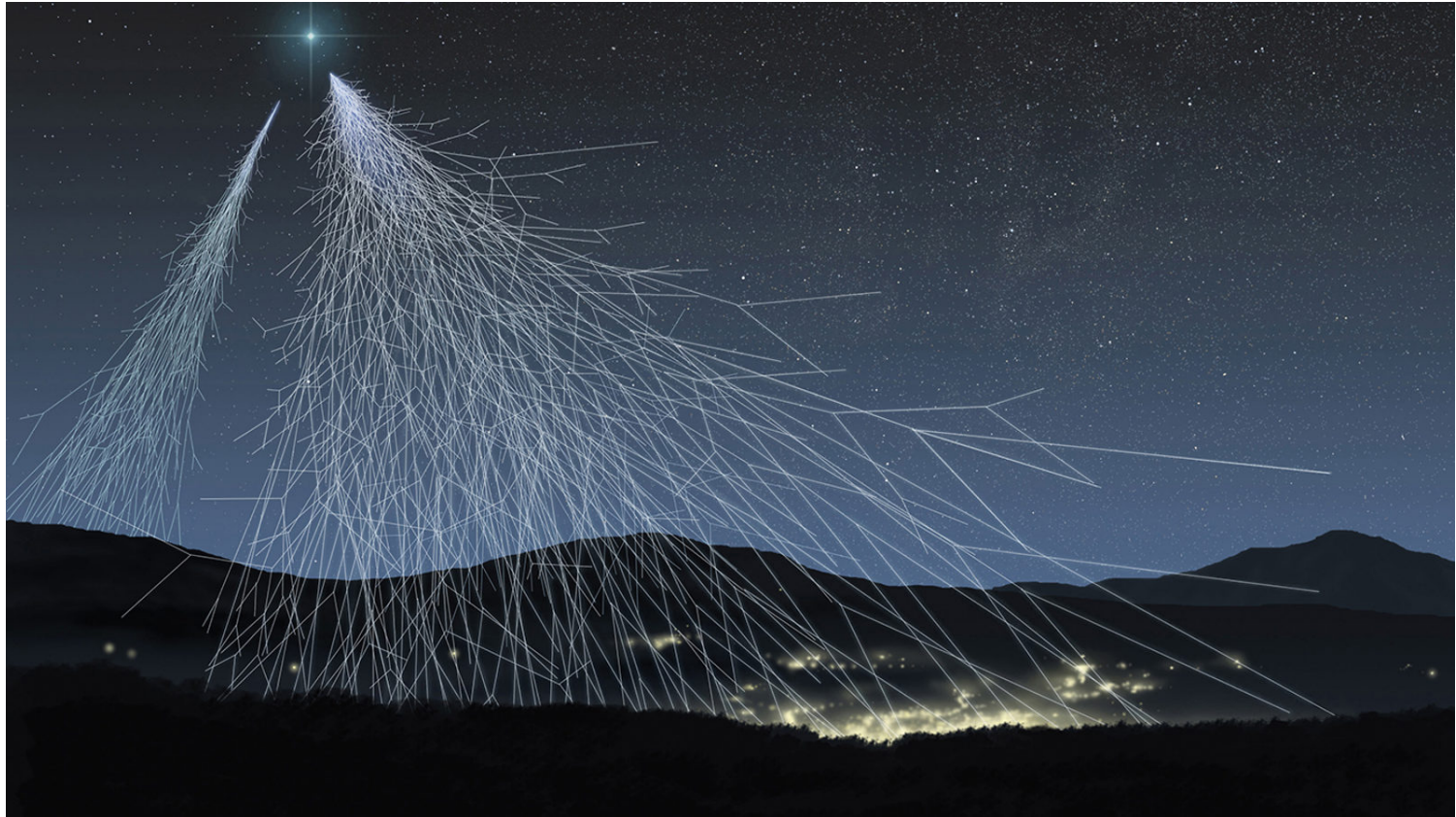


Rayonnements en provenance du cosmos



**18-19 janvier 2016, Formation PAF
académie de Reims, Troyes**

Nicolas Arnaud (narnaud@lal.in2p3.fr)
Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire
(CNRS/IN2P3 & Université Paris-Sud)



Sommaire

- Un peu d'histoire
- Rayonnements de très haute énergie
- Les rayons cosmiques : utiles ?



- Pour en savoir plus

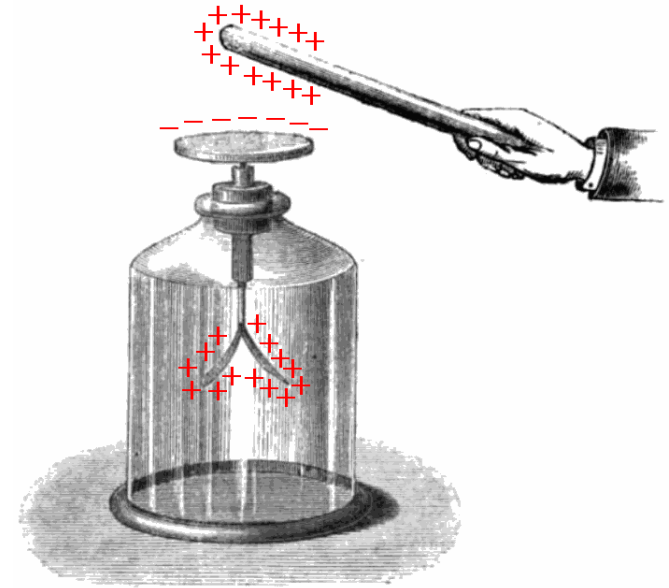
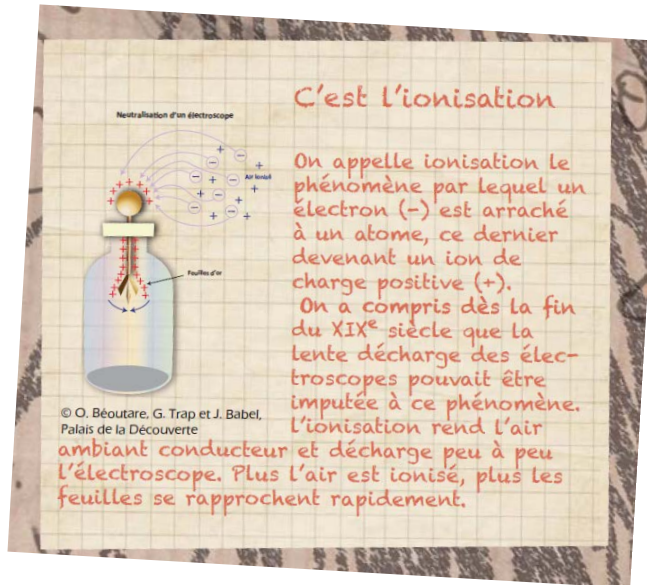
- Exposition IN2P3 sur les rayons cosmiques (2012) :

http://www.in2p3.fr/physique_pour_tous/informations/manifestations/expo_RC/expo_RC.htm

Un peu d'histoire

Origine de l'ionisation de l'atmosphère ?

