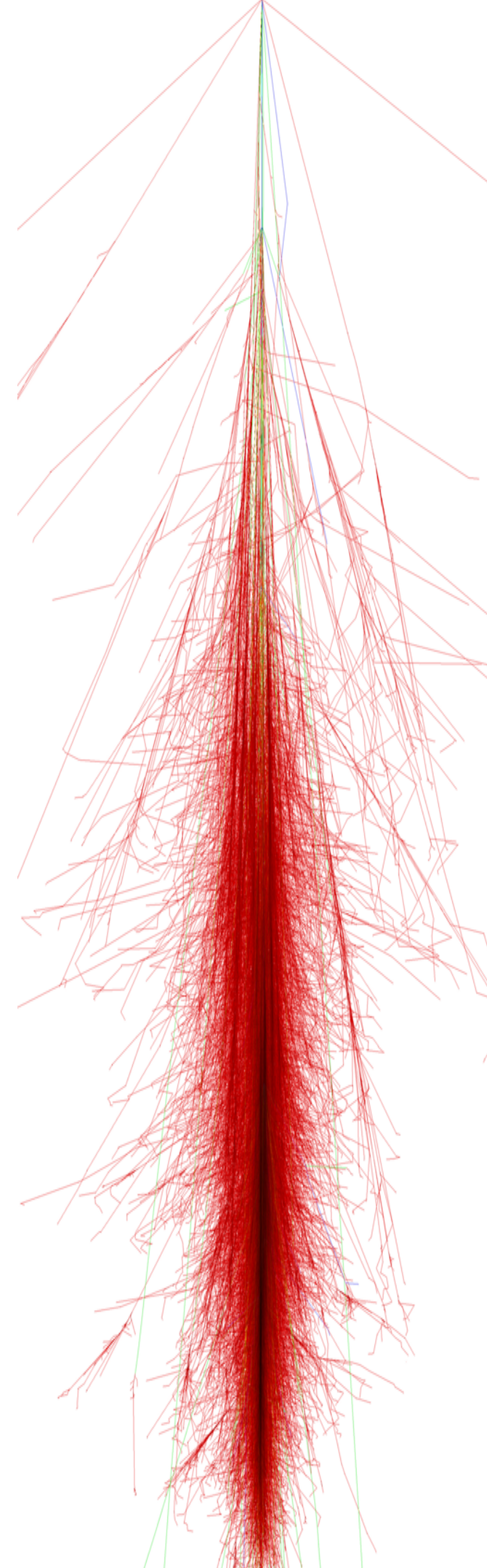
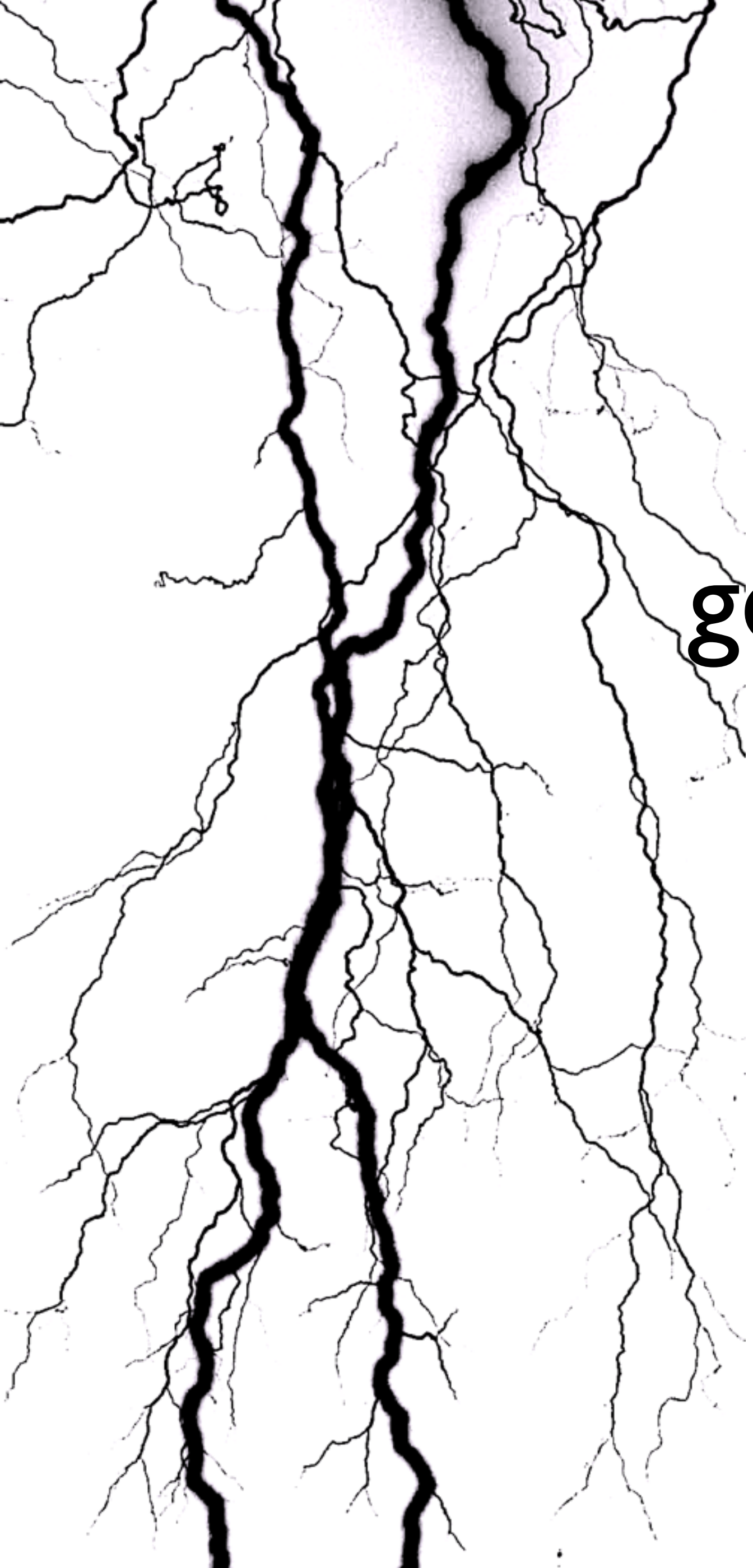


# Rayons cosmiques, gerbes atmosphériques

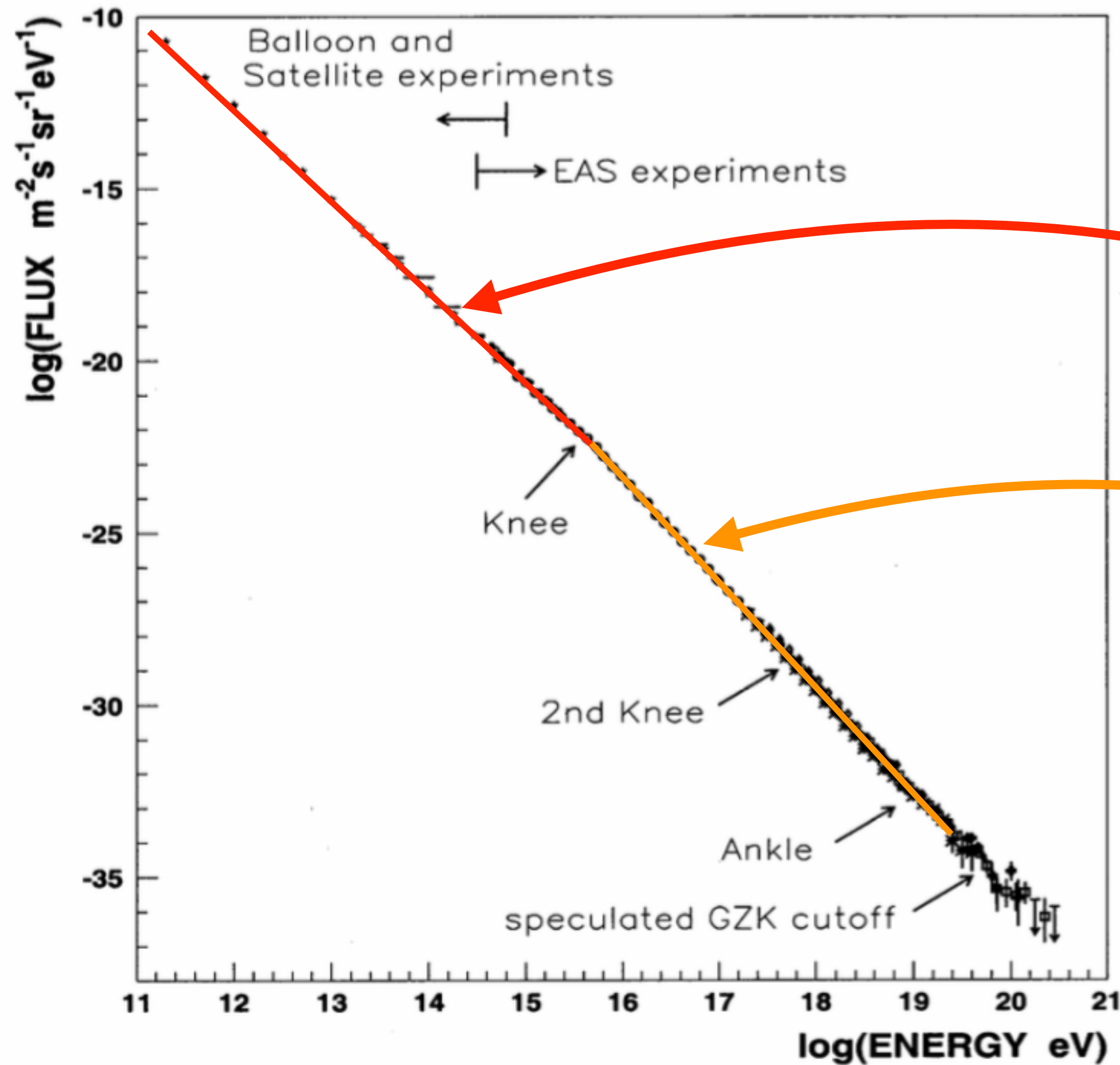


# Rayons cosmiques

- rayon cosmique = noyau chargé d'origine non solaire (ie accéléré dans notre Galaxie ou ailleurs)
- rayon cosmique primaire = particules accélérées dans les objets astrophysiques
- rayon cosmique secondaire = particules produites suite à l'interaction des primaires avec le gaz interstellaire
- détection de rayons cosmiques d'énergies allant de quelques  $10^9$  eV jusqu'à  $10^{20}$  eV

composition ? énergie (et mécanismes d'accélération) ? sources ? limite en énergie ?

