

# La mystérieuse décharge de l'électroscope

1880



Les rayons cosmiques ont 100 ans !



Charles-Augustin de Coulomb (1736-1806)  
© RMN (Château de Versailles)

CHARLES DE COULOMB S'APERÇOIT A LA FIN DU XVIII<sup>e</sup> SIÈCLE QU'UNE SPHERE CHARGÉE ET ISOLÉE, SUSPENDUE PAR UN FIL DE SOIE, PERD PEU A PEU SA CHARGE ÉLECTRIQUE. POURQUOI ? MYSTÈRE...

## L'électroscope...

Un siècle plus tard, les scientifiques observent le même phénomène avec l'électroscope, un instrument plus élaboré constitué de deux feuilles métalliques. En raison de la force répulsive entre charges de même signe, ces feuilles s'écartent l'une de l'autre lorsqu'elles sont chargées. Plus la

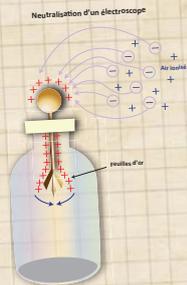


Electroscope à feuilles d'or  
© Oak Ridge Associated Universities

charge est grande, plus l'écart est important. Lorsqu'un électroscope est chargé et isolé, ses feuilles se rapprochent lentement. Cela indique qu'il se décharge spontanément.

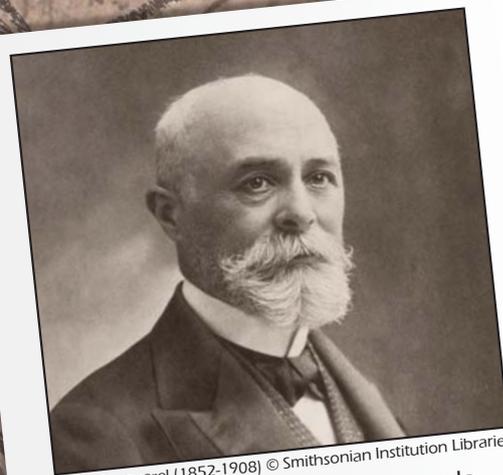
Mais quelle peut être la cause de cette décharge ?

## C'est l'ionisation



© O. Béoutare, G. Trap et J. Babel, Palais de la Découverte

On appelle ionisation le phénomène par lequel un électron (-) est arraché à un atome, ce dernier devenant un ion de charge positive (+). On a compris dès la fin du XIX<sup>e</sup> siècle que la lente décharge des électroscopes pouvait être imputée à ce phénomène. L'ionisation rend l'air ambiant conducteur et décharge peu à peu l'électroscope. Plus l'air est ionisé, plus les feuilles se rapprochent rapidement.



Henri Becquerel (1852-1908) © Smithsonian Institution Libraries

Pour les physiciens qui travaillent sur la radioactivité, qui vient d'être découverte par Henri Becquerel, c'est la radioactivité terrestre qui est responsable de l'ionisation de l'air autour de l'électroscope. Puisque la Terre est radioactive, elle fait un excellent suspect.

VERS 1898, CHARLES WILSON AVANCE UNE AUTRE EXPLICATION : LA CAUSE DE L'IONISATION ATMOSPHERIQUE POURRAIT RESIDER DANS UN RAYONNEMENT D'ORIGINE EXTRATERRESTRE !



# Rayonnement terrestre ou extraterrestre ?



Les rayons cosmiques ont 100 ans !

1910

A L'AUBE DU XX<sup>e</sup> SIECLE, ON SAIT QU'UN RAYONNEMENT IONISANT EST RESPONSABLE DE LA DECHARGE DES ELECTROSCOPES. MAIS PROVIENT-IL DE LA RADIOACTIVITE NATURELLE DES ROCHES VOISINES OU A-T-IL UNE AUTRE ORIGINE ?

## L'ère des pionniers

Ernest Rutherford montre qu'un blindage autour de l'électroscope ralentit sa décharge, sans la faire disparaître : la radioactivité naturelle des matériaux de l'électroscope n'est donc pas en cause. La radioactivité du sol pourrait-elle l'expliquer ? Pour isoler les instruments de la radioactivité terrestre, il faut s'éloigner du sol. En 1910, Théodore Wulf monte au sommet de la tour Eiffel avec son électroscope pour tester cette hypothèse. Le rayonnement diminue avec l'altitude, mais pas autant qu'attendu. En 1911, Domenico Pacini ne voit pas de changement en comparant les décharges d'un électroscope sur l'eau, sous l'eau dans une boîte étanche, ou sur la terre ferme. Ces mesures confirment les observations de Wulf et mettent à mal l'hypothèse de l'origine terrestre de ce rayonnement.



La tour Eiffel lors de l'exposition universelle de 1900 © DR



Electroscope de Wulf (1912)  
© University of Innsbruck

## Carte Postale

Correspondance

Adresse

Viktor Hess réalise en 1911 et 1912 près de dix vols en ballon équipé d'électroscopes adaptés à la haute altitude.

Avec des mesures de nuit et lors de l'éclipse du 17 avril 1912, Hess montre que le Soleil ne peut être la source principale de ces radiations...

Le 7 août 1912, il atteint une altitude de 5350 mètres. Il observe qu'au-delà de 1000 mètres, l'ionisation s'accroît considérablement. A 5000 mètres, elle a déjà doublé ! Il en conclut que le rayonnement ionisant vient de plus haut et donc que son origine est très probablement extraterrestre...



Le destroyer «Fulmine» : c'est à bord de ce navire que Pacini fit, en baie de Livourne, ses expériences sur la décharge des électroscopes.  
© Archivio Storico della Marina Militare Italiana.

En 1913 et 1914, sur les pas de Hess, Werner Kolhörster monte jusqu'à 9000 mètres, toujours en ballon ! Il observe des effets d'ionisation dix fois plus importants qu'au sol et confirme ainsi les résultats de Hess.



Viktor Hess dans la nacelle de son ballon en 1912 © DR

LA PISTE EXTRATERRESTRE EST LA BONNE, ET LE TERME "RAYONS COSMIQUES" EST ADOPTE EN 1926. MAIS LEUR ORIGINE RESTE UN MYSTERE. COMMENT CONTINUER L'ENQUETE ?

# De nouveaux moyens d'investigation



Les rayons cosmiques ont 100 ans !



DANS LES ANNEES 1910-1930, DE NOUVEAUX INSTRUMENTS PERMETTENT D'IMPORTANTES AVANCEES DANS L'ETUDE DU RAYONNEMENT COSMIQUE...



