

Pulsações na gravitação universal(*)

por FREDERICO MACHADO

(Junta de Investigações do Ultramar)

1. Introdução

Alguns fenómenos geológicos têm carácter periódico (cf. Machado, 1968). Uns apresentam pulsação com período aproximado de 200 milhões de anos; são nomeadamente os seguintes:

- Variação (à escala mundial) do nível do mar;
- Grandes variações climáticas;
- Ciclos orogénicos.

Outros parecem ter período muito mais curto, cerca de 11 anos apenas, e compreendem os fenómenos tectónicos actuais (abertura dos riftes médios dos oceanos e contracção das cadeias de montanhas) e a actividade sísmica e vulcânica associada.

Uma variação da gravitação universal (equivalente à variação da «constante» gravitacional) explicaria todos estes fenómenos pulsantes. Com efeito, daí resultaria uma variação de pressão e portanto do volume do interior da Terra. Isto iria aumentar ou diminuir a área dos oceanos, fazendo assim oscilar o nível «médio» do mar.

A expansão do interior faria também abrir os riftes e a contracção produziria os enrugamentos das montanhas. Embora estes fenómenos possam ser produzidos por uma pulsação com período de 11 anos, a pulsação de longo período parece influir de modo decisivo na respectiva intensidade.

Por outro lado, as variações da gravitação influem na radiação solar e explicariam também as variações climáticas.

A título de exemplo, apresentam-se na figura 1 as grandes oscilações do nível do mar (baseadas em dados de Belousov, 1962) e na figura 2 a variação da frequência dos sismos em ilhas dos Açores que ficam junto ao rift médio do Atlântico. Na primeira figura nota-se a pulsação de longo período (200 milhões de anos) e na última uma periodicidade de 11 anos.

As variações da gravitação (no sentido em que são aqui interpretadas) parecem compatíveis com a teoria da Relatividade Geral, o que constitui um aspecto de certo interesse para a Física Relativista.

2. Massa inerte e massa gravitacional

Como se sabe, a massa inerte dum corpo é o cociente da força aplicada a esse corpo pela aceleração que ela lhe imprime. A massa gravitacional é a que figura na expressão da atracção newtoniana dos corpos.

A priori nada obrigava a identificar as duas espécies de massa, mas experimentalmente não tem sido possível encontrar diferença entre elas. Pode-se portanto considerar como um facto experimental a identidade entre massa inerte e massa gravitacional.

Einstein (1958, p. 125) sugeriu que a massa inerte pudesse variar proporcionalmente ao potencial devido às outras massas do Universo. Este postulado deverá

(*) O presente artigo é o resumo dum seminário realizado no Serviço de Investigação de Física da Junta de Energia Nuclear.

portanto estender-se igualmente à massa gravitacional.

Podemos então admitir que a massa dum corpo é

$$(1) \quad M = \mu m$$

onde μ é um factor vizinho da unidade e m a massa do corpo quando $\mu = 1$.

O factor μ pode definir-se pela equação

$$(2) \quad \mu^2 = 1 + 2(U - U_0)/c^2$$

tante U_0 pode então determinar-se pela relação

$$(4) \quad 1 - 2U_0/c^2 = 0$$

o que permite simplificar (2) para

$$(5) \quad \mu^2 = 2U/c^2.$$

Quanto ao campo de integração de (3), deveria estender-se, em princípio, a todo o Universo. Admite-se porém actualmente que o Universo está em permanente ex-

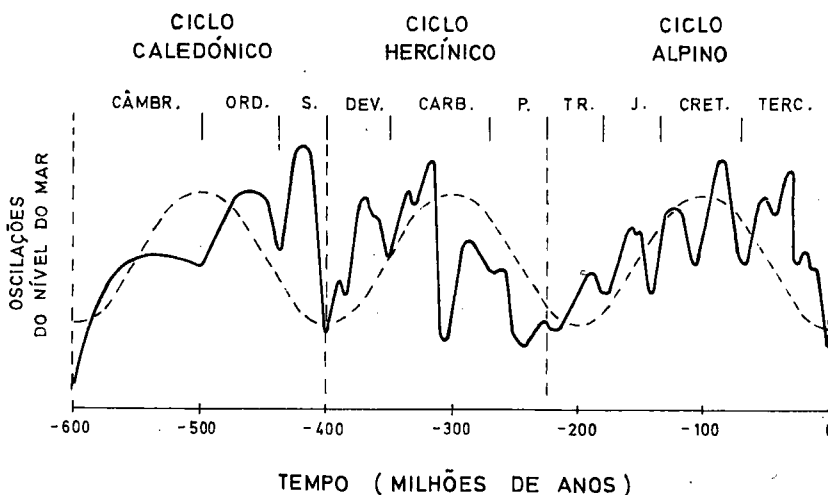


Fig. 1 — Variação do nível do mar ao longo dos tempos geológicos (reproduzida de Machado, 1968)

