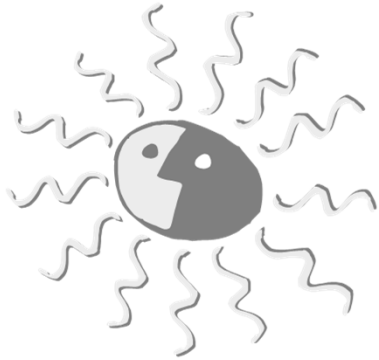




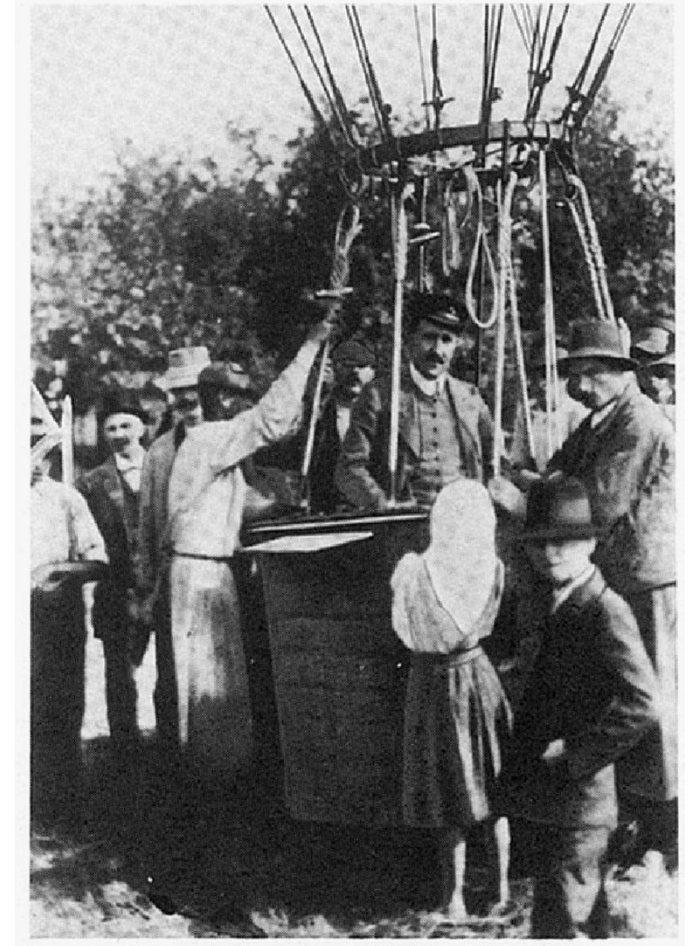
I raggi cosmici

Parte 1

Corso di Introduzione all'astrofisica
Anno accademico 2019-2020
Barbara Caccianiga

Cosa sono i raggi cosmici?

- **La terra e' costantemente bombardata da particelle ionizzanti chiamate "raggi cosmici";**
- **I raggi cosmici sono stati scoperti nel 1912 da V. Hess;**
 - Esperimento su pallone per misurare la radioattivit  in funzione dell'altezza dal suolo;
 - Man mano che si saliva la radioattivit  prima diminuisce e poi ricomincia ad aumentare!
- **I raggi cosmici che colpiscono l'atmosfera terrestre sono costituiti per il 98% di p , α e altri nuclei piu' pesanti;**
- **Il 2% circa e' costituito da e^- , e^+ ;**
- **Solo una piccola parte (0.1%) sono γ ;**
- **Al di sopra di un'energia di $\sim \text{TeV}$ hanno una distribuzione isotropa, poiche' non vengono deflessi dal campo magnetico del sistema solare**



Energie dei raggi cosmici

- **La distribuzione in energia dei raggi cosmici si estende da energie inferiori a 10^9 eV a energie superiori a 10^{20} eV;**
- **Possiamo classificare i raggi cosmici in base alla loro energia:**
 - High Energy Cosmic Rays (HECR): $E \sim 10^9$ eV (GeV);
 - Very High Energy Cosmic Rays (VHECR): $E \sim 10^{12}$ eV (TeV);
 - Ultra High Energy Cosmic Rays (UHECR): $E \sim 10^{15}$ eV (PeV);
 - Extreme High Energy Cosmic Rays (EHECR): $E > 10^{18}$ eV (>EeV);
- **Per $E < 10^{14}$ eV il flusso di raggi cosmici primari e' sufficientemente grande da poter venire misurato direttamente con palloni o satelliti al di fuori (o quasi) dell'atmosfera;**
- **Per $E > 10^{14}$ eV il flusso si riduce cosi' tanto da rendere impossibile la misura diretta in quanto i rivelatori che si possono montare sui satelliti sono troppo piccoli per raccogliere una statistica adeguata;**
- **E' necessaria la misura indiretta, cioe' dei prodotti secondari dell'interazione dei raggi cosmici con l'atmosfera; queste misure vengono effettuate a terra con rivelatori di grandi dimensioni;**

Flusso di raggi cosmici

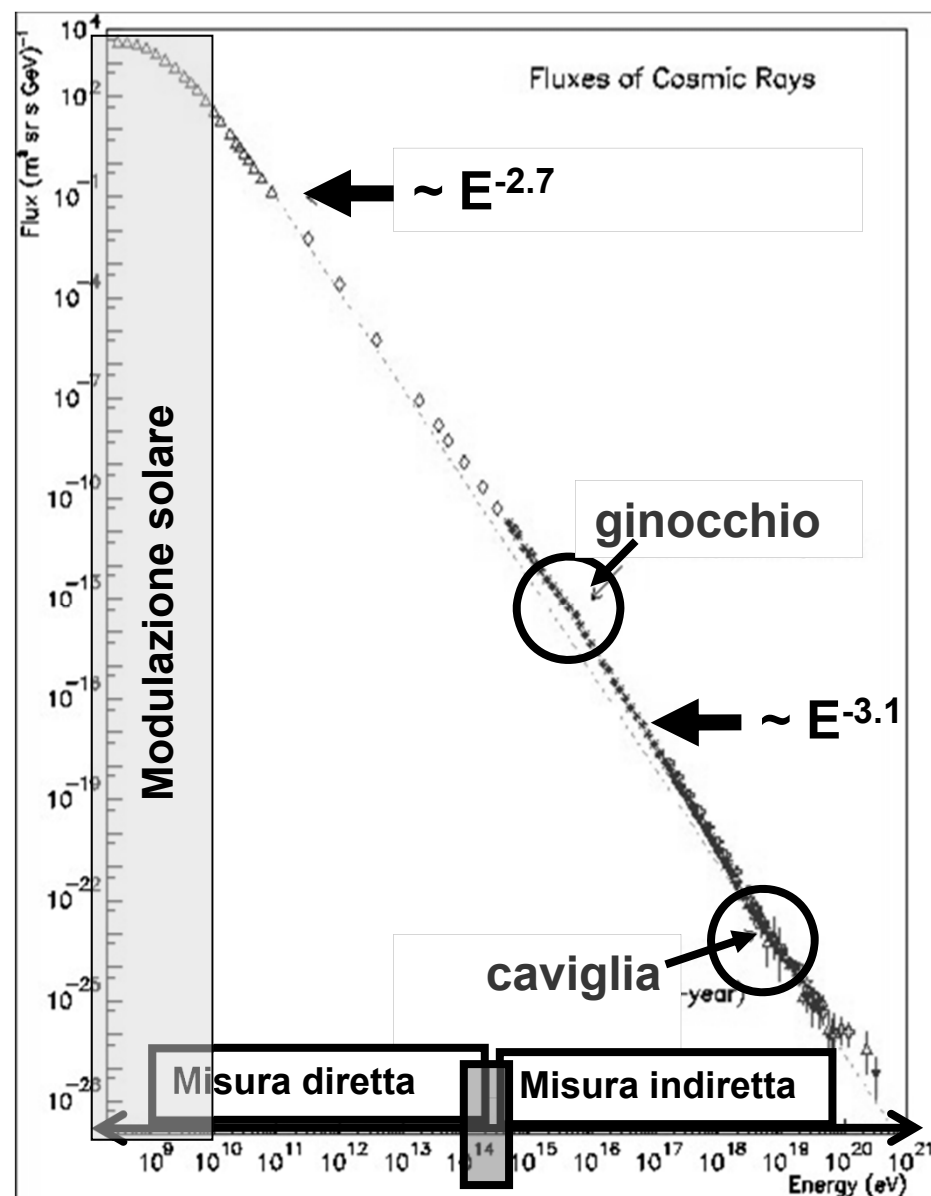
- Per $E < 10^{10}$ eV il flusso è affetto dalla “modulazione solare”, ovvero varia al variare dell’attività solare;
- Per $E > 10^{10}$ eV il flusso dei raggi cosmici in funzione dell’energia può essere descritto da una legge del tipo

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\alpha}$$

Con α

$$\begin{cases} 2.7 & E < 10^{15} \text{ eV} \\ 3.1 & 10^{15} < E < 3 \times 10^{18} \text{ eV} \end{cases}$$

- Per energie $E > 3 \times 10^{18}$ eV α sembra diminuire leggermente (cioè la pendenza della curva è meno ripida)

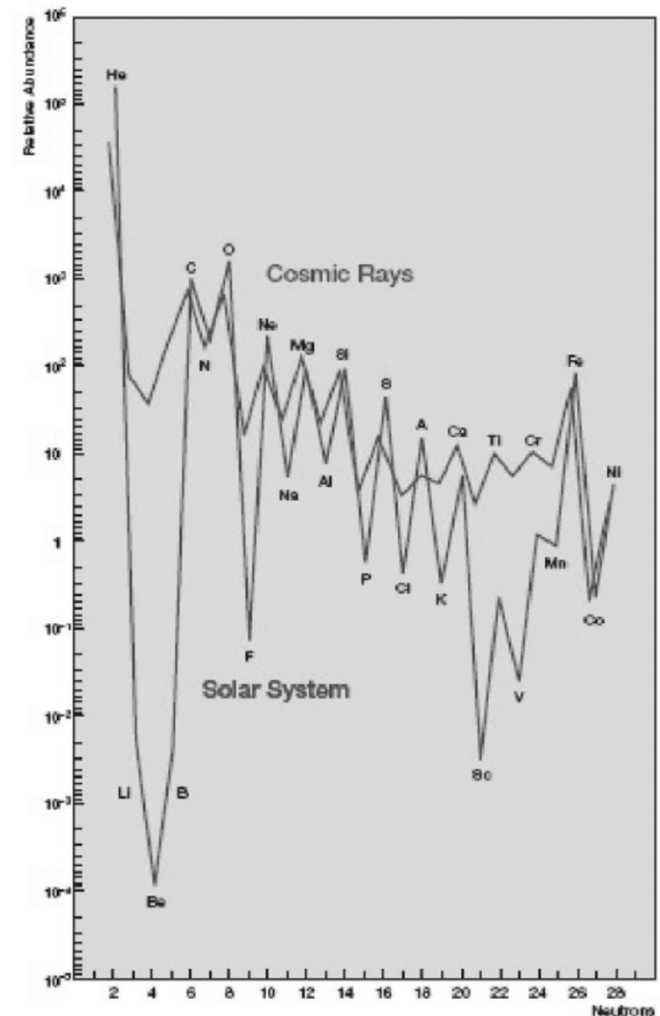


Flusso di raggi cosmici

- Per $E < 10^{15}$ eV (ginocchio) la maggior parte dei raggi cosmici e' di origine galattica;
- Il cambio di pendenze a livello del ginocchio corrisponde all'energia per cui i raggi cosmici (protoni) non sono piu' confinati nella galassia e quindi il loro flusso scende;
- Per $E > 3 \times 10^{18}$ eV (caviglia) diventa dominante il contributo dei raggi cosmici extra-galattici;
- Per $E > 3 \times 10^{19}$ eV sembra esserci una forte soppressione del flusso (cutoff GZK?)

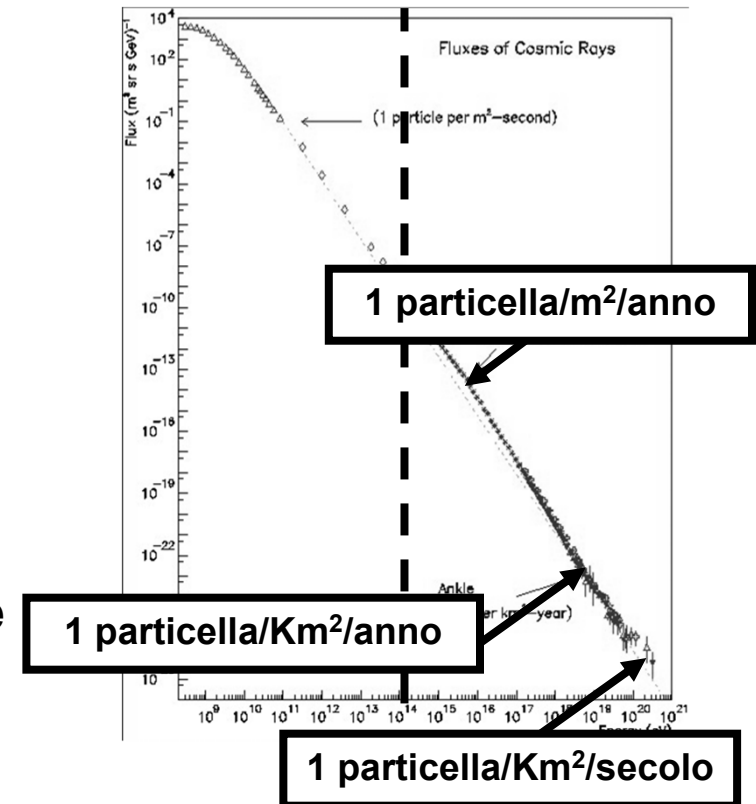
I raggi cosmici di “bassa energia” $E(10^{12}-10^{14})$ eV

- Il flusso dei raggi cosmici primari di $E < 10^{14}$ eV che raggiungono l'atmosfera terrestre e' relativamente alto:
- $\Phi \sim 1$ particella /m²/sec;
- Questo permette lo studio diretto tramite rivelatori posizionati su palloni o su satelliti;
- Esperimenti come JACEE, Egg e HESS hanno determinato la composizione di questa parte di raggi cosmici;
- 50% protoni, 24% He, 13% CNO, 13% Fe, $< 10^{-2}$ e⁻, $< 10^{-3}$ γ ;
- Confrontando la composizione con quella tipica osservata nel sistema solare, si vede un eccesso di Li, Be e B dovuto probabilmente a spallazione di C e O su idrogeno e He interstellare (frantumazione in nuclei piu' leggeri);
- Il fatto che il flusso di questa porzione di raggi cosmici sia indipendente dall'attivit  solare o da eclissi suggerisce che abbiano origine extra-solare;



I raggi cosmici di “altissima energia” $E > 10^{14}$ eV

- In questa regione di energia il flusso di raggi cosmici e' basso;
- Non e' piu' possibile rivelarli direttamente da satellite o pallone;
- Si utilizzano metodi indiretti;
- In pratica i raggi cosmici primari interagiscono con l'atmosfera terrestre e producono degli sciami (EAS, Extensive-Air-Shower);
- Le particelle di questi sciami sono rivelate a terra;



- Notiamo che la traiettoria dei raggi cosmici di altissima energia e' deviata solo debolmente dai campi magnetici galattici ($\sim \mu\text{G}$) o extra-galattici ($\sim \text{nG}$):

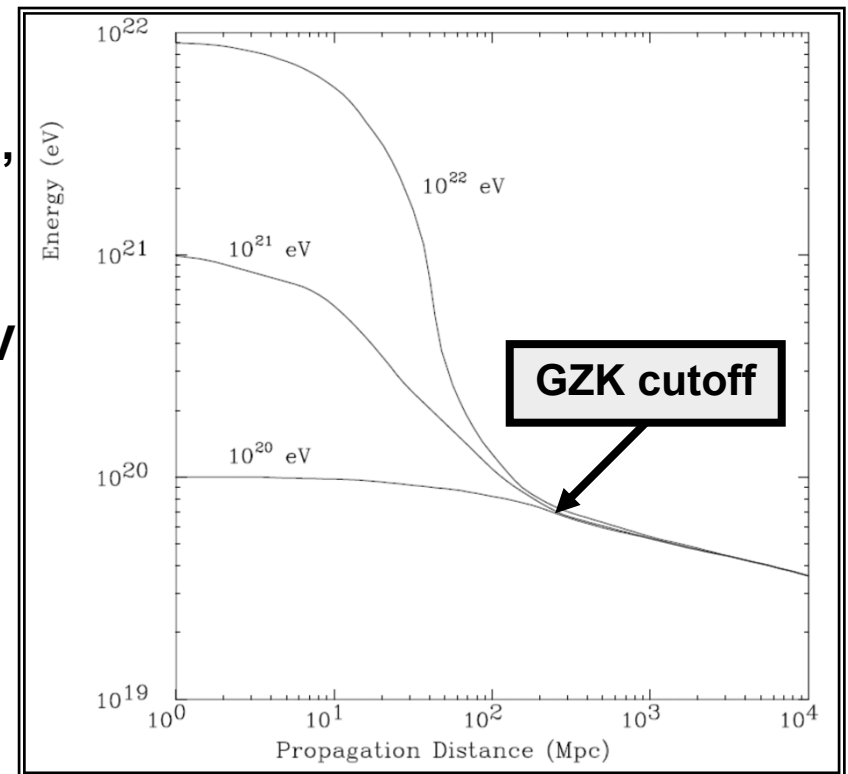
$$\theta = 3^\circ Z \left(\frac{L}{1\text{kpc}} \right) \times \left(\frac{B}{1\mu\text{G}} \right) \times \left(\frac{10^{19} \text{ eV}}{E} \right)$$

Dove L e' la distanza della sorgente

- Possono quindi darci importanti informazioni sugli “acceleratori cosmici” che li hanno prodotti (o accelerati);

Il cutoff GZK (Greisen, Zatsepin e Kuzmin)

