

# Les Rayons Cosmiques

A map of the sky showing the anisotropy of cosmic rays. The map is color-coded, with blue representing lower anisotropy and red representing higher anisotropy. A prominent red region is visible in the upper right quadrant, indicating a higher concentration of cosmic rays. The map is overlaid with a dashed white grid representing celestial coordinates.

Peter von Ballmoos, IRAP Toulouse

# les messagers de l'astronomie

messagers

message, source principale ...

**hV1**

photons

quasi-totalité de ce que l'on connaît

**2**

météorites

histoire du système solaire

**3**

rayons cosmiques

leur origine, accélérateurs cosmiques

**4**

neutrinos

processus de très haute énergie

**5**

ondes gravitationnelles "ballets" et "spirales" de la mort

**CANAL+**

?

matière noire

?

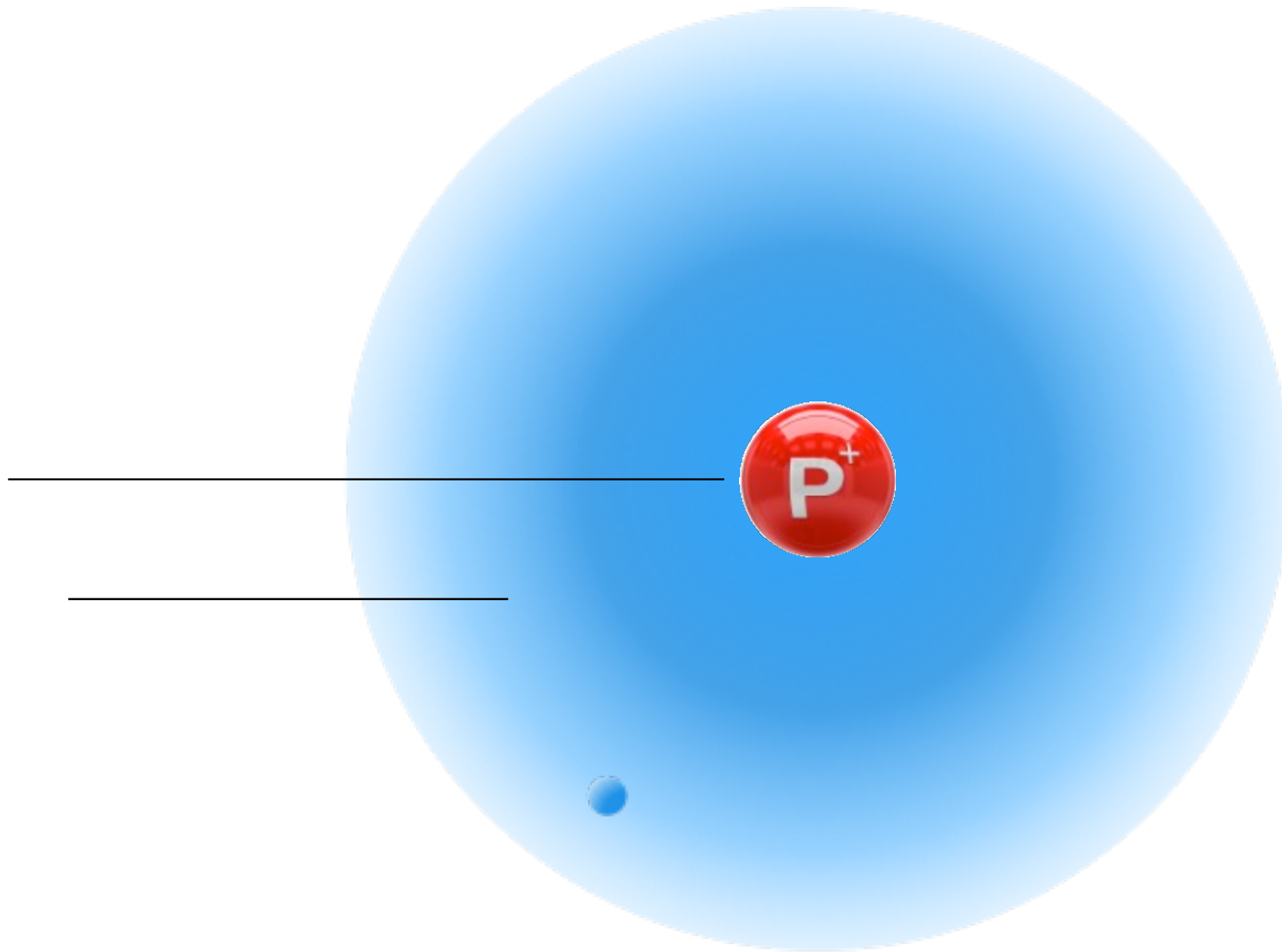
énergie sombre

# les rayons cosmiques

**atome :**

noyau

électron



# les messagers celeste "baryoniques"

météorites vs. rayonnement cosmique

météorites



$$f_{M>10g} \approx 18,000 - 84,000 [\text{an}^{-1}]$$

$$M_{m/\text{an}} \approx 40\,000 [\text{tonnes} / \text{an}]$$

rayons cosmiques



$$f_{\text{RC}} \approx 4 [\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}] = 5.7 \cdot 10^{26} [\text{an}^{-1}]$$

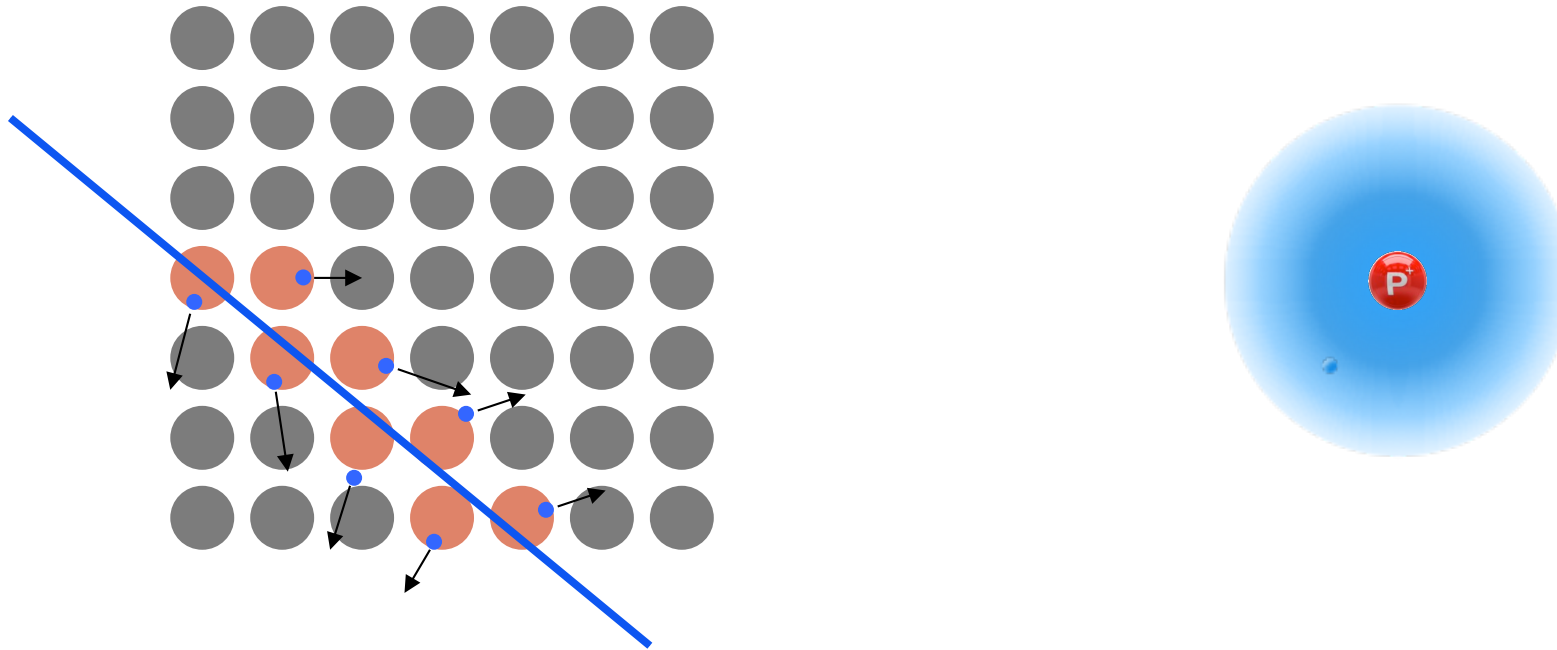
$$M_{\text{RC}/\text{an}} < 500 [\text{g} / \text{an}]$$



Yellowknife, Canada

KWON O CHUL

# Comment détecter les rayons cosmiques



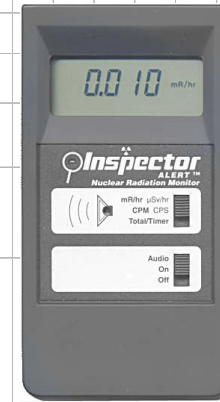
- I ionisation du matériau du détecteur par la particule  
-> création d'un grand nombre de porteurs de charge
  
- II collection (reconversion) du signal du détecteur,  
amplification du courant et conversion par un CAD

# la découverte des Rayons Cosmiques

Victor Hess mesure une augmentation des rayonnements ionisants jusqu'à 5000 m

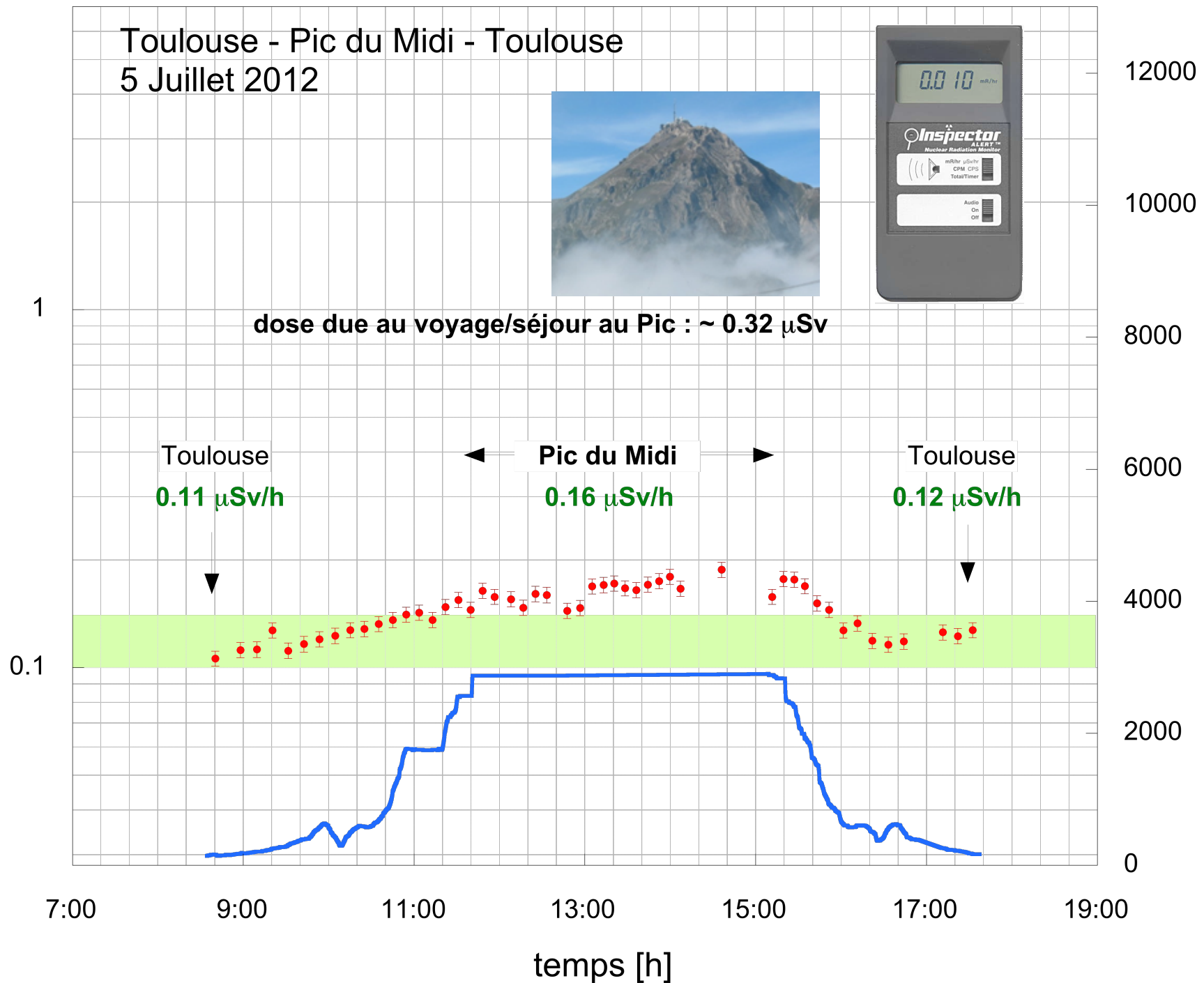


Toulouse - Pic du Midi - Toulouse  
5 Juillet 2012



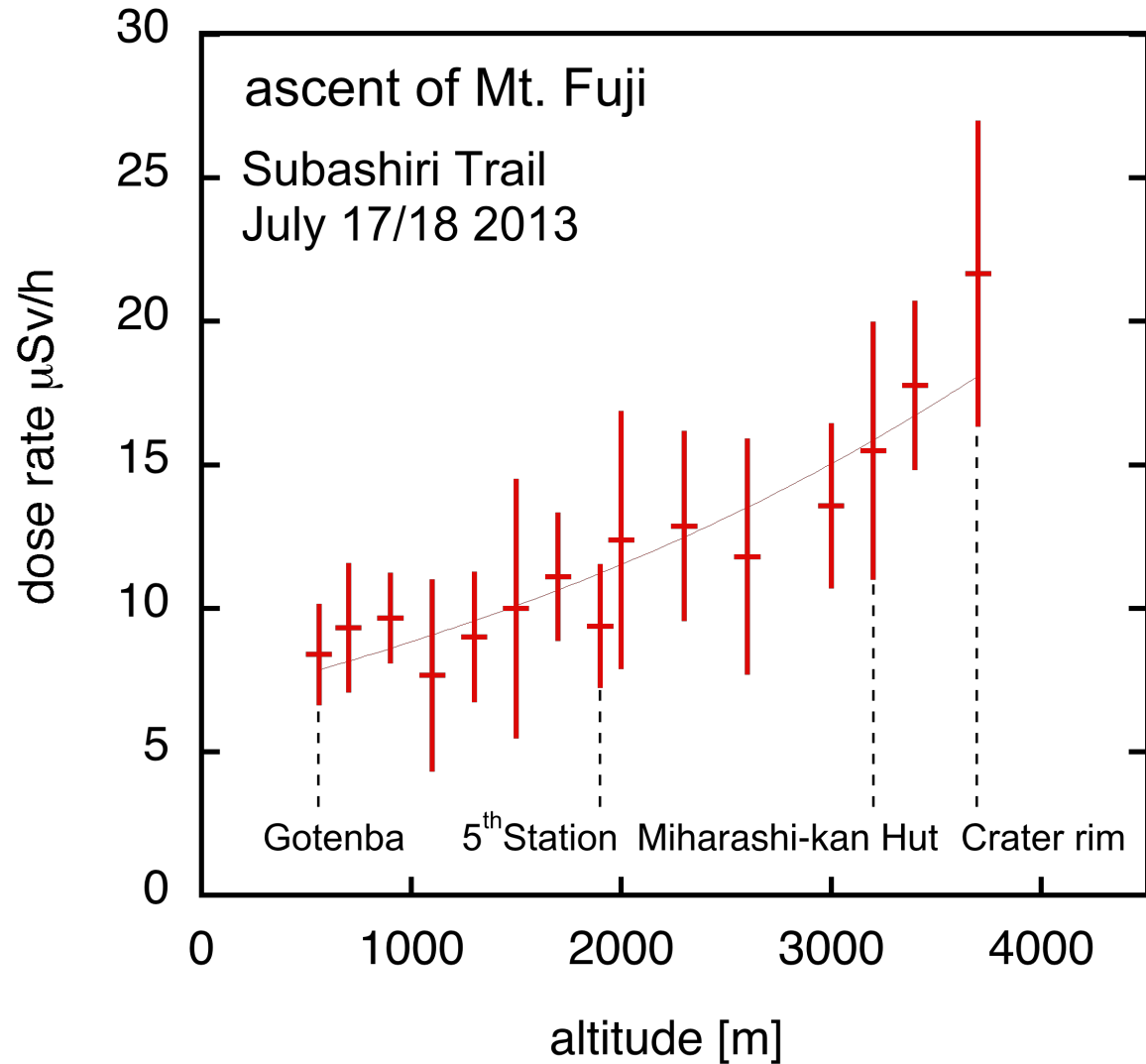
doserate [ $\mu\text{Sv/hr}$ ]

altitude [m]

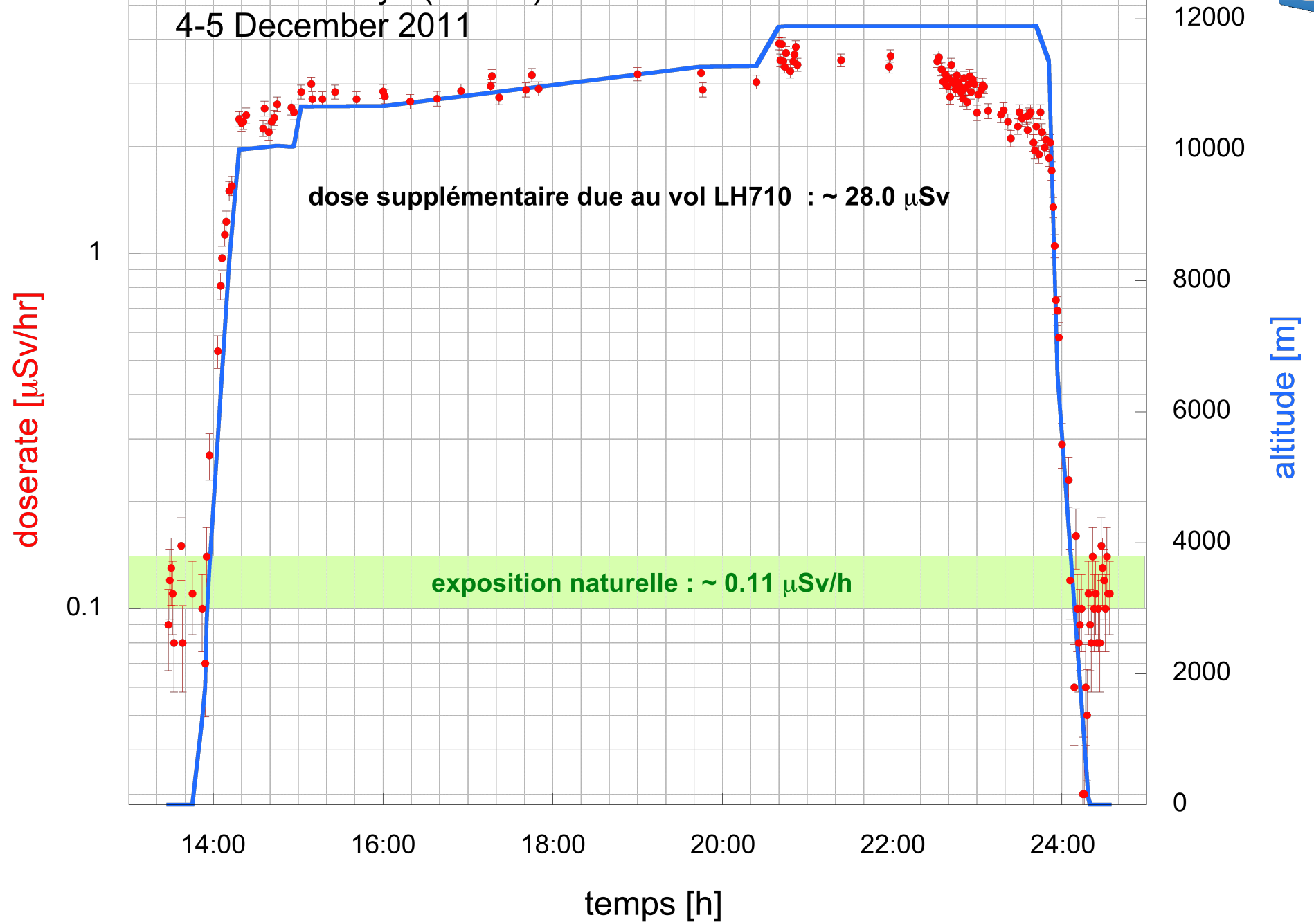




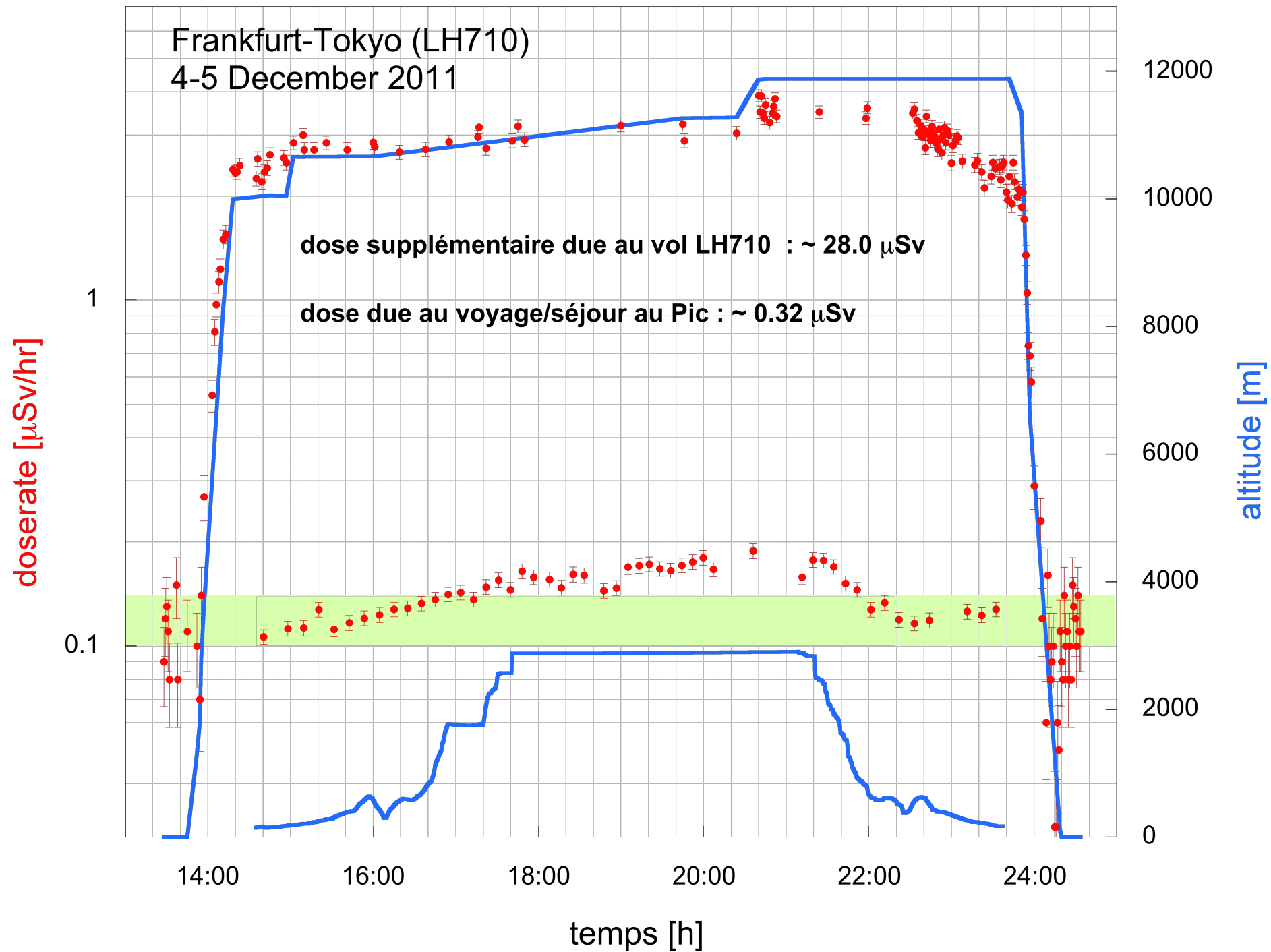
# Ascension du Mt. Fuji ...



