



Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del sole alle tempeste spaziali

Alessandro Bemporad
INAF - Osservatorio Astrofisico di Torino

Sommario

- Il nostro posto nell'Universo
- Perché studiare il Sole?
- Cosa conosciamo del Sole?
 - L'interno del Sole: produzione e trasporto dell'energia
 - L'esterno del Sole: struttura ed attività dell'atmosfera
- Dal Sole alla Terra
 - La magnetosfera terrestre
 - Aurore e Tempeste Geomagnetiche
- La missione Solar Orbiter dell'ESA

Il nostro posto nell'Universo

“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino



Casa nostra: la Terra



“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino



Casa nostra: la Terra



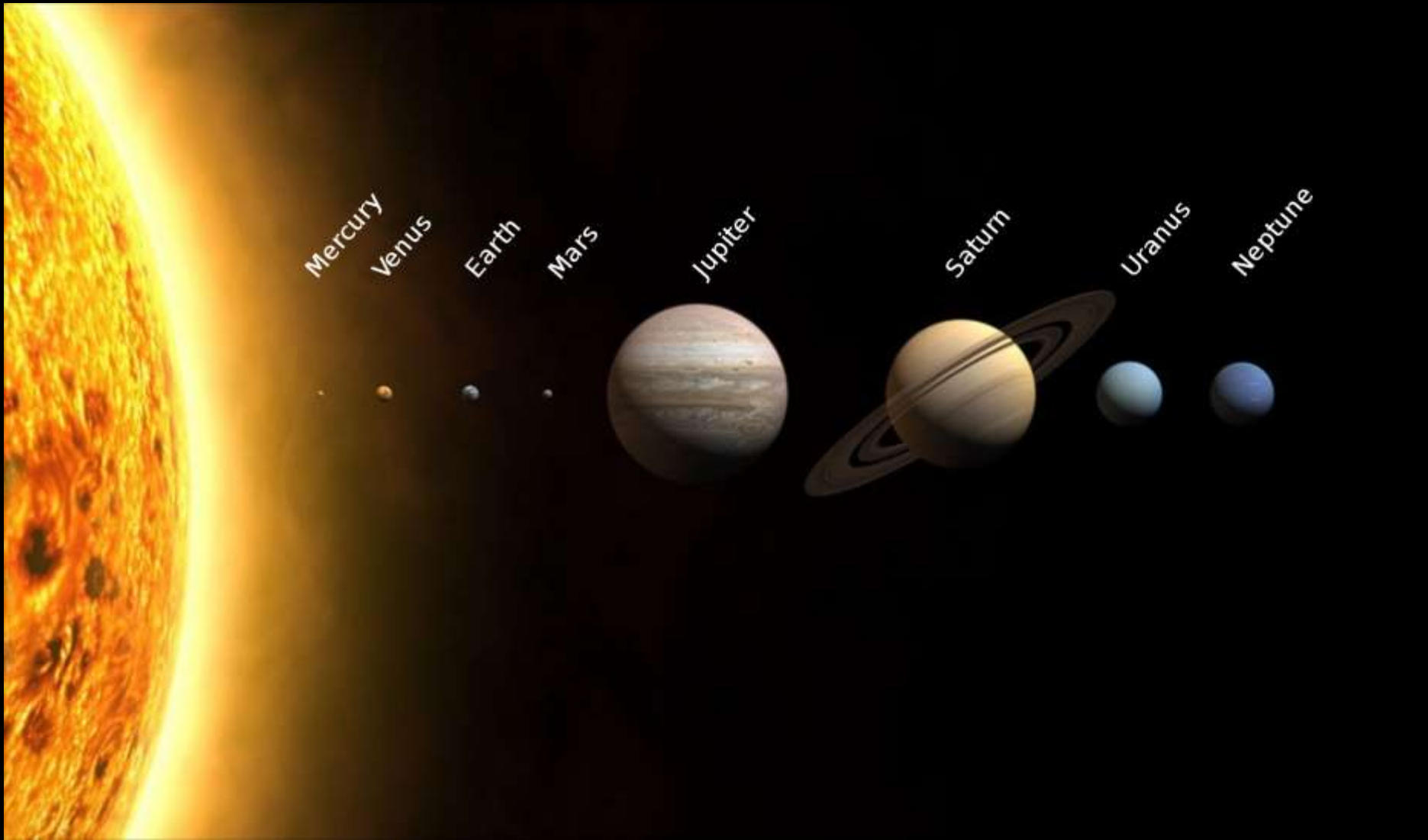
Terra (da 1.4 miliardi di km)

“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino



Il nostro vicinato: il sistema solare

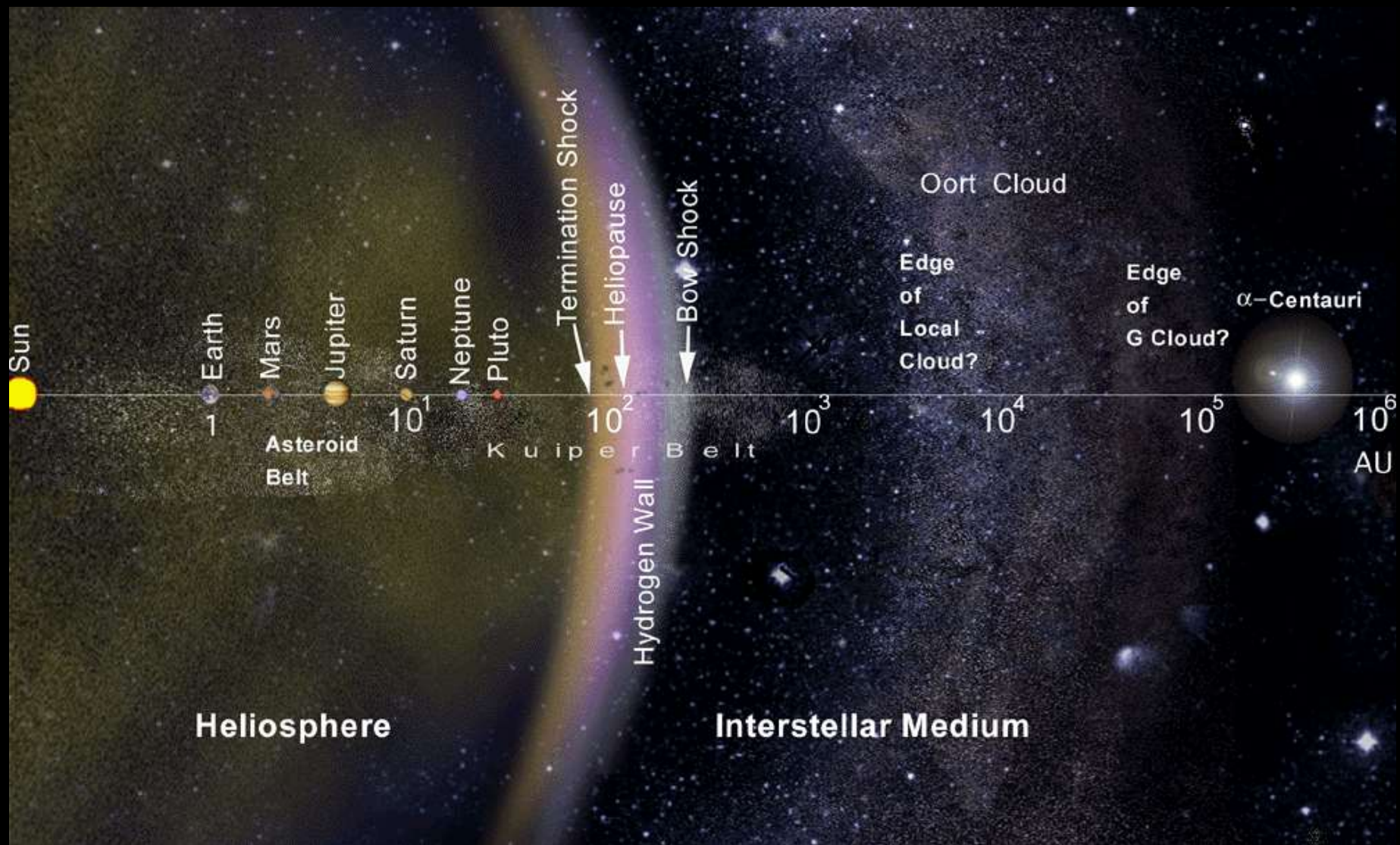


“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino



Il nostro spazio: l'Eliosfera



“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino

Il nostro spazio: l'Eliosfera



Bow Shock Near a Young Star in the Orion Nebula  HUBBLESITE.org

“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino

Lasciando casa: spazi interstellari



Supponiamo ora che **tutta l'Eliosfera** (~ 200 AU) stia in una **goccia d'acqua** (~ 2 mm di diametro), allora:

Raggio Terra: ~ 1.5 molecole di H_2O

Raggio Sole: $\sim$ dimensione di un virus

Orbita della Terra (1 AU): $\sim 1/100$ mm

Proxima Centauri (4.23 a.l.):
 ~ 2.67 metri da noi

Diametro Via Lattea ($100 \cdot 10^3$ a.l.):
 ~ 63 chilometri

Spessore Via Lattea (10^3 a.l.):
 ~ 630 metri
contiene circa 100 miliardi di stelle

“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino

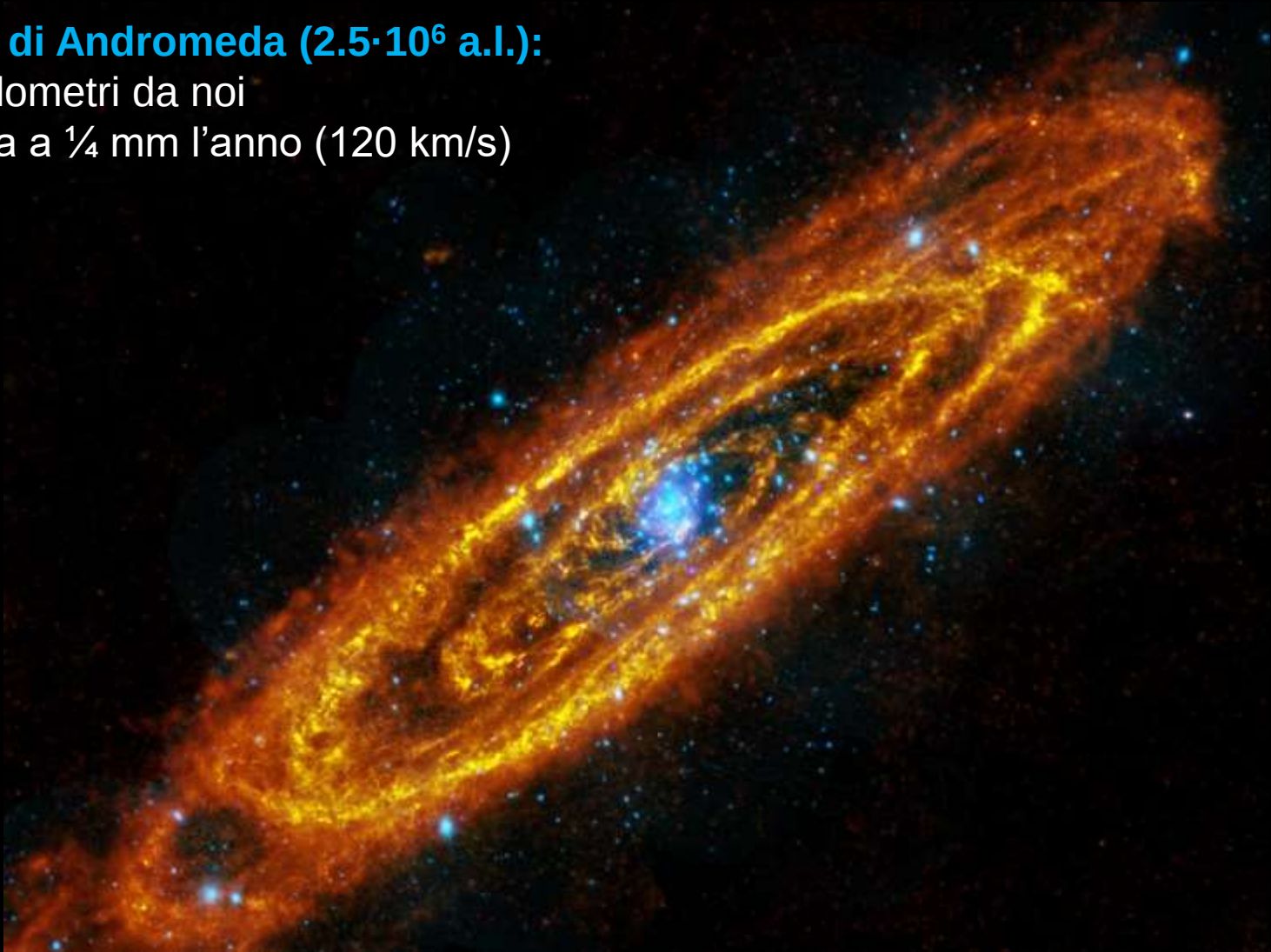


Lontano da casa: altre galassie

Galassia di Andromeda ($2.5 \cdot 10^6$ a.l.):

~ 1600 chilometri da noi

si avvicina a $\frac{1}{4}$ mm l'anno (120 km/s)

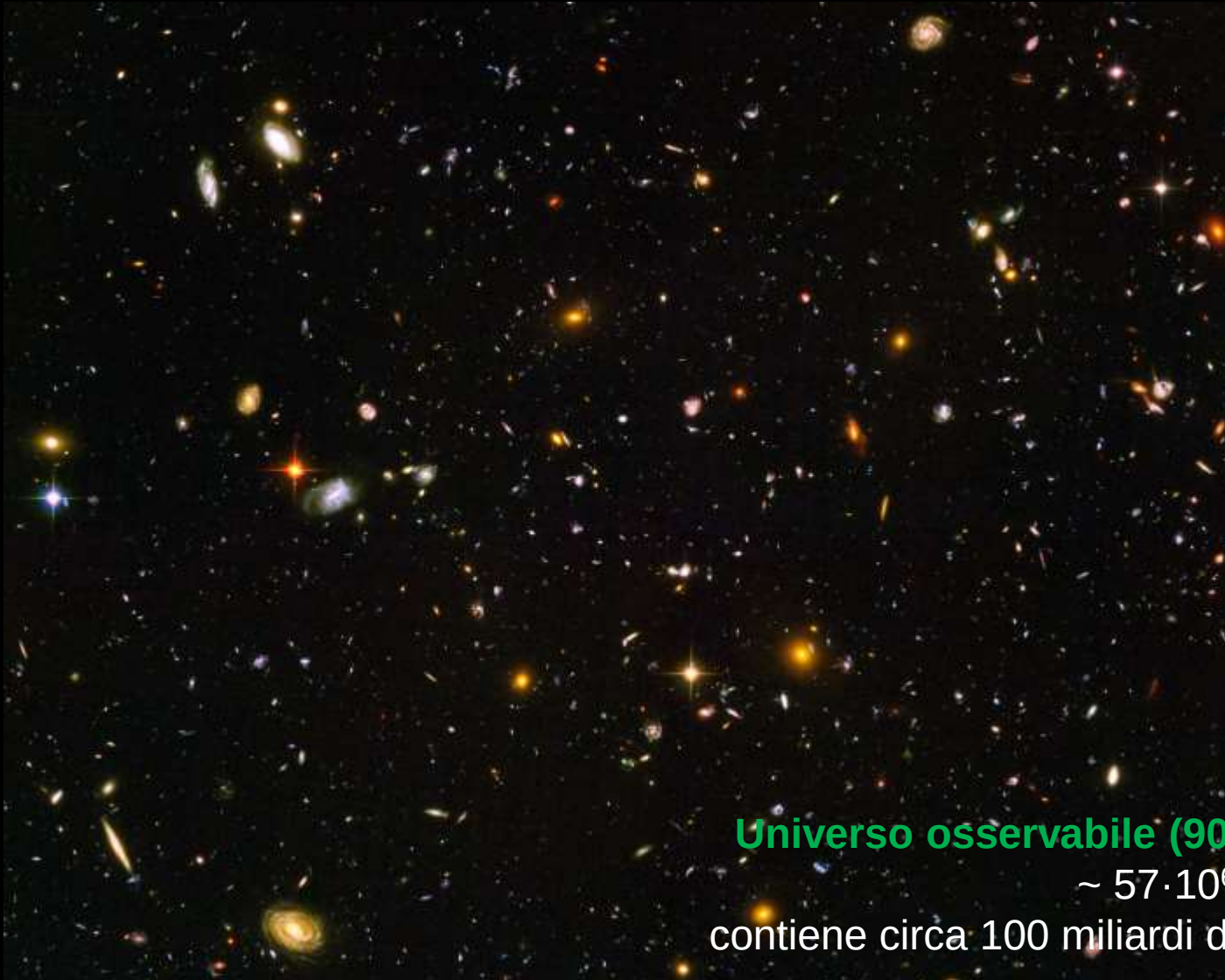


“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino



Molto lontano da casa



Universo osservabile ($90 \cdot 10^9$ a.l.):
~ $57 \cdot 10^6$ chilometri
contiene circa 100 miliardi di galassie

“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino



Noi e la nostra stella



Il nostro posto è **qui vicino alla nostra stella** da cui dipende **tutta la vita** sulla Terra; niente nel resto dell'universo ci influenza più del Sole

“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino



Perché studiare il Sole?

“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

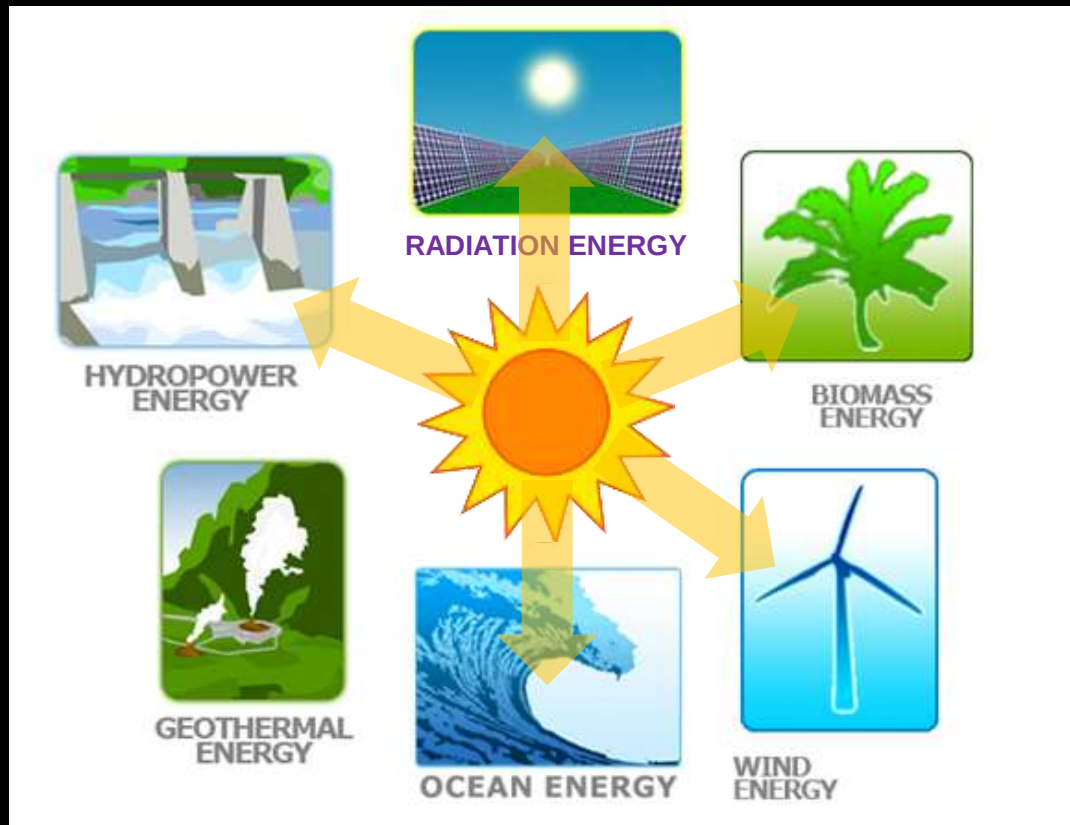
A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino



Perché studiare il Sole?

- Sole come fonte di energia

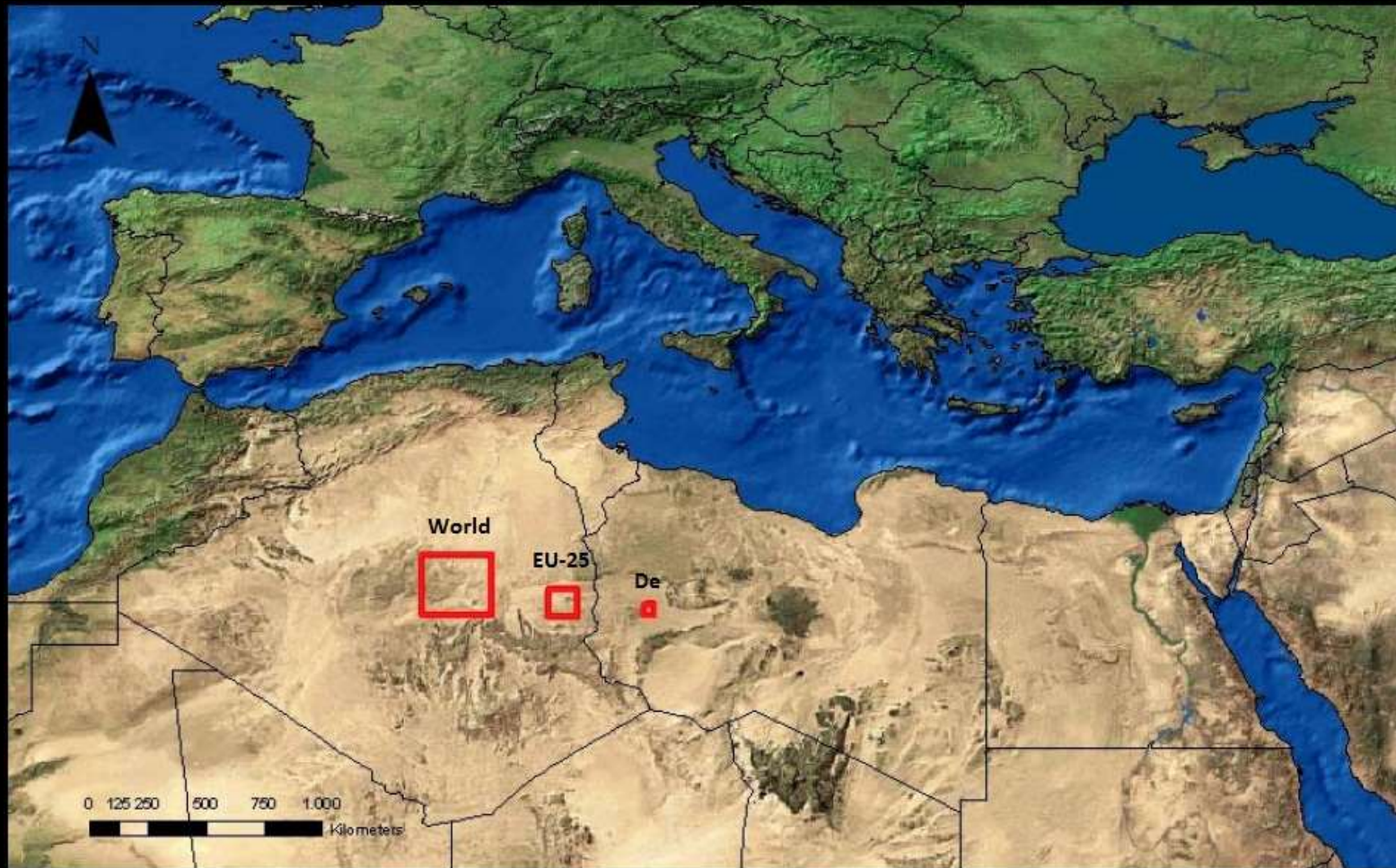
- 1) **Diretta**, sotto forma di radiazione elettromagnetica,
- 2) **Indiretta**, sotto forma di petrolio, carbone, energia eolica, energia idroelettrica, energia da biomassa.



