

Significado Ontológico da Gravitação segundo Einstein: entre a métrica e a filosofia

Ramiro Délio Borges de Meneses

**Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Saúde do Norte – Gandra e
Famalicão – PORTUGAL**

Introdução

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

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 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.²

A relatividade generalizada afirma que a constante de gravitação é verdadeiramente uma “constante”.

¹ SANTAVY, I. – “Newton’s first law”, in: *European Journal of Physics*, 7 Bristol, 1986, 133.

² NEWTON, I. – *Principia della Filosofia Naturale*, a cura di A Pala, Unione Tipografico Editrice, Torino, s/d, 67.

Uma das experiências fundamentais, para interpretar os fenómenos gravíticos, fora apresentada por Eötvös, segundo a qual o fio de uma barra não está pendurado exactamente na vertical, devido à força centrífuga, 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 e 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:

$$G \cdot m \cdot m' / r^2 \cdot x' / r ;$$

$$G \cdot m \cdot m' / r^2 \cdot y' / r ;$$

$$G \cdot m \cdot m' / r^2 \cdot z' / r .$$

$$F = -grad(k \cdot m \cdot m' / r) = -grad \cdot S .^3$$

A força, que actua no campo com massa m , é um gradiente negativo do potencial gravitacional $(Gk, \lambda k)$.

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

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

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

³ *Idem, Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, Fromman-Verlag, Stuttgart, 1964, 120.

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 conjugação uniforme do espaço-tempo.

Para Newton, o fenómeno gravítico resulta do influxo interactivo de dois ou n-corpos, como se assevera no próprio texto *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*.⁴

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:

$$F = G \cdot m \cdot M / r^2 .$$

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

1 – Inícios da Gravitação : de Newton a Einstein

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.

⁴ *Idem, Ibidem*, 120-122.

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 m 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 \vec{g} no 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:

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

$$\vec{E} = \varepsilon^2 \cdot \vec{r} / \varepsilon \cdot \vec{r}^3. ^5$$

Daqui se conclui que a aceleração de um sistema de pontos materiais ($\sum P_i m_i$) ,no campo gravitacional, é independente das duas massas ($m \cdot g_i; m_i$) para as velocidades:

$$(\text{força}) = (\text{massa inerte}) \cdot (\text{aceleração})$$

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

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

⁵ WEYL, H – *Espace, Temps et Matière, leçons sur la relativité générale*, traduites sur la 4^a editions allemand, Librairie Scientifique, Paris, 1922, 197.

$$[\text{força}] = [\text{massa pesada}] \cdot [\text{intensidade do campo gravítico}]$$

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:

$$g_{ik} = (\varepsilon_1 + \alpha/r) \cdot \delta_{ik} + \delta_2 + \delta_3;$$

$$g_{ik} = (1 + 2\alpha/r) + \delta_2 + \delta_3;$$

$$g_{ik} = (\varepsilon_1 - \alpha/r) \cdot \delta_{ik} + \delta_2 + \delta_3.$$

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

$$M = M_0/\sqrt{1-v^2/c^2}; M_0 = M_0/c^2.$$

Teremos:

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

Daqui se aufere que:

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

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

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

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.⁶

A igualdade dos três tipos de massa é um tratamento matemático na teoria da gravitação de Einstein.⁷

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 dar-nos 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.

A esta hipótese da equivalência física, completada para referenciais R' e R'' , chama Einstein “princípio da equivalência”.⁸

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.

⁶ 8 - DIRAC, P.M.N. – *General Theory of Relativity*, J. Weley and Sons, London, 1975, 25-26.

⁷ ROSSER, W.G. – *Introduction to Relativity*, Butterworthes, London, 1967, 260-262.

⁸ EDDINGTON, A. S. – *The Mathematical Theory of Relativity*, At the University Press, Cambrigde, 1958, 145.

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:

$$[\text{massa inerte}] = [\text{massa pesada}]$$

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.⁹

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:

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

Eoetvoes 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:

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

⁹ HENRIQUES, A. B. – “Espaço, tempo e matéria” in: *Colóquio de Ciências*, 4, Lisboa, 1989, 8-17.

