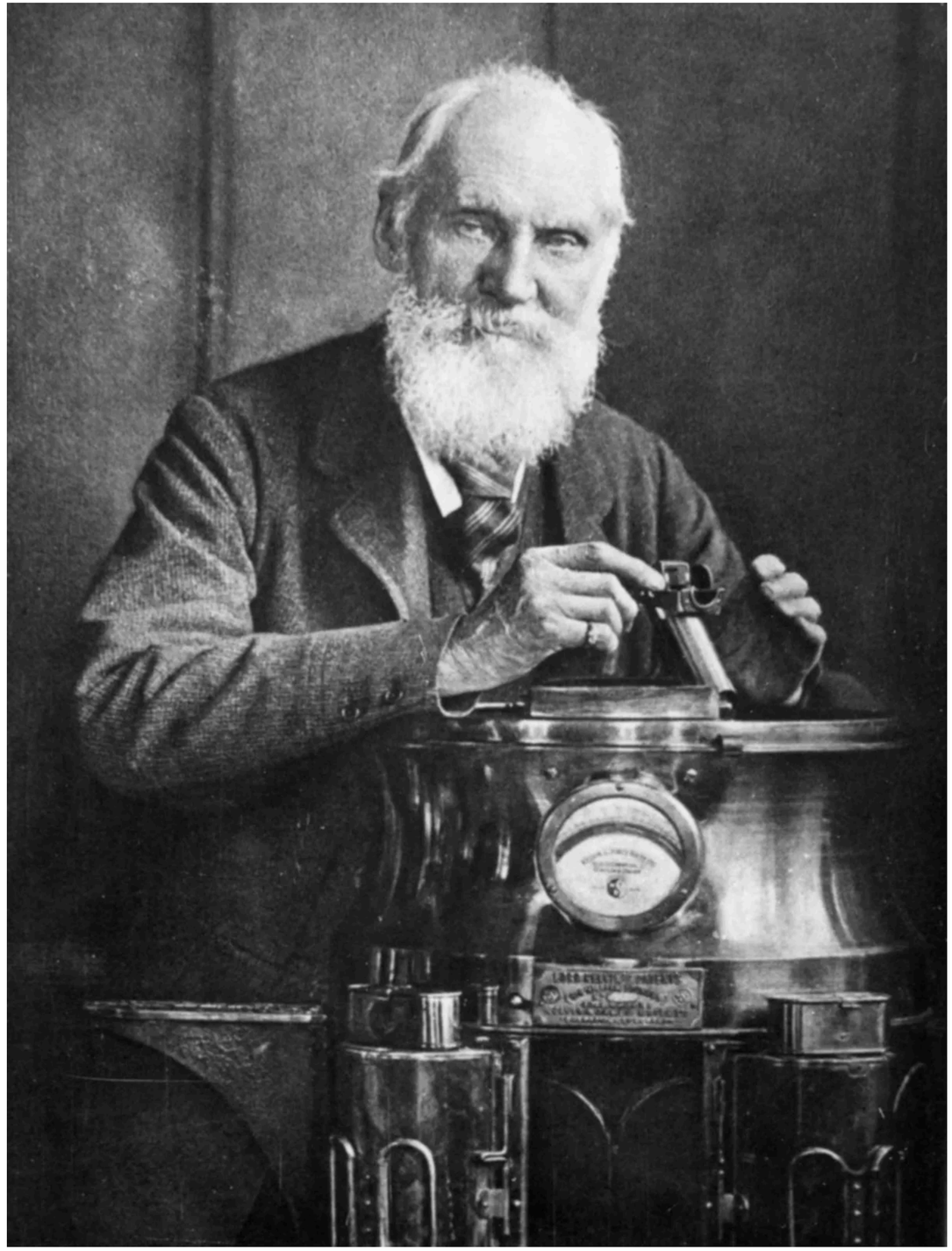
Massimiliano Matteuzzi, Corso di Astrofisica, 08/03/2024

La termodinamica in Astrofisica

il problema della datazione del Sistema Solare

Cosa vedremo stasera

Lord William Thomson, primo barone di Kelvin



Credit: Photos.com/Thinkstock

Primi studi e scoperte

- Nato a Belfast nel 1824 e morto nel 1907 a Largs;
- Glasgow 1832: teoria di **Fourier** sulla propagazione del **calore** (datazione della Terra nel 1862);
- 1845: **induzione elettrostatica** di Faraday;
- 1848: **scala assoluta di temperatura** e concetto di zero assoluto;
- 1851: **secondo principio della termodinamica**.
  Il "calore perduto" di Carnot unito alla conservazione dell'energia di Joule;
- 1852 - 1856: **effetto Joule-Thomson** (variazione di T ad entalpia costante).