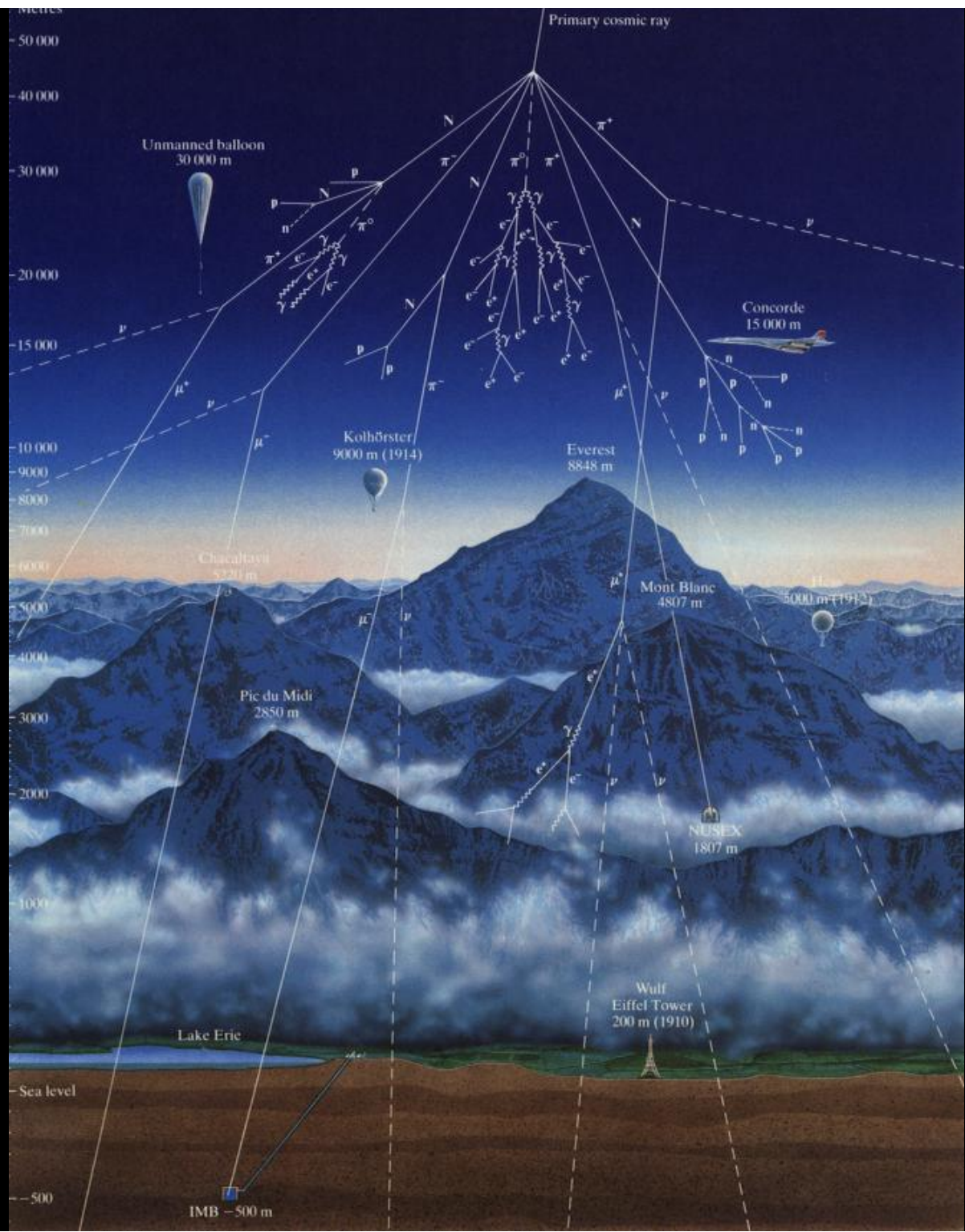
Frankfurt-Tokyo (LH710)  
4-5 December 2011



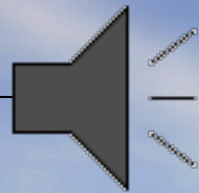
Frankfurt-Tokyo (LH710)  
4-5 December 2011



la gerbe produite par une particule primaire



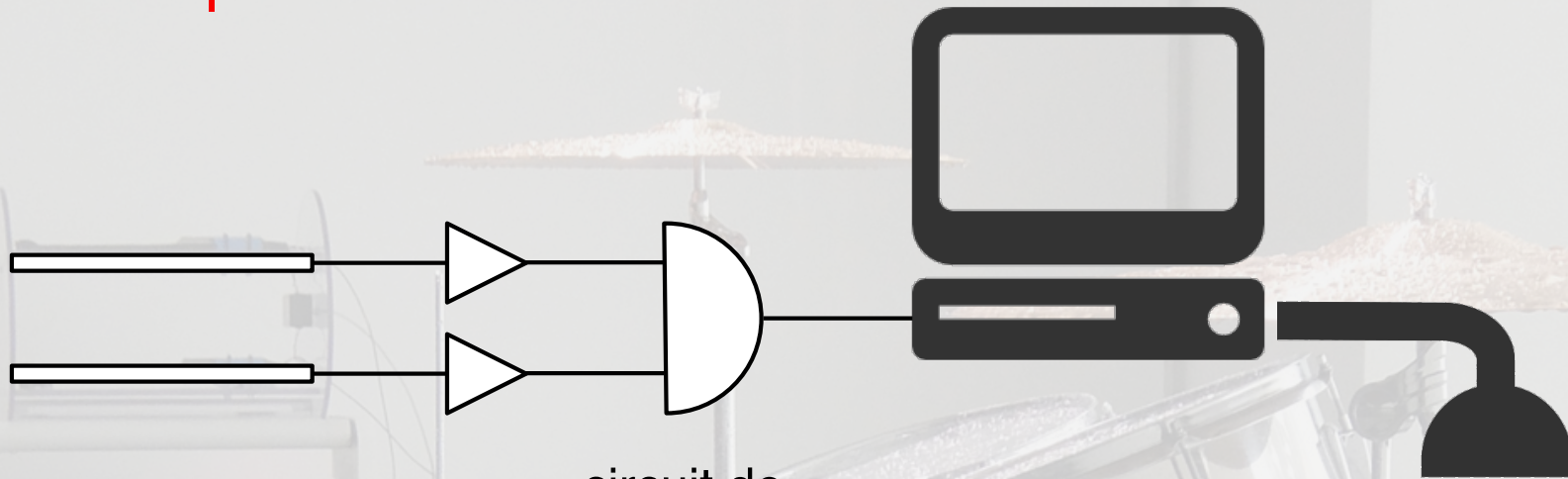
# Les rayons cosmiques - comment les observer ?



