

# L'età della Terra

L'emergere dell'orizzonte storico nella Fisica

Sergio Giudici  
dip. di Fisica “ Enrico Fermi”  
email: [sergio.giudici@df.unipi.it](mailto:sergio.giudici@df.unipi.it)

# ***Paradigma Antico Ciclico***

- Le sfere celesti si muovono di moto circolare uniforme, inestinguibile ed eterno. Il mondo sub-lunare è per contro soggetto a continui processi di generazione e corruzione. Determinati dai cicli del mondo celeste, i movimenti del mondo sublunare sono soggetti alle stesse ripetizioni : generazioni e corruzioni si sono già ripetuti e si produrranno ancora una infinità di volte.

# ***Paradigma Moderno Evolutivo***

- Evoluzione dei sistemi --> Transizione di fase
- Evoluzione planetaria
- Evoluzione del sistema solare
- Evoluzione stellare
- Evoluzione delle specie

# ***Paradigma Antico Ciclico***

- Le sfere celesti si muovono di moto circolare uniforme, inestinguibile ed eterno. Il mondo sub-lunare è per contro soggetto a continui processi di generazione e corruzione. Determinati dai cicli del mondo celeste, i movimenti del mondo sublunare sono soggetti alle stesse ripetizioni : generazioni e corruzioni si sono già ripetuti e si produrranno ancora una infinità di volte.

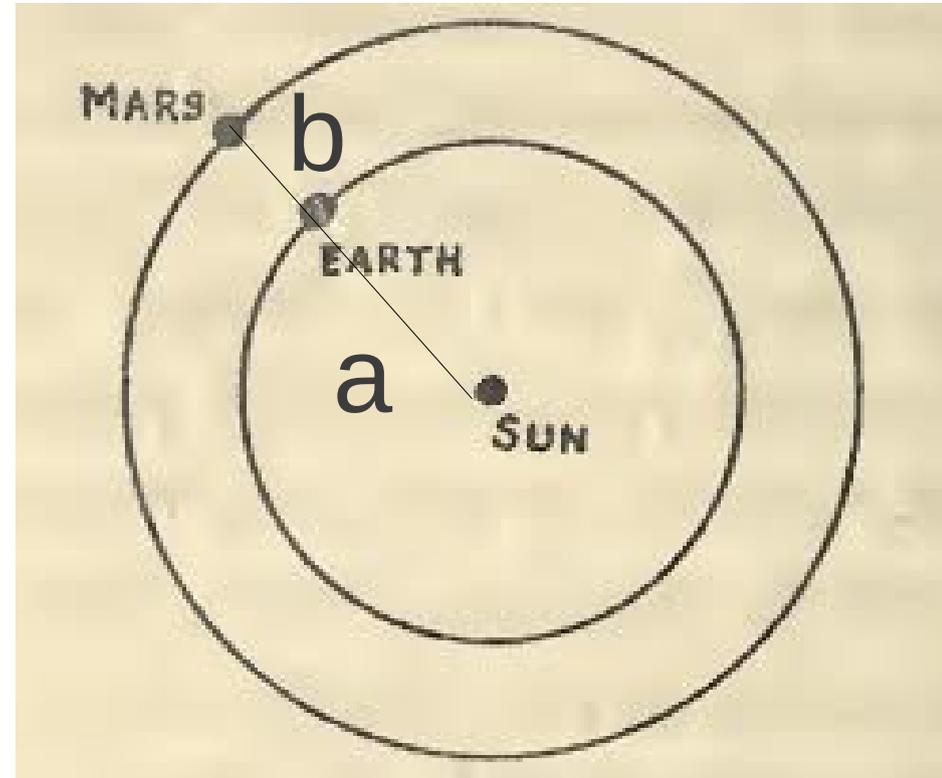
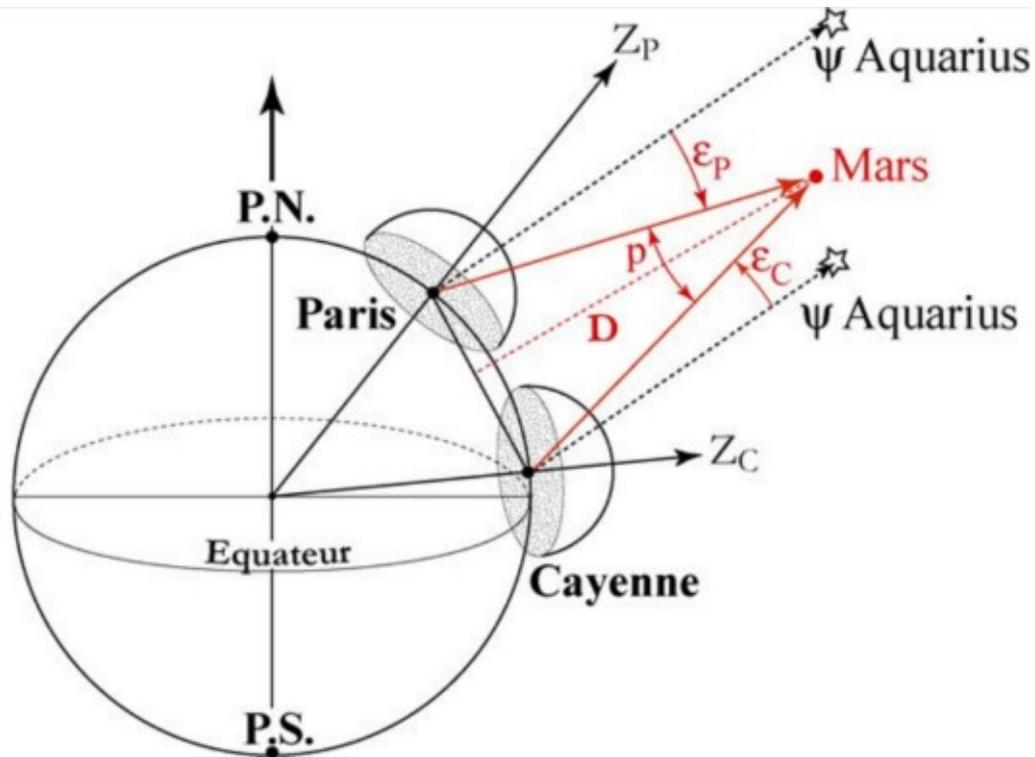
# ***Paradigma Moderno Evolutivo***

