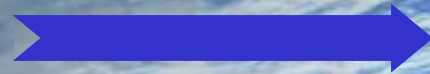


Les Rayons Cosmiques : De Hess à Auger

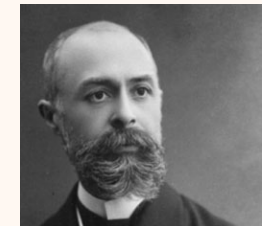
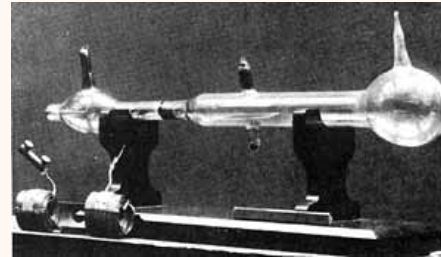
Gérard Tristram
IN2P3/CNRS



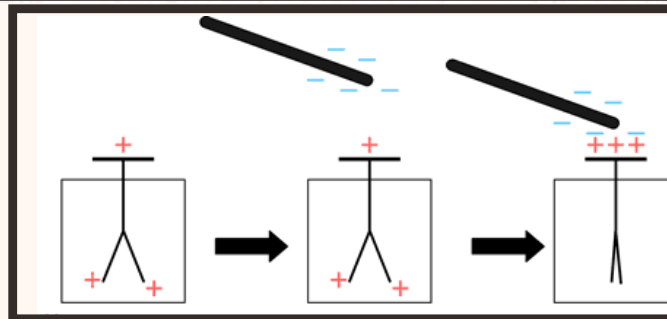
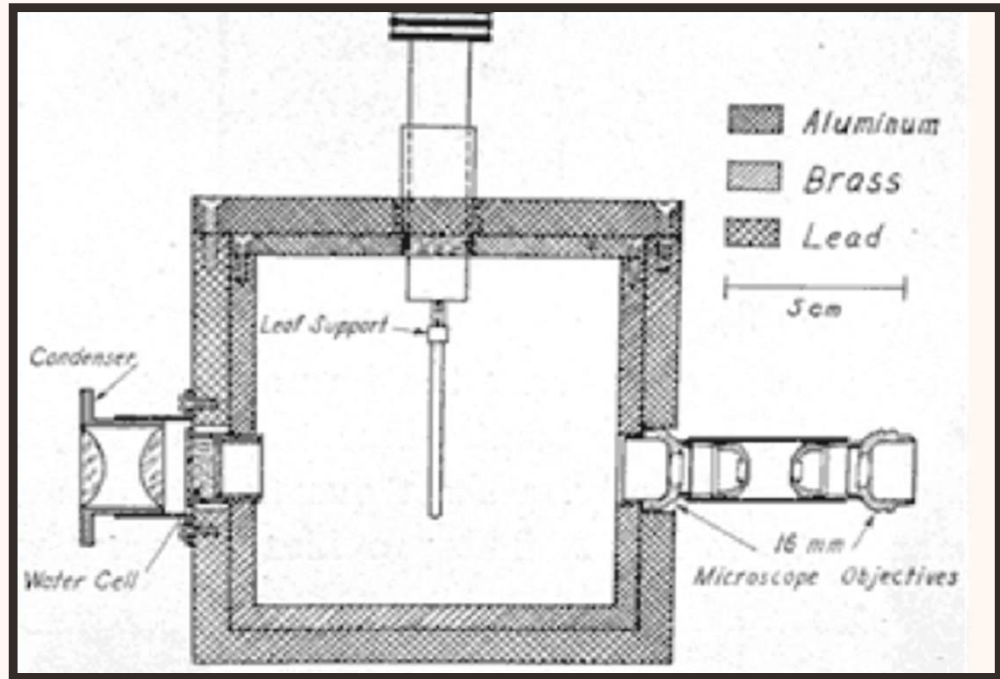
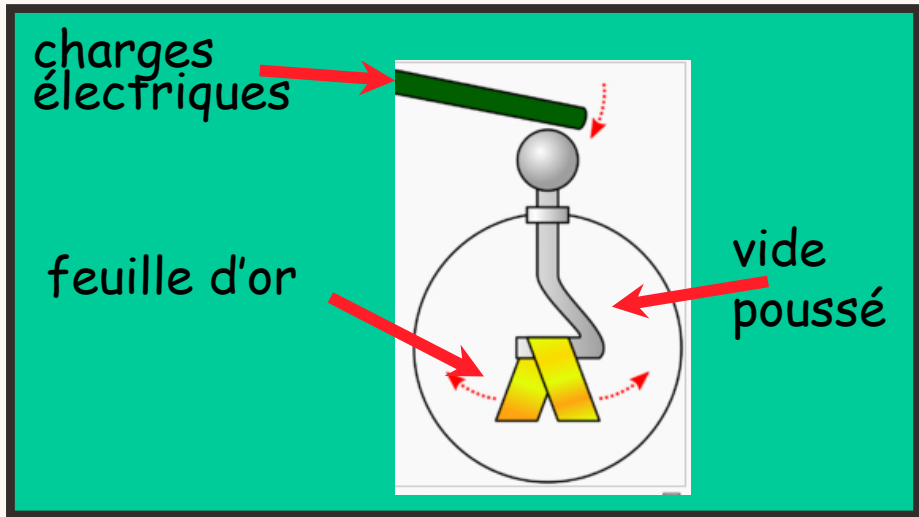
CPPM - juin 2014

Fin du XIXe siècle : découverte de nouveaux rayonnements «invisibles»

- 1895 : les rayons X
 - rayonnement provoqué, **Wilhelm Röntgen**
- 1896 : le rayonnement uranique (radioactivité)
 - rayonnement naturel **Henri Becquerel**
- 1897 : les rayons cathodiques (électrons)
 - rayonnement provoqué, **Joseph John Thomson**
- 1898 - 1900 : plusieurs type de radioactivité
 - α^+ , β^- , γ : **Pierre et Marie Curie, Ernest Rutherford**

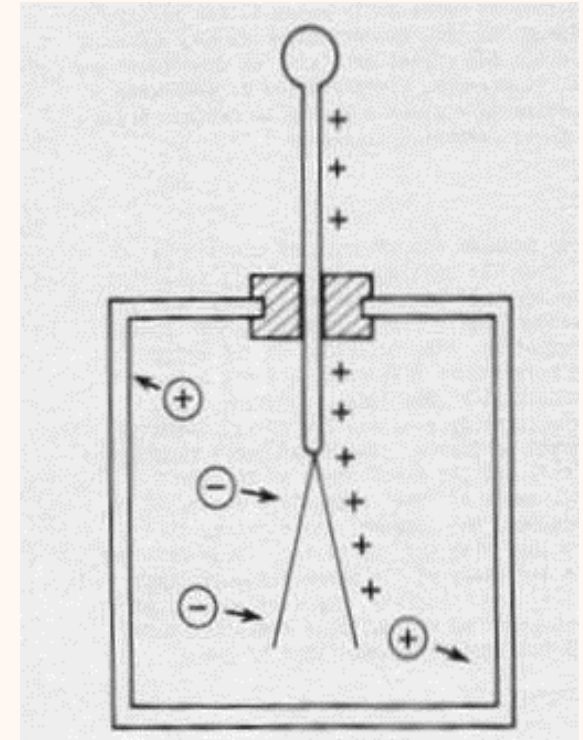


L'électromètre



Décharge d'un électromètre

- Par la présence d'une source ionisante (rayons X, électrons)
- Par la présence d'une source radioactive (rayons β)
- Sans présence de source: décharge spontanée !!!
 - mauvais isolement de l'appareil ? Non.
 - radio-activité de la Terre ?
 - le rayonnement doit diminuer avec l'altitude



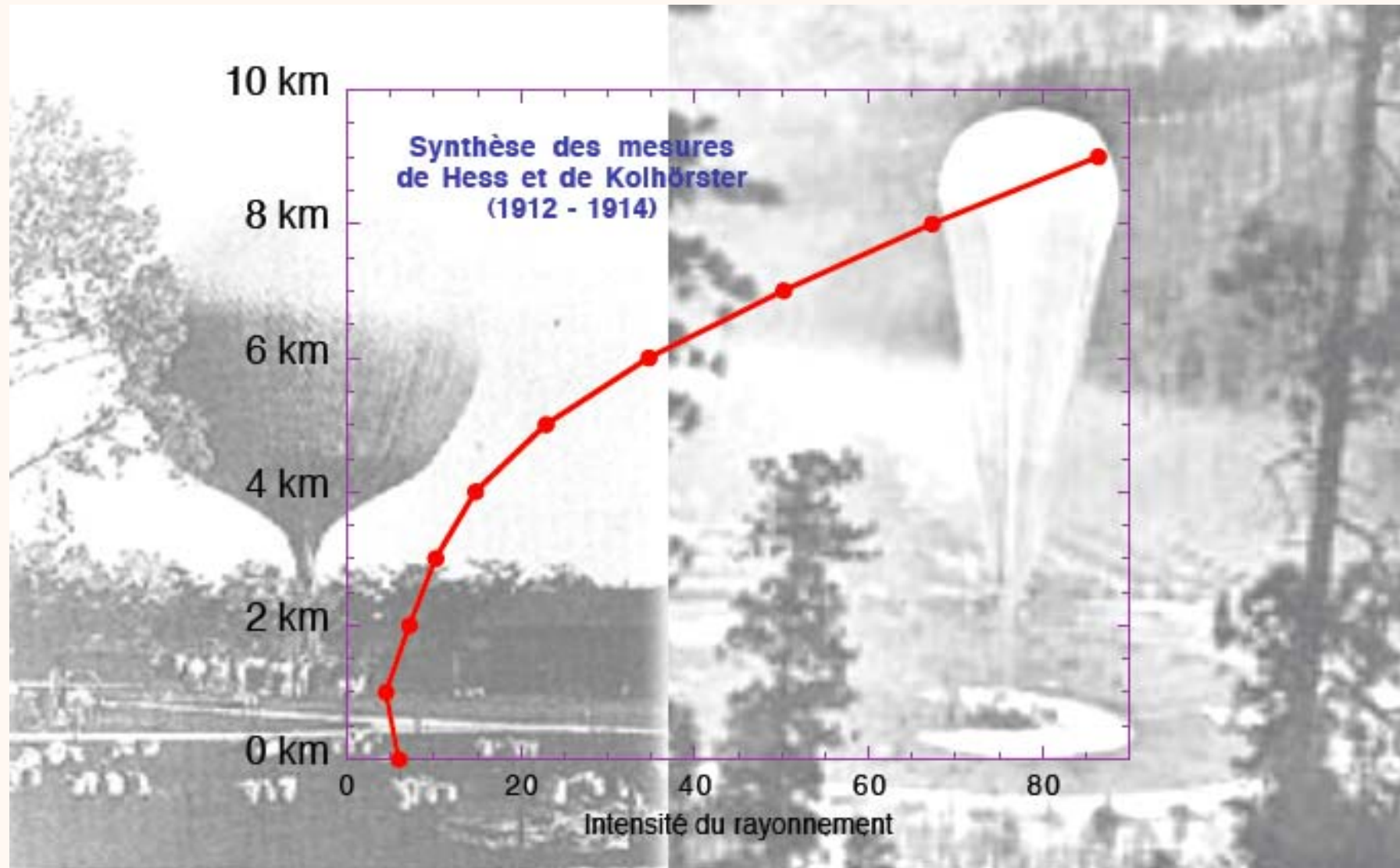


- **1910 : le père Théodore Wulf (jésuite et physicien amateur, qui construit les meilleurs électromètres) fait des études au sommet de la tour Eiffel.**
- **Altitude trop faible, résultats surprenants mais peu significatifs**

1912 : Hess découvre le rayonnement cosmique (ionisation atmosphère)



Surprise : le rayonnement augmente avec l'altitude !



Un mystérieux rayonnement qui vient du ciel...

Photons ou Electrons ?

Millikan est persuadé que les RC sont des photons de qq dizaines de MeV créés par la fusion nucléaire dans les étoiles. Il introduit le terme « rayons cosmiques »

Compton pense que ce sont des électrons.

Pour lever cette incertitude, **Rossi, Vallarta** suggèrent d'étudier l'influence du champ magnétique terrestre sur les RC:

Prédiction d'un minimum d'intensité à l'équateur; les RC de faible impulsion, s'ils sont chargés, n'atteignent pas le sol

→ Effet de la latitude

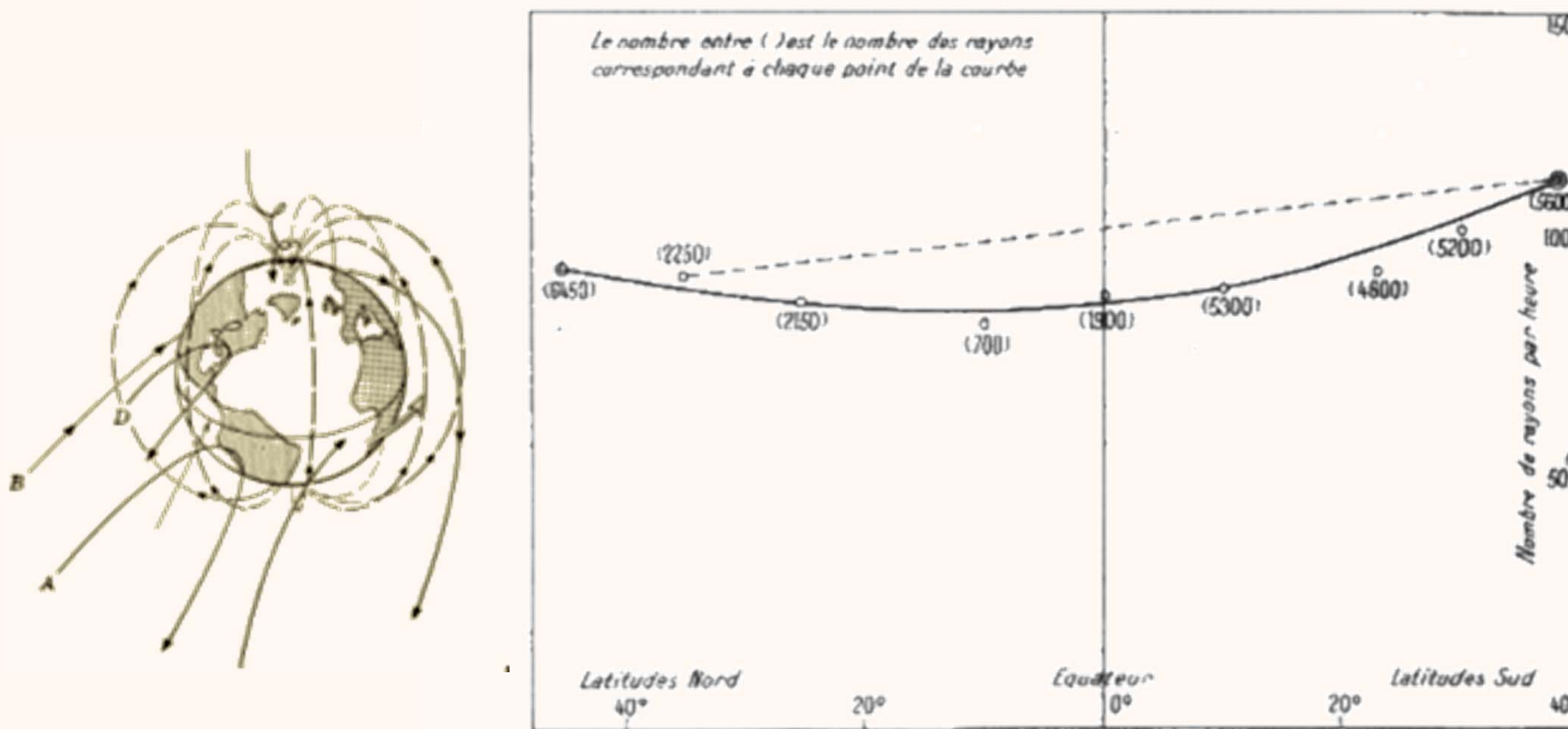
Expériences:

J. Clay (entre Amsterdam et l'Indonésie)

P. Auger et L. Leprince Ringuet (Le Havre - Buenos Aires)

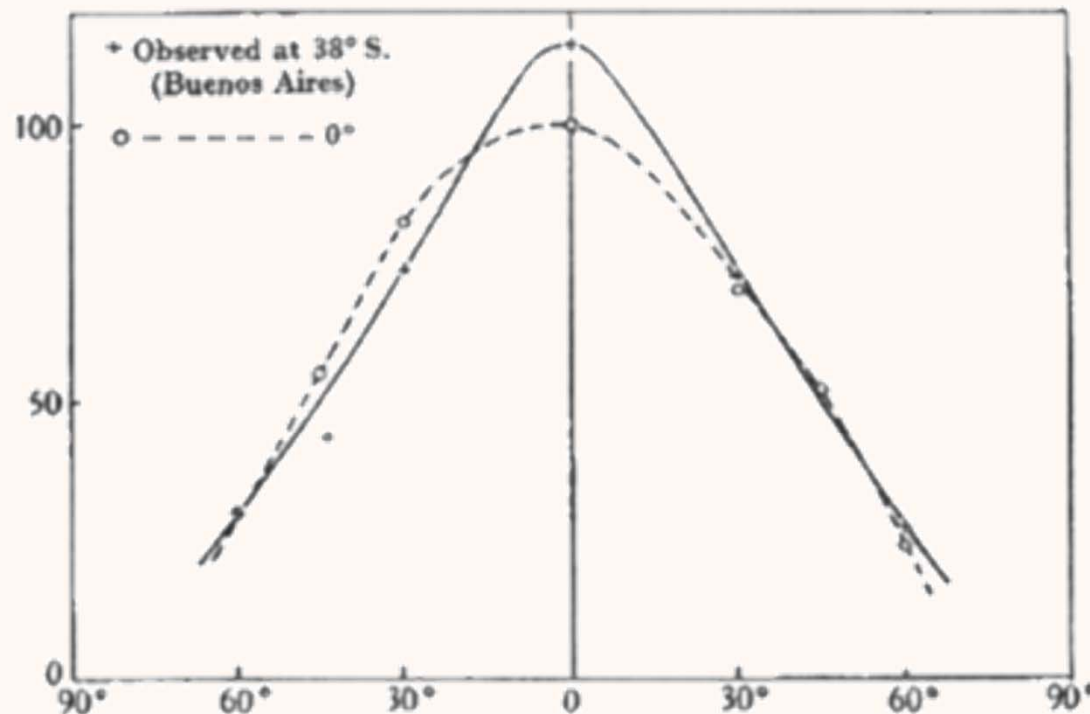
Ionisation en fonction de la Latitude

Dans un voyage en bateau, entre Le Havre et Buenos Aires, mesurent l'ionisation avec trois G-M et trouvent un minimum à l'équateur.



Auger & Leprince-Ringuet [CRAS [197](#) 1242 (1933)]

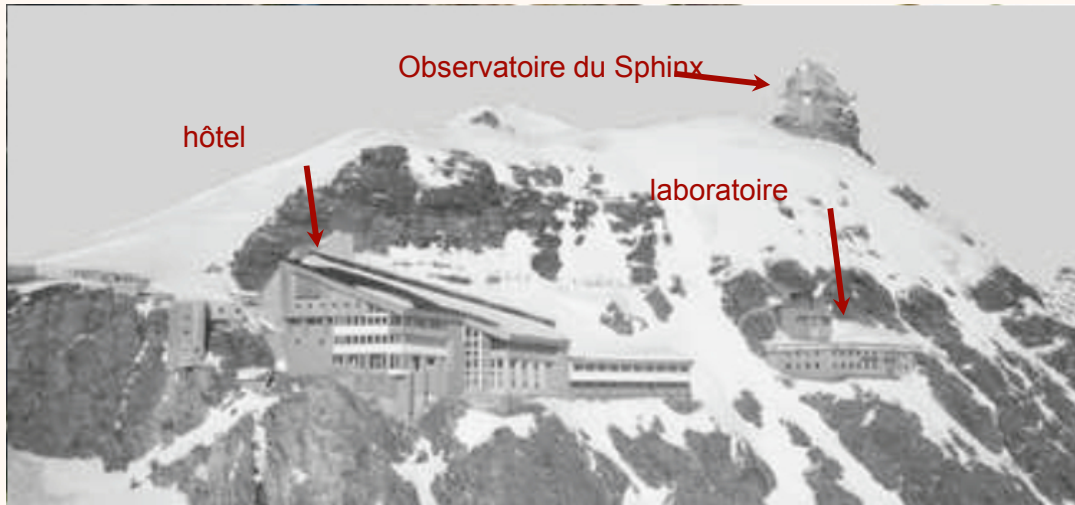
Les rayons cosmiques sont des particules chargées !!!



Nombre des rayons en fonction de la direction.
Abcisses : angle avec la verticale.
Ordonnée : nombre de rayons par heure.

Les rayons cosmiques sont en majorité chargés positivement.