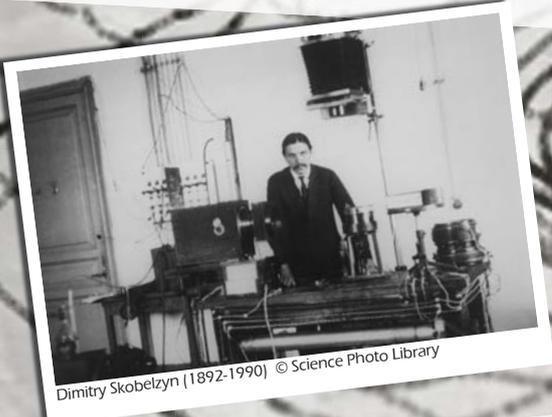
Charles Thomson Rees Wilson (1869-1959)  
© Science Photo Library



Image d'une gerbe de rayons cosmiques obtenue dans une chambre à brouillard placée dans un champ magnétique, par Giuseppe Occhialini et Patrick Blackett en 1933, à l'aide du dispositif de coïncidences mis au point par Walther Bothe. La courbure vers la gauche, ou vers la droite, indique le signe positif, ou négatif, de la charge.  
© Blackett et Occhialini. Proc. Roy. Soc. Lond., A. 139, 699, 1933

## Les révélations de la chambre à brouillard

En 1912, Charles Wilson invente la chambre à brouillard. Remplie de vapeur d'eau saturée, elle dévoile le passage des particules chargées qui laissent des traces de condensation. Plongée dans un champ magnétique, cette chambre révèle des trajectoires courbes. Eureka ! Il devient possible d'identifier la charge et l'énergie de ces particules ! En 1927, le physicien russe Dimitry Skobelzyn photographie fortuitement ce type de trajectoire, premiers clichés connus de traces laissées par des rayons cosmiques de haute énergie.



Dimitry Skobelzyn (1892-1990) © Science Photo Library



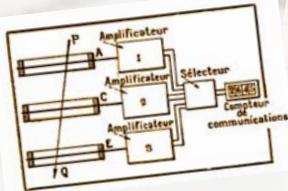
Compteur Geiger, modèle des années 50  
© Oak Ridge Associated Universities



En 1928 le compteur Geiger-Müller est mis au point. C'est une chambre cylindrique remplie d'un gaz sous faible pression et traversée par un fil métallique porté à une tension de l'ordre de 1000 volts. Au passage d'une particule chargée, le gaz est ionisé et les électrons arrachés se multiplient, rendant le gaz conducteur et provoquant un phénomène de décharge, qui produit une impulsion électrique sur le fil. Ce compteur permet de détecter une à une les particules le traversant.

## Coïncidences !

Au début des années 1930, un pas décisif est franchi lorsque Walther Bothe a l'idée de coupler plusieurs compteurs pour ne comptabiliser que les impulsions observées simultanément dans tous les détecteurs : c'est la méthode des coïncidences. Il démontre ainsi que le rayonnement détecté est dû au passage de particules électriquement chargées venant du ciel et traversant les différents compteurs. Le déclenchement des chambres à brouillard de Wilson par ce dispositif permet en outre d'obtenir des clichés de rayons cosmiques avec une efficacité remarquable.



L'origine extraterrestre du rayonnement cosmique est acquise mais une controverse fait rage quant à sa nature. Pour Robert Millikan, ce sont des rayons semblables à des rayons X, alors qu'Arthur Compton défend l'idée qu'il s'agit de particules chargées. Le débat entre les deux Américains est tellement virulent que le New York Times en fait sa « Une » le 31 décembre 1932

ALORS, RAYONS OU PARTICULES ? POUR LE SAVOIR, LES PHYSICIENS VONT ENCORE JOUER LES AVENTURIERS. NON PLUS DANS LES AIRS, MAIS SUR LES MERS...

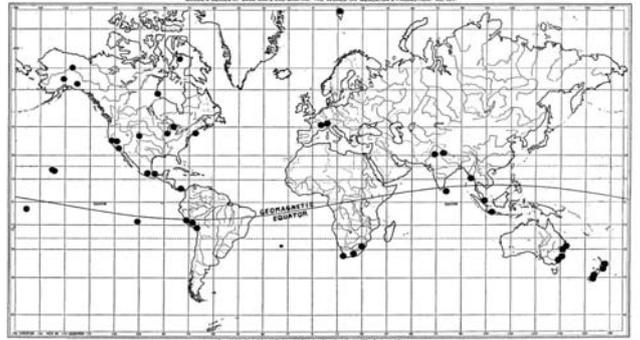
# Rayons ou particules ?



Les rayons cosmiques ont 100 ans !

1930

DANS LES ANNEES 1930, LES PHYSICIENS PARCOURENT LE MONDE POUR RESOUDRE LA CONTROVERSE SUR LA NATURE DU RAYONNEMENT COSMIQUE...



Cette carte situe l'emplacement des principales stations d'observation des rayons cosmiques. Expéditions de 1933. Extraite de *The Physical Review*, Vol. 43, Nr. 6, 15/3/1933, «A Geographic Study of Cosmic Rays», Arthur Compton, Univ. of Chicago

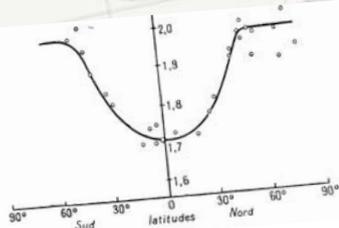
## L'action du champ magnétique terrestre



© Kenneth Lohman et al./Pnas

Le champ magnétique terrestre dévie les particules chargées venant de l'Espace. Il empêche les particules les moins énergétiques d'atteindre le sol. Cet effet dépend de la latitude, il est maximal à l'équateur. Lorsqu'on progresse des hautes vers les basses latitudes, le nombre de particules détectées au niveau du sol diminue, par élimination des particules les moins énergétiques. Cette évolution est surtout sensible entre 30° et 0°.

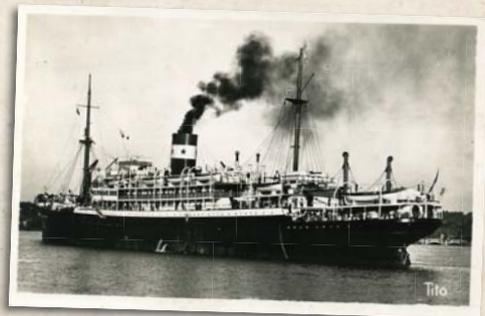
A l'équateur, la direction du champ magnétique est telle qu'il dévie vers l'est les particules de charge positive qui arrivent de l'Espace. Si ces dernières sont majoritaires dans le rayonnement cosmique, on doit observer un excès de particules semblant venir de l'ouest.



Cette image est extraite d'un article intitulé « Étude par la méthode des coïncidences de la variation du rayonnement cosmique suivant la latitude », L. Leprince-Ringuet et P. Auger, *J. Phys. Radium*, Vol. 5, N° 5, mai 1934 (EDP Sciences).

