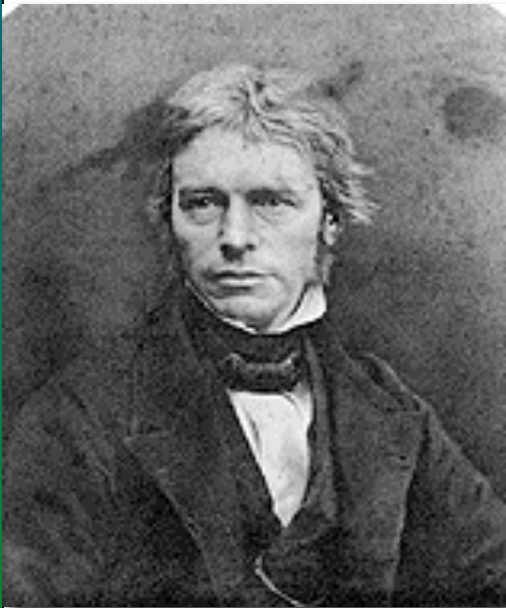


La fin de la physique classique et la découverte des rayons cosmiques

Le contexte scientifique

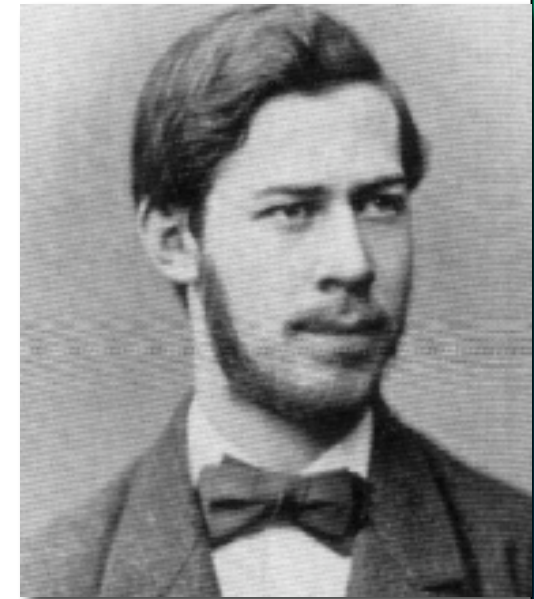
- La grande percée du XIX^e siècle :
 - Unification de l'électricité et du magnétisme
 - Identification de la nature de la lumière (onde EM)



M. Faraday



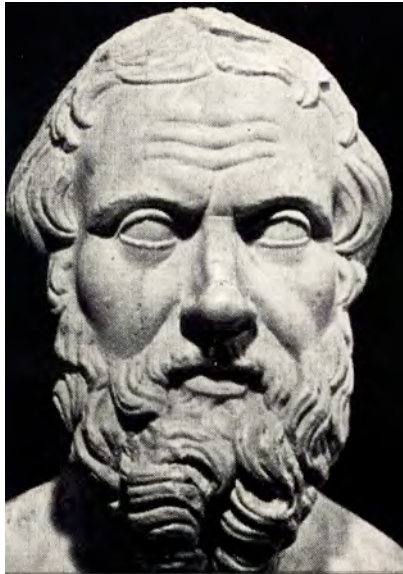
J.C. Maxwell



H.R. Hertz

Le contexte scientifique - II

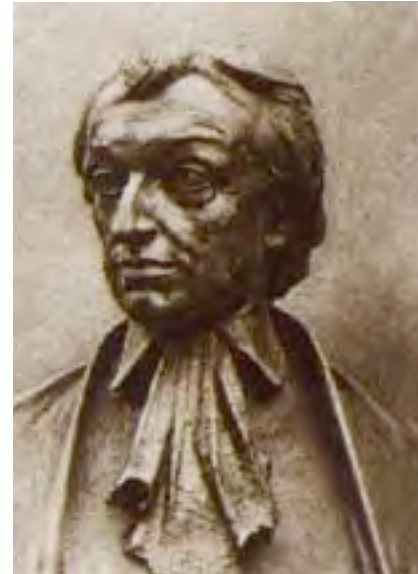
- Matière : théorie atomique primitive
 - Combinaison d'atomes différents (« indivisibles »)
 - Le noyau et les électrons sont inconnus !



Démocrite



J. Dalton



A. Avogadro



D.I. Mendeleiev

Les nouveaux rayonnements

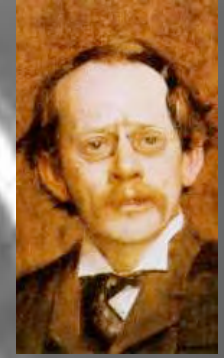
- Les rayons cathodiques
- La lumière « non lumineuse »
- Les rayons X
- Les rayonnements radioactifs
- Les rayons cosmiques

Les rayons cathodiques



Crookes

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



Thomson

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 (α , β , γ)

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



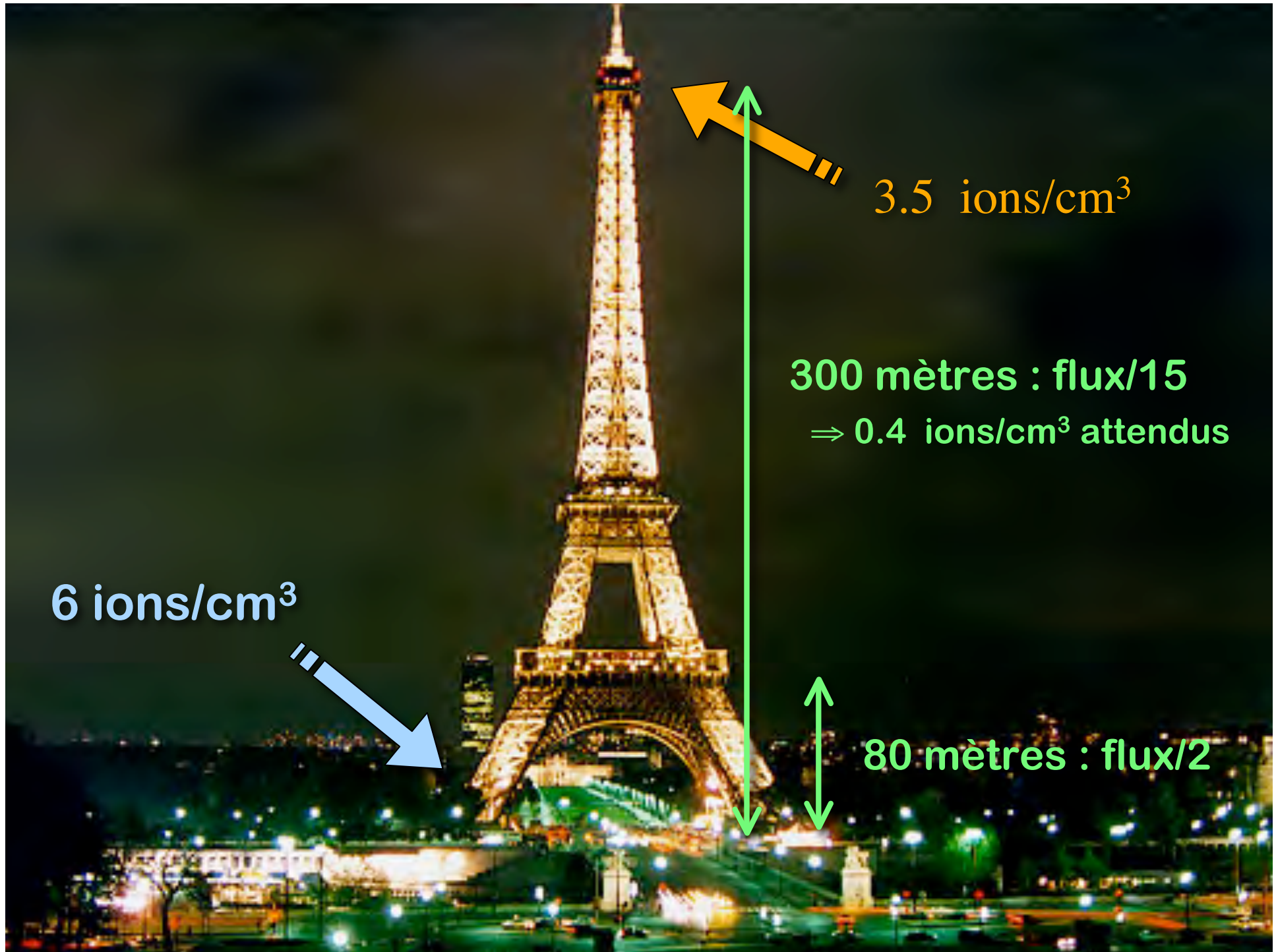
Décharge spontanée !



C. Wilson

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





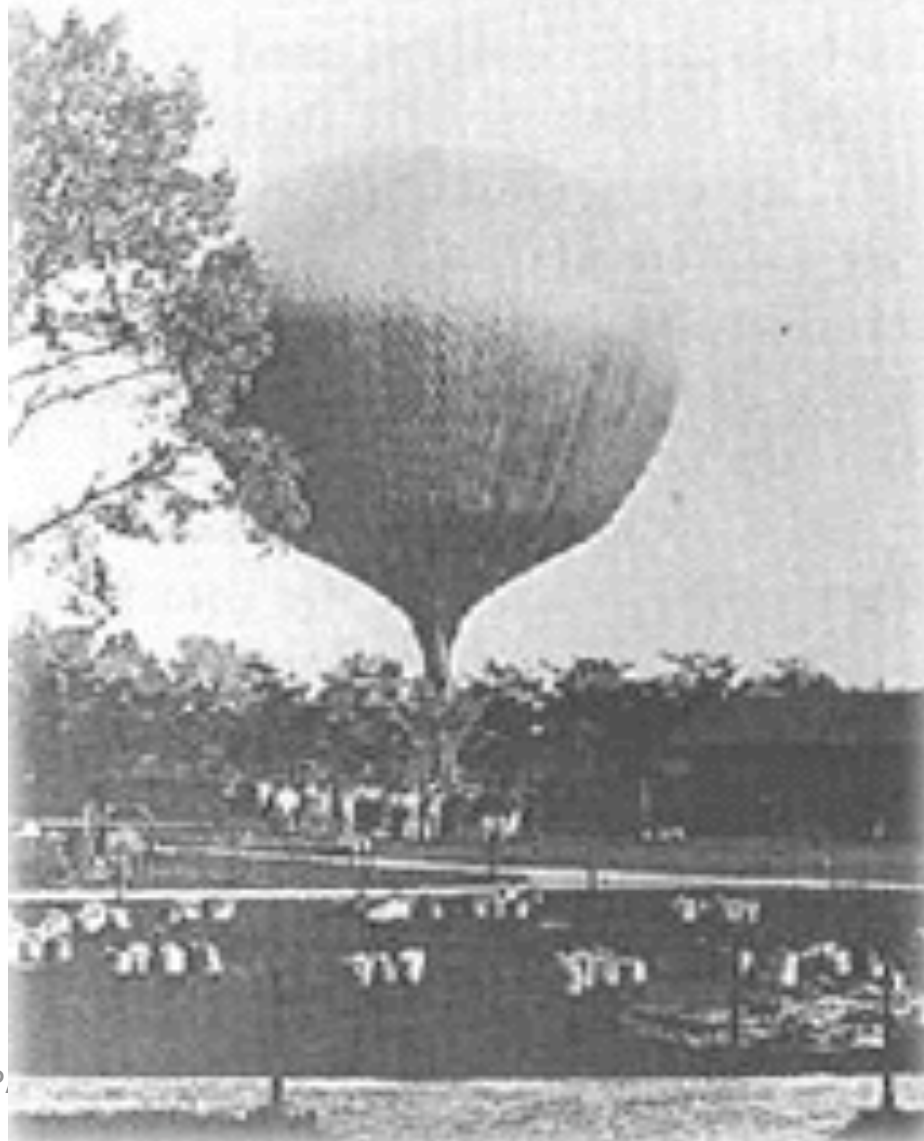
3.5 ions/cm³

300 mètres : flux/15
⇒ 0.4 ions/cm³ attendus

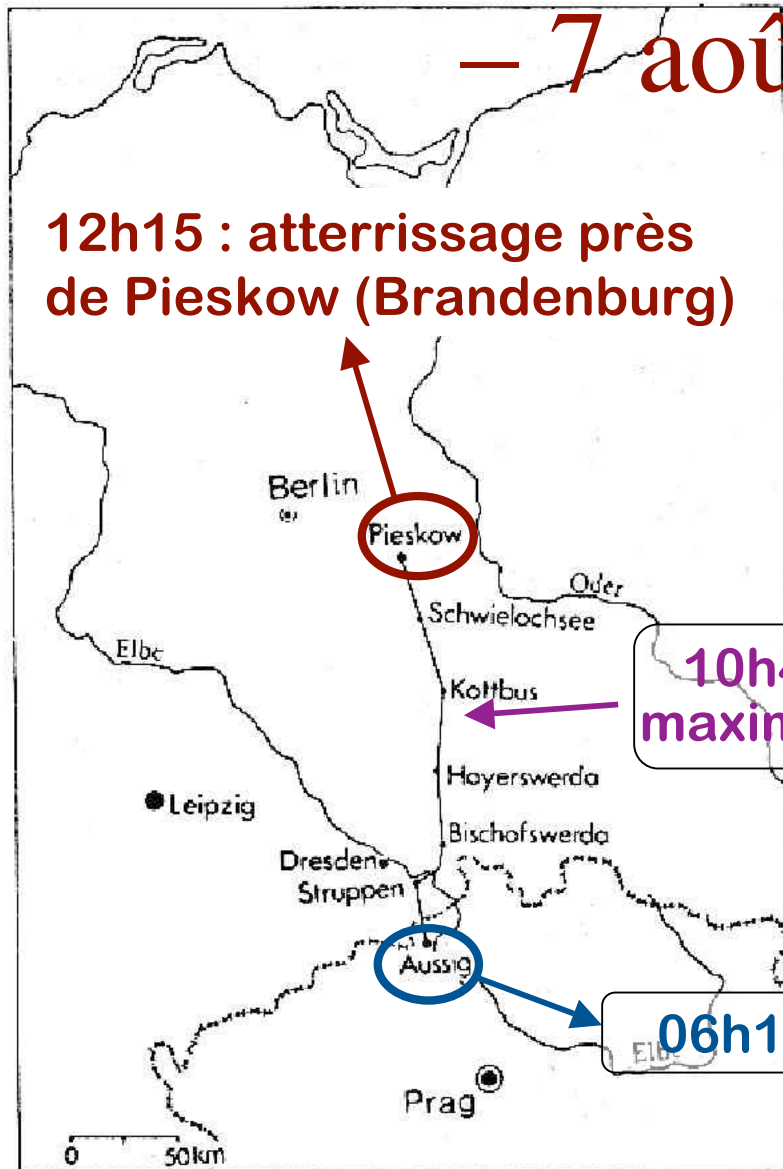
6 ions/cm³

80 mètres : flux/2

Victor Hess à l'assaut du ciel...



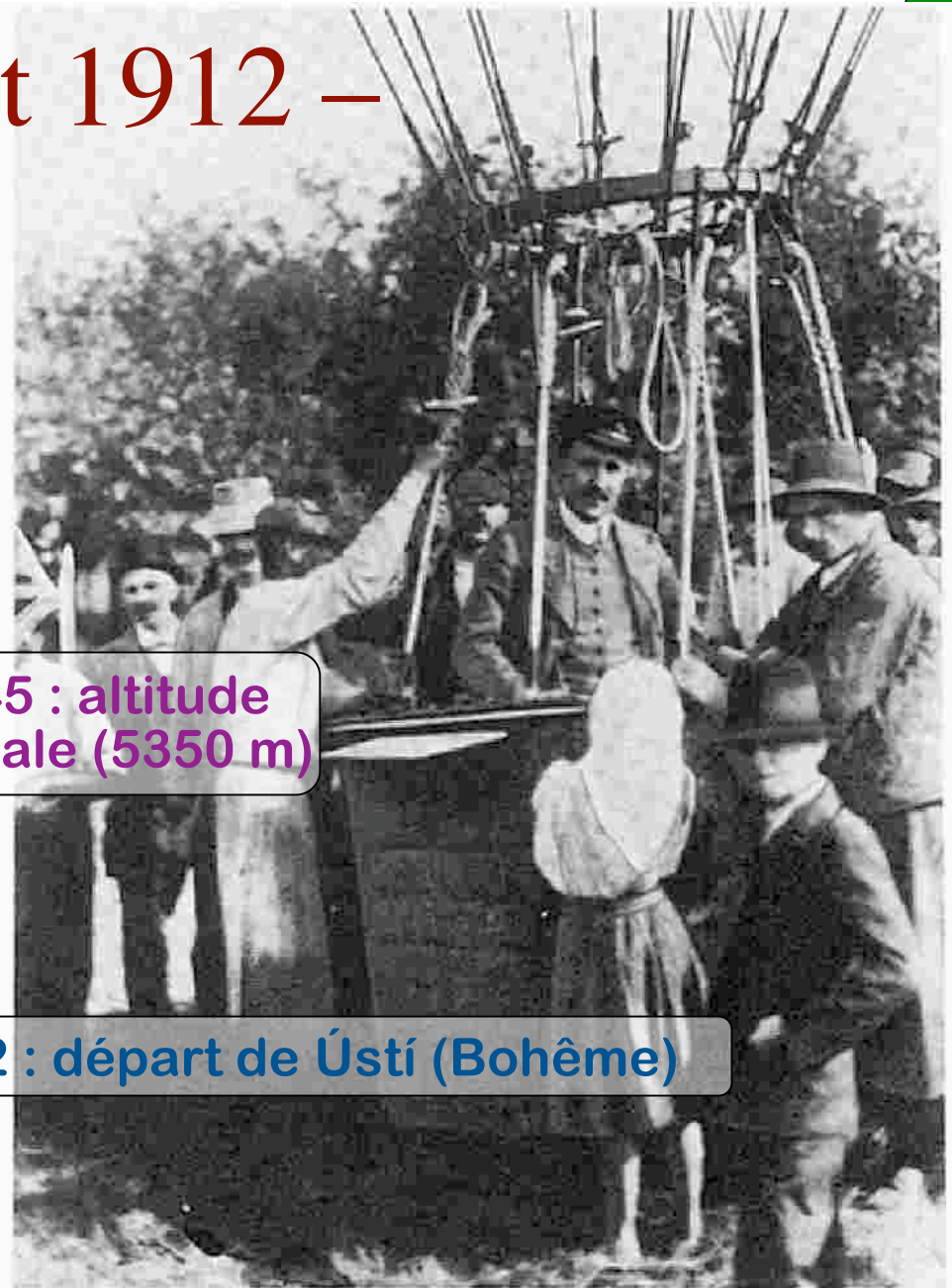
– 7 août 1912 –



12h15 : atterrissage près de Pieskow (Brandenburg)

10h45 : altitude maximale (5350 m)

06h12 : départ de Ústí (Bohême)

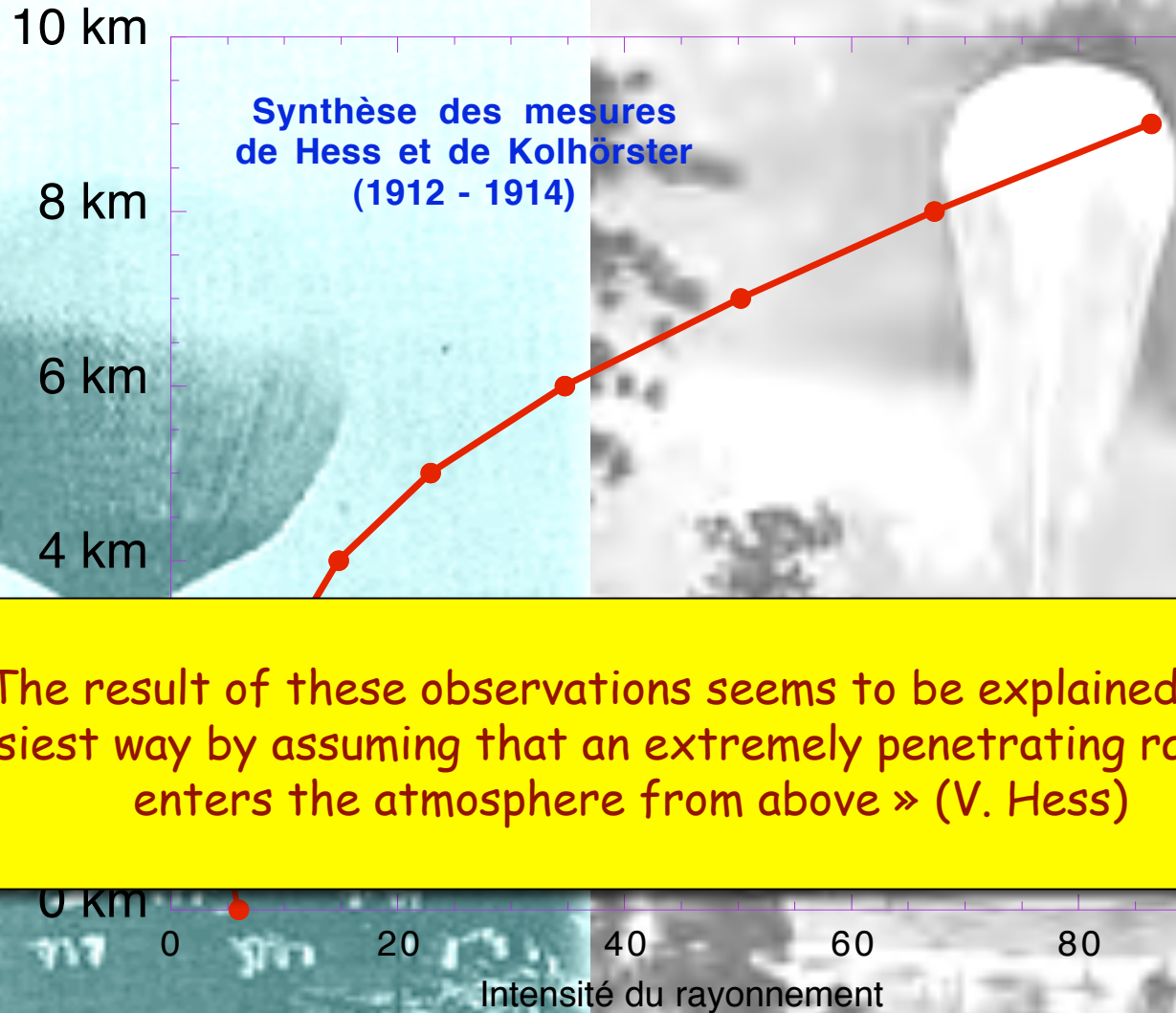


Route des Entdeckungsfluges der kosmischen Strahl

– NPAC / Astrophysique des partic

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 !

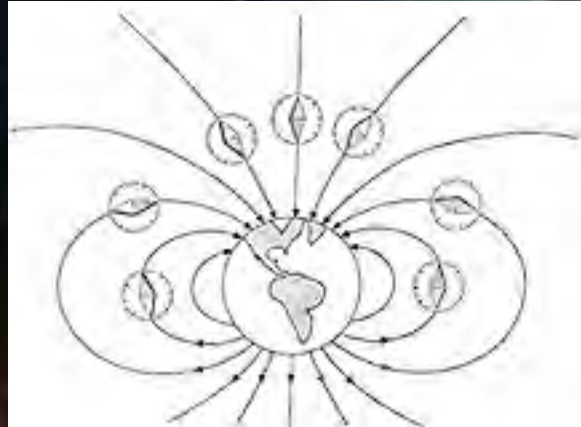
- Mais d'où ? Le cosmos est vaste !
- Et quoi ? Le radium C (^{214}Bi) est 5 fois moins pénétrant !
- Lumière ? Matière ? Comment savoir ?
- Situation très difficile : on ne connaît pas les particules, et on n'a pas d'outils pour les observer ! Les détecteurs sont encore à créer...
- Une piste : s'agit-il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

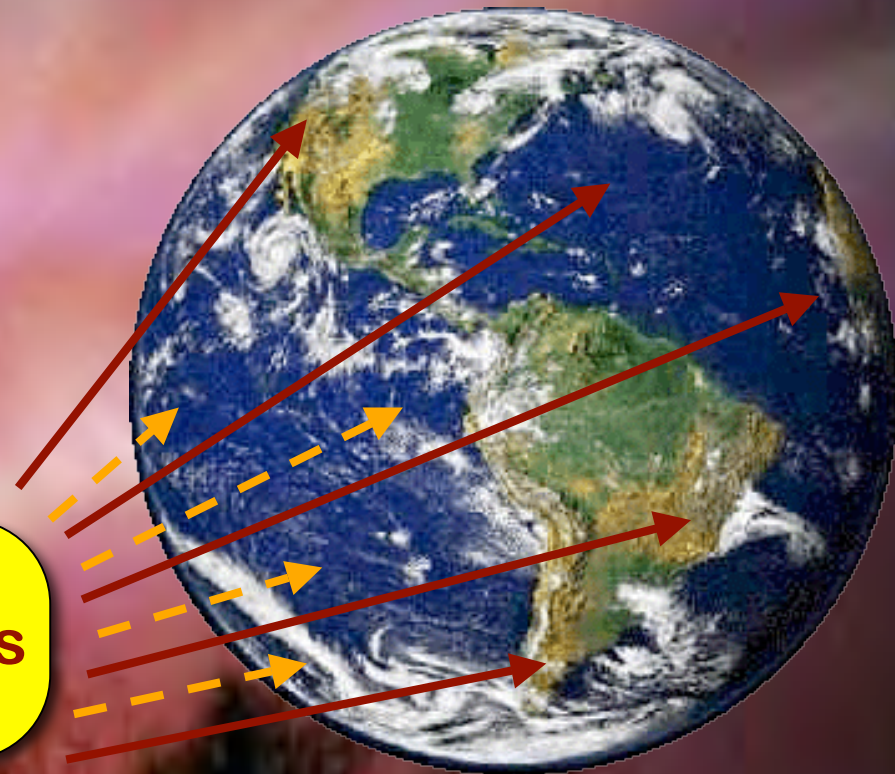
Mais Millikan résiste et refuse ces conclusions...

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 !
- \Rightarrow aller en altitude : montagne, ballons, satellites...

