

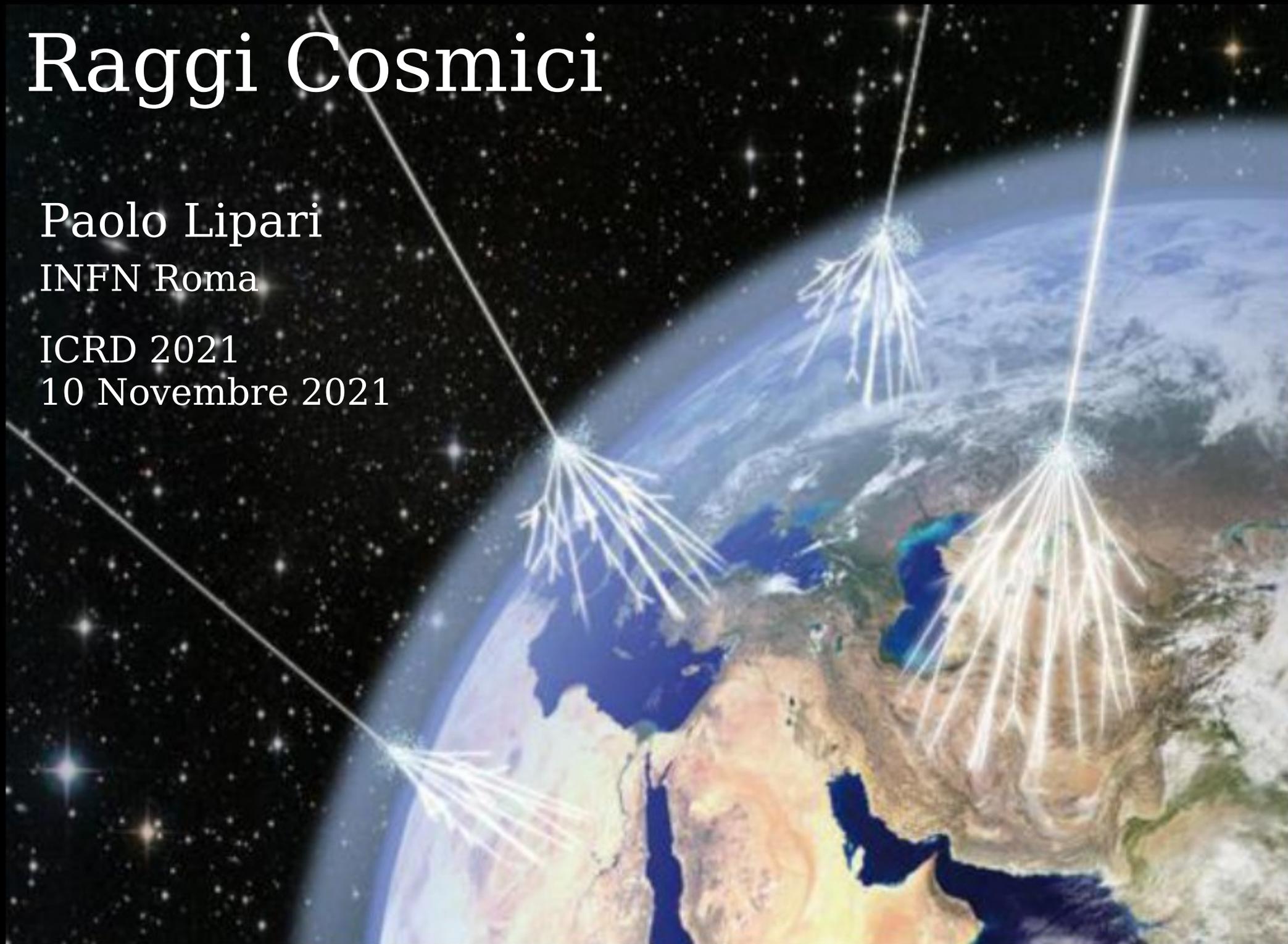
Raggi Cosmici

Paolo Lipari

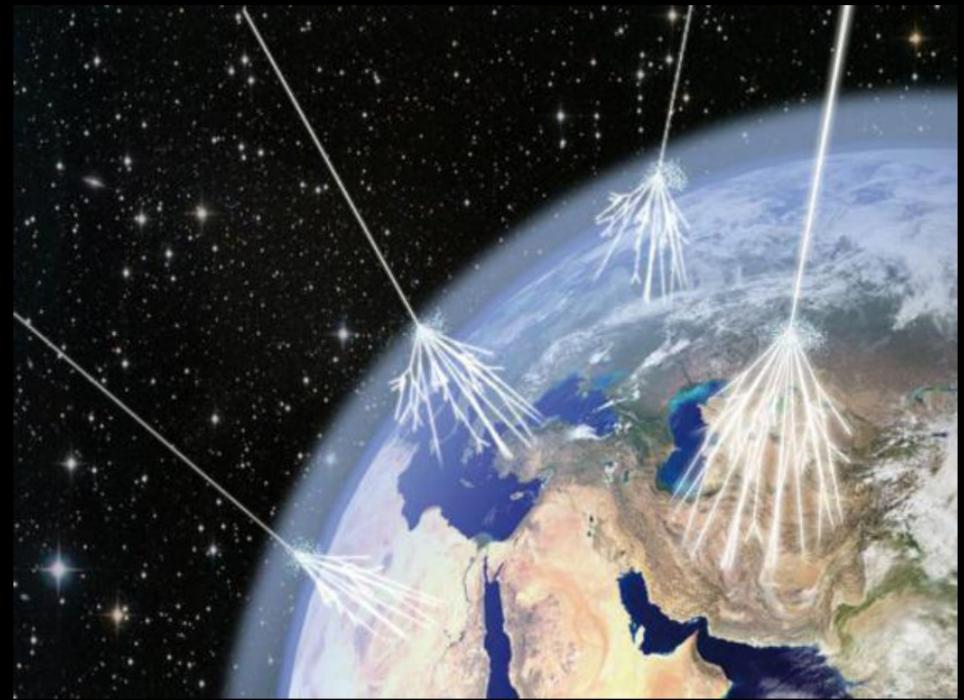
INFN Roma

ICRD 2021

10 Novembre 2021



Cosa sono i Raggi Cosmici ?



Sono una “pioggia” di particelle (protoni, nuclei atomici, elettroni) di altissima (straordinaria !) energia e velocità vicina a quella della luce che arriva continuamente sulla Terra da tutte le direzioni

Cosa sono i Raggi Cosmici ?



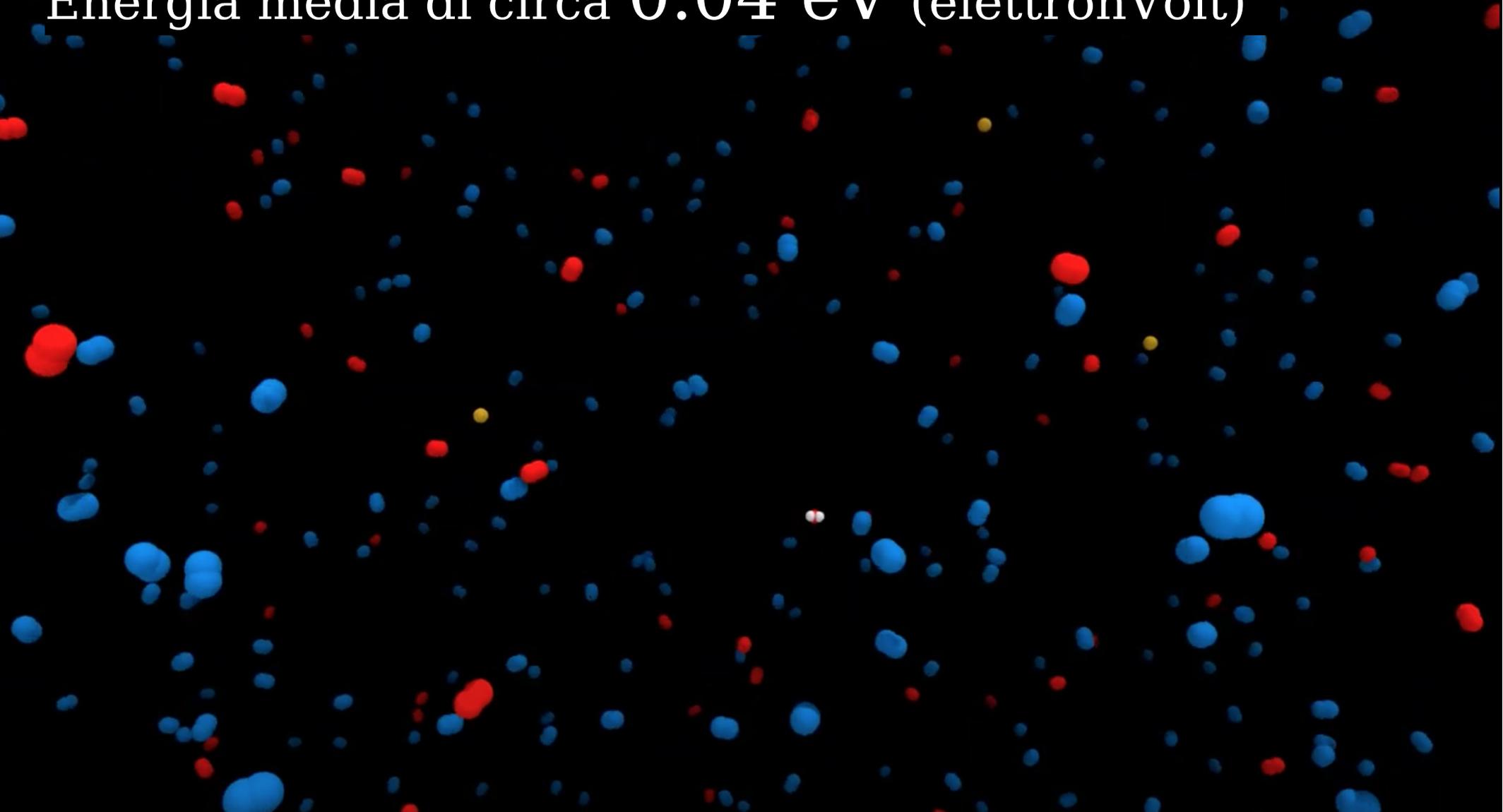
Sono una “pioggia” di particelle (protoni, nuclei atomici, elettroni) di altissima (straordinaria !) energia e velocità vicina a quella della luce che arriva continuamente sulla Terra da tutte le direzioni

Da dove vengono ?

Dopo un secolo di ricerca stiamo cominciando a capirlo

Parliamo un attimo di Energia...

Le molecole dell'aria (in questa stanza)
si muovono ad una velocità di circa 2000 Km/ora
Energia media di circa 0.04 eV (elettronVolt)



I protoni del plasma sulla superficie del Sole
hanno una velocità media di circa 40mila Km/ora
Energia media di circa 1 eV (elettronVolt)

Anche i fotoni della luce del Sole
trasportano ciascuno circa 1 eV



Particelle “primarie” dei Raggi Cosmici
(quelle che arrivano dallo spazio)

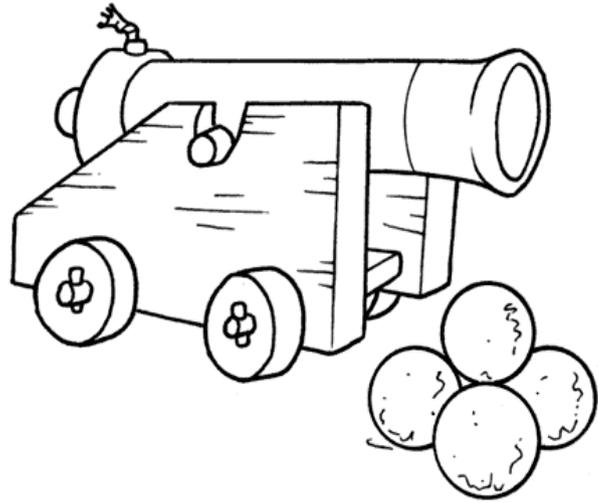
hanno un'energia che va da diversi **Miliardi di eV**

fino a circa **100-miliardi-di-miliardi di eV (!!)**

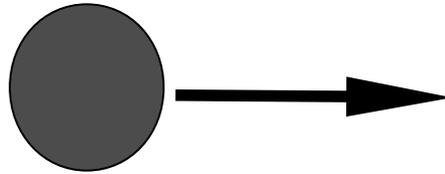
(10^9 eV - 10^{20} eV)



concetto di *Energia*



massa m



velocità V



L'Energia "cinetica" trasportata da un corpo è proporzionale alla sua massa e cresce con la velocità

Newton (meccanica classica)

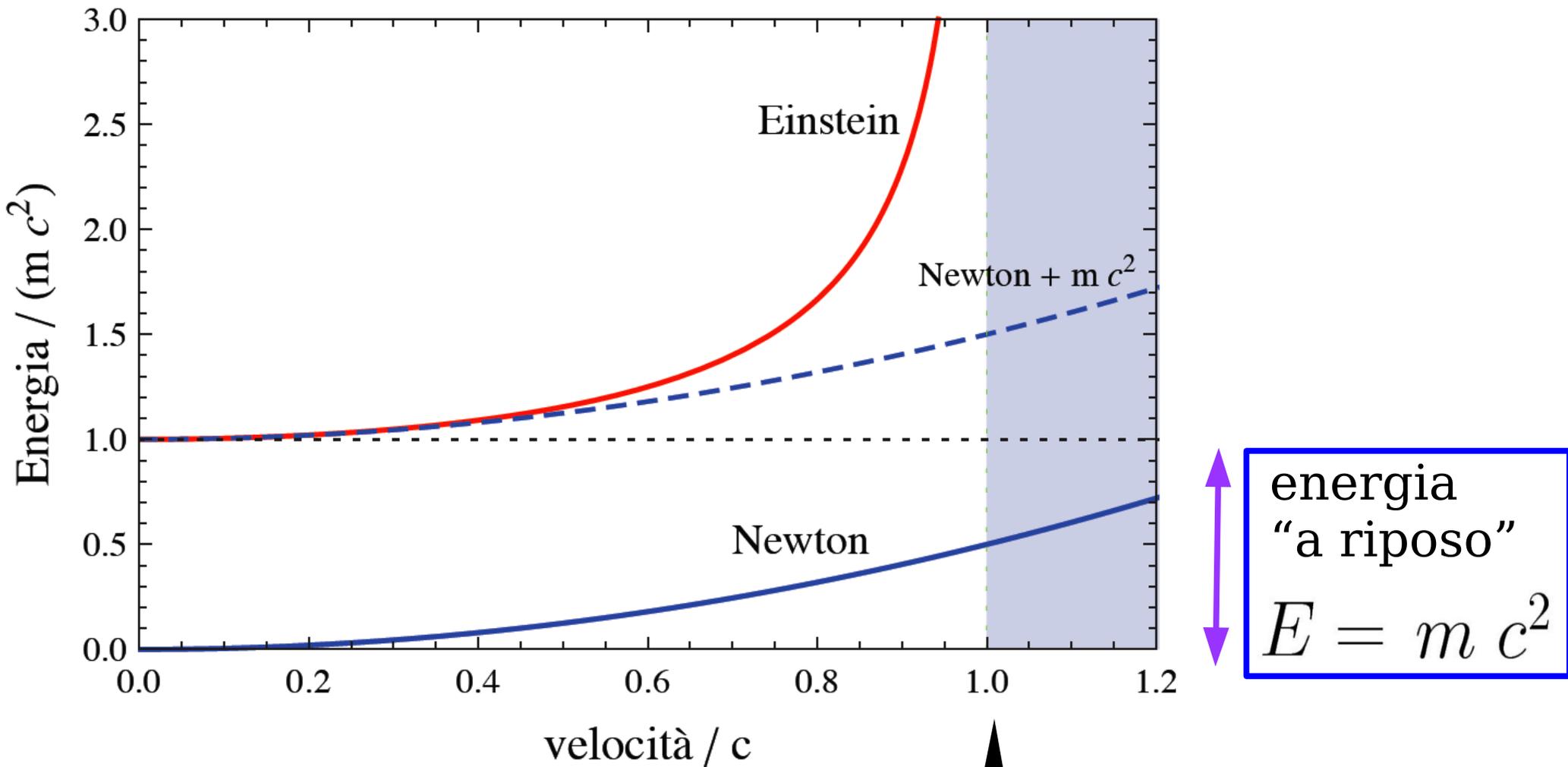
$$E = \frac{1}{2} m v^2$$

Einstein ("Relatività")

$$E = \frac{m c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

c = velocità della luce

Relazione tra *Energia* e *Velocità*



Quando la velocità di una particella si avvicina a quella della luce la sua energia aumenta sempre di più

velocità limite
(velocità della luce)
"irraggiungibile"

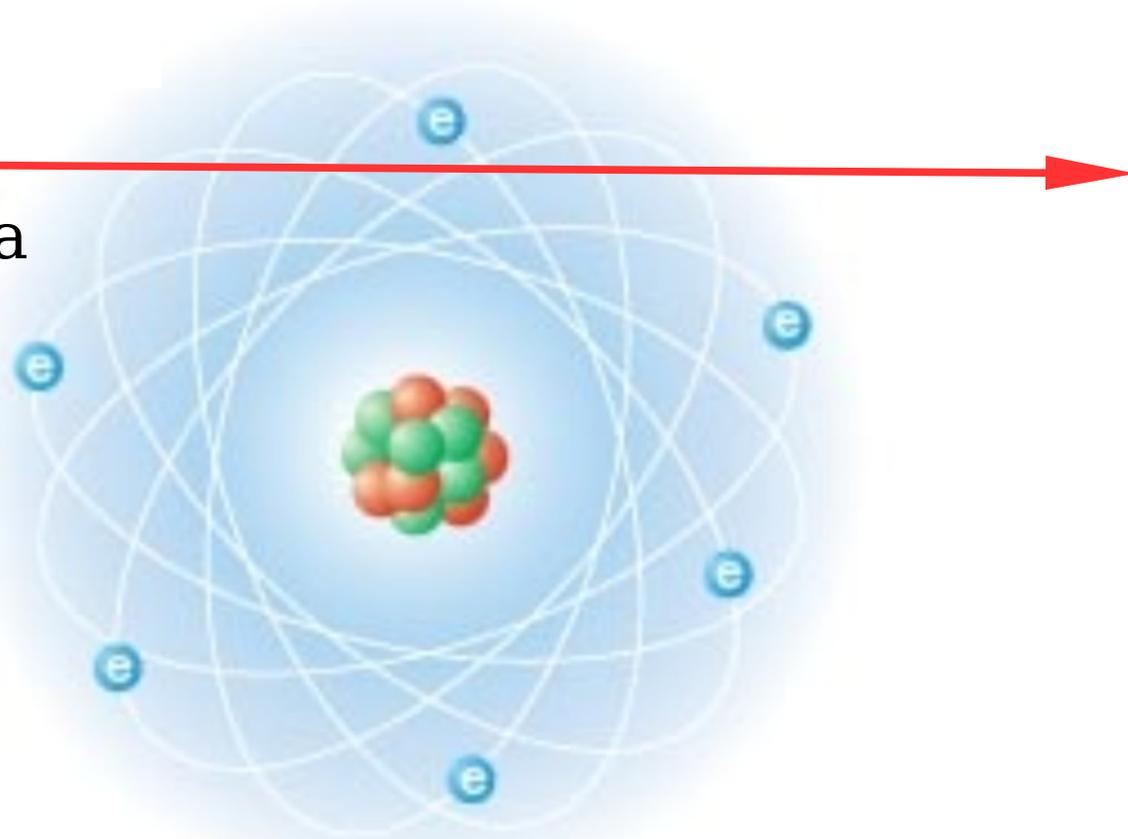
Cosa succede quando le particelle dei raggi cosmici arrivano alla Terra e cominciano ad attraversare l'aria ?