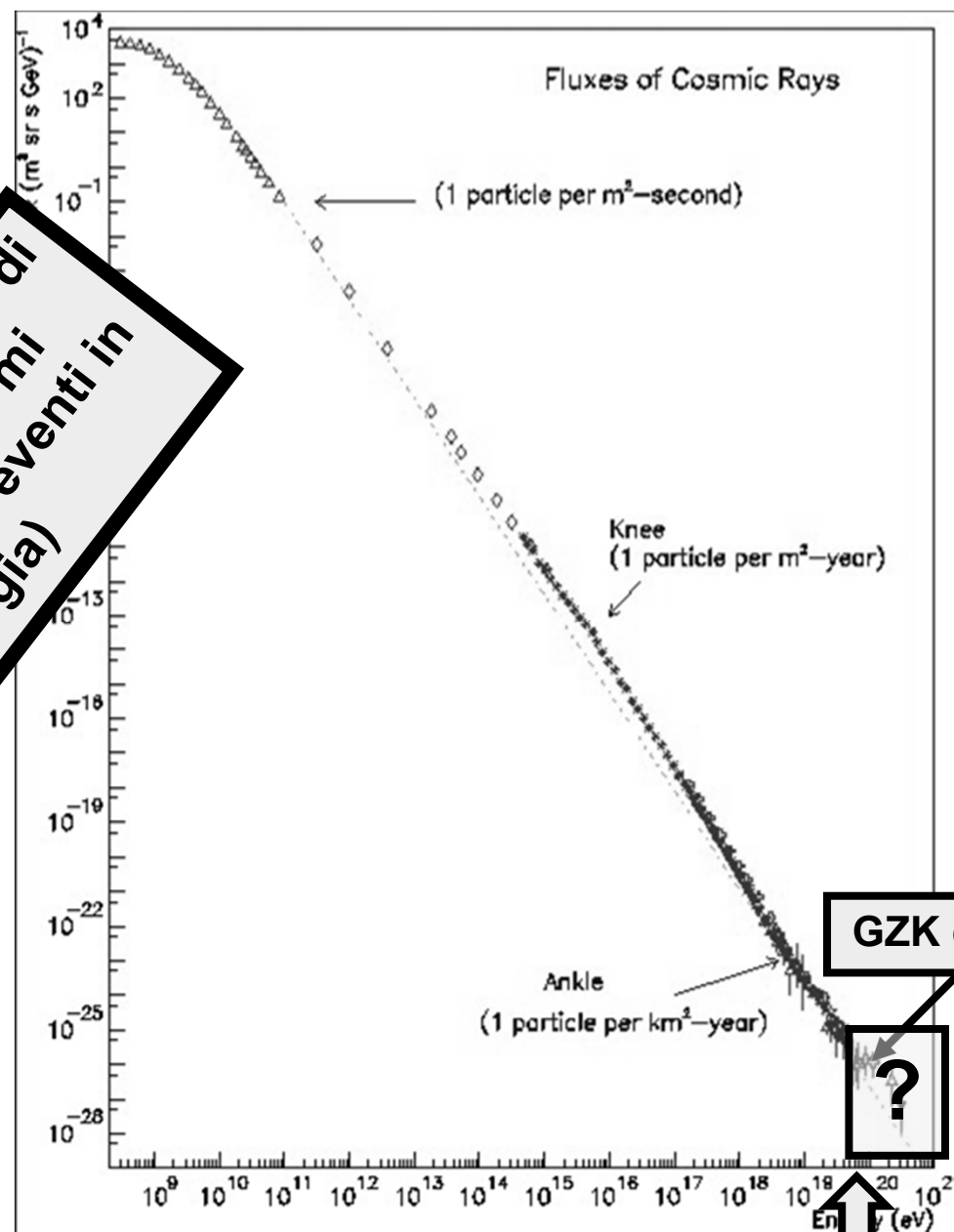
- Le particelle di origine extra-galattica devono attraversare il mezzo interstellare della loro galassia e della nostra + il mezzo intergalattico prima di arrivare a noi;
- Il mezzo interstellare e' composto da gas neutro e ionizzato (H) e dalla radiazione cosmica di fondo (CMB);
- Subiscono quindi interazioni che causano perdita della loro energia;
- Guardiamo il grafico che indica la previsione teorica sull'energia dei protoni in funzione della distanza percorsa;
- Notiamo che indipendentemente da quanto grande era la loro energia all'origine, dopo ~ 100Mpc, sono andati sotto $E \sim 10^{20}$ eV;
- Cio' dipende dal fatto che per $E > 6 \times 10^{19}$ eV si innesca la reazione
$$p + \gamma_{\text{CMB}} \rightarrow \Delta^+ \rightarrow N + \pi$$
sui fotoni del fondo a micro-onde che ha un'alta sezione d'urto ($\sigma \sim 10^{-28} \text{ cm}^2$) e comporta una grossa perdita (20%) dell'energia del protone;



Il cutoff GZK (Greisen, Zatsepin e Kuzmin)

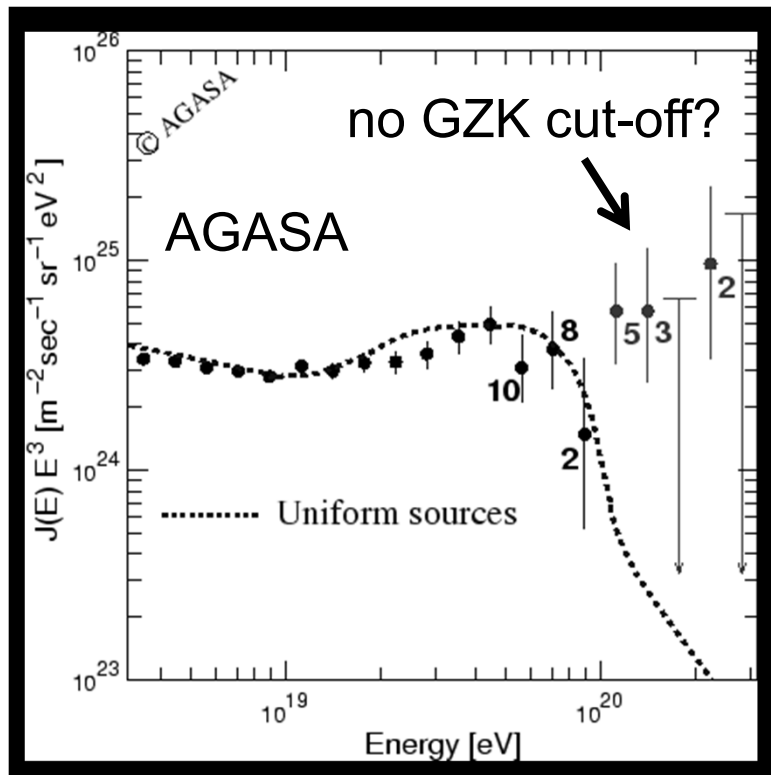
- **L'effetto GZK propriamente detto si ha se i raggi cosmici di altissima energia sono protoni;**
- **Nel caso fossero tutti o in parte elementi piu' pesanti (per esempio nuclei di Fe) le reazioni tipo GZK avverrebbero a energie piu' elevate (poiche' un nucleo di energia E con numero atomico A si comporta come A nucleoni di energia E/A).**
- **Nel caso particolare del Fe, mi aspetto comunque una soppressione attorno a 5×10^{19} eV, ma dovuta a un meccanismo diverso: a queste energie i nuclei di Fe hanno alta probabilita' di frammentazione in nuclei piu' leggeri;**
- **E' possibile invece che la soppressione osservata non sia dovuta a meccanismi di propagazione dei raggi cosmici, ma alla produzione stessa: potrebbe essere la massima energia a cui i raggi cosmici possono venir prodotti;**

Non mi aspetto eventi di raggi cosmici al di sopra di $E \sim 10^{20}$ eV (o per lo meno mi aspetto una forte soppressione di eventi in questa regione di energia)



A meno che non provengano da sorgenti "vicine"

Problema: l'esperimento AGASA vede eventi al di sopra del GZK cutoff



- Perché il fatto che AGASA non veda un cutoff GZK è un problema?
- Perché non riusciamo a ricondurre questi eventi a nessuna sorgente vicina!
- Allora c'è qualche cosa che non capiamo:
 - Non capiamo l'interazione dei raggi cosmici con il fondo a microonde?
 - Non siamo in grado di misurare da terra l'energia dei raggi cosmici di altissima energia correttamente?
 - C'è semplicemente un errore sperimentale in AGASA?

In realtà gli altri esperimenti sui raggi cosmici (HiRes e Auger) NON sono compatibili con i risultati di AGASA e confermano la presenza di GZK cutoff

Questioni aperte a proposito dei raggi cosmici a 100 anni dalla loro scoperta

Quali e dove sono le sorgenti dei raggi cosmici di $E > 10^{19}$ eV?

Come vengono accelerati a $E > 10^{19}$ eV?

La provenienza dei raggi cosmici di energia ultra-elevata e' isotropa o va attribuita a poche sorgenti localizzate?

Esistono davvero degli "acceleratori cosmici" oppure bisogna chiamare in causa della nuova fisica?

Che particelle sono i raggi cosmici di energia $E > 10^{19}$ eV? Protoni? Nuclei piu' pesanti? O un misto dei due?

- Numerose teorie sono state proposte per spiegare l'origine dei raggi cosmici di $E > 10^{19}$ eV;

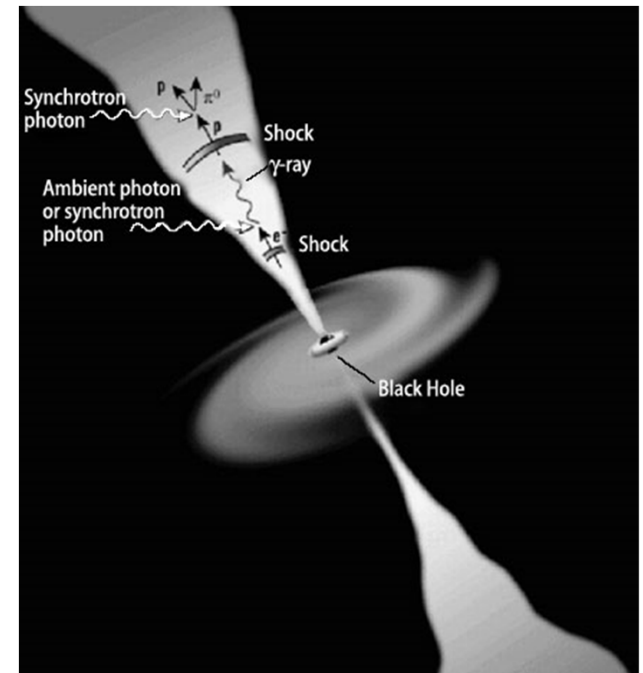
- Possiamo dividerle in due grandi categorie:

 - Modelli "Bottom-Up": acceleratori cosmici;

 - Modelli "Top-Down": sorgenti esotiche;

Modelli “Bottom-Up”: acceleratori cosmici

- L'idea alla base di questi modelli e' l'esistenza di oggetti cosmologici attivi in grado di creare e poi accelerare raggi cosmici attraverso processi elettromagnetici innalzandone l'energia;
- Nel 1949 Fermi suggerisce la possibilita' che le particelle possano venire accelerate interagendo con nubi di gas interstellari in movimento (*magnetic clouds*) (*“On the Origin of Cosmic Radiation,” Phys. Rev. 75 (1949) 1169*) ;
- La distribuzione finale della velocita' della particella dipende dai modelli, ma in molti casi e' proprio descritta da una legge di potenza $\sim E^{-a}$;
- In realta' questo processo e' poco efficiente: risulta piu' attendibile pensare che il fenomeno di accelerazione dei raggi cosmici avvenga in prossimita' dell'onda d'urto di un evento “esplosivo” come per esempio una Supernova;
- I candidati piu' promettenti di acceleratori cosmici sono le SuperNove (fino a un'accelerazione di $\sim 10^{16}$ eV), Nuclei Galattici Attivi, Gamma Ray Burst;



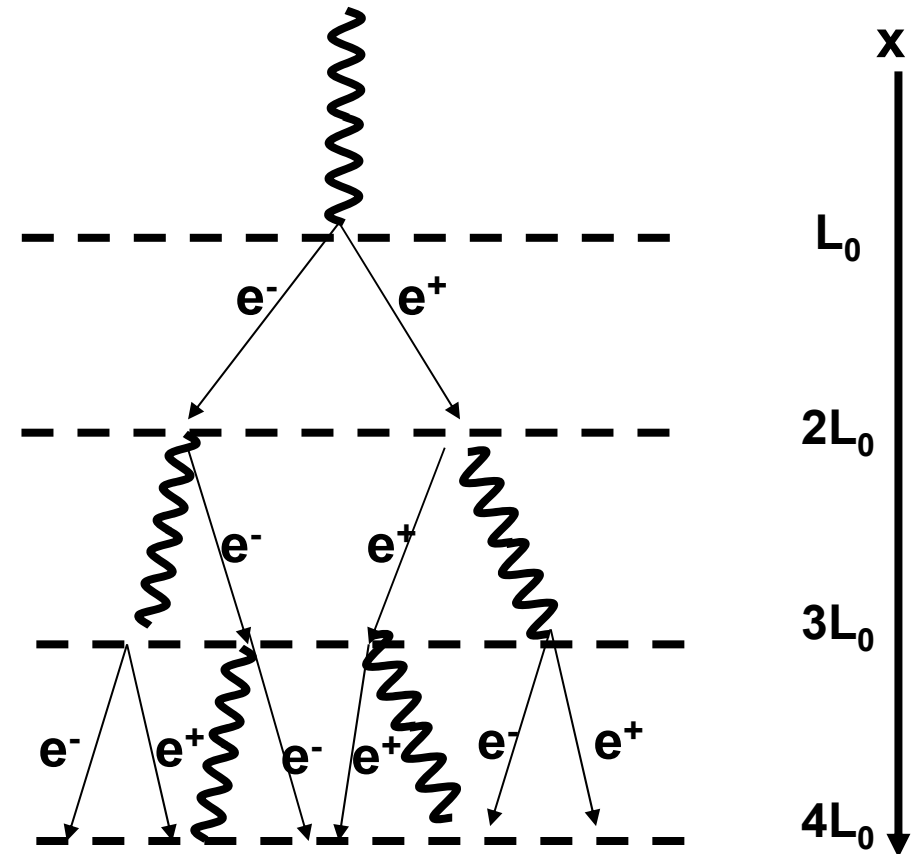
Modelli “Top-Down”: sorgenti esotiche

- Si basano sull'ipotesi che nuova fisica sia coinvolta nella produzione dei raggi cosmici di UHE;
- In particolare si ipotizza che i raggi cosmici possano venir prodotti dal decadimento di particelle supermassive non standard come per esempio:
 - Particelle SuperSimmetriche;
 - Difetti topologici (monopoli magnetici, stringhe cosmiche e stringhe superconduttrici): resti delle prime fasi evolutive dell'universo; in questo caso verrebbero soprattutto prodotti γ di $E > 10^{20}$ eV;
- Un'altra ipotesi nei modelli top-down prevede che i raggi cosmici di UHE siano prodotti dall'annichilazione di neutrini cosmici con il fondo cosmico di neutrini a 1.9 °K presente nell'alone galattico esteso (~ 50 Mpc);
- questo processo viene detto Z-burst, perché passa attraverso la produzione di Z^0 che poi decadono in $p, \gamma, \pi^0, \pi^+, \pi^-, e^+, e^-$

La rivelazione indiretta di raggi cosmici: Extended Air shower (EAS)

- I raggi cosmici primari interagiscono con l'atmosfera terrestre producendo un cosiddetto “sciame” di particelle;
- Consideriamo per semplicità uno sciame “elettromagnetico”, cioè iniziato da un γ che si propaga lungo x ;
- Dopo una lunghezza di interazione L_0 , il γ interagisce producendo $e^+ e^-$;
- A loro volta dopo $\sim$ una lunghezza di interazione $e^+ e^-$ emettono un γ per Bremsstrahlung ..e così via..
- Il numero di particelle presenti a ogni stadio e

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



- Lo sciame si esaurisce quando gli elettroni raggiungono l'energia critica E_c a cui la sezione d'urto per produzione di coppie diventa minore di quella di ionizzazione;

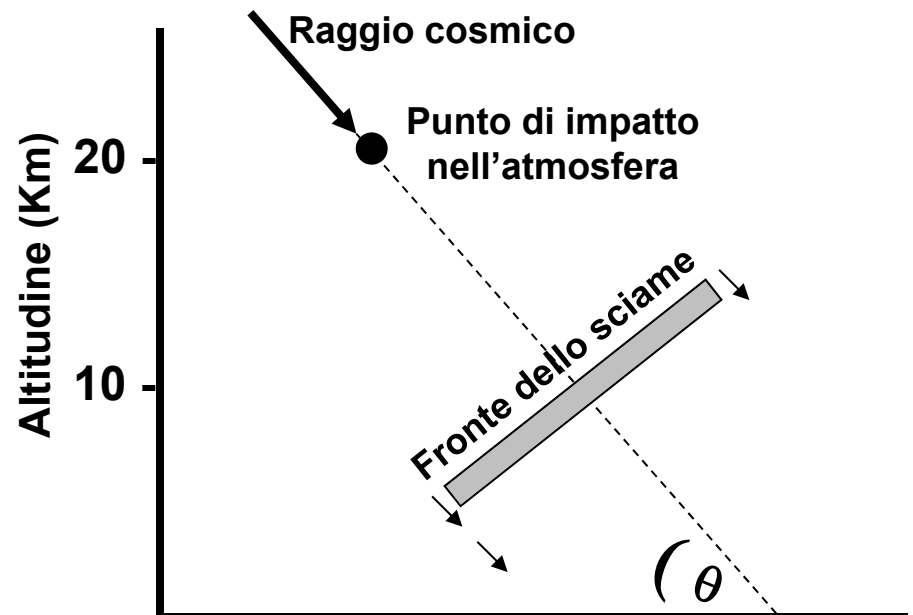
....Extended Air Shower (EAS) (2)

- Al massimo del suo sviluppo, cioè quando (in un modello MOLTO semplificato) tutte le particelle hanno raggiunto l'energia critica E_c , il numero totale di particelle è:

$$N_{\max} = \frac{E}{E_c} \quad \text{e la posizione del massimo è} \quad x_{\max} = \frac{L_0}{\ln 2} \ln \frac{E}{E_c}$$

dove E è l'energia del raggio cosmico incidente

- È possibile quindi ricavare diverse informazioni sul raggio cosmico primario studiando lo sciame da esso generato:
 1. Energia ($\sim N_{\max}$);
 2. Direzione (studiando i tempi di arrivo delle particelle del fronte dello sciame)

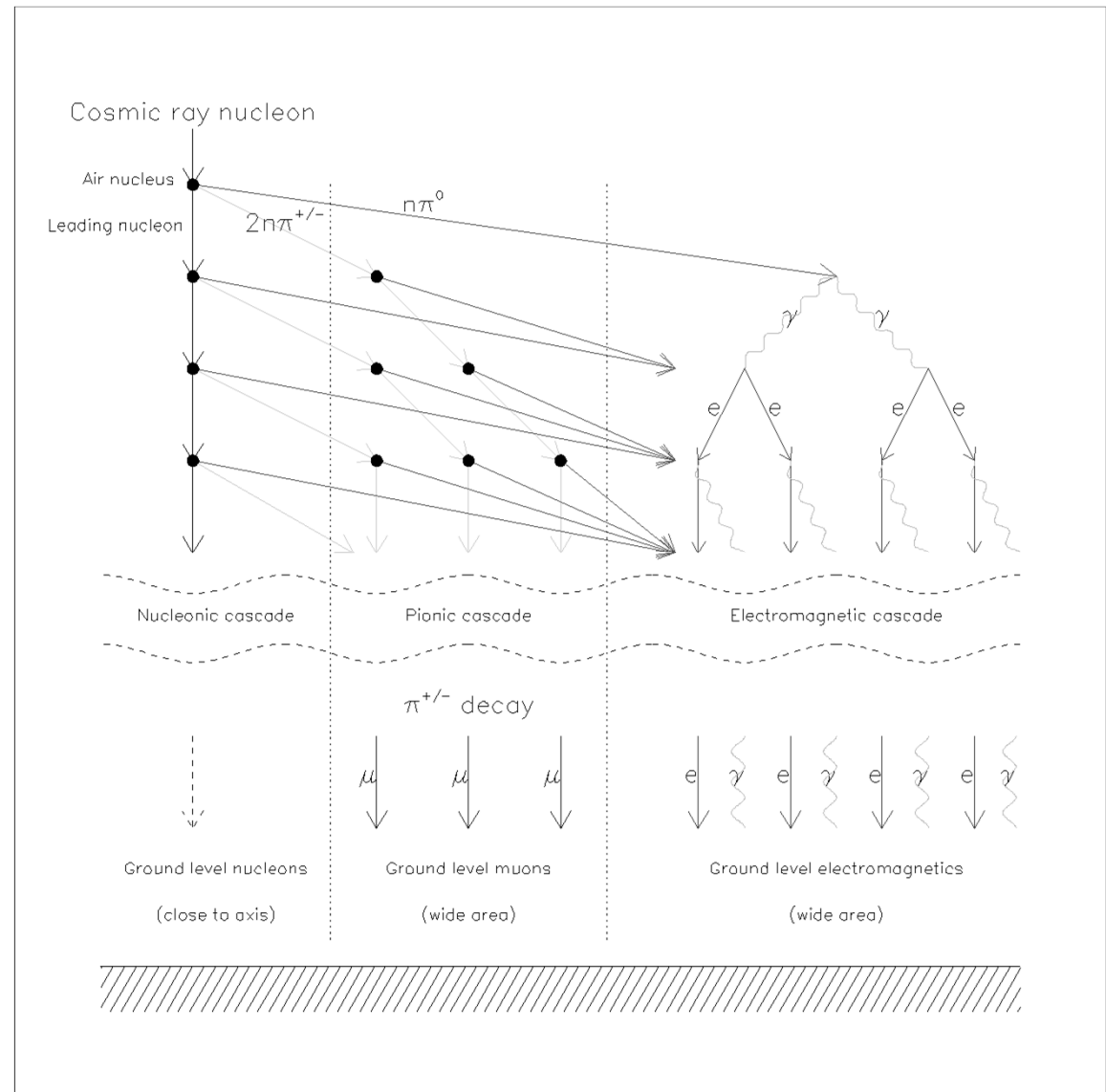


..Extended Air Shower (3)

