

Discover Cosmic Rays

I RAGGI COSMICI

Edoardo Bossini,
INFN- Pisa

INTERNATIONAL COSMIC DAY

Cosmic particles, these unnoticed particles that surround us all the time, are the focus of this day. Students, teachers and scientists get together to talk and learn about Cosmic particles from the cosmos

November 21 | 2023

Image credit: DESY, Science Communication Lab

La scoperta della radiazione

La radiazione cosmica era sconosciuta all'inizio del 1900.

Un elettroscopio si scaricava spontaneamente, anche quando non c'era alcuna sostanza radioattiva nelle vicinanze, indicando la presenza di una qualche forma di radiazione ionizzante.

ELETTROSCOPIO: recipiente isolante e trasparente, nel quale è inserita, attraverso un tappo isolante, un'asticciola terminata in alto da una sferetta ed alla quale in basso sono appese due foglie sottilissime d'oro o d'alluminio; avvicinando un corpo elettrizzato, le foglie divergono in virtù delle azioni repulsive dovute alla carica, dello stesso segno, che è indotta su di esse

Scoperta di una forma di radiazione ignota



Da dove viene? (1911-12)

Si può tentare di rispondere alla domanda misurando la variazione del tasso di ionizzazione:

sott'acqua (Domenico Pacini, 1911) in quota (Victor Hess, 1912)



Da dove viene? (1911-12)

A partire dal 1910 di fronte all'Accademia Navale di Livorno, Pacini inizia uno studio sistematico della radiazione penetrante sul suolo e sul mare.



Un elettroscopio di Wulf **viene immerso sott'acqua** a 300 m dalla riva, a 3 m di profondità:

- media di ioni misurati alla superficie: 11 per cm^3 per secondo
- media di ioni misurati a 3 m di profondità: 8,9 per cm^3 per secondo
- differenza di 2,1 ioni (circa del 20%).

l'intensità della radiazione penetrante diminuisce!

Questa differenza è consistente con l'assorbimento da parte dell'acqua di una radiazione esterna.

“Nuovo Cimento” VI/3, nel 1912: *“esiste nell'atmosfera una sensibile causa ionizzante, con radiazioni penetranti, indipendente dall'azione diretta delle sostanze attive nel terreno”*

Un'esperienza....ripetibile (1)

GIORNALE DI FISICA

VOL. XLII, N. 2

Aprile 2011

L'esperimento di Pacini sull'origine dei raggi cosmici

G. Batignani, G. Cerretani

Corso di laurea in Fisica dell'Università di Siena. Siena, Italy

M. Bitossi, R. Paoletti

Dipartimento di Fisica dell'Università di Siena e INFN Pisa

A. De Angelis

Dipartimento di Matematica e Informatica dell'Università di Udine e INFN Trieste



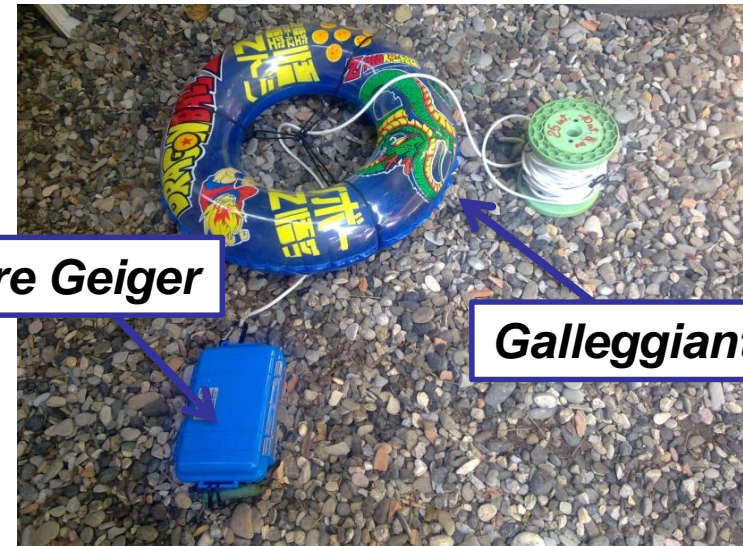
ICD 2023

ICD 2019



Contatore Geiger

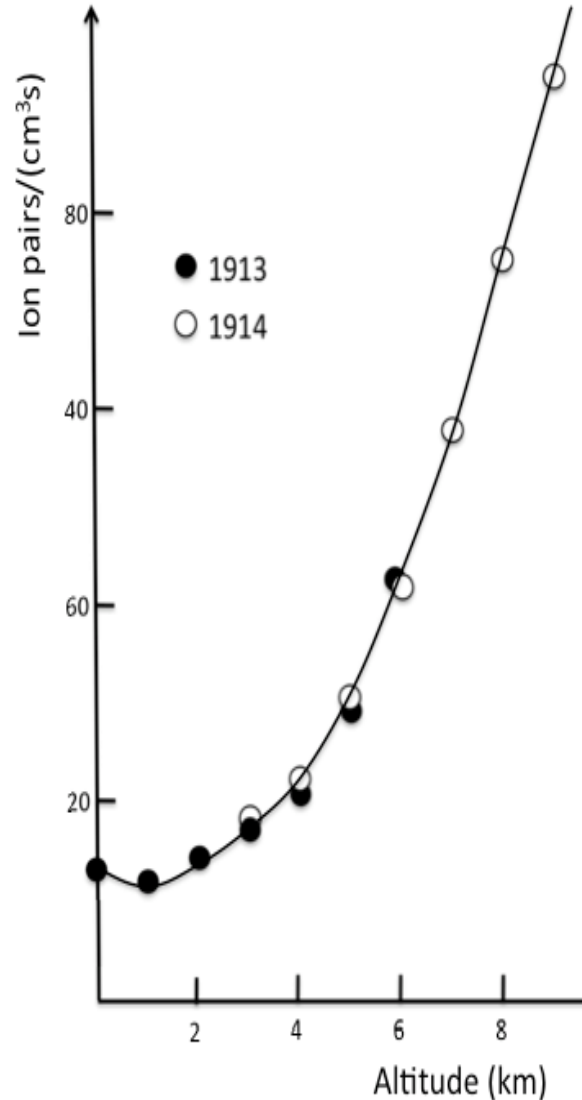
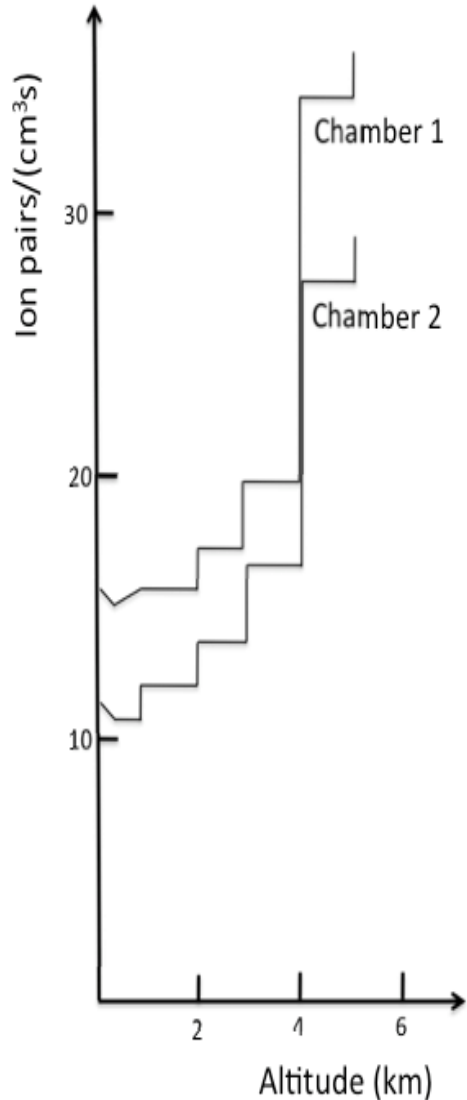
Galleggiante



5

5

Studi in quota



Victor Hess (1912):

Dimostra l'origine extraterrestre della radiazione

Premio Nobel nel 1936

Ipotizzando che la radiazione fosse di origine extraterrestre, dotato di alcuni elettroscopi, Hesse effettuò una decina di ascensioni in pallone.

L'intensità della radiazione effettivamente cresceva con l'altezza raggiungendo a 5000 m un valore 3-5 volte maggiore di quello a livello del mare.

Doveva esistere una fonte di radiazione notevole, con origine nello spazio esterno alla Terra, radiazione che penetrava nell'atmosfera terrestre, e diminuiva di intensità con lo spessore attraversato.

Un'esperienza....ripetibile (2)



PROCEEDINGS
OF SCIENCE

The MIRACLE Experiment: a cosmic rays' laboratory on a balloon

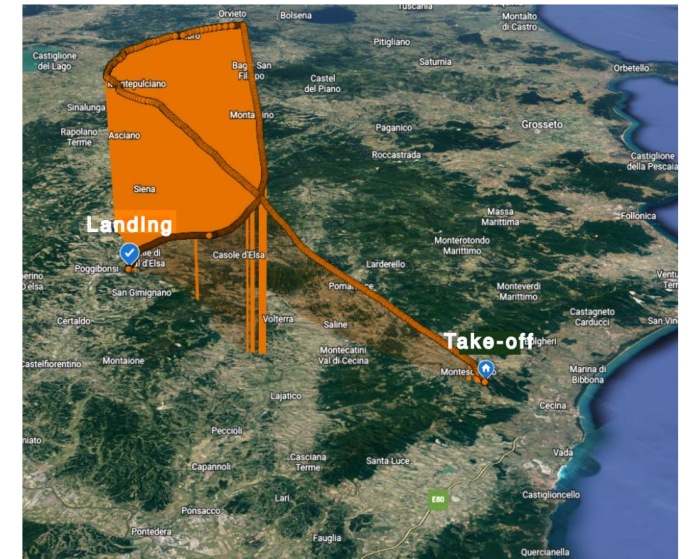
A. Venturini,^{a,*} V. Floris,^a M. Gemignani,^b G. Lamanna,^{a,c} S. Marcuccio,^b F. Morsani,^{c,d} D. Passaro,^a F. Pilo,^{c,d} D. Riccardi,^a M. Riggirello^a and N. Torrini^b

^aUniversity of Pisa; Dept. of Physics, Largo B. Pontecorvo 3, 56127 Pisa, Italy

^bUniversity of Pisa; Dept. of Civil and Industrial Engineering, 56127 Pisa, Italy

^cINFN Sezione di Pisa; Largo B. Pontecorvo 3, 56127 Pisa, Italy

^dOCRA Group

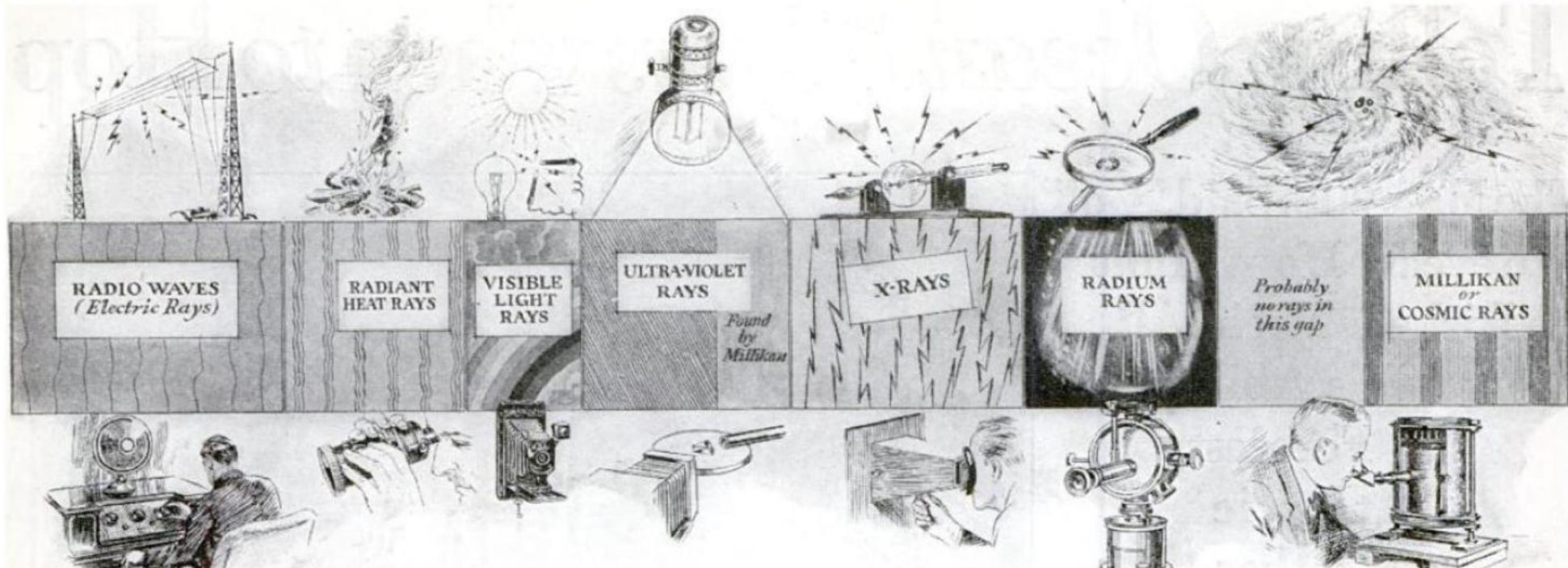


Cosa sono raggi cosmici?