“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino

Perché studiare il Sole?



Area da coprire a pannelli solari per il **fabbisogno mondiale di energia**: 254x254 km²
(~ Piemonte + Lombardia + Veneto)

“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

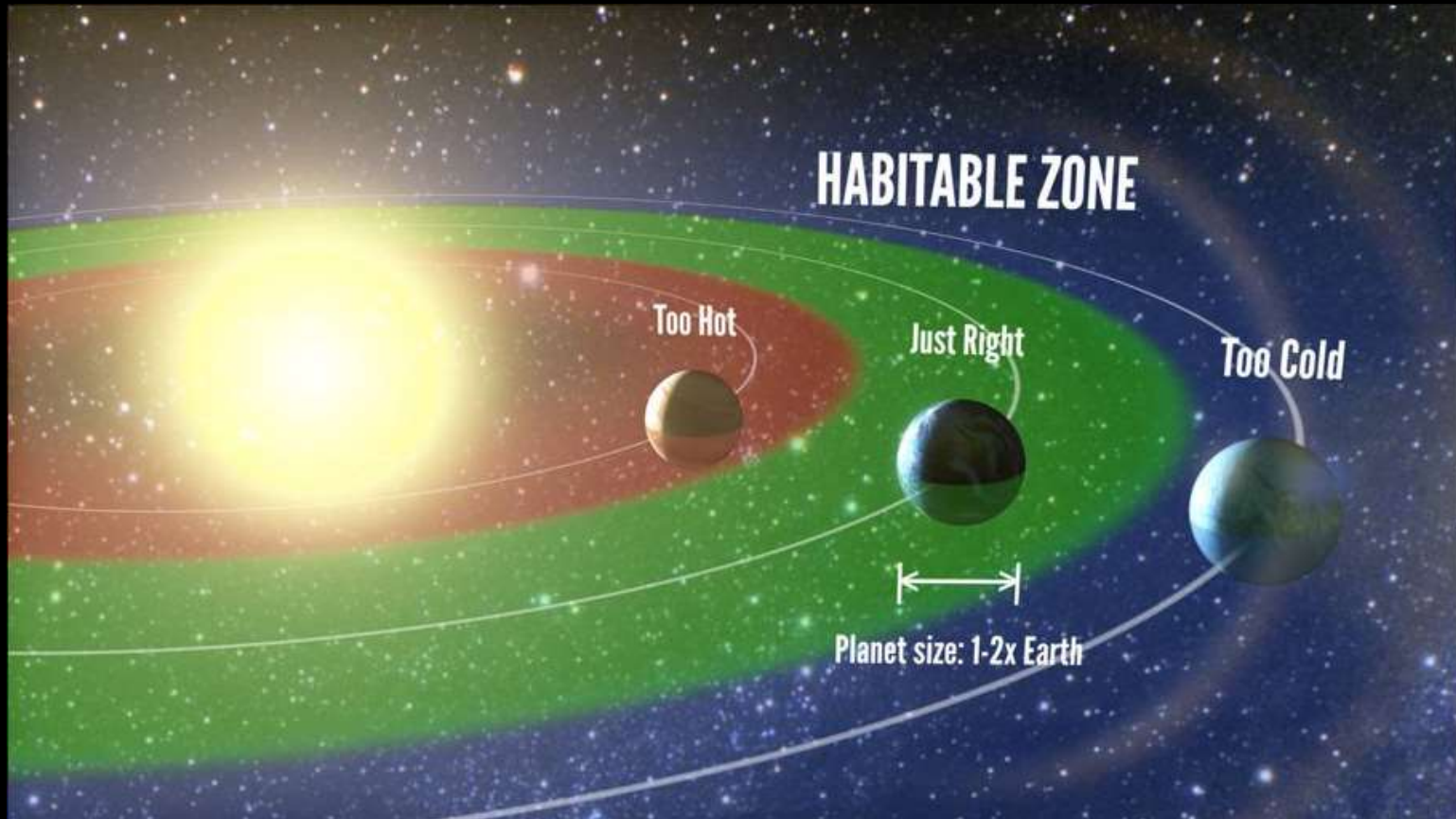
A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino



Perché studiare il Sole?

- **Capire l'origine della vita e la sua sostenibilità**

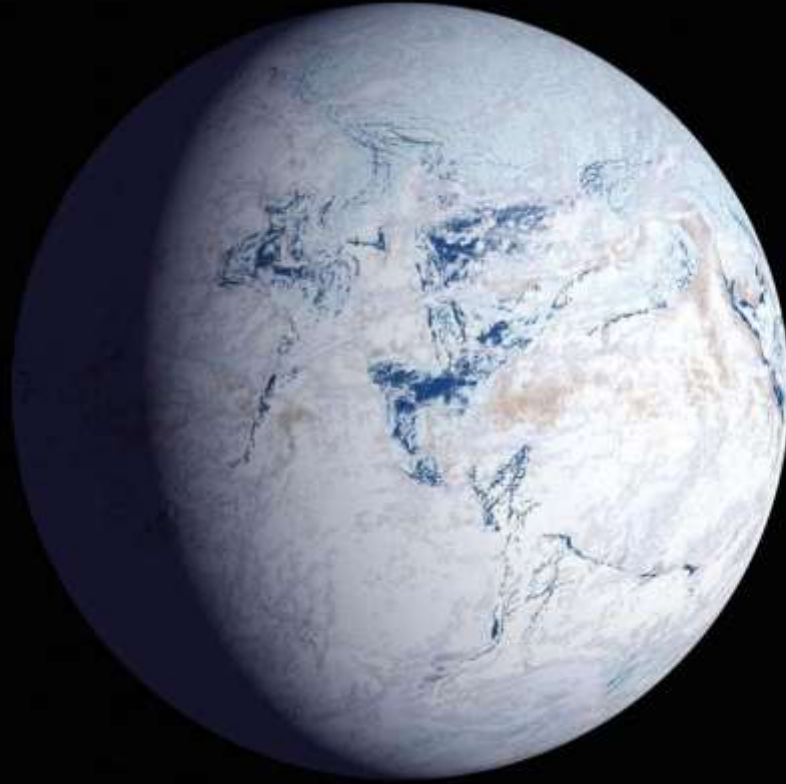
Le caratteristiche del sole sono tali da permettere (unitamente alle caratteristiche del pianeta) la vita → **zone di abitabilità planetaria**



“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino

Perché studiare il Sole?



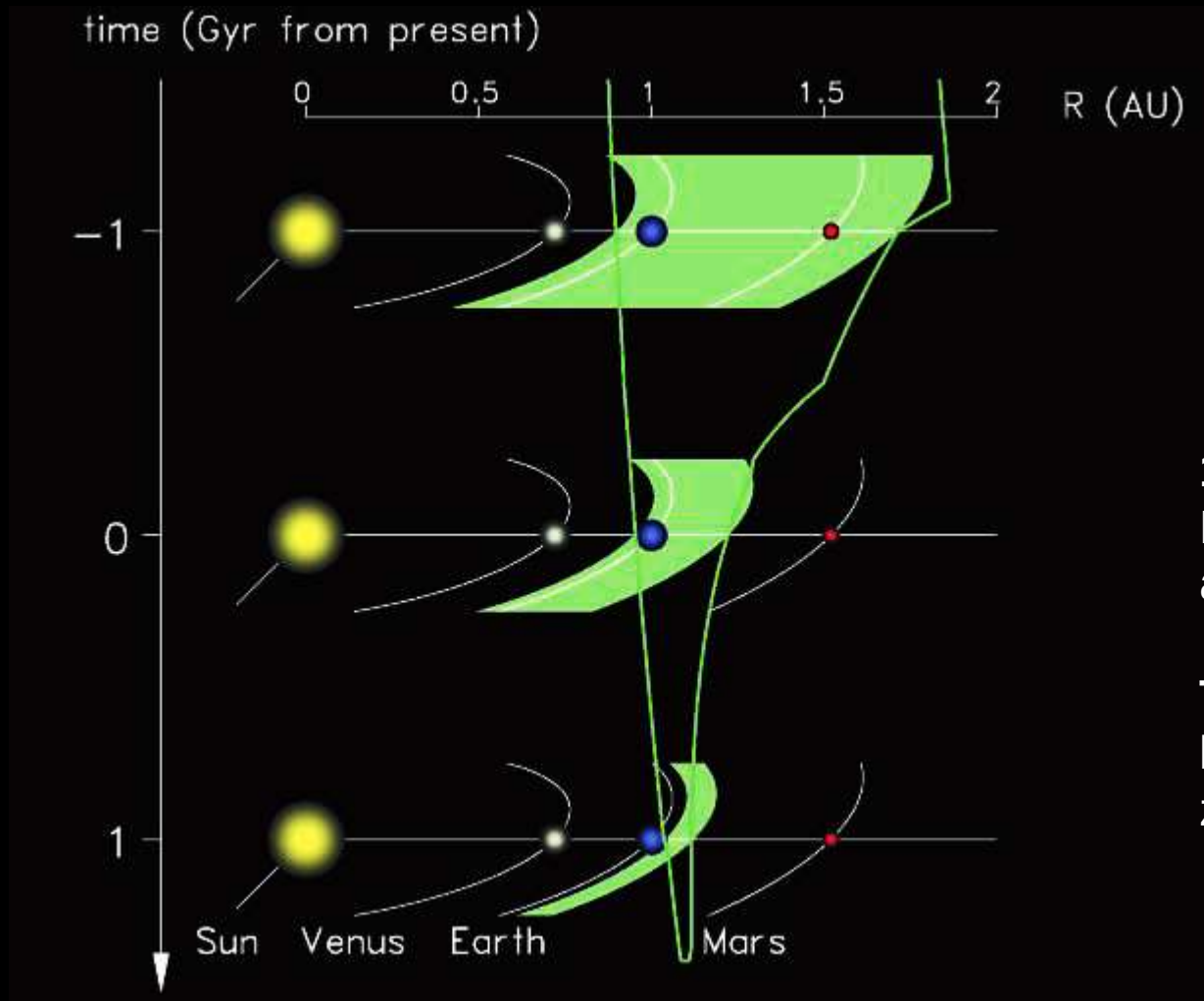
Evoluzione solare: il sole giovane era circa il 30% meno luminoso di adesso → **glaciazione completa e irreversibile** della Terra (paradosso del Sole giovane debole)

“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino



Perché studiare il Sole?



Evoluzione del Sole e della vita

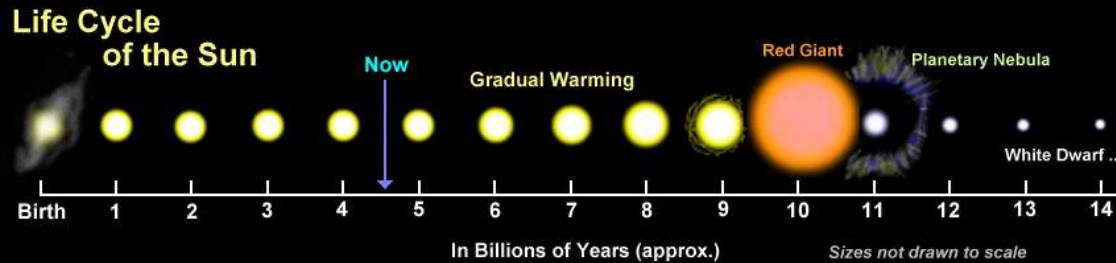
1 miliardo di anni fa:
Marte era nella zona abitabile

Tra 1 miliardo di anni:
la Terra uscirà dalla zona abitabile

“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino

Perché studiare il Sole?



La **fine del Sole**: nebulosa planetaria e nana bianca (foto: Ring Nebula)

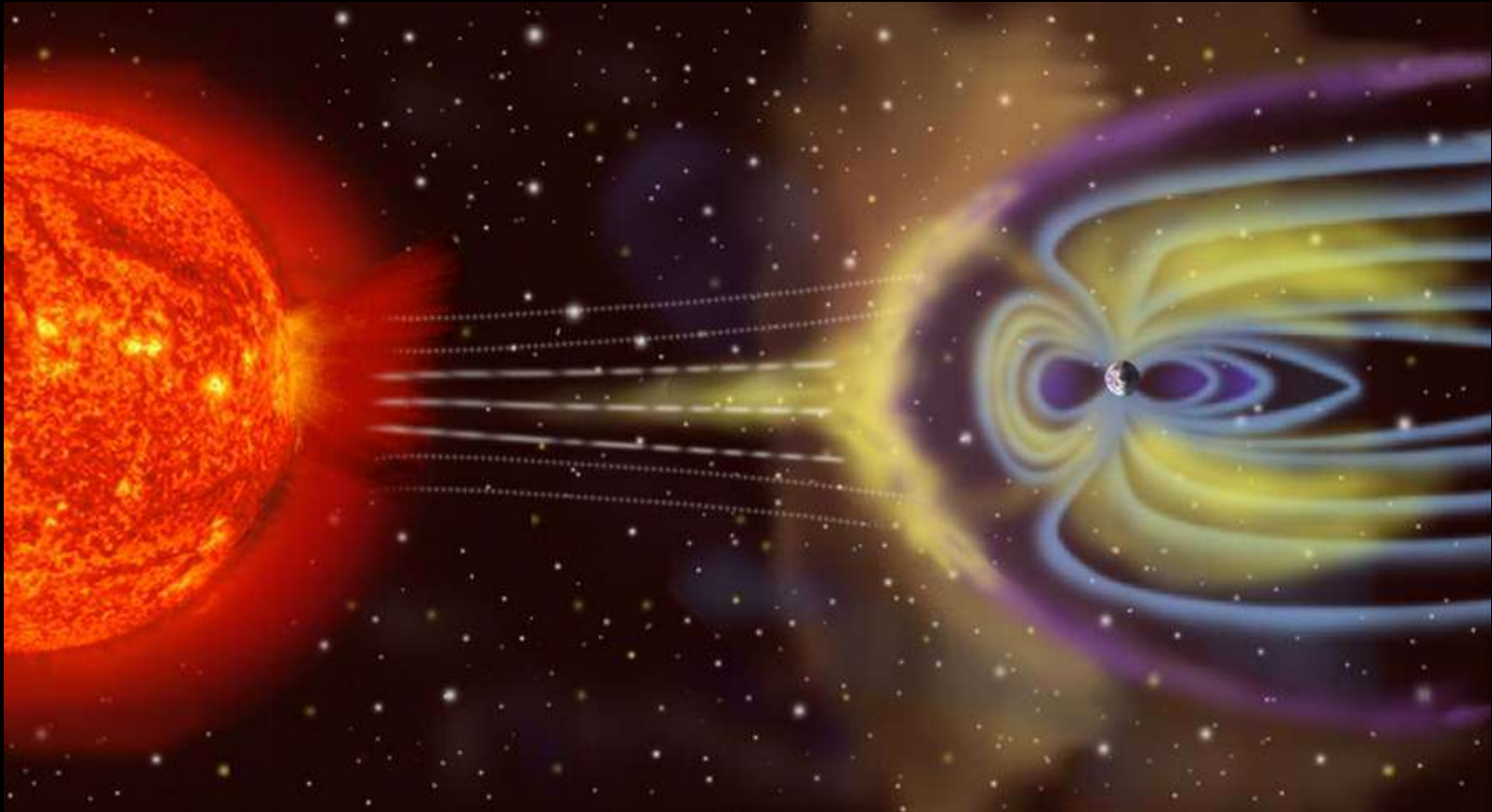
“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino

Perché studiare il Sole?

- Capire e prevedere gli eventi di Meteorologia Spaziale

Le **eruzioni solari** investono spesso la Terra con un flusso di particelle ad alta energia, solo in parte schermate dal campo magnetico terrestre



“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino

Perché studiare il Sole?



“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

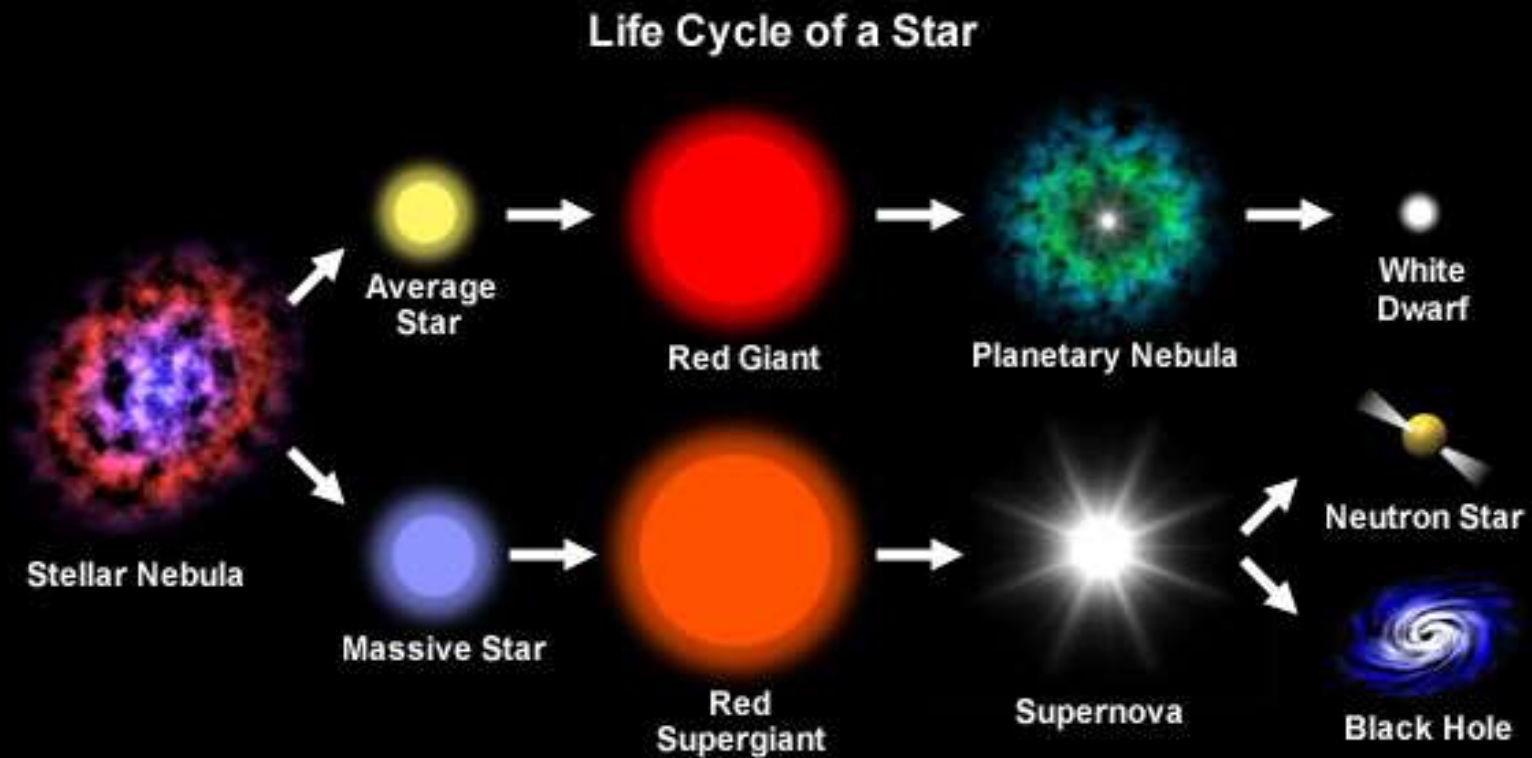
A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino



Perché studiare il Sole?

