

# Astrofisica e particelle elementari

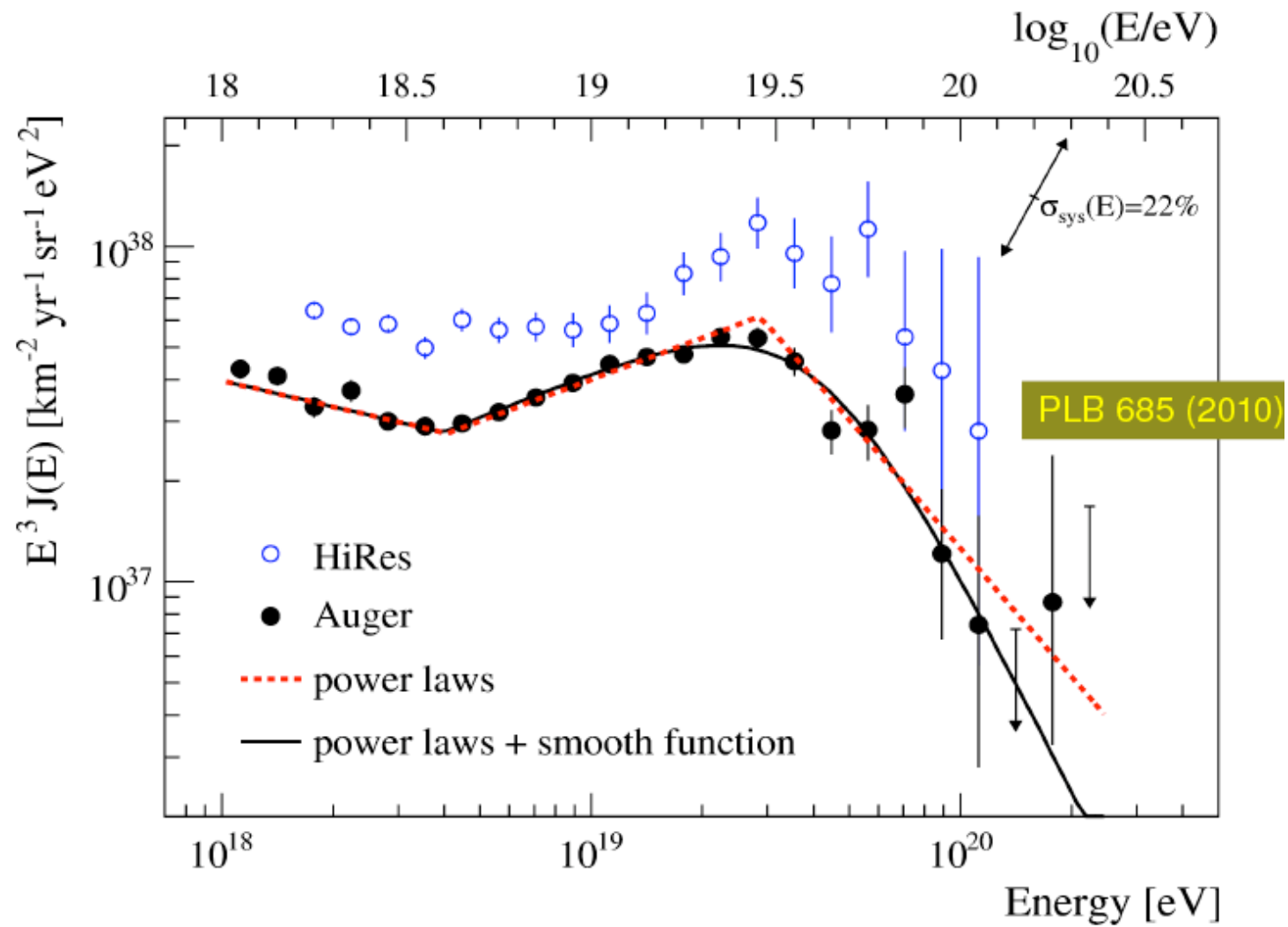
aa 2010-11

Lezione 5

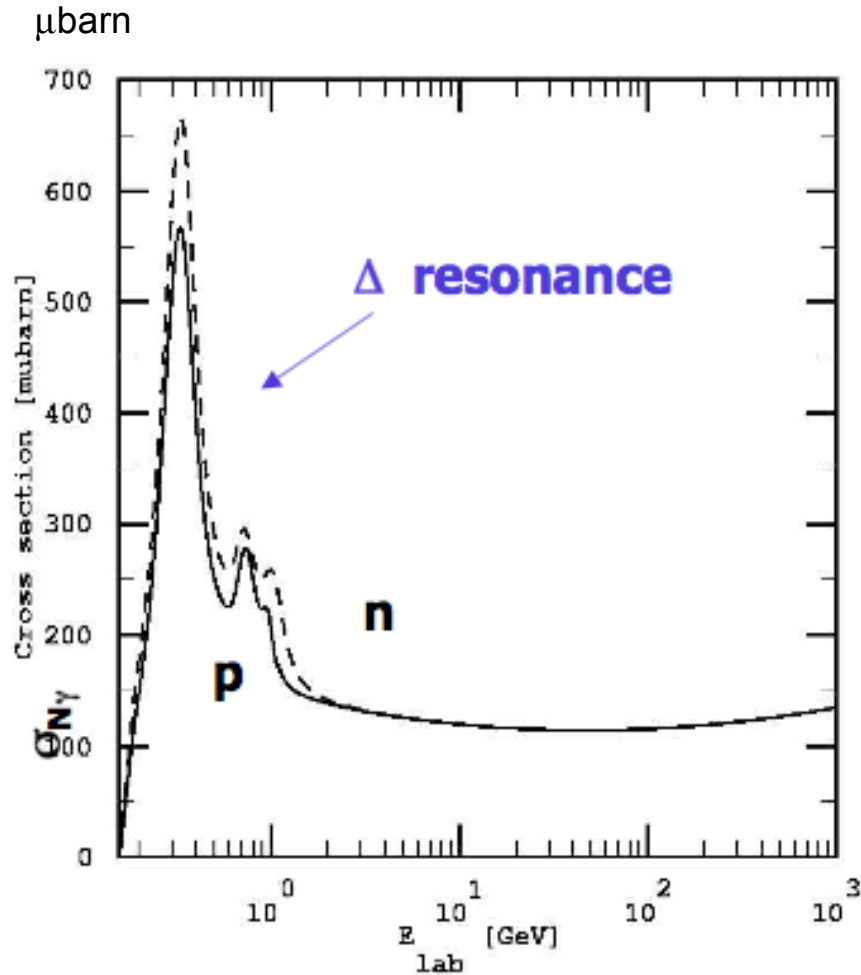
- UHECR
- Gamma cosmici
- Assorbimento  $\gamma$  nello spazio e nell'atmosfera

