

宇宙線

# RAGGI COSMICI

Kosmische  
Strahlen

cosmic rays

rayos cosmicos

宇宙射线

rayons cosmiques

rayos cosmicos

космические лучи

Davide Meloni  
Dipartimento di Matematica e Fisica  
Roma Tre

Query a Grok:

genera immagine di studenti/esse di scuola superiore attraversati da flusso di cosmici





Query a Grok:

genera immagine di studenti/esse di scuola superiore attraversati da flusso di cosmici



Query a ChatGPT:

genera immagine di studenti/esse di scuola superiore attraversati da flusso di cosmici



Da quando siete entrati in questa aula il vostro corpo e' stato attraversato da circa 1 milione di raggi cosmici

## Solo un appetizer...

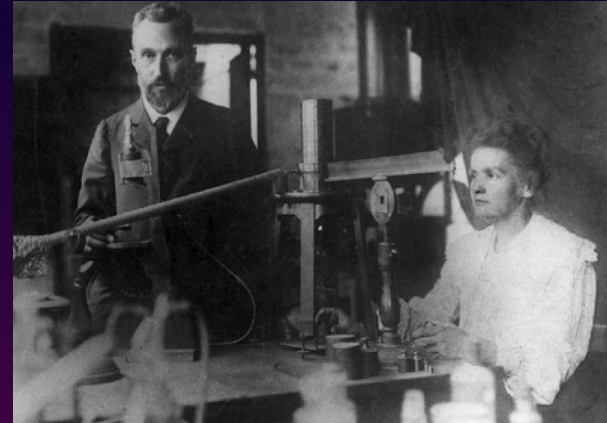
I raggi cosmici sono particelle energetiche  
provenienti dallo spazio esterno alla Terra



- **1900–1908: Le origini della scoperta**

All'inizio del Novecento, la scienza vive un momento rivoluzionario. Henri Becquerel e i coniugi Marie e Pierre Curie scoprono la radioattività, aprendo una nuova finestra sul mondo invisibile dell'atomo.

Le loro ricerche valgono loro il Premio Nobel per la Fisica, e danno il via a una nuova era della fisica moderna.

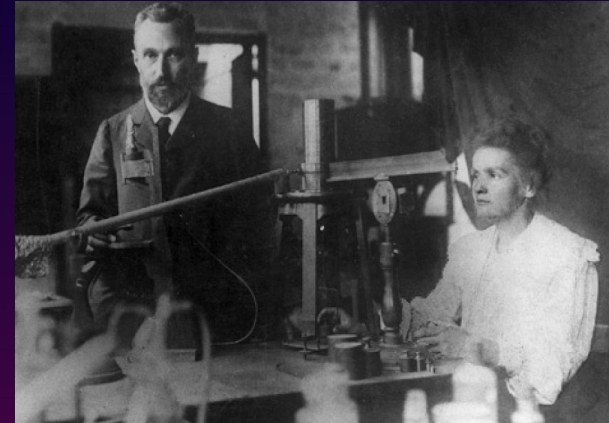


## Storia

- **1900–1908: Le origini della scoperta**

All'inizio del Novecento, la scienza vive un momento rivoluzionario. Henri Becquerel e i coniugi Marie e Pierre Curie scoprono la radioattività, aprendo una nuova finestra sul mondo invisibile dell'atomo.

Le loro ricerche valgono loro il Premio Nobel per la Fisica, e danno il via a una nuova era della fisica moderna.



- **La radiazione “misteriosa”**

Molti scienziati iniziano a studiare una radiazione penetrante presente nell'aria, la cui origine è ancora sconosciuta.

Tra questi troviamo Elster e Geitel, Wilson, Rutherford, Cooke, McLennan, Burton, Mache, Strong ed Eve.

Ipotesi dominante: la radiazione è di origine terrestre

La radioattività del suolo sembra la causa principale

Ma... alcuni risultati non tornano

Qualcosa di ignoto sembra provenire dall'alto

## **1909–1914: Nuove indagini sulla radiazione penetrante**

In questi anni, la ricerca sulla misteriosa radiazione atmosferica continua con nuovi protagonisti:

Domenico Pacini, Theodor Wulf, Victor Hess e Werner Kohlhörster.

Ognuno di loro contribuisce, con esperimenti innovativi, a chiarire l'origine del fenomeno.



## 1909–1914: Nuove indagini sulla radiazione penetrante

In questi anni, la ricerca sulla misteriosa radiazione atmosferica continua con nuovi protagonisti:

Domenico Pacini, Theodor Wulf, Victor Hess e Werner Kohlhörster.

Ognuno di loro contribuisce, con esperimenti innovativi, a chiarire l'origine del fenomeno.



Con un elettroscopio immerso a 3 metri di profondità nel mare di Livorno e nel lago di Bracciano, Domenico Pacini osserva una diminuzione significativa (circa il 20%) dell'intensità della radiazione rispetto ai valori misurati in superficie.

### Esperimenti sempre più audaci

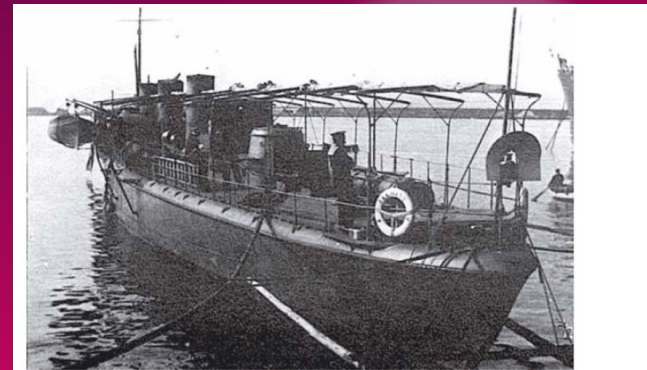
Miglioramento continuo degli elettroscopi, strumenti più sensibili e affidabili

Misure effettuate in mare e persino sotto la superficie dell'acqua (**Pacini**)

Osservazioni sulla Torre Eiffel (Wulf)

Esperimenti ad alta quota con palloni aerostatici (Hess, Kohlhörster)

Gli scienziati cercano di capire se la radiazione arriva dal suolo o dall'alto.

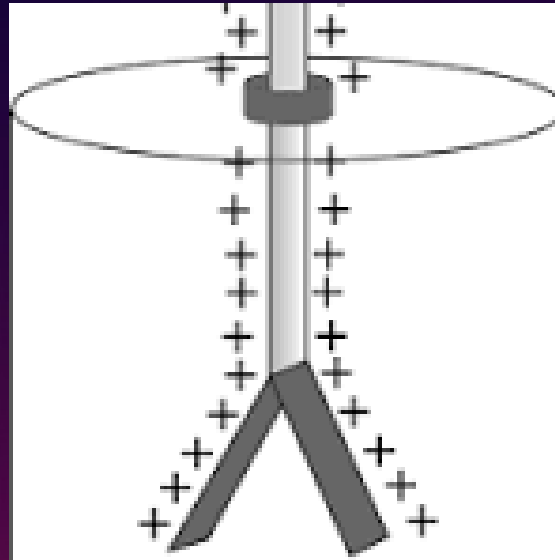


The cacciatorpediniere "Fulmine", used by Pacini for his measurements on the sea

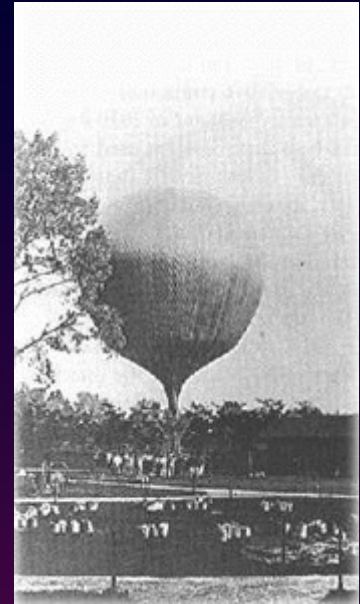
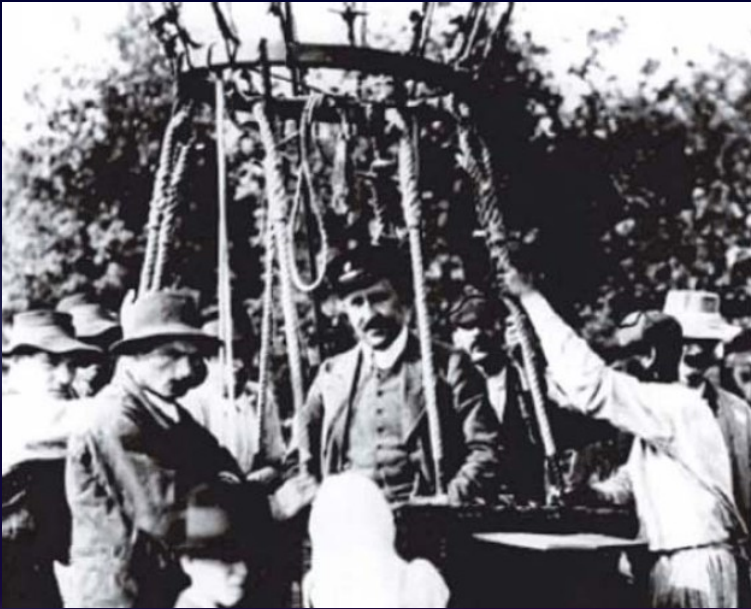


# Elettroscopio

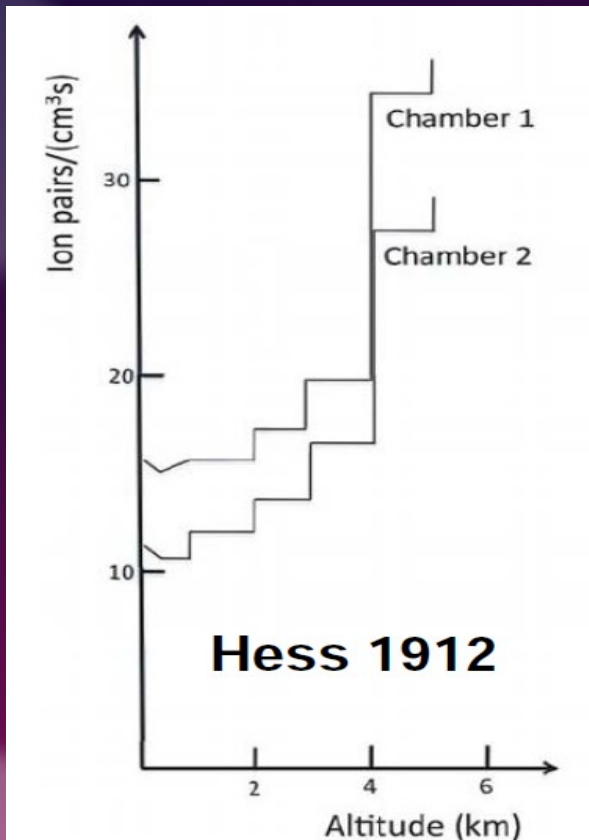
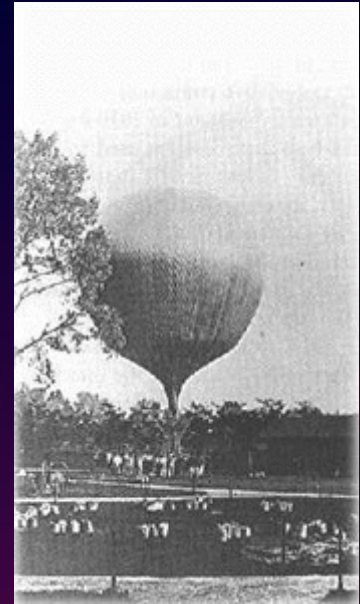
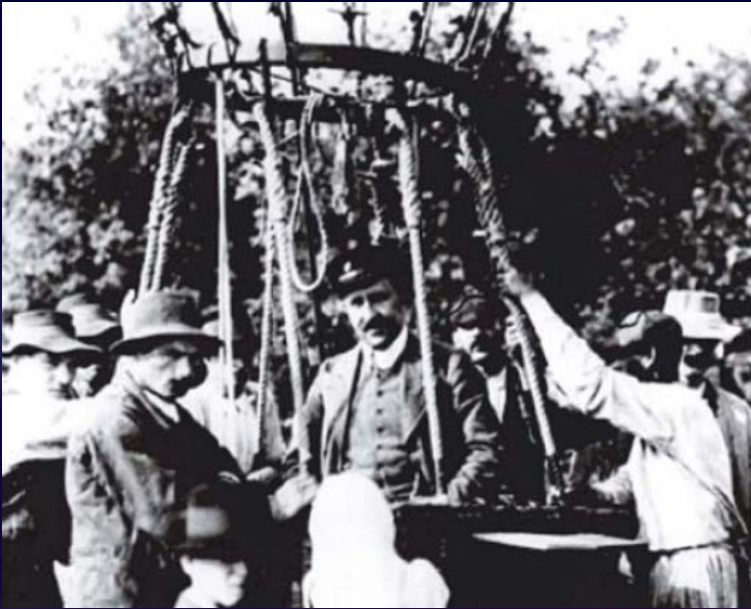
L'elettroscopio è un apparecchio che permette di stabilire se un corpo è carico elettricamente



funziona grazie all'elettricità statica: quando riceve una carica elettrica, le sue foglie metalliche (o lamine) si respingono perché hanno la stessa carica, mostrando così la presenza di elettricità.