## Chercheurs globe-trotters

En 1932, le Hollandais Jacob Clay montre l'influence de la latitude sur l'intensité des rayons cosmiques, lors d'un voyage en Indonésie.



Paquebot Le Kerguelen © DR

En France, Pierre Auger et Louis Leprince-Ringuet embarquent en 1933 à bord du paquebot Le Kerguelen qui assure la liaison entre le Havre et Buenos Aires. Les deux physiciens ont réservé une cabine du pont supérieur pour y installer leurs détecteurs, qui fonctionnent nuit et jour durant les deux mois du voyage. Les détecteurs enregistrent près de 170 000 particules.

Auger et Leprince-Ringuet observent une baisse de 15% de l'intensité du rayonnement à l'équateur ainsi qu'un excès significatif de rayons venant de l'ouest !

LES RAYONS COSMIQUES NE SONT PAS DES "RAYONS" MAIS DES PARTICULES CHARGÉES ! L'ASYMÉTRIE EST-OUEST PERMET MEME D'AFFIRMER QU'ELLES SONT EN MAJORITE CHARGÉES POSITIVEMENT. ON SAIT AUJOURD'HUI QUE 90% D'ENTRE ELLES SONT DES PROTONS ET PRES DE 10% DES NOYAUX D'HELIUM.

## De nouvelles traces inconnues



Les rayons cosmiques ont 100 ans !

1930

EN 1932, LA DECOUVERTE DU NEUTRON SEMBLAIT BOUCLER L'ENQUETE SUR LES CONSTITUANTS DE LA MATIERE. MAIS D'ETRANGES TRACES LAISSEES PAR LES RAYONS COSMIQUES APPORTENT BIENTOT DE NOUVELLES REVELATIONS.

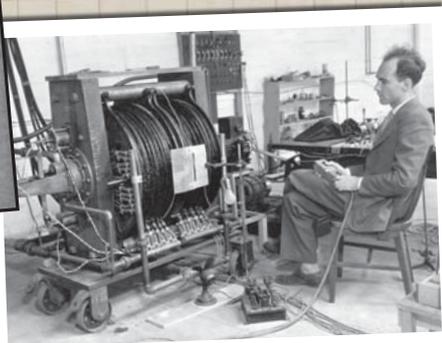
## Vous avez dit antimatière ?

En 1932, l'Américain Carl Anderson observe dans un cliché de chambre à brouillard une trajectoire identique à celle d'un électron. Il semblerait qu'elle provienne d'une particule portant une charge électrique positive...

Or, en 1931 les travaux en physique théorique du physicien britannique Paul Dirac l'avaient conduit à postuler l'existence du positron, l'antiparticule associée à l'électron. L'antimatière prédite par les équations existe donc bel et bien, même si l'Univers que nous observons semble exclusivement formé de matière !



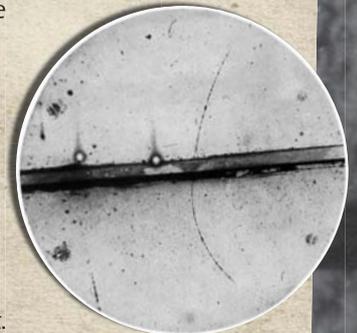
Paul Dirac (1902-1984)  
© DR



Carl Anderson devant la chambre à brouillard avec laquelle il découvre l'électron positif ou positron.  
© California Institute of Technology

Anderson a l'idée de placer sa chambre à brouillard dans un champ magnétique qui dévie les particules chargées. La déviation est d'autant plus forte que la charge électrique de la particule est élevée, et que sa masse et sa vitesse sont faibles. Une plaque de plomb au centre de la chambre ralentit les particules qui la traversent : elles sont davantage déviées par le champ magnétique après l'obstacle qu'avant.

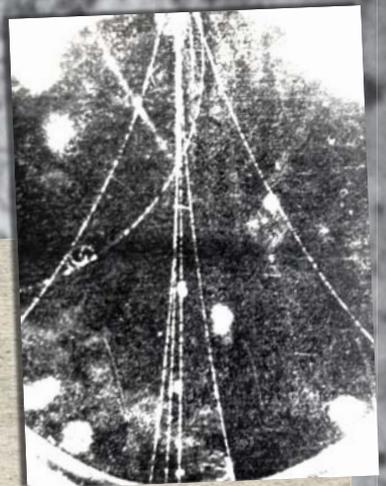
On en déduit ainsi leur sens de parcours. Grâce à ce dispositif, Anderson peut affirmer que la trace observée sur ce cliché est celle d'un « antiélectron » chargé positivement.



© American Physical Society

## Les gerbes d'électrons et de positrons

Ce cliché obtenu par Anderson montre une gerbe d'électrons résultant de l'interaction d'un rayon cosmique avec l'atmosphère un peu au-dessus de la chambre. Des électrons « des deux signes » y apparaissent en proportion comparable. C'est l'observation de telles gerbes qui a convaincu les physiciens de l'existence du positron annoncé par Anderson.



© California Institute of Technology

LE POSITRON EST LE PREMIER D'UNE LONGUE SERIE DE NOUVELLES PARTICULES QUI SERONT DECOUVERTES GRACE A L'ETUDE DE PLUS EN PLUS POUSSEE DU RAYONNEMENT COSMIQUE...

# Que contient le rayonnement cosmique ?



Les rayons cosmiques ont 100 ans !

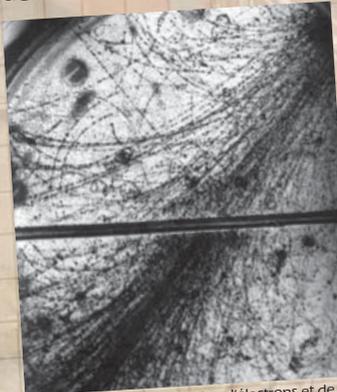
1933

SI L'ORIGINE EXTRATERRESTRE DU RAYONNEMENT COSMIQUE EST MAINTENANT SOLIDEMENT ETABLIE, LA NATURE DES PARTICULES DETECTEES AU NIVEAU DU SOL ET LE MECANISME DE LEUR PRODUCTION RESTENT ENCORE MAL CONNUS.

## Une «composante molle»

Les physiciens analysent le rayonnement cosmique à différentes altitudes et derrière des écrans absorbants, de nature et d'épaisseur variables. Ils mettent ainsi

en évidence une «composante molle». En traversant un centimètre de plomb, elle produit des gerbes formées de nombreux électrons et positrons, mais elle est rapidement absorbée par une épaisseur de plomb plus grande. Cette «composante molle» augmente fortement avec l'altitude (un facteur six entre le niveau de la mer et 3500 m).