Céleste Boursier-Mougenot - averses  
Le Abattoirs, Toulouse, jan - mai 2014

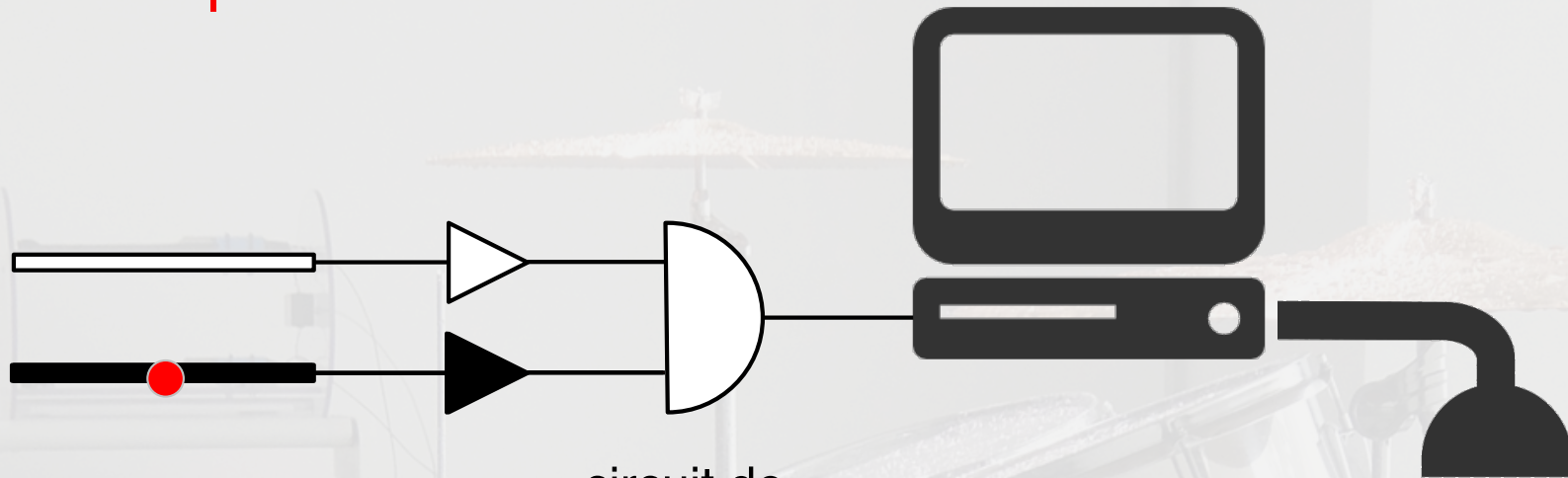


# télescope à muons



circuit de  
coïncidence

# télescope à muons

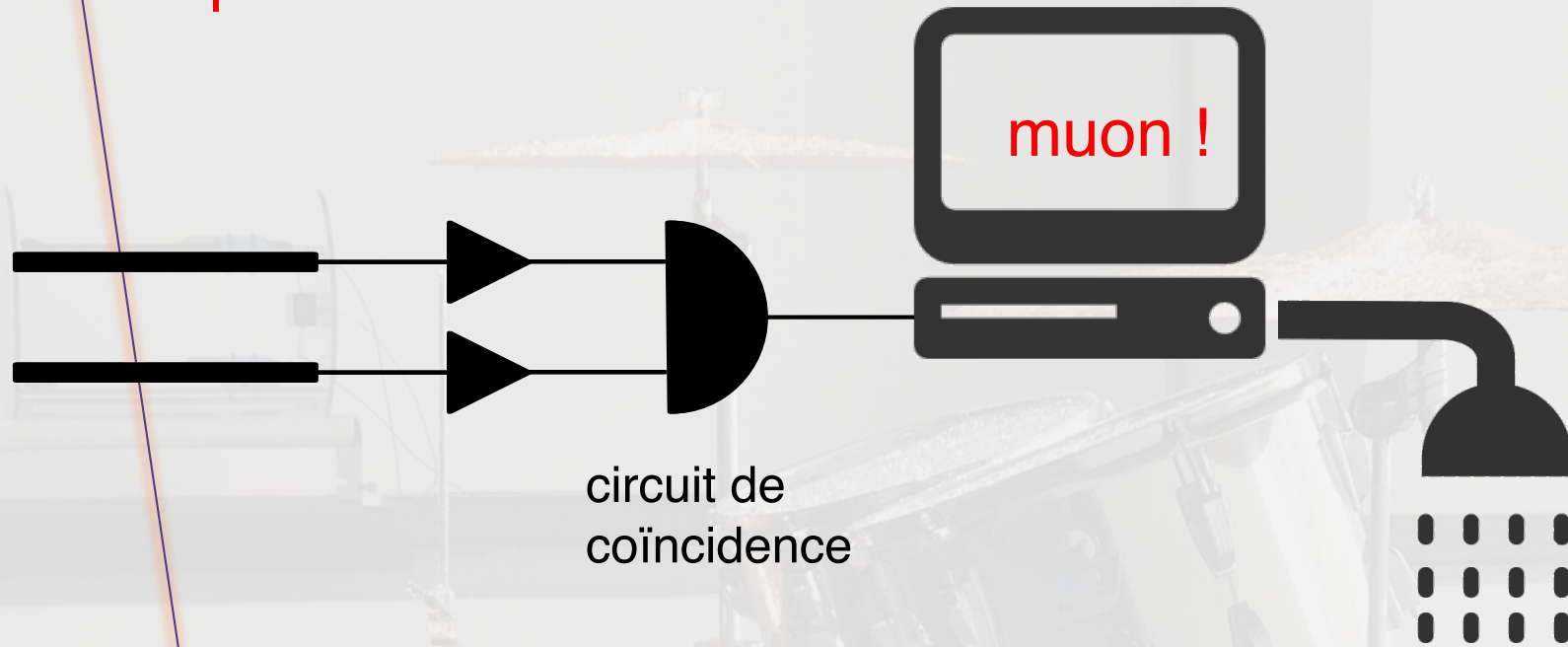


circuit de  
coïncidence





# télescope à muons



Céleste Boursier-Mougenot - averses  
Le Abattoirs, Toulouse, jan - mai 2014



# détecter les rayons cosmiques

RC primaires

RC de ultra haute énergie



détecteur spatial

télescope Cerenkov

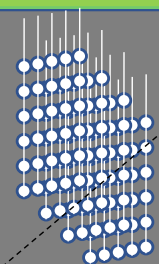
lumière Cerenkov

gerbe

lumière de fluorescence

détecteur de fluorescence

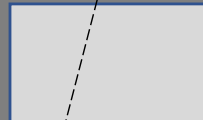
détecteur de surface



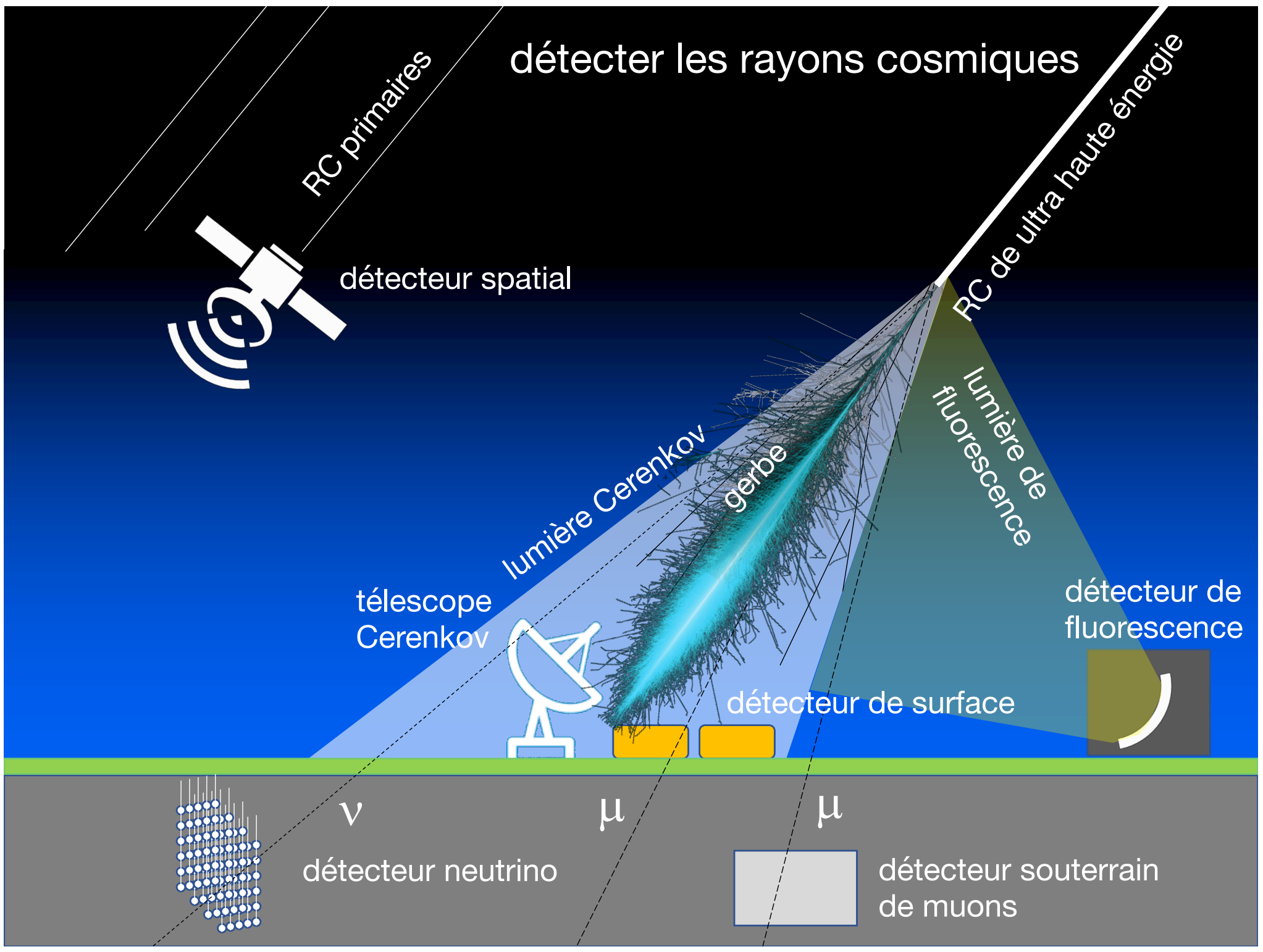
$\nu$   
détecteur neutrino

$\mu$

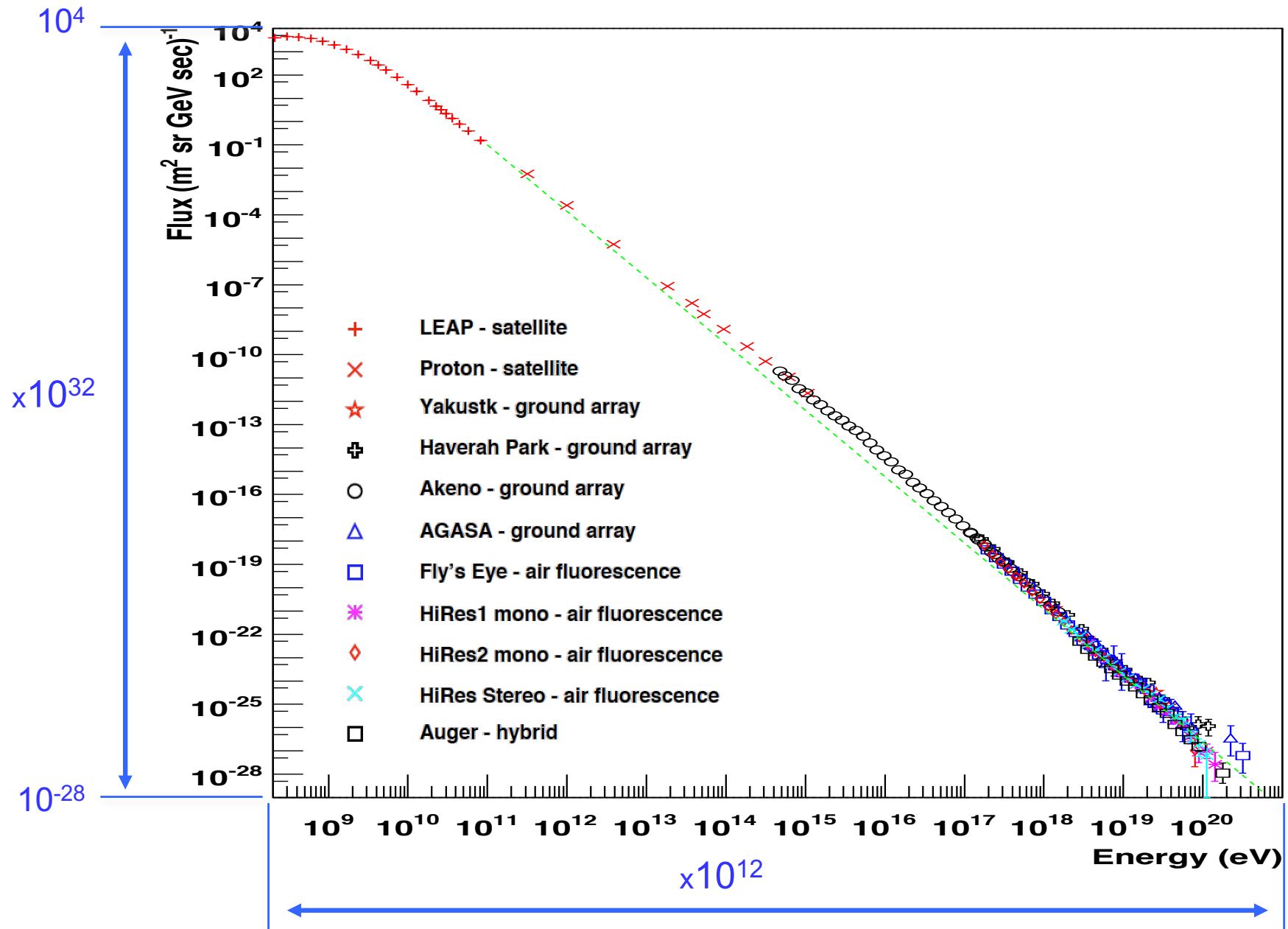
$\mu$



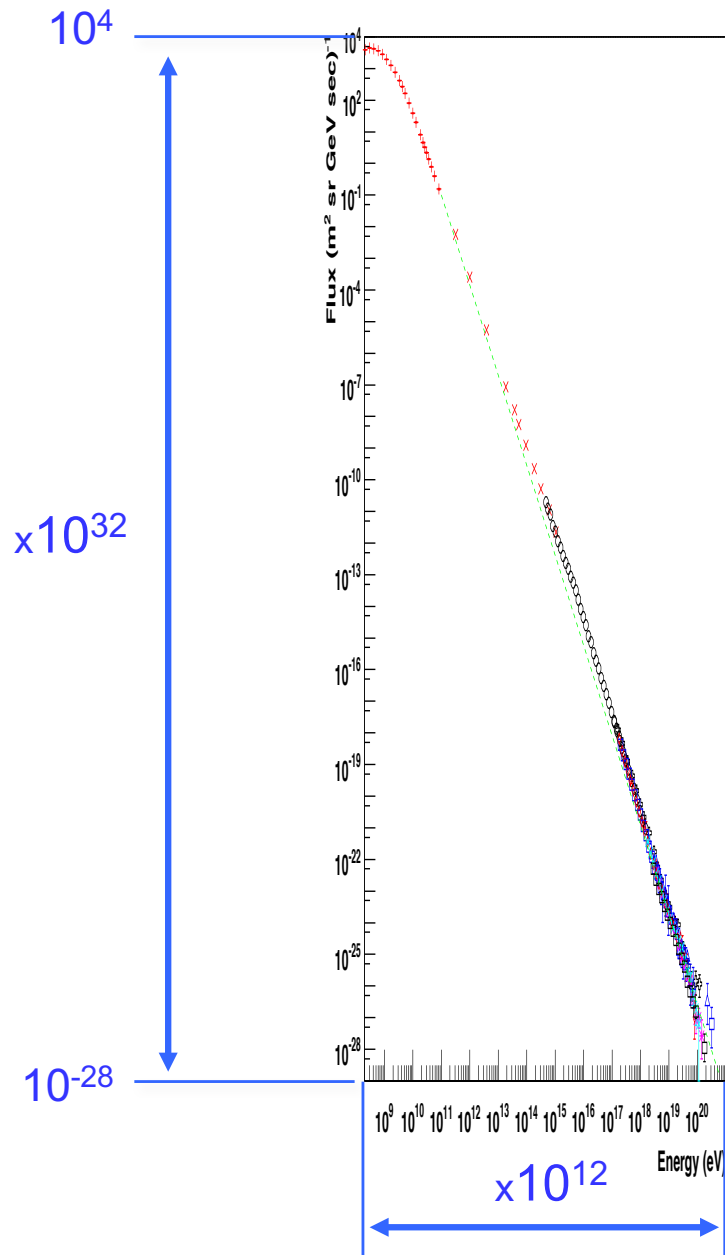
détecteur souterrain de muons



# Le spectre des Rayons Cosmiques



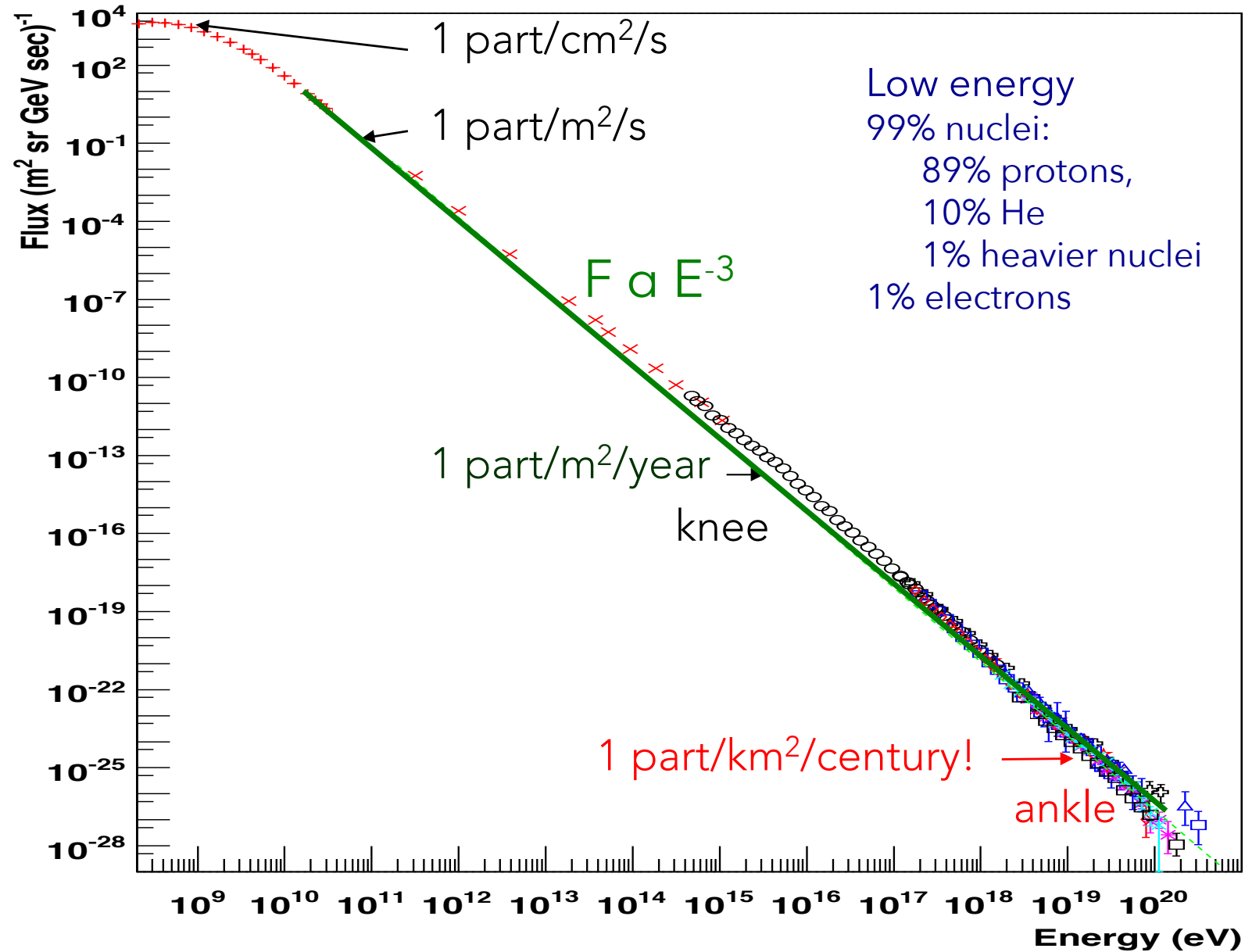
# Le spectre des Rayons Cosmiques



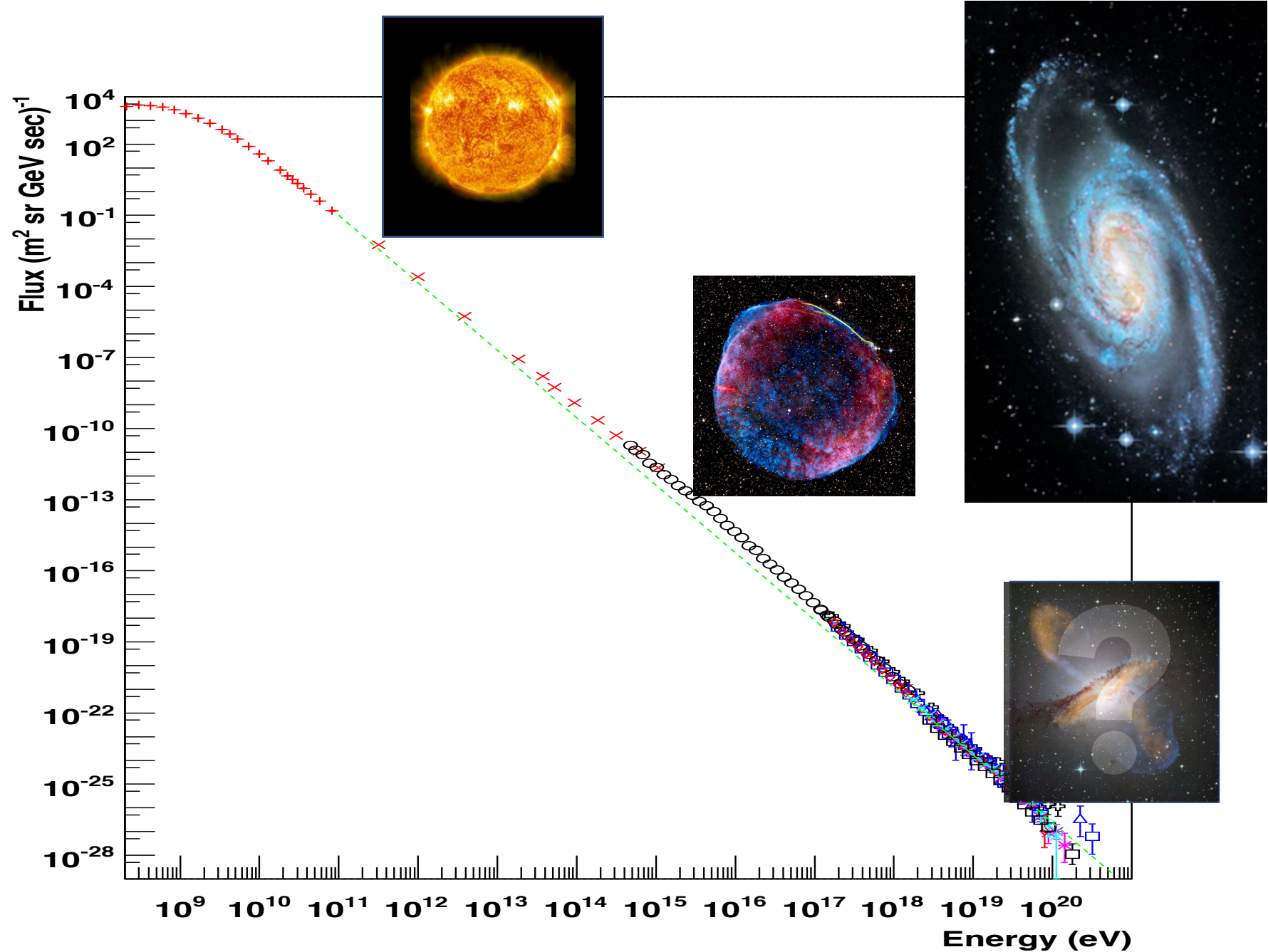
regulier sur  
12 ordres de magnitude

dynamique  
32 ordres de magnitude

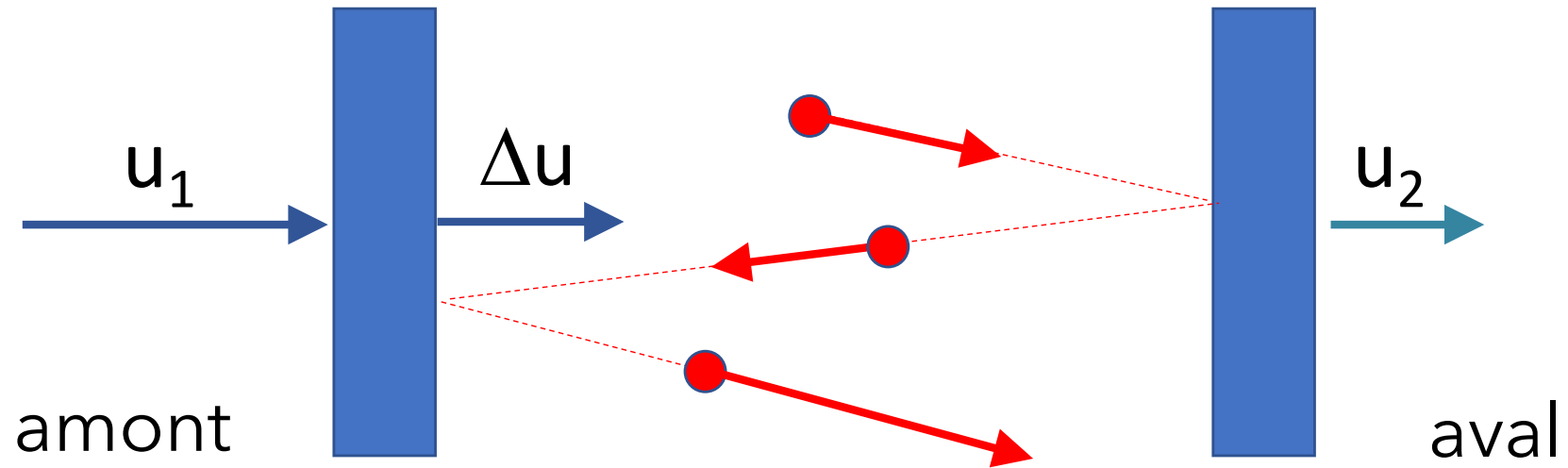
# Le spectre des Rayons Cosmiques



# Le spectre des Rayons Cosmiques - quels sources ?



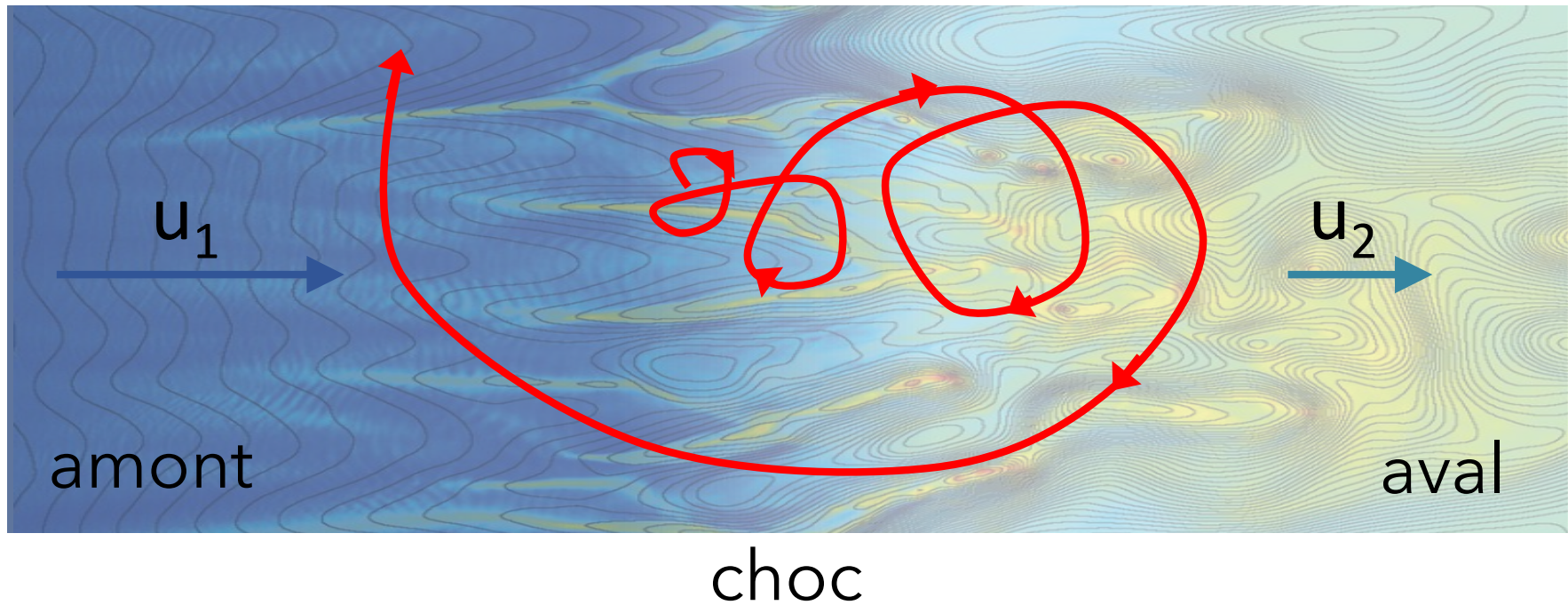
# l'accélération par onde de choc



Le gain d'énergie de la particule qui traverse le choc depend de  $\Delta u (u_1 - u_2)$ .



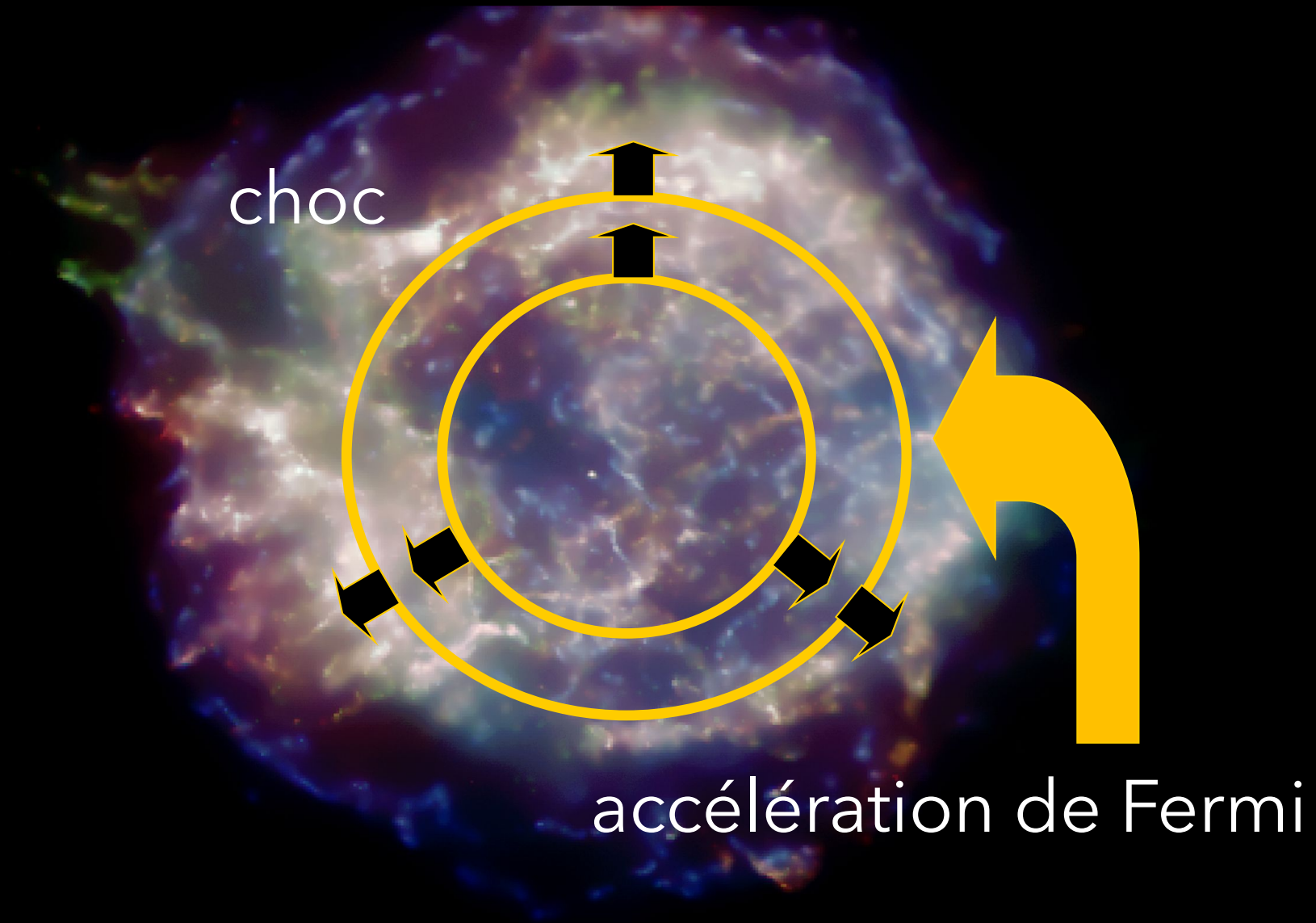
# l'accélération par onde de choc



Le gain d'énergie de la particule qui traverse le choc depend de  $\Delta u$  ( $u_1 - u_2$ ). En considerant les processus de perte, cela conduit à un spectre  $E^{-q}$  avec  $q > 2$ .

Le spectre "coupe" pour des rayons de gyration comparables à la dimension du choc.

# l'accélération par onde de choc - reste de supernova



# Les rayons cosmiques de Ultra-Haute Energie

# "Evidence of Primary Cosmic Ray particle with energy $10^{20}$ eV"

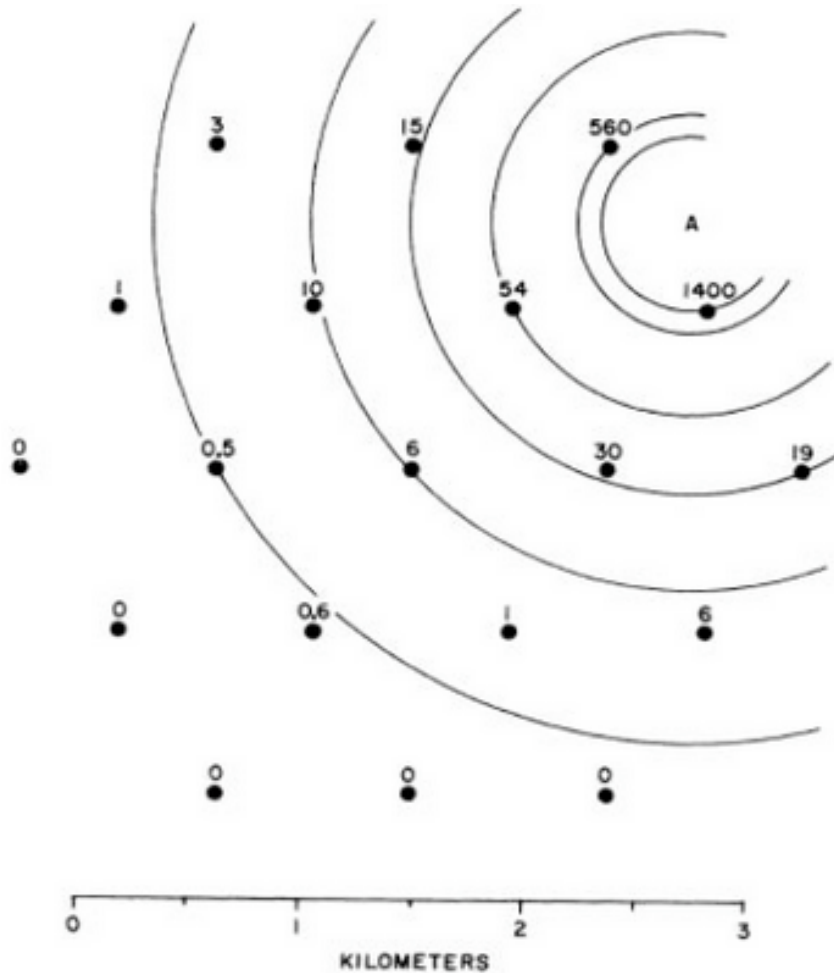
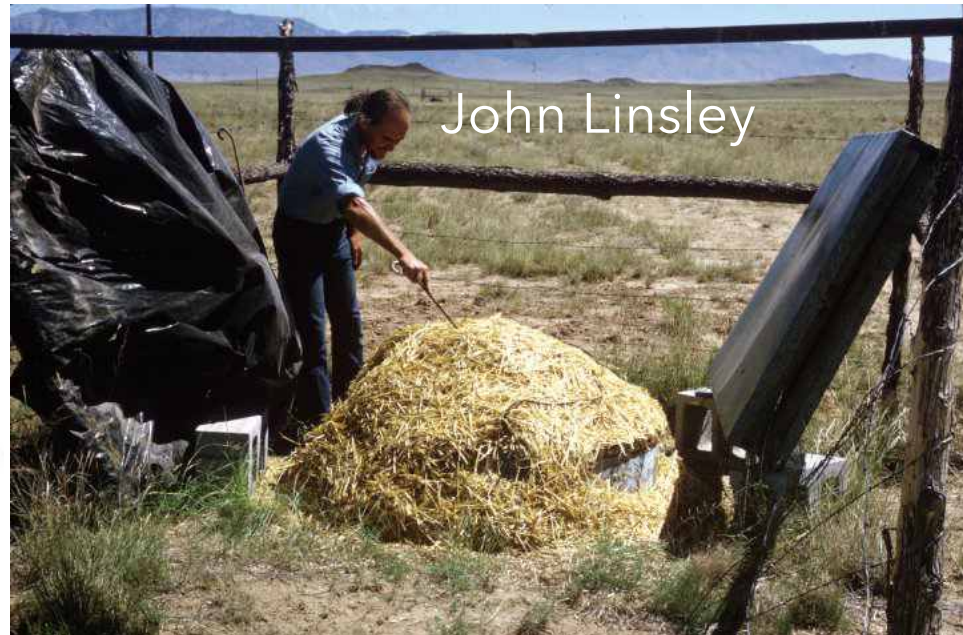


FIG. 1. Plan of the Volcano Ranch array in February 1962. The circles represent 3.3-m<sup>2</sup> scintillation detectors. The numbers near the circles are the shower densities (particles/m<sup>2</sup>) registered in this event, No. 2-4834. Point "A" is the estimated location of the shower core. The circular contours about that point aid in verifying the core location by inspection.

Linsley, Phys. Rev. Lett. 10, 1963

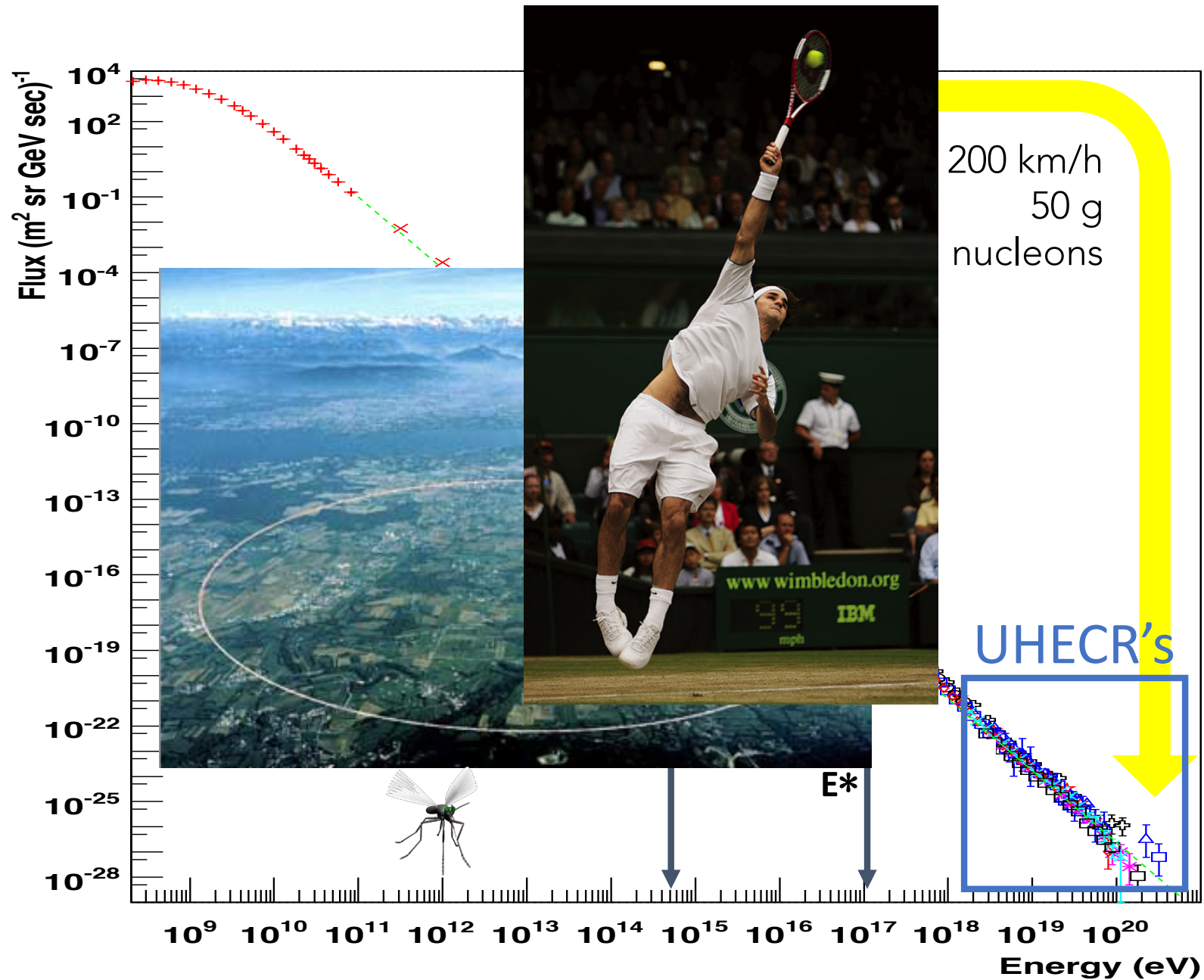


Volcano Ranch (New Mexico), 1962



Livio Scarsi

# Le spectre des Rayons Cosmiques - quels sources ?



astronomie avec des protons ?  
comment savoir d'où ils viennent ?

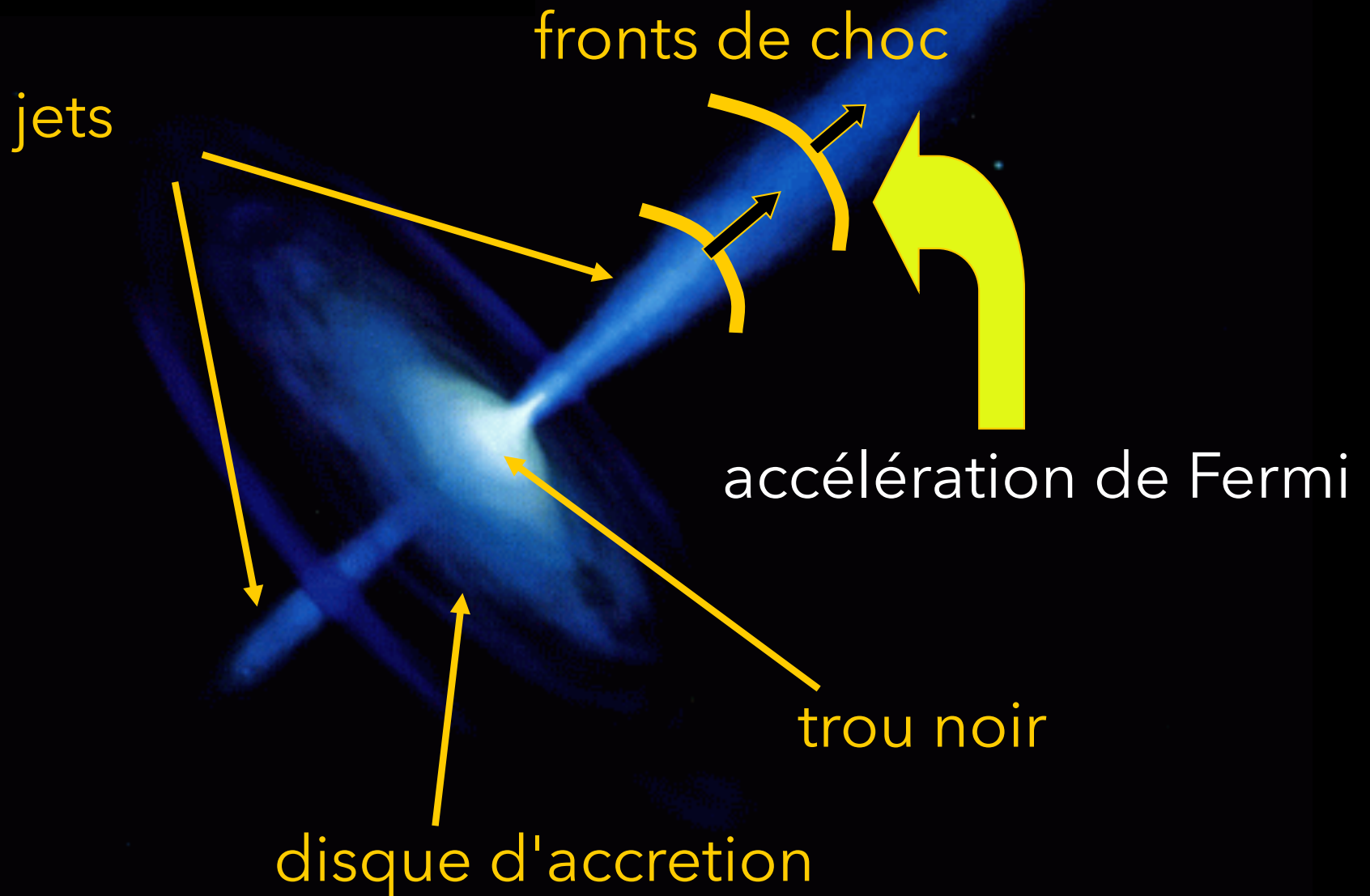
$$\theta \approx \frac{d}{R_{\text{gyro}}} = \frac{dB}{E}$$

$\theta$     déviation  
 $d$     distance  
 $R_{\text{gyro}}$     rayon de gyration  
 $B$     champ mag.  
 $E$     énergie proton

$$\frac{\theta}{0.1^\circ} \approx \frac{\left[ \frac{d}{1 \text{ Mpc}} \right] \left[ \frac{B}{10^{-9} \text{ G}} \right]}{E}$$

$$\frac{\theta}{0.1^\circ} \approx \frac{E}{3 \times 10^{20} \text{ eV}}$$

# l'accélération par onde de choc - NAG



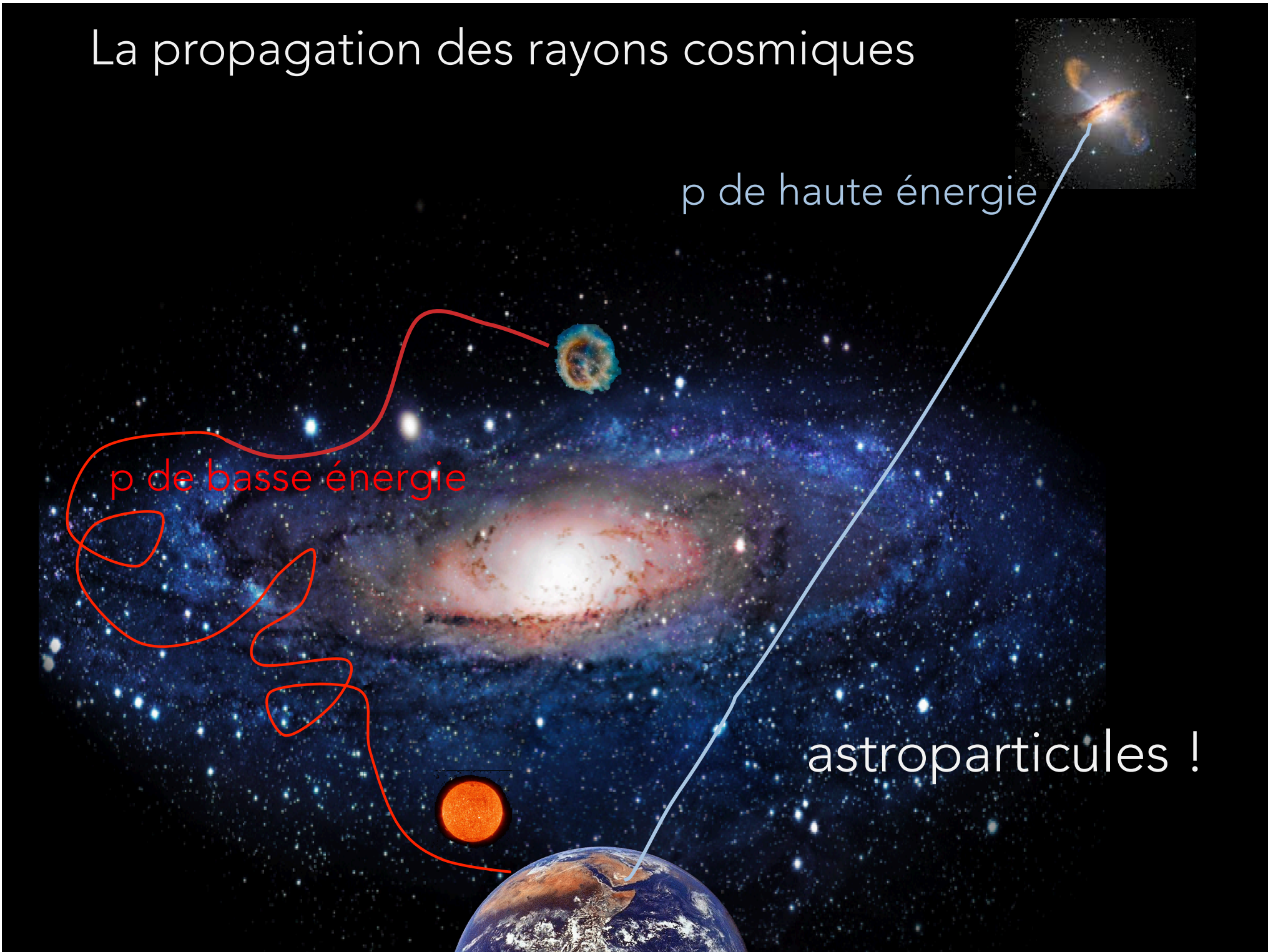
# La propagation des rayons cosmiques



p de haute énergie

p de basse énergie

astroparticules !





