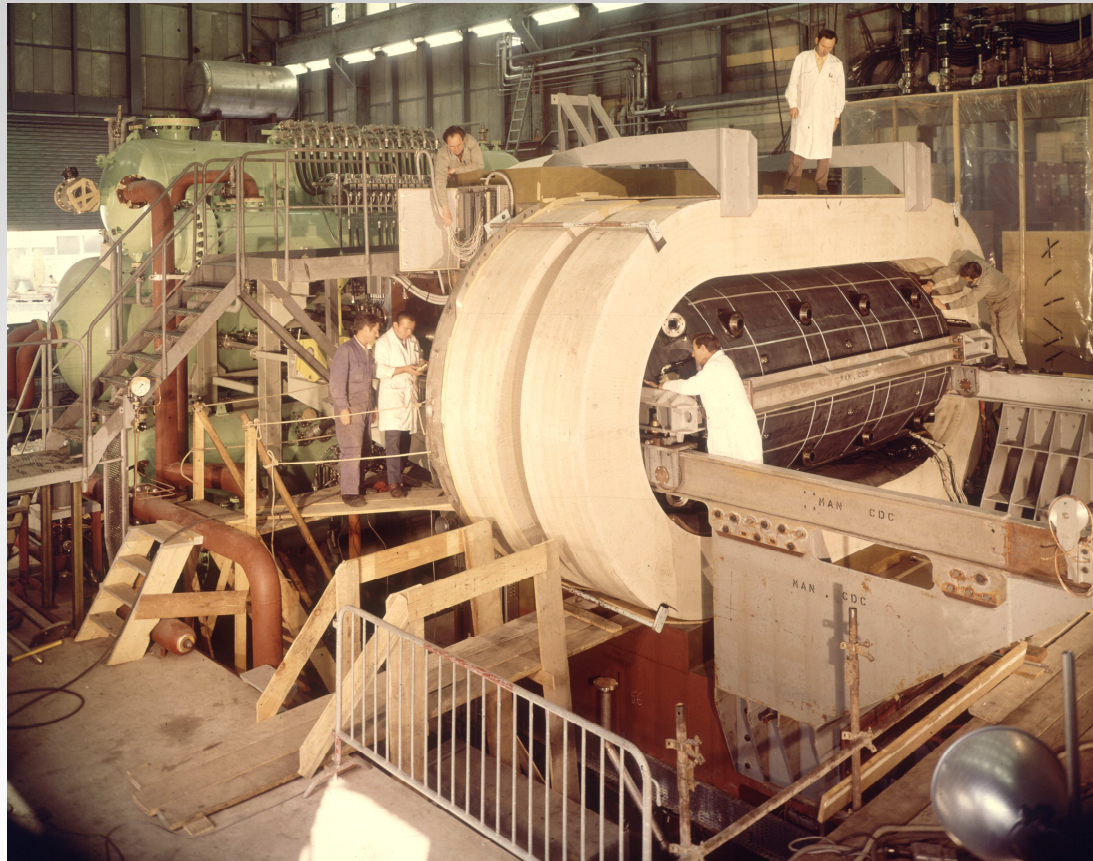


Gargamelle et la découverte des courants neutres



Prix 2009 de la Société Européenne de Physique

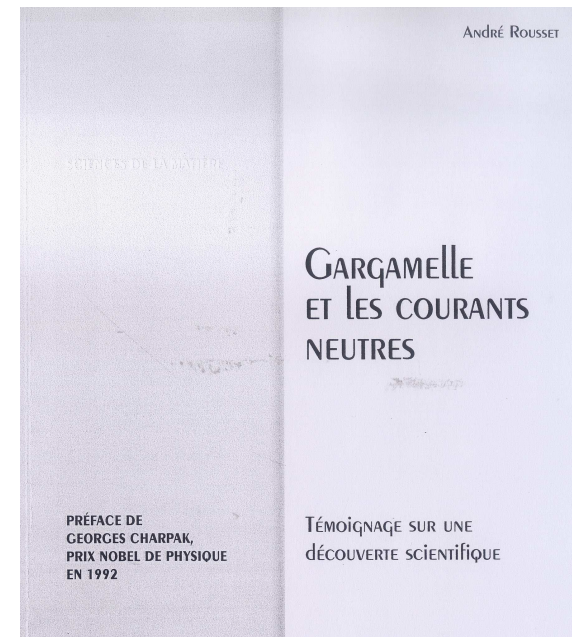
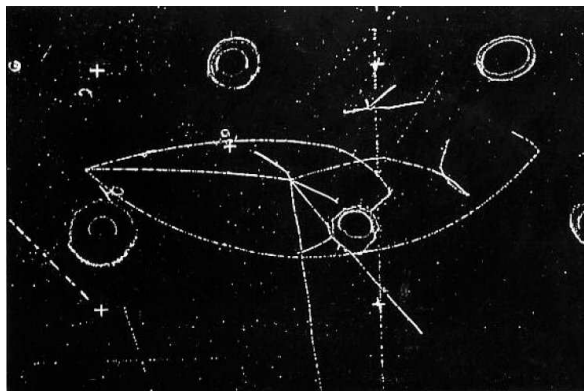
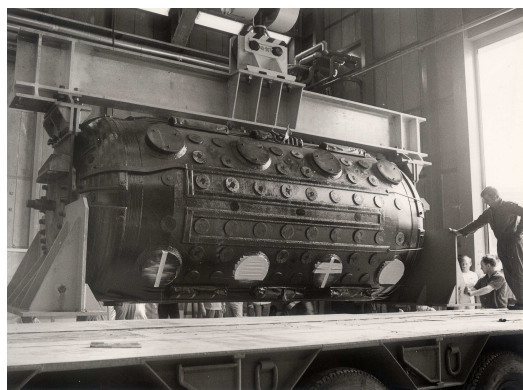
Une aventure scientifique qui a pris naissance au Laboratoire Leprince-Ringuet



En mémoire d'André Lagarrigue, André Rousset et Paul Musset

Gargamelle et la découverte des courants neutres faibles

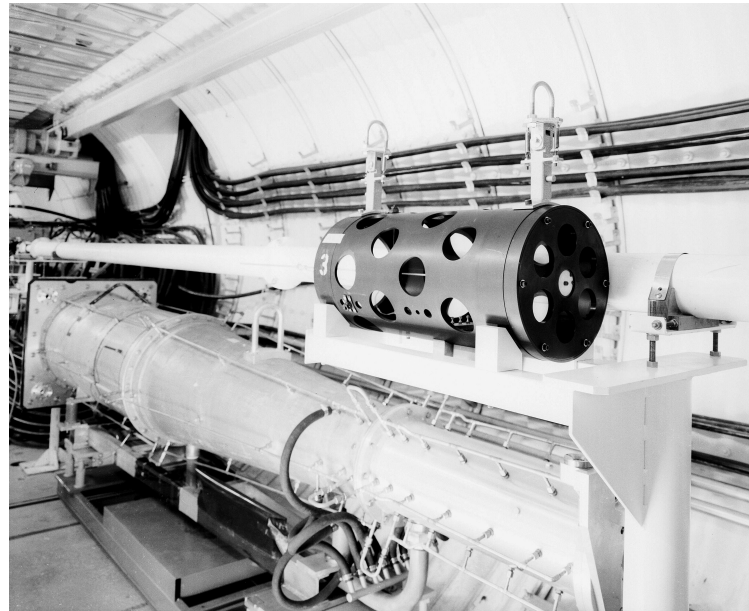
- La physique des particules dans les années 1950-1960
- Conception et construction de Gargamelle
- L'expérience neutrino dans Gargamelle
- L'épisode des courants alternatifs américains
- Conséquences de la découverte des courants neutres
- Épilogue



Cet exposé s'est largement appuyé sur le livre d'André Rousset (1996), Presses Mines-Paris Tech

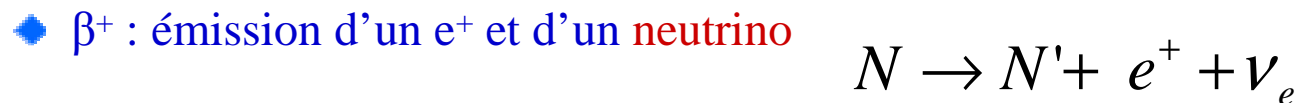
1. La physique des particules dans les années 1950-1960

- L'interaction faible : premières découvertes, premières théories
- Les premiers faisceaux de neutrinos auprès des accélérateurs
- Les chambres à bulles, détecteurs universels

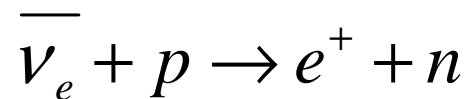


1.a L'interaction faible : premières découvertes

- L'interaction nucléaire faible a été découverte par la radioactivité bêta des noyaux atomiques :

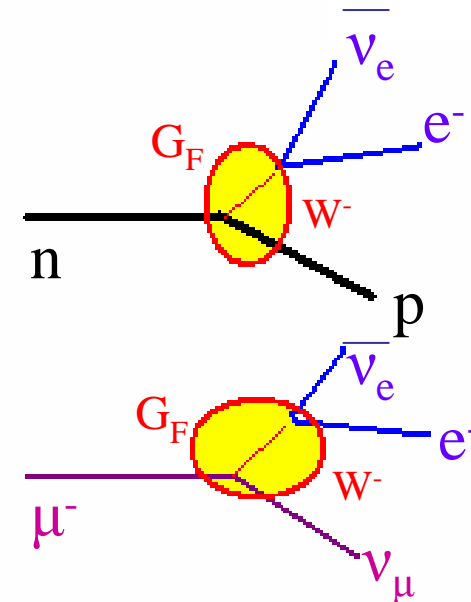
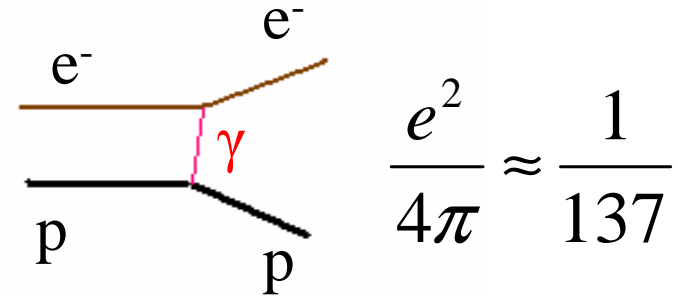


- La présence de neutrinos ou d'antineutrinos dans l'état final a été postulée par W. Pauli en 1932 sur la base des lois de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement ...
- ... mais ces particules, qui n'ont avec la matière que des interactions faibles et peuvent traverser d'énormes épaisseurs de matière sans interagir, n'ont pu être mises en évidence que dans le flux intense sortant d'un réacteur nucléaire (C.L. Cowan et F. Reines, réacteur de Savannah River, 1956) par la réaction inverse aux énergies de l'ordre du MeV :