- Capire la nascita e la vita di tutte le stelle

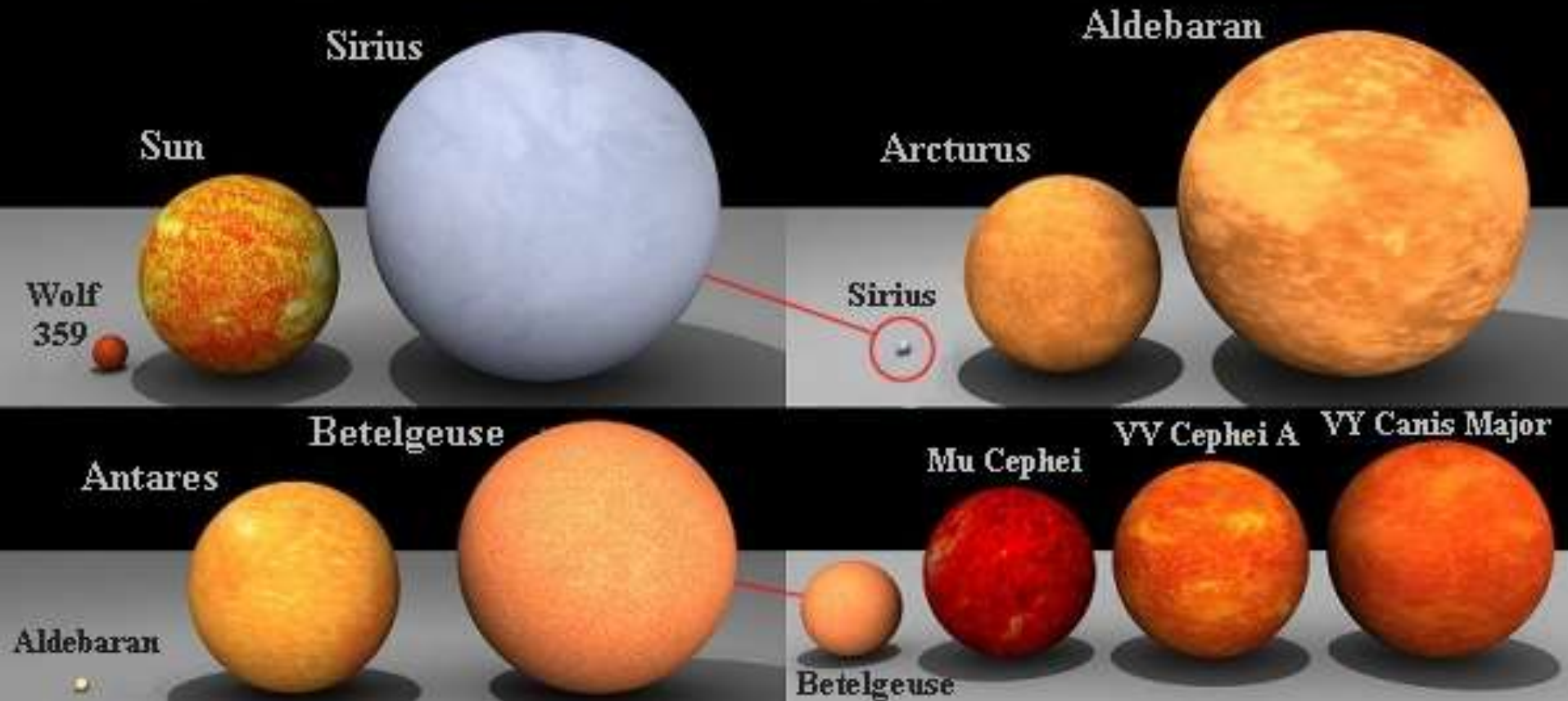
Tutti i modelli di **evoluzione stellare** sono «versioni modificate» dei nostri modelli di **evoluzione solare**



“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino

Perché studiare il Sole?



Tutte le rappresentazioni che vediamo delle altre stelle dell'universo sono solo disegni: il Sole è **l'unica stella di cui possiamo vedere in dettaglio le strutture**

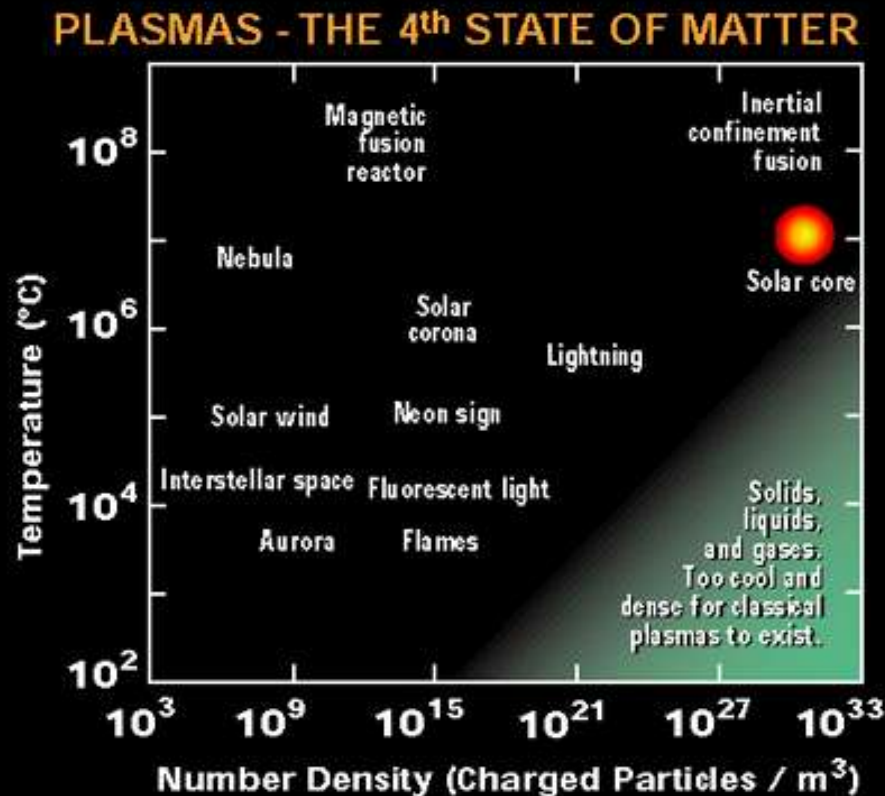
"Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali"

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino

Perché studiare il Sole?

- Capire la fisica del plasma

Il 99.999% dell'universo visibile è fatto di **plasma**, come il Sole → studiare il Sole vuol dire studiare la fisica del 4° stato della materia **di cui è fatto tutto l'universo**

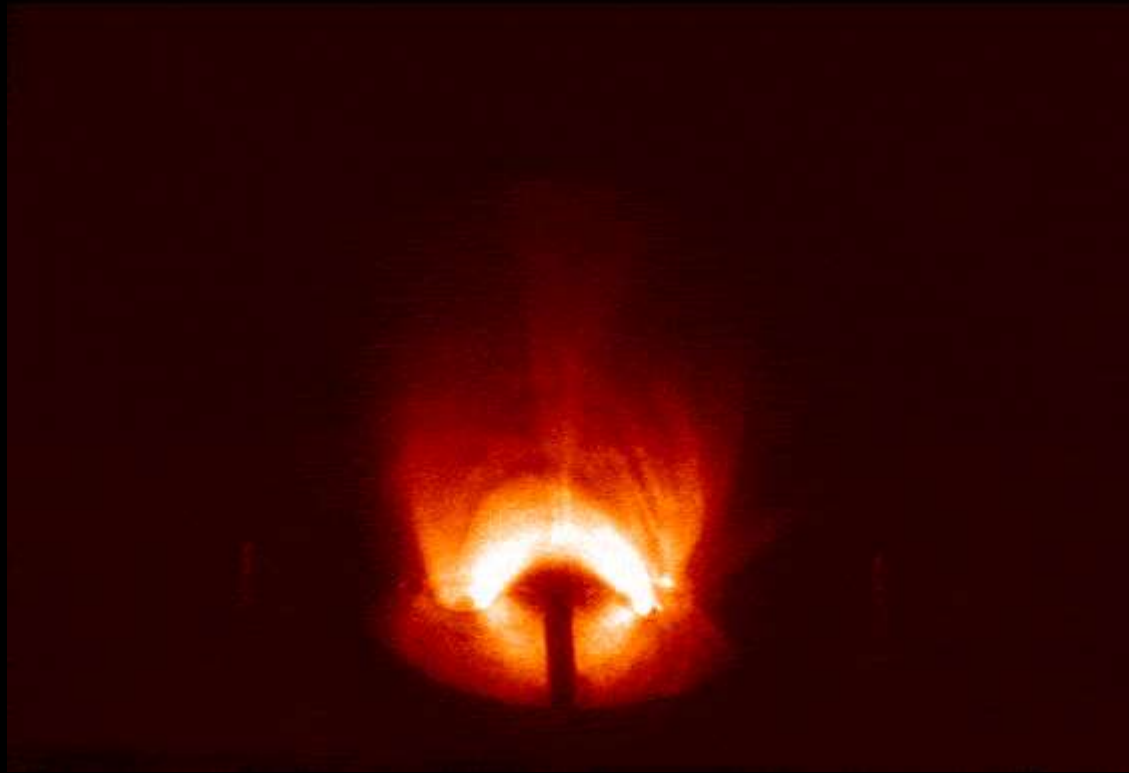


“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino

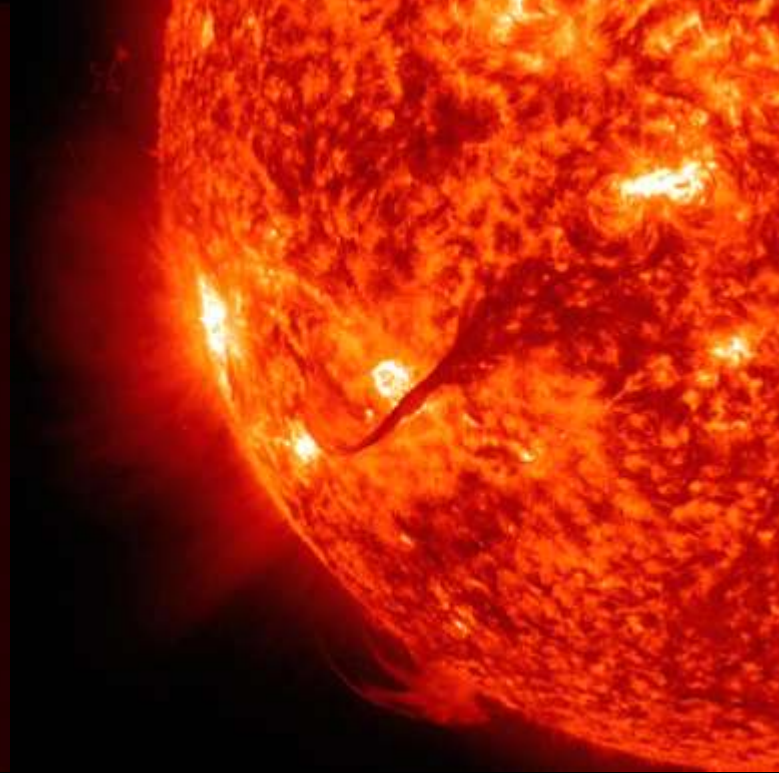
Perché studiare il Sole?

Laboratorio di plasma «artificiale»



30 cm

«Laboratorio» di plasma naturale



500.000 km

“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

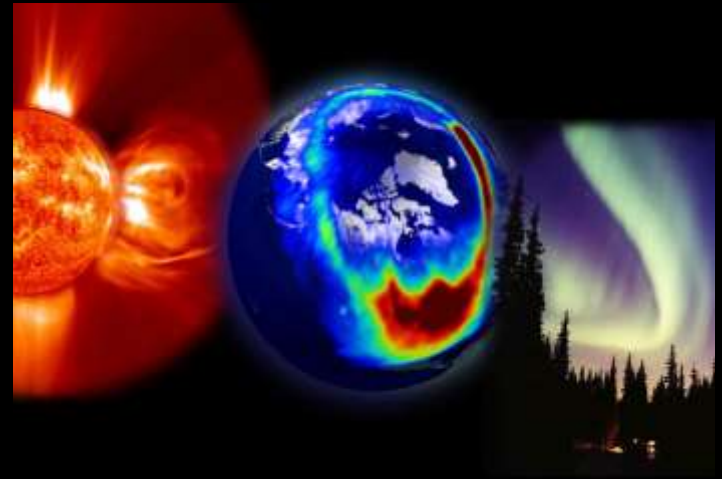
A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino

Perché studiare il Sole?

Relazione con il clima terrestre



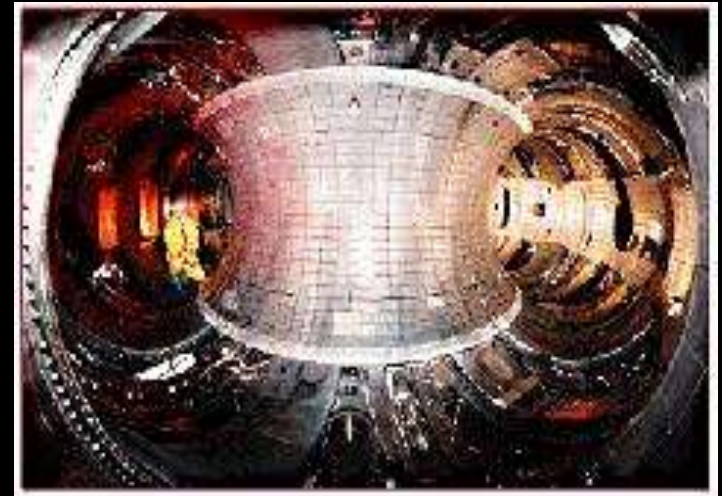
Meteorologia spaziale



Il Sole come una stella



Il Sole come laboratorio di fisica



“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino

Cosa sappiamo e cosa ancora non capiamo del Sole?

“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino



Come si osserva il Sole?

Da Terra fin da Galileo



Osservatorio delle Canarie

Dallo spazio... solo dagli anni '70!

Solo dallo spazio è possibile:

- **monitorare il sole 24h su 24**
- **vedere luce UV-EUV-raggi X**

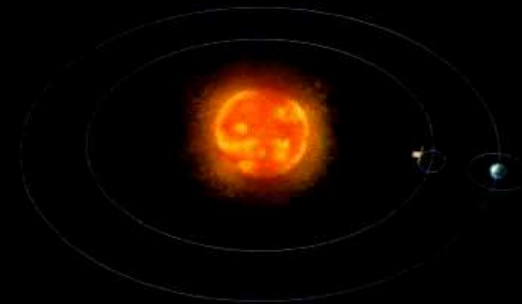


Il satellite SDO



Durante le eclissi

(per studiarne l'atmosfera esterna)



Orbita di SOHO

“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino

Il Sole in cifre

❑ Il Sole si trova in un braccio spirale della nostra Galassia (Via Lattea), chiamato braccio di Orione, a circa 30000 anni-luce dal centro.

❑ Il Sole ruota intorno al centro della Galassia in 225 milioni di anni. Quindi il Sistema Solare ha una velocità di 230 km/s (o 830.000 km/h).



Massa: 2×10^{30} kg = 333,000 volte la massa della Terra

Diametro: 1,400,000 km = 109 volte il diametro della Terra

Densità: 1.4 volte la densità dell'acqua

Composizione: PLASMA: 74% H + 25% He + 1% Metalli

Temperatura della superficie: 5,800 K

Temperatura dell'atmosfera esterna (corona): >1,000,000 K

Temperatura al centro: 15,000,000 K

Energia totale emessa: 4×10^{26} W (5 minuti della radiazione che investe la Terra sono pari al consumo mondiale annuale di energia elettrica).

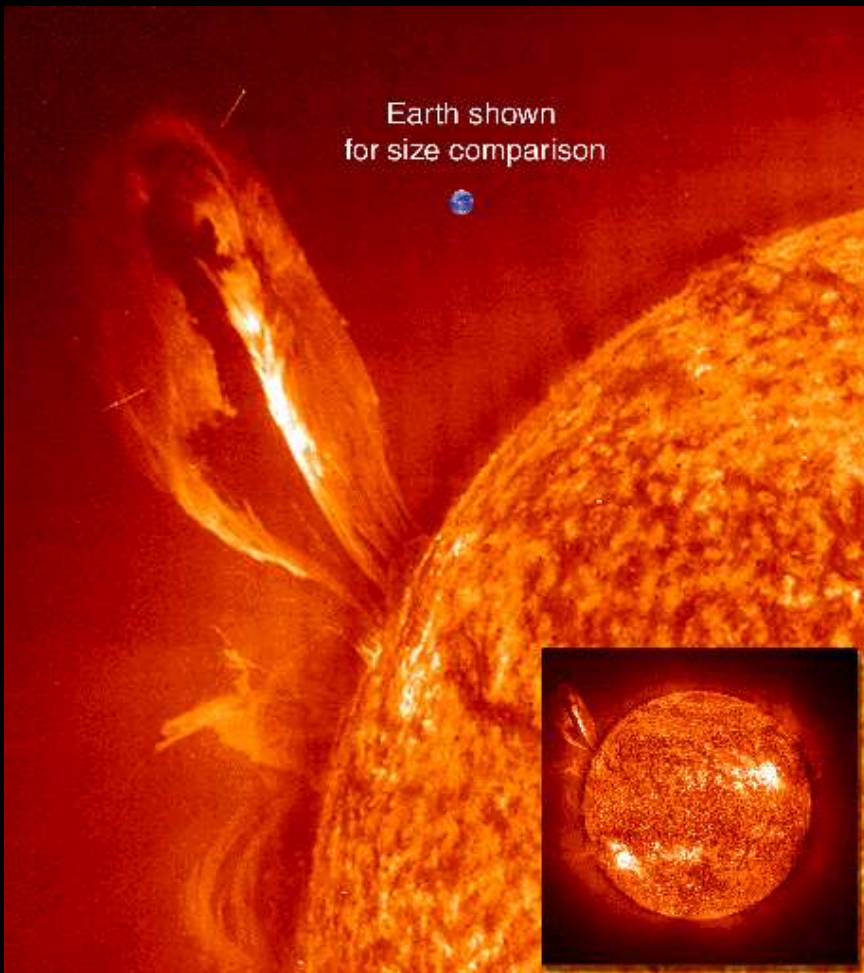


“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino



Ma quanto è grande il Sole?



Se il sole avesse le dimensioni di una palla da basket, la terra sarebbe una “goccia” del diametro di 2.2 mm e sarebbe ad una distanza di circa 26 m.



“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino

Interno del Sole

❑ **Nocciolo** $0 \Rightarrow 0.25 R_{\odot}$

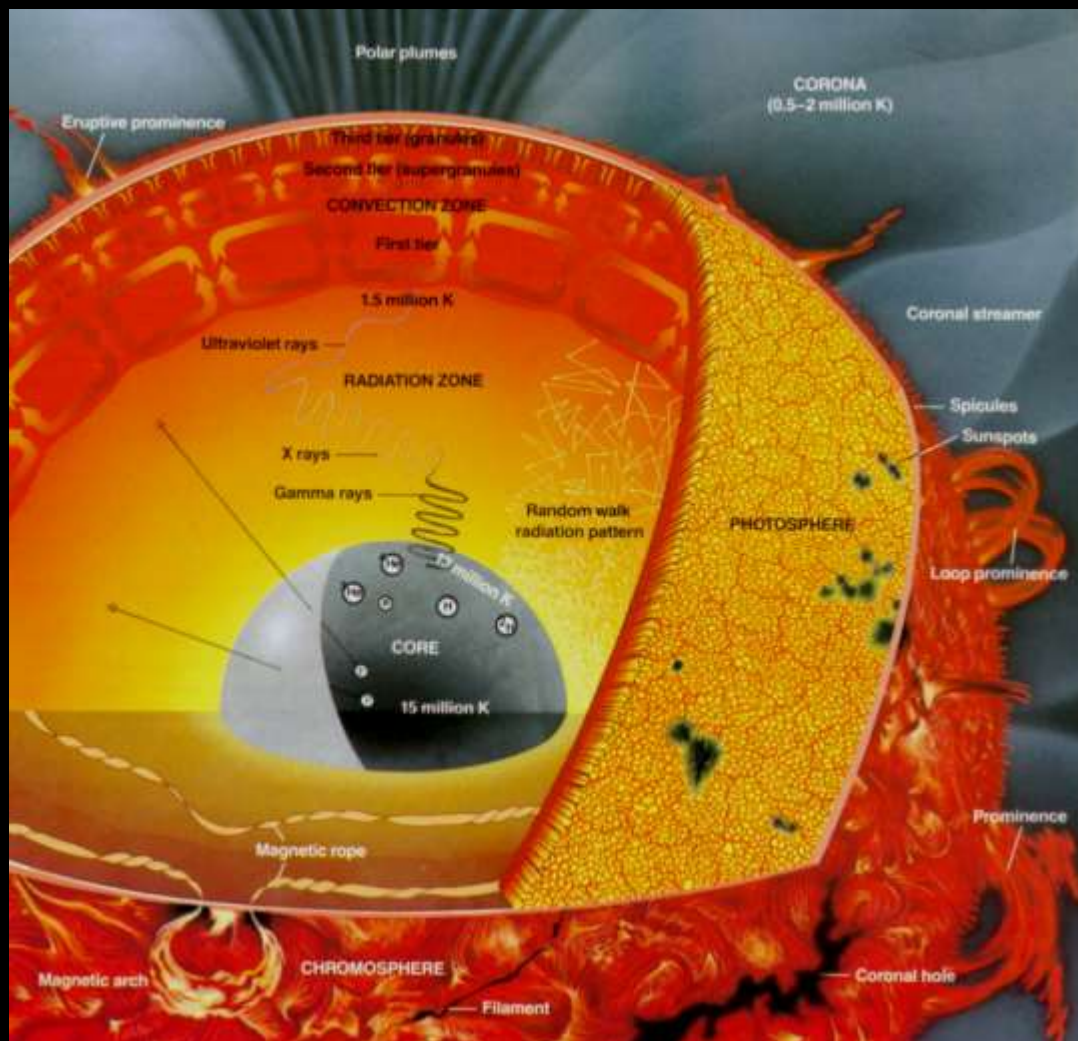
- L'energia viene prodotta
- La fusione nucleare trasforma $7 \cdot 10^{11}$ kg di idrogeno in elio al secondo

❑ **Zona Radiativa** $0.25 \Rightarrow 0.75 R_{\odot}$

- l'energia viene trasportata per radiazione
- Sebbene i fotoni prodotti viaggino alla velocità della luce, vengono deviati così tante volte dal denso materiale che impiegano circa 100000 anni per raggiungere la superficie

❑ **Zona Convettiva** $0.75 \Rightarrow 1 R_{\odot}$

- L'energia viene trasportata per convezione in superficie, come in una pentola d'acqua che bolle