Laboratoires en altitude



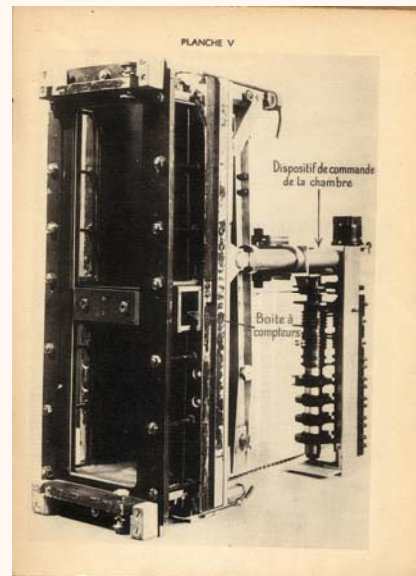
laboratoire de la JungFraujoch (3 500 m)



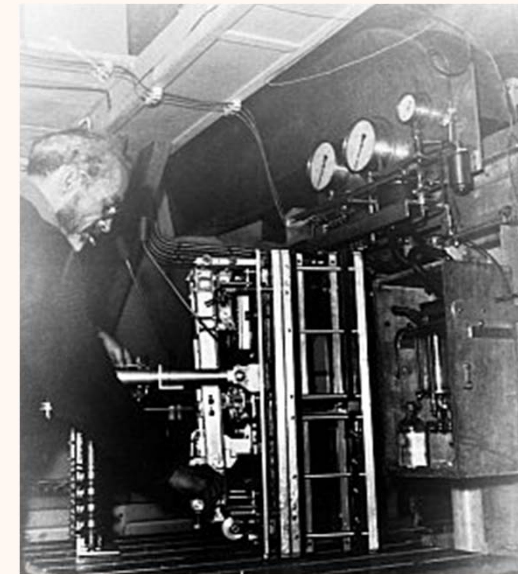
Pic du Midi de Bigorre (3000 m)



Aiguille du Midi Chamonix (3650 m) 1942



Aiguille du midi : chambre à brouillard de 55 cm de E Nagéotte



La chambre à brouillard

- Inventeur : Charles Thomson Rees Wilson, 1912, météorologue
- Premier objectif : étudier l'influence du rayonnement cosmique sur la formation des nuages

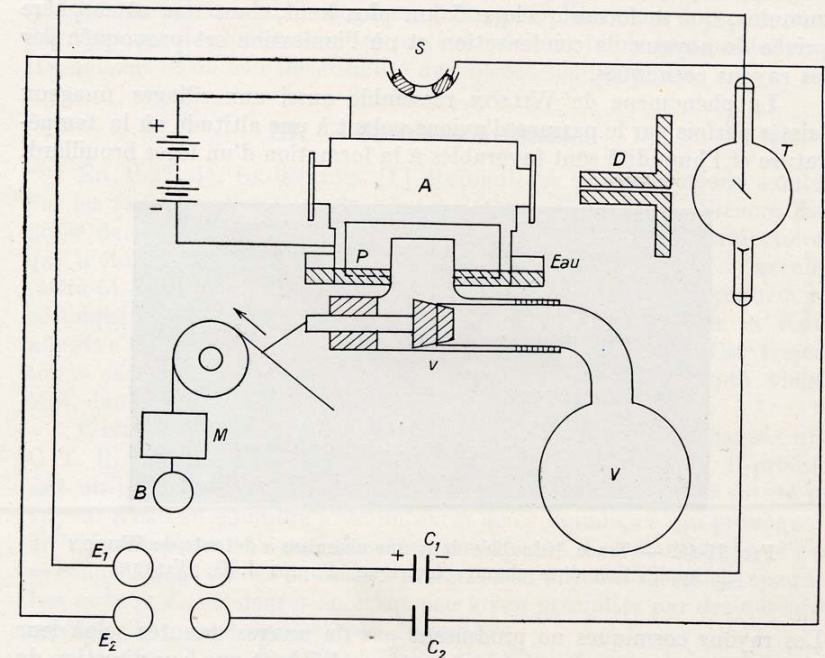
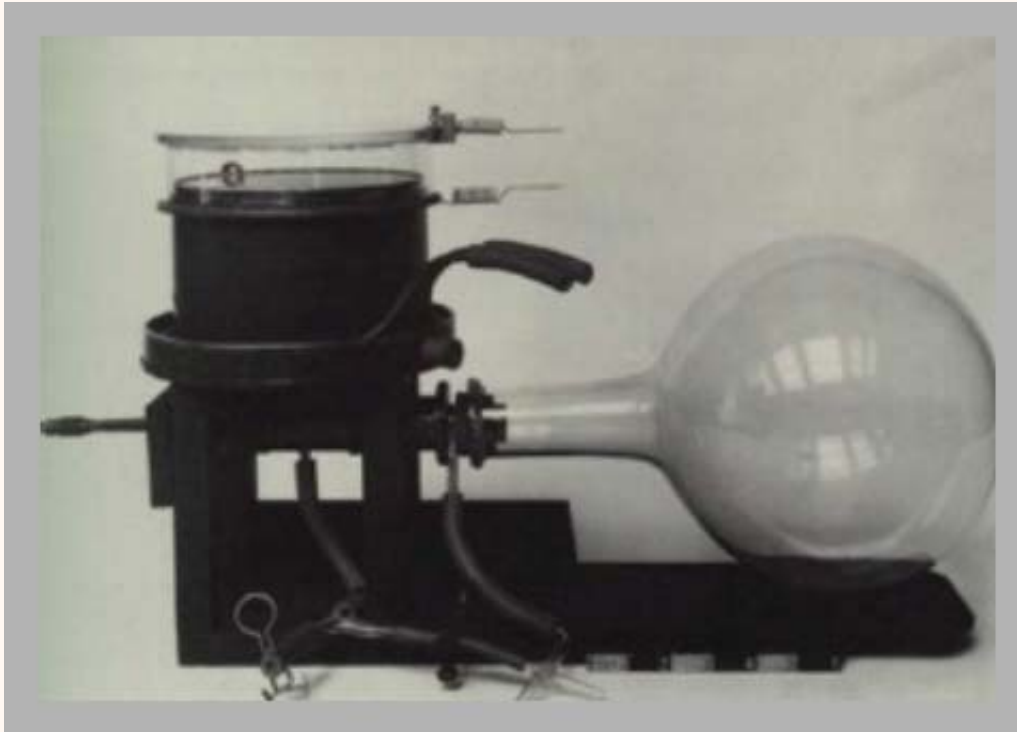


FIG. II-65. — Chambre originale de C. T. R. WILSON.

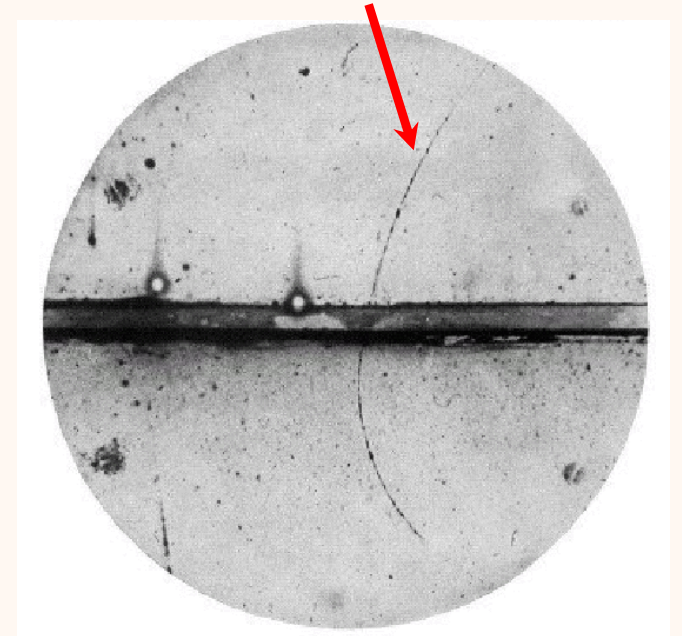
- **Découverte** : dans certaines conditions, un brouillard peut rendre visible des particules et du rayonnement.

1932: première grande découverte

- Carl David Anderson découvre le positon e^+



Electrons chargés positivement, observés avec une chambre à brouillard dans un champ magnétique



Découverte de l'anti-matière prédite par Dirac

Non Relativiste

$$E = \frac{m v^2}{2} = \frac{p^2}{2m}$$

Relativiste

$$\begin{cases} E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2 \\ E = \pm \sqrt{m^2 c^4 + p^2 c^2} \end{cases}$$

Anti-matière = solutions négatives

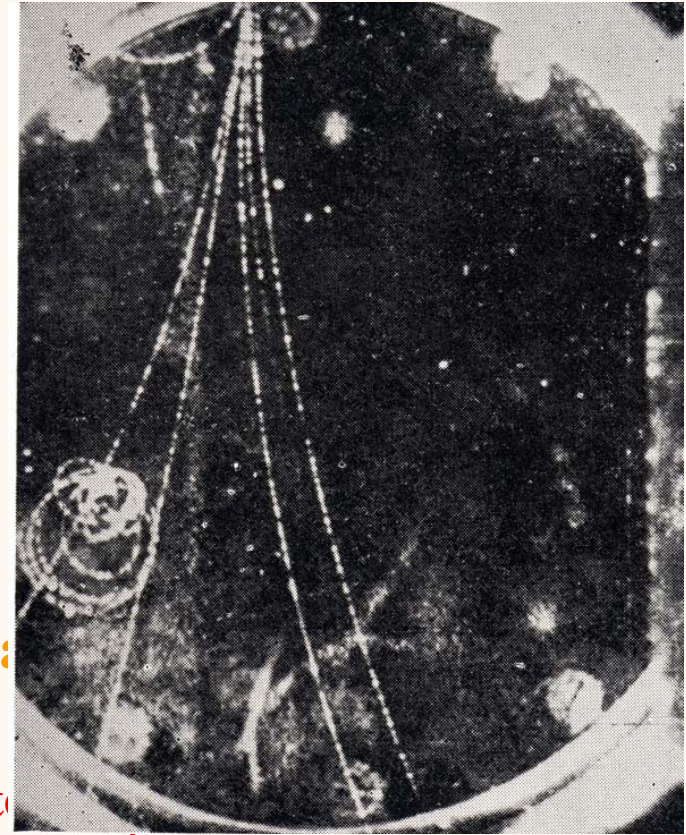
Début de la physique des particules

1932: première grande découverte

- Carl David Anderson découvre le positon e^+



Electrons chargé
positivement, observé
avec une chambre à
brouillard dans un
champ magnétique



Découverte de l'anti-matière prédite par Dirac

Non
Relativiste

$$E = \frac{m v^2}{2} = \frac{p^2}{2m}$$

Relativiste

$$E = \pm \sqrt{m^2 c^4 + p^2 c^2}$$

Anti-matière = solutions négatives

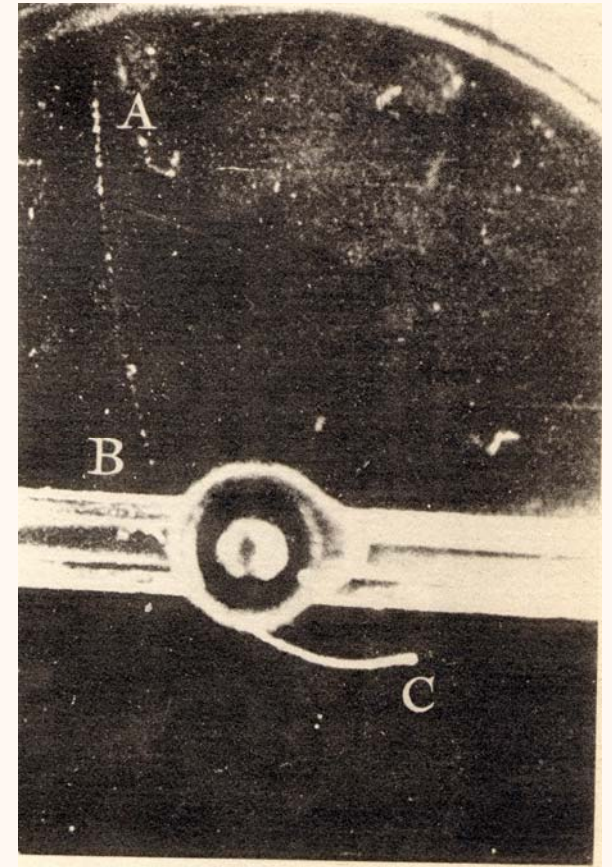
Début de la physique des particules

1936: découverte du muon dans le rayonnement cosmique

Carl Anderson et Seth Neddermeyer

- rayonnement cosmique chargé, pénétrant
- formé par des particules massives avec une masse comprise entre électron et le proton
- il ne sent pas la force nucléaire
- il se désintègre

Particle	Electric charge ($\times 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$)	Mass ($\text{GeV} = \times 1.86 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$)
<i>e</i>	-1	0.0005
<i>p</i>	+1	0.938
<i>n</i>	0	0.940
γ	0	0



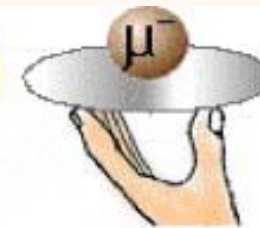
Premier cliché d'un muon
Anderson et Neddermeyer

1936: découverte du muon dans le rayonnement cosmique

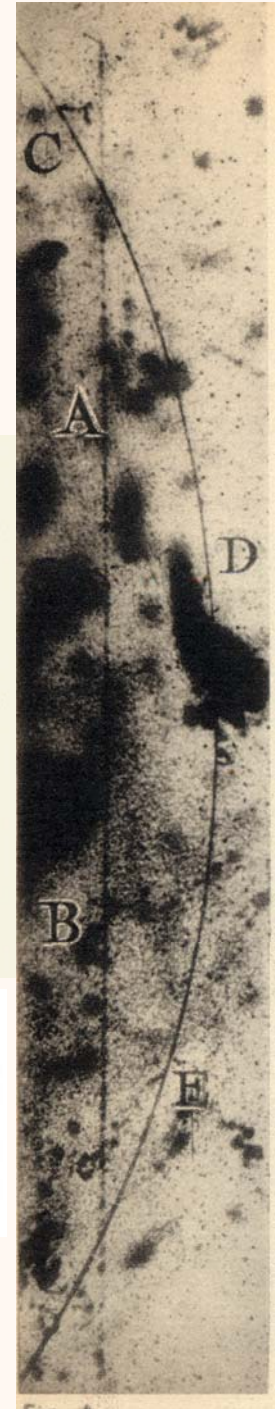
- Carl Anderson et Seth Neddermeyer
- rayonnement cosmique chargé, pénétrant
- formé par des particules massives avec une masse comprise entre électron et le proton
- il ne sent pas la force nucléaire
- il se désintègre

Particle	Electric charge ($\times 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$)	Mass ($\text{GeV} = \times 1.86 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$)
e	-1	0.0005
μ	-1	0.106
p	+1	0.938
n	0	0.940
γ	0	0

Who ordered THAT?!?!

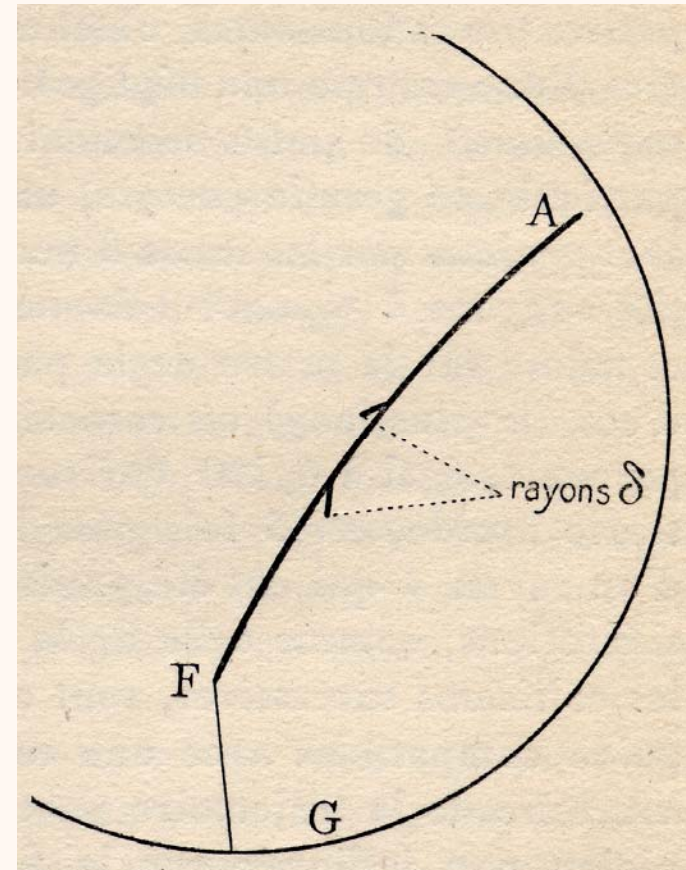
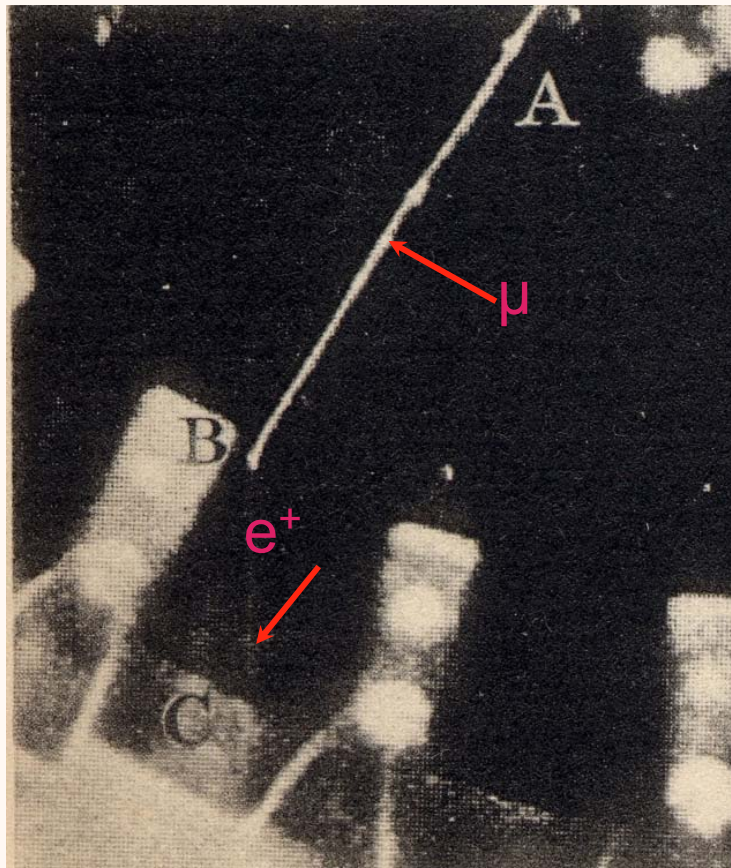


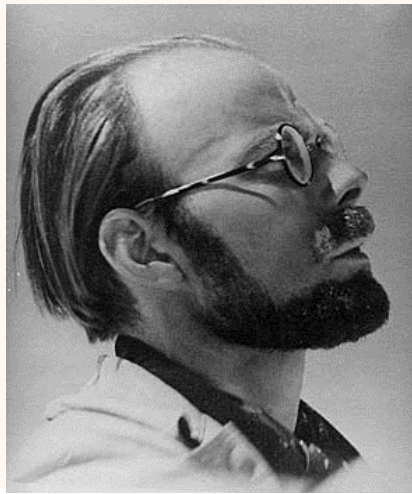
Cliché Louis Leprince-Ringuet



1940: confirmation de la désintégration du muon

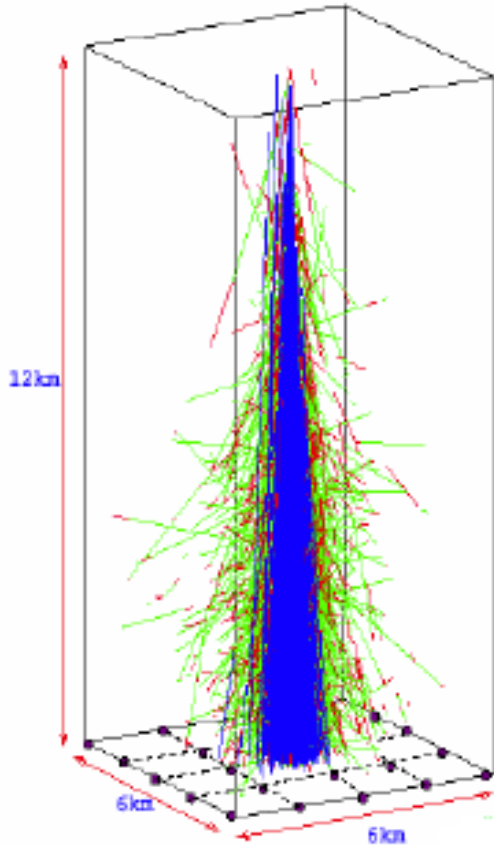
- première observation directe (Williams et Roberts)





1938 :

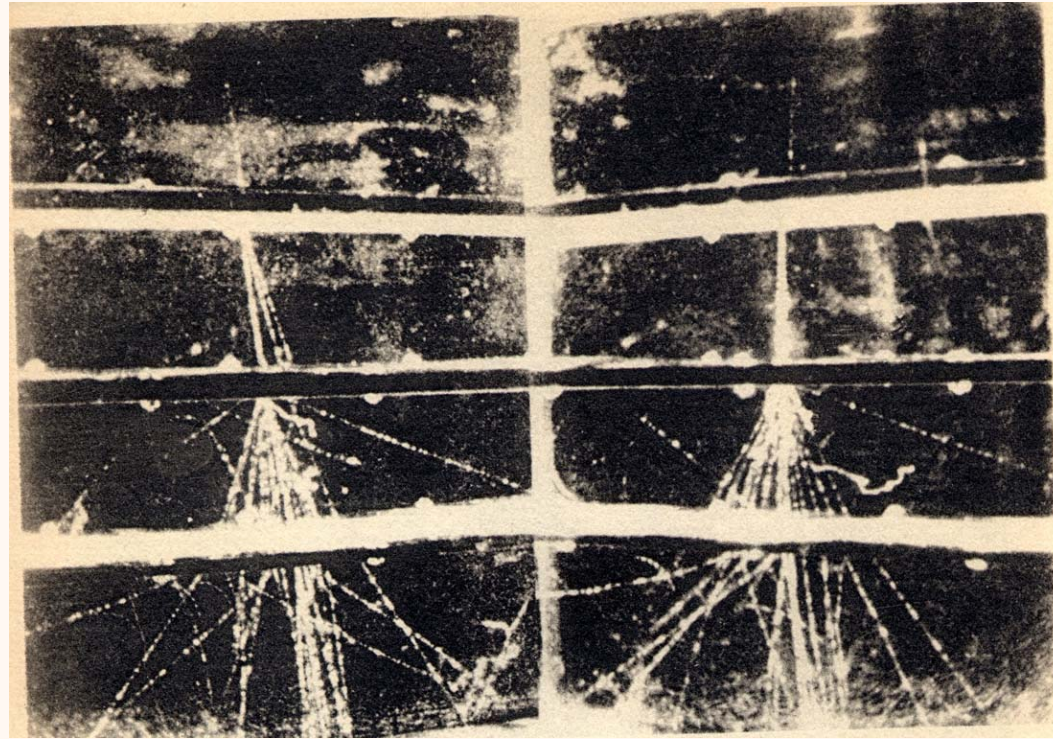
Auger découvre les « grandes gerbes »



- ◆ Ce sont des averses soudaines de particules, résultant d'un seul rayon cosmique initial d'énergie colossale.
- ◆ découvertes par Pierre Auger en 1938, au laboratoire Jean Perrin au JungFraujoch



