

La mallette COSMIX : un détecteur pédagogique de rayons cosmiques portable



Campus Paris Saclay

FONDATION DE COOPERATION SCIENTIFIQUE



université
PARIS-SACLAY

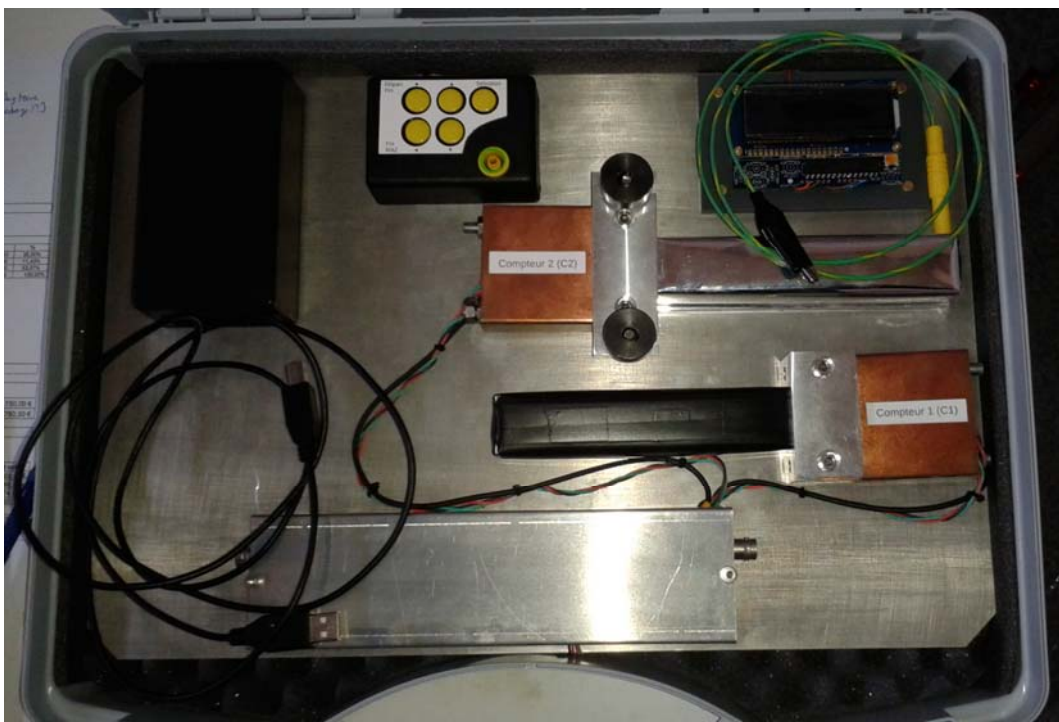
LA DIAGONALE

Version 3 (23/01/2015)

<http://groups.lal.in2p3.fr/professeurs/malette-cosmix>



Au LAL à Orsay, les dix malles COSMIX conçues et construites au CENBG, financées par la région Ile-de-France et la Diagonale Paris-Saclay pour diffusion dans les lycées.



L'intérieur type d'une mallette COSMIX. Ses réglages sont proches de ceux des malles de types « II » et « III » mentionnées sur le site internet du CENBG : <http://www.cenbg.in2p3.fr/COSMIX-presentation-du-Detecteur>.

Introduction

Le détecteur pédagogique COSMIX que vous avez entre les mains a été conçu et fabriqué au Centre d'Etudes Nucléaires de Bordeaux Gradignan (CENBG) sous la direction de Benoit Lott et Denis Dumora. Il a été financé en 2014 par la région Ile-de-France et la Diagonale Paris-Saclay. Au total, dix mallettes COSMIX ont bénéficié de ces soutiens. Le Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire (LAL) organise leur diffusion sur les académies de Créteil, Paris & Versailles, avec le soutien des rectorats.

Le CENBG et le LAL sont deux laboratoires de l'Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules (IN2P3) du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS). Les domaines de compétence du CNRS/IN2P3 sont vastes : ils vont de « l'infiniment petit » (la physique des particules et la physique nucléaire) à « l'infiniment grand » (les astroparticules et la cosmologie), en passant par toutes les technologies nécessaires pour mener à bien ces recherches (informatique, électronique, mécanique, vide) et les accélérateurs de particules. En plus de leurs activités de recherche, les personnels du CNRS/IN2P3 forment des docteurs en science, sont impliqués dans l'enseignement supérieur (aux niveaux licence et master) et développent des **ressources pédagogiques pour les enseignants en science du secondaire** – cette mallette en est un exemple.

Avec un minimum de moyens (une simple connexion USB) et **sans connaissance technique particulière** (aucun réglage nécessaire), la mallette COSMIX vous permettra de faire découvrir à vos élèves les rayons cosmiques, des particules chargées en provenance de l'espace et qui arrivent en permanence sur Terre. Parmi les produits ultimes de leurs interactions avec l'atmosphère, on trouve des muons, dont vous détectez le passage avec la mallette COSMIX. Ces particules énergétiques sont produites en altitude ; et si elles arrivent jusqu'au sol, c'est à la fois parce qu'elles interagissent peu et grâce aux effets relativistes – sans lesquels elles ne pourraient parcourir que quelques centaines de mètres avant de se désintégrer puisque leur durée de vie est de l'ordre de 2 microsecondes (μs).

Vous pouvez également connecter la mallette COSMIX à un oscilloscope numérique pour observer les signaux électriques produits en sortie des deux détecteurs – des barreaux de scintillateur, dont l'un est mobile pour permettre de compter les détections coïncidentes entre les deux barreaux superposés. Toutes les données des détecteurs (compteur 1, compteur 2, coïncidences compteurs 1-2) sont enregistrées en format texte (CSV) sur une carte SD dont vous pouvez récupérer le contenu avec un lecteur adapté ou en passant par un appareil photo numérique. Analysez-les à loisir pour voir l'évolution des taux de comptage dans différents environnement ou leurs fluctuations dans des conditions de prise de données stables.

Enfin, le détecteur COSMIX est nomade : profitez-en pour le faire fonctionner dans des conditions les plus variées possibles : barreau simple/barreaux en coïncidence, jour/nuit, en extérieur/en intérieur, en altitude/en sous-sol, en plaçant au-dessus de la mallette des matériaux de différentes épaisseurs, etc. Et n'hésitez pas à nous envoyer vos données les plus spéciales¹ avec le protocole expérimental suivi : nous les mettrons en ligne pour vos collègues – tout le monde n'a pas la chance d'avoir une montagne, une construction élevée, un tunnel ou un gouffre à proximité !

La mallette COSMIX vous offre une initiation à la physique des particules. Si cette « mise en bouche » vous a plu, n'hésitez pas à aller plus loin et à découvrir les programmes et ressources pédagogiques proposées par le CNRS/IN2P3 et ses partenaires : projet « Passeport pour les deux infinis », visites en tout genre dont les « Masterclasses Internationales », le plan d'équipement « Cosmos à l'Ecole », le stage de formation annuel d'une semaine au CERN, etc.

Janvier 2015

Nicolas ARNAUD – chercheur au LAL, chargé des activités pédagogiques à l'IN2P3

¹ E-mail de contact du projet « COSMIX en Ile-de-France » : cosmixIDF@lal.in2p3.fr

Composants élémentaires de la matière

Être humain
1 m

Terre
10⁷ m

Soleil
10⁹ m

Galaxie
10²¹ m

Cellule
10⁻⁵ m

Molécule
10⁻⁹ m

Atome
10⁻¹⁰ m

Noyau
10⁻¹⁴ m

Neutron
10⁻¹⁵ m

Proton
10⁻¹⁵ m

LEPTONS

ν_e neutrino électron 1 ^{re} fam. Q=0 m=2.10 ⁻³⁶ GeV/c ²	e électron 1 ^{re} fam. Q=-1 m=0.000511GeV/c ²	μ muon 2 ^e fam. Q=-1 m=0.10566GeV/c ²	τ tau 3 ^e fam. Q=-1 m=1.77686GeV/c ²
--	--	--	--

QUARKS

u haut / up 1 ^{re} fam. Q=2/3 m=0.0023GeV/c ²	d bas / down 1 ^{re} fam. Q=-1/3 m=0.0047GeV/c ²	c charm / charm 2 ^e fam. Q=2/3 m=1.31GeV/c ²	s étrange / strange 2 ^e fam. Q=-1/3 m=0.139GeV/c ²	t top 3 ^e fam. Q=2/3 m=173.1GeV/c ²	b beau / beauty / bottom 3 ^e fam. Q=-1/3 m=4.2GeV/c ²
--	--	---	---	--	--

1^{re} famille
Constituants de la matière usuelle

2^e famille
Réplique plus massive de la 1^{re} famille

3^e famille
Réplique plus massive des 1^{re} et 2^e familles

INTERACTIONS FONDAMENTALES

10 ⁻¹⁷ m	Interaction faible
infinie	Interaction électromagnétique
10 ⁻¹⁵ m	Interaction forte
infinie	Gravitation

BOSON de HIGGS
H

Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de leur masse. Il provoque aussi la séparation entre interactions électromagnétique et faible.