# détecter les rayons cosmiques

RC primaires

RC de ultra haute énergie



détecteur spatial

télescope Cerenkov

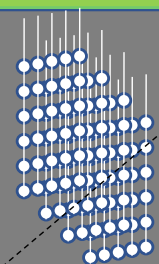
lumière Cerenkov

gerbe

lumière de fluorescence

détecteur de fluorescence

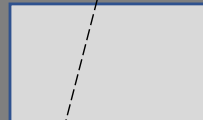
détecteur de surface



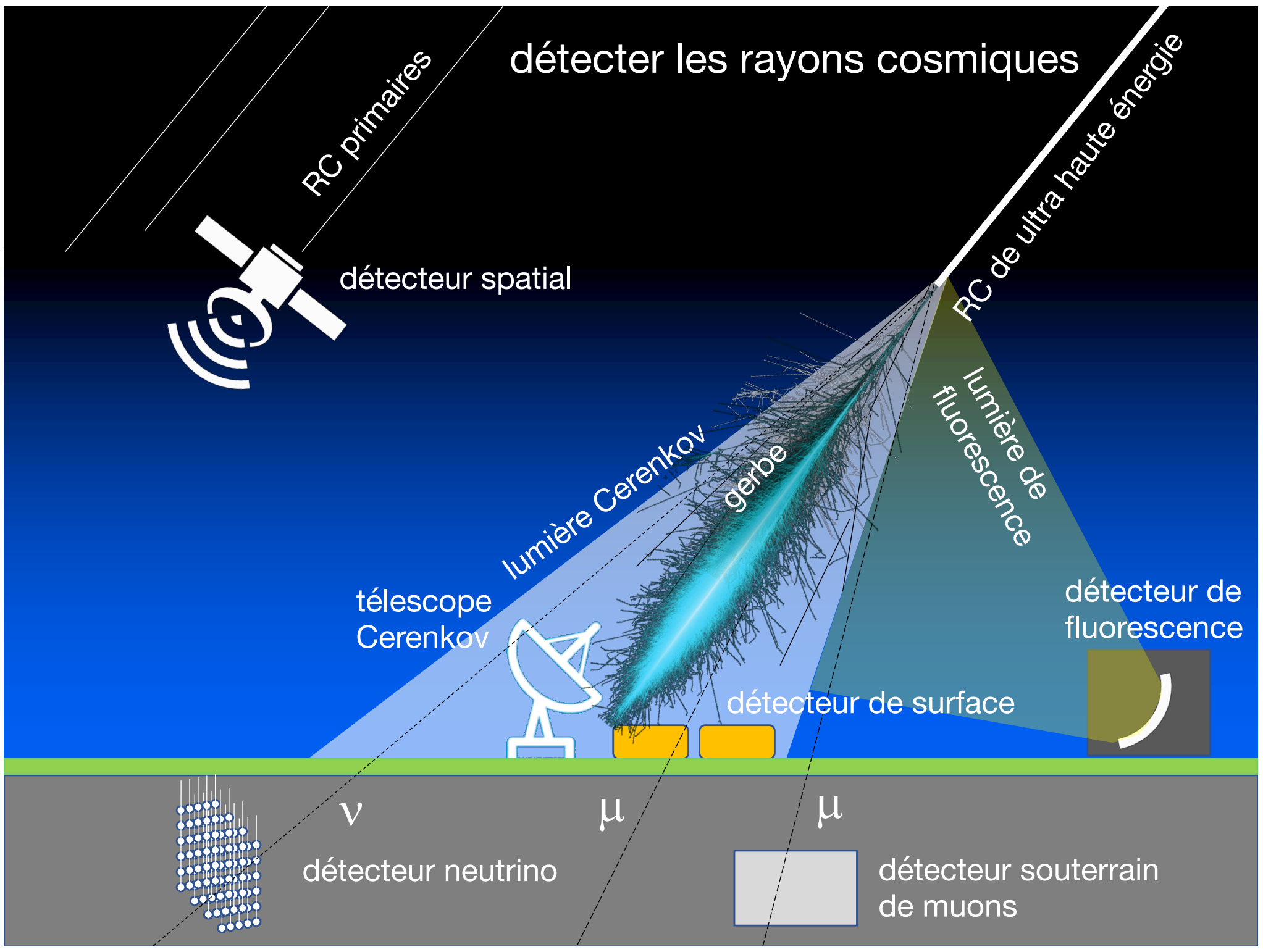
$\nu$   
détecteur neutrino

$\mu$

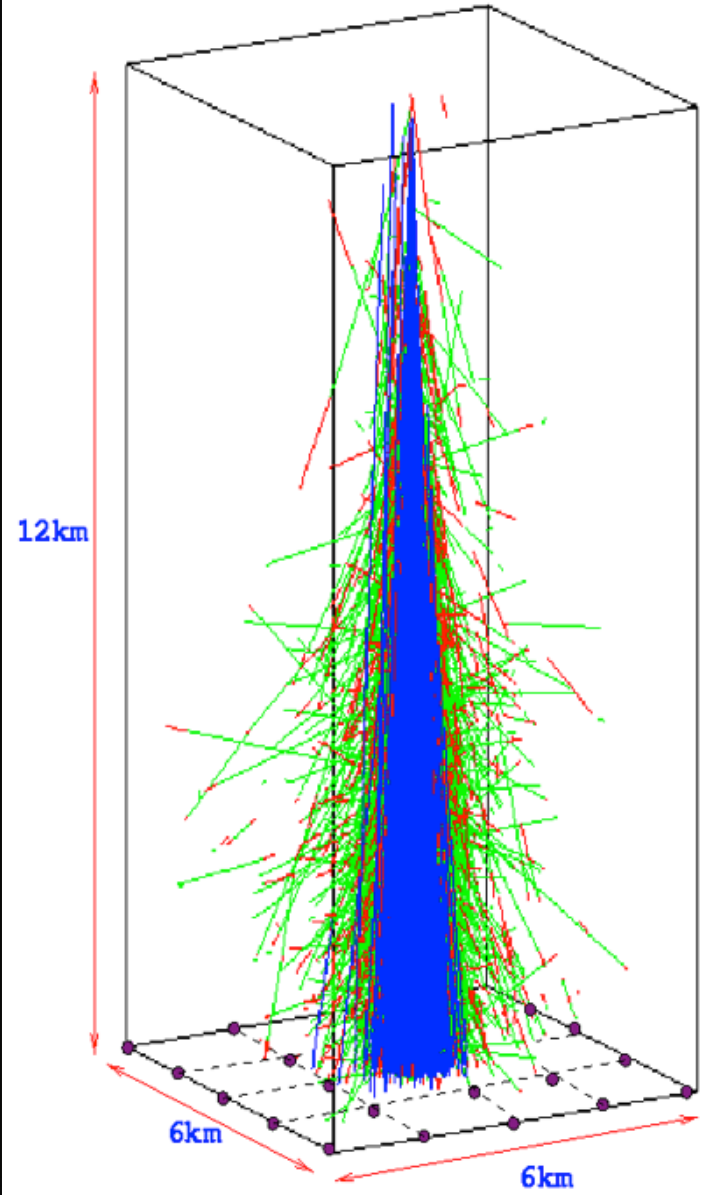
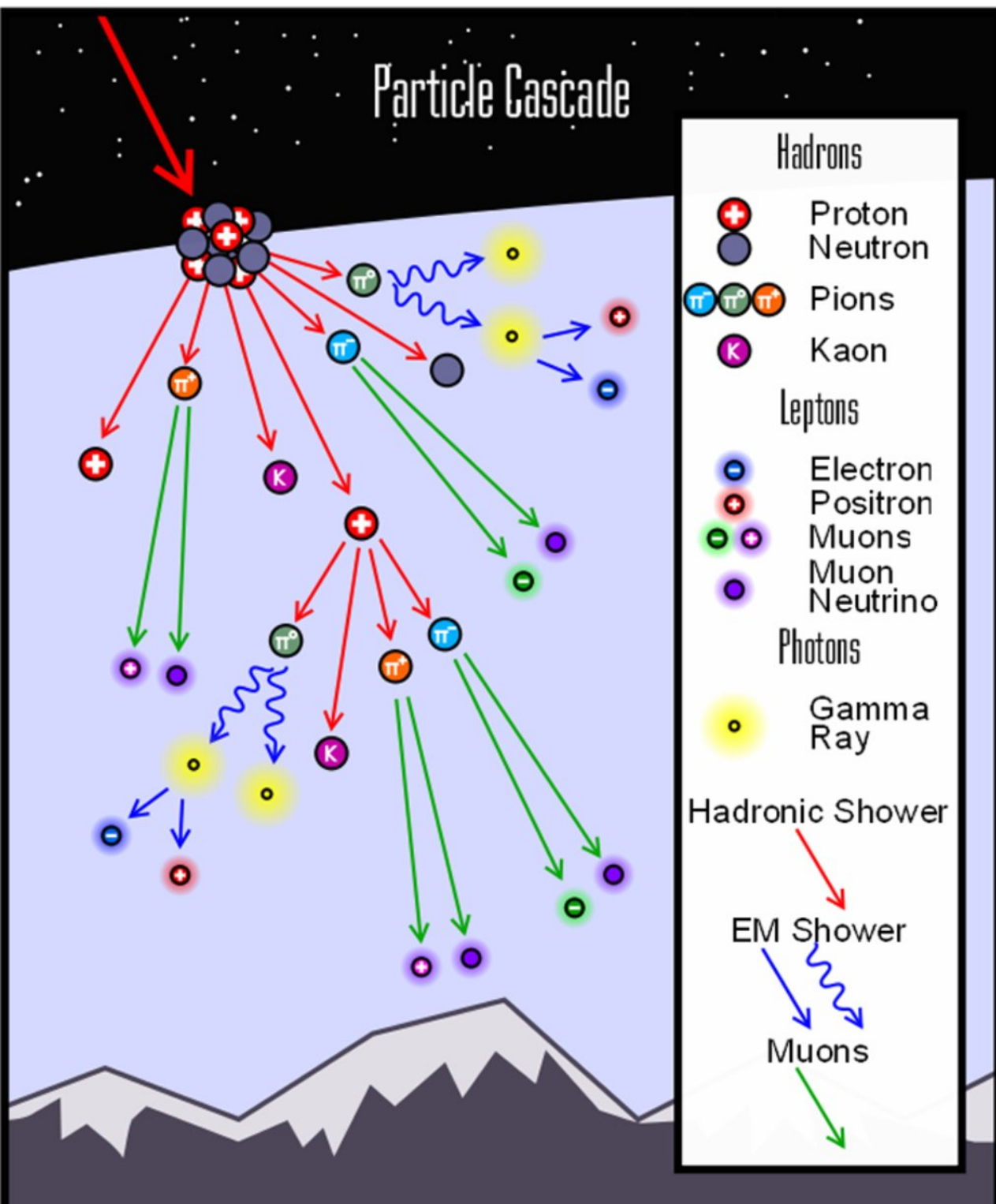
$\mu$

