



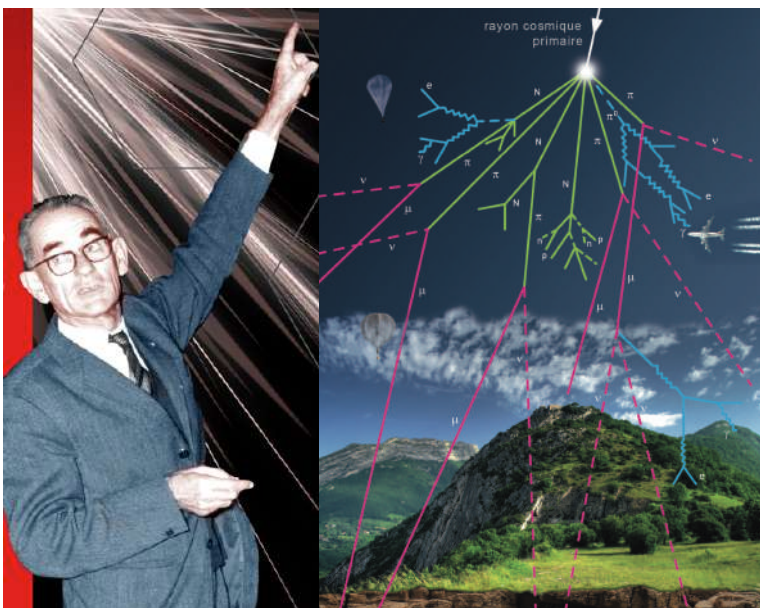
Célébration au LLR le 19 mai 2021
des cinquante ans de l'IN2P3

**Des particules cosmiques à l'astronomie des particules
ou l'épopée du rayonnement cosmique**



Interview de Gérard Fontaine :

- L'étude des rayons cosmiques a joué un rôle essentiel dans l'émergence de la physique des particules, quelles ont été les grandes étapes et le rôle de Louis Leprince-Ringuet ?



C'est une aventure humaine qui a commencé, plus de 50 ans avant l'IN2P3, par un bruit de fond perturbant les expériences sur la radioactivité découverte par Becquerel.

L'origine extraterrestre de cette perturbation a été démontrée par Victor Hess en 1912 avec des électroscopes en vol ballon à 4500 m d'altitude. Pour ce résultat, il a obtenu le prix Nobel en 1936.

La nature de ce phénomène (s'agissait-il de particules ou de rayonnement électromagnétique ?) a longtemps fait débat.

Leprince-Ringuet et Auger apportent en 1933 (simultanément avec Rossi) une réponse décisive en faveur des particules. Profitant de l'expérience en électronique acquise par Leprince dans le corps des PTT avec les câbles sous-marins, ils ont utilisé des compteurs Geiger-Müller en coïncidence, embarqués sur un paquebot entre Le Havre et Buenos-Aires, et cette instrumentation innovante a montré une dépendance en latitude ainsi qu'une asymétrie Est-Ouest prouvant que les particules étaient chargées, donc sensibles au champ magnétique terrestre, et en majorité positives. Cependant le mot « rayonnement » est resté en usage...

Il devenait alors possible d'étudier les interactions à des énergies non disponibles en laboratoire en utilisant les cascades de particules (les grandes gerbes découvertes par Auger) produites dans l'atmosphère par l'interaction des rayons cosmiques primaires avec les noyaux du gaz.

L'observation des particules ainsi produites a conduit à des découvertes majeures telles que :

- le positon (première antiparticule) par Carl Anderson en 1932, également récompensé par le prix Nobel 1936 ;
- le muon, découvert par le même Anderson en 1936 ;
- le pion, par Cecil Powell en 1947, à 5500 m d'altitude dans les Andes.

Très rapidement, au labo de Maurice de Broglie, Leprince-Ringuet construit une première chambre de Wilson et la place dans le grand électro-aimant de l'Académie des Sciences construit par Aimé Cotton au laboratoire de Bellevue.



Inauguré en 1928 et d'une masse de 120 tonnes, cet électro-aimant est à l'époque le plus puissant du monde et préfigure les grands équipements nationaux du futur CNRS.

