

# Rayons cosmiques, particules énergétiques et rayonnement non-thermique

La fin de la physique classique  
et la découverte des rayons cosmiques

Etienne Parizot  
(APC - Univ. Paris 7)

# Le contexte scientifique

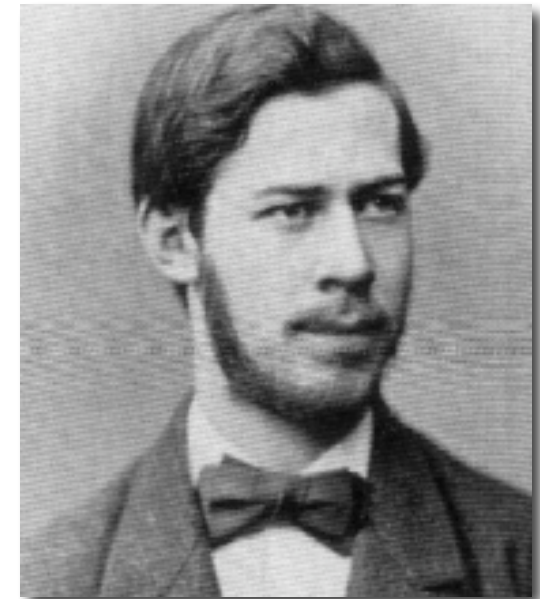
- La grande percée du XIX<sup>e</sup> siècle :
  - ◆ Unification de l'électricité et du magnétisme
  - ◆ Identification de la nature de la lumière (onde EM)



M. Faraday



J.C. Maxwell

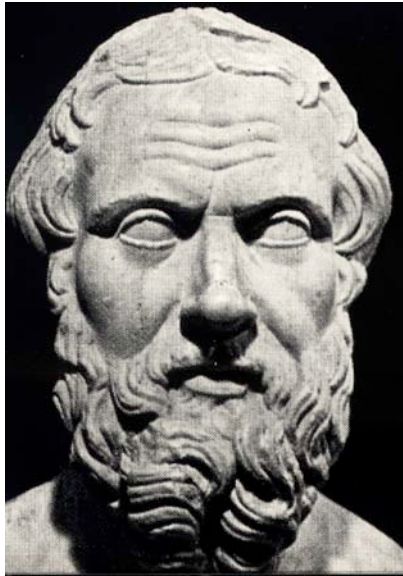


H.R. Hertz

**LUMIÈRE**

# Le contexte scientifique - II

- **Matière : théorie atomique primitive**
  - ◆ Combinaison d'atomes différents (« indivisibles »)
  - ◆ Le noyau et les électrons sont inconnus !



Démocrite



J. Dalton



A. Avogadro

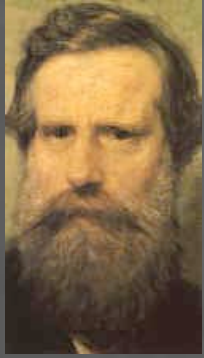


D.I. Mendeleiev

**MATIÈRE**

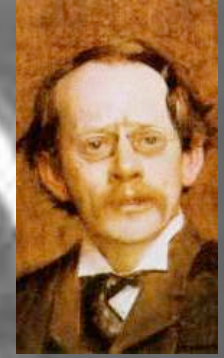
# Les nouveaux rayonnements

- Les rayons cathodiques
- La lumière « non lumineuse »
- Les rayons X
- Les rayonnements radioactifs
- Les rayons cosmiques



Crookes

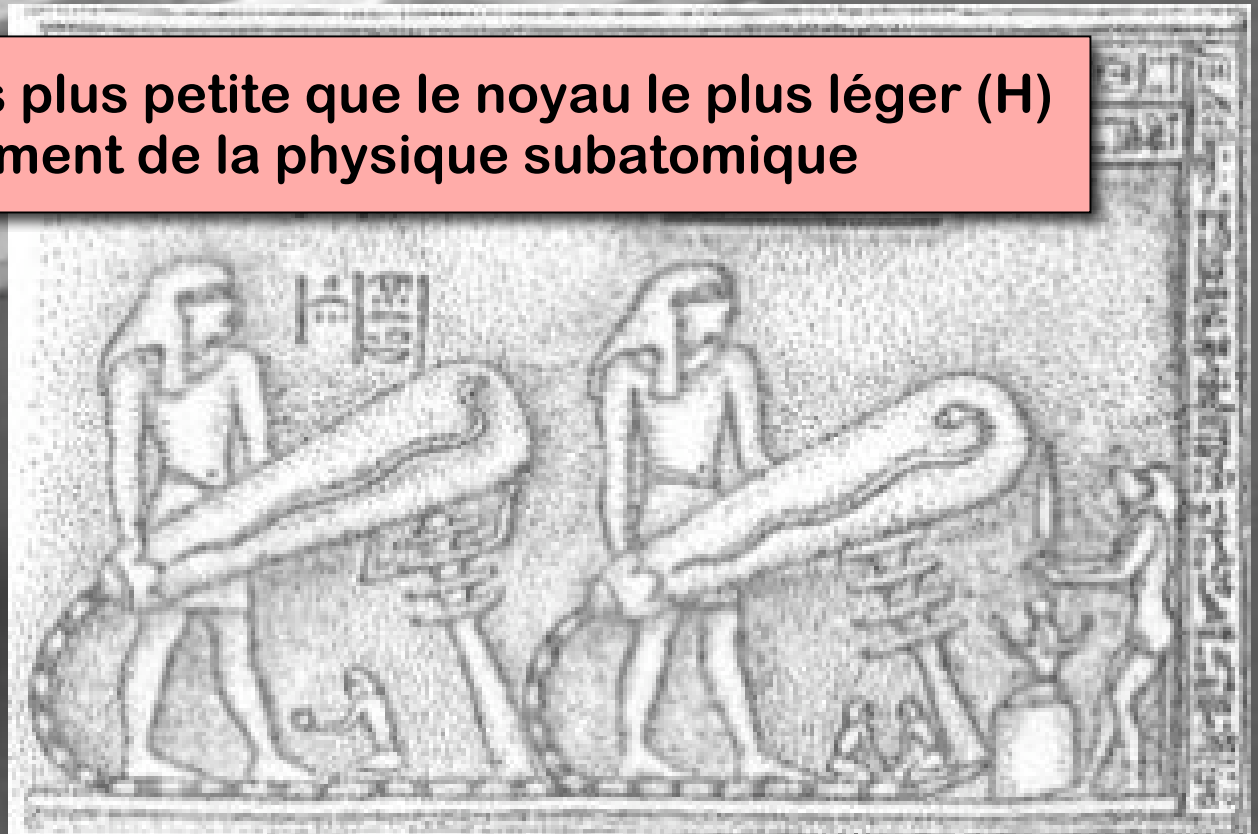
# Les rayons cathodiques



Thomson

- 1855 : pompe à vide de Geissler
- 1879 : tube de Crookes → rayons inconnus
- 1897 : Thomson identifie l'électron

masse 2000 fois plus petite que le noyau le plus léger (H)  
⇒ lancement de la physique subatomique

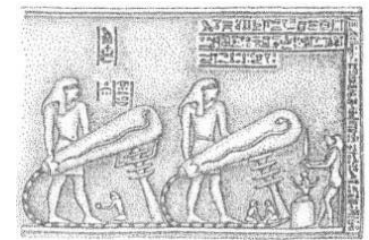




# Lumière ou matière ?

- Rayons cathodiques : électrons (1897)
- Rayons X (Röntgen, 1895) : nature incertaine jusqu'à von Laue (1912)
- Radioactivité de l'uranium (Becquerel, 1896)
- 1898-1900, P. et M. Curie, E. Rutherford, P. Villard... comprennent qu'il y a plusieurs types de radioactivité ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ )

10 ans pour  $\alpha = \text{He}$



# L'électroscope

- **Électroscope chargé**  $\Rightarrow$  les « bras » se repoussent
- **Soumis à un rayonnement énergétique**, l'air se trouve partiellement ionisé et les charges sont évacuées
- **L'électroscope se décharge d'autant plus vite** que le rayonnement est plus intense



# Décharge spontanée !



- 1901 : Wilson remarque que la décharge est identique sur Terre et sous un tunnel (environ 7 divisions par heure).
- Rutherford montre que la radioactivité naturelle (roche et contamination de l'équipement) en est responsable.
- 1910 : le père Théodore Wulf (jésuite physicien amateur, qui construit les meilleurs électromètres) fait des études au sommet de la tour Eiffel.



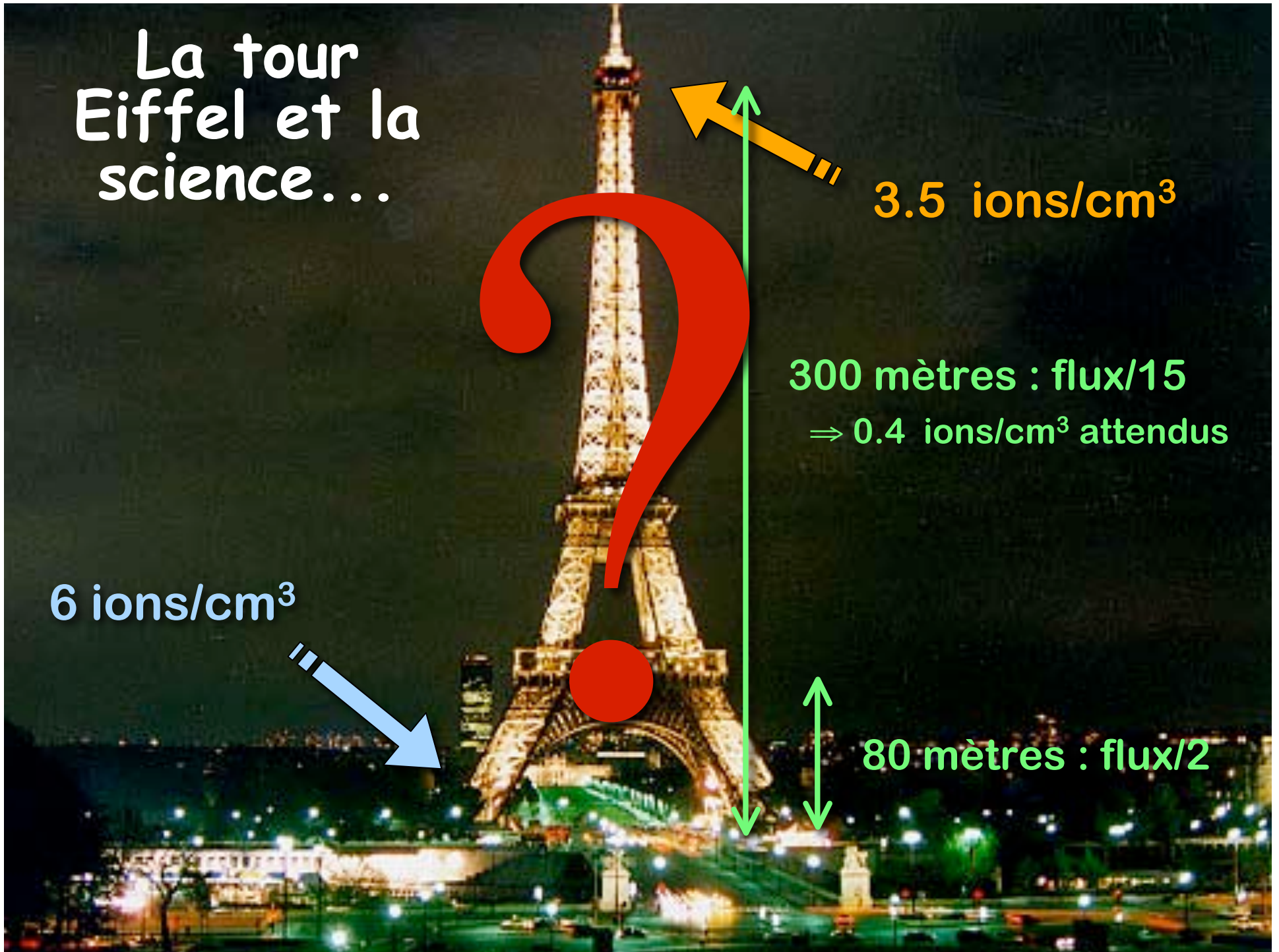
# La tour Eiffel et la science...

3.5 ions/cm<sup>3</sup>

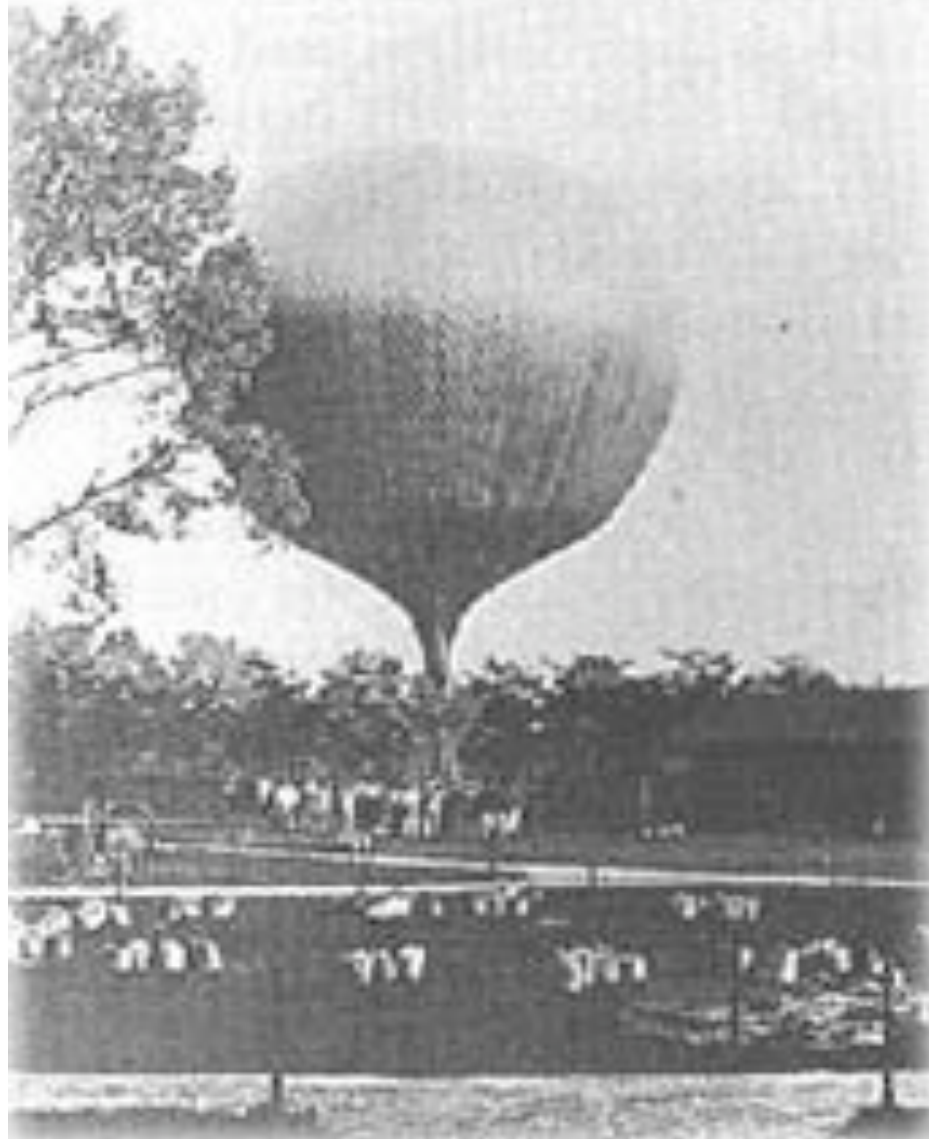
300 mètres : flux/15  
⇒ 0.4 ions/cm<sup>3</sup> attendus

