Conférences 2008 – autour du LHC

1. 100 ans d'exploration en physique des particules : de Becquerel au LHC...
   26 janvier 2008, Maximilien Melissas
2. Le LHC – la machine à remonter le temps
   01 mars 2008, Fabrice Hubaut
3. Le LHC - objectifs scientifiques : le Higgs
   29 mars 2008, Sylvain Tisserant
4. Le LHC - objectifs scientifiques : l'antimatière, les dimensions supplémentaires
   26 avril 2008, Julien Cogan
5. A la croisée des deux infinis
   17 mai 2008, Damien Dornic
6. La cosmologie
   07 juin 2008, Charling Tao
7. Du LHC à l'imagerie médicale
   18 octobre 2008, Jean-Claude Clémens
8. La recherche à hautes énergies : incitateur de hautes technologies depuis 100 ans
   15 novembre 2008
9. Nouvelles du LHC
   13 décembre 2008

A la croisée des 2 infinis extrêmes
L'aventure des rayons cosmiques...
Damien Dornic
17 mai 2008

Sommaire

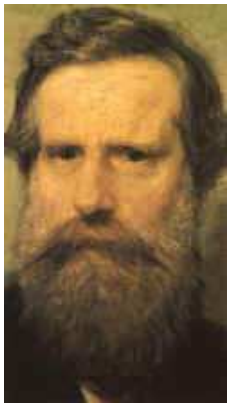
∞ Le rayonnement cosmique
Une très longue histoire de découverte

∞ Les rayons cosmiques ultra-énergétiques
Extrême et paradoxe

∞ Une difficile quête
Vers une possible résolution du mystère …

Les rayons cathodiques

Expériences sur l'électricité



Crookes

1879 : Le tube de Crookes

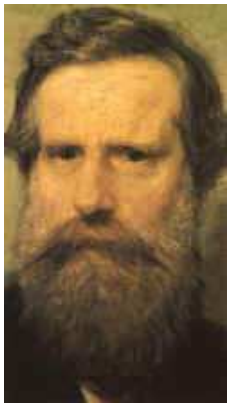
→ découverte des rayons cathodiques

Les rayons cathodiques

Expériences sur l'électricité

1879 : Le tube de Crookes

→ découverte des rayons cathodiques



Crookes

1897 : Thomson identifie l'électron

Thomson

Masse 2000 fois plus petite que le noyau le plus léger (H)

→ Lancement de la physique sub-atomique

L'électroscope

Electroscope chargé → les feuilles se repoussent

Soumis à un rayonnement énergétique, l'air se trouve partiellement ionisé → les feuilles se rapprochent l'une de l'autre

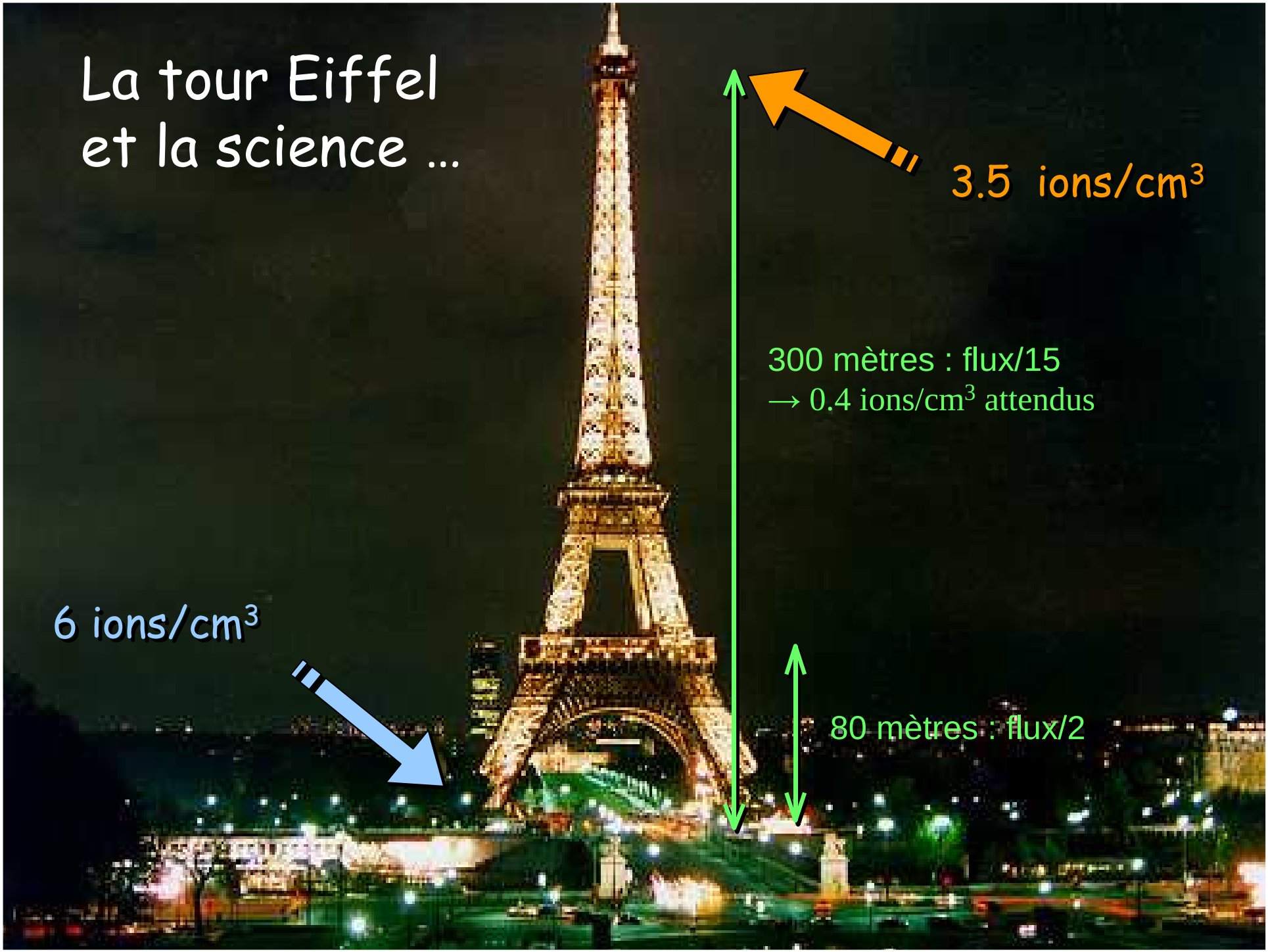
L'électroscope se décharge d'autant plus vite que le rayonnement est plus intense

Décharge spontanée !

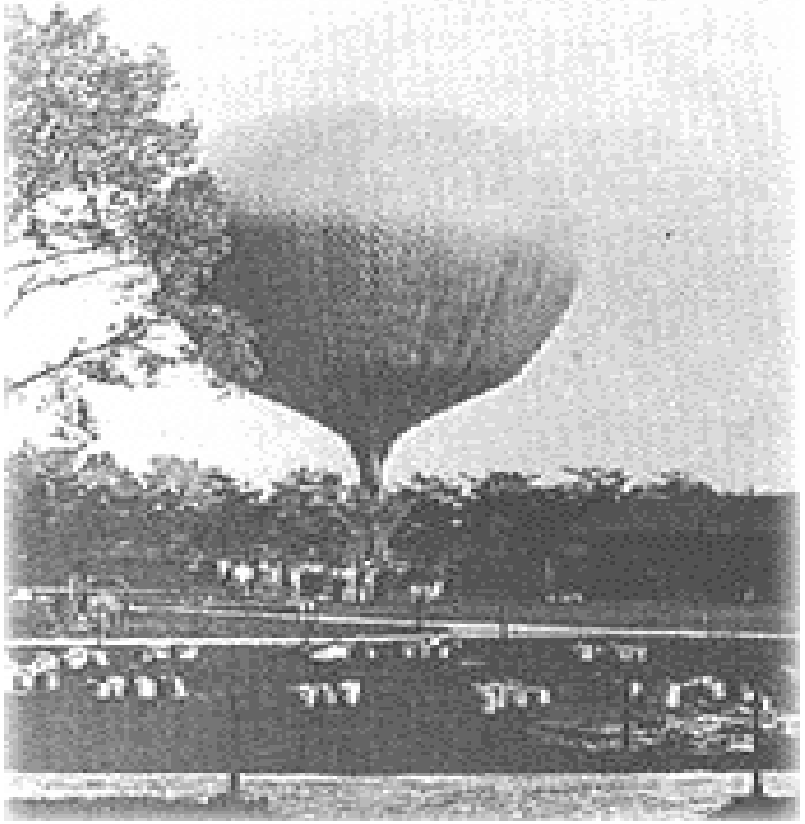
1901: Wilson remarque que la décharge est identique sur Terre et dans un tunnel

Rutherford montre que la radioactivité naturelle (roche et contamination des instruments) en est responsable

1910: le père Théodore Wulf (jésuite amateur et meilleur fabricant d'électromètres) fait des études au sommet de la tour Eiffel …


La tour Eiffel
et la science …
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…

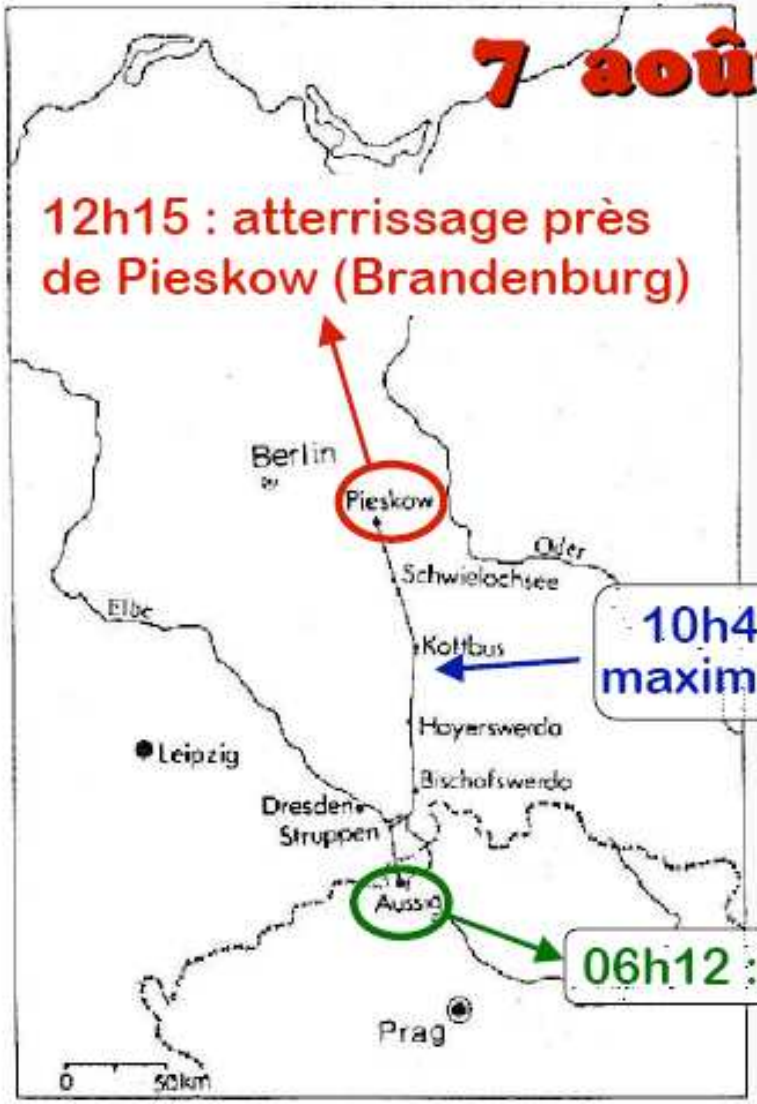


Hess and Kolhörster chargent des électromètres à bord d'un ballon à air chaud

Puis mesurent lors de vols en ballon le taux d'ionisation de l'atmosphère en fonction de l'altitude