- In realta' quando si tratta di sciame iniziati da protoni o nuclei piu' pesanti le cose si complicano ed e' necessario utilizzare programmi di simulazione Montecarlo per descriverli;

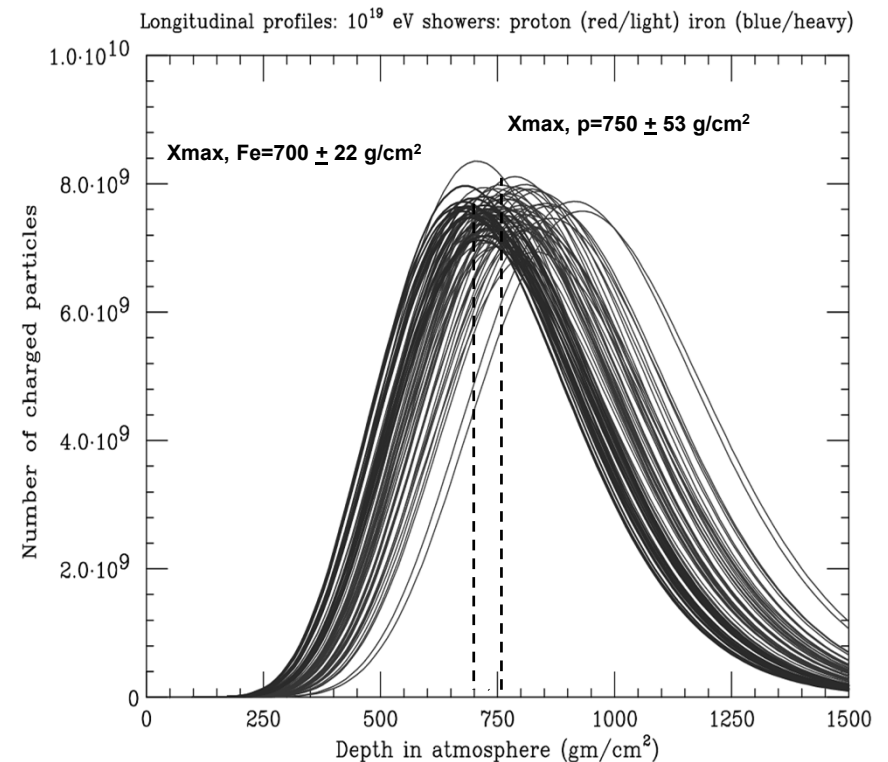
A grandi linee:

- Il raggio cosmico primario produce adroni, K e π ;
- Gli adroni secondari si concentrano attorno all'asse;
- K e π carichi danno origine a μ e ν (la componente piu' penetrante dello sciame);
- K e π neutri danno origine a γ , che cominciano sciame elettromagnetici;
- Il numero di particelle cresce fino a che si raggiunge l'energia critica al di sotto della quale non si producono piu' particelle

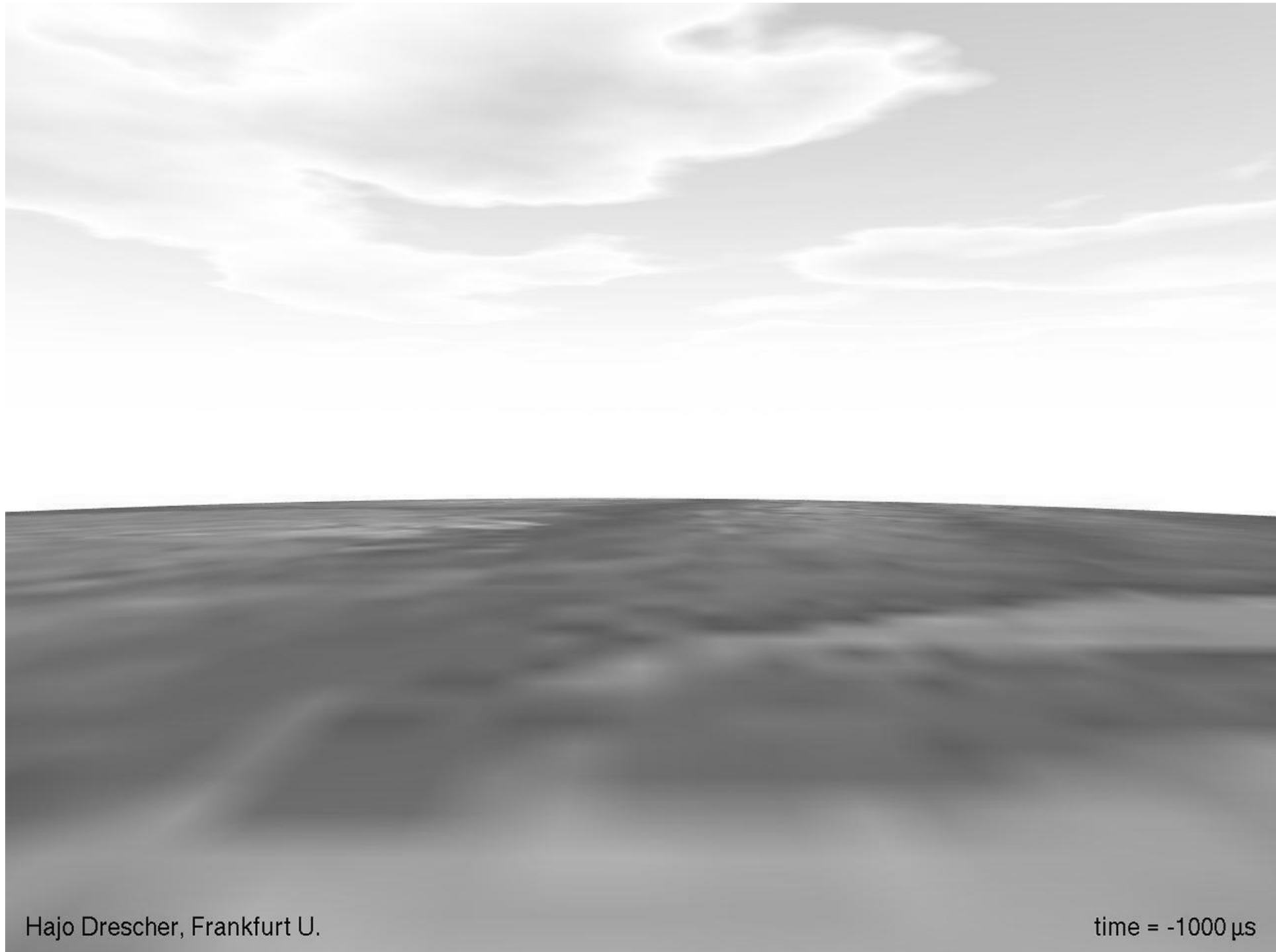


...Extended Air Shower (4)

- Le dipendenze essenziali che avevamo visto per lo sciame elettromagnetico, valgono comunque ancora:
- Vale ancora che $N_{\text{max}} \sim E$;
- Vale ancora che $x_{\text{max}} \sim \ln E$;
- Vale inoltre che la profondità massima dello sciame dipende anche dal tipo di particella che lo ha originato;

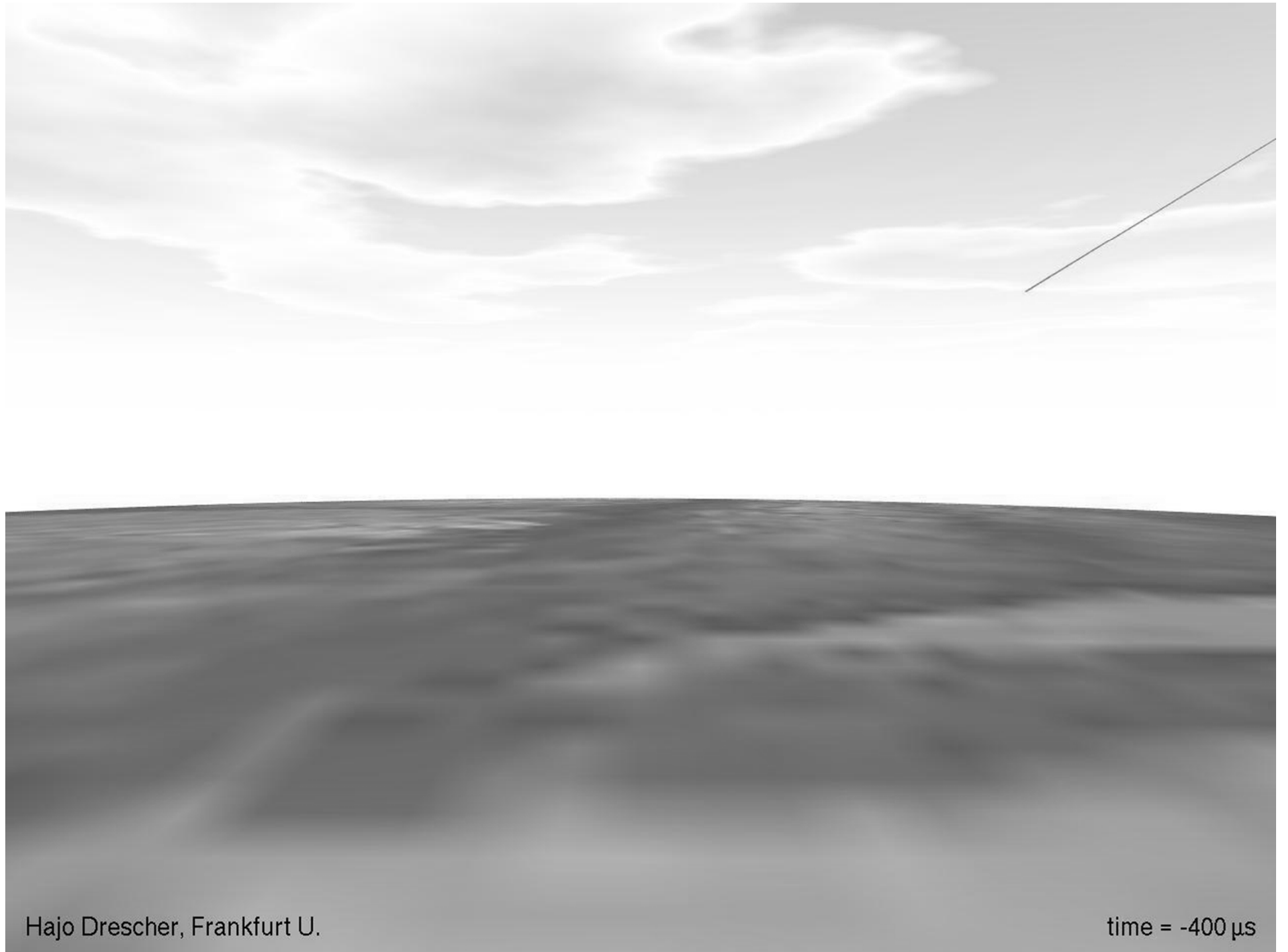


- Inoltre e' possibile determinare la natura della particella primaria che ha originato lo sciame, studiando la distribuzione laterale delle particelle: il numero di muoni prodotti aumenta all'aumentare del numero atomico del primario;
- Quindi il rapporto N_{μ}/N_e e' un buon estimatore della natura del "padre" di uno sciame



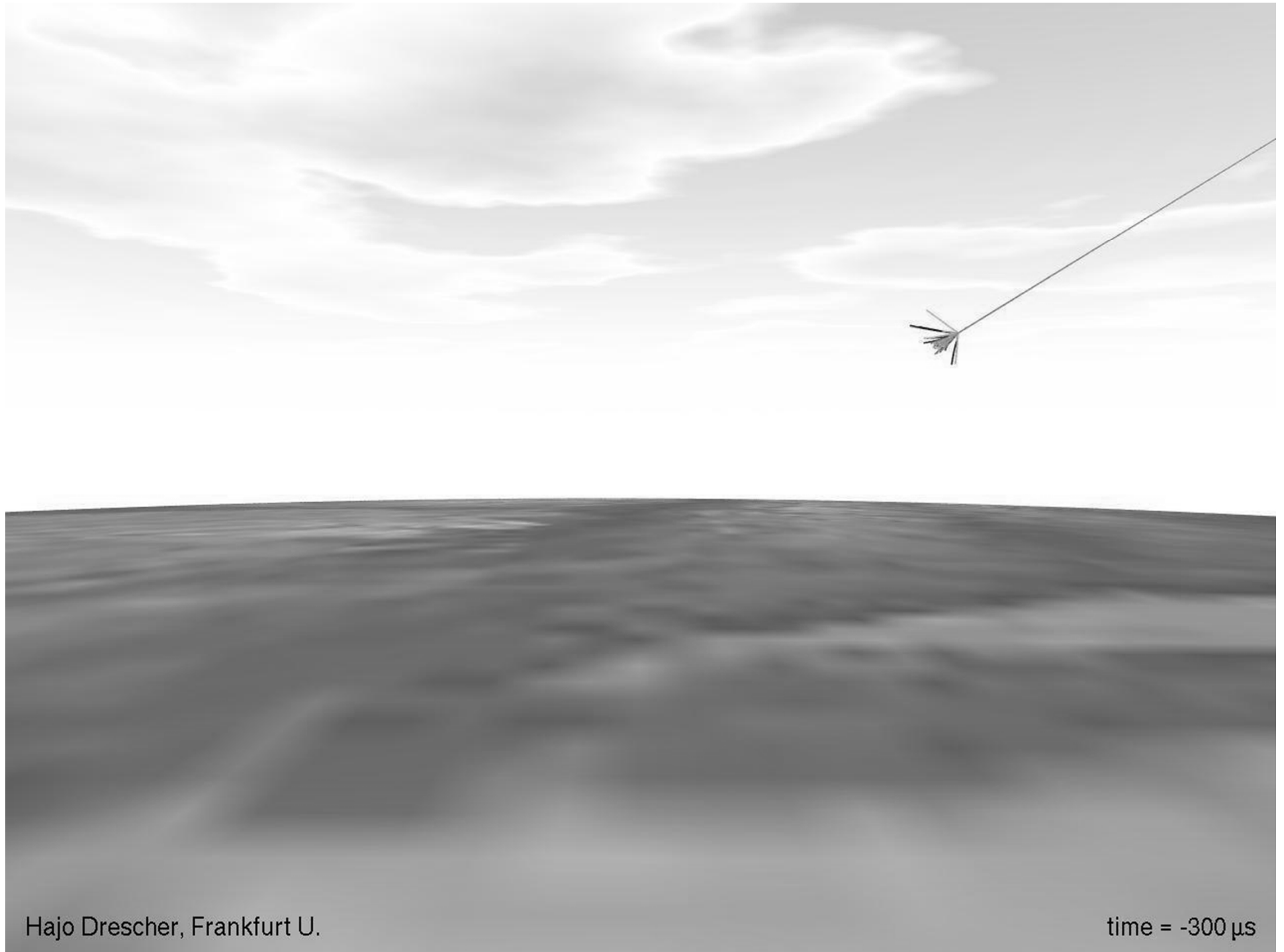
Hajo Drescher, Frankfurt U.

time = -1000 μ s



Hajo Drescher, Frankfurt U.

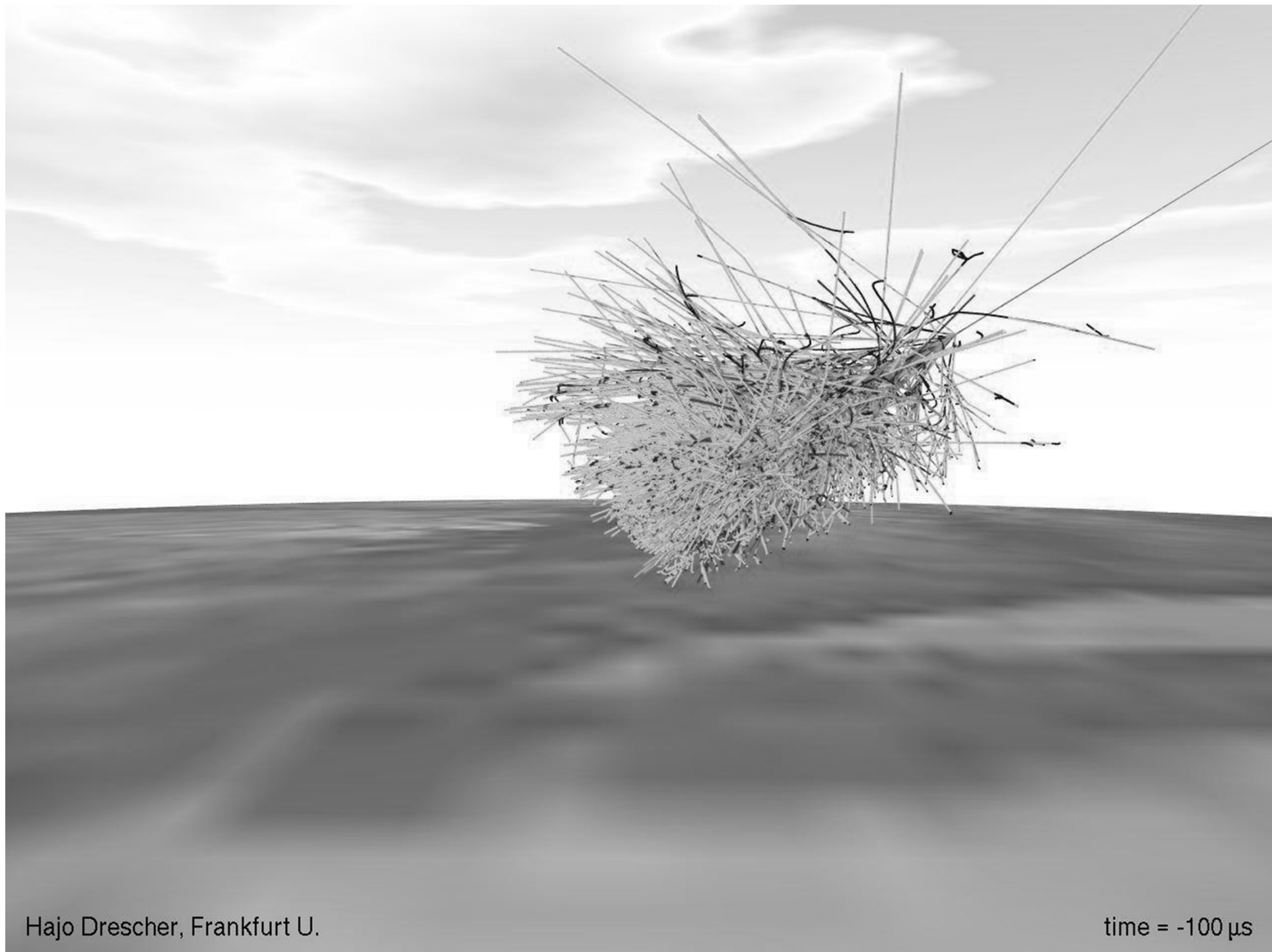
time = -400 μ s



Hajo Drescher, Frankfurt U.