La chambre à brouillard



C.T.R. Wilson

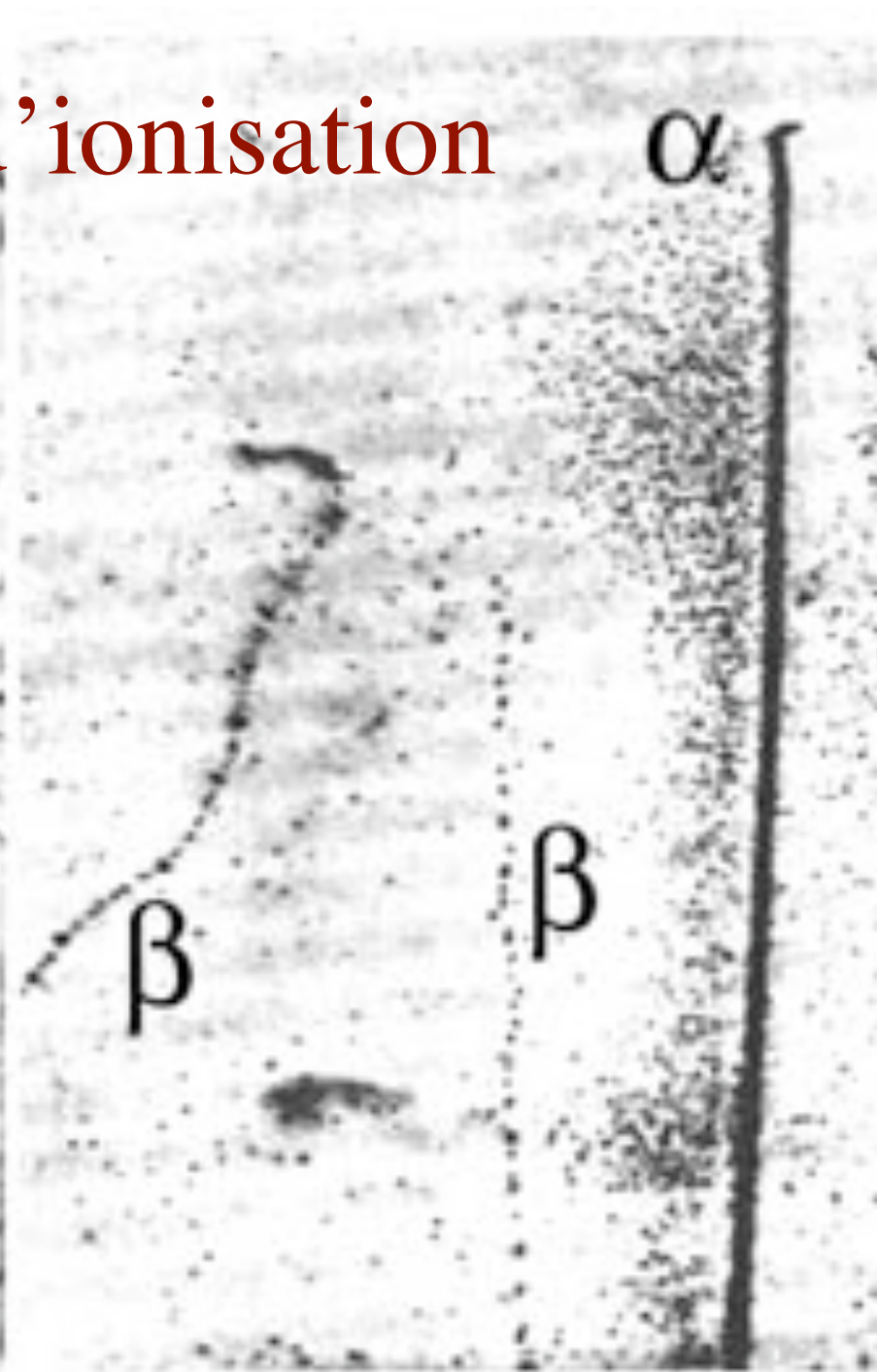
Expansion rapide du gaz pour le refroidir et le rendre sursaturé



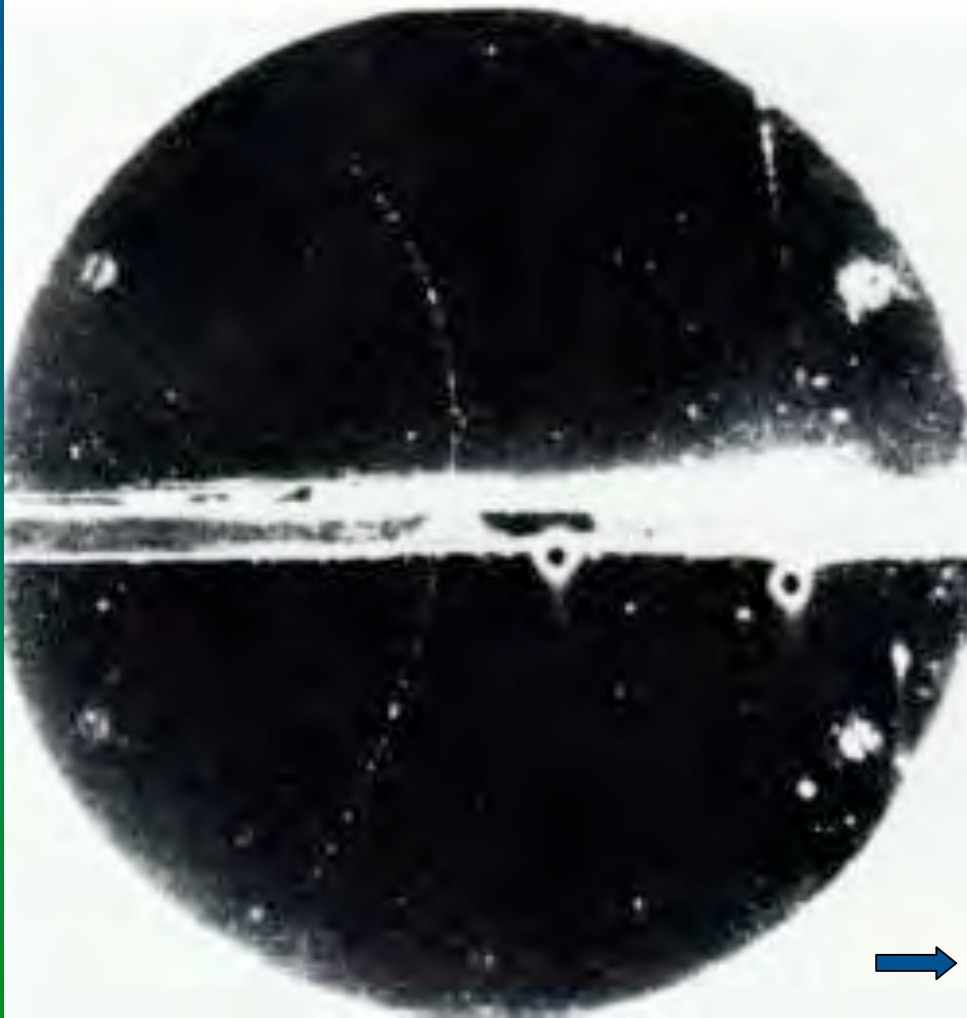
Condensation de gouttelettes sur les ions produits par les particules énergétiques



Traînées d'ionisation



Découverte du positron



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

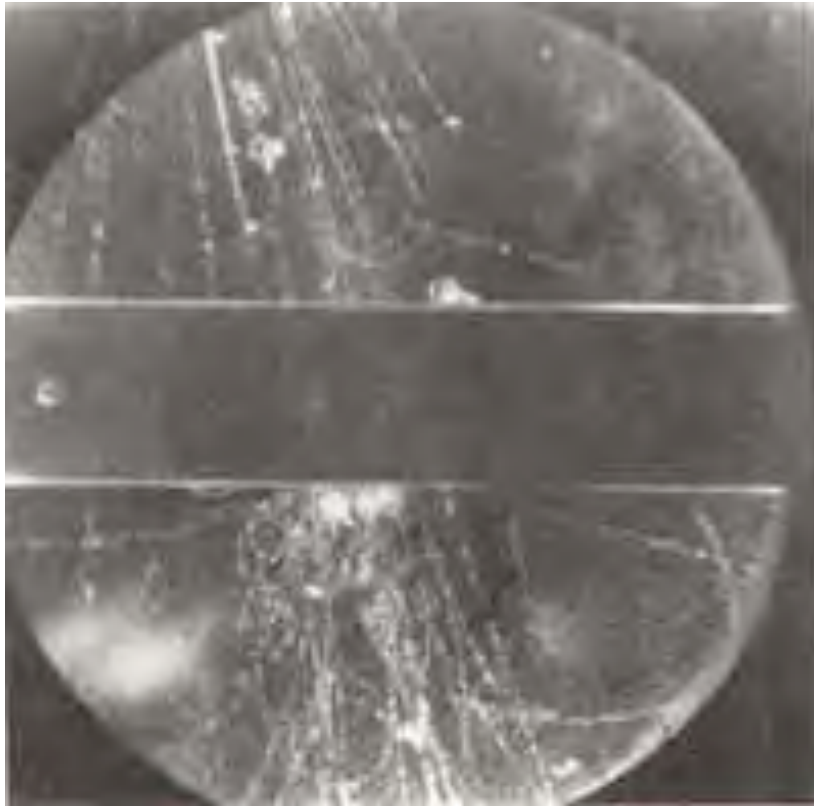
avant: 1 sur 100 !
long et cher !!!

1933, Nobel pour Dirac

1936, Nobel pour Anderson

Paires particule/antiparticule...

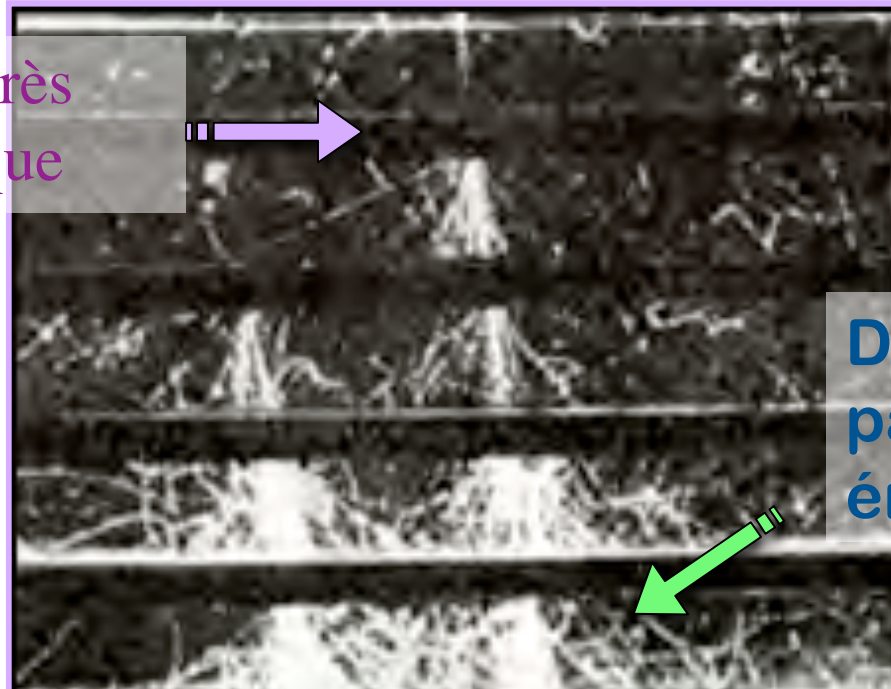
(Blackett démontre la réversibilité de la transformation lumière/matière...)



... et « douches » de particules

Cascades, douches et gerbes

1 particule très
énergétique



De nombreuses
particules moins
énergétiques

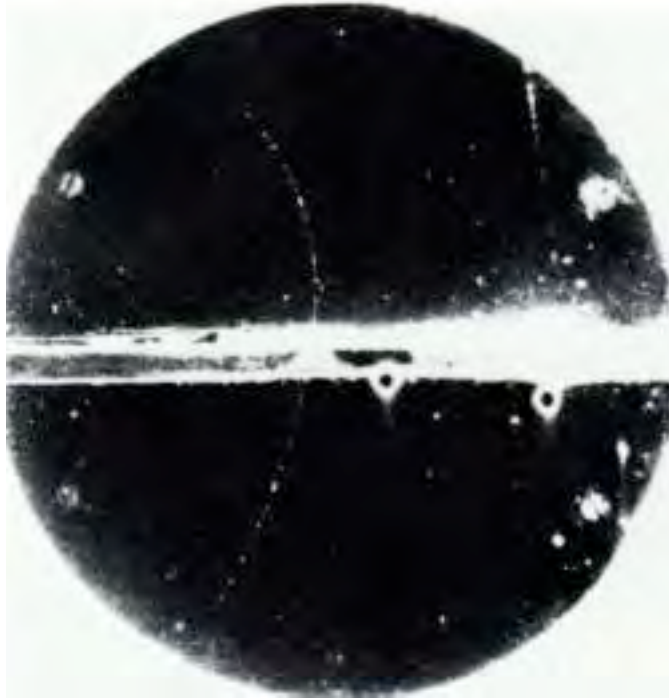
conversion multiple de l'énergie initiale

- 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



Cecil Powell

**11 ans
après**

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 : π^0, π^+, π^-

1949

– Kaons (K)

1949

– Lambda (Λ)

1952

– Xi (Ξ)

1953

– Sigma (Σ)

Particules « étranges »

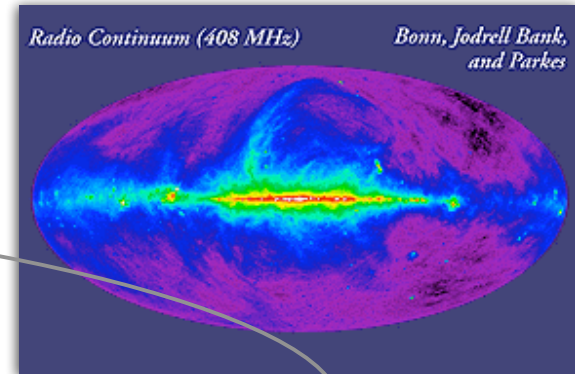
(Durée de vie beaucoup trop longue)

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

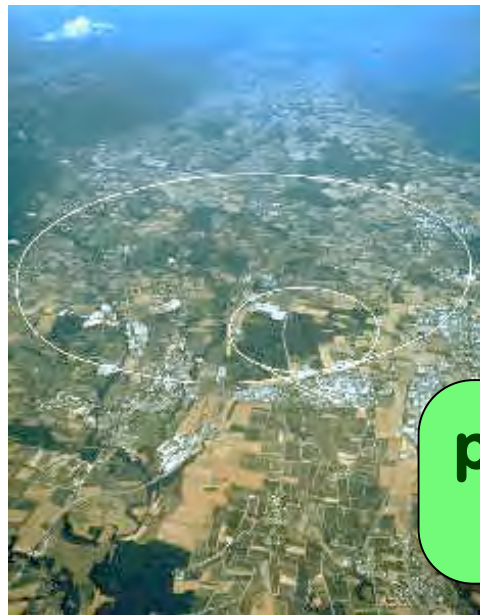
La croisée des chemins...

Étude du
rayonnement
cosmique

1953



astrophysique



physique des
particules

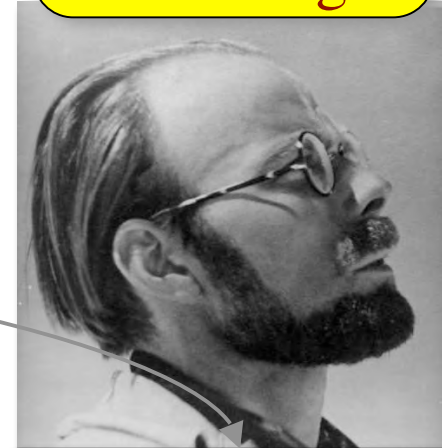
La croisée des chemins...

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

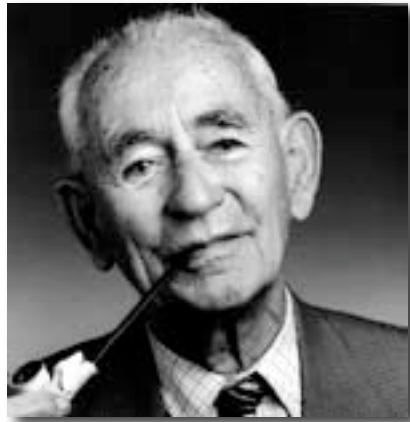
Étude du
rayonnement
cosmique

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
- $4 \text{ CR/cm}^2/\text{s} \Rightarrow 1 \text{ kg/an}$
- Extrêmement importants pour le science, mais toujours incompris !

3 dimensions spectrales : directions, énergies, + nature physique

Observables fondamentales

1

**Spectre
angulaire**



directions d'arrivée

2

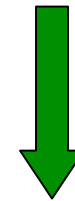
**Spectre de
masse**



composition

3

**Spectre
d'énergie**



flux différentiel

Observables fondamentales

1

**Spectre
angulaire**



directions d'arrivée

2

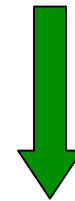
**Spectre de
masse**



composition

3

**Spectre
d'énergie**



flux différentiel

Distribution angulaire

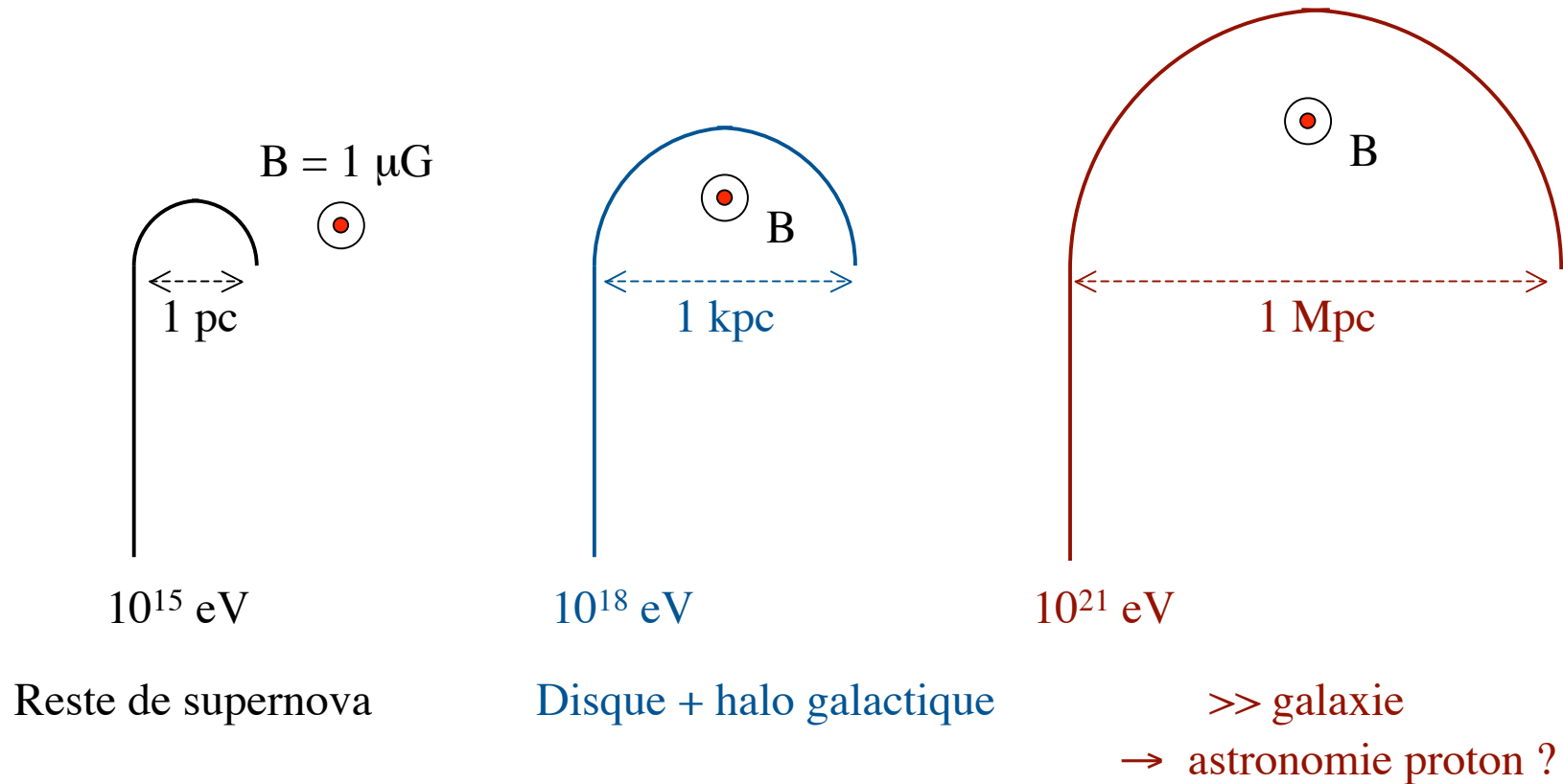
- Isotrope !

(→ aucune information sur les sources)



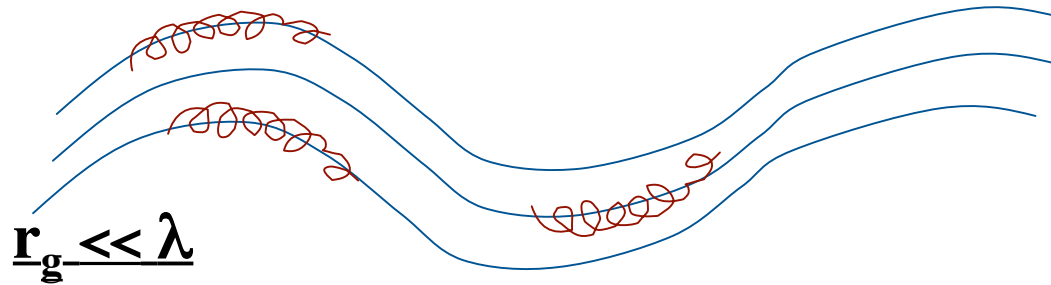
Propagation non rectiligne !

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

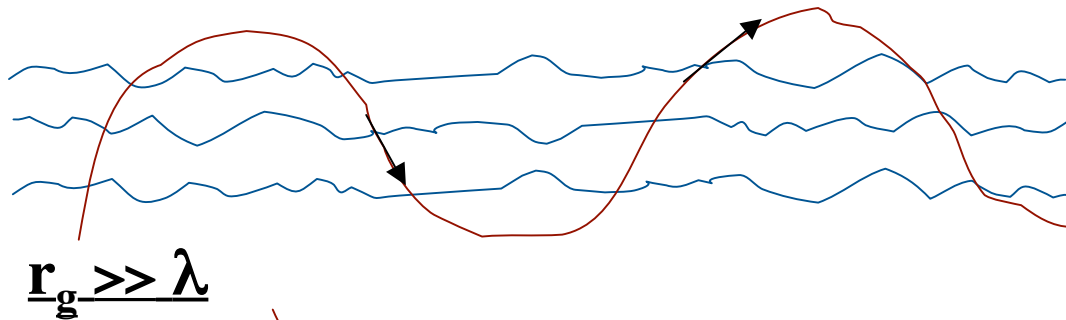


Interaction onde-particule

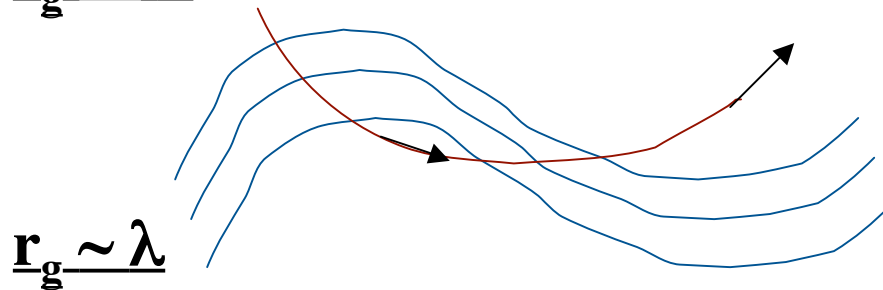
- Inhomogénéités magnétique \approx ligne de champ perturbée



Ajustement du premier invariant adiabatique :
 $p_{\perp}^2 / B \sim \text{const}$



Rien de spécial...