L'interaction faible : première théorie

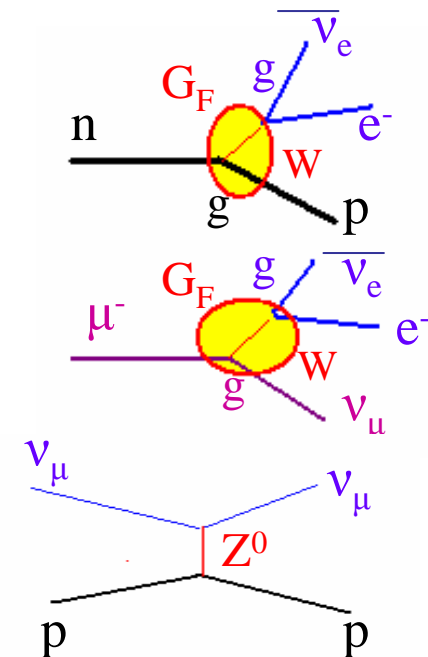
- Le point de comparaison : l'interaction **électromagnétique** dont la théorie quantique avait été élaborée dans les années 1940.
 - ◆ Une constante de couplage e (charge de l'électron)
 - ◆ Une particule médiatrice : le photon γ
 - ◆ Le photon a une masse nulle
 - \rightarrow portée macroscopique de l'interaction
 - \rightarrow théorie « renormalisable » (sans quantité infinie donc non calculable)
 - ◆ L'interaction électromagnétique procède par l'échange d'une particule neutre, le photon = « **par courant neutre** ».
- La théorie de Fermi de l'interaction faible (1934).
 - ◆ Une constante de couplage effective G_F qui est une « boîte noire » recouvrant :
 - La vraie constante de couplage faible g
 - La particule médiatrice inconnue W dont la masse est sûrement non nulle (interaction quasi-punctuelle)
 - ◆ ... mais cette théorie n'est pas renormalisable !
 - ◆ Et le W est chargé électriquement (W^+ ou W^-) \rightarrow « **courants faibles chargés** »



L'interaction faible : vers une théorie renormalisable

- Dans les processus « courants chargés », la constante effective de Fermi G_F est reliée à la « vraie » constante de couplage faible g et à la masse de la particule médiatrice W : $G_F = 1,166 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$
 - ◆ Si $M_W \approx 1 \text{ GeV}$, alors $g \ll e \rightarrow$ l'interaction est « faible » par rapport à l'interaction électromagnétique aux énergies de l'ordre du GeV .
 - ◆ Mais si $M_W \approx 100 \text{ GeV}$, alors $g \approx e \rightarrow$ unification électro-faible envisageable.
- Peut-on envisager des processus faibles avec échange de particule neutre ?
 - ◆ Avant les premiers faisceaux de neutrinos auprès des accélérateurs, l'interaction faible était surtout étudiée dans les désintégrations de noyaux, du muon et des particules étranges \rightarrow aucune trace de tels processus (« courants neutres ») dans les désintégrations de ces dernières : $(K^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) / (K^0 \rightarrow \text{tous modes}) \approx 10^{-8}$ compatible avec un processus électromagnétique du second ordre \rightarrow d'où le dogme des années 1960 : « Il n'y a pas de courant neutre faible ! »
 - ◆ En 1971, G.'t Hooft et M. Veltman proposent une brisure de symétrie du vide qui permet de rendre la théorie renormalisable, même si $M_W \neq 0$, mais cette nouvelle classe de théories prédit, soit des « courants neutres », soit de nouvelles particules.

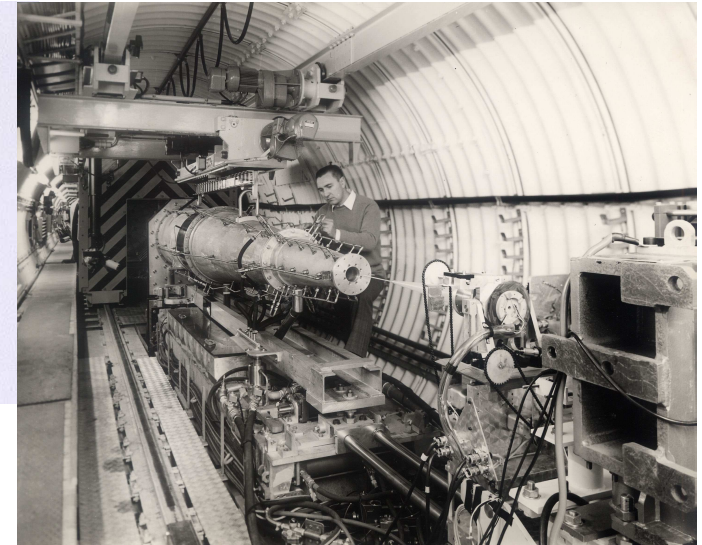
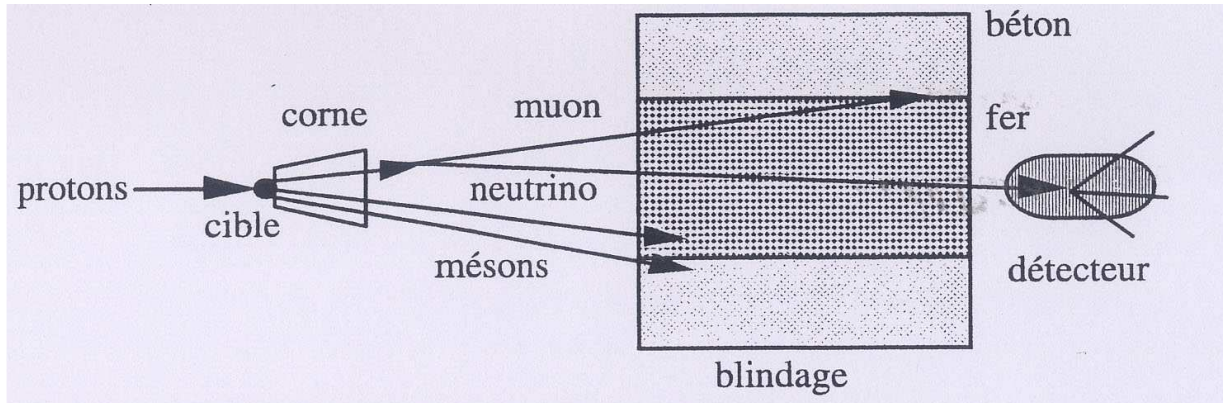
$$G_F = \frac{g^2}{4\sqrt{2}M_W^2}$$



1.b Les premiers faisceaux de neutrinos auprès des accélérateurs

- Avant 1953, les rayons cosmiques étaient la seule source d'interactions au-dessus du GeV. Les premiers grands accélérateurs prennent le relais :
 - ◆ Cosmotron (Brookhaven, 1953) 3,3 GeV
 - ◆ Bevatron (Berkeley, 1954) 6 GeV → découverte de l'antiproton
 - ◆ Saturne (Saclay, 1958) 3 GeV
 - ◆ CERN PS (Genève, 1959) 26 GeV → faisceaux de neutrinos
 - ◆ AGS (Brookhaven, 1960) 33 GeV → faisceaux de neutrinos
- Le principe des faisceaux de neutrinos (B. Pontecorvo 1958, M. Schwartz 1960)
 - ◆ Envoyer un très grand nombre (10^{12} - 10^{13}) de protons de haute énergie sur une cible → flux élevé de mésons π^\pm et K^\pm qu'on laisse se désintégrer dans un long tunnel.
 - ◆ $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$; $\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$; $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$; $K^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$ d'où un flux très élevé de muons et de neutrinos → découverte du ν_μ différent du ν_e à Brookhaven en 1962 (L. Lederman, M. Schwartz, J. Steinberger 1962)
 - ◆ Les muons μ^\pm sont arrêtés pour la plupart par un blindage (fer ou terre) et, au-delà, il reste de l'ordre de 10^{10} - 10^{11} neutrinos par paquet de protons.

Progrès dans les faisceaux de neutrinos de 1961 à 1971



- La « corne » magnétique (S. Van der Meer) focalise vers l'avant :
 - ◆ soit les π^+ ou $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ d'où un faisceau de neutrinos
 - ◆ soit les π^- ou $K^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$ d'où un faisceau d'antineutrinos
- ... et augmente le flux de neutrinos atteignant le détecteur
- Plusieurs faisceaux au CERN (1961, 1963, 1967, 1971) et à Brookhaven (découverte du ν_μ en 1962)

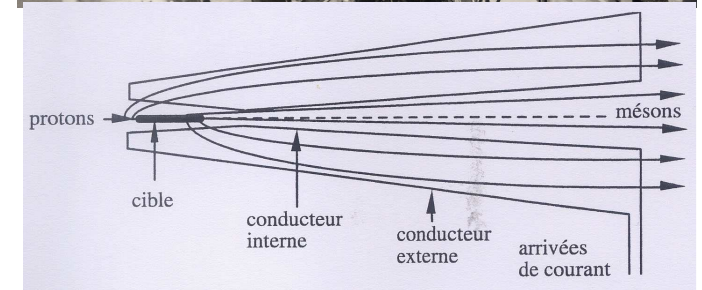
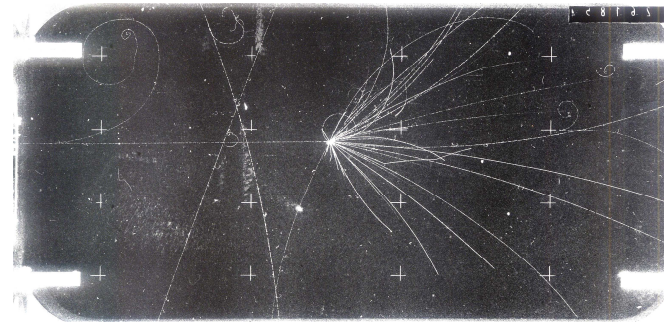


Photo et schéma de la corne du CERN

1.c Les chambres à bulles, détecteurs universels

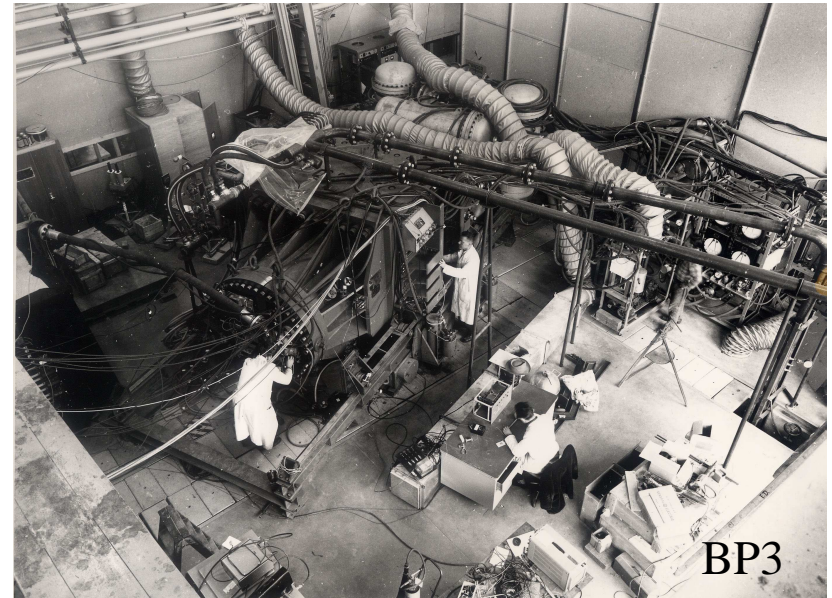


BP3

- Le principe des chambres à bulles (D. Glaser 1952) : les particules chargées ionisent localement un liquide brutalement détendu et cet apport d'énergie crée un ébullition locale → les petites bulles matérialisent la trajectoire et sont éclairées par flash et photographiées.
- Ces détecteurs peuvent sans problème s'adapter au rythme des accélérateurs (recompression en une fraction de seconde).
- Ils permettent l'étude des événements « tout-venant », ce qui est essentiel pour une physique des particules encore exploratoire.
- Deux types de chambres à bulles :
 - ◆ Les chambres à hydrogène liquide : cible simple (proton libre) ; traces régulières → reconstruction de haute qualité, mais les particules neutres (photons γ , neutrons) sont la plupart du temps non détectées. Au LLR : Bernard Grégory.
 - ◆ Les chambres à liquides « lourds » (propane, fréons) : cibles complexes (noyaux) et traces plus irrégulières, mais photons et neutrons sont souvent détectés, une qualité essentielle pour l'étude des désintégrations faibles. Au LLR : André Lagarrigue.