Un' ipotesi



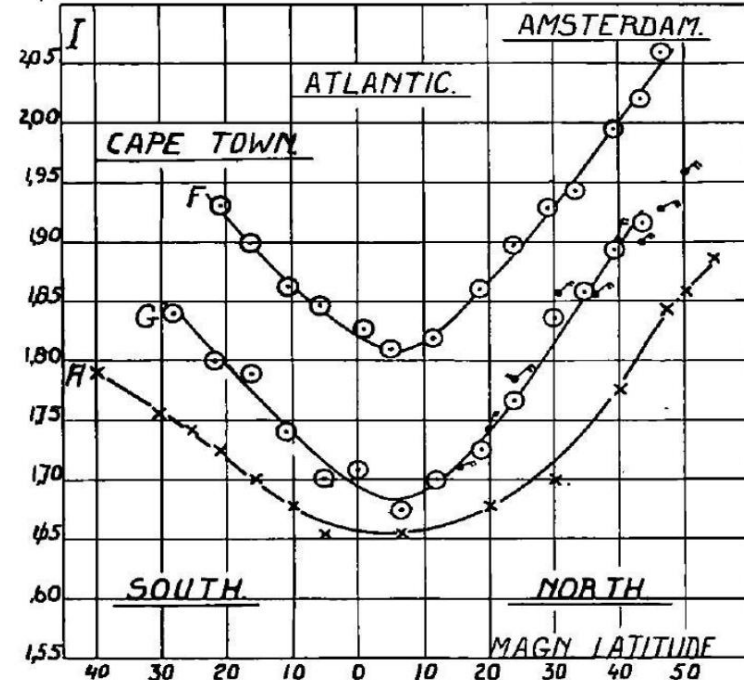
Super-Rays Reveal Secret of Creation



J. Clay – particelle cariche?

Una misura

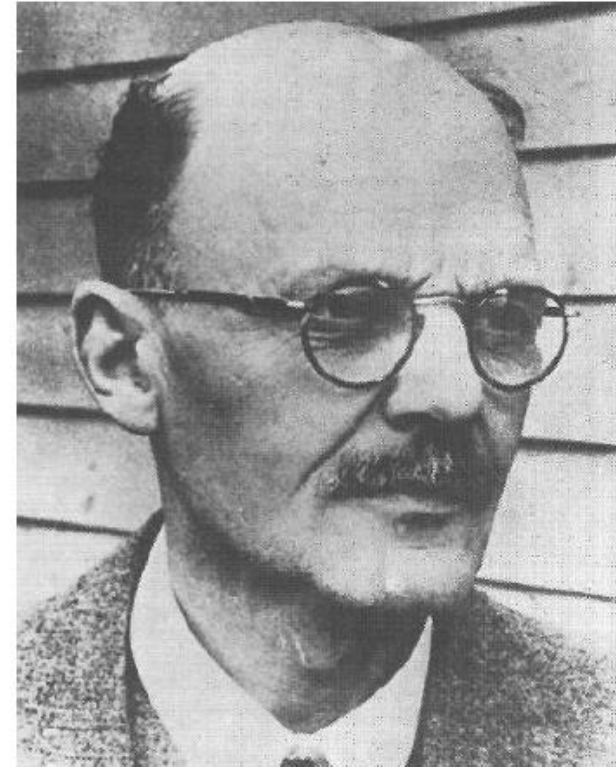
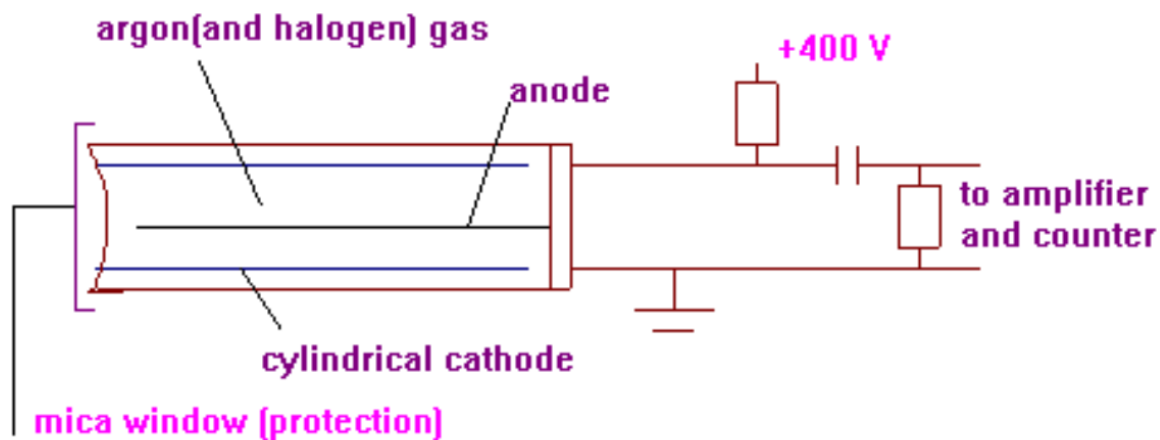
- Data la sua capacità di penetrare attraverso le schermature, si riteneva che la radiazione cosmica fosse costituita da raggi gamma, al tempo unica fonte nota con tali caratteristiche.
- L'effetto geomagnetico sui RC (dipendenza del flusso dalla latitudine) fu scoperta accidentalmente nel 1927 dal ricercatore tedesco J. Clay. → **parte dei raggi cosmici è elettricamente carica.**
- Clay stava facendo misure a Java; nel 1927 trasportò il rivelatore in viaggio verso Genova e lo utilizzò durante il viaggio
- Confermato dallo stesso Clay nel 1928 (da Java a Amsterdam), da Kolhörster, da Rossi, da Compton.



Nuova strumentazione per nuove misure - Il contatore Geiger

*Un grosso passo avanti venne fatto nel 1928, Con lo sviluppo di un particolare tipo di rivelatore, il **contatore Geiger-Muller**, ad opera di Hans Geiger and Walther Muller.*

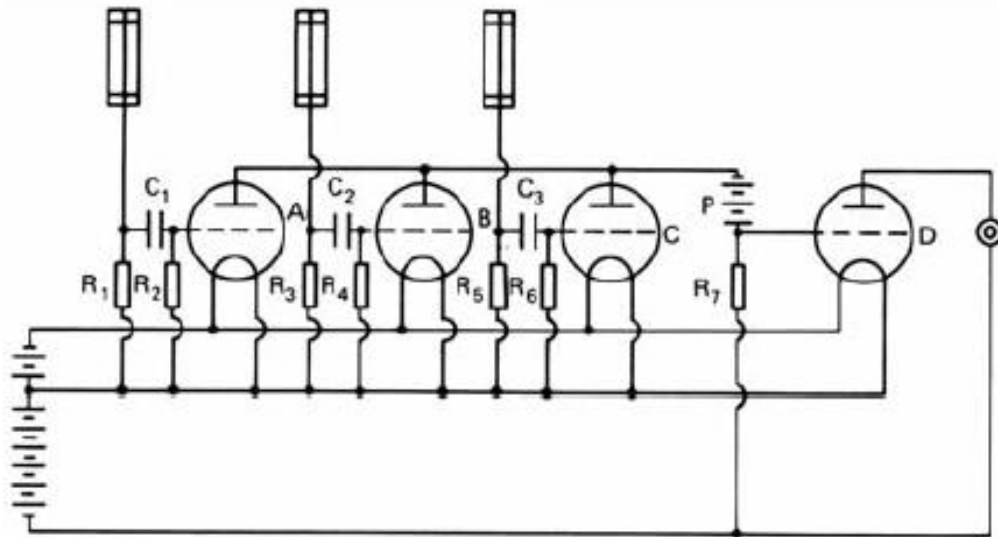
Era possibile contare le particelle ed individuare il momento «esatto» del loro passaggio!!



Hans Geiger

Nuova strumentazione per nuove misure – Elettronica di coincidenza

A Firenze negli anni '30 Bruno Rossi sviluppa i primi circuiti di coincidenza elettronici, basati sull'uso di valvole termoioniche.

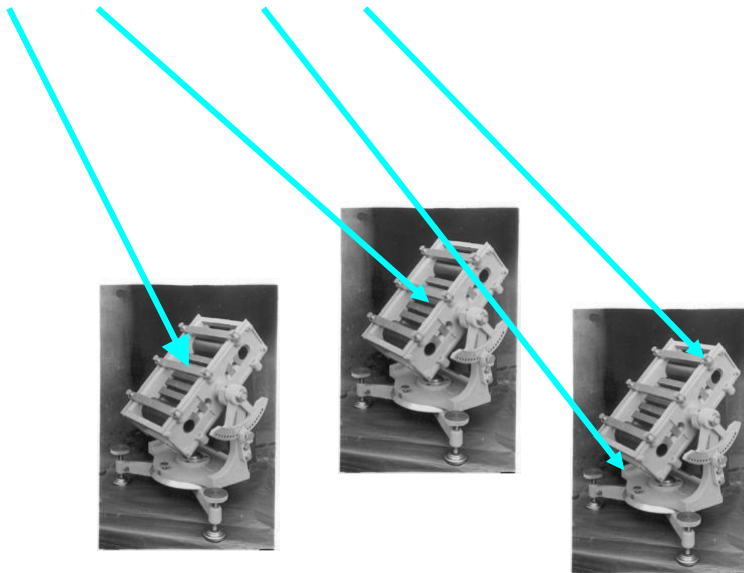


Quando le griglie di tutti i triodi vengono portate simultaneamente a un potenziale negativo dalle coincidenti scariche di tutti i contatori, si produce un impulso di potenziale che viene inviato a un elettrometro, le cui deviazioni vengono registrate fotograficamente.

Lo “sciame”

1933 – Asmara, Eritrea.

“ ... parrebbe che di tanto in tanto giungessero sugli apparecchi degli sciami molto estesi di corpuscoli i quali determinavano coincidenze fra contatori, anche piuttosto lontani l’uno dall’altro. Mi è mancato purtroppo il tempo di studiare più da vicino questo fenomeno ...”.



Questa, forse, fu la prima osservazione degli sciami estesi dell’atmosfera, EAS, Extensive Air Showers

Lo “sciame”

1938 – Parigi.

Usando contatori Geiger-Müller in coincidenza tra loro, Pierre Auger e Roland Maze dimostrano che contatori disposti a diversi metri l'uno dall'altro registrano contemporaneamente l'arrivo di particelle da raggi cosmici.



Ulteriori esperimenti sulle Alpi, presso le stazioni di Pic du Midi e di Jungfrauoch, rilevano coincidenze tra contatori disposti anche a distanze di 200 metri l'uno dall'altro.

E' la conferma definitiva dell'esistenza degli sciame atmosferici estesi, una cascata di particelle secondarie e nuclei prodotti dalla collisione di raggi cosmici primari di alta energia con le molecole dell'aria.

