

LA DECOUVERTE DES COURANTS NEUTRES

1973

Violette Brisson

La Physique (→1969)

➤ Interactions élémentaires : unification

- **Gravitation** Newton
- **Electromagnétisme** Maxwell
- **Interaction faible** β -decay: $n \rightarrow p + e + \bar{\nu}$ → Pauli ($m_\nu = 0$) Soleil
- **Interaction forte** nucléaire

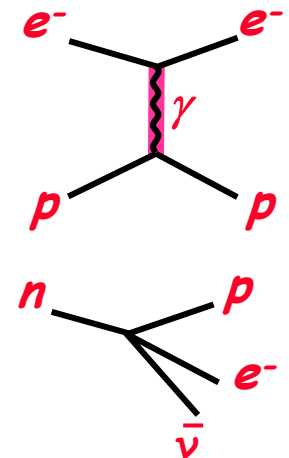
➤ Interaction faible

- Théorie de Fermi (1934): I. faible sur modèle de e.m.

- E.m.: $e^- + p \rightarrow e^- + p$ par échange de photon virtuel
courant électrique conserve → **Courant neutre**
- Faible : $n \rightarrow p + (e^- + \bar{\nu})$ → **Courant chargé**

➤ ~1960: idée ttes interactions: échange de bosons vecteurs

- QED (γ de masse nulle)
- I. faible (W^+, W^-) Théorie V-A, pas OK à haute énergie
- I. forte : Yukawa (1930) → échange de π entre nucléons



➤ **1960-70: Recherche principe unificateur pour toutes interactions:**
Principe d'invariance de jauge

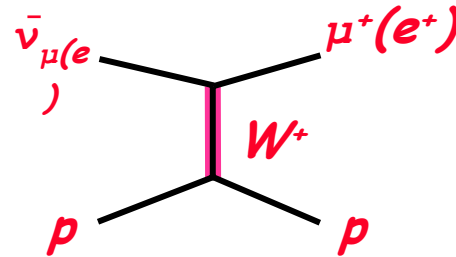
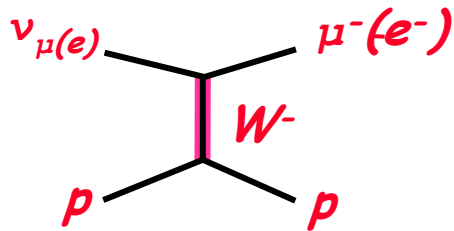
- Invariance dans opérations de symétrie locales (X,t)
- **QED:** inv.de jauge → conservation de charge électrique → photon nécessaire → champ de jauge (masse=0). Théorie ok.
- **Théories de Yang et Mills:** essai de généralisation aux int. nucléaires mais **problème de masse: champs de jauge doivent avoir masse = 0**
- **I faible: Glashow Salam Weinberg(1964)** → théorie voisine de QED
4 bosons vecteurs W^+, W^-, W^0, B^0 $\theta_W = \text{angle de mélange e.m./IF}$
 $\gamma = B^0 \cos \theta_W + W^0 \sin \theta_W$ $Z^0 = -B^0 \sin \theta_W + W^0 \cos \theta_W$
 γ et Z = bosons pour e.m et faible → **COURANTS NEUTRES**
- problème: bosons doivent avoir **m=0**
 - **Mecanisme de Higgs (1963):**
 - brise la symétrie initiale par champ supplémentaire
→ se couple aux particules → **masse**
 - **Théorie en principe renormalisable** (pas de divergences dans calculs de σ)
pas démontré.

➤ Neutrinos : sonde idéale pour les I. faibles

➤ Agit seulement par interaction faible

➤ Ni masse ni structure

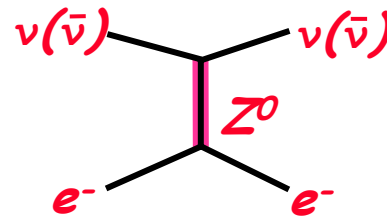
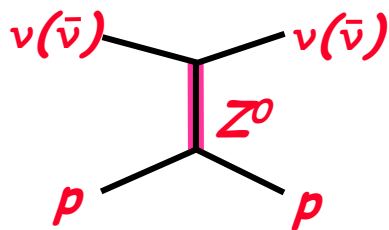
➤ Courants Chargés $\nu + N \rightarrow \mu + N$



➤ Courants Neutres : hypothétiques, jamais vus

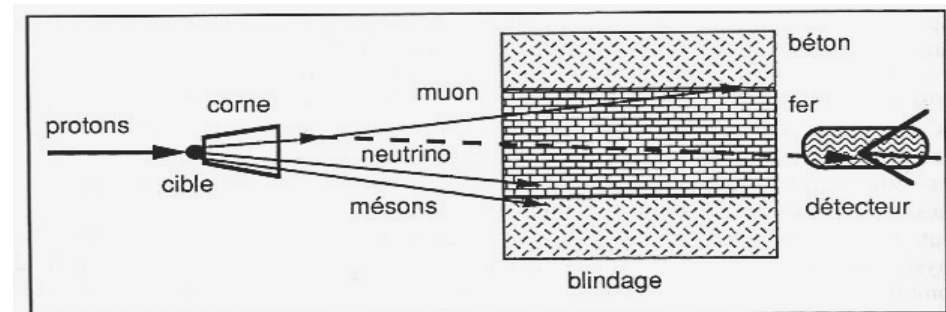
$\nu + N \rightarrow \nu + N$

$\nu + e \rightarrow \nu + e$



Accélérateurs - Faisceaux 1960 -1975

- Au CERN : Proton Synchrotron
 - 25 GeV , 10^{12} à 10^{13} protons/pulse
 - Faisceaux Neutrinos :
 - Entre 1960 et 1970: 3 faisceaux successifs
 - 10^{10} à 10^{11} Neutrinos/pulse
De 1 à 12 GeV



- Aux USA : - Alternate Gradient Synchrotron
Brookhaven , protons de 30 GeV
Faisceau Neutrinos ν_{μ} et ν_e (Lederman,
1962 Schwartz, Steinberger)
-FermiLab (Batavia)
Protons de 400 GeV (1972)
Faisceau Neutrinos de 10 à 100 GeV