- Décharge spontanée d'un corps chargé
 - Observée dès le XVIII^e siècle par Coulomb
 - **Electroscope**
- Cause : **ionisation de l'atmosphère**

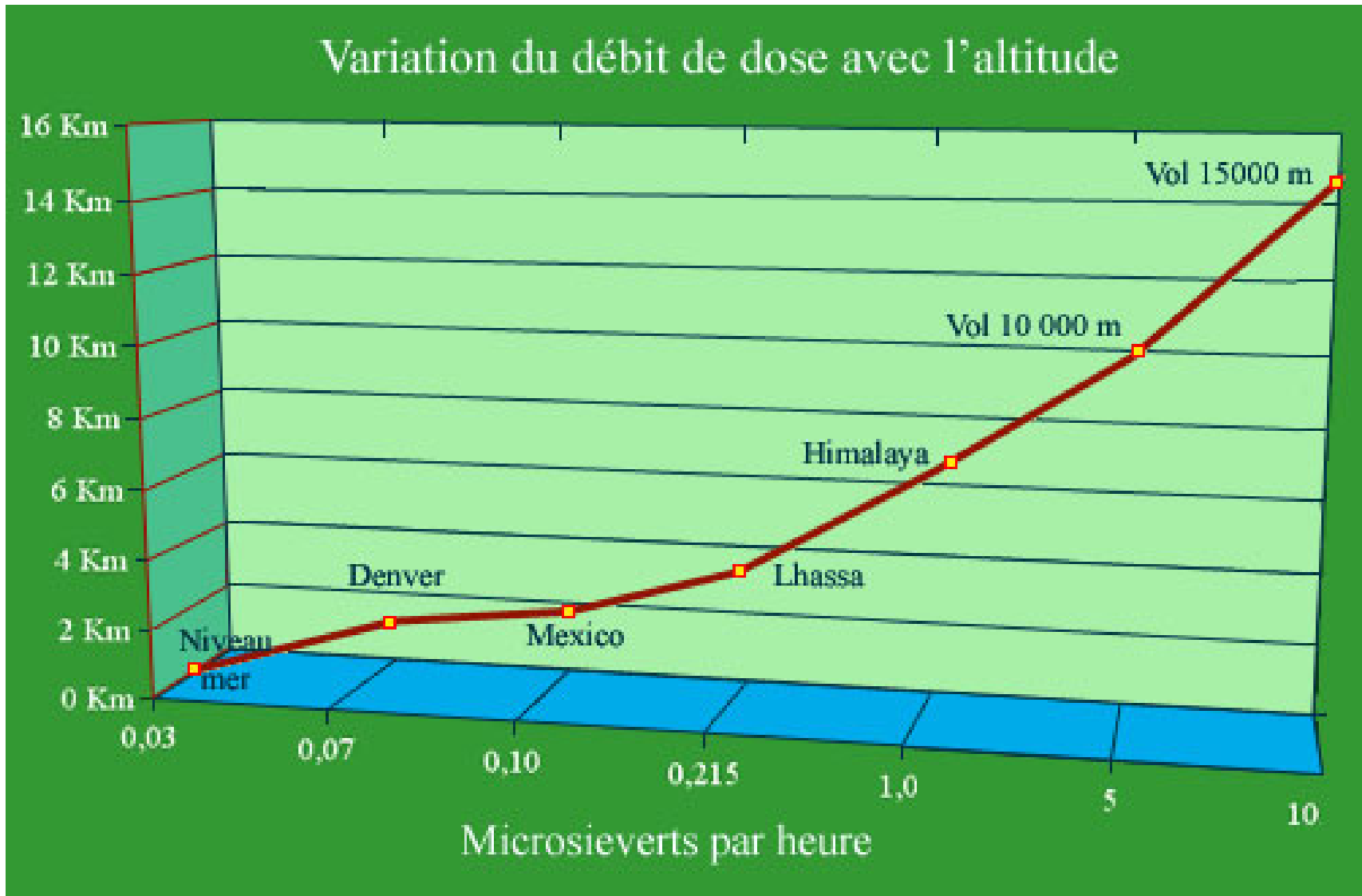


- Origine ?
 - Becquerel : radioactivité terrestre
→ 1896 : découverte de la radioactivité
 - **Wilson : rayonnement d'origine extra-terrestre (1898)**

L'origine des rayons cosmiques

- 1910, Rutherford : un blindage ralentit la décharge de l'électroscope
 - Les matériaux de l'électroscope ne sont pas en cause
 - 1910, Wulf : monte au sommet de la Tour Eiffel avec un électroscope
 - Diminution de l'intensité du rayonnement, mais pas autant qu'attendu s'il était dû à la radioactivité du sol
 - 1911, Pacini : pas de différence entre mesures au niveau du sol et dans l'eau
 - Hypothèse de l'origine terrestre mise à mal
 - 1911-1912, Hess : dix vols en ballon avec un électroscope
 - Mesures lors d'une éclipse et de nuit : le Soleil n'est pas la source de ces radiations
 - Rayonnement augmente à partir de 1000 m
 - A plus que doublé à 5000 m
 - 1913-1914, Kolhörster : vol jusqu'à 9000 m : 10× le rayonnement mesuré au sol
- Ionisation de l'atmosphère créée par un rayonnement d'origine extra-terrestre !

L'origine des rayons cosmiques



Rayons ou particules ?

- Milikan : rayons semblables à des rayons X
- **Compton : particules chargées**

→ « Une » du New York Times le 31 décembre 1932

- Pour trancher ce débat, on étudie l'influence du champ magnétique terrestre sur les rayons cosmiques
 - Installation de stations de mesure dans de nombreux endroits du globe
 - Détecteurs installés sur des bateaux lors de longues traversées

- Résultats
 - Rayonnement plus faible à l'équateur qu'aux pôles (~15%)
 - Excès de rayons cosmiques venant de l'ouest

- **Les rayons cosmiques sont issus de particules chargées, en majorité positives**
- Protons : ~90%
 - Noyaux d'hélium : ~10%



Découverte de nouvelles particules

- Rappels :

- 1897 : découverte de l'électron (Thomson)
- 1909 : découverte du noyau atomique (Rutherford)
- 1918 : découverte du proton (Rutherford)
- 1932 : découverte du neutron (Chadwick)

→ Et après ?

- **Rayons cosmiques et radioactivité : seules sources de particules à l'époque**

- Accélérateurs de particules encore balbutiants

- Augmentation du flux avec l'altitude

- **Observatoires en montagne**

→ Aiguille du Midi, Pic du Midi, Jungfrau, Pike's peak, etc.

- **1932 : découverte du positron**

(Anderson)

- **1936 : découverte du muon**

(Anderson & Nedermeyer)

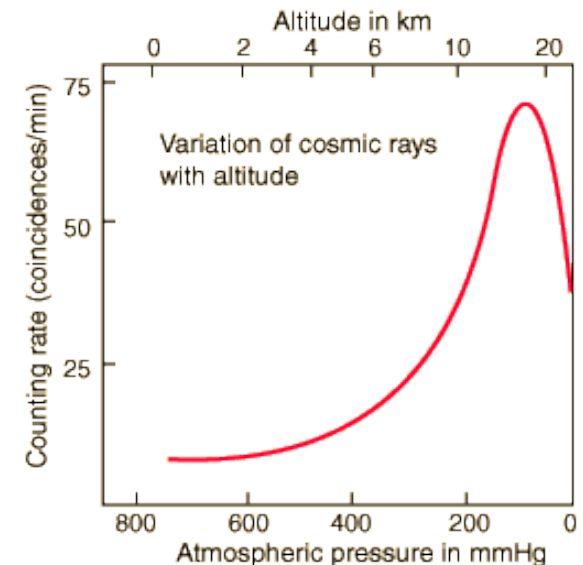
- **1947-début des années 1950 : découverte du pion et de « particules étranges » (kaon)**