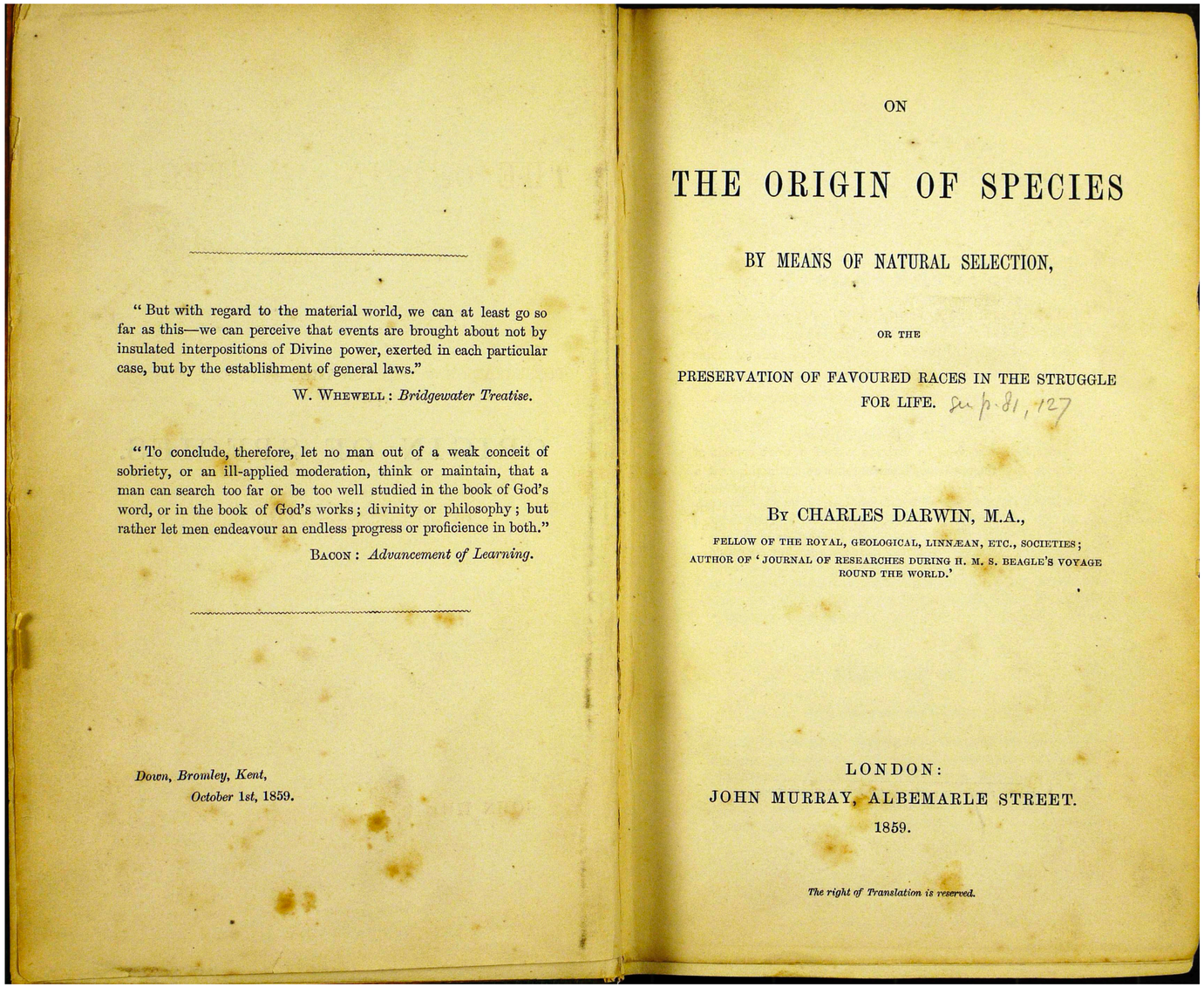
Altri importanti contributi

- **Instabilità di Kelvin-Helmholtz** (moto relativo tra fluidi);
- **Modello atomico** (ripreso poi da J. J. Thomson);
- **Telecomunicazione intercontinentale** (galvanometro a specchi)
- **1892** divenne primo barone di **Kelvin**;
- Nell'arco della sua lunga carriera scrisse **661 articoli** e collezionò **69 brevetti**.