Détecteurs - Chambres à Bulles

- Détecteurs type "électronique"
- Chambres à traces
 - Chambres de Wilson (cosmiques)
 - Chambres à bulles (D.Glaser 1952)
 - Principe
 - Liquide sous pression près de bouillir.
Détente brutale : passage d'une particule chargée =
ébullition due à l'ionisation des atomes, Photo de la
trace
 - Liquide
 - Hydrogène ,X-Saclay,Cern 2m. BEBC,USA 7",12", 15"
inconvenients : 25 K, neutres perdus
avantages : cible = protons (chambres "nobles")
OK pour exp. de production Int.Fortes
 - Liquides lourds: Propane, Fréons
 - Avantages de 20 a 50 deg C, on voit tout
inconvenients: cible complexe
OK pour Interactions faibles

Les ancêtres de Gargamelle 1955-1963

- 1955-André Lagarrigue: Berkeley→Paris (LLR-X)
 - Chambres à Bulles à LIQUIDES LOURDS

- BP1

4 l

Propane
LLR



- BP2

20 l

Prop.+ Iodure-méthyle
LLR puis SACLAY

π -1GeV (thèse Musset)



- BP3

300 l

Propane+Fréon lourd
LLR à SACLAY(aimant)

π - 1 GeV (th.J.Six)

1960:CERN, π^- , K^+ , K^-
I.Faibles :decay modes



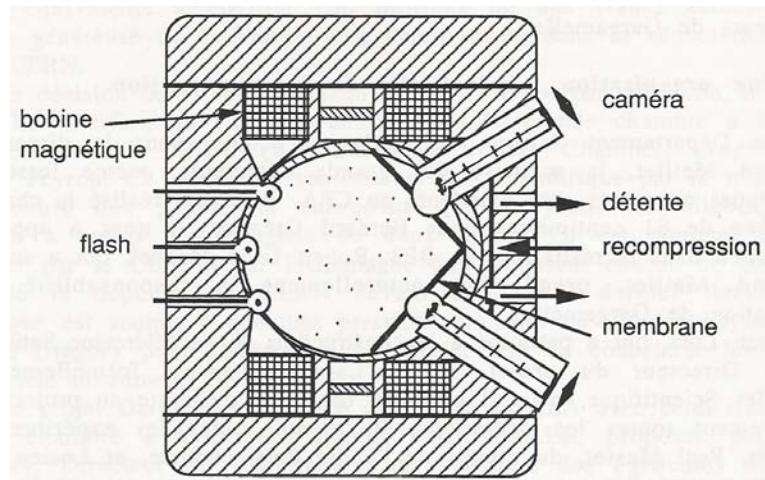
Thèses:D.Drijard, JJ.Veillet
B.Aubert, C.Pascaud, L.Behr
P.Petiau, U.Nguyen-Khac, C.Baglin

GARGAMELLE

- **1963 : Naissance de l'idée au congrès de Sienne**
 - **Chambre à liquide lourd (tout voir) nom:LLR**
 - Très grande (stat), très longue (pour i.d.neutrinos)
- **Aout 1964 : première proposition (réaliste)**
 - L = 4,8 mètres, diamètre 1,9 m , 8 caméras
- **Oct. 1964 : A. LAGARRIGUE Professeur à ORSAY**
 - Part au LAL avec la moitié du groupe Liquides Lourds LLR (208)
- **1964-1965 : Politique**
 - **Construction : possible au CEA-Saclay, département Saturne**
 - **CERN**
 - Comités scientifiques : OK pour Gargamelle au Cern
 - Conseil et Comité des Finances : pas vraiment OK
 - Finalement 2/12/65 **Accord signé CEA - Direction CERN**
Victor Weisskopf et Bernard Gregory

Construction

- Construction au CEA Saturne
(R. Levy-Mandel)
 - Direction J Lutz (+ P. Musset + L. Alfille)
 - Conseiller scientifique A Lagarrigue
A. Rousset, et quelques physiciens
(A. Bezaguet, P. Petiau, JJ. Veillet, V. B.)
Finances : CEA+CNRS (~20 ME)



Collaboration et "Livre Blanc"

- "Grande" Collaboration se forme
 - Amorcée avec précédentes expériences:
 - 7 laboratoires européens : Aachen, Bruxelles, Cern, Ecole Polytechnique, Milan, Orsay, UCL-Londres, environ 50 physiciens
 - Gargamelle users'committee

- Livre Blanc
 - 1968 Workshop à Milan:
 - Proposals : faisceaux de K^- , K^+ , π de haute énergie, neutrinos : W , canaux élastiques, exclusifs, facteurs de forme du proton (28).....
mais courants neutres en 10 ième priorité !!!!!

Lumière dans la grisaille

➤ 1969 Expérience de SLAC : Les PARTONS

➤ J.Friedman, H.Kendal, R.Taylor

➤ $\sigma (e^- + p) \rightarrow \Sigma(\text{composants ponctuels}) \quad E_e \sim 20 \text{ GeV}$

➤ Electrons \rightarrow diffusions a grand angle trop frequentes

➤ structure interne granulaire du proton : grains quasi ponctuels

➤ Partons = quarks predits par Gell-Mann(1964)(foisonnement de nouvelles particules) \rightarrow 3 quarks de charge fractionnaire.
De plus, presence de "glue"

➤ Quarks confines dans proton,mais quasi libres a l'interieur

➤ 1970 (et +) \rightarrow Chromodynamique quantique (couleur)