Gerbe formée d'une centaine d'électrons et de positrons, enregistrée par Carl Anderson et ses collaborateurs au laboratoire du Pike's Peak (4300 m d'altitude)  
© California Institute of Technology

## Une «composante dure»

En se plaçant dans des salles profondément enterrées ou derrière des blindages épais, les physiciens observent l'existence d'une seconde composante très pénétrante, qualifiée de «dure» et variant peu avec l'altitude. Les particules correspondantes ne produisent presque aucune gerbe en traversant la matière : elles sont donc d'une nature différente. Si certains chercheurs de l'époque pensent à des protons, Carl Anderson (encore lui !) va découvrir qu'il s'agit en fait de nouvelles particules...



© Nicolas Arnaud



Un des clichés ayant conduit à la découverte du muon © DR

En 1936, au sommet du Pike's Peak (4300 mètres) dans le Colorado, Carl Anderson et Seth Neddermeyer identifient une nouvelle particule fortement pénétrante avec une chambre à brouillard. Baptisée «mésotron», cette particule (appelée aujourd'hui «muon») s'avère très semblable à l'électron, bien que 200 fois plus lourde !

LES MONTAGNES SONT DECIDEMENT DES LIEUX REVES POUR ETUDIER LES RAYONS COSMIQUES. LES SAVANTS MONTAGNARDS NE SONT PAS AU BOUT DE LEURS SURPRISES.

# Sur la piste des grandes gerbes



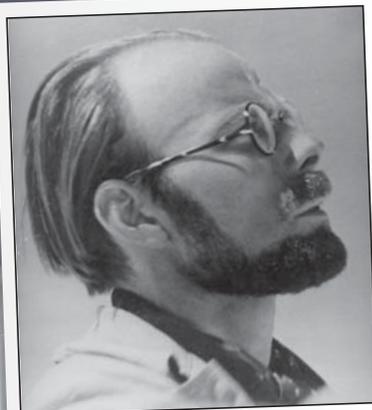
Les rayons cosmiques ont 100 ans !



HASARD OU COINCIDENCE ? DES DETECTEURS ELOIGNES DE PLUSIEURS METRES MONTRENT QUE DES PARTICULES COSMIQUES ARRIVENT EXACTEMENT EN MEME TEMPS ! COMMENT EXPLIQUER CE PHENOMENE ?

## L'épopée des montagnards

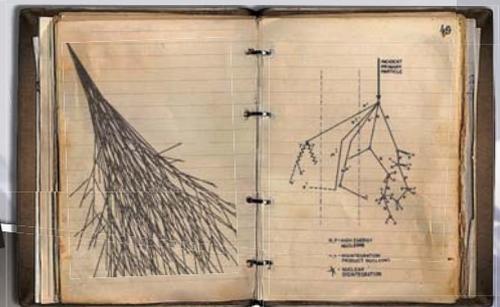
Dès 1934, Bruno Rossi note l'existence de décharges simultanées dans deux compteurs Geiger séparés de plusieurs mètres, et démontre qu'elles ne peuvent être dues à des coïncidences fortuites. En 1937, Pierre Auger et ses collaborateurs observent le même effet et en entreprennent une étude systématique, à Paris tout d'abord, puis à l'Observatoire du Pic du Midi (2900 m) et à la station scientifique du Jungfraujoch (3500 m), en Suisse.



Le physicien Pierre Auger (1899-1993), considéré comme le père de la découverte des gerbes de particules © DR



L'Observatoire du Pic du Midi en 1937. © DR

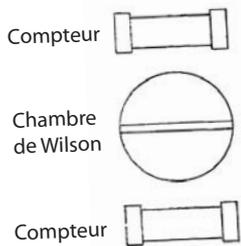


Page de gauche © Emmanuelle Martinez  
Page de droite © Simpson et al., 1953b



Vue de la station de la Jungfraujoch. © Kyocera Fineceramics GmbH

Pierre Auger constate que le nombre de rayons cosmiques détectés diminue avec l'écartement des détecteurs. Mais ce nombre reste trop élevé pour que ces coïncidences soient dues au hasard !



A la Jungfraujoch, Pierre Auger ajoute une chambre de Wilson déclenchée par le signal simultané de trois compteurs distants de plusieurs mètres et observe sur la plupart des 210 clichés pris dans ces conditions la présence de traces verticales, parfois en très grand nombre.

Chambre de Wilson commandée par deux compteurs Geiger en coïncidence © DR

## Carte Postale

Correspondance

Adresse

Ces résultats conduisent l'équipe de Pierre Auger à émettre l'hypothèse que les particules qui nous arrivent sous forme de gerbes sont des particules «secondaires» chargées produites par l'interaction d'une particule énergétique «primaire» avec la haute atmosphère. L'énergie des particules cosmiques primaires pourrait dépasser le million de GeV. Une énergie colossale, que même les plus puissants accélérateurs de particules du XXI<sup>e</sup> siècle comme le LHC sont incapables d'atteindre !

UNE SEULE PARTICULE COSMIQUE QUI INTERAGIT AVEC L'ATMOSPHERE GENERE UNE CASCADE D'AUTRES PARTICULES ! CES VERITABLES PLUIES FURENT BAPTISEES LES "GRANDES GERBES DE L'AIR".

# De nouvelles particules



VERS LA FIN DES ANNEES 1930, LES PHYSICIENS DEVELOPPENT DE NOUVEAUX DETECTEURS, POUR ETUDIER LES RAYONS COSMIQUES. DURANT DEUX DECENNIES, LES DECOUVERTES SE SUCCEDENT...

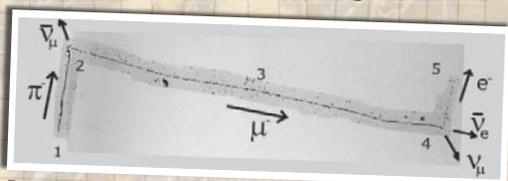
## L'avènement de la photographie

En 1937, une nouvelle technique basée sur l'utilisation de plaques photographiques fait son apparition : lorsqu'une particule chargée traverse une émulsion photographique, elle produit une réaction chimique similaire à celle causée par la lumière. Une fois la plaque développée, la trajectoire de la particule est bien visible sous forme d'une ligne de petits points argentés.



Cecil Powell (à droite) et Giuseppe Occhialini © SPL/Phanie

Cecil Powell, physicien anglais, améliore les émulsions pour les rendre plus sensibles : en quelques années, leurs performances dépassent celles d'une chambre à brouillard. L'utilisation de ces émulsions conduit, en 1947, à la découverte d'une nouvelle particule, le « pion », dans les interactions de rayons cosmiques. Dans l'illustration ci-dessous, chaque ligne représente la trajectoire d'une particule, tandis que les coudes correspondent à des désintégrations.



