

Des Courants Neutres au Boson de Higgs, 50 ans d'aventure expérimentale

Daniel TREILLE, CERN Contributing Retiree

La crise de la cinquantaine ?

Une série de tableaux....

Tableau général

Brève de préhistoire

L'exploration du proton

L'évolution des détecteurs

(L'essentiel des machines)

Les Courants Neutres

La violation de CP

Le W et le Z

Le LEP

Neutrinos

Le LHC: les défis

Le LHC: les résultats

Coups de coeur

... en privilégiant l'apport français

SURVOL

Deux périodes contrastées

Voir back-up

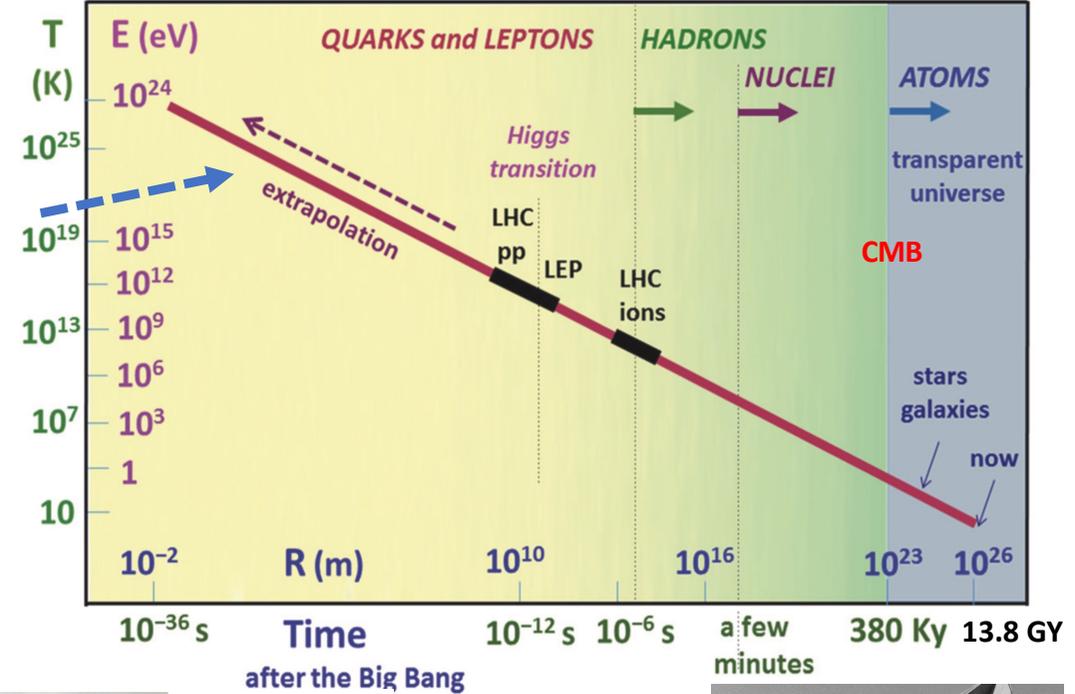
théorie découvertes machines expérience cosmo

1950	Peu de lignes directrices venant de la théorie	L'Europe et le CERN apprennent	PS	2m BC	CMB*
1960					
1970	Tests et validation du Modèle Standard	Rôle majeur du CERN	LEP	WEB	COBE*
1980					
1990	Tests et validation du Modèle Standard	Rôle majeur du CERN	LHC	GRID 10 ⁹ trans.	Planck
2000					
2010		BEH boson *			

* = Nobel

Univers en expansion

Un nouveau point de vue sur notre physique recréer en microscopique les densités d'énergie de l'univers primitif



Mirabilis 1964

inégalités de Bell



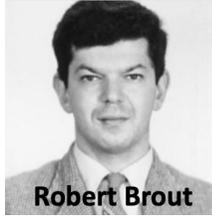
hypothèse des quarks



A. Petermann Murray Gell-Mann George Zweig
2001.04843 **Hypéron OMEGA**



BEH
 Peter Higgs



François Englert



R. Turley



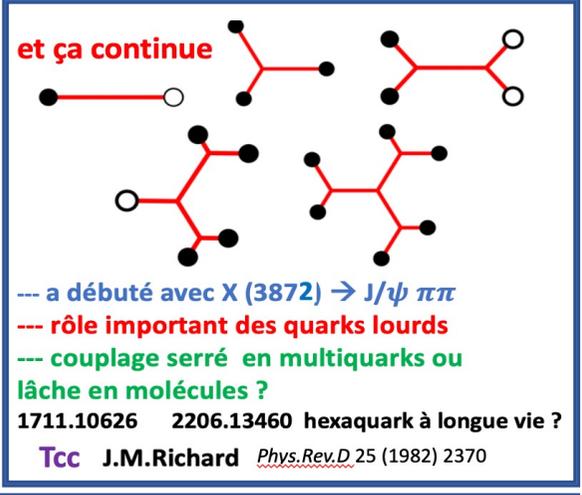
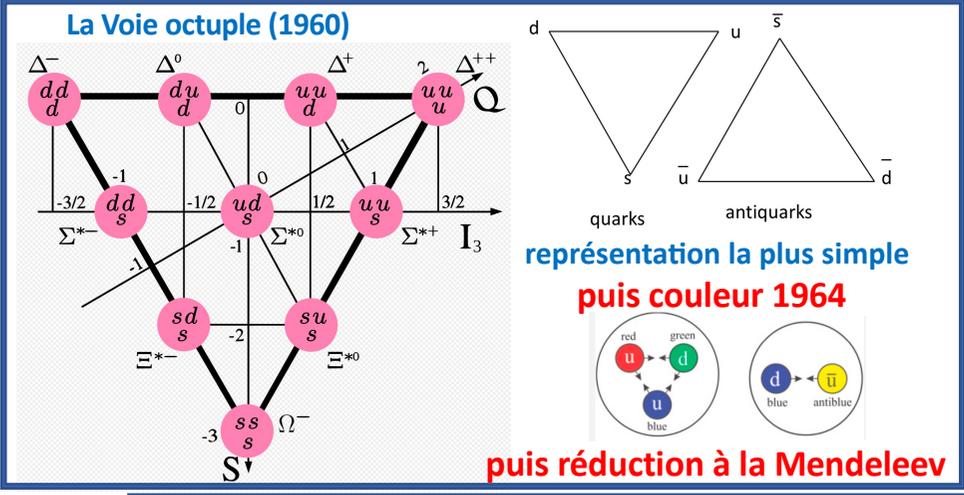
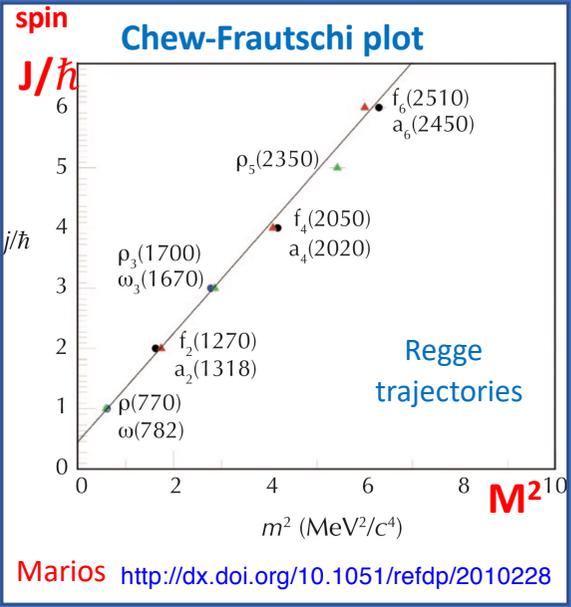
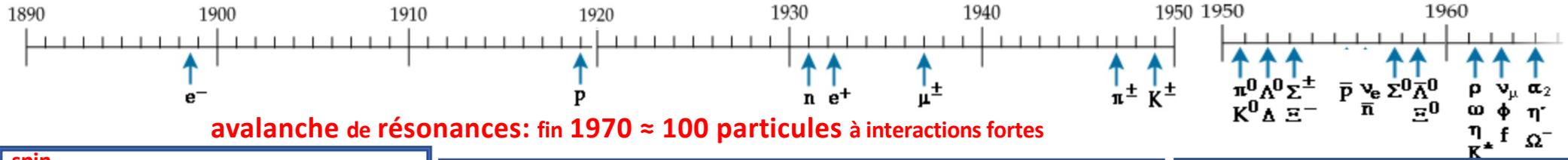
CP

Evidence for the 2π Decay of the K_2^0 Meson
 Phys. Rev. Lett. **13**, 138 – Published 27 July 1964
 J. H. Christenson, J. W. Cronin, V. L. Fitch, and R. Turley

Brève de pré-histoire

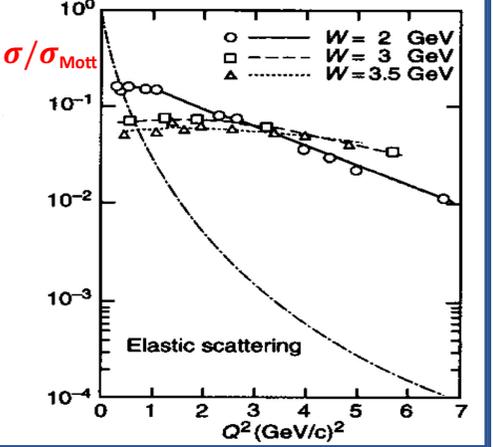
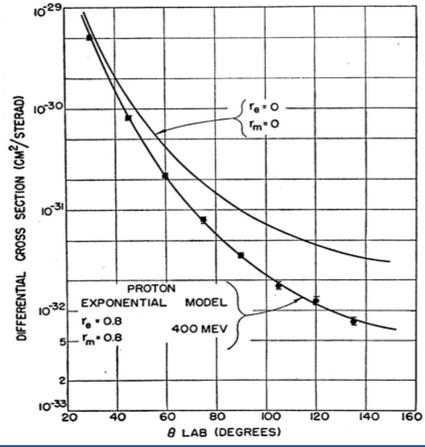
La grande réduction

Cosmotron, Bevatron, AGS



Les Houches 1965 M.Jacob
M.Froissart, R.Omnès, G.Chew
Analytic S-matrix, bootstrap, "démocratie"
R.Dalitz : Quark models for elem. particles
Un peu schizo...
Voir David Gross, discours Nobel
Les quarks "gagnent", mais confinement ?
Intermédiaire de la recherche de quarks libres

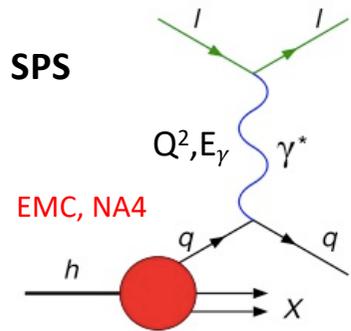
Stanford, diffusion d'e⁻
1957: taille finie du proton
r = 0 (fermi) Nobel 1961
1968: il contient des "partons"
ponctuels, chargés, de spin 1/2
Nobel 1990
1973 ISR: les partons sont aussi
ponctuels pour l'interaction forte



Qu'est-ce que le proton ?

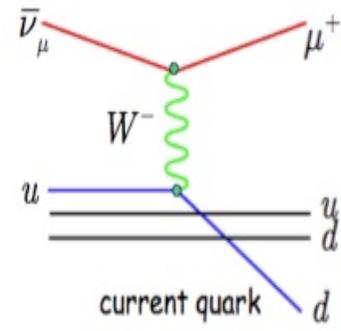
diffusion de muons

SPS



effet EMC, etc

diffusion de neutrinos



violation de scaling: le contenu dépend du pouvoir de résolution

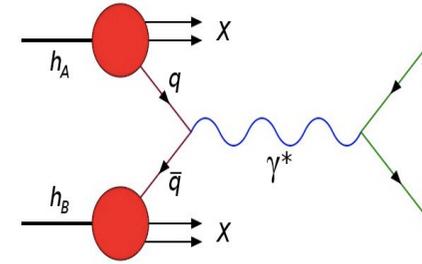


BEBC

GARGAMELLE décidée en 1965

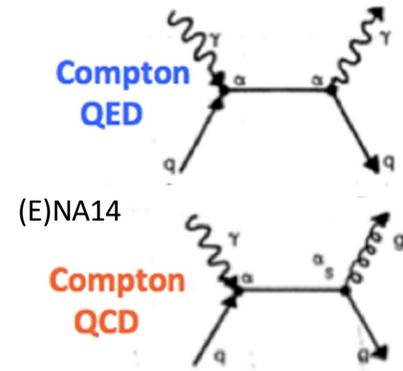
Collisions hadroniques "dures"

photon ou paire de leptons dans l'état final WA11, NA3, WA70,



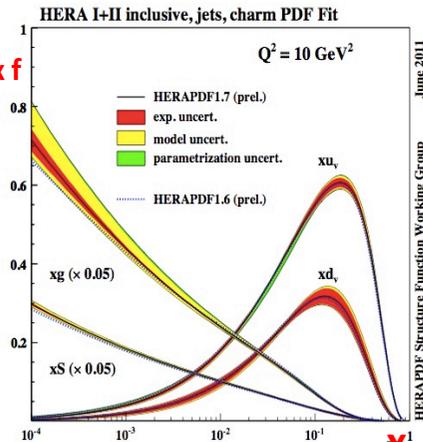
facteur K : le premier ordre ne suffit pas. P.Aurenche et al

Photoproduction "dure"



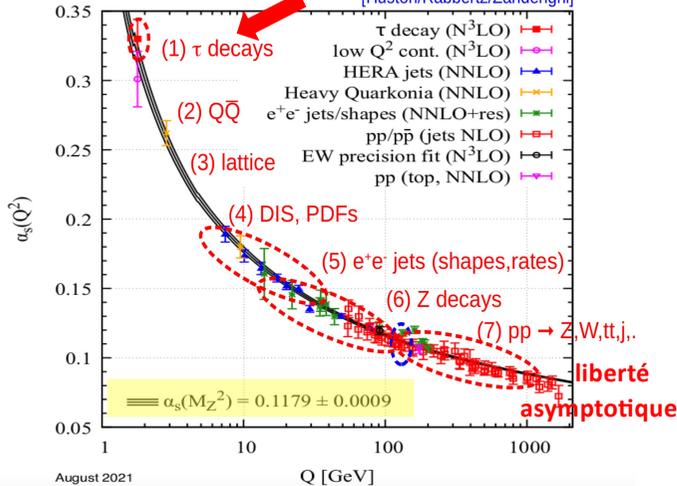
confirmation des charges fractionnaires

Relai de HERA (e-p)1992-2007
H1 J.Feltesse



le LHC contribue encore 1810.03639

élaboration et preuve de QCD
confinement



2203.08271, D.d'Enterria, Moriond QCD 2023

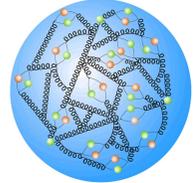
Gavin Salam
1011.5131

formidable travail pour passer des bases de QCD au détail de ses manifestations dans les collisions

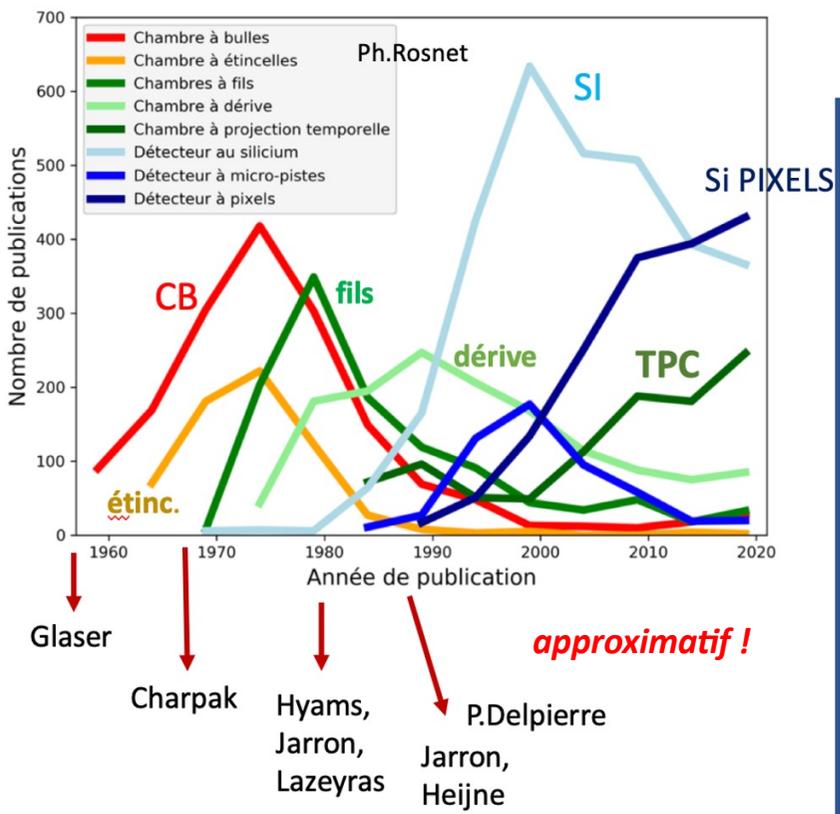
- Jetologie
- fixed-order calculations LO, NLO, NNLO,...
- QCD sur réseau
- parton showers and jets

grande proximité théorie/expérience

rayon exact ?
 $r = 0.8775$ fermi
2304.07035
répartition du spin ?



