

Le CERN

Histoire

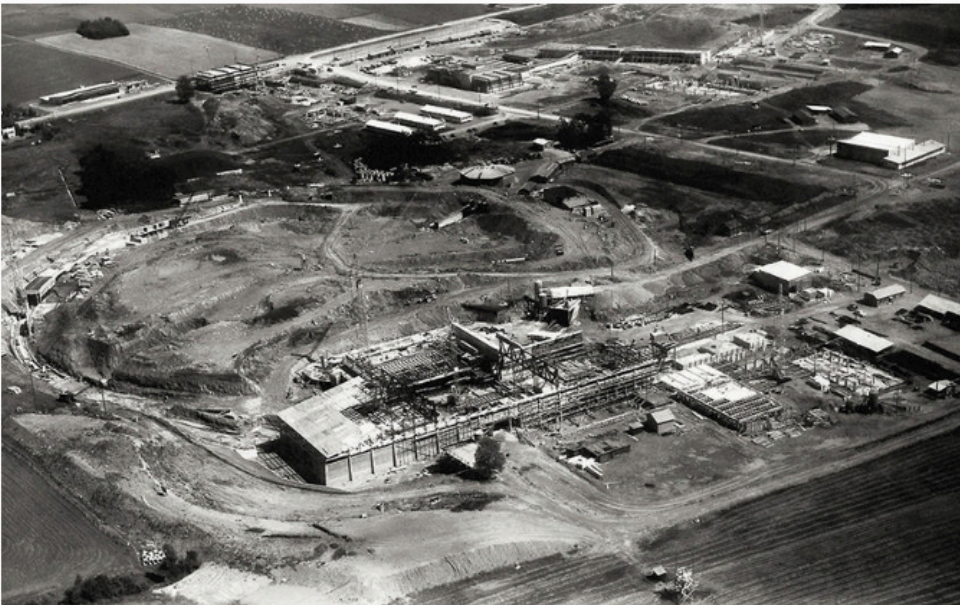
Technologies

Physique

Futur

D.Treille

1 October 1952



1955 Les travaux débutent à Meyrin.

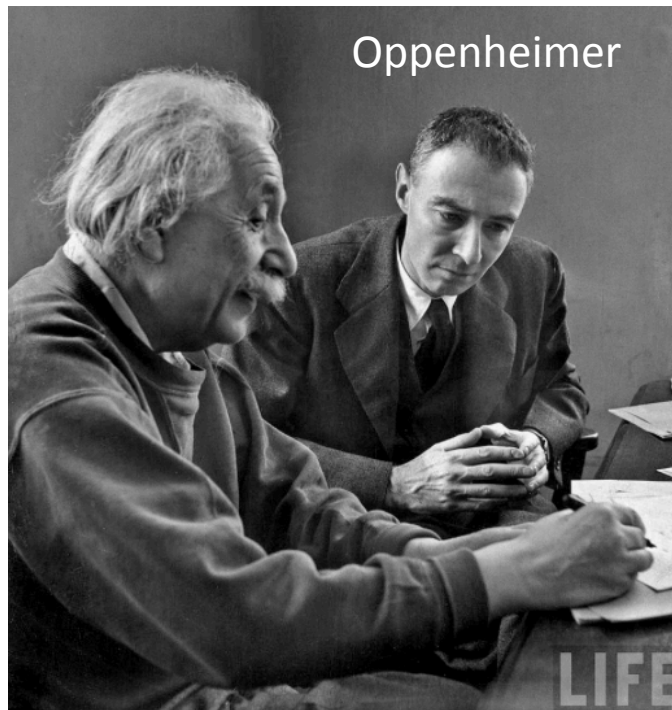
CERN



Le synchrocyclotron

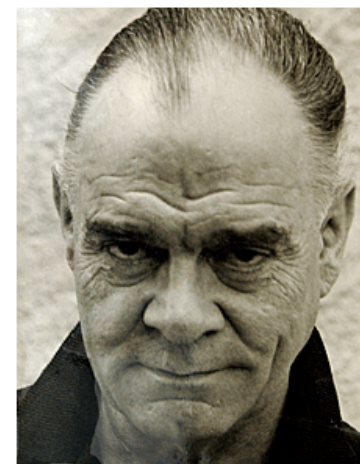


François de Rose during his visit to CERN to celebrate his 100th birthday.



Oppenheimer

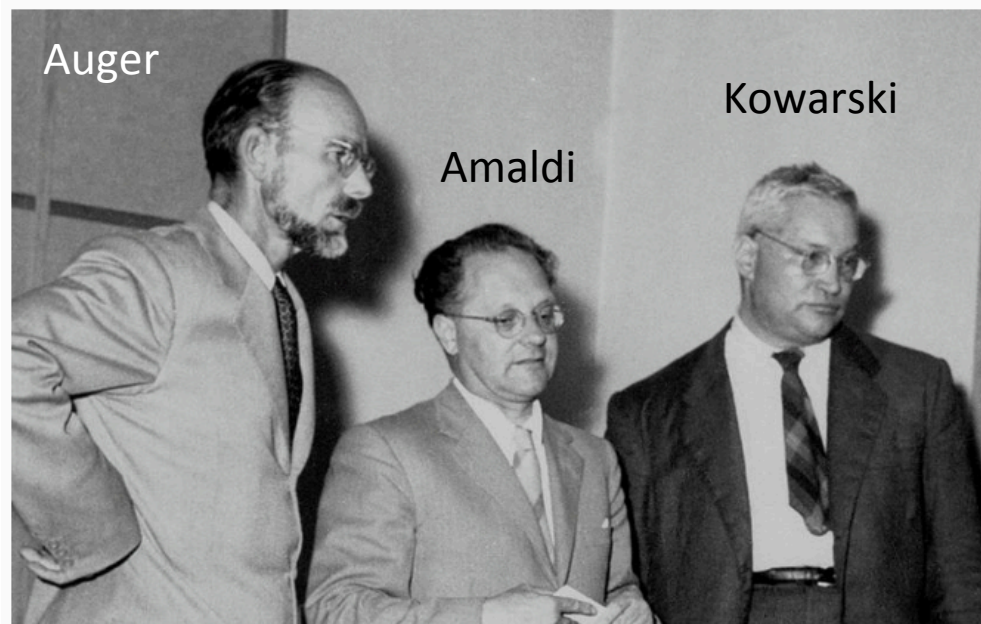
Louis de Broglie 1949



Denis de
Rougemont



Pauli, Heisenberg, Fermi



Auger

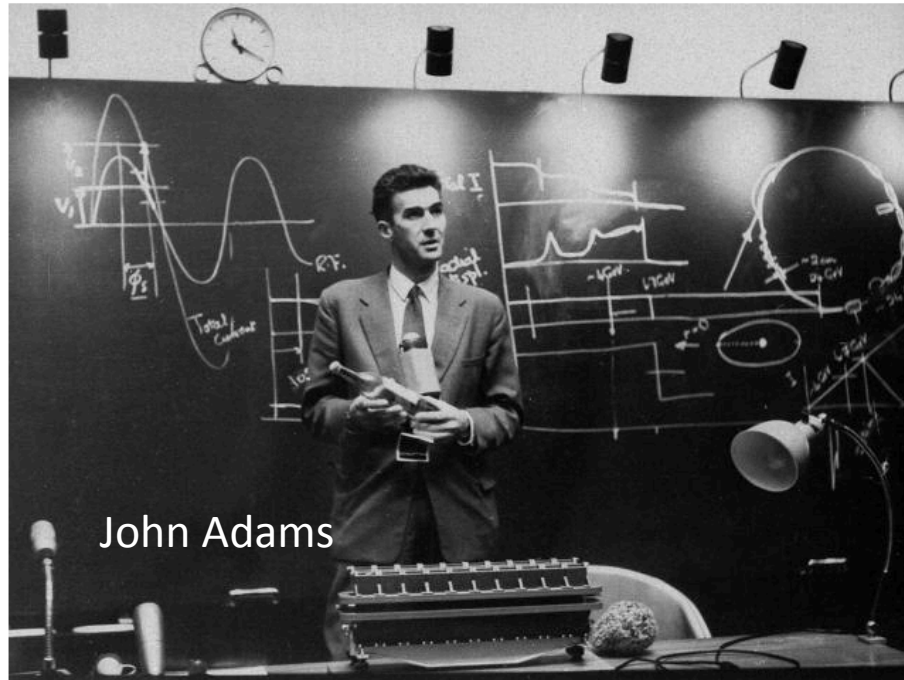
Amaldi

Kowarski

1949 Les pionniers Pierre Auger, Edoardo Amaldi et Lew Kowarski (de gauche à droite) lancent l'idée du CERN.

CERN

24 November 1959



John Adams



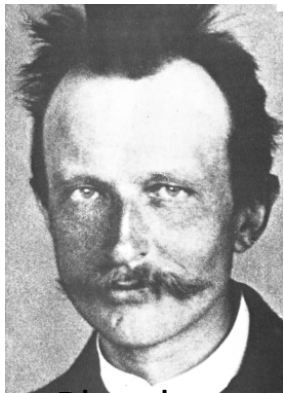
Le synchrotron à protons 1959



12/35 - 5 février 1960: le Professeur Niels Bohr tient un discours lors de l'inauguration du synchrotron à protons.

KEYSTONE





Planck



Pauli



Dirac



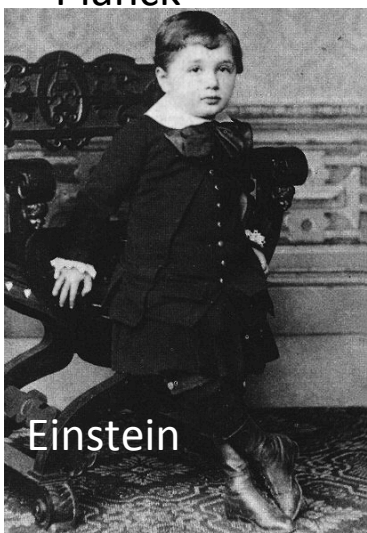
Dyson



Feynman



Gell-Mann



Einstein



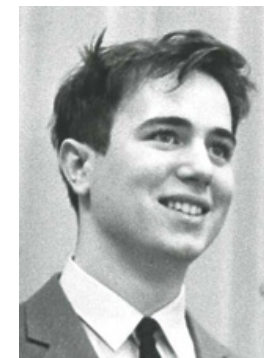
Pauli



Feynman



Weinberg



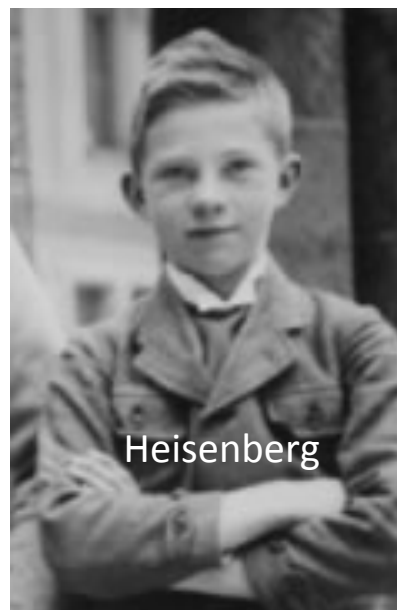
Wilczek



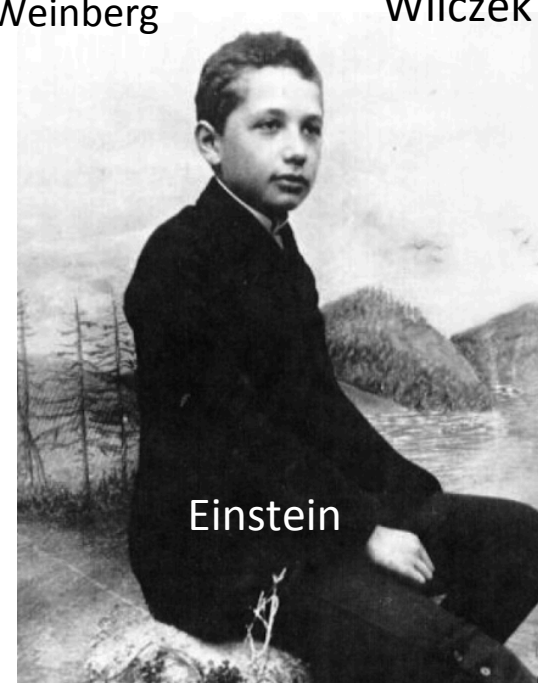
Schrodinger



Pauli



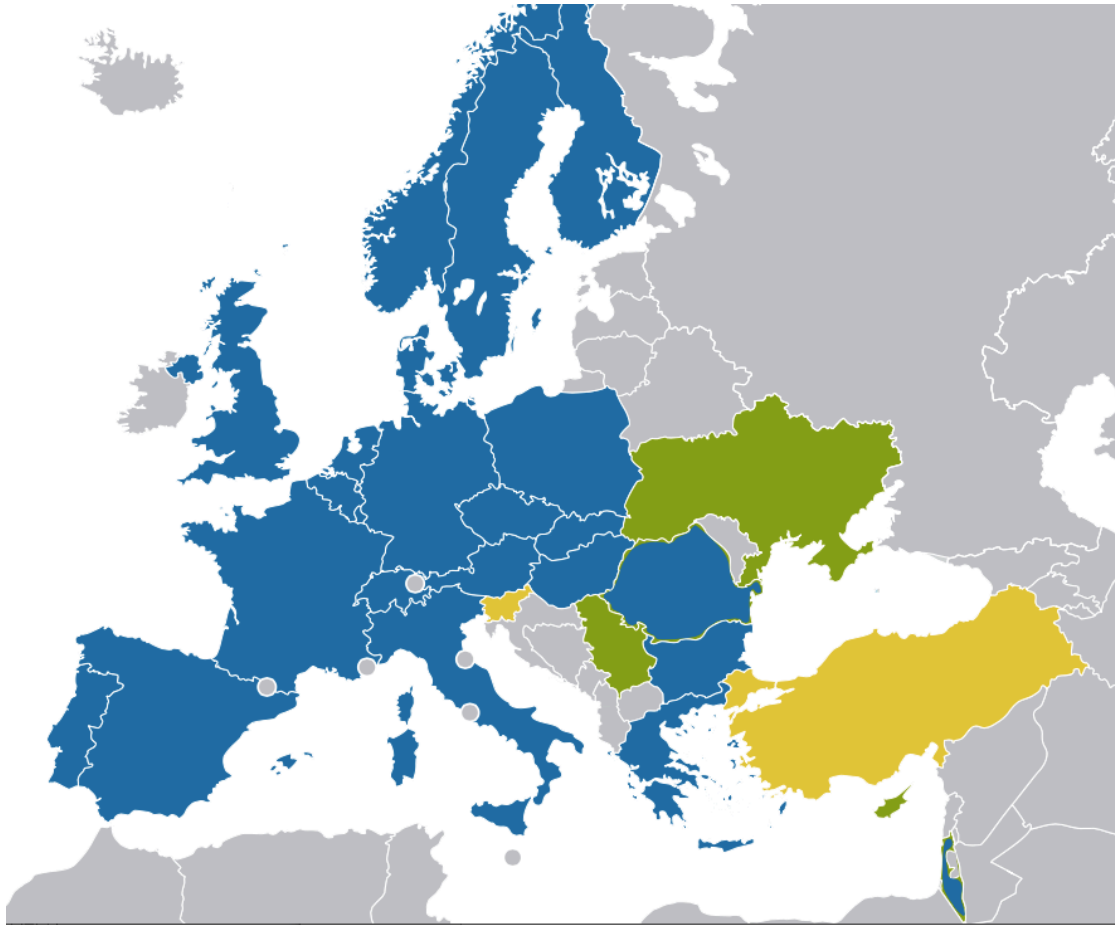
Heisenberg



Einstein

L'expérience du CERN: le rêve, moteur de l'invention

- organisation européenne intergouvernementale dédiée à la recherche fondamentale en Physique des Particules (PP)*
- 21 pays membres européens (sauf Israël). Mais déjà labo mondial.*
- budget annuel ~ 1000 millions de francs suisses
cf hôpital de Genève, < ETH Zurich, mais fait plus de la moitié de la PP mondiale*
- ~ 2500 employés: physiciens "applied", ingénieurs, techniciens.*
- ~10000 utilisateurs, de ~ 75 pays, 1/3 de pays non membres*
- rôle important de formation des jeunes, de promotion de technologies de pointe.
3/4 du budget du CERN "revient" à l'industrie. France ! Suisse !*
- gouvernance : Conseil et Direction. Comités scientifiques: jugement des pairs.
Défi de la gestion des grands projets et expériences: le « modèle du CERN »*
- le CERN fait de la physique fondamentale: son "produit" est de la connaissance sur l'identité et les interactions des constituants de base de la matière. Cela nourrit d'autres domaines, comme la Cosmologie*



21 pays membres

1954: 12 pays fondateurs

Israël (non européen) en 2014

candidats Roumanie 2015, Serbie 2017

Turquie Pays Associé 2015

Pakistan

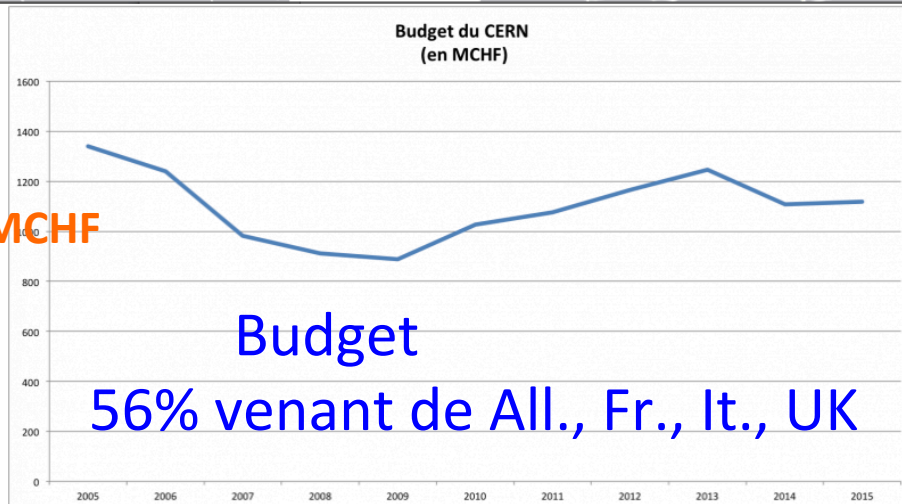
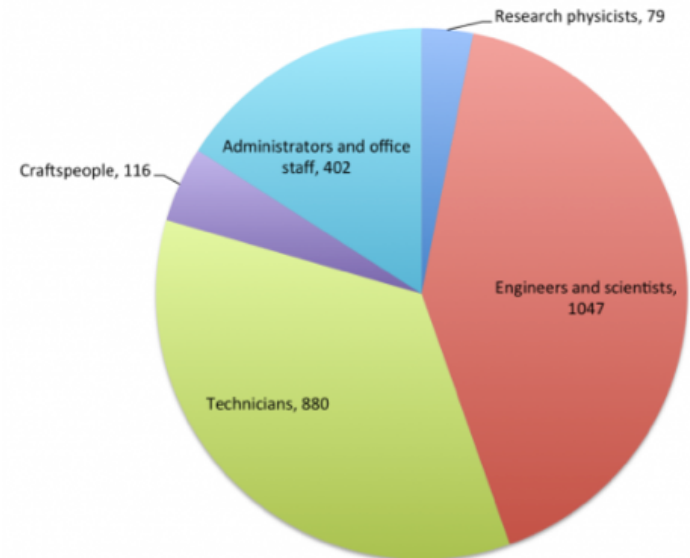
observateurs

Inde, Japon, Russie, USA

EU, JINR, UNESCO

nouvelle politique d'élargissement

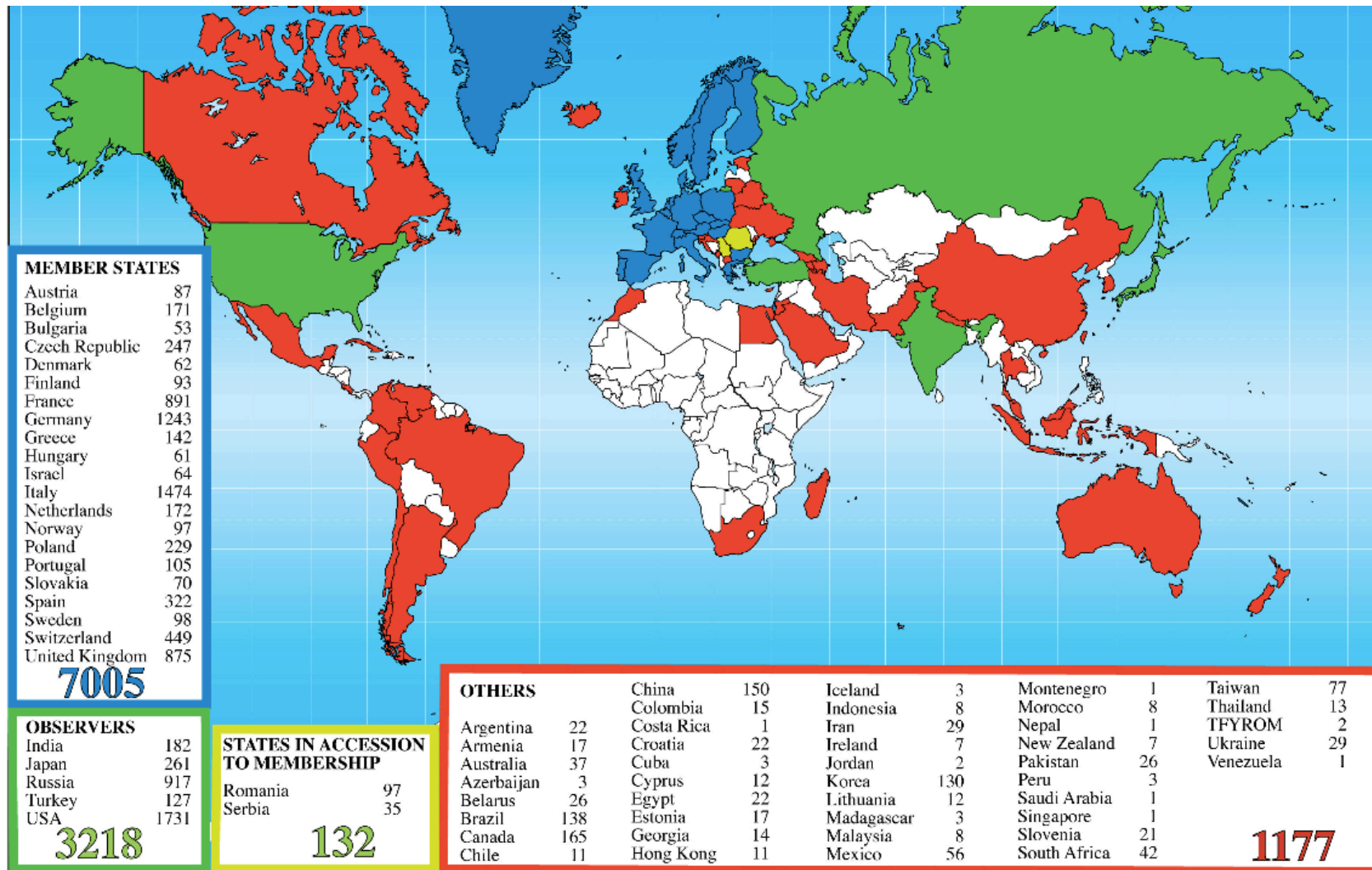
profil des 2500 employés du CERN



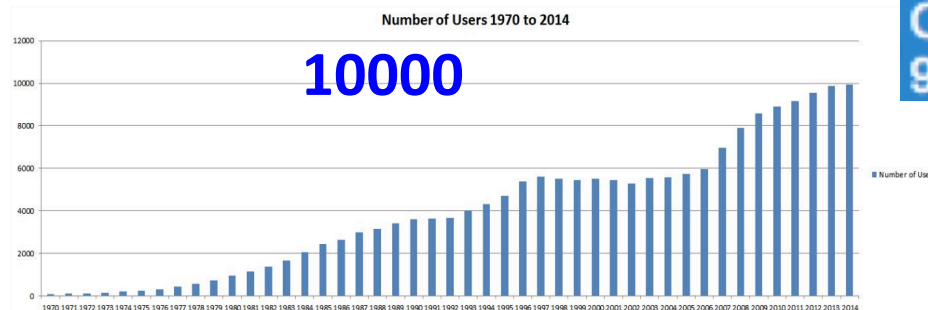
1000 MCHF

Budget

56% venant de All., Fr., It., UK



Répartition des utilisateurs du CERN selon la place de leur institut de recherche



CERN Teacher Programme: 9509 teachers since 1999

~ 1500 young people trained at CERN every year

Que fait le CERN?

→ “accélération” des particules
“projectiles”: e^\pm , p , \bar{p} , etc

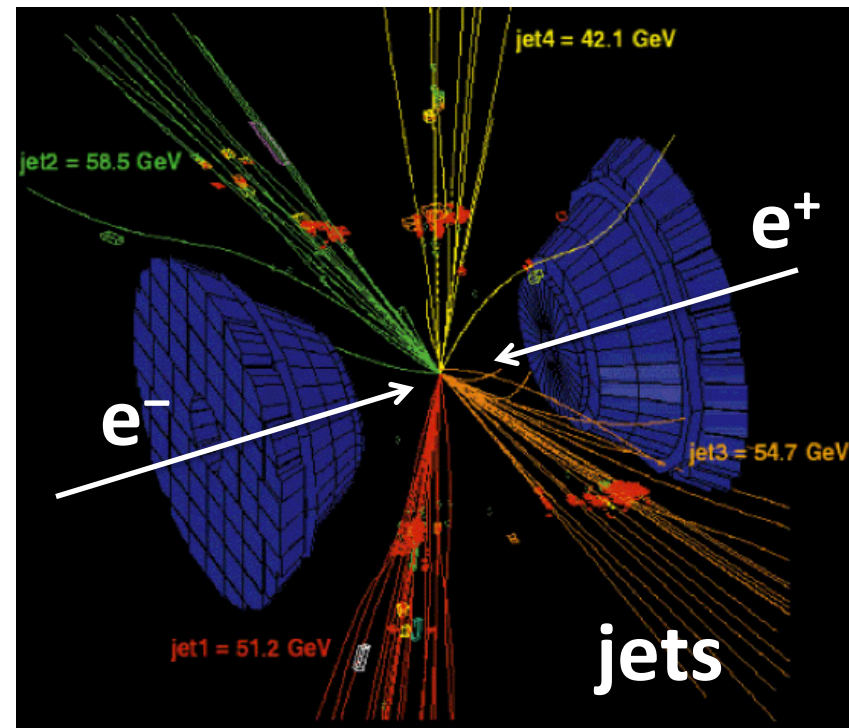
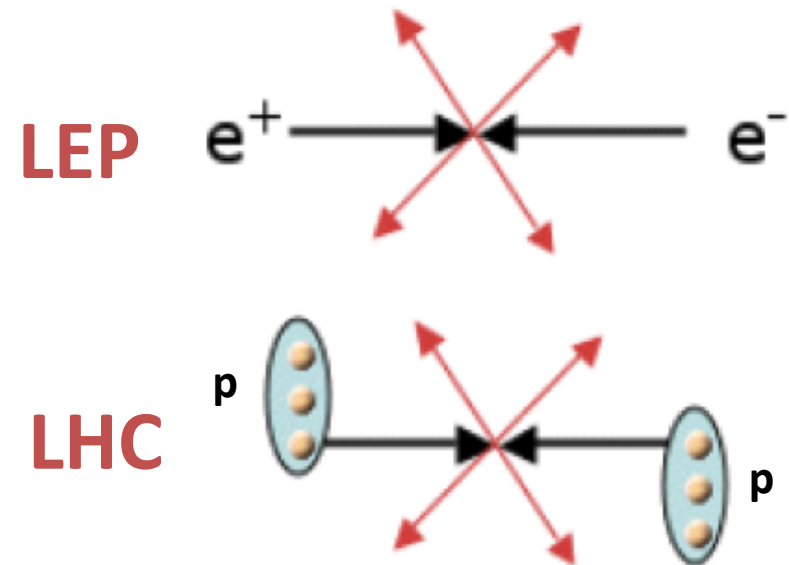
→ collisions entre projectiles:
l'énergie cinétique devient masse
“ $E = mc^2$ ”

Des particules “neuves” sont créées

Au LHC l'intérêt est dans les
collisions “dures” entre
constituants des protons,
quarks et gluons

→ notre travail: détection, mesure
et identification de ces particules

→ beaucoup de technologies de
pointe nécessaires



Pour être un peu rigoureux

“ $E = mc^2$ ” ?

$$E_0 = m_0 c^2$$

$$E = E_{\text{cin}} + m_0 c^2 = m_0 c^2 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

It is not good to introduce the mass $M = m / (1 - v^2/c^2)^{1/2}$ of a moving body for which no clear definition can be given. It is better to introduce no other mass concept than the "rest mass" m . Instead of introducing M it is better to mention the expression for the momentum and energy of a body in motion.