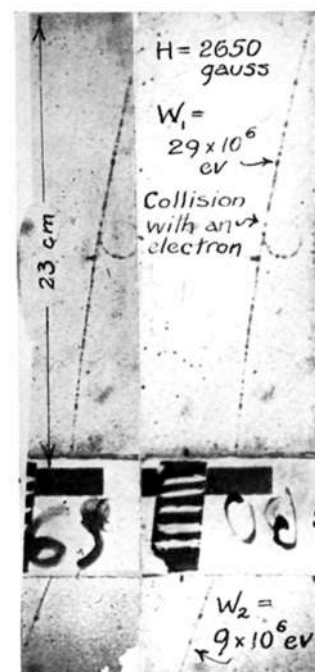


FIG. 2. Stereoscopic cloud-chamber photograph of a cosmic-ray mesotron of mass $M_0 = (240 \pm 20) m_e$. The measurement of the mass was obtained from the elastic collisions with an electron of the gas in the chamber.

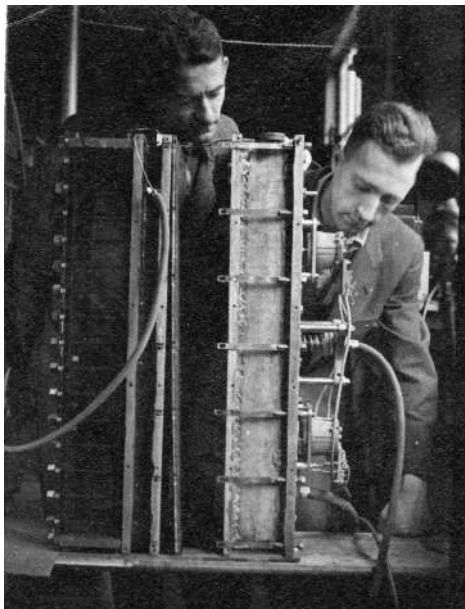
Mesure directe de la masse du muon, obtenue en 1939 par la diffusion élastique sur un électron du gaz de la chambre de Wilson.

Puis en 1936, Leprince crée le premier labo de recherche de l'Ecole polytechnique et y transfère ses études sur le rayonnement cosmique.

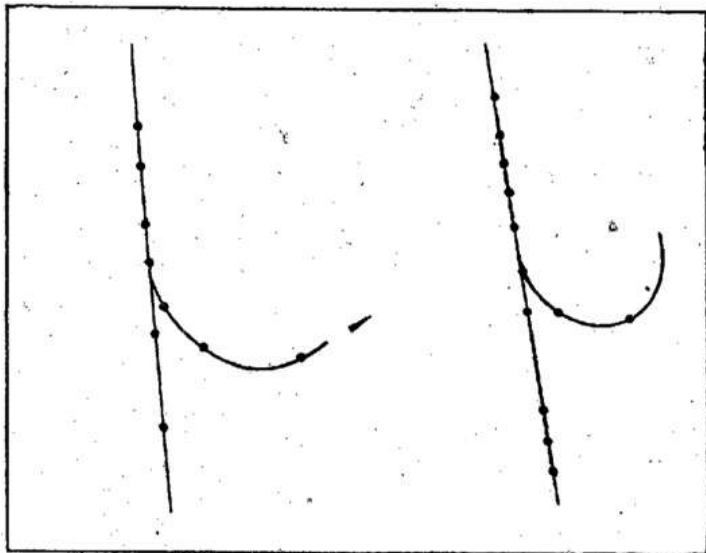
En 1939 : il obtient à Bellevue la première mesure directe de la masse du muon (ou méson μ) lors de sa collision élastique avec un électron du gaz.

Pendant la guerre, le labo s'installe à L'Argentière-La-Bessée dans les Hautes-Alpes. Leprince y utilise une chambre de Wilson plus grande dans un nouvel électro-aimant alimenté par l'usine hydro-électrique toute proche, et il y découvre en 1943 la première trace d'un méson plus lourd que le muon et plus léger que le proton.

Ce nouveau méson était le **premier membre d'une nouvelle famille de particules** ultérieurement appelées « étranges ». Cette découverte majeure fut publiée en 1944 mais contestée par Bethe jusqu'en 1948.



La chambre de Wilson du laboratoire de L'Argentière-la-Bessée (Hautes Alpes)



Dessin stéréoscopique de la collision.