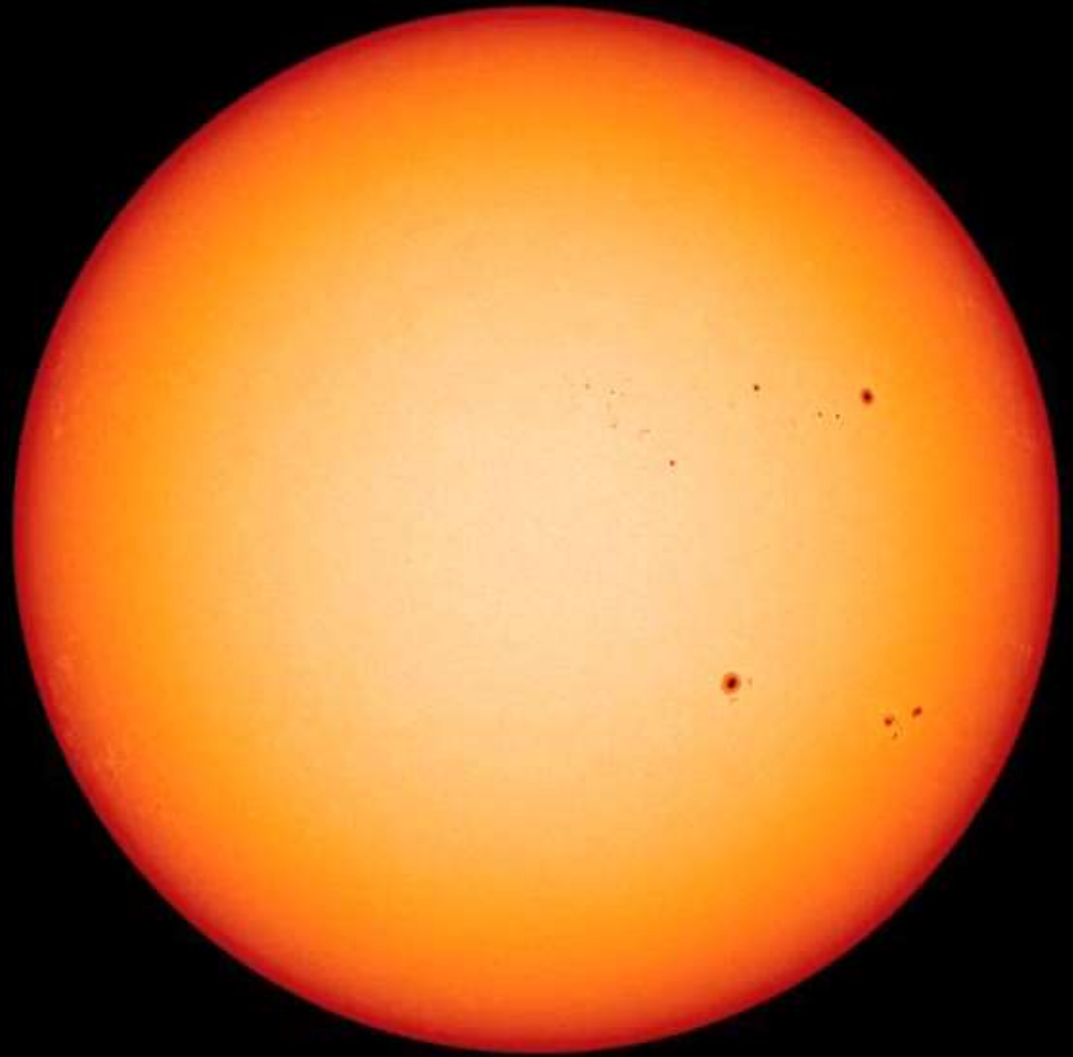
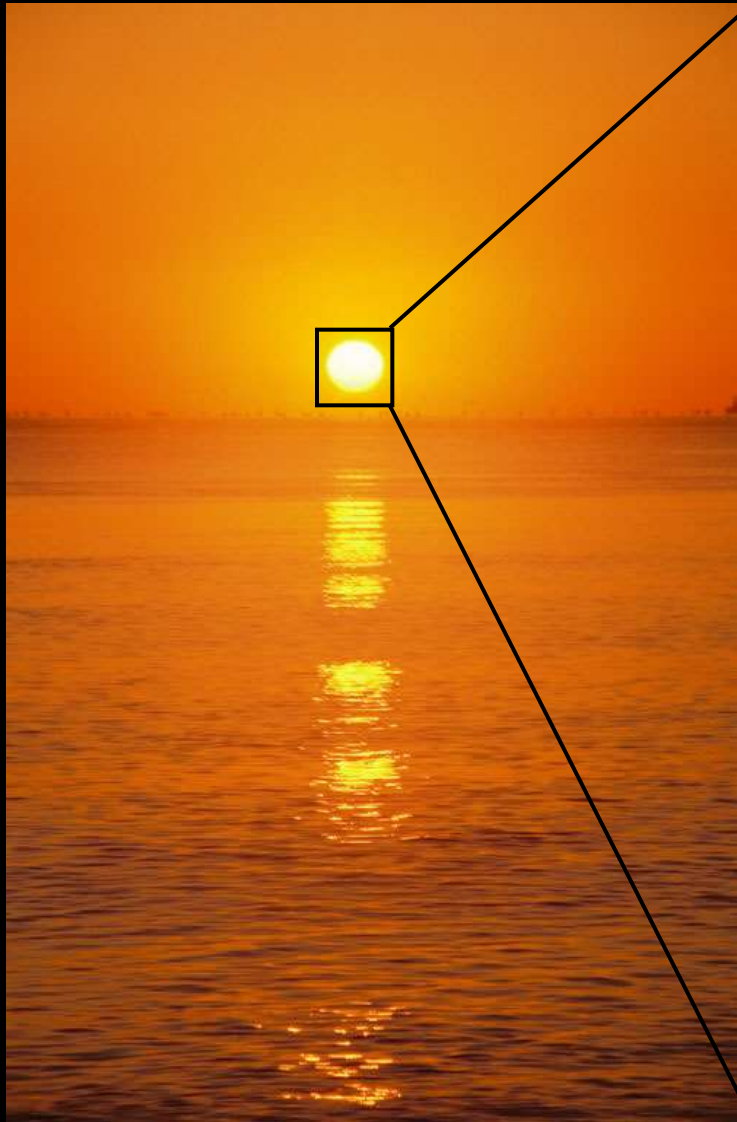


La temperatura nel sole varia da 15.000.000 K (nucleo) a 5000 K (fotosfera)

“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino

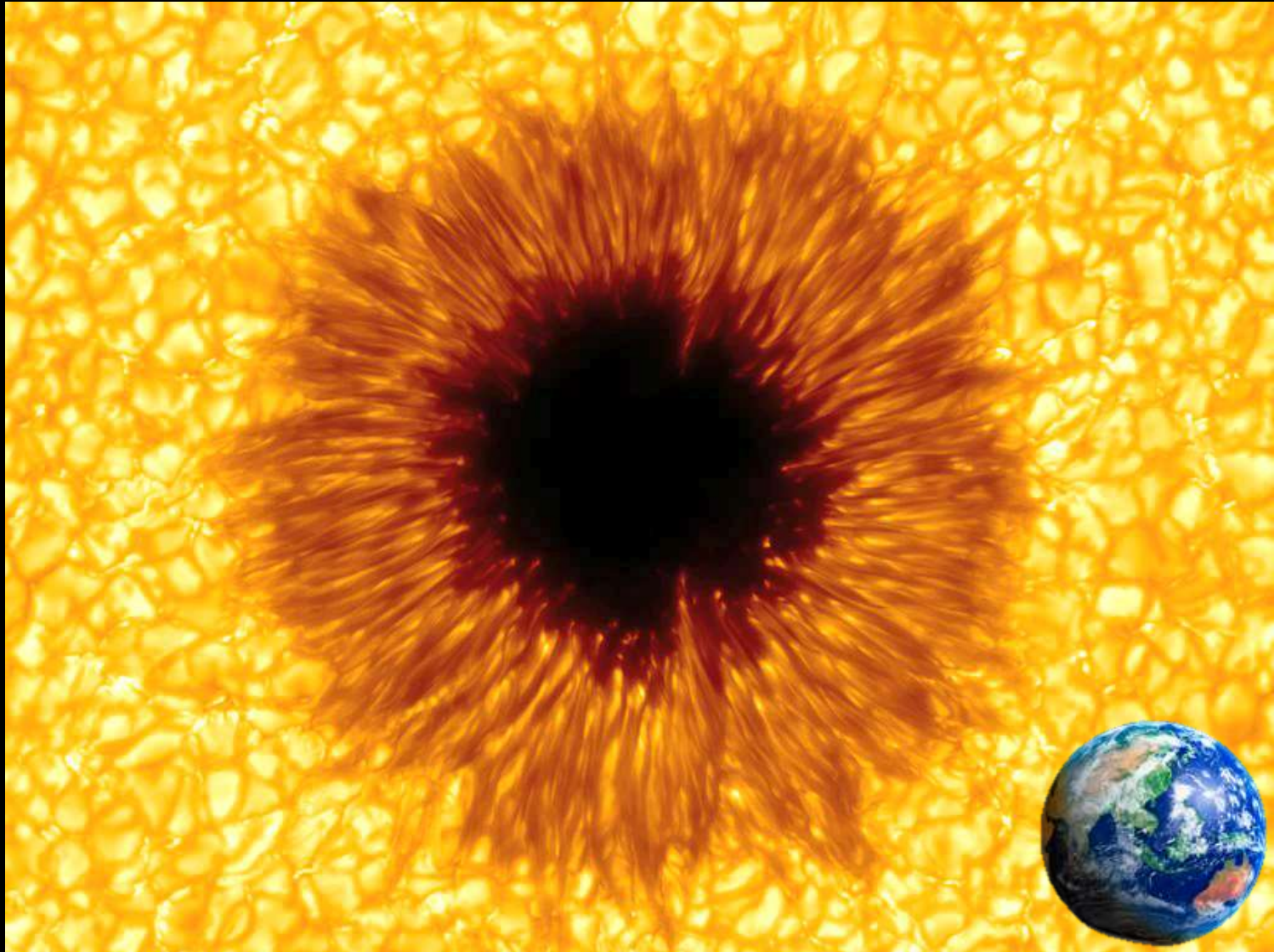
Esterno del Sole: Fotosfera



“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino

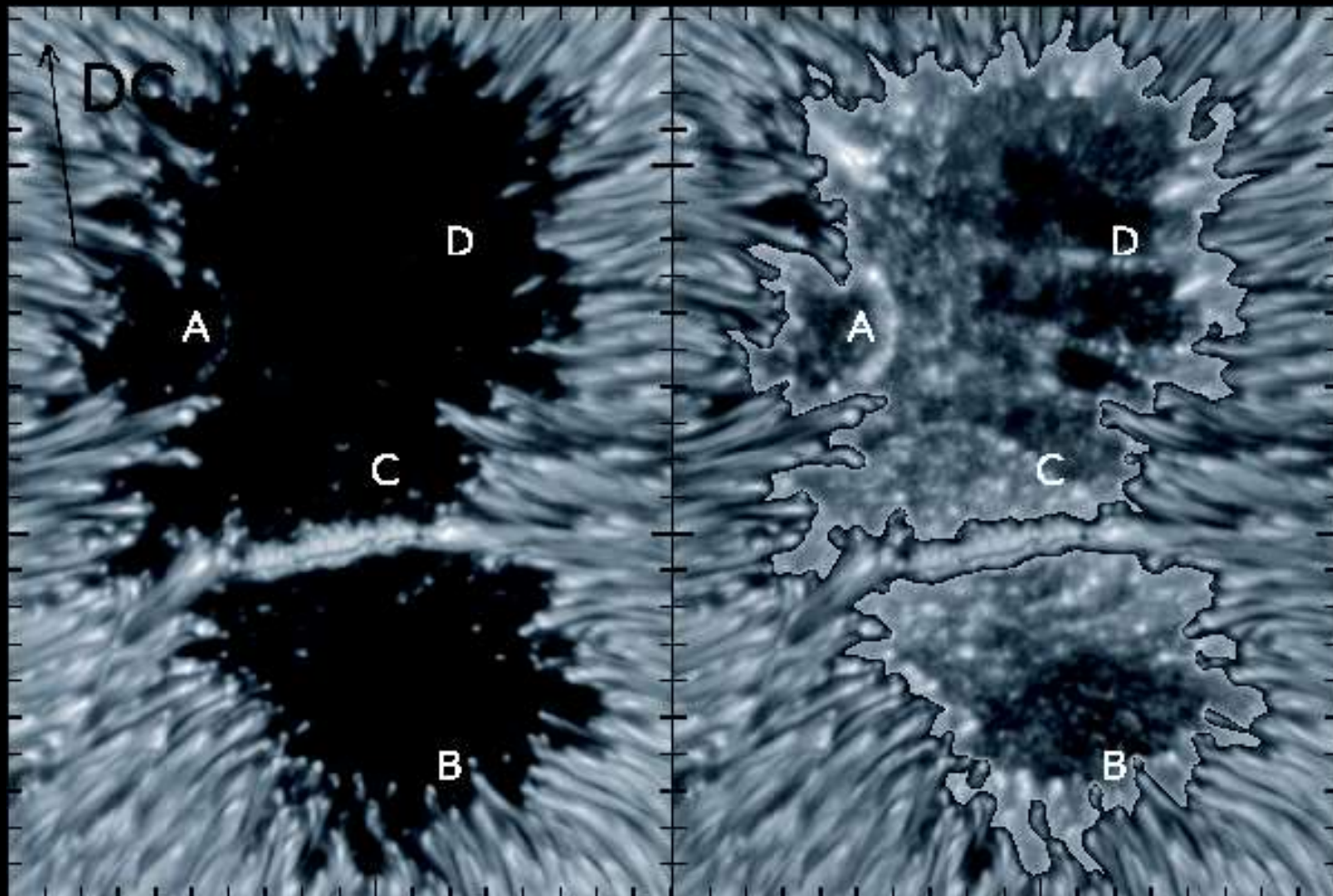
Fotosfera: le macchie solari



“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino

Fotosfera: le macchie solari

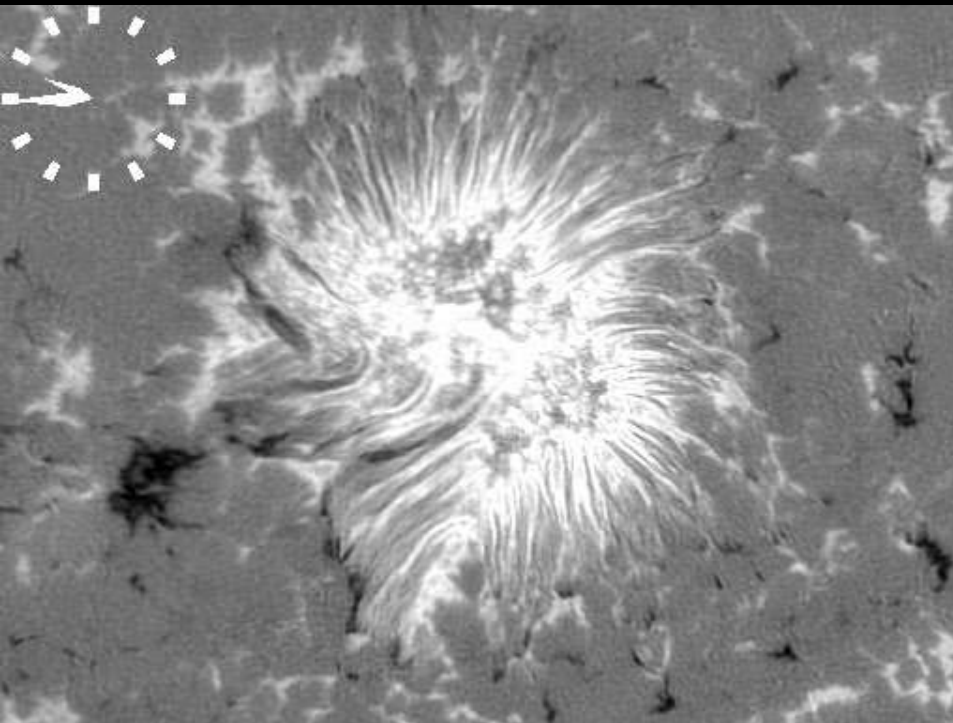


Le **macchie solari** non sono «nere» ma solo **meno luminose**: aumento di contrasto → *umbral dots*

“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino

Fotosfera: le macchie solari



Magnetogramma della superficie solare: le aree chiare e quelle scure indicano la presenza di intensi campi magnetici di polarità opposta

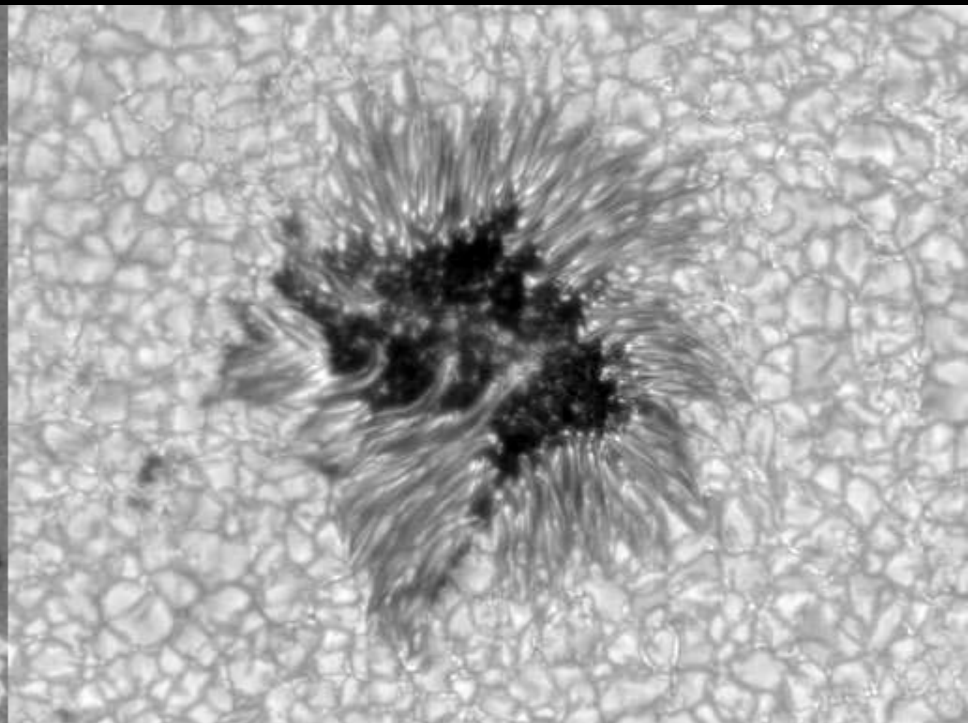


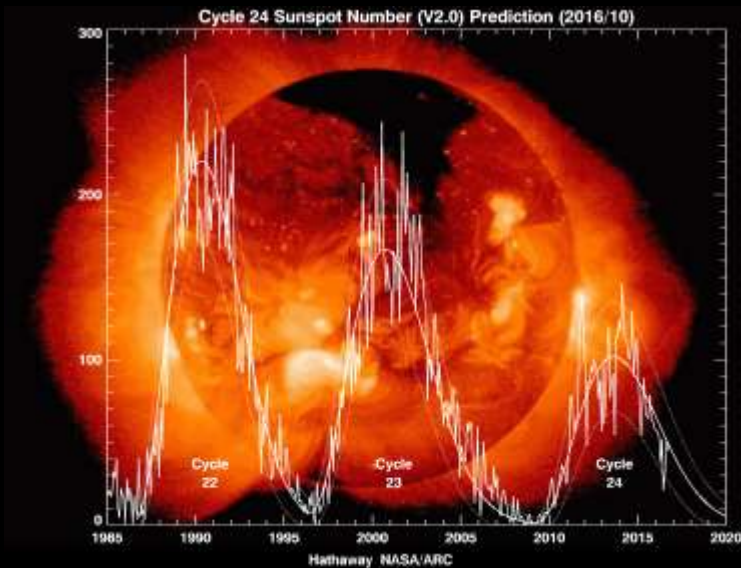
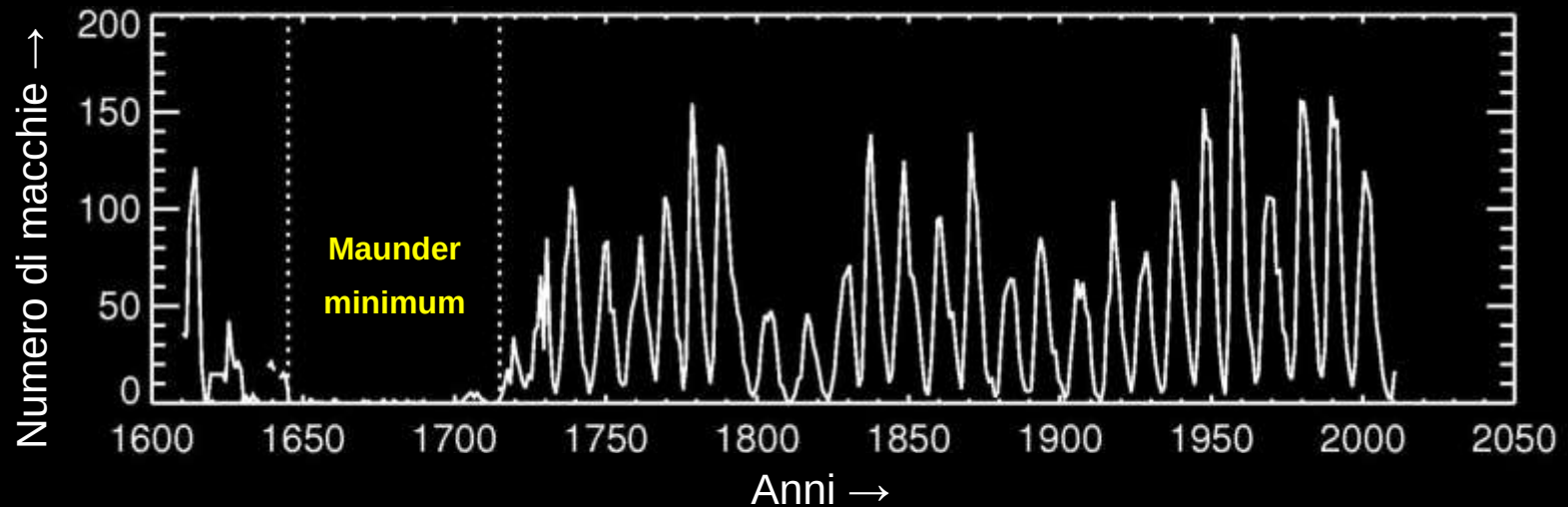
Immagine in luce visibile della superficie solare: le aree chiare e quelle scure indicano regioni a maggiore o minore temperatura fotosferica

Le macchie solari sono sede di **intensi campi magnetici** (2000 volte il campo terrestre)

