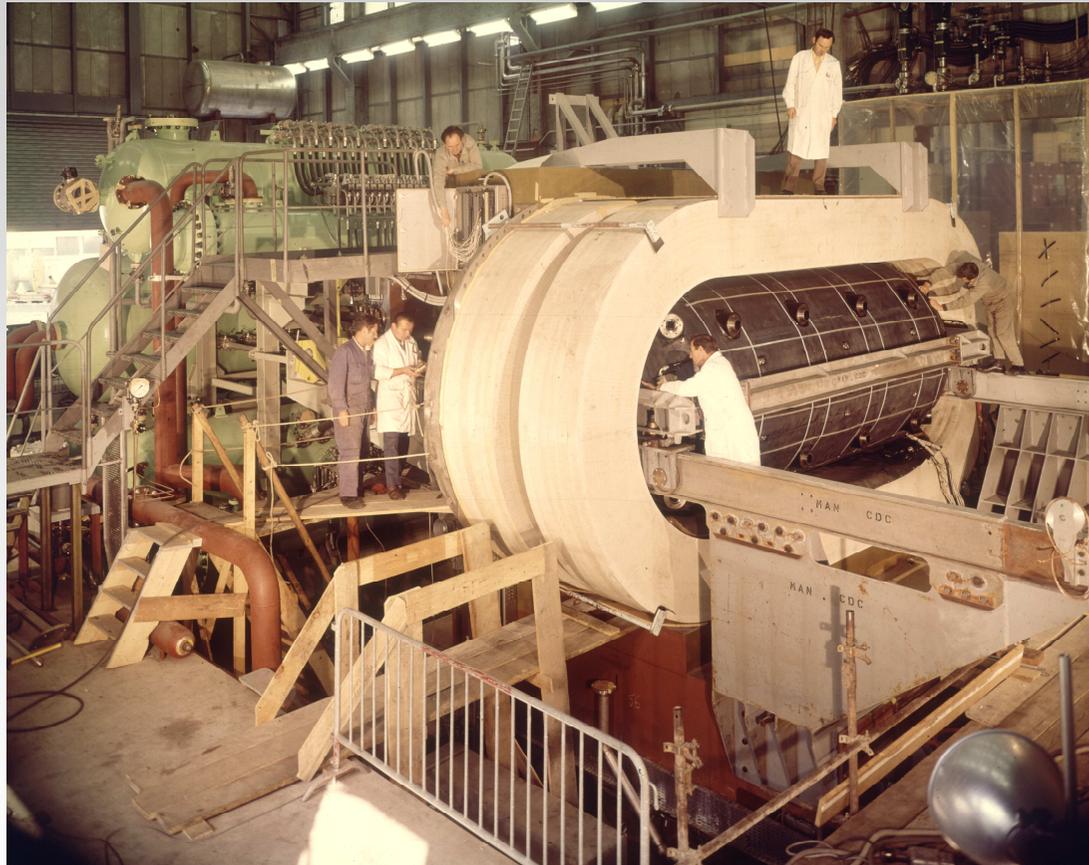


Gargamelle et la découverte des courants neutres



Prix 2009 de la Société Européenne de Physique

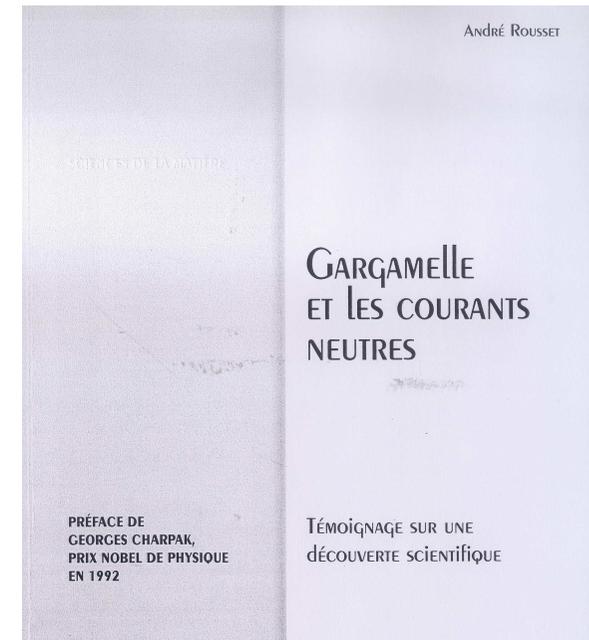
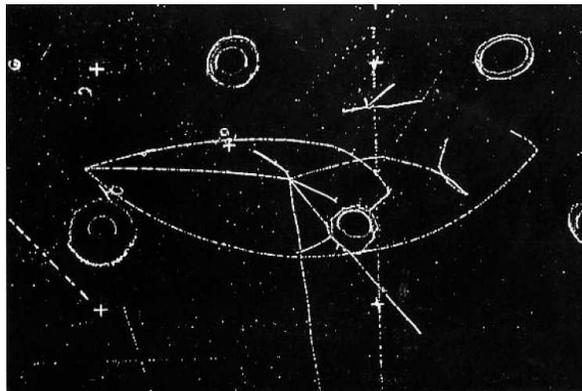
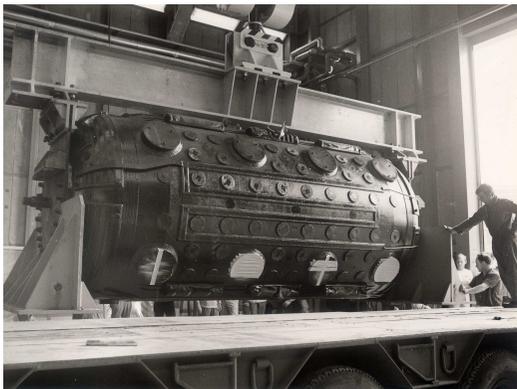
Une aventure scientifique qui a pris naissance au Laboratoire Leprince-Ringuet en 1963



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

Gargamelle et la découverte des courants neutres faibles

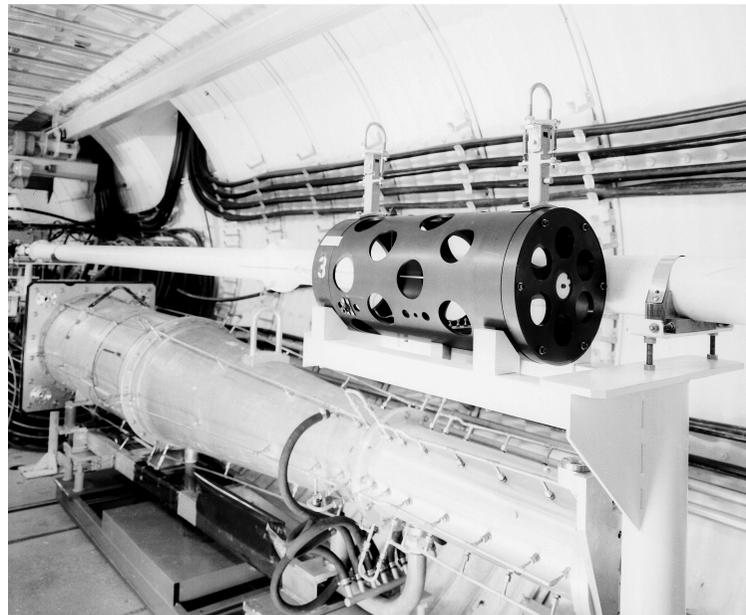
- La physique des interactions faibles avant 1963
- Conception et construction de Gargamelle
- L'expérience neutrino dans Gargamelle
- Les « courants alternatifs » de l'expérience HPW
- Conséquences de la découverte des courants neutres
- Épilogue



Cet exposé s'est largement appuyé sur le livre d'André Rousset (1996), Presses Mines-Paris Tech et sur les comptes-rendus de la conférence « Neutral Currents, 20 years later »

1. La physique des interactions faibles avant 1963

- L'interaction faible : premières découvertes, premières théories
- Les premiers faisceaux de neutrinos auprès des accélérateurs
- Les détecteurs de neutrinos avant 1970



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
- **1934** Première théorie de Fermi : couplage à 4 fermions
- **1949** L'étude de la **désintégration du muon et de sa capture** montre que les constantes de couplage dans ces phénomènes et dans la radioactivité β sont très voisines \rightarrow **Universalité du couplage faible (1949)**
- **1956** Mise en évidence du $\bar{\nu}_e$ dans le flux intense sortant du réacteur nucléaire **de Savannah River (C.L. Cowan et F. Reines)** aux énergies de l'ordre du MeV par la réaction
- **1957-1958** Non conservation de la parité (Lee et Yang, Wu et al. 1957). Théorie V-A (Feynman-Gell-Mann)
- **1962** Neutrinos des accélérateurs : $\nu_\mu \neq \bar{\nu}_e$
- Études des désintégrations des particules étranges (Cabibbo **1963**) \rightarrow Règles $\Delta S = \Delta Q$ et $\Delta I = 1/2$ dans les modes semi-leptoniques.

$$N \rightarrow N' + e^- + \bar{\nu}_e$$

$$N \rightarrow N' + e^+ + \nu_e$$

$$L = G_F J_\mu^+ J_\mu^- \quad \text{avec} \quad J_\mu = J_\mu^\ell + J_\mu^h$$

Courants chargés

$\nu \leftrightarrow e$ $p \leftrightarrow n$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \quad \mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

$$G_\beta \approx G_\mu \approx G_{\mu \text{ capt}}$$

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$$

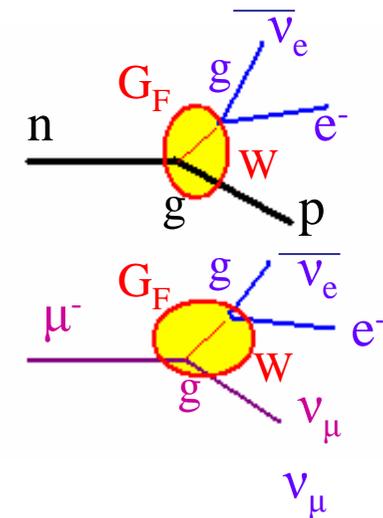
$$L = \frac{G_F}{\sqrt{2}} (J_\mu^{V+} + J_\mu^{A+}) (J_\mu^V + J_\mu^A)$$

$$J_\mu^h = \bar{u} \gamma_\mu (1 + \gamma_5) (d \cos \theta_c + s \sin \theta_c)$$

Un lien avec l'interaction électromagnétique ?