# Rayons cosmiques : spectre en énergie



$$I_N(E) = \frac{dN}{dS dt d\Omega dE} \text{ nucléons.m}^{-2}.\text{s}^{-1}.\text{sr}^{-1}.\text{eV}^{-1}$$

flux différentiel dans  $10^{11}$ - $3 \times 10^{15}$  eV avec  $\alpha=2.7$  :

$$I_N(E) \sim 10^{19.555} \left( \frac{E}{1 \text{ eV}} \right)^{-\alpha}$$

flux différentiel dans  $3 \times 10^{15}$  eV -  $3 \times 10^{18}$  eV avec  $\alpha=3.1$  :

$$I_N(E) \sim 10^{25.748} \left( \frac{E}{1 \text{ eV}} \right)^{-\alpha}$$

flux intégré :

$$\frac{dN}{dS dt d\Omega} (E > E_0) = k \frac{E_0^{1-\alpha}}{\alpha - 1} \text{ nucléons.m}^{-2}.\text{s}^{-1}.\text{sr}^{-1}$$

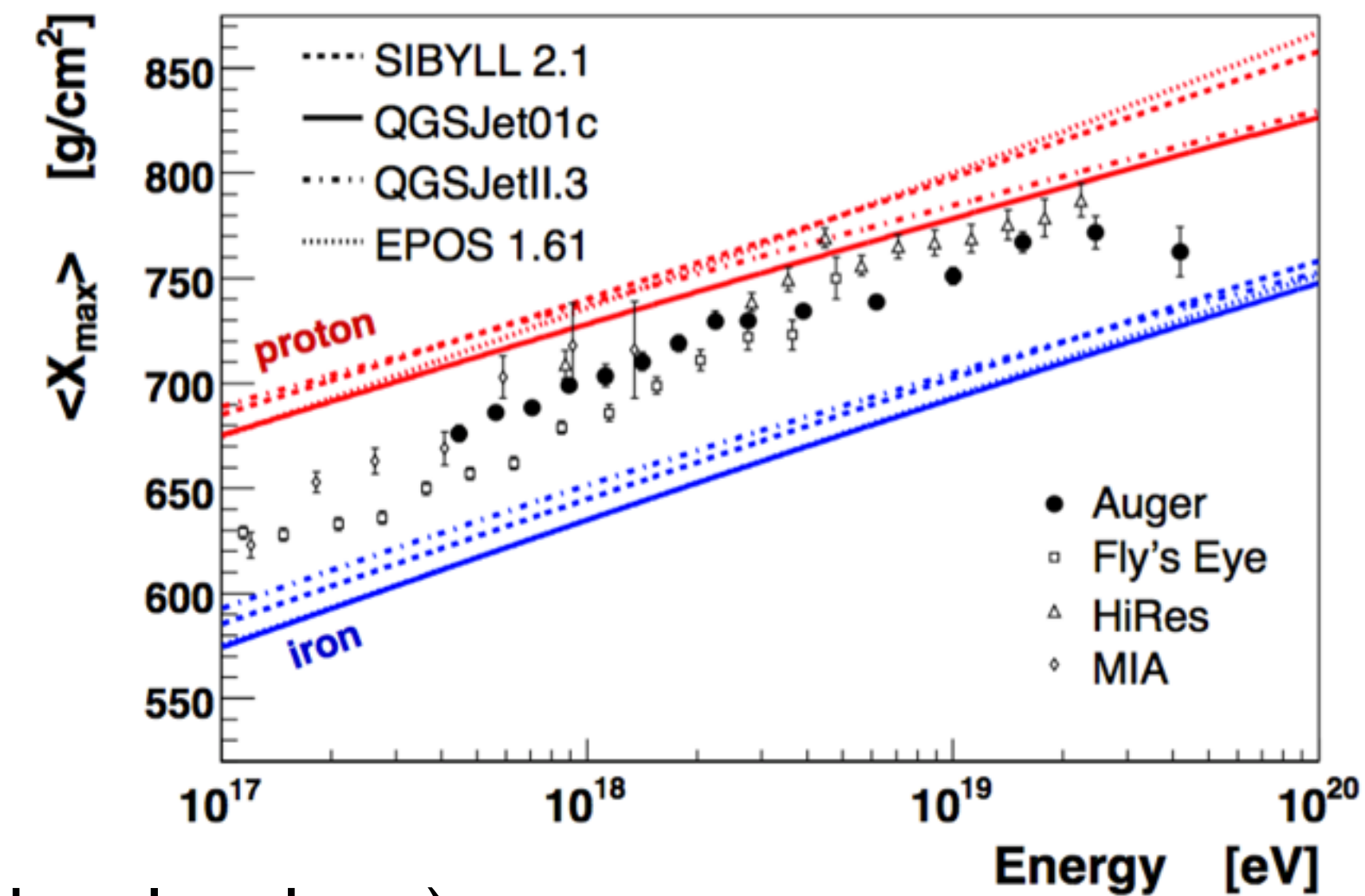
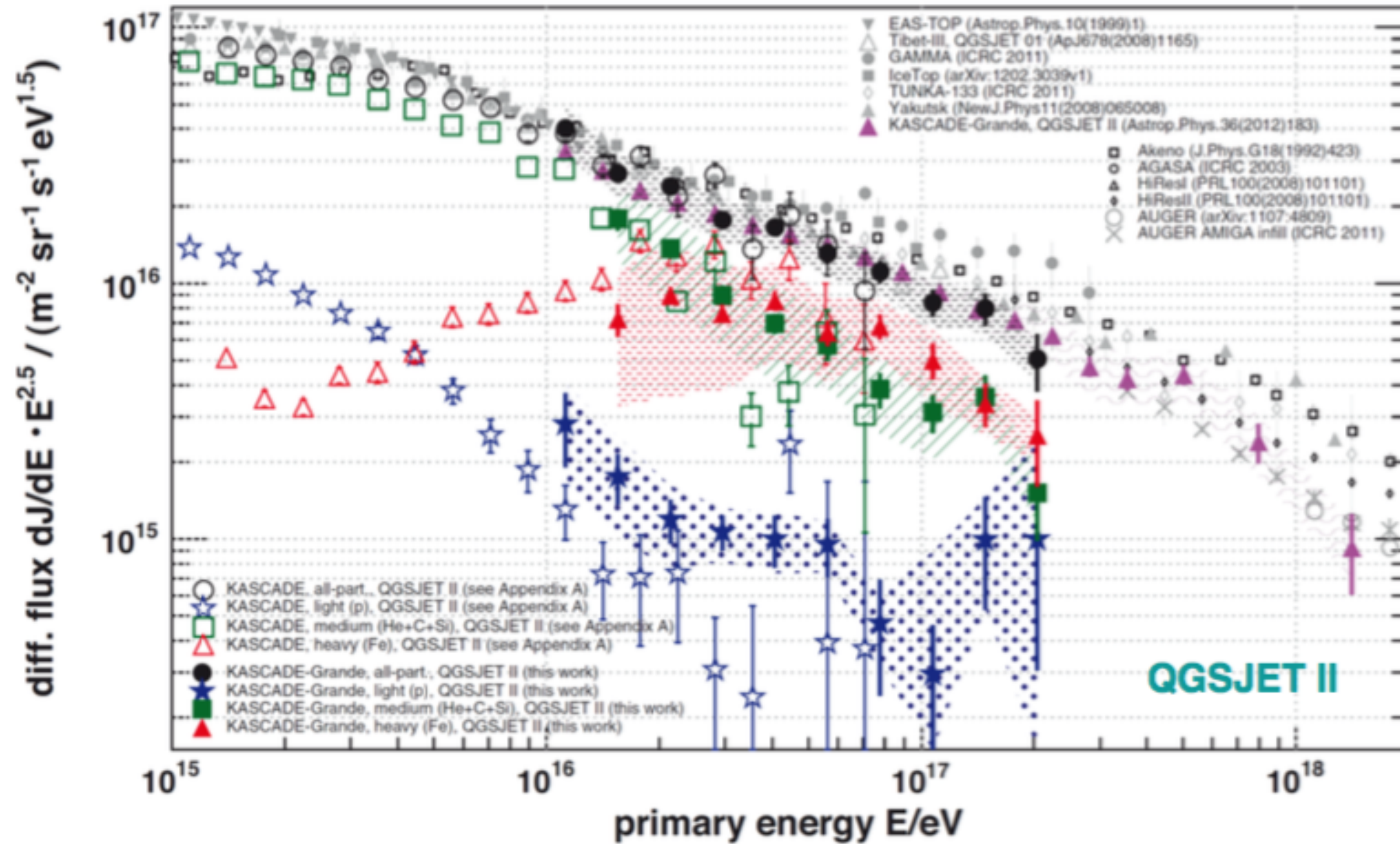
$$= 50 \text{ km}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ sr}^{-1} \text{ pour } E > 10^{15} \text{ eV}$$

$$= 0.4 \text{ km}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ sr}^{-1} \text{ pour } E > 10^{16} \text{ eV}$$