“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino

Il Ciclo di Attività Solare

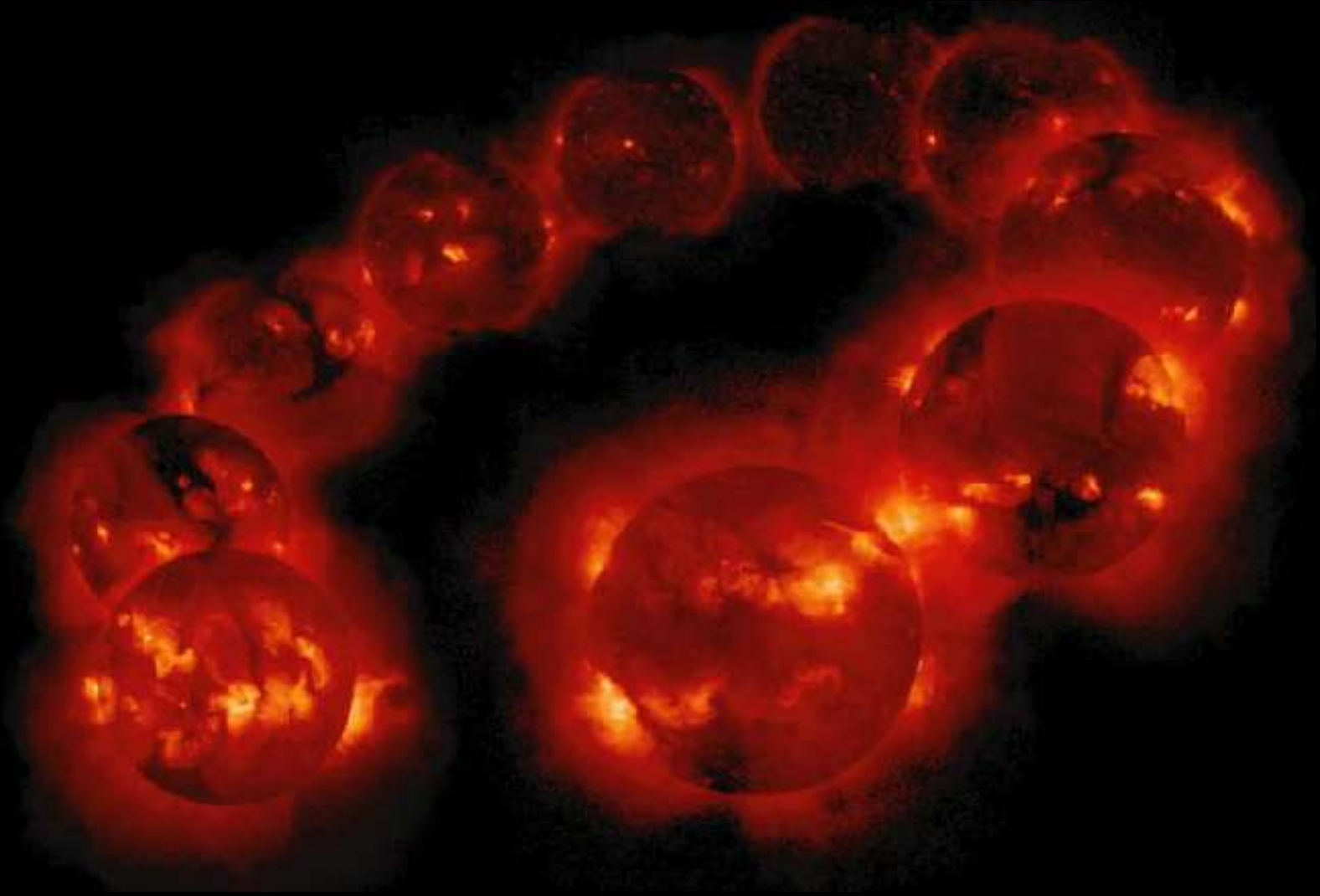


(Congelamento del Tamigi – 1677)

“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino

Il Ciclo di Attività Solare



“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino

Esterno del Sole

Fotosfera

- ❑ Il sole visibile all'occhio umano
- ❑ $T = 5.000 \text{ K}$

Cromosfera

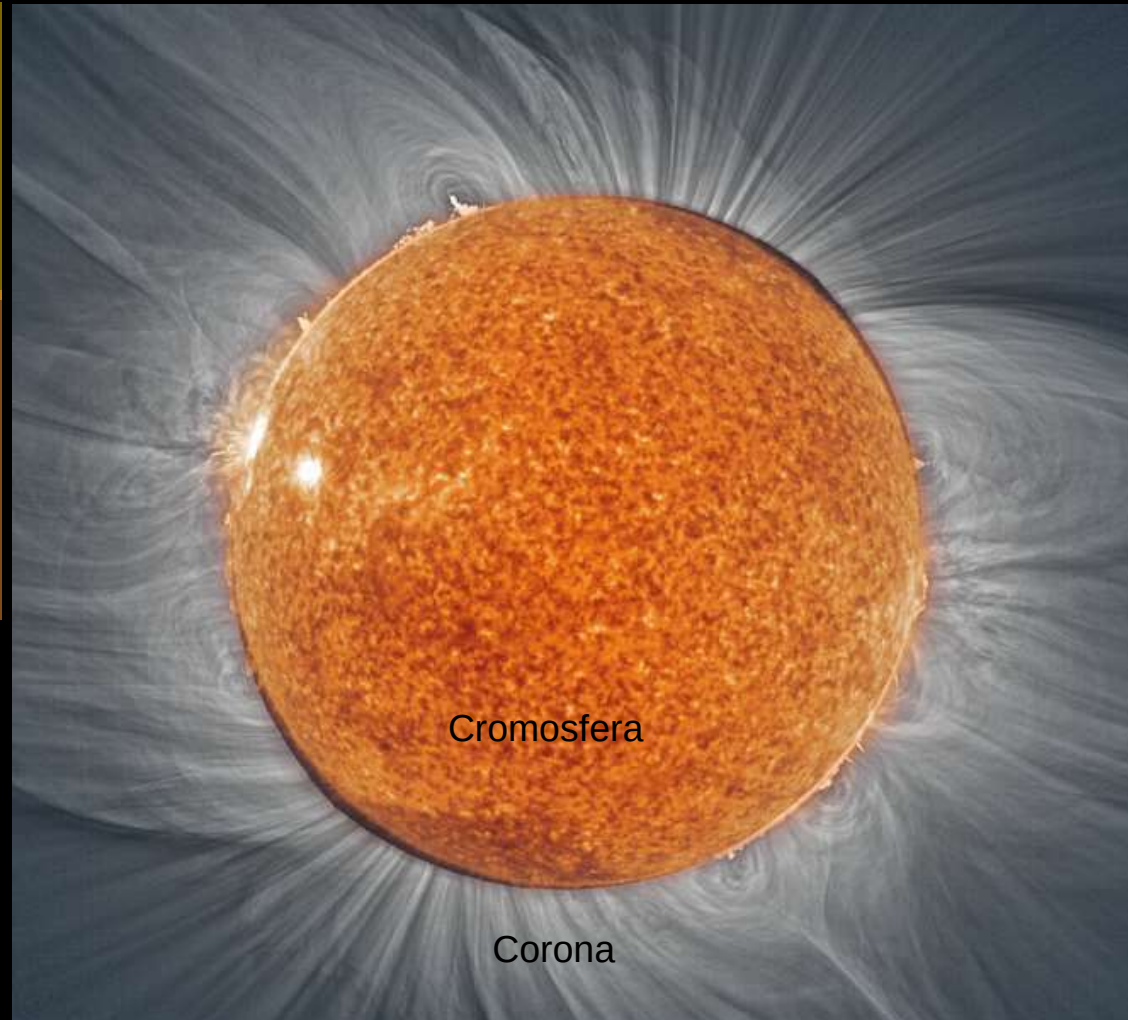
- ❑ $T = 50.000^\circ$

Regione di Transizione

- ❑ T aumenta fino a 500.000 K

Corona

- ❑ L'atmosfera del Sole
- ❑ Visibile durante le eclissi oppure dallo spazio
- ❑ Vento solare
- ❑ T più di 1 Milione di gradi!



La temperatura sale da 5.000 K (fotosfera) $1.000.000 \text{ K}$ (corona)

“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino



Esterno del Sole: Cromosfera

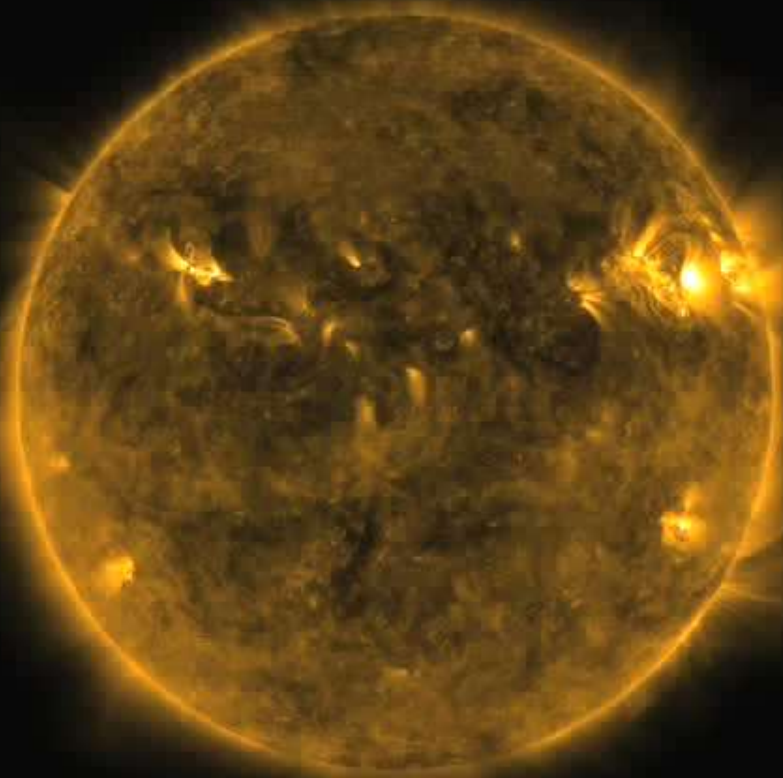


“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

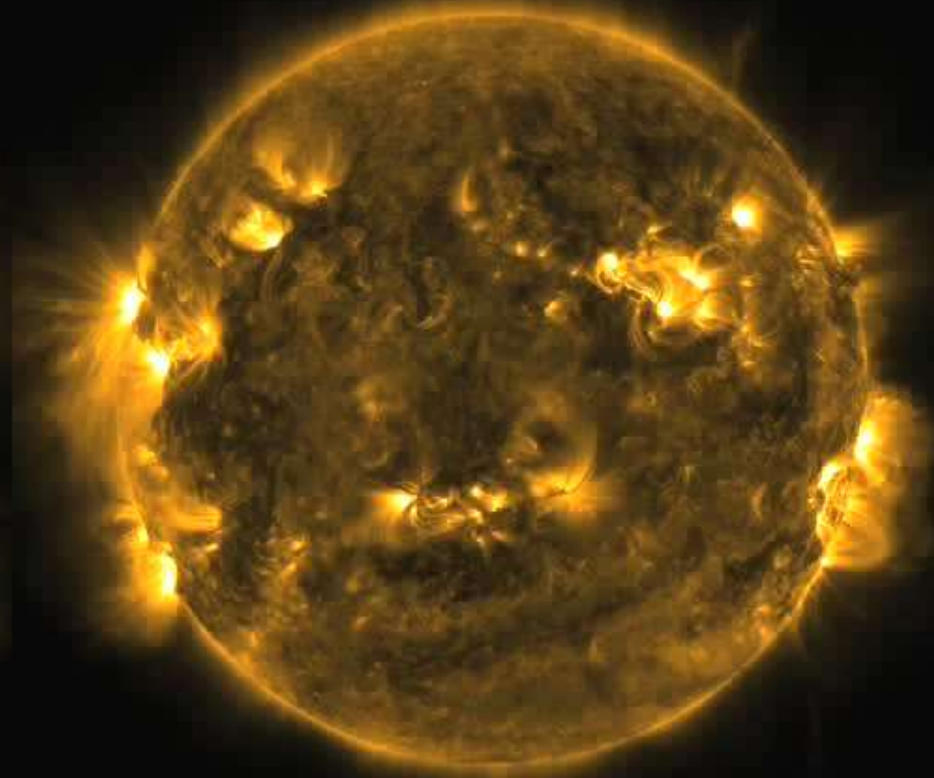
A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino



Esterno del Sole: bassa Corona



SDO/AIA 171 2010-10-02 01:15:01 UT



SDO/AIA 171 2013-05-11 01:15:48 UT

Filmati nell'EUV (17.1 nm) → plasmi a 1.5 milioni di gradi. Questa regione del Sole può essere osservata **solo dallo spazio** (NASA-SDO AIA telescope)

“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino



Il Campo Magnetico del Sole

Osservando nell'UV si notano molte arcate che si espandono sopra la fotosfera. La regione qui visibile è chiamata corona solare: sono le **arcate coronali**

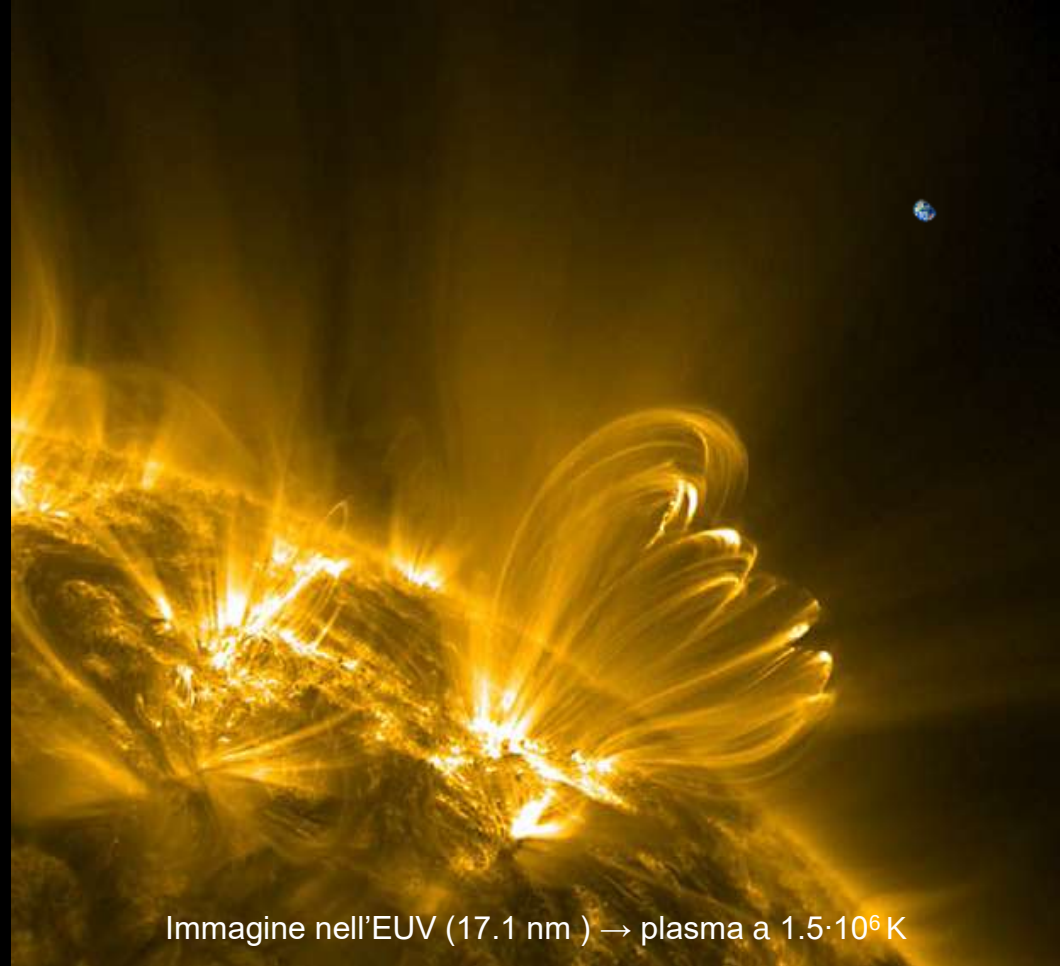
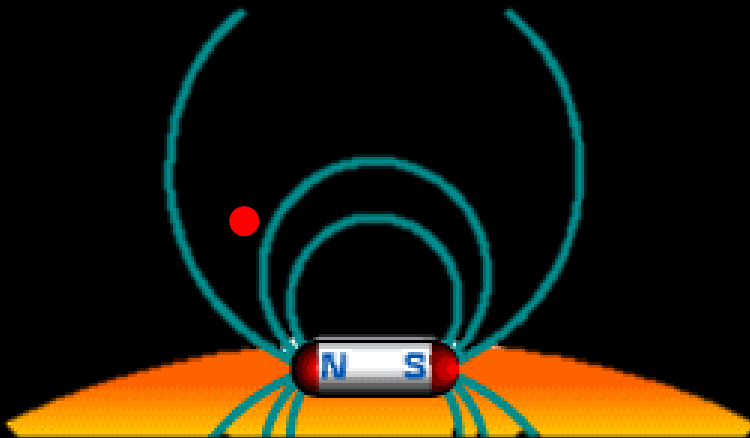


Immagine nell'EUV (17.1 nm) → plasma a $1.5 \cdot 10^6$ K

Le particelle cariche (gas ionizzati) restano intrappolate all'interno della regione di campo magnetico dipolare ed emettono radiazione nell'UV; si rende visibile **un'arcata coronale**.

“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino

I brillamenti solari

Filmati nell'EUV (30.4 nm - rosso - e 17.1 nm - verde) → plasma a $50 \cdot 10^3$ K e $1.5 \cdot 10^6$ K

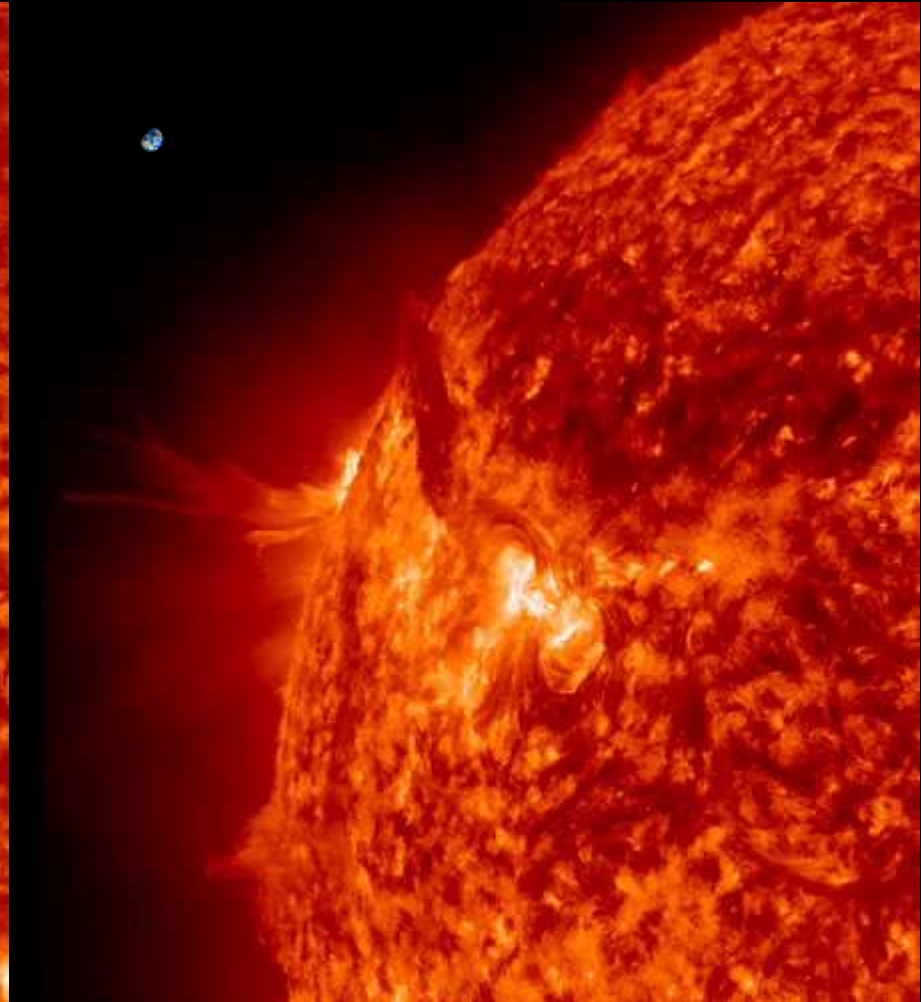
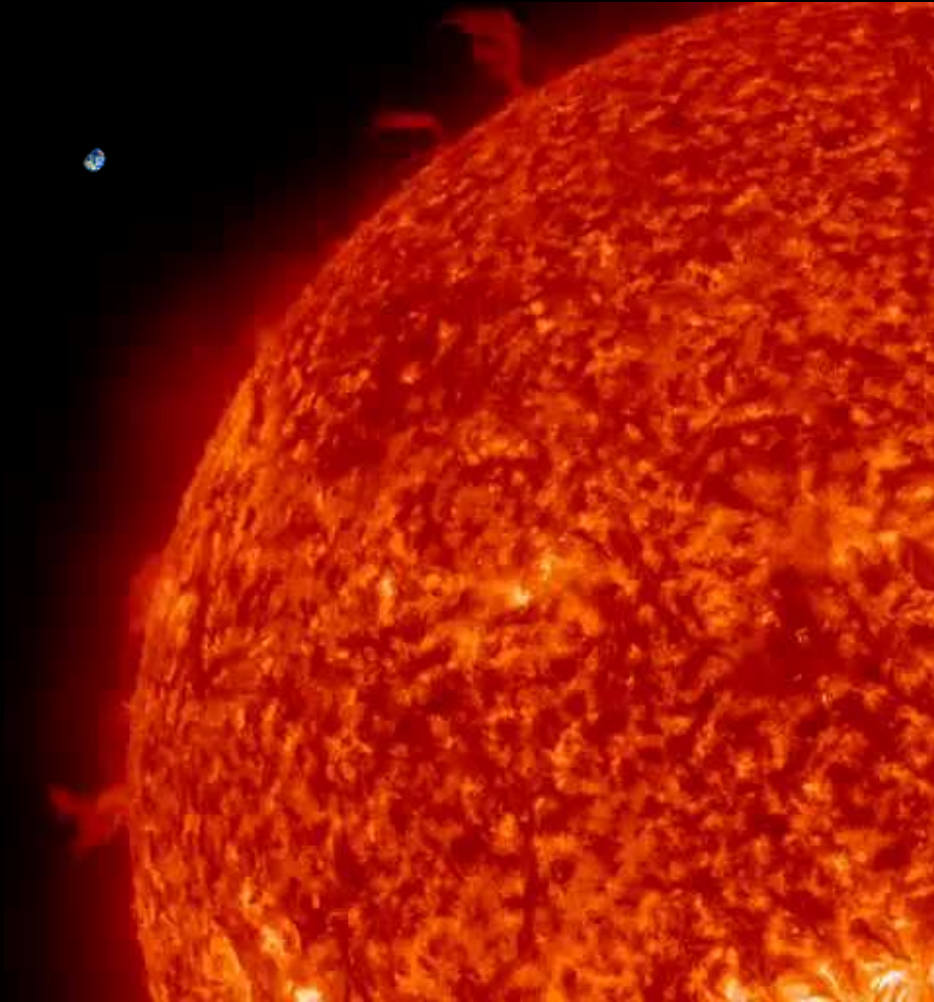
Energia rilasciata: $\sim 10^{25}$ Joules in ~ 10 minuti (~ 100 miliardi di bombe di Hiroshima)