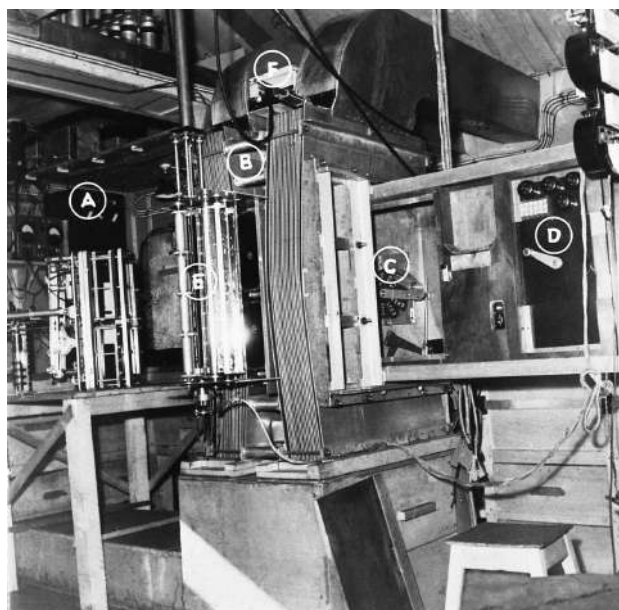
Mesure directe de la masse du K^+ , obtenue en 1943 par la diffusion élastique sur un électron du gaz de la chambre de Wilson.

Malgré le soutien apporté par Oppenheimer à l'observation de Leprince, le crédit de la découverte du K^+ fut finalement attribué à Rochester et Butler pour leur observation de 1947.

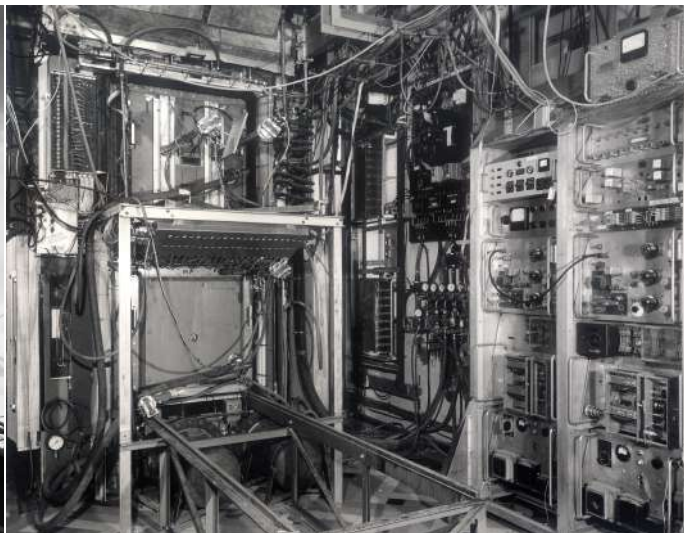
En parallèle, Leprince lance dès 1941 la construction d'un laboratoire pour l'étude des cosmiques à 3600 m d'altitude près de l'Aiguille du Midi à Chamonix. Les conditions d'accès sont acrobatiques, mais après son achèvement en 1946 des mesures ont pu y être effectuées avec une chambre de Wilson ainsi qu'avec des émulsions, et elles ont notamment complété l'étude du kaon commencée à l'Argentière.



Le laboratoire des cosmiques au col du Midi et sa chambre de Wilson à 3600 m alt.



A partir de 1949, l'étude de ces particules cosmiques « étranges » va être au centre des activités du laboratoire qui s'est largement renforcé autour de Ch. Peyrou, B.P. Grégory, et A. Lagarrigue. Les équipes investissent le Pic du Midi de Bigorre à 2900 m d'altitude dans les Pyrénées, moins haut mais plus facile d'accès et qui offre un espace plus vaste pour l'expérimentation.



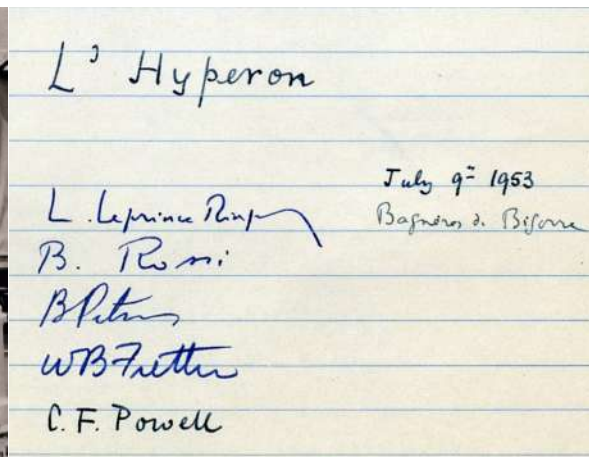
La double chambre de Wilson au Pic du Midi de Bigorre.