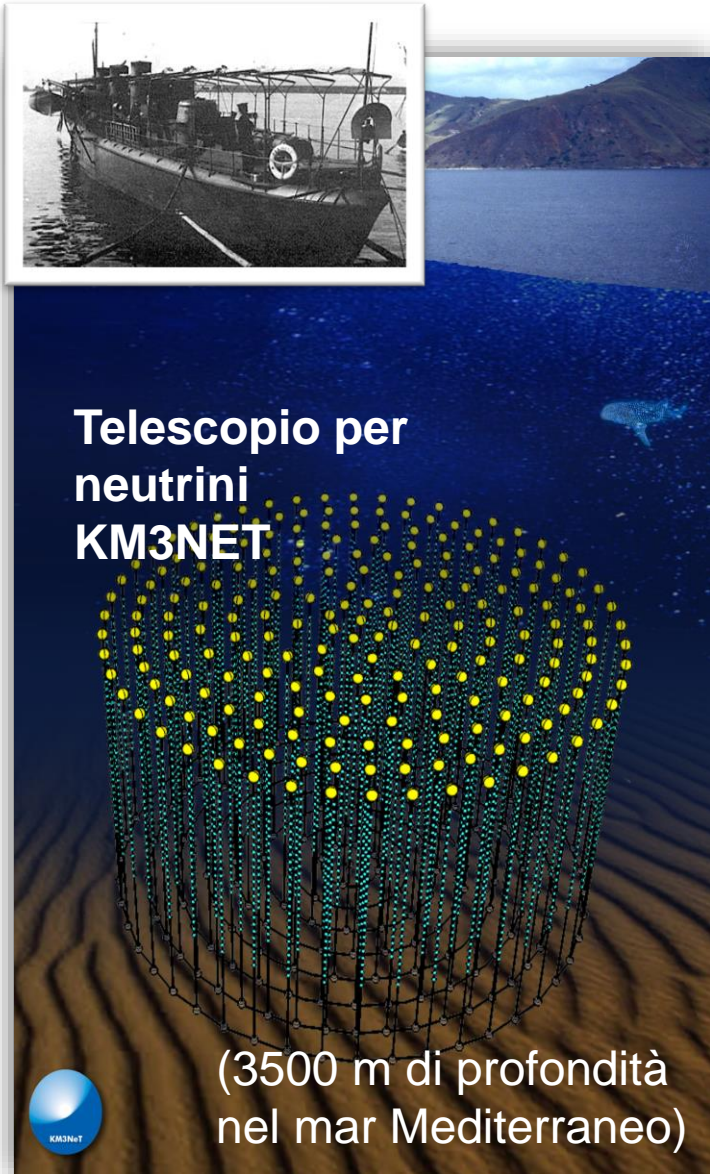
Un nuovo mondo

Negli anni dal 1937 ai primi anni '50 una serie ulteriore di osservazioni condotte con camera a nebbia in vari luoghi mostrarono evidenza di altre particelle prodotte dalla radiazione cosmica, dando luogo ad una “giungla” di particelle, confermata anche dai primi studi con gli «acceleratori» di particelle.

Dagli anni '50 in poi si ha una rappresentazione coerente del fenomeno dei raggi cosmici, dalla radiazione primaria, alla sua interazione con l'atmosfera e il conseguente sviluppo dello sciame che si propaga fino alla superficie terrestre.

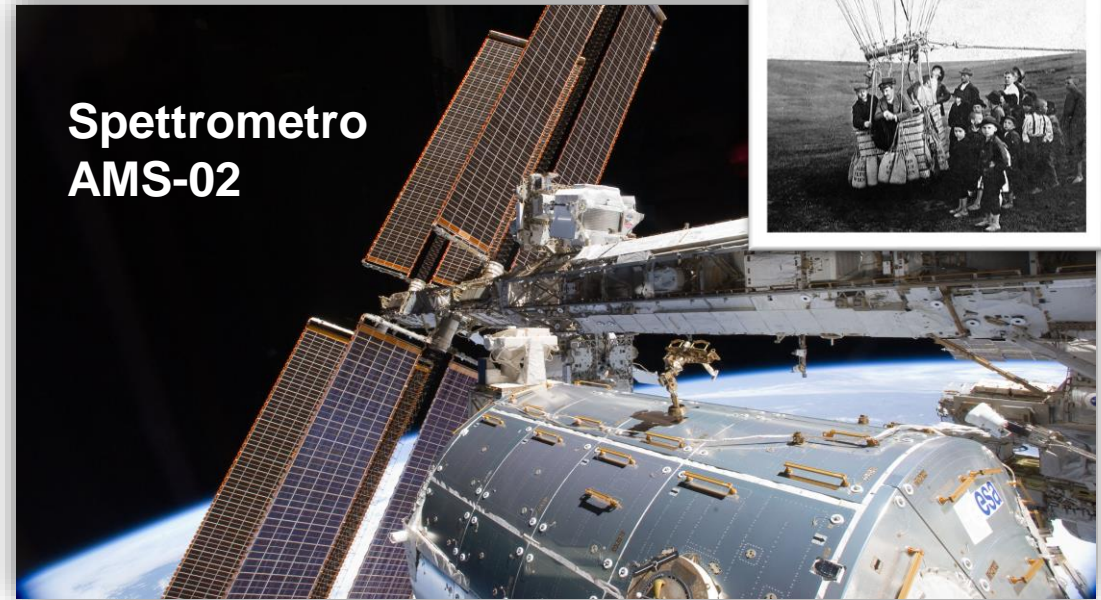


L'era moderna



Telescopio per neutrini
KM3NET

(3500 m di profondità nel mar Mediterraneo)



Spettrometro
AMS-02



Osservatorio
Pierre Auger

γ -ray enters the atmosphere

Electromagnetic cascade

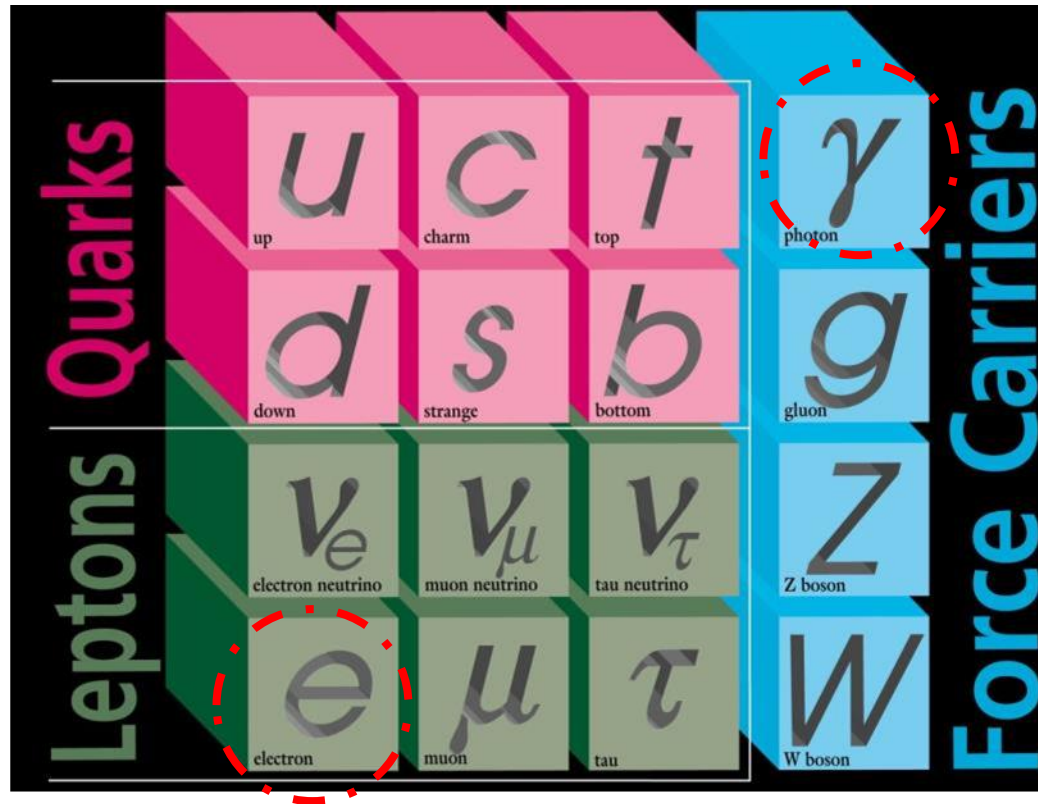
Primary γ

10 nanosecond snapshot

0.1 km² "light pool", a few photons per m².

Magic - CTA

Nuovi attori



4 Forze fondamentali:

- Forte
- Debole
- Elettromagnetica
- Gravitazionale

Dove sono il protone e il neutrone?

I muoni sono particelle con una vita media di $\sim 2.2 \mu\text{s}$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e$$

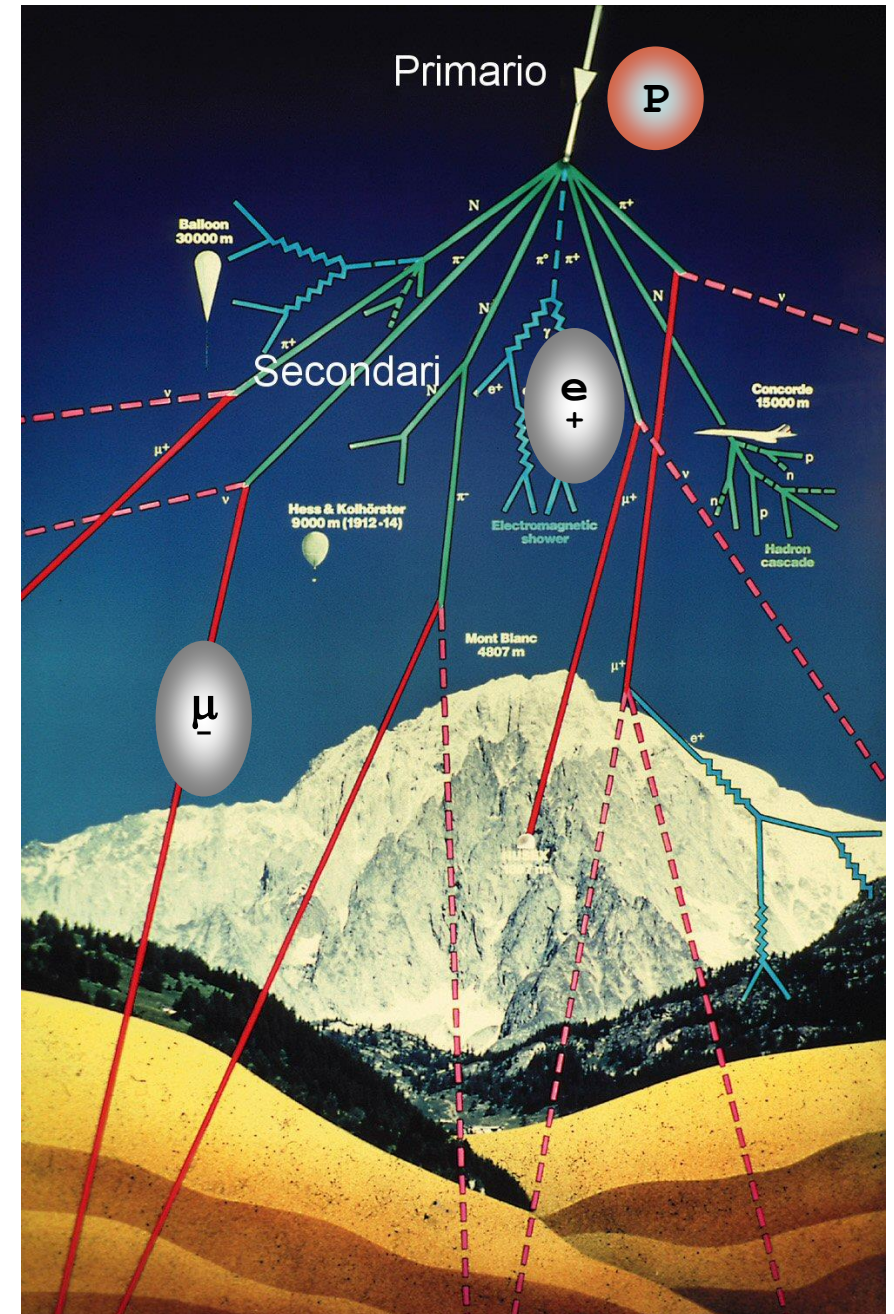
I raggi Cosmici

Una **pioggia invisibile** di circa 100 particelle elementari per m^2 al secondo raggiunge continuamente la superficie terrestre