Des rayons cosmiques aux accélérateurs

- Dans les années 1950-1960, les accélérateurs de particules remplacent les rayons cosmiques comme sources de particules
 - Faisceaux plus intenses
 - Contrôle de l'énergie des collisions et de l'endroit où elles se déroulent
 - Conception de détecteurs pour étudier les produits des collisions
- Création du CERN en 1954
- Expériences sur cible fixe
 - Exemple : structure du proton en quarks (SLAC, 1967)
- Collisionneurs : e^+e^- , $p\bar{p}$, e^-p , pp
- Avec un accélérateur, on ne sait pas atteindre aujourd'hui les énergies des rayons cosmiques les plus énergétiques mesurés – voir plus loin.
 - Par contre, ces rayons cosmiques sont extrêmement rares !
 - ~ 1 boson de Higgs produit toutes les 10 secondes dans l'atmosphère lors d'interactions de rayons cosmiques
 - Taux de production du même ordre de grandeur au LHC

Etudier les rayons cosmiques primaires

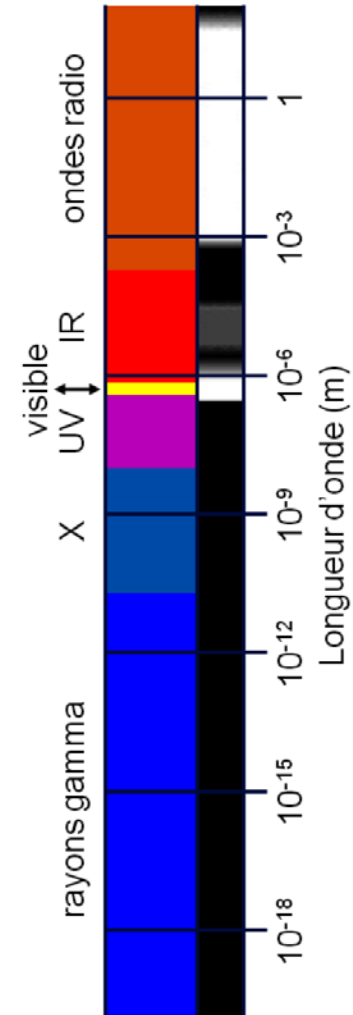
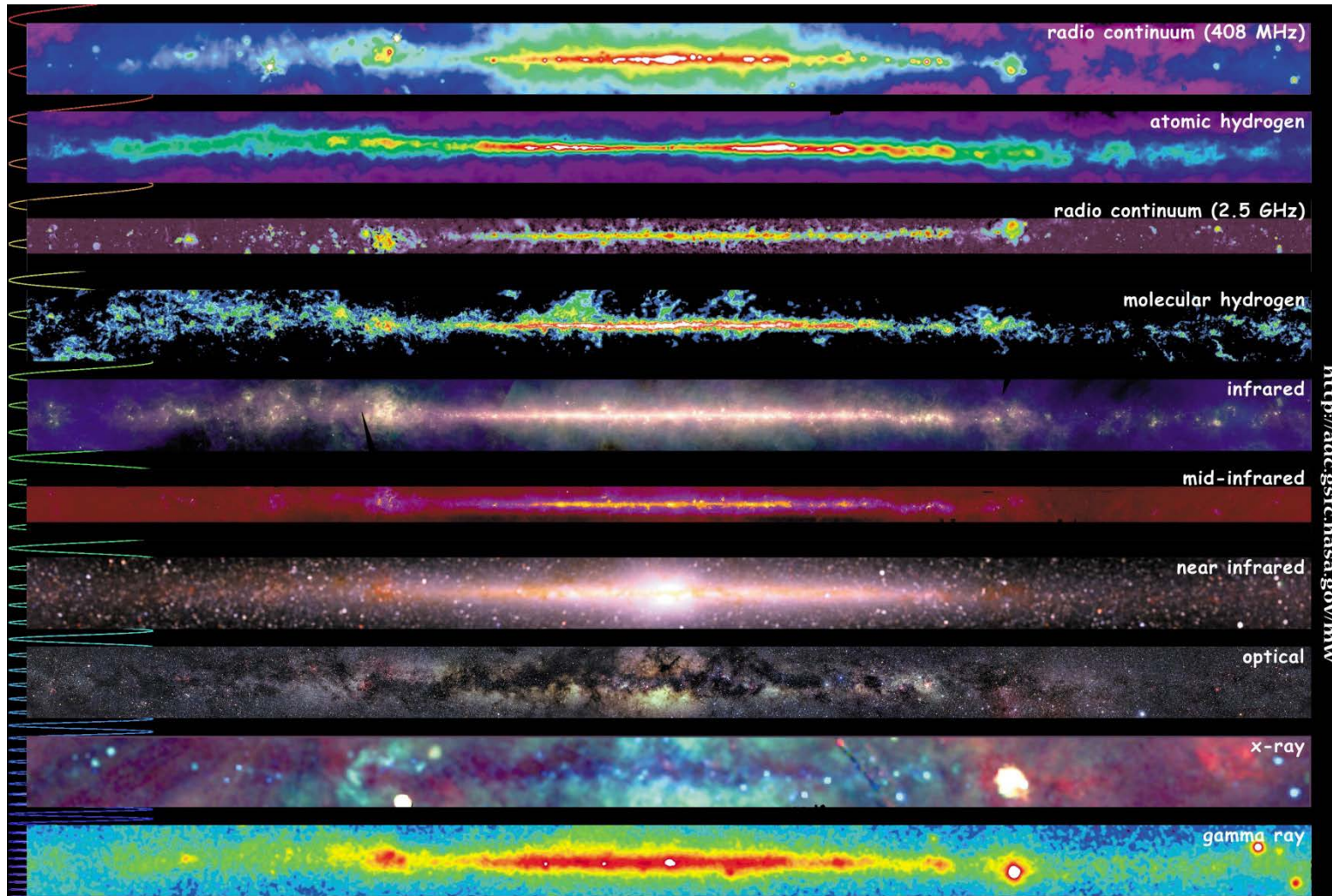
- **Interaction des rayons cosmiques avec l'atmosphère**
 - Cascade de particules secondaires, tertiaires, etc.
 - Jusqu'à épuisement de l'énergie disponible
- **Un rayon cosmique incident très énergétique peut créer une gerbe de particules qui s'étend sur une très grande surface au niveau du sol**
 - Détecteurs très étendus nécessaires pour mesurer l'énergie de la particule incidente
- **Rayonnement d'origine cosmique maximum vers 15 km**
 - Développement puis « épuisement » des gerbes
 - Les « physiciens aérospatiaux » du début du XXe siècle ne sont (heureusement !?) pas montés jusqu'à cette altitude !