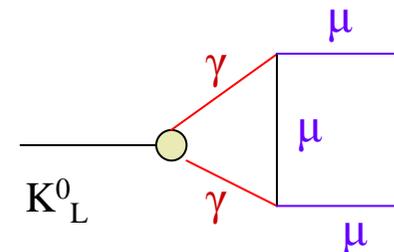
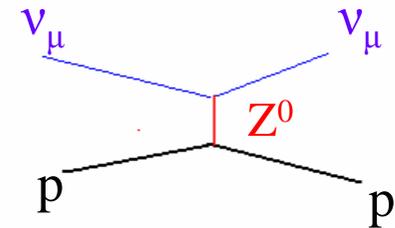
- Dans les processus « courants chargés », la constante effective de Fermi G_F est reliée à la « vraie » constante de couplage faible g et à la masse de la particule médiatrice W : $G_F = 1,166 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$
 - ◆ Si $M_W \approx 1 \text{ GeV}$, alors $g \ll e \rightarrow$ l'interaction 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.
- C'est seulement vers la fin des années 1960 que les premières expériences avec des faisceaux de neutrinos montrent que la section efficace $\nu+N$ croît à peu près linéairement avec l'énergie, alors que la section efficace $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ décroît. L'extrapolation montre qu'elles doivent se rejoindre vers environ 100 GeV
- La théorie de Fermi n'est pas renormalisable ! Le caractère renormalisable de l'électrodynamique quantique est lié à la propriété d'invariance de jauge. En 1954, Yang et Mills proposent une théorie des champs invariante par rapport à des groupes de jauge non commutatifs qui pourrait s'appliquer aux interactions faibles ... si les bosons W^+ et W^- avaient une masse nulle !

$$\frac{G_F}{\sqrt{2}} = \frac{g^2}{8M_W^2}$$



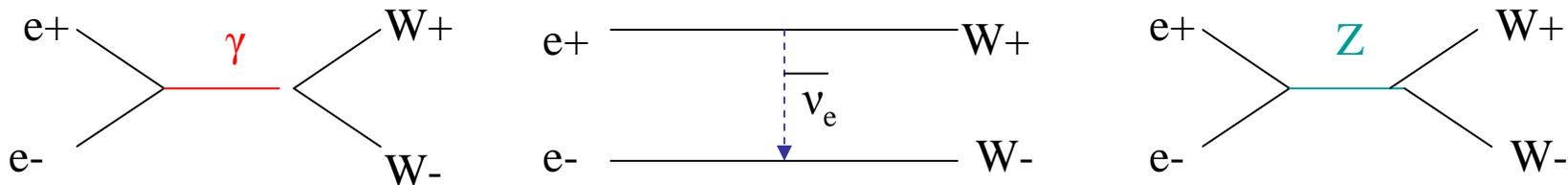
Peut-on envisager un boson faible neutre ?

- Dans une théorie de jauge non abélienne, si des bosons W^\pm sont couplés à des courants chargés, il doit y avoir un boson couplé à leur commutateur \rightarrow **courant neutre** dans le cas du groupe SU_{2L} .
- Cette possibilité ouverte par les modèles de type Yang-Mills est prise au sérieux par quelques théoriciens (notamment S.Glashow, A.Salam, S. Weinberg)
- **MAIS** ces théories conduisaient à des bosons de masse nulle et on ne savait pas si elles étaient renormalisables.
 “The reader must be fully aware that field theory was very unpopular in the years 1964-1971. It was too difficult.”
 (M. Veltman).
- **MAIS** les désintégrations des particules étranges ne montraient aucun signe de présence de courants neutres :
 - ◆ $(K_L^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^-)$ /tous modes $\approx 10^{-8}$ compatible avec un processus d'ordre supérieur ($G\alpha^2$).
 - ◆ $(K^+ \rightarrow \pi^+ + e^+ + e^-)$ /tous modes $\approx 10^{-7}$
- D'où le dogme des années 1960 :
 « **Il n'y a pas de courant neutre faible !** »



L'interaction faible : vers une théorie renormalisable

- En 1971, G.'t Hooft et M. Veltman établissent le caractère renormalisable des théories de Yang-Mills dans lesquelles la brisure spontanée de symétrie donne une masse non nulle aux bosons de jauge. Cette nouvelle classe de théories prédit, soit des courants neutres, soit de nouveaux leptons.
- Un processus à courant neutre (**violant P**) permet de compenser les divergences des 3 graphes ci-dessous, impliquant un lien entre les constantes de couplage électromagnétique et faible.



- En 1970, Glashow, Iliopoulos et Maiani introduisent un modèle à 4 quarks dans lequel l'absence de courants neutres changeant l'étrangeté est expliquée. Mais c'est au prix de la prédiction de nouvelles particules non observées, les particules « charmées » et beaucoup restent sceptiques.

1.b Les premiers faisceaux de neutrinos auprès des accélérateurs

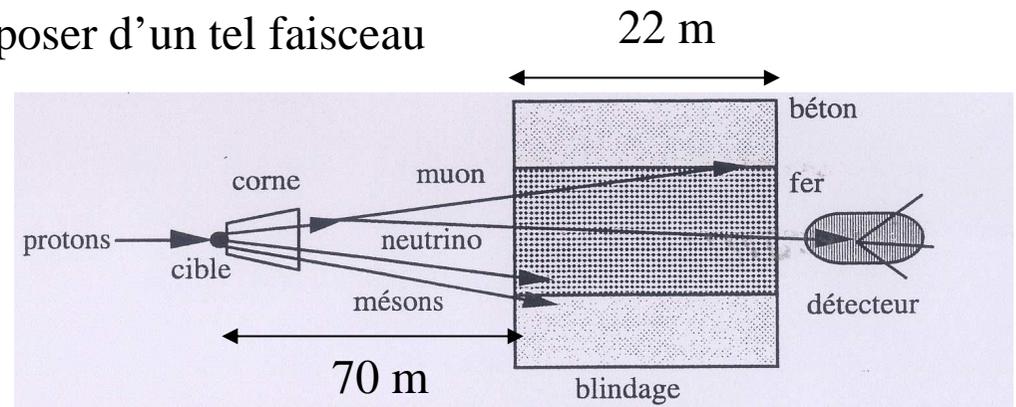
- Le principe des faisceaux de neutrinos (B. Pontecorvo 1958, M. Schwartz 1960)
 - ◆ Envoyer un très grand nombre (10^{12} - 10^{13}) de protons de haute énergie sur une cible → flux élevé de mésons π^\pm et K^\pm qu'on laisse se désintégrer dans un long tunnel.
 - ◆ $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$; $\pi^- \rightarrow \mu^- \nu_\mu$; $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$; $K^- \rightarrow \mu^- \nu_\mu$ 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.

- Les premiers grands accélérateurs à disposer d'un tel faisceau

- ◆ CERN PS (Genève, 1959) p de 26 GeV
- ◆ AGS (Brookhaven, 1960) p de 33 GeV

- À partir de 1972, nouveaux faisceaux

- ◆ ZGS (Argonne) p de 12 GeV
- ◆ Fermi Lab : p de 400 GeV



Distances relatives au faisceau du CERN de 1971

Les premières expériences de neutrinos au CERN

- En 1961, le premier faisceau ν du CERN est 5 fois moins intense que prévu et **Brookhaven** gagne la première manche avec un faisceau suffisamment intense pour mettre en évidence **l'existence de deux saveurs de neutrinos** : ν_μ et ν_e .
- En 1963, le faisceau du CERN utilise une cible externe et bénéficie de la « **corne** » magnétique (**flux $\times 10$**) de **S. Van der Meer** qui 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
- Deux détecteurs sont exposés : la **chambre à bulles de la division Nuclear Physics Apparatus (NPA)** et des **chambres à étincelles**. Confirmation des deux espèces de neutrinos. Limite sur la masse du boson chargé $M_W > 2 \text{ GeV}$
- En 1967, deuxième expérience avec la **chambre de la division NPA** exposée à un faisceau amélioré (distances plus longues, focalisation améliorée par **adjonction de deux réflecteurs**).

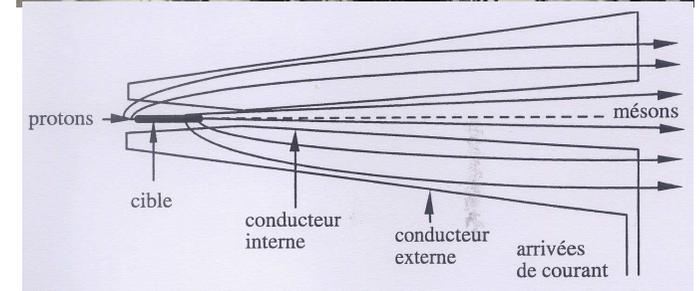
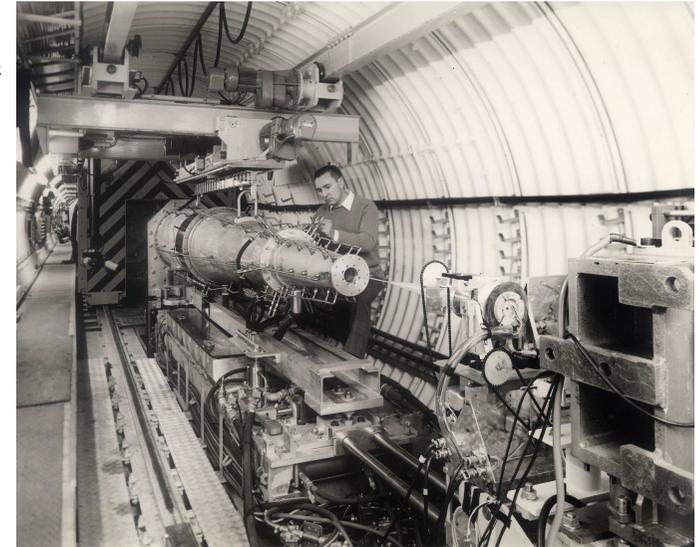