$$\times 10 \text{ en } E \rightarrow \times 1/126 \text{ en flux}$$

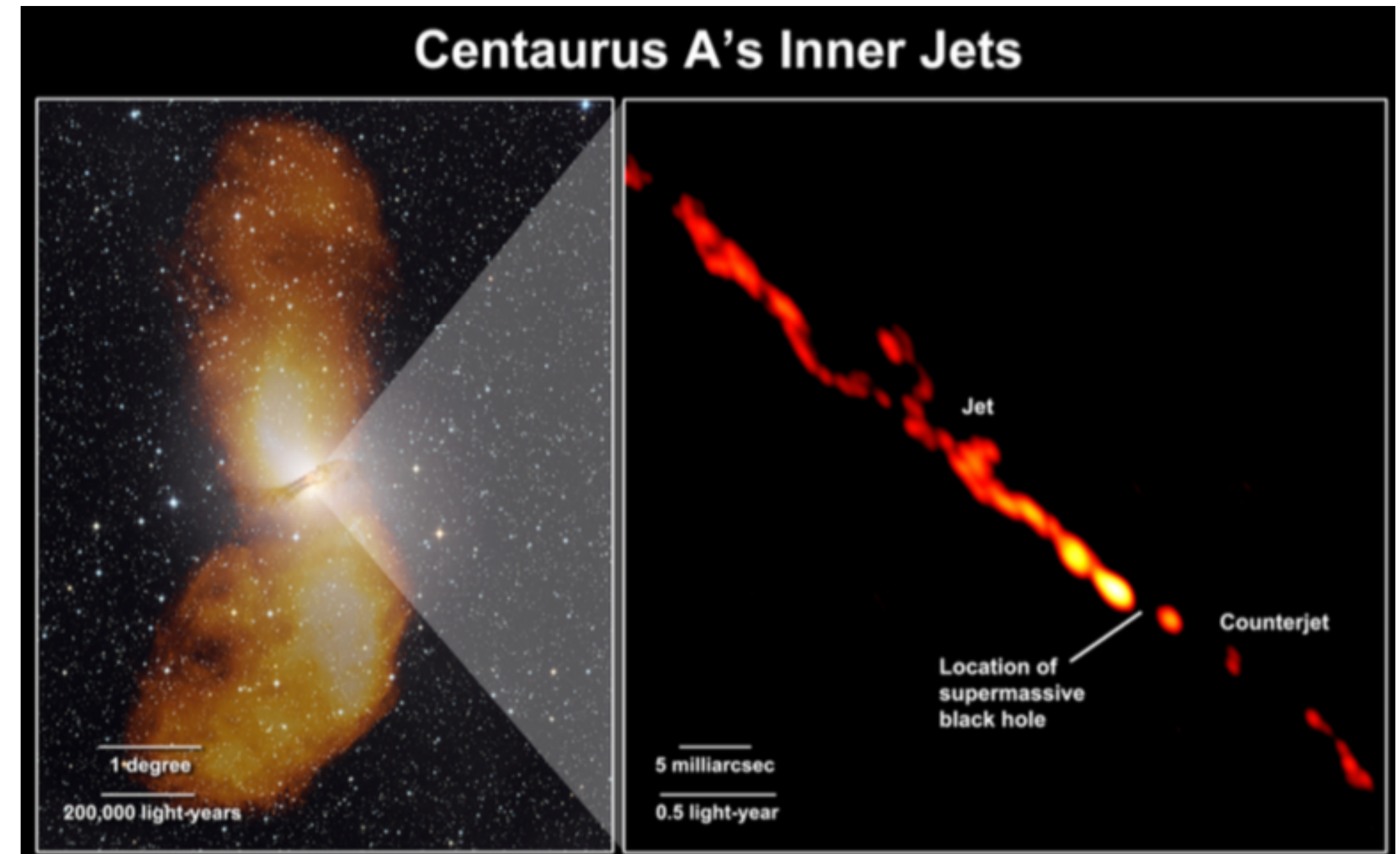
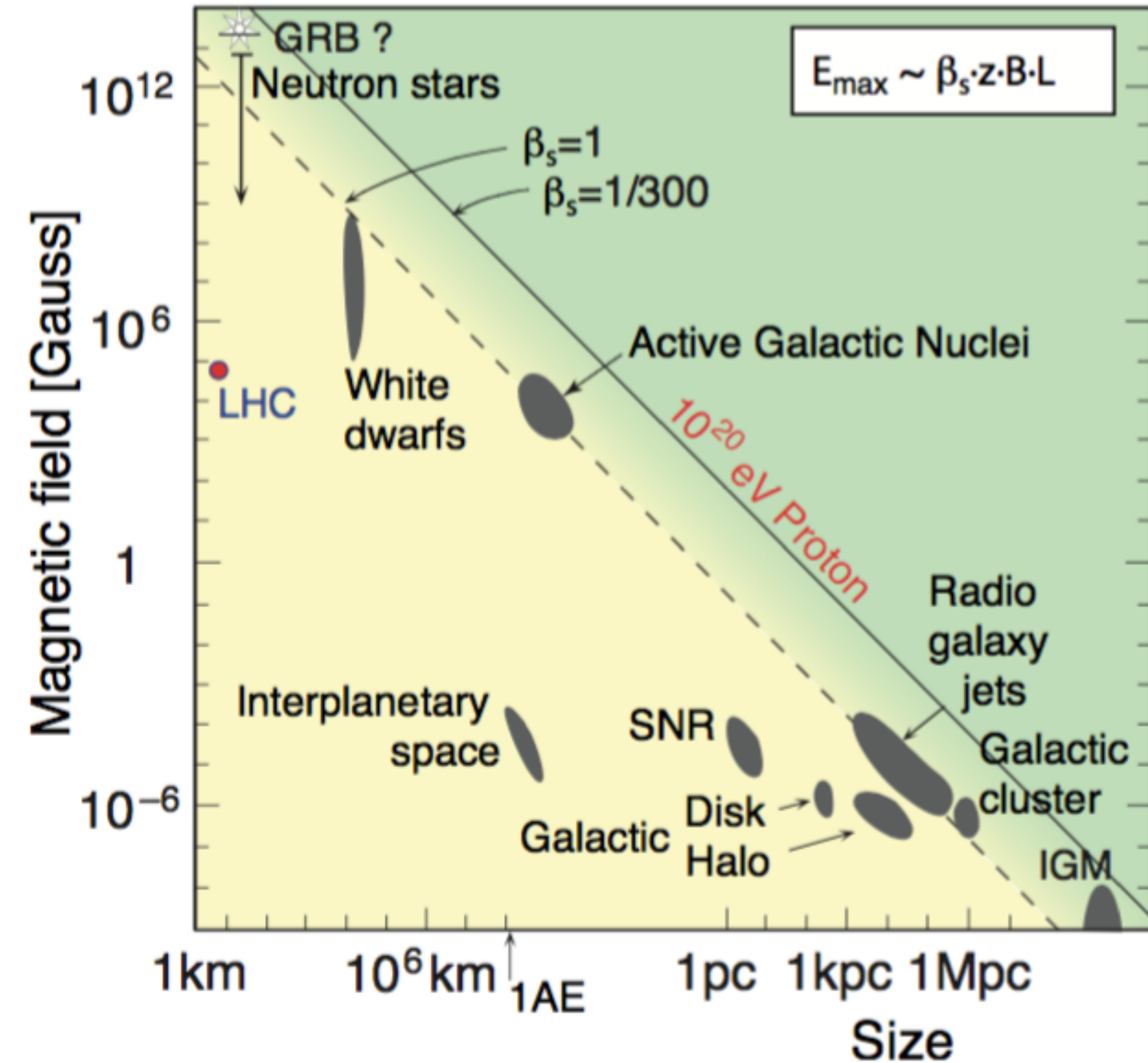
# Rayons cosmiques : composition

proton medium (He+C+Si) iron



Lois de puissance : mécanisme générique de Fermi (accélération dans les chocs)