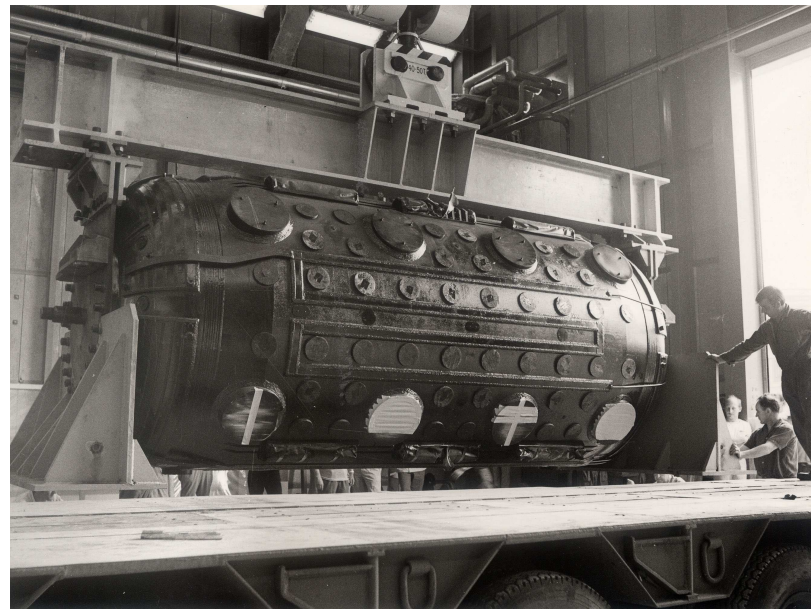
Les chambres à bulles à liquides lourds au LLR

- Premier prototype BP1 (4 litres) en 1957 (A. Lagarrigue et A. Rousset)
- BP2 (20 litres) en 1958 est exposée à un faisceau de π de 1 GeV/c à Saturne → thèse de P. Musset (1960)
- BP3 (300 litres), dans un aimant de 2 T construit par le Dép^t. Saturne du CEA, est installée au CERN (1960), en particulier dans le faisceau de neutrinos de 1963. Retour à Saturne en 1964 → nombreuses thèses au LLR.
- Au CERN, la chambre de la division Nuclear Physics Apparatus (NPA) (500 puis 1000 litres) prend le relais pour l'expérience neutrino de 1967.



2. Conception et construction de Gargamelle

- De la conception aux décisions
- Une chambre à bulles originale
- L'installation au CERN

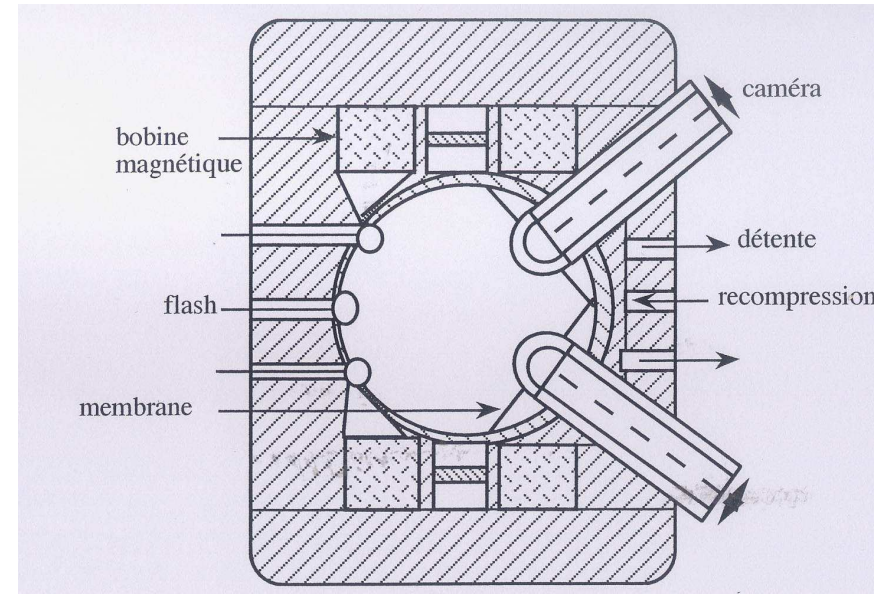


2.a De la conception aux décisions

- L'idée d'une **très grande chambre à bulles à liquide lourd** naît dans une discussion à la **conférence de Sienna (1963)** où sont présentés les résultats de la première **expérience neutrino du CERN**.
- Le projet prend sa forme finale en **août 1964** (4,8 m de long, 2 m de diamètre soit **15 m³**). Louis Leprince-Ringuet propose le nom de « **Gargamelle** » (30 physiciens et ingénieurs signataires, particulièrement A. Lagarrigue, A. Rousset et P. Musset).
- En 1964, A. Lagarrigue est nommé professeur à Orsay et **le LAL rejoint le projet**.
- **Le Dép^t. Saturne du CEA** accepte de prendre la responsabilité de la construction et la plus grande part du financement.
- Au CERN, accueil favorable du « Track Chamber Committee » et du « Scientific Policy Committee », mais le conseil du CERN et le comité des finances ne se prononcent pas.
- Malgré cela, **le CEA et le CERN signent un accord en décembre 1965** : le CEA s'engage à construire Gargamelle et le CERN à la faire fonctionner.

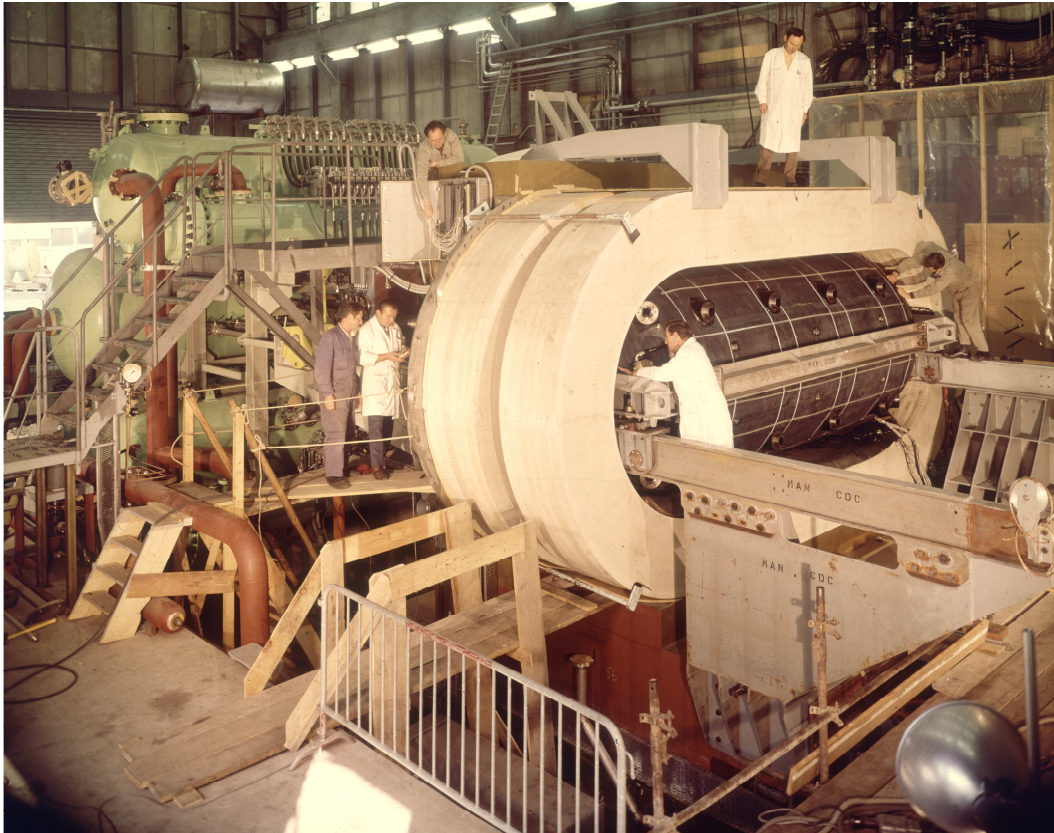
2.b Une chambre à bulles originale

- Responsable de la construction :
Robert Lévy-Mandel (Dépt. Saturne)
- Directeur scientifique : André Lagarrigue
(LLR puis LAL)
- Directeur du projet : Jean Lutz (Dépt. Saturne)
 - ◆ Directeur adjoint : P. Musset (LLR)
 - ◆ Directeur adjoint : L. Afillé (Dépt. Saturne)
- Principaux physiciens et ingénieurs du LLR impliqués dans la construction:
 - ◆ Corps de chambre : P. Quéru
 - ◆ Électronique : P. Rançon
 - ◆ Optique : P. Petiau et V. Brisson
 - ◆ Système de détente : A. Bézaguet
 - ◆ Caméras : M. Reposeur
 - ◆ Expérimentation : J.-J. Veillet, C. Girard
- Electro-aimant : M. Ohayon (Dépt. Saturne)

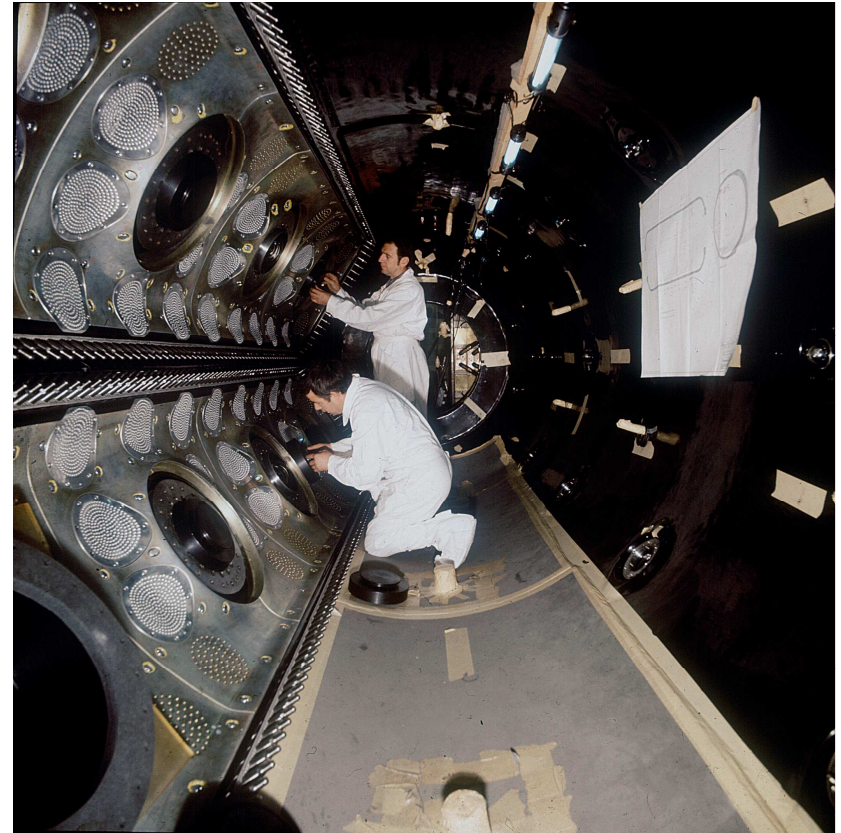


- Corps de chambre cylindrique ($L=4,8\text{m}$, $\varnothing =2\text{m}$)
- Détente par 2 membranes (22 bar \leftrightarrow 10 bar)
- Éclairage par 21 flashes face aux caméras
- 8 caméras : objectifs “œil de poisson”
- Electro-aimant de 900 t, 80 t de bobines ($B= 2\text{T}$)