- Evoluzione dei sistemi --> Transizione di fase
- Evoluzione planetaria
- Evoluzione del sistema solare
- Evoluzione stellare
- Evoluzione delle specie

# 1671: una spedizione a la Cayenne



# La spedizione di Jean Richer a la Cayenne (1671)



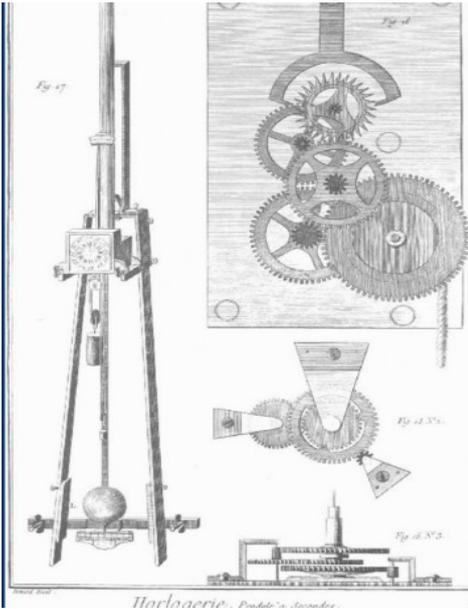
Dalle due misure si determina  $p = 15''$  e la distanza  $b$  tra Terra e Marte.

Dalla III legge di Keplero si ottiene l'unità astronomica

$$a^3 : (1 \text{ year})^2 = (a+b)^3 : (1.88 \text{ year})^2$$

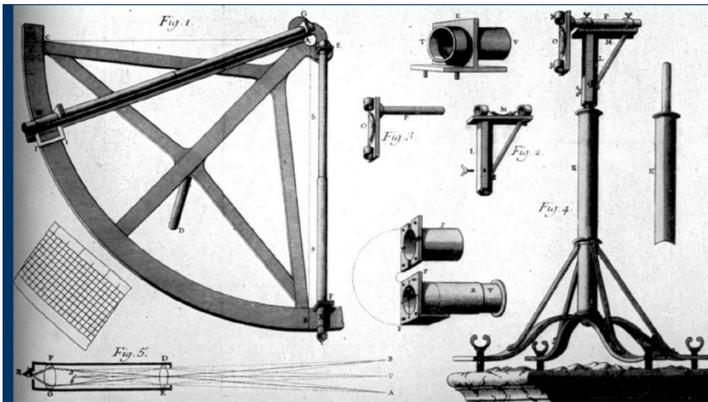
$$a = 146 \times 10^6 \text{ Km}$$

# Gli strumenti di Richer: Pendoli e quadranti



Misura della accelerazione di gravità a la Cayenne

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} \quad \frac{\delta g}{g} = \frac{0.28 \text{ cm}}{99.39 \text{ cm}} \sim 3 \times 10^{-3}$$



- Un ottante di 1.9 m di raggio
- Un quadrante di 0.76 m di raggio
- Due orologi a pendolo  
uno batte il secondo  
l'altro il mezzo secondo

<< Horloges fabriquées par le sieur Thuret, Horloger ordinaire du roi qui par son exactitude et la délicatesse de ses ouvrages a surpassé jusqu'à present Tous ceux qui se mettent à la fabrique des horloge à pendule >> (Richer, 1679)

