Sommario

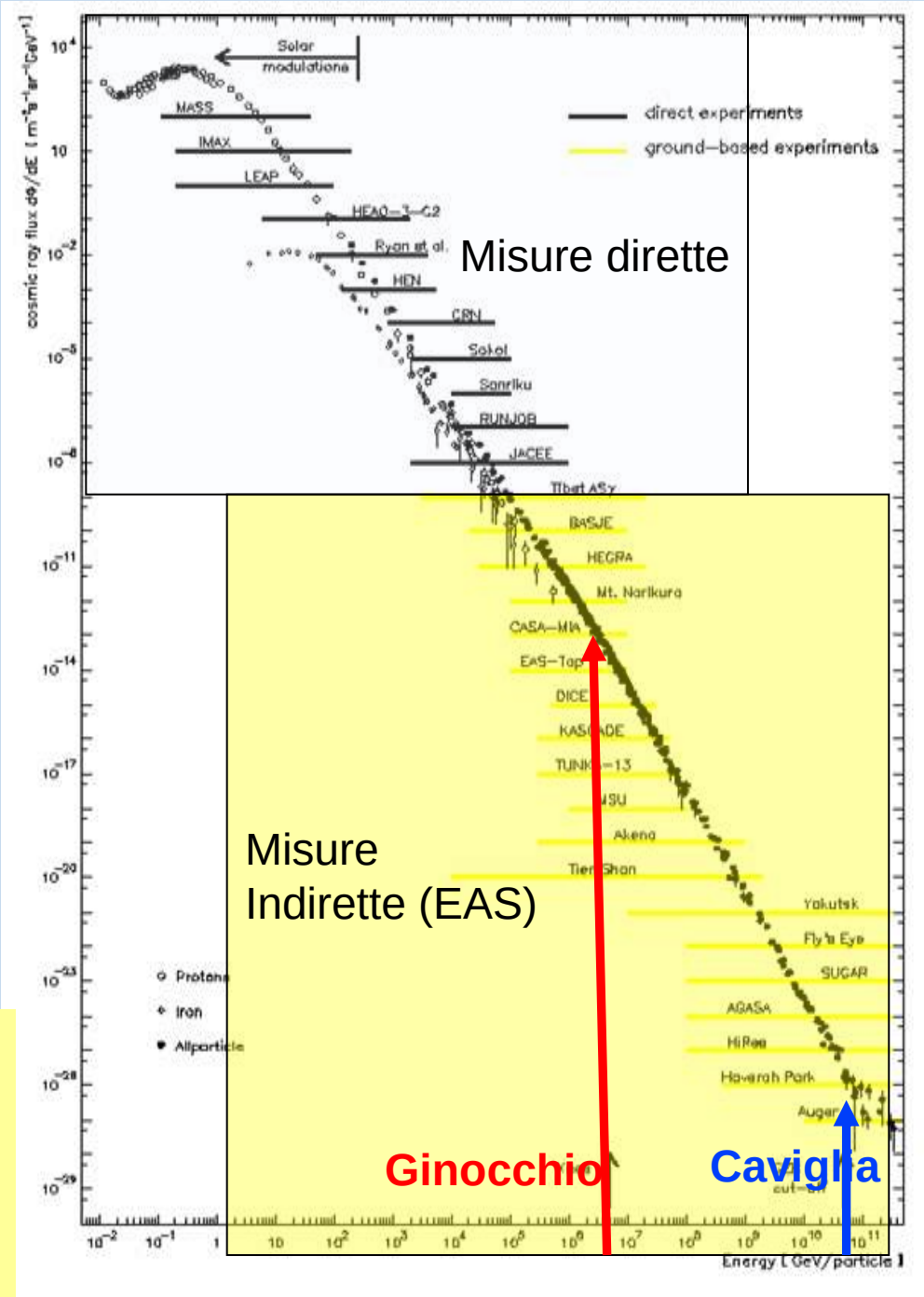
1. **I Raggi Cosmici**
   i. **Generalità e prime osservazioni**
   ii. **Misure dirette e “composizione chimica”**
      a. **La nostra Galassia**
      b. **Le Supernovae originano i RC**
   iii. **Misure Indirette**
      a. **Possibili sorgenti extragalattiche**
2. **2. Alcuni effetti dei RC sulla vita quotidiana**

Sommario

1. I Raggi Cosmici
   i. Generalità e prime osservazioni
   ii. Misure dirette e “composizione chimica”
      a. La nostra Galassia
      b. Le Supernovae originano i RC
   iii. Misure Indirette
      a. Possibili sorgenti extragalattiche
2. 2. Alcuni effetti dei RC sulla vita quotidiana

Spettro Energetico dei raggi cosmici

- Φ_{TOT}~1000 $m^{-2}s^{-1}sr^{-1}$
- Misure dirette: 90% p, 9% He, 1% nuclei pesanti
- Si estende per 11 ordini di grandezza in energia: da 1 GeV a 10^{11} GeV
- Legge di potenza su tutto lo spettro, con due cambi di pendenza

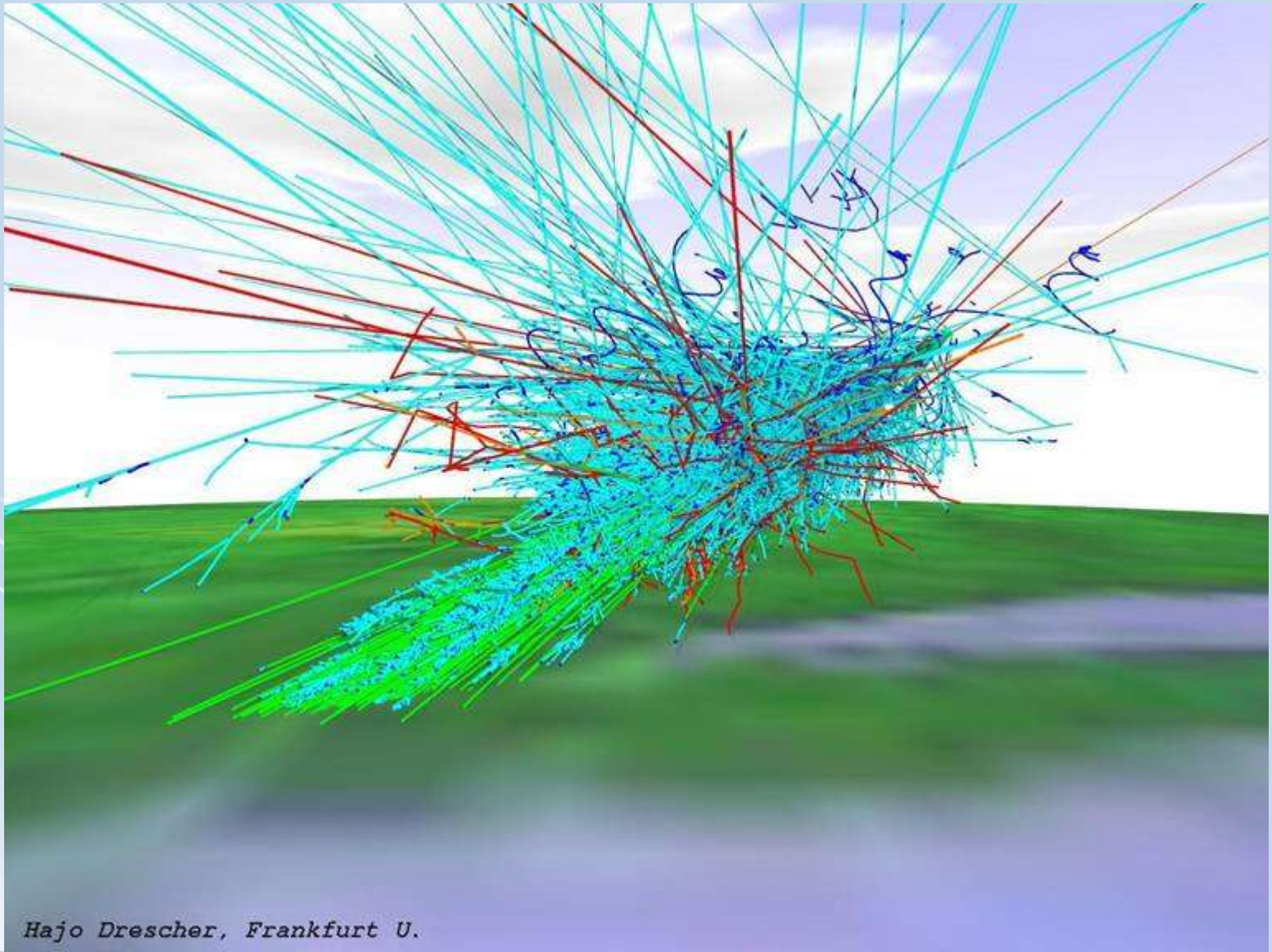


Nota: i Fisici misurano spesso le energie in GeV anziché in Joule.
1 GeV = 1.6 x 10^{-10} J.
Poiché $E=mc^2$, la massa del protone corrisponde circa a 1 GeV/c^2.