onde c é a velocidade da luz, U_0 uma constante e U o potencial newtoniano

$$(3) \quad U = f \int_{\Omega} \frac{\mu \rho + W/c^2}{r} d\Omega.$$

Aqui $\mu \rho$ (massa gravitacional) é a densidade do elemento de volume $d\Omega$ situado à distância r ; W é a energia por unidade de volume; e f a constante da gravitação universal. O termo W/c^2 foi introduzido de acordo com as ideias da Relatividade Restrita.

Segundo o princípio de Mach, a massa (e portanto μ) deverá anular-se num universo vazio onde seria $U = 0$. A cons-

pansão, cada galáxia afastando-se com uma velocidade

$$(6) \quad v = Hr$$

onde H é a constante de Hubble ($H \cong 2,4 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1}$) e r a distância da galáxia ao ponto de observação. A velocidade da luz será atingida a uma distância c/H e parece razoável admitir que as massas exteriores a essa fronteira já não contribuem para o integral de (3).

Fica assim definido um universo «visível» de forma esférica com raio $c/H \cong 1,2 \times 10^{23} \text{ km}$.

Embora em larga escala a distribuição

de massa no Universo seja sensivelmente uniforme, é de esperar que os vários pontos do Universo tenham «universos visíveis» ligeiramente diferentes, correspondendo-lhes assim valores de μ também diferentes.

O movimento duma partícula (que teria massa unitária quando fosse $\mu = 1$) será descrito pela equação de Newton

$$(7) \quad \frac{d}{dT} \left(\mu \frac{dX_i}{dT} \right) = \mu \frac{\partial U}{\partial X_i}$$

onde T é o tempo e X_i ($i = 1, 2, 3$) as coordenadas espaciais (locais); as veloci-

têm influência apreciável no valor de μ , este pode considerar-se constante dentro da cavidade. Então (atendendo a (3) e desprezando W/c^2) o segundo membro de (7) que representa a atracção newtoniana é proporcional ao valor local de μ^2 e tudo se passa (dentro da aproximação considerada) como se tivéssemos uma constante de gravitação $f\mu^2$ que seria assim variável de ponto para ponto.

3. Deslocação galáctica do sistema solar

Ficou delineado um mecanismo capaz de fazer variar a atracção gravitacional

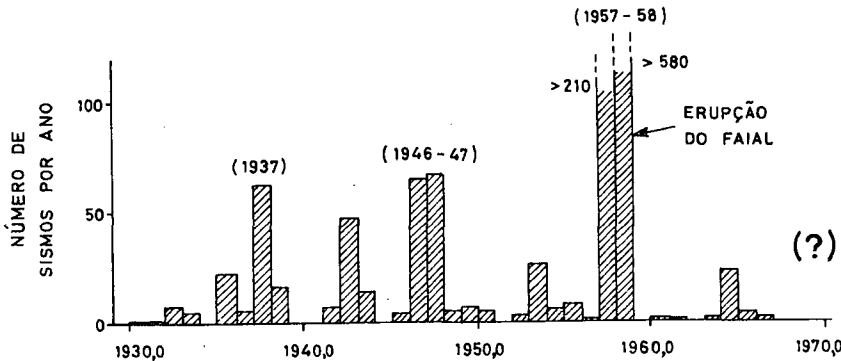


Fig. 2 — Frequência dos abalos de terra nas ilhas Faial e Pico, Açores (reproduzida de Machado, 1968).

dades dX_i/dT deverão ser pequenas em relação a c .

Podemos admitir que estamos dentro duma cavidade esférica concêntrica do nosso «universo visível». Supondo que fora da cavidade a densidade é sensivelmente constante, as massas exteriores produzirão na cavidade um potencial uniforme. Virá

$$(8) \quad \frac{\partial U}{\partial X_i} = \frac{\partial}{\partial X_i} (U_{\text{int}} + U_{\text{ext}}) = \frac{\partial U_{\text{int}}}{\partial X_i}$$

sendo U_{int} e U_{ext} , respectivamente, o potencial das massas interiores e exteriores à cavidade.