“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino



Protuberanze quiescenti ed eruttive



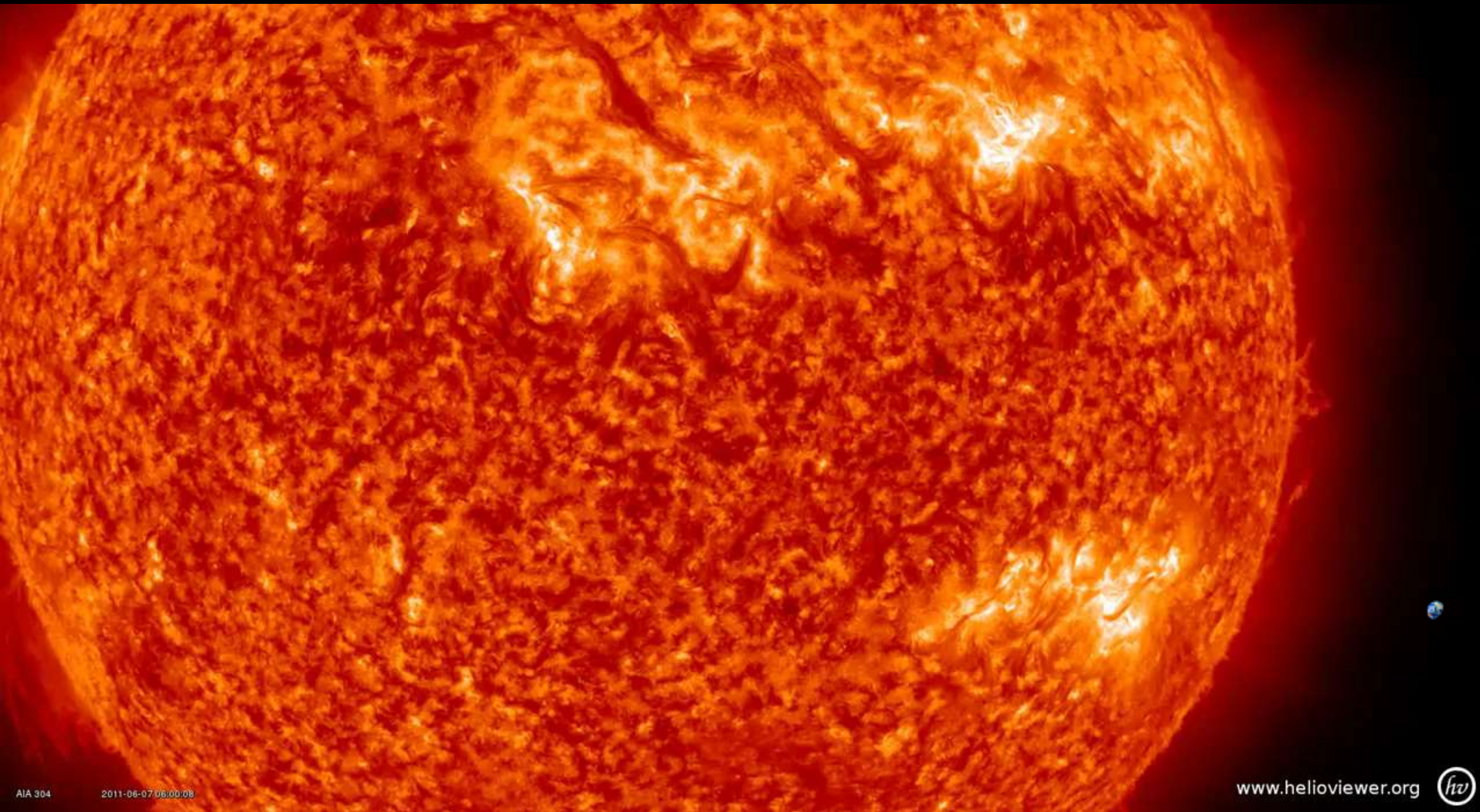
Filmati nell'EUV (30.4 nm) → plasma a 50.000 gradi

“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino



Eruzioni solari



www.helioviewer.org



Un'eruzione solare che ha espulso parte della cromosfera che poi ricade sul Sole

“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

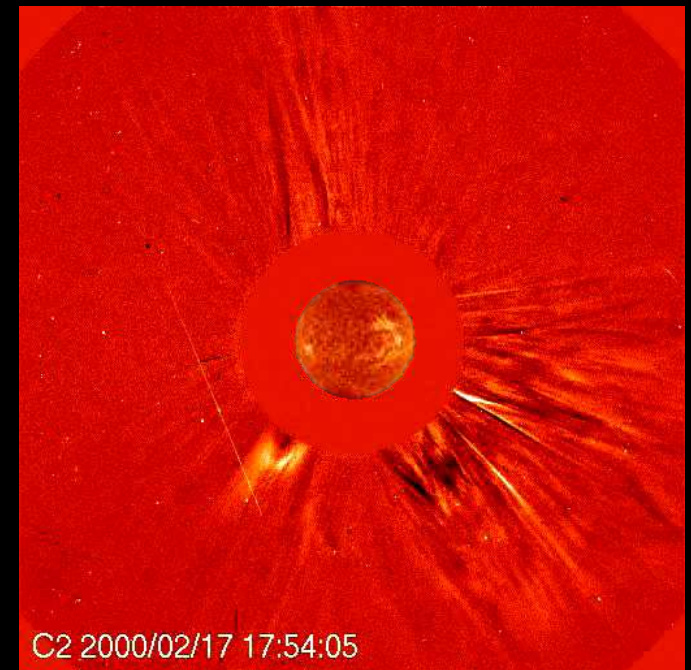
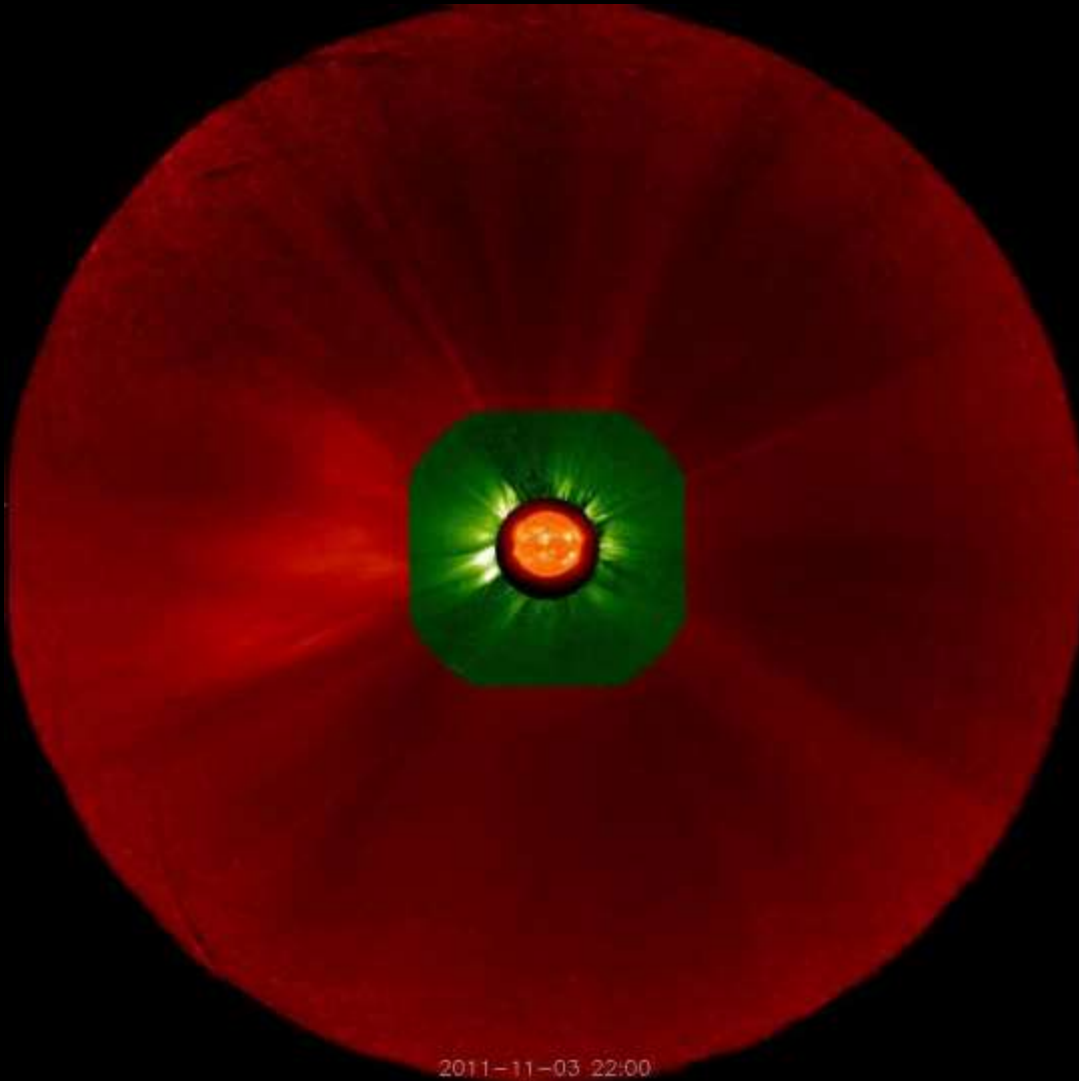
A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino



Espulsioni Coronali di Massa (CME)

Un CME può espellere fino a **10^{13} kg** di plasma (10 miliardi di tonnellate) a **1000-2000 km/s**.

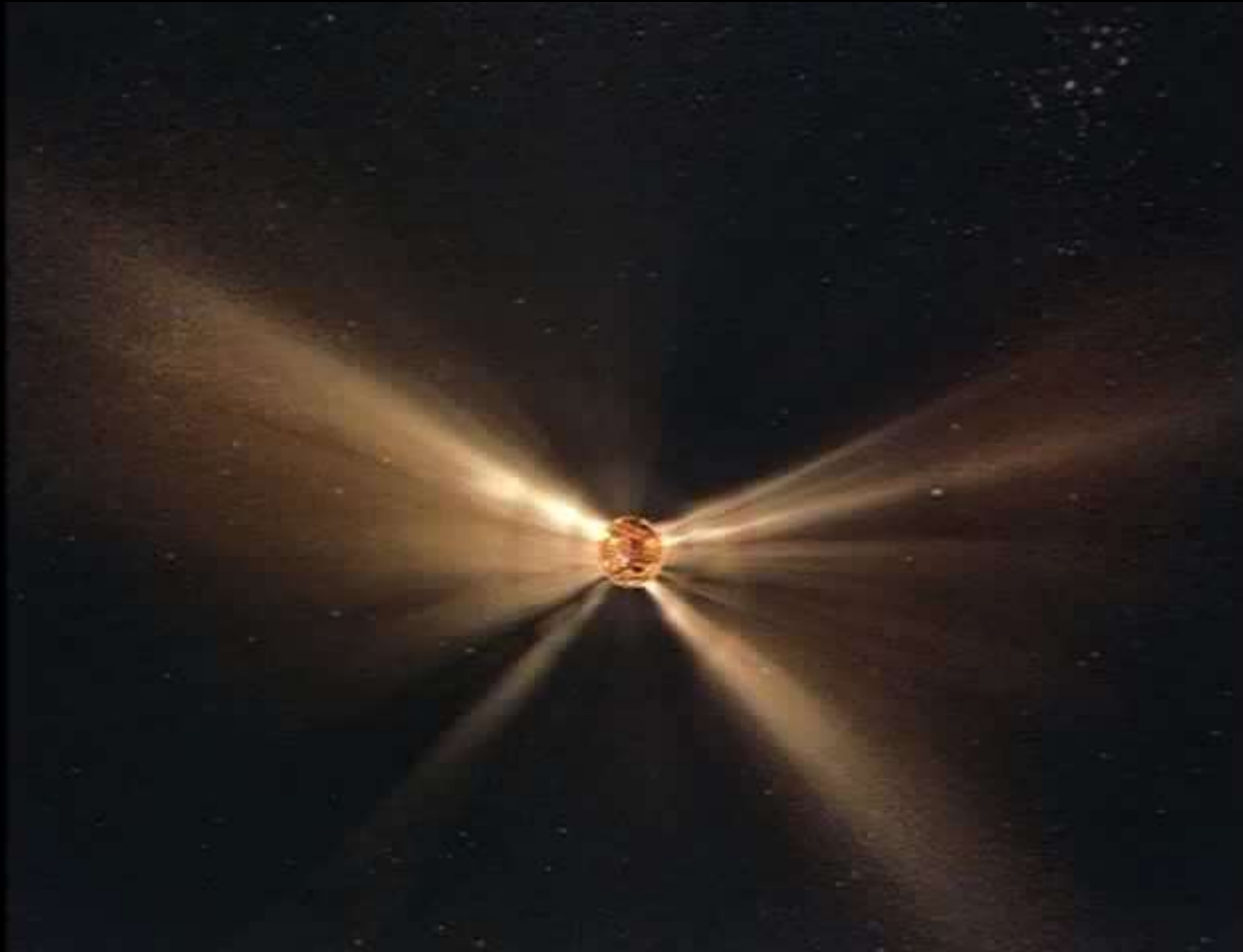
I CME hanno una frequenza di circa **uno alla settimana** (fase di minimo) a più di **uno al giorno** (fase di massimo)



“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino

Il vento solare



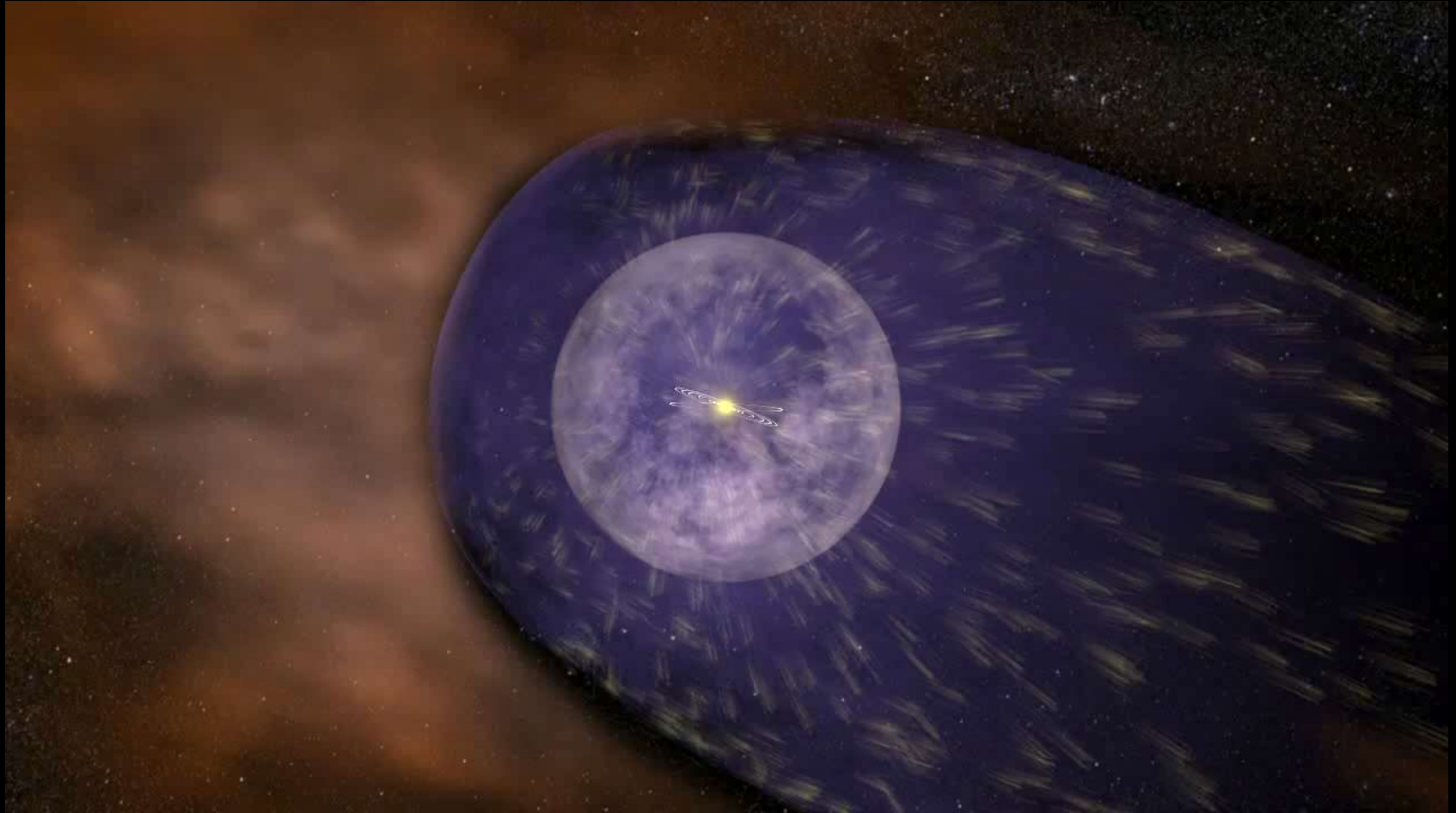
Oltre alle sporadiche euzioni solari, il Sole è sorgente di un flusso continuo di particelle che si propagano in tutto lo spazio a 400-800 km/s, il **vento solare**

“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino



Il vento solare e l'Eliosfera



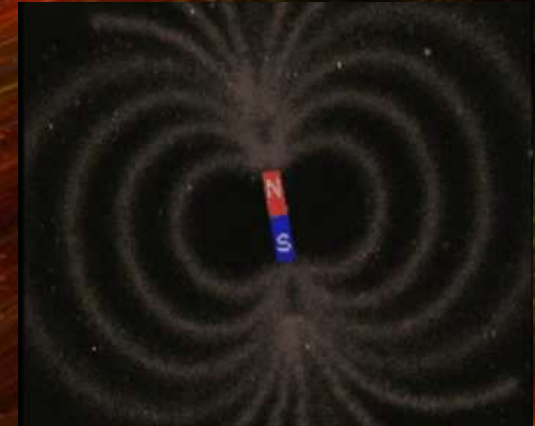
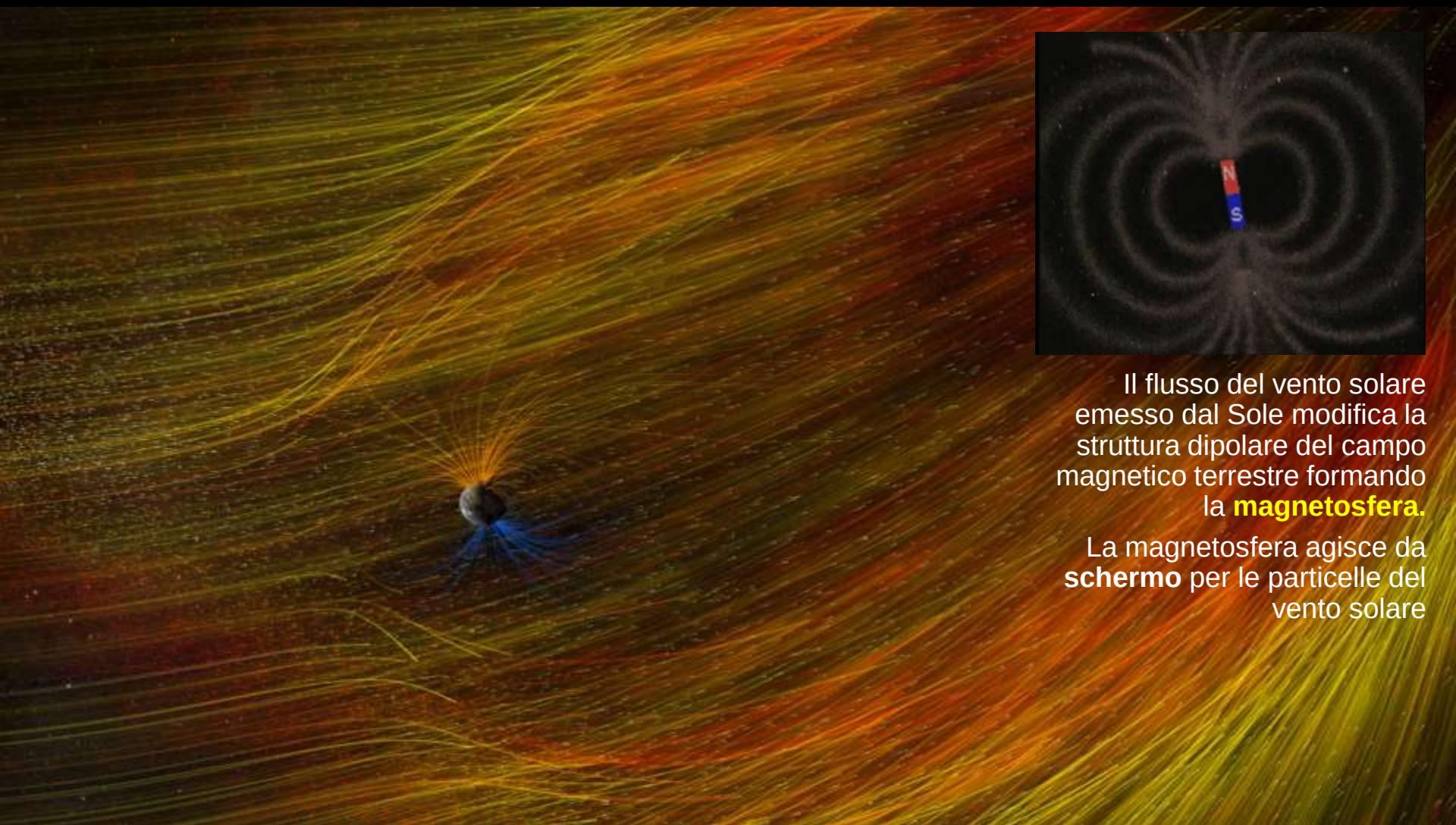
Il vento solare si espande in tutto lo spazio interplanetario scavando un'enorme bolla (~200 AU) nei gas interstellari: l'**eliosfera**. Questa è la nostra prima **protezione** contro i raggi **cosmici**. Le dimensioni di questa «bolla» cambiano col ciclo solare → «**respiro Eliosferico**»

“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino



Il vento solare e la magnetosfera



Il flusso del vento solare emesso dal Sole modifica la struttura dipolare del campo magnetico terrestre formando la **magnetosfera**.