Une sacrée aventure …

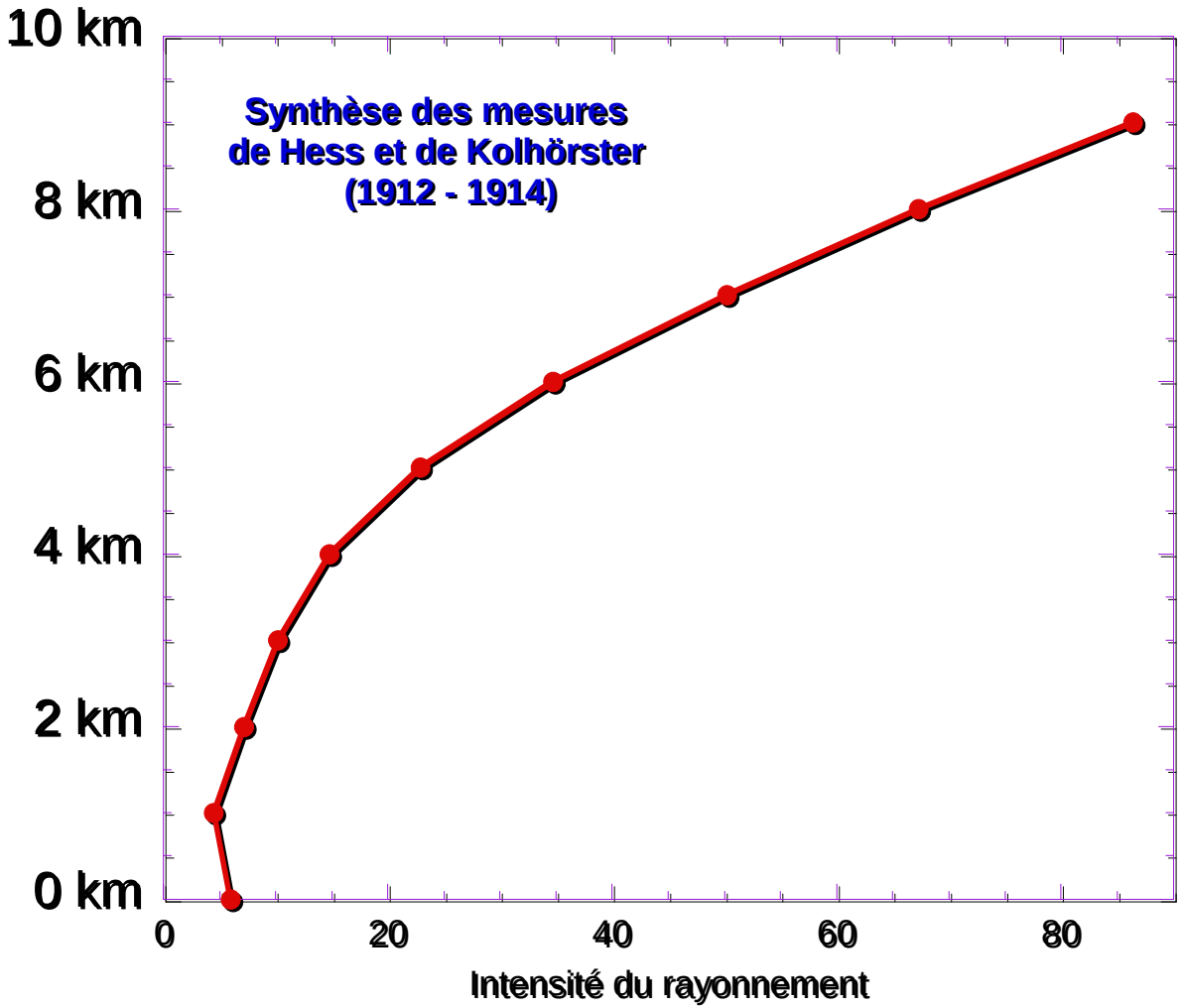
7 août 1912



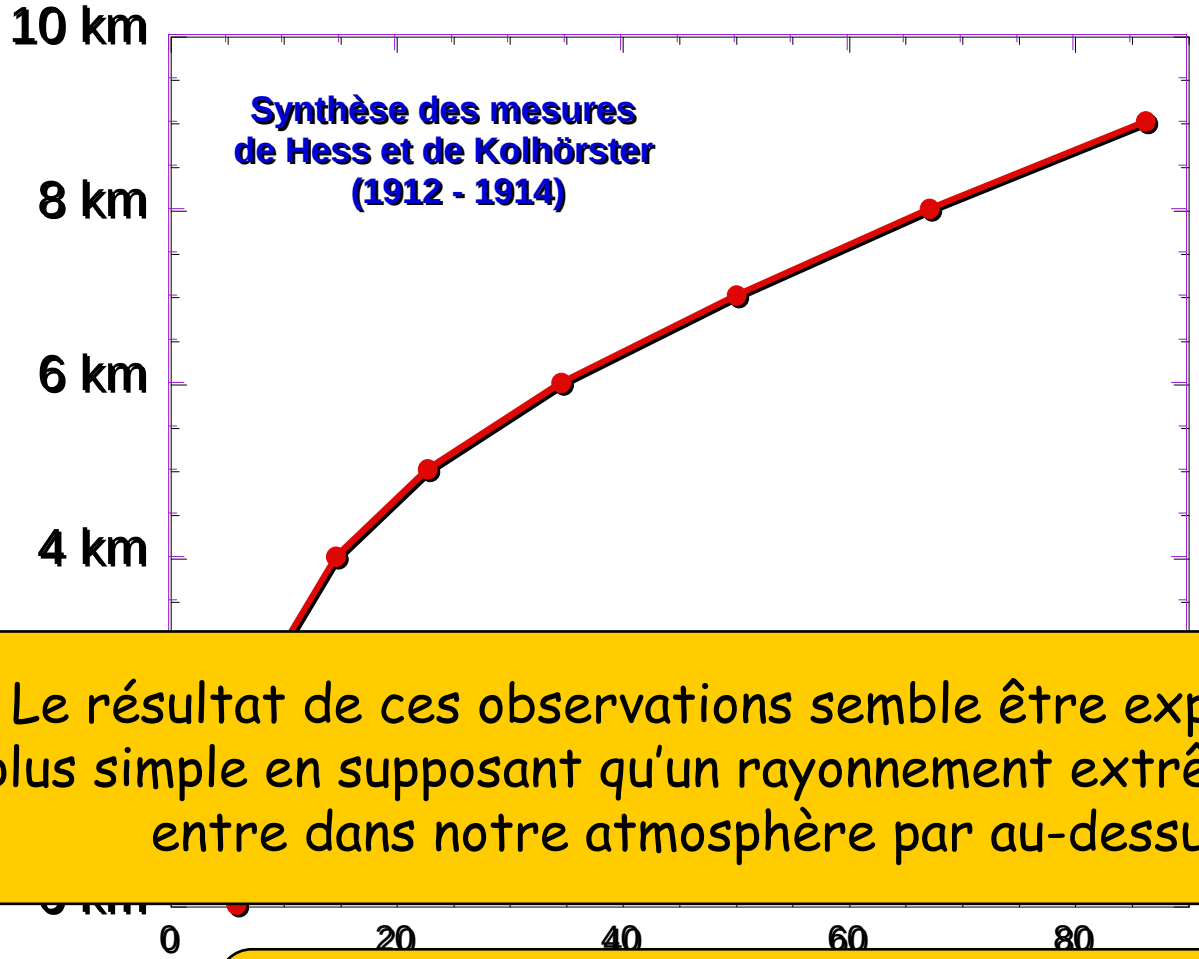
Route des Entdeckungsfluges der kosmischen Stral

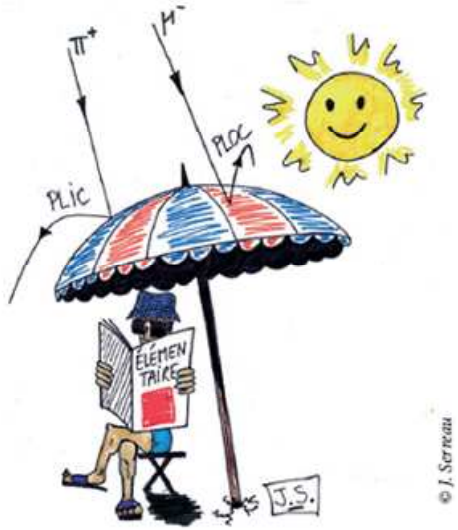
Hess bei Ballonlandung (1912).

Intensification du rayonnement



Intensification du rayonnement





" Le résultat de ces observations semble être expliqué de la façon la plus simple en supposant qu'un rayonnement extrêmement pénétrant entre dans notre atmosphère par au-dessus" (V. Hess)

OK, mais qu'est-ce ?

Le radium C(214Bi) est 5 fois moins pénétrant !

17 ans de réflexion plus tard …

Robert Millikan (Prix nobel) mène le jeu et pense que les rayons de Hess sont des rayons gamma de très haute énergie (→ 1925 les nomment “rayons cosmiques”)

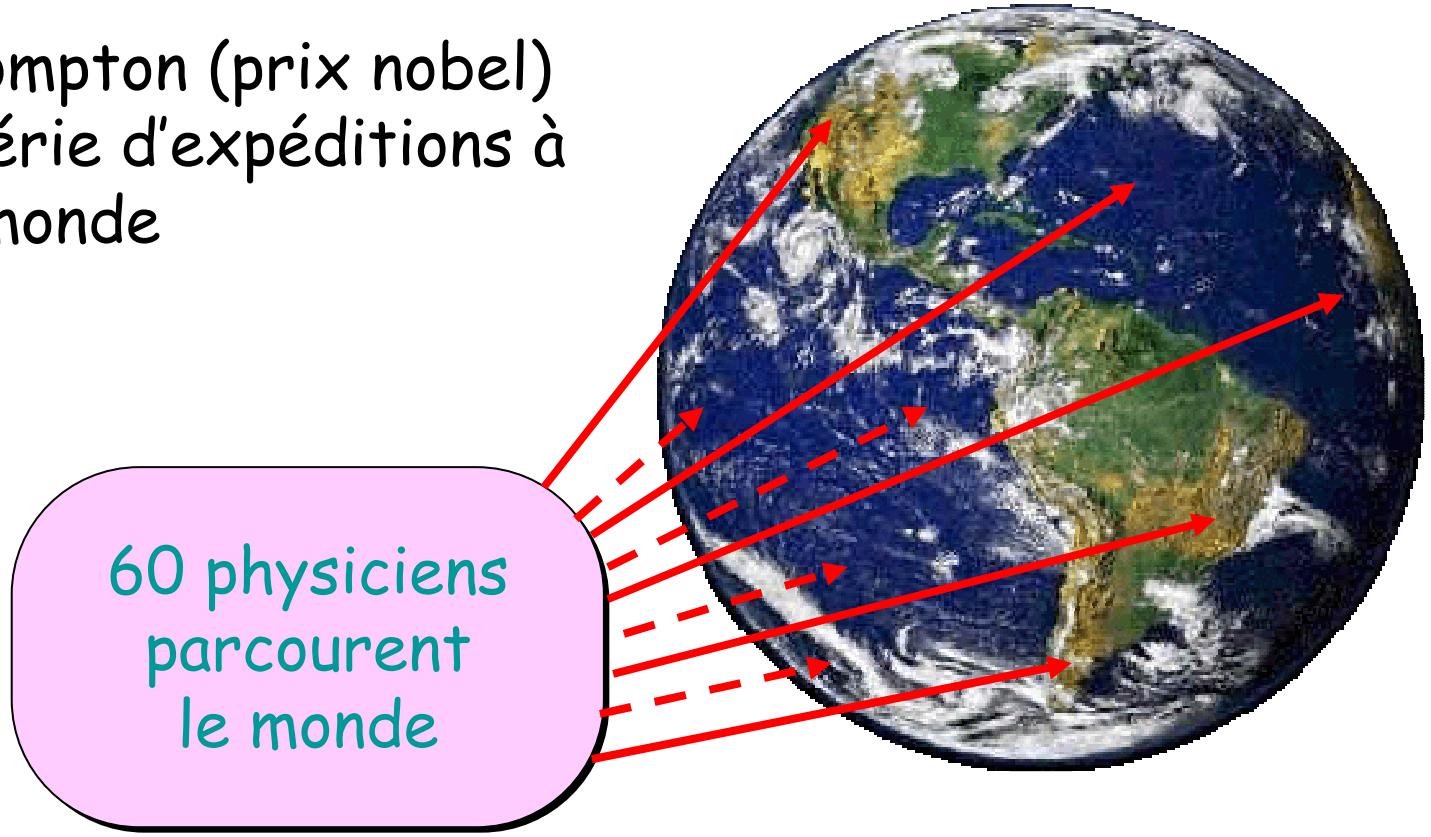
En 1929, Bothe et Kohlörster montrent avec des compteurs Geiger que ces rayons sont chargés

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 …

Quand Compton s'en mèle …

En 1930, Compton (prix nobel) lance une série d'expéditions à travers le monde

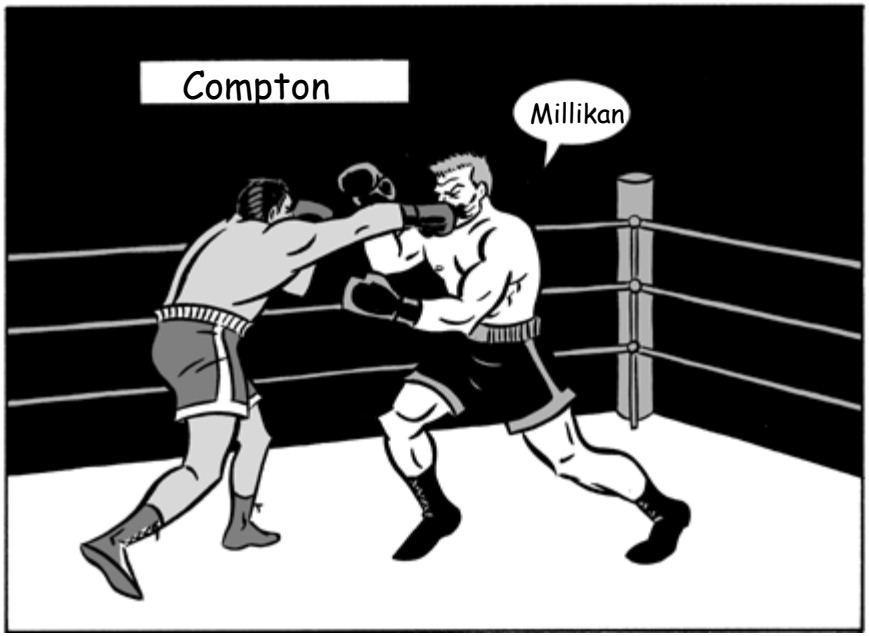


Résultats: effet de latitude

Combat Millikan vs Compton

Fin décembre 1932, affrontement lors de la réunion de Noel de l'association Américaine pour l'Avancement des Sciences

Le débat
que le N
le 31 dé



The New York Times

VOL. LXXXII...No. 27,370. December 31, 1932

MILLIKAN RETORTS HOTLY TO COMPTON IN COSMIC RAY CLASH

Debate of Rival Theorists Brings Drama to Session of Nation's Scientists.

THEIR DATA AT VARIANCE

New Findings of His Ex-Pupil Lead to Thrust by Millikan at 'Less Cautious' Work.

Millikan doit reconnaitre s'être trompé …
Rayons cosmiques sont des particules chargées

Un feu d'artifice de particules

Dans les années 1930, les physiciens pensaient enfin avoir percé le secret de la matière.

Atome

Electrons (Thompson, 1897) circulent autour d'un noyau (Rutherford, Geiger, Mardsen, 1911) qui contient des protons (Rutherford, 1919) et des neutrons (Chadwick, 1932)

Surprise

Ils découvrirent dans les rayons cosmiques que la matière était bien plus riche et diverse.

Découverte du muon

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

Observations: courbure moins grande que le proton mais plus grande que l'électron → **le mésotron**

1936: C. Anderson découvre le muon: particule en tout point semblable à l'électron, mais 200 fois plus massif

Une science est née !

(la physique des particules)

La liste des particules découvertes est longue :

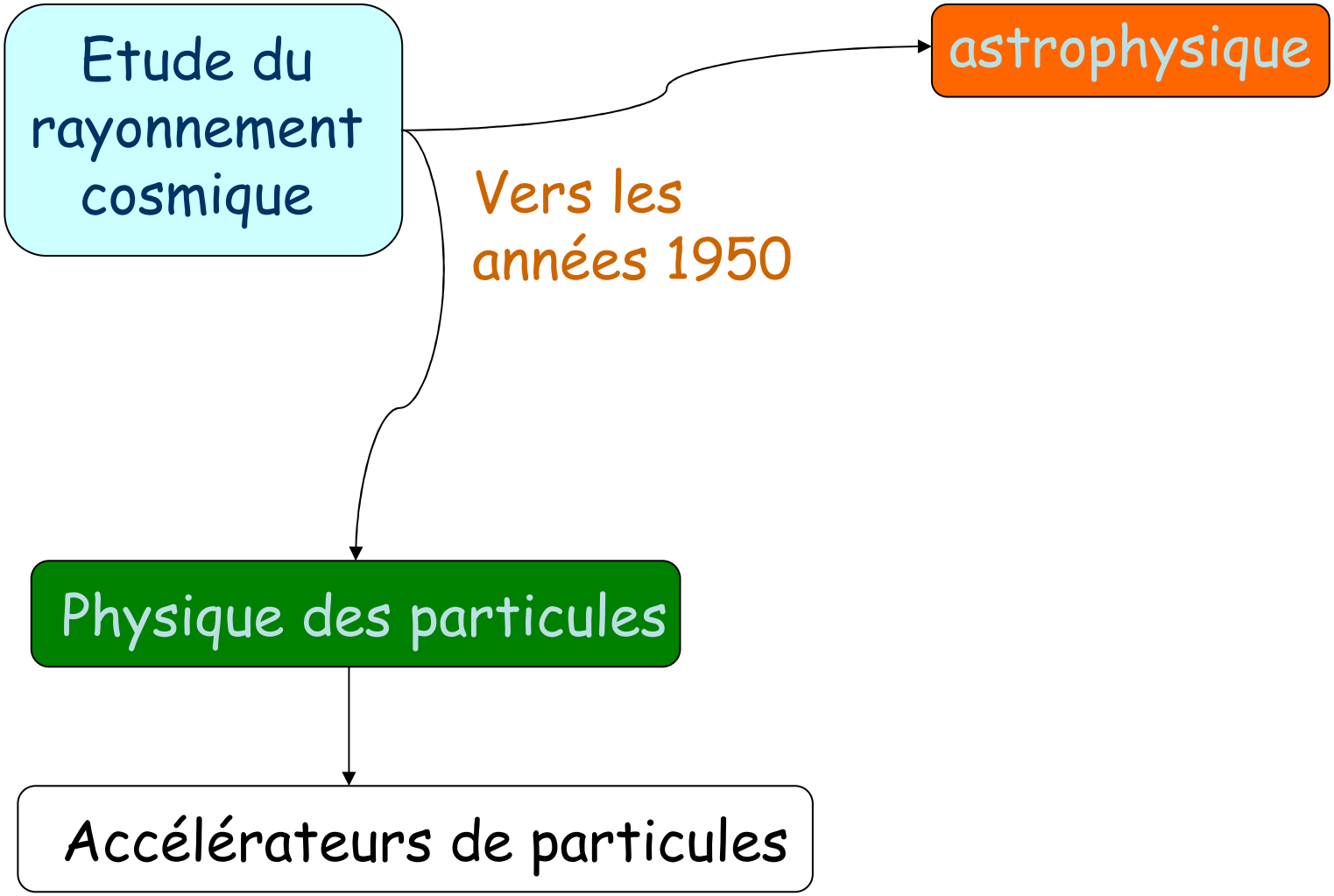
- 1932: positon (anti-matière !!)
- 1936: muon
- 1947: pions (π^0, π^-, π^+)
- 1949: kaons (K)
- 1949: lambda (Λ)
- 1952: xi (Ξ)
- 1953: sigma (Σ)

} Particules étranges
(durée de vie beaucoup trop longue)

Et tout cela, grâce aux rayons cosmiques …

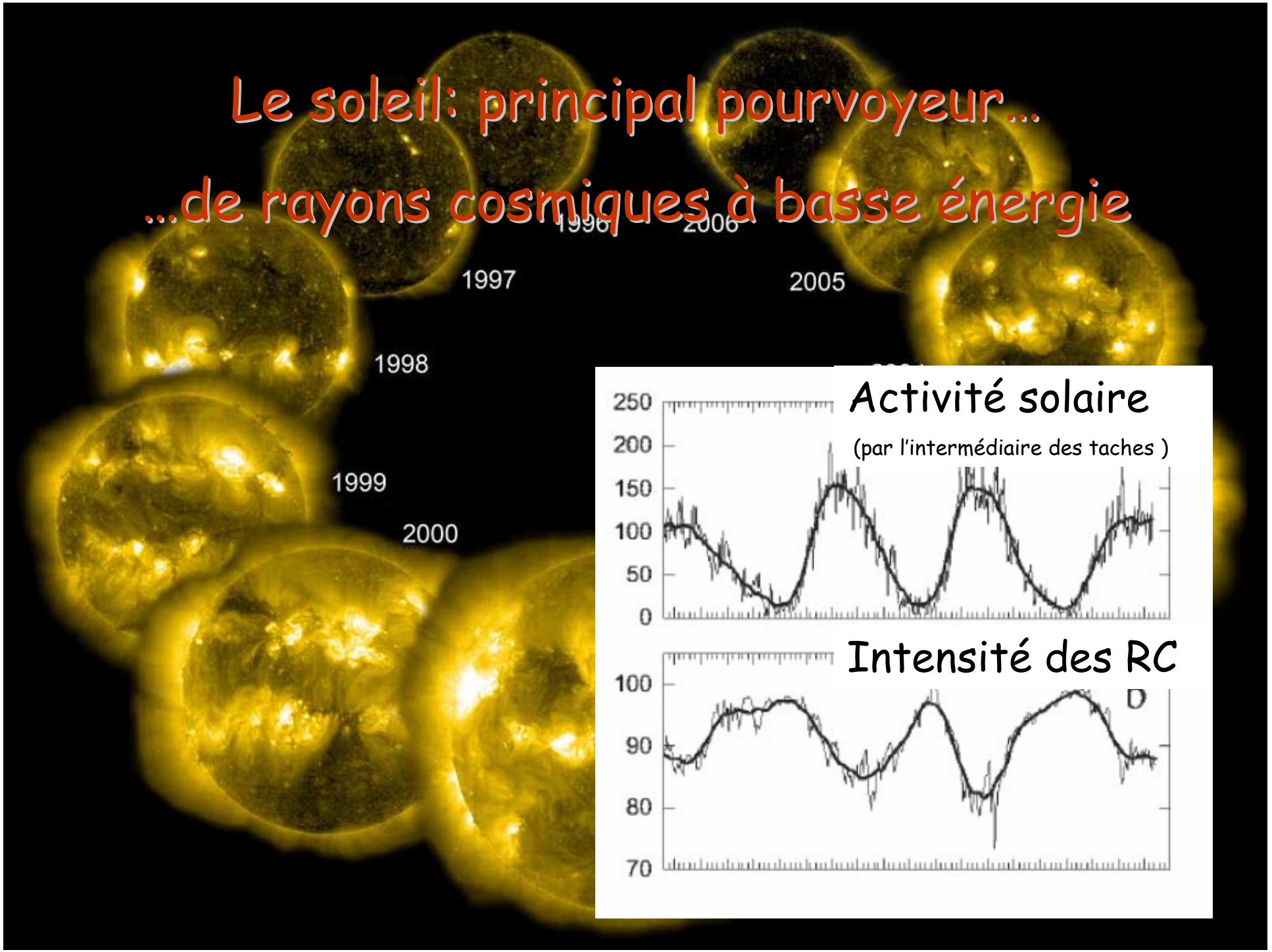
… Dont on ignore toujours l'origine !!!!