# Schiacciamento ai poli

Luogo	latitudine	Gravita $m/s^2$
Uranieborg	55°54'	9.815
Paris	48°50'	9.809
Lyon	45°48'	9.806
Cayenne	04°57'	9.781

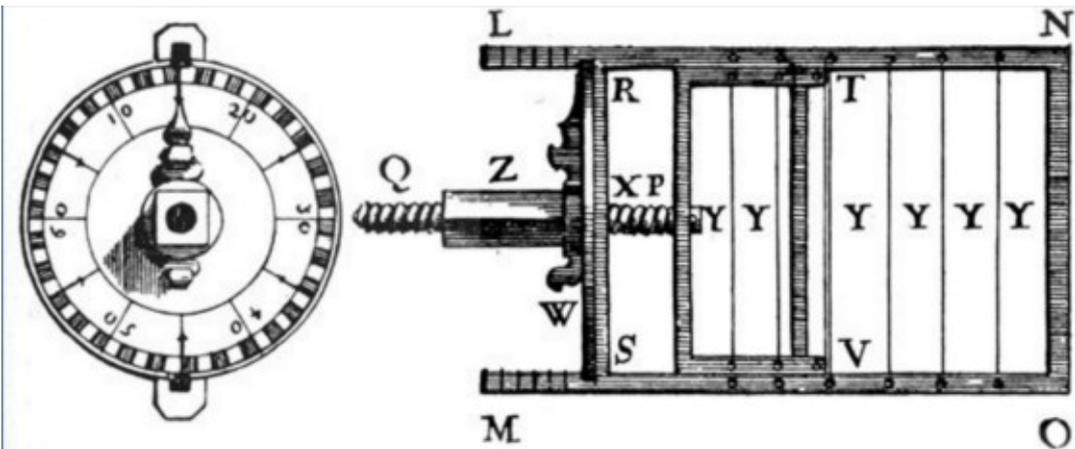
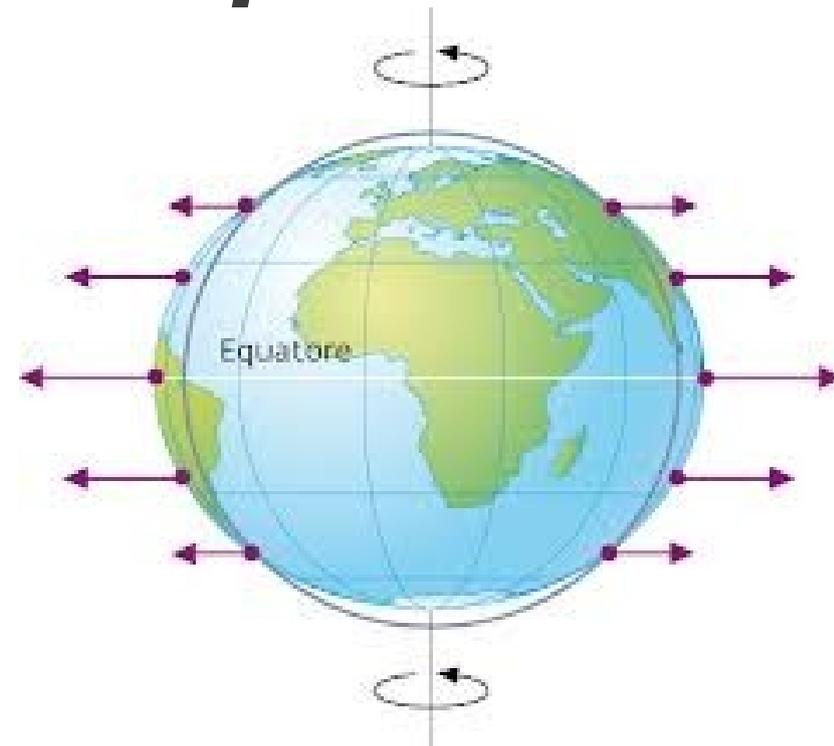


FIG. 314. — Micromètre d'Auzout. *Manière exacte pour prendre le diamètre des Planètes, la distance entre les petites Etoiles, la distance des lieux, etc.* Paris, 1667 [sans nom d'auteur]. (Fac-simile.)

Vite micrometrica ----> Calibro Palmer



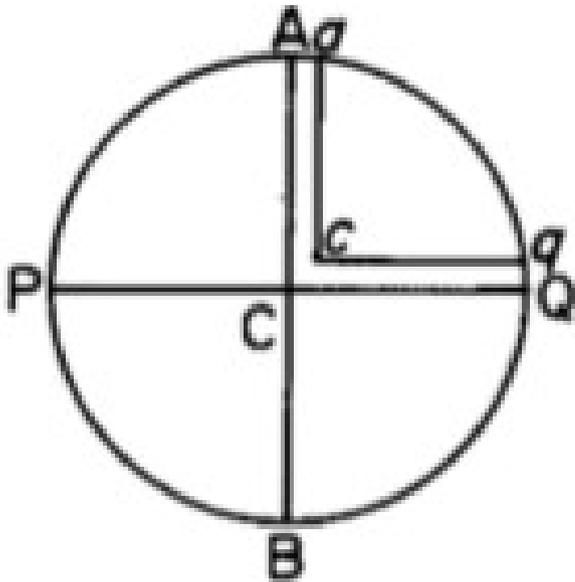
**SFERA**



**GEOIDE**

# Schiacciamento ai poli

Newton (Principia, Book III, prop. XVIII-XX)