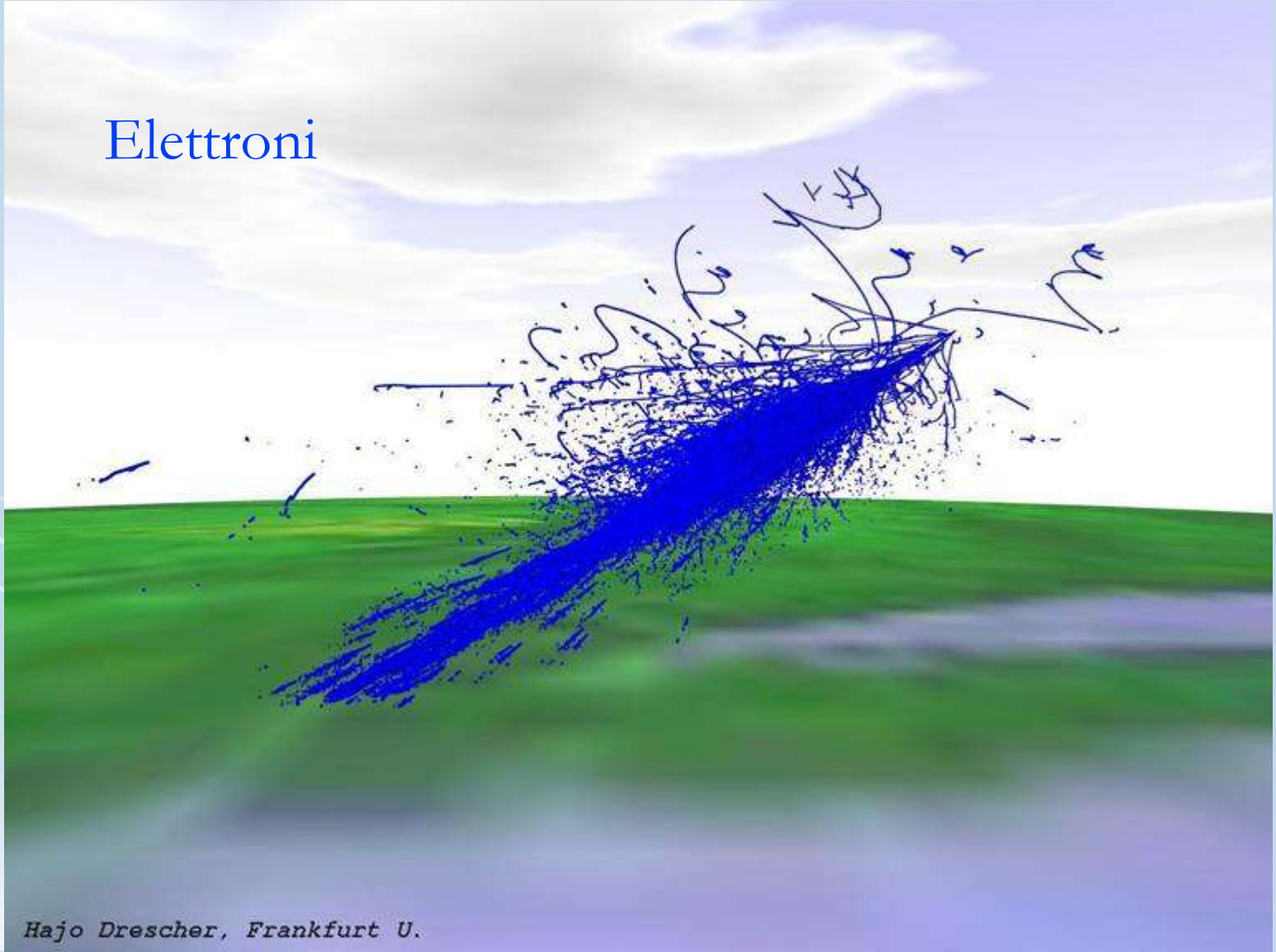
5.1 Sciami estesi in Atmosfera

- L'interazione di un primario in Atmosfera origina uno sciame di particelle con 3 componenti:
  - Elettromagnetica (EM)
  - Muoni
  - Adroni
- Le Energie dei RC molto maggiori delle E raggiungibili con acceleratori. E' possibile esplorare interazioni adroniche in regioni cinematiche non ancora studiate.
- Tevatron: protoni e antiprotoni collidono frontalmente con energia nel CdM pari a $\sqrt{s} = 2\mathrm{TeV}$
- LHC: protoni protoni "head-on" con $\sqrt{s} = 14TeV$

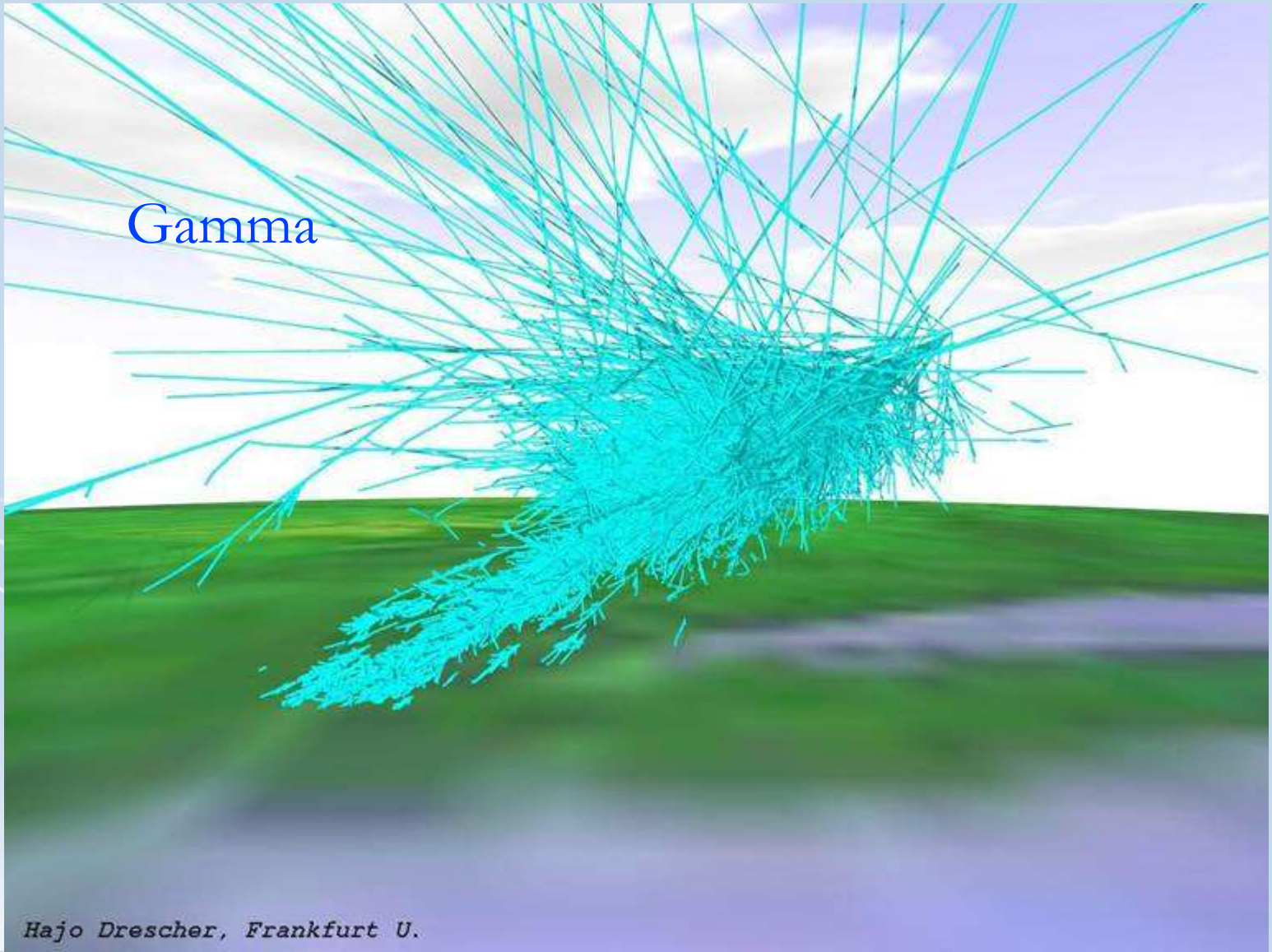
Simulazione al computer di una Cascata di particelle