# Accélération de Fermi



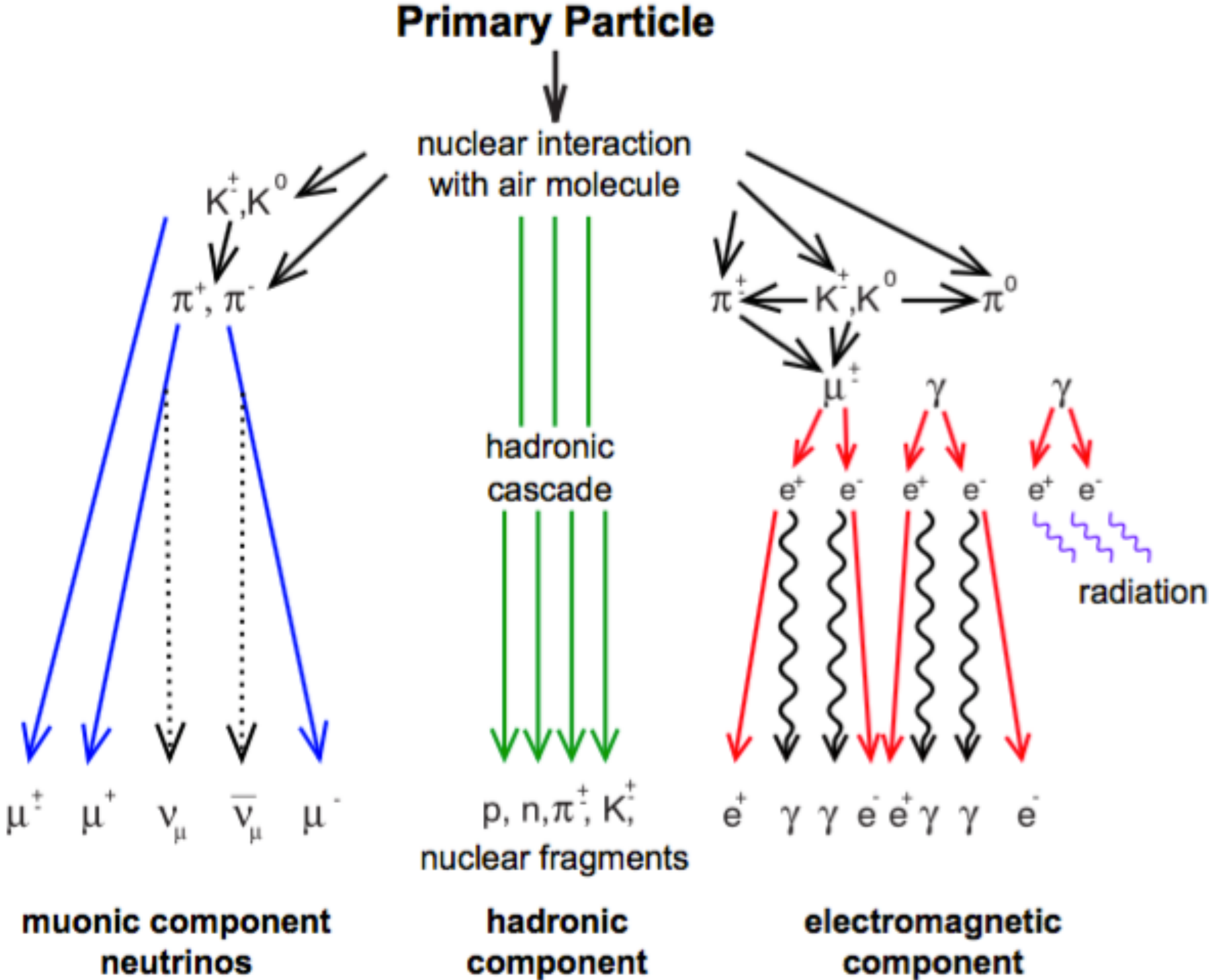
# Gerbes atmosphériques



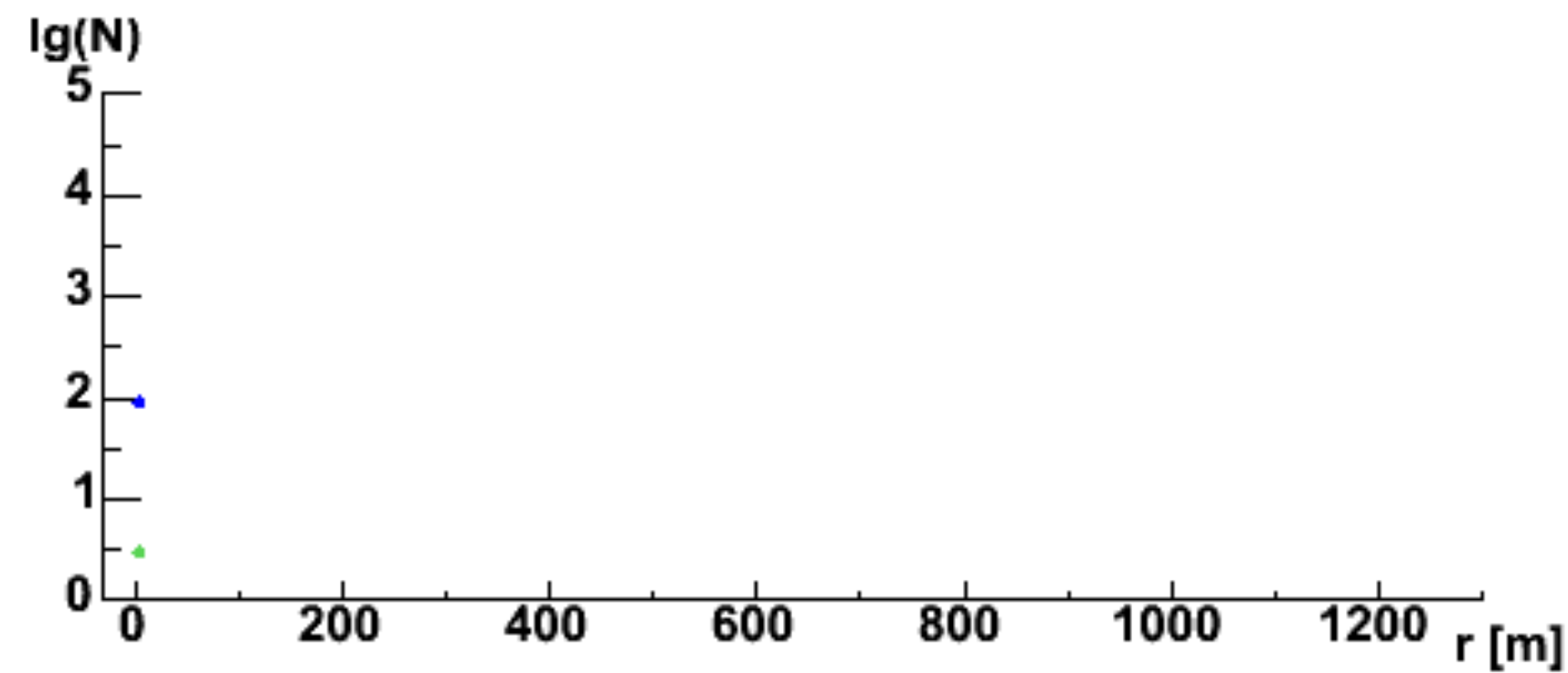
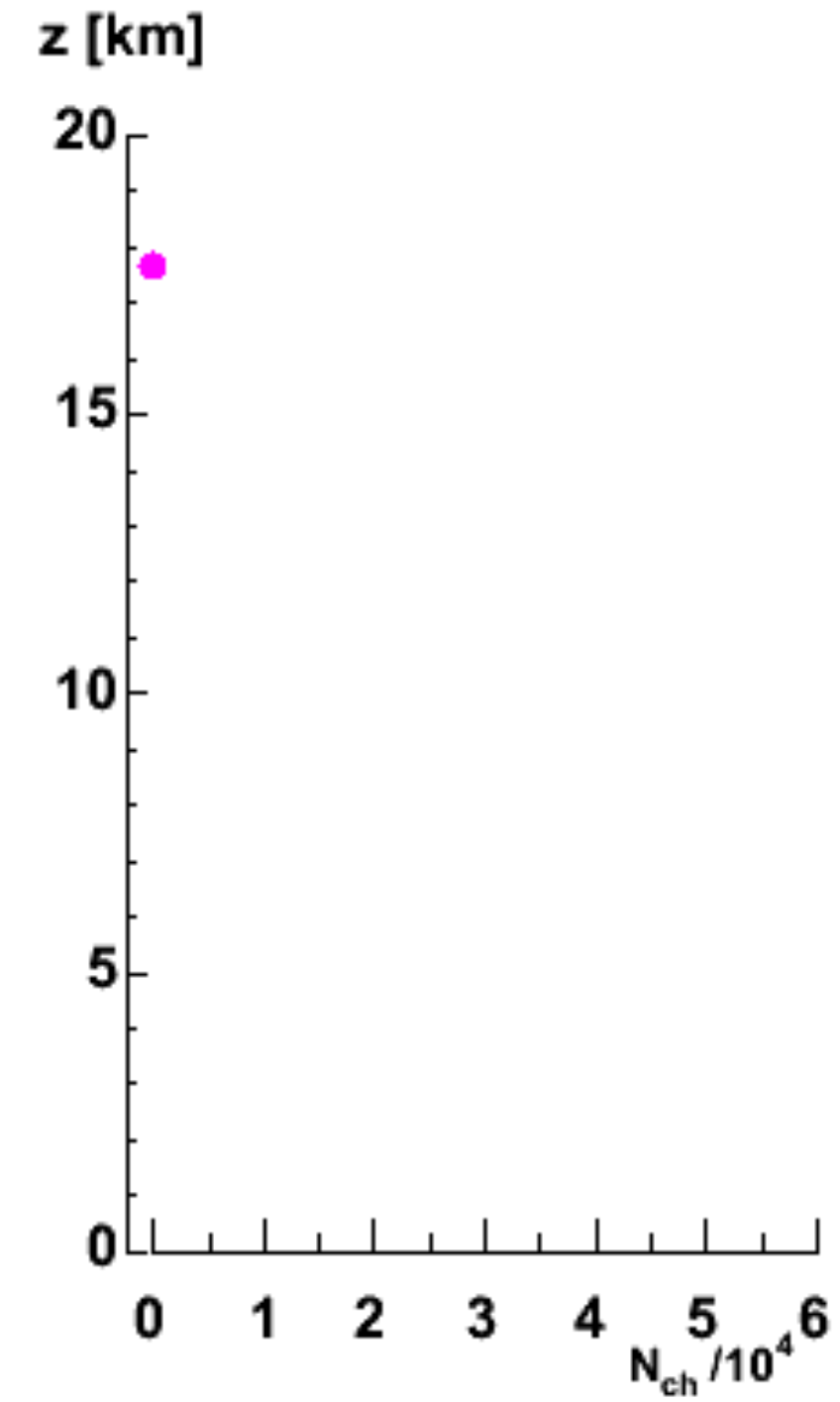
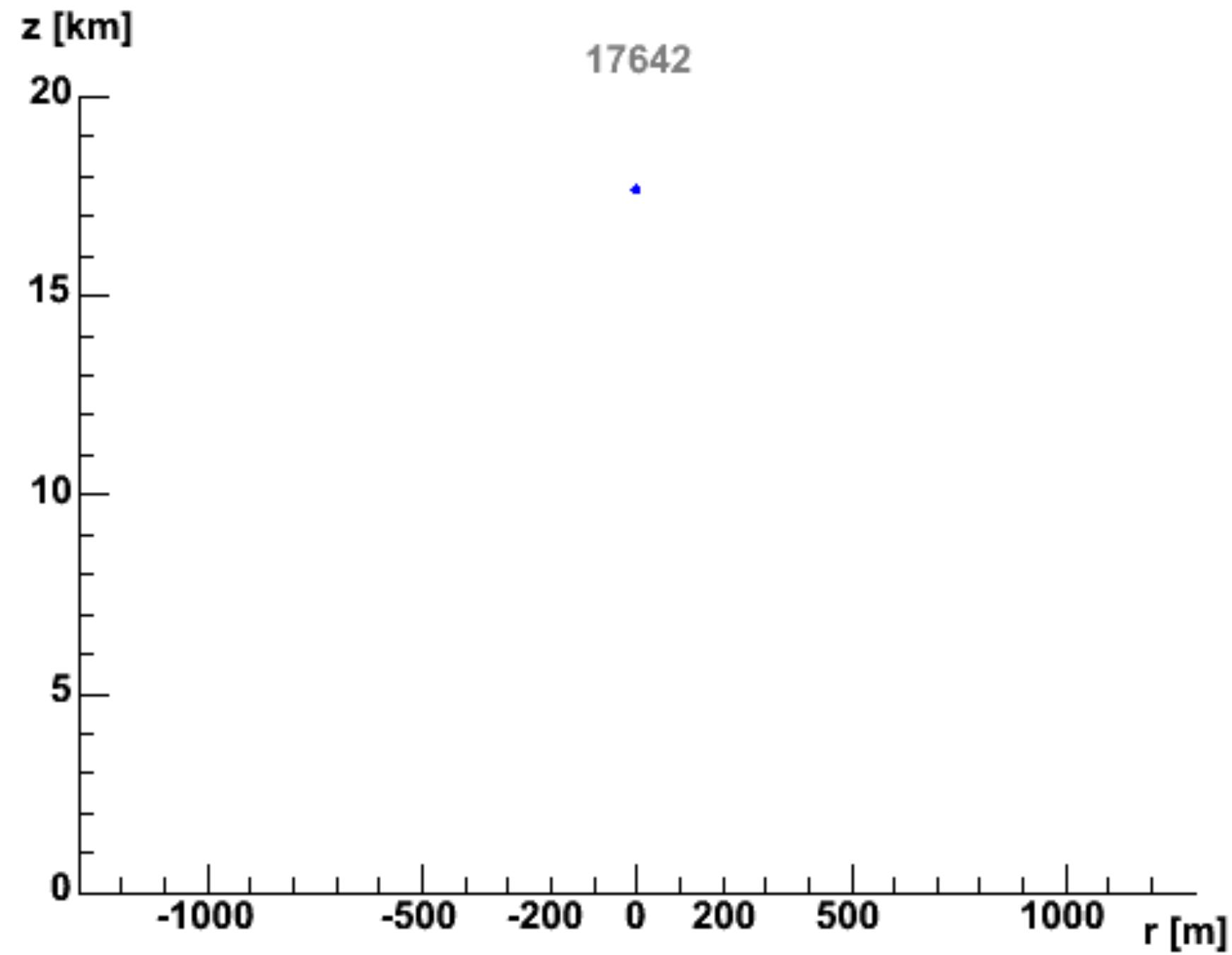
**Fig. 1.** Image of a particle cascade, or shower, as seen in a cloud chamber at 3027 m altitude. The primary particle is estimated to be a proton of about 10 GeV. The first interaction will most probably have been in one of the lead plates. Neutral pions feed the cascade which multiplies in the lead. Charged pions make similar interactions to protons, or decay into muons. The cross-sectional area of the cloud chamber is  $0.5 \times 0.3 \text{ m}^2$  and the lead absorbers have a thickness of 13 mm each [Fretter, 1949].