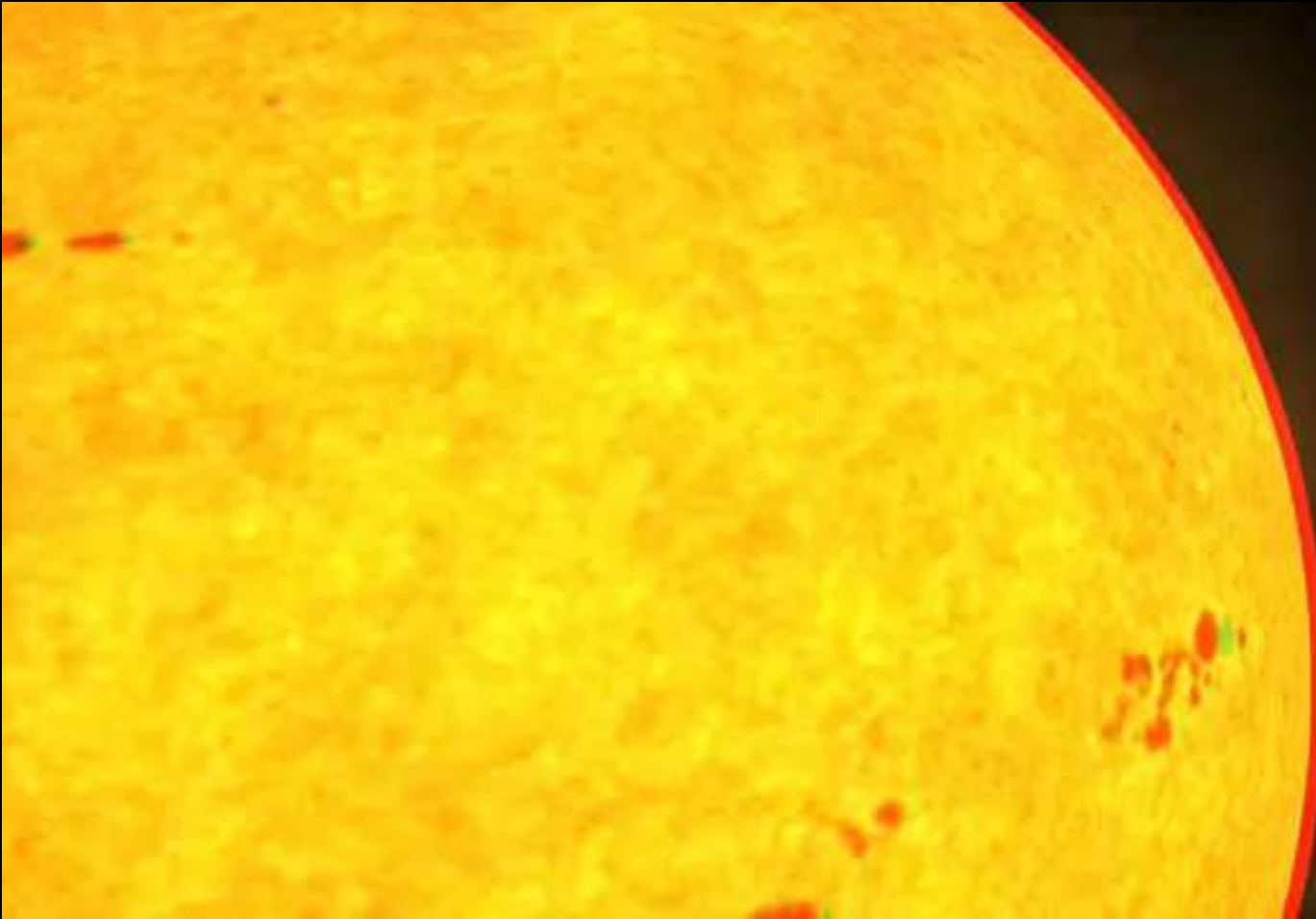
La magnetosfera agisce da **schermo** per le particelle del vento solare

“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino



Dal Sole alla Terra



Le **eruzioni solari** si propagano nello spazio e raggiungono l'orbita terrestre in 2-3 giorni dove possono **impattare con la nostra magnetosfera** e generare un **tempesta geomagnetica**

“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino



I colori delle Aurore

Gli elettroni provenienti dal Sole vengono imprigionati dal campo magnetico terrestre ed entrano nell'atmosfera. Le loro collisioni con gli atomi e molecole dell'atmosfera producono la **luce delle Aurore**.

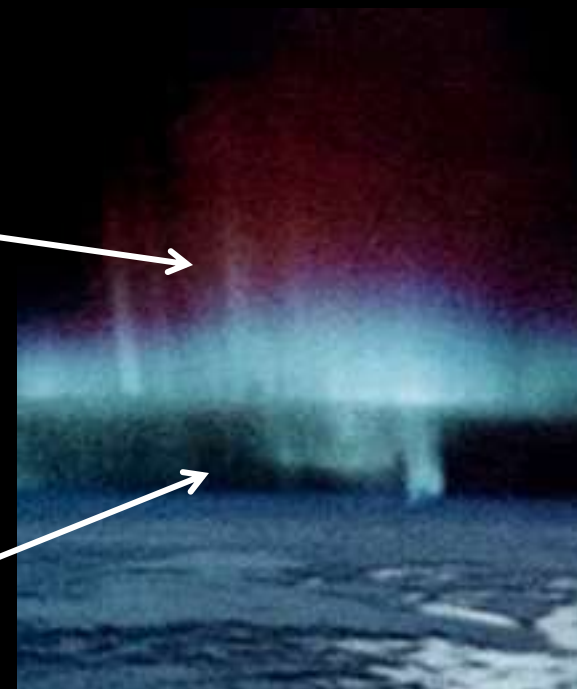
Gli atomi di ossigeno emettono luce rossa (> 200 km) o verde.

———— 200 KM ————

Gli atomi di azoto emettono luce blu.

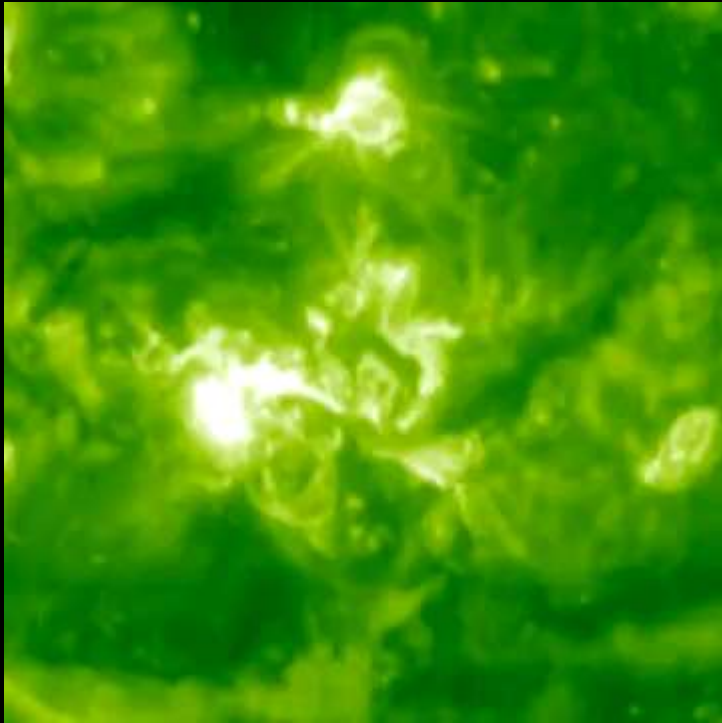
———— 100 KM ————

Le molecole di azoto emettono luce violetta (< 100 Km).



La “Halloween Storm”

SOLE: 28 ottobre 2003, il brillamento più intenso mai registrato dall’era spaziale



Energia rilasciata $\sim 5 \times 10^{25}$ Joules

TERRA: 65 milioni di anni fa, l’impatto più importante mai conosciuto con un asteroide



Energia rilasciata $\sim 1 \times 10^{23}$ Joules $\rightarrow$ 500 volte meno!

“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino



Effetti delle Tempeste Solari



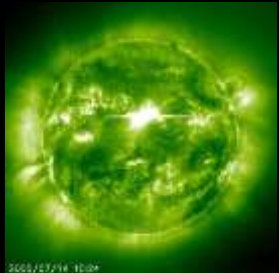
✓ Rischio radiazioni per astronauti



“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino

Effetti delle Tempeste Solari



**RADIAZIONE
ELETTROMAGNETICA**
ARRIVO: 8 MINUTI
DURATA: 1-2 ORE

RAGGI X, EUV,
ATTIVITA' RADIO

**PARTICELLE
AD ALTA ENERGIA**
ARRIVO: 15 MIN - ORE
DURATA: GIORNI

EVENTI A PROTONI

**PARTICELLE AD ENERGIA
MEDIO-BASSA**
ARRIVO: 2-4 GIORNI
DURATA: GIORNI

TEMPESTE GEOMAGNETICHE

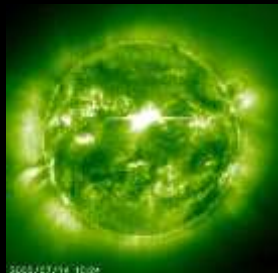
- ✓ Danneggiamento delle sonde spaziali:
- danneggiamento strumentazione elettronica
 - degradazione pannelli solari
 - degradazione rivelatori ottici
 - caduta per attrito atmosferico



“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino

Effetti delle Tempeste Solari



**RADIAZIONE
ELETTROMAGNETICA**
ARRIVO: 8 MINUTI
DURATA: 1-2 ORE

RAGGI X, EUV,
ATTIVITA' RADIO

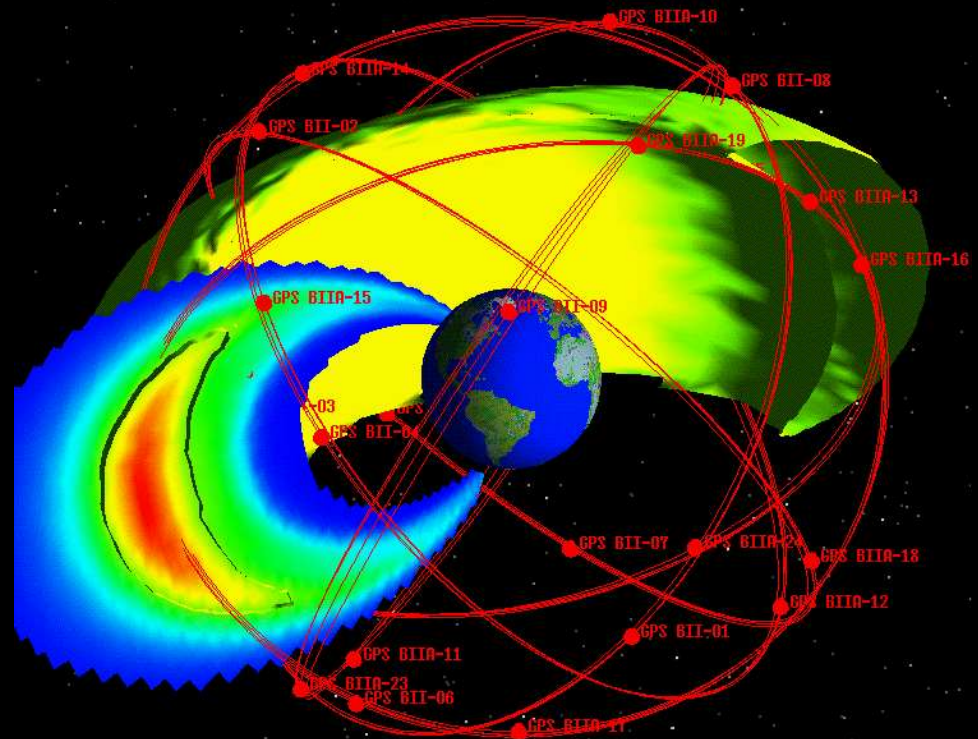
**PARTICELLE
AD ALTA ENERGIA**
ARRIVO: 15 MIN - ORE
DURATA: GIORNI

EVENTI A PROTONI

**PARTICELLE AD ENERGIA
MEDIO-BASSA**
ARRIVO: 2-4 GIORNI
DURATA: GIORNI

TEMPESTE GEOMAGNETICHE

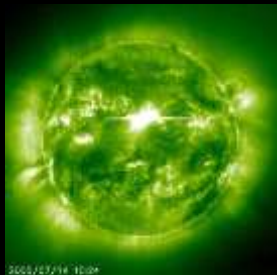
✓ Interferenze sistemi di navigazione (GPS, Loran-C)



“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino

Effetti delle Tempeste Solari



2005/03/24 10:04

**RADIAZIONE
ELETTROMAGNETICA**
ARRIVO: 8 MINUTI
DURATA: 1-2 ORE

RAGGI X, EUV,
ATTIVITA' RADIO

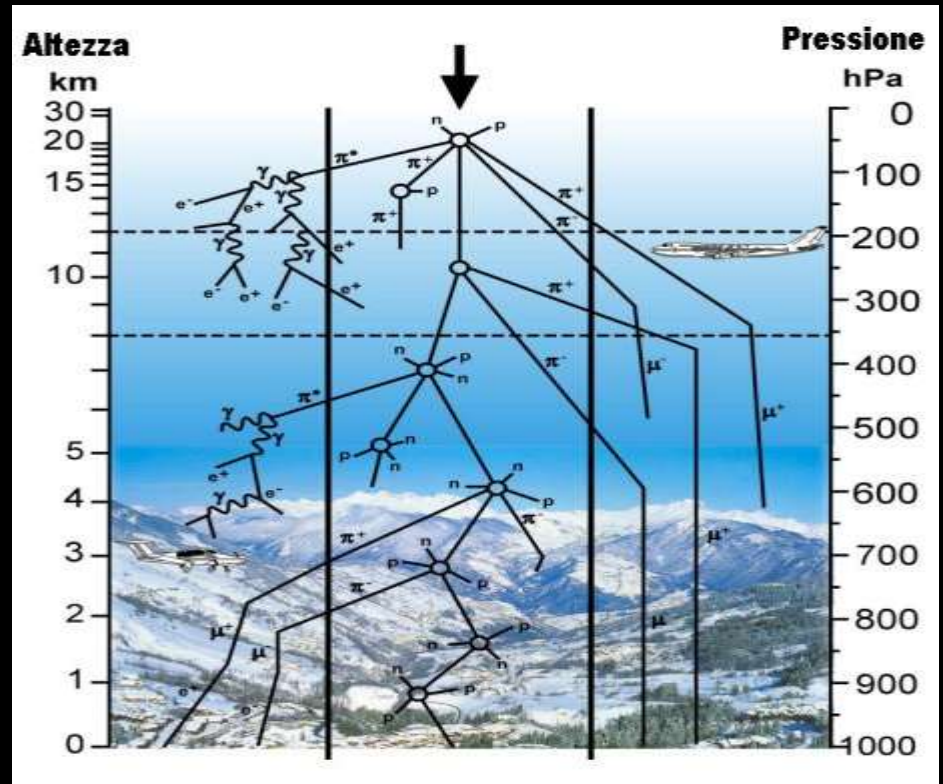
**PARTICELLE
AD ALTA ENERGIA**
ARRIVO: 15 MIN - ORE
DURATA: GIORNI

EVENTI A PROTONI

**PARTICELLE AD ENERGIA
MEDIO-BASSA**
ARRIVO: 2-4 GIORNI
DURATA: GIORNI

TEMPESTE GEOMAGNETICHE

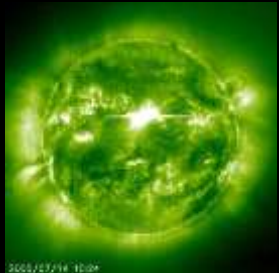
✓ Radiazioni aerei ad alta quota



“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino

Effetti delle Tempeste Solari



**RADIAZIONE
ELETTROMAGNETICA**
ARRIVO: 8 MINUTI
DURATA: 1-2 ORE

RAGGI X, EUV,
ATTIVITA' RADIO

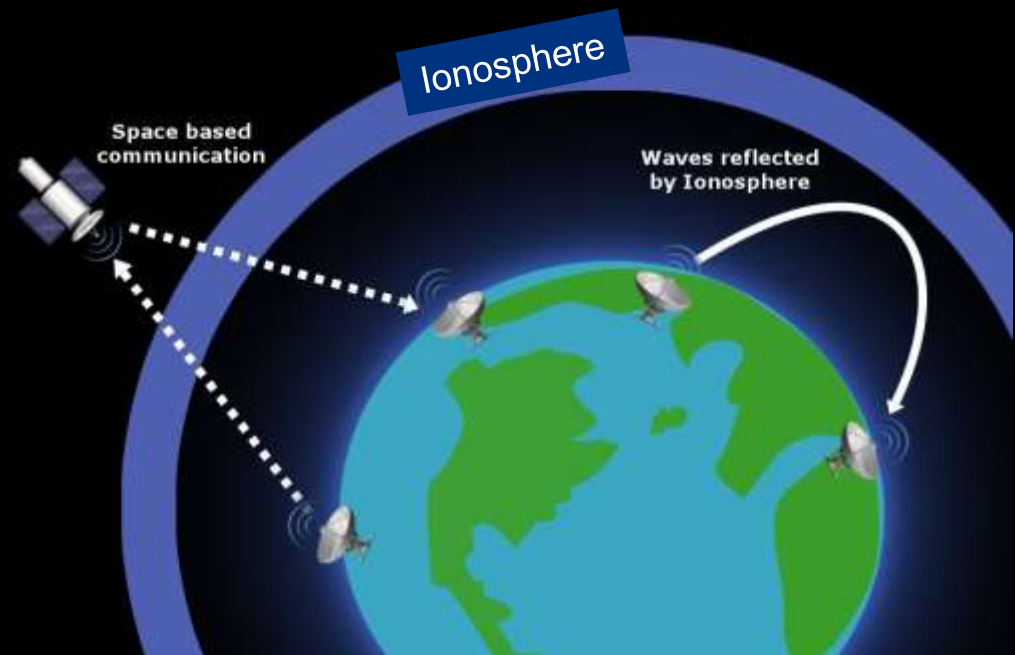
**PARTICELLE
AD ALTA ENERGIA**
ARRIVO: 15 MIN - ORE
DURATA: GIORNI

EVENTI A PROTONI

**PARTICELLE AD ENERGIA
MEDIO-BASSA**
ARRIVO: 2-4 GIORNI
DURATA: GIORNI

TEMPESTE GEOMAGNETICHE

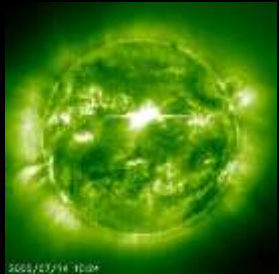
✓ Interferenze segnali radio



“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino

Effetti delle Tempeste Solari



**RADIAZIONE
ELETTROMAGNETICA**
ARRIVO: 8 MINUTI
DURATA: 1-2 ORE

RAGGI X, EUV,
ATTIVITA' RADIO

**PARTICELLE
AD ALTA ENERGIA**
ARRIVO: 15 MIN - ORE
DURATA: GIORNI

EVENTI A PROTONI

**PARTICELLE AD ENERGIA
MEDIO-BASSA**
ARRIVO: 2-4 GIORNI
DURATA: GIORNI

TEMPESTE GEOMAGNETICHE

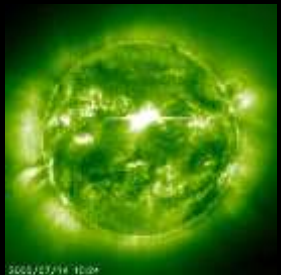
- ✓ Correnti indotte sui sistemi di terra:
- corrosione reti oleodotti/gasdotti
 - danneggiamento centrali elettriche



“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino

Effetti delle Tempeste Solari



**RADIAZIONE
ELETTROMAGNETICA**
ARRIVO: 8 MINUTI
DURATA: 1-2 ORE

RAGGI X, EUV,
ATTIVITA' RADIO

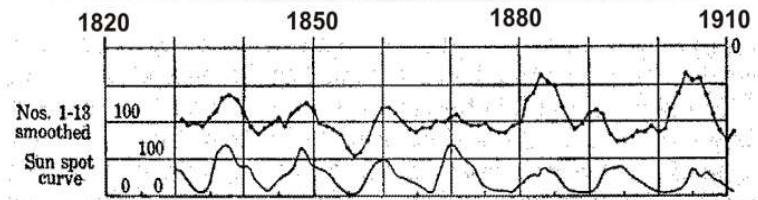
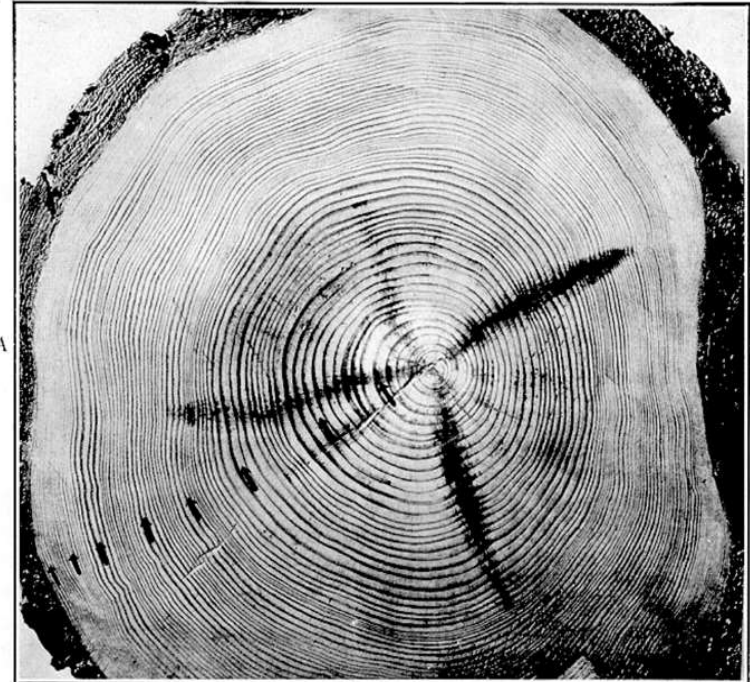
**PARTICELLE
AD ALTA ENERGIA**
ARRIVO: 15 MIN - ORE
DURATA: GIORNI

