as equações:

$$H^0 = 4\pi\alpha/k > 0$$

e

$$M = M_0 \Big/ \sqrt{1 - v^2/c^2}\,; \bullet\bullet M_0 = M_0 \big/ c^2$$

Teremos:

$$H = M \cdot C^2$$

Daqui se aufere que:

$$Mg = 4\pi r \big/ K \cdot c^2 = H^0 \big/ c^2 = M_0$$

Sendo $H^0 = M \cdot c^2$, substituindo, na parte final da equação, teremos:

$$M^0 \cdot c^2 \big/ c^2 = Mc$$

A massa gravitacional activa é igual à massa inerte, que, por sua vez, será igual à massa passiva e define o comprimento da força gravitacional, na qual um campo gravítico actua num corpo[8].

A igualdade dos três tipos de massa é um tratamento matemático na teoria da gravitação de Einstein[9].

Uma simples transformação, para sistemas acelerados de referência, permite a determinação das quantidades do campo, descrevendo os gravitacionais em sistemas acelerados.

De acordo com o princípio da equivalência, estas quantidades poderão darnos uma descrição correcta dos campos permanentes da gravitação, visto que R' surge, em repouso, estando presente um campo gravítico em R'.

Tal julga-se equivalente pela ideia de que R é um referencial admissível, ainda que não exista campo de peso presente.

---

[8] DIRAC, P. M. N. *General Theory of Relativity*, J. Weley and Sons, London, 1975, 25-26.
[9] ROSSER, W. G. *Introduction to Relativity*, Butterworthes, London, 1967, 260-262.

A esta hipótese da equivalência física, completa para referenciais *R′* e *R′*, chama Einstein «princípio da equivalência»[10].

Assim, gravitação e equivalência formam um «todo», como igualdade fenomenológica, para todos os sistemas de referência.

O princípio da equivalência mostra que o movimento acelerado não é absoluto. As forças de inércia, criadas pela aceleração, não podem distinguir-se das forças gravitacionais. Tais forças são equivalentes segundo o movimento e a aceleração relativas.

Todavia, o princípio da equivalência anda ligado ao teorema da igualdade, entre massa inerte e massa gravítica, passando à generalização do princípio da relatividade para referenciais que estão animados de movimento não uniforme.

Segundo esta concepção, chegamos à proporcionalidade entre inércia e gravitação:

[massa inerte] = [massa pesada]

As propriedades do movimento, num referencial não-galilaico, são as mesmas do que num referencial galilaico na presença do campo gravítico,

Para ilustrar a equivalência dos referenciais de Galileu e dos referenciais não-galilaicos, Einstein determinou um observador isolado e fechado na cabina dum ascensor. Concluiu-se que todos os objectos têm a mesma aceleração.

O campo equivalente a um referencial animado de movimento uniformemente acelerado é o mesmo para todo o espaço e tende para infinito[11].

O princípio da equivalência pode enunciar-se da seguinte forma: a inércia e o peso são iguais, [$mi = mg$], no campo gravítico. Assim, se exprime matematicamente:

---

[10] EDDINGTON, A. S. *The Mathematical Theory of Relativity*, At the University Press, Cambrigde, 1958, 145.

[11] HENRIQUES, A. B. «Espaço, tempo e matéria» in: *Colóquio de Ciências*, 4, Lisboa, 1989, 8-17.

$$Mi\,(1)/Mg\,(2) = Mi\,(Pt)/Mg\,(Pt) \bullet \text{ou} \bullet Mi/Mg = 0$$

R. Eœtvœs verificou experimentalmente a lei da equivalência. A sua experiência consistiu em usar um pêndulo suspenso, à superfície da Terra, na latitude de 45°. Sobre o pêndulo exerce-se uma força com valor de *Mg*, orientada na direcção do baricentro terrestre e, também, com força centrífuga:

$$Mi^2 \cdot Rg/\sqrt{2}$$

Mas de tal forma que o factor $i/\sqrt{2}$ aparece como: $\cos 45° R(t)/\sqrt{2}$, sendo a distância perpendicular à referida latitude do pêndulo no eixo de rotação da Terra. Eœtvœs utilizou um instrumento denominado balança de torção.

Segundo a experiência, se *M*(1) não for igual a *M*(2), então a fibra de torção vai actuar sobre a acção das forças centrífugas não isócronas.

A experiência repetiu-se rodando o aparelho e facilitando a determinação do valor zero na balança.

Segundo esta experiência, observou-se:

$$Mi(1) \neq Mi(2)$$

A platina (*Pt*) foi usada como padrão, verificando-se:

$$Mi/Mg = 0$$

Uma experiência realizada em 1964, por Pollkrikkov-Decke, veio confirmar a igualdade das categorias da massa até uma parte para 10^{10}. Zeemann repetiu esta experiência usando isótopos de urânio.

A massa determinada, com um espectógrafo de massa, é a massa inerte. O resultado de Zeemann (1917) mostrou que a energia de ligação do núcleo de Urânio também corresponde a uma massa gravitacional, que possui o mesmo quociente universal para a massa inercial.

A presente situação experimental resume-se nas seguintes conclusões:

1. O valor de θ para um electrão e para um protão, é equivalente ao valor de θ para um neutrão até uma parte por 107;

2. O valor de θ, no desenvolvimento da massa nuclear, associada à energia de ligação nuclear, será igual até a uma parte por 10^5;

3. O valor de θ, para a parte da massa atómica, conjuntamente com a energia de ligação dos electrões orbitais, será igual à unidade até uma parte por 200.

Uma experiência com maior precisão foi realizada por R. Digke (1964), obtendo-se valores diferentes.

Um valor pequeno, para a massa gravítica dos protões, foi definido por R. V. Pound e A. Rebkar. Estes partiram das equações sobre a frequência de protões, medida após a queda:

$$\overline{v} = v\left(1 + 2L/c^2\right)$$

O desvio relativo da frequência será:

$$\Delta v/v = gL/c^2 = \left(10^3\right)\cdot\left(2\cdot 10^3\right)/\left(9\cdot 10^{10}\right)^2 = 2\cdot 10^{-15}$$

Um efeito, extremamente pequeno, foi observado usando uma fonte de raios gama (γ). Pound e Rebka encontraram o seguinte valor:

$$\left(\Delta v\right)/\left(\Delta v\right)_{cat} = 1{,}64 \pm 0{,}20^{12}$$

Porém, muitas foram as confirmações experimentais de tal princípio fundamental da Relatividade Generalizada. A invariância desta relatividade é mais «abs-

[12] EINSTEIN, A. *La Theórie de la Relativité Restreinte et Générale*, Gauthier-Villars, Paris, 1954, 64.

tracta», porque «contravariante». É mais universal, enquanto que a invariância da Relatividade Restrita é particular e «covariante» em termos inerciais.

As leis da física devem ter uma estrutura tal que a sua validade permaneça em sistemas, de referência, animados de qualquer movimento.

A nova extensão expressa-se no enunciado seguinte: seja K um referencial de Galileu, tal como em relação a uma massa infinitamente afastada de outras massas, desloca-se em movimento rectilíneo e uniforme. Será K' um segundo sistema de coordenadas, que tem uma relação a K com movimento de translocação uniformemente acelerado.

Teríamos uma massa suficientemente afastada das outras, animada de movimento acelerado, relativamente a K', sendo a sua aceleração, tanto em grandeza quanto em direcção, independente da sua composição material e do seu estado físico.

Poderá um observador em repouso, relativamente a K', encontrar-se sobre um referencial acelerado? A resposta é negativa.

O referido comportamento das massas move-se livremente em relação a K. O referencial K' não só será animado de movimento acelerado, como também existe um campo de gravitação, no espaço-tempo, originando tal movimento acelerado dos corpos em relação a K[13].

Verificámos, pelo princípio da covariância das leis da física, que a grande generalização, relativamente ao princípio da relatividade restrita, se operará nos graus do movimento, passando do movimento uniforme e rectilíneo para o de translação acelerado. Implica uma remodelação extensiva do sistema de inércia, segundo a lei geral, que não só são válidos em sistemas inerciais, como igualmente os referenciais não inerciais.

Segundo Einstein, todos os referenciais são equivalentes para formular as leis da natureza física. Estas leis são covariantes para as transformações de coordenadas, ou seja, devem ser tais que serão válidas para quaisquer referenciais. A nova

[13] EINSTEIN, A. *The Meaning of Relativity*, second edition, Princeton University Press, New Jersey, 1945, 103-104.

extensão exige que as equações exprimam tais leis, conservando a sua forma num campo gravitacional. Logo:

$$F\left(A, B, \ldots, dA/dx, dB/dx\right) = 0$$

em que A e B são quantidades físicas.

Noutro sistema arbitrário de coordenadas (x'), surge a mesma relação funcional entre as quantidades físicas em x':

$$F\left(A', B', \ldots, dA'/dx^i, dB'/dx^j\right) = 0$$

Estas quantidades determinam as propriedades da Geometria em cada sistema de coordenadas curvilíneas, definindo a métrica do espaço-tempo de Riemann para o campo gravítico.