La materia è fatta di atomi
formati da un nucleo circondato da elettroni

●
particella con carica elettrica
(e grande velocità)

interazioni elettriche
con elettroni (ed il nucleo).
rompono l'atomo

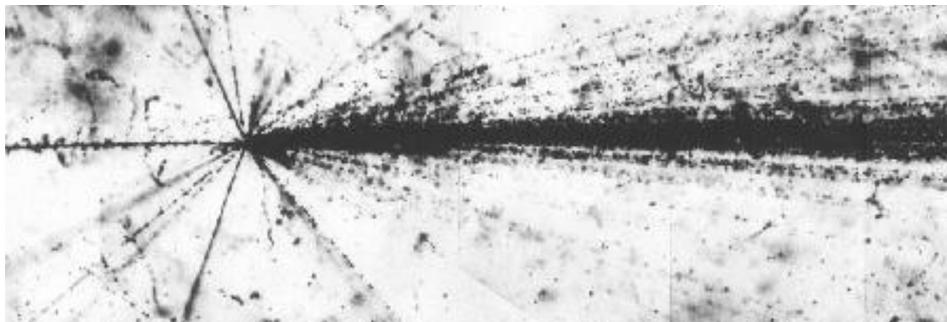
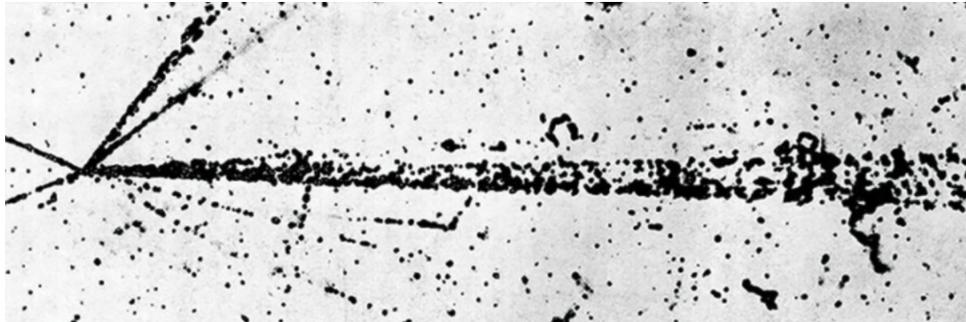
“Ionizzano la materia”



Scoperta dei raggi cosmici
grazie alla osservazione di questa
ionizzazione

particella con “carica nucleare”
[che sente la forza che
tiene insieme protoni e neutroni
nei nuclei atomici]

Interazione nucleare



Immagini al microscopio
di interazioni nucleari
in emulsione fotografica

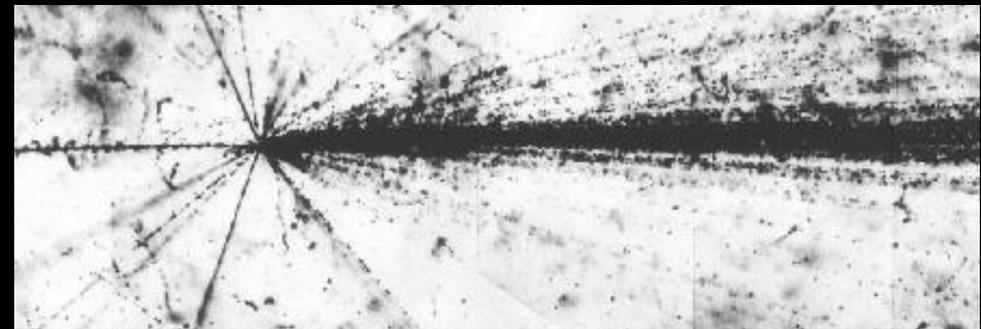
dove le particelle cariche
lasciano una “traccia”

Urto tra due macchine
crea scintille

(che non sono
frammenti delle
macchine)

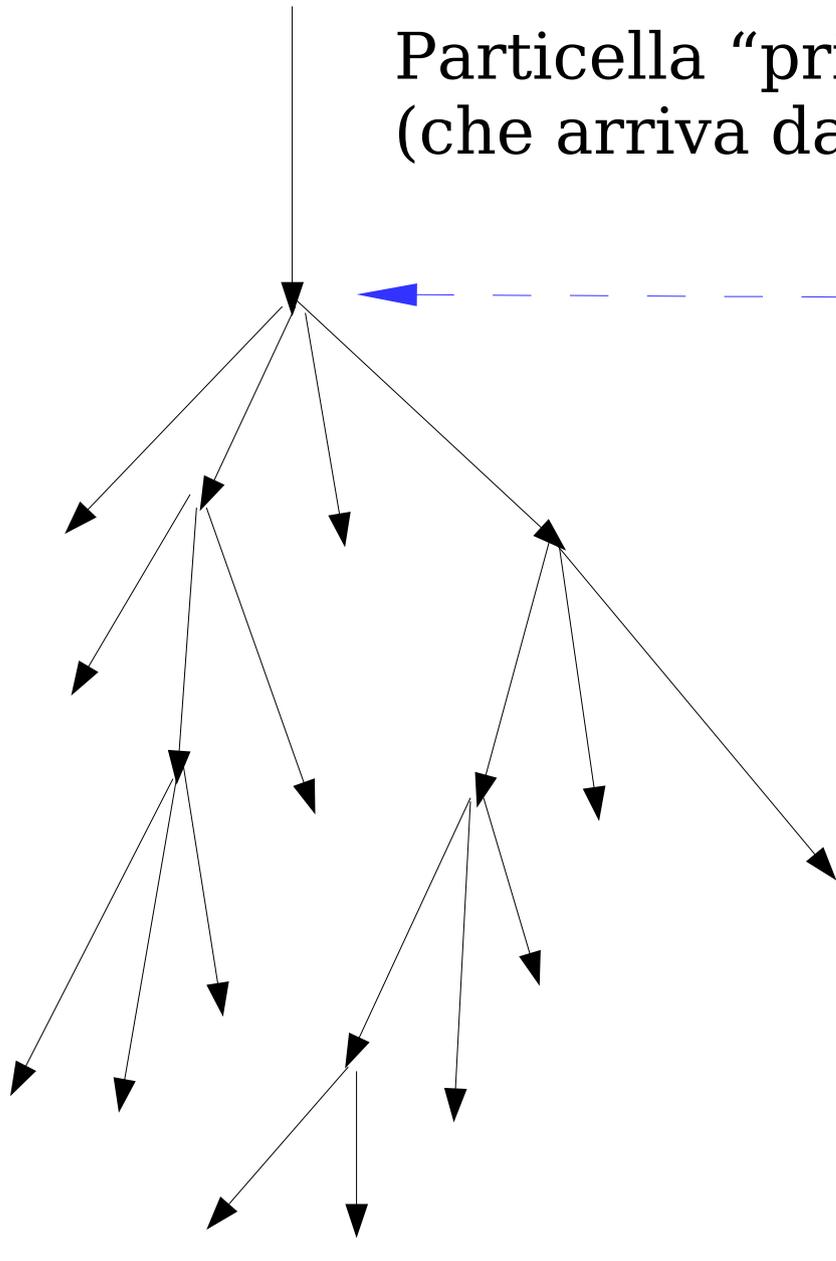


Interazioni nucleari
creano “scintille”
che sono **nuove**
particelle elementari



Le “cascate” o “sciami” dei raggi cosmici

Particella “primaria”
(che arriva dallo spazio)



← prima interazione
nucleare

Numero di particelle
prima aumenta con la
profondità

.....

poi decresce via via
che le particelle perdono
energia e vengono “assorbite”

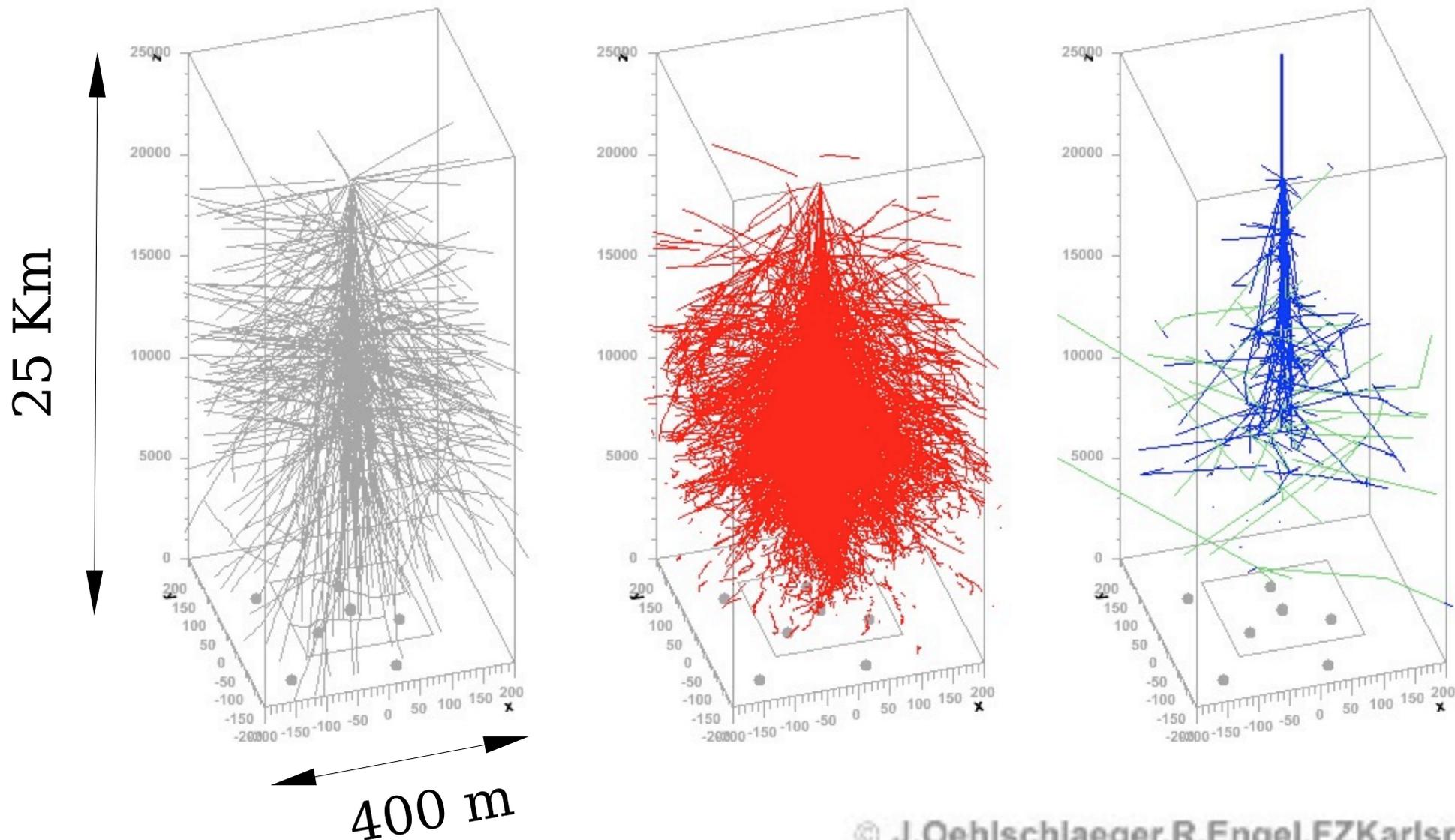


“Simulazione” al computer della cascata
di un raggio cosmico (protone di 10^{13} eV)
[3 figure: stesso sciame, 3 tipi di particelle]

