

I raggi cosmici – introduzione

Emiliano Mocchiutti
INFN Trieste, Italia

Discover Cosmic Rays 10 Novembre 2021 – Udine

**INTERNATIONAL
COSMIC DAY**

In questa presentazione

- ❑ **Introduzione**
- ❑ **La scoperta dei raggi cosmici**
- ❑ **La fisica della astroparticelle**
- ❑ **Rivelatori di raggi cosmici**

Introduzione

La scienza è rigore non certezza

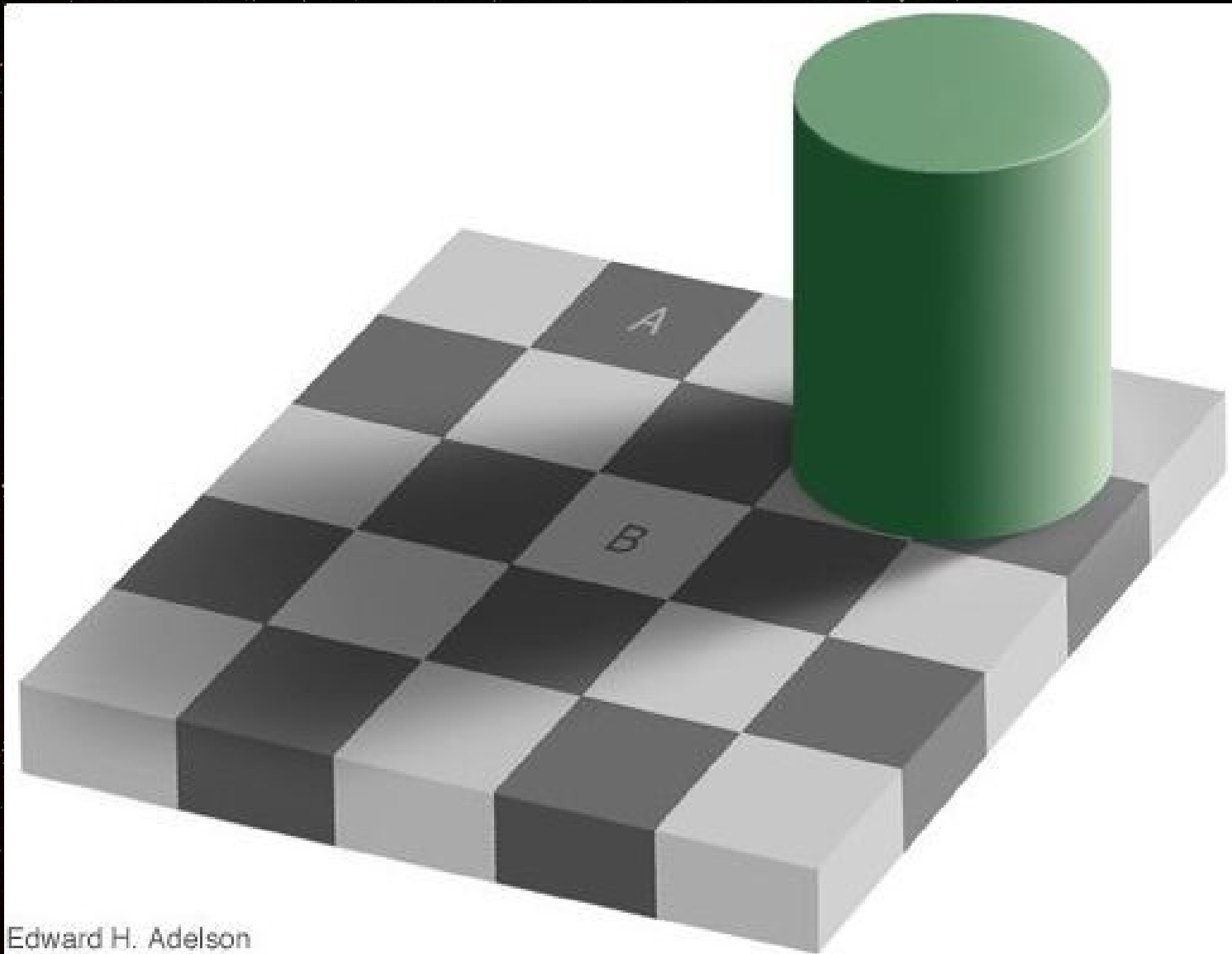
Fisica è rigore nel metodo,
non rigore nel risultato.

Fisica è fare le domande
giuste, non ottenere
risposte certe e indiscutibili.

Fisica è dubbio, è senso
critico, è curiosità, è sfidare
il “senso comune”, è cercare
di andare dove nessuno è mai arrivato, è (cercare di)
non avere pregiudizi,...