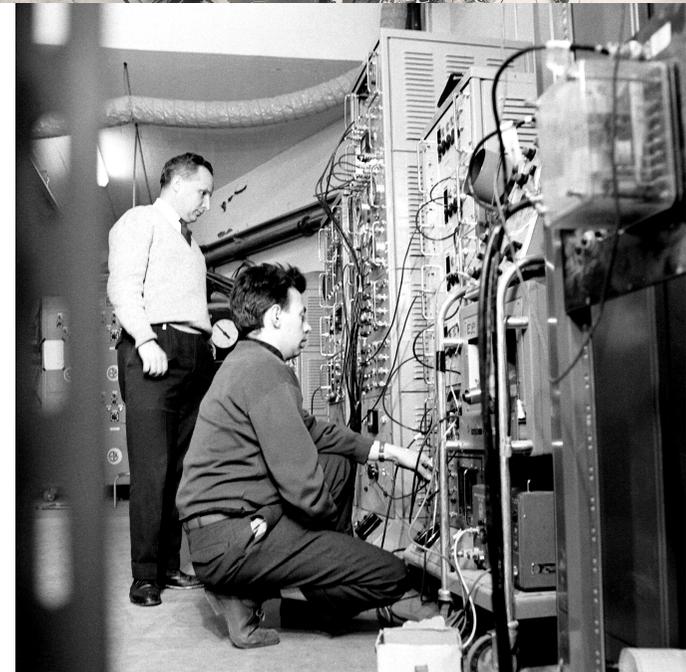
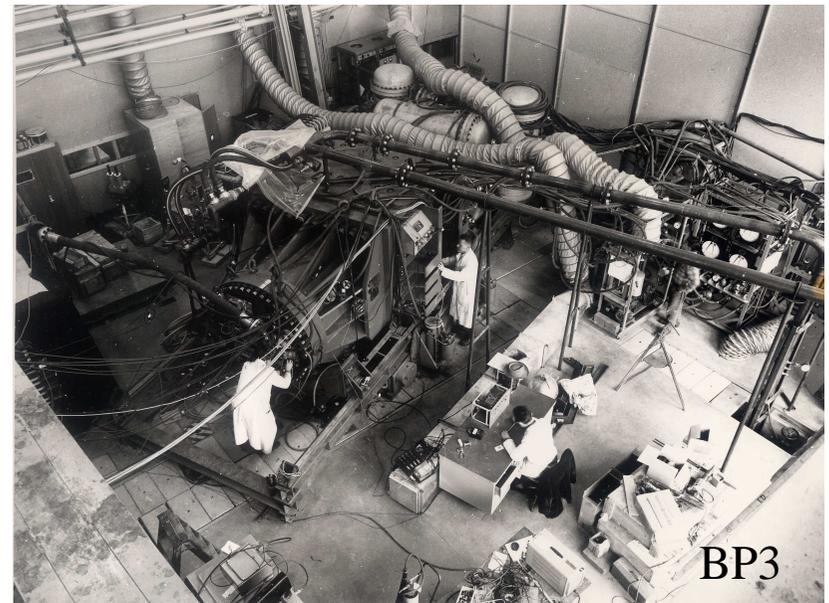
Photo et schéma de la corne du CERN

1.c Les détecteurs de neutrinos avant 1970

- Les expériences d'électronique de l'époque :
 - ◆ Elles comportent généralement un assemblage de chambres à étincelles et de compteurs à scintillation, un aimant ou du fer magnétisé (spectromètre à muon).
 - ◆ Cependant, le déclenchement exige souvent l'identification du muon ...
- Les chambres à bulles à liquide « lourd » (propane C_3H_8 , fréon CF_3Br) :
 - ◆ Elles permettent l'étude des événements « tout-venant », ce qui est essentiel pour une physique encore exploratoire.
 - ◆ Contrairement aux chambres à bulles à hydrogène liquide (réactions sur protons libres, traces régulières), elles fournissent des clichés plus complexes ...
 - ◆ mais les photons et les neutrons sont souvent détectés, et les électrons facilement identifiés, une qualité essentielle pour l'étude des processus faibles.
 - ◆ Ces expériences « artisanales » apportent une information plus complète : (milieu de détection homogène, granularité, détection des neutres etc). → fiabilité des résultats
- À partir de 1961, une communauté de physiciens européens se constitue autour des programmes scientifiques de chambres à liquide lourd au CERN, principalement sur des thèmes liés à l'interaction faible :
 - ◆ désintégration des particules étranges,
 - ◆ interactions de neutrinos.

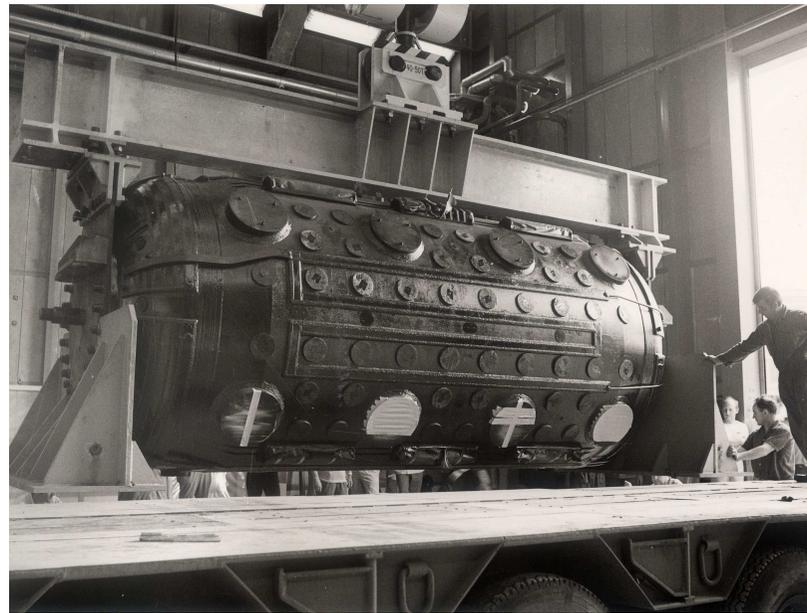
Les chambres à bulles à liquides lourds avant Gargamelle

- 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 1961. Retour à Saturne en 1964
- Au CERN, la chambre de la division Nuclear Physics Apparatus (NPA) (500 puis 1000 litres) prend le relais pour l'expérience neutrino de 1967
- Aux États-Unis, le projet d'une grande chambre à liquide lourd par le groupe de Madison est rejeté. On privilégie les grandes chambres à hydrogène (H_2 ou D_2) de 7 pieds (Brookhaven) et de 12 pieds (Argonne).



2. Conception et construction de Gargamelle

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

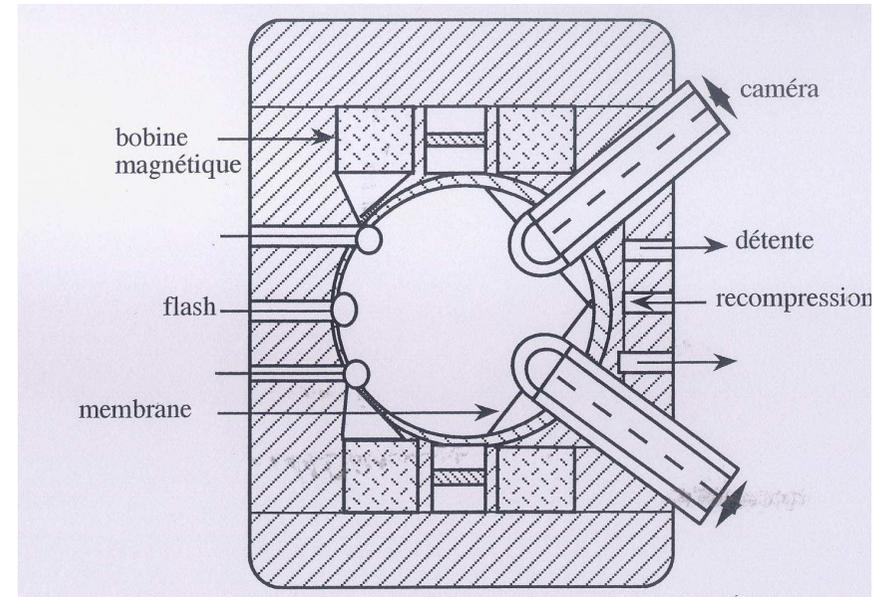


2.a De la conception aux décisions

- L'idée d'une **très grande chambre à bulles à liquide lourd** naît dans une discussion à la **conférence de Sienne (1963)** où sont présentés les résultats de la première expérience neutrino du CERN.
 - ◆ Améliorer la statistique d'interactions de neutrinos
 - ◆ Dimensions \gg longueurs d'interaction hadronique \rightarrow identification des particules
 - ◆ Bonne détection des γ et des π^0 , détection appréciable des neutrons
- 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. Raçon
 - ◆ 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)

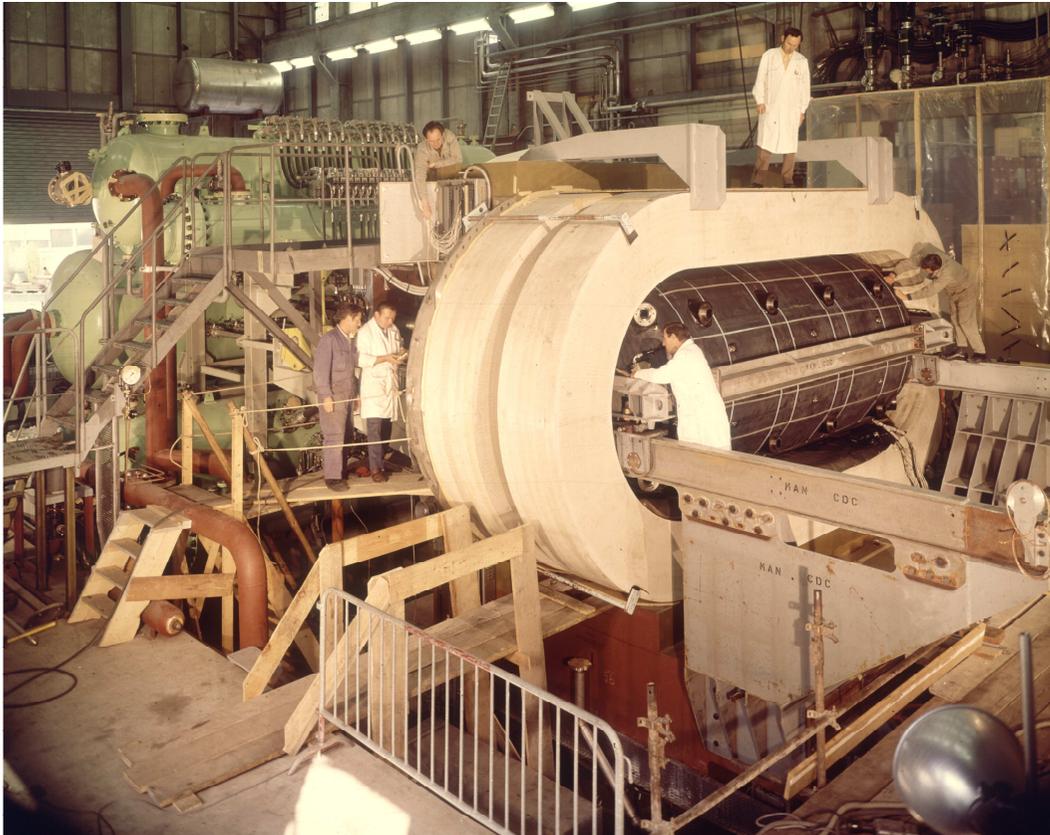


- Corps de chambre cylindrique ($L=4,8\text{m}$, $\varnothing = 2\text{m}$)
- Détente par 2 membranes (22 bar \leftrightarrow 10 bar)
- Éclairage par 21 flashes face aux caméras
- 8 caméras : objectifs “œil de poisson”
- Electro-aimant de 900 t, 80 t de bobines ($B= 2\text{T}$)