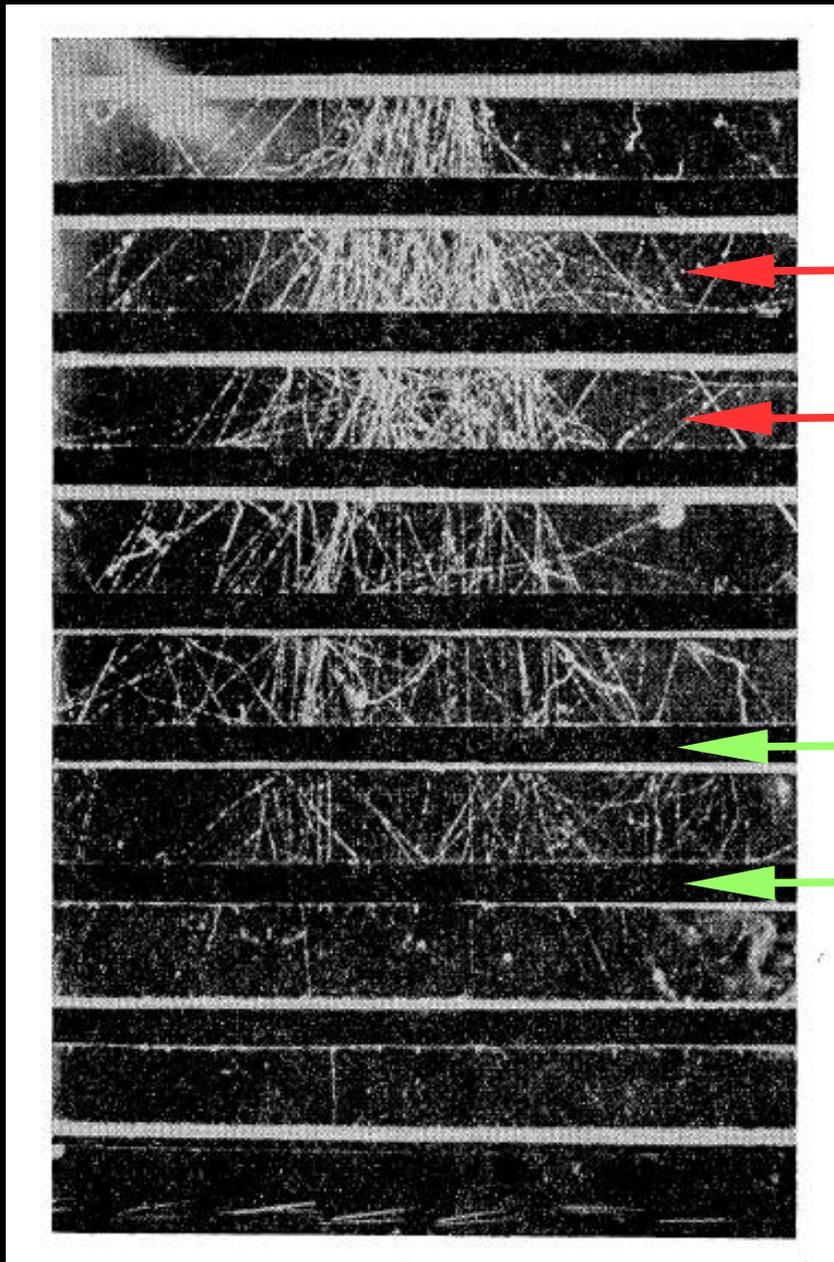
muoni

elettroni

adroni



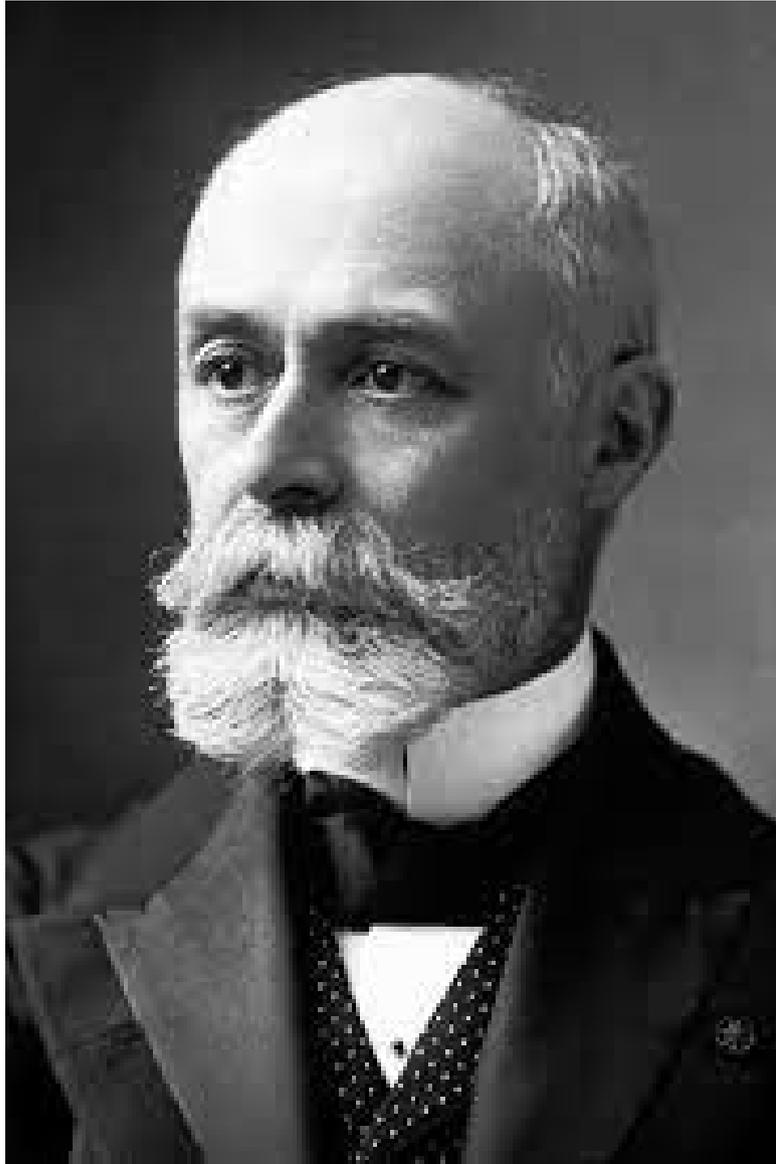
Esempi di "cascate" reali (generate da raggi cosmici secondari)



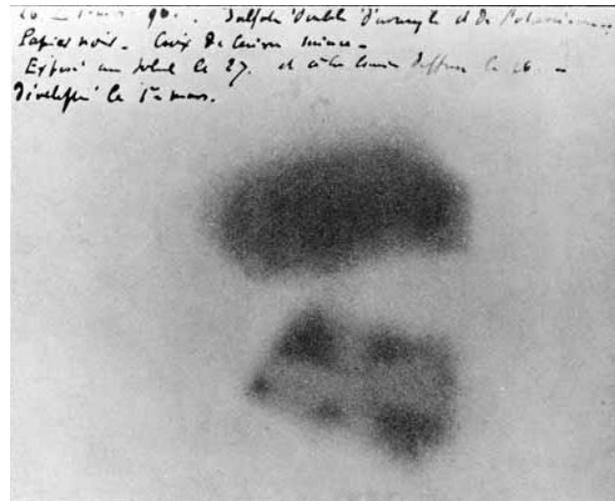
Strati di gas
(permettono visualizzare
le particelle cariche che
ionizzano gli atomi del gas)

Strati di materia solida

La Scoperta dei Raggi Cosmici



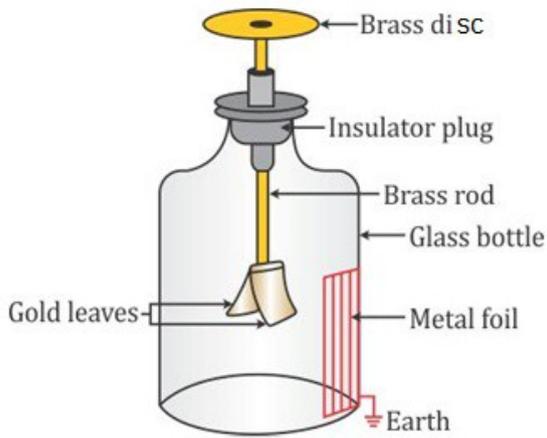
1896 Henri Bequerel scopre la *Radioattività* dell' Uranio



Una forma di radiazione penetrante che annerisce l'emulsione fotografica

e *ionizza i gas*

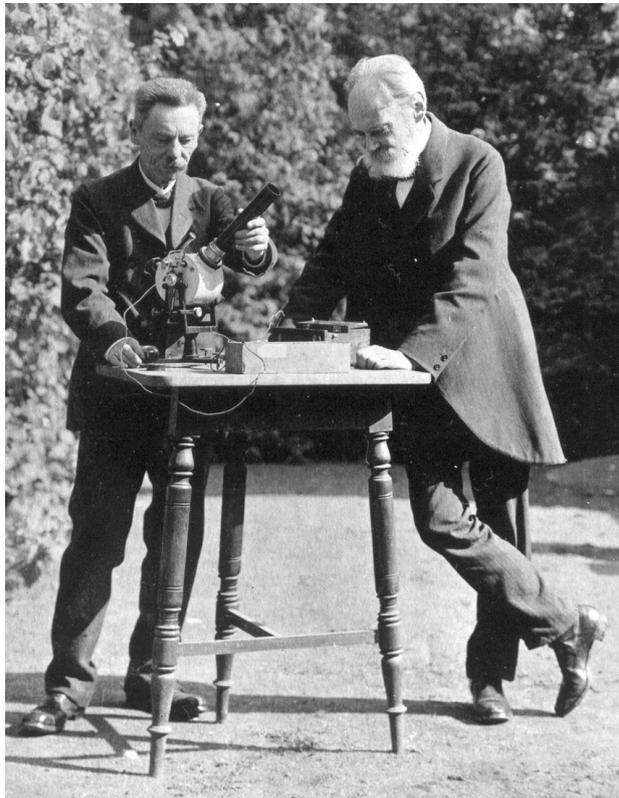
Electroscopio



tempo di scarica di
un elettroscopio

Numero di ioni
creati per unità
di volume e di tempo

Intensità
della radiazione

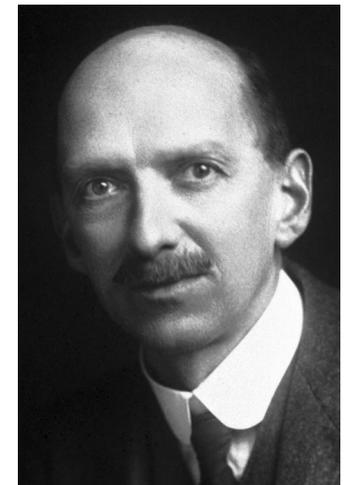


Julius Elster
Hans Geitel

(1900) La radiazione ionizzante
sembra essere dappertutto
anche lontano dalle sostanze
radioattive

Suggerimento (1901) di
Charles Wilson

*Esiste una sorgente
extraterrestre di
radiazione ionizzante*



Ci è voluto un decennio per provarlo

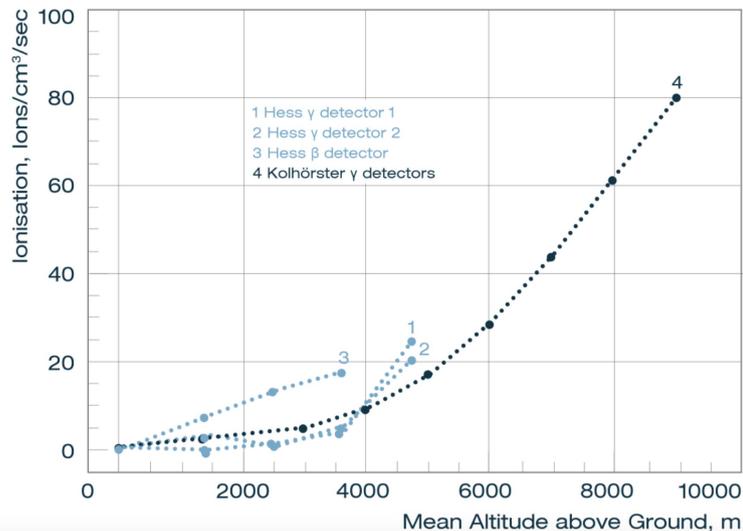
Misure su Pallone



Victor Hess [1912]



Walter Kolhörster [1913]



Stabiliscono la natura extraterrestre della radiazione ionizzante

Ruolo di Domenico Pacini

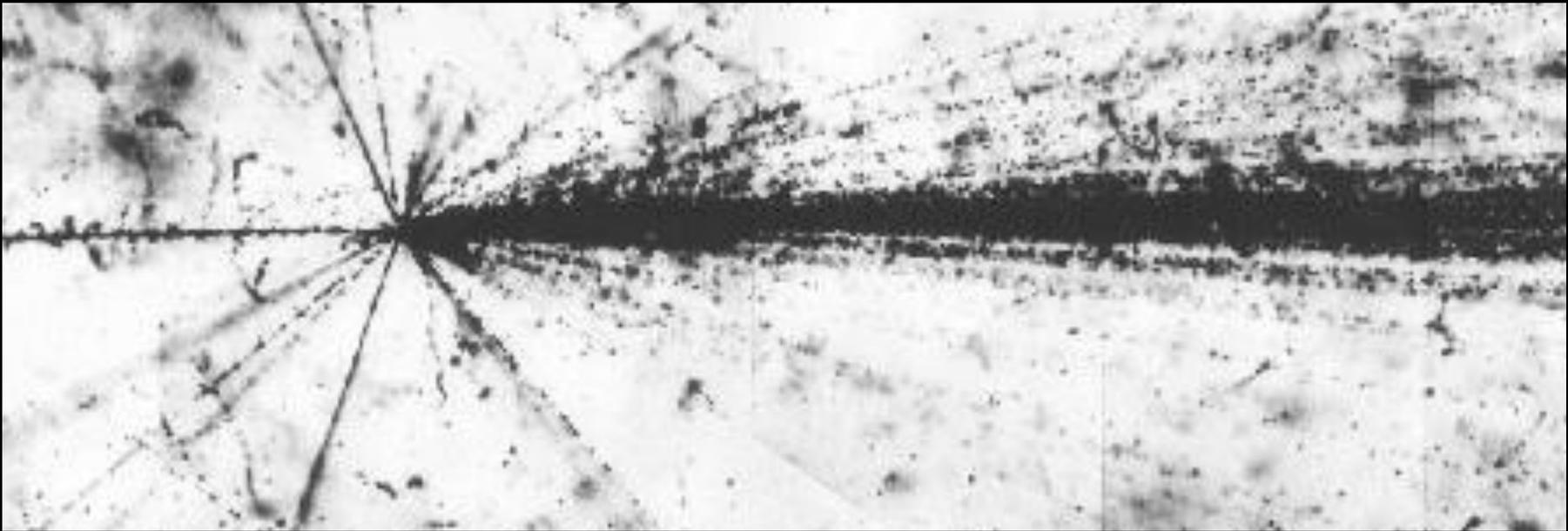
LA RADIAZIONE PENETRANTE ALLA SUPERFICIE ED IN SENO ALLE ACQUE.

NOTA DI D. PACINI.

quanto appare confermino le esperienze di cui è oggetto questa nota: cioè che *esista nell'atmosfera una sensibile causa ionizzante, con radiazioni penetranti, indipendente dall'azione diretta delle sostanze radioattive del terreno.*



Raggi Cosmici e Particelle Elementari



Le interazioni dei raggi cosmici
creano nuovi tipi di particelle

Due principi fondamentali della Fisica

Materia - AntiMateria

Per ogni
Particella

Massa
Carica elettrica
Carica “nucleare”
....

elettrone
protone
neutrone
.....
fotone

esiste una

Anti-Particella

Massa (identica)
- (Carica elettrica)
- (Carica “nucleare”)
- (....)

anti-elettrone
anti-protone
anti-neutrone
anti-(.....)
fotone (la antiparticella di se stessa)

Equivalenza di Massa ed energia

$$E = m c^2$$

E' possibile trasformare
energia in materia + antimateria

creando particelle ed antiparticelle
in modo che tutte le "cariche" rimangano "conservate"
[se l'energia è sufficientemente elevata]

Energia  Materia +
Anti-Materia

I Raggi cosmici hanno grandissima energia che si trasforma in materia+anti-materia

I raggi cosmici sono quasi interamente materia ordinaria, ma i loro sciami sono poi formati da un numero quasi uguale di particelle ed anti-particelle (con solo un piccolo eccesso di particelle)

Quali sono le particelle / antiparticelle che formano gli sciami dei raggi cosmici ?

La materia ordinaria è formata da

elettroni	e^{-}	e^{+}	gli sciami dei raggi cosmici contengono anche le antiparticelle
protoni	p	\bar{p}	
neutroni	n	\bar{n}	

Negli sciami dei raggi cosmici sono importantissimi

Muoni μ^{-} μ^{+} particelle molto penetranti

Neutrini (“quasi invisibili”) ν_e $\bar{\nu}_e$ ν_μ $\bar{\nu}_\mu$

“Adroni” (particelle che sentono le interazioni nucleari)

π^0 π^{+} π^{-} K^{+} K^{-} K^0 \bar{K}^0

Il “Muone”



Una particella “misteriosa”, “enigmatica”
“Chi lo ha ordinato ?!” [Isidor Isaac Rabi (1936)]

Si comporta esattamente come un
elettrone/anti-elettrone solo 206 volte più pesante
(quindi non sente la forza nucleare, ed è più penetrante
degli elettroni perchè perde energia più lentamente)

Ma è “instabile” e si *disintegra spontaneamente* in
circa 2 microsecondi in un elettrone/anti-elettrone e
due neutrini:



Il “Muone” μ^- μ^+

Una particella “misteriosa”, “enigmatica”
“Chi lo ha ordinato ?!” [Isidor Isaac Rabi (1936)]

Si comporta esattamente come un
elettrone/anti-elettrone solo 206 volte più pesante
(quindi non sente la forza nucleare, ed è più penetrante
degli elettroni perchè perde energia più lentamente)

Ma è “instabile” e si *disintegra spontaneamente* in
circa 2 microsecondi in un elettrone/anti-elettrone e
due neutrini:



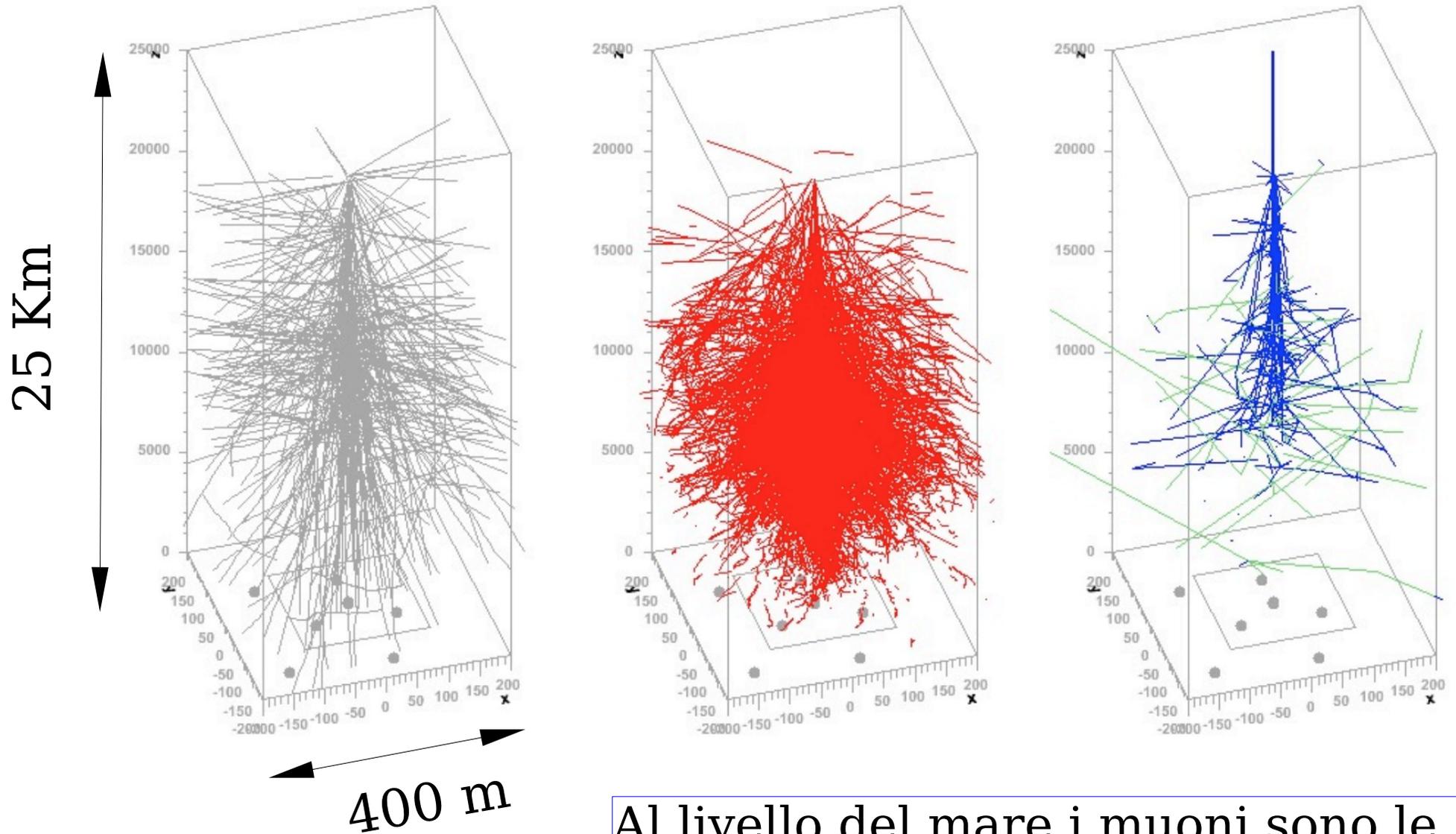
Conoscerete “personalmente” i muoni tra poco !!