A.Einstein

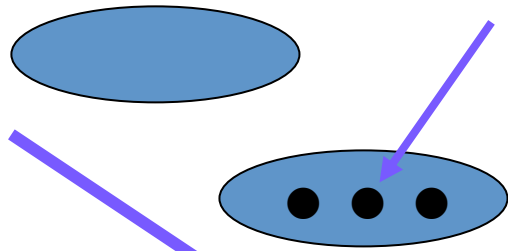
1989-2000 LEP (Large Electron Positron collider)
électrons contre positrons (anti-électrons)
énergie maximum par faisceau de **100 GeV**
Giga (10^9) eV

2008- ??? LHC (Large Hadron Collider)
protons contre protons
énergie maximum par faisceau de **7 TeV**
Tera (10^{12}) eV

gain réel en énergie d'environ **10**

même tunnel, même infrastructure

petit calcul



100
milliards
de protons
par paquet

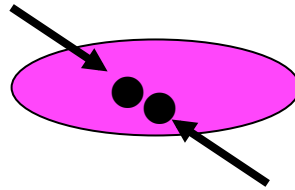
~ 3000
paquets
par faisceau,
1 nanogramme de
protons stockés

énergie stockée
dans les faisceaux
~ un train de 300t

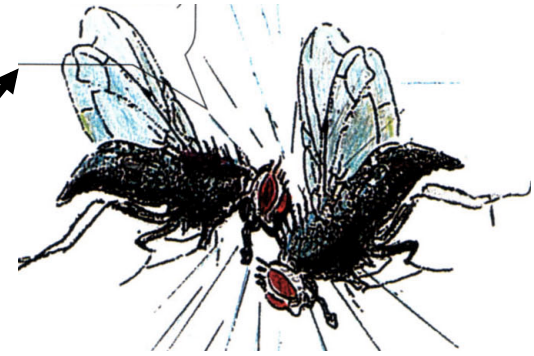
à 150 km/h ($4 \cdot 10^8$ joule)



collisions:
~ 20 par croisement
~ 10^9 par seconde



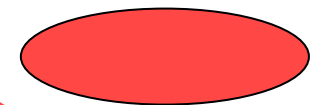
25 nanoseconde
(soit ~ 7.5 m)
donc $4 \cdot 10^7$
croisements par s



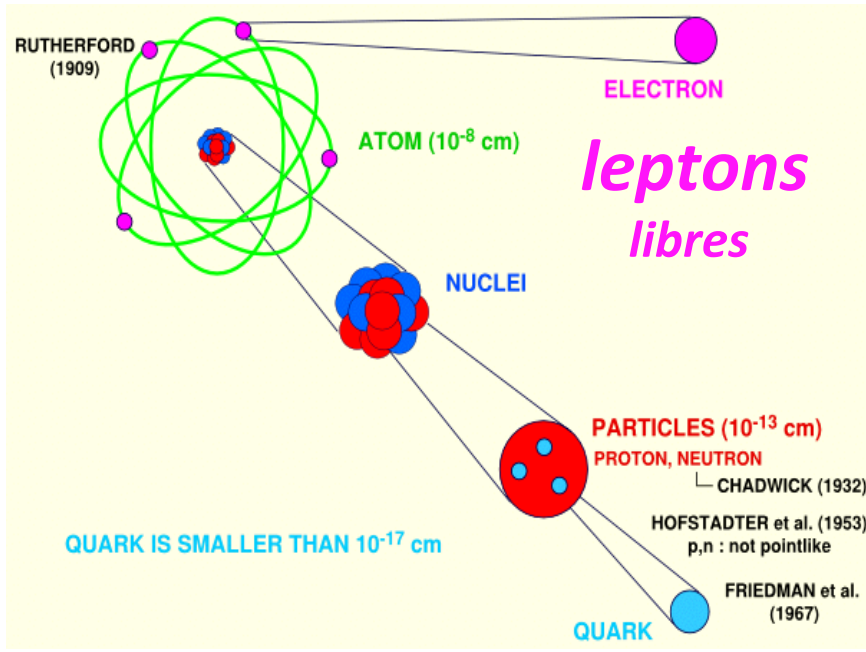
une collision: ~
deux moustiques
~ 10^{-6} joule
mais concentrée dans
un volume infime

**densité d'énergie
colossale**

11000
tours par s



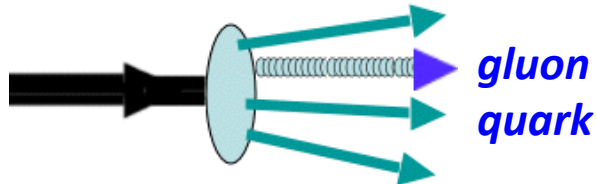
les objets de nos études



ponctuels, à mieux que 10^{-17} cm

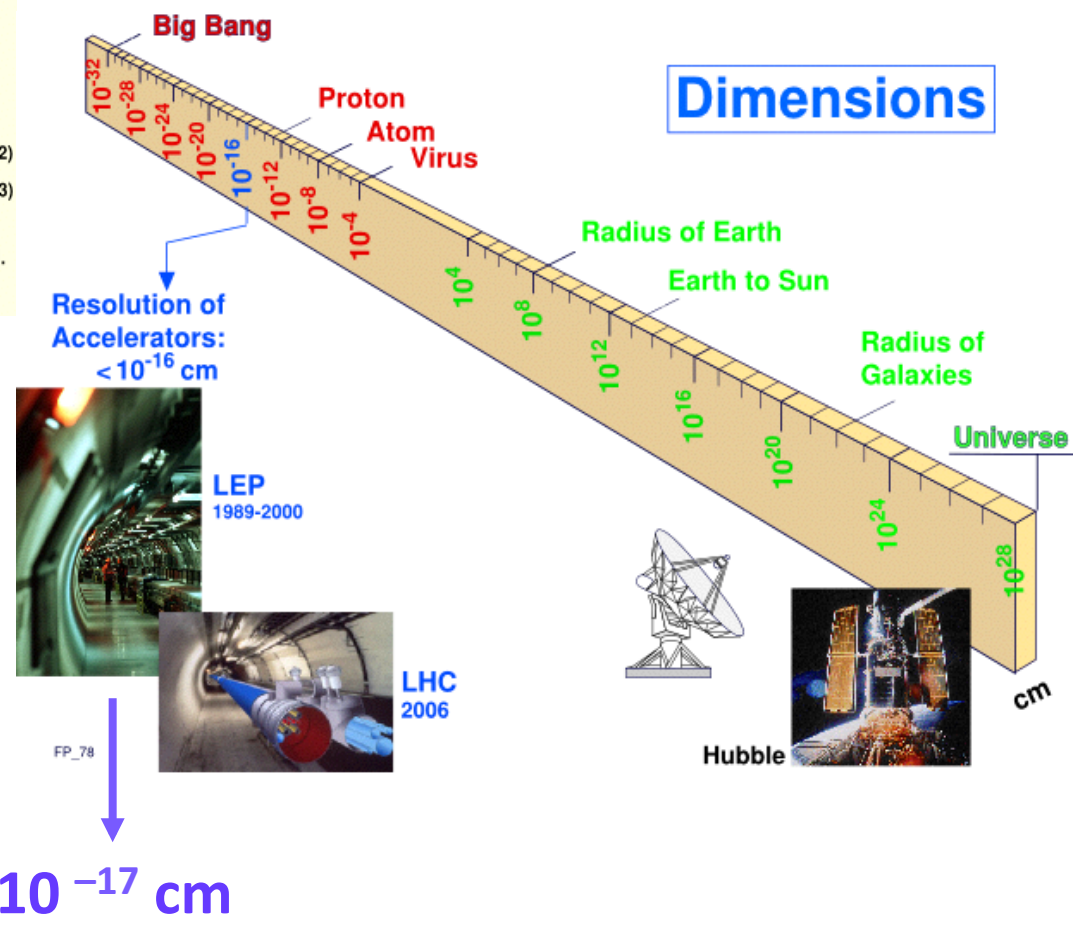
quarks confinés

hadron: « sac à quarks et gluons »

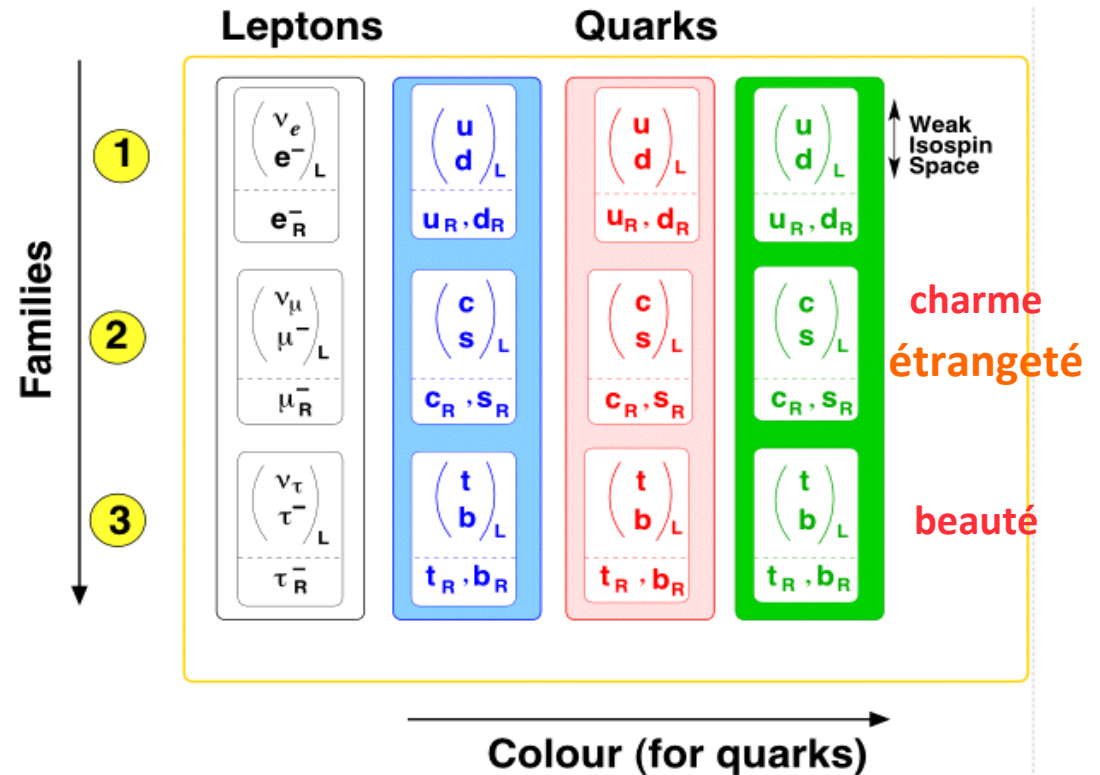


fonctions de structure

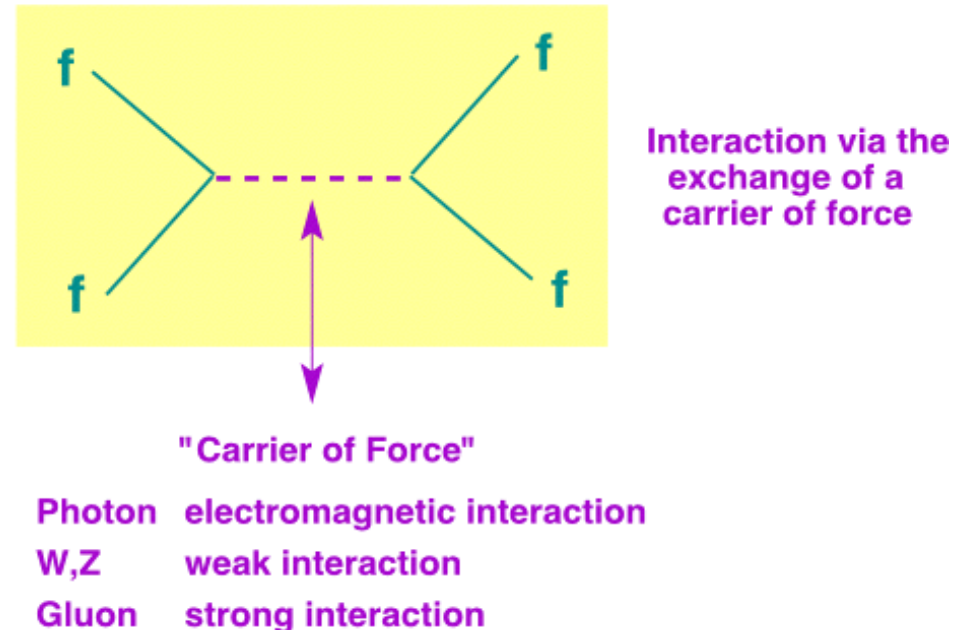
Un super-microscope: $\lambda \sim 1/E$
la faute à de Broglie

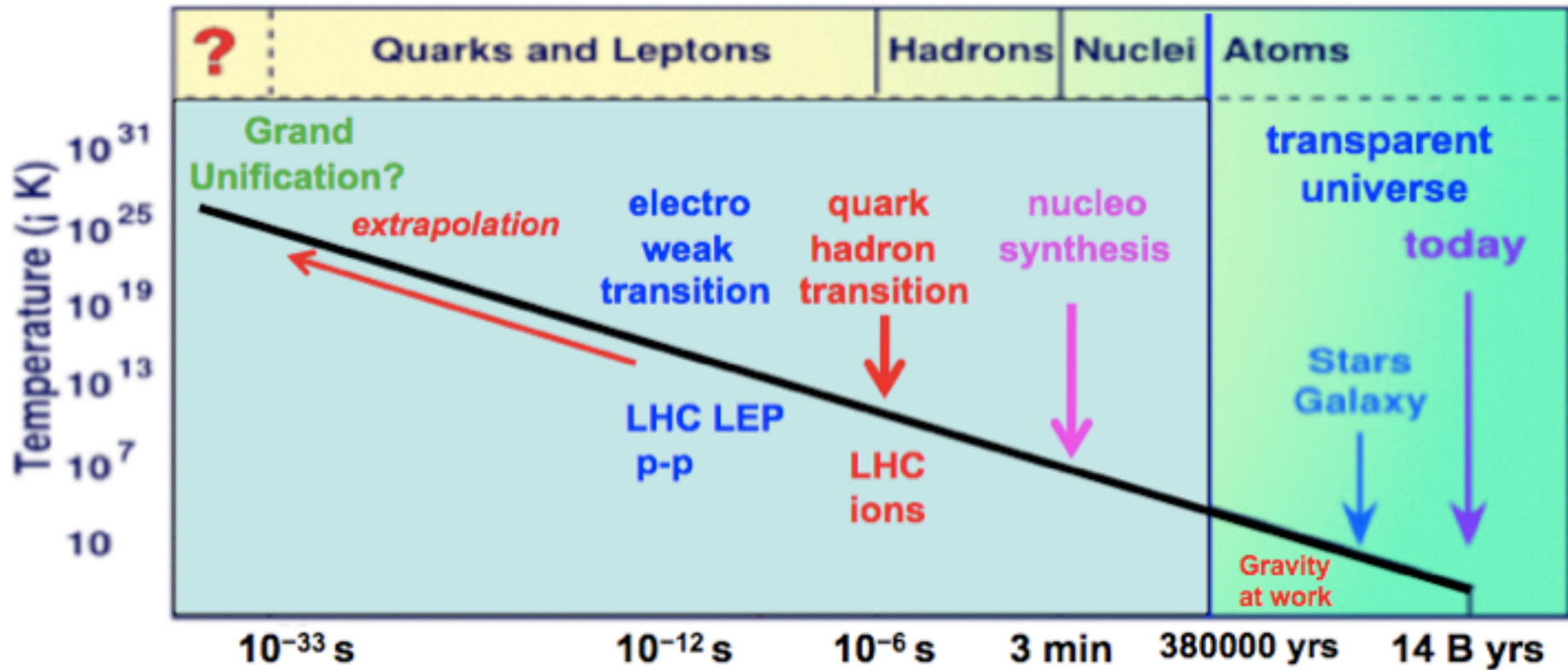


quels sont les constituants:
 les quarks et les leptons,
 “répétés” en trois familles.
 Nous les considérons comme
 élémentaires parce que,
 jusqu’ à
 10^{-4} de la taille du proton
 (10^{-17} cm), ils sont ponctuels.



la manière dont ils interagissent:
 en échangeant des particules
 nommées bosons, comme le photon
 On a montré que les forces
 électromagnétique et faible ont la
 même structure et, d’un point de
 vue, sont “unifiées”
 (Courants Neutres en 73, découverte
 du W et du Z en 83, Nobel 84).





"windows"?
proton decay, etc

particle
physics
TeV

hadronic
physics
GeV

nuclear
physics
MeV

atomic
physics
eV

re-creation

accelerators, colliders,
cosmic rays, radioactivity

observation

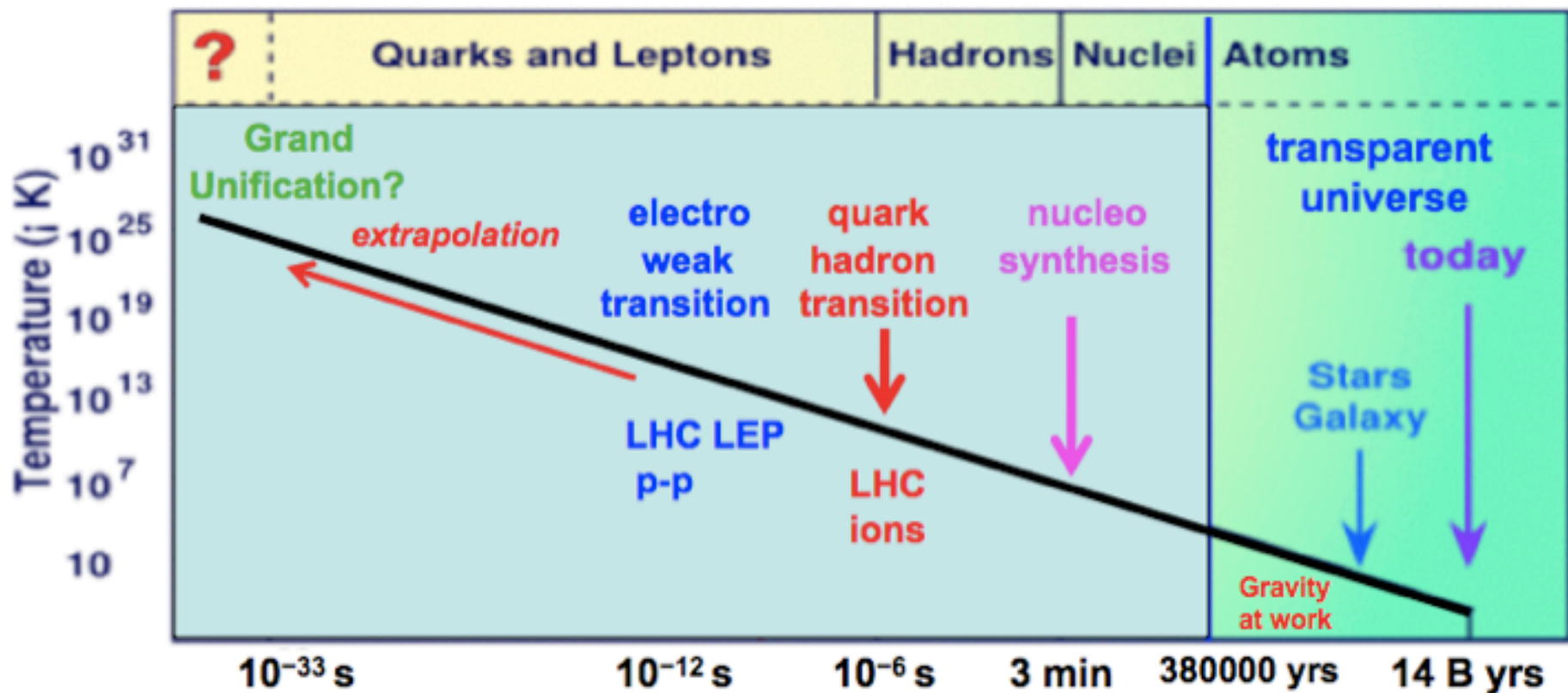
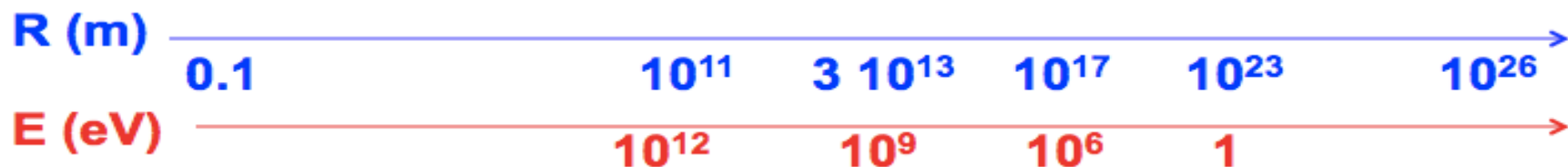
telescopes, satellites,
various wavelengths

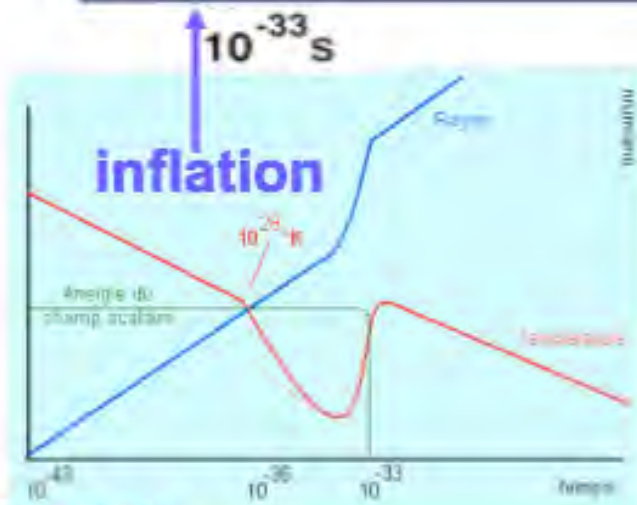
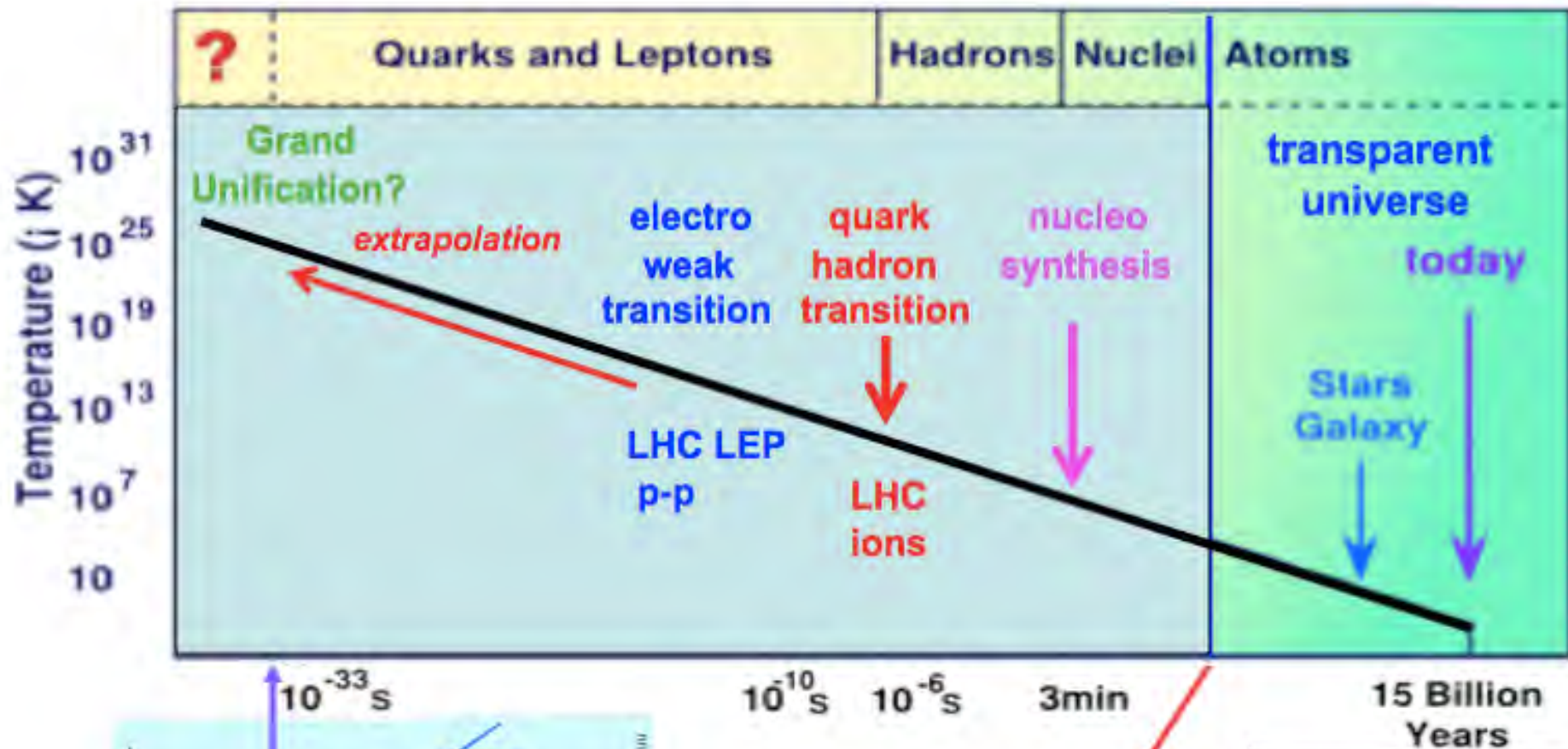
nos expériences re-crée à l'échelle microscopique la physique prévalant aux premiers instants de l'Univers.

Nous en étudions l' "archéologie".

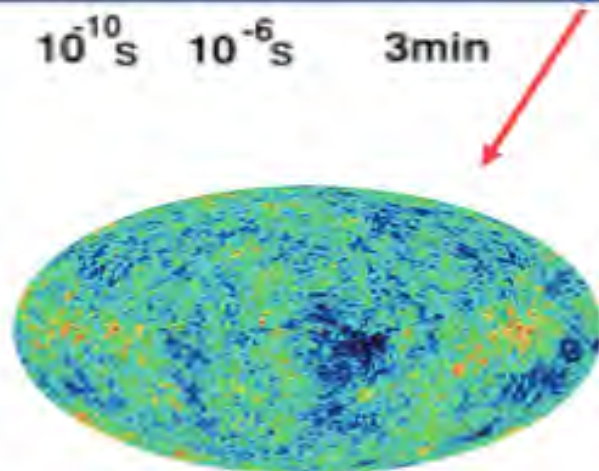
Histoire de l'Univers

radius of observable universe





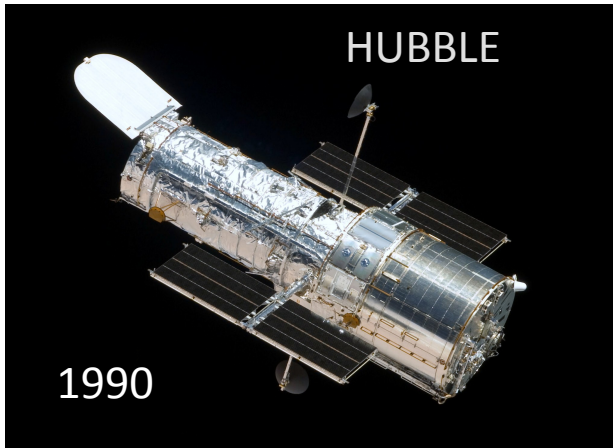
Planck



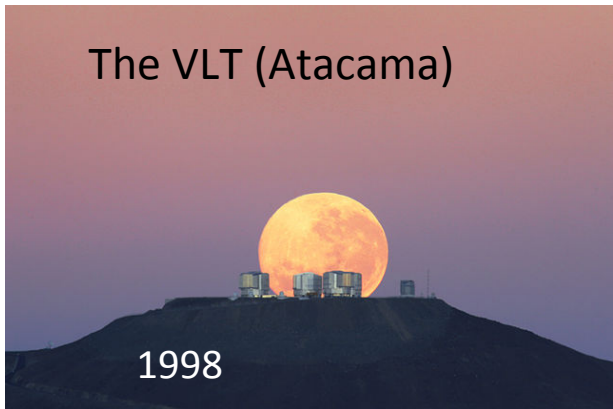
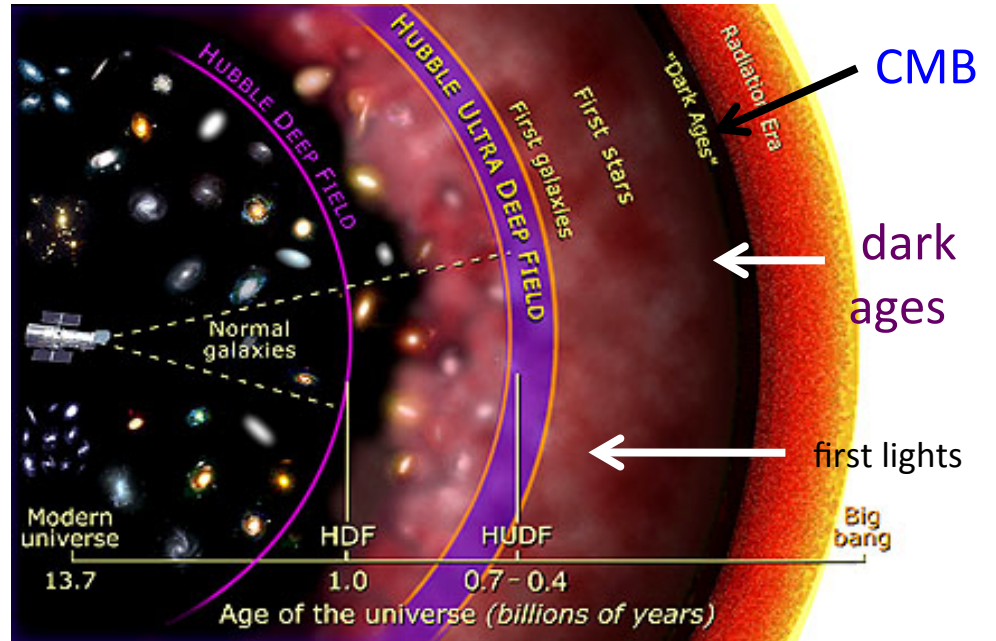
380000 yrs



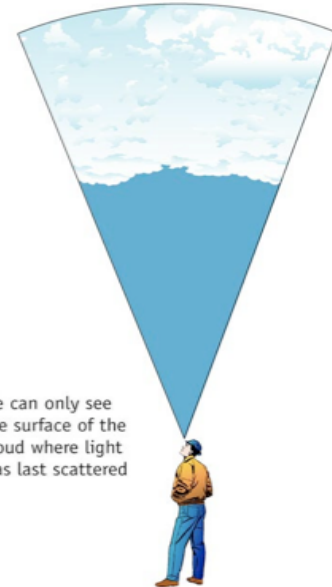
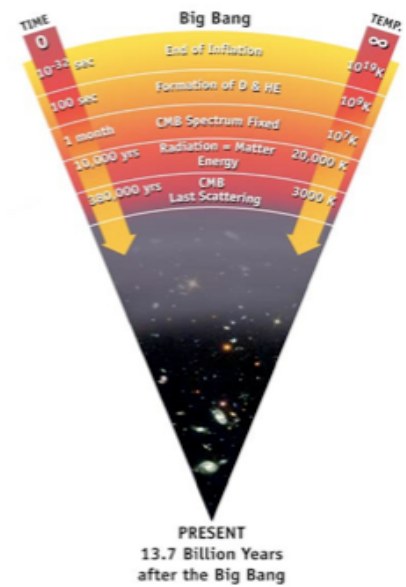
15 Billion Years



JWST
2018?



ELT
2024?

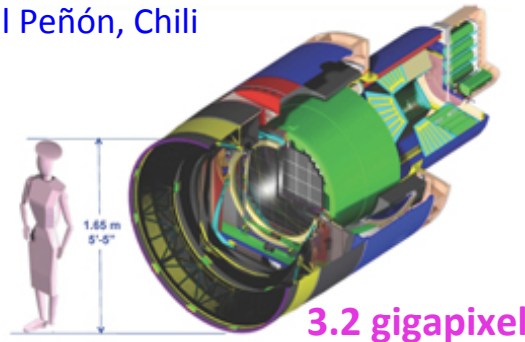
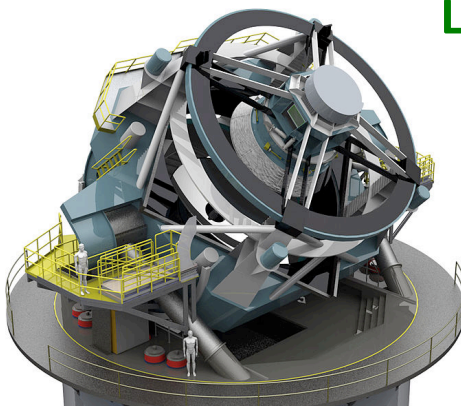


PLANCK

EUCLID 2020?

LSST 2019

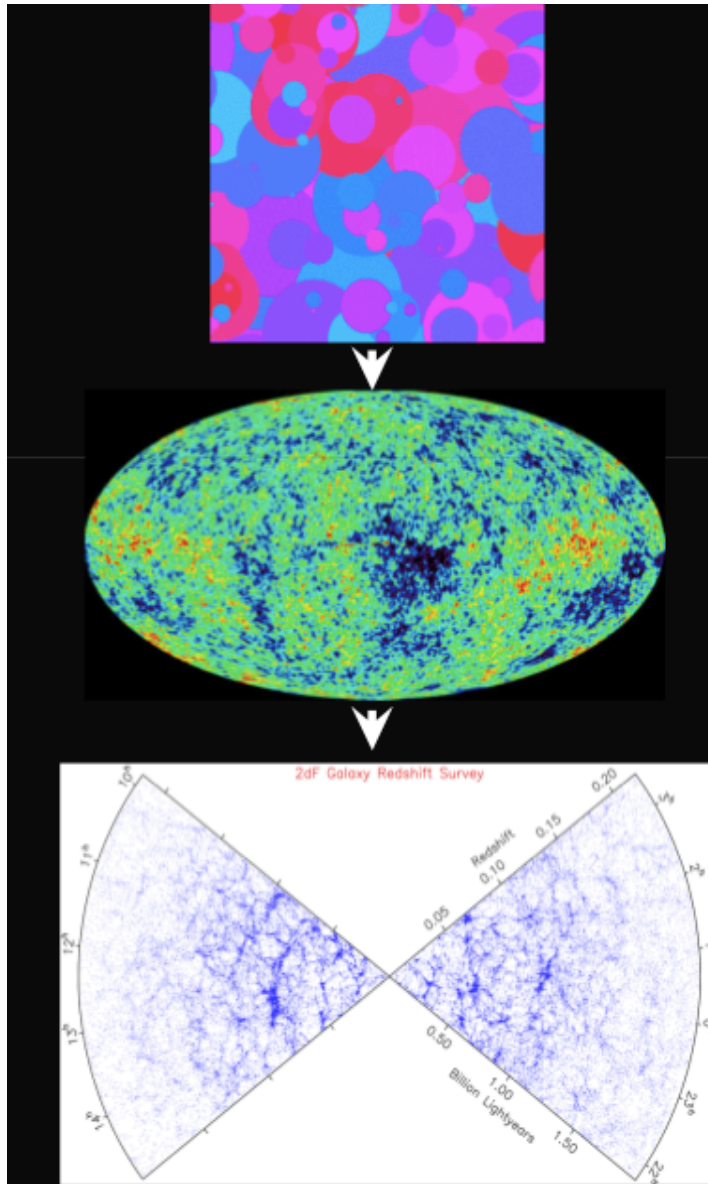
El Peñón, Chili



neutrinos, ondes gravitationnelles
n'ont pas cette limite

homogénéité et platitude spatiale réclament un processus initial appelé inflation

Ces petites fluctuations sont les germes des grandes structures présentes, et résultent peut être elles-mêmes de fluctuations quantiques durant l'inflation



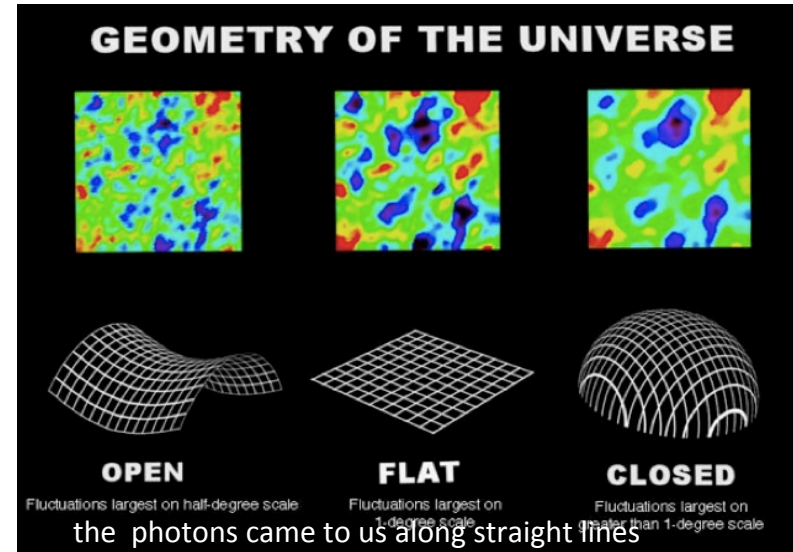
inflation?



fond visible



structures du cosmos actuel



atoms

4.6%

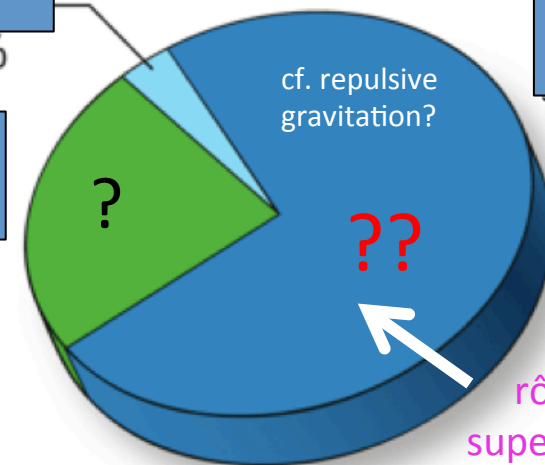
dark matter

23%

dark energy

72%

cf. repulsive gravitation?

