

Lord Kelvin e a Idade da Terra

o debate sobre a idade da Terra

A C Tort ¹ & F Nogarol

¹Mestrado profissional em Ensino de Física
Instituto Física – Universidade Federal do Rio de Janeiro

24 de Outubro de 2012

O problema da Idade da Terra

Quantos anos tem a Terra?



Figura: A Terra ... hoje!

A pergunta é relevante?

Na Antiguidade...não era! Para as civilizações antigas, o problema da existência da Terra confunde-se com a existência do Mundo!

- babilônios,
- sumérios,
- egípcios,
- e naturalmente...os gregos,

O mundo é cíclico! E isto não era necessariamente um problema.

Não há evidências de esforços para contar o tempo.

Quando começa a contagem do tempo?

A questão da contagem do tempo desde a criação foi considerada pelos judeus antigos e introduzida no Ocidente pelo Cristianismo.



Figura: A Criação do Mundo.

Cronologias

As primeiras cronologias fundamentadas nos textos bíblicos se devem a:

- Téofilo de Antióquia (c.115 - c. 183 E.C.);
- Júlio Africano (c. 200 - c. 250 E.C.);
- Eusébio de Cesaréia (c. 265 - c. 339 E.C.).

Durante a Idade Média os cristãos cultos (estudiosos e teólogos) interpretam a Bíblia de modo não literal.

A interpretação literal

A Reforma Protestante recupera a interpretação literal e surgem novas cronologias:

- Martinho Lutero (1483-1546). Data da Criação: 4000 a.C.
- James Usher (1581-1656). Data da Criação: 4004 a.C.
- John Lightfoot. Data da Criação: 3929 a.C.

Por um erro histórico, a cronologia de Lightfoot é confundida com a cronologia de Usher → cronologia de Usher-Lightfoot à qual se atribui a afirmativa:

De acordo com o calendário juliano, a Terra foi criada no dia 23 de outubro de 4004 a.C., às nove horas da manhã na Mesopotâmia.

O advento do Iluminismo

Em 1779, Georges-Louis Leclerc (1707-1788), Conde de Buffon, determina experimentalmente a idade da Terra.

Buffon perguntou-se em quanto tempo uma esfera de material derretido do tamanho da esfera da Terra esfriaria até atingir uma temperatura em que a vida pudesse ser sustentada.

Seu resultado: **aproximadamente 75 mil anos para que o processo de resfriamento ficasse completo.**

Os registros fósseis

Mas o golpe mais severo para as cronologias baseadas nos textos bíblicos veio nos séculos 18 e 19 com o estudo dos registros fósseis.



Figura: Grandes durações temporais são necessárias para explicar a riqueza da fauna e da flora...

Mais fósseis...

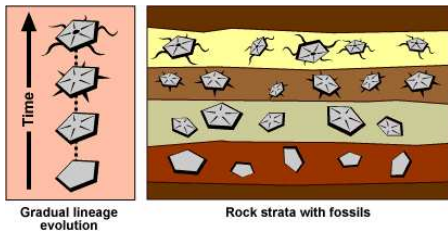


Figura: Fósseis de transição.

- Georges Cuvier (1769-1832);
- Jean-Baptiste Lamarck (1744-1829).

James Hutton (1726-1797): “nenhum vestígio de um começo, nenhuma perspectiva de um final”.



Figura: James Hutton, escocês, médico, fazendeiro e geólogo amador.

Hutton em *The Theory of Earth* (1788): a água e o fogo, principalmente o fogo, atuando lentamente mas durante um tempo indefinido, explicam a geografia física da Terra.

Charles Lyell (1797-1875)

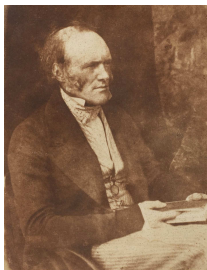


Figura: Opositor do catastrofismo e teórico do uniformitarismo.

Charles Lyell *Principles of Geology* (1830): exceto por ações localizadas e eventuais, a Terra está em equilíbrio dinâmico, sujeita à ação de forças naturais, água, fogo, vento, que atuam ao longo de durações temporais tão grandes que é melhor considerá-las como indefinidas ou de magnitude inimaginável à mente humana.