Emulsion montrant une chaîne de désintégration mettant en jeu le pion et le muon © DR

Dans les années 1950, l'émulsion photographique devient la méthode la plus répandue pour détecter les rayons cosmiques. Ici un bain à émulsions au laboratoire de Zeuthen en Allemagne.

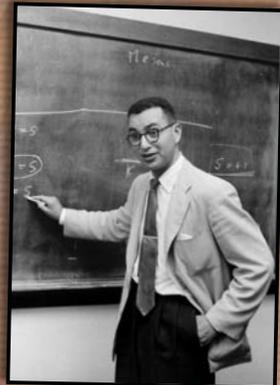


© DESY Zeuthen



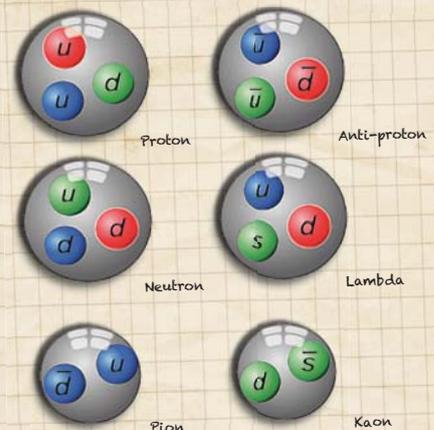
Traces de pions © DR

En présence d'un champ magnétique, les pions spiralent dans un sens ou dans l'autre, selon le signe de leur charge électrique.



Portrait du physicien américain Murray Gell-Mann © SPL/Phanie

D'autres nouvelles particules sont également observées ; on les nomme «étranges» car leurs caractéristiques surprennent ! Il en est ainsi du «kaon» découvert en 1947. Toute une zoologie de nouvelles particules émerge au fil des années. Dans les années 1960, le besoin d'une classification s'impose, ce qui conduira Murray Gell-Mann et George Zweig à élaborer le modèle des quarks, les constituants élémentaires de tous les hadrons : protons, neutrons, pions, etc.



© Bruno Mazoyer IAL

La famille des hadrons regroupe toutes les particules formées de 3 quarks (baryons) ou d'une paire de quark-antiquark (mésons). Par exemple, le proton contient deux quarks «u» et un quark «d», tandis que le kaon neutre est constitué d'un quark «d» et d'un antiquark «s», responsable de ses propriétés «étranges», «strange» en anglais.



EN EUROPE ET AUX AMERIQUES, LA RECHERCHE SUR LES RAYONS COSMIQUES A POUR CADRE LA HAUTE MONTAGNE. EN FRANCE, LE PIC DU MIDI ET L'AIGUILLE DU MIDI COMPTENT PARMIS LES PLUS MYTHIQUES...



Les rayons cosmiques ont 100 ans !



# Cosmic Rays Trapped in MOUNTAIN-TOP LABORATORY



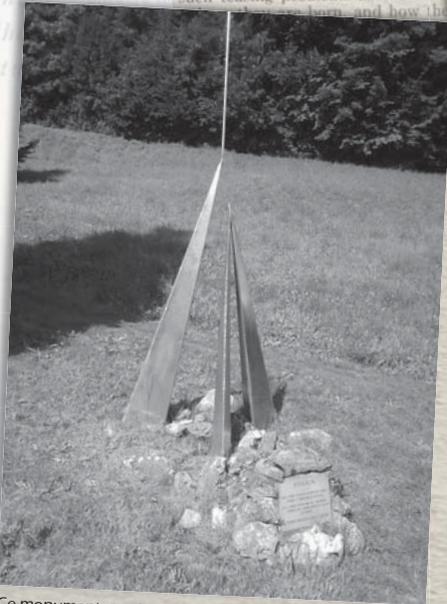
ON A lonely 14,000-foot mountain peak, fifty miles west of Denver, Colo., two scientists have just moved into the only house of its kind on earth. Shaped like a wedge tent and completely sheathed with copper, it stands among bare, wind-bitten bowlders, far above the timber line. It is the world's first permanent cosmic-ray laboratory.



Photos gauche et ci-dessus : Louis Leprince-Ringuet et ses collègues à la «cabane des cosmiques».

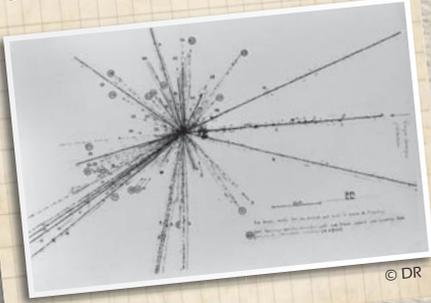
## Les refuges de la science

Dans les Pyrénées, une installation dédiée aux rayons cosmiques a vu le jour au Pic du Midi dès 1949. Elle accueille des «cosmiciciens» fameux tels que Giuseppe Occhialini, Jean Daudin et Patrick Blackett. Les travaux menés par cette équipe conduisent à la découverte de la particule «hypéron». En 1953, le Congrès International sur le Rayonnement Cosmique se tient à Bagnères-de-Bigorre, seule ville de France pouvant se targuer d'avoir un «boulevard de l'hypéron» ainsi qu'un monument commémoratif de la découverte de cette particule étrange.



Ce monument représente les traces qui ont conduit à la découverte de l'hypéron. © François Montanet

Juchée à 3613 m d'altitude dans le massif du Mont Blanc sur des rochers surplombant le col du Midi, la «cabane des cosmiques» est un laboratoire créé par le CNRS pendant l'occupation. Placé sous l'égide du professeur Louis Leprince-Ringuet, il est destiné à l'étude des rayons cosmiques. Inauguré en 1946, il fonctionne pendant dix ans.



© DR

CEPENDANT, UNE PAGE SE TOURNE : LES ACCELERATEURS DESTINES A CREER DES PARTICULES OUVRENT UNE NOUVELLE ERE DE RECHERCHE EN PHYSIQUE NUCLEAIRE, COMME L'ANNONCE CECIL POWELL A SES PAIRS DES 1950 : " MESSIEURS, NOUS AVONS ETE ENVAHIS. LES ACCELERATEURS SONT LA. "

# Des machines à particules

1950

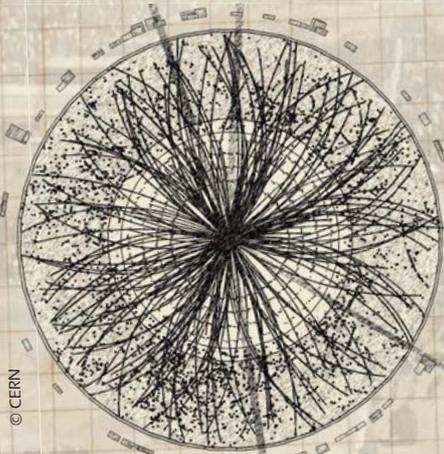


Les rayons cosmiques ont 100 ans !