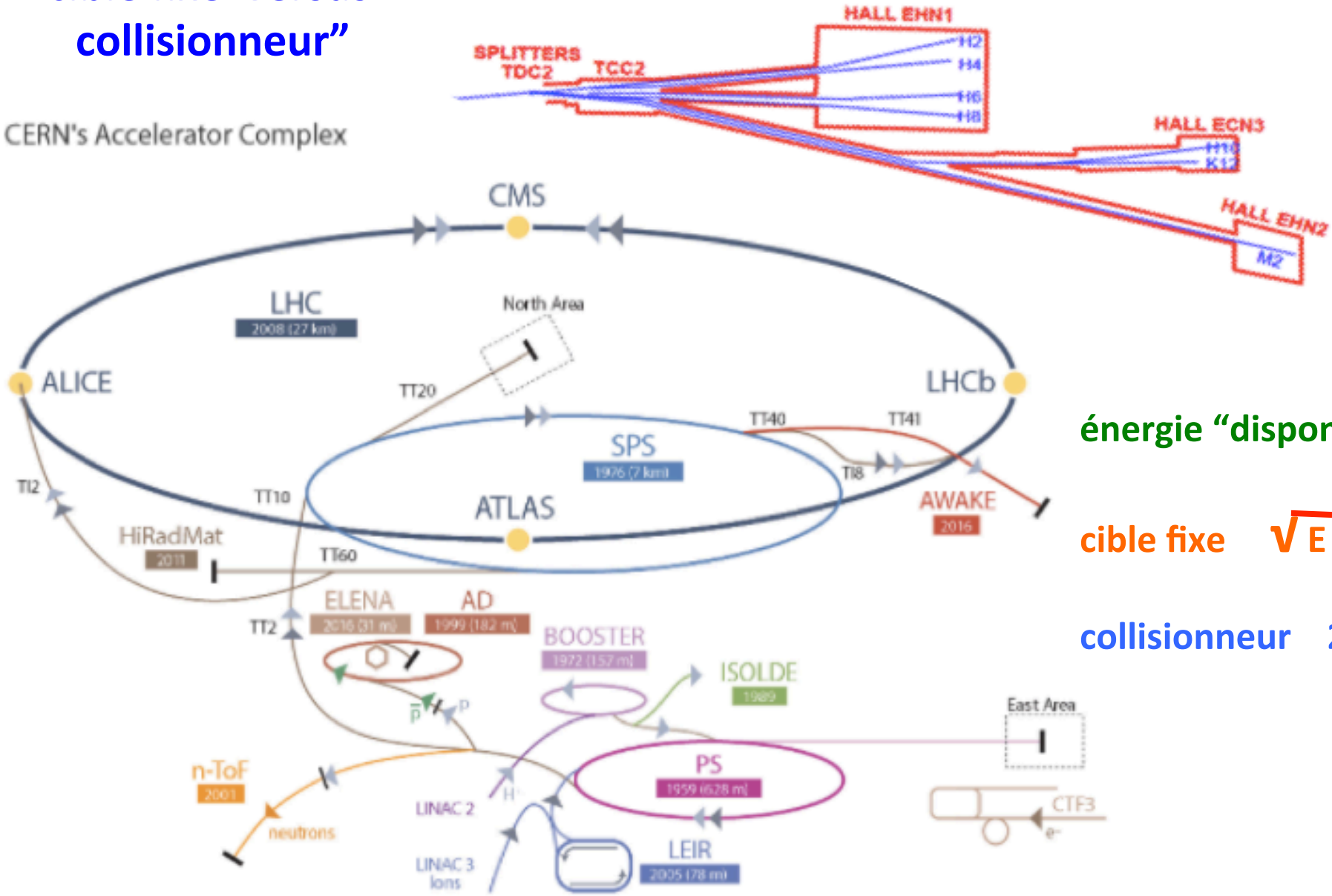


C'est le modèle présent, dit de "concordance".

Bon de garder à l'esprit quelques hypothèses hérétiques

“cible fixe” versus collisionneur

CERN's Accelerator Complex

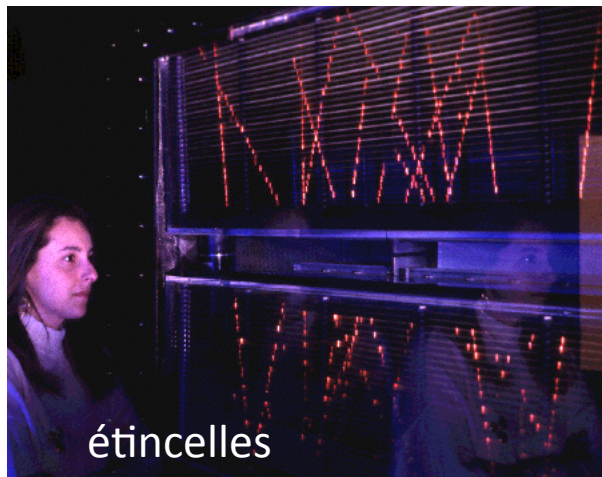


énergie “disponible”

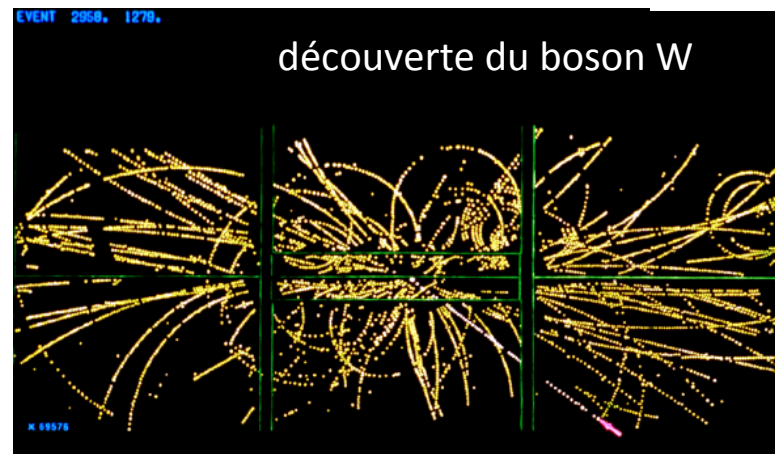
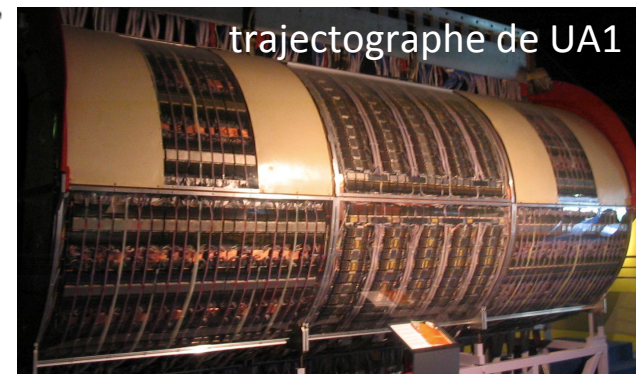
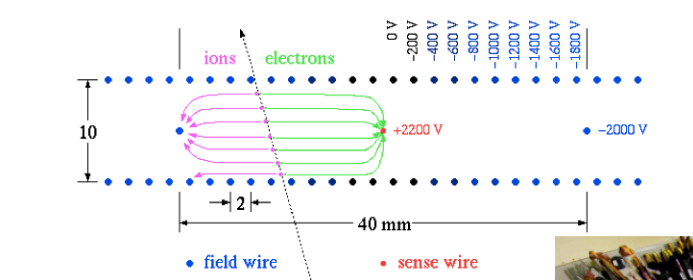
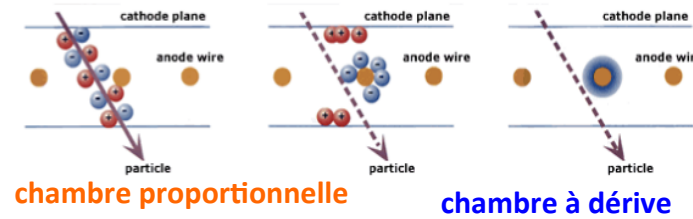
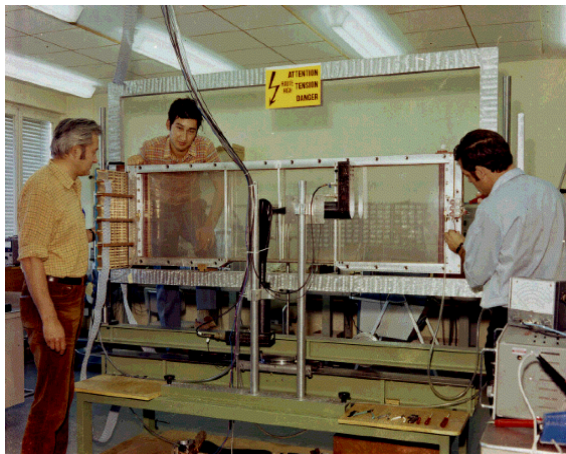
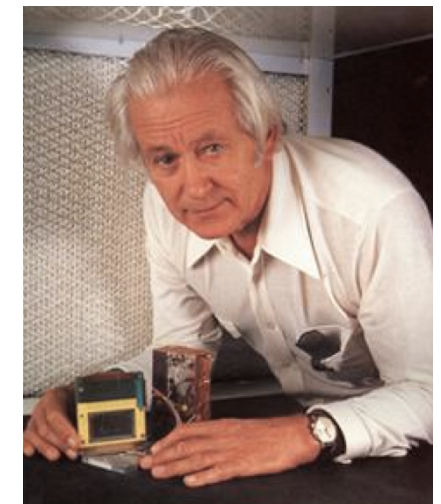
cible fixe \sqrt{E}

collisionneur $2E$

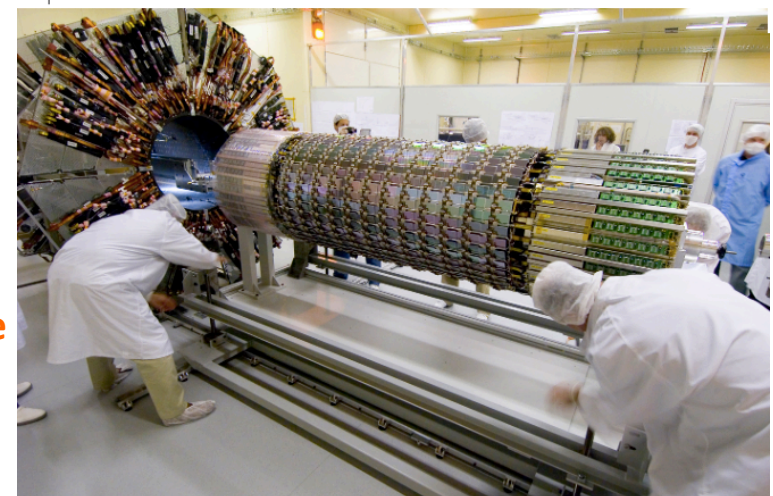
▶ p (proton) ▶ ion ▶ neutrons ▶ \bar{p} (antiproton) ▶ electron ▶ \leftrightarrow proton/antiproton conversion



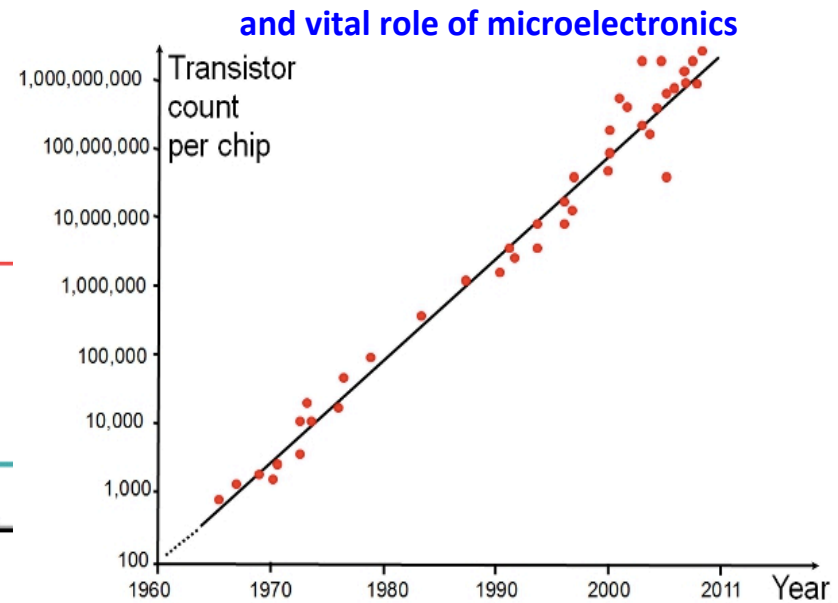
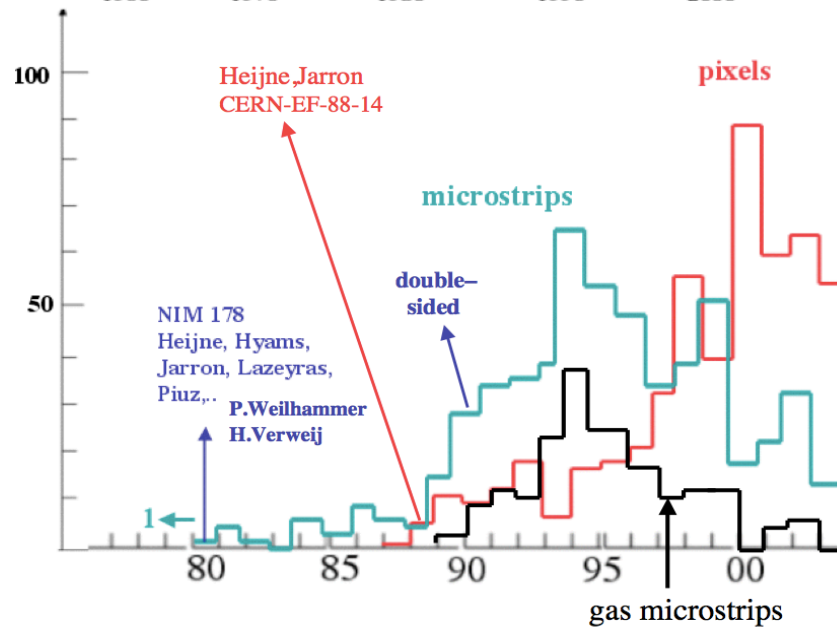
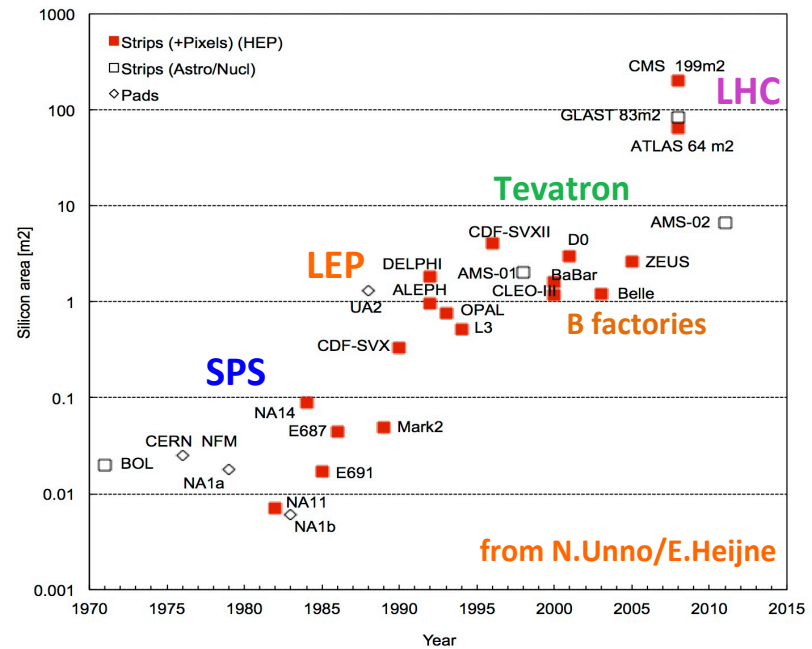
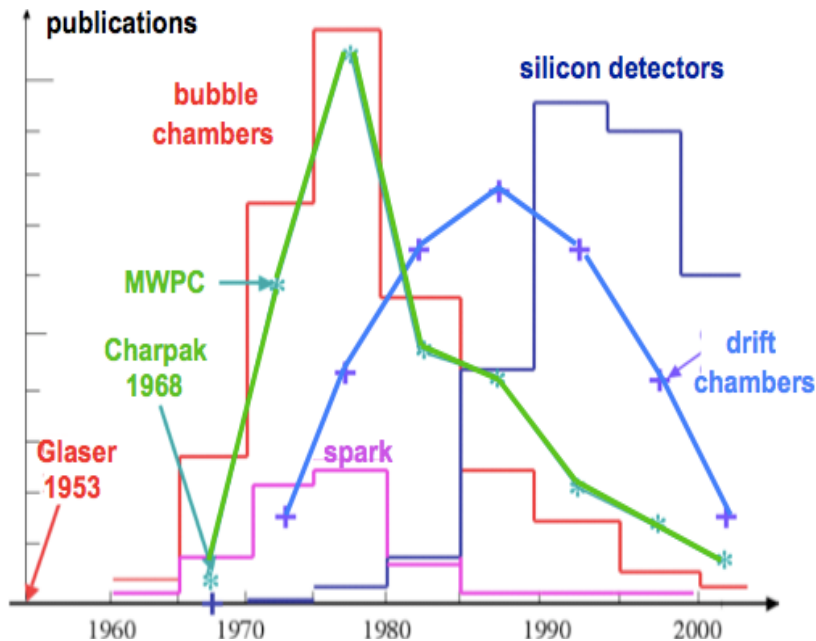
G.Charpak
révolution de 68

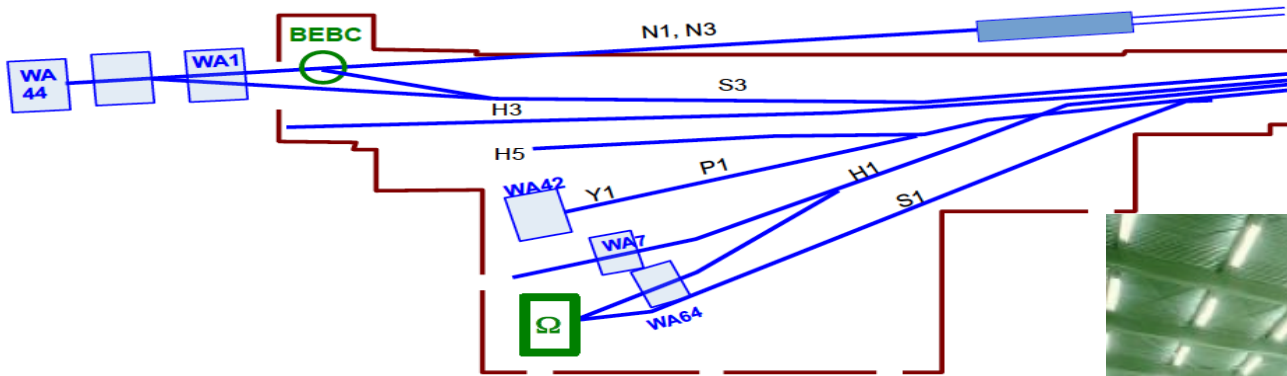


trajectographe au silicium d'ATLAS



histoire





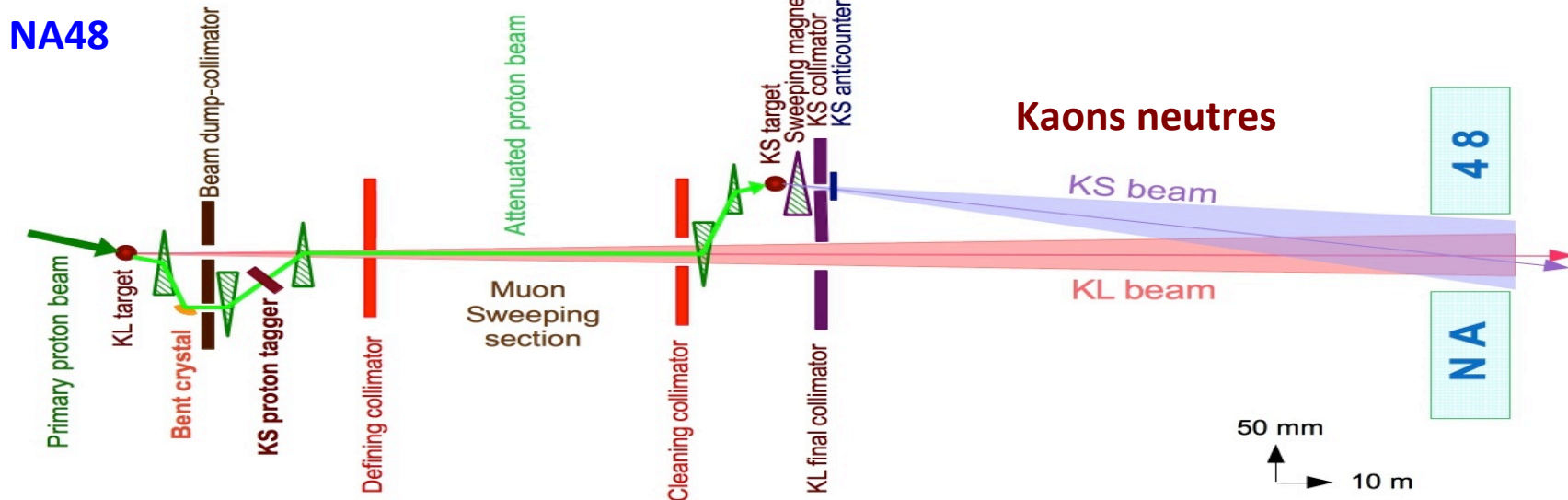
Hall Ouest
vers 1980



Hall Nord
récemment



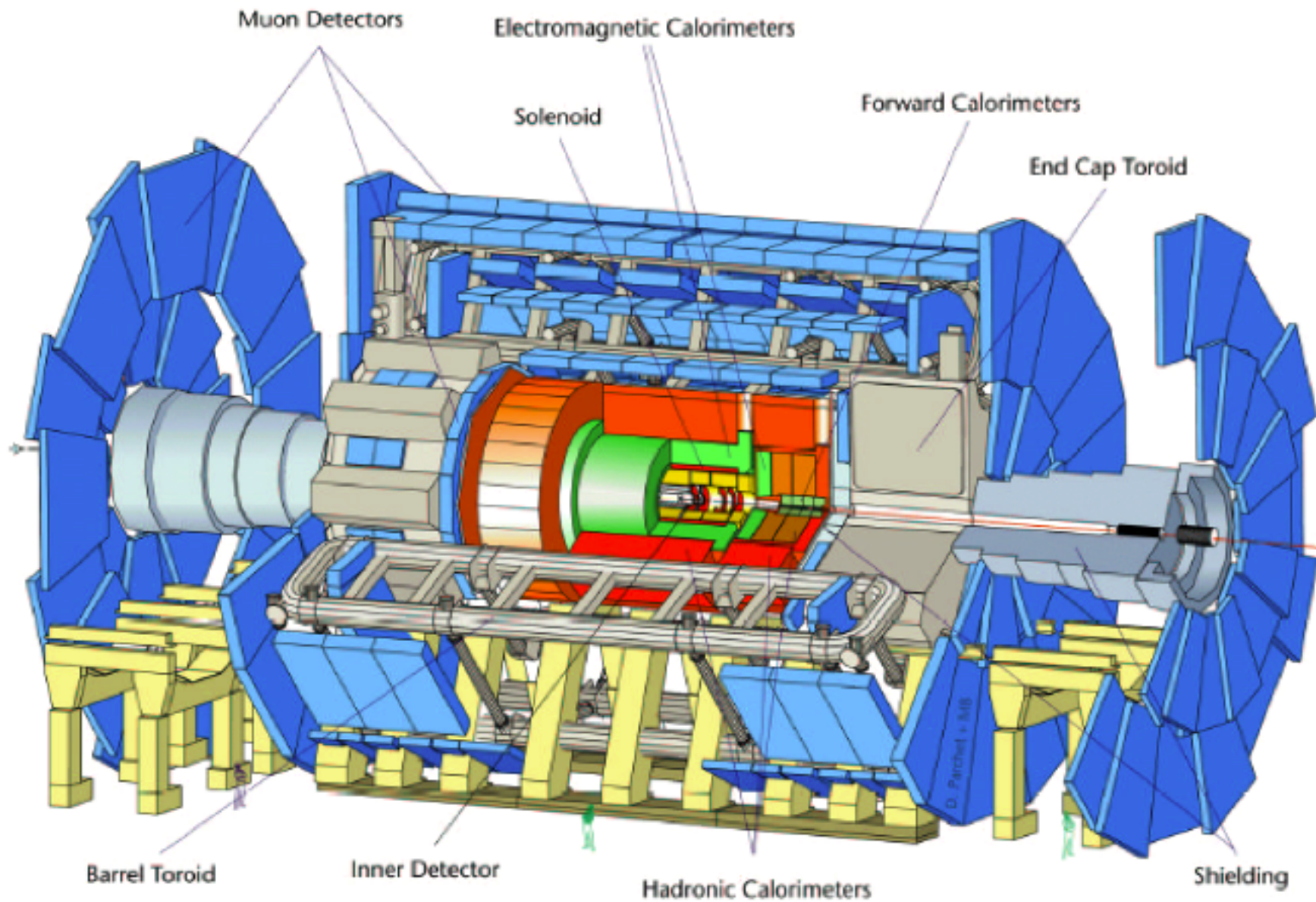
neutrino
experiment



NA48

Kaons neutres

LE DETECTEUR ATLAS





CMS Collaboration



36 Nations, 159 Institutions, 1940 Scientists (February 2003)

TRIGGER & DATA ACQUISITION

Austria, Finland, France, Greece, Hungary, Italy, Korea, Poland, Portugal, Switzerland, UK, USA

TRACKER

Austria, Belgium, Finland, France, Germany, Italy, Japan*, New Zealand, Switzerland, UK, USA

CRYSTAL ECAL

Belarus, China, Croatia, Cyprus, France, Italy, Japan*, Portugal, Russia, Serbia, Switzerland, UK, USA

PRESHOWER

Armenia, Belarus, Greece, India, Russia, Taipei, Uzbekistan

RETURN YOKE

Barrel: Czech Rep, Estonia, Germany, Greece, Russia
Endcap: Japan*, USA, Brazil

SUPERCONDUCTING MAGNET

All countries in CMS contribute to Magnet financing in particular:
Finland, France, Italy, Japan*
Korea, Switzerland, USA

FEET
Pakistan
China

FORWARD CALORIMETER

Hungary, Iran, Russia, Turkey, USA

HCAL

Barrel: Bulgaria, India, Spain*, USA
Endcap: Belarus, Bulgaria, Russia, Ukraine
HO: India

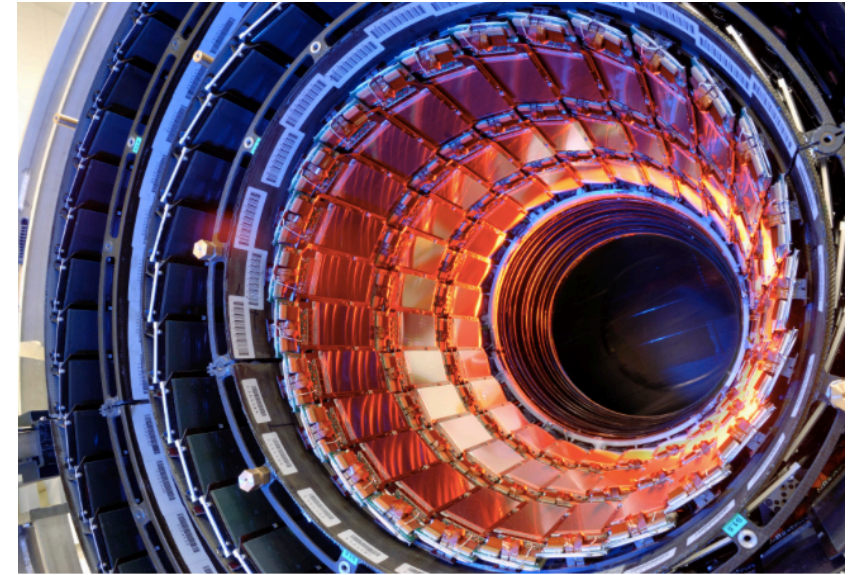
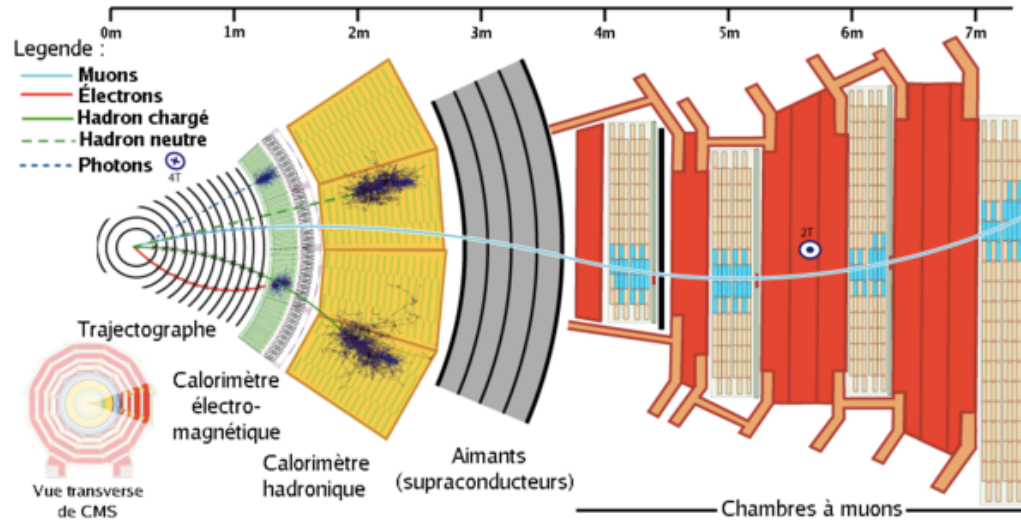
MUON CHAMBERS

Barrel: Austria, Bulgaria, China, Germany, Hungary, Italy, Spain,
Endcap: Belarus, Bulgaria, China, Korea, Pakistan, Russia, USA

Total weight : 12500 T
Overall diameter : 15.0 m
Overall length : 21.5 m
Magnetic field : 4 Tesla