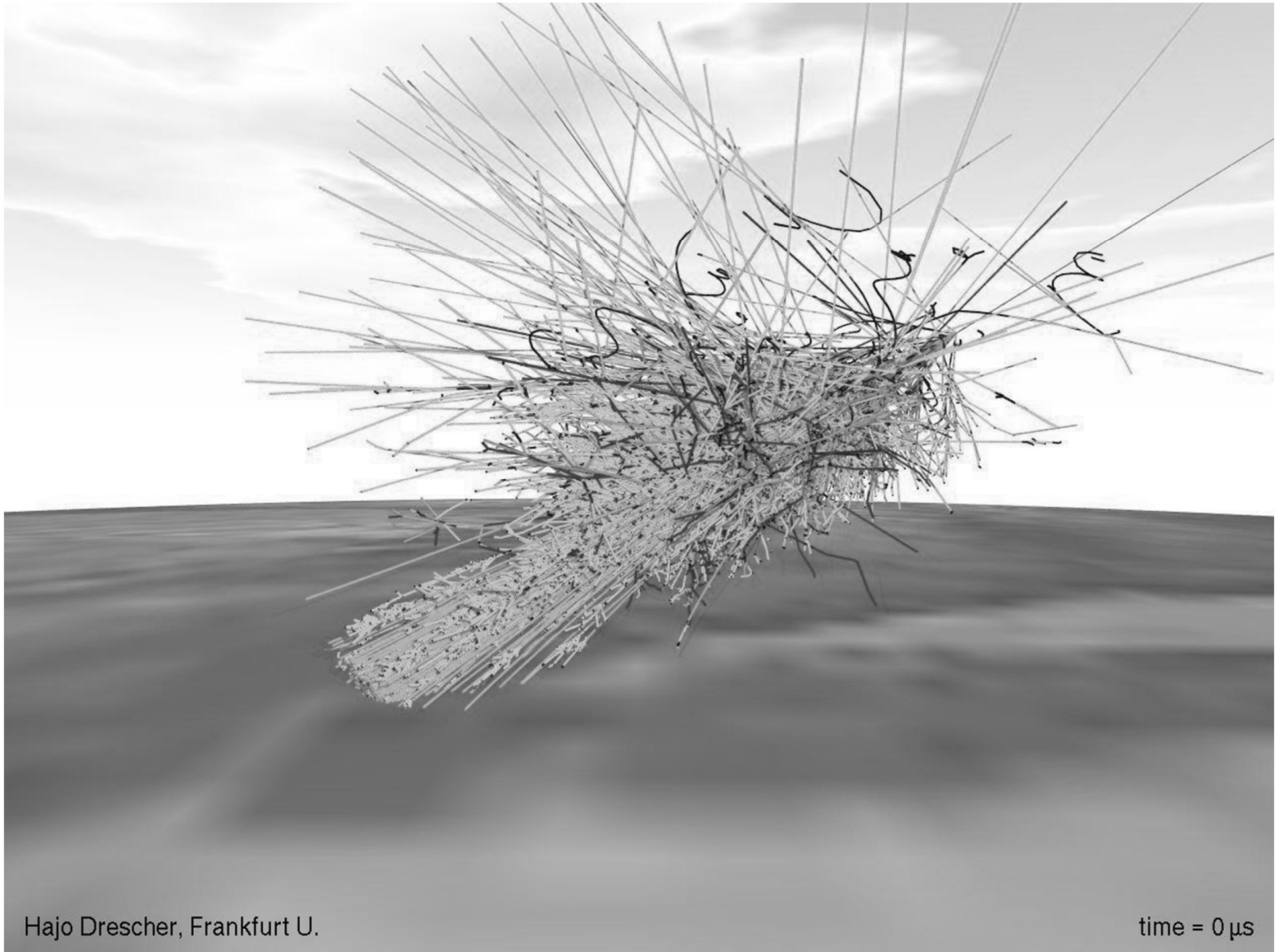
time = -300 μ s





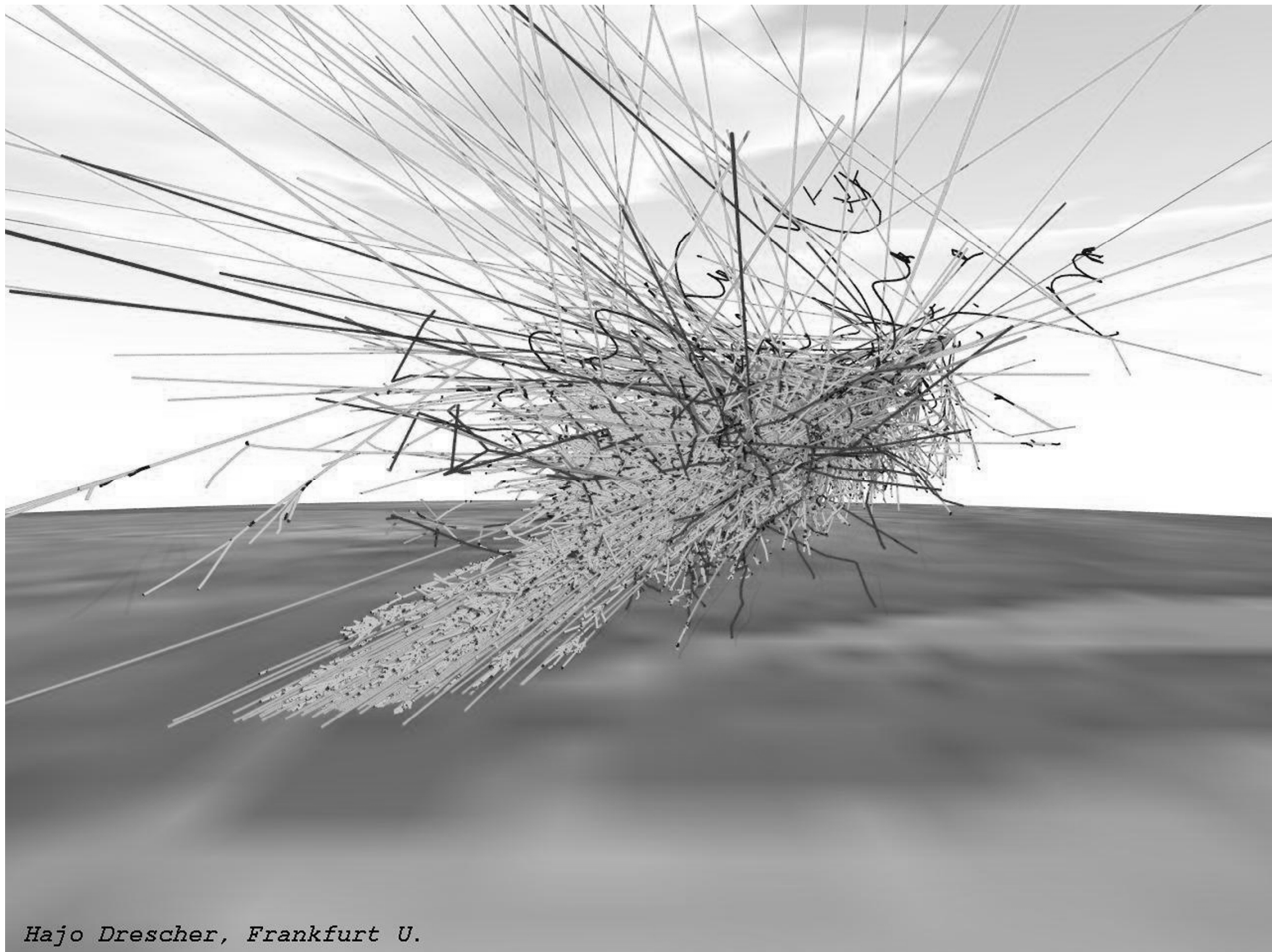
Hajo Drescher, Frankfurt U.

time = -100 μ s



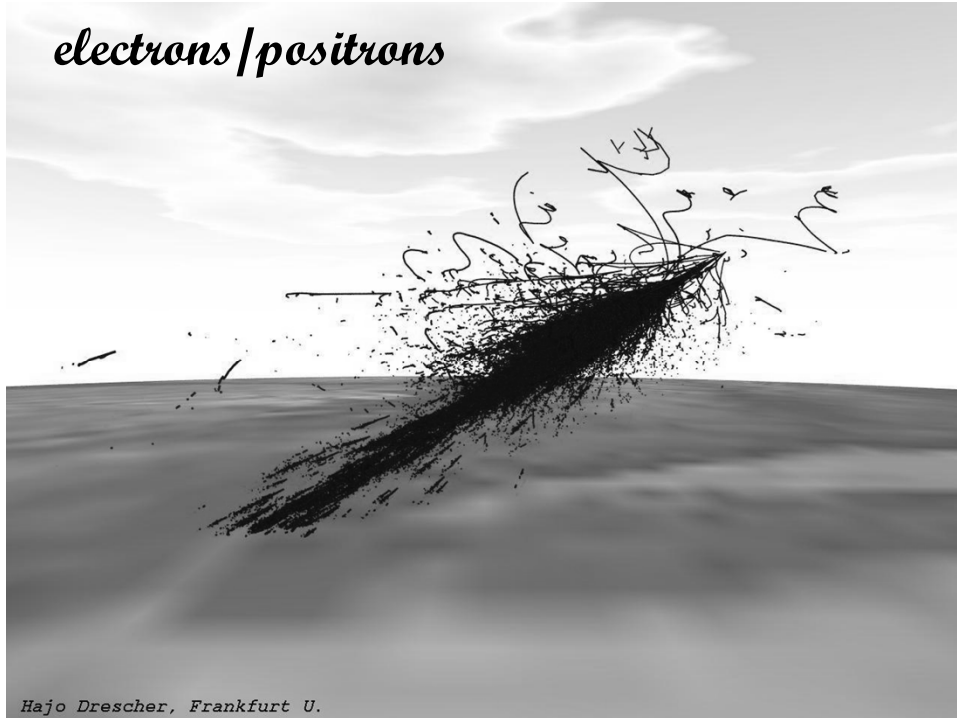
Hajo Drescher, Frankfurt U.

time = 0 μ s

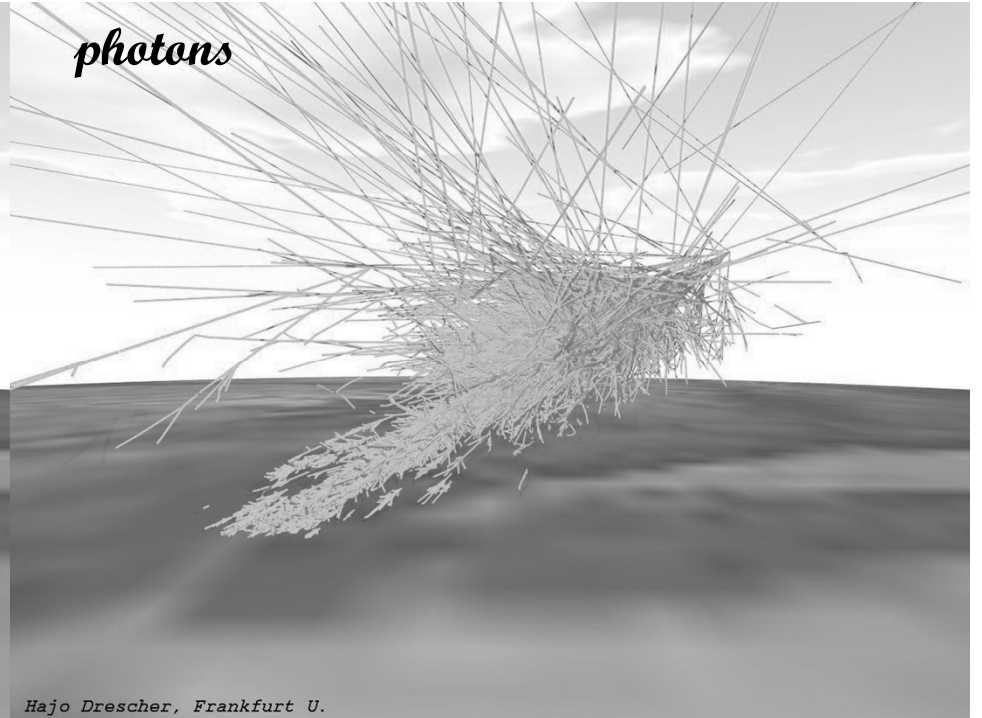


Hajo Drescher, Frankfurt U.

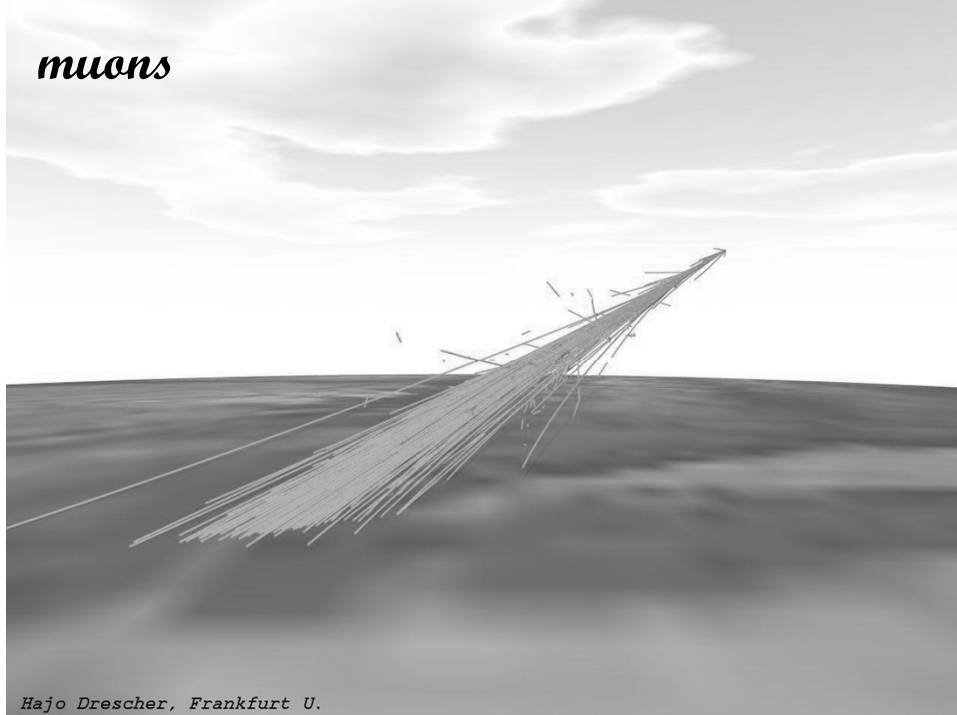
electrons/positrons



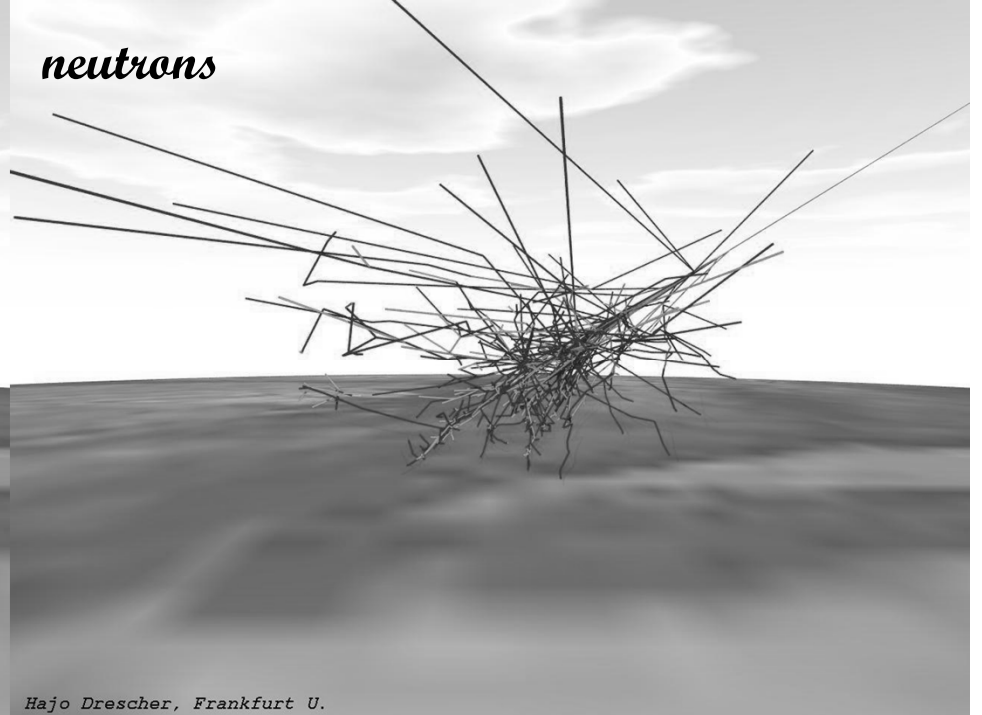
photons



muons



neutrons



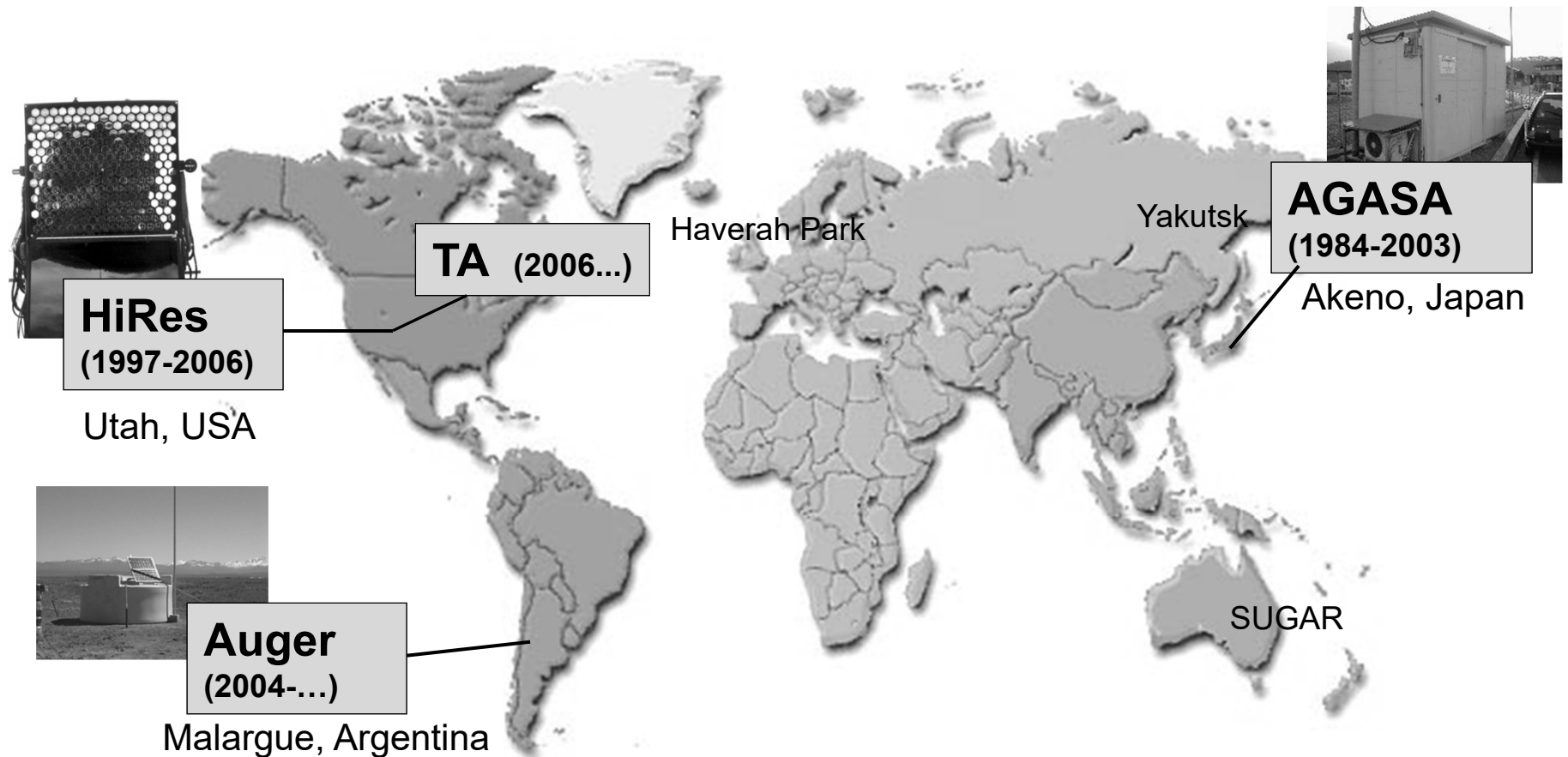
Come vengono rivelati gli sciame a terra?