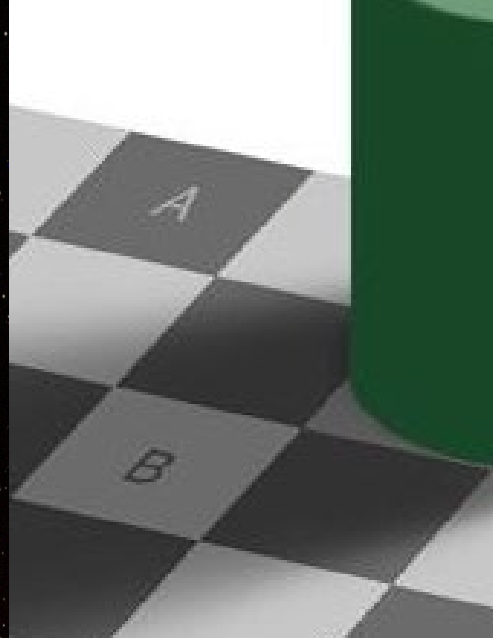


Non tutto è quello che sembra

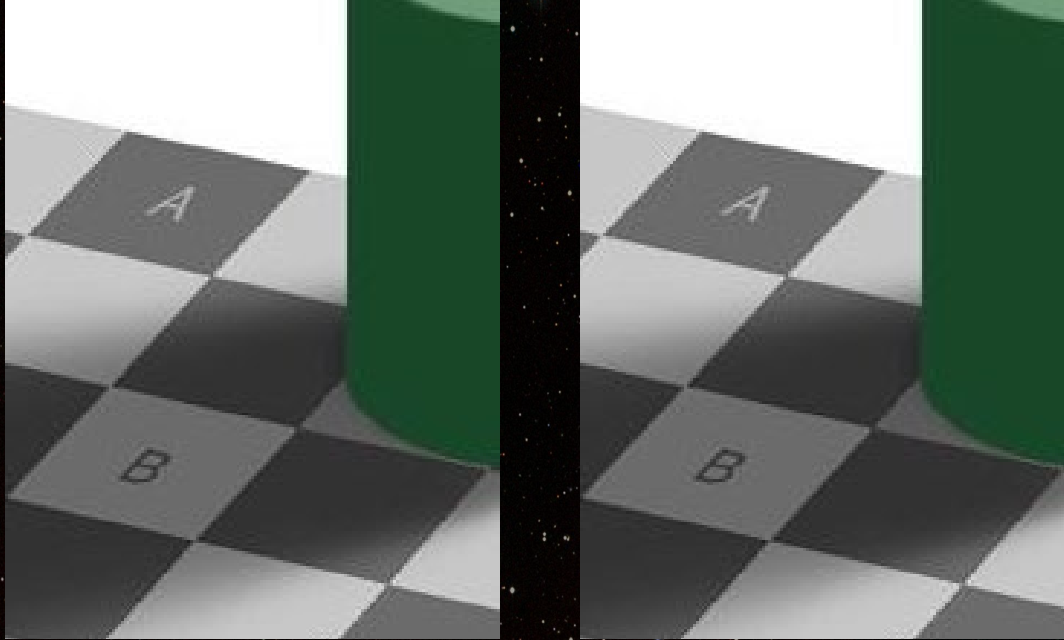


Edward H. Adelson

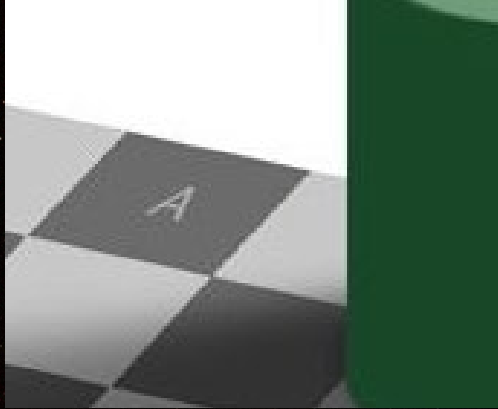
Non tutto è quello che sembra



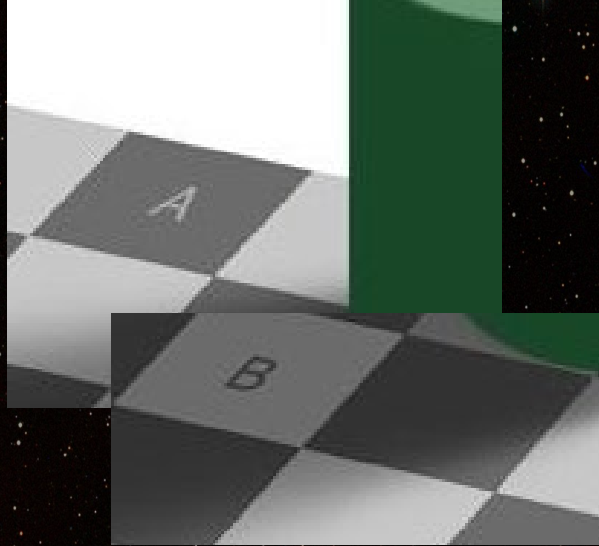
Non tutto è quello che sembra



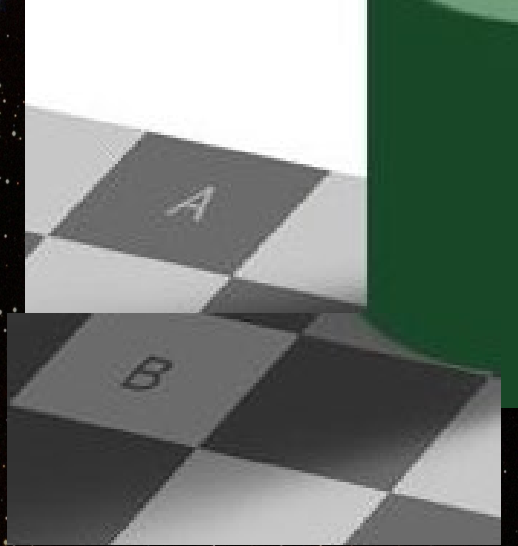
Non tutto è quello che sembra



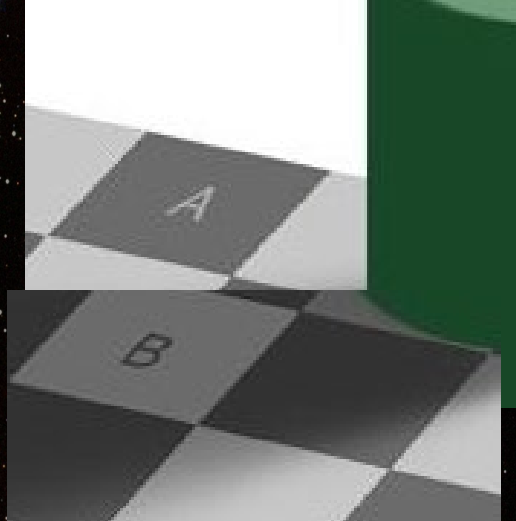
Non tutto è quello che sembra



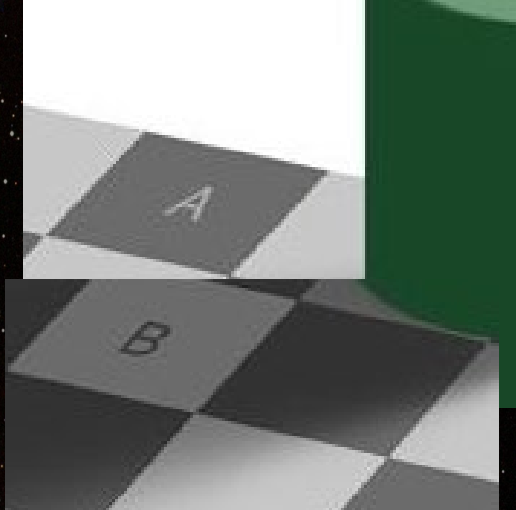
Non tutto è quello che sembra



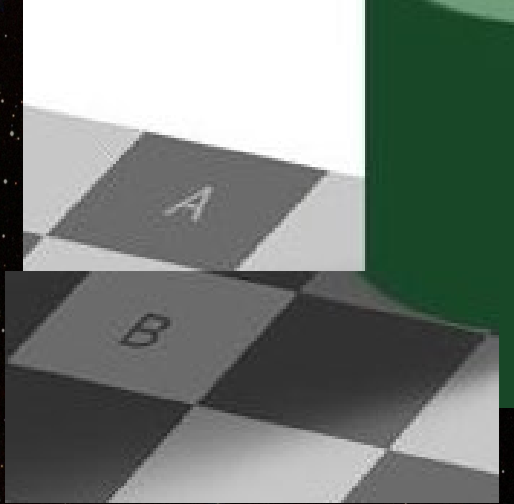
Non tutto è quello che sembra



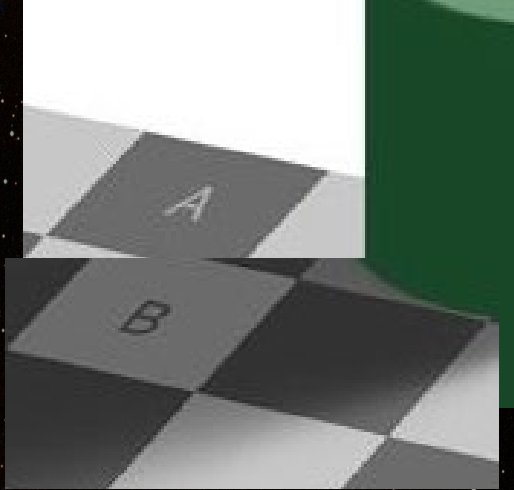
Non tutto è quello che sembra



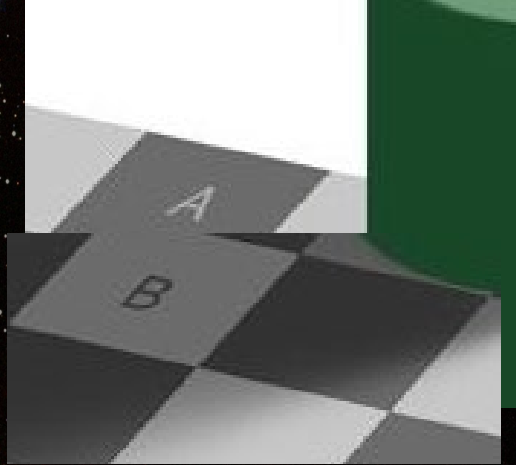
Non tutto è quello che sembra



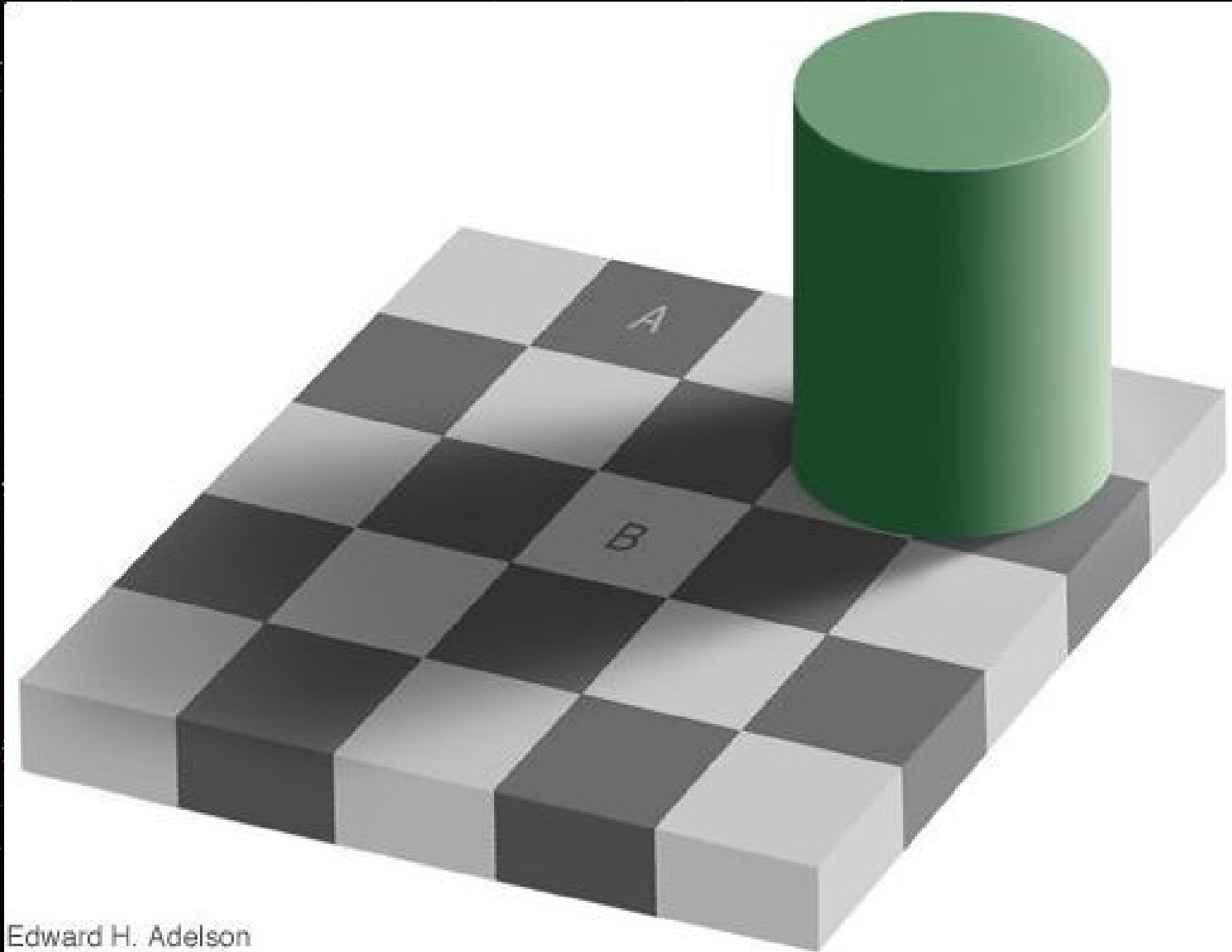
Non tutto è quello che sembra



Non tutto è quello che sembra

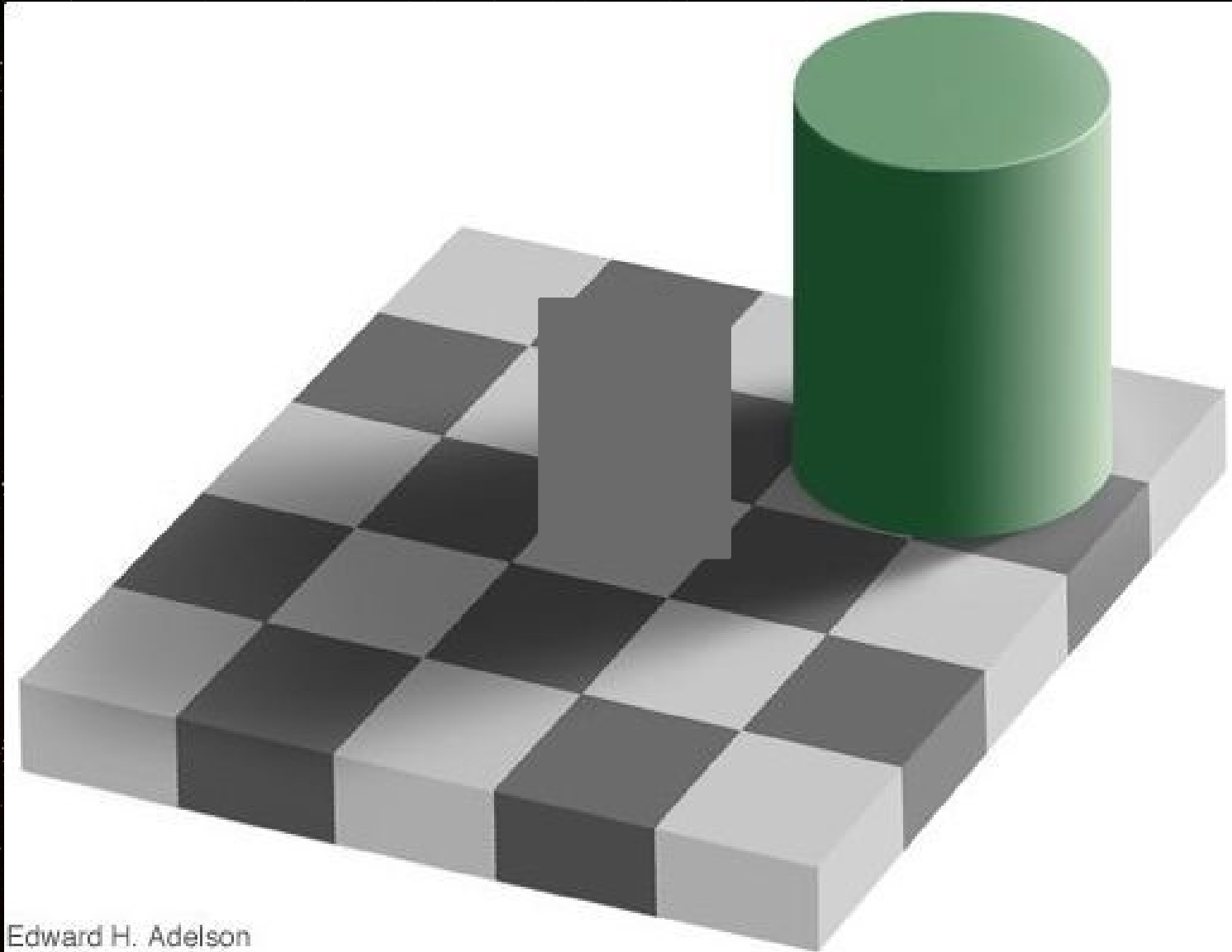


Non tutto è quello che sembra



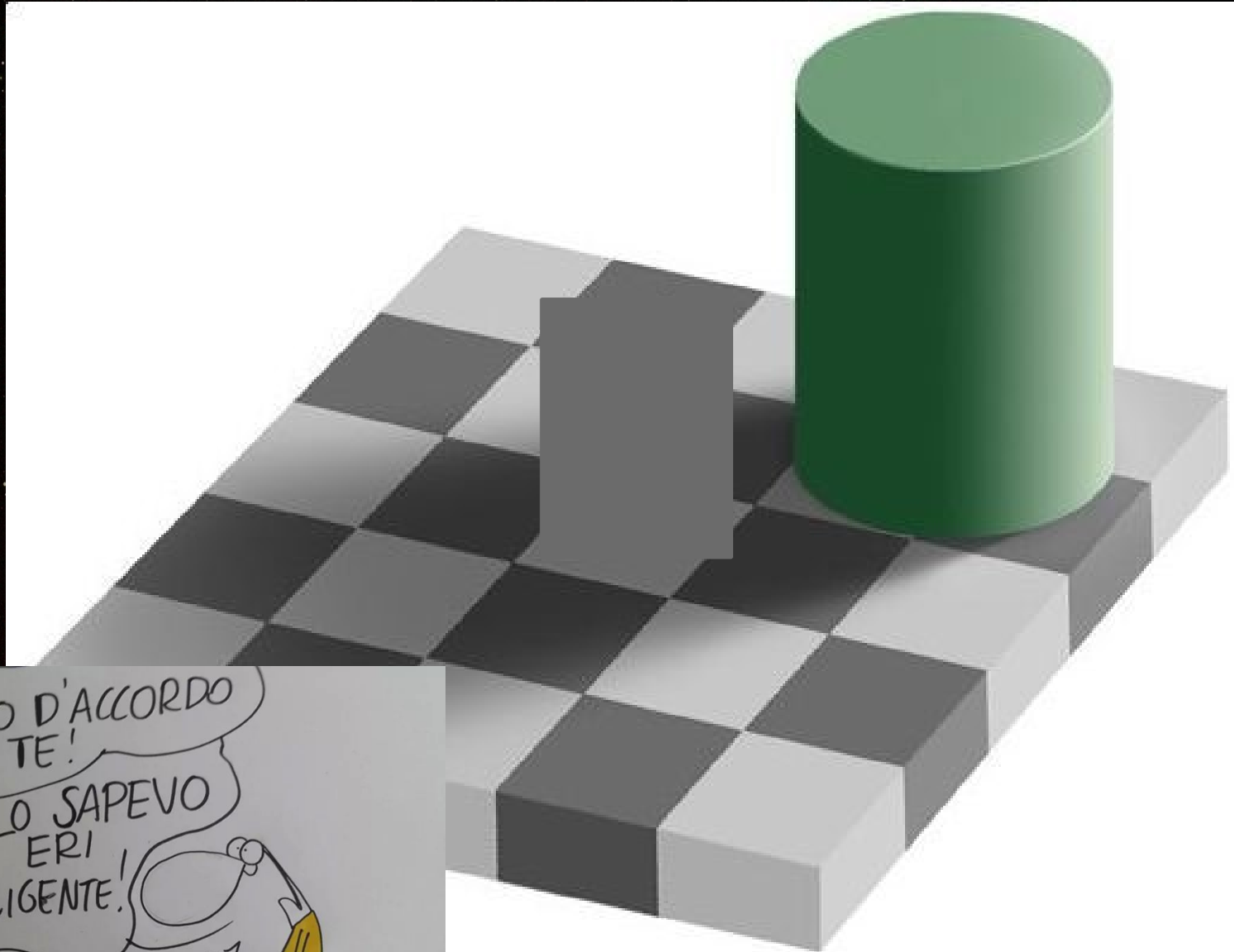
Edward H. Adelson

Non tutto è quello che sembra

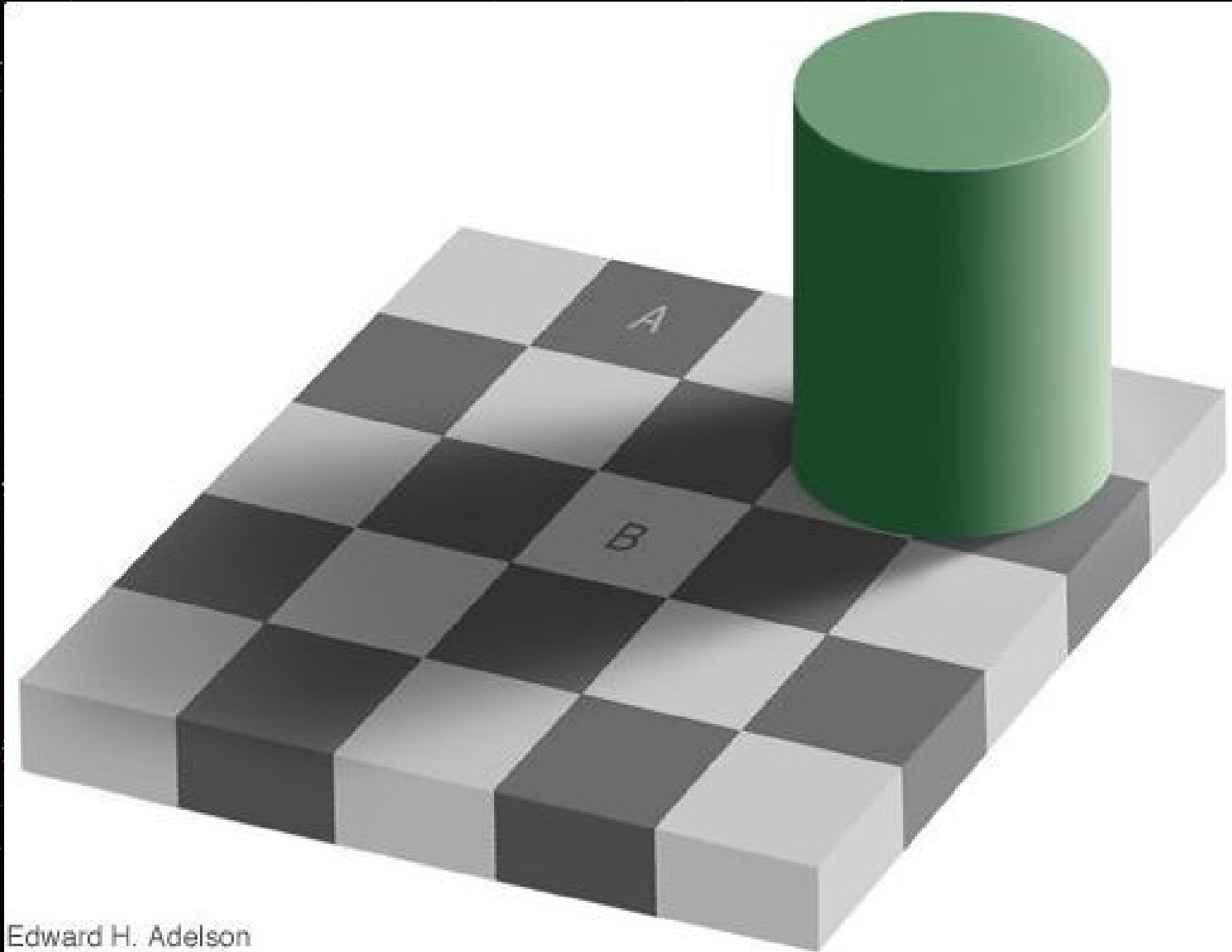


Edward H. Adelson

Non tutto è quello che sembra



Non tutto è quello che sembra



Edward H. Adelson

Il fisico “osserva” non “vede”

Osservare

Vocabolario on line

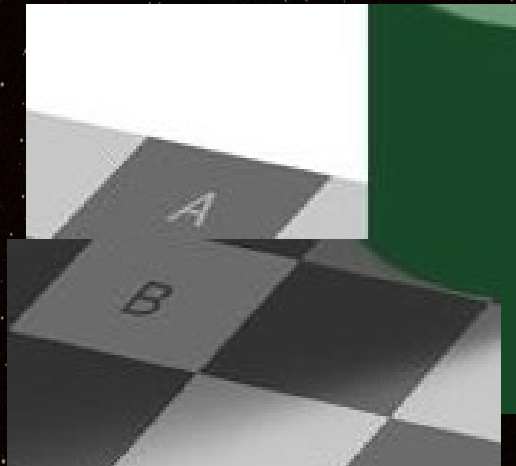
-A +A



osservare v. tr. [dal lat. *observare*, comp. di *ob-* e *servare* «serbare, custodire, considerare»] (*io osservo*, ecc.). –

1.

a. Guardare, esaminare, considerare con attenzione, anche con l'aiuto di strumenti adatti, al fine di conoscere meglio, di rendersi conto di qualche cosa, di rilevare i particolari, o per formulare giudizi e considerazioni di varia natura: o. *un quadro*; o. *i movimenti di un insetto*; o. *il funzionamento di un motore*; o. *le stelle a occhio nudo, col telescopio*; o. *al microscopio, col cannocchiale*. Talora fa riferimento più all'attenzione della mente che a quella dell'occhio: o. *gli effetti di una reazione chimica*; o. *l'andamento di un fenomeno*.



Vedere

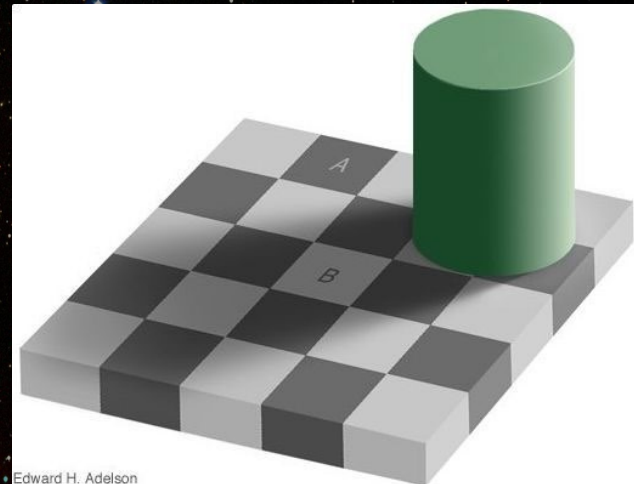
Vocabolario on line

-A +A



vedere v. tr. [lat. *vidēre*] (pres. indic. *vedo* [letter. *veggo*, ant. o poet. *veggió*], *vedi* [ant. *véi*, *vé'*], *vede*, *vediamo* [ant. o poet. *veggiamo*], *vedéte*, *vedono* [letter. *véggono*, ant. o poet. *véggiono*]; pres. cong. *io, tu, egli véda* [letter. *végga*, ant. o poet. *véggia*], *vediamo* [ant. o poet. *veggiamo*], *vediate* [ant. o poet. *veggiate*], *védano* [letter. *véggano*, ant. o poet. *véggiano*]; imperat. *vedi* [ant. *ve'*], *vedéte*; fut. *vedrò, vedrài*, ecc. [ant. *vederò, vederài*, ecc.]; condiz. *vedrèi, vedrésti*, ecc. [ant. *vederèi, vederésti*, ecc.]; pass. rem. *vidi* [ant. *vedètti, vedéi, véddi, viddi*], *vedésti, vide* [ant. *vedétte*], *vedémmo* [ant. *viddimmo*], *vedéste, videro* [ant. *vedéttero, vedérono, vidono*]; part. pres. *veggente*, soprattutto con uso di sost., accanto a *vedente* (v. le due voci); part. pass. *visto* o, meno pop., *veduto*; ger. *vedendo* [letter. *veggendo*]). –

1. Percepire stimoli esterni per mezzo della funzione visiva.



Edward H. Adelson

La scoperta dei raggi cosmici



Elettroscopio



T. Cavallo, 1780
Perfezionato, in seguito, da A. Volta

Emiliano Mocchiutti, INFN Trieste – ICD 2021

Elettroscopio, funzionamento



<https://www.youtube.com/watch?v=XXVUuW5F0xU>

Università degli Studi di Padova

Elettroscopio: non «tiene» la carica!



<https://www.youtube.com/watch?v=Px2KVG1PGhg>

Inizi del '900

Marie Skłodowska e Pierre Curie



La radioattività proveniente dal terreno sembra risolvere il problema dell'elettroscopio!

1910: Padre Wulf e la torre Eiffel



Padre Wulf scopre che a 300 metri di altezza la radioattività dell'aria **NON** è significativamente diversa da terra! Diminuisce con l'altezza ma non quanto ci si aspettava.

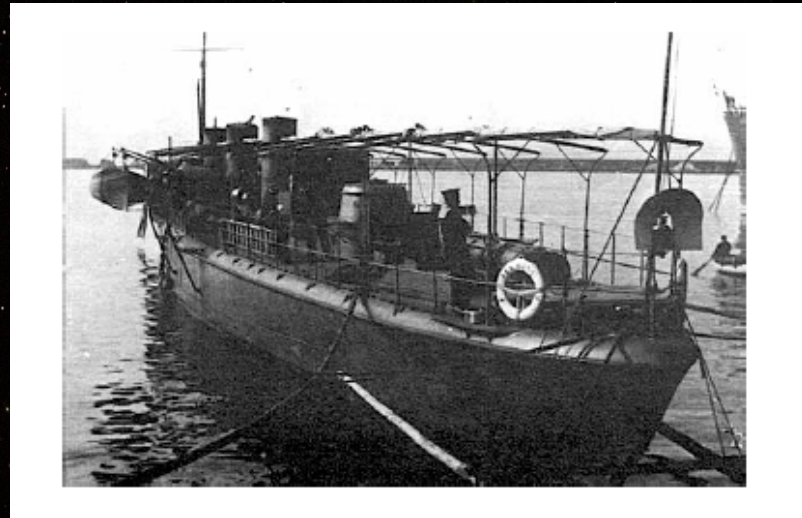
Padre Wulf conclude che: o l'aria assorbe molto meno del previsto la radioattività del terreno o questa radioattività non proviene dal suolo.



1911: Domenico Pacini



Domenico Pacini
1878 – 1934



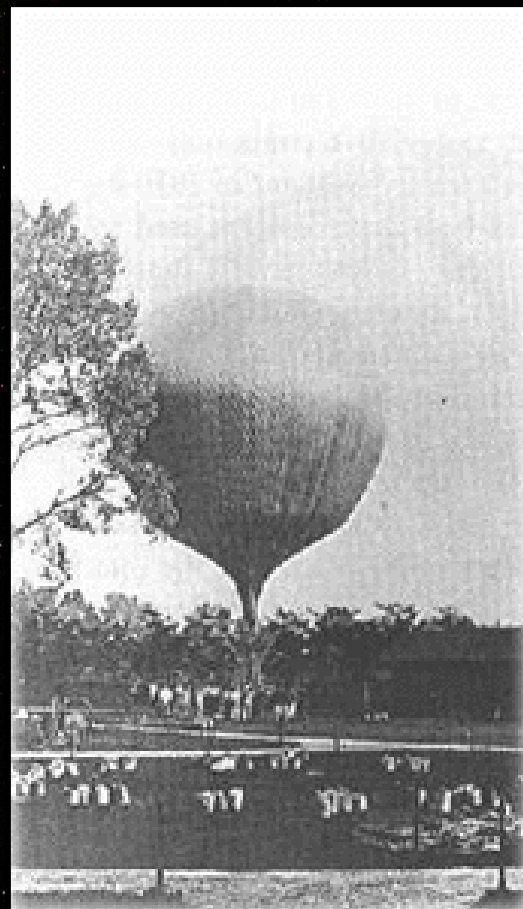
Domenico Pacini studia il comportamento degli elettroscopi su una nave lontano dalla riva e poi anche sotto il livello del mare.

Pacini pubblica un articolo in cui conclude che “esiste nell’atmosfera una sensibile causa ionizzante, con radiazioni penetranti, indipendente dall’azione diretta delle sostanze radioattive del terreno”

[Il Nuovo Cimento VI/III, 93 (1912) - arXiv: 1002.1810v1]

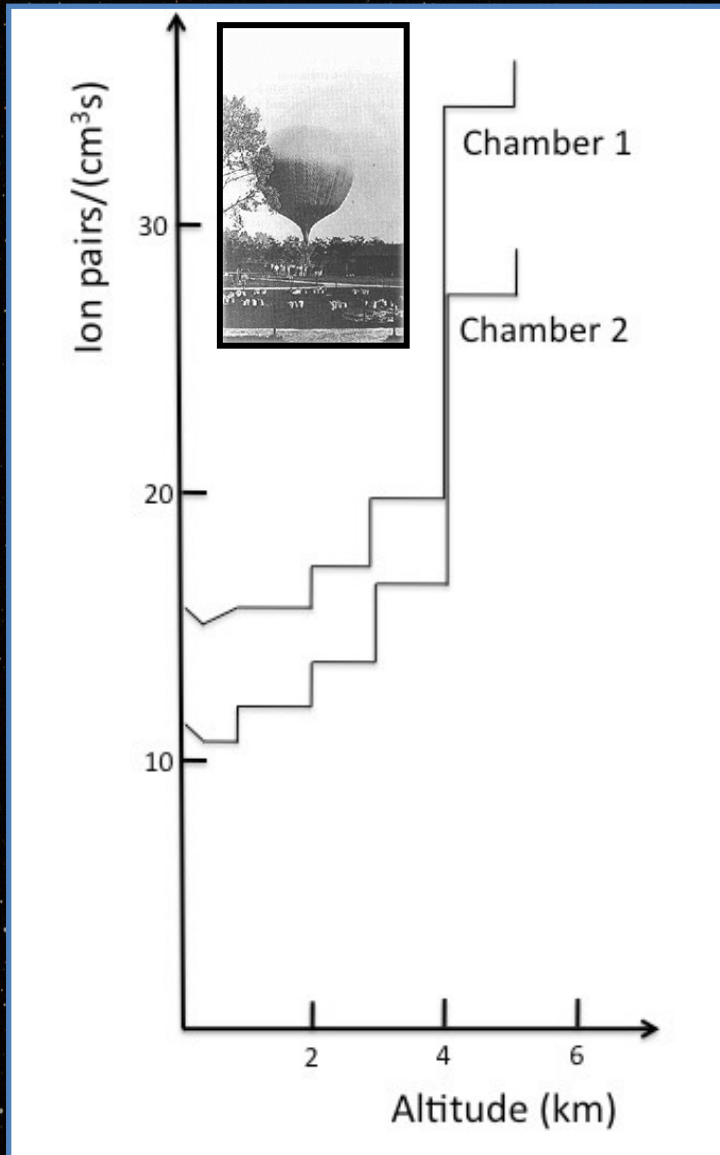
<https://arxiv.org/pdf/1002.1810.pdf>

1912: Victor Hess

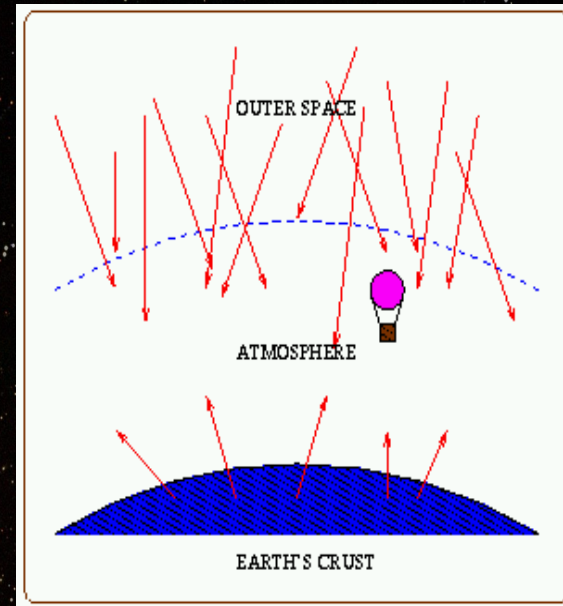


L'austriaco Victor Hess propone una misura complementare a quella di Pacini: la radiazione aumenta o diminuisce in quota?
Nel 1912 Hess fa 7 voli. Nel volo finale, nell'agosto 1912, raggiunge i 5300 metri.

1912: Victor Hess



I risultati mostrano che la radioattività cresce rapidamente oltre i 3000 metri
Hess conclude che parte della radiazione viene dal suolo, e parte dall'alto (fuori dalla Terra).



Il lavoro è pubblicato nel Novembre 1912; non cita l'ultimo e decisivo lavoro di Pacini...

<https://arxiv.org/abs/1808.02927>

Nasce la fisica dei raggi cosmici...



1925: **Robert Millikan**
conferma l'esperimento
di Pacini (e conia il
termine "raggi cosmici")

Nasce la fisica dei raggi cosmici...