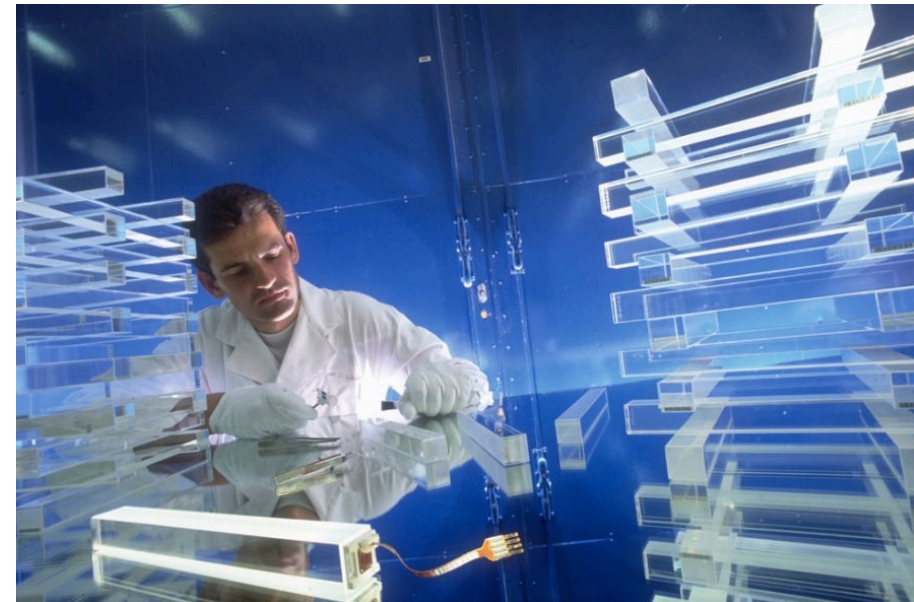
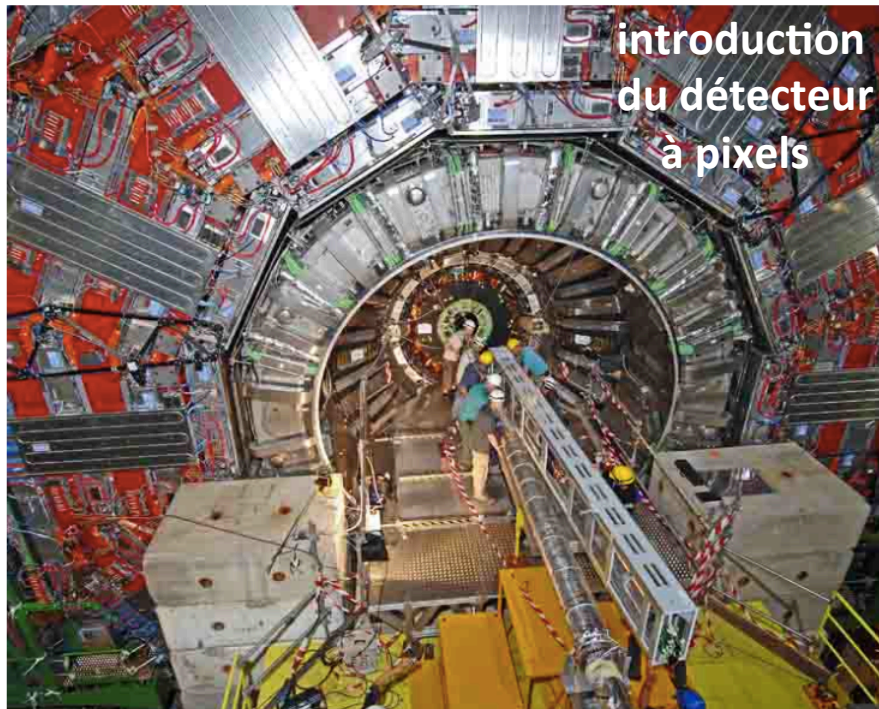
* Only through industrial contracts

une caméra de ≈ 100 megapixels
prenant 40 millions de photos par s



trajectographe de micropistes au silicium

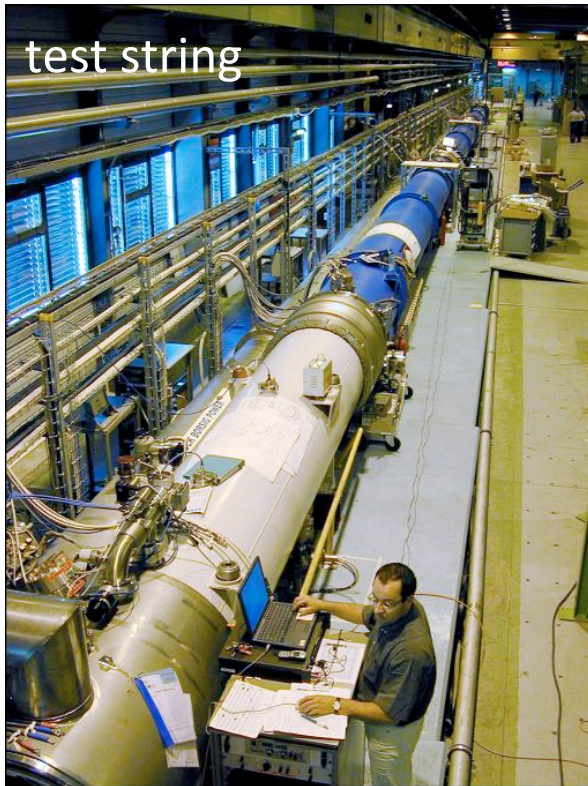
80000 cristaux scintillants de tungstate de plomb



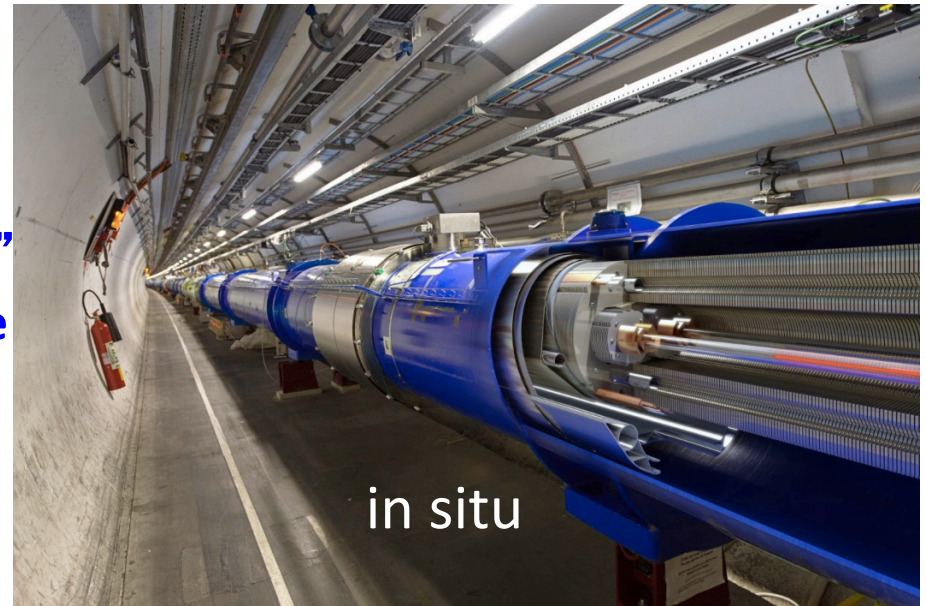
In full activity: Research group of PSI, ETH and University of Zurich installing the pixel detector at CMS. (Photo: H.R. Bramaz)

Quelques highlights de technologie

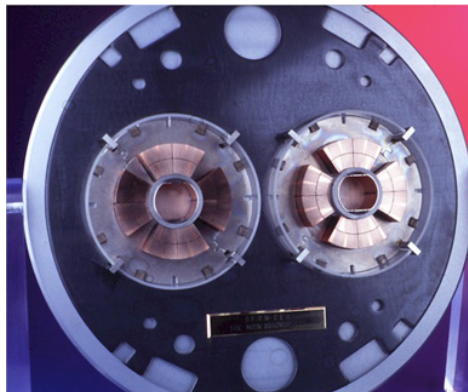
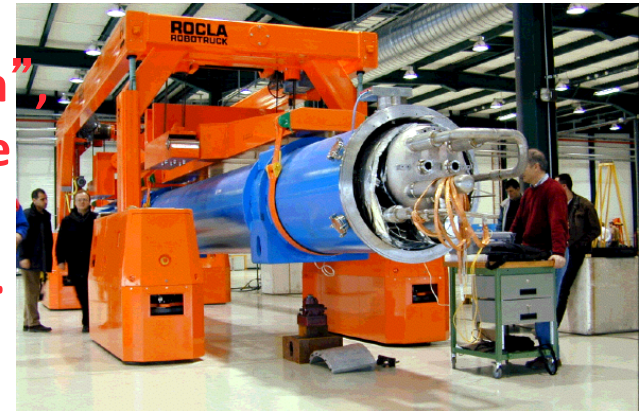
Les aimants du LHC, une aventure...



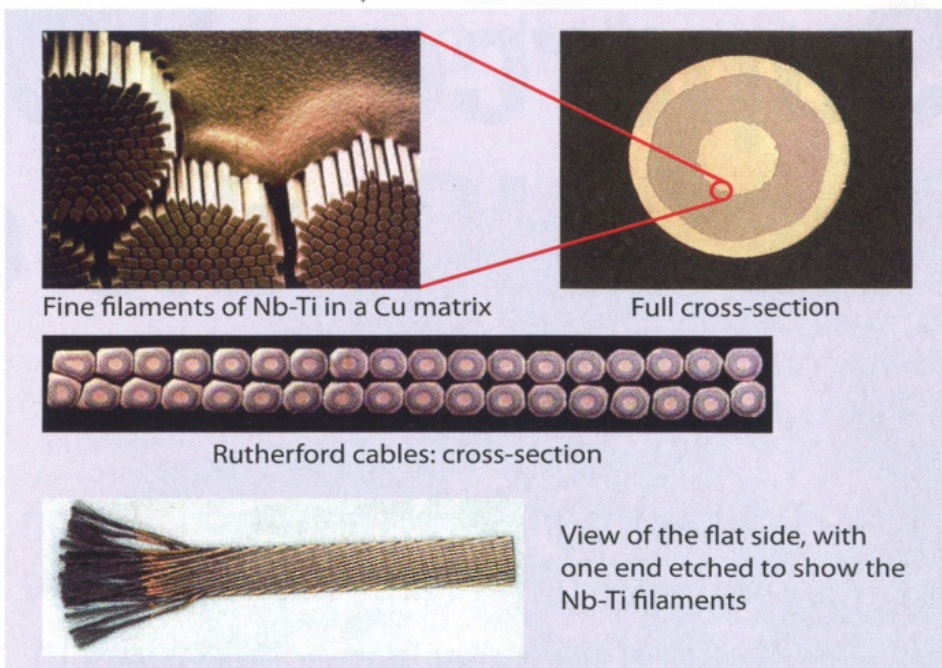
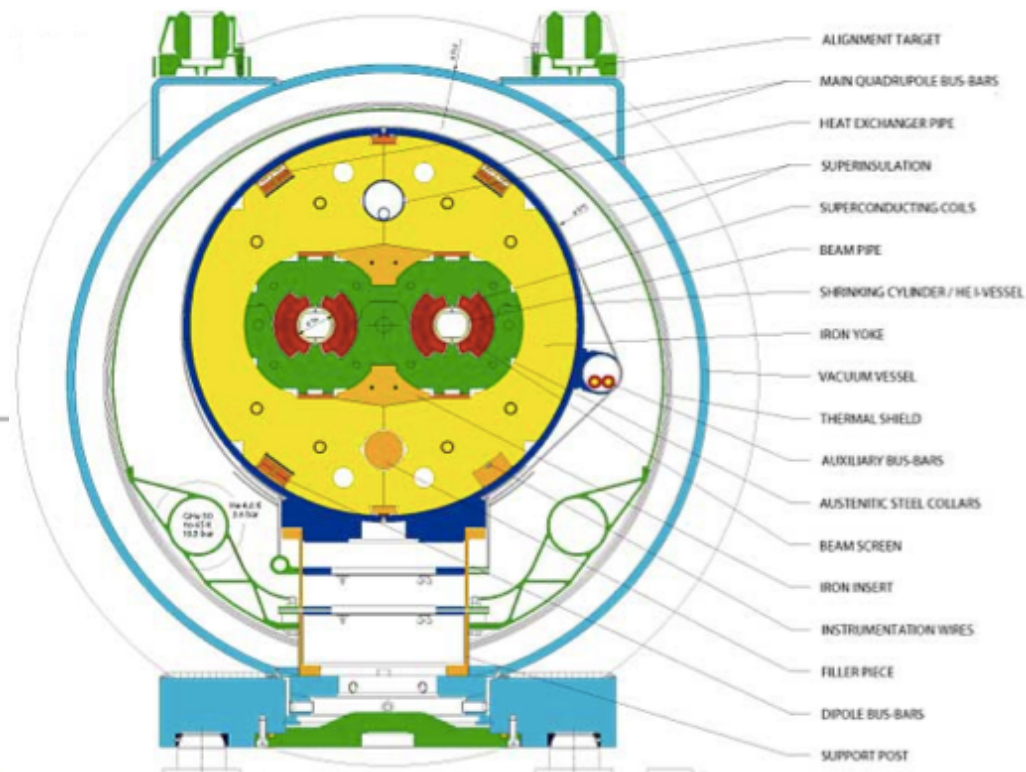
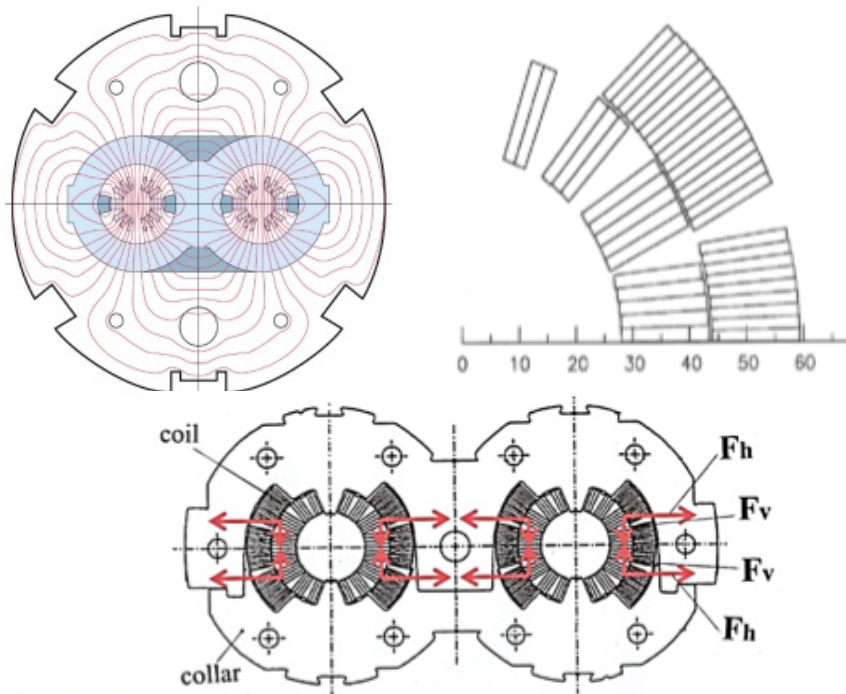
- 31000 tonnes de "masse froide"
- 1200 tonnes de supraconducteur
- 100 tonnes d'hélium



Un nouveau type d'aimant supraconducteur "deux-en-un" fonctionnant à la température de l'hélium superfluide (1.8 degré K). Il en faut ~1250.

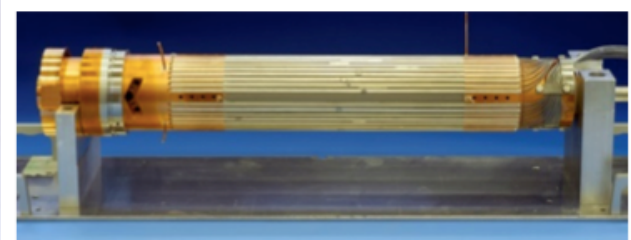


aimants LHC "2-en-1"



$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ (BSCCO)
 "entrées chaudes"

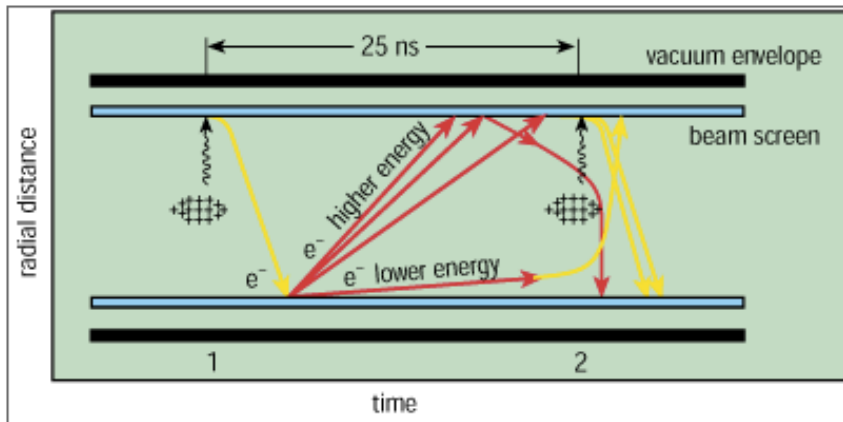
multi-filamentary BSCCO 2223
 embedded in silver-gold alloy
 in the form of tape.
 temperature range from 50 K to 4.2 K



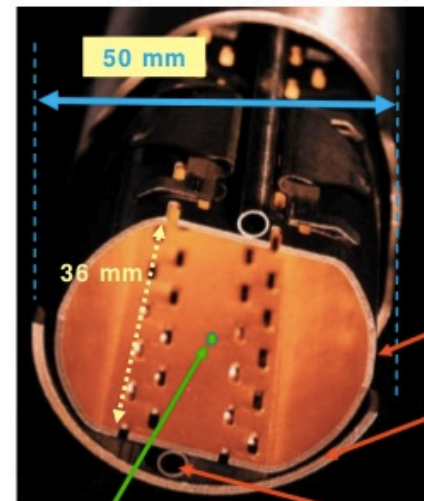
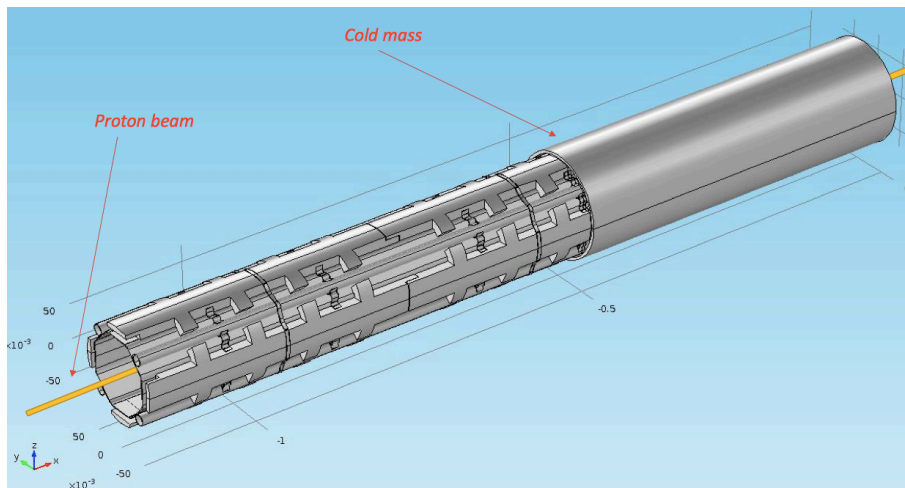
Un petit détail de 23 km de long....

se rappeler Carnot....

1 W of heat on CB = 1kW of cooling energy

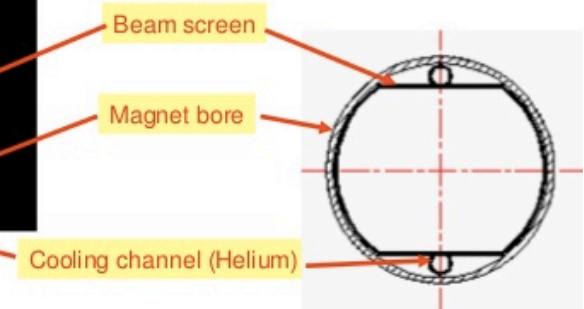


Vacuum chamber

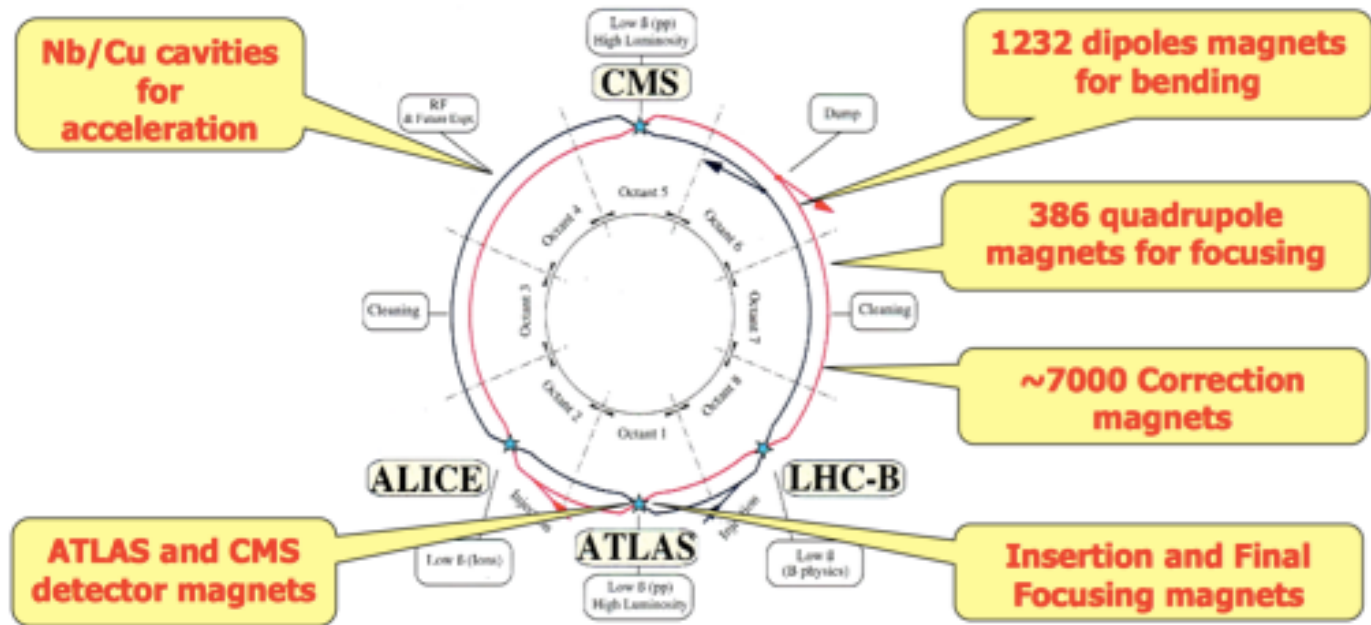


Beam envel ($\pm 4 \sigma$)
~ 1.8 mm @ 7 TeV

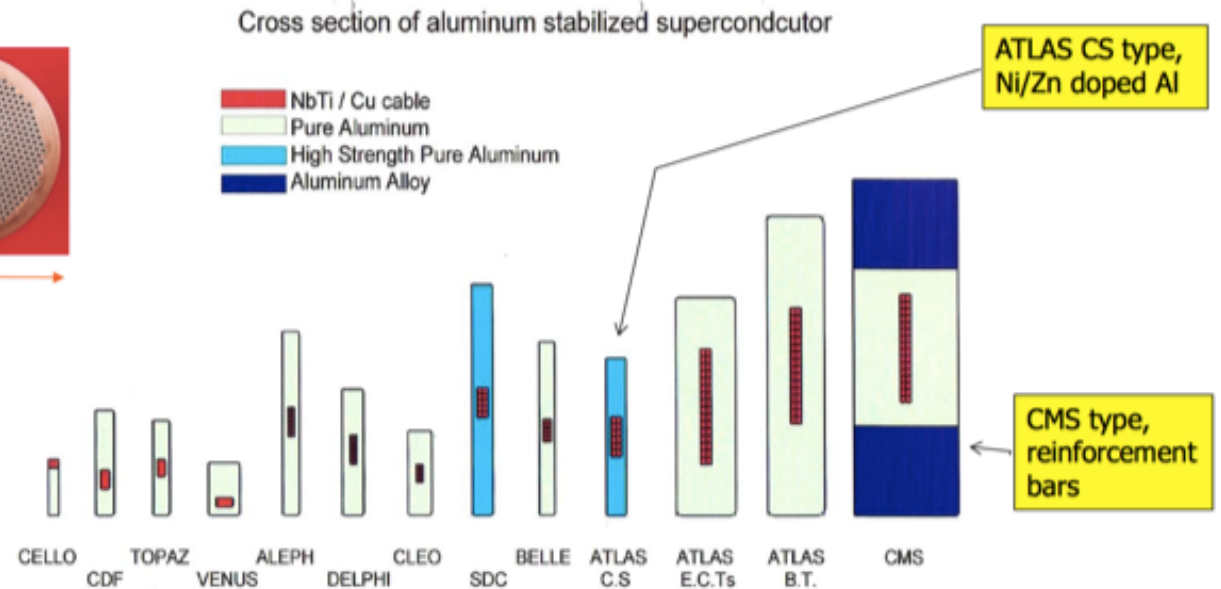
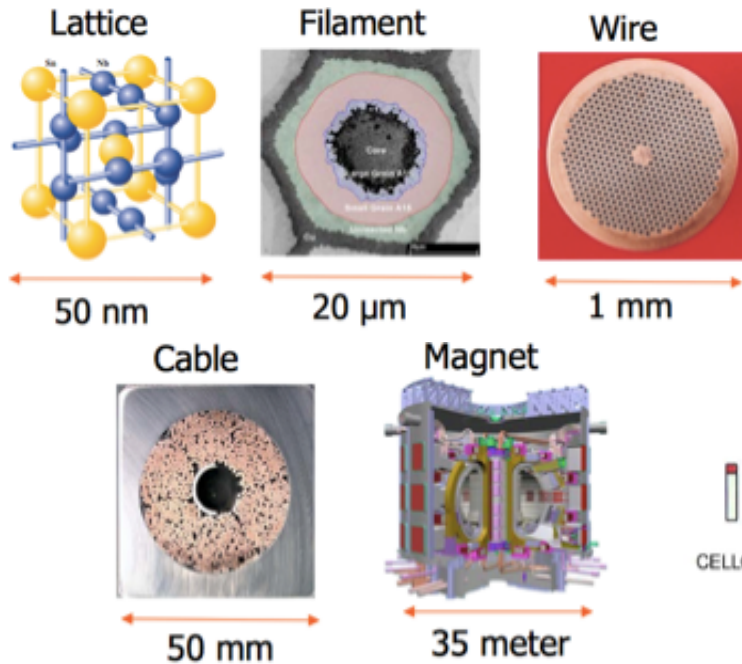
- The beams circulate in two ultra-high vacuum chambers, $P \sim 10^{-10}$ mbar.
- A Copper beam screen protects the bore of the magnet from heat deposition due to image currents, synchrotron light etc from the beam.
- The beam screen is cooled to $T = 4-20$ K.



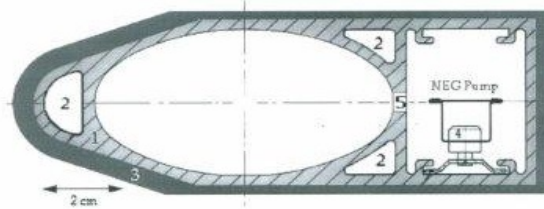
Au LHC la supraconductivité est omniprésente



No Higgs without Superconductivity !



L'ultravide pompage par getter

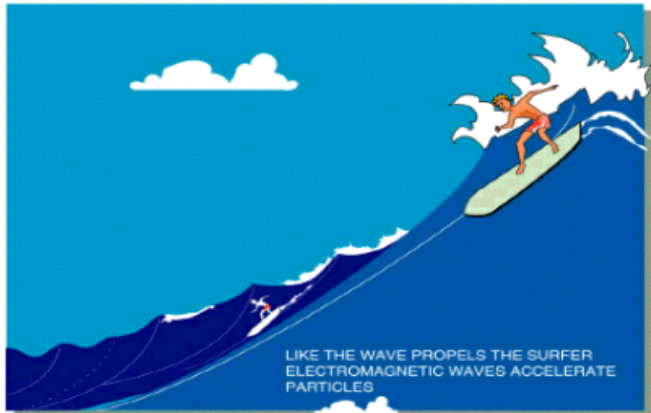


entre 10^{-10} et 10^{-11} mbar

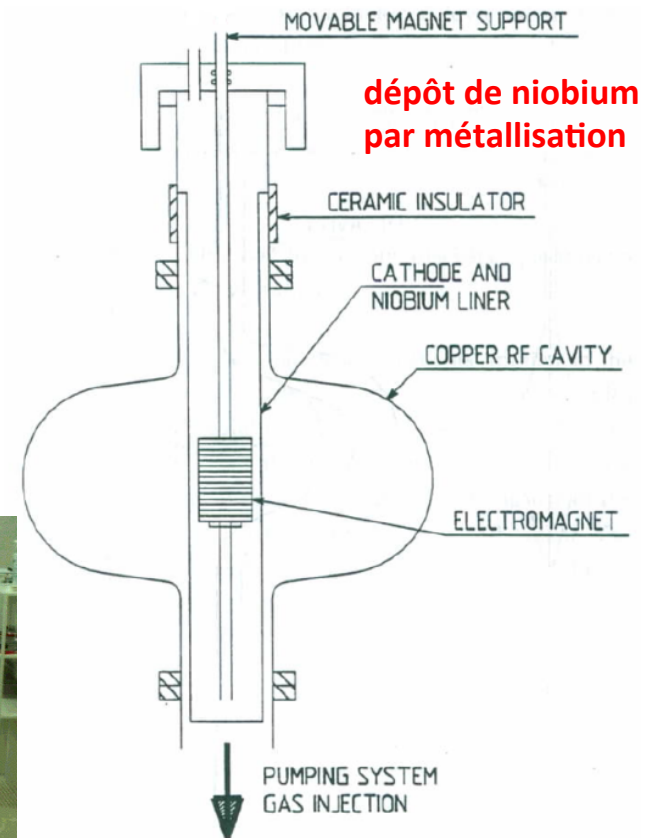
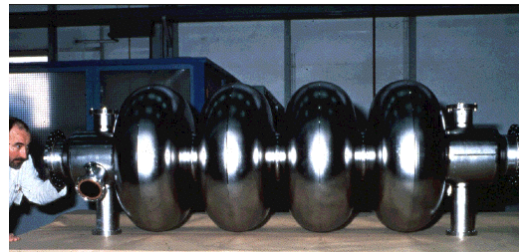
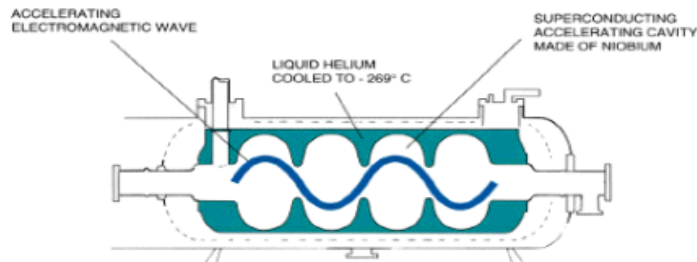


alliage Titane, Zirconium et Vanadium

L'état de surface

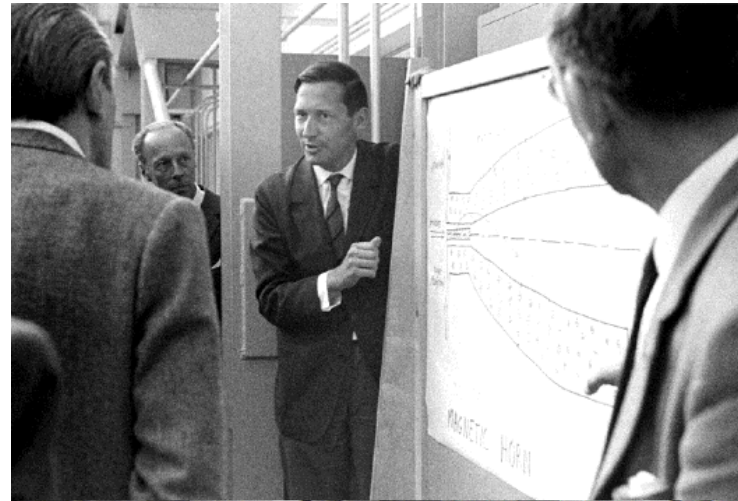


THE USE OF SUPRACONDUCTIVITY TO INCREASE PERFORMANCES AND CONSIDERABLY REDUCE ELECTRICITY CONSUMPTION

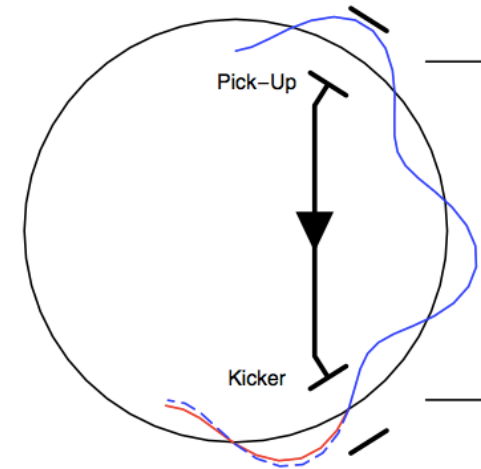


dépôt de niobium
par métallisation

bulk niobium aspérités < 2 microns

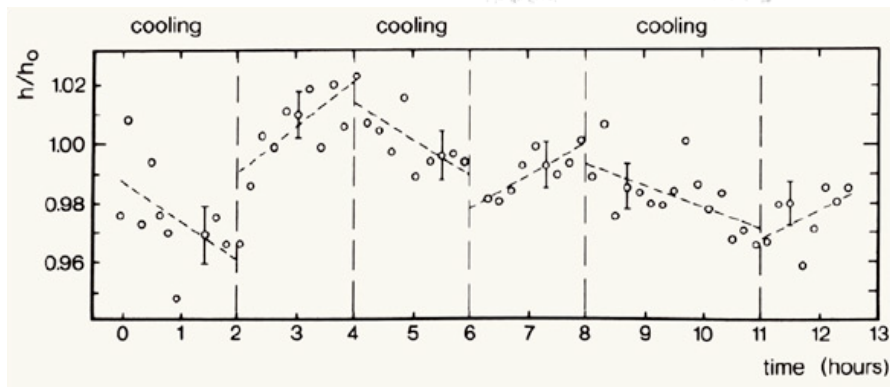
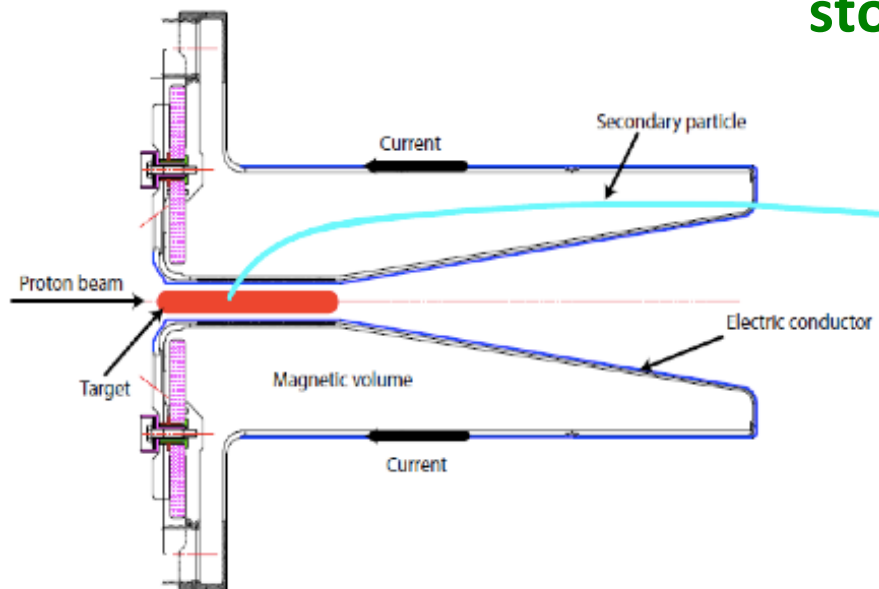
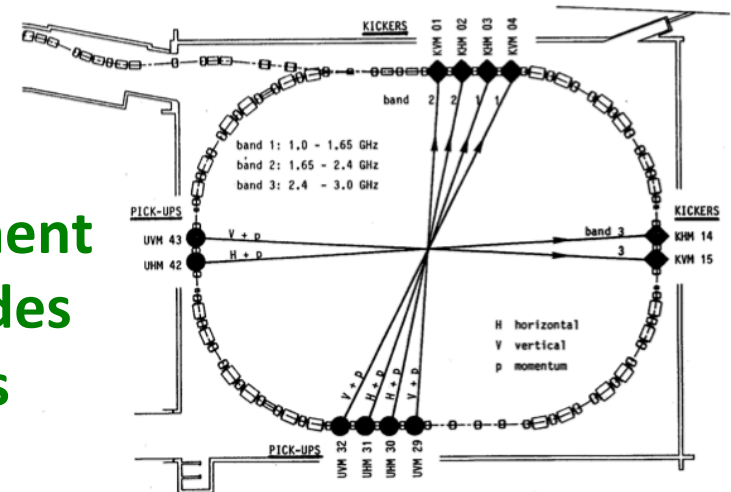