Rayonnements de très haute énergie

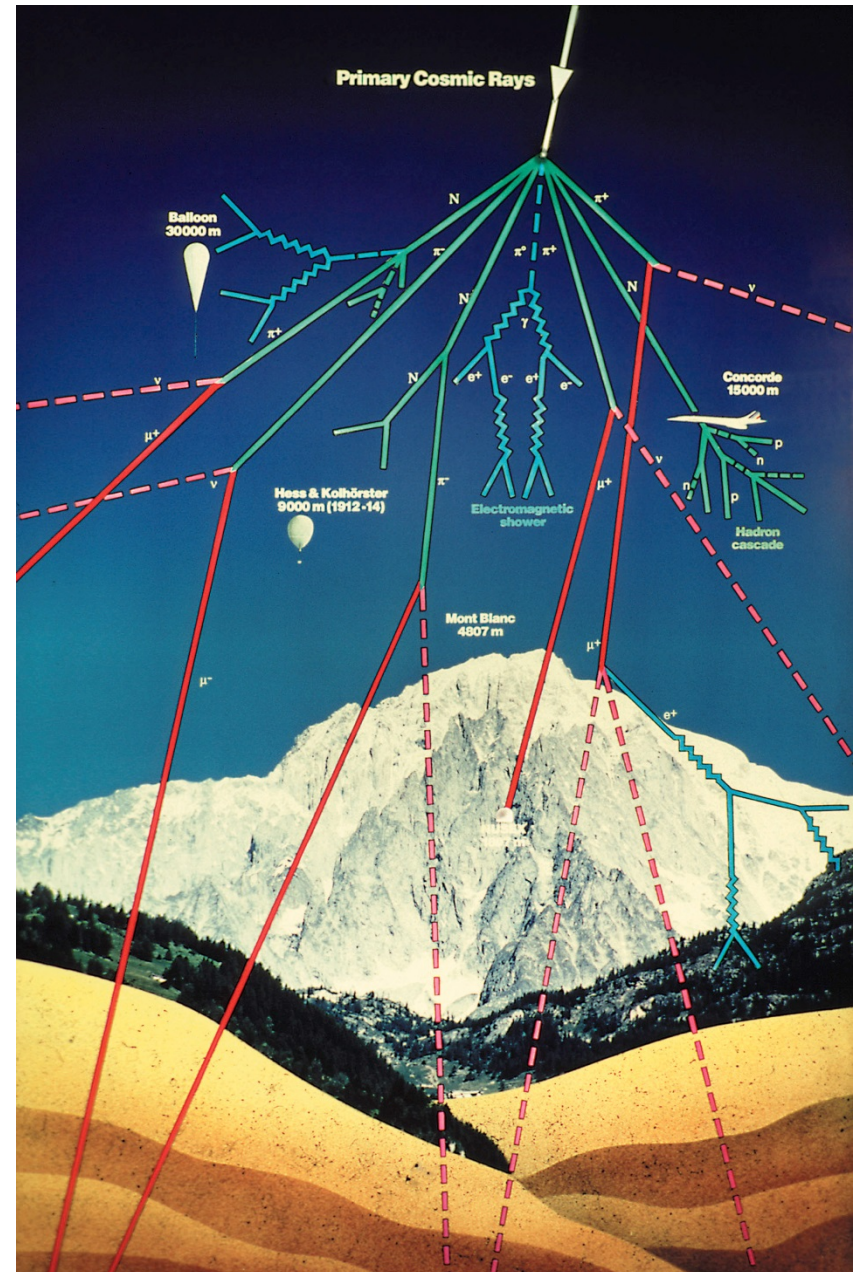
Observation « multi-messagers » de l'Univers

- Exemple : le spectre électromagnétique

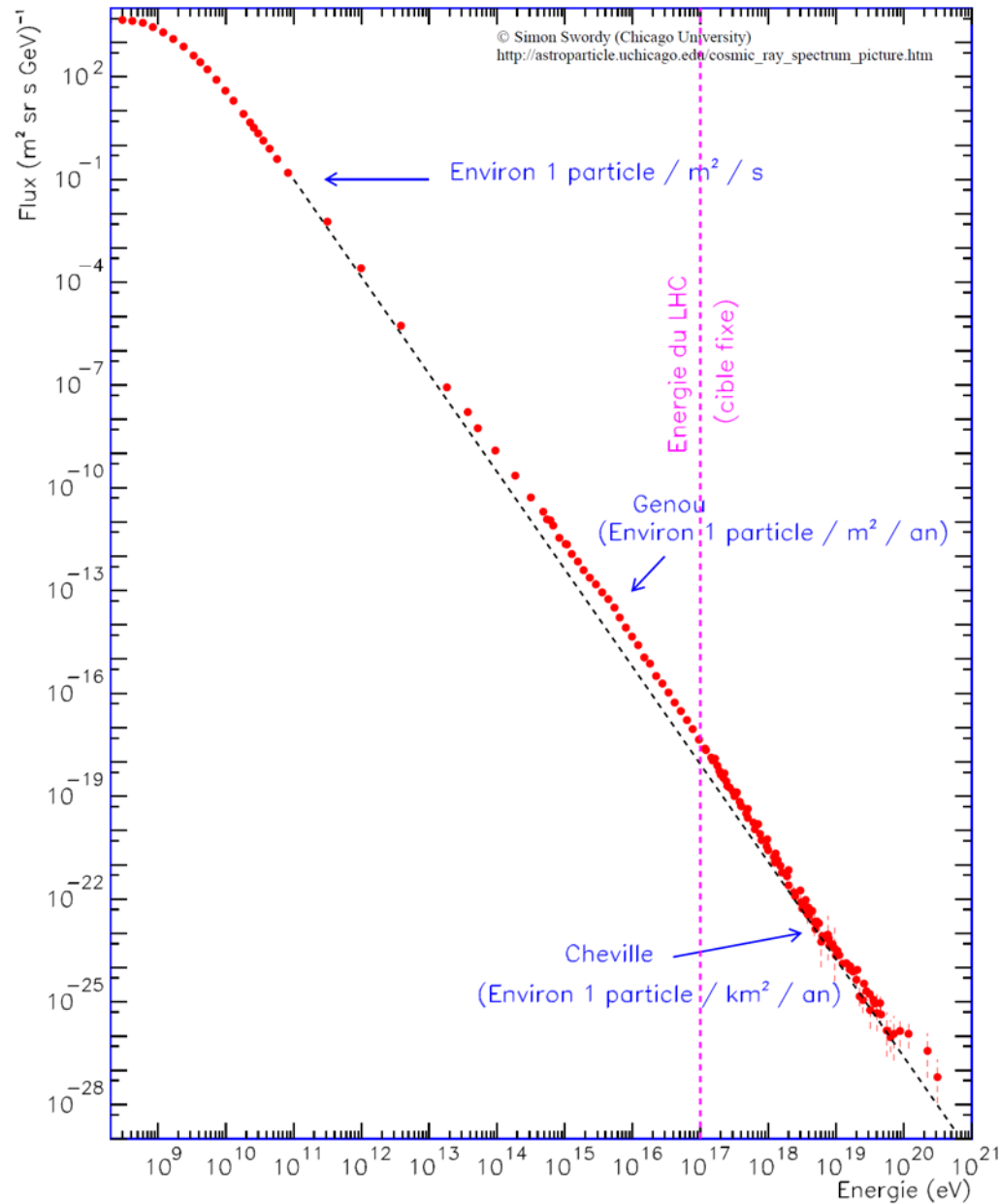


Les grandes gerbes atmosphériques

- Mise en évidence dans les années 1930 dans les observatoires d'altitude
- Détections en coïncidence dans plusieurs compteurs proches
- Les particules les plus abondantes au sol sont les muons (énergétiques)
 - Malgré leur durée de vie faible :
2,2 μs au repos
→ Effet relativiste