➤ Invariante de jauge. Bosons mediateurs : les GLUONS

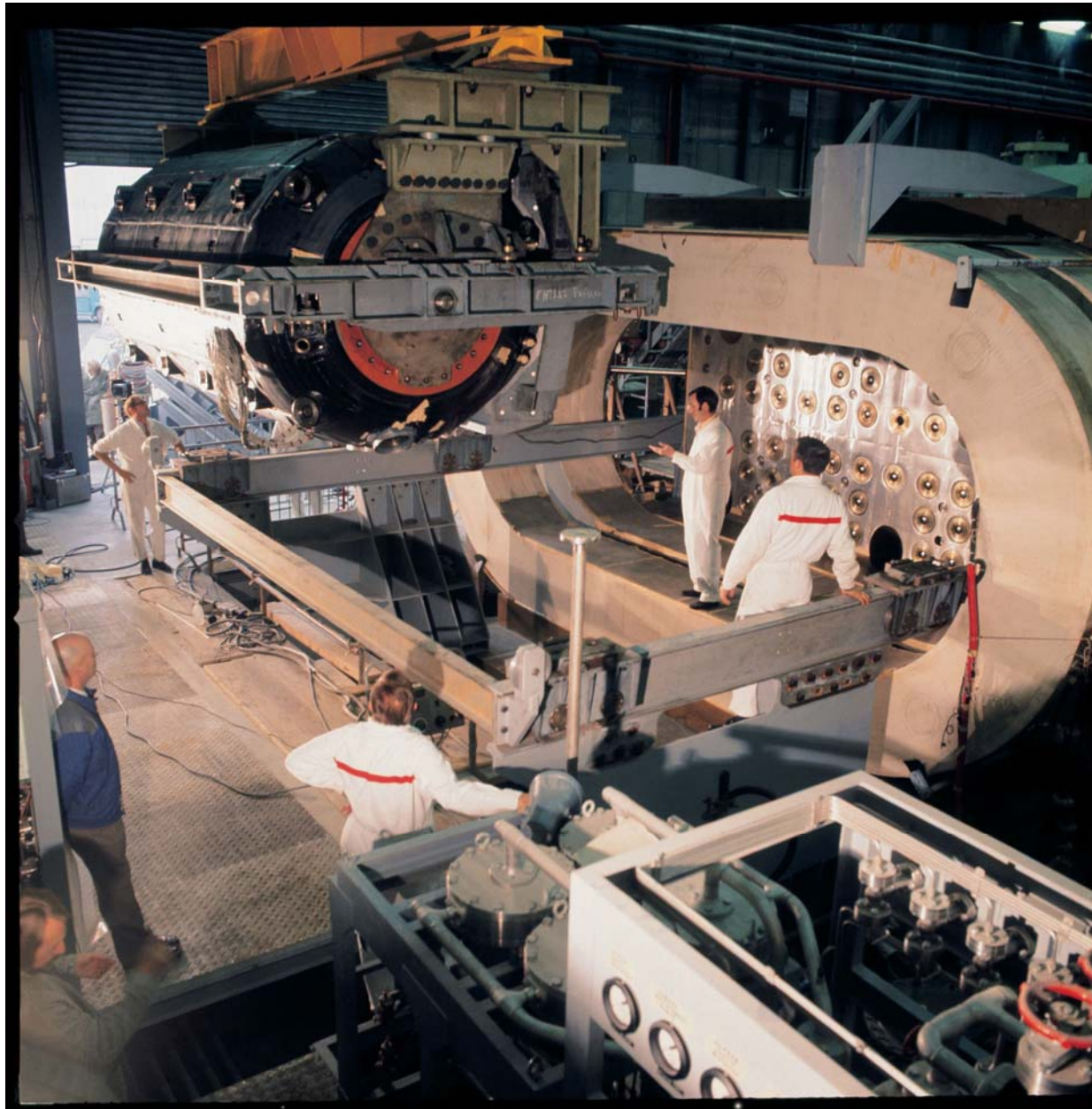
➤ Pour Gargamelle ,tres interessant :

➤ Neutrinos : très bonnes sondes pour les nucléons,tres petites

➤ Spectre d'energie \rightarrow verification d'invariance d'echelle
(Bjorken)

Juillet 1970 Gargamelle au Cern

- En 1969, A.Lagarrigue → Directeur du LAL
 - Continue Gargamelle et experience neutrino
- Decision pour montage
 - Problèmes de soudures mal faites
 - Multiples vérifications Passage aux Mines OK (1970)
 - Retard arrivée corps de chambre
 - Décision difficile: en principe montage a Saclay (Lag)
 - Décision finale: pas de montage a Saclay !!!!!
 - Transport de toutes les pièces au Cern ,installation de l'aimant. Arrivée du corps de chambre au Cern fin juillet.
 - Montée pour la première fois.
Installée dans son aimant dans le faisceau neutrinos fin décembre 1970 (photo).Equipe tres cosmopolite.
- **Déc.1970 :1ère photo prise dans Gargamelle (cosmiques)**
- **Nov 1970: disparition de Jean Lutz (directeur du projet-Saclay)**



8-9.06.06

L'expérience neutrinos

- Début 1971: première photo neutrino
- "run" neutrinos et antineutrinos : COURANTS CHARGÉS

- Réactions:



- Détermination:

- Sections efficaces ν et $\bar{\nu}$ pour vérifier modèle des partons

- Résultats (fin 1972)

- $\sigma(E) = (0.78 \pm 0.08) E \cdot 10^{-38} \text{ cm}^2/\text{Gev}$ neutrinos

- $\sigma(E) = (0.28 \pm 0.03) E \cdot 10^{-38} \text{ cm}^2/\text{Gev}$ antineutrinos -

- Rapport = 0.38 ± 0.02

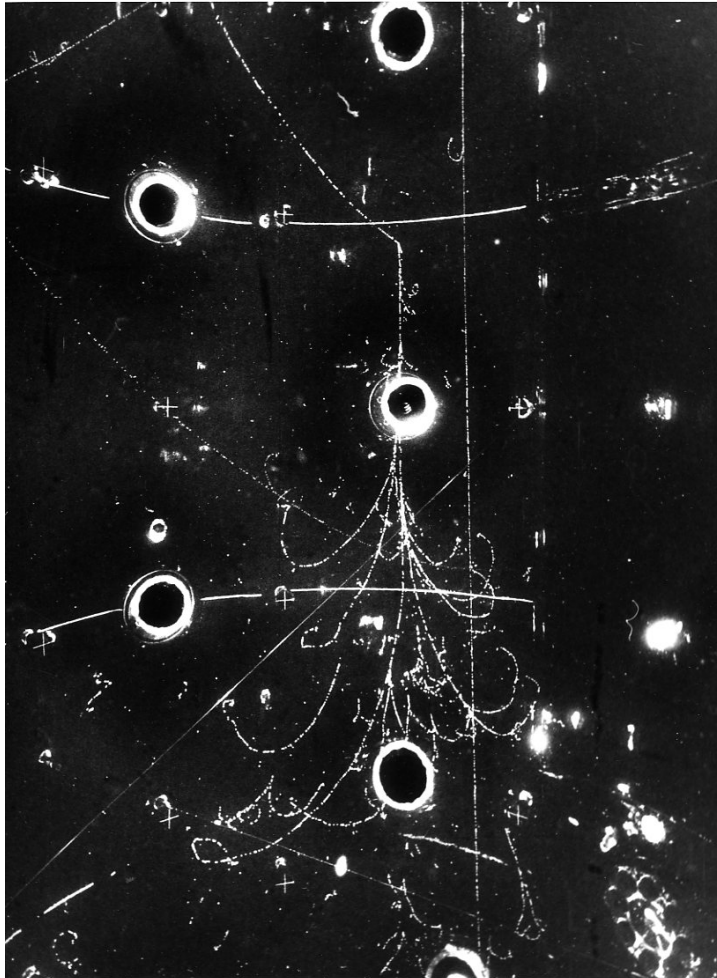
- Confirmation des partons, de spin $\frac{1}{2}$, charges $\frac{2}{3}$ et $-\frac{1}{3}$,