Une chambre à bulles originale



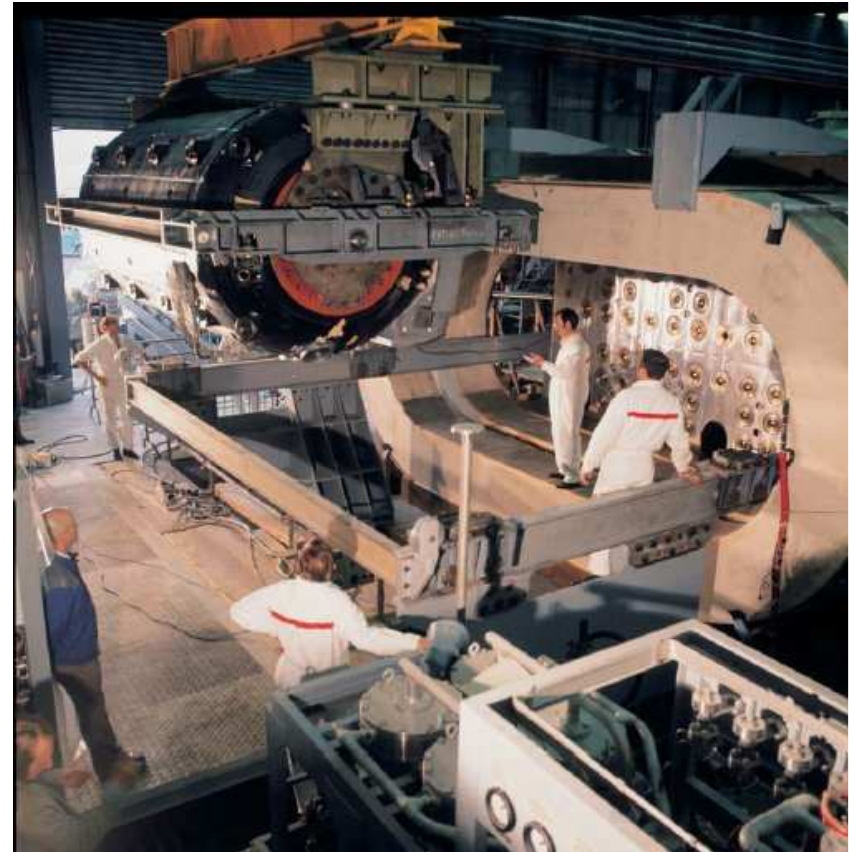
Gargamelle insérée dans les bobines de l'aimant.
Au fond, les réservoirs d'azote
(détente/recompression)



Gargamelle, vue intérieure :
à gauche les optiques

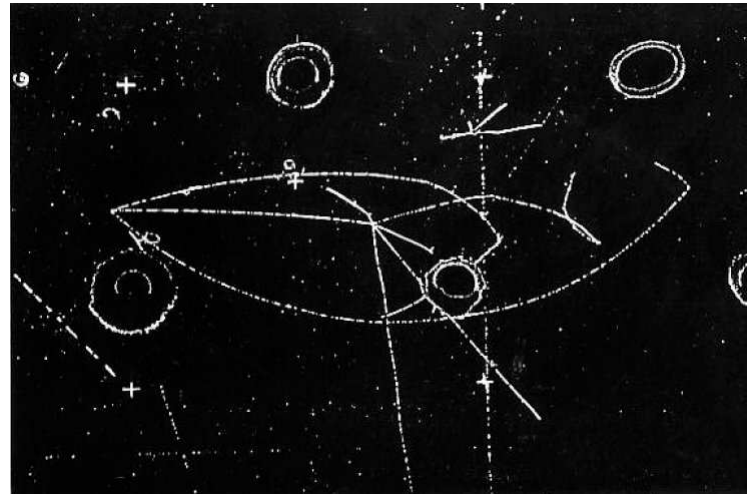
2.c L'installation au CERN

- La préparation des expériences :
 - ◆ Formation des collaborations (« Gargamelle users' committee » présidé par E. Fiorini (Milan)) : environ 140 physiciens.
 - ◆ A. Rousset part au CERN à l'été 1969 pour diriger l'ancienne division NPA, rebaptisée TC_L (Track Chamber « lourd », *sic*). Il est rejoint peu après par P. Musset.
 - ◆ Reconstruction du faisceau de neutrinos par le groupe TC_L avec la participation de M. Haguenaer (LLR), de L.-M. Chounet et de Ph. Heusse (LAL)
- Réception du corps de chambre après retard (qualité des soudures) au début de 1970
- Arrivée au CERN en juillet 1970
- Premières photographies de cosmiques en décembre 1970
- Exposition au faisceau de neutrinos le 28 janvier 1971.

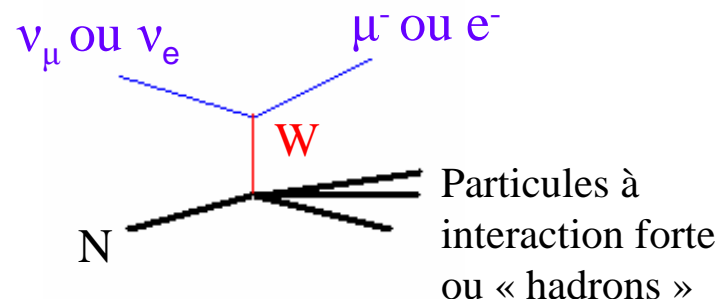
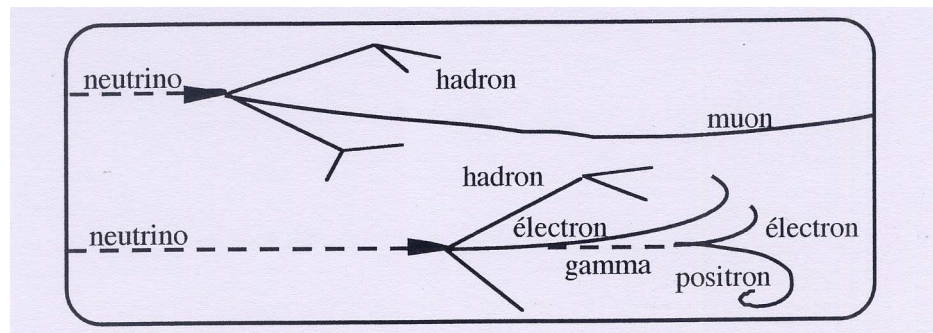


3. L'expérience neutrino dans Gargamelle

- Les interactions de neutrinos produisant un muon ou un électron
- Des événements sans muon ni électron final
- S'agit-il d'interactions de neutrinos (« courant neutre ») ou de neutrons ?
- La cerise sur le gâteau : « courants neutres » $\bar{\nu}_\mu + e^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu + e^-$
- Publication et premières présentations (été 1973)



3.a Les interactions de neutrinos produisant un muon ou un électron (processus « courant chargé »)



- Dans sa première expérience, Gargamelle est remplie de fréon lourd CF_3Br et exposée à un faisceau, soit de neutrinos, soit d'antineutrinos (selon la polarité de la corne magnétique).
- Le faisceau de neutrinos contient **essentiellement des ν_μ** (produits en même temps qu'un muon) et **quelques % de ν_e** (produits en même temps qu'un e^+ dans des modes rares de désintégration des mésons K).
- Dans les processus « courant chargé » connus à l'époque, on attend des réactions de la forme :
 - ◆ $\nu_\mu + N \rightarrow \mu^- + \dots$ le muon étant identifié car il n'interagit pas dans le liquide, mais sort de la chambre ou s'arrête à l'intérieur (candidat $\text{CC}\mu$)
 - ◆ $\nu_e + N \rightarrow e^- + \dots$ l'électron étant identifié par la cascade de photons et d'électrons qu'il engendre par rayonnement de freinage et création de paires e^+e^- (candidat CCe)
- Au début de l'expérience, **une interaction de ce type toutes les 100 photos environ**. Ensuite, entre 1971 et 1975, l'intensité du PS a été progressivement multipliée par 10 (de 10^{12} à 10^{13} protons par paquet) → **étude de la structure en quarks des nucléons** (thèse de M. Haguenaer).

Interaction de neutrino ν_{μ} produisant un muon (CC_{μ})

Direction des neutrinos incidents



Muon μ^{-} (sort)



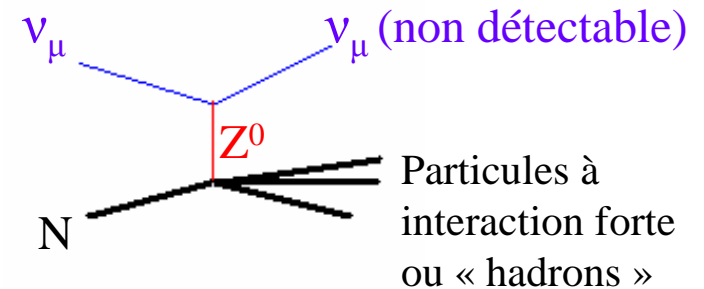
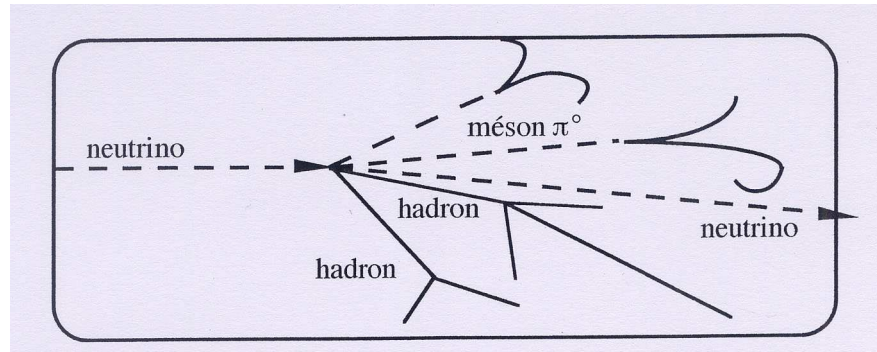
Direction des neutrinos incidents