A PARTIR DES ANNEES 1950, ON NE CHERCHE PLUS LES NOUVELLES PARTICULES AVEC LES RAYONS COSMIQUES, MAIS AVEC DES ACCELERATEURS. AUJOURD'HUI, LES RAYONS COSMIQUES SE REVELENT TRES UTILES POUR CALIBRER LES DETECTEURS.

$$E = mc^2$$

Pour progresser dans leur enquête sur les constituants de la matière, les physiciens ont besoin de sources intenses de particules et construisent des accélérateurs. Ces instruments apportent une énergie considérable à des particules transformées en projectiles, dont on étudie les collisions. Comme lors de l'impact d'un rayon cosmique sur les molécules de l'air, l'énergie libérée se transforme en matière. De nouvelles particules sont ainsi créées suivant le principe d'équivalence énergie (E) - matière (m), résumé par la fameuse équation d'Einstein.

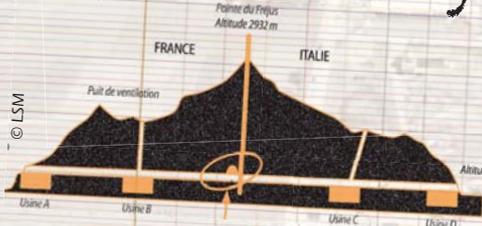


© CERN

Salle de contrôle du synchrocyclotron du CERN, en 1957 © CERN



## Se protéger des rayons cosmiques



La plupart des particules issues de rayons cosmiques et arrivant sur Terre sont des muons énergétiques, produits lors de la désintégration de pions dans l'atmosphère. Ils peuvent gêner certaines mesures de précision. Pour s'en protéger, on utilise un blindage épais. On peut aussi installer des expériences sous une montagne, comme dans le tunnel du Fréjus entre la France et l'Italie, ou même au fond de mines, comme à Sudbury au Canada.

Le «Cosmotron», dans les années 1950, à Brookhaven aux Etats-Unis. Il devait accélérer des protons à des énergies record, comparables à celles des rayons cosmiques. Même de nos jours, les accélérateurs n'atteignent pas les énergies extrêmes des rayons cosmiques. Cependant, ils constituent une source bien plus intense et fiable de particules énergétiques. C'est devenu l'outil quotidien des physiciens dans leur quête de nouvelles particules. © BNL



L'EUROPE VOIT NAITRE LE CERN A GENEVE, OU LE PREMIER ACCELERATEUR EST MIS EN SERVICE EN 1957. AUJOURD'HUI, LES PLUS GRANDES EXPERIENCES DE PHYSIQUE DES PARTICULES AU LHC Y OBSERVENT LES TRACES DE MUONS COSMIQUES QUI TRAVERSENT LES DETECTEURS... POUR VERIFIER L'ALIGNEMENT ET LES PERFORMANCES DES INSTRUMENTS.



Trace de muon cosmique dans le détecteur CMS. © CERN

POUR ETUDIER LES PROPRIETES DES RAYONS COSMIQUES PRIMAIRES, IL FAUT MONTER AU-DELA DES SOMMETS.

### En ballon...



Ballon Explorer 2 de Stevens et Anderson, 1935  
© Smithsonian National Air and Space Museum

Durant les années 1930, les physiciens embarquent avec leurs détecteurs en ballon et parviennent à l'altitude record de 22 km dans des cabines pressurisées. Ensuite, les vols habités sont remplacés par des ballons sondes, qui permettent de réaliser des vols de longue durée à très haute altitude.



Le 18 août 1932, Auguste Piccard et Max Cosyns atteignent l'altitude de 16201 m © Archives Piccard Family

### En orbite...

A partir des années 1960, les programmes spatiaux ouvrent de nouveaux horizons avec des mesures de longue durée par satellite. AMS-02, à bord de la station spatiale internationale depuis 2011, observe le flux et la nature des rayons cosmiques d'énergie variant entre le GeV et quelques centaines de GeV avec une précision sans précédent.

Les rayons cosmiques sont constitués à environ 89% de protons, 10% de noyaux d'hélium et 1% d'électrons. La petite fraction restante est constituée de noyaux plus lourds.



© NASA

Du ciel  
à  
l'espace



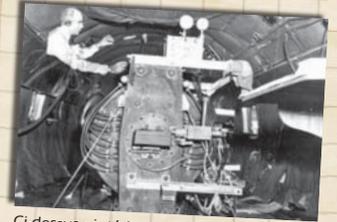
Les rayons cosmiques ont 100 ans !

### En avion...

Après la seconde guerre mondiale, Carl Anderson enregistre des clichés de rayons cosmiques à une altitude d'environ 10 km, grâce à une chambre à brouillard installée dans la soute d'un bombardier B29 spécialement équipé pour l'occasion...



© US Air Force



Ci-dessus : intérieur d'un B29 équipé d'une chambre à brouillard pour la recherche en haute altitude sur les rayons cosmiques  
© California Institute of Technology

De 1979 à 1995, ECHOS, l'expérience franco-japonaise, enregistre jusqu'à des altitudes de 17 km le passage de particules cosmiques d'énergies exceptionnellement élevées grâce à des chambres à émulsion transportées dans les soutes du Concorde !



© DR



© NASA

Atteindre l'espace a également permis d'étudier les rayons gamma. Ces photons de haute énergie, plus d'un million de fois celle de la lumière visible, ne peuvent s'observer directement depuis le sol car l'atmosphère leur est opaque. Les photons étant des particules neutres, ils voyagent en ligne droite jusqu'à la Terre, apportant ainsi des informations sur leur source. Le satellite *Fermi*, bien plus performant que les instruments qui l'ont précédé, cartographie depuis 2008 le rayonnement gamma dans l'Univers.

LES RAYONS COSMIQUES LES PLUS ENERGÉTIQUES SONT RARES ET LEURS GERBES ATMOSPHERIQUES TRÈS ÉTENDUES. POUR LES ÉTUDIER, ON INSTALLE DES DÉTECTEURS SUR DES SURFACES DE PLUS EN PLUS GRANDES.

Le flux des particules cosmiques décroît rapidement avec l'énergie. Il n'est que de quelques particules par km<sup>2</sup> et par siècle pour les plus extrêmes, dont l'énergie, concentrée en une seule particule, est comparable à celle d'une balle de tennis frappée à 200 km/h. Pour les observer, de vastes surfaces au sol sont équipées de systèmes de détection mesurant les gerbes de particules secondaires produites lors de leur interaction avec l'atmosphère.



© Nelly Lemar, ScrivaCom

## Des observatoires gigantesques



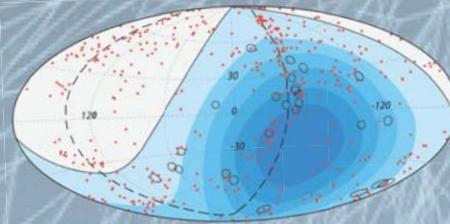
Les rayons cosmiques ont 100 ans !