1925: **Robert Millikan** conferma l'esperimento di Pacini (e conia il termine "raggi cosmici")



1928: **Jacob Clay** dimostra che i raggi cosmici sono prevalentemente particelle cariche (effetto geomagnetico)

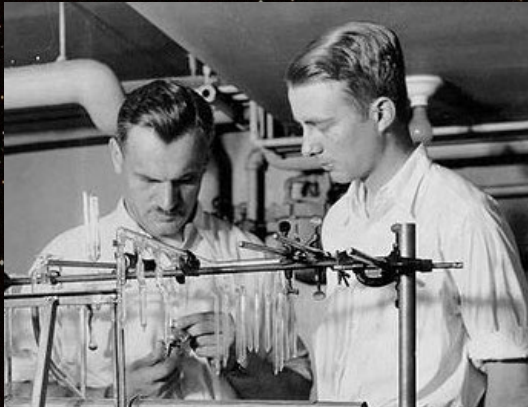
Nasce la fisica dei raggi cosmici...



1925: **Robert Millikan** conferma l'esperimento di Pacini (e conia il termine "raggi cosmici")



1928: **Jacob Clay** dimostra che i raggi cosmici sono prevalentemente particelle cariche (effetto geomagnetico)



1933: **Luis Alvarez** e **Arthur Compton** scoprono che sono prevalentemente positive (effetto est-ovest, previsto da Rossi)

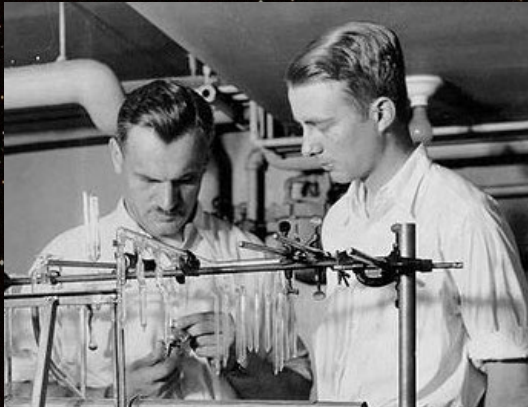
Nasce la fisica dei raggi cosmici...



1925: **Robert Millikan** conferma l'esperimento di Pacini (e conia il termine "raggi cosmici")



1928: **Jacob Clay** dimostra che i raggi cosmici sono prevalentemente particelle cariche (effetto geomagnetico)



1933: **Luis Alvarez** e **Arthur Compton** scoprono che sono prevalentemente positive (effetto est-ovest, previsto da Rossi)

1933: **Bruno Rossi** scopre che entrando nell'atmosfera producono sciame di particelle (Padova/Asmara)



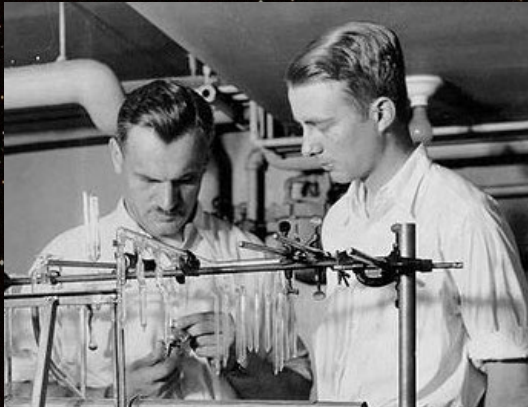
Nasce la fisica dei raggi cosmici...



1925: **Robert Millikan** conferma l'esperimento di Pacini (e conia il termine "raggi cosmici")



1928: **Jacob Clay** dimostra che i raggi cosmici sono prevalentemente particelle cariche (effetto geomagnetico)



1933: **Luis Alvarez e Arthur Compton** scoprono che sono prevalentemente positive (effetto est-ovest, previsto da Rossi)

Da notare:

- Si sviluppano nuovi tipi di rivelatori: contatori Geiger, camere a nebbia, camere a bolle, camere ad emulsione nucleare...
- Rossi perfeziona e rende pratico il "circuitto di coincidenza" (inventato da Walther Bothe, per cui vince il premio Nobel nel 1954)

1933: **Bruno Rossi** scopre che entrando nell'atmosfera producono sciame di particelle (Padova/Asmara)



... e la fisica delle particelle elementari

Studiando i raggi cosmici vengono scoperte nuove particelle e nuove proprietà della materia:

1934: il
positrone
(Anderson)

... e la fisica delle particelle elementari

Studiando i raggi cosmici vengono scoperte nuove particelle e nuove proprietà della materia:

1934: il
positrone
(Anderson)

1937: il leptone
mu o “muone”
(Neddermeyer
e Anderson)

... e la fisica delle particelle elementari

Studiando i raggi cosmici vengono scoperte nuove particelle e nuove proprietà della materia:

1934: il
positrone
(Anderson)

1937: il leptone
mu o “muone”
(Neddermeyer
e Anderson)

1947: il mesone π o
“pione” (Lattes,
Occhialini e Powell,
previsto
teoricamente da
Yukawa nel 1935)

1947: il mesone K o
“kaone”, la prima
particella strana
(Rochester &
Butler)

... e la fisica delle particelle elementari

Studiando i raggi cosmici vengono scoperte nuove particelle e nuove proprietà della materia:

1934: il
positrone
(Anderson)

1937: il leptone
mu o “muone”
(Neddermeyer
e Anderson)

1947: il mesone π o
“pione” (Lattes,
Occhialini e Powell,
previsto
teoricamente da
Yukawa nel 1935)

1947: il mesone K o
“kaone”, la prima
particella strana
(Rochester &
Butler)

1951: il barione Λ ,
il primo barione
strano
(Armenteros)

... e la fisica delle particelle elementari

Studiando i raggi cosmici vengono scoperte nuove particelle e nuove proprietà della materia:

1934: il
positrone
(Anderson)

1937: il leptone
mu o “muone”
(Neddermeyer
e Anderson)

1947: il mesone π o
“pione” (Lattes,
Occhialini e Powell,
previsto
teoricamente da
Yukawa nel 1935)

1947: il mesone K o
“kaone”, la prima
particella strana
(Rochester &
Butler)

1951: il barione Λ ,
il primo barione
strano
(Armenteros)

1954: scoperta la
violazione della
simmetria di parità (G-
stack, la prima
collaborazione Europea)

... e la fisica delle particelle elementari

Studiando i raggi cosmici vengono scoperte nuove particelle e nuove proprietà della materia:

1934: il
positrone
(Anderson)

1937: il leptone
mu o “muone”
(Neddermeyer
e Anderson)

1947: il mesone π o
“pione” (Lattes,
Occhialini e Powell,
previsto
teoricamente da
Yukawa nel 1935)

1947: il mesone K o
“kaone”, la prima
particella strana
(Rochester &
Butler)

1951: il barione Λ ,
il primo barione
strano
(Armenteros)

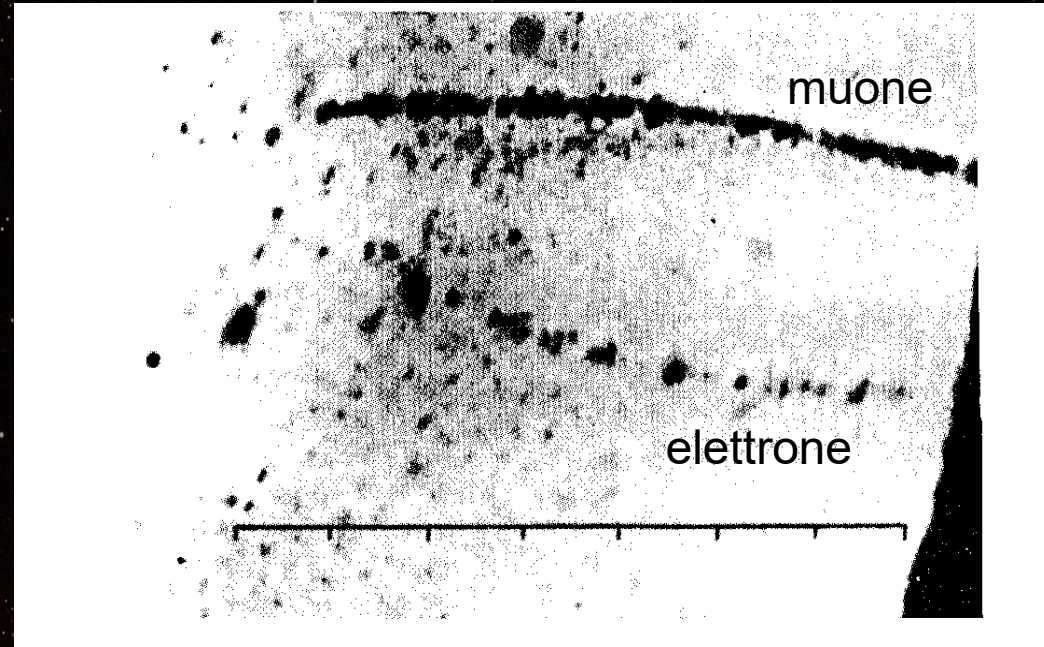
1954: scoperta la
violazione della
simmetria di parità (G-
stack, la prima
collaborazione Europea)

Il muone: cugino pesante dell'elettrone

Fotografia scattata da **Neddermayer** e **Anderson** in una **camera a nebbia** di un raggio cosmico anomalo e di un elettrone (1937):

- dalla direzione di curvatura in campo magnetico si conclude che la particella ha carica positiva
- dalla raggio di curvatura si capisce che la massa è maggiore dell'elettrone ma inferiore a quella di un protone
- dallo spessore della traccia si conclude che ha carica uno (come l'elettrone)

E' il primo muone (positivo) osservato!



I muoni, molto simili agli elettroni ma:

- 1) Hanno una massa circa 200 volte maggiore**
- 2) Decadono in $2 \mu\text{s}$ (in elettroni e neutrini)**
- 3) Interagiscono molto meno con la materia**

Il premio Nobel per la fisica 1936

The Nobel Prize in Physics 1936



Photo from the Nobel Foundation archive.

Victor Franz Hess

Prize share: 1/2



Photo from the Nobel Foundation archive.

Carl David Anderson

Prize share: 1/2

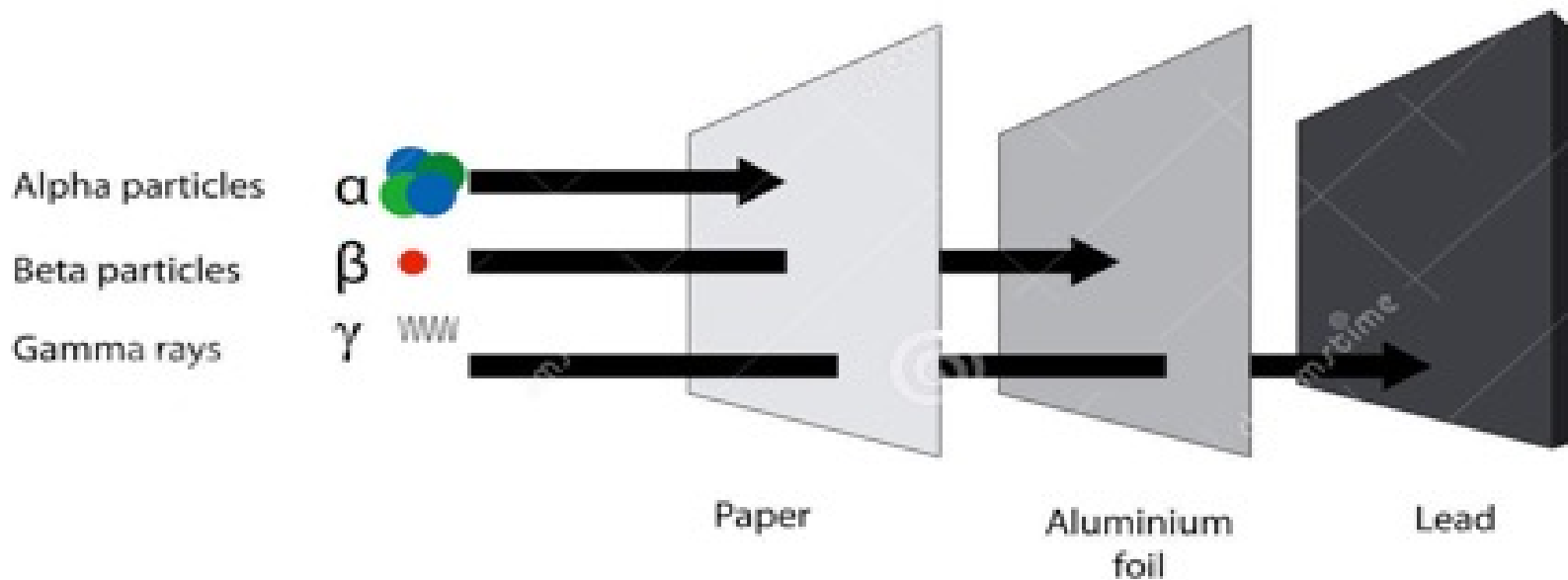
The Nobel Prize in Physics 1936 was divided equally between Victor Franz Hess "for his discovery of cosmic radiation" and Carl David Anderson "for his discovery of the positron."



La fisica dei raggi cosmici

Ma cosa sono i raggi cosmici?

Radioactivity Penetration Range



Ma cosa sono i raggi cosmici?

Radioactivity Penetration Range

Muone

Alpha particles

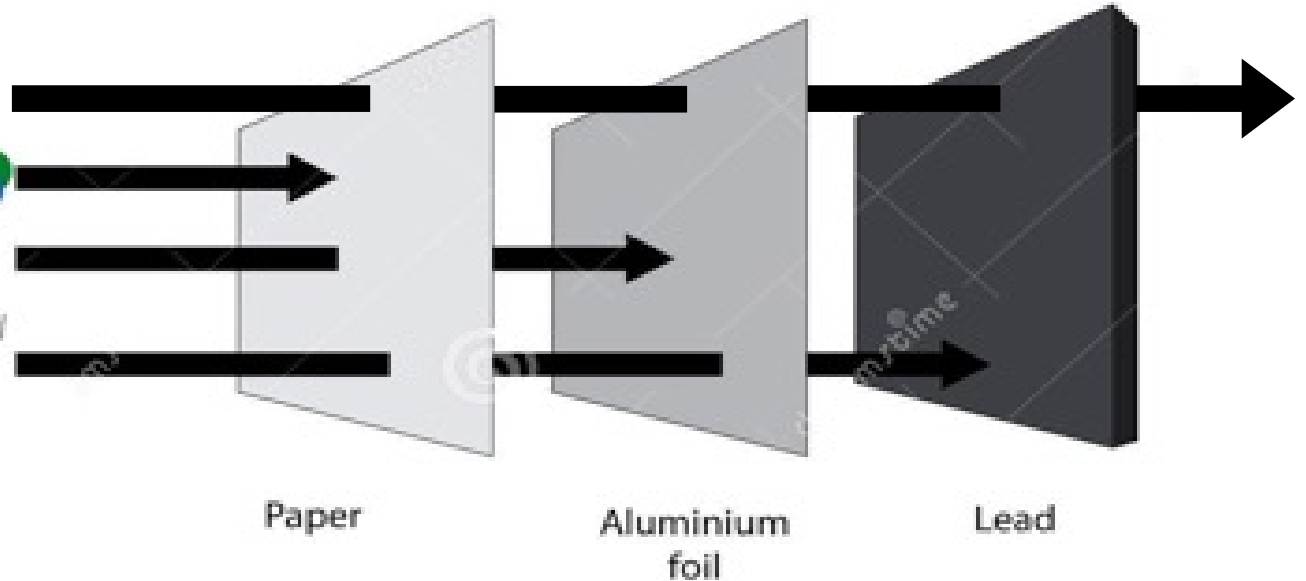
Beta particles

Gamma rays

α

β

γ



Esperimenti in alta quota

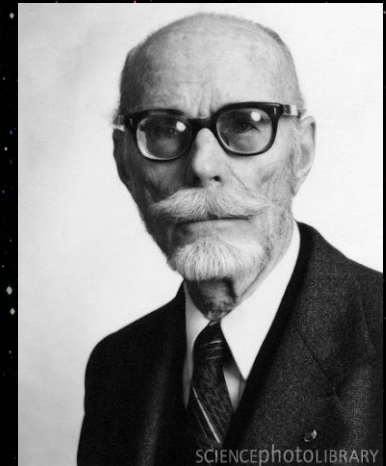


1933: **Bruno Rossi** scopre che entrando nell'atmosfera producono sciame di particelle (Padova/Asmara)



1935: Sergey Vernov effettua misure con palloni fino a 13.6 km di altezza

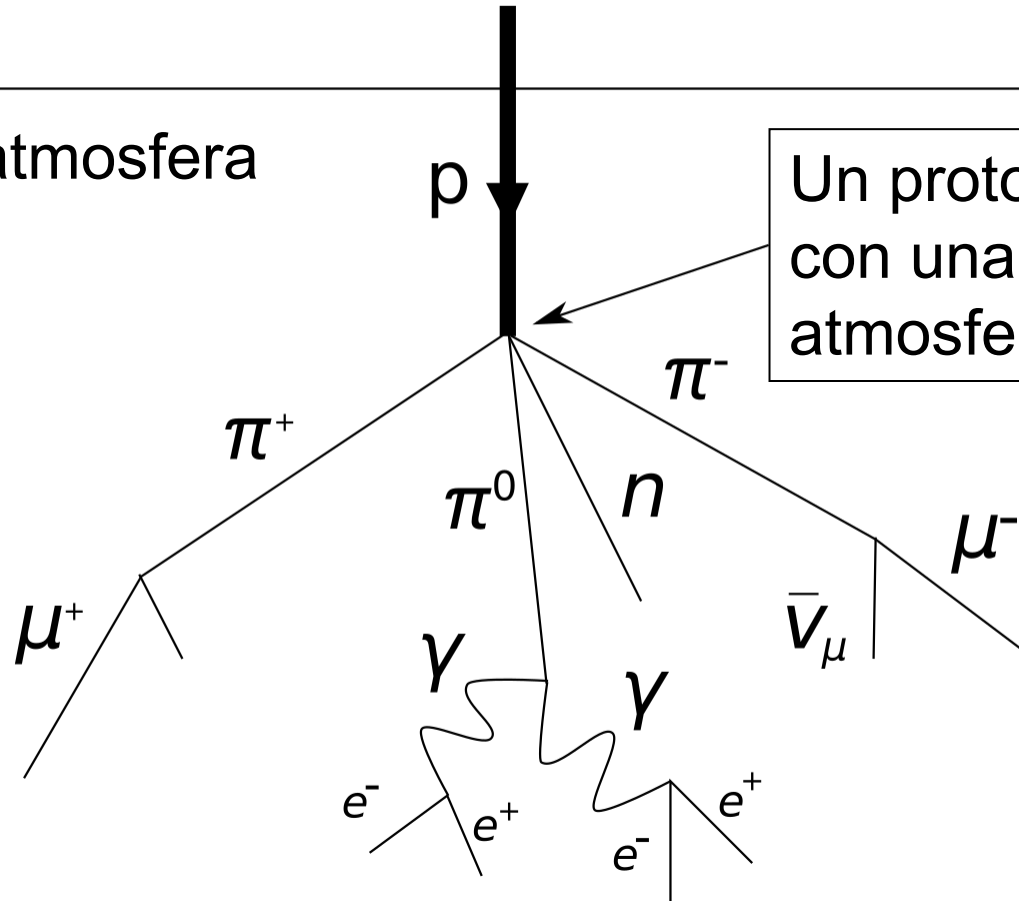
1937: Pierre Auger studia le coincidenze di raggi cosmici e conclude che esistono dei raggi cosmici "primari" che interagiscono con gli strati superiori dell'atmosfera e iniziano una "cascata" di interazioni secondarie che alla fine porta a terra una "doccia" di elettroni e fotoni (NB: muone ancora non noto!).



Attorno al 1950 è abbastanza assodato che ***i raggi cosmici primari sono particelle cariche***, nella maggior parte ***protoni*** (~90%), ***nuclei di elio*** (~9%) e una piccola percentuale di ***altri nuclei ed elettroni***.