6 ions/cm<sup>3</sup>

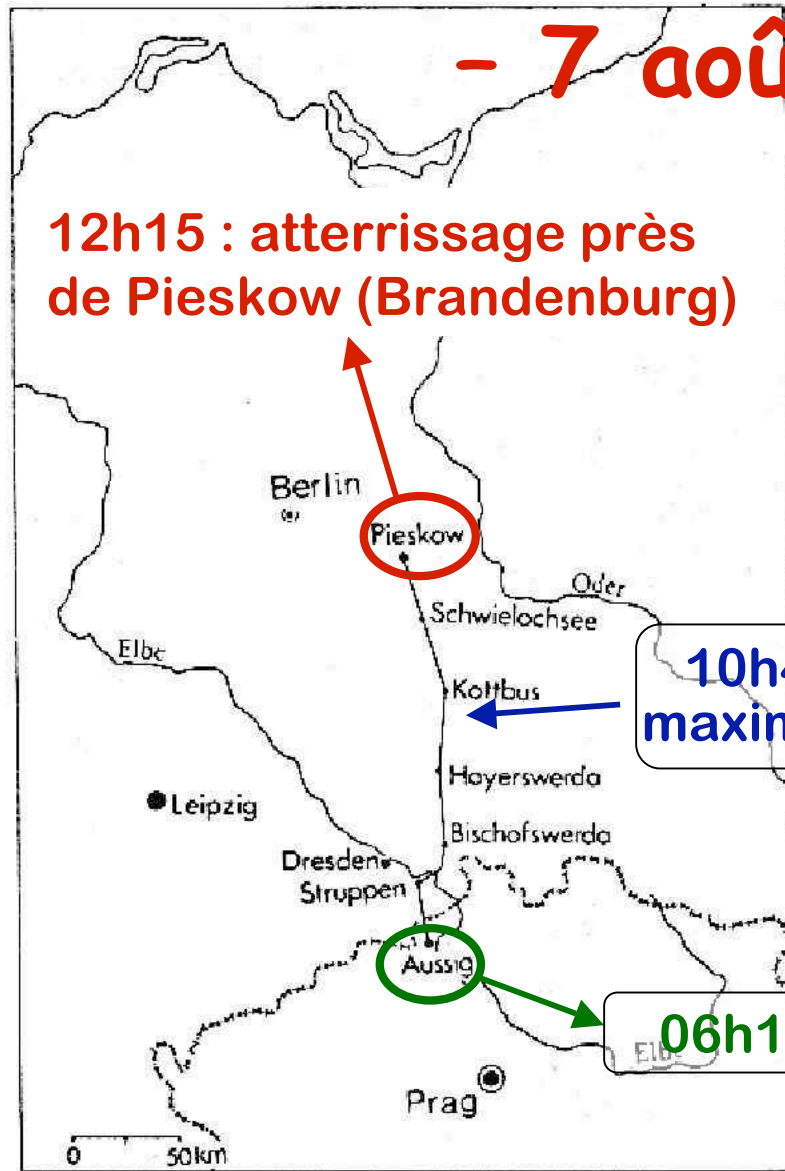
80 mètres : flux/2



# Victor Hess à l'assaut du ciel...



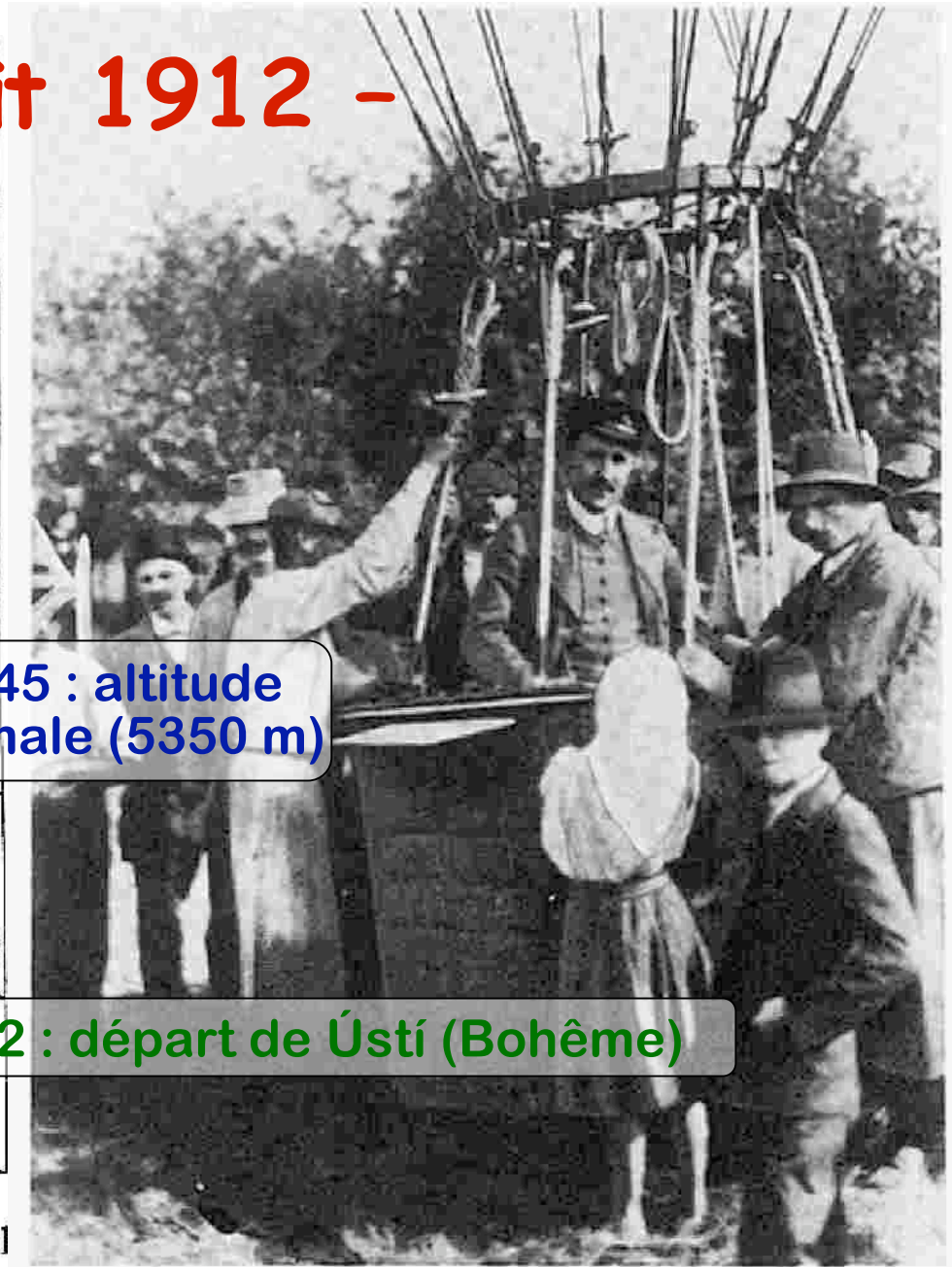
**- 7 août 1912 -**



**12h15 : atterrissage près de Pieskow (Brandenburg)**

**10h45 : altitude maximale (5350 m)**

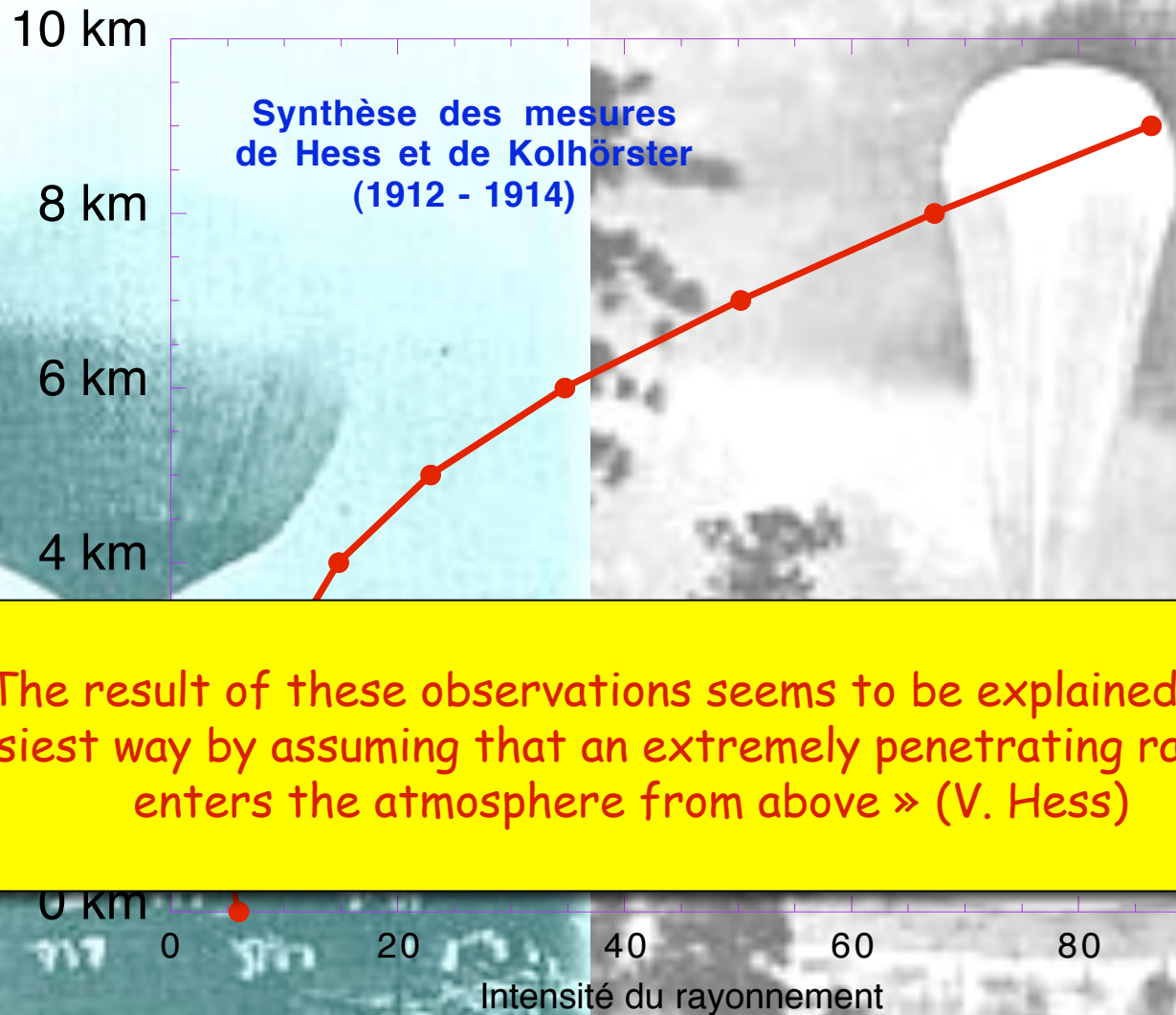
**06h12 : départ de Ústí (Bohême)**



Route des Entdeckungsfluges der kosmischen Stral

Hess bei Ballonlandung (1912).

# Intensification du rayonnement



« The result of these observations seems to be explained in the easiest way by assuming that an extremely penetrating radiation enters the atmosphere from above » (V. Hess)

# Le ciel descend sur Terre !

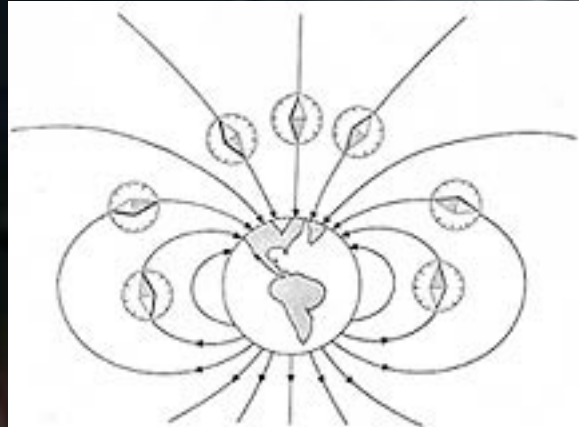
- **Mais d'où ?** Le cosmos est vaste !
- **Et quoi ?** Le radium C ( $^{214}\text{Bi}$ ) est 5 fois moins pénétrant !
- **Lumière ? Matière ? Comment savoir ?**
- **Situation très difficile : on ne connaît pas les particules, et on n'a pas d'outils pour les observer !** Les détecteurs sont encore à créer...
- **Une piste : s'agit-il de particules électriquement chargées ou bien neutres ?**

# 17 ans de réflexion !

- De 1912 à 1928, la confusion règne.
- Robert Millikan mène le jeu et pense que les rayons de Hess sont des rayons gamma de très haute énergie (→ 1925 : « rayons cosmiques »).
- En 1929 : Bothe et Kohlörster travaillent avec les détecteurs de Geiger et montrent que les rayons de Hess sont chargés !
- D. Skobeltzyn, qui travaille avec des chambres à bulles, trouve également des trajectoires courbées par le champ magnétique

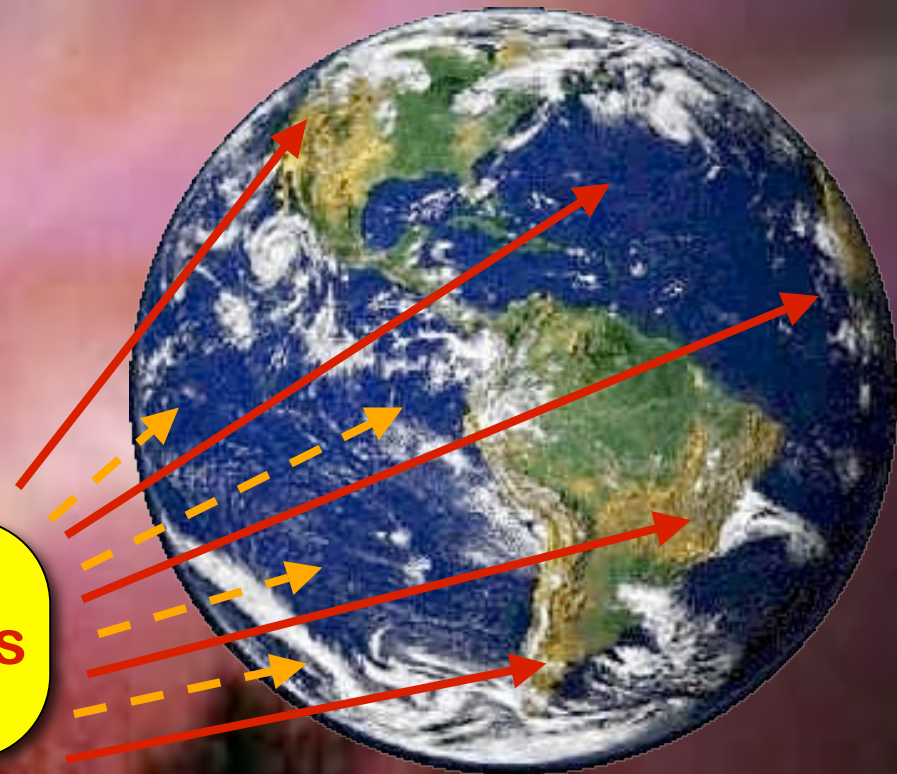
**Mais Millikan résiste et refuse ces conclusions...**

# Effet du champ magnétique terrestre



Effet de latitude  
(déjà observé  
par Clay en 1928)

En 1930, Compton lance  
une série d'expéditions



60 chercheurs  
aux quatre coins  
du monde !

RC = particules chargées !!!

# Comment identifier les rayons cosmiques ?

- Particules chargées, mais lesquelles ? Et venant d'où ? Et produites comment ?
- Autre problème : on n'a affaire qu'à des particules secondaires !
- Les primaires interagissent le plus souvent dans l'atmosphère !
- ⇒ aller en altitude : montagne, ballons, satellites...



Pierre Auger va y faire une découverte extraordinaire...

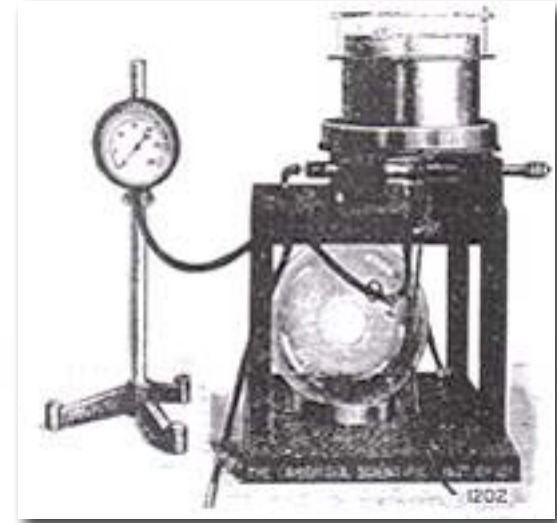


# La chambre à brouillard



C.T.R. Wilson

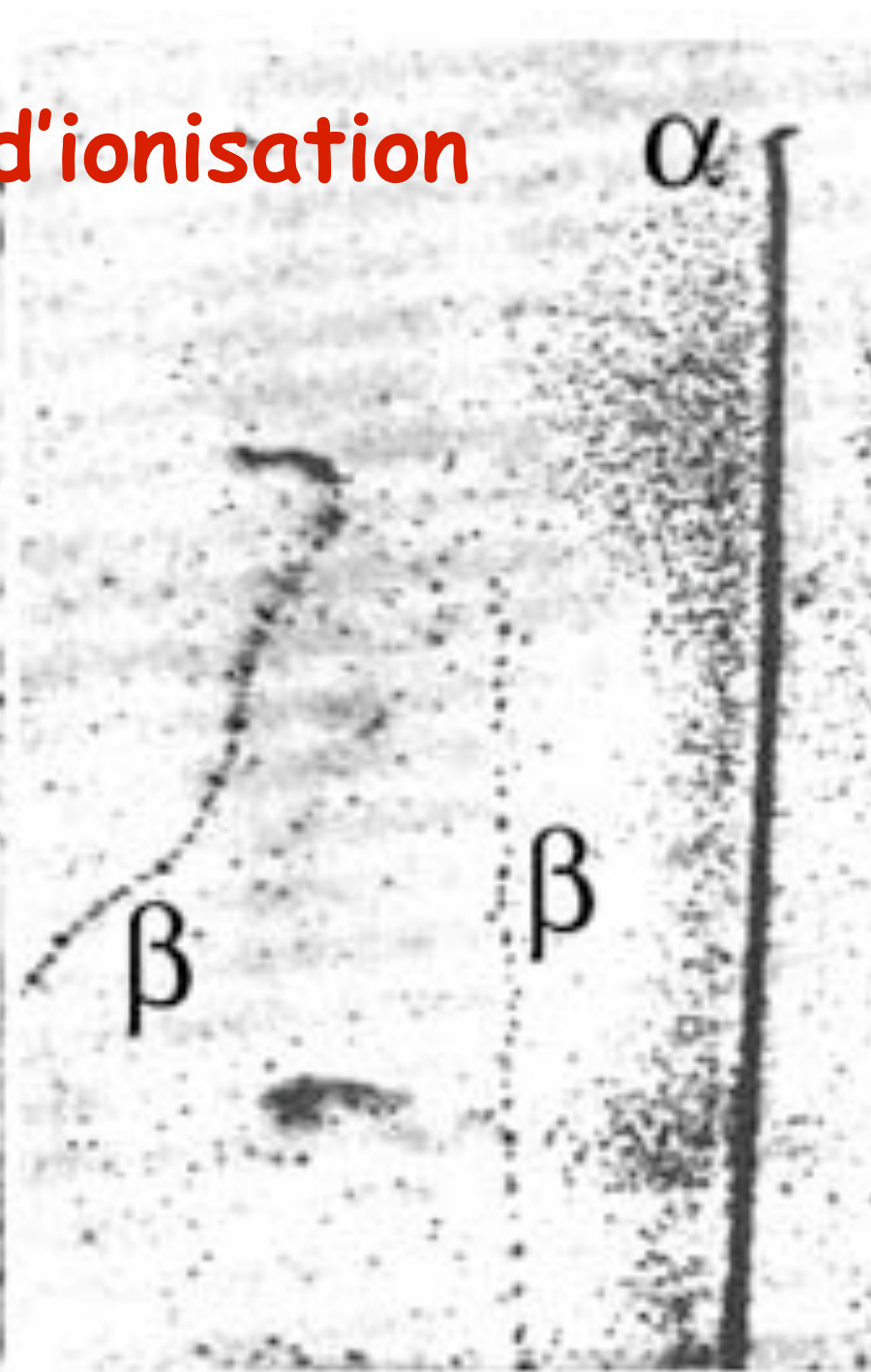
Expansion rapide  
du gaz pour le  
refroidir et le  
rendre sursaturé



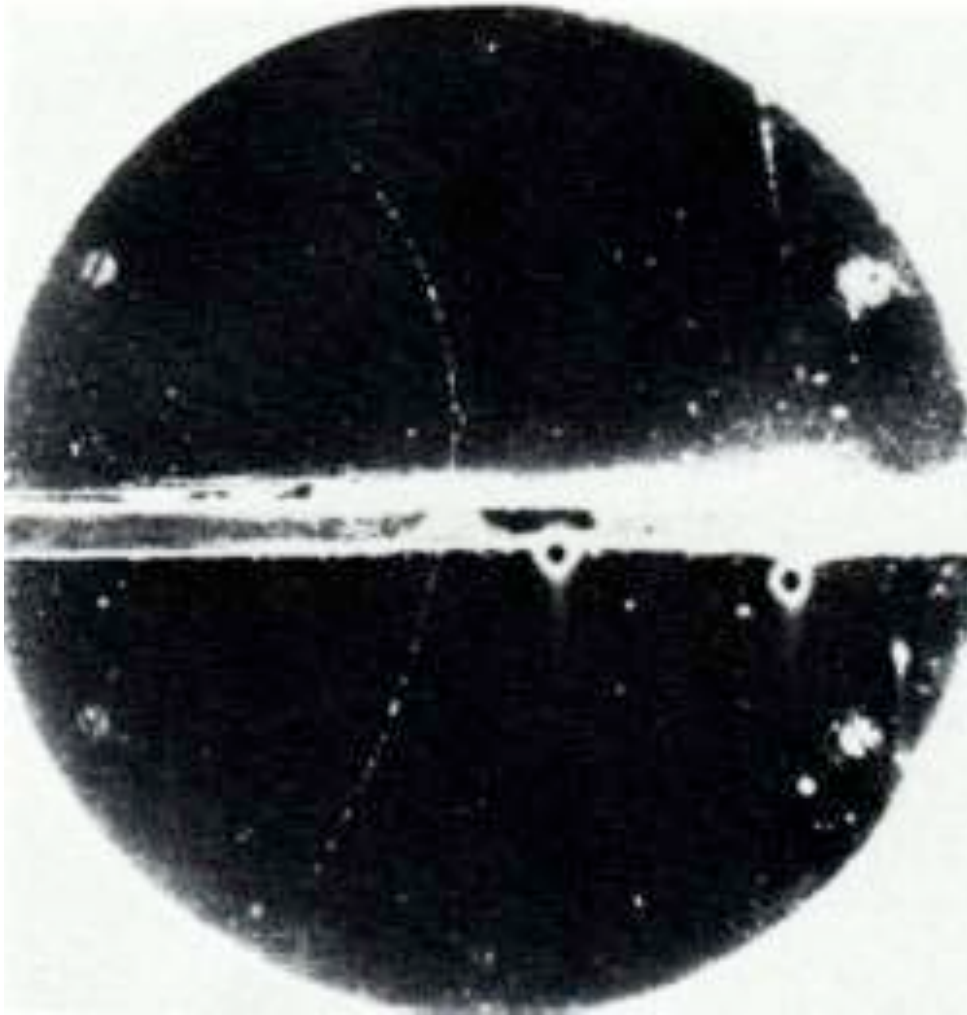
Condensation  
de gouttelettes  
sur les ions  
produits par les  
particules  
énergétiques



# Traînée d'ionisation



# Découverte du positron

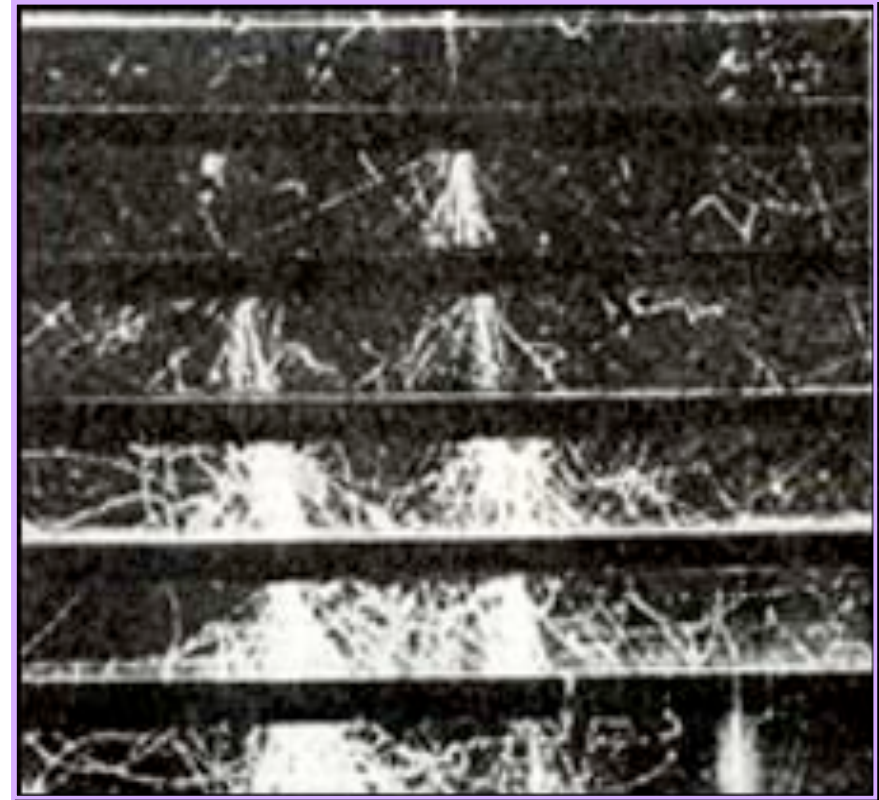
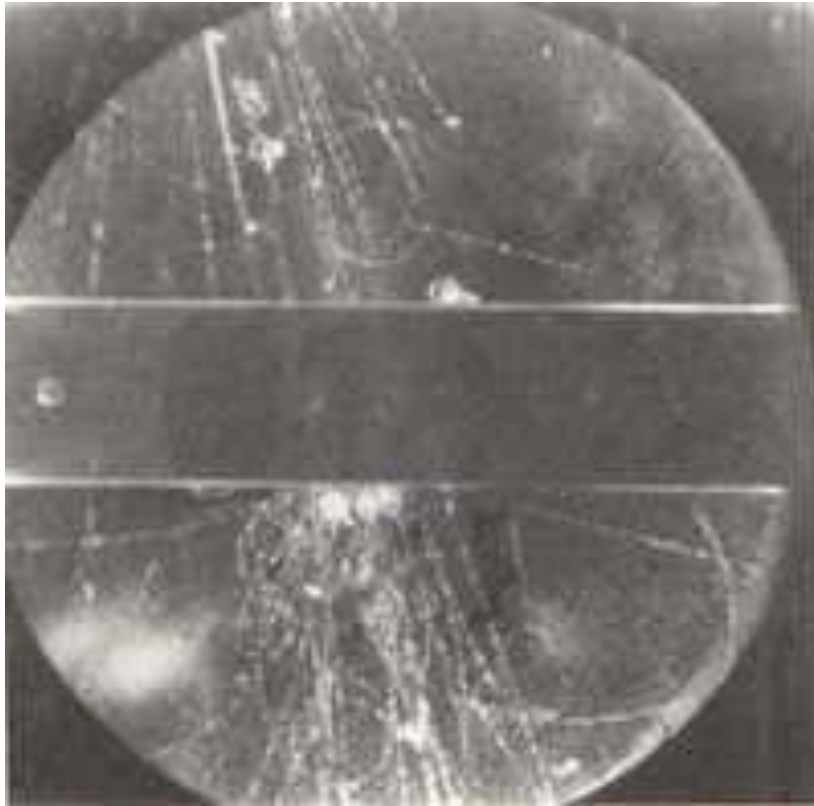


- 1930: P. Dirac prédit l'anti-électron (positon)
- 1932: C. Anderson le découvre par hasard dans une trace de rayon cosmique
- 1932: Blackett et Occhialini inventent la chambre à bulles à déclenchement intelligent !

avant: 1 sur 100 !  
long et cher !!!

# Paires particule/antiparticule...

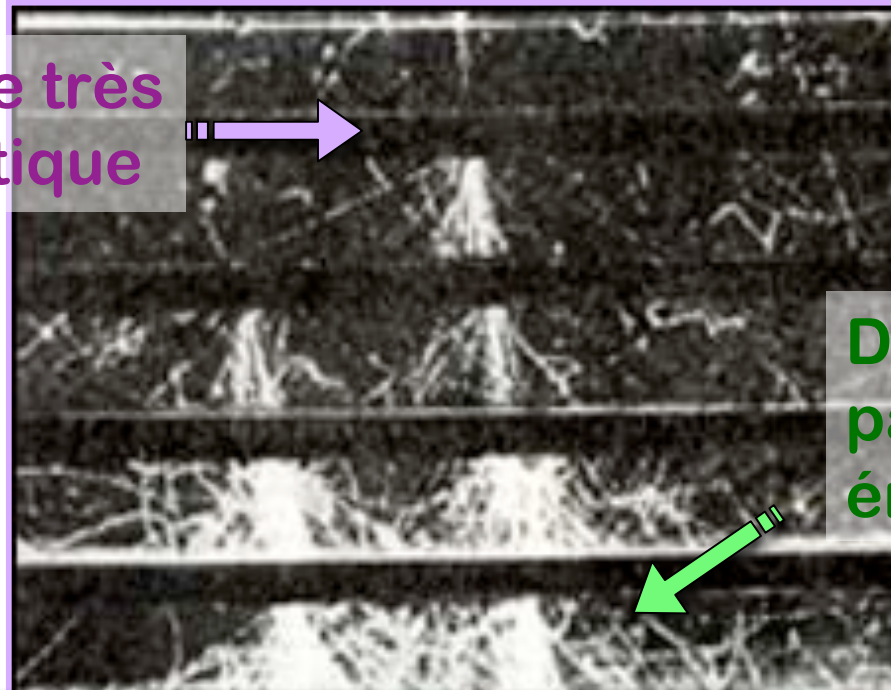
(Blackett démontrant la réversibilité de la transformation lumière/matière...)