- Invariance d'échelle (Bjorken)

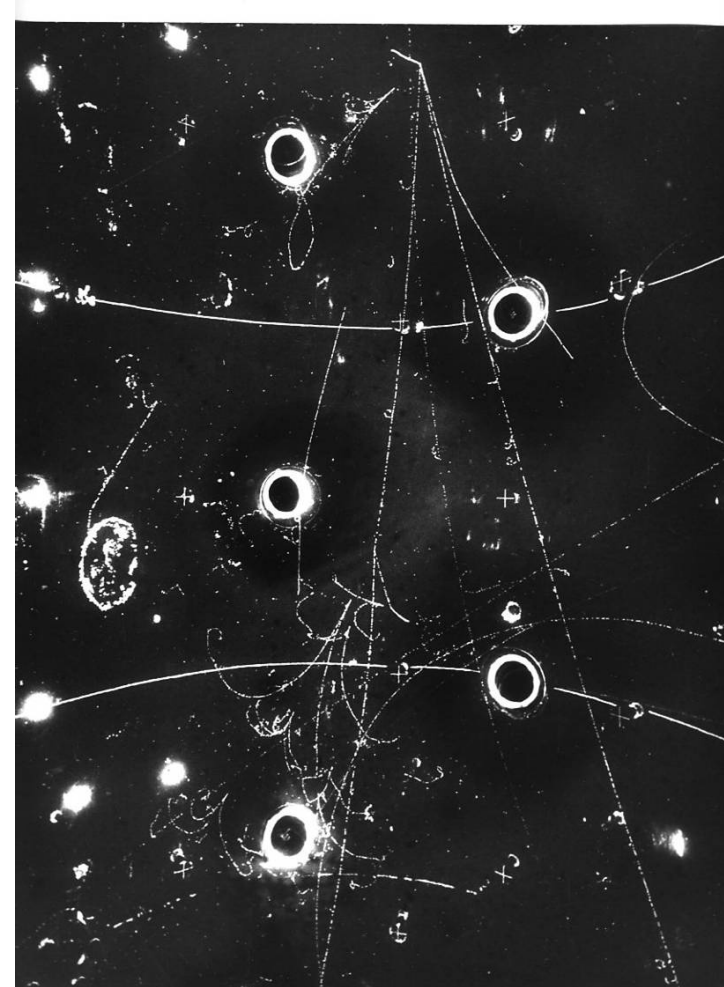
- $\Sigma(\text{moment des partons}) = \frac{1}{2}(\text{moment du proton})$

- ➔ GLUONS

Neutrinos en courants chargés



Neutrino électron

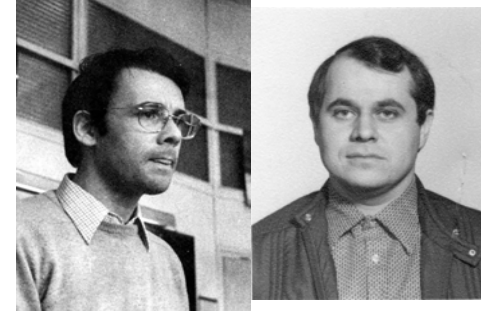
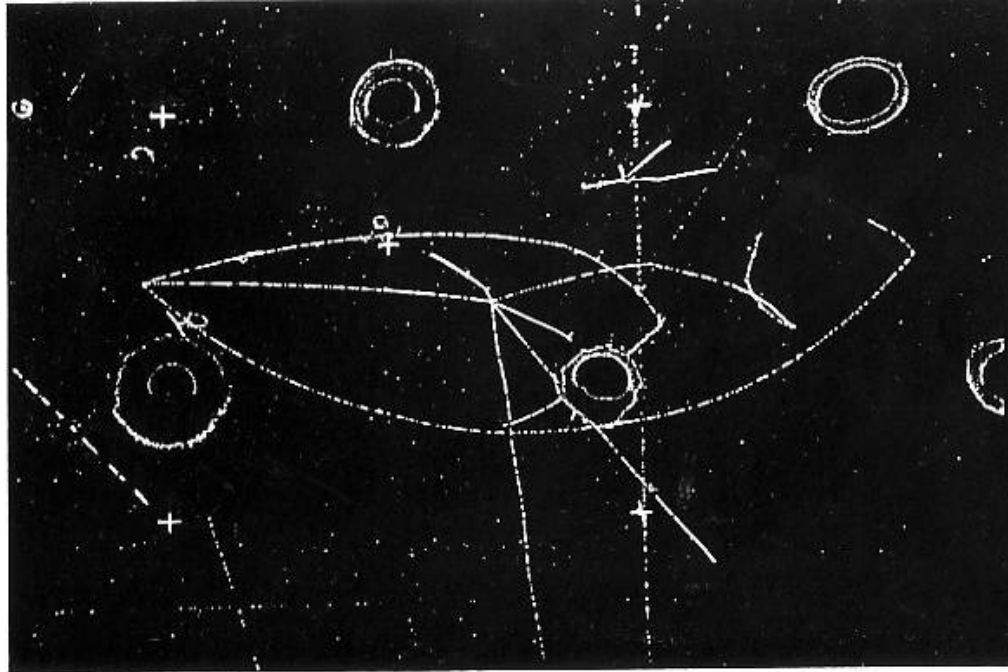