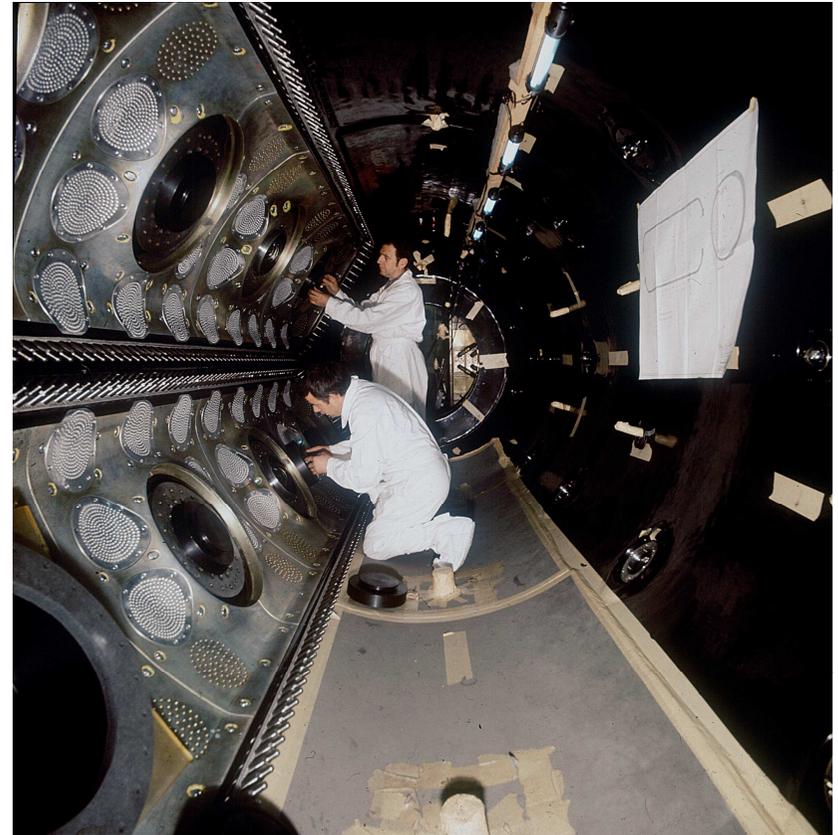
Une chambre à bulles originale : tests et réalisation

- En 1966, construction de « la Tranche », section de Gargamelle (même diamètre de 2 m) mais longue de 45 cm utilisant le système de détente-recompression de BP3 (tests à Saclay).
 - ◆ Test des membranes, des hublots et du système d'éclairage
 - ◆ Choix d'éclairage face à l'objectif avec des « mouches » peintes sur les hublots pour masquer la lumière directe des flashes.
- Réalisation de l'aimant (Alsthom et Creusot-Loire) sans problème majeur.
- Réalisation du corps de chambre (Creusot-Loire)
 - ◆ Spécifications non respectées pour diverses soudures qu'il a fallu refaire plusieurs fois.
 - ◆ Ces défauts d'exécution sont à l'origine de la fissure qui mettra fin au fonctionnement de Gargamelle 10 ans plus tard ...
 - ◆ → Retard important ~ 2 ans
- Décision d'installer la chambre au CERN directement **en court-circuitant les tests qui devaient être faits à Saclay** (on regagne la moitié du retard).
Accord CERN-CEA du 20 Mars 1969
- Réception du corps de chambre au début de 1970

Une chambre à bulles originale



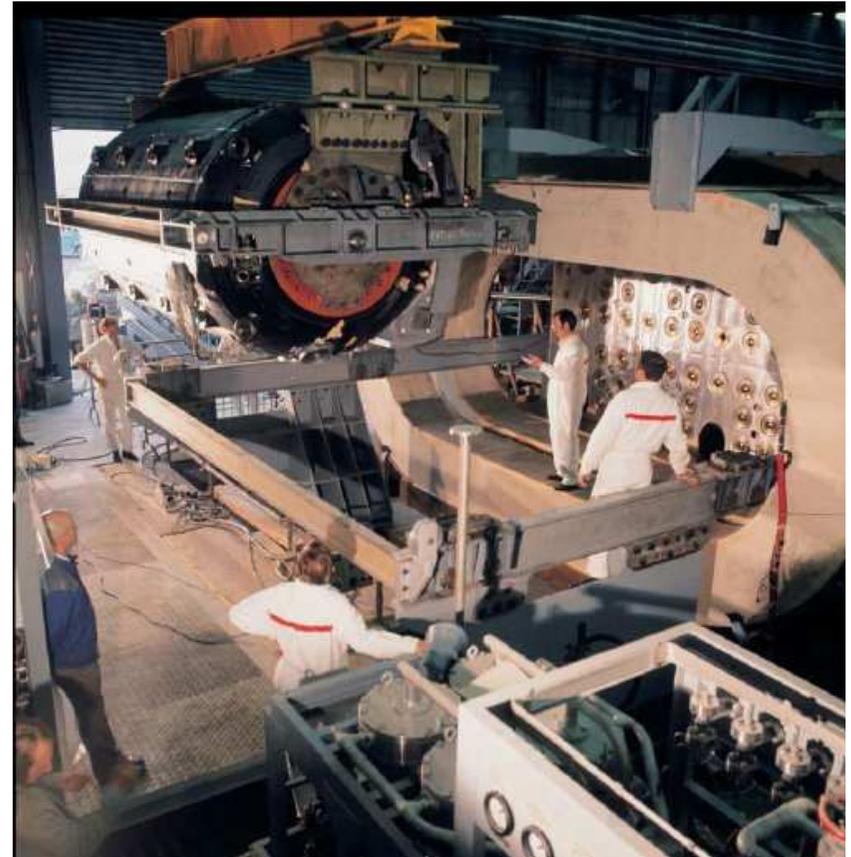
Gargamelle insérée dans les bobines de l'aimant.
Au fond, les réservoirs d'azote
(détente/recompression)



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, rattachée à la division Track Chamber (groupe TC_L) Il est rejoint peu après par P. Musset.
 - ◆ Reconstruction du faisceau de neutrinos par le groupe TC_L avec la participation de M. Haguener (LLR), de L.-M. Chounet et de Ph. Heusse (LAL)
- Arrivée de Gargamelle au CERN en juillet 1970
- Premières photographies de cosmiques en décembre 1970
- Exposition au faisceau de neutrinos le 28 janvier 1971.

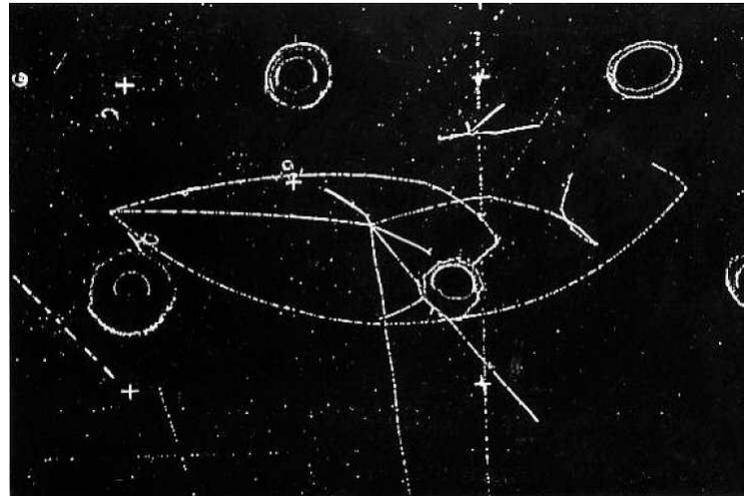


Le contexte scientifique avant le démarrage

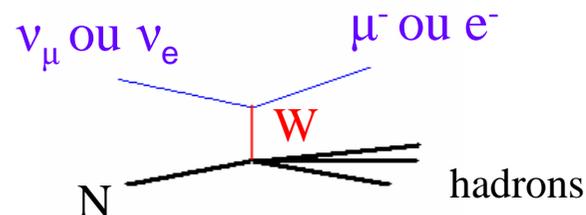
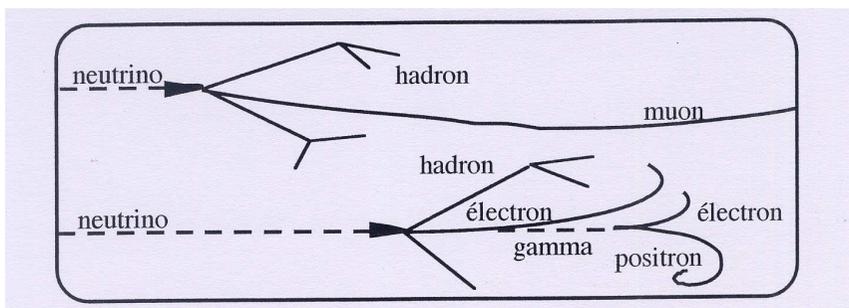
- Les premiers comptes-rendus du « Gargamelle Users' Committee » (1968, 1971) reprennent les thèmes traditionnels de la physique des interactions faibles à courants chargés (tests d'universalité μ/e , production de boson W, facteurs de forme, processus quasi-élastiques). Les courants neutres sont à peine mentionnés.
- Les expériences de diffusion profondément inélastique $e + N$ au SLAC (1969), la mesure des fonctions de structure électromagnétiques du nucléon et la mise en évidence des « partons » font passer au premier plan l'étude analogue dans les réactions « courants chargés » $\nu + N \rightarrow \mu + \dots$ en neutrinos et en antineutrinos, sensibles à l'hélicité des partons.
- Au démarrage de l'expérience, la mesure des sections efficaces totales « courant chargé » et des fonctions de structure du nucléon est la priorité.
- Toutefois, à partir de 1971, quelques théoriciens, en particulier M. Veltman et J. Prentki insistent pour qu'on recherche des courants neutres, en particulier dans la très rare réaction $\nu_\mu(\bar{\nu}_\mu) + e^- \rightarrow \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu) + e^-$ dont la section efficace a été prédite par 't Hooft.
- Le tir est corrigé dans la collaboration au printemps 1972, d'autant plus que l'expérience neutrino HPW au Fermi Lab. (p de 400 GeV) démarre fin 1972.

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** 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**.