EVENTI A PROTONI

**PARTICELLE AD ENERGIA
MEDIO-BASSA**
ARRIVO: 2-4 GIORNI
DURATA: GIORNI

TEMPESTE GEOMAGNETICHE

✓ Variazioni climatiche



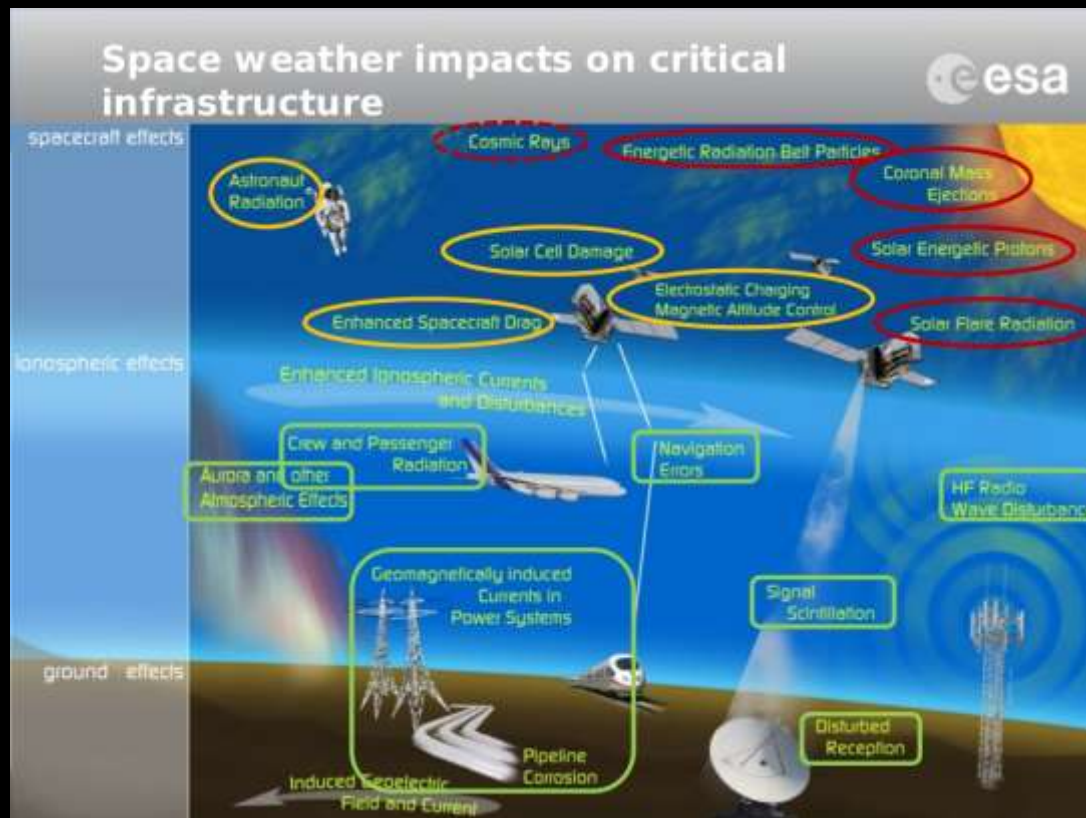
“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino

Perché la meteorologia spaziale?

- ❑ La nostra società dipende sempre di più dalla tecnologia
- ❑ Il settore di mercato delle comunicazioni in più rapida crescita è quello basato sui satelliti:
 - Trasmissioni TV/Radio,
 - Servizio telefonico a lunga distanza, Telefoni cellulari, Cercapersone
 - Internet, transazioni finanziarie
- ❑ Cambiamento della tecnologia
 - Carichi commerciali più sensibili
 - Componenti ad elevate prestazioni
- ❑ Uomini nello Spazio
 - Più missioni umane e di lunga durata

Gli avvisi dello Space Weather saranno molto importanti in futuro per la nostra società!



"Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali"

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino

Perché la meteorologia spaziale?



Dal **12 marzo 2018**, il Centro Operativo per la Meteorologia (COMet) inizierà l'elaborazione e diffusione di un "*Bollettino Space Weather (SWx)*" quotidiano, prodotto sulla base di informazioni fornite dalla NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration).

"Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali"

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino



Dobbiamo preoccuparci?

- Nel corso della sua vita il Sole ha sicuramente generato eruzioni molto più intense della *Halloween Storm*, eppure la vita si è comunque sviluppata sul nostro pianeta → **rischio biologico molto limitato**.
- Oggi però molti su questo pianeta dipendono nella loro vita direttamente dalla corrente elettrica, telefonia, internet, GPS, trasmissioni TV, voli aerei, etc... molti, ma non tutti → **rischio tecnologico molto elevato**.



Rappresentazione di una famiglia moderna
(US, paese altamente industrializzato)



Famiglia moderna (Papua Nuova Guinea,
paese in via di sviluppo)

“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino

Sole e Terra: alcune “big questions”

- **RISCALDAMENTO CORONALE**

Molti fenomeni possibili per spiegare sia le alte temperature coronali, sia l'accelerazione del vento solare → non sappiamo quale fenomeno domini → limitata comprensione fisica del plasma

- **CICLO SOLARE**

Conoscenza limitata dei moti di plasma all'interno del sole → limitata comprensione della dinamo solare → incapacità previsione del ciclo solare

- **ATTIVITA' SOLARE**

Conoscenza limitata dei processi fisici alla base delle eruzioni solari → limitata comprensione delle loro cause → incapacità previsioni eruzioni solari

- **METEOROLOGIA SPAZIALE**

Conoscenza limitata delle interazioni tra tempeste solari e magnetosfera terrestre → limitata comprensione cause tempeste geomagnetiche → incapacità previsioni di meteorologia spaziale

- **CLIMATOLOGIA TERRESTRE**

Comprensione non completa delle complesse sequenze causa-effetto che a partire dal Sole generano il clima sulla Terra → incapacità previsioni climatologiche

“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino



Il prossimo futuro: la missione Solar Orbiter

“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino



La missione Solar Orbiter

SOLAR ORBITER

Missione dell' **Agenzia Spaziale Europea (ESA)** con partecipazione dell' Agenzia Americana (**NASA**).

Lancio: febbraio 2020 dalla base di Cape Canaveral - Florida

Orbita: ellittica tale da

- osservare per la **prima volta il Sole da vicino** (0.28 AU quasi 1/4 della distanza Terra-Sole → mai nessun satellite così vicino al Sole)
- osservare per la **prima volta i poli del Sole** (fino a 34° fuori dal piano dell'eclittica)



“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino



Il Sole dal Solar Orbiter



Da Terra



Dal Solar Orbiter → 3.6 volte più grande, 12.7 volte più luminoso

“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino



Modello termico-strutturale del Solar Orbiter (ESA ESTEC)



"Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali"

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino

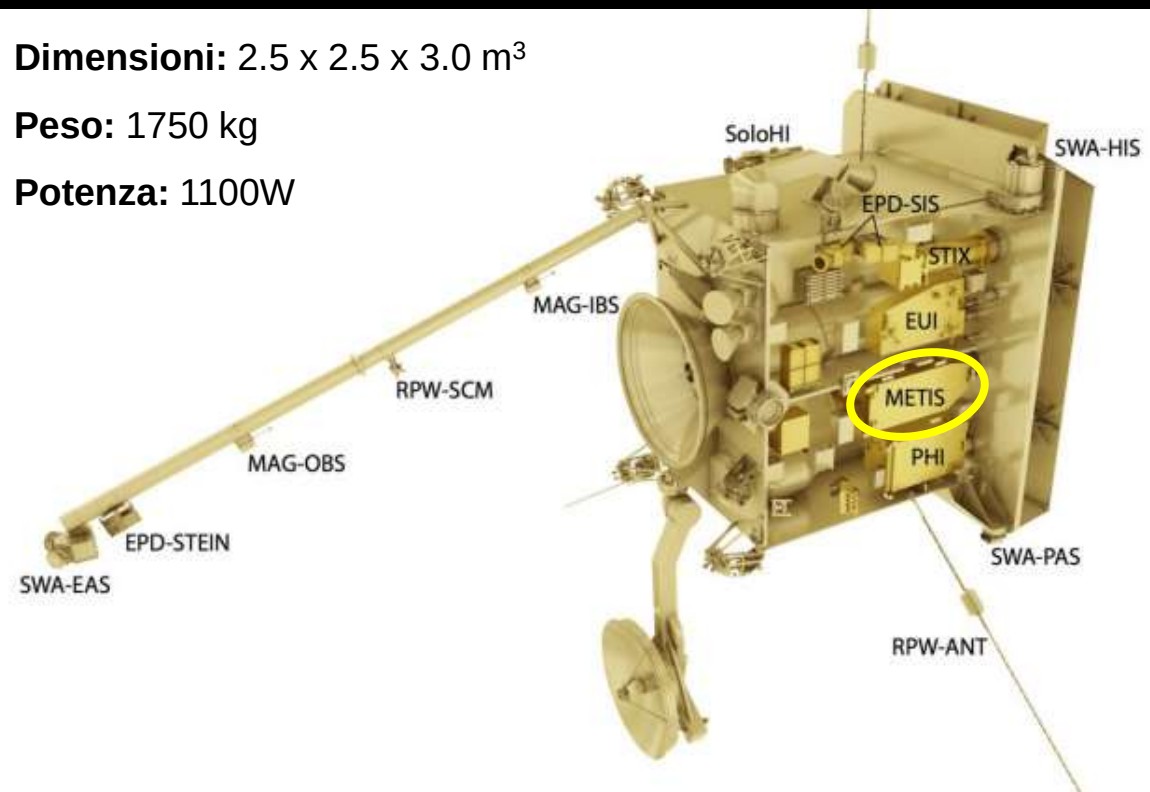
Solar Orbiter: strumentazione

10 gli strumenti a bordo di Solar Orbiter (nel rendering una parte del satellite è stata rimossa per mostrare gli strumenti montati all'interno, uno strumento SPICE non è visibile perchè montato dietro).

Dimensioni: 2.5 x 2.5 x 3.0 m³

Peso: 1750 kg

Potenza: 1100W



Due tipi di strumenti:

REMOTE SENSING per studiare il Sole da «lontano», ossia catturando la luce emessa a diverse lunghezze d'onda

IN SITU per misurare localmente le particelle del vento solare ed i campi magnetici nello attorno al satellite

METIS: il coronografo italiano:
*Consorzio Internazionale sotto la responsabilità di INAF – OATo;
Principale Agenzia finanziatrice: ASI*

“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino



Lo strumento METIS

Lo strumento METIS in corso di calibrazioni presso ALTEC - Torino



<http://metis.oato.inaf.it/>



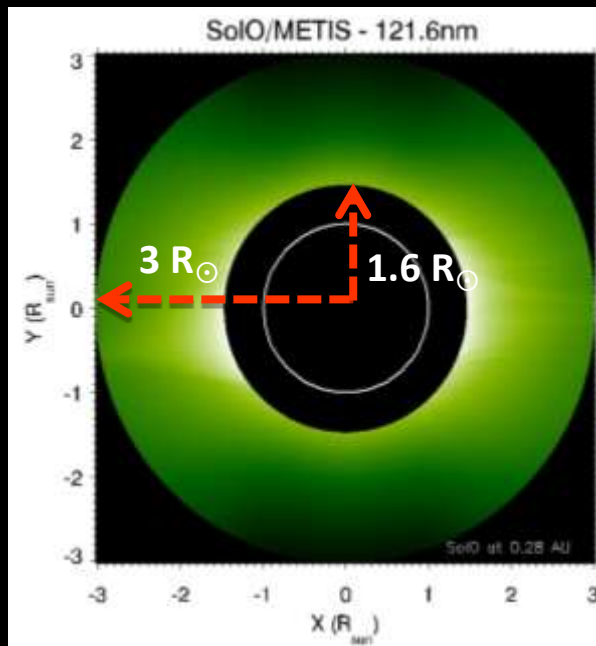
“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino

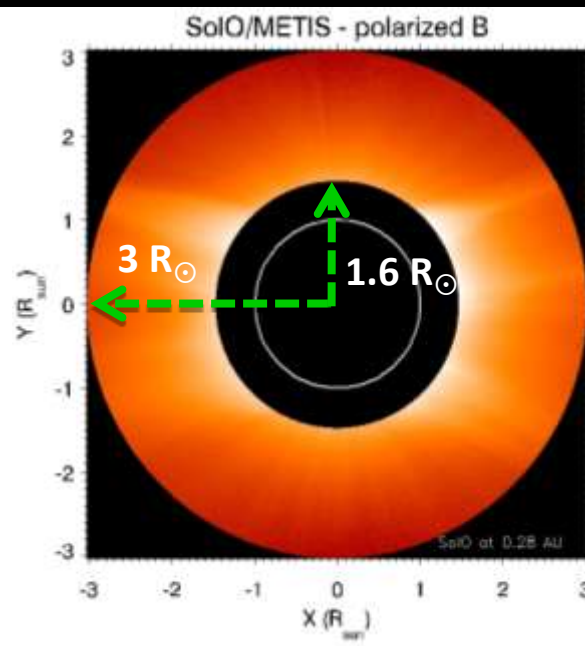


Lo strumento METIS

(luce ultravioletta)



(luce visibile)



METIS è il primo coronografo **multi-channel** → osserverà per la prima volta contemporaneamente la corona solare in due diverse lunghezze d'onda: nella **luce visibile** (590-650 nm) e nell'**UV** (121 nm).

Le strutture della corona saranno osservate con una risoluzione di 20"/pixel (~ 4.000 km/pixel a 0.28 AU)

"Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali"

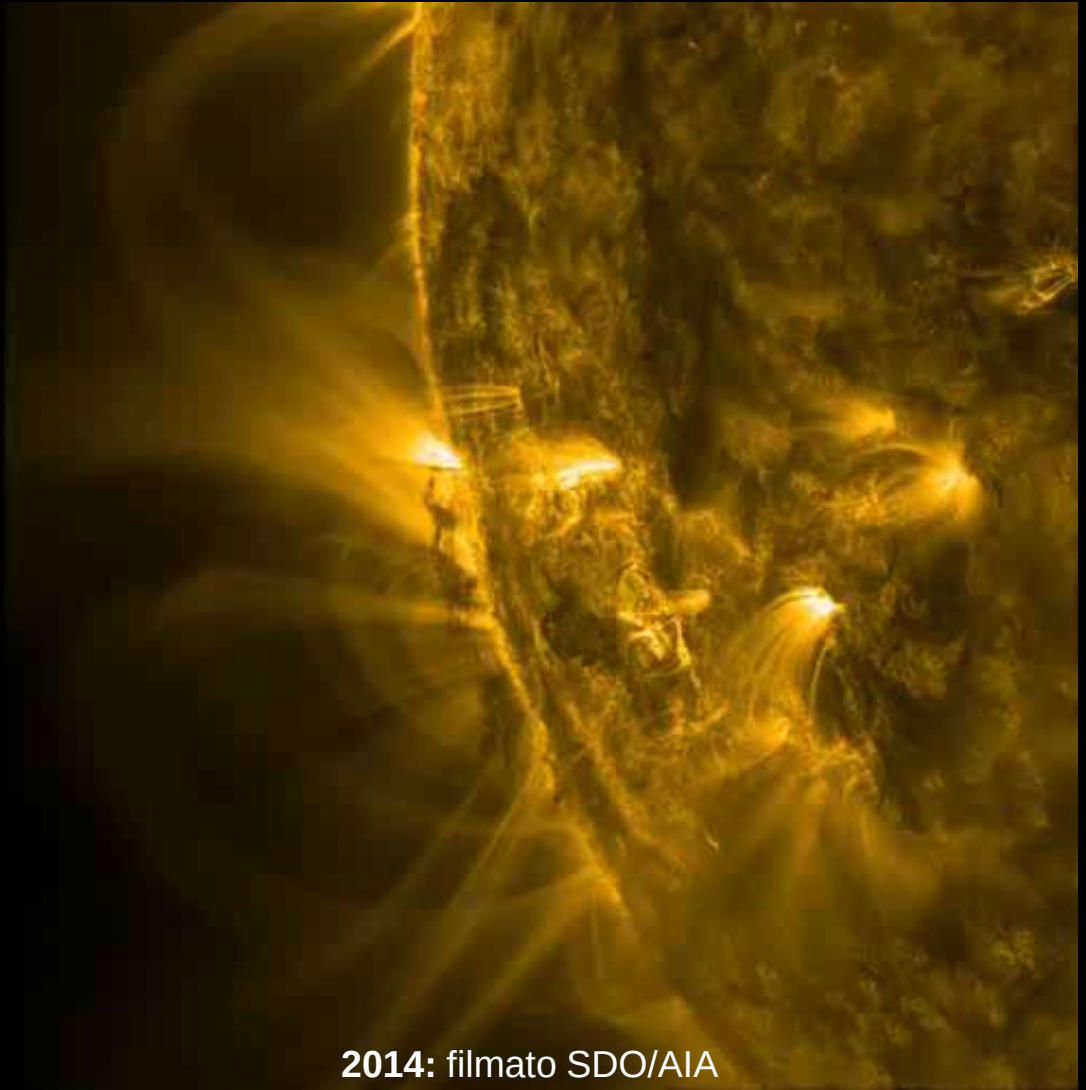
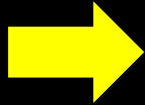
A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino



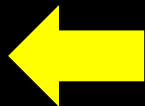
Sfide delle future osservazioni



1960: prima immagine X
del Sole (satellite Solrad I)



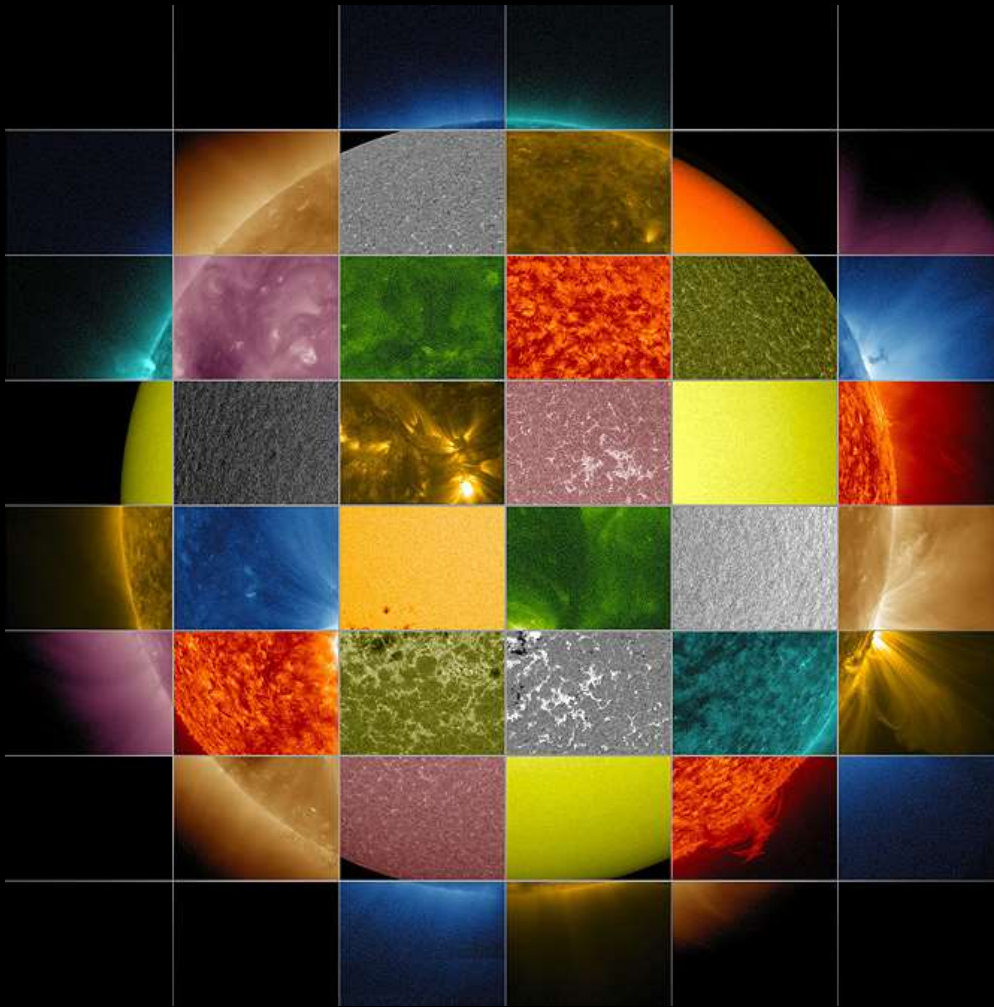
2014: filmato SDO/AIA



“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino

Conclusioni



Composizione di immagini del Sole a diverse lunghezze d'onda

- Lo studio del Sole è molto importante: è la **nostra stella!**
- Il Sole ha una **struttura molto complessa** dominata da intensi campi magnetici.
- Sul Sole avvengono molti **fenomeni dinamici** quali brillamenti, protuberanze eruttive, vento solare, etc...
- A causa dell'atmosfera terrestre, molti di questi fenomeni sono **osservabili solo dallo spazio.**
- Molti fenomeni dell'attività solare hanno **effetti diretti sulla Terra** ancora **non del tutto compresi.**
- La futura missione **ESA Solar Orbiter** cercherà **risposte** alle molte domande ancora aperte.

“Convivere con la nostra stella: dalla quiete apparente del Sole alle tempeste spaziali”

A. Bemporad, INAF – Osservatorio Astrofisico di Torino