Deux grandes chambres de Wilson superposées y sont construites, celle du dessus permettant de mesurer les trajectoires et les impulsions des particules (grâce à un champ magnétique) et celle du dessous (munie d'écrans absorbeurs) aidant à leur identification et à l'estimation de leur énergie, une structure préfigurant celle des détecteurs actuels. Bien des découvertes y furent effectuées de 1953 à 1956, en particulier celle de la désintégration du K en muon et neutrino.

- Comment et quand s'est passée la transition des particules cosmiques vers les accélérateurs ?

La grande conférence internationale bisannuelle sur le rayonnement cosmique fut en 1953 organisée à Bagnères-de-Bigorre par Blackett et Leprince-Ringuet dans le cadre de l'Union Internationale de Physique.

Elle fut essentiellement consacrée aux propriétés de ces particules « étranges » et à cette occasion Leprince créa le nom « hypéron » pour désigner celles plus lourdes que le proton. Dans Bagnères, un boulevard de l'Hypéron immortalise cet événement !



Ce congrès fut l'apothéose des « cosmiciens ». Il marque la naissance de la physique des particules mais aussi l'amorce d'un changement majeur dû à la concurrence inexorable des accélérateurs :

- 1953, entrée en service du Cosmotron (3 GeV) à Brookhaven,
- 1954, celle du Bevatron (6 GeV) à Berkeley,
- 1955, découverte de l'antiproton auprès du Bevatron.

Simultanément en Europe, le chemin vers la création du CERN est parcouru et la convention est peu à peu ratifiée par les 12 états membres, de 1953 à 1954.

Leprince-Ringuet et Auger ont joué un rôle décisif dans ce processus ainsi qu'au sein du Comité des Directives Scientifiques du CERN.

L'approbation dès 1953 du projet de construction du PS visant une énergie d'au moins 25 GeV grâce à la focalisation forte par gradients alternés, convainc la majorité des cosmiciens de se tourner vers les accélérateurs.

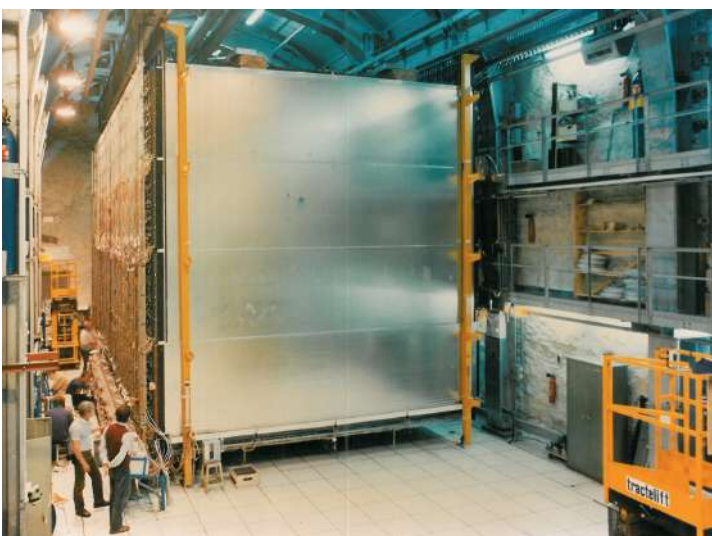
La diaspora du labo Leprince a eu un rôle majeur au CERN dans les années 60 et 70, Grégory devenant directeur général du CERN (1966-1970) et par la suite directeur général du CNRS puis délégué général de la DGRST.

La physique des particules est ainsi née de l'étude du rayonnement cosmique, elle va désormais voler de ses propres ailes tandis que l'étude de ce rayonnement va se mettre en demi-sommeil pendant quelques décennies.

- Qu'est-ce qui a favorisé la ré-émergence de la physique cosmique pour l'astronomie gamma au LLR ?