Bruno Borgia

# UHECR



# LIMITE GZK



protone :  $(\vec{p}, E)$ ; fotone<sub>CMB</sub> :  $(\vec{q}, qc)$

$$s = E_{cm}^2 = (E + q)^2 - (\vec{p} + \vec{q})^2 = M^2 + 2q(E - |\vec{p}| \cos \theta)$$

*s iniziale > s a soglia*

$$M^2 + 2q(E - |\vec{p}| \cos \theta) > M^2 + m_\pi^2 + 2Mm_\pi$$

*protone relativistico*

$$E \approx p$$

$$2qE(1 - \cos \theta) > m_\pi^2 + 2Mm_\pi$$

*urto centrale*

$$(1 - \cos \theta) = 2$$

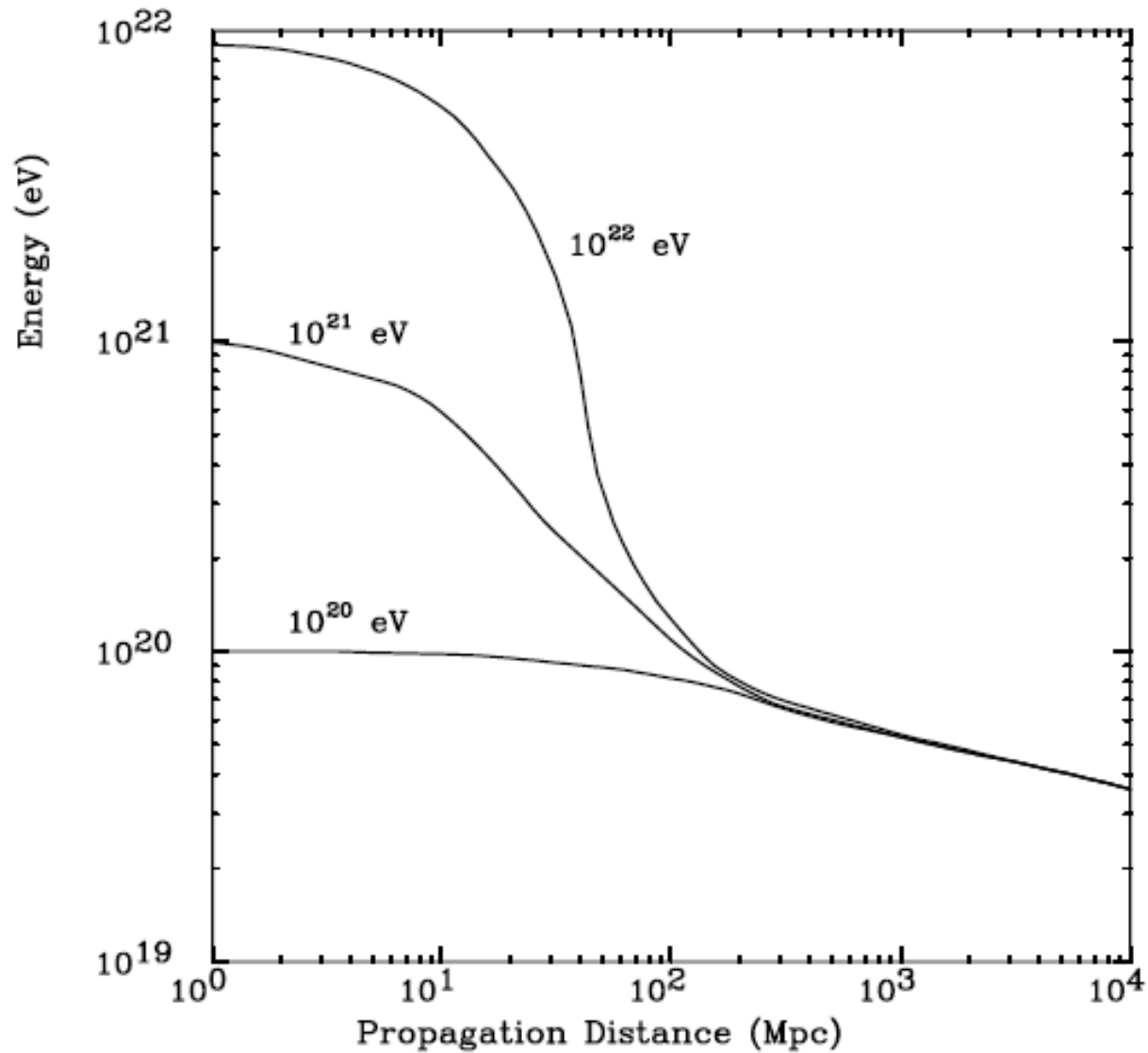
$$E_{soglia} = m_\pi \frac{M + m_\pi / 2}{2q}$$

*fotoni CMB : T = 2.74K; qc = kT = 2.35 × 10<sup>-4</sup> eV*

$$E_{soglia} = (4.3 / y) \times 10^{20} \text{ eV} \quad \text{con } qc = ykT$$

*dove y da la coda dello spettro*

# Propagazione protoni nel CMB



# ATTENUAZIONE ELETTRONI

Elettroni e positroni, generati dal processo  $\gamma+\gamma\rightarrow e^+e^-$ , perdono energia per radiazione di sincrotrone con

$$-\frac{dE}{dt} = \frac{4\alpha^2}{3m_e^2} \langle B^2 \rangle \left( \frac{E}{m_e} \right)^2$$

