

I Raggi Cosmici alle energie estreme dallo spazio

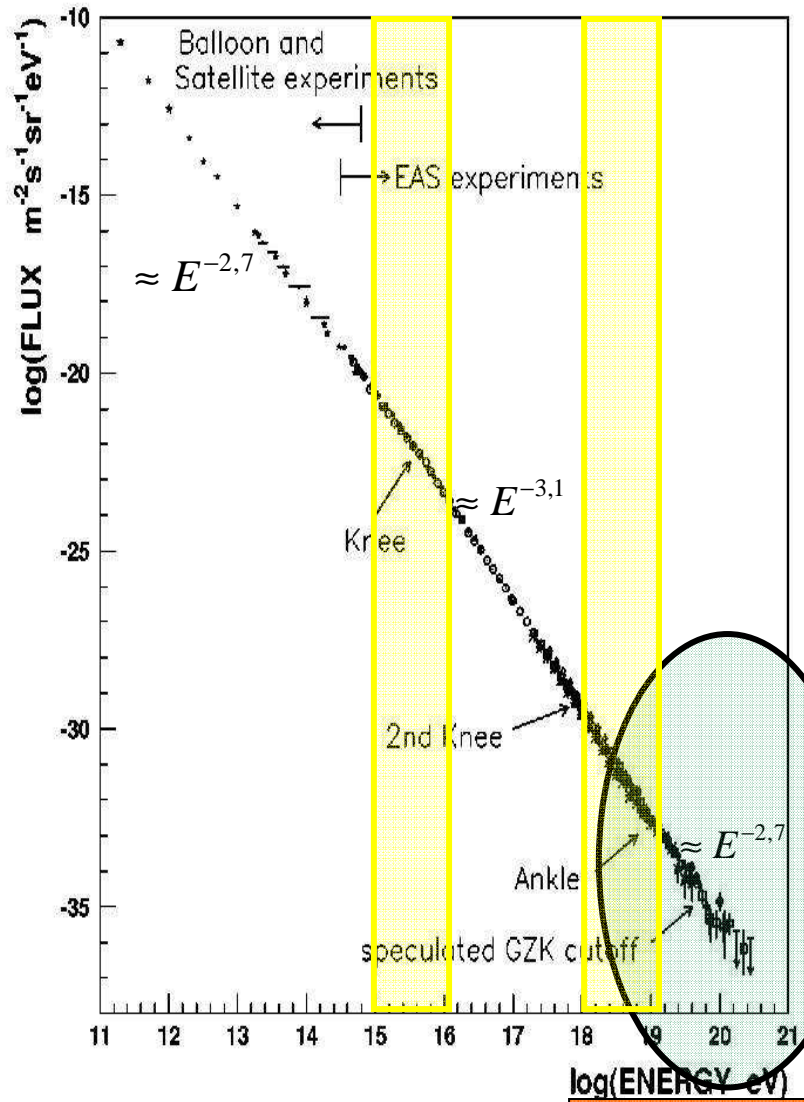
(Cosmic ray at extreme energy from space)



Relatore : Mario Bertaina

Co-Relatore : Piero Galeotti

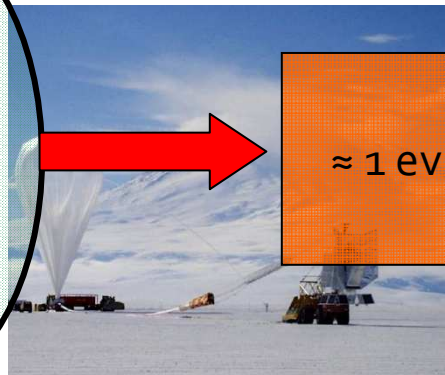
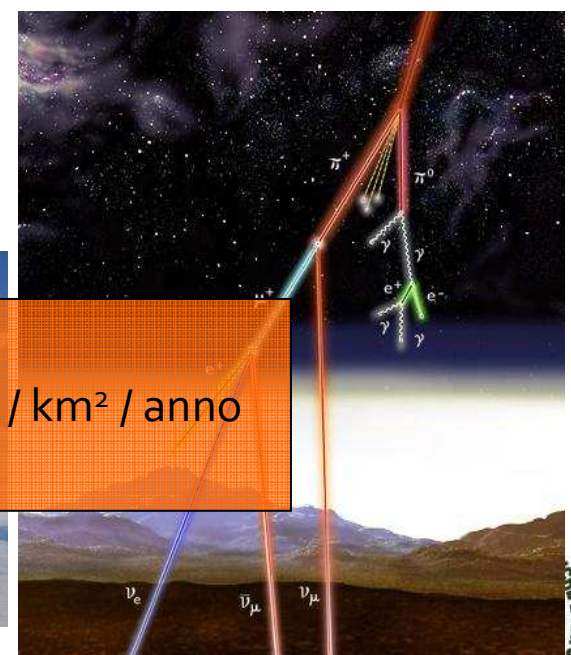
Lo spettro dei raggi cosmici



- Ha delle variazioni nella pendenza
- Si estende su diversi ordini di grandezza
- Le misure dirette si arrestano a $\approx 10^{15}$ eV
- Per osservare gli eventi alle alte energie è necessario misurare lo sciame di particelle prodotte nell'interazione del raggio cosmico primario con l'atmosfera



E.A.S. (Extensive Air Shower)



$\approx 1 \text{ ev} / \text{km}^2 / \text{anno}$

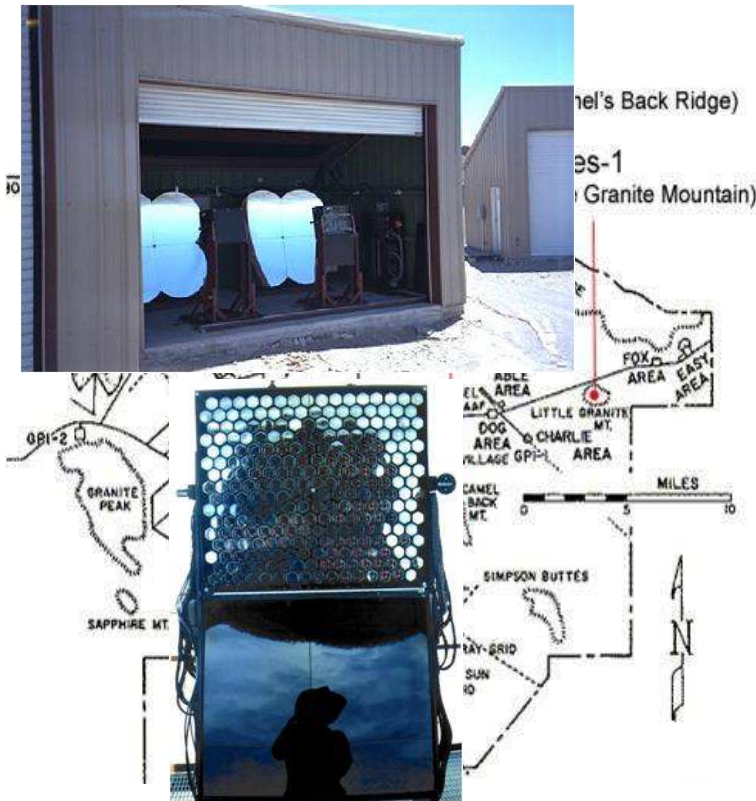
Energie estreme



HI-RES

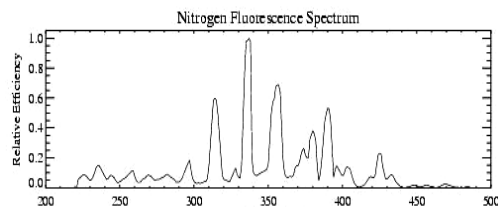
AGASA

≈ 100 Km²



Luce di fluorescenza

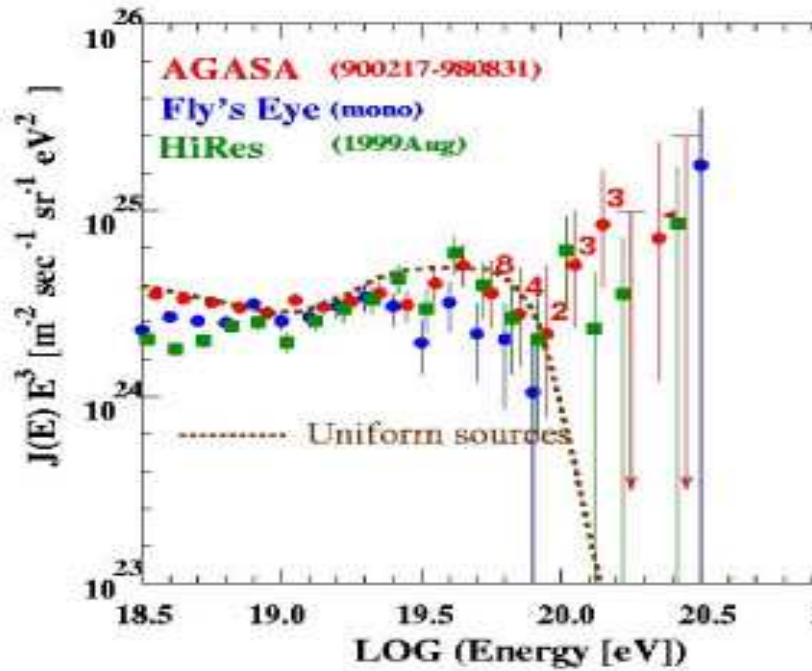
- misura colorimetrica
- traccia sciame e.m.



Array di rivelatori di particelle

- osserva una sezione dello sciame
- Ricostruzione dell'energia dal flusso di particelle a terra

I dati sperimentali

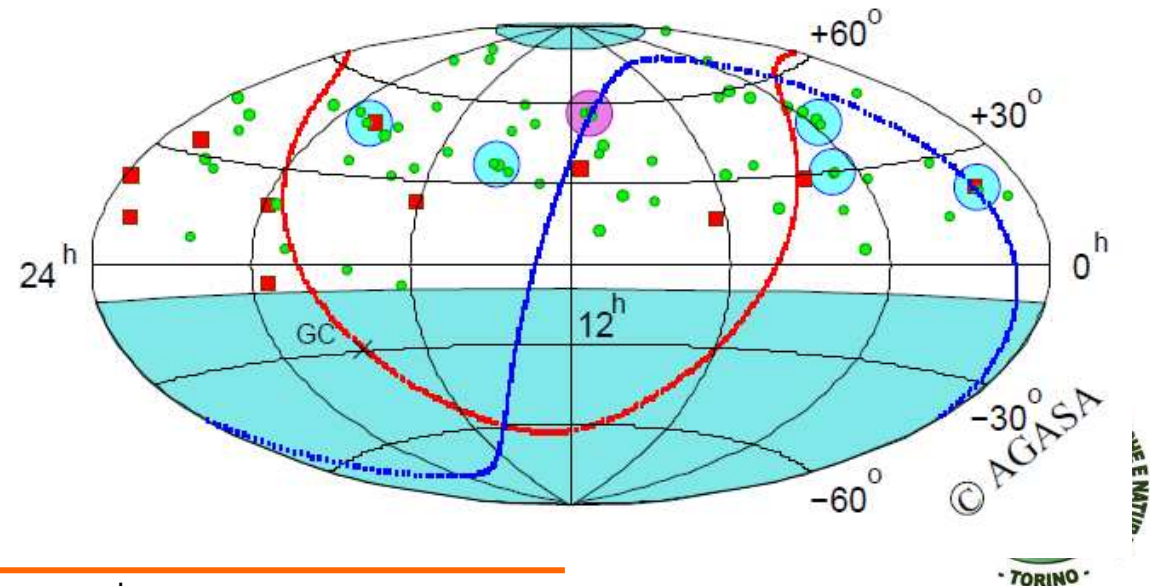


Discrepanza tra gli spettri misurati

Hi-res → aumento della pendenza tra 10^{19} e 10^{20} eV

AGASA → eventi oltre 10^{20} eV

Direzioni d'arrivo (AGASA)



Hi-res → Correlazione con BL-Lacs

Segni dell'interazione p-CMB

- CMB (Cosmic Microwave Background) prevista da Gamow nel 1948 e scoperta da Penzias e Wilson nel 1960

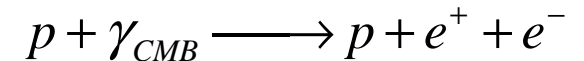


Spettro di corpo nero con T caratteristica = 2,725 K

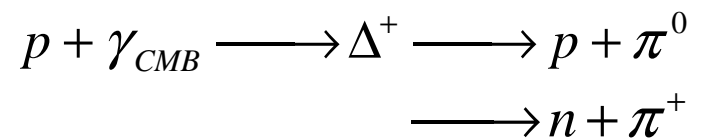
I principali processi di perdita di energia sono



Produzione di coppie



Produzione di pioni

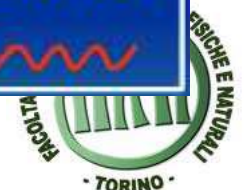
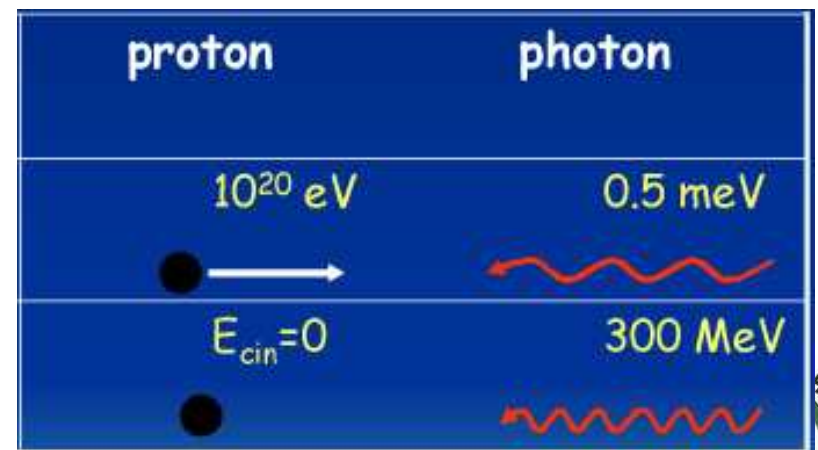