"La masse sans masse"
proton \cong antiproton
Gravité ?
GBAR. AEGIS



Détecteurs

I. Wingerter-Seez
 Particle Physics Instrumentation
 1804.11246

G.Giomataris Micromégas, etc
<https://cerncourier.com/a/georges-charpak-a-true-man-of-science/>

Calorimétrie:
 Accordéon: **D.Fournier**
 Nucl.Instrum.Meth.A 623 (2010) 42-47
 Cristaux scint.: **P.Lecoq**
<https://home.cern/fr/news/news/experiments/crystal-clear-30-years>

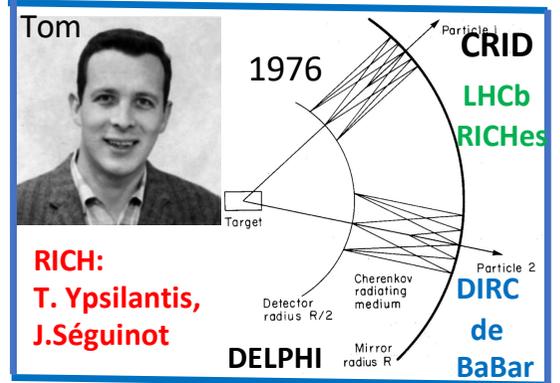
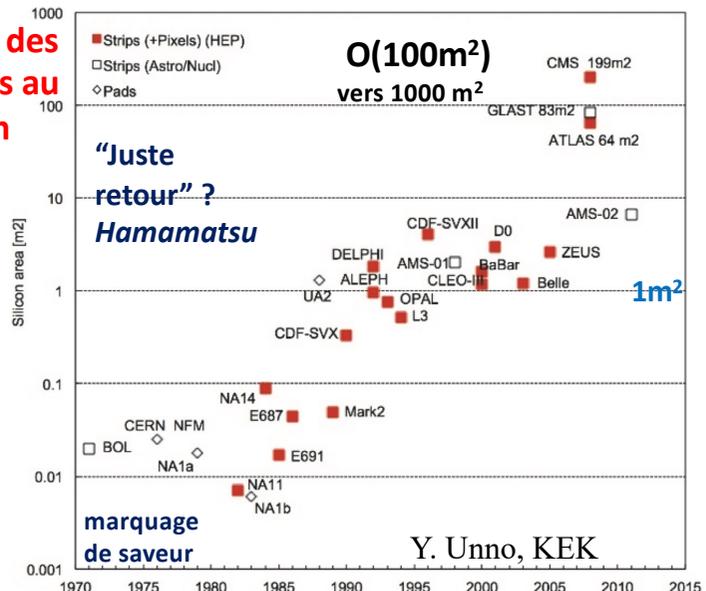
CC-IN2P3: **D.Boutigny, D.Linglin, ..**
<https://cc.in2p3.fr>

GRID: **F. Malek**,
 « Les pétaoctets du LHC »,
Pour la Science, 25 octobre 2013

ROOT: **R.Brun**
J.Phys.Conf.Ser. 396 (2012)

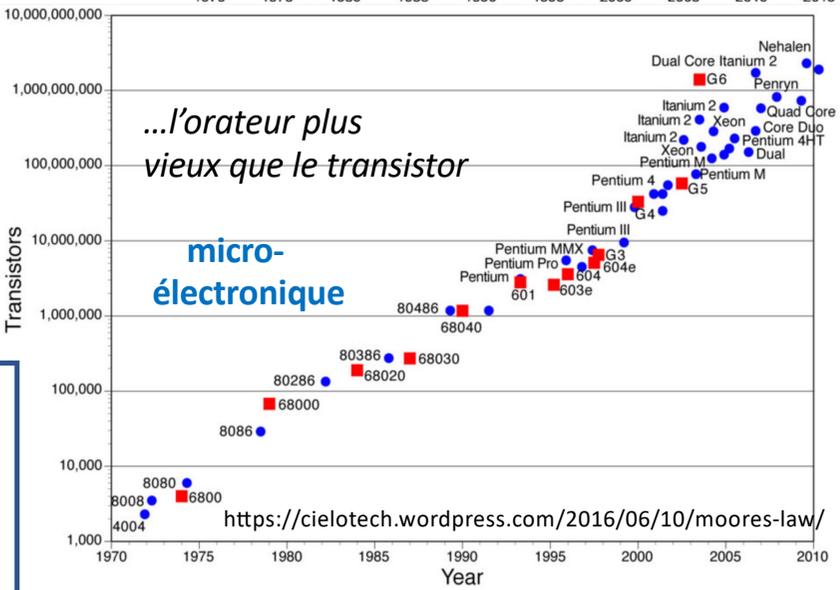
Spin off médecine
 Cern Courier 61 n° 4 p23

évolution des détecteurs au silicium



Organisation: IN2P3, DAPNIA, univ.
A.Berthelot, R.Aymar, J.Teillac, J.Yoccoz, P.Falk-Vairant

M.Vivargent et le LAPP
 Ursula Bassler, Denis Guthleben
<https://cerncourier.com/a/lessor-de-la-physique-des-particules-en-france/>
 Jeanne Laberrigie-Frolow et Christian de la Vaissière
<https://doi.org/10.4000/histoire-cnrs.9275>



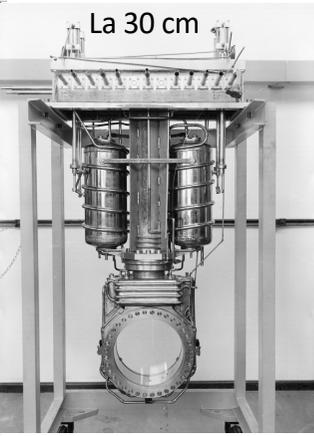
<https://cielotech.wordpress.com/2016/06/10/moores-law/>
https://llr.in2p3.fr/IMG/pdf/50ans-christophe-delataille_c.pdf
60 ans de calcul: CERN Courier in focus 2019



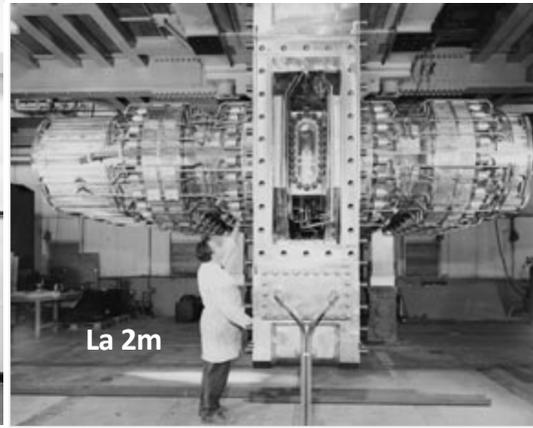
Peyrou Muller

Gregory Leprince

Armenteros Lagarrigue



La 30 cm



La 2m



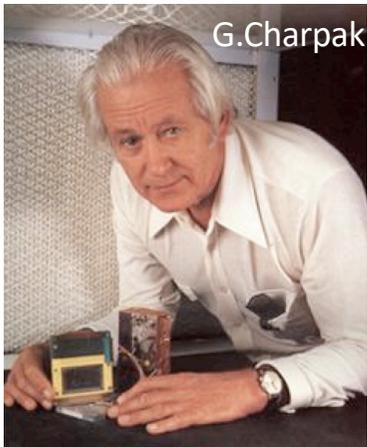
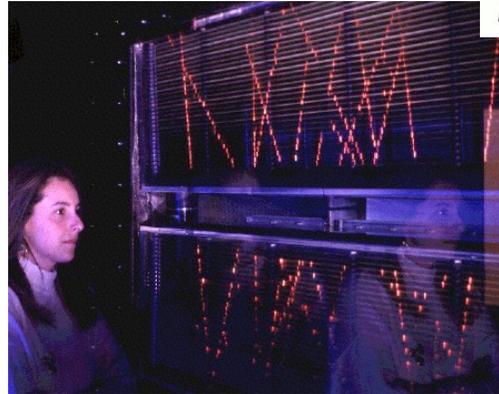
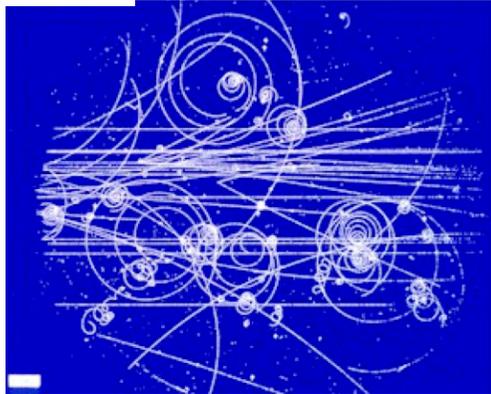
Peyrou shows how large future bubble chambers should be,

“Le CERN c’est les états-membres, plus l’X”

LLR et son état-major

G.Giomataris

<https://cerncourier.com/a/georges-charpak-a-true-man-of-science/>



G.Charpak

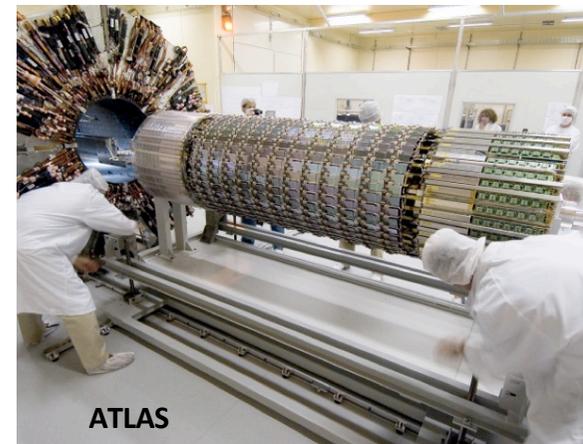


G.Charpak F.Sauli. C.Santiard



UA1 tracker

semiConductor Tracker SCT

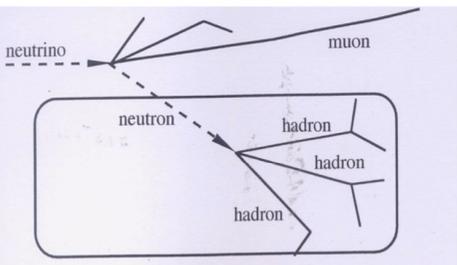
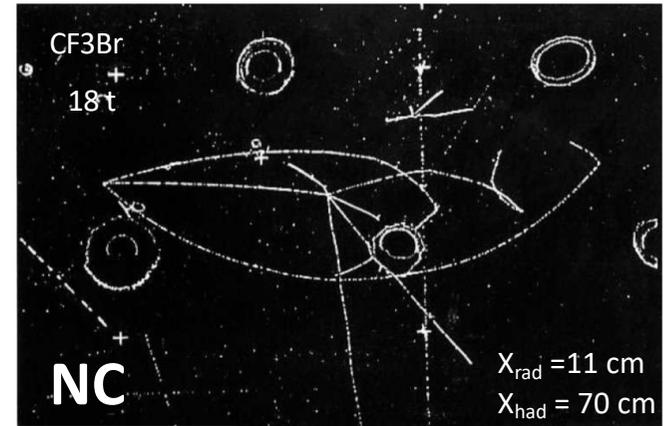
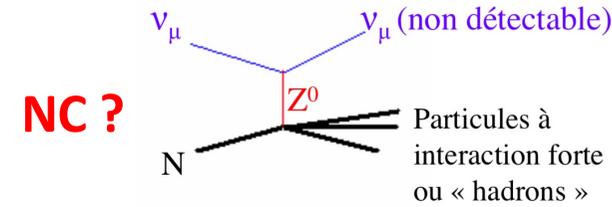
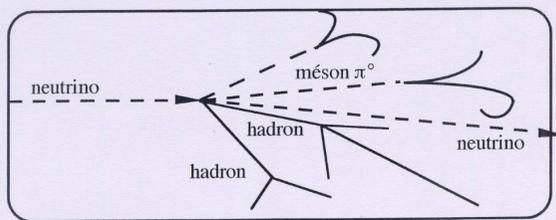
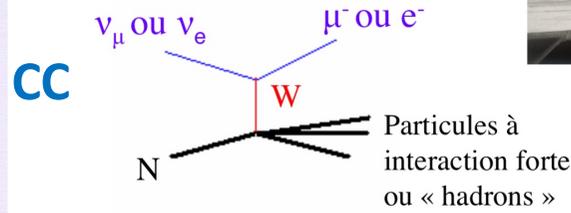
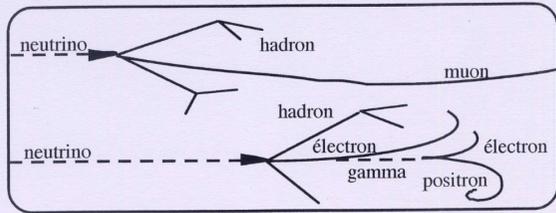
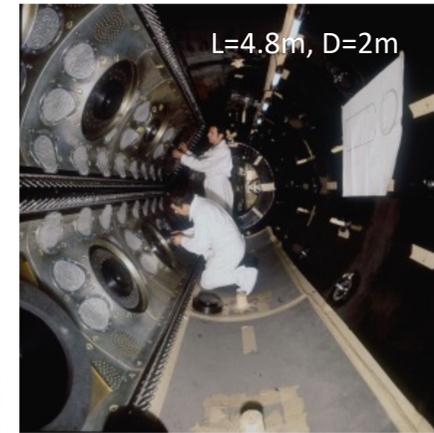
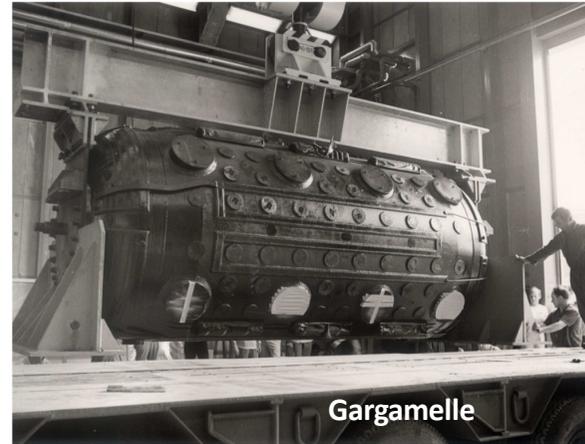
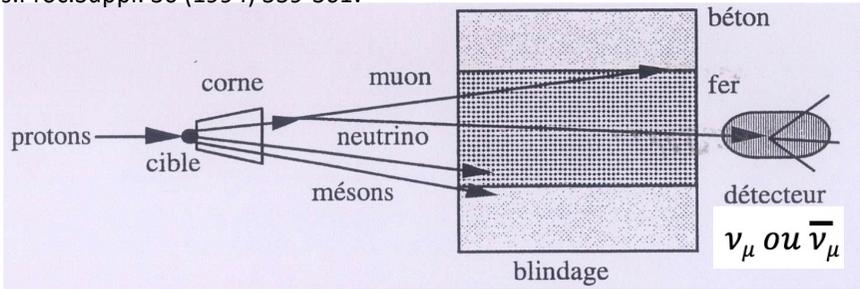


ATLAS

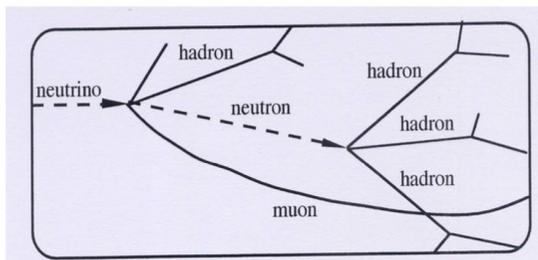
B.Degrange https://llr.in2p3.fr/services/llr_seminaires/upload/ggm_cn_09.pdf

A.Rousset, Nucl.Phys.Proc.Suppl. 36 (1994) 339-361.