As equações diferenciais, na sua formulação generalizada covariante, serão:

$$F\left(g_{ik}, R_{jo}, \ldots, dg_{ik}/dx_l; dg_{ik}/dx_i\right) = F\left(g'_{ik}, g'_{jl}, \ldots, dg_{ik}/dx_{1k}; dg_{jl}/dx_l\right)$$

Nas equações gerais das leis da física, as dimensões tensoriais (covariantes, contravariantes e mistas) são as mesmas para todo e qualquer sistema inercial ou não.

Para certas regiões, em que o espaço-tempo é vazio, confina-se o uso de coordenadas lineares de Lorentz. O tensor métrico g_{ik} é a continuação do g_{ik} de Minkowki.

As equações, em dimensões tensoriais contravariantes, por contracção dos índices, passarão a covariantes:

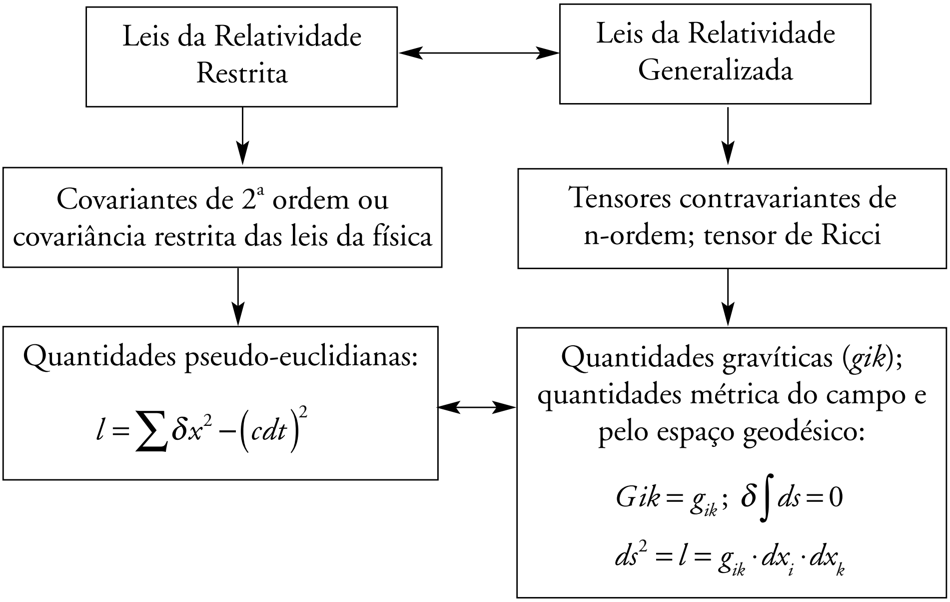
$$F\left(A, B, \ldots, dA/dxi, dB/dxi\right) = F\left(A', B', \ldots, dA'/dxi, dB'/dxj\right)$$

As leis da teoria da relatividade restrita diferem das da Relatividade Generalizada, em dois aspectos:

— quantidades físicas;
— dimensões tensoriais.

Para se obter a representação das leis da física, segundo a Relatividade Generalizada, teremos de generalizar os sistemas de coordenadas pseudo-cartesianas, pelo cálculo tensorial, para traduzir a sua validade segundo a quantidade gravitacional[14].

Sinopticamente, poderemos apresentar as diferenças:



Desta sorte, o princípio de Mach, que está ligado ao princípio da equivalência, determina, pelas massa dos corpos, o campo de gravitação.

Sendo g_{ik} a determinação métrica da geodésica do espaço-tempo, condiciona-se o tensor-energia da matéria.

O princípio de Mach pode enunciar-se da forma seguinte: para que o campo gravítico $\lambda \cdot g_{ik}$ tenha condições necessárias e suficientes, encontra-se implícito o tensor de 2ª ordem da energia-densidade de matéria[15].

[14] ANDERSON, J. *Principles of Relativistic Physics*, Academic Press, New York, 1967, 331-332.
[15] SCHROEDINGER, E. *Space, Time Structure*, At the University Press, Cambrigde, 1934, 84-85.

Galileu demonstrou que todos os objectos caem com a mesma velocidade independentemente do peso.

Newton havia utilizado este conceito na formulação das leis do movimento, sendo a força da gravidade proporcional à massa.

Daqui que a massa desaparece e todos os objectos cairiam à mesma velocidade. Todavia, o génio de Einstein determinou o cerne da questão.

Se a aceleração do elevador, em queda livre, pode anular a força da gravidade, significa que a força e a aceleração são equivalentes.

Imaginemos, segundo o raciocínio de Einstein, um laboratório sem janela que se encontra à superfície da Terra e um físico lá dentro, podendo medir como é que as coisas caem segundo a força da gravidade.

Agora, imaginemos o laboratório a flutuar no espaço. O físico não tem dificuldade em concluir que está em queda livre.

Com efeito, o que sucede se o laboratório for empurrado por uma força «constante», com o mesmo valor que a força da gravidade, à superfície da Terra, cujo sentido é para cima, em termos de disposição, relativamente ao chão e ao tecto do laboratório.

Tudo o que está no interior do laboratório imaginário segue segundo uma força que o mantém para baixo, enquanto o laboratório está a ser acelerado para cima.

Contudo, o físico pode repetir todas as suas experiências e obter os mesmos resultados, quando o laboratório estava estacionário no chão. Não há maneira de determinar se o laboratório está a ser acelerado para cima. A gravidade e a aceleração são «equivalentes»[16].

Como o laboratório está a ser empurrado pelo espaço fora, através duma força constante, o físico instala uns feixes de luz, de tal modo que começa num dos laboratórios e atravessa até ao outro extremo.

[16] LANDAU, L. D.; LIFCHITZ, E. *Theóries des Champs*, traduit du russe, par E. Gloukhian. Editions Mir, Moscow, 1970, 299-325.

A luz demora uma quantidade de tempo definida para atravessar o laboratório. Durante esse tempo, este estará em aceleração para cima, de modo que a parede se desloca um pouco antes de o feixe de luz a ser atingido.

O físico pode medir na parede a distância que o ponto da luz desceu, deduzindo que o seu laboratório está a ser «acelerado». Pode mesmo medir a aceleração, determinando o grau de curvatura do feixe.

É como se houvesse uma maneira de distinguir a gravidade e a aceleração. Recorde-se que a gravidade e a aceleração são equivalentes até prova em contrário. Se o fluxo de luz se encurvar, num sistema de referência, em aceleração, então a teoria será correcta, o fluxo de luz deve-se encurtar pela gravidade, apresentando uma quantidade equivalente.

Einstein desenvolveu estas ideias, transformando-as na Teoria da Relatividade Generalizada, prevendo, pois, que a luz pode ser deflectida pela gravitação.

3. Geometria e Invariante na Relatividade Generalizada

A expressão analítico-geométrica, tendo como instrumentos matemáticos a análise tensorial e a geometria de Riemann, usa-se para a métrica do campo gravítico com o surgiu, em 1915, com Einstein.

Considerando que, em vez do sistema local de características especiais, se adopta como referencial um sistema quadridimensional qualquer, como elemento de linha ou só um par de pontos-acontecimentos, corresponderá, também, um determinado diferencial de coordenadas.

Daqui que os *x*, *y* e *z* serão representáveis por expressões lineares homogéneas.

Se se introduzirem estas expressões:, obteremos então:

$$ds^2 = \sum_{ik} g_{ik} \cdot dx_i \cdot dx_k$$ [17]

[17] SYNGE, J. L. *Relativity: The Special Theory*, second edition, North-Holland, Amsterdam, 1972, 55-59.

Os seus valores poderão depender da orientação e do estado de movimento dos sistemas de coordenadas locais, se admitirem, como definição para o ds^2, uma grandeza associada a pares de pontos-instantes (acontecimentos), considerados no espaço-tempo, independentemente de qualquer escolha particular de coordenadas e determinável por meio da medição da régua e do relógio.

Pela definição que acabámos por determinar para ds^2, poderá passar-se para o caso da teoria da relatividade, sempre que haja condicionamento particular dos g_{ik}, ao estabelecer um sistema de referência, onde os mesmos impliquem valores constantes.

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Porém, a presença de um campo de gravidade aparece-nos associado à variabilidade espacio-temporal dos g_{ik}. A gravidade desempenha, na teoria da relatividade, uma relação com outras forças e particularmente com forças electromagnéticas, visto que as funções —g_{ik}—, que fazem a descrição do campo gravítico, determinam as propriedades métricas do espaço quadridimensional.