# Gerbes atmosphériques

- gerbe atmosphérique = ensemble des particules secondaires générées suite à la collision d'un unique rayon cosmique
- existence d'un cœur hadronique près de l'axe, à l'origine de sous-gerbes électromagnétiques générées par  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$
- les  $\gamma$  créent des  $e^+$ ,  $e^-$  et sont les particules les plus nombreuses
- à  $10^{15}$  eV,  $\exists 10^6$  particules au sol, réparties sur 100 m x 100 m
- à  $10^{20}$  eV,  $\exists 10^{11}$  particules au sol, réparties sur 3 km x 3 km



# Gerbes atmosphériques



**Proton  $10^{14}$  eV**

$h^{1st} = 17642$  m

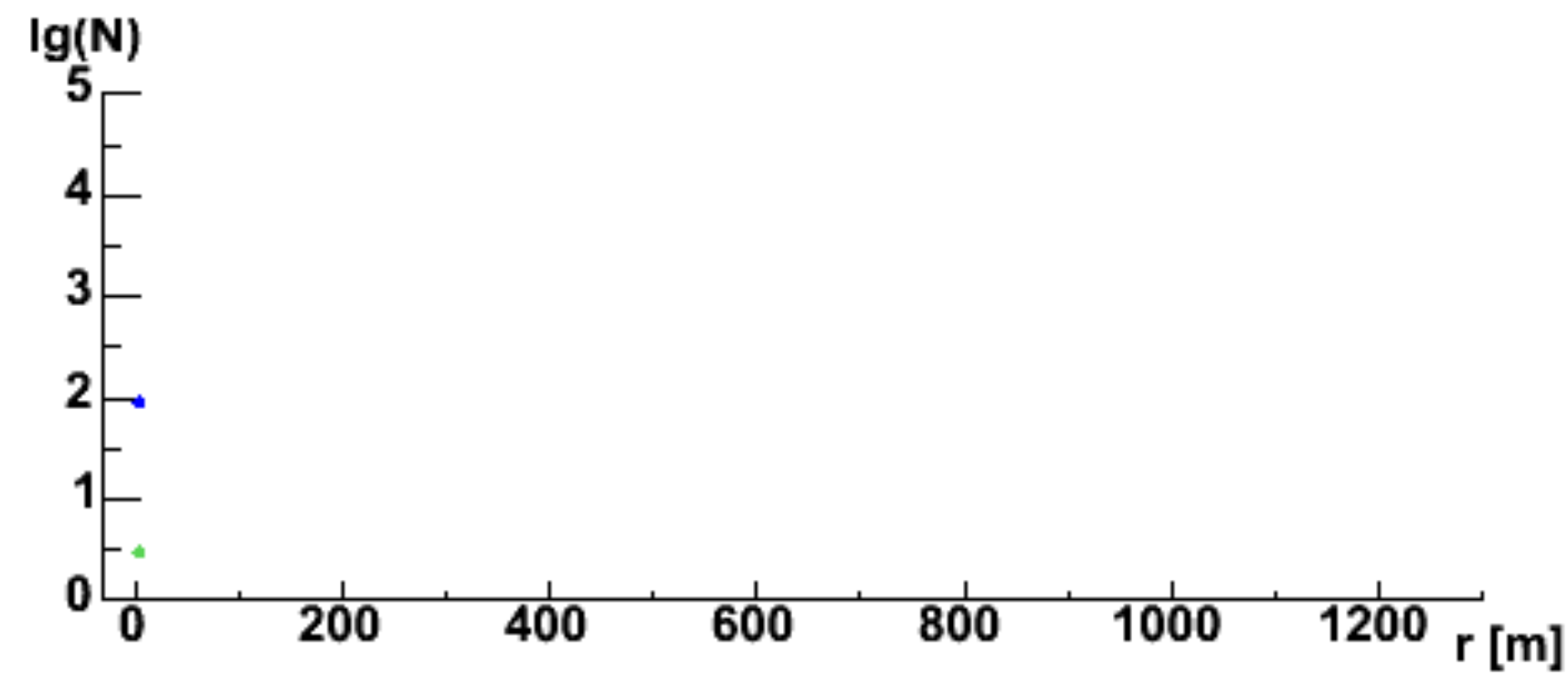
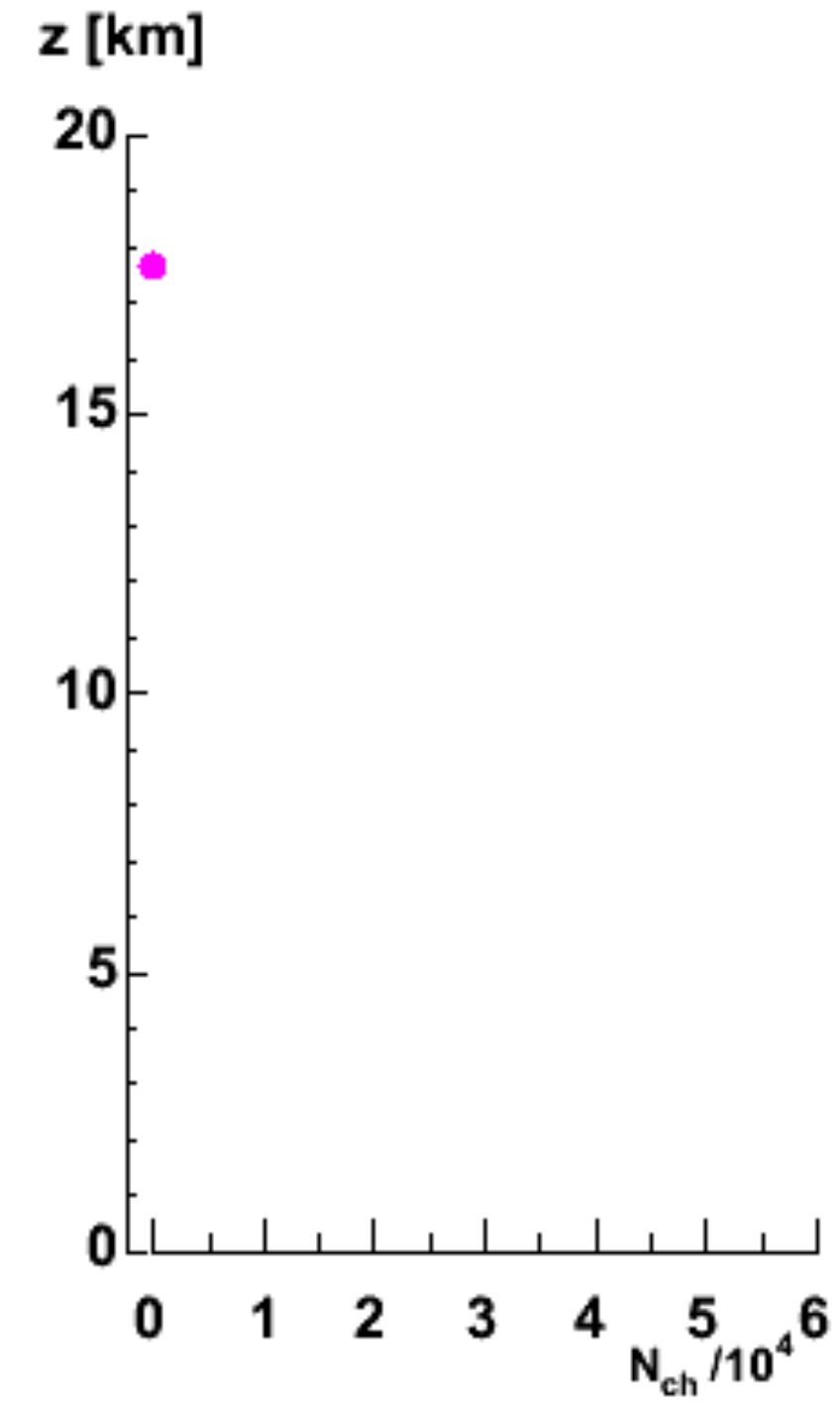
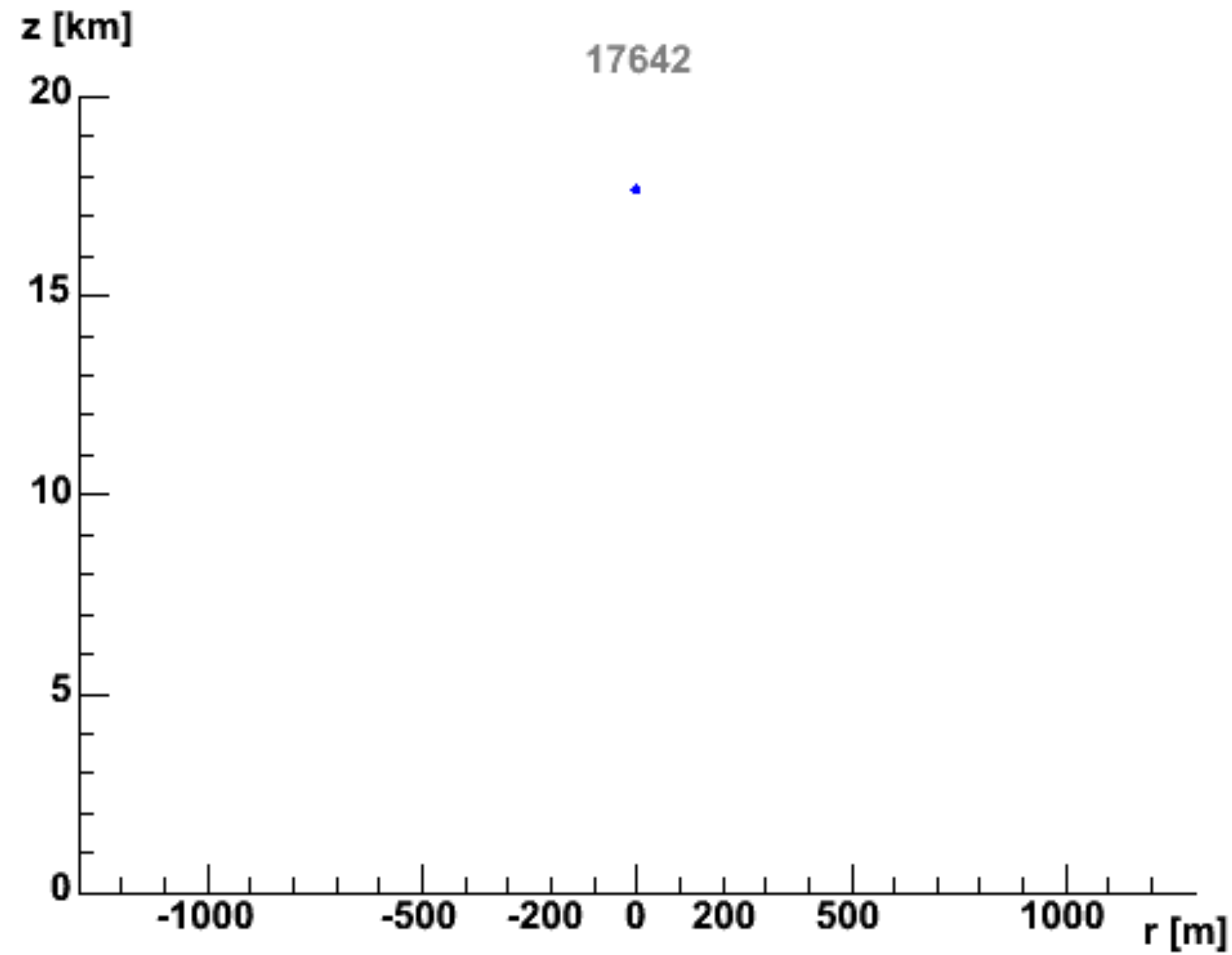
hadrons    muons