Ad energie al disopra di

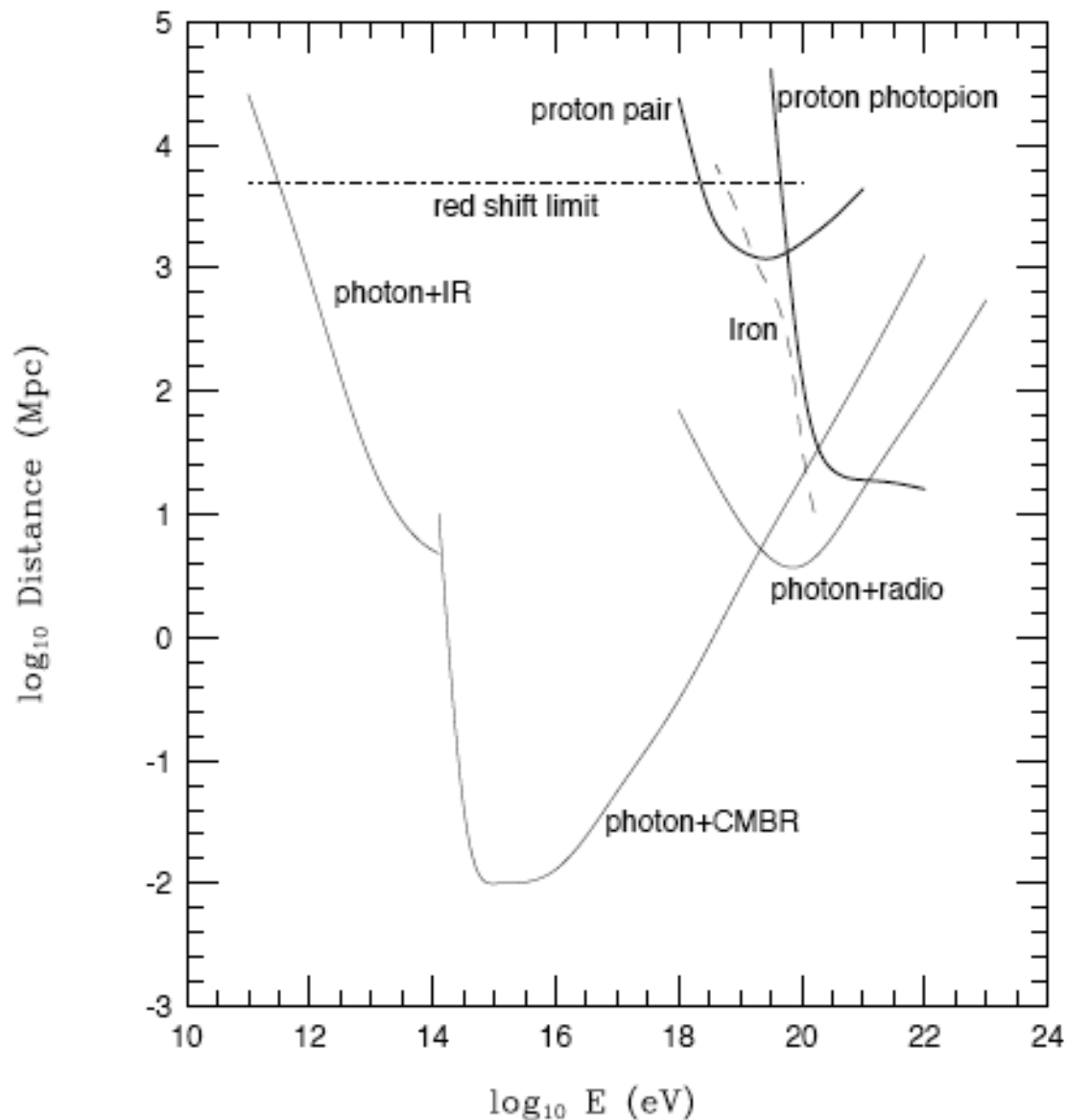
$$E \sim \left( \frac{B}{10^{-9} G} \right)^{-1} 10^{19} eV$$

questo processo domina rispetto al Compton inverso su CMB e IR. I gamma avranno lo spettro di energia tipico della radiazione di sincrotrone.

Al di sopra della soglia, la radiazione di sincrotrone attenuerà l'energia degli elettroni e positroni molto rapidamente. A 100 EeV la lunghezza di attenuazione è dell'ordine di 20 kpc.

# $\Lambda$ ATTENUAZIONE

Lunghezza di attenuazione per fotoni, protoni e ferro in funzione dell'energia. La linea a punto-tratto rappresenta il limite superiore assoluto della distanza che una particella può percorrere verso la Terra qualunque sia la sua energia iniziale,



# REGIONI DI ACCELERAZIONE

Qualunque sia il meccanismo di accelerazione, l'energia massima che può raggiungere una particella di carica  $Ze$  in una regione di dimensione  $R$  è:

$$E_{\max} \approx \beta Z \left( \frac{B}{1 \mu\text{G}} \right) \left( \frac{R}{1 \text{kpc}} \right) 10^{18} \text{ eV}$$

dove  $B$  è il campo magnetico nel volume di accelerazione e  $\beta$  è la velocità dell'onda d'urto o l'efficienza del meccanismo di accelerazione.

Questa relazione stabilisce essenzialmente che il raggio di Larmor della particella accelerata deve essere più piccolo delle dimensioni della regione di accelerazione.

$r_L(\text{m}) = 3.3 p (\text{GeV}/c) / B(\text{T})$ , raggio di Larmor o giroraggio

AGN:  $d \approx 10^{12}\text{m}$ ,  $B \approx 1 \text{T}$

$p = 10^{20}\text{eV}/c = 10^{11} \text{GeV}/c$ ;  $r_L = (3.3 \times 10^{11}/1) \text{m}$

A. M. Hillas, *Annual Review Astron. Astrophys.* **22** (1984) 425.

# HILLAS PLOT: CANDIDATI PER ACCELERAZIONE CON $E > 10^{20}$ EV

Letessier-Selvon astro-ph/0006111

Dimensione e campo magnetico di possibili regioni di accelerazione dei RC. Oggetti al disotto delle diagonali non possono accelerare gli elementi corrispondenti, Fe o p, sopra  $10^{20}$  eV