“Simulazione” al computer di una cascata di un raggio cosmico (protone di 10^{13} eV)

muoni

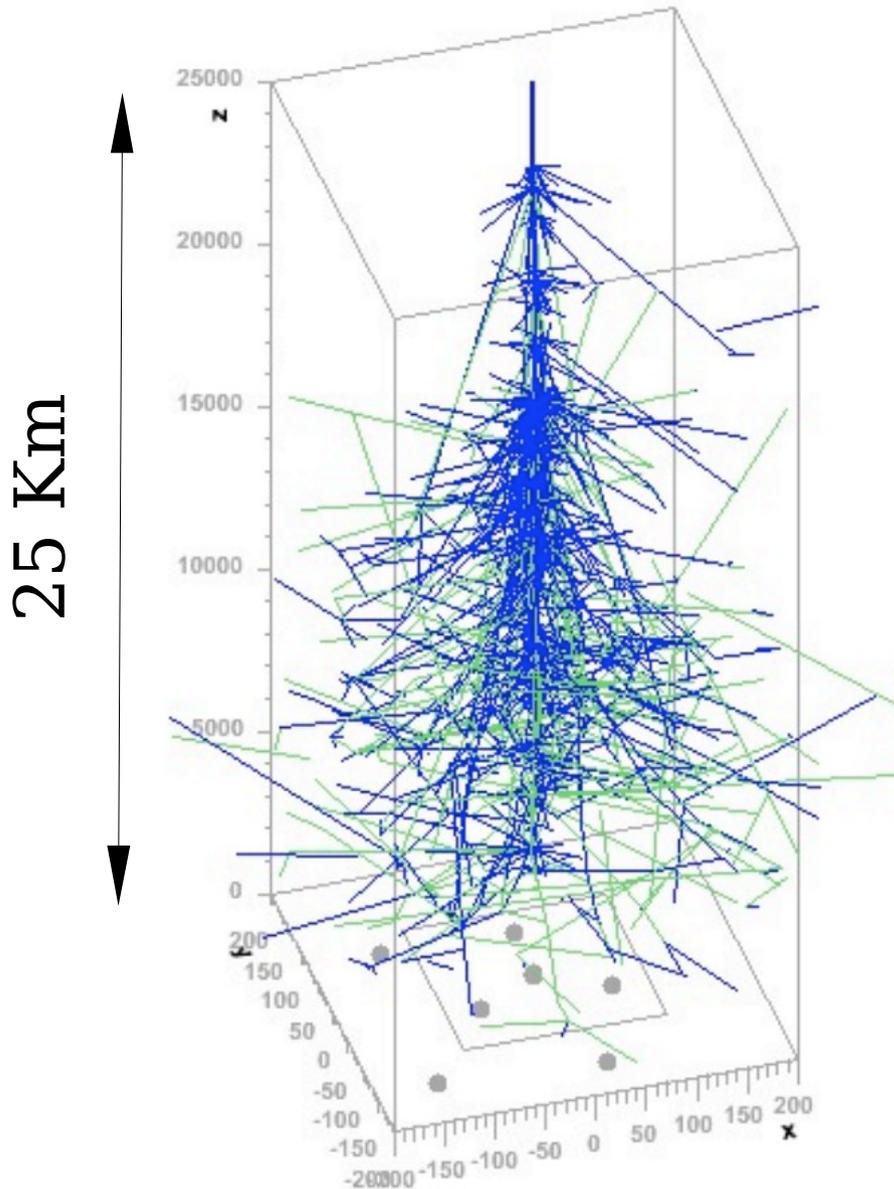
elettroni

adroni



Al livello del mare i muoni sono le particelle più comuni nello sciame

Come si possono studiare i Raggi Cosmici ?



Metodo 1.

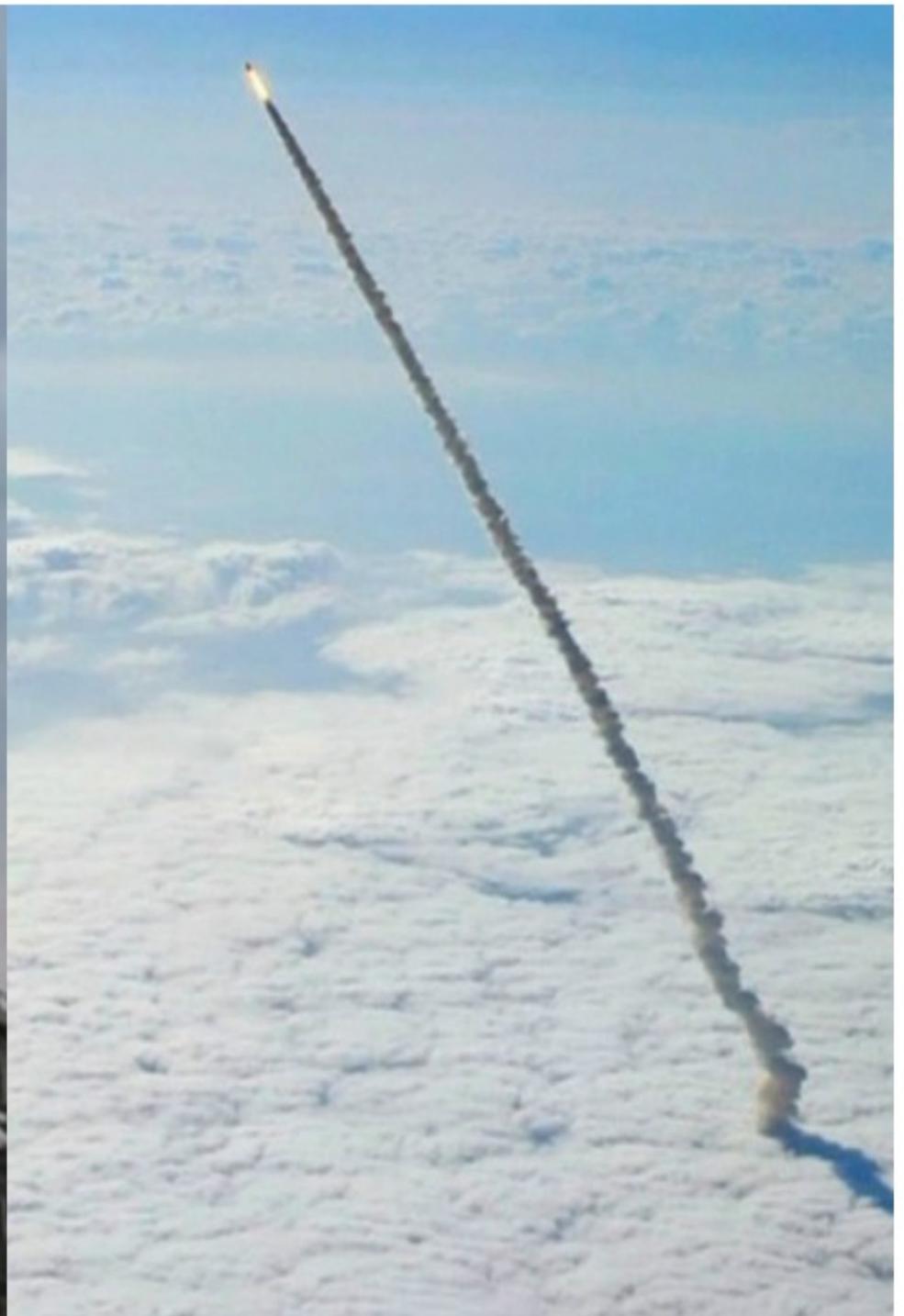
Andando sopra l'atmosfera per osservare la particella primaria prima che interagisca

Metodo 2.

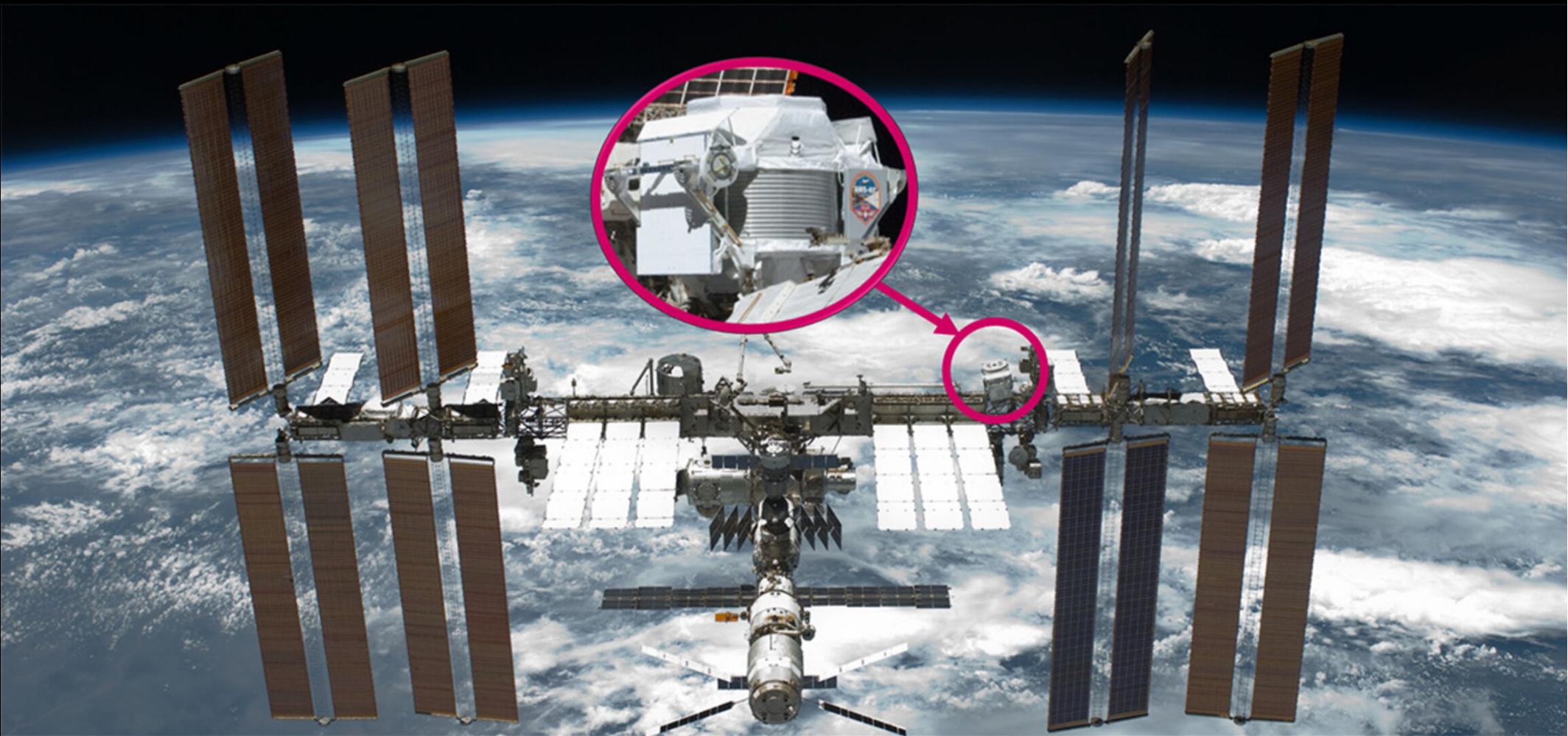
Osservando lo sciame al suolo oppure nel suo sviluppo in aria



May 16, 2011

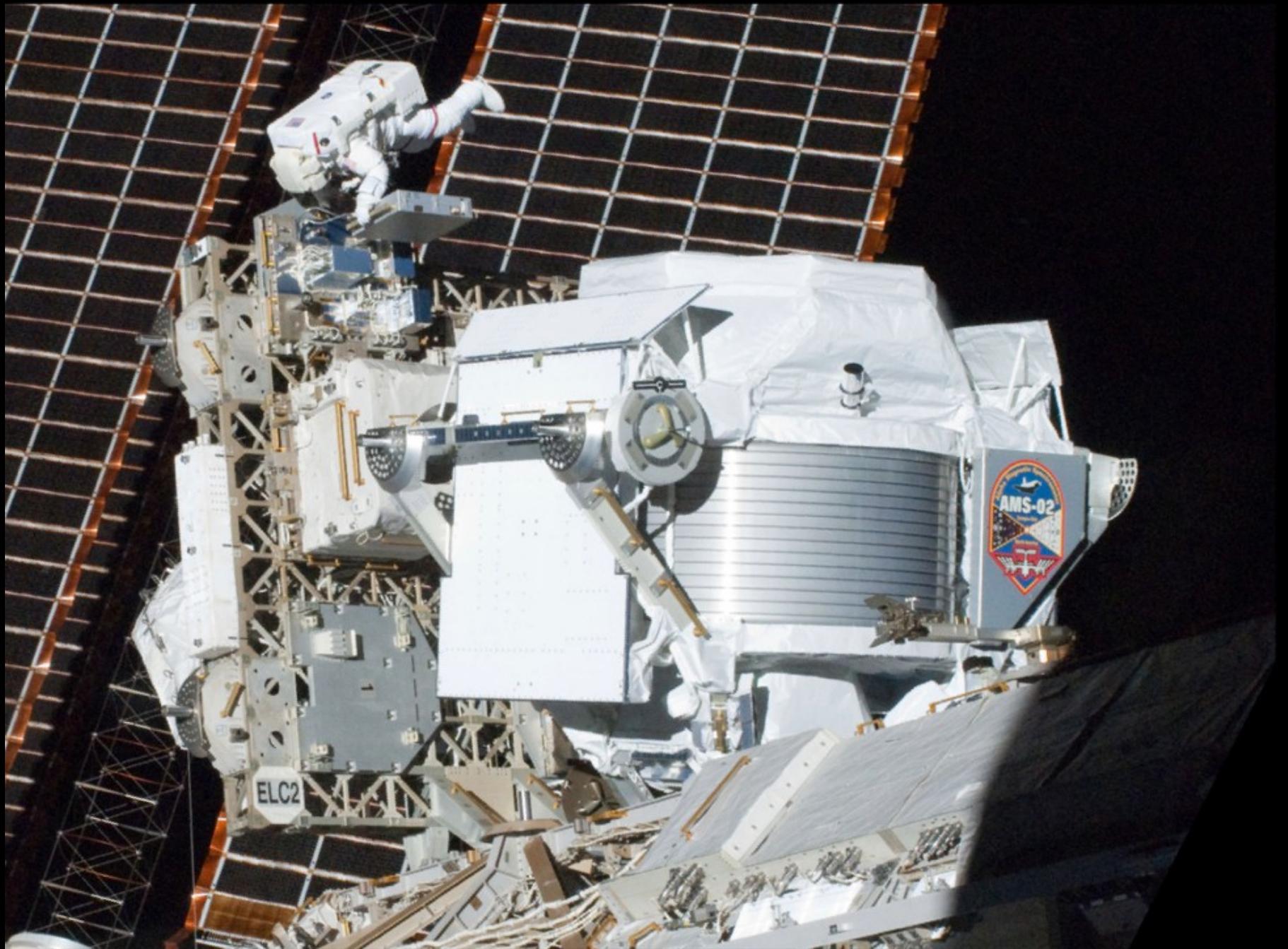


Lancio del Telescopio per Raggi Cosmici AMS a bordo dello Shuttle



Telescopio AMS
(al maggio 2011)