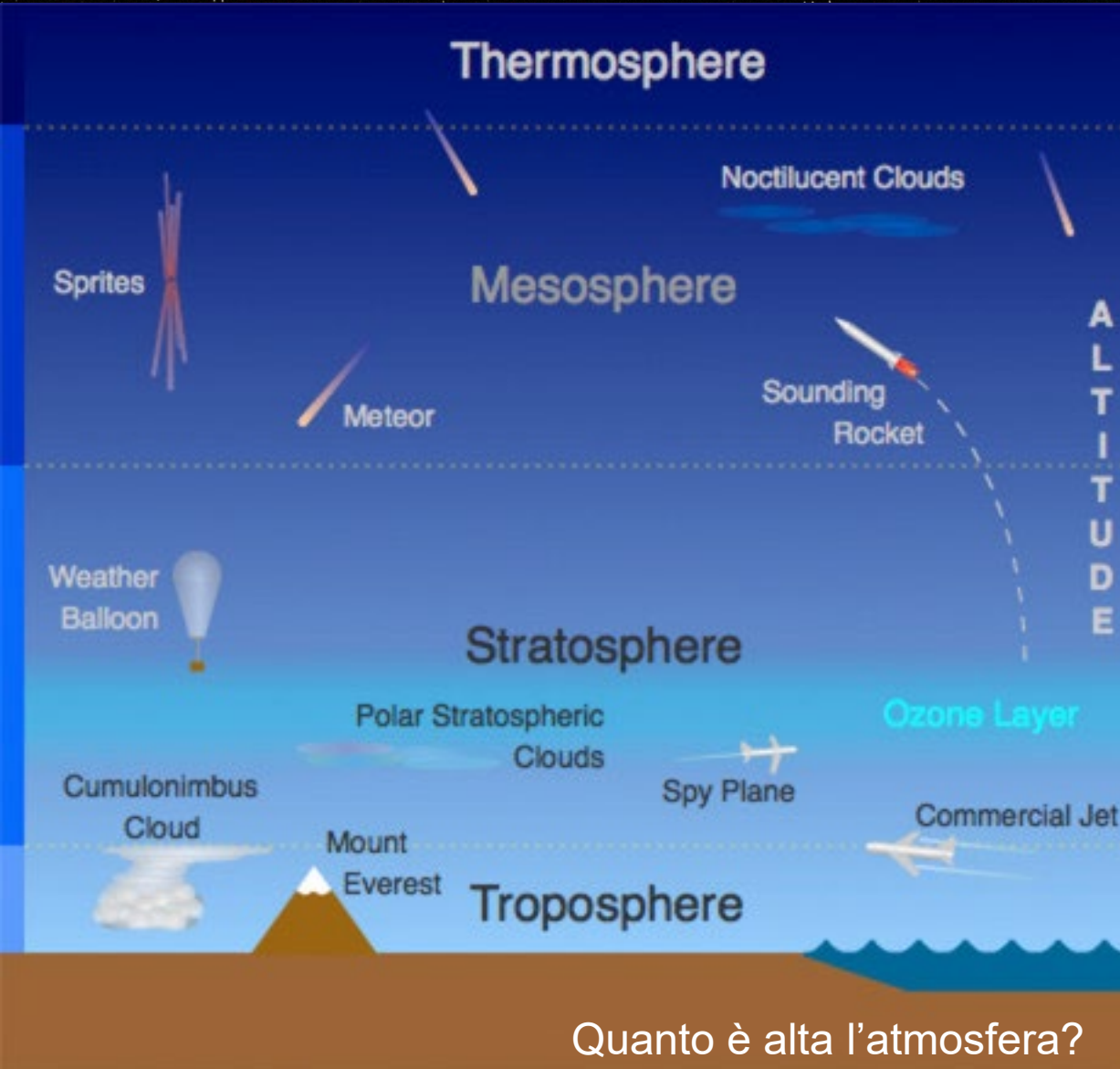
Prima interazione

Limite dell'atmosfera

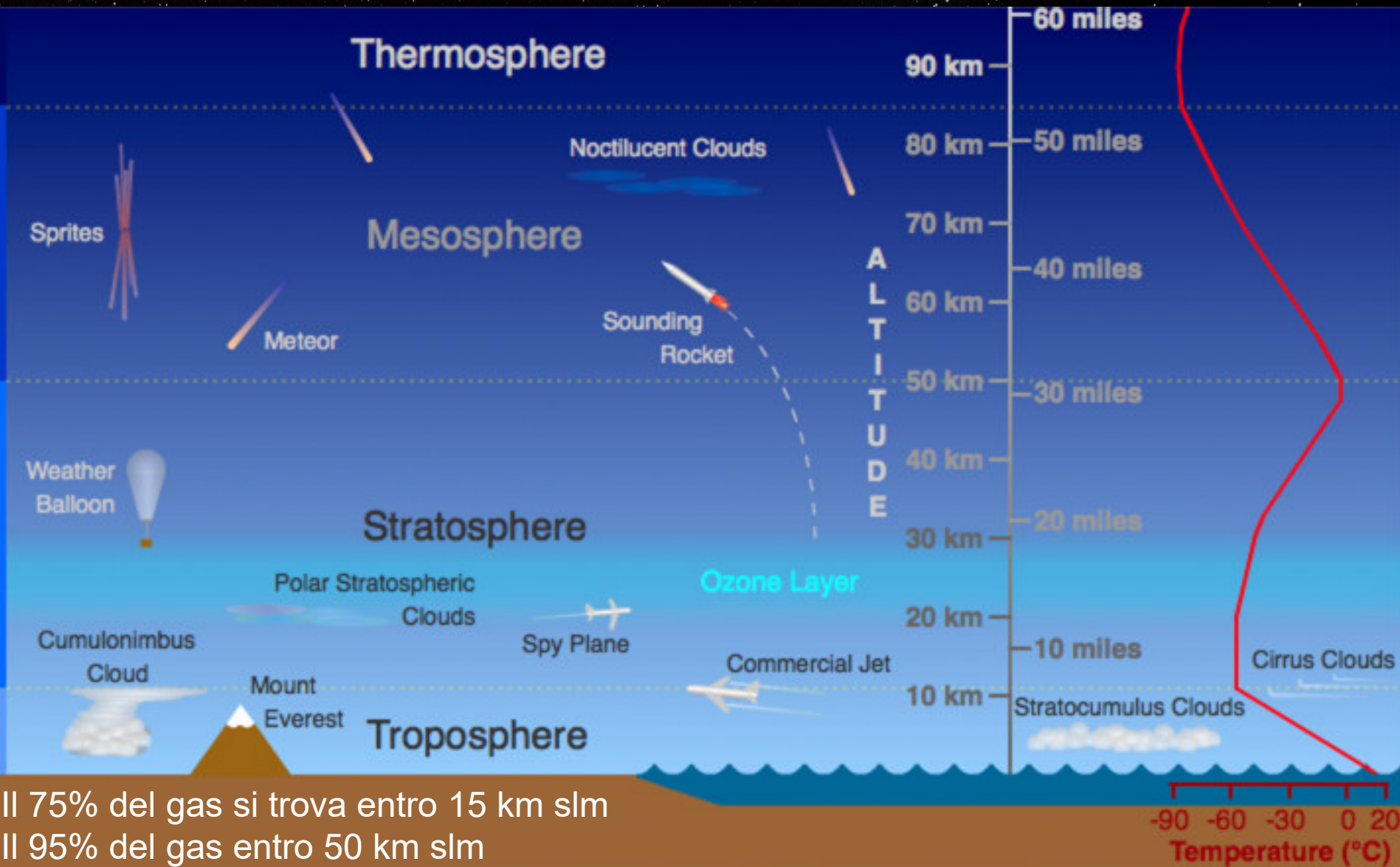


Un protone collide con una molecola atmosferica

L'atmosfera terrestre

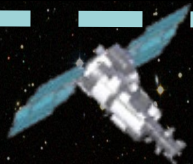


L'atmosfera terrestre



Il 75% del gas si trova entro 15 km slm
Il 95% del gas entro 50 km slm

~500 km



Raggio cosmico primario

Limite dell'atmosfera



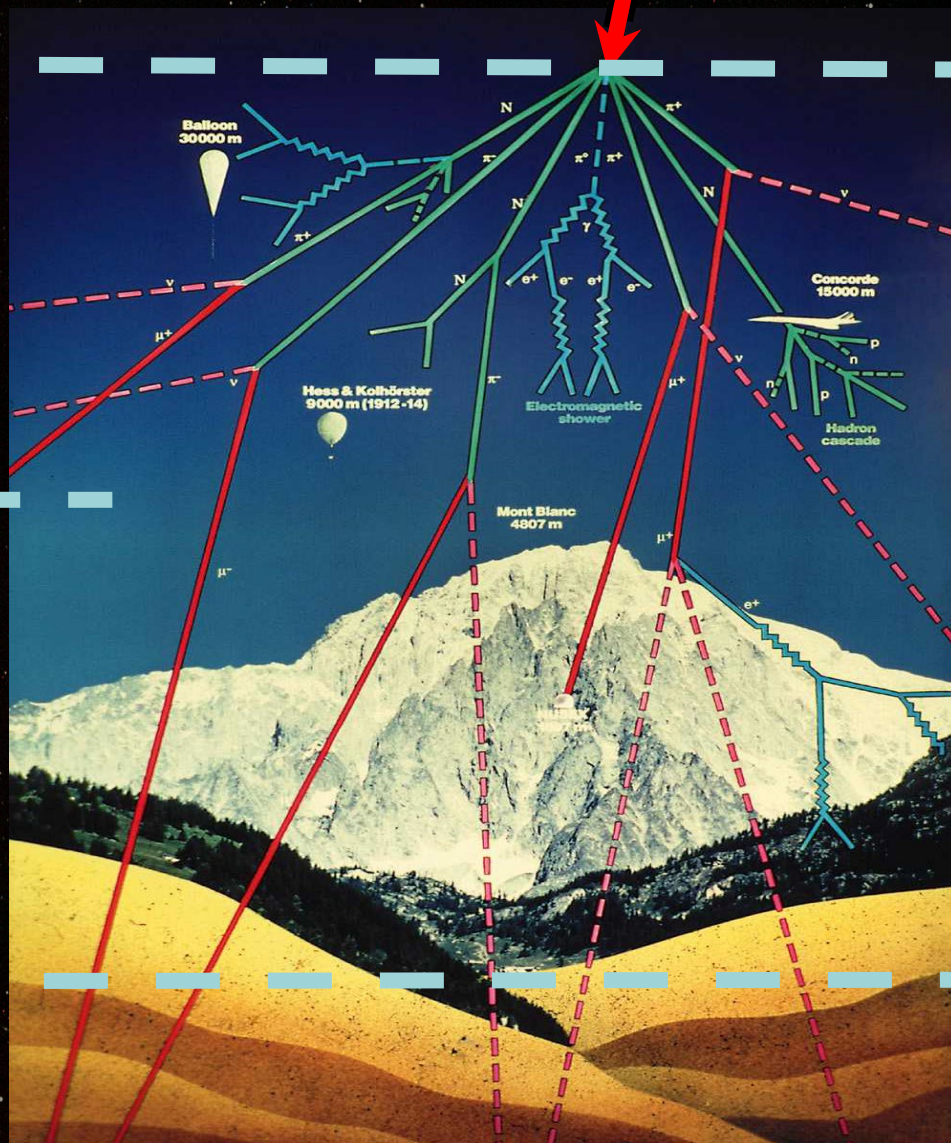
~40 km

~5 km

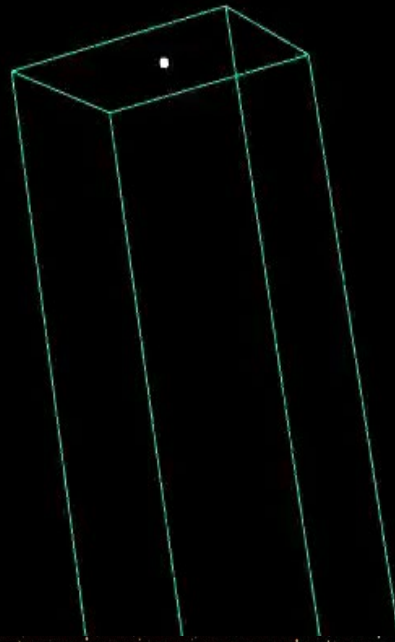


Ground

0 m



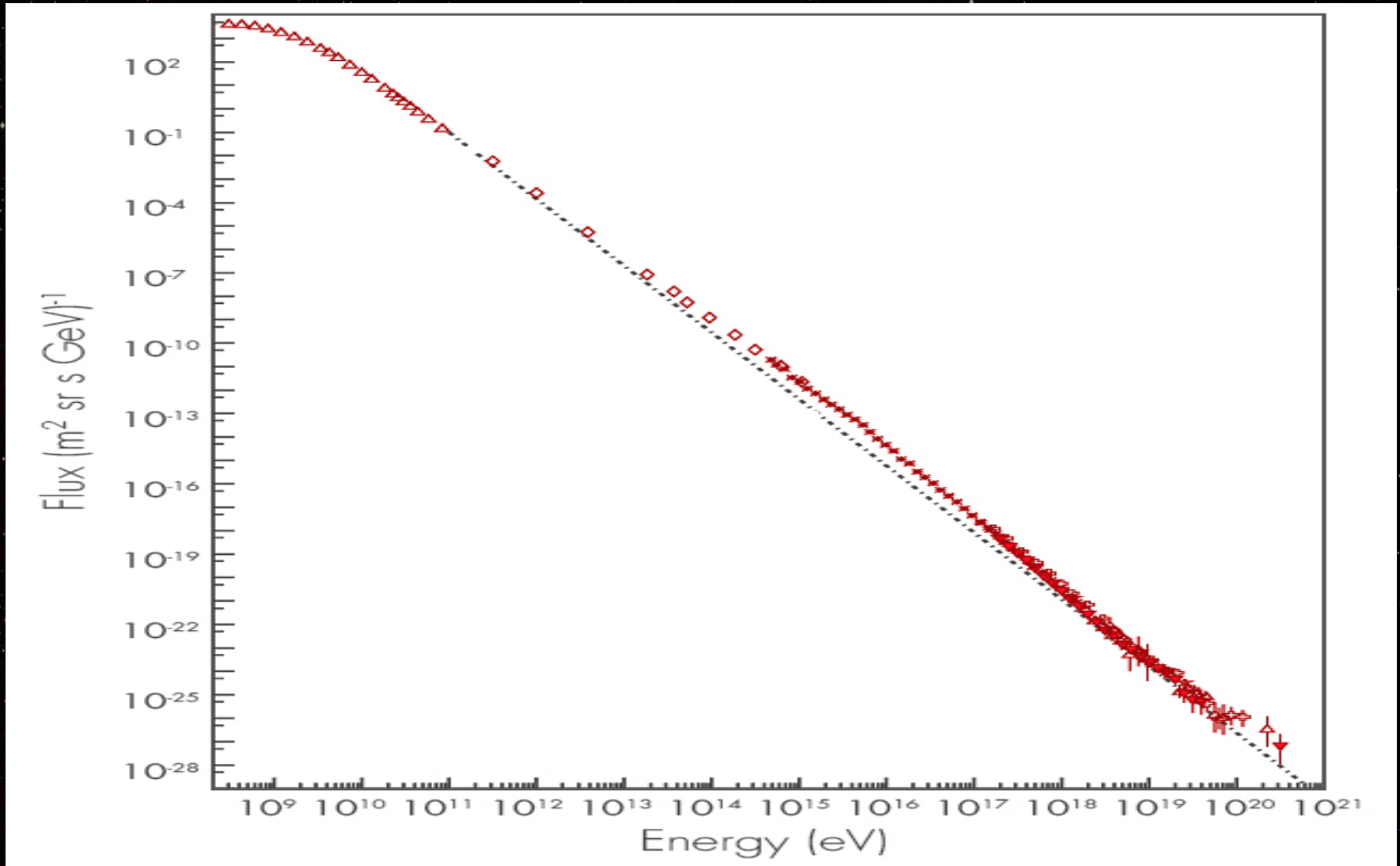
Simulazione al computer di uno sciame



<https://www.youtube.com/watch?v=i1sQuVmBXb8>

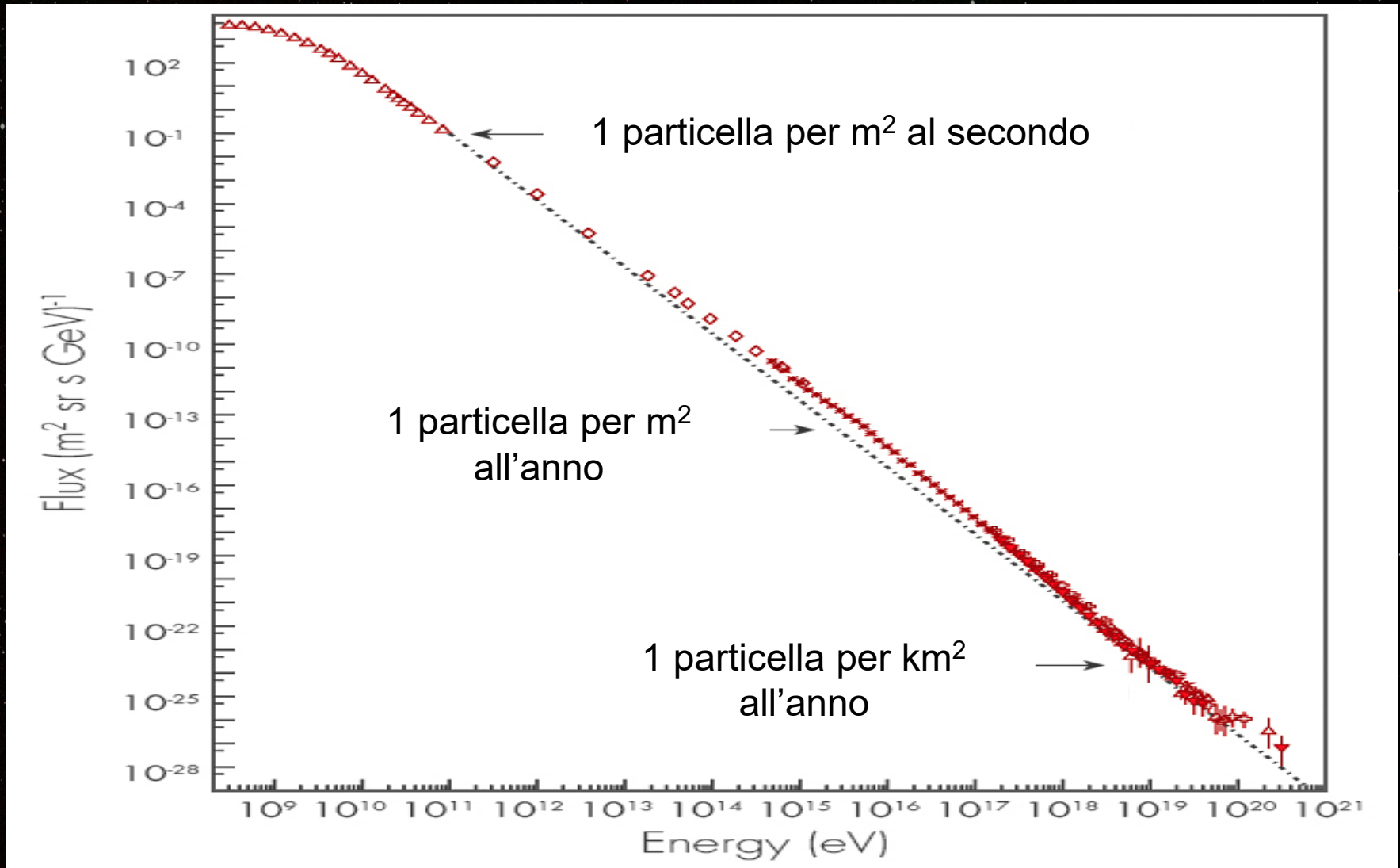
Scatola: 20 km x 5 km x 5 km. Particella primaria: protone da 1 TeV.

Quanti sono i raggi cosmici?



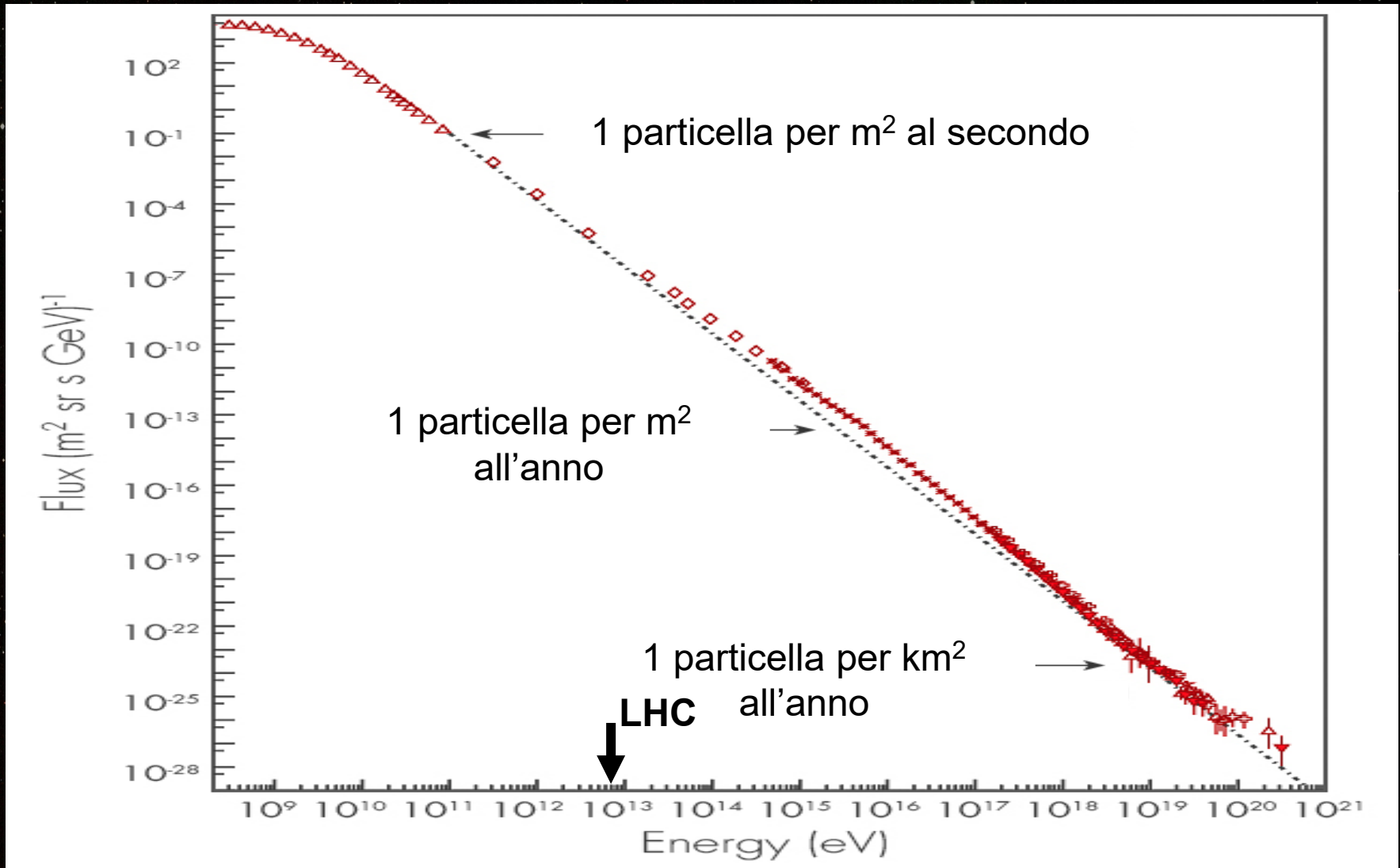
6×10^{18} eV = 1 Joule : energia cinetica di una massa di 100 grammi che cade da un metro

Quanti sono i raggi cosmici?