Altri importanti contributi

- **Instabilità di Kelvin-Helmholtz** (moto relativo tra fluidi);
- **Modello atomico** (ripreso poi da J. J. Thomson);
- **Telecomunicazione intercontinentale** (galvanometro a specchi)
- **1892** divenne primo barone di **Kelvin**;
- Nell'arco della sua lunga carriera scrisse **661 articoli** e collezionò **69 brevetti**.

Charles Darwin e l'origine delle specie



"But with regard to the material world, we can at least go so far as this—we can perceive that events are brought about not by insulated interpositions of Divine power, exerted in each particular case, but by the establishment of general laws."

W. WHEWELL: *Bridgewater Treatise.*

"To conclude, therefore, let no man out of a weak conceit of sobriety, or an ill-applied moderation, think or maintain, that a man can search too far or be too well studied in the book of God's word, or in the book of God's works; divinity or philosophy; but rather let men endeavour an endless progress or proficience in both."

BACON: *Advancement of Learning.*

Down, Bromley, Kent,
October 1st, 1859.

ON

THE ORIGIN OF SPECIES

BY MEANS OF NATURAL SELECTION,

OR THE

PRESERVATION OF FAVOURED RACES IN THE STRUGGLE FOR LIFE. Sup p. 81, 127

BY CHARLES DARWIN, M.A.,

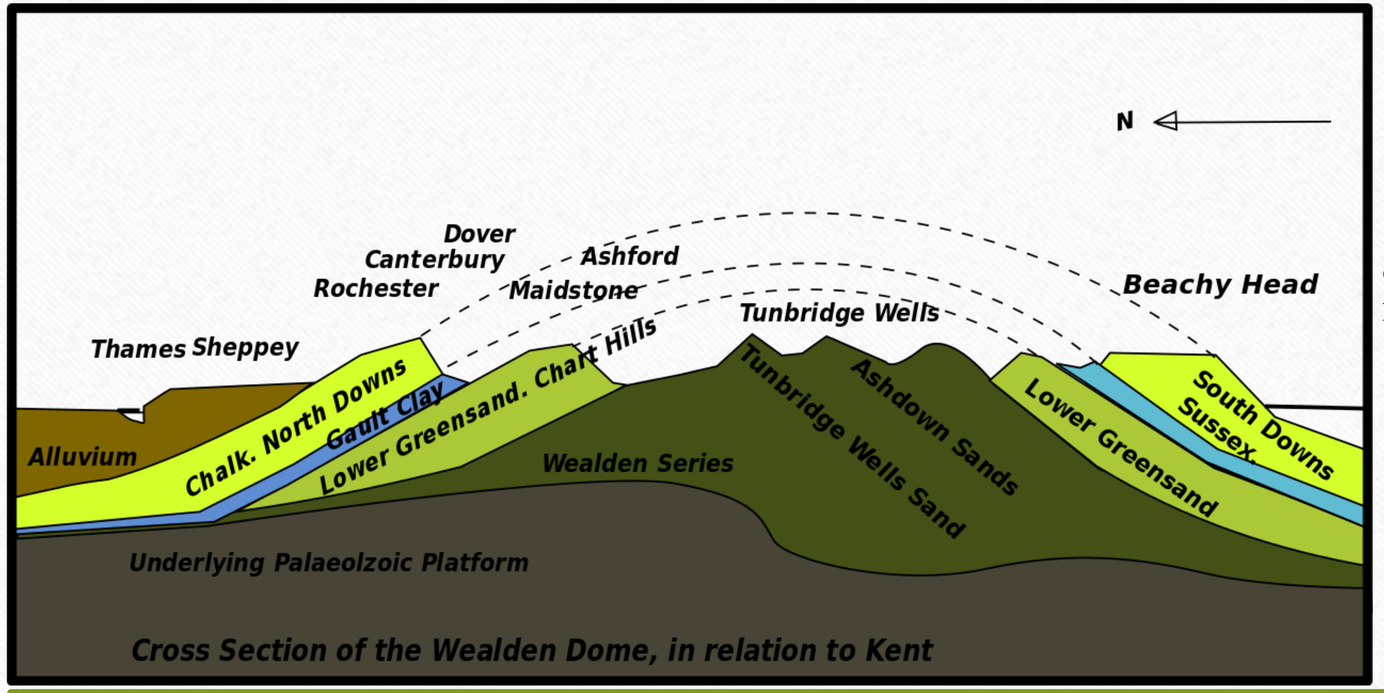
FELLOW OF THE ROYAL, GEOLOGICAL, LINNÆAN, ETC., SOCIETIES;
AUTHOR OF 'JOURNAL OF RESEARCHES DURING H. M. S. BEAGLE'S VOYAGE ROUND THE WORLD.'