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

Direction des neutrinos incidents



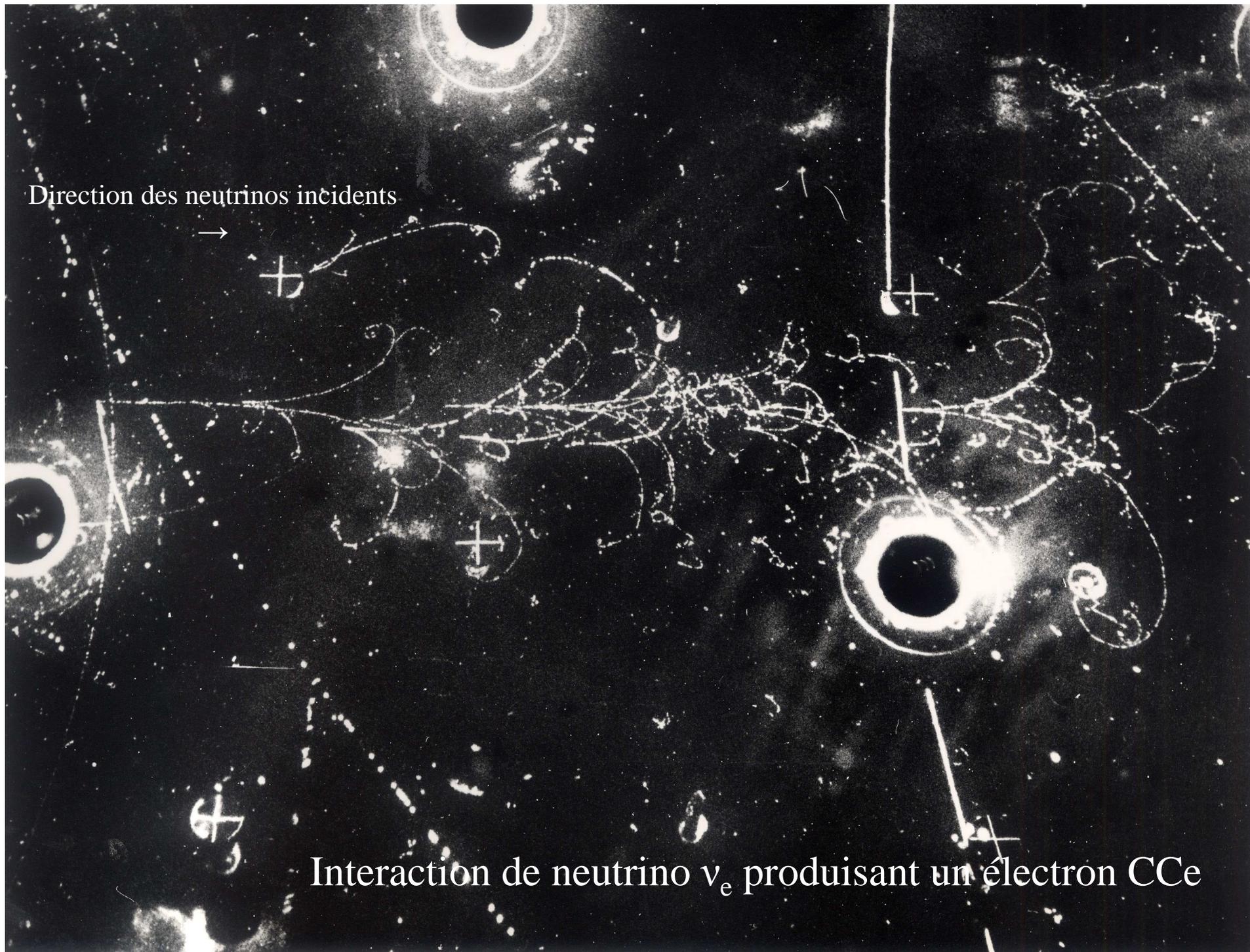
Muon μ^{-} (sort)



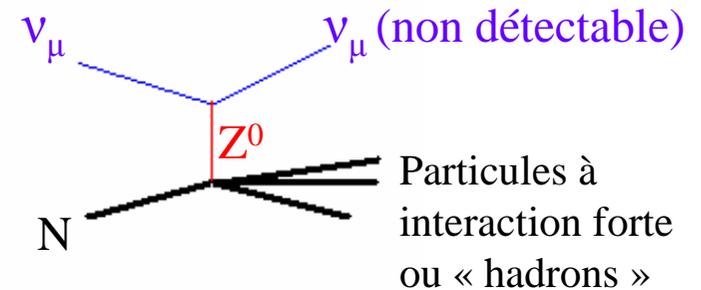
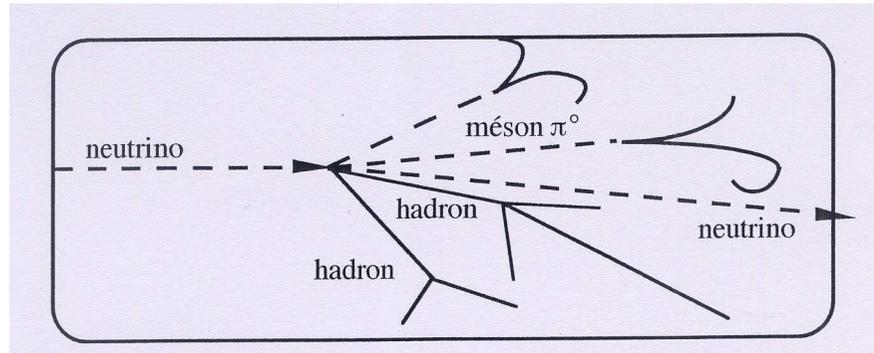
Direction des neutrinos incidents



Interaction de neutrino ν_e produisant un électron CCE



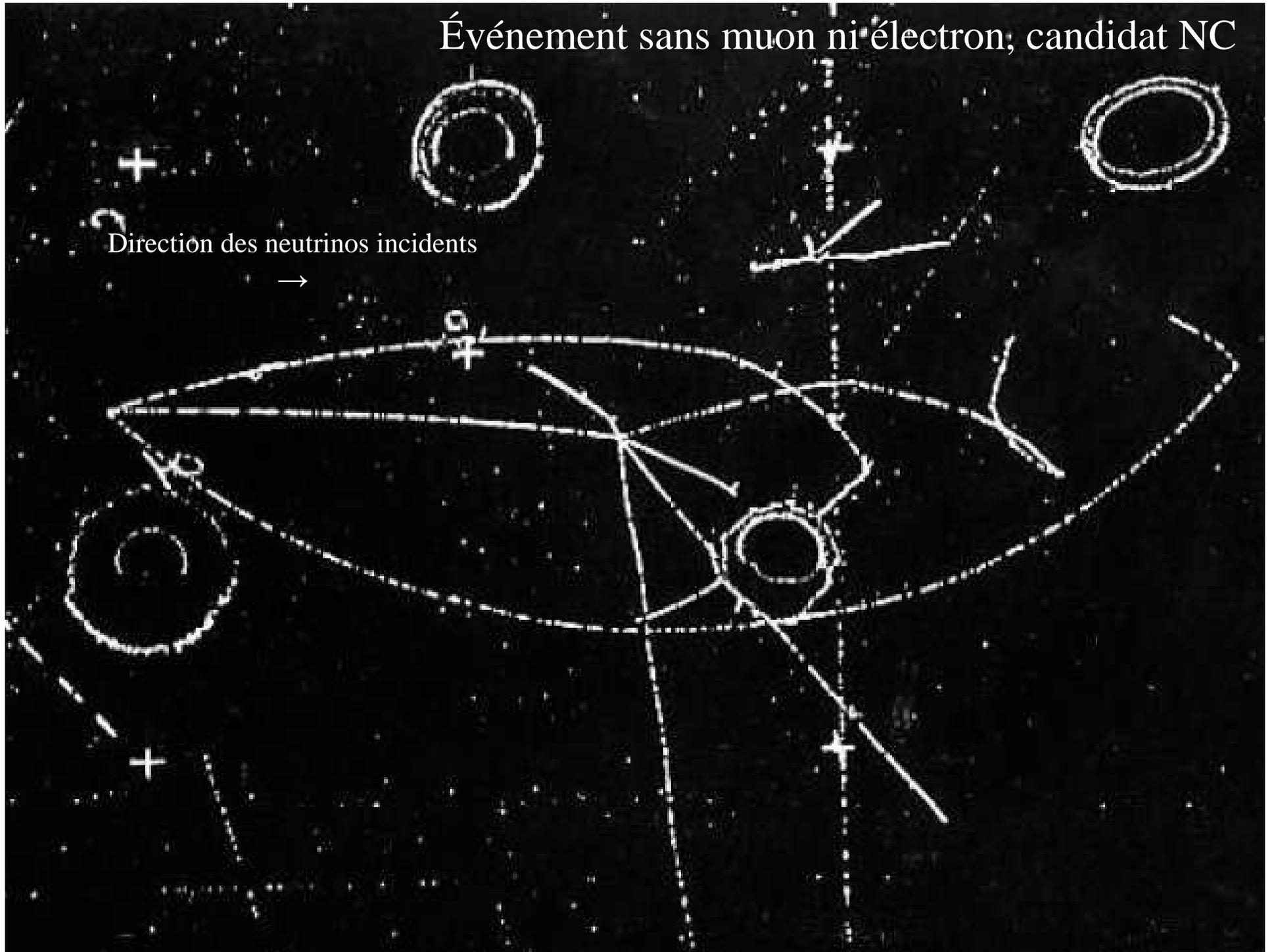
3.b Des événements sans muon ni électron dans l'état final



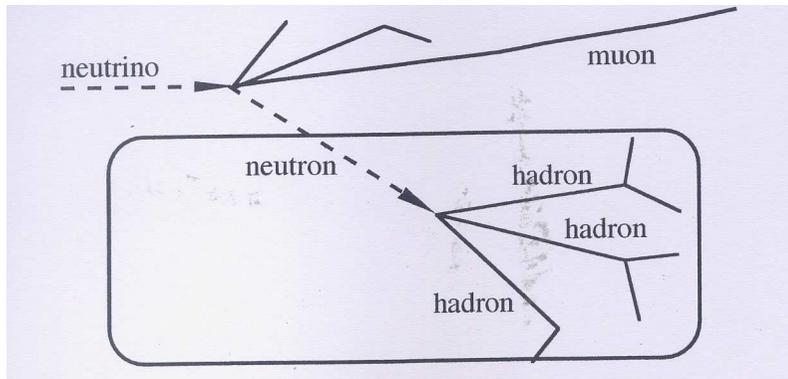
- Dès le début de l'expérience, on pouvait constater **qu'environ 20% à 30% des événements ne comportaient ni muon ni électron !**
- Si ces événements sont dus à des interactions de neutrinos, il s'agit de « **courants neutres faibles** » car la particule virtuelle échangée est neutre...(candidats NC)
- ... 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

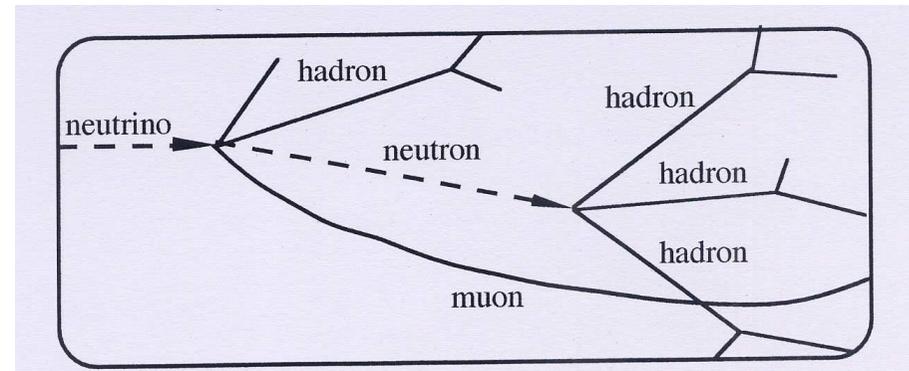
Direction des neutrinos incidents
→



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 ?