Bosons Z, W[±]
Désintégrations radioactives β^+ et β^- de certains noyaux instables

Photon γ
Electricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie

Gluons g
Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire

Graviton (?)
Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies

ANTIMATIÈRE

A chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

Antiproton

Chaque interaction fondamentale joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil :

- la gravitation permet la formation des étoiles à partir de nuages de gaz ;
- les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;
- l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière ;

Chaque interaction fondamentale est transmise par des **particules** qui lui sont associées

élémentaires

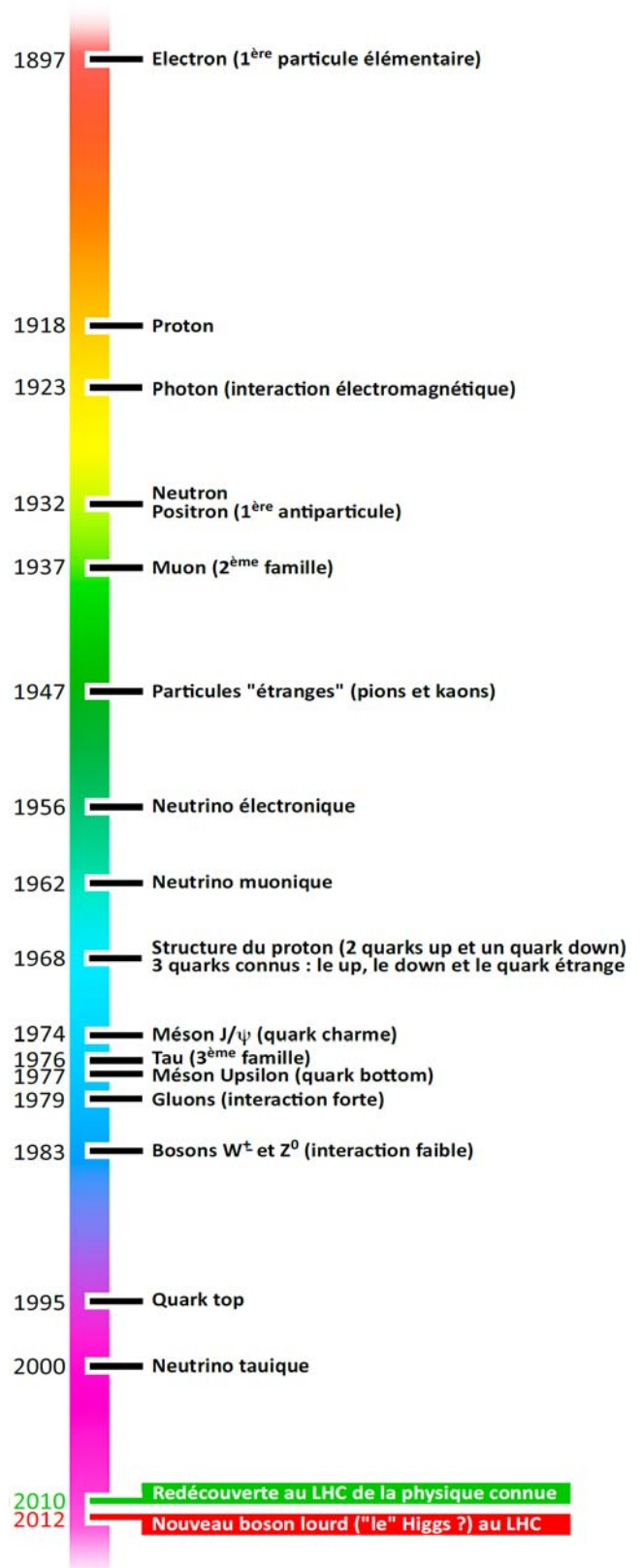
Sur la page de gauche, vous pouvez voir la version 2014 de « l’Affiche des composants élémentaires de la matière », créée en 2005 à l’occasion de l’année mondiale de la physique. Comme sa devancière, cette nouvelle ressource pédagogique est également destinée à être diffusée dans les établissements scolaires qui en font la demande. Vous trouverez plus d’informations sur le site internet <http://www.particuleselementaires.fr>.

Cette affiche présente les douze particules élémentaires connues à ce jour – six quarks, trois leptons chargés (dont l’électron) et trois neutrinos – ainsi que leur répartition en trois familles de quatre particules, de compositions similaires : deux quarks, un lepton chargé et un neutrino. Seule la première famille est stable ; ses composants permettent de former l’ensemble de la matière que nous connaissons. En effet, les quarks « u » et « d » permettent de former les constituants du noyau – les nucléons : protons et neutrons. En y ajoutant les électrons on a les atomes et donc les molécules, la chimie, etc. Les particules des autres familles sont instables et donc produits uniquement lors de collisions (rayons cosmiques ou accélérateurs).

Sous le tableau des particules, on peut voir les interactions fondamentales auxquelles elles sont soumises. Si la gravitation est négligeable à ce niveau, les trois autres forces jouent des rôles essentiels. La force électromagnétique est bien connue car ses effets se font également sentir à notre échelle ; les deux autres interactions sont, elles, à très courte portée (nucléaire ou sub-nucléaire) : l’interaction forte (responsable de la cohésion des nucléons et des noyaux) et l’interaction faible (à l’origine de certaines désintégrations radioactives).

Enfin, une place de choix est réservée sur l’affiche au champ de Higgs et à sa particule associée, le boson de Higgs. Cet élément joue en effet un rôle central dans le Modèle Standard, la théorie qui décrit « l’infiniment petit » avec une excellente précision. La découverte du boson de Higgs au CERN (sur le collisionneur LHC) en 2012 est donc un succès majeur, 48 ans (!) après la prédiction de l’existence du mécanisme dont il marque la présence.

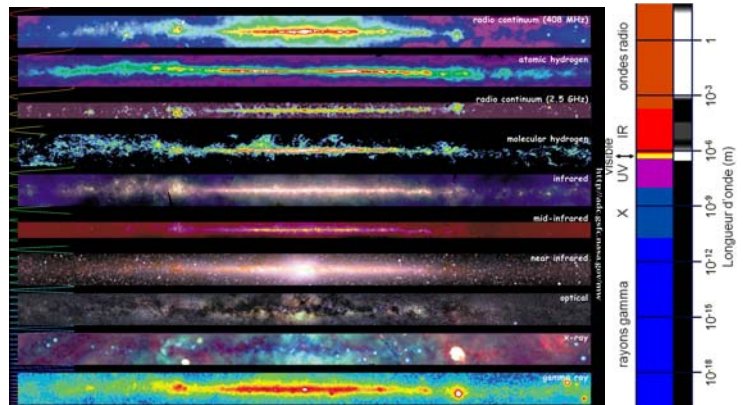
Pour terminer cette brève introduction, vous trouverez ci-dessus une frise chronologique montrant les dates de découverte des particules élémentaires de matière (les « fermions ») et des « bosons », les particules médiatrices des interactions. Certaines particules – le positron, le muon, les pions (non indiqués ici) et les particules étranges – ont été découvertes dans des observatoires de rayons cosmiques situés en altitude, car le flux de rayons cosmiques y est plus abondant qu’au niveau de la mer.