LONDON:
JOHN MURRAY, ALBEMARLE STREET.
1859.

The right of Translation is reserved.

Credit: https://keespopinga.blogspot.com/2022/01/darwin-e-il-problema-della-datazione.html

Età della Terra: geologia



Credit: https://keespopinga.blogspot.com/2022/01/darwin-e-il-problema-della-datazione.html

1859, Charles **Darwin**: servono **300 Myr** per eliminare il **Weald** tramite erosione.

Cosa suggeriva la Fisica?
Età del Sole e della Terra

Come splende il Sole?
Da quanto esiste?

- **Luminosità**: tasso di perdita di energia per irraggiamento al secondo;
- Distanza Terra-Sole + luce misurata a Terra: stimiamo circa $3.8 \cdot 10^{26}$ W;
- **1840**, **Mayer** e **Waterson**: **energia gravitazionale** come fonte dell'energia solare.
- **1854**, **Helmholtz:** enorme potenza solare causata da **contrazioni gravitazionali**;

Età del Sole per Kelvin

- **Conseguenza** del **secondo principio** della termodinamica:
  Sole e Terra si raffreddano progressivamente (**morte termica**);
- 1854: **impatto continuo** di **meteoriti** sulla sua superficie producono energia;
- 1862: **contrazione gravitazionale** come fonte di energia (**meteoriti primordiali**).

Teoria delle meteoriti primordiali

"Questo aspetto della teoria meteorica rappresenta sicuramente la spiegazione vera e completa del calore solare e può essere difficilmente messa in dubbio, se consideriamo le seguenti ragioni: (1) Nessun'altra spiegazione naturale, a parte l'azione chimica, può essere pensata. (2) La teoria chimica è comunque insufficiente, perché la reazione chimica più energetica che conosciamo, messa in atto tra sostanze ammontanti all'intera massa solare, genererebbe calore soltanto per 3.000 anni. (3) Non c'è alcuna difficoltà a giustificare il calore di 20.000.000 anni tramite la teoria delle meteoriti.

