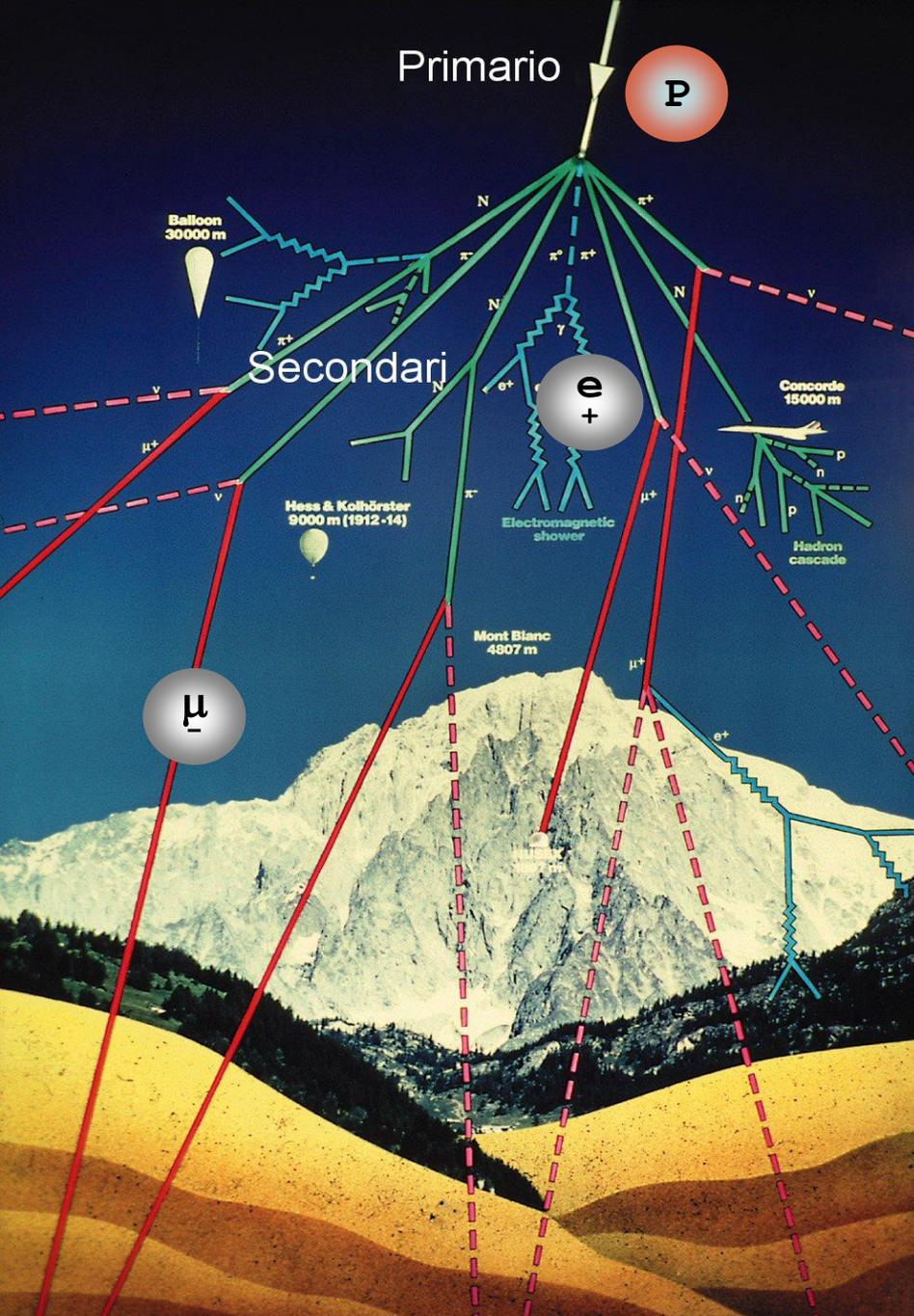




I RAGGI COSMICI

Edoardo Bossini



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

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



La scoperta dei raggi cosmici (1911–12)

Da dove viene questa radiazione ionizzante?

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

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



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”

Victor Hess (1912):

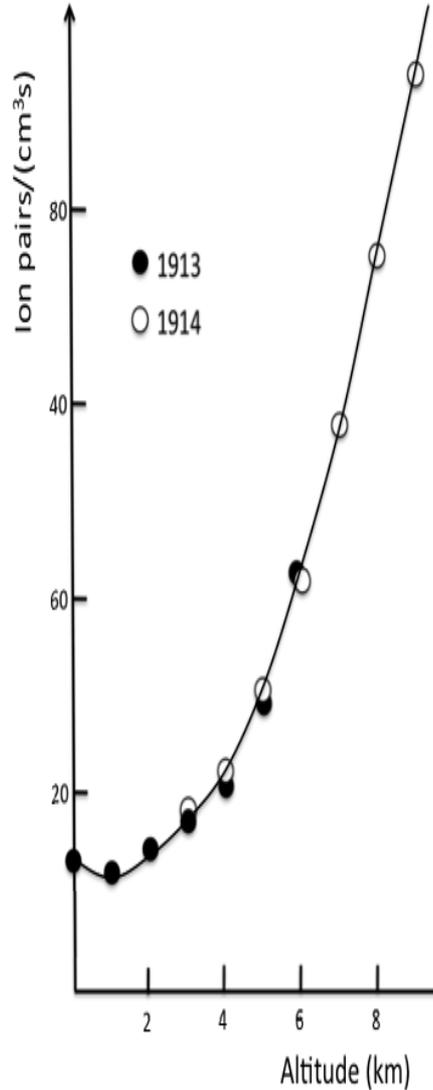
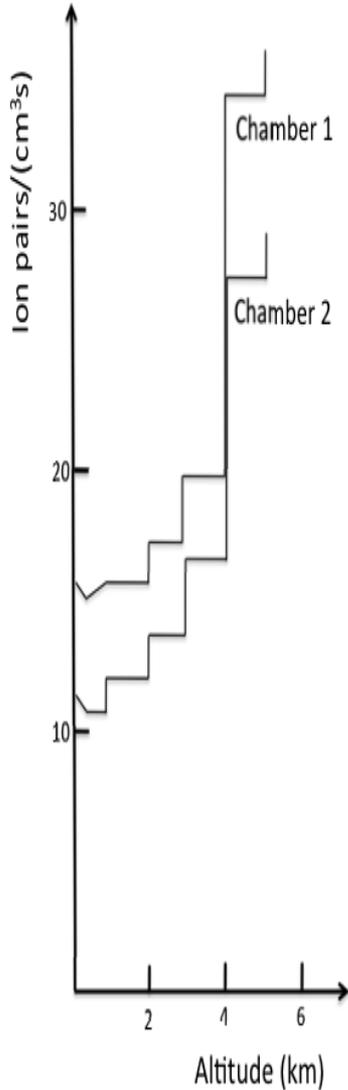
Dimostra l'origine extraterrestre della radiazione

Premio Nobel nel 1936

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

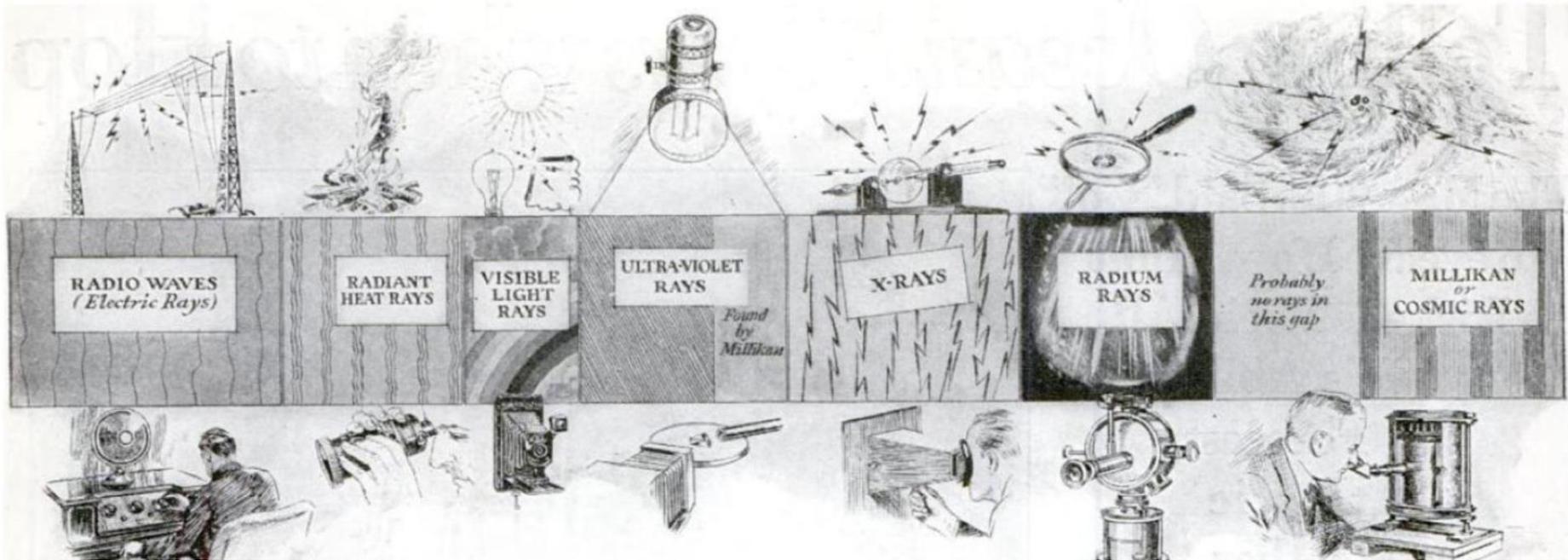
L'intensità della radiazione effettivamente cresceva con l'altezza raggiungendo a 5000 m un valore 3-5 volte maggiore di quello a livello del mare.

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.





Super-Rays Reveal Secret of Creation

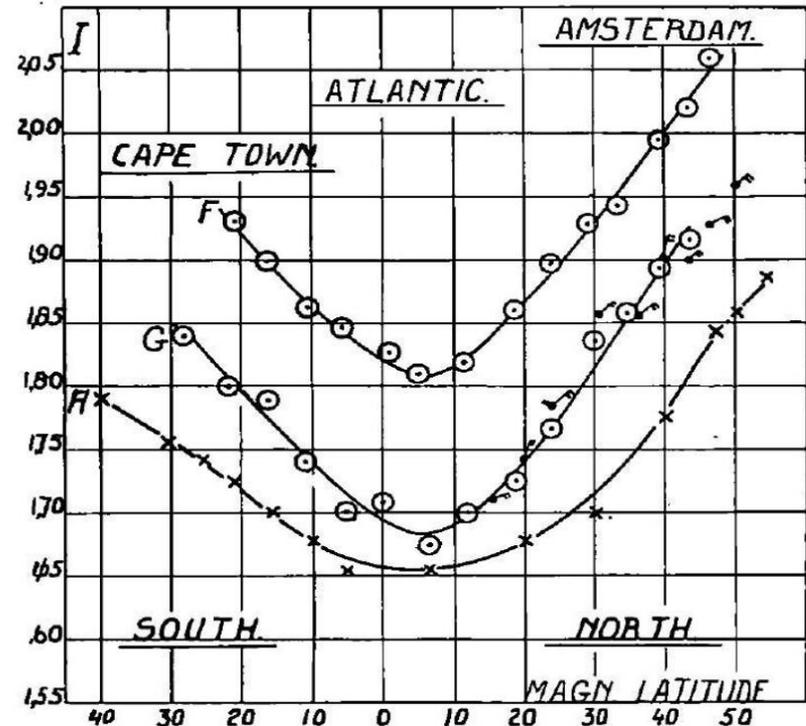


- Data la sua capacità di penetrare attraverso le schermature, si riteneva che la radiazione cosmica fosse costituita da raggi gamma, al tempo unica fonte nota con tali caratteristiche.

- **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.**

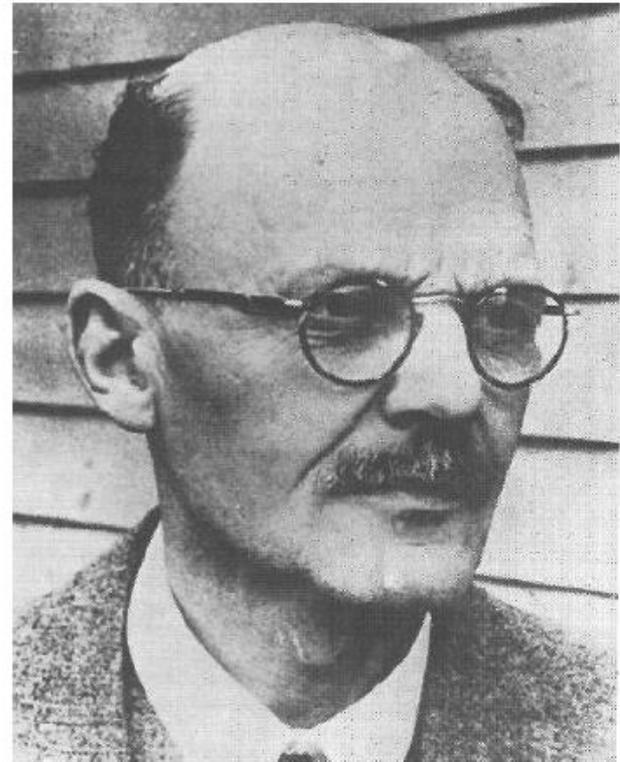
- Clay stava facendo misure a Java; nel 1927 trasportò il rivelatore in viaggio verso Genova e lo utilizzò durante il viaggio

- Confermato dallo stesso Clay nel 1928 (da Java a Amsterdam), da Kolhörster, da Rossi, da Compton.