A distância (ds) entre dois pontos adjacentes, nas superfícies, corresponde a valores de parâmetros, determinados em coordenadas, apresentando ds^2 a seguinte expressão:

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2;$$
$$ds^2 = -dx_1^2 - dx_2^2 - dx_3^2 + dx_4^2$$

Mais precisamente para S' e S'', virá:

$$-dx_1^2 - dx_2^2 - dx_3^2 + dx_4^2 = -dx_1'^2 - dx_2'^2 - dx_3'^2 + dx_4'^2$$

A distância ds, na formulação quadrática, será:

$$ds^2 = g_{11}\left(dx^1 \cdot dx^1\right) + g_{12}\left(dx^1 \cdot dx^2\right) + g_{22}\left(dx^2 \cdot dx^2\right) + \ldots$$

Os coeficientes tensoriais do campo apresentam os seguintes valores:

$$g_{11} = \left(dF/dx\right)^2 + \left(dG/dx\right)^2 + \left(dH/dx\right)^2;$$
$$g_{12} = g_{21} = dF/dx' \cdot dE/dx^2 + dG/dx^2 + dG/dx^2 + dH/dx^1 \cdot dH/dx^2;$$
$$g_{22} = \left(dF/dx^2\right)^2 + \left(dG/dx^2\right)^2 + \left(dH/dx^2\right)^2$$

A expressão trigonométrica dos ângulos, formados por *m* e *n*, será:

$$\cos\theta = g_{11} \cdot dx^1 \cdot Dx^1 = g_{12} \cdot dx^1 \cdot Dx^2 + g_{21} \cdot dx^2 \cdot Dx^1 + g_{22} \ldots \Big/ \delta s \cdot Ds$$

Se as componentes da linha do elemento são generalizadas, nas suas direcções, por estas coordenadas curvadas, teremos:

$$\left(dx^1\right) = \left(\delta x^1, 0\right); \ \left(\Delta x'\right) = \left(0, dx^2\right); \ \left(\Delta x'\right) = \left(0, dx^2\right);$$
$$\delta s = \left(g_{11}\right)^{1/2} \cdot dx^1; \ \ \Delta s = \left(g_{22}\right)^{1/2} \cdot dx^2$$

A métrica ds^2 é a distância entre dois acontecimentos ou pontos de espaço-tempo.

Para o ângulo dado, seguir-se-á naturalmente:

$$\cos\theta = g_{12} \Big/ \left(g_{11} \cdot g_{22}\right)^{1/2};$$
$$\operatorname{sen}\theta = \left(1 - \cos\theta\right)^{1/2} = \left(g / g_{11} \cdot g_{22}\right)^{1/2}$$

O valor determinante, para estas componentes, será:

$$g = g_{11} \cdot g_{22} - g_{22} = \begin{vmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{vmatrix} \cdot g_{ik}$$

Assim, *g* é o determinante no esquema dos números tensoriais: g_{ik}[18].

[18] BERGMANN, R. G. *Introduction to the theory of relativity*, Prentice Hall, New York, 1946, 161-174.

Todas as quantidades geométricas são expressas em coordenadas únicas, sem referência às variáveis do espaço tridimensional, no qual a superfície é suposta para se interpretar. Se $g_{ik} = g_{ki}$, *ki* origina funções de coordenadas x_{ki}.

As linhas de elemento serão:

$$ds^2 = g_{ik} \cdot dx_i \cdot dx_k$$

No desenvolvimento do determinante, teremos:

$$ds^2 = g_{11} \cdot dx_{11}^2 + g_{22} \cdot dx_{22}^2 + \ldots + g_{34} \cdot dx_3 \cdot dx_4 = \sum g_{ik} \cdot dx_i \cdot dx_k$$

Os coeficientes g_{ik} são funções de coordenadas e dependem das transformações seguintes:

$$X_1 = f_i\left(x_{11}; x_{21}; x_{31}; x_{41}\right);$$
$$X_4 = r_4\left(x_1; x_2; x_3; x_4\right)$$

Pela sua formulação geral, podemos escrever a quadrática de x^0:

$$g_{ik} = -\sum\left(\delta f_i / \delta x_m\right) \cdot \left(\delta f_i / \delta x_k\right);$$
$$dX_1 = \sum \delta f_i / \delta x_i$$

Os coeficientes do determinante g_{ik} serão:

$$\begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} & g_{14} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} & g_{24} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} & g_{34} \\ g_{41} & g_{42} & g_{43} & g_{44} \end{bmatrix}$$

Os g_{ik} são funções de coordenadas especiais (x_1^2, x_2^2, x_3^2) e da coordenada temporal (x^0), sendo dezasseis potenciais, uma vez que, obtendo $g_{ik} = g_{ki}$, poderemos reduzir a dez potenciais. Estes são elementos fundamentais do campo:

$$G_{ik} = \lambda \cdot g_{ik}$$ [19]

O ds^2 é independente do sistema de coordenadas como «invariante» ou como tensor de ordem zero. A equação quadrática:

$$ds^2 = g_{ik} \cdot \left(dx\right)^i \cdot \left(dx\right)^k,$$

mostra que g_{ik} $(dx)^2$ é multiplicada por um vector «contravariante» determinado $(dx)^k$ ou «tensor nulo». Logo, g_{ik} $(dx)^k$ é um vector e g_{ik} é um tensor. Einstein chamou-lhe «tensor fundamental»[20].

Todavia, o estudo dos campos de gravitação exige o exame dos fenómenos em referenciais arbitrários, desenvolvendo-se a Geometria a 4-dimensões (geometria de Riemann) sob forma válida para as coordenadas x^0, x^1, x^2, x^3 e noutras x'^0, x'^1, x'^2, x'^3 surgirá, então:

$$x^i = r^i (x'^0, x'^1, x'^2, x'^3)$$

Os diferenciais destas coordenadas transformam-se segundo as fórmulas seguintes:

$$dx^i = dx^i / \delta x^{ik} \cdot \delta x^{ik}$$

Chamamos «quadrivector contravariante» ao conjunto de quatro quantidades, que se transformam segundo a relação:

$$A^i = \delta x^i / \delta x^k \cdot \delta A^k$$

A fórmula seguinte designa-se como «vector covariante»:

$$A^i = \delta x^k / \delta x^i \cdot A_k$$

[19] *Idem. The Meaning of Relativity*, second edition, Princeton University Press, New Jersey, 1945, 75-76.

[20] SYNGE, J. L. *Ibidem*, 80-88.

As regras, segundo as quais se mantém «invariantes» os g_{ik}, são por multiplicação ou contracção dos quadrivectores, substituindo-se em coordenadas curvilíneas:

$$dx^i = \delta x^i / \delta x^k \cdot \delta x^{ik}$$

Chamamos, pois, «quadrivector contravariante» ao conjunto de quatro quantidades, que se transformam segundo a relação:

$$A^i = Ax^i / \delta x^k \cdot A_k$$

As regras, pelas quais surgem os invariantes g_{ik}, obtém-se por multiplicação ou contracção dos quadrivectores, substituindo-se as coordenadas curvilíneas. Para as leis de transformação de coordenadas tensoriais, a «quadrática» e demais teoremas mantêm-se invariáveis e constantes para qualquer mudança de coordenadas gaussianas[21].

O quadrado do elemento dos comprimentos, em coordenadas curvilíneas, é uma «forma quadrática» dos diferenciais $(dx)^i$, ou seja:

$$ds^2 = g_{ik} \cdot dx_i \cdot dx_k$$

Os tensores g_{ik} são simétricos para os índices i e k em $g_{ik} = g_{ki}$ pelo tensor contravariante e para dx_i e dx_k, por forma escalar. Os g_{ik} constituem um «tensor métrico».

As únicas quantidades susceptívas de se ligarem umas às outras são as componentes do «tensor métrico». Esta ligação é dada pela seguinte fórmula:

$$A^i = g^{ik} \cdot A_{ki}$$

[21] BIRKHOFF, G. D. *Relativity and Modern Physic*, Harvard University Press, Cambridge, 1925, 225-230.

Para um sistema galilaico, o tensor métrico tem, por componentes, os valores definidos no determinante seguinte:

$$g_{ik} = g^{ik} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Assim, a adaptação dum tensor físico opera-se à custa dum tensor métrico.

A Relatividade Generalizada está constituída segundo o cálculo tensorial, em coordenadas gaussianas, por meio de uma Geometria não-euclidiana. Nas leis do campo gravítico, não há solução para este sistema de 10 equações diferenciais de 2ª ordem. Os valores dos potenciais g_{ik} são calculados por meio dos coeficientes da métrica ds^2 [22].

4. Leis Gerais do Campo Gravítico

A simetria e a homogeneidade da lei do campo gravítico não são propriedades do mundo externo, mas antes uma qualidade interna do mesmo campo[23].

Na verdade, as equações fundamentais do campo exprimem-se em formas diferenciais, de derivadas parciais de 2ª ordem, que limitam os potenciais da gravitação g_{ik}, mediante duas condições:

$$R_{ik} - 1/2\, g_{ik} \cdot R = Q_{ik} \quad \rightarrow \quad \text{interno}$$
$$R_{ik} - 1/2\, g_{ik} \cdot R = 0 \quad \rightarrow \quad \text{externo}$$

Fazendo uma substituição, surgirá a equação:

$$dg = g \cdot g^{ik} \cdot g_{ik} = -g \cdot g_{ik} \cdot dg^{ik}$$

[22] EINSTEIN, A. *Ibidem*, 79-80.
[23] SOURIAN, D. *Géométrie et Relativité*, Hermann, Paris, 1964, 338.