$6 \times 10^{18} \text{ eV} = 1 \text{ Joule}$: energia cinetica di una massa di 100 grammi che cade da un metro

Quanti sono i raggi cosmici?



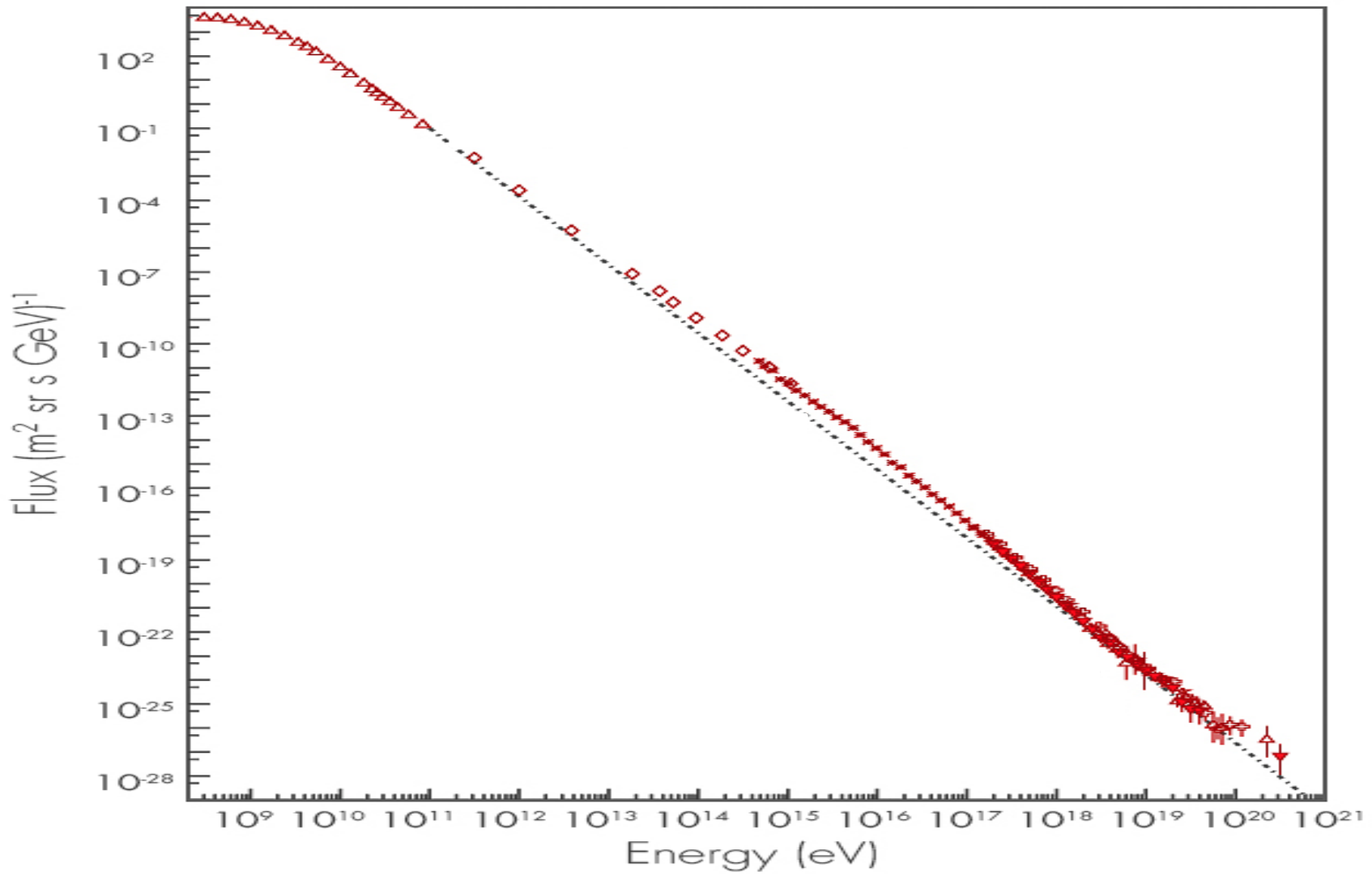
$6 \times 10^{18} \text{ eV} = 1 \text{ Joule}$: energia cinetica di una massa di 100 grammi che cade da un metro

E al suolo?

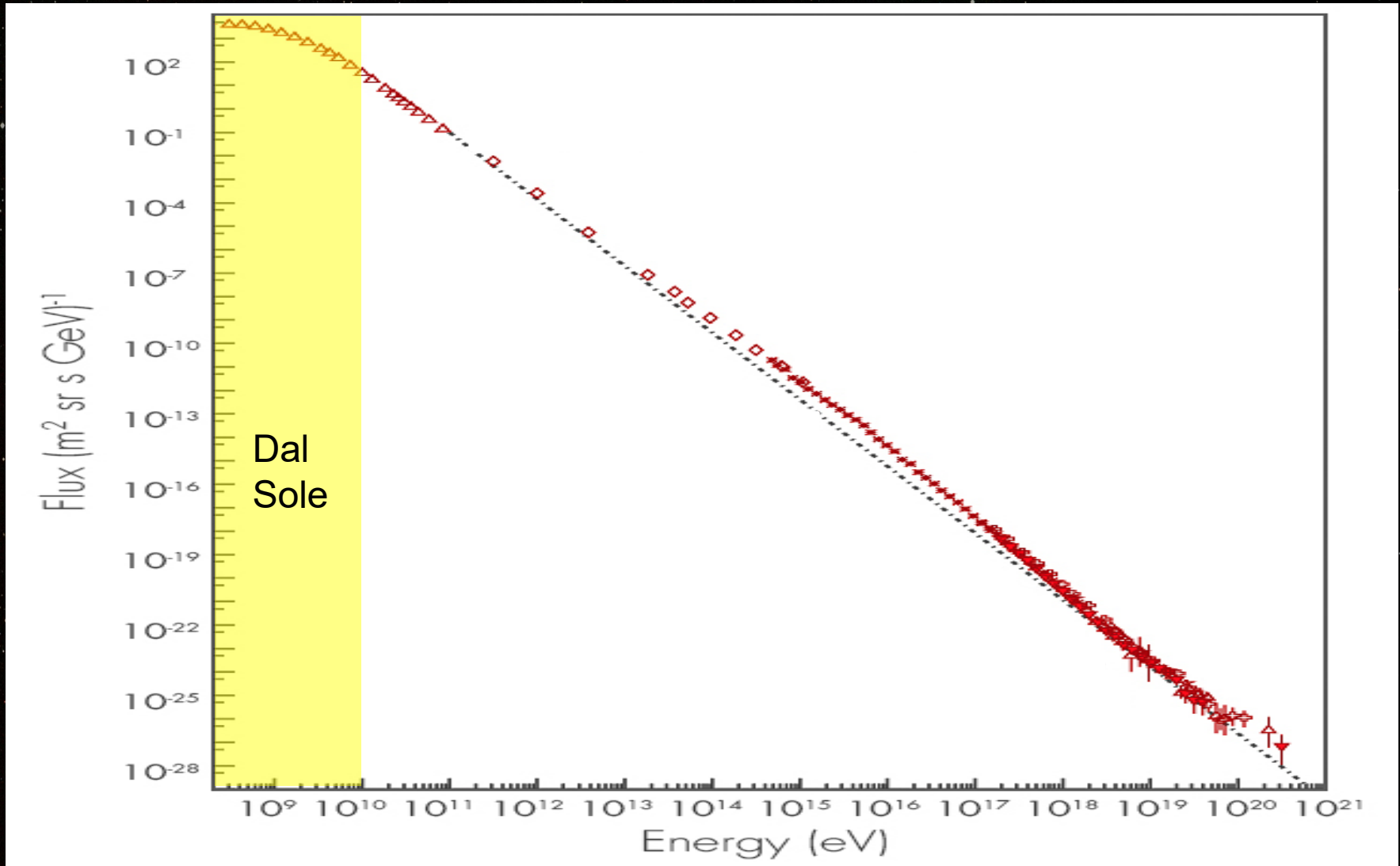
A livello del mare circa:
160 muoni al secondo per m^2
(1 muone al minuto per cm^2)



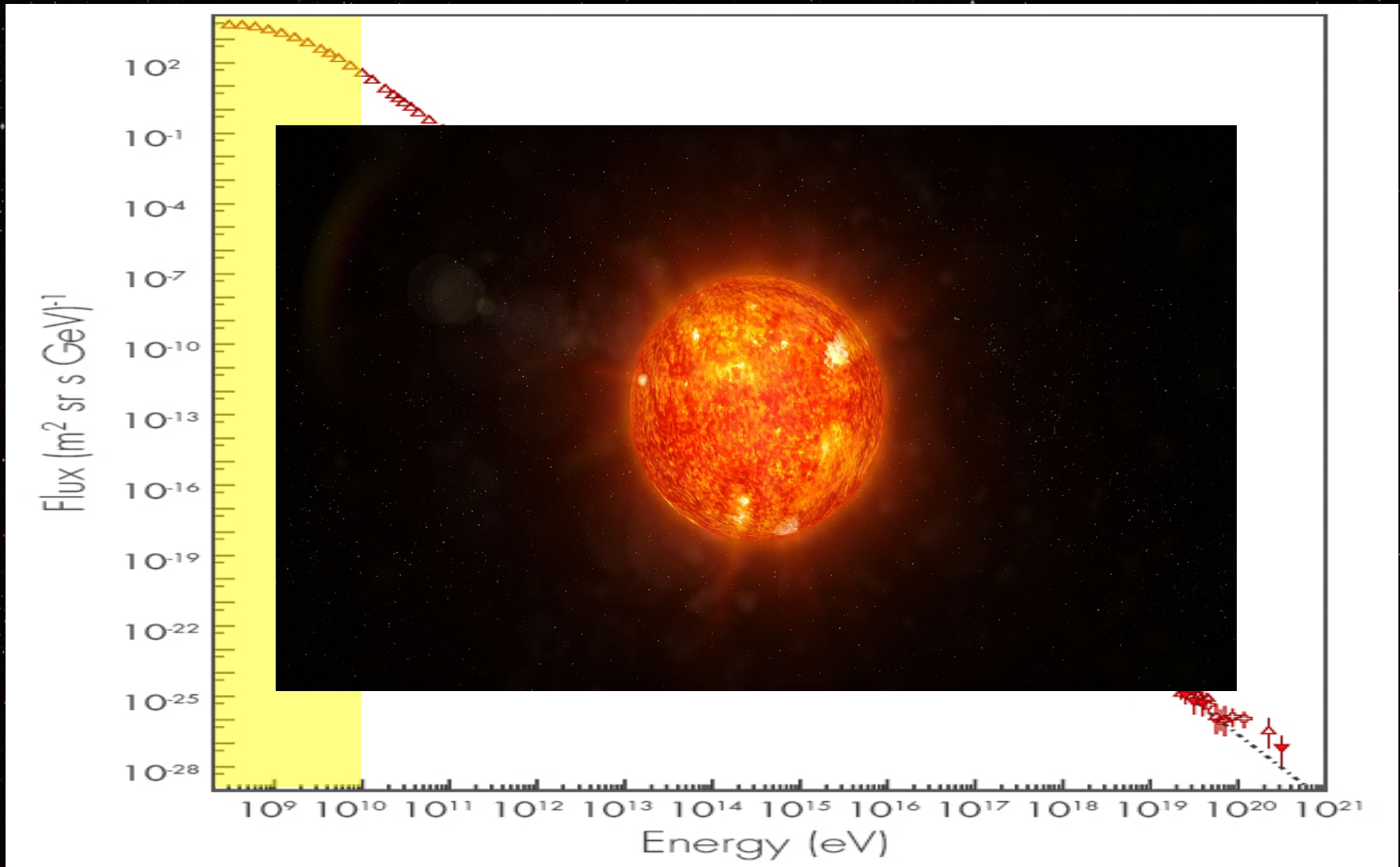
Da dove vengono i raggi cosmici?



Da dove vengono i raggi cosmici?

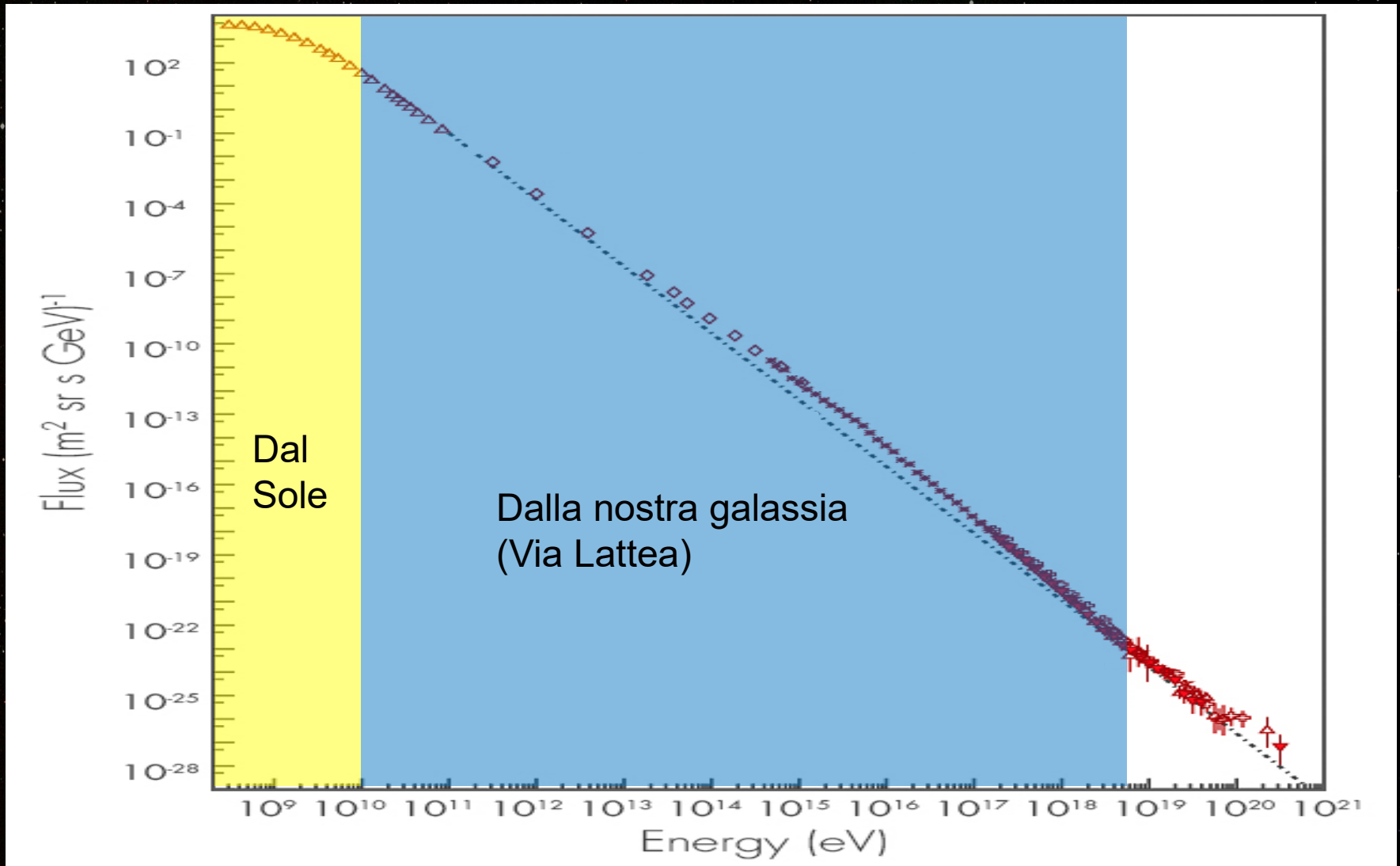


Da dove vengono i raggi cosmici?



<https://www.youtube.com/watch?v=GX5FbXX-hks>

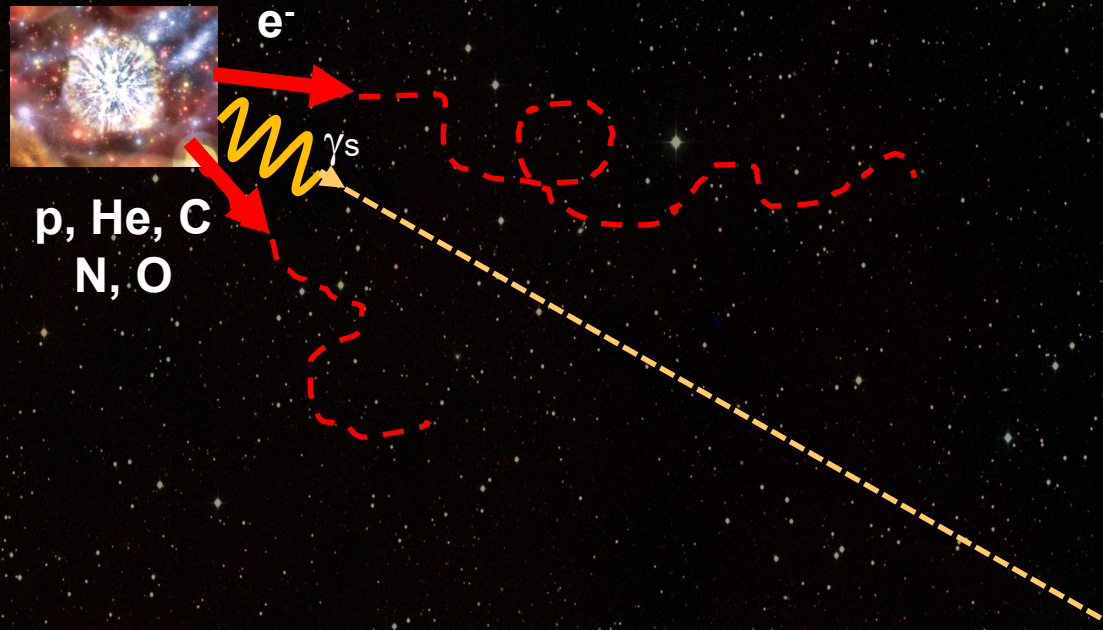
Da dove vengono i raggi cosmici?