... et « douches » de particules

# Cascades, douches et gerbes

1 particule très  
énergétique



De nombreuses  
particules moins  
énergétiques

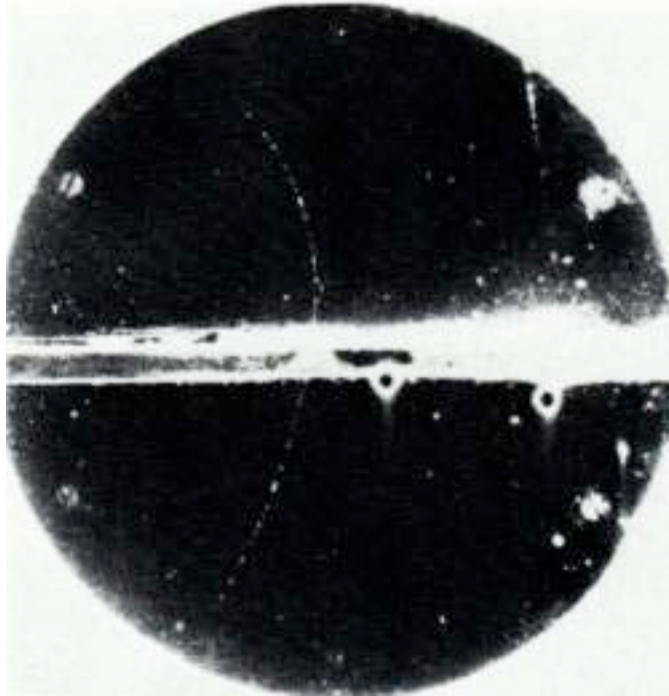
**conversions multiples de l'énergie initiale**

- Entre 1933 et 1937, la théorie des cascades de réactions et des « douches de particules » se développe (Carlson, Oppenheimer, Bhabha, Heitler...)

# 1936 : découverte du muon

(Neddermeyer et Anderson)

- Le rayon de courbure des trajectoires dépend de la charge et de la masse des particules



- Courbure plus grande que le proton, mais moins grande que l'électron : le mésotron
- Était-ce la particule de masse intermédiaire prédite par Hideki Yukawa l'année précédente ?

**NON**

- particule en tout point semblable à l'électron, mais 200 fois plus massive

# Découverte du pion en 1947



Hideki Yukawa

11 ans  
après



Cecil Powell

**Yukawa avait raison !**

# Découverte du pion en 1947





# Une science est née !

(La physique des particules)

## ■ La liste des particules découvertes est longue

1932

◆ Positron  $\Rightarrow$  antimatière !

1936

◆ Muon  $\Rightarrow$  la nature n'est pas si économe !

1947

◆ Pions :  $\pi^0, \pi^+, \pi^-$

1949

◆ Kaons (K)

1949

◆ Lambda ( $\Lambda$ )

1952

◆ Xi ( $\Xi$ )

1953

◆ Sigma ( $\Sigma$ )

Particules « étranges »

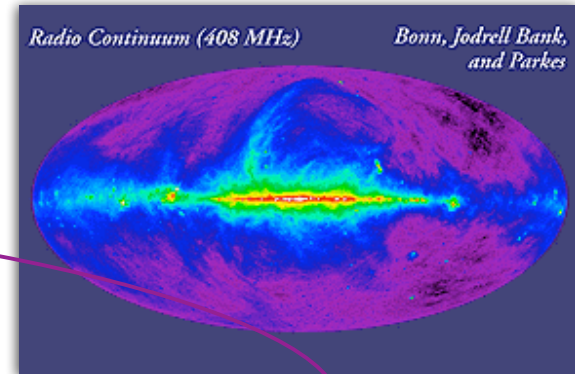
(Durée de vie beaucoup trop longue)

- Tout cela, grâce aux rayons cosmiques...
- ... dont on ignore toujours la nature et l'origine !!!

# La croisée des chemins...

Étude du  
rayonnement  
cosmique

1953



astrophysique



physique des  
particules

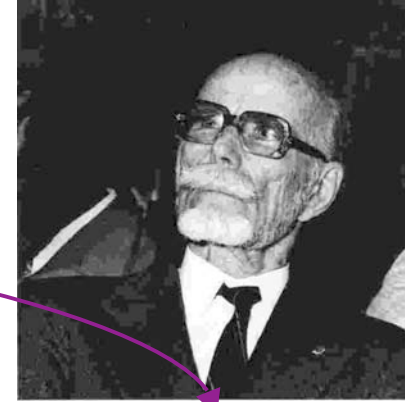
# La croisée des chemins...

« Celui qui croyait au ciel, celui qui n'y croyait pas »

Étude du  
rayonnement  
cosmique

1953

Pierre Auger



astrophysique



Louis Leprince Ringuet

physique des  
particules

# Les RCs sont (aussi) intéressants par eux-mêmes!

- Quels sont les primaires ?
- D'où viennent-ils ?
- Comment obtiennent-ils leur énergie ?
- Que nous révèlent-ils sur l'univers ?
- Peut-on les utiliser pour faire de l'astrophysique ?
- Peuvent-ils représenter des “messagers”  
intéressants en provenance de sources lointaines ?

# Tout ce que nous savons, nous le tenons de la lumière !

- Nous connaissons des étoiles, des galaxies, le milieu interstellaire, des champs magnétiques cosmiques, des températures, des masses, des densités, des compositions, des vitesses, etc.
- Tout cela uniquement grâce aux photons atteignant la Terre depuis le cosmos !
- La lumière les messenger cosmique par excellence...
- Mais elle n'est plus l'unique messenger !
  - ◆ Pendant des dizaines de milliers d'années, la lumière visible a été notre seul accès au cosmos
  - ◆ Depuis 100 ans, il y aussi les rayons cosmiques !
  - ◆ Puis la lumière non visible, et maintenant les neutrinos, et bientôt les ondes gravitationnelles !

# L'astronomie est vivante !

- « Astronomie binaire » : quelque chose ici, rien là...
- Hipparcos (190 - 120 B.C.) : magnitudes...
- > 1860: spectroscopie
  - ◆ Helium découvert par Lockyer en 1889 (puis sur Terre par Ramsay in 1995)
  - ◆ Raies d'émission et d'absorption
  - ◆ Identification des éléments, décalages Doppler, etc.
- Maxwell, Hertz...: découverte de la lumière invisible !
  - ◆ Ondes radio, infrarouge, UV, X, gamma



**2 dimensions spectrales : directions et énergies**

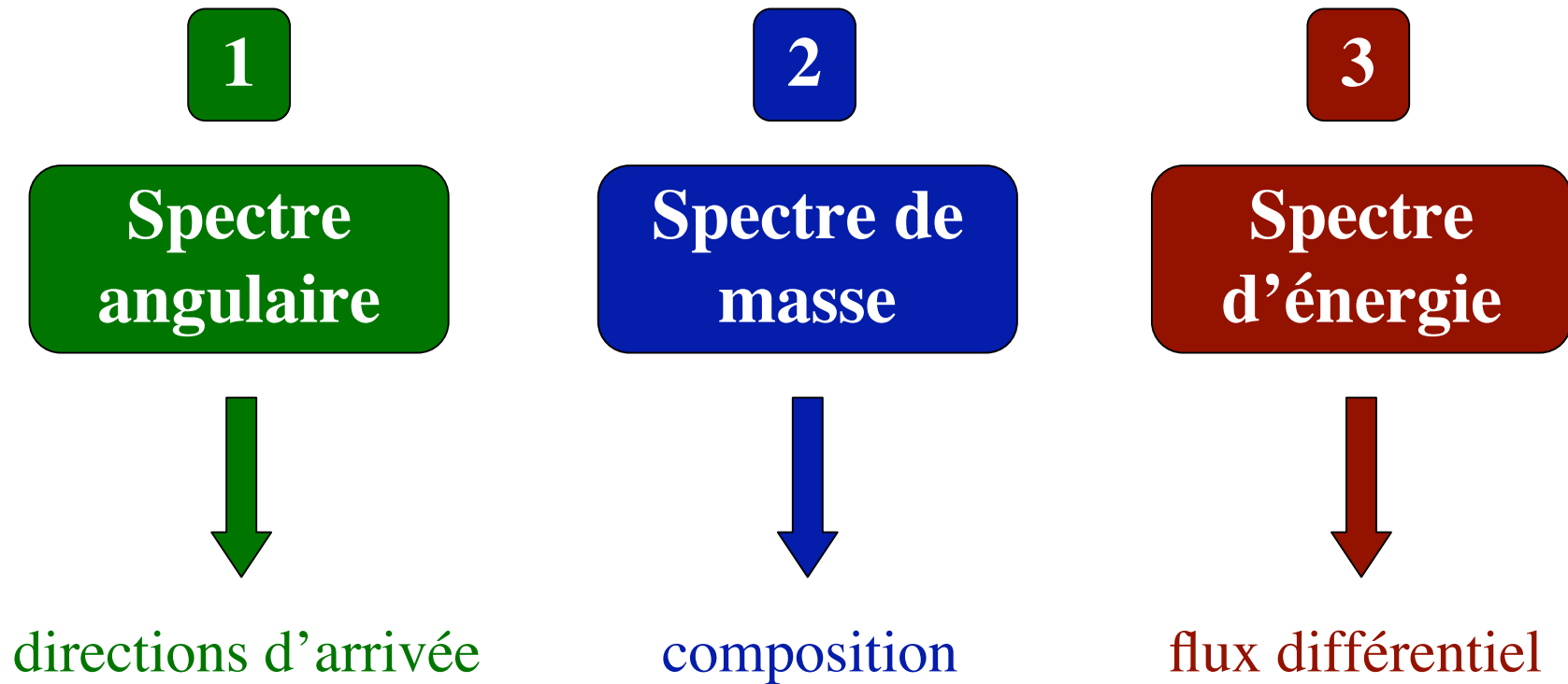
# Les rayons cosmiques

Quelques grammes de matière dans un monde lumineux !

- Toute ce que nous savons en astrophysique vient de la lumière...
- ... et de quelques particules de matière extra-solaire : les rayons cosmiques
- 4 CR/cm<sup>2</sup>/s => 1 kg/an
- Extrêmement importants pour le science, mais toujours incompris !

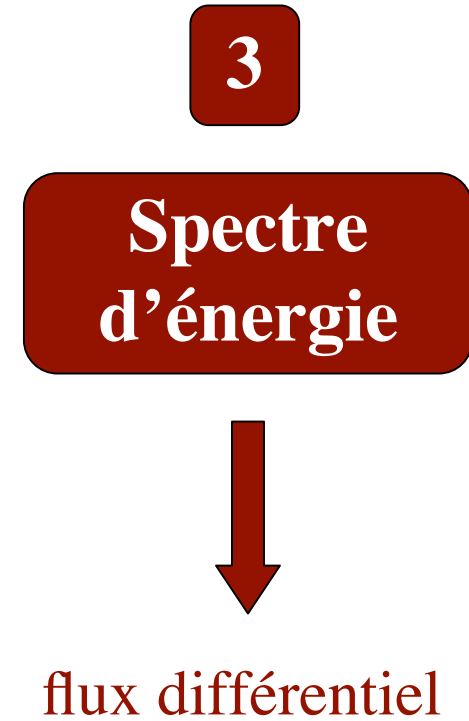
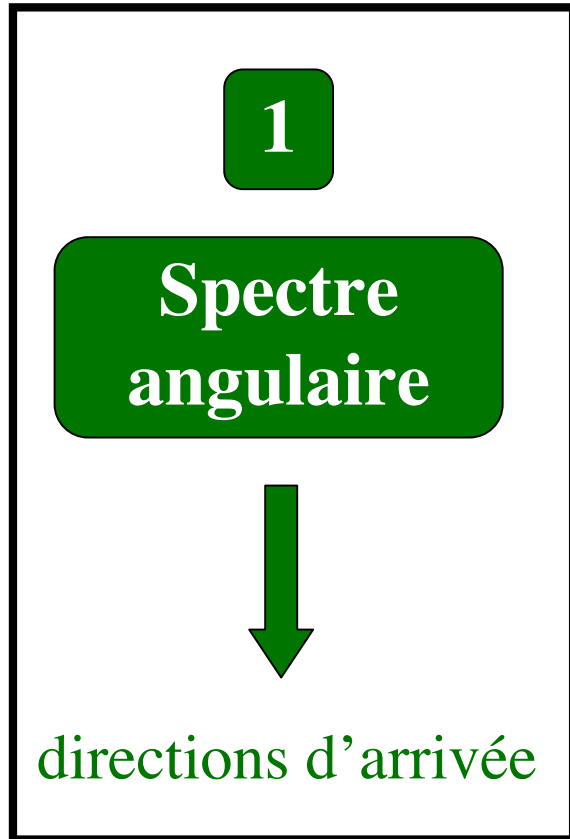
3 dimensions spectrales : directions, énergies, + nature physique

# Observables fondamentales





# Observables fondamentales



# Distribution angulaire

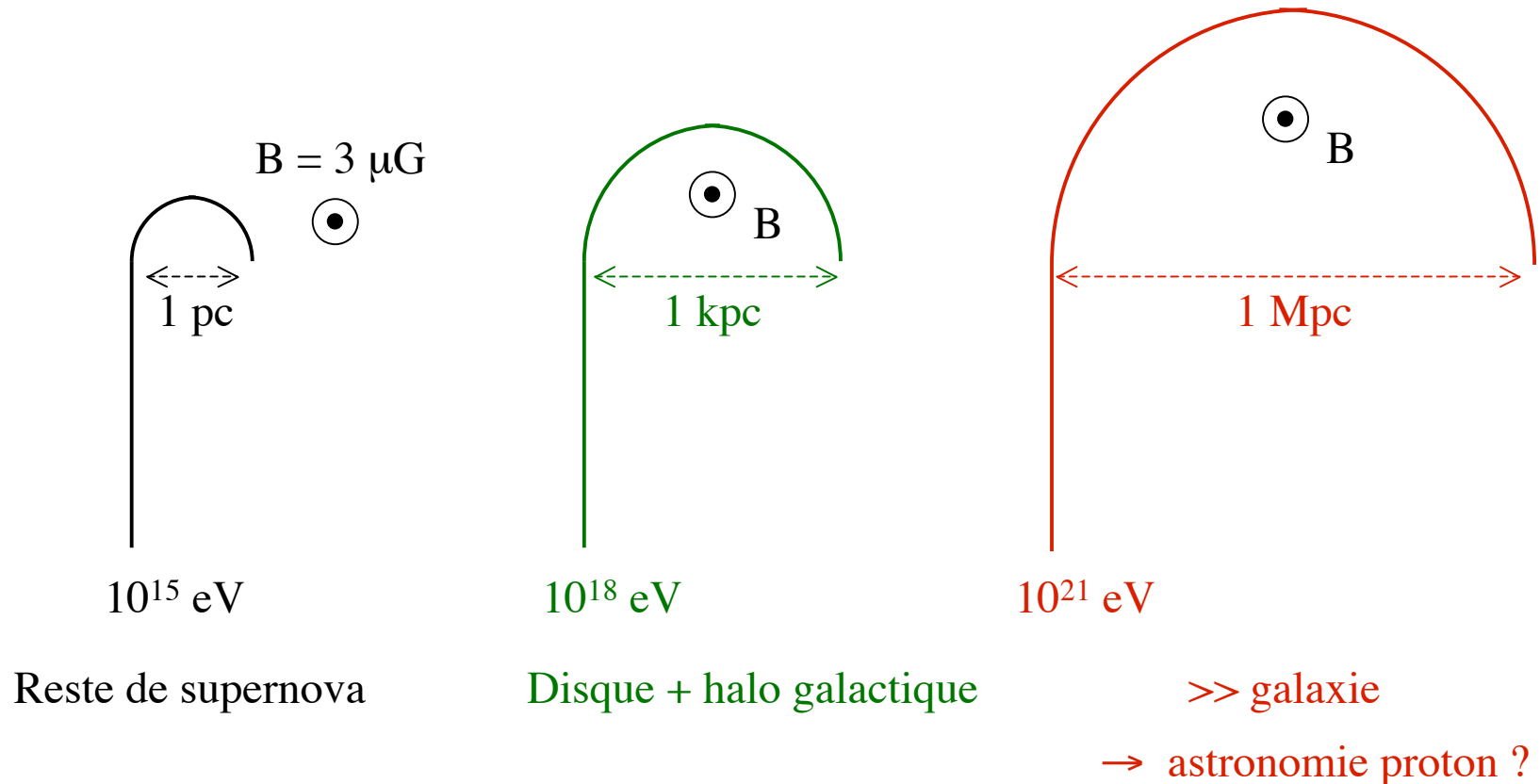
- **Isotrope !**

( $\rightarrow$  aucune information sur les sources)

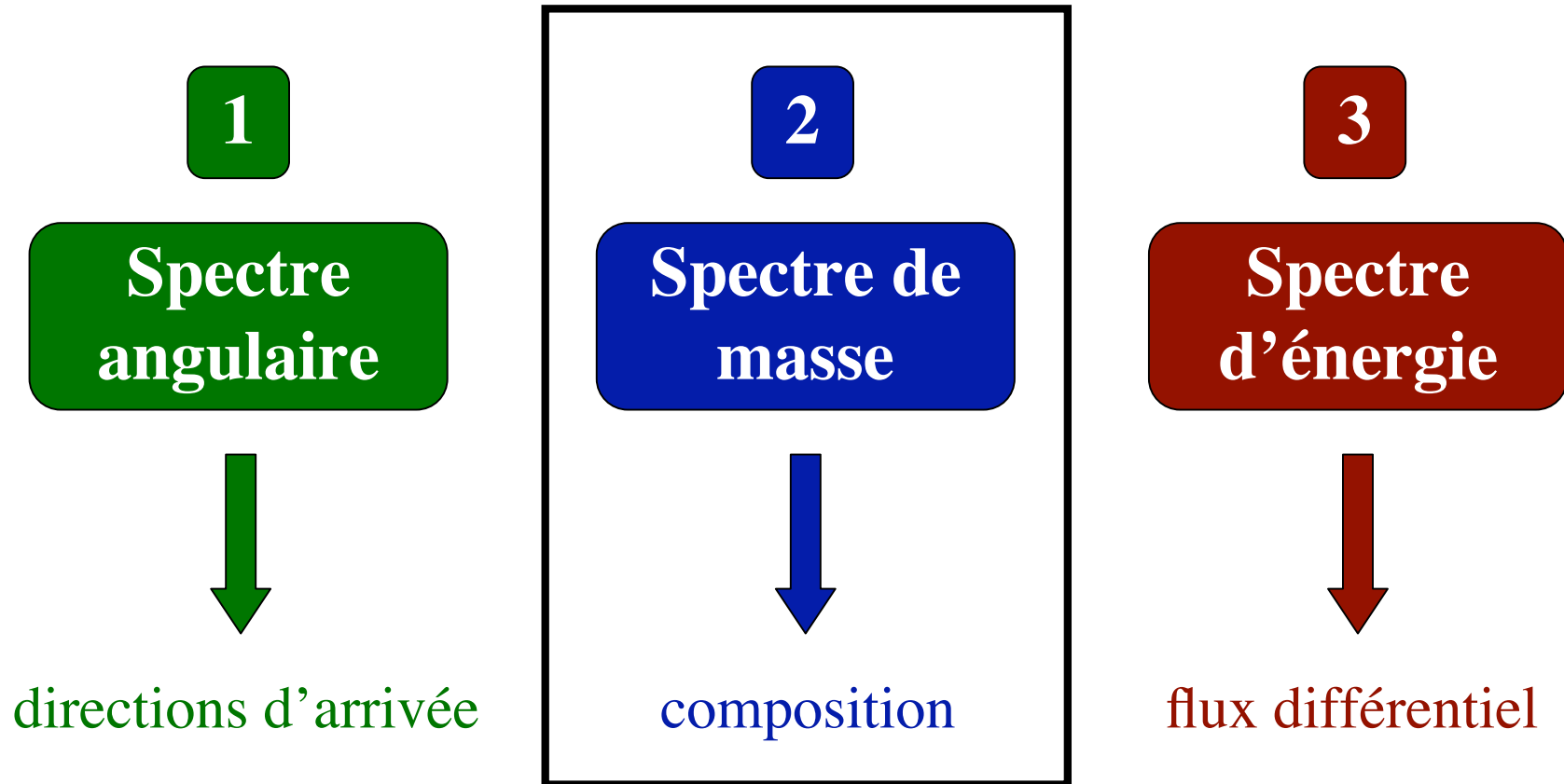


# Propagation non rectiligne !

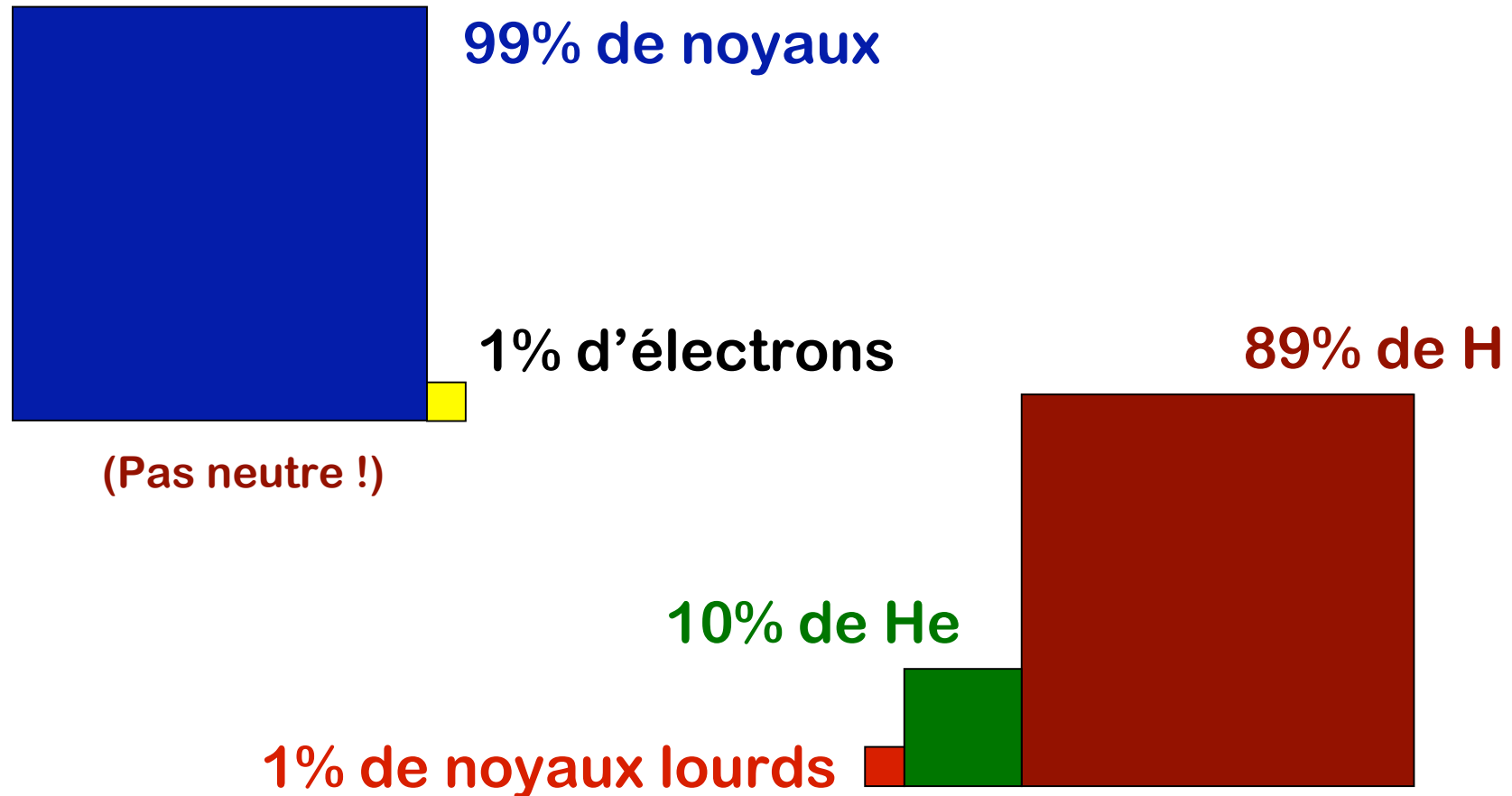
- Champ magnétique galactique :  $\sim 3 \mu\text{G}$  ( $3 \cdot 10^{-10} \text{T}$ )
- Rayon de giration :