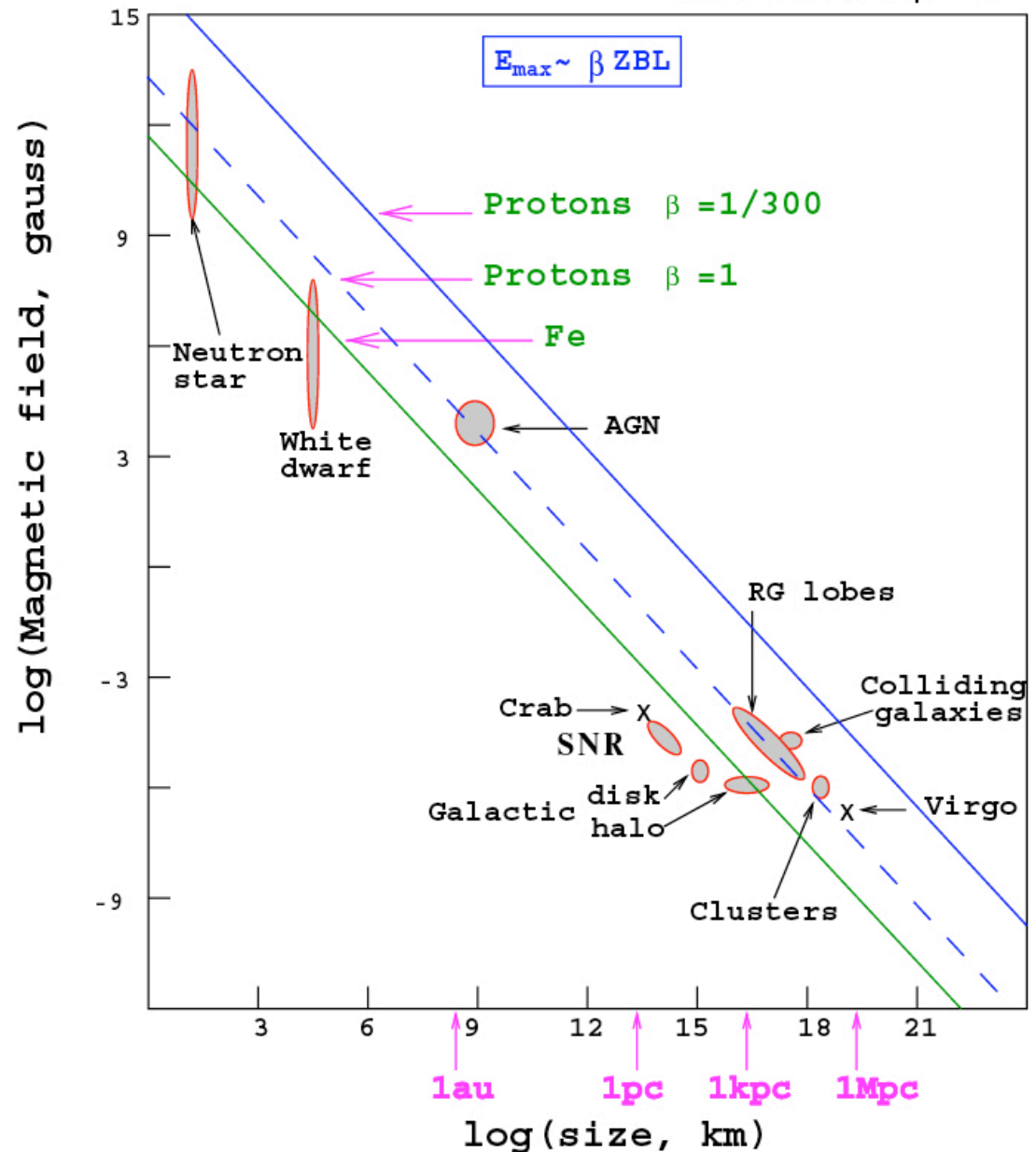
$$E_{\max} \approx \beta Z \left( \frac{B}{1\mu G} \right) \left( \frac{R}{1kpc} \right) 10^{18} eV$$

$\beta$  = velocità onda d'urto

$B$  = campo magnetico della regione

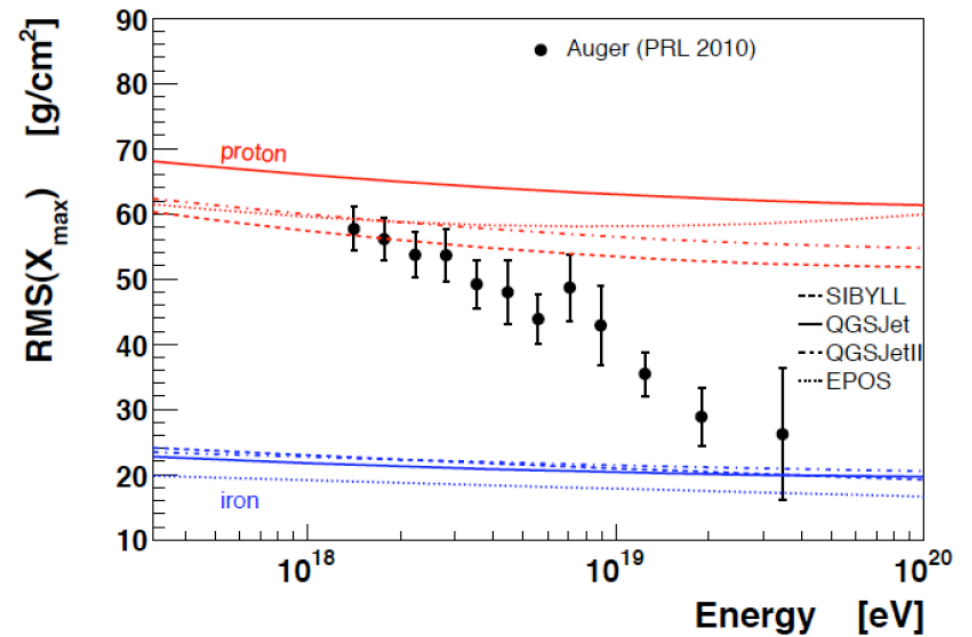
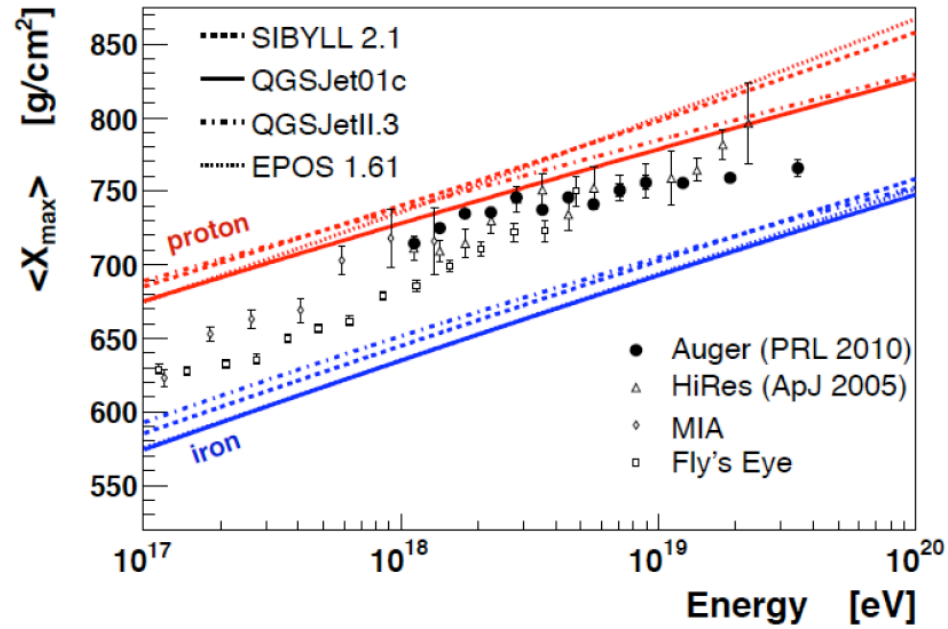
$R$  = dimensione della regione