Nel 1912, Hess caricò su un pallone aerostatico un dispositivo per misurare le particelle cariche

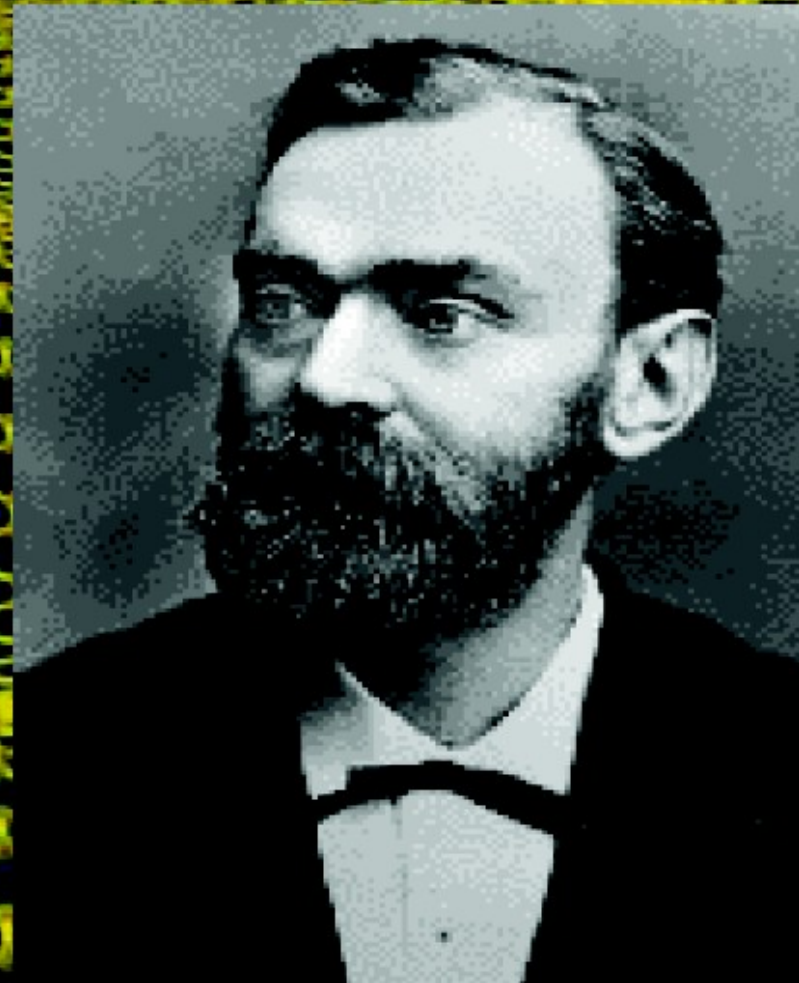


Nel 1912, Hess caricò su un pallone aerostatico un dispositivo per misurare le particelle cariche

- Nel volo, si dimostrò come la radiazione aumentava con l'altitudine
- Questo significava che la radiazione sconosciuta non aveva origine terrestre (come la radioattività naturale) ma proveniva dallo spazio esterno, da cui il nome di **Raggi Cosmici**



# *1936: The Nobel Prize to Hess*

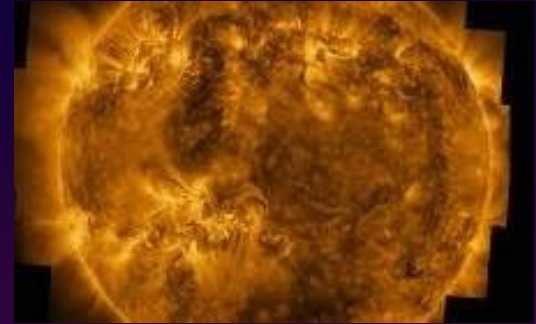




## Origine

### Raggi Cosmici a Bassa Energia (nel Sistema Solare):

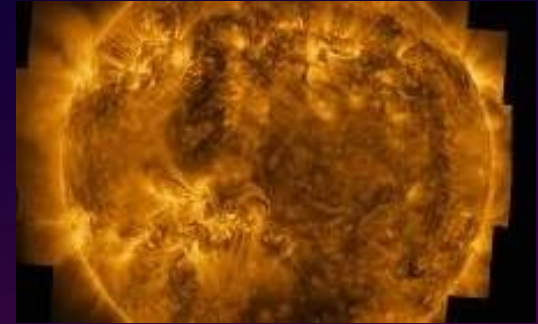
La maggior parte dei raggi cosmici a bassa energia che rileviamo sulla Terra provengono dal Sole, generati durante i brillamenti solari e altri processi che avvengono nella sua cromosfera.



## Origine

### Raggi Cosmici a Bassa Energia (nel Sistema Solare):

La maggior parte dei raggi cosmici a bassa energia che rileviamo sulla Terra provengono dal Sole, generati durante i brillamenti solari e altri processi che avvengono nella sua cromosfera.



### Raggi Cosmici Galattici (energia intermedia):

La maggior parte dei raggi cosmici che arrivano dallo spazio profondo all'interno della nostra galassia (Via Lattea) si ritiene provenga dalle esplosioni di supernove e dagli ammassi di stelle massicce vicine. Le onde d'urto generate da questi eventi agiscono come potenti acceleratori di particelle, principalmente protoni e nuclei atomici.

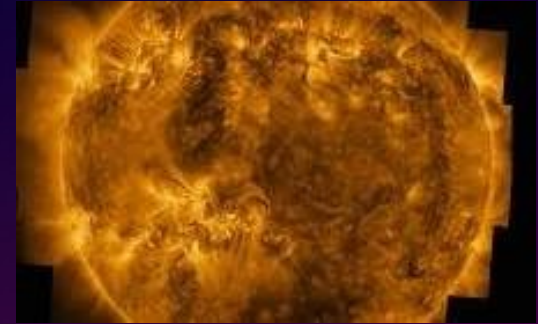




## Origine

### Raggi Cosmici a Bassa Energia (nel Sistema Solare):

La maggior parte dei raggi cosmici a bassa energia che rileviamo sulla Terra provengono dal Sole, generati durante i brillamenti solari e altri processi che avvengono nella sua cromosfera.



### Raggi Cosmici Galattici (energia intermedia):

La maggior parte dei raggi cosmici che arrivano dallo spazio profondo all'interno della nostra galassia (Via Lattea) si ritiene provenga dalle esplosioni di supernove e dagli ammassi di stelle massicce vicine. Le onde d'urto generate da questi eventi agiscono come potenti acceleratori di particelle, principalmente protoni e nuclei atomici.



### Raggi Cosmici ad Altissima Energia (extragalattici):

Provengono da sorgenti situate al di fuori della nostra galassia, in galassie distanti.

Le possibili sorgenti includono: **Buchi neri** supermassicci; **Blazar**, che sono nuclei galattici attivi che emettono getti di particelle e radiazioni diretti verso la Terra...

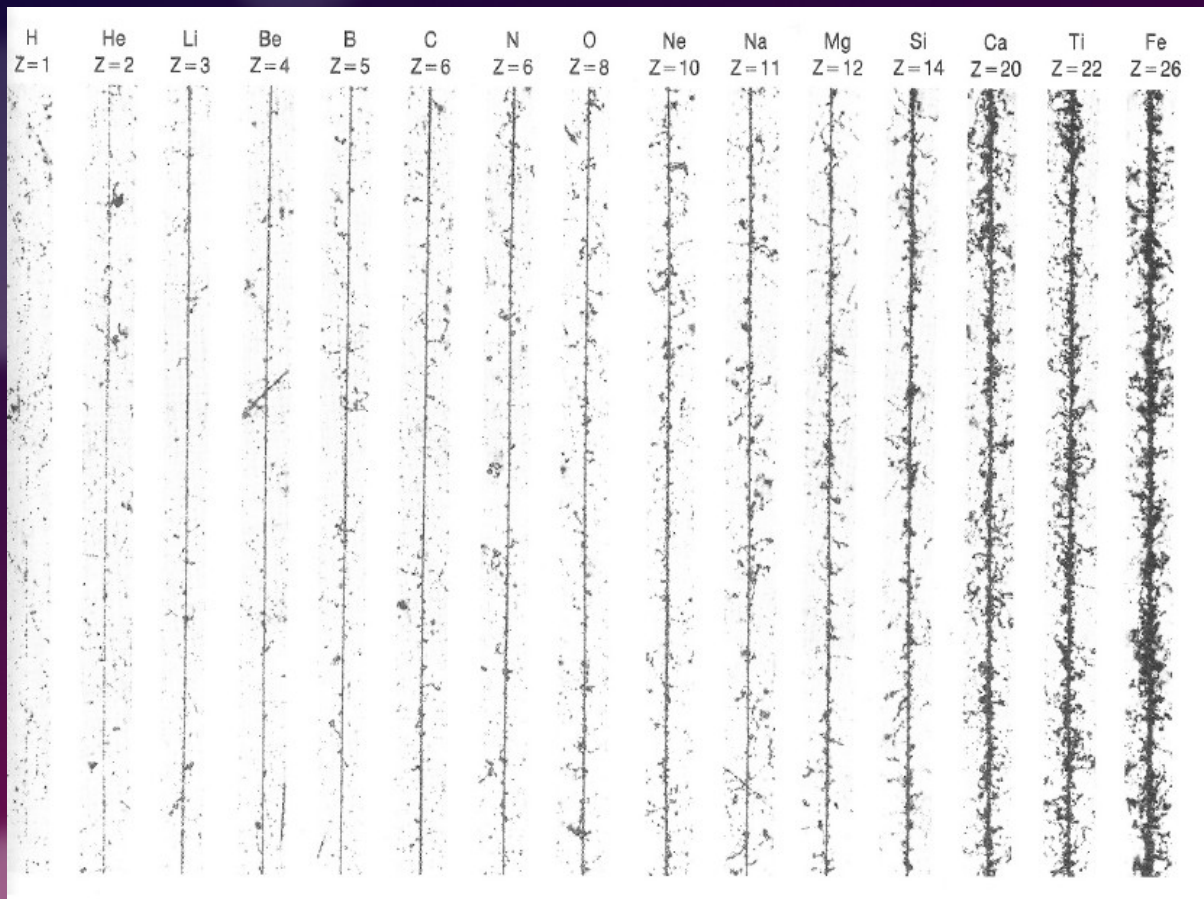
## Particelle scoperte nei raggi cosmici