# Observables fondamentales

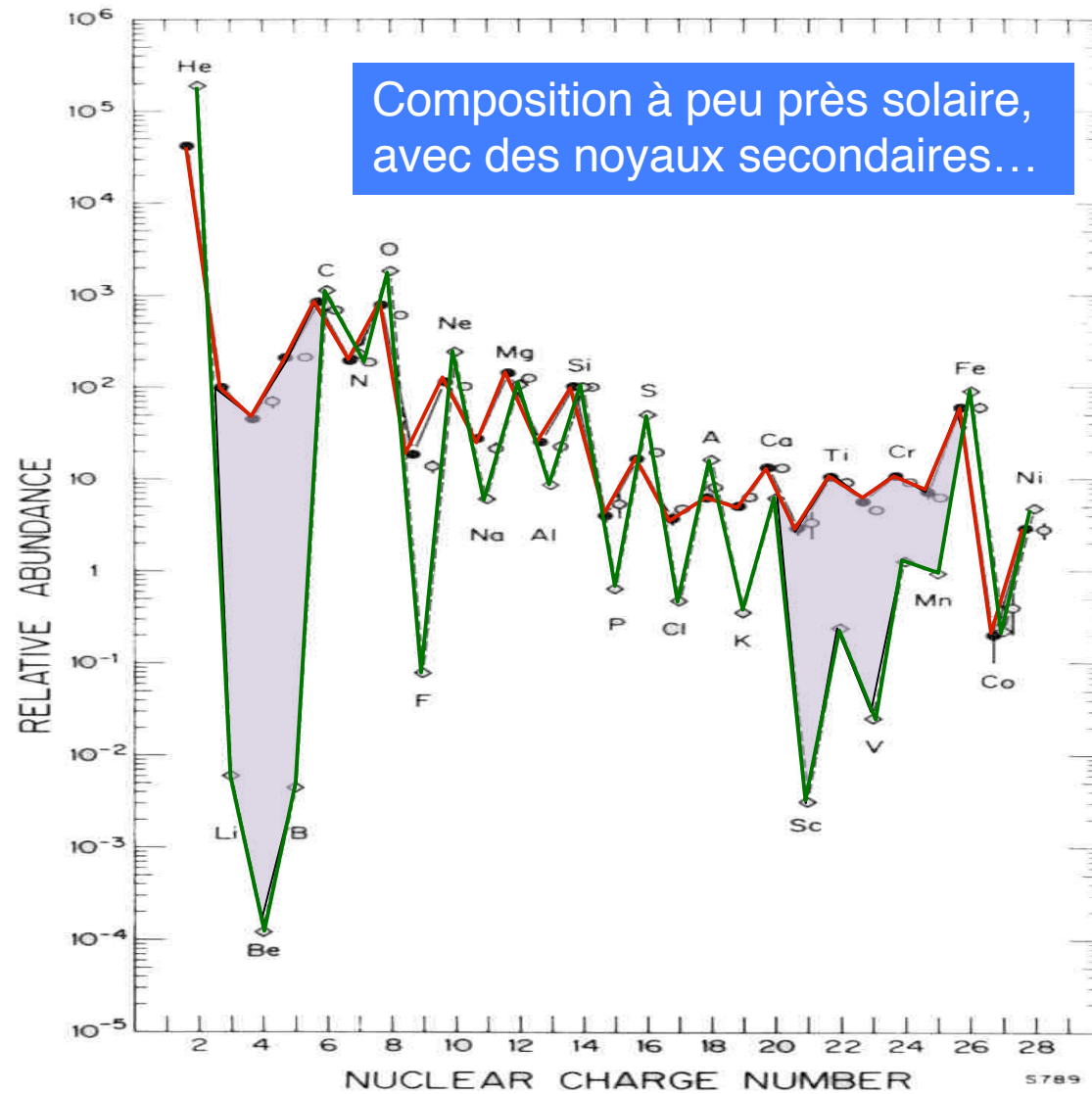


# Composition des rayons cosmiques



Flux : 4 RC/cm<sup>2</sup>/s  $\Rightarrow$  1 kg/an  $\ll$  40 000 tonnes/an (météorites)

# CR vs système solaire

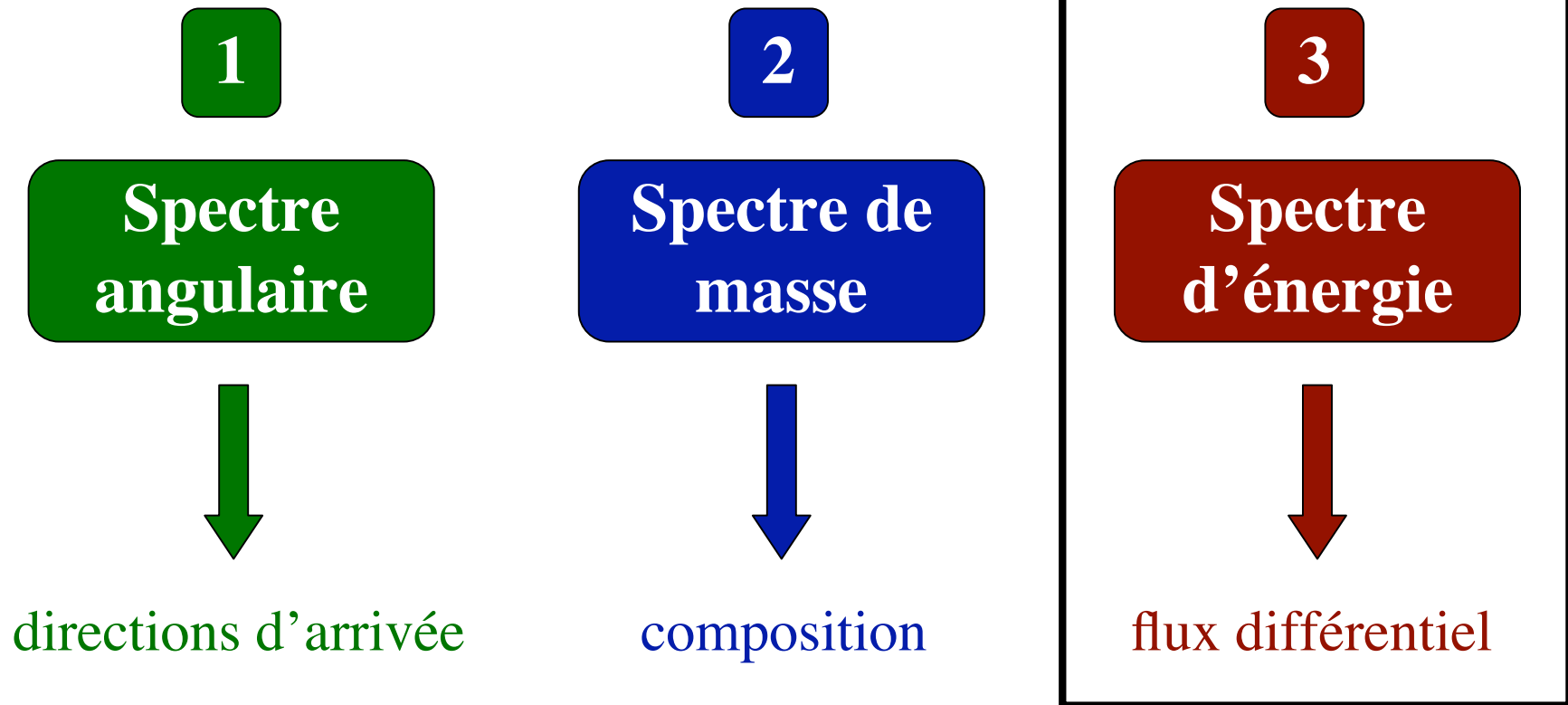


# Composition à haute énergie ?

- Très controversé
- Essentiellement inconnu au delà de  $10^{16}$  eV



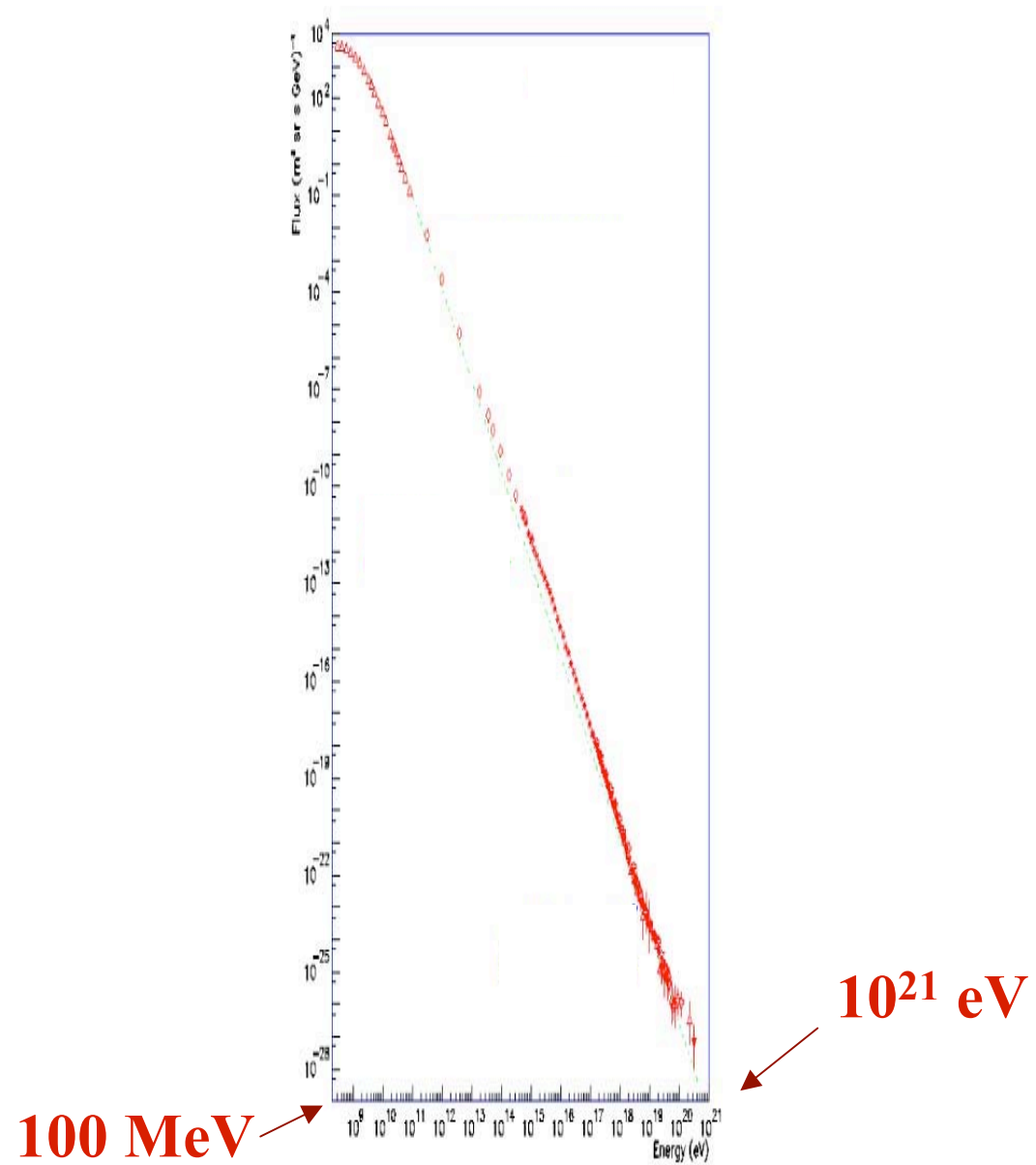
# Observables fondamentales



# Le spectre d'énergie des rayons cosmiques

La première merveille du monde physique !

# Le spectre d'énergie des RC



# Laboratoire de Jungfraujoch (3500 m)



# Plateau Rosa (3400 m)



# Chacaltaya (Bolivie, 5300 m)



# Chacaltaya (Bolivie, 5300 m)

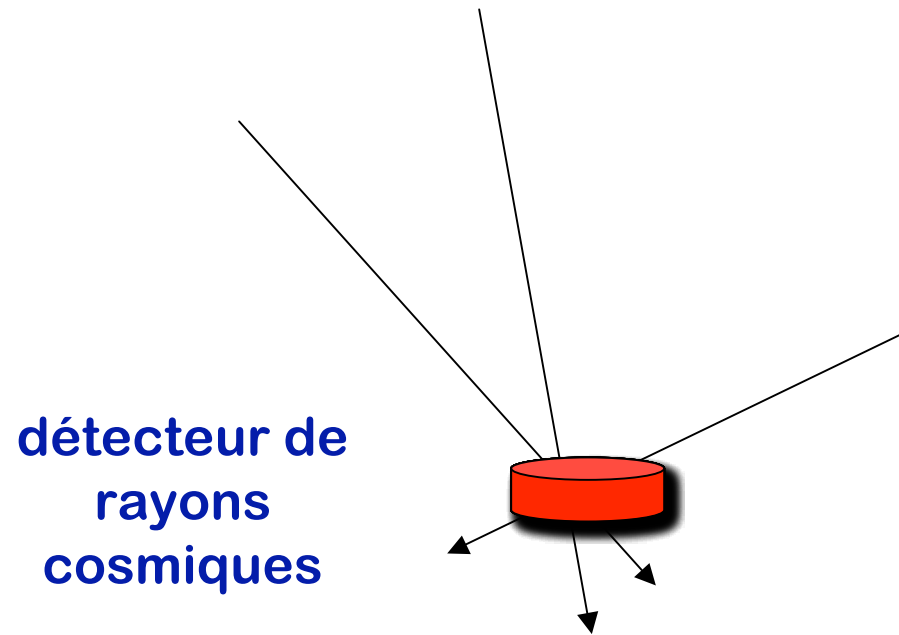


**Pierre Auger à la montagne...  
(1937-1938)**



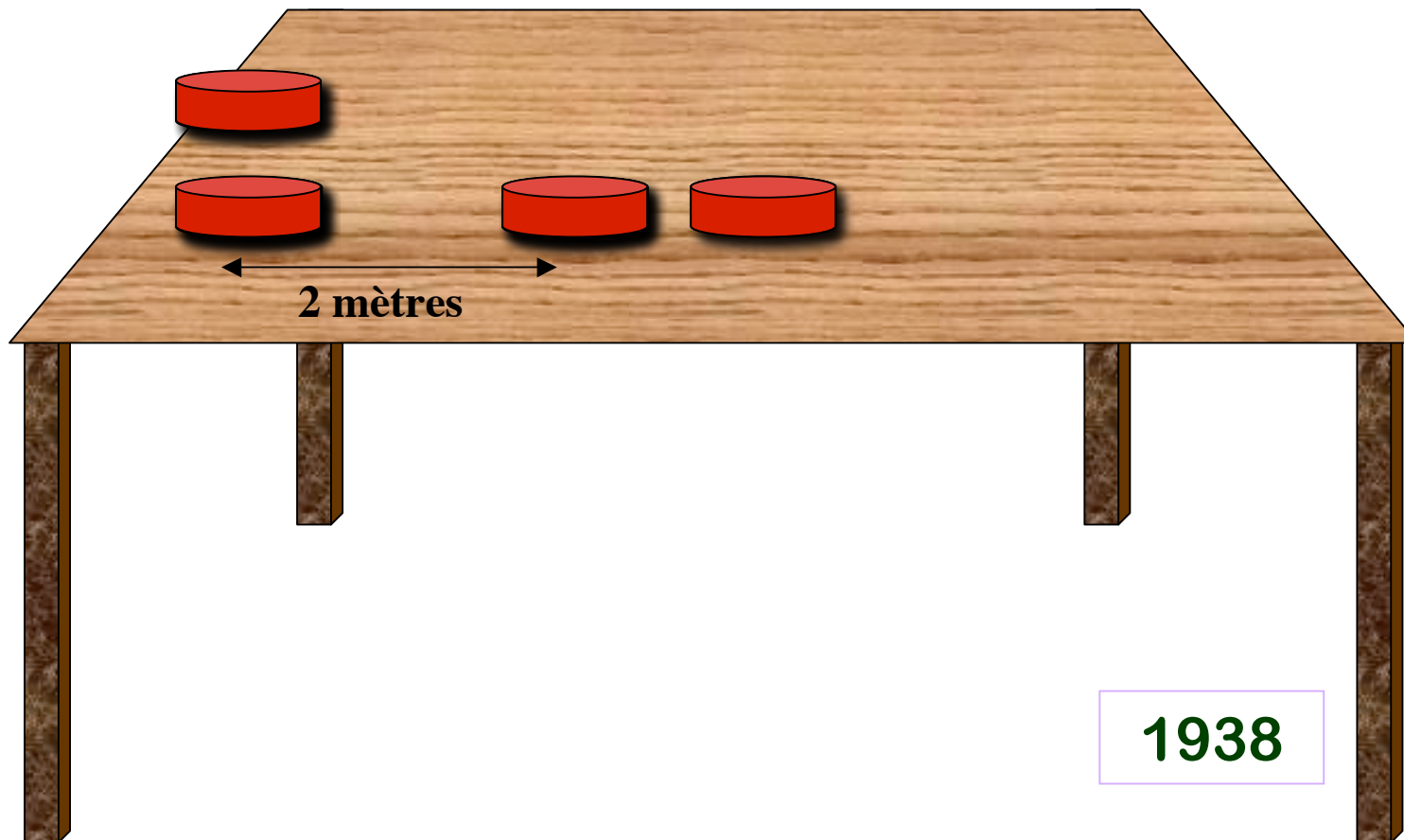


# Pierre Auger et les gerbes atmosphériques

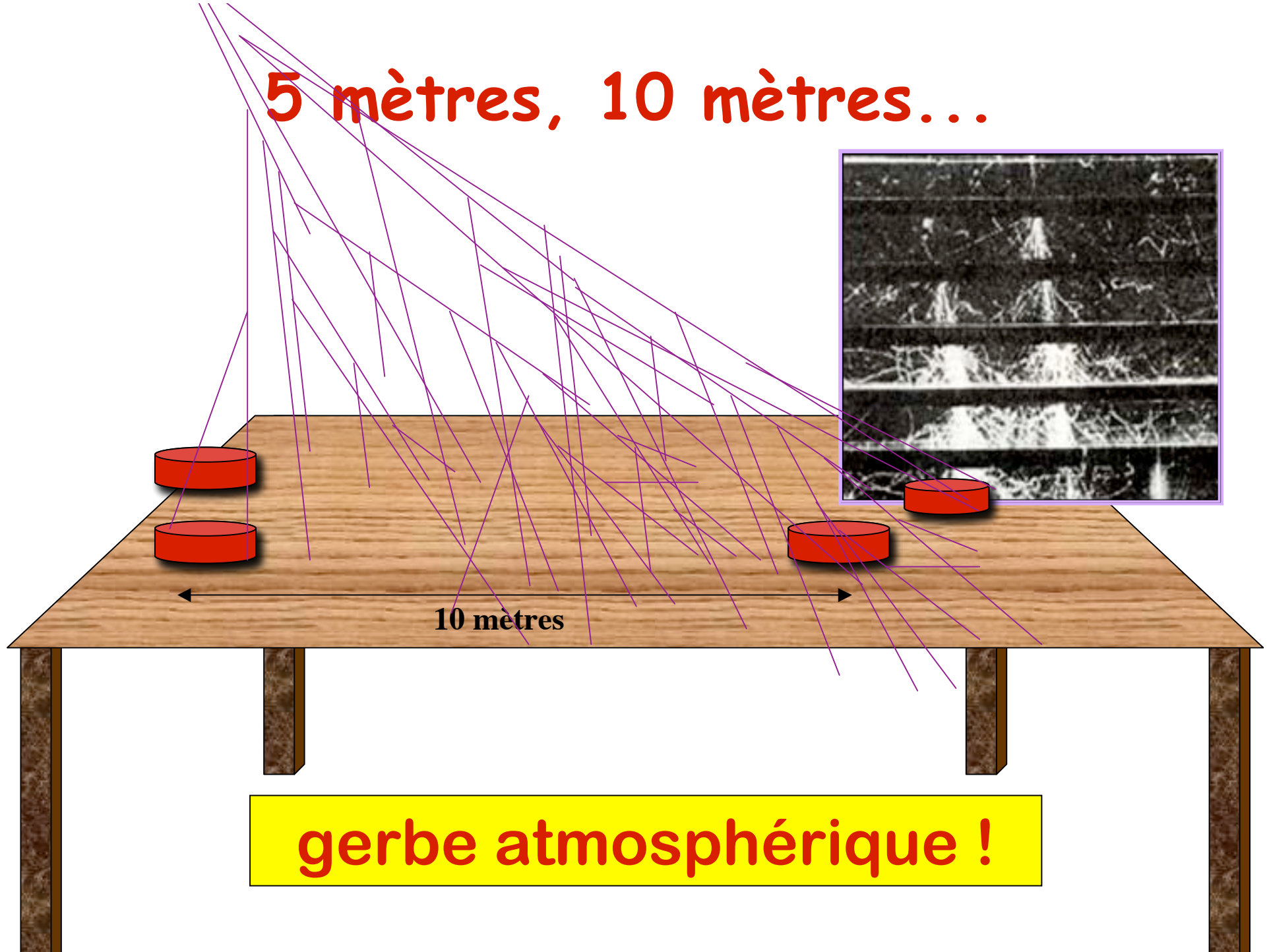


1938

# Coïncidences de détection



5 mètres, 10 mètres...



gerbe atmosphérique !