Observatoire Pierre Auger. Sur la colline : un des bâtiments abritant 6 des 27 télescopes de fluorescence. Au premier plan, un des 1660 détecteurs de particules © Pierre Auger Observatory

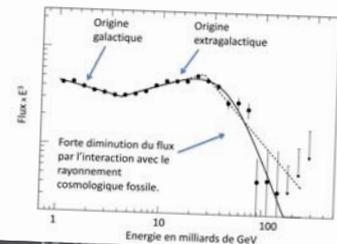
Pierre Auger, le plus grand observatoire de rayons cosmiques au monde, couvre 3000 km<sup>2</sup> dans la Pampa Argentine. Des détecteurs enregistrent une partie des particules de la gerbe à leur arrivée au sol et mesurent leurs caractéristiques, tandis que des télescopes captent la faible lumière de fluorescence émise par l'air lors du passage de la gerbe.

Déterminer précisément le flux de particules cosmiques d'énergie extrême est une des réussites de l'Observatoire Pierre Auger.



© Pierre Auger Collaboration

Les informations reçues permettent de déterminer l'énergie du cosmique primaire et sa direction d'origine. Les particules faiblement chargées d'énergie extrême étant peu déviées par les champs magnétiques, les physiciens cherchent une correspondance entre leur direction d'arrivée (ronds noirs) et la position des accélérateurs cosmiques supposés (points rouges).



Spectre en énergie des rayons cosmiques d'énergie extrême et interprétation possible des variations observées © Observatoire Pierre Auger



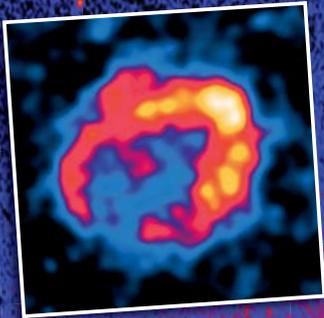
© NASA, Chandra X-ray observatory

Des sources extragalactiques, telles que la galaxie à noyau actif Centaurus A, pourraient être à l'origine de ces particules d'énergie phénoménale.

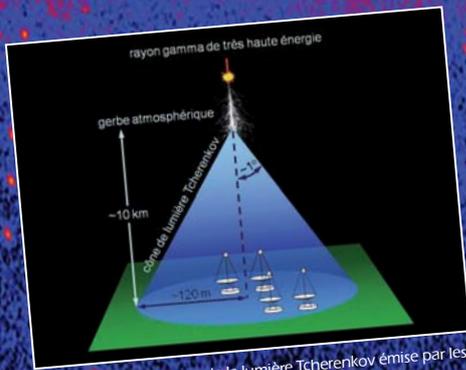
## LE RAYONNEMENT GAMMA NOUS APPORTE AUSSI DES INFORMATIONS INDISPENSABLES A LA COMPREHENSION DE L'UNIVERS....

Le satellite Fermi cartographie le ciel en rayonnement gamma dans un domaine en énergie de 0,02 à 300 GeV. Sur ce cliché du ciel, les régions en rouge orangé marquent les zones d'émission les plus intenses. On y distingue deux sources de rayonnement :

- une émission diffuse, résultant des interactions des particules accélérées avec la matière interstellaire, particulièrement dense le long du plan de la Galaxie,
- des signaux localisés correspondant à des sources ponctuelles telles que des restes de supernovae ou des pulsars.



Ce cliché du vestige de supernova RX J1713 a été pris par le télescope HESS. Il montre un rayonnement gamma d'énergie comprise entre 800 et 10000 GeV issu d'une région en forme de coquille. Il démontre sans ambiguïté que l'onde de choc de ce reste de supernova est un puissant accélérateur cosmique © HESS Collaboration



Principe de la détection de la lumière Tcherenkov émise par les gerbes © HESS Collaboration

On étudie le rayonnement gamma d'énergie supérieure à la centaine de GeV à partir de détecteurs au sol. En traversant l'atmosphère, ce rayonnement donne naissance à des gerbes composées de centaines d'électrons et positrons. En se propageant dans l'air, ces gerbes produisent par effet Tcherenkov un bref flash de lumière bleutée. Les télescopes de l'expérience HESS, installée en Namibie, captent cette lumière et permettent de reconstruire l'énergie et la direction du rayonnement gamma initial.



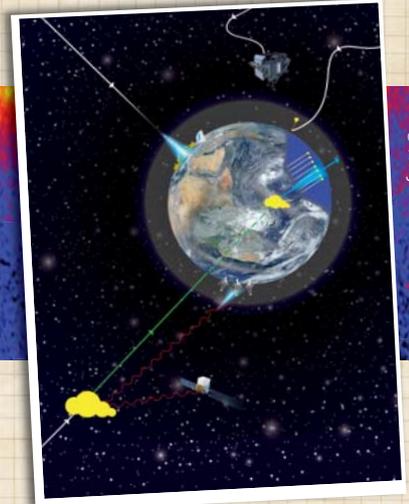
Les cinq télescopes de l'expérience HESS en Namibie © HESS Collaboration

## Une nouvelle image de L'Univers



Les rayons cosmiques ont 100 ans !

Les rayons cosmiques chargés, exception faite des plus énergétiques, sont déviés par les champs magnétiques interstellaires, et perdent la mémoire de leur origine. Il n'est donc pas possible de remonter à leur source... contrairement aux rayons gamma, qui eux voyagent en ligne droite ! Même si leur flux est inférieur de plusieurs ordres de grandeur à celui des particules chargées, ces rayons gamma nous apportent de précieuses informations sur les sources du rayonnement cosmique.



© Nelly Lemarié - ScriwaCom

Seules les particules chargées peuvent être accélérées. Les rayonnements gamma d'énergie supérieure à environ 0,1 GeV sont issus de la désintégration en deux photons de pions neutres produits dans les collisions de rayons cosmiques chargés avec la matière interstellaire. Une autre source, hypothétique, pourrait être la désintégration de particules extraordinairement massives encore inconnues (matière noire).

LES AURORES POLAIRES SONT UN EFFET SPECTACULAIRE DES RAYONS COSMIQUES. MAIS IL Y EN A D'AUTRES, PLUS DISCRETS...

Et nous dans tout ça ?



Les rayons cosmiques ont 100 ans !

## Clash cosmiques !

Le Soleil émet en continu des jets de protons et d'électrons, particulièrement intenses lors des éruptions. Près des pôles, le champ magnétique terrestre laisse les rayons cosmiques pénétrer plus profondément dans l'atmosphère, provoquant ainsi des aurores polaires. Ces flux peuvent aussi perturber les moyens de télécommunications spatiaux et même les réseaux électriques, comme lors de la grande panne de 1989 au Canada.