La croisée des chemins…



Le soleil: principal pourvoyeur…

…de rayons cosmiques à basse énergie



Retombées

Aurores boréales ou australes

Découverte par Galilée au début du XVII^{ème} siecle

Facilement observables la nuit à une latitude magnétique de 70° (Scandinavie, Canada, Sibérie…)

On sait: interaction des particules chargées avec les couches externes de l'atmosphère se produisant entre 80 et 400 km d'altitude

Rayons Cosmiques et le réchauffement global

Plus de vent solaire

↓

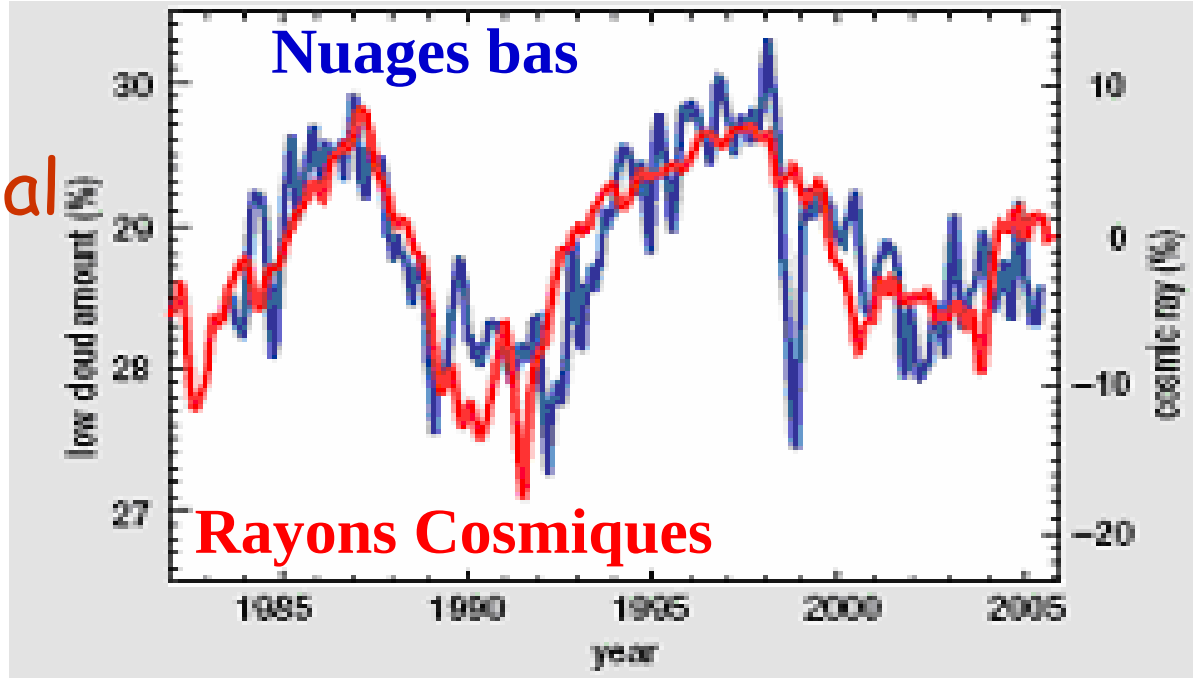
Moins de RC

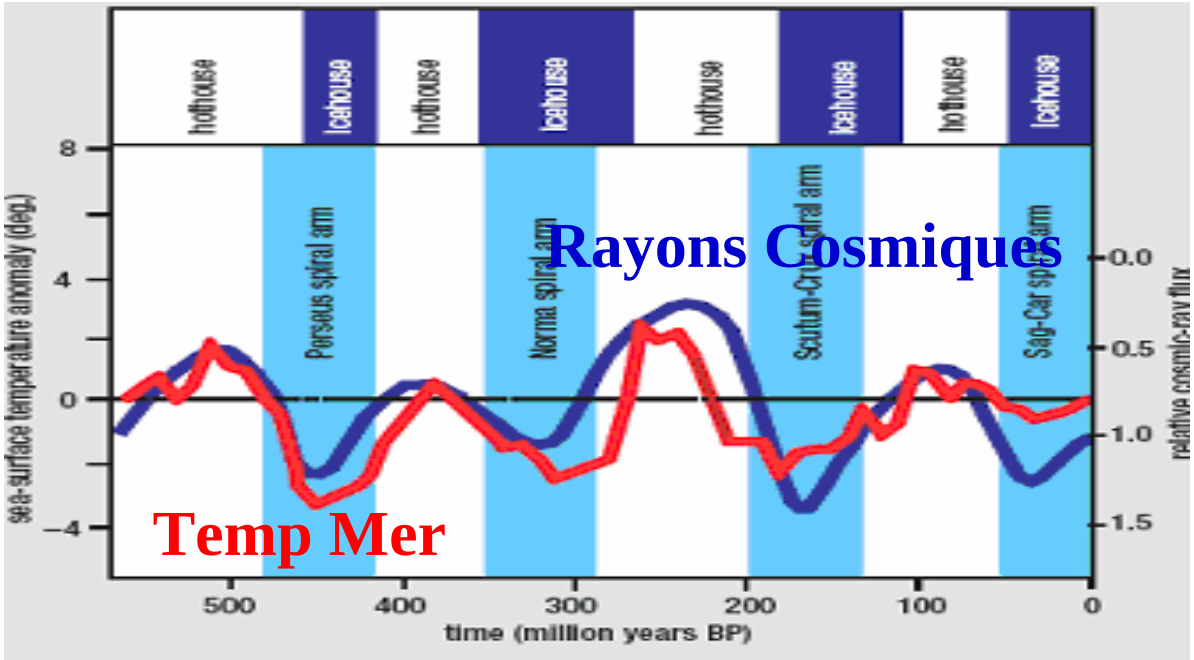
↓

Moins de nuages

↓

Plus chaud





Les rayons cosmiques
ultra énergétiques
et les "gerbes atmosphériques"

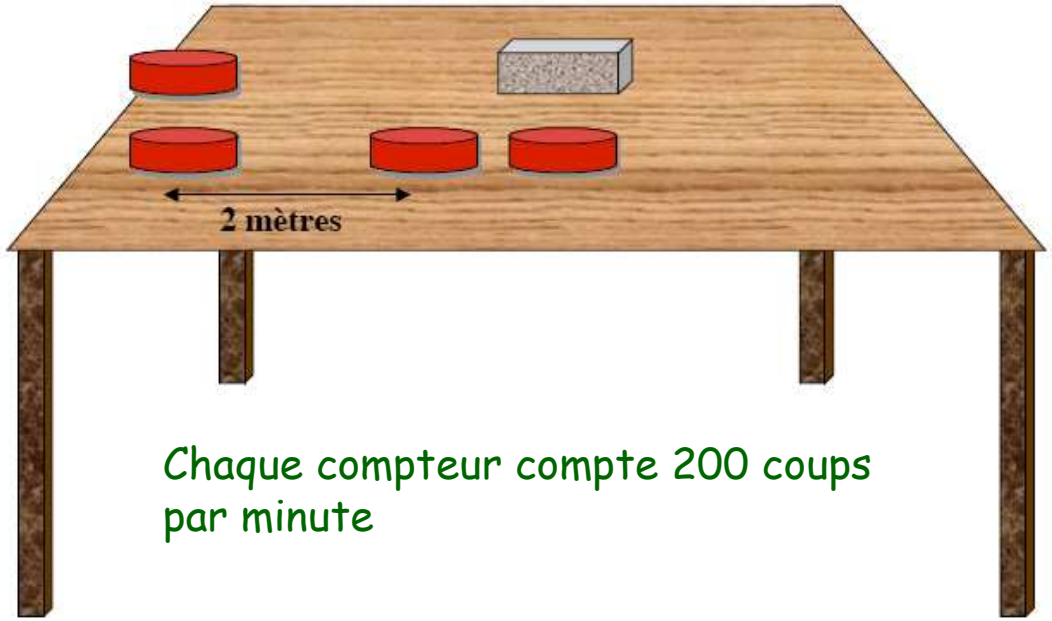
Pierre Auger à la montagne... (1937-1938)

Laboratoire de Jungfraujoch
à 3500 mètres

Histoire d'une découverte

ACADÉMIE DES SCIENCES - SÉANCE DU 8 JUIN 1938

PHYSIQUE NUCLÉAIRE.- *Grandes gerbes cosmiques atmosphériques contenant des corpuscules ultra-pénétrantes.* Note de MM. **PIERRE AUGER, RAYMOND MAZE** et Mme **THÉRÈSE GRIVET-MEYER**, présentée par M.Jean Perrin.



Chaque compteur compte 200 coups par minute

Mesure du taux de coincidences entre 2 détecteurs Geiger en fonction de la distance

Et voila les résultats…

	1ère partie			2ème partie		3ème partie			
Nombre de compteurs	3	3	3	2	3	2	2	2	2
Distance extrême en mètres	0,20	2	5	1,3	1,3	2	2	2	2
Ecran de plomb (cm)	-	-	-	-	-	0	5	10	15
Coïncidences par heure (fortuites déduites)	6,7	2,1	0,7	3,4	1,5	4	0,7	0,5	<0,2

→ Le nombre de coincidence diminue avec la distance et reste toujours supérieur au taux de fortuites !!!

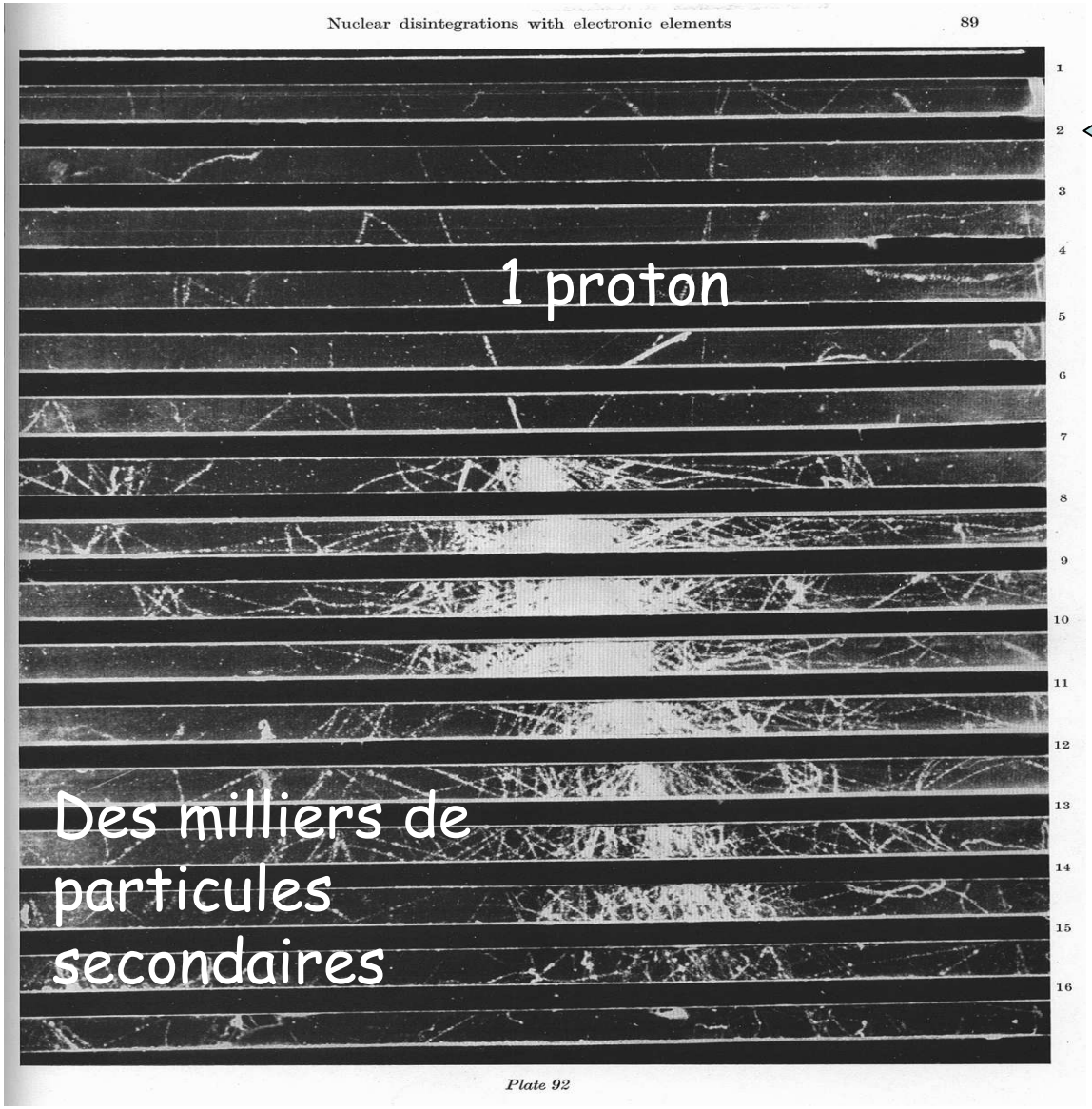
→ Particules cohérentes qui touchent les 3 détecteurs

→ Gerbes atmosphériques

→ Même avec 15cm de plomb, il reste quand même des particules qui déclenchent la coincidence

→ Les gerbes ne sont pas constituées que d'électrons !!!