# Des énergies stupéfiantes !



$$\Rightarrow E > 10^{15} \text{ eV}$$

$$\Rightarrow \Gamma > 10^6$$

**1 seconde = 3 semaines**

**1 km = 1 mm**

« On voit d'après ces résultats que les **averses soudaines de rayons cosmiques** décrites ici peuvent couvrir des surfaces de l'ordre de **1000 m<sup>2</sup>**, et comportent donc **plusieurs dizaines de milliers de corpuscules**, dont une **moitié environ peut traverser 5 cm de plomb.** »

Académie des sciences, séance du 18 juillet 1938

# Jusqu'où cela peut-il aller ?

5 mètres → 40 minutes en moyenne

20 mètres → 1h15 en moyenne

...

1 km → des années !!!

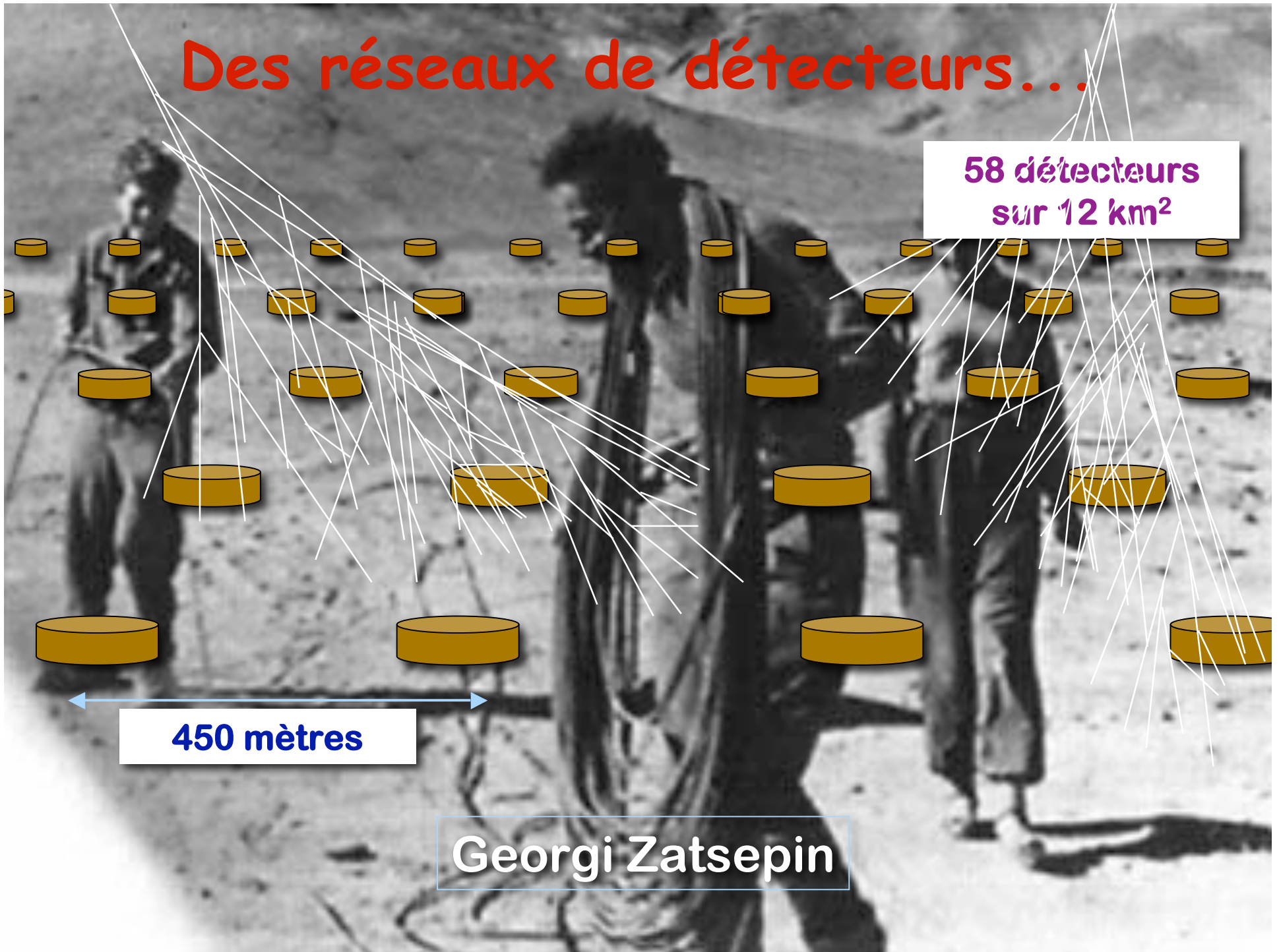


# Des réseaux de détecteurs...

58 détecteurs  
sur 12 km<sup>2</sup>

450 mètres

Georgi Zatsepin



# Haverah Park (UK)

- Réseau de 12 km<sup>2</sup> de détecteurs constitués de cuves d'eau à effet Cherenkov
  - ◆ En opération 20 ans jusqu'à 1987
  - ◆ Enregistre quelque 1000 gerbes atmosphériques
  - ◆ Jusqu'à 10<sup>20</sup> eV...



*Dégustation de l'eau après 20 ans:  
« a little bit stale... »*

# Volcano ranch (Nouveau-Mexique)

John  
Linsley  
chasse les  
serpents !

1962

Un rayon cosmique d'énergie  
supérieure à  $10^{20}$  eV !!! !!! !!! !!! !!!





# Invraisemblable !

- $10^{20}$  eV, c'est...
- ... plusieurs Joules = énergie macroscopique !
- ... l'énergie d'une balle de tennis à 100 km/h !
- ... un facteur de Lorentz de  $10^{11}$  !
- ... une seconde qui dure 3500 ans !
- ... la distance Terre-Soleil ramenée à 1,50 m !
- En un mot, c'est fou !
- Mais la quête n'est pas terminée...

# La technique de fluorescence

- Les rayons cosmiques ionisent (c'est comme ça qu'on les a découverts !). Donc ils produisent de la fluorescence.



- Une gerbe à  $10^{20}$  eV, c'est 100 milliards de particules dans l'atmosphère
- En regardant bien, par nuit noire, on peut détecter le rayonnement UV associé

# L'œil de mouche (Utah)



# L'œil de mouche (Utah)

15 octobre 1991  
Un événement à  $3.2 \times 10^{20}$  eV

Le plus énergétique à ce jour...



# High Resolution Fly's Eye: HiRes



- **21 Miroirs**
  - 360 deg en azimuth
  - 3-17 deg en élévation
- **Sample & Hold DAQ**
- **Observation jusqu'à juin 1997**



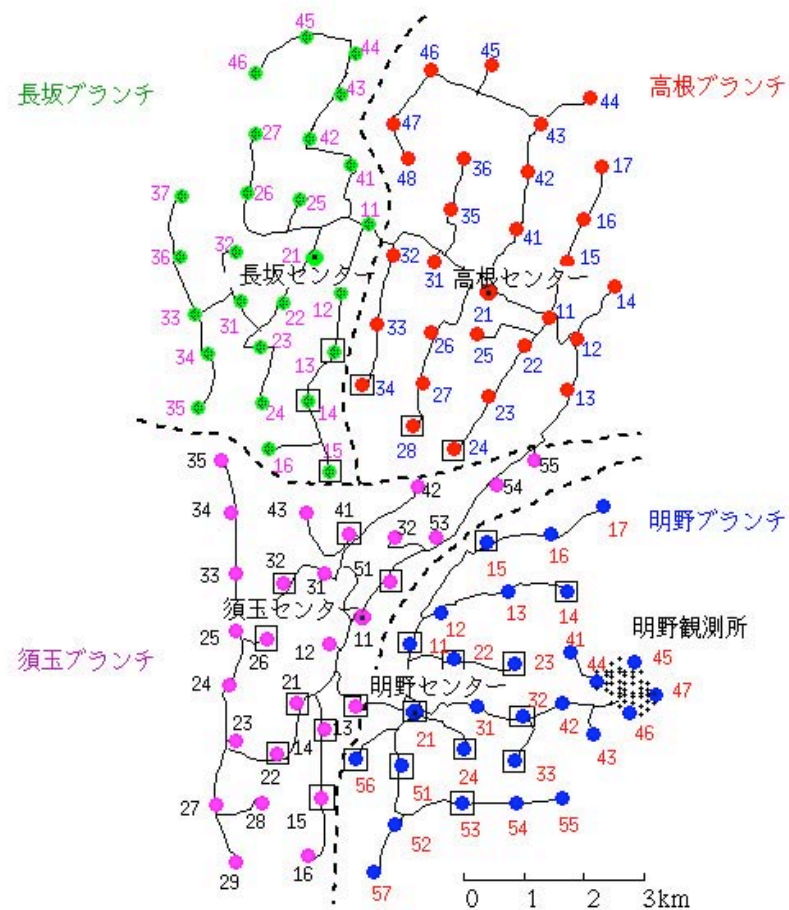
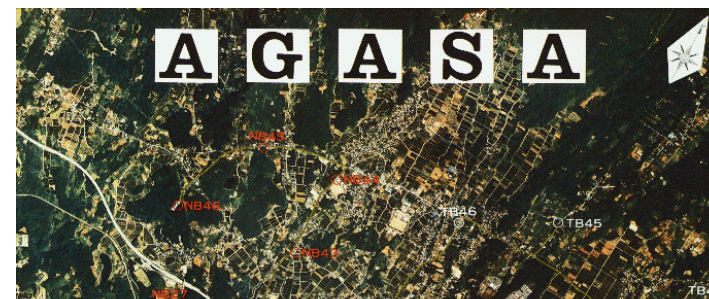
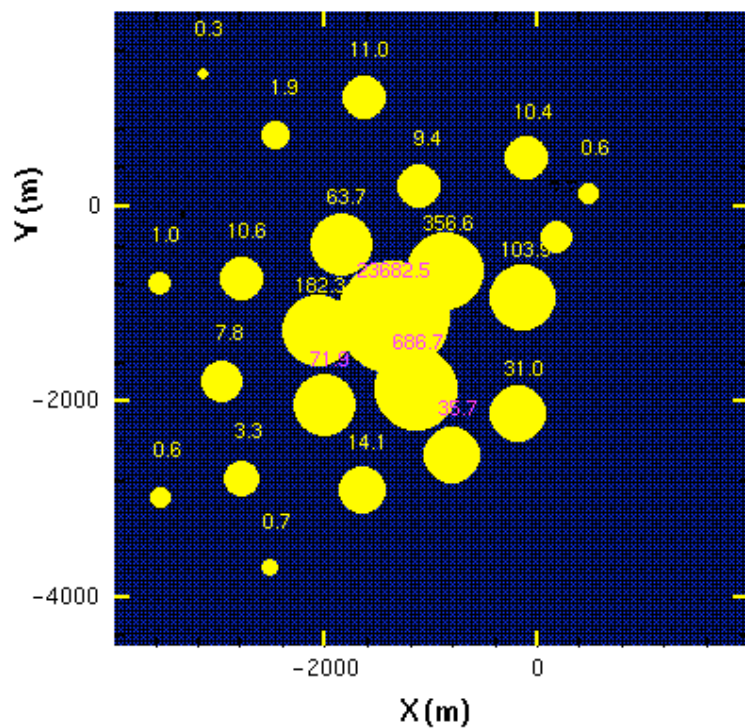
- **42 Miroirs**
  - 360 deg en azimuth
  - 3-33 deg en élévation
- **FADC DAQ**
- **Observation depuis october 1999**

# AGASA

Akeno Giant Air Shower Array

100 km<sup>2</sup>

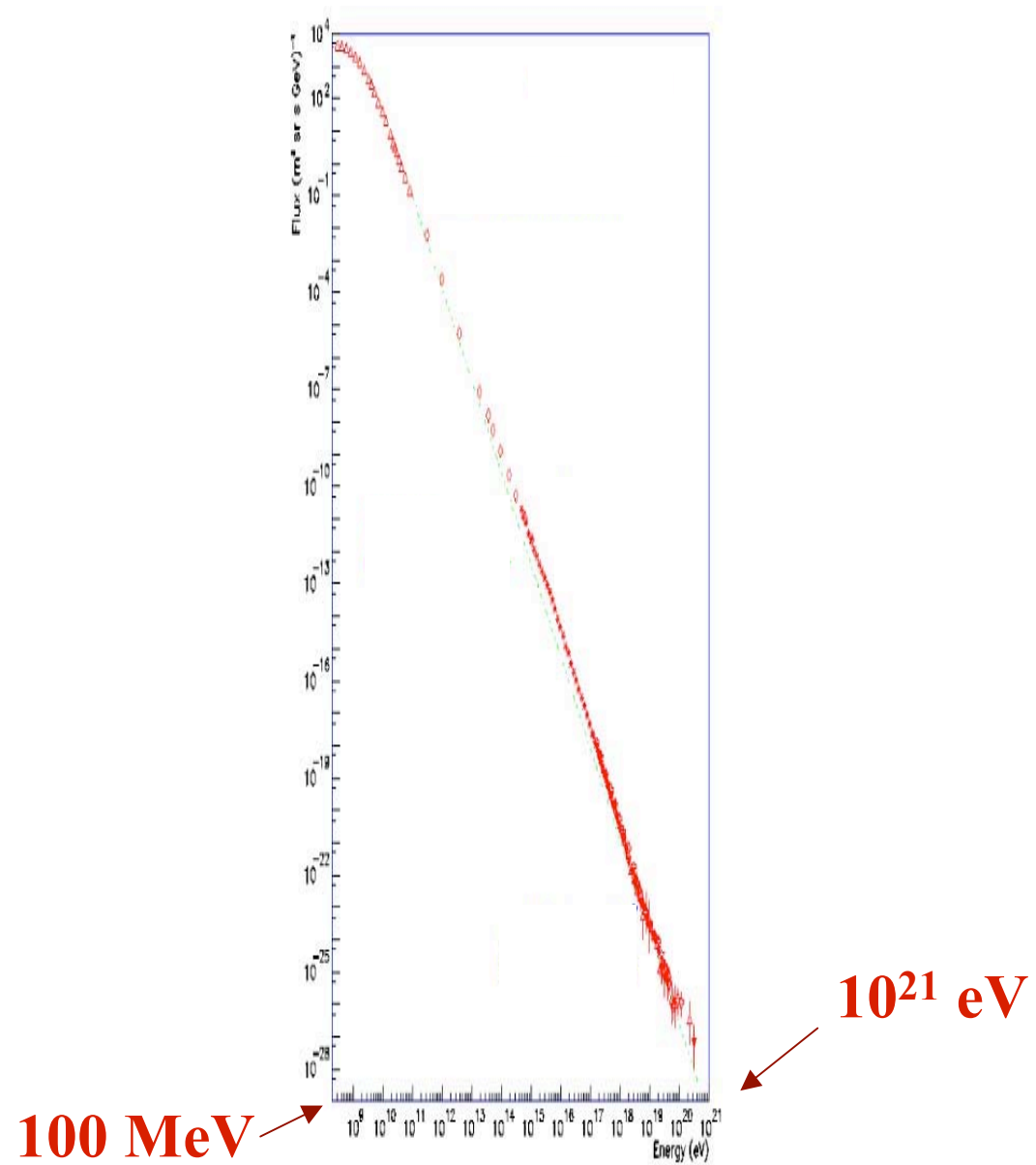
technique des scintillateurs



# Le spectre d'énergie des rayons cosmiques

La première merveille du monde physique !

# Le spectre d'énergie des RC

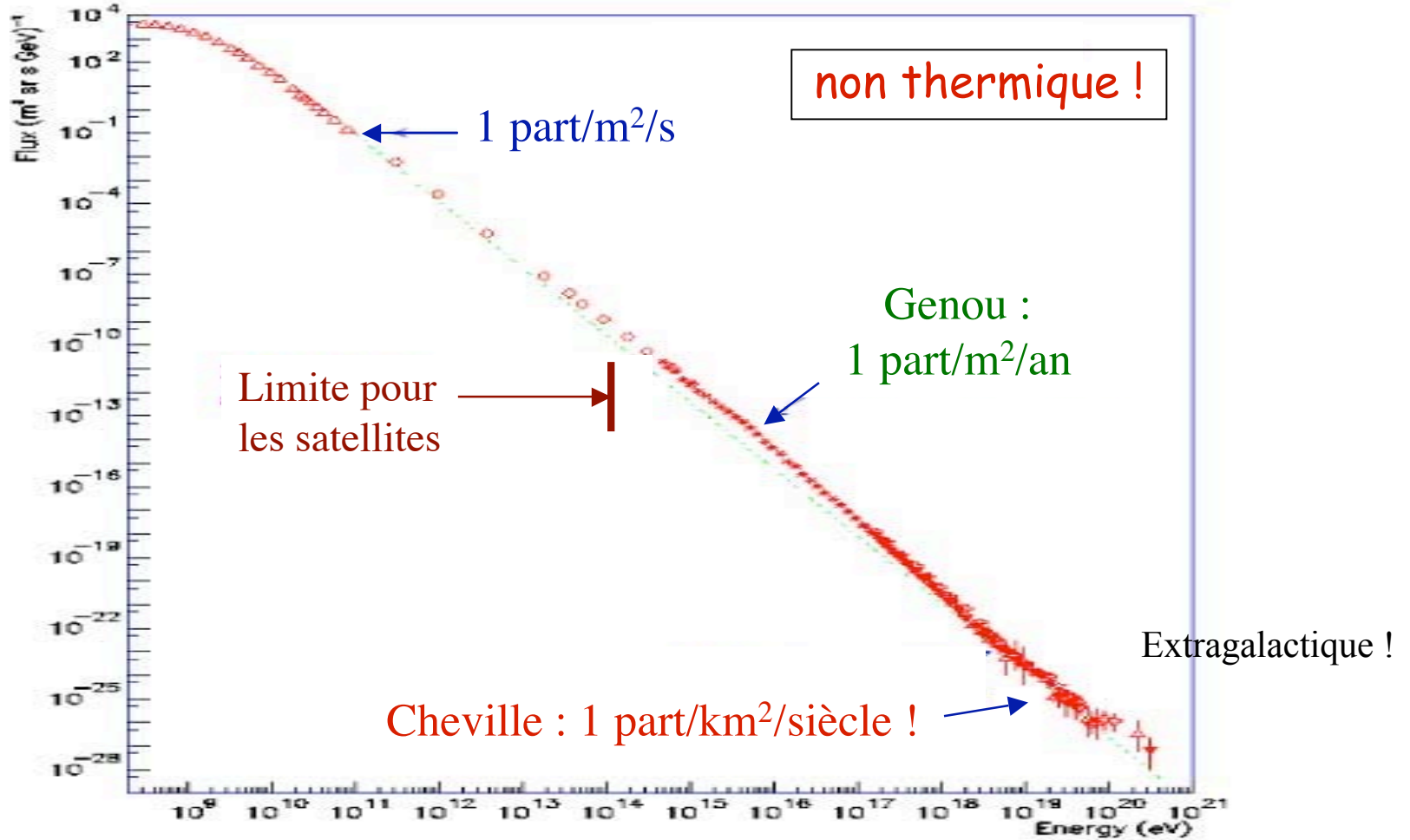




# Spectre d'énergie

de 1 cheveu à 10 milliards d'années lumière !

32 ordres de grandeur !



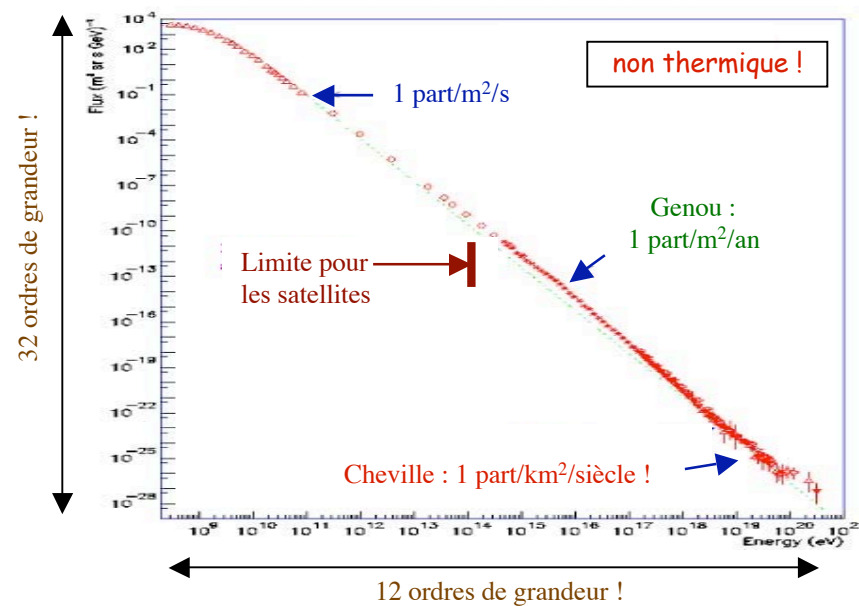
12 ordres de grandeur !

de 1 cheveu à 100 000 km !

# Limite à haute énergie ?

Où s'arrête le spectre ?

Pourra-t-on faire de l'astronomie proton ?



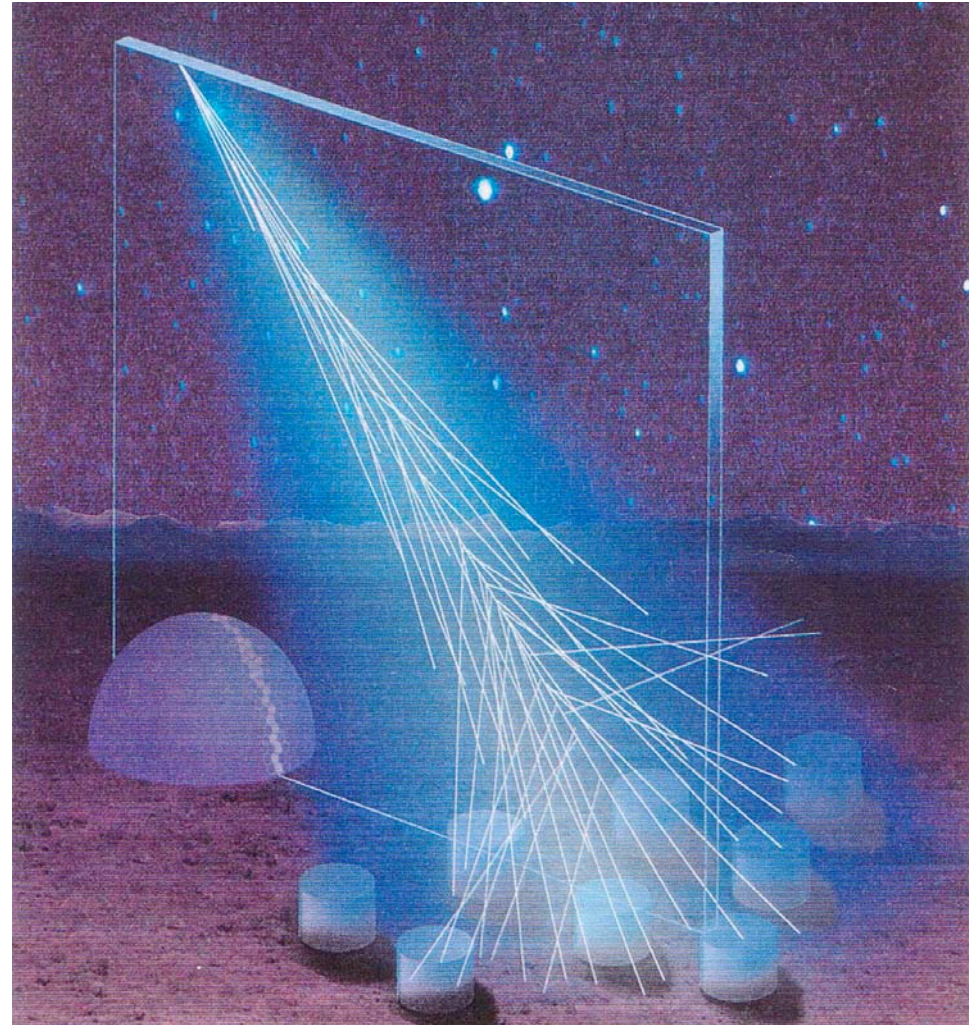
Énergies extraordinaires, permettant de tester la physique à des énergies inaccessibles sur Terre !