Les rayonnements en provenance du cosmos

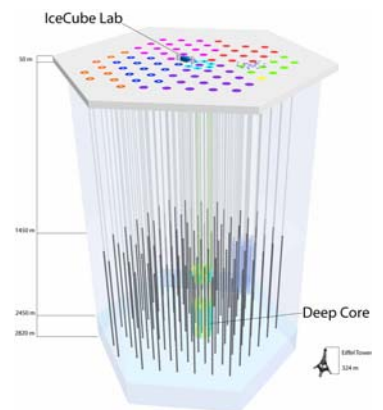
La Terre reçoit en permanence des particules de tous types (photons, particules chargées, neutrinos, etc.) en provenance de l'espace. Celles-ci ont été émises par le Soleil ou par d'autres sources, connues ou non, situées dans notre galaxie ou bien plus loin. Le défi de la science actuelle est de détecter l'ensemble de ces « particules messagères » afin d'obtenir un maximum d'informations et de les combiner pour en apprendre davantage sur l'histoire de l'Univers, sur sa composition actuelle et sur son évolution future.

Commençons par le spectre électromagnétique, c'est-à-dire les photons de différentes énergies-fréquences-longueurs d'onde reçus par le cosmos. Comme le montre l'image de ci-contre (© NASA), une région donnée du ciel prend un aspect complètement différent selon qu'on l'observe dans le domaine des ondes radio, de l'infrarouge, du visible, des rayons X ou des rayons gammas. Là où les choses se compliquent, c'est que l'atmosphère est plus ou moins transparente selon la longueur d'onde de la lumière incidente. C'est ce que montre la bande monochrome de la frise de droite (© Jacques Paul) : plus elle est foncée, et plus l'atmosphère est opaque – sans surprise, elle est transparente dans les domaines des ondes radio et du visible. L'atmosphère nous protège donc des rayonnements les plus énergétiques ; pour s'en affranchir, les scientifiques doivent envoyer des satellites dans l'espace – par exemple Fermi pour les rayons gamma, dont nous reparlerons dans la suite.



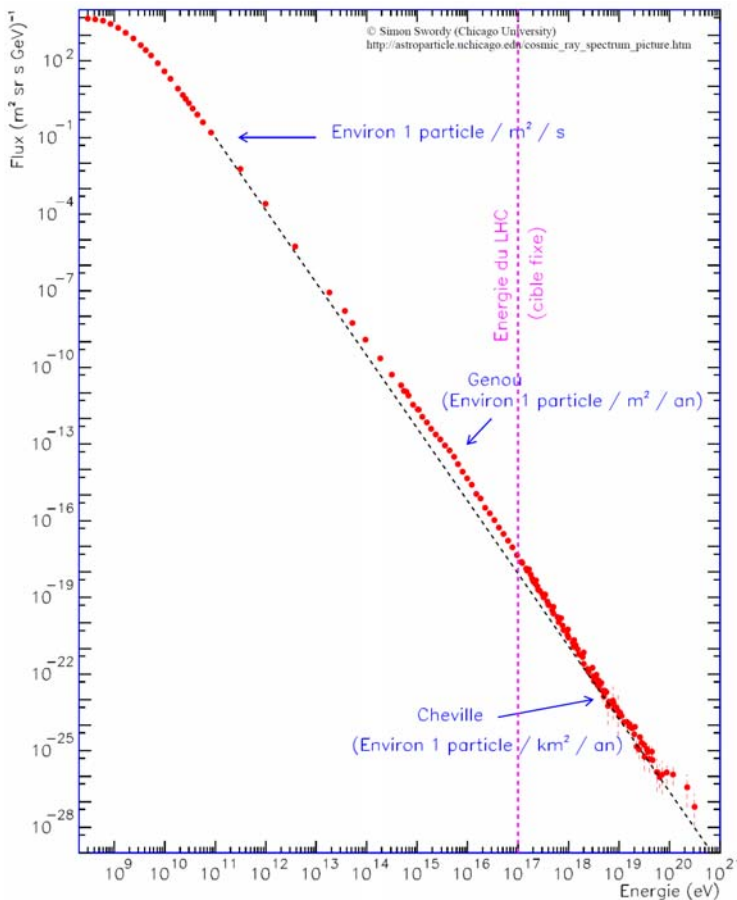
Les particules chargées en provenance du cosmos sont appelées « rayons cosmiques » de manière générique. Cette expression, entrée dans l'usage, n'est pas forcément heureuse : elle date des années 1930 lorsqu'une controverse sur l'origine de ce mystérieux rayonnement – découvert en 1912 par Viktor Hess – faisait rage. Certains physiciens pensaient qu'il était dû à des photons très énergétiques ; d'autres, à des particules chargées. C'est la seconde hypothèse qui se révéla la bonne lorsqu'on montra que ces « rayons » étaient affectés par le champ magnétique terrestre – produisant notamment les fameuses aurores polaires dont un exemple est présenté ci-contre. Nous reviendrons plus en détail dans la suite sur ces rayons cosmiques puisque ce sont les lointains produits de leur interaction avec l'atmosphère terrestre, des muons énergétiques, que la mallette COSMIX détecte.

La physique des neutrinos est un des domaines qui a connu les développements les plus spectaculaires depuis une vingtaine d'années. L'étude de l'Univers n'échappe pas à cette orientation : des détecteurs géants construits en pleine mer Méditerranée (ANTARES) ou dans la glace du pôle sud (IceCube, ci-contre) traquent les neutrinos les plus énergétiques en provenance du cosmos. En effet, ces particules sont neutres et interagissent très peu avec les milieux qu'elles traversent : elles représentent donc des témoignages directs des phénomènes qui leur ont donné naissance. Une quantité « astronomique » de neutrinos beaucoup moins énergétiques et d'origines terrestre (centrales nucléaires) ou extraterrestre (les réactions de fusion du Soleil) nous traversent également en permanence.



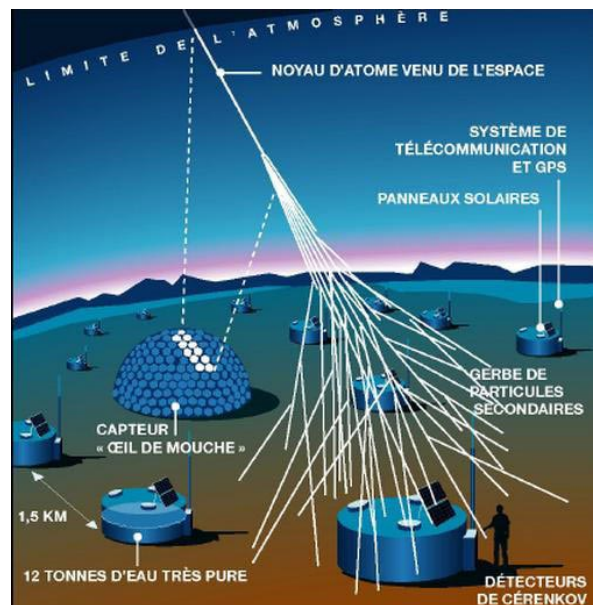
Plus généralement, l'astronomie du XXI^e siècle se veut définitivement « multi-messagers ». D'autres signaux, en particulier les ondes gravitationnelles prédites par la relativité générale d'Einstein, devraient bientôt enrichir la palette des scientifiques qui étudient notre Univers sous toutes ses coutures !

Les rayons cosmiques



Intéressons-nous maintenant aux rayons cosmiques. Les particules chargées qui arrivent sur Terre en provenance du cosmos sont à 87% des protons ; les noyaux atomiques (majoritairement de l'hélium) représentent 12% du total et les électrons l'essentiel du 1% restant. Le graphique ci-contre montre le flux incident de rayons cosmiques sur les couches externes de l'atmosphère terrestre. Sans entrer dans les détails de cette figure, extrêmement riche, on peut remarquer qu'elle couvre plus de trente ordres de grandeur en flux (axe vertical) et treize en énergie (axe horizontal). Les rayons cosmiques les plus énergétiques ont une énergie de plusieurs dizaines de joules ($1 \text{ J} \leftrightarrow 6,2 \times 10^{18} \text{ eV}$) ; on ne connaît actuellement aucun mécanisme physique capable d'accélérer autant des particules chargées ! Et leurs interactions avec des molécules d'air mettent en jeu des énergies bien supérieures à celles qui sont libérées lors des collisions du LHC au CERN, l'accélérateur de particules le plus puissant jamais construit !