Neutrino muon

Les Courants Neutres

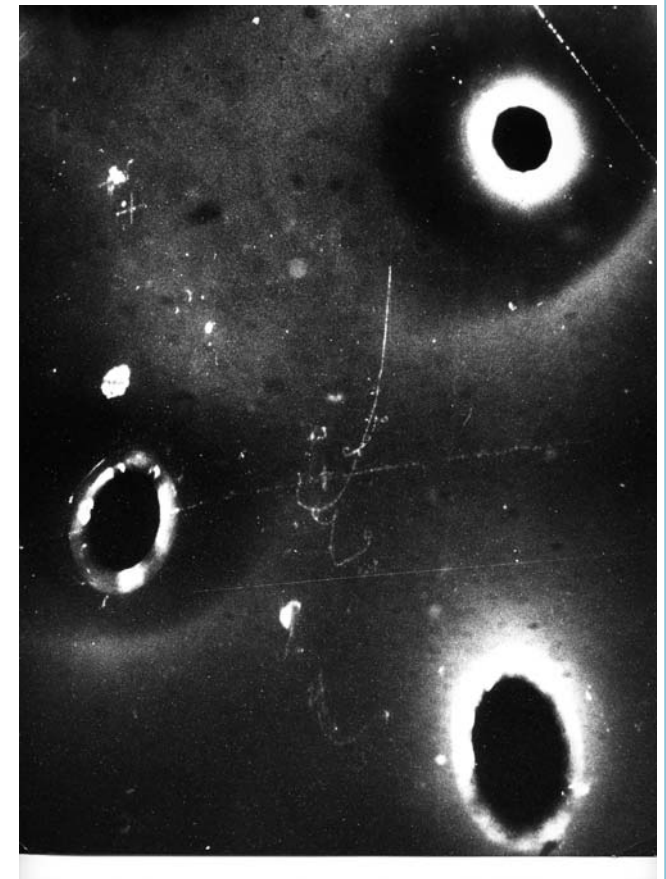
- Fin 1971: T'Hooft et Veltman $\Rightarrow \sigma(\nu_\mu + e \Rightarrow \nu_\mu + e)$
 - ➔ Théorie Renormalisable
 - Message théoriciens à Gargamelle:
chercher courants neutres
 - mais $\sigma(\nu + e \rightarrow \nu + e)$ très petite ($\sim 10^{-41} \text{cm}^2$)
 - $\sigma(\nu + N \rightarrow \nu + N) \sim 10^{-38} \text{cm}^2 \Rightarrow$ CN sur nucléons plus prometteurs
 - Première recherche à Milan: ~15 events C.N. (A. Pullia)
 - Grande excitation \Rightarrow Recherche intensive partout mars 72
 - Mai 1972 : examen des candidats au Cern : conviction
 - Beaucoup de visiteurs....
 - Congrès ICHEP Chicago août 1972: Résultats sur CC,
mais seulement limites sur $\sin^2\theta$ et candidats CN

Candidat Courant Neutre hadronique



Courants neutres (suite) Euphorie

- Décembre 1972: $\bar{\nu}_{\mu} + e \rightarrow \bar{\nu}_{\mu} + e$
à Aix la Chapelle - Courant neutre leptonique
 - Angle / faisceau ~ 0 deg,
 - Bruit de fond très faible (antineutrino)
 - 1973 Recherche CN hadroniques continue
 - 83000 photos ν , 207000 photos $\bar{\nu}$
 - analysées (mai 1973)
 - Dans volume de 3 m³
- | CC | CN | AS(n*associées) | |
|-----|-----|-----------------|---------------|
| 428 | 102 | 15 | neutrinos |
| 148 | 64 | 12 | antineutrinos |



Bruit de Fond des CN : les neutrons

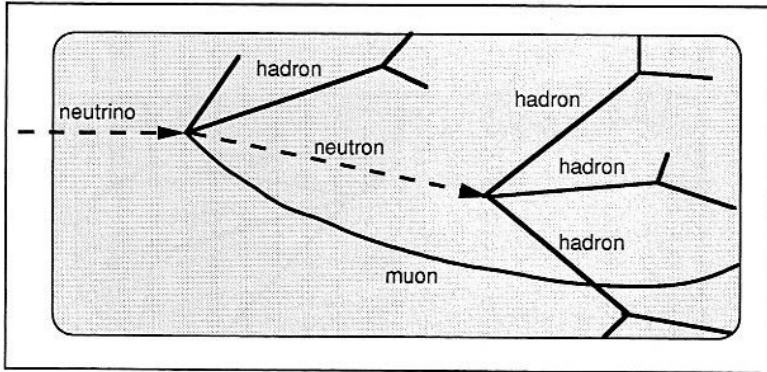


Figure IV-5. Un événement associé (AS). **AS**

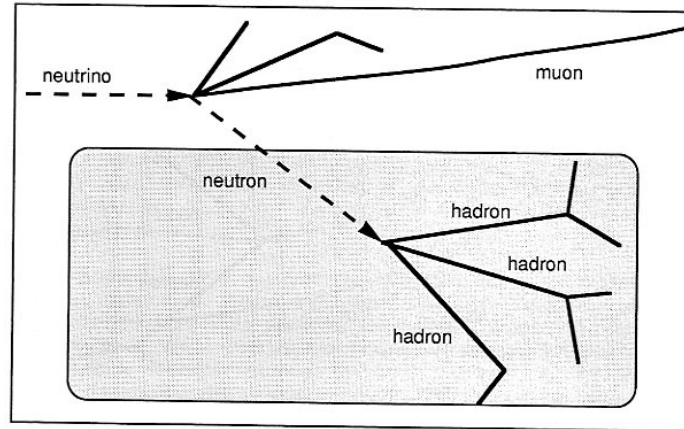
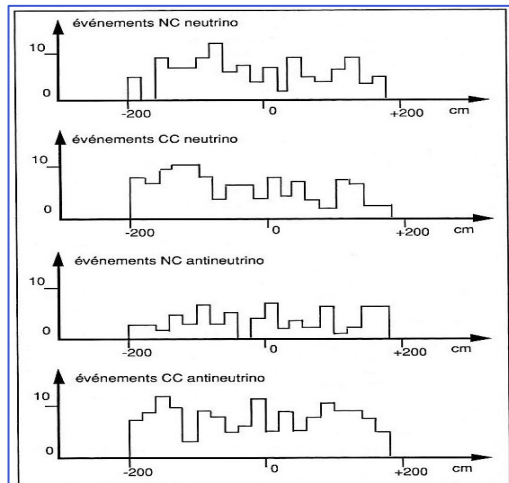


Figure IV-4. Un événement de bruit de fond B. **B**

Les CN
peuvent-ils
être tous des
neutrons
????