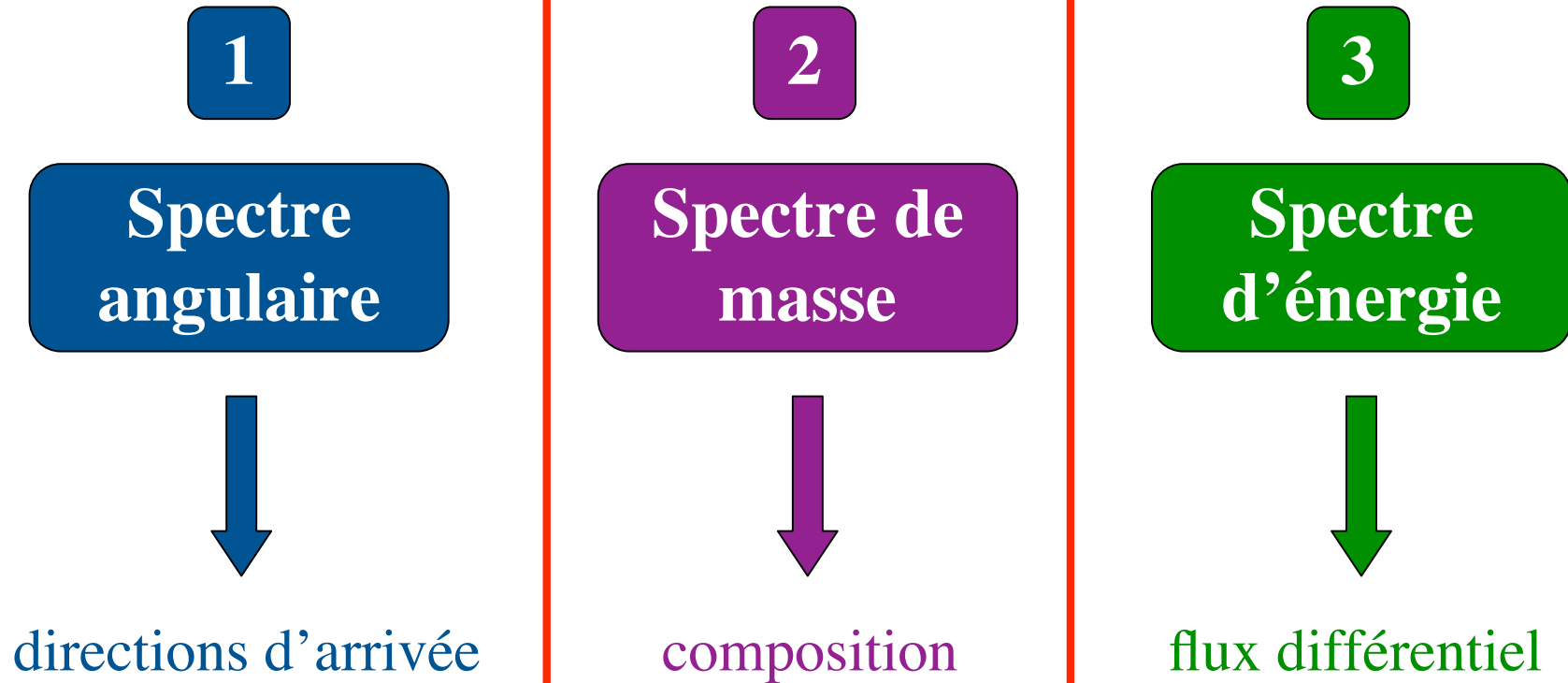
Diffusion du pitch-angle :

$$\Delta\alpha \sim B_1/B_0$$

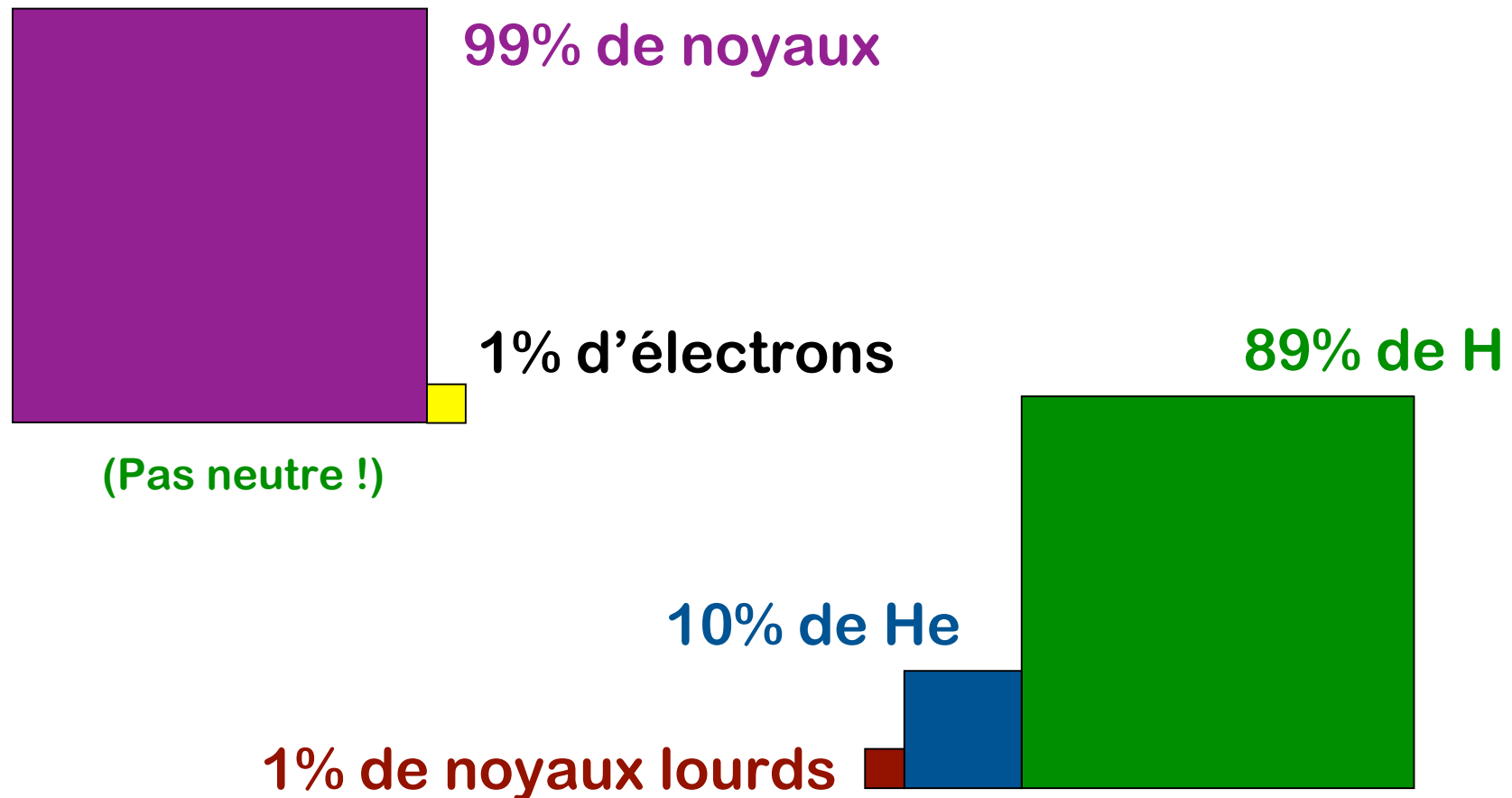
Dérive du centre de guidage :

$$r \sim r_g \Delta\alpha$$

Observables fondamentales

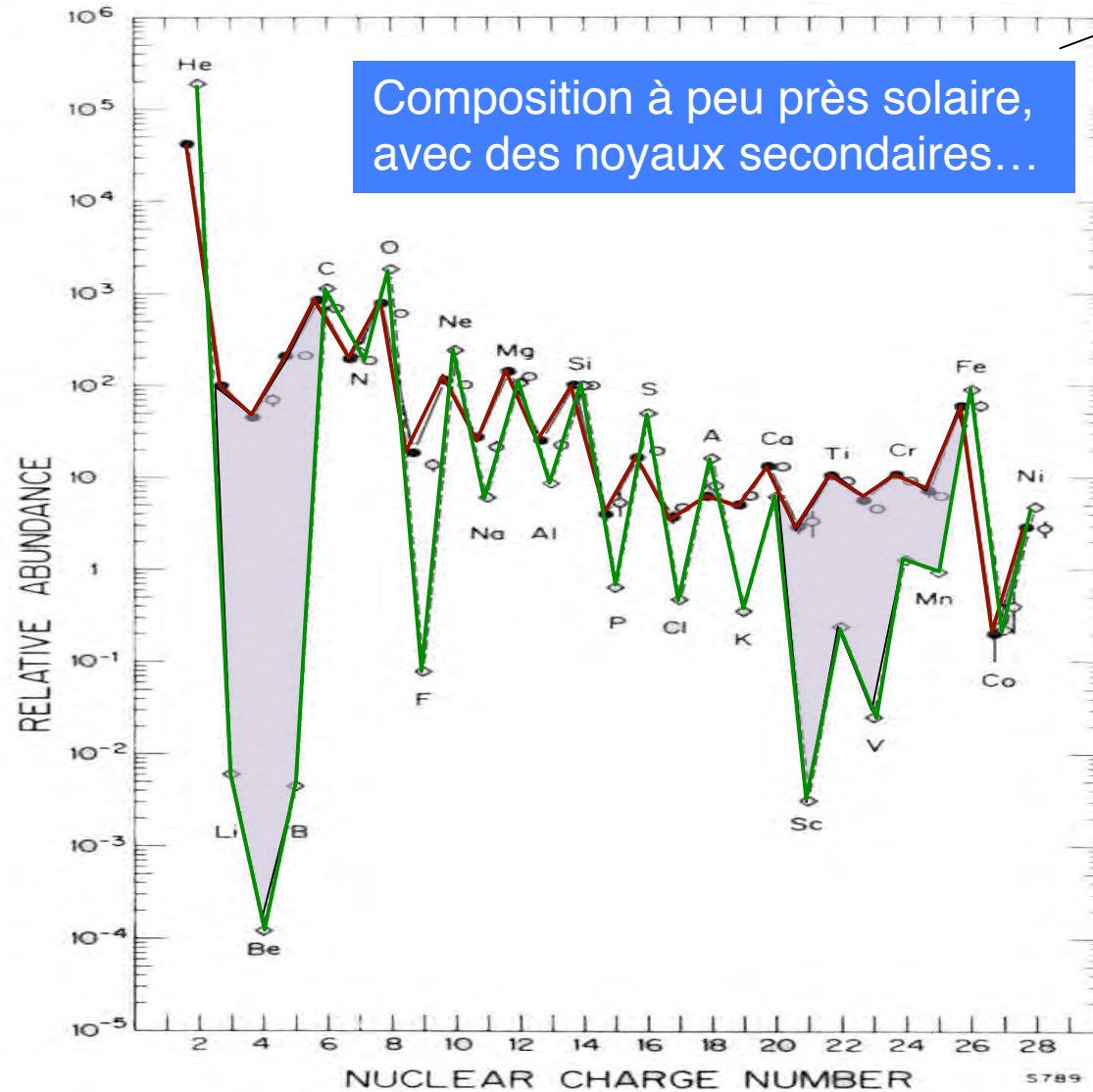


Composition des rayons cosmiques



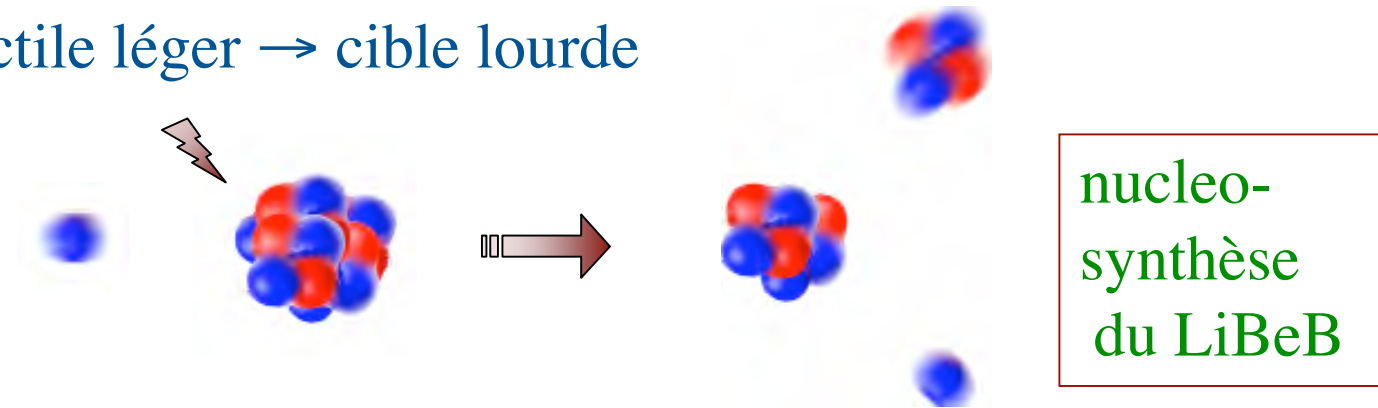
Flux : 4 RC/cm²/s \Rightarrow 1 kg/an \ll 40 000 tonnes/an (météorites)

CR vs système solaire

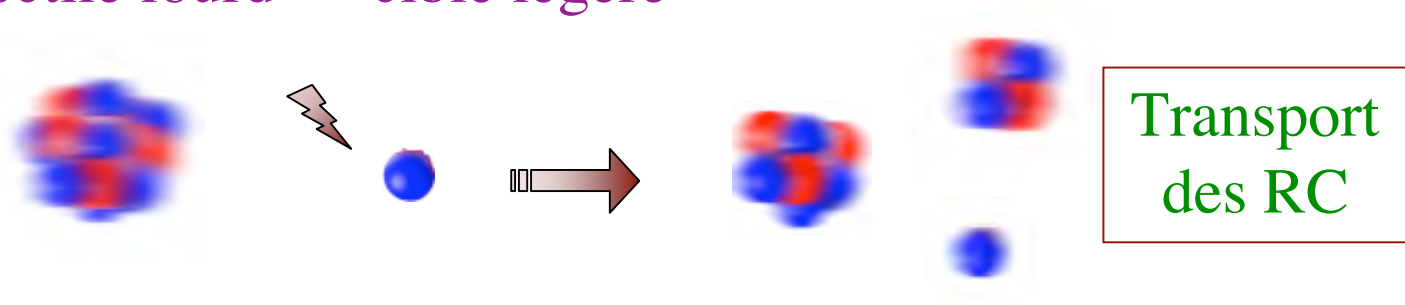


Spallation induite par les RC

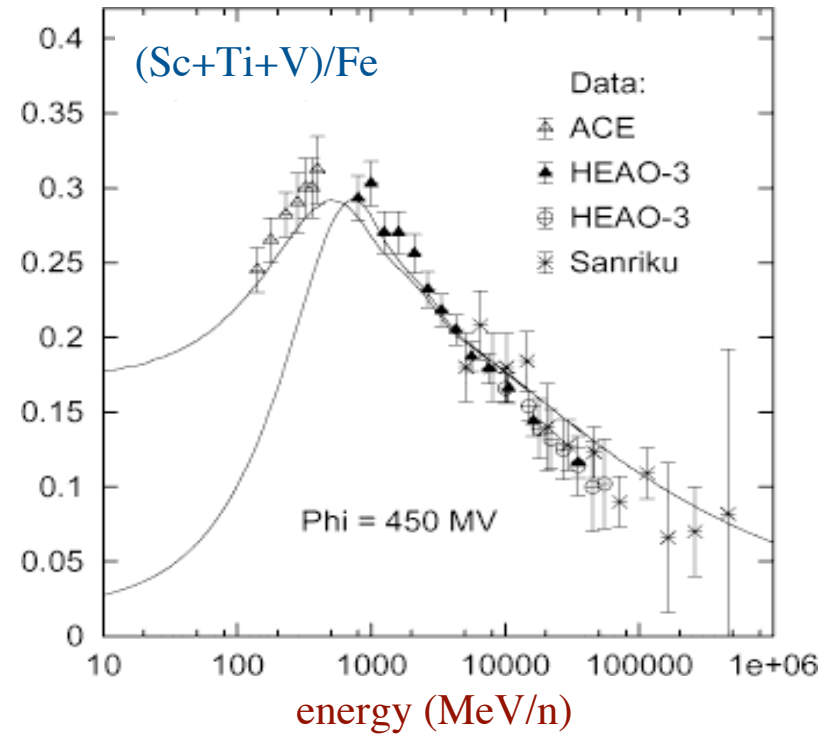
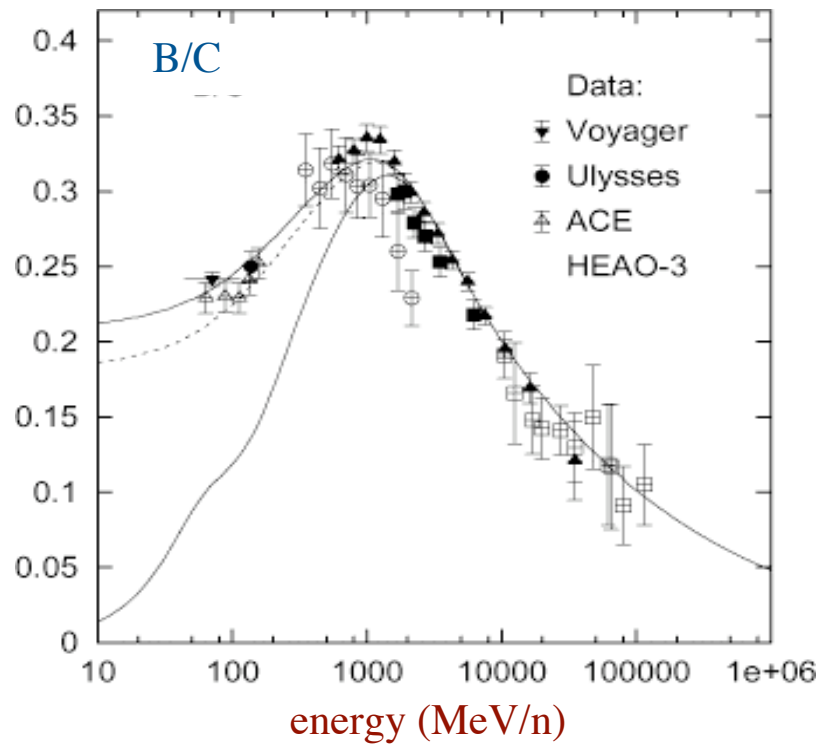
- Spallation directe :
projectile léger \rightarrow cible lourde



- Spallation inverse :
projectile lourd \rightarrow cible légère



La composition dépend de l'énergie

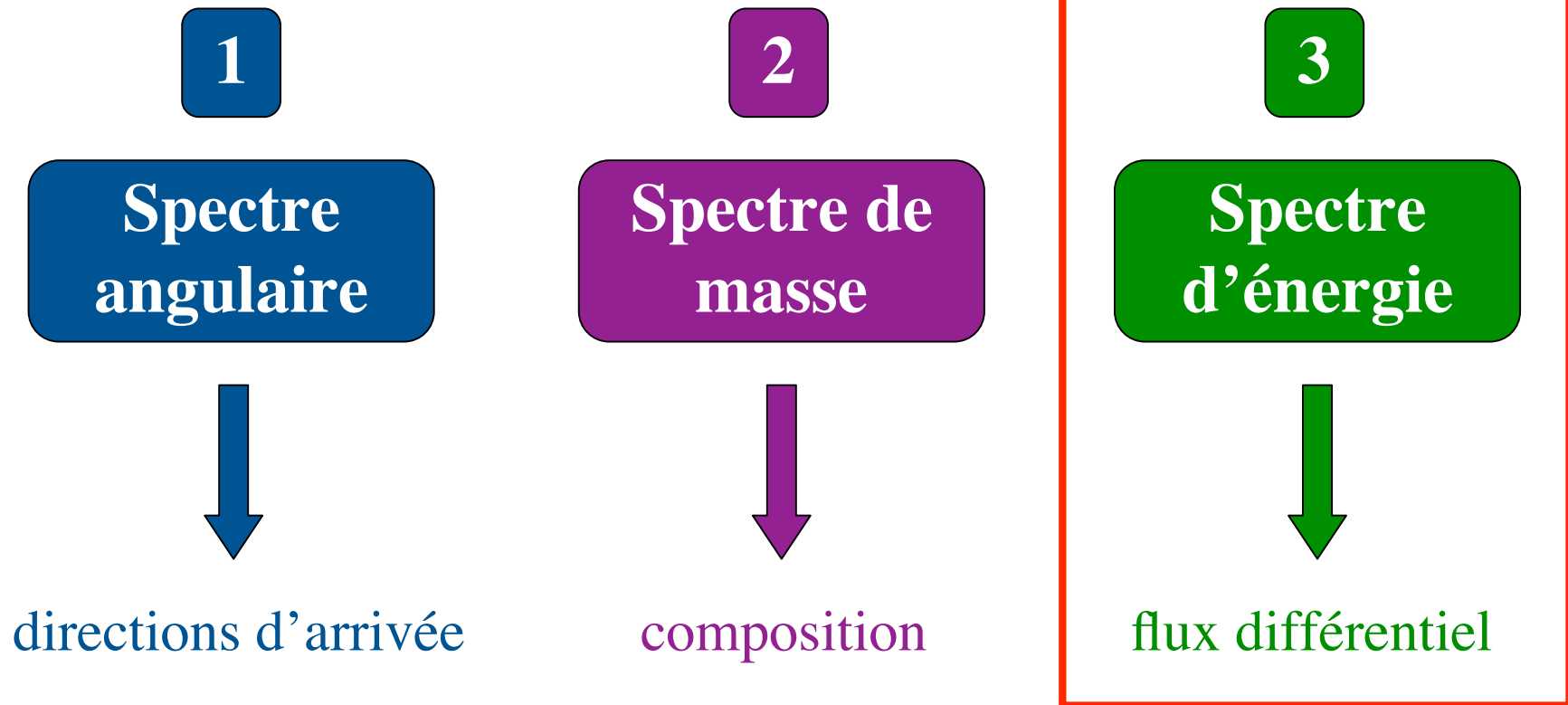


[Strong & Moskalenko (2001)]

Composition à haute énergie ?

- Très controversée
- Essentiellement inconnue au-delà de 10^{16} eV

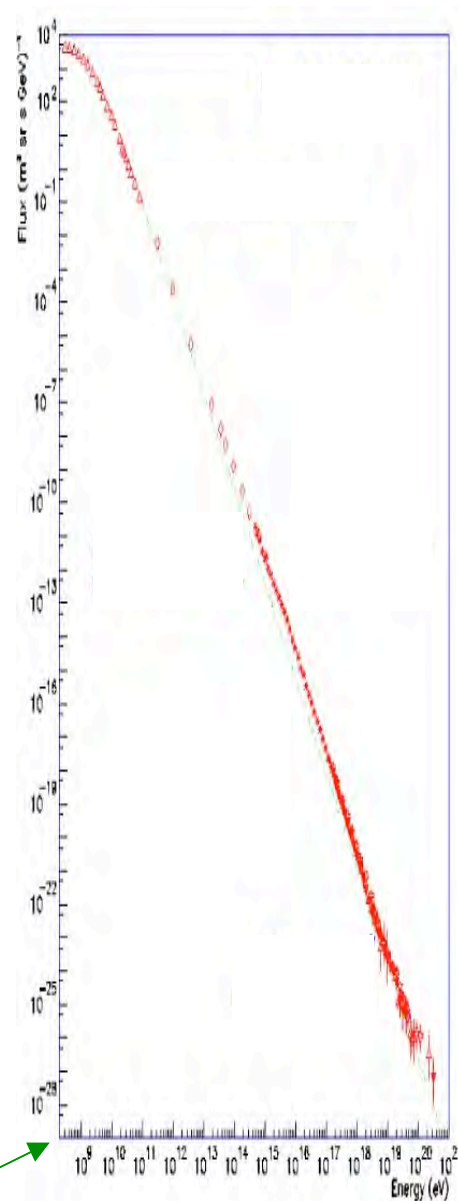
Observables fondamentales



Le spectre d'énergie des rayons cosmiques

Une des sept merveilles du monde physique !

Le spectre d'énergie des RC



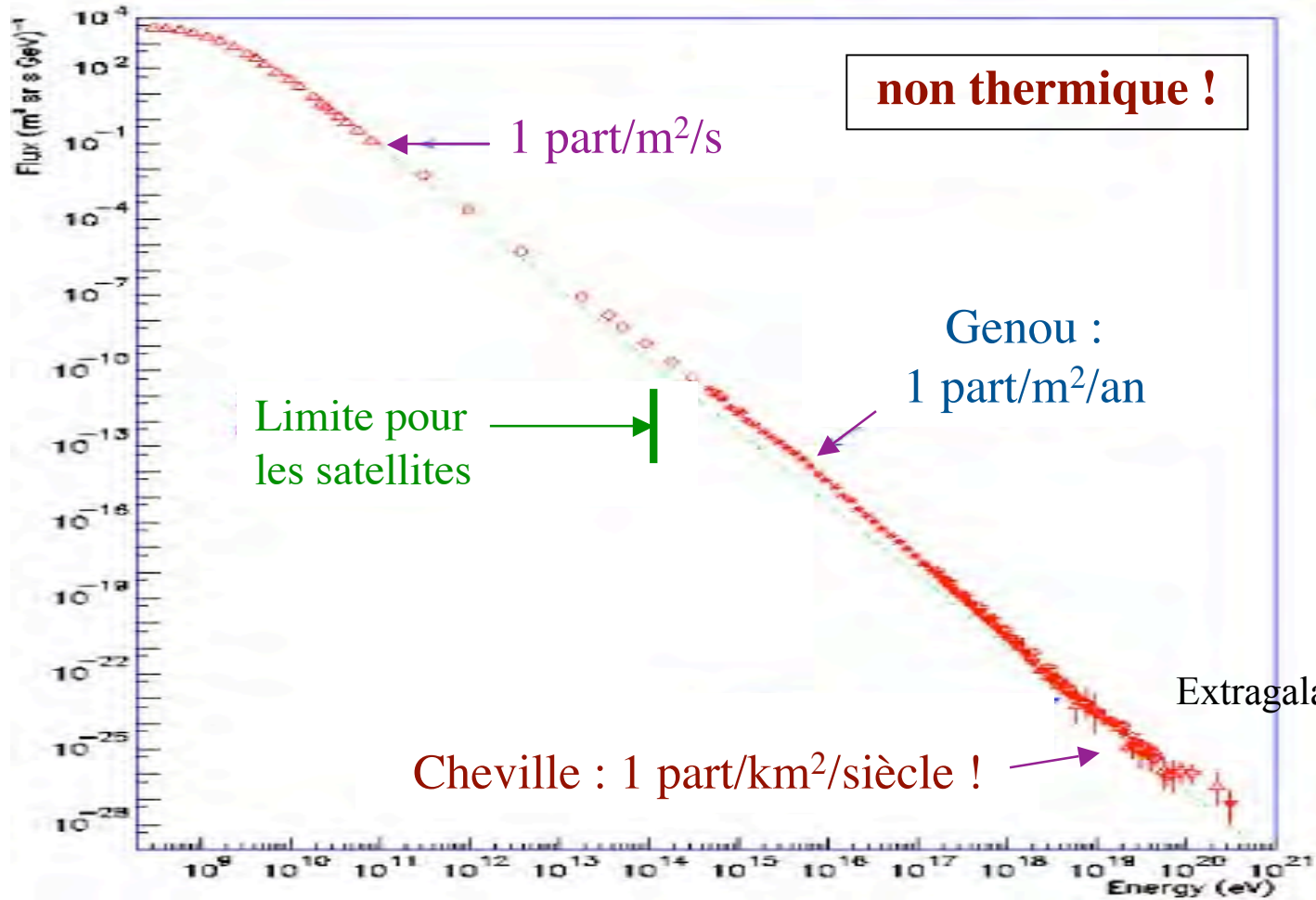
100 MeV

10²¹ eV

Spectre d'énergie

de 1 cheveu à 10 milliards d'années lumière !

32 ordres de grandeur !



12 ordres de grandeur !