L'atmosphère, parlons-en. Avec le champ magnétique terrestre (dont l'interaction avec des « rafales » de vent solaire canalisés vers les pôles magnétiques produit les spectaculaires aurores polaires dont un exemple est montré page précédente), c'est notre principale protection contre les rayons cosmiques. Lorsqu'un rayon cosmique primaire entre en collision avec des noyaux de molécules de la haute atmosphère, il produit des particules secondaires qui elles-mêmes rencontrent d'autres noyaux et produisent des particules tertiaires, etc. Une « gerbe » de particules se développe alors dans le prolongement de la trajectoire de la particule primaire – elle forme un cône de 1 degré d'ouverture environ. Certaines de ces particules arriveront jusqu'au sol tandis que d'autres interagiront avec de nouveaux noyaux ou seront absorbées par l'atmosphère. Plus le primaire est énergétique et plus la gerbe sera importante. Des expériences gigantesques comme l'observatoire Pierre Auger en Argentine (3000 km^2 instrumentés au moyen de 1600 détecteurs déployés au sol tous les 1,5 km, auxquels s'ajoutent quatre télescopes sensibles à la lumière de fluorescence produite par la gerbe, voir vue d'artiste ci-contre) étudient notamment les rayons cosmiques d'ultra-haute énergie qui sont très rares et d'origine inconnue.

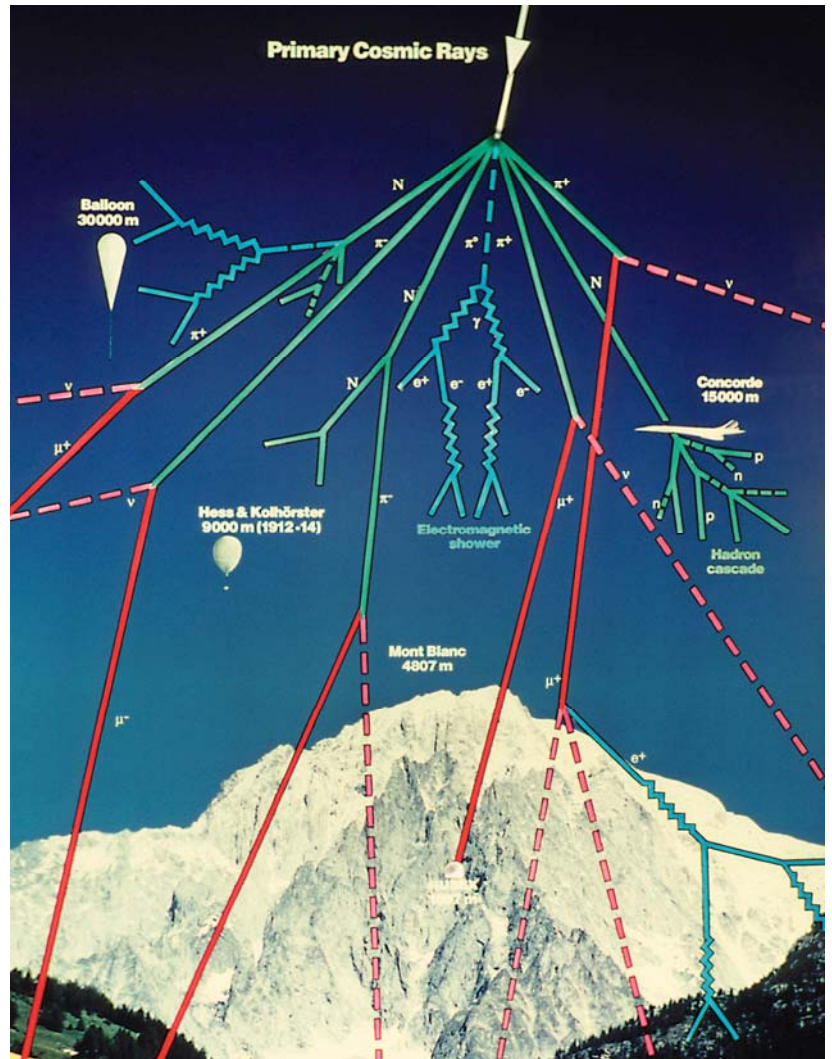


Pour en savoir plus

- Numéro 3 « [Les Rayons cosmiques](#) » (Revue Élémentaire, 2006).
- L'exposition « [Le Mystère des rayons cosmiques](#) » (CNRS/IN2P3, 2012).
- Le [cahier pédagogique](#) associé au plan d'équipement « Cosmos à l'École ».

Le flux de rayons cosmiques

Cette vue d'artiste (© CERN) montre le développement d'une gerbe de particules à partir d'un rayon cosmique primaire qui interagit avec l'atmosphère. Les différents types de particules produites au cours du processus sont reconnaissables par les symboles utilisés, ainsi que par les couleurs et les formes des traits qui matérialisent leurs trajectoires. Les pointillés représentent des particules neutres : neutrons (n) ou neutrinos (ν , indétectables). Les lignes rouges montrent les muons (μ), produits à une altitude moyenne de 15 km et qui descendent jusqu'au sol (car ce sont les particules qui ont la probabilité d'interaction la plus faible), sauf s'ils se désintègrent en cours de route. Les pions chargés (π^\pm) ou neutres (π^0 , non représentés sur ce dessin) sont des hadrons (des particules formées de quarks) instables dont les durées de vie sont faibles par rapport à celles des muons (10^{-8} s pour les π^\pm et 10^{-16} s pour les π^0). Ils se désintègrent donc dans l'atmosphère, donnant dans un cas des muons et des neutrinos, dans l'autre des paires de photons (γ , lignes en zigzag). Les photons interagissent avec

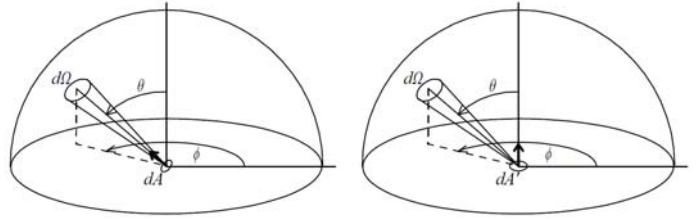


l'atmosphère et donnent des paires électron (e^-)-positron (e^+). Ces dernières particules, légères, perdent leur énergie à cause du « rayonnement de freinage » qui affecte toutes les particules chargées accélérées. Les muons sont également soumis à cet effet mais ils y sont beaucoup moins sensibles car ils sont environ 200 fois plus lourds que les électrons. Les noyaux (N) donnent des pions, des neutrons et des protons (p). Les protons, peu sensibles au rayonnement de freinage (car encore neuf fois plus lourds que les muons), perdent leur énergie par ionisation, si bien qu'il en arrive moins au sol que les neutrons (dont la détection demande des détecteurs spécifiques). Enfin, comme le montre l'image, certaines branches de la gerbe s'arrêtent en altitude, faute d'énergie disponible pour prolonger la chaîne de réactions.