Paragonabile al numero di gocce d'acqua che cadono a terra durante una pioggia moderata (4-5 mm/h)

Del totale circa 1 particella al cm^2 al minuto è costituito da radiazione ionizzante

IONIZZAZIONE: generazione di uno o più ioni a causa della rimozione o addizione di elettroni da una entità molecolare neutra (cioè atomi o molecole), che può essere causata da collisioni tra particelle o per assorbimento di radiazioni

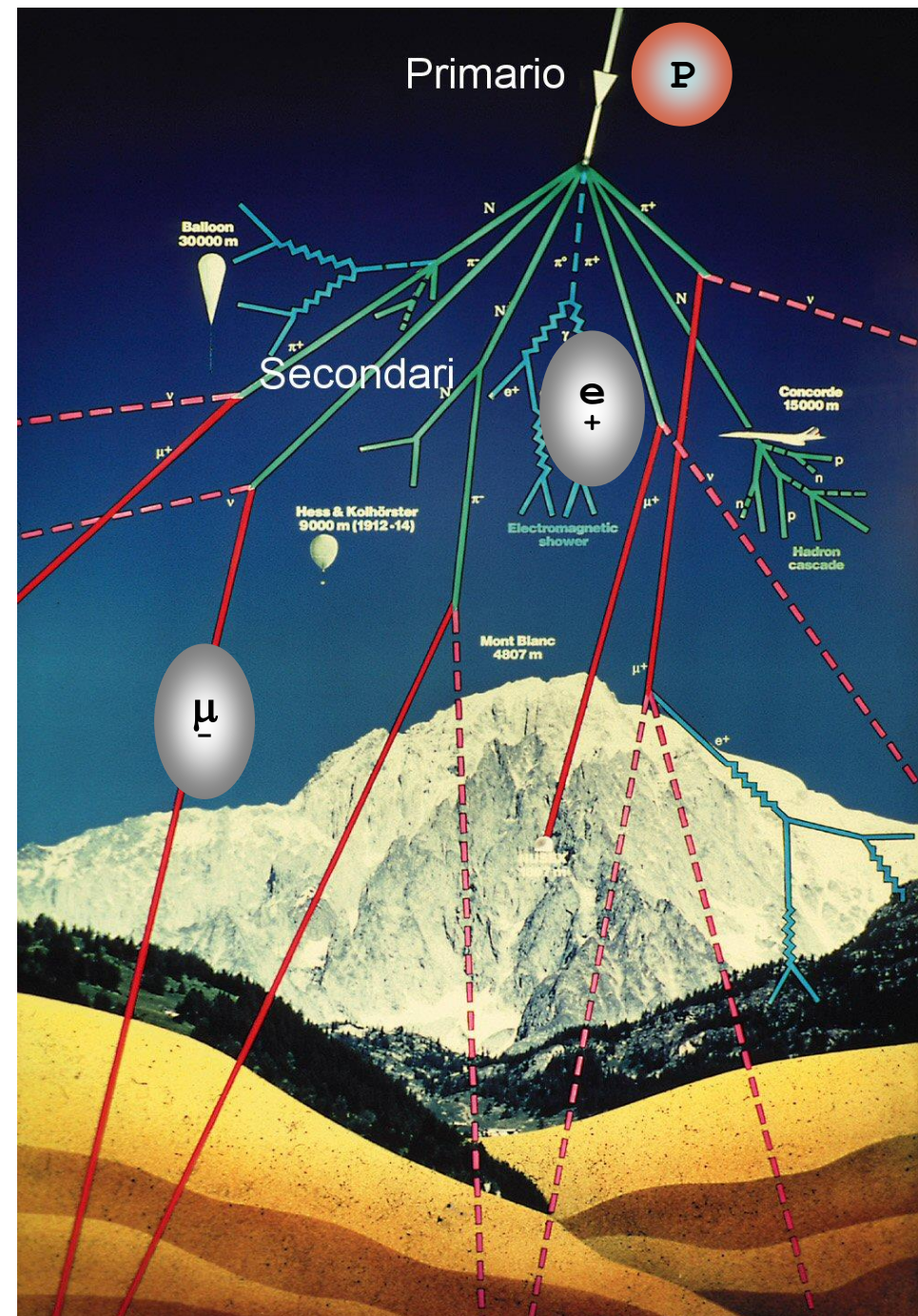


I raggi Cosmici

Raggi cosmici secondari

Il raggio cosmico primario interagisce con l'atmosfera terrestre generando uno sciame di particelle che si propaga fino a terra.

Tra queste, i muoni μ sono la componente di maggior abbondanza negli sciami generati da nuclei.



Composizione ed energia

Raggi cosmici primari

Protoni 90%

Nuclei di Elio 9%

Altre particelle: 1%

elettroni

positroni

antiprotoni

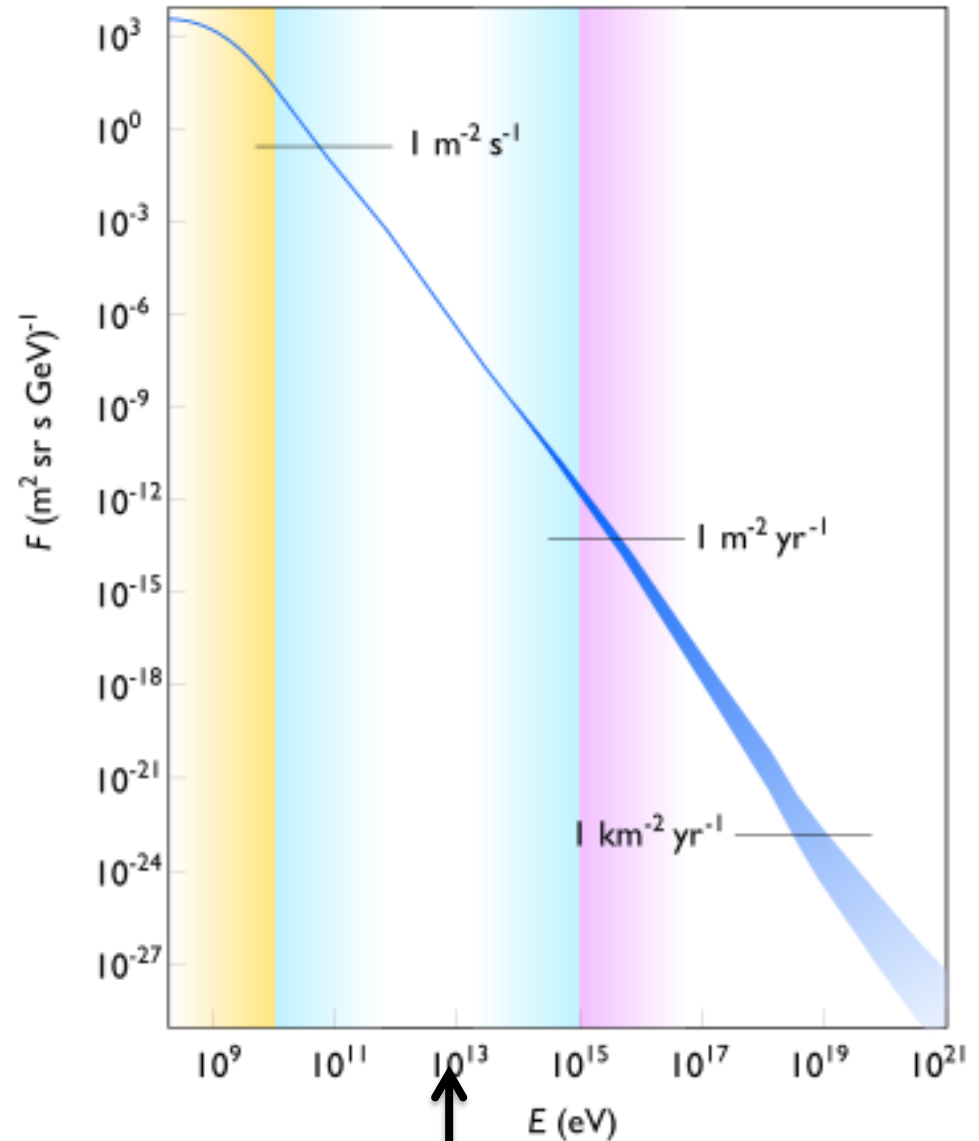
fotoni ad alta energia -> raggi gamma

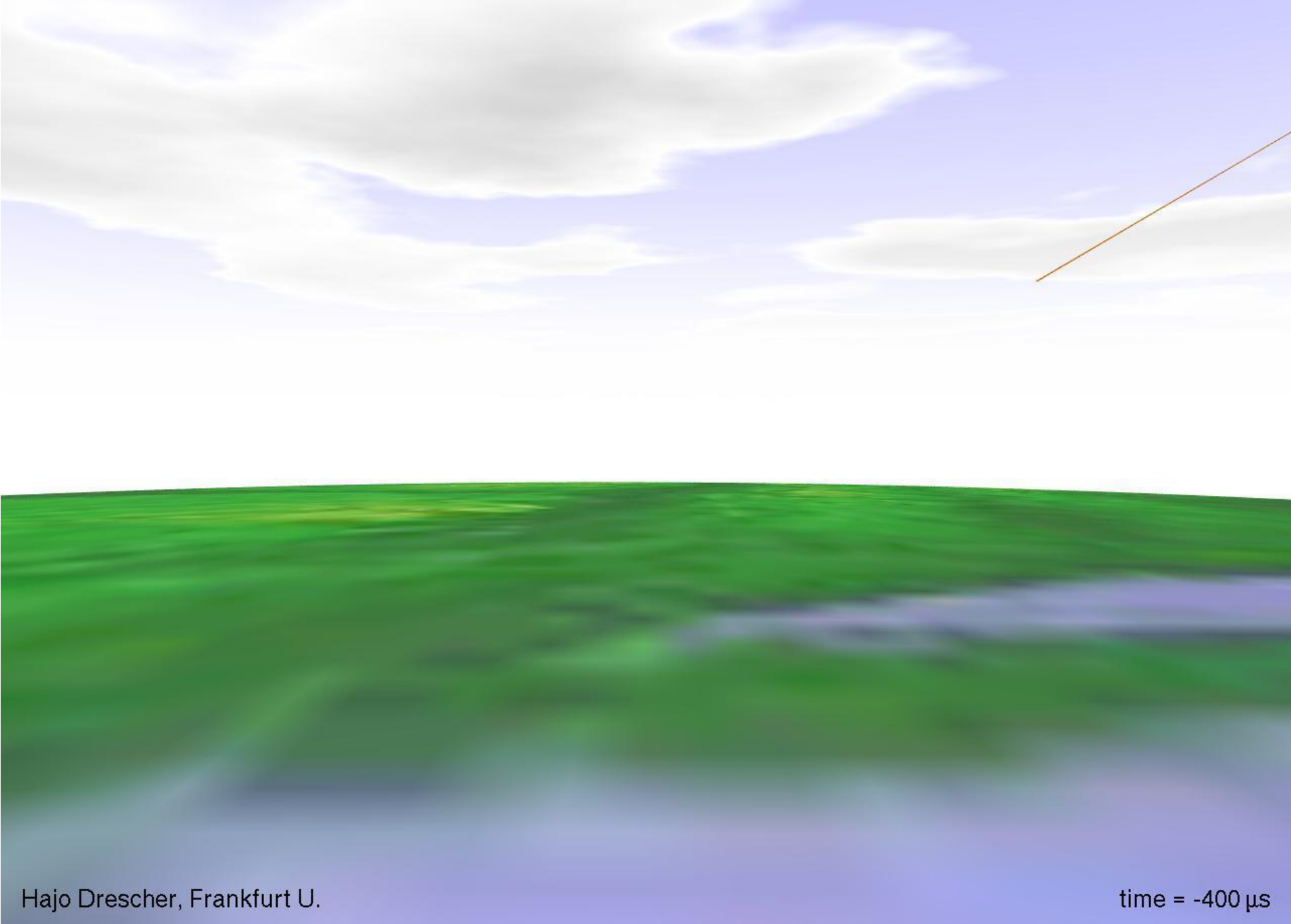
neutrini

Altri nuclei 0,1%

Origine: solare, galattica, extra-galattica

- Il Sole è una sorgente di radiazione elettromagnetica e particelle cariche.
- Nella nostra Galassia i residui di Supernova accelerano particelle cariche.
- I raggi cosmici di altissima energia sono di origine extra-galattica.