Daqui, então, seguir-se-á:

$$\delta\sqrt{-g} = -1/2 \cdot \sqrt{-g} \cdot \delta g = -1/2 \cdot \sqrt{-g} \cdot g_{ik} \cdot \delta g^{ik}$$

Refere-se, então:

$$\delta \int R \cdot \sqrt{-g} \cdot d\Omega = \int \left(R_{ik} - 1/2\, g_{ik} \cdot R \right) \cdot \delta g_{ik} \cdot \sqrt{-g}$$

Para calcular δR_{ik}, notaremos que as quantidades não constituem um tensor. As suas variações $\delta\gamma kl^i$ constituem um «tensor»[24].

Com efeito, $\gamma il^k \cdot A_k \cdot dk^i$ é uma quantidade, na qual varia um vector no transporte paralelo dum ponto para outro.

Entretanto, no ponto dado, $\gamma il^k = 0$, servimo-nos da expressão:

$$R_{ik} = d\gamma^l_{ik} \,/\, dx^i = d\gamma^l_{ik} \,/\, dx^k \cdot \gamma^l_{ik} \cdot \gamma^m_{km} - \gamma^m_{il} \cdot \gamma^l_{km}$$

O número de potenciais gravíticos é de dez, correspondendo a dez equações fundamentais do campo. As suas derivadas estão implicadas nas equações geodésicas, por meio dos símbolos de Christofell-Riemann, definindo o campo de gravitação num sistema de coordenadas gaussianas.

A lei geral do campo gravítico deduz-se a partir do princípio da acção mínima de Maupertuis:

$$\delta\left(Sm + Sg\right) = 0$$

A acção da gravitação e da matéria relacionam *per se* os potenciais do campo gravítico: g_{ik}.

[24] MØLLER, C. *The Theory of Relativity*, At the Clarendon Press, Oxford, 1972, 402-407.

Calculando a variação de δg, surgirá então a formulação seguinte:

$$\delta\int R\cdot\sqrt{-g}\cdot d\Omega=\delta\int g^{ik}R_{ik}\cdot\sqrt{g}\cdot\sqrt{g}\cdot d\Omega=$$
$$=\int\left(R_{ik}\sqrt{-g}\cdot\delta g^{ik}+R_{ik}\cdot g^{ik}\cdot\delta\sqrt{g}+g^{ik}\cdot\sqrt{-g}\cdot\delta R_{ik}\right)\cdot d\Omega$$

Mas do tensor de Ricci seguir-se-á:

$$g_{ik}\cdot\gamma R_{ik}=g^{ik}\left[\delta/\delta x^{i},\delta\gamma^{l}_{ik}-\delta/\delta x^{k}\right]$$
$$d\gamma_{ik}=g^{ik}\cdot\delta/\delta x_{i}\cdot\delta\gamma_{ik}=g^{ik}\cdot\delta/\delta x\cdot\delta\gamma_{ik}=\delta w/\delta x_{i}$$

Daqui teremos que:

$$w^{l}=g^{ik}\cdot\delta\gamma_{ik}\cdot g^{il}\cdot\delta\gamma_{ik}$$

Assim, w^l é um vector escrito por relações métricas em sistemas de coordenadas:

$$g^{ik}\cdot\delta R_{ik}=i/\sqrt{-g}\cdot\delta/\delta x^{l}\left(\sqrt{-g}\cdot w^{il}\right)$$

Com efeito, substituindo $\delta w^k/\delta\mu^l$ por w^l_i e utilizando

$$A^{i}_{i}=1/\sqrt{-g}\cdot\delta\left(\sqrt{-g}\cdot A^{i}/\delta x^{i}\right)$$

segundo o integral da segunda dimensão, determinamos que:

$$\delta\int R\cdot\sqrt{g}\cdot d\Omega=\int\left(R_{ik}-1/2\cdot g_{ik}\cdot R\right)$$
$$\delta\cdot g^{ik}-\sqrt{g}\cdot d\Omega+\int g^{ik}\cdot\delta R_{ik}\cdot\sqrt{-g}\cdot d\Omega$$

Daqui, auferimos o seguinte valor:

$$\int g^{ik}\cdot\delta R_{ik}\cdot\sqrt{-g}\cdot d\Omega=\int\delta\sqrt{-g}\cdot w^{l}/2x^{l}\cdot d\Omega$$ [25]

[25] BERGMANN, P. G. *Ibidem*, 212-220.

A variação de *dS′* será:

$$\delta S'g = -c^3/16\pi\cdot k\int\left(R_{ik} - 1/2\, g_{ik}\cdot R\right)\cdot\delta\cdot g^{ik}\cdot\sqrt{-g}\cdot d\Omega$$

Partindo da equação da acção do campo:

$$S = -c^3/16\pi k\int G\cdot\sqrt{-g}\cdot d\Omega,$$

obteremos:

$$\delta Sg = -c^3/16\pi k\int\left[\delta\left(G\cdot\sqrt{-g}\right)\Big/\delta g^{ik}\cdot\delta\Big/\delta x^l\cdot\delta\left(G\cdot\sqrt{-g}\right)\Big/\delta g^{ik}/\delta x\right]\cdot\delta g^{ik}\cdot d\Omega$$

Comparando com as anteriores equações, surgirá a seguinte relação:

$$R_{ik} - 1/2\, g_{ik}\cdot R = 1\Big/\sqrt{-g}\left[\delta\left(G\sqrt{-g}\right)\Big/\delta g^{ik}\cdot\delta\Big/\delta x^l\cdot\delta\left(G\sqrt{-g}\right)\Big/\delta g^{ik}/\delta x\right]$$

Para a variação da matéria, escreveremos, em virtude de:

$$\delta S = 1/2\cdot c\int T_{ik}\cdot\delta\cdot g^{ik}\cdot\sqrt{-g}\cdot d\Omega = -1/2\cdot c\int T^{ik}\cdot\delta g_{ik}\cdot\sqrt{g}\cdot d\Omega$$

a seguinte equação tensorial:

$$S_m = 1/2c\int T_{ik}\cdot\delta g^{ik}\cdot\sqrt{-g}\cdot d\Omega$$

Será T_{ik} o «tensor da massa-energia» da matéria. Atendendo ao princípio de Maupertuis (princípio da mínima acção), chegaremos a:

$$-c^3/16\pi\cdot k\int\left(R_{ik} - 1/2\, R_i - 8\pi k/c^4\cdot T_{ik}\right)\delta\cdot g^{ik}\cdot\sqrt{-g}\cdot d\Omega = 0$$

Mas, aplicando o método da redução para a solução da anterior equação ou para o método da substituição, virá:

$$R_{ik} - 1/2\, g_{ik}\cdot R = 8\pi k/c^4\cdot T_{ik}$$

Aqui, temos a equação tensorial que define metricamente o «campo gravítico»[26].

Para o caso de componentes mistas, apresentamos o seguinte corolário:

$$R_{ik} - 1/2\, d_i^k \cdot R = 8\pi k / c^4 \cdot T^k$$

O complexo formado por este corolário significa o conjunto das equações do campo de gravitação.

Porém, contrariando os índices dos tensores mistos, obteremos o corolário:

$$R = -8\pi k / c^4 \cdot T$$

Poderemos transpor as equações do campo da forma seguinte:

$$R_{ik} = 8\pi k / c^4 \left(T^{ik} - 1/2\, g_{ik} \cdot T \right)$$

Aqui se expressa o lema da reciprocidade, visto que estas equações não são lineares, resultando que os princípios da sobreposição não são válidos para os campos gravitacionais, por oposição ao que acontece com o campo electromagnético. Mas, pela operação de passagem ao limite, nos índices dos tensores de curvatura, pelos potenciais gravíticos, obteremos: $R_{ik} = 0$ e $T^{ik} = 0$, definidos como potenciais de Newton[27].

Para determinar a distribuição e o movimento da matéria, no caso do campo gravítico, é necessário associar, às equações de Einstein, a equação do estado da matéria[28].

Segundo Einstein, para um sistema qualquer, a massa total do mesmo, bem como o efeito gravítico, devem depender da energia total.

---

26 LANDAU, L. D.; LIFCHITZ, E. *Ibidem*, 373-378; 416-422.

27 EINSTEIN, A. *Ibidem*, 103-107.

28 MEYERS *et alii* R. A. «General Relativity» in: *Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics*, Academic Press, London, 1989, 535.

As equações do campo gravítico tiveram grandes implicações desde a ciência até à filosofia. Mas, atingem, no aspecto matemático, grande influência nos modelos cosmológicos, designados como «relativistas», tendo como base o paradigma do «Big-Bang».

5. Testes Observacionais da Relatividade Geral

Todos os testes realizados, relativamente à Relatividade, além de serem de carácter observacional, surgem como testes confirmativos da verificabilidade experimental da Relatividade Generalizada. Desta sorte, passamos ao estudo de várias experiências, que confirmaram esta teoria, definindo o valor indutivo no determinismo causal dos fenómenos físicos, desde o aspecto actual ao potencial.