- Il faut calculer le rapport $B(\text{bruit})/AS(\text{associées})$ prédit
- Sélection : $E(\Sigma \text{hadrons}) > 1 \text{ GeV}$
- Si $B=NC$
On a B/AS expérimental égal à $102/15 \sim 6.8$ pour neutrinos et $63/12 \sim 5.3$ pour antineutrinos

➤ Evaluation

➤ Simulation : 2 programmes de Monte-Carlo

➤ Cern (Dieter Haidt + Jack Fry), LAL (Jean-Pierre Vialle)

➤ Géométrie : faisceau, blindage, chambre

➤ données physiques :

➤ flux neutrinos,

➤ AS fournissent : production de neutrons, dynamique de cascade hadronique (longueur effective d'interaction des neutrons Δ_{eff})

➤ Δ_{eff} mesurée (avec AS par Pullia, méthode de Bartlett)
➔ $\Delta_{\text{eff}} = 0.95 \pm 0.10$ m

➤ Δ_{eff} est $> \Delta_{\text{int}}$ sur fréon : élasticité des interactions de neutrons (n+n=n+n)

➤ Aucun paramètre libre dans les MC mais faciles à faire varier.

➤ Résultats:

Cern: (B/AS) = 0.7 ± 0.3

Orsay (B/AS) = 0.6 ± 0.3

➤ Vérification

➤ Distributions E , θ des neutrons (int.de.v)

➤ $dE / E \sim E^{-n}$ $dN/d\cos \sim e^{-\theta^2/2\theta_0^2}$

➤ Pour candidats CN

➤ $n = 1.1 (+/-0.3)$ $\theta_0 = 0.35 (+/- 0.05) \rightarrow B/AS = 1.0 +/- 0.3$

➤ Pour neutrons AS

➤ $n = 2.7 (+/- 0.5)$ $\theta_0 = 0.30 (+/- 0.05) \rightarrow B/AS = 0.6 +/- 0.3$

➤ Méthode d'équilibre neutrons-neutrinos (A.Rousset)

➤ $\rightarrow B/AS \sim 1$

➤ Conclusion:

$0.5 < B/AS \text{ évalué} < 1$

$B/AS \text{ observé} \sim 6$ si CN sont tous neutrons

**➔ les candidats CN sont essentiellement des
COURANTS NEUTRES**

Les Résultats

➤ Juillet 1973, premiers résultats

➤ Rapports Courants Neutres sur Courants chargés

➤ Après soustraction bruit de fond et corrections (petites)

➤ $CN/CC = 0.21 \pm 0.03$ (neutrinos) → UNIFICATION

➤ $CN/CC = 0.45 \pm 0.09$ (antineutrinos) $\sin^2 \theta_w < 0.4$

➤ Beaucoup de discussions dans la collaboration

➤ Séminaire au Cern (P. Musset): "Neutrinolike reactions" (19 juillet)... beaucoup de scepticisme. Rien à la presse

➤ Publications Physics Letters

➤ Courant neutre leptonique (Search for...) P.L.46B,121(1973)

➤ Reçu par PL le 2 juillet, paru le 3 septembre

➤ Courants neutres hadroniques (neutrinolike int. without muon) P.L.46B,138 (1973)

➤ Reçu par PL le 25 juillet, paru le 3 septembre

**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

CERN (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

E.P. (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

LAL (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.