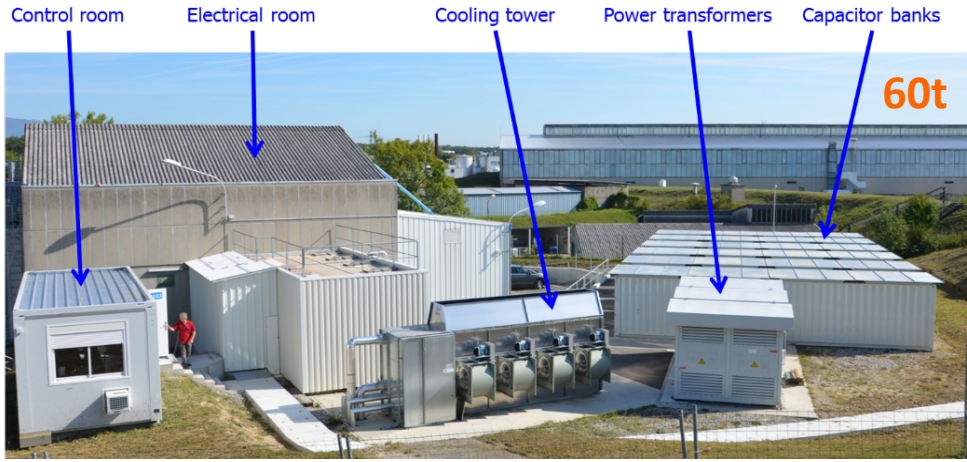
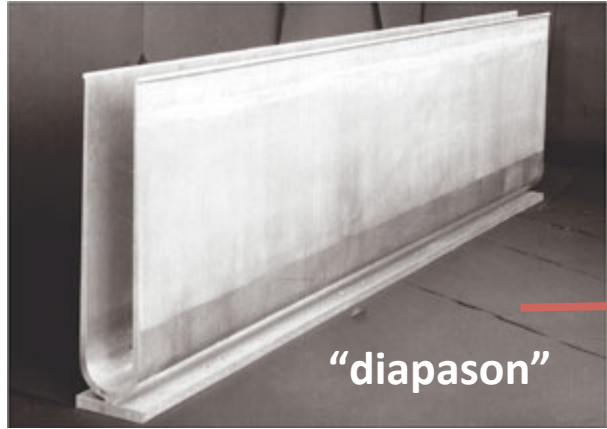
Simon van der Meer
Nobel 1994



La corne à neutrinos

**Le refroidissement
stochastique des
antiprotons**

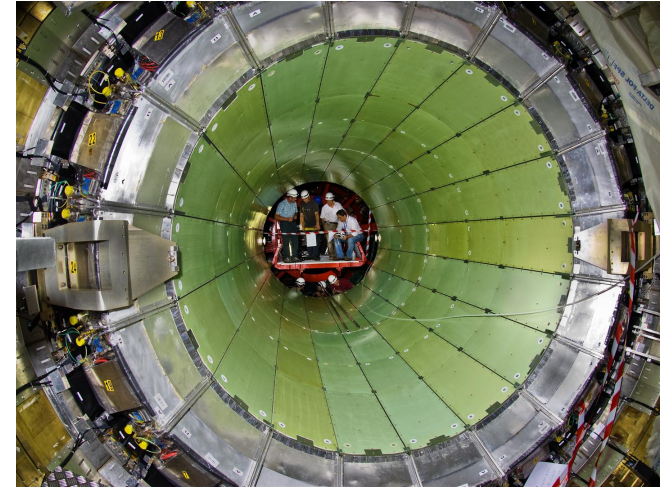
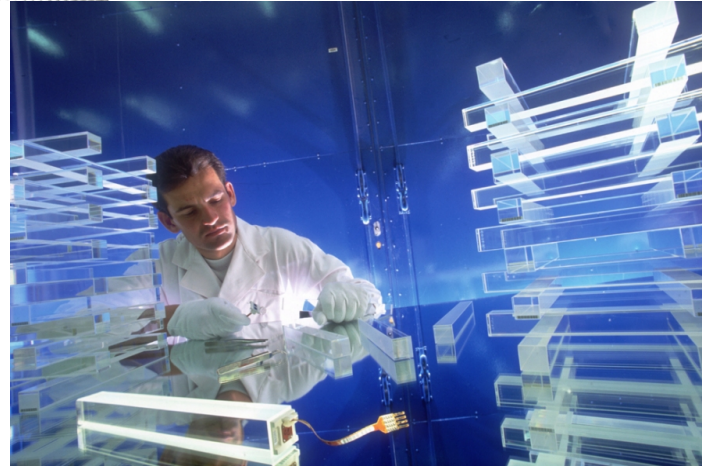
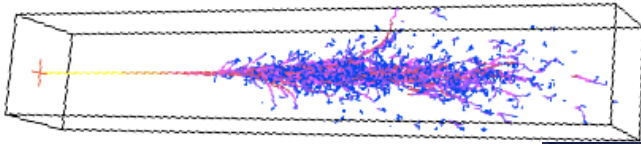




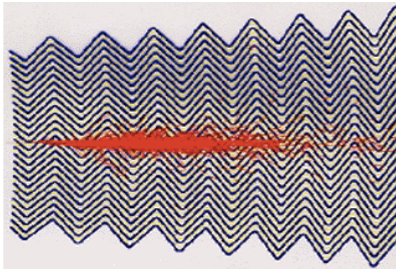
Cavités
chaudes
du LEP



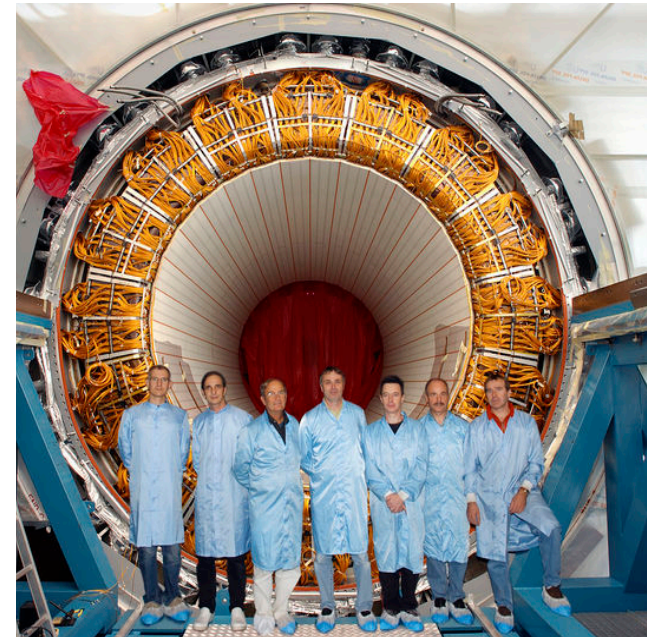
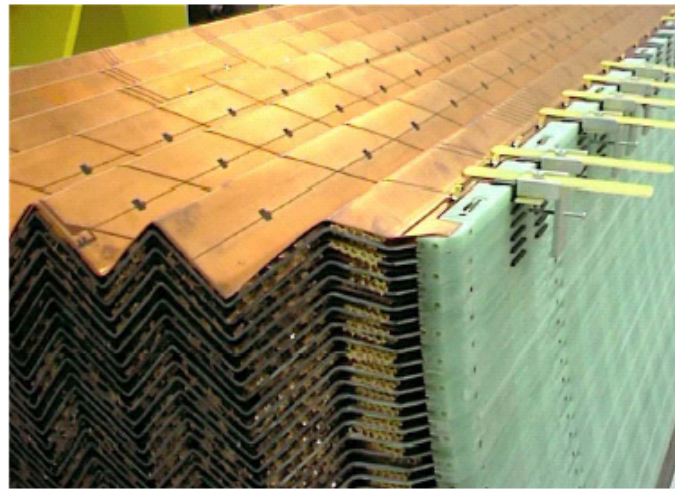
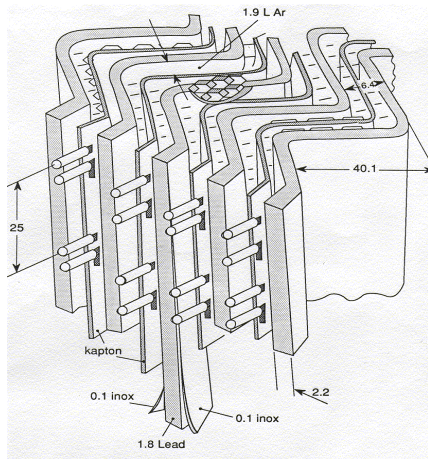
Calorimétrie LHC



Les cristaux de tungstate de plomb de CMS lus par photodiodes à avalanche

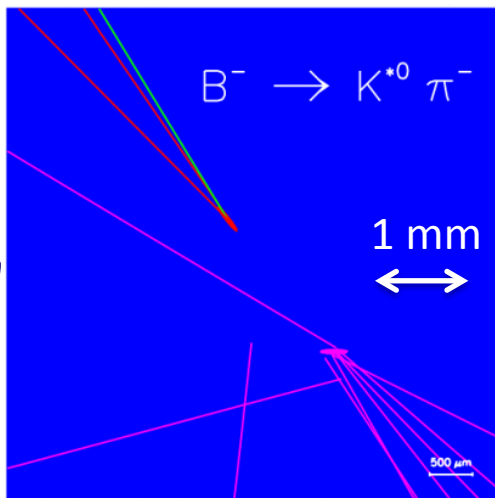
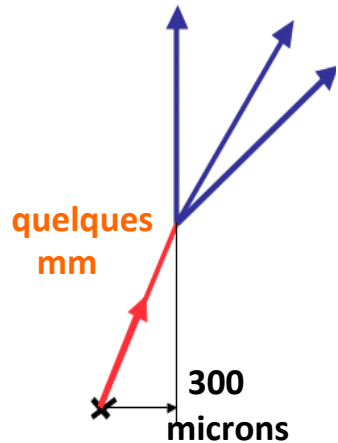


Le calorimètre "accordéon" à argon liquide d'ATLAS

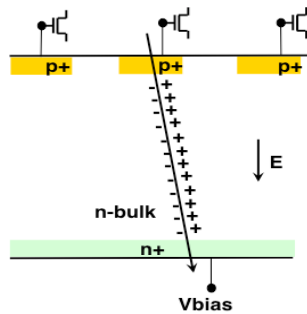


Détecteurs au silicium

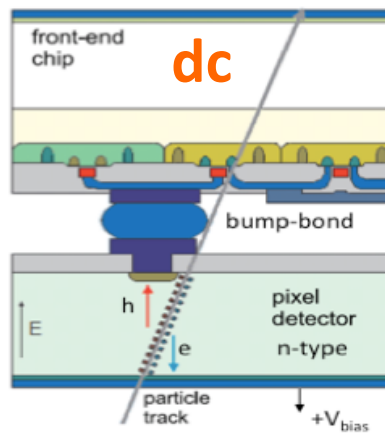
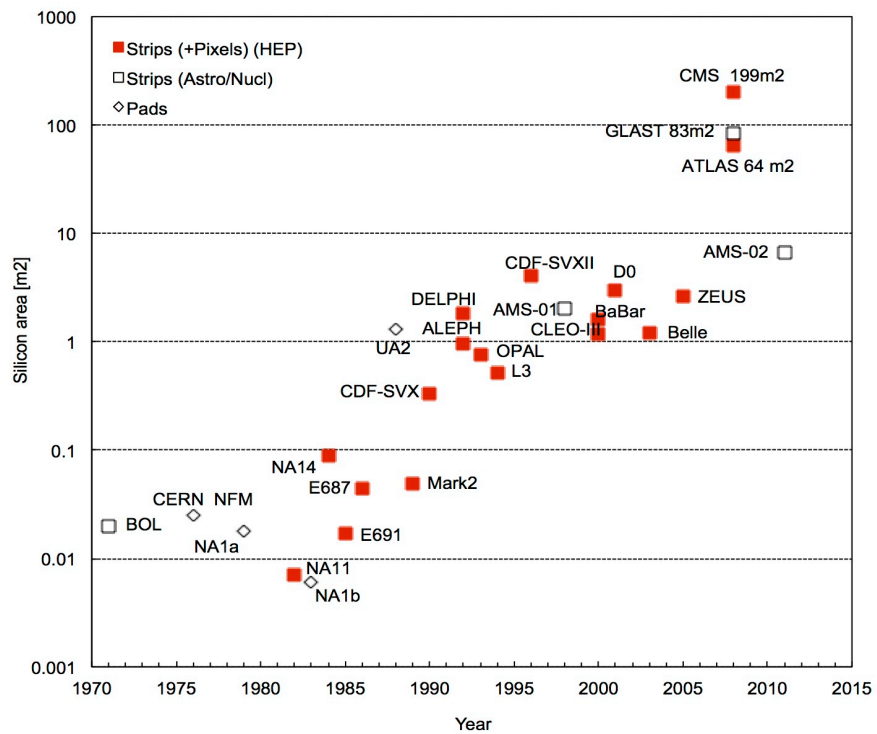
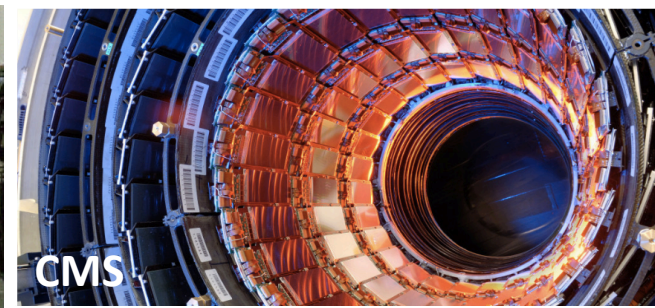
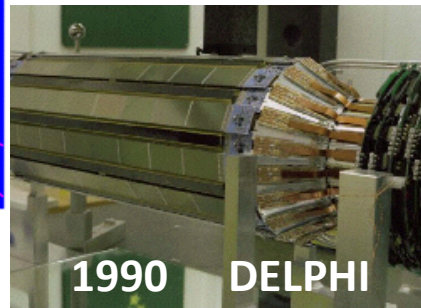
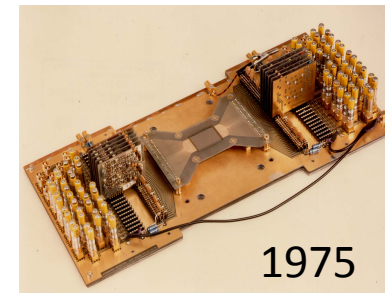
1 picoseconde



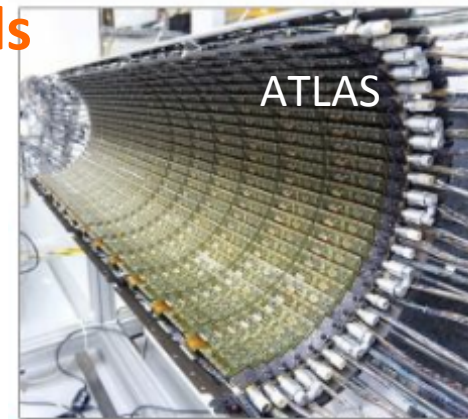
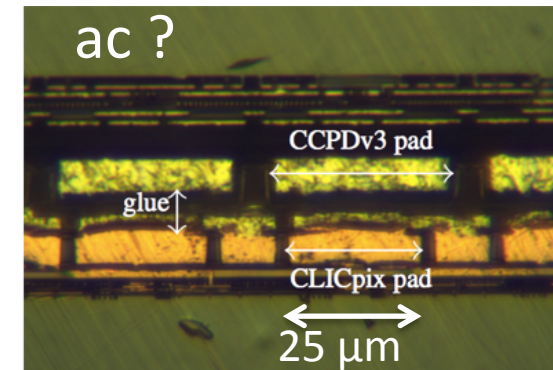
beauté allant directement en étrangeté sans passer par le charme



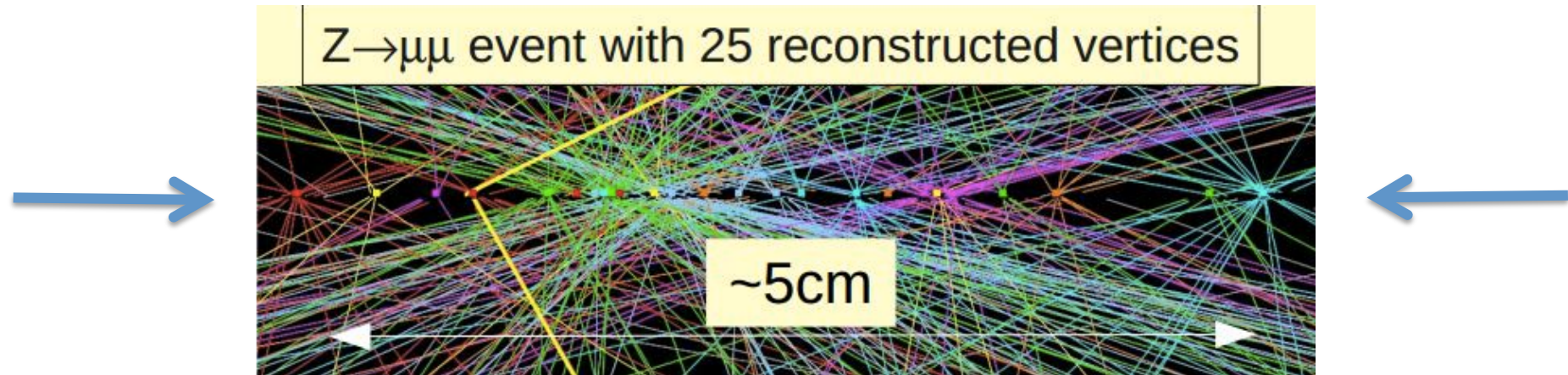
microstrips



pixels



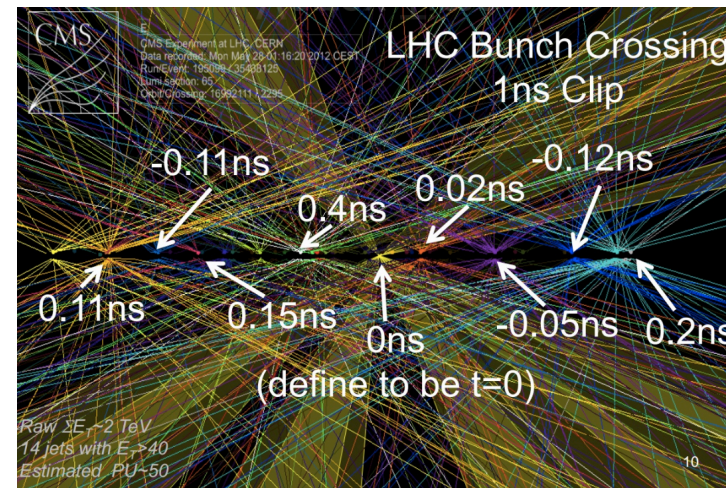
toutes les 25 nanoseconde les paquets de protons se rencontrent
 il en résulte ≈ 25 interactions dont chacune produit une centaine de particules
 la plupart des 50 millions de “photos” sont sans intérêt
 Il faut décider vite (quelques microsecondes) lesquelles on garde (≈ 200 par s)



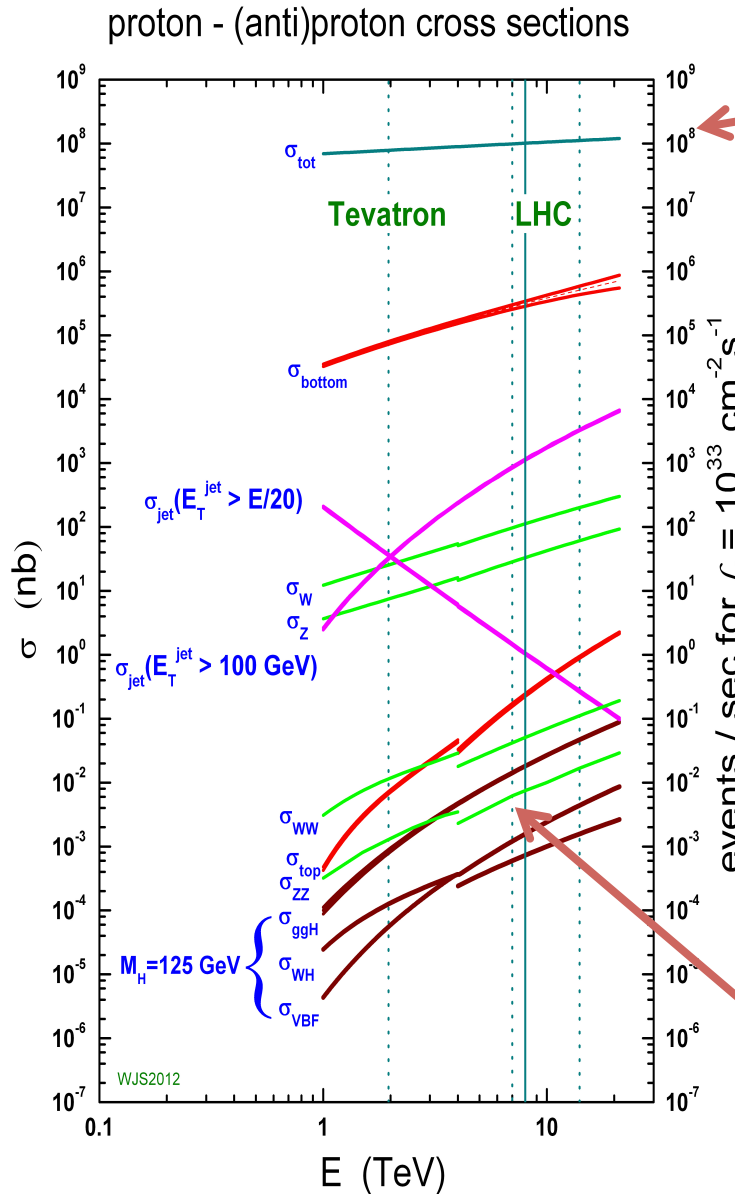
Ce tri se fait en deux étapes, hardware puis software, sur la base de la présence de particules de grande énergie produites à grand angle, signalant ce qui nous intéresse, des collisions dures entre quarks et gluons à l’intérieur du proton

Vitesse de la lumière 300000 km/s
 1 nanoseconde 30 cm
 1 picoseconde 300 microns
 (durée de vie de charme, beauté)

Un défi pour le futur
 distinguer les interactions à l’échelle
 de temps de 10 picoseconde

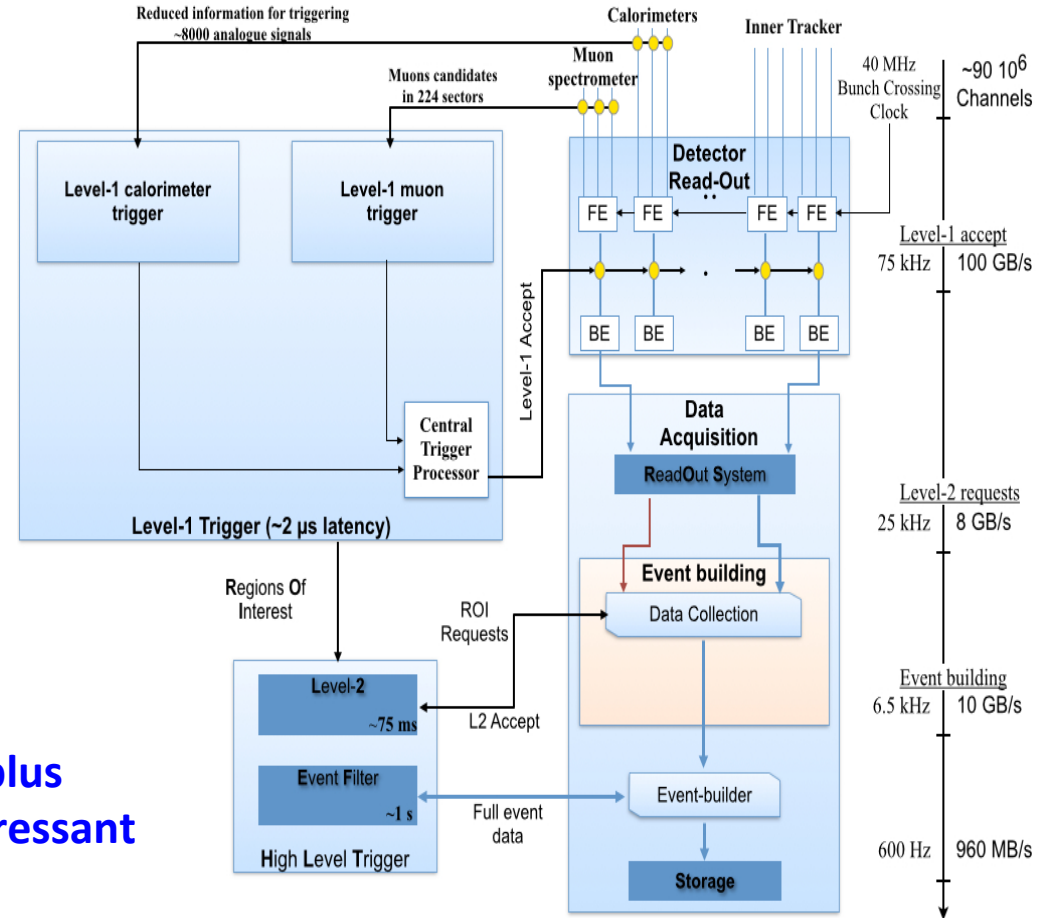


Pourquoi au LHC avaler 40 millions d'événements par seconde pour n'en retenir que 200 ?



inévitabile

et comment faire?

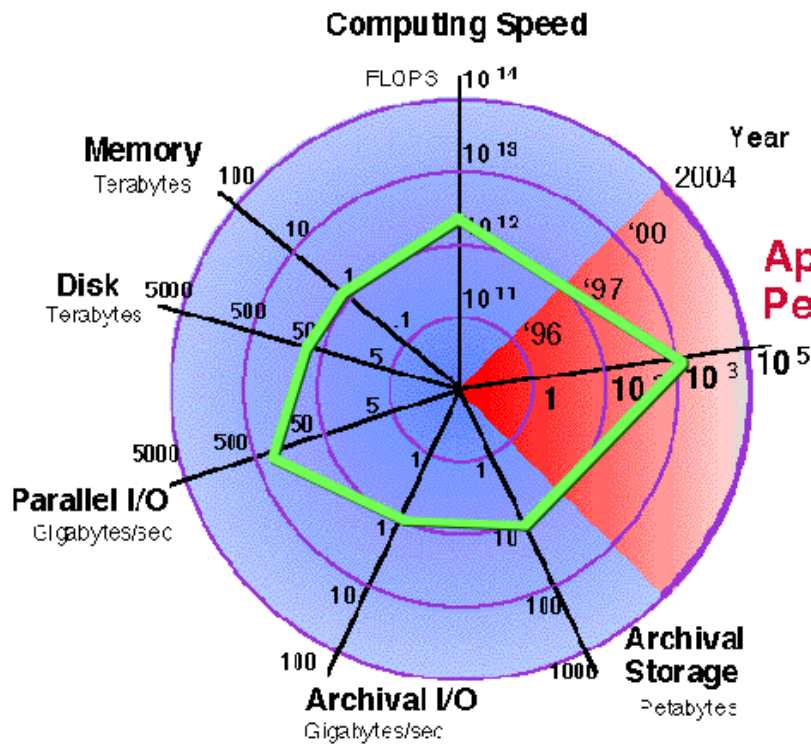


le plus intéressant

De l'art d'anticiper...