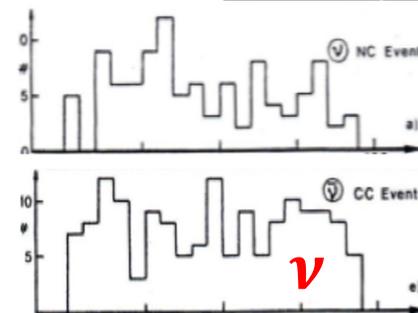
Courants neutres



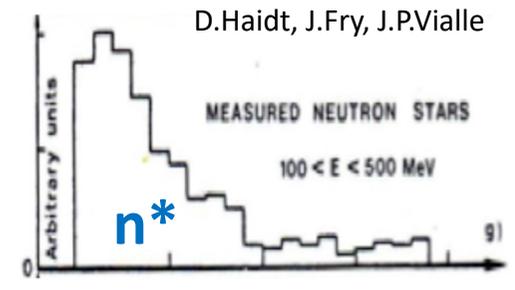
Interaction de neutron dont l'origine est hors du détecteur (événement de fond B)



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

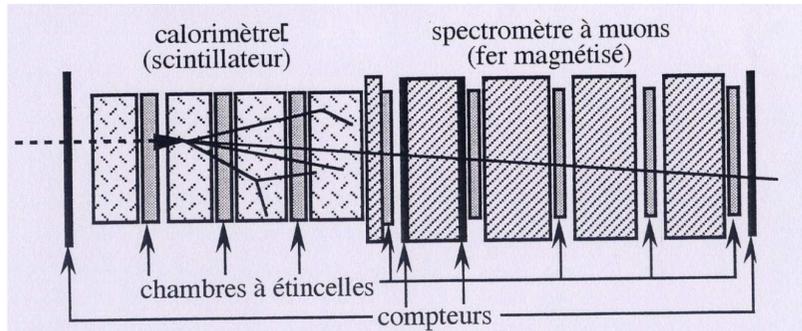


profondeur dans la chambre



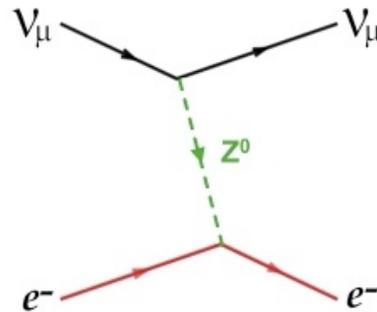
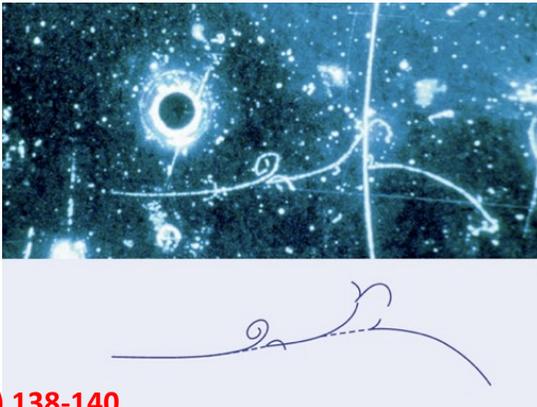
Un autre bruit de fond moins contrôlable...
Les Courants alternatifs

HPW



La cerise sur le gâteau...

1 (Aix 72)
puis 4
attention aux $\nu_e n \rightarrow e^- (p)$



Les 3 responsables :

- C. Rubbia (Harvard)
- A.K. Mann (Pennsylv.)
- D. Cline (Wisconsin)

cross-check !

La route tracée était droite
Mais la pente était forte

1976, deux propositions
--- le collisionneur LEP
--- transformer le SPS en collisionneur proton-antiproton

Phys.Lett.B 46 (1973) 138-140

V. BRISSON, B. DEGRANGE, M. HAGUENAUER, L. KLUBERG, B. AUBERT, D. BLUM, L.M. CHOUNET, P. HEUSSE, A. LAGARRIGUE, U. NGUYEN-KHAC and P. PETIAU

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

Laboratoire de Physique Nucléaire des Hautes Energies, Ecole Polytechnique, Paris, 1

Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire, Orsay, France



A.Lagarrigue



A.Rousset



P.Musset



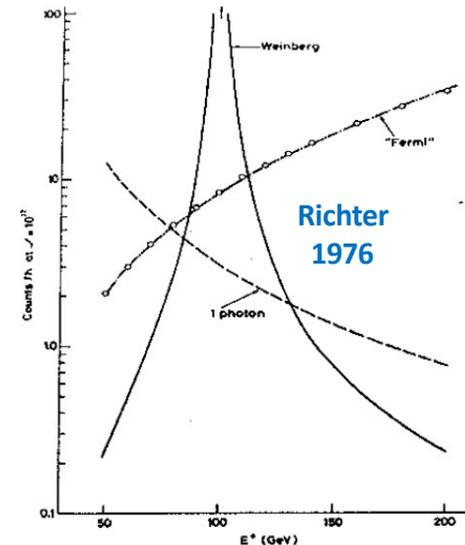
Violette Brisson

$\sin^2 \vartheta_w$

Gargamelle	0.3-0.4
CDHS 1977	0.24 ± 0.02
SLAC e-D 1978	0.20 ± 0.03
CHARM 1984	$0.236 \pm 0.005 \pm 0.003$
CDHS 1986	$0.225 \pm 0.005 \pm 0.003$
BEBc 1986	0.240 ± 0.030

Vers 1976, prédiction :

M_W entre 60 et 80 GeV,
 M_Z entre 75 et 95 GeV



V.Brisson https://indico.ijclab.in2p3.fr/event/4345/contributions/14340/attachments/11586/13587/NCpresent11_new.pdf

Le collisionneur p-p̄

But: découvrir W et Z
 décisions et réalisations rapides,
 brillante machine, excellents détecteurs,
 herméticité, redondance, techniques
 innovantes, trigger sur E manquante

détermination de C.Rubbia
 dans un climat parfois adverse

1976 papier de C.Rubbia,

P.McIntyre, D.Cline

1977 proposal au CERN et à

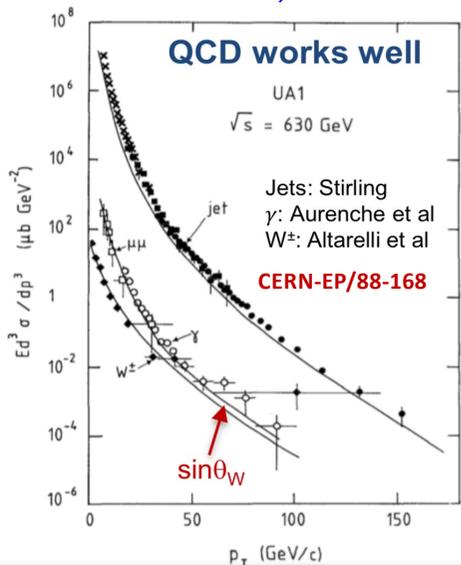
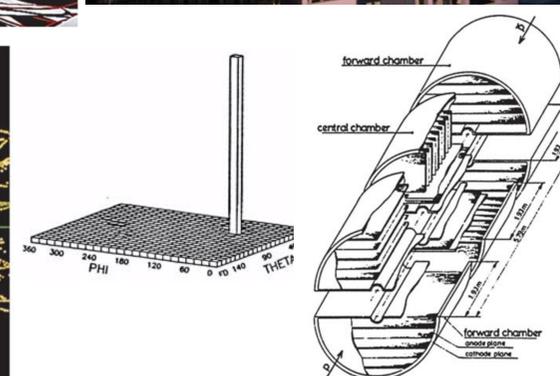
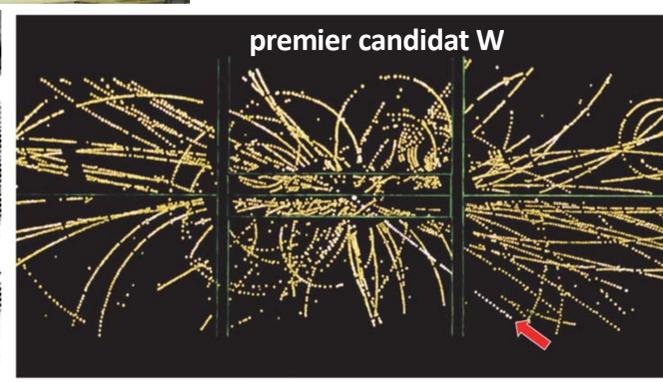
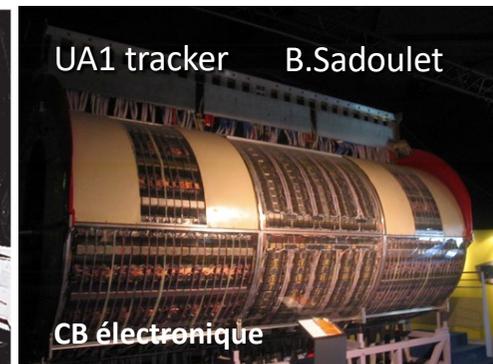
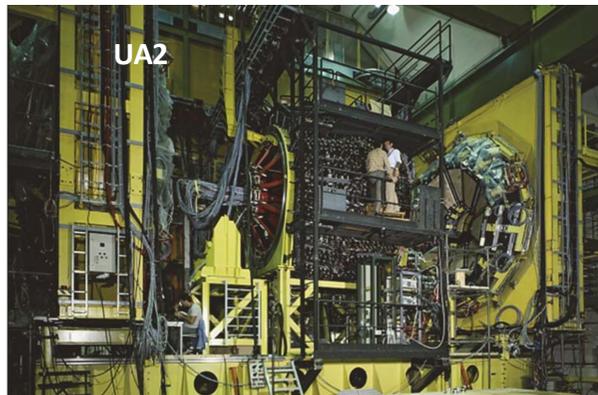
Fermilab, études de faisabilité

1978 succès de ICE

1979 approbation des expériences

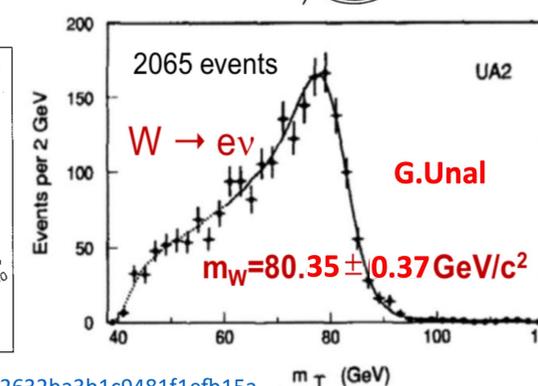
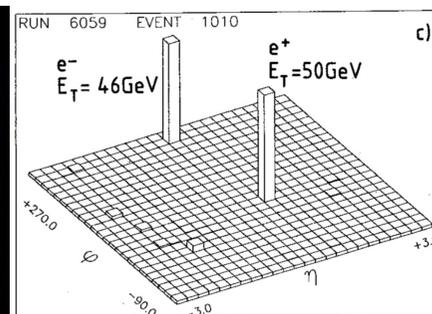
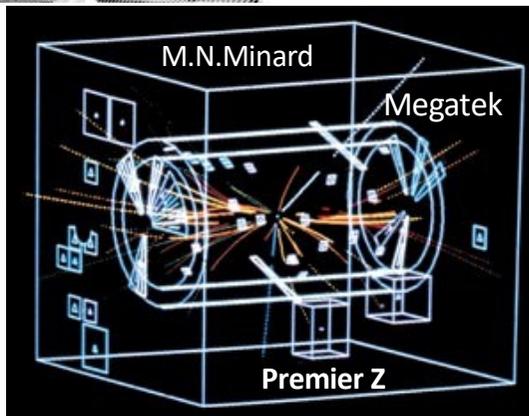
1983 découverte (10 W...)

1984 Nobel Rubbia, van der Meer



physique au
 rendez-vous:
 jets, QCD, etc

P.Darriulat



<https://inspirehep.net/files/b6490184742632ba3b1c9481f1efb15a>

P. Darriulat, The W and Z particles : a personal recollection, CERN COURIER Mar 31, 2004

D.Denegri CERN Cour. 43N4 (2003) 26-30

"L'espoir changea de camp, le combat changea d'âme" (D.Denegri et V.Hugo)

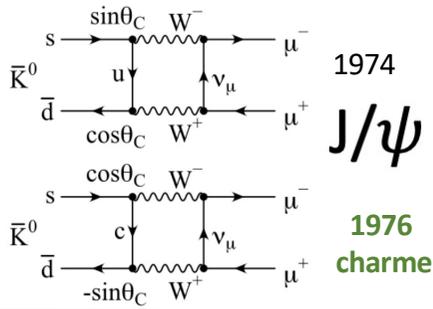
puis LEAR, AD, ELENA

CP

GIM 1970

Ouvre la voie des études NCFV

2204.08220

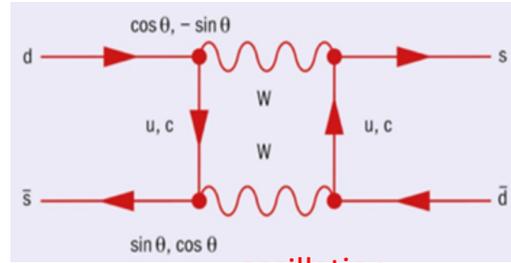


1974

J/psi

Le système des K⁰

1976
charme



oscillation

$$|K_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle) \quad CP |K_1\rangle = +1 |K_1\rangle$$

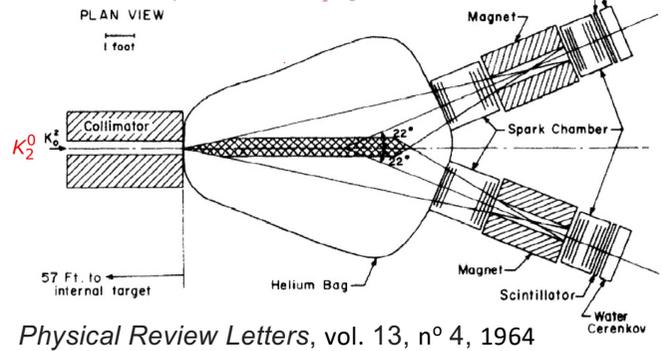
$$|K_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle) \quad CP |K_2\rangle = -1 |K_2\rangle$$

$K_2 \rightarrow 2\pi$
mais $K_L \neq K_2$

$$|K_S\rangle = \frac{1}{\sqrt{1+|\epsilon|^2}}(|K_1\rangle + \epsilon |K_2\rangle)$$

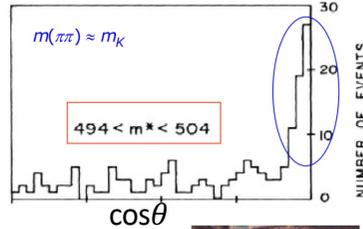
$$|K_L\rangle = \frac{1}{\sqrt{1+|\epsilon|^2}}(|K_2\rangle + \epsilon |K_1\rangle)$$

K⁰ Violation de CP 1964



Physical Review Letters, vol. 13, n° 4, 1964

Violation indirecte de CP



Nobel 1980
Fitch, Cronin

René
Turlay



ScintillationS 57

Saga de la violation directe

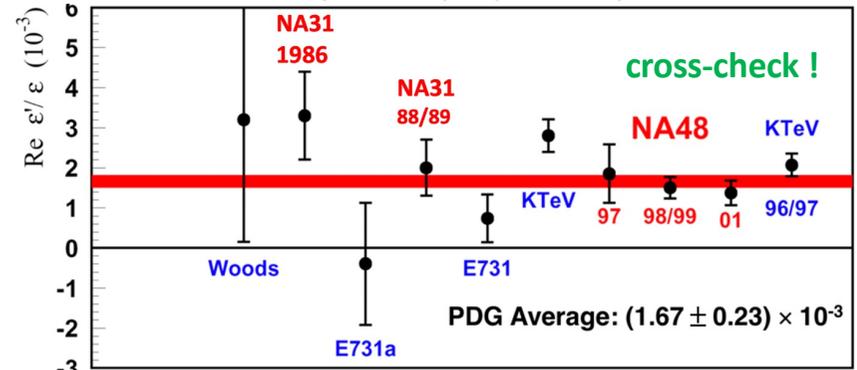
expériences et faisceaux !

L. Fayard,
D. Fournier

https://cds.cern.ch/record/2103283/files/9789814644150_0009.pdf

Re ε'/ε au fil du temps

$$R = \frac{\Gamma(K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0)}{\Gamma(K_S \rightarrow \pi^0 \pi^0)} / \frac{\Gamma(K_L \rightarrow \pi^+ \pi^-)}{\Gamma(K_S \rightarrow \pi^+ \pi^-)} \approx 1 - 6 \text{ Re}(\epsilon'/\epsilon)$$



NA62

La troisième génération



Kobayashi Maskawa
1973 / Nobel 2008

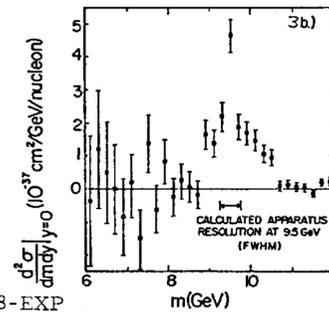
Des états propres de masse aux états propres d'interaction faible

$$U_{CKM} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{1}{2}\lambda^2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \frac{1}{2}\lambda^2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3[1 - (\rho + i\eta)] & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix}$$

τ lepton
M. Perl 1975
Nobel 1995

Beauté 1977
Lederman et al

FERMILAB-Pub-77/58-EXP



CP Lear $p\bar{p} \rightarrow \pi^- K^+ K^0$ $p\bar{p} \rightarrow \pi^+ K^- K^0$

mesure directe de la non-invariance par renversement du temps

$P(K_0 \rightarrow \bar{K}_0) - P(\bar{K}_0 \rightarrow K_0) \neq 0$ at 5σ

Ann.Rev.Nucl.Part.Sci. 65 (2015) 403-427

conservation de CPT démontrée
50 fois plus précisément qu'avant

Ph.Bloch

stimulant, mais frustration au CERN. Puis abondante spectroscopie des saveurs lourdes, surtout charme: SPS (20 exp.), 60 exp. dans le spectro Ω, e.g. photoproduction: WA4, F.Richard, NA14-2, R.Barate. Puis LEP.