Simulazione MC di una Cascata

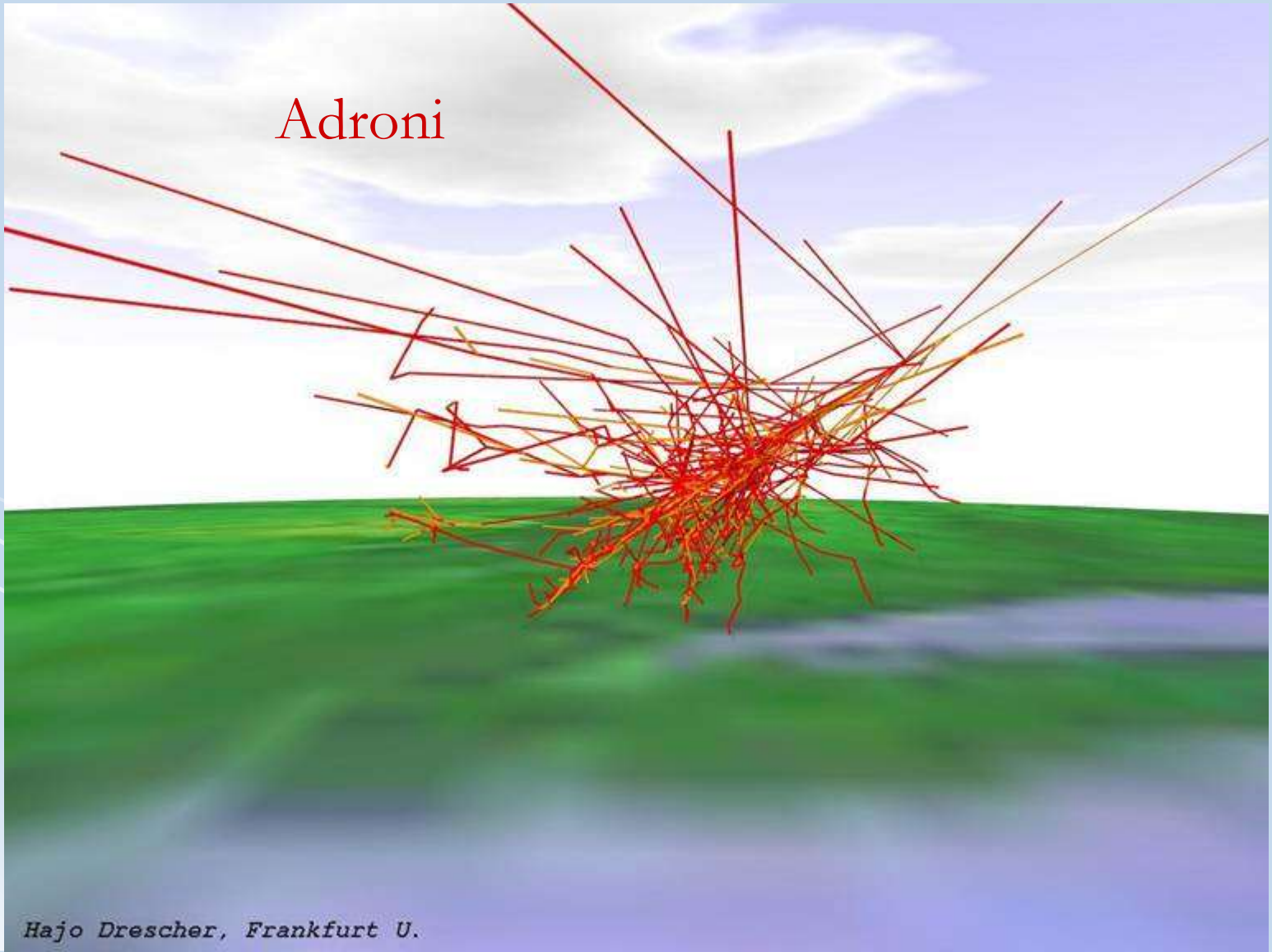


Simulazione MC di una Cascata



Simulazione MC di una Cascata

Simulazione MC di una Cascata



Lo sciame Elettromagnetico

- E' indotto dal decadimento dei mesoni neutri

$$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$$

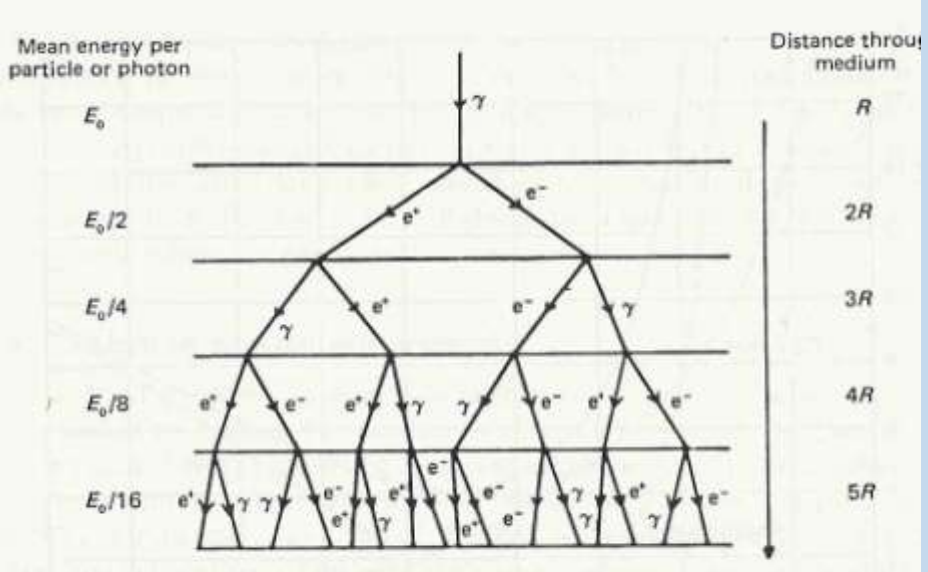
- Il principale meccanismo di interazione dei fotoni

  è la creazione di coppie $\gamma \rightarrow e^+ e^-$

- Gli elettroni perdono energia per

  bremmstrahlung $e^{\pm} \rightarrow e^{\pm} \ \gamma$

- Sviluppo dello sciame EM in atmosfera.
- Fotoni (creazione di coppie) ed elettroni (bremmstrahlung) hanno la stessa R (lunghezza di radiazione): il numero di particelle *raddoppia* ogni R.



igure 4.17. A simple model for an electromagnetic shower.

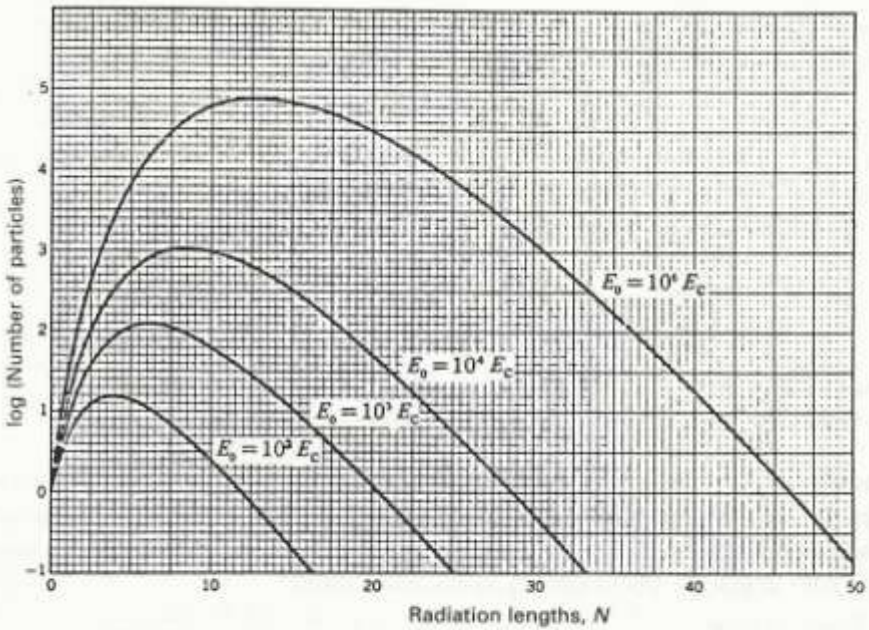


Figure 4.18. The total number of particles in a shower initiated by an electron of energy E_0 as a function of depth through the medium measured in radiation lengths N; E_c is the critical energy. (From B. Rossi and K. Greisen (1941). *Rev. Mod. Phys.*, **13**, 240.)

- Lo sciame si arresta quando l'energia media delle particelle uguaglia l'energia critica E_c.
- In aria, E_c= 80 MeV
- R(aria) ~ 40 g cm^{-2}
- Atmosfera= 25 lunghezze di radiazione

Profondità e massimo dello sciame EM

- Il numero di particelle prodotte dopo *nR:* $N=2^n$
- Energia media di ciascuna particella alla profondità *nR* in atmosfera: $E_{nR}=E_0/2^n$
- Lo sviluppo si arresta quando l'energia media di una particella uguaglia l'energia critica E_c
- Per un certo valore di n*, si verifica la condizione:

  $E_{n^*R}=E_0/2^{n^*}=E_c$ (*massimo* dello sciame)
- Il numero di particelle al massimo: $\mathbf{N_{max}=2^{n^*}=E_0/E_c}$
- La profondità (in g cm^{-2}) del massimo:

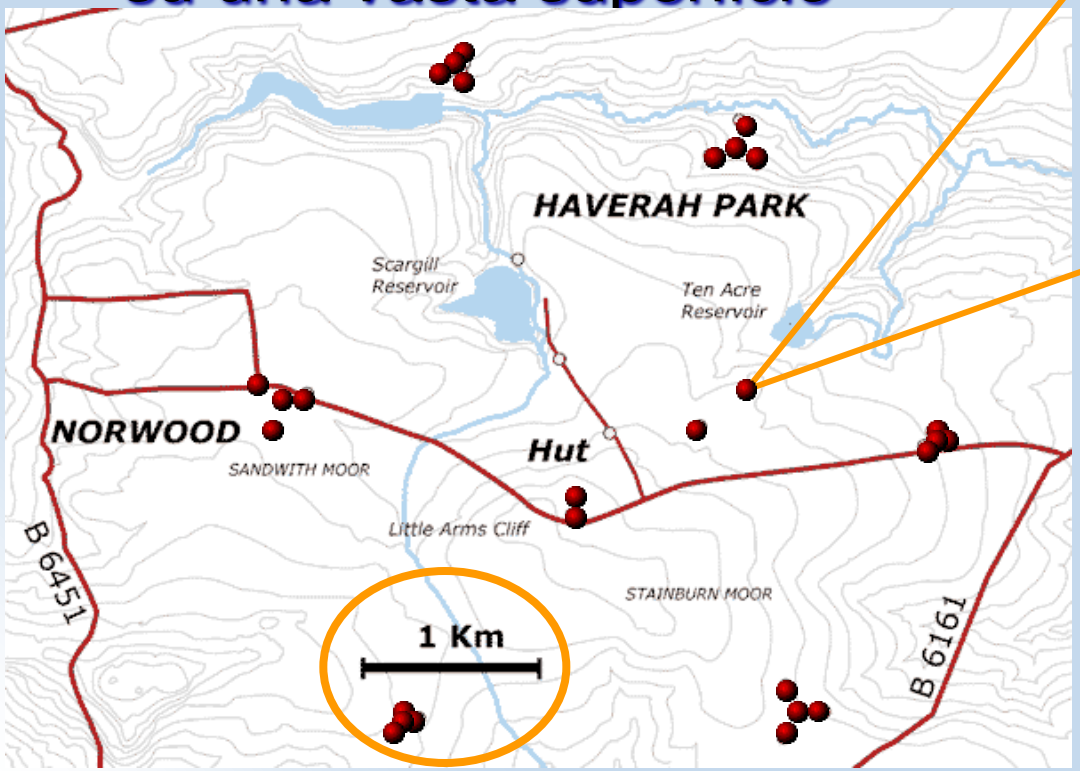
$$D=n^*R = n^* \cdot R = cost \cdot ln(E_0/E_c)$$

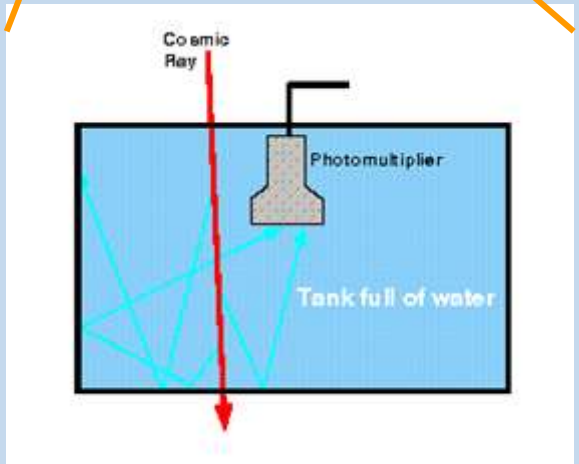
- Il numero di particella al massimo dipende linearmente da E_o
- Solo una frazione (~1/3) di E_o viene convertita nello sciame EM; dalla misura (effettuata a *campionamento* con un rivelatore di sciami estesi) del numero di particella si può risalire tramite MC ad E_o.