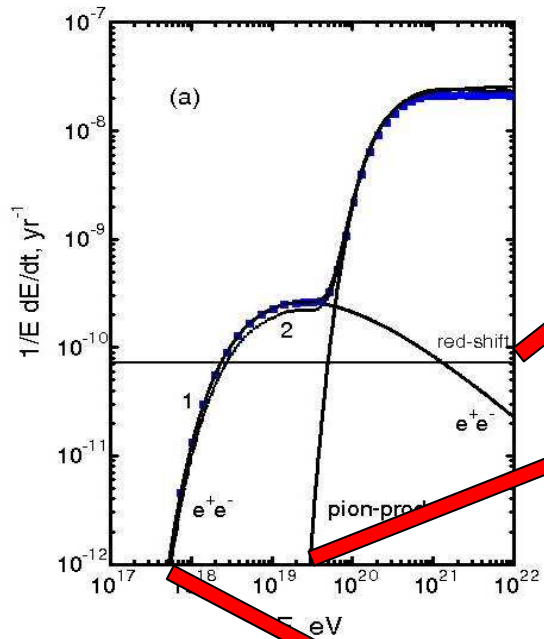
Nel S.R. del protone a riposo, l'energia di soglia per la produzione di π è :

$$E_{\gamma}^{lab} = m_{\pi} \left(1 + \frac{m_{\pi}^2}{2m_p} \right) \cong 160 \text{ MeV}$$

Che significa raggi γ di altissima energia

Per un protone altamente energetico l'energia disponibile nel c.m. può essere sufficiente a innescare queste reazioni





Perdite adiabatiche di energia

L'energia di soglia per la produzione di pioni è:

$$E_{\pi}^{thr} = \frac{m_{\pi}(m_p + m_{\pi})}{2\varepsilon} \cong 6,8 \times 10^{19} \text{ eV}$$

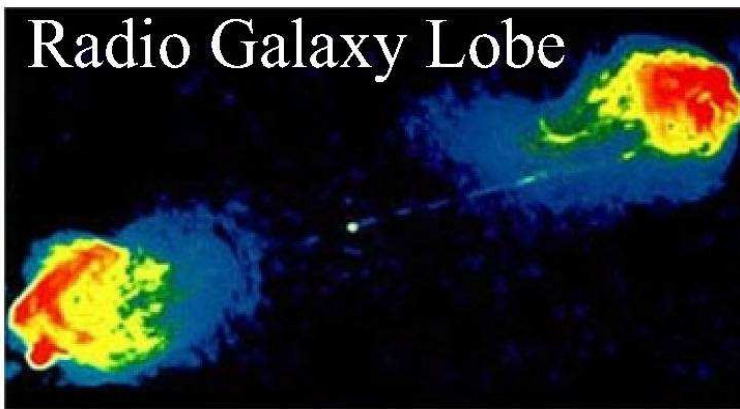
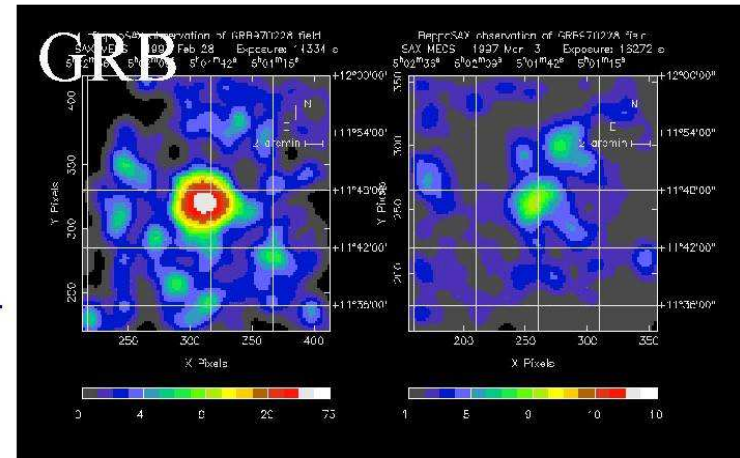
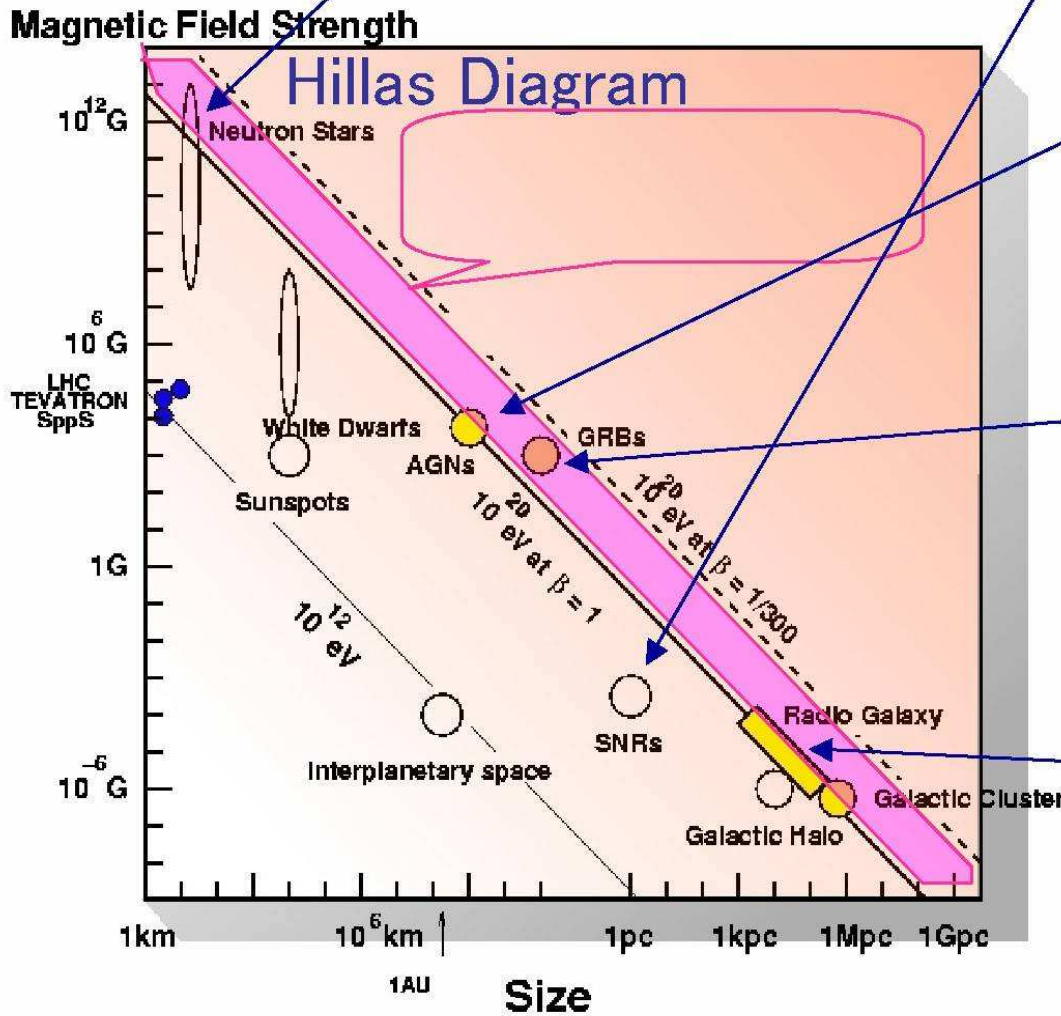
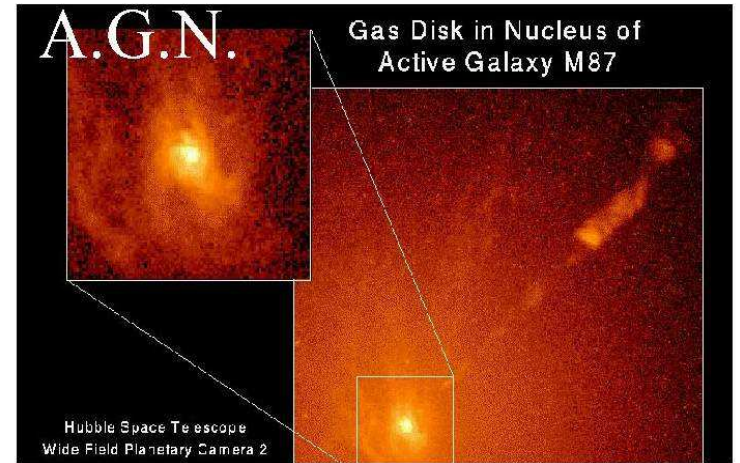
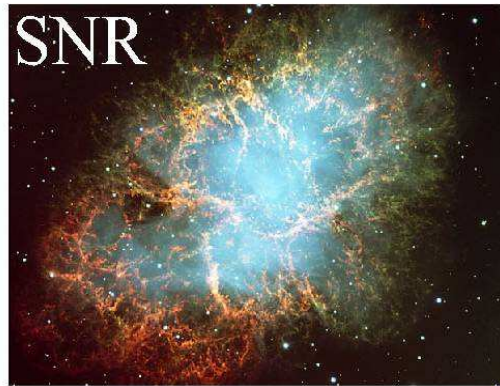
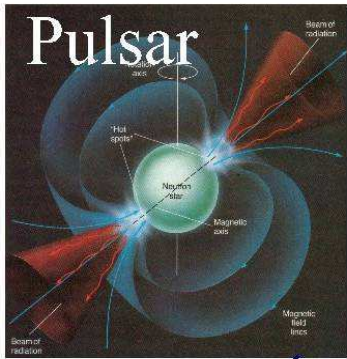
L'energia di soglia per la produzione di coppie è :

$$E_{e^{\pm}}^{thr} = \frac{m_e(m_p + m_e)}{\varepsilon} \cong 4,8 \times 10^{17} \text{ eV}$$

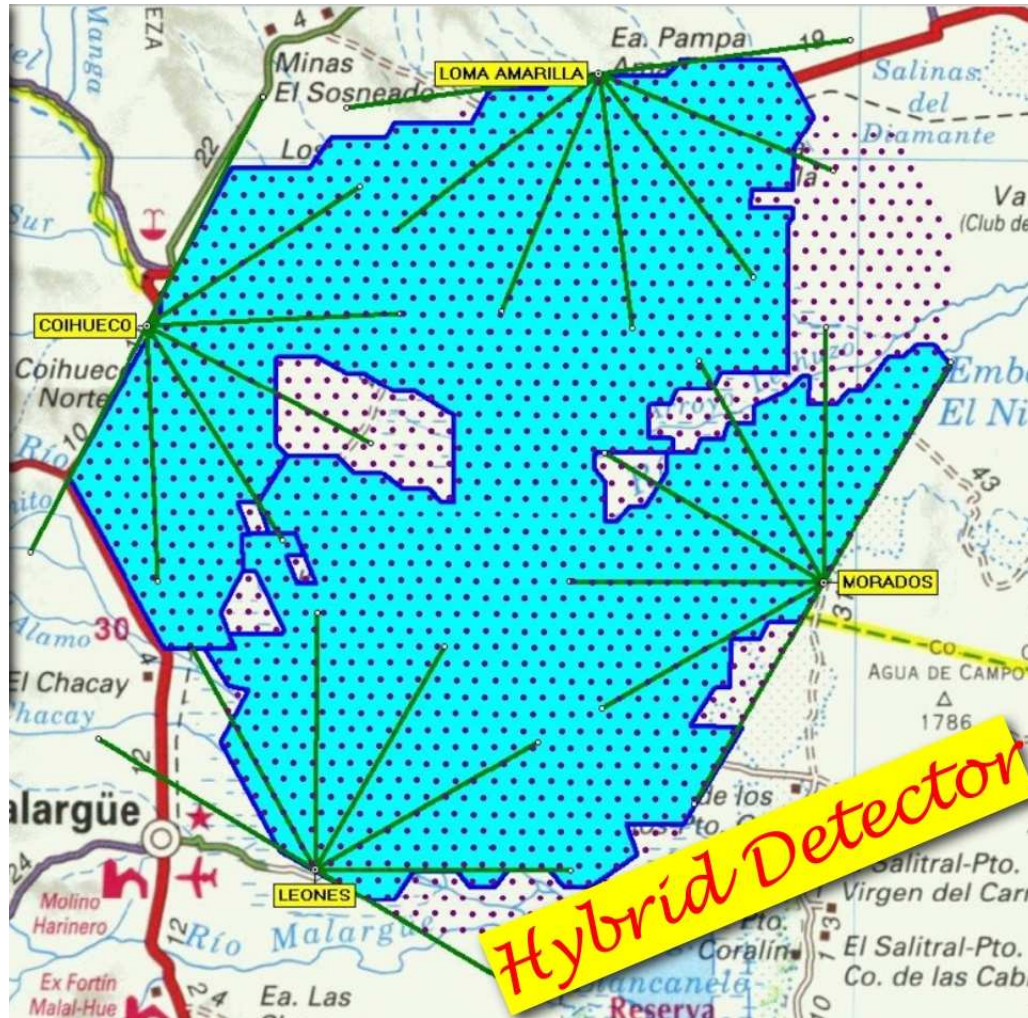
I valori tipici dell'energia dei fotoni sono $\varepsilon \approx 10^{-3} \text{ eV}$

Particelle accelerate in sorgenti oltre 50 Mpc risentono di quest'effetto





Auger

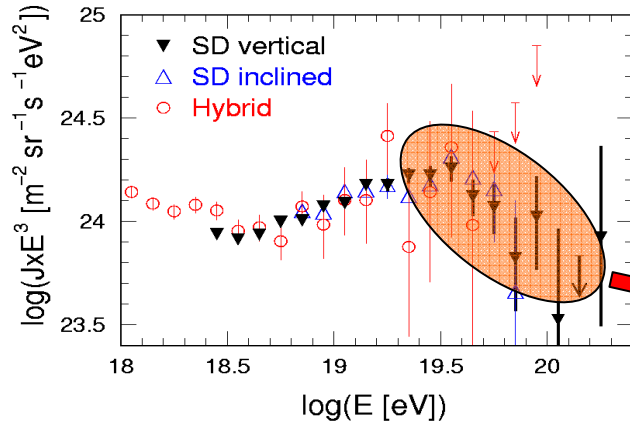


≈ 3000 Km²

- Luce fluorescenza
 - Array a terra
- Eventi ibridi : rivelati da entrambi gli apparati