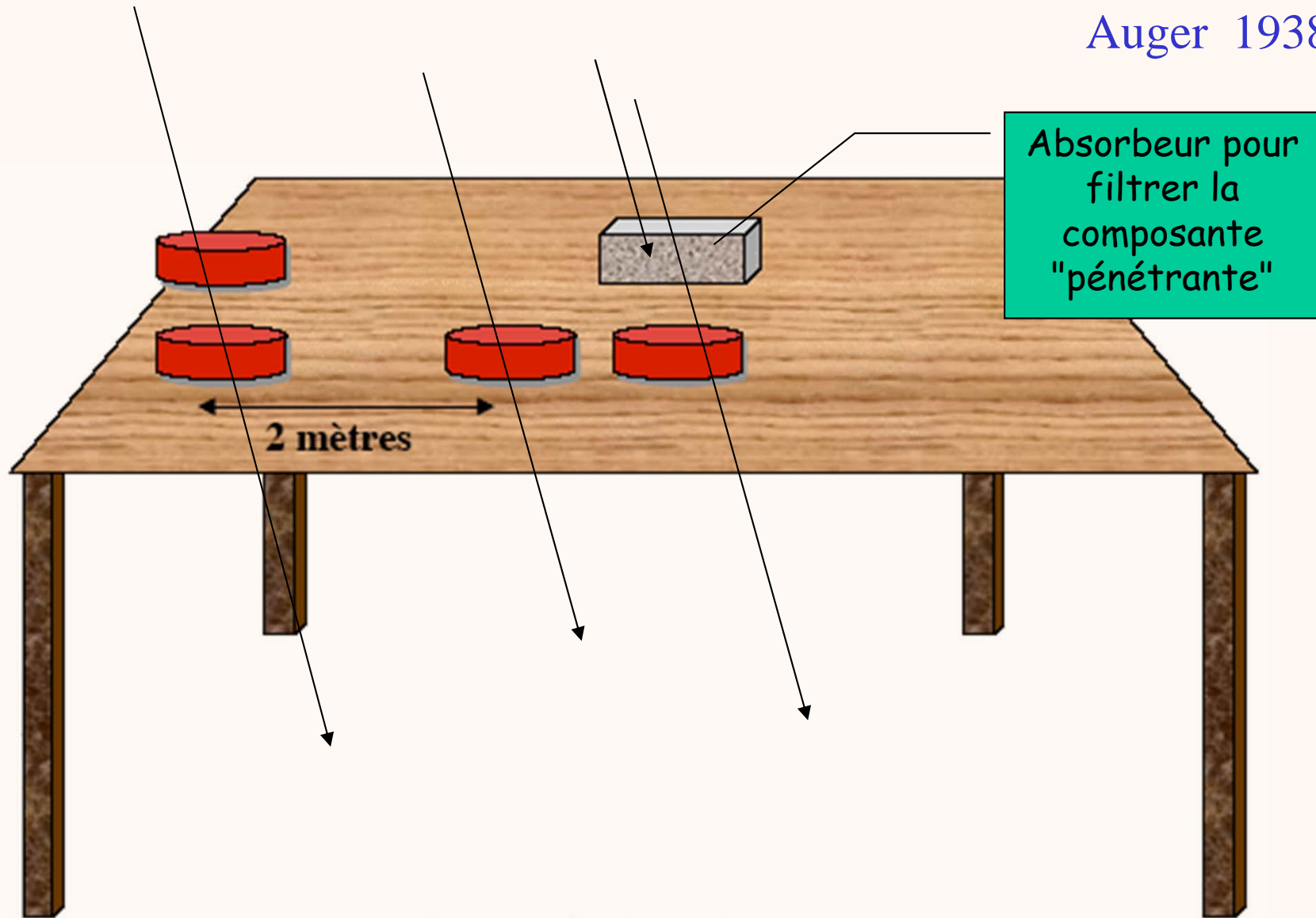
Développement de cascades de particules (gerbes)



- Pierre Auger : il doit se former des gerbes semblables dans l'atmosphère

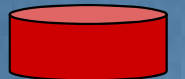
Coïncidences de détection

Auger 1938



Jusqu'où cela peut-il aller ?

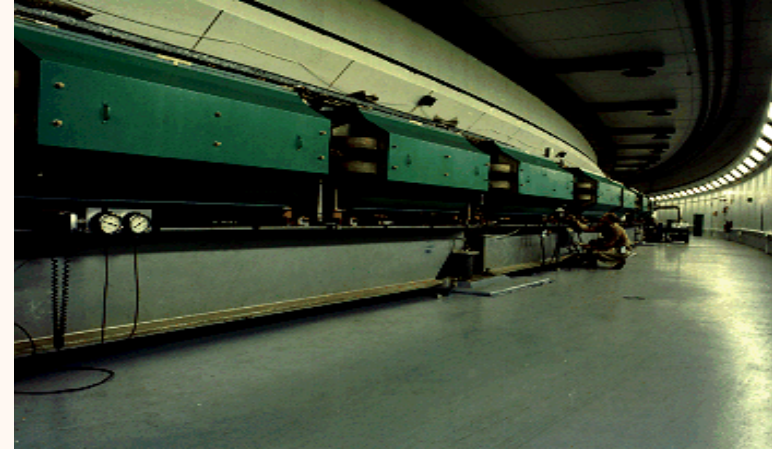
5 mètres → 40' en moyenne
20 mètres → 1h15 en moyenne
...
1 km → des années !!!



Dans les années 50 les RC sont remplacés par les accélérateurs



Cosmotron (1952)



Synchrotron à Gradients Alternés
AGS (1960 ...)



CERN

La mutation 1956 → 1962 (en Europe)

*Conférence Internationale "Les Mésons et Particules récemment découvertes"
Venise 22-28 Septembre 1957*

Trois sujets "phares": (1) Production et propriétés des particules étranges.
(2) Le " $\theta - \tau$ " puzzle et la violation de la parité.
(3) Les antiprotons.

Les données expérimentales: (1) 50% RC (CW et émulsions) 50% AC
(2) 70% RC (CW et émulsions) 30% AC (BRL)
(3) 10% RC (Amaldi) 90% AC (BRL)

ICHEP CERN Juillet 1962 (1) Physique des pions et nucléons.
(2) Propriétés e-m des nucléons.
99% AC (CB) (3) Physique des Particules Étranges.
(4) Interactions faibles. (interaction des neutrinos)
(5) HEP

Les rayons cosmiques au Pic

1938 : Installation de l'équipe de Pierre Auger
Etude des gerbes atmosphériques

1949 : Installation de l'équipe de Manchester de P.M.S. Blackett
Arrivée de l'électricité -> électro-aimant pour chambre de Wilson
découverte de la particule " Hypéron "

1951 : Installation de l'équipe de Louis Leprince-Ringuet (Ecole polytechnique)
Etude des particules « étranges ». Découverte du méson K_{μ}

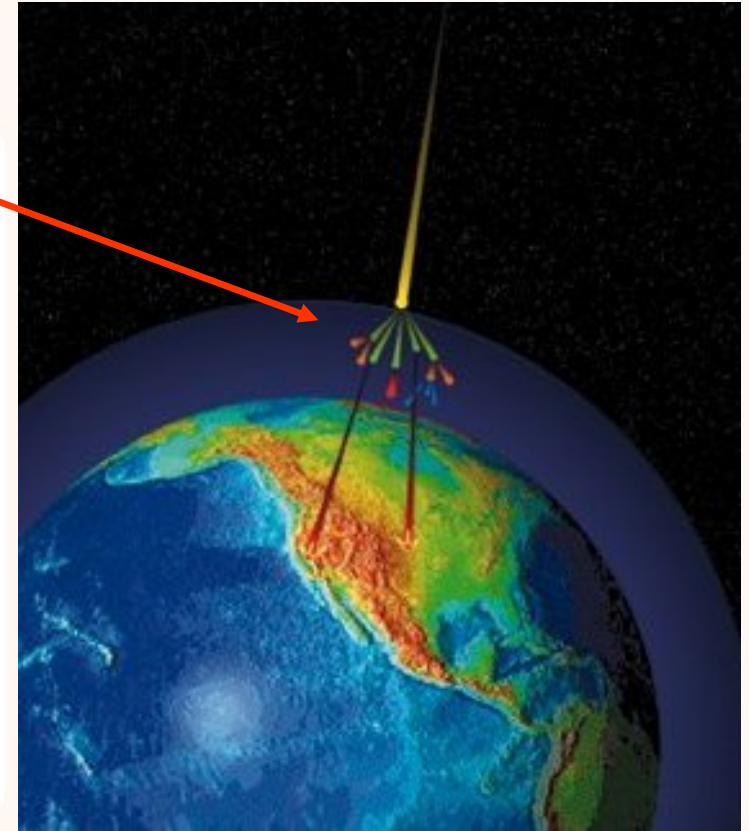
Congrès International sur le Rayonnement Cosmique
Bagnères-de-Bigorre - Juillet 1953

1957 : Départ de l'équipe de l'Ecole polytechnique

Les rayons cosmiques aujourd'hui

- Rayons cosmiques *secondaires*

- **Secondaires** : particules observées sur terre produites par l'interaction d'un primaire avec des molécules de la haute atmosphère
- => des électrons, muons, protons, neutrons... créés dans les couches supérieures de l'atmosphère
- particule la plus abondante au niveau de la mer : le muon
 - en moyenne un muon /cm²/mn.



- Les particules cosmiques *primaires*

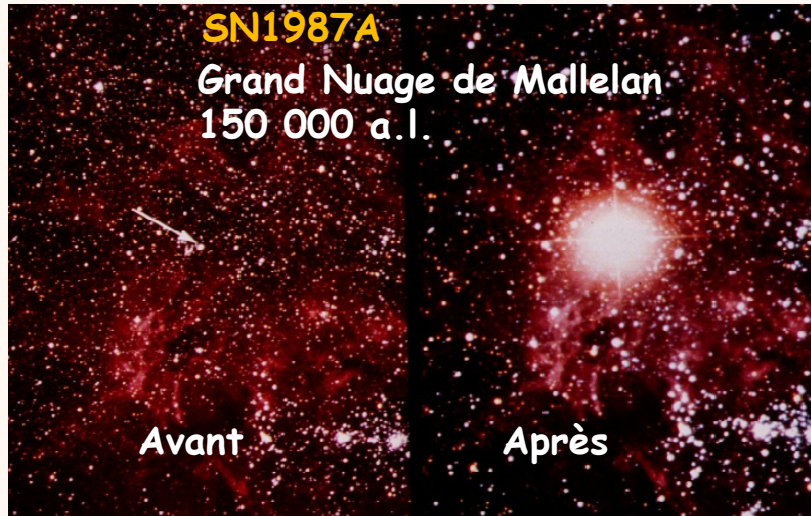
- voyagent dans l'espace interstellaire
- sur des millions d'années lumière,
- à des vitesses proches de celle de la lumière

d'où
viennent-
elles ?

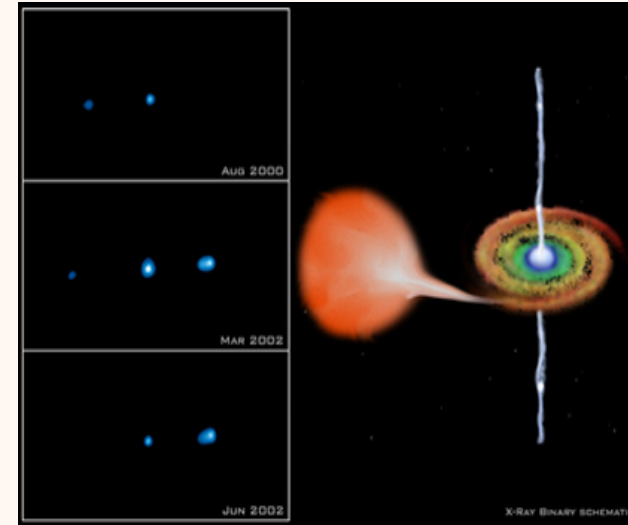
- Vent solaire :
- Plasma $\sim 100\,000\text{ K}$
 - vitesse $\sim 500\text{ km/s}$ $\sim 1000\text{ km/s}$



Sources possibles de «rayons cosmiques»



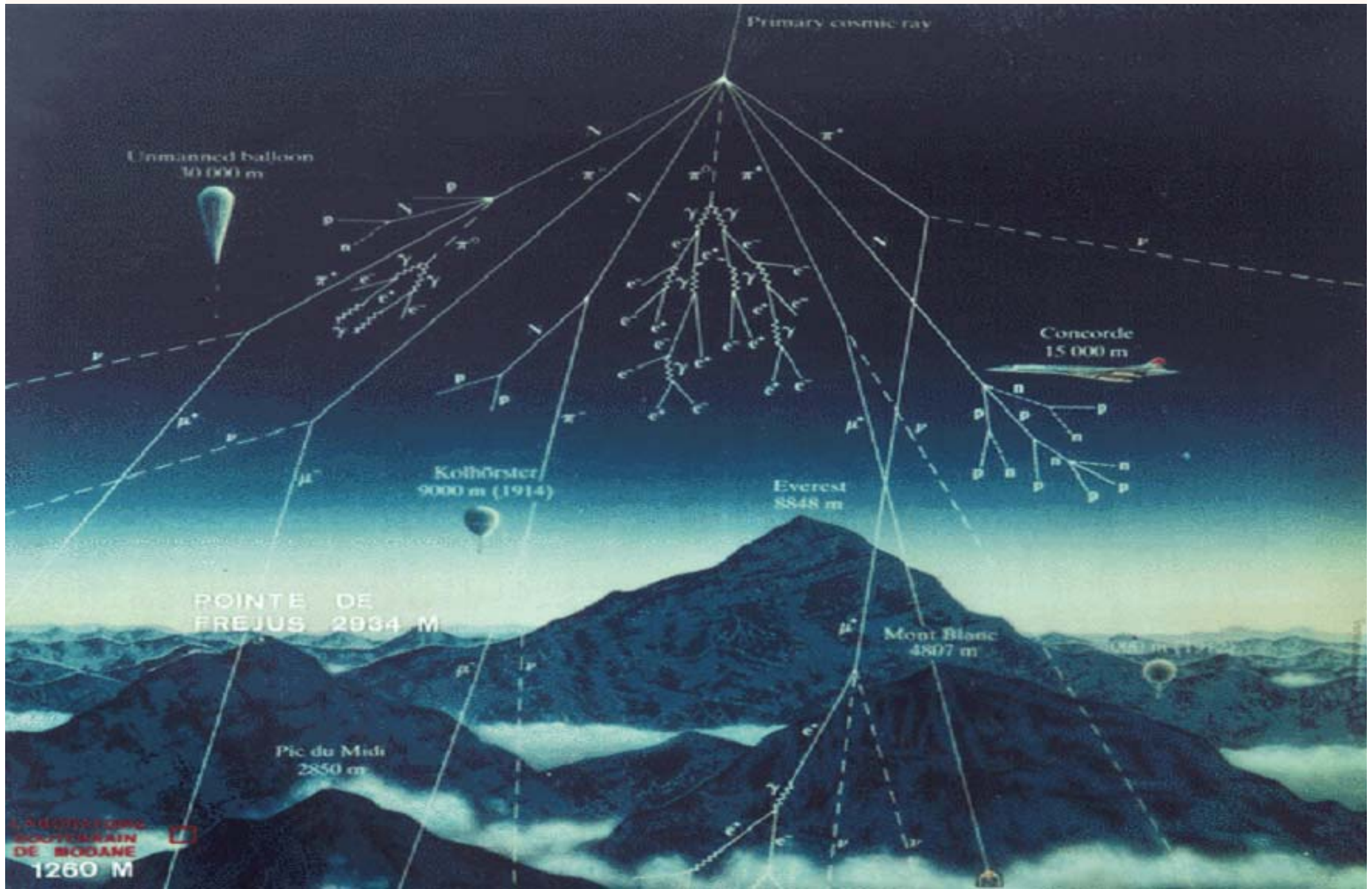
Supernovae



noyaux actifs de galaxies (AGN)



L'atmosphère comme cible



Composition

Primaires

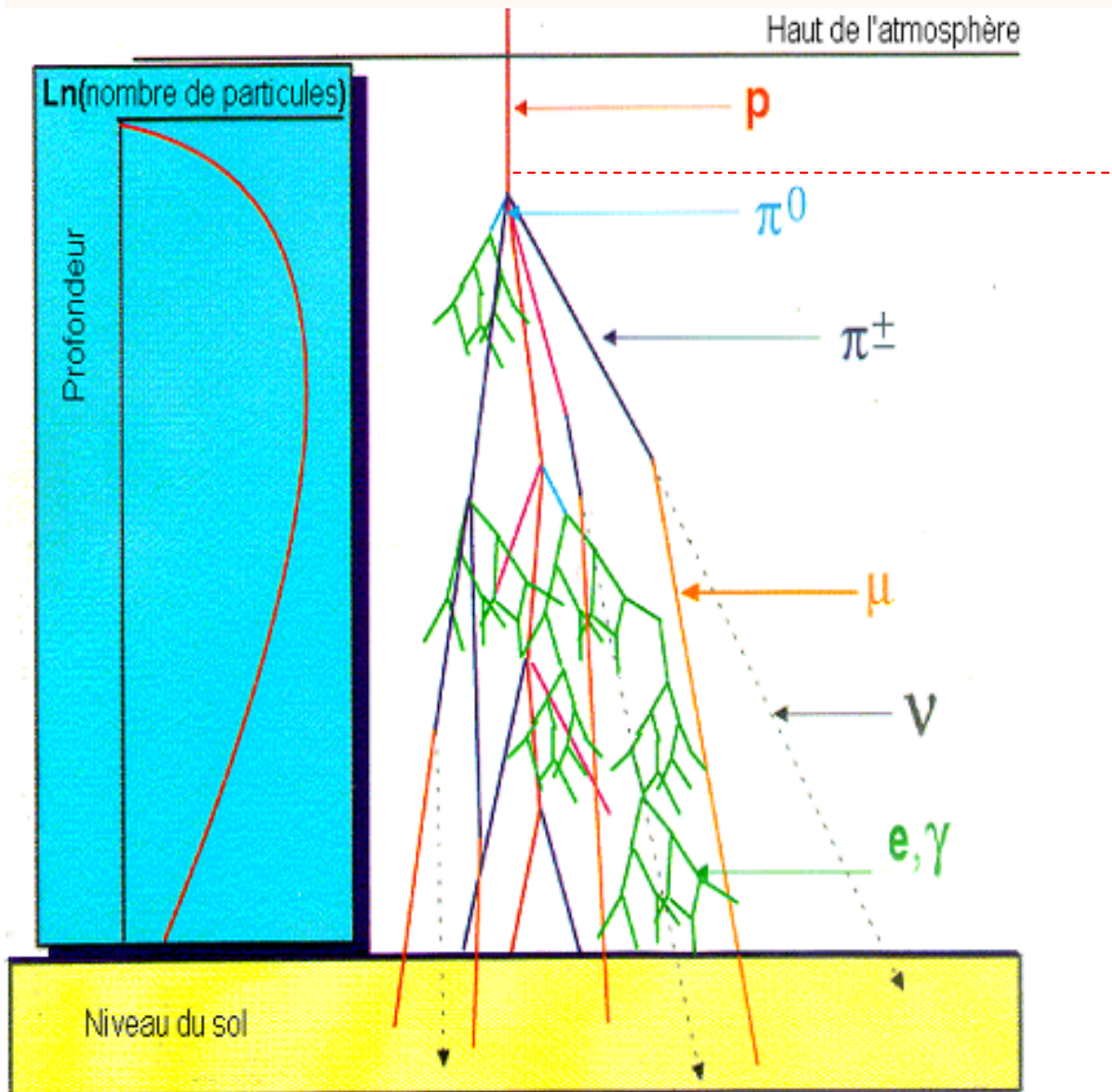
p : 80% , γ : 0.1%

α : 9% , ν : 0.1%

n : 8%

e^- : 2%

$Z > 3$: 1%



Secondaires au niveau du sol

68% ν : invisibles

Basse énergie (qq GeV) :

μ 100 %

γ et e n'arrivent pas au sol

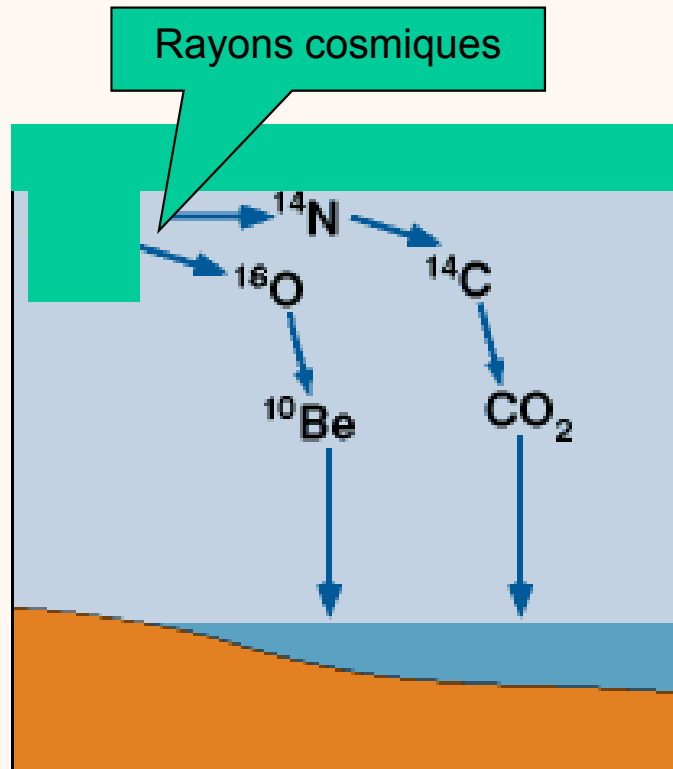
Haute énergie ($\sim 10^{20}$ eV) :

γ qq milliards (10^{10})

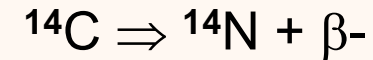
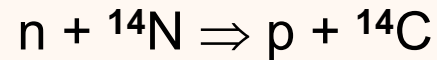
e ~ 1 milliard (10^9)

μ ~ 1 million (10^6)

La belle aventure du ^{14}C



Le ^{14}C est produit dans l'air par les rayons cosmiques à un taux de 7 kg/an. Une fois produit il a une durée de vie de 8300 ans ($\text{C}^{14}/\text{C}^{12} = 10^{-12}$)



