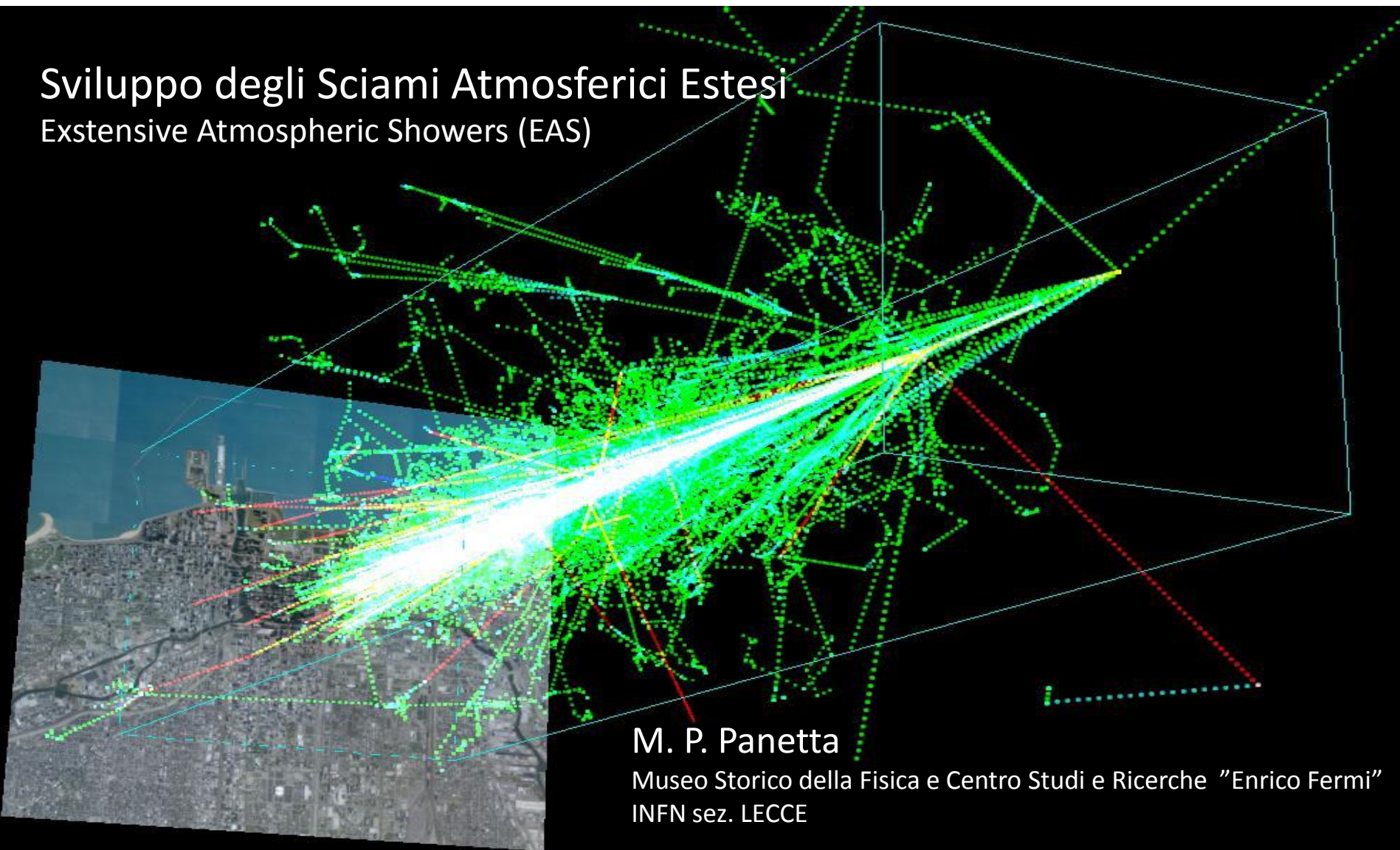


Sviluppo degli Sciami Atmosferici Estesi

Extensive Atmospheric Showers (EAS)



M. P. Panetta

Museo Storico della Fisica e Centro Studi e Ricerche "Enrico Fermi"
INFN sez. LECCE

1. Parliamo di Raggi Cosmici

Facciamo in breve riepilogo di quello che sappiamo!

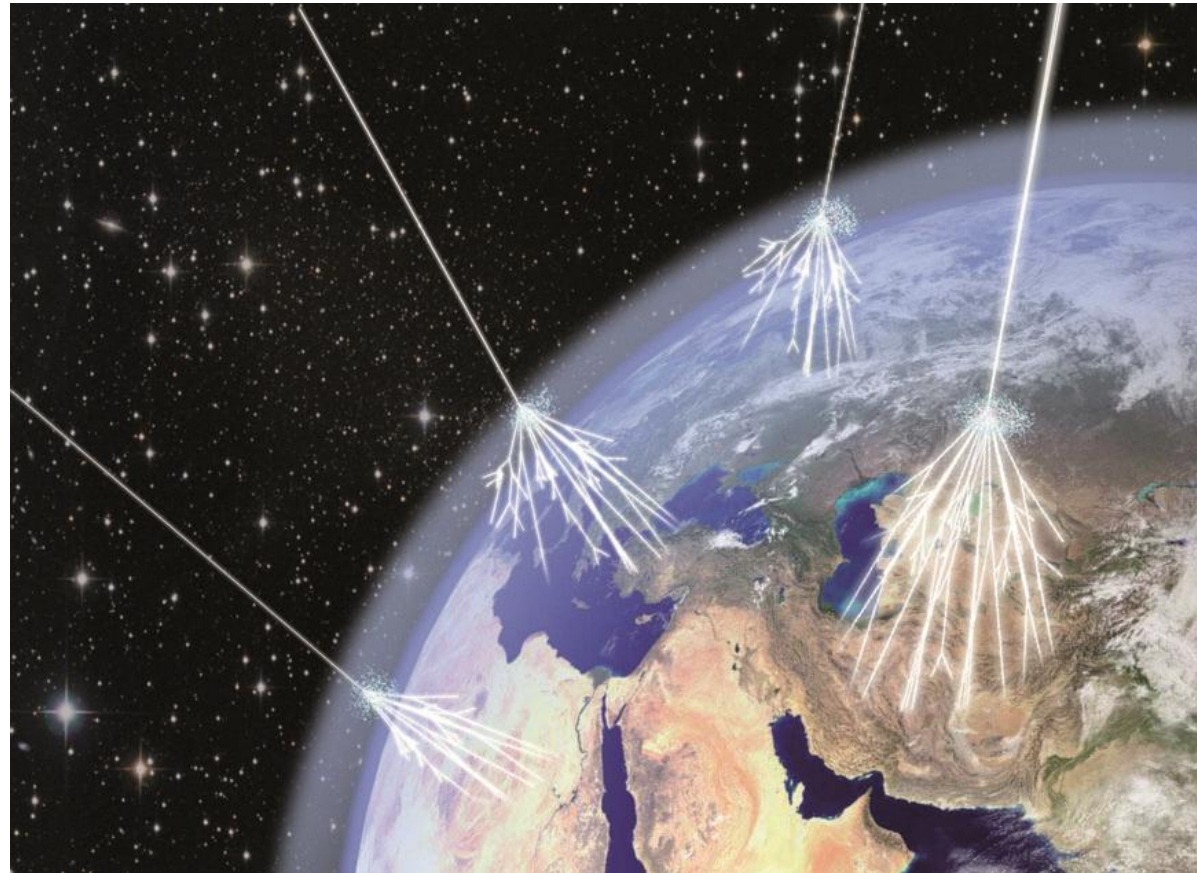


Raggi Cosmici “Primari”

Cosa sono?

Particelle cariche di altissima Energia che dallo Spazio arrivano nell’Atmosfera

- Sono una delle **principali componenti dell’Universo**
- Sono Messaggeri dello **spazio profondo**
- Sono la maggiore **fonte di materiale extra-terrestre** che raggiunge la Terra



1. Raggi Cosmici “Primari”

Sono particelle cariche:

- ♦ Protoni , Neutroni
- ♦ Nuclei di Elio (le particelle α : 2 protoni + 2 neutroni)
- ♦ Nuclei atomici di tutti gli elementi della tavola periodica
C (Z=6), O (Z=8), Na (Z=11) , Fe (Z=26) ...

♦ Elettroni

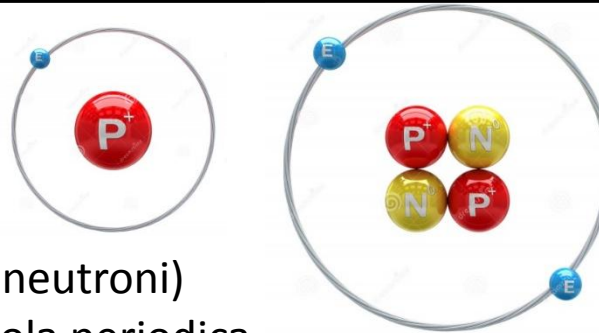
♦ Un pizzico di «ANTIMATERIA» ;)

particelle simili agli elettroni ma con carica positiva → **positroni**
simili ai protoni ma con carica negativa → **antiprotoni**

⚡ ? ⚡ ? ⚡ ?

♦ E forse anche **nuclei di Antimateria** ~

anti-nuclei di Elio: fatti di antiprotoni e antineutroni



Nucleo formato da protoni(+) e neutroni() tenuti assieme dalla [forza nucleare forte](#)

atomo

→ elettroni(-) all'esterno del nucleo si collocano a differenti livelli di energia (legati al nucleo dall'interazione [elettromagnetica](#))



Composizione ...dipende dall' ENERGIA

- ~ 85 % protoni
- ~ 11,5 % Nuclei di elio
- ~ 2 % elettroni
- ~ 1% Altri nuclei
- ~ 0,1 % positroni
-

1. Raggi Cosmici “Primari”

Da dove vengono i Raggi Cosmici Primari ?

L'identificazione delle sorgenti di Raggi Cosmici è correlata alla loro **ENERGIA**

Alle basse energie

Origine solare - Eruzioni solari,
Brillamenti



Alle alte energie

Origine galattica - Esplosioni di Super Nova
(Prob. la Nebulosa del Granchio)



Ad altissime energie

Origine extra galattica - Buchi neri
super massivi, quasar, oggetti ?
estremi, difetti dello spazio tempo?
?



1. Raggi Cosmici “Primari”

Energia dei Raggi Cosmici

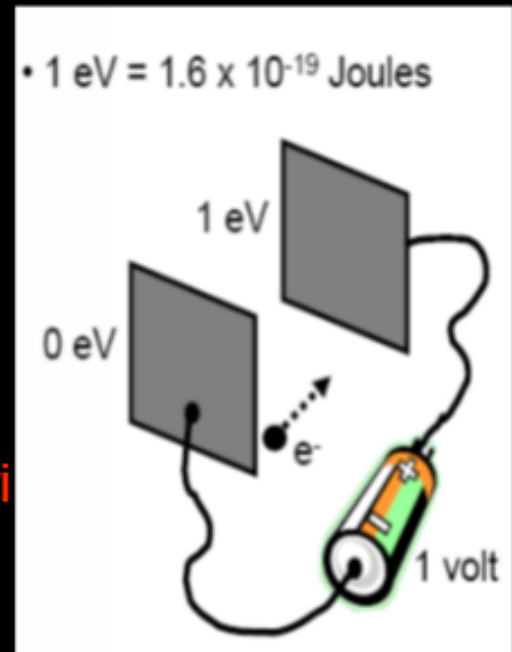
Nella fisica delle Alte Energie l'unità di misura per l'Energia usata è l'**elettron -Volt**

• Ma quanta energia è 1 eV ?

$$1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J} \quad 1 \text{ eV}/c^2 = 1.8 \cdot 10^{-36} \text{ Kg}$$

La luce = radiazione elettromagnetica
costituita da fotoni di energia pari
a circa 1 eV.

Energia di una molecola d'aria in questa stanza = 0.03 eV



1. Raggi Cosmici “Primari”

Che energia hanno i Raggi Cosmici ?

Si utilizzano multipli dell' eV e le potenze in base 10

Energia	abbreviazione
$10^3 \text{ eV} = 1,000 \text{ eV}$	KeV = Kilo eV
$10^6 \text{ eV} = 1,000,000 \text{ eV}$	MeV = Mega eV
$10^9 \text{ eV} = 1,000,000,000 \text{ eV}$	GeV = Giga eV
$10^{12} \text{ eV} = 1,000,000,000,000 \text{ eV}$	TeV = Tera eV
$10^{15} \text{ eV} = 1,000,000,000,000,000 \text{ eV}$	PeV = Peta eV
$10^{18} \text{ eV} = 1,000,000,000,000,000,000 \text{ eV}$	EeV = Exa eV
$10^{21} \text{ eV} = 1,000,000,000,000,000,000,000 \text{ eV}$	ZeV = Zetta eV

raggi X

massa 2 elettroni

massa protone

LHC



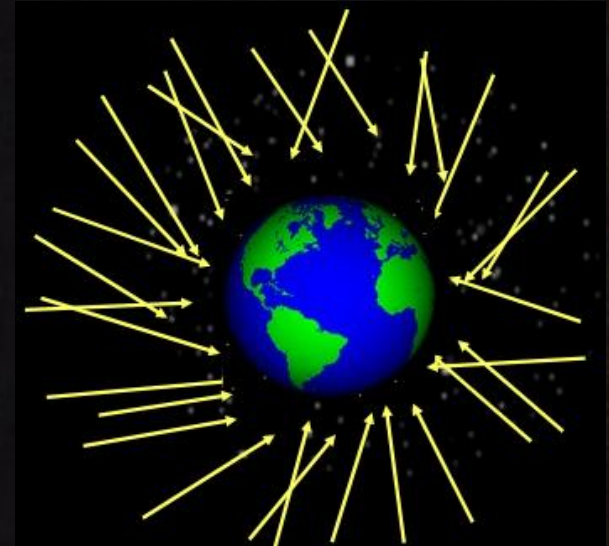
Più comodo del dover dire
«uno stramilione di miliardi di
milioni», no?

1. Raggi Cosmici “Primari”

Quanti raggi cosmici primari ci raggiungono?

I **raggi cosmici** bombardano continuamente la Terra da ogni direzione

Fuori dall'atmosfera terrestre su ogni m^2 «piovono» circa 30000 particelle ogni secondo!!!

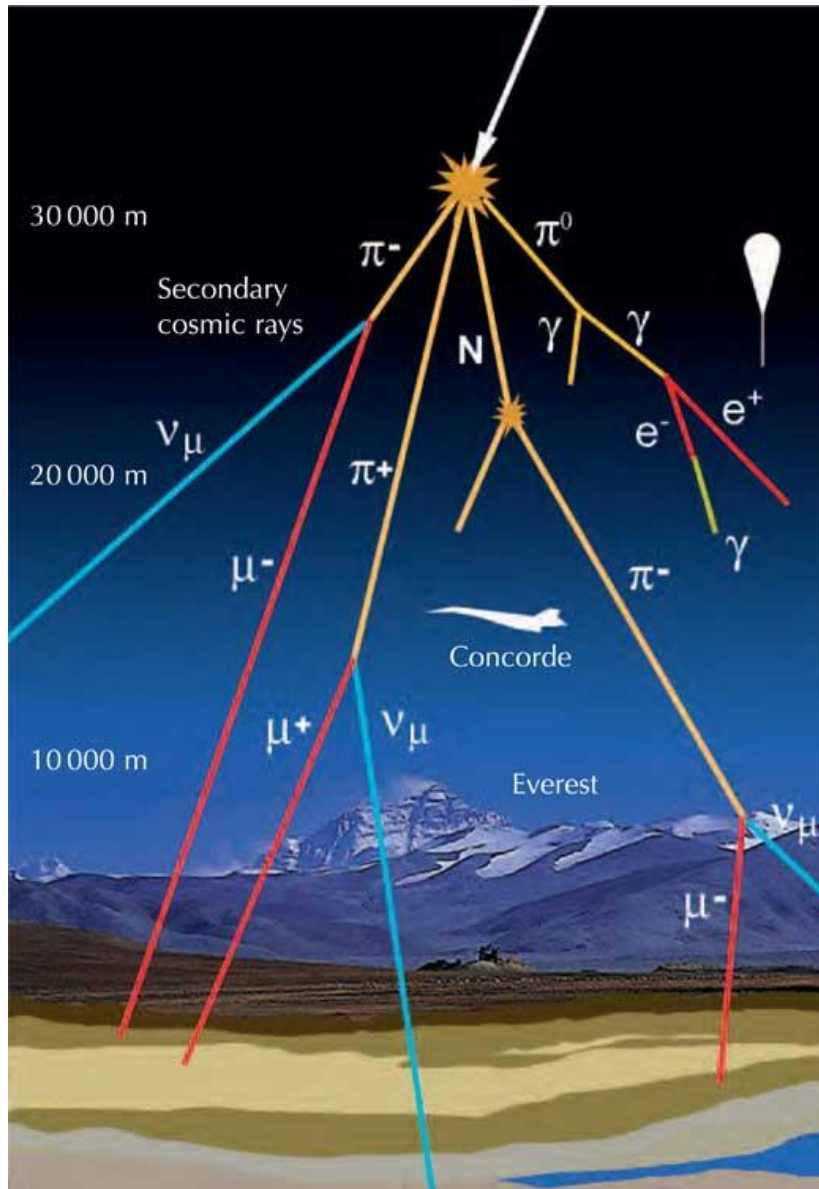


L' **Atmosfera** ci scherma dalla **maggior parte dei raggi** cosmici altrimenti nocivi per gli esseri viventi

Quindi, prima di offrirvi volontari per una missione su Marte, pensateci un attimo ...



2. Raggi Cosmici “Secondari”



Raggi cosmici primari si avvicinano alla Terra ed incontrano l'atmosfera....

Danno luogo a catene di interazioni nucleari e subnucleari, il cui risultato è la formazione dei

Raggi Cosmici Secondari

I protoni subiscono la prima collisione con i nuclei degli atomi dei gas atmosferici poco dopo essere entrati in Atmosfera: dopo aver attraversato 1/15 della massa totale di aria al di sopra del livello del mare (70 g/cm^2)

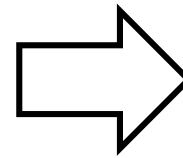
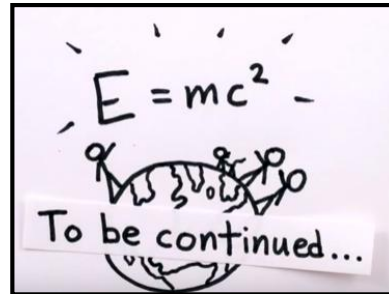
Le particelle α (Elio) e i nuclei più pesanti collidono ancora prima.

La probabilità che una particella dei raggi cosmici primari sfugga a collisioni nucleari finché non raggiunge il livello del mare è praticamente nulla.

2. Raggi Cosmici “Secondari”

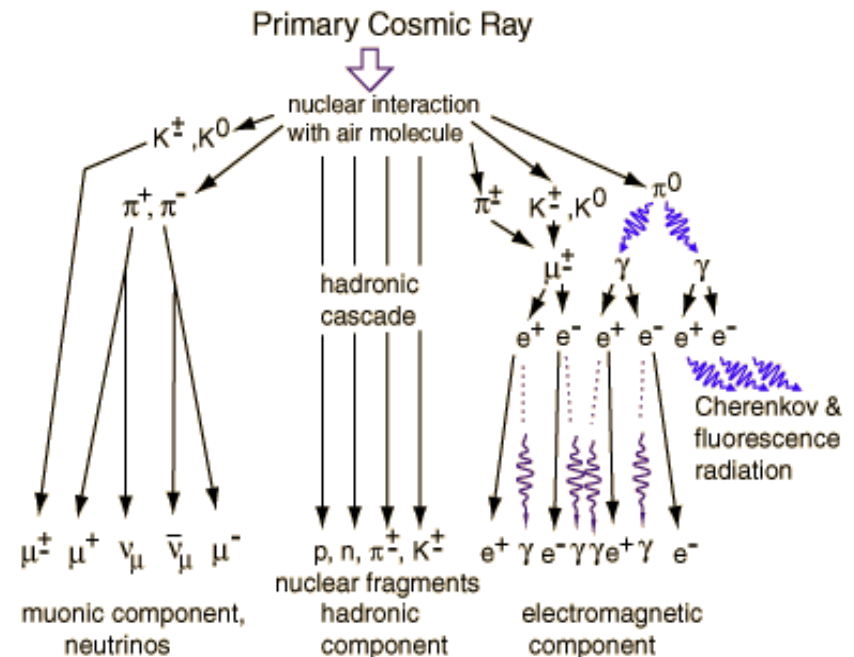
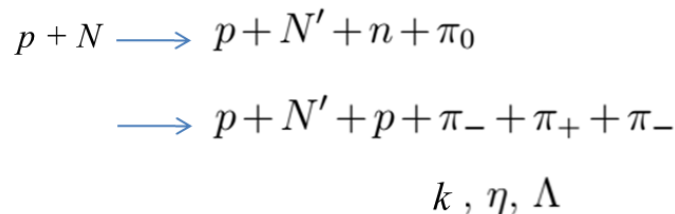
Nell’urto tra un Nucleo dell’atmosfera e il Raggio Cosmico primario, in generale questo si disintegra, e nuove particelle si creano nell’interazione.