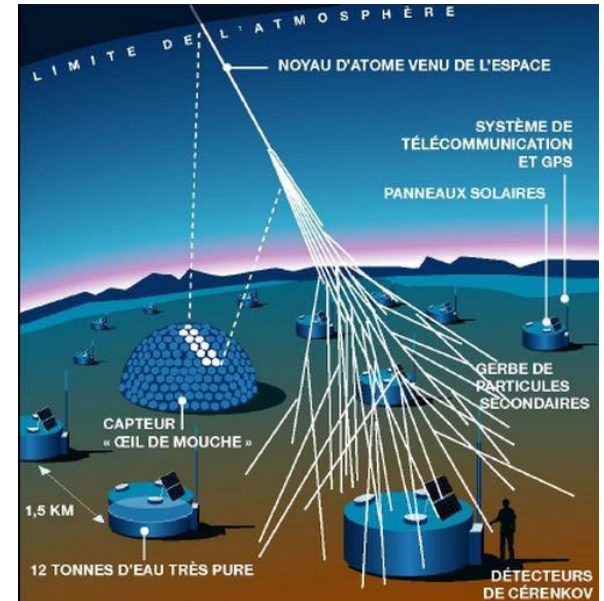


Le spectre des rayons cosmiques

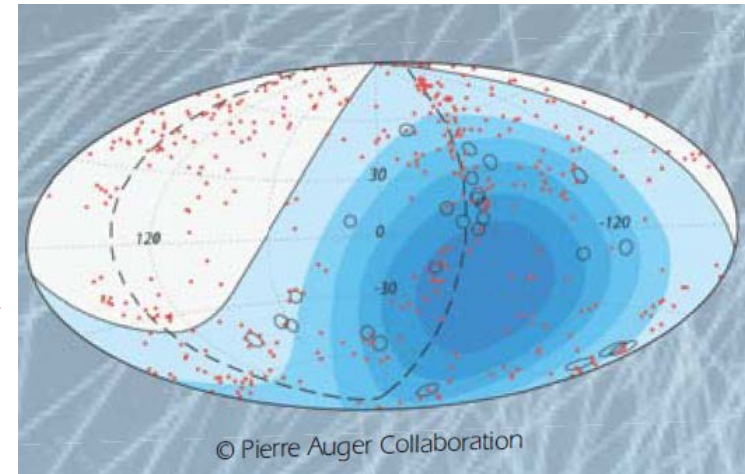


L'observatoire Pierre Auger

- 3000 km² dans la Pampa argentine
- 1600 détecteurs Cherenkov (cuves remplies d'eau)
- 24 télescopes à fluorescence

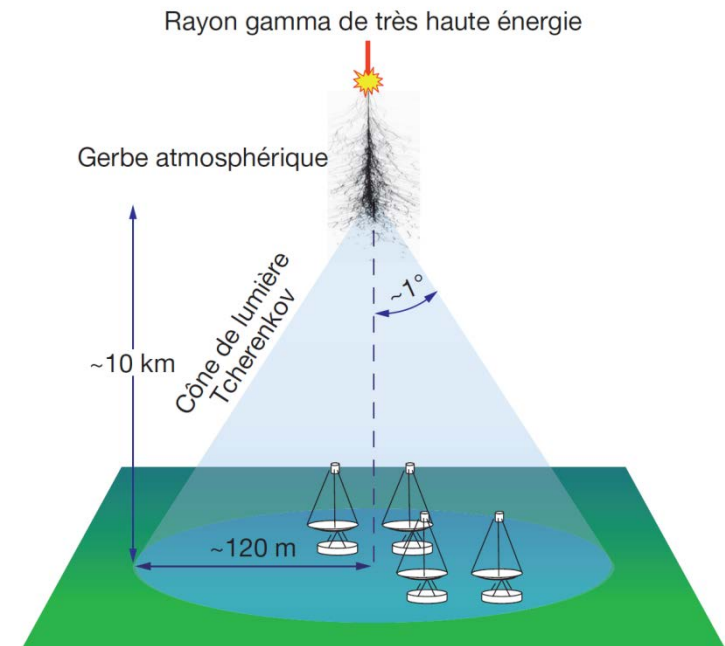
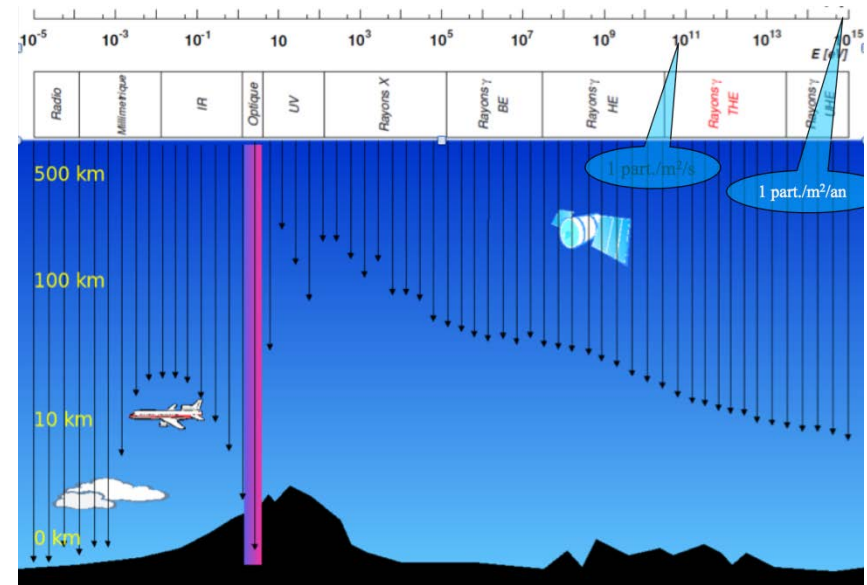


- Etude des rayons cosmiques d'ultra-haute énergie
 - Mise en évidence de la coupure « GZK »
- Sources de ces rayons cosmiques ?
- Mécanismes d'accélération ?



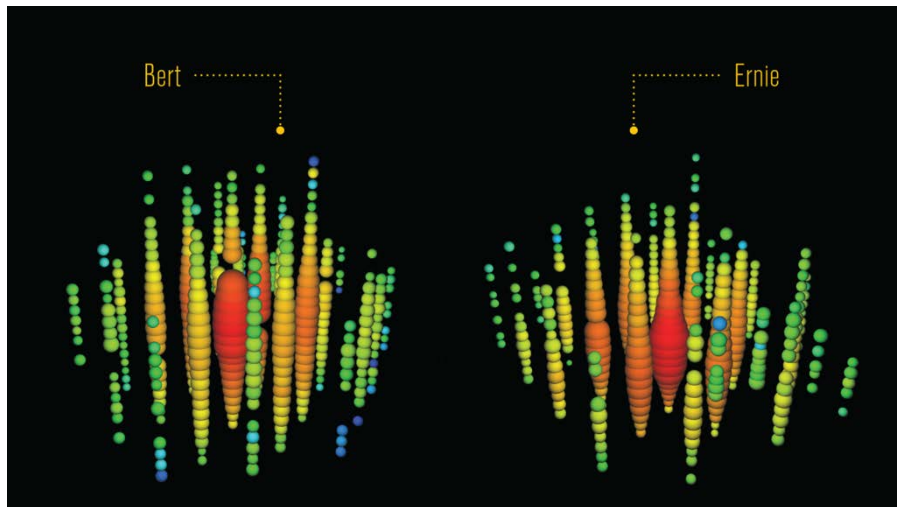
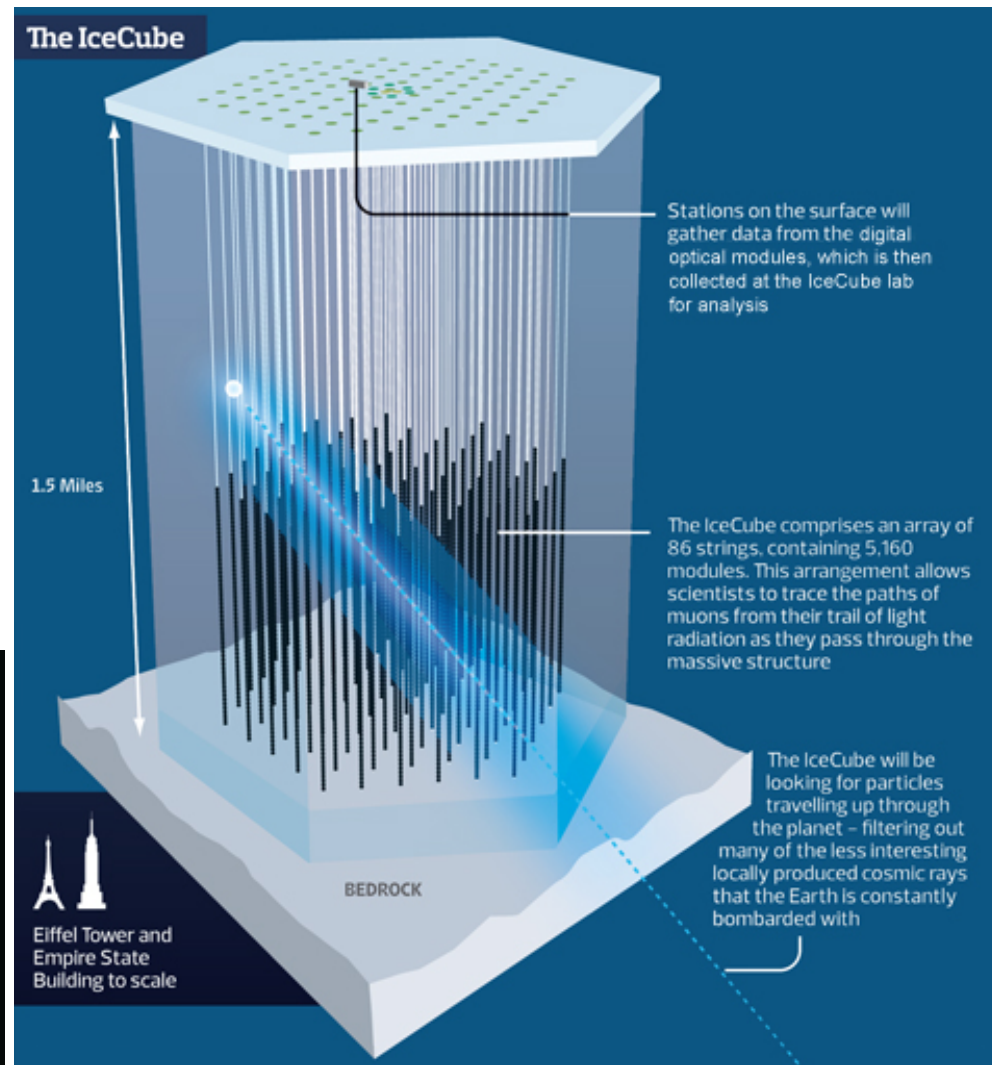
Les rayons gamma