5.1. «Red-Shift» gravitacional

Segundo a Relatividade Generalizada, a velocidade aparente, na qual correm os relógios, é afectada pela presença de um campo gravítico. Este possui contrapartida na Relatividade Especial, tratando-se de um efeito cinemático interno ao relógio.

O valor do «Red-Shift» é facilmente calculado no caso de um campo gravitacional estático e para dois relógios que se encontram, em repouso, neste campo.

Supomos que o relógio-emissor transmite ondas luminosas, cujas frequências são as mesmas que a própria frequência.

Um relógio receptor, que é de idêntica construção à do relógio emissor, isto é, que possui a mesma dinâmica interna, é utilizado para medir a frequência de radiação recebida. Então, poderá determinar-se que:

$$Z = \left(v_{rec} - v_{em}\right) / v_{em} = 1/c^2 \cdot \left(\phi_{em} - \phi_{rec}\right)$$

São, pois, ϕ_{em} e ϕ_{rec} os «potenciais» gravíticos nas localizações do emissor e do receptor, respectivamente[29].

Se $\phi_{em} < \phi_{rec}$, então Z será negativo, surgindo a luz emitida, como «red-shift». Este efeito, caracterizar-se-ia ao ir de um emissor para um receptor, por um fotão, ganhando energia total. O emissor ou o receptor movem-se relativamente ao campo-padrão, onde o valor de $Z = (1/c^2) \cdot (\phi_e - \phi_r)$ poderá ser corrigido ao considerar o registo do Efeito Doppler, produzido por tal movimento.

A primeira tentativa, para observar o «red-shift» gravitacional, observa-se nas linhas espectrais do Sol e em anãs brancas conhecidas.

Para o Sol, o valor será $Z = -2{,}12 \cdot 10^6$. Mas, no caso das anãs brancas, obtêm-se valores tão distantes, quanto 10^{-10} do tempo[30].

O primeiro teste, para predição do «red-shift», realizou-se numa série de experiências terrestres por Pound e Rebika (1960), usando o efeito de Moessbauer. Neste caso, o potencial gravitacional é considerado igual a g_3, onde g é a aceleração local, devido à gravidade e Z'. Será o valor relativamente ao nível fundamental, surgindo a equação $Z = 1/c^2 \cdot (\phi_{em} - \phi_r)$. Então, o valor será de $2{,}6 \cdot 10^{-16}$.

Relativamente a pequenos valores, Pound e Rebka determinaram cálculos, para o «red-shift» iguais a $1{,}05 \pm 0{,}10 \cdot s$.

Tem-se argumentado que o «red-shift» não se sustenta como elemento válido da Relatividade Generalizada, mas, unicamente, na validade do princípio da equivalência.

Se se assume que o campo gravitacional da Terra é uniforme, separando o emissor do receptor, na experiência de Pound – Rebka, então um resultado poderá ser calculado[31].

29 *Ibidem*, 535-536.
30 *Ibidem*, 535.
31 *Ibidem*, 536-537.

A derivação da equação:

$$Z = 1/c^2\left(\phi_{em} - \phi_{rec}\right);$$
$$d^2x^l/d\lambda^2 + \left[{i^l_k}\right]\left(dx'/d\lambda\right)\cdot\left(dx^k/d\lambda\right) = 0,$$

para um raio luminoso, é consequência das equações do campo:

$$R_{ik} - 1/2\, g_{ik}R + \lambda g_{ik} = k \cdot T_{ik}$$

5.2. Testes no Sistema Solar

É no sistema solar que o campo gravítico surge tão somente, onde os desvios da teoria de Newton se observam. Ao calcular aspectos destes efeitos, asseveramos que as trajectórias dos planetas e da radiação obedecem à equação do campo.

O formalismo pós-newtoniano, parametrizado e desenvolvido por Eddington, e generalizado por Schift, Will *et alteri*, assume uma forma generalizada para alterações pós-newtonianas no campo gravitacional.

Estas correcções são admitidas, dependendo em número de parâmetros desconhecidos, porque se estimam definidas pelo sistema solar.

As razões, para proceder desta forma, residem em tratar a validade de outras teorias da gravidade, comparativamente onde tais parâmetros possuem diferentes valores.

Usamos, pois, dez parâmetros e o primeiro pode ser eliminado, se se requere que as equações do movimento sejam dependentes do campo gravítico.

Segundo a versão de Hillings, usamos a abreviatura P.P.N. (parameterized post-newtonian), sendo as componentes do campo gravitacional:

$$g_{00} = 1 - 2U\left[1 - Z_2\left(C_0/C'\right)^2 \cdot P_2\left(\vartheta\right)\right] + 2\beta U^2 + \alpha_1 \cdot U\left(w/c\right);$$
$$g_{ij} = \alpha_1 \cdot U_{wi}/c; \quad g_{ij} = +\left(1 + \alpha\gamma U\right)\delta_{ij}$$

Onde α, β, γ são P.P.N parâmetros e $U = GM_0/rc^2$ é o potencial gravítico de Newton, para o Sol, sendo R_0 e M_0 o raio e a massa da estrela, respectivamente.

Considerando g_{00}, teremos um termo proporcional a J_2 e este apresenta-se como medida dimensional do movimento quadripolar do Sol.

Neste termo, R_2 e o polinomial de Legandre, de 2ª ordem, serão θ o ângulo entre o raio vector do centro do Sol e do normal ao seu equador.

5.3. Curvatura da Luz

Uma das mais espectaculares confirmações da teoria da Relatividade Generalizada ocorreu, em 1919, quando uma expedição chefiada por Eddington anunciou ter observado uma curvatura de luz das estrelas, que passavam relativamente à orbita solar, estando de acordo com a predição da teoria.

O ângulo de curvatura, para a luz, passando à distância do centro do Sol, pode ser calculado, usando a equação do movimento:

$$g_{ik} + dx^i / d\lambda \cdot dx^k / d\lambda = 0$$

Atendendo, com efeito, à equação do campo gravitacional, o ângulo de curvatura será dado por:

$$(1+\gamma) 2G \cdot M / c^2 \cdot d = \alpha$$

A luz, que se deflecte junto ao Sol, terá o seguinte valor: θ = 1,75, quando γ = 1. Em virtude deste valor tão pequeno, é necessário observar estrelas cuja luz passa muito próxima da ângulo do Sol e este pode ser dado durante um eclipse total.

A posição aparente destas estrelas, durante o eclipse, compara-se às suas posições, quando o Sol não está tão longe do campo de visão, em ordem a medir a quantidade de curvatura. Infelizmente, tais medidas são acometidas por números de incerteza. A recente medida ocorreu, no eclipse solar de 30 de Junho de 1973, com o valor seguinte:

$$1/2(1-\gamma)=0{,}3\pm M$$

5.4. *Atraso no Tempo*

A razão para o atraso, no tempo, referiu-se à variação de refracção. Este efeito fora proposto, pela primeira vez, por Shapiro, em 1964, significando um teste à Relatividade Generalizada.

Pode observar-se com um sinal vigoroso de radar, distante de um planeta ou satélite artificial, medindo-se o tempo da viagem.

Sempre que o planeta ou satélite está distante do Sol, a partir da Terra, o efeito é máximo e a quantidade do atraso será:

$$\delta t=2(1+\gamma)\cdot\left(G\cdot M_0/c^2\right)\ln\left(4r_1r_2/d^2\right),$$

onde r_1, r_2 e d são, respectivamente, a distância do Sol ao calculado e a distância de aproximação do sinal ao centro do Sol.

Infelizmente, tais flutuações na pressão da radiação solar produzem uma aceleração aleatória, que pode conduzir a incertezas de cerca de segundos. Finalmente, o satélite Marinus, na órbita de Marte, fora usado como alvo. As mais recentes medidas foram realizadas por Reasenberg *et alteri*, em 1979, apresentando o seguinte valor:

$$(1+\gamma)/2=1{,}000\pm 0{,}0001$$

5.5. *Movimento Planetário*

Muito antes da teoria geral da relatividade ser proposta (1915), conhecia-se uma variação anormal no perihélio do planeta Mercúrio, que não deveria ser considerada com base na teoria de Newton, tendo em conta as perturbações na órbita de Mercúrio.

No fim do último século, Newcomb calculou este avanço residual para um valor de 41″24 ≠ 2″,09 do arco.

De acordo com a equação do campo gravítico, teremos como expressão para o avanço do perihélio, num dado período, em conformidade com as observações, o seguinte valor:

$$\delta\varpi = \left(6\pi G M_0 / c^2 p\right) \cdot \left[1/2 \cdot \left(2+\gamma-\beta\right) + J^2 \left(R_0^2 c^2 / 2 G M_0 p\right)\right],$$

onde $p = a(1 - e^2)$ será o *semilatus rectus* da órbita e o semieixo, sendo maior a sua excentricidade.