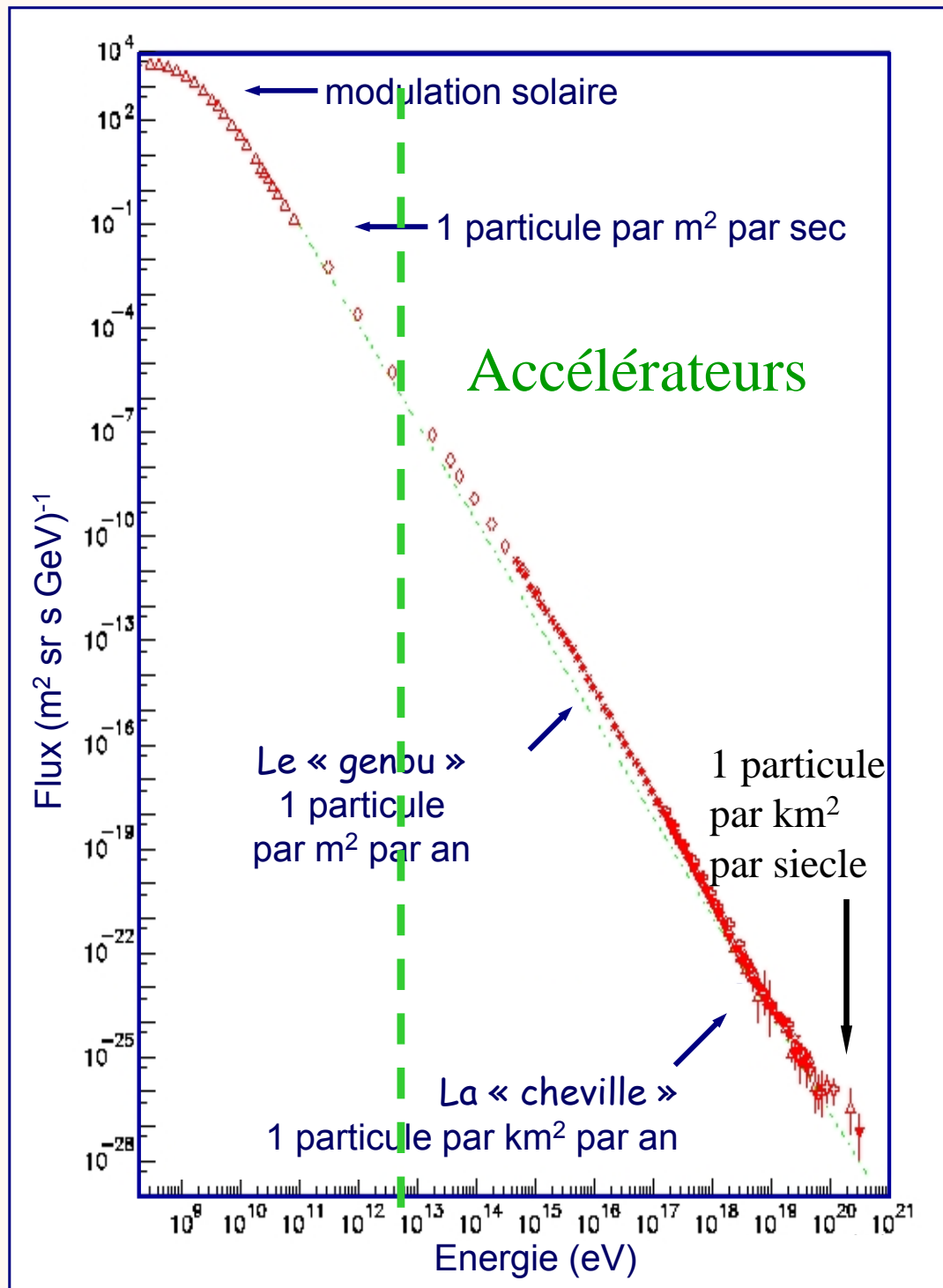
Lorsqu'une créature naît elle se met en équilibre avec le ^{14}C de l'atmosphère. Quand elle meurt, elle ne renouvelle plus son ^{14}C

=> son stock diminue par rapport à ^{12}C qui, lui, est fixe.

W. F. Libby 1949 (Prix Nobel en 1960), a l'idée de s'en servir comme marqueur du temps.

Spectre en énergie

- n Spectre régulier sur 12 ordres de grandeur en énergie, et 32 ordres de grandeur en flux !
- n Une légère rupture vers $3 \cdot 10^{15}$ eV : le « genou »
- n Une autre vers 10^{18} eV : la « cheville »
- n Spectre inconnu aux deux extrêmes
 - u Modulation solaire
 - u Extrême rareté...



*L'Observatoire
Pierre Auger*

Etude des rayons cosmiques autour de 10^{20} eV

Etat des connaissances en 1995

~20 événements au-dessus de 10^{20} eV

6 expériences avec chacune quelques événements détectés

2 expériences en désaccord sur le spectre en énergie

... avec 2 techniques de détection différentes

=> Détecteur géant avec 2 techniques de détection :

* réseau de surface : coupe transversale de la gerbe

* détecteur de fluorescence : développement longitudinal de la gerbe

Paramètres à mesurer : Direction, Énergie, Nature

Définition du détecteur

Etude des rayons cosmiques autour de 10^{20} eV

Evénements extrêmement rares : 1 evt/km²/siècle

surface de détection importante : 30 evts/an = 3000 km²

Impact au sol important : qq 10^9 particules sur qq km²

Symétrie/direction du primaire : échantillonnage possible

réseau triangulaire : 1.5km entre détecteur → 1600 détecteurs

Synchronisation à moins de 15 ns

=> Détecteur autonome :

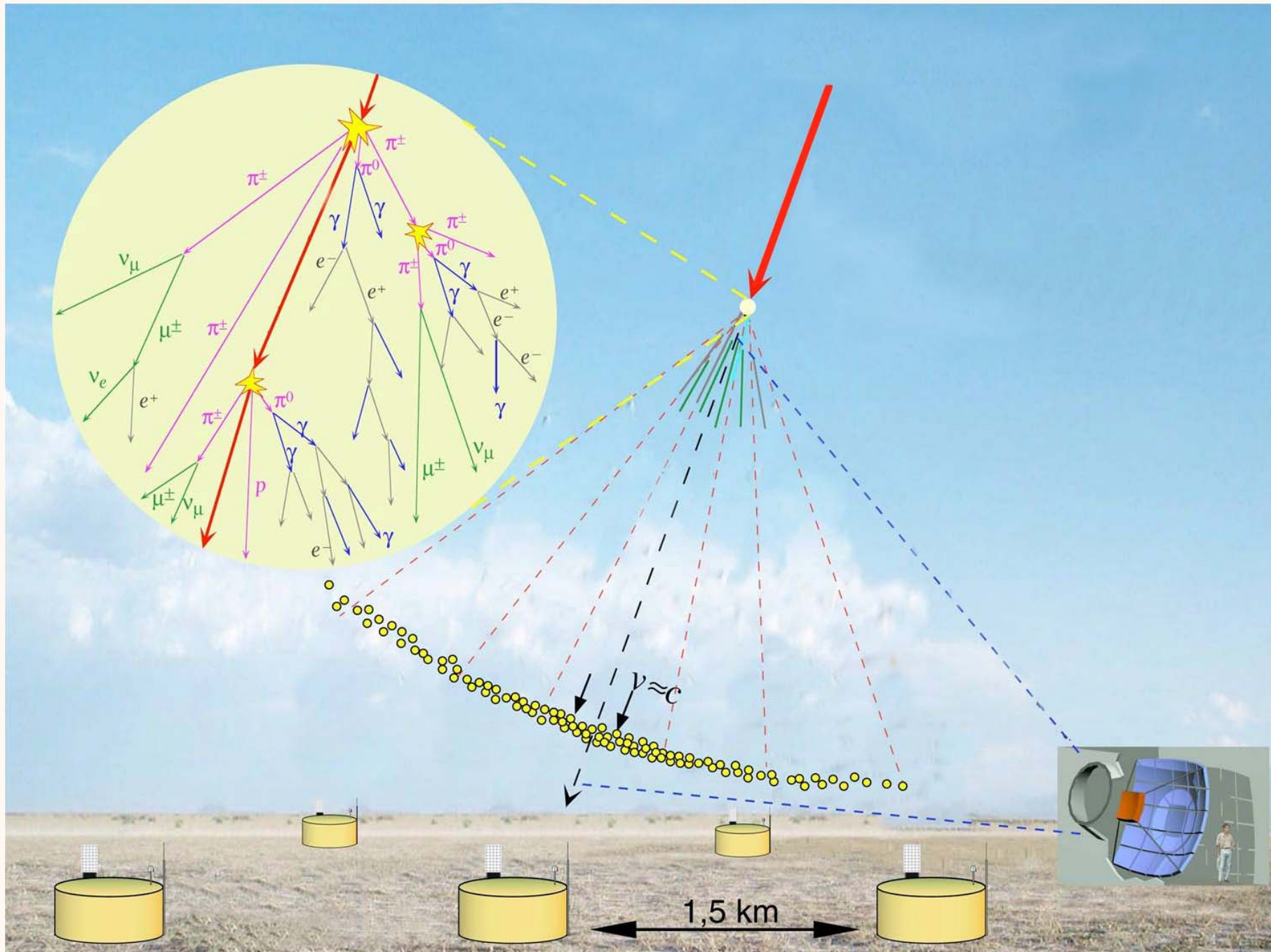
Alimentation sur batteries rechargées par panneaux solaires

Communications hertziennes avec le monde extérieur

Marquage en temps par GPS

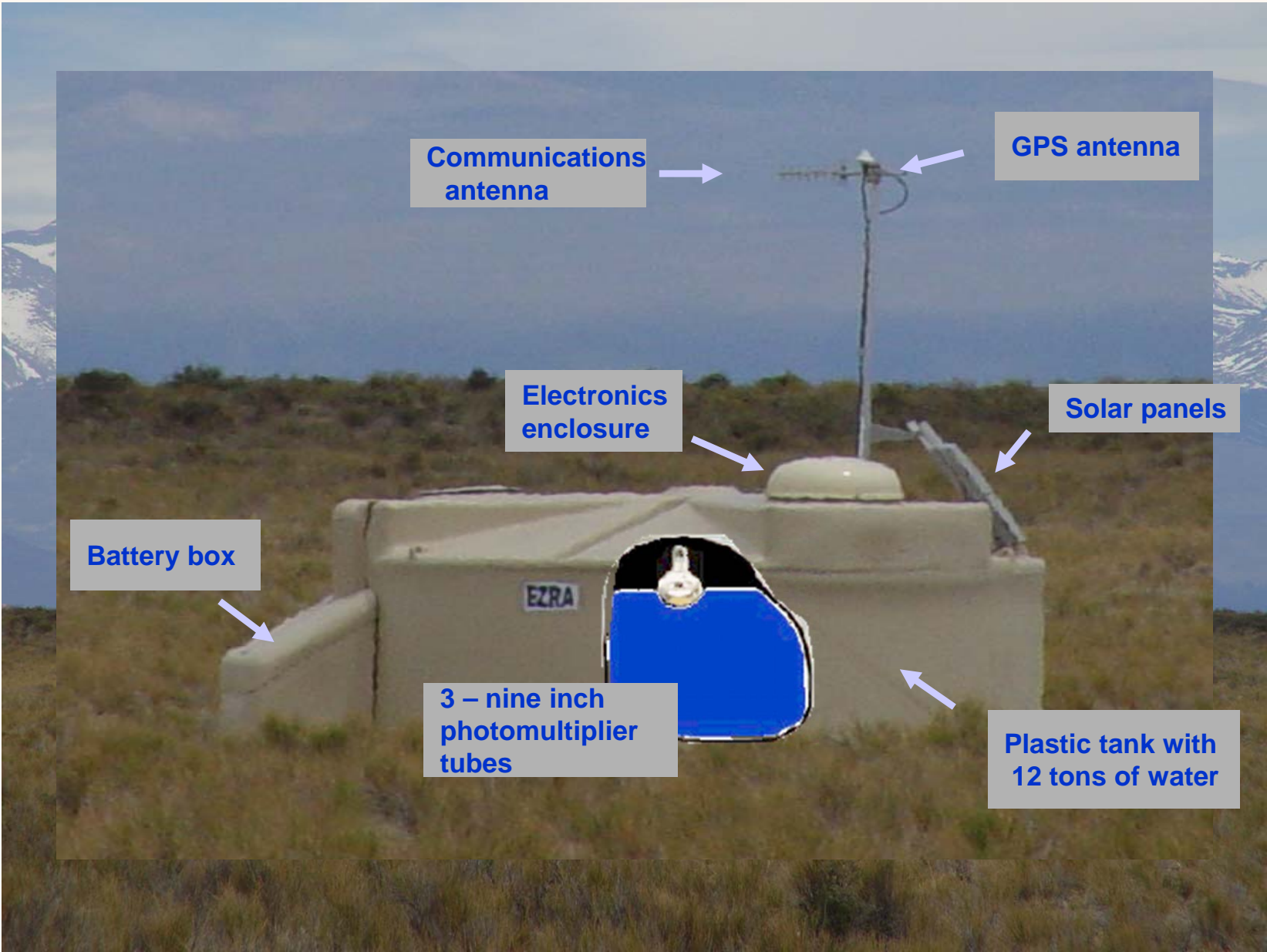
Intelligence locale pour gérer l'ensemble

La détection des gerbes atmosphériques



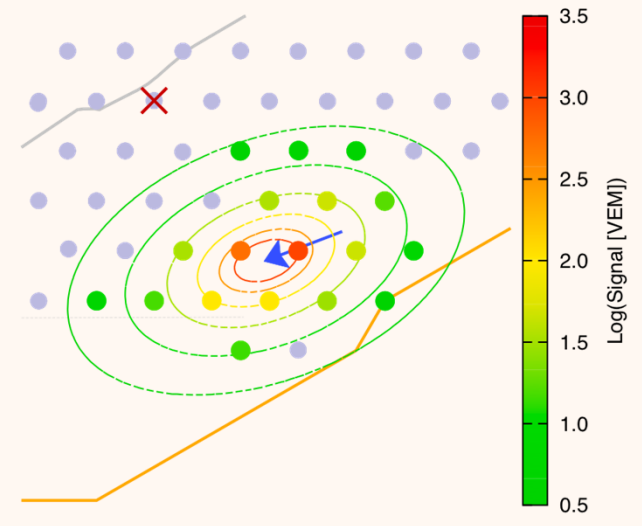
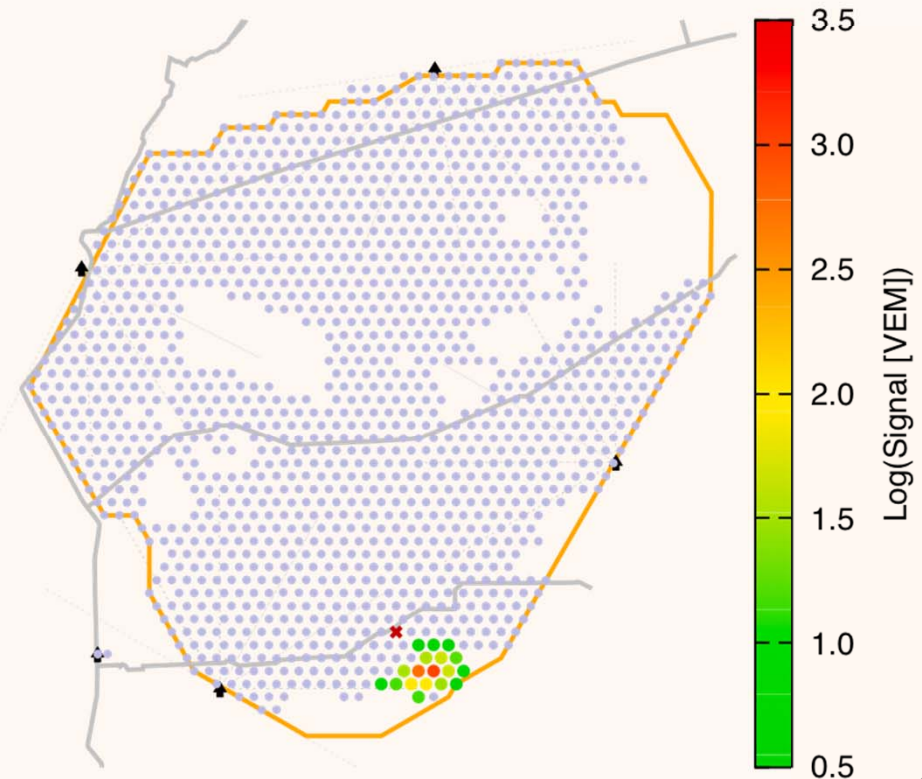
The Surface Array

Detector Station

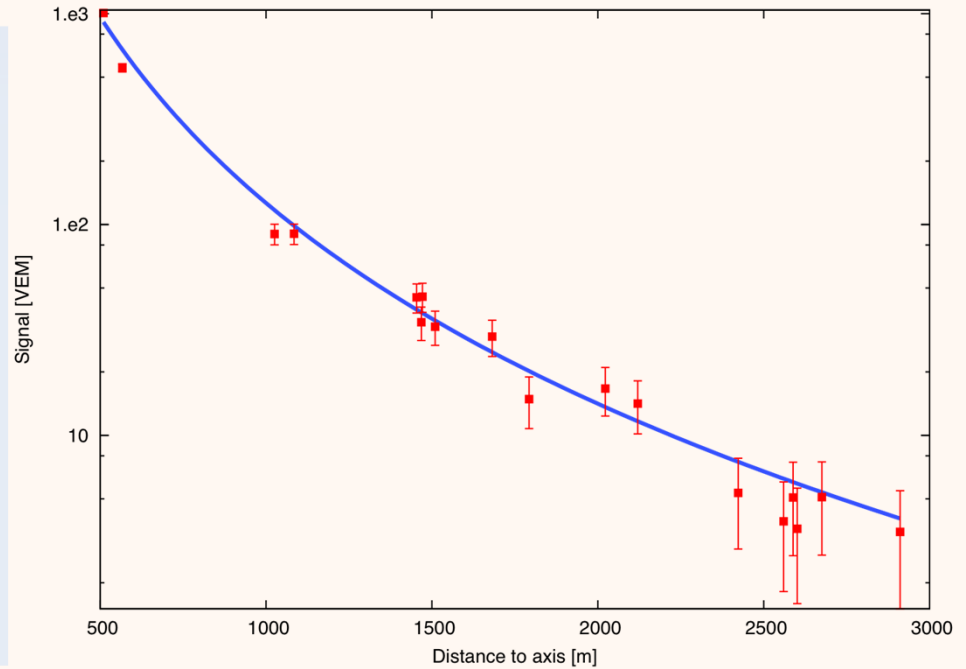


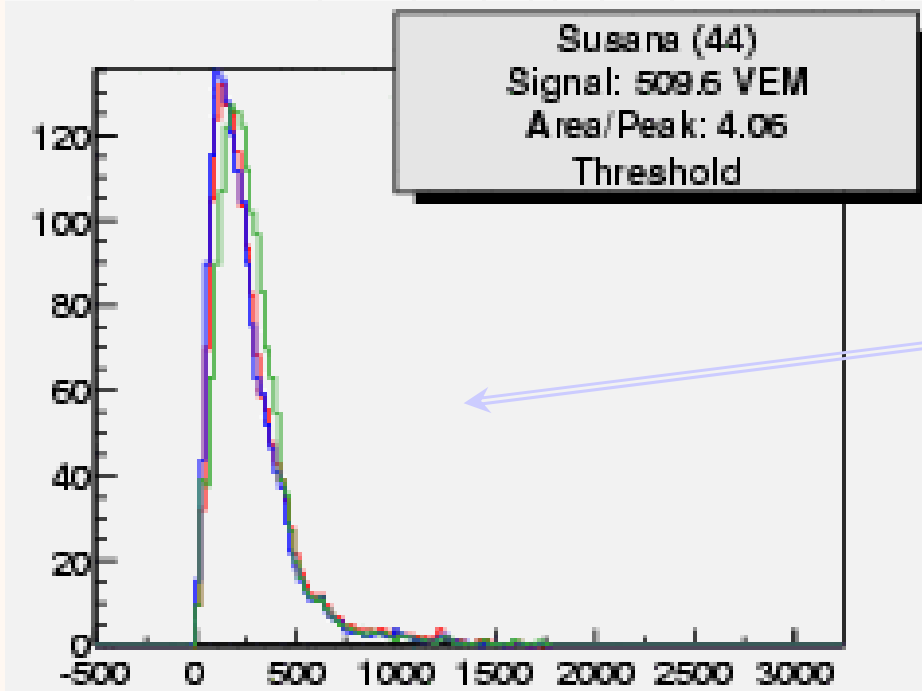






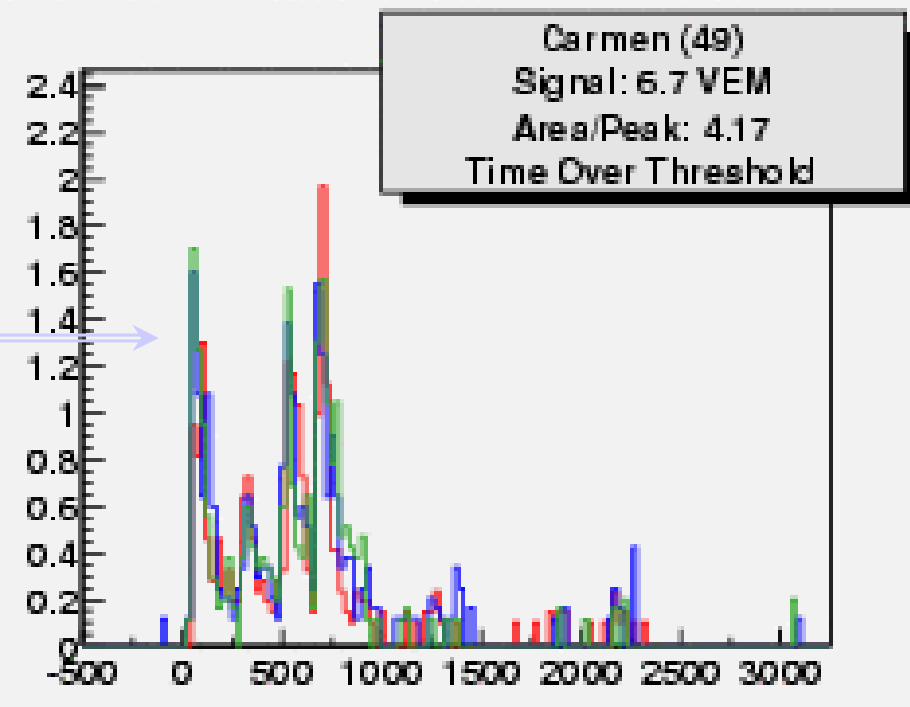
Generic Information	
Id / Date	4128900 / Tue Oct 30 11:14:14 2007
Nb. of stations	18
Energy	41.1 ± 1.4 FeV
Theta	54.5 ± 0.1 deg
Phi	20.9 ± 0.1 deg
Curvature	19.0 ± 0.9 km
Core Easting	479789 ± 14 m
Core Northing	6073404 ± 25 m
Reduced Chi ²	1.68