- Abbiamo visto che per avere informazioni sul raggio cosmico primario che ha prodotto un certo sciame EAS e' utile studiare:
 - Sviluppo longitudinale dello sciame (l'evoluzione dello sciame in funzione dello spessore di atmosfera attraversato, per es $X_{\max}$);
 - Sviluppo trasversale dello sciame (la larghezza dello sciame a livello del suolo, il numero e il tipo di particelle che lo compongono);
 - Direzione dell'asse dello sciame;
- Questo studio e' condotto attraverso due tecniche principali:

METODO 1: Campionamento delle particelle a livello del suolo, tramite una griglia di rivelatori (Ground Array) disposti su una superficie opportuna →
Studio del profilo trasversale dello sciame

METODO 2: Rivelazione della luce di fluorescenza emessa dalle particelle dello sciame dall'azoto nell'atmosfera →
Studio del profilo longitudinale dello sciame

Stato attuale dei rivelatori di raggi cosmici



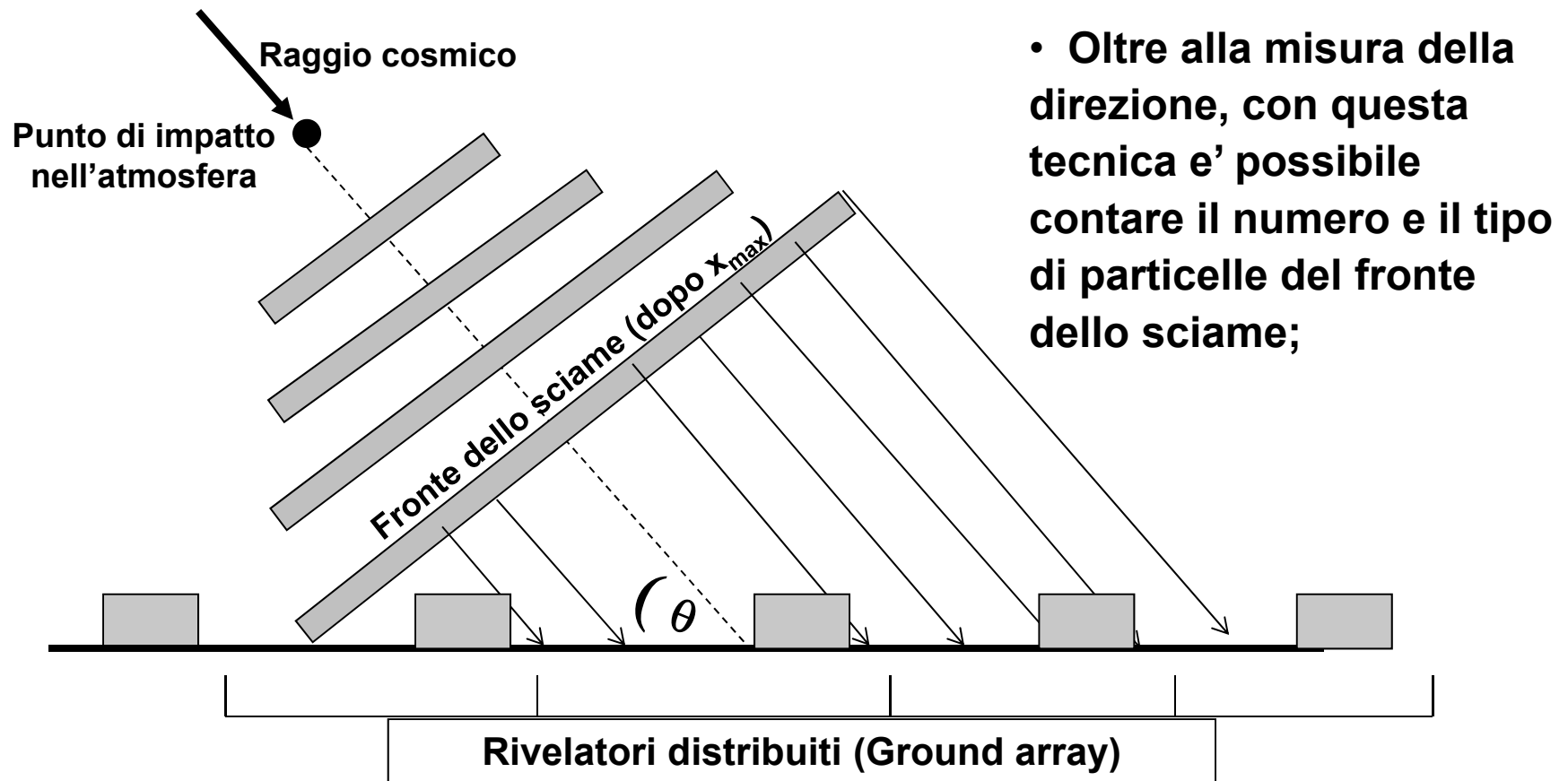
AGASA	Campionamento al suolo
HiRes	Fluorescenza
Pierre Auger Observatory	Ibrido: fluorescenza e campionamento al suolo

TECNICA 1: Campionamento dello sciame a livello del suolo

- Da quanto detto fino ad ora sulla produzione di sciame a partire da raggi cosmici primari, possiamo considerare l'atmosfera come un enorme calorimetro di spessore pari a $13 L_0$ per i protoni e $27 L_0$ per i fotoni;
- Analogamente ai calorimetri "artificiali" e' possibile ricavare informazione sulle sciame andando a "campionarlo" lungo la sua evoluzione longitudinale;
- In questo caso si tratta di un solo campionamento a livello del suolo;
- In pratica, la tecnica consiste nel sistemare su una vasta superficie della terra una griglia di rivelatori in grado di determinare il numero e/o la natura delle particelle che compongono lo sciame a livello del suolo;
- Il primo a usare questa tecnica fu il fisico francese Pierre Auger che nel 1938 utilizzo' per questo scopo dei contatori Geyger-Muller riuscendo a rivelare le particelle prodotte in un EAS di 10^{15} eV;
- Attualmente si preferisce usare rivelatori Cherenkov o scintillatori plastici poiche' danno informazioni temporali piu' accurate;

TECNICA 1: campionamento dello sciame a livello del suolo (2)

- Analizzando la distribuzione di densità nell'array di rivelatori è possibile determinare il punto di impatto dello sciame;
- Dai tempi di arrivo delle particelle ai vari rivelatori è possibile individuare l'angolo di impatto θ sul suolo (precisione 1^0 - 5^0);

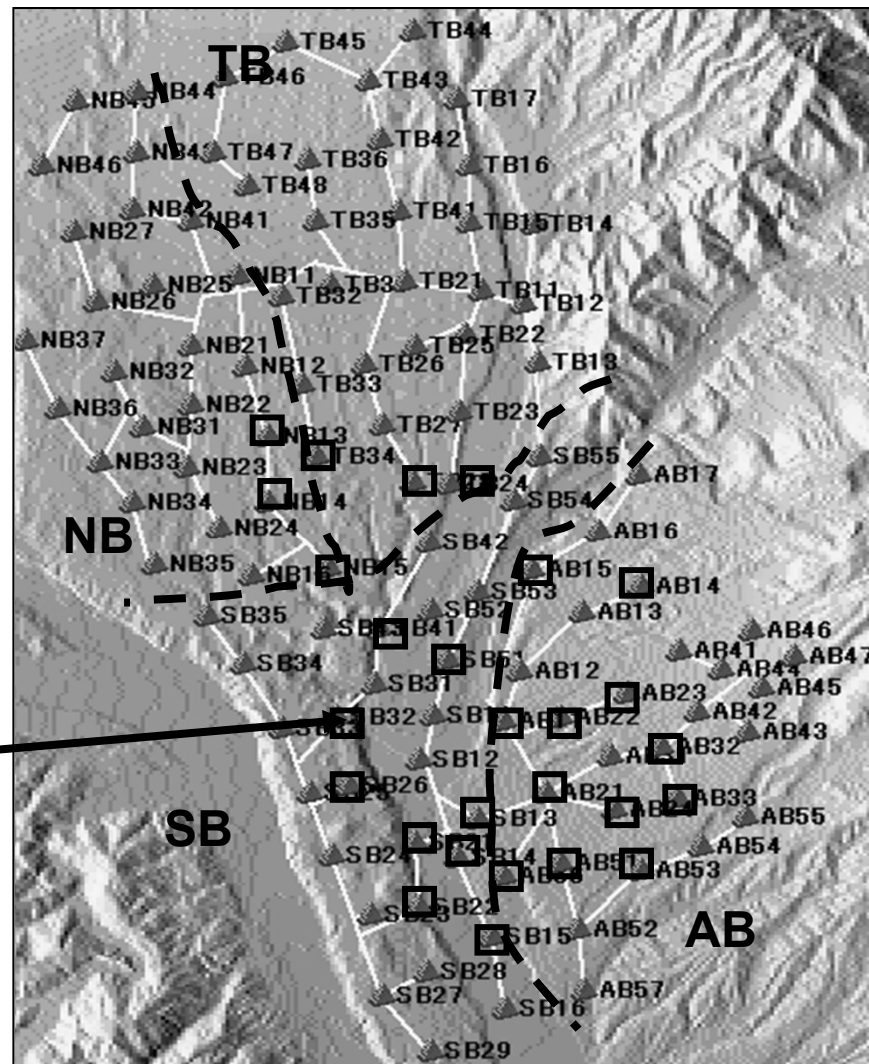


TECNICA 1: campionamento dello sciame a livello del suolo (3)

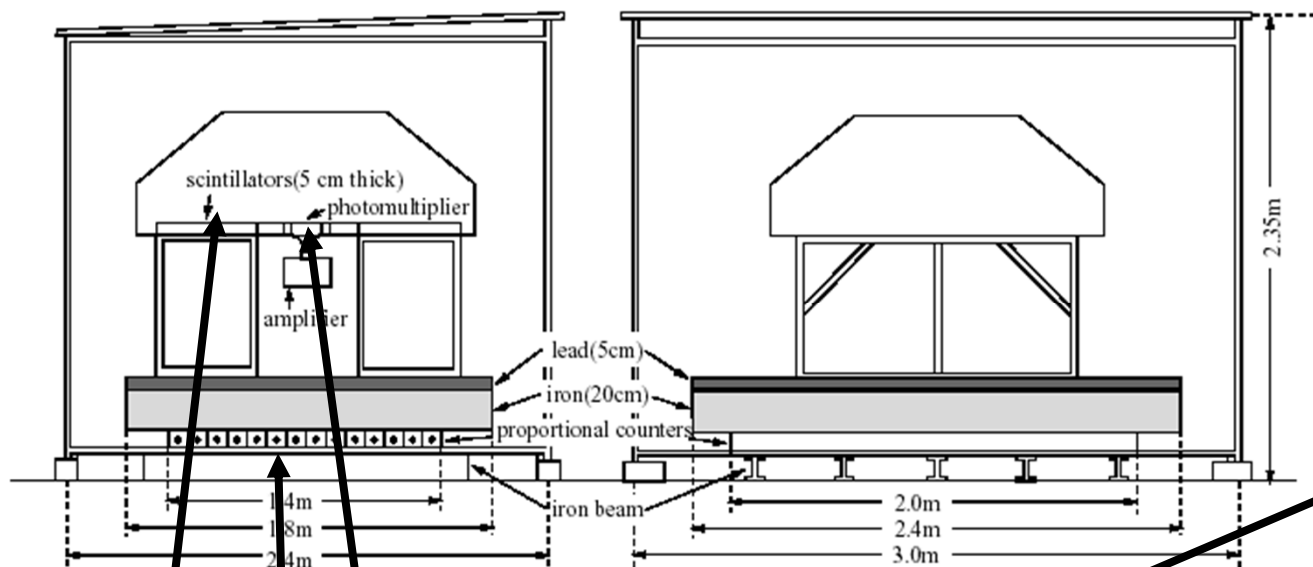
- Uno sciame prodotto da un raggio cosmico primario di energia ultra-elevata (UHECR, $E > 10^{15}$ eV) arriva ad estendersi lateralmente a livello del suolo fino a diversi Km²;
- Di conseguenza, anche la griglia di rivelatori incaricati di campionarlo dovrà avere estensioni di questo tipo;
- La disposizione dei rivelatori nell'array (in particolare la distanza d fra un rivelatore e l'altro) dipende dalle energie tipiche degli sciame che l'esperimento vuol rivelare;
- Per gli UHECR, $d \sim 100$ m;
- Dal momento che il punto piu' interessante a cui campionare uno sciame e' $x \sim X_{\max}$, e' opportuno posizionare il piano dei rivelatori il piu' possibile vicino a questo punto (o poco dopo);
- Per gli UHECR questo punto corrisponde a un'altitudine compresa fra 500 e 1500 m sul livello del mare;
- E' inoltre importante selezionare un sito il piu' possibile pianeggiante;
- Il piu' grande esperimento costruito basandosi sul principio di campionamento dello sciame a livello del suolo e' AGASA;

AGASA: Akeno Giant Air-Shower Array

- E' stato realizzato in Giappone e ha preso dati dal 1990 al 2004;
- Consiste in 111 scintillatori di dimensione 2.2 m^2 disposti a una distanza di 1 Km l'uno dall'altro;
- L'area complessiva dell'array e' di 100 Km^2 ;
- I rivelatori a scintillazione servono per rivelare gli elettroni dello sciame;
- Esistono poi 27 rivelatori per muoni di dimensione variabile (da 2 a 10 m^2) formati da scintillatore plastico + 14-20 contatori proporzionali schermati da 30cm di Fe o 1m di cemento;
- Disposti su una superficie di 30 Km^2 ;



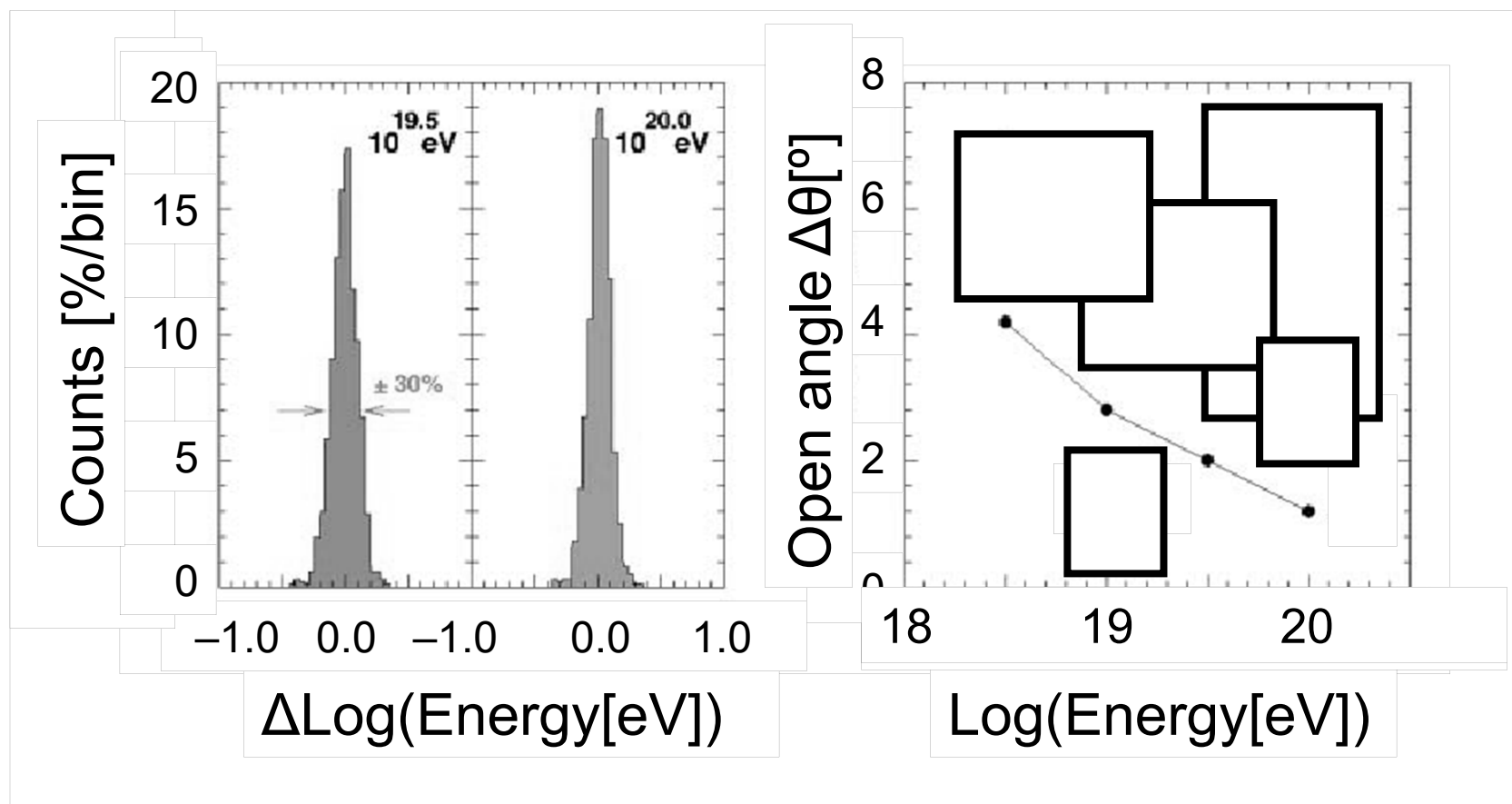
Modulo per rivelare muoni in AGASA



- Rivelatori a scintillatore plastico di spessore 5 cm;
- La luce e' raccolta da un tubo fotomoltiplicatore da 5";
- Contatori proporzionali "triggerati" dallo scintillatore;



Qualita' della ricostruzione di energia e direzione dello sciame

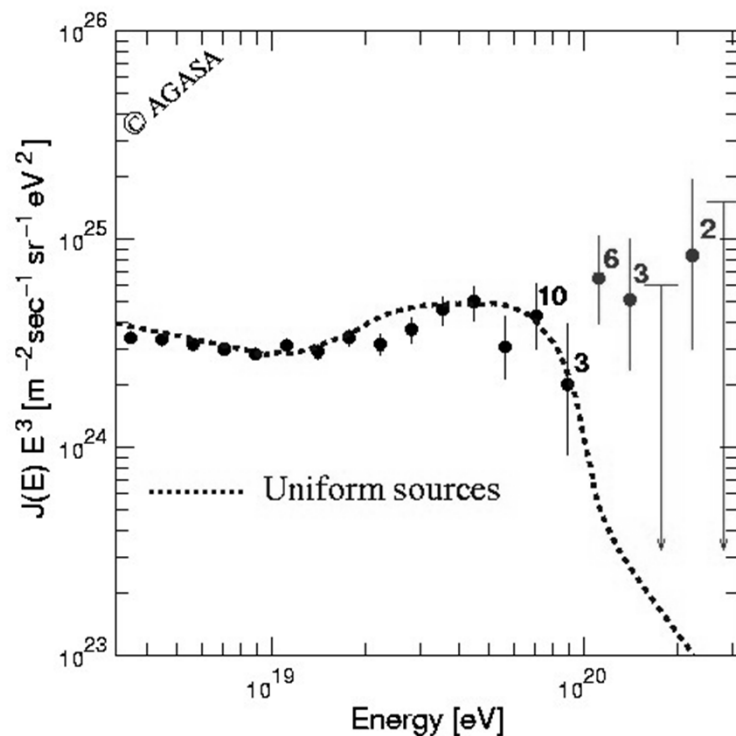


Risoluzione in Energia

- $\Delta E_0/E_0 = \pm 30\%$ @ $10^{19.5} \text{ eV}$
- $\Delta E_0/E_0 = \pm 25\%$ @ 10^{20} eV