Tutto espresso da ad una FAMOSA EQUAZIONE



$$E^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2$$

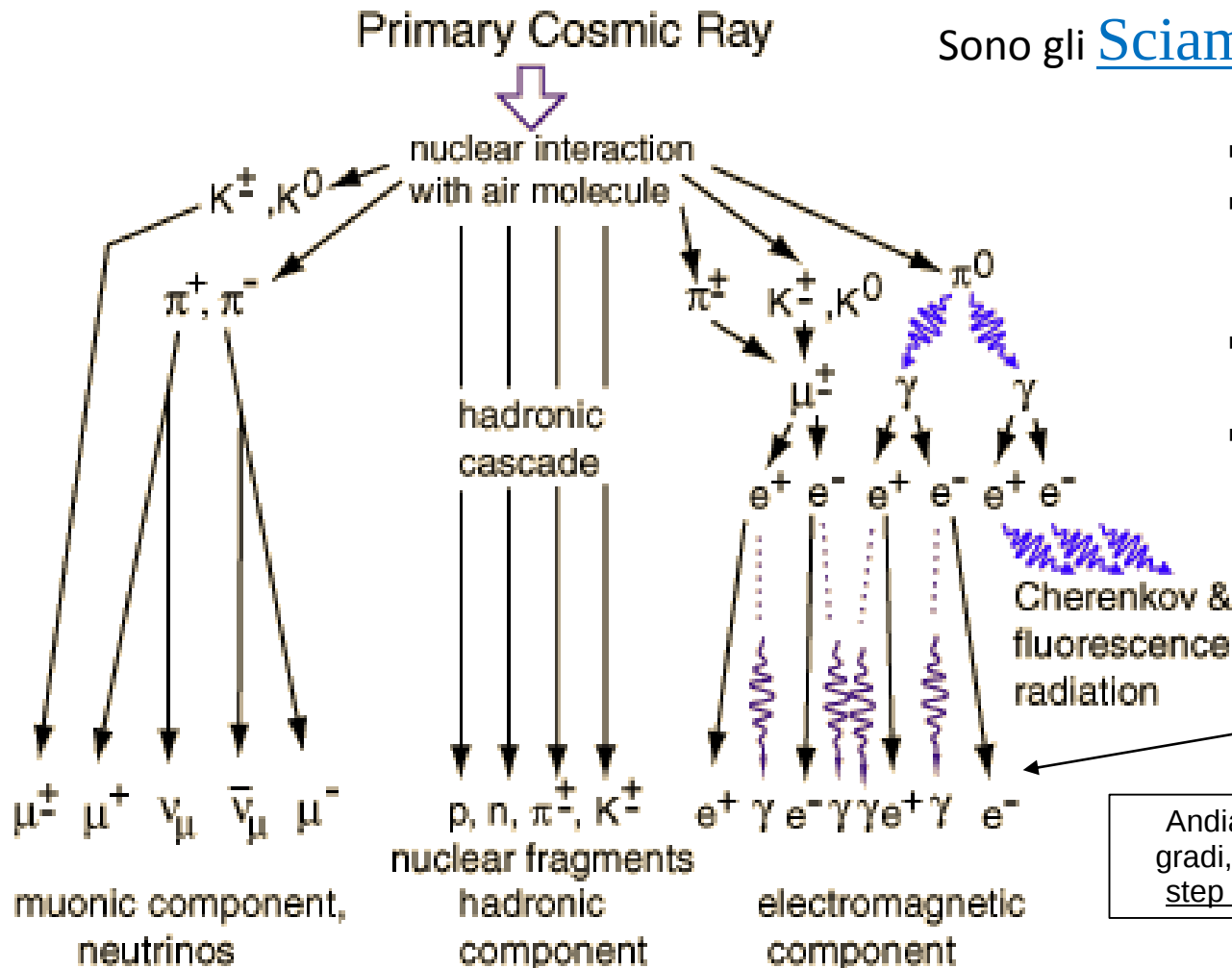
I prodotti delle collisioni, nuovi protoni e neutroni, possono avere energie sufficienti per rompere altri nuclei e generare particelle a vita breve: mesoni π (*pioni*), mesoni k (*kaoni*) e iperoni



2. Gli Sciami Atmosferici Estesi

In queste interazioni sono numerosissime le particelle che si generano...

Sono gli Sciame Atmosferici Estesi



- Protoni, Neutroni, Antiprotoni
- Pioni $\pi^\pm$ e kaoni $k^\pm$ che decadono in muoni $\mu^\pm$ e neutrini ν e $\bar{\nu}$...
- Pioni π^0 che decadono in fotoni γ
- I fotoni danno luogo a un processo a catena: cascata elettromagnetica con produzione di elettroni e positroni, ed ancora fotoni, ed elettroni e positroni ...

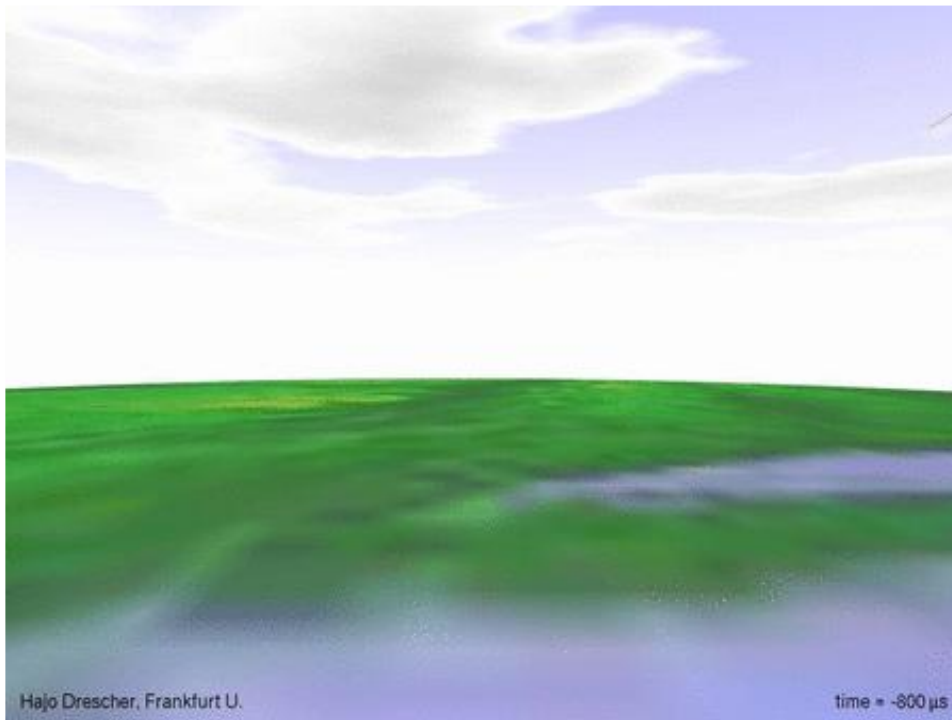
Andiamo per gradi, anzi per step di 33 μs



2. Gli Sciami Atmosferici Estesi

In queste interazioni sono numerosissime le particelle che si generano...

Sono gli Sciami Atmosferici Estesi



- Protoni, Neutroni, Antiprotoni
- Pioni $\pi^\pm$ e kaoni $k^\pm$ che decadono in muoni $\mu^\pm$ e neutrini ν e $\bar{\nu}$...
- Pioni π^0 che decadono in fotoni γ
- I fotoni danno luogo a un processo a catena: cascata elettromagnetica con produzione di elettroni e positroni, ed ancora fotoni, ed elettroni e positroni ...

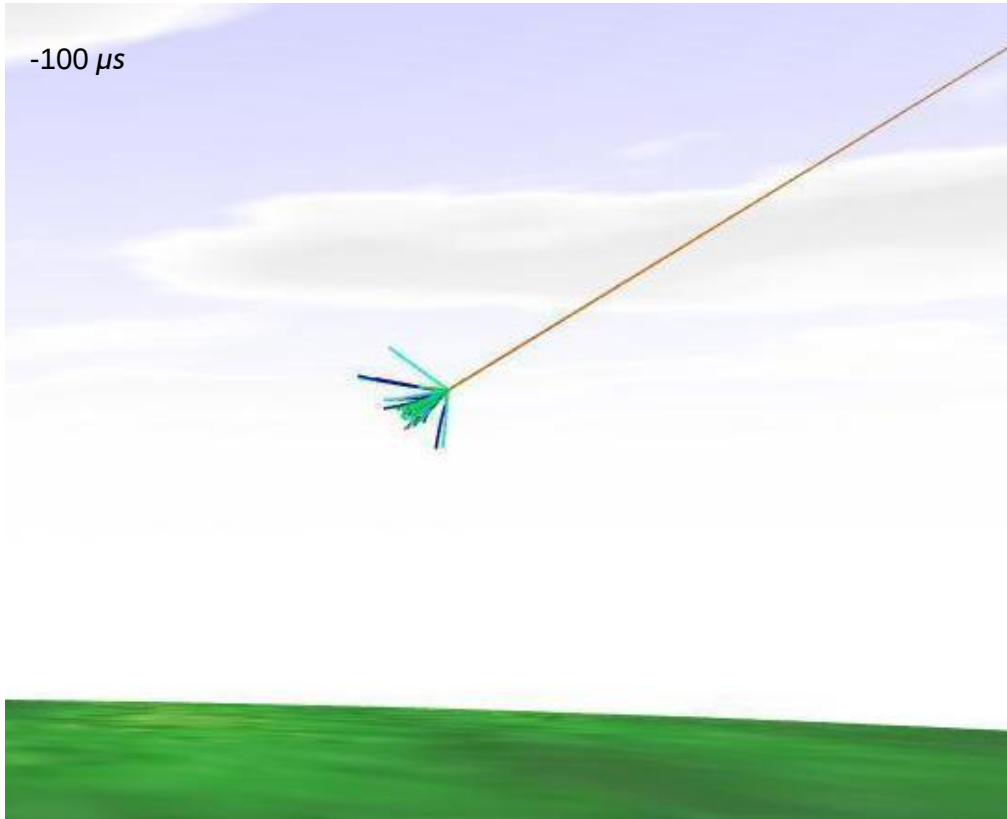
Andiamo per gradi, anzi per step di 33 μ s



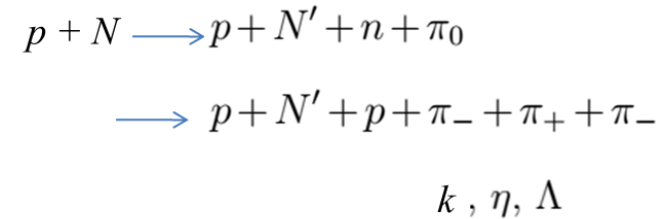
2. Gli Sciami Atmosferici Estesi

Sciame Atmosferico Esteso (EAS) generato da un protone di energia 10^{19} eV

Proiezione X-Z le traiettorie delle particelle sono mostrate



Il protone interagisce con un nucleo dei gas generando $\pi^\pm$ e $k^\pm$ altri protoni e neutroni



Blu : elettroni + positroni e^+ / e^-

Celeste : fotoni γ

Rosso : neutroni n

Arancio : protoni p / antiprotoni $\bar{p}$

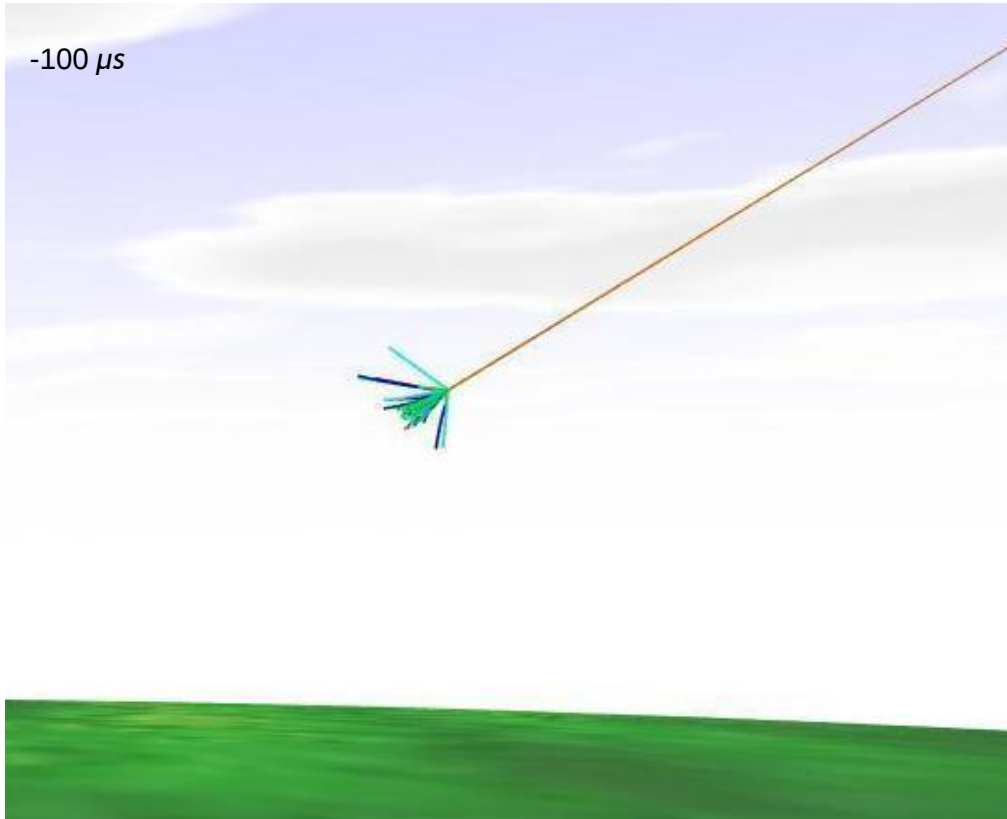
Grigio : mesoni $\pi^+ / \pi^- / \pi^0$

Verde : muoni μ^- / μ^+

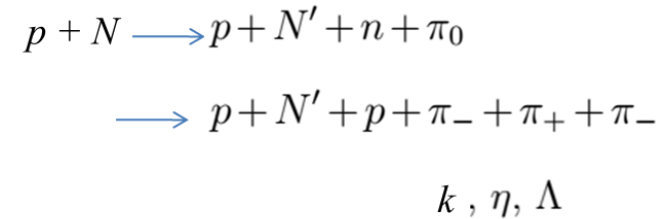
2. Gli Sciami Atmosferici Estesi

Sciame Atmosferico Esteso (EAS) generato da un protone di energia 10^{19} eV

Proiezione X-Z le traiettorie delle particelle sono mostrate



Il protone interagisce con un nucleo dei gas generando $\pi^\pm$, $k^\pm$, altri protoni e neutroni



Blu : elettroni + positroni e^+ / e^-
Celeste : fotoni γ
Rosso : neutroni n
Arancio : protoni p / antiprotoni $\bar{p}$
Grigio : mesoni $\pi^+ / \pi^- / \pi^0$
Verde : muoni μ^- / μ^+

I mesoni π o *pioni* hanno carica $+, -, 0$.

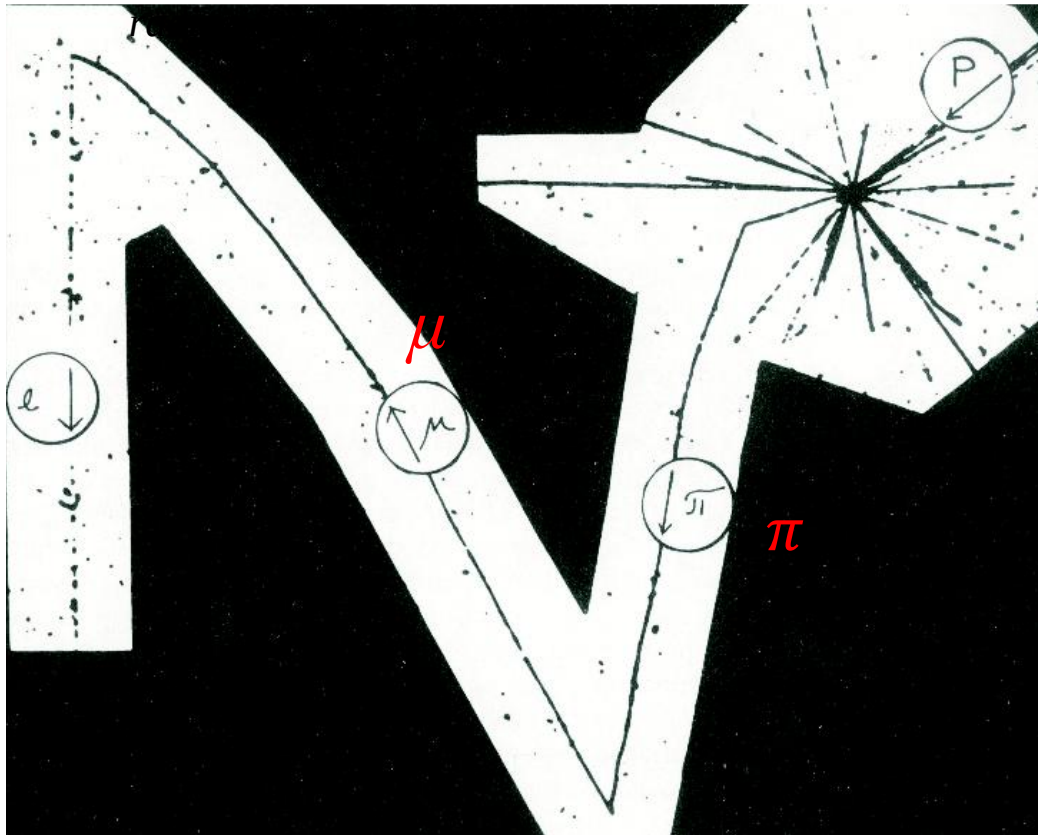
In quiete decadono in 10^{-8} s ($\pi^\pm$) e 10^{-16} s (π^0).

Nei raggi cosmici hanno $v \approx c$, e grazie agli effetti relativistici vivono di più ma non abbastanza per raggiungere il livello del mare

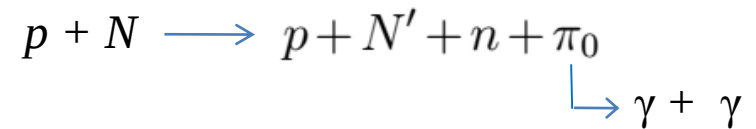
2. Gli Sciami Atmosferici Estesi

I pioni sono stati scoperti, osservati per la prima volta, negli EAS

La scoperta del pione nella

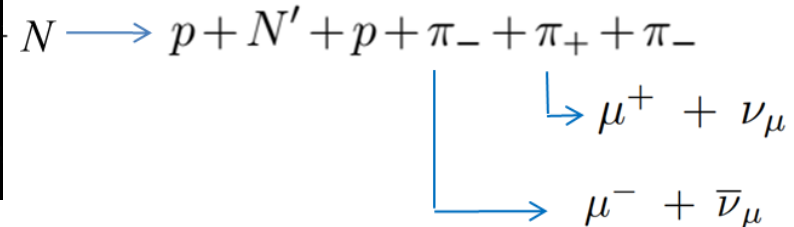


Il protone interagisce con un nucleo dei gas generando $\pi^\pm$ e $k^\pm$ altri protoni e neutroni



I π^0 decadono in 2 fotoni γ

Mentre π^{+-} decadono in muone μ e neutrino ν



I mesoni π o *pioni* hanno carica $+, -, 0$.