$$m = \frac{\text{accelerazione centrifuga all'equatore}}{\text{gravità media sulla superficie}} = \frac{\omega^2 R_T}{g} = \frac{1}{290}$$

$$\epsilon = \frac{\text{raggio equatoriale} - \text{raggio polare}}{\text{raggio medio}} = \frac{b - a}{R_T}$$

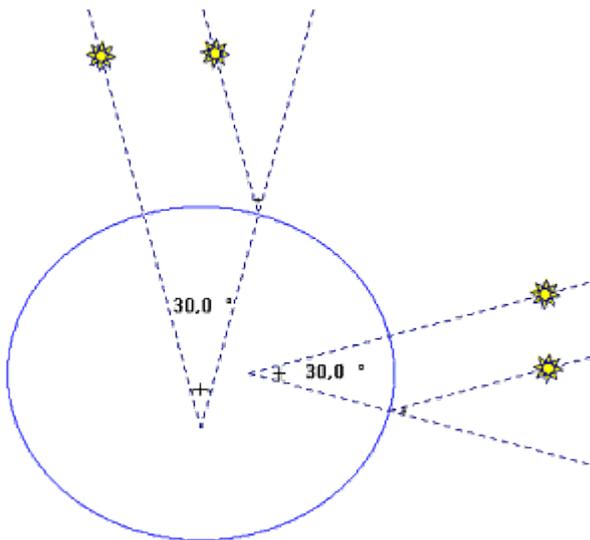
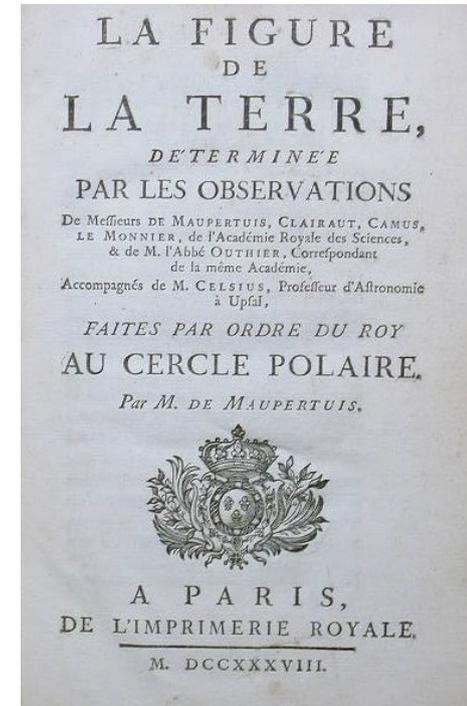
$$\epsilon = \frac{5}{4} m = \frac{1}{230}$$

L'attuale schiacciamento vale circa **1/294** più piccolo di quello calcolato da Newton  
La discrepanza riflette la non omogeneità della Terra

# Misura del grado di meridiano Laponnia e Perù (1735-1744)



Maupertuis in Lapponia, Incisione tratta da "Vie des savants illustrés", Louis Figuier, 1882.



*“Vous avez confirmé dans les lieux plein d'ennui  
Ce que Newton connut sans sortir de chez lui”  
(Voltaire)*

# Una terra inizialmente calda & fluida

Newton (Principia, Book III) :

<< Un corpo di ferro di un pollice di diametro esposto all'aria per un'ora, perde appena tutto il suo calore. Così un globo di ferro al calor rosso uguale alla Terra, ciò a dire il cui diametro fosse circa di 40000000 piedi [...] sarebbe appena raffreddato in **50000 anni**. [...] **che per delle cause nascoste, la durata del calore deve aumentare in ragione minore che quella del diametro. Desidererei bene trovarne i veri motivi con l'esperimento.** >>

$Q \propto R^3$		$\frac{dQ}{dt} = -\frac{Q}{\tau}$	Raffreddamento esponenziale
$\frac{dQ}{dt} \propto -R^2$		$\tau \propto R$	Tempo di raffreddamento

50000 anni sono troppi ! Newton tenta una **Datazione Sacra della Terra**  
Combina esegesi biblica, miti greci, cronologia dei regni persiani e Babilonesi ,  
precessione degli equinozi  **3998 A.C.** Creazione della Terra

Cfr. **23 Ottobre 4004 A.C.** ; James Ussher, (1658)

# Un aristocratico Newtoniano



Georges Louis Leclerc, conte di Buffon  
(1707 - 1788)