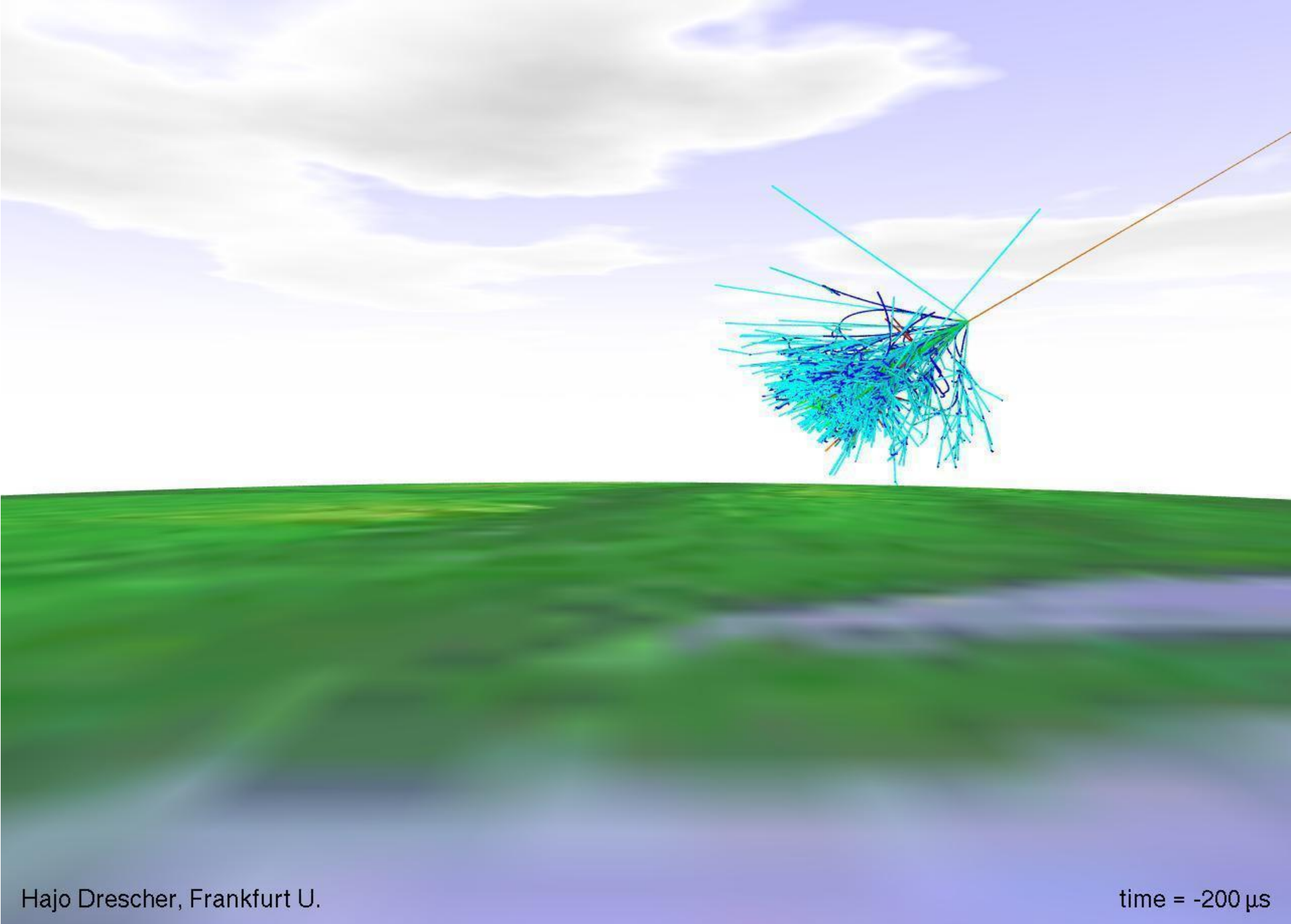
Hajo Drescher, Frankfurt U.

time = -400 μ s



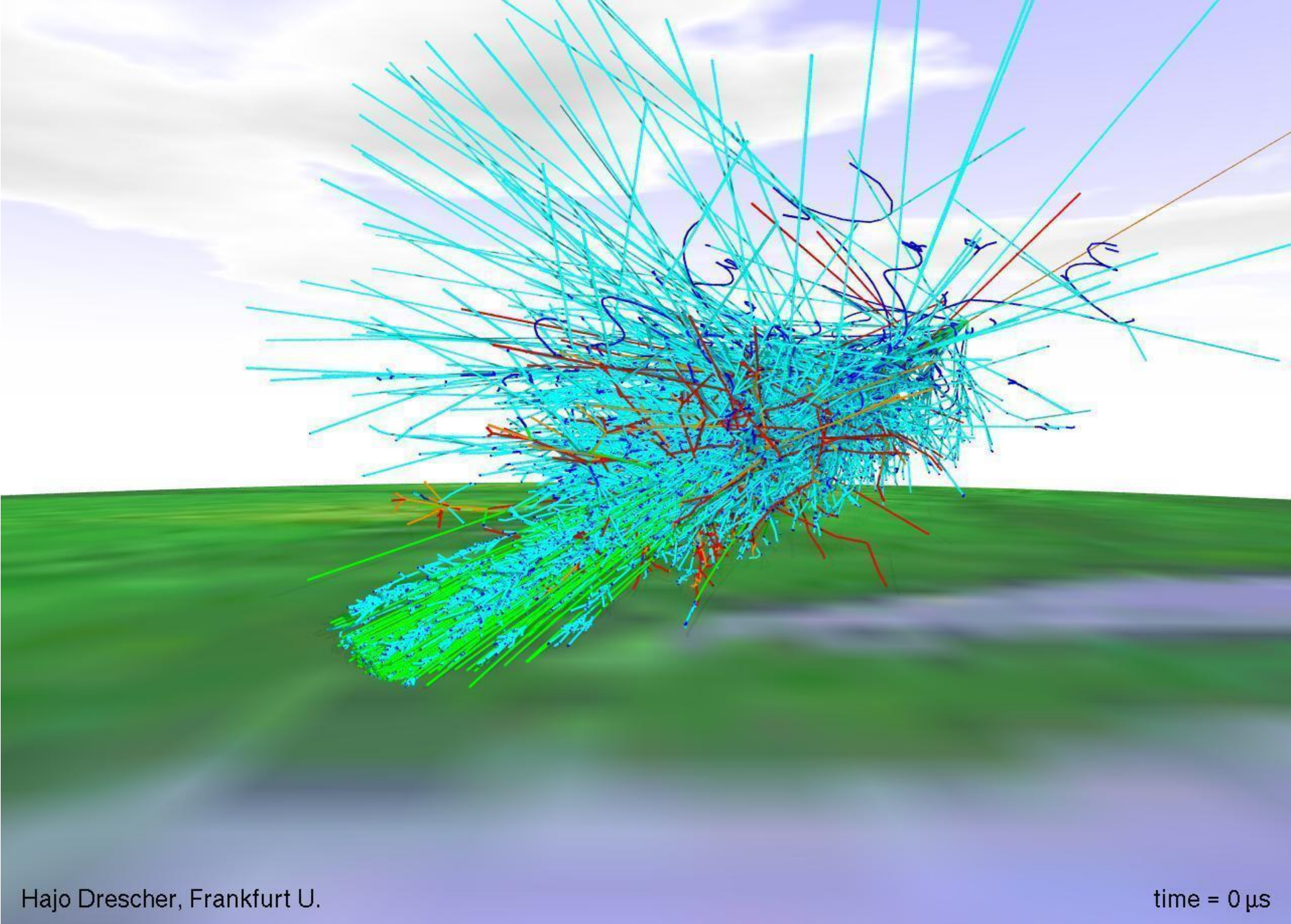
Hajo Drescher, Frankfurt U.

time = -300 μs



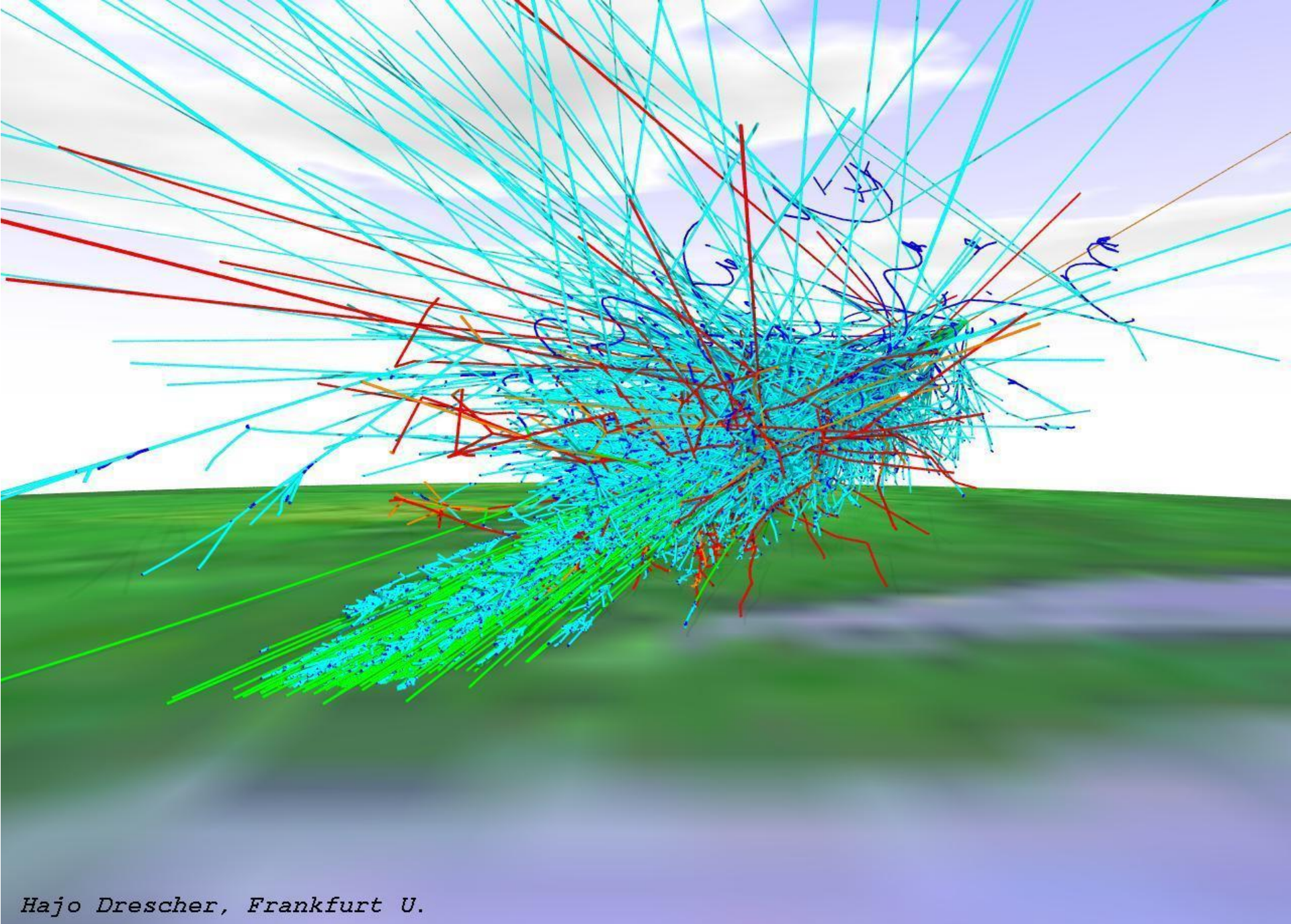
Hajo Drescher, Frankfurt U.