In genere: $E_o=(1.1 \div 1.6)\ N_{max}$ (GeV).

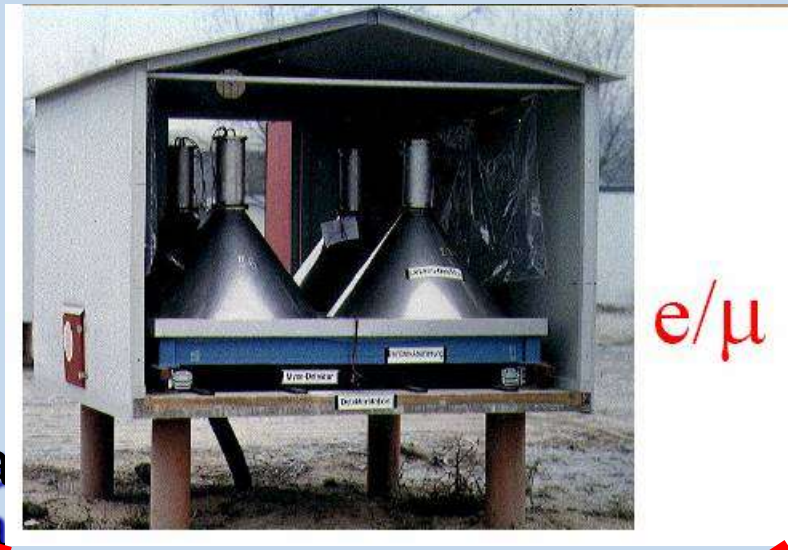
5.3 Rivelatori di Sciami

- Apparati sperimentali (Extensive Air Shower Arrays, EAS) che misurano sciami estesi sono in genere situati in alta quota.
- Misurano lo sciame "campionandolo" su una vasta superficie





- Il rivelatore di sciami KASKADE (Karlsruhe) in Germania
- Ciascuna casetta contiene un rivelatore
- Distanza media: 13 m. L'edificio centrale contiene l'elettronica necessaria per l'esperimento
- Ottimizzato per lo studio dei RC nella regione del ginocchio. Non necessita di essere molto grande.



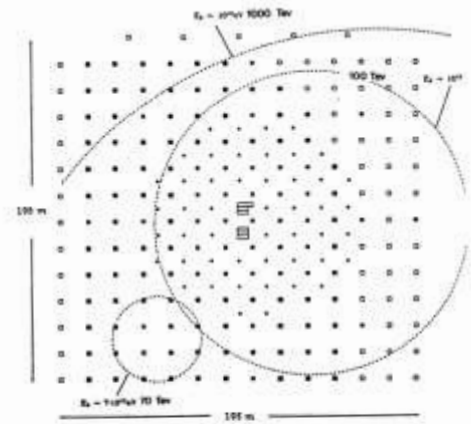


Figure 3: Effective circle (density > 1 e/m²) for electrons reaching the ground in an air shower at zenith. The energy quoted is the initial cosmic-ray energy (high-energy proton) [2].

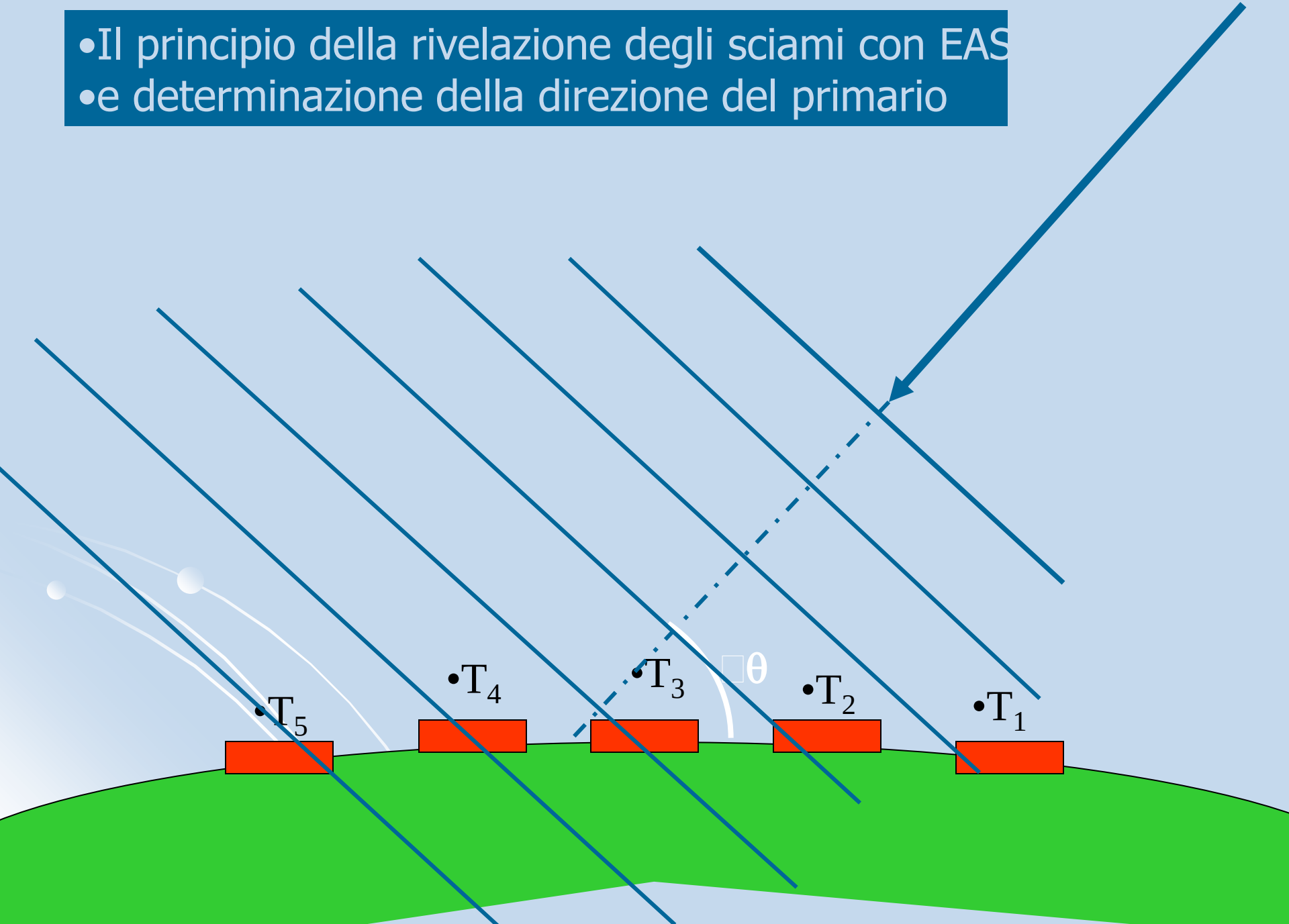
2		2	5	5	3		3	8	5	6	6	7	
2		1	1		5	7	15	12	11	11	7	9	8
2	3	2	1	7	6	11	12	21	19	11	20	17	11
4			4	4	12	11	13	22	45	38	27	18	10
1	1	3	6	4	6	6	26	43	45	81	42	39	17
2	2	3	2	9	6	14	28	65	149	340	101	33	14
	4	3	7	6	8	11	21	41	113	156	92	30	20
	2		5	4	11	11	19	33	48	69	42	22	16
1	2	3	1	6	6	14	15	22	23	22	29	14	19
1		4		2	8	6	14	19	16	22	13	9	14
	3	2		5	1	7	9	12	13	13	8	2	4
	2	3		3	4	3	6	7	5	6	9	5	7
1	1	2	2	4	2	2	3	2	2	4	4	5	1
		1		2		3	4	3	2	4	2		1

Fig. 8.13. Map of an air shower in a 196 detector array on a 15 m grid. The densities from (8.18) fluctuate with a Gaussian distribution with $\sigma = \sqrt{\rho}$. Because of that some detectors do not trigger.