In quiete decadono in 10^{-8} s ($\pi^\pm$) e 10^{-16} s (π^0).

Nei raggi cosmici hanno $v \approx c$, e grazie agli effetti relativistici vivono di più ma non abbastanza per raggiungere il livello del mare

2. Gli Sciami Atmosferici Estesi

Blu : elettroni + positroni e^+ / e^-

Celeste : fotoni γ

Rosso : neutroni n

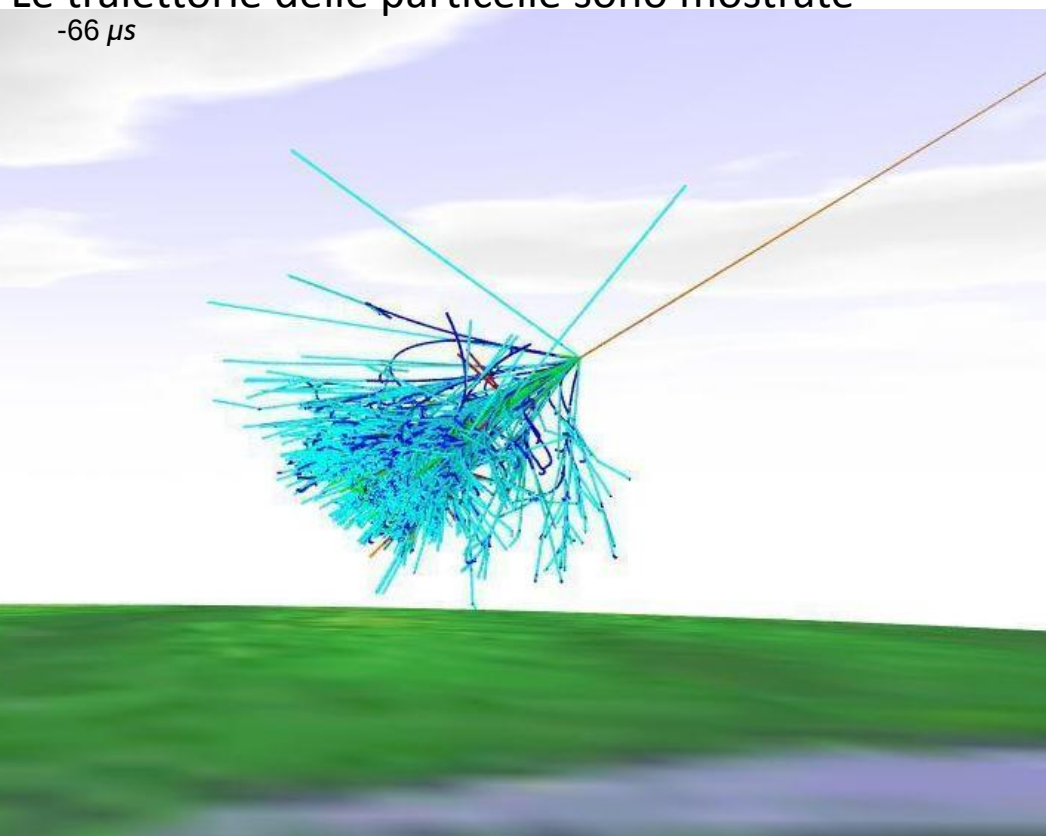
Arancio : protoni p / antiprotoni $\bar{p}$

Grigio : mesoni $\pi^+ / \pi^- / \pi^0$

Verde : muoni μ^- / μ^+

Le traiettorie delle particelle sono mostrate

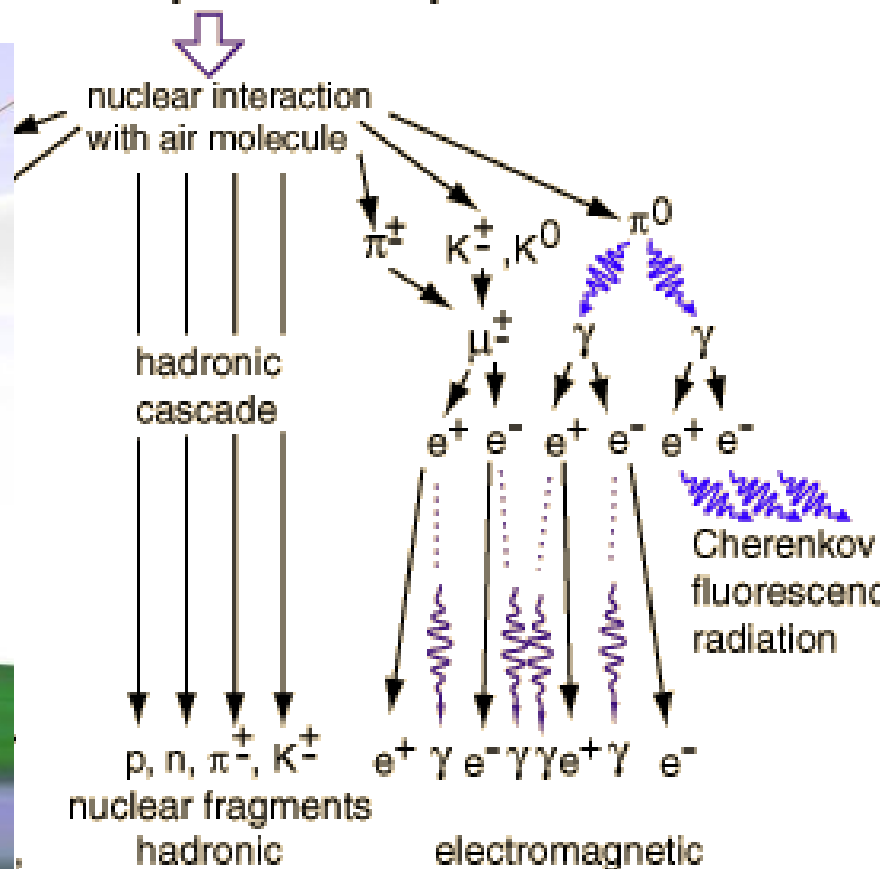
-66 μs



I pioni e kaoni sono particelle con una vita breve e subito decadono

- π^0 che decadono in fotoni γ
- $\pi^\pm$ e $k^\pm$ che decadono in muoni $\mu^\pm$ e neutrini ν e $\bar{\nu}$...

Primary Cosmic Ray



2. Gli Sciami Atmosferici Estesi

Blu : elettroni + positroni e^+ / e^-

Celeste : fotoni γ

Rosso : neutroni n

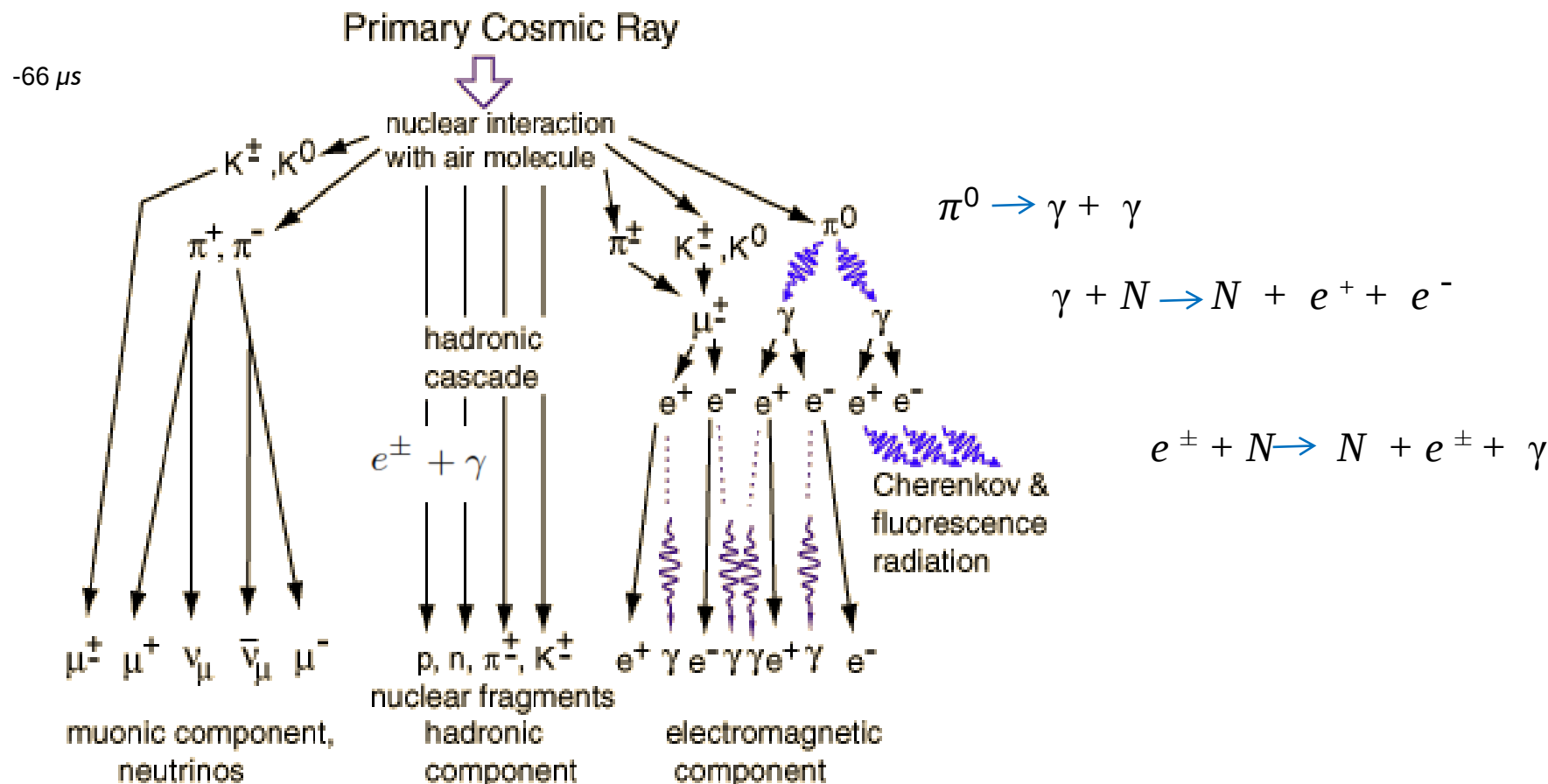
Arancio : protoni p / antiprotoni $\bar{p}$

Grigio : mesoni $\pi^+ / \pi^- / \pi^0$

Verde : muoni μ^- / μ^+

I mesoni sono particelle con una vita breve e subito decadono

- mesoni π^0 che decadono in fotoni γ
- mesoni $\pi^\pm$ e $K^\pm$ che decadono in muoni $\mu^\pm$ e neutrini ν e $\bar{\nu}$...



2. Gli Sciami Atmosferici Estesi

Blu : elettroni + positroni e^+ / e^-

Celeste : fotoni γ

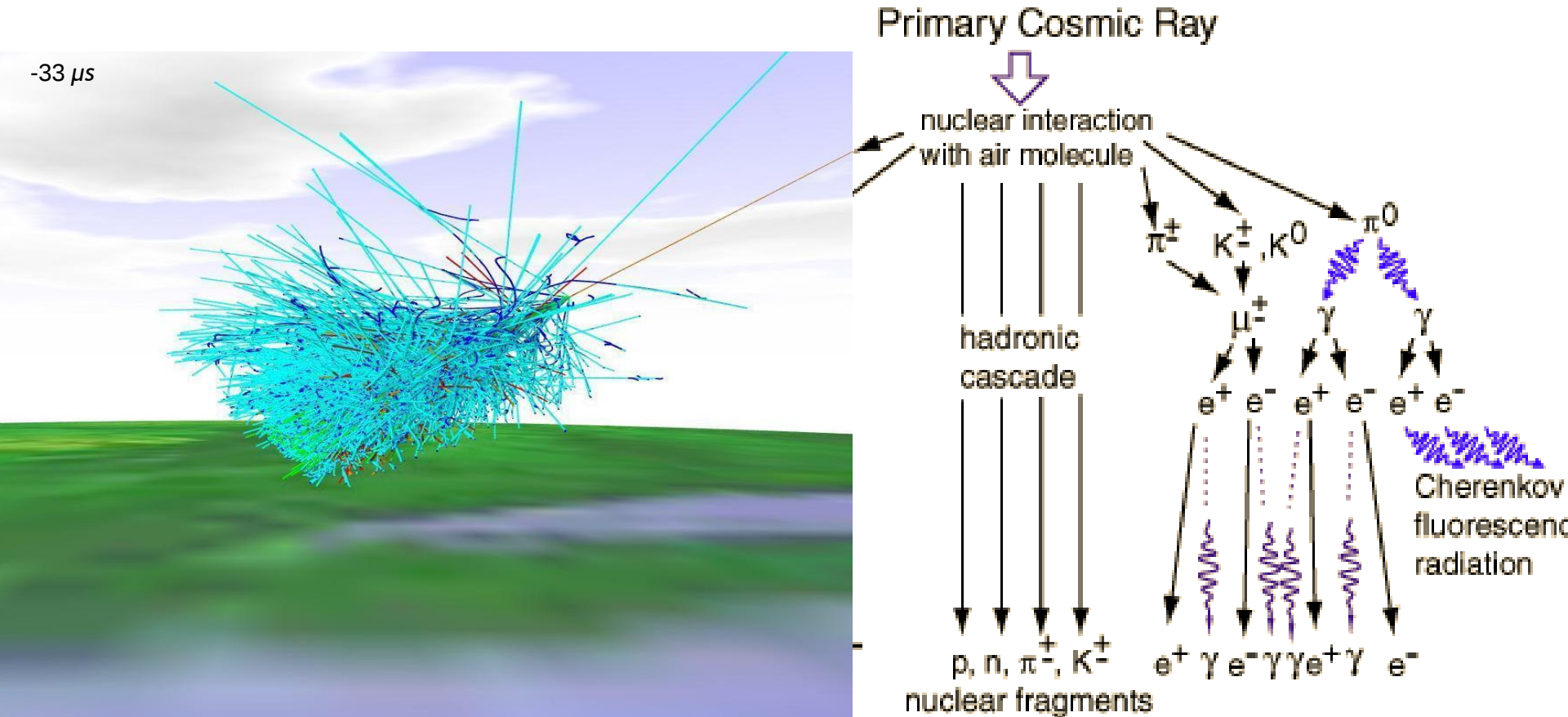
Rosso : neutroni n

Arancio : protoni p / antiprotoni $\bar{p}$

Grigio : mesoni $\pi^+ / \pi^- / \pi^0$

Verde : muoni μ^- / μ^+

I fotoni danno luogo a un processo a catena: [cascata elettromagnetica](#) con produzione di elettroni e positroni, ed ancora fotoni, ed elettroni e positroni ...



2. Gli Sciami Atmosferici Estesi

Blu : elettroni + positroni e^+ / e^-

Celeste : fotoni γ

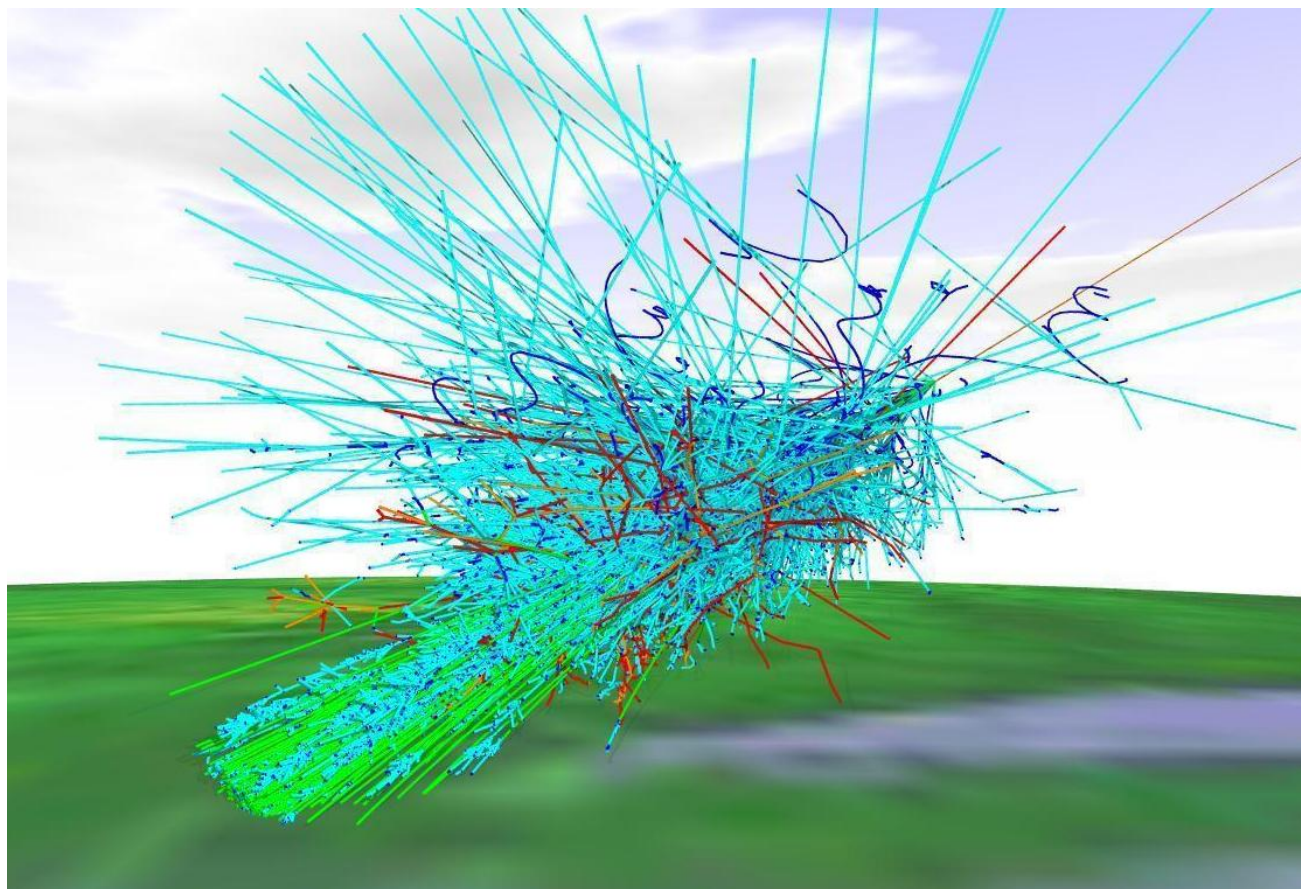
Rosso : neutroni n

Arancio : protoni p / antiprotoni $\bar{p}$

Grigio : mesoni $\pi^+ / \pi^- / \pi^0$

Verde : muoni μ^- / μ^+

Man mano che la cascata di particelle si ingrossa, l'energia media dei fotoni, degli elettroni e dei positroni che la costituiscono diminuisce, sicché, a un certo punto, diventa insufficiente a proseguire il processo. La cascata, allora, si esaurisce



2. Gli Sciami Atmosferici Estesi

Blu : elettroni + positroni e^+ / e^-

Celeste : fotoni γ

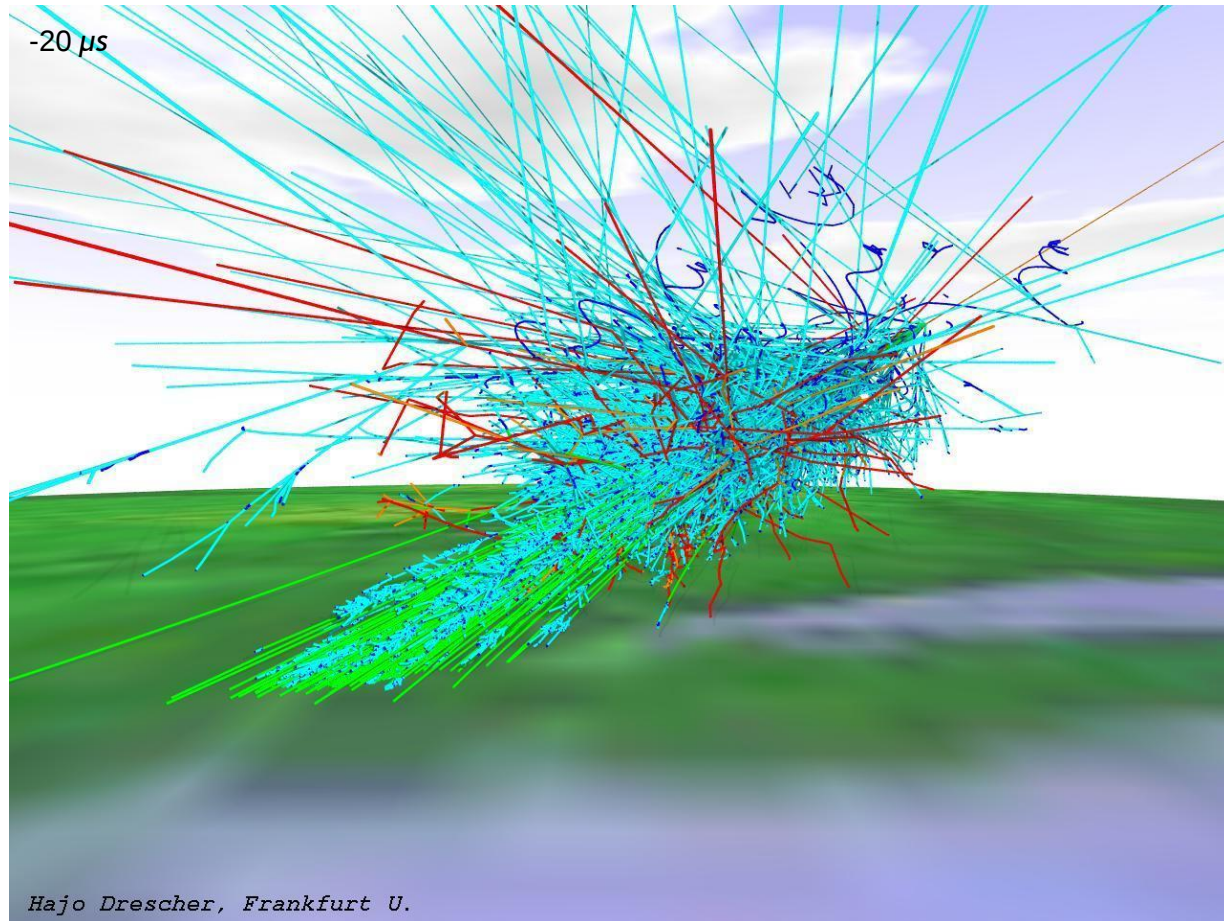
Rosso : neutroni n

Arancio : protoni p / antiprotoni $\bar{p}$

Grigio : mesoni $\pi^+ / \pi^- / \pi^0$

Verde : muoni μ^- / μ^+

I muoni $\mu^\pm$, generati dai mesoni $\pi^\pm$ hanno una vita media relativamente lunga ($2,2 \cdot 10^{-6}$ s) e un forte potere penetrante, in quanto perdono energia quasi soltanto per ionizzazione.