Montbard, 7 settembre 1707  
**Nasce in Borgogna, vicino a Digione, Georges Buffon, biologo, zoologo e valente saggista. Le sue teorie lo pongono come il più importante precursore di Lamarck e Darwin. I suoi scritti furono tra le opere più celebri dell'Illuminismo.**

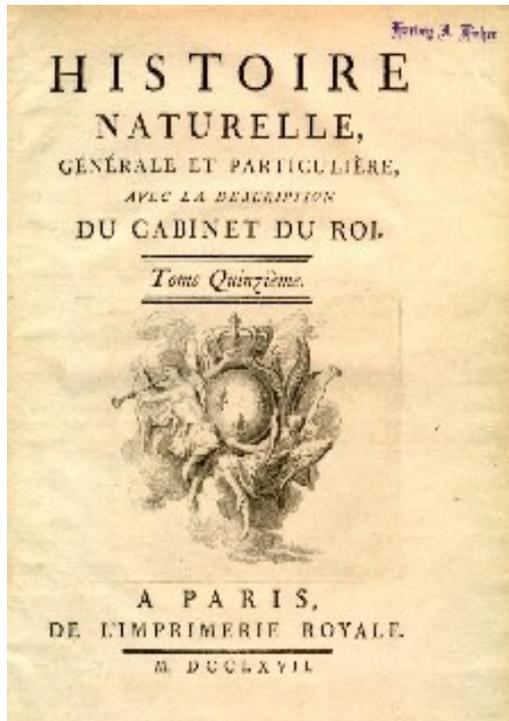
**George Louis Leclerc,**

**conte di Buffon, signore di Montbard, marchese di Rougement, Visconte di Quincy e Vismomino di Tonnère.... ebbe la fortuna di non nascere troppo male !**



*« È per mezzo di esperimenti fini, ragionati e seguiti, che si forza la natura per scoprirne il segreto; tutti gli altri metodi non hanno mai funzionato... Le raccolte di esperimenti e di osservazioni sono quindi gli unici libri che possono aumentare le nostre conoscenze »*

# Datazione termica della Terra



Fonderie Buffon presso Montbard.

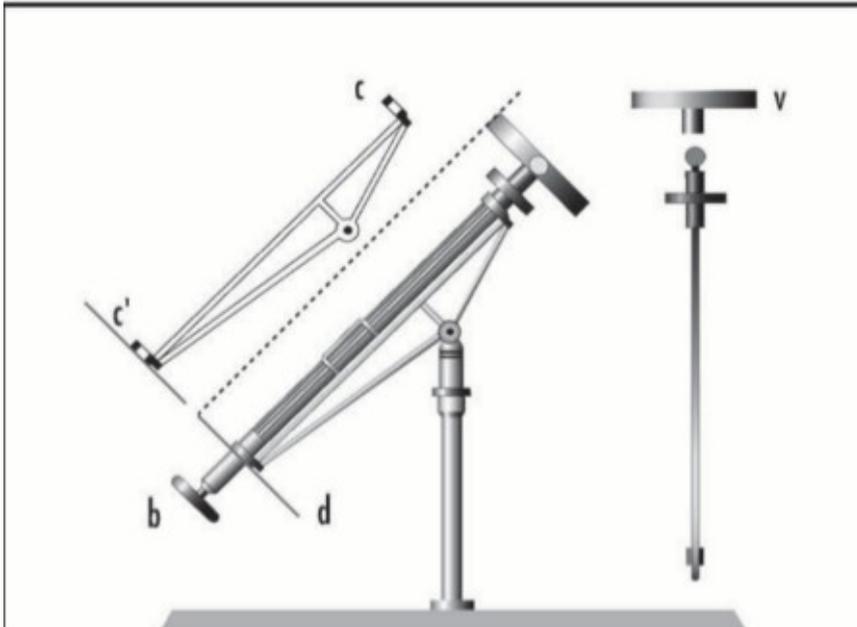
Il sistema solare e la Terra stessa si sarebbero formati a seguito di una **violenta collisione tra una cometa ed il Sole** causando l'emissione di una serie di "globi" di fuoco che raffreddandosi hanno originato i pianeti

**Nella fonderia di sua proprietà, fece costruire dieci sfere di ferro di diametro variabile da 1.3 cm a 12,5 cm e verificò la legge Newtoniana del raffreddamento**

Diede una stima dell'età della Terra prossima a **75000 anni.**

# Misura della costante Solare

**Pireliometro di Pouillet:** Calorimetro ad acqua per misurare  
Il Calore proveniente dal sole nell'unità di tempo e di superficie



$$c \frac{dT}{dt} = -D(T - T_0) + \varphi S$$

$$T - T_0 = \frac{\varphi S \tau}{c} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right]$$

Dalla variazione di temperatura si risale  
Alla costante Solare  $\varphi \sim 1300 \text{ W/m}^2$