Darwin e a teoria da evolução

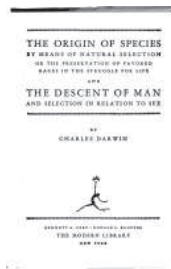
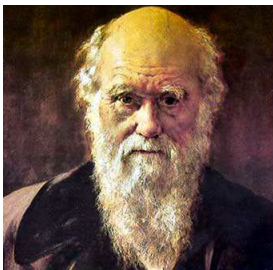


Figura: Charles Darwin (1809-1882). Primeira edição de *Origens*: 1830.

A teoria de evolução de Darwin também exigia grandes durações temporais para que as espécies pudessem evoluir e alcançar as formas que observamos hoje.

A posição de Kelvin

- o uniformitarismo era uma grosseira violação das leis da termodinâmica. (As perdas de energia levariam a uma diminuição da atividade natural da Terra e o calor perdido nesta atividade seria irrecuperável);
- o darwinismo não tinha uma explicação para a origem da vida, exigia durações temporais enormes e uma aleatoriedade que acarretava em uma ausência de propósito divino. (Kelvin era leitor e admirador de William Paley (1743-1805) autor do influente livro *Natural Theology - or Evidences of the Existence and Attributes of the Deity Collected from the Appearances of Nature*).

O cenário

É contra esse pano de fundo que devemos entender a participação e a enorme influência que Kelvin teve sobre a questão da idade da Terra e o posterior desenvolvimento das ciências da Terra.

Mas quem era Kelvin afinal?

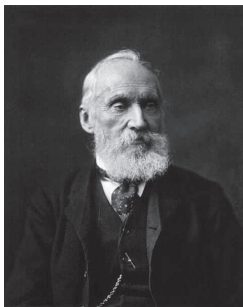


Figura: William Thomson (1824-1907), primeiro Barão Kelvin de Larg, o cientista mais respeitado da Era Vitoriana.

Alguns feitos de Lord Kelvin

- Divulgador da teoria do calor de Fourier no mundo anglo-saxão. ("Fourier made Kelvin!"(P.G. Tait));
- Contribuições importantes ao eletromagnetismo de Maxwell e à física-matemática;
- Contribuições importante à termodinâmica e à formulação do princípio da conservação de energia;
- Mais de 160 patentes!
- Participação decisiva no projeto do cabo transatlântico;
- O primeiro cientista a ficar rico graças às suas patentes e colaborações com a indústria britânica como consultor.

e ainda...

Kelvin defendia a idéia de que a vida origina-se na Terra a partir de formas pré-existentes vindas do espaço a bordo de meteoros que atingiram a superfície terrestre.

Uma idéia que sobrevive em...SPORE!



Figura: o game da evolução que começa com uma idéia de Kelvin.

Kelvin e a Idade do Sol

Antes de voltar sua atenção para o problema da idade da Terra, Kelvin interessou-se pela origem do calor irradiado pelo Sol e perguntou-se:

Quantos anos tem o Sol?

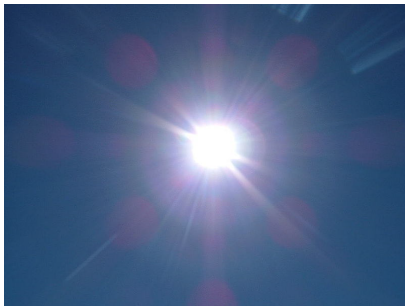


Figura: O Sol.

Pois é plausível supor que a Terra não exista sem o Sol!!!

O modelo de Helmholtz para o Sol

Mas antes de Kelvin alguém já havia pensado no problema...



Figura: Hermann von Helmholtz (1821-1894).

O modelo de Helmholtz para o Sol...

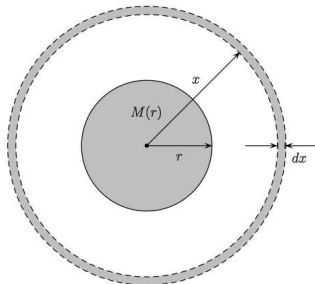


Figura: Modelo de Helmholtz:

Começando com uma protomassa $M(r)$, Helmholtz calcula o trabalho necessário para construir uma esfera homogênea de raio R e massa M .