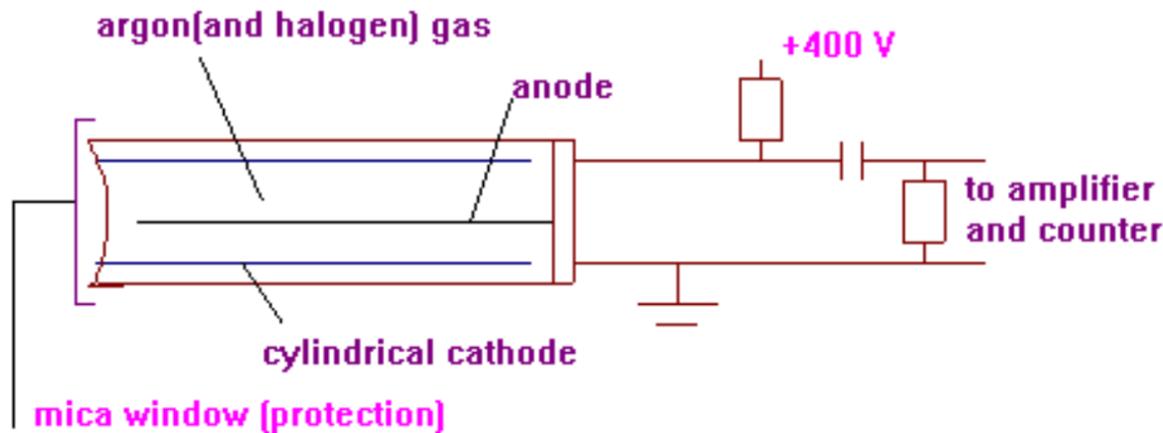


Un grosso passo avanti venne fatto nel 1928, con lo sviluppo di un particolare tipo di rivelatore, il **contatore Geiger**, ad opera di Hans Geiger e Walther Muller (Kiel).

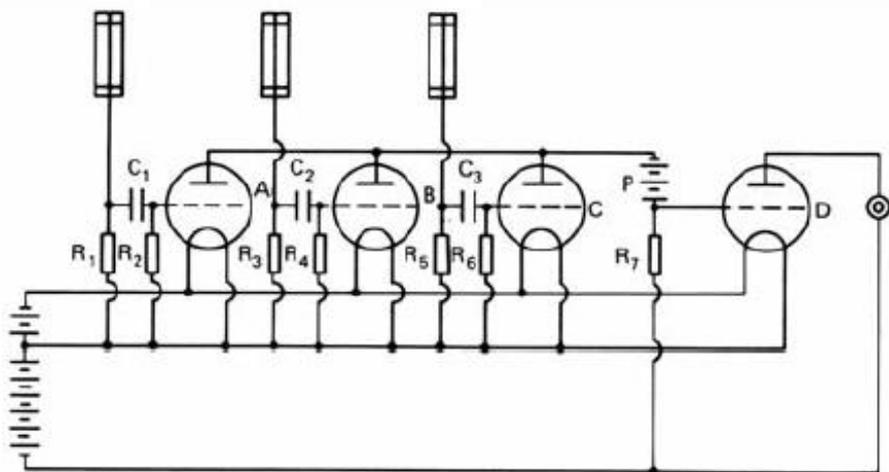
Era possibile contare le particelle ed individuare il momento «esatto» del loro passaggio!!



Hans Geiger



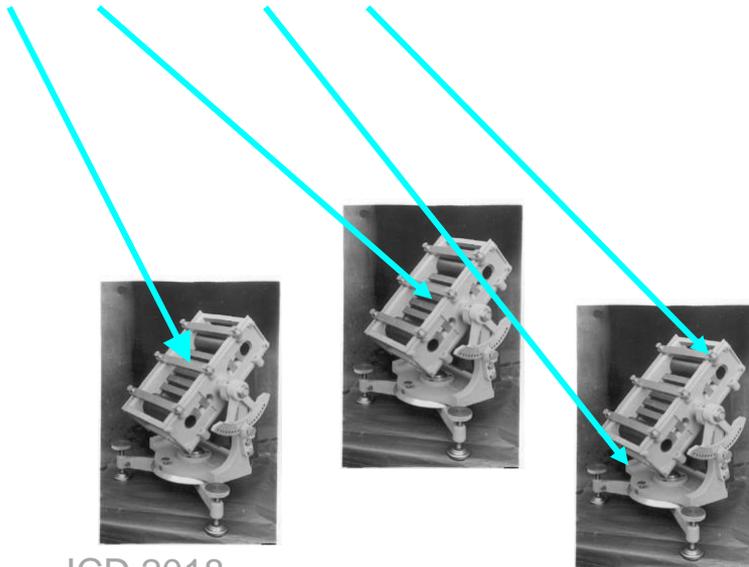
A Firenze negli anni '30
Bruno Rossi sviluppa i primi
circuiti di coincidenza
elettronici, basati sull'uso di
valvole termoioniche.



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.

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



Occhialini e Blackett (1932)

*"decidemmo di sviluppare
un metodo che costringesse i raggi cosmici a
farsi la
loro stessa foto"*

I contatori Geiger, equipaggiati con il circuito di coincidenza di Rossi, sono utilizzati come "trigger" delle camere a nebbia. Si realizzano così numerosissime fotografie di raggi cosmici.

Le tracce dei raggi cosmici si presentano in sciame con ugual numero di particelle a carica positiva e negativa: scoperta dell'esistenza del **positrone**

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 Jungfraujoch, rilevano coincidenze tra contatori disposti anche a distanze di 200 metri l'uno dall'altro.

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

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.

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.



Raggi cosmici *primari*

Protoni 90%

Nuclei di Elio 9%

Altre particelle: 1%

elettroni

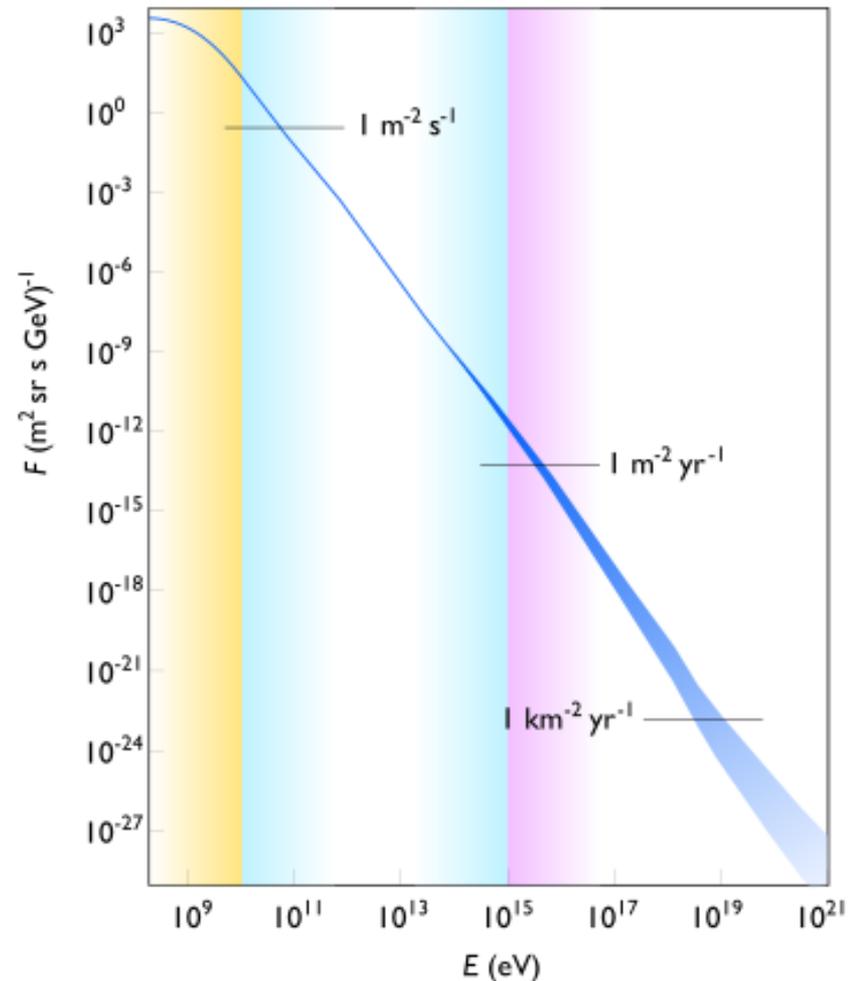
positroni

antiprotoni

fotoni

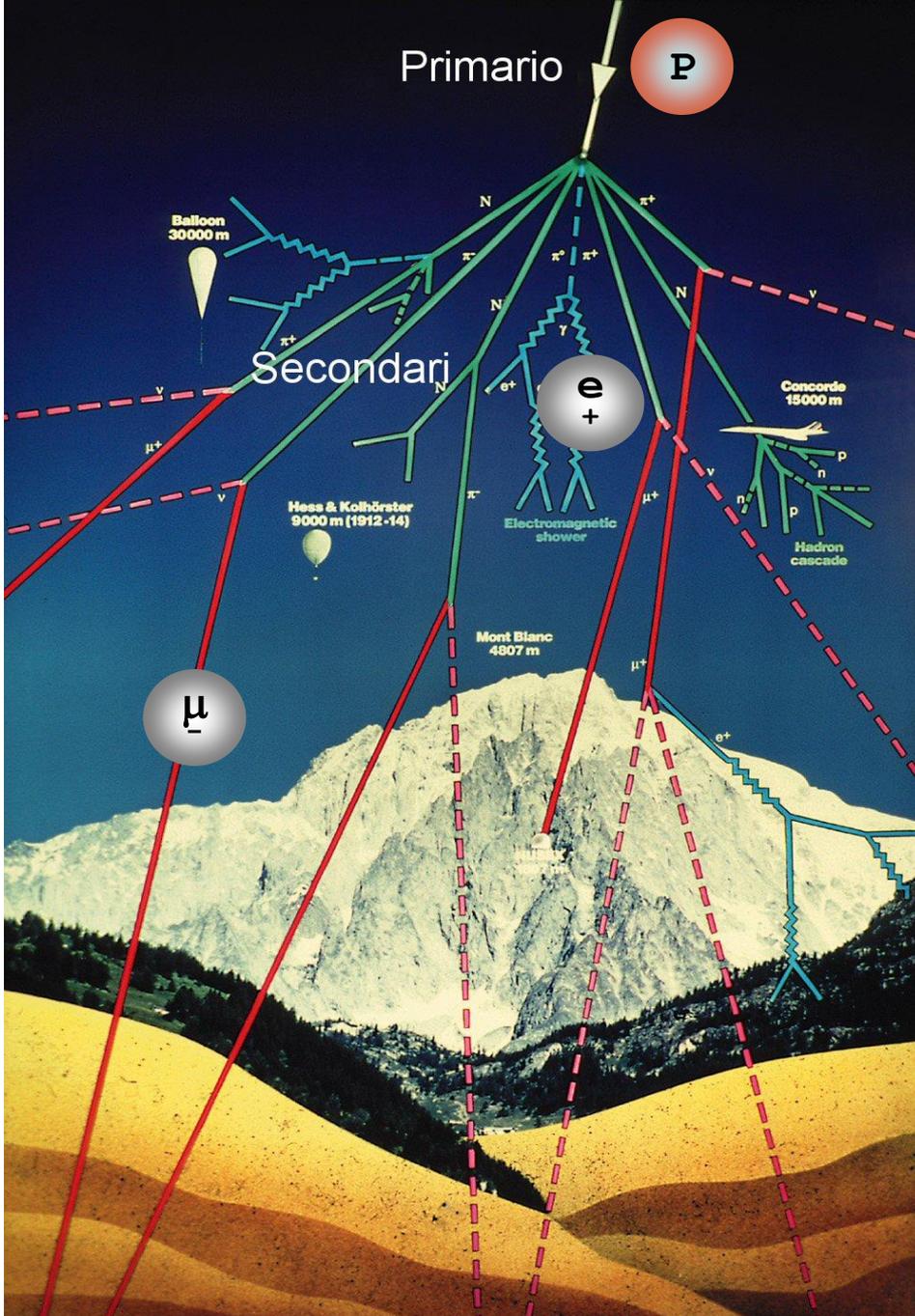
neutrini

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.