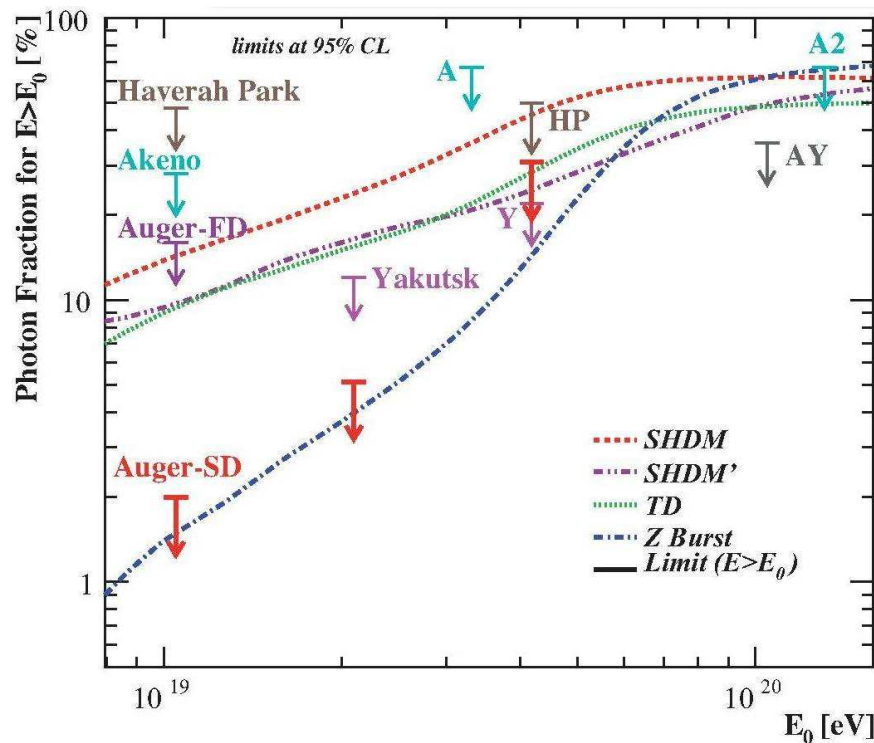
Avendo un'accettanza maggiore la statistica e' piu' elevata



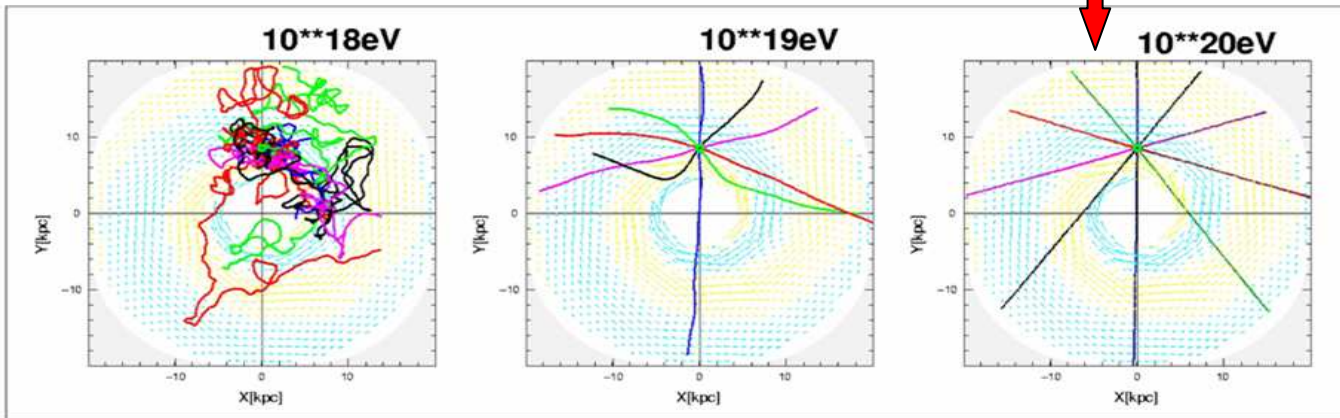
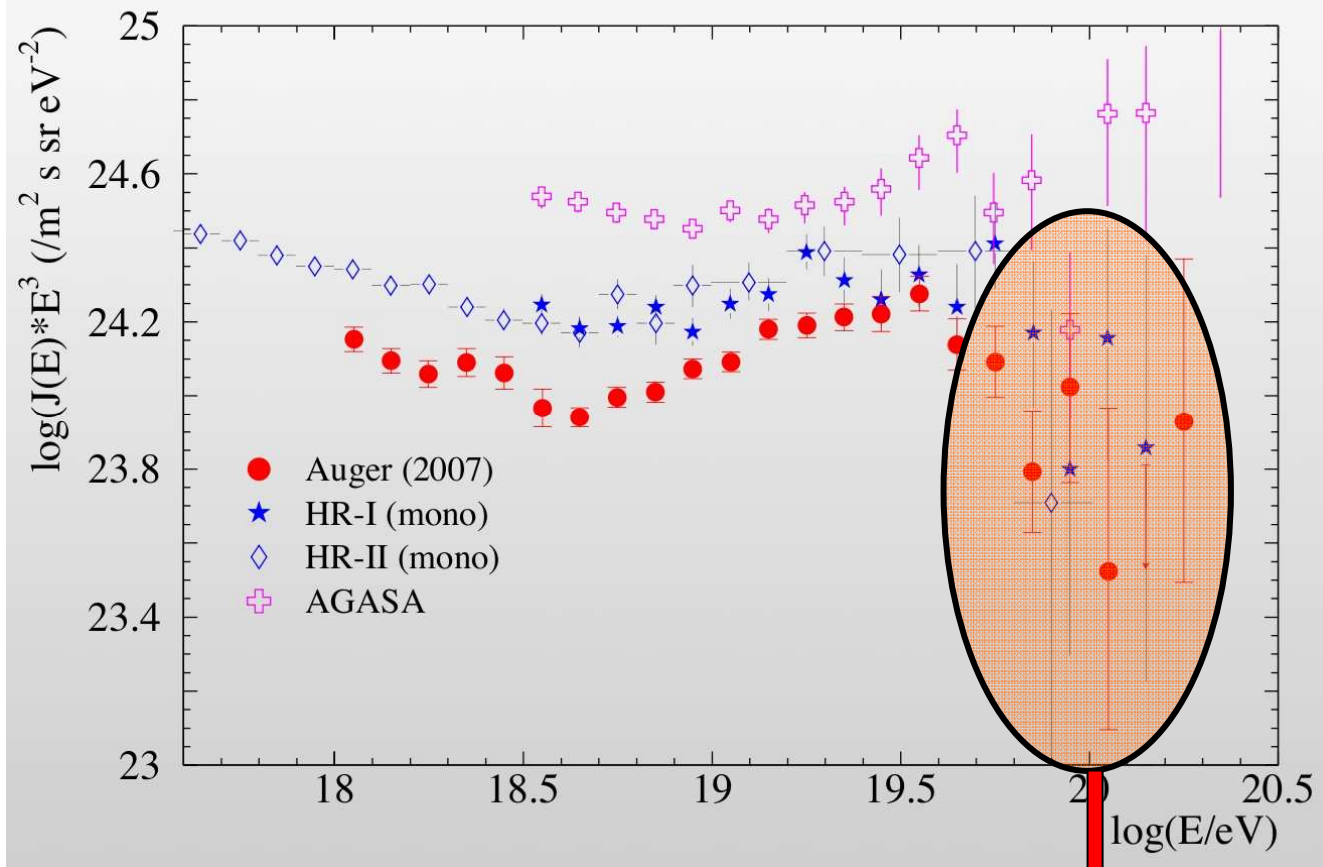


- Solo 2 eventi osservati oltre 10^{20} eV
- L'indice spettrale per la regione tra $10^{19,6}$ e 10^{20} misurato da Auger è $\gamma = 4.14 \pm 0,42$
- Mancanza di eventi alle più alte energie

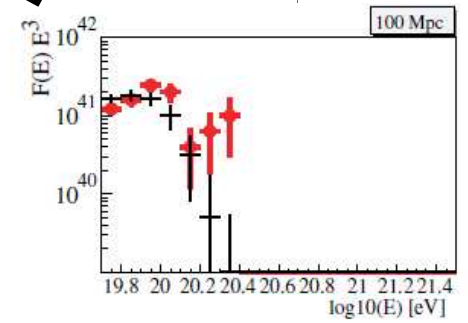
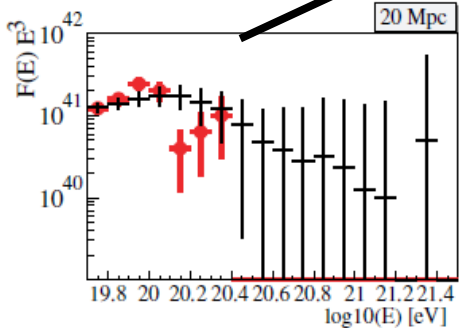
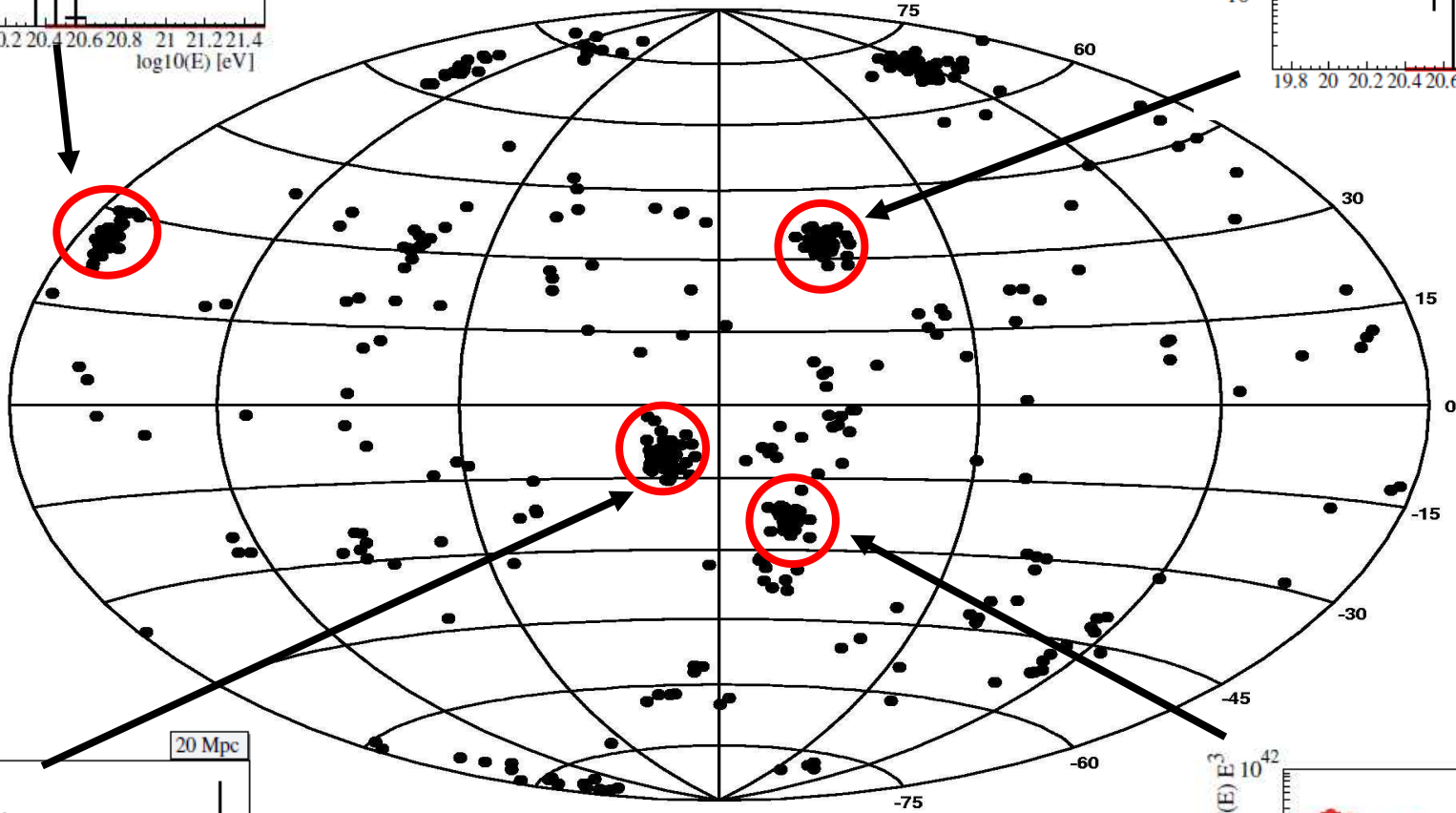
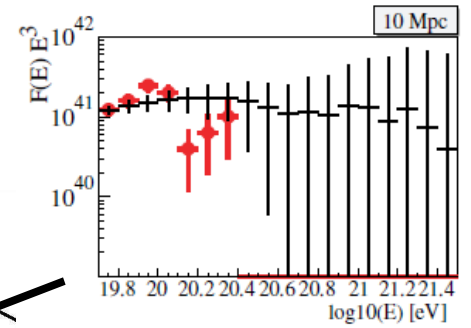
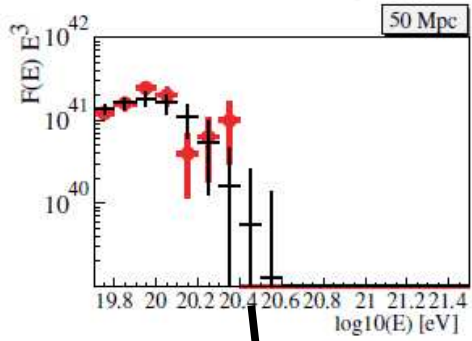
$E^{-4,14}$, GZK?