Au final, les muons représentent environ $\frac{3}{4}$ des particules chargées d'origine cosmique qui arrivent au niveau de la mer – et qui contribuent pour environ 10% à la radioactivité naturelle. Leur énergie moyenne est de l'ordre de 4 GeV. L'intensité du rayonnement cosmique augmente avec l'altitude : c'est par des vols en ballon que Viktor Hess et d'autres ont montré il y a un siècle que les rayons cosmiques venaient « d'en haut » plutôt que « d'en bas ». L'impact de ce rayonnement est ainsi multiplié par un facteur cinq ou six entre le niveau de la mer et les montagnes des Andes ou de l'Himalaya. Et, lors d'un vol long-courrier en avion, la dose de radioactivité reçue est équivalente à celle d'un séjour d'un mois à ces altitudes. En orbite terrestre (hors de l'atmosphère), le flux de rayons cosmiques est très intense : 1500 fois celui enregistré au niveau du sol. Et la situation est encore bien pire au-delà de la magnétosphère où le champ magnétique terrestre n'agit plus. Trouver comment protéger des rayons cosmiques des astronautes lors d'un voyage spatial vers Mars est un problème qui n'a pas encore de solution à ce jour.

au niveau du sol

Le flux de muons varie en fonction de leur direction par rapport à la verticale, direction dans laquelle il est maximal – plus on descend du zénith vers l’horizon, plus l’épaisseur d’atmosphère traversée est importante et plus la



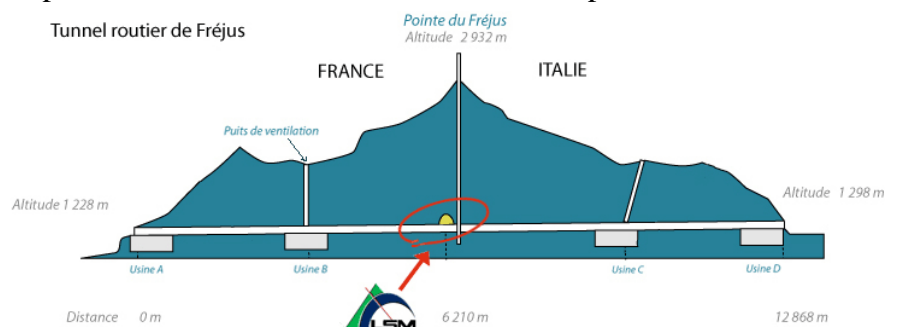
probabilité qu’un muon cosmique atteigne le sol diminue. Au niveau de la mer, le flux de muons verticaux est d’environ $I_0 = 70$ par mètre carré, par seconde et par stéradian. En intégrant sur toutes les directions possibles, on arrive à environ 1 muon/cm²/min. Un barreau COSMIX, de surface horizontale 48 cm², détecte donc à peu près un muon par seconde, ce que confirment les compteurs. La formule empirique donnant le nombre de muons détectés par unité de temps en provenance de la direction Ω (vue sous un angle solide $d\Omega$) et passant à travers la surface perpendiculaire dA (voir figure de gauche) est :

$$\frac{dN}{dA d\Omega dt} = I_0 \cos^k \theta$$
, avec $k \approx 2$ – cette formule est valable jusqu’à $\theta \approx 80^\circ$, un angle pour lequel la rotondité de la Terre n’est plus négligeable. Dans le cas où on s’intéresse à une surface dA' horizontale (voir figure de droite), la même formule s’applique en effectuant la substitution $dA = dA' \cos\theta$.

Au niveau de la mer, on compte environ 60% d’antimuons (μ^+) pour 40% de muons (μ^-). Cette différence est due à la composition des rayons cosmiques primaires et aux processus qui ont lieu lors du développement des gerbes atmosphériques. Il est intéressant de noter que, à cause du champ magnétique terrestre, cette asymétrie de charge se traduit par un flux de rayons cosmiques plus élevé en provenance de l’ouest. Cette différence peut atteindre 10-15% aux basses latitudes géomagnétiques (2-3% à partir de 50°) et se manifeste jusqu’à une énergie de l’ordre de 100 GeV.

Les rayons cosmiques sont une source gratuite et permanente de particules chargées. Si les accélérateurs de particules les ont peu à peu remplacés depuis les années 1950 pour l’étude de « l’infiniment petit » (un accélérateur produit de manière contrôlée des flux de particules bien plus intenses), les rayons cosmiques sont toujours utilisés, en particulier pour mesurer les performances et vérifier le bon fonctionnement de la plupart des détecteurs de particules. Ainsi, les détecteurs géants du LHC sont par exemple régulièrement testés, pendant les périodes où l’accélérateur ne produit pas de faisceaux, grâce aux rayons cosmiques qui les traversent. De même, de nombreux laboratoires possèdent un « télescope à rayons cosmiques », un dispositif dans lequel un détecteur peut être caractérisé en utilisant les muons cosmiques dont la trajectoire et l’énergie sont mesurées par un système dédié qui entoure la zone de test. En comparant les propriétés des rayons cosmiques incidents et la réponse du détecteur à leur passage, on peut en déduire les performances du détecteur, identifier des problèmes ou découvrir des améliorations potentielles.

Dans d’autres cas, en particulier pour des expériences de précision qui cherchent à mettre en évidence des signaux très rares ou très faibles, les rayons cosmiques sont une nuisance qui perturbe les mesures. La seule manière de s’en affranchir est de s’enterrer le plus profondément possible : la terre et la



roche forment un « bouclier » qui arrête d’autant plus de rayons cosmiques que la couche de protection qu’elles forment est profonde. Ainsi, presque au milieu du tunnel routier du Fréjus (qui relie les villes de Modane en France et de Bardonnèche en Italie) se trouve le Laboratoire Souterrain de Modane (LSM), cogéré par le CNRS/IN2P3. Situé à 1800 mètres sous la pointe du Fréjus, on n’y détecte que 4 muons par mètre carré et par jour – à comparer aux 200 rayons cosmiques/m²/s environ enregistrés à la surface !

La mallette COSMIX :

Le site internet du CENBG inclut toute une zone dédiée au détecteur COSMIX, accessible via la page <http://www.cenbg.in2p3.fr/COSMIX-presentation-du-Detecteur>. Elle contient :

- une description du contenu de la mallette, notamment des détecteurs (deux barreaux de scintillateur connectés chacun à un photodétecteur) et de la chaîne d'acquisition des données ;
- des informations sur la méthode de comptage des muons (séparément dans chacun des deux barreaux de scintillateur, ou en coïncidence temporelle) ;
- des procédures à suivre pour visualiser les signaux analogiques en sortie de COSMIX avec un oscilloscope numérique comme ceux qu'on trouve dans les lycées.

Les barreaux utilisés pour détecter les muons sont en iodure de césium dopé au thallium – CsI(Tl). Ce matériau est un scintillateur inorganique : il émet des photons (donc de la lumière) après absorption d'un rayonnement ionisant, c'est-à-dire suffisamment énergétique pour ioniser des atomes du cristal. D'où vient ce rayonnement ? De l'énergie ΔE perdue par le muon lors de sa traversée du barreau COSMIX.

$$\text{Pour des muons cosmiques, } \Delta E \approx 1,5 \text{ MeV} \left(\frac{\text{Densité du CsI(Tl)}}{1 \text{ g/cm}^3} \right) \left(\frac{\text{Longueur de barreau traversée}}{1 \text{ cm}} \right)$$

Comme $\rho_{\text{CsI(Tl)}} \approx 4,5 \text{ g/cm}^3$, que les barreaux utilisés pour la mallette COSMIX font 2 cm de haut pour 3 cm de large (et 16 cm de long) et que la direction privilégiée des muons cosmiques est la verticale, ΔE vaut de l'ordre de 10-15 MeV. En quelques microsecondes, les atomes du scintillateur se désexcitent : les électrons passés à un niveau d'énergie supérieur reviennent à leur niveau fondamental en émettant un photon dont l'énergie correspond exactement à la différence d'énergie entre les deux niveaux électroniques. Le CsI(Tl) émet dans le visible (pic d'émission à une longueur d'onde de 565 nm, soit à la limite du vert et du jaune) de l'ordre de 10 000 photons par MeV d'énergie déposée.

Les scintillateurs organiques (par exemple en plastique) émettent leurs photons bien plus rapidement – en quelques dizaines de nanosecondes. Si on en prend un bloc suffisamment épais, on peut y arrêter (littéralement) les muons cosmiques les moins énergétiques. Ceux-ci vont alors se désintégrer en un électron et deux neutrinos au bout de quelques microsecondes – puisque leur durée de vie au repos vaut 2,2 μs . Avec un dispositif permettant de détecter les deux émissions de lumière successives, l'une provoquée par l'arrivée du muon dans le scintillateur et l'autre par l'électron issu de sa désintégration, on peut mesurer la durée de vie du muon en accumulant un nombre suffisant d'événements.