LA FISICA DELLO SCIAME ESTESO

- La distanza media tra i contatori determina la *energia minima* dello sciame rivelabile.
- Il numero dei contatori, la *precisione* della misura
- L'area totale coperta, determina la *massima energia* misurabile.
- Ciascun contatore (*casetta*) misura in modo proporzionale la perdita di energia delle particelle che lo attraversa; da qui, si risale al numero di particelle incidenti
- Dalle misure della densità di particelle in ciascuna casetta dell'array, si risale alla distribuzione laterale *D(r)* e quindi all'energia del primario.
- Dalla *frequenza del numero di conteggi* si risale al flusso.
- **La direzione dello sciame può essere determinata dalla *misura dei tempi di ritardo temporale* nell'arrivo dello sciame su diverse casette (le particelle dello sciame sono ⊥ al suo asse)**

- Il principio della rivelazione degli sciami con EAS
- e determinazione della direzione del primario



La misure del flusso RC con EAS

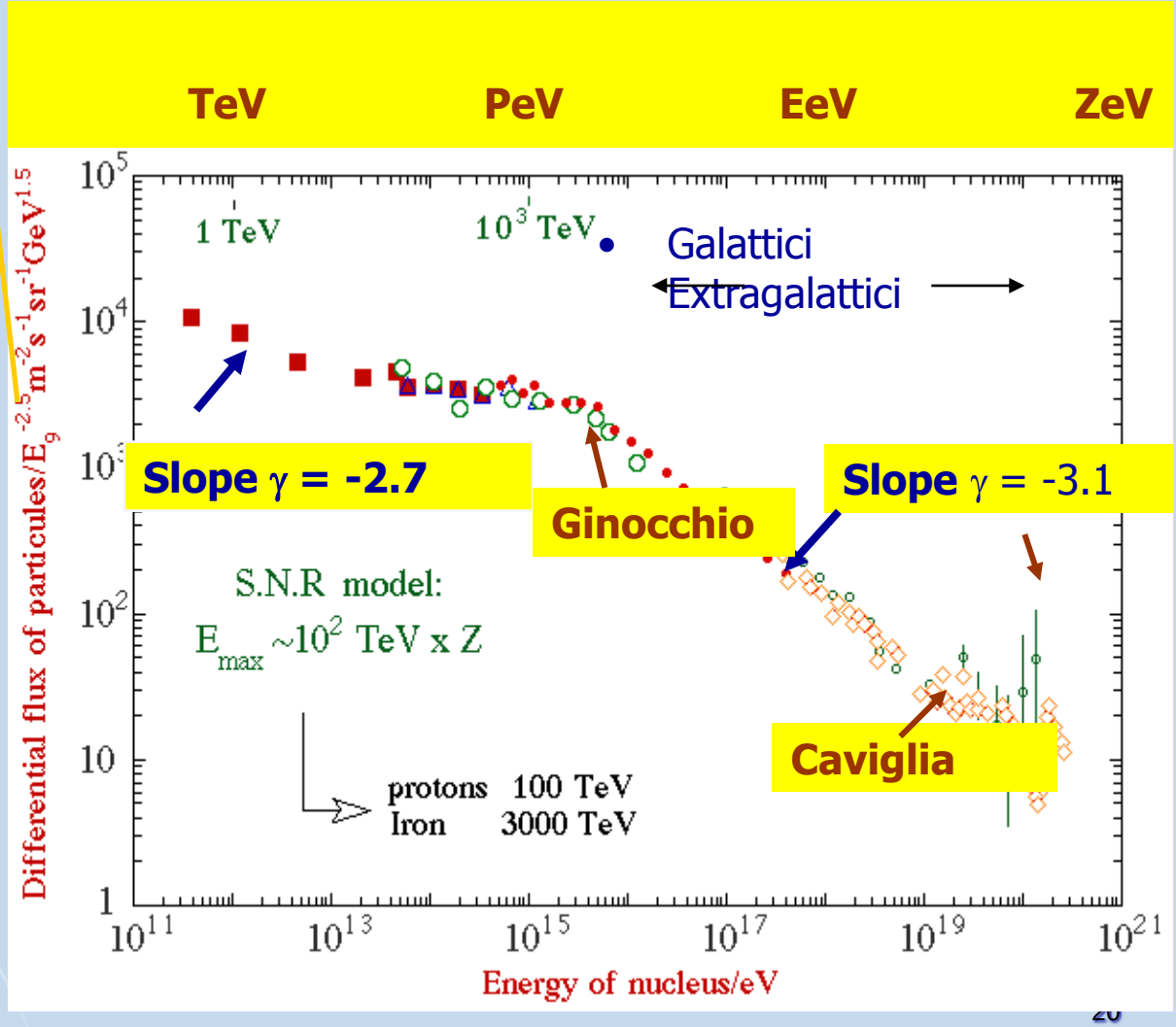
- Gli EAS sono diversi, la misura dell'energia del primario è affetta tipicamente da errori sistematici del 20%
- Lo spettro energetico misurato nell'intervallo 10^{16}<Eo<10^{19} eV è dato dalla funzione:

$$\Phi(E) = K \cdot E^{-3.1} \qquad cm^{-2}\, s^{-1} sr^{-1} GeV^{-1}$$

- La regione tra 10^{14}<Eo<10^{15} eV è detta ***Ginocchio***, a causa del cambiamento di pendenza.
- I RC sono completamente isotropi.
- I RC si arricchiscono di nuclei pesanti nella regione oltre il ginocchio, sino ad energie Eo<10^{19}.

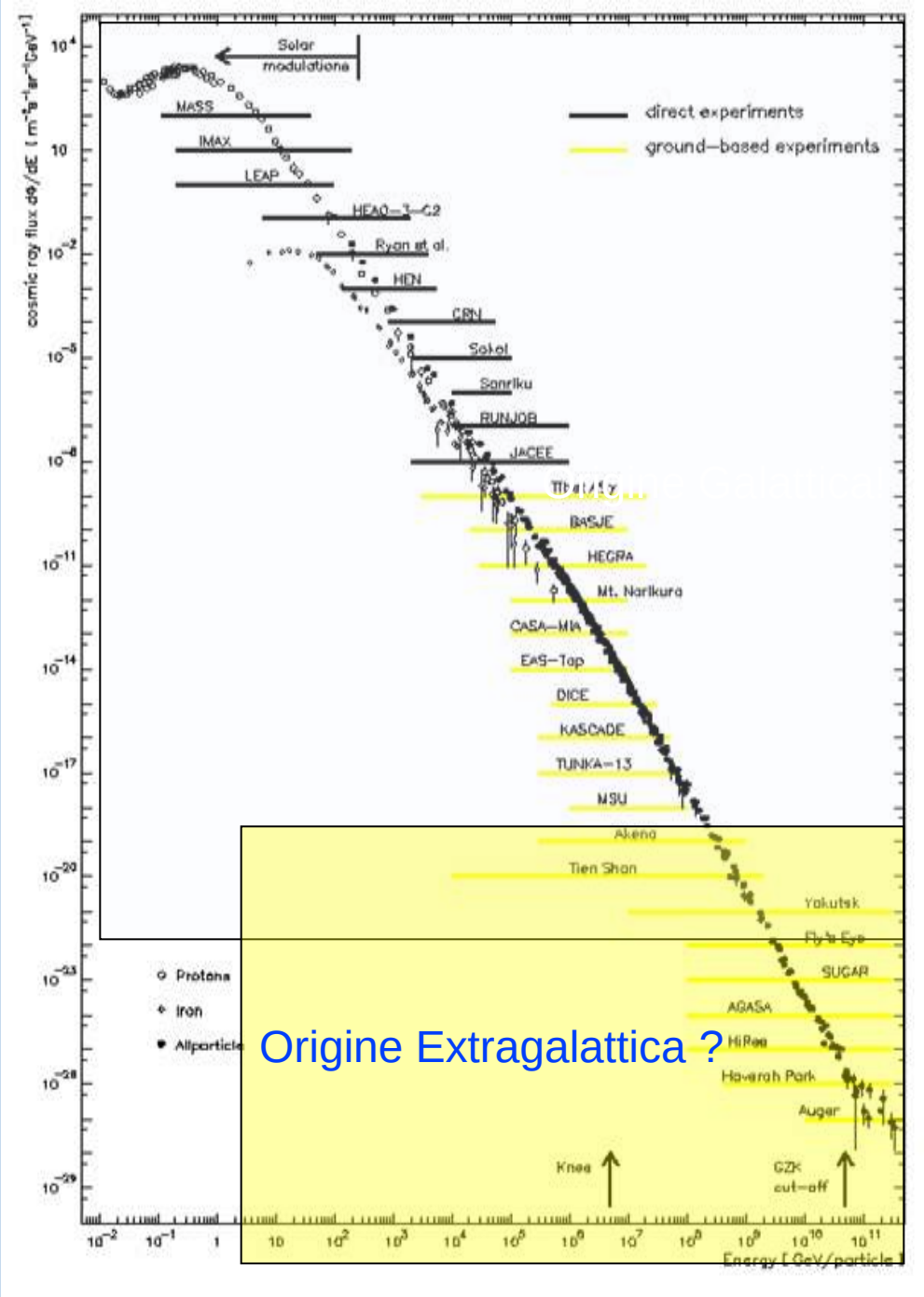
Ancora lo spettro dei RC, ma…

L'asse y viene moltiplicato per $E^{2.5}$, in modo da rendere "più piatta" la figura, ed accentuare il ***cambiamento di pendenza!***