- **Photons de très haute énergie**
- **Neutres** : pointent vers leur source
 - Particules recherchées déviées par les champs magnétiques (très faibles) présents dans le cosmos
- **Satellites** (Fermi)
- **Télescopes au sol** (HESS en Namibie)



Les neutrinos ultra-énergétiques

- Particules neutres
- Interagissent très peu avec la matière
- Détecteurs de très grand volume
 - **ANTARES** près de Marseille
 - **IceCube** au pôle sud
- Evénements « Bert » et « Ernie » :
énergie ~ 1000 TeV

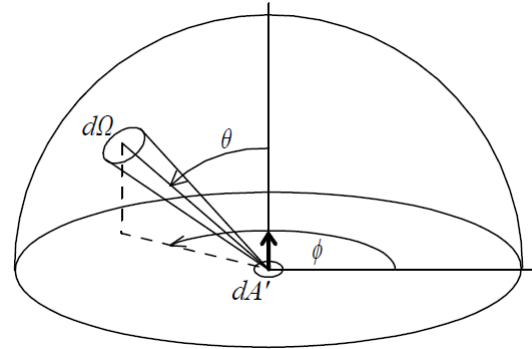


Les rayons cosmiques : utiles ?

Au sol

- Nombre de muons traversant une surface horizontale dA' , en provenance de la direction Ω vue sous un angle solide $d\Omega$

$$\frac{dN}{dt} = I_0 \cos^2 \theta (\cos \theta dA') d\Omega$$



- $I_0 \sim 70$ muons cosmiques / m^2 / s / sr
 ~ 1 / cm^2 / minute
- Charge du muon : 44% / 56% : μ^- / μ^+
- Comptage en fonction de l'angle θ avec un cosmodétecteur