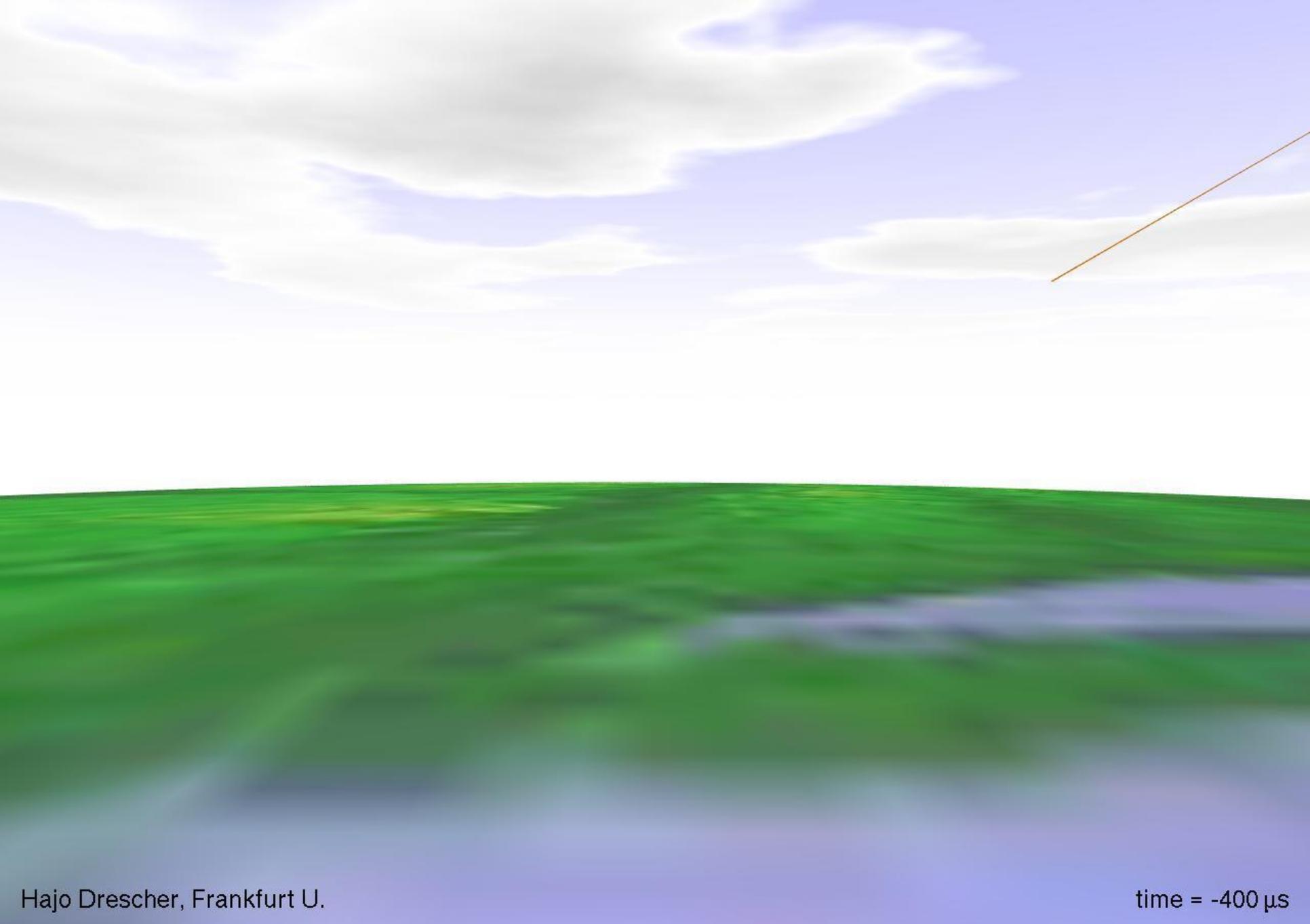


Raggi cosmici secondari

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

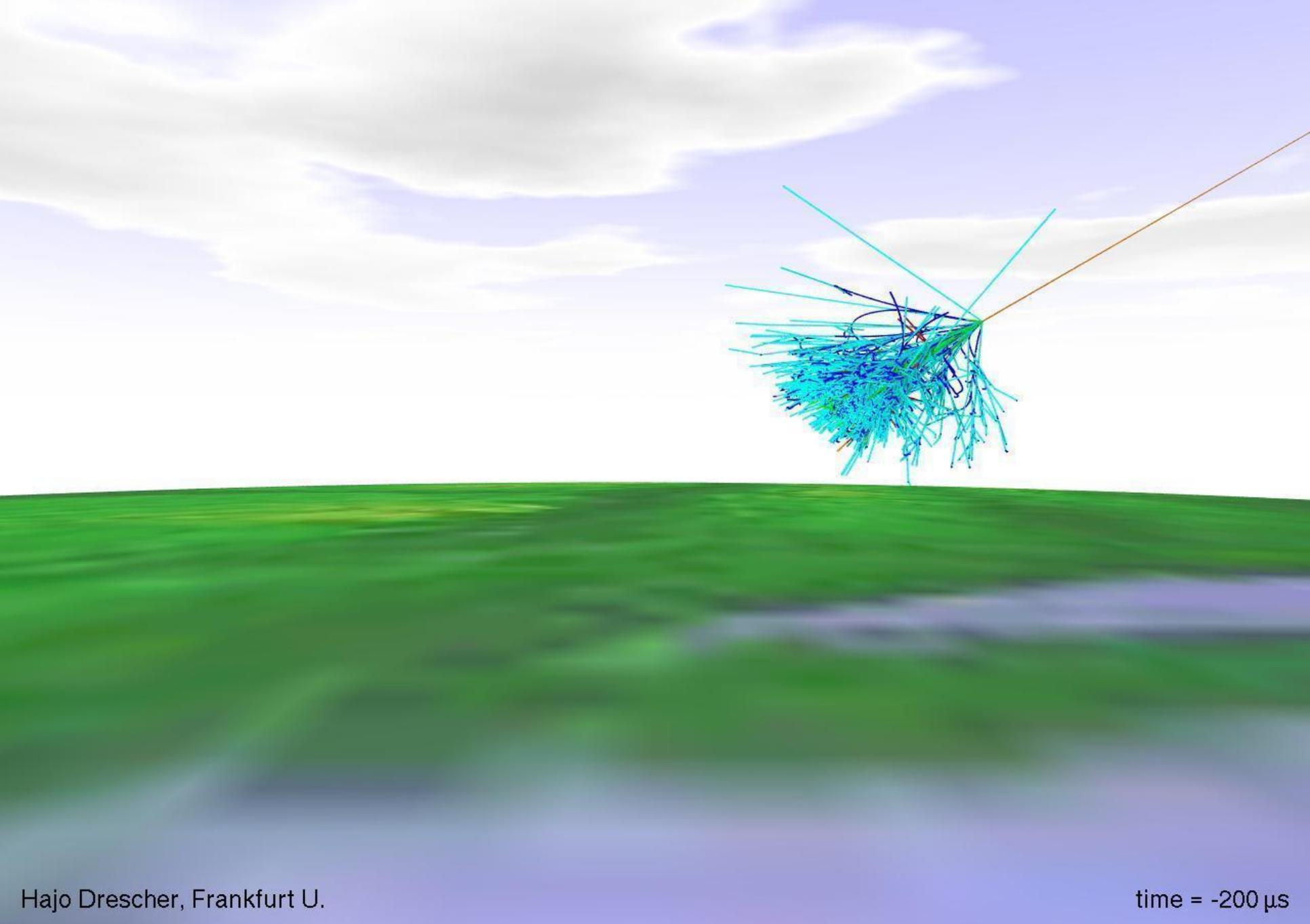
Il muone μ è una particella altamente penetrante che ha la stessa carica dell'elettrone, ma che pesa circa 200 volte di più.

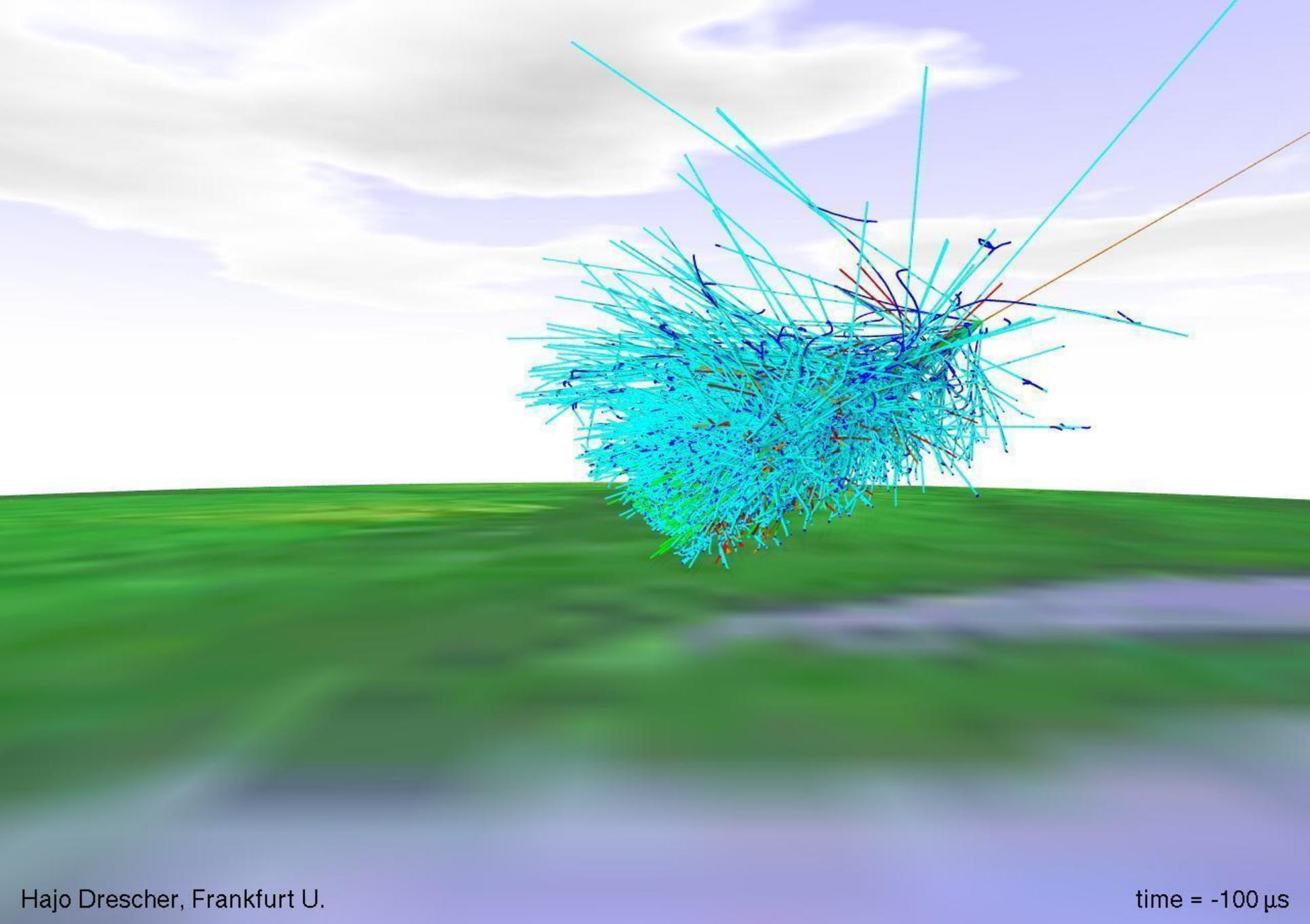


Hajo Drescher, Frankfurt U.