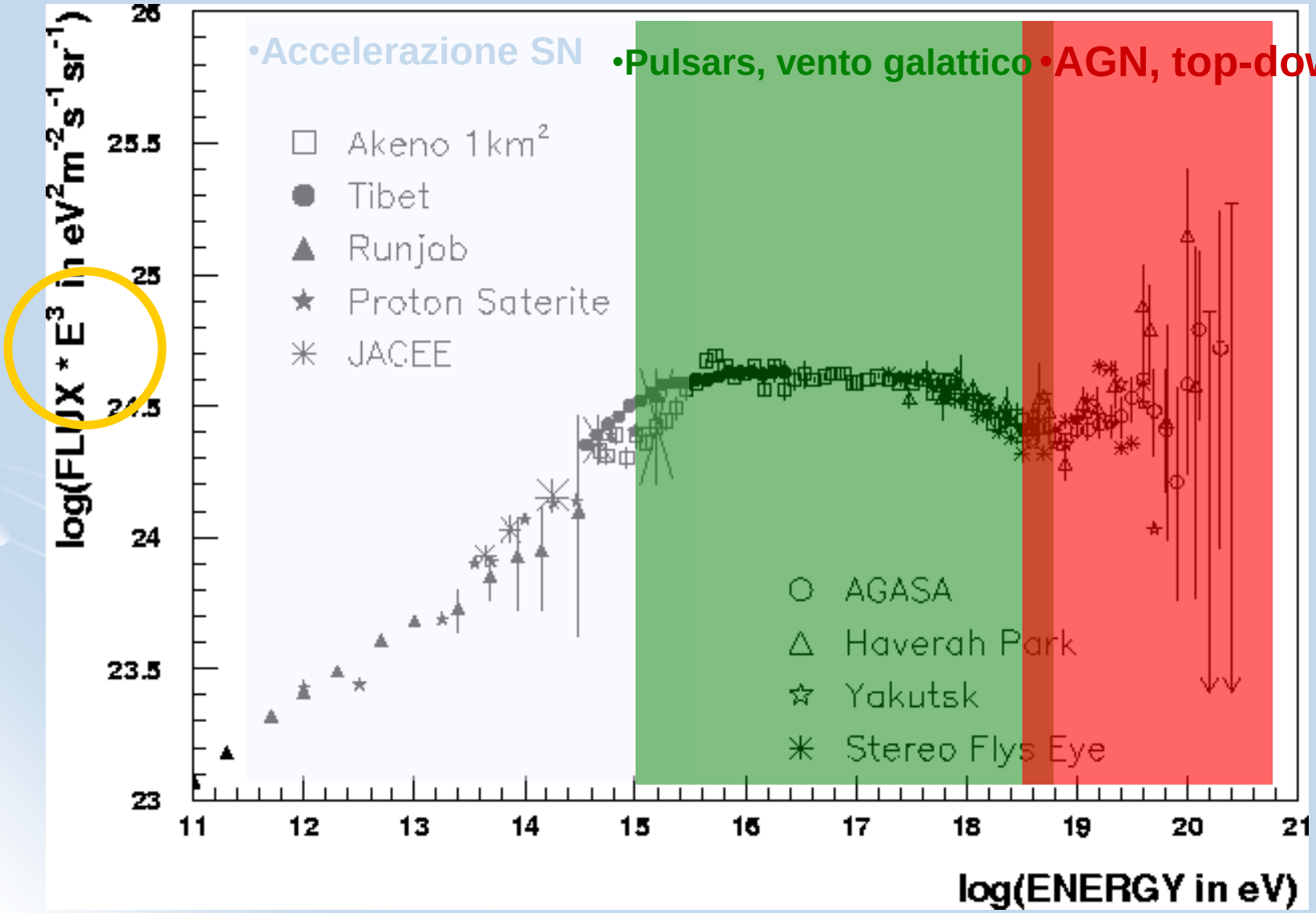


RC di energia estrema

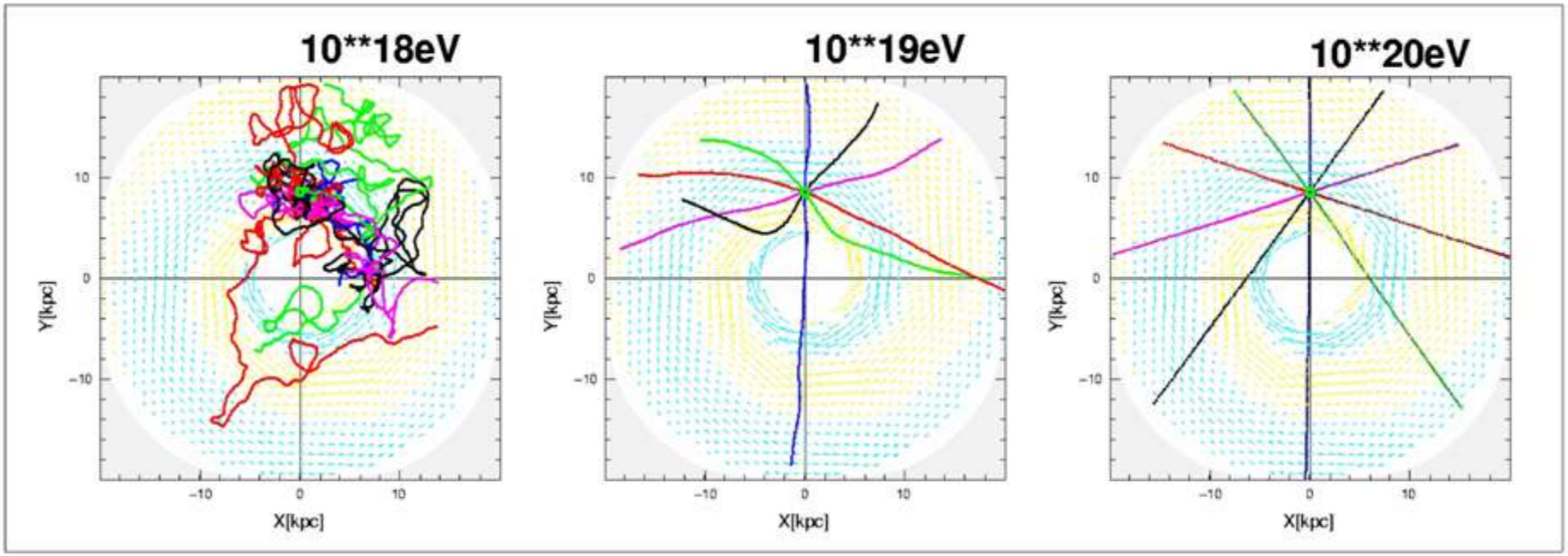
- I RC di elevata energia (>10^{19} eV) sono estremamente rari, a causa del basso flusso.
- Occorrono enormi superfici attrezzate per rivelarli.
- La loro origine è incerta: non si conoscono oggetti nella Galassia in grado di fornire tanta energia.
- I RC di energia estrema sono probabilmente di origine extragalattica!



Dati e sorgenti ipotizzate



Confinamento (richiamo)

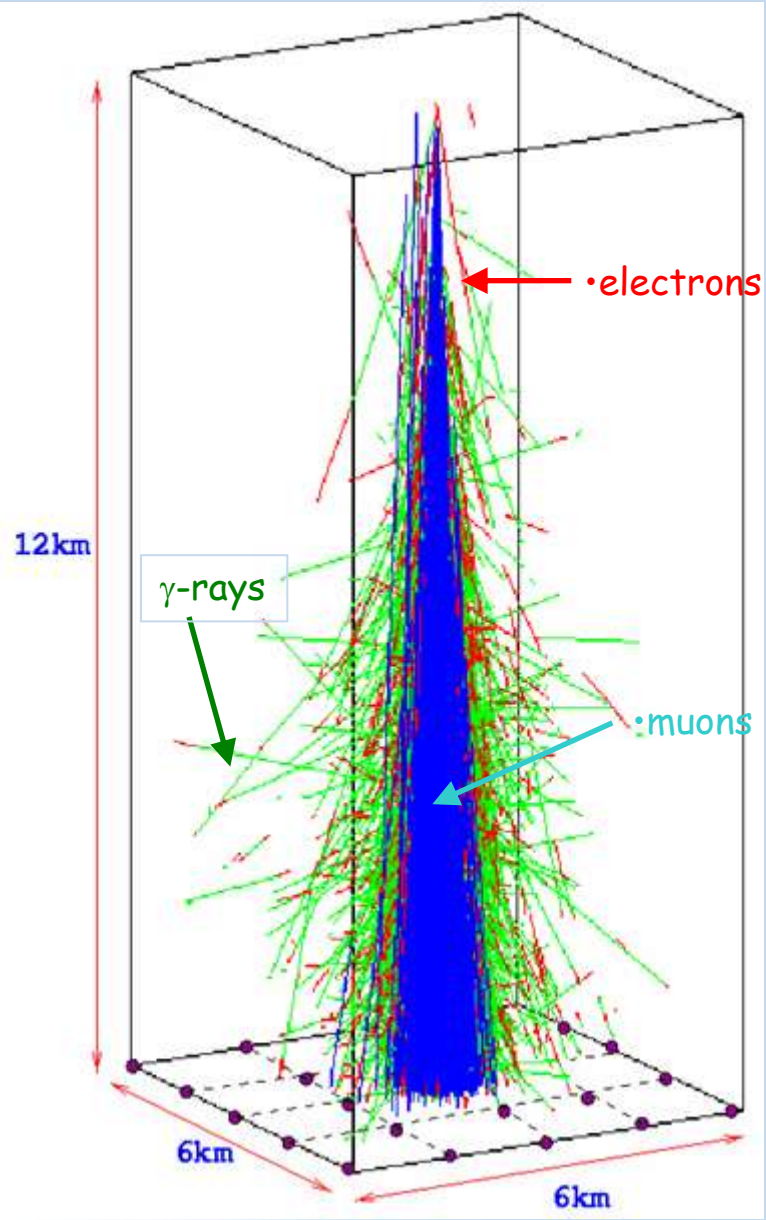


- ~ 10^{18} eV: RC ben confinati nella galassia
- ≳ 10^{19} eV: sorgenti extragalattiche
- ~ 10^{20} eV la deviazione nella galassia è inferiore ad 1°