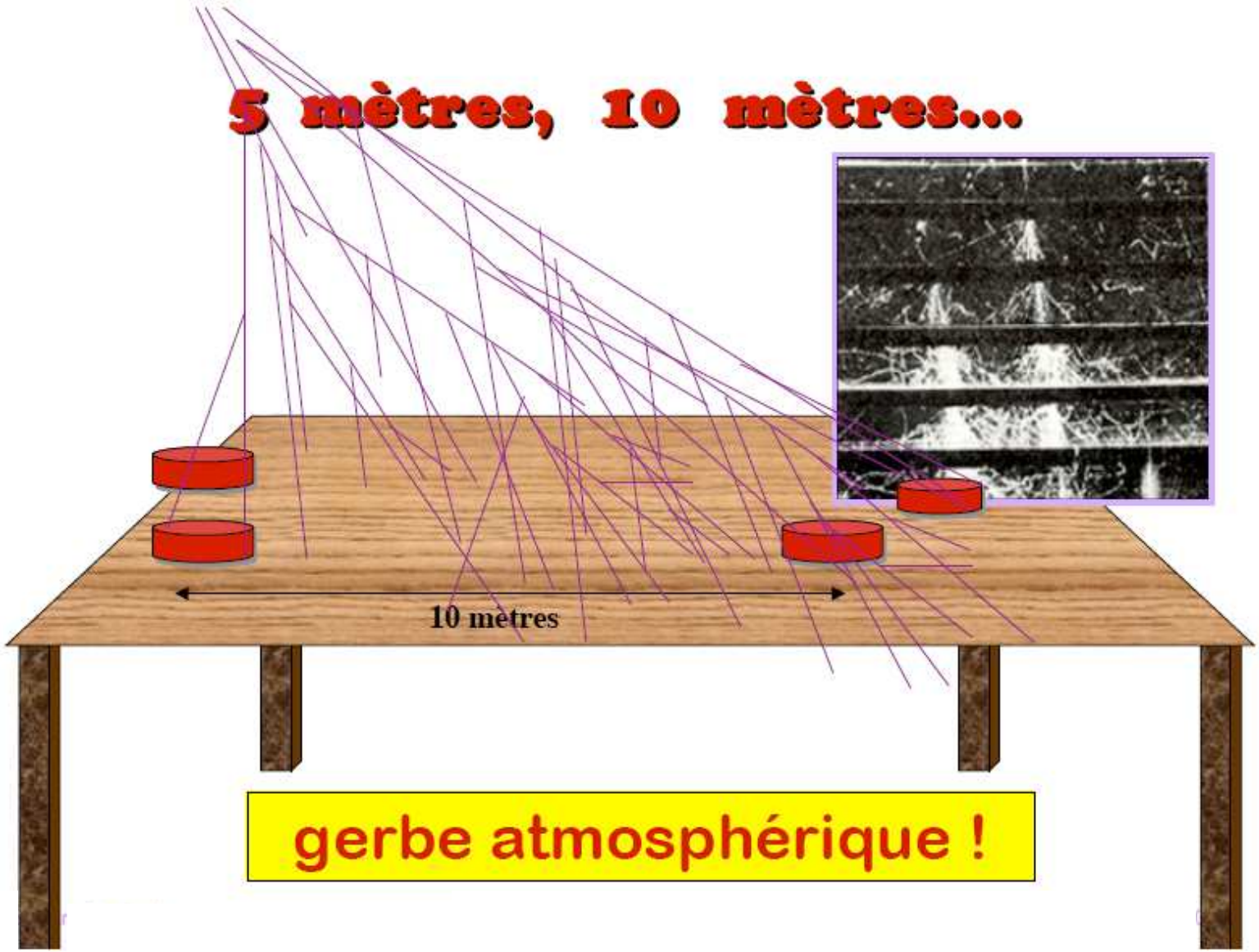
Cascades, douches et gerbes



1.3 cm Pb

Rossi: Gerbe initiée par un seul proton dans des couches de plomb dans une chambre à brouillard

Et voila les gerbes atmosphériques…



Des énergies stupéfiantes !!!

ACADÉMIE DES SCIENCES - SÉANCE DU 18 JUILLET 1938

PHYSIQUE NUCLÉAIRE.- *Les grandes gerbes cosmiques de l'atmosphère.* Note[1] de MM. **PIERRE AUGER** et **ROLAND MAZE**, présentée par M. Jean Perrin.

« 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. Si on évalue à 5 10^7 eV la perte d'énergie de ces corpuscules par centimètre de plomb, on voit que l'énergie totale de la gerbe, et par conséquent du corpuscule initial qui la produit peut aller de **10^{12} à 10^{13} électron-volts** »

Jusqu'où cela peut-il aller ?

On ne sait pas !!!!

Alors espaçons plus les détecteurs

5 mètres → 40 minutes en moyenne

20 mètres → 1h15 en moyenne

...

1 km → des années

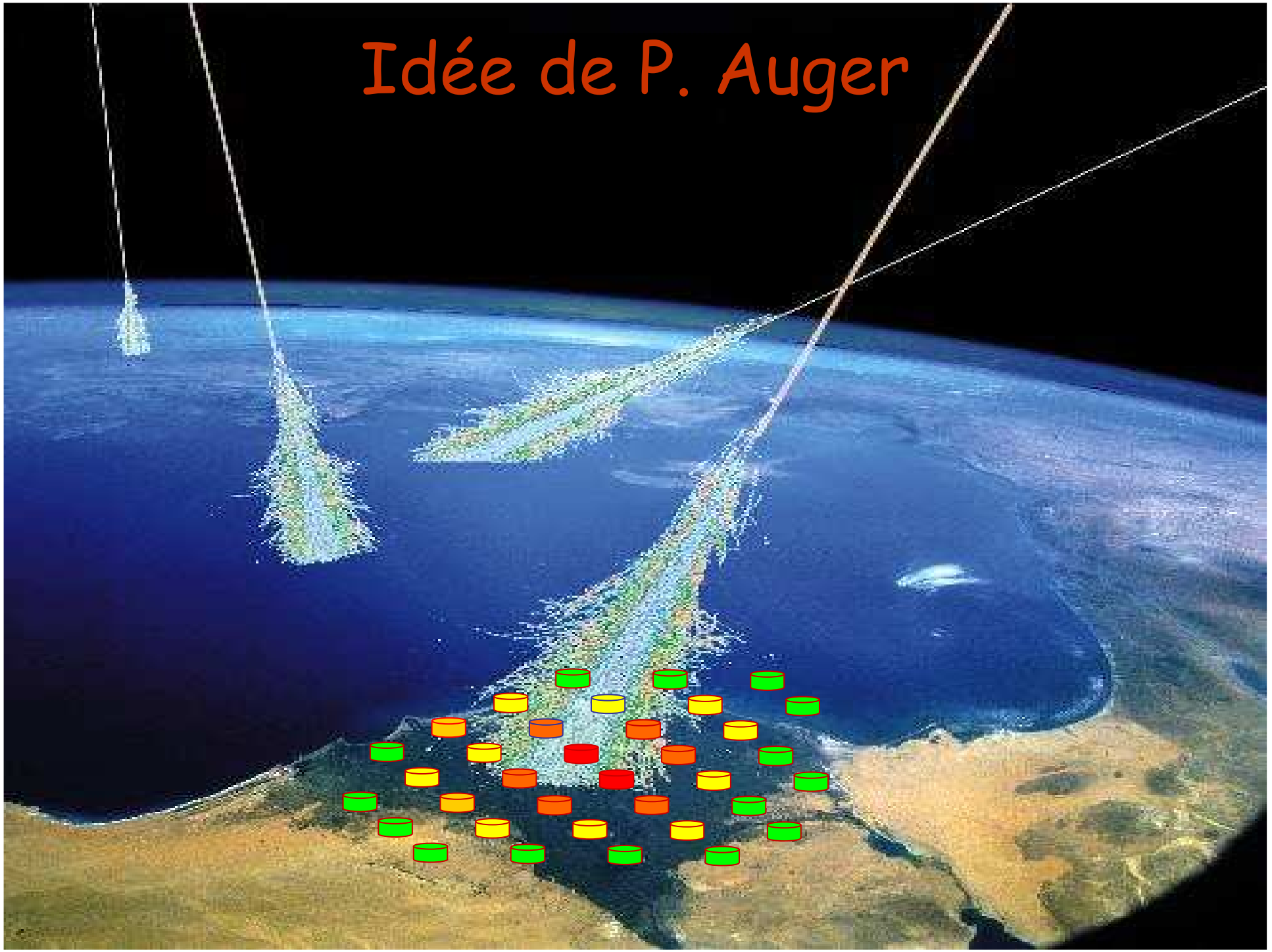
Impossible à mesurer

→ on l'a fait !!!!

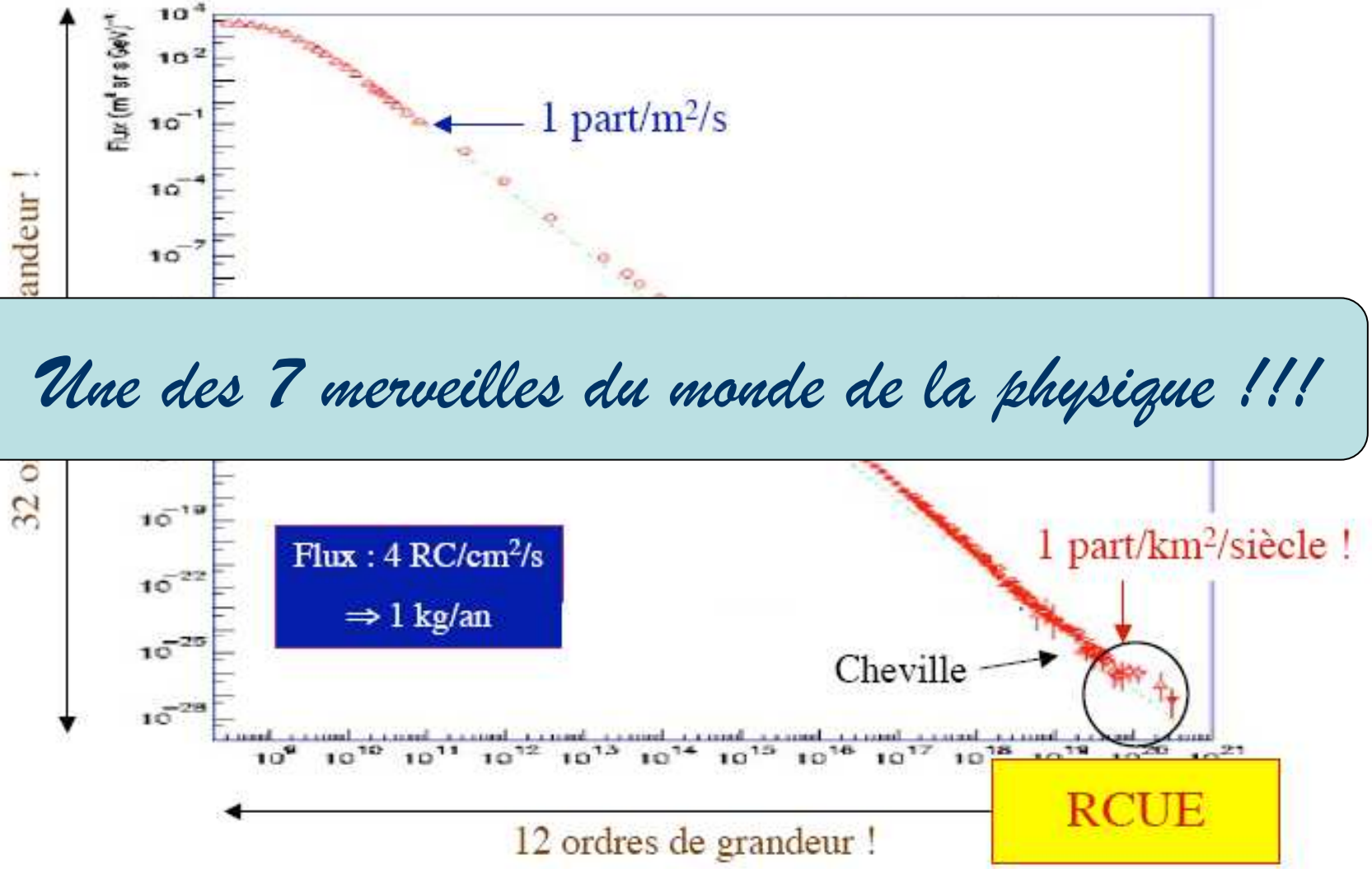
Comment ?

E > 10^{14} eV: flux trop faible pour détection directe

Idée de P. Auger



Distributions

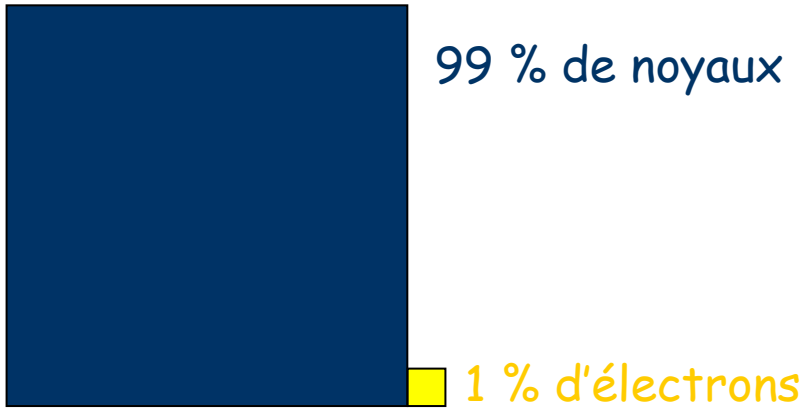


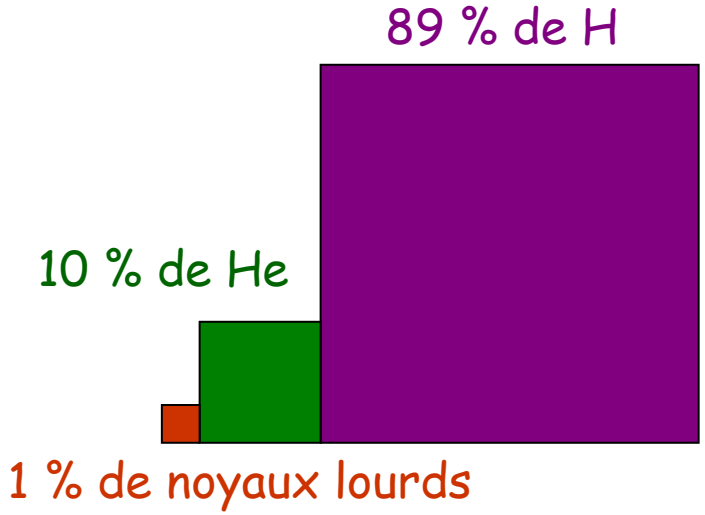
Une des 7 merveilles du monde de la physique !!!

Mais au fait, quelle est la nature des RC

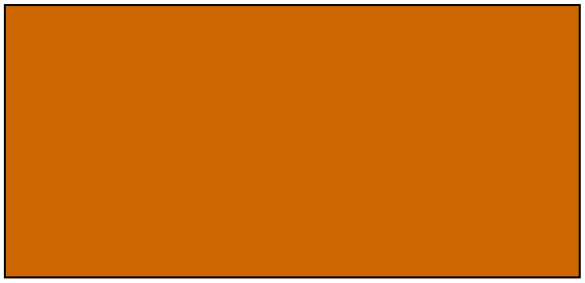
Flux: ~ 4 RC/cm²/s → 1 kg/an (~40000 tonnes/an de météorites)

A basse et haute énergie :



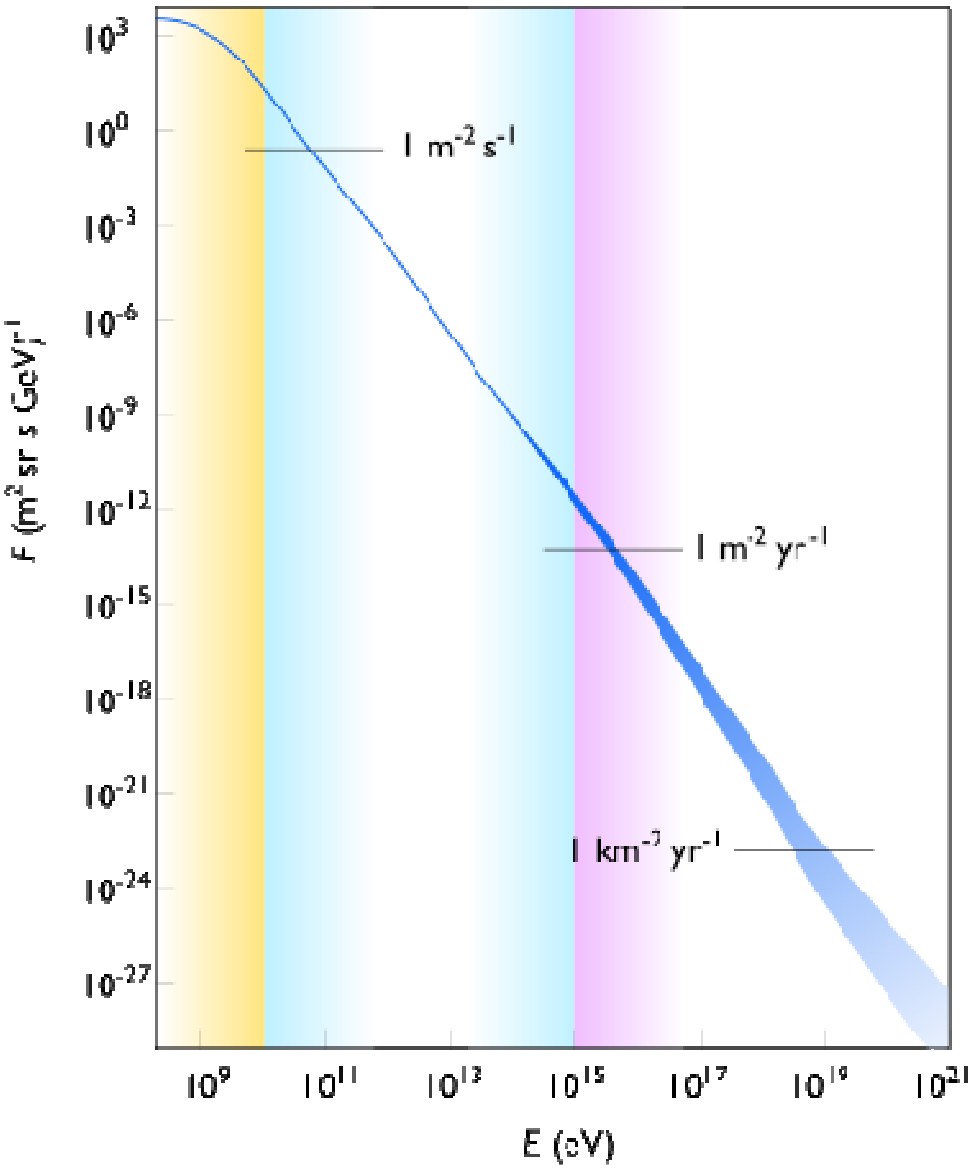


A ultra haute énergie :

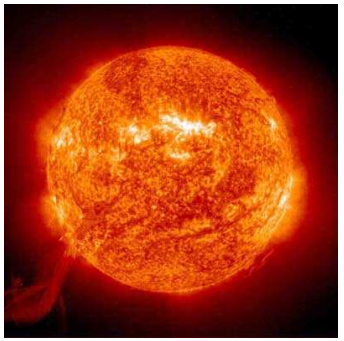


?% noyaux
?% protron
+ ????