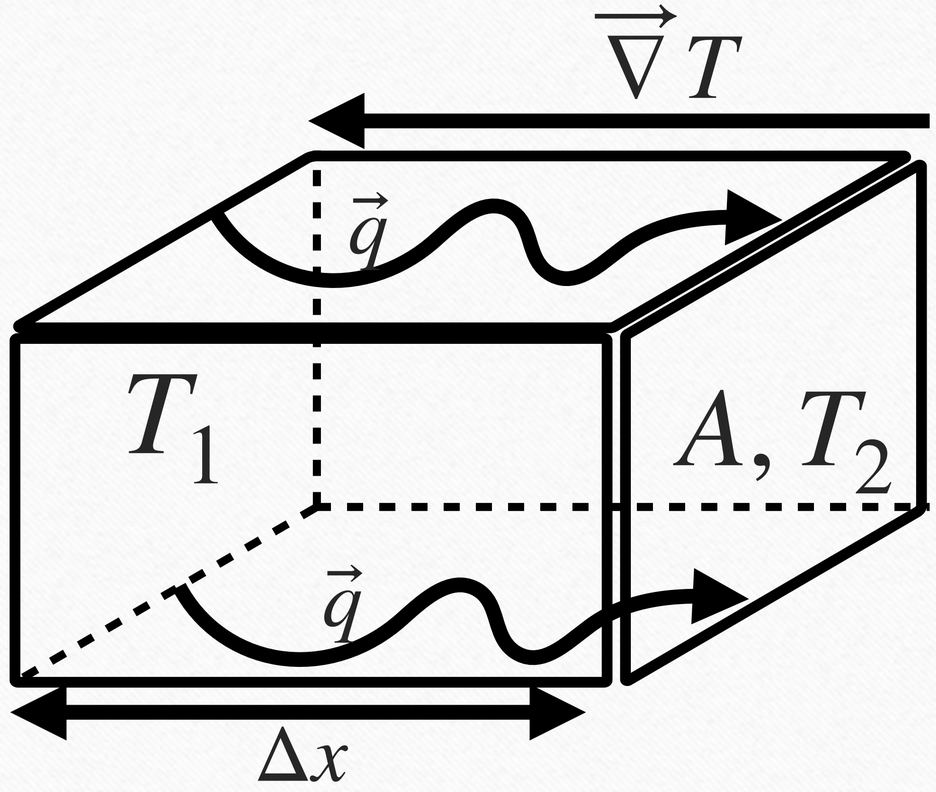
Teorema del viriale

- E_{th} e $|E_{\text{g}}|$ sono legate in sistemi **autogravitanti all'equilibrio**: $E_{\text{th}} = \frac{|E_{\text{g}}|}{2}$;
- **Contrazione** di un sistema: $|E_{\text{g}}|$ aumenta, ovvero $\Delta|E_{\text{g}}| > 0$;
- $\Delta E_{\text{th}} = \frac{\Delta|E_{\text{g}}|}{2}$: **metà** $\Delta|E_{\text{g}}|$ usata per **aumentare** E_{th}, **metà** per **irraggiare**.

Tempo termodinamico

- Per una sfera uniforme: $|E_g| = \frac{3GM^2}{5R}$. Se $R \gg R_\odot$, $\Delta|E_{g,\odot}| = \frac{3GM_\odot^2}{5R_\odot}$;
- $\Delta E_{th} \equiv E_{rad} = \frac{\Delta|E_g|}{2}$ da teorema del viriale. Pertanto, $E_{rad,\odot} = \frac{3GM_\odot^2}{10R_\odot}$;
- Tempo termodinamico: $t_{age,\odot} = \frac{E_{rad\odot}}{L_\odot} = \frac{3GM_\odot^2}{10R_\odot L_\odot} \approx 9.4\,\mathrm{Myr}$

Legge di Fourier del flusso termico



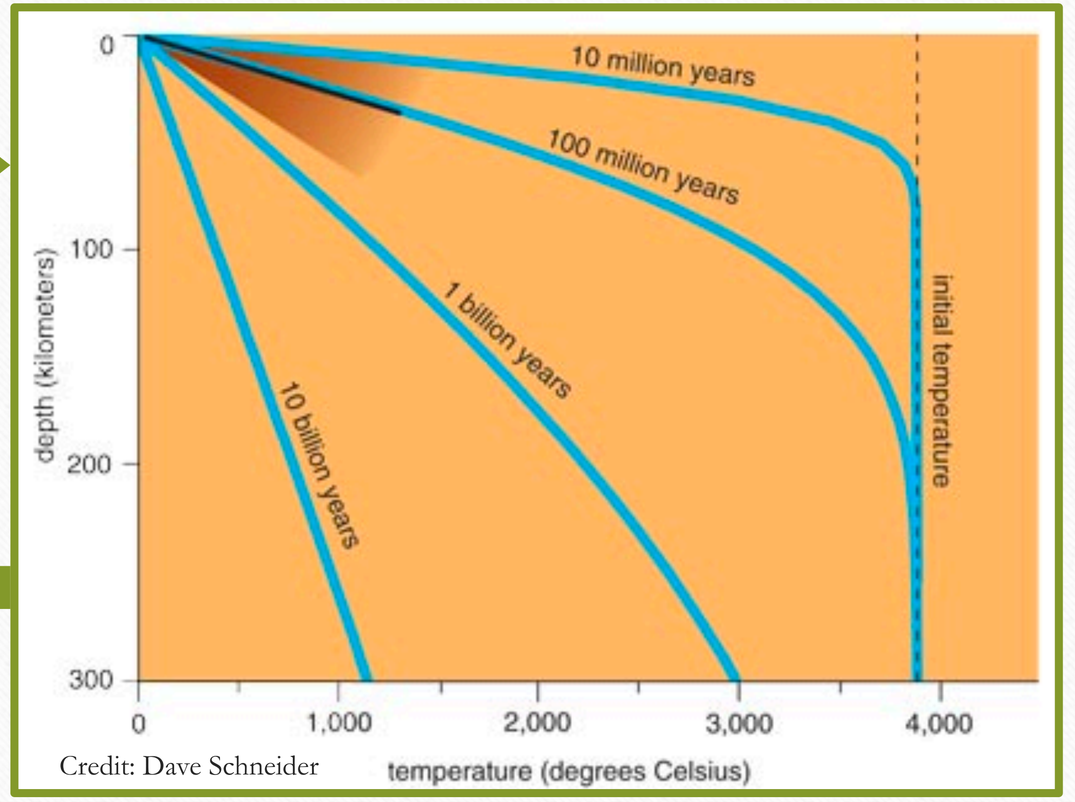
- Conduzione del calore;
- $T_1 > T_2$ nell'esempio;
- $\vec{q} = -\kappa \vec{\nabla} T$ in $\frac{W}{m^2}$;
- κ in $\frac{W}{m \cdot K}$ è conducibilità termica (dipende dal materiale);