International Space Station



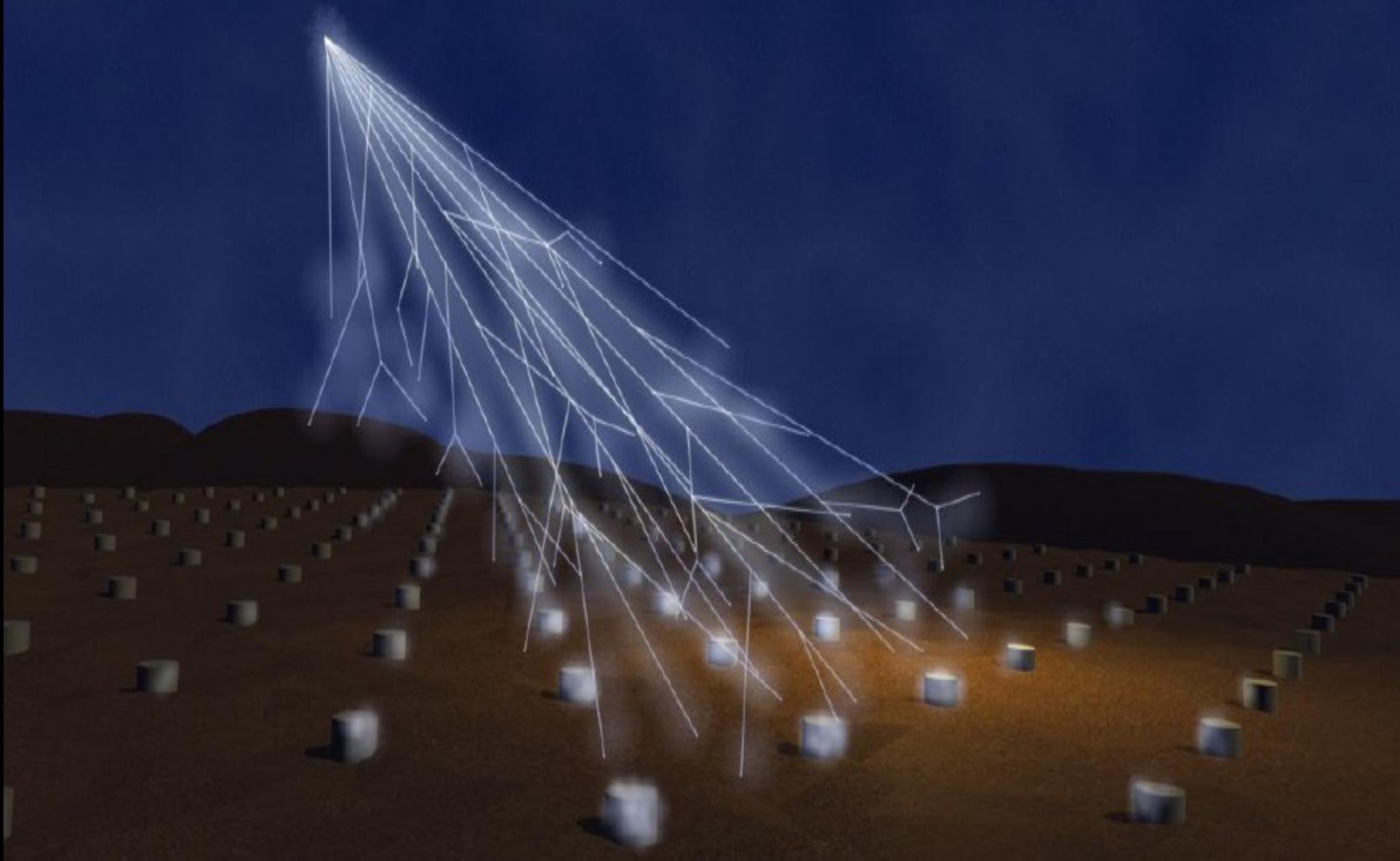
Telescopio per Raggi Cosmici AMS sistemato sulla Stazione Spaziale



Il telescopio AMS in costruzione prima del lancio

Telescopio per Raggi Cosmici AMS sistemato sulla Stazione Spaziale

Misura degli sciami atmosferici

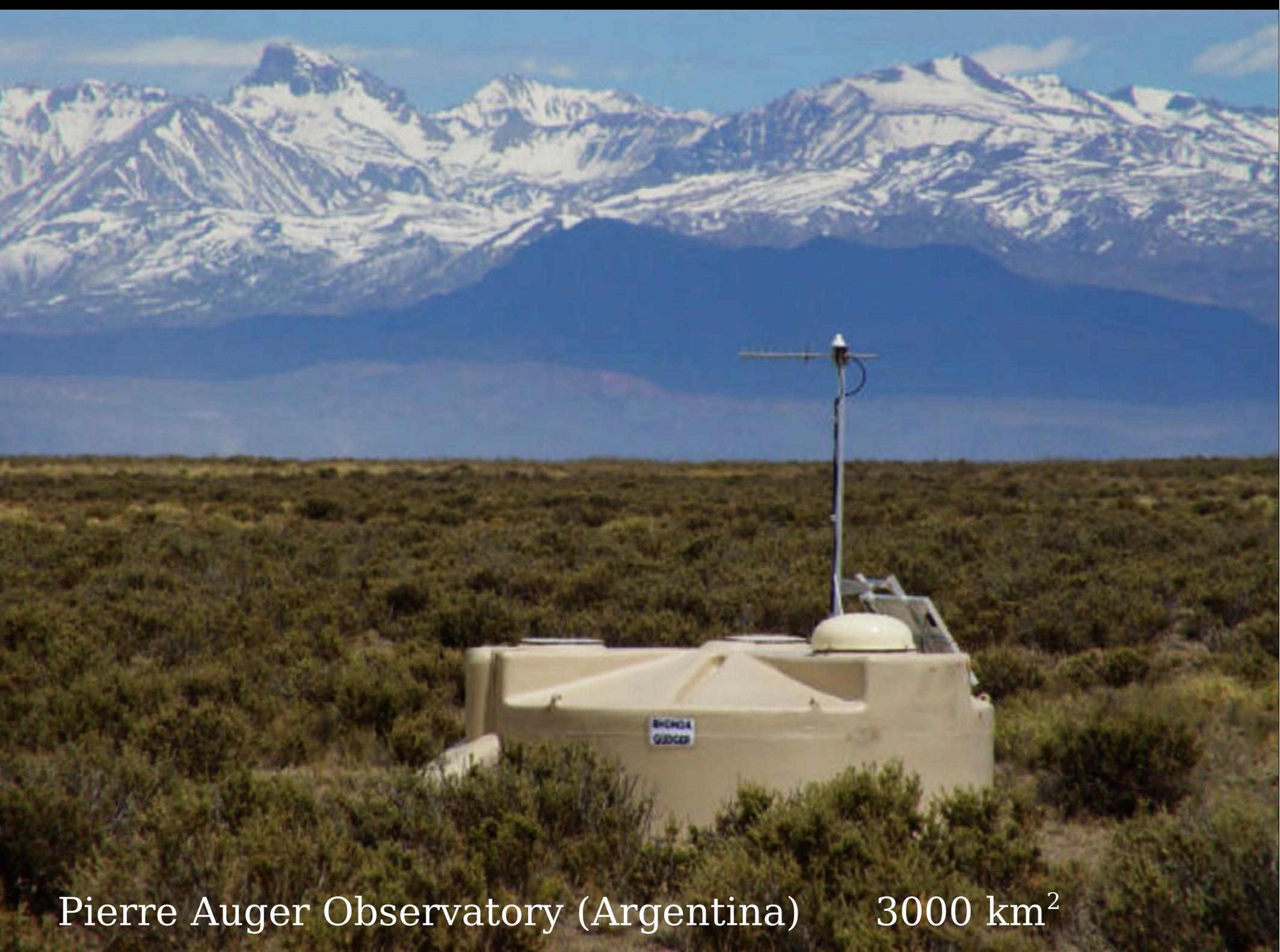


Un esperimento ai tropici

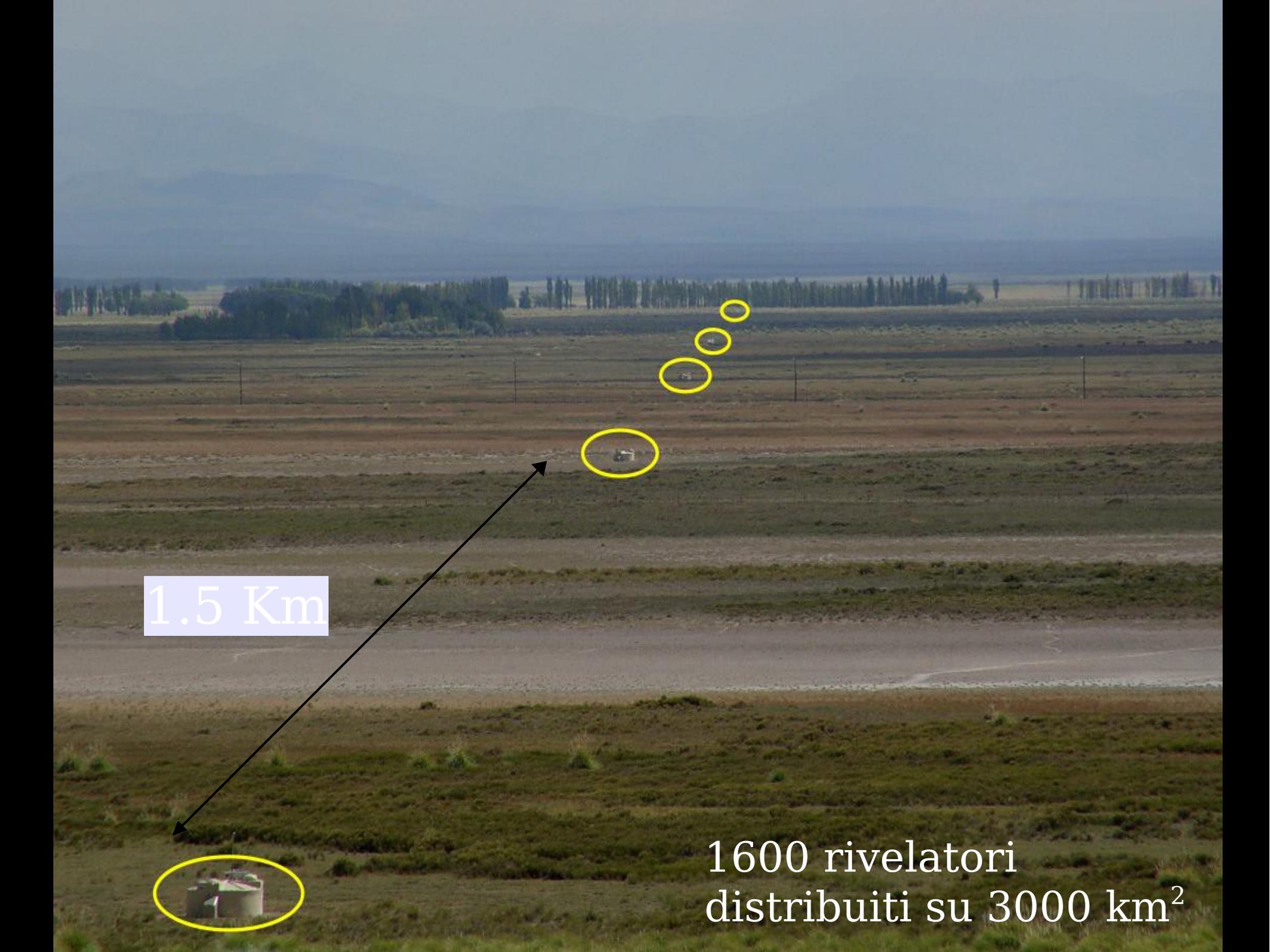


GRAPES

Ooty - INDIA - 2200 metri



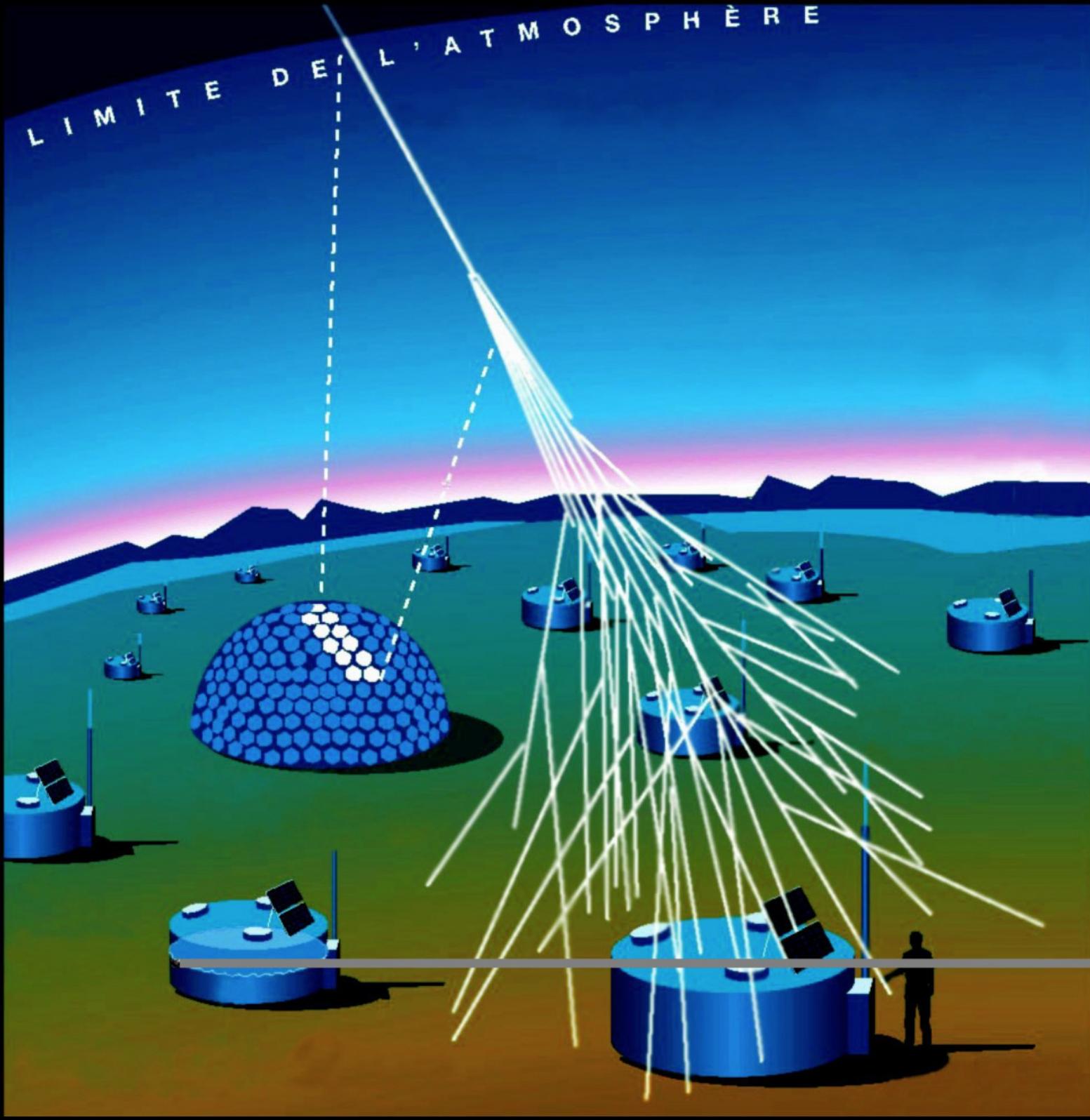
Pierre Auger Observatory (Argentina) 3000 km²