Risoluzione angolare

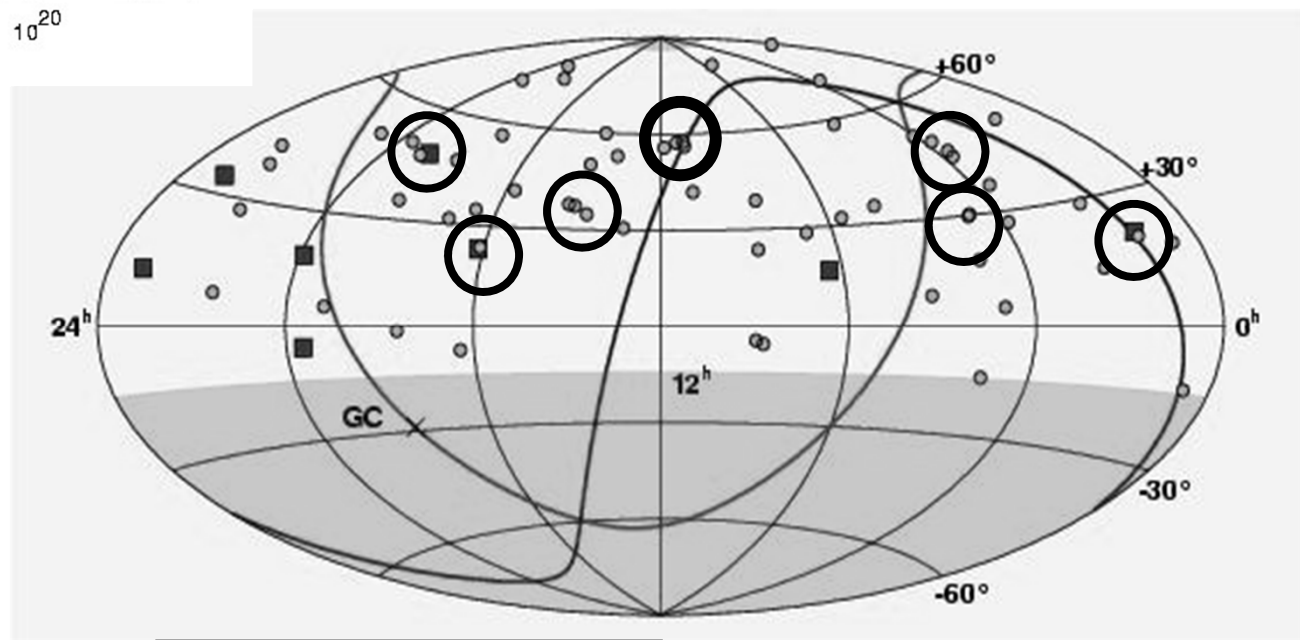
- $\Delta\theta = 2.0^\circ$ @ $10^{19.5} \text{ eV}$
- $\Delta\theta = 1.3^\circ$ @ 10^{20} eV



Risultati di AGASA

- Trovano 11 eventi con $E > 10^{20}$ eV;
- C'è una strana anisotropia negli eventi con $E > 4 \times 10^{19}$ eV;
- Formano (entro 2.5°)
 - 1 tripletto;
 - 6 doppietti;

Nessuno degli
eventi di EHECR
punta verso una
sorgente
plausibile

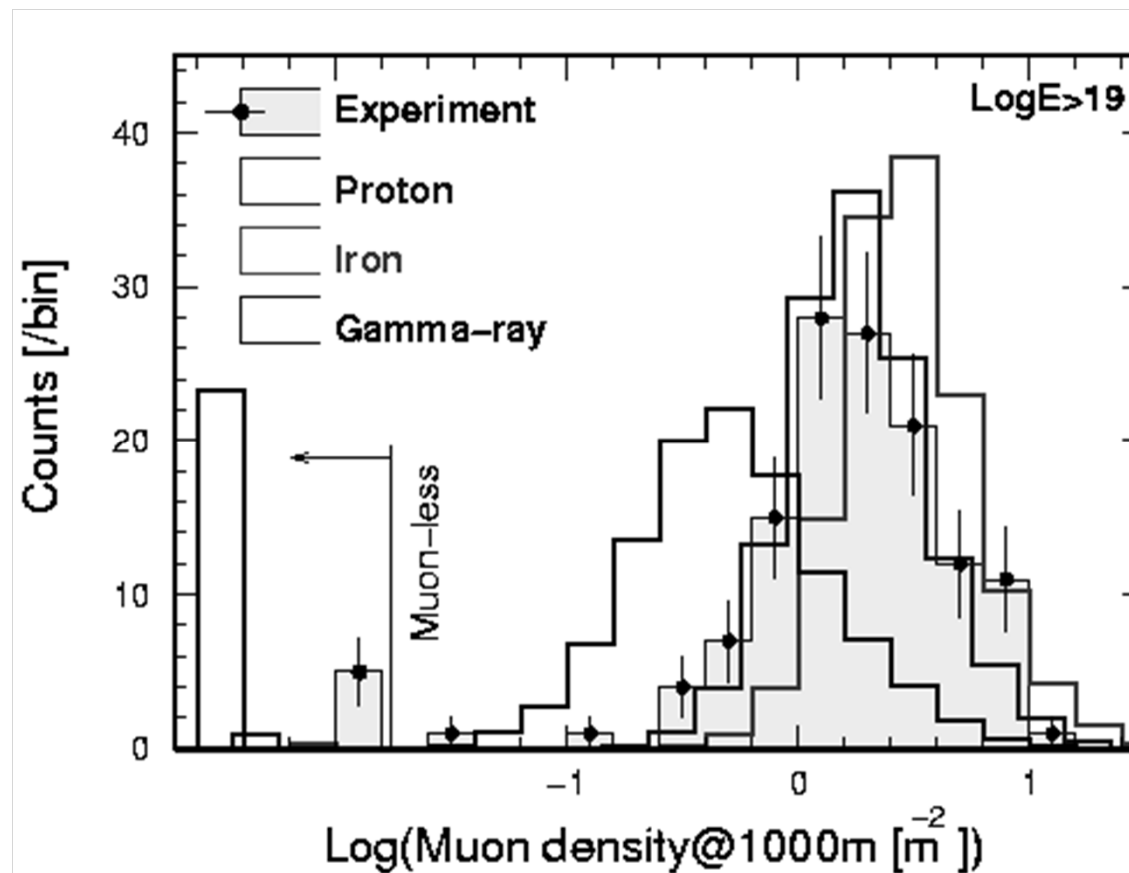


● $4 \times 10^{19} - 10^{20}$ eV

■ $> 10^{20}$ eV

Analisi della composizione degli UHECR

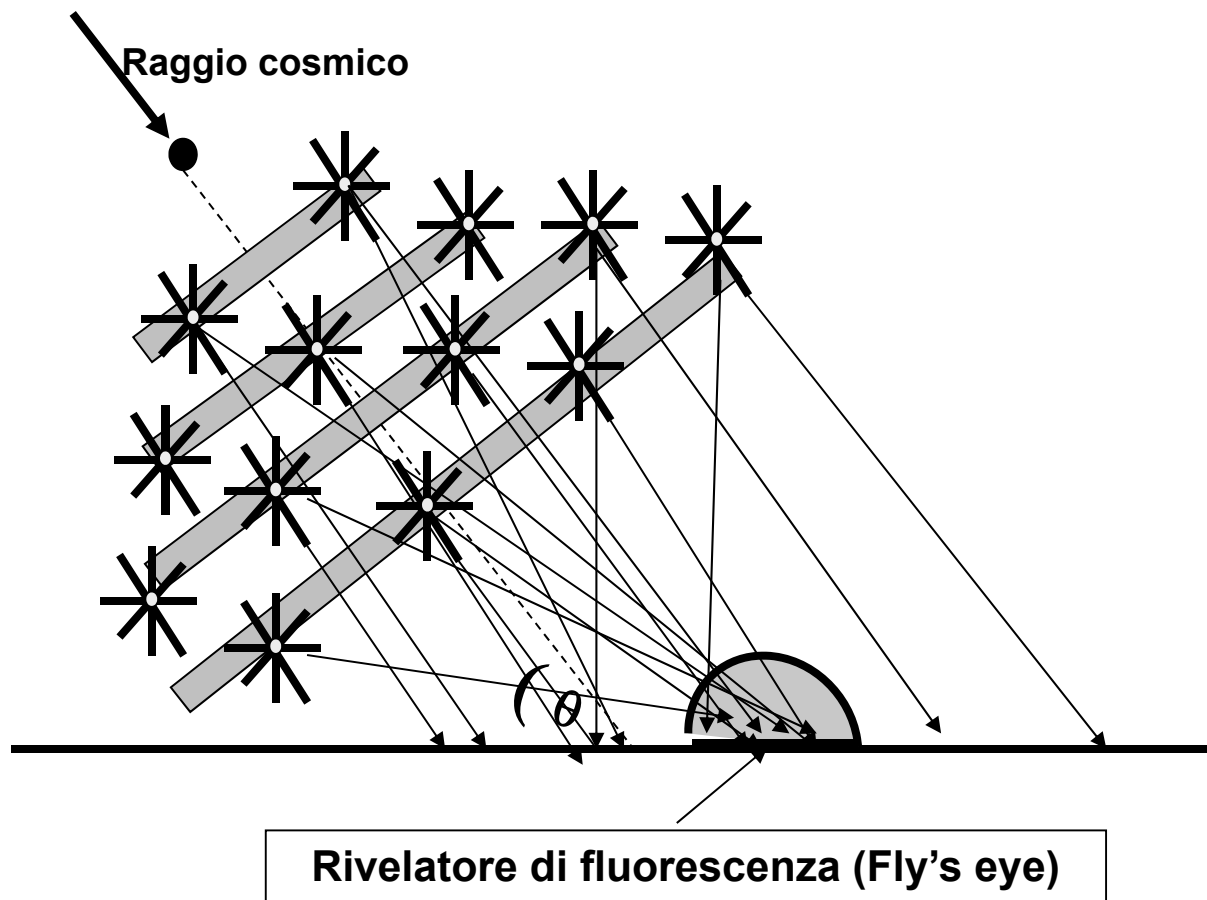
- Misurando la densita' di muoni negli sciami UHECR ($E > 10^{19}$ eV) AGASA riesce a stimare la natura dei raggi cosmico primari che li hanno prodotti;



• Da questo studio risulta che i raggi cosmici primari di energie ultra-elevate sembrano essere in prevalenza protoni

TECNICA 2: rivelazione della luce di fluorescenza

- Questa tecnica nasce nel 1962 e utilizza l'atmosfera come se fosse un grande rivelatore a scintillazione;
- Il materiale scintillante e' l'azoto dell'atmosfera che produce fotoni fra 300 e 400 nm;
- Un opportuno "array" di fototubi disposto a terra rivela questi fotoni;



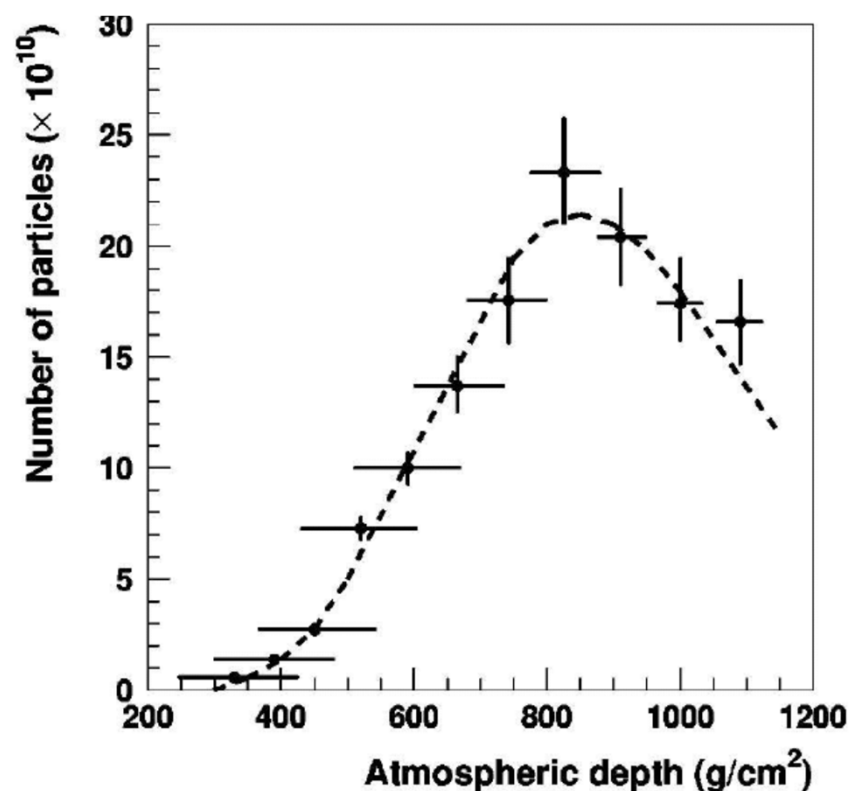
- Questo metodo fornisce informazioni sullo sviluppo longitudinale dello sciame,;
- In pratica, dal numero di fotoni rivelati in funzione del tempo e' possibile ricostruire il numero di particelle a diverse profondita' dello sciame;
- E' possibile quindi determinare $X_{\max}$;

TECNICA 2: rivelazione della luce di fluorescenza

- La luce emessa per scintillazione dall'azoto ha una $\lambda \sim 300\text{-}400\text{ nm}$;
- A queste λ , l'atmosfera e' quasi trasparente ($L_{\text{att}} \sim 15\text{ Km}$);
- Il numero di fotoni emessi per fluorescenza dalle particelle dello sciame e' $\sim 4.5\text{ fotoni/m}$;
- Poiche' un EAS primario di $E > 10^{19}\text{ eV}$ produce a X_{max} piu' di 10^8 elettroni la luce e' sufficiente;
- I fotoni vengono raccolti da specchi e rivelati da PMT;
- Ogni PMT guarda una porzione di cielo;
- Per ogni porzione di cielo (PMT) conosco: numero di fotoni e tempo di arrivo;
- Ricavo il piano rivelatore-sciame e quindi la direzione dello sciame;

TECNICA 2: rivelazione della luce di fluorescenza

- Come detto con questa tecnica e' possibile ricostruire il profilo longitudinale dello sciame EAS;
- L'E dello sciame puo' venire calcolata integrando il numero di fotoni raccolti;
- Si puo' inoltre determinare $X_{\max}$ da cui e' possibile dedurre informazioni sulla natura del primario che ha generato lo sciame;
- E' inoltre possibile determinare la direzione dell'asse dello sciame ;
- Se si usa una visione binoculare (cioe' 2 rivelatori Fly's Eyes) $\Delta\theta \sim 0.5^\circ$!!
- Notiamo che questa tecnica di rivelazione ha un altissimo tempo morto (>90%) in quanto non puo' essere operato di giorno e nelle notti di luna!
- Richiede inoltre che il luogo di installazione sia mediamente poco nuvoloso lungo l'intero anno!

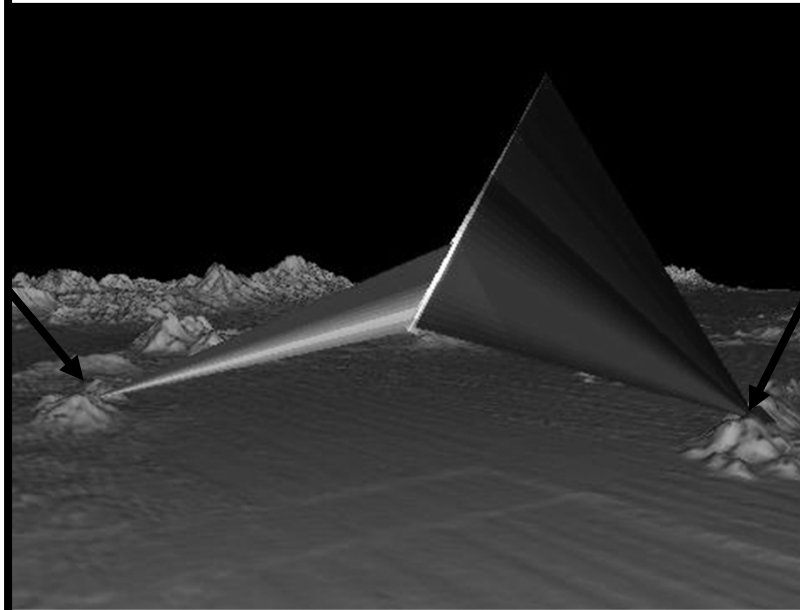


Hi-Res (Hi Resolution Fly's Eyes)

- E' situato nello Utah (USA) e ha cominciato a prendere dati nel 1998;
- E' composto da due rivelatori Fly's Eyes situati a distanza di 12.6 km per avere visione stereoscopica e migliorare la risoluzione sulla direzione dello sciame;

HiRes 1

- Composto da 22 specchi che raccolgono la luce proveniente da altrettante porzioni di cielo;
- Copre un campo visivo del cielo che si estende da 3° a 17° in elevazione, e 360° in azimuth;

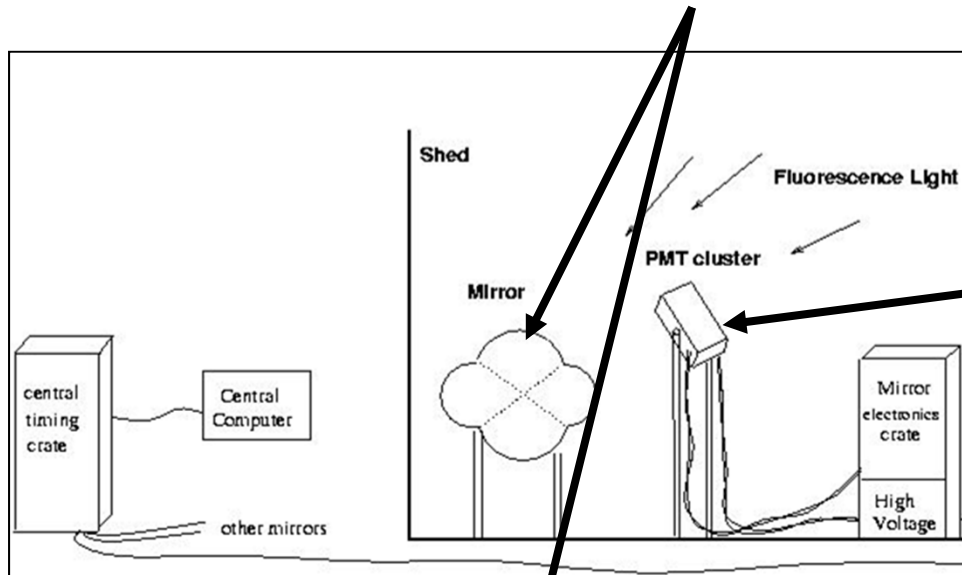


HiRes 2

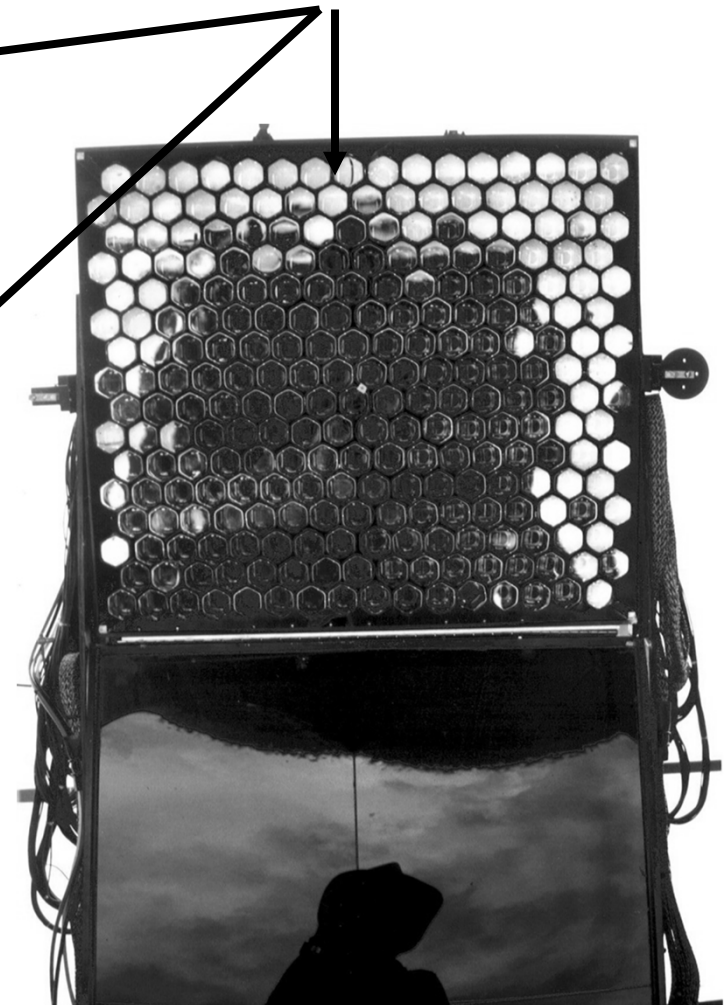
- Composto da 42 specchi che raccolgono la luce proveniente da altrettante porzioni di cielo;
- Copre un campo visivo del cielo che si estende da 3° a 31° in elevazione, e 360° in azimuth;