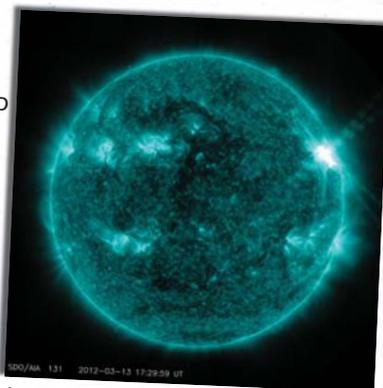


Image vue en rayons-X montrant l'activité intense du Soleil © NASA

## Effets sur le vivant

Tout rayonnement ionisant peut interagir avec les cellules vivantes et produire par exemple des mutations ADN. Heureusement, le champ magnétique terrestre et l'atmosphère filtrent la plupart des rayons cosmiques !

Dans l'espace, les astronautes sont exposés aux rayons cosmiques. Les protéger lors d'un long voyage est l'un des défis majeurs à relever pour conquérir la planète Mars.



Bison de la grotte d'Altamira (Espagne) daté de -15000 ans par le carbone 14 © DR

### Dater

Les rayons cosmiques produisent le carbone 14 ( $^{14}\text{C}$ ), un isotope radioactif du carbone, qui se désintègre avec une demi-vie de 5700 ans. Le gaz carbonique de l'atmosphère contient 1 atome de  $^{14}\text{C}$  sur 1000 milliards d'atomes de carbone, et les êtres vivants assimilent ce gaz. Mais après leur mort, ils ne l'assimilent plus. Le pourcentage de  $^{14}\text{C}$  est alors divisé par 2 tous les 5700 ans. La mesure de ce pourcentage sur des vestiges organiques permet donc de les dater jusqu'à -40000 ans environ !

## Neutrons cosmiques

Les barrages sont alimentés par la fonte des neiges. Des neutrons sont présents dans les gerbes des rayons cosmiques. Or, plus il y a de neige, plus les neutrons sont absorbés ! En comparant la différence entre le flux de neutrons mesuré en-dessus et en-dessous de la neige, on en déduit l'épaisseur de la couche à quelques pourcents près ! Grâce à des modèles informatiques, cela permet d'évaluer les réserves de neige sur l'ensemble des massifs français.

LES RAYONS COSMIQUES VOUS TRAVERSENT PAR MILLIERS DEPUIS QUE VOUS REGARDEZ CETTE EXPOSITION. LEURS EFFETS SONT SI SUBTILS QUE VOUS NE VOUS EN ETES MEME PAS APERCU !

## L'enquête

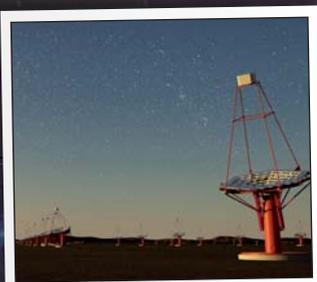
continue



Les rayons cosmiques ont 100 ans !

MALGRE DES PROGRES CONSIDERABLES, DES MYSTERES SUBSISTENT: ORIGINE DES RAYONS COSMIQUES TRES ENERGETIQUES, MECANISMES D'ACCELERATION... LES PHYSIENS TRAVAILLENT DONC A DE FUTURS PROJETS INNOVANTS ET... TOUJOURS PLUS GRANDS !

Le réseau de télescopes CTA observera les rayons gamma de très haute énergie via la lumière Cherenkov émise par la gerbe issue de leur interaction avec l'atmosphère. Il sera environ dix fois plus sensible que l'expérience actuelle HESS et efficace sur une gamme d'énergie bien plus vaste. Il aura ainsi accès à des sources plus nombreuses et étudiera en particulier la mystérieuse matière noire de l'Univers dont on ne sait rien aujourd'hui.



Vue d'artiste du projet CTA (Cherenkov Telescope Array) © G. Pérez, IAC (SMM)

## Vers de nouvelles techniques !

Les gerbes contiennent des milliards de particules qui émettent aussi des ondes radio détectables par des réseaux d'antennes. Ces ondes offrent une technique complémentaire pour caractériser les rayons cosmiques à l'origine des gerbes. Comme les futurs observatoires couvriront des milliers de kilomètres carrés, la robustesse des antennes et leur faible coût sont des atouts majeurs de cette technique développée entre autres à l'observatoire Pierre Auger.



© Pierre Auger collaboration



© JEM-EUSO collaboration

Et pourquoi ne pas observer les grandes gerbes depuis l'espace ? C'est l'idée du projet JEM-EUSO, un télescope embarqué sur la Station Spatiale Internationale qui observera « par en-dessus » la lumière produite par les gerbes les plus énergétiques.

D'autres signaux seront exploités pour obtenir des informations nouvelles sur l'Univers, par exemple les presque insaisissables neutrinos produits en quantités « astronomiques » dans le cosmos. Les ondes gravitationnelles, émises lors d'événements cataclysmiques pourraient également nous renseigner sur l'explosion de supernovae ou la naissance de trous noirs. La première détection d'ondes gravitationnelles est très attendue par les physiciens !



Vue aérienne de l'antenne Virgo de détection des ondes gravitationnelles © EGO-VIRGO Virgo

# LE MYSTERE DES RAYONS COSMIQUES

## Conception et réalisation :

- . Françoise Amat (LUPM Montpellier)
- . Nicolas Arnaud (LAL Orsay)
- . Corinne Bérat (LPSC Grenoble)
- . Armand Fiasson (LAPP Annecy)
- . Jean-Pierre Lees (LAPP Annecy)
- . Arnaud Marsollier (CNRS/IN2P3/CERN)
- . Gilles Maurin (LAPP Annecy)
- . Jean-Luc Robert (APC Paris)
- . Catherine Thibault (CSNSM Orsay)

## Coordination :

- . Françoise Amat (LUPM Montpellier)
- . Arnaud Marsollier (CNRS/IN2P3/CERN)

## Conception graphique :

- . Arnaud Marsollier (CNRS/IN2P3/CERN)
- . Christophe Mercier (LUPM Montpellier)

## Remerciements pour leur aide précieuse :

Christina Cantrel (CNRS/IN2P3), Gabriel Chardin (CNRS/IN2P3), Daniel Decamp (LAPP Annecy), Fabrice Feinstein (LUPM Montpellier), Christine Hadrossek (CSNSM Orsay), Clarisse Hamadache (CSNSM Orsay) Bernard Pellequer (CERN), Brigitte Perucca (CNRS)

Une exposition réalisée par l'IN2P3, l'Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules du CNRS, à l'occasion du centenaire de la découverte des rayons cosmiques.



Les rayons cosmiques ont 100 ans !