Un mot sur l'origine des RC …

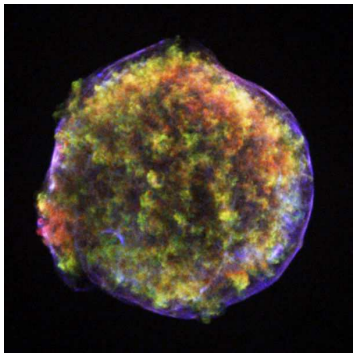


→ Basse énergie



Soleil

→ Haute énergie



Sources galactiques ??? (Supernovae, microquasars…)

→ Ultra haute énergie

?????

Comment mesurer quand il y en a si peu !!!

→ Attendre longtemps

Physiciens pas très patients !!!

→ Agrandir la taille des détecteurs

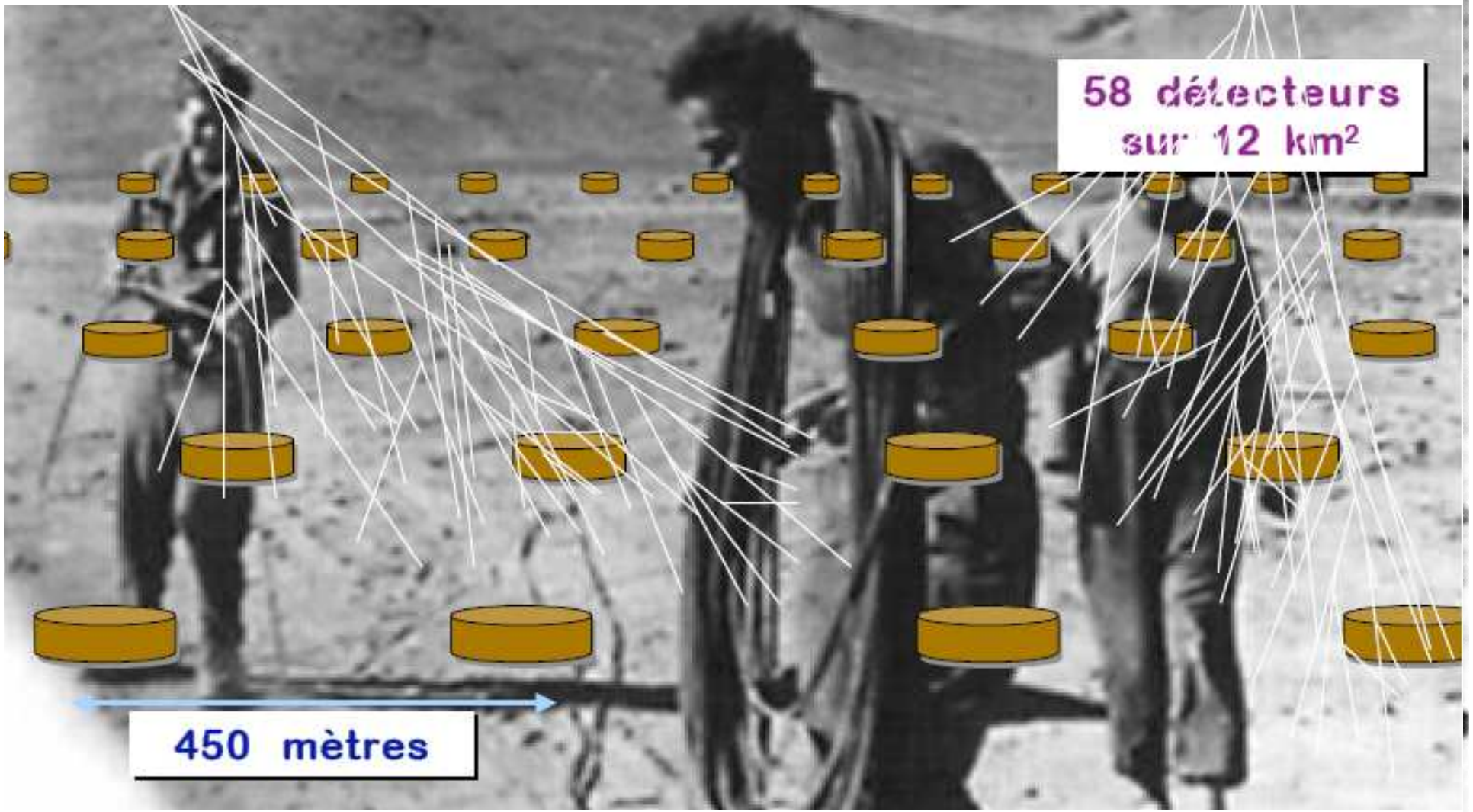
Mais jusqu'où ?

10^{19} eV → 1 particule par km^2 et par an

→ Taille minimale du détecteur : ~ 50 km^2

Construction de nombreux détecteurs basée sur l'idée de P. Auger

Georgi Zatsepin preparant l'expérience Pamir en Russie en 1946



Volcano Ranch (Nouveau Mexique)
(1959 - 1974)
J. Linsley
chasse les
serpents !!!
1962: Détection d'un rayon cosmique
d'énergie à 10^{20} eV !!! !!! !!! !!! !!! !!!

C'est fou !!!

10^{20} eV, c'est…

100 000 000 000 000 000 000 eV

… plusieurs joules – énergie macroscopique

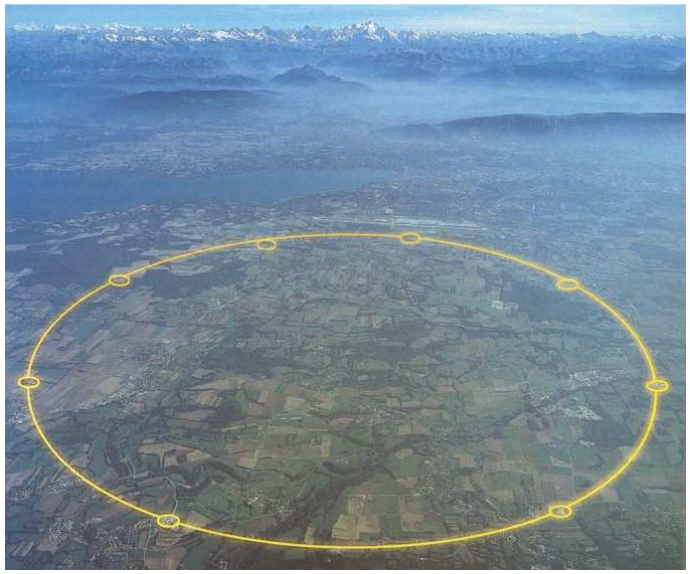
… l'énergie d'une balle de tennis à 100 km/h

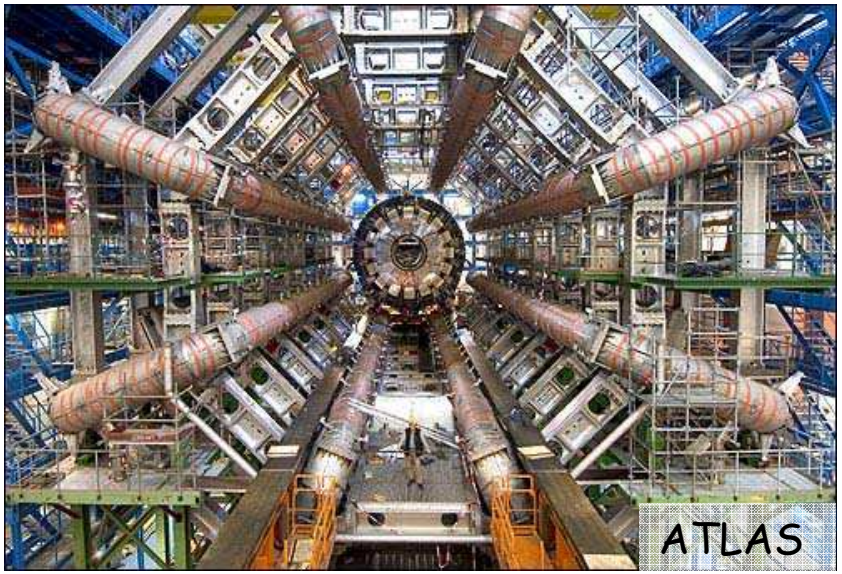
… l'énergie pour élever d'un 1° la température de 1 g d'eau

Sur Terre, le LHC…

→ collision p-p avec une énergie de 14 TeV dans le centre de masse (~ 1150 TeV par collision)

10^{20} eV → 100000 fois plus élevée





C'est fou !!!

10^{20} eV, c'est…

100 000 000 000 000 000 000 eV

… plusieurs joules – énergie macroscopique

… l'énergie d'une balle de tennis à 100 km/h

… l'énergie pour élever d'un 1° la température de 1 g d'eau

C'est une énergie incroyable

Pire, c'est impossible !!!

A cause du rayonnement fossile

1965, Penzias et Wilson: découverte du rayonnement fossile (fond cosmologique à 2.7 K)

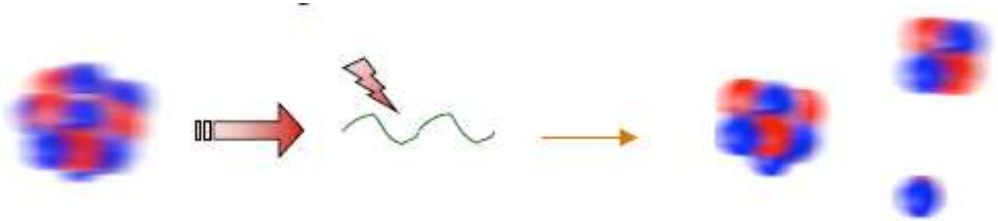
L'univers est rempli de photons, très froids, en grand nombre : 400 par cm^3.

Ces photons sont inoffensifs, car d'énergie très faible...

... à moins qu'on ne se jette sur eux à toute allure !

Interaction avec les photons "froids"

Les noyaux :

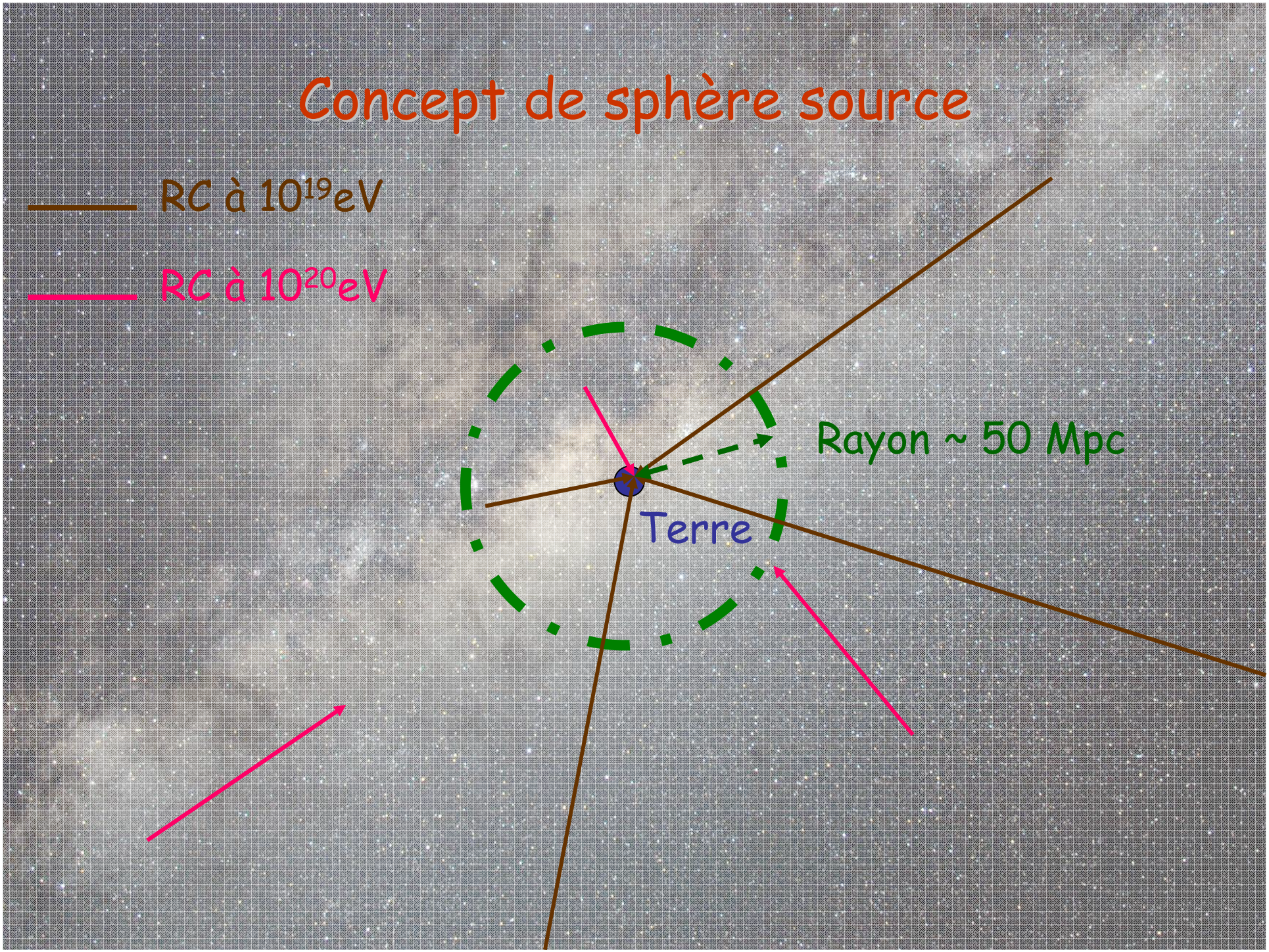


Les protons :