$1pc = 3.1 \cdot 10^{16}m = 3.3 ly$   
 $1 AU = 1.4 \cdot 10^{11}m$



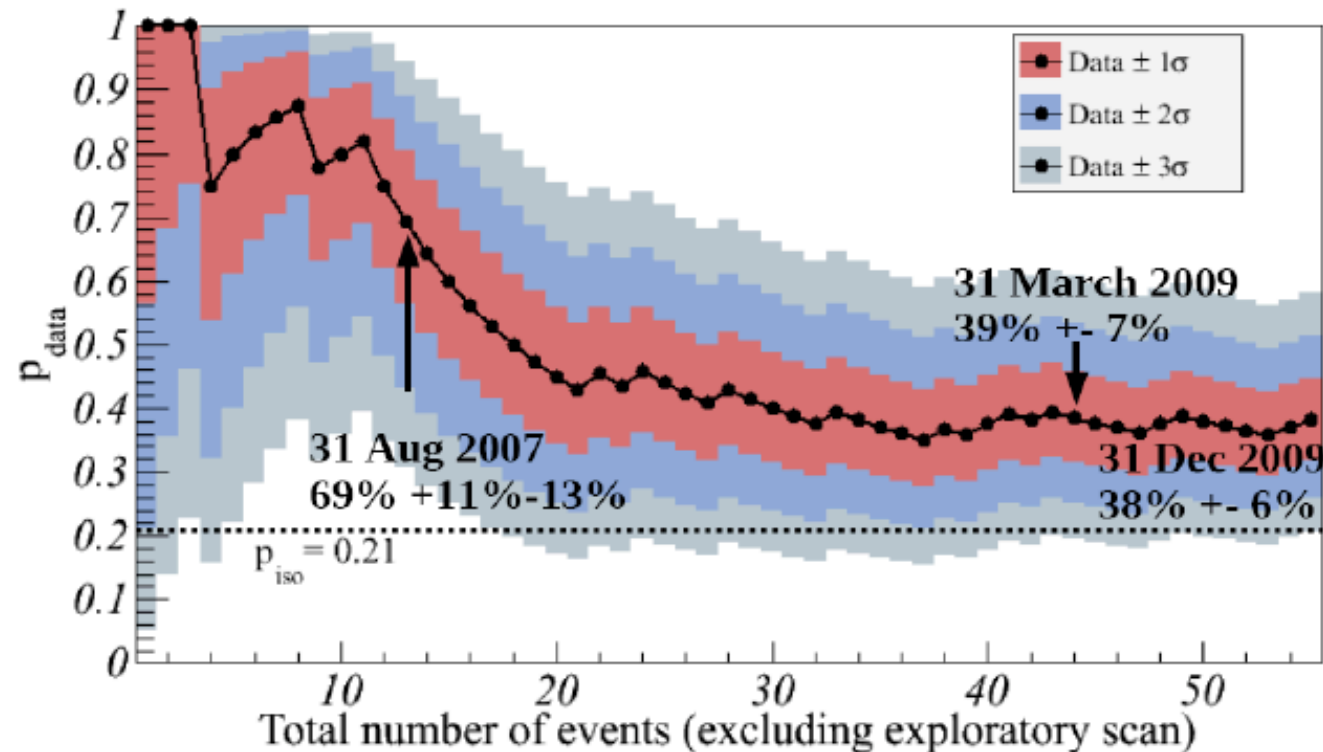


# COMPOSIZIONE RC PRIMARI



# CORRELAZIONE CON CATALOGO VCV

## ► Anisotropy



**Status of the Prescribed Anisotropy Test** (*correlation with VCV catalog of AGNs*)

**38% (21/55) correlate (post exploration) vs. 21% expected from isotropy  $\Rightarrow$  99% C.L.**

*Nuovo paper in preparazione: update prescrizione, cross-correlation con 2MASS, HIPASS, Swift-BAT, autocorrelazione, eccesso da CenA*

# SORGENTI ESOTICHE

Per superare i problemi derivanti dall'accelerazione dei UHECR, il flusso, la visibilità delle sorgenti ecc., si introduce una nuova particella instabile, supermassiva correntemente chiamata X. Il decadimento della X produce tra l'altro quark e leptoni. I quark adronizzano, gli adroni ed i leptoni decadono in fotoni, neutrini, leptoni leggeri con una parte di protoni e neutroni che daranno origine ai UHECR.

Perché questo scenario sia osservabile deve essere

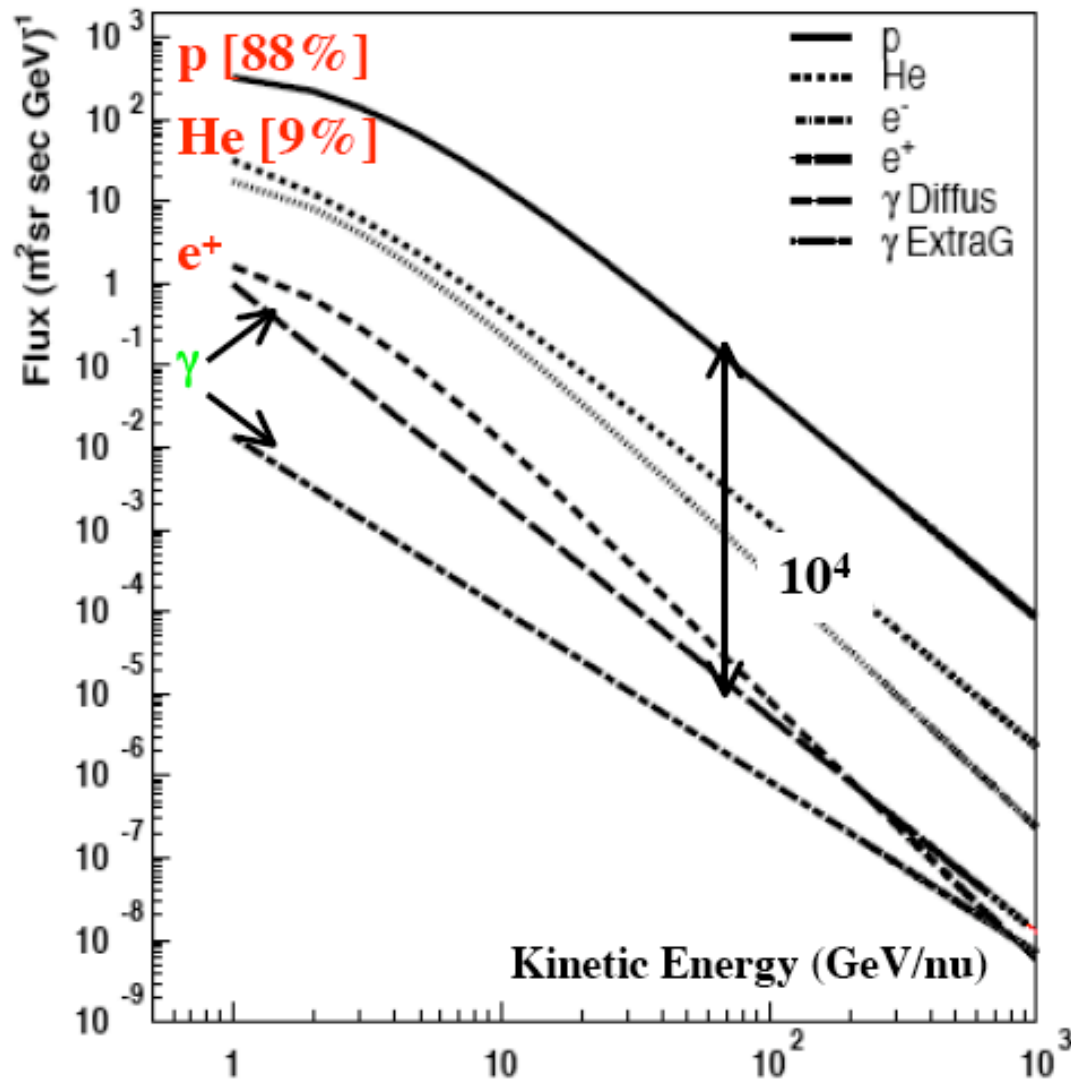
- Il decadimento deve essere recente poiché i prodotti del decadimento debbono aver viaggiato meno di circa 100 Mpc a causa dei processi di attenuazione.
- La massa della X deve essere molto al disopra della massima energia osservata, ipotesi soddisfatta dalle teorie Grand Unification (GUT) la cui scala di massa è  $10^{24}$ - $10^{25}$  eV.
- Il rapporto della densità di volume di queste particelle con il suo tempo di decadimento deve essere compatibile con il flusso osservato da UHECR.