➔ Mélange $B^0 \bar{B}^0$ mesuré par ARGUS en 1987
 $0.007 \leq |V_{td}| < 0.034$ **DORIS, Y(4S)**

oscil. observée par UA1

➔ **Usines à B asymétriques**
non-séparabilité devenue outil de travail

BaBar (PEPII) et BELLE (KEKB)

	Dates	fb ⁻¹	Nombre de upilon
upsilon(4S)	1999 - 2007	426	468 millions
upsilon(3S)	2008	28	122 millions
upsilon(2S)	2008	14	99 millions

mesures des angles β, α, γ violation de la symétrie T

Y(4260), η_b recherches BSM $e^+ e^- \rightarrow$ hadrons et $g-2$ (M.Davier et al)

➔ **LHCb**

abondance et variété:
 étrangeté, beauté,

charme (VCP directe)

baryons Λ_b^0

$B^0, B_s^0 \rightarrow \mu\mu$ avec CMS

$B_s^0 \rightarrow J/\psi \phi$, VCP phase ϕ_s

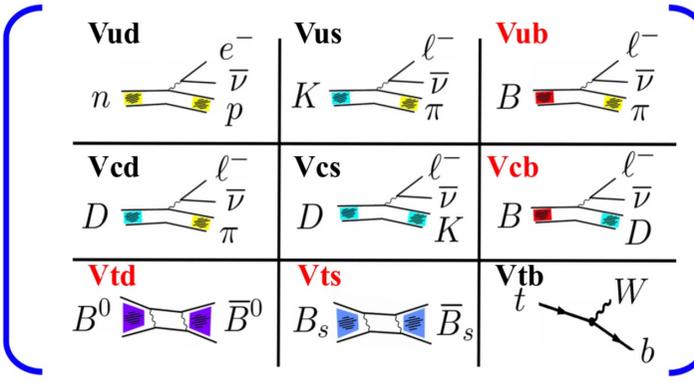
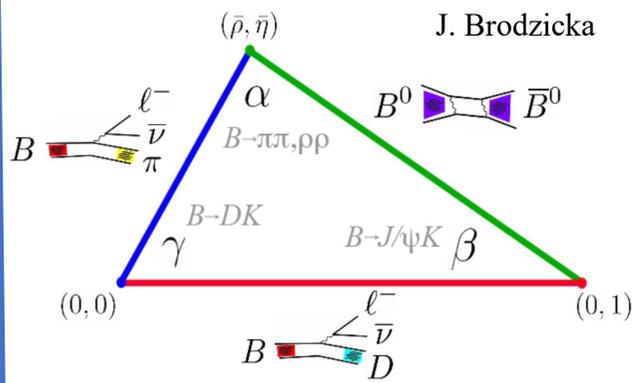
états multiquarks, etc

➔ **Conclusions**

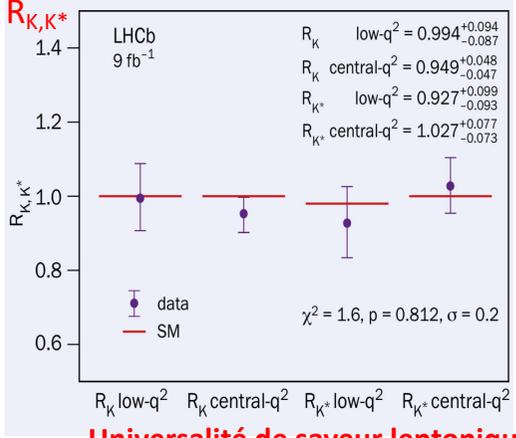
Immense travail accompli (M.H.Schune, prix fondé par l'État 2021) Mécanisme de K-M source dominante de la violation de CP observée

CP dans le secteur des quarks très insuffisante pour expliquer la baryogénèse Vers précision accrue (Belle II, I.Ripp-Baudot et al., LHCb upgrade)

Vaste entreprise: la construction de la matrice CKM et les outils utilisés
 désintégrations semi-leptoniques et des fréquences d'oscillation $B^0 \bar{B}^0$

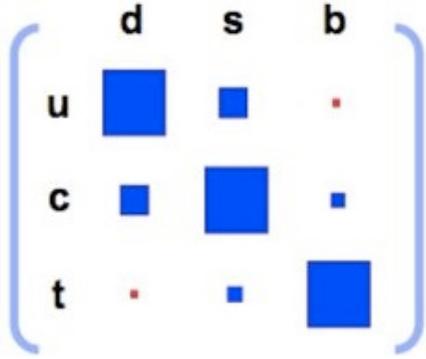


Cross-check !



Universalité de saveur leptonique

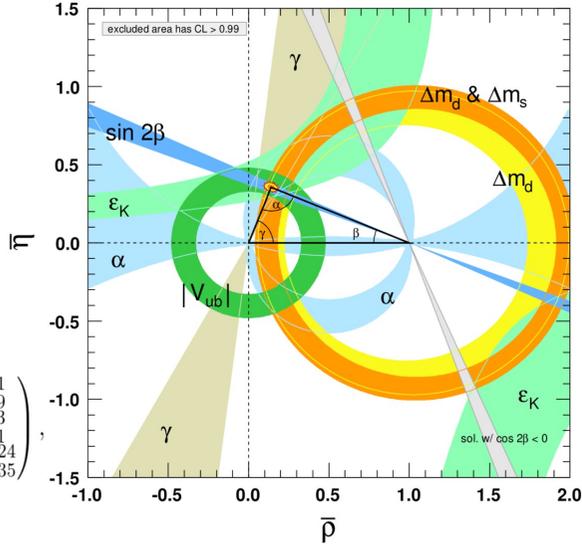
Moriond: R(D*) à un sigma du SM



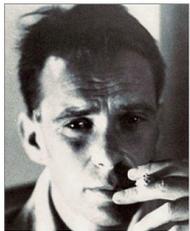
$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} 0.97401 \pm 0.00011 & 0.22650 \pm 0.00048 & 0.00361^{+0.00011}_{-0.00009} \\ 0.22636 \pm 0.00048 & 0.97320 \pm 0.00011 & 0.04053^{+0.00083}_{-0.00061} \\ 0.00854^{+0.00023}_{-0.00016} & 0.03978^{+0.00082}_{-0.00060} & 0.999172^{+0.000024}_{-0.000035} \end{pmatrix}$$

$$\eta = 0.355^{+0.012}_{-0.011}$$

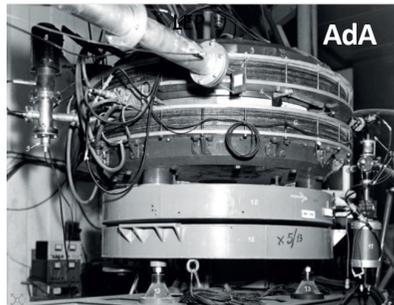
CKMfitter: très français et Clermontois



Les collisionneurs e^+e^-



B. Touschek



AdA

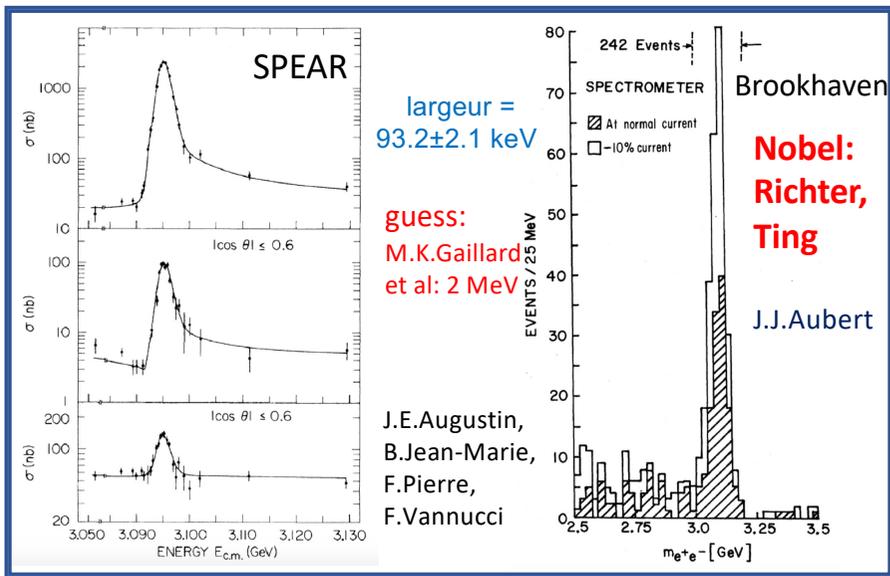
J. Haissinski, P. Marin

J. Haissinski <https://inspirehep.net/files/95fe8dc10ef532a513cf50c5ebfefb84>

<https://cerncourier.com/a/ada-the-small-machine-that-made-a-big-impact/>

ACO, (COPPELIA), DCI VEPP

SPEAR la révolution de Novembre 74: le J/ψ

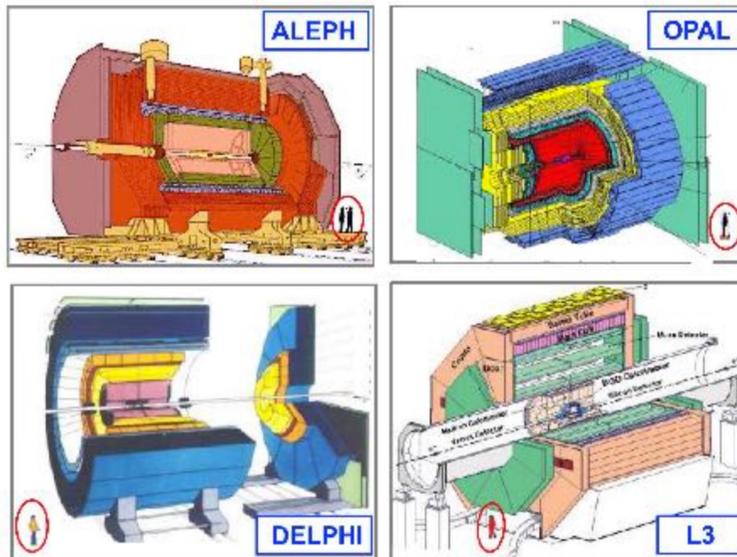


TRISTAN (Japon)

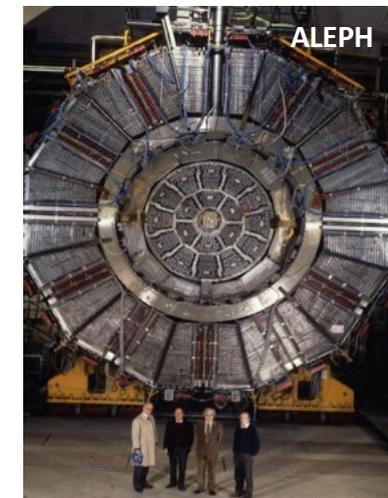
PETRA: CELLO, TASSO le gluon 1979

LEP

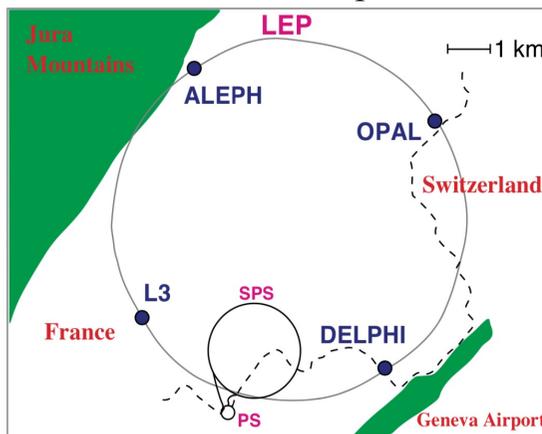
J. Lefrançois



J.E. Augustin, D.T.



ALEPH



ADLO

U. Amaldi

Microstrip and pixel silicon detectors

ALEPH
DELPHI
L3
OPAL

ALICE
ATLAS
CMS
LHCb

Large room temperature magnet

L3

ALICE

Large arrays of crystal to measure γ/e energies

L3

CMS

TPC = Time Projection drift Chamber

ALEPH
DELPHI

ALICE

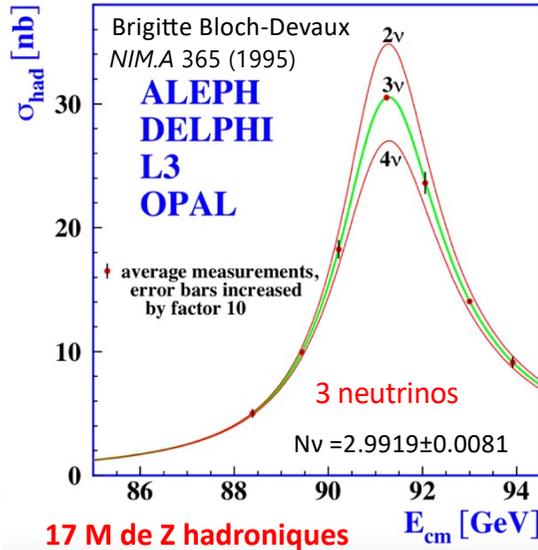
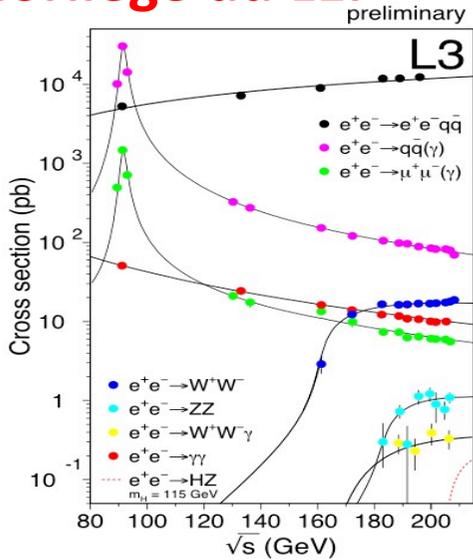
RICHs = Ring Imaging Cherenkov counters

DELPHI

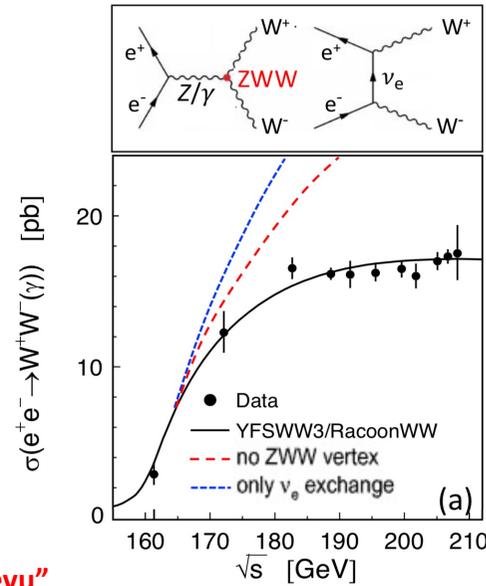
LHCb

du calcul central à des "fermes" de calcul par expérience

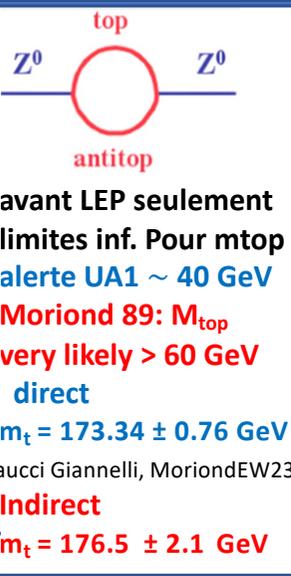
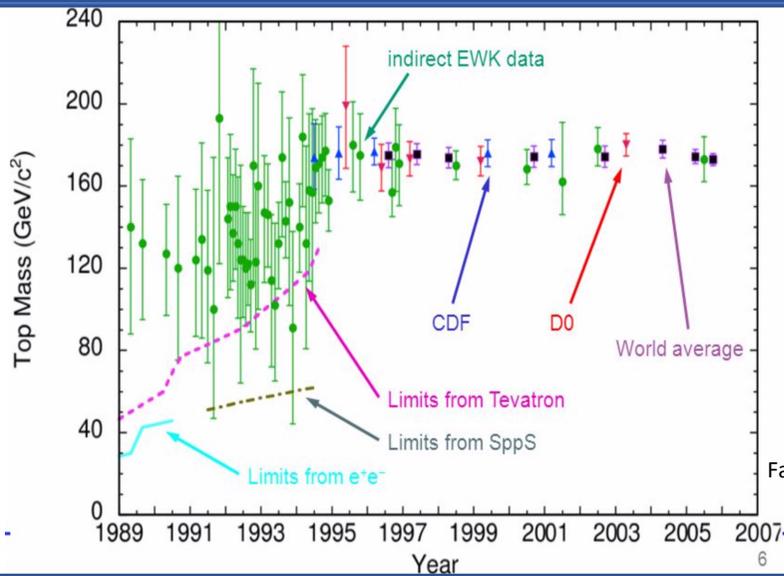
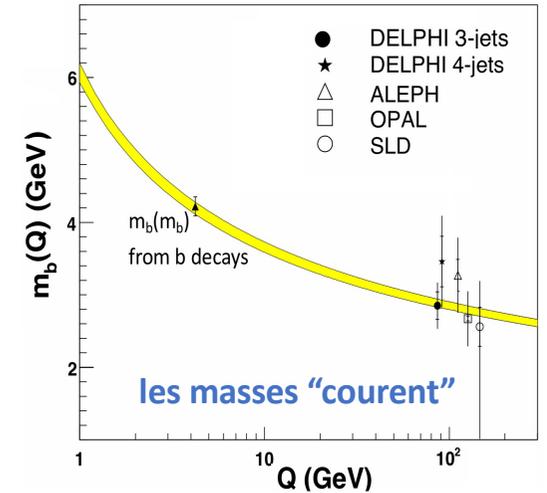
Florilège du LEP