La concurrence

➤ Expérience HPW a FermiLab

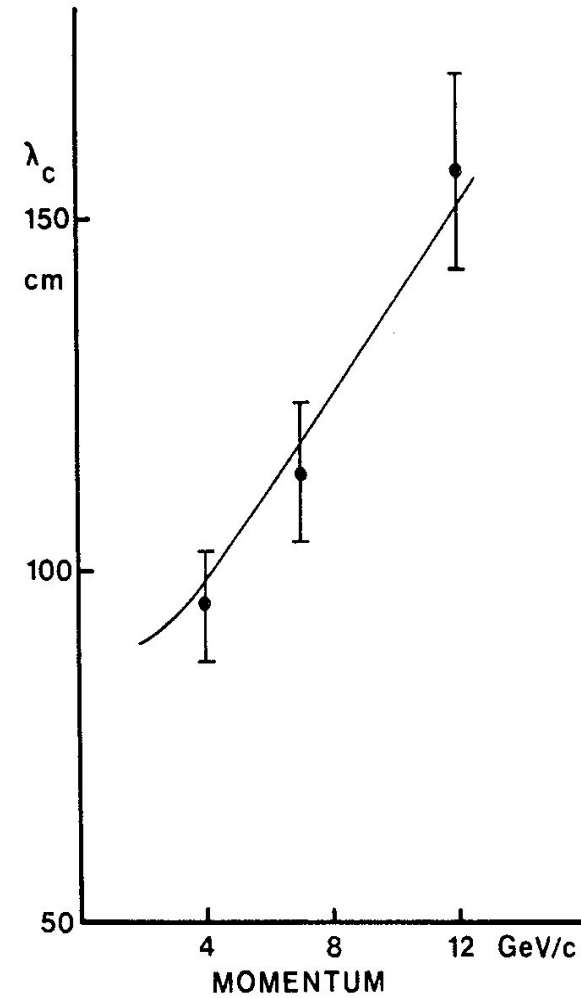
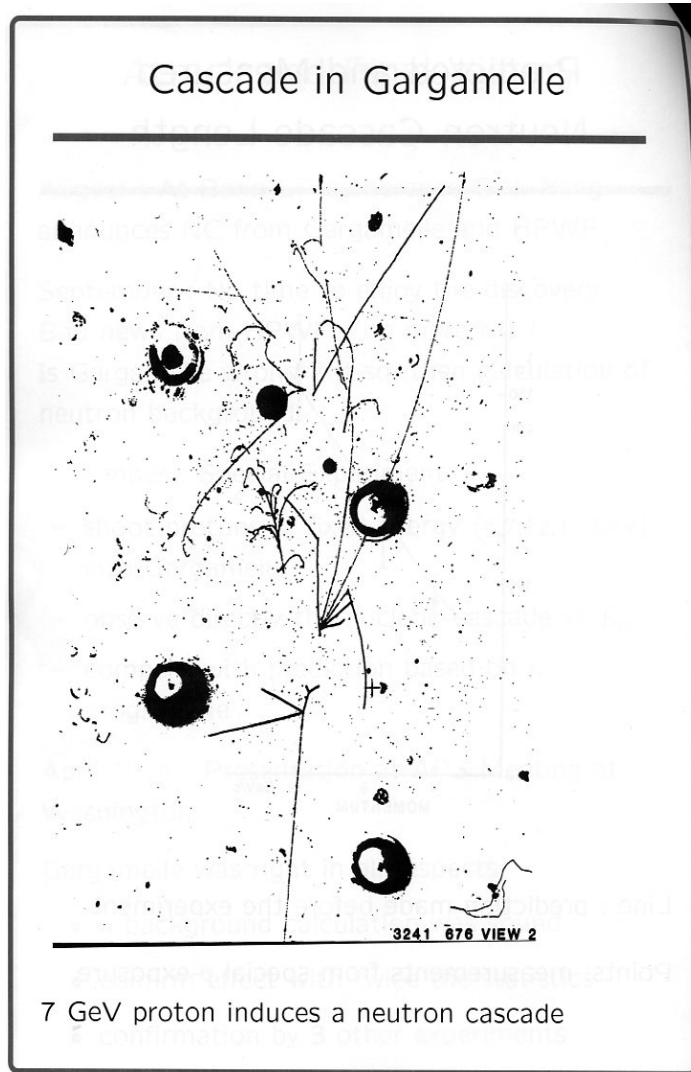
- Harvard (C.Rubbia), Pennsylvania (A.Mann), Wisconsin (D.Cline)
- Faisceau ν a large bande : $E_\nu \sim 10$ (E ν Cern)
- Détecteur: calo(scintillateur liquide) Ehad +spectro(fer magnétisé) E μ
- Trigger sur le mu, puis sur E hadrons pour CN a leur annonce
- Ete 1973: ont des candidats, mais pas de publication. En septembre modifient l'appareillage

➤ Octobre 1973 coup de théâtre: les courants neutres de HPW ont disparu

- Lagarrigue.....
- Scepticisme accru au Cern (et ailleurs)....
- Nous : confiants.
- Décision: renforcer tests des Monte Carlo pour Δ int. des neutrons.
Prises de données dans Gargamelle : faisceau de protons de 4,7,12 et 19 GeV pour mesurer cascade du neutron et comparer avec MC

➤ **Tout est correct pour nous**

Cascade d'un neutron (protons dans Gargamelle)



La Joie

- Janvier 1974 : 2ieme $\bar{\nu}_{\mu}+e \rightarrow \bar{\nu}_{\mu}+e$ Orsay
 - Sur 1000000 photos, 3 events $\rightarrow \sigma = (0.10+0.21-0.09)10^{-41}$ E cm²/électron
 - Le délire... pour nous plus de doutes
 - Février 1974: thèse de JP Vialle (Lag)
 - Avril 1974: Congres de Philadelphie
 - Rousset présente CN Gargamelle
 - CN HPW revenus , compatibles
 - CN vus a Argonne (CB H2 de 12 pieds)
 - ➔ COURANTS NEUTRES EXISTENT (Feynman?)
- Juillet 1974 : Conf. Londres (lepton-photon)
 - Cal.Tech. a FNAL: Barry Barish presente CN
 - COURANTS NEUTRES VRAIMENT ACCEPTES (?)
- ➔ 1977: ~10⁶ photos prises-mesures de couplages des courants neutres, sin² θ_w, fonctions de structure, distributions de partons, charme etc

Conséquence

➤ Les théories de jauge sont OK

- Pour l'interaction électrofaible, grâce aux **courants neutres**, (bosons: W^+ , W^- , Z^0)
- Pour les interactions fortes, avec la chromodynamique quantique, grâce à l'**expérience de SLAC** découvrant les quarks (bosons: les gluons)

➤ Ces 2 expériences sont la base du Modèle Standard

	1 ^{re} famille	2 ^e famille	3 ^e famille
	Les membres de la 1 ^{re} famille possèdent l'ensemble de la matière ordinaire: électrons, neutrons, atomes, ...	Plus que plus massive et instable de la 1 ^{re} famille. Découvert en 1975. Plus lourd que l'électron.	Plus qu'encore plus massive et instable de la 2 ^e famille. Découvert en 1975. Plus lourd que l'électron.
LEPTONS Particules insensibles à l'interaction forte.	e électron $m_e = 0,511 \text{ MeV}/c^2$ $q_e = -1$	μ muon $m_\mu = 105,7 \text{ MeV}/c^2$ $q_\mu = -1$	τ tau $m_\tau = 1,777 \text{ GeV}/c^2$ $q_\tau = -1$
	ν_e neutrino e $m_{\nu_e} < 2 \text{ eV}/c^2$ $q_{\nu_e} = 0$	ν_μ neutrino muon $m_{\nu_\mu} < 190 \text{ MeV}/c^2$ $q_{\nu_\mu} = 0$	ν_τ neutrino tau $m_{\nu_\tau} < 18,2 \text{ MeV}/c^2$ $q_{\nu_\tau} = 0$
QUARKS S'assemblent en triplets ou en paires quark-antiquark pour former les nombreuses particules subatomiques.	u haut / up $m_u = 2,3 \text{ MeV}/c^2$ $q_u = +2/3$	c charm / charm $m_c = 1,27 \text{ GeV}/c^2$ $q_c = +2/3$	t top $m_t = 173,1 \text{ GeV}/c^2$ $q_t = +2/3$
	d bas / down $m_d = 4,7 \text{ MeV}/c^2$ $q_d = -1/3$	s étrange / strange $m_s = 96 \text{ MeV}/c^2$ $q_s = -1/3$	b beau / beauty / bottom $m_b = 4,18 \text{ GeV}/c^2$ $q_b = -1/3$