2. Gli Sciami Atmosferici Estesi

Blu : elettroni + positroni e^+ / e^-

Celeste : fotoni γ

Rosso : neutroni n

Arancio : protoni p / antiprotoni $\bar{p}$

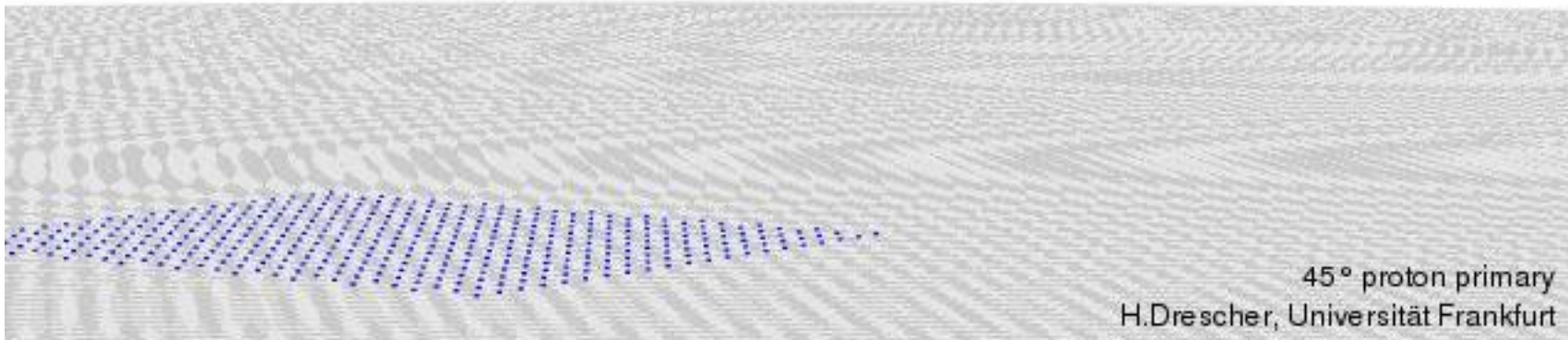
Grigio : mesoni $\pi^+ / \pi^- / \pi^0$

Verde : muoni μ^- / μ^+

Il fronte dello sciame di raggi cosmici secondari



$-100 \mu s$



2. Gli Sciame Atmosferici Estesi

Blu : elettroni + positroni e^+ / e^-

Celeste : fotoni γ

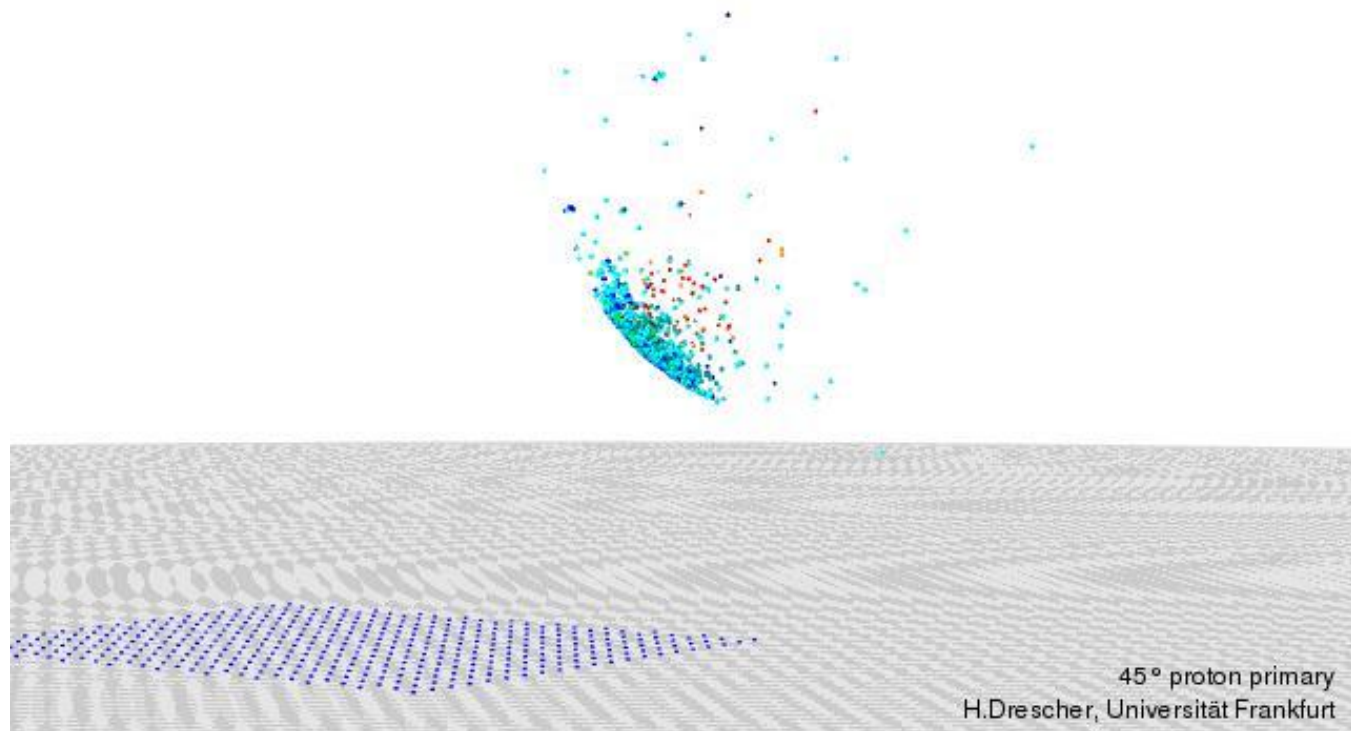
Rosso : neutroni n

Arancio : protoni p / antiprotoni $\bar{p}$

Grigio : mesoni $\pi^+ / \pi^- / \pi^0$ $\tau \approx 66 \mu s$

Verde : muoni μ^- / μ^+

Il fronte dello sciame di raggi cosmici secondari



2. Gli Sciami Atmosferici Estesi

Blu : elettroni + positroni e^+ / e^-

Celeste : fotoni γ

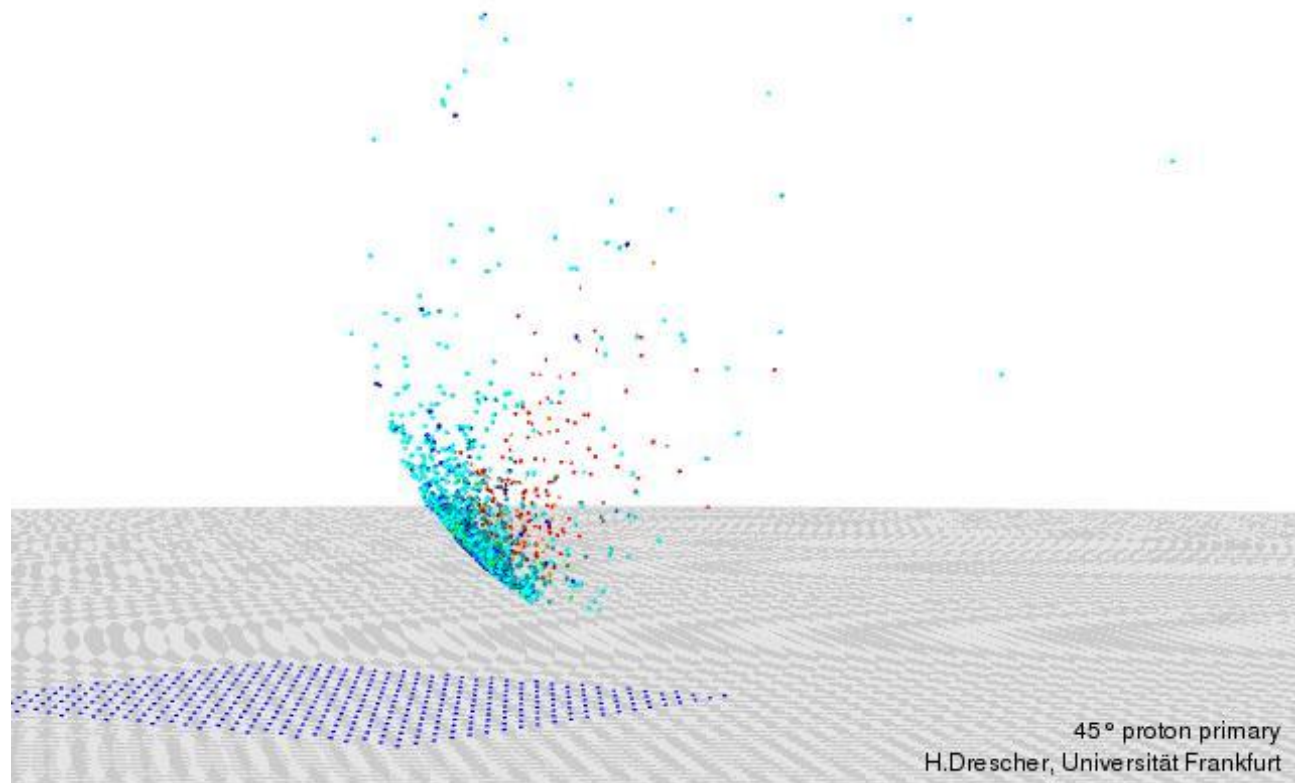
Rosso : neutroni n

Arancio : protoni p / antiprotoni $\bar{p}$

Grigio : mesoni $\pi^+ / \pi^- / \pi^0$ time=-33 μ s

Verde : muoni μ^- / μ^+

Il fronte dello sciame di raggi cosmici secondari



2. Gli Sciami Atmosferici Estesi

Blu : elettroni + positroni e^+ / e^-

Celeste : fotoni γ

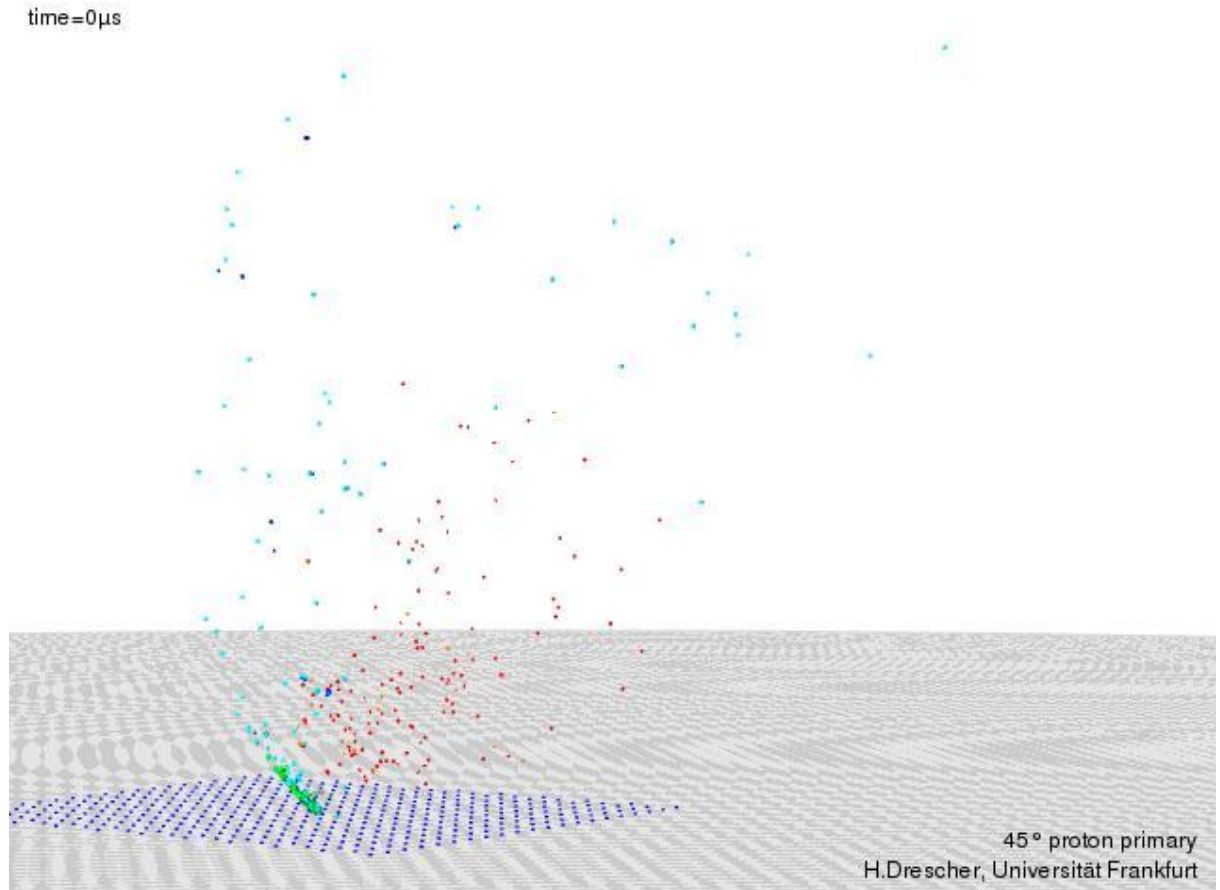
Rosso : neutroni n

Arancio : protoni p / antiprotoni $\bar{p}$

Grigio : mesoni $\pi^+ / \pi^- / \pi^0$

Verde : muoni μ^- / μ^+

Il fronte dello sciame di raggi cosmici secondari



2. Gli Sciami Atmosferici Estesi

Blu : elettroni + positroni e^+ / e^-

Celeste : fotoni γ

Rosso : neutroni n

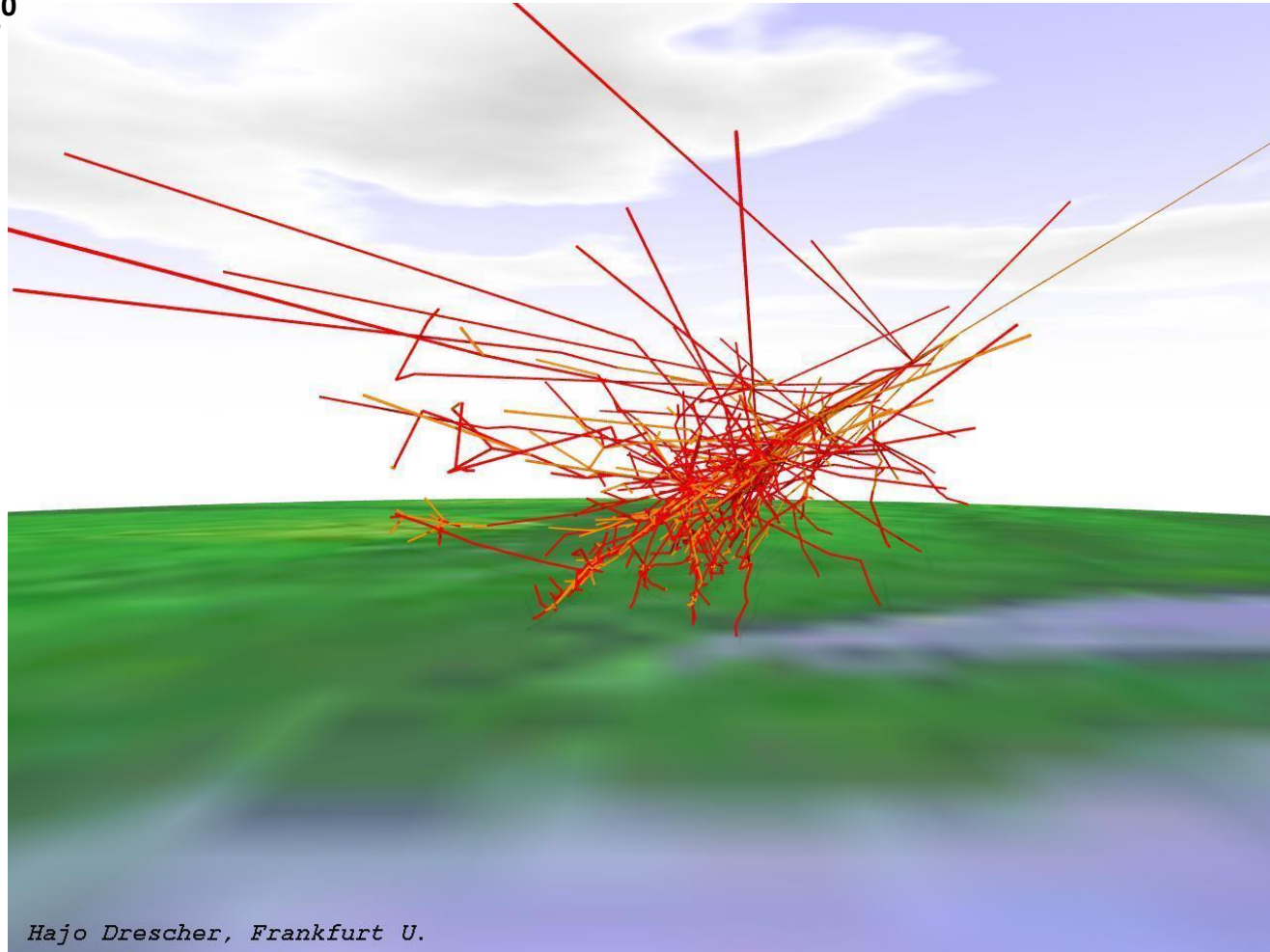
Arancio : protoni p / antiprotoni $\bar{p}$