Sono composti principalmente da:

Protoni (circa il 90%)

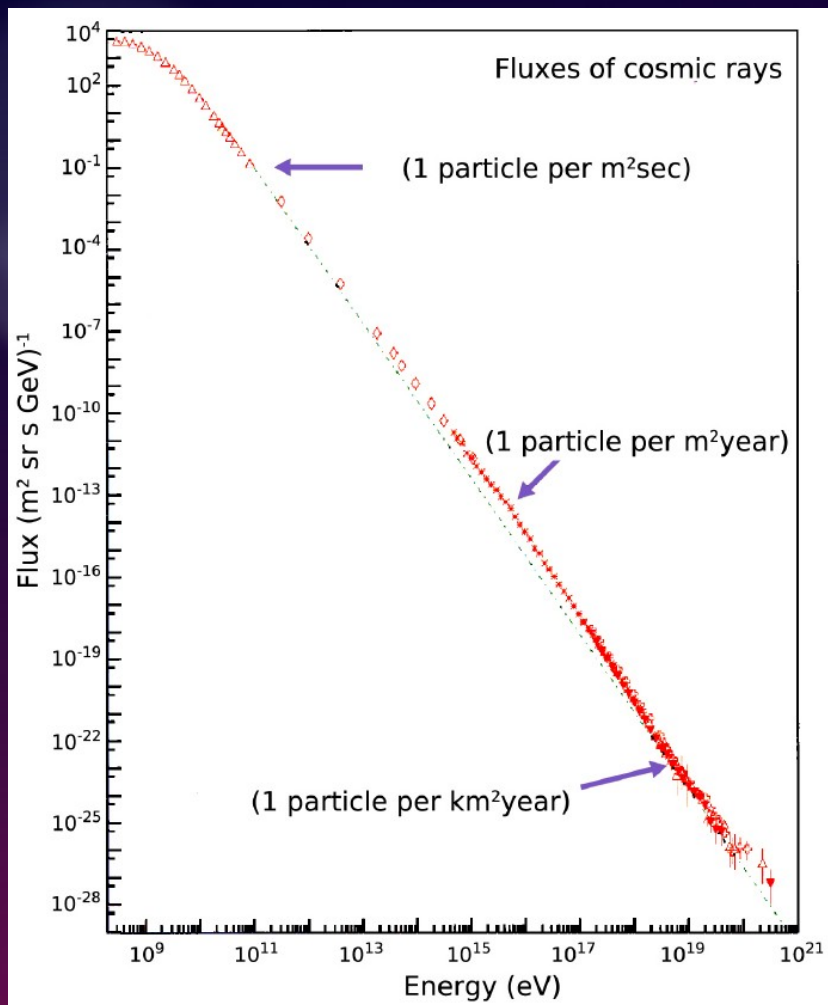
Nuclei di elio o particelle alfa (circa il 9%)

Una piccola parte (circa l'1%) di altri nuclei atomici, elettroni e antiparticelle



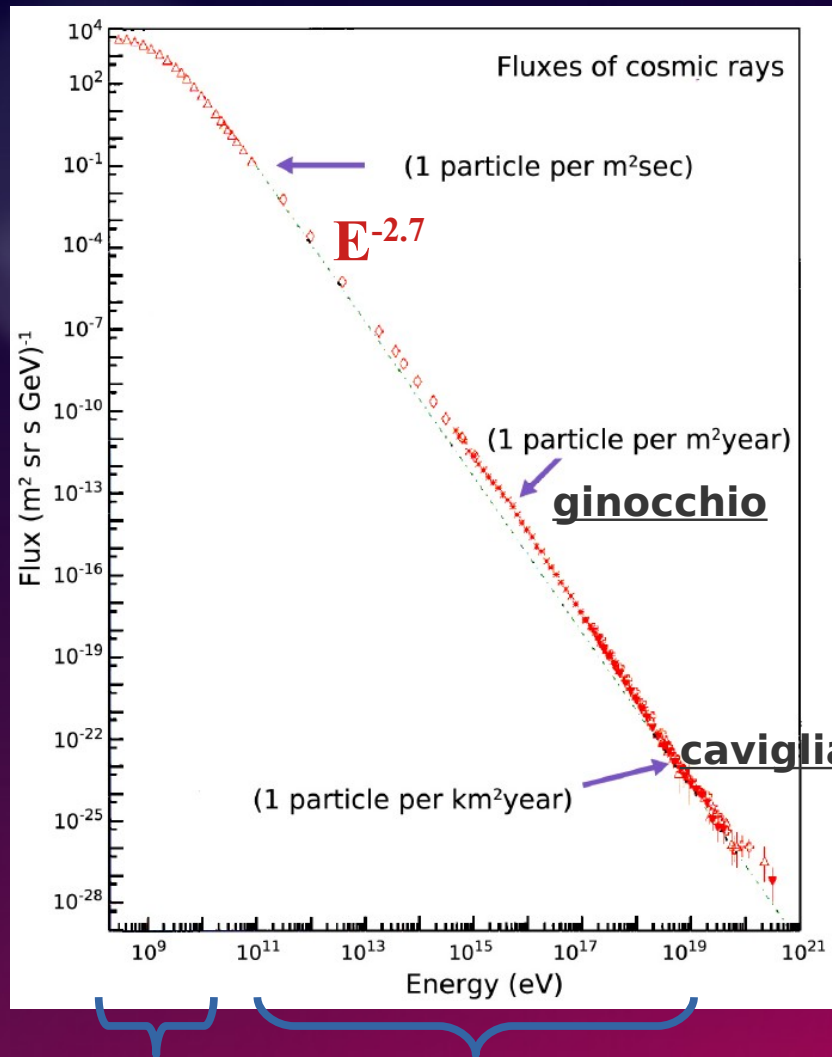
Tracce di raggi cosmici su emulsioni fotografiche

## Energie raggi cosmici





## Energie raggi cosmici

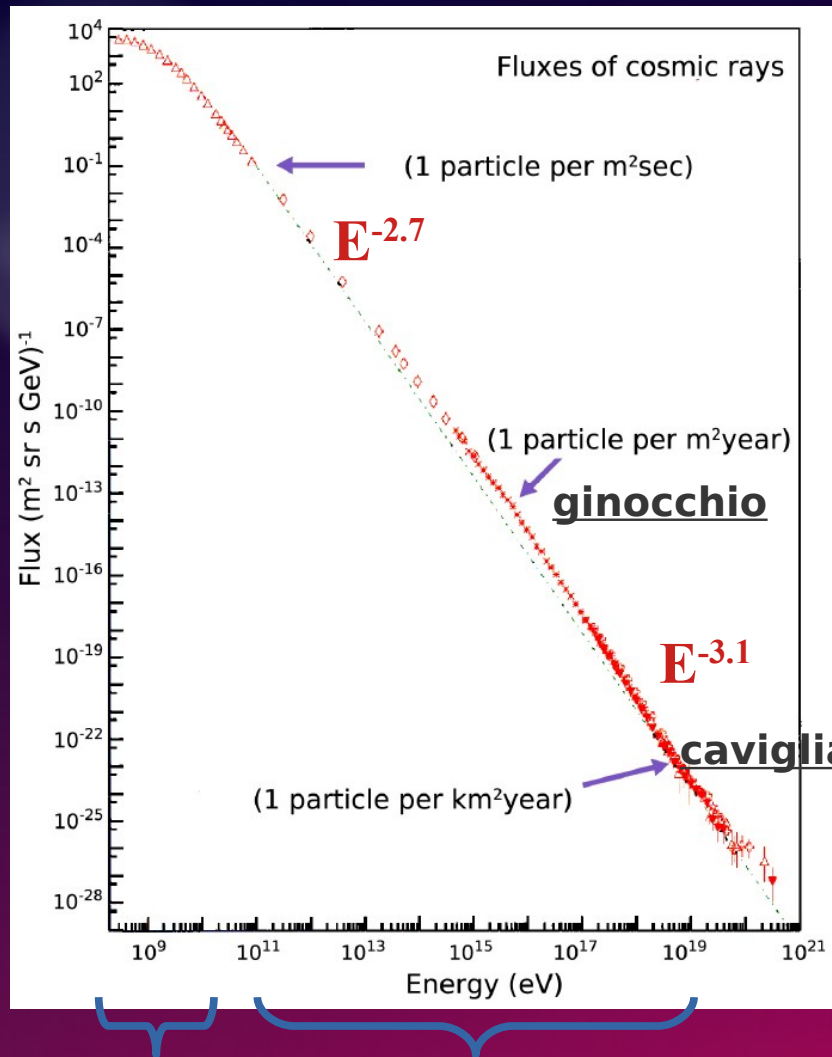


Fino al ginocchio la maggior parte dei raggi cosmici e' di origine galattica

flusso varia al variare dell'attivita' solare

legge di potenza  $E^{-x}$

# Energie raggi cosmici



Fino al ginocchio la maggior parte dei raggi cosmici e' di origine galattica

Al cambio di pendenza i protoni non sono piu' confinati nella galassia e quindi il loro flusso scende

diventa dominante il contributo dei raggi cosmici extra-galattici

flusso varia al variare dell'attivita' solare

legge di potenza  $E^{-x}$

## Energie raggi cosmici

Misuriamo la loro energia in elettronvolt (eV): energia acquistata da un elettrone quando è accelerato dalla differenza di potenziale di un volt

| Classificazione                      | Energia            | Proprieta'                                                            |
|--------------------------------------|--------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| High Energy Cosmic Rays (HECR)       | $10^9$ eV (GeV)    | misurato con palloni o satelliti al di fuori (o quasi) dell'atmosfera |
| Very High Energy Cosmic Rays (VHECR) | $10^{12}$ eV (TeV) |                                                                       |
|                                      |                    |                                                                       |
|                                      |                    |                                                                       |



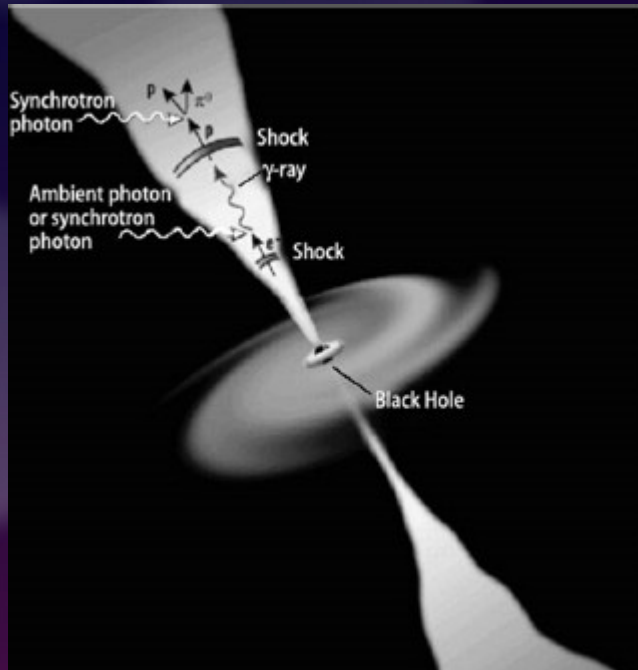
## Energie raggi cosmici

Misuriamo la loro energia in elettronvolt (eV): energia acquistata da un elettrone quando è accelerato dalla differenza di potenziale di un volt

| Classificazione                       | Energia             | Proprieta'                                                                                                                                                                               |
|---------------------------------------|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| High Energy Cosmic Rays (HECR)        | $10^9$ eV (GeV)     | misurato con palloni o satelliti al di fuori (o quasi) dell'atmosfera                                                                                                                    |
| Very High Energy Cosmic Rays (VHECR)  | $10^{12}$ eV (TeV)  |                                                                                                                                                                                          |
| Ultra High Energy Cosmic Rays (UHECR) | $10^{15}$ eV (PeV)  | il flusso troppo basso; serve misura <i>indiretta</i> , cioè dei prodotti secondari dell'interazione dei raggi cosmici con l'atmosfera, grazie a rilevatori a terra di grandi dimensioni |
| Extreme High Energy Cosmic Rays       | $10^{18}$ eV (>EeV) |                                                                                                                                                                                          |