Mas, de tal forma que o factor $i/\sqrt{2}$ aparece como: $\cos 45^\circ R(t)/\sqrt{2}$, sendo a distância perpendicular à referida latitude do pêndulo no eixo de rotação da Terra. Eötvös 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:

$$M_i(1) \neq M_i(2).$$

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

$$M_i/M_g = 0.$$

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 atômica, 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:

$$\bar{\nu} = \nu(1 + 2L/c^2).$$

O desvio relativo da frequência será:

$$\Delta\nu/\nu = gL/c^2 = (10^3) \cdot (2 \cdot 10^3) / (9 \cdot 10^{10})^2 = 2 \cdot 10^{-15}.$$

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

$$(\Delta\nu)/(\Delta\nu)_{cat} = 1,64 \pm 0,20. \text{ }^{10}$$

Porém, muitas foram as confirmações experimentais de tal princípio fundamental da Relatividade Generalizada. A invariância desta relatividade é mais “abstracta”, 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

¹⁰ EINSTEIN, A. – *La Théorie de la Relativité Restreinte et Générale*, Gauthier-Villars, Paris, 1954, 64.

coordenadas, que tem uma relação a K com movimento de translocação uniformemente acelerado.

Teríamos uma massa suficientemente afastada das outras, como massa 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.¹¹

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. Estas são covariantes para transformações de coordenadas, ou seja, devem ser tais que serão válidas para quaisquer referenciais. A nova extensão exige que as equações expressem tais leis, conservando a sua forma num campo gravitacional. Logo:

$$F(A, B, \dots, dA/dx, dB/dx) = 0, \text{ em que } A \text{ e } B \text{ são quantidades físicas.}$$

¹¹ EINSTEIN, A. – *The Meaning of Relativity*, second edition, Princeton University Press, New Jersey, 1945, 103-104.

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

$$F(A', B', \dots, dA'/dx^i, dB'/dx^j) = 0.$$

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:

$$F(g_{ik}, R_{jo}, \dots, dg_{ik}/dx_l; dg_{ik}/dx_i) = F(g'_{ik}, g'_{jl}, \dots, dg_{ik}/dx_{lk}; dg_{jl}/dx_l).$$

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} do Minkowski.

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

$$F(A, B, \dots, dA/dx_i, dB/dx_i) = F(A', B', \dots, dA'/dx_i, dB'/dx_i).$$

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.¹²

Sendo g_{ik} a determinação métrica da geodésica do espaço-tempo, condiciona-se pelo 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 misto de 2ª ordem da energia-densidade de matéria.¹³

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 caíram 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.

¹² ANDERSON, J. – *Principles of Relativistic Physics*, Academic Press, New York, 1967, 331-332.

¹³ SCHROEDINGER, E. – *Space, Time Structure*, At the University Press, Cambridge, 1934, 84-85.

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”.¹⁴

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.

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, se a teoria for

¹⁴ LANDAU, L. D. ; LIFCHITZ, E – *Theories des Champs*, traduit du russe, par E. Gloukhian. Editions Mir, Moscow, 1970, 299-325.

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.

2 – Invariância e Covariância 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 como surgiu, em 1915, a partir de 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 dx_1, \dots, dx_4 de coordenadas:

$$ds^2 = \sum_{ik} g_{ik} \cdot dx_i \cdot dx_k .^{15}$$

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.

¹⁵ SYNGE, J. L. – *Relativity: The Special Theory*, second edition, North-Holland, Amsterdam, 1972, 55-59.

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

Porém, a presença de um campo de gravidade aparece-nos associado a variabilidade espaço-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:

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

Os coeficientes tensoriais do campo apresentam os seguintes valores:

$$g_{11} = (dF/dx)^2 + (dG/dx)^2 + (dH/dx)^2 ;$$

$$g_{12} = g_{21} = dF/dx' \cdot dE/dx^2 + dG/dx^2 + dG/dx^2 + dH/dx^1 \cdot dH/dx^2 ;$$

$$g_{22} = (dF/dx^2)^2 + (dG/dx^2)^2 + (dH/dx^2)^2 .$$

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

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

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

$$\begin{aligned} (dx^1) &= (\delta x^1, 0); & (\Delta x') &= (0, dx^2); & (\Delta x') &= (0, dx^2); \\ \delta s &= (g_{11})^{1/2} \cdot dx^1; & \Delta s &= (g_{22})^{1/2} \cdot dx^2. \end{aligned}$$

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

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

$$\begin{aligned} \cos \theta &= g_{12} / (g_{11} \cdot g_{22})^{1/2}; \\ \text{sen} \theta &= (1 - \cos^2 \theta)^{1/2} = (g / g_{11} \cdot g_{22})^{1/2}. \end{aligned}$$

O valor determinante, para estas componentes, será:

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

Assim, g é o determinante no esquema dos números tensoriais: g_{ik} .¹⁶

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:

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

¹⁶ BERGMANN, R. G – *Introduction to the theory of relativity*, Prentice Hall, New York, 1946, 161-174.