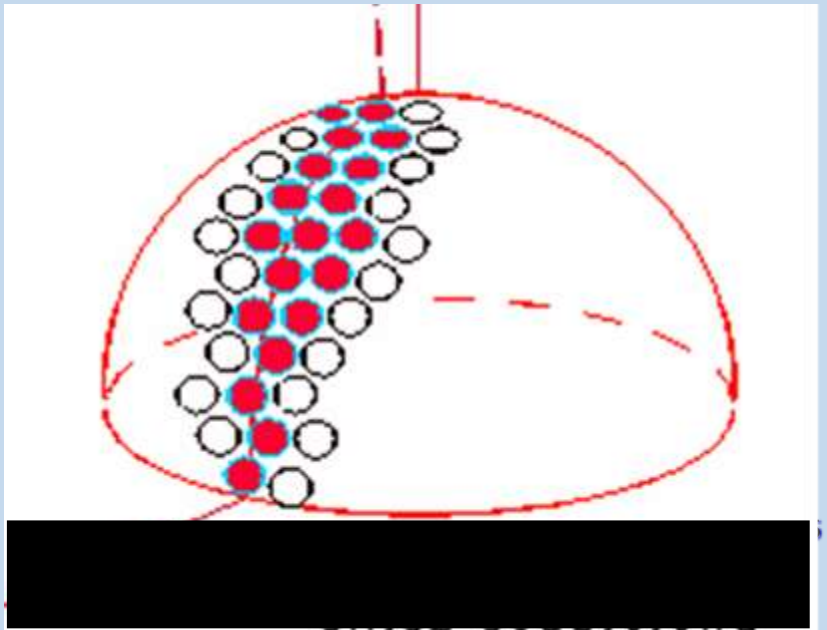
Altri metodi di Rivelazione

- Le particelle cariche dello sciame EM che giungono al suolo possono essere rivelate da **rivelatori di sciami estesi** (EAS)
- Gli sciami di particelle producono anche **luce nell'atmosfera per effetto Cerenkov** (gli elettroni con E>20÷30 MeV).
- La luce Cerenkov può venire rivelata (**telescopi Cerenkov**) nelle notti senza luna da appositi rivelatori al suolo.
- Gli sciami EM inducono anche **l'eccitazione dell'azoto atmosferico**, che riemette irraggiando luce. Questa fluore-scenza può essere rivelata al suolo (**Rivelatori fluorescenza**).
- La componente di muoni può essere rivelata da rivelatori "**underground**".

Rivelatori di sciami di alta energia

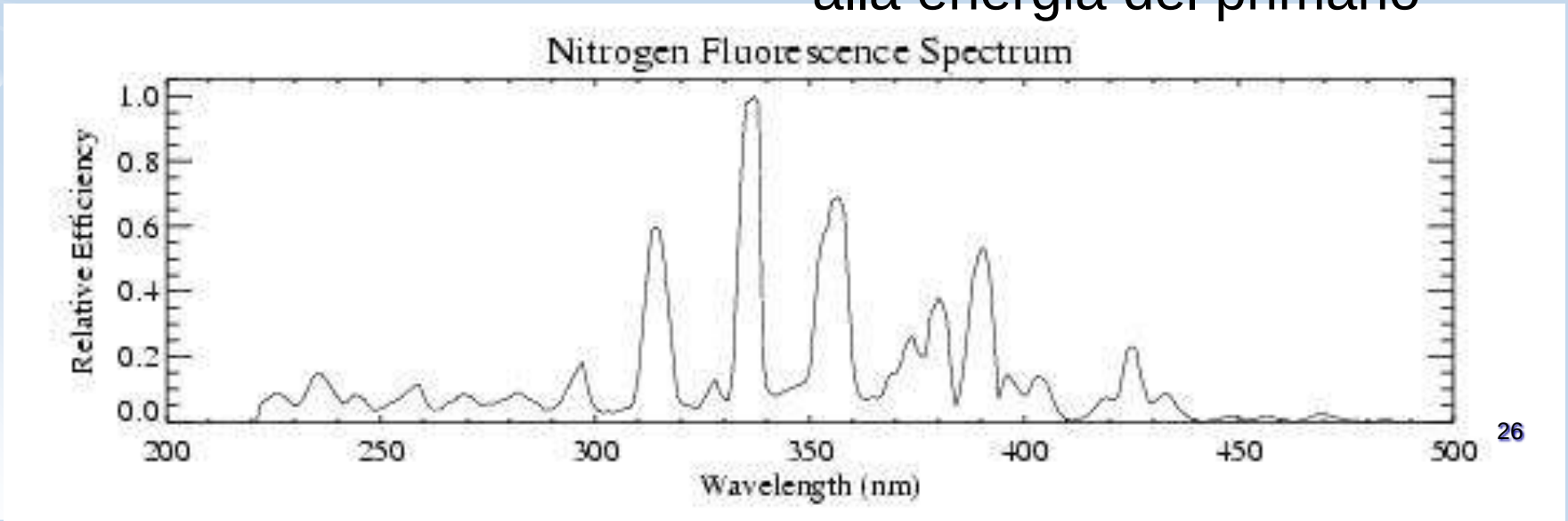


- Rivelatori di radiazione Cerenkov e fluorescenza in atmosfera (HiRes)
- Rivelatori al suolo (array) di vario genere (AGASA)
- Miste (AUGER)



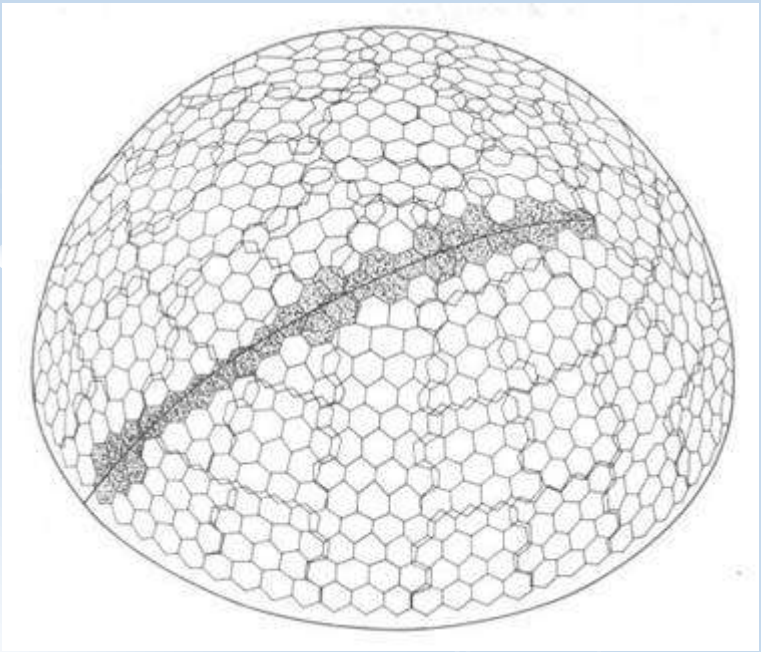
Il rivelatore Fly's Eye (USA)

- Utah, 160 km da Slat Lake City
- Specchi con fotomoltiplicatori rivelano la fluorescenza (visibile e UV) di N_2 indotta dalla cascata
- Si può quindi studiare lo sviluppo dello sciame e risalire alla energia del primario



Il rivelatore Fly's Eye - 2

- 67 specchi con PM osservano la volta celeste
- È possibile ricostruire il profilo della cascata

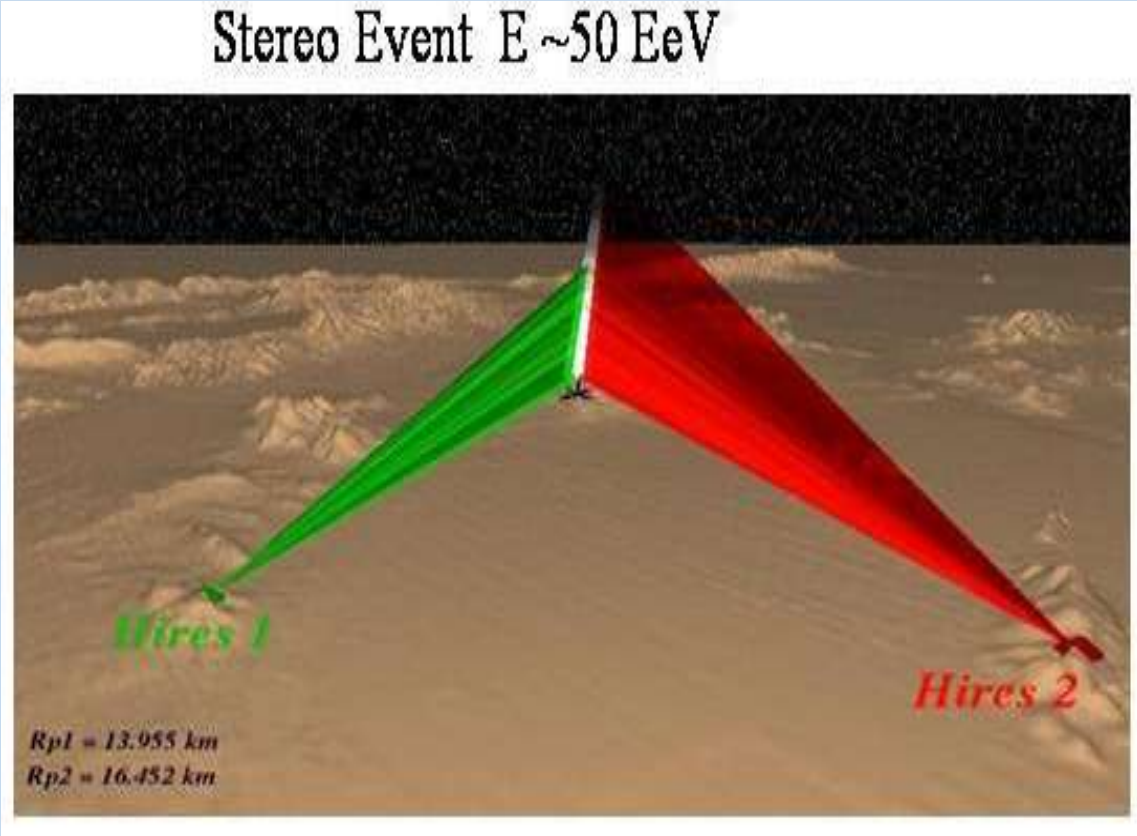


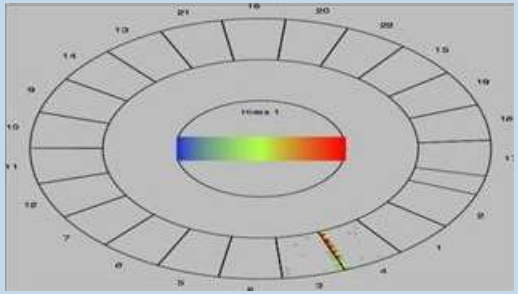
- Si misura così energia (sviluppo shower) e direzione del primario