Cette nouvelle transition s'est passée en plusieurs étapes, toutes après la création de l'IN2P3.

Tout d'abord, à partir de 1983, la recherche de la désintégration du proton a conduit des physiciens du LLR vers la recherche hors accélérateur. André Rousset a joué un rôle décisif dans la création du laboratoire souterrain de Modane pour disposer d'un environnement de très faible radioactivité et protégé du rayonnement cosmique. Mais les muons cosmiques pouvaient quand-même pénétrer les km de roche et ce « bruit de fond » a été étudié de façon approfondie en tant que « signal » par Bernard Degrange qui en a déduit des conséquences astrophysiques.



Utilisation du détecteur recherchant la désintégration du proton pour étudier les gerbes de muons cosmiques de haute énergie

Par ailleurs en 1987 au Collège de France, dans l'ancien labo de Leprince, plusieurs physiciens dont Claude Ghesquière et moi-même, en connexion avec Paul Baillon du CERN et Philippe Goret du CEA, ont perçu que les développements instrumentaux de la physique des particules permettaient d'étudier de façon innovante le rôle des particules dans l'Univers, un domaine nouveau maintenant appelé « Astroparticule ».

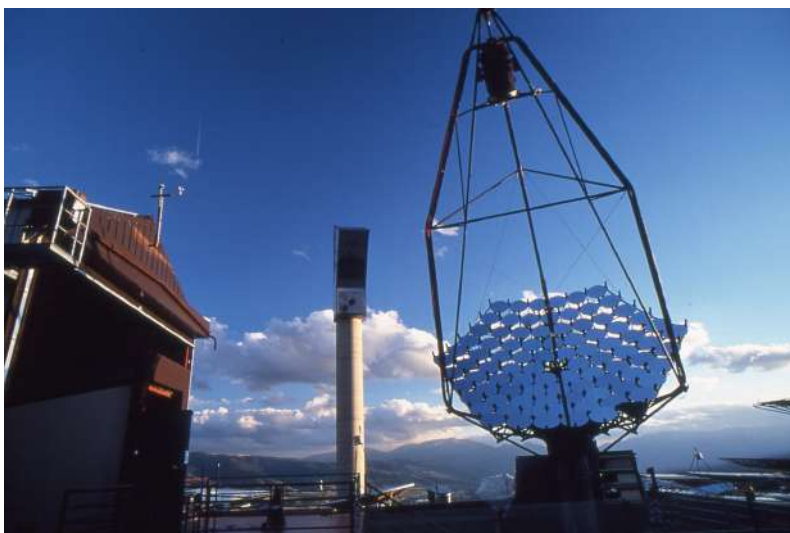


Réutilisation pour l'étude des rayons gamma cosmiques du champ d'héliostats de l'ex centrale solaire Thémis dans les Pyrénées

Ce mouvement a été reconnu par l'IN2P3 qui a créé la fonction de Directeur Adjoint Scientifique « *Astroparticule et Cosmologie* » en 1992.

Au delà de l'astronomie gamma spatiale de basse énergie qui venait de naître, il était désormais possible, depuis le sol, de séparer les photons (minoritaires mais se propageant en ligne droite) des cosmiques chargés (déviés par les champs magnétiques et formant un fond isotrope). Une fois le « brouillard » de ce fond cosmique éliminé, l'astronomie gamma permettait d'obtenir une image claire des phénomènes de haute énergie se produisant dans l'Univers, notamment au voisinage des étoiles à neutrons et des trous noirs.

Avec Patrick Fleury, Bernard Degrange et Eric Paré, le LLR s'est rapidement engagé dans cette voie, en compagnie de Monique Rivoal (LPNHE), David Smith (CENBG) et de chercheurs du PCC et du LAL. Une série d'expériences fut conduite sur le site de l'ancienne centrale solaire Thémis dans les Pyrénées, Mathieu de Naurois vous en parlera dans son exposé.