O modelo de Helmholtz para o Sol...

Helmholtz obteve:

$$W_g = \frac{3}{5} \frac{GM_{\odot}^2}{R_{\odot}}.$$

Para: $R_{\odot} \approx 7 \times 10^8$ m, $M_{\odot} \approx 2 \times 10^{30}$ kg:

$$W_g \approx 2,3 \times 10^{41} \text{ J}.$$

A potência com que o Sol emite energia é:

$$P_{\odot} \approx 3,6 \times 10^{26} \text{ J/s},$$

A idade do Sol é:

$$T_{\odot} \approx \frac{2,3 \times 10^{41} \text{ J}}{3,6 \times 10^{26} \text{ J/s}} = 6,4 \times 10^{14} \text{ s} \approx 20 \text{ milhões de anos !}$$

Insuficiente para os evolucionistas e geólogos do século 19!

Kelvin adota o modelo de Helmholtz

Em 1862, em um artigo publicado em uma revista popular, Kelvin adota o modelo de Helmholtz (com refinamentos):

“A forma de teoria meteórica que agora parece ser a mais provável e que foi discutida pela primeira vez com base nos princípios termodinâmicos verdadeiros por Helmholtz, consiste em supor que o Sol e o calor solar originaram-se de uma coalizão de corpos menores caindo conjuntamente em razão da sua atração gravitacional mútua, e gerando, como deve ser em concordância com a lei maior demonstrada por Joule, um equivalente exato em calor ao movimento perdido na colisão. ”

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2}, \quad (1)$$

x é coordenada associada com a profundidade da Terra; D é o coeficiente de difusão térmica do meio que se supõe ser uniforme. A função $T(x, t)$ nos diz como a temperatura está espacialmente distribuída em um dado instante de tempo t . As condições de contorno e as condições iniciais (problema de Kelvin) são:

$$T(x, t) = \begin{cases} 0, & x = 0; \quad \forall t, \\ T_0, & x \rightarrow \infty; \quad \forall t, \end{cases}$$

e a distribuição inicial de temperatura:

$$T(x, 0) = \begin{cases} 0, & x < 0; \\ T_0, & x > 0. \end{cases}$$

A solução do problema de Kelvin é dada por:

$$\begin{aligned} T(x, t) &= \frac{2 T_0}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{Dt}}} dz e^{-z^2} \\ &= T_0 \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right), \end{aligned}$$

onde o símbolo erf indica a função erro.

O gradiente é dado por:

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial x} = \frac{T_0}{\sqrt{\pi Dt}} e^{-x^2/(4Dt)}.$$

Em $x = 0$:

$$\frac{\partial T(0, t)}{\partial x} \equiv G(0, t) = \frac{T_0}{\sqrt{\pi Dt}}.$$

Identificando nessa fórmula t com a idade da Terra, $t \rightarrow t_{\text{Terra}}$:

$$t_{\text{Terra}} = \frac{T_0^2}{G^2(0, t_{\text{Terra}})\pi D}.$$

Dados de Kelvin $D = 1,2 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} = 400 \text{ pés}^2/\text{ano}$,

$G(0, t_{\text{Terra}}) = 0,037 \text{ }^\circ\text{C}/\text{m} = 37 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km} = \frac{1}{50} \text{ }^\circ\text{F}/\text{pé}$.

Com estes dados:

- se $T_0 = 5538^\circ\text{C} = 10\,000^\circ\text{F}$ (aproximadamente igual à temperatura da superfície do Sol), então $t_{\text{Terra}} = 200$ milhões de anos;
- se $T_0 = 3871^\circ\text{C} = 7000^\circ\text{F}$, (temperatura acima das temperaturas de fusão da maioria das rochas) segue que $t_{\text{Terra}} = 97$ milhões de anos.

Gráficos

Definimos o comprimento de penetração λ_P para $t = t_{\text{Terra}}$, como o valor de x tal que quando $x = \lambda_P$, o gradiente vale $1/e$ do valor do gradiente na superfície $x = 0$:

$$\lambda_P = 2\sqrt{D t_{\text{Terra}}}.$$

Nos gráficos a seguir representa-se $T(x, t_{\text{Terra}})/T_0$, e $G(x, t_{\text{Terra}})/G(0, t_{\text{Terra}})$ como funções da variável adimensional $u = x/\lambda_P$.