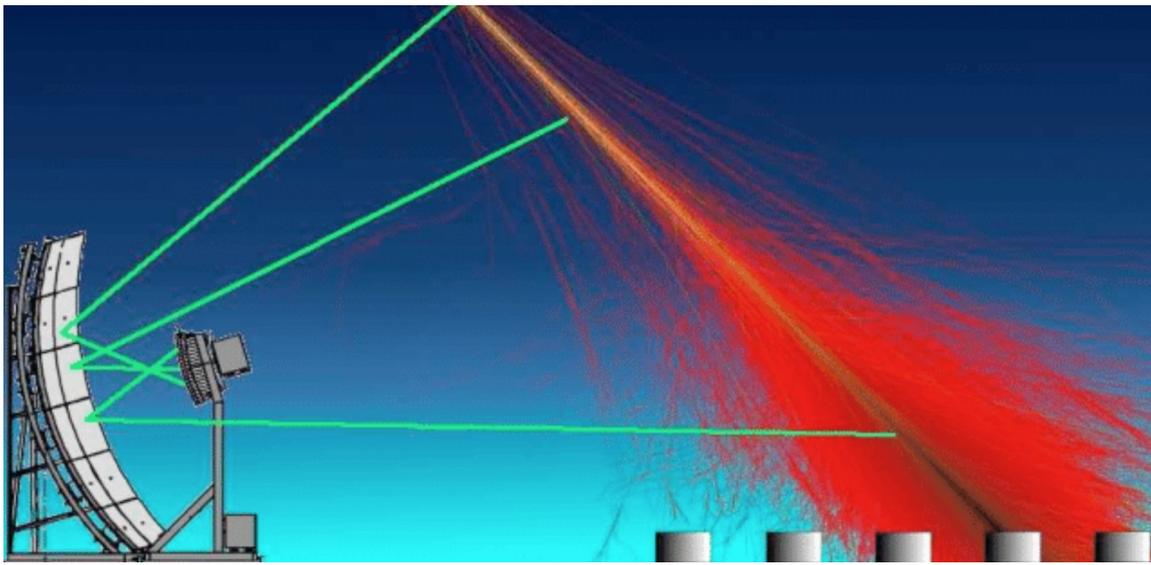


1.5 Km

1600 rivelatori
distribuiti su 3000 km²

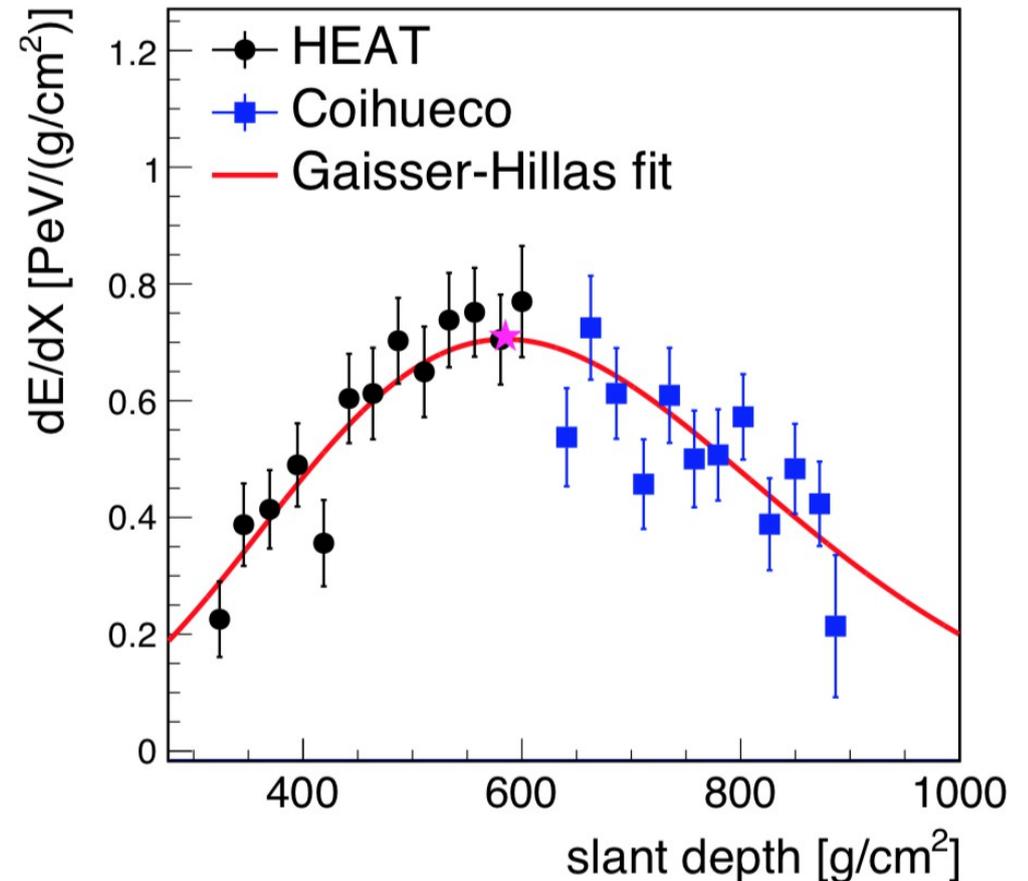
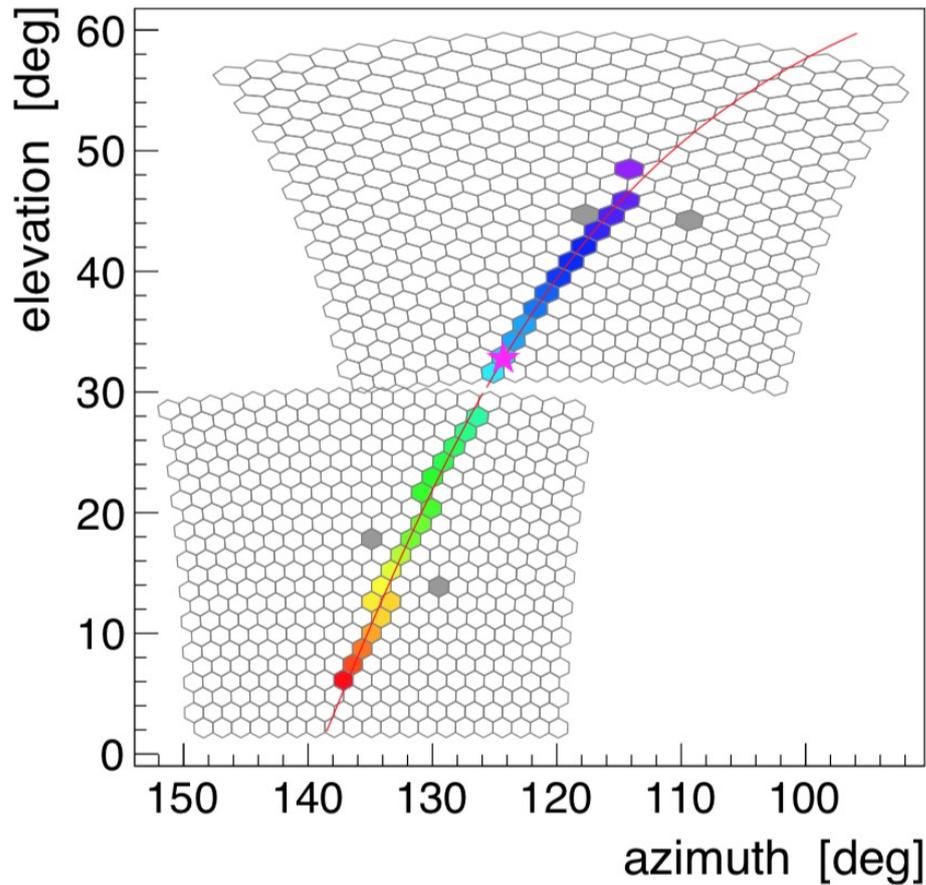
LIMITE DE L'ATMOSPHERE





Le molecole dell'aria sono eccitate dal passaggio delle particelle dello sciame e si diseccitano emettendo luce di fluorescenza

Rivelazione durante notti serene e senza luna



Da dove vengono i Raggi Cosmici ?

...e perché è così difficile rispondere ?

Perché le particelle con carica elettrica curvano nei campi magnetici che riempiono lo spazio interstellare

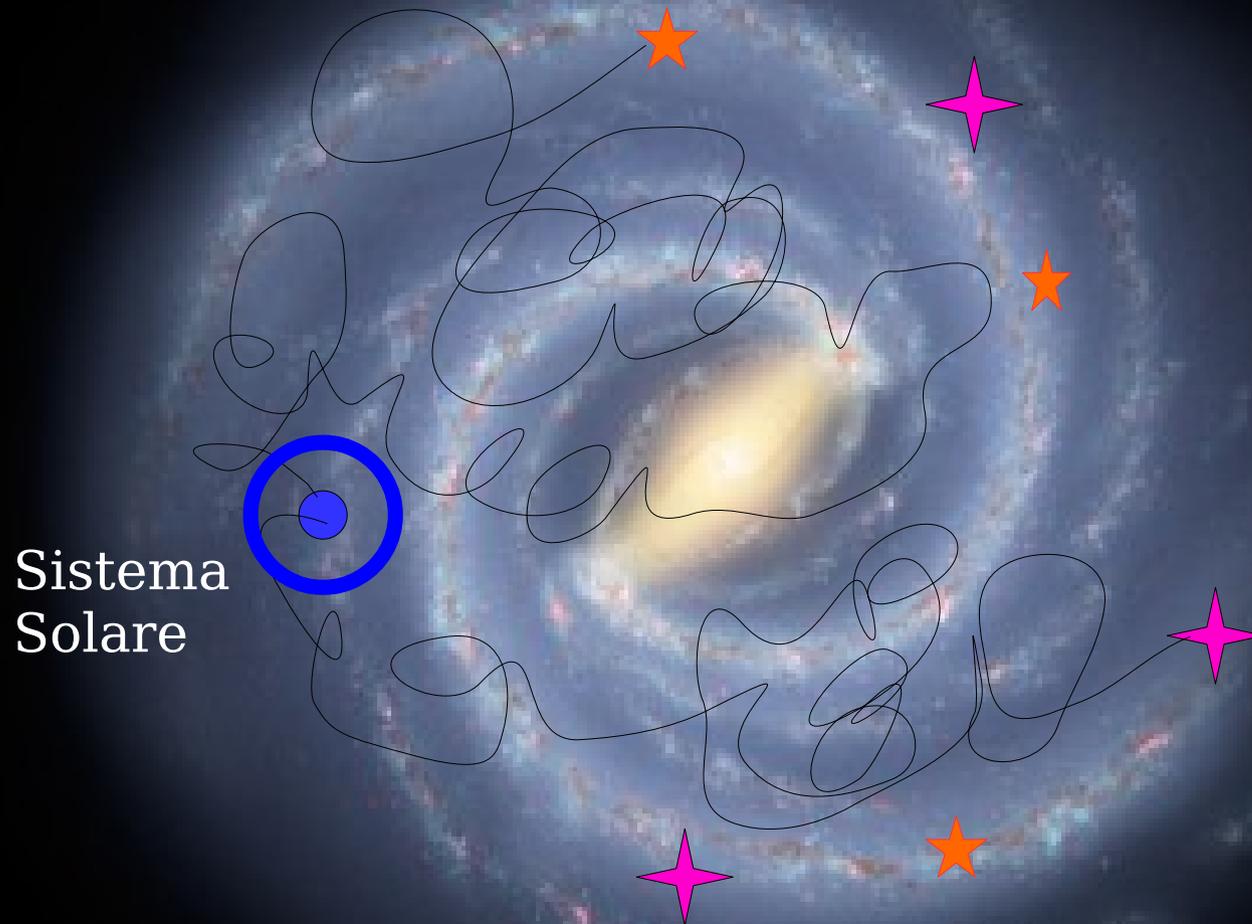
Le direzioni delle particelle sono rimescolate dai campi magnetici, ed arrivano in modo “isotropo” con la stessa probabilità da tutte le direzioni “dimenticando” la posizione delle loro sorgenti.

La maggior parte dei Raggi Cosmici viene accelerato da sorgenti distribuite in tutta la nostra Galassia

Quelli di energia più elevata vengono da distanze ancora maggiori, e nascono in sorgenti extragalattiche

Via Lattea

*Sorgenti
dei Raggi Cosmici
distribuite in tutta
la Galassia*



Sistema
Solare

Confinamento Magnetico

Raggio Cosmico
da sorgente
extragalattica



MILKY WAY

“Bolla” di Raggi Cosmici
generati da sorgenti
nella Galassia e
confinati dai
campi magnetici



LARGE MAGELLANIC CLOUD



SMALL MAGELLANIC CLOUD

Oggi sappiamo che esistono diverse sorgenti astrofisiche nella nostra Galassia e nello spazio extragalattico che riescono ad accelerare particelle ad altissima energia.

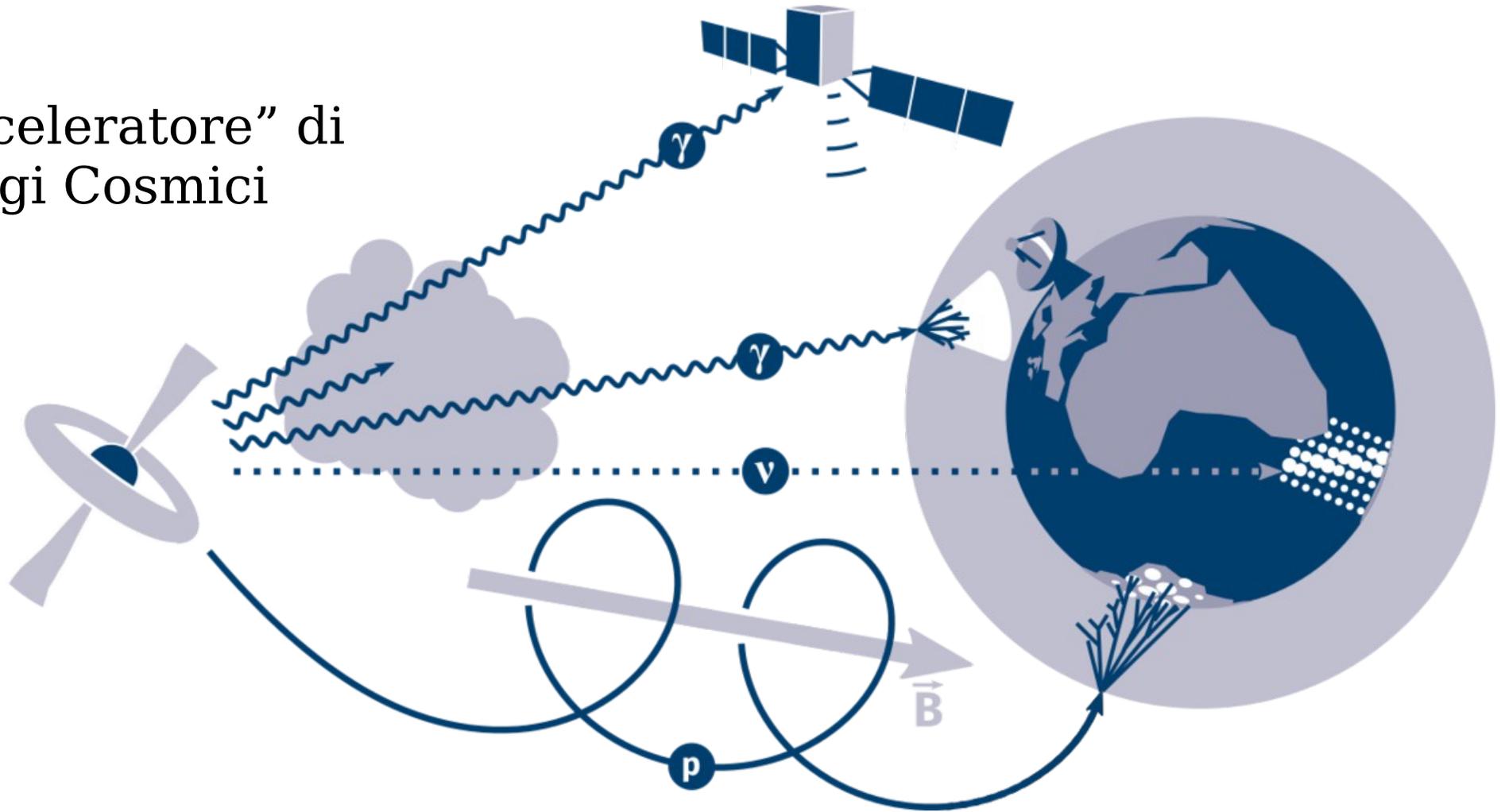
Come lo sappiamo ?

Astronomia Raggi Gamma
Astronomia dei Neutrini

Telescopi per raggi gamma (fotoni di alta energia)

Telescopi per neutrini

“Acceleratore” di Raggi Cosmici



I Raggi Cosmici possono interagire dentro la sorgente (con gas o radiazione) e creare fotoni e/o neutrini

Fotoni e neutrini hanno carica elettrica nulla e *viaggiano in linea retta* e se rivelati, formano un'immagine della sorgente

Sorgenti Astrofisiche capaci di accelerare Raggi Cosmici

“Oggetti” (o “Eventi”) affascinanti e straordinari

- Esplosioni di SuperNova
- Pulsars
- Buchi Neri Supermassivi al centro delle galassie
- Quasars
- Gamma Ray Bursts
- Coalescenze di stelle di Neutroni
- ...
- (cose ancora da scoprire)

L' Universo delle Alte Energie (che stiamo iniziando ad esplorare)

SuperNovae (eventi rarissimi)

歷代名臣奏議卷之三百一
灾祥

宋仁宗至和二年侍御史趙抃上言曰臣伏見自去年五月已來妖星遂見僅及周稔至今光耀未退此谷永所謂馳騁驟步芒炎長短所慙奸犯其為譎變甚可畏也又去冬連今春京東西路及陝右川蜀諸郡旱暵不雨麥苗焦死民既艱食寇攘必興此京房所謂欲德不用茲謂張厥災荒其為災沴復可懼也邇來岷峽山谷驚裂有聲他郡數處地亦震動此伯陽所謂陽伏而不能出陰迫而不能升蓋土失其性其為災異益可駭也夫燮調陰陽者三公之職天戒若曰陛下左右輔弼當得忠賢剛正之人為之乃可以召至和之氣消未萌之眚不然何以妖星謫變也旱暵災沴也地震祥異也三者咎應察明如是之著耶臣愚伏望陛下謹天之戒應天以實取天下公議與天下瞻望之所謂賢人君子者降之使居廟堂之上責以三公四輔之事業委注而仰成之若然則陰陽以和災異以消朝廷清明矣秋畏服太平之風可翹足引領而待之也臣朝夕思慮載惟擇賢命相繫國家休戚治亂之本伏願陛下慎重之然後發聖斷力行而不疑則宗廟社稷之福天下生靈之幸

起居舍人知諫院范鎮上奏曰臣伏見去冬多南風今春多西六風乍寒乍暑欲雨不雨又有黑氣蔽日此皆人事之所感動也黑氣陰也小人也日陽也君象也黑氣蔽日者陰侵陽小人惑君也欲雨不雨者政事不決也陳執中為相不病而家居者百日矣陛下以御史之言決一婢死而欲退宰相為是即乞速退執中以解天意以御史之言為非亦乞勅執中起視事無使天意久不決也寒暑者賞罰也乍寒乍暑者不當賞而賞當罰而不罰也鄧保吉有過於法不當為

Osservazioni degli astronomi imperiali in Cina di una
“nuova stella” (anno 1054)



Il cielo all'alba del 4 luglio 1054 nella città di Kaifeng in Cina (secondo gli astronomi dell'imperatore)