time = -400 μ s

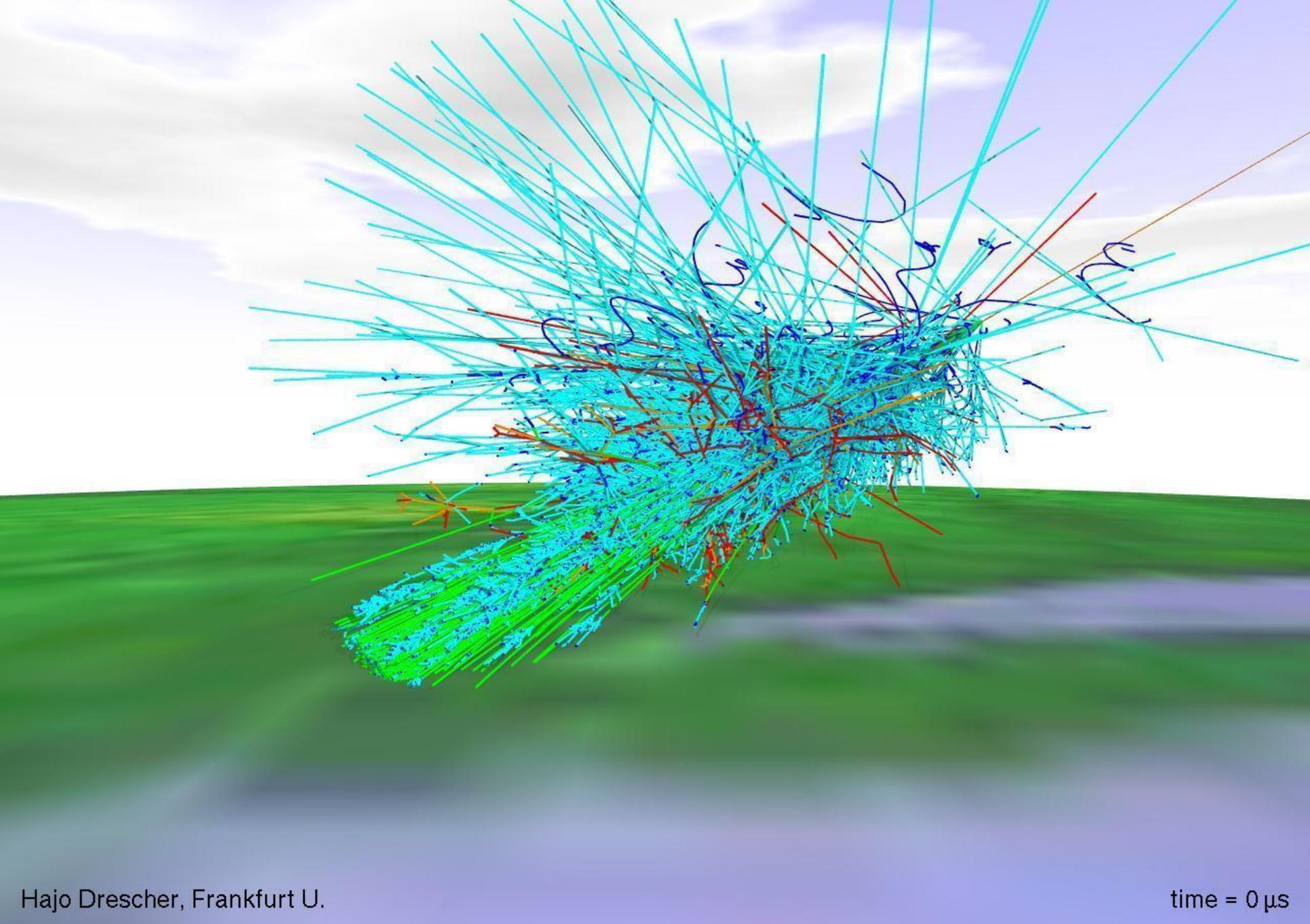






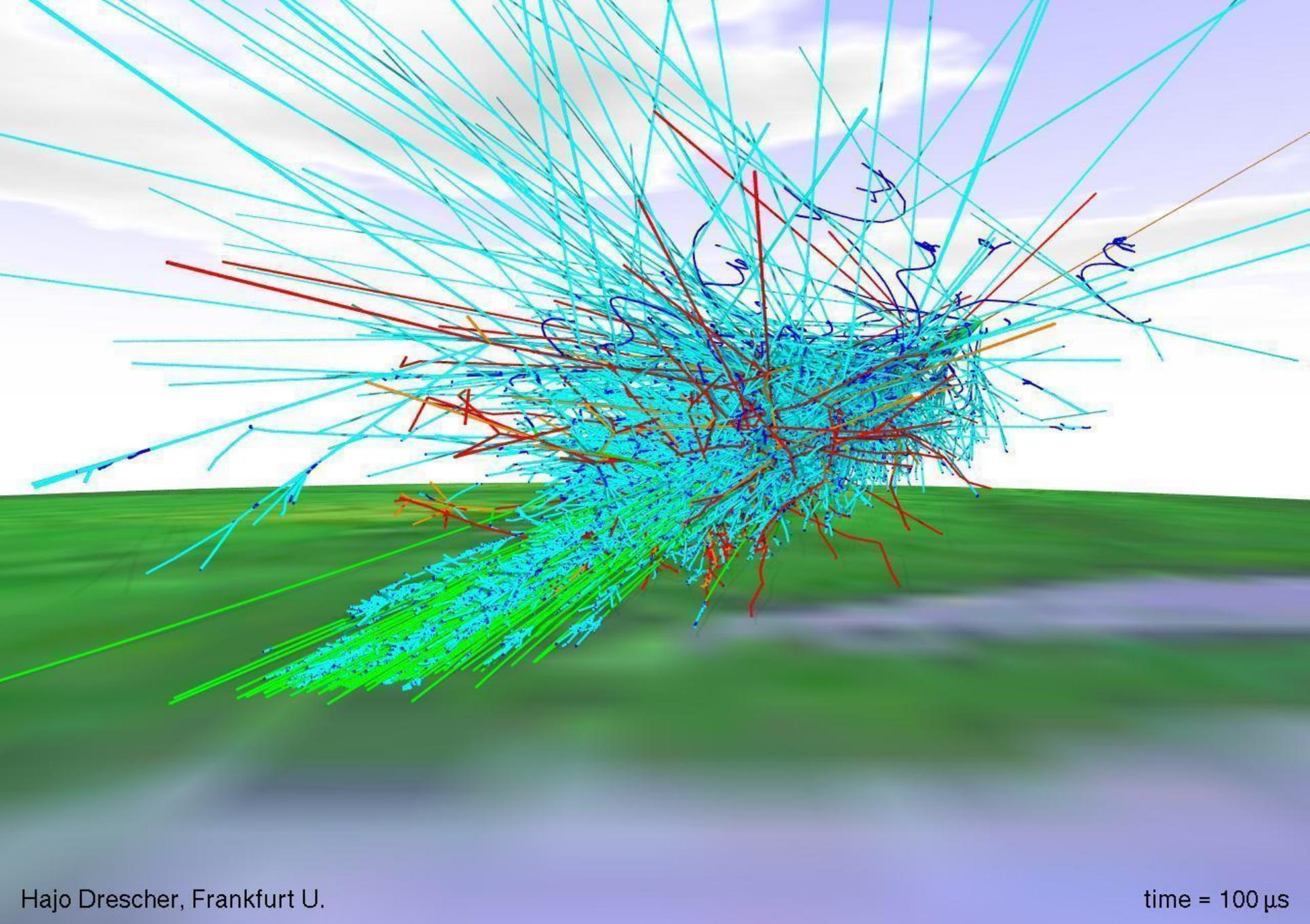
Hajo Drescher, Frankfurt U.

time = -100 μ s



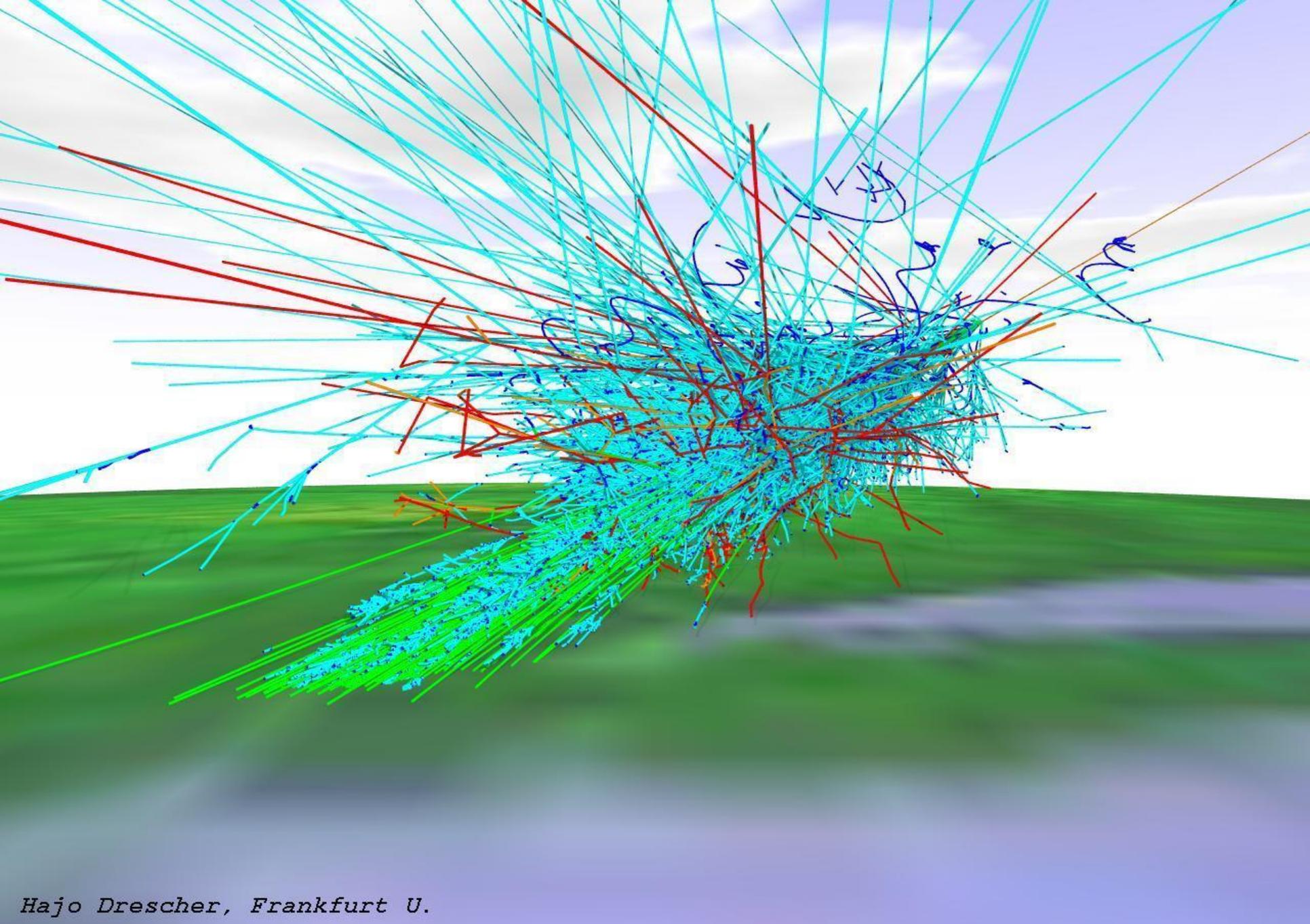
Hajo Drescher, Frankfurt U.

time = 0 μ s

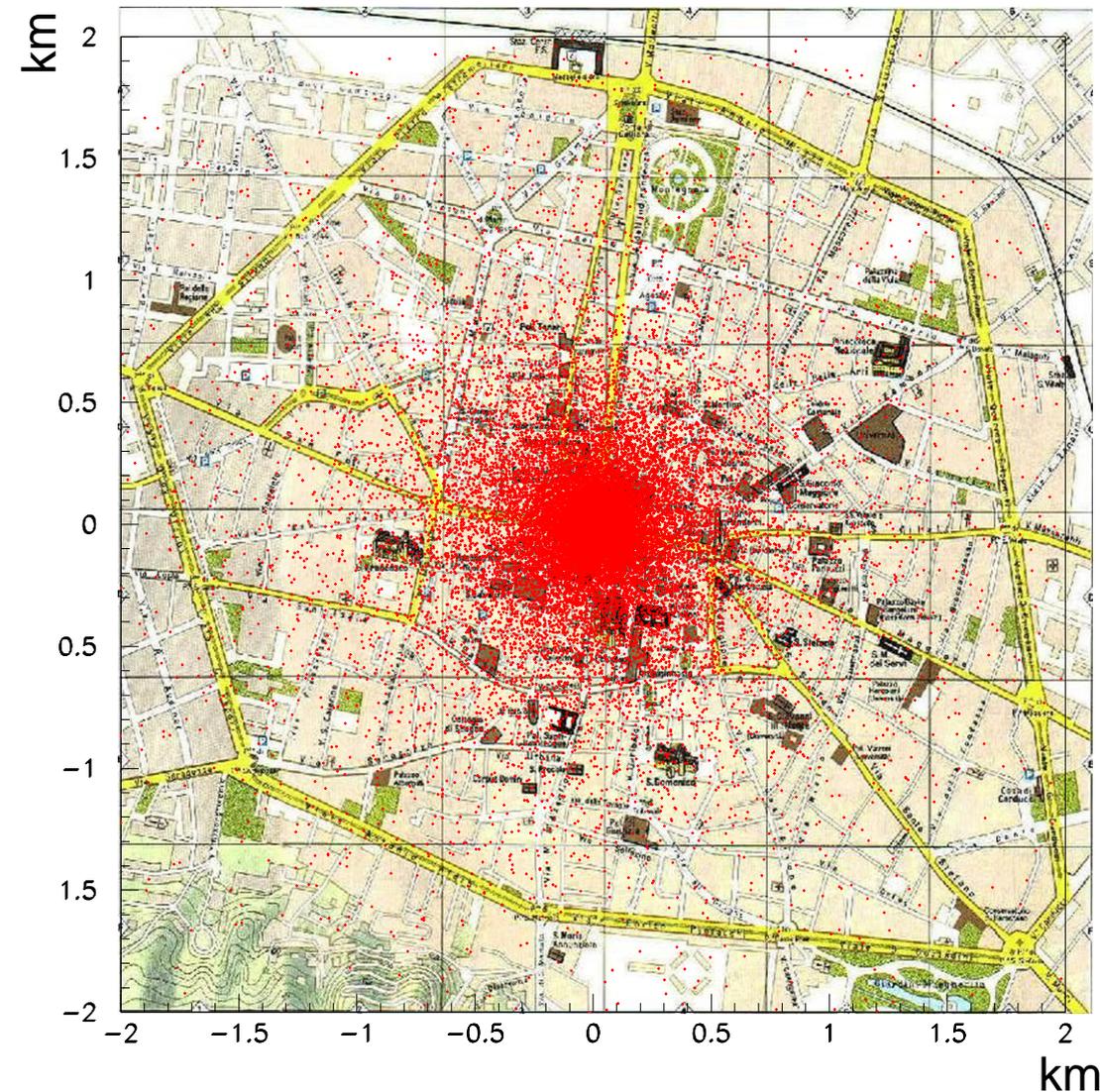


Hajo Drescher, Frankfurt U.

time = 100 μ s



Hajo Drescher, Frankfurt U.



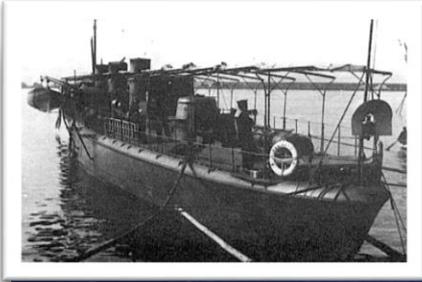
**Simulazione di uno sciame cosmico sopra
alla città di Bologna**

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

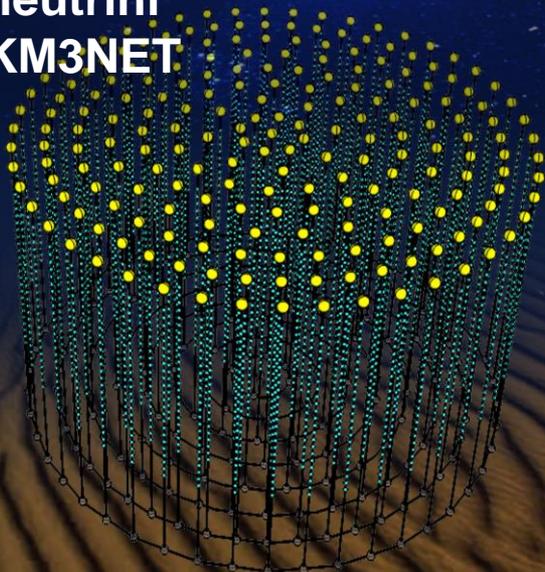
I raggi cosmici secondari vengono prodotti in nell'apertura di un grado attorno alla direzione del primario.