Les données

Le liquide CF₃Br : longueur de radiation = 11 cm

Volume fiduciel = 3 m³

longueur de collision = 58 cm

■ Sélection CC :

- ◆ un seul candidat muon possible
- ◆ énergie hadronique > 1 GeV

■ Sélection NC :

- ◆ tous les secondaires sont identifiés comme hadrons
- ◆ énergie hadronique > 1 GeV

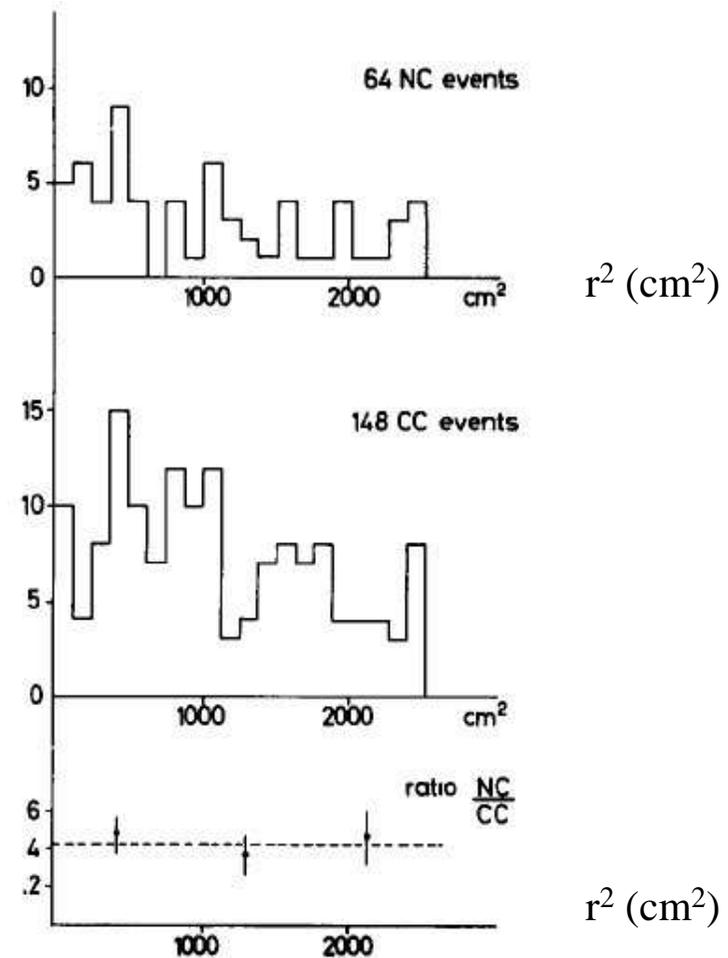
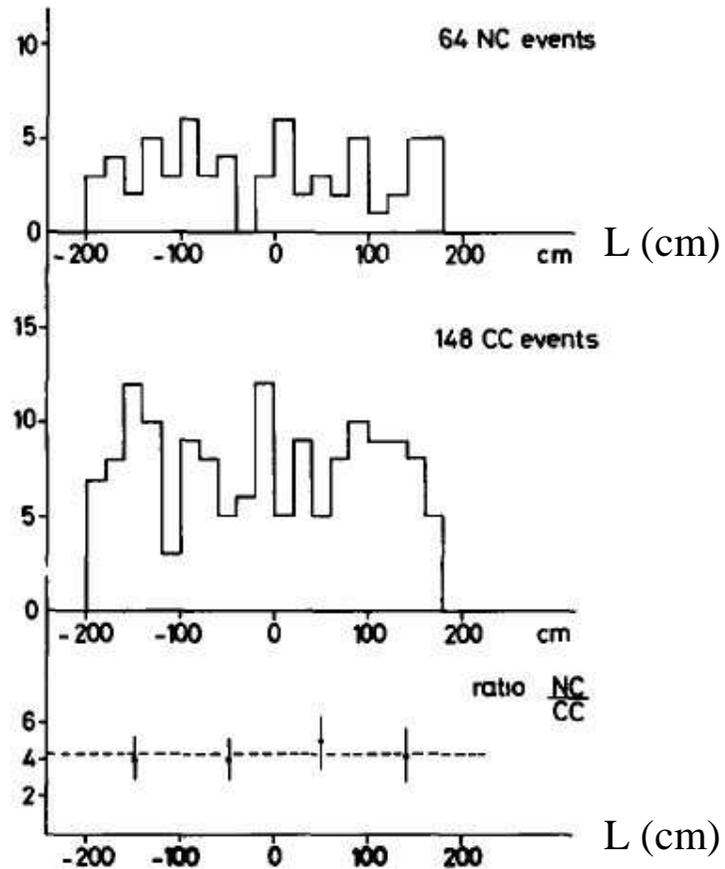
■ Sélection AS :

- ◆ comme pour les NC, mais
- ◆ produit par un événement CC dans la même photo.

| | Faisceau ν | Faisceau $\bar{\nu}$ |
|-------------------------|----------------|----------------------|
| Nombre de photographies | 83000 | 207000 |
| Nombre de candidats CC | 428 | 148 |
| Nombre de candidats NC | 102 | 64 |
| Nombre de candidats AS | 15 | 12 |

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

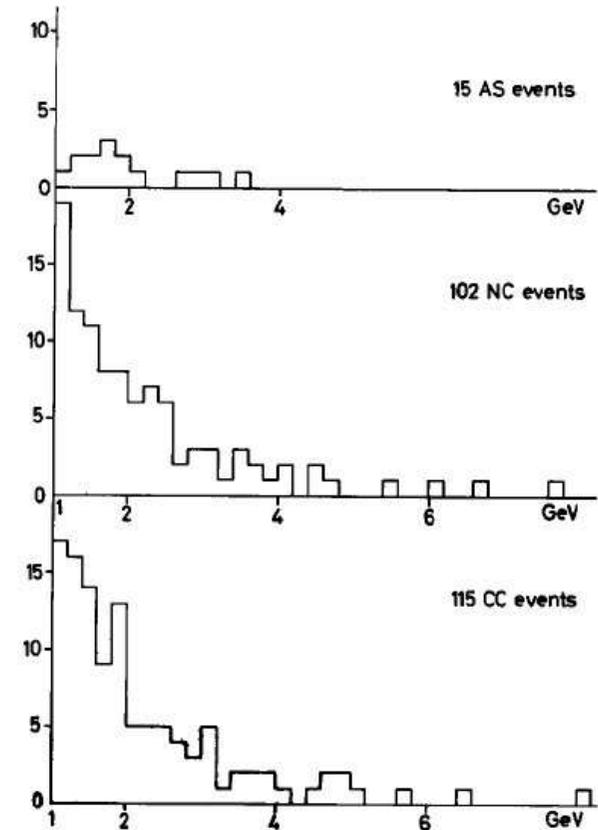
Distributions longitudinale et radiale (r^2) des événements antineutrinos



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

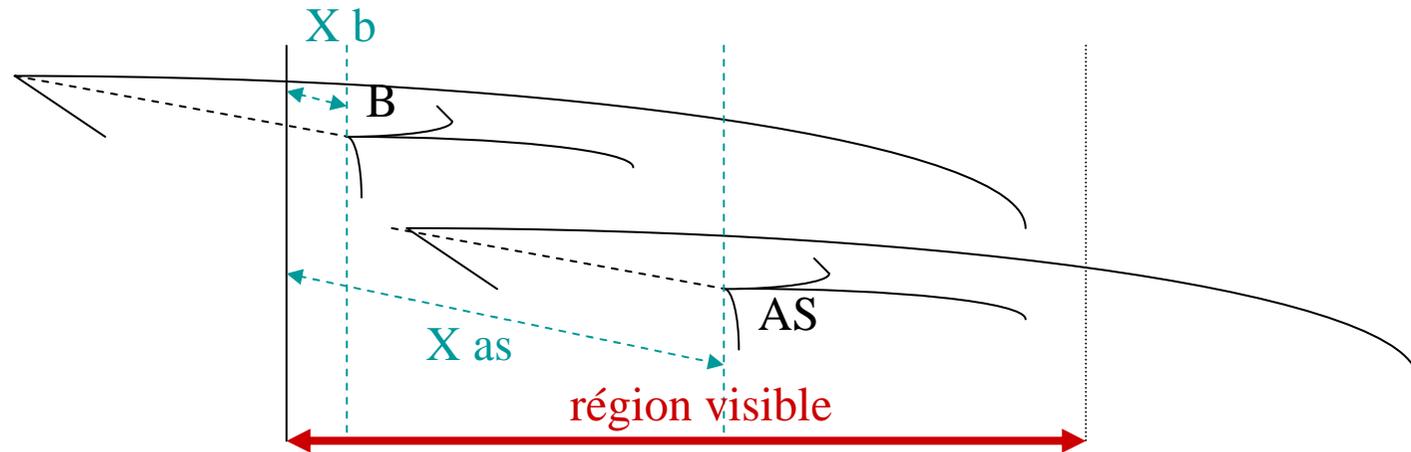
Des premiers éléments en faveur d'interactions de neutrinos

- La distribution des points d'interaction le long de l'axe de la chambre est **uniforme**, tant pour les NC que pour les CC.
- La distribution radiale (en r^2) de ces points est également **semblable pour les CC et les NC**.
- La distribution de l'énergie **hadronique** des candidats CC et celle des candidats NC sont semblables et différente de celle des AS.
- Les distributions des **longueurs de vol dans le volume visible** des NC et CC sont semblables (et \neq de celles des AS) (méthode de Bartlett proposée par A. Pullia) :
 - ◆ $\lambda > 2,70$ m pour CC (90% c.l.)
 - ◆ $\lambda > 2,20$ m pour NC (90% c.l.)
- ... alors que **la longueur de collision inélastique dans le liquide des neutrons aux énergies de quelques GeV** est de $\lambda_i = 0,75$ m,
- ... mais **la longueur effective** pour produire une « étoile » de plus de 1 GeV (**effet de cascade**) est plus grande et estimée à $\lambda_e = 0,95 \pm 0.10$ m.



Énergie hadronique (GeV)

Un raisonnement statistique simple (A. Rousset)
montrant que le rapport B/AS est au plus de l'ordre de l'unité



■ **Simplifications** : on suppose le milieu homogène et on raisonne sur les neutrons de direction donnée.