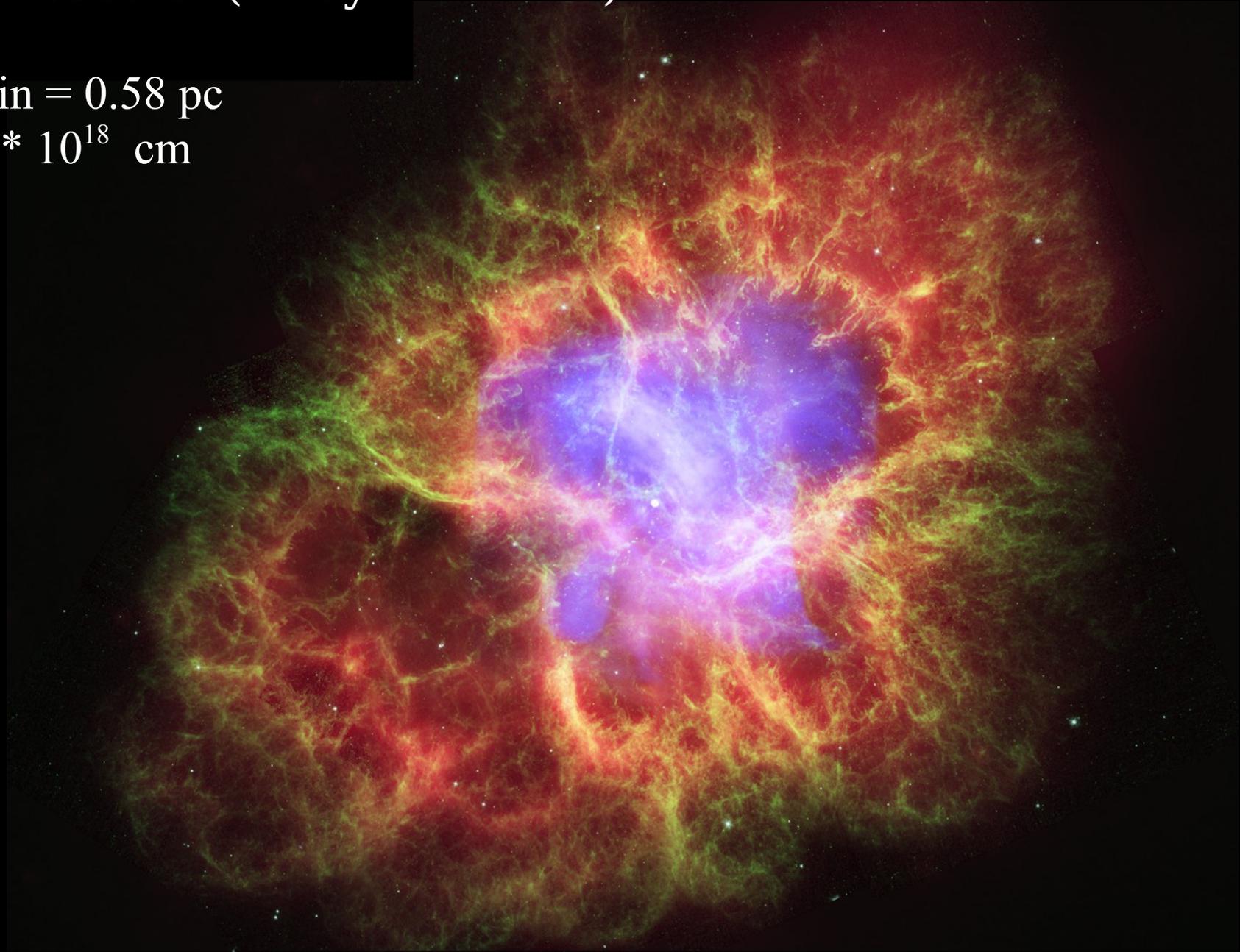
L'imperatore Enrico III nel 1054 guardando la "nuova Stella"



La Supernova del 1054 vista oggi
(La Nebulosa del Granchio)

Crab Nebula (X-ray + Visible)

1 arcmin = 0.58 pc
= $1.8 * 10^{18}$ cm

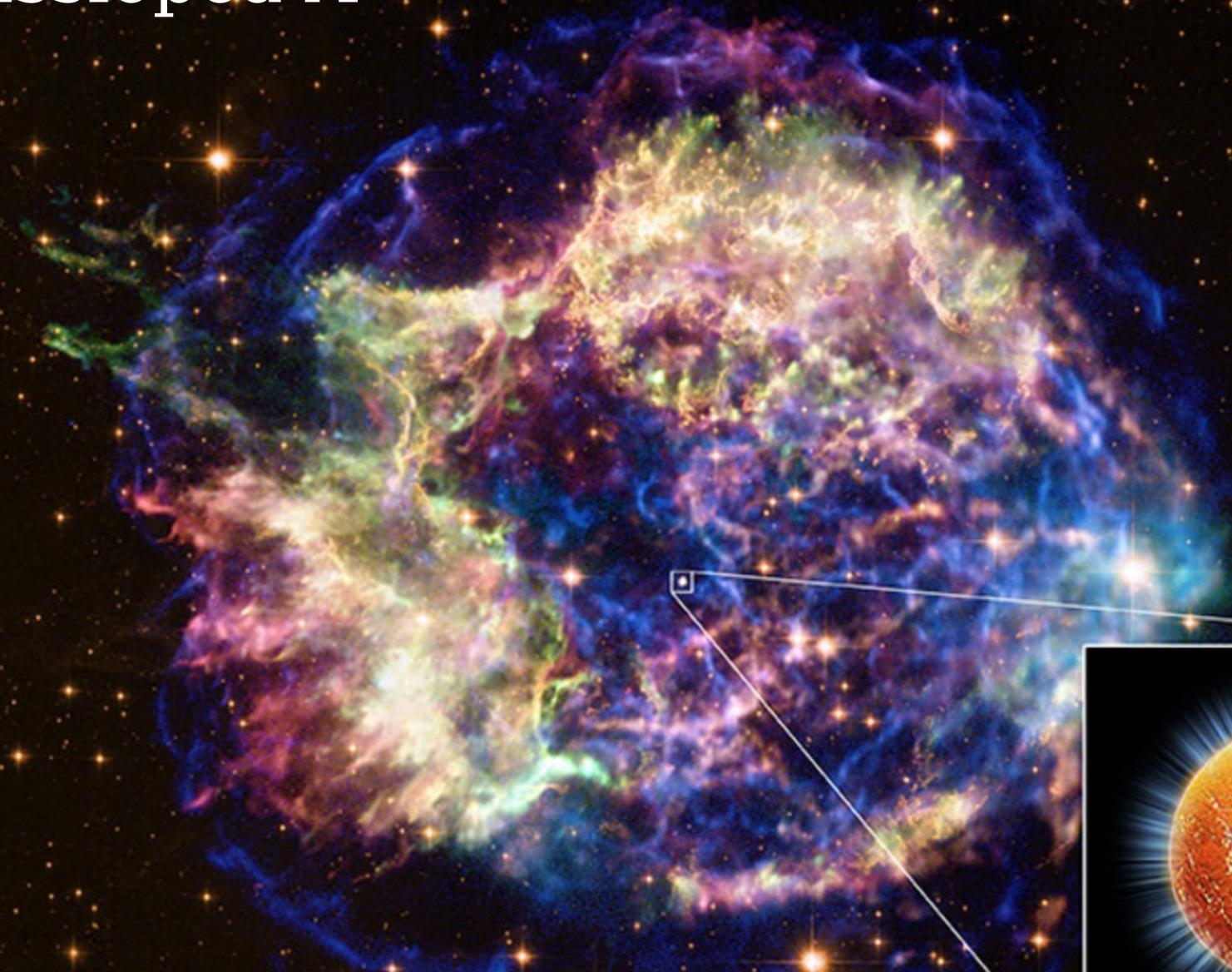


6 arcminutes

Pulsar
Period 0.033 sec

[HTTP://CHANDRA.HARVARD.EDU](http://chandra.harvard.edu)

Cassiopea A

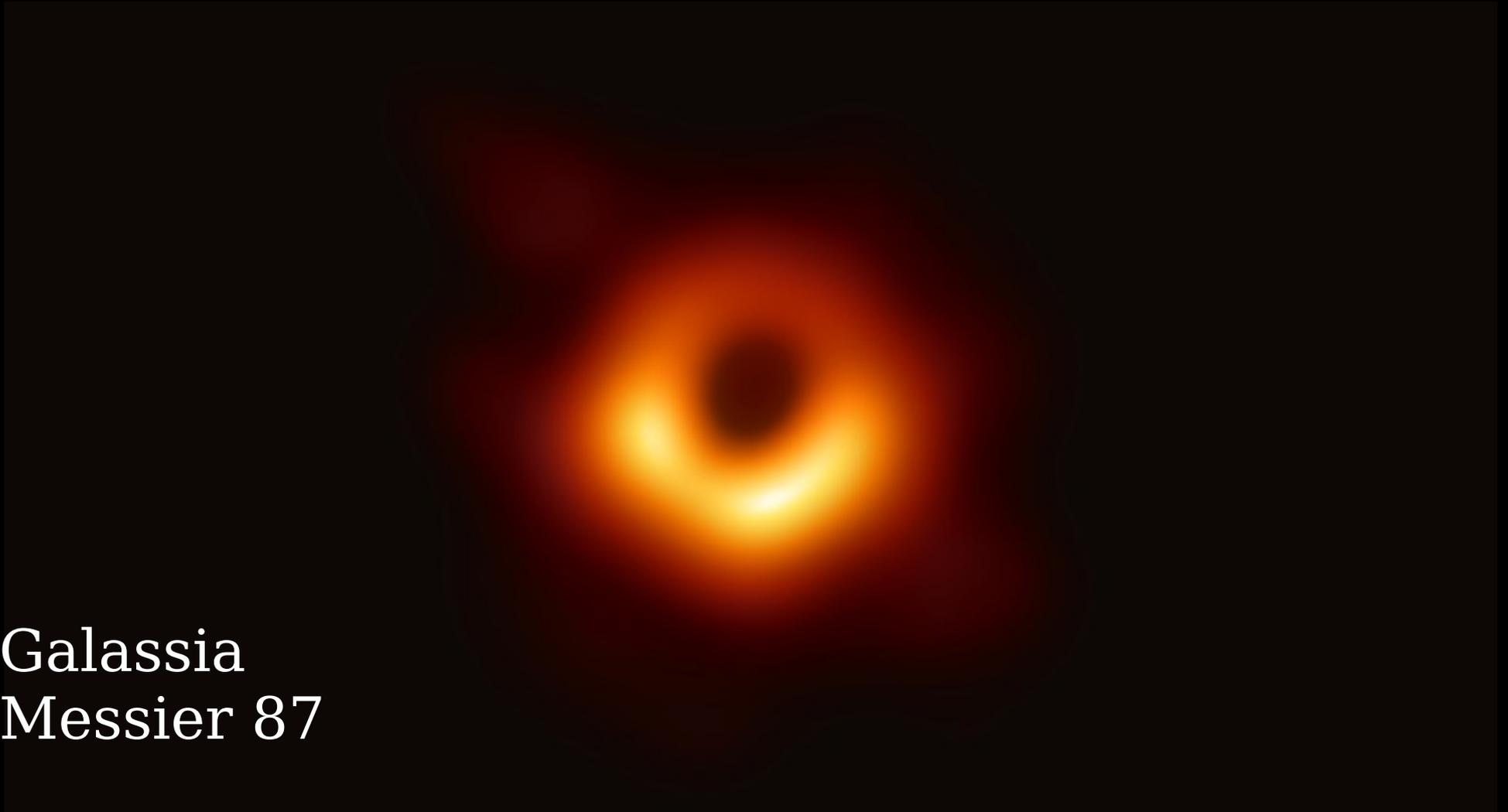


diameter = 10 anni luce
distance = 10000 anni luce

SN : 16 august 1680 [Astronomer Royal John Flamsteed]

X-ray: NASA/CXC/UNAM/loftis/D. Page, P. Shternin et al;
Optical: NASA / STScI; Illustration: NASA/CXC/M. Weiss

La prima immagine di un buco Nero (Pubblicata Aprile 2019)

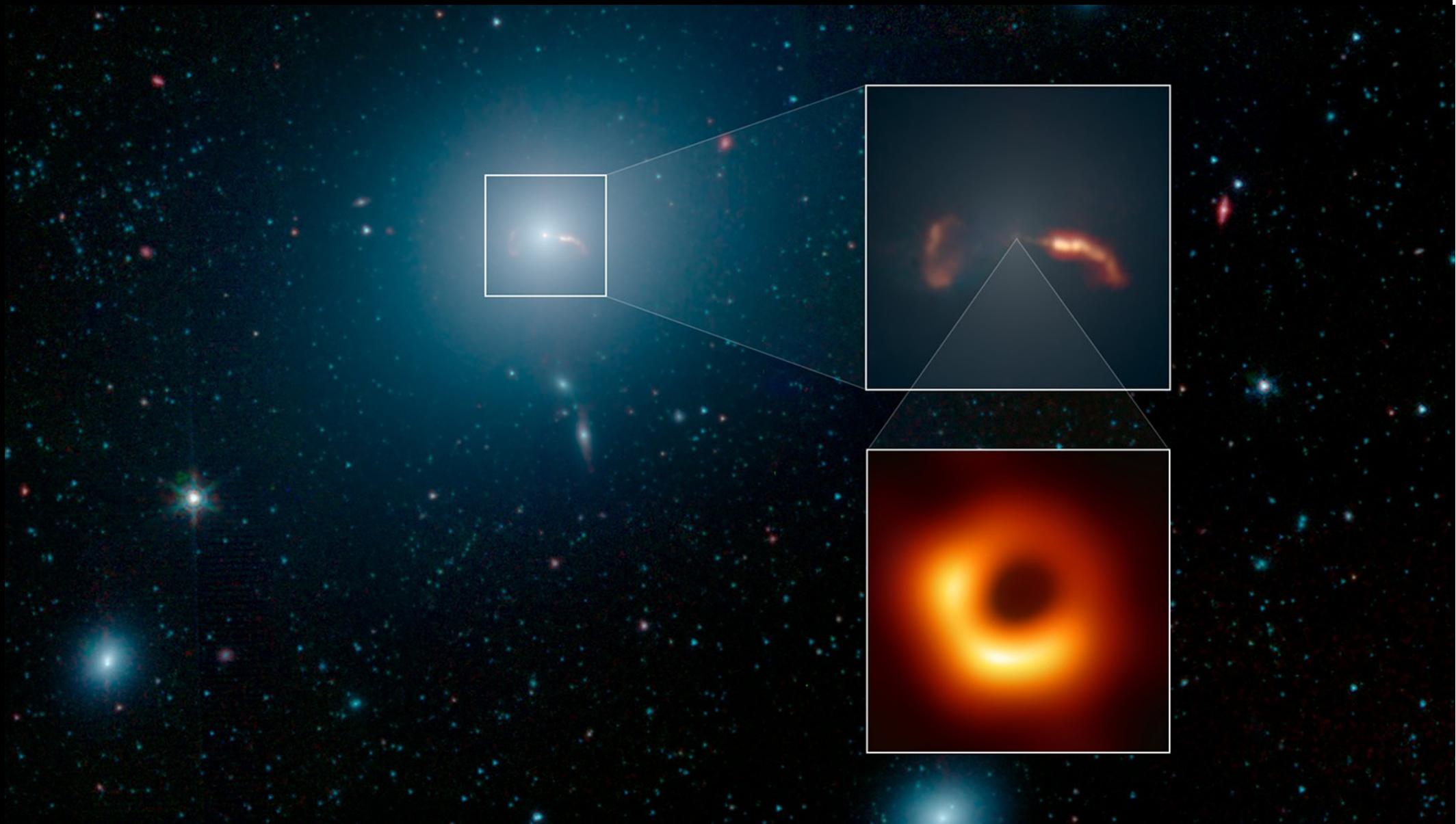


Galassia
Messier 87

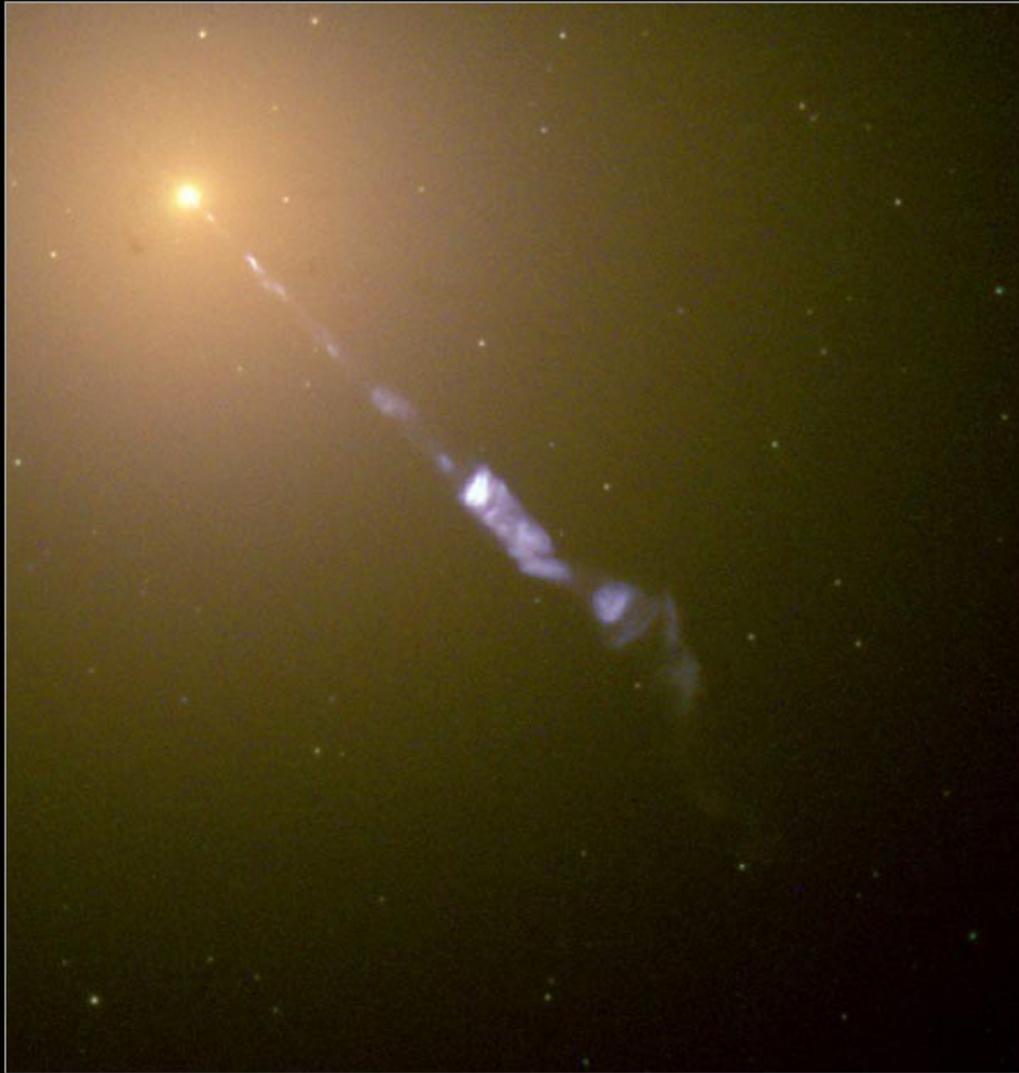
55 Milioni di anni luce
dalla Terra

$$M = (6.5 \pm 0.7) \times 10^9 M_{\odot}$$

M87 (d=55 Millions di anni luce)