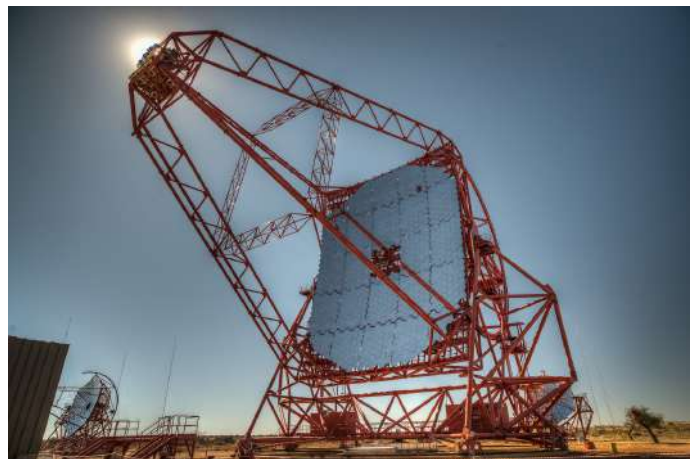
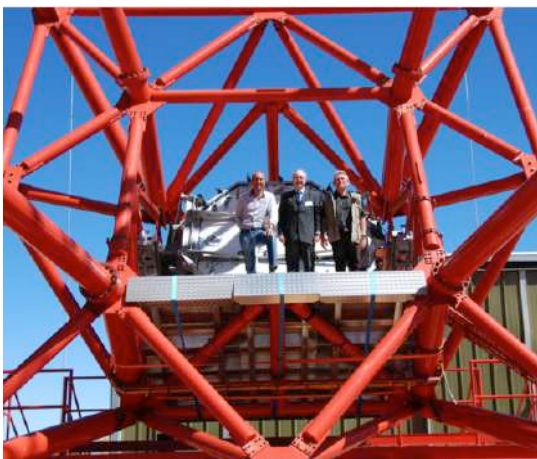


Le télescope Tcherenkov CAT sur le site de Thémis

Au delà des résultats scientifiques obtenus sur les sources gamma de l'Univers, ces expériences pilotes ont montré qu'une électronique performante issue de la physique des particules permettait de faire aussi bien avec un miroir de 16 m² qu'une instrumentation plus traditionnelle avec un miroir bien plus coûteux de 80 m².

Pour favoriser un regroupement des forces, le LLR a été l'initiateur d'une série de rencontres internationales fédératrices qu'il a hébergées à deux reprises en 1992 et 2005.

Le labo a été l'un des moteurs de l'expérience européenne H.E.S.S. installée en Namibie pour une meilleure vision du centre galactique, et combinant les avantages de toutes les installations antérieures : grands miroirs, vision stéréoscopique des gerbes de particules et une électronique rapide et finement pixellisée.



Le réseau H.E.S.S. lors de l'inauguration du 5^{ème} télescope en 2012

Cette expérience a reçu le prix Descartes Recherche 2006 décerné par la Commission Européenne pour avoir, je cite « révolutionné les techniques d'observation astronomique existantes et accru notre connaissance et notre compréhension de la voie lactée et de l'univers ». Elle a été classée en 2009 par la revue Nature dans le « Top 10 » des observatoires mondiaux, puis elle a reçu le prix Rossi 2010 décerné par la Société Américaine d'Astronomie.

En parallèle, le LLR a participé à la conception et la construction du satellite d'astronomie gamma Glast-Fermi lancé par la NASA en 2008, puis à l'analyse de ses données : Près de 5700 sources ont été détectées et ce consortium a également reçu le prix Rossi en 2011.



Le télescope spatial Glast-Fermi (4300 kg – 15 m d'envergure) lancé par la NASA en 2012

Depuis 2006, le LLR s'est engagé dans le grand projet mondial d'astronomie gamma CTA. Et avec ces différents instruments, le labo sera bientôt en mesure d'étudier les phénomènes non thermiques, les plus énergétiques, et les plus violents de l'Univers dans un vaste intervalle d'énergie couvrant 6 ordres de grandeur de 100 MeV à 100 TeV.



Photomontage montrant le ciel vu en rayons gamma par les télescopes Tcherenkov au sol.

Au terme de ce long parcours, j'espère vous avoir montré :

- Comment le rayonnement cosmique chargé, initialement bruit de fond des expériences sur la radioactivité, s'est transformé en un signal riche de découvertes en nouvelles particules, avant de redevenir un bruit de fond pour l'astronomie gamma, elle-même riche d'une nouvelle science,
- Et comment on est passé de **l'utilisation de l'Univers pour étudier les particules** à **l'utilisation des particules pour étudier l'Univers.**

* *
*