# PRODUZIONE X

La particelle X può essere prodotta da due meccanismi distinti:

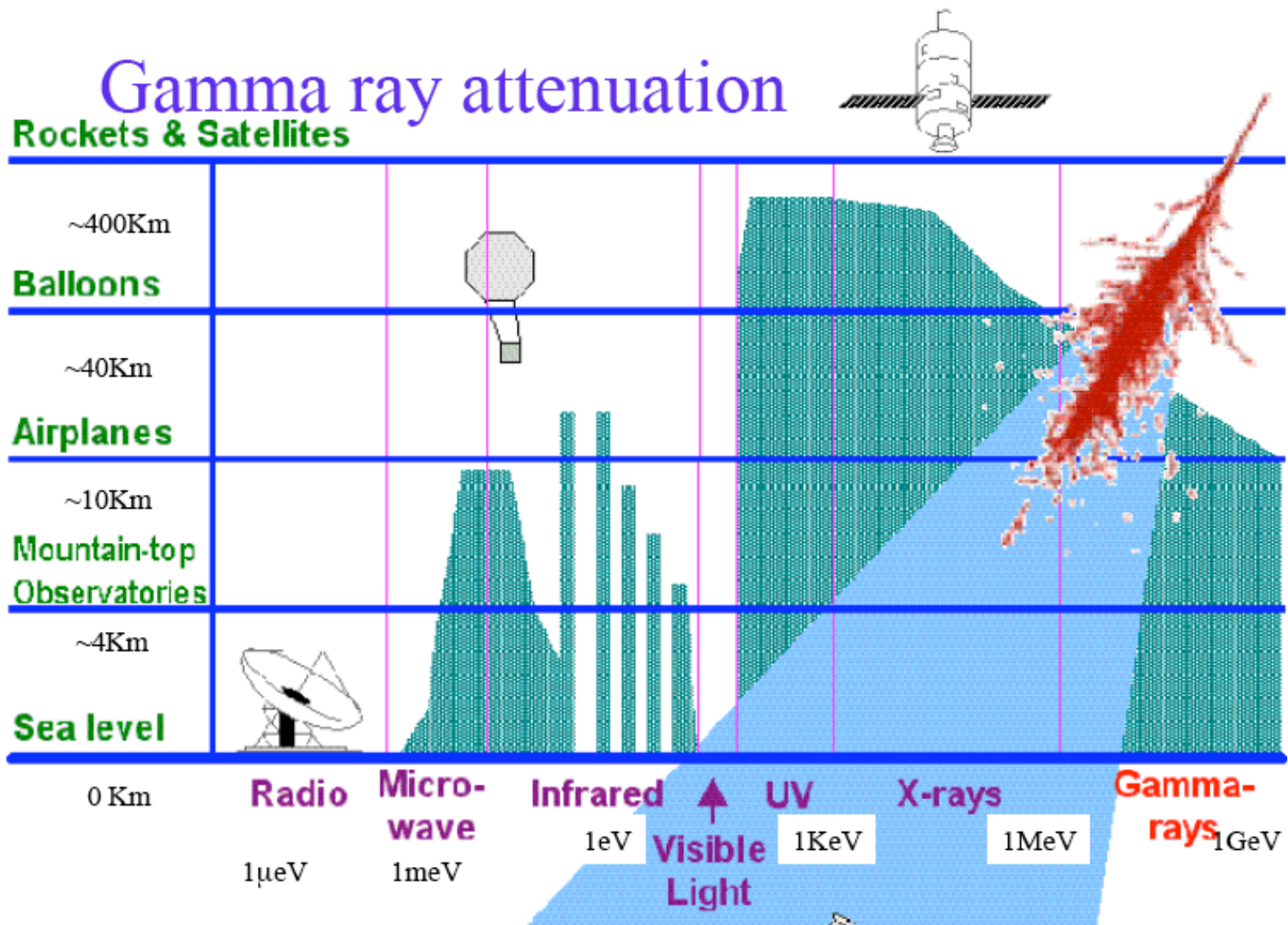
- Radiazione, interazione o collasso di Difetti Topologici (TD). In questi modelli i TD sono i residui della rottura di simmetria delle GUT nell'Universo primitivo.
- Particelle supermassive metastabili relitti di qualche campo quantistico primordiale prodotto dopo lo stadio inflazionario dell'espansione dell'Universo.

# GAMMA COSMICI



- per ottenere un rapporto fondo/segnale  $\approx 1\%$  occorre raggiungere una reiezione del fondo per un fattore  $10^6$
- fondo per conversione coppia e<sup>+</sup> e<sup>-</sup>: protoni + raggi  $\delta$
- fondo calorimetro em: protoni

# RAGGI GAMMA



# ASSORBIMENTO $\gamma$

- Assorbimento dovuto alle interazioni dei gamma con la radiazione di fondo e con l'infrarosso.

$$\gamma(k_1) + \gamma(k_2) \rightarrow e^+ + e^-;$$

se

$$E_{cm} = \sqrt{2k_1 k_2 (1 - \cos\theta)} \geq 2m_e$$

Nel rapporto  $I(L)/I_0 = \exp(-k_\gamma L)$ , dove  $L$  è la distanza sorgente-osservatore, alla temperatura  $kT$ , il coefficiente di assorbimento  $k_\gamma$  è dato da

$$k_\gamma = \frac{1}{2} \int_0^\infty \int_\theta \frac{dn_\gamma}{dk_2} \sigma_{\gamma\gamma} \sin\theta d\theta dk_2$$

e  $k_1$  e  $k_2$  sono le energie rispettivamente del fotone incidente e del fotone infrarosso o di microonde.