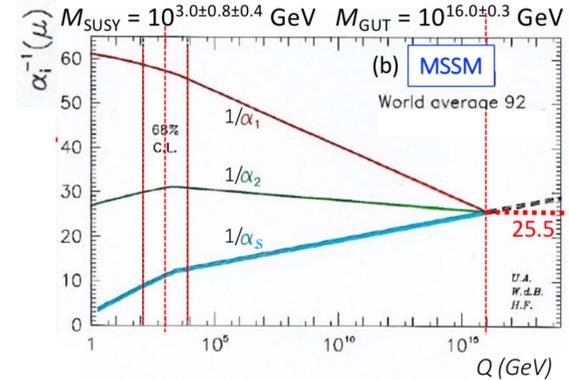
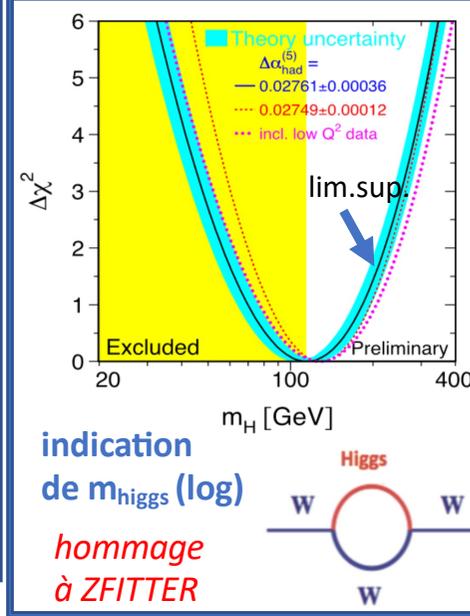
17 M de Z hadroniques
 M_Z à 23 ppm, "toujours mieux que prévu"



les bosons se couplent



U.Amaldi <https://inspirehep.net/files/f326403157ffa3993b5e86384d754293>



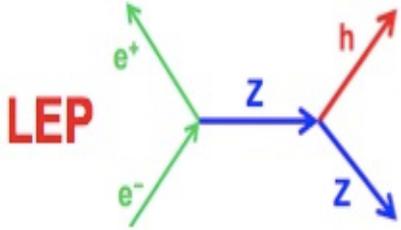
convergence des couplages dans MSSM

SUSY ? "L'annonce de ma mort est très exagérée"

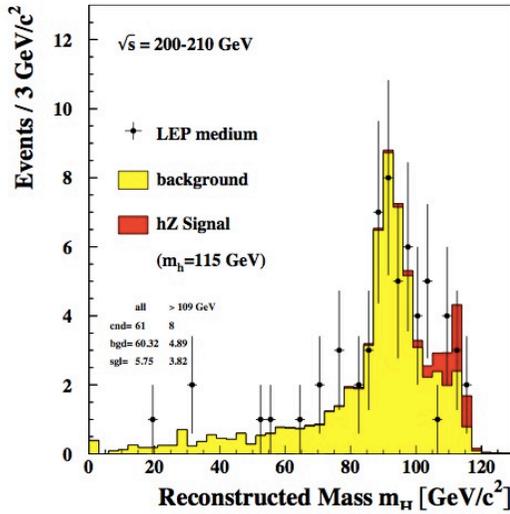
M_h OK, LSP au TeV ? fine-tuning ?

Nazila Mahmoudi 2210.16337
Moriond EW 2023 2209.00063 1906.10706

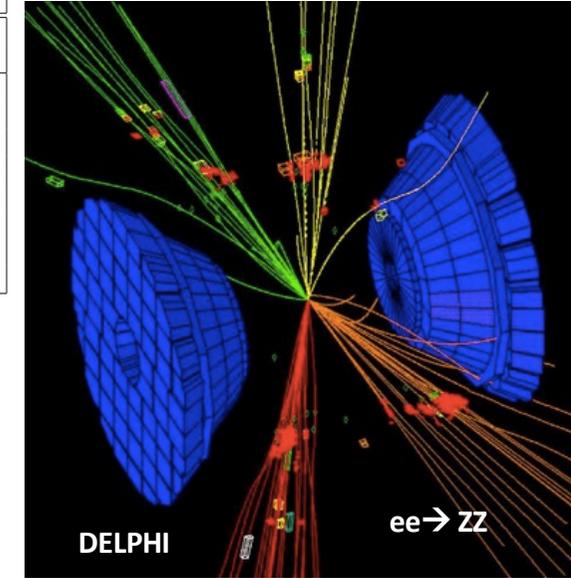
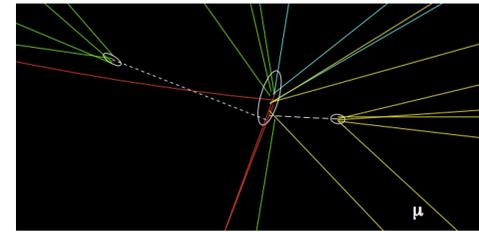
2000, an odyssey



marquage du b très performant
 accès à $M_h = 2E - M_Z$
 limite atteinte à chaque énergie
 2000: en butée vers 207 GeV



	EXP	\sqrt{s} (GeV)	Channel	M (GeV)	s/b	w
1	ALEPH	206.7	4-jet	114.3	4.6	1.73
2	ALEPH	206.7	4-jet	112.9	2.4	1.21
3	ALEPH	206.5	4-jet	110.0	0.9	0.64
4	L3	206.4	E-miss	115.0	0.7	0.53
5	OPAL	206.6	4-jet	110.7	0.7	0.53
6	DELPHI	206.7	4-jet	114.3	0.6	0.49
7	ALEPH	205.0	Lept	118.1	0.6	0.47
8	ALEPH	208.1	Tau	115.4	0.5	0.41
9	OPAL	205.4	4-jet	112.6	0.5	0.40
10	ALEPH	206.5	4-jet	114.5	0.5	0.40

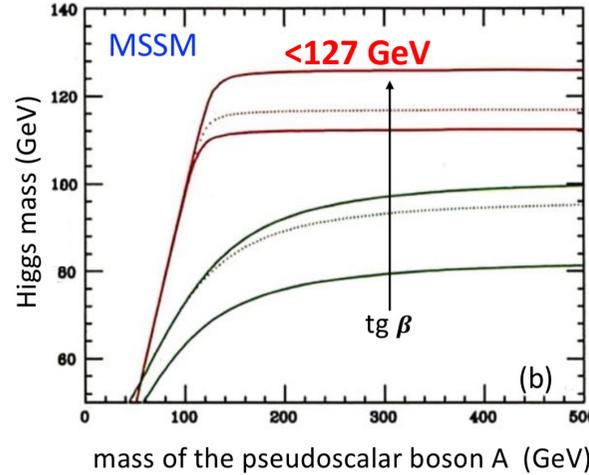


cross-check !

Phys. Lett. B 355 (1995) 209.

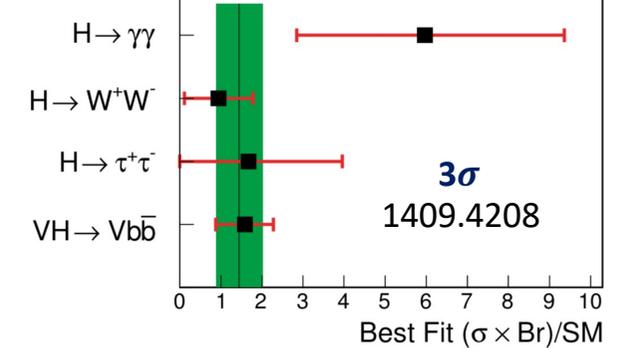
MSSM exige..

30 % more RF cav.

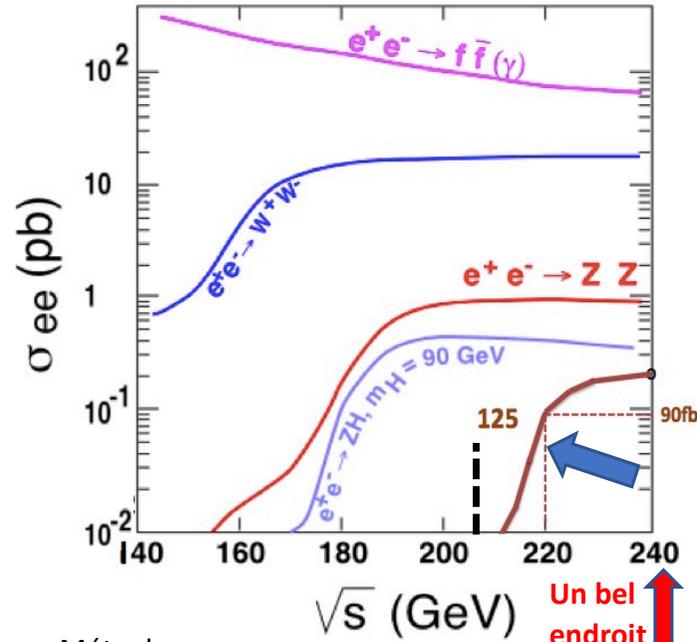


dans SUSY masse du Higgs donnée par g et g'
 + corrections radiatives dominées par m_t^4 , etc

G. Bernardi et al

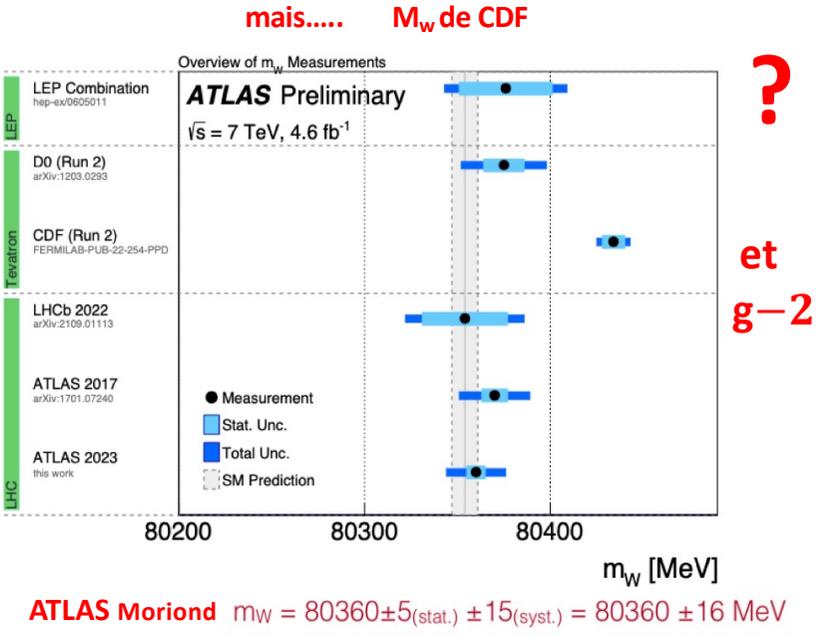
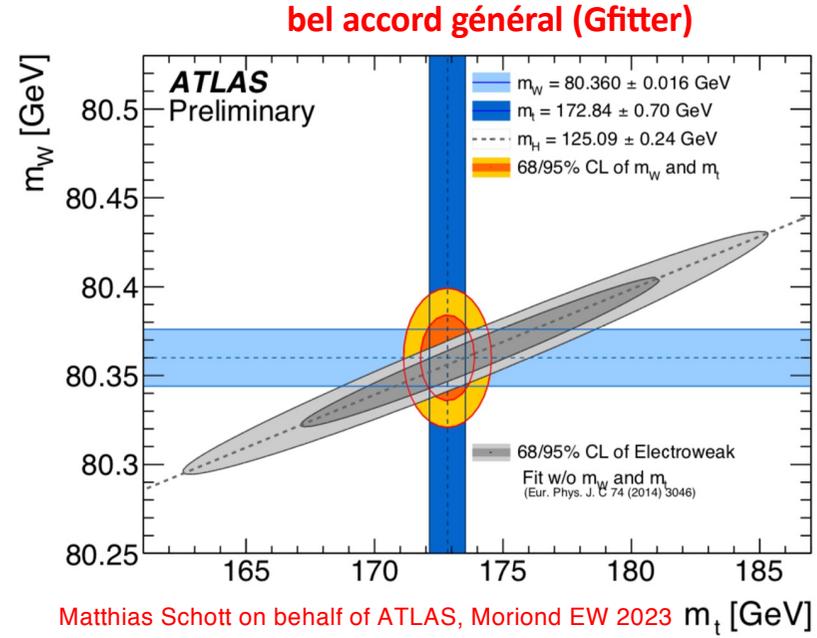
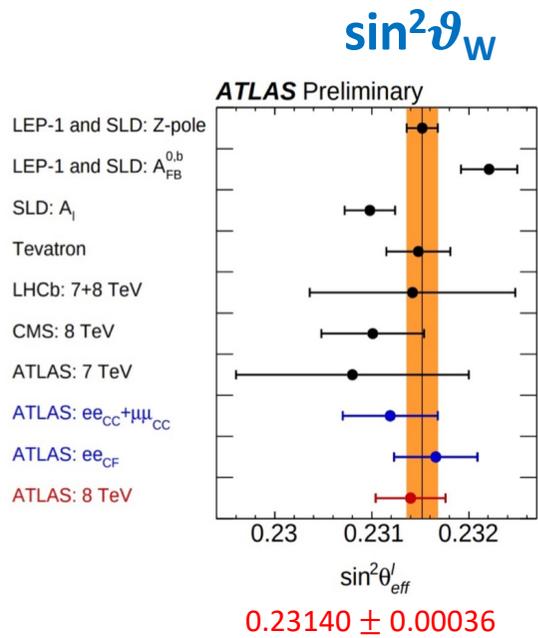
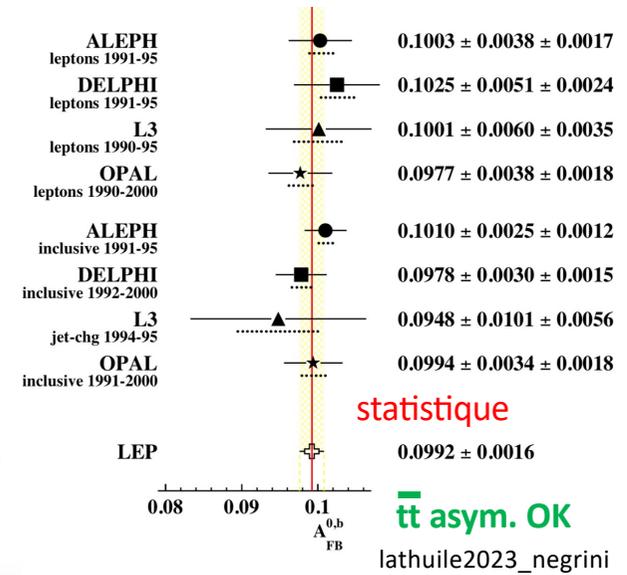
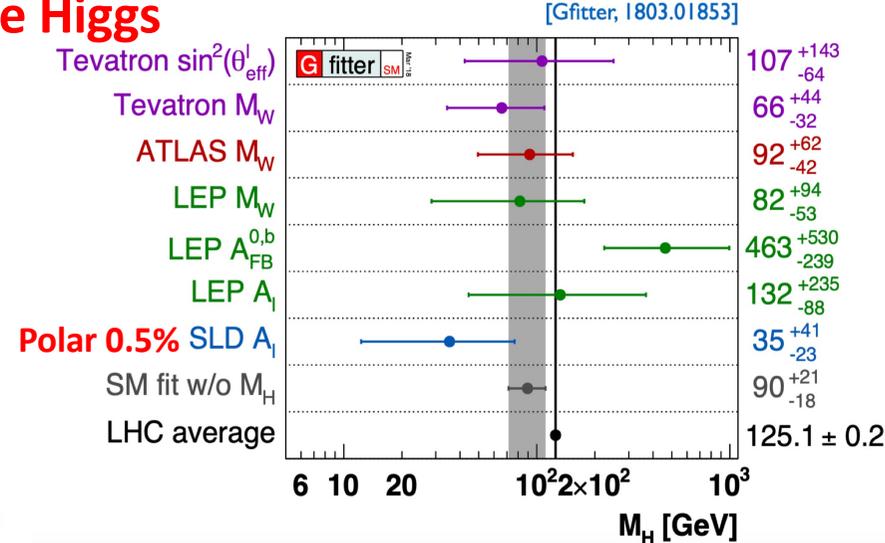
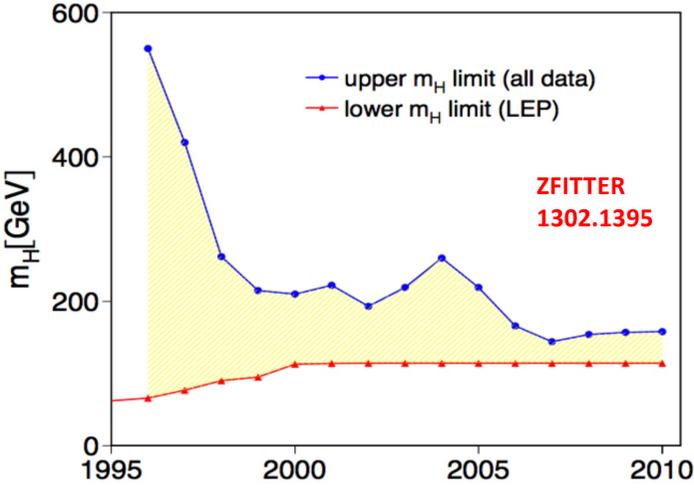


Le Tevatron n'était pas loin du but...
 Reste sa cruciale découverte du top 1995

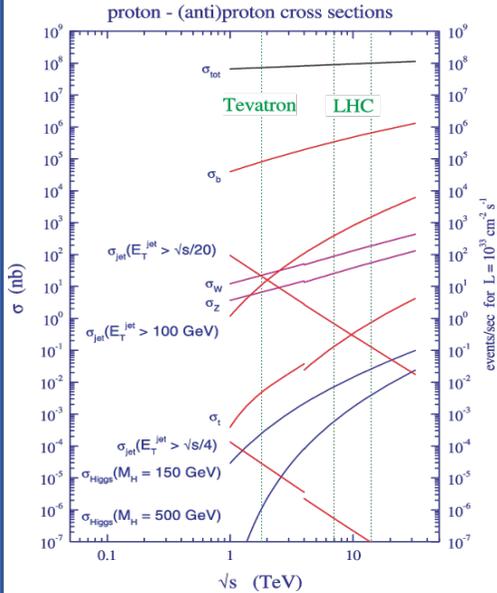


Métaphore...