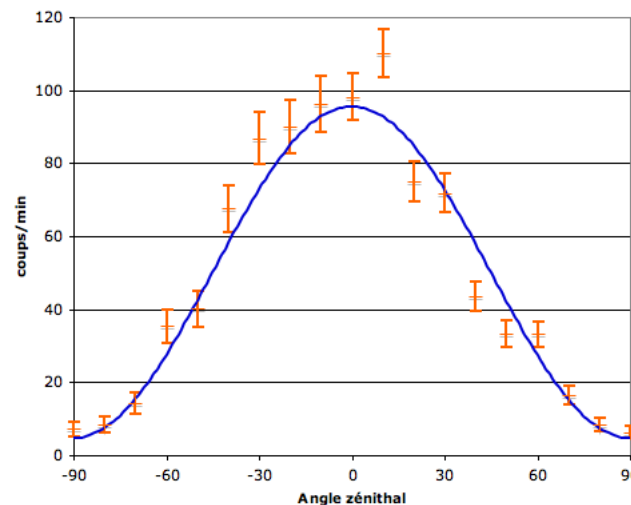


Figure 4 : Distribution zénithale des muons

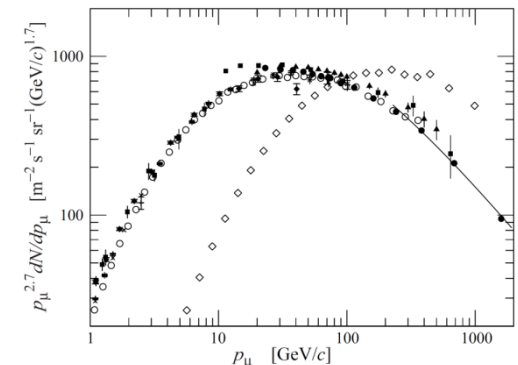
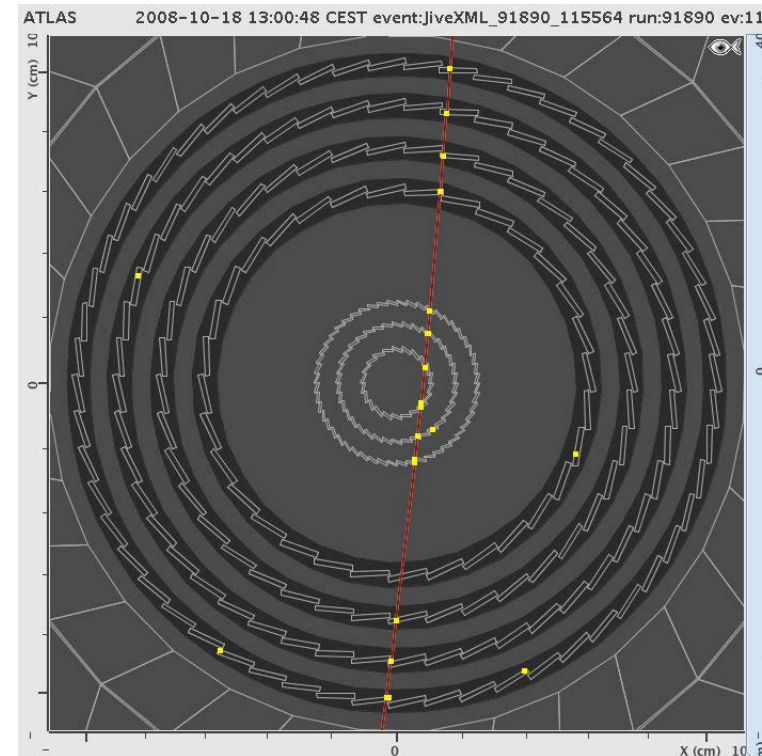
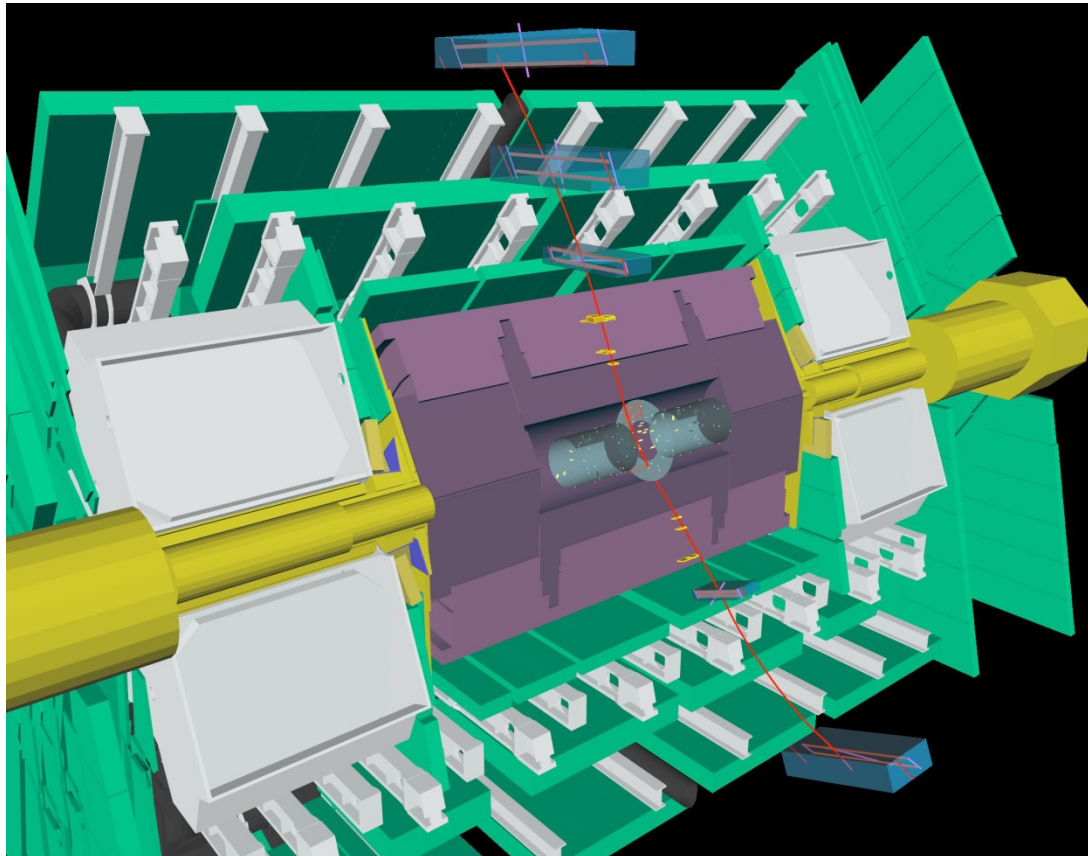


Figure 24.4: Spectrum of muons at $\theta = 0^\circ$ (\blacklozenge [41], \blacksquare [46], \blacktriangledown [47], \blacktriangle [48], \times , $+$ [43], \circ [44], and \bullet [45] and $\theta = 75^\circ$ \diamond [49]). The line plots the result from Eq. (24.4) for vertical showers.

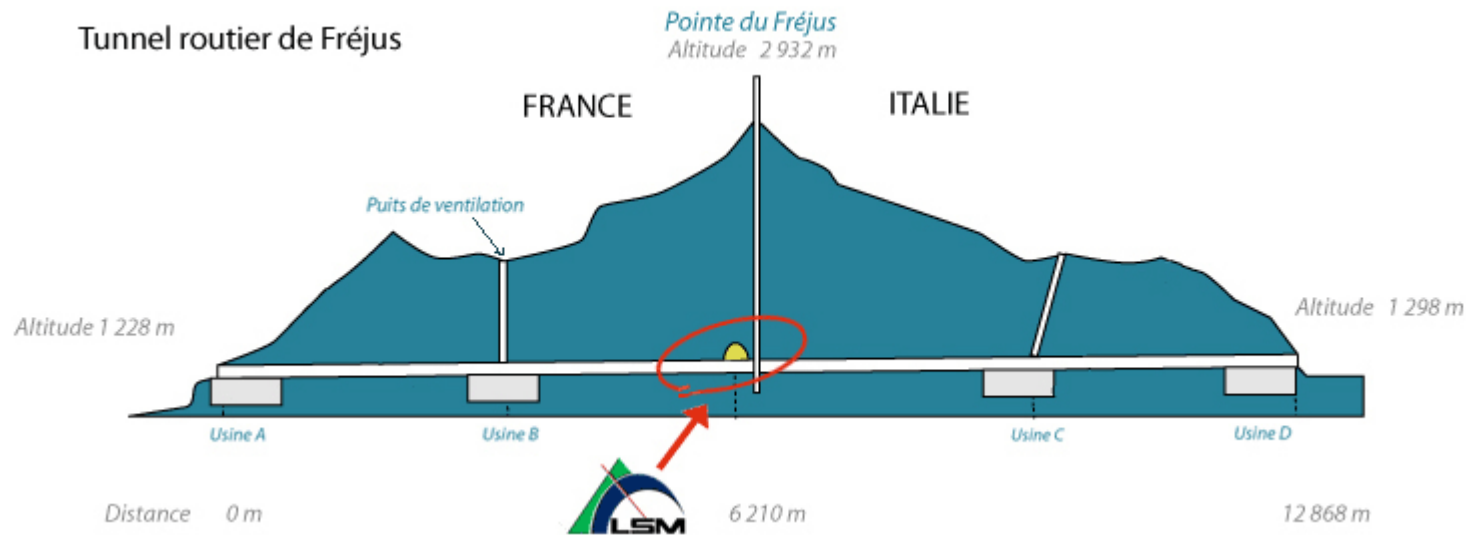
Calibration / monitoring des détecteurs sur accélérateur

- **Les rayons cosmiques suppléent aux faisceaux de particules dans les accélérateurs**
 - Maintenance, tests
 - Suivi du fonctionnement des différents détecteurs



S'en protéger : les laboratoires souterrains

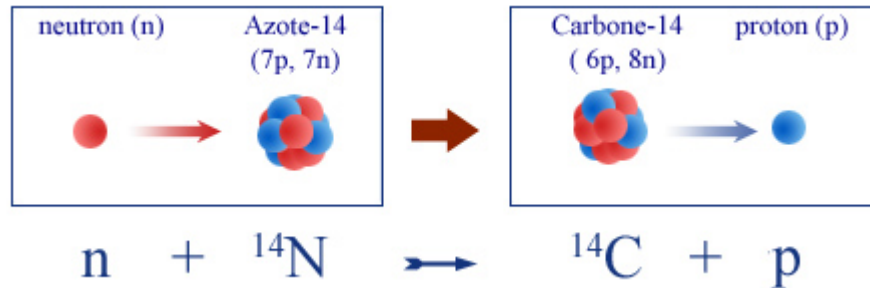
- Exemple : **le laboratoire souterrain de Modane**



- Performance : $4 \text{ muons} / \text{m}^2 / \text{jour} \ll 200 \text{ muons} / \text{m}^2 / \text{s}$ à la surface
- Hébergent des expériences de précision qui demandent un bruit de fond très faible**
 - Recherche directe de matière noire (qui interagit très peu avec la matière ordinaire)
 - Recherche de désintégrations radioactives très rares
 - Double désintégration bêta avec (sans !) émission de neutrinos
 - Période : $\sim 10^{21}$ années pour les désintégrations observées (2- ν)
 - $> (>> ???) 10^{24}$ années pour celles qui n'ont pas été vues (0- ν)
 - ... et dont on ne sait pas si elles existent !