En physique des particules, les scintillateurs sont souvent utilisés dans des calorimètres, c'est-à-dire des détecteurs chargés de mesurer l'énergie des particules. Dans un calorimètre, la particule dont on veut mesurer l'énergie interagit avec les matériaux présents, produisant des particules secondaires qui vont ensuite elles-mêmes interagir, etc. La gerbe se développe jusqu'à épuisement de l'énergie disponible et l'énergie de la particule initiale – détruite au cours du processus – est reconstruite en sommant tous les dépôts d'énergie enregistrés le long de la gerbe. Un étalonnage précis effectué au préalable permet de connaître la correspondance entre l'énergie effectivement mesurée et l'énergie réelle de la particule. Le calorimètre doit être suffisamment profond et étendu pour contenir les gerbes de toutes les particules, quelles que soient leur énergie et leur trajectoire.

Les barreaux de CsI(Tl) utilisés comme détecteurs de muons dans les mallettes COSMIX sont similaires à ceux qui forment le calorimètre de l'instrument LAT (« Large Area Telescope », « Télescope Grand Champ ») embarqué sur le satellite Fermi, lancé par la NASA le 11 juin 2008. Le LAT observe le ciel dans la gamme des rayons gamma (photons d'énergies comprises entre 20 MeV et 300 GeV) et recherche les sources de ces rayonnements qui peuvent être permanentes – comme des pulsars – ou variables – par exemple les blazars, des noyaux actifs de galaxies très éloignées. Au dos de cette brochure, vous trouverez une vue d'artiste du satellite Fermi et la carte du ciel obtenue après cinq années d'observations. Le CENBG est l'un des laboratoires français qui participent à la collaboration internationale Fermi-LAT.

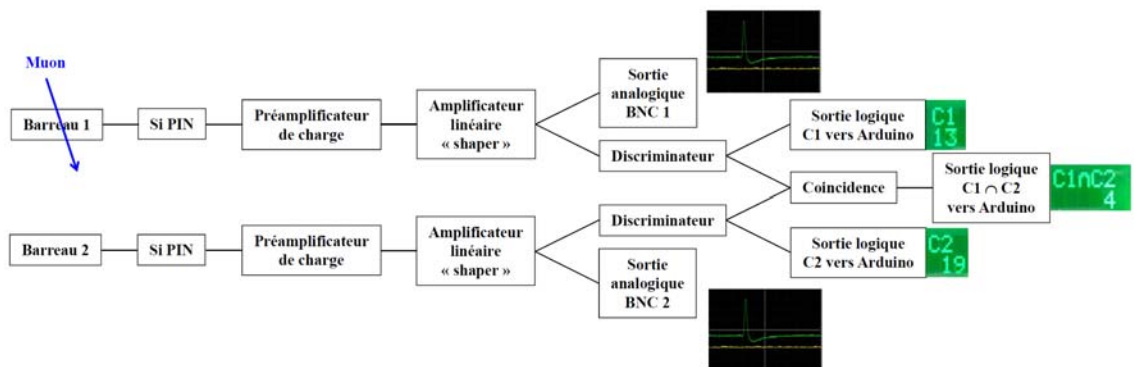
un détecteur de rayons cosmiques

Une partie des photons produits dans un barreau COSMIX arrivent sur une photodiode de silicium qui convertit la lumière reçue en courant électrique. Un photodétecteur est caractérisé par trois quantités :

- son efficacité quantique, c'est-à-dire la fraction de photons incidents effectivement détectés – typiquement 20%. Cette quantité dépend du photodétecteur et de la longueur d'onde du photon ;
- son gain, c'est-à-dire le nombre d'électrons créés par photon détectés : de l'ordre de 10^6 , soit une amplification importante, nécessaire pour obtenir un signal détectable en sortie ;
- sa réponse temporelle – rapidité et reproductibilité dans le temps.

Une photodiode de silicium a une qualité supplémentaire, essentielle pour un détecteur pédagogique comme la mallette COSMIX : elle fonctionne avec une tension assez faible – 12 V pour celles de la mallette COSMIX, notées Si PIN –, contrairement aux « photomultiplicateurs » classiques qui requièrent une haute tension plusieurs dizaines de fois plus élevée – typiquement 800 à 1 000 volts, voire plus.

Schéma simplifié de la chaîne de détection COSMIX, depuis le scintillateur jusqu'au signal analogique.



Le signal électrique en sortie du photodétecteur est amplifié et mis en forme dans un circuit électronique dédié, pour finalement donner le signal analogique visualisé sur l'écran de l'oscilloscope. En interne, un seuil est appliqué sur l'amplitude de ce signal pour décider s'il correspond ou non au passage d'un muon. En prenant en compte l'ensemble des caractéristiques du détecteur et de son électronique, un dépôt d'énergie de l'ordre de 10 MeV dans le barreau produit en sortie de la chaîne de détection une impulsion de plusieurs centaines de millivolts, bien supérieure aux signaux produits par la radioactivité ambiante ou au bruit du détecteur. On peut ainsi parfaitement discriminer le « signal cherché » (le passage d'un muon) du « bruit de fond » (tous les autres phénomènes produisant une impulsion en sortie de l'électronique).

Chaque fois que le passage d'un muon est détecté dans un barreau, le compteur correspondant (« C1 » ou « C2 ») est incrémenté. Une coïncidence (« $C1 \cap C2$ ») est définie lorsque les deux barreaux détectent un muon simultanément, c'est-à-dire lorsque les temps de détection sont distants de moins de 100 μ s. Or, le temps de passage d'un muon dans un barreau est connu avec une précision de l'ordre de 10 μ s tandis que les muons cosmiques parcourent près de 300 mètres chaque microseconde et qu'à peine un muon traverse un barreau chaque seconde en moyenne. Donc, la probabilité que cette coïncidence soit accidentelle, c'est-à-dire due au passage simultané de deux muons différents dans les barreaux, est négligeable.

Dans un détecteur de physique des particules, la séparation signal/bruit de fond n'est pas toujours aussi nette que dans le cas de la mallette COSMIX. Selon le but poursuivi par l'analyse des données produites, on peut vouloir optimiser cette séparation dans deux directions. Soit obtenir le maximum de signal en tolérant un niveau de bruit de fond plus ou moins fort, soit minimiser le bruit de fond et accepter d'avoir une efficacité plus faible sur le signal – mais un échantillon plus pur au final.

Pour finir, rappelons que tous les muons détectés par la valise COSMIX sont enregistrés dans un fichier au format CSV (« Comma Separated Variables ») : chaque événement est repéré par une série de variables séparées par des virgules). Une fois passées de la carte mémoire SD de la mallette (dans le boîtier « arduino » au-dessus de la prise USB) sur un ordinateur, ces données peuvent être analysées en détail.

Ressources pédagogiques proposées par l'IN2P3

Fort de son réseau de 25 laboratoires, infrastructures et plateformes de recherche indiqués sur la carte ci-contre, l'Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules du CNRS (CNRS/IN2P3) propose des ressources pédagogiques et de vulgarisation scientifique variées à destination des enseignants, des lycéens et des étudiants, ainsi que pour le grand public. A l'échelle nationale, cette offre est regroupée au sein de « [l'Ecole des deux infinis](#) ». En plus des classiques



conférences dans les lycées et des visites de laboratoires (sur demande ou lors de journées portes ouvertes comme pour la Fête de la Science), le CNRS/IN2P3 propose des activités assez uniques. Citons :