Message final du LEP/SLC sur le Higgs



Les défis du LHC



- ~ 4 10⁷ croisements/s
- ~ 25 interactions / X
- ~ 10⁹ événements / X
- ~ 100 particules / evt
- ~ 1Mo / evt

D'où les 4 défis:

- nombre élevé de canaux indépendants
- très forte irradiation
- déclenchement très sélectif O (100 evts / s)
- très grand volume d'info à tous niveaux

→ LHC Lausanne 1984 C.L.Smith

“ Extensive studies of Higgs boson production were reported at Lausanne ^{ref} which lead to the conclusion that discovering a conventional heavy Higgs boson will be difficult even at 20 TeV, the energy we assume in the following discussion.”

mais m_{top} s'avère plus élevée en 1987 (la Thuile) $L=10^{34}$ est suggéré LEP indique un Higgs léger

et un programme massif de R&D démarre: le DRDC

rôle majeur de H.Curien

ANSWERS TO PROFESSOR LORENZO FOA

QUESTION 0:

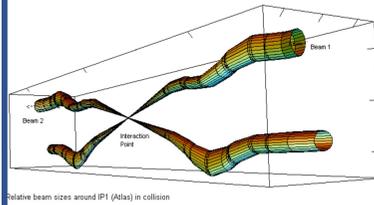
General question that concerns all experiments: What can your e.m. calorimeter do in a "stand alone" mode, I mean if you have to switch off your inner tracking because of excessive rate ?

We would like to distinguish between two scenarios, namely:

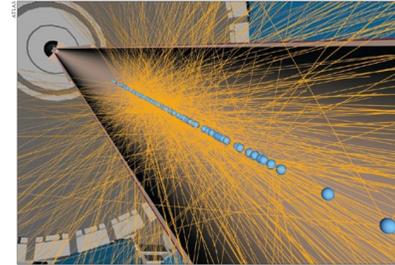
- all inner tracking fails. We consider this to be an unlikely scenario.
- tracking is still possible in the area close to the calorimeters i.e. the last four points are still measurable.

At $5 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ « .. only a beam-dump” experiment with muon detection would probably survive. »

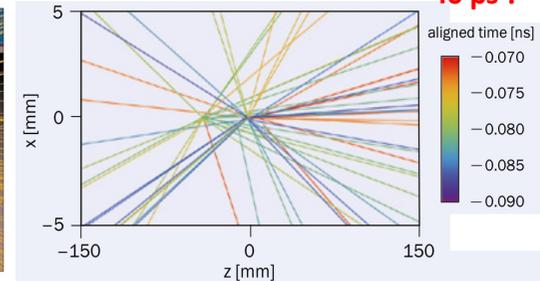
10-20 μ transverse



ATLAS CERN Courier Jan/Feb 2023

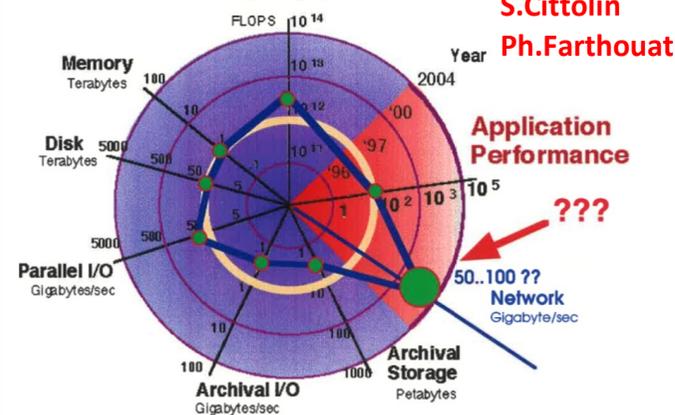


LHCb CERN Courier March/april 2023



40 ps ?

Computing Speed



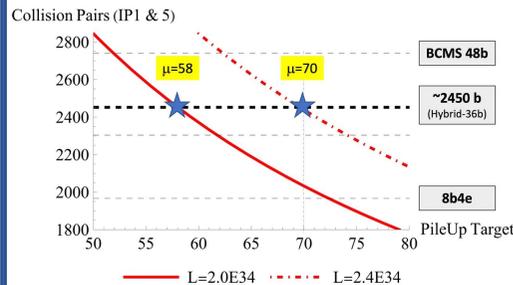
S.Cittolin
Ph.Farhouat

Application Performance

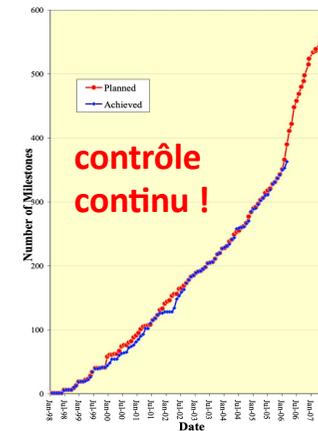
???

besoin d'une vision complète de la situation et de sa dérivée futur vu de 1997 pour une réalisation en 2004 ? la bande passante du réseau de commutation ?

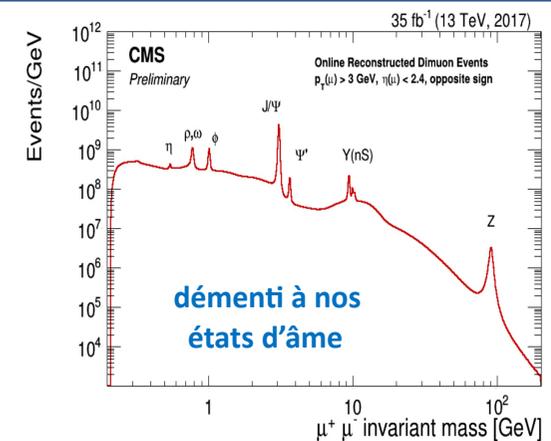
envisagé pour 2023: 70 fb⁻¹ ? nuage d'électrons versus nb de pile up



CMS Milestone Monitoring : Update March 2006



contrôle continu !



démenti à nos états d'âme

Henri Desportes CEA



LHC

Cryogénie
R.Aymar
Ph.Lebrun
S.Claudet

Revêtement
Getter
C.Benvenuti

Supra HT pour
amenées de
courant

M. Della Negra CMS)
Andreas Hoecker
(ATLAS SP)
G.Hamel de
Monchenault
(CMS SP adjoint)

Alain Hervé
TC de L3, CMS

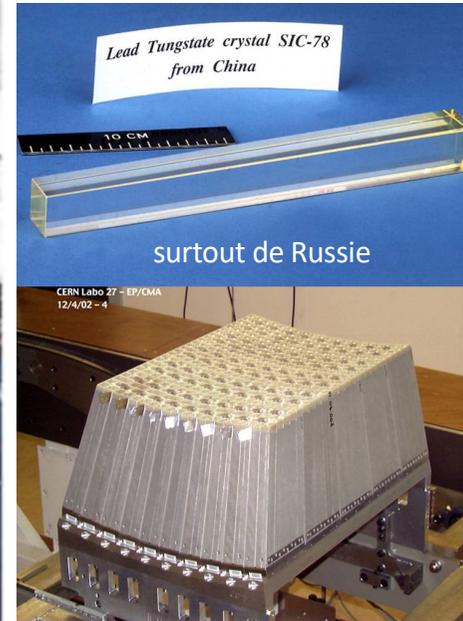
ALICE forward muon tracker



ATLAS

Accordéon
LAPP

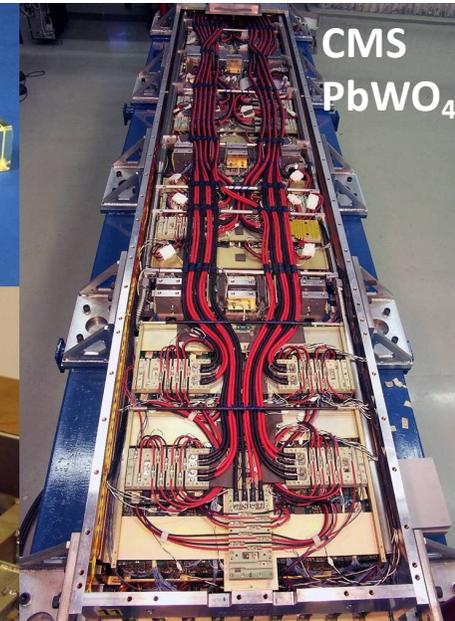
D.Fournier
I.Wingerter-Seez
G.Sauvage



Lead Tungstate crystal SIC-78
from China

surtout de Russie

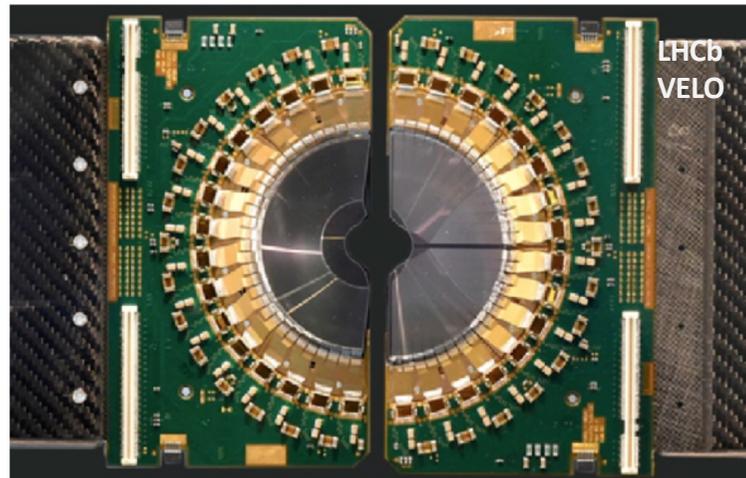
CERN Labo 2T - EP/CMA
12/4/02 - 4



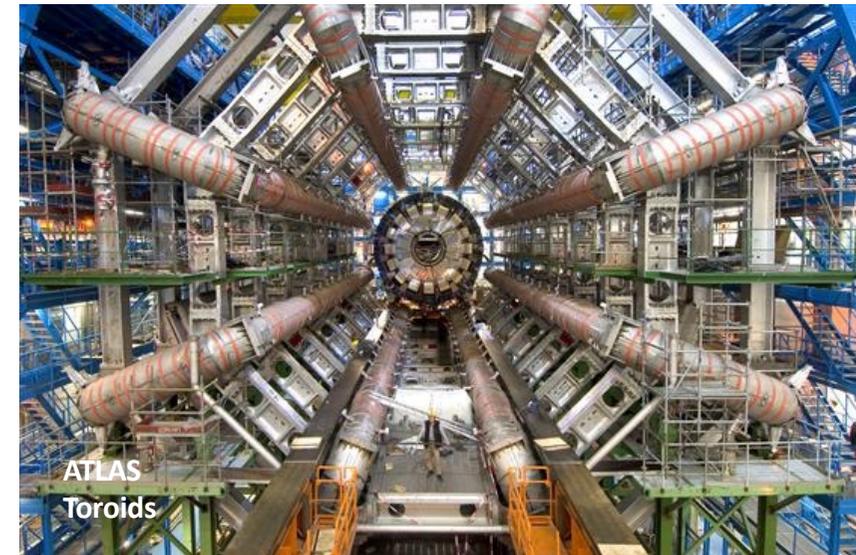
CMS
PbWO₄



et nouveaux détecteurs
vers l'avant (FASER, etc)



LHCb
VELO

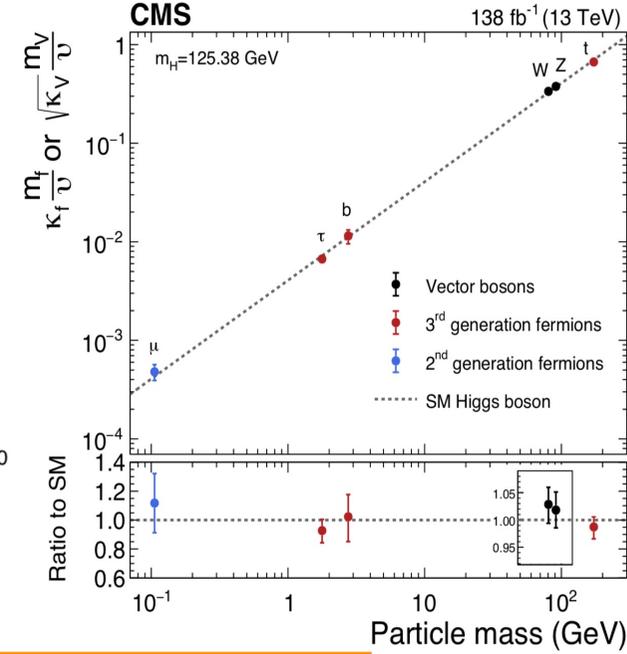
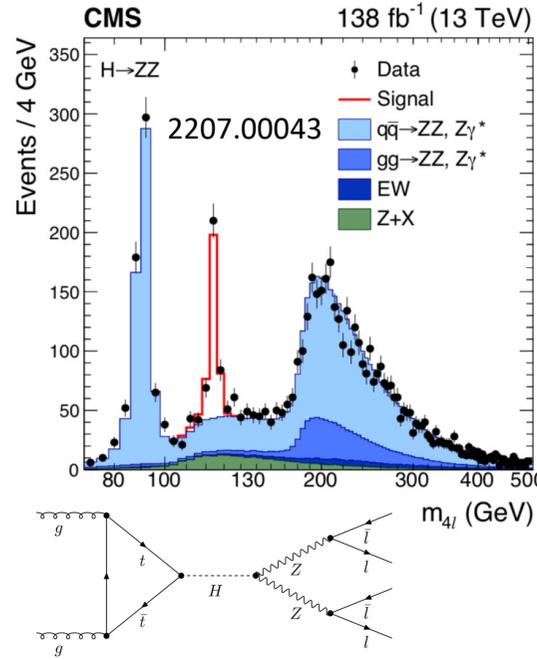
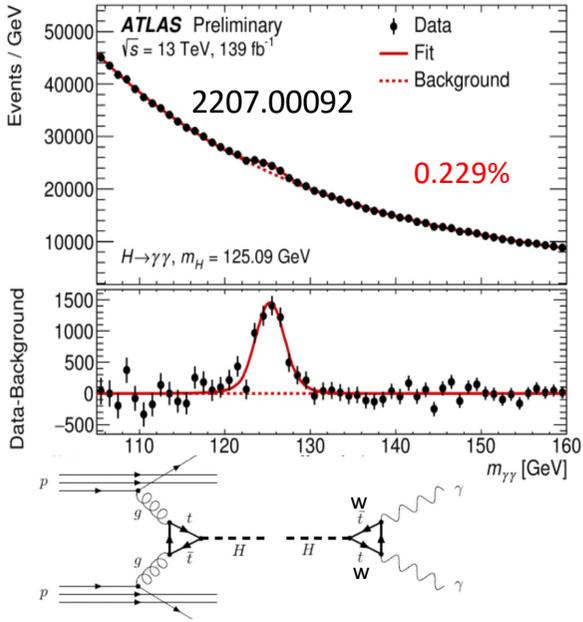


ATLAS
Toroids

G.Brianti, P.Jenni <https://inspirehep.net/files/d59e7aaf7b366b4da3ed4a0798e7a8e9>