time = -200 μ s



Hajo Drescher, Frankfurt U.

time = 0 μ s



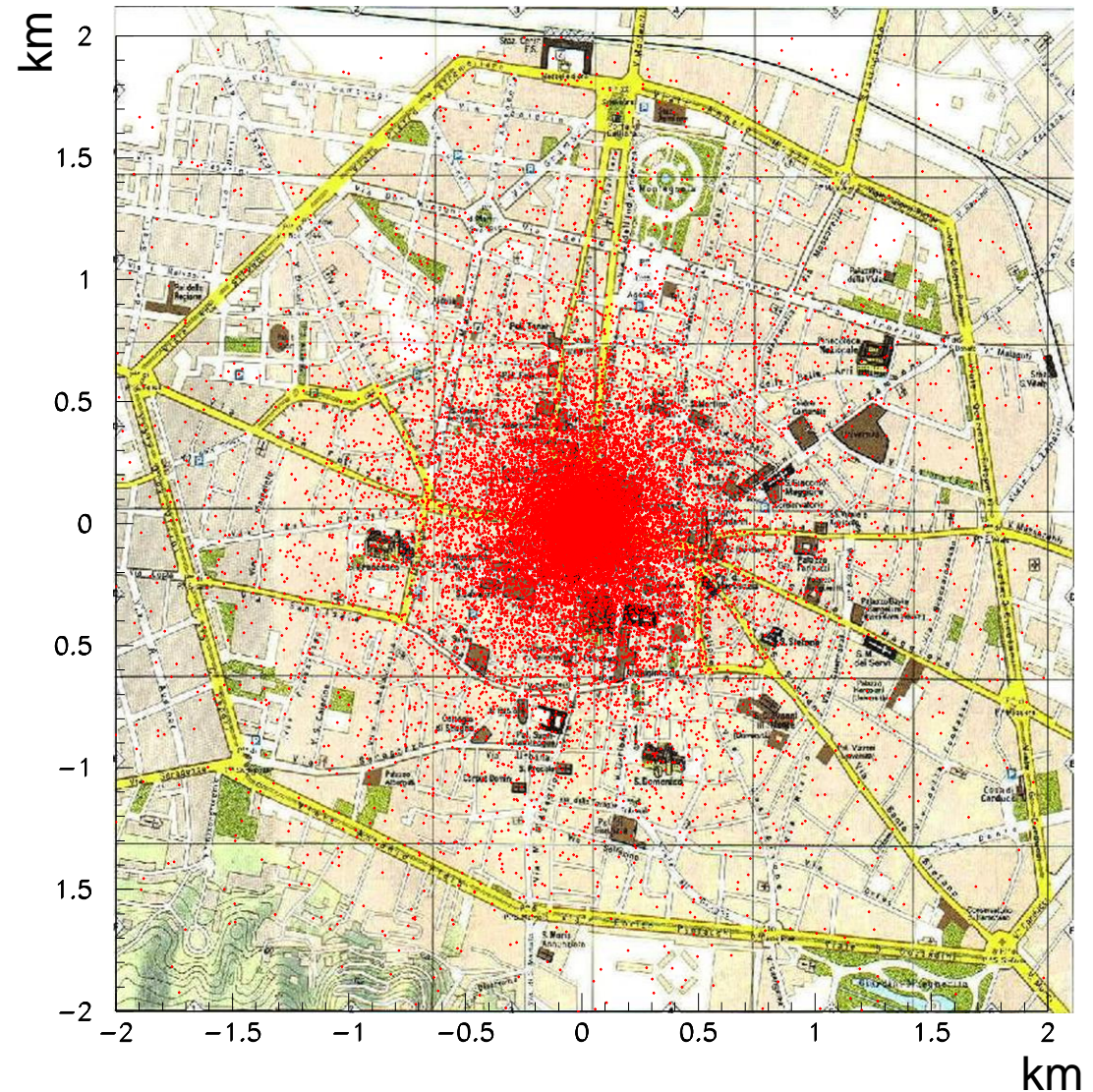
Hajo Drescher, Frankfurt U.

Distribuzione al suolo

Uno sciame esteso (EAS) può contenere miliardi di particelle.

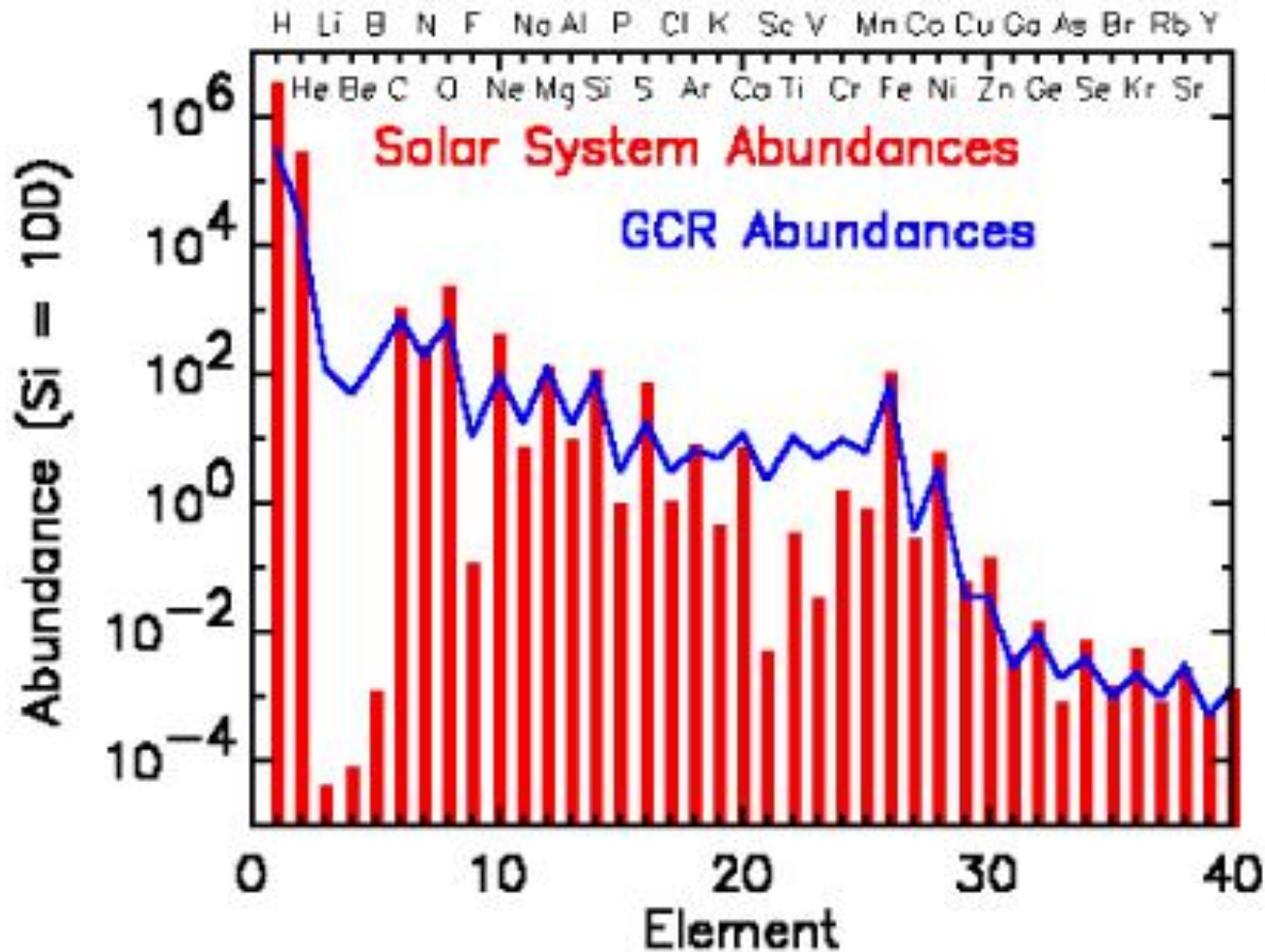
I raggi cosmici secondari vengono prodotti in nell'apertura di un grado attorno alla direzione del primario.

Per una particella prodotta a 20 km di altezza, questo significa un diametro dello sciame di ~ 700 m al livello del mare.



Simulazione di uno sciame cosmico sopra alla città di Bologna (EEE experiment)

Composizione dei nuclei



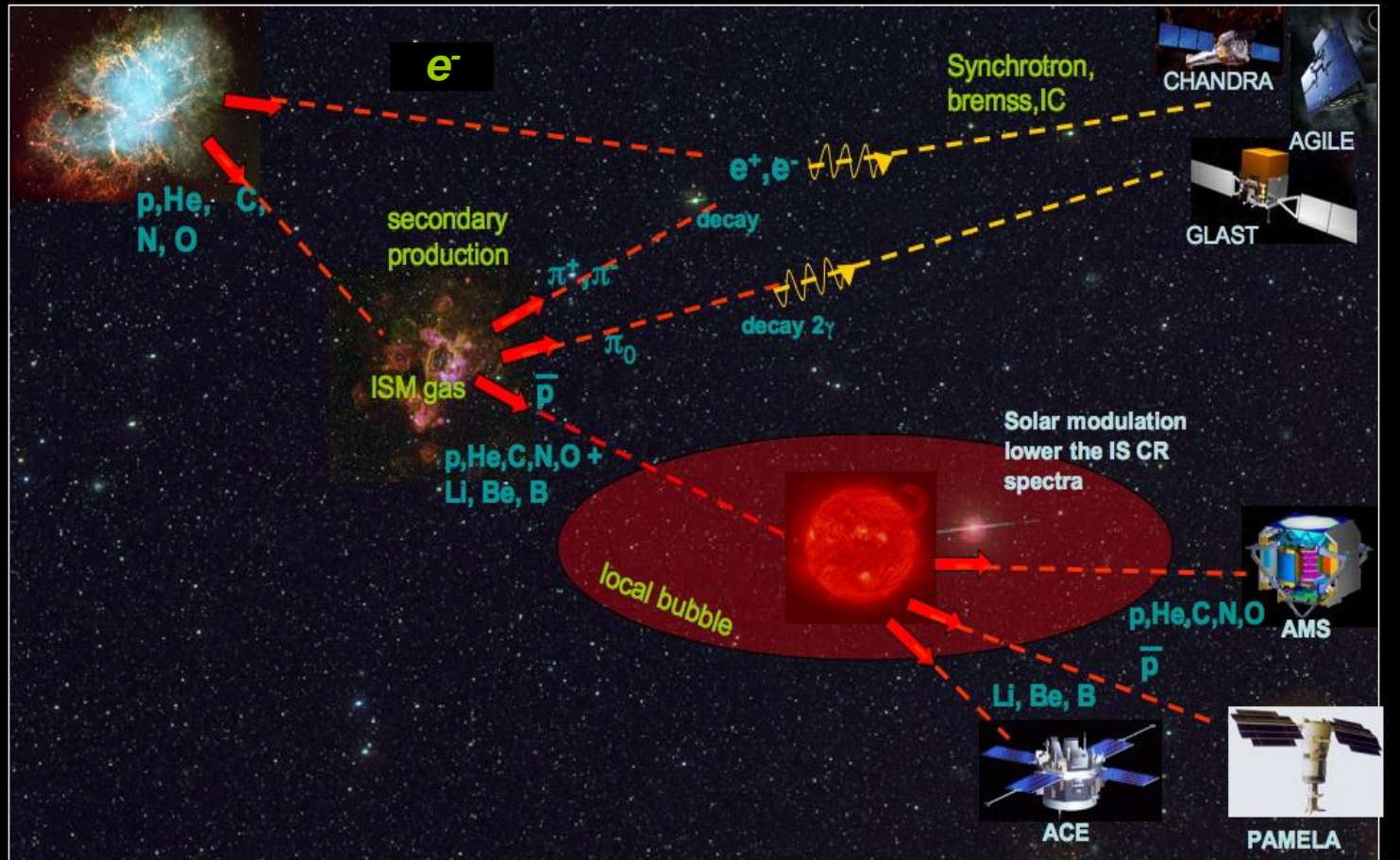
Protoni ed Helio sono più abbondanti nel Sistema Solare

Li/be/B and S/Ti/c/cr/Mn (non prodotti durante i meccanismi classici di fusione stellare) più abbondanti nei raggi cosmici

- Meccanismi di produzione diversi dalla fusione stellare?
- Succede qualcosa durante il loro viaggio?
- Anisotropia nella composizione del cosmo?