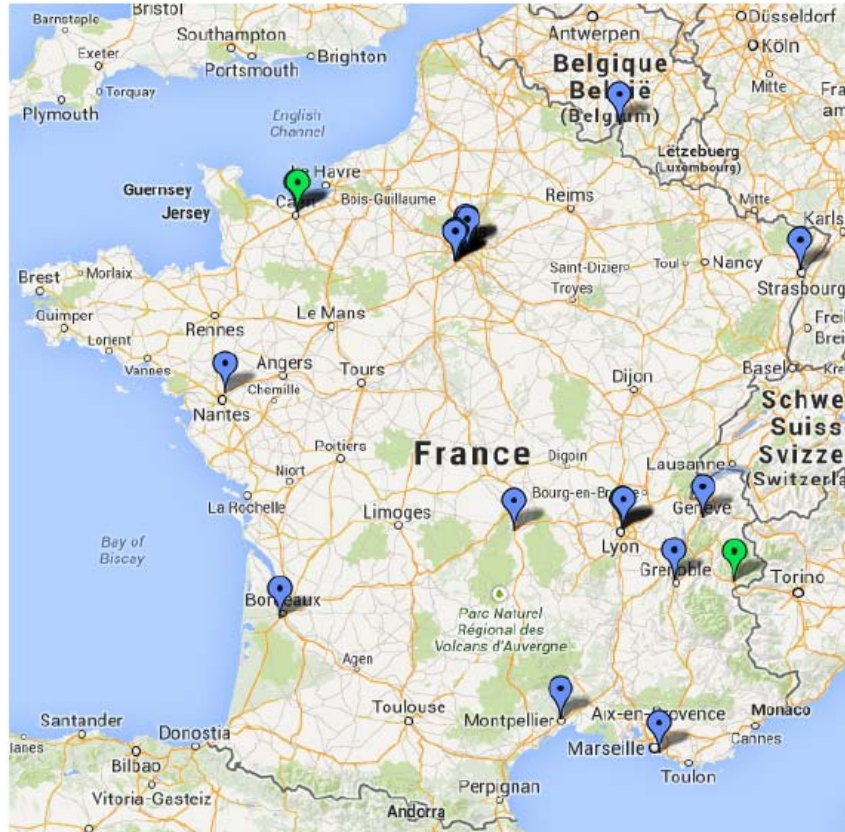
- la nouvelle (2014) [affiche des composants élémentaires de la matière](#), reproduite en page 4 de ce document. Diffusée dans les établissements scolaires, elle est accompagnée d'une brochure pédagogique à destination des enseignants. Un autre document, « les cartes d'identités des particules », sera publié ultérieurement.
- les [Masterclasses internationales](#) qui permettent à une classe de passer une journée dans un laboratoire, de découvrir le métier de chercheur et l'aspect international de nos disciplines tout en travaillant sur de vraies données du grand collisionneur LHC du CERN.
- le programme « [Cosmos à l'Ecole](#) », en partenariat avec le dispositif ministériel « Sciences à l'Ecole » : des appels à candidatures réguliers permettent aux enseignants sélectionnés de disposer dans leur établissement et pour une durée de trois ans d'un détecteur de rayons cosmiques performant, le cosmodétecteur, qui peut être utilisé pour de nombreuses activités en lien avec les programmes scientifiques de lycée.
- les mallettes « [COSMIX](#) », des détecteurs de rayons cosmiques portables qui permettent de découvrir ce rayonnement en provenance du cosmos et de s'initier à la problématique de la détection des particules.
- le projet pédagogique « [Passport pour les deux infinis](#) », en partenariat avec le CEA/IRFU et les universités. Ce projet est centré sur un livre éponyme publié aux éditions Dunod et qui est envoyé gratuitement (dans la limite des stocks disponibles) aux professeurs de sciences physiques qui en font la demande sur internet.

Les formations des enseignants ne sont pas oubliées avec un stage annuel au CERN dans le cadre du programme « Cosmos à l'Ecole » et des stages inscrits aux Plans Académiques de Formation. Parmi les autres ressources disponibles, on peut citer des expositions sous formes de panneaux (accélérateurs de particules, rayons cosmiques, la lutte contre les cancers), le projet « [COSMAX](#) » basé sur les données du satellite Fermi qui étudie le rayonnement de photons de haute énergie en provenance du cosmos ou la [mallette pédagogique](#) développée par la collaboration internationale Planck.

De nombreuses autres ressources plus locales existent, comme le [musée Sciences ACO](#) à Orsay, la revue de vulgarisation scientifique « [Elémentaire](#) » (dont les huit numéros sont téléchargeables gratuitement), une [exposition permanente sur les « petits secrets de l'Univers »](#) au Laboratoire Souterrain de Modane ou le « [Billotron](#) » au Laboratoire de Physique Corpusculaire de Caen.

Vous pouvez trouver sur internet des informations sur tous ces projets. N'hésitez pas à contacter le laboratoire CNRS/IN2P3 le plus proche de chez vous ou à nous écrire (ecole2infinis@in2p3.fr).

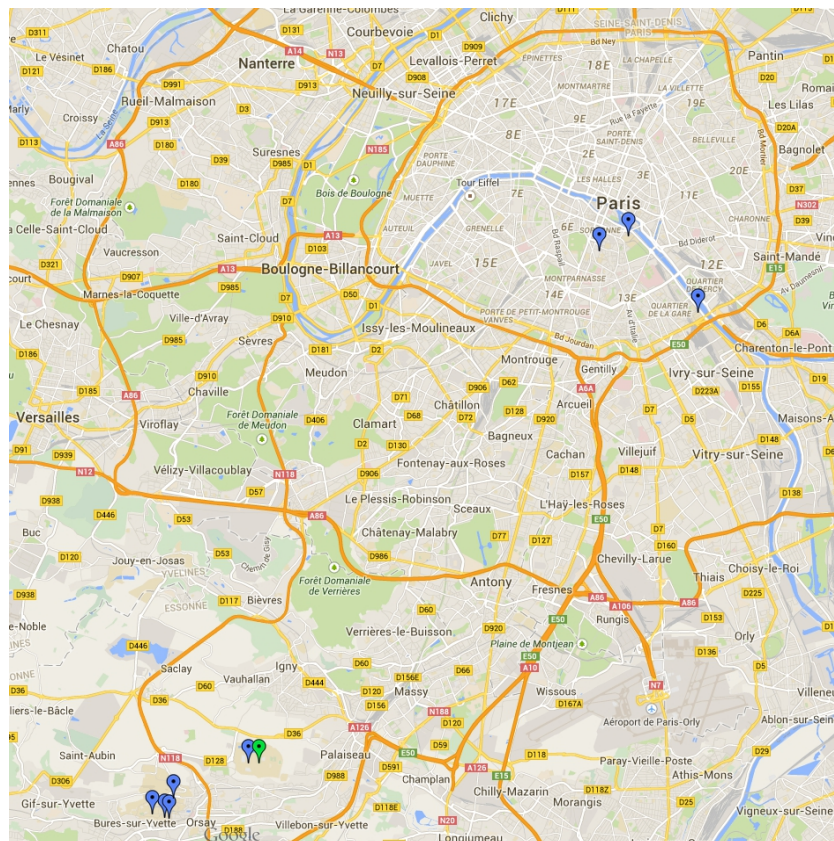
Le CNRS/IN2P3 et son réseau de laboratoires



Repères bleus : laboratoires

Repères verts : infrastructures et plateformes technologiques

Le CENBG est près de Bordeaux et le LAL à Orsay – au sud-ouest de Paris.



Check-list mallette COSMIX

Pensez à vérifier les points suivants lorsque

- vous recevez une mallette COSMIX en prêt
- vous rangez votre mallette COSMIX après utilisation
- vous transmettez votre mallette COSMIX à un collègue enseignant ou médiateur scientifique, ou quand vous la rendez au laboratoire qui vous l'avait prêtée.



La mallette doit contenir

- le câble d'alimentation USB noir
- le câble vert et jaune de mise à la terre
- la feuille de documentation A4 plastifiée
- la carte mémoire SD qui se trouve dans le boîtier noir.



Le barreau amovible C2 doit être fixé dans son logement au moyen des deux vis noires.

Les protections de mousse doivent être en place pour protéger le contenu de la mallette.

Attestation de transfert de mallette COSMIX

Je soussigné(e)
.....
.....

atteste avoir reçu ce jour la mallette COSMIX numéro IDF/.....
de M(me)
.....
.....

J'ai vérifié le contenu de la mallette à l'aide de la check-list incluse dans le livret pédagogique d'accompagnement de l'opération « Mallettes COSMIX en Ile-de-France ».

Je m'engage à utiliser la mallette COSMIX dans un cadre éducatif et à respecter en toutes circonstances ses conditions d'utilisation. En particulier, la mallette COSMIX doit toujours être posée à plat en respectant les indications « haut » et « bas » inscrites sur la coque de la mallette.