D.Froidevaux <https://inspirehep.net/files/f2ad7fa061e17fdef13533e2883dd3fa>

Le boson



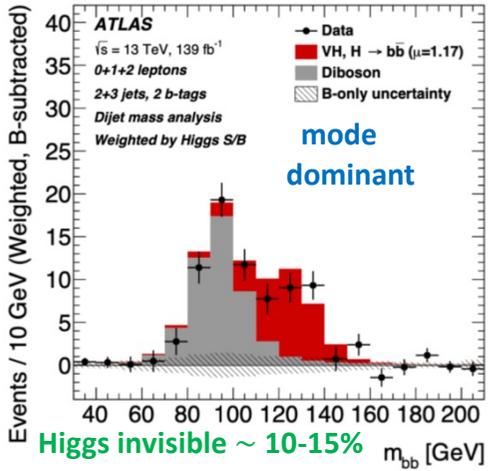
pour l'instant boson conforme aux attentes mais première génération ?
 $B(H \rightarrow e^+e^-) = 5.22 \times 10^{-9}$
 2107.02686. 1503.04830
objectif: son autocouplage 50% à HL-LHC

recherches en tous genres
 2204.03053
 M.Kado, Moriond summary
 nature de la transition ew e.g. d'autres scalaires ?
 2-doublets ? triplets, etc ?
 benchmarks nourris de divers "indices" tirés des expériences

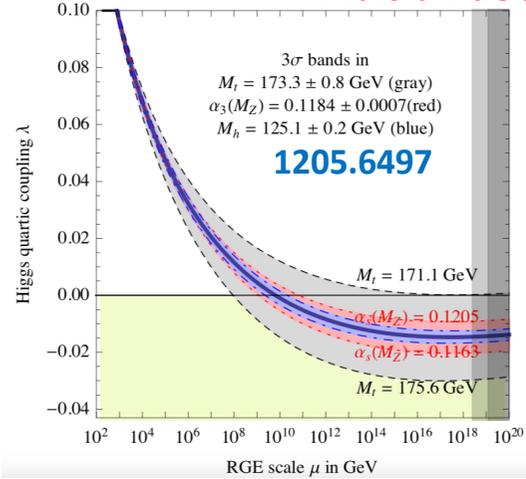
Atlas $m_H = 124.94 \pm 0.18 [\pm 0.17(stat) \pm 0.03(syst)] \text{ GeV}$

CMS $m_H = 125.38 \pm 0.14 [\pm 0.11(stat) \pm 0.08(syst)] \text{ GeV}$

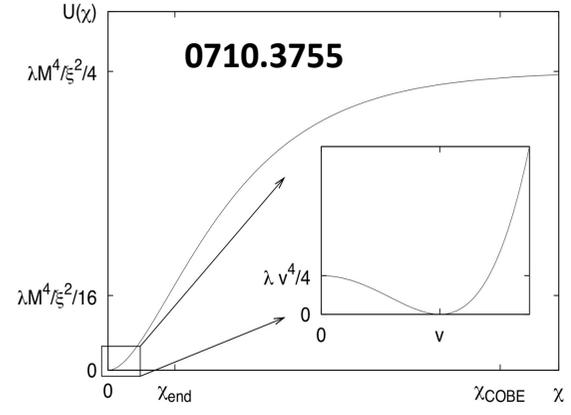
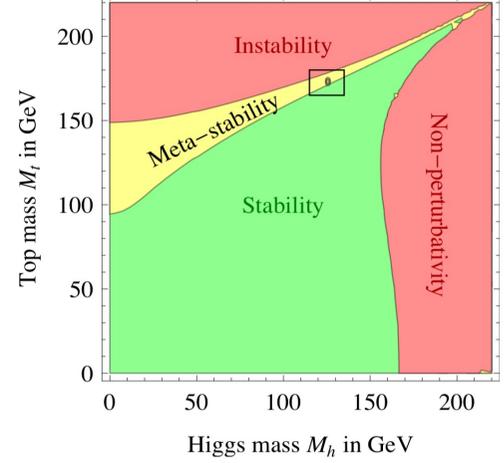
encore du travail....



mais un début, pas une fin....



R.Salerno, Y.Sirois Physics of Two Infinities, Kyoto
scalaire élémentaire et inflation ?



L'histoire des deux neutrinos :
<https://www.desy.de/~haidt/nove06.pdf>

ν_1 ν_2 ν_3
 ν_e ν_μ ν_τ

C. Giganti, S. Lavignac, M. Zito 1710.00715

$$U_{TB} = \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & 0 \\ -\frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

Symétrie discrète non-abélienne ?
 hep-ph/0202074 1002.0211

PS191 82-84 **NOMAD**
 F.Vannucci, J.Dumarchez, J.Chauveau, etc

Etat des lieux M.Kado Moriond 2023

Cosmology
 $\Sigma = \sum_i m_i$

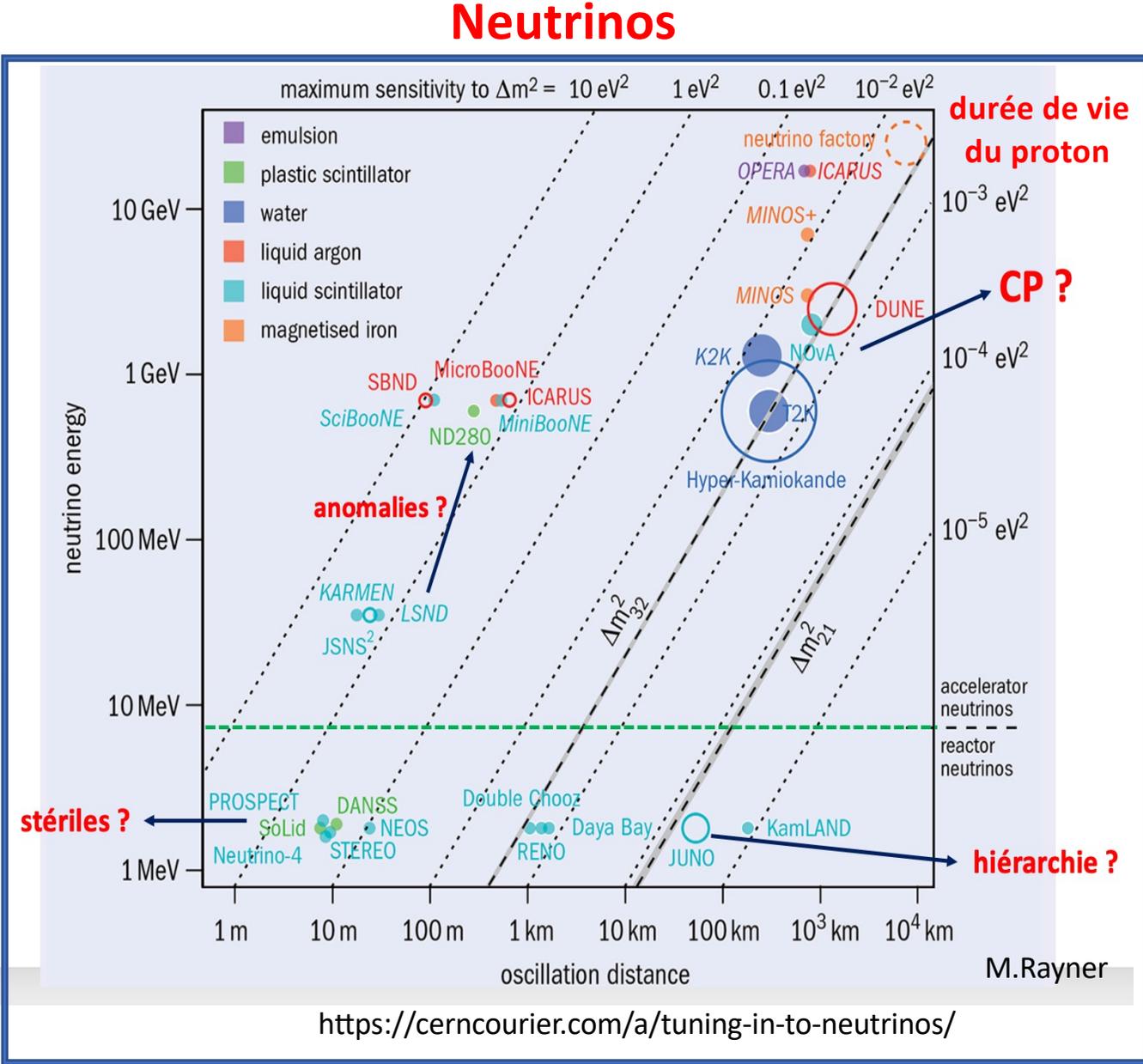
Neutrinoless $\beta\beta$ decay
 $m_{\beta\beta} = \sum_i U_{ei}^2 \cdot m_i$

β -decay kinematics
 $m_{\nu/\beta}^2 = \sum_i |U_{ei}|^2 \cdot m_i^2$

Planck, GERDA, Katrin

2212.11099

nature, Dirac ou Majorana ?
SuperNEMO : suite de NEMO-3
Topologie, énergie et timing
Démonstrateur à Modane, état ?



Coups de coeur

Le π^0 ...et couleur *subtil...*

simplissime...

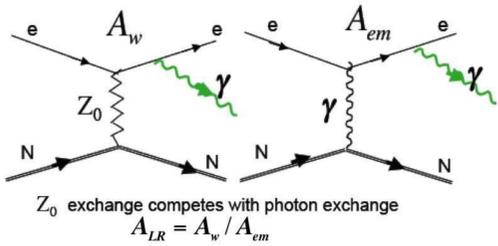
Variable Separation
450 GeV/c Incident Protons
150 GeV/c e^+ H6 beam line
70 μ m Tungsten Foils

puis usage de Primakov

durée de vie = $(0.897 \pm 0.022 \pm 0.017) \times 10^{-16}$ s
soit: $(7.34 \pm 0.18 \pm 0.11)$ eV
calcul de l'anomalie axiale: 7.87 eV
PL 158B, number 1, 1985

La violation de parité atomique

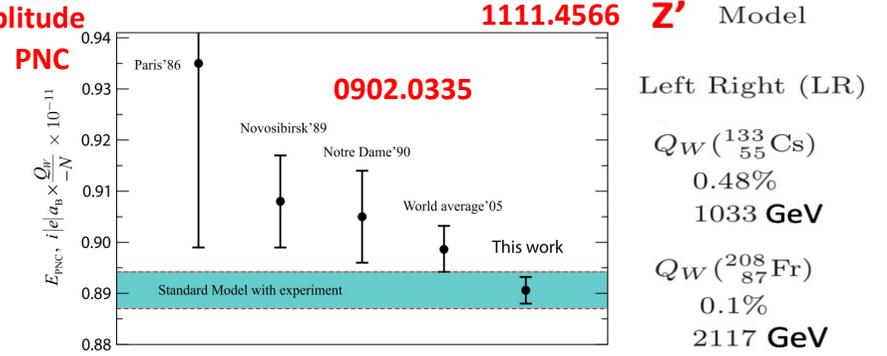
C. et M.A. Bouchiat 1111.2172



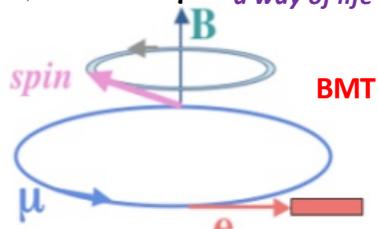
$\sim Z^3$
Cs
Francium ?



amplitude



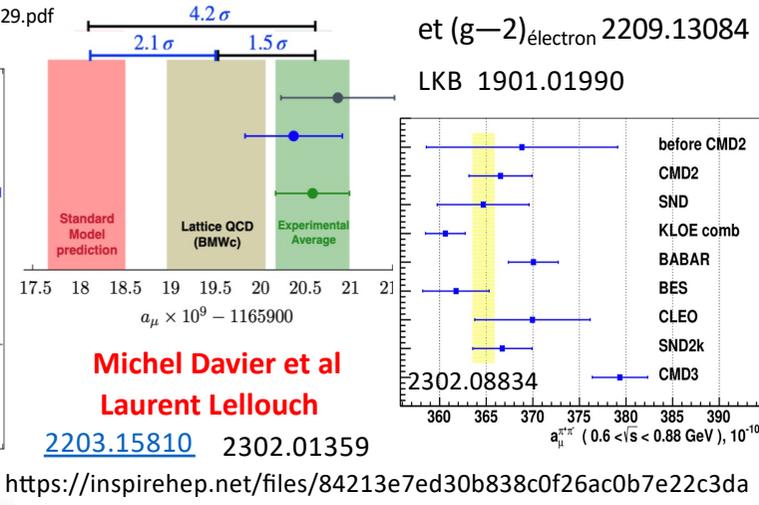
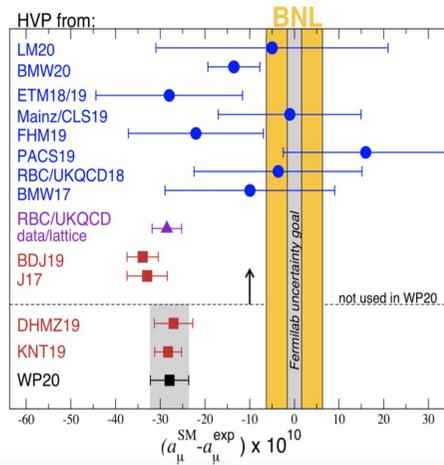
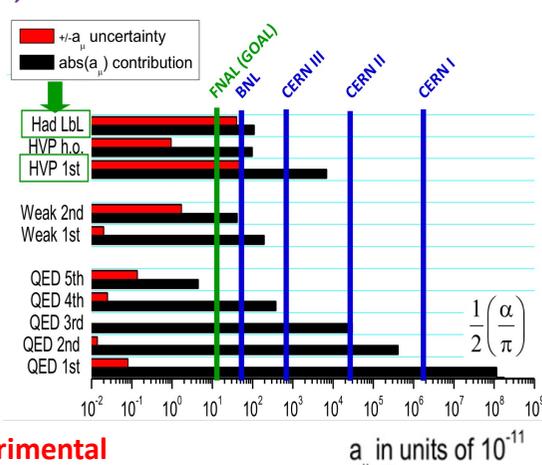
$(g-2)_\mu$ "not an experiment, a way of life"



battement entre fréquence de rotation du μ et celle du spin g devrait être 2, mais rôle des boucles : 12672 5-boucles...

beau travail théorique et expérimental

https://indico.cern.ch/event/1043872/attachments/2259944/3836157/YkS_g2_INP_Demokritos_2021_0608%282%29.pdf



Excuses multiples de ma part: la frontière à haute luminosité, les EDM (Guillaume Pignol à Moriond, 2203.08103) les axions et ALPs (hep-ph/9506229, CERN-ESU-012), les astres sombres (astro-ph/9803082, 2202.13819, astro-ph/0701488), les Wimps (2205.06833, 1602.03781).

Demi-siècle extraordinaire pour la PP.

Approuvé: HL-LHC LHC X 10 2029 énormes upgrades en cours
facteur 2 en luminosité intégrée à éventuellement discuter.

Intime collaboration théorie-expérience vitale.

Physique en train de se faire: nombre d'erreurs corrigées. Rôle de Moriond dans cet esprit.

Essentiel: vérifications ! recoupements de programmes et d'expériences.

R&D vigoureuse, à maintenir.

Le boson H est un début, pas une fin. Se risquer à des conjectures... Higgs et inflation, etc ?

Nature du neutrino ? CP en interaction forte et axion ?

Désintégration du proton ? Les vraies symétries sont-elles les symétries de jauge ?

Vigilance ! Ne rien manquer ni au LHC ni ailleurs !

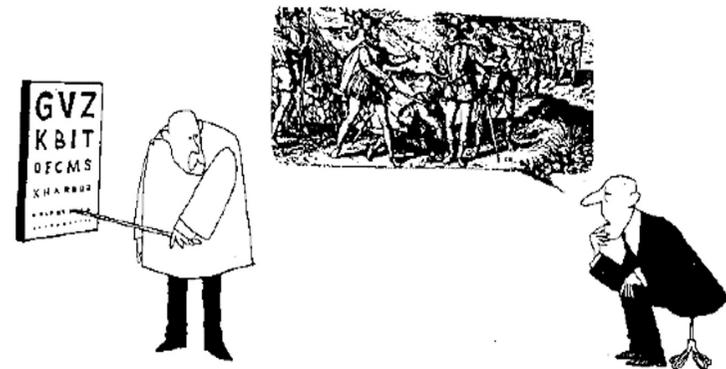
Précision, encore et toujours....

Explorer toutes les topologies.

Se coordonner entre expériences.