Supondo também que no interior da cavidade há apenas «partículas» que não

no sistema solar desde que o Sol e os planetas, ao longo da história geológica, vão ocupando sucessivamente posições diferentes no Universo.

Como se sabe, o Sol faz parte da galáxia Via Láctea, parecendo que descreve em torno do núcleo galáctico uma órbita sensivelmente circular (Fig. 3). Se a velocidade actual ($\cong 230$ km/s) for constante, uma rotação completa deve durar 230 milhões de anos. É razoável associar esta deslocação galáctica com a pulsação de longo período (cerca de 200 milhões de anos) verificada nos fenómenos geológicos.

Surge porém uma dificuldade: as pulsações geológicas sugerem uma variação $\delta U/U \cong 0,05$ e pela conservação da energia

(a energia potencial é $-U$) deverá ser, atendendo a (5) com $\mu \simeq 1$,

$$(9) \quad \frac{1}{2} \delta(V^2) = \delta U \simeq \frac{c^2}{2} \frac{\delta U}{U}$$

onde V é a velocidade do Sol na órbita galáctica.

A época actual parece corresponder a um mínimo de U . Do lado oposto da

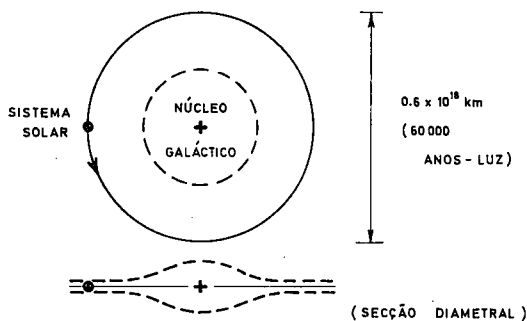


Fig. 3 — Esquema da órbita galáctica do sistema solar.

Galáxia, onde U tivesse um aumento de 5%, a velocidade do Sol atingiria valores de cerca $c/5$ (60 000 km/s). As variações de U serão talvez inferiores a 5%, mas em qualquer caso parecem de esperar, do lado oposto da Galáxia, velocidades bastantes elevadas. Essas velocidades devem aparecer não só no Sol mas em todas as estrelas que passem na região; infelizmente o núcleo galáctico impede a observação das estrelas que se encontram do outro lado. Em zonas mais próximas não têm sido observadas velocidades muito superiores à velocidade actual do Sol.

A repetição aproximada dos ciclos indicados na figura 1 faz supor que a estrutura do Universo (em especial a densidade de cada «universo visível») pouco varia durante rotações sucessivas da Galáxia. Em primeira aproximação aquela estrutura pode considerar-se independente do tempo.

Esta constância aproximada da densidade média dum Universo em expansão implica uma criação mais ou menos con-

tínua de matéria, hipótese um tanto ousada que foi sugerida por Hoyle (1955).

Quanto à pulsação com período de 11 anos, pode ser explicada por uma oscilação do Sol perpendicular ao plano galáctico, se admitirmos que esse plano (independentemente das massas próprias da Galáxia) corresponda a valores de U ligeiramente mais altos do que no espaço vizinho.

Com hipóteses plausíveis (cf. Machado, artigo no prelo) é fácil imaginar uma oscilação com período de 22 anos (que dá, em cada período, dois máximos de μ correspondentes às duas passagens pelo plano galáctico).

O sistema solar descreveria em torno da Galáxia uma órbita sinusoidal, conforme vai esquematizado na figura 4. Esta hipotética oscilação transversal pode certamente ser investigada por observações astronómicas.

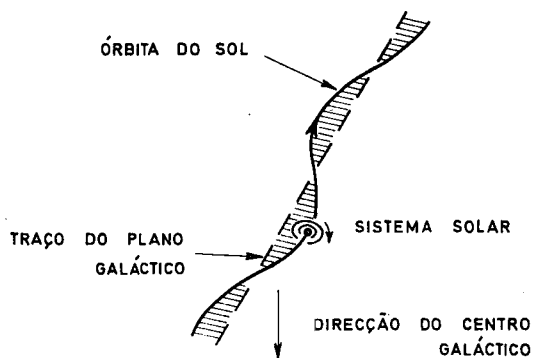


Fig. 4 — Possível oscilação transversal na órbita galáctica do sistema solar.