Interaction de neutrino ν_e produisant un électron CCE



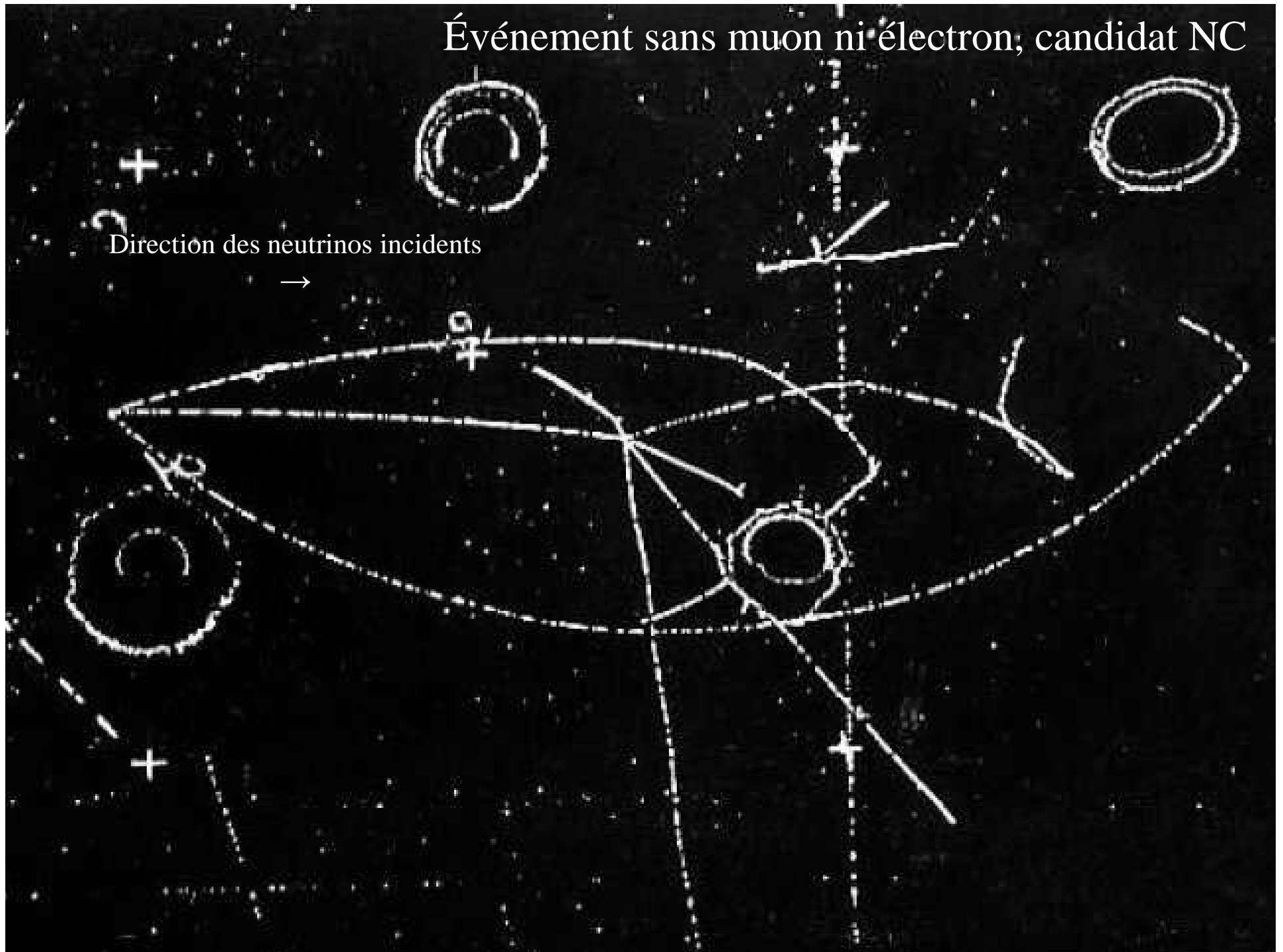
3.b Des événements sans muon ni électron dans l'état final



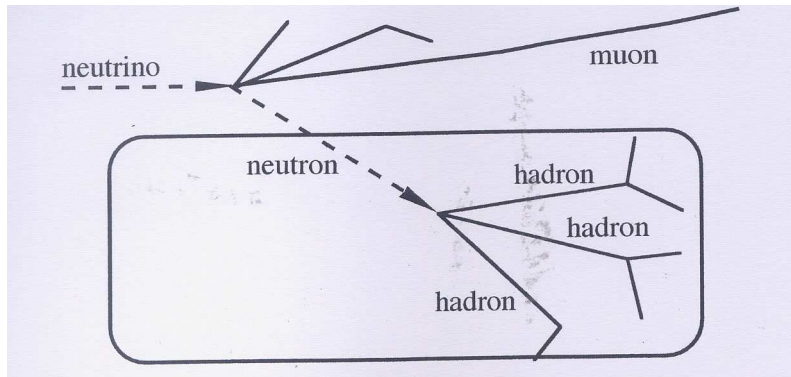
- Dès le début de l'expérience, on pouvait constater **qu'environ 20% à 30% des événements ne comportaient ni muon ni électron !**
- Si ces événements sont dus à des interactions de neutrinos, il s'agit de « **courants neutres faibles** » car la particule virtuelle échangée est neutre...(candidats NC)
- ... mais est-on bien sûr qu'il ne s'agit pas d'interactions de neutrons ?
- Des neutrons (et plus rarement des mésons K^0 à longue vie moyenne) sont produits par des **interactions de neutrinos dans le blindage de fer ou dans la culasse de l'aimant** de Gargamelle et certains peuvent pénétrer dans la chambre.

Événement sans muon ni électron, candidat NC

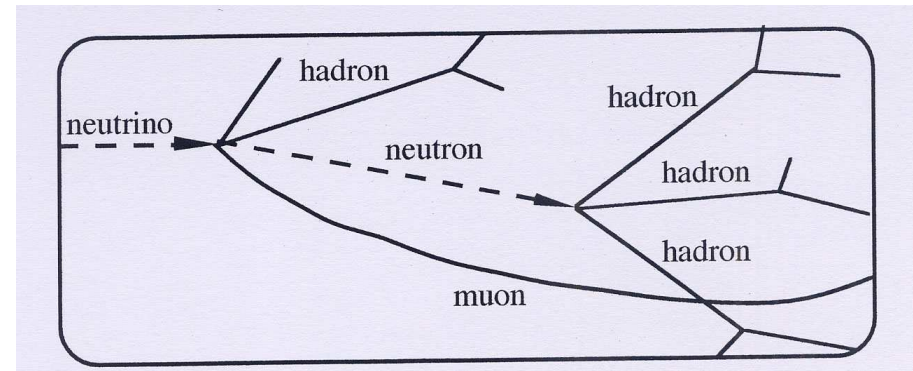
Direction des neutrinos incidents



3.c S'agit-il d'interactions de neutrinos ... ou de neutrons ?



Interaction de neutron dont l'origine est hors du détecteur (événement de fond B)

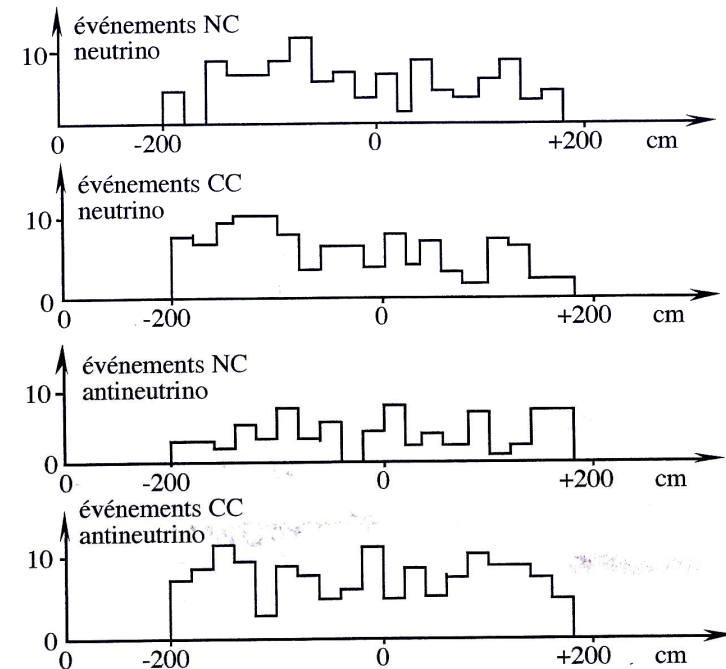


Interaction de neutron dont l'origine est détectée dans Gargamelle (événement dit "associé AS")

- Les interactions de neutrinos CC dans le volume de la chambre produisent parfois des neutrons (ou K_L^0) qui interagissent aussi dans Gargamelle.
- Ces événements, dits « associés » (AS), sont de précieux indicateurs pour connaître le fond B de neutrons (d'origine non détectée) à soustraire du lot de candidats NC ... mais ils sont rares.
- Le rapport B/AS dépend essentiellement de la valeur de la longueur d'interaction effective des neutrons dans le liquide.

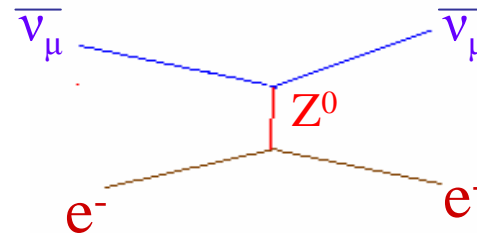
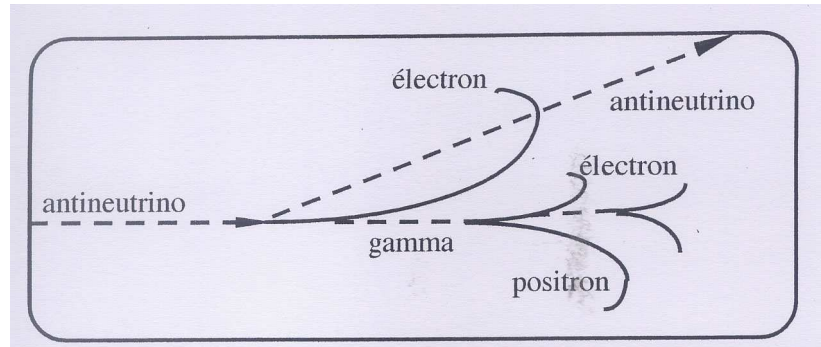
S'agit-il d'interactions de neutrinos ou de neutrons ?