Près du coeur de la gerbe :
- beaucoup d'énergie déposée
- durée courte (<750 ns)

Loin du coeur de la gerbe :
- peu d'énergie déposée
- longue durée (~ 3µs)



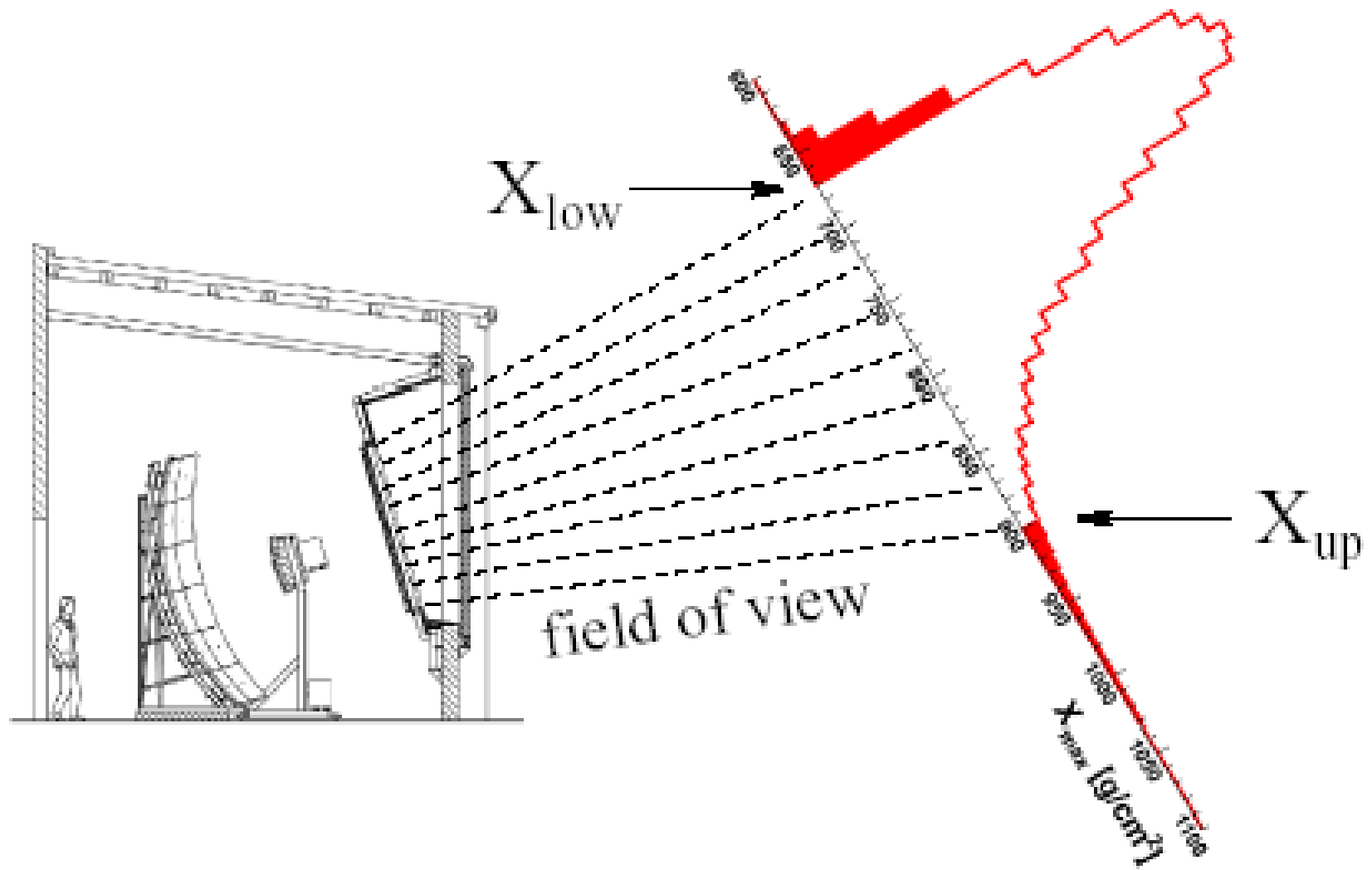
Le réseau de surface

Chaque détecteur de surface est équipé d'une unité de réseau sans fil qui communique avec une station de base située sur une tour de concentration :

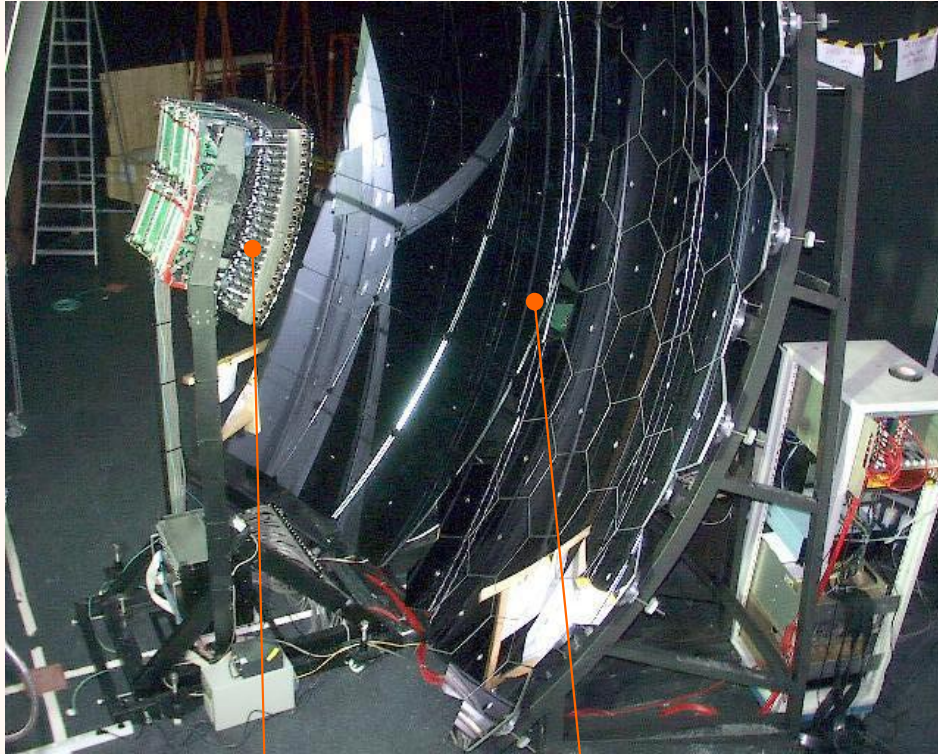
- le réseau opère dans la bande industrielle, scientifique et médical (ISM) : 902-928 MHz
- "over-the-air" bit rate de 200 kbits/s partagé entre toutes les stations d'un secteur
- volume de données 1200 bits/s pour chaque station
- le protocole garantit un accès au réseau à chaque détecteur toutes les secondes



Le détecteur de fluorescence

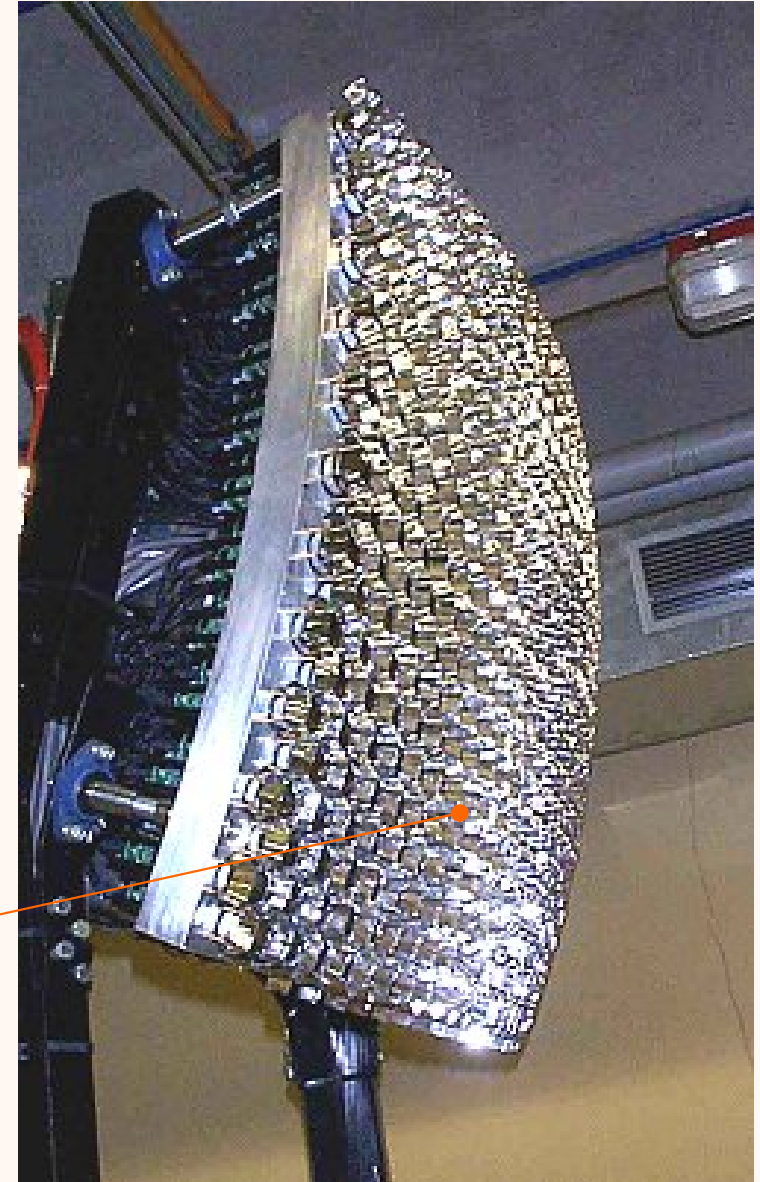


Le détecteur de fluorescence

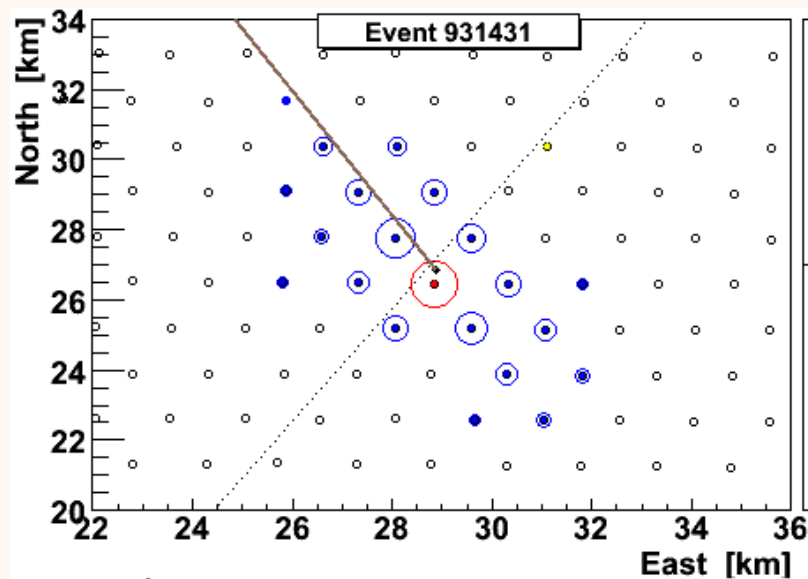


Miroir sphérique (3,5x3,5 m²)

Caméra (440 PM)

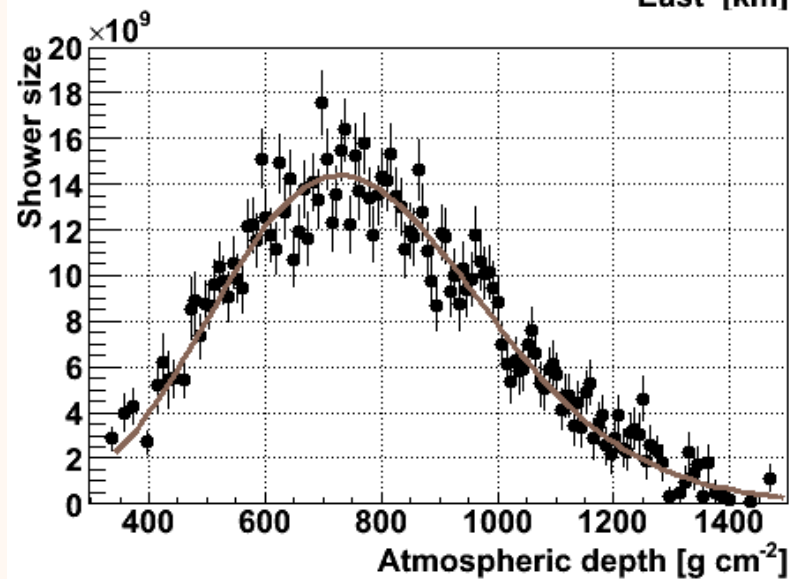


Hybrid Event



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

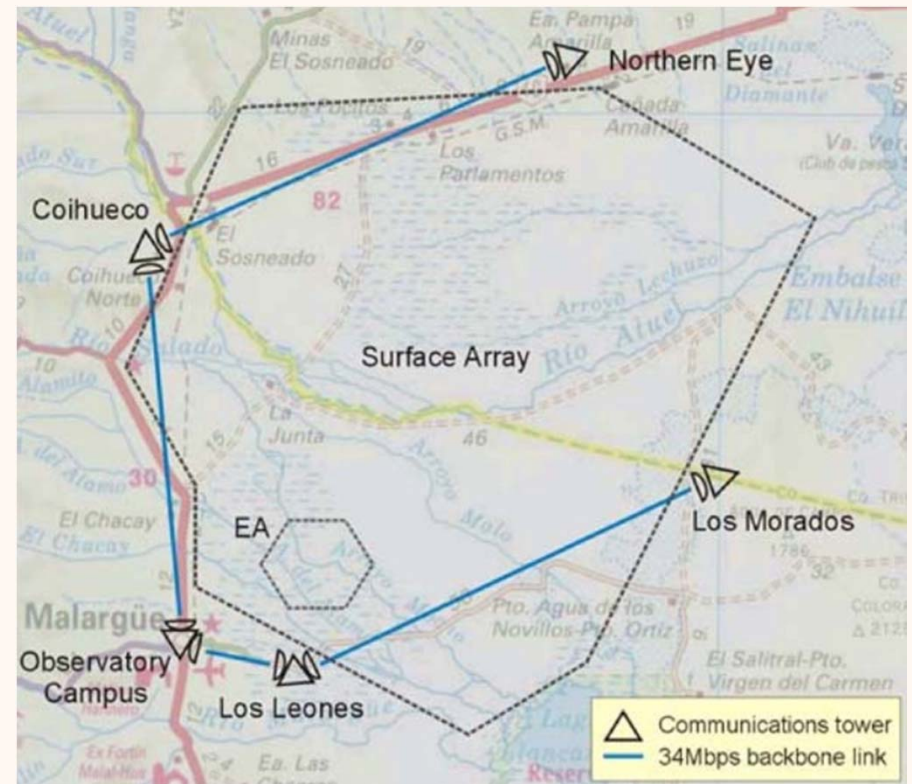
Shower Axis
 $\theta = (62.3 \pm 0.2)^\circ$
 $\phi = (119.7 \pm 0.1)^\circ$



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

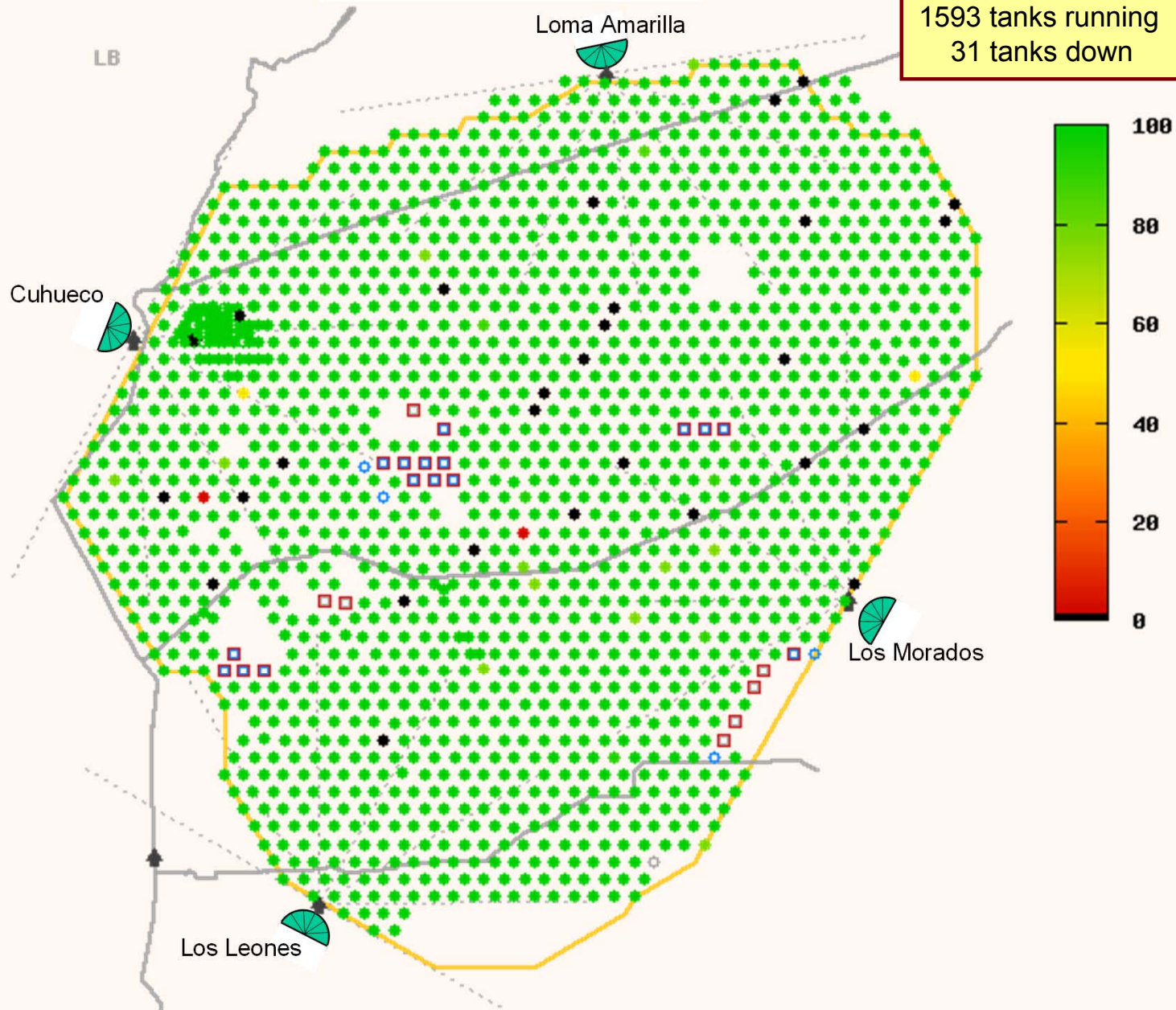
Les liens micro-ondes

- liaison point à point entre les concentrateurs de données
- réseau micro-ondes utilisant une architecture de télécommunications standard
- fonctionne dans la bande de 7 GHz
- chaque liaison a une capacité of 34 Mbps
- 2 branches aboutissant à une station centrale

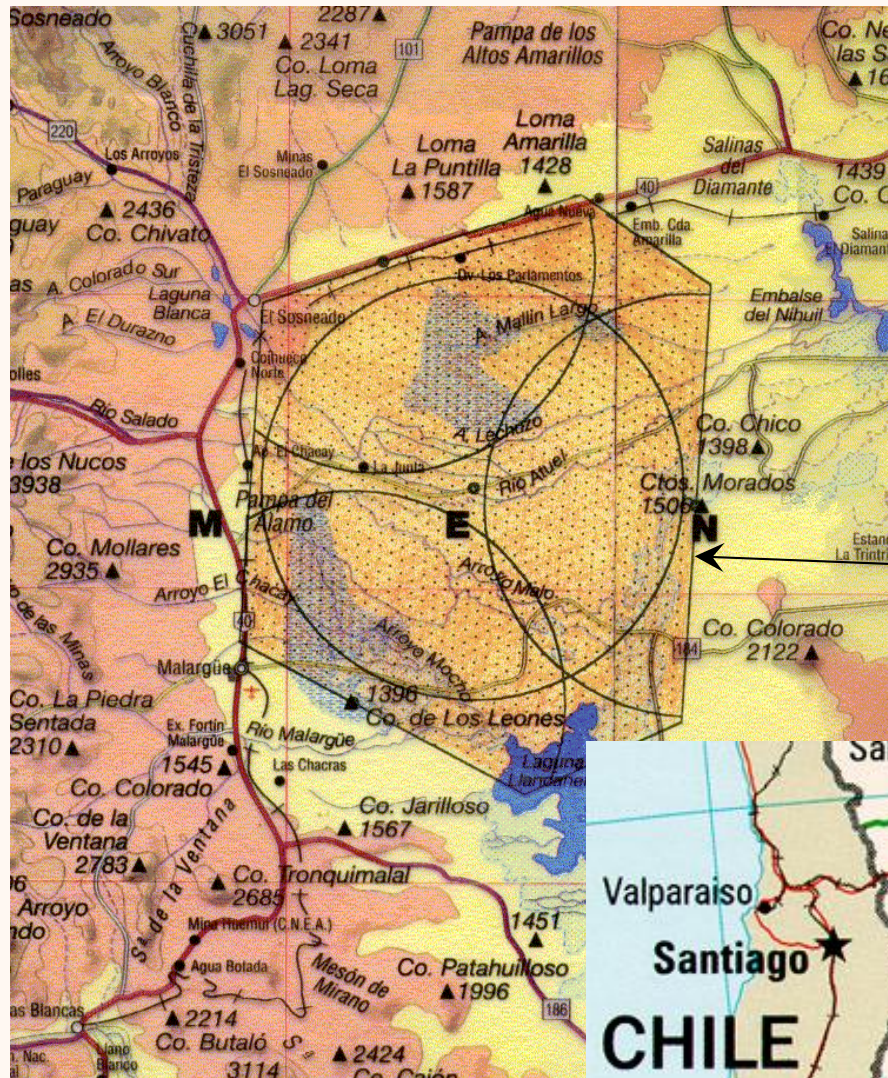


SD le 01/04/2009

1652 tanks deployed
1644 with water
1624 with electronics
1593 tanks running
31 tanks down