Laboratoire de Jungfraujoch (3500 m)



Plateau Rosa (3400 m)



Chacaltaya (Bolivie, 5300 m)



Chacaltaya (Bolivie, 5300 m)



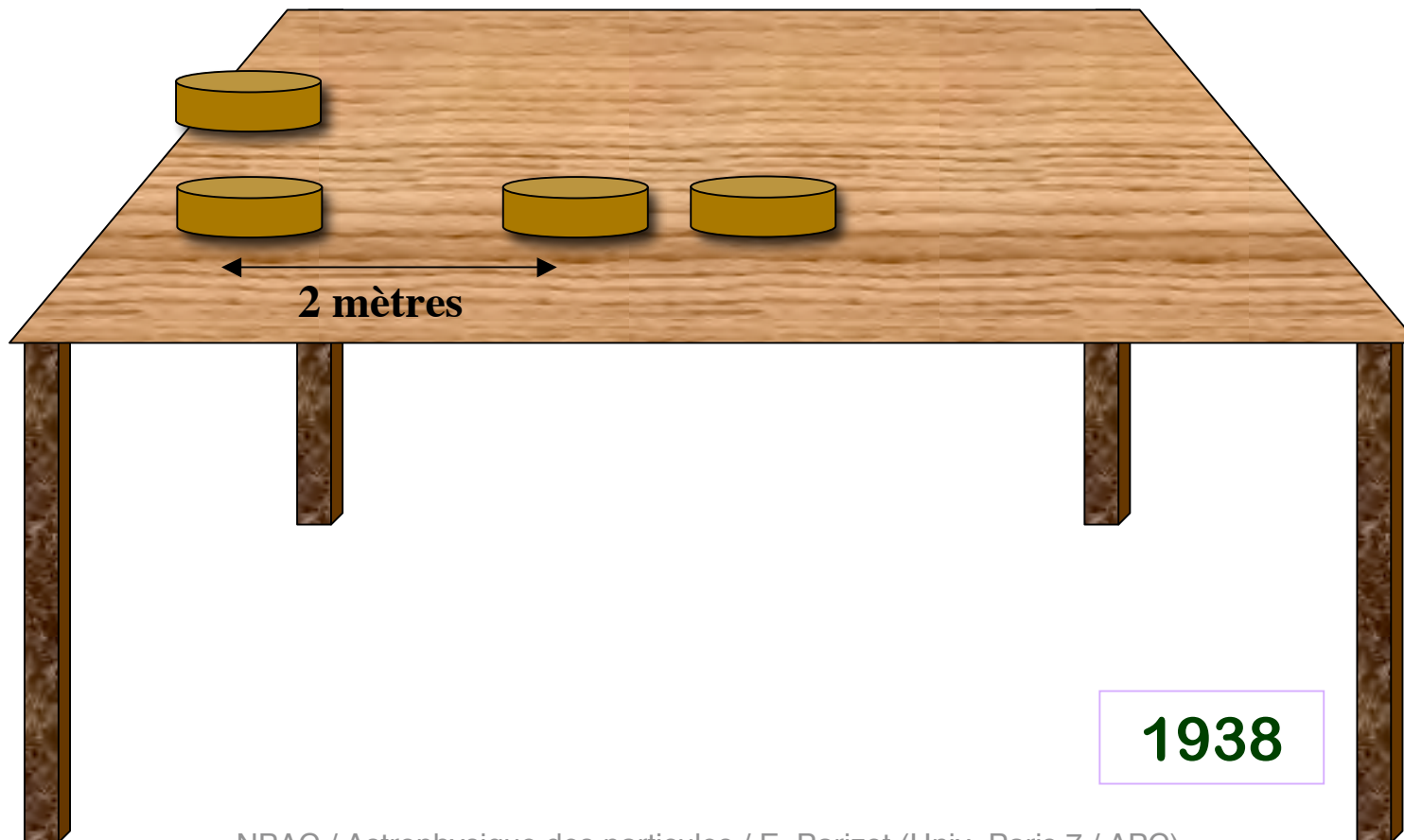
Pierre Auger et les gerbes atmosphériques

détecteur de
rayons
cosmiques

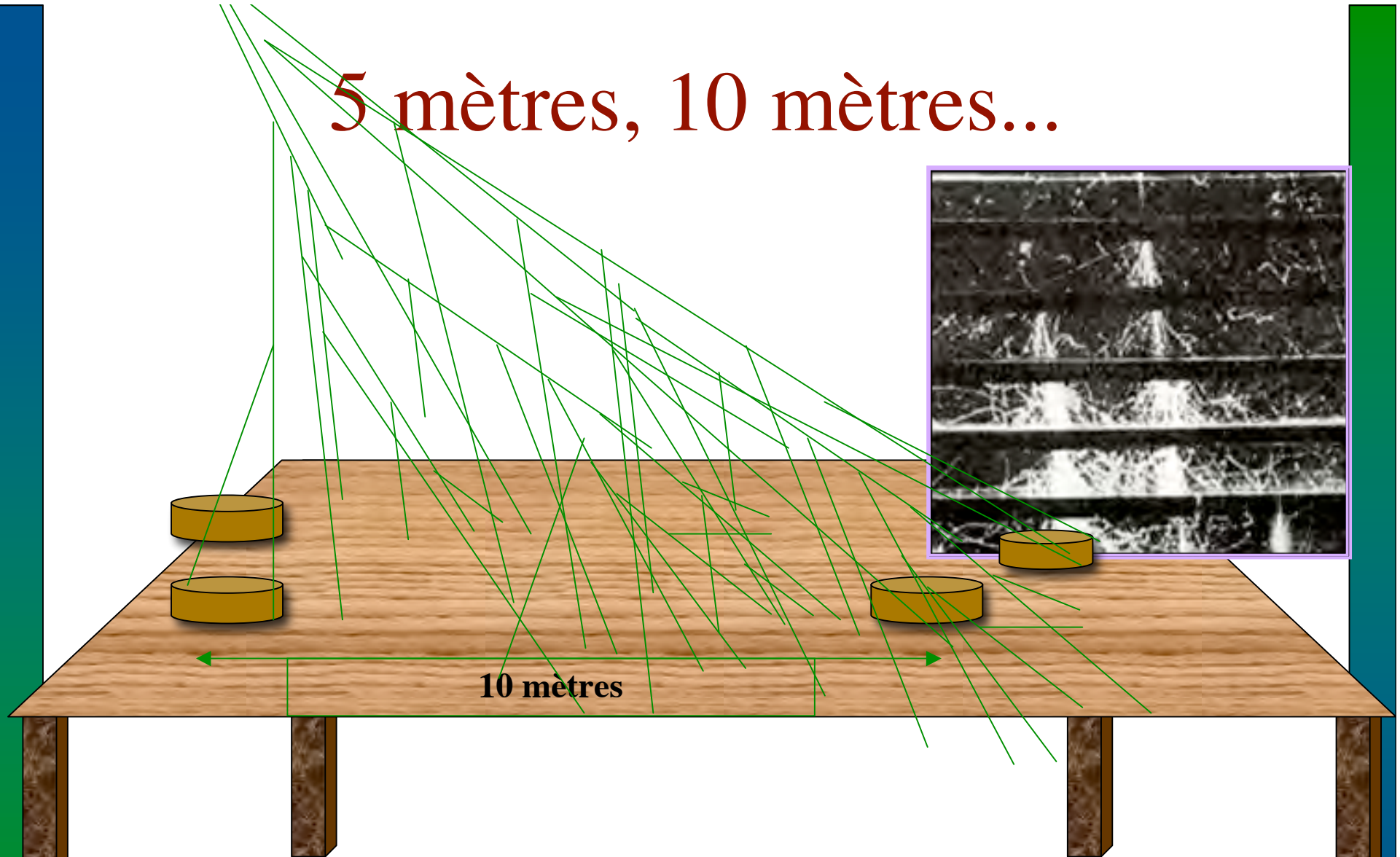


1938

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^2 , 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 peut-on aller ?

5 mètres → 40 minutes en moyenne

20 mètres → 1h15 en moyenne

...

1 km → des années !!!

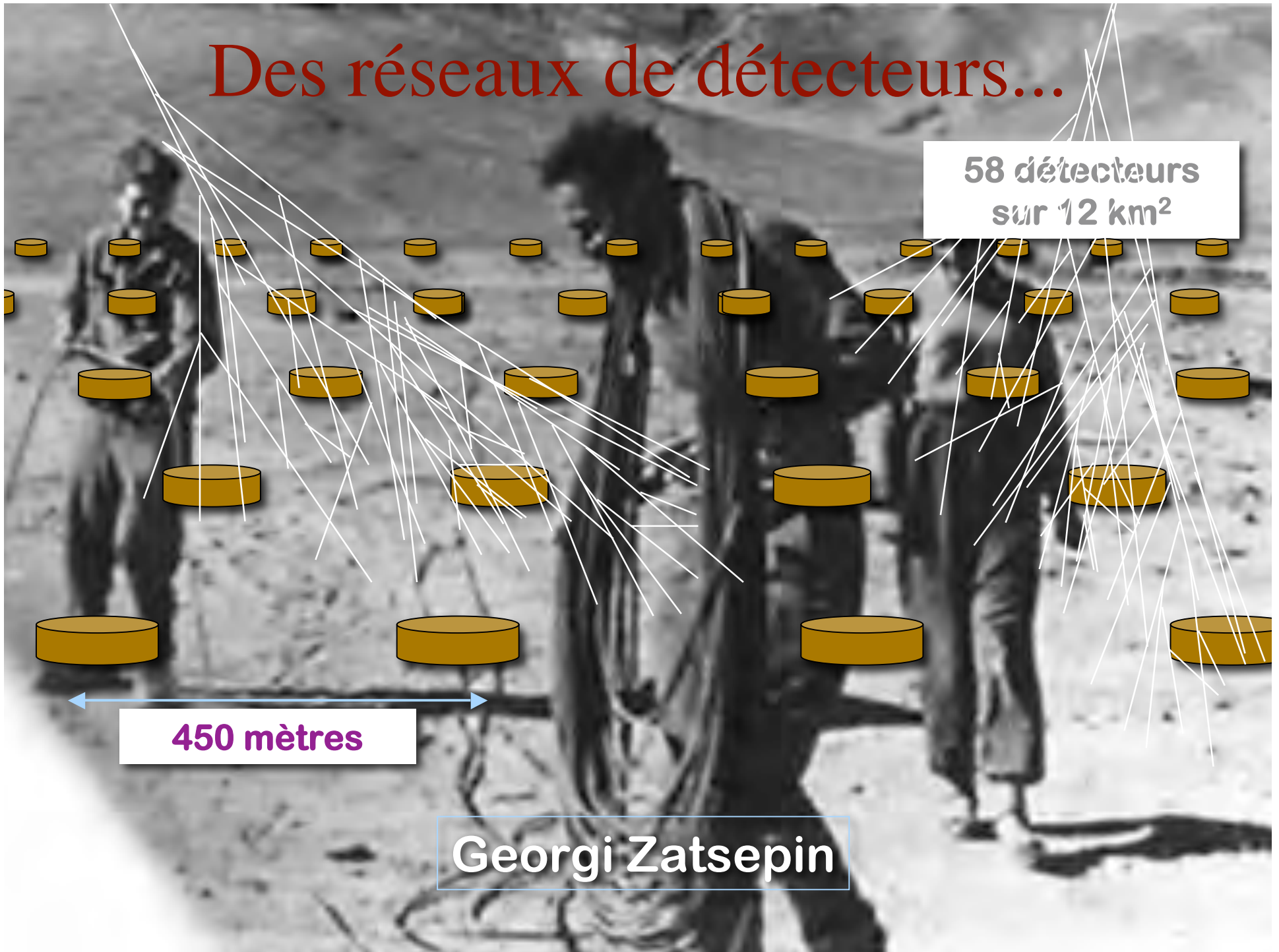


Des réseaux de détecteurs...

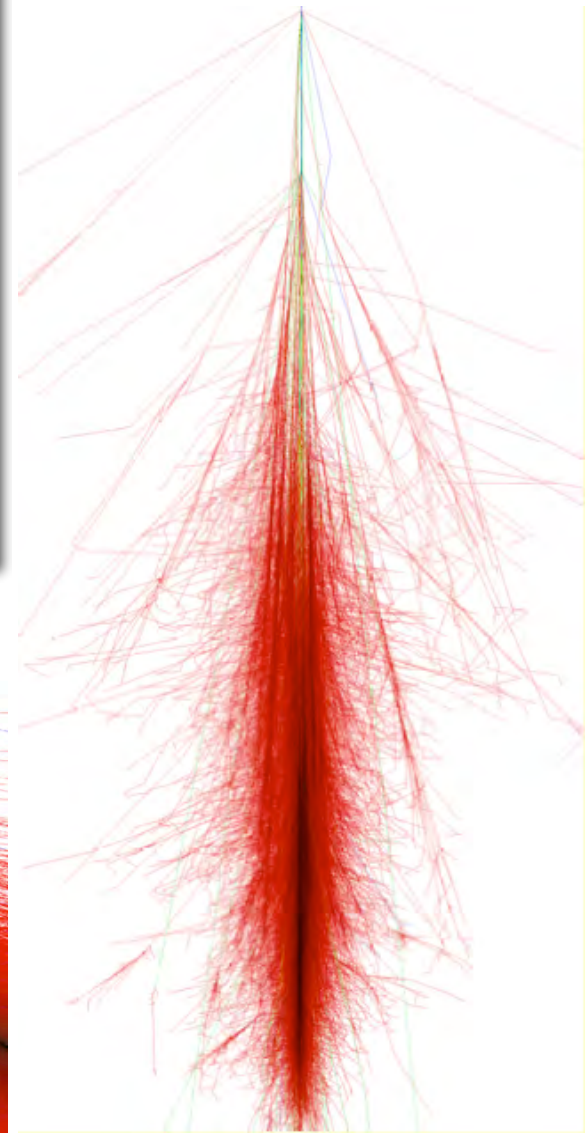
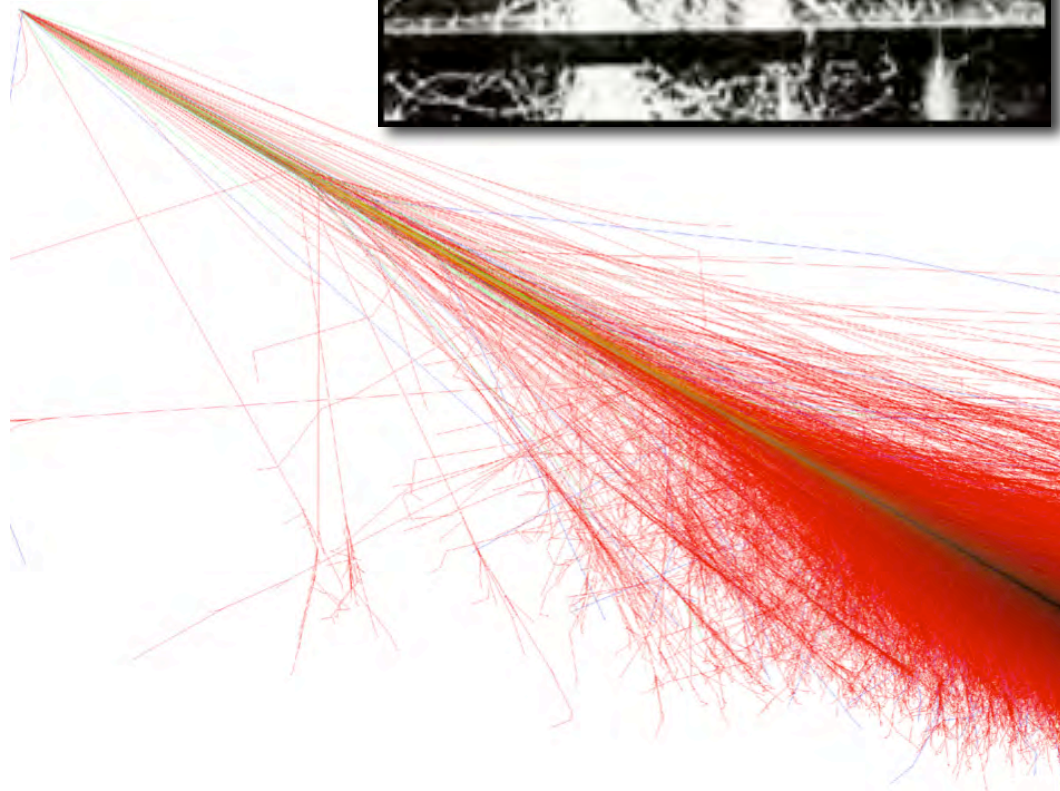
58 détecteurs
sur 12 km²

450 mètres

Georgi Zatsepin



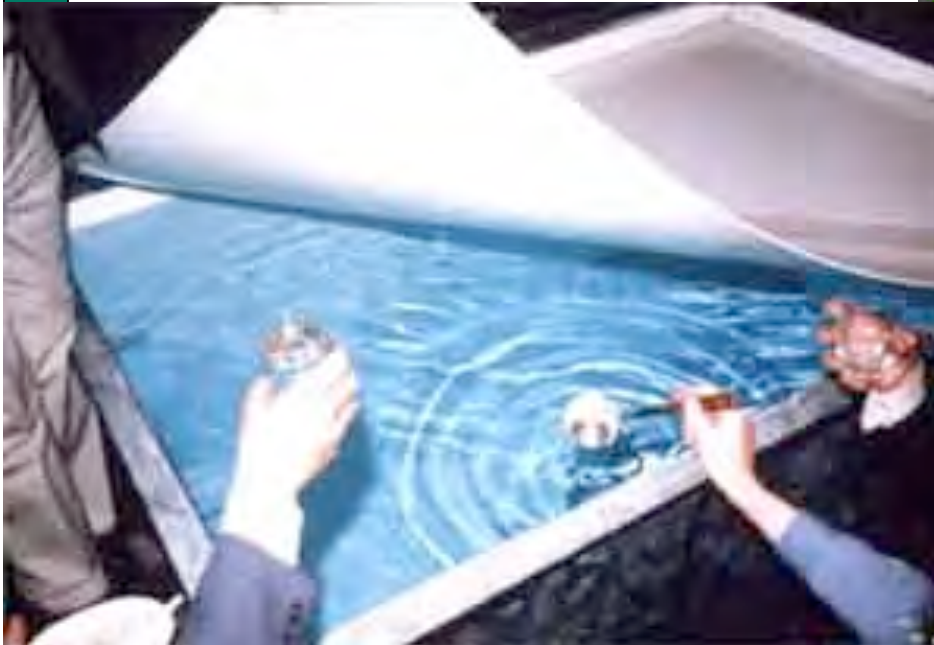
Gerbes atmosphériques...



Haverah Park (UK)

Réseau de 12 km² de détecteurs constitués de cuves d'eau à effet Cherenkov

- En opération 20 ans jusqu'à 1987
- Enregistre quelque 1000 gerbes atmosphériques
- Jusqu'à 10²⁰ 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 !
-
- 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 3.2×10^{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



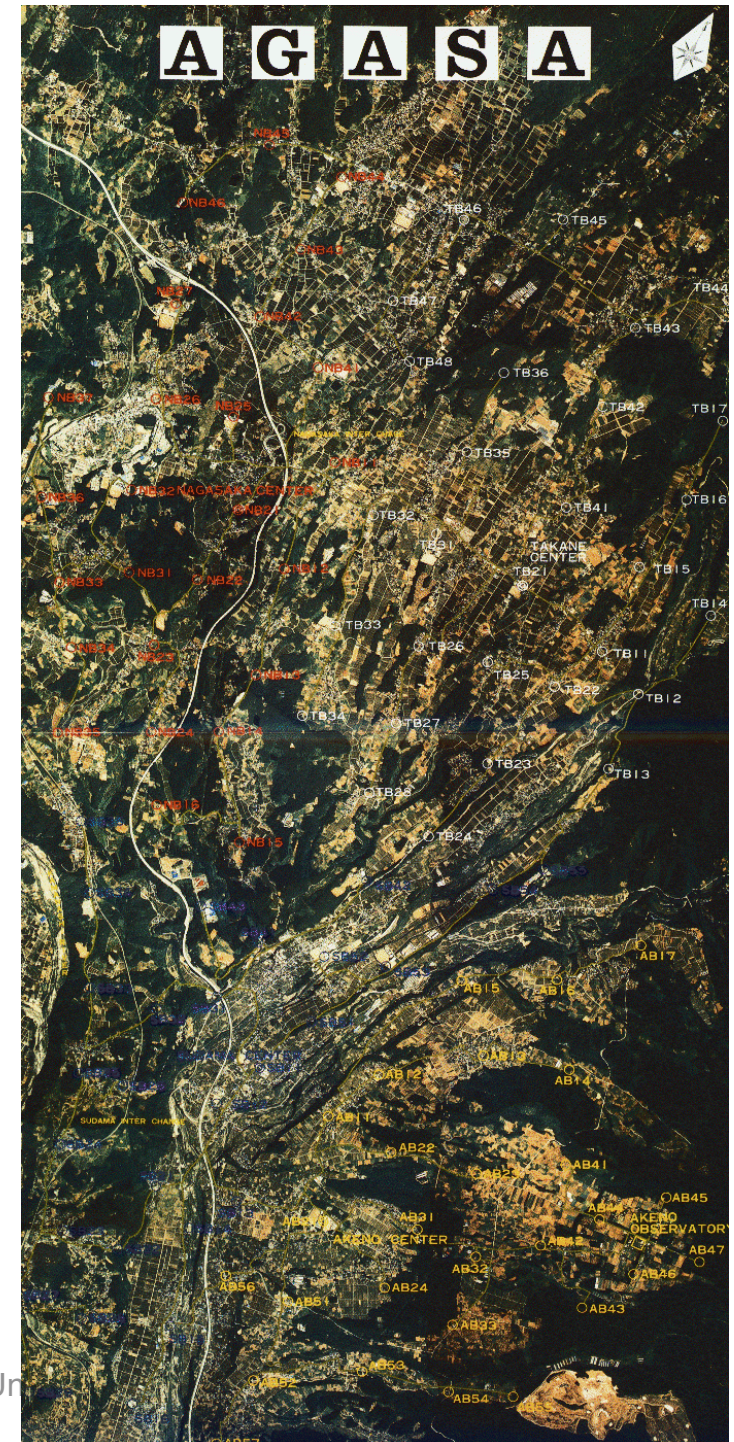
- 42 Miroirs
 - 360 deg en azimuth
 - 3-33 deg en élévation
- FADC DAQ
- Observation depuis october 1999

AGASA

Akeno Giant Air Shower Array

100 km²

technique des scintillateurs

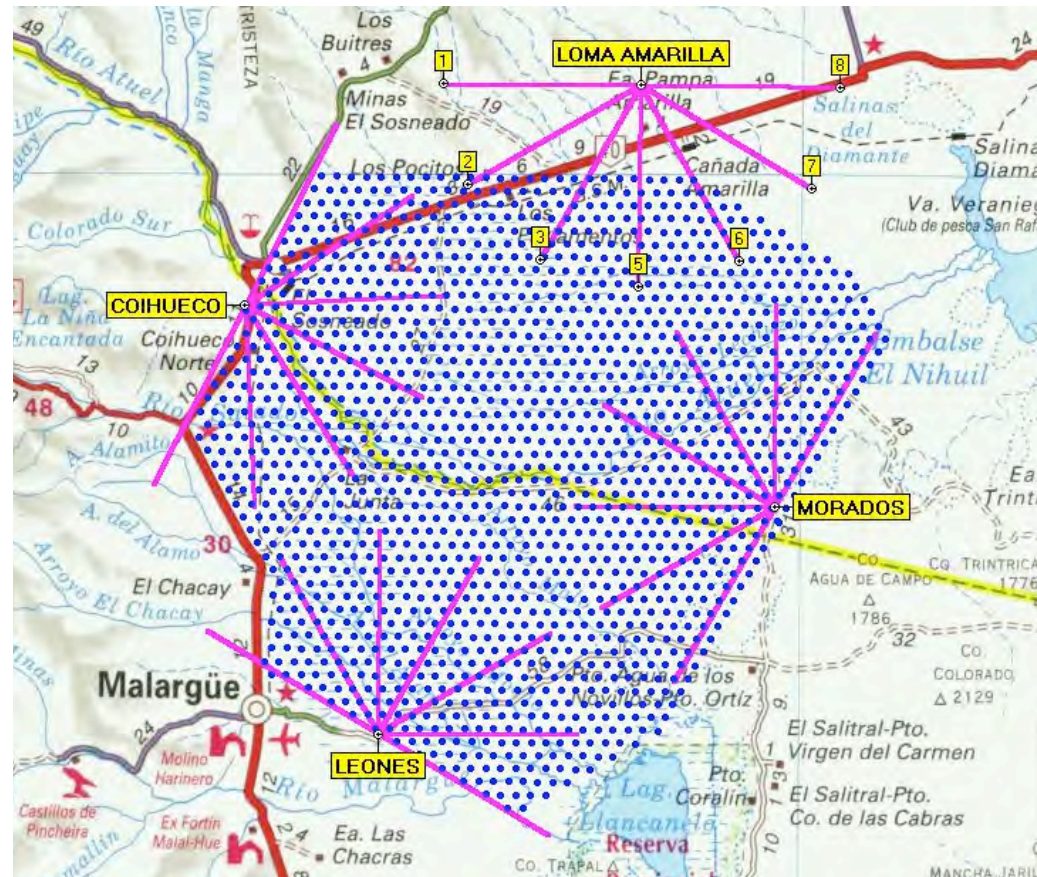
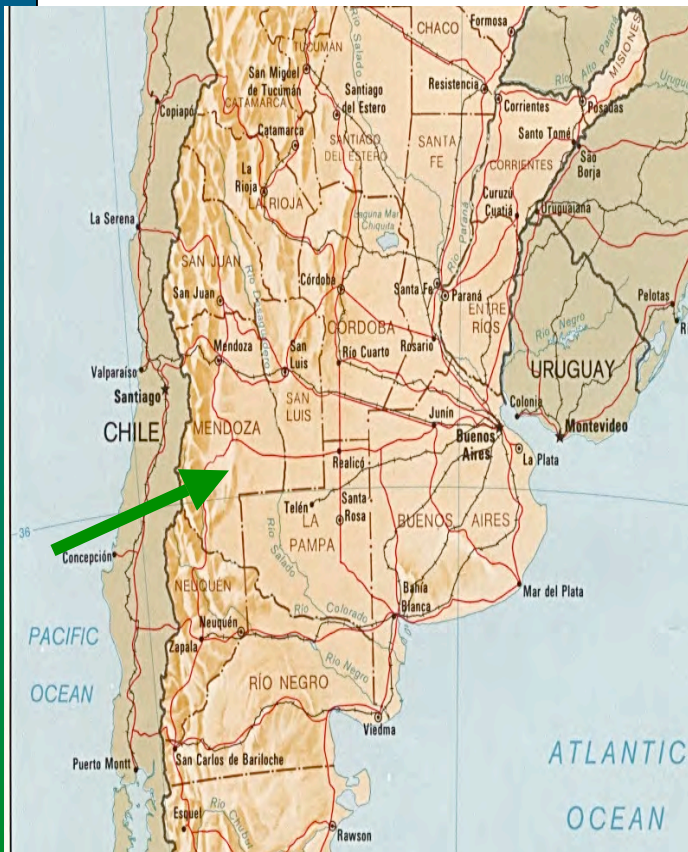