4. Consequências na Relatividade Geral

Como é sabido, a teoria da Relatividade Geral considera no Universo um sistema de coordenadas riemannianas a 4 dimensões. Com suficiente aproximação, estas coordenadas podem considerar-se ortogonais, sendo então a métrica (que é definida pela diferencial de arco ds)

$$(10) \quad ds^2 = g_{44} (dx^4)^2 + \sum_i g_{ii} (dx^i)^2.$$

Aqui x^4 é a coordenada de tipo tempo e x^i ($i=1,2,3$) são as coordenadas de tipo espaço (os índices superiores significam que as coordenadas são contravariantes e não covariantes).

A partir dos coeficientes da métrica, g_{44} e g_{ii} , podem determinar-se as linhas geodésicas que, segundo Einstein, devem descrever neste complexo riemanniano o movimento duma partícula unitária. Por outro lado, aqueles coeficientes terão de satisfazer às chamadas equações do campo (veja-se, por exemplo, McVittie, 1965).

Na vizinhança de cada ponto é possível definir um sistema «local» de coordenadas ortogonais, chamadas de Minovski, cuja métrica é

$$(11) \quad ds^2 = dT^2 - \frac{1}{c^2} \sum_i dX_i^2.$$

Basta, com efeito, fazer

$$(12) \quad dT = \sqrt{g_{44}^0} dx^4 \quad \text{e} \quad dX_i = c \sqrt{-g_{ii}^0} dx^i$$

sendo g_{44}^0 e g_{ii}^0 os valores de g_{44} e g_{ii} no ponto central considerado. Os X_i são aqui coordenadas cartesianas ortogonais (em que já não há distinção entre covariância e contravariância).

Para que as geodésicas (reduzidas a coordenadas locais) tomem com suficiente aproximação (caso de velocidades pequenas em relação a c) a forma da equação (7), os coeficientes da métrica deverão ser

$$(13) \quad g_{44} = e^{-(\mu^2-1)}, \quad g_{ii} = -\mu^2/c^2$$

com μ definido por (5).

Admite-se que em primeira aproximação U é independente de x^4 e que μ é sempre vizinho da unidade. Nesse caso, as equações do campo, com hipóteses plausíveis sobre a distribuição das energias interna e gravitacional, conduzem aproximadamente às equações (Machado, artigo no prelo)

$$(14) \quad \sum_i \frac{\partial^2 U}{\partial X_i^2} = -4\pi f(\mu\rho + W/c^2)$$

$$(15) \quad \mu^2 - 1 = \frac{15}{2c^2} \cdot \frac{p}{\mu\rho}$$

onde p é a pressão.

A primeira é a equação de Poisson para uma distribuição de «massa» $\mu\rho + W/c^2$. A segunda é equivalente à equação dum gás em repouso e em regime adiabático

$$(16) \quad U - U_0 = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \cdot \frac{p}{\mu\rho}$$

se a razão dos calores específicos a pressão e a volume constantes for $\gamma = 15/11$. Aceitando que a massa do Universo, em larga escala, se pode considerar equivalente a um gás, os coeficientes (13) verificam com suficiente aproximação as equações do campo.

Supondo ainda que a massa do Universo pode ser assimilada a um gás perfeito, a equação (15) dá

$$(17) \quad \mu^2 - 1 = \frac{15}{2c^2} \cdot \frac{RT}{M}$$

sendo agora T a temperatura absoluta, M a massa molecular e R a constante dos gases perfeitos.

A equação (17) mostra que o zero absoluto de temperatura seria atingido nos pontos onde fosse $\mu = 1$. Isso poderá ser impedido (apesar da expansão do Universo) pela criação de matéria nesses pontos.

A criação de matéria volta a aparecer como hipótese necessária para esta teoria de variações da gravitação.

BIBLIOGRAFIA

- V. V. BELOUSSOV, *Basic Principles of Geotectonics*, Mc Graw Hill, New York (1962).
 A. EINSTEIN, *O Significado da Relatividade*, Amado, Coimbra (1958).
 F. HOYLE, *Frontiers of Astronomy*, Heinemann, Londres (1955).
 F. MACHADO, *Sobre a pulsação de fenómenos geológicos*, Bol. Soc. Geol. Port., Vol. 16, p. 253 (1968).
 ———, *Variações da gravitação na Relatividade Geral*, Rev. Fac. Ciên., Lisboa (no prelo).
 G. C. McVITTIE, *General Relativity and Cosmology*, 2.ª ed., Chapman and Hall, Londres (1965).