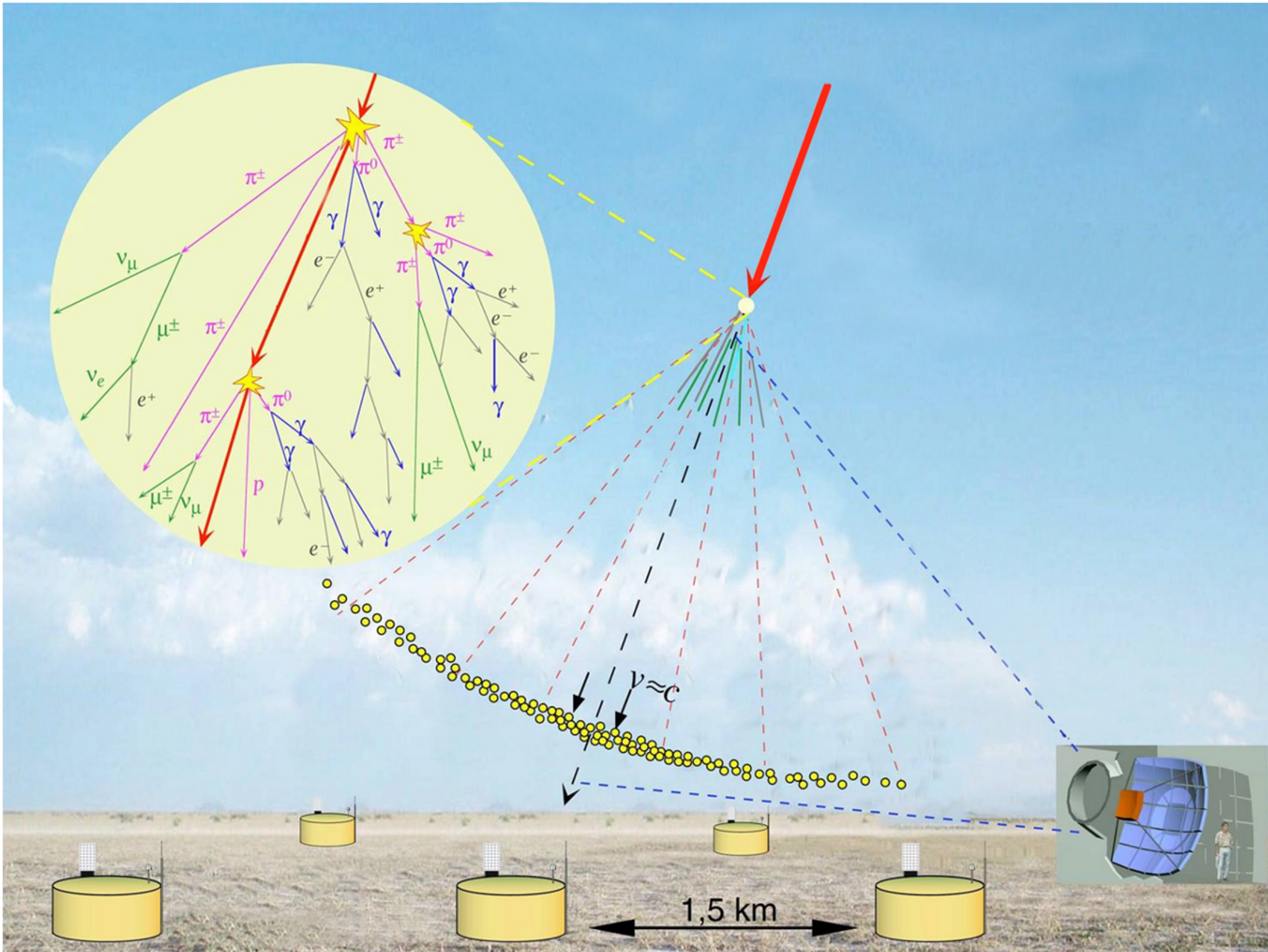


détecteur souterrain de muons



# Particle Cascade

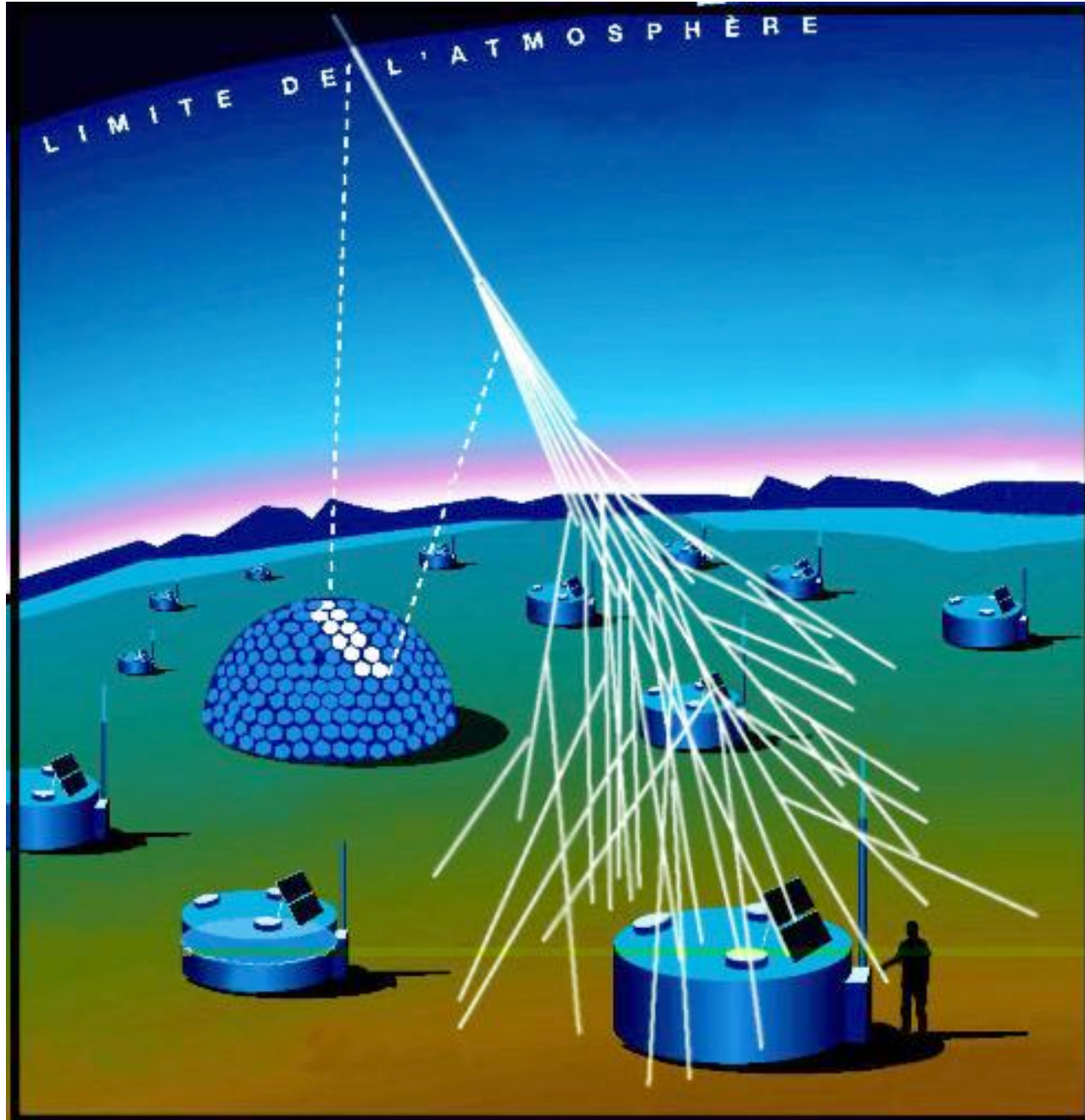




# Détection : Fly' s Eye Detector Array in Utah



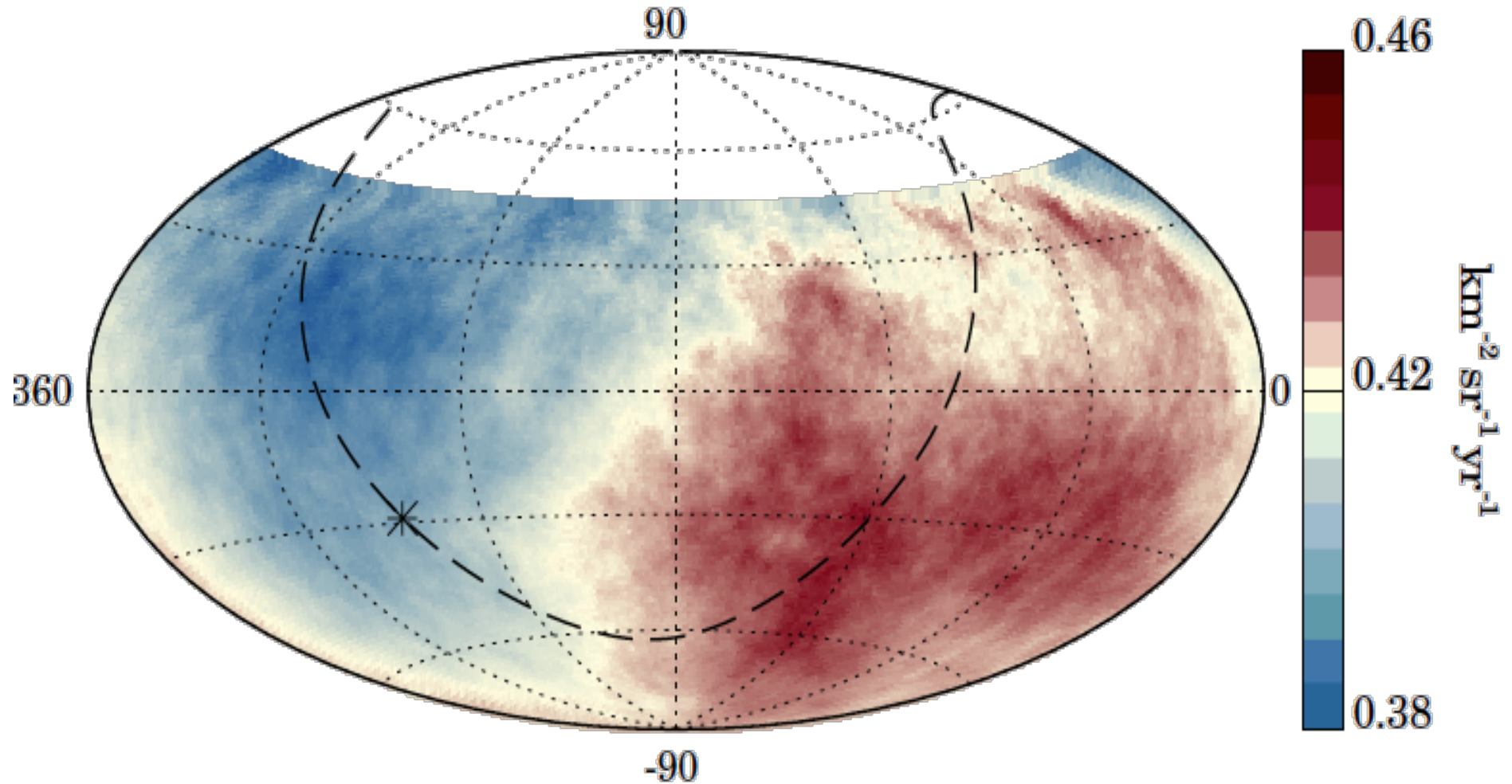
# Détection : Observatoire Pierre Auger



# Détection : Observatoire Pierre Auger



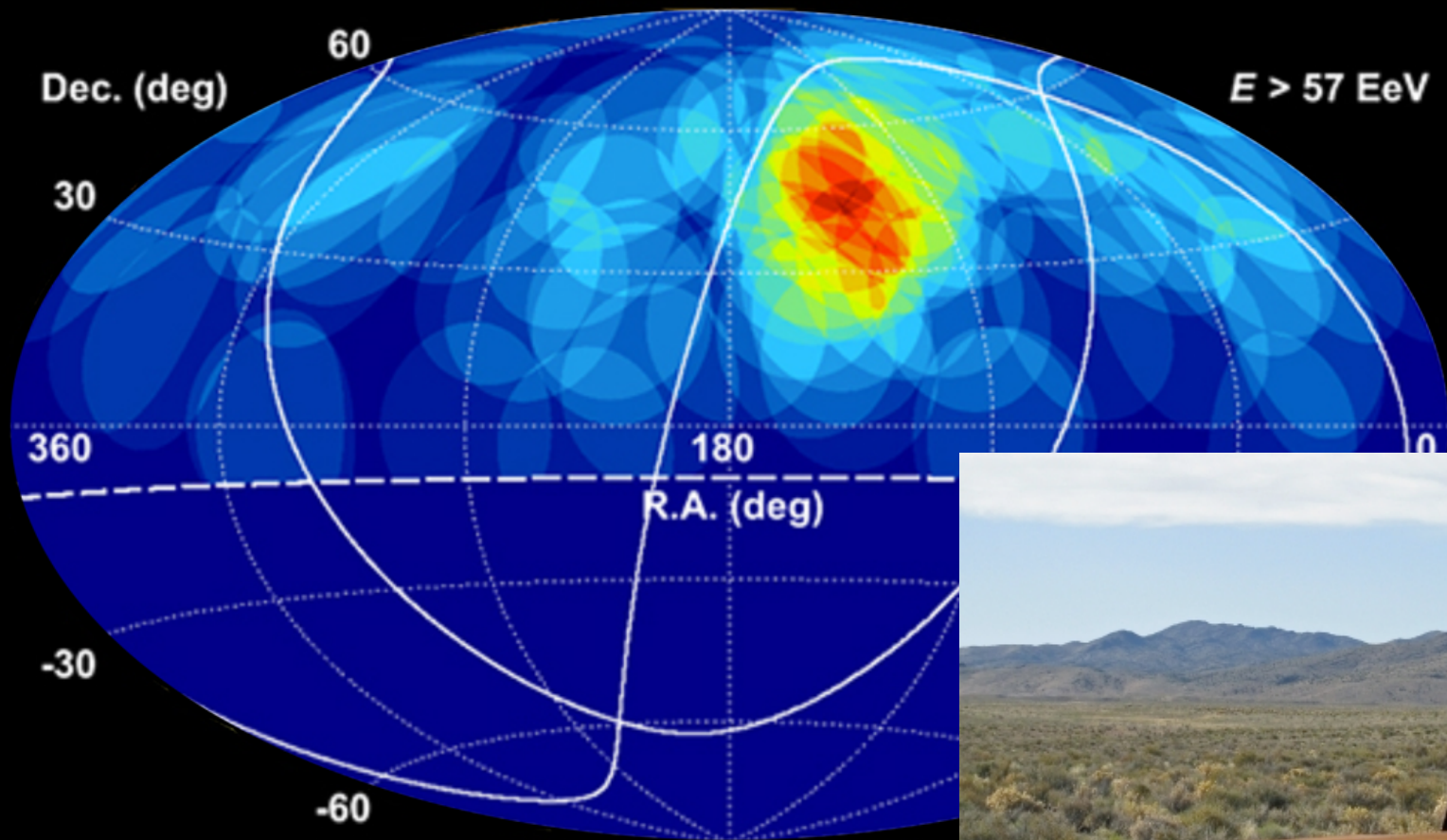
# L'anisotropie dipolaire de Auger




Auger, 13.7 ans de données

Auger Collaboration, Science Sept 2017

# Les rayons cosmiques de Ultra-Haute Energie

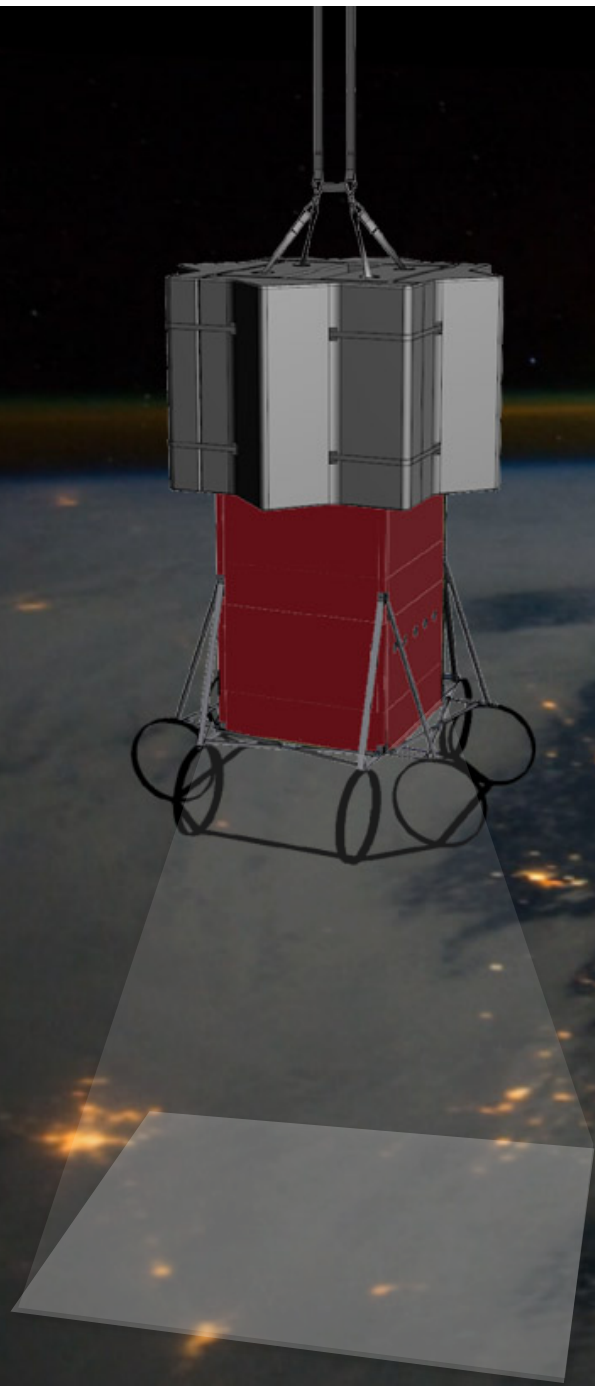




A satellite is shown in the upper right corner of the image, with a large, bright purple particle shower or air shower extending from it across the dark sky. The shower consists of many thin, parallel lines of light that fan out as they travel. In the background, a bright, glowing nebula or galaxy is visible against a starry sky. Below the satellite, the Earth's surface is visible, showing blue oceans and white clouds.

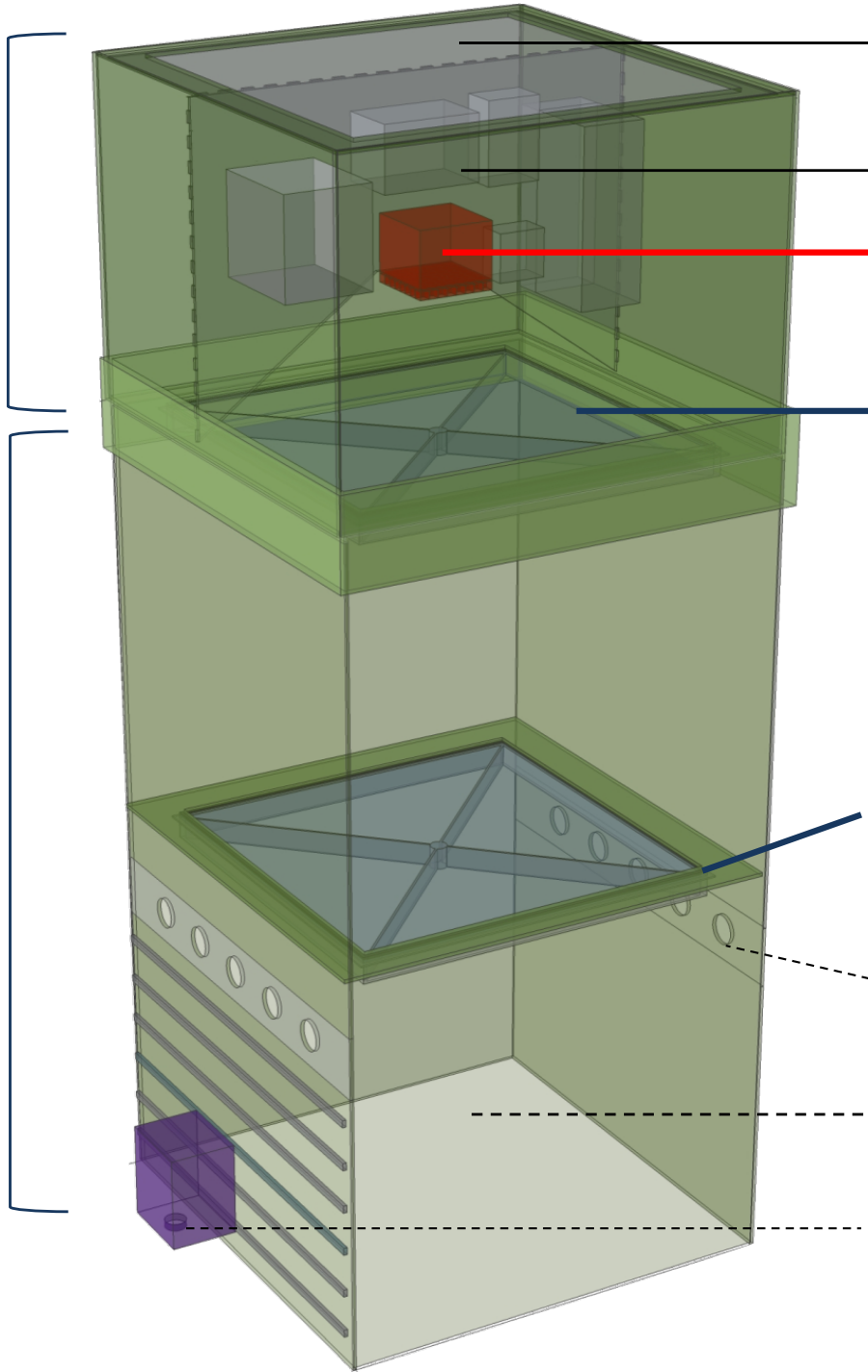
l'objectif  
physique des  
astroparticules  
avec JEM-EUSO

eusoballon



instrument booth

optical bench



radiator

electronics (DP)  
on "dry shelf"

**PDM**

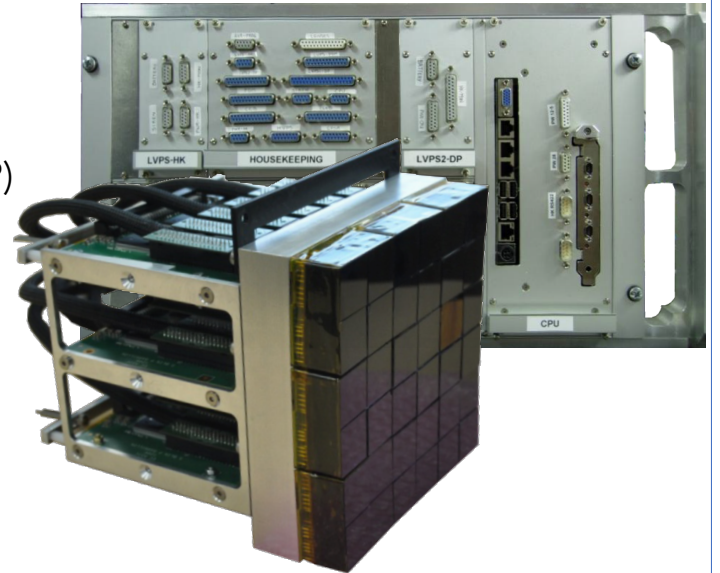
Fresnel lens L3  
fixed/tight

Fresnel lens L1  
adjustable

evacuation holes

Baffle &  
"deceleration cylinder"

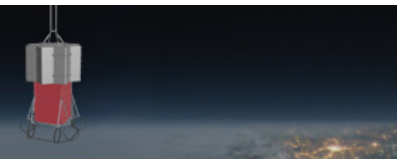
IR Camera



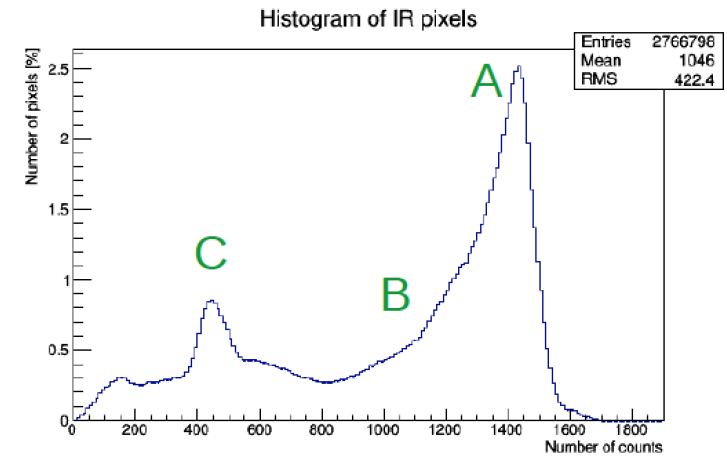
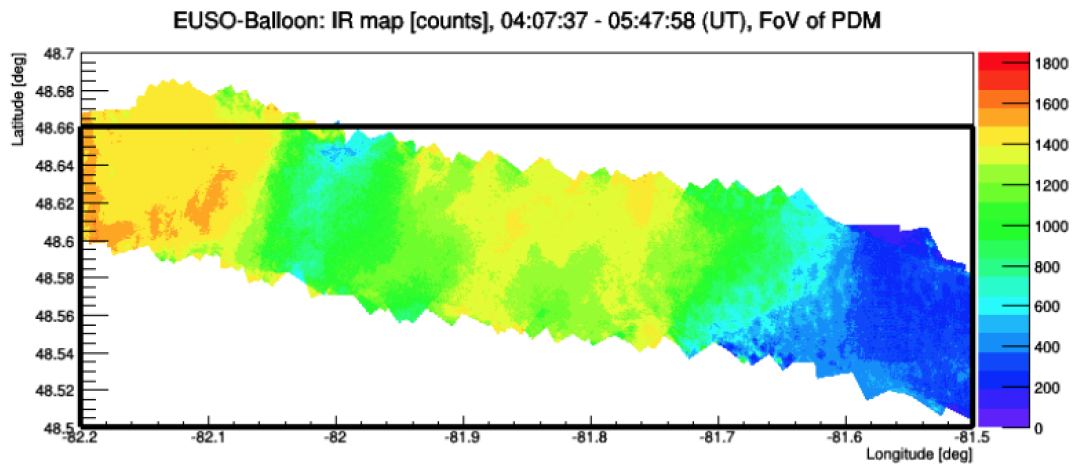
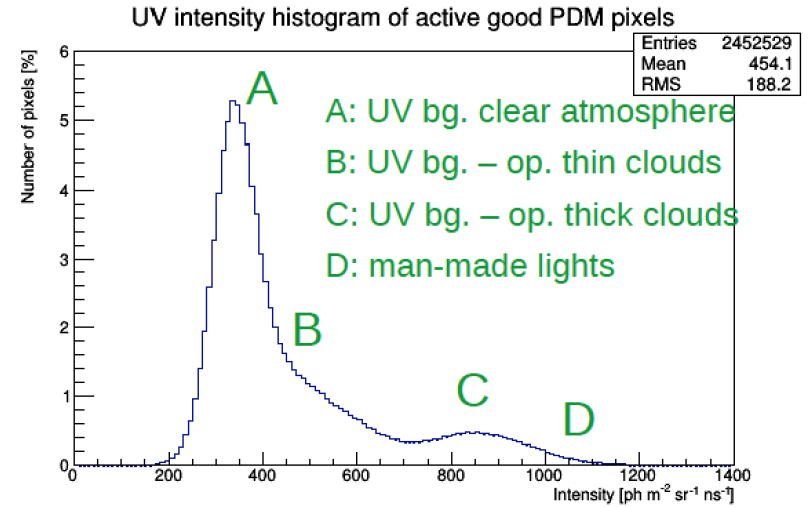
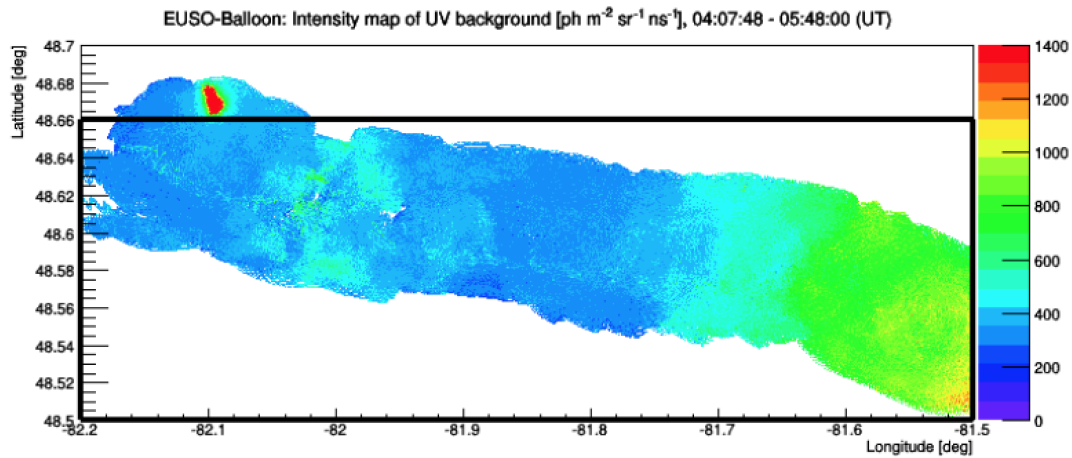
eusoballoon 24.8.2014 20:53 LT



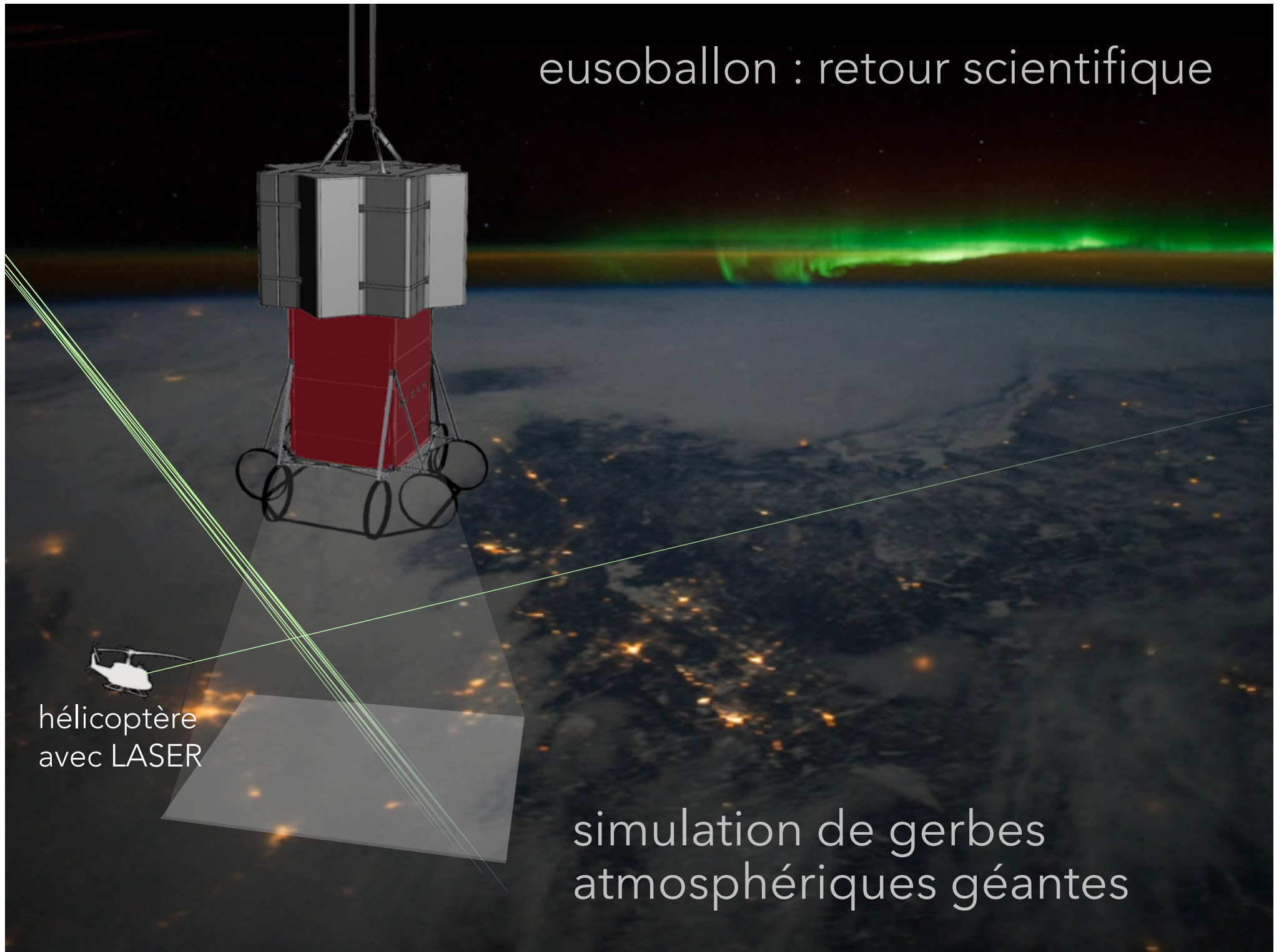
# eusoballon : retour scientifique



Measure du fonds UV !



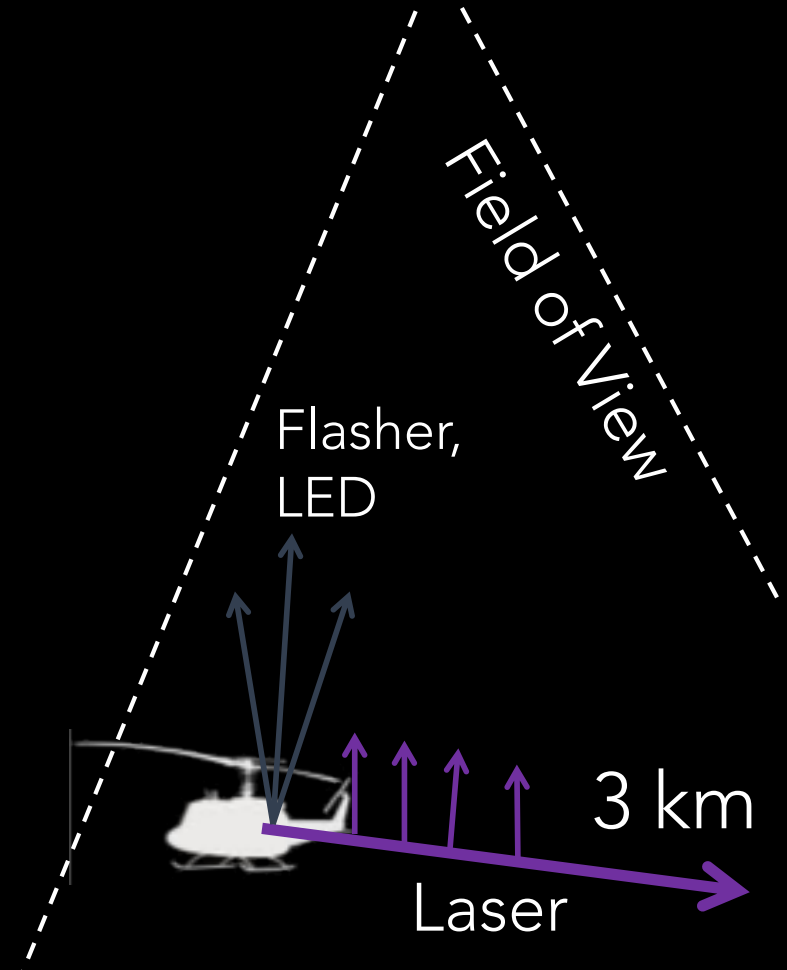
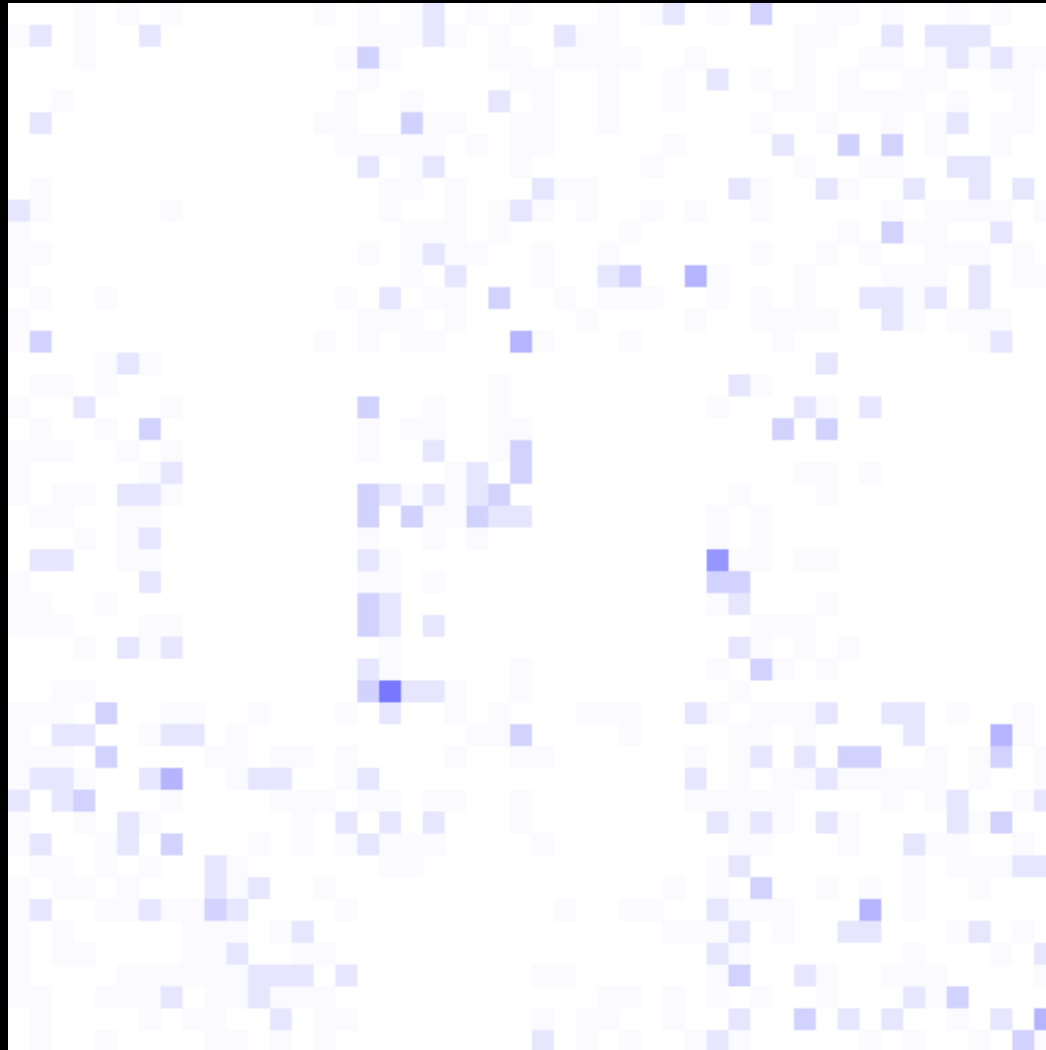
# eusoballon : retour scientifique