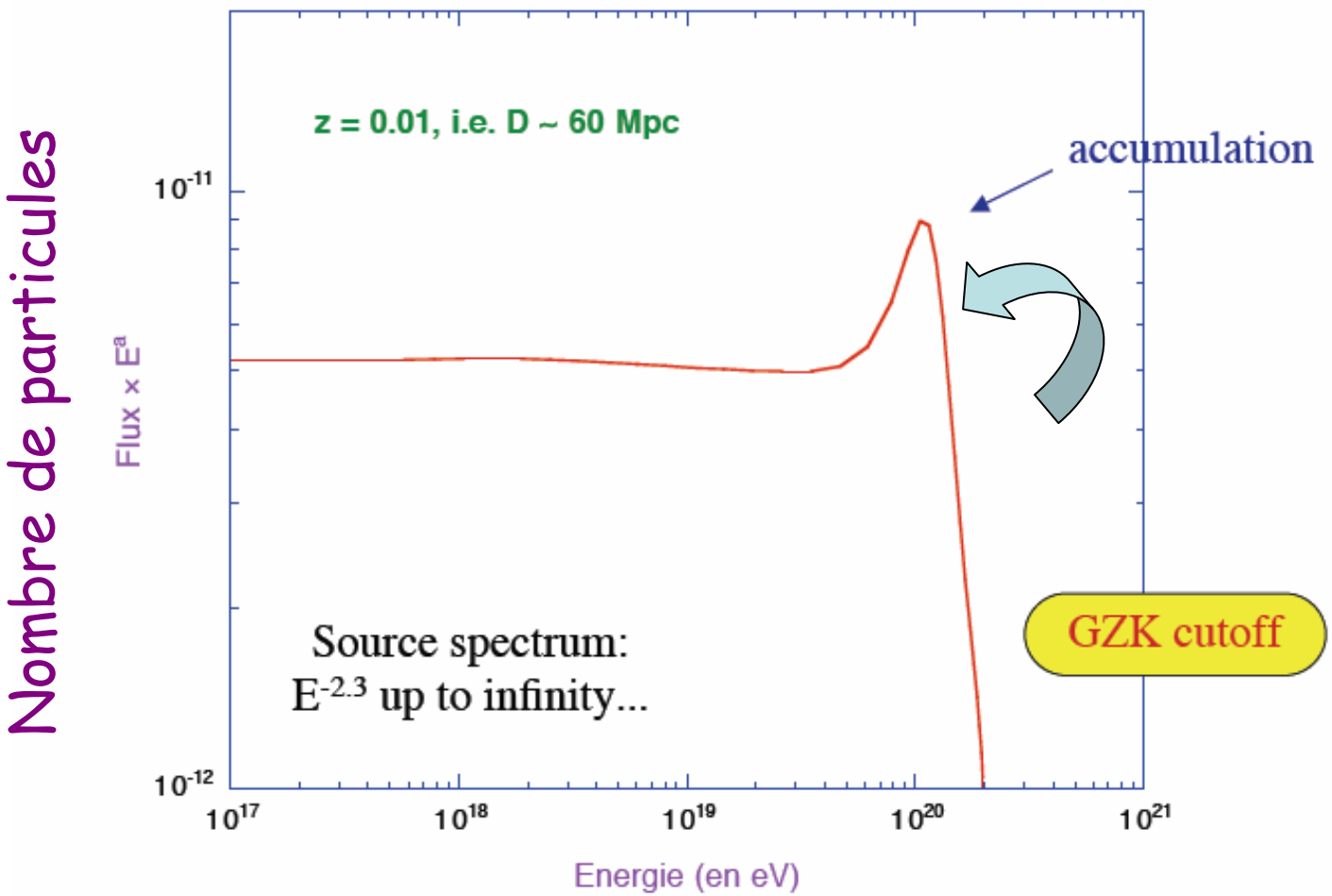
1966 : prédiction d'une "coupure" dans le spectre des rayons cosmiques : Greisen, Zatsepin et Kuzmin (GZK) comprennent que les RC au delà de 10^{20} eV ne peuvent pas venir de très loin

10^{20} eV : distance inférieure à 100 Mpc (300 millions années lumière)
3 10^{20} eV : distance inférieure à 15 Mpc (50 millions d'années lumière)

Concept de sphère source



Conséquence …



Comment mesurer quand il y en a si peu !!!

→ Attendre longtemps

Physiciens pas très patient !!!

→ Agrandir la taille des détecteurs

Mais jusqu'où ?

10^{19} eV → 1 particule par km^2 et par an

→ Taille minimale du détecteur : ~ 50 km^2

10^{20} eV → 1 particule par km^2 et par siècle

→ Taille minimale du détecteur : ~ 5000 km^2

Ca parait énorme !!!!

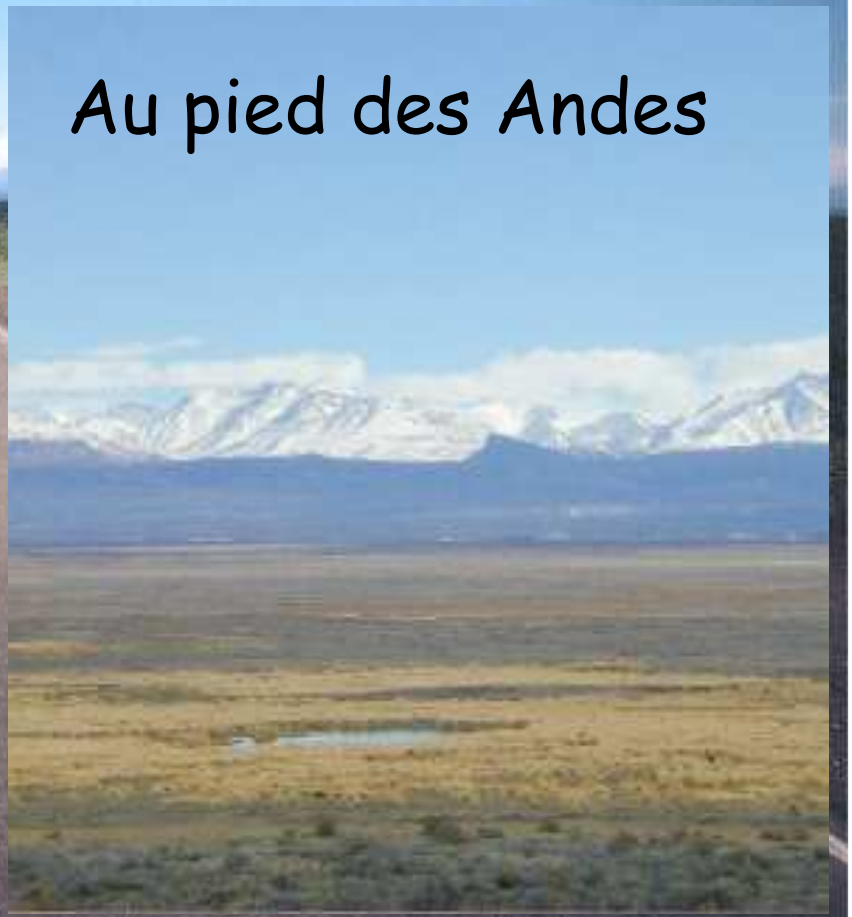
5000 km², c'est quoi ?

Incroyable, on l'a fait !!!

L'Observatoire Pierre Auger

3000 km² sur la Pampa argentine

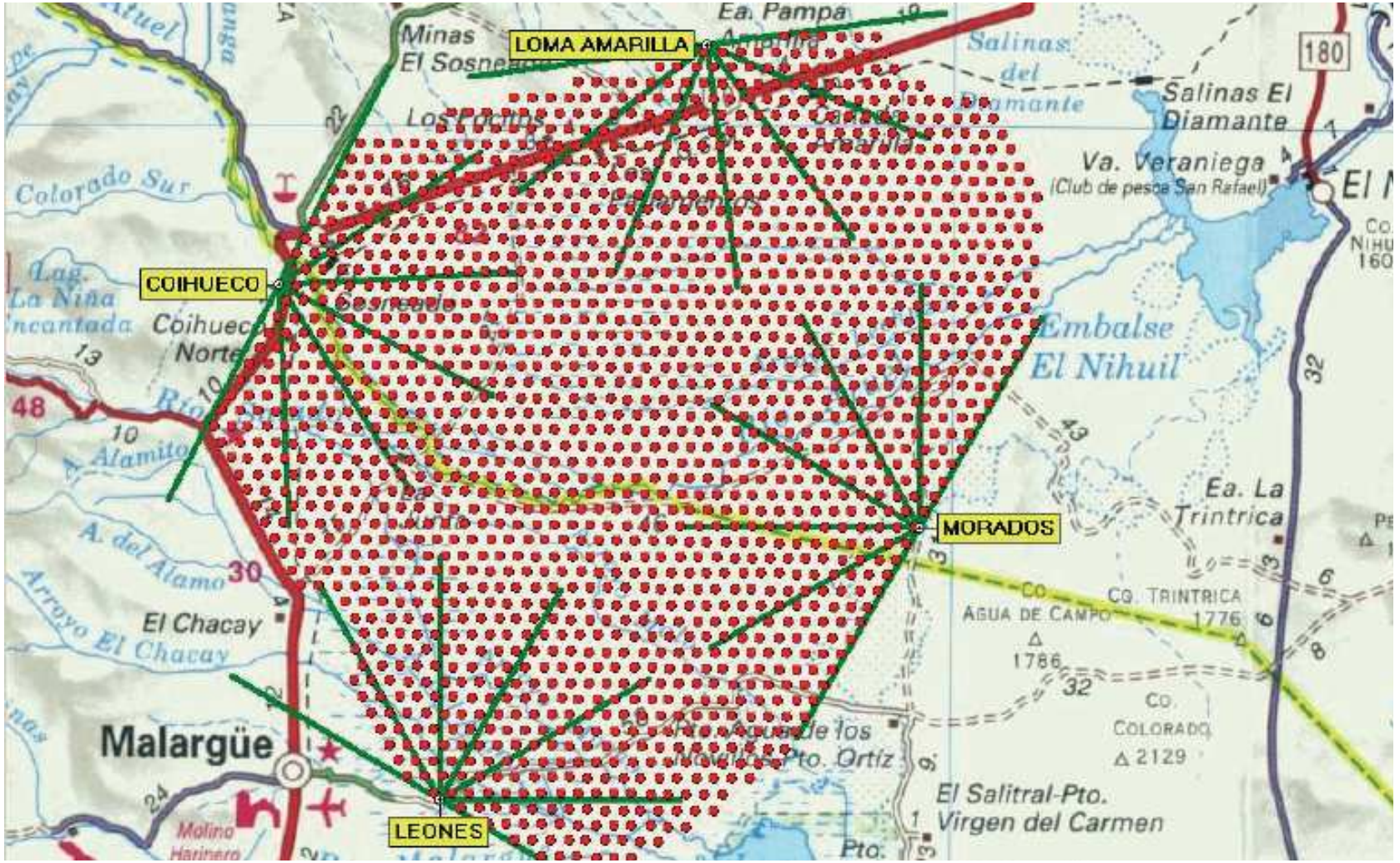
Au pied des Andes



Un paradis pour les vaches …

…et aussi pour les chercheurs!!!

A quoi ressemble l'Observatoire Auger ?



La construction du détecteur est quasiment terminée

Pourquoi faire ?

Qu'est ce que Auger a découvert ?

Auger prend des données depuis janvier 2004,
soit 4 ans de données

Et avec çà: détection d'environ 12000 événements

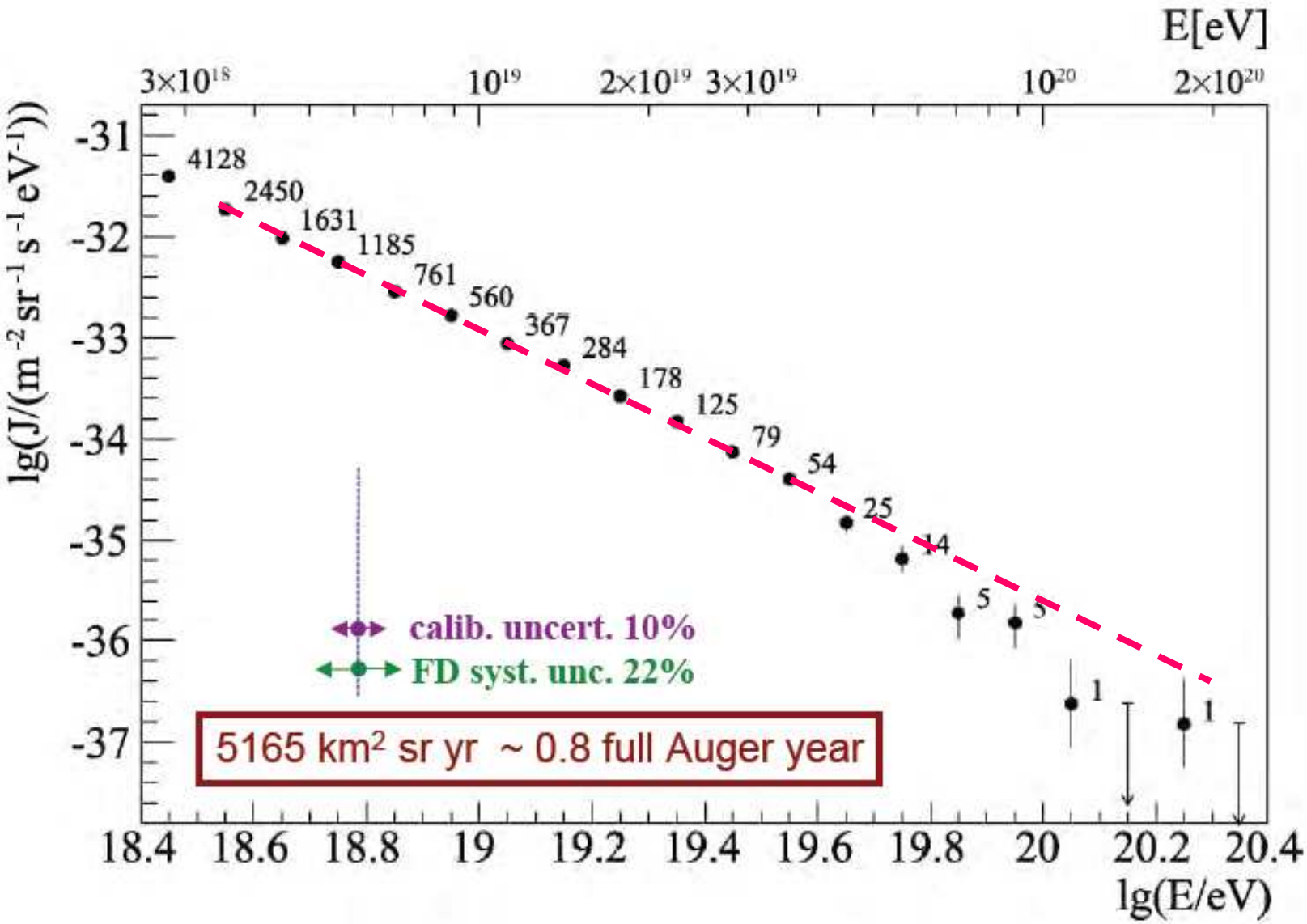
$E > 10^{19}$ eV → ~1200 événements
$E > 10^{20}$ eV → ~6 événements

Résultats importants sur 3 observables:

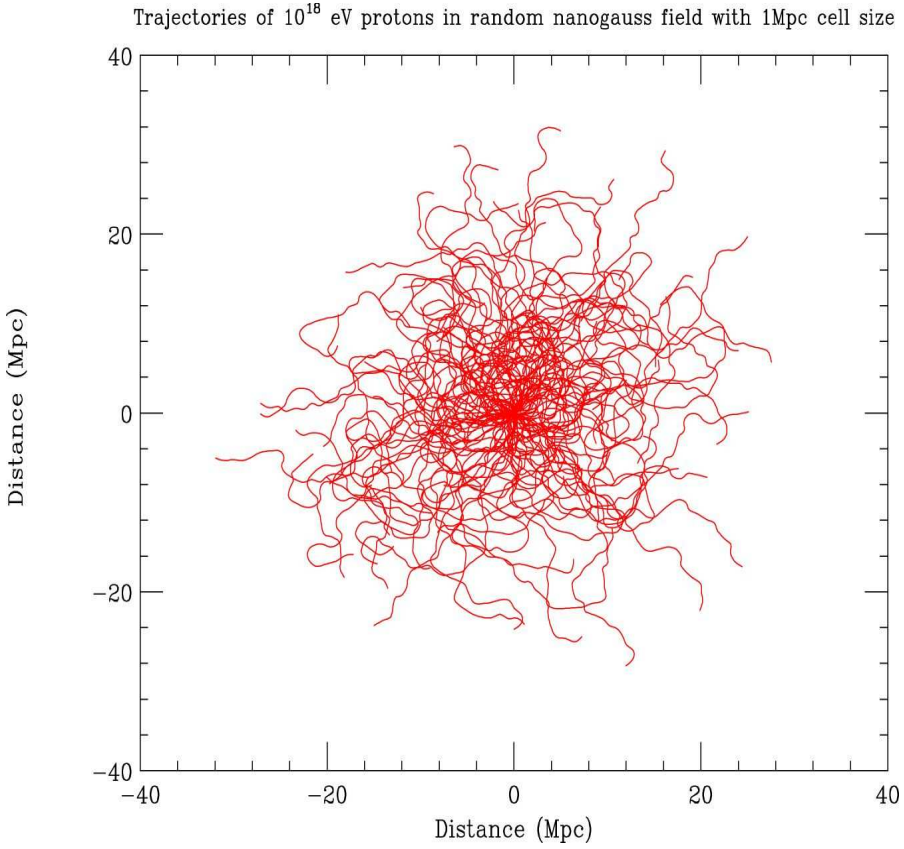
- Spectre en énergie
- Directions d'arrivée
- Nature des RCHE