neutrons    electrs

J.Oehlschlaeger,R.Engel,FZKarlsruhe



# Gerbes atmosphériques



**Proton  $10^{14}$  eV**

$h^{1st} = 17642$  m

hadrons    muons

neutrons    electrs

J.Oehlschlaeger,R.Engel,FZKarlsruhe

# Scénario de développement

noyau de masse  $A$ , d'énergie  $E$ , section efficace avec l'air :

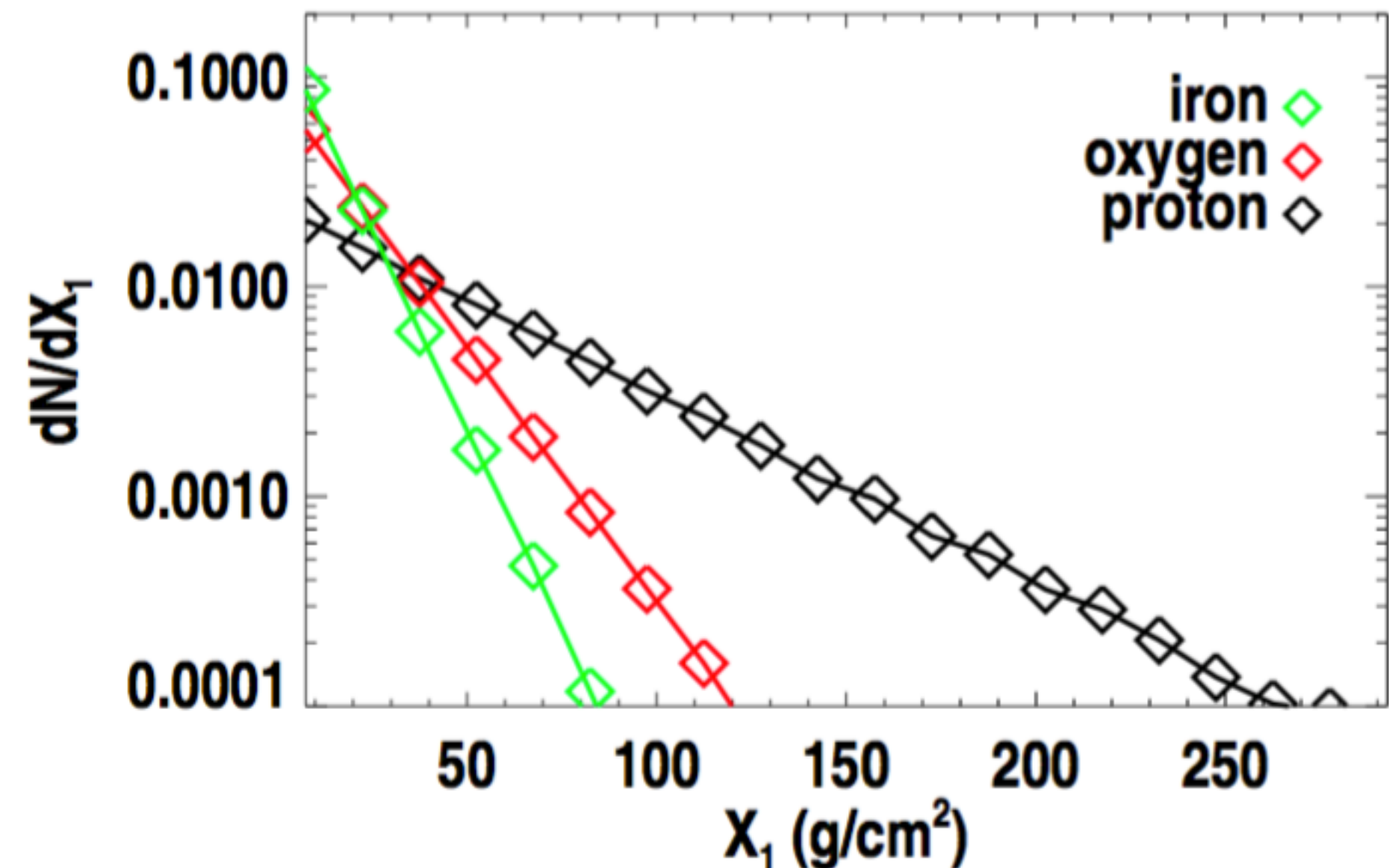
$$\sigma_M(A, E) = A^{3/2} \left[ \alpha_{3/2} \log E + \beta_{3/2} \log^2 E + \gamma_{3/2} \right] + A \left[ \alpha_1 \log E + \beta_1 \log^2 E + \gamma_1 \right] + A^{1/2} \left[ \alpha_{1/2} \log E + \beta_{1/2} \log^2 E + \gamma_{1/2} \right] + \left[ \alpha_0 \log E + \beta_0 \log^2 E + \gamma_0 \right] \text{ mb}$$

longueur d'interaction dans l'air :

$$\lambda_{\text{int}}(A, E) = M_{\text{air}} / \sigma_M(A, E), \text{ avec } M_{\text{air}} = 24160 \text{ mb.g.cm}^{-2}.$$

point de première interaction aléatoire, loi Poissonienne :

$$\frac{dP}{dX_1} = \frac{1}{\lambda_{\text{int}}(A, E)} e^{-X_1 / \lambda_{\text{int}}(A, E)}.$$

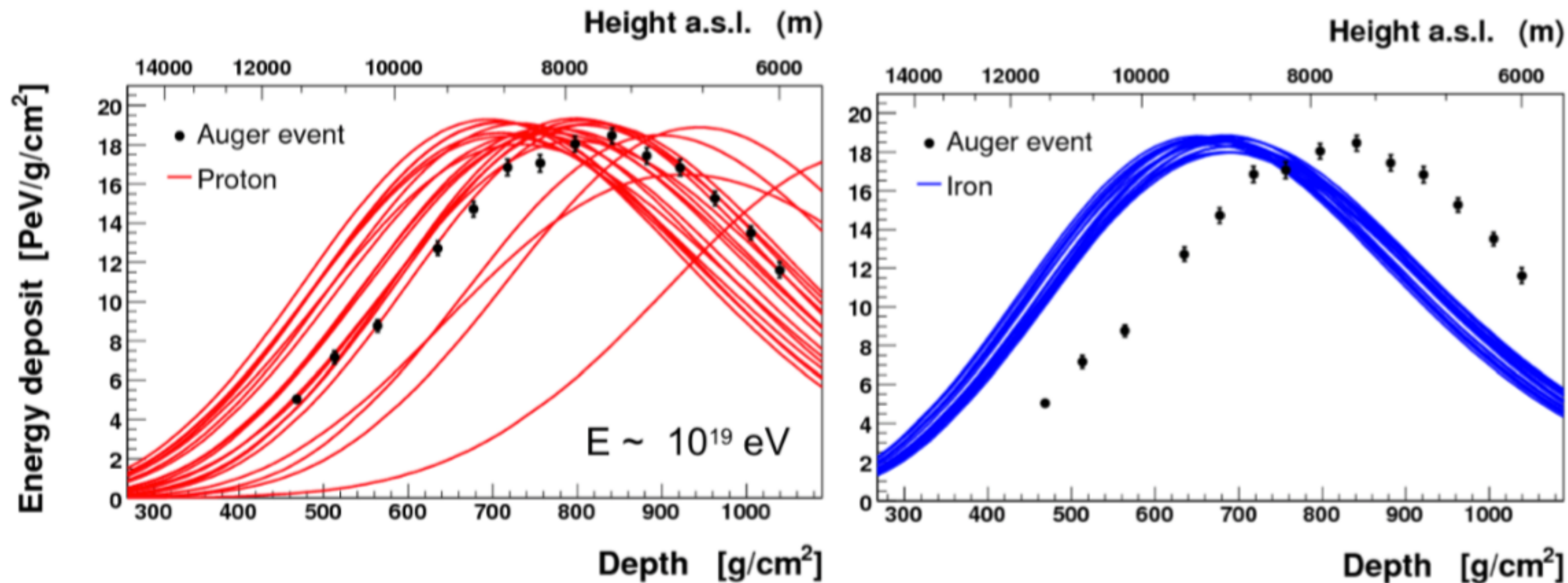


# Scénario de développement

puis déroulement ultérieur caractérisé par peu de paramètres :

$$X_{\max} = X_1 + X_0 \left( a + b \ln \frac{10^{12} E / 81 \text{ MeV}}{A} \right) \propto \ln E / A$$