■ X = distance entre l'étoile (B ou AS) et le bord de la zone visible, prise le long de la ligne de vol du neutron

◆ distribution en X des B : $dN_B/dX = n_0 \exp(-X/\lambda_e)$

◆ distribution en X des AS : $dN_{AS}/dX = n_0 [1 - \exp(-X/\lambda_e)]$

■ **Prendre la moyenne** sur toutes les abscisses X

(distribution uniforme pour B+AS) et sur les directions : $\frac{B}{AS} = \left\langle \frac{1}{1 - \exp(-X/\lambda_e)} \right\rangle - 1$

L'argument décisif

Le rapport B/AS est au plus de l'ordre de l'unité

- Même en tenant compte des incertitudes sur la longueur effective λ_e d'interaction des neutrons, un calcul simple (A. Rousset) montre que le rapport B/AS doit être au plus de l'ordre de l'unité.

- ◆ Dans un milieu homogène, et pour une distance X donnée entre l'étoile et le bord de la zone visible, prise le long de la ligne de vol, on doit avoir

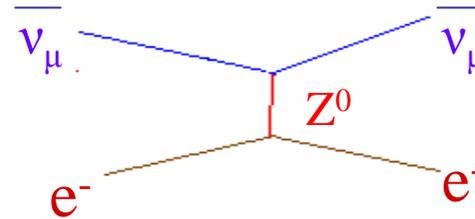
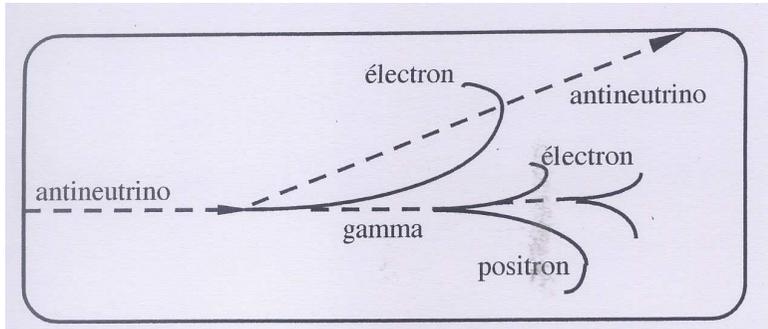
$$\frac{B}{AS} = \left\langle \frac{1}{1 - \exp(-X / \lambda_e)} \right\rangle - 1 \quad B/AS \approx 1 \text{ même si } \lambda_e = 2\lambda_i$$

- Deux programmes de simulations indépendants

(D. Blum et J.-P. Vialle au LAL, W. Fry et D. Haidt au CERN)

- ◆ prise en compte de tous les matériaux environnant la chambre
 - ◆ **hypothèse pessimiste** : on choisit le spectre et la distribution angulaire des neutrons **comme si tous les NC étaient dus à leurs interactions**
 - ◆ On trouve néanmoins **$B/AS = 1,00 \pm 0,25$**
- Or, les événements associés sont très peu nombreux
→ le fond à soustraire représente moins de 15% du signal de NC

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).
- L'interprétation de l'événement comme fond (interaction $\nu_e + n \rightarrow e^- (+ p \text{ invisible})$ dans un faisceau **d'antineutrinos** est peu vraisemblable.(0,03 événements attendus)

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

Direction des antineutrinos incidents



Fond dominant : $\nu_e + n \rightarrow e^- + p$ de très basse énergie
dans un faisceau d'antineutrinos ! (0,03 événements attendus)

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 IRFU/SPP 2010

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:

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

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

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/\bar{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.

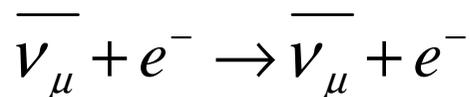
*⁸ On leave of absence from University and INFN-Pavia.

*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.

Publication et premières présentations (été 1973)

- L'article présentant l'unique événement candidat



est publié également le 3/09/1973

- Pour les théoriciens, ce canal rare entre leptons était important car **complètement calculé par 't Hooft**
- La collaboration Gargamelle reste cependant prudente (cf. le titre « **Search for elastic muon-neutrino electron scattering** ») mais donne un intervalle de confiance pour l'angle électrofaible $0,1 < \sin^2 \theta_W < 0,6$

SEARCH FOR ELASTIC MUON-NEUTRINO ELECTRON SCATTERING

F.J. HASERT, H. FAISSNER, 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. LEMONNE, J. SACTON, W. Van DONINCK and P. VILAIN*
Interuniversity Institute for High Energies, U.L.B., V.U.B. Brussels, Belgium

C. BALTAY**², D.C. CUNDY, D. HAIDT, M. JAFFRE, P. MUSSET, A. PULLIA**³,
S. NATALI**⁴, J.B.M. PATTISON, D.H. PERKINS**⁵, A. ROUSSET, W. VENUS**⁶ and H.W. WACHSMUTH
CERN, Geneva, Switzerland

V. BRISSON, B. DEGRANGE, M. HAGUENAUER, L. KLUBERG, U. NGUYEN-KHAC and P. PETIAU
Laboratoire de Physique des Hautes Energies, Ecole Polytechnique, Paris, France

E. BELLOTTI, S. BONETTI, D. CAVALLI, C. CONTA**⁷, E. FIORINI and M. ROLLIER
Istituto di Fisica dell'Università, Milano and I.N.F.N. Milano, Italy

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

and

F.W. BULLOCK, M.J. ESTEN, T. JONES, J. MCKENZIE, A.G. MICHETTE**⁸,
G. MYATT**⁹, J. PINFOLD and W.G. SCOTT**¹⁰,
University College, University of London, England

Received 2 July 1973

One possible event of the process $\nu_{\mu} + e^{-} \rightarrow \nu_{\mu} + e^{-}$ has been observed. The various background processes are discussed and the event interpreted in terms of the Weinberg theory. The 90% confidence limits on the Weinberg parameter are $0.1 < \sin^2 \theta_W < 0.6$.

Recently many theoretical models have been postulated in an attempt to resolve the divergence of the classical current-current theory by unifying the weak and electromagnetic interactions. All these theories require neutral currents, heavy leptons or both. One of these theories, that of Salam and Ward [1] and Weinberg [2], gives specific predictions about the

amplitudes of the neutral currents which are susceptible to experimental tests.

In particular, using this model, 't Hooft [3] has calculated the differential cross sections for the purely leptonic processes

$$\nu_{\mu} + e^{-} \rightarrow \nu_{\mu} + e^{-} \quad (1)$$

*1. Centre de Recherches Agréées à l'I.N.F.N. Belgique.

**2. Columbia University, New York, U.S.A.

**3. On leave from the University of Milan.

**4. Istituto di Fisica, Bari, Italy.

**5. And at the University of Oxford, England.

**6. Rochester High Energy Laboratory, Chilton, England.

**7. On leave of absence from the Sezione INFN and University of Pavia.

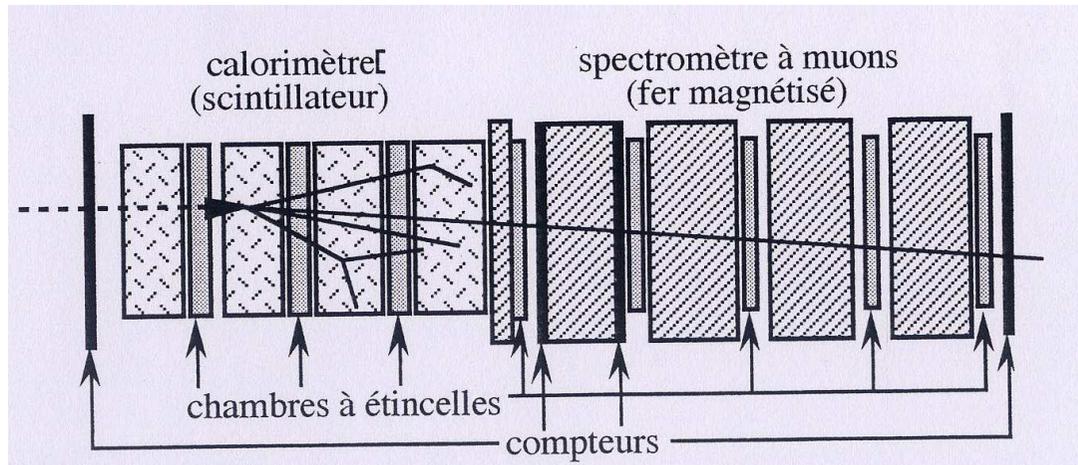
**8. Grant from the Science Research Council.

4. L'épisode des « courants alternatifs » HPW

- L'expérience concurrente HPW au Fermi Lab.
- Les oscillations HPW
- 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.

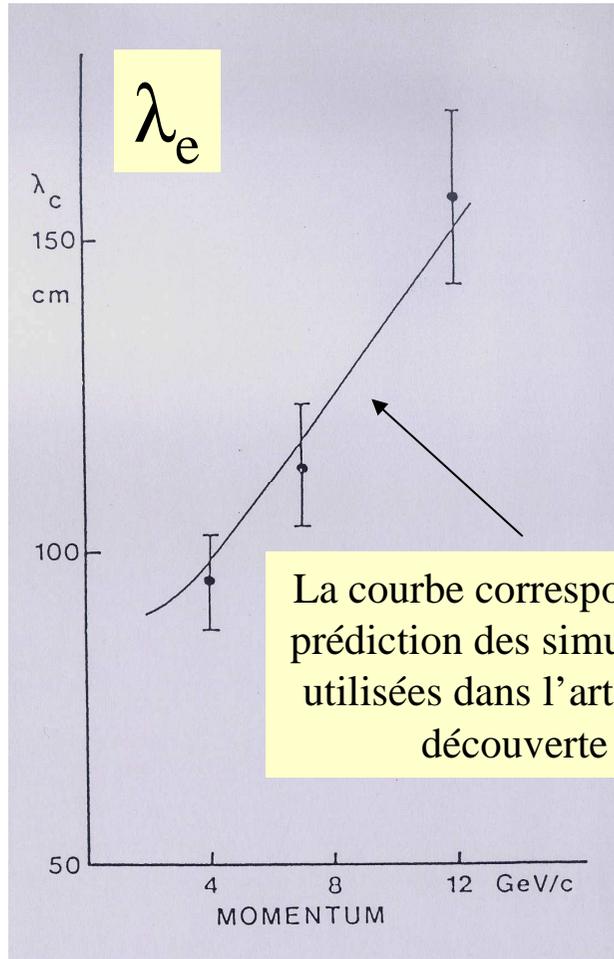
L'expérience concurrente HPW au Fermi Lab.