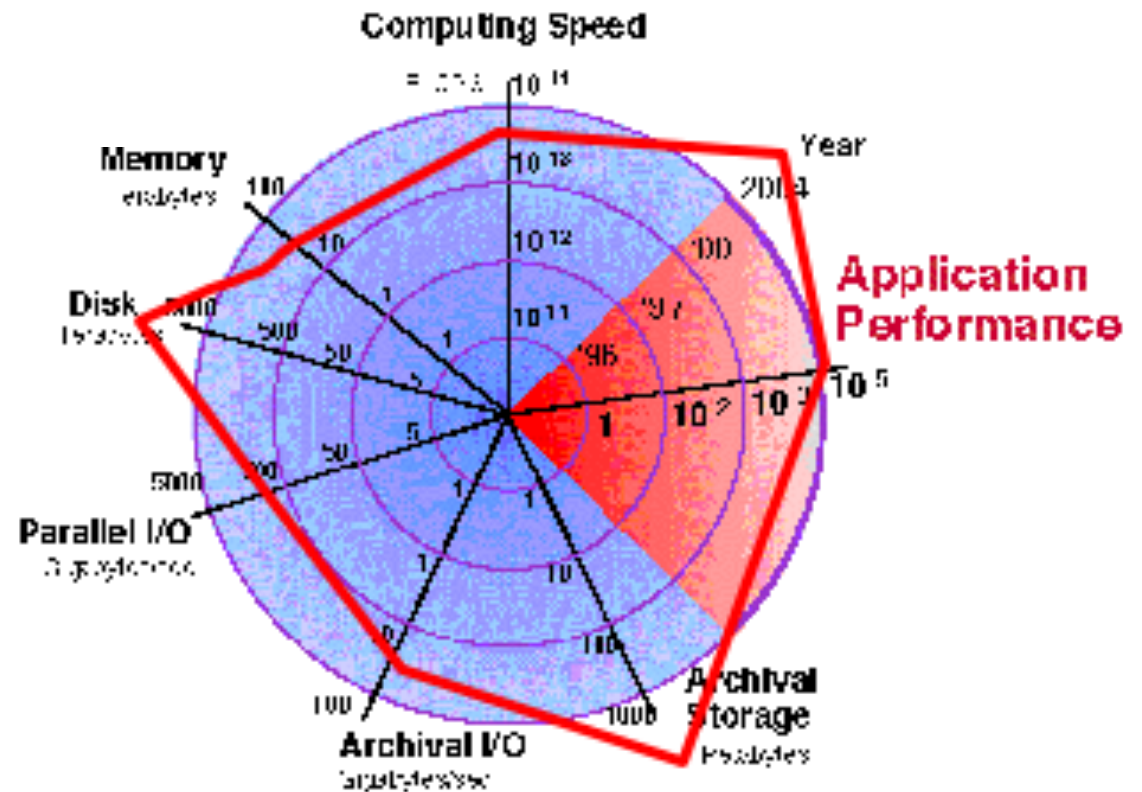
*Durant la conception
et la réalisation nécessité
d'anticiper les performances
à venir des technologies
de l'information*

S.Cittolin



Application
Performance

*All expectations fulfilled.
More: supercomputing has
become PC farming with
high speed interconnection
as needed in the on/ off-line
systems*



Application
Performance

theory

discoveries machines detectors cosmo

1950	<p>QED*</p> <p>Yang-Mills CPT</p> <p>Regge mass from sym. breaking</p>	<p>strange particles</p> <p>antiproton* ν_e^* R^* proton size*</p>	<p>klystron ↑</p> <p>Cosmotron Bevatron</p> <p>BCS theory* PS AGS</p> <p>NbTi Josephson* VdMeer horn 1st g-2 ring</p>	<p>scintillator transistor*</p> <p>bubble ch.* Texas trans.</p> <p>MOS trans. spark ch.</p>	<p>BBN pred.CMB</p>
1960	<p>Higgs*</p> <p>Bell</p> <p>V-A Eightfold Way Cabibbo</p>	<p>2 neutrinos*</p> <p>CP^* Ω</p>	<p>e cooling</p> <p>ISR</p> <p>stoch.cooling* SPS</p> <p>p-p collider</p> <p>LEAR *YBCO Tevatron La Thuile</p>	<p>2m BC</p> <p>MWPC* Gargamelle Ω</p> <p>BEBC 5k trans./chip</p> <p>TPC Si MC68000 microstrips pixels PC</p>	<p>CMB* Sakharov</p>
1970	<p>EW SM*</p> <p>SM renormalization*</p> <p>strings SM final</p> <p>Veneziano</p> <p>SUSY</p> <p>quarks colour partons quarks validated asymptotic freedom*</p> <p>QCD validated</p> <p>phenomenology QCD improved</p> <p>GIM KM*</p>	<p>DIS*</p> <p>neutral currents jets e^+e^- J/Psi tau* Y charm gluon</p> <p>W, Z*</p>	<p>ISR</p> <p>stoch.cooling* SPS</p> <p>p-p collider</p> <p>LEAR *YBCO Tevatron La Thuile</p> <p>LEP HERA</p> <p>LHC approved stop LEP cav. PEP2 KEKB end of LEP AD</p> <p>end HERA LHC</p> <p>end Tevatron</p>	<p>MWPC* Gargamelle Ω</p> <p>BEBC 5k trans./chip</p> <p>TPC Si MC68000 microstrips pixels PC</p> <p>WEB 10⁶ trans. 1 m² Si</p> <p>Pentium Super K</p> <p>200 m² Si GRID</p> <p>10⁹ trans.</p>	<p>CMB* Sakharov</p> <p>binary pulsar*</p> <p>inflation</p> <p>COBE*</p> <p>accel. univ.* WMAP polar E</p> <p>PLANCK polar B?</p>
1980	<p>MSSM</p> <p>SUSY phenomenology</p> <p>Higgs MSSM < 130 GeV</p> <p>1st SString revolution</p> <p>large ED</p> <p>2nd SString revolution</p> <p>SS landscape</p>	<p>DIS*</p> <p>neutral currents jets e^+e^- J/Psi tau* Y charm gluon</p> <p>W, Z*</p> <p>3 neutrinos converg.couplings</p> <p>gas BEC* top antihydrogen atm. nu oscill.* p lifetime > 10³⁴y SM checked in depth Higgs > 114 GeV cold antihydrogen muon g-2 at 10⁻⁹</p> <p>μ to $e\gamma$ < 5 · 10⁻¹³</p> <p>θ_{13} boson BEH 125 GeV</p>	<p>ISR</p> <p>stoch.cooling* SPS</p> <p>p-p collider</p> <p>LEAR *YBCO Tevatron La Thuile</p> <p>LEP HERA</p> <p>LHC approved stop LEP cav. PEP2 KEKB end of LEP AD</p> <p>end HERA LHC</p> <p>end Tevatron</p>	<p>BEBC 5k trans./chip</p> <p>TPC Si MC68000 microstrips pixels PC</p> <p>WEB 10⁶ trans. 1 m² Si</p> <p>Pentium Super K</p> <p>200 m² Si GRID</p> <p>10⁹ trans.</p>	<p>binary pulsar*</p> <p>inflation</p> <p>COBE*</p> <p>accel. univ.* WMAP polar E</p> <p>PLANCK polar B?</p>
1990	<p>SUSY phenomenology</p> <p>Higgs MSSM < 130 GeV</p> <p>1st SString revolution</p> <p>large ED</p> <p>2nd SString revolution</p> <p>SS landscape</p>	<p>DIS*</p> <p>neutral currents jets e^+e^- J/Psi tau* Y charm gluon</p> <p>W, Z*</p> <p>3 neutrinos converg.couplings</p> <p>gas BEC* top antihydrogen atm. nu oscill.* p lifetime > 10³⁴y SM checked in depth Higgs > 114 GeV cold antihydrogen muon g-2 at 10⁻⁹</p> <p>μ to $e\gamma$ < 5 · 10⁻¹³</p> <p>θ_{13} boson BEH 125 GeV</p>	<p>ISR</p> <p>stoch.cooling* SPS</p> <p>p-p collider</p> <p>LEAR *YBCO Tevatron La Thuile</p> <p>LEP HERA</p> <p>LHC approved stop LEP cav. PEP2 KEKB end of LEP AD</p> <p>end HERA LHC</p> <p>end Tevatron</p>	<p>BEBC 5k trans./chip</p> <p>TPC Si MC68000 microstrips pixels PC</p> <p>WEB 10⁶ trans. 1 m² Si</p> <p>Pentium Super K</p> <p>200 m² Si GRID</p> <p>10⁹ trans.</p>	<p>binary pulsar*</p> <p>inflation</p> <p>COBE*</p> <p>accel. univ.* WMAP polar E</p> <p>PLANCK polar B?</p>
2000	<p>SUSY phenomenology</p> <p>Higgs MSSM < 130 GeV</p> <p>1st SString revolution</p> <p>large ED</p> <p>2nd SString revolution</p> <p>SS landscape</p>	<p>DIS*</p> <p>neutral currents jets e^+e^- J/Psi tau* Y charm gluon</p> <p>W, Z*</p> <p>3 neutrinos converg.couplings</p> <p>gas BEC* top antihydrogen atm. nu oscill.* p lifetime > 10³⁴y SM checked in depth Higgs > 114 GeV cold antihydrogen muon g-2 at 10⁻⁹</p> <p>μ to $e\gamma$ < 5 · 10⁻¹³</p> <p>θ_{13} boson BEH 125 GeV</p>	<p>ISR</p> <p>stoch.cooling* SPS</p> <p>p-p collider</p> <p>LEAR *YBCO Tevatron La Thuile</p> <p>LEP HERA</p> <p>LHC approved stop LEP cav. PEP2 KEKB end of LEP AD</p> <p>end HERA LHC</p> <p>end Tevatron</p>	<p>BEBC 5k trans./chip</p> <p>TPC Si MC68000 microstrips pixels PC</p> <p>WEB 10⁶ trans. 1 m² Si</p> <p>Pentium Super K</p> <p>200 m² Si GRID</p> <p>10⁹ trans.</p>	<p>binary pulsar*</p> <p>inflation</p> <p>COBE*</p> <p>accel. univ.* WMAP polar E</p> <p>PLANCK polar B?</p>
2010	<p>SUSY phenomenology</p> <p>Higgs MSSM < 130 GeV</p> <p>1st SString revolution</p> <p>large ED</p> <p>2nd SString revolution</p> <p>SS landscape</p>	<p>DIS*</p> <p>neutral currents jets e^+e^- J/Psi tau* Y charm gluon</p> <p>W, Z*</p> <p>3 neutrinos converg.couplings</p> <p>gas BEC* top antihydrogen atm. nu oscill.* p lifetime > 10³⁴y SM checked in depth Higgs > 114 GeV cold antihydrogen muon g-2 at 10⁻⁹</p> <p>μ to $e\gamma$ < 5 · 10⁻¹³</p> <p>θ_{13} boson BEH 125 GeV</p>	<p>ISR</p> <p>stoch.cooling* SPS</p> <p>p-p collider</p> <p>LEAR *YBCO Tevatron La Thuile</p> <p>LEP HERA</p> <p>LHC approved stop LEP cav. PEP2 KEKB end of LEP AD</p> <p>end HERA LHC</p> <p>end Tevatron</p>	<p>BEBC 5k trans./chip</p> <p>TPC Si MC68000 microstrips pixels PC</p> <p>WEB 10⁶ trans. 1 m² Si</p> <p>Pentium Super K</p> <p>200 m² Si GRID</p> <p>10⁹ trans.</p>	<p>binary pulsar*</p> <p>inflation</p> <p>COBE*</p> <p>accel. univ.* WMAP polar E</p> <p>PLANCK polar B?</p>

Moriond

AM

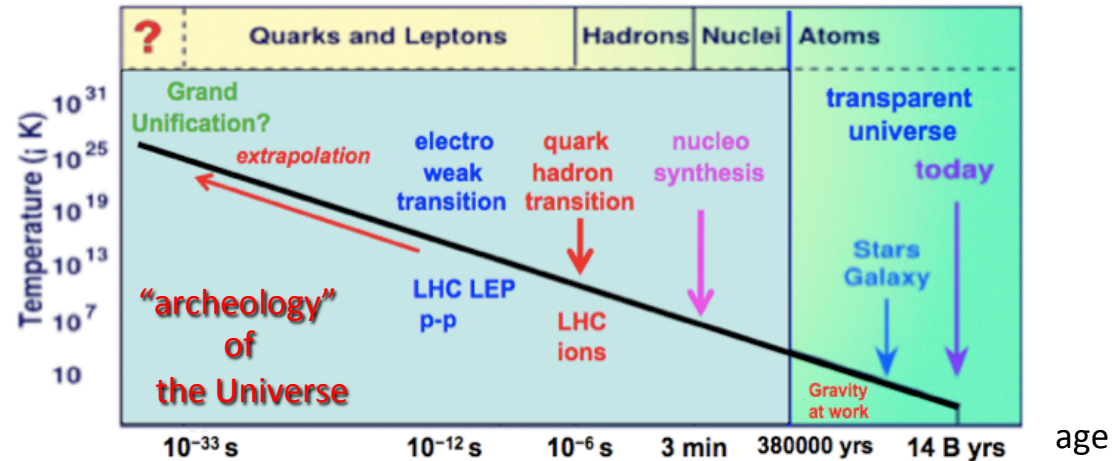
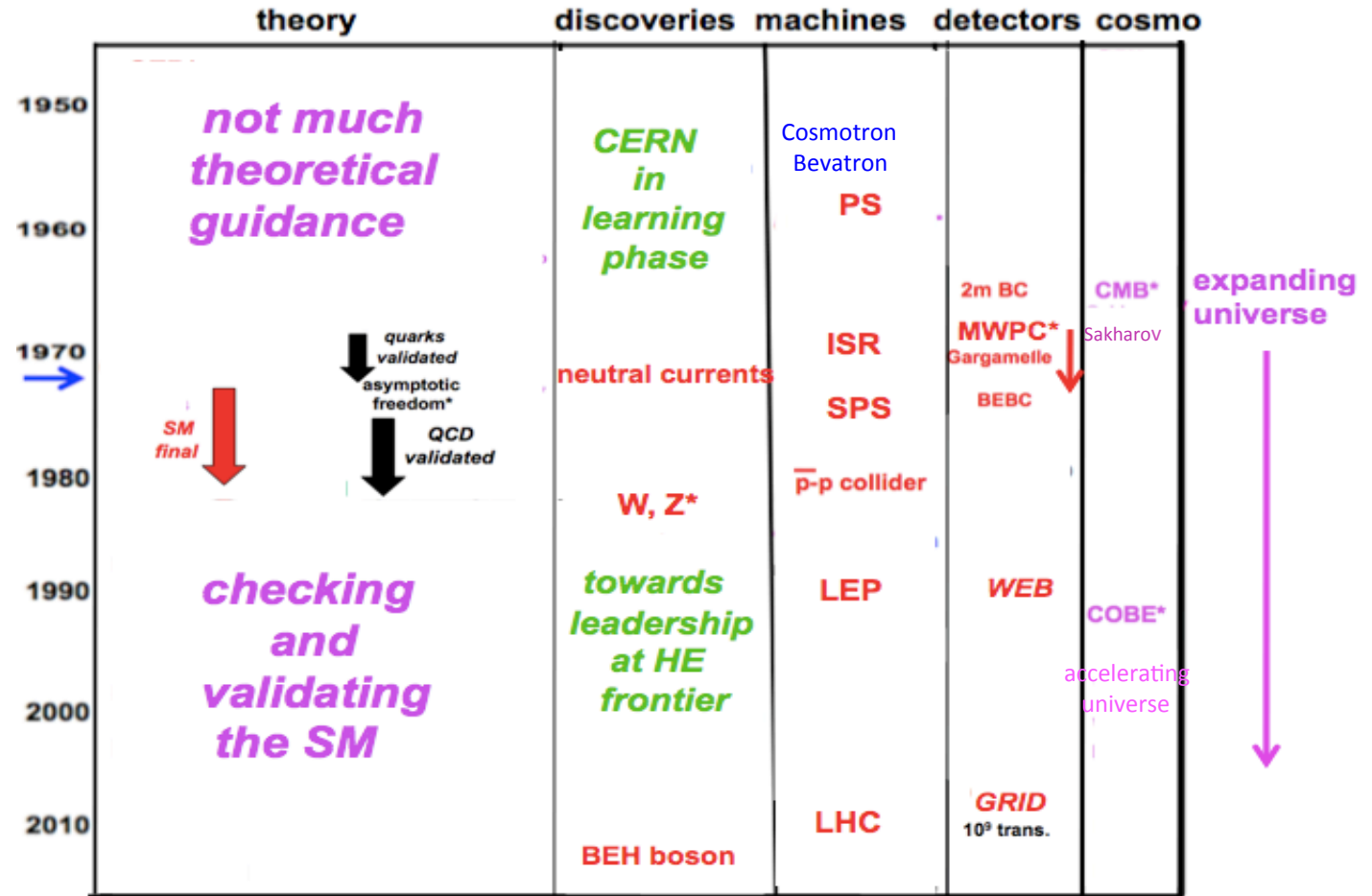
*

means NP

PM

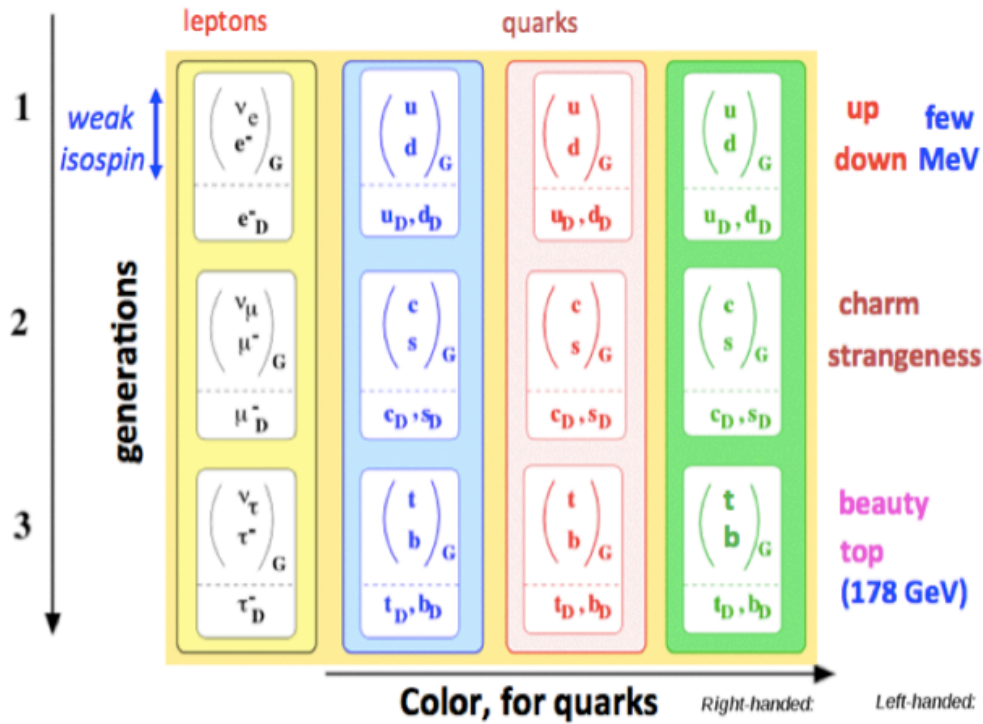
D.T. June 2014

since 1966
much change
in the scenery!

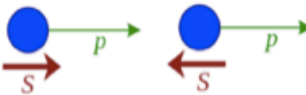


SM: $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$

Building blocks mysterious, but interactions simple



pointlike, size smaller than 10^{-4} fermi



and the boson

ELECTROMAGNETISM

Abelian gauge theory

U(1)

CHROMODYNAMICS

the gluon feels the color charge and carries it (octet tensor of color)

YES !

SU(3)_C

NON ABELIAN GAUGE THEORY

ELECTROWEAK INTERACTION

SU(2) coupling g **U(1) coupling g'**

transition inside doublet of weak isospin
exact for leptons
approximate for quarks

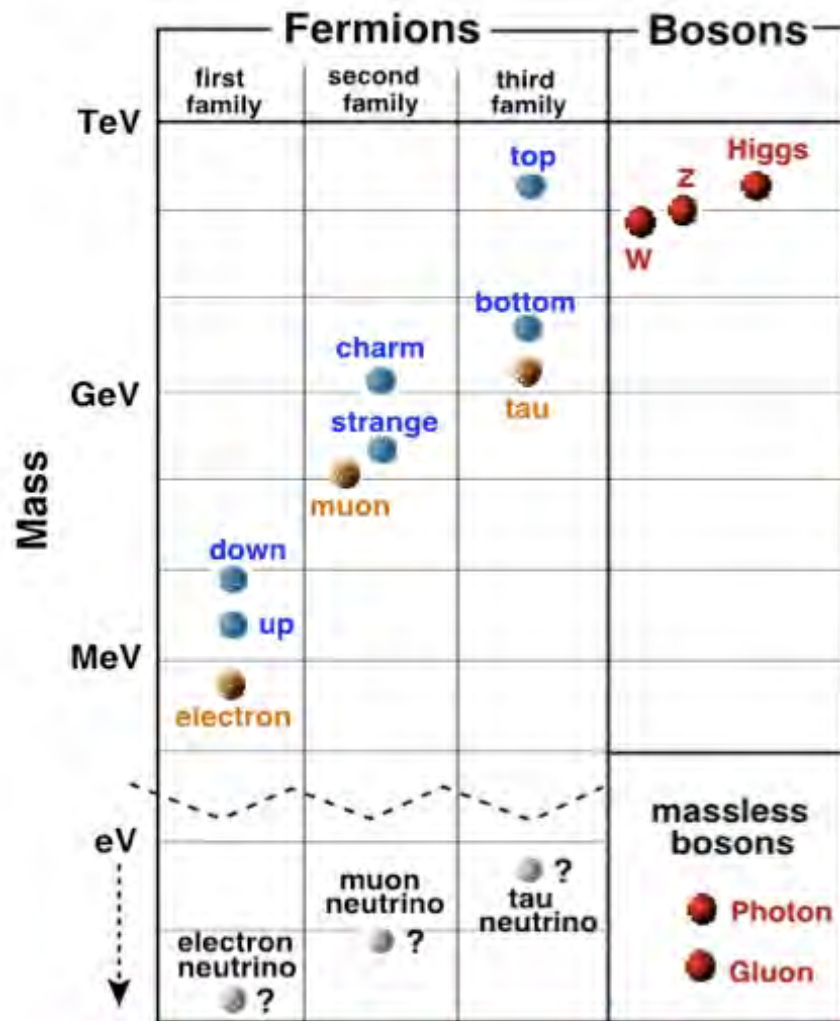
neutral current
charged current

A last complication: the physical states are

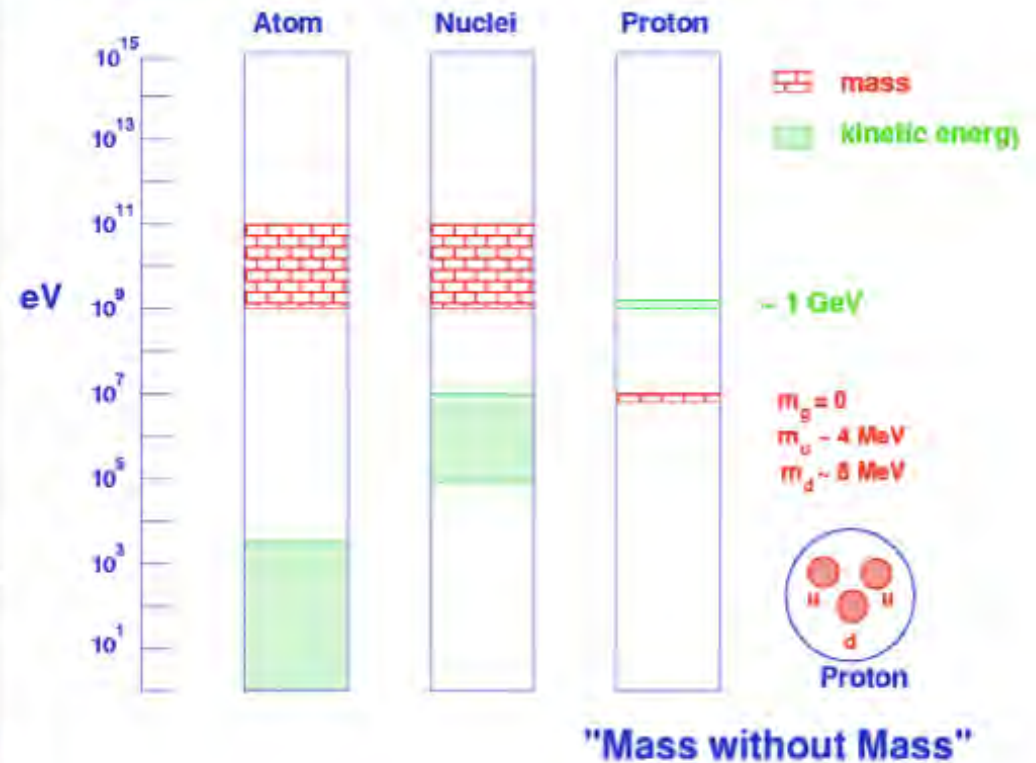
$$\begin{pmatrix} \gamma \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_w & \sin \theta_w \\ -\sin \theta_w & \cos \theta_w \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B^0 \\ W^0 \end{pmatrix}$$

$\sin \theta_w \sim 0.5$
 $\theta_w =$ mixing angle

$e = g \sin \theta_w$



$$E=mc^2 \longrightarrow m=E/c^2$$



D'où provient cette hiérarchie?

Pourquoi est-elle stable?

Le Z et le γ sont "cousins". Pourquoi

leur différence de masse?

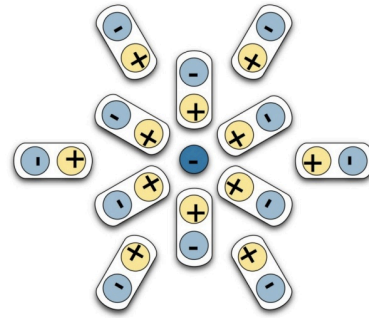
Exemple de Symétrie brisée.

“La masse sans masse” :

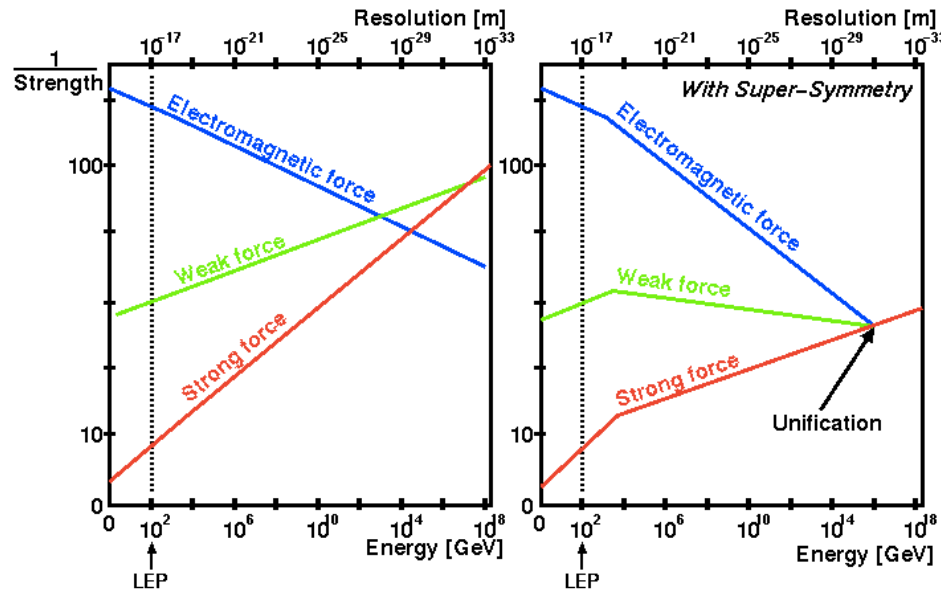
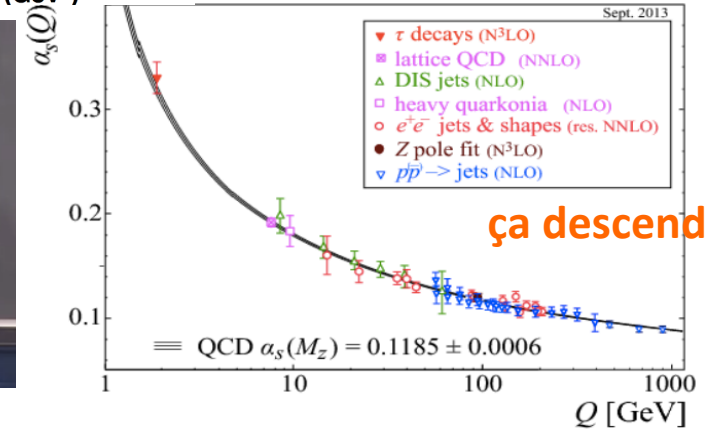
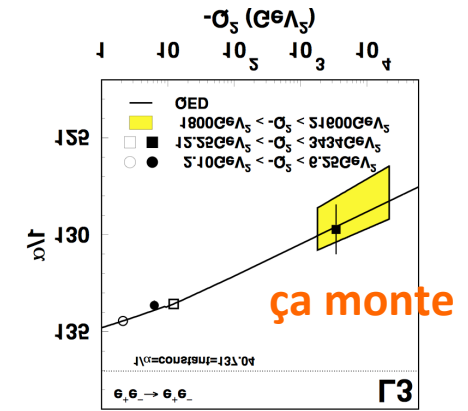
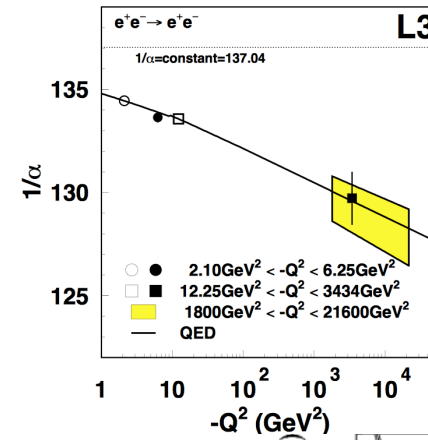
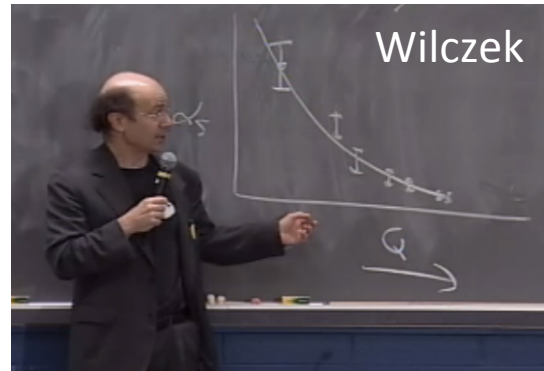
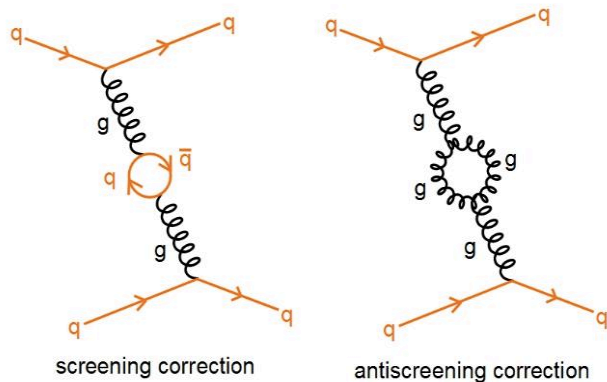
l'Univers visible, et nous mêmes, pesons non pas la masse de nos constituants ultimes, mais leur dynamique.

L'Univers très simple à ses débuts ?

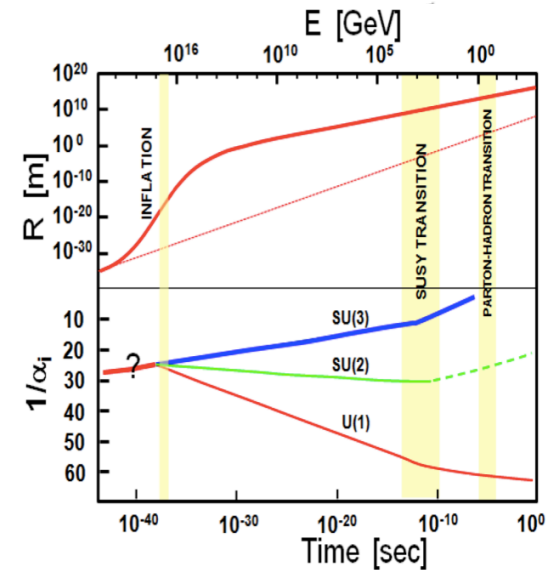
couplage électromagnétique



couplage fort

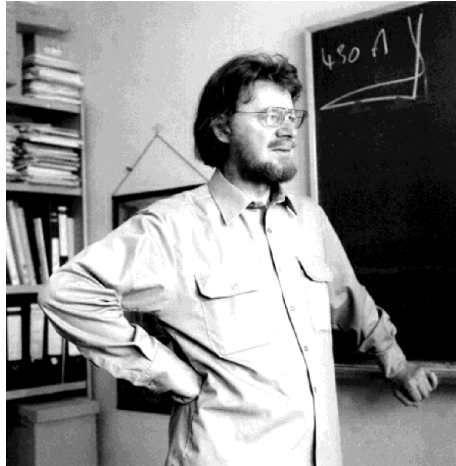


Les couplages des trois forces semblent s'unifier à très haute énergie



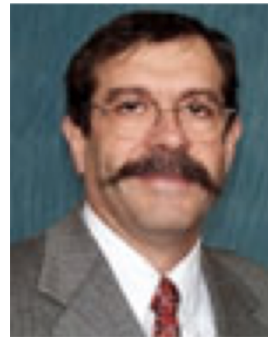
Validité de la Mécanique Quantique

Les inégalités de Bell

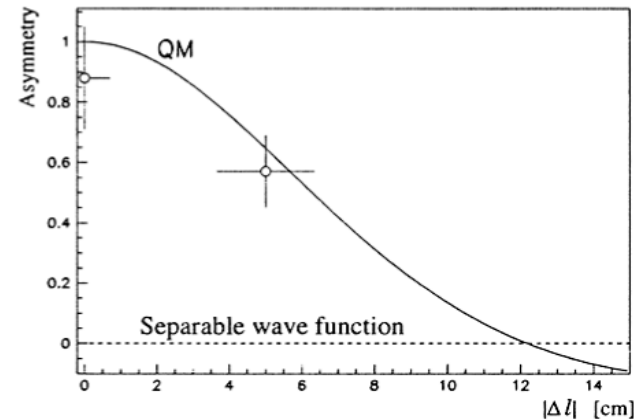


J. Bell

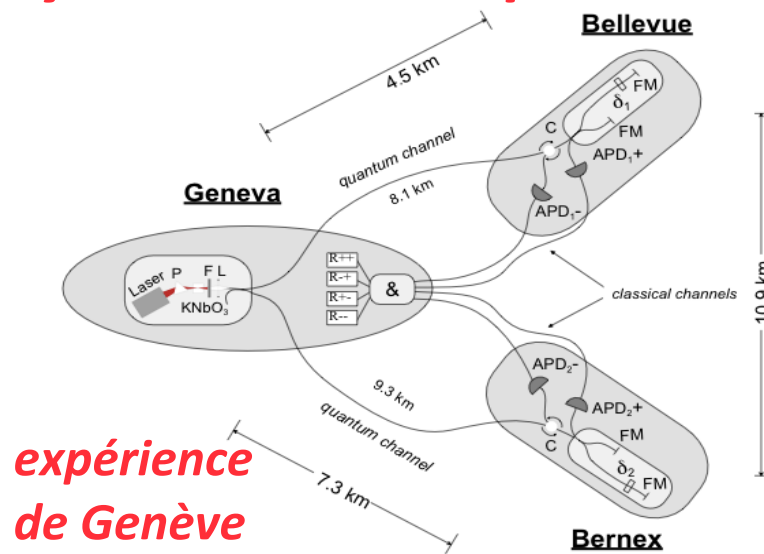
A. Aspect



non-séparabilité du système $K^0 \bar{K}^0$ (CP Lear au CERN)

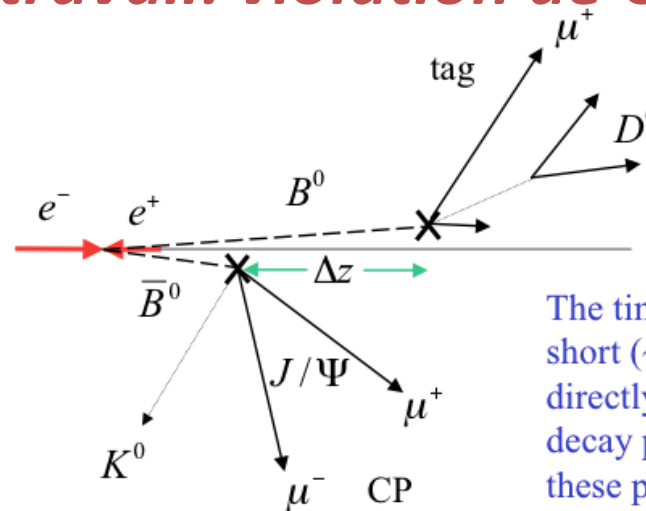


l'intrication d'un système à deux photons



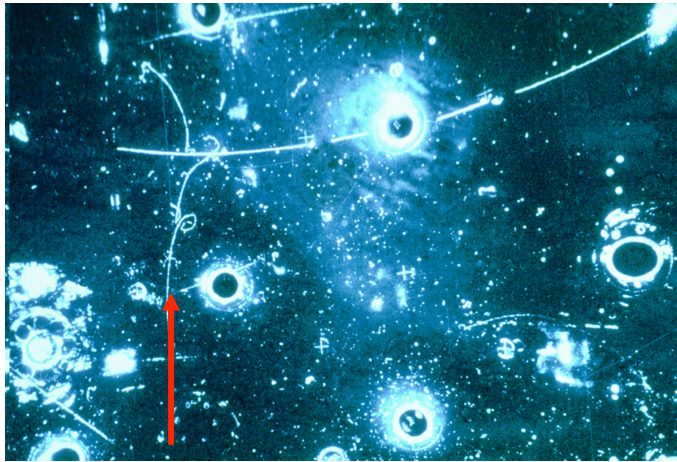
expérience de Genève

non-séparabilité devenue outil de travail: violation de CP en $B^0 \bar{B}^0$

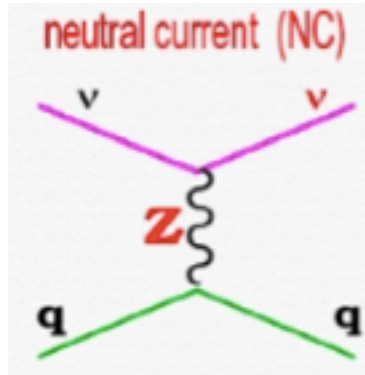


The times involved are too short (~ 1 ps) to measure directly, instead we measure the decay positions and convert these positions to times.