Limite superiore alla presenza di γ nei primari oltre 10^{19} eV

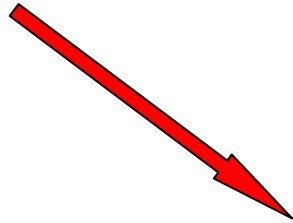


Se avessimo >1000 eventi

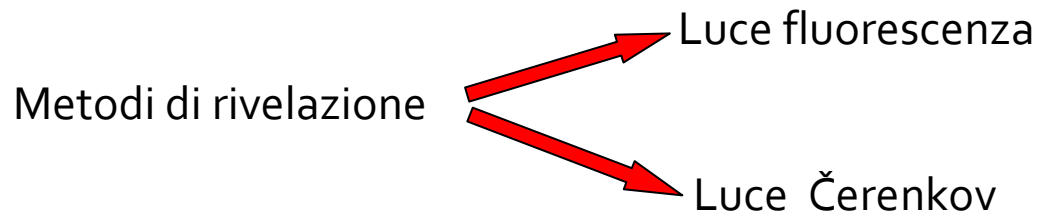


- 1,000 eventi : $E > 7 \times 10^{19}$ eV
- Diverse dozzine di cluster

Gli eventi da 10^{20} sono eventi rari ($\approx 1 \text{ ev/km}^2/\text{secolo}$)

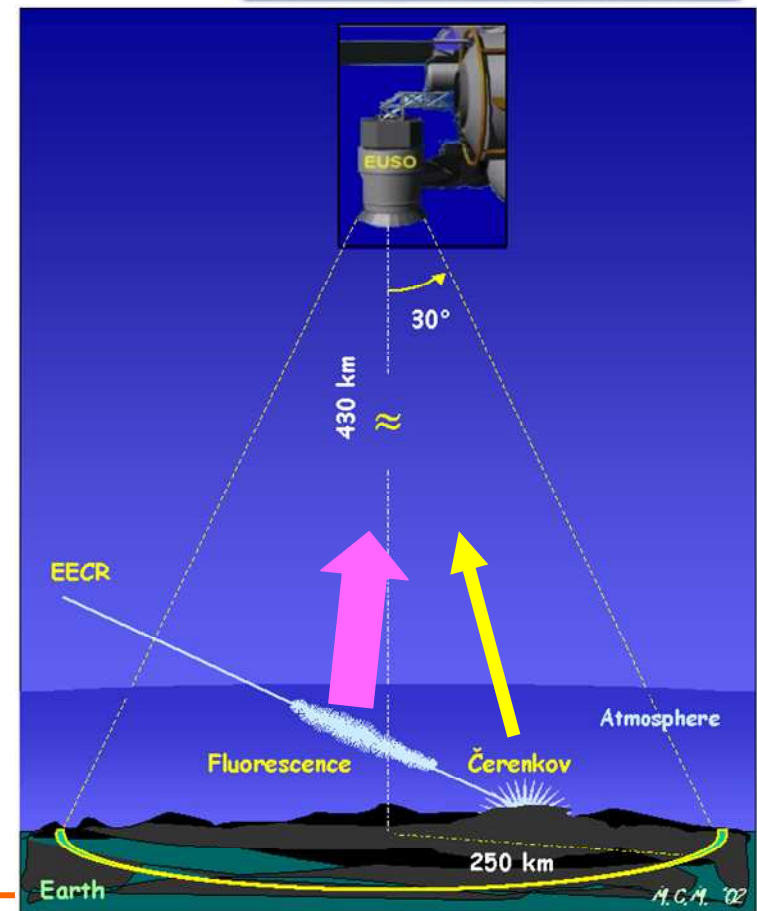


Necessita' di un esperimento con grande accettazione

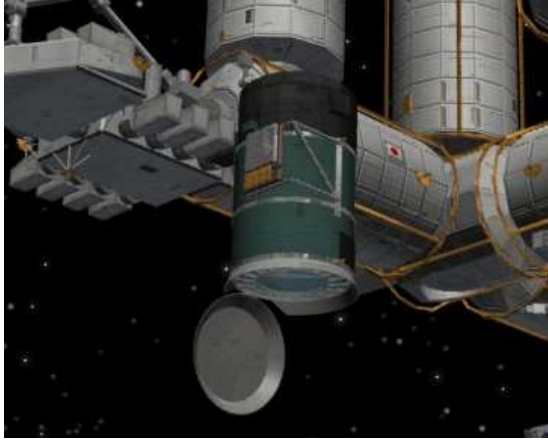


- Campo di vista : $\pm 30^\circ$
- Diametro di apertura : 2,5 m
- Altitudine : 430 Km
- Area di osservazione al suolo : $1,9 \cdot 10^5 \text{ Km}^2$

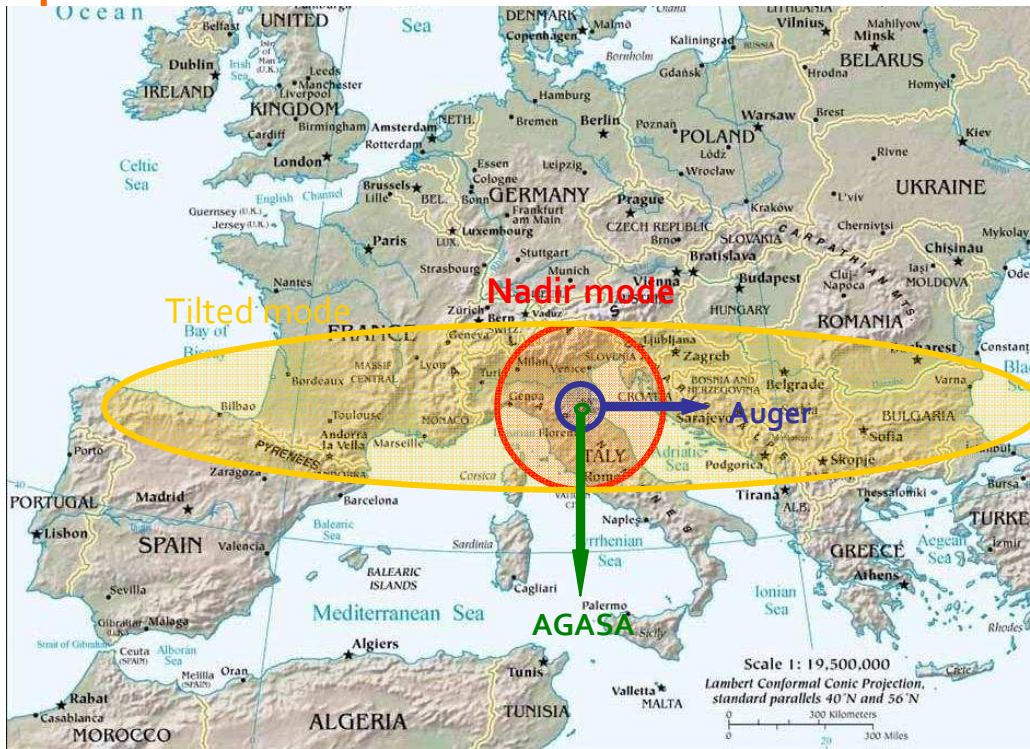
Come avere 10^{12} ton di rivelatore!



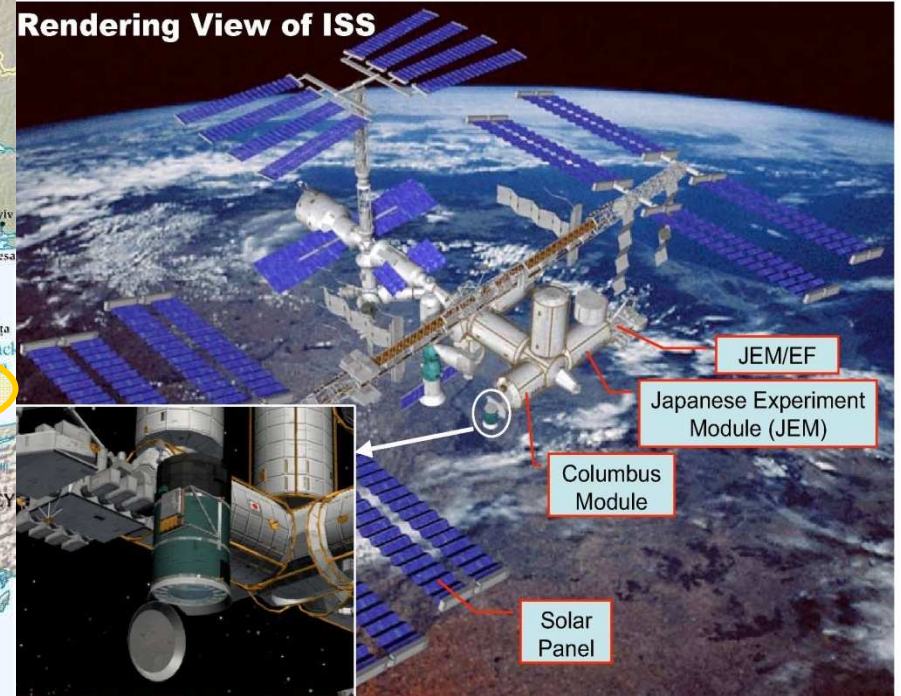
Nadir mode



Tilted mode



Rendering View of ISS

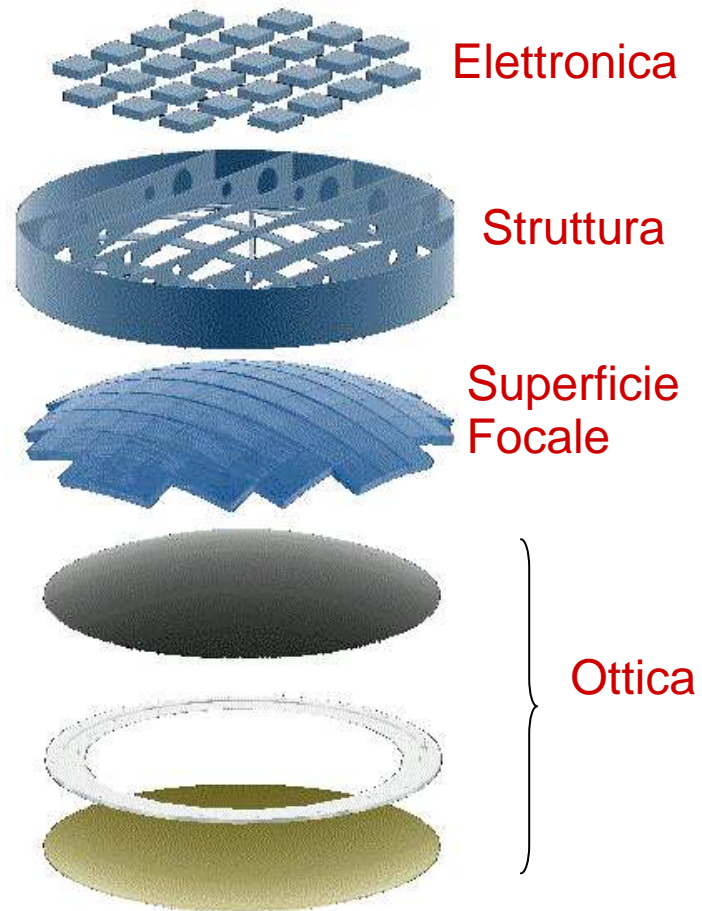


L'osservazione dallo spazio

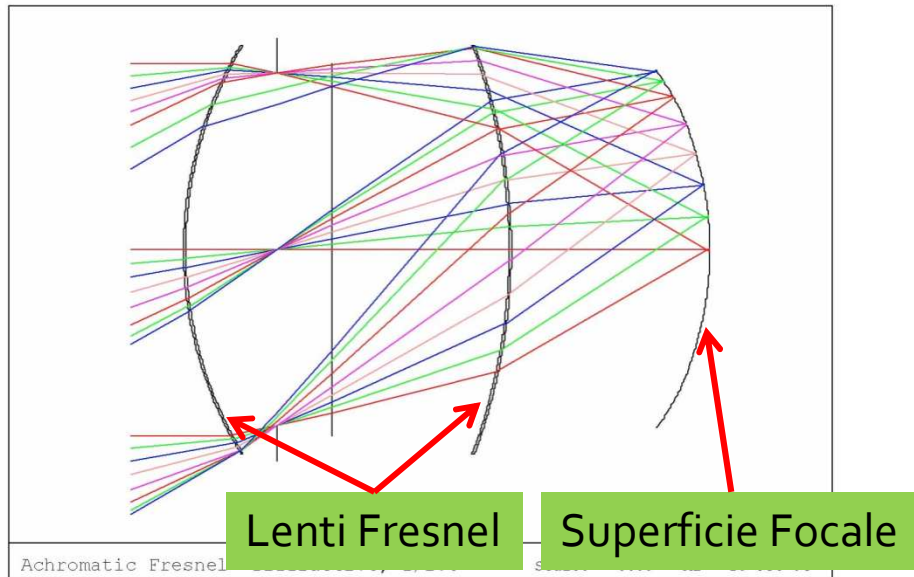
- Grande accettazione
- Molti sciami raggiungono il max in alto
~ 5000 m ($\theta \approx 45^\circ$) per eventi intorno a 10^{20} eV



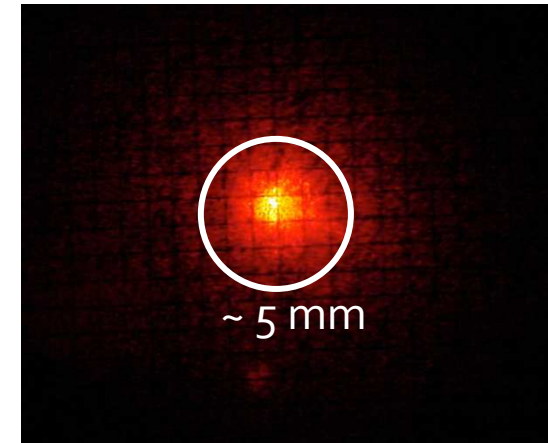
2.5m



L'ottica

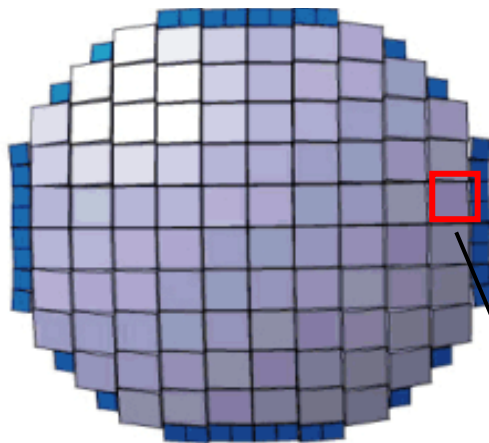


- Alta focalizzazione



Focal Surface detector

(164PDMs = 0.2M pixels)



2.26 m max

Elementary Cell

(2x2 PMTs = 144 pixels)