## Questioni aperte: come vengono accelerati?

### Acceleratori cosmici

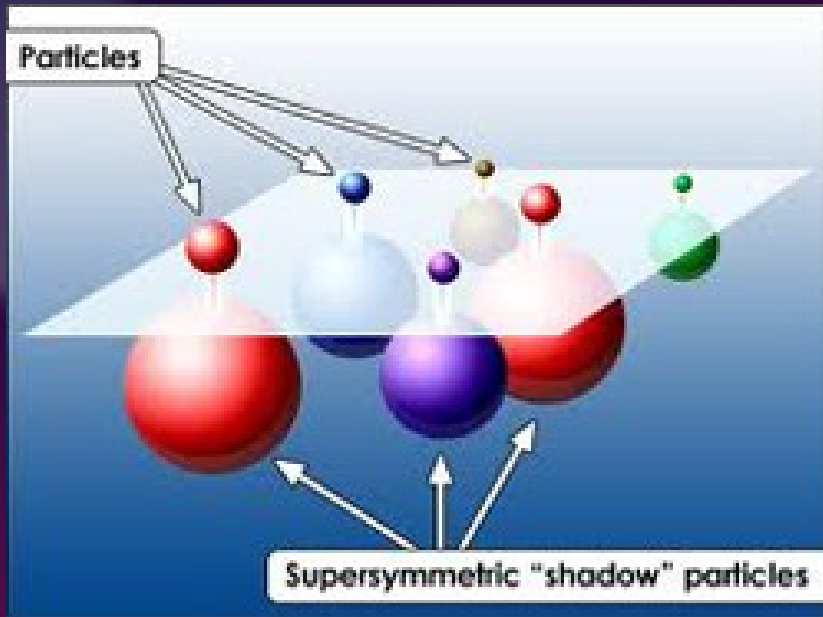


E' probabile che il fenomeno di accelerazione dei raggi cosmici avvenga in prossimita' dell'onda d'urto di un evento "esplosivo" come per esempio una Supernova

## Questioni aperte: come vengono accelerati?

### Sorgenti esotiche

E' l'idea che nuova fisica sia coinvolta nella produzione dei raggi cosmici

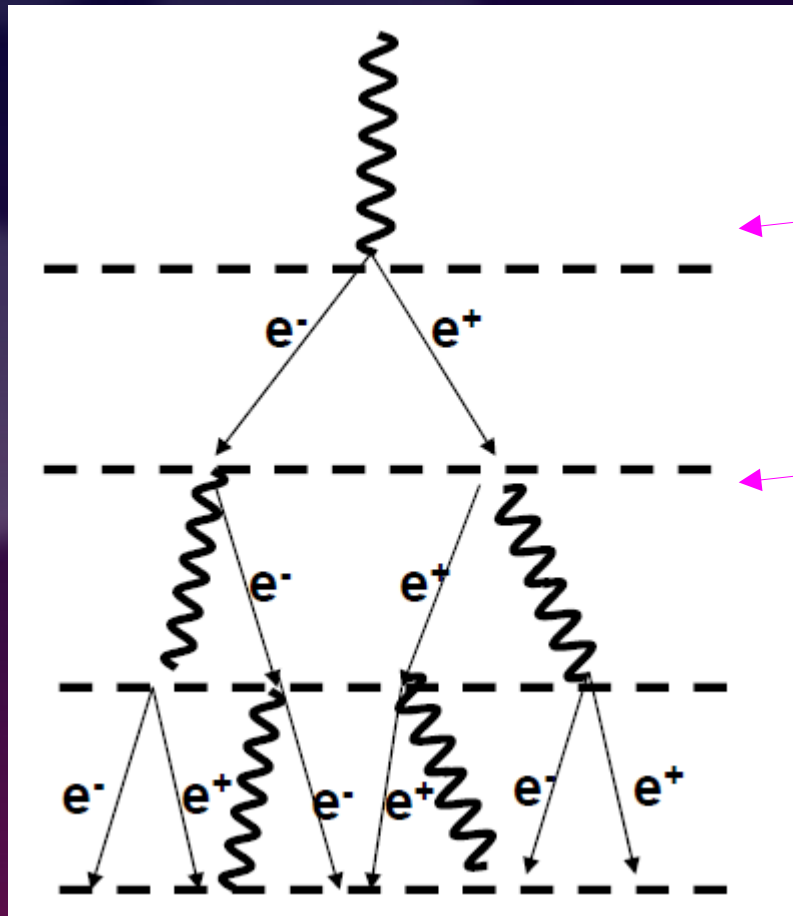


raggi cosmici possano venir prodotti dal decadimento di particelle supermassive non standard



## Rivelazione indiretta di raggi cosmici: Extended Air shower

sciame elettromagnetico  
(semplificato)



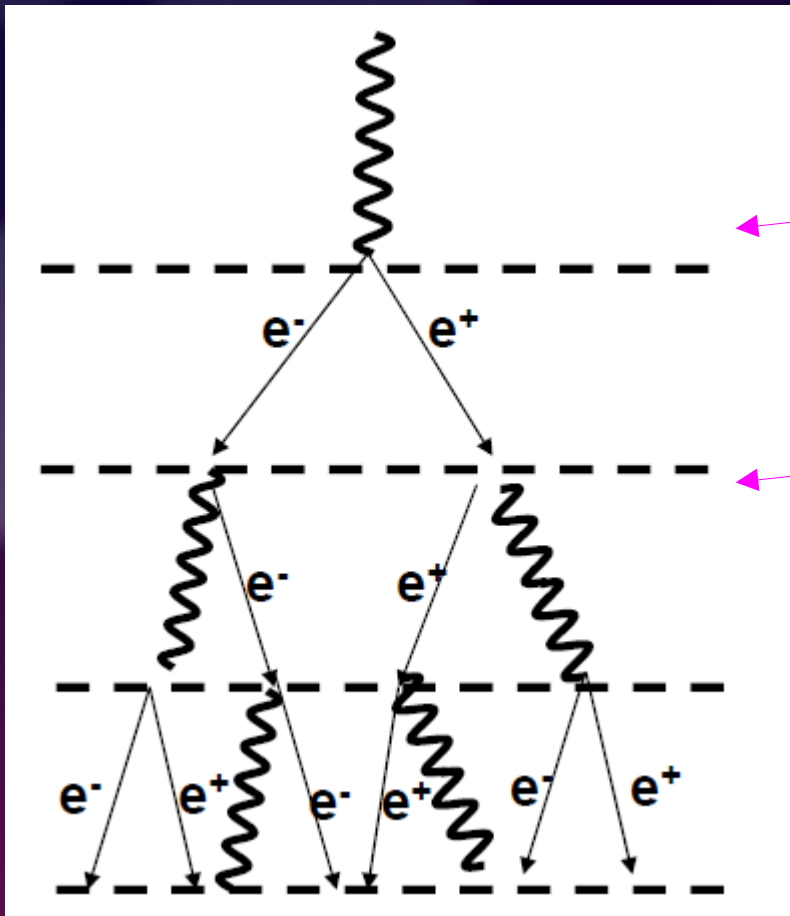
produzione di coppie

Il numero di particelle presenti a  
ogni stadio:

$$N(x) = 2^{x/L_0}$$

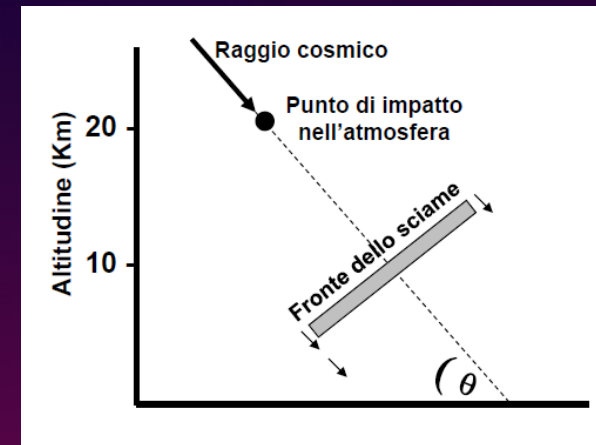
# Rivelazione indiretta di raggi cosmici: Extended Air shower

sciame elettromagnetico  
(semplificato)



produzione di coppie

Bremmstrahlung:  
radiazione di frenamento

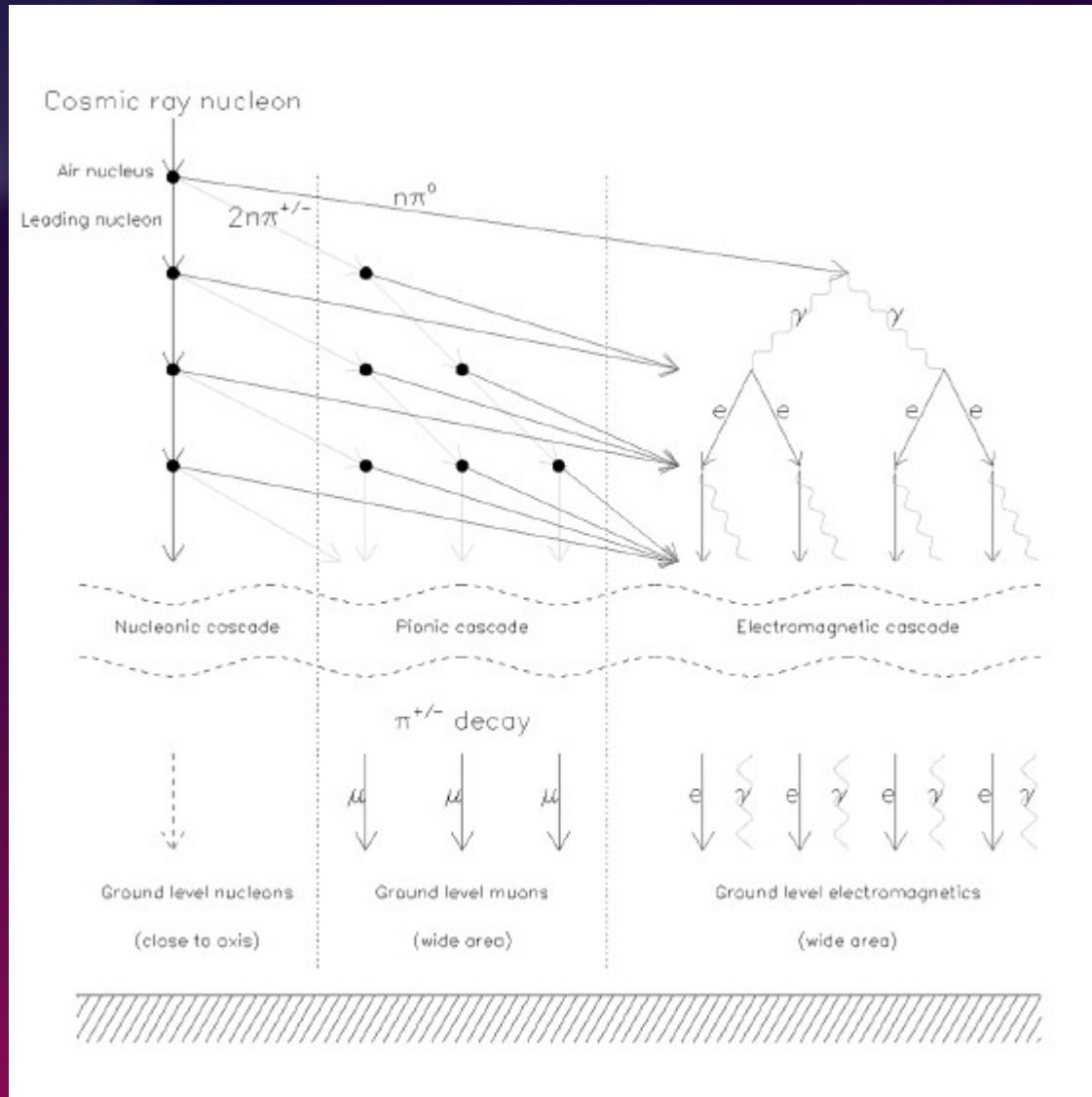


Il numero di particelle presenti  
a ogni stadio:

$$N(x) = 2^{x/L_0}$$

# Rivelazione indiretta di raggi cosmici: Extended Air shower

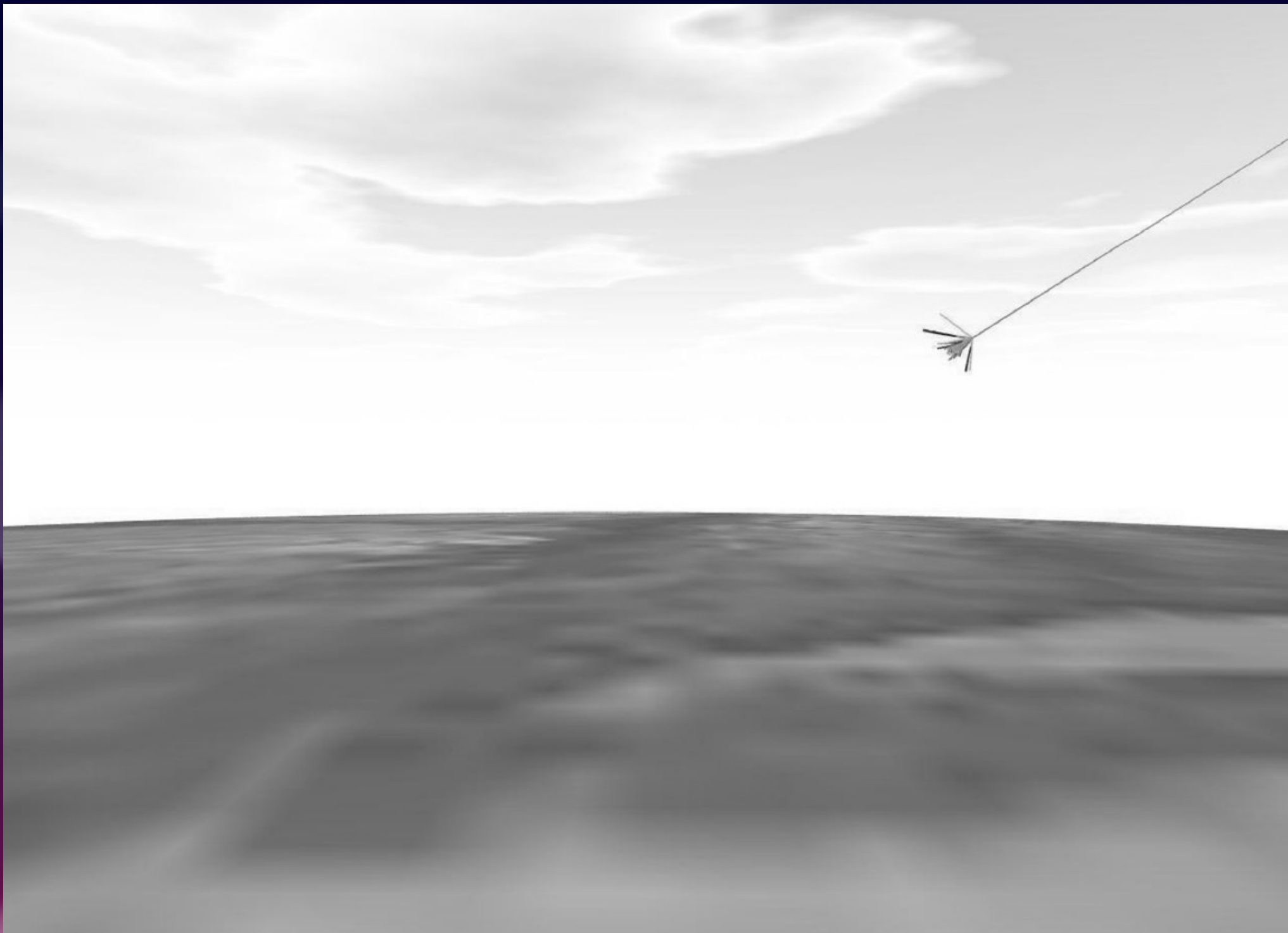
sciame adronico



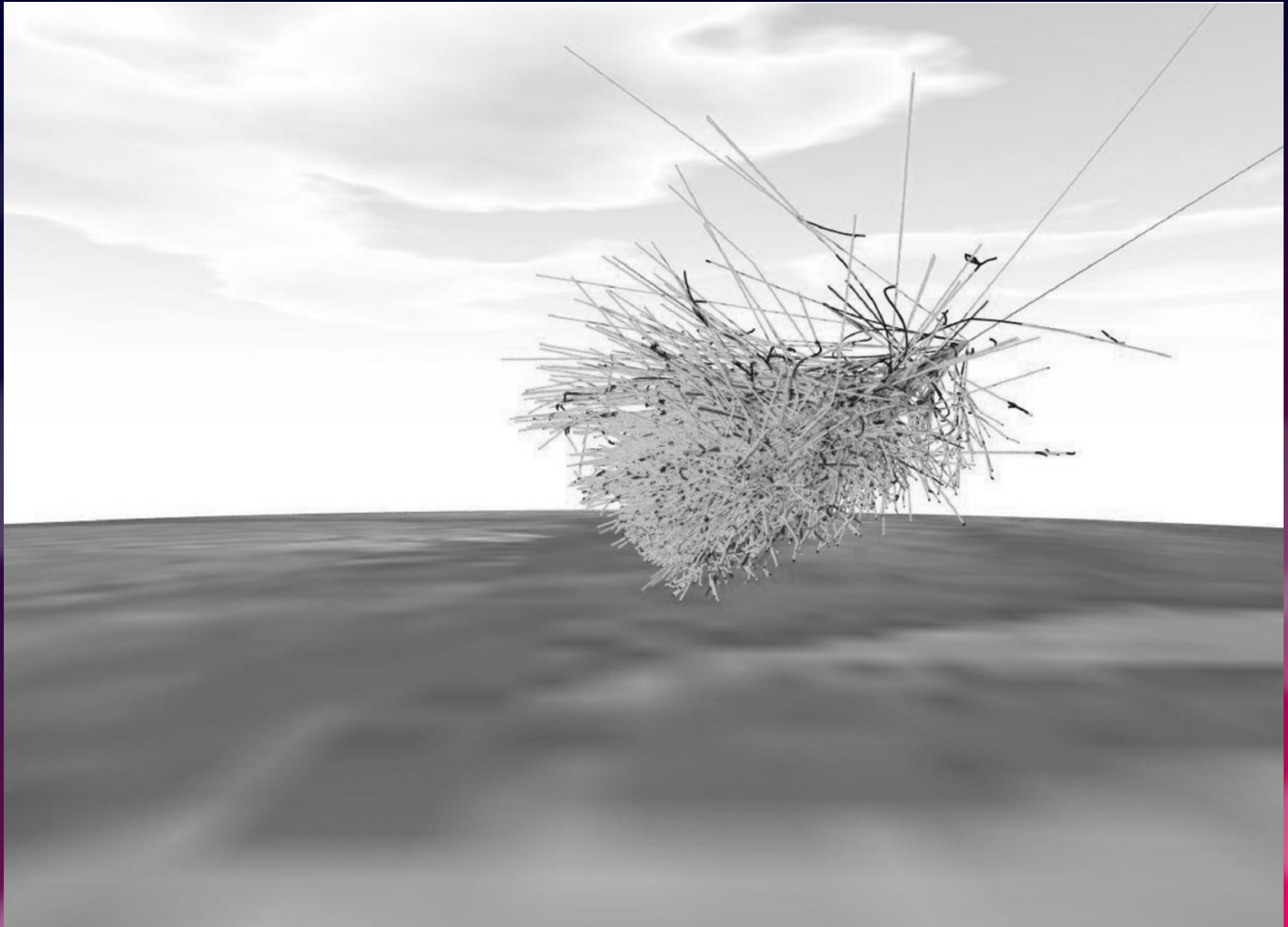
Hajo Drescher, Frankfurt U.