1892: Kelvin stima l'età della Terra

- **Inizialmente** la **Terra** era una sfera **calda e fusa** (**stessa T ovunque**);
- Si **raffredda fino** alla temperatura superficiale dei **giorni nostri**;
- Matematicamente dobbiamo risolvere $\vec{q} = -\kappa \overrightarrow{\nabla} T$ e $\Delta Q = mc_{\mathrm{h}} \Delta T$;

1892: Kelvin stima l'età della Terra

- $\nabla T = 36\,^{\circ}\mathrm{C/km}$ delle miniere;
- $T_{in} = 3900\,^{\circ}\mathrm{C}$ (fusione delle rocce);
- $T_{sup,oggi} = 0\,^{\circ}\mathrm{C}$ sulla superficie oggi.



- Età della Terra **tra 20 e 400 Myr**;
- L'**interno della Terra** ha **mantenuto** meglio la **T iniziale**.

Chi ha ragione?

- Kelvin: "*Allora cosa dobbiamo pensare di certe stime geologiche (di Darwin) come 300 milioni di anni per la "Denudazione del Weald"?*";
- Darwin: "*Le opinioni di Thompson riguardo alla recente età del mondo sono state per un po' di tempo il motivo dei miei più dolorosi problemi.*".

Cosa manca nel modello solare: radioattività?

- **1896**, si scopre la **radioattività**. Calore prodotto senza cambiare la temperatura;
- 1904, Rutherford: "*La scoperta di elementi radioattivi, che nella loro disintegrazione liberano enormi quantità di energia, aumenta il limite possibile della durata della vita su questo pianeta, e giustifica il tempo richiesto dai biologi e geologi per il processo dell'evoluzione.*";
- **Wilson** e **Darwin ipotizzano in essa la causa della luce solare**.

Cosa manca nel modello solare: fusione nucleare!