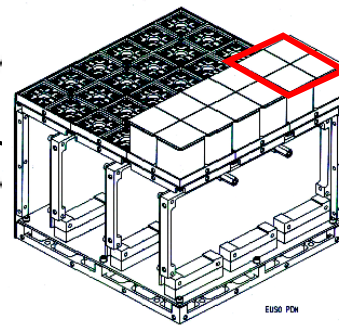
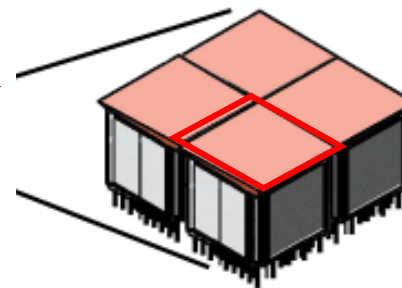
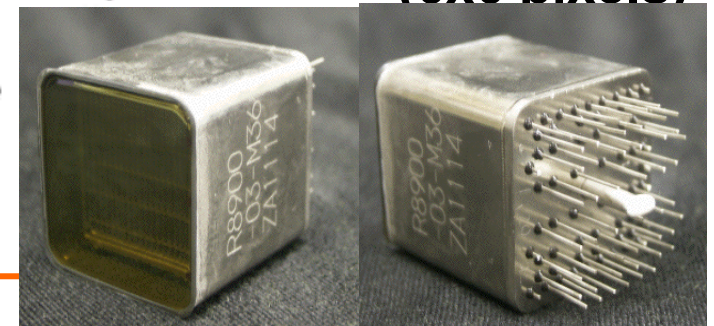


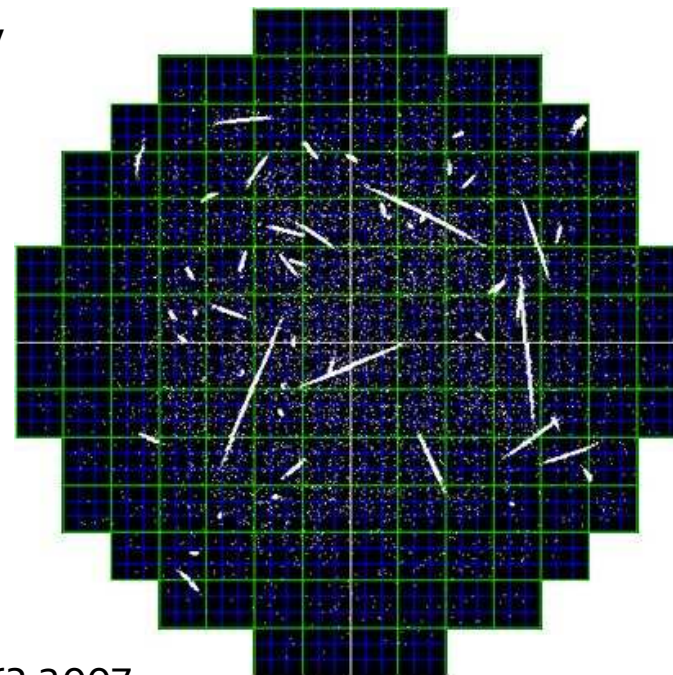
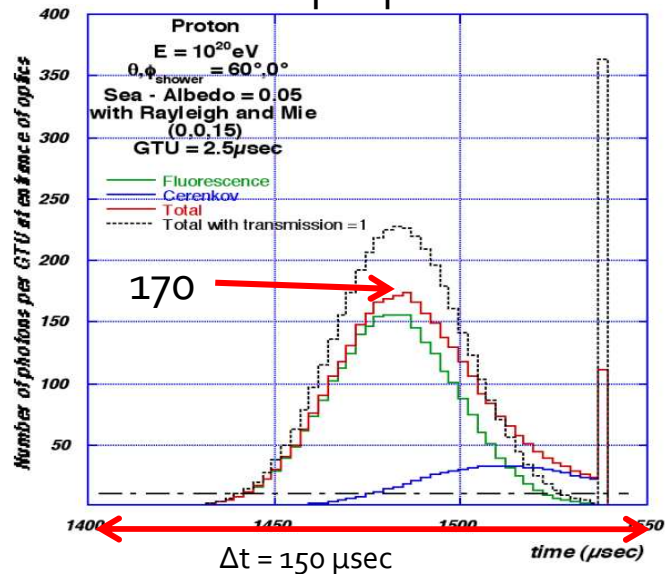
Photo-Detector Module

(3x3 ECs = 1296 pixels)

R8900-M36
MAPMT
(6x6 pixels)

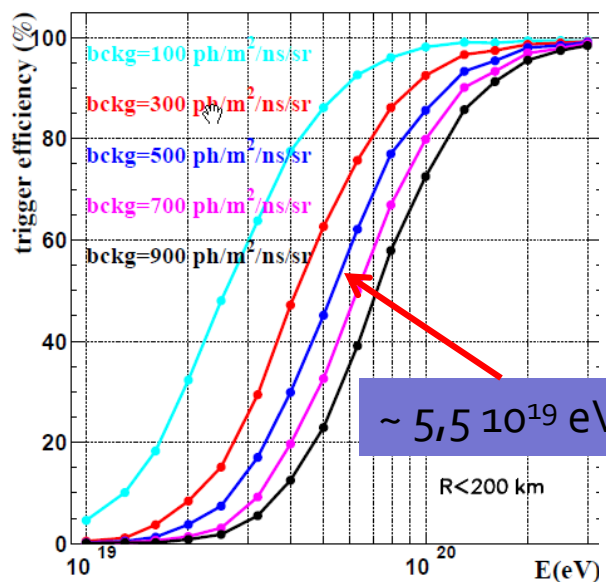


Fotoni attesi sul telescopio per un evento da 10^{20} eV

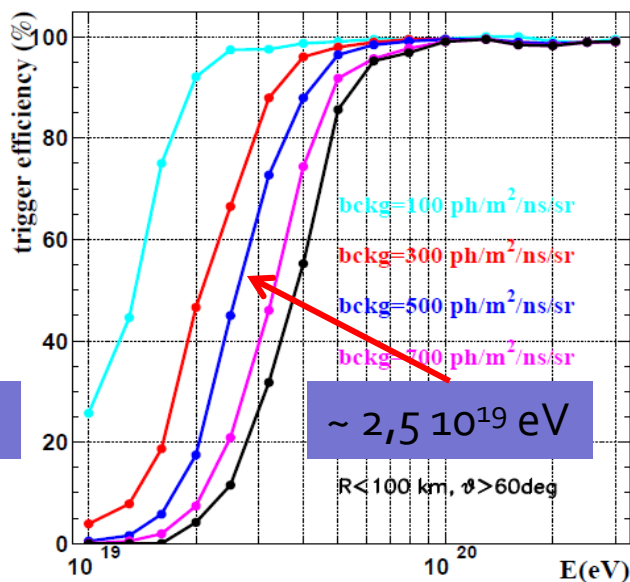


Efficienza Trigger = $N_{\text{Ev. Rivelati}} / N_{\text{Eventi}}$

Primavera 2007



$R < 200$ km



$R < 100$ Km, $\theta > 60^\circ$

Il tilted mode avrà una soglia più alta.