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

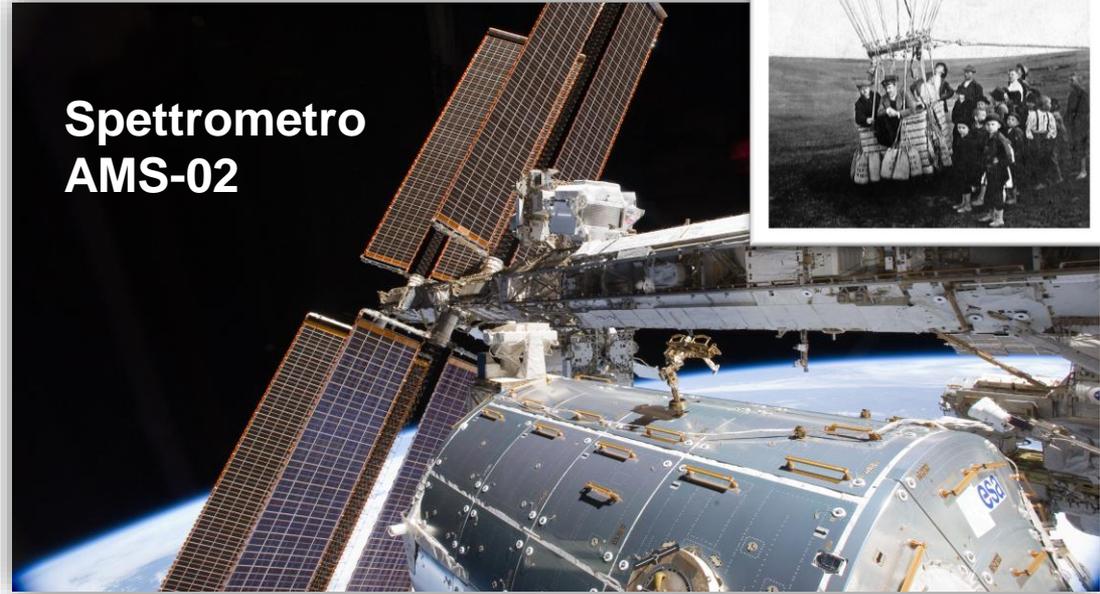
RITORNO AL FUTURO ...



Telescopio per
neutrini
KM3NET



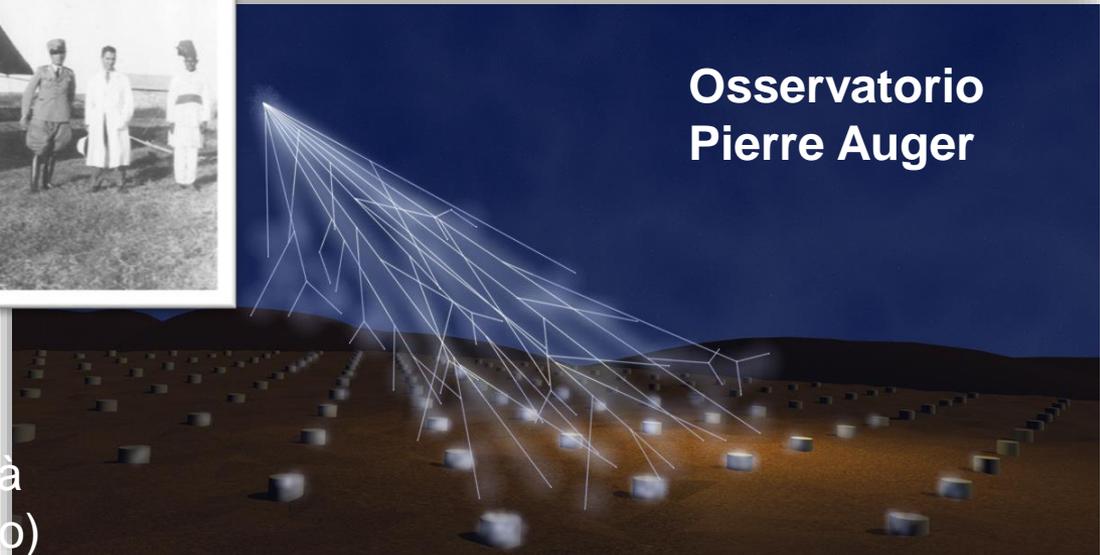
(3500 m di profondità
nel mar Mediterraneo)



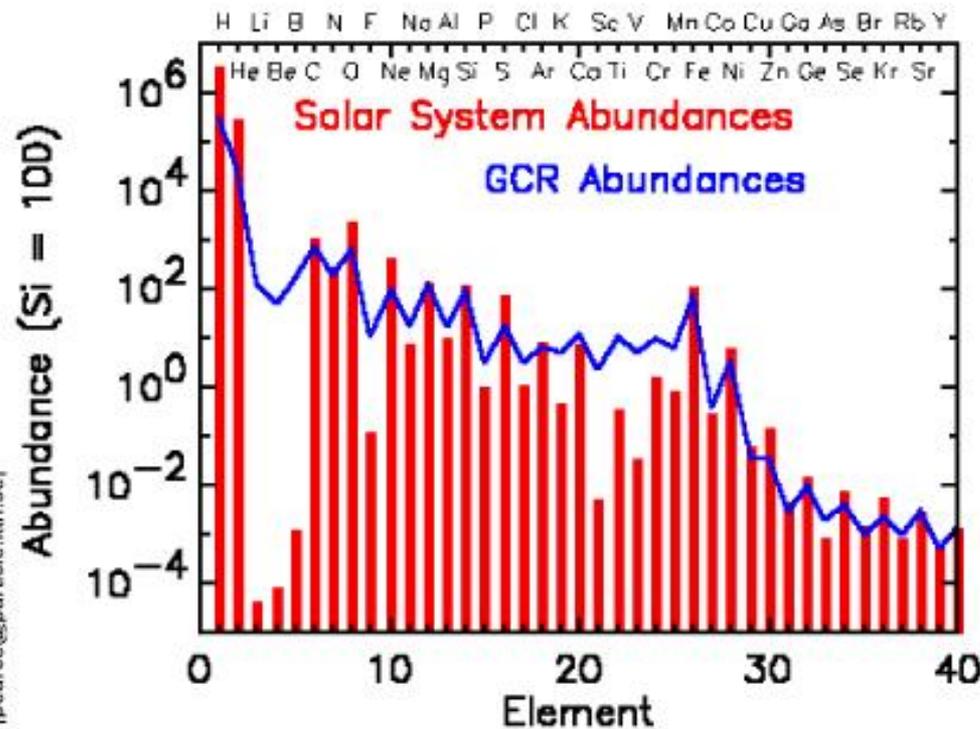
Spettrometro
AMS-02



Osservatorio
Pierre Auger



Abundance of Cosmic Rays



- Mass spectrometers have been flown onboard satellites and balloons

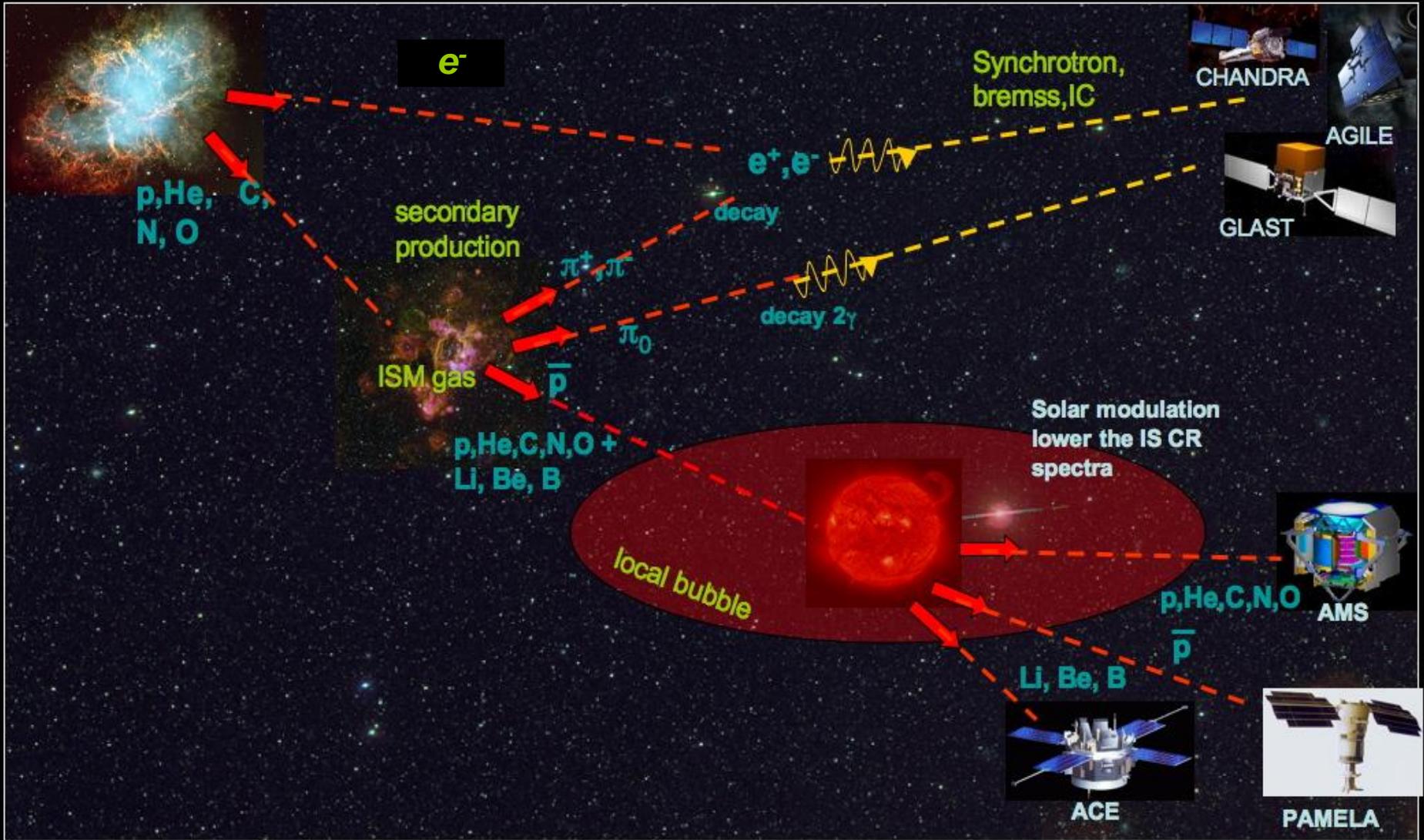
- Protons and helium are more abundant in solar system

- Not fully understood - could reflect primordial composition or reflect ease of ionisation (and hence acceleration for heavier species)

- Li / Be / B and Sc / Ti / V / Cr / Mn are more abundant in GCR

- Due to spallation of C and O (Li/Be/B) and Fe (Sc/Ti/V/Cr/Mn). Fragmented with collisions with ISM (H and He)