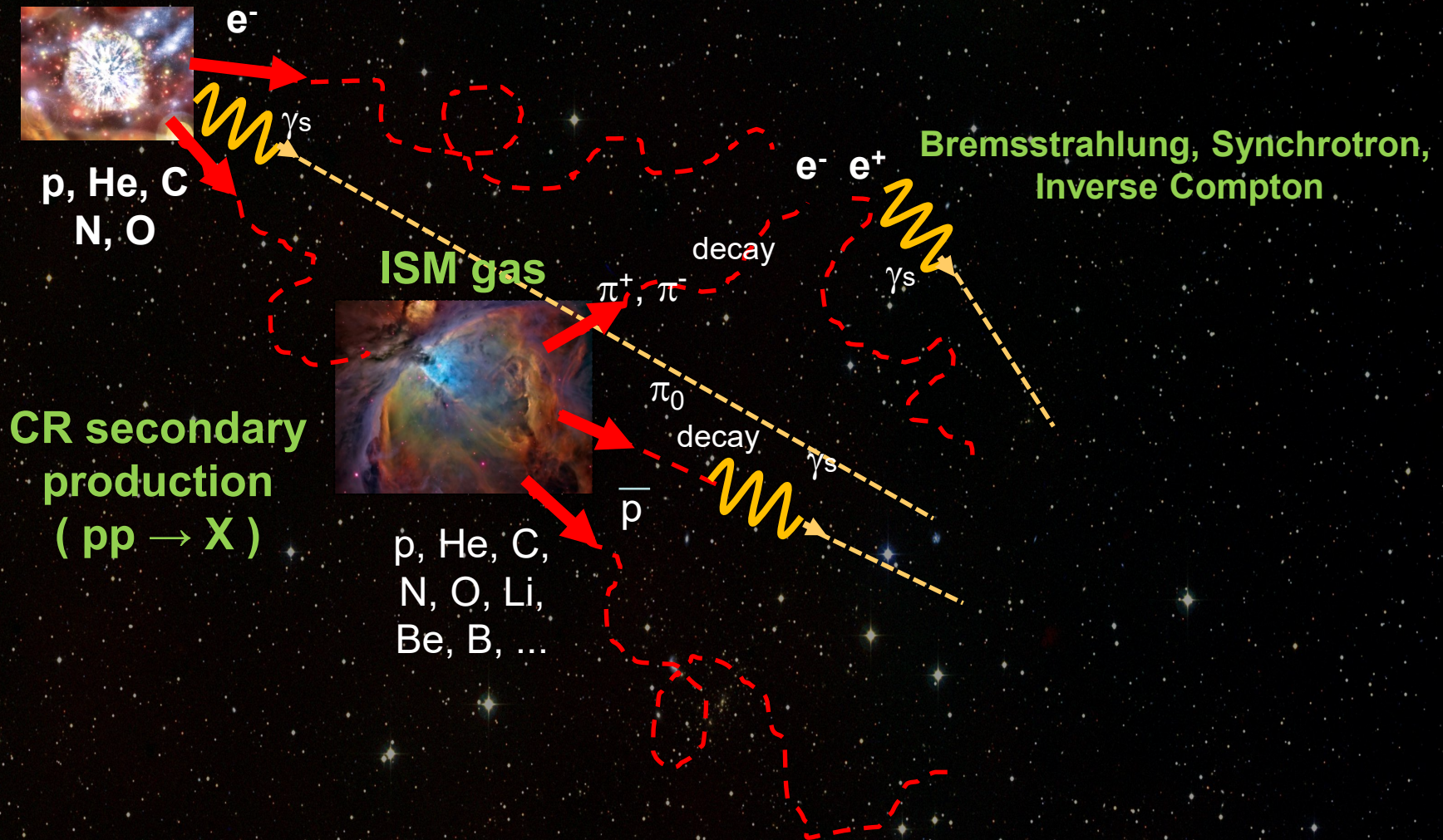
Il viaggio dei raggi cosmici



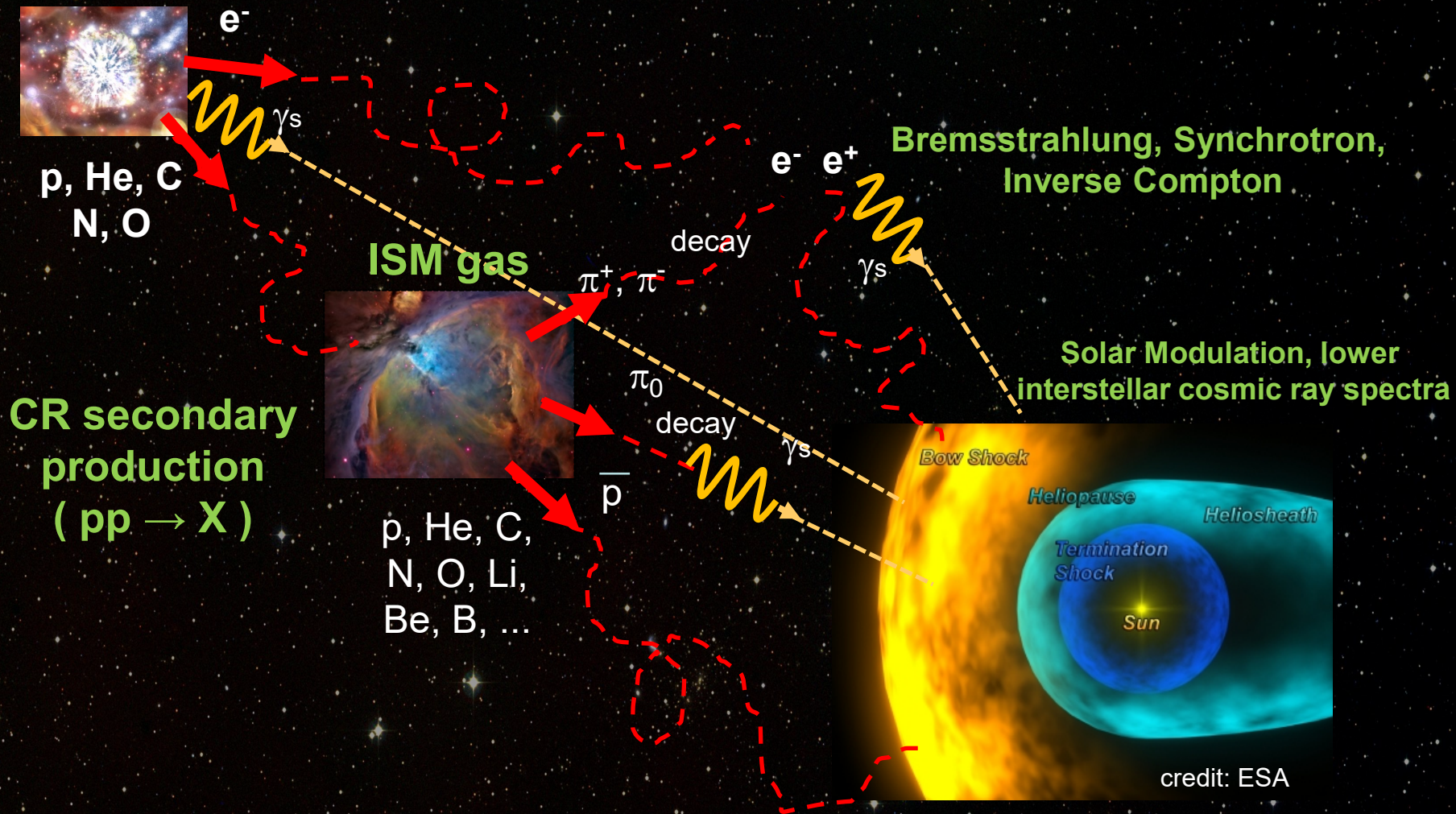
Raggi cosmici accelerati



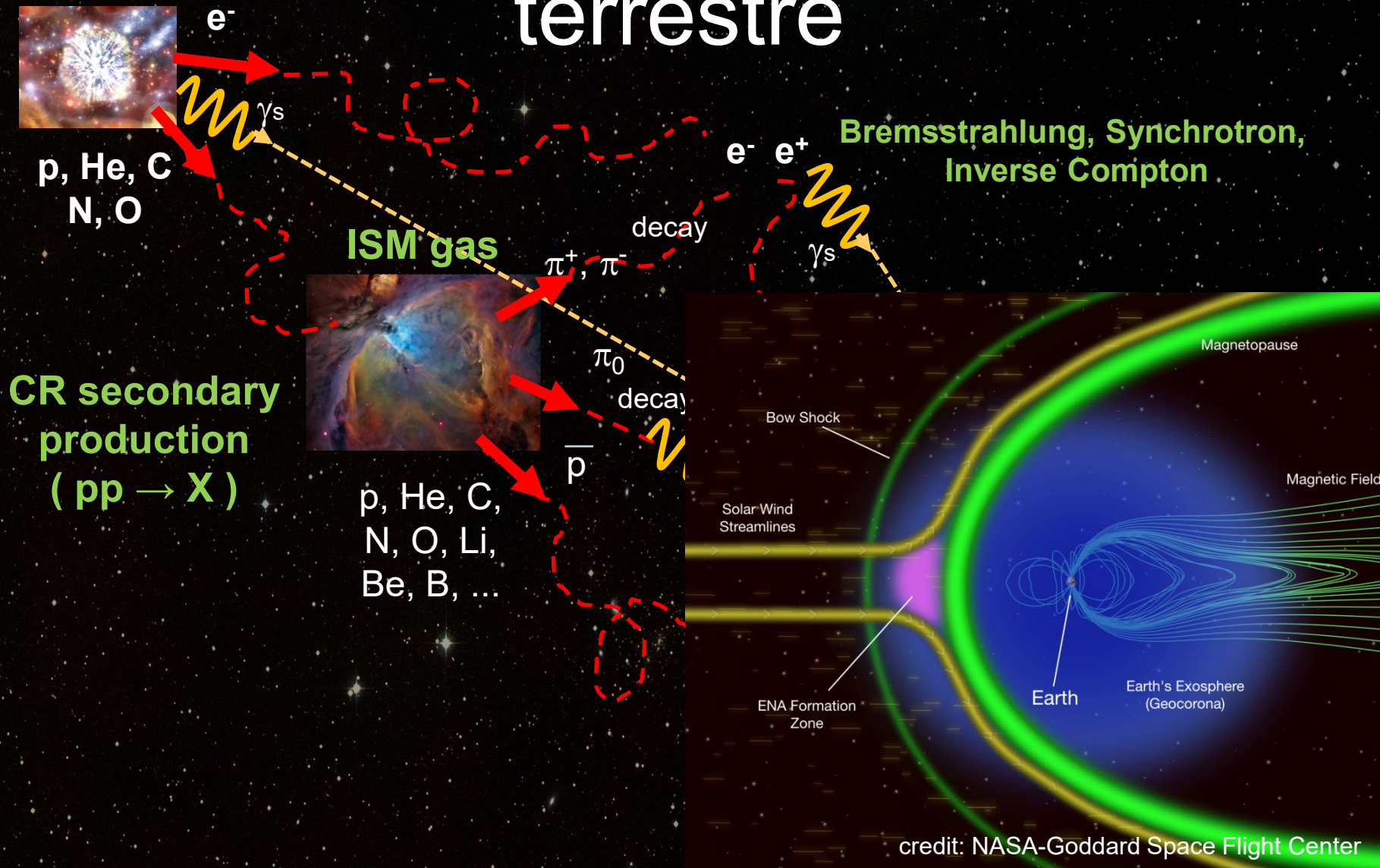
Raggi cosmici prodotti da interazioni



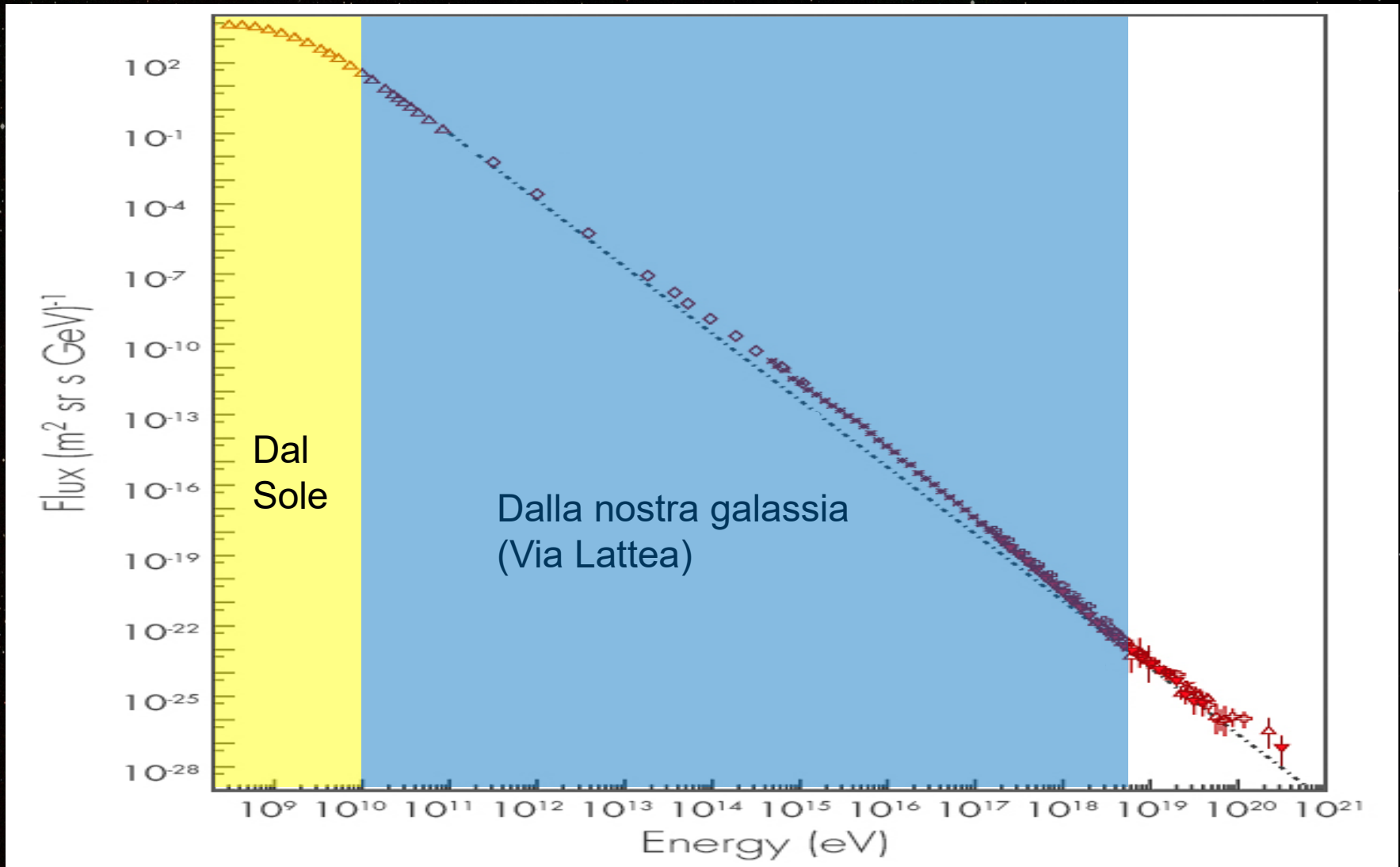
Raggi cosmici nell'eliosfera



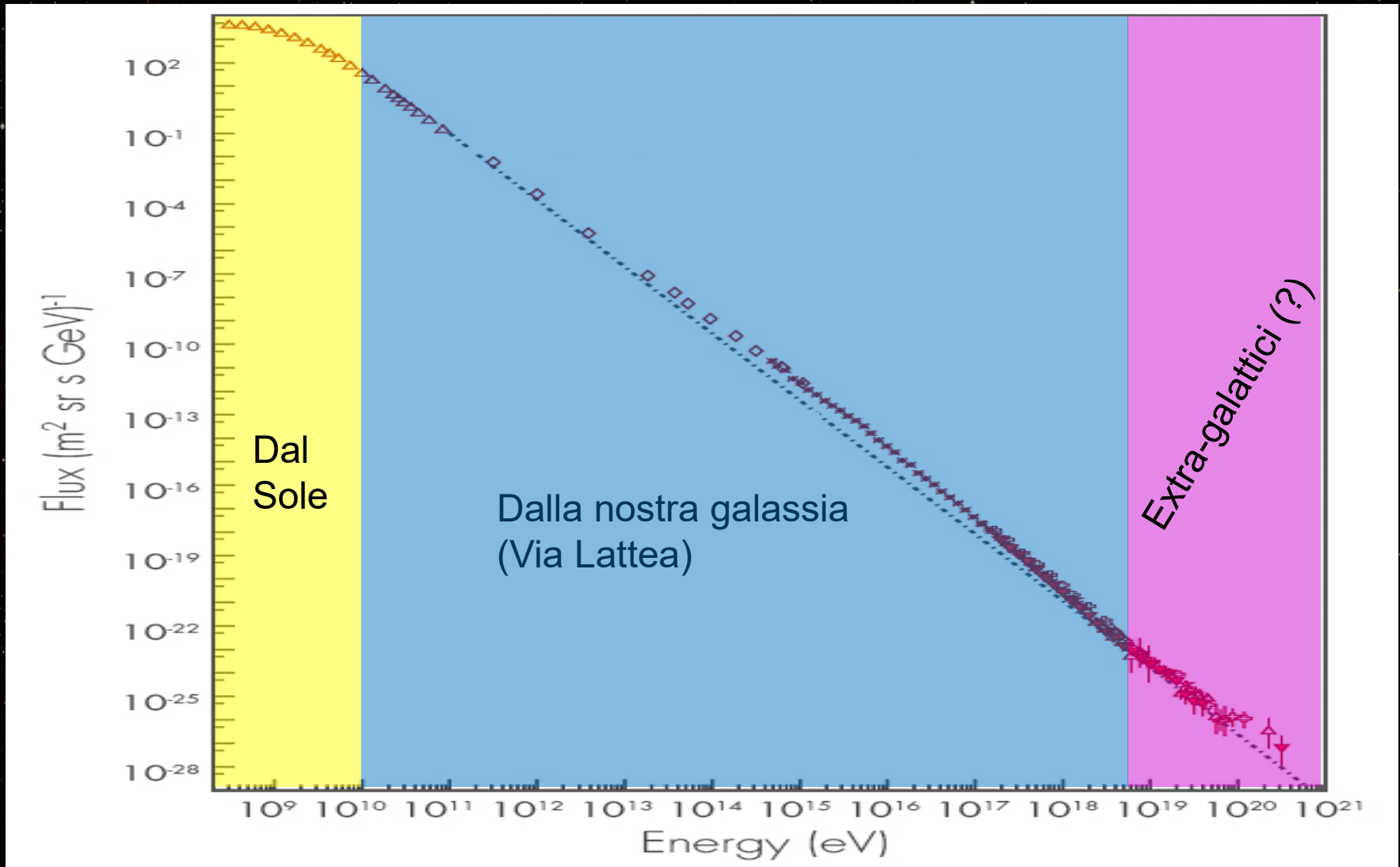
Raggi cosmici nella magnetosfera terrestre



Da dove vengono i raggi cosmici?



Da dove vengono i raggi cosmici?



Perché studiamo ancora i raggi cosmici?

Perché studiamo ancora i raggi cosmici?

Parafrasando George Mallory: perché sono lì!

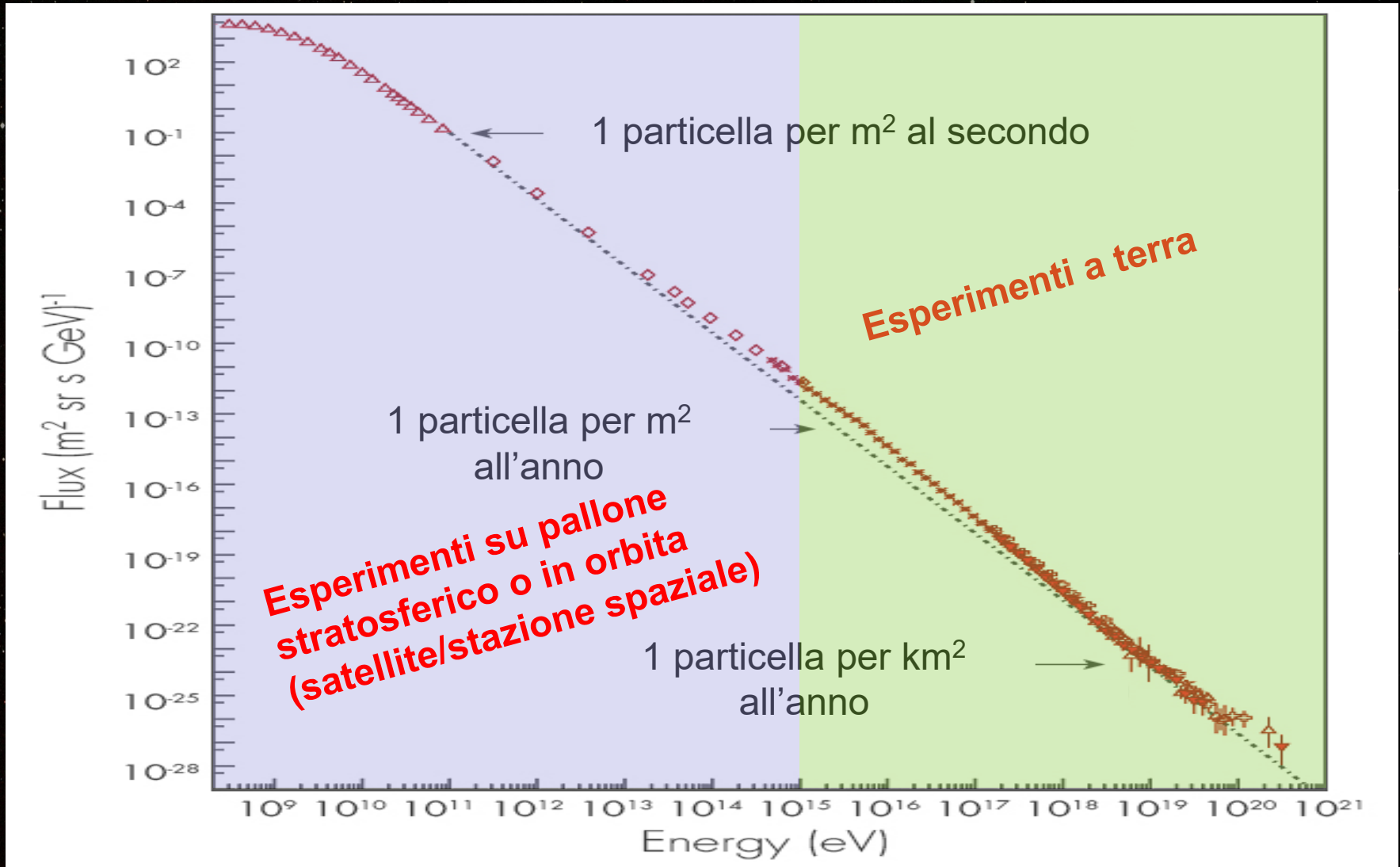
Perché studiamo ancora i raggi cosmici?

Parafrasando George Mallory: perché sono lì!