L'Observatoire Pierre Auger



Plan de l'Observatoire

Argentina



Réseau de surface

1600 stations

1.5 km entre voisines

3000 km²

Détecteurs de fluorescence

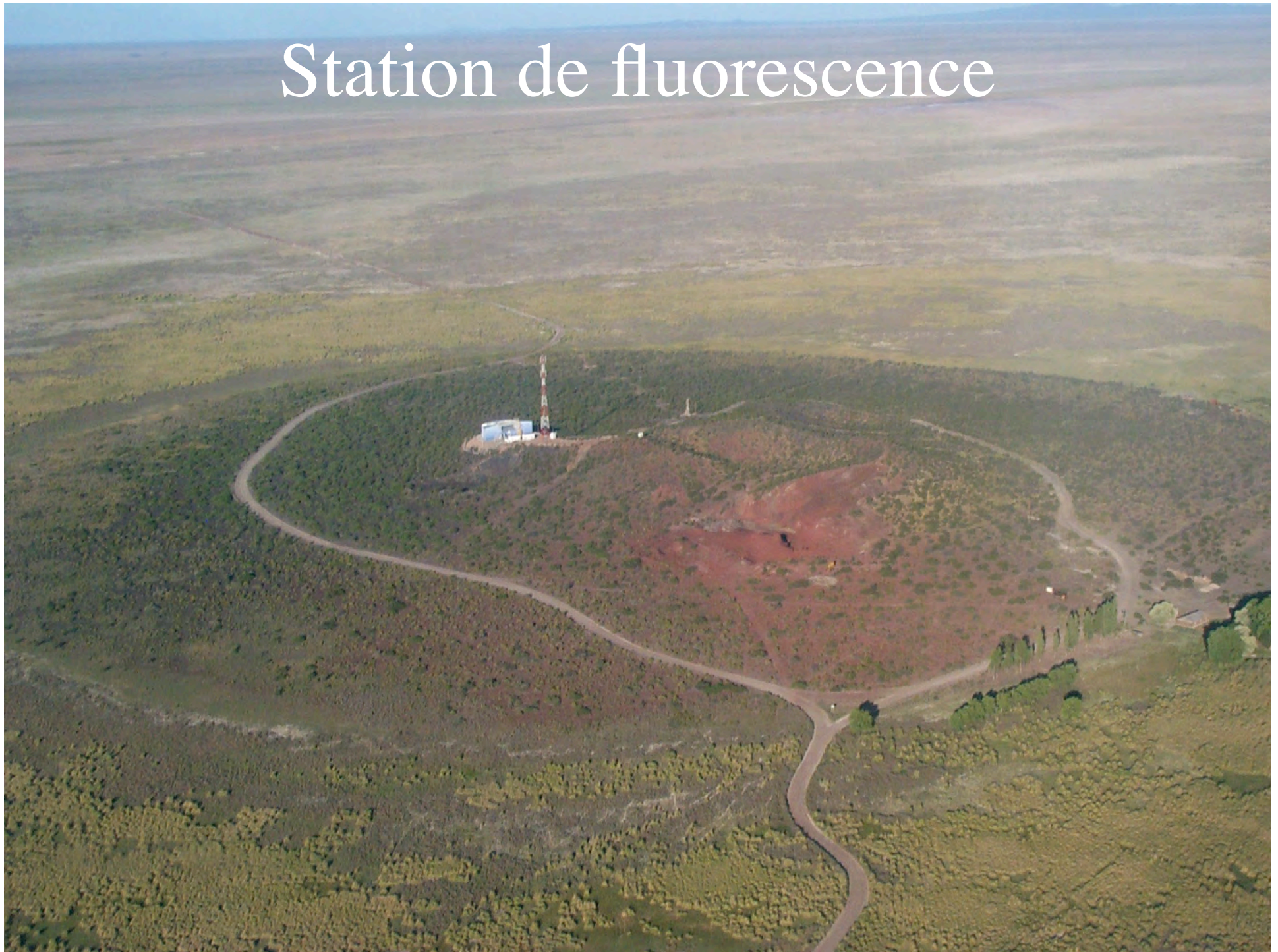
4 bâtiments

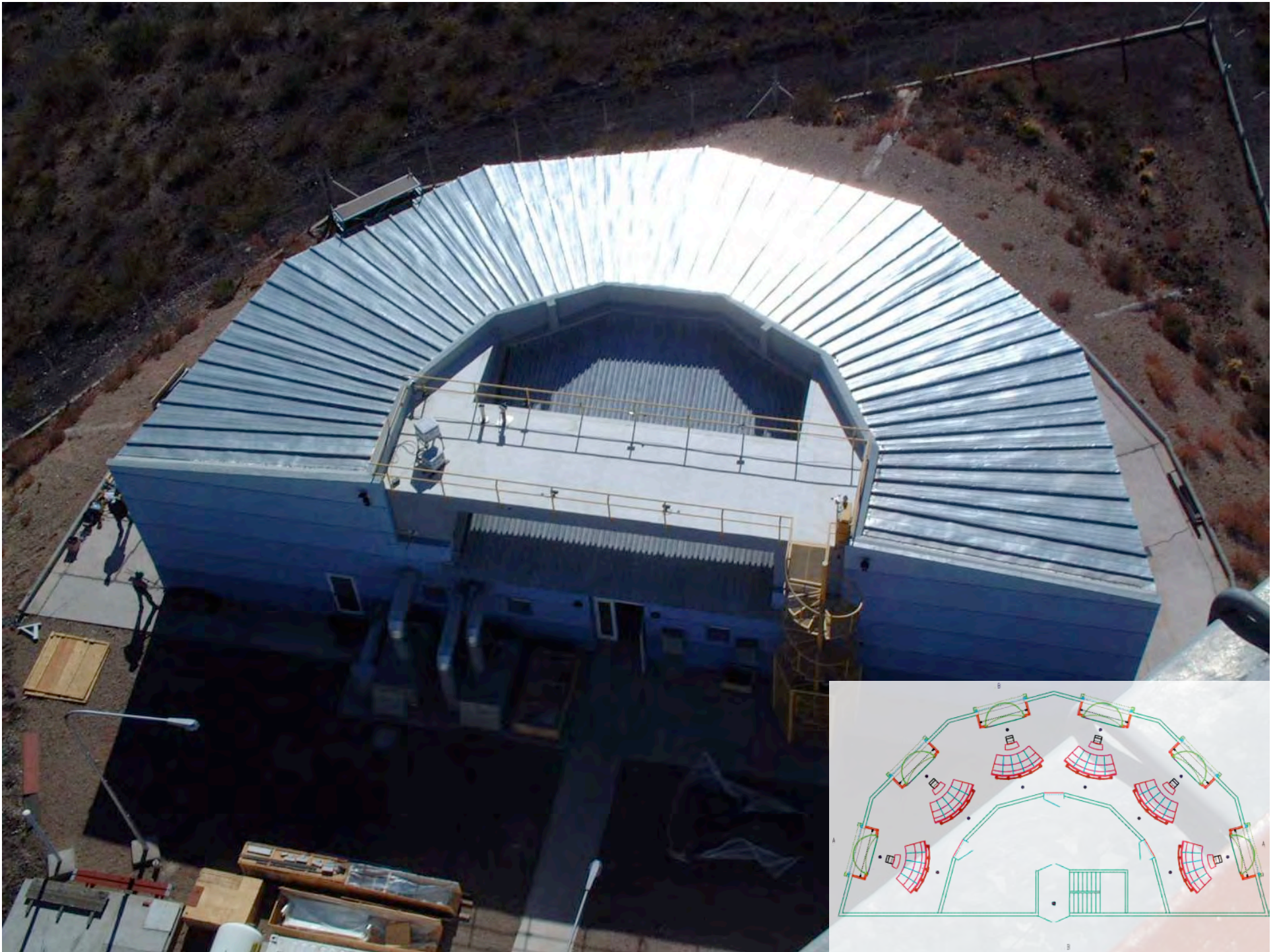
6 télescopes par bâtiment

24 télescopes au total

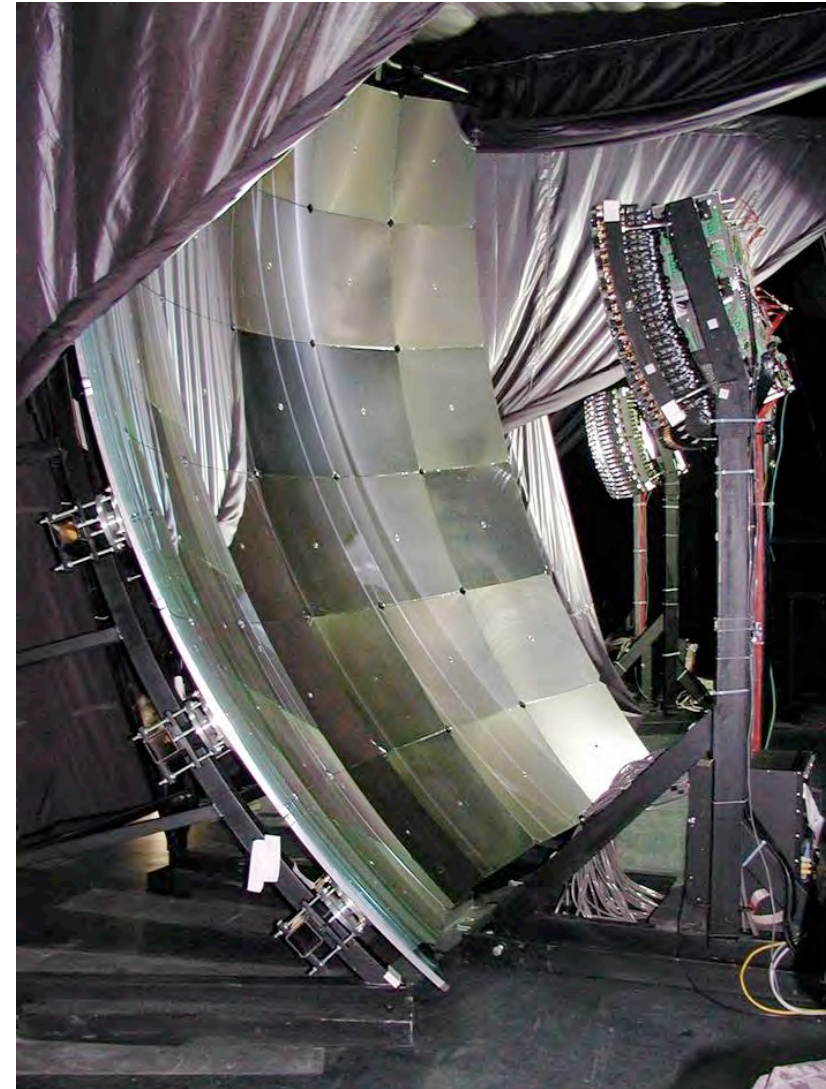
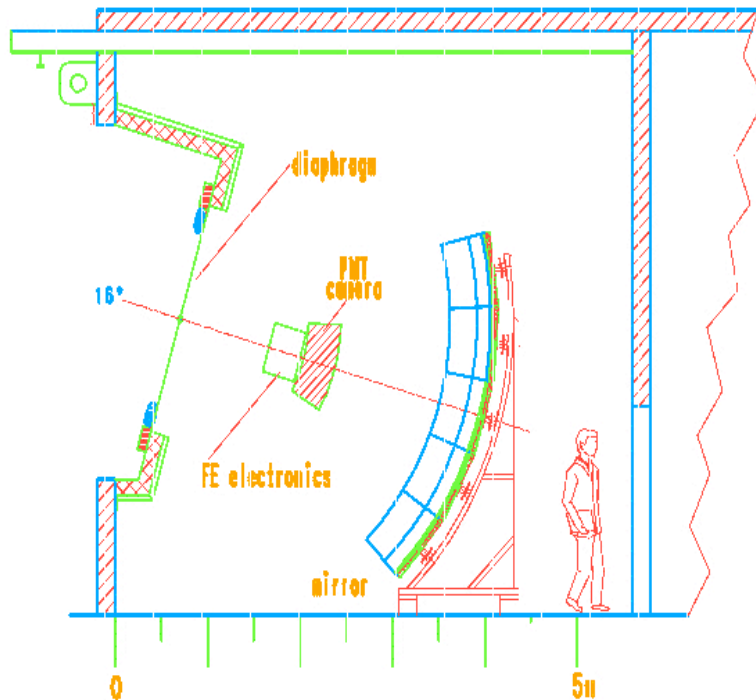
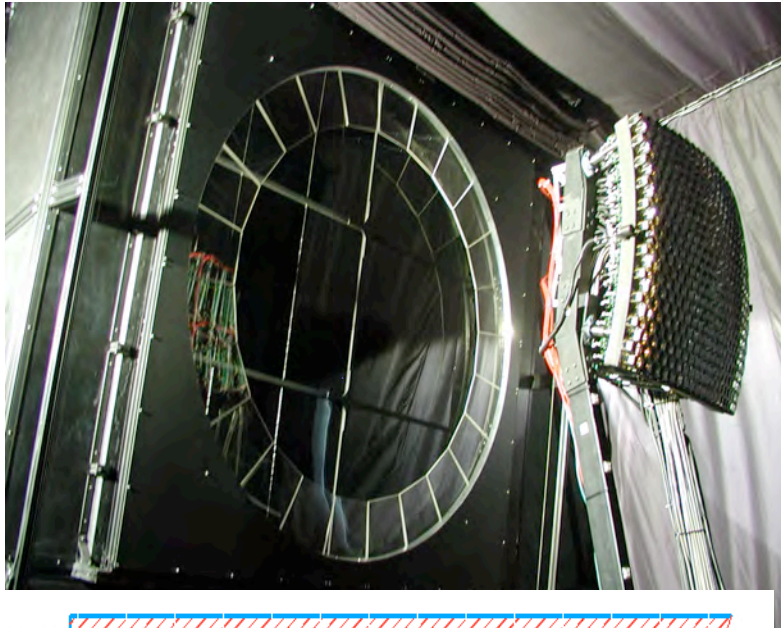


Station de fluorescence





Un des $6 \times 4 = 24$ télescopes



Miroir fragmenté: 3.4 mètres diam.

es / E. Parizot (Univ. Paris 7) / APC **caméra à 440 pixels**

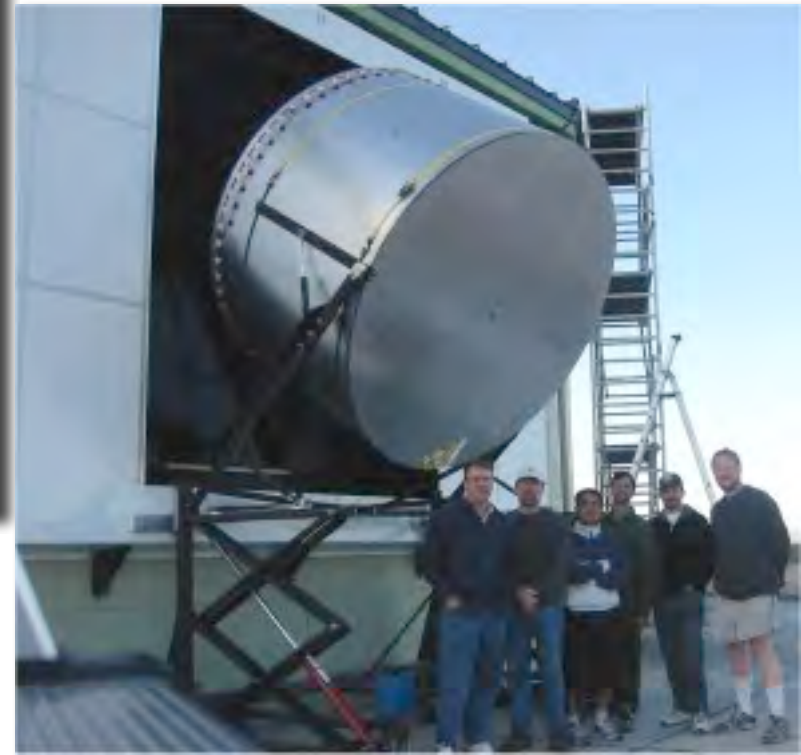
2007-2008

Monitoring de l'atmosphère et calibration

“Central Laser Facility”



Calibration absolue

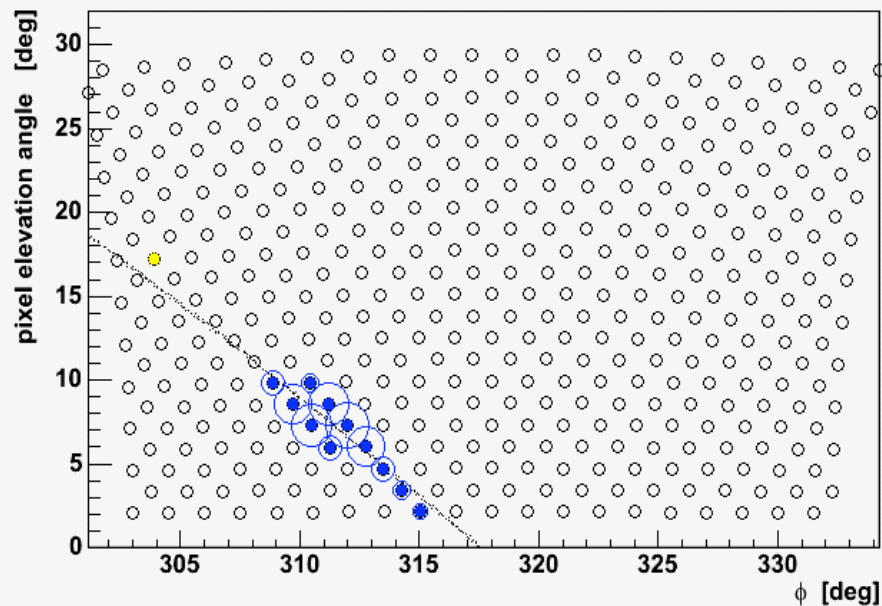


Tambour pour illumination
uniforme des caméras
(calibration “end to end”)

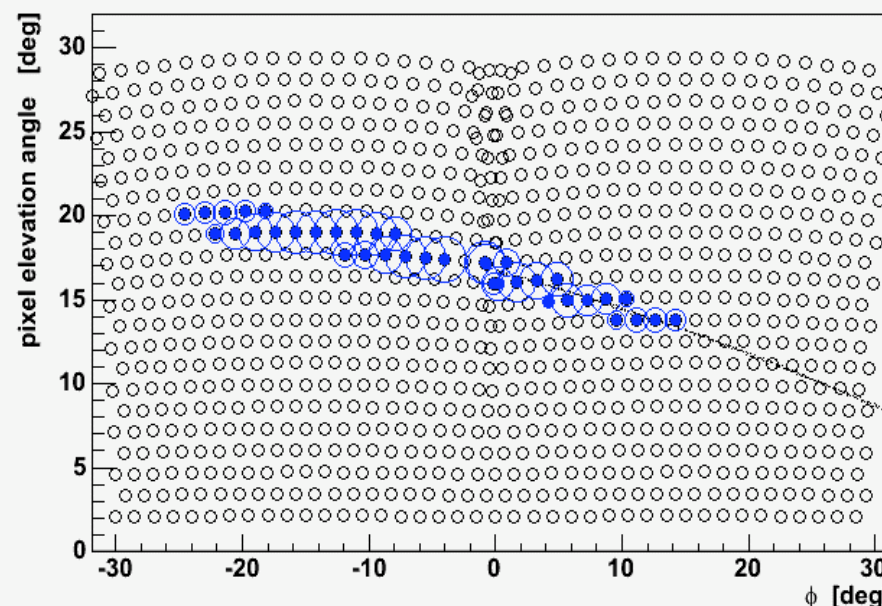


Lidar (pour chaque œil
à fluorescence)

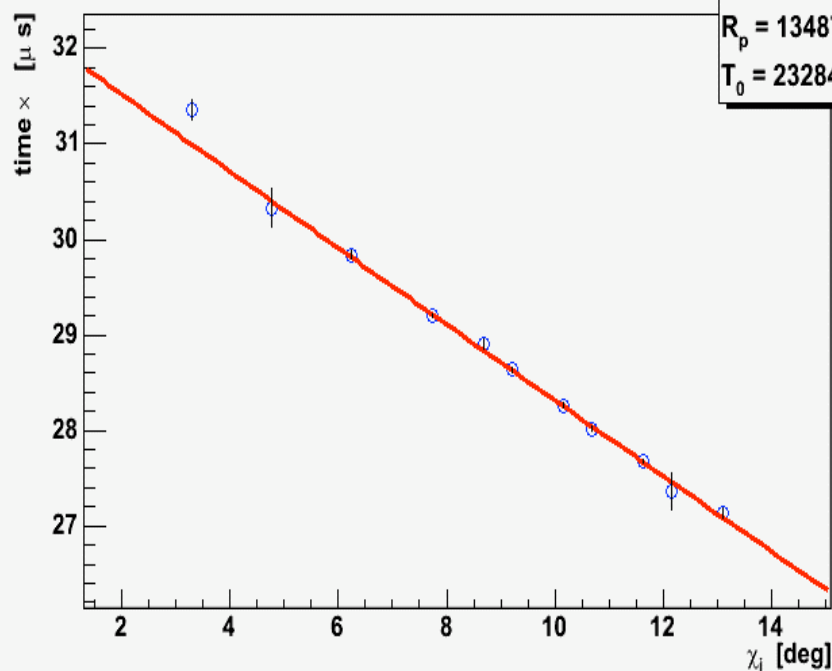
SDP Id 850019 Run 469 Event 197 Eye Id: 4



SDP Id 850019 Run 1 Event 687 Eye Id: 1

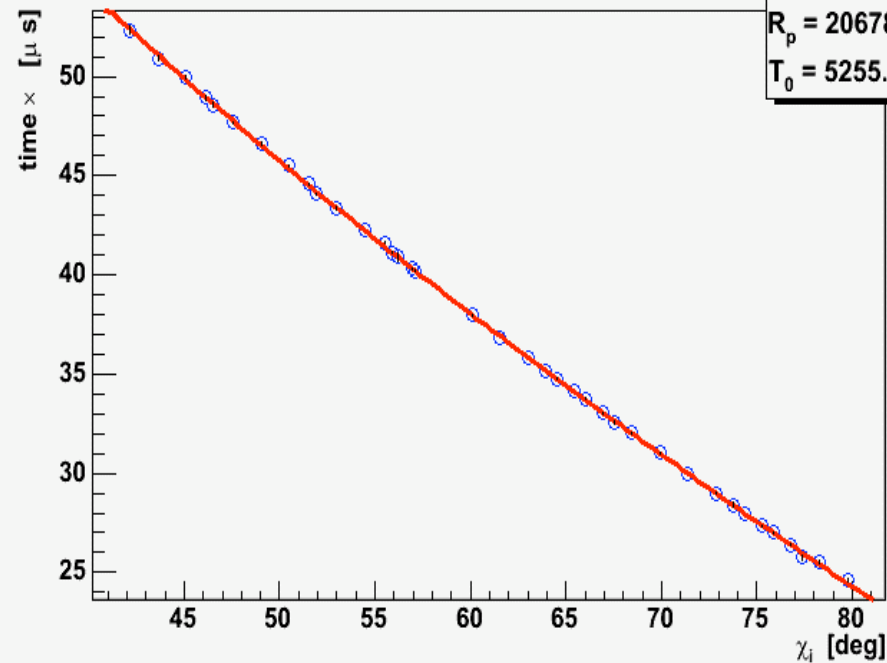


TimeFit Id 850019 Run 469 Event 197 Eye Id: 4



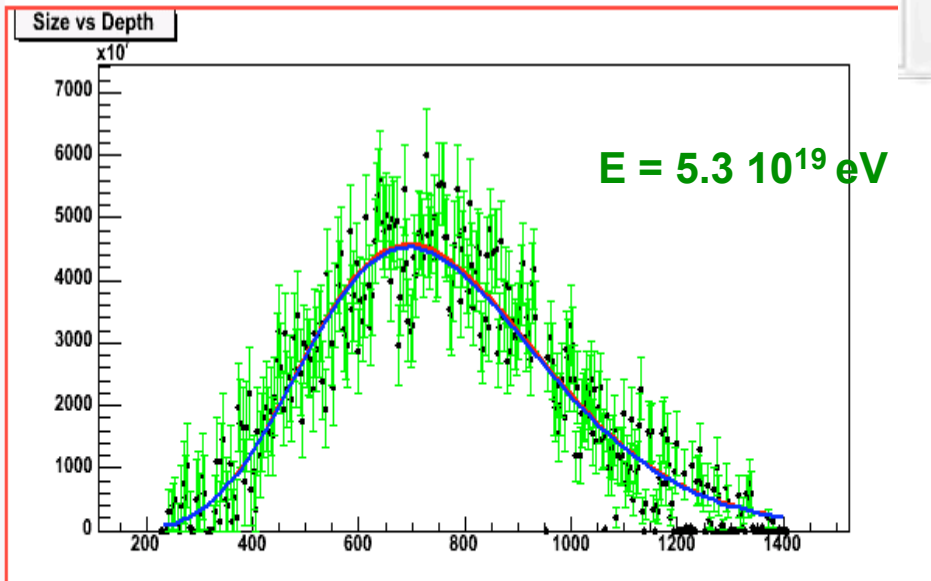
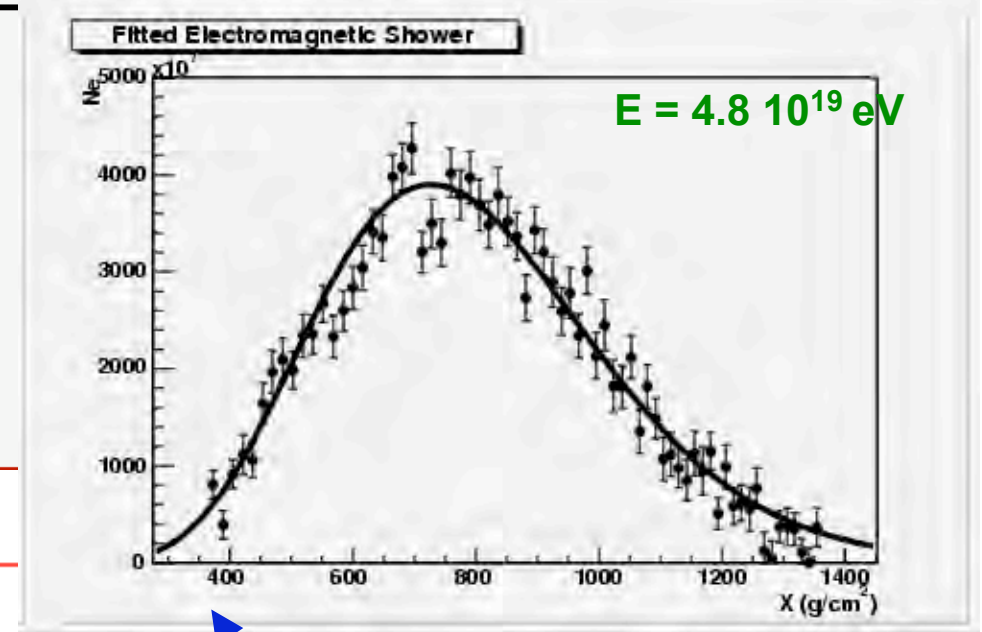
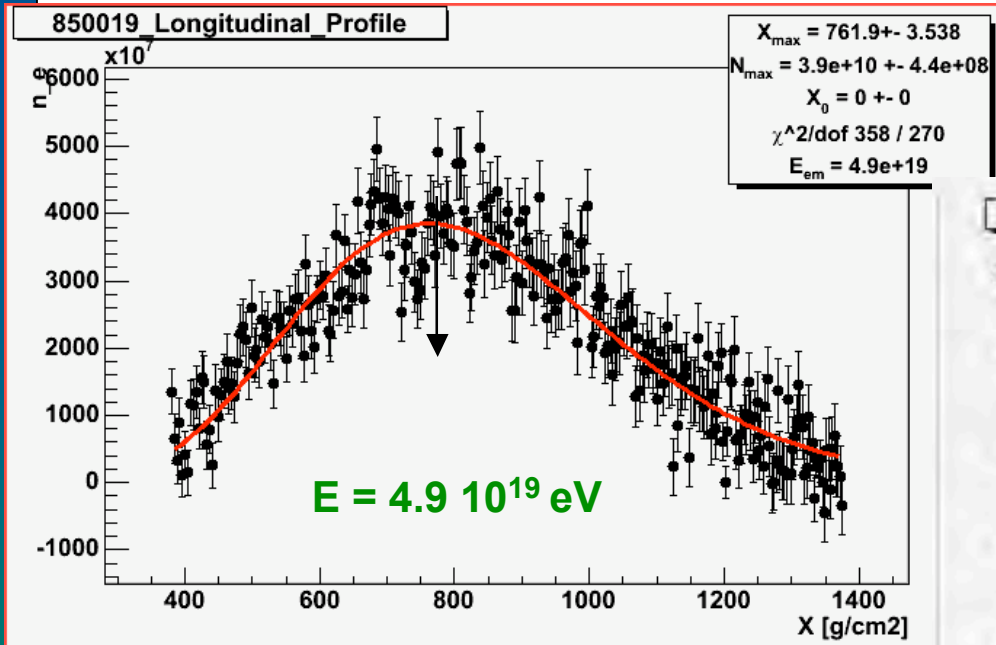
$\chi_0 = 22.753556$
 $R_p = 13487.3271$
 $T_0 = 23284.6537$