- 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 augmenter l'acceptance des μ à grand angle.
 - ◆ ... mais μ identifiés par la traversée de 1,3 m de fer, au lieu de 4 m dans la première version

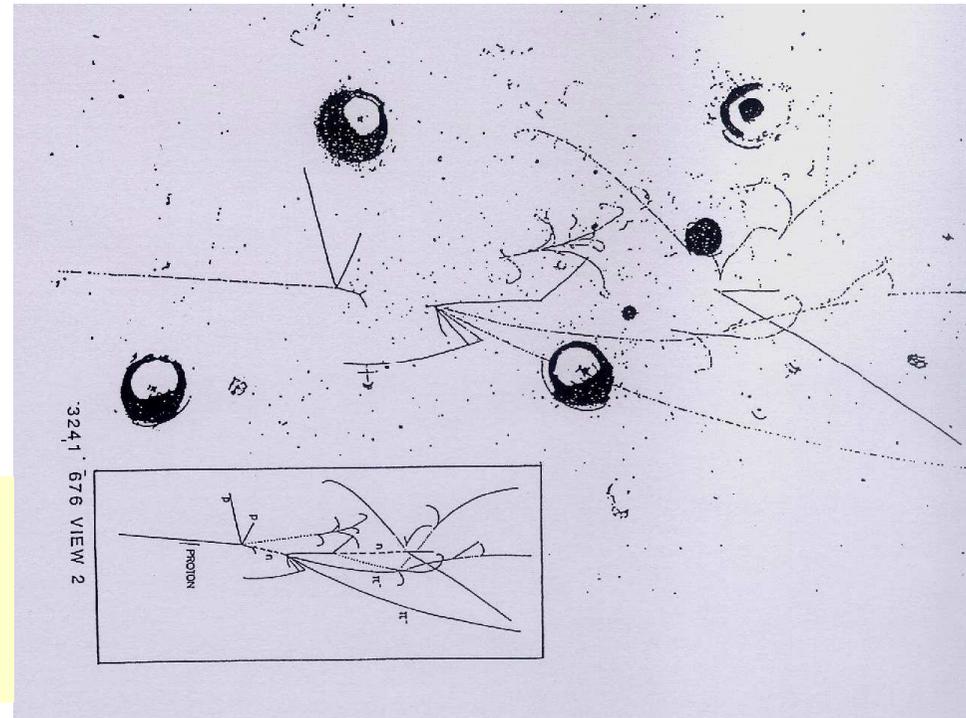
4.b Face aux oscillations de l'expérience HPW ...

- 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 :
 - ◆ soumission de l'article détaillé de Gargamelle à Nuclear Physics B, le 10 Janvier 1974
 - ◆ mesure expérimentale des longueurs d'interaction de neutrons dans le liquide (en envoyant en Novembre 1973 dans Gargamelle des protons de 4, 7, 12 et 19 GeV/c) : accord avec la prédiction des simulations utilisées dans l'article de 1973.
 - ◆ augmentation de la statistique d'événements associés.
 - ◆ découverte (au LAL) d'un second événement $\bar{\nu}_\mu + e^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu + e^-$ (Janvier 1974)
- 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.

... les dernières vérifications de Gargamelle : Mesure de la longueur effective des cascades nucléoniques



Novembre 1973



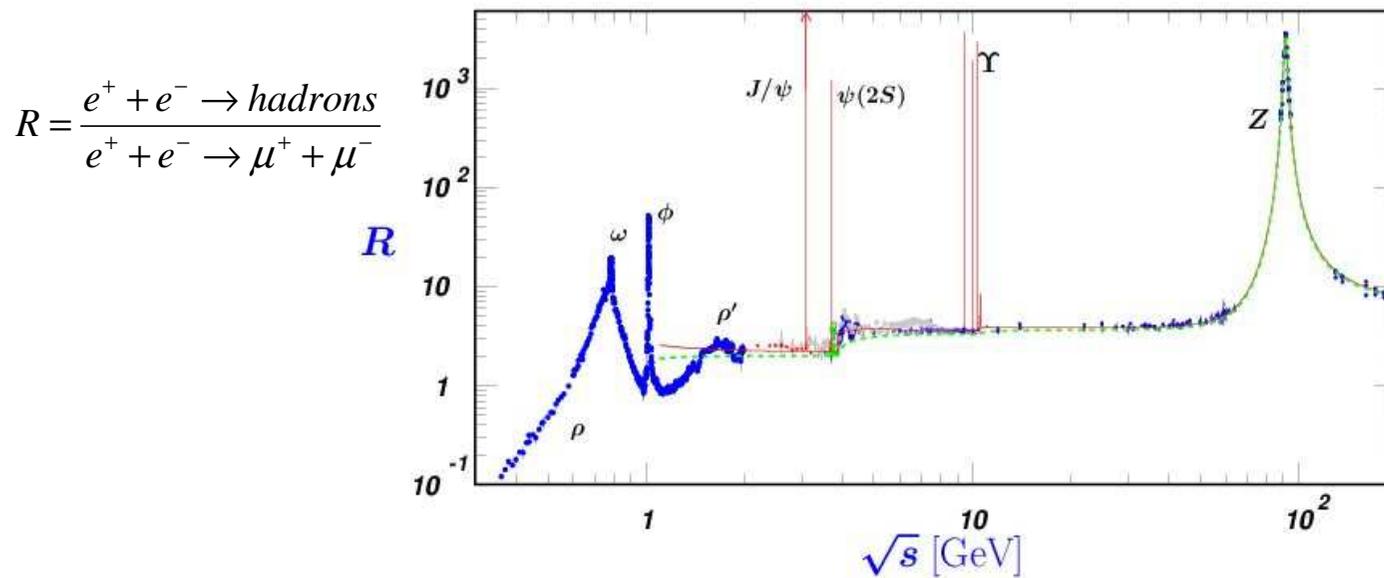
4.c Le triomphe de Gargamelle

- 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.



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 al.) et UA2 (P. Darriulat et al.) 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 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 |

Nouveau schéma proposé

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

Pourquoi le charme ?

Dans une théorie de jauge non commutative, si un boson est couplé à un courant, il doit y avoir un boson vecteur couplé à leur commutateur.

■ Modèle à 3 quarks

◆ Courant de quarks couplé à W^+
$$\begin{pmatrix} \bar{u} \\ \bar{d} \\ \bar{s} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ d \\ s \end{pmatrix} = \bar{q} C q \quad [C, C^+] = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\cos^2 \theta & -\sin \theta \cos \theta \\ 0 & -\sin \theta \cos \theta & -\sin^2 \theta \end{pmatrix}$$

◆ Courant de quarks couplé à W^-
$$\begin{pmatrix} \bar{u} \\ \bar{d} \\ \bar{s} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \cos \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ d \\ s \end{pmatrix} = \bar{q} C^+ q$$
 Commutateur non diagonal → courants neutres changeant S

■ Modèle à 4 quarks

◆ Courant de quarks couplé à W^+
$$\begin{pmatrix} \bar{u} \\ \bar{c} \\ \bar{d} \\ \bar{s} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & 0 & -\sin \theta & \cos \theta \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ c \\ d \\ s \end{pmatrix} = \bar{q} C q \quad [C, C^+] = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

◆ Courant de quarks couplé à W^-
$$\begin{pmatrix} \bar{u} \\ \bar{c} \\ \bar{d} \\ \bar{s} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ c \\ d \\ s \end{pmatrix} = \bar{q} C^+ q$$
 Commutateur diagonal → pas de courants neutres changeant 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.

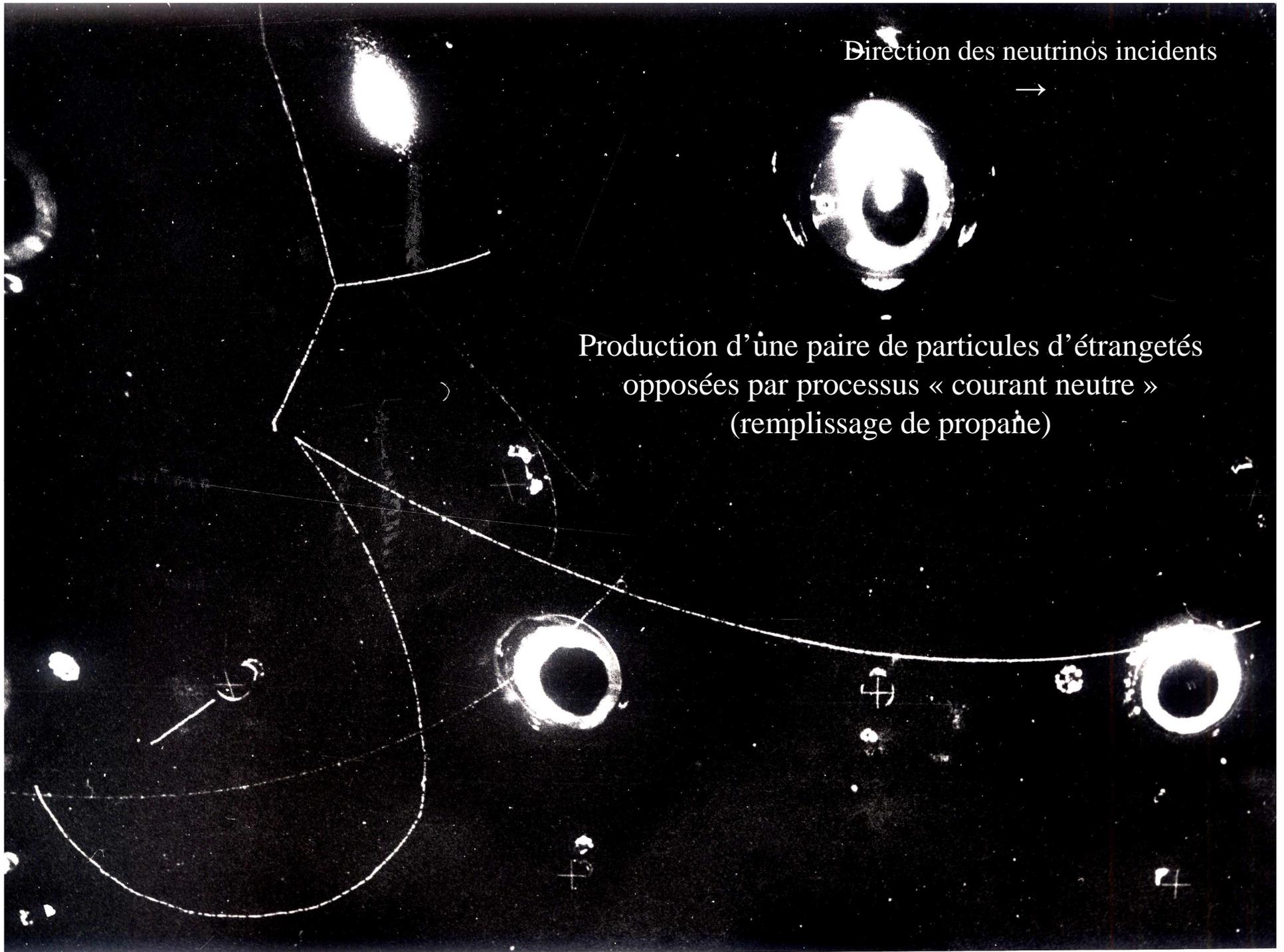
6. Épilogue

- 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
 - ◆ 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.)... 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.