La distanza Terra – Sole  
 $d = 150 \text{ Mkm}$



$$\frac{dE}{dt} = \varphi \pi d^2 \sim 3 \times 10^{26} \text{ W}$$

**Da dove viene questa energia ? Quanto può durare ?**

# Una rassegna di spiegazioni sbagliate

La storia della scienza è un cumulo di rovine: teorie sbagliate, enti dimenticati (etere, flogisto) , distinzioni superate (moto naturale – moto violento)

La storia della scienza è <<*Indissolubile intreccio di tradizionalismo e di spirito critico , di adesione a criteri saldamente stabiliti e di “scetticismo generalizzato”* [...] *Gli standard professionali impongono un contesto di disciplina e al tempo stesso incoraggiano la ribellione verso di essa. Per essere presa sul serio una ricerca deve essere in accordo con una serie diffusa di convinzioni intorno alla natura e ai nostri modi di conoscerla*>> (Paolo Rossi, **I classici e la Scienza**)

**Da dove viene l'energia del Sole ? Quanto può durare ?**

- Modello a palla di carbone
- Caduta Meteorica (Kelvin)
- Contrazione gravitazionale (Kelvin-Helmoltz)

# Palla di carbone

- Il sole è una palla di massa =  $2 \times 10^{30}$  Kg
- L'energia persa dal sole =  $3 \times 10^{26}$  J/s
- Il sole è una grande fornace a carbone
- Il carbone libera per combustione  $3 \times 10^7$  J/kg

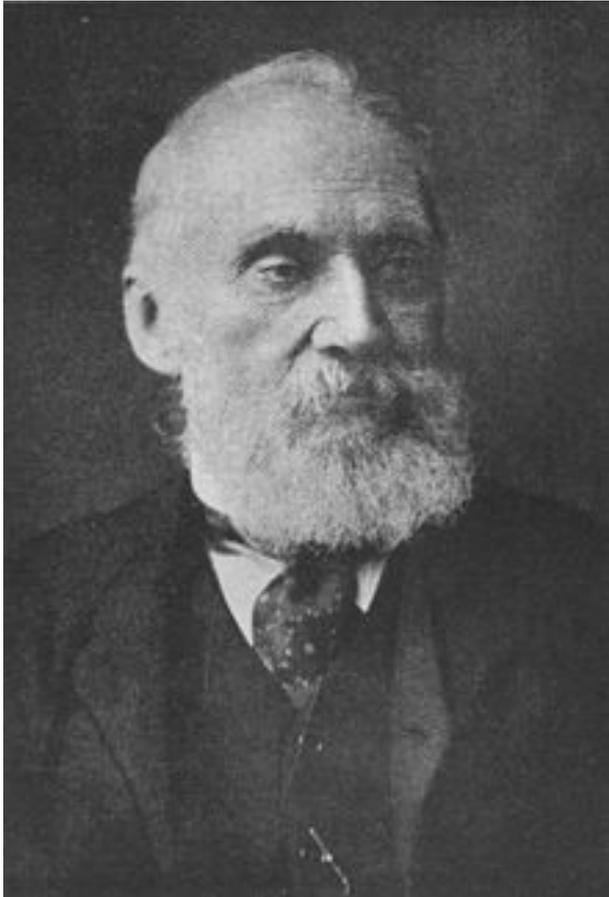
$$\tau = \frac{2 \times 10^{30} \times 3 \times 10^7}{3 \times 10^{26}} \sim 6300 \text{ anni}$$

Se – come afferma Newton - il sistema solare è stato creato nel 4000 A.C.

**La fine del mondo non dovrebbe tardare**

# Caduta meteorica (Kelvin)

- Sul Sole cadono incessantemente meteore che al momento dell'impatto liberano energia sotto forma di calore
- Il processo va avanti finché c'è materia disponibile
- La materia in caduta è probabilmente localizzata in dischi instabili interni all'orbita di Mercurio, infatti il perielio di Mercurio mostra una precessione anomala



$$\Delta E = GM_s \left( \frac{1}{R_s} - \frac{1}{R} \right) \Delta M$$

$$\frac{\Delta E}{\Delta t} = 3 \times 10^{26} \text{ J/s}$$



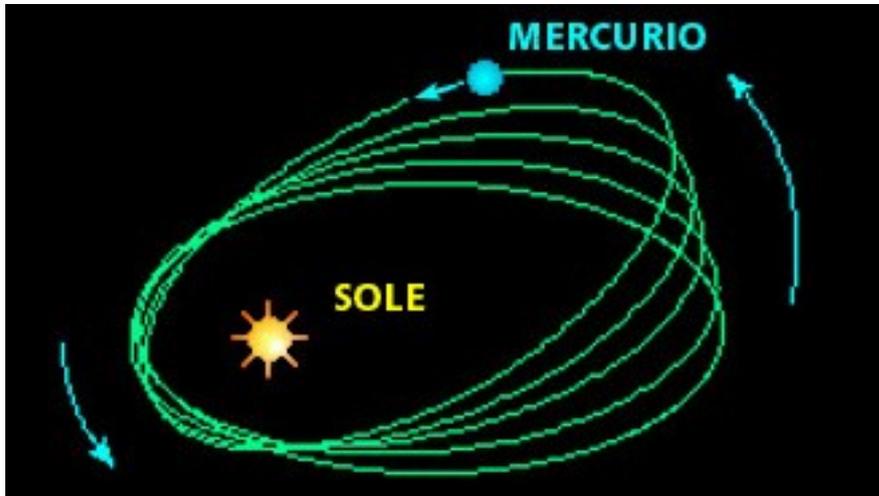
$$\frac{\Delta M}{\Delta t} = 3 \times 10^{-8} \frac{M_s}{\text{year}}$$