Mais éviter les fausses nouvelles, voir le 750 GeV

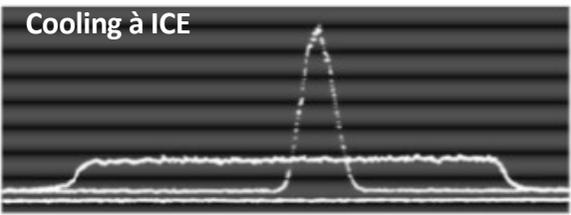
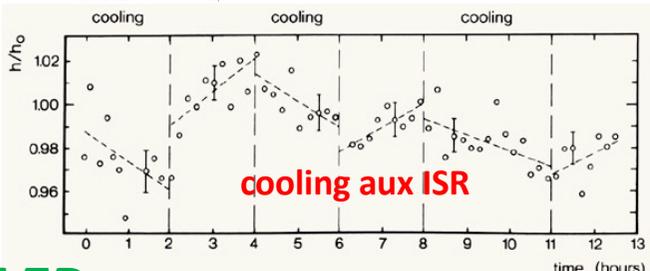
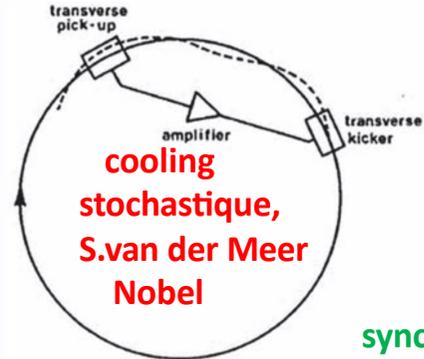
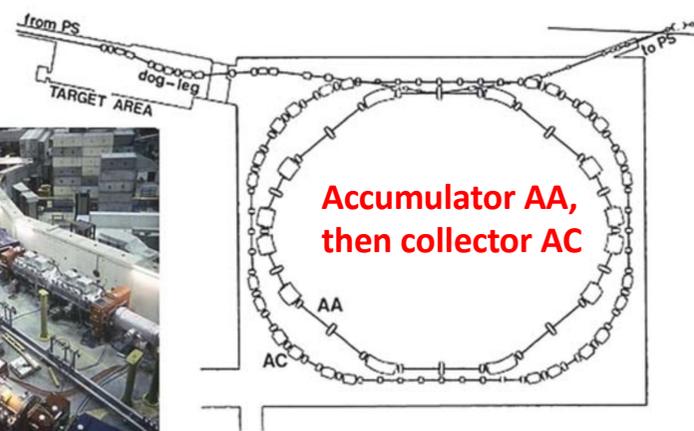
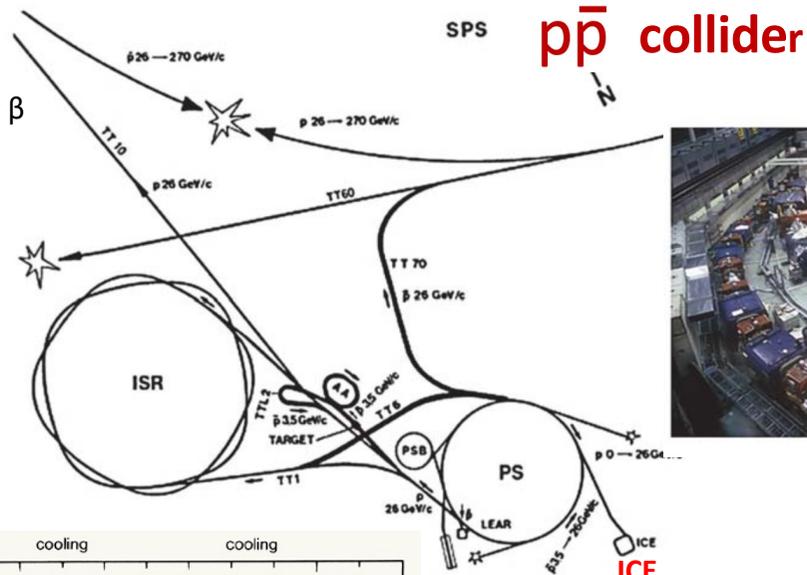
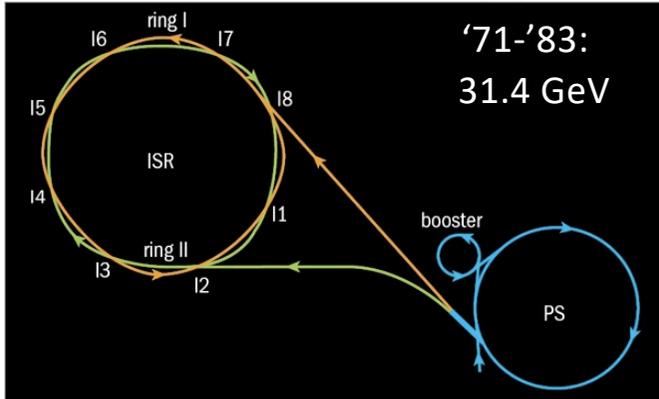
Wiki: "The event highlighted the desire in the community for the LHC to discover a fundamentally new particle, and the difficulties in searching for a signal which is unknown a priori "



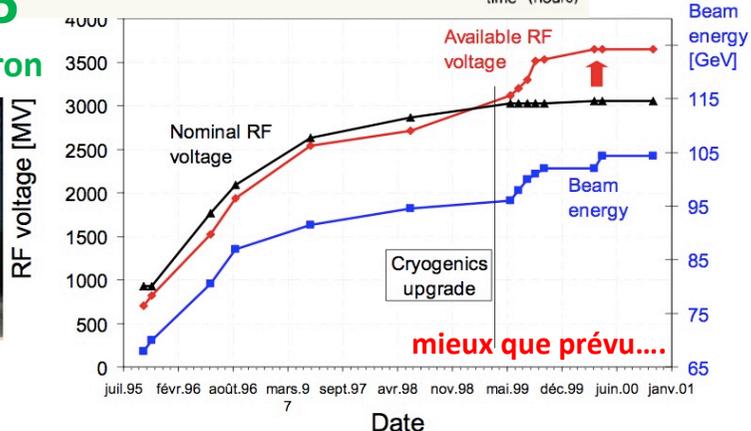
VARIA

Machines

ISR B.Gregory ultravide, cooling, quads SC low β



SC cavités RF Cu recouvert de Nb
C.Benvenuti, E.Picasso, Ph.Bernard



LHC
Cryogénie
R.Aymar
Ph.Lebrun
S.Claudet

Pompage
Getter
C.Benvenuti



La création du CERN <https://lejournal.cnrs.fr/billets/le-cern-quelle-histoire>. <https://www.techno-science.net/actualite/essor-physique-particules-france-N18915.html>

Le CERN est une des plus belles réussites scientifiques en Europe, une prouesse institutionnelle et jusqu'ici un succès politique, prouvant que des États – 12 à l'origine, 23 aujourd'hui, sans compter les 10 non-membres qui participent à ses programmes – peuvent s'entendre sur des projets ambitieux.

son existence officielle date du 29/9/1954, avec l'entrée en vigueur de la convention ratifiée par les états fondateurs, aboutissement d'un long processus entamé dès après la Seconde Guerre mondiale, dans un contexte marqué par l'hégémonie de la recherche US et en Europe par une forte volonté de réconciliation.

C'est autour de la physique « subatomique » (et non de l'énergie nucléaire, domaine réservé...) que naît l'espoir d'une coopération scientifique, avec des défenseurs passionnés comme L.Kowarski, P.Auger et R.Dautry, le renfort de figures scientifiques prestigieuses, comme Louis de Broglie et Isidor Rabi, et l'aide de l'UNESCO. L'objectif est un laboratoire disposant d'une machine de 6 GeV et le canton de Genève est choisi comme site.

7 décennies plus tard, le CERN est devenu un laboratoire quasi-mondial (40% de ses utilisateurs sont de pays non membres). Il possède toujours un grand prestige et le Modèle CERN est souvent donné en exemple. Le prestige du CERN est bien sûr lié à la remarquable série de grandes machines qu'il a permis de construire, aux succès de leur physique, et, *last but not least*, au fait que ces machines ont été **réalisées sur le site originel**. Il est probable que si ces collisionneurs avaient été construits ailleurs dans le Monde on parlerait moins du Modèle CERN à l'heure actuelle.

À quelques avatars près le CERN a rempli sa mission et ses membres européens joué le jeu, tout en gardant, e.g. l'Allemagne, un fort programme en parallèle.

Le CERN a été le modèle d'autres entreprises communes comme l'ESO. Il a toujours contribué à une bonne entente des scientifiques concernés, gardant le contact avec ceux qui étaient en difficulté en URSS sous la Guerre Froide, faisant travailler ensemble des communautés que la politique pouvait rendre adversaires, lançant l'idée du projet SESAME, etc.

Dans ses réalisations le CERN a en général tenu les objectifs, ne dépassant pas de plus d'une vingtaine de pourcents les budgets prévus. Il s'est efforcé de pratiquer au mieux l'idée d'un juste retour, industriel et autre, vers les pays membres.

Mais je peux souligner des aspects moins positifs.

--- sur ce retour l'impossibilité pour l'industrie européenne, faute de compétitivité, de réaliser des parties de ses programmes, comme les détecteurs au silicium.

--- comme ailleurs un recours exagéré à la sous-traitance, les compétences du jeune CERN en matière de soudure, de métrologie, largement perdues ensuite.

--- Il est aussi évident que les pays hôtes bénéficient de certains avantages que les autres peuvent jalouser. Il est clair également que l'apport des laboratoires impliqués dans ses programmes a été une clé des succès, et il se peut que le monde extérieur ait pu parfois se sentir, à juste titre ou pas, non reconnu à la hauteur de ses contributions.

Ions lourds (2012.08832)

Une collision d'ions lourds ultra-relativistes comporte les stades suivants :

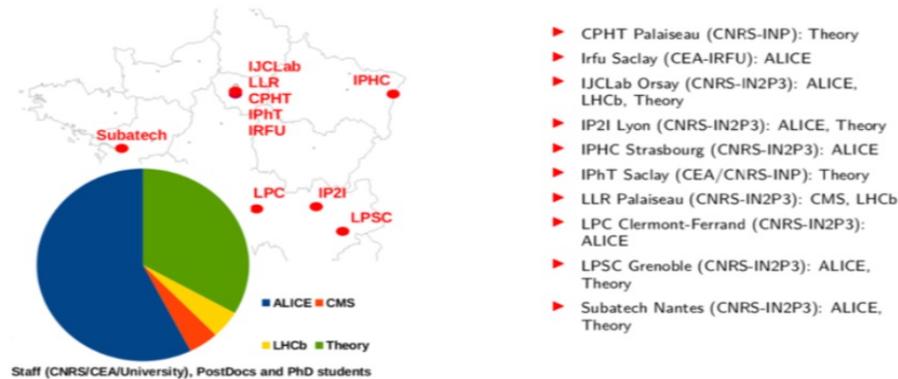
- 1/ collision initiale, qui se produit durant le croisement des noyaux contractés de Lorentz ;
- 2/ création et thermalisation du QGP (quark gluon plasma) pendant 0.1–1 fm/c ;
- 3/ expansion, mouvement collectif et refroidissement du QGP ;
- 4/ hadronisation quand la température baisse sous T_C ;
- 5/ après 5–10 fm/c, gel chimique : fin des collisions inélastiques, les productions de hadrons se fixent ;
- 6/ le gel cinétique se produit : les collisions élastiques cessent et les impulsions ne changent plus.

Les effets du milieu chaud sont quantifiés par le facteur de modification nucléaire RAA , rapport des distributions de p_T (ou autres variables) mesurées en collisions AA et en collisions pp : $RAA = 1/\langle N_{coll} \rangle (dN_{AA}/dp_T) / (dN_{pp}/dp_T)$, où dN_{AA}/dp_T et dN_{pp}/dp_T sont les taux différentiels en p_T d'une espèce de particule donnée en collisions AA et pp, respectivement, et $\langle N_{coll} \rangle$ est le nombre moyen de collisions binaires nucléon-nucléon dans la région de recouvrement des noyaux en collision. Si les effets du milieu sont absents et les effets de matière nucléaire froide petits, le rapport RAA est 1 dans la région où la production de particules par des processus de diffusion dure domine ($p_T \geq 2$ GeV/c).

Résultats majeurs des collisions d'ions lourds ultrarelativistes, outre la découverte que le QGP s'apparente à un liquide parfait :

- 1/ Les mesures des **sondes électrofaibles (photon, Z)** contraignent à la fois la **géométrie initiale de la collision et les fonctions de distribution des partons**.
- 2 / les résultats de **production de particules soft** montrent que l'abondance de hadrons de saveurs légères, des pions à ^4He , peut être décrite par une **température universelle** et que ces particules participent au **mouvement collectif du système**.
- 3/ les études des **sondes dures, comme les quarks lourds et les jets**, montrent que la **perte d'énergie partonique** joue un rôle important dans les collisions d'ions lourds.
- 4/ des mesures différentielles des mésons J/ψ élucident leur **mécanisme de production**, i.e. la **régénération**, et offrent l'évidence du **déconfinement** en collision Pb-Pb à la pleine énergie du LHC. Récemment observée, la suppression de l'Upsilon ($3S$), en fonction du nombre moyen de nucléons participants, complète l'étude des schémas de suppression de 5 différents quarkonia, démarrée il y a 35 ans au SPS avec le J/ψ et le $\psi(2S)$ à NA38.
- 5/ L'abondance des données au LHC permet d'étudier les **sondes rares** comme le $\chi_{c1}(3872)$ et la production top-antitop. Les mesures de sections efficaces d'antinoyaux servent d'information pour les recherches de matière noire.

Côté France :

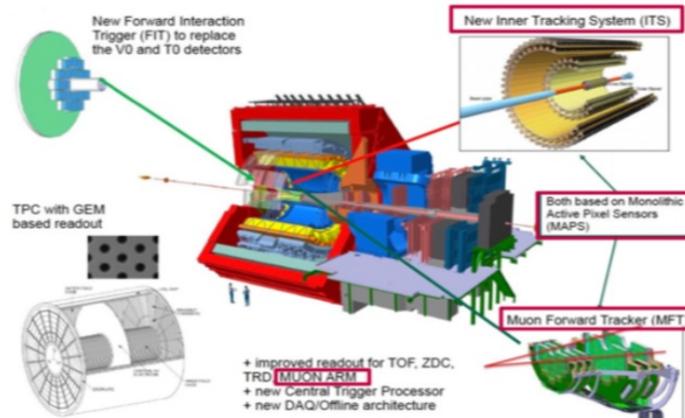


- ▶ CPHT Palaiseau (CNRS-INP): Theory
- ▶ Irfu Saclay (CEA-IRFU): ALICE
- ▶ IJCLab Orsay (CNRS-IN2P3): ALICE, LHCb, Theory
- ▶ IP2I Lyon (CNRS-IN2P3): ALICE, Theory
- ▶ IPHC Strasbourg (CNRS-IN2P3): ALICE
- ▶ IPhT Saclay (CEA/CNRS-INP): Theory
- ▶ LLR Palaiseau (CNRS-IN2P3): CMS, LHCb
- ▶ LPC Clermont-Ferrand (CNRS-IN2P3): ALICE
- ▶ LPSC Grenoble (CNRS-IN2P3): ALICE, Theory
- ▶ Subatech Nantes (CNRS-IN2P3): ALICE, Theory

Cette physique est présente depuis longtemps en France avec une participation au SPS (CERN) puis au RHIC (États-Unis). Aujourd'hui les efforts se concentrent au CERN dans ALICE, CMS et LHCb. Le LHC délivre environ un mois par an, des collisions d'ions lourds plomb- plomb, ou plus rarement proton-plomb.

La communauté française du plasma quark-gluon est vaste et participe à l'analyse des données du LHC dans ces 3 expériences, à leur interprétation et à ses améliorations, concernant surtout les observables du quarkonium et des saveurs lourdes.

ALICE exploite les collisions noyau-noyau, proton-noyau et proton-proton du LHC pour déterminer les propriétés fondamentales d'un plasma de quarks et de gluons (QGP). Le potentiel de l'expérience pour mesurer, identifier les particules et faire la physique à petites impulsions transverses est relativement unique et dédié à l'exploration de la physique des ions lourds.



Les laboratoires de l'IN2P3 sont engagés de façon importante dans le projet d'amélioration de l'expérience pour les *runs* à venir (encadrés en rouge sur la figure). Les physiciens de IPNL, LPC, SUBATECH sont porteurs du projet MFT (Muon Forward Tracker). L'IN2P3 est également fortement impliquée dans la construction de la nouvelle électronique des stations de trajectographie (IPNO, SUBATECH) et d'identification (LPC, SUBATECH) du spectromètre MUON, et de l'assemblage de modules du nouveau trajectographe ITS (IPHC). Le LPSC contribue aux améliorations des amas calorimétriques EMCAL/DCAL et, avec son groupe d'électronique, participe au développement du module de lecture des données commun à l'ensemble des détecteurs ALICE.

ALICE, LHCb et CMS se complètent mutuellement. ALICE est unique pour la physique petites impulsions transverses et toute son instrumentation est optimisée pour la physique des ions lourds. LHCb est unique grâce à sa couverture des angles avant et ses capacités de mesure des saveurs lourdes. CMS possède une couverture angulaire complémentaire de celle d'ALICE et de meilleures performances en reconstruction des *jets*.

Rappel : au SPS, expériences NA10,38,50,51,60, WA48, ...

Quelques acteurs : P.Sonderregger, L.Kluberg, C. Gerschel, Ph.Gorodetzky, etc, B.Erasmus (PP adjointe d'ALICE), C.Roy (projet EMCAL)