hélicoptère  
avec LASER

simulation de gerbes  
atmosphériques géantes

# eusoballon : mesurer c ...

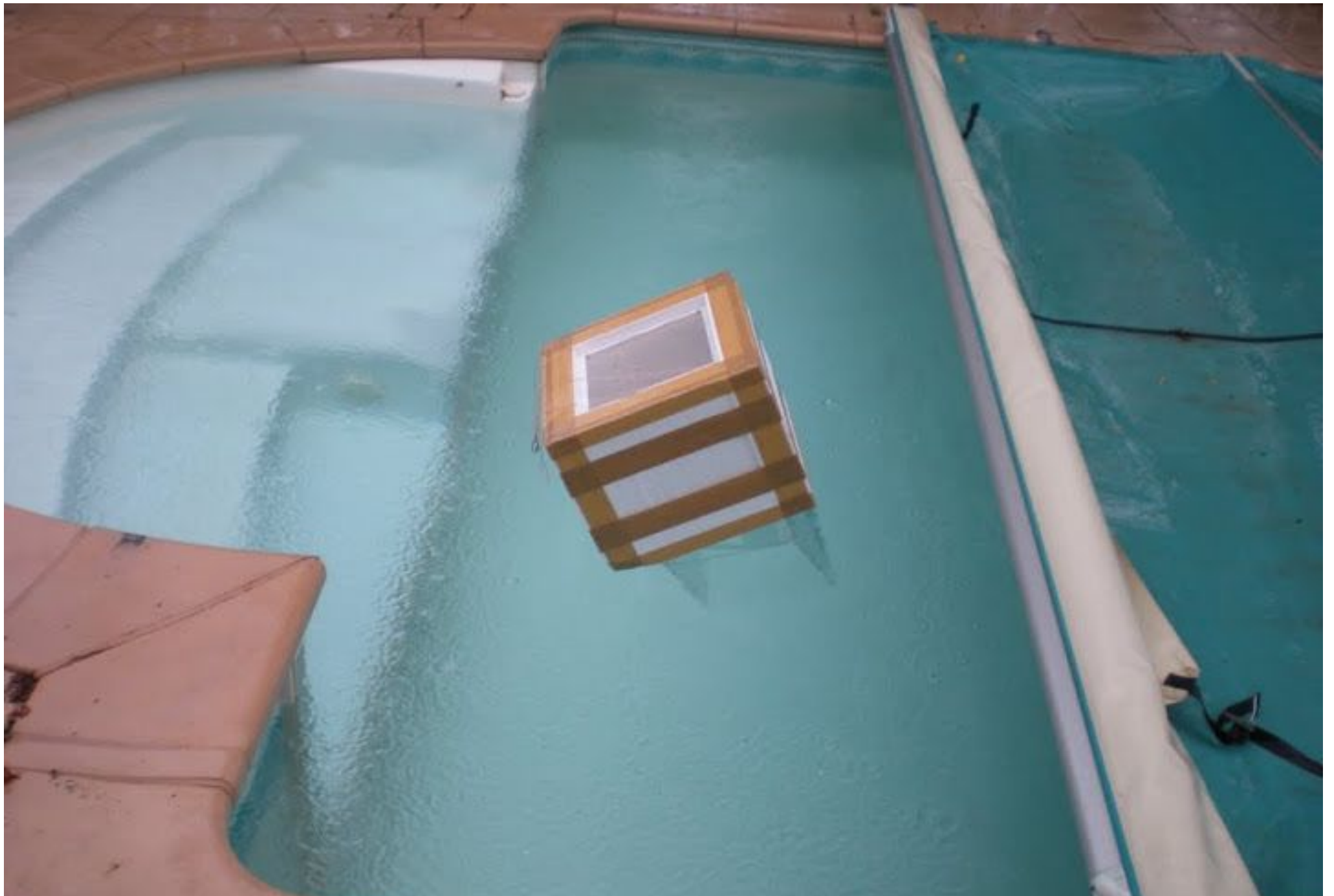


eusoballon : un retour imprévu ...





... mais qui a été préparé (marinisation)



# Lake Euso



eusoballon récupération



eusoballon

trempé à l'extérieur – sec à l'intérieur



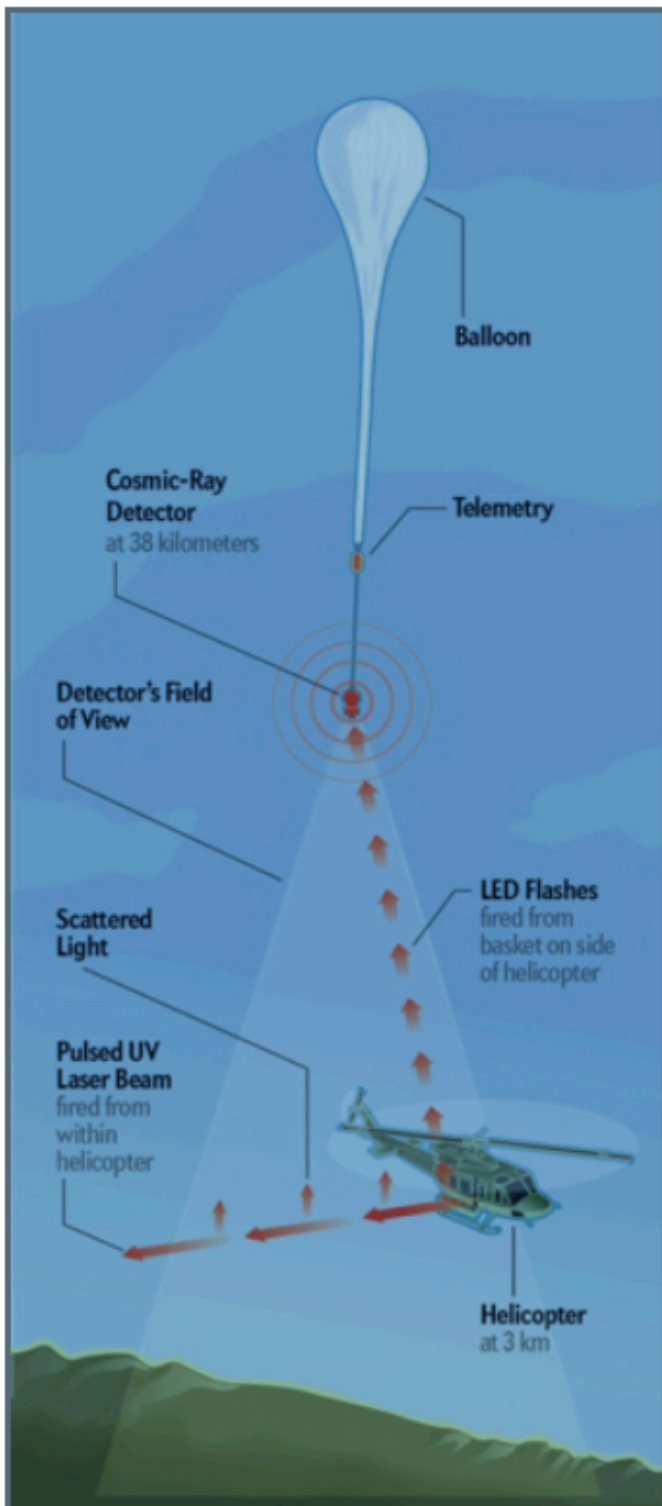
# SCIENTIFIC AMERICAN™

Scientific American Volume 311, Issue 5

Oct 14, 2014 | By [Debra Weiner](#)

The new detector passes tests involving a helicopter balloon and lasers

.... In August the team launched a prototype of the telescope 38 kilometers into the stratosphere onboard a helium-filled balloon. For two hours, researchers followed below in a helicopter, shooting a pulsed UV laser and, LED into the telescope's field of view. The test was a success: the prototype detected, the UV traces, which are similar to the fluorescence generated by extreme energy, cosmic-ray air showers ...





"Le succès est la capacité d'aller d'échec en échec sans perdre son *enthousiasme*" Churchill

Les composition des rayons cosmiques

# détecter les rayons cosmiques

RC primaires

RC de ultra haute énergie



détecteur spatial

télescope Cerenkov

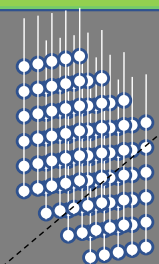
lumière Cerenkov

gerbe

lumière de fluorescence

détecteur de fluorescence

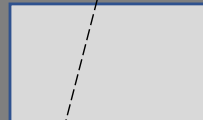
détecteur de surface



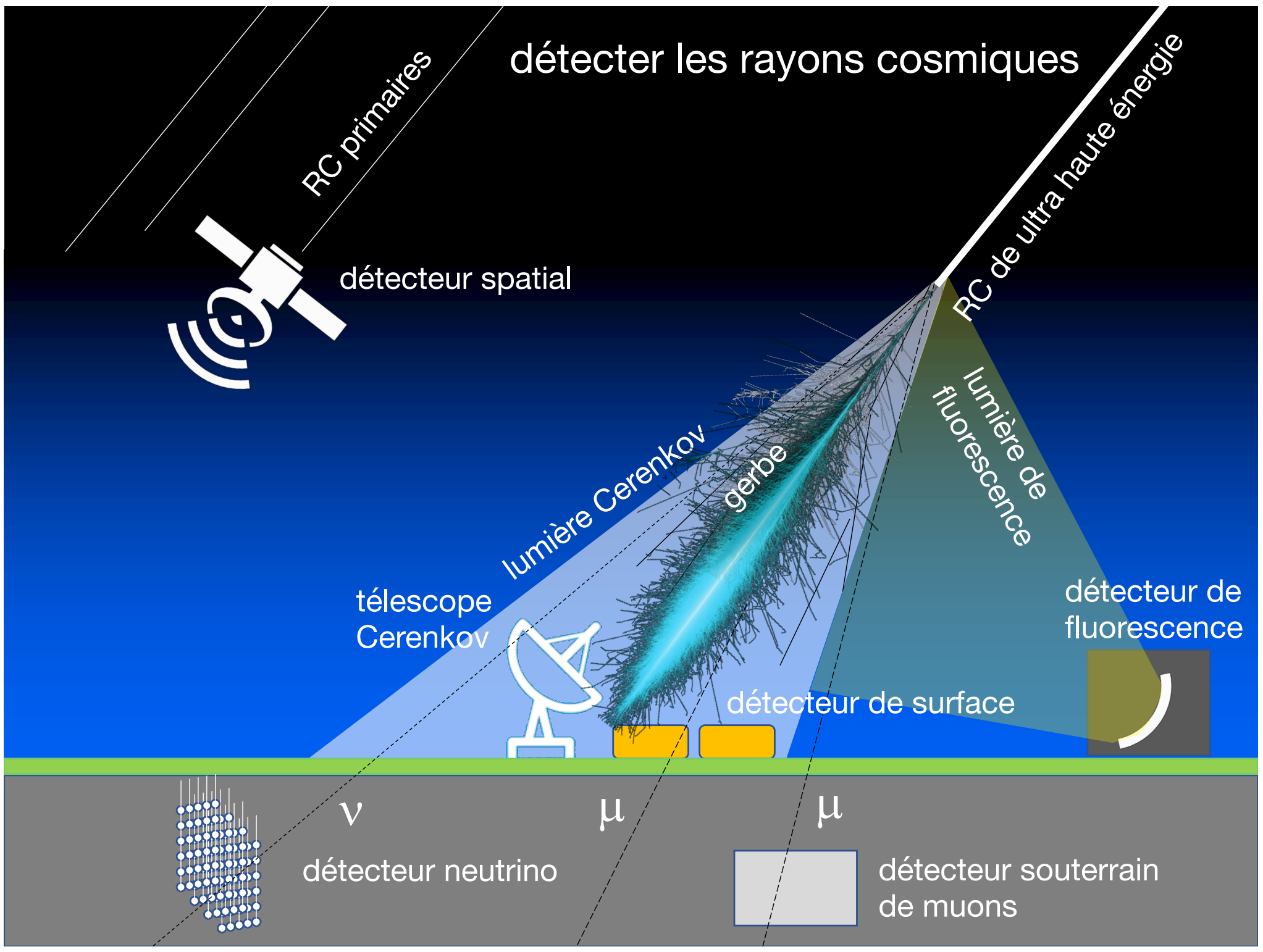
$\nu$   
détecteur neutrino

$\mu$

$\mu$

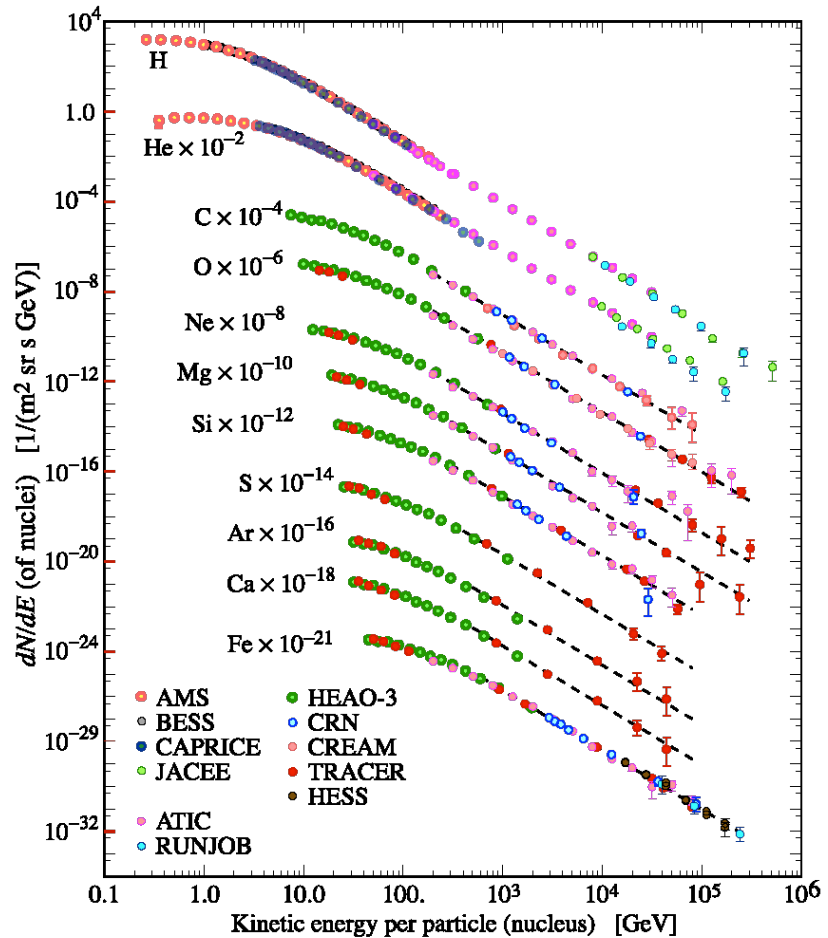


détecteur souterrain de muons

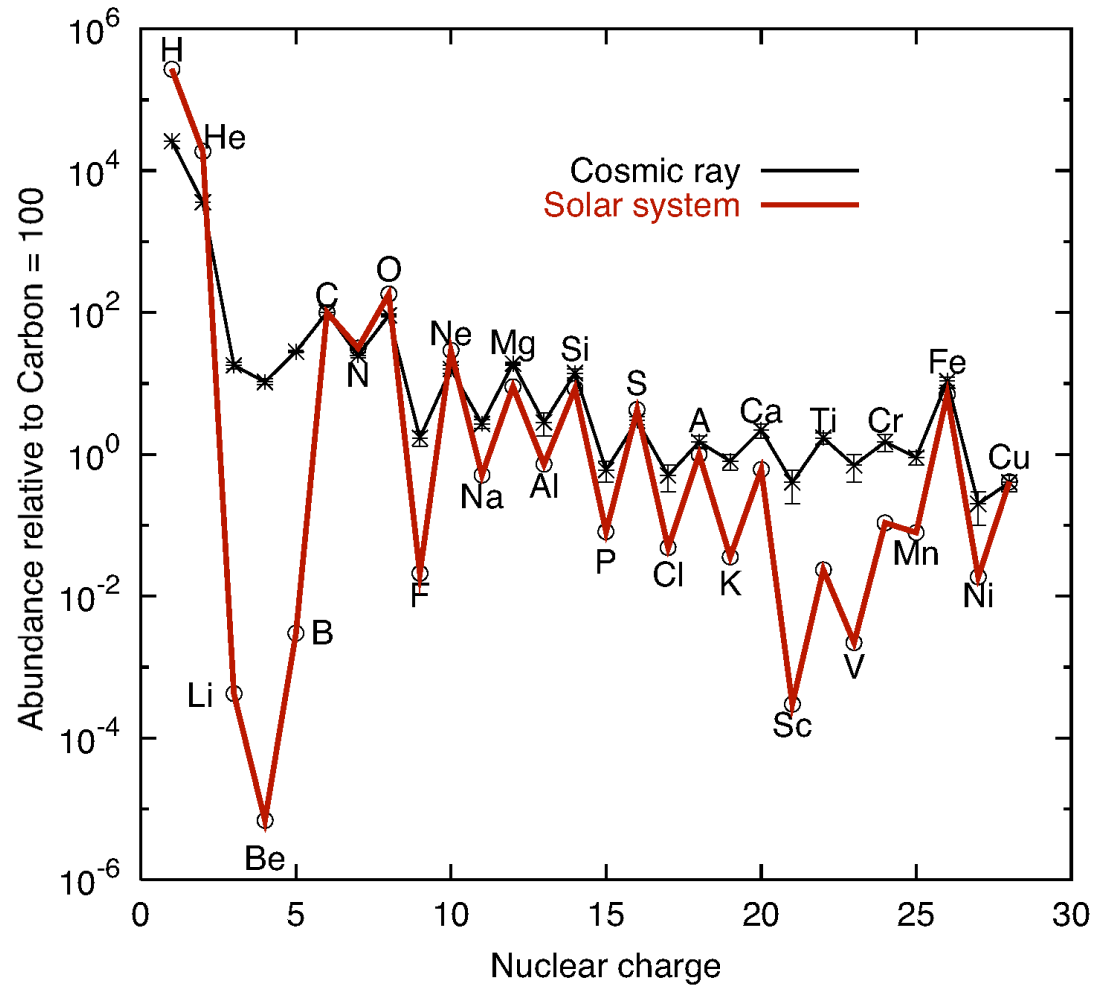




# la composition des rayons cosmiques



Nuclear abundance: cosmic rays compared to solar system



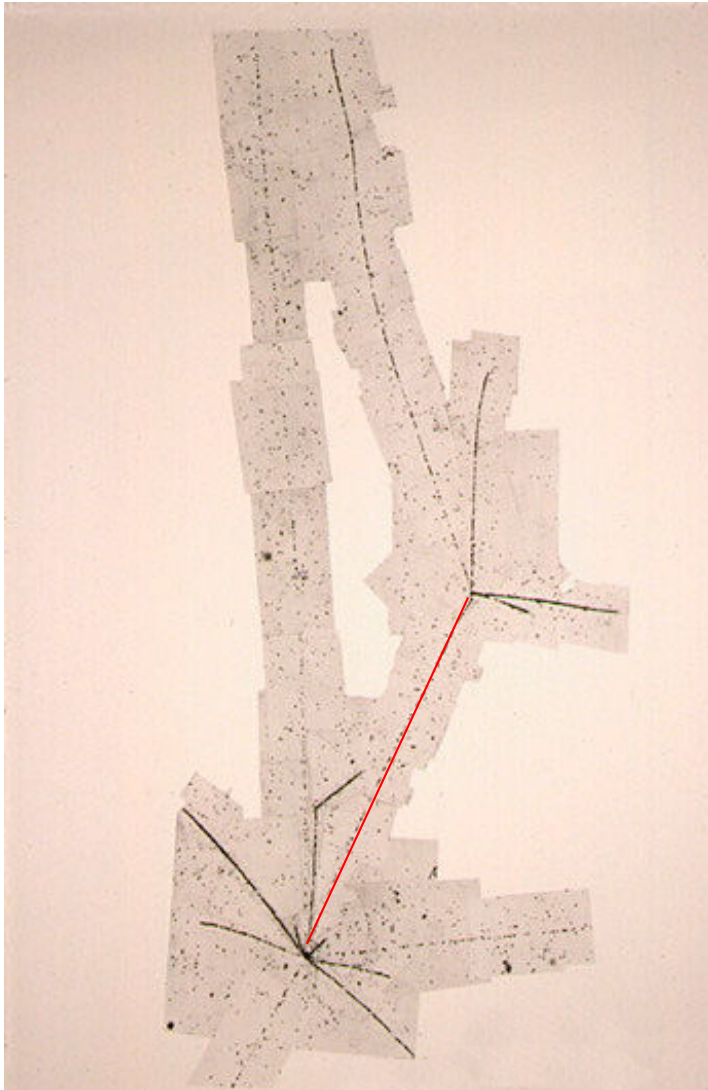
La découverte du pion

dans une émulsion photographique exposée au Pic du Midi

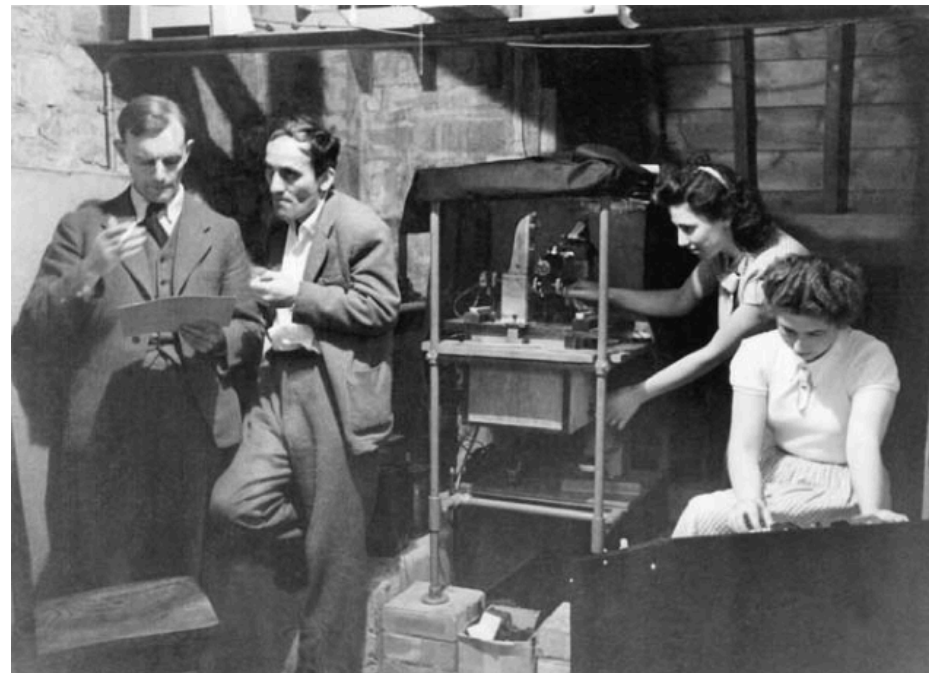


# La découverte du pion

dans une émulsion photographique exposée au Pic du Midi

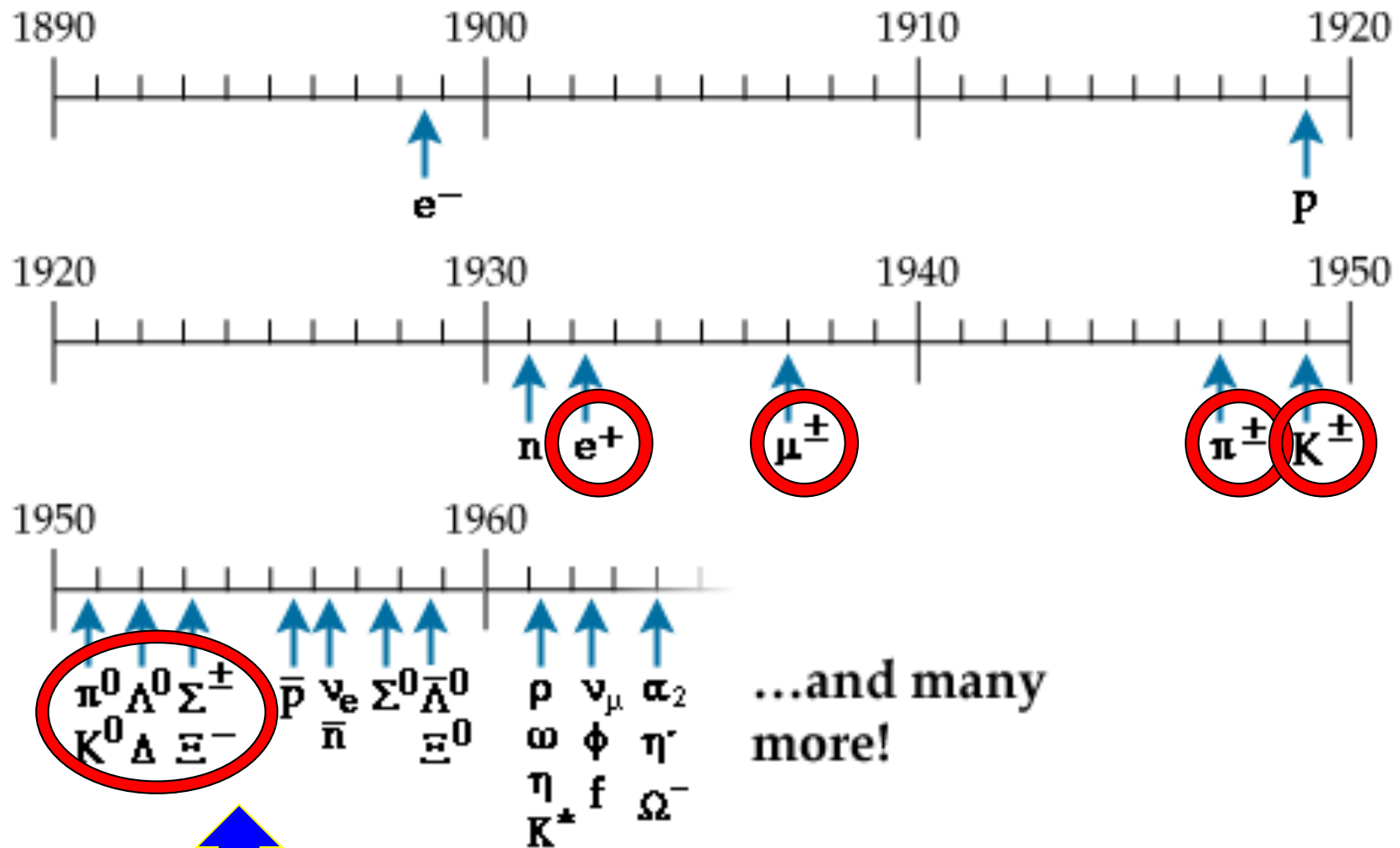


Lattes, Occhialini & Powell, 1947



Occhialini & Powell à Bristol

# la découverte des particules élémentaires



$\pi^0, \Lambda^0, \Sigma^\pm, \bar{p}, \nu_e, \Sigma^0, \bar{\Lambda}^0, \rho, \nu_\mu, \alpha_2, \omega, \phi, \eta', \eta, f, \Omega^-, K^*$