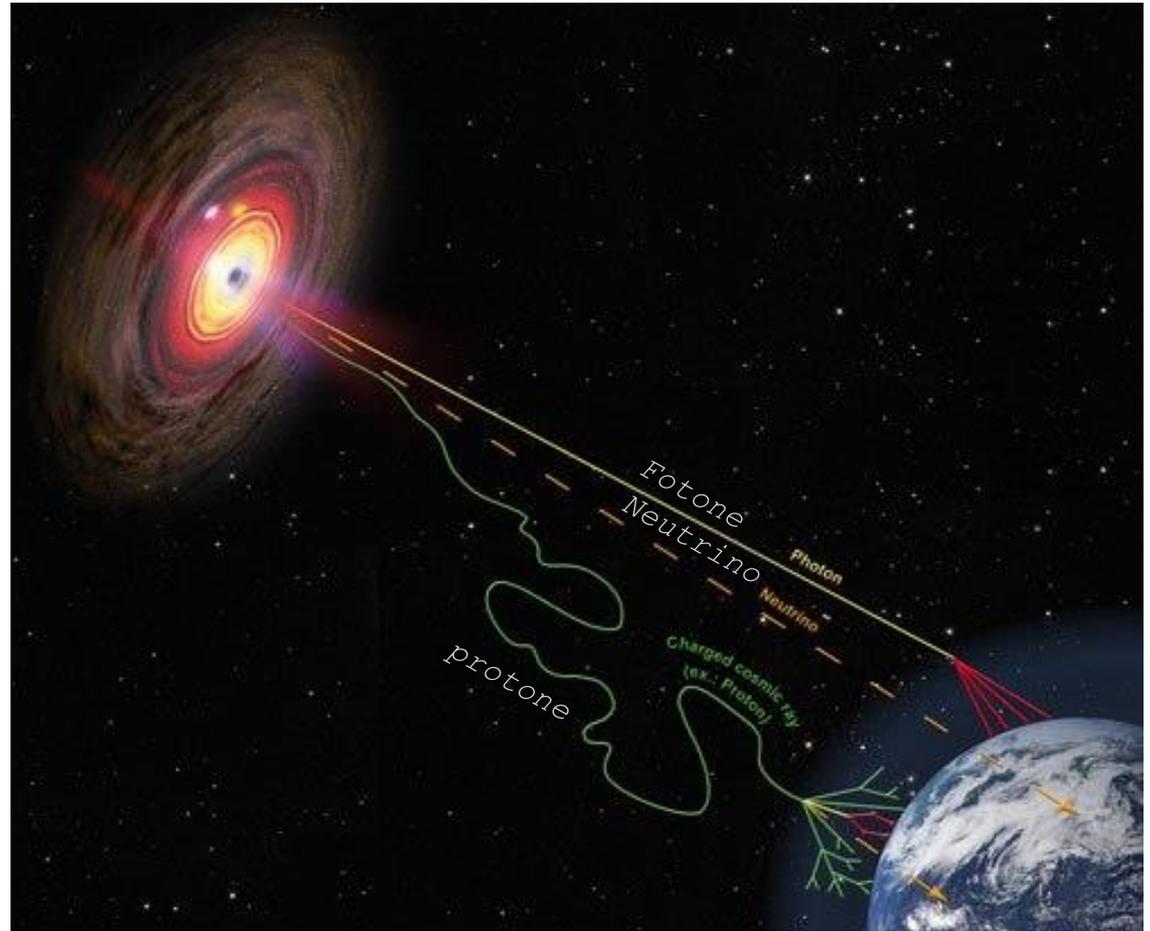
COSMIC RAYS PRODUCTION MECHANISMS



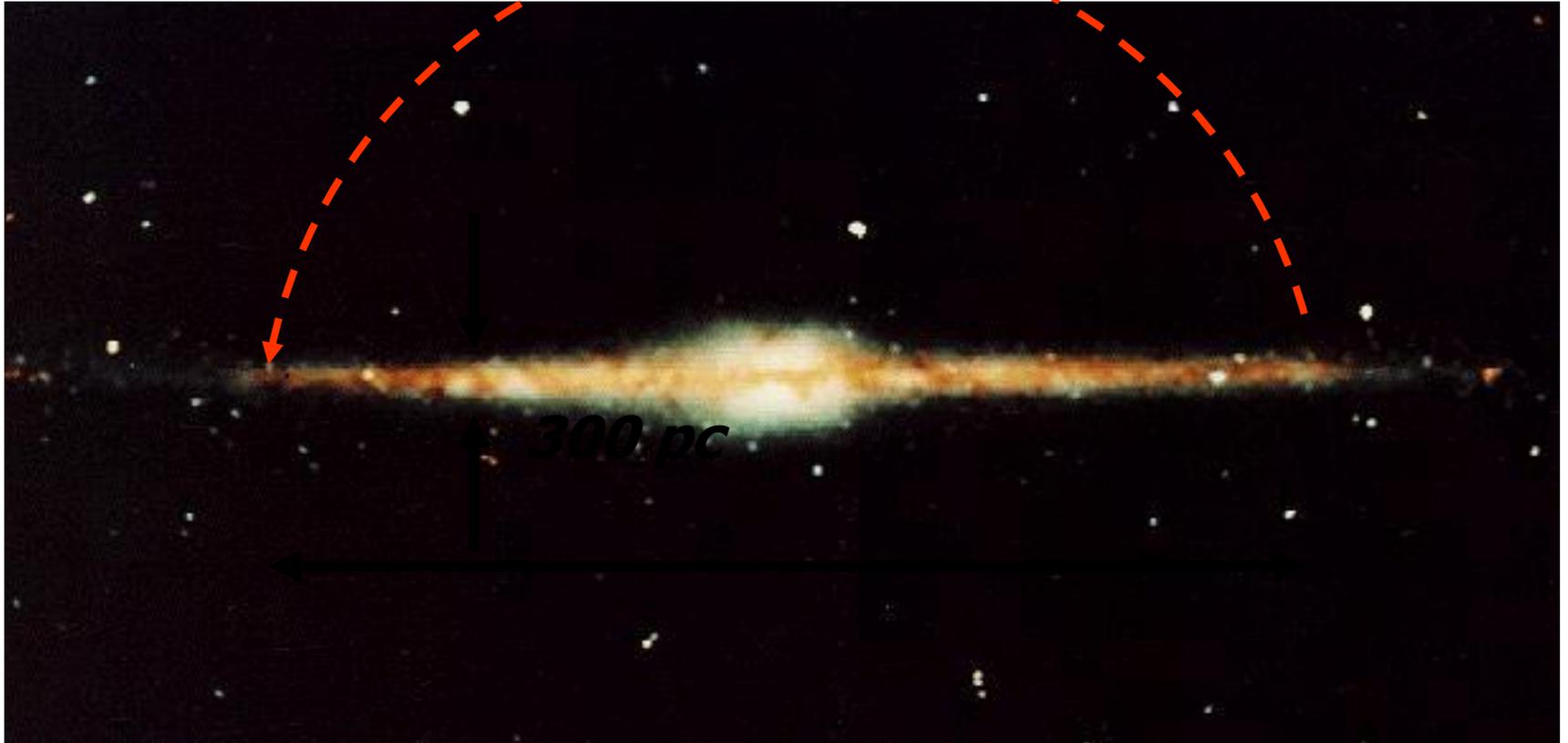
Galactic magnetic field

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

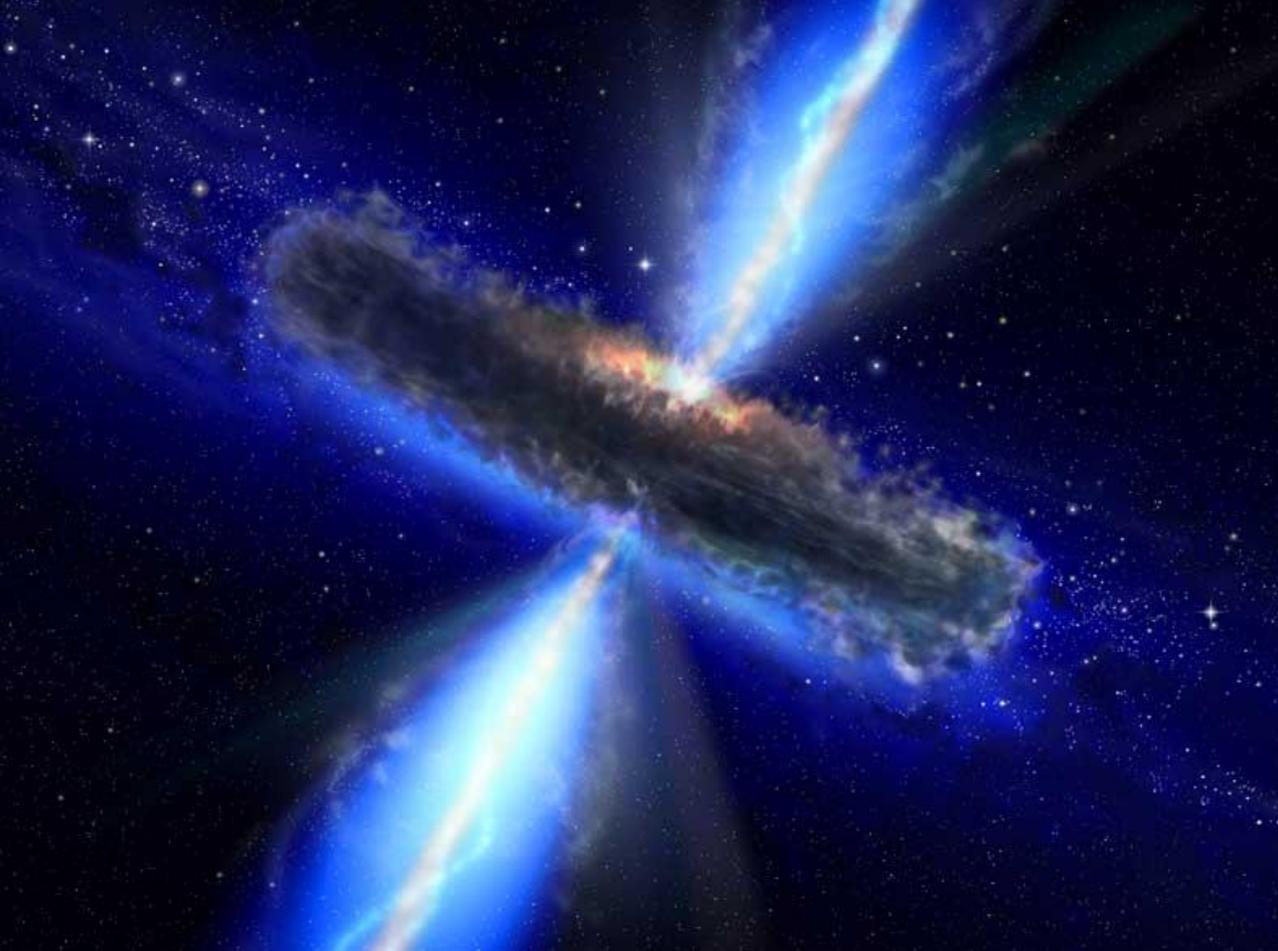
*Solo le particelle più
energetiche non vengono
significativamente deflesse!!*



Protone da $5 \cdot 10^{19}$ eV in un campo di $3 \mu\text{G}$



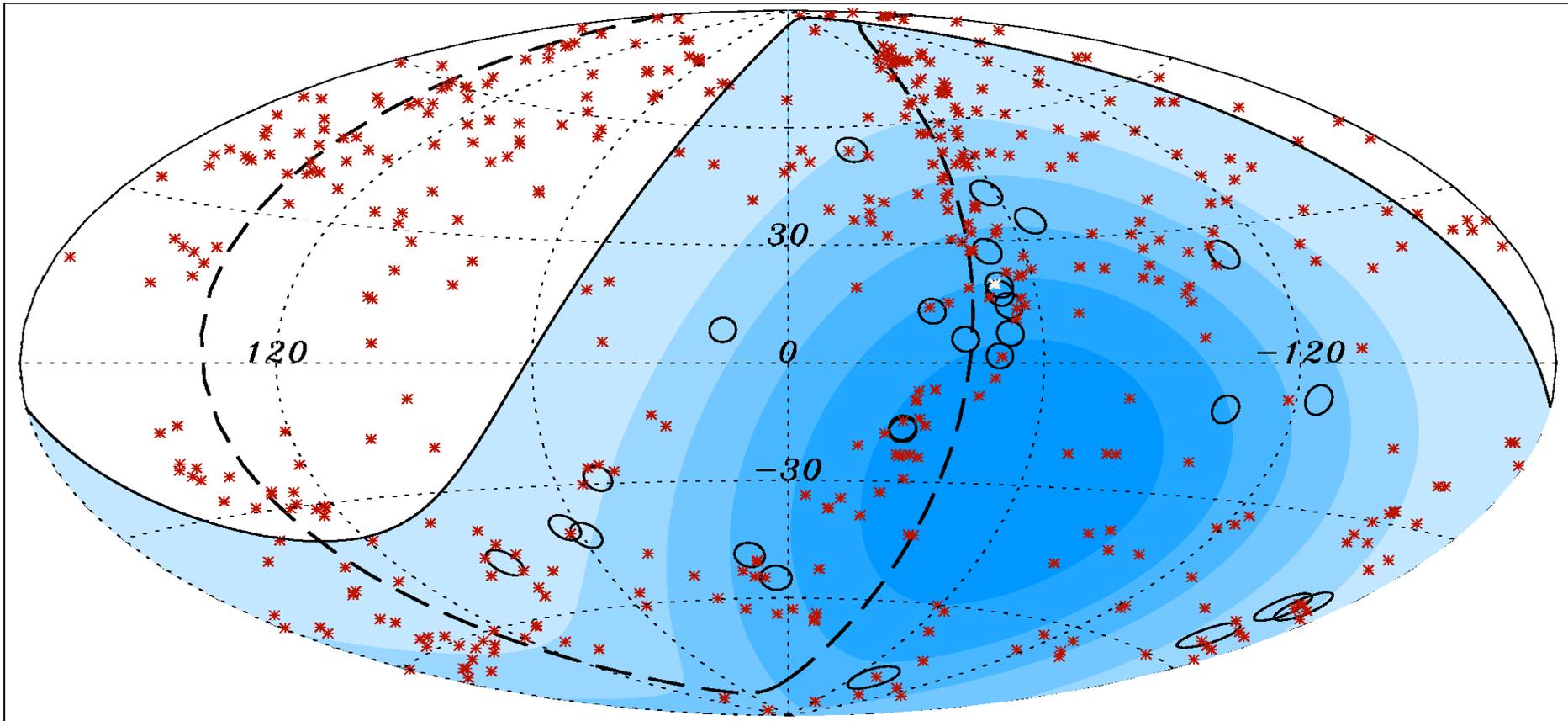
30 kpc \rightarrow 10 miliardi di volte la distanza terra-sole!