Juin 2007

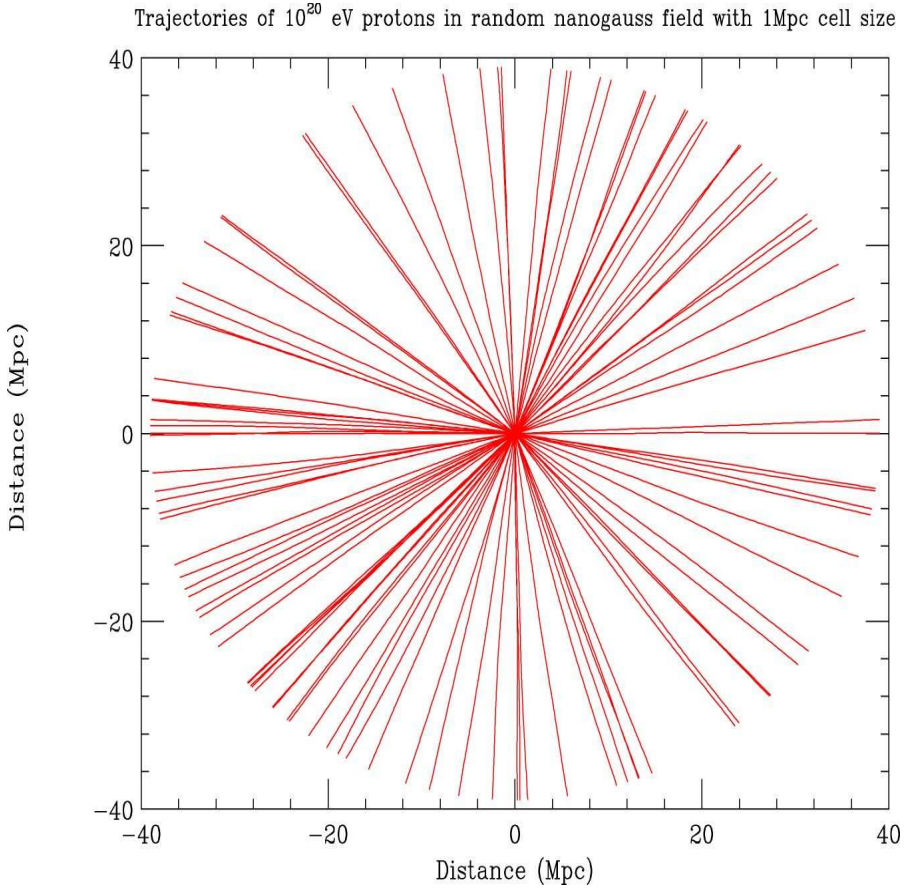
Spectre en énergie



Isotropie / anisotropie: histoire de champs magnétiques

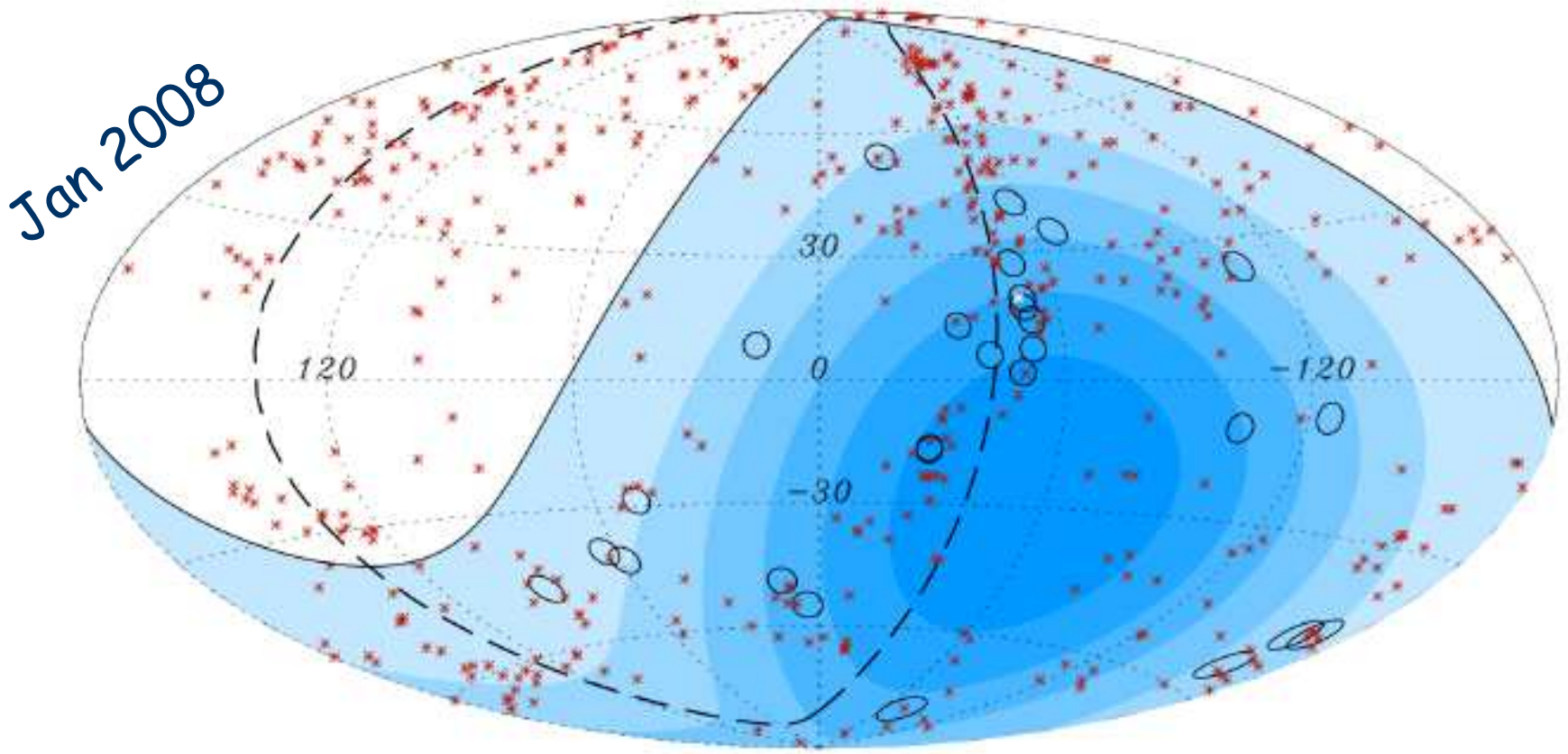


Proton 10^{18} eV
→ isotropie



Proton 10^{20} eV
→ anisotropie

Vers un nouveau type d'astronomie…



Pour la première fois, corrélation entre ces évenements et des objets situés dans l'univers local

Vers un nouveau type d'astronomie…

Dès l'antiquité → astronomie pré-télescopiques

A partir de 1609, la lunette astronomique par Galilée

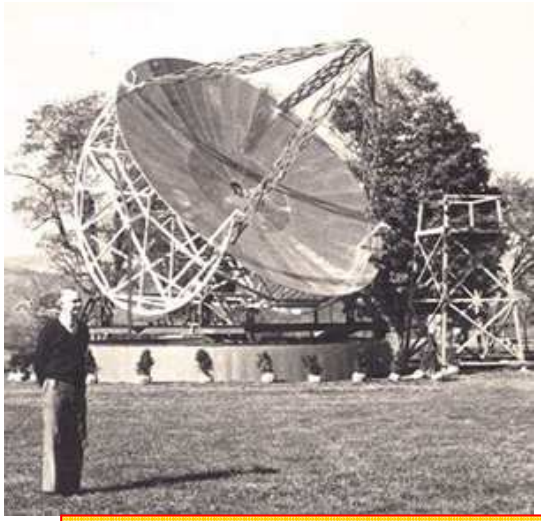
Vers un nouveau type d'astronomie…

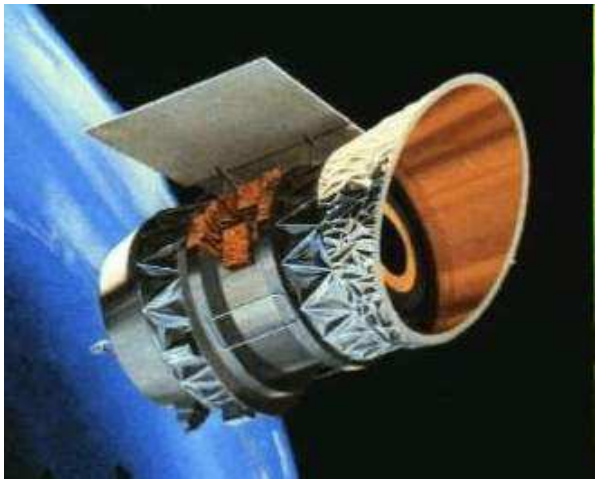
Dès l'antiquité → astronomie pré-télescopiques

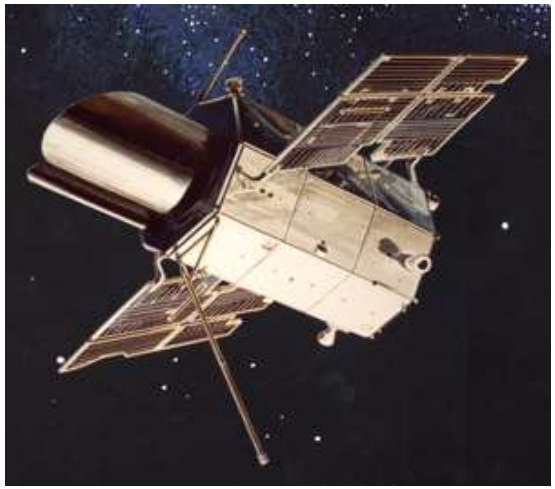
A partir de 1609, la lunette astronomique par Galilée

Années 1960, développement de radiotélescopes

1970 - 1990, observation dans les domaines X, UV, IR







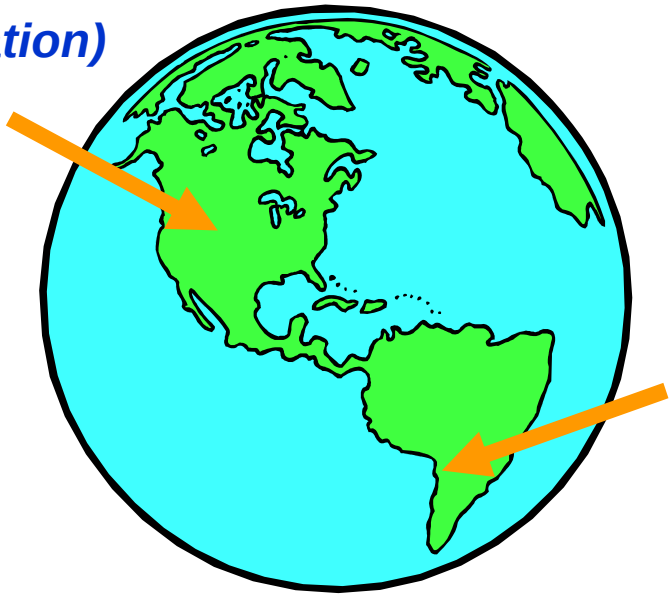
2007 → naissance d'une astronomie non photonique

→ nouvelle ouverture sur l'univers

Que faire dans le futur…

…continuer à agrandir les détecteurs

Colorado, Etas-Unis
(en préparation)



Mendoza, Argentine

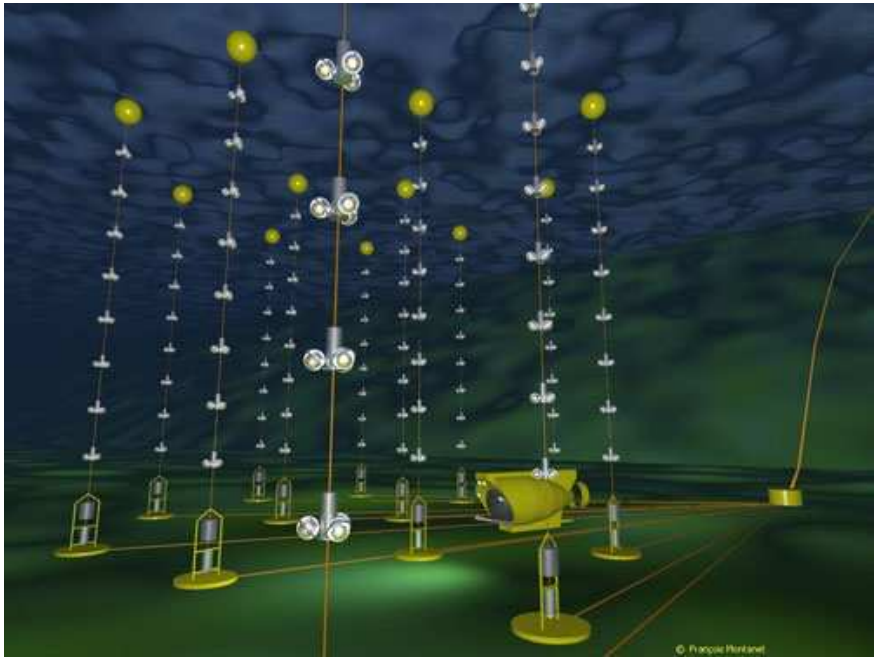
Auger Nord: 22000 km^2

Y a t-il d'autres moyens de les voir?

Par l'intermédiaire des neutrinos:

Les neutrinos produits lors de l'interaction des RC avec les photons dans les sources (comme GZK)

Par exemple, expérience ANTARES ou AMANDA/ICE CUBE au pôle Sud



Y a t-il d'autres moyens de les voir?

Par l'intermédiaire des photons de haute énergie:

produits aussi lors de l'interaction des RC avec les photons dans les sources

Par exemple, expérience HESS en Namibie, MAGIC aux Iles Canaries…

Mais que font les théoriciens ?

Ils attendent …

Ils réflechissent…

Ils conjecturent…

Ils salivent…

Il est vraiment temps de parler de sources…

Quelles sont les sources capable de produire ces RCHE ?

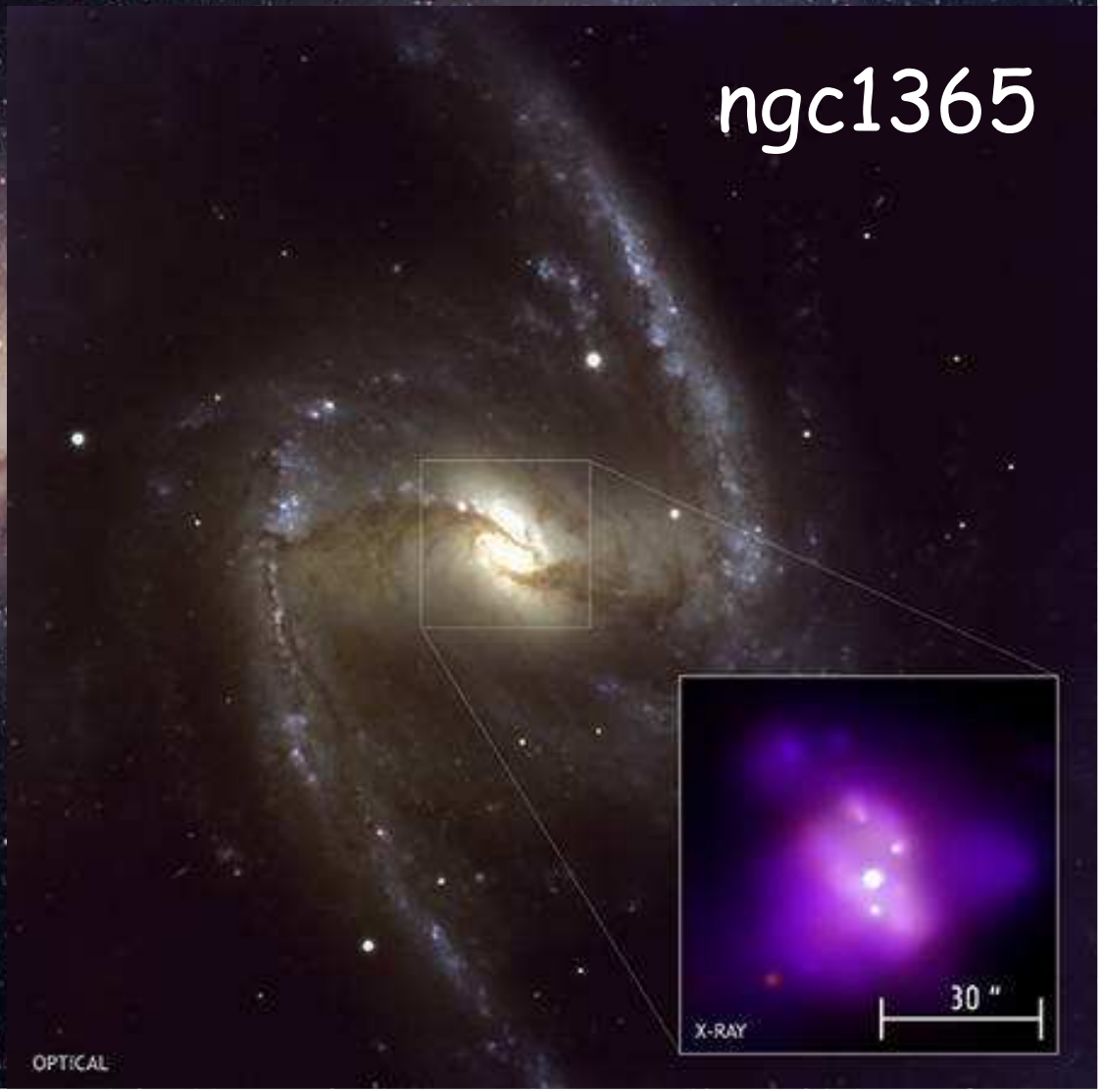
→ Pratiquement, on n'en sait rien !!!