Observatoire Pierre Auger Site sud



L'observatoire



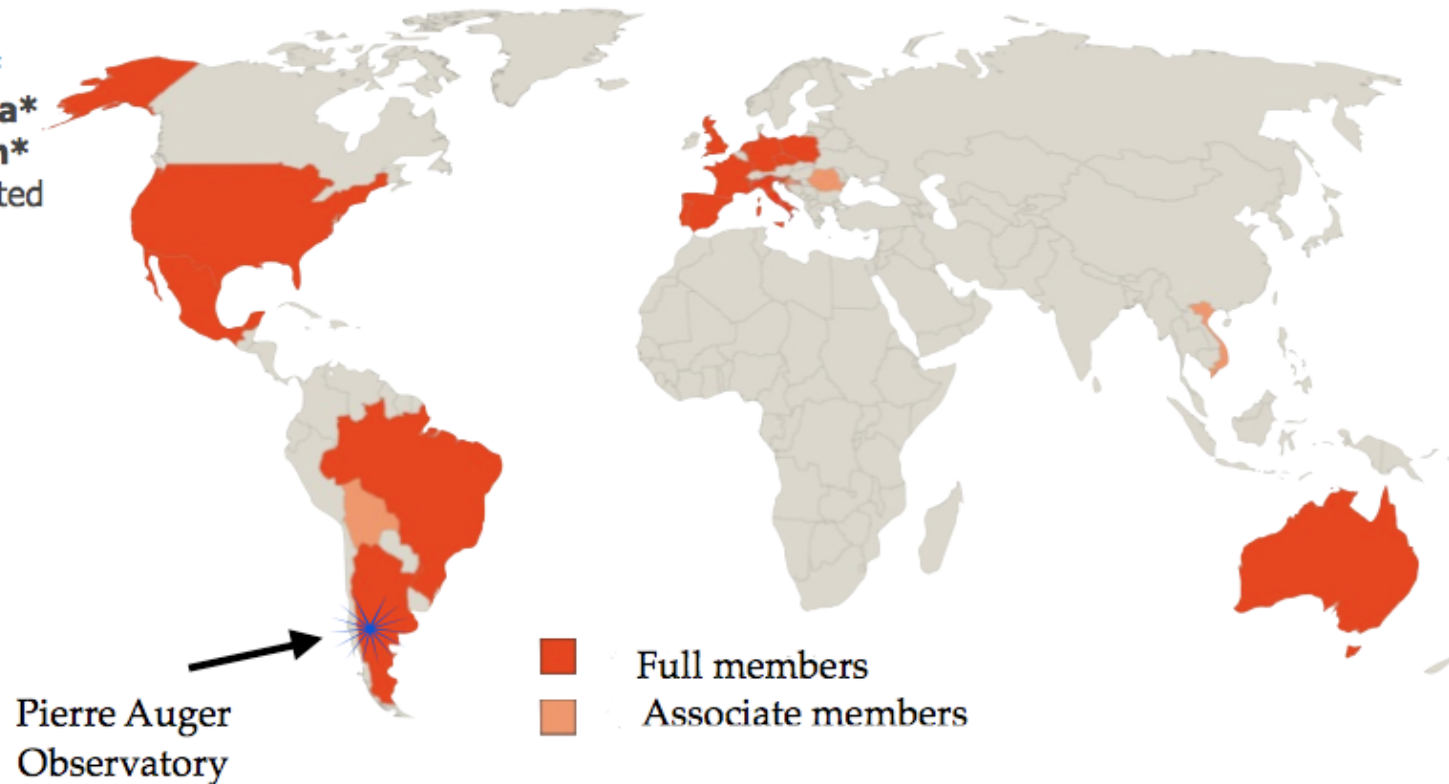
THE WORLD'S LARGEST COSMIC RAY OBSERVATORY



Collaboration : ~ 500 members & 19 countries

Argentina
Australia
Brazil
Croatia
Czech Republic
France
Germany
Italy
Mexico
Netherlands
Poland
Portugal
Slovenia
Spain
United Kingdom
USA

Bolivia*
Romania*
Vietnam*
*Associated





**Des résultats fondamentaux
et des interrogations**

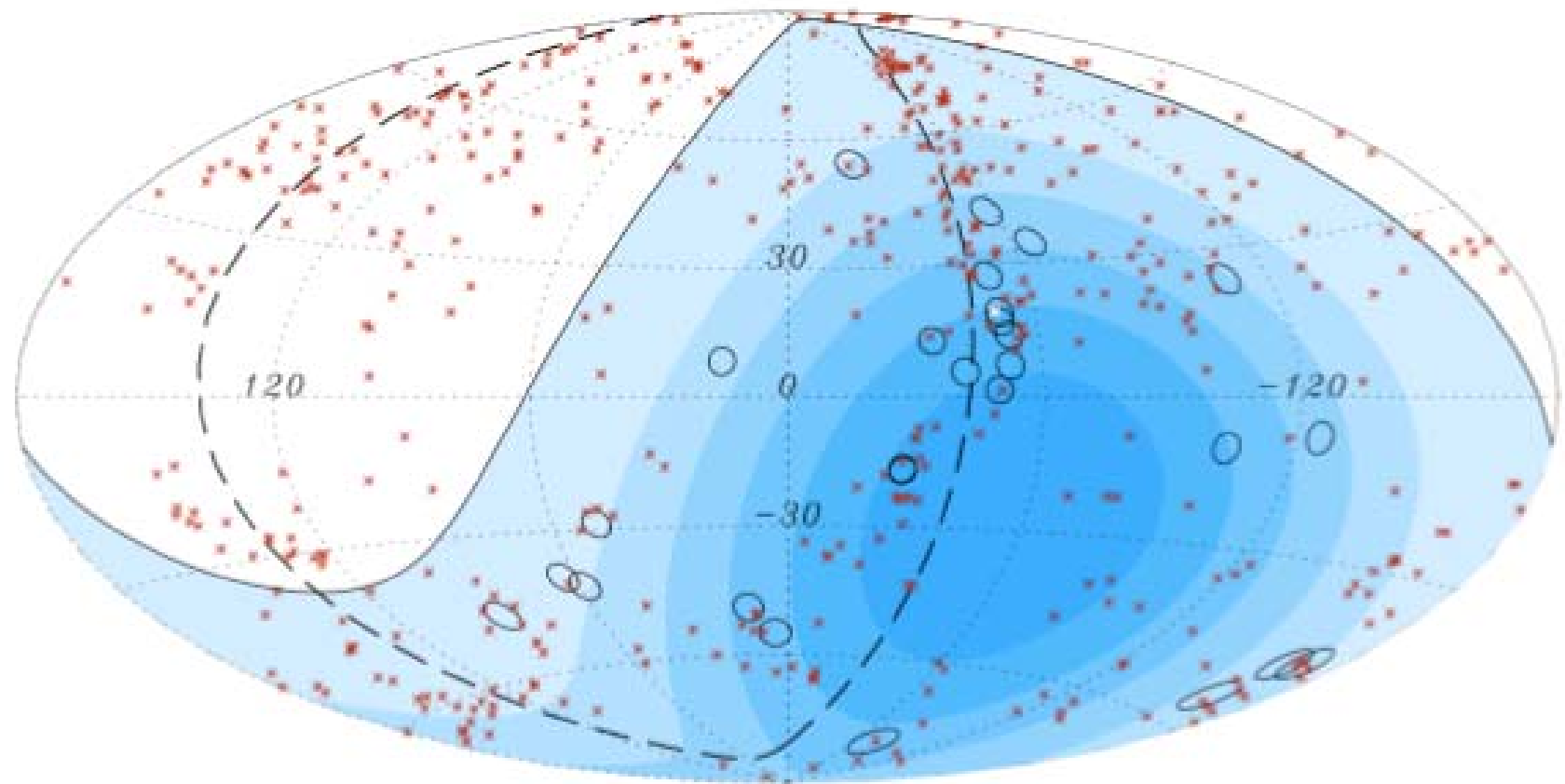
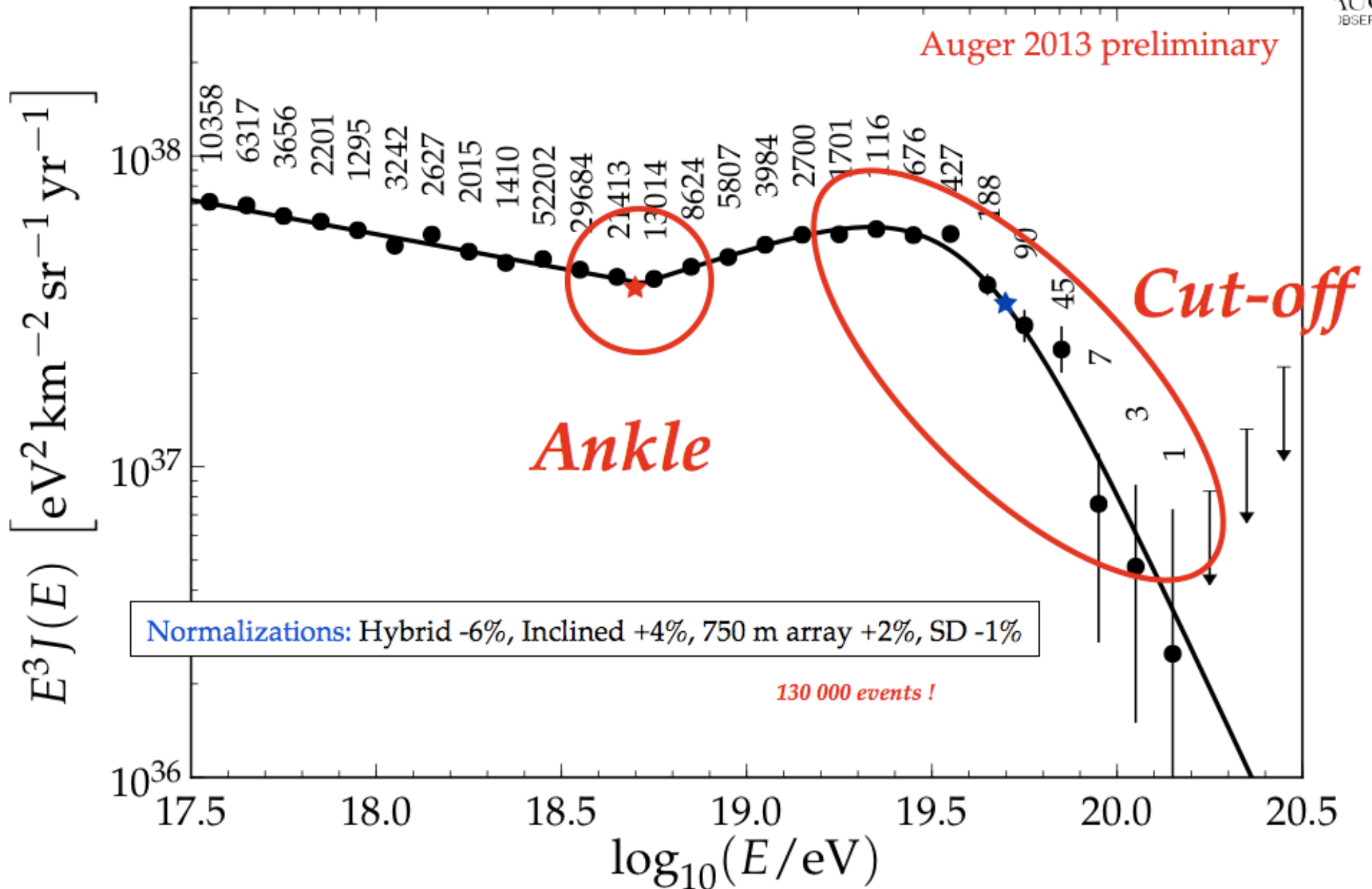
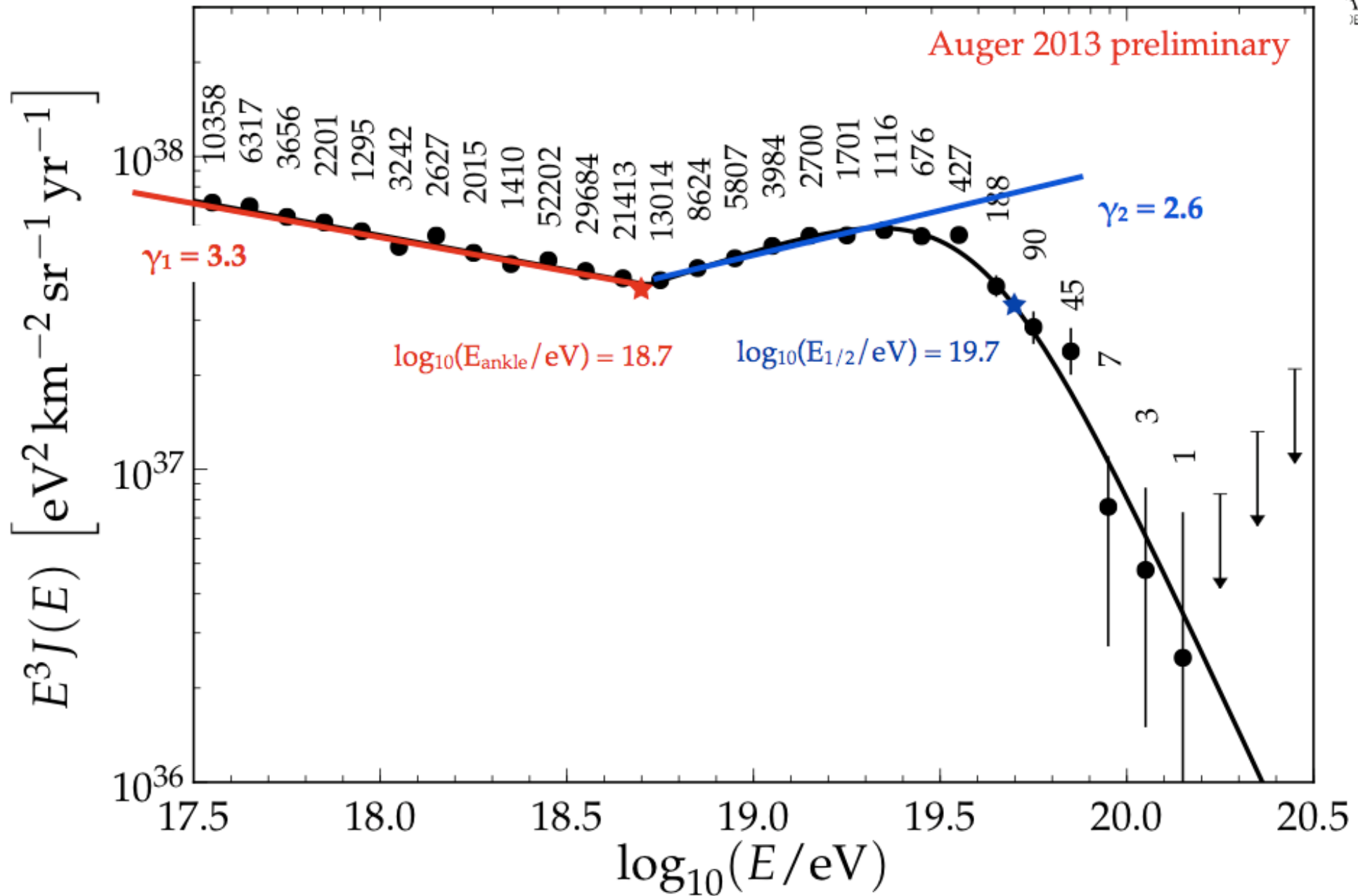


Figure 3: Aitoff projection of the celestial sphere in galactic coordinates with circles of radius 3.1° centered at the arrival directions of the 27 cosmic rays with highest energy detected by the Pierre Auger Observatory. The positions of the 472 AGN (318 in the field of view of the Observatory) with redshift $z \leq 0.018$ ($D < 75$ Mpc) from the 12th edition of the catalog of quasars and active nuclei from the VCV catalog are indicated by red asterisks. The solid line draws the border of the field of view (zenith angles smaller than 60°). Darker color indicates larger relative exposure. Each colored band has equal integrated exposure. The dashed line is, for reference, the super-galactic plane. Centaurus A, one of our closest AGN, is marked in white.

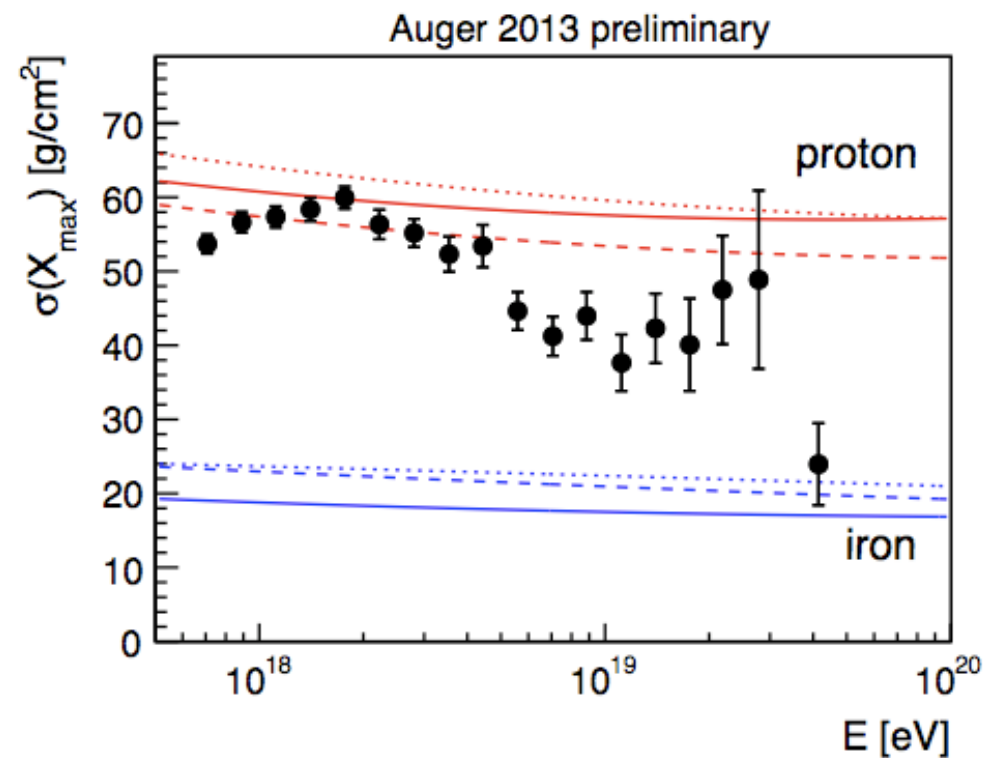
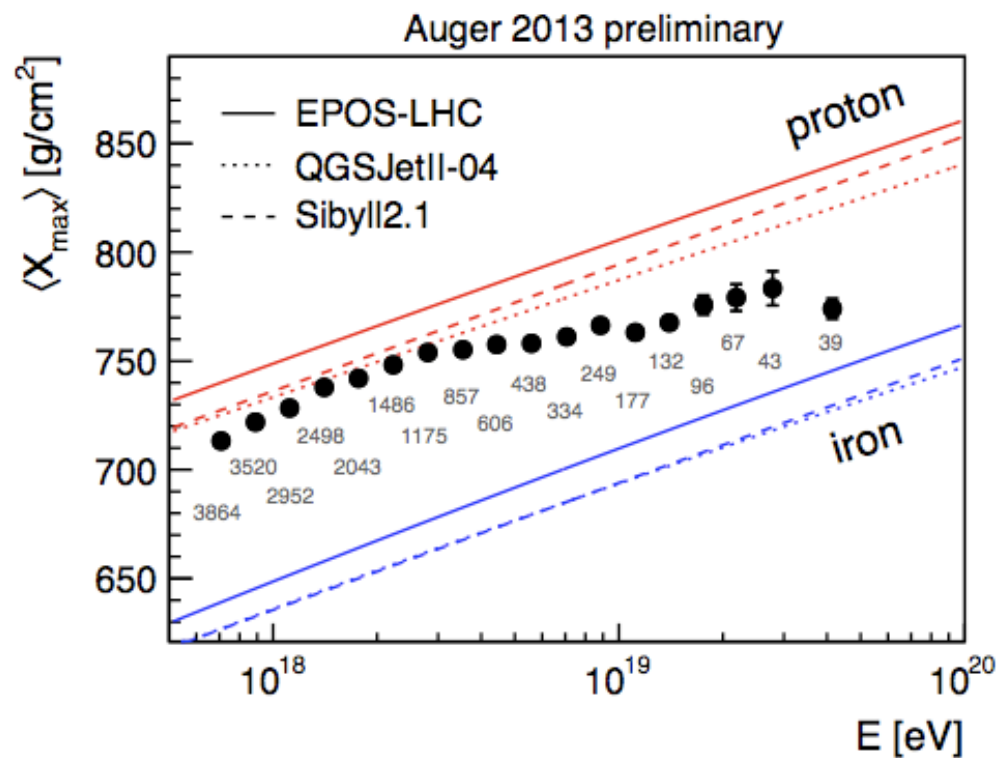
THE AUGER ALL-PARTICLE FLUX