1% della massa della Terra ogni anno !!!!

**Sembra quasi ragionevole ma è sbagliato...  
Le anomalie di Mercurio dovrebbero essere enormi !**

# Precessione del perielio di Mercurio

5600" ogni secolo di cui solo 5557" spiegati dalla meccanica celeste



- Uno dei “challenging problem” della meccanica celeste
- **U. Laverrier** propose l'esistenza di un pianeta nuovo, Vulcano, interno all'orbita di Mercurio
- **Kelvin** inizialmente lo spiegò con la presenza di dischi di materia intorno al Sole
- Non sfericità del Sole
- Modifiche della gravitazione universale

# Contrazione gravitazionale del Sole

- Invece di far cadere materia sulla superficie solare è l'intero sole che collassa su se stesso implodendo verso il proprio centro
- Durante la lenta contrazione, in ogni istante la densità è omogenea ( ipotesi è molto debole ! )

$$E = \frac{3}{5} \frac{G M_s^2}{R} = 2.3 \times 10^{41} J$$

$$\frac{\Delta E}{\Delta t} = 3 \times 10^{26} J/s$$



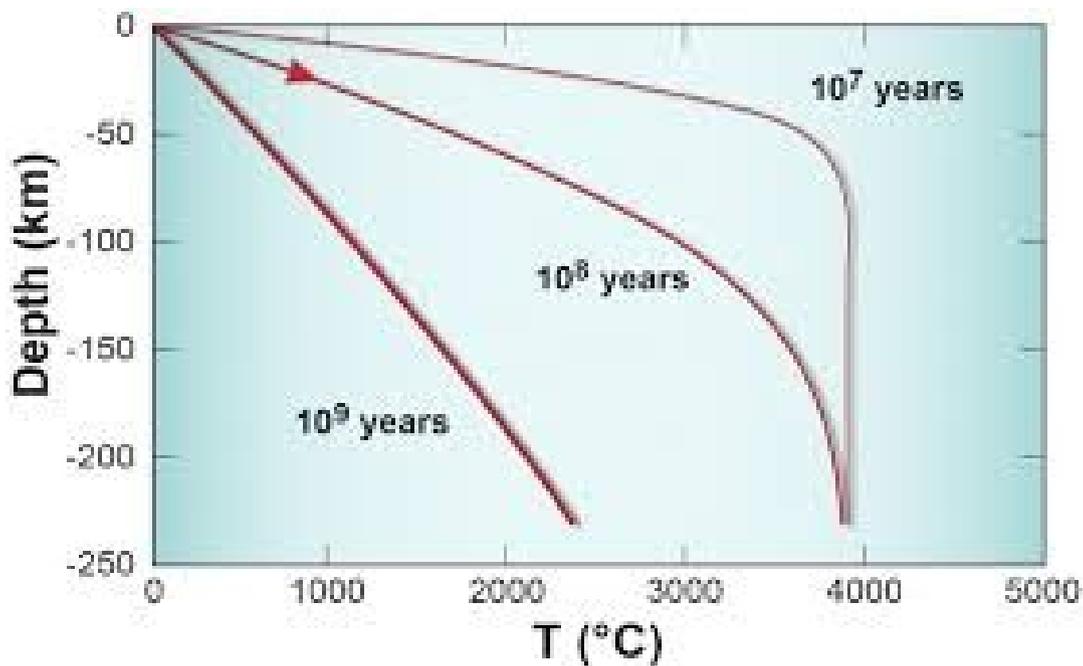
$$\tau = 20_{-0}^{+80} \times 10^6 \text{ anni}$$

In un anno il sole si contrae di 85 m  
Impercettibile rispetto a ~ 600000 km di raggio !