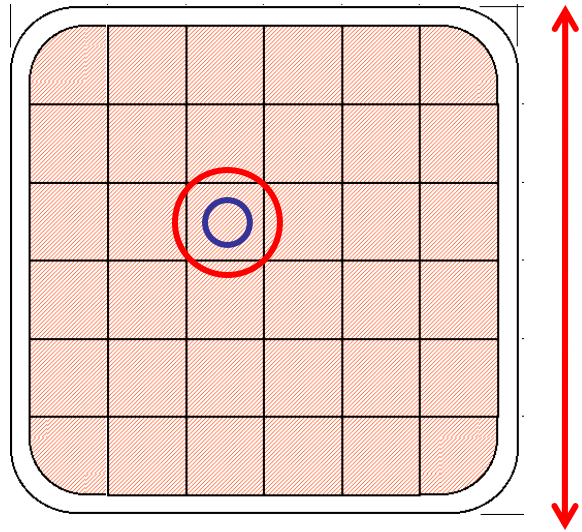


Abbassare soglia esperimento

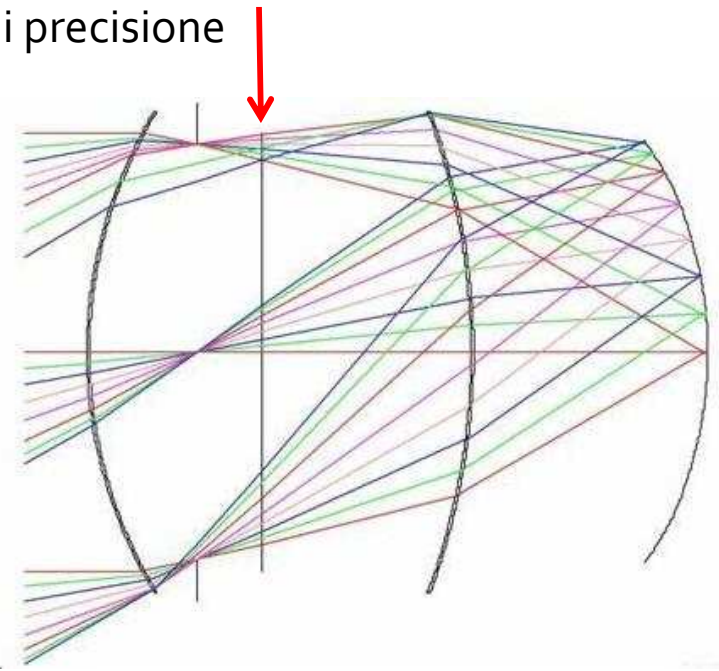


Sviluppo di una nuova ottica → Lente fresnel di precisione

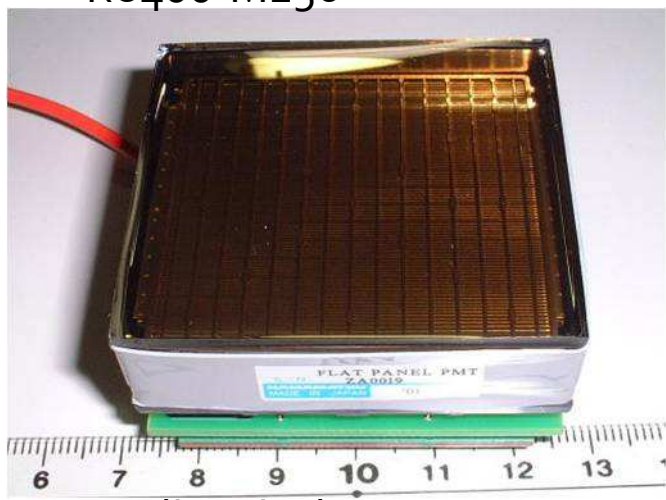
Focalizzazione
~ 2,5 mm



26.2 mm

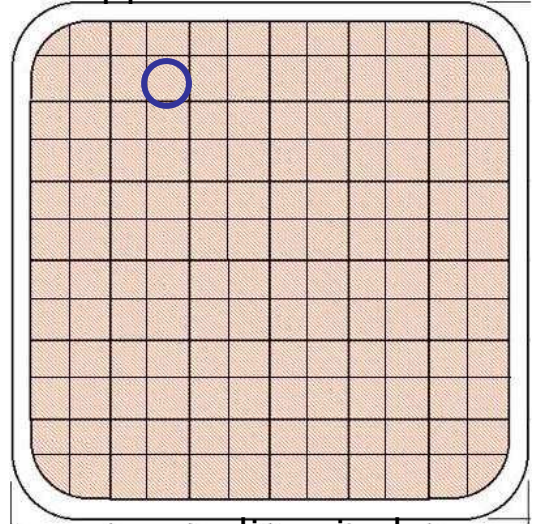


R8400-M256



dim pixel 3 mm

M144

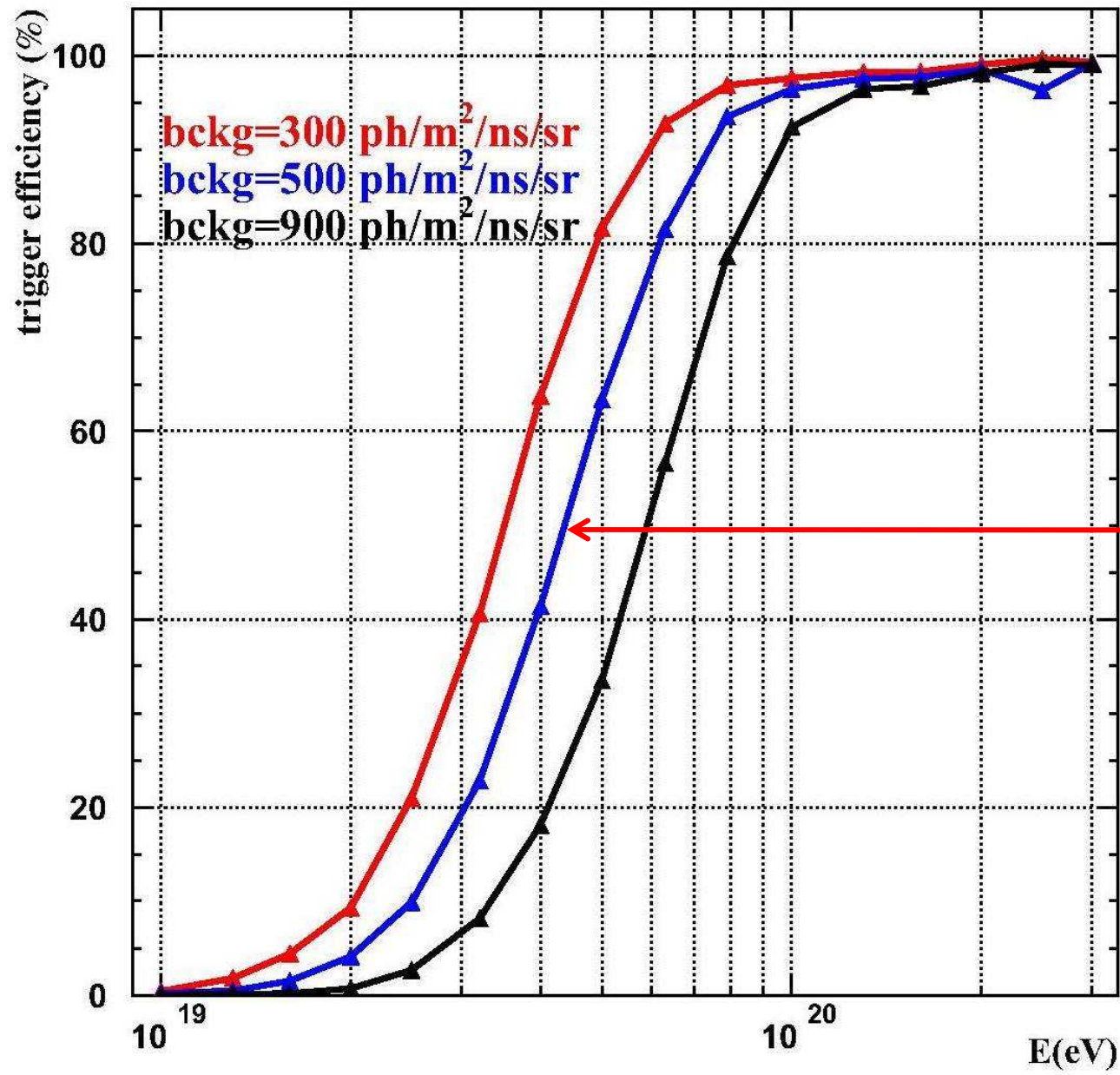


26.2 mm

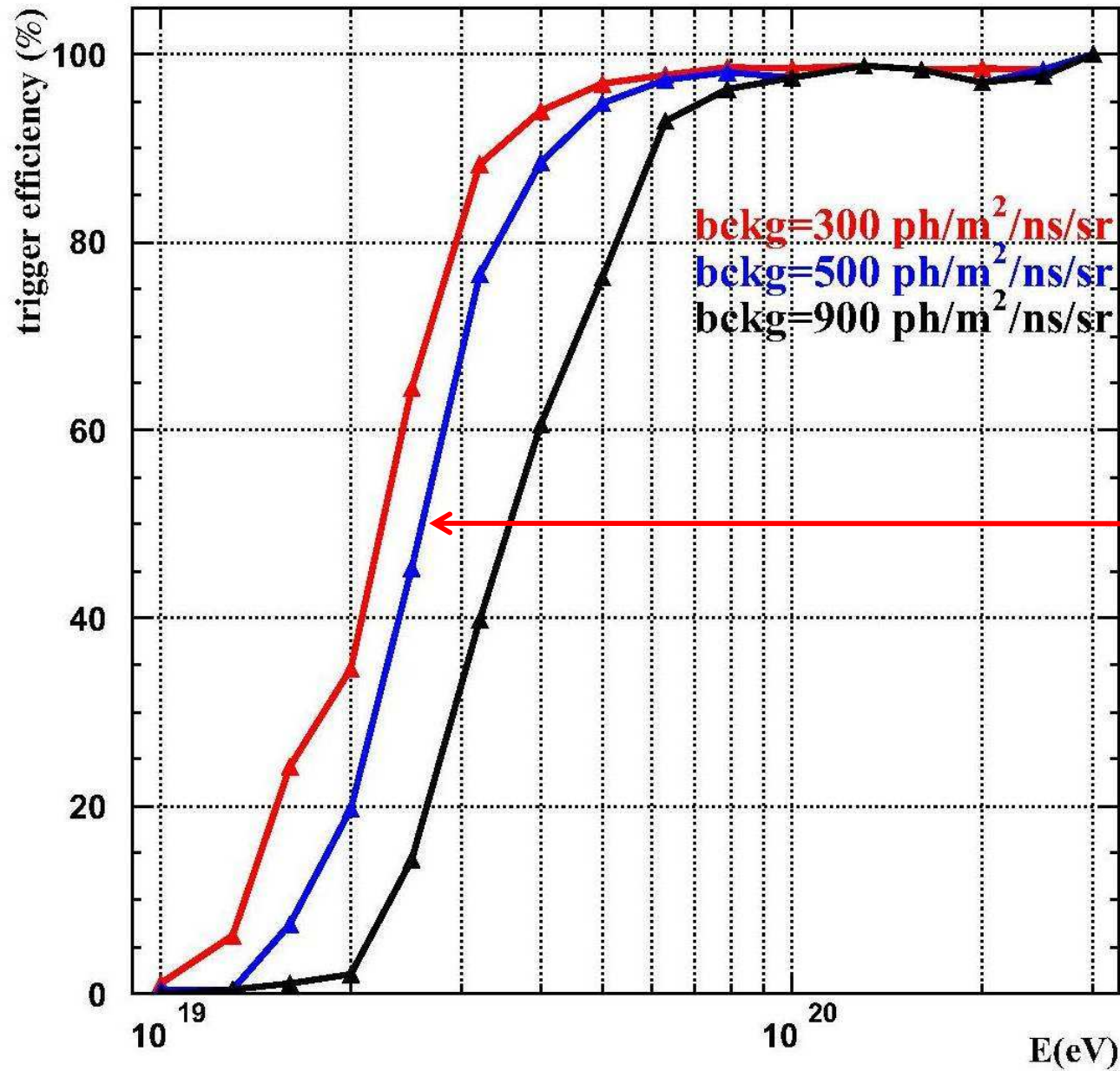
dim pixel 2,2 mm



R<200 km – HQE



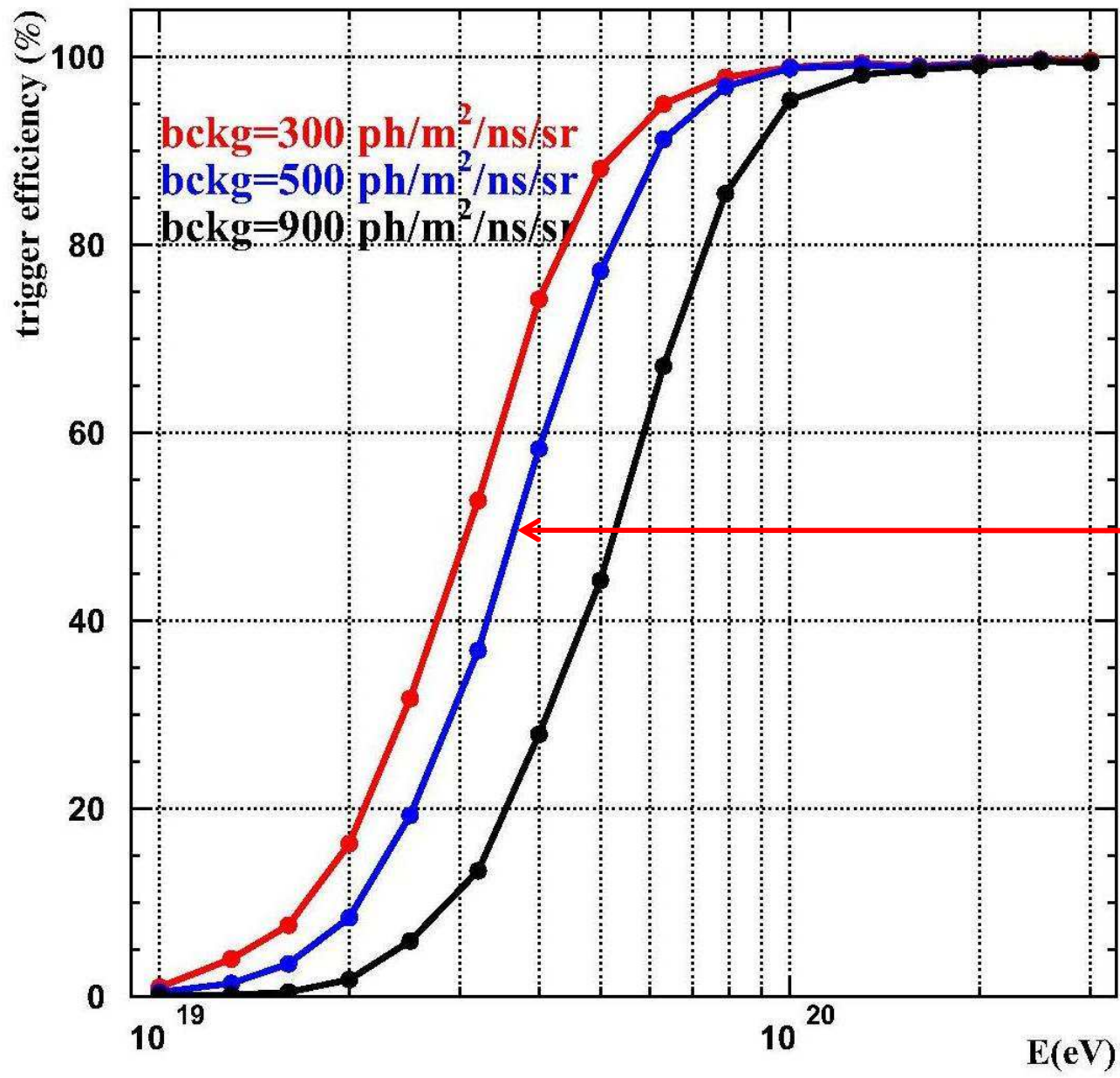
R<100 km, $\theta > 60\text{deg}$ – HQE



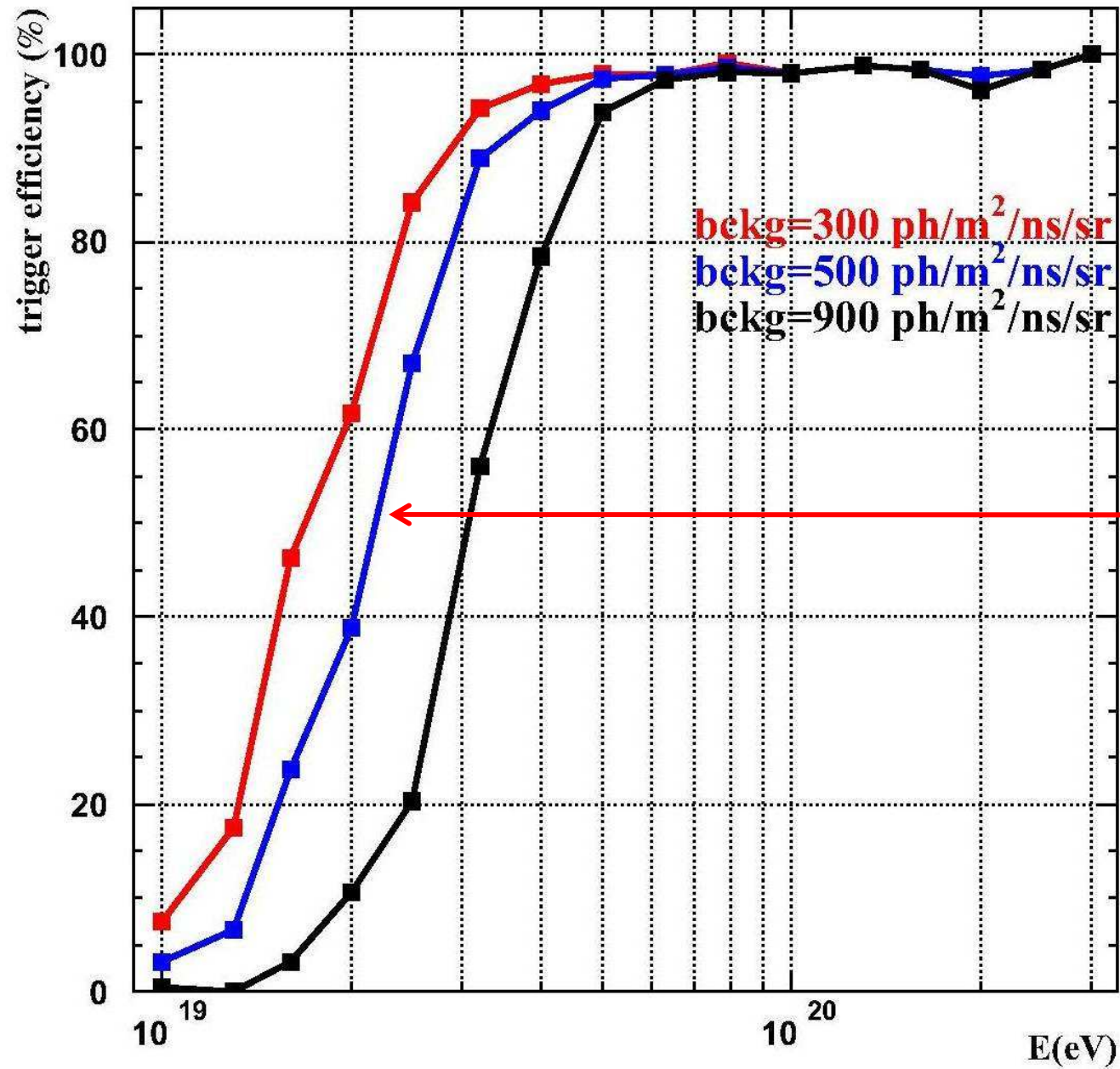
M256
R<100, $\theta > 60^\circ$

~ 2,5 10¹⁹ eV

R<200 km – HQE



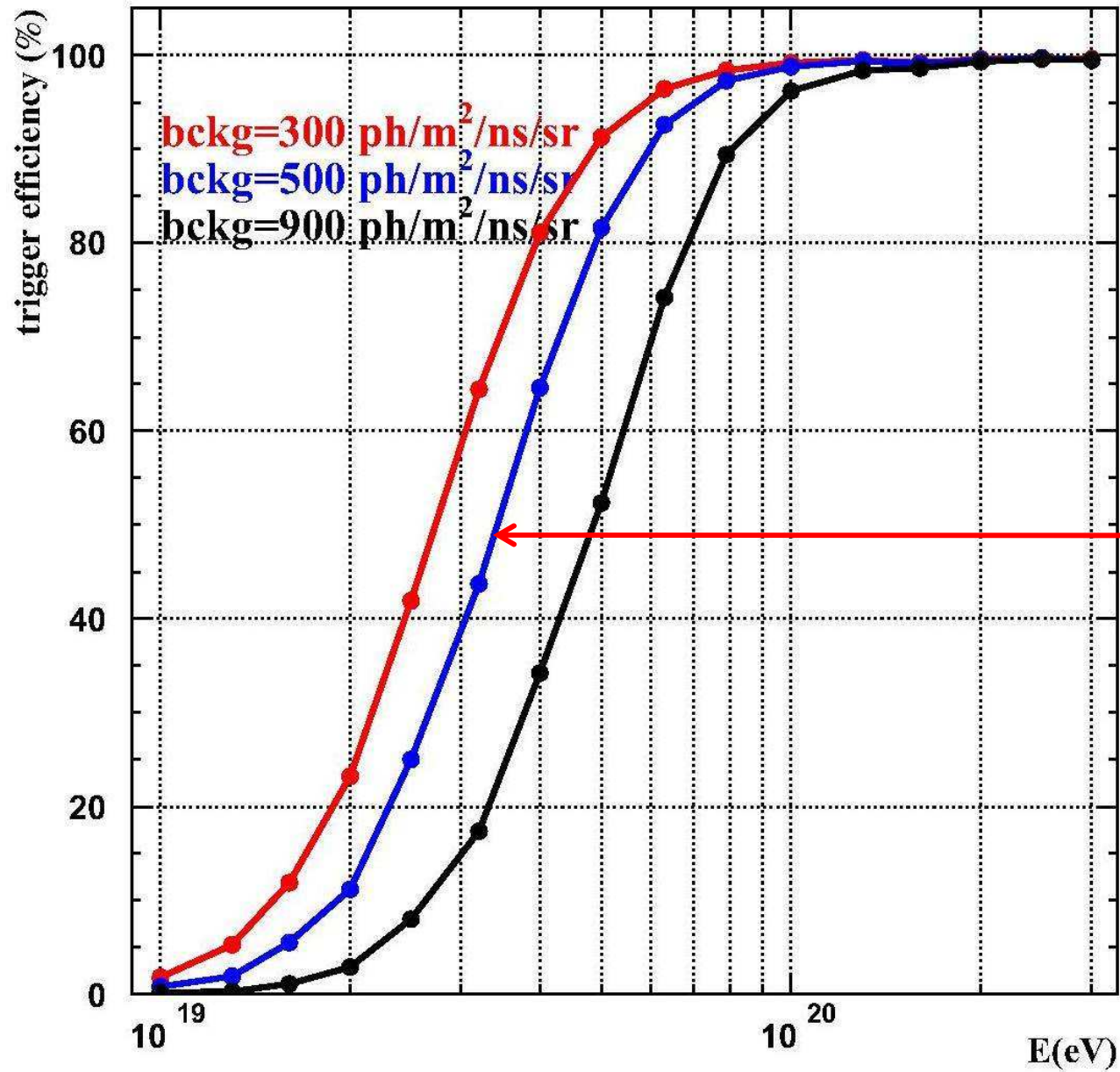
R < 100 km, $\vartheta > 60\text{deg}$ - HQE