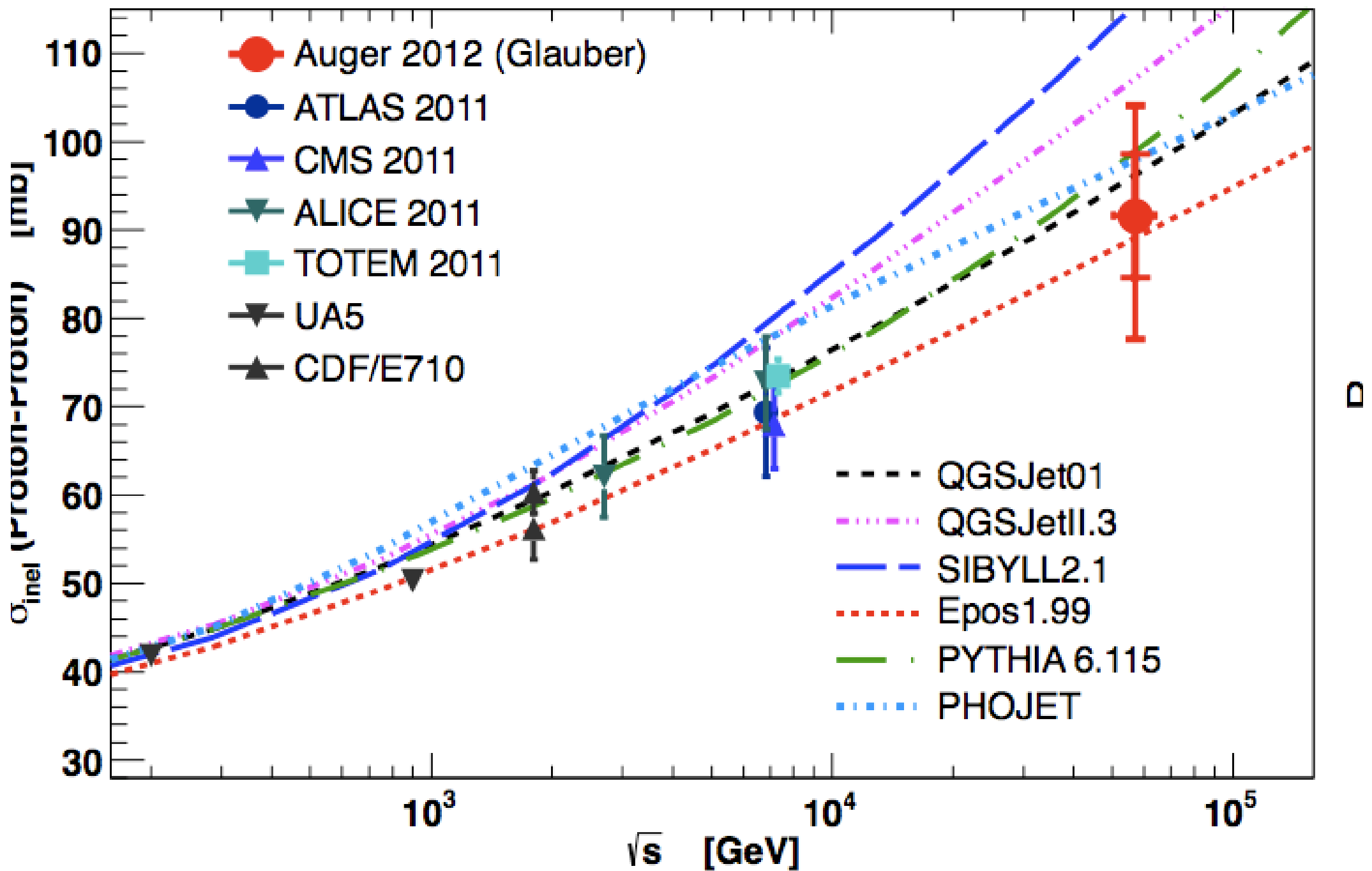
THE AUGER ALL-PARTICLE FLUX

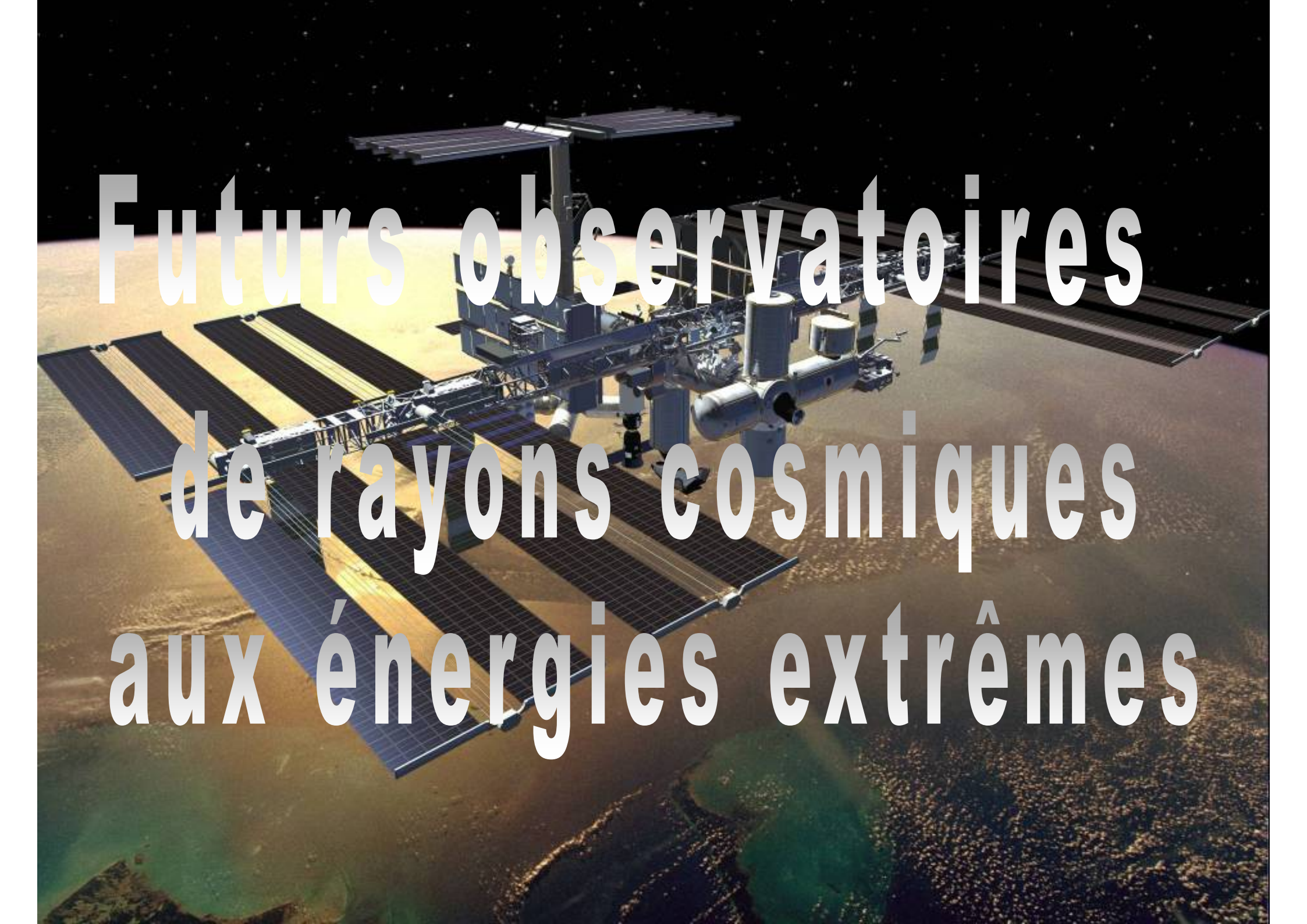


$\langle X_{\max} \rangle$ and $\sigma(X_{\max})$ data



X_{\max} : Dominantly light around 3 EeV, getting heavier above
Supported by the decreasing fluctuations (right)





**Futurs observatoires
de rayons cosmiques
aux énergies extrêmes**

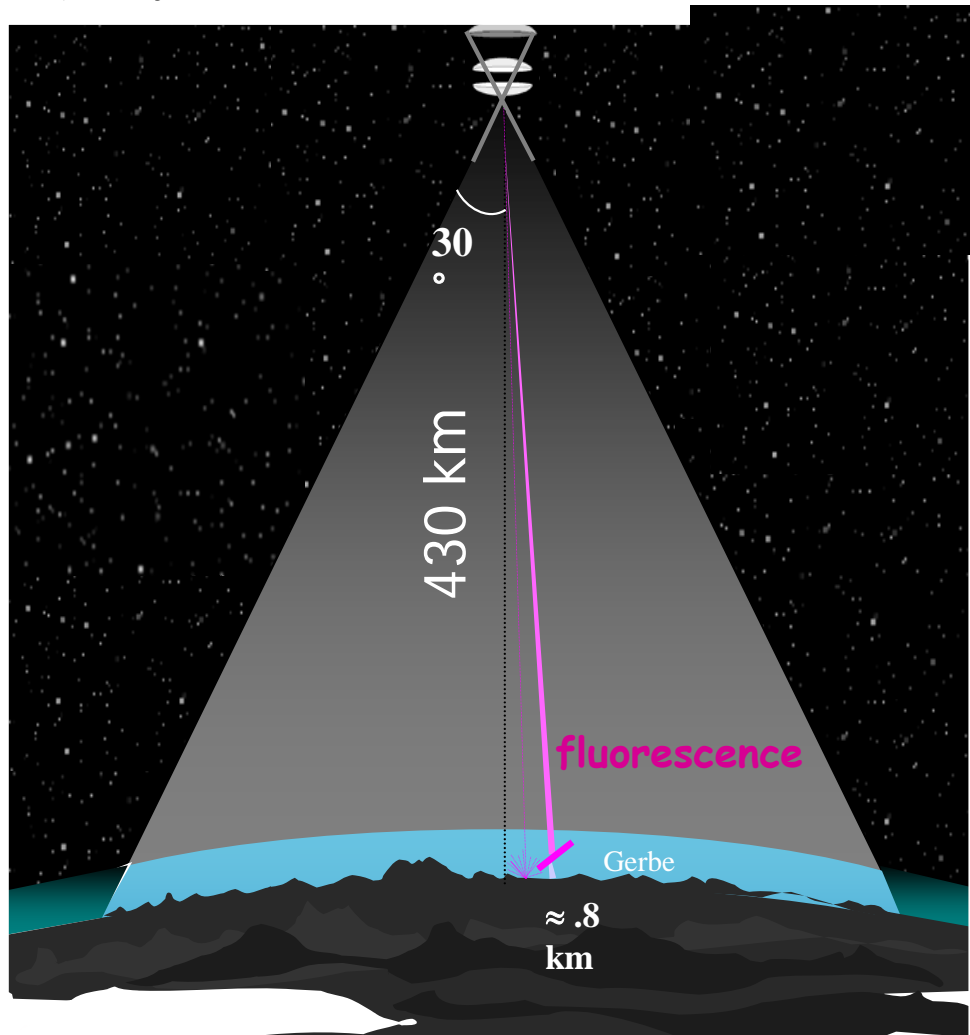
Futurs observatoires de RCUHE

- Extension et amélioration de l'Observatoire Pierre Auger en Argentine
 - Couvrir une plus grande surface
 - Développer de nouveaux détecteurs (ondes radio)
- Vers un futur observatoire mondial
 - Plus grande surface pour détecter plus de rayons cosmiques de très haute énergie
 - **Identification et caractérisation des sources astrophysiques**
 - Nouvelle technologie (détection radio)
 - Couverture complète du ciel (dans l'hémisphère Nord)



Futurs observatoires de RCUHE

- Détection depuis l'espace
projet JEM-EUSO



Grandes surface
d'observation et masse
de cible :

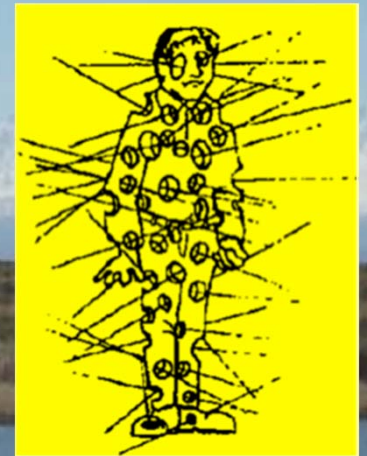
- 200000 km²
- $2 \cdot 10^{12}$ tonnes
d'atmosphère



Je vous remercie pour
votre attention

ATTENTION !

Pendant cette conférence vous avez été la
cible de plus de 100000 rayons cosmiques !

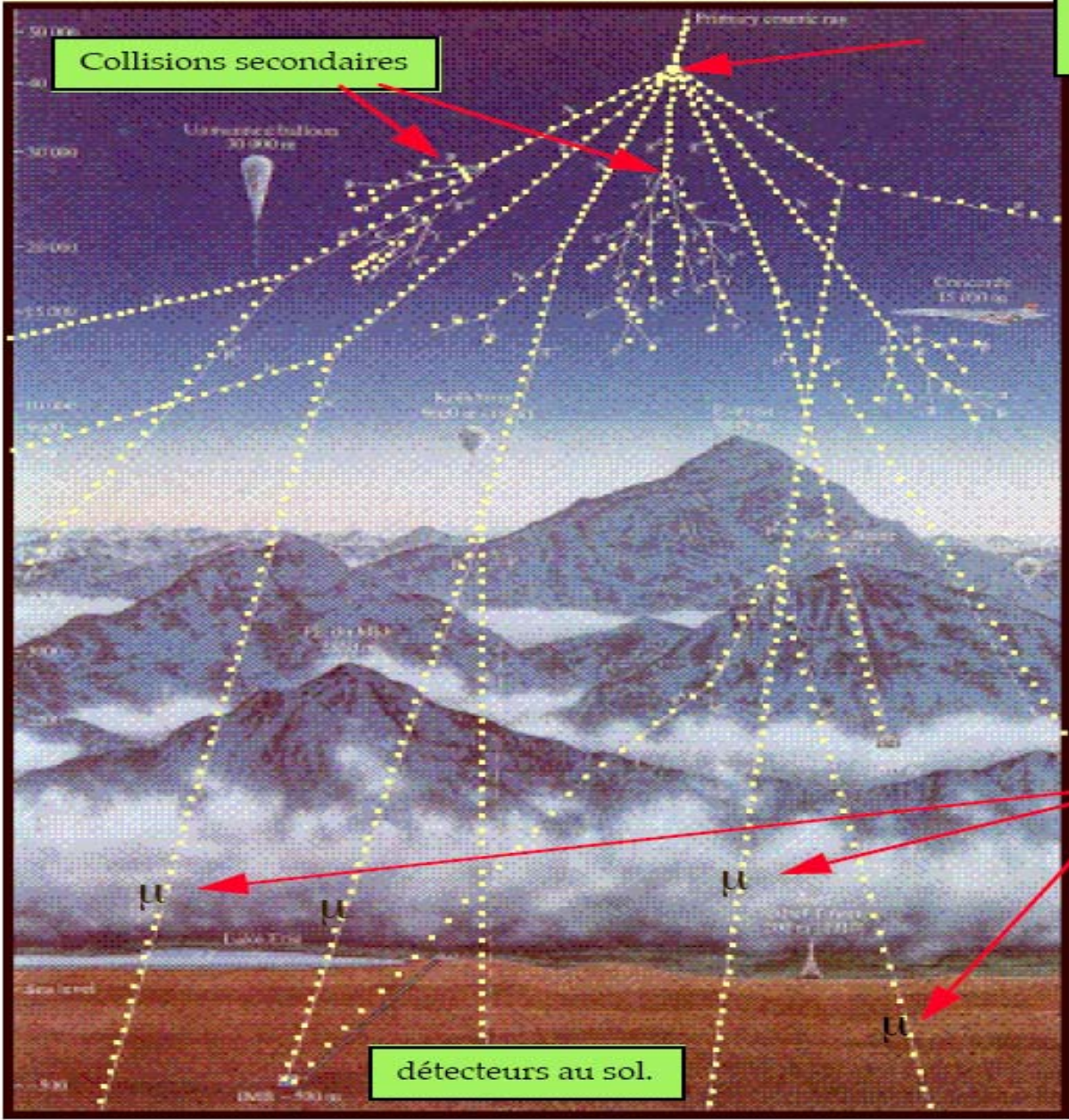


Les Muons

Particules cosmiques :
Noyau ou proton

Collision primaire avec un noyau
de la haute atmosphère

Collisions secondaires



collis. sur noyaux.

p, n
 $\pi^+ / \pi^- / \pi^0$

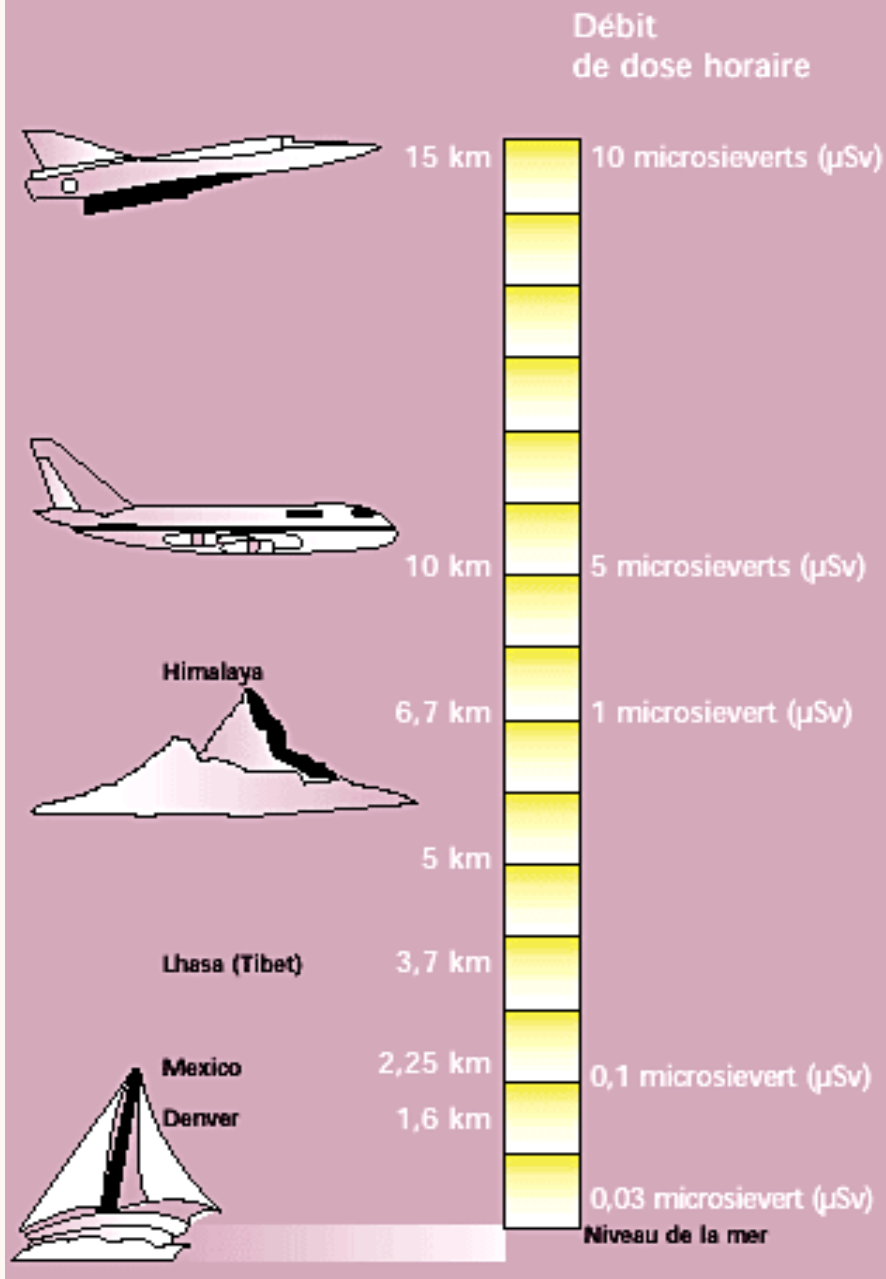
Désintégrations

$\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$
 $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$

Muons

détecteurs au sol.

La dose due aux rayonnements cosmiques croît avec l'altitude



Les RC et la Radioactivite

Au niveau du sol : 100 muons/m²/s

⇒ corps humain 100 000 muons/h

Est-ce dangereux ?

Avec 2 GeV d'énergie moyenne et pour une masse corporelle de 100 kg :

⇒ $\approx 3 \cdot 10^{-11}$ J/kg/s = **0.001 Sv/an**

Dose létale : 10 Sv/an

Limite de sécurité du CERN : 0,015 Sv/an

Le muon est une particule relativiste !

- Les muons sont créés entre 10 et 15 km d'altitude
- Ils se déplacent à une vitesse proche de celle de la lumière (300 000 km/s)
- Ils se désintègrent en $\sim 2.2 \mu\text{s}$

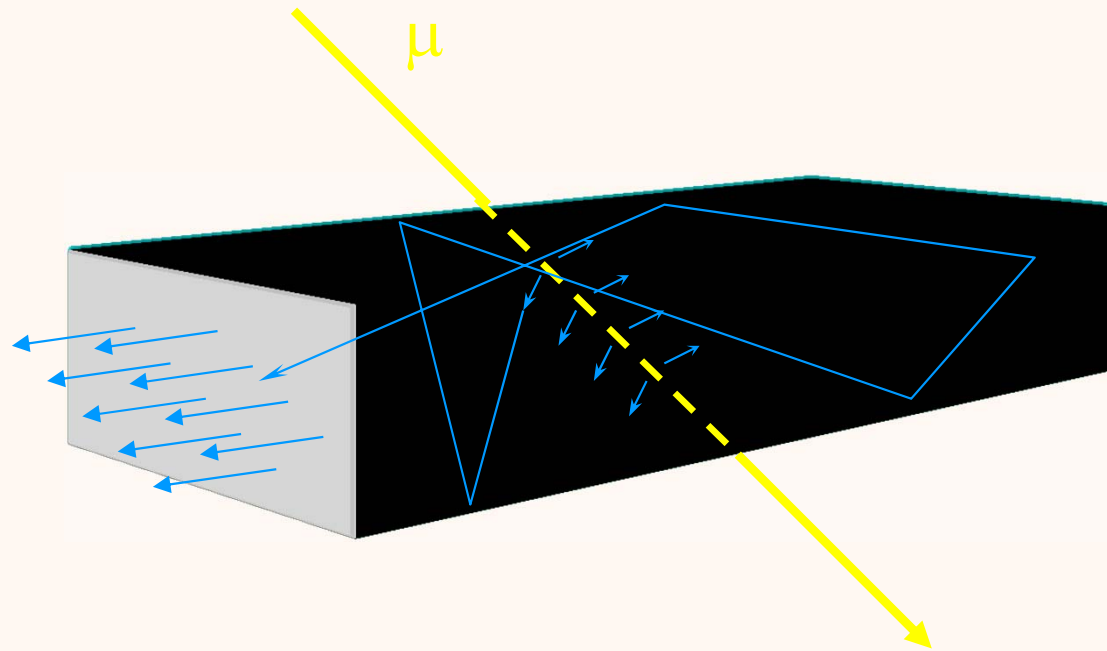
La distance parcourue est donc : $d = v \times t \sim 660 \text{ m} !!!$

Question : Comment les muons arrivent-ils sur terre ?