TimeFit Id 850019 Run 1 Event 687 Eye Id: 1



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

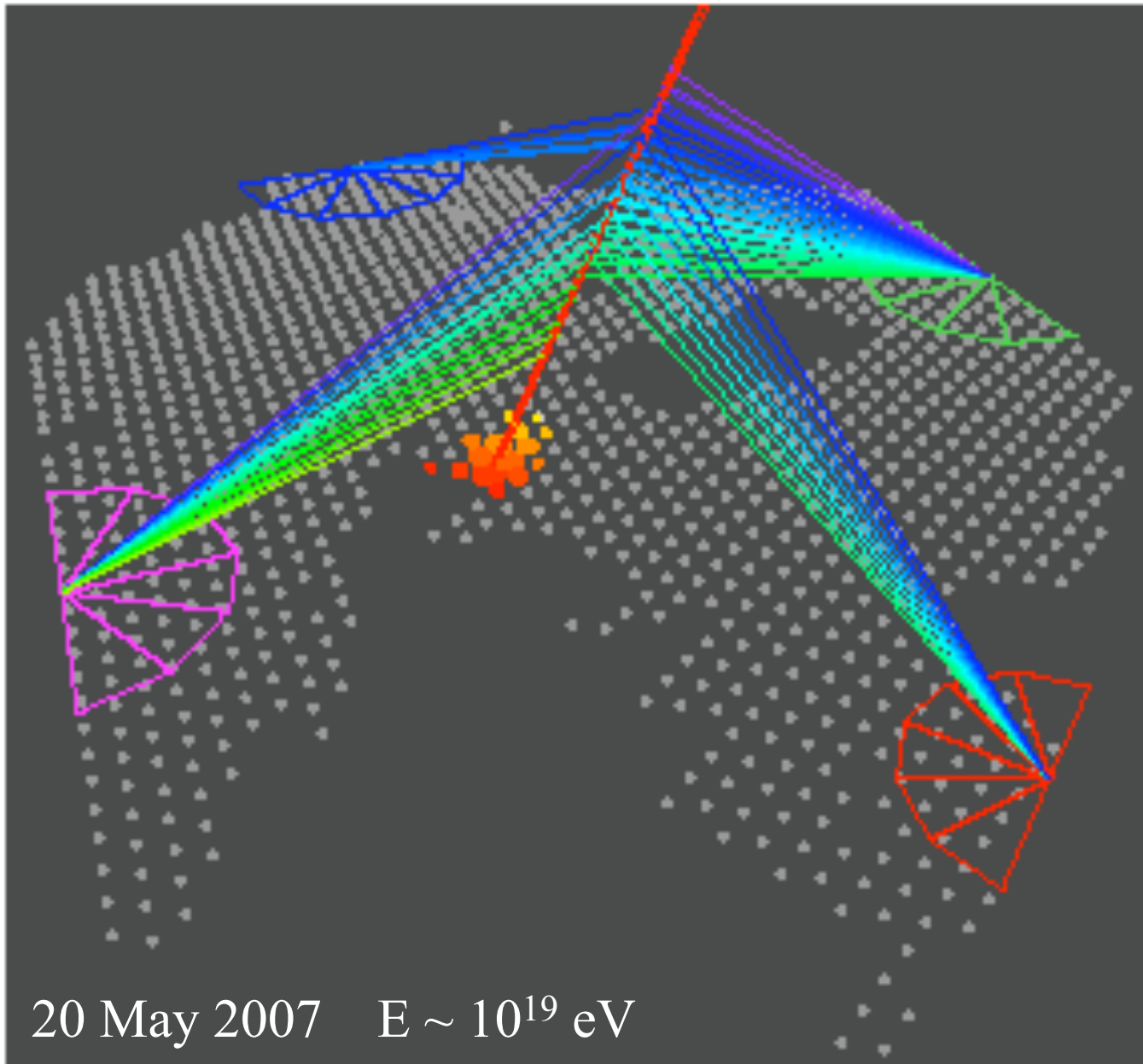
analyses indépendantes



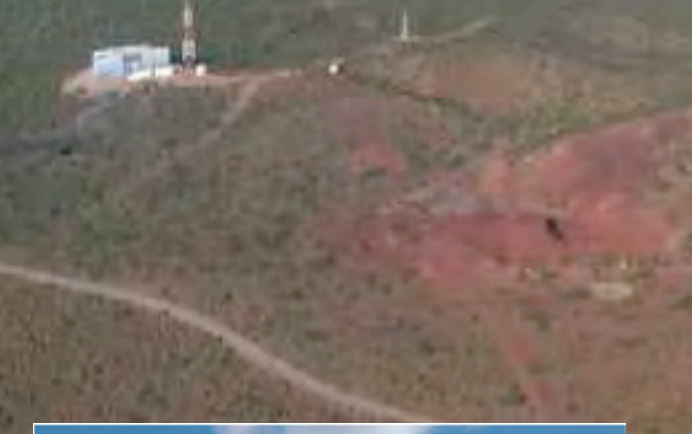
temps \rightarrow profondeur
géométrie, atmosphère

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

1st 4-fold hybrid event!



4 times 6 telescopes overlooking the site



Completed!

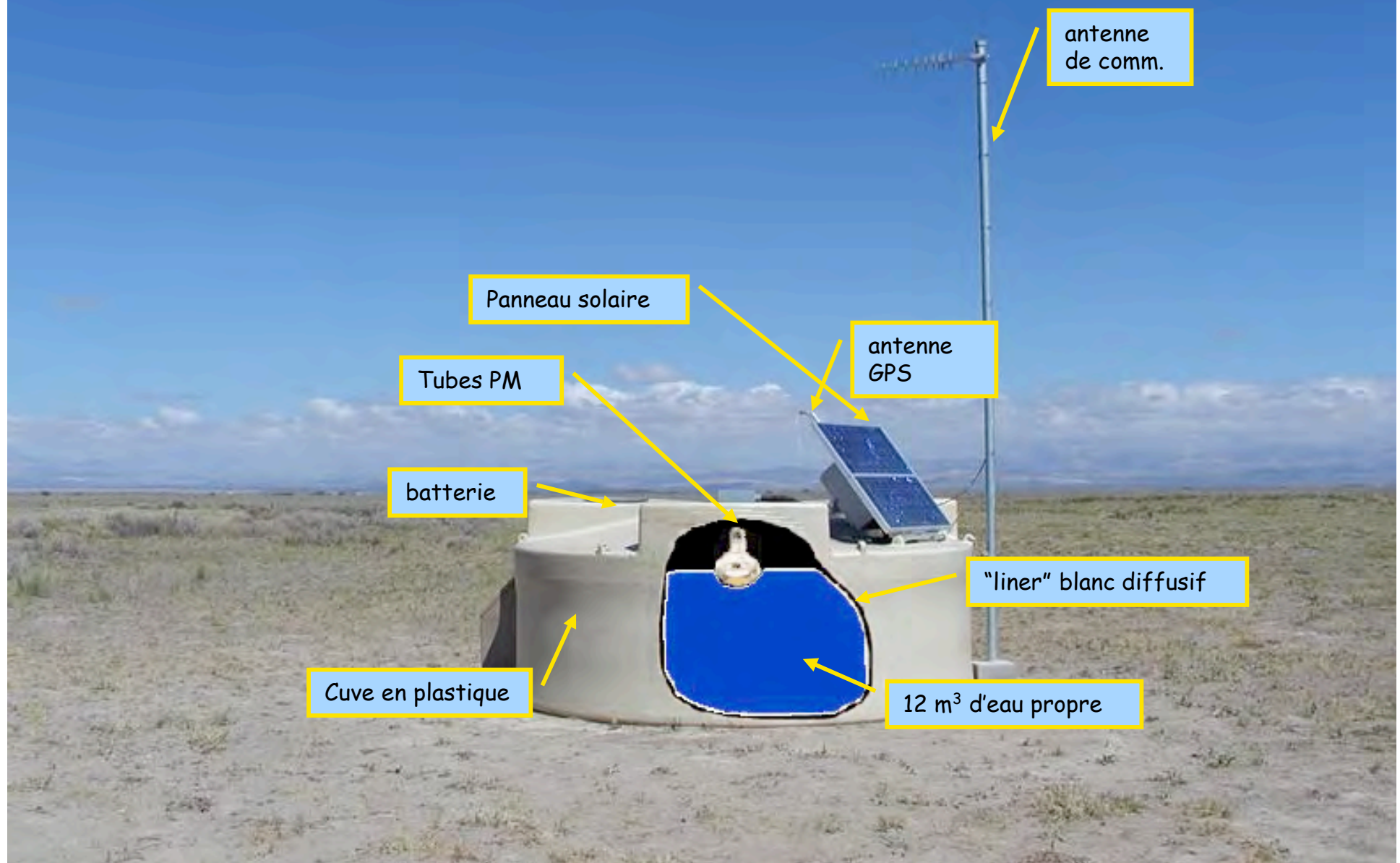
Alignement de cuves à effet Cherenkov



Une cuve... et les Andes argentines !



Fonctionnement des cuves

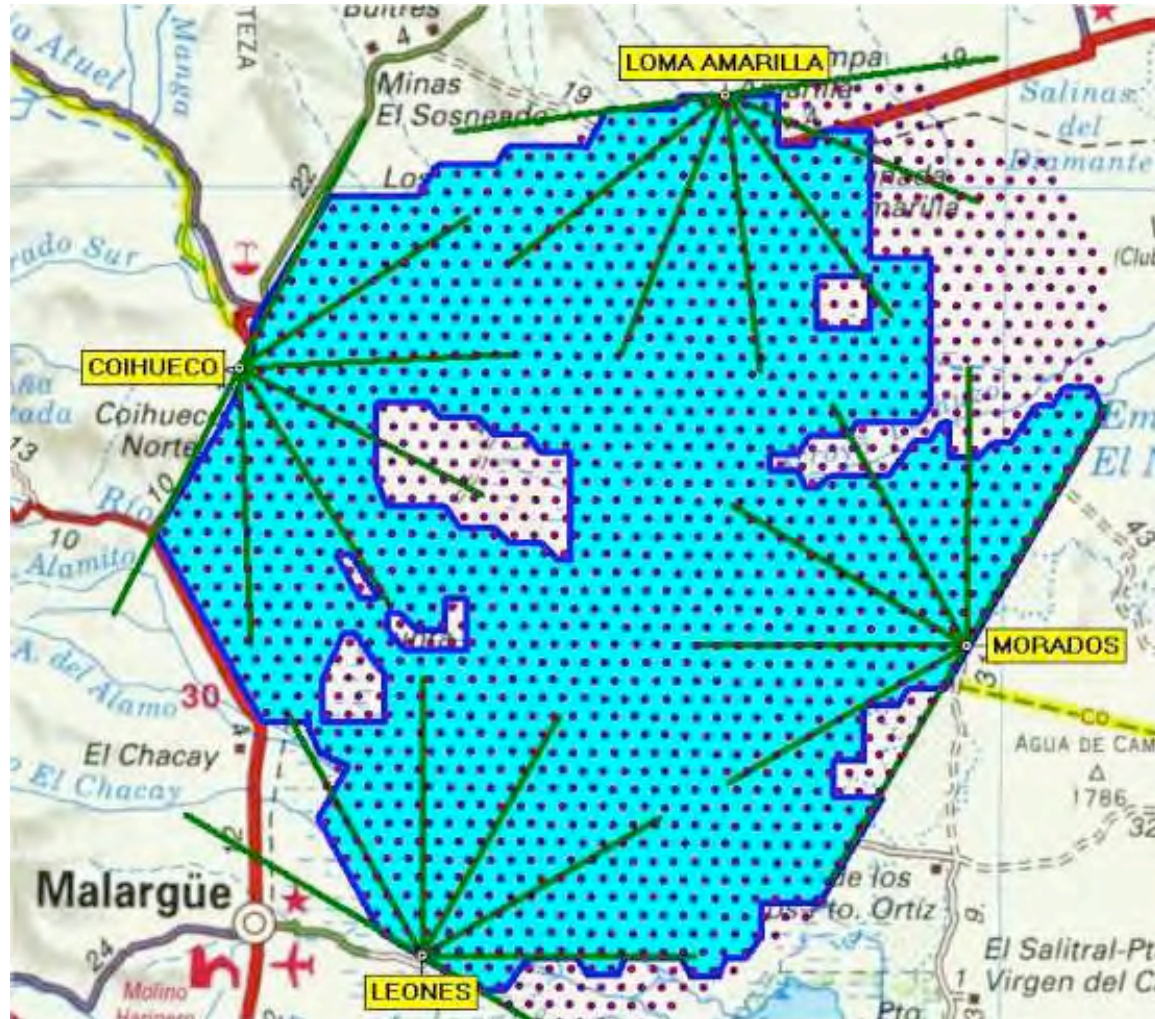


SD deployment

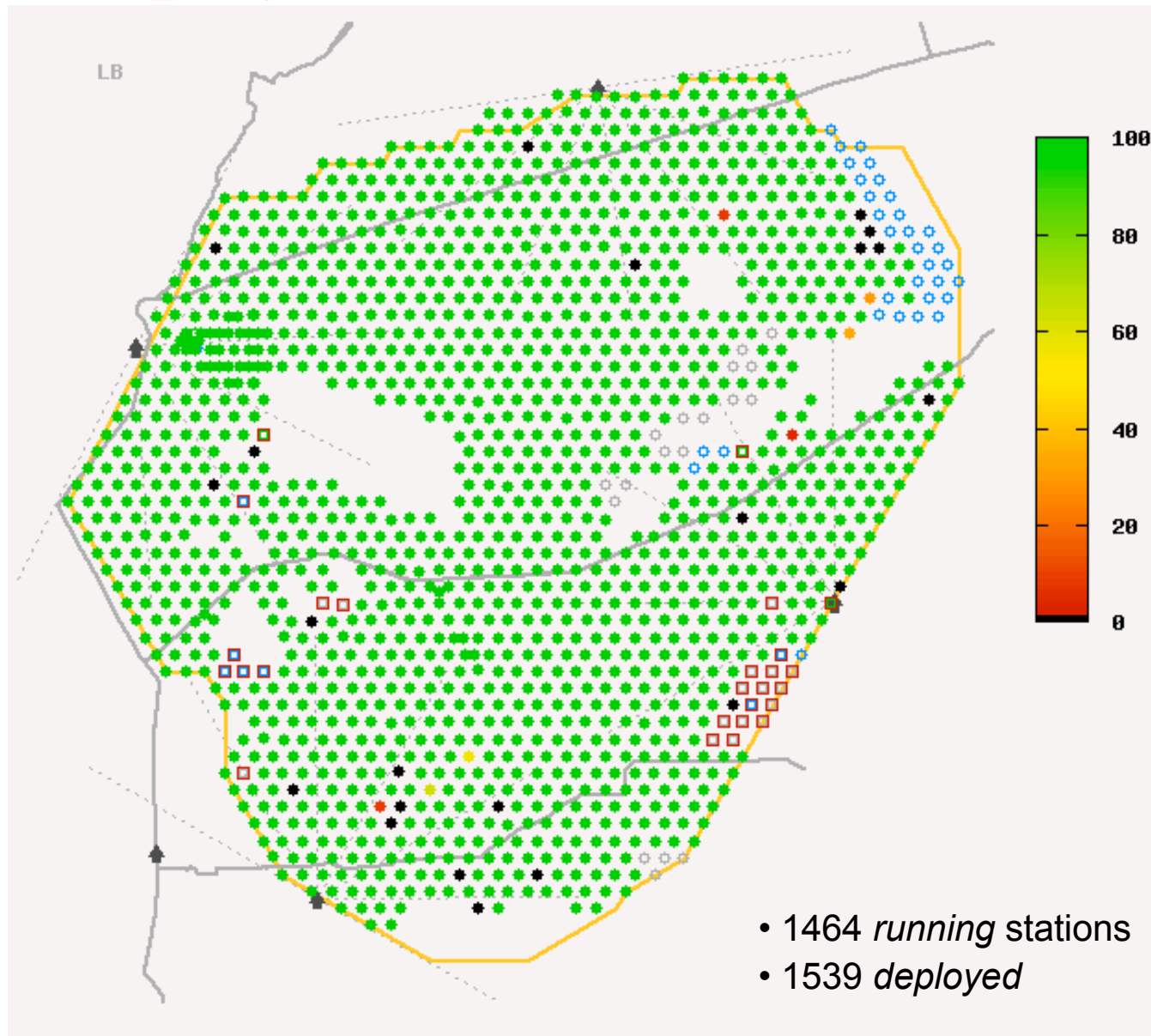
9th July 2007

1438 deployed
1400 filled
1364 taking data

AIM: 1600 tanks



SD deployment: 6th November 2007

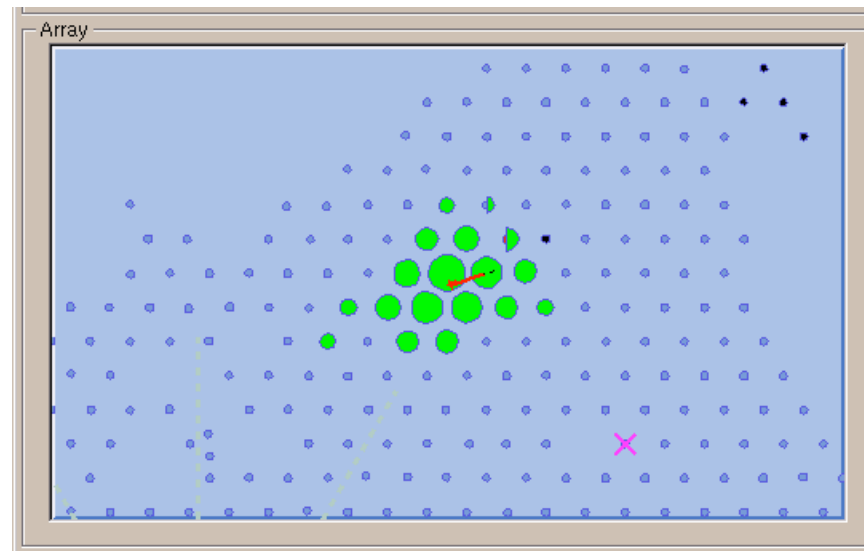
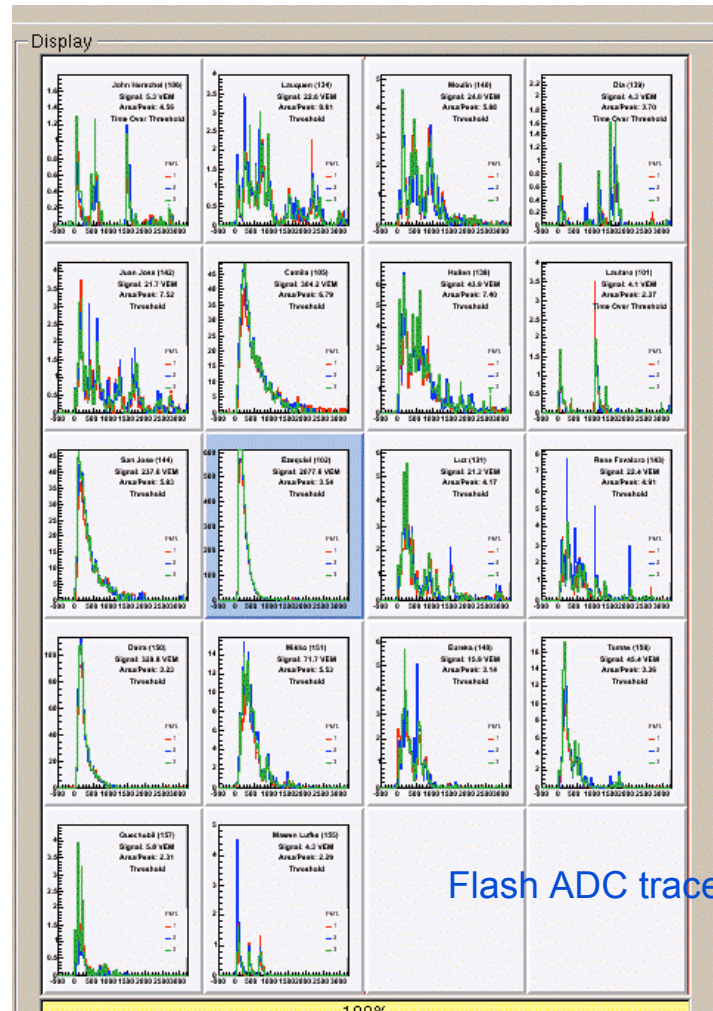


Environment difficile !