M144
R < 100, $\theta > 60^\circ$

$\sim 2,2 \cdot 10^{19} \text{ eV}$

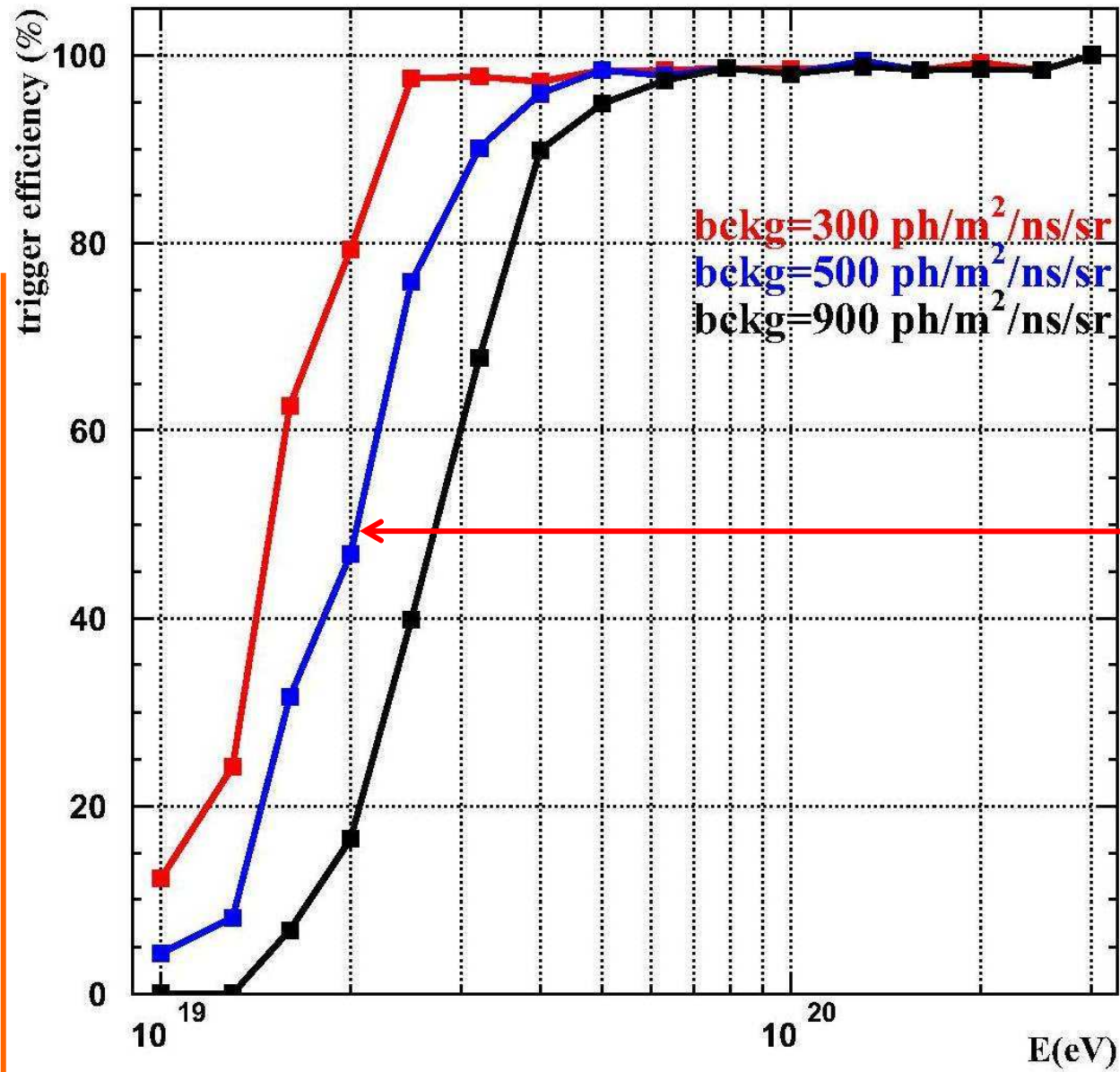
R<200 km – HQE



M144 (Trigger modificato)
R<200

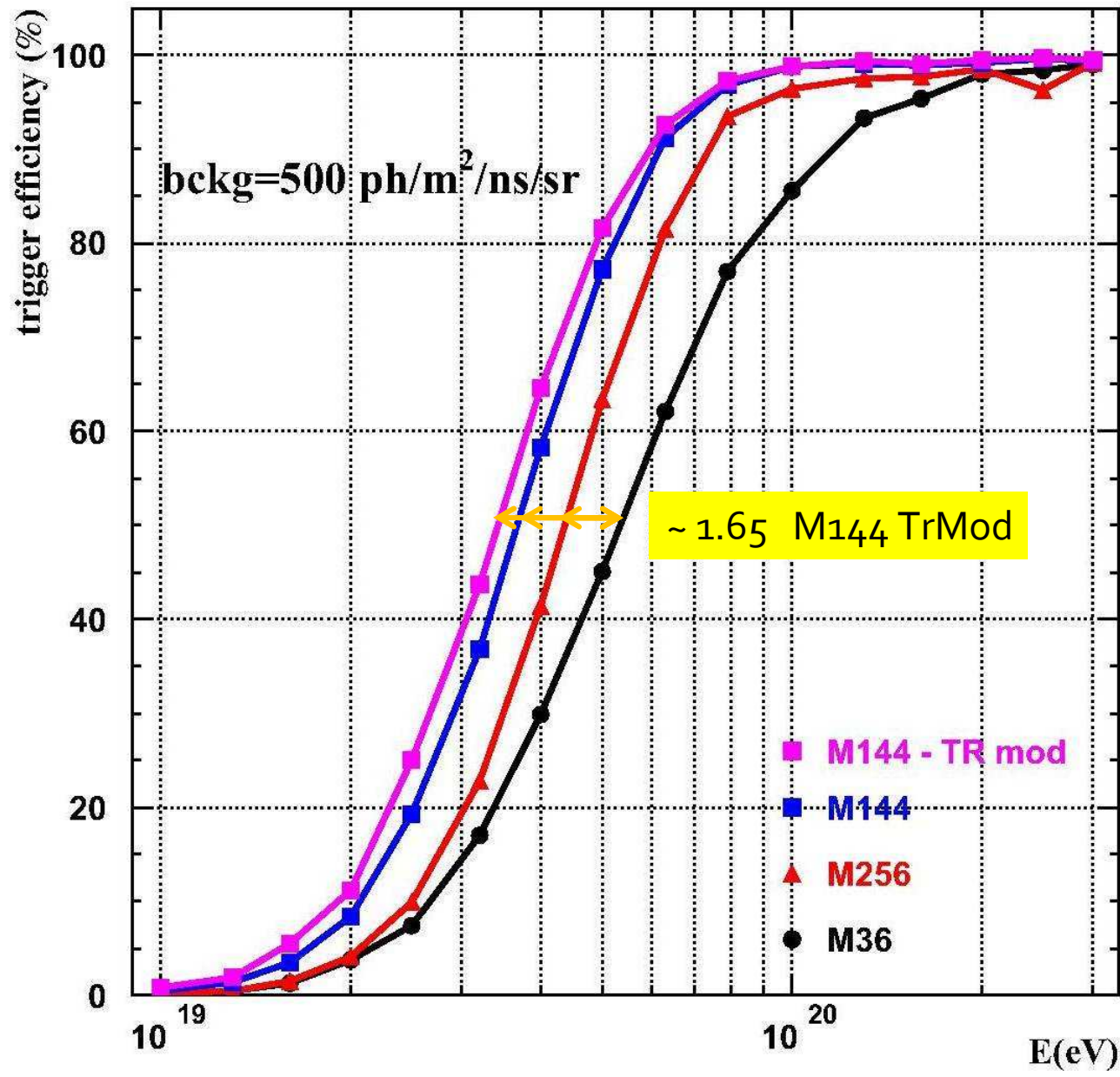
$\sim 3,3 \cdot 10^{19} \text{ eV}$

R < 100 km, $\theta > 60^\circ$ - HQE



M144 (Trigger modificato)
R < 100, $\theta > 60^\circ$

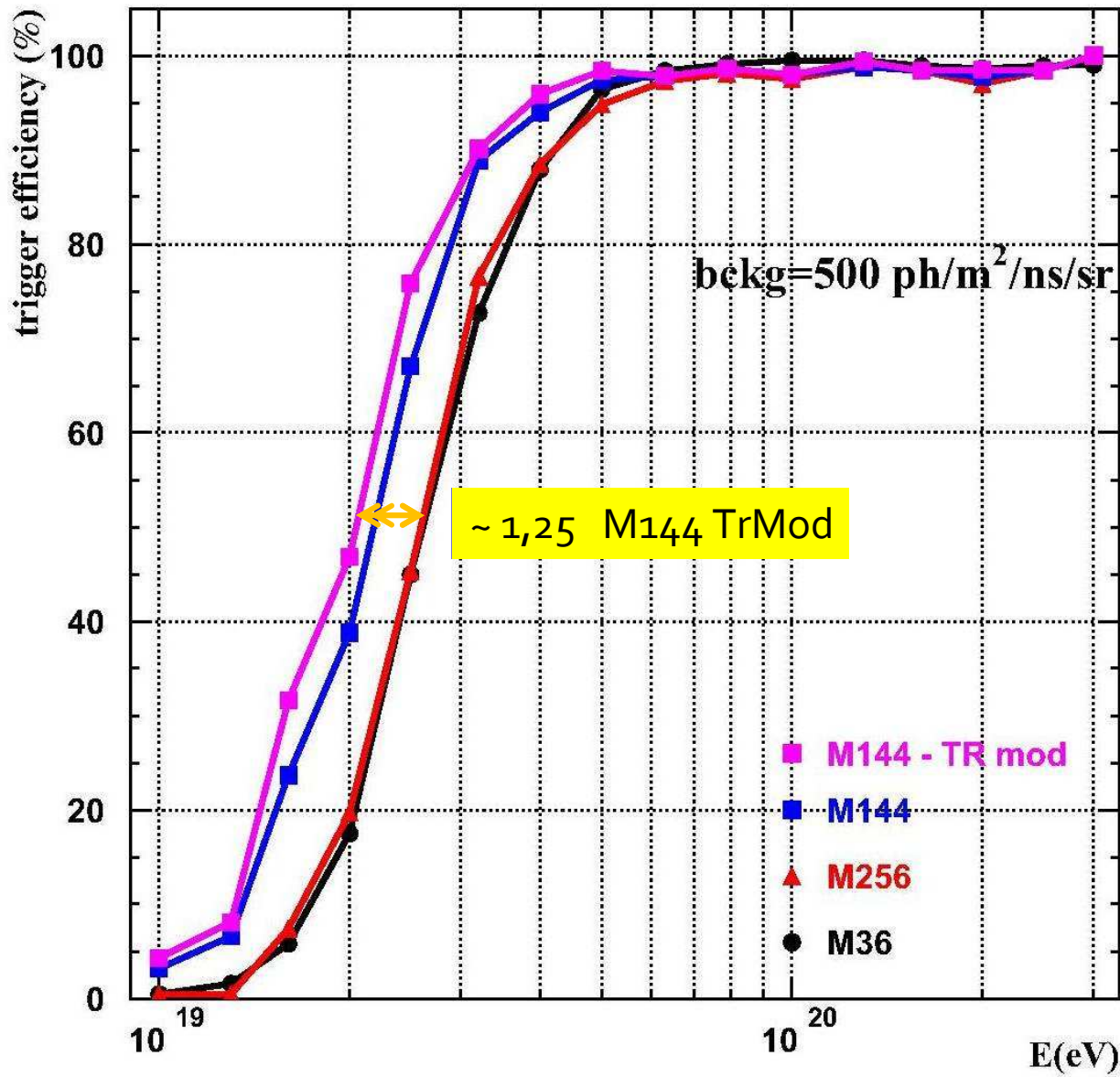
R<200 km - HQE



R<200

R < 100 km, $\theta > 60^\circ$ - HQE

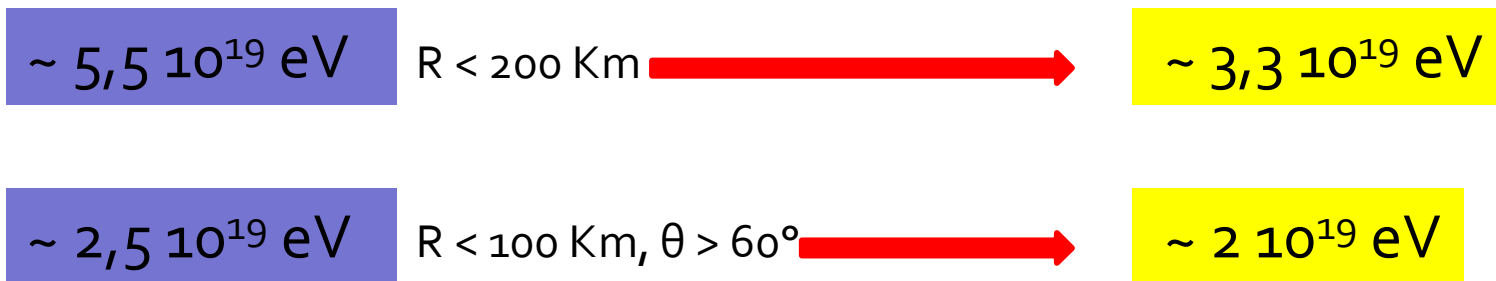
R < 100, $\theta > 60^\circ$



Conclusioni

- I dati sperimentali sembrano favorire un scenario Bottom-Up nella regione oltre la caviglia
- La localizzazione e lo studio degli spettri delle sorgenti darà importanti informazioni sulla validità dei modelli sui meccanismi di accelerazione
- Il modello Top-Down non è da scartare ma da ritenersi quantomeno non dominante alle alte energie
- Le modifiche apportate all'ottica dell'esperimento JEM-EUSO e l'utilizzo di fotomoltiplicatori con dimensioni pixel di 2,2 mm portano ad un abbattimento della soglia di un fattore 1,55
- Questo fattore di guadagno può essere portato fino a 1,65 con la modifica della logica di Trigger