Grigio : mesoni $\pi^+ / \pi^- / \pi^0$

Verde : muoni μ^- / μ^+

Guardiamo le singole componenti del nostro Sciame

protoni + neutroni



2. Gli Sciami Atmosferici Estesi

Blu : elettroni + positroni e^+ / e^-

Celeste : fotoni γ

Rosso : neutroni n

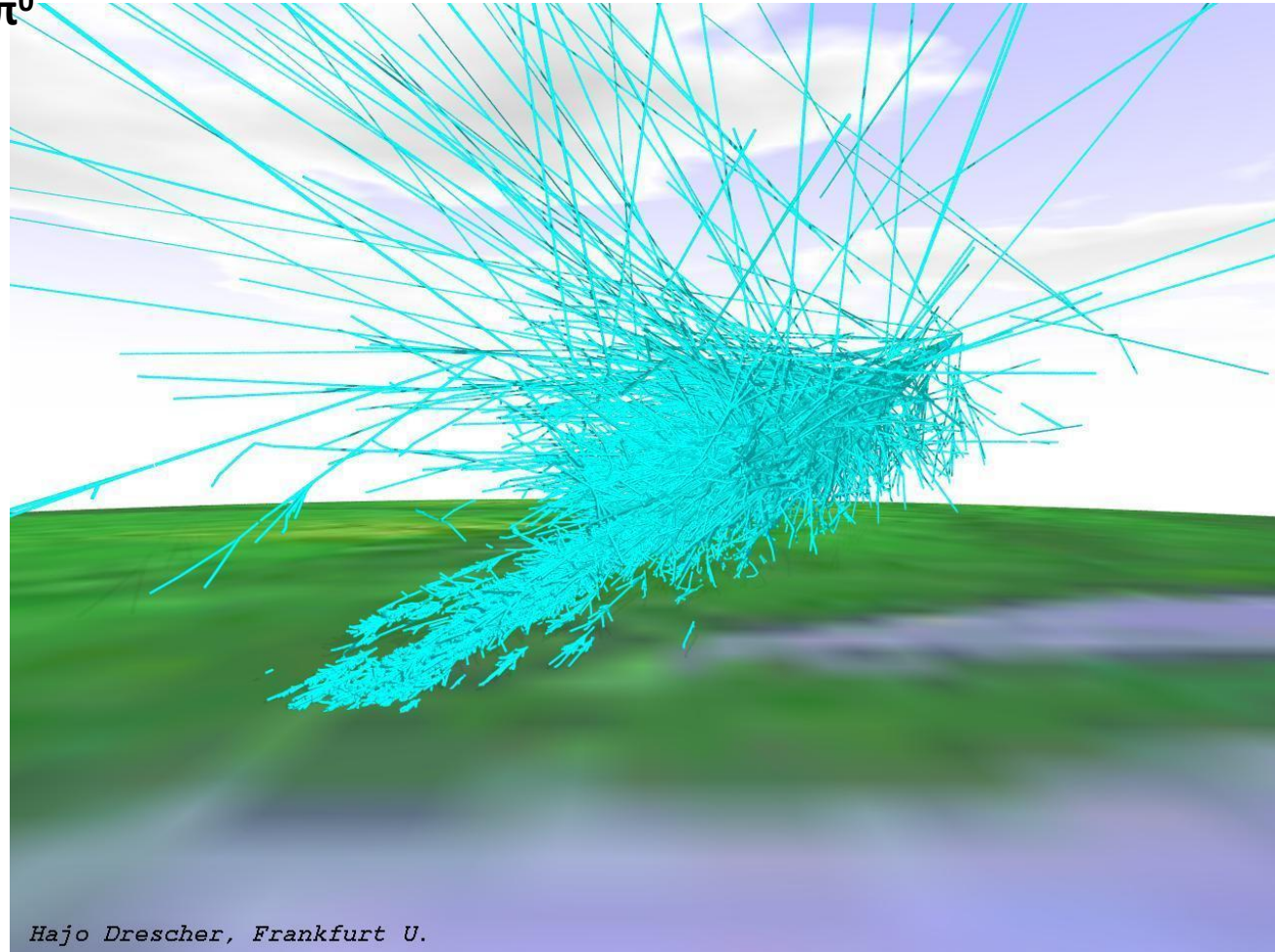
Arancio : protoni p / antiprotoni $\bar{p}$

Grigio : mesoni $\pi^+ / \pi^- / \pi^0$

Verde : muoni μ^- / μ^+

Guardiamo le singole componenti del nostro Sciame

fotoni



2. Gli Sciami Atmosferici Estesi

Blu : elettroni + positroni e^+ / e^-

Celeste : fotoni γ

Rosso : neutroni n

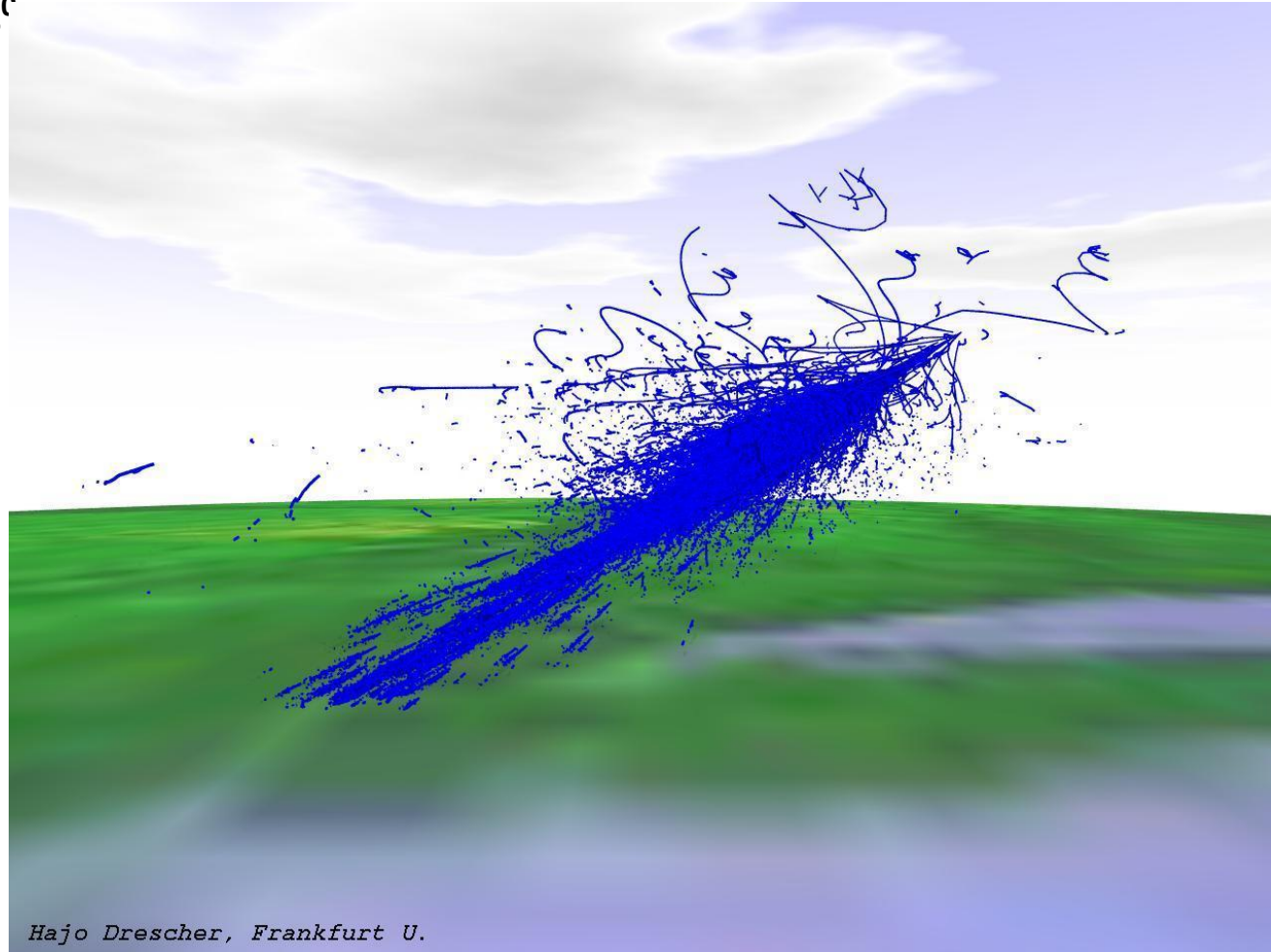
Arancio : protoni p / antiprotoni $\bar{p}$

Grigio : mesoni $\pi^+ / \pi^- / \pi^0$

Verde : muoni μ^- / μ^+

Guardiamo le singole componenti del nostro Sciame

elettroni + positroni



2. Gli Sciami Atmosferici Estesi

Blu : elettroni + positroni e^+ / e^-

Celeste : fotoni γ

Rosso : neutroni n

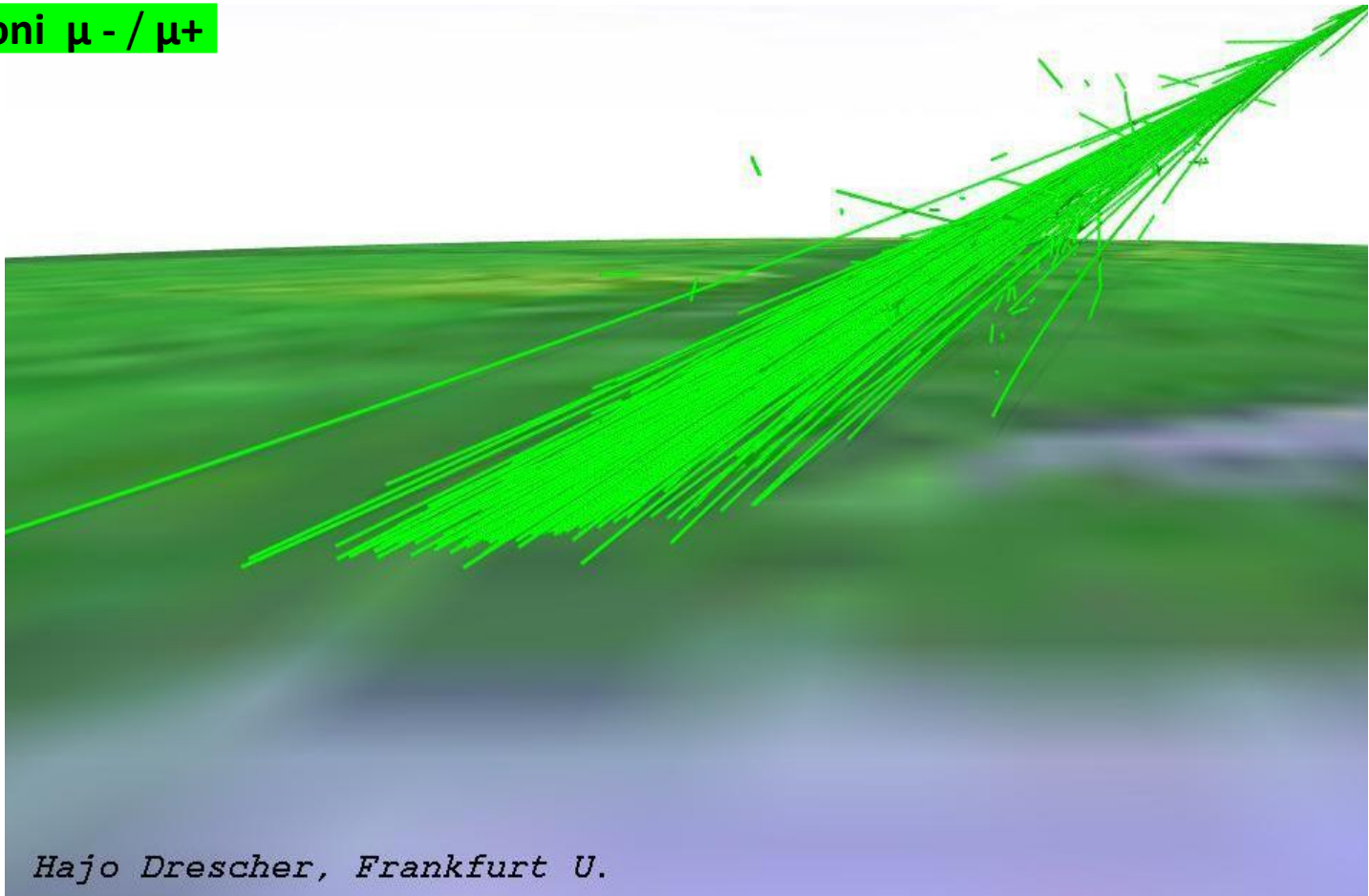
Arancio : protoni p / antiprotoni $\bar{p}$

Grigio : mesoni $\pi^+ / \pi^- / \pi^0$

Verde : muoni μ^- / μ^+

Guardiamo le singole componenti del nostro Sciame

Muoni $\mu^\pm$



Hajo Drescher, Frankfurt U.

2. Gli Sciami Atmosferici Estesi

Blu : elettroni + positroni e^+ / e^-

Celeste : fotoni γ

Rosso : neutroni n

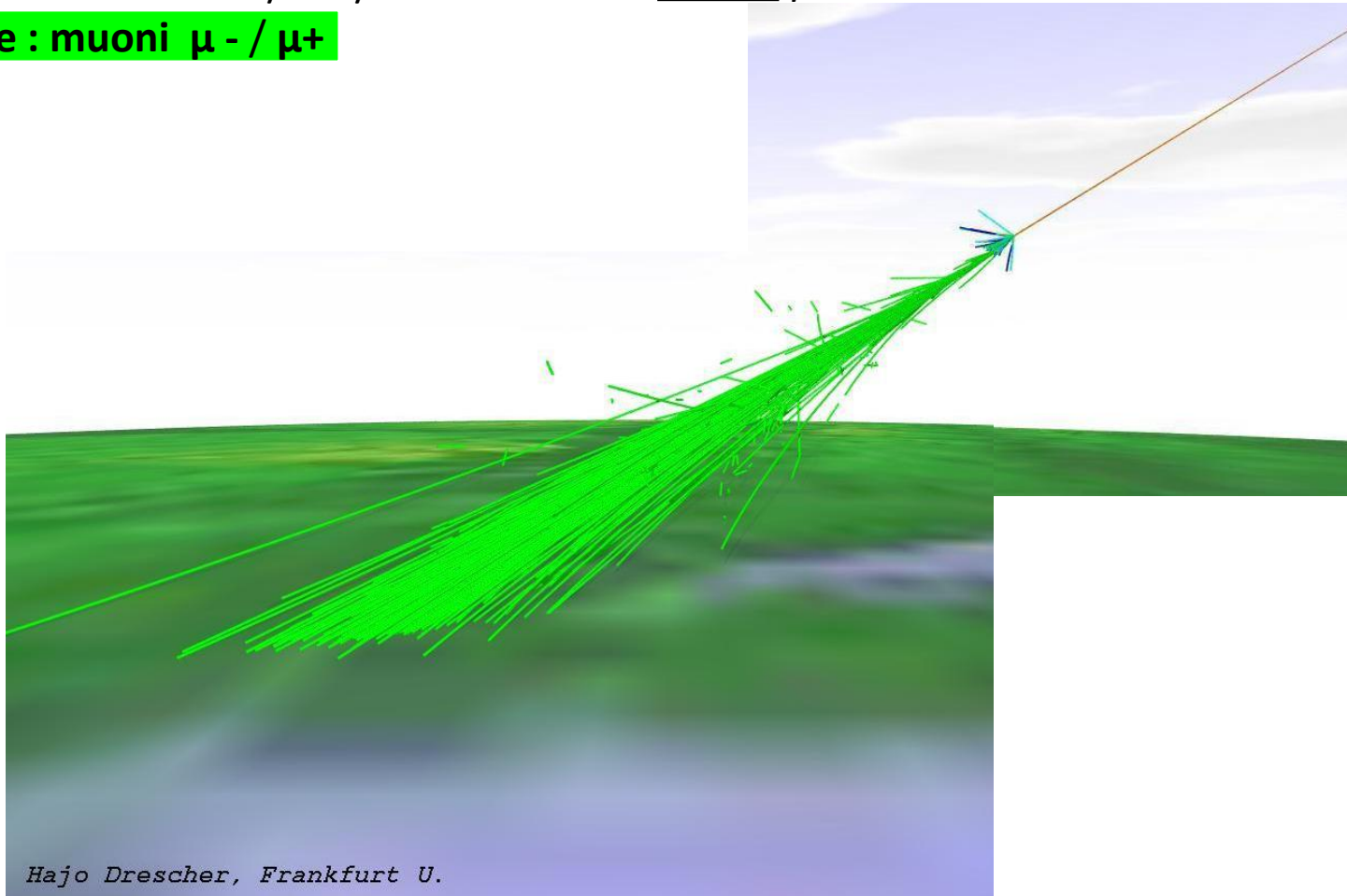
Arancio : protoni p / antiprotoni $\bar{p}$

Grigio : mesoni $\pi^+ / \pi^- / \pi^0$

Verde : muoni μ^- / μ^+

Guardiamo le singole componenti del nostro Sciame

Muoni $\mu^\pm$



2. Gli Sciami Atmosferici Estesi

Blu : elettroni + positroni e^+ / e^-

Celeste : fotoni γ

Rosso : neutroni n

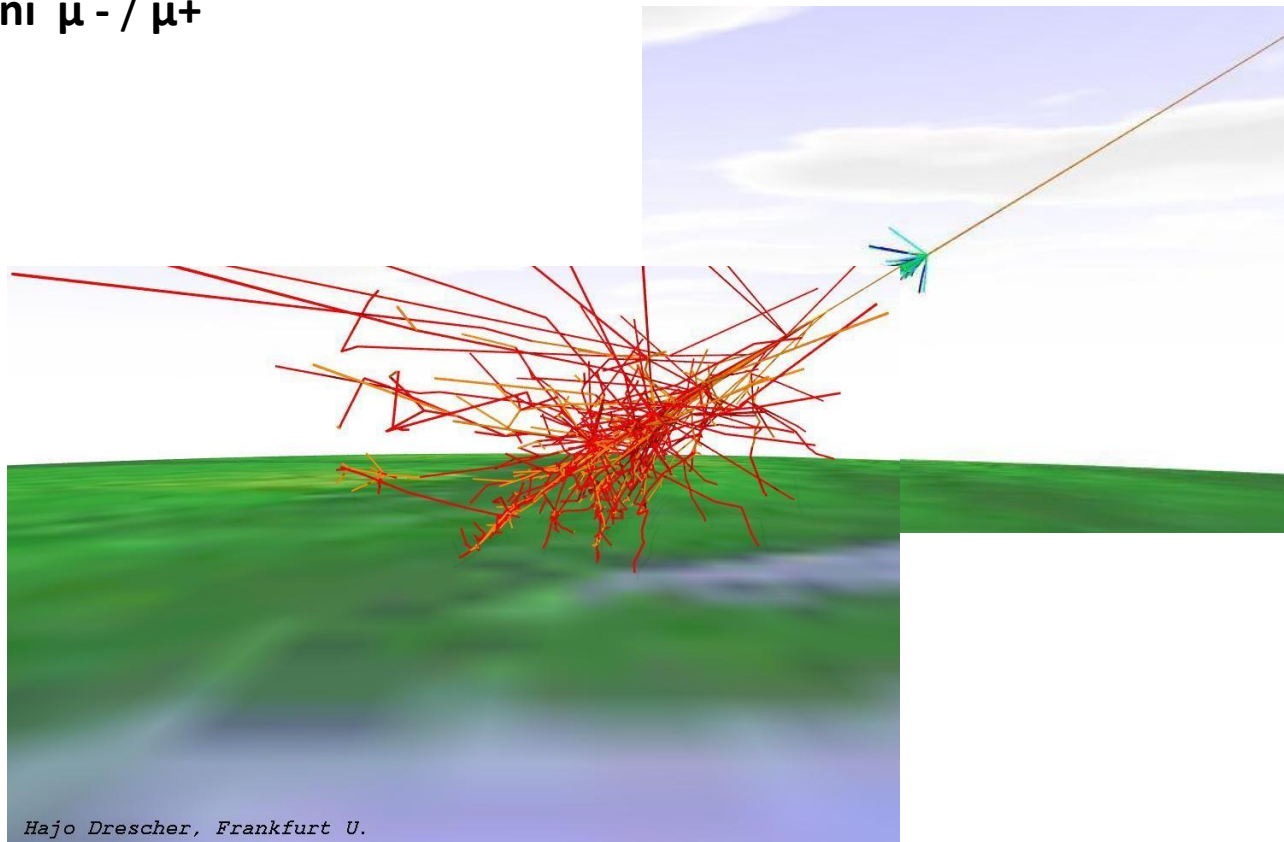
Arancio : protoni p / antiprotoni $\bar{p}$

Grigio : mesoni $\pi^+ / \pi^- / \pi^0$

Verde : muoni μ^- / μ^+

Guardiamo le singole componenti del nostro Sciame

protoni + neutroni



Hajo Drescher, Frankfurt U.