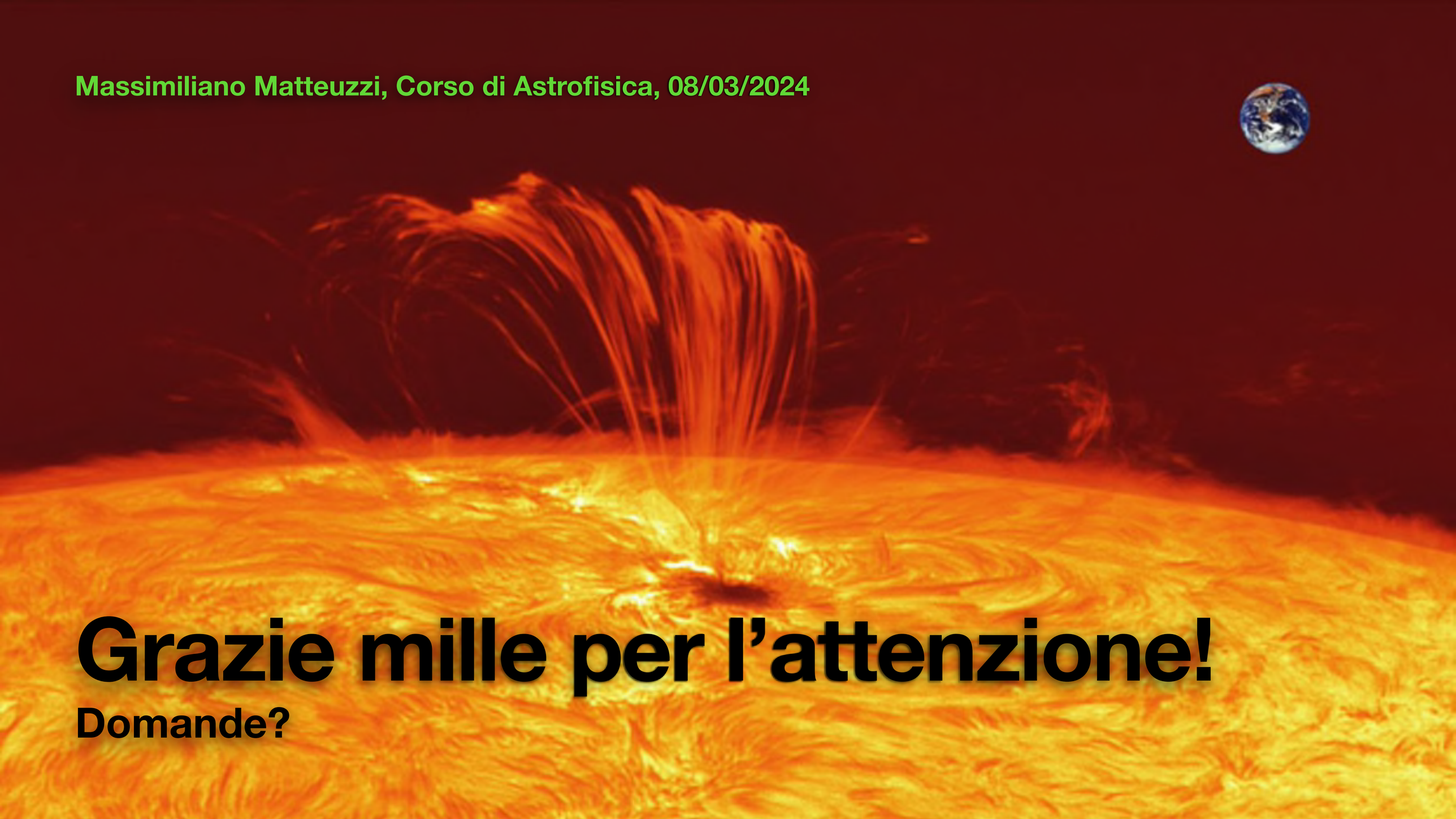
- **Sole contiene** quasi **solo H: serve** una **fonte alternativa** (c'è **dipendenza con la T**);
- 1905, Einstein: **relazione massa-energia**;
- 1920, Aston: **differenza in massa 4H-He**. **Eddington ipotizza** sia la **fonte** di $E_{\mathrm{rad},\odot}$;
- 1939, Bethe: meccanica quantistica completa il quadro, ovvero le **reazioni termonucleari** (**neutrini** e misura della **temperatura centrale** del Sole).

Cosa mancano nel modello terrestre: convezione e radioattività!

- 1894, **John Perry**: crosta solida+centro liquido nella Terra;
- **Mantello** oggi è un **fluido viscoso** mosso da **correnti convettive**;
- È un **serbatoio di calore**: si cede con estrema lentezza (**300°C ogni 3 Gyr**);

Cosa mancano nel modello terrestre: convezione e radioattività!

- **Radioattività**: anch'essa **serbatoio di calore** (meno della convezione);
- **Datazione radiometrica:** Terra ha circa 4,54 miliardi di anni;
- Rocce terrestri, lunari e meteoriti per stimare l'**età del sistema solare**.



Grazie mille per l'attenzione!

Domande?

Bibliografia

- "*Intervista impossibile a William Thomson – Lord Kelvin*" di Franco Bagnoli;
- "*Come splende il Sole*" di John N. Bahcall;
- "*John Perry's neglected critique of Kelvin's age for the Earth: A missed opportunity in geodynamics*" di Philip England, Peter Molnar, Frank Richter.

Bibliografia

- https://it.wikipedia.org/wiki/William_Thomson,_I_barone_Kelvin
- https://www.scientificast.it/lerrore-di-lord-kelvin/
- https://keespopinga.blogspot.com/2022/01/darwin-e-il-problema-della-datazione.html
- https://it.wikipedia.org/wiki/Storia_della_geologia
- https://en.wikipedia.org/wiki/Age_of_Earth
- https://www.americanscientist.org/article/kelvin-perry-and-the-age-of-the-earth