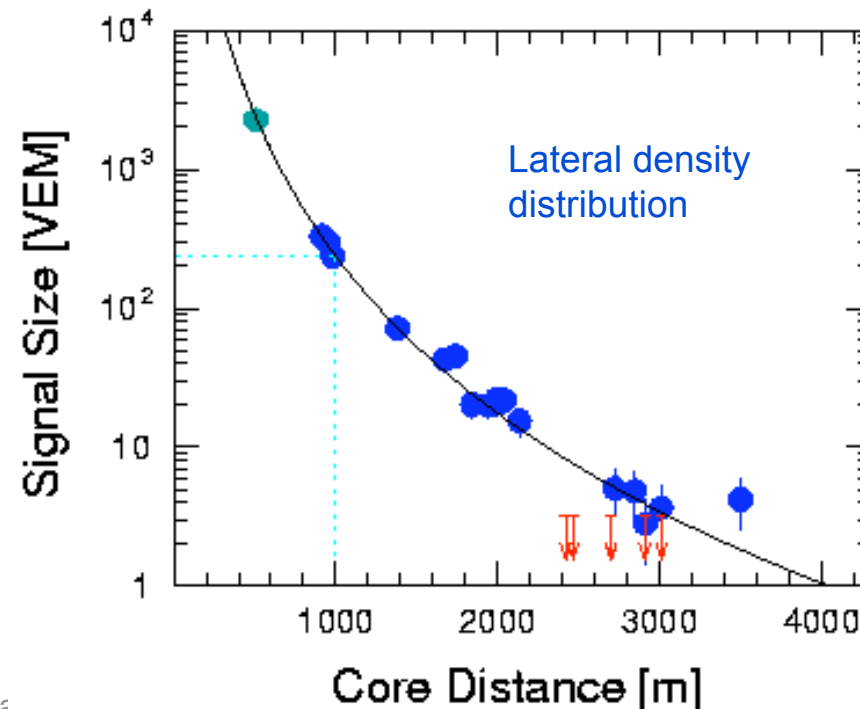


Example Event

*A moderate angle event - 762238
Zenith angle $\sim 48^\circ$, Energy ~ 70 EeV*

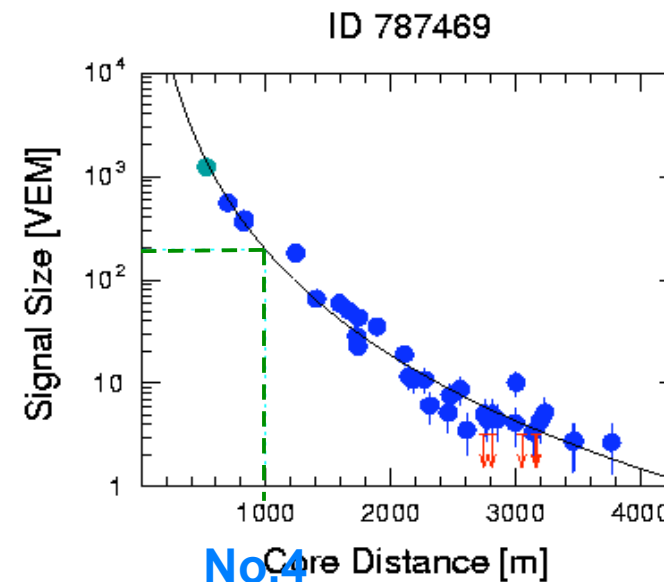
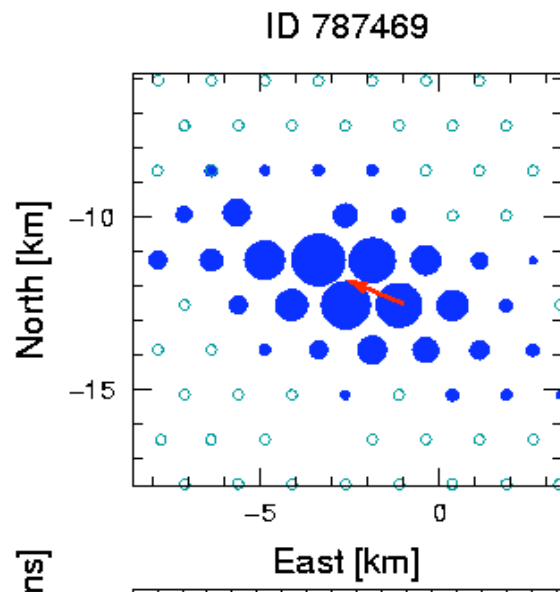
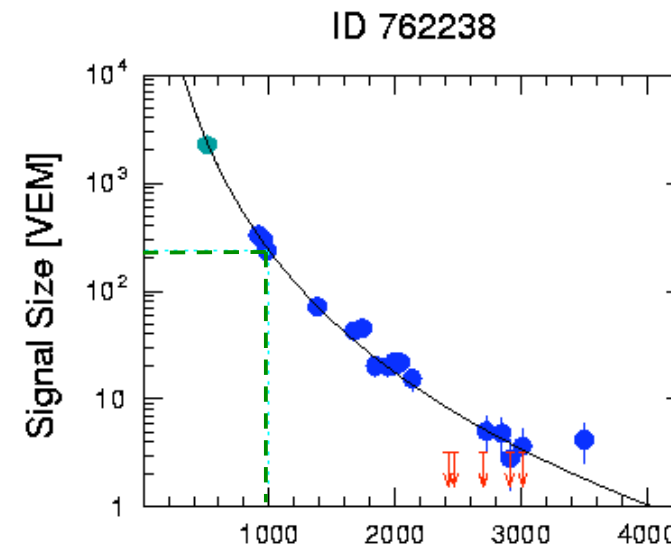
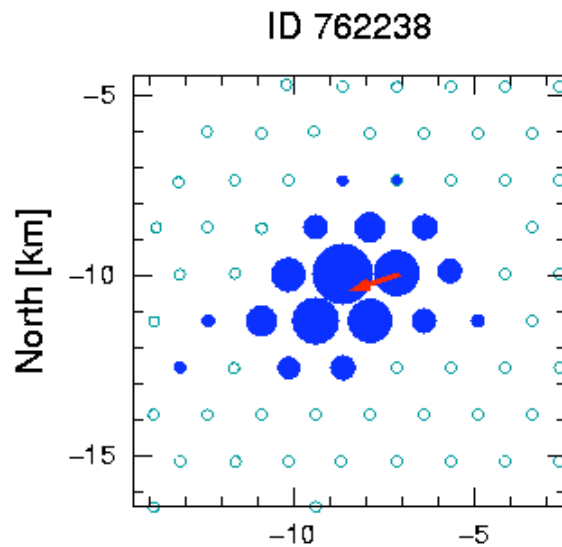


ID 762238

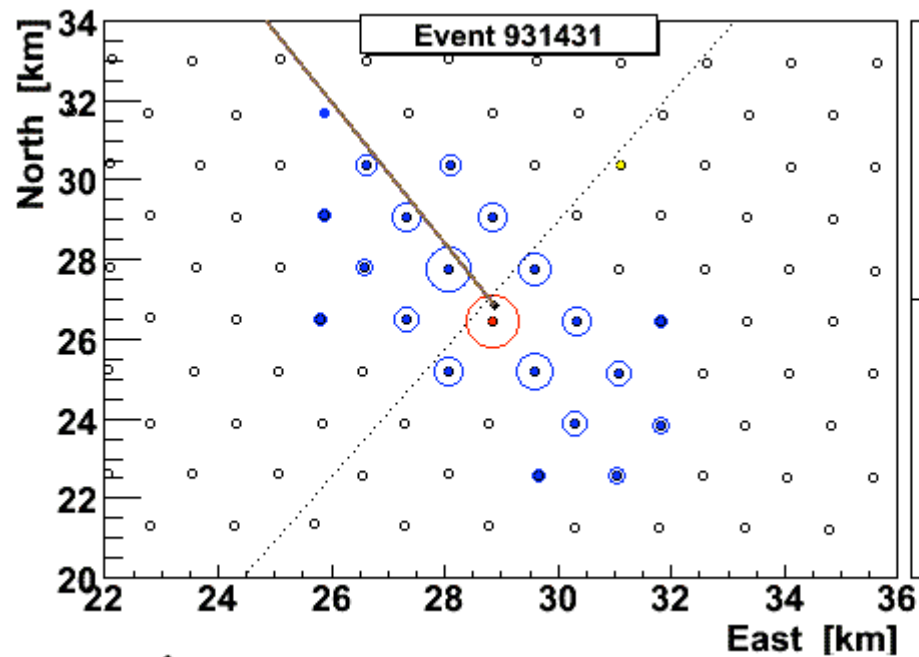


Energy reconstruction

- SD energy estimator: interpolated signal in a tank at 1000 meters and 38°

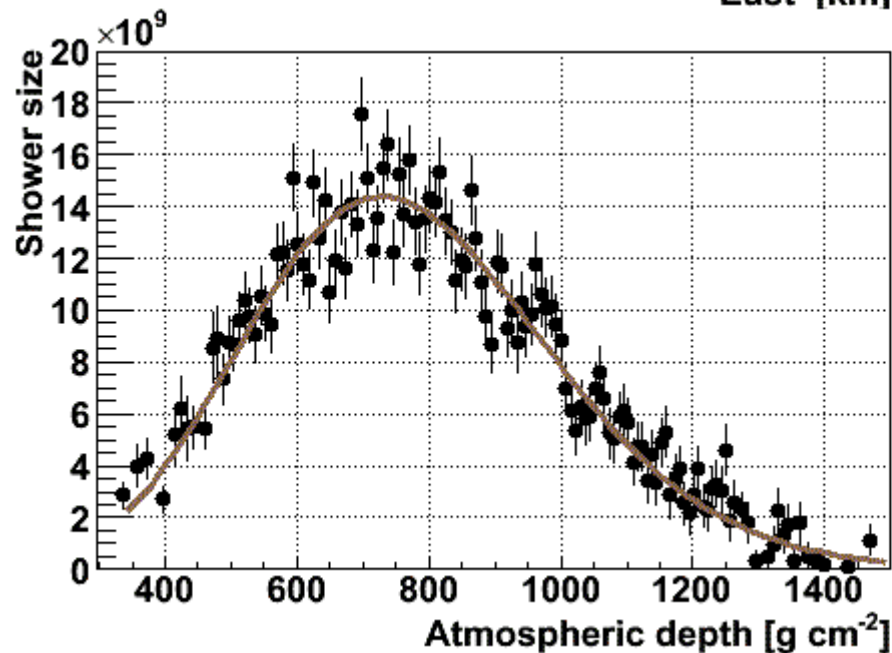


Another Hybrid Event



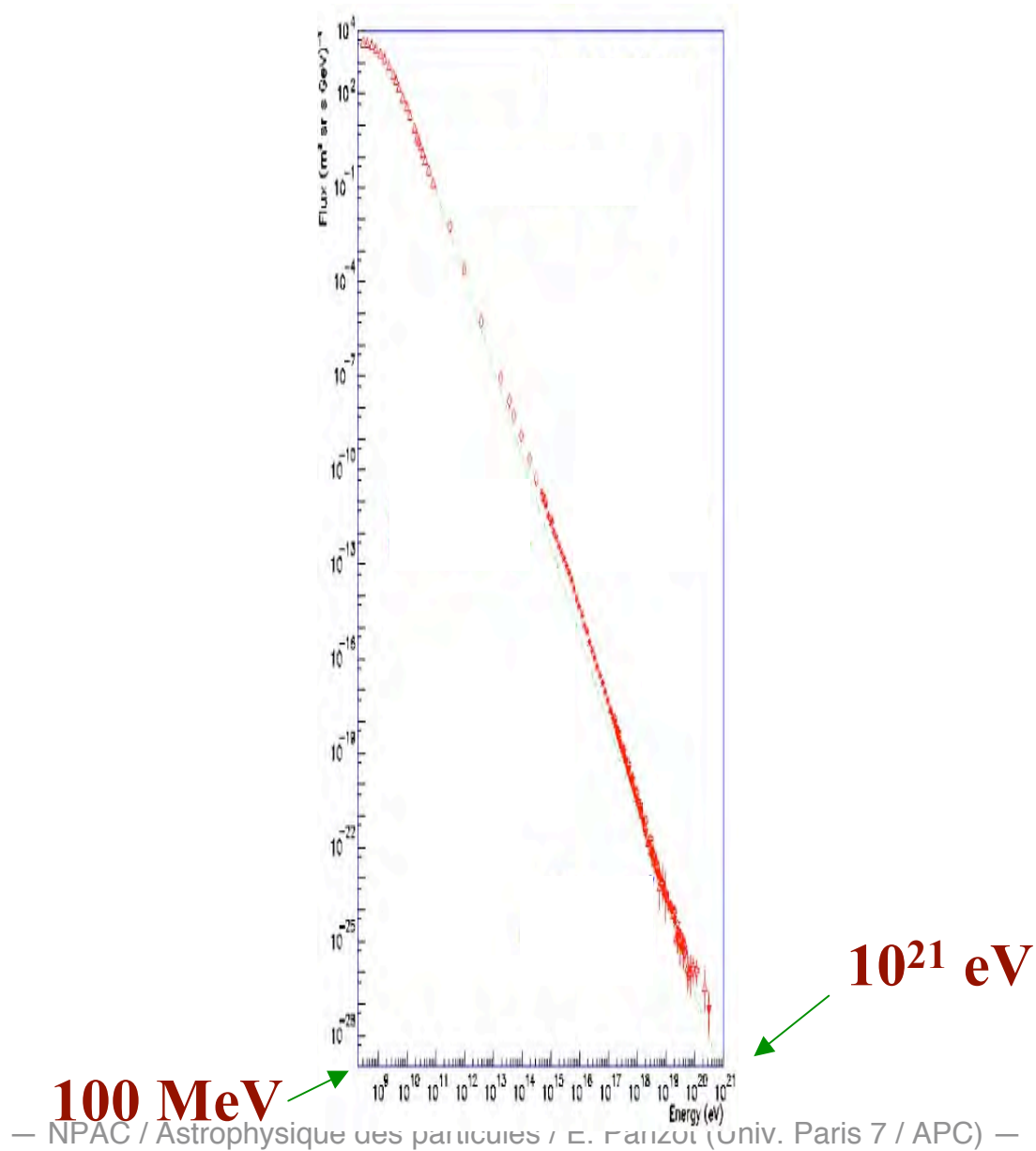
Core location
Easting 468693 ± 59
Northing 6087022 ± 80
Altitude = 1390 m a.s.l.

Shower Axis
 $\theta = (62.3 \pm 0.2)^\circ$
 $\phi = (119.7 \pm 0.1)^\circ$

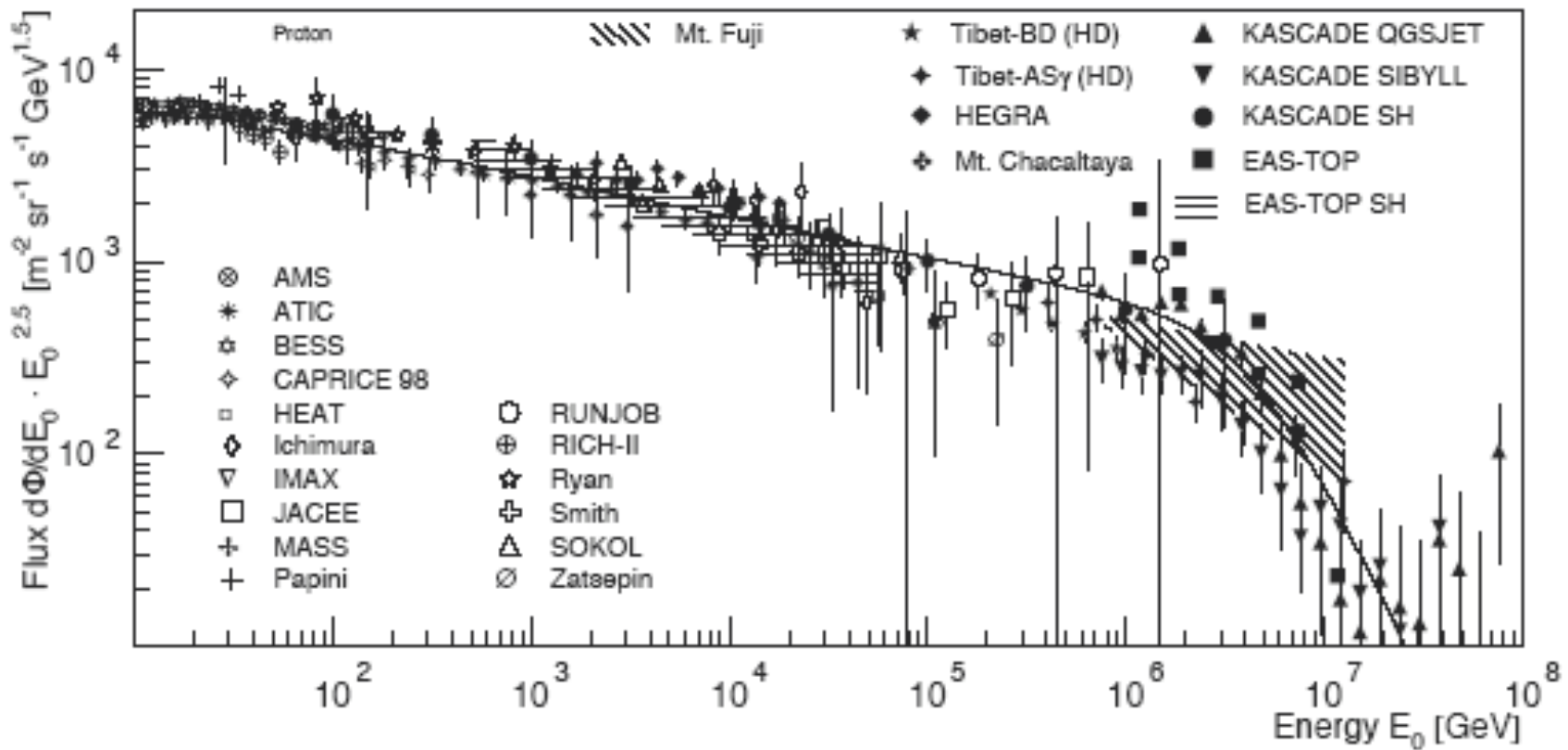


Energy Estimate:
 $X_{\text{max}} = (728 \pm 20) \text{ g cm}^{-2}$
 $\chi^2/\text{dof} = 258 / 134$
 $E_{\text{em}} = (21 \pm 5) \text{ EeV}$
 $E_{\text{tot}} = (23 \pm 6) \text{ EeV}$