2. Gli Sciami Atmosferici Estesi

Blu : elettroni + positroni e^+ / e^-

Celeste : fotoni γ

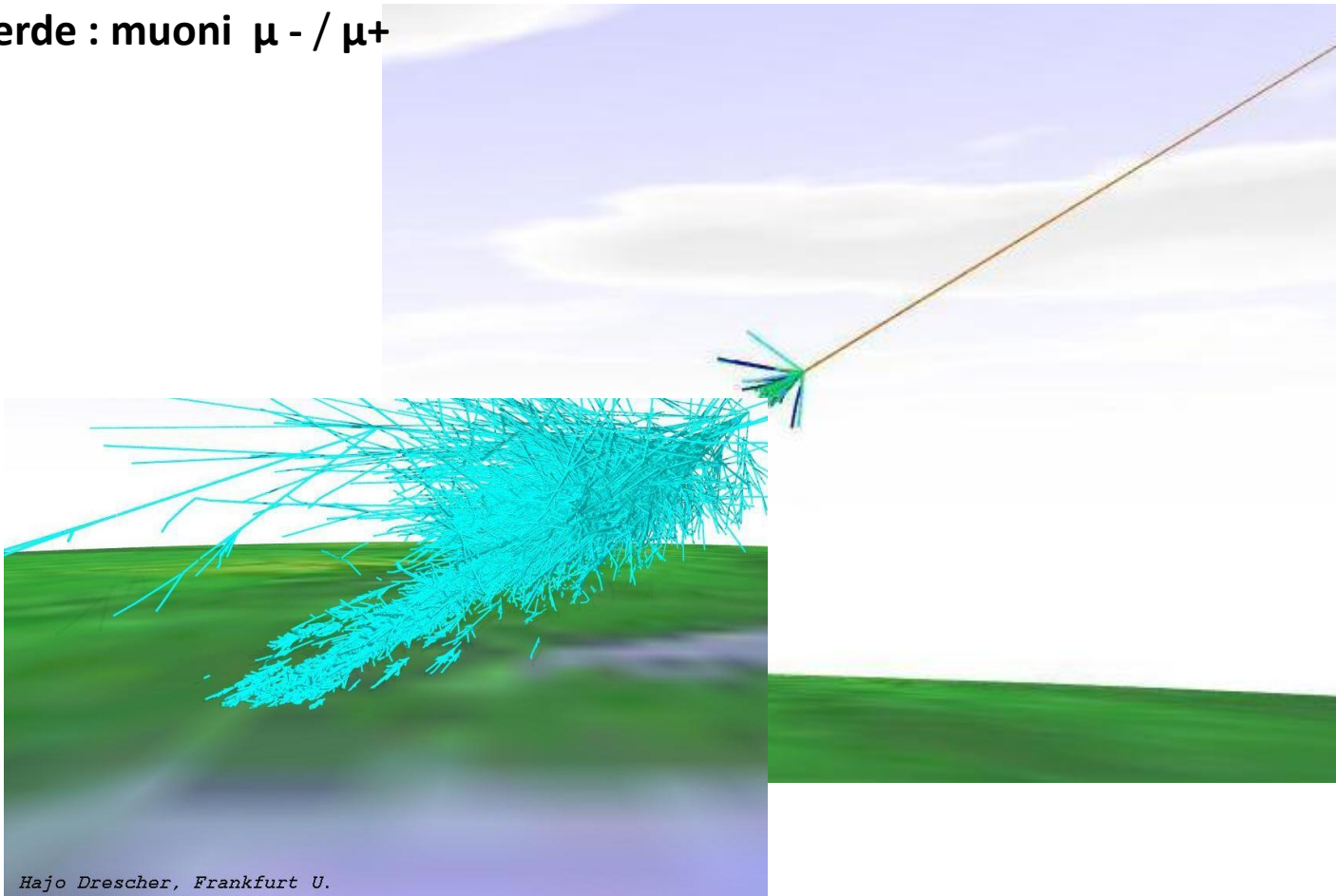
Rosso : neutroni n

Arancio : protoni p / antiprotoni $\bar{p}$

Grigio : mesoni $\pi^+ / \pi^- / \pi^0$

Verde : muoni μ^- / μ^+

fotoni



Hajo Drescher, Frankfurt U.