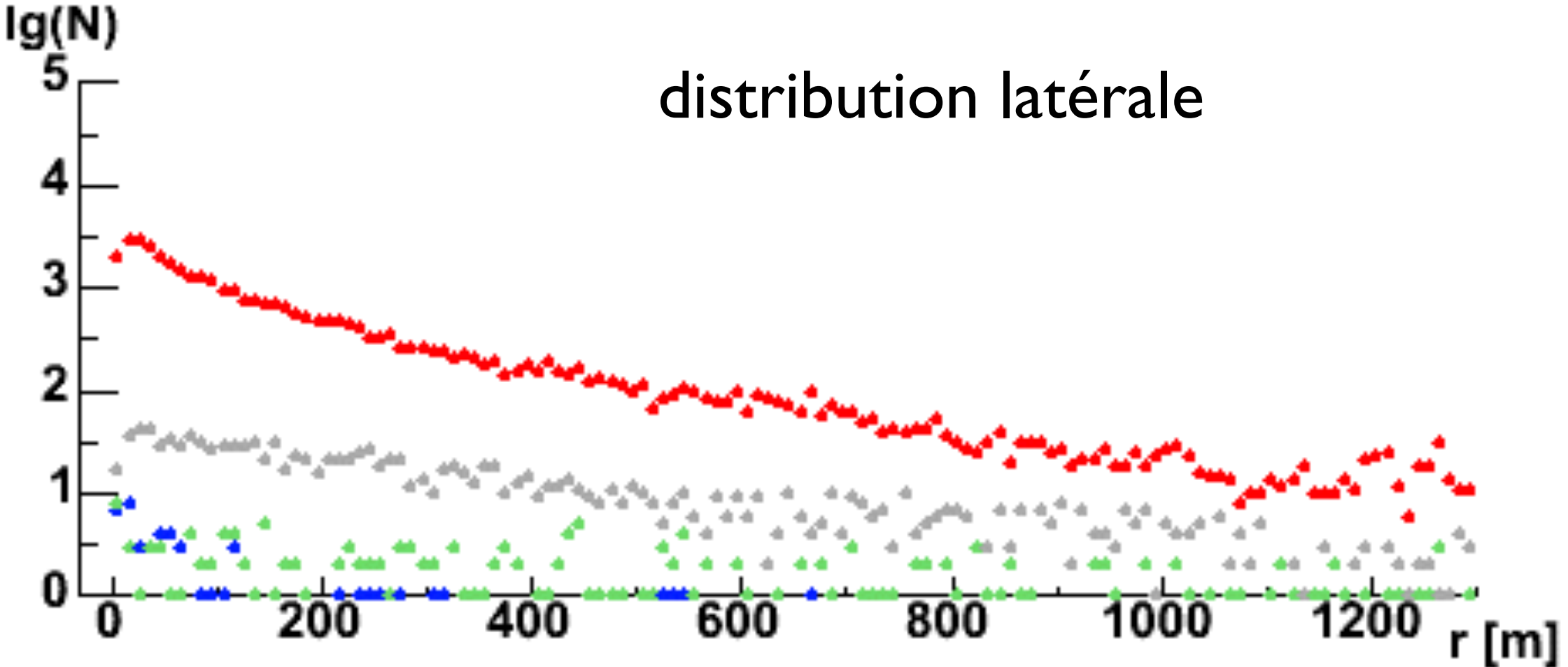
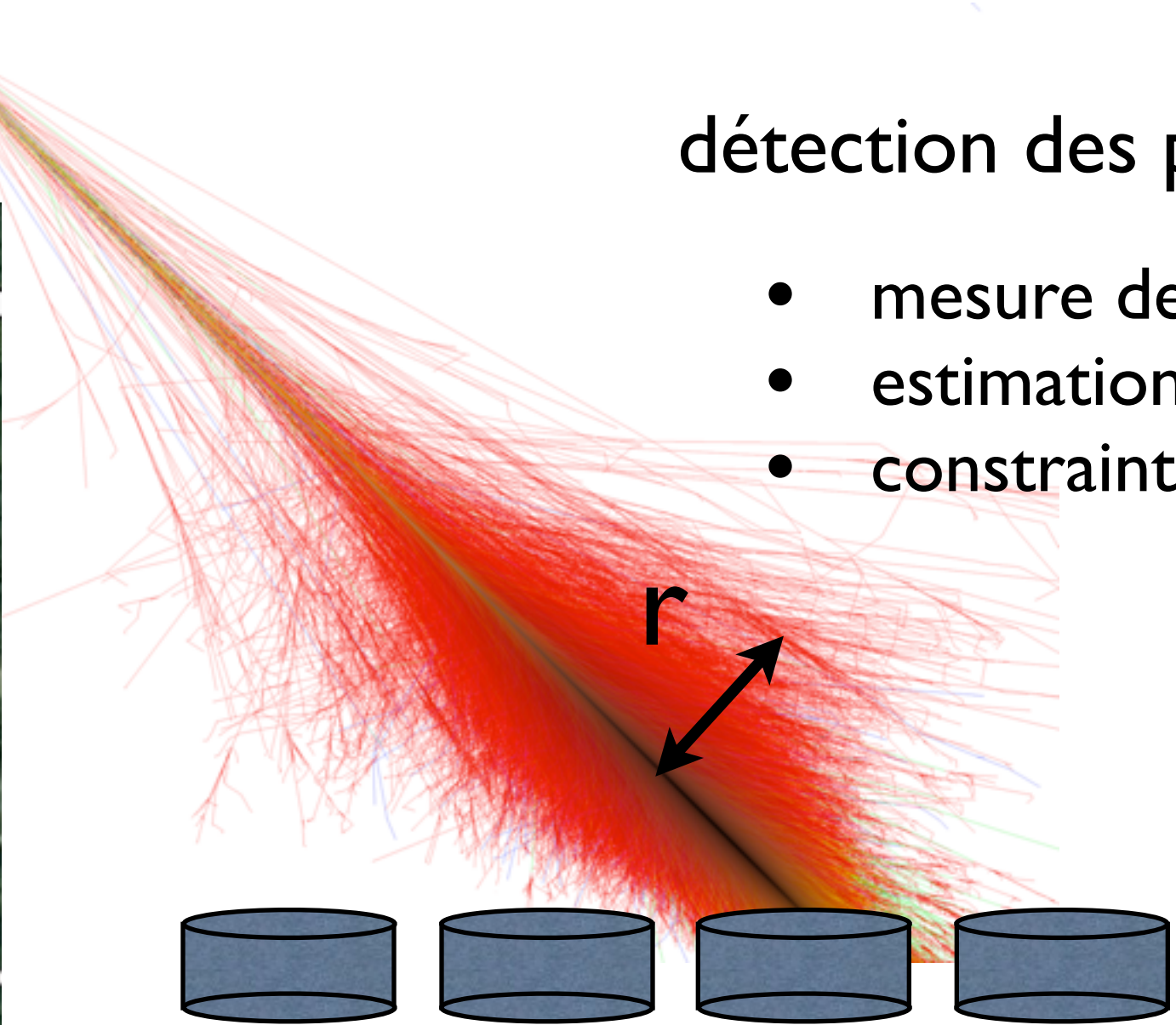
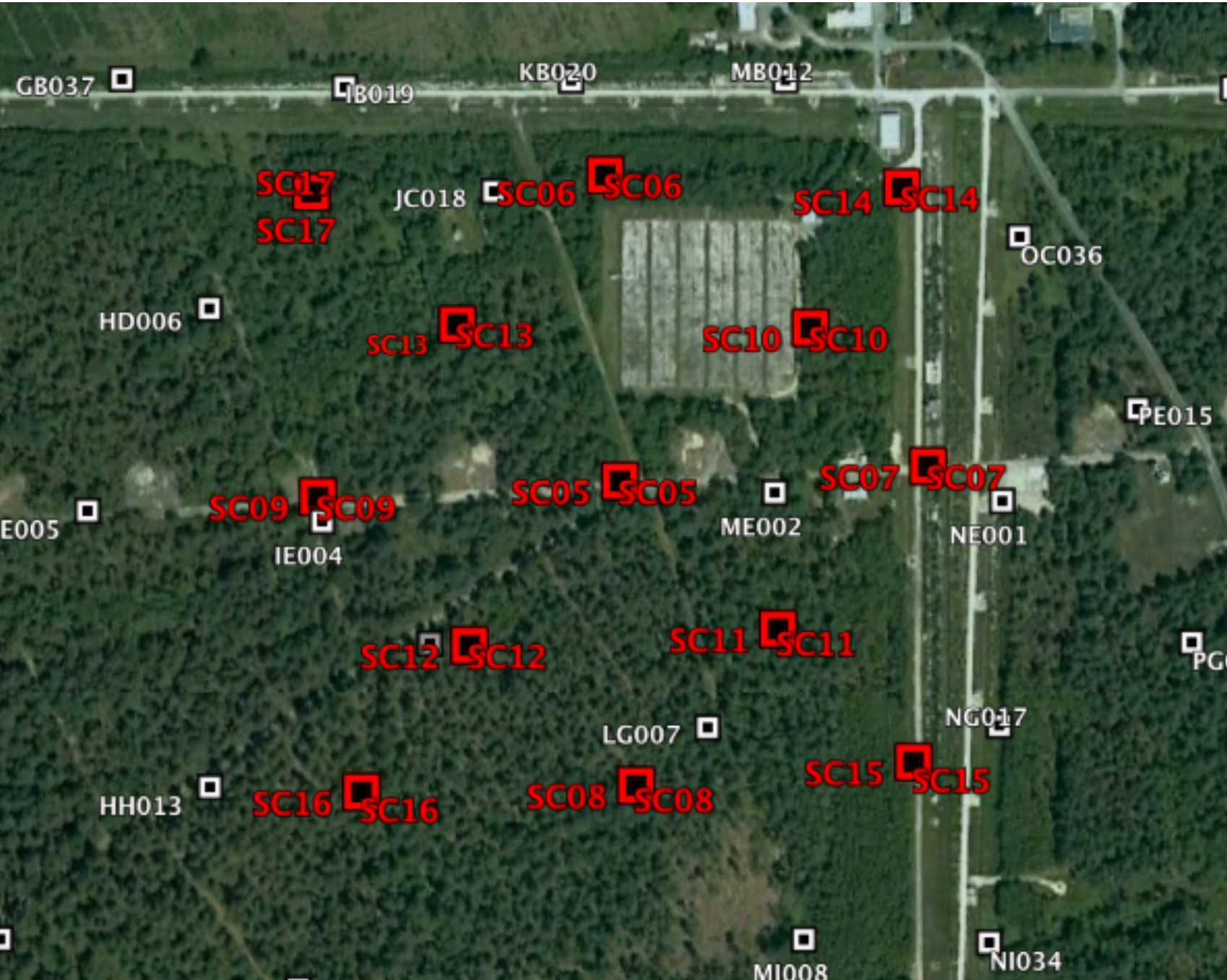
$$a = \bar{1}.7, b = 0.7\bar{6}, X_0 = 36.2 \text{ g.cm}^{-2}$$