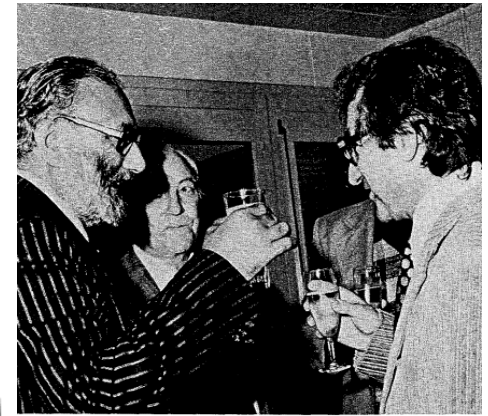
De grands moments...



Les Courants Neutres 1973

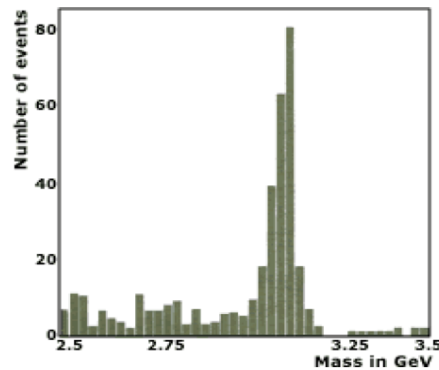


A.Lagarrigue



A.Salam et P.Musset

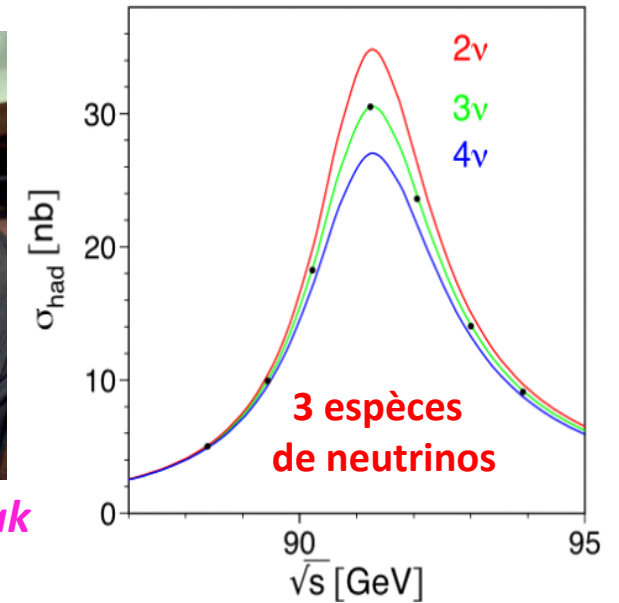
$$\bar{\nu}_\mu e^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu e^-$$



Le J/Psi
charme-
anticharme
Brookhaven
1974



C.Rubbia, S.Ting, G.Charpak

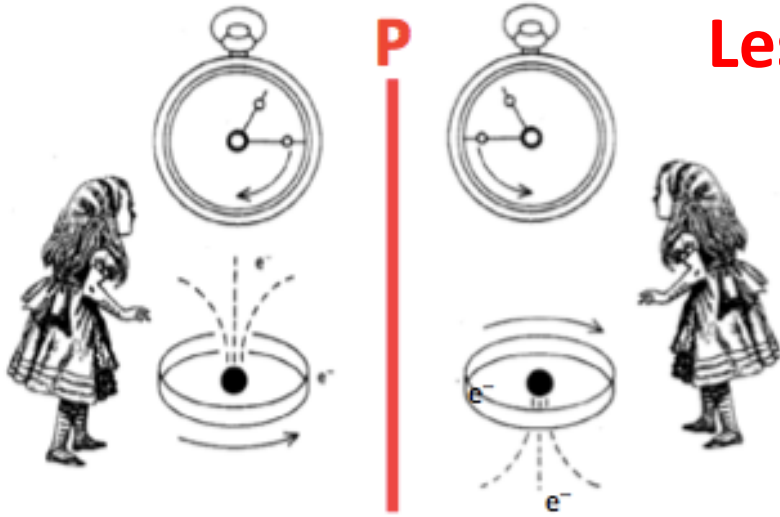


tests en profondeur
du Modèle Standard
au LEP 1989-2000



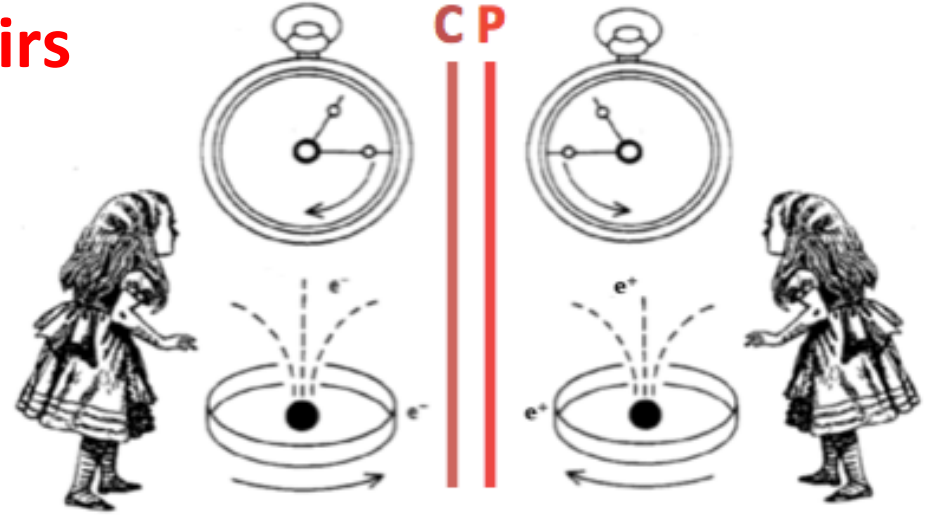
Les bosons
W et Z
CERN 1983

Les miroirs



1956 Violation de la parité

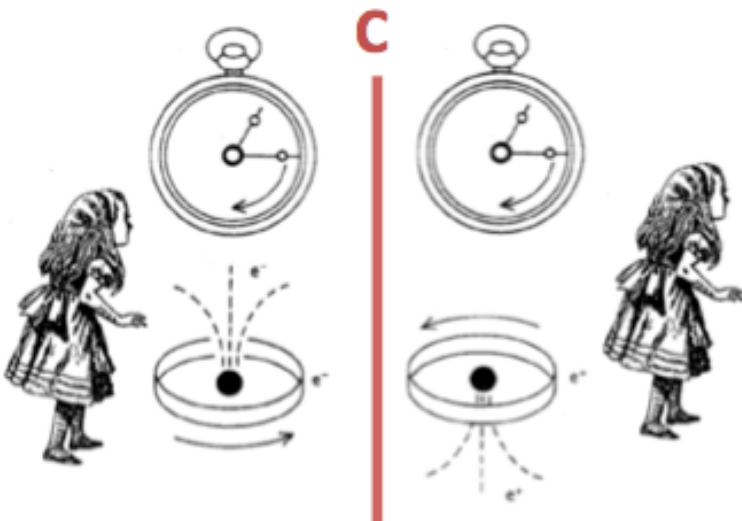
Nobel 1957



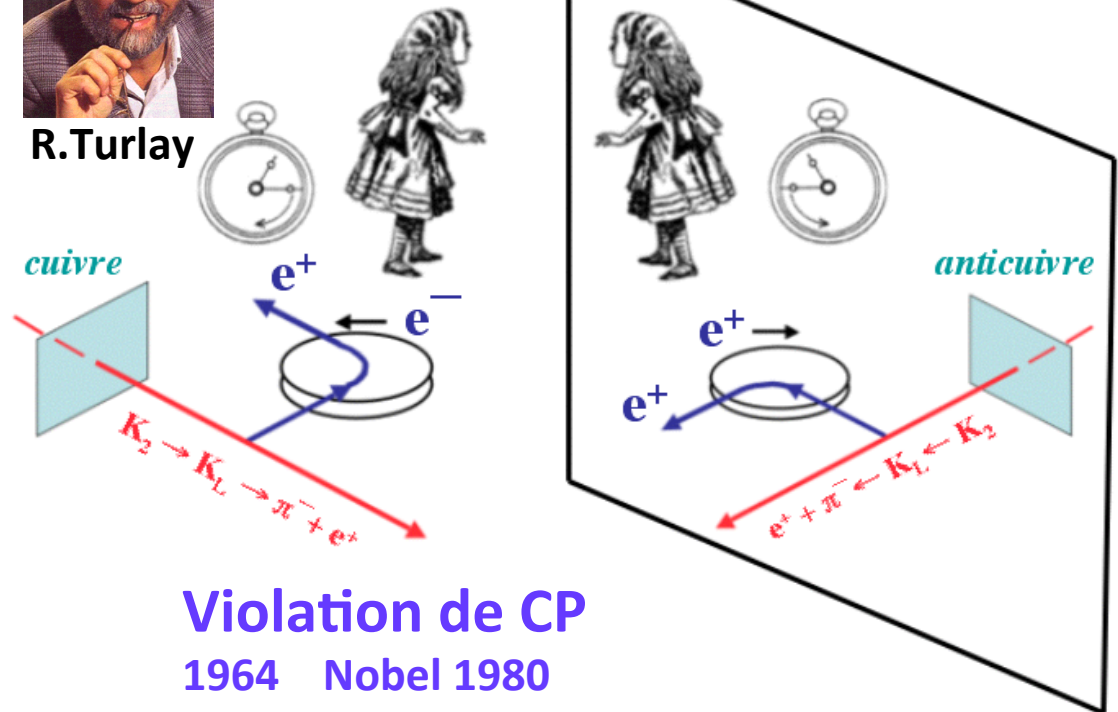
CP comme bon miroir ? Non !



R. Turlay



matière → antimatière

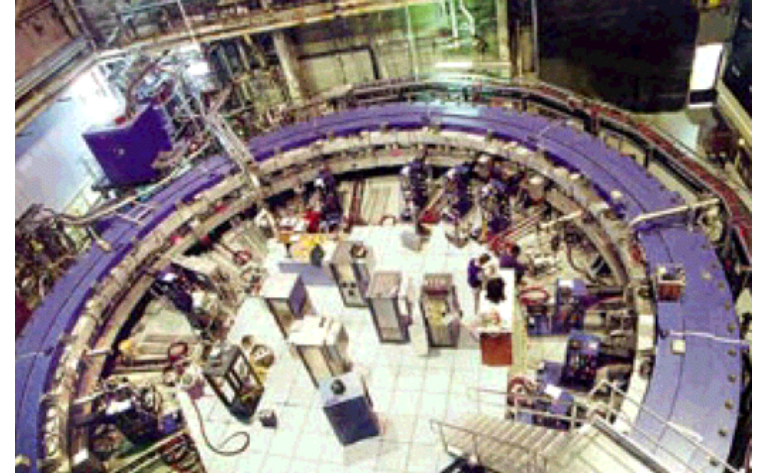
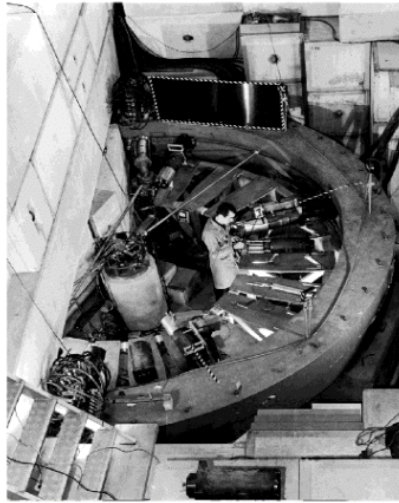
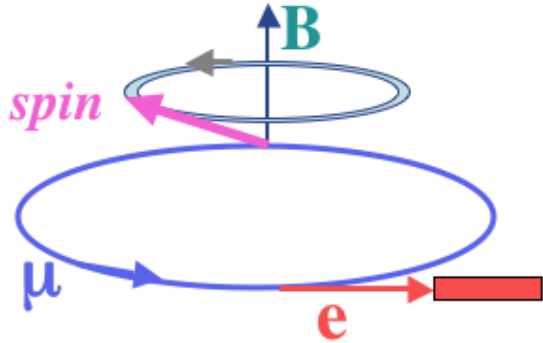


Violation de CP

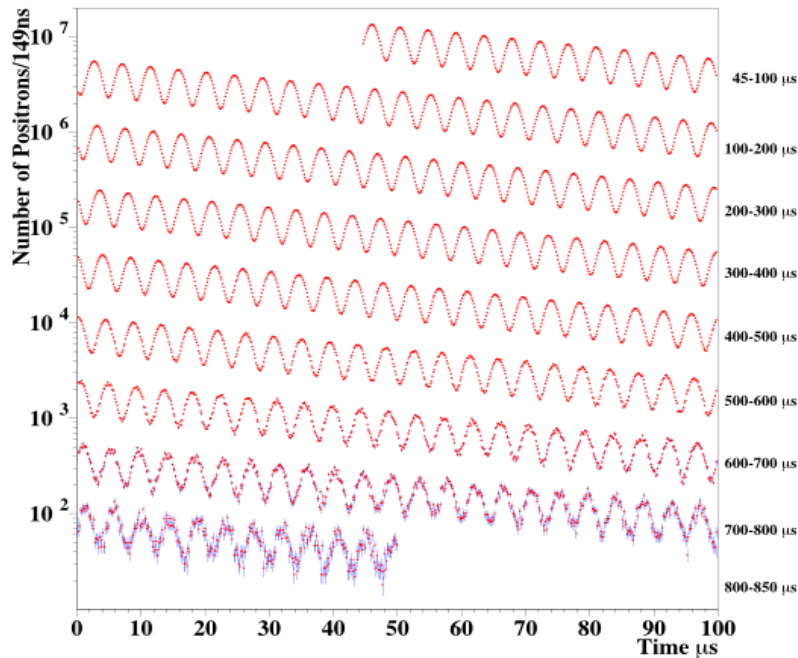
1964 Nobel 1980

Le Modèle Standard est bon au millionième près

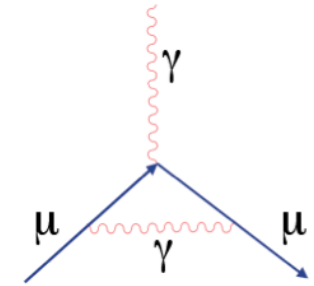
facteur $g-2$ du muon



4 Billion Positrons with $E > 2$ GeV



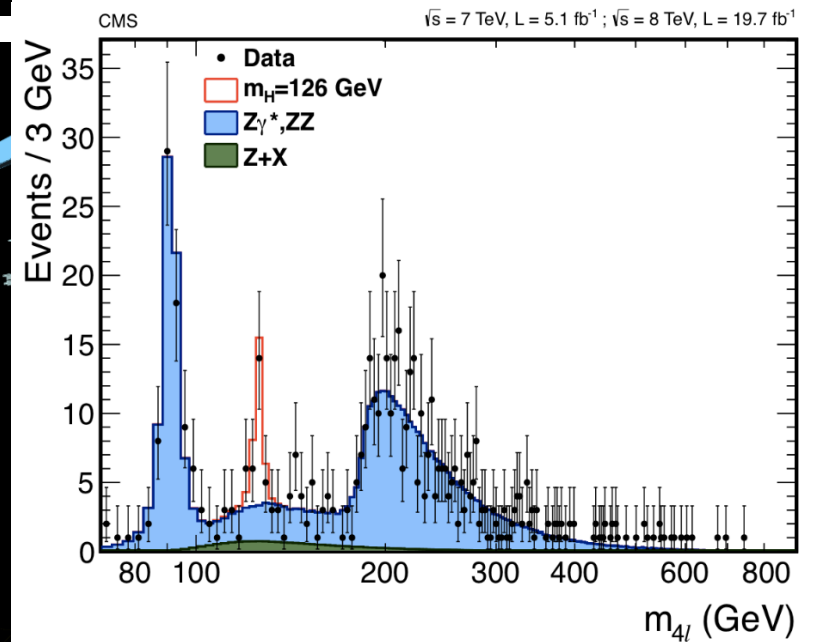
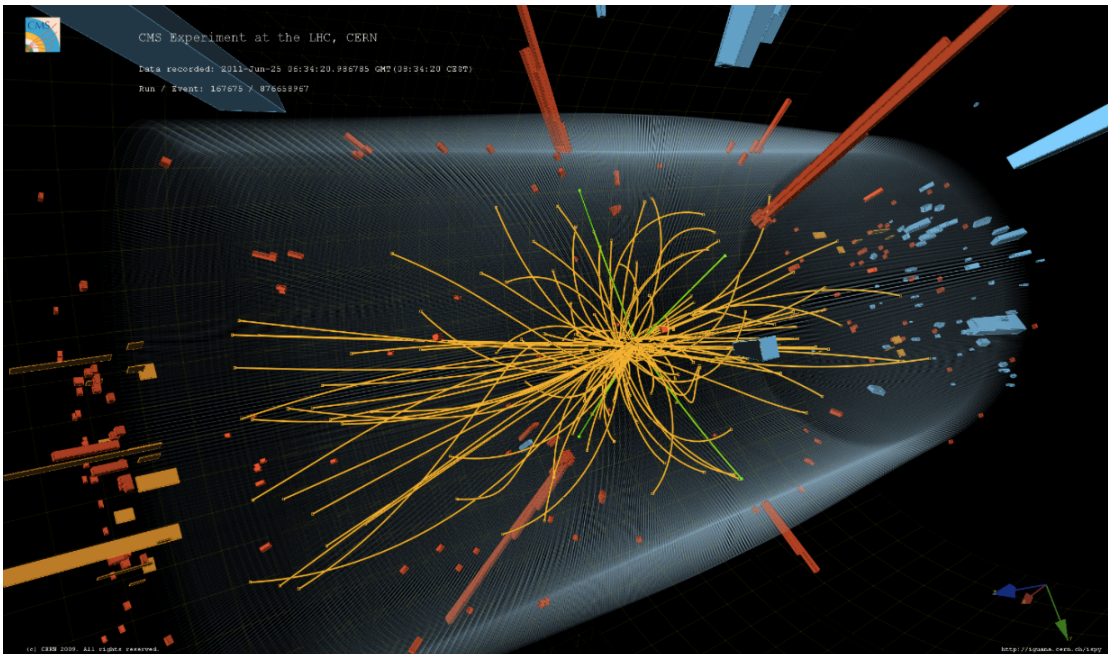
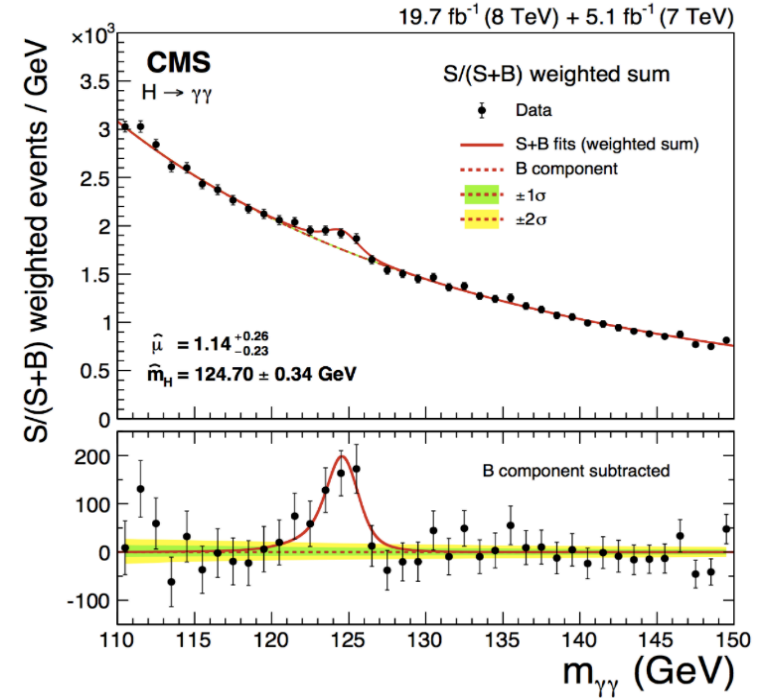
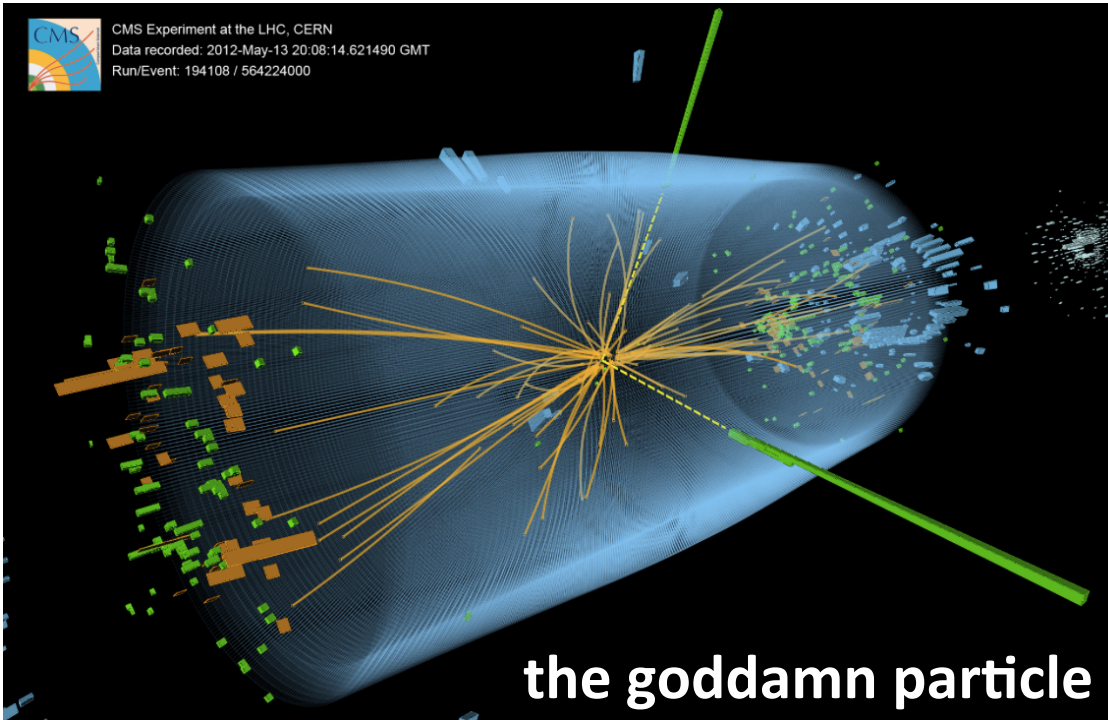
$$g_\mu = 2 + 0.0023318416 \pm 0.0000000012$$



Accord au millionième entre expérience et Modèle Standard. Commence à renseigner sur la nouvelle physique éventuelle.

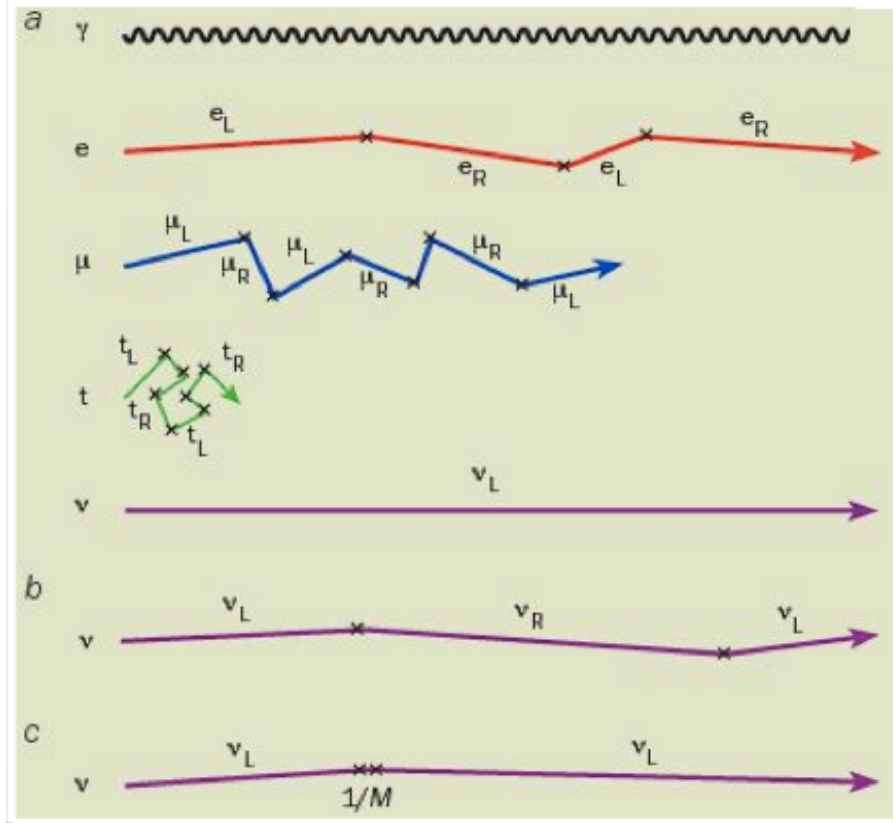
Tests multiples de la relativité

facteur $\gamma = 29.33$
 $\tau^+ = 64.419 (58) \mu s$
 $\tau^- = 64.368 (29) \mu s$
 $\rightarrow \tau_0^+ = 2.1966 (20) \mu s$
 $\tau_0^+ = 2.19711 (8) \mu s$



Il manquait 10 GeV au LEP, dommage..

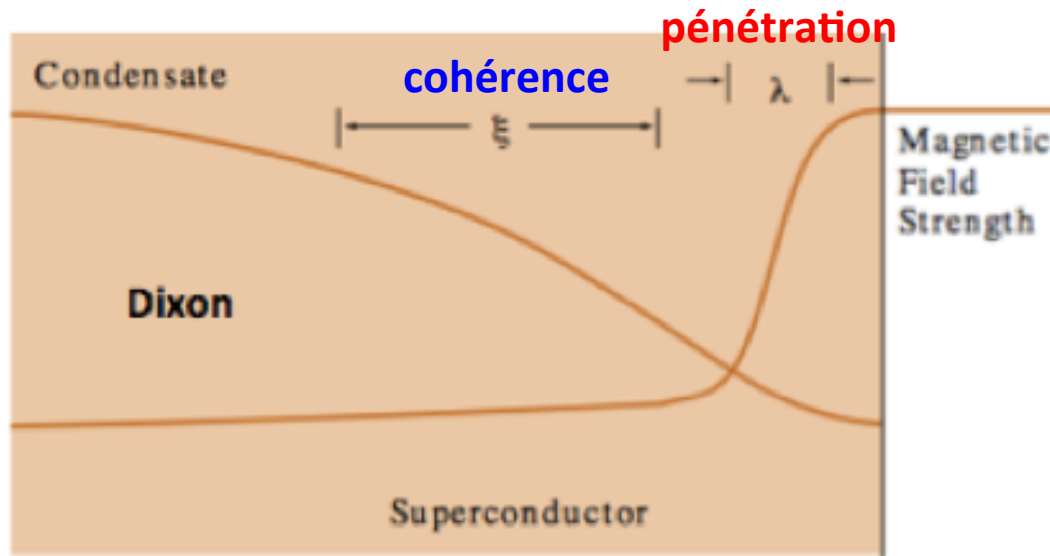
Le boson BEH



Les particules élémentaires acquièrent une masse en interagissant avec le champ de BEH

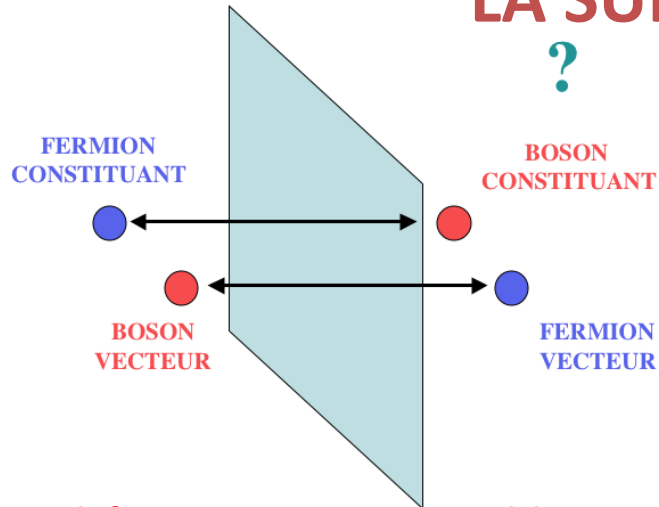
ν_R presque non-intéragissant ou s'échappant vers une extra-dimension
 Majorana ν lourd de brève existence $1/M$ masse m^2/M

analogie avec supra-conductivité

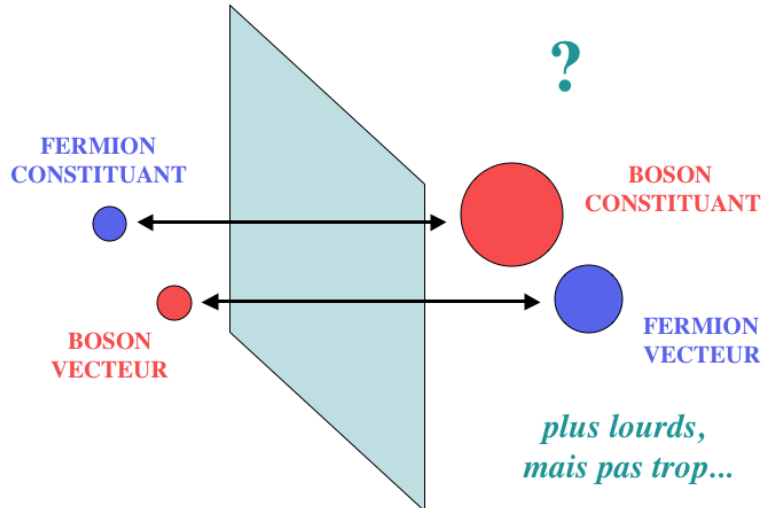


les longueurs λ and ξ , réinterprétées dans le contexte électrofaible deviennent λ_{Compton} ou masse inverse du boson W (λ) et du boson de Higgs (ξ).

LA SUPERSYMETRIE



*mathématiquement possible...
mais rien de tel dans notre monde...*



*plus lourds,
mais pas trop...*

*...si elle existe, la Supersymétrie
est une "symétrie brisée"*

?

*La Supersymétrie (SUSY pour les
intimes) présente beaucoup de progrès
par rapport au Modèle Standard.*

*Elle corrige certains de ses défauts
de cohérence les plus graves.*

*En outre elle pourrait apporter
la réponse au problème de la
Masse Cachée de l'Univers.*

?