2. Gli Sciami Atmosferici Estesi

Blu : elettroni + positroni e^+ / e^-

Celeste : fotoni γ

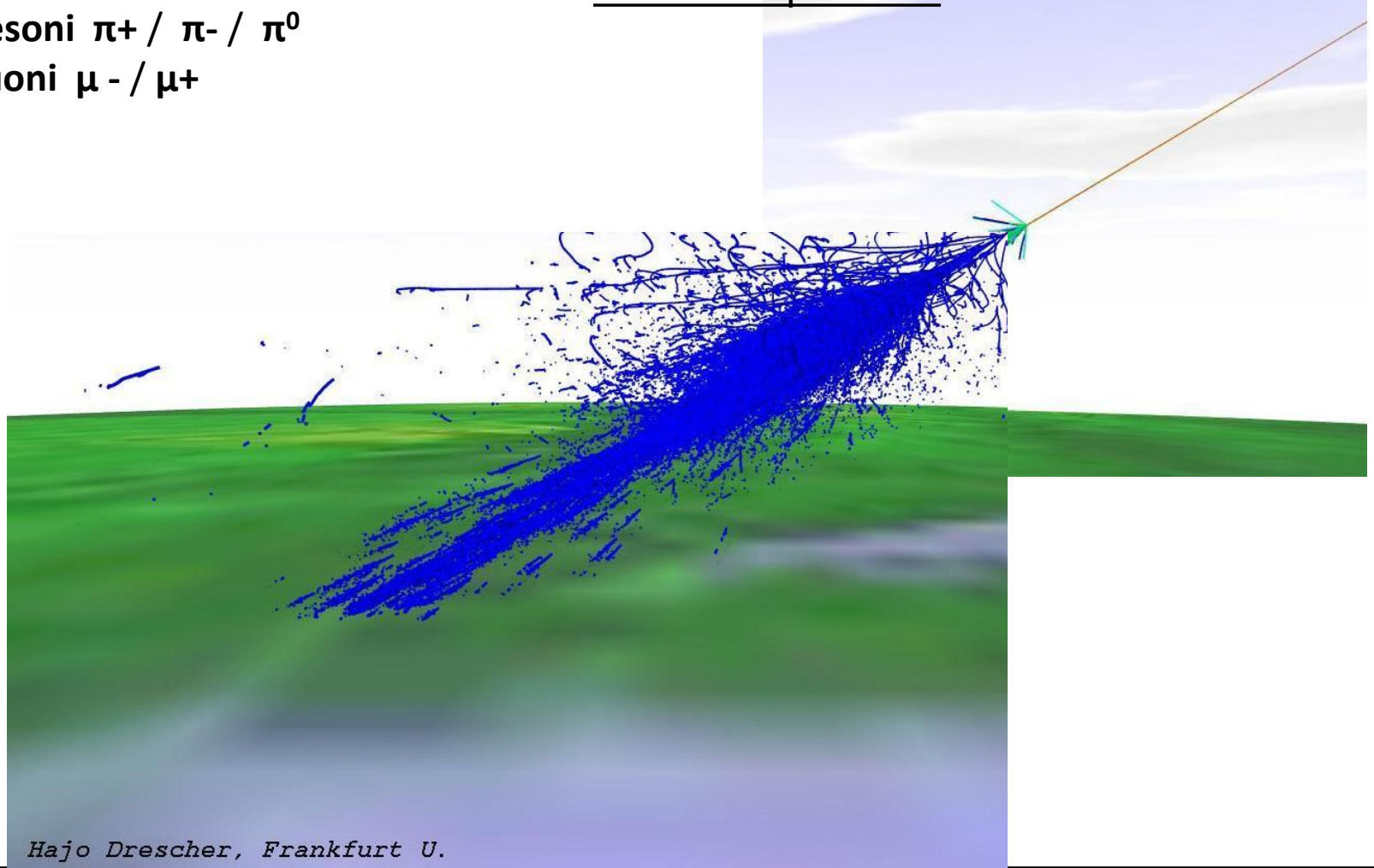
Rosso : neutroni n

Arancio : protoni p / antiprotoni $\bar{p}$

Grigio : mesoni $\pi^+ / \pi^- / \pi^0$

Verde : muoni μ^- / μ^+

elettroni + positroni



2. Gli Sciami Atmosferici Estesi

Blu : elettroni + positroni e^+ / e^-

Celeste : fotoni γ

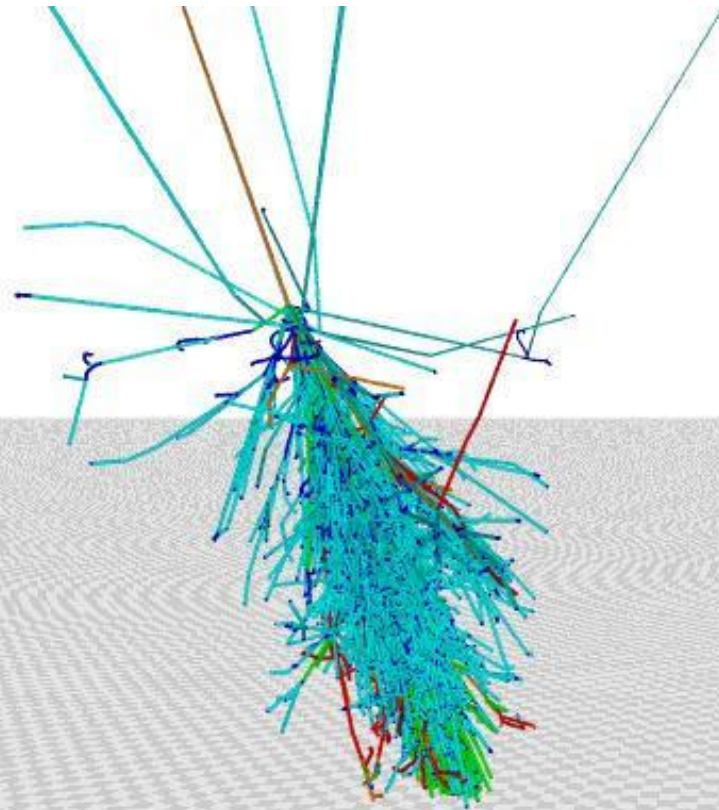
Rosso : neutroni n

Arancio : protoni p / antiprotoni $\bar{p}$

Grigio : mesoni $\pi^+ / \pi^- / \pi^0$

Verde : muoni μ^- / μ^+

Sciame Atmosferico Esteso (EAS) generato da un protone di energia 10^{16} eV



Proiezione X-Z

(c) Hajo Drescher, NYU

2. Gli Sciami Atmosferici Estesi

Blu : elettroni + positroni e^+ / e^-

Celeste : fotoni γ

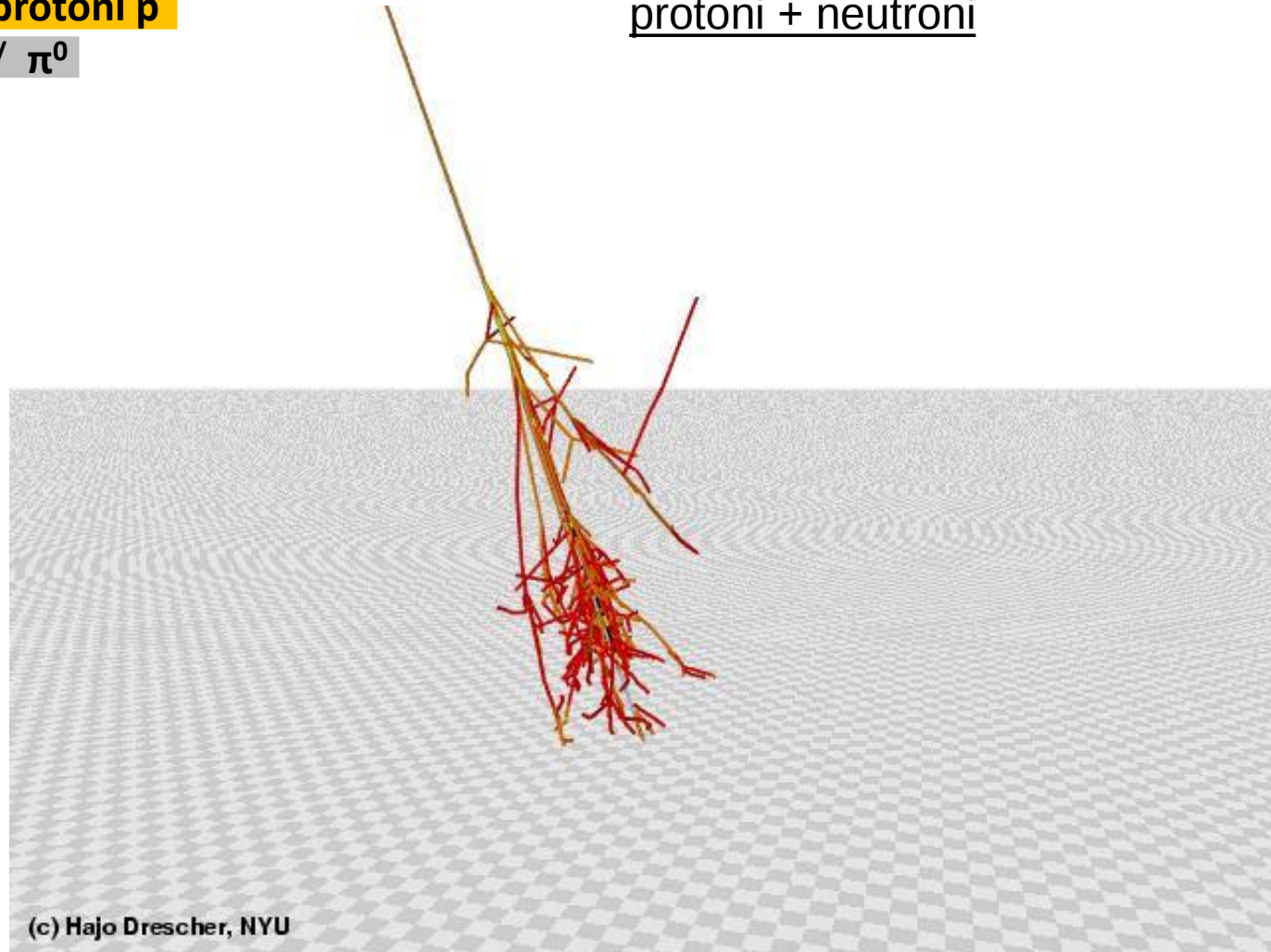
Rosso : neutroni n

Arancio : protoni p / antiprotoni $\bar{p}$

Grigio : mesoni $\pi^+ / \pi^- / \pi^0$

Verde : muoni μ^- / μ^+

protoni + neutroni



2. Gli Sciami Atmosferici Estesi

Blu : elettroni + positroni e^+ / e^-

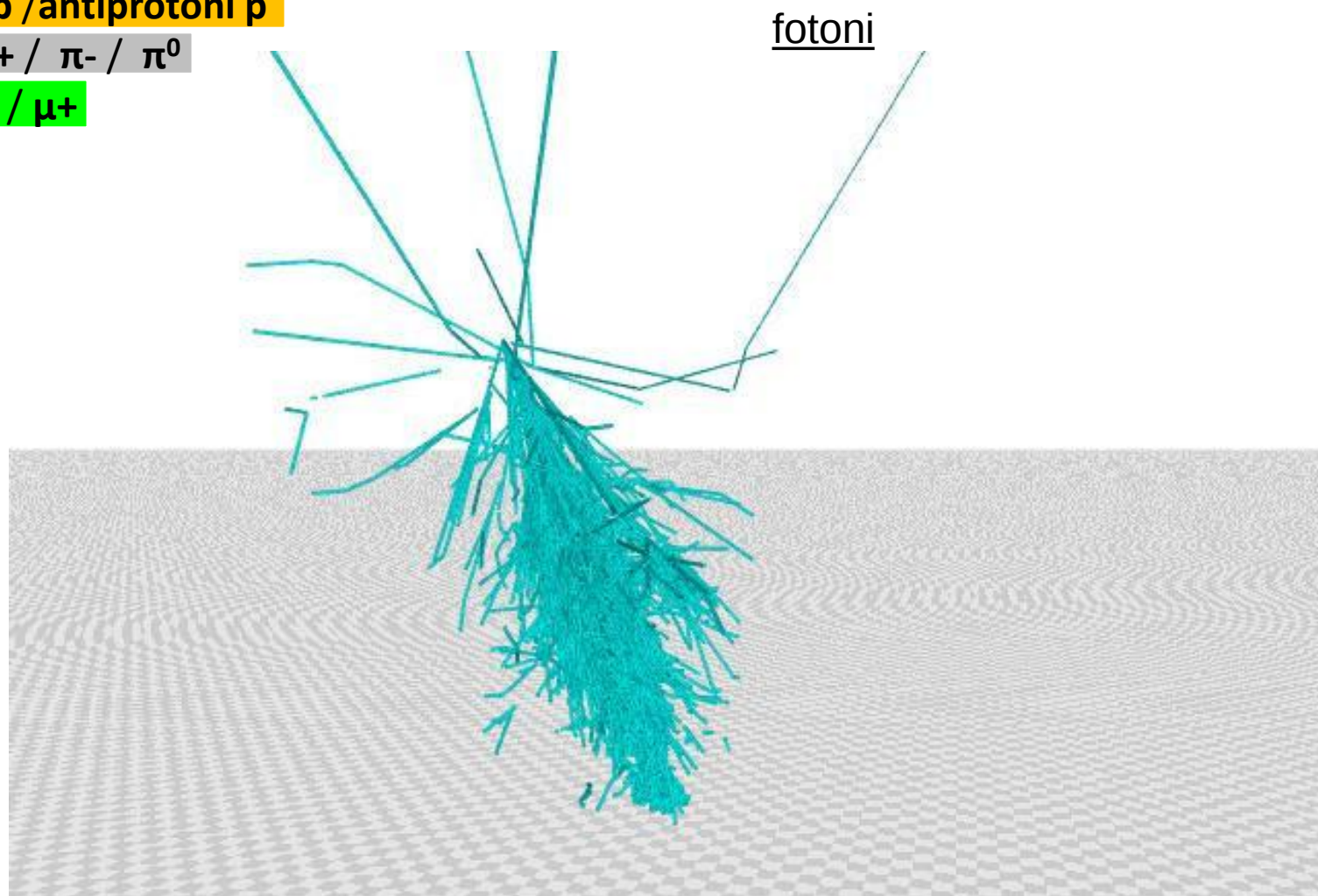
Celeste : fotoni γ

Rosso : neutroni n

Arancio : protoni p / antiprotoni $\bar{p}$

Grigio : mesoni $\pi^+ / \pi^- / \pi^0$

Verde : muoni μ^- / μ^+



2. Gli Sciami Atmosferici Estesi

Blu : elettroni + positroni e^+ / e^-

Celeste : fotoni γ

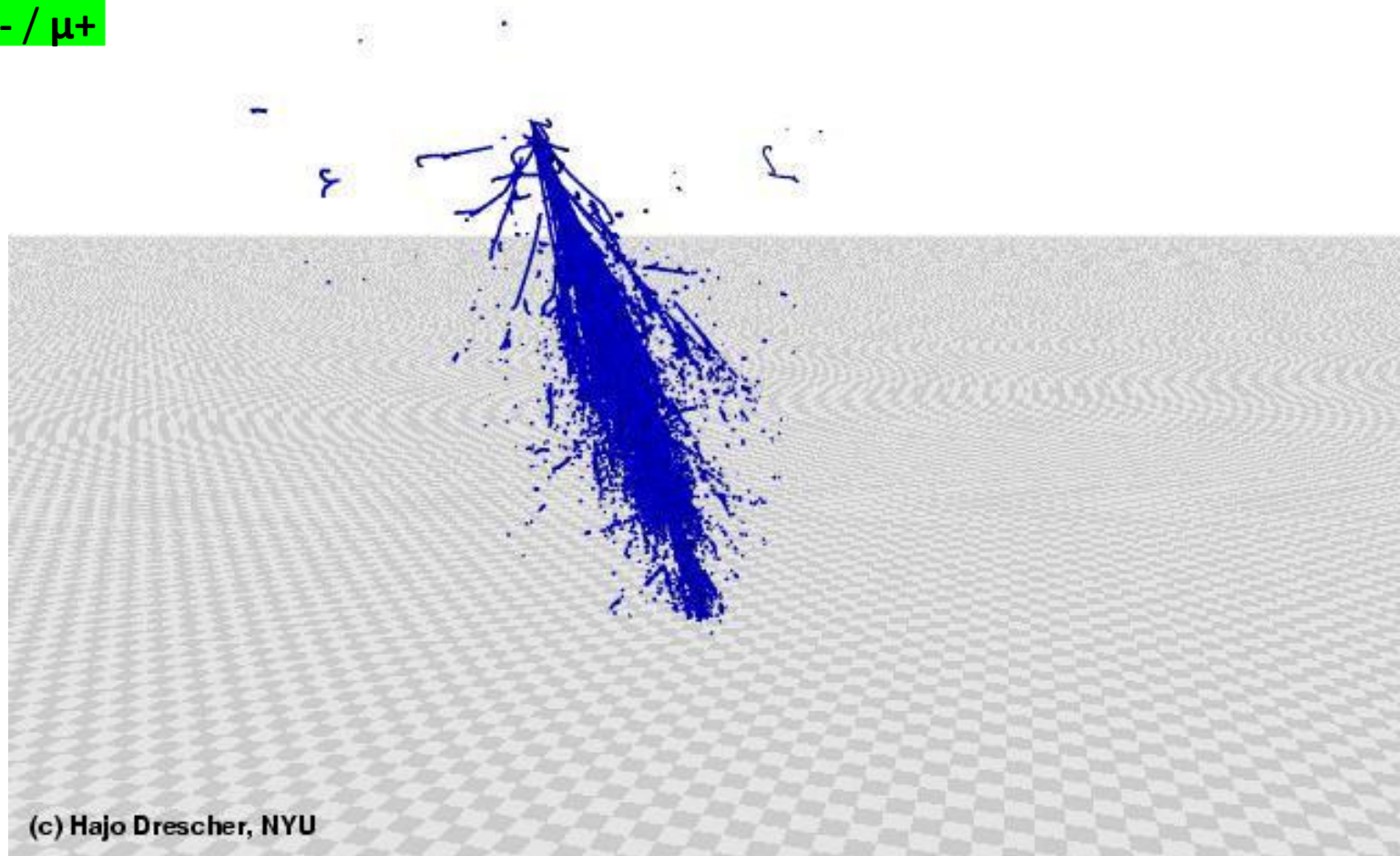
Rosso : neutroni n

Arancio : protoni p / antiprotoni $\bar{p}$

Grigio : mesoni $\pi^+ / \pi^- / \pi^0$

Verde : muoni μ^- / μ^+

elettroni + positroni



2. Gli Sciami Atmosferici Estesi

Blu : elettroni + positroni e^+ / e^-

Celeste : fotoni γ

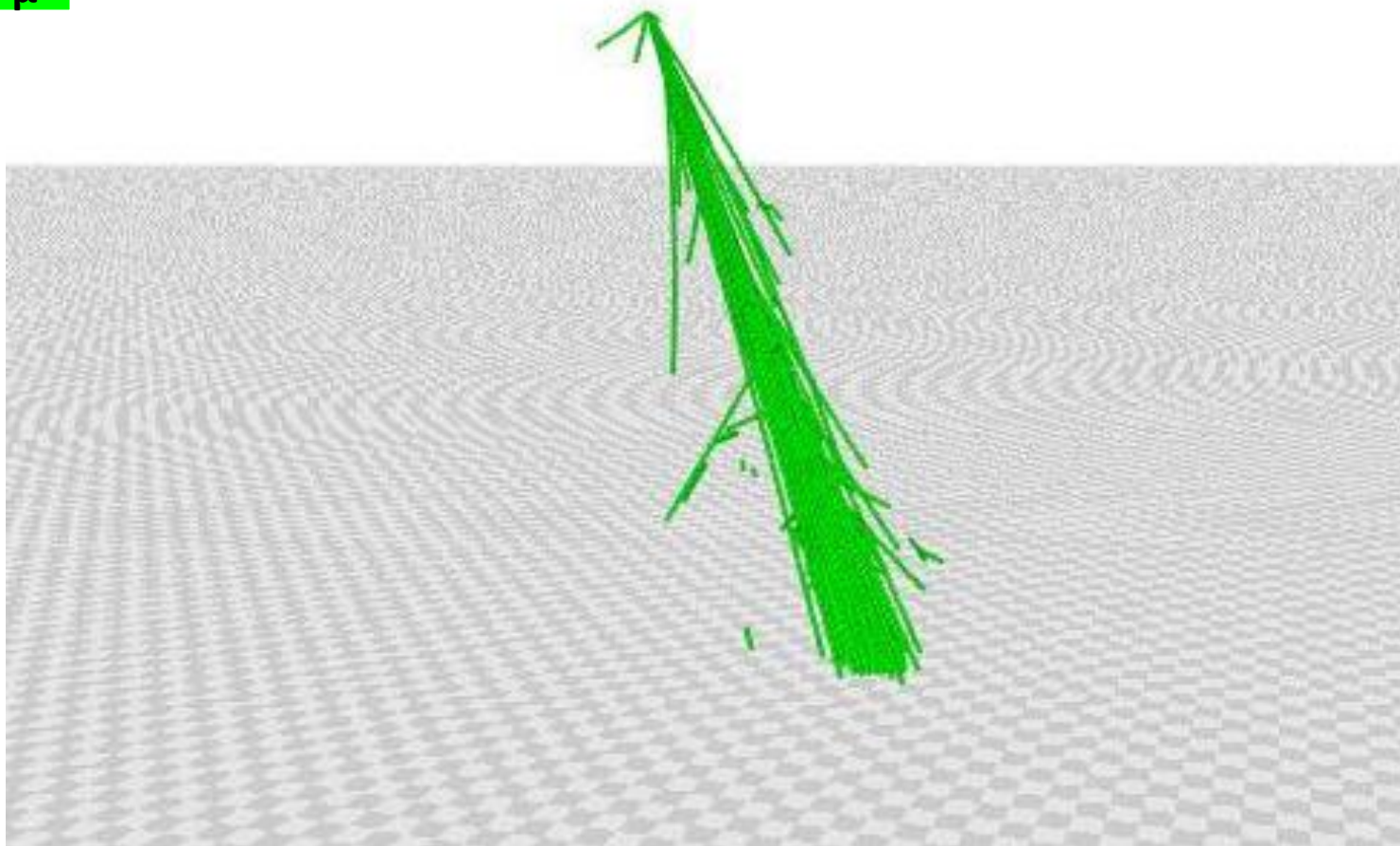
Rosso : neutroni n

Arancio : protoni p / antiprotoni $\bar{p}$

Grigio : mesoni $\pi^+ / \pi^- / \pi^0$

Verde : muoni μ^- / μ^+

Muoni $\mu^\pm$

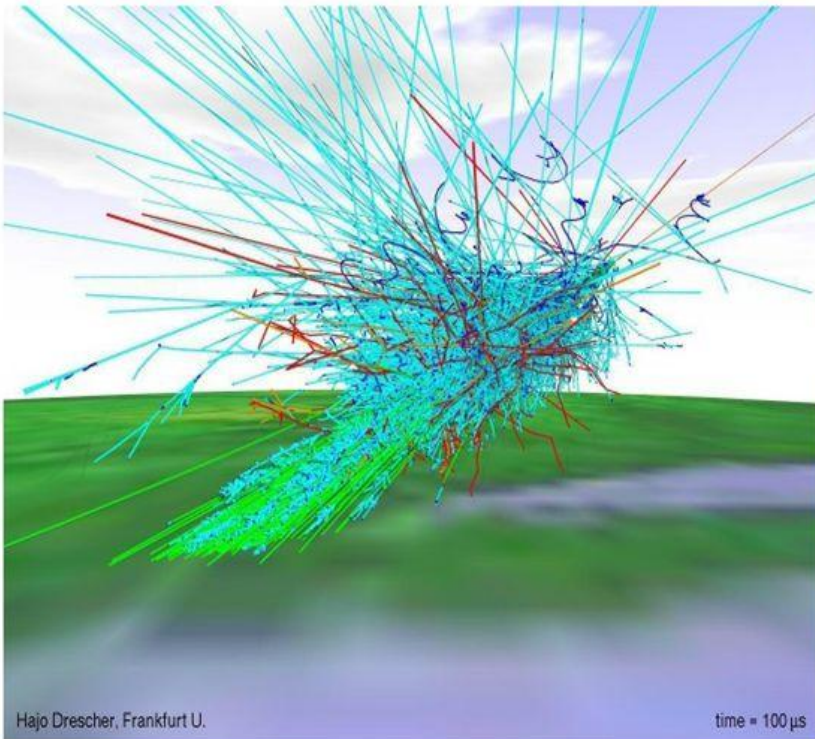


2. Gli Sciami Atmosferici Estesi

Cosmic Ray Air Shower Pictures
by H.-J. Drescher drescher@th.physik.uni-frankfurt.de

Air showers are cascades of secondary particles induced in the atmosphere by high energy cosmic rays. What you see here is a visualisation of realistic simulations of these showers. Of course, not all of the particles in a shower are displayed, there are far too many! The fraction displayed here is about $1e-6$, sampled with a thinning algorithm. At a distance beyond some 100 meters from the shower axis, thinning is not applied any more. This way you can see decays or electron-positron creation. Each square on the ground is one square kilometer.

[new layout](#)



blue: electrons/positrons
cyan: photons
red: neutrons
orange: protons
gray: mesons
green: muons
Picture Width: 640

No Movie

next 100 μ s prev

shower with time sequence

shower with time sequence ▾

time = 100 μ s

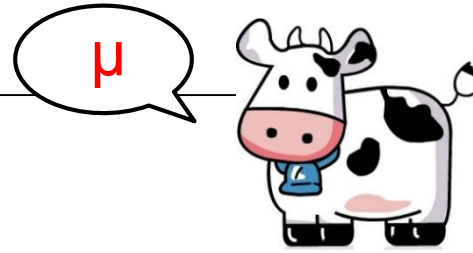
Hajo Drescher, Frankfurt U.

Feel free to take these pictures and show them in your talks, but don't forget to cite me :-)

Le Belle simulazioni sono opera di H.J. Drescher

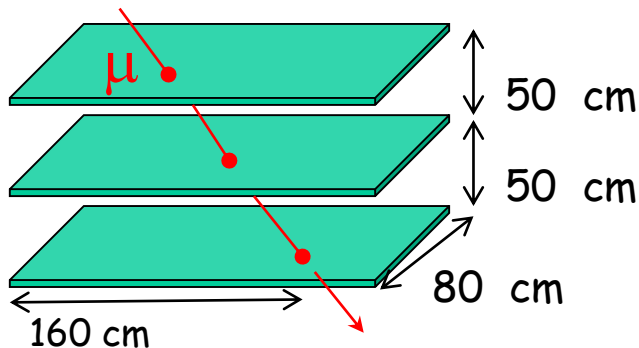
<http://fias.uni-frankfurt.de/~drescher/CASSIM/>

I Muoni

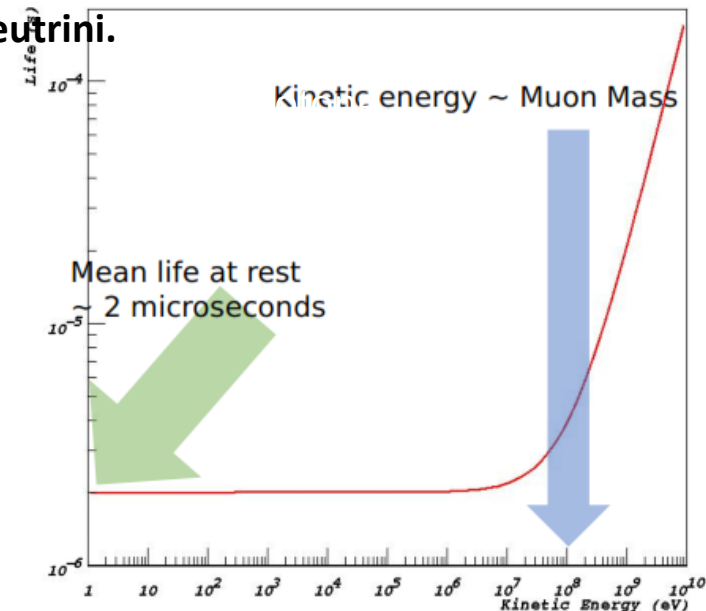


I Muoni μ

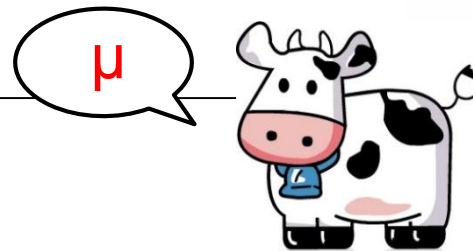
- ♦ Sono particelle elementari
- ♦ Sono **raggi cosmici Secondari** prodotti nelle prime interazioni dei raggi cosmici primari con l'atmosfera.
- ♦ Hanno direzione quasi parallela al raggio cosmico primario.
- ♦ Hanno carica positiva o negativa.
- ♦ Sono **raggi cosmici altamente penetranti** ovvero interagiscono poco con l'atmosfera. Perdono un po' di energia per ionizzazione.
- ♦ Hanno in quiete una **vita media** relativamente **lunga**, pari a $2,2 \cdot 10^{-6}$ s (2 μ s), ma nei raggi cosmici hanno $v \approx c$ e grazie agli effetti relativistici vivono di più, arrivando al suolo prima di decadere.
- ♦ Possono interagire con l'atmosfera decadendo in elettroni e neutrini.



Muon Life vs Kinetic Energy



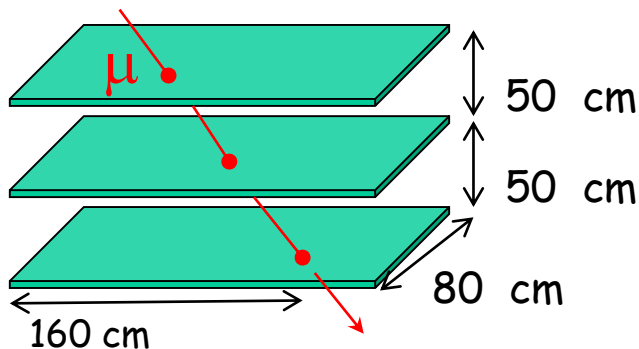
I Muoni



I Muoni μ

- ♦ Sono particelle elementari
- ♦ Sono **raggi cosmici Secondari** prodotti nelle prime interazioni dei raggi cosmici primari con l'atmosfera.
- ♦ Hanno direzione quasi parallela al raggio cosmico primario.
- ♦ Hanno carica positiva o negativa.
- ♦ Sono **raggi cosmici altamente penetranti** ovvero interagiscono poco con l'atmosfera. Perdono un po' di energia per ionizzazione.
- ♦ Hanno in quiete una **vita media** relativamente **lunga**, pari a $2,2 \cdot 10^{-6}$ s ($2 \mu\text{s}$), ma nei raggi cosmici hanno $v \approx c$ e grazie agli effetti relativistici vivono di più, arrivando al suolo prima di decadere.
- ♦ Possono interagire con l'atmosfera decadendo in elettroni e neutrini.

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



elettrone
0,5 MeV/c²



muone
106 MeV/c²

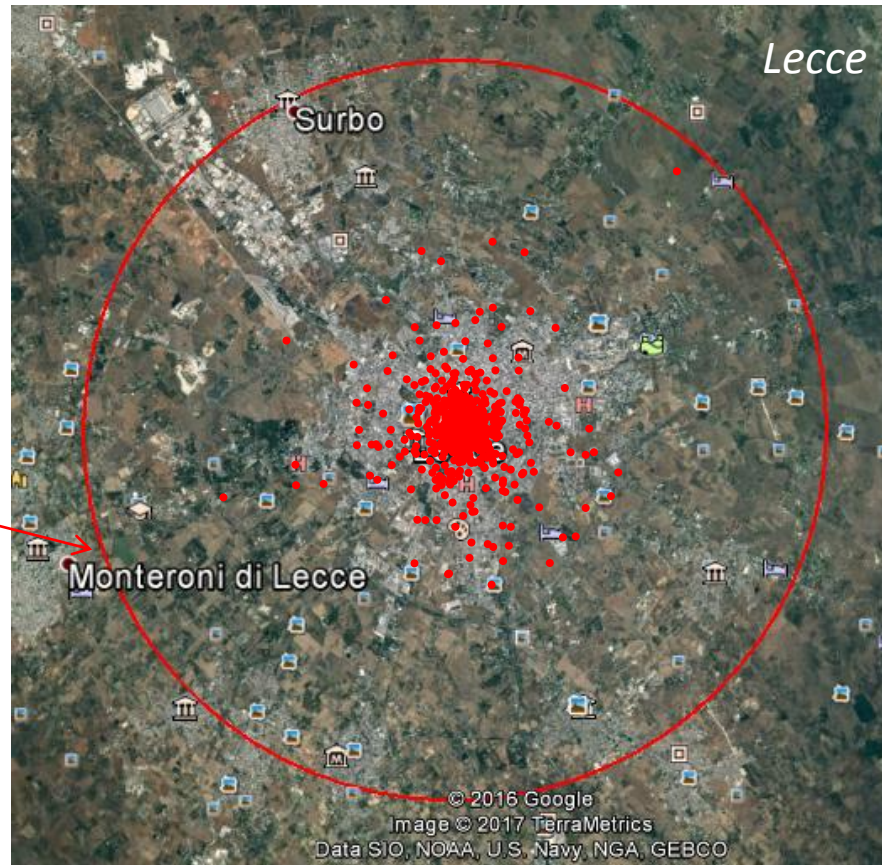
protone
938 MeV/c²

Confronto tra la massa dell' elettrone, del muone e del protone

3. Muoni

Impronta dei muoni in uno Sciame Atmosferico Esteso, generato da un raggio cosmico primario di 10^{14} eV su Lecce.

*Dipartimento di
Matematica e Fisica*

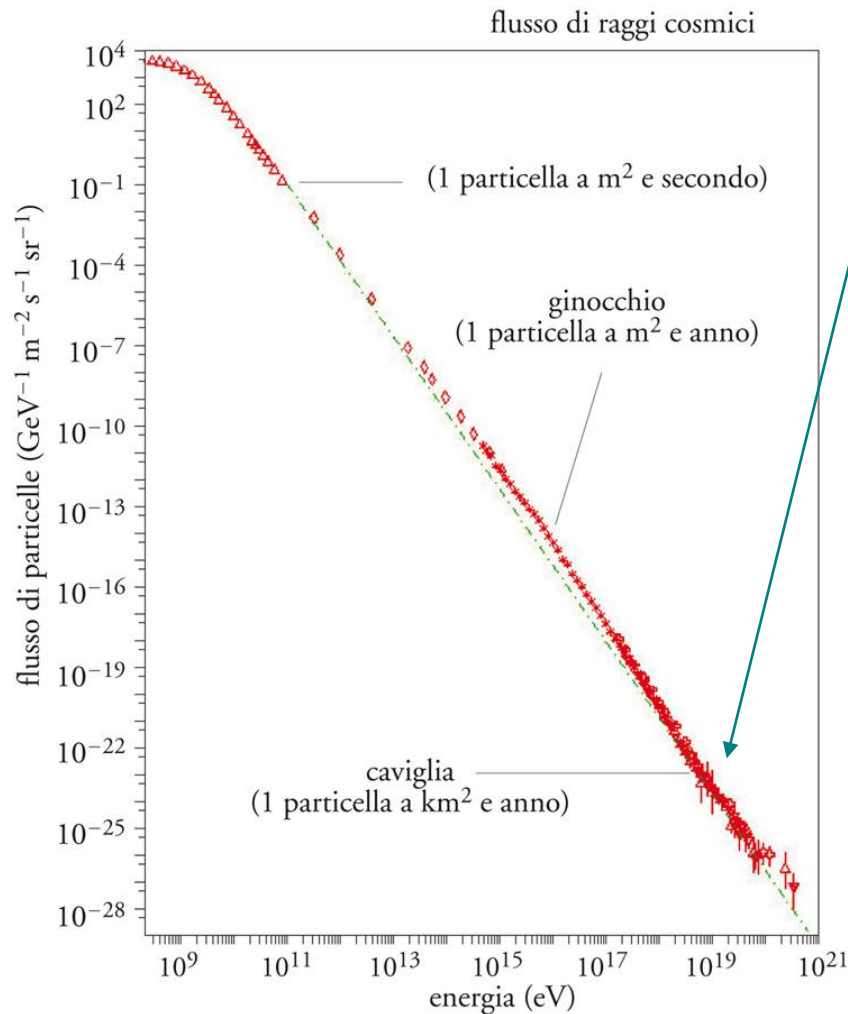


I muoni coprono un raggio dal centro della città sino al Dipartimento di Matematica e Fisica (5km..)