...and many more!

arrivée des accélérateurs

# détecter les positrons (antimatière leptonique)

détection directe



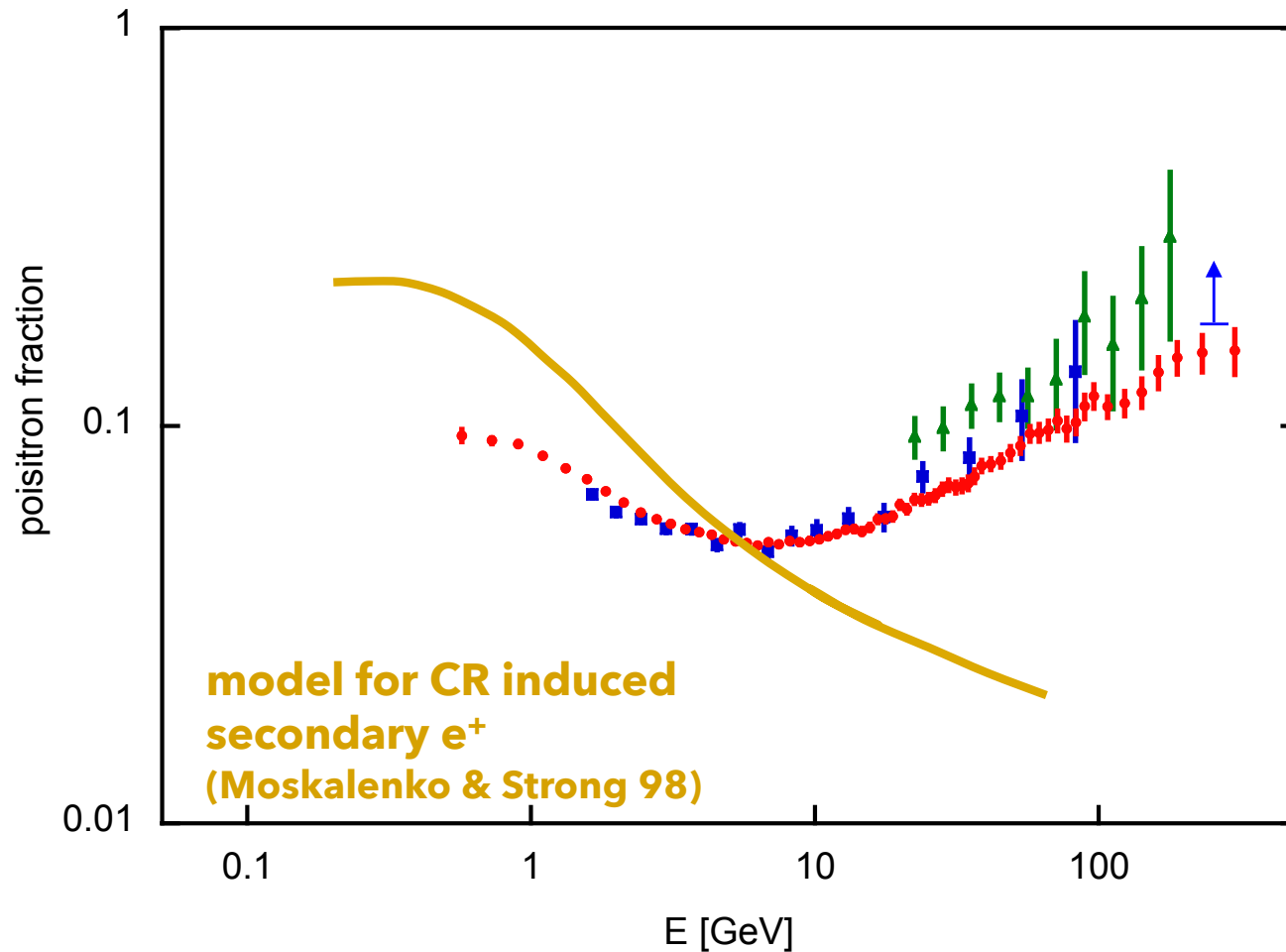
détection indirecte

$e^+$  de basse énergie

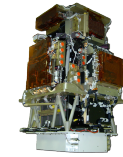


# détection directe de positrons de haute énergie

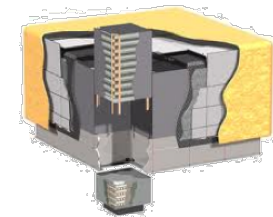
$$\text{fraction de positron} \doteq \frac{e^+}{e^- + e^+}$$



Pamela



Fermi



AMS-02



"anomalie" des positrons observés  
par rapport aux modèles de production secondaire positrons

# détecter les positrons (antimatière leptonique)

détection directe

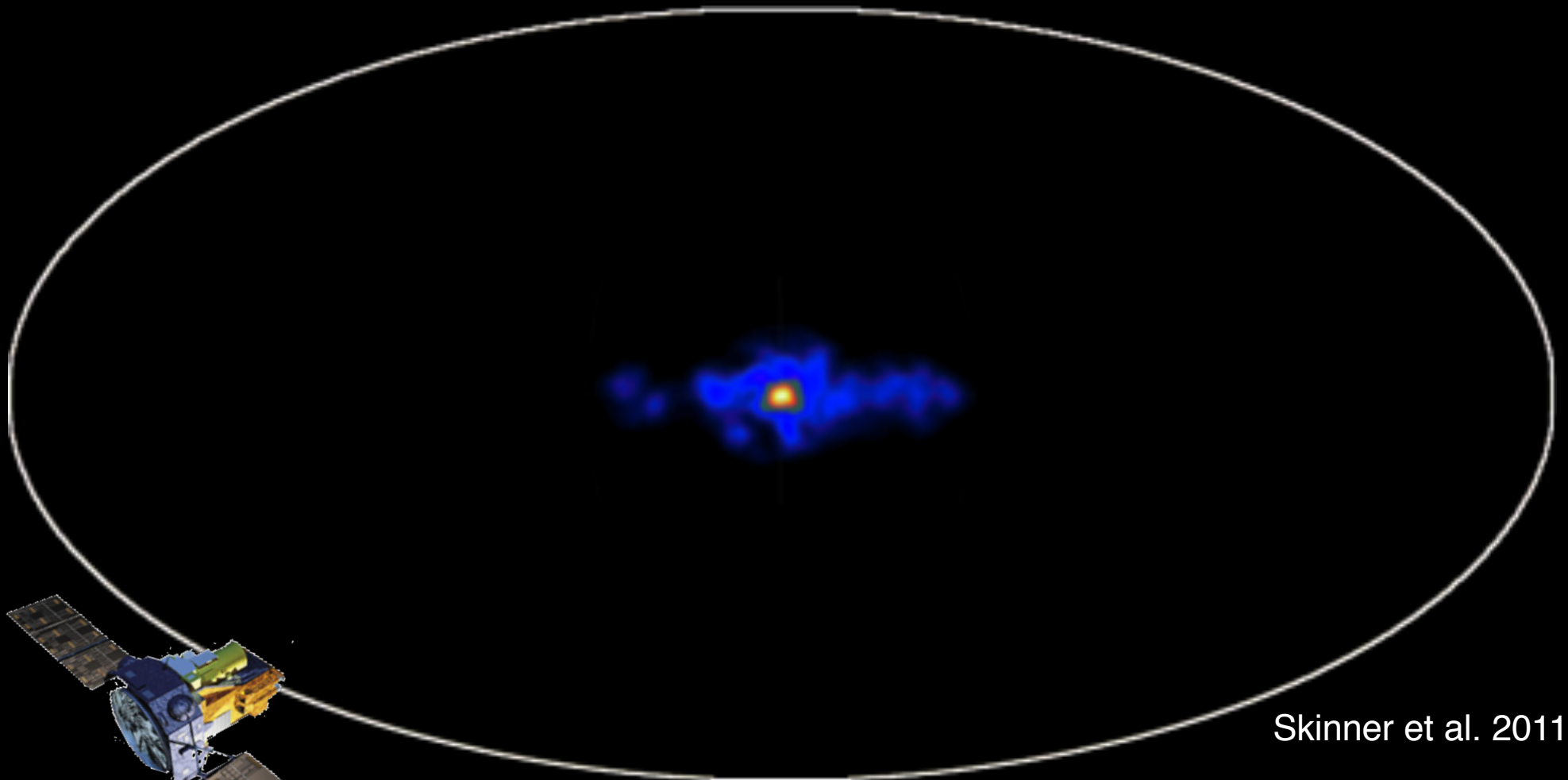


détection indirecte

$e^+$  de basse énergie



La carte du ciel dans la lumière d'annihilation  $e^-e^+$   
observé par INTEGRAL SPI



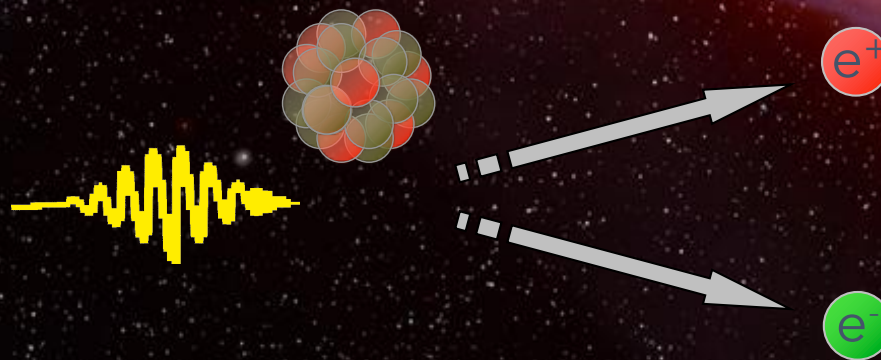
Skinner et al. 2011



binaire X (vue d'artiste)

Accélérateurs Cosmiques

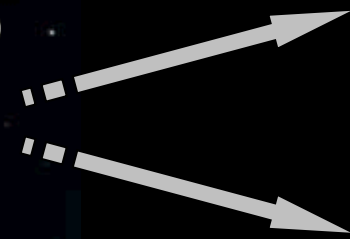
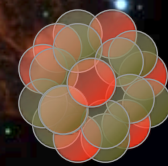
origine des  $e^+$   
production de paires  $e^-e^+$



Crabe  
reste de supernova

Accélérateurs Cosmiques

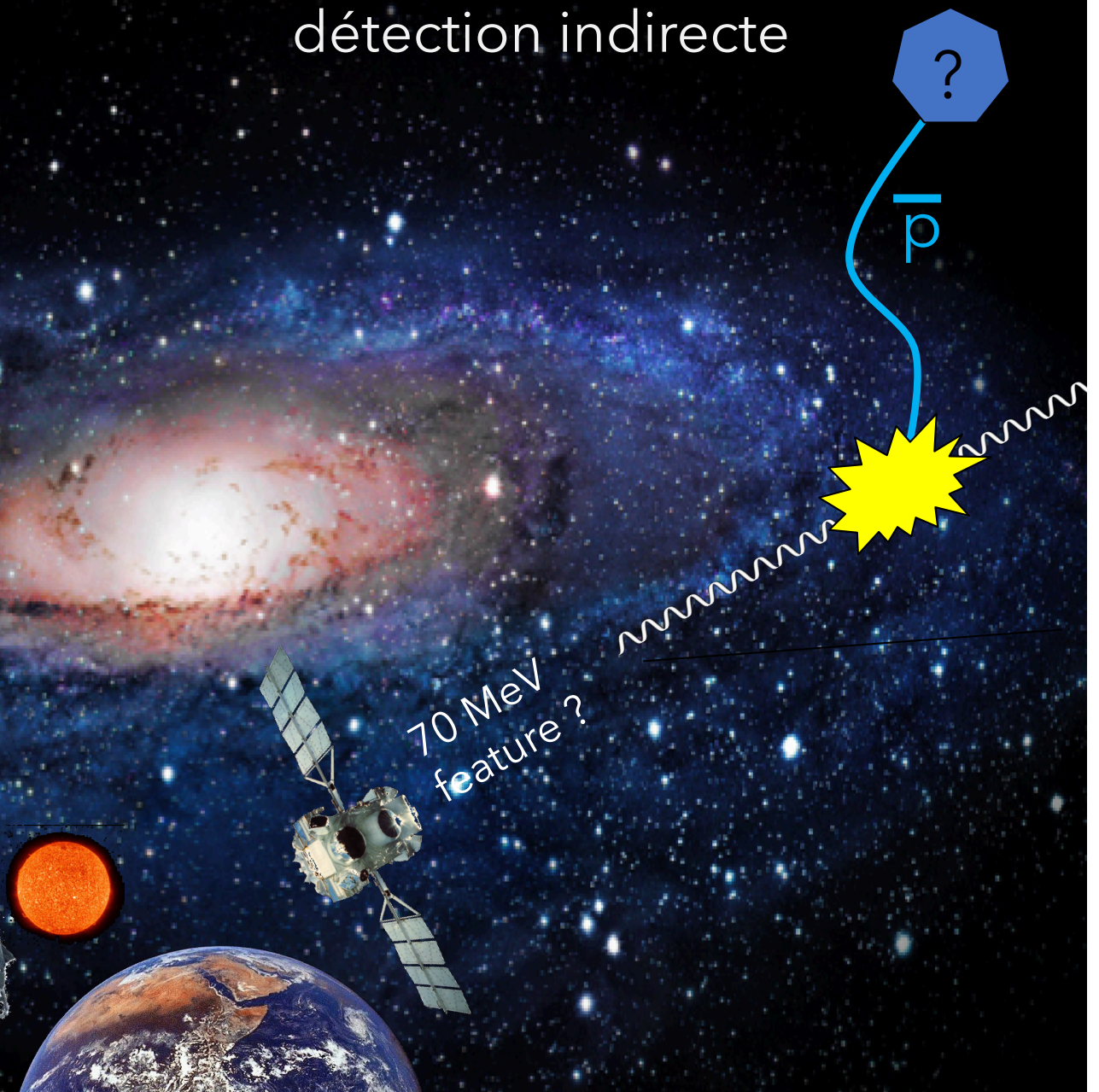
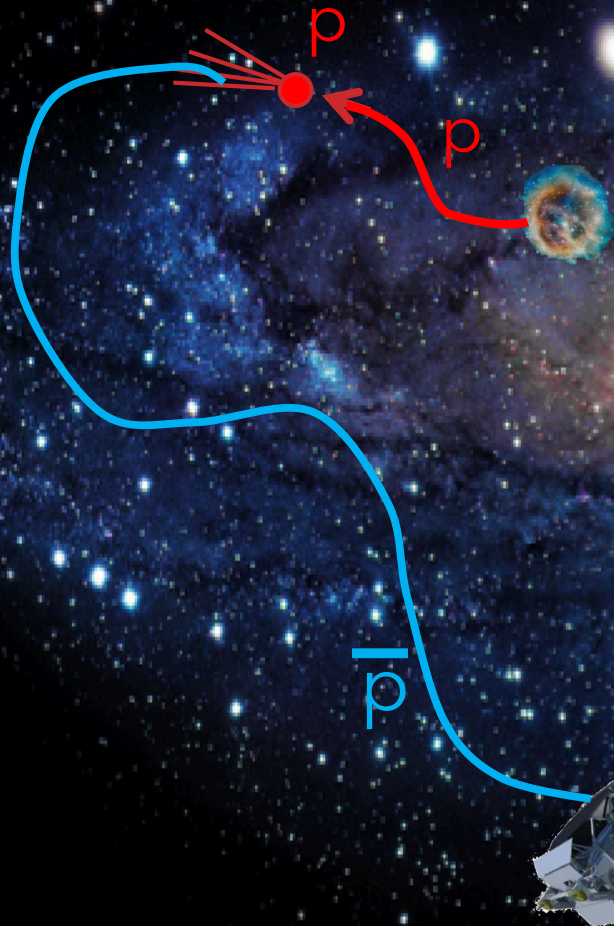
origine des  $e^+$   
production de paires  $e^-e^+$



# antimatière baryonique

détection directe

détection indirecte



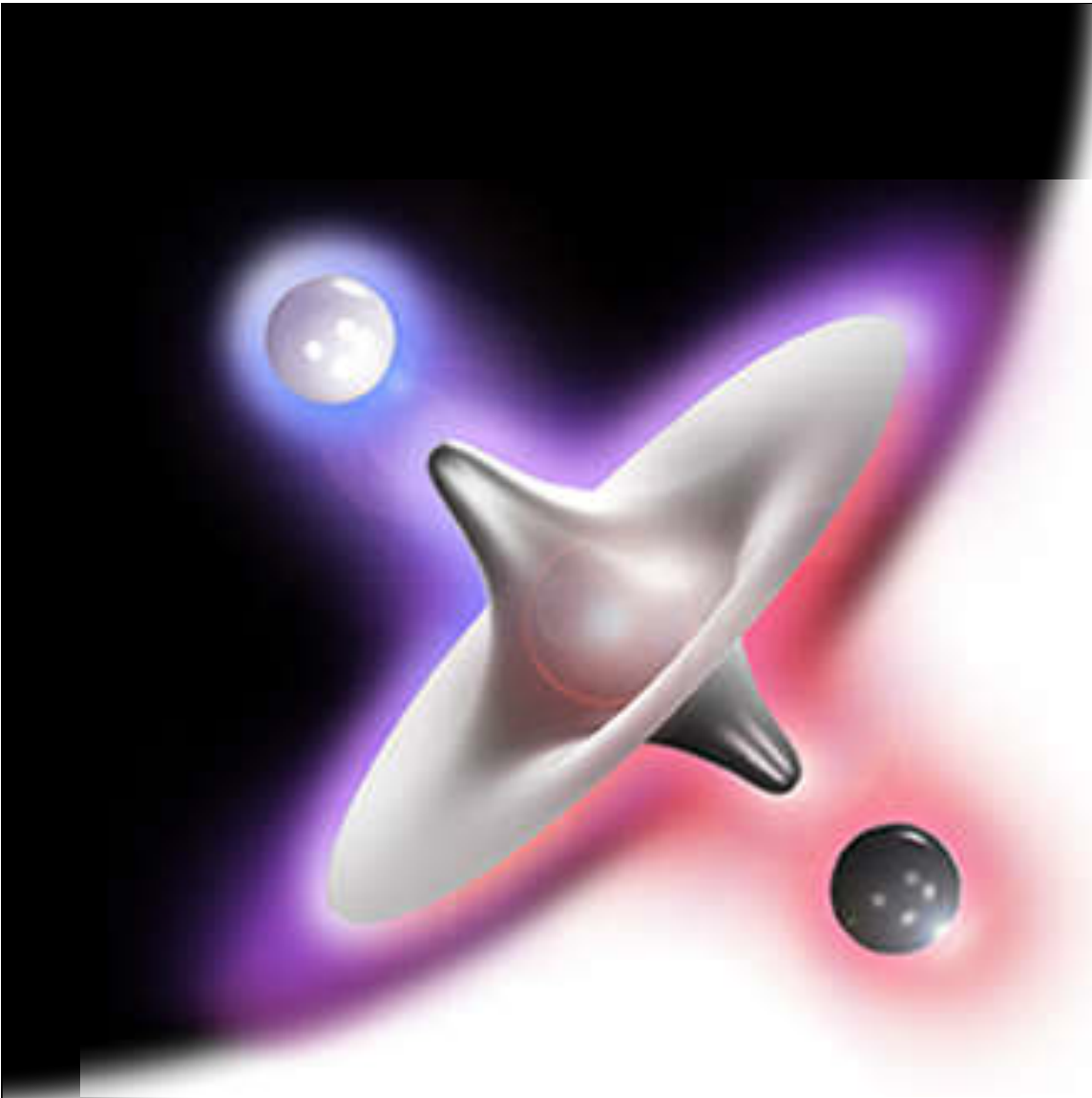
$$E = mc^2$$

dans le Big Bang  
des quantités  
égales de matière et  
d'antimatière sont  
créées

symétrie entre  
particules et  
antiparticules

tout cette  
matière/antimatière  
s'annihile aussitôt

...