Soglia exp JEM-EUSO (Primavera 2007)



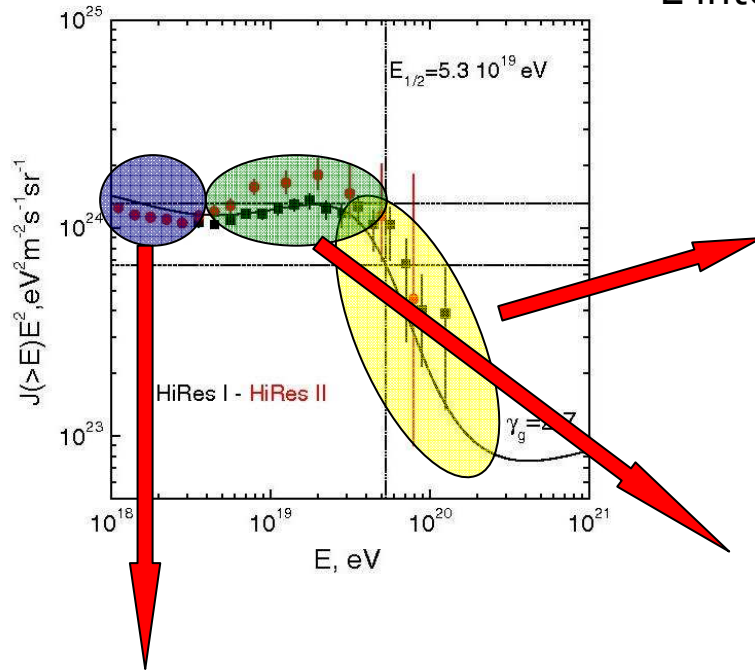


Ringraziamenti :

Prof. Mario Bertaina
Prof. Piero Galeotti



L'interazione con il CMB influisce sullo spettro :



Taglio GZK, rapido aumento della pendenza dello spettro dovuto alla perdita di energia per produzione di pioni.

Il taglio inizia a $\approx 6,8 \times 10^{19} \text{ eV}$

BUMP, ossia un accumulo di particelle all'energia in cui inizia il taglio GZK

DIP, un cambio di pendenza dovuto alla perdita di energia per produzione di coppie

L'esperimento AGASA ha misurato 11 eventi super-GZK, ossia con energia oltre E_{GZK} , questo sembra contraddire la teoria sull'effetto GZK.

La posizione del "DIP" è indipendente dal modello utilizzato, è quindi un ottimo strumento per la calibrazione in energia degli strumenti

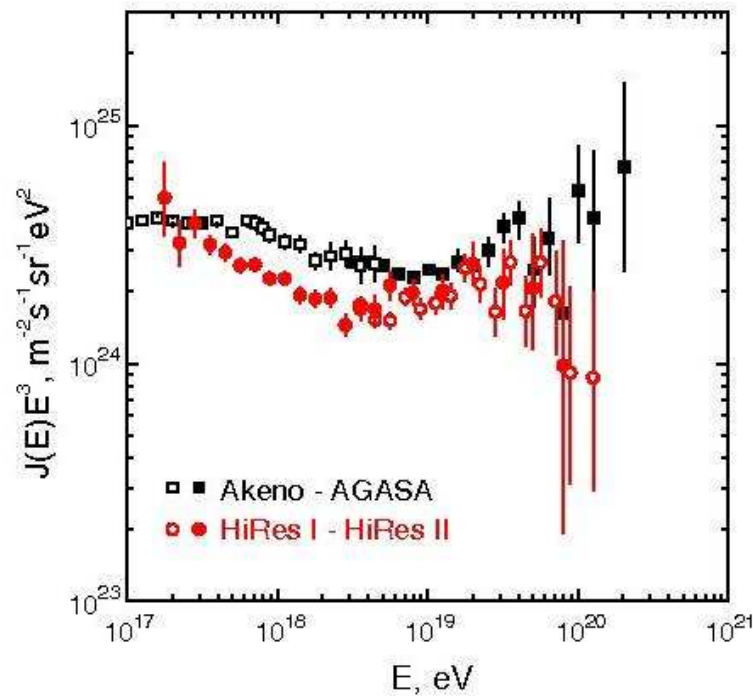
Se si utilizza questo tipo di calibrazione per interpretare i dati di AGASA si può affermare che le discrepanze fra AGASA e Hi-Res (che invece vede il taglio) sono di natura sistematica (V.Berezinsky, Gazivov, Grigorieva)



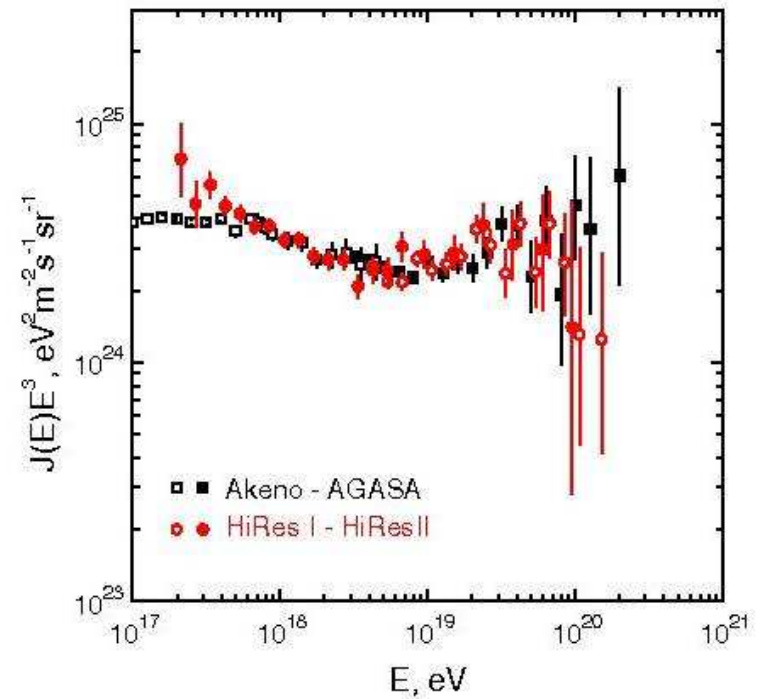
Hi-Res vs AGASA

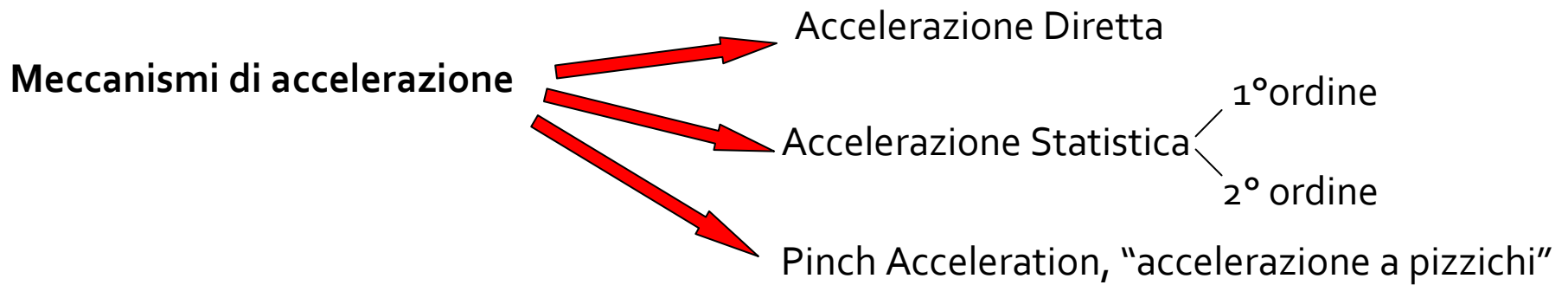
Il buon accordo degli spettri dopo la calibrazione è un segno dell'interazione dei protoni con la radiazione di fondo cosmico

Prima della calibrazione



Dopo la calibrazione





ACCELERAZIONE DIRETTA

in campi elettrici generati da campi magnetici in rotazione es. stelle di neutroni, dischi di accrescimento di AGNs



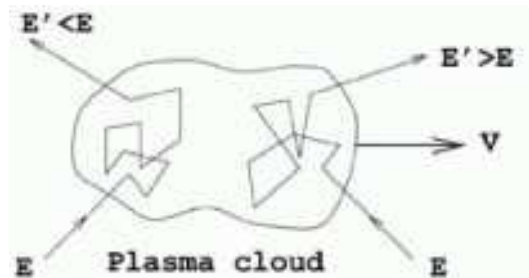
- difficile ottenere la legge osservata

ACCELERAZIONE STATISTICA

Anche se il valor medio di E può essere nullo, ci può essere un trasferimento di E_k dovuto al movimento in un plasma magnetizzato e a ripetuti eventi di scattering

- 2° ordine

L'accelerazione avviene in nubi di plasma con velocità v

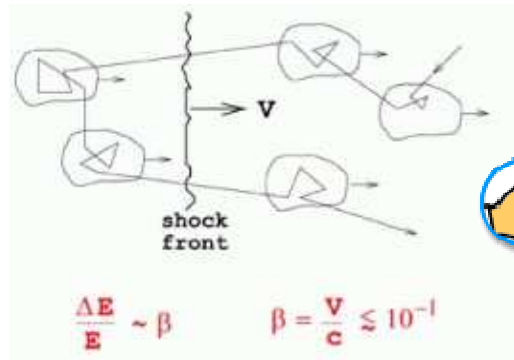


- Lento e poco efficace
- E' difficile ottenere la legge spettrale

$$\frac{\Delta E}{E} \sim \beta^2 \quad \beta = \frac{v}{c} \lesssim 10^{-4}$$

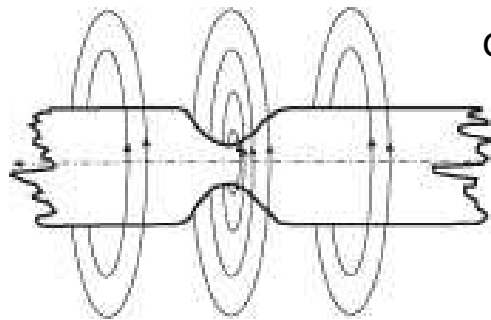
•1°ordine

Accelerazione in violenti fronti di shock piani



- Metodo di accelerazione efficace
- Shock diffusi in situazioni astrofisiche (spazio interplanetario, radio galassie, supernovae, situazioni cosmologiche)
- L'indice spettrale dipende dal rapporto di compressione e non dalla velocità dello shock (posso ottenere la legge osservata)

PINCH ACCELERATION



Correnti presenti nel jet di un AGN creano un campo toroidale che schiaccia il tubo di flusso → Aumento di B ed E, accelerazione idrodinamica del jet e del campo elettrico



- Meccanismo energeticamente efficace
- Riproduce lo spettro osservato
- OK correlazione con BL Lacs

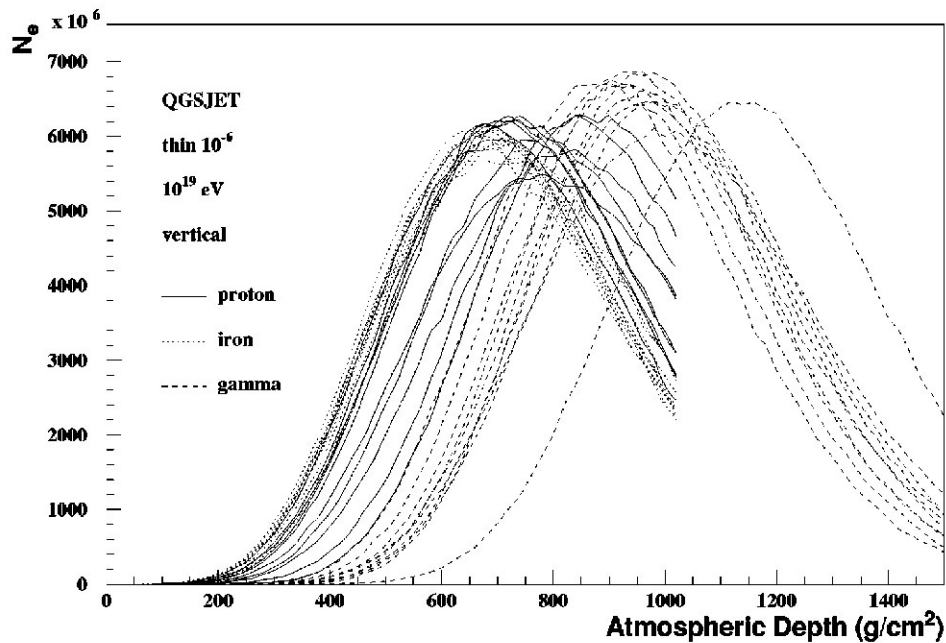


Composizione dei CR primari

- Contenuto muonico dell'EAS $\pi^\pm \longrightarrow \mu^\pm + \nu_\mu$

Sciame da nuclei pesanti sono ricchi di μ

- Altezza di interazione (nuclei pesanti interagiscono in alto in atmosfera)
- Misura della posizione di X_{\max} (larghezza massima che raggiunge lo sciame)



La posizione di X_{\max} dipende dalla massa del CR primario