# L'Observatoire Pierre Auger



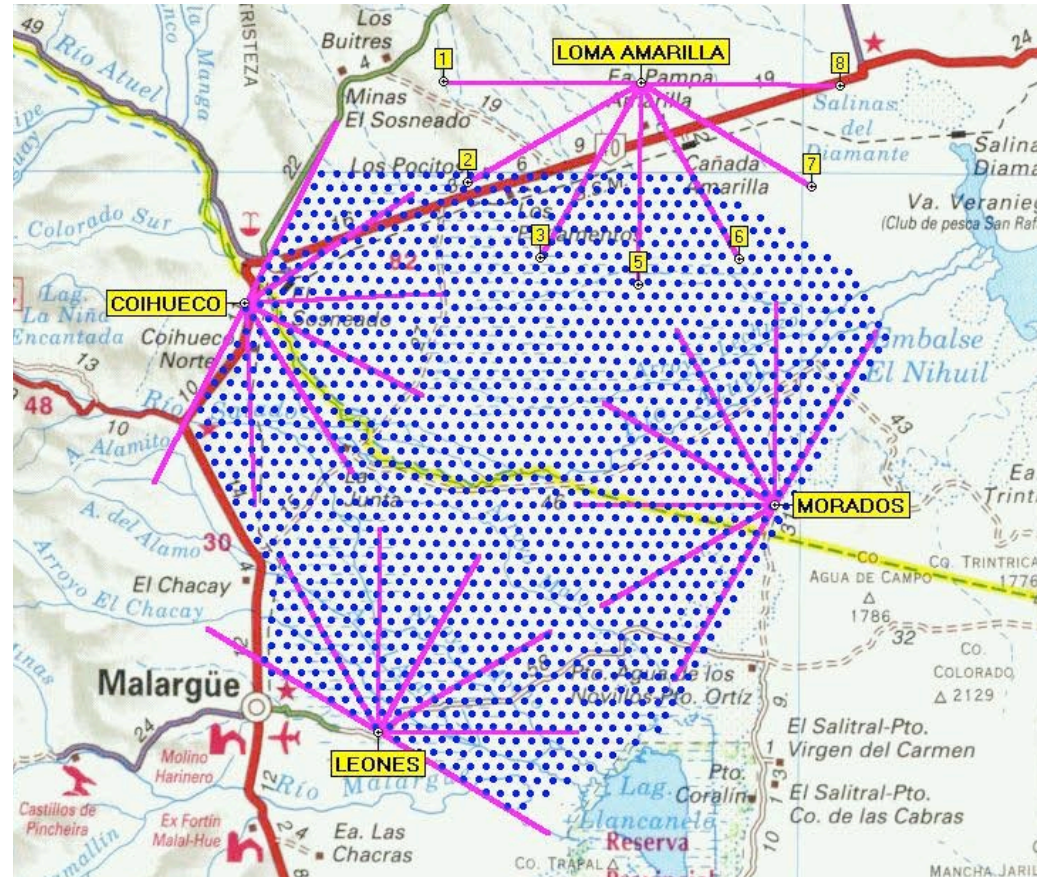
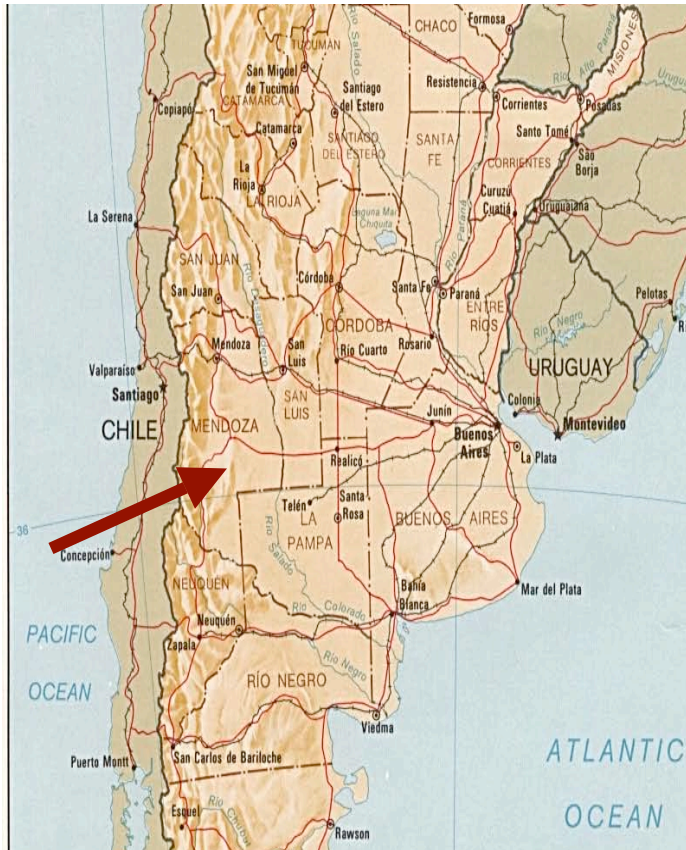
# Observatoire hybride !

- Réseau de détecteurs de surface et détecteur de fluorescence
- Techniques de mesures indépendantes : contrôle des systématiques
- Plus grande précision sur l'énergie et la direction d'arrivée
- Identification du noyau primaire de façon complémentaire
- Détection de gerbes horizontales



# Plan de l'Observatoire

## Argentina



**Réseau de surface**

**1600 stations**

**1.5 km entre voisines**

**3000 km<sup>2</sup>**

**Détecteurs de fluorescence**

**4 bâtiments**

**6 télescopes par bâtiment**

**24 télescopes au total**



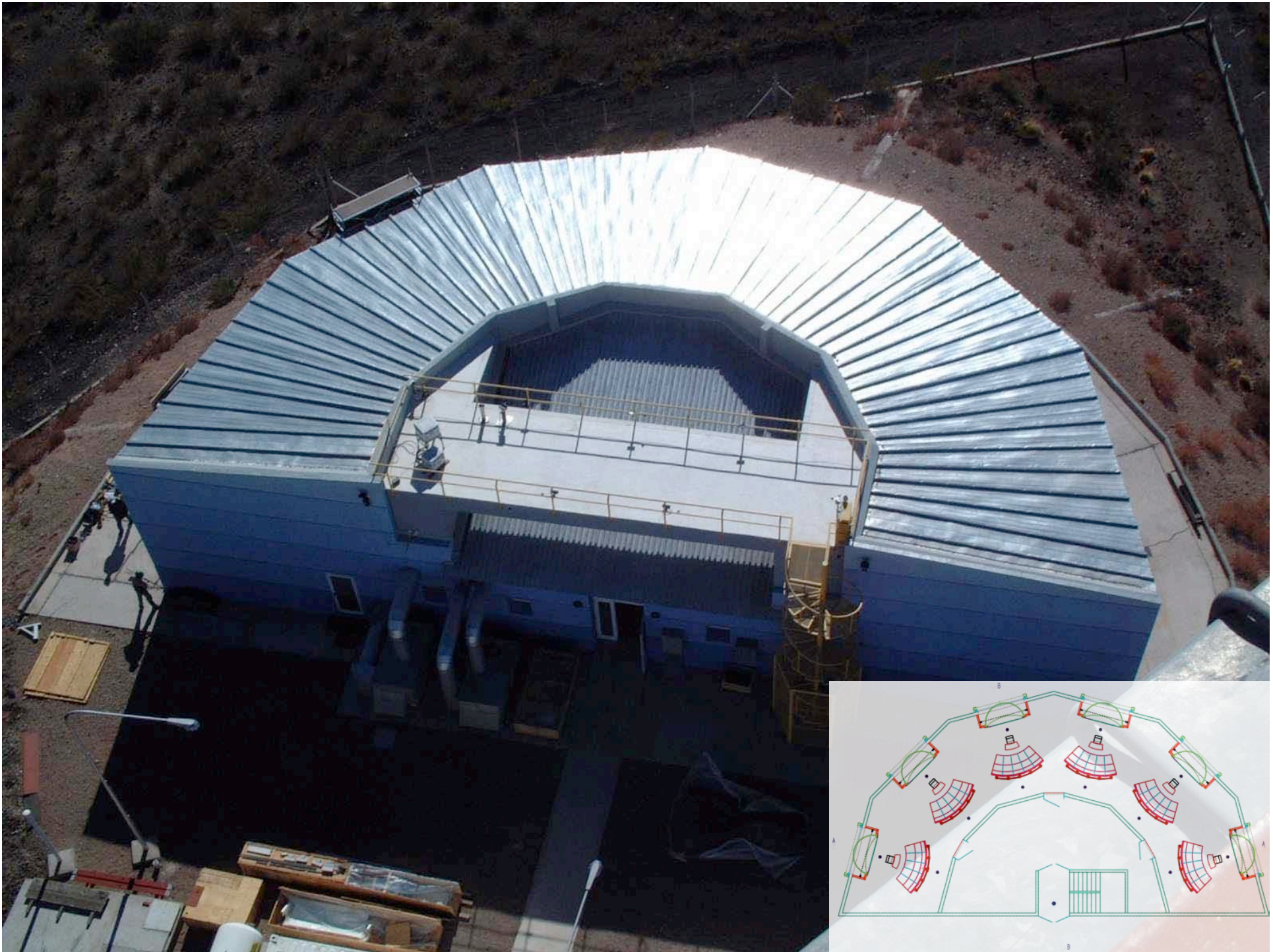
## Vue aérienne de la station de fluorescence de Los Leones



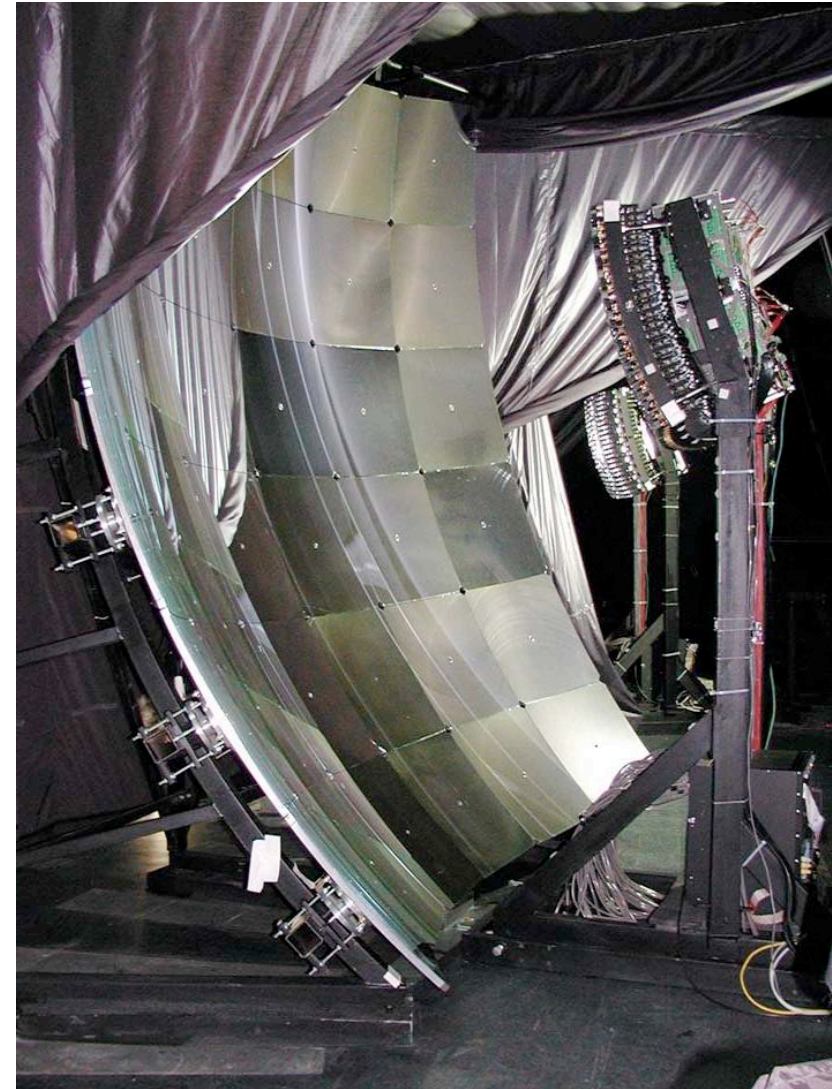
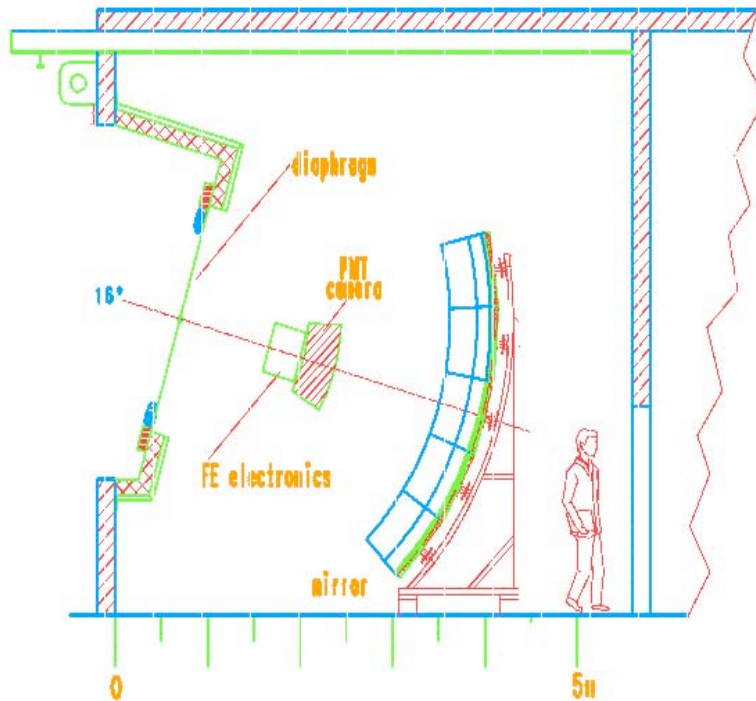
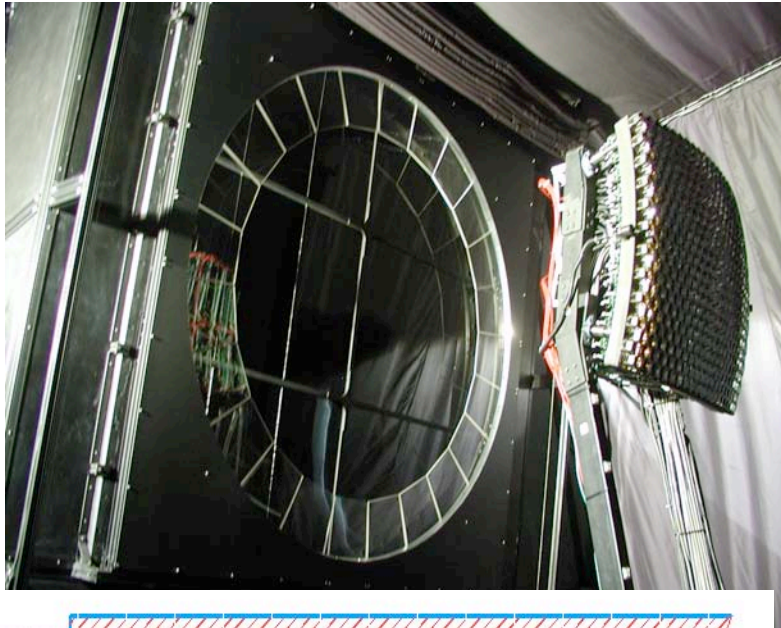
# Détecteurs de fluorescence







## Un des $6 \times 4 = 24$ télescopes



Miroir fragmenté: 3.4 mètres diam.  
caméra à 440 pixels

# Monitoring de l'atmosphère et calibration

“Central Laser Facility”



Calibration absolue

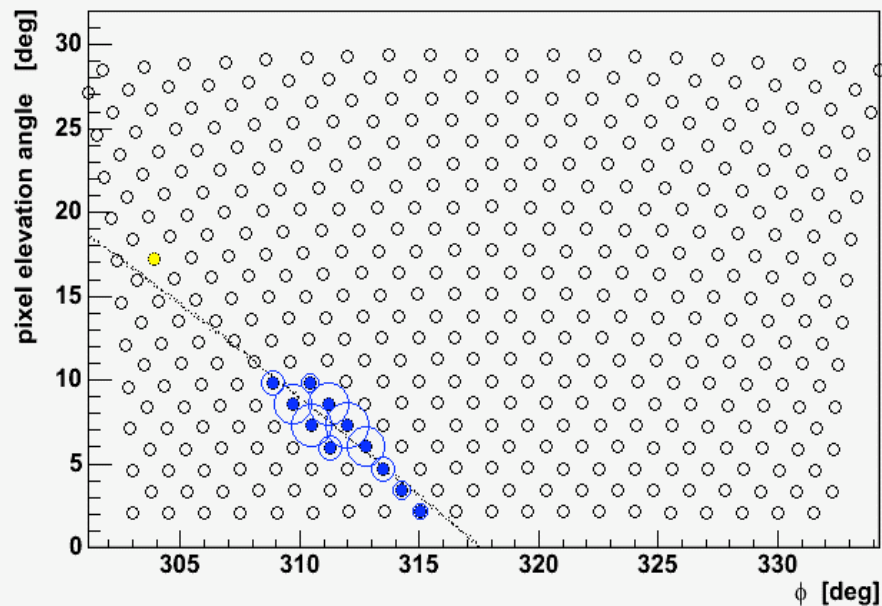


Tambour pour illumination  
uniforme des caméras  
(calibration “end to end”)

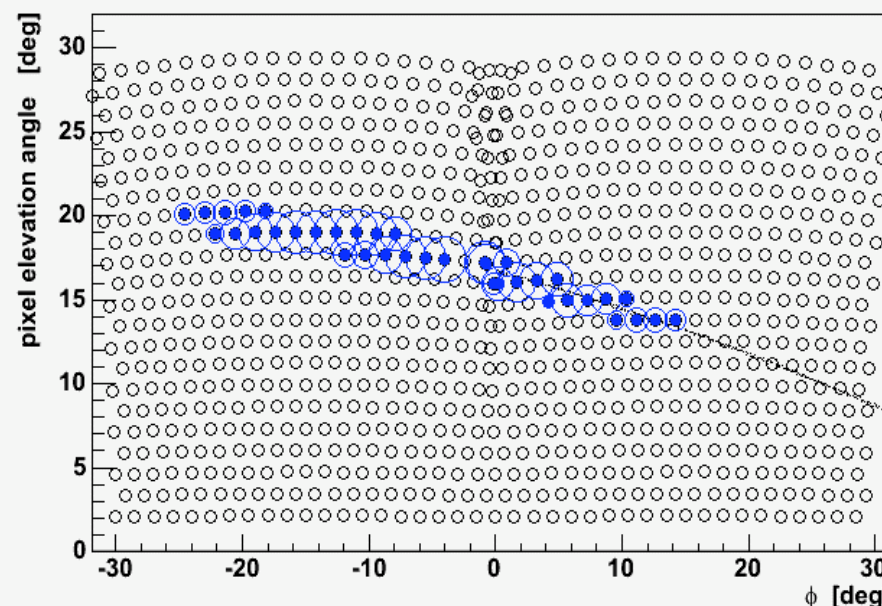


Lidar (pour chaque œil  
à fluorescence)

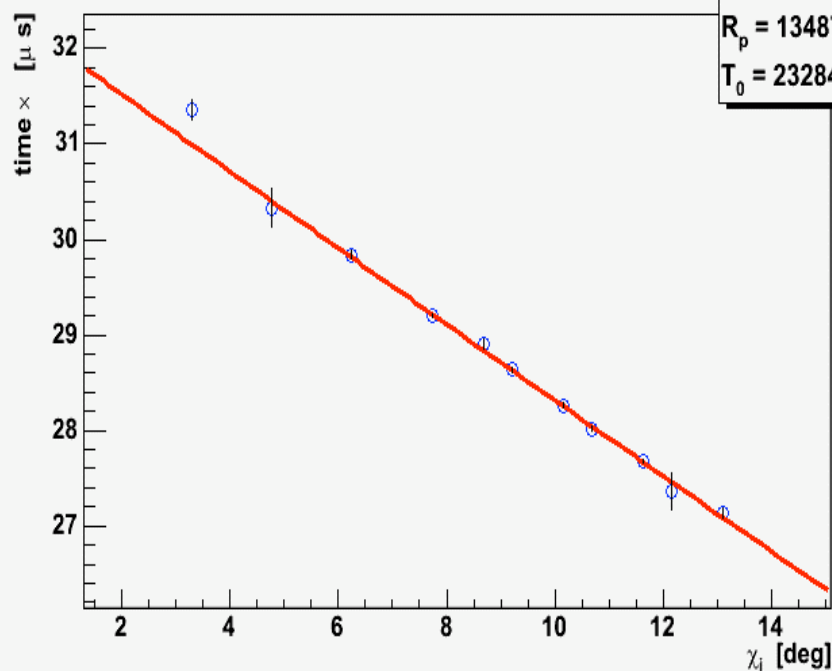
SDP Id 850019 Run 469 Event 197 Eye Id: 4