- Comprendere meglio la fisica del Sole
- La struttura dell'eliosfera e della magnetosfera terrestre
- Capire dove sono prodotti e di cosa sono fatti (ok protoni a bassa energia, ma a più alta energia che succede?)
- Come vengono accelerati e dove
- Di cosa è composto il mezzo interstellare e quali sono i campi magnetici coinvolti
- Cercare nuove particelle e nuove forme di materia
- Comprendere i fenomeni di astrofisica

Rivelatori di raggi cosmici

Tipologie di esperimenti



6×10^{18} eV = 1 Joule : energia cinetica di una massa di 100 grammi che cade da un metro

Lista di esperimenti

Atmospheric Cherenkov experiments (see [intro](#))

Telescopes and telescope systems:

- CANGAROO** in Woomera, Australia [Collaboration between Australia and Nippon for a GAmma Ray Observatory in the Outback]. See also [the Australian page](#) from Adelaide.
- CANGAROO-III** system of four 10 m telescopes in Australia (fully operational since March 2004).
- CAHA** (Cherenkov Array at Thémis) (Link broken)
- CHATE** (Cherenkov Light Ultraviolet Experiment) at the HEGRA site on La Palma (operational from 1997 to 2000)
- HAGAR** (Telescope) at, Hanle valley, Ladakh (India).
- HEGRA** (Cherenkov Telescopes) on [La Palma](#), Canary Islands (operation until Sep. 2002)
- HESS** (High Energy Stereoscopic System), four 13 m telescopes in Namibia (see also [pages from Paris](#), fully operational since December 2003)
- MAFCA** (Major Atmospheric Cerenkov Telescope Experiment) (project in India) (Link broken)
- MAGIC** (a 17 m telescope on La Palma, Canary Islands, operational since 2003)
- Narrabri**, Australia: Mark 6 telescopes of the [University of Durham](#) (operational until March 2000)
- PACT** (Pachmarhi Array of Cherenkov telescopes) at the High Energy Gamma Ray Observatory at Pachmarhi, India. (Link broken)
- IACTs** (TeV Atmospheric Radiation Imaging Telescope Array System) at Mt. Abu, Rajasthan, India (see also [here](#)).
- VERITAS** (Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System) in Arizona, USA, operational since 2007
- Whipple Gamma-Ray Telescope** on [Mt. Hopkins](#), Arizona. (operational 1988-2008)

Solar power facilities at light collectors:

- CACTUS** (Converted Atmospheric Cherenkov Telescope Using Solar-2) (Initially called *Solar Two Observatory*)
Link broken: See [wikipedia entry](#) instead.
- CERASTE** (Cherenkov Low Energy Sampling and Timing Experiment) at Thémis, France Link broken: See [article](#) instead.
- GRANAT** (Gamma-Ray Astrophysics at ALcora) near Almería, Spain (operational 1995-2001)
- SACRE** (Solar Tower Air Cherenkov Experiment) at Sandia Labs, New Mexico (operational 2001-2007)

Cherenkov counter arrays:

- AIROBICC** (non-imaging counters in the [HEGRA](#) array)
- BLANCA** (Broad ALateral Non-imaging Cherenkov Array) (at CASA), (Link broken) see [paper](#)
- TUNKAS-2** (array of non-imaging counters near Lake Baikal)

Other Cherenkov light detection concepts:

- SPHERE** (a balloon project looking for light reflected on snow) (*link not operational*)
- GAM Gamma Air Watch** (a project using Fresnel lenses for imaging). (Link broken)

Future projects:

- CTA** [Cherenkov Telescope Array] (a project taking Cherenkov telescope arrays to a larger scale).

Atmospheric fluorescence experiments

- ASHEA** (All-sky Survey: High Resolution Air-shower detector) (see also [Hawaii 1999](#))
- Auger Project Fluorescence Group**
- EURO** (Extreme Universe Space Observatory 1) (a proposed space experiment on ISS to observe air shower fluorescence light).
- HiRes** The High Resolution Fly's Eye Cosmic Ray Detector
(see also HiRes home pages at [Adelaide](#) and [Columbia University](#) (~ 614 1999)
- OWA** (Orbiting Wide-angle Light collectors) (a plan to build a pair of satellites for air shower detection).
See also pages in [Euroville](#).
- TA, TALE** (Telescope Array, TA) and its [low energy extension \(TALE\)](#) (multiple detectors for fluorescence light plus ground array).
See also [U.S. web site](#) (and this [personal University of Utah TA page](#))

Air shower experiments with particle detectors (see [intro](#))

- AGASA** [Akeno Giant Air Shower Array]
- ARGO-YBI**: new experiment under construction in Tibet (see also [pages in Torino](#))
- ASKEP** (Air-Shower Core Experiment) (Sydney, operational 1989-1991)
- Superfired Park Extension Air Shower Array** (Australia) (operational 1971-1993)
- CASA** (Chicago Air Shower Array) (operational 1990-1998), link not operational, see [NSPIRE entry](#)
- CACTA** (Cosmic Ray Tracking) (prototype, operational 1992-1994)
- FAST-TOF** experiment (Italy, above the [Gran Sasso](#) underground laboratory, until April 2000)
- Haverah Park** (former experiment of Leeds University, operational until 1993)
- GRANAT** (air shower array and muon counters at Mount Aragats, Armenia)
- GRANAT** (Gamma Ray Astrophysics at Notre Dame) (an array of tracking detectors)
- GRAP** (Gamma Ray Experiment) array (Haverah Park, operational 1984-1995)
- HEGRA** (High Energy Gamma Ray Astronomy) (operational 1988-2002) (see also [here](#))
- KASCADE** (KASCADE Shower Core and Array Detector). Now extended as [KASCADE-GRANDE](#)
- MILAGRO** (Water Cherenkov experiment near Los Alamos). See also [related pages at University of Maryland](#) and at [New York University](#).
- Nonima Observatory** in Japan
- Pierre Auger Project** (originally also known as the Giant Airshower Detector Project). The administrative page is now [here](#).
See also the pages at in by [Utah](#), [CNRS](#) (central French Auger site), [Leeds](#), [Michigan Tech U](#), [Chicago](#), [La Plata](#), [Adelaide](#), and [more than 20 others](#).
- SPASE** (South Pole Air Shower Array)
- SUGRA** (Sydney University Giant Air shower Recorder) (was operational from 1968 to 1979)
- Lian-Shan Mountain Cosmic Ray Station** (pages by Lebedev Institute), link not operational
- Tibet AS-gamma experiment**: scintillation counter array

Space experiments

(see [intro](#))

- ACE** [Advanced Composition Explorer] Mission mainly for solar particles; launched in August 1997.
- AGILE** [Astro-rivatore Gamma a Immagini Leggero] X-ray/gamma ray mission launched April 23, 2007.
- AMIS** (Alpha Magnetic Spectrometer) Detector installed on the [International Space Station](#) on May 19, 2011. See also [NASA page](#)
- ASCA** (Advanced Satellite for Cosmology and Astrophysics) [Orary mission but with some cosmic-ray relevant results, see also [here](#)]. Observations ended July 14, 2000.
- BepiColombo** (Satellite per Astronomia) (operational Nov. 1996 - April 2002)
- Chandra** X-ray satellite
- CGRO** [Compton Gamma Ray Observatory] (mission terminated) with the four experiments:
 - EGRET** (Burst And Transient Source Experiment)
 - OSSE** (Oriented Scintillation Spectrometer Experiment)
 - COMPTEL** (imaging Compton telescope) (also [here](#))
 - EGEKA** (Energetic Gamma Ray Experiment Telescope)
- Cosmic** (measures the Earth's magnetotail)
- Fermi Gamma-ray Space Telescope**, originally: GLAST [Gamma ray Large Area Space Telescope] (launched June 11, 2008, see also [NASA page](#))
- GRANAT** gamma-ray satellite with several experiments (SIGMA, WATCH and others) was turned off November 27, 1998
- HEAT** (Système d'Imagerie Gamma à Masque Aléatoire)
- HELE** (High-Energy Transient Experiment) (launched failed on 4 Nov. 1996) has a follow-up:
 - SIGMA** (Système d'Imagerie Gamma à Masque Aléatoire)
- HELE** (launched October 9, 2000)
- IMP-8** (Interplanetary Monitoring Platform)
- INTEGRAL** [INTErnational Gamma-Ray Astrophysics Laboratory] (launched October 17, 2002)
- INMIA** (New Instrument for Nuclear Analysis), a mission for low energy cosmic rays.
- INTEGRAL** (magnet spectrometer, launched June 15, 2000). See also [here](#)
- ISAR** (examines the Earth's magnetosphere and ionosphere)
- Kontu** X-ray satellite (ended February 12, 1999)
- KRUE** (Kossu X-ray Timing Explorer)
- SARFEN** (Solar Anomalous Magnetospheric Particle Explorer)
- Spectrum-X-Gamma** satellite project apparently abandoned for some time (see also [here](#) and [here](#))
- Sumac** X-ray satellite (Astro-E2 mission, see also [this NASA page](#))
- SWIFT** (gamma ray burst mission, launched November 20, 2004)
- Ulysses** (explores interplanetary space at high solar latitudes)
- Voyager** (two spacecrafts heading towards interstellar space)
- WIND** (explores solar wind and plasma processes near the earth as well as gamma-ray bursts)
- XMM-Newton** (X-ray Multi-mirror Mission) (see also [pages at GSFC](#))

Some missions/experiments proposed or under development:

- ACCESS** [Advanced Cosmic ray Composition Experiment for the Space Station] (see also pages at [U. of Maryland](#))
- Andromeda** (a cooled-aperture gamma-ray telescope)
- BLAST** (Burst Locations with an Arc Second Telescope)
- EURO** (Extreme Universe Space Observatory) (see also under [fluorescence experiments](#))
- HEGFA** (Medium Energy Gamma-ray Astronomy)
- OWA** (Orbiting Wide-angle Light-collectors) (see also under [fluorescence experiments](#))

For a comprehensive list of high-energy astrophysics missions see [here](#). For a list of gamma-ray missions see also [this page](#).

Balloon experiments

- AESOP** / **LEE** (Anti-Electron Sub Orbital Payload / Low Energy Electrons)
- ANITA** (Antarctic Impulsive Transient Array) (project for radio frequency neutrino shower detection) See also [here](#).
- AMEC** (Advanced Thin Ionization Calorimeter)
- BEP** (Background Bypass) (measuring atmospheric UV background for the [EUSO](#) project)
- BEAS** (Balloon-borne Experiment with a superconducting Solenoid Spectrometer) (see also [here](#))
- BEAS-2** (Balloon borne Electron Telescope with Scintillating Fibers), for PDB-BETS (Polar Panel Balloon) flight see also [here](#)
- CAPRICE** (Cosmic AntiParticle Ring Imaging Cherenkov Experiment) (see also [CAPRICE-II](#))
- CECANT** (Cosmic Ray Energetics and Mass Balloon Experiment) (see also [here](#) and [here](#))
- GRAP** (Gamma-Ray Arctminute Telescope Imaging System)
- GRIP** (Gamma Ray Imaging Payload)
- GRIS** (Gamma-Ray Imaging Spectrometer)
- HEAT** (High Energy Astrometer Telescope)
- HIREES** (High Resolution Gamma-Ray and Hard X-Ray Spectrometer)
- IMAX** (Isotope Matter Antimatter Experiment) (see also [here](#) and [here](#))
- ISOMAX** (Isotope Magnet Experiment)
- JACEE** (Japanese-American Collaborative Emulsion Experiment)
(mainly for cosmic-ray composition up to several hundred TeV)
- MASS** (Matter Antimatter Superconducting Spectrometer) (flown in different configurations; for MASS2 see also [here](#))
- POLARIS** (Polarized Gamma-ray Observer)
- RUNJOB** (RUssian-Nippon JOint Balloon Experiment)
- SUPER** (Superconducting Magnet Instrument for Light Isotopes)
- UAGS** (Tracking and Imaging Gamma Ray Experiment) (under development)
- UGER** (Ultra Iron Galactic Element Recorder)
- TRACER** (Transition Radiation Array for Cosmic Energetic Radiation)

See also the [NASA balloon programs](#).

Atmospheric Cherenkov experiments (see [intro](#))

Telescopes and telescope systems:

CANGAROO in Woomera, Australia [Collaboration between Australia and Nippon for a GAmma Ray Observatory in the Outback]. See also [the Australian page](#) from Adelaide.

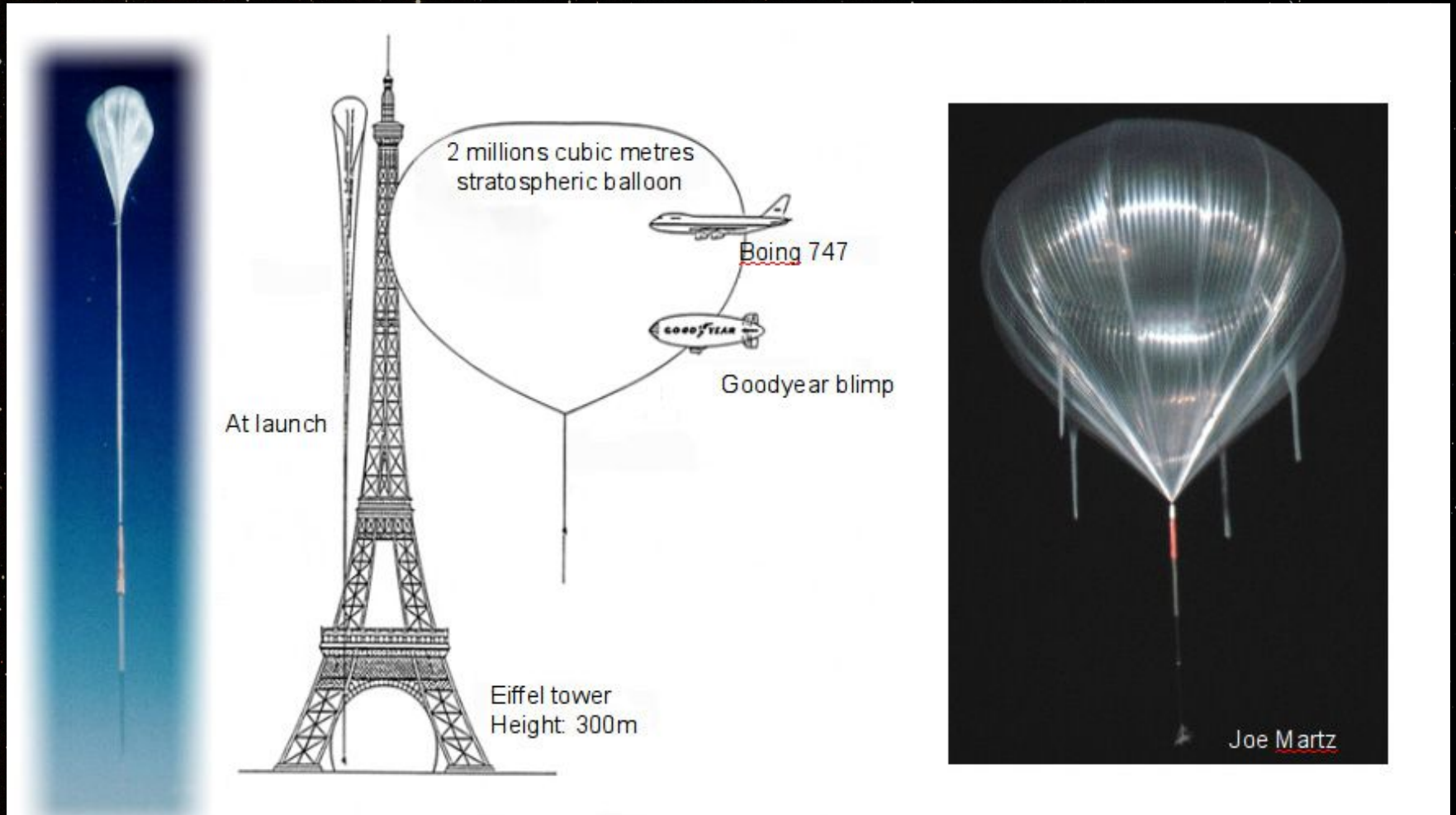
<https://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/CosmicRay/CosmicRaySites.html>

Esperimenti su pallone

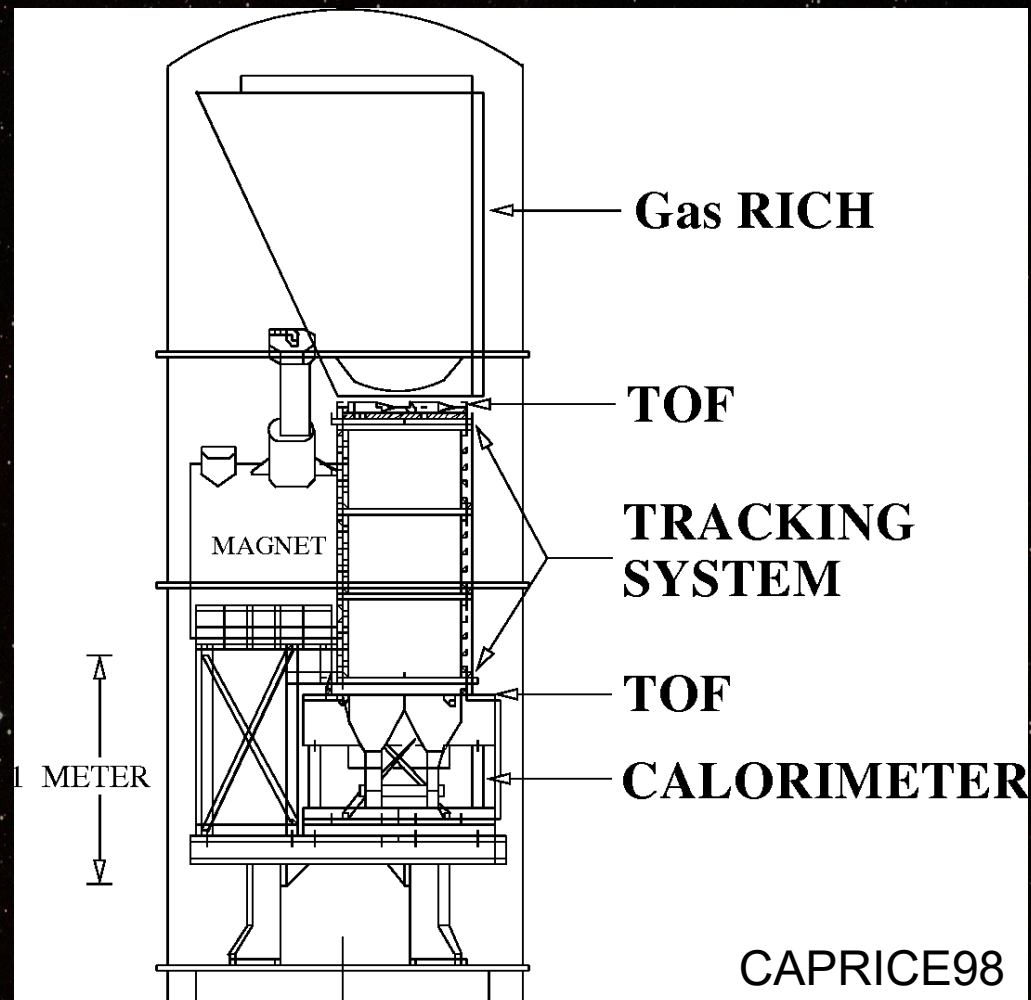


<https://www.youtube.com/watch?v=2mj2pjByvUw>

Esperimenti su pallone



Esperimenti su pallone



Pro:

- esperimenti "grandi"
- apparati riutilizzabili (se l'atterraggio riesce)
- "economici"

Contro:

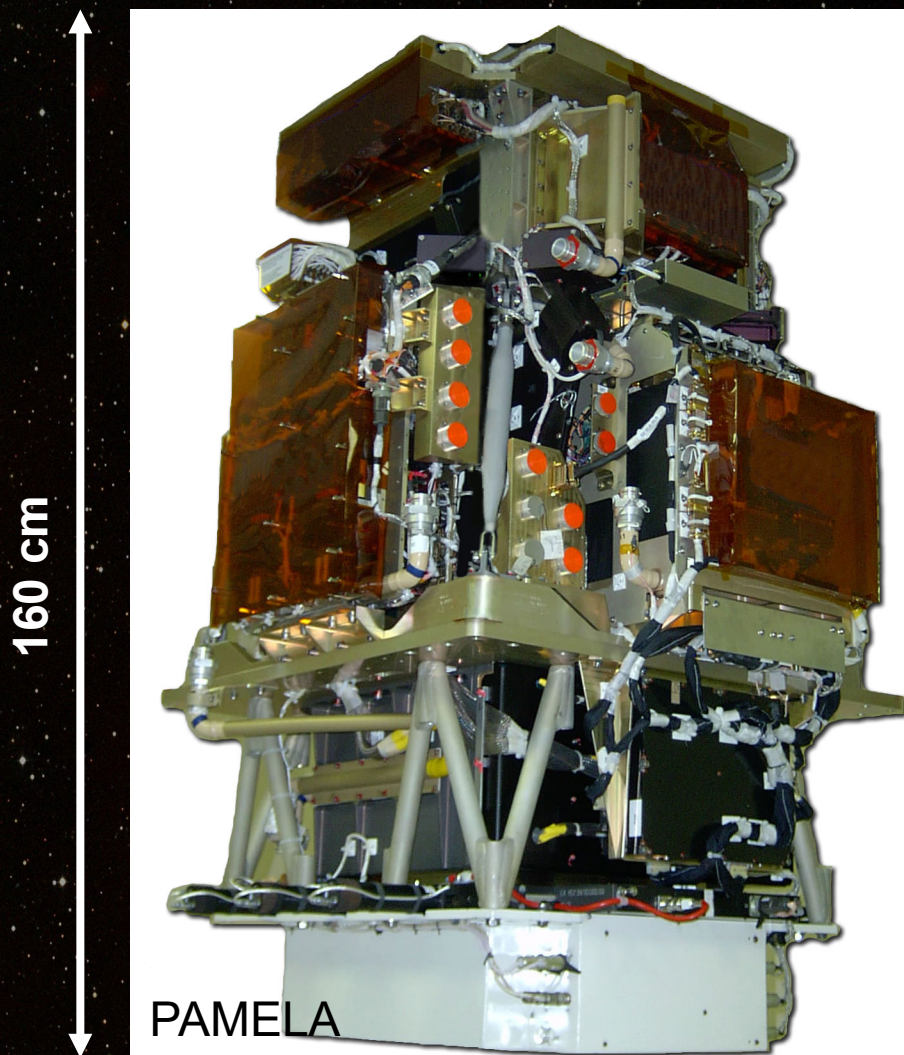
- durata breve (da ~2 a ~60 giorni)
- atmosfera residua