- Des premiers éléments en faveur d'une forte majorité d'interactions de neutrinos dans les candidats NC :
 - La distribution des points d'interaction le long de l'axe de la chambre est uniforme, tant pour les NC que pour les CC.
 - Les distributions des longueurs potentielles de vol des NC et CC sont semblables (\neq des AS) (méthode de Bartlett proposée par A. Pullia)
- Même en tenant compte des incertitudes sur la longueur effective d'interaction des neutrons, **un calcul simple (A. Rousset) montre que le rapport B/AS doit être de l'ordre de 1.**
- Des simulations plus précises (J.-P. Vialle, D. Haidt, W. Fry) montrent que $B/AS \approx 0,8$ (faisceau de neutrinos) **et $B/AS \approx 1,2$** (faisceau d'antineutrinos).
- Or, les événements associés sont très peu nombreux \rightarrow **le fond à soustraire représente moins de 15% du signal de NC**



Distributions des points d'interaction (événements NC et CC) le long de l'axe de la chambre

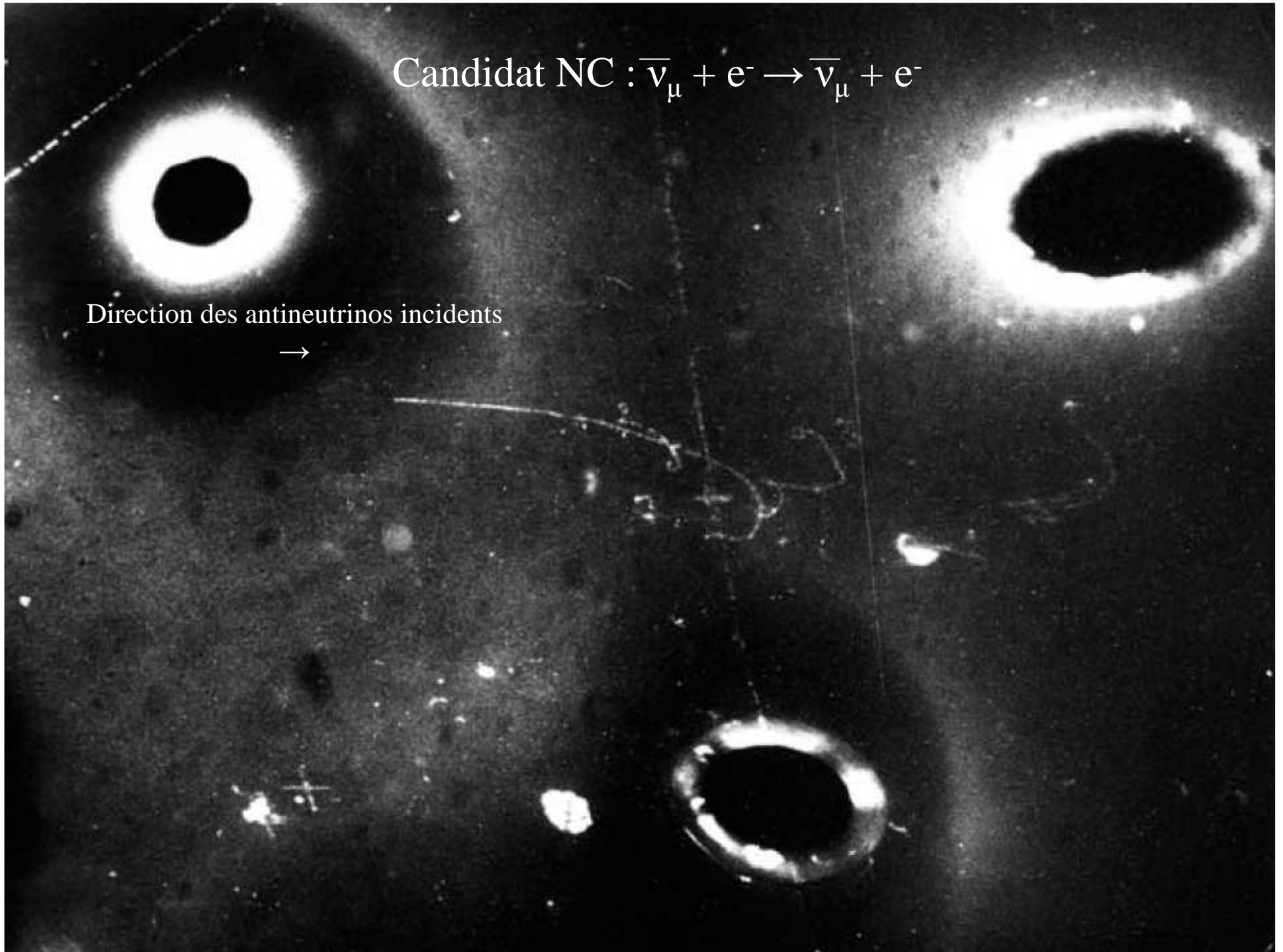
3.d La cerise sur le gâteau : un événement $\bar{\nu}_\mu + e^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu + e^-$



- Les neutrinos ou antineutrinos peuvent aussi **interagir avec les électrons des atomes** du liquide (mais avec une probabilité 2000 fois plus faible qu'avec les protons ou neutrons).
- Si l'interaction a lieu par « courant neutre », **l'électron est propulsé vers l'avant à faible angle (<5°) de la direction du faisceau.**
- En décembre 1972, un tel événement (**électron isolé de 400 MeV au milieu de la chambre et émis dans une direction voisine de celle du faisceau**) est trouvé dans une exposition d'antineutrinos (lot d'Aix-la-Chapelle).
- Compte-tenu des dimensions de la chambre, l'interprétation de l'événement comme fond (électron produit par effet Compton) est invraisemblable.

Candidat NC : $\bar{\nu}_\mu + e^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu + e^-$

Direction des antineutrinos incidents



3.e Publication et premières présentations (été 1973)

- Annonce au CERN par P. Musset le 19 juillet 1973.
- L'article est reçu par Phys. Lett. le 2 juillet et publié le 3 septembre.
- Le titre est prudent : observation d'événements de type neutrino sans muon ni électron.
- Présentations au Symposium Lepton-Photon de Bonn (août) par G. Myatt et F. W. Bullock) et à la conférence européenne de physique des hautes énergies à Aix-en-Provence (septembre) par P. Musset.
- Rudes discussions à ces conférences avec C. Rubbia qui travaille sur l'expérience concurrente au Fermi lab. Les résultats des 2 groupes semblent alors compatibles ... mais l'article américain est refusé par Phys. Rev. Lett.

B. Degrange

Séminaire LLR 2009

27

OBSERVATION OF NEUTRINO-LIKE INTERACTIONS WITHOUT MUON OR ELECTRON IN THE GARGAMELLE NEUTRINO EXPERIMENT

F.J. HASERT, S. KABE, W. KRENZ, J. Von KROGH, D. LANSKE, J. MORFIN, K. SCHULTZE and H. WEERTS

III. Physikalisches Institut der Technischen Hochschule, Aachen, Germany

G.H. BERTRAND-COREMANS, J. SACTON, W. Van DONINCK and P. VILAIN*¹

Interuniversity Institute for High Energies. U.L.B. - V.U.B. Brussels, Belgium

U. CAMERINI*², D.C. CUNDY, R. BALDI, I. DANILCHENKO*³, W.F. FRY*², D. HAIDT,

S. NATALI*⁴, P. MUSSET, B. OSCULATI, R. PALMER*⁴, J.B.M. PATTISON,

D.H. PERKINS*⁶, A. PULLIA, A. ROUSSET, W. VENUS*⁷ and H. WACHSMUTH

CERN, Geneva, Switzerland

V. BRISSON, B. DEGRANGE, M. HAGUENAUER, L. KLUBERG,

U. NGUYEN-KHAC and P. PETIAU

Laboratoire de Physique Nucléaire des Hautes Energies, Ecole Polytechnique, Paris, France

E. BELOTTI, S. BONETTI, D. CAVALLI, C. CONTA*⁸, E. FIORINI and M. ROLLIER

Istituto di Fisica dell'Università, Milano and I.N.F.N. Milano, Italy

B. AUBERT, D. BLUM, L.M. CHOUNET, P. HEUSSE, A. LAGARRIGUE,

A.M. LUTZ, A. ORKIN-LECOURTOIS and J.P. VIALLE

Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire, Orsay, France

F.W. BULLOCK, M.J. ESTEN, T.W. JONES, J. MCKENZIE, A.G. MICHETTE*⁹

G. MYATT* and W.G. SCOTT*^{6,9}

University College, London, England

Received 25 July 1973

Events induced by neutral particles and producing hadrons, but no muon or electron, have been observed in the CERN neutrino experiment. These events behave as expected if they arise from neutral current induced processes. The rates relative to the corresponding charged current processes are evaluated.

We have searched for the neutral current (NC) and charged current (CC) reactions:

$$\text{NC } \nu_{\mu} / \bar{\nu}_{\mu} + N \rightarrow \nu_{\mu} / \bar{\nu}_{\mu} + \text{hadrons}, \quad (1)$$

$$\text{CC } \nu_{\mu} / \bar{\nu}_{\mu} + N \rightarrow \mu^{-} / \mu^{+} + \text{hadrons} \quad (2)$$

which are distinguished respectively by the absence of any possible muon, or the presence of one, and only one, possible muon. A small contamination of $\nu_e / \bar{\nu}_e$ exists in the $\nu_{\mu} / \bar{\nu}_{\mu}$ beams giving some CC events which are easily recognised by the e^{-} / e^{+} signature. The analysis is based on 83 000 ν pictures and 207 000 $\bar{\nu}$ pictures taken at CERN in the Gargamelle bubble chamber filled with freon of density $1.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ *. The dimensions of this chamber are such that most

*¹ Chercheur agréé de L'Institut Interuniversitaire des Sciences Nucléaires, Belgique.

*² Also at Physics Department, University of Wisconsin.

*³ Now at Serpukhov.

*⁴ Now at University of Bari.

*⁵ Now at Brookhaven National Laboratory.

*⁶ Also at University of Oxford.

*⁷ Now at Rutherford High Energy Laboratory.

*⁸ On leave of absence from University and INFN-Pavia.

*⁹ Supported by Science Research Council grant.

* A more detailed account of the analysis of this experiment appears in a paper to be submitted to Nuclear Physics.

Parmi les 55 signataires, 12 personnes ont été membres du LLR dans une phase du projet

- École Polytechnique :
V. Brisson, B. Degrange,
M. Haguenauer, L. Kluberg,
U. Nguyen-Khac et P. Petiau
- LAL (à partir de 1964) :
B. Aubert, L.-M. Chounet,
A. Lagarrigue, A. Orkin-Lecourtois
- CERN (à partir de 1969) :
P. Musset, A. Rousset

OBSERVATION OF NEUTRINO-LIKE INTERACTIONS WITHOUT MUON OR ELECTRON IN THE GARGAMELLE NEUTRINO EXPERIMENT

F.J. HASERT, S. KABE, W. KRENZ, J. Von KROGH, D. LANSKE, J. MORFIN, K. SCHULTZE and H. WEERTS

III. Physikalisches Institut der Technischen Hochschule, Aachen, Germany

G.H. BERTRAND-COREMANS, J. SACTON, W. Van DONINCK and P. VILAIN*¹
Interuniversity Institute for High Energies. U.L.B. - V.U.B. Brussels, Belgium

U. CAMERINI*², D.C. CUNDY, R. BALDI, I. DANILCHENKO*³, W.F. FRY*², D. HAIDT, S. NATALI*⁴, P. MUSSET, B. OSCULATI, R. PALMER*⁴, J.B.M. PATTISON, D.H. PERKINS*⁶, A. PULLIA, A. ROUSSET, W. VENUS*⁷ and H. WACHSMUTH
CERN, Geneva, Switzerland

V. BRISSON, B. DEGRANGE, M. HAGUENAUER, L. KLUBERG, U. NGUYEN-KHAC and P. PETIAU

Laboratoire de Physique Nucléaire des Hautes Energies, Ecole Polytechnique, Paris, France

E. BELOTTI, S. BONETTI, D. CAVALLI, C. CONTA*⁸, E. FIORINI and M. ROLLIER
Istituto di Fisica dell'Università, Milano and I.N.F.N. Milano, Italy

B. AUBERT, D. BLUM, L.M. CHOUNET, P. HEUSSE, A. LAGARRIGUE, A.M. LUTZ, A. ORKIN-LECOURTOIS and J.P. VIALLE
Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire, Orsay, France

F.W. BULLOCK, M.J. ESTEN, T.W. JONES, J. MCKENZIE, A.G. MICHETTE*⁹, G. MYATT* and W.G. SCOTT*^{6,9}
University College, London, England

Received 25 July 1973

Events induced by neutral particles and producing hadrons, but no muon or electron, have been observed in the CERN neutrino experiment. These events behave as expected if they arise from neutral current induced processes. The rates relative to the corresponding charged current processes are evaluated.