Particule relativiste \Rightarrow dilatation du temps (facteur de Lorentz γ)

$$\gamma = E_{\text{muon}}/m_{\text{muon}} \Rightarrow \text{pour } E = 2 \text{ GeV}, t \approx 42 \mu\text{s} \text{ et } d \approx 13 \text{ km}$$

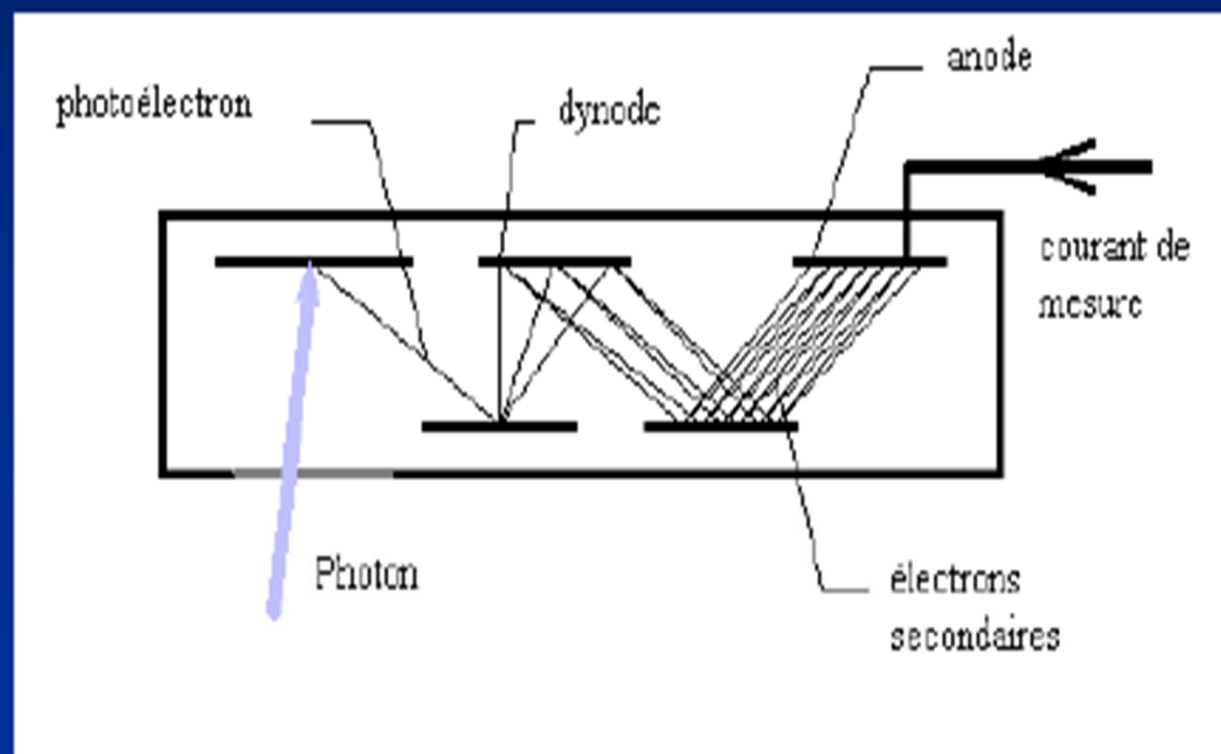
Scintillateurs



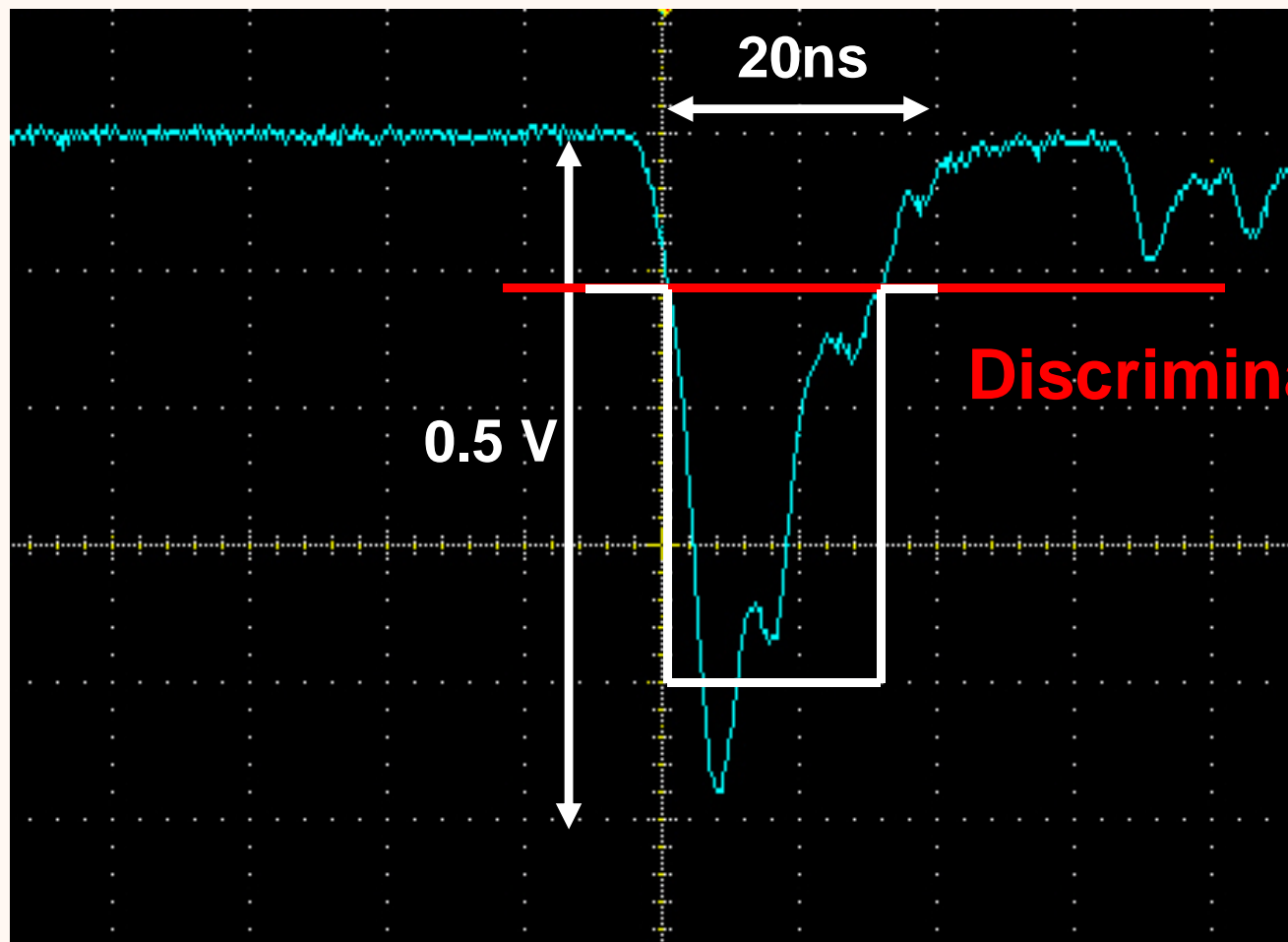
Milieux organiques aromatiques (polystyrène, polyvinyltoluène, ...)

PhotoMultipliateurs (PM)

- Comme son nom l'indique, le photomultiplicateur transforme un faible signal lumineux en un signal électrique qui peut être mesuré



Forme du signal ...



Discrimination

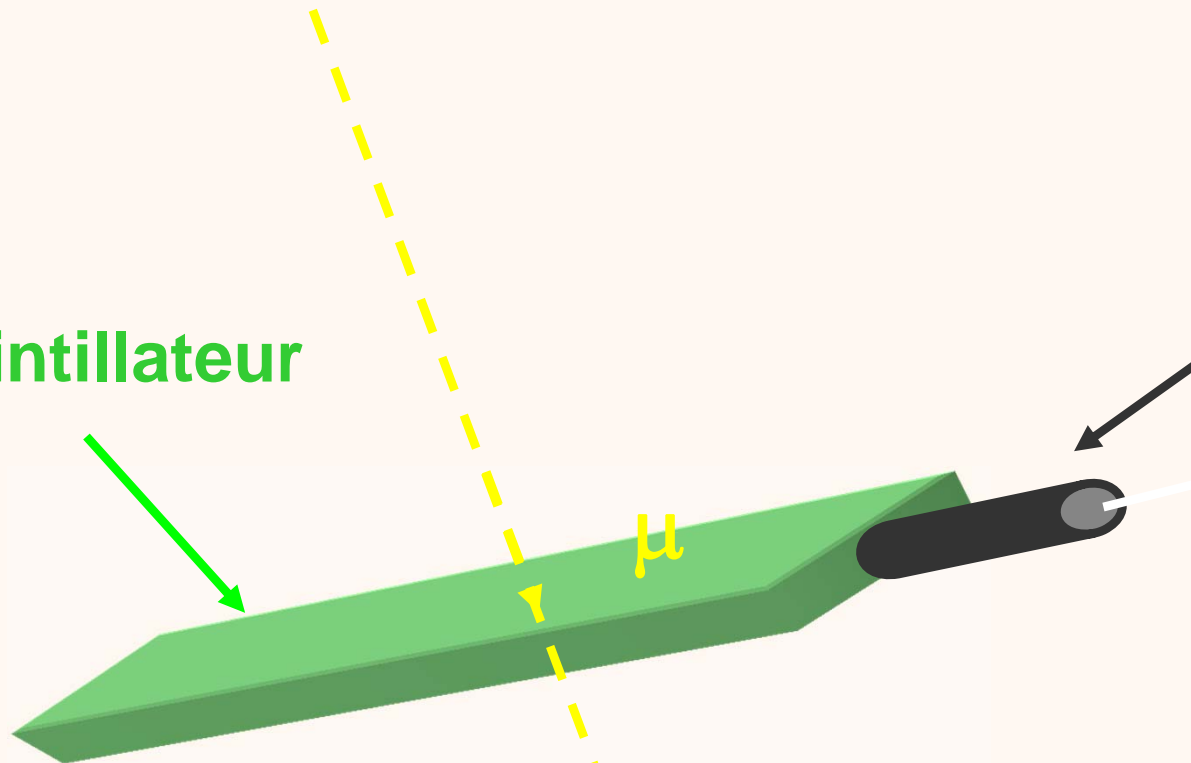
0.5 V

20ns

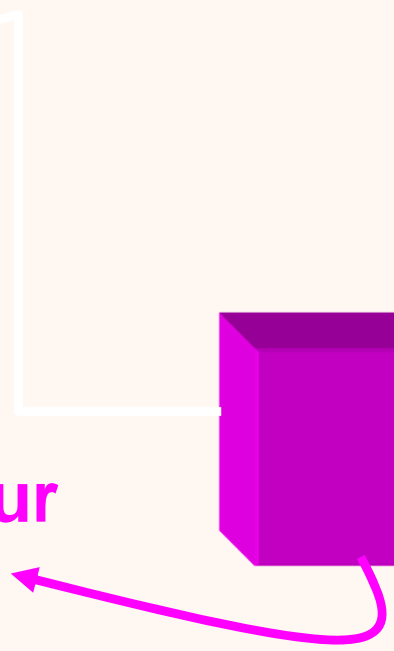
~0.8 V

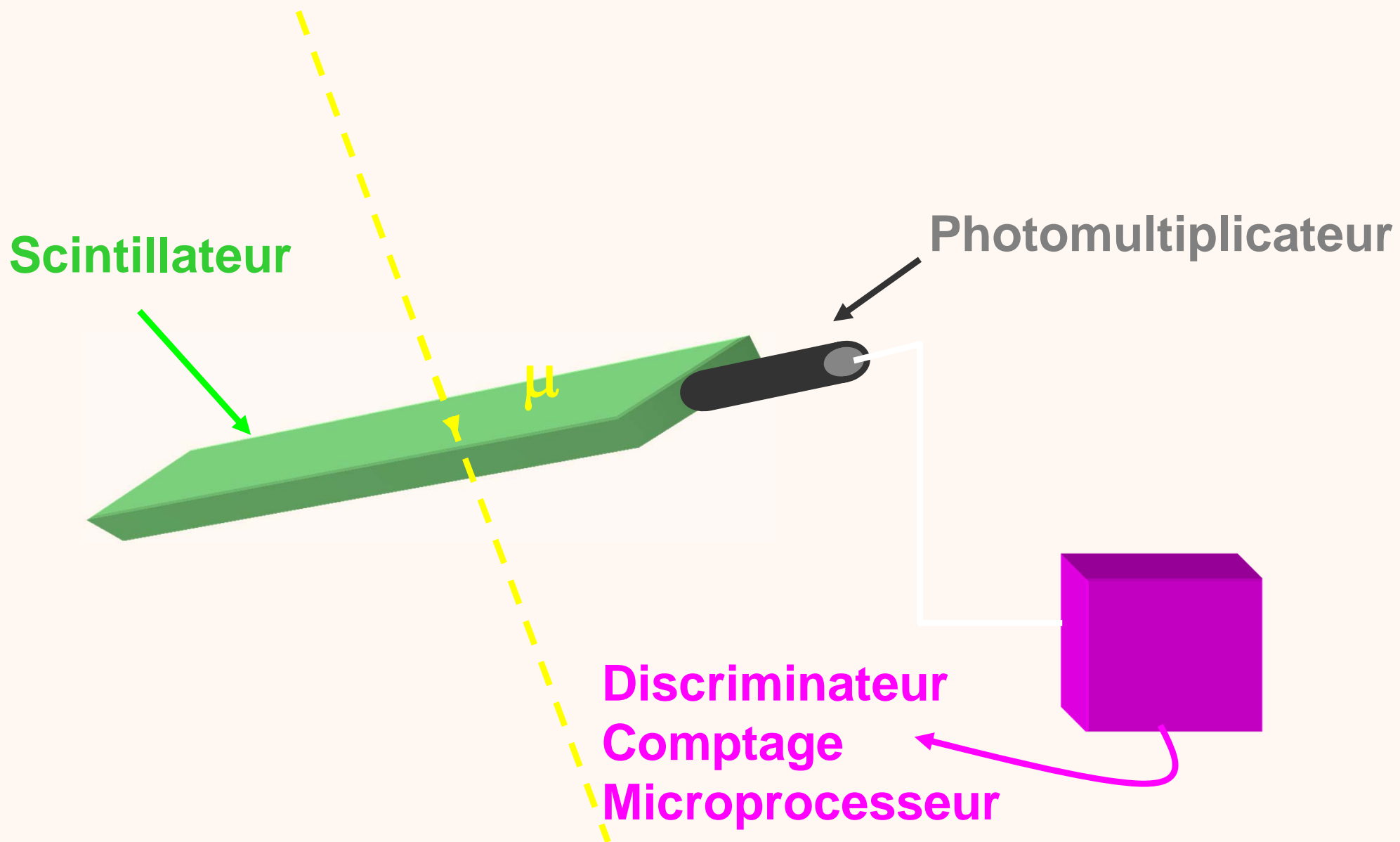
Scintillateur

Photomultiplicateur

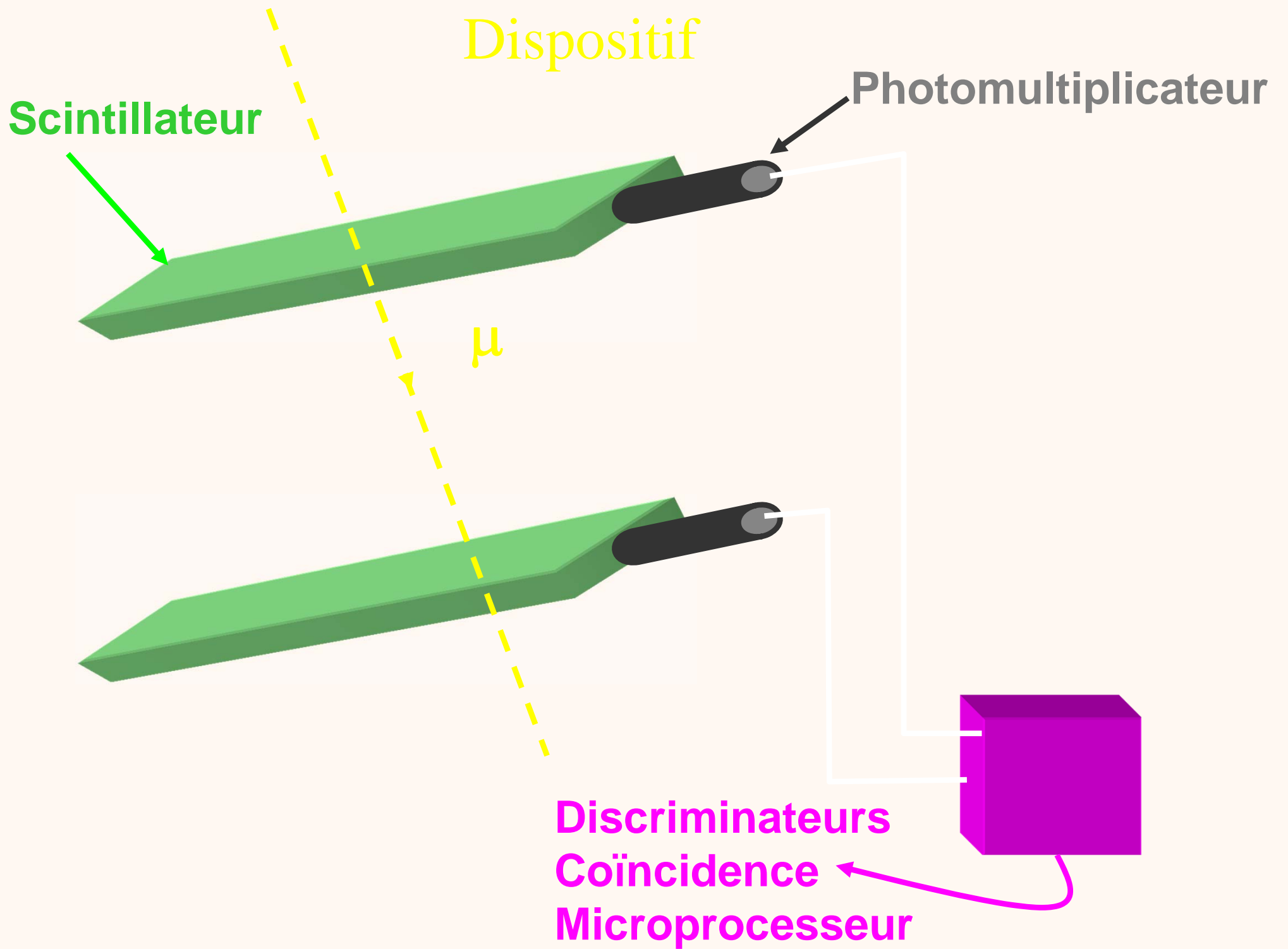


**Discriminateur
Comptage
Microprocesseur**

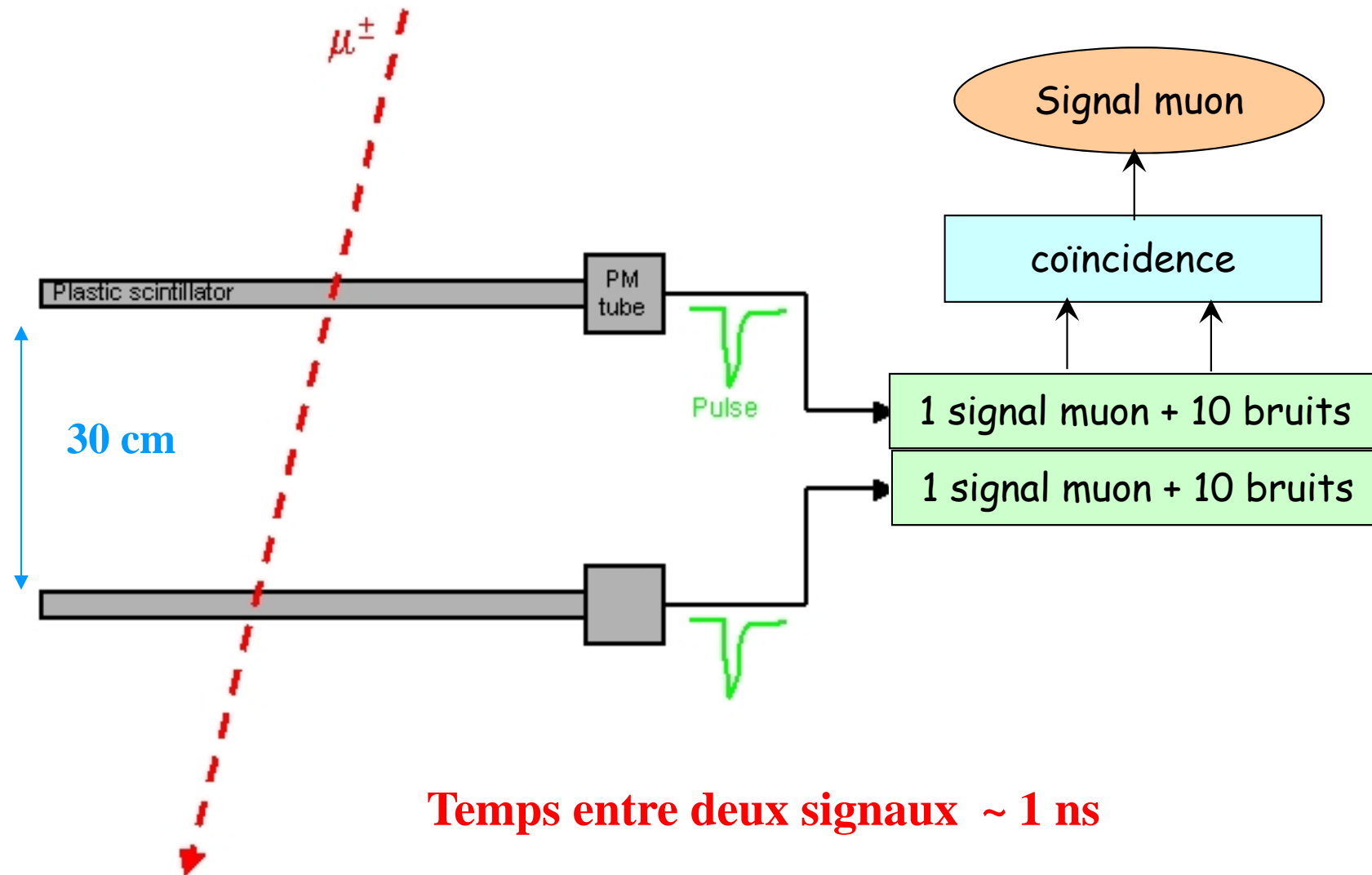




Ça ne marche pas : 10 à 20 signaux parasites pour 1 muon



Télescope à muons



Le Cosmodétecteur