**Kelvin contro la Geologia :** 20 milioni di anni sono troppo pochi per i geologi che reclamavano oltre 300 Milioni di anni per spiegare i fenomeni di erosione e stratificazione geologica

# Età della Terra (Kelvin)

- La terra è stata nel passato una palla a circa  $T_0 = 2000^\circ \text{C}$
- La temperatura superficiale è in equilibrio con l'esterno a  $T_s = 0^\circ$
- Si è raffreddata esternamente ma dentro è ancora calda
- Al giorno d'oggi si osserva che la temperatura aumenta di  $(3 \pm 1)^\circ \text{C}$  ogni 100 m di profondità



$$\frac{dT}{dz} = \frac{T_0 - T_s}{\sqrt{\pi D t}}$$

$$D = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$t = (45 \pm 30) \times 10^6 \text{ years}$$

# ***Publicazioni di Kelvin***

- **On the secular cooling of the earth**, Transactions of the Royal Society of Edinburgh, Vol. XXIII, pp. 167-169, 1864. Read April 28, 1862
- **On the Age of the Sun's Heat**, Macmillan's Magazine, vol. 5 (March 5, 1862), pp. 388-393.
- **The “Doctrine of Uniformity” in Geology Briefly Refuted** Proceedings of the Royal Society of Edinburgh, 1866, 5: 512-13

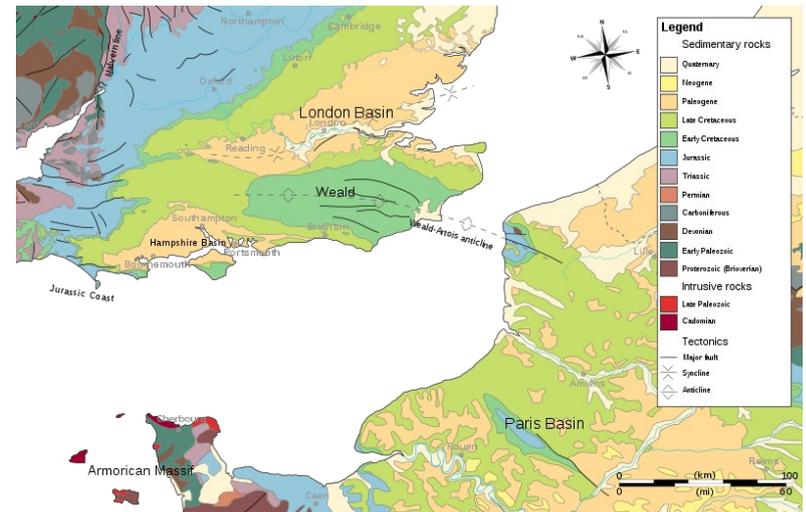
# Alcuni estratti

## Attacco a Darwin

<< What then are we to think of such geological estimates as 300,000,000 years for the “**denudation of the Weald**”? Whether is it more probable that the physical conditions of the sun’s matter differ 1,000 times more than dynamics compel us to suppose they differ from those of matter in our laboratories; or that a stormy sea, with possibly Channel tides of extreme violence, should encroach on a chalk cliff 1,000 times more rapidly than **Mr. Darwin’s** estimate of one inch per century? >>

## Finitezza del mondo

<<As for the future, we may say, with equal certainty, that inhabitants of the earth can not continue to enjoy the light and heat essential to their life for many million years longer **unless sources now unknown** to us are prepared in the great storehouse of creation.>>



# ***Uno scenario incerto ma accettato in forza dell'autorità Scientifica di Kelvin***

- Il Sole dura 20 ~ 100 milioni di anni
- La Terra è uscita dal forno ( $45 \pm 30$ ) milioni di anni fa

## Effetti negativi:

- I suoi tempi limitati hanno ritardato lo sviluppo della geo-dinamica
- Ha ostacolato l'assimilazione delle teorie di Darwin

## Effetti positivi:

- Ha sottoposto a critica l'uniformitarismo di Lyell
- Ha mostrato come la natura sia soggetta ad una storia termodinamica
- Ha portato a compimento quantitativo i tentativi di cronologia di Buffon

# Entra in scena la radioattività

- Datazioni al radio-carbonio : la Terra ha 4.5 miliardi di anni
- Il Sole è una centrale nucleare a fusione, la sua massa gli permette di splendere per circa 10 miliardi di anni



... ma questa è un'altra storia !

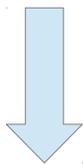
# Cambio di paradigma

- Il cosmo-orologio di Newton non esiste più
- La natura non è statica, qualche volta oscilla intorno a stati di equilibrio altre volte evolve irreversibilmente verso nuovi stati.

## Meccanica Newtoniana

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = F(r)$$

invariante per  $t \rightarrow -t$

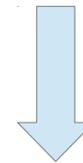


**Fenomeni ciclici**

## Termodinamica

*Il calore fluisce spontaneamente da un corpo caldo ad un corpo freddo*

rottura della simmetria  $t \rightarrow -t$



**Fenomeni evolutivi**

# Bibliografia

- P. Richet, una storia naturale del tempo, (2010)
- H. Krivine, La Terre, des mythes au savoir (2011)
- J.D. Burchfield, Lord Kelvin and the age of the earth, Chicago (1975)
- A. Stinner, Calculating the age of the Earth and the Sun, [www.iop.org/journals](http://www.iop.org/journals) (2002)