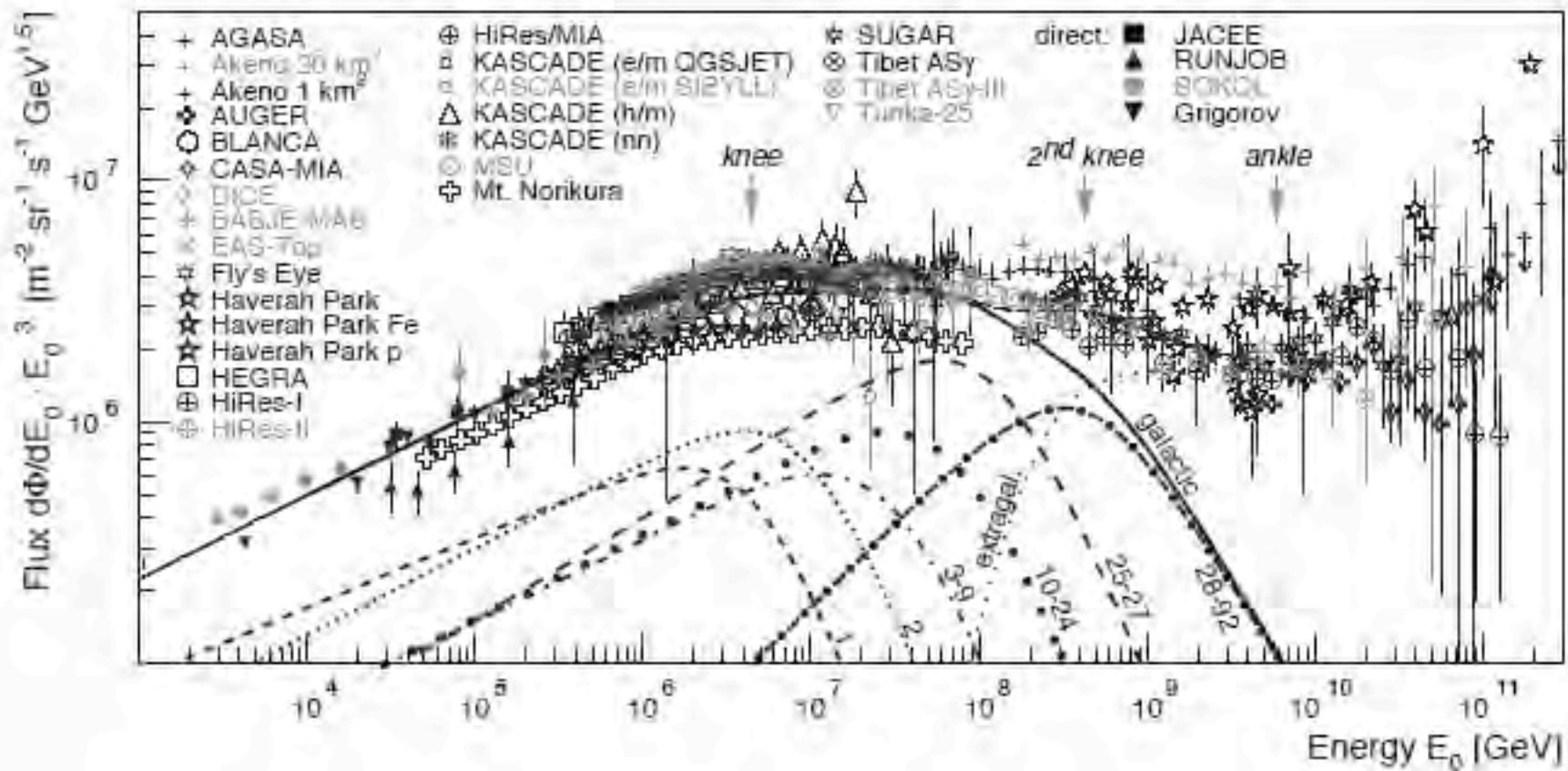
Le spectre d'énergie des RC



[CR flux] x E^{2.5}



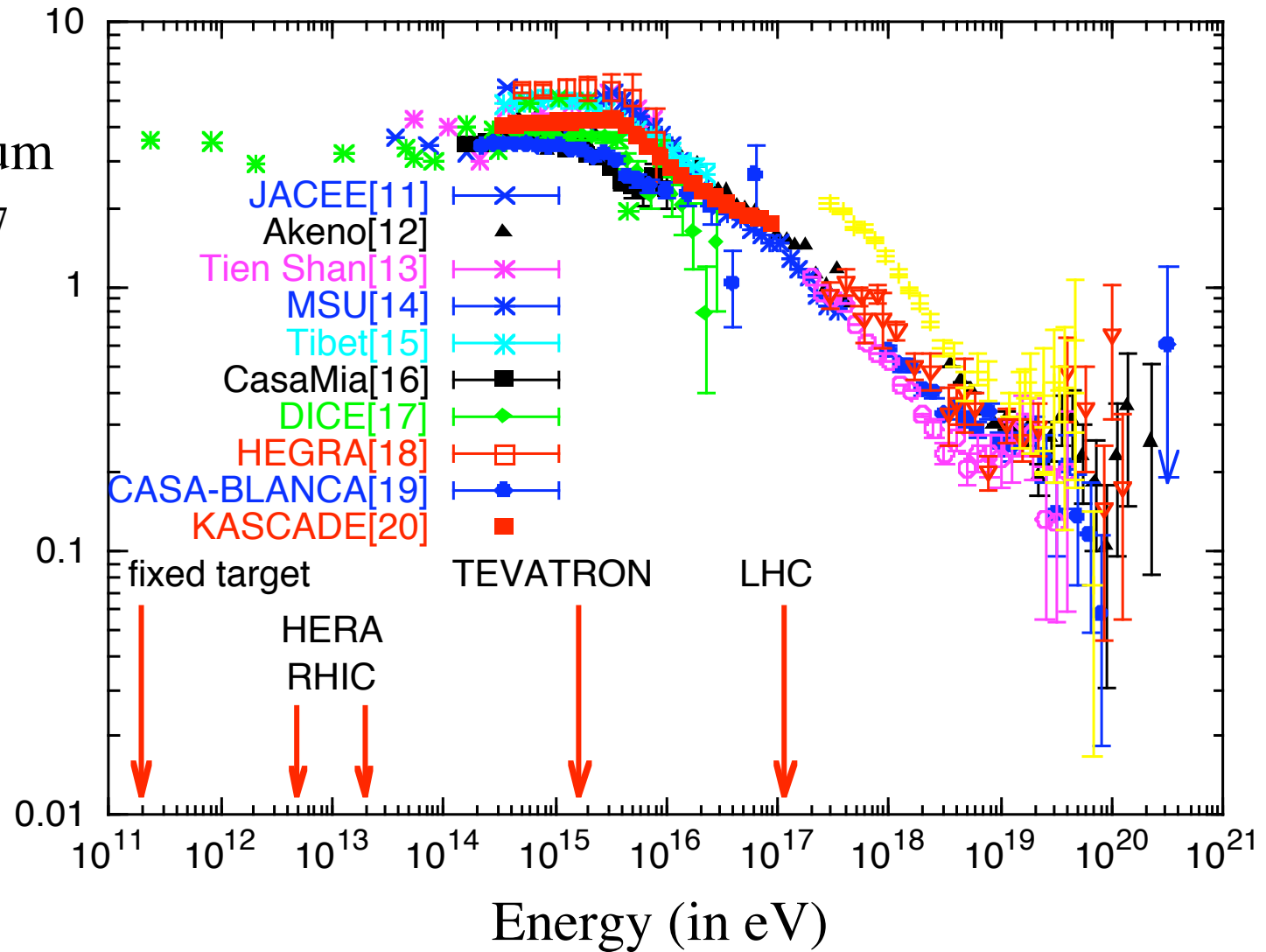
[CR flux] x E³



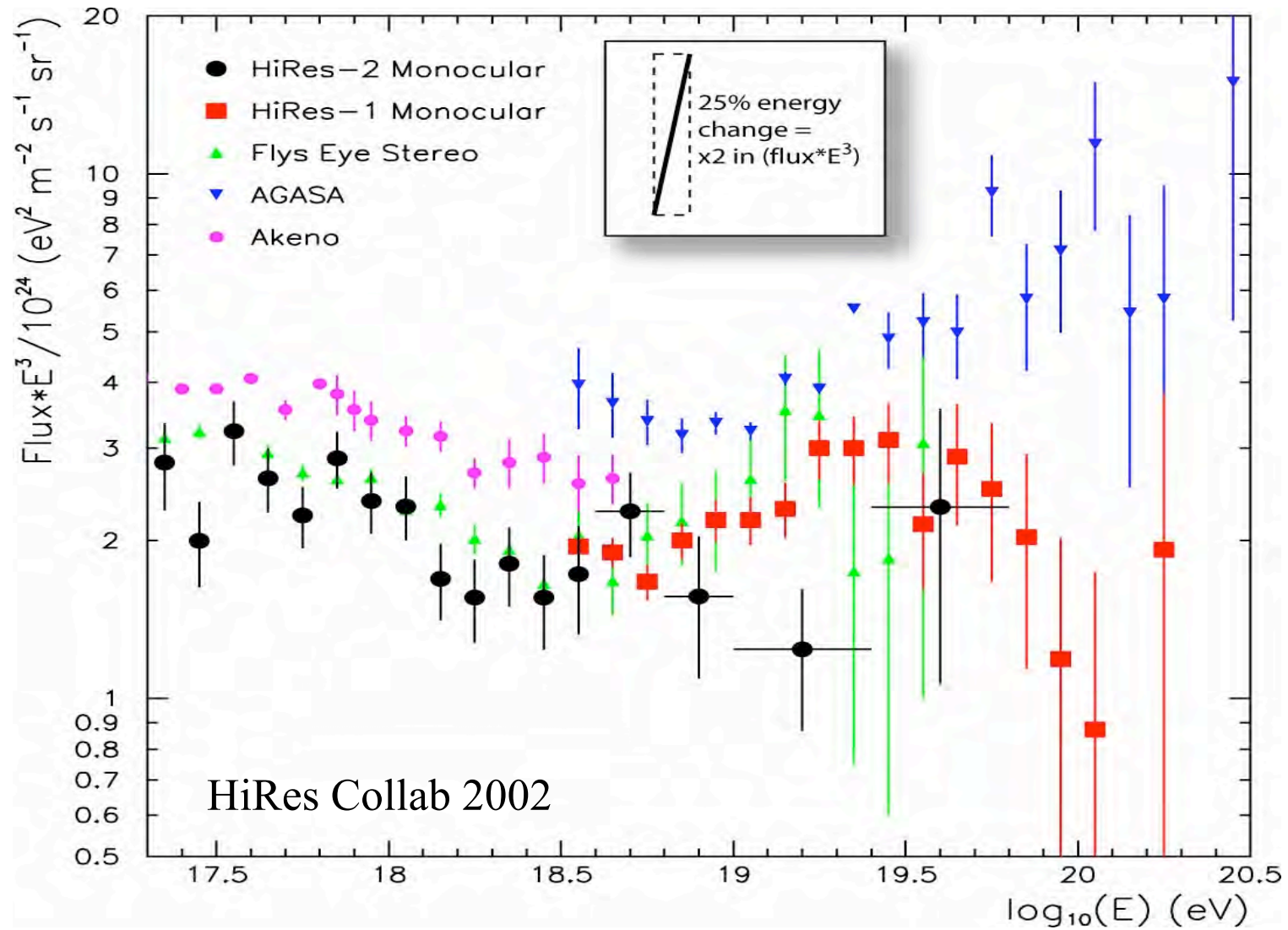
The 'knee' at 5×10^{15} eV

Tilted spectrum

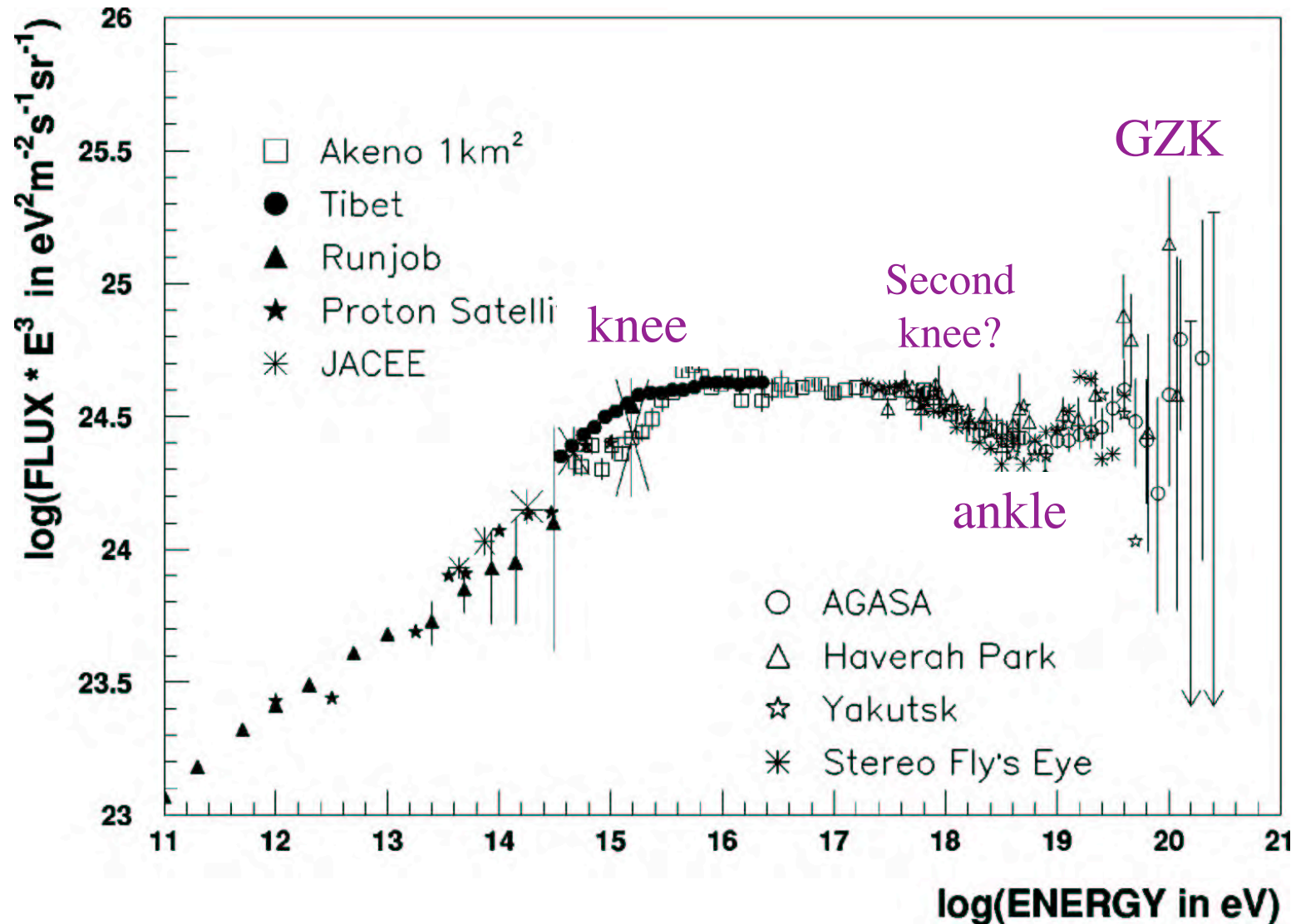
$$\Phi(E) \times E^{2.7}$$



Highest energies



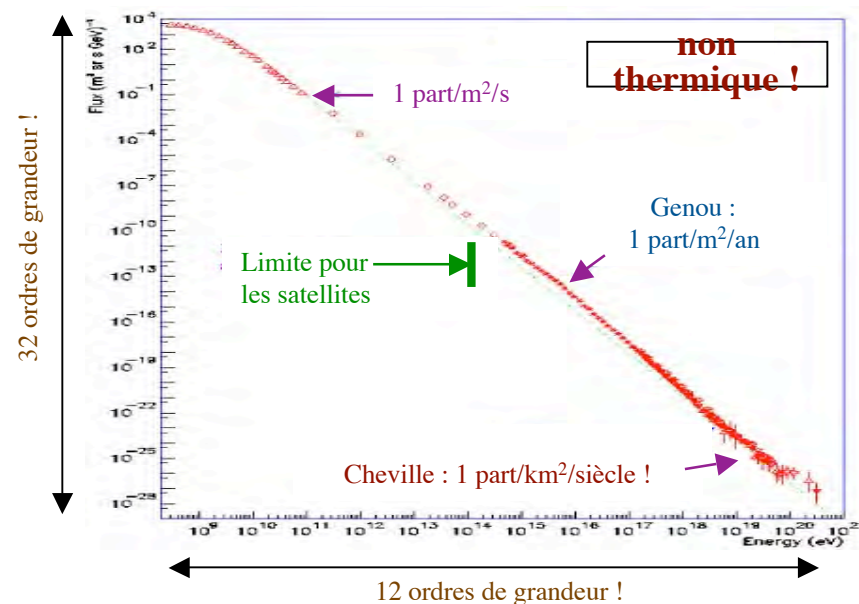
[CR flux] x E³



Limite à haute énergie ?

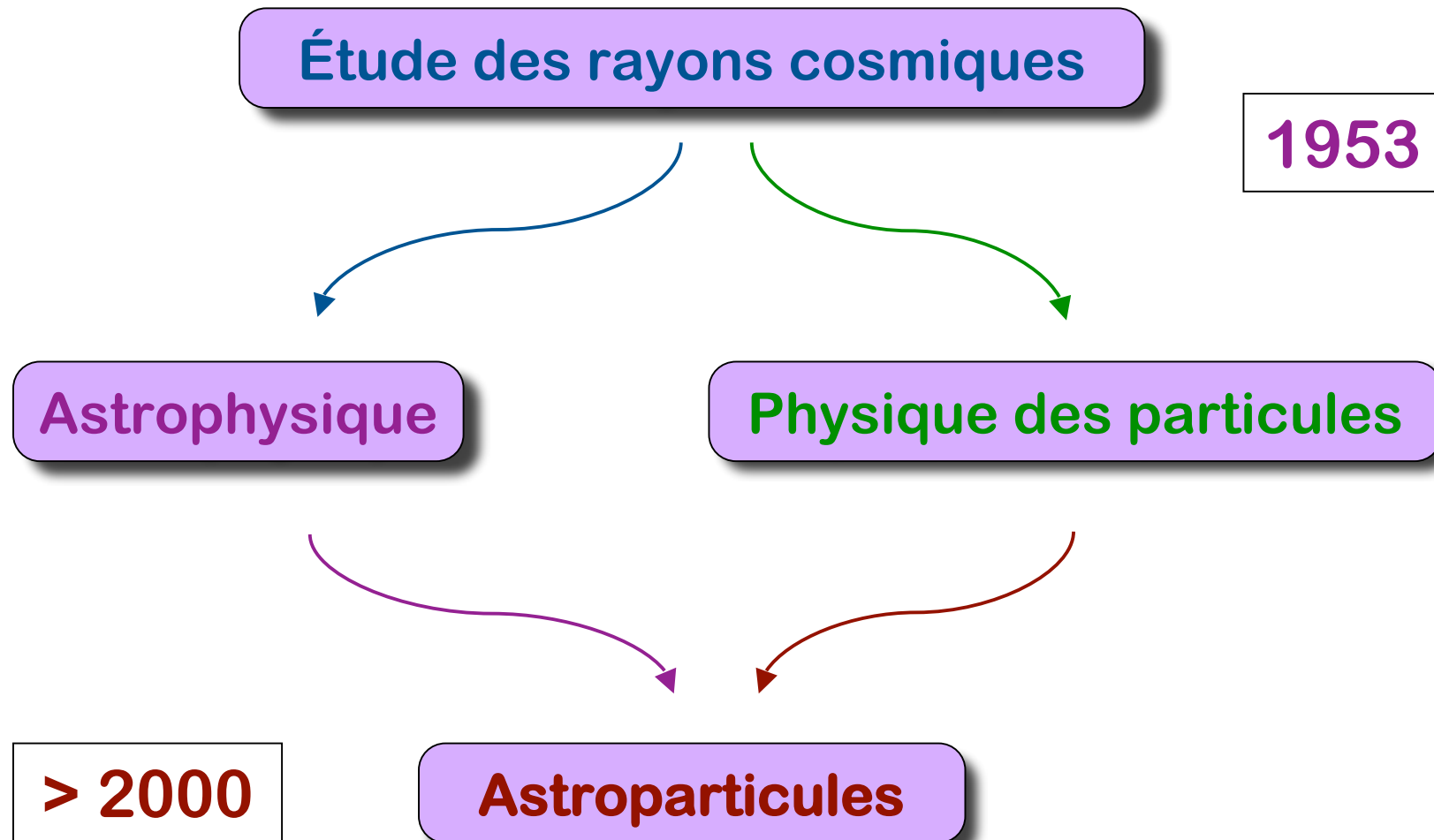
Où s'arrête le spectre ? → coupure physique (GZK)

Pourra-t-on faire de l'astronomie proton ? → Oui !



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

Une longue parenthèse se ferme

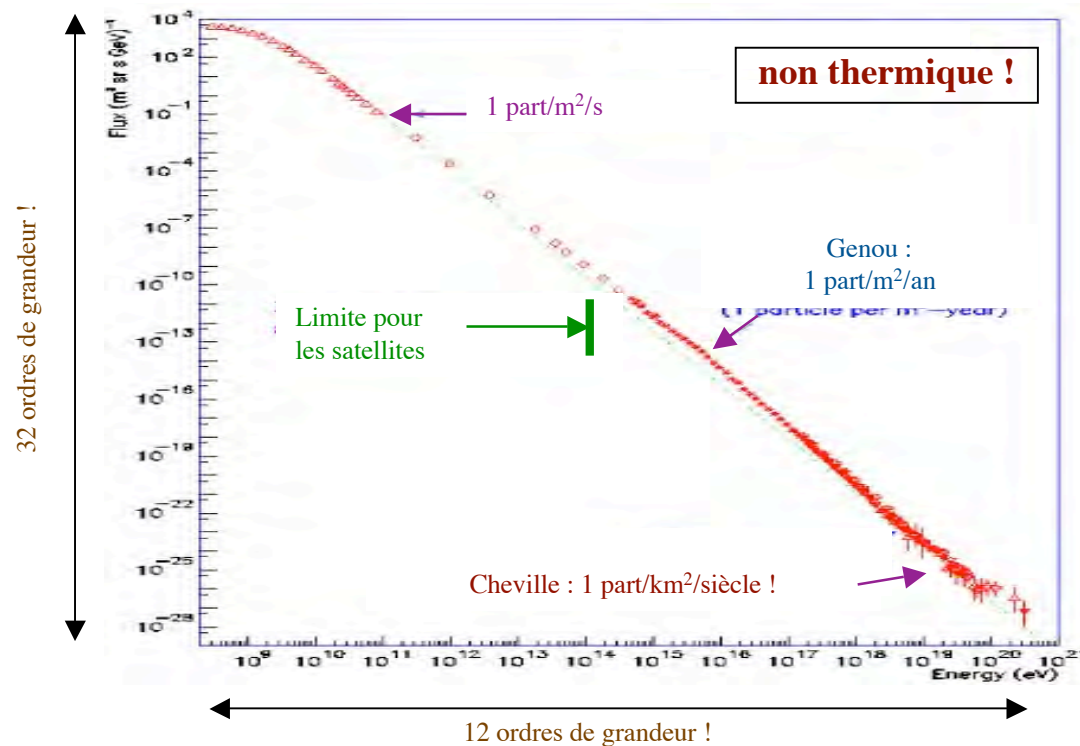




Bonus !

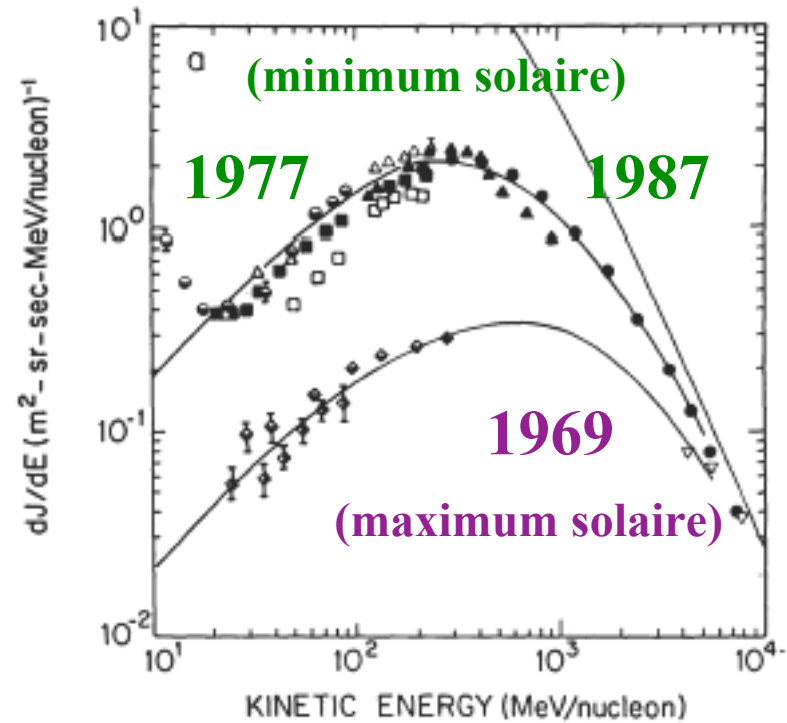
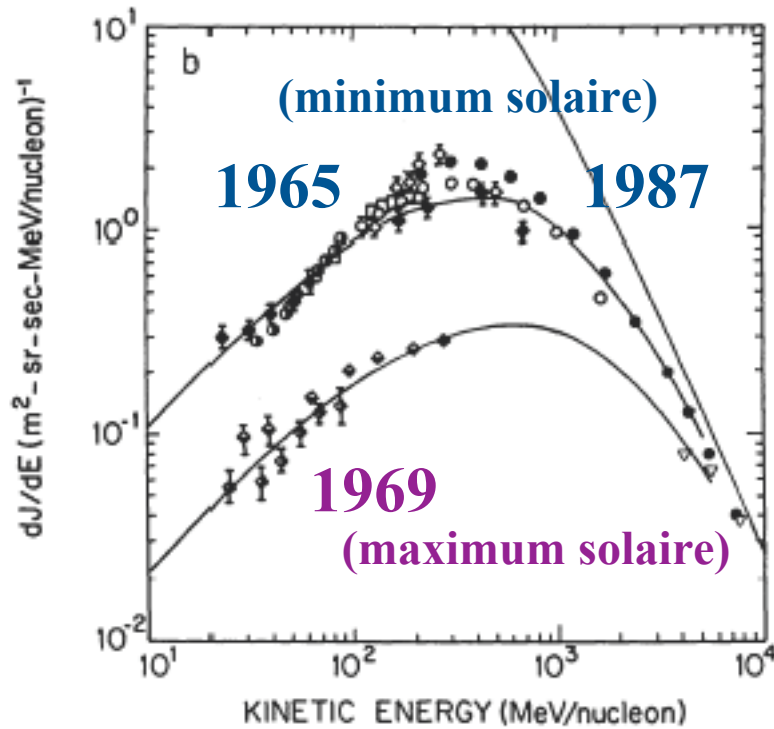
Limite à basse énergie ?

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



MAIS : Phénomène de modulation solaire...

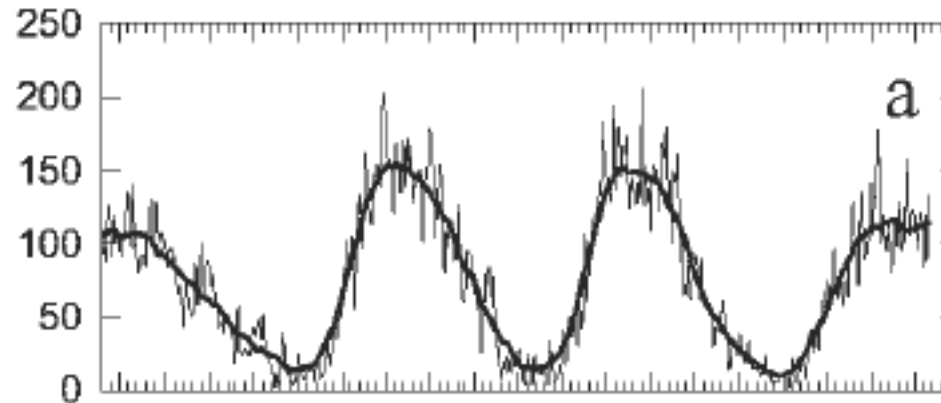
Modulation solaire



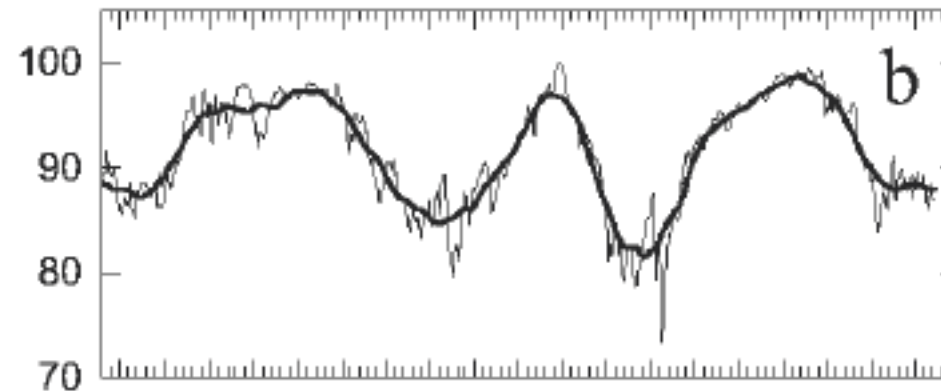
Modulation solaire

- variation du flux de RC en coïncidence avec les cycles solaires

Nombre de
tâches solaires



Intensité du RC



Modulation solaire : données de Voyager et de Pioneer

330

WEBBER

Vol. 506

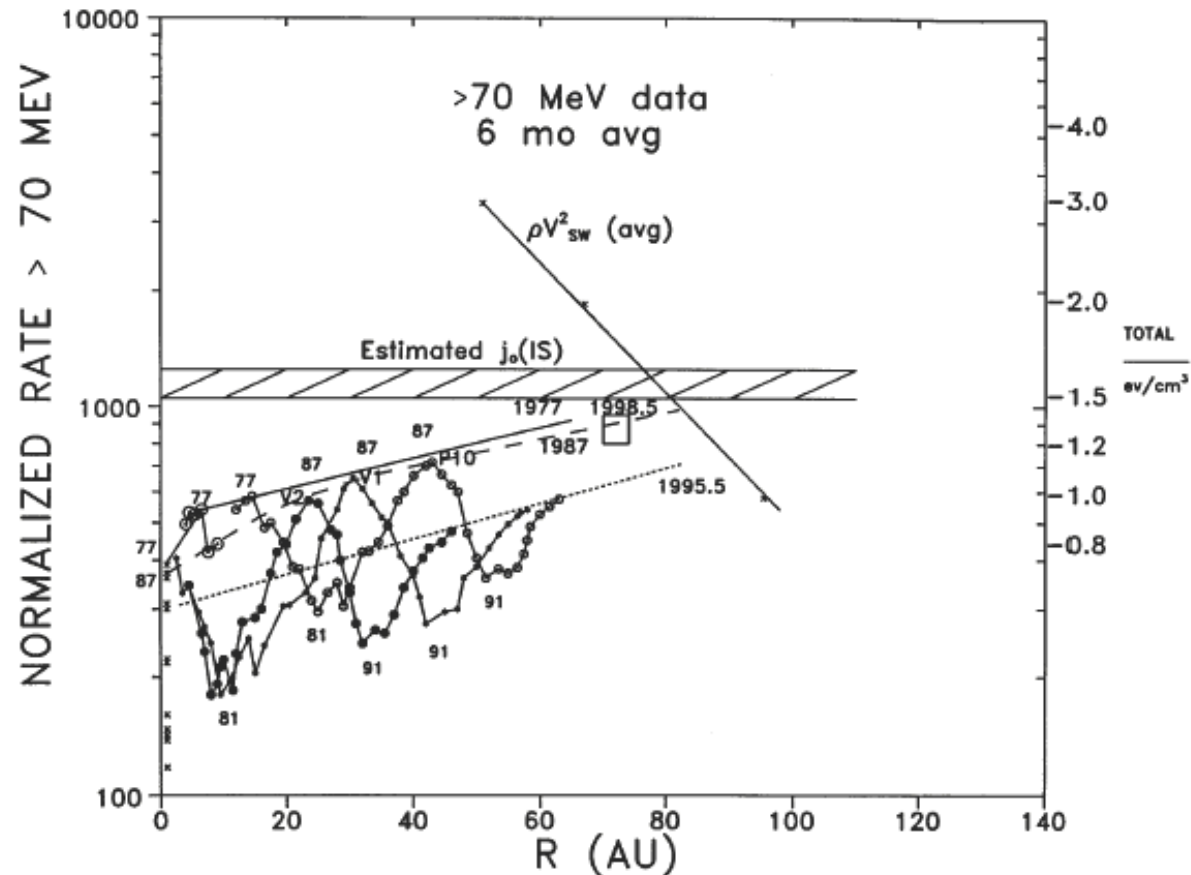
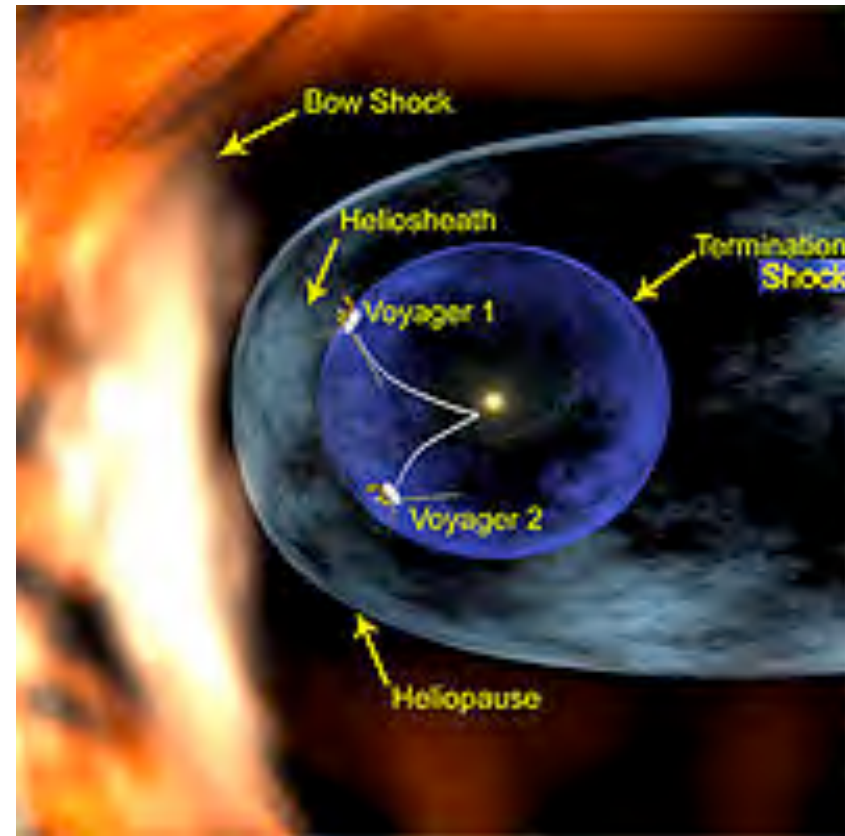
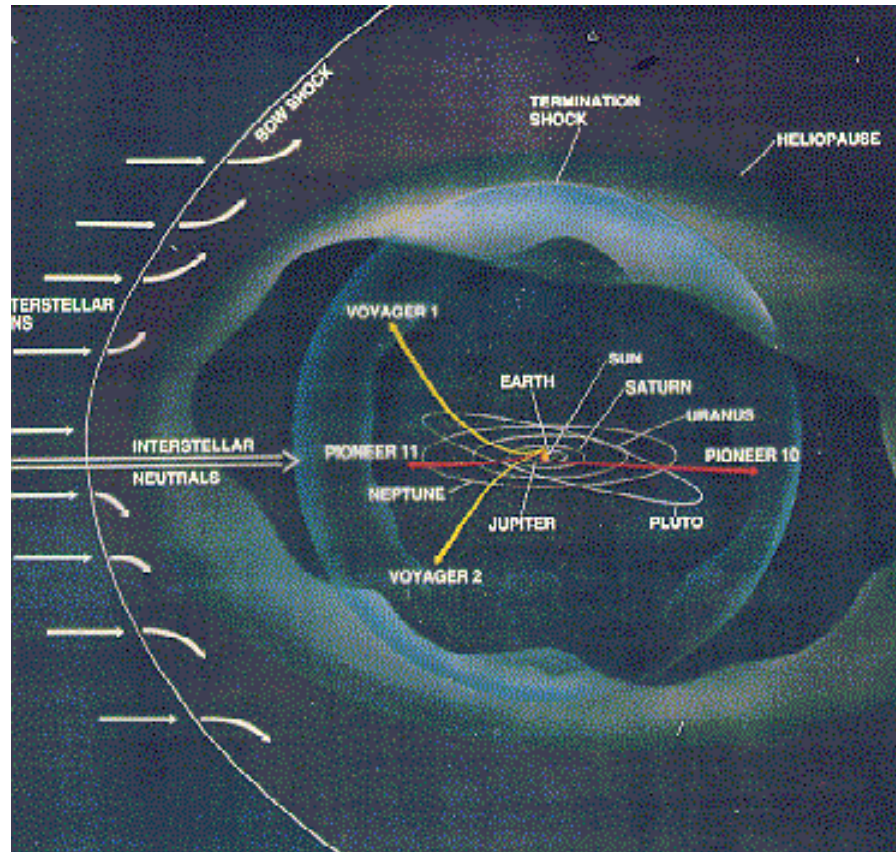


FIG. 1.—Counting rates of greater than 70 MeV cosmic rays vs. distance measured on *Voyager* and *Pioneer* spacecraft from 1977 to 1995. These integral rates, converted to energy densities are shown on the right-hand axis. The estimated interstellar counting rate is shown as a hatched region. The average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