Gravitation Attraction universelle, planètes, galaxies. GRAVITON?
Interaction faible Désintégrations radioactives. Z^0, W^+, W^-
Interaction électromagnétique Électricité, magnétisme, cohésion de l'atome et du cristal, chimie. PHOTON
Interaction forte Cohésion des protons et des noyaux. GLUON

La suite

- Beaucoup d'expériences ν au SPS et Fnal
 - pour mesurer les propriétés des courants charges et neutres (CDHS, CHARM, BEBC...etc)
 - Sections efficaces, fonctions de structure, distribution des quarks, couplages des courants neutres, $\sin^2 \theta_w$ etc
 - A Hera (collisionneur e-p): preuve de l'unification (figure)
- Découverte des W et Z (1983)
 - Dans les expériences UA1 et UA2 au Cern-SppS
 - C. Rubbia , P. Darriulat
- Mesures de précision faites au LEP
 - Modèle standard OK ,reste a trouver le Higgs
 - Si déviations → nouvelle physique
 - Masses des neutrinos? Ne sont plus nulles...

HERA $\sigma(e+p)$

➤ Courants neutres

➤ E.m. et faible

➤ (bleu)

➤ Courants charges

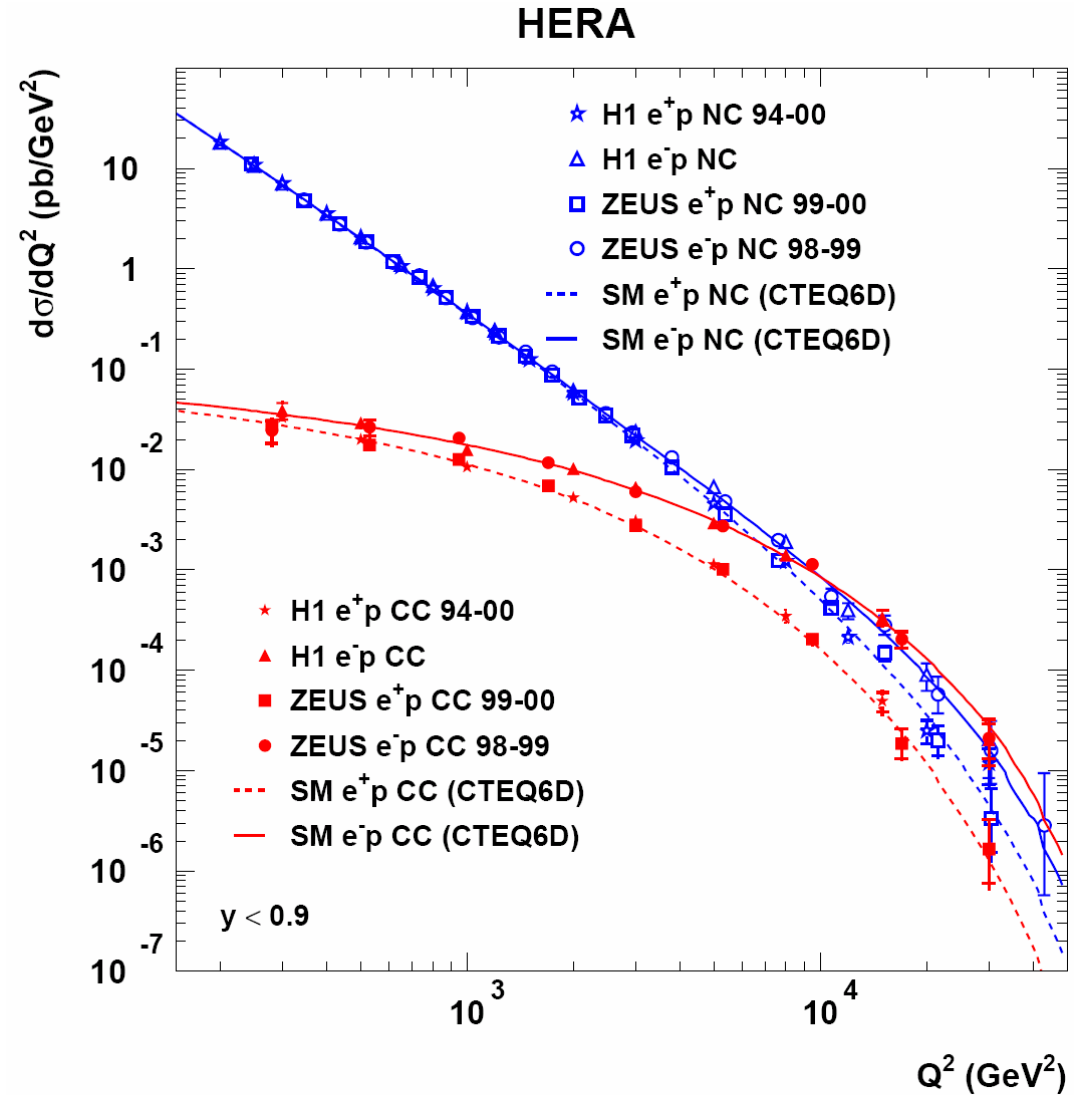
➤ faible

➤ (rouge)

➤ Constante

$$➤ G_F = \pi\alpha / \sqrt{2} M_w^2 \sin^2 \theta_w$$

➤ b



Le Big Bang des physiciens



===== → 10^{-12} s
 Découplage interaction faible et électromagnétique

Les peines

- **Janvier 1975: disparition de A.Lagarrigue**
 - Crise cardiaque.
 - Trop de stress pour cette découverte?
 - Désarroi dans la collaboration, mais le travail continue.
- **Janvier 1976: disparition de B.Gregory**
- **1985 P.Musset disparaît en montagne**

- **1979: Gargamelle, transportée au SPS de 300 GeV, se fissure après quelques mois de run...(soudures)**
 - Exit Gargamelle → quelques années sur un terrain vague...
Puis érigée en monument au Cern à côté de sa fière collègue BEBC (M.Jacob)

Conclusion

- Formidable experience, unique
- Bon Appareil au bon moment
- Right people at the right place