Alors, on suppose, on conjecture…

On connait que 2 types de sources astrophysiques

- Noyaux actifs de galaxie
- Sursauts gamma

Galaxie d'Andromède (M31)

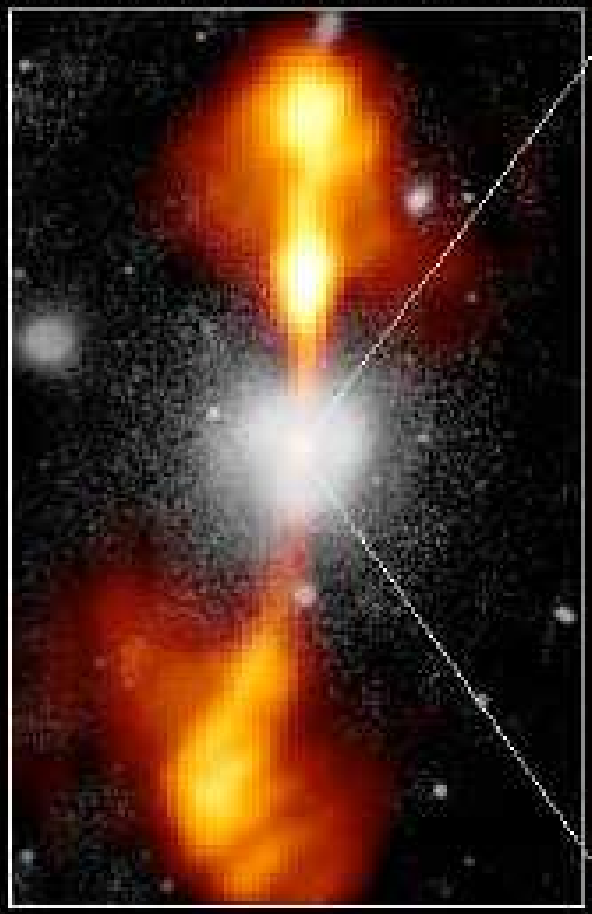


Core of Galaxy NGC 4261

Hubble Space Telescope

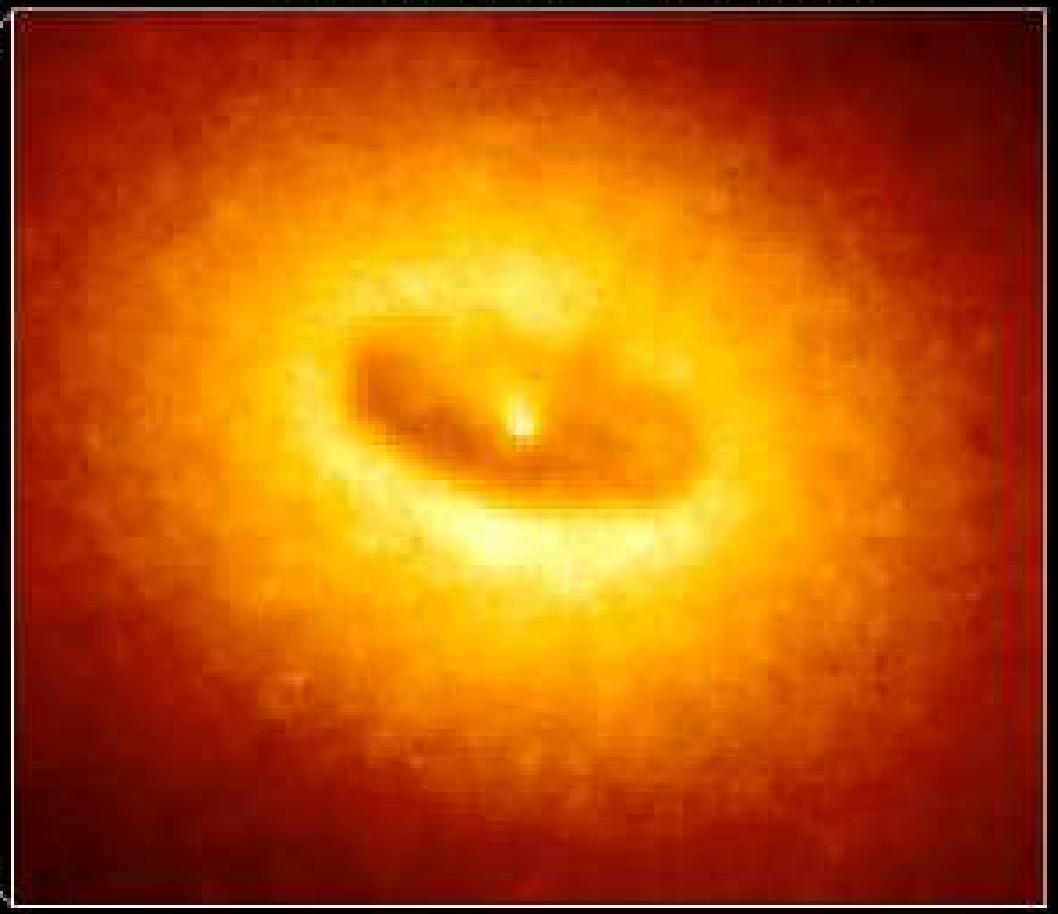
Wide Field / Planetary Camera

Ground-Based Optical/Radio Image

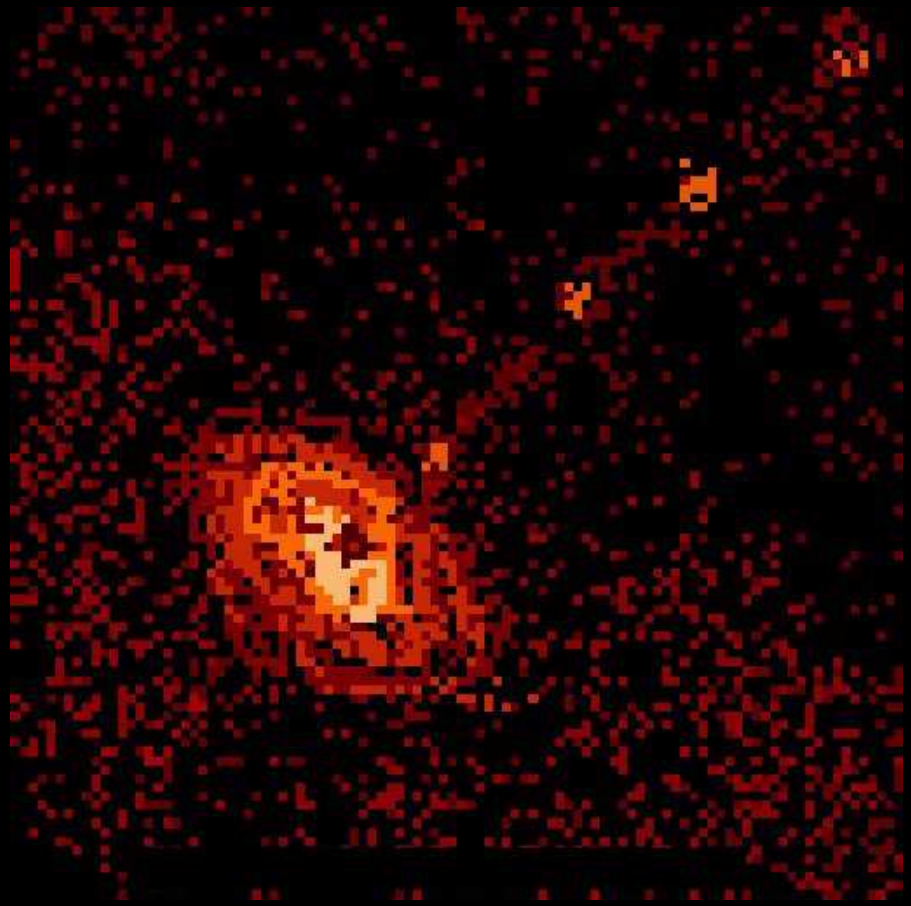


380 Arc Seconds
88,000 LIGHT-YEARS

HST Image of a Gas and Dust Disk



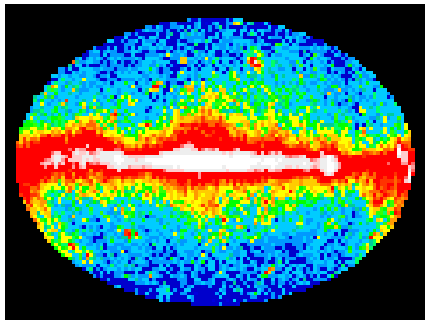
1.7 Arc Seconds
400 LIGHT-YEARS

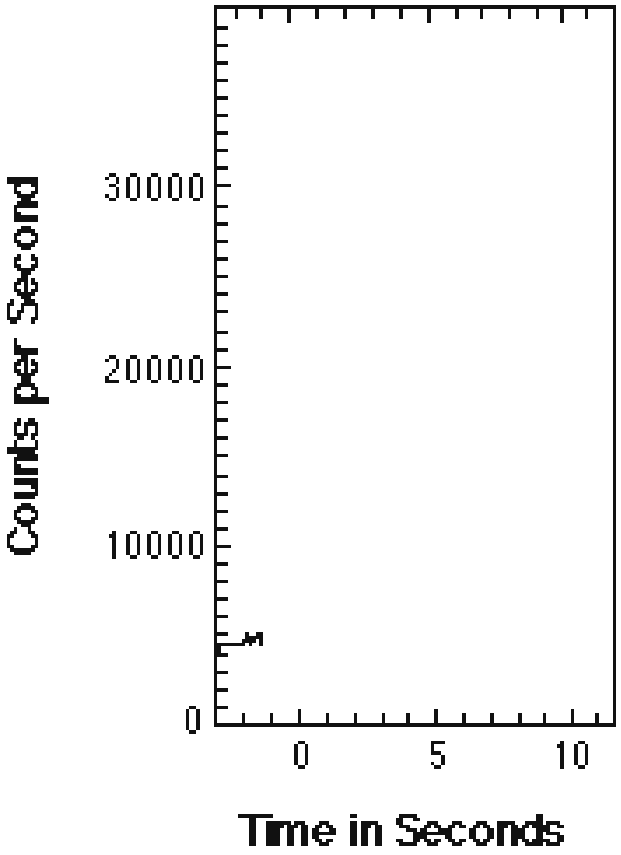


M87

Les sursauts gamma

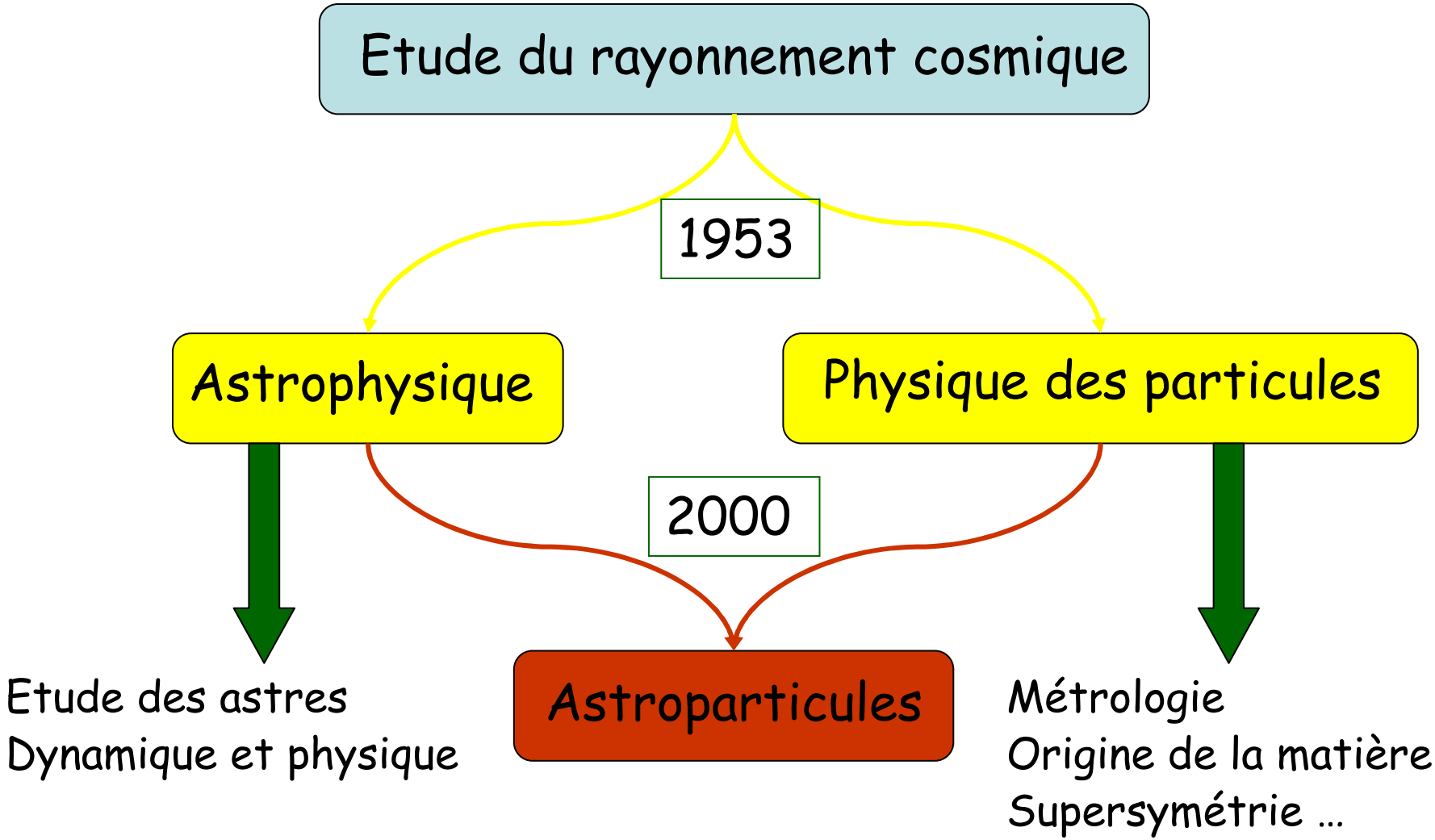
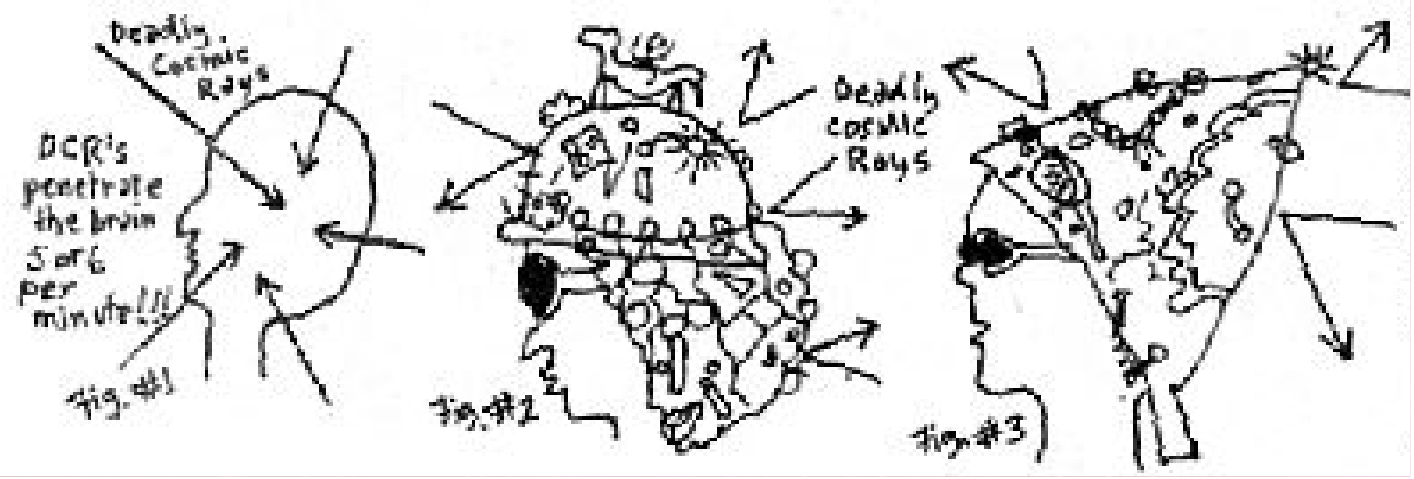
Augmentation brutale du flux de photons dans une direction particulière sur un temps très court





2 origines possibles:

La boucle est bouclée



Restez à l'écoute...