1. Raggi Cosmici “Primari”

Quanti ne arrivano?

Dipende dalla loro energia



Cosa significa?

Esempio: **eventi rari**

Se vogliamo studiare i R.C. di altissima energia
10¹⁹ eV

“1 evento l’anno per km² di superficie”

Ho bisogno di raccogliere un po’ di dati

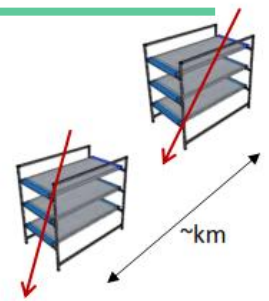
“un campione statistico numeroso”

Se volessimo raccogliere un campione di almeno 100 eventi

1 km² $\Rightarrow$ 100 anni

Se ho 100 rivelatori in 100 km²

100 km² $\Rightarrow$ 1 anno!



3. Muoni

Il numero di muoni n_μ negli sciame atmosferici estesi che raggiungono la Terra dipende dal raggio cosmico primario che ha dato origine allo sciame:
dall' **Energia**, dalla **specie** e dalla direzione di arrivo del primario!

Dall' **Energia** (se riveliamo le particelle a livello del mare)...

Their number depends on the energy of the primary particle:

Primary energy	Number of muons at sea level
10^{13} eV	~100
10^{14} eV	~1000
10^{15} eV	~7000
10^{16} eV	~77000
10^{17} eV	~650000
10^{18} eV	~6 millions

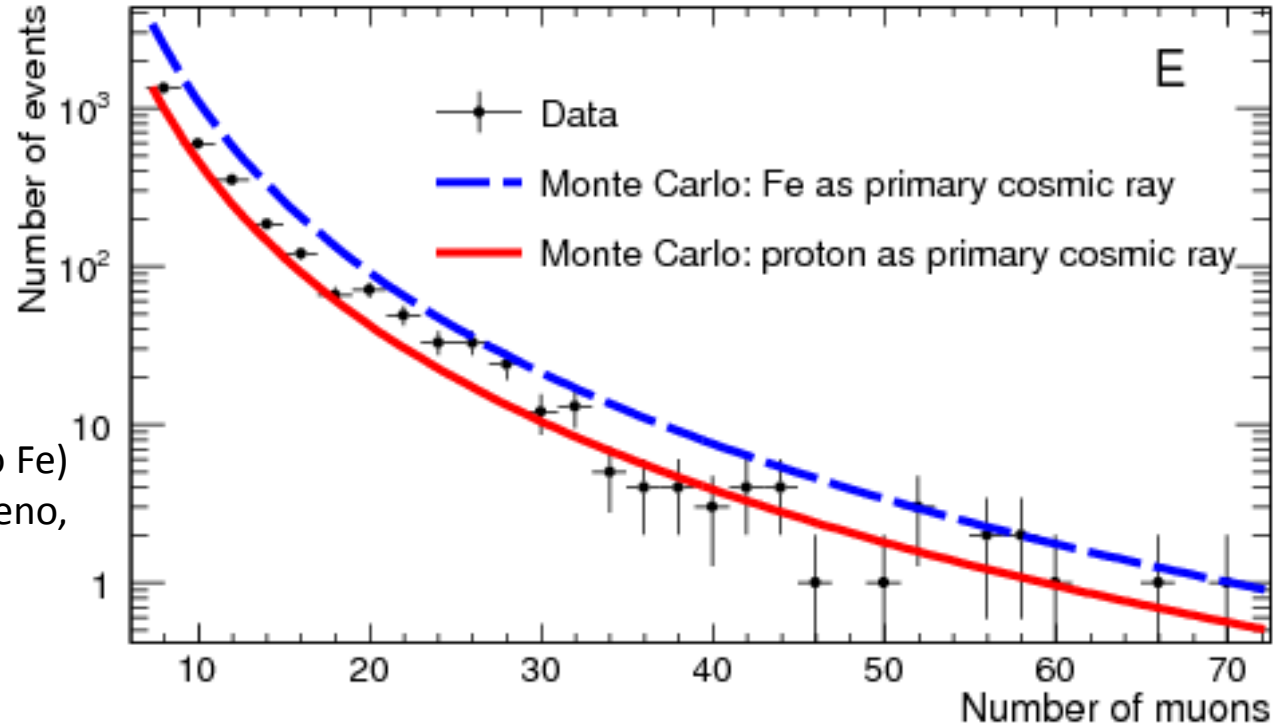
3. Muoni

Il numero di muoni n_μ negli sciame atmosferici estesi che raggiungono la Terra dipende dal raggio cosmico primario che ha dato origine allo sciame, dall' **Energia**, dalla **specie** e dalla direzione di arrivo del primario!

Primari diversi generano sciame un po' diversi....

La distribuzione delle particelle dello sciame varia, misurando differenti grandezze possiamo distinguerli.

Nuclei più pesanti (ad esempio Fe) generano qualche muone in meno, ma nel complesso un numero maggiore di particelle nello sciame, e le particelle hanno maggiore energia.



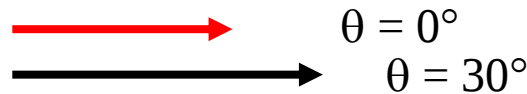
Fe ($m \approx 56 \text{ GeV}/c^2$, $Z = 26$)

p ($m \approx 1 \text{ GeV}/c^2$, $Z = 1$)

3. Muoni

Il numero di muoni μ negli sciame atmosferici estesi che raggiungono la Terra dipende dal raggio cosmico primario che ha dato origine allo sciame, dall' **Energia**, dalla specie e dalla direzione di arrivo del primario!

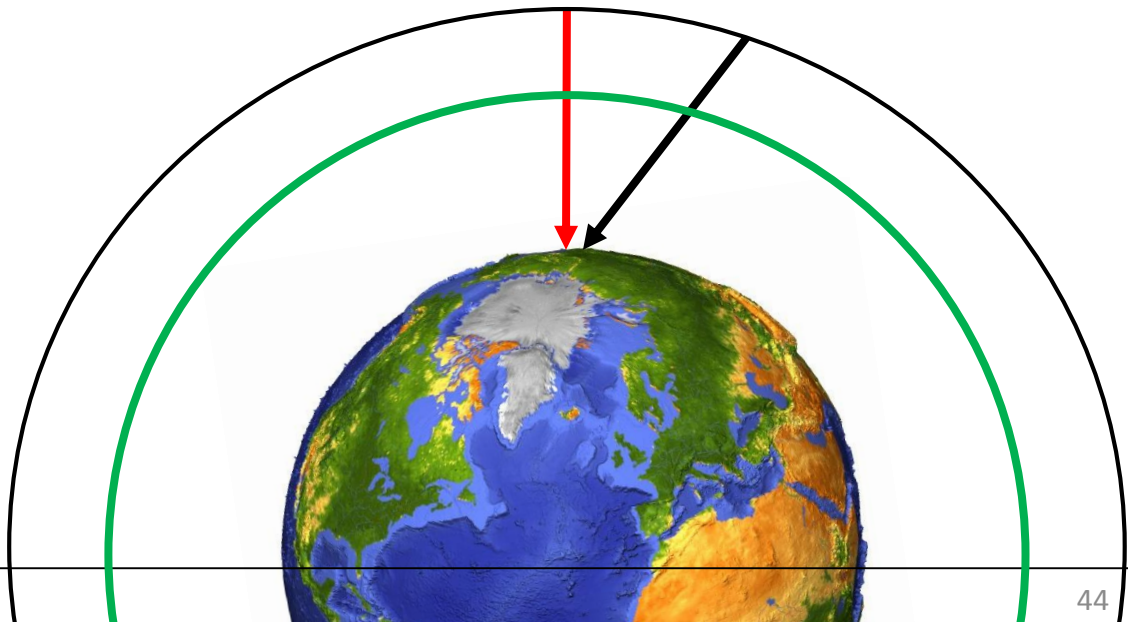
Sciame che hanno direzioni di arrivo ad angoli maggiori attraversano maggiore quantità di Atmosfera. Quindi i muoni hanno maggiore probabilità di interagire con l'Atmosfera, e decadere!



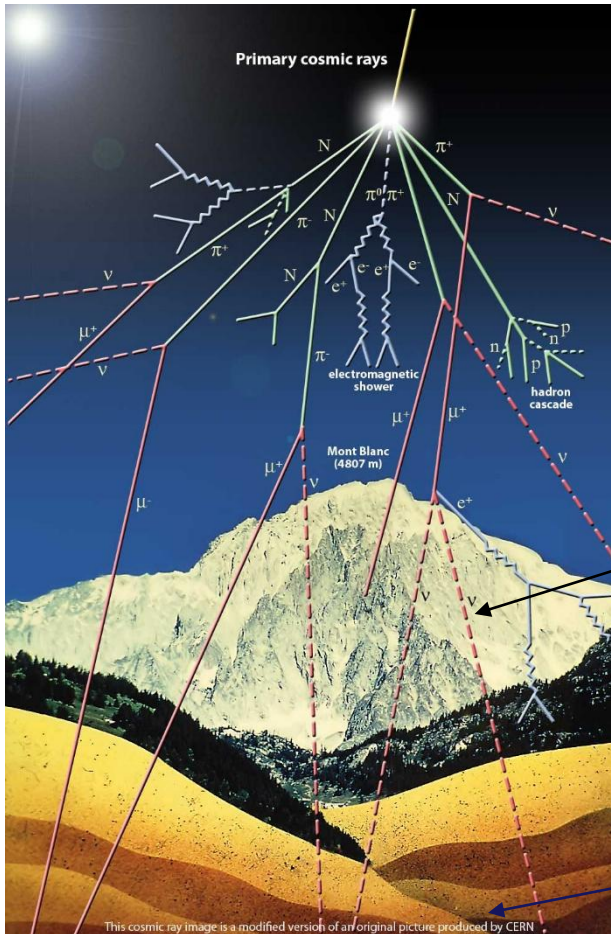
↓ Minore è l'Energia del muone → Maggiore è la sua probabilità di interagire e decadere ↑

Flusso $\Phi(\theta) = I_0 \cos^2\theta$

All' aumentare di θ diminuisce il numero di muoni.
Sopravvivono i muoni di energia maggiore.



3. Muoni



Il numero di muoni μ negli sciame atmosferici estesi che raggiungono la Terra dipende dal raggio cosmico primario che ha dato origine allo sciame, ma anche dall'altezza al livello del mare dove misuro le particelle nello sciame.

Esperimenti in montagna ad alta quota

Maggiore è l'altezza a cui osservo i muoni $\rightarrow$ maggiore è il numero di muoni che osservo.
Le particelle meno energetiche non sono ancora decadute!

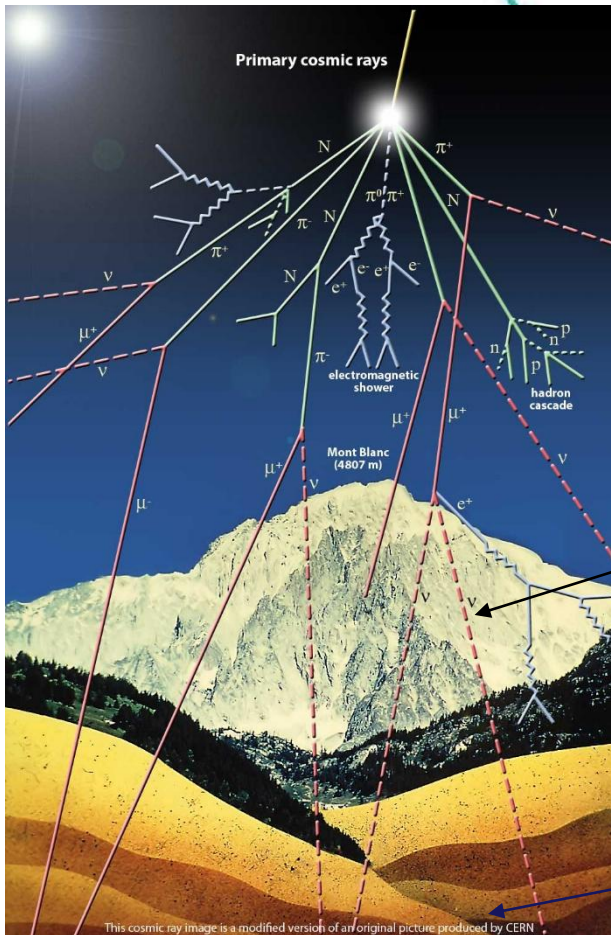
Esperimenti al livello del mare

Sono persi i muoni meno energetici, ed i muoni che hanno interagito con gli atomi dell'atmosfera

Esperimenti nelle gallerie sotto le montagne

i muoni più energetici attraversano fino a qualche km di roccia.
Energia dei muoni $> \text{TeV}$

3. Muoni



Il numero di muoni μ negli sciame atmosferici estesi che raggiungono la Terra dipende dal raggio cosmico primario che ha dato origine allo sciame, ma anche dall'altezza al livello del mare dove misuro le particelle nello sciame.

Esperimenti in montagna ad alta quota

Maggiore è l'altezza a cui osservo i raggi cosmici secondari $\rightarrow$ maggiore è il numero di particelle che osservo. Le particelle meno penetranti non sono ancora decadute e non hanno interagito con l'atmosfera!

Esperimenti al livello del mare

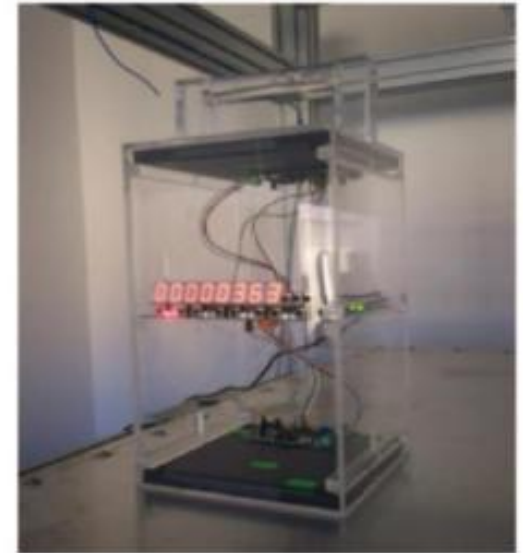
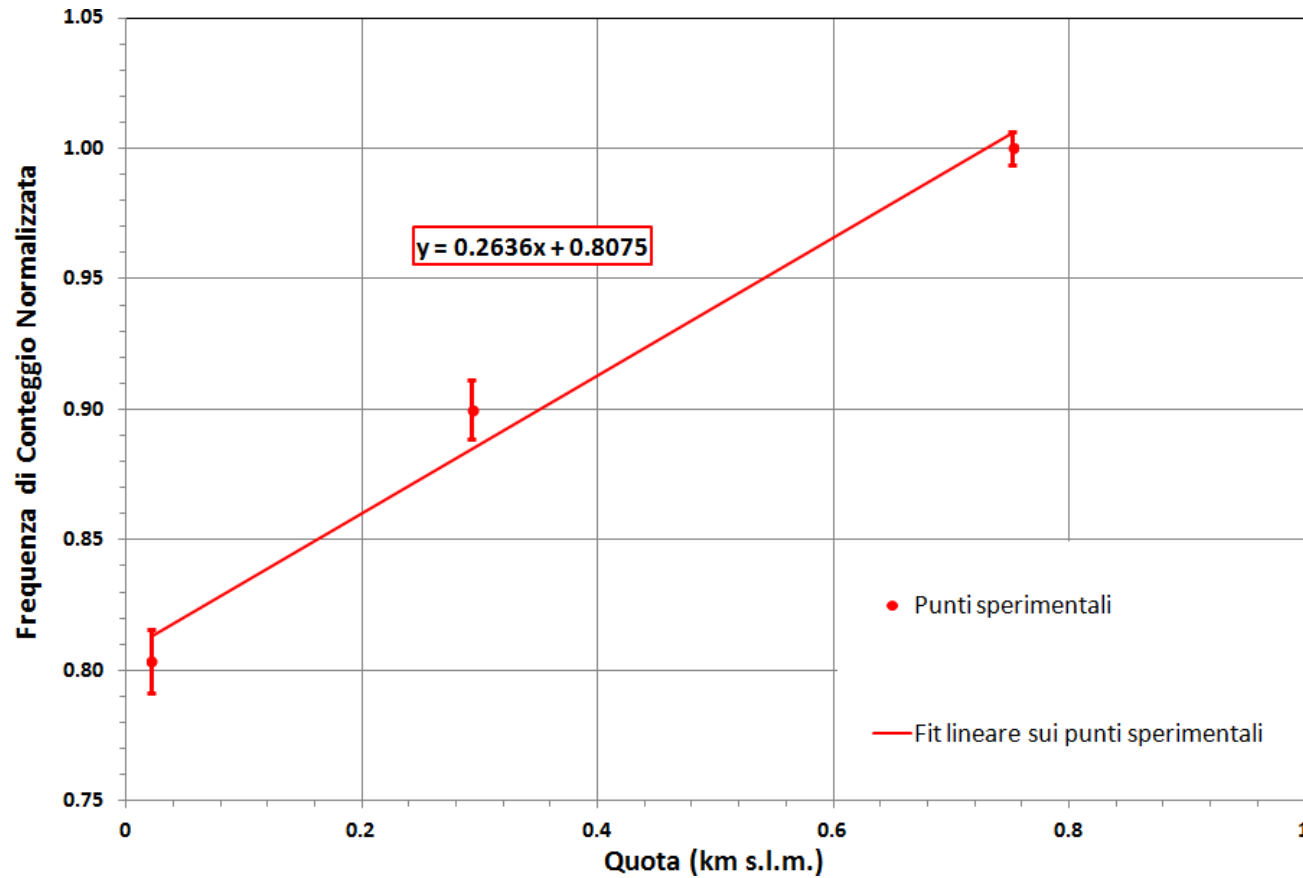
Molte particelle sono ormai perdute, la componente residua è costituita dai muoni (99%), protoni (1%), elettroni e positroni (0,1%) .

Esperimenti nelle gallerie sotto le montagne

I muoni più energetici attraversano fino a qualche km di roccia. Permettono di studiare i raggi cosmici di più alta energia (Energia dei muoni $> \text{TeV}$)

Talks: Underground Measurements (C. Cicalò)

Lo scorso Maggio ad Erice è stata fatta una misura della variazione dei Raggi Cosmici con la quota utilizzando le Cosmic Box



Come varia il flusso dei raggi cosmici con la quota? Basta chiederlo agli studenti del progetto EEE

FISICA PER TUTTI

Come varia il flusso dei raggi cosmici con la quota? Basta chiederlo agli studenti del progetto EEE

How does cosmic ray flux vary with altitude? Let's ask it to EEE project students

Collaborazione EEE (*)

*Centro Fermi - Museo Storico della Fisica e Centro Studi e Ricerche "Enrico Fermi"
Piazza del Viminale 1, 00184 Roma, Italia*

Riassunto. La misura del flusso dei raggi cosmici al variare dell'altitudine rappresenta uno degli esperimenti che permise di comprendere la natura non terrestre della radiazione cosmica. Ancora oggi tale misura viene ripetuta a scopo didattico, facendo uso di apparati sperimentali più evoluti degli elettroscopi adoperati dai pionieri della fisica dei raggi cosmici. In questo articolo è descritta una misura del flusso dei raggi cosmici effettuata a diverse altitudini, dal livello del mare fino a quota 760 m. La misura è stata realizzata da un numeroso gruppo di studenti e docenti provenienti da 44 scuole italiane, riunitisi presso la Fondazione e Centro di Cultura Scientifica "Ettore Majorana" a Erice in occasione dell'Ottava Conferenza dei Progetti del Museo Storico della Fisica e Centro Studi e Ricerche "Enrico Fermi", dedicata al progetto Extreme Energy Events.