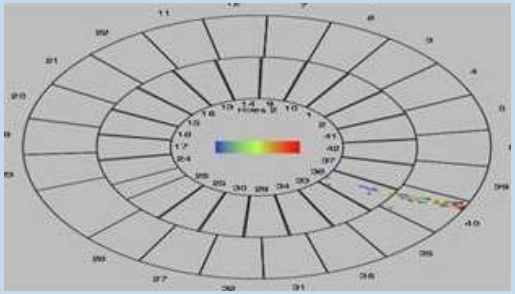
- FE2: visione stereoscopica

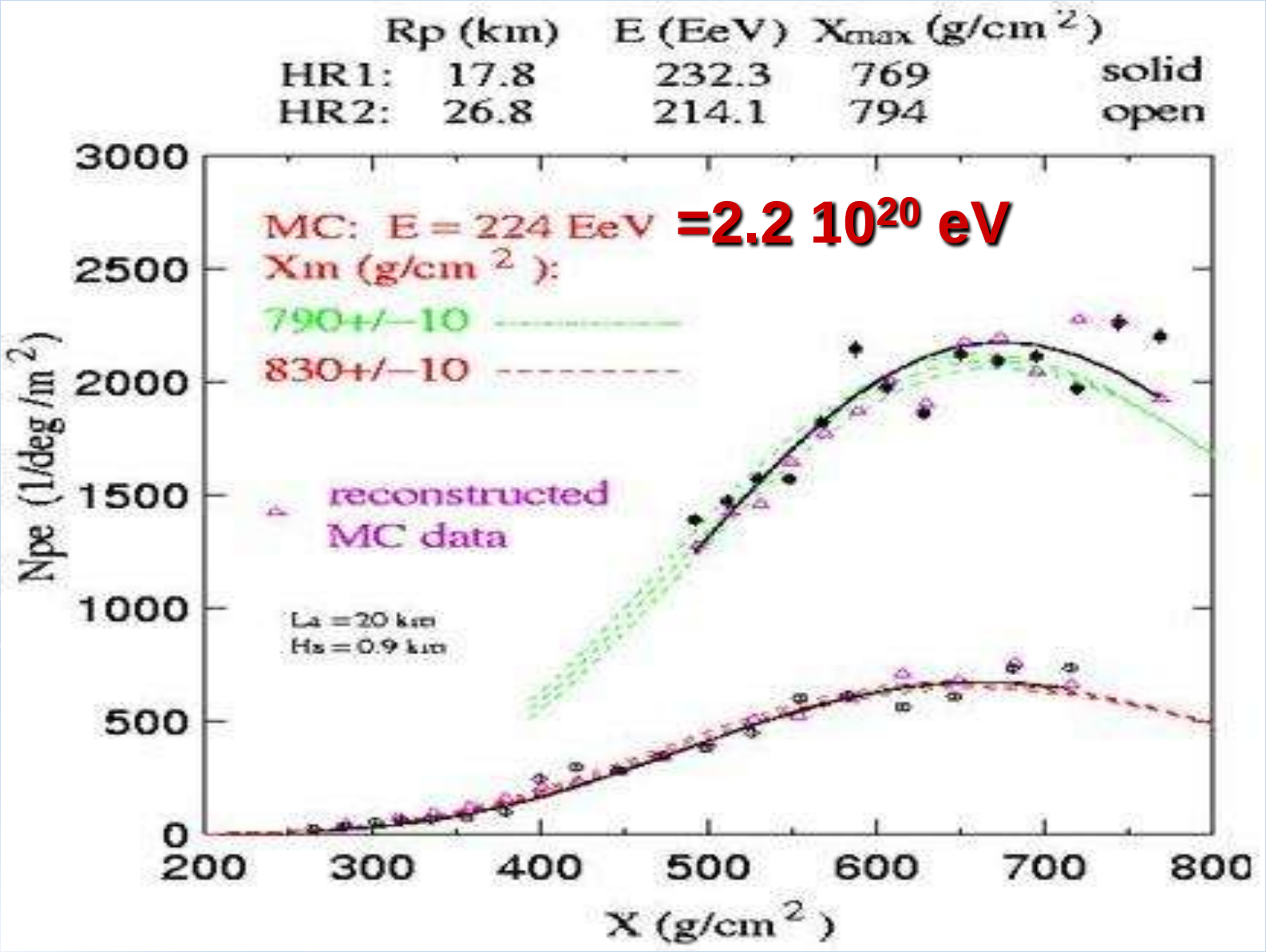
Fly's eye→HiRes

- *Stereo* Hires: due insiemi di rivelatori per ricostruire in 3D lo sviluppo dello sciame
  - Migliore risoluzione angolare, studio correlazioni a piccoli angoli
  - Migliore comprensione della composizione chimica dei primari



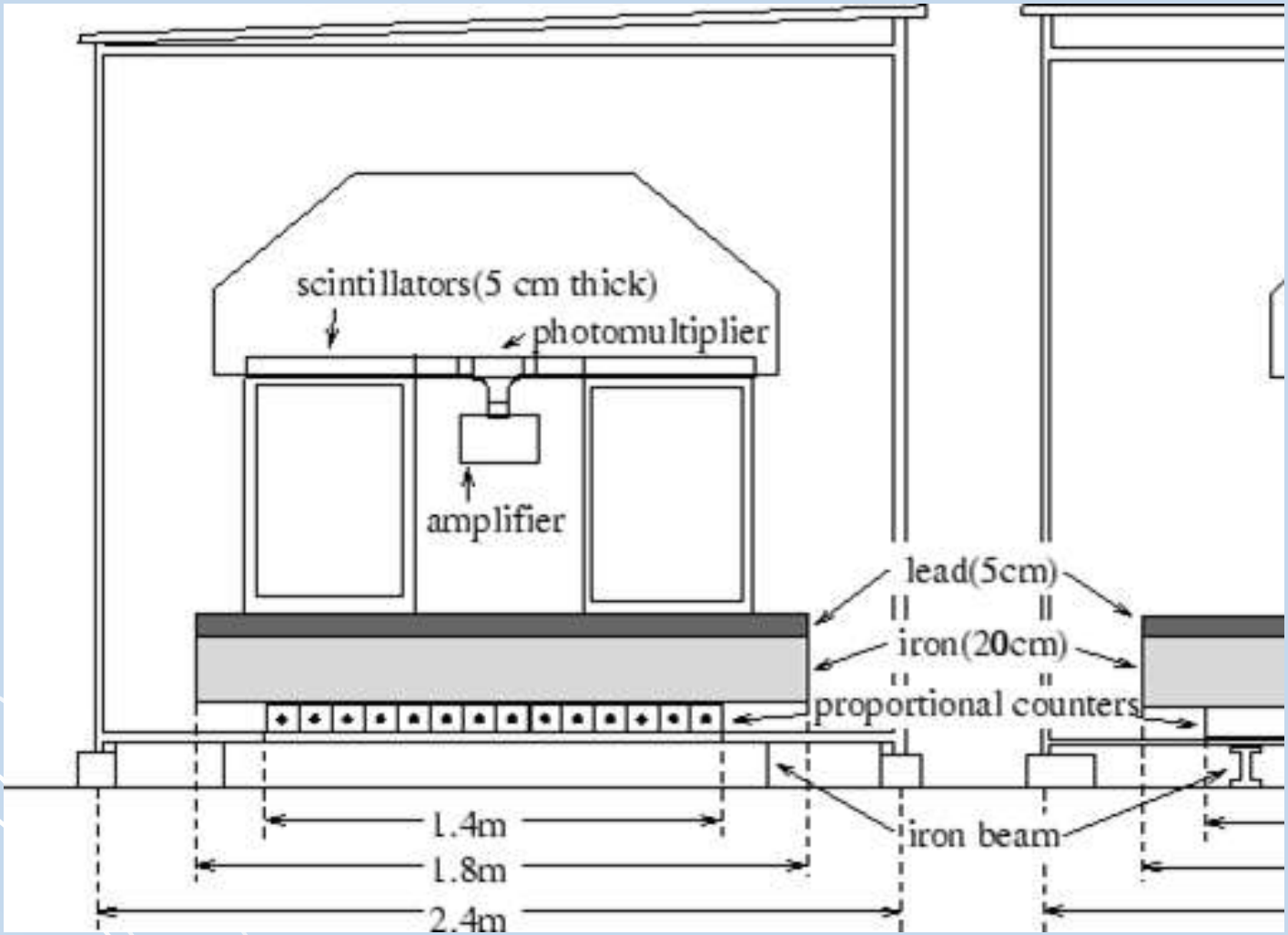





Rp (km) E (EeV) Xmax (g/cm 2)
HR1: 17.8 232.3 769 solid
HR2: 26.8 214.1 794 open
MC: E = 224 EeV =2.2 10^20 eV
Xm (g/cm 2):
790+/−10
830+/−10
reconstructed
MC data
La = 20 km
Hs = 0.9 km
Npe (1/deg/m 2)
X (g/cm 2)
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
200
300
400
500
600
700
800

Agasa (Giappone)

- 100 km^2, 111 rivelatori a scintillazione, 27 per muoni, separazione ~1 km – $5 \cdot 10^{16}$ m^{2}s sr
- per E>10^{19} eV, θ < 45°


scintillators(5 cm thick)
photomultiplier
amplifier
lead(5cm)
iron(20cm)
proportional counters
iron beam
1.4m
1.8m
2.4m