I RAGGI COSMICI ULTRA ENERGETICI

Un nuovo modo di fare astronomia

Identificazione delle sorgenti di raggi cosmici di altissima energia attraverso l'analisi ad alta statistica della loro direzione di arrivo



Le direzioni di arrivo dei raggi cosmici più energetici (cerchi) proiettate sulla sfera celeste (coordinate galattiche, proiezione di Aitoff)

IL MISTERO

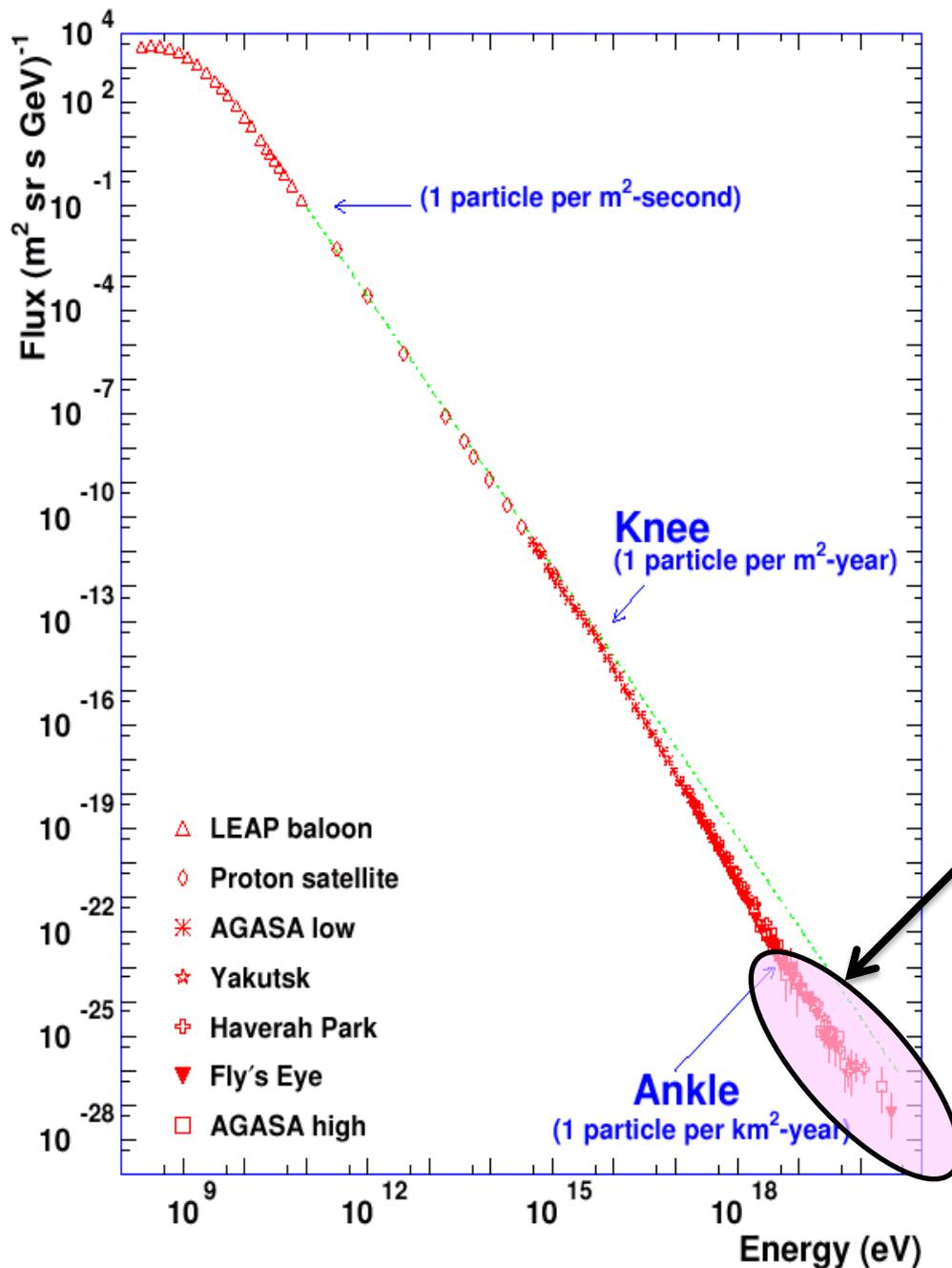
Le previsioni teoriche indicano che il flusso di raggi cosmici di energia superiore a 4×10^{19} eV debba essere fortemente ridotto.



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.



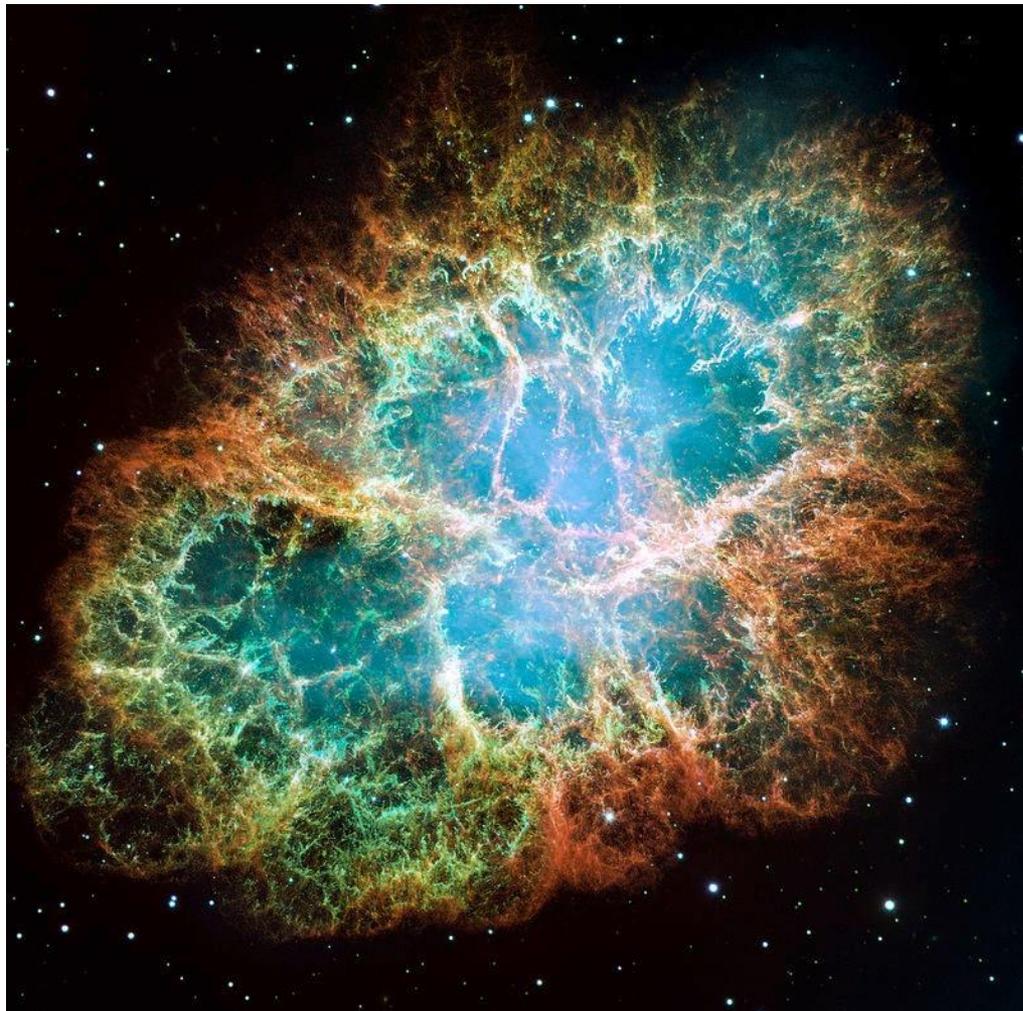
Gli oggetti più energetici osservati al mondo



In una particella microscopica è concentrata un'energia pari a quella di una pallina da tennis dopo un discreto servizio:

68 g @ 150 km/h
 ~ 59 Joules
 ~ 3.7×10^{20} eV

La Crab Nebula

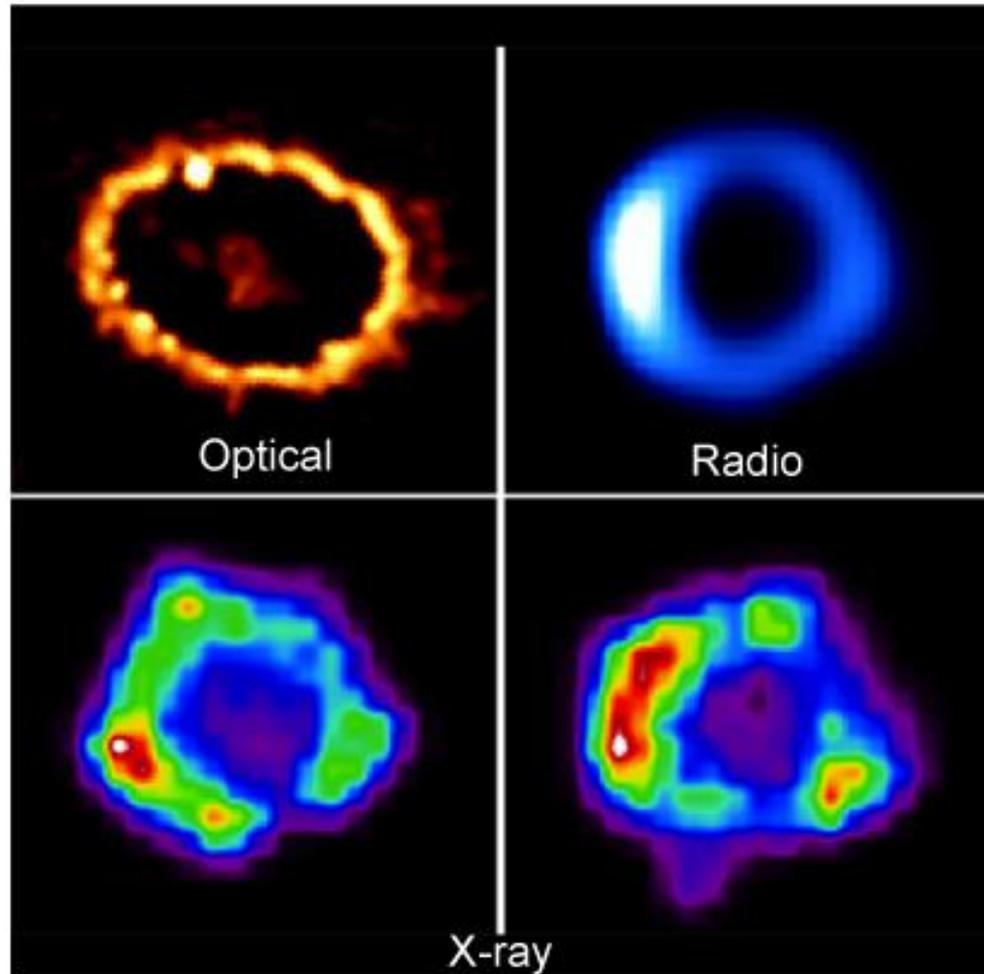


La Crab Nebula



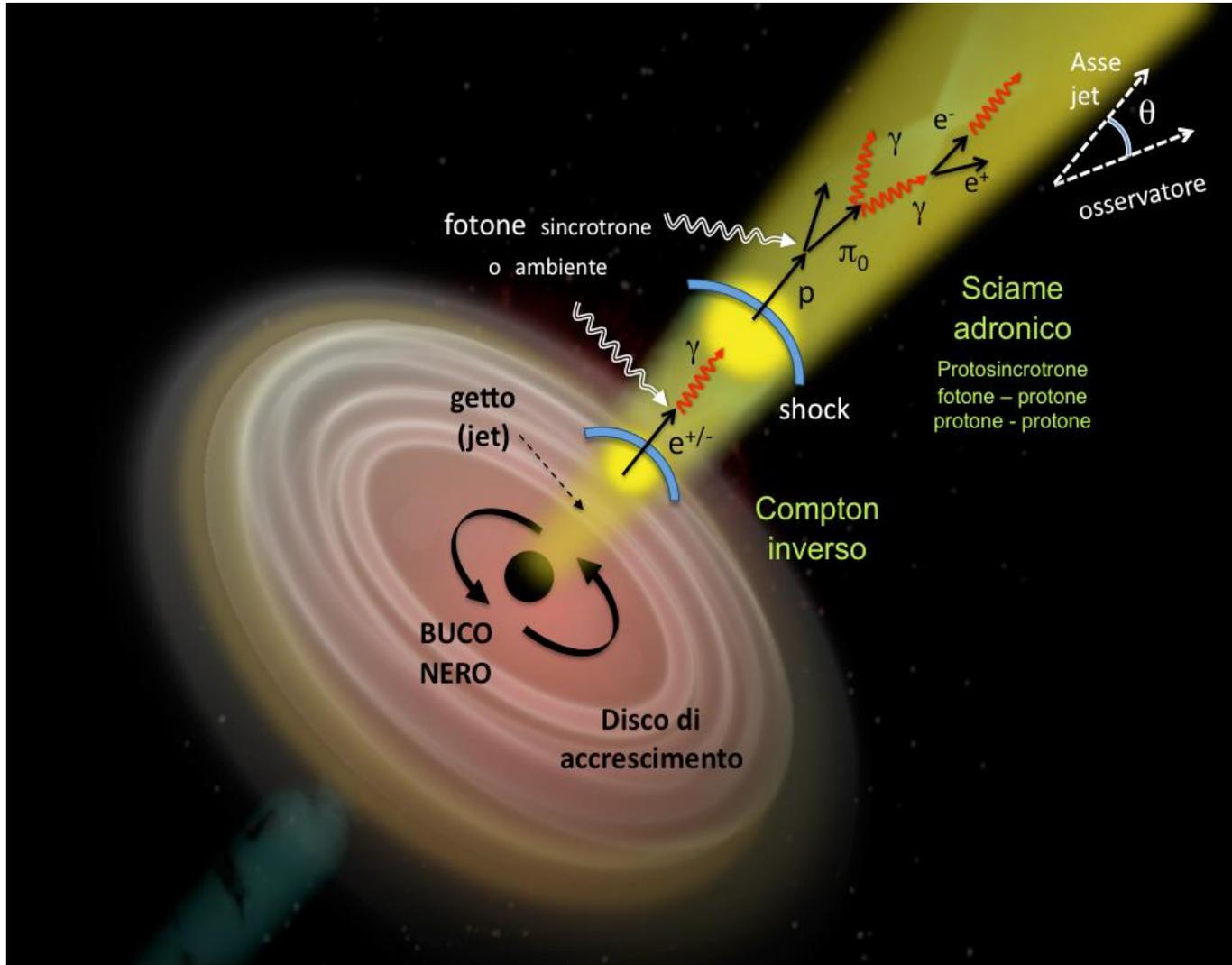
Pulsar Wind Nebula: 4 July 1054
DC a 6800 anni luce dalla Terra
nella costellazione del Toro.
Pulsar con $T=33$ ms