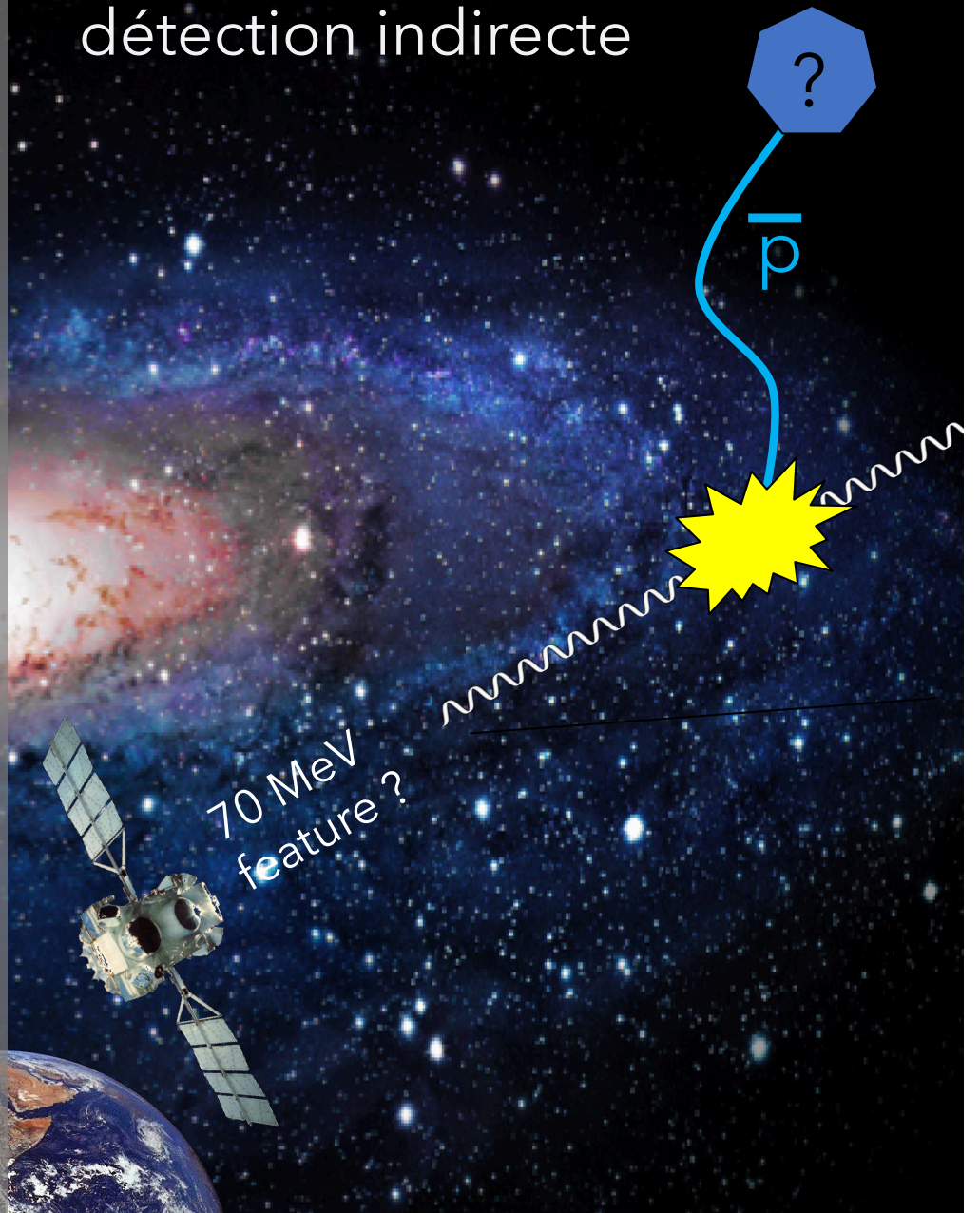


# antimatière baryonique

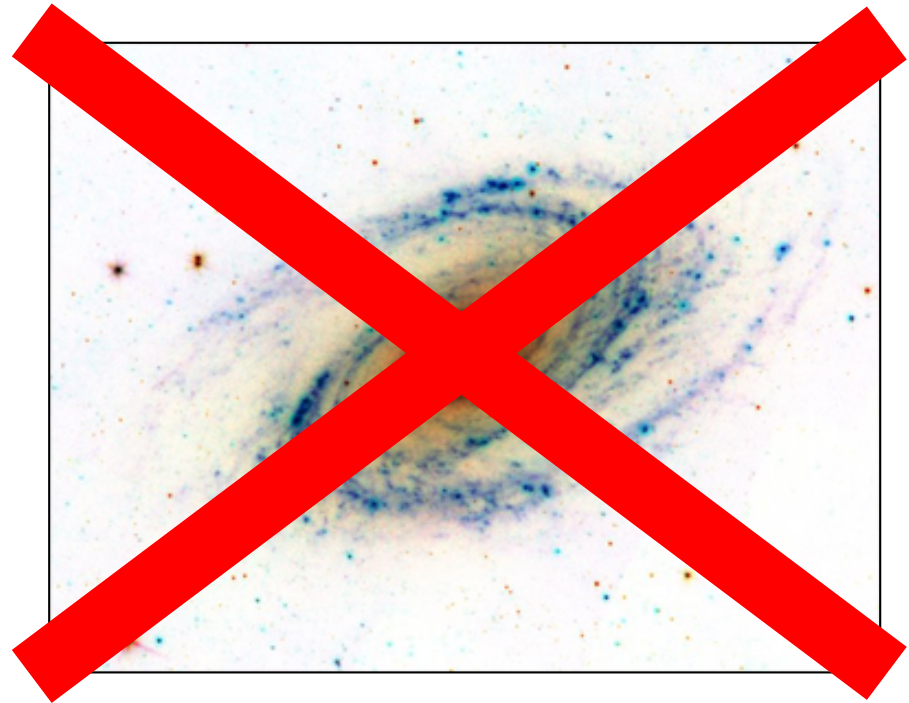
détection directe



détection indirecte



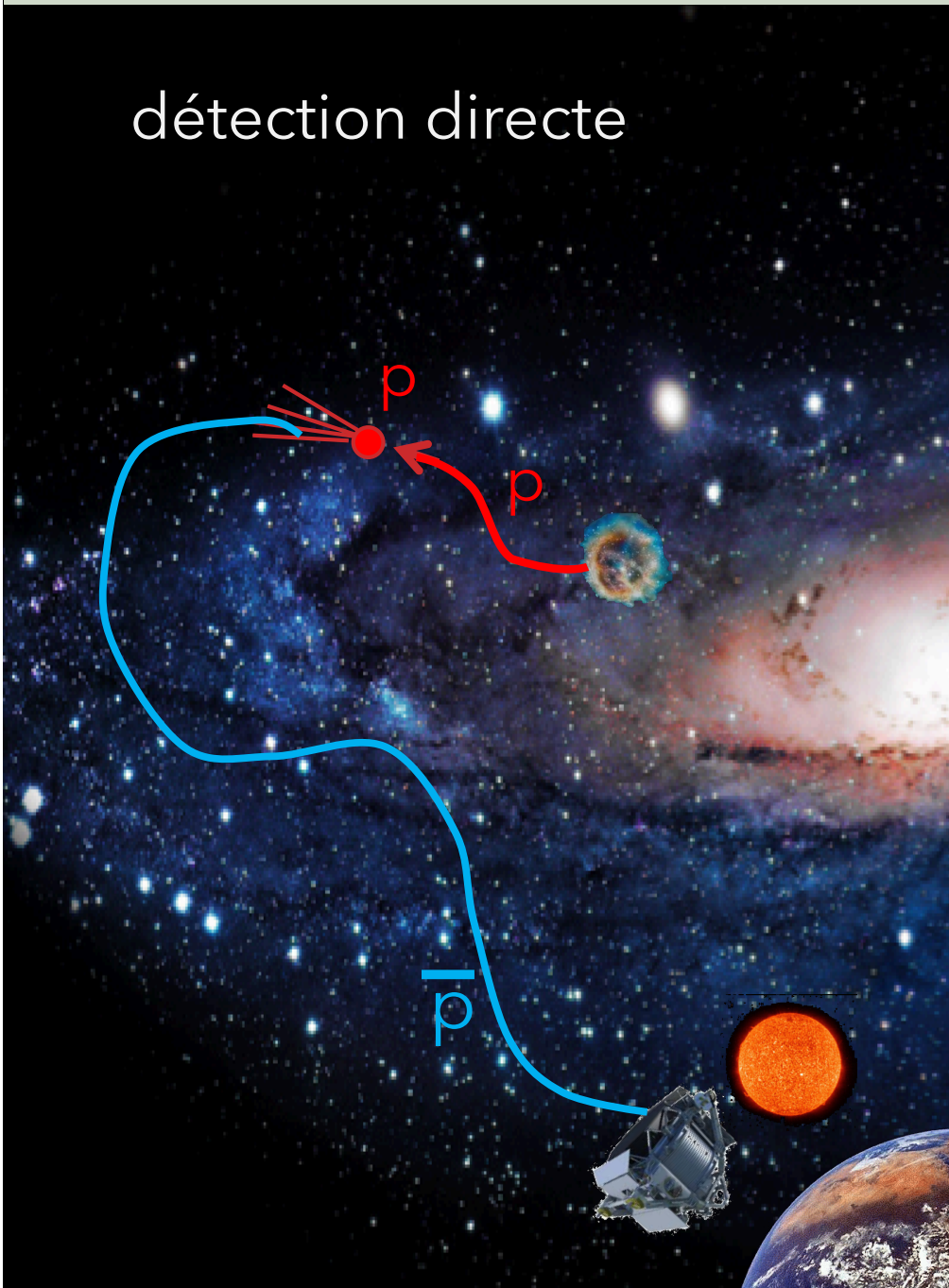
# Des mondes d'antimatière ?



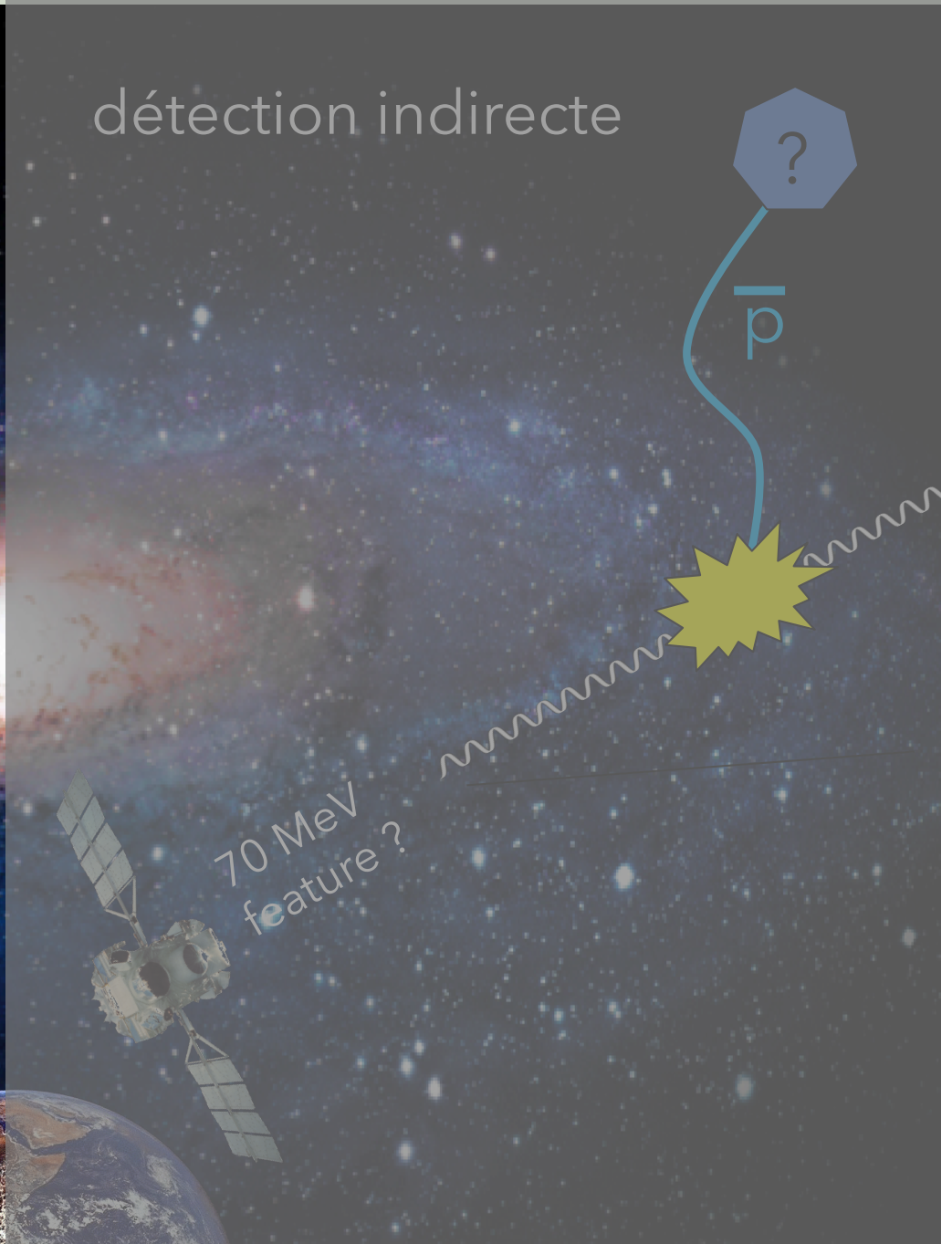
l'astronomie gamma  
n'a pas (encore ?)  
détecté des signatures  
d'annihilation baryonique

# antimatière baryonique

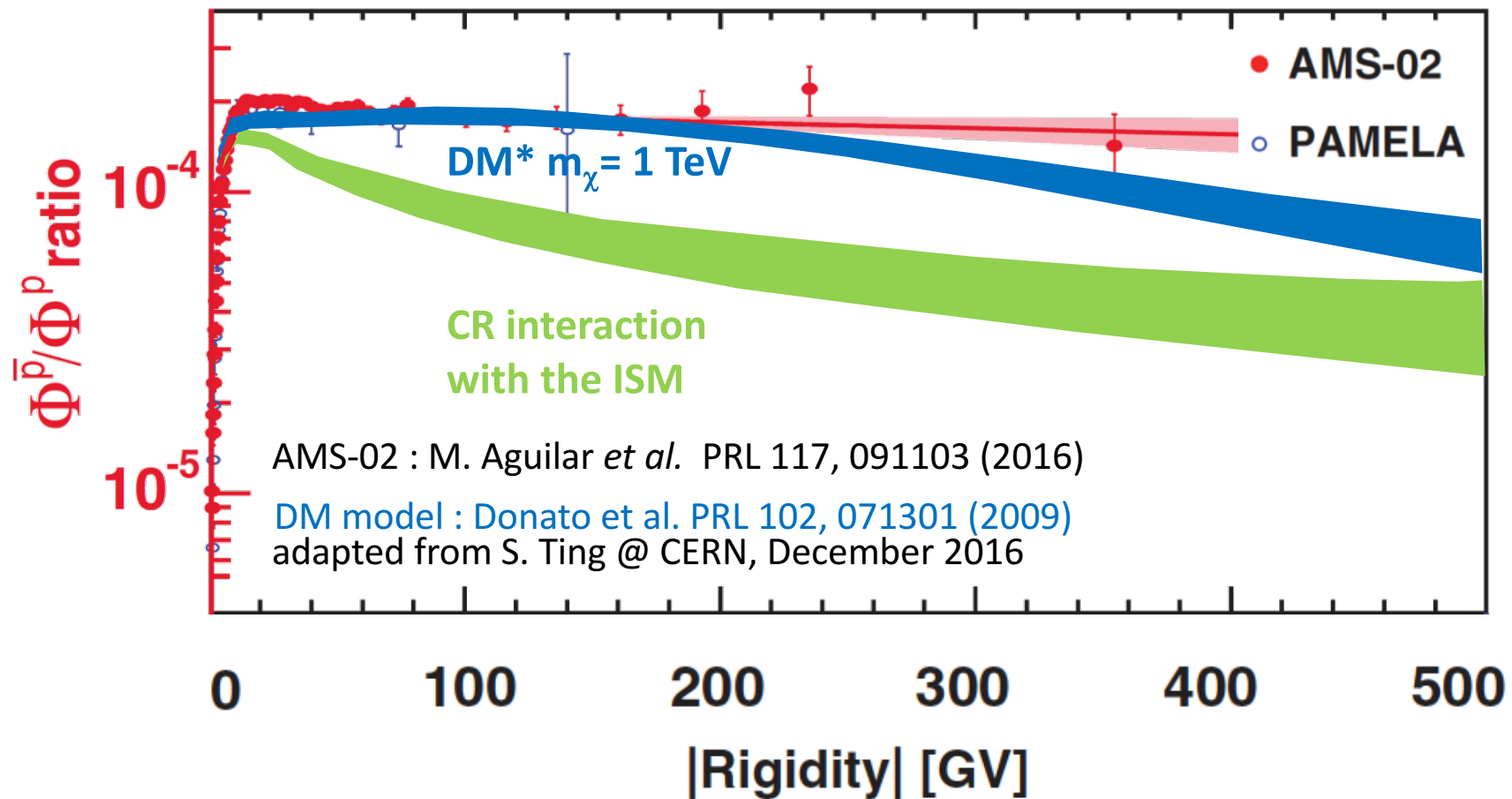
détection directe



détection indirecte



# AMS-02 : antiproton/proton ratio

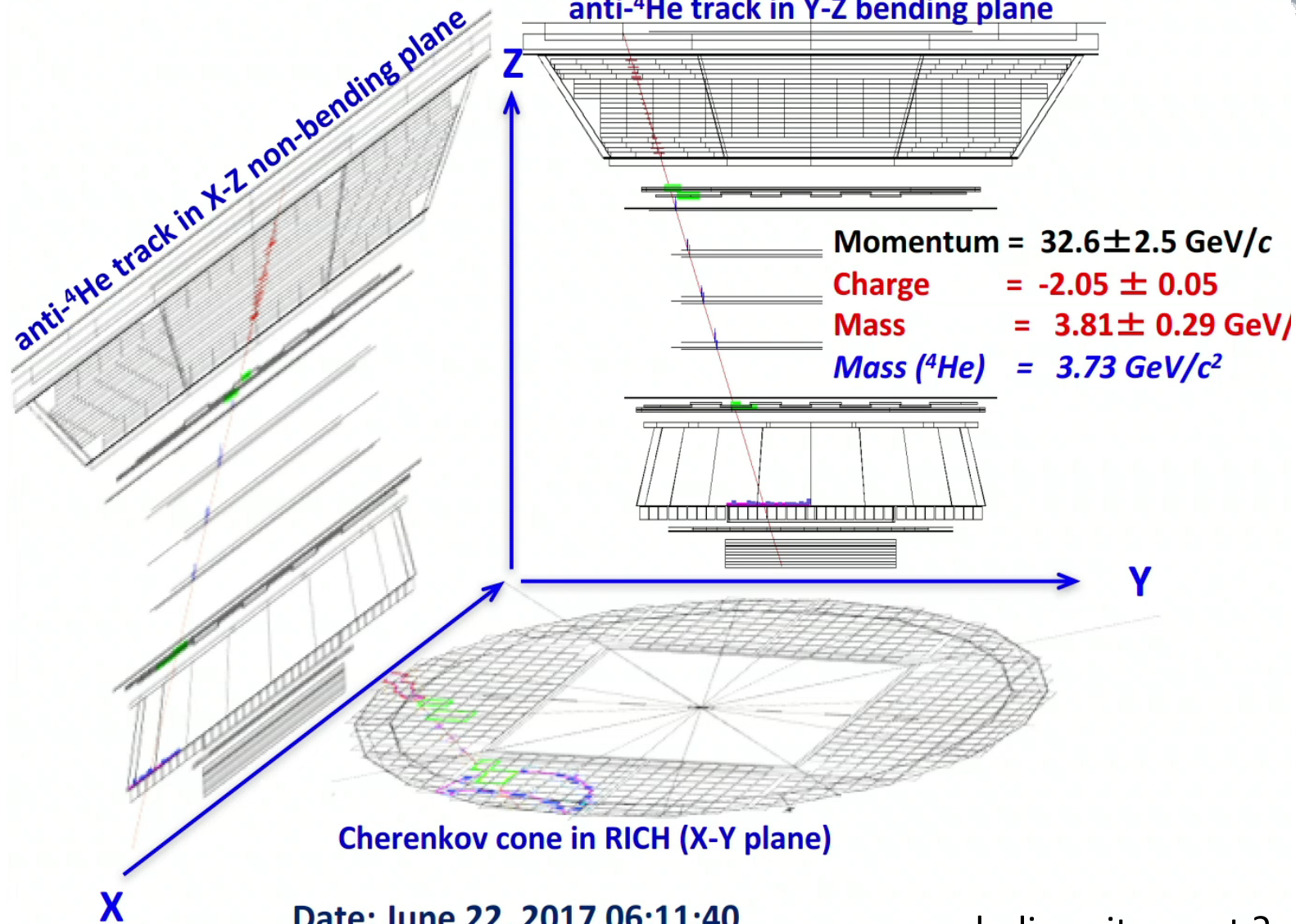




# détection d'un Anti-<sup>4</sup>He par AMS-02 ?



evenement candidae



Date: June 22, 2017 06:11:40

believe it or not ?

# Anti- ${}^4\overline{\text{He}}$ detection by AMS-02 ?



from S. Ting, CERN Colloquium of May 24 2018,

Latest Results from the AMS Experiment on the International Space Station

<https://indico.cern.ch/event/592392>

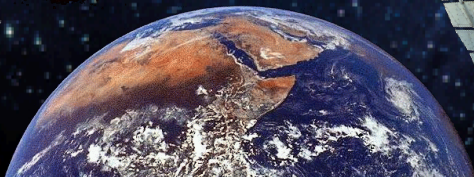
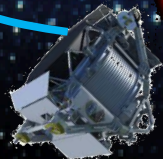
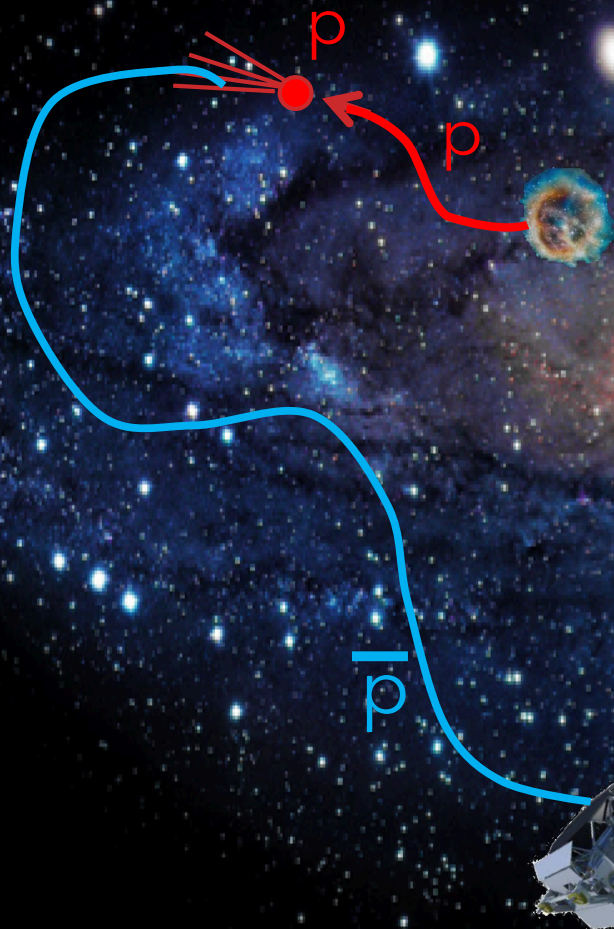
## Observations on ${}^4\overline{\text{He}}$

1. We have two  ${}^4\overline{\text{He}}$  events with a background probability of  $3 \times 10^{-3}$ .
2. Continuing to take data through 2024 the background probability for  ${}^4\overline{\text{He}}$  would be  $2 \times 10^{-7}$ , i.e., greater than 5-sigma significance.
3. The  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  ratio is 10-20% yet  ${}^3\overline{\text{He}}/{}^4\overline{\text{He}}$  ratio is 300%.  
More data will resolve this mystery.

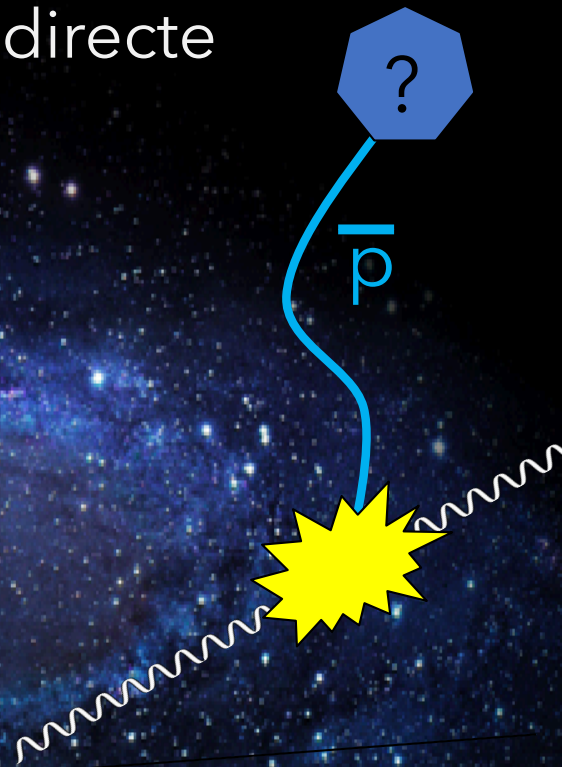
# astronomie d'antimatière

détection directe

détection indirecte



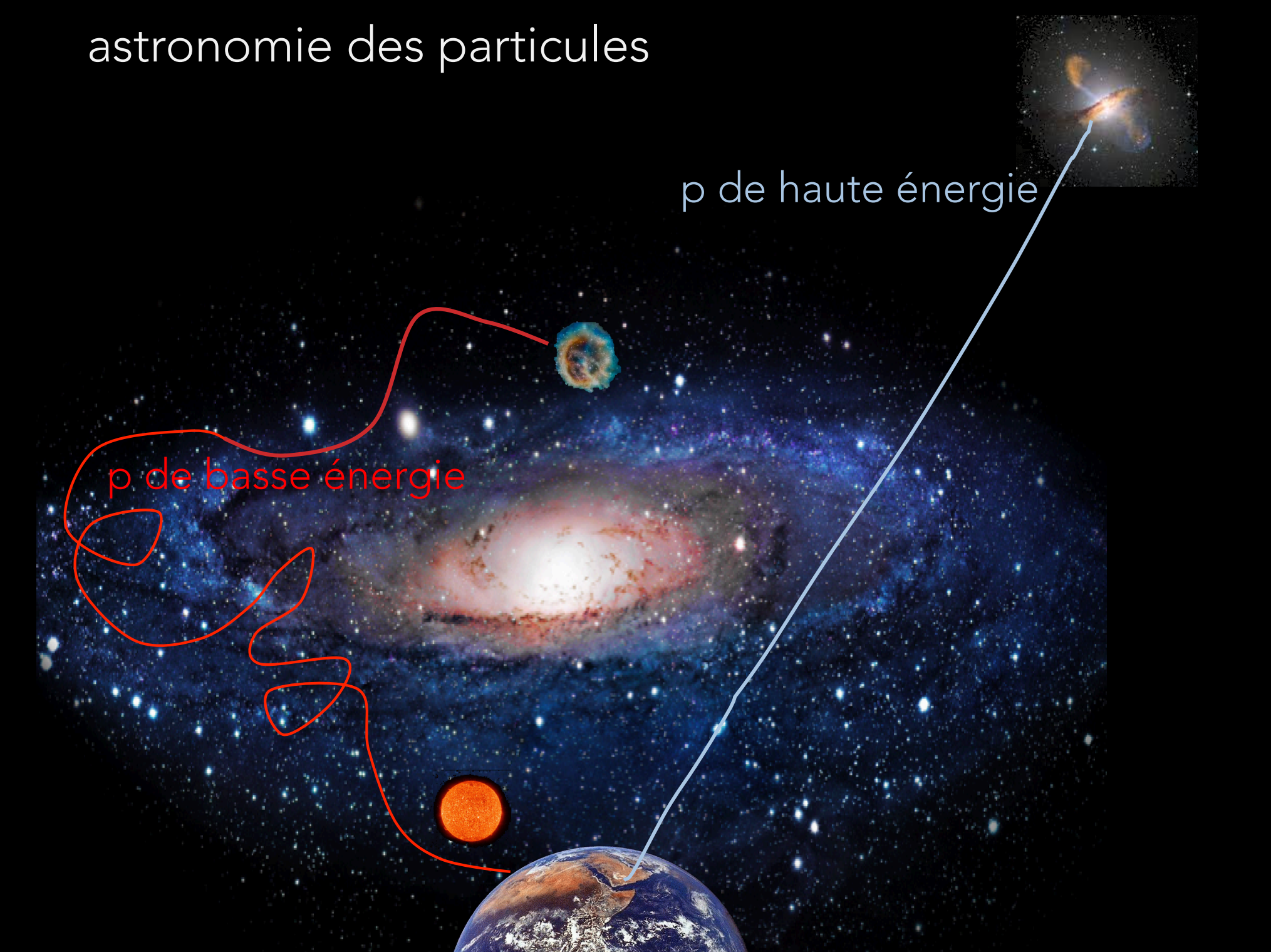
70 MeV feature ?



# astronomie des particules

p de haute énergie

p de basse énergie



# les messagers de l'astronomie

messagers

message, source principale ...

**hV1**

photons

quasi-totalité de ce que l'on connaît

**2**

météorites

histoire du système solaire

**3**

rayons cosmiques

leur origine, accélérateurs cosmiques

**4**

neutrinos

processus de très haute énergie

**5**

ondes gravitationnelles

"ballets" et "spirales" de la mort

?

matière noire

**CANAL+**

?

énergie sombre