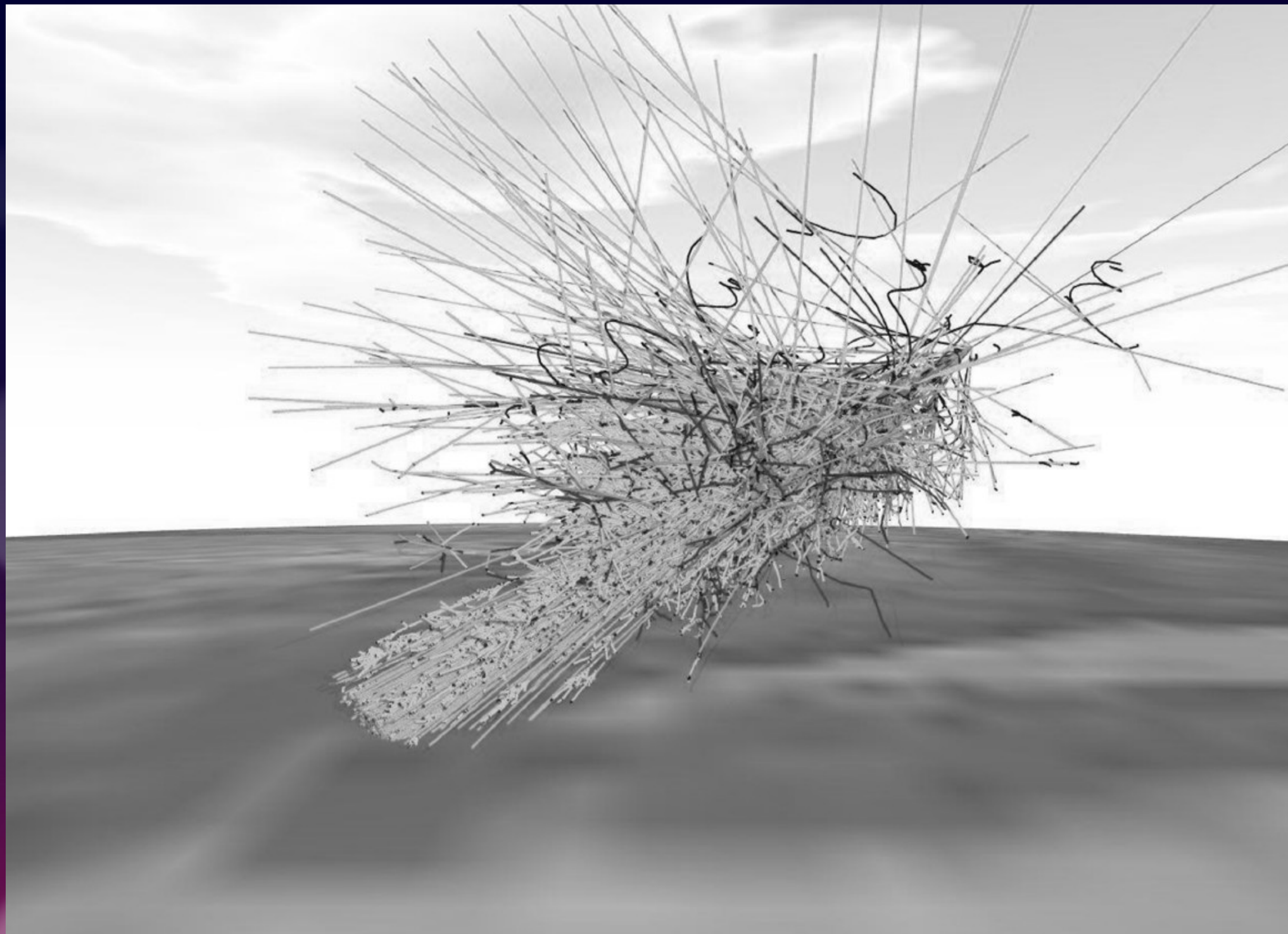
Barbara  
Caccianiga



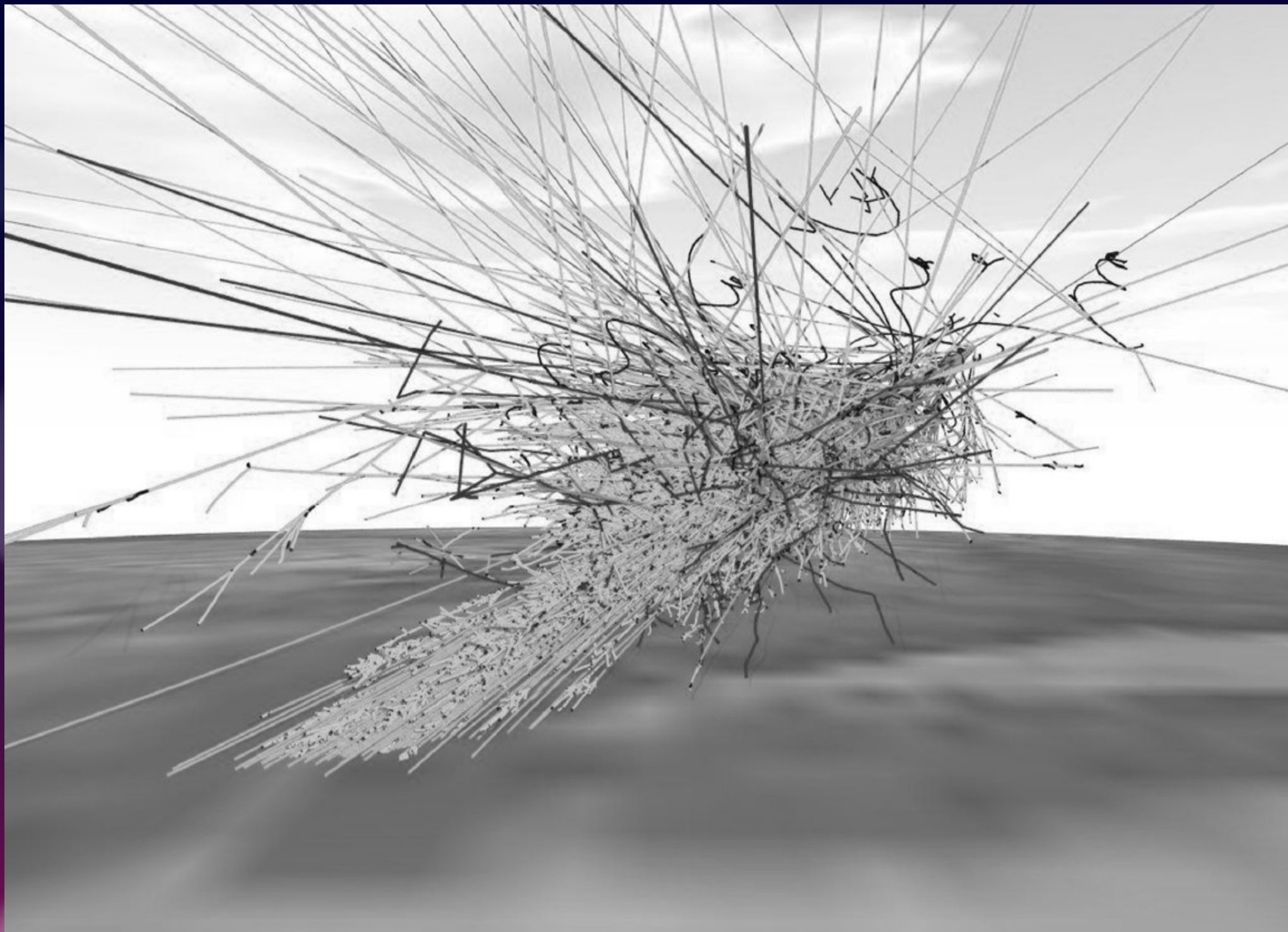










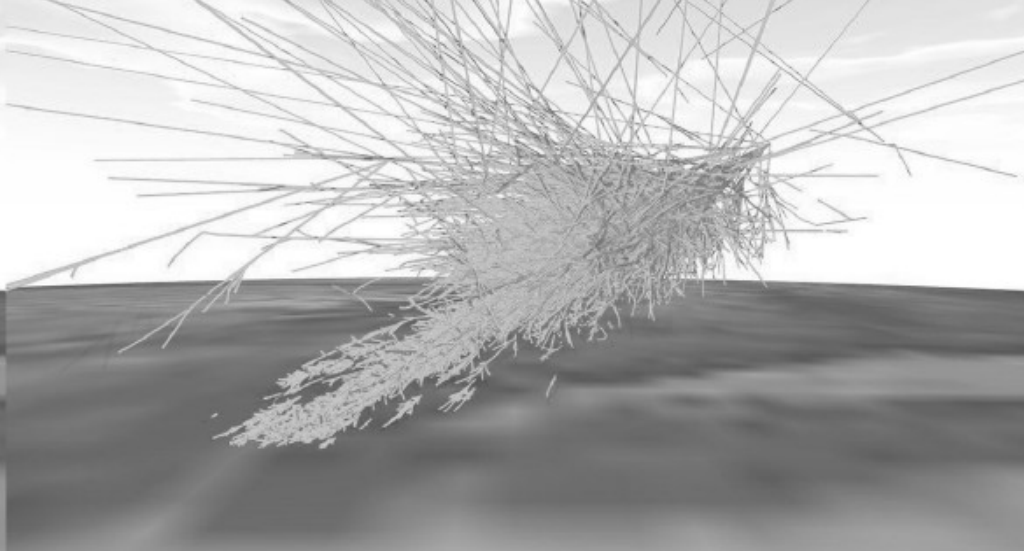


*electrons/positrons*



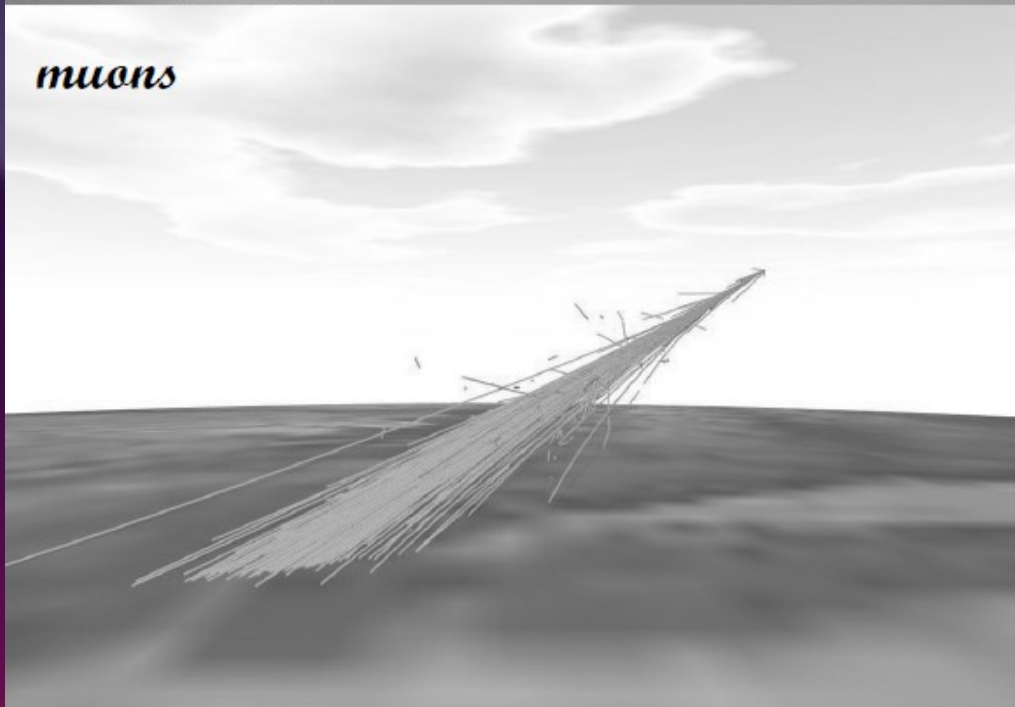
*Hajo Drescher, Frankfurt U.*

*photons*



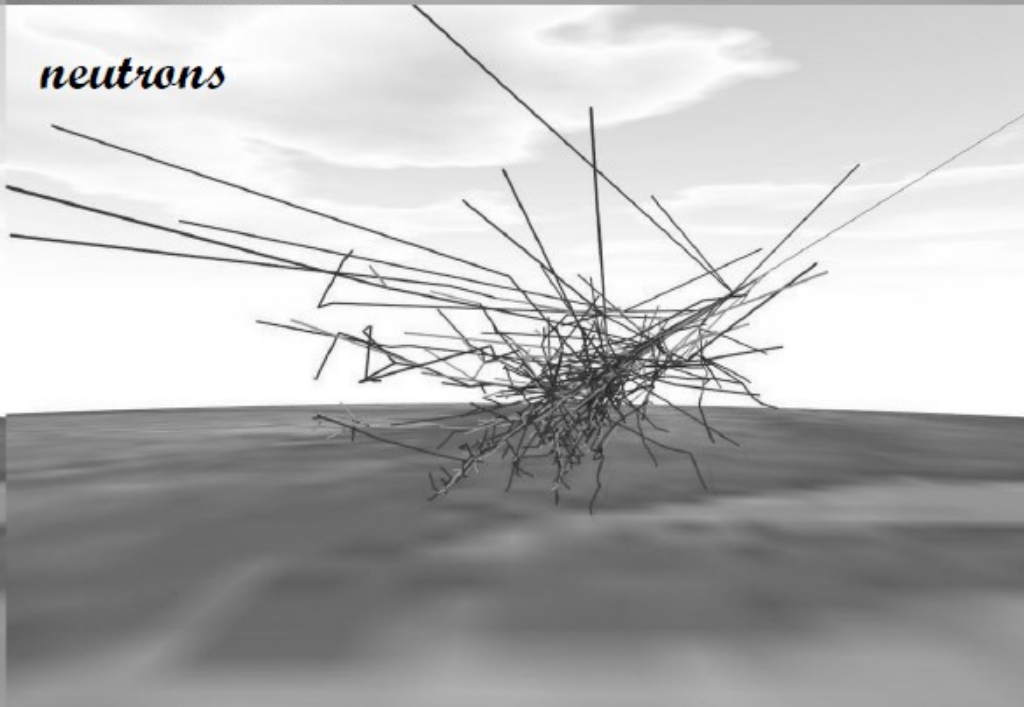
*Hajo Drescher, Frankfurt U.*

*muons*



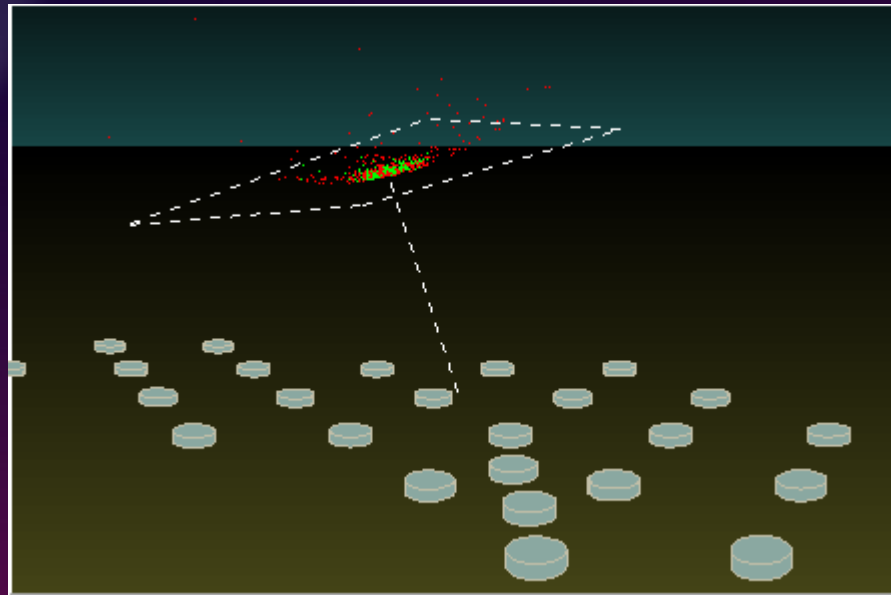
*Hajo Drescher, Frankfurt U.*

*neutrons*



*Hajo Drescher, Frankfurt U.*

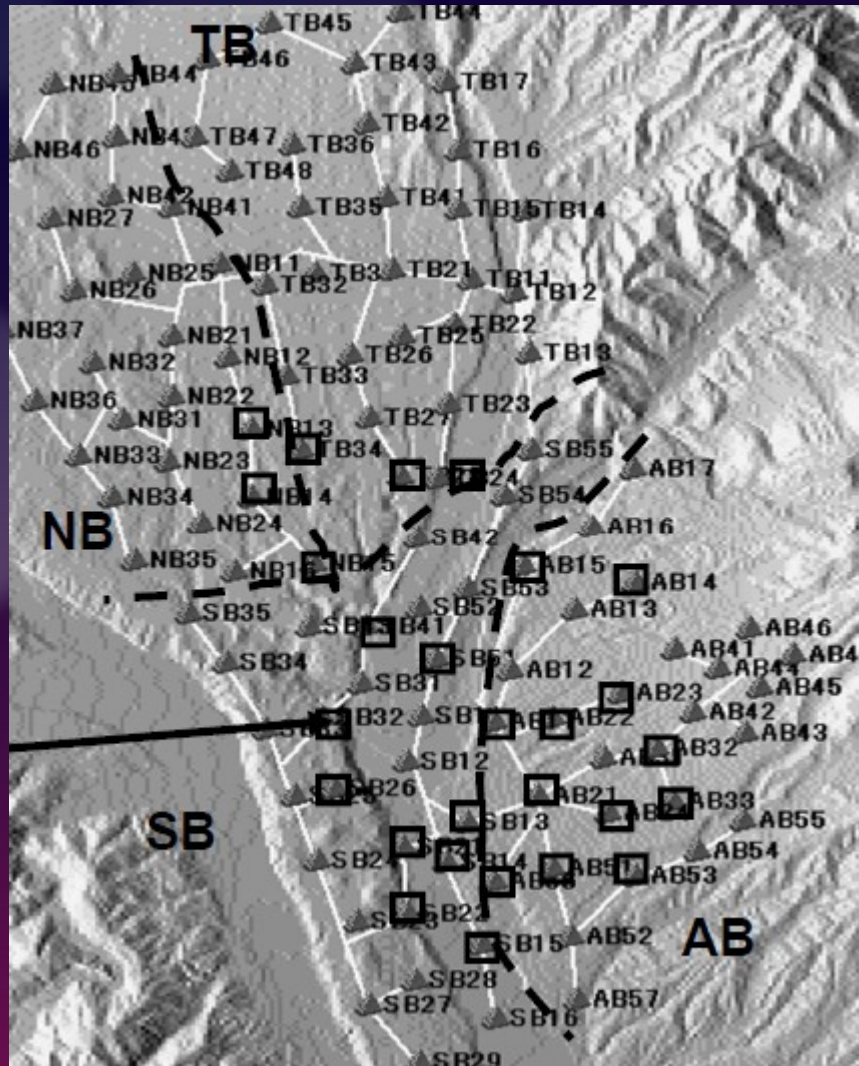
## Rivelazione indiretta di raggi cosmici: Extended Air shower



<https://news.fnal.gov/wp-content/uploads/2003/10/Auger-Animation.gif>



## Rivelazione indiretta di raggi cosmici: AGASA



- 111 scintillatori di dimensione  $2.2 \text{ m}^2$  disposti a una distanza di 1 Km l'uno dall'altro
- L'area complessiva dell'array e' di  $100 \text{ Km}^2$
- I rivelatori a scintillazione servono per rivelare gli elettroni dello Sciame
- Esistono poi 27 rivelatori per muoni



## Carta di identita' del muone

NOME COMPLETO:

Muone ( $\mu^-$ )

SIMBOLO:

$\mu^-$  (antimuone:  $\mu^+$ )

FAMIGLIA:

Leptoni (2<sup>a</sup> generazione)

CARICA ELETTRICA:

-1 e ( $-1,602 \times 10^{-19}$  C)

MASSA A RIPOSO:

105,6583755(23) MeV/c<sup>2</sup>

(circa 206,768 volte la massa dell'elettrone)

VITA MEDIA (a riposo):

2,1969811(22)  $\times 10^{-6}$  s ( $\approx 2,197$   $\mu$ s)

MODI DI DECADIMENTO PRINCIPALI:

$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$  ( $\approx 100\%$ )

INTERAZIONI:

✓ Elettromagnetica

✓ Debole

✗ Forte

DATA DI SCOPERTA:

1936 (Carl D. Anderson e Seth Neddermeyer,  
raggi cosmici nei rivelatori a nebbia)

PARTICELLE FIGLIE TIPICHE NEL DECADIMENTO:

Elettrone ( $e^-$ ), antineutrino elettronico ( $\bar{\nu}_e$ ),  
neutrino muonico ( $\nu_\mu$ )

## Carta di identita' del muone

NOME COMPLETO:

Muone ( $\mu^-$ )

SIMBOLO:

$\mu^-$  (antimuone:  $\mu^+$ )

FAMIGLIA:

Leptoni (2<sup>a</sup> generazione)

CARICA ELETTRICA:

-1 e ( $-1,602 \times 10^{-19}$  C)

MASSA A RIPOSO:

105,658375(23) MeV/c<sup>2</sup>

(circa 206,768 volte la massa dell'elettrone)

VITA MEDIA (a riposo):

$2,1969811(22) \times 10^{-6}$  s ( $\approx 2,197$   $\mu$ s)

MODI DI DECADIMENTO PRINCIPALI:

$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$  ( $\approx 100\%$ )

INTERAZIONI:

✓ Elettromagnetica

✓ Debole

✗ Forte

DATA DI SCOPERTA:

1936 (Carl D. Anderson e Seth Neddermeyer,  
raggi cosmici nei rivelatori a nebbia)

PARTICELLE FIGLIE TIPICHE NEL DECADIMENTO:

Elettrone ( $e^-$ ), antineutrino elettronico ( $\bar{\nu}_e$ ),  
neutrino muonico ( $\nu_\mu$ )



# Carta di identita' del muone

NOME COMPLETO:

Muone ( $\mu^-$ )

SIMBOLO:

$\mu^-$  (antimuone:  $\mu^+$ )

FAMIGLIA:

Leptoni (2<sup>a</sup> generazione)

CARICA ELETTRICA:

-1 e ( $-1,602 \times 10^{-19}$  C)

MASSA A RIPOSO:

105,6583755(23) MeV/c<sup>2</sup>

(circa 206,768 volte la massa dell'elettrone)

VITA MEDIA (a riposo):

$2,1969811(22) \times 10^{-6}$  s ( $\approx 2,197$   $\mu$ s)

MODI DI DECADIMENTO PRINCIPALI:

$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$  ( $\approx 100\%$ )

INTERAZIONI:

✓ Elettromagnetica

✓ Debole

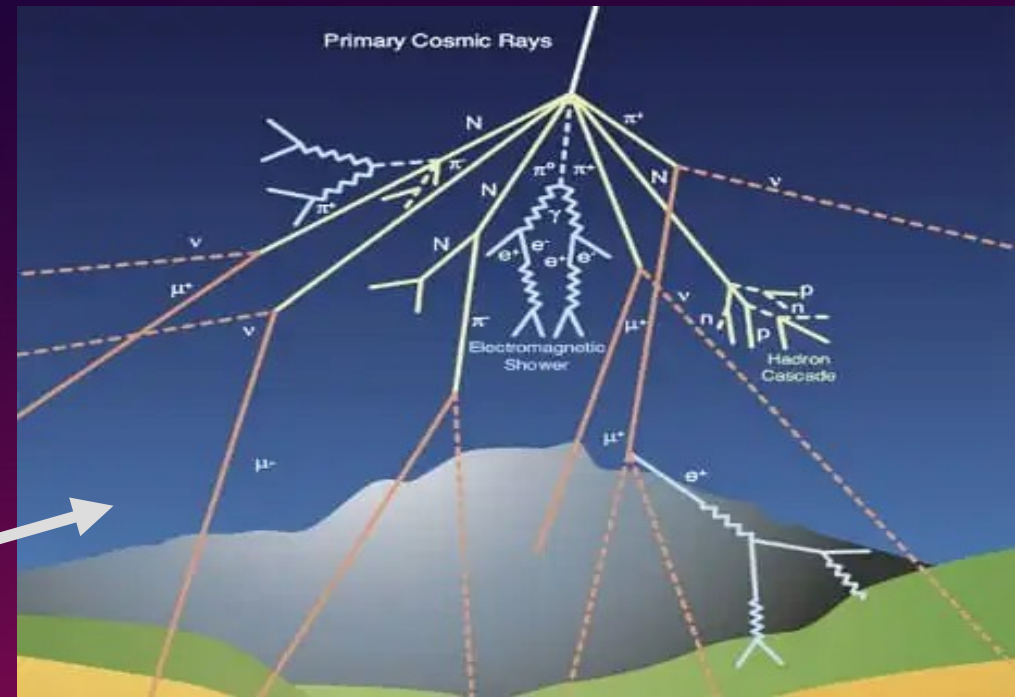
✗ Forte

DATA DI SCOPERTA:

1936 (Carl D. Anderson e Seth Neddermeyer, raggi cosmici nei rivelatori a nebbia)

PARTICELLE FIGLIE TIPICHE NEL DECADIMENTO:

Elettrone ( $e^-$ ), antineutrino elettronico ( $\bar{\nu}_e$ ), neutrino muonico ( $\nu_\mu$ )