Fait à le

Signature
(précédée de la mention manuscrite « *lu et approuvé* »)

Merci de scanner ce document et de l'envoyer à cosmixIDF@lal.in2p3.fr.

Annexe : documentation jointe à la mallette



Contenu

Cette valise COSMIX contient, en plus de la plaque supportant le détecteur, un câble USB et un câble de mise à la terre (voir ci-après). Une carte micro SD est enfichée dans le module arduino (juste au-dessus de la prise USB) sur laquelle le comptage des barreaux et les informations du GPS et de l'altimètre sont stockés.

Utilisation

Elle est décrite en détail sur le site <http://www.cenbg.in2p3.fr/COSMIX-Compter-les-muons>
Pour une utilisation rapide : ouvrez la mallette, branchez le câble USB sur une sortie d'ordinateur ou un chargeur. Le détecteur est alors fonctionnel ! Le comptage démarre sur l'afficheur et les signaux peuvent être visualisés avec un oscilloscope sur les sorties BNC. Faites une mesure avec les compteurs C1 et C2 juxtaposés et une autre avec C2 superposé à C1 (éviter de saisir C2 par le barreau parallélépipédique).

Mise à la terre

Si l'alimentation USB se fait par un ordinateur ou chargeur branché sur le secteur sans mise à la terre, des effets d'influence électrostatique peuvent apparaître (comptage parasite quand on approche la main des barreaux par exemple). Les détecteurs sont protégés contre cet effet, mais dans le cas improbable où il serait néanmoins constaté, il faut connecter le détecteur à la terre via le câble terminé par une pince crocodile : fiche banane dans le connecteur placé près des 5 boutons de commande et pince crocodile sur une terre (châssis d'appareil électrique ou fiche terre d'une prise électrique). La mise à la terre du détecteur n'est pas nécessaire si:

- l'alimentation USB est indépendante du secteur (batterie, ordinateur sur batterie...);
- l'alimentation USB se fait par un élément branché sur le secteur avec mise à la terre.

Avant de fermer

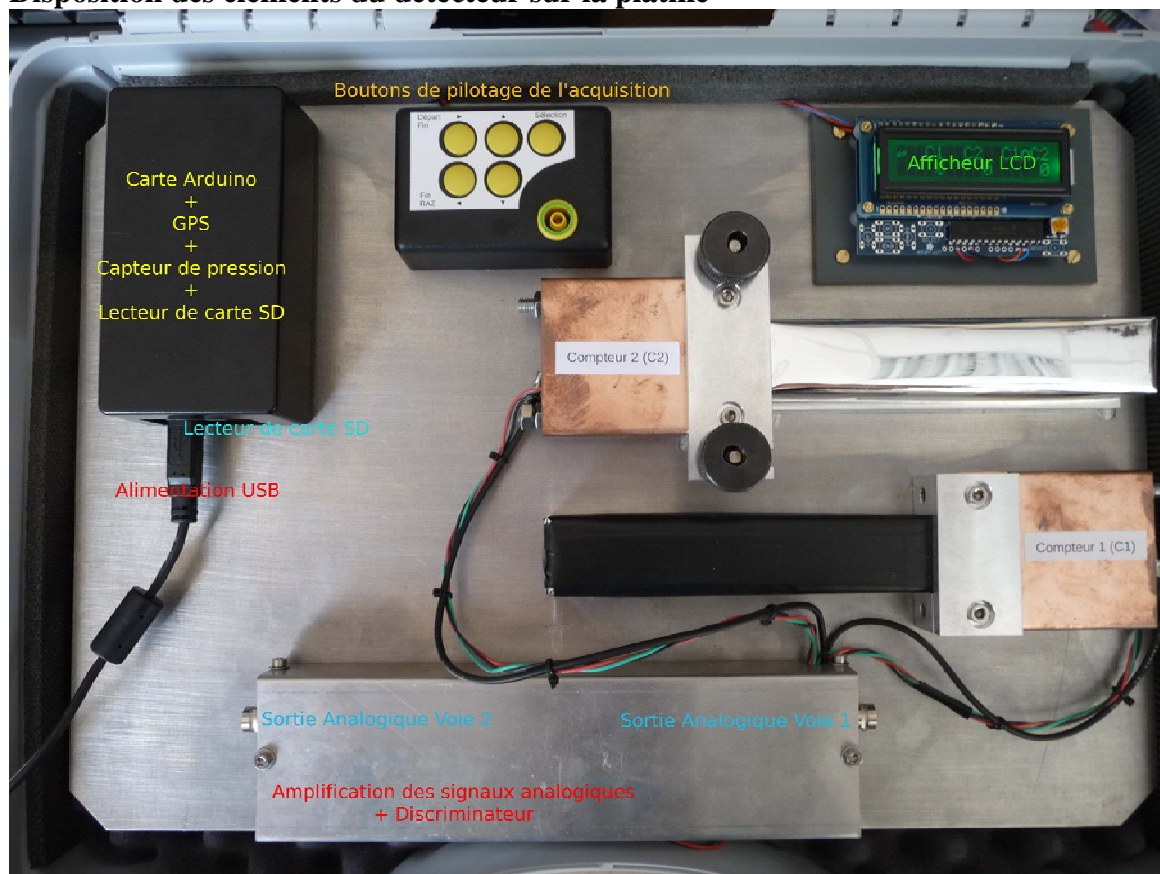
Assurez-vous que :

- le compteur C2 est fixé sur son socle avec les deux vis noires ;
- les 2 câbles et la carte SD sont dans la valise ;
- les protections de mousse inférieure et supérieure sont en place.

Contact/Assistance

cosmix@cenbg.inp3.fr

Disposition des éléments du détecteur sur la platine



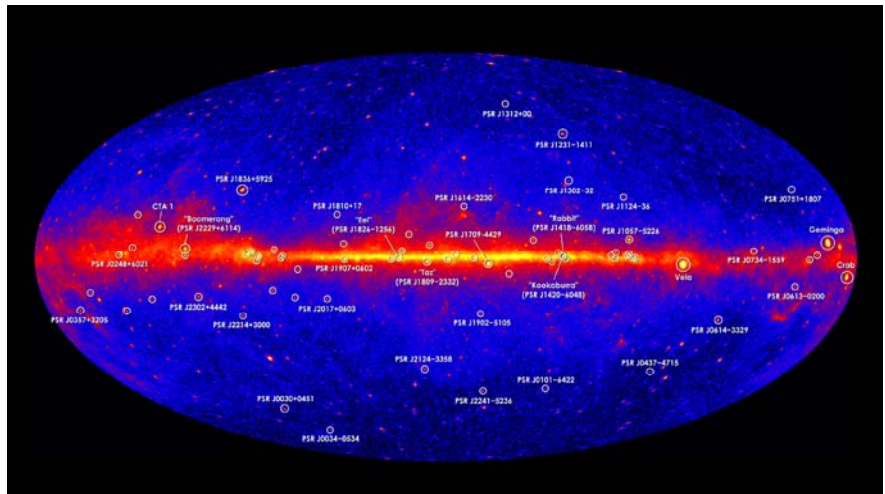
Les boutons de commande

	Départ Fin	Démarrage/arrêt de comptage
	▶	Curseur vers la droite
	Fin RAZ	Arrêt de comptage/Remise à zéro
	◀	Curseur vers la gauche
	▲	Défilement des options de menu.
	▼	Incrémenter/Décrémenter (Durée)
	Sélection	Sélection des menus de paramétrage et d'information

Modes de comptage

Expériences types

Durée illimitée 	Barreaux Juxtaposés
Durée définie 	Barreaux Superposés



A gauche : une vue d'artiste montrant, de haut en bas, des sources de rayons gamma dans l'Univers, le satellite Fermi et la Terre. A droite, la carte du ciel gamma (en coordonnées galactiques : le plan galactique est horizontal au centre) obtenue au bout de cinq ans d'observation par le satellite Fermi. Plus la couleur d'un pixel est chaude et plus le flux de photons gamma d'énergie supérieure ou égale à 1 GeV en provenance de cette direction est élevé. Les principaux pulsars observés par Fermi sont indiqués. Vela, sur le plan galactique à droite, est la source permanente de rayons gamma la plus brillante du ciel.