Usando os valores mais correntes, para os elementos orbitários e constantes físicas, no Mercúrio e no Sol, obter-se-á a equação seguinte:

$$\theta = \left(1+\gamma\right) 2 G M_0 / c^2 d$$

Todavia, um avanço do perihélio de 42′ · 95λp, de arco de século, será oferecido, teoricamente, por:

$$\lambda p = \left[1/3\left(\left(2+2\gamma\right)-\beta\right)+3M^3\right]_2$$

O valor, medido do avanço do perihélio de Mercúrio, é conhecido para precisão de cerca de 1% das medidas ópticas, feitas sobre os últimos três séculos e cerca de 0,5% das observações de radar, foram feitas nas últimas duas décadas.

Considerando ter-se obtido $1 \cdot 10^{-7}$, determinamos o valor central, devido a uma rotação do Sol, igual à velocidade de superfície, usando uma tal expressão e tendo Schapero apresentado a medida:

$$1/3\left(2+2\gamma-\beta\right) = 1{,}000^3 \pm 0{,}005$$

Assim, é um excelente ajuste relativamente à predição da Relatividade Generalizada.

As observações do «oblateness» solar por Dick e Guldenberg, em 1966, levaram a concluir que J^2 tem actualmente o valor de $2{,}47 \pm 0{,}23 \cdot 10^{-5}$, conduzindo à contribuição de cerca de 4 por século, para o avanço do perihélio.

Se tal se verificar é colocada em dificuldade a predição da Relatividade Generalizada em conformidade com as observações.

Muitos autores estão em discordância com a interpretação das observações realizadas por Dicke e Guldenberg.

Aqueles autores argumentaram que as observações serão igualmente bem explanadas ao assumir um modelo-padrão, com $J^2 \approx 10\mu$, surgindo uma temperatura superficial entre o pólo e o equador.

Recentemente, apresentaram o valor de $J^2 = 6 \cdot 10^{-6}$, como base das medidas de oscilação do Sol.

As medidas presentes na órbita de Mercúrio não são suficientemente características para pararem os efeitos pós-newtonianos, sobre efeitos quadripolares.

A solução deste problema resulta da análise do dador, ordenada para o planeta Marte.

Hillings utilizou dados para analisar a teoria gravitacional não simétrica, consistente com os dados do planeta Mercúrio, sendo o valor de Hill, para J^2, de:

$$J^2 = \left(1{,}7 \pm 2{,}4\right) \cdot 10^{-7}$$

Atendendo aos resultados referidos, é claro que as predições da Relatividade Generalizada se confirmam à volta de 0,1%.

5.6. *Pulsares Binários*

Nova e quase única oportunidade, para testar a Relatividade Generalizada, surgiu com a descoberta das «pulsares binárias» (PSR, 1913 + M_0) por Hillse e Taylor, em 1974, tendo sido laureados com o Nobel da Física.

Considerando uma pulsar, em movimento orbitário, com um período de 7.75 horas, a relevância para a Relatividade Generalizada é de $v^2/c^2 \approx 5 \cdot 10^{-7}$, como factor mais largo do que para o Mercúrio.

Os efeitos relativistas são consideravelmente mais longos do que qualquer um, que tenha sido observado no sistema solar.

O periastro observado avança na quantidade de 4′226″ ± 0,0077 de arco por ano, comparado com do arco de século para o planeta Mercúrio[32].

As pulsares binárias consideraram-se instrumentos necessários para testar efeitos orbitários da Teoria da Relatividade Generalizada[33].

A dispersão de sinais pulsados mostram pequenas mudanças sobre uma órbita, implicando a ausência do denso plasma no sistema.

No caso das pulsares binárias, poderemos usar a Relatividade Generalizada para determinar os parâmetros nas medidas de avanço do periastro e o risco de segunda ordem de Soppler, bem como o «red-shift» gravitacional de sinais emitidos.

Além das pulsares binárias serem um laboratório confirmativo da Relatividade Generalizada, outros dois fenómenos recentes poderão confirmar a Teoria da Relatividade Geral, como as lentes gravitacionais e a interacção de ondas gravíticas[34].

Além destas experiências fundamentais, para a comprovação experimental da Teoria da Relatividade Generalizada, muitas outras verificações contribuíram para a fundamentação desta teoria generalizada.

---

[32] *Ibidem*, 538-539.
[33] *Ibidem*, 540.
[34] SILK, J. *The Big Bang*, W. H. Freeman and Company, New York, 1985, 23-27.

6. Valor Gnosiológico

A Relatividade Generalizada apresenta-se como reflexão sobre a natureza do espaço-tempo, podendo asseverar-se que se refere numa relação triádica: matéria, espaço e tempo. A nova relatividade vai mais longe do que a Relatividade Restrita, porque descreve, tanto a matéria, quanto o espaço-tempo, interrelacionados.

A Relatividade Geral foi elaborada em geometria riemanniana sobre a matéria, o espaço e o tempo.

Assim, a Relatividade Generalizada não abstrai da matéria como o faz a Relatividade Restrita, que considera a conexão espaço-tempo como Geometria autónoma.

Entretanto, a nova teoria sobre a natureza da matéria e do espaço-tempo define adequada visão sobre o Universo, desde os fenómenos gravitacionais.

O Universo apresentar-se-ia como hipercilíndrico, limitado a uma «esfera curva» a três dimensões e o seu eixo refere o tempo linear. As outras duas soluções estatísticas foram as De Sitter e de Minkowsky[35].

Einstein não conhecia a expansão do Universo, porque a descoberta da velocidade de recessão galáctica foi apresentada em 1927. Einstein já tinha sugerido o seu modelo cosmológico[36].

A influência da Relatividade Generalizada, através das equações do campo gravítico, é tão intensa que os novos modelos cosmológicos do Big-Bang são escritos em linguagem relativista.

Einstein inferiu as regras segundo as quais os componentes tensoriais se calculam para um sistema de coordenadas. Não obstante, os tensores do campo e

[35] Carrigan, R. A.; Trower, W. H. (edit.). *Particle Physics in the Cosmos*, W. H. Freeman and Company, New York, 1987, 22-24.

[36] Barrow, J. A.; Silk, J. *A mão esquerda da Criação*, tradução do inglês, Gradiva, Lisboa, 1989, 14-20.

da matéria caracterizam as equações de transformação para as suas componentes, como lineares e homogéneas. A lei da covariância generalizada engloba o domínio dos sistemas inerciais e não inerciais (aceleração). Pelo princípio da relatividade generalizada, as equações conservam a sua forma para quaisquer sistemas.

Gnoseologicamente, as duas formulações concordam com a experiência, quer a Relatividade Generalizada, quer a «gravitação» de Newton, parecendo mais simples a última, uma vez que a Relatividade Generalizada se centraliza na explicação do espaço-tempo curvo, pelo tensor métrico, descrevendo a curvatura da gravitação em dez potenciais, em vez de um.

A natureza gosta de coisas tão simples quanto possível. A navalha de Ockam favoreceria Newton. Com efeito, pela experiência de Eötvös, segundo o mesmo Newton, o tensor métrico do espaço-tempo pode definir-se parcialmente, sendo introduzidos dois campos adicionais.

Segundo o espaço-tempo curvo, a «lâmina de Ockam» cortaria em favor da Relatividade Generalizada.

Só a observação e a experiência decidirão entre a teoria gravitacional de Newton e a gravitação segundo Einstein[37].

O princípio da relatividade generalizada declara que todos os sistemas de referência se consideram como equivalentes para a descrição das leis da física, qualquer que seja o seu estado de movimento.

Logicamente, as acelerações e o espaço absoluto inferir-se-ão da formulação das leis da física.

Desta feita, a igualdade entre a massa pesada (inercial) e a massa gravitacional, confirmada adequadamente pelas experiências de Evoetoes, aparece como acidente do ponto de vista da Física Clássica, sem explicação gnoseológica, porque a origem das duas massas é distinta.

[37] GORDON, A. «A Modification of Einstein's first deduction of the Inertia Energy relationship» in: *European Journal of Physics*, 8, Bristol, 1985, 25-26.

As acelerações absolutas eliminam-se da física, dado que podem ser substituídas por campos gravitacionais apropriados.

Nada existe de absoluto num movimento, que possa ser substituído pela acção de um campo gravitacional. A força gravítica será uma força de inércia, isto é, $m_g \equiv m_i$.

Einstein refere-se a esta relação, num campo gravitacional, com a notável propriedade para comunicar a todos os corpos a mesma aceleração, sendo esta independente da natureza do corpo[38].

A concepção mais expressiva do novo invariante da Relatividade Generalizada, introduzida pela equivalência, reside no facto de, para o campo gravitacional, a aceleração ser a mesma. As forças gravitacionais que se verificam, quando estamos num laboratório, em queda livre, não são mais do que uma consequência da curvatura do espaço-tempo.

A ausência do anulamento da gravidade foi tão significativa que Einstein o elevou à categoria de postulado, a que denominou princípio da equivalência. Porém, a equivalência surge da ideia de que a vida num laboratório em queda livre era equivalente à vida, sem gravidade, e daqui se concluir pelo espaço-tempo curvo.