Un lungo viaggio

COSMIC RAYS PRODUCTION MECHANISMS



Lo spazio attraversato da particelle e radiazione elettromagnetica è tutt'altro che vuoto!

- Nubi di gas (Elio e idrogeno)
- Campi magnetici di varie dimensioni, anche localmente molto intensi

Inoltre non tutte le particelle sono "stabili", ma alcune "decadono" in altre particelle e/o radiazione elettromagnetica



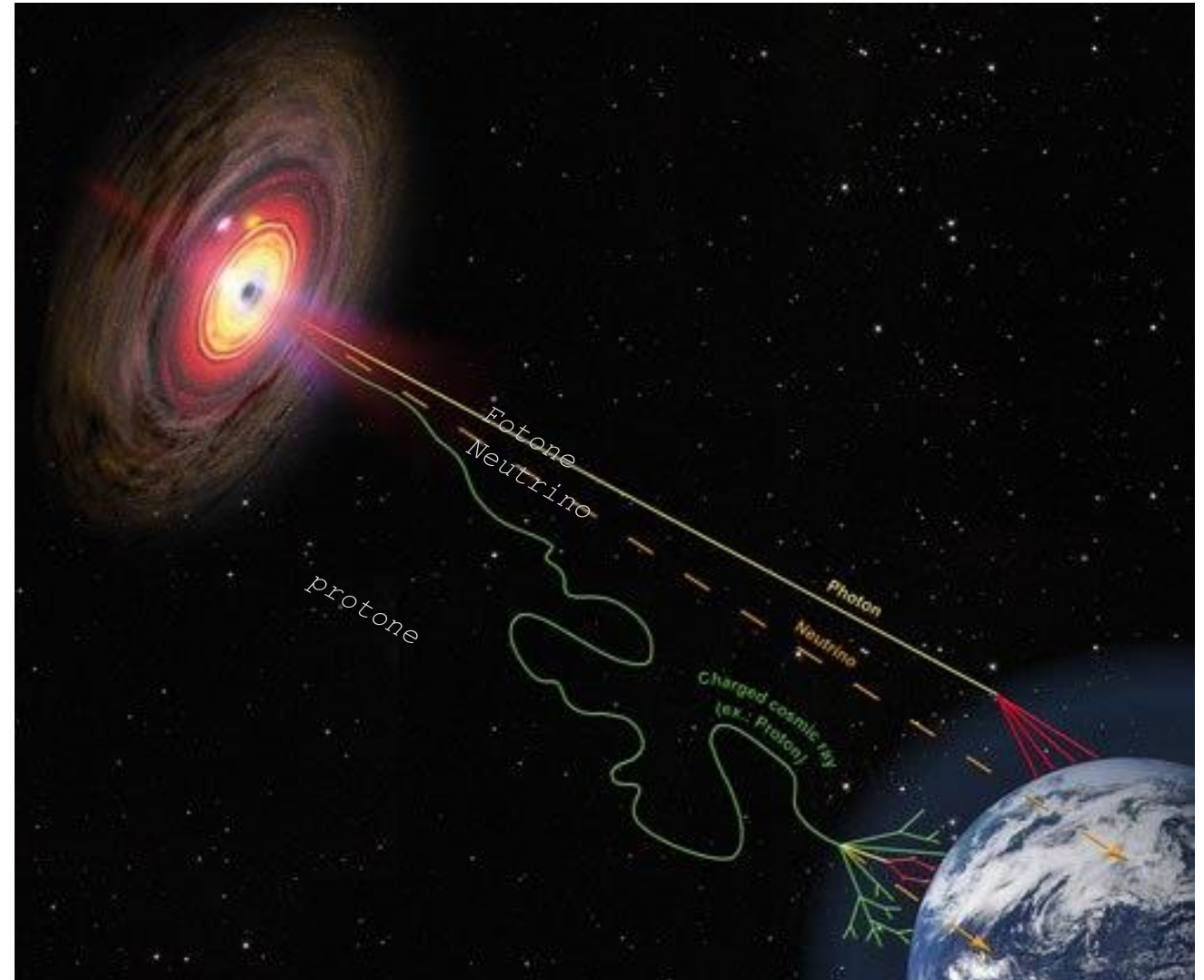
Risultato: ciò che osserviamo è ben diverso dall'originale!!

I CR sono sonde del nostro universo!

Un lungo viaggio

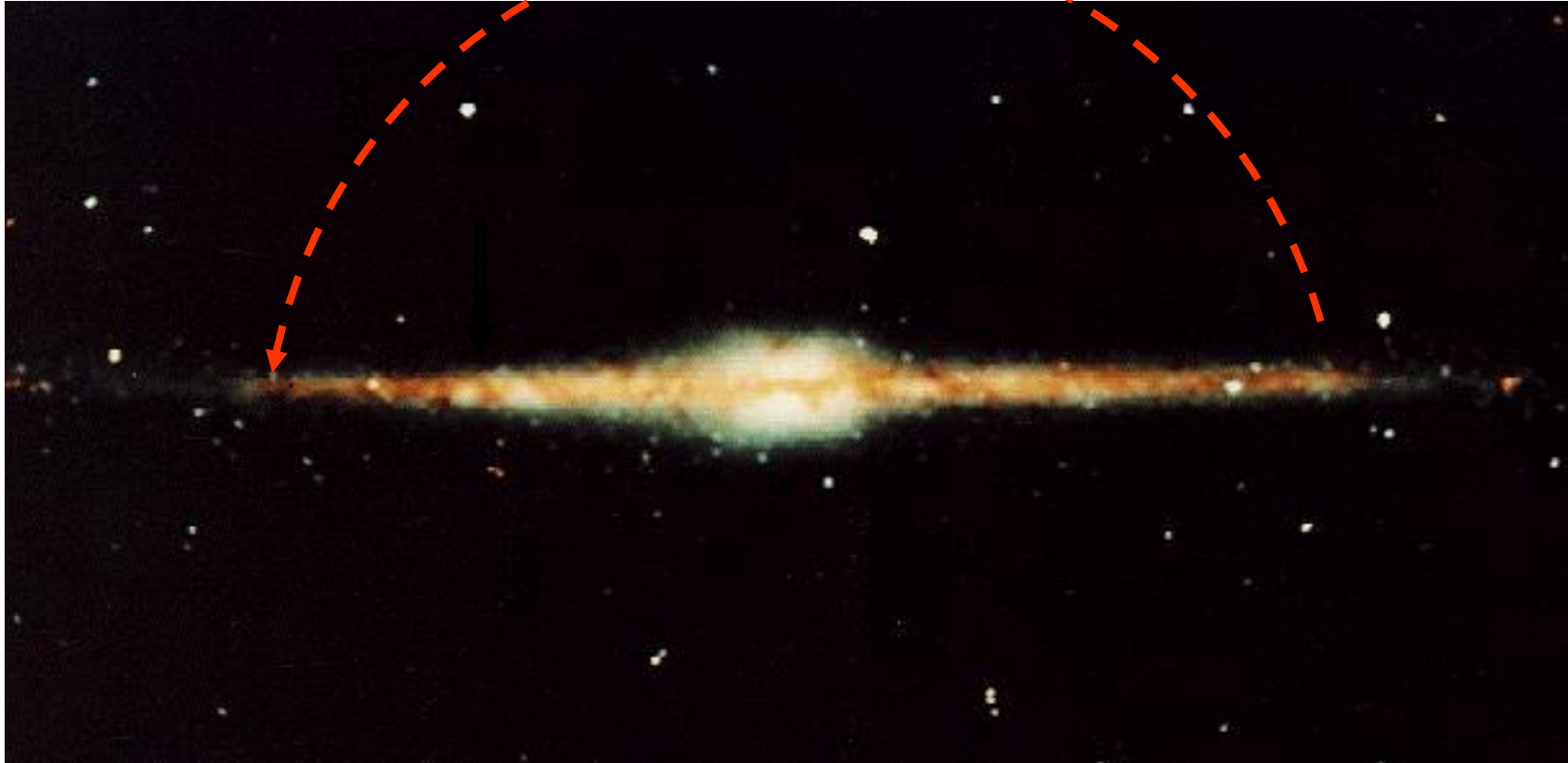
La componente carica (protoni, elettroni, nuclei,...) subisce la deflessione dei campi magnetici galattici.

Solo le particelle più energetiche non vengono significativamente deflesse!!



Un lungo viaggio

Protone da $5 \cdot 10^{19}$ eV in un campo di $3 \mu\text{G}$ (sulla terra $0,5\text{G}$)



30 kpc (100000 anni luce) → 10 miliardi di volte la distanza terra-sole!

Il mistero

Le previsioni teoriche indicano che il flusso di raggi cosmici di energia superiore a 4×10^{19} eV debba essere fortemente ridotto.



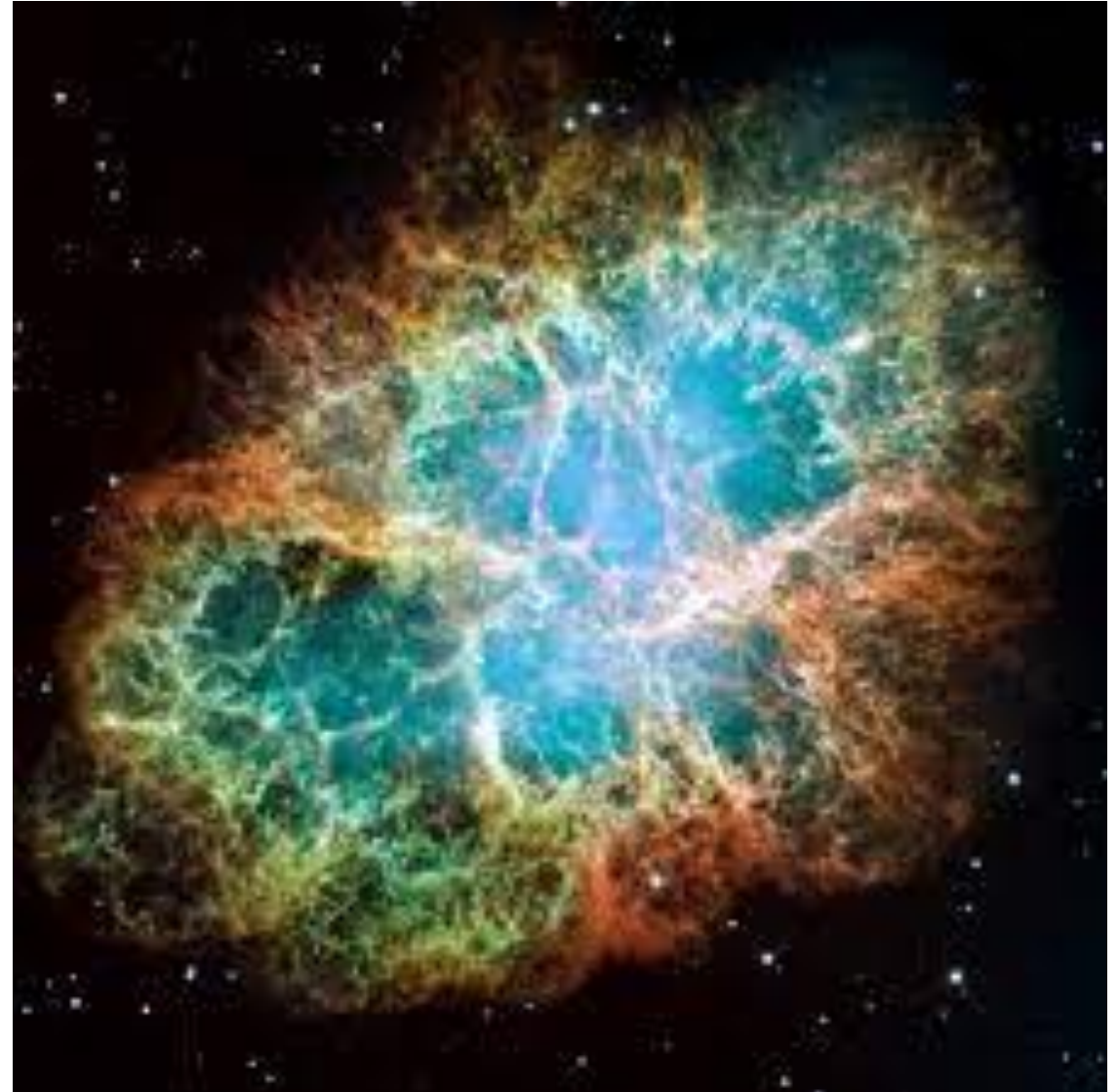
1962 - *Volcano Ranch, New Mexico*

John Linsley rivela un evento da 10^{20} eV con rivelatori di raggi cosmici disposti su una griglia di 3,6 km di diametro

L'origine di queste particelle così energetiche è sconosciuta e allo stesso tempo affascinante, e attrae un enorme interesse scientifico.