O raio da Terra é da ordem de 10^3 km e o comprimento de penetração é da ordem de 10^2 km.

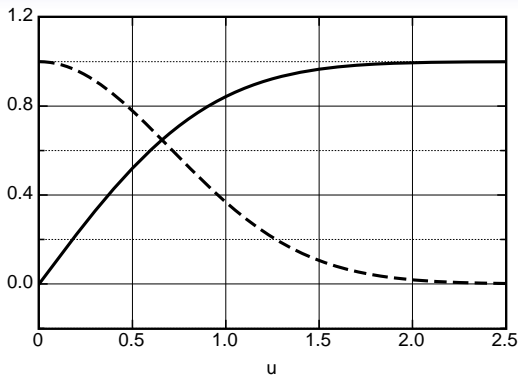


Figura: Curva sólida: $T(x, t)/T_0 = \text{erf}(x/\lambda_p)$; curva tracejada: $G(x, t_{\text{Terra}})/G(0, t_{\text{Terra}}) = \exp(-x^2/\lambda_p^2)$. A temperatura tende rapidamente para T_0 no intervalo $1 < u < 2$, e o gradiente de temperatura tende a zero. No modelo de Kelvin, resfriamento acontece principalmente próximo à superfície.

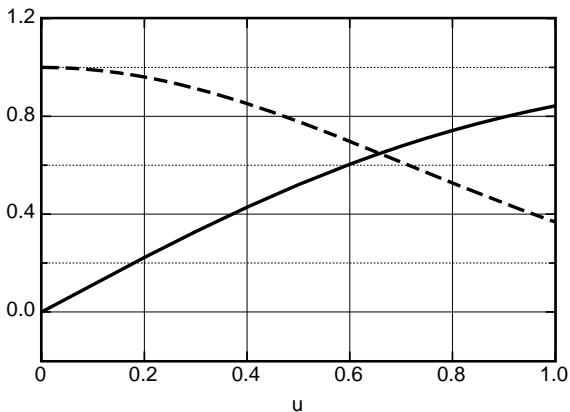


Figura: Curva sólida: $T(x, t)/T_0 = \text{erf}(x/\lambda_P)$; curva tracejada: $G(x, t_{\text{Terra}})/G(0, t_{\text{Terra}}) = \exp(-x^2/\lambda_P^2)$.

Recepção

Este é o cálculo que sustenta o forte ataque que Kelvin lança contra os uniformitaristas. Em 1868, em um encontro da Geological Society de Glasgow, Kelvin afirma:

“Uma grande reforma nas hipóteses geológicas parece agora ter-se tornada necessária.”

Aos poucos, o resultado de Kelvin impõe-se entre os geólogos que só manifestam-se contrariados quando revisões posteriores do resultado reduziram mais ainda a idade da Terra.

O que Kelvin não sabia....

A radioatividade!!!

cuja implementação como contadora de tempo não está livre de controvérsias!

A principal fonte dessas controvérsia é a qualidade das amostras.

A solução moderna

Hoje, graças aos métodos modernos de datação radioativa sabemos que a Terra é muito mais velha...

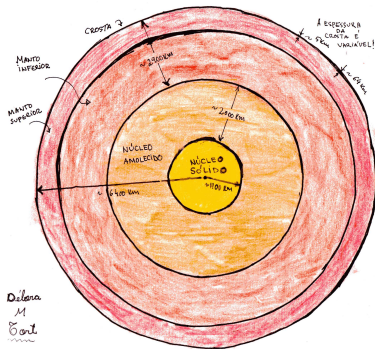


Figura: A Terra tem aproximadamente 4,5 bilhões de anos e uma estrutura interna complexa. (Desenho D.M. Tort)

Referências

- A C Tort e F Nogarol: *Another look at Helmholtz's model for the gravitational contraction of the Sun* Eur. J. Phys. 32 (2011) 1679-1685.
- A C Tort e F Nogarol: *Reverendo o debate sobre a idade da Terra*. Rev. Bras. Ens. Fís. No prelo.