SDP Id 850019 Run 1 Event 687 Eye Id: 1

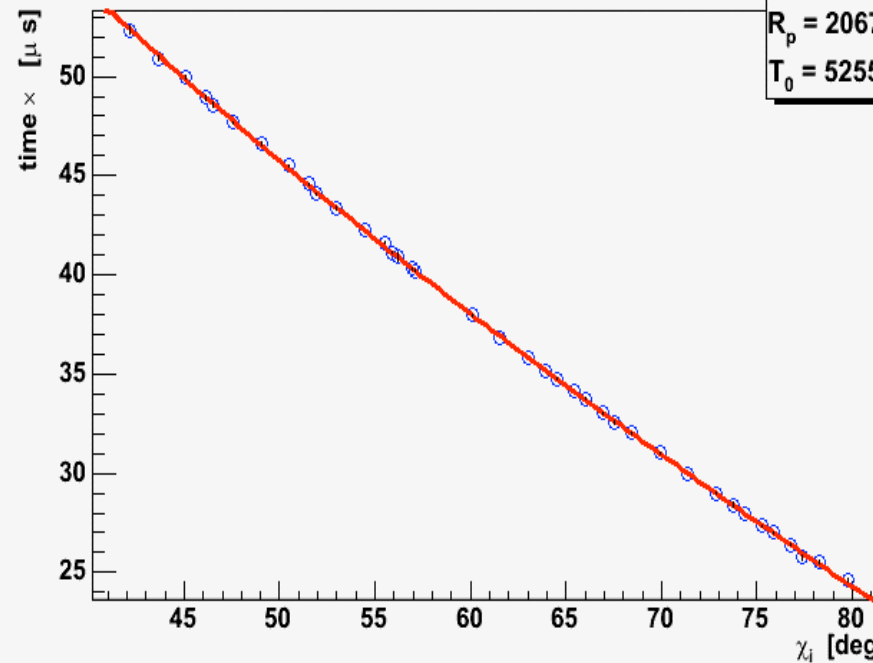


TimeFit Id 850019 Run 469 Event 197 Eye Id: 4



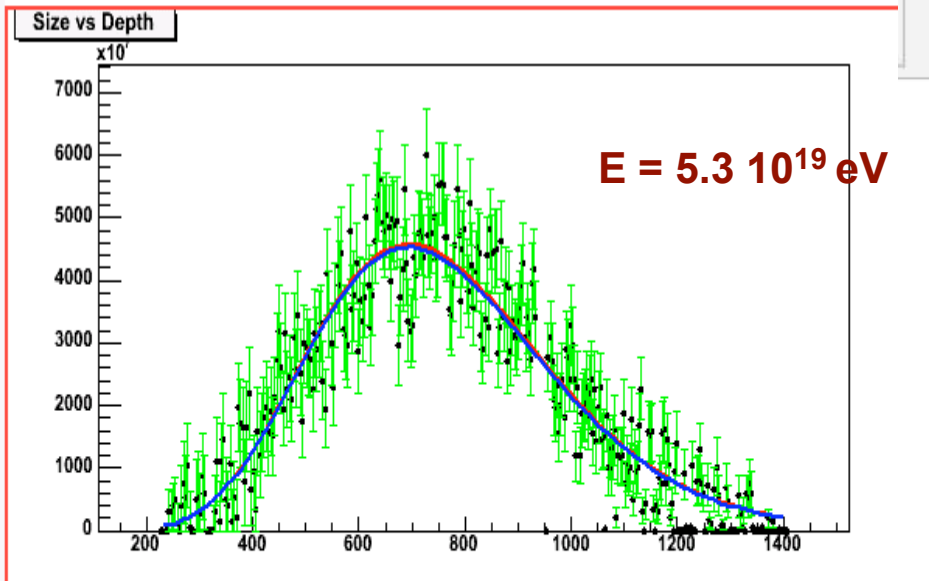
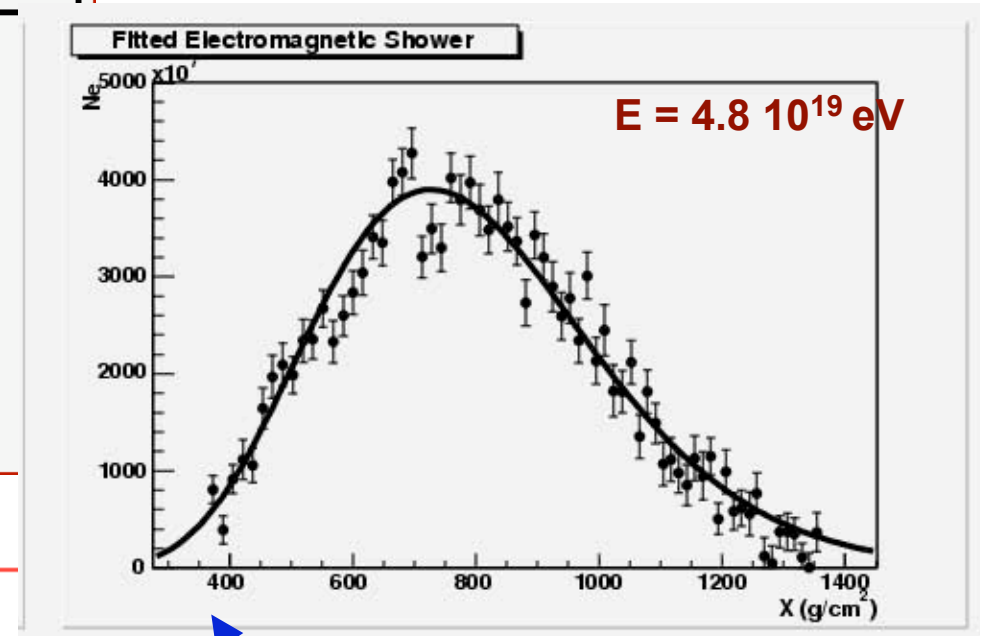
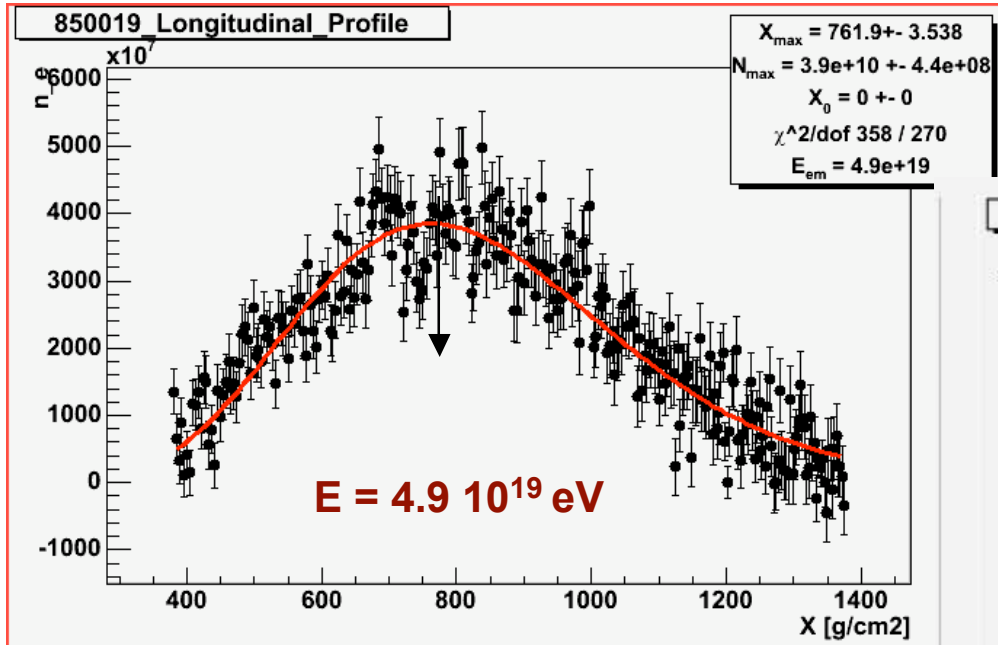
$\chi_0 = 22.753556$   
 $R_p = 13487.3271$   
 $T_0 = 23284.6537$

TimeFit Id 850019 Run 1 Event 687 Eye Id: 1



$\chi_0 = 110.836375$   
 $R_p = 20678.2944$   
 $T_0 = 5255.68658$

# analyses indépendantes



temps -> profondeur  
geometrie, atmosphere

$E_{\text{em}}$  est calculée en fittant un  
profil GH et en intégrant

# Alignement de cuves à effet Cherenkov



# Une cuve... et les Andes argentines !

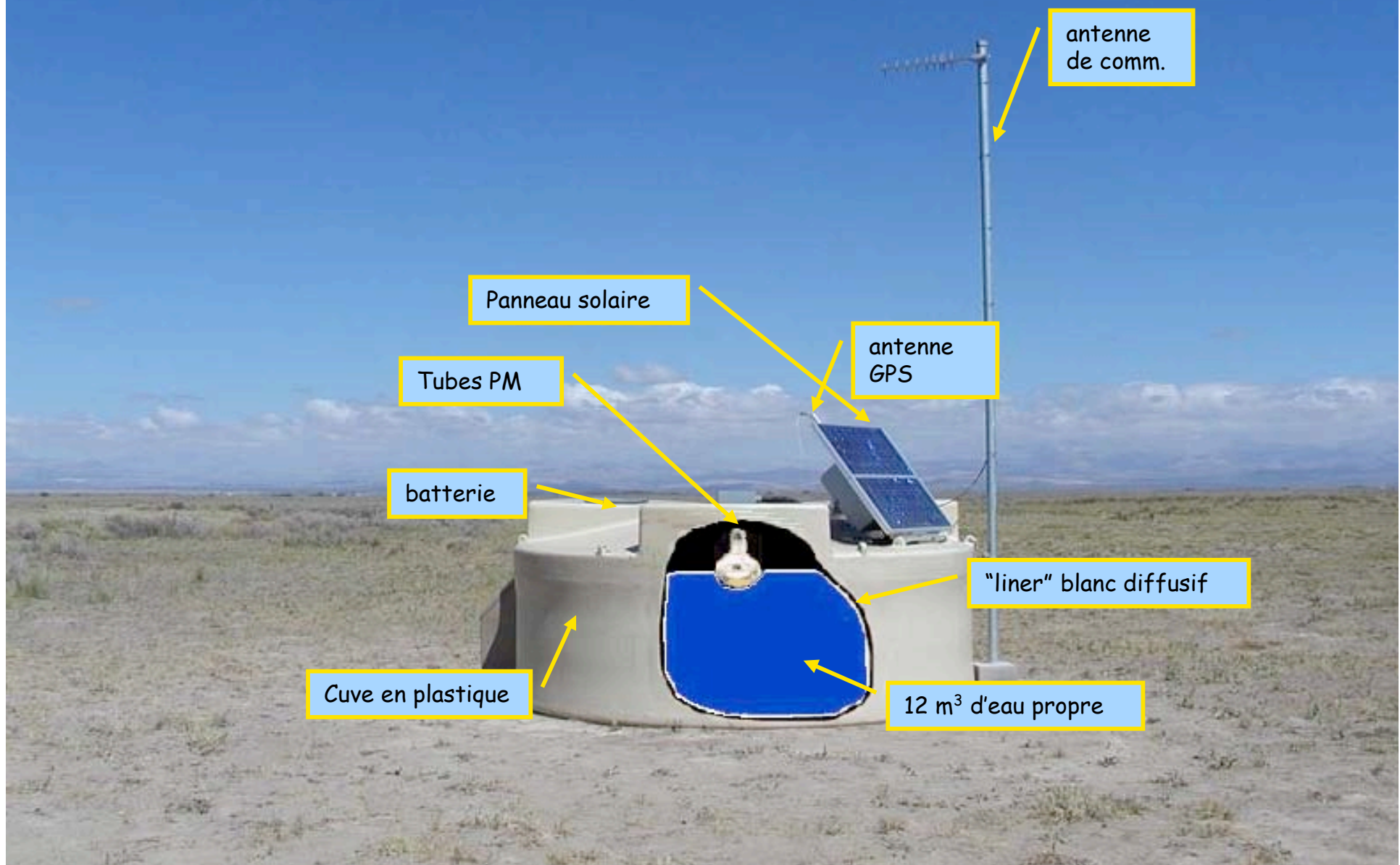


## Vue rapprochée d'une des 1600 cuves

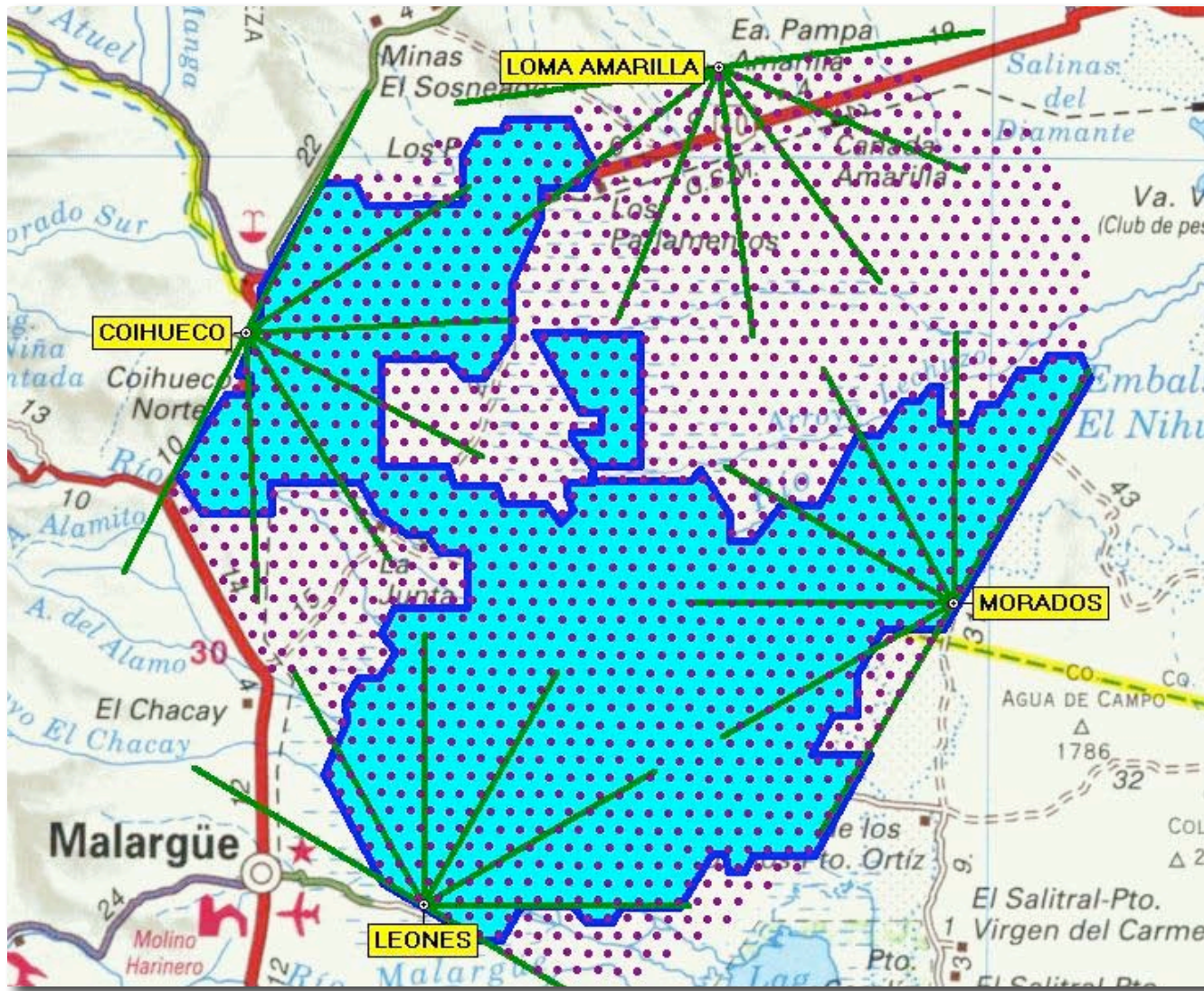




# Fonctionnement des cuves



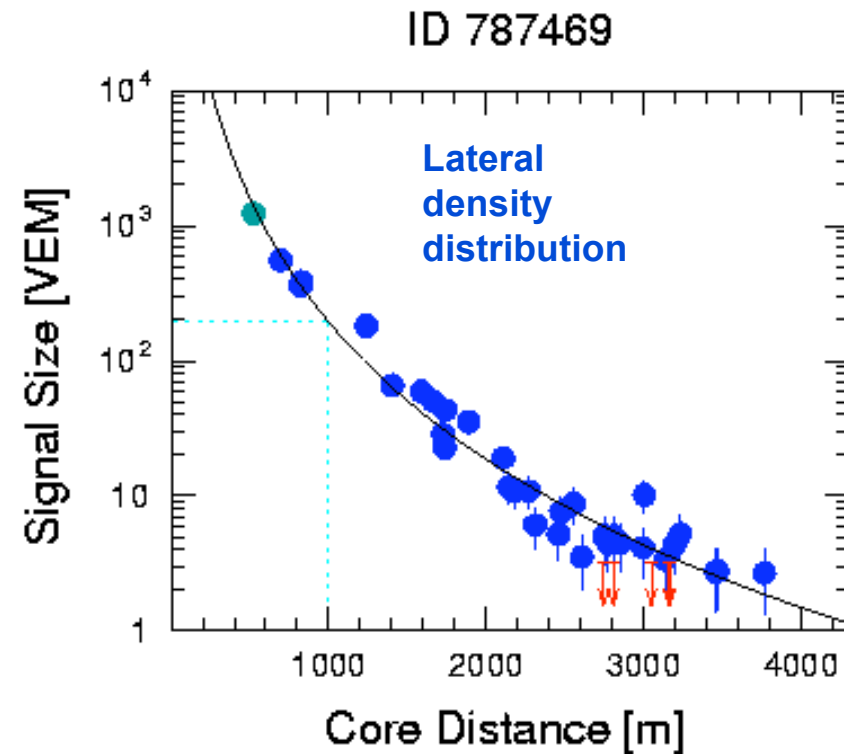
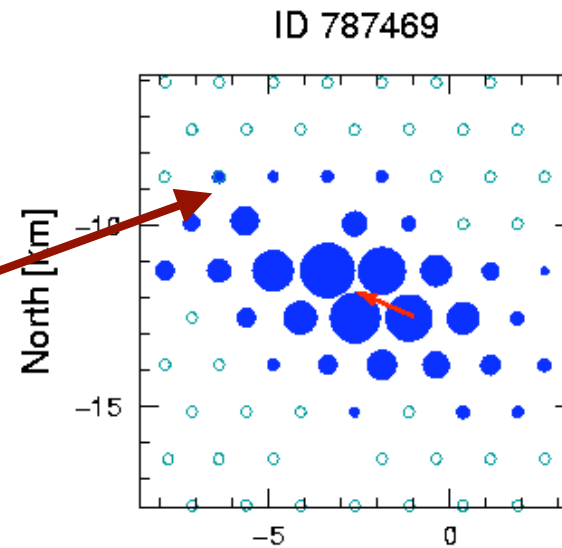
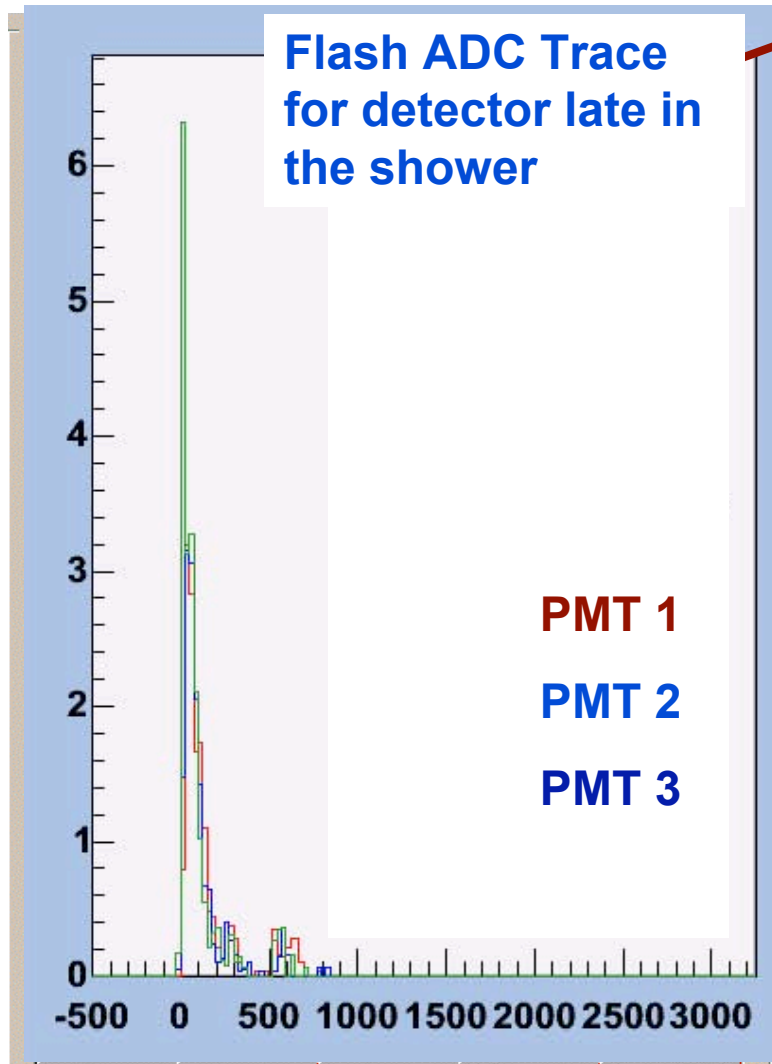
# Réseau en cours d'installation...