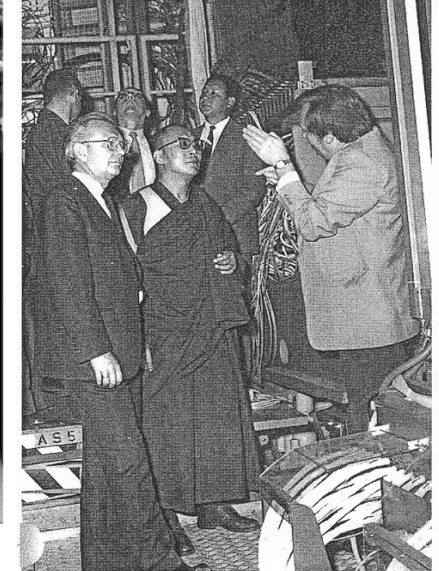
*Elle prédit un boson de Higgs léger, <130 GeV
Le boson de 125 GeV est un encouragement
mais pas une preuve*

*L'un des objectifs du LHC est de mettre en
évidence des particules supersymétriques
si elles sont assez légères
Pour l'instant rien en vue...*

LA PHYSIQUE DES PARTICULES N'EST PAS UN ROMAN...

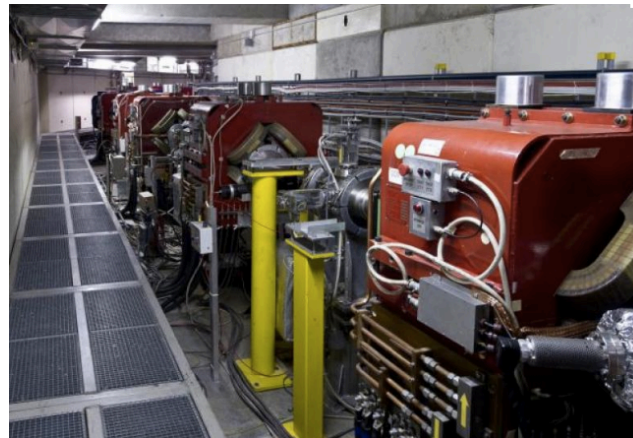
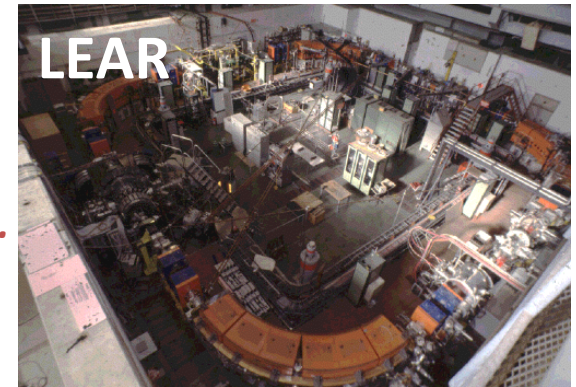
Excellentes relations avec le Vatican...

Oui, les antiparticules existent et on en produit autant que de particules. Mais les antiprotons sont rares. Concentrer, ralentir et stocker des \bar{p} dans une "bouteille électromagnétique" est bien compliqué et de rendement infinitésimal.



*En 1996 sur l'anneau LEAR, quelques atomes d'antihydrogène furent créés.
En 2002, sur l'AD (Anneau de Décélération) on en a fait quelques 10^4 .
A ce rythme il faudrait $25 \cdot 10^{15}$ années pour remplir un ballon d'enfant d'antihydrogène.*

Si même on savait stocker toute l'antimatière jamais produite au CERN et l'annihiler cela ne tiendrait allumée une ampoule électrique que quelques minutes. Pour faire la bombe du roman il faudrait $\sim 2 \cdot 10^9$ années.



**Vues de
l'AD**

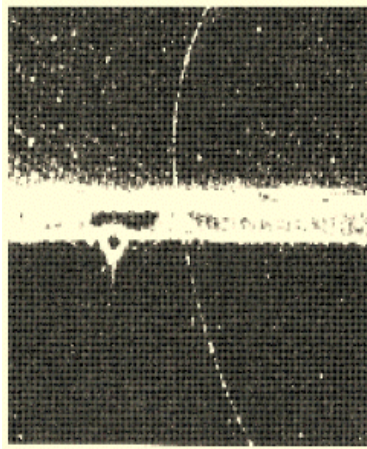
L'antimatière



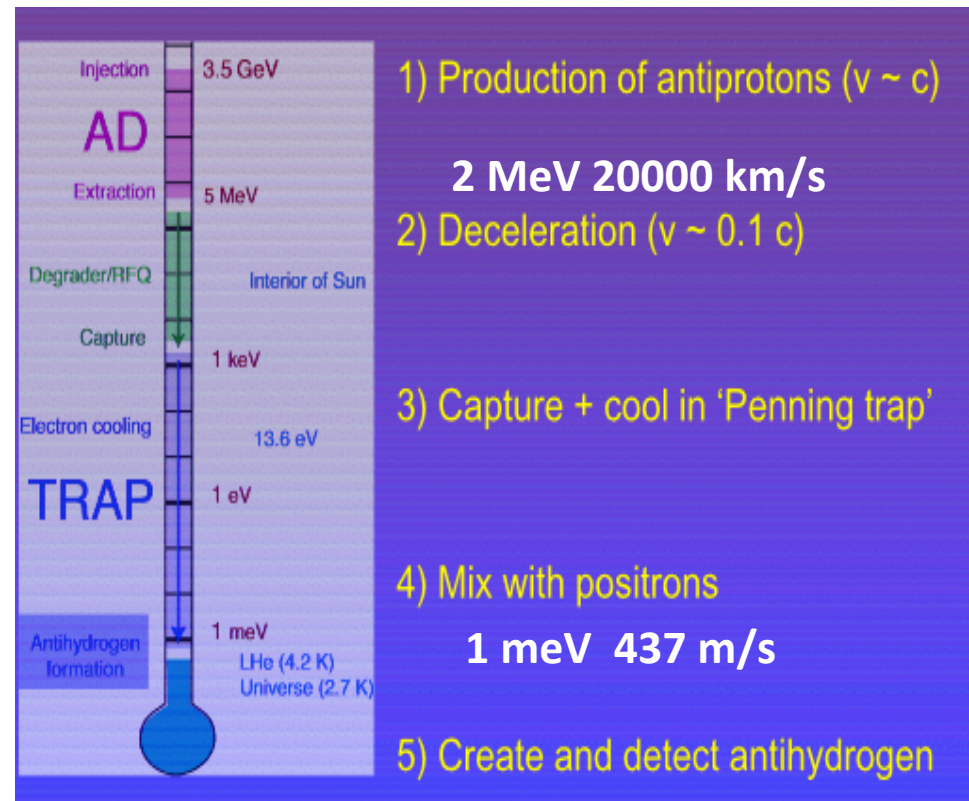
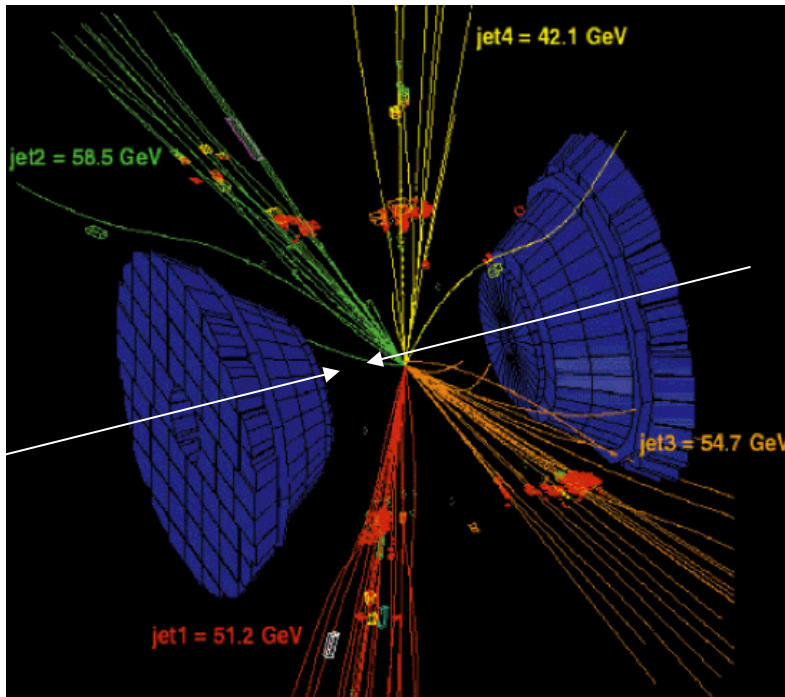
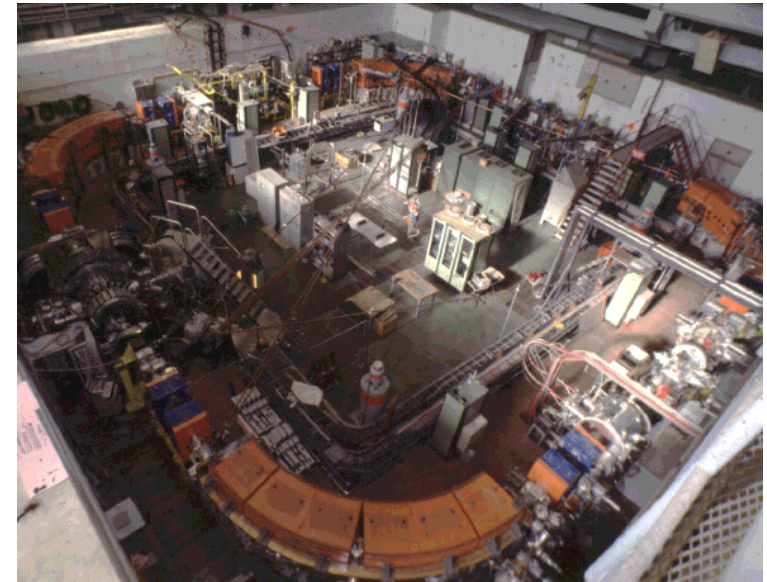
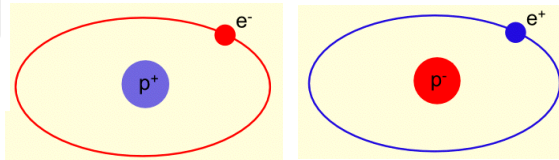
Paul Adrien Maurice Dirac
(1902 – 1984)



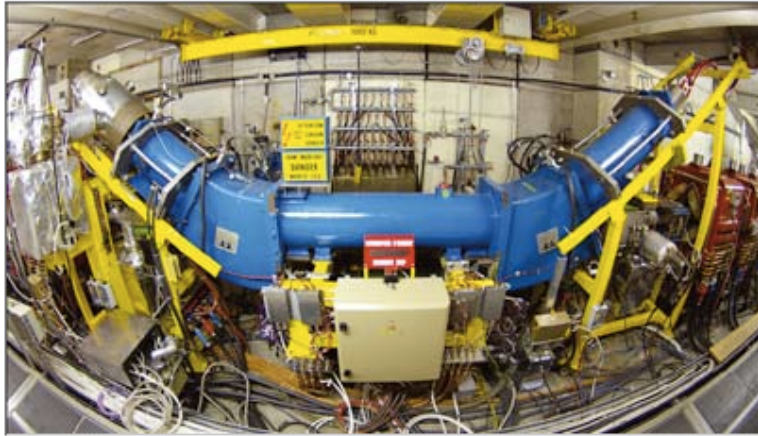
Carl D. Anderson
(1905 – 1991)
Nobelpreis 1936



antiproton Berkeley 1955 Nobel 59

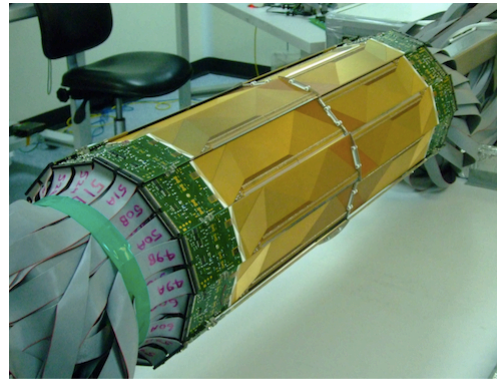


refroidissement des antiprotons



The electron cooler, which was upgraded to be operated on LEAR, in place in the ring of the Antiproton Decelerator at CERN.

production d'antihydrogène



Piège de l'expérience ALPHA au CERN ayant capturé un antihydrogène. ©

17.11.2010 : Des atomes d'antimatière produits et capturés au CERN

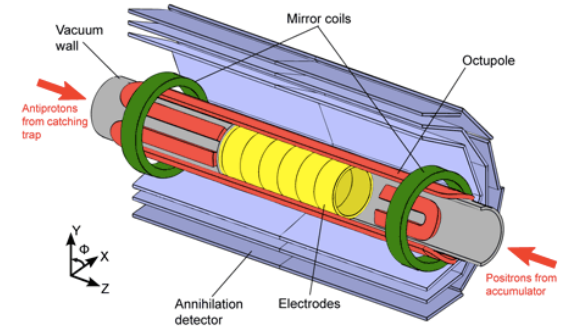
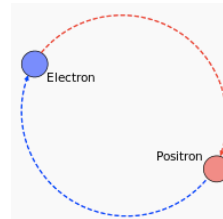
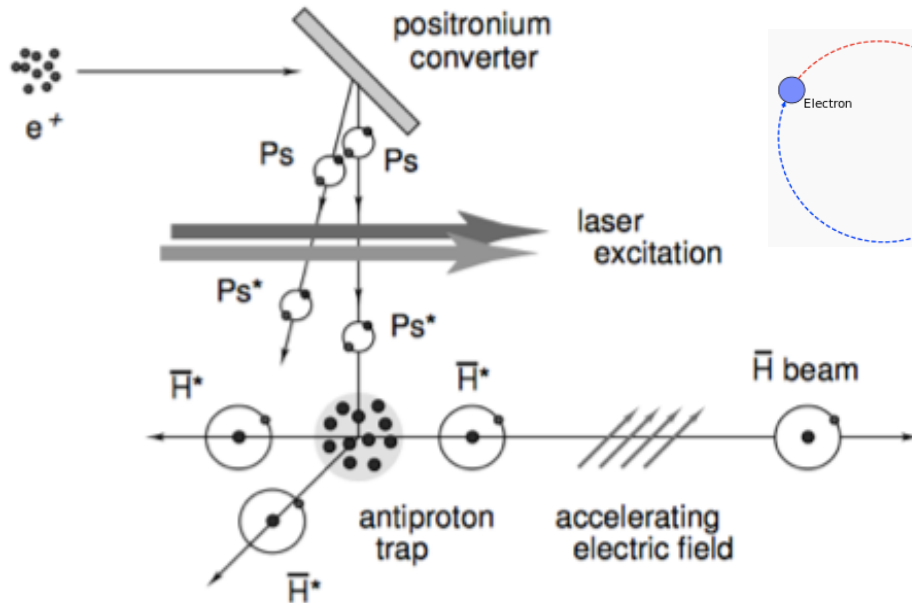


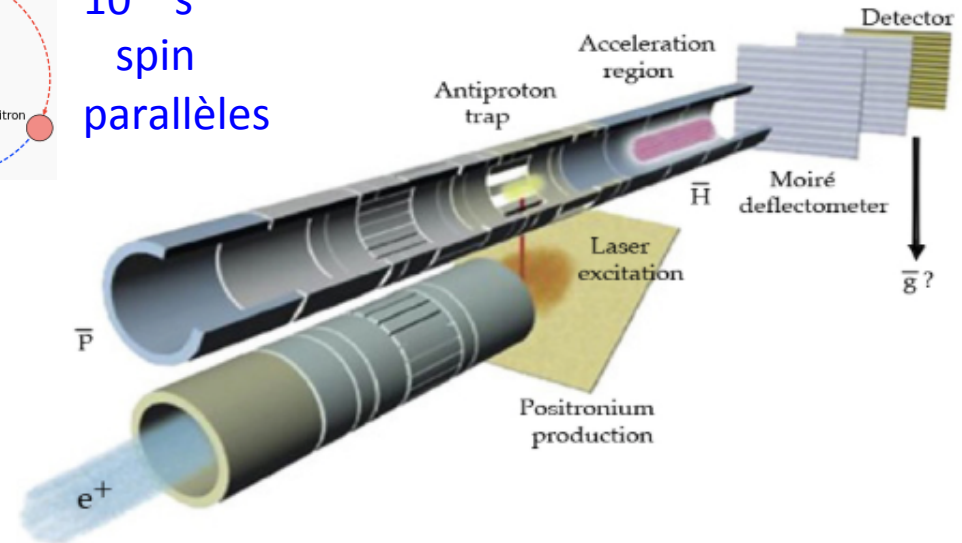
Schéma montrant la région où les atomes d'antihydrogène sont produits et capturés dans le dispositif de la collaboration ALPHA. IMAGE: Nature, copyright Macmillan Magazines 2010.

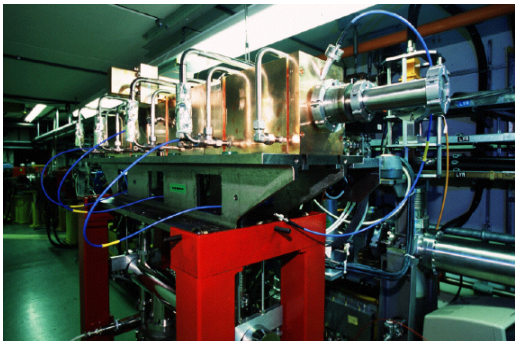
AEGIS

direct measurement of the Earth's local gravitational acceleration g on \bar{H}



10^{-7} s
spin
parallèles

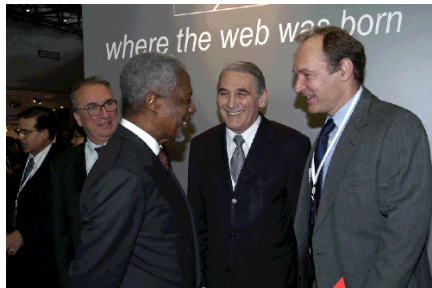
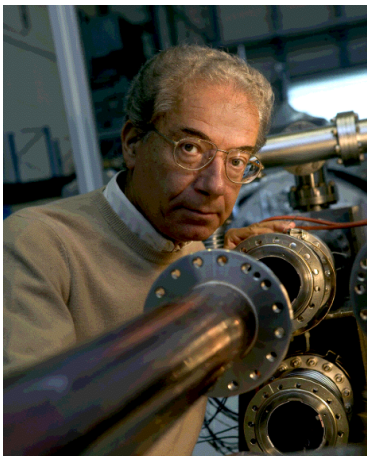




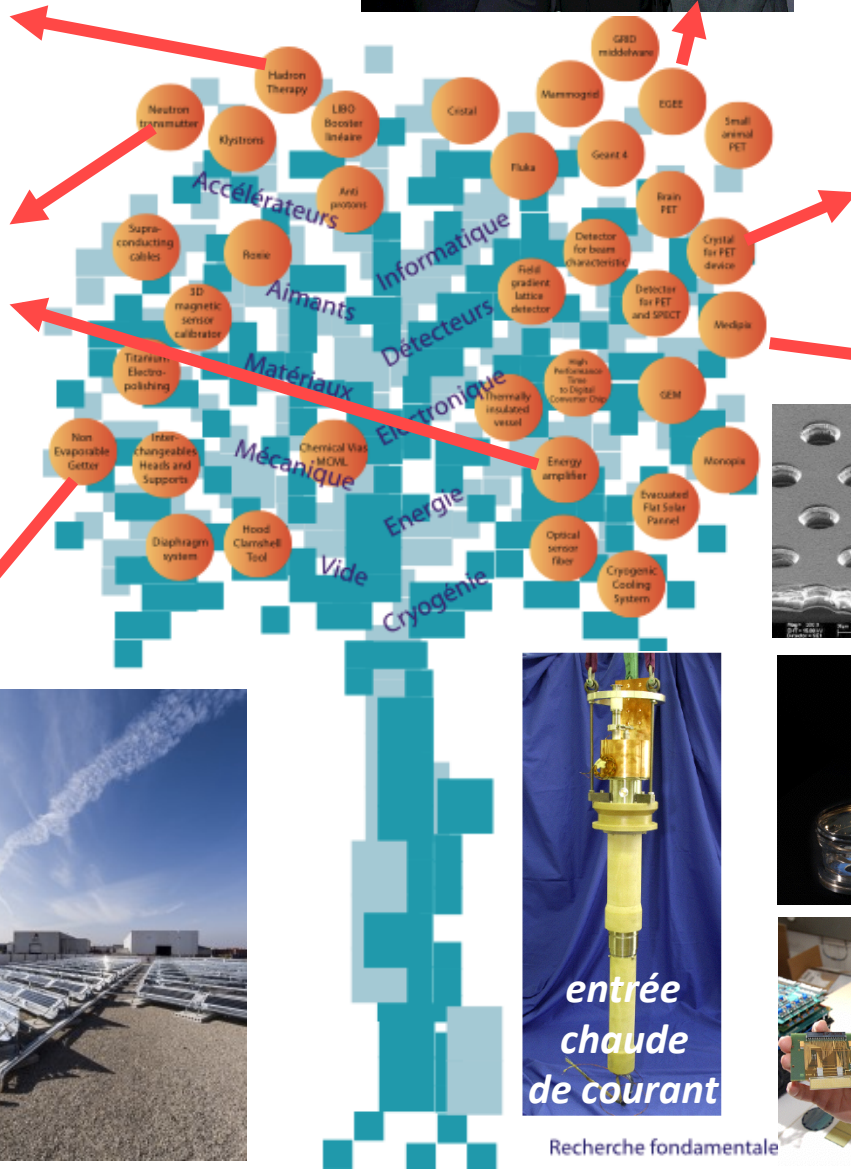
LIBO, pour hadrontherapie



*amplificateur d'énergie,
ADS
ultravide*



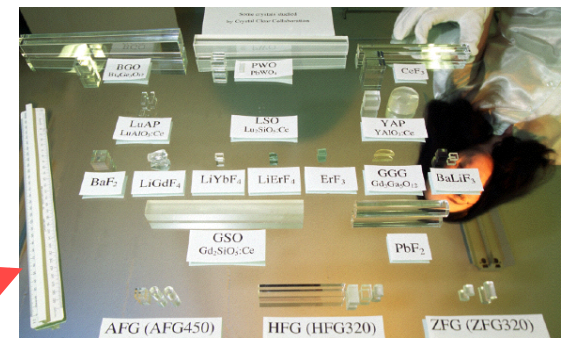
*le WEB,
puis la GRILLE
(LHCg, EGEE,
OpenLab)*



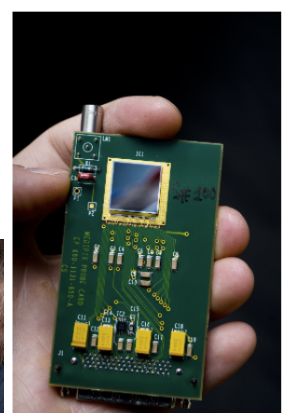
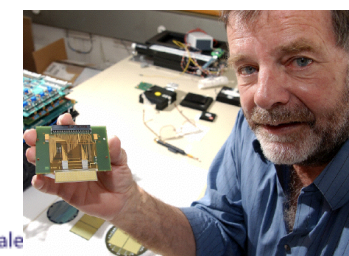
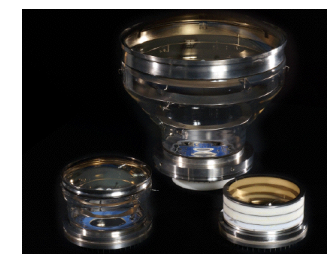
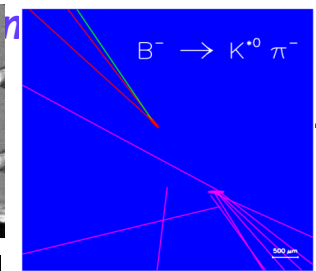
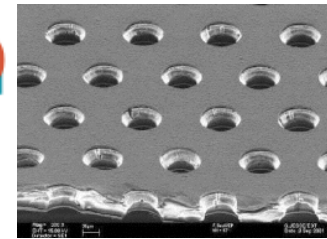
*entrée
chaude
de courant*

Recherche fondamentale

*de la détection de photon,
pour le boson de Higgs,
à la tomographie*

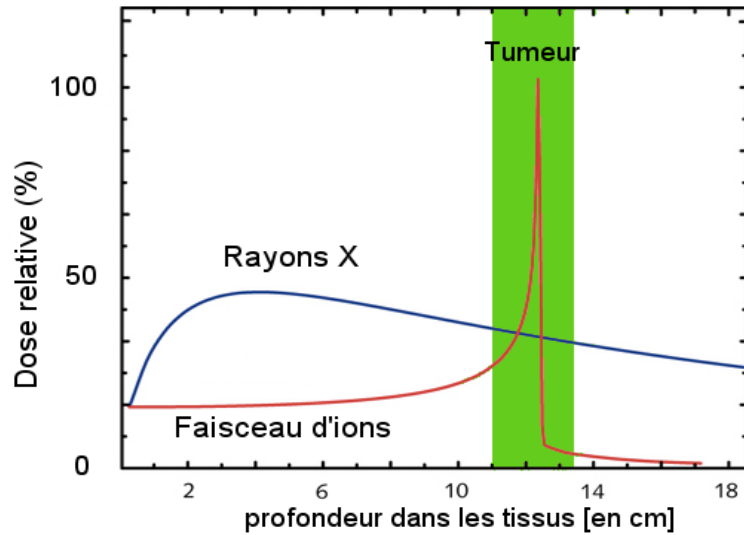


*du marquage de la beauté
à l'imagerie médicale*



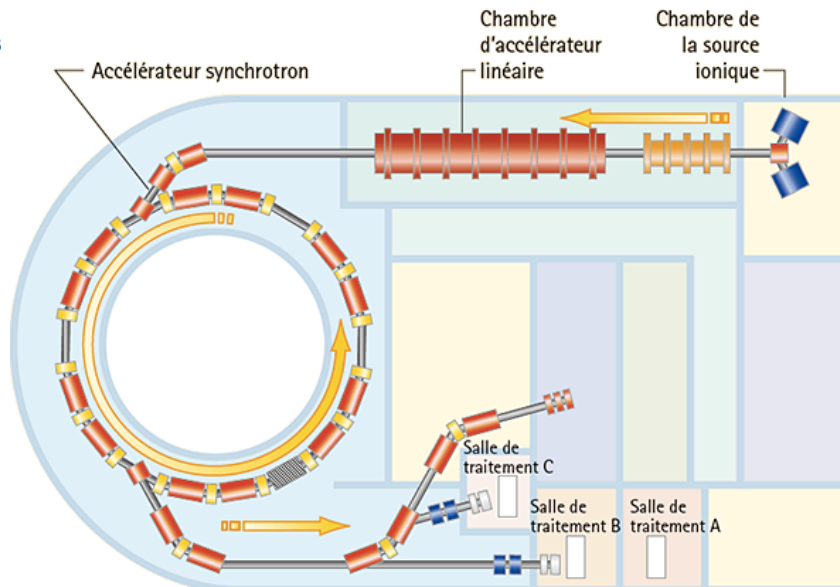
The Medipix chip, a CERN technology commercialised for different applications by 7 start-up companies.

hadronthérapie

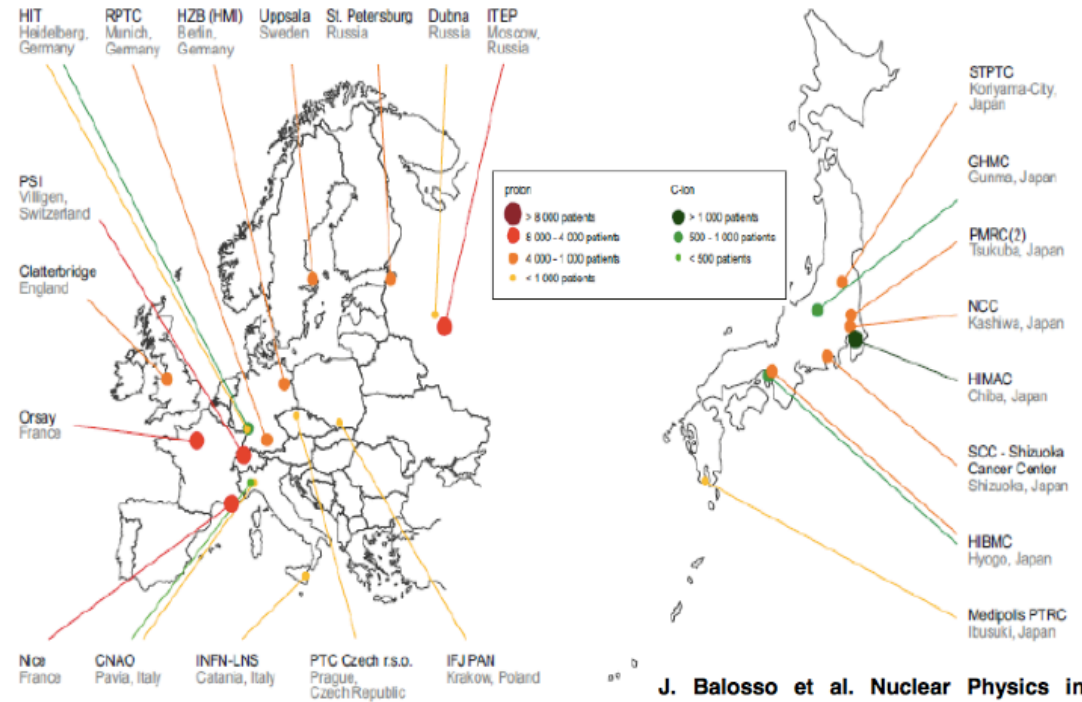


Clinical Indications for Hadron Therapy

- Particle therapy is effective in treating certain types of cancers as well as some non-cancerous tumors:
 - Brain tumors
 - Prostate cancer
 - Pediatric cancers
 - Head and neck tumors
 - Base-of-skull tumors
 - Tumors near the spine
 - Lung tumors
 - Breast cancers
 - Lymphomas
 - Testicular cancers
 - Esophageal cancers



*Proton & Carbon Ion facilities & Patient capacity in Europe- 17 & Japan- 10 in the of 2013):

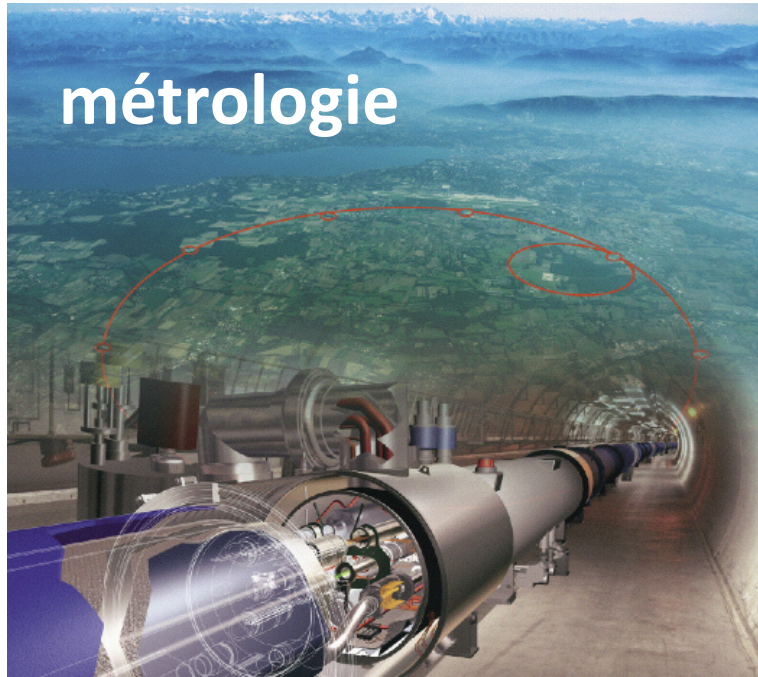


J. Balosso et al. Nuclear Physics in medicine – Chapter 1 – Hadrontherapy, 2013 (<http://www.nupec.org/NuclearPhysicsinmedicine>)



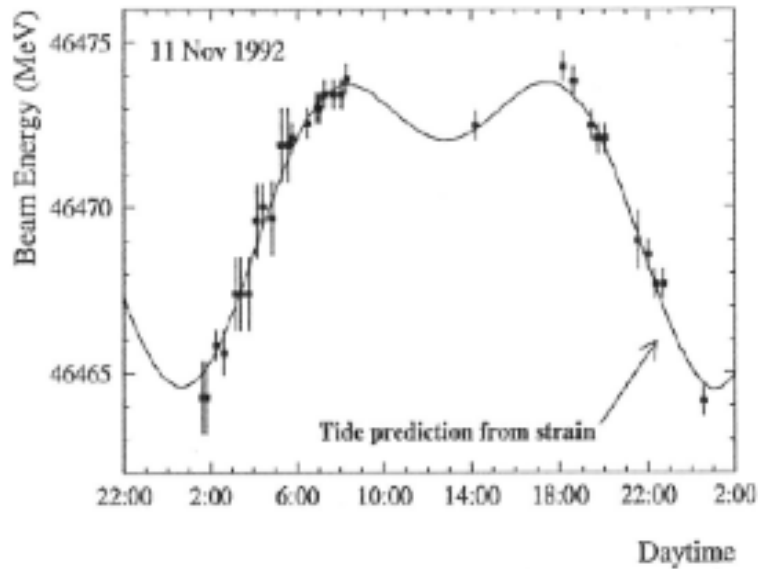