In entrambi i casi, la luce raccolta da ciascuno specchio viene rivelata da un array di 256 tubi fotomoltiplicatori

Uno degli specchi che compongono i telescopi di HiRes

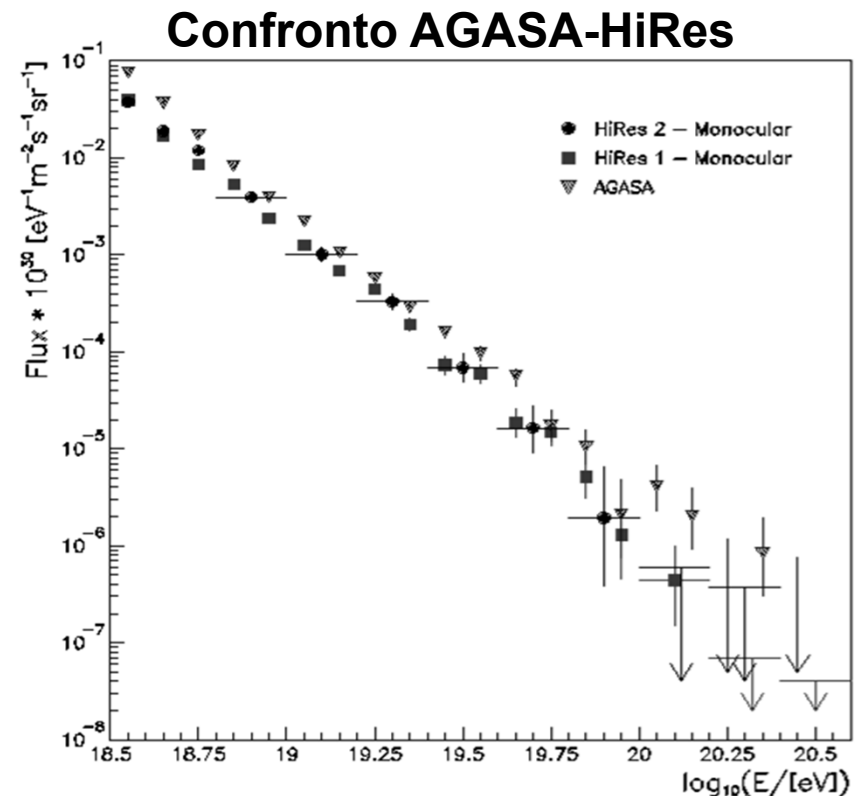


Array di 256 PMT che ricevono la luce da quello specchio;



Spettro dei raggi cosmici ottenuto con HiRes

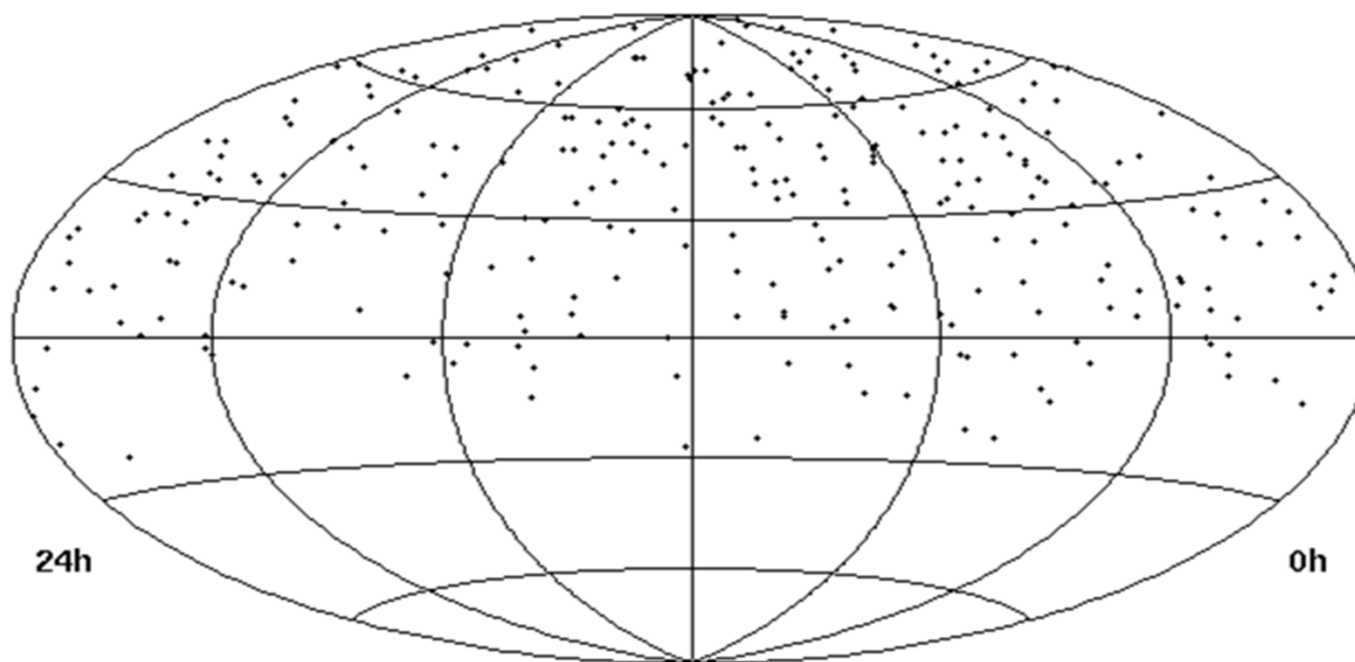
- L'E dello sciame viene ottenuto a partire dalla somma dei fotoni raccolti;
- La risoluzione in energia e' $\sim 15\%$;
- N.B.: in un rivelatore a fluorescenza il controllo della trasparenza dell'atmosfera e' particolarmente critico per la stima dell'energia dello sciame;
- La trasparenza dell'atmosfera puo' variare velocemente e imprevedibilmente in base alle condizioni atmosferiche $\rightarrow$ vengono controllate ora per ora e introdotte per ricorreggere i dati;



- Il confronto fra AGASA e Hires mostra innanzitutto una leggera discrepanza nella scale in energia (possibile shift sistematico);
- HiRes trova 5 eventi di energia $E > 10^{20}$ eV (contro 2 attesi);
- AGASA ne trovava 11;

Determinazione della provenienza dei raggi cosmici con HiRes

- Grazie alla visione binoculare, HiRes e' in grado di ottenere una risoluzione angolare sulla direzione dello sciame di $\sim 0.6^\circ$, meglio di quella di AGASA;
- Non evidenzia anisotropie nella distribuzione dei raggi cosmici di energia $E > 10^{19}$ eV;



Un esperimento ibrido: AUGER

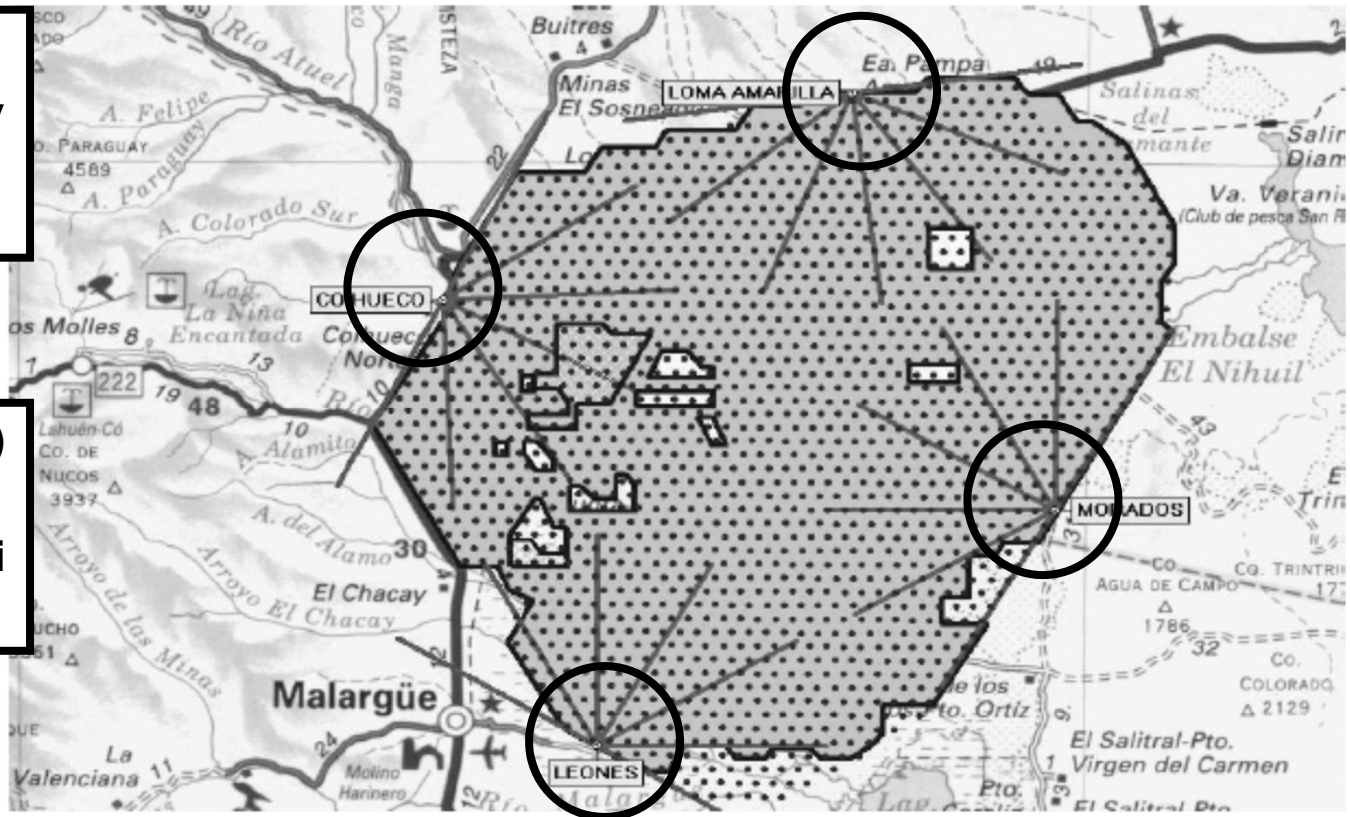
- E' un rivelatore ibrido, che sfrutta cioe' sia la tecnica di campionamento al suolo che la tecnica di fluorescenza;
- E' realizzato in Argentina;
- Occupa una superficie di 3000 Km² (1 anno di Auger ~ 30 anni di AGASA!);

Array di superficie (SD)

1600 rivelatori Cerenkov
distanti 1.5Km l'uno
dall'altro

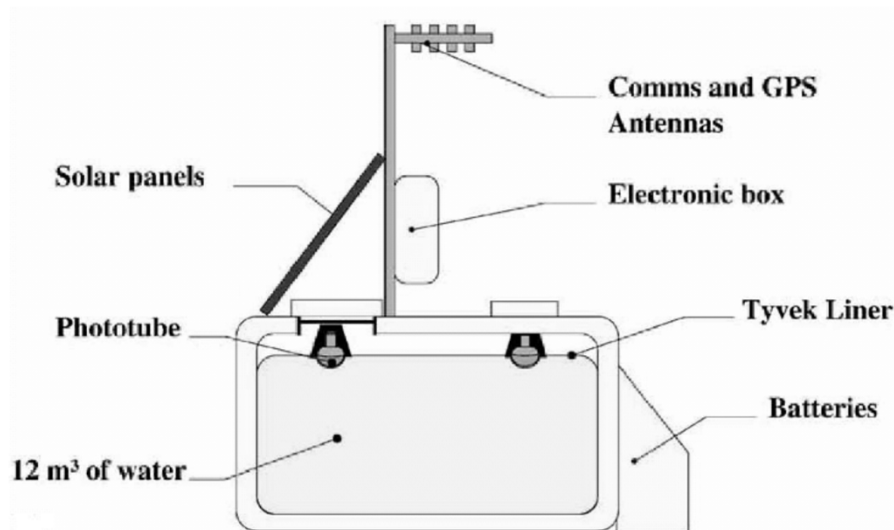
Rivel. Fluorescenza (FD)

4 stazioni ottiche
composte da 6 telescopi
ciascuna

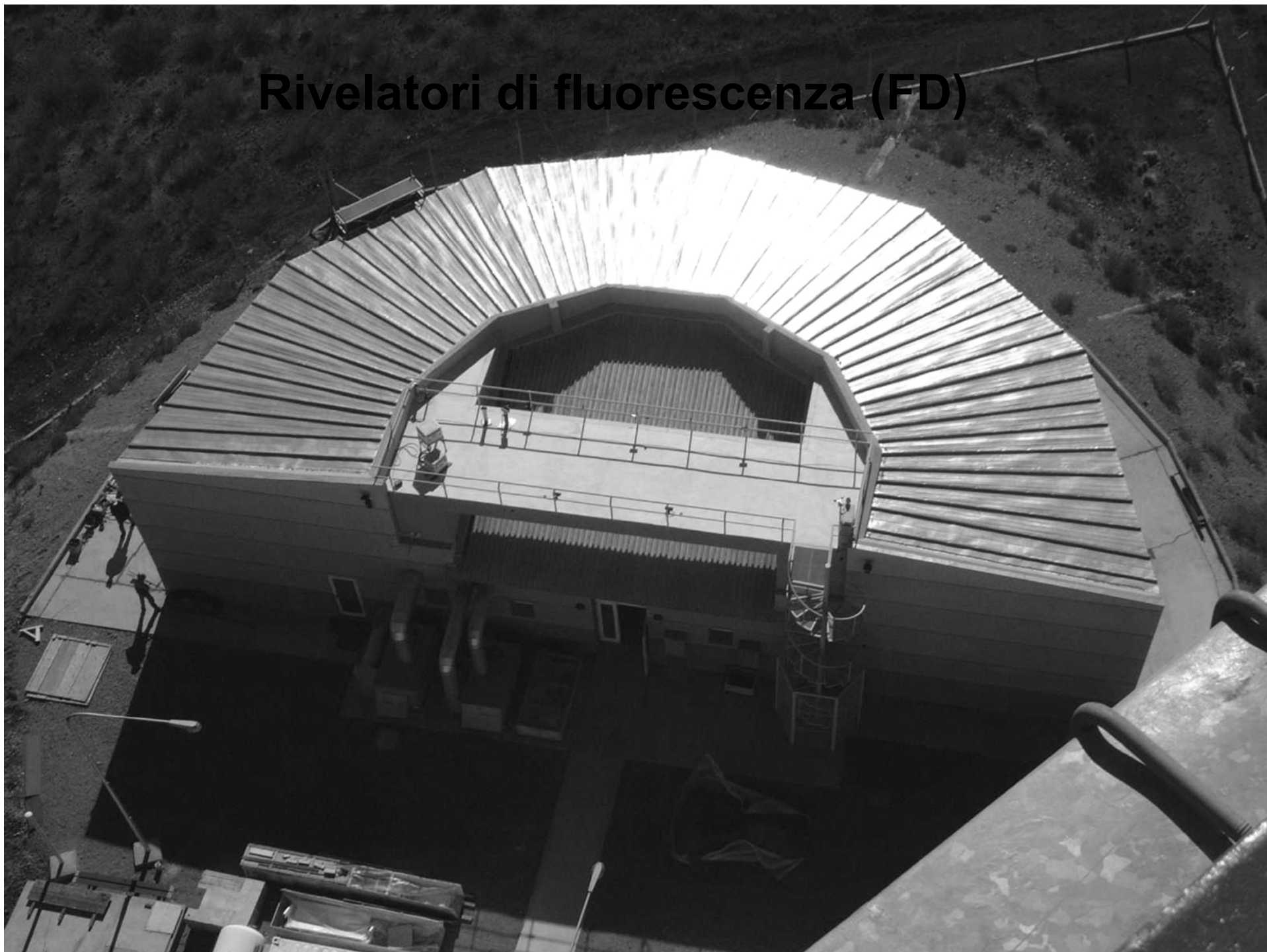


Rivelatori per campionare lo sciame in superficie (SD)

- 1600 stazioni distanti 1.5Km l'una dall'altra;
- Ogni stazione e' composta da una tanica di 12 m³ di acqua ultra-pura;
- La luce Cerenkov emessa dalle particelle dello sciame viene vista da 3 PMT da 9";
- L'istallazione e' stata completata in agosto 2007;
- Da allora prende dati con continuita';

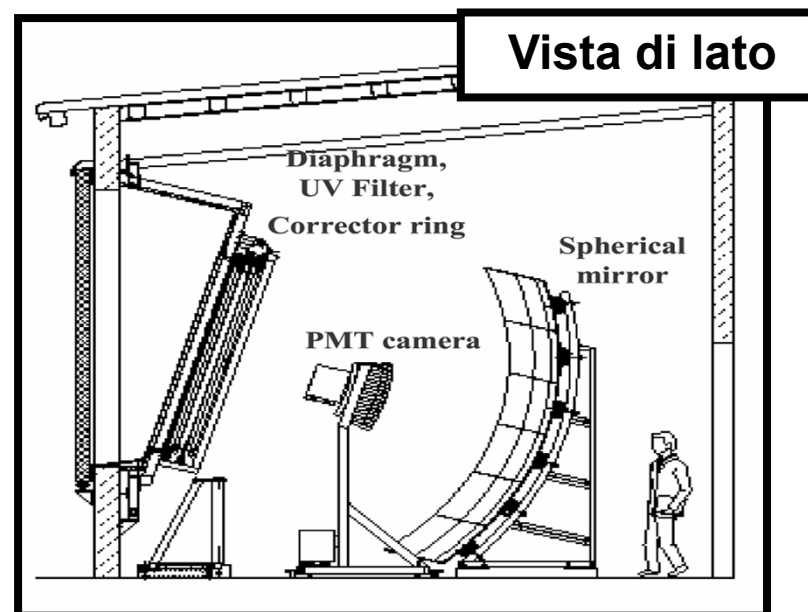
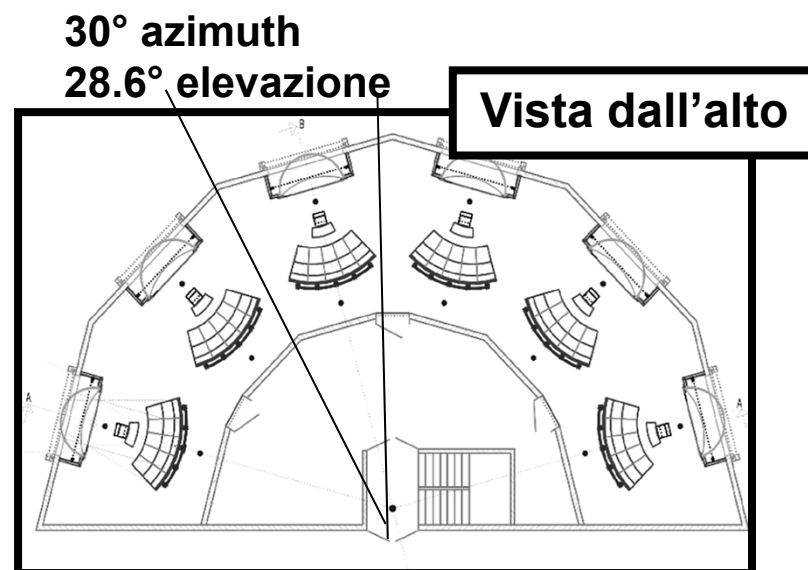