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

$$X_1 = i(x_{11}; x_{21}; x_{31}; x_{41});$$

$$X_4 = r_4(x_1; x_2; x_3; x_4).$$

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

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

$$dX_1 = \sum \delta f_i / \delta x_i.$$

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

$$G_{ik} = \lambda \cdot g_{ik} \cdot^{17}$$

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

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

mostra-nos 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”.¹⁸

¹⁷ *Idem – The Meaning of Relativity*, second edition, Princeton University Press, New Jersey, 1945, 75-76.

¹⁸ SYNGE, J. L. – *Ibidem*, 80-88.

Todavía, 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”:

$$A_i = \delta x^k / \delta x^i \cdot A_k .$$

As regras, segundo as quais se mantêm “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.¹⁹

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 susceptíveis de se ligarem umas às outras são as componentes do “tensor métrico”. Esta ligação é dada pela seguinte fórmula:

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

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, e segundo 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 .²⁰

¹⁹ BIRKHOFF, G. D. – *Relativity and Modern Physic*, Harvard University Press, Cambridge, 1925, 225-230.

²⁰ EINSTEIN, A. – *Ibidem*, 79-80.

3 - 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.²¹

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:

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

$$R_{ik} - 1/2 g_{ik} \cdot R = 0 \rightarrow \text{externo.}$$

Fazendo uma substituição, surgirá a equação:

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

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:

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

Para calcular δR_{ik} , notaremos que as quantidades γ_{ik} não constituem um tensor.

As suas variações $\delta\gamma_{kl}^i$ constituem então um “tensor”.²²

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, $\gamma_{kl}^i = 0$, servimo-nos da expressão:

²¹ SOURIAN, D. – *Géométrie et Relativité*, Hermann, Paris, 1964, 338.

²² MÖLLER, C. – *The Theory of Relativity*, At the Clarendon Press, Oxford, 1972, 402-407

$$R_{ik} = d\gamma_{ik}^l / dx^i = d\gamma_{ik}^l / dx^k \cdot \gamma_{ik}^l \cdot \gamma_{km}^m - \gamma_{il}^m \cdot \gamma_{km}^l \cdot$$

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 Christoffel-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:

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

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

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

$$\begin{aligned} \delta \int R \cdot \sqrt{-g} \cdot d\Omega &= \delta \int g^{ik} R_{ik} \cdot \sqrt{g} \cdot \sqrt{g} \cdot d\Omega = \\ &= \int (R_{ik} \sqrt{-g} \cdot \delta g^{ik} + R_{ik} \cdot g^{ik} \cdot \delta \sqrt{g} + g^{ik} \cdot \sqrt{-g} \cdot \delta R_{ik}) \cdot d\Omega \end{aligned}$$

Mas do tensor de Ricci seguir-se-á:

$$\begin{aligned} g_{ik} \cdot \gamma R_{ik} &= g^{ik} [\delta / \delta x^i, \delta \gamma_{ik}^l - \delta / \delta x^k] \\ d\gamma_{ik} &= g^{ik} \cdot \delta / \delta x_i \cdot \delta \gamma_{ik} = g^{ik} \cdot \delta / \delta x \cdot \delta \gamma_{ik} = \delta w / \delta x_i \cdot \end{aligned}$$

Daqui teremos que:

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

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

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

Com efeito, substituindo $\delta w^k / \delta \mu^l$ por w^l e utilizando $A_i^i = 1/\sqrt{-g} \cdot \delta(\sqrt{-g} \cdot A^i / \delta x^i)$, segundo o integral da segunda dimensão, determinamos que:

$$\begin{aligned} \delta \int R \cdot \sqrt{g} \cdot d\Omega &= \int (R_{ik} - 1/2 \cdot g_{ik} \cdot R); \\ \delta \cdot g^{ik} - \sqrt{g} \cdot d\Omega + \int g^{ik} \cdot \delta R_{ik} \cdot \sqrt{-g} \cdot d\Omega. \end{aligned}$$