O princípio da equivalência diz-nos que o espaço-tempo é «curvo», mas não nos diz «quanto», apenas dá-nos o aspecto «qualitativo» do fenómeno.

Todavia, este limite será imposto ao referido princípio, dado que a Relatividade Generalizada forma um conjunto de equações, que permitem calcular *quanta* curvatura espacio-temporal é gerada pela matéria[39].

Einstein percebeu a importância das consequências que resultam da equivalência entre a massa gravítica e a massa inercial, e, ao compreende-lo, elevou-

---

[38] EINSTEIN, A. *The Meaning of Relativity*, second edition, Princeton University Press, New ~~Jersey, 1945, 1~~03.
[39] EDDINGTON, A. S. *The Mathematical Theory of Relativity*, At the University Press, Cambridge, 1958, 2-4.

o à categoria de princípio fundamental, com vista à elaboração da teoria da gravitação[40]. A lei proferida engloba todos os casos ou fenómenos da experiência.

Os físicos dizem que o princípio da equivalência é valido apenas localmente, uma vez que as trajectórias das esferas de massas: m_1, m_2, m_3 não são rigorosamente paralelas para o elevador com massas no interior.

Aceleração e campo gravitacional não são equivalentes, na ordem ontológica, sendo-o somente no domínio fenomenológico.

O princípio da equivalência fundamenta-se na categoria do *ubi*, dado ser uma correlação extrínseca e fenoménica do domínio gravítico.

Contrastando com a relatividade do movimento uniforme e rectilíneo, o movimento acelerado ou não uniforme goza de estatuto diferente.

Contudo, que a força centrífuga seja sentida como «força gravítica», já é uma orientação, ao ponto de tanto Galileu, quanto Einstein, terem tido plena consciência da grande semelhança entre as forças centrifugas e gravítivas. Porém, o princípio fundamental da relatividade generalizada afirma que as duas forças são equivalentes.

A Relatividade Generalizada pode ser usada como instrumento na compreensão e na dificuldade revelada pelas observações astronómicas.

Também, as «pulsares binárias» confirmaram que as ondas gravitacionais existem e que a descrição relativista da queda orbital através do envio da energia, pelas ondas gravitacionais, está de acordo com os observadores[41].

Agora, estuda-se a tentativa de medição de deflexão da luz pelo Sol, com precisão muito superior à orbita encontrada até ao momento.

---

[40] FOCK, V. *The Theory of Space-Time and Gravitation*, translation from Russian, Pergamon Press, New York, 1959, 173-174.

[41] CURTS, F. (editor). «Pulsars» in: *Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics*, Academic Press, London, 1989, 457-463.

Ao nível do microsegundo do arco, a Relatividade Generalizada prevê uma pequena correcção, de ordem superior à deflexão, que será medida nessas condições. Uma ideia, para tentar realizar esta medição, estava a ser considerada pelo centro de Astrofísica de Harvard, como designativo de «Precesion Optical Interferometry in Space», usando-se uma técnica com comprimento de onda inferior ao da luz visível.

A teoria da relatividade decretou novo esquematismo métrico, quanto às leis da natureza, definindo-se em novo grau de unificação. A nova estrutura covariante, imposta pela Relatividade Generalizada às leis da natureza, expressou-se numa síntese dialéctica do espaço-tempo e da matéria. O grau de certeza da lei geral da gravitação funda-se, objectivamente, no determimismo causal.

A gravitação, segundo Einstein, define-se numa geometria curva. Mas, em sentido ontológico, determina-se como deformação espacio-temporal.

O conflito epistemológico de generalização e limites da Relatividade Generalizada não resulta tanto das divergências, quanto do que existe em comum. As forças da Relatividade Generalizada derivam das propriedades geométricas do espaço-tempo, muito embora em Mecânica Quântica derivem das mudanças dos *quanta*. Aqui, encontramos o valor noético e a definição dos limites da relatividade, pelo facto da «supergravidade» se descrever segundo a Mecânica Quântica, pela Física das Partículas.

Todavia, passamos gnoseologicamente do determinismo relativo das leis causais e observáveis do campo para o indeterminismo do *fieri* da causalidade potencial.

A teoria da relatividade geral e a teoria electromagnética de Maxwell fundamentam-se em «simetrias locais«. A recente unificação das teorias do campo electromagnéticos e de forças fracas são **«gauge theories»**, dado que as quatro forças implicariam uma «simetria local».

Na supergravidade existe uma contribuição adicional da mudança de gravitinos de spin , porque os gravitinos são fermiões, que mudam aos pares, seguindo o princípio de Pauli. A força gravitacional deriva da mudança de gravitões para »spin –2».

A supergravidade é uma extensão da Relatividade Generalizada, que determina as mesmas predições para os testes da teoria de Einstein, tais como: determinação das órbitas planetárias; passagem da radiação junto do Sol; deslocação para o vermelho das linhas espectrais das estrelas; determinação de sinais de radar através de campo solar, etc.

Para a supergravidade, a superssimetria estende-se desde o nível global até ao nível local. Concluímos, pois, que a força e o campo gravítico derivam de uma simetria quebrada, que relaciona partículas com diferenciação de propriedades.

Com efeito, um elemento antipositivo, indispensável ao novo método de Einstein, conhecido por relacional, seria o «salto intuitivo», a partir da experiência que estabeleceria o postulado, pela primeira vez, porque a teoria não pode deduzir-se racionalmente. Só a intuição pode inventar o axioma, como o compreendeu Einstein, originando um «salto dialéctico».

A primeira afirmação tem valor filosófico, podendo-se considerar como aplicação do princípio ontológico: *magis et minus dicuntur de diversis, secundum quod appropinquum diversimo ad aliquid quod maxime est*. A isto deve adicionar-se que, nas perfeições que não podem possuir valor infinito, como é a velocidade do movimento local, o valor máximo deve ser finito. Sendo o máximo absoluto no seu domínio, não pode ser nem acrescentado, nem diminuído, nem de algum modo superado, segundo a fórmula da relatividade verificando-se de acordo com a velocidade da luz.

A negação do tempo universal, enquanto consignador de absolutos, coincide com outro princípio, segundo o qual não existe um tempo único, se não for por meio do movimento.

A teoria da gravitação de Einstein é uma teoria geométrica, segundo a qual os efeitos gravitacionais da massa são vistos como propriedade da geometria não euclidiana, imposta pelo espaço-tempo, como expressão fenomenológica.

Assim, a teoria de Einstein introduz dez potenciais, definidos em dez componentes do tensor métrico: g_{ik}.

Mas, Einstein elaborou um tensor simétrico de 2ª ordem com dez componentes a partir das vinte componentes de Riemann.

Todavia, o tensor de Ricci é relativo à curvatura do espaço-tempo, sendo o tensor da matéria-energia: T_{ik}[42]. A teoria da relatividade generalizada é uma formulação geométrica desse espaço-tempo curvo.

7. Valor Ontológico

Einstein sugeriu diversas verificações experimentais para as distorções do espaço-tempo, sendo uma delas referente à deformação produzida pela «gravidade solar», durante um eclipse total. Encontrando-se o disco solar obstruído pela Lua, é possível detectar ligeira deslocação das estrelas, próximas da órbita do Sol, em relação às posições que ocupam e que constam da cartografia celeste. A luz proveniente destas estrelas passa perto do Sol, sendo desviada pelo campo gravitacional deste.

Tais provas, bem como outras, envolvendo campos gravitacionais, mais intensos das estrelas de neutrões, convenceram os físicos de que a «gravitação» deforma realmente o «espaço-tempo».

A gravidade é uma propriedade ou qualidade primária inerente a todo e qualquer porção de matéria.

Embora, a teoria da gravitação de Newton permaneceu válida durante mais de duzentos anos, viria a ser generalizada pela nova física, que irrompeu no século XX[43].

A teoria de Newton conserva a sua validade, nas aplicações aproximativas, em pequena escala (como seja a navegação aérea espacial) e constitui instrumento adequado à descrição da maior parte dos sistemas astronómicos. Falha, contudo, sempre que os campos gravíticos forem demasiado intensos, como acontece na vizinhança deste, sejam com estrelas de neutrões, sejam com buracos negros.

---

[42] HAWKING, S. W.; ISRAEL, W. *Three Hundred Years of Gravitation*, At the University Press, Cambridge, 1989, 482-484.

[43] PAIS, A. *Subtil é o Senhor*, tradução do inglês, Gradiva, Lisboa, 1993, 325-350.

Segundo Einstein, a gravidade não é uma força, mas surge como manifestação da curvatura ou da distorção do espaço-tempo. A gravidade não obriga os corpos a descreverem trajectórias curvas, sendo os próprios corpos a seguirem o caminho mais fácil num espaço-tempo curvo.

Mas, a curvatura espacio-temporal detecta-se para campos gravíticos não muito intensos. Não obstante, a gravitação, segundo a moderna teoria, é efeito da curvatura métrica do espaço-tempo.