- $\sigma_{\gamma\gamma}$  è la sezione d'urto, di trasformazione di due fotoni in due elettroni;
- $dn_\gamma/dk_2$  è la distribuzione dei fotoni di bassa energia.

Lo spettro di energia del fondo di microonde è:

$$\frac{dn_\gamma}{dk_2} = \frac{1}{\hbar^3 c^3 \pi^2} \frac{k_2^2}{\exp(k_2/kT) - 1}$$

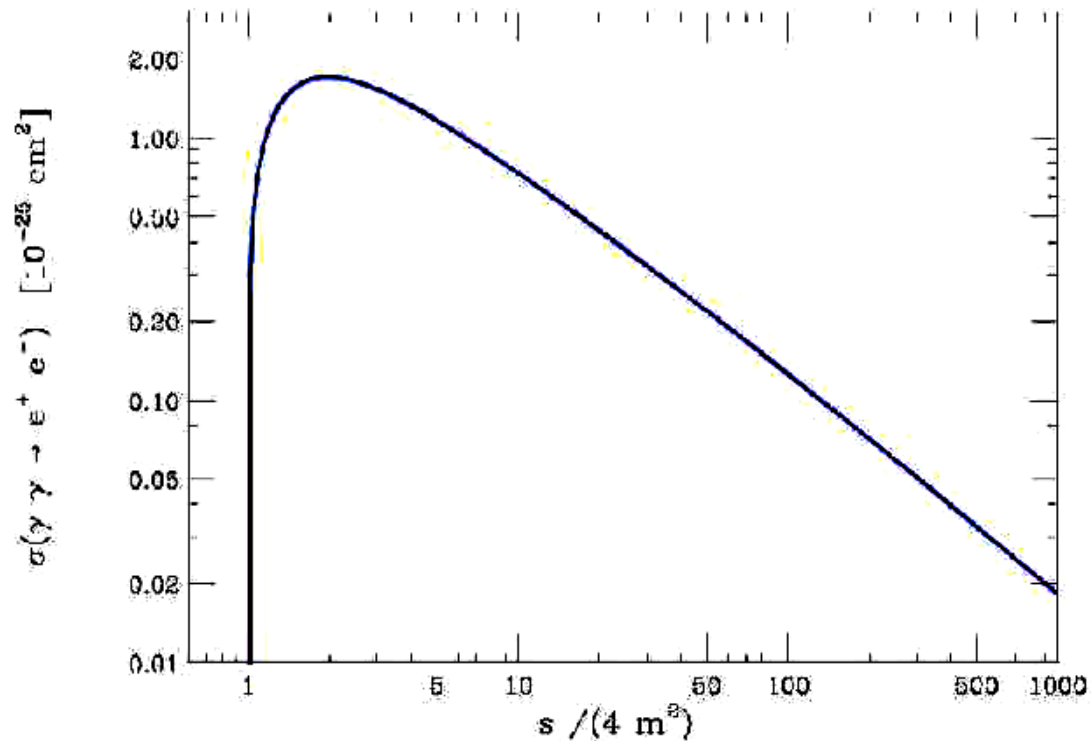
# ASSORBIMENTO $\gamma$

La sezione d'urto  $\gamma \rightarrow e^+e^-$  è:

$$\sigma_{\gamma} = \frac{\pi r_e^2}{2} (1 - v^2) \left\{ (3 - v^4) \ln \left( \frac{1 + v}{1 - v} \right) - 2v(2 - v^2) \right\}$$