Resti di supernova

*Resti di esplosioni di
supernova
al cui interno sono presenti
grossi campi magnetici*



Pulsar

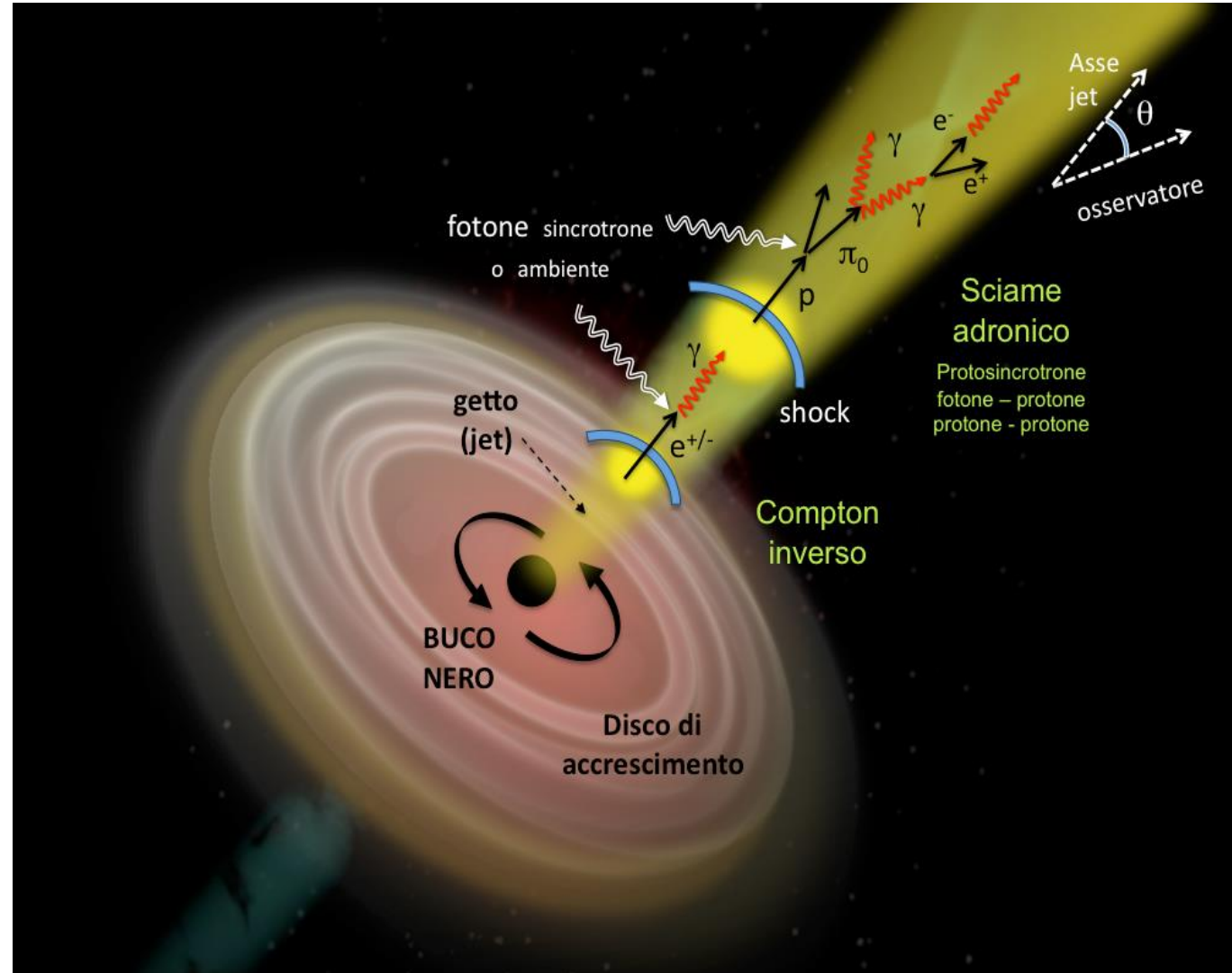
Stella di neutroni con grande
velocità di rotazione
1017eV



Pulsar Wind Nebula: 4 July 1054
DC a 6800 anni luce dalla Terra
nella costellazione del Toro.
Pulsar con $T=33$ ms

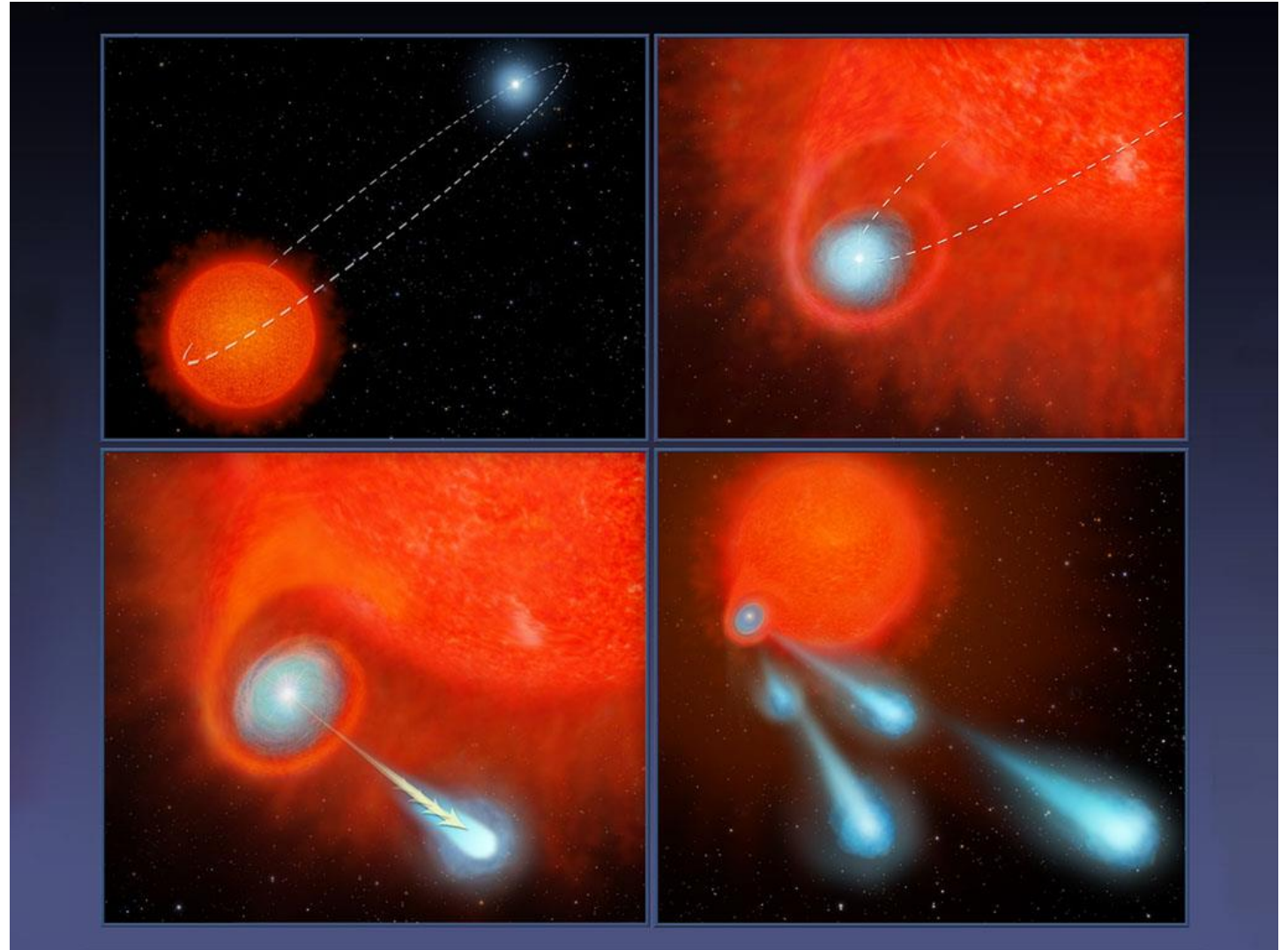
Nuclei galattici attivi

Nuclei Galattici Attivi
nuclei centrali di galassie con
espulsioni di jet di particelle



Sistemi binari

Sistemi Binari
Trasferimento di materia da
un oggetto alla compagna.
Espulsione di jet di plasma



Perchè studiarli?

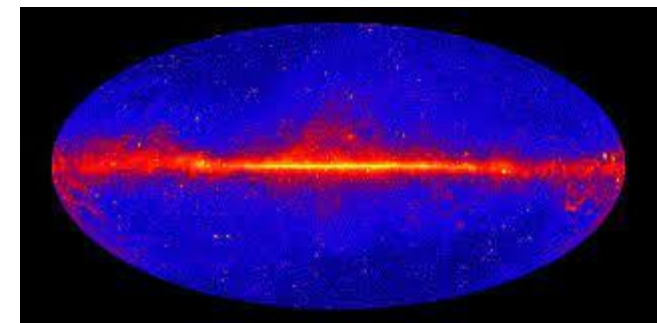
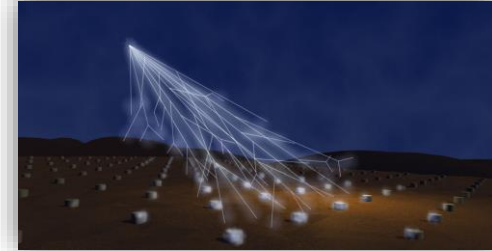
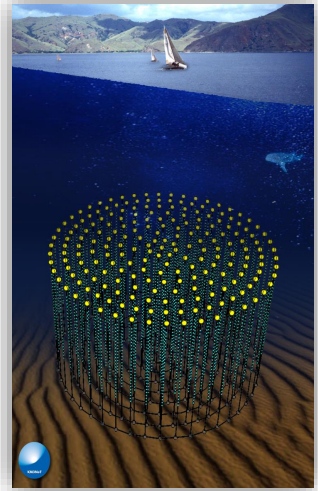
- I raggi cosmici sono «**messaggeri**» provenienti da zone remote dell' universo e possono fornirci informazioni su alcuni dei suoi fenomeni più spettacolari.
- Possono aiutarci a comprendere meglio i principi della fisica particellare grazie alle **energie estreme** che possono raggiungere
- Sono un utile strumento per studiare **l'asimmetria materia/antimateria** nell'universo
- Potranno aiutarci a capire la natura della «**materia oscura**» o perfino dell' «**energia oscura**»

E altro ancora....

Osservazione multi-messaggero

L'osservazione di un fenomeno da molteplici punti di vista ci permette di creare modelli accurati:

- Neutrini al MeV (origine solare rimnenti di supernova) e superiore (extragalattici)
- Raggi cosmici (nuclei, particelle elementari, raggi gamma ad alta energia) di ogni energia
- Onde gravitazionali, al momento osservabili da sistemi binari di buchi neri o stele di neutroni
- Radiazione elettromagnetica a varie lunghezze d'onda (radio,infrarossa, ottica, ultravioletta, raggi-x, raggi gamma)



Discover Cosmic Rays

INTERNATIONAL COSMIC DAY

November 21 | 2023

Image credit: DESY, Science Communication Lab