Supernovae Remnants



AGN

nuclei galattici attivi



Pierre Auger Observatory

*An International Experiment to Study
the Highest Energy Cosmic Rays*

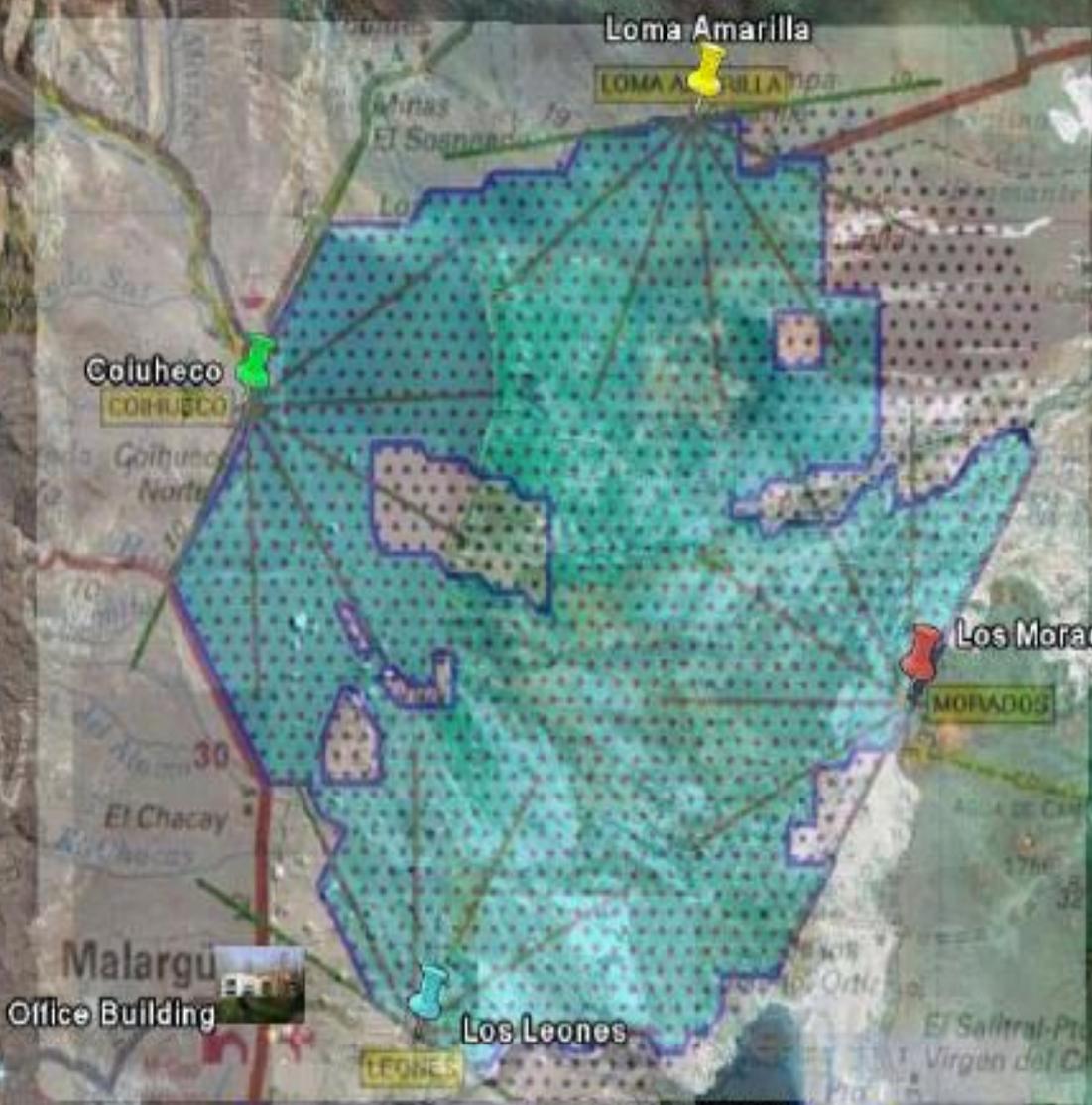


L'osservatorio Pierre Auger

il più grande osservatorio del mondo per lo studio dei raggi cosmici, un team di scienziati di diciassette nazioni

1600 telescopi per raggi cosmici ricoprono una superficie di 3000 km² della pampa Argentina

Mendoza Province, Argentina



Loma Amarilla

LOMA AMARILLA

Coluheco

COLUHECO

Los Morados

MORADOS

Los Leones

LEONES

Malargu
Office Building

Image © 2007 DigitalGlobe
Image © 2007 TerraMetrics

~ 60 km

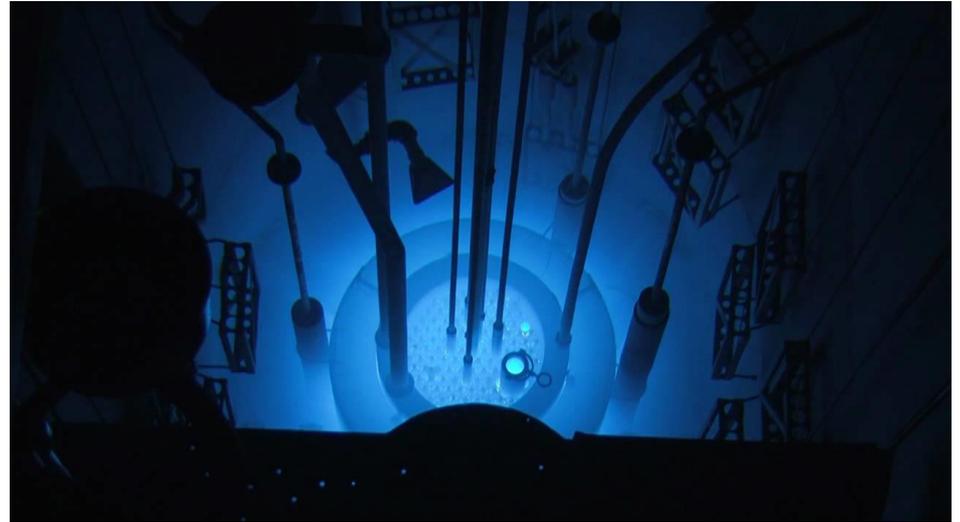
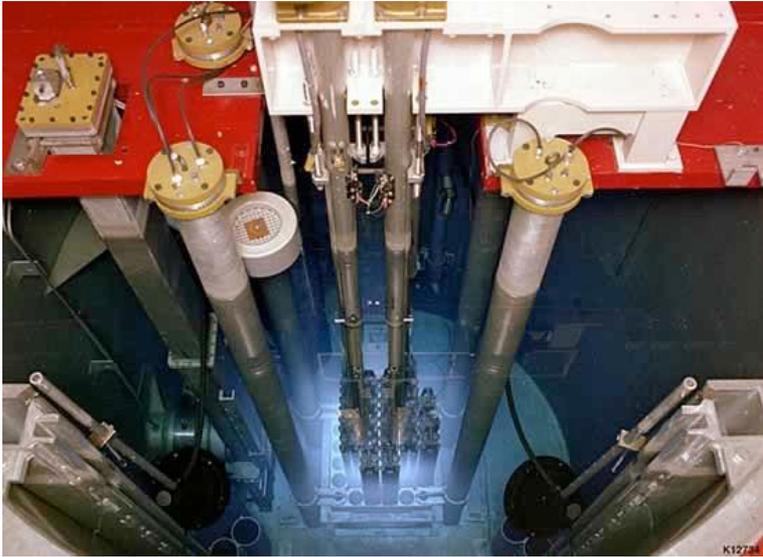
Google™

Bang supersonico

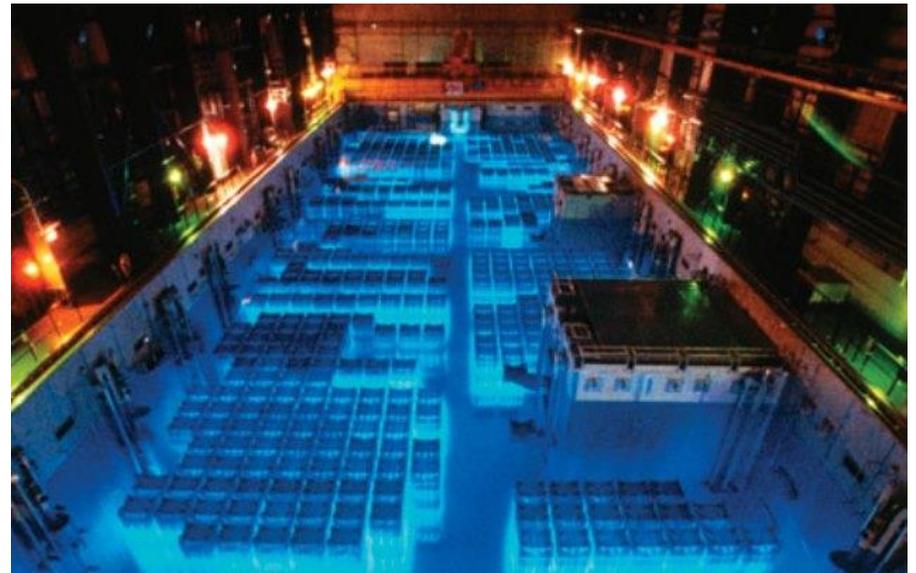
Quando un aeroplano si muove più veloce della velocità del suono, l'aria non ha tempo sufficiente per propagare il suono. Allora si accumula e forma un'onda d'urto (shock wave), un'onda sonora breve e intensa.



Un bang luminoso: luce Cherenkov



Luce Cherenkov: particelle cariche relativistiche con velocità superiore alla velocità della luce nel mezzo emettono un brevissimo flash luminoso



Imaging Air Cherenkov Telescopes

IACT

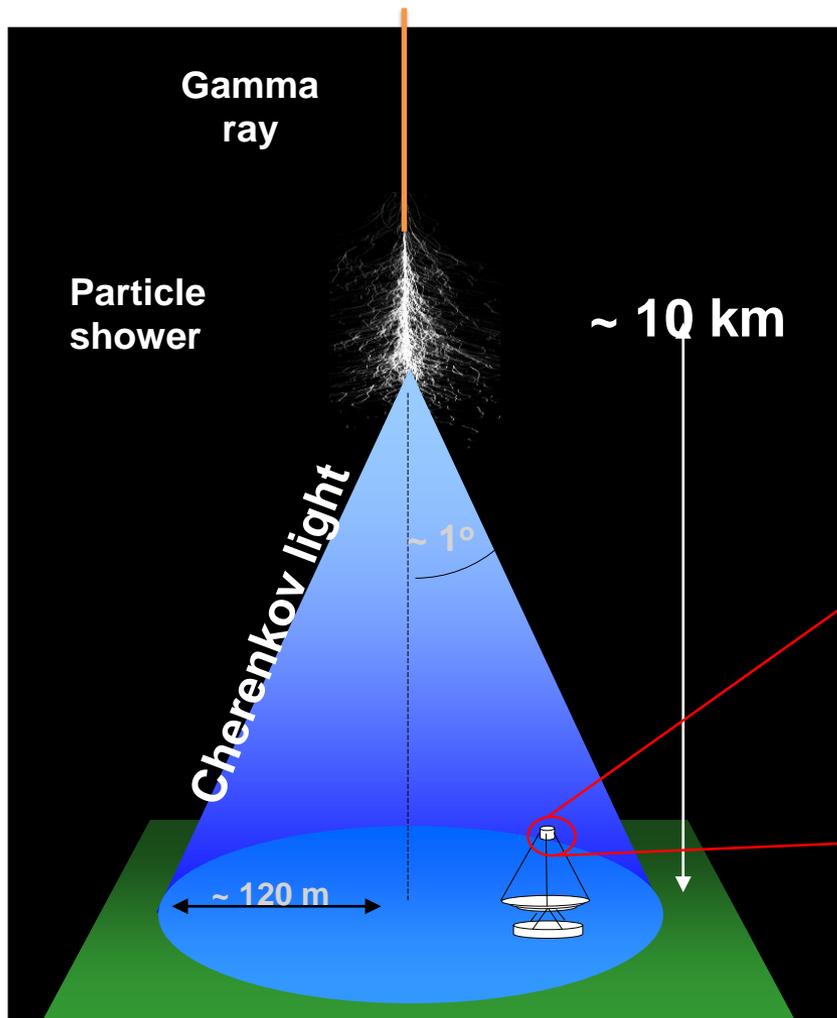
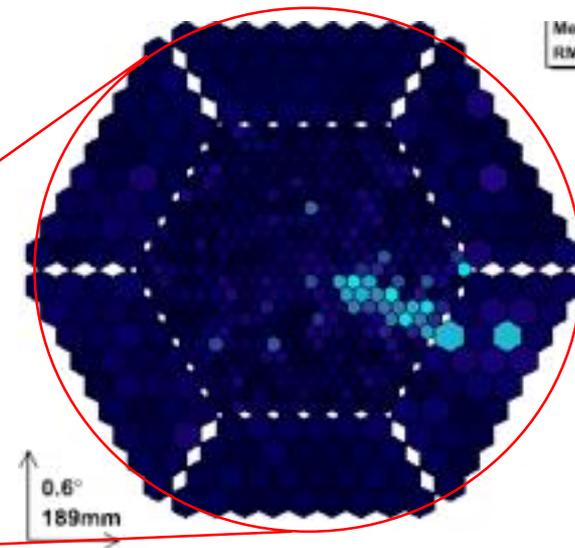


Image of Cherenkov flash on the camera



- ❖ discriminazione gamma/particella
- ❖ ricostruzione dell'energia e della direzione del primario