Esperimenti su satellite



<https://www.youtube.com/watch?v=VmpOZECLbIQ>

Esperimenti su satellite



Pro:

- esperimenti di lunga durata
- atmosfera residua trascurabile

Contro:

- poco spazio, peso e potenza disponibili
- difficile o impossibile manutenzione
- lancio molto costoso

Esperimenti su satellite



Pro:

- esperimenti di lunga durata
- atmosfera residua trascurabile

Contro:

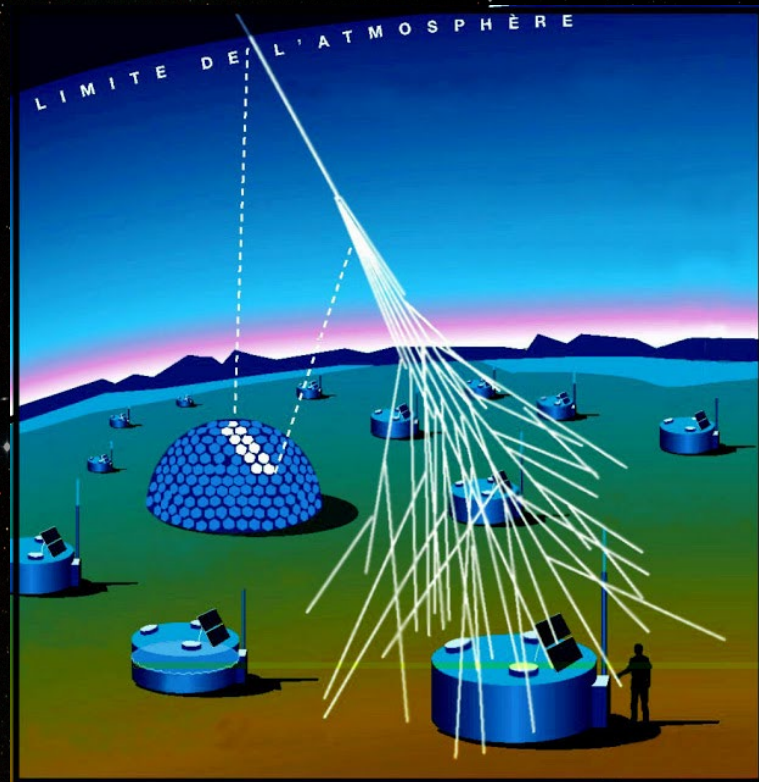
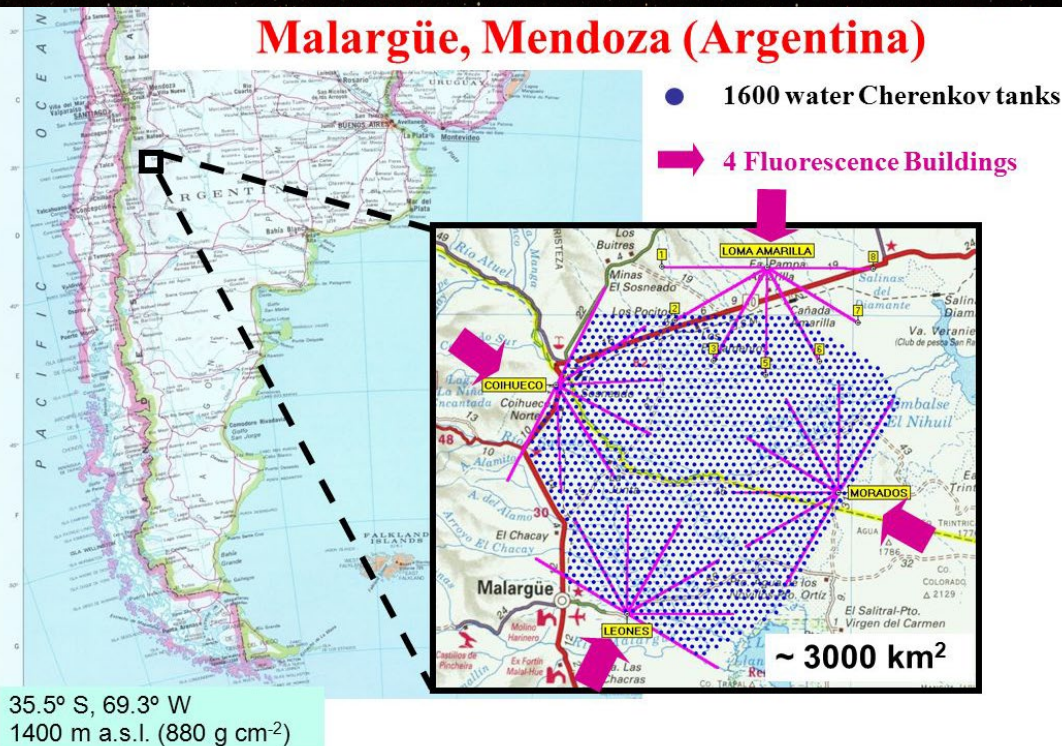
- poco spazio, peso e potenza disponibili
- difficile o impossibile manutenzione
- lancio molto costoso

Esperimenti a terra

L'esperimento Auger è stato costruito per osservare a terra raggi cosmici di altissima energia ($E > 10^{18}$ eV, l'energia cinetica di una pallina da tennis a 100 km/h).

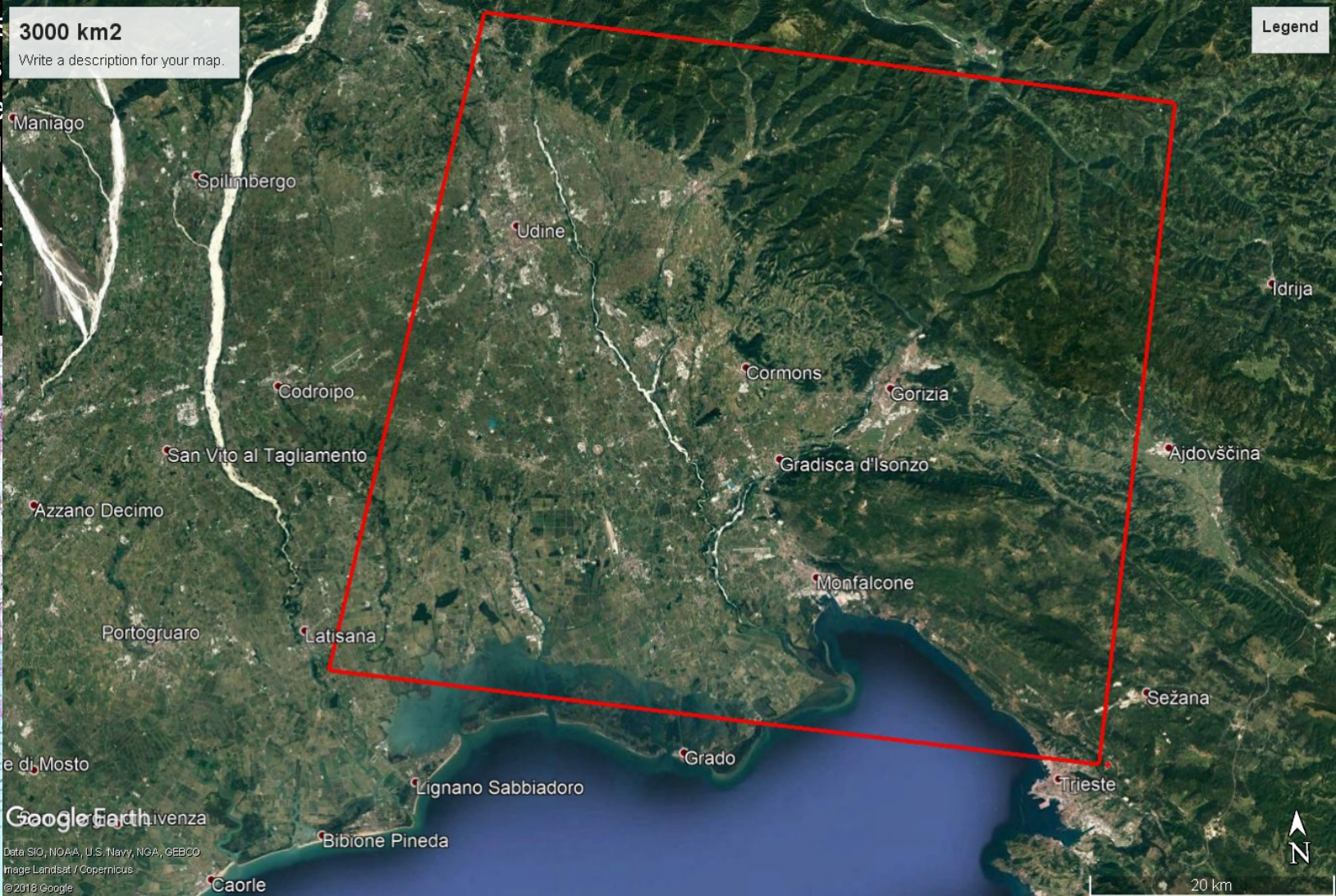
Date le basse frequenze (1 evento/km² secolo) occorre strumentare superfici > 1000 km².

Malargüe, Mendoza (Argentina)



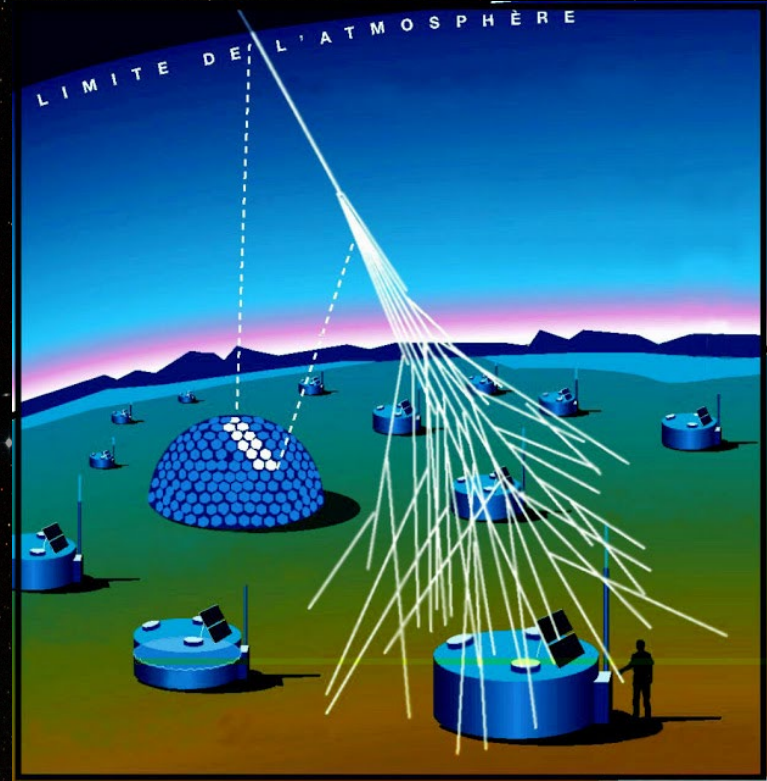
Esperimenti a terra

L'es
oss
ene
pall
Dat
occ



35.5° S, 69.3° W
1400 m a.s.l. (880 g cm⁻²)

Esperimenti a terra: osservatorio Auger



Solo particelle cariche?

Per definizione i raggi cosmici sono particelle cariche.

Solo particelle cariche?

Per definizione i raggi cosmici sono particelle cariche.

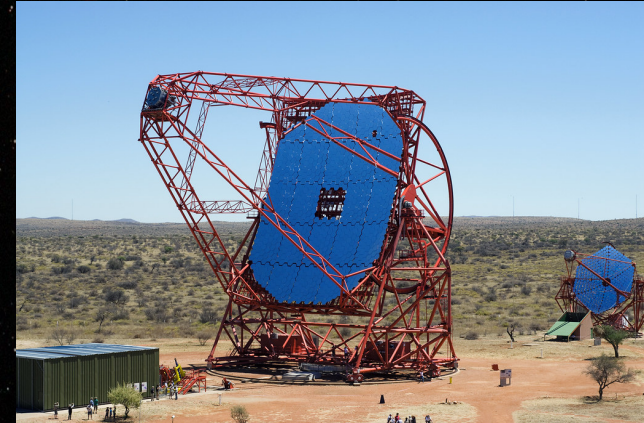
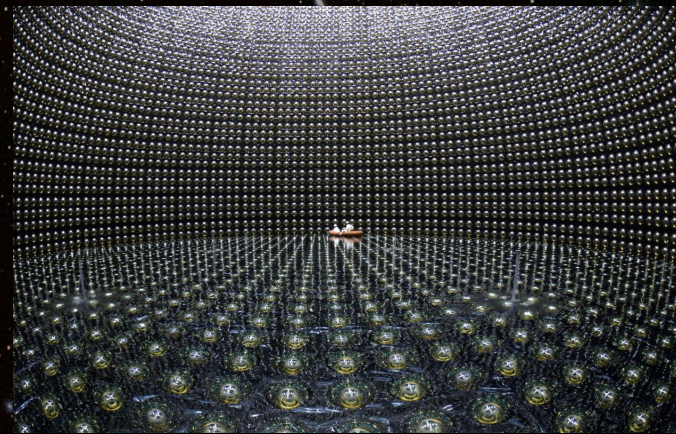
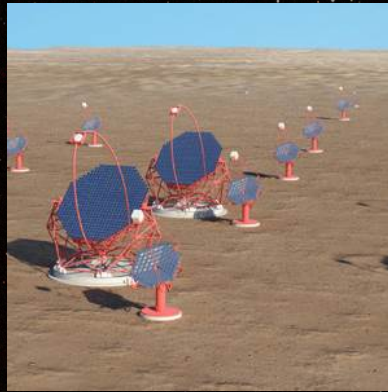
Ma la Terra è raggiunta da un numero molto superiore di fotoni (di ogni energia) e altre particelle neutre, come i neutrini.

Solo particelle cariche?

Per definizione i raggi cosmici sono particelle cariche.

Ma la Terra è raggiunta da un numero molto superiore di fotoni (di ogni energia) e altre particelle neutre, come i neutrini.

Tantissimi esperimenti, a terra e nello spazio, sono dedicati a queste altre particelle!

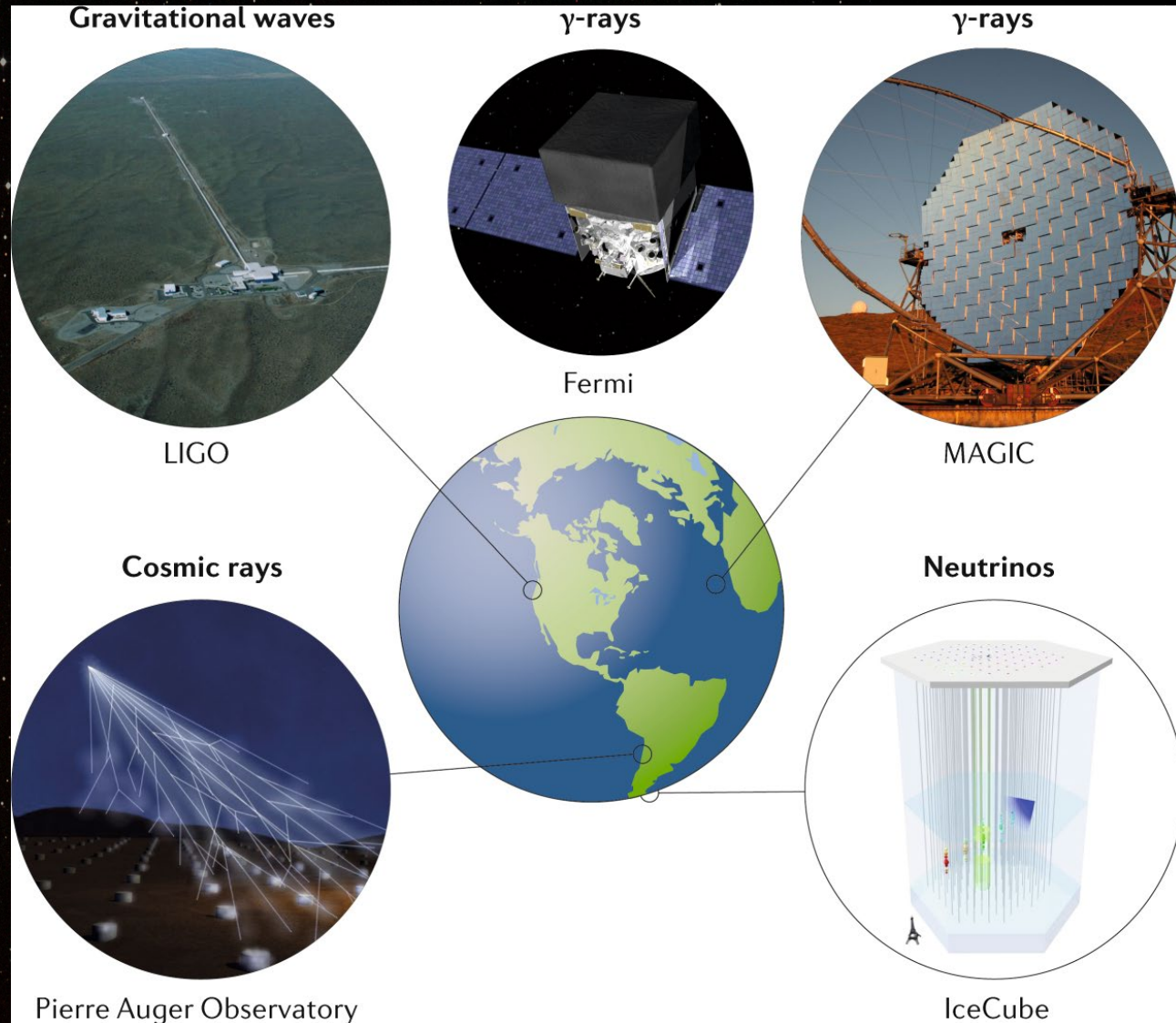


Astrofisica “multi-messaggera”

Sfida del 21° secolo:
osservare
contemporaneamente
varie particelle
provenienti dallo stesso
oggetto

Enfasi su quello che non
viene deviato dai campi
magnetici:

- Fotoni (da radio a gamma)
- Neutrini
- Onde gravitazionali
- Raggi cosmici ad altissima energia



Grandi esperimenti, grandi collaborazioni

PAMELA Collaboration

Italy



Bari



Florence



Frascati



Naples



Rome



Trieste



CNR, Florence



Germany:



Siegen

Sweden:



KTH, Stockholm

Russia:



Moscow / St. Petersburg



Grandi esperimenti, grandi collaborazioni

PAMELA Collaboration

Italy



Bari



Florence



Frascati



Naples



Rome



Trieste



CNR, Florence



Germany:



Siegen

Sweden:

KTH

AMS Collaboration



Grandi esperimenti, grandi collaborazioni

PAMELA Collaboration



AMS Collaboration



Pierre Auger Collaboration



Conclusioni

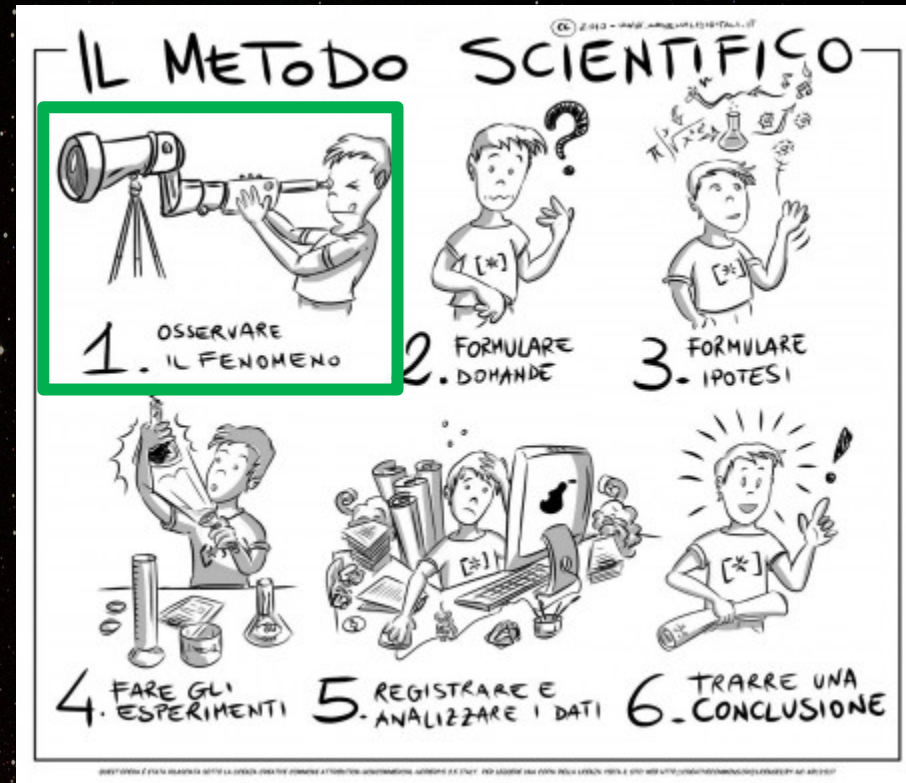
Esistono i raggi cosmici: particelle cariche che arrivano, principalmente, dalla Galassia e dal Sole.

I raggi cosmici interagiscono con l'atmosfera terrestre e, a livello del mare, arriva su di noi una continua «doccia» di particelle secondarie, la maggior parte muoni.

I muoni sono simili agli elettroni, solo di massa maggiore e molto più penetranti.

Esistono molti strumenti per studiare i raggi cosmici, dallo spazio e da terra.

C'è ancora molto da capire e studiare!



Grazie!