The M87 Jet



Hubble
Heritage

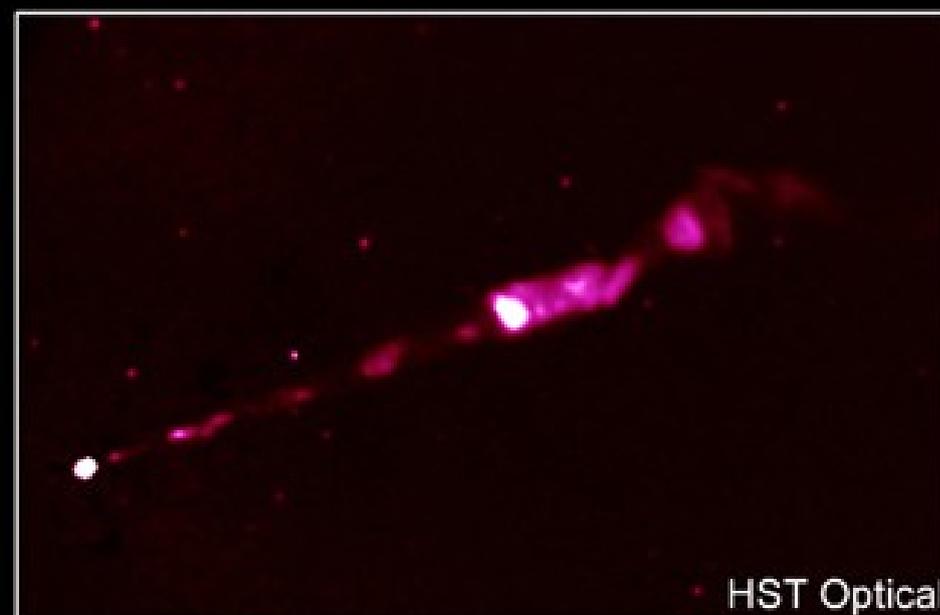
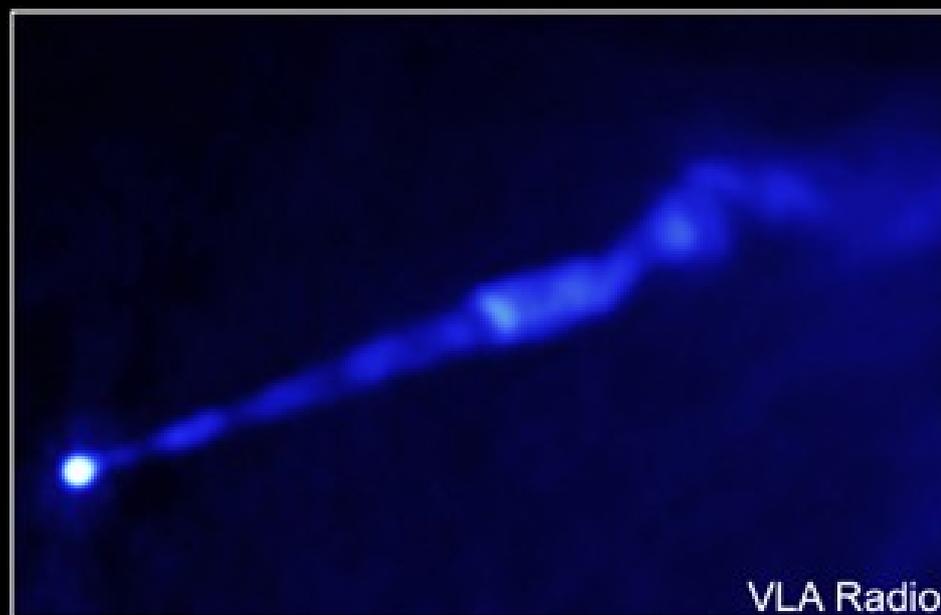
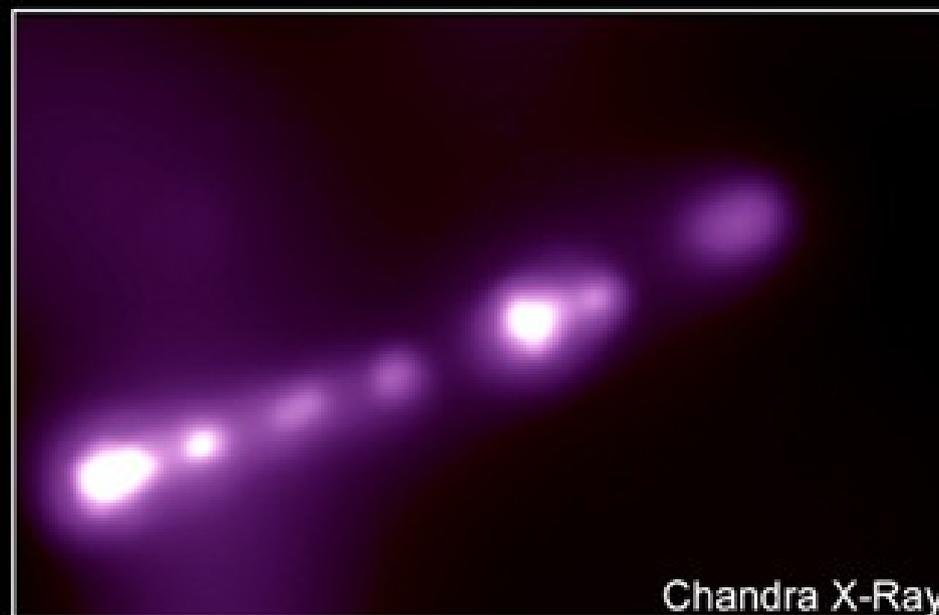
M87 JET

Heber Curtis (1918)
[Lick Observatory]

“Descriptions of 762
Nebulae and Clusters”

“...Uno strano raggio
diritto apparentemente
connesso al nucleo da
una sottile linea di materia”

M 87

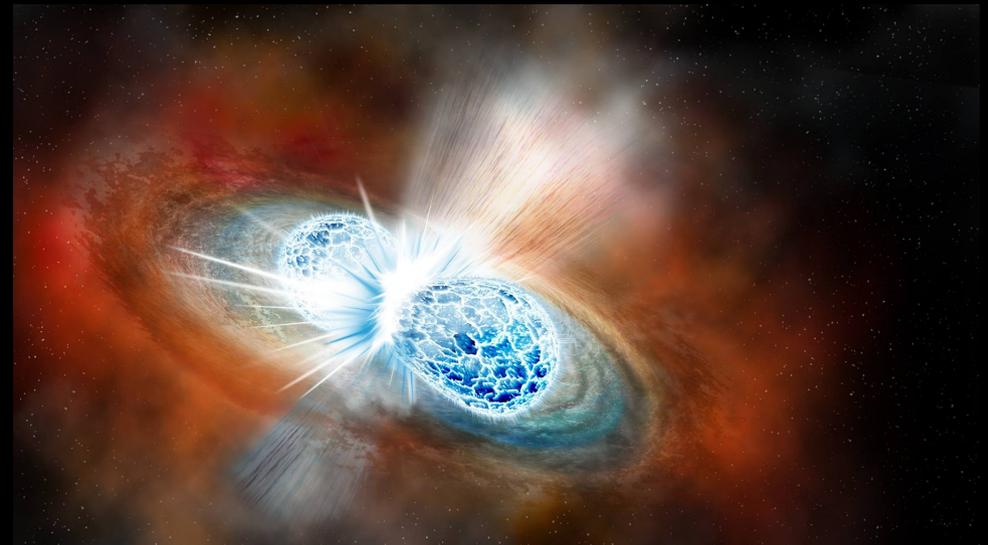
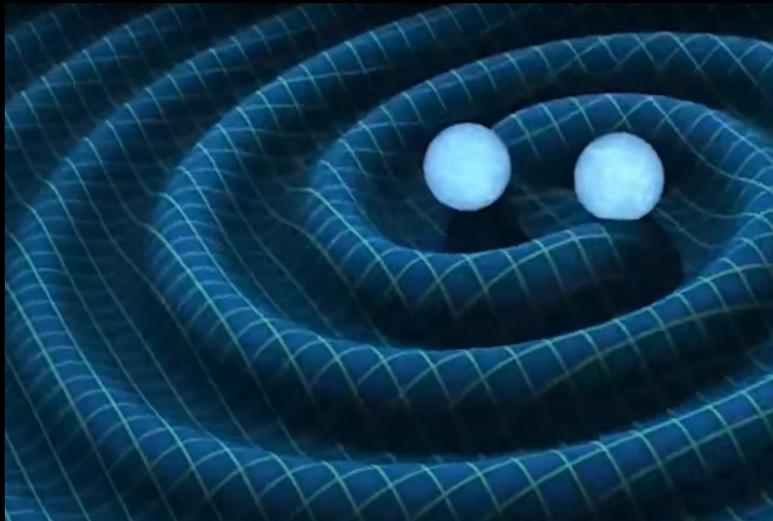


Primo "Jet" astrofisico [1913 Heber Curtis]

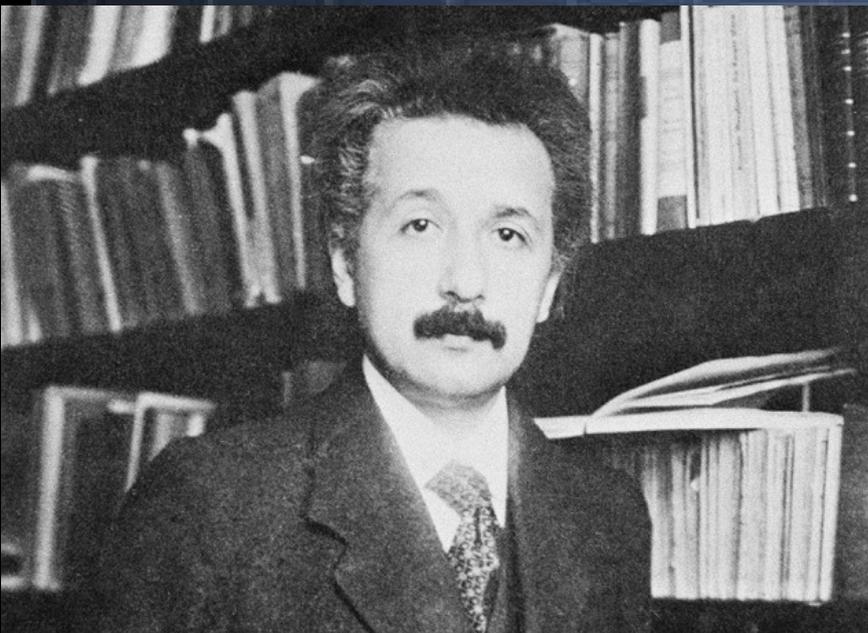
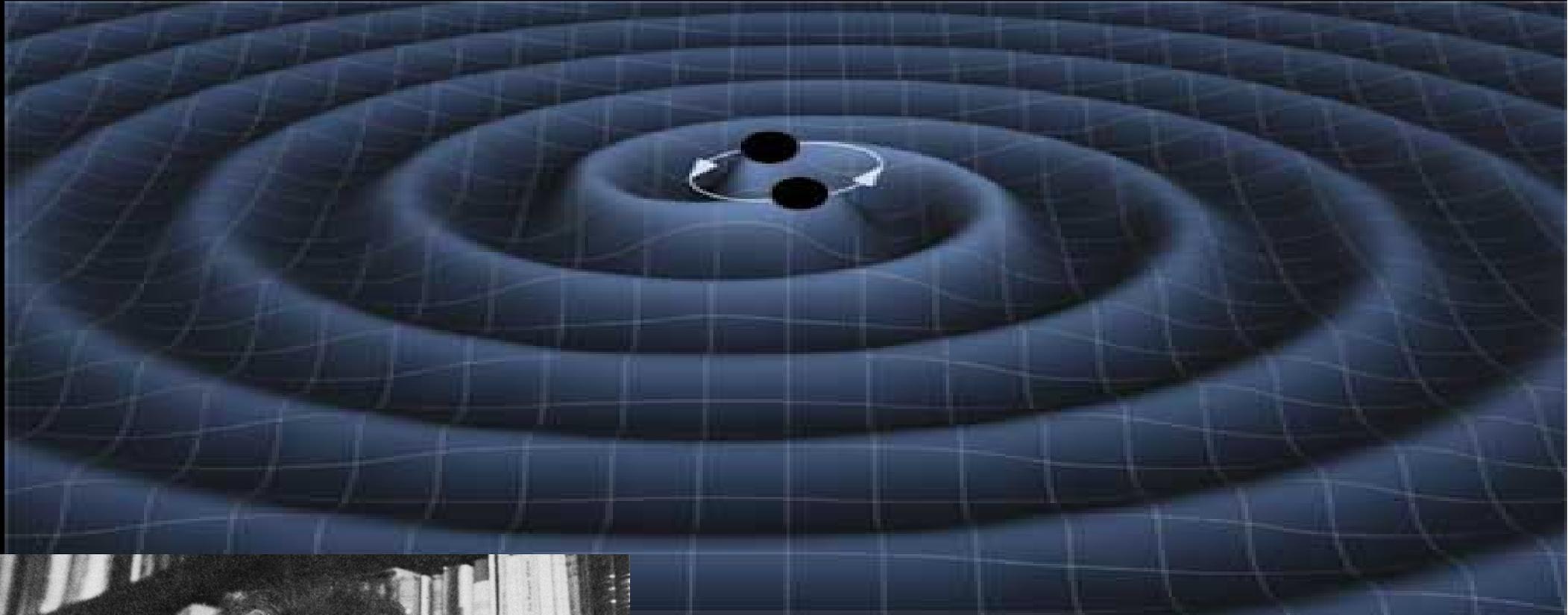
17 Agosto 2017

Coalescenza (fusione) di un sistema di due stelle di Neutroni osservata dai **rivelatori di Onde Gravitazionali** (LIGO e VIRGO)

e come “Short Gamma Ray Burst” da due telescopi per raggi gamma su satellite (Fermi-GBM ed Integral)



Onde Gravitazionali

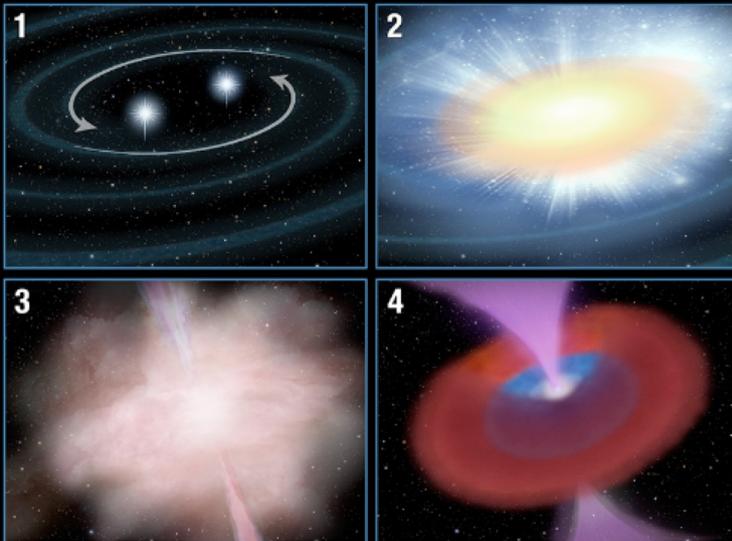


Galassia
NGC 4993

distanza = 140 Milioni di anni luce

GW 170817

Neutron Star Collision Creates Kilonova



La scoperta dei Raggi Cosmici
all'inizio del XX secolo fu un'enorme sorpresa.

In un secolo abbiamo imparato moltissimo,
ma molto resta ancora da capire e da scoprire.

Lo studio di questi fenomeni affascinanti
continua, e richiede lo sviluppo e la costruzione
di nuovi strumenti, sempre più sensibili.
Nuovi “telescopi” che ci permetteranno di
*guardare il cielo in modo nuovo
e sempre più profondo.*

Sono alla fine della mia presentazione....



Le Pleiadi (Ammasso di stelle nella costellazione del Toro)



Galileo Galilei (1610) schema delle Pleiadi viste con il telescopio. **Nuove stelle diventano visibili**



L' "Universo delle Alte Energie" è ancora pieno di misteri. Nuovi telescopi ci permetteranno di guardare più profondamente il cielo, scoprire "nuove stelle" e nuove meraviglie