We have searched for the neutral current (NC) and charged current (CC) reactions:

$$\text{NC } \nu_{\mu}/\bar{\nu}_{\mu} + N \rightarrow \nu_{\mu}/\bar{\nu}_{\mu} + \text{hadrons}, \quad (1)$$

$$\text{CC } \nu_{\mu}/\bar{\nu}_{\mu} + N \rightarrow \mu^{-}/\mu^{+} + \text{hadrons} \quad (2)$$

which are distinguished respectively by the absence of any possible muon, or the presence of one, and only one, possible muon. A small contamination of $\nu_e/\bar{\nu}_e$ exists in the $\nu_{\mu}/\bar{\nu}_{\mu}$ beams giving some CC events which are easily recognised by the e^{-}/e^{+} signature. The analysis is based on 83 000 ν pictures and 207 000 $\bar{\nu}$ pictures taken at CERN in the Gargamelle bubble chamber filled with freon of density $1.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ *. The dimensions of this chamber are such that most

*¹ Chercheur agrégé de L'Institut Interuniversitaire des Sciences Nucléaires, Belgique.

*² Also at Physics Department, University of Wisconsin.

*³ Now at Serpukhov.

*⁴ Now at University of Bari.

*⁵ Now at Brookhaven National Laboratory.

*⁶ Also at University of Oxford.

*⁷ Now at Rutherford High Energy Laboratory.

*⁸ On leave of absence from University and INFN-Pavia.

*⁹ Supported by Science Research Council grant.

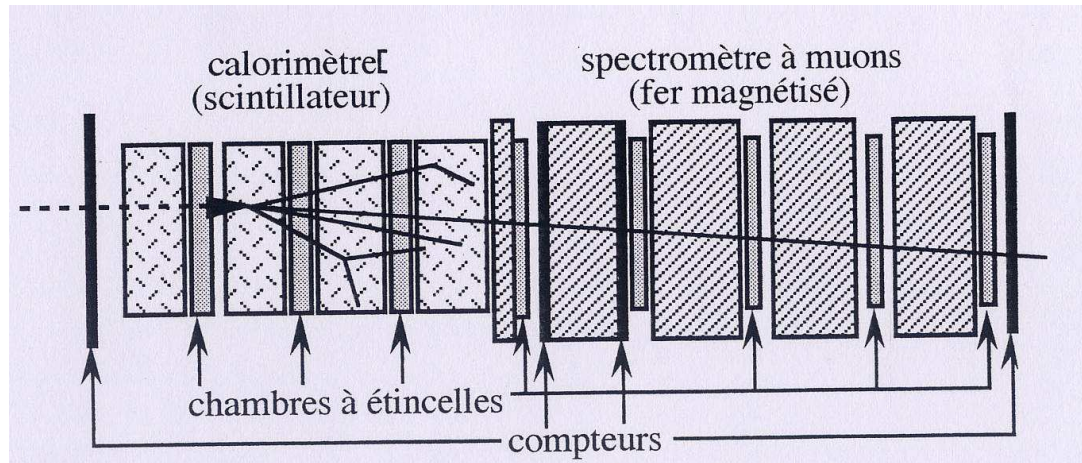
* A more detailed account of the analysis of this experiment appears in a paper to be submitted to Nuclear Physics.

4. L'épisode des « courants alternatifs » américains

- L'expérience concurrente HPW au Fermi Lab.
- Les oscillations américaines
- Le triomphe de Gargamelle



4.a L'expérience concurrente HPW au Fermi Lab.



Les 3 responsables :

C. Rubbia (Harvard)

A.K. Mann (Pennsylv.)

D. Cline (Wisconsin)

- Les expériences « neutrino » au Fermi Lab. disposent d'un accélérateur de 400 GeV → neutrinos d'énergies 10 fois plus hautes qu'au CERN.
- Le faisceau auquel est exposée l'expérience de la collaboration Harvard-Pennsylvania-Wisconsin (HPW) ne dispose pas de corne magnétique → mélange naturel de neutrinos et d'antineutrinos.
- Calorimètre de 20 t de scintillateur liquide et de chambres à étincelles.
- Spectromètre à fer magnétisé pour mesurer et identifier le muon.
- Premier mode de déclenchement sur la présence du muon dans le spectromètre (CC).
- Second mode de déclenchement (spécial NC, ajouté sur l'insistance de S. Weinberg) si l'énergie déposée dans le calorimètre dépasse 6 GeV.

L'expérience concurrente HPW au Fermi Lab.

- A priori, l'expérience HPW voit une proportion appréciable d'événements sans muon, mais ... des corrections importantes sont nécessaires :
 - ◆ Tous les muons ne sont pas identifiés dans le spectromètre, soit si leur énergie est trop basse, soit s'ils sont émis à grand angle → vrai CC classé NC à tort.
 - ◆ Certains hadrons énergétiques pénètrent profondément dans le spectromètre et sont, à tort, appelés muons → vrai NC classé CC à tort.
- Le 17 juillet 1973, C. Rubbia écrit à A. Lagarrigue, lui dit qu'il sait que la collaboration Gargamelle a détecté des événements « courants neutres », et lui propose d'associer les résultats des deux expériences dans leur annonce.
- En l'absence de toute information sur les résultats américains, A. Lagarrigue refuse cette proposition le 18 juillet.
- Les résultats américains présentés à Bonn et Aix-en-Provence sont néanmoins compatibles avec ceux de Gargamelle, mais l'article américain envoyé le 3 août à Phys. Rev. Lett. est refusé par la revue.
- En septembre 1973, l'expérience HPW est remaniée :
 - ◆ Addition d'un bloc de fer entre calorimètre et spectromètre
 - ◆ Nouvelles chambres à étincelles pour mesurer les particules émises à grand angle.

4.b Les oscillations américaines

- Le 13 novembre 1973, D. Cline, A.K. Mann, C. Rubbia et D. Reeder écrivent à A. Lagarrigue pour lui annoncer le résultat de l'expérience HPW dans sa nouvelle configuration : le signal NC a disparu !
- Un article est écrit pour réviser celui qui avait été refusé par Phys. Rev. Lett., mais il ne paraîtra jamais.
- C. Rubbia cependant répand l'annonce du désaccord, jetant ainsi un trouble dans la communauté scientifique.
- Entre-temps, la collaboration Gargamelle conforte ses résultats et rassure la direction du CERN :
 - ◆ mesure expérimentale des longueurs d'interaction de neutrons dans le liquide (en envoyant dans la chambre des protons de différentes énergies).
 - ◆ augmentation de la statistique d'événements associés.
 - ◆ découverte (au LAL) d'un second événement $\bar{\nu}_\mu + e^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu + e^-$
- En janvier 1974, A. Rousset se rend au Fermi Lab., vérifie l'analyse de l'expérience HPW, refait les calculs de correction et se rassure : il retrouve la présence de courants neutres. Il ignore qu'un rapport interne de D. Cline va dans le même sens.

4.c Le triomphe de Gargamelle

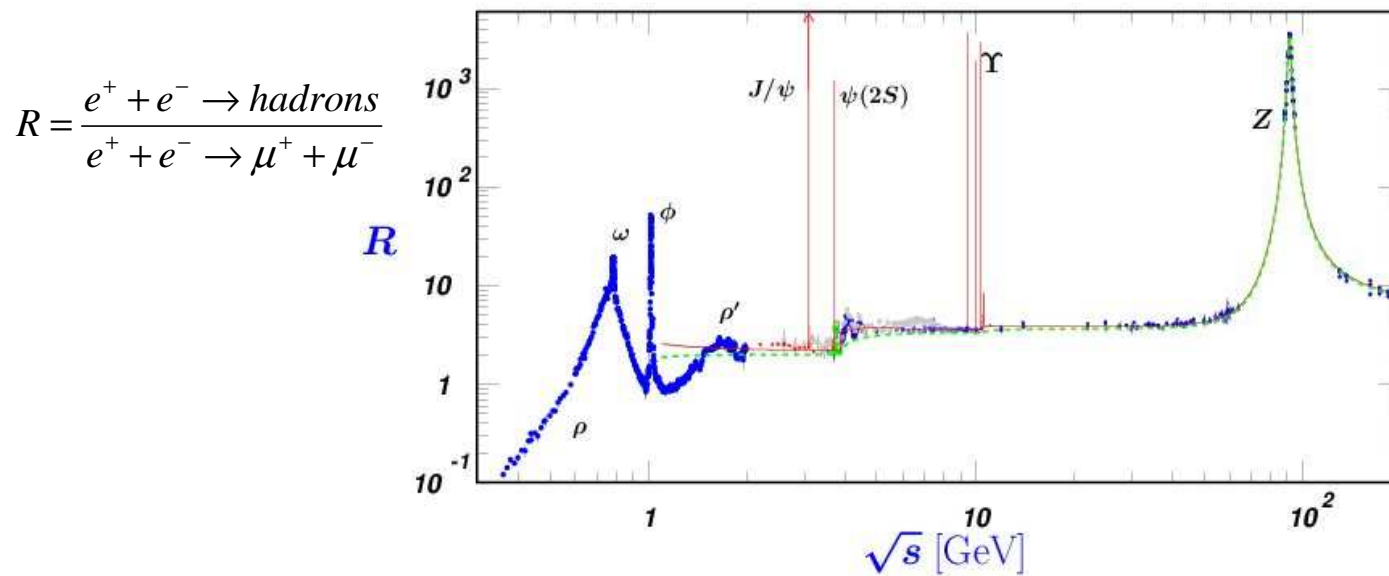
- Au printemps 1974, le groupe d'Argonne (chambre à hydrogène de 12 pieds) confirme la détection de courants neutres et ceux de la collaboration HPW « ressuscitent » → publication le 8 avril 1974 dans Phys. Rev. Lett. ... mais avec la date de réception du 3 août 1973 !
- Conférence de Philadelphie (printemps 1974) : A. Rousset rapporteur conclut à l'existence confirmée des courants neutres faibles.
- Conférence de Londres (juillet 1974) : une seconde expérience au Fermi Lab., celle de B. Barish (Cal. Tech.), avec un faisceau séparé à bande d'énergie étroite, confirme les courants neutres.