# Gerbes atmosphériques

détection des particules secondaires au sol

- mesure de la direction d'arrivée
- estimation de l'énergie du primaire
- contraintes sur la nature du primaire



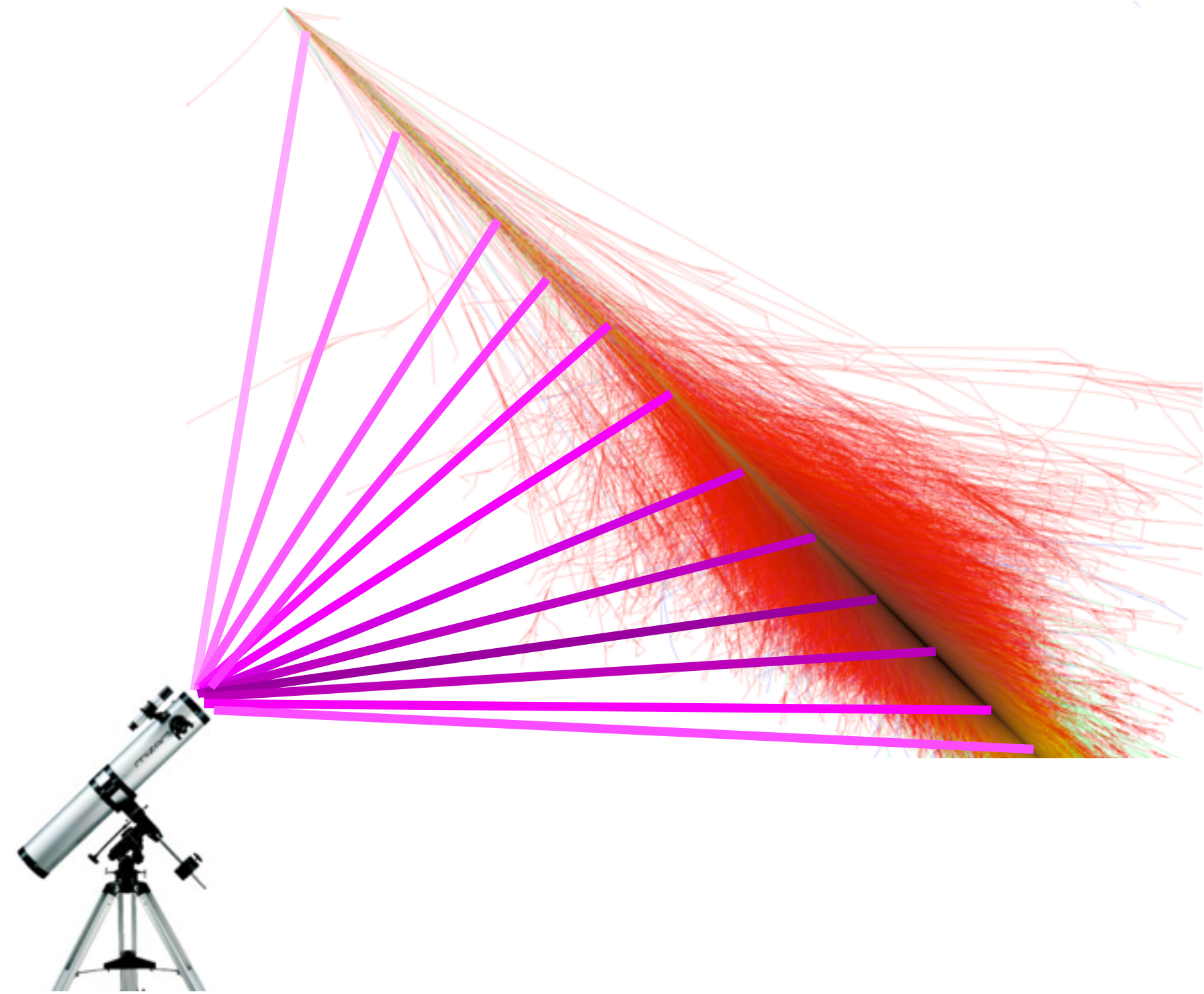
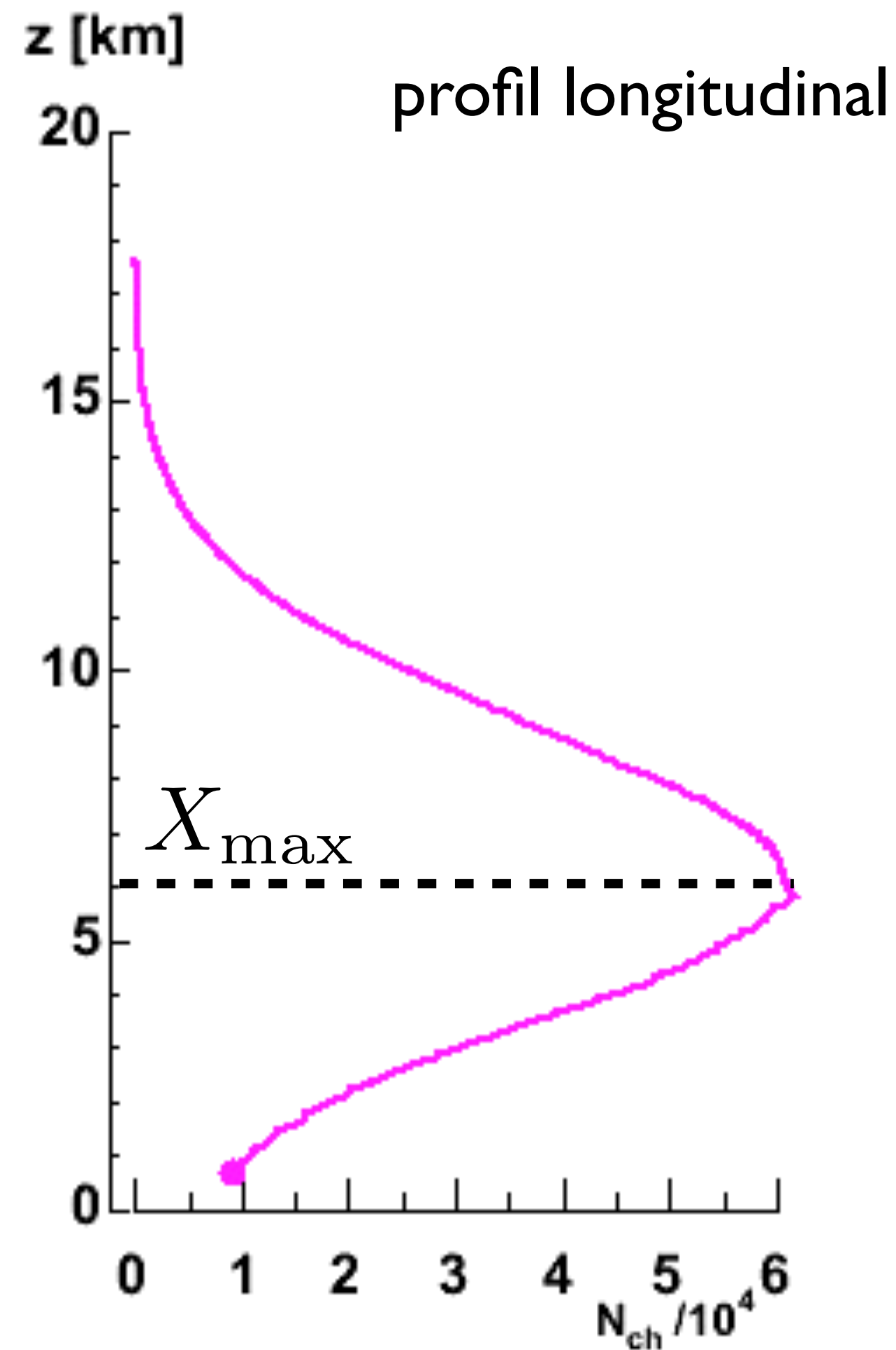
$$t_i = t_0 - \frac{u(x_i - x_0) + v(y_i - y_0) + w(z_i - z_0)}{c}$$

$$u = \sin \theta \cos \phi \quad w = \sqrt{1 - u^2 - v^2} = \cos \theta$$

$$v = \sin \theta \sin \phi$$

# Gerbes atmosphériques

détection de lumière de fluorescence



$X_{max}$  : dépend de la nature et de l'énergie du primaire (mesure calorimétrique)

cycle utile 13%