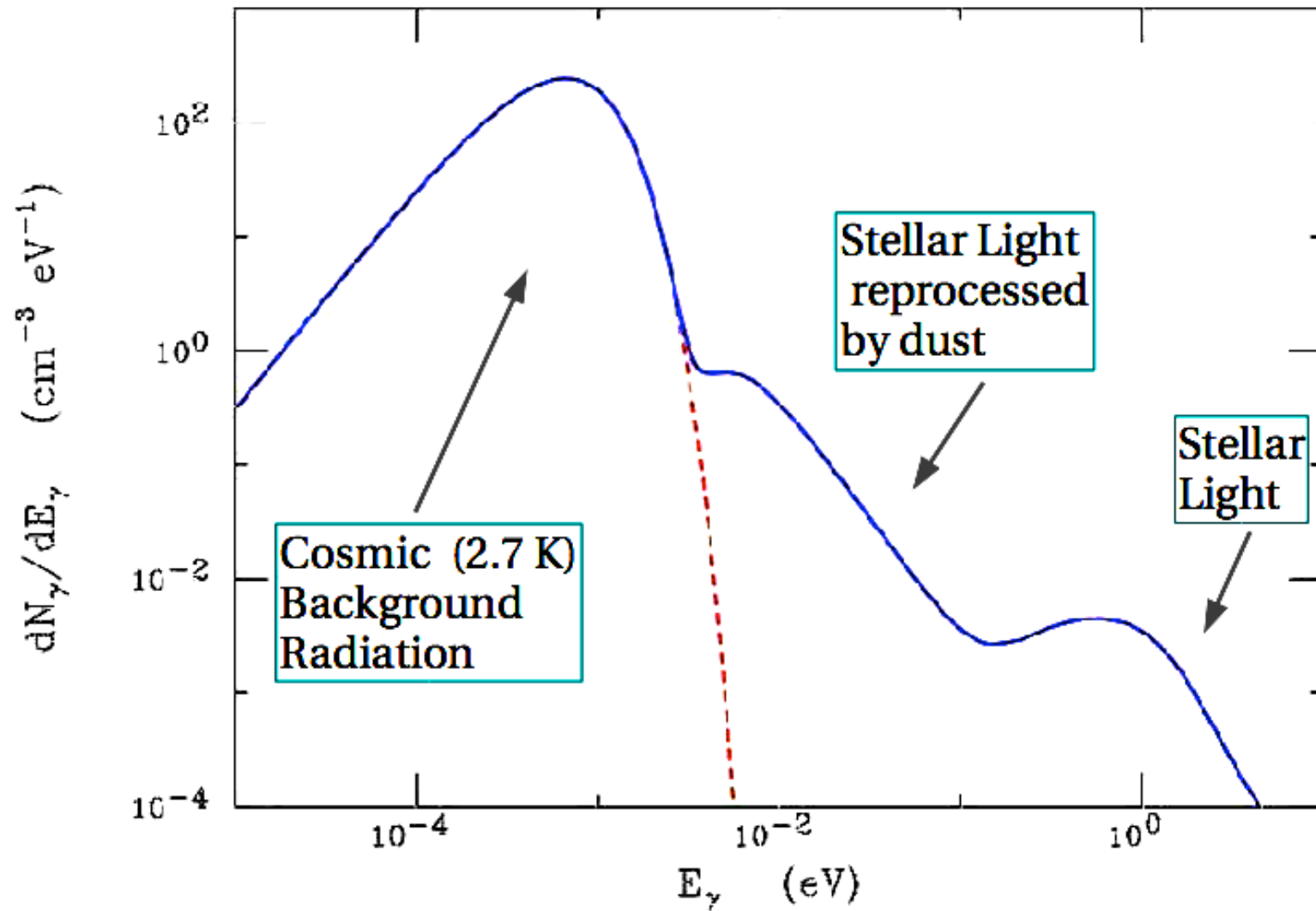
dove

$$v = \sqrt{1 - \frac{4m_e^2}{2k_1k_2(1 - \cos\theta)}}$$

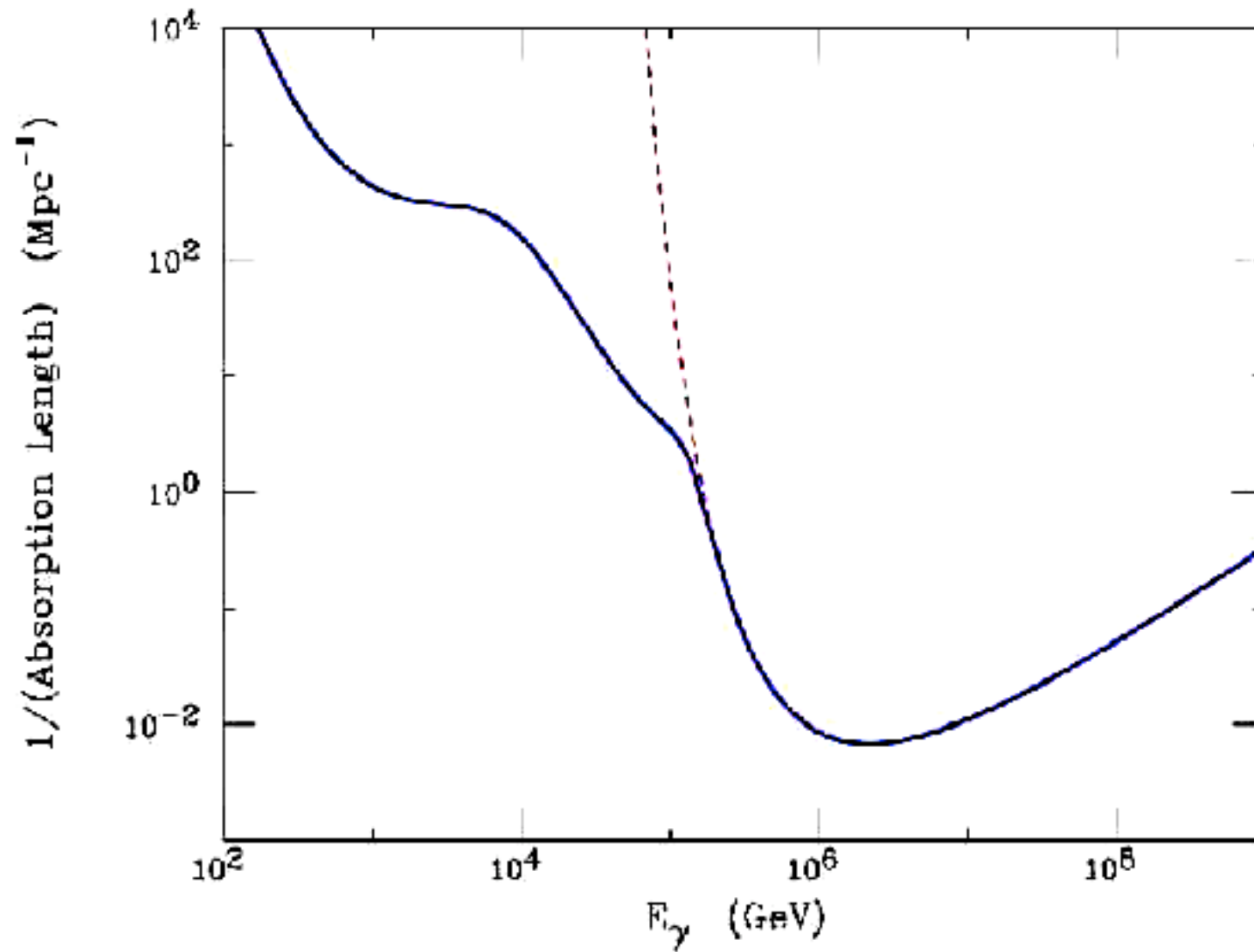




# DENSITA' FOTONI/UNIVERSO



# LUNGHEZZA DI ASSORBIMENTO



# ORIGINE DEI GAMMA COSMICI

Le sorgenti dei gamma cosmici non possono essere di origine termica in quanto richiederebbero temperature al di sopra di  $10^9$  K, ovvero  $kT > 1$  MeV.

1. *Bremsstrahlung*. I gamma possono essere emessi da elettroni relativistici nel campo coulombiano di particelle cariche. L'energia persa dagli elettroni è per unità di materia attraversata ( $\rho x$ , grammi/cm<sup>2</sup>)  $dE/d\rho x = -E/X_0$  dove  $X_0$  è la lunghezza di radiazione. La radiazione è emessa predominantemente in un intervallo angolare  $m_e c^2/E$ .
2. *Scattering Compton inverso*. Un elettrone relativistico può trasferire una parte considerevole della sua energia a fotoni di bassa energia. Fotoni di energia  $E_i \gamma$  ricevono in media un'energia

$$E_\gamma \approx E_i \gamma (E / m_e c^2)^2$$

Ad esempio un elettrone di 60 GeV/c può trasformare un fotone del CMB di  $6 \times 10^{-4}$  eV in un gamma di 10 MeV.

3. *Collisioni anelastiche*  $p + p \rightarrow \pi^0 + X$ . Protoni al di sopra della soglia di energia possono produrre pioni neutri che decadono in  $2 \times 10^{-16}$  s in due gamma con energia nel c.m. di  $m_\pi/2$ .
4. *Annichilazione*  $e^+ e^- \rightarrow \gamma \gamma$ .
5. *Radiazione di sincrotrone*. Emessa da elettroni relativistici in campo magnetico. Questo processo è importante nelle pulsar che hanno un campo magnetico molto elevato dell'ordine di  $10^6 - 10^8$  T. La potenza irradiata dagli elettroni è  $P \propto (B_\perp \beta \gamma)^2$  dove  $B_\perp$  è il campo magnetico,  $\beta=v/c$ ,  $\gamma=E/m$  dell'elettrone. Lo spettro di emissione ha un massimo per

$$\nu_m = 0.29(3/4\pi)eB_\perp \gamma^2 / m_e$$

6. *Linee spettrali nucleari*. Transizioni tra livelli nucleari emessi nei decadimenti radioattivi o in seguito all'eccitazione dei nuclei da parte di particelle energetiche.