# Environment difficile !

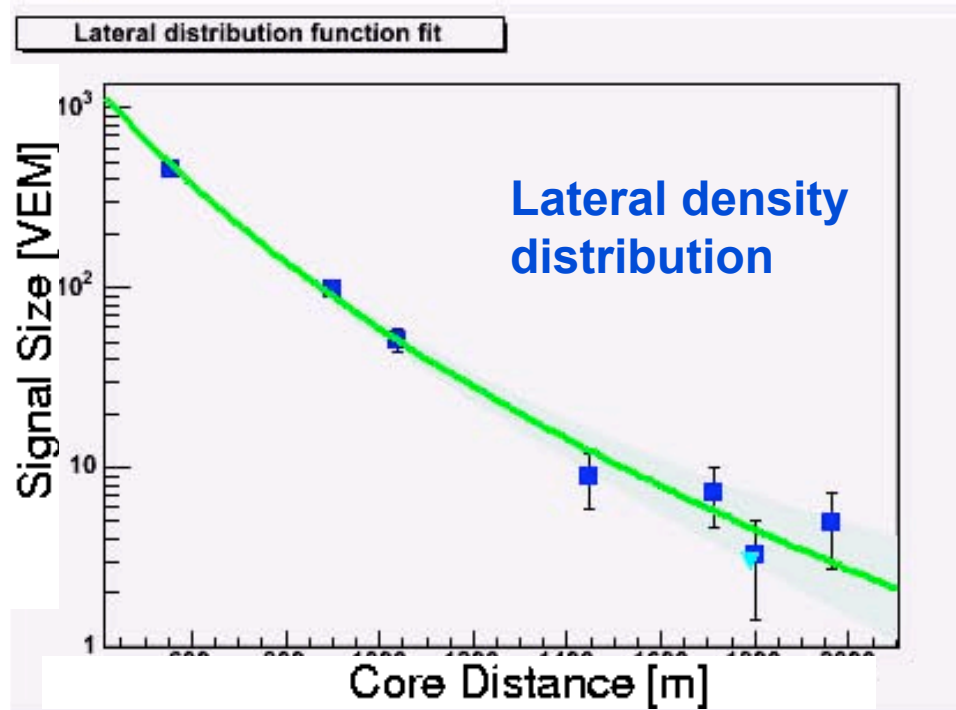
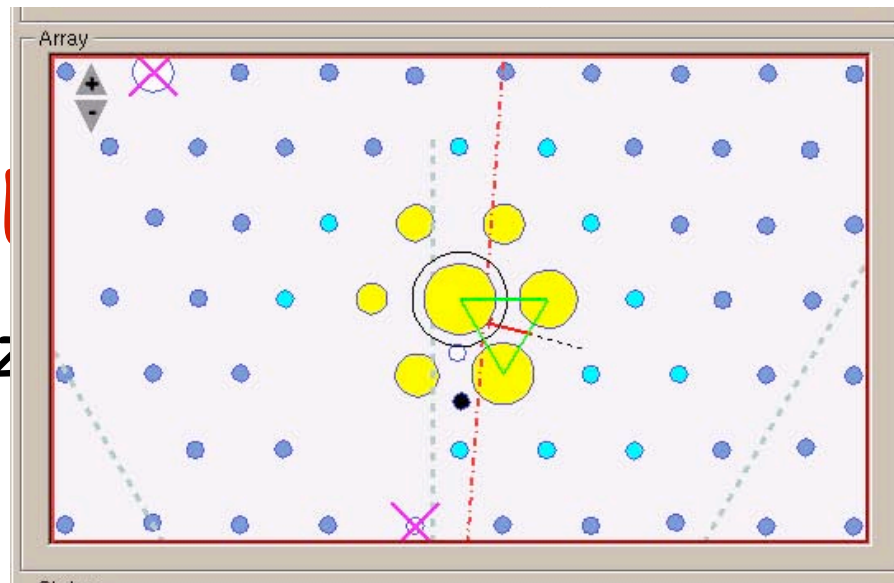
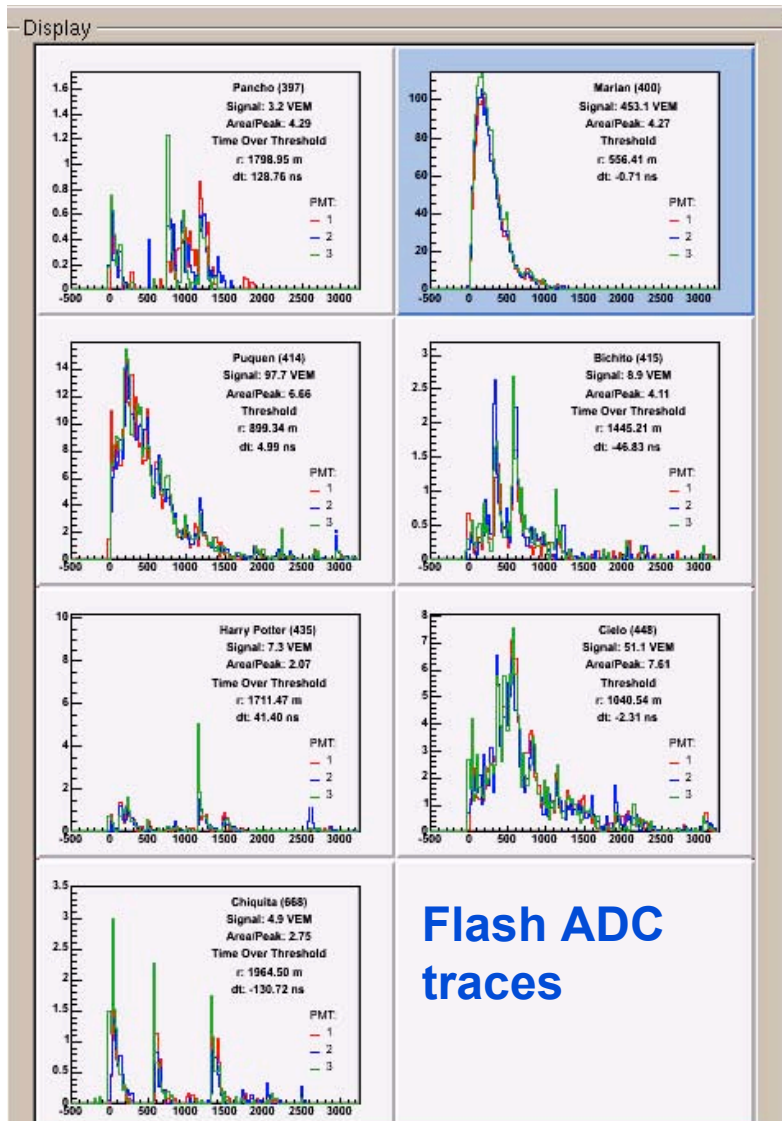


# Surface Detector Event $\Theta \sim 60^\circ$ , $\sim 86$ EeV



# Événement hybride

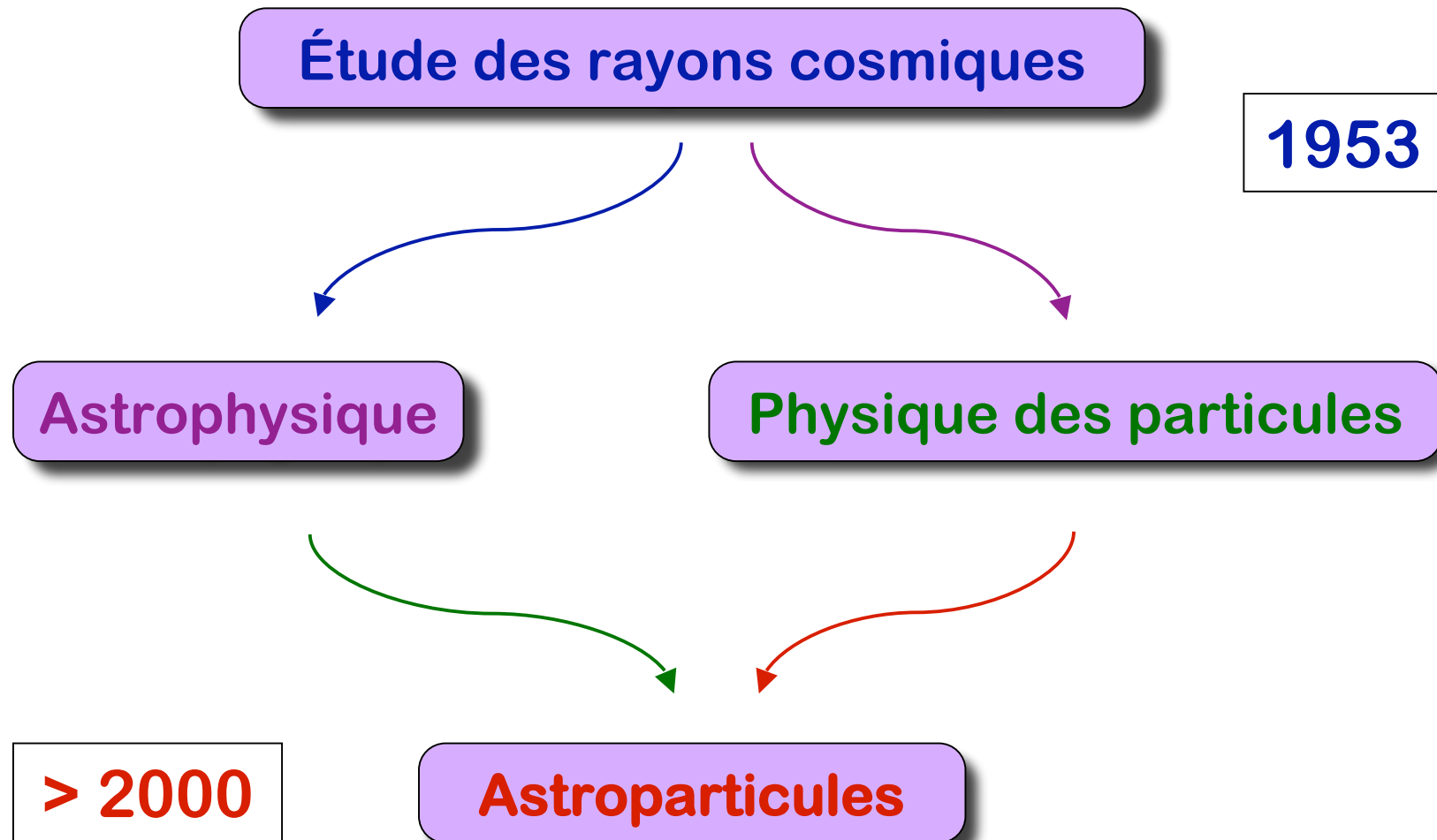
$\Theta \sim 30^\circ$ ,  $\sim 8$  EeV



# Résultats ?

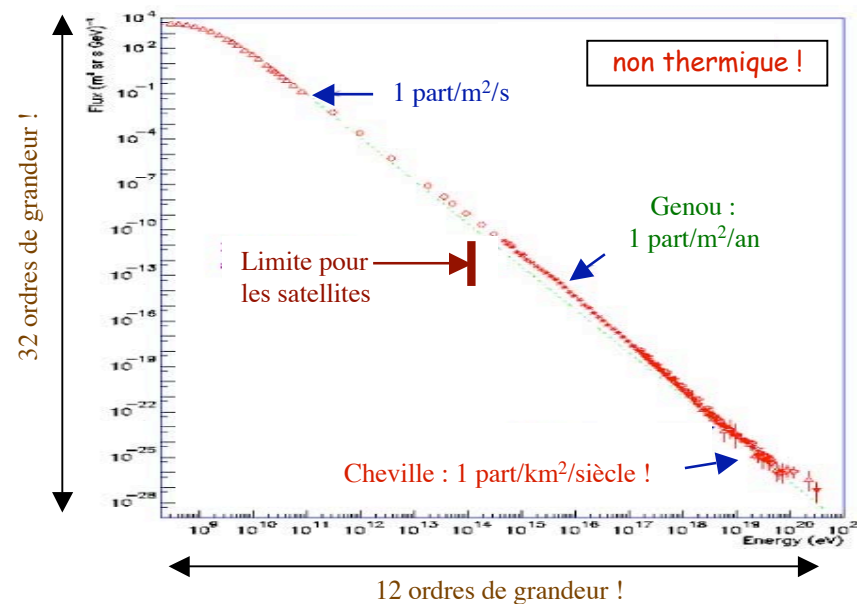
- Attendre encore un peu, mais déjà :
- Toujours pas d'anisotropie !
- Toujours pas de limite apparente au spectre
- La physique des gerbes semble inadéquate ou incomplète :
- Il semble de plus en plus que les rayons cosmiques ultra-énergétiques pourraient révéler de la nouvelle physique à très haute énergie : fascinant !

# Une longue parenthèse se ferme



# Limite à basse énergie ?

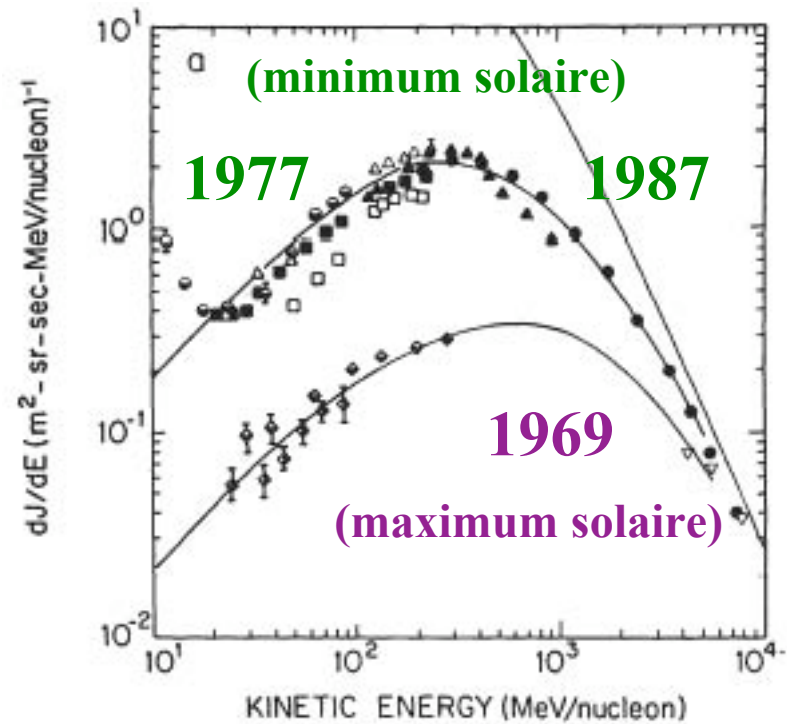
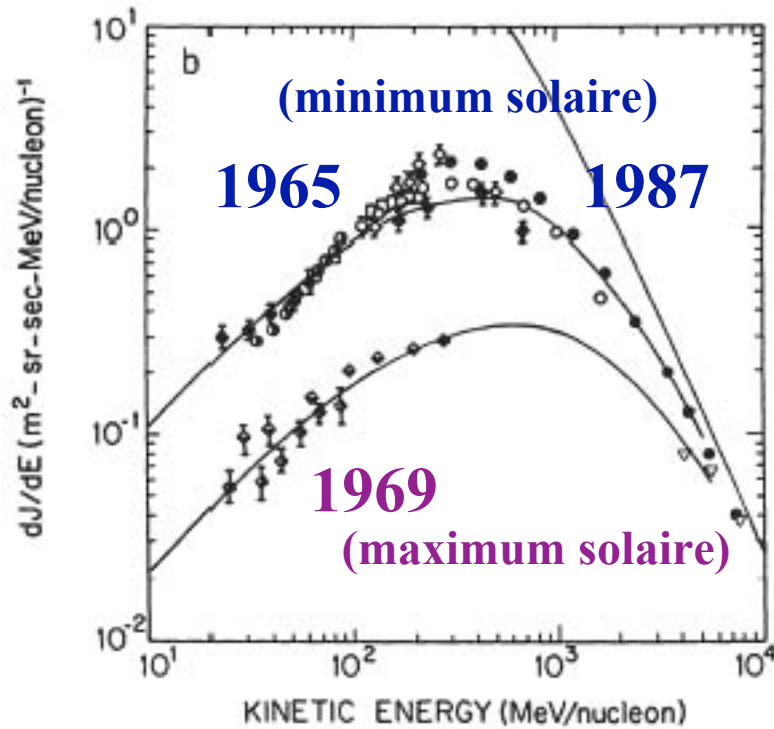
Rayons cosmiques les plus nombreux et les plus importants pour l'astrophysique galactique...



MAIS : Phénomène de modulation solaire...



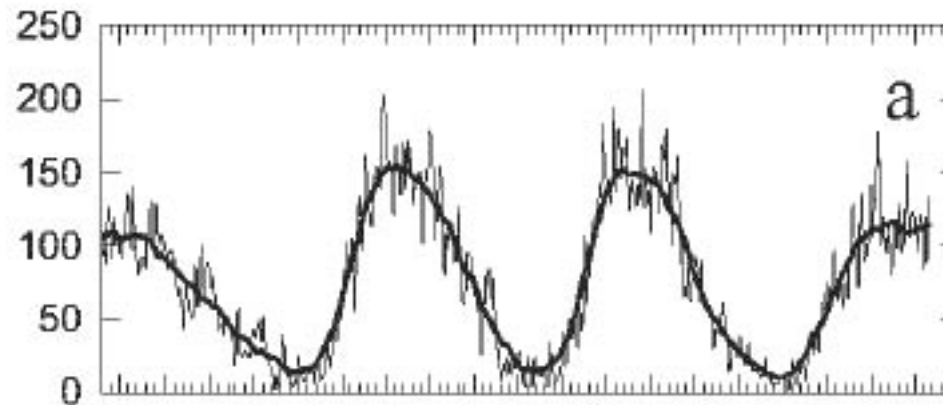
# Modulation solaire



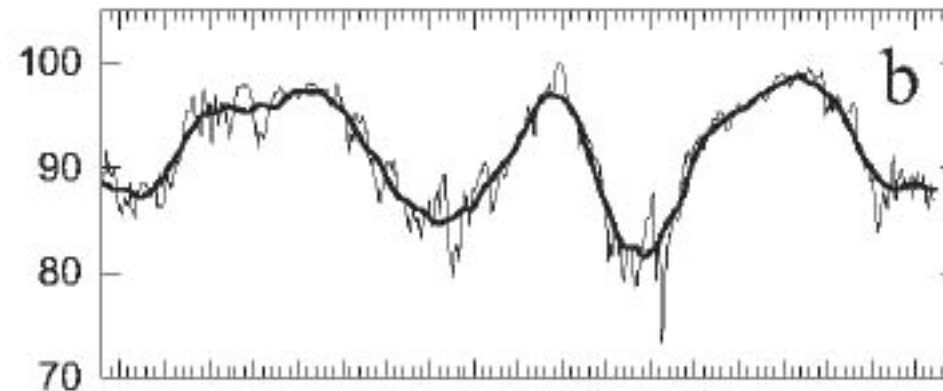
# Solar modulation

- Flux variation in coincidence with solar cycles

Sun spot activity



CR intensity



# Modulation solaire : données de Voyager et de Pioneer

330

WEBBER

Vol. 506

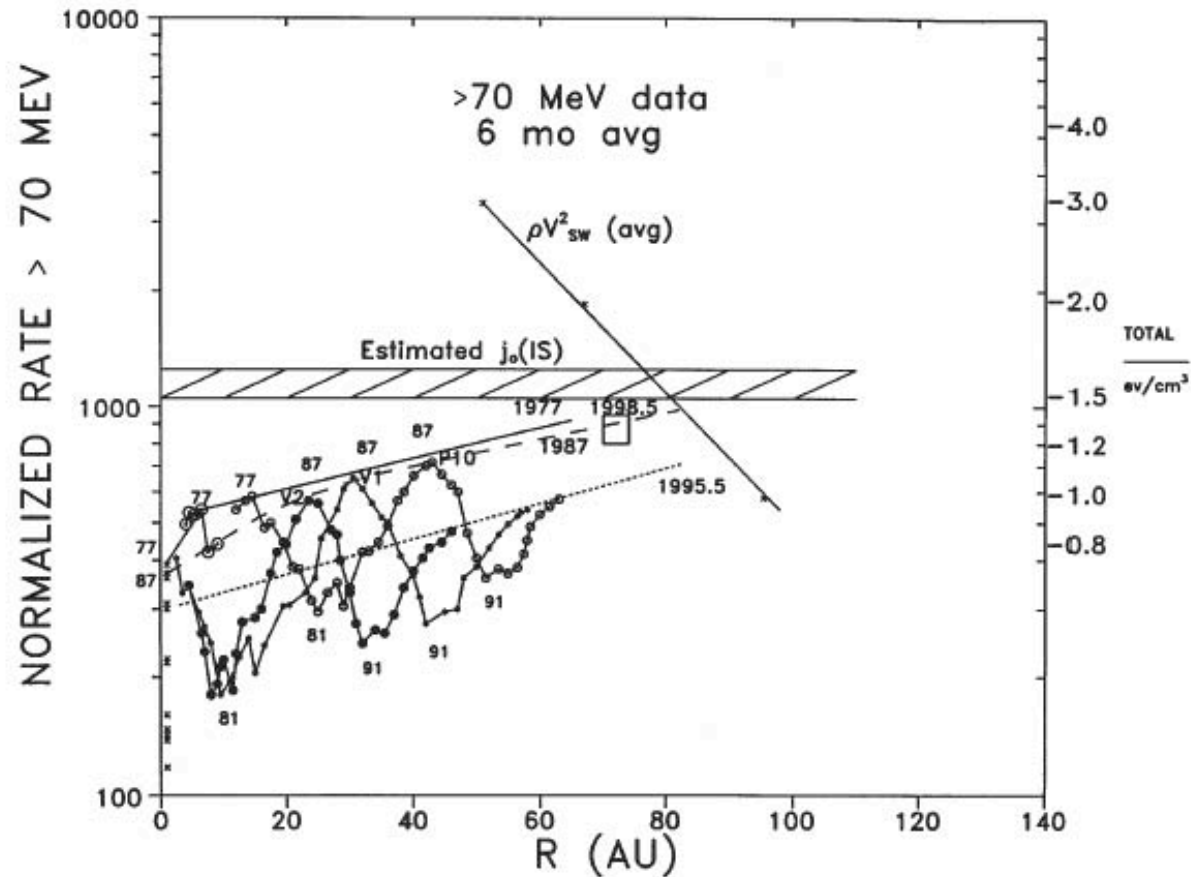
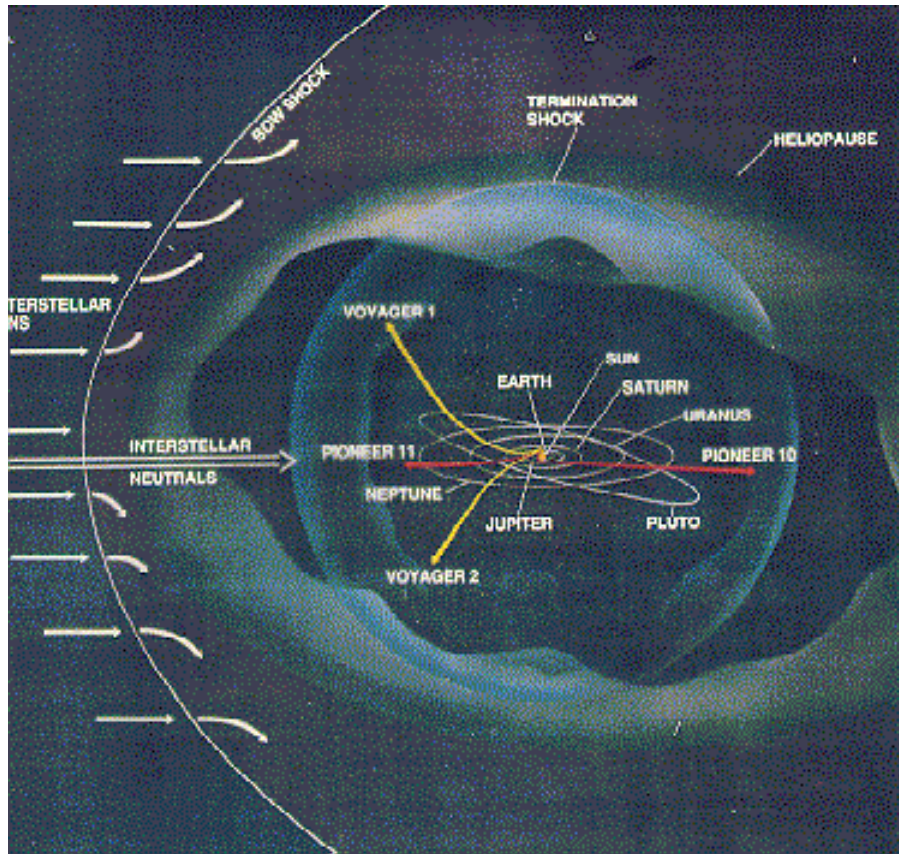


FIG. 1.—Counting rates of greater than 70 MeV cosmic rays vs. distance measured on *Voyager* and *Pioneer* spacecraft from 1977 to 1995. These integral rates, converted to energy densities are shown on the right-hand axis. The estimated interstellar counting rate is shown as a hatched region. The average energy density contained in the solar wind is also shown.



# Limite à basse énergie ?

Rayons cosmiques les plus nombreux et les plus importants pour l'astrophysique galactique !

- Ionisation du milieu interstellaire (MIS)
- Chauffage du MIS
- Production du champ magnétique
- Contrôle de l'astrochimie (→ panspermie ?)
- Régulation de la formation d'étoiles
- Nucléosynthèse des éléments légers

Domaine inaccessible à une mesure directe !

→ recours à l'astronomie photonique

→ toute l'astronomie non thermique et des hautes énergies...