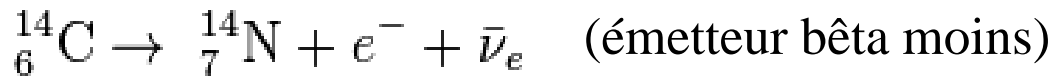
Datation par le carbone-14

- ^{14}C produit par interaction des rayons cosmiques avec l'atmosphère



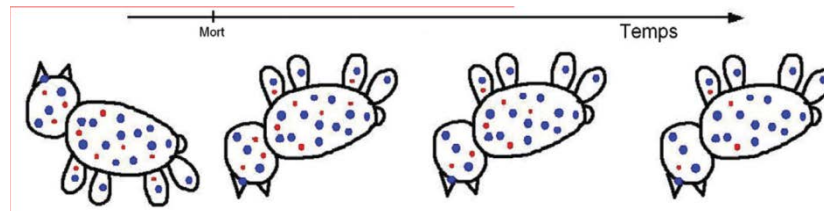
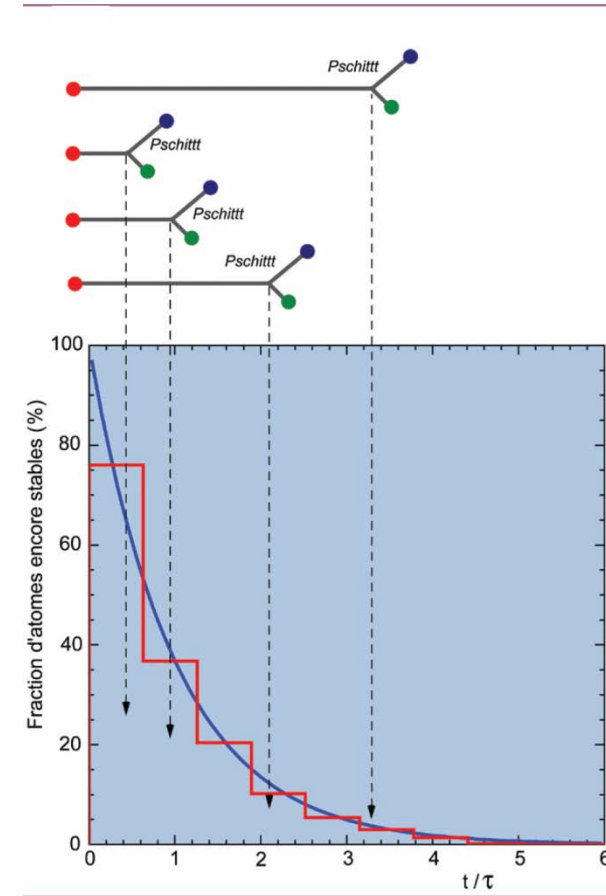
- Chimiquement identique au ^{12}C : absorbé par les végétaux et les animaux

- ^{14}C radioactif, période de 5700 ans



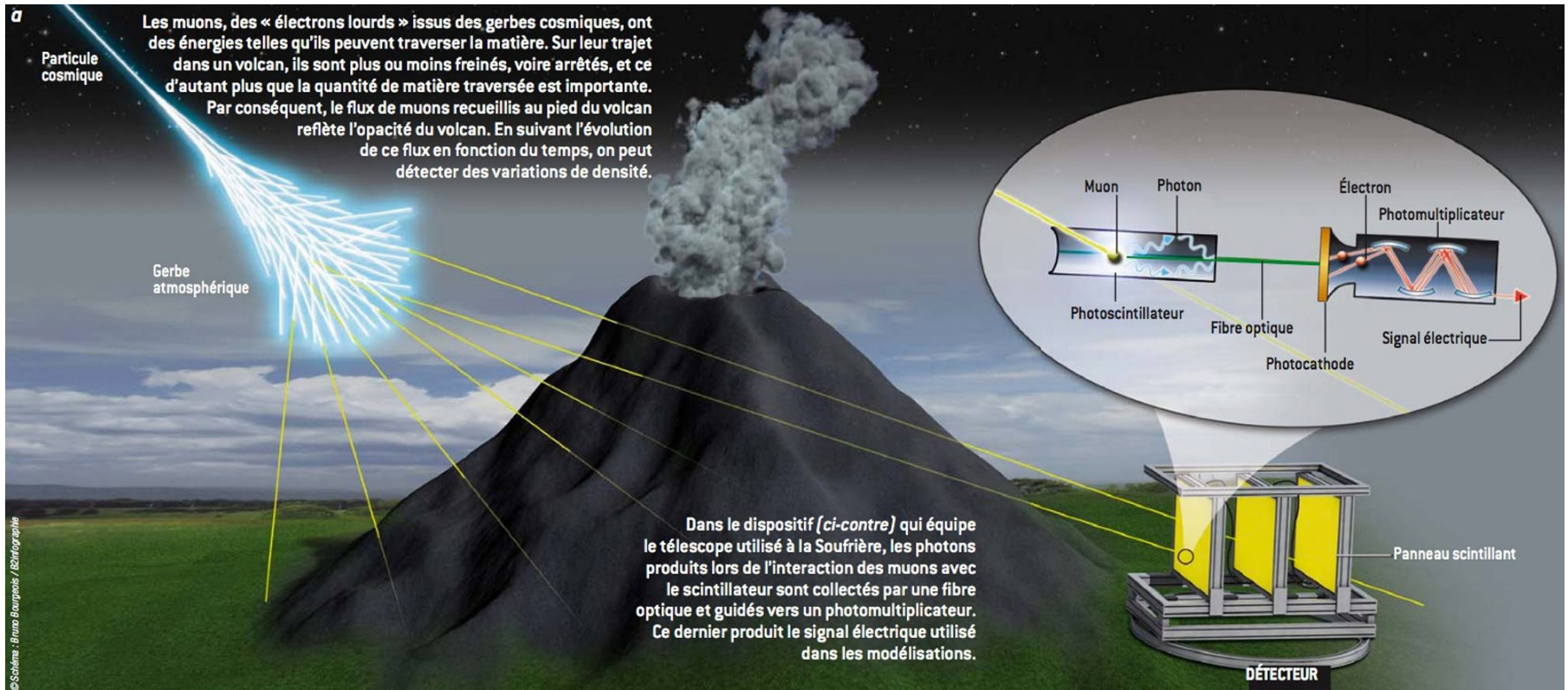
→ **Equilibre $^{14}\text{C} / ^{12}\text{C}$ dans un être vivant : 10^{-12}**

- Lorsque l'être vivant meurt, la proportion de ^{14}C diminue
→ Loi exponentielle



Tomographie avec les muons

- Exemple : étude de l'intérieur d'un volcan



- Flux de muons dépend de la quantité de matière traversée (cheminée vide / obstruée)
- Autre application potentielle :
 - Etude de la structure d'une pyramide (Egypte, Mayas, etc.)

Un problème pour les voyages spatiaux

- **Sievert (Sv)** : unité utilisée pour donner une évaluation de l'impact des rayonnements sur l'homme
 - J / kg + prise en compte de l'efficacité biologique des rayonnement et de leur impact sur un organe donné
 - Sur terre : rayons cosmiques
~10-15% de la radioactivité naturelle
 - Dans l'espace : absence de protection due à l'atmosphère et au champ magnétique
- Un sérieux problème pour de futurs voyages spatiaux de longue durée :
- Mars, etc.