Daqui, auferimos o seguinte valor:

$$\int g^{ik} \cdot \delta R_{ik} \cdot \sqrt{-g} \cdot d\Omega = \int \delta \sqrt{-g} \cdot w^l / 2x^l \cdot d\Omega. \text{ }^{23}$$

A variação de dS' será:

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

Partindo da equação da acção do campo:

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

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

Comparando com as anteriores equações, surgirá a seguinte relação:

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

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:

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

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

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

²³ BERGMANN, P. G. – *Ibidem*, 212-220.

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”.²⁴

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:

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

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 da curvatura, pelos potenciais gravíticos, obteremos: $R_{ik} = 0$ e $T^{ik} = 0$, definidos como potenciais de Newton.²⁵

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.²⁶

²⁴ LANDAU, L. D.; LIFCHITZ, E. – *Ibidem*, 373-378; 416-422.

²⁵ EINSTEIN, A. – *Ibidem*, 103-107.

²⁶ MEYERS *et alii*, R. A. – “General Relativity” in: *Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics*, Academic Press, London, 1989, 535.

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

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 sua base o paradigma do “Big-Bang”.

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.²⁷

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.²⁸

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

4. Significado Ontológico da Gravitação

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.

²⁷CARRIGAN ,R.A.;TROWER, W. H. (edit.) – *Particle Physics in the Cosmos*, W. H. Freeman and Company, New York, 1987, 22-24.

²⁸BARROW,J. A.; SILK, J.- *A mão esquerda da Criação*, tradução do inglês, Gradiva, Lisboa, 1989, 14-20.

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.²⁹

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.

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.

²⁹ Pais, A. – *Subtil é o Senhor*, tradução do inglês, Gradiva, Lisboa, 1993, 325-350.

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) → \vec{F} (n-causas);
- Gravitação (segundo Einstein) → 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.³⁰

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 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 accidental, tratando-se de uma força fraca. A gravitação determina um grau de perfeição accidental 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.

³⁰EINSTEIN, A. – *The Meaning of Relativity*, 80-82.

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:

$$\underbrace{R_{ik} - 1/2 \cdot g_{ik} \cdot R}_{\text{Curvatura métrica do espaço-tempo ou acontecimento curvado}} \quad \equiv \quad \underbrace{8\pi K/c^4 \cdot T_{ik}}_{\text{Distribuição da densidade de matéria}}$$

↓
↓
←

“efeito”
“causa”

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 na medida em que a massa-energia adquire novas formas de curvatura (forma de perfeição accidental), tal como é ditado pela essência do invariante da Relatividade Generalizada:

$$ds^2 = g_{ik} \cdot dx_i \cdot dx_k .^{31}$$

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 nova métrica do espaço-tempo.

A equação do campo, no aspecto gnoseológico, não se traduz *ipso facto* por qualquer Geometria do espaço-tempo, nem com qualquer distribuição da matéria.³²

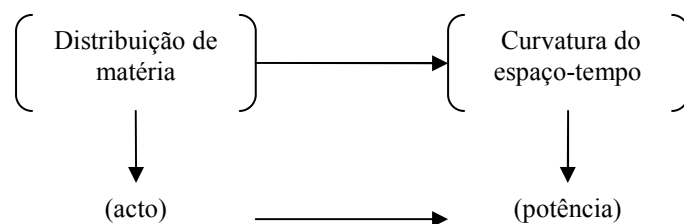
O adágio ontológico – *actus et potentia sunt in eodem genere* – enquadra-se, na teoria de Einstein, porque se o acto pertence à ordem acidental, então a potência pertence a essa ordem.

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:

³¹ MATVEEV, A. N. – *Mechanics and Theory of Relativity*, Mir Publishers, Moscow, 1989, 301-303.

³² GEROCH, R. – *Relatividade Geral de A a Z*, tradução do inglês, Editorial Presença, Lisboa, 1991, 39-45.



Predicamentalmente, a gravitação fundamenta-se na correlação primária da *quantitas et qualitas*, como se apresenta ontologicamente pela equação do campo gravítico:

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

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 auferi-se como acção e como paixão, devido à curvatura do espaço-tempo:

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

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 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.³³

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.

³³ 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.