B. Degrange

5. Conséquences de la découverte des courants neutres

- La théorie électro-faible
(S. Glashow, A. Salam, S. Weinberg)
- La prédiction du quark « charmé »
(S. Glashow, J. Iliopoulos, L. Maiani)



5.a L'unification électro-faible

- Avant brisure des symétries, deux types d'interactions, chacune avec son groupe de symétrie (tableau), sa constante de couplage et ses particules médiatrices, toutes de masse nulle.
- Après brisure de symétrie (mécanisme de Higgs)
 - ◆ Les particules médiatrices W^+ et W^- prennent une masse \rightarrow l'interaction faible à courant chargé.
 - ◆ Les particules médiatrices neutres W^0 et B^0 « se mélangent » pour donner deux particules physiques :
 - Le photon γ de masse nulle \rightarrow l'interaction électromagnétique (constante de couplage e)
 - Le Z^0 prend une masse \rightarrow l'interaction faible à courant neutre
- Unification partielle : g et g' dépendent de deux constantes : e et l'angle θ_w .

Groupe de symétrie	Constante de couplage	Particules médiatrices
$(SU_2)_L$	g	W^+ W^0 W^-
U_1	g'	B^0

$$Z^0 = \cos \theta_w W^0 + \sin \theta_w B^0$$

$$\gamma = -\sin \theta_w W^0 + \cos \theta_w B^0$$

$$g = e / \sin \theta_w$$

$$g' = e / \cos \theta_w$$

L'unification électro-faible

- L'expérience neutrino dans Gargamelle et les expériences qui ont suivi aux États-Unis comme au CERN ont permis de mesurer l'angle θ_w , appelé « angle de mélange électro-faible » : $\sin^2\theta_w = 0,23 \dots$
- ... ce qui permettait de prédire précisément les masses des particules médiatrices de l'interaction faible W^\pm et Z^0

$$M_W = \frac{e}{2^{5/4}} G_F^{1/2} \sin\theta_w \quad \text{et} \quad M_Z = \frac{M_W}{\cos\theta_w} \quad \begin{array}{l} M_W = 80,43 \text{ GeV}/c^2 \\ M_Z = 91,19 \text{ GeV}/c^2 \end{array}$$

- Suivant une idée proposée par C. Rubbia, P. Mc Intyre et D. Cline, l'accélérateur SPS du CERN a été transformé en collisionneur protons + anti-protons (270 GeV) et, en 1983, les expériences UA1 (C. Rubbia) et UA2 (P. Darriulat) ont mis en évidence les W^\pm et le Z^0 avec les masses attendues.
- À partir de 1989, le collisionneur e^+e^- LEP du CERN a permis de tester de manière plus précise la théorie électro-faible et les propriétés des particules W^\pm et Z^0 .

5.b La prédiction du quark charmé

- Si les courants neutres existent, pourquoi ne les avait-on pas observés dans les désintégrations des particules étranges ?
cf. $(K^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) / (K^0 \rightarrow \text{tous modes}) \approx 10^{-8}$ compatible avec un processus électromagnétique du second ordre.
- En 1970, S. Glashow, J. Iliopoulos et L. Maiani avaient proposé un scénario dans lequel les courants neutres faibles (contrairement aux courants chargés, doubles flèches ci-dessous) ne pouvaient pas modifier la « saveur » des quarks.
- Pour cela, il est nécessaire d'introduire un nouveau quark : le quark charmé c

Quarks connus en 1970

Charge +2/3	u	
Charge -1/3	d	s

Proton = uud

Neutron = ddu

$\Lambda^0 = sdu$

s est le quark
« étrange »

Nouveau schéma proposé

Charge +2/3	u	c
Charge -1/3	d	s

La découverte du « charme »

- À la conférence internationale de physique des hautes énergies de Londres en 1974, J. Iliopoulos, constatant que l'existence des courants neutres est bien établie, **parie** qu'avant 2 ans le charme sera découvert.
- Premiers indices à Brookhaven et au collisionneur e^+e^- de Stanford en novembre 1974 avec la **découverte du J/Ψ** (S. Ting et B. Richter) qui s'avèrera être un état lié charme-anticharme ($c\bar{c}$).
- **Gargamelle (encore !)** : le quark c peut être produit dans une interaction de neutrino par courant chargé : $\nu_\mu + d$ (dans un p ou un n) $\rightarrow \mu^- + c$, la particule « charmée » produite se désintégrant ensuite (également par interaction faible, courant chargé) $c \rightarrow s + e^+ + \nu_e$. On aboutit alors à un événement produisant à la fois un muon μ^- , une particule étrange (quark s), un e^+ . **Un premier candidat bien identifié en 1975** (U. Nguyen-Khac, conférence de Paris 1975). On en trouvera finalement 3 dans l'expérience de Gargamelle au PS.
- En 1976, l'existence de particules charmées est bien établie au collisionneur e^+e^- de Stanford.

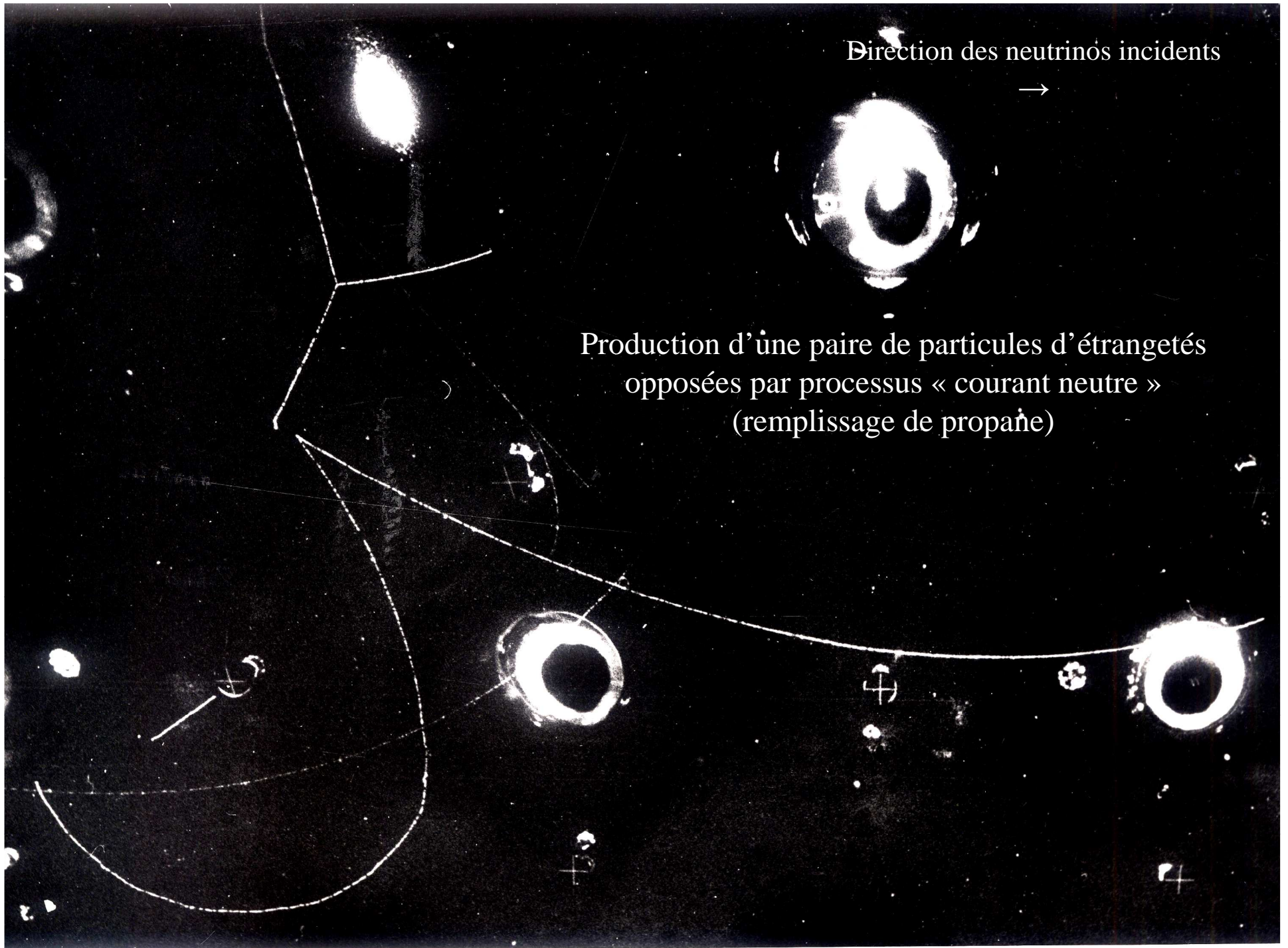
6. Épilogue

- Gargamelle a obtenu au PS une moisson importante de résultats dont la découverte des courants neutres est la plus célèbre, mais il ne faut pas oublier les autres, notamment :
 - ◆ L'étude de la structure du proton et du neutron (thèse de M. Haguenaer)
 - ◆ La production de particules étranges par des neutrinos et par des antineutrinos.
 - ◆ La mesure des sections efficaces sur proton et sur neutron (avec un remplissage de propane), tant en courant chargé qu'en courant neutre.
 - ◆ L'étude de la production d'un méson π (par courant chargé et par courant neutre)
- Gargamelle a ensuite fonctionné au SPS à partir de 1976 avec un équipement auxiliaire externe: **identificateur de muon** et **calorimètre** :
 - ◆ Courants neutres $\nu_\mu + e^- \rightarrow \nu_\mu + e^-$; courant chargé $\nu_\mu + e^- \rightarrow \mu^- + \nu_e$
 - ◆ Production de particules étranges et de particules charmées (di-muons etc.) (thèse d'A. Blondel, thèse de 3^e cycle de Ph. Busson)
- ... jusqu'à la fissure dans le corps de chambre en 1978 qui met fin à la carrière de Gargamelle.

Direction des neutrinos incidents



Production d'une paire de particules d'étrangetés
opposées par processus « courant neutre »
(remplissage de propane)



En guise de conclusion ...

- Une des plus importantes découvertes obtenues au CERN ...
- ... malheureusement assombrie par le décès prématuré d'André Lagarrigue en janvier 1975, puis par ceux de Paul Musset (1985) et d'André Rousset (2001).
- Des prix Nobel ont été décernés pour la théorie électro-faible (S. Glashow, A. Salam et S. Weinberg en 1979, G. 't Hooft et M. Veltman en 1999), de même que pour la découverte des particules W^\pm et Z^0 (C. Rubbia en 1984).
- Depuis peu, le prix de la Société Européenne de Physique peut être décerné à une collaboration. Les « survivants » de cette belle aventure de Gargamelle ont pu en bénéficier.



les COURANTS NEUTRES aujourd'hui et demain

colloque

à l'occasion du Prix EPS (Société Européenne de Physique) 2009
attribué à la Collaboration Gargamelle pour la
découverte des courants neutres de l'interaction
faible



le 10 décembre 2009 à 14h

Auditorium Pierre Lehmann, LAL Orsay, bâtiment 200

Au programme

Z⁰-Tests du Modèle Standard - Andreas Hoecker, Cern

Courants Neutres et saveurs - Achille Stocchi, LAL Orsay

Testing neutrino properties with Astrophysics and Cosmology

- Günter Sigl, Hamburg University

Courants Neutres et Nouvelle Physique au LHC

- Christophe Grojean, CEA Saclay