## Carta di identita' del muone

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}, \quad \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$$

decadimento mediato  
dalla forza debole



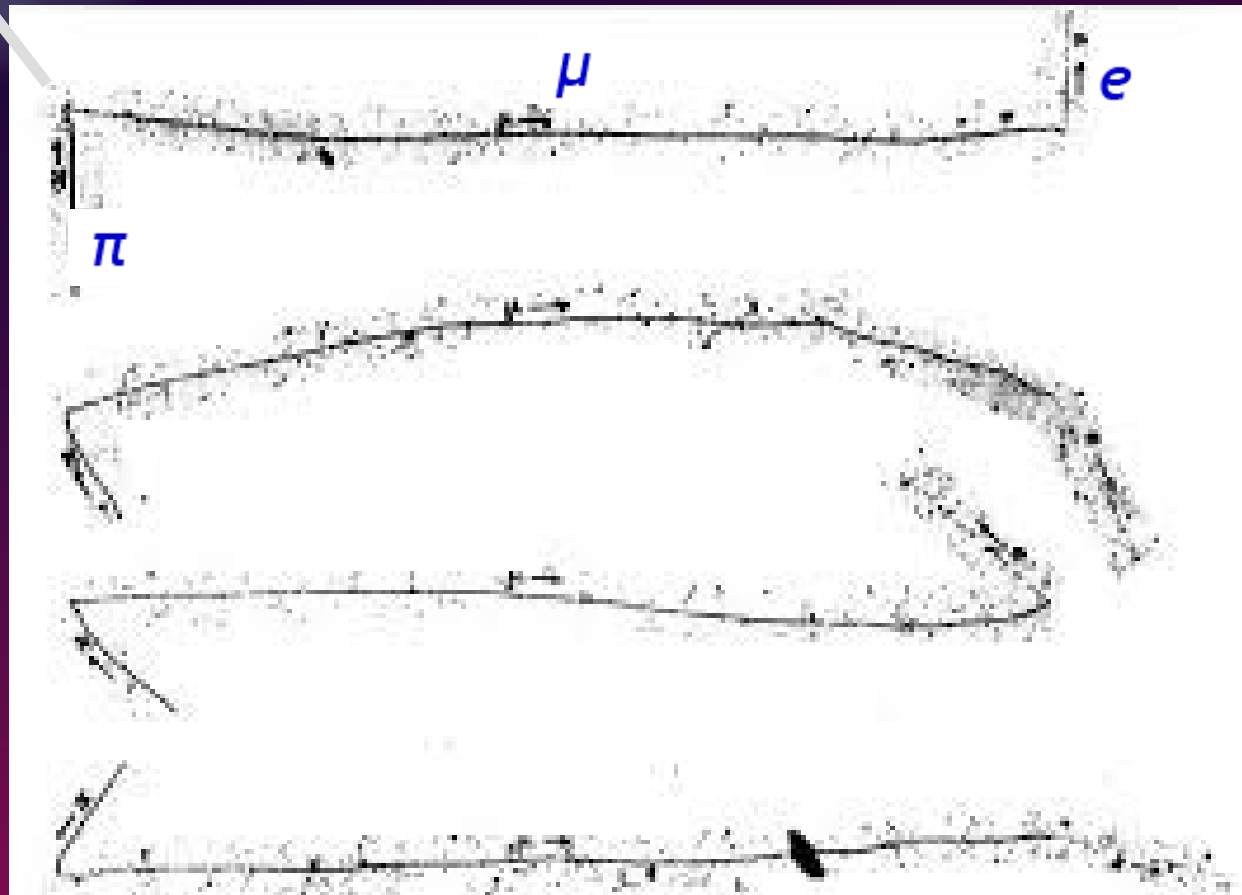
## Carta di identita' del muone

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}, \quad \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$$

decadimento mediato  
dalla forza debole

Il pione si  
arresta

il neutrino e'  
"invisibile"



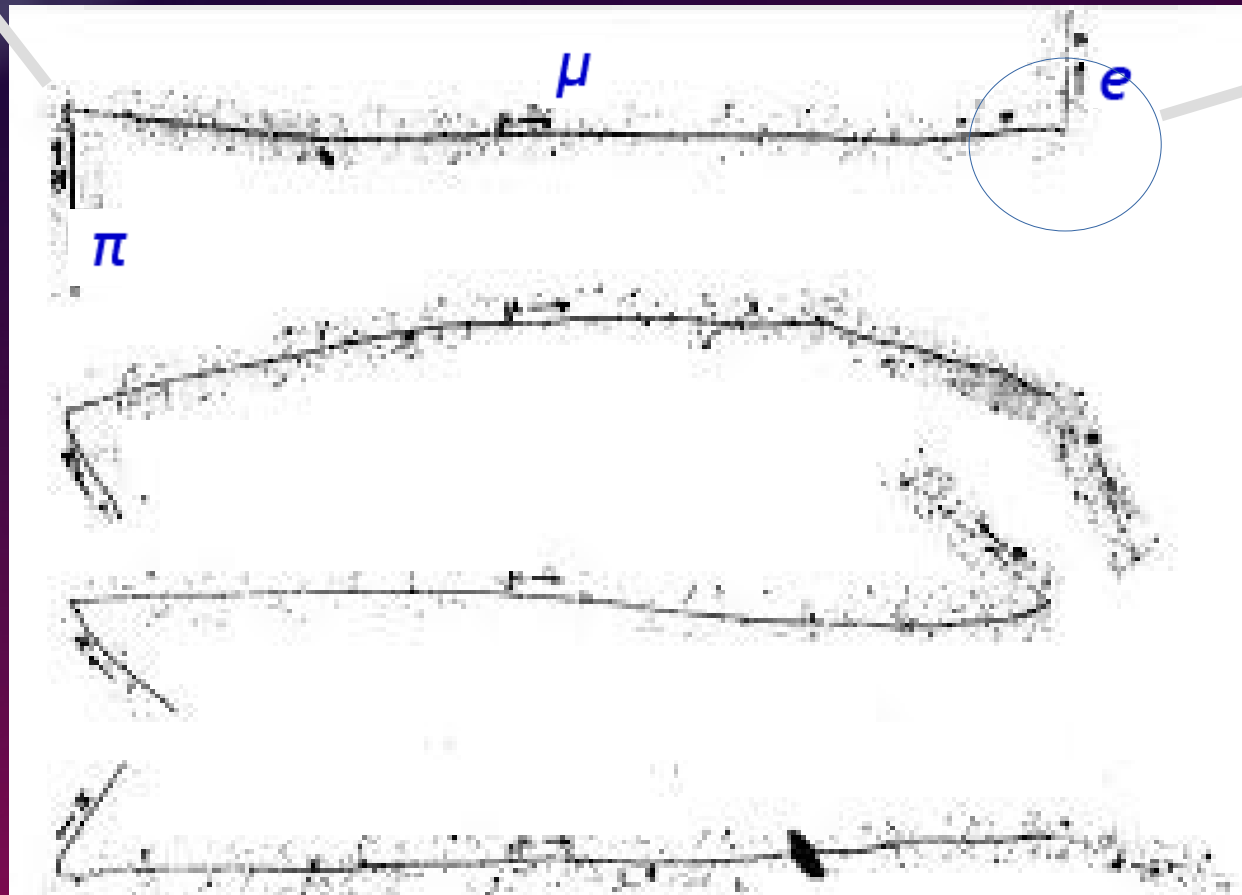
## Carta di identita' del muone

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}, \quad \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$$

decadimento mediato  
dalla forza debole

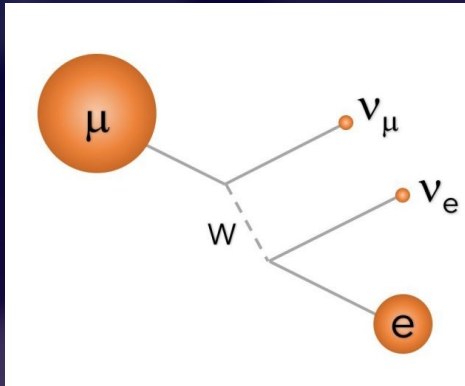
Il pione si  
arresta

il neutrino e'  
"invisibile"

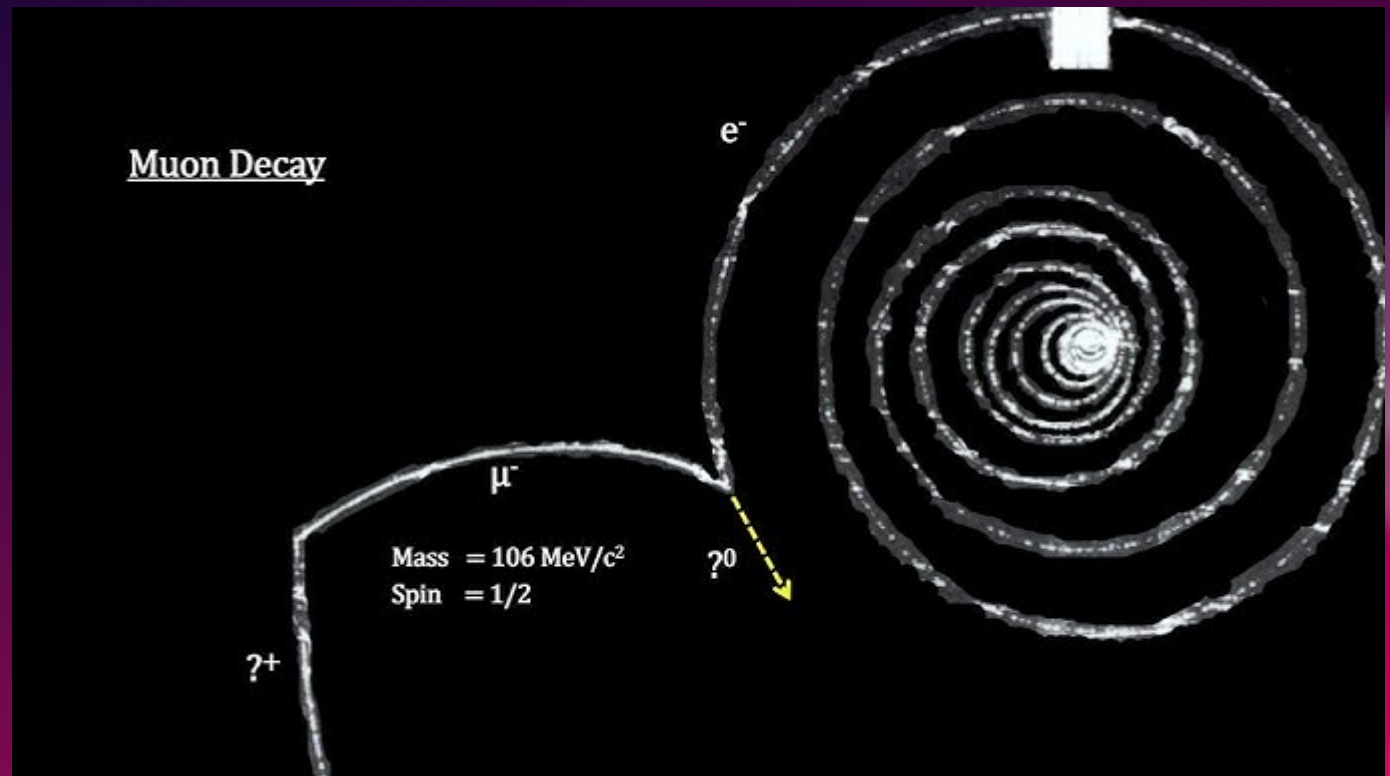
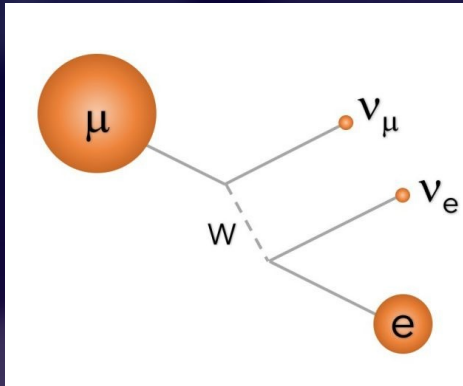


cosa  
succede qui?

## Carta di identità' del muone



## Carta di identita' del muone



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

<https://www.borborigmi.org/2016/10/03/i-parametri-del-modello-standard-quarta-puntata-luniverso-muonico/>