A expressão gravítica de Newton é uma lei de causalidade actual. O efeito colocado à distância implica uma total realização das n-forças que originam o fenómeno.

A gravitação, segundo Newton, traduz-se como «causa», enquanto que para Einstein trata-se de um fenómeno ou efeito físico. Mas esquematicamente surge:

- Gravitação (segundo Newton) $\rightarrow \vec{F}$ (n-causas);
- Gravitação (segundo Einstein) $\rightarrow$ (efeito da curvatura).

Para Newton, entende-se a gravidade como relação causa-efeito, uma vez que resulta da interacção de n-forças, manifestando-se como causalidade actual e eficiente dos fenómenos astronómicos. Aquilo que determina o influxo no *esse* fenomenológico será a interacção entre massas pelas atracções ou repulsões da Terra (m) e do Sol (M).

Porém, além de ser uma causalidade eficiente, caracteriza-se por ser a causalidade actual pelo facto de existir na ordem fenomenológica[44].

O fenómeno gravítico, além de ser uma expressão do determinismo físico, é uma «qualidade primária».

Newton preocupou-se em explicar o fenómeno gravítico, segundo uma orientação ontológica. Se a gravitação, para Newton, é resultante de uma interacção

[44] EINSTEIN, A. *The Meaning of Relativity*, 80-82.

de n-causas, implicada pelo conceito de força, para Einstein, a gravitação será uma interacção de n-efeitos.

Como realidade dinâmica, a gravitação, segundo Newton, é «actual», enquanto que, segundo Einstein, a gravitação é um fenómeno potencial, constituindo-se pela interacção de n-efeitos, como expressão cinemática.

Porém, o efeito é potencial, surgindo *in fieri*. A gravitação não está em acto, mas antes em potência, porque adquire novas formas de perfeição acidental, tratando-se de uma força fraca. A gravitação determina um grau de perfeição acidental por se tratar de uma propriedade métrica. Logo, a gravitação passou de causa a efeito, porque, segundo Einstein, é efeito cinemático resultando da métrica curvada.

O fundamento da gravitação é a própria curvatura do espaço-tempo, causada pela densidade de distribuição da massa-energia. A experiência mostra que as propriedades e estrutura do espaço-tempo se relacionam com a presença da matéria-energia.

Tais fenómenos são manifestação da deformação existente na presença de matéria. Se se submete a lei determinada por Einstein, então referimos a essência e a natureza do fenómeno gravítico pela equação do campo:

$$\begin{array}{ccc} \underbrace{R_{ik} - 1/2 \cdot g_{ik} \cdot R}_{\substack{\text{Curvatura métrica do} \\ \text{espaço-tempo ou} \\ \text{acontecimiento curvado}}} & \equiv & \underbrace{8\pi K / c^4 \cdot T_{ik}}_{\substack{\text{Distribuição da} \\ \text{densidade de matéria}}} \\ \downarrow & & \downarrow \\ \text{«efeito»} & \longleftarrow & \text{«causa»} \end{array}$$

A lei geral do campo gravítico, como enunciado sintético ou progressivo *a posteriori* (universal e transcendental), exprime, ontologicamente, a causalidade formal.

Com efeito, a gravitação, como fenómeno real, é um efeito ou resultante da curvatura do espaço-tempo. Contudo, no segundo membro, surge a causa do campo gravítico. Formalmente, a «gravitação» traduz-se no primeiro membro da equação.

A gravitação é um efeito de densidade da massa-energia curvada espacio-temporalmente. Na verdade, a gravitação é efeito da estrutura curvada do Universo.

Mas, a lei geral indica uma causalidade potencial, *in fieri*, porque o fenómeno da gravitação está a evoluir somente na medida em que a massa-energia adquire novas formas de curvatura (forma de perfeição acidental), tal como é ditado pela essência do invariante absoluto da Relatividade Generalizada:

$$ds^2 = g_{ik} \cdot dx_i \cdot dx_k$$ [45]

A gravitação manifesta-se como influxo da interacção de duas massas. Tal interacção é formada por uma força que coloca um efeito à distância, requerendo-se uma velocidade infinita para a propagação dessas forças. Daqui resulta que a gravitação surge como efeito de *n*-forças:

$$\vec{F} = -G \cdot \frac{M \cdot m}{r^2} \cdot \vec{r}$$

«causa»•→ •«efeito»•

A equação de Einstein determina a curvatura geométrica do espaço-tempo a partir da densidade de matéria. Mas, esta interpretação é análoga a outra que refere a distribuição da matéria no espaço-tempo, causando a curvatura. Tal interpretação será mais importante, provocando a matéria curvada uma geometria do espaço-tempo.

A equação do campo, no aspecto gnoseológico, não se traduz *ipso facto* com qualquer geometria do espaço-tempo, nem com qualquer distribuição da matéria[46].

[45] MATVEEV, A. N. *Mechanics and Theory of Relativity*, Mir Publishers, Moscow, 1989, 301-303.
[46] GEROCH, R. *Relatividade Geral de A a Z*, tradução do inglês, Editorial Presença, Lisboa, 1991, 39-45.

O adágio ontológico —*actus et potentia sunt in eodem genere*— enquadra-se, na teoria de Einstein, porque se o acto pertence à ordem acidental, então a potência pertence a essa ordem.

Este é o princípio segundo o qual a potência se encontra ordenado ao acto. Se o acto é da ordem substancial, também a potência é ontologicamente.

Aplicando virá:

$$\begin{tikzcd} \left(\begin{array}{c}\text{Distribuição de}\\ \text{matéria}\end{array}\right) \arrow[r] \arrow[d] & \left(\begin{array}{c}\text{Curvatura do}\\ \text{espaço-tempo}\end{array}\right) \arrow[d] \\ \text{(acto)} \arrow[r] & \text{(potencia)} \end{tikzcd}$$

Predicamentalmente, a gravitação fundamenta-se no correlação primária da *quantitas et qualitas*, como se apresenta ontologicamente pela equação do campo gravítico:

$$\underbrace{R_{ik} - 1/2 \cdot g_{ik} \cdot R}_{\textit{Quantitas et qualitas}} \equiv \underbrace{8\pi K/c^4 \cdot T_{ik}}_{\textit{Qualitas}}$$

Os tensores definem a direcção e sentido das geodésicas, traduzindo formalmente a *qualitas* do fenómeno gravítico, como indicadores da curvatura do espaço-tempo, auferindo-se pela determinação dos g_{ik}.

A grandeza R, orientadora do parâmetro escalar, induz a existência dos potenciais clássicos, salientando a quantidade. A gravitação fundamenta-se, também, na relação diádica e secundária: «*actio-patio*». O fenómeno gravítico aufere-se como acção e como paixão, devido à curvatura do espaço-tempo:

$$\underbrace{R_{ik} - 1/2 \cdot g_{ik} \cdot R}_{\textit{patio}} \equiv \underbrace{8\pi K/c^4 \cdot T_{ik}}_{\textit{actio}}$$

O princípio —*actio est in passo*— induz que toda a acção surge no efeito geométrico, que sofre uma modificação da curvatura não linear para o espaço-tempo.

A novidade constitui a própria deformação espacio-temporal, que é expressa na sua densidade.

O tensor T_{ik}, ao implicar esta nova forma de perfeição fenoménica, dá origem à deformação espacio-temporal, que é a gravitação segundo Einstein.

Assim, a «gravitação» existe como qualidade primária dos fenómenos físicos.

Resumidamente, a gravitação torna-se efeito cinemático, como fenómeno independente da causa, porque é resultante da curvatura espacio-temporal[47].

8. Conclusão

A teoria da gravitação evoluiu, desde Newton, como leitura ontológica, explicada pelo princípio de causalidade actual, para um discurso fenomenológico com Einstein.

O novo discurso, sobre a gravitação, segundo a semântica lógica, determinou uma orientação isomórfica perante a concepção newtoniana. Einstein, ao analisar o fenómeno gravítico, faz uma descrição do que «aparece» no espaço-tempo curvado, como «efeito». Logo, segundo a perspectiva einsteiniana, a gravitação surge como fenómeno consequente, enquanto que, para Newton, é uma entidade antecedente. Ontologicamente, o fenómeno gravítico, segundo Einstein, rege-se pela causalidade potencial.

Assim, Einstein deu um novo sentido à teoria da gravitação, desde o aspecto físico até ao domínio filosófico.

A causa do fenómeno gravítico não se encontra na força, mas, antes, encontra-se na distorção da massa-energia, que permite a deformação ou a curvatura do espaço-tempo.

[47] HAWKING, S. W. *Breve História do Tempo*, tradução do inglês, Gradiva, Lisboa, 1988, 117-139.

Porém, gnoseologicamente, existe uma complementaridade entre as noções de «gravitação», sendo a mais geral e universal enumerada por Einstein, porque a equação de Newton se encontra englobada na formulação gravítica moderna, expressa pelo cálculo tensorial.

Recibido: 27/01/2009
Aceptado: 10/02/2009