Rivelatori di fluorescenza (FD)



Rivelatori di fluorescenza (FD)

- Auger e' composto da 4 stazioni di fluorescenza;
- Ciascuna stazione e' formata da 6 telescopi;
- Ciascun telescopio ha un campo visivo di 30° in azimuth e 28.6° in elevazione;
- Ciascun telescopio e' formato da uno specchio di $3.5\text{m} \times 3.5\text{m}$ che focalizza la luce su un array di 440 PMT;
- Un filtro UV permette solo il passaggio di luce nel range di lunghezze d'onda (300-400)nm;
- Tutte le 4 stazioni sono istallate e prendono dati regolarmente;



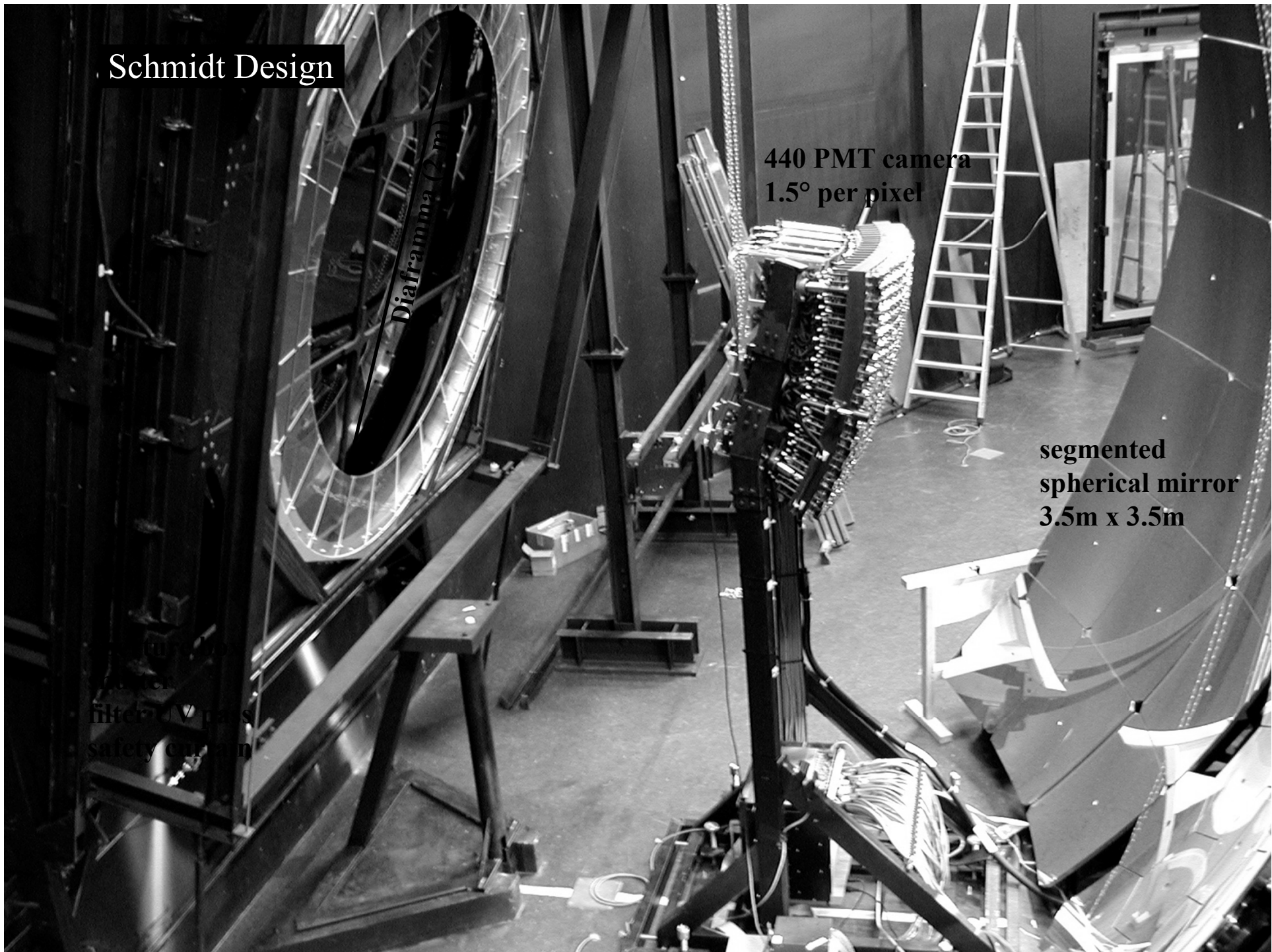
Schmidt Design

Diaframma (2 m)

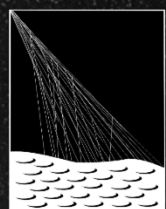
440 PMT camera
1.5° per pixel

segmented
spherical mirror
3.5m x 3.5m

UV pass
safety camera



2015



OBSERVATORIO
PIERRE
AUGER

ENERO 2015

LUN	MAR	MIÉ	JUE	VIE	SÁB	DOM
		1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30			

FEBRERO 2015

LUN	MAR	MIÉ	JUE	VIE	SÁB	DOM
						1
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	

MARZO 2015

LUN	MAR	MIÉ	JUE	VIE	SÁB	DOM
						1
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29
30	31					

ABRIL 2015

LUN	MAR	MIÉ	JUE	VIE	SÁB	DOM
		1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30			

MAYO 2015

LUN	MAR	MIÉ	JUE	VIE	SÁB	DOM
			1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30	31	

JUNIO 2015

LUN	MAR	MIÉ	JUE	VIE	SÁB	DOM
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30					

JULIO 2015

LUN	MAR	MIÉ	JUE	VIE	SÁB	DOM
		1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30	31		

AGOSTO 2015

LUN	MAR	MIÉ	JUE	VIE	SÁB	DOM
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28		
31						

SEPTIEMBRE 2015

LUN	MAR	MIÉ	JUE	VIE	SÁB	DOM
		1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30			

OCTUBRE 2015

LUN	MAR	MIÉ	JUE	VIE	SÁB	DOM
			1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30	31	

NOVIEMBRE 2015

LUN	MAR	MIÉ	JUE	VIE	SÁB	DOM
						1
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29
30						

DICIEMBRE 2015

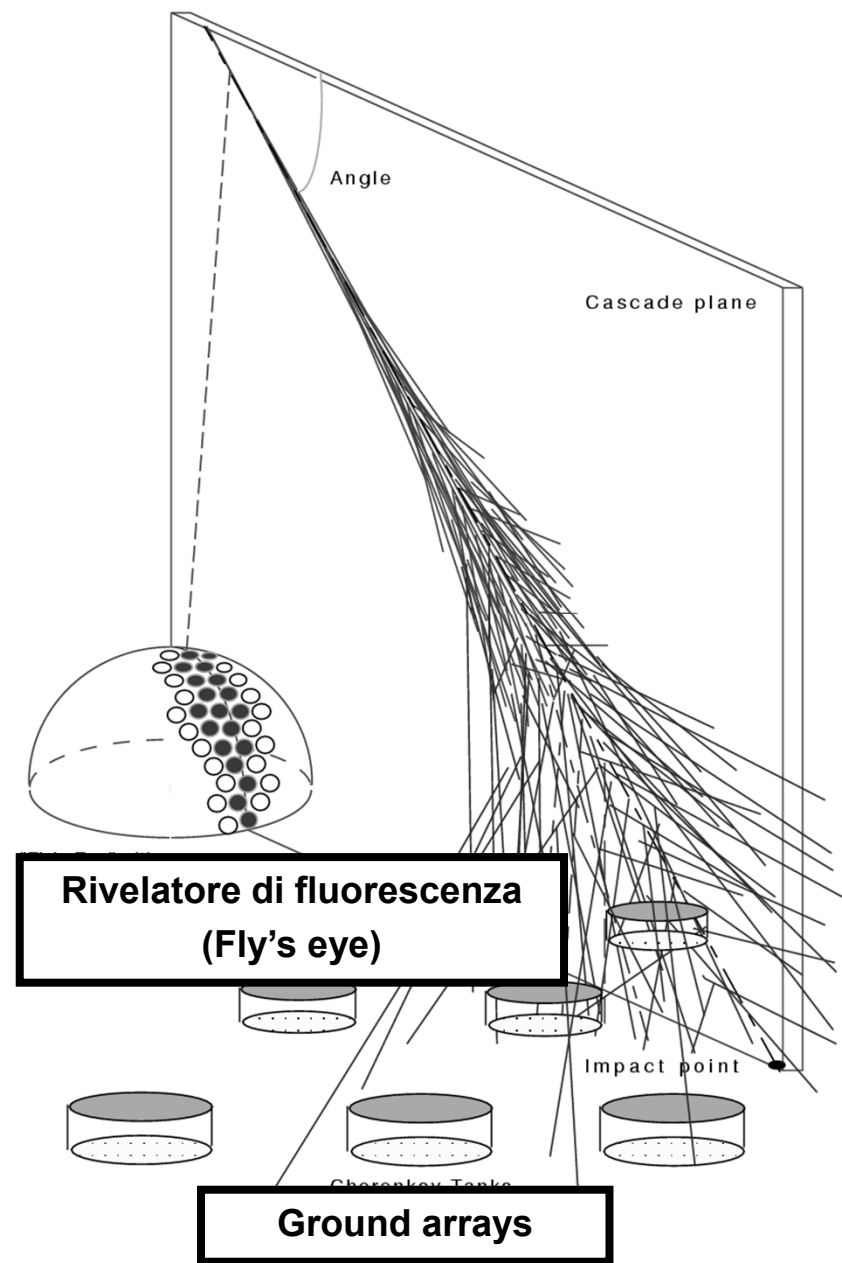
LUN	MAR	MIÉ	JUE	VIE	SÁB	DOM
		1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30	31		

Le solicitamos, por favor, que en los días marcados con AMARILLO no se realicen quemas de campo. Gracias.

Observatorio Pierre Auger - Av. San Martín Norte N°304 - CP. M5613DXQ - Malargüe, Mendoza, Argentina.
Tel.: 0260-4471556 /62 /79 - Web: www.auger.org.ar - E-mail: info@auger.org.ar

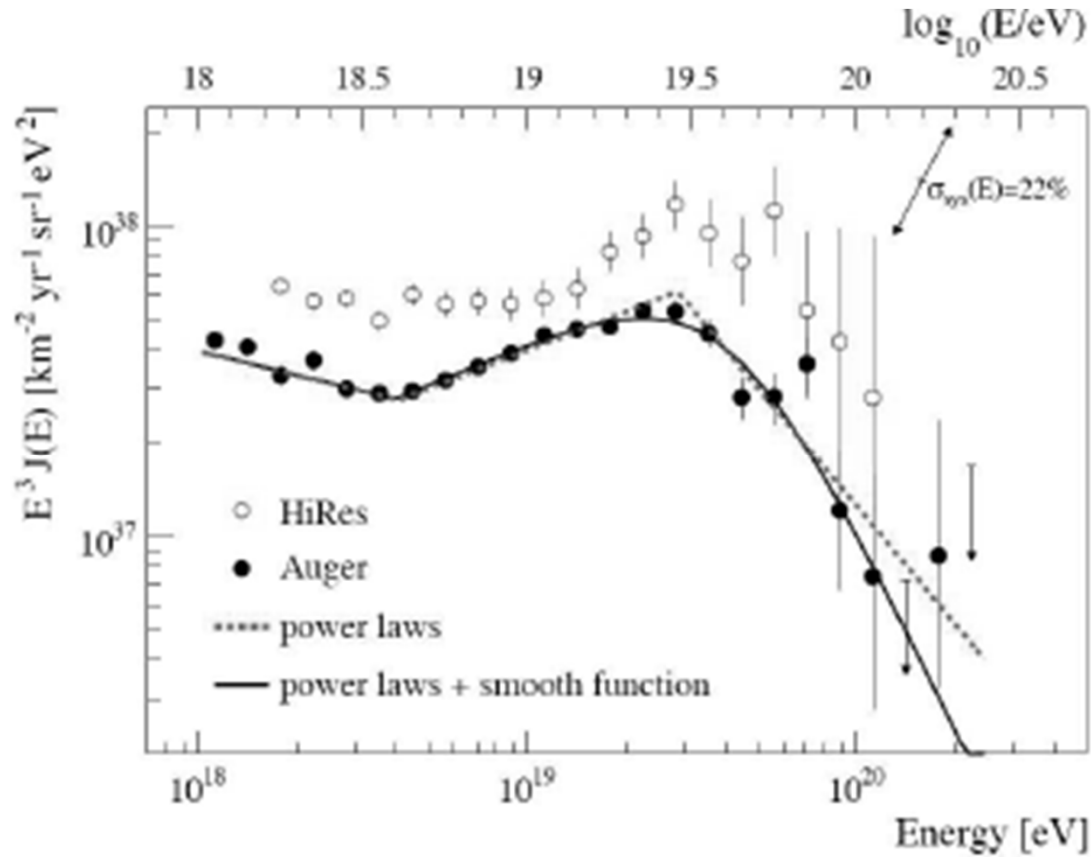
I vantaggi di un rivelatore ibrido

- Un rivelatore ibrido permette di combinare i pregi di diverse tecniche di rivelazione e fornisce elementi utili per individuare eventuali effetti sistematici nelle singole tecniche;
- Per esempio, il problema legato a possibili sistematiche della misura dell' E degli sciami viene risolto dal fatto di avere 2 tecniche completamente indipendenti per misurarla;
- Lo stesso vale per la misura dell'asse di propagazione del fascio e per la stima della natura del “padre” dello sciame;
- Inoltre, a differenza dei rivelatori che sfruttano solo fluorescenza, Auger può prendere dati 100% del tempo;



Risultati di Auger: il flusso degli UHECR

Auger vede ~ 60 ev/giorno per $E > 10^{18}$ eV, 1.5 ev/giorno per $E > 10^{19}$ eV;

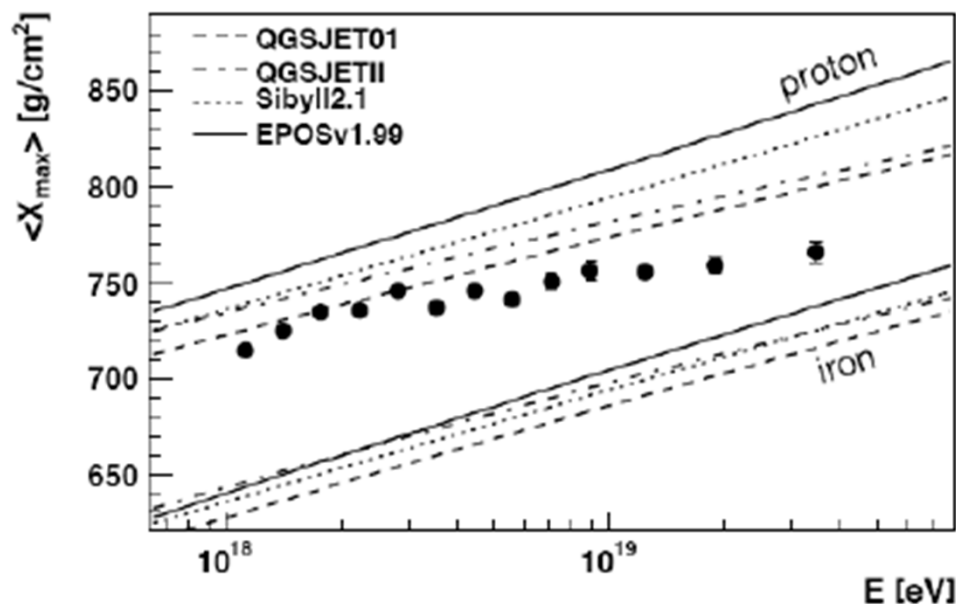


RISULTATO n.1

•Auger CONFERMA l'esistenza di un cutoff per $E > 5 \times 10^{19}$ eV (in accordo con Hires); E' il cutoff GZK?

Risultati di Auger: la composizione degli UHECR

Studiando la distribuzione dell' $X_{\max}$ con il rivelatore di fluorescenza e' possibile capire la natura del primario: un protone tende ad avere un $X_{\max}$ piu' grande rispetto a un nucleo di Fe



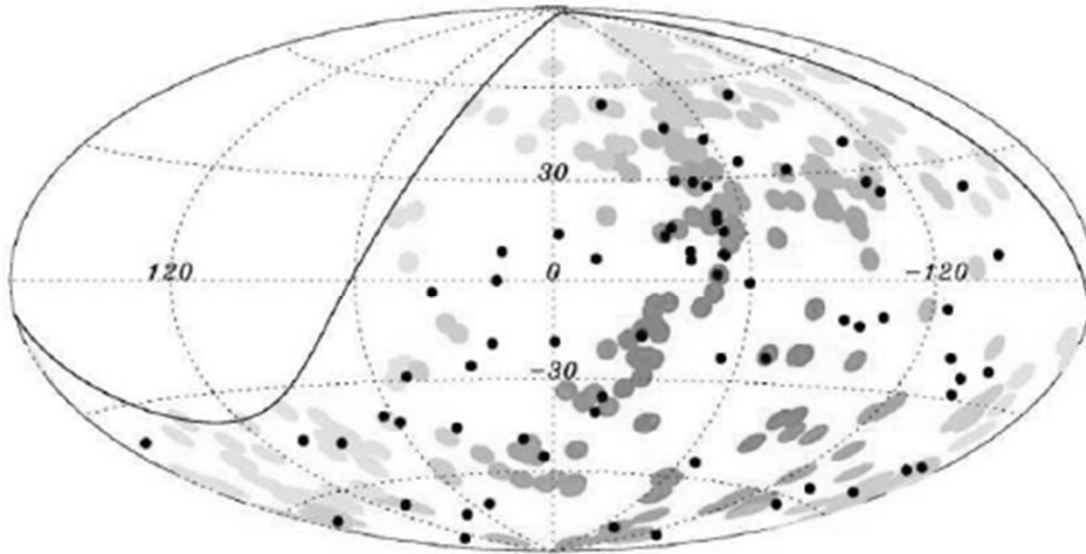
Risultato n.2

- L'attuale risultato di Auger sembra preferire una composizione di protoni per $E < 10^{19}$ eV e a piu' alte energie una transizione a elementi piu' pesanti;
- Purtroppo non c'e' abbastanza statistica al di sopra di 5×10^{19} eV per avere informazioni sulla composizione degli eventi ad altissime energie;

Risultati di Auger: la presenza di γ fra gli UHECR

Inoltre Auger pone un limite sul numero di gamma che fanno parte degli eventi di altissima energia $<2\%$ $\rightarrow$ questo porta a rigettare molti dei modelli “top-down”;

Risultati di Auger : correlazione degli UHECR con oggetti astronomici (dati raccolti fra gennaio 2004 e dicembre 2009)



Risultato n.3

- Puntini neri: 69 eventi di UHECR ($E > 5.5 \times 10^{19}$ eV)
- Pallini blu: cerchi di 3.1° attorno ai 318 AGN presenti nel catalogo VCV a distanza < 75 Mpc ($z < 0.018$). Il colore indica l'esposizione relativa di Auger in quella zona;
- Si osserva una correlazione fra AGN e UHECR visti da Auger, ma il grado di correlazione è diminuito rispetto a quello che si osservava con i primi 30 eventi

Questioni ancora aperte

GZK

- La soppressione del flusso a $E.5 \times 10^{19}$ eV e' davvero l'effetto GZK oppure e' solo l'energia massima a cui arrivano gli acceleratori cosmici?

COMPOSIZIONE

- Qual'e' la composizione dei raggi cosmici per $E > 10^{19}$ eV? Ovvero, sono protoni, sono nuclei piu' pesanti? Auger sembra dire che sono nuclei piu' pesanti, ma altri esperimenti hanno risultati piu' ambigui (TA per esempio);

SORGENTI DI RAGGI COSMICI

- E' possibile capire meglio quali sono le sorgenti di raggi cosmici $E > 10^{19}$ eV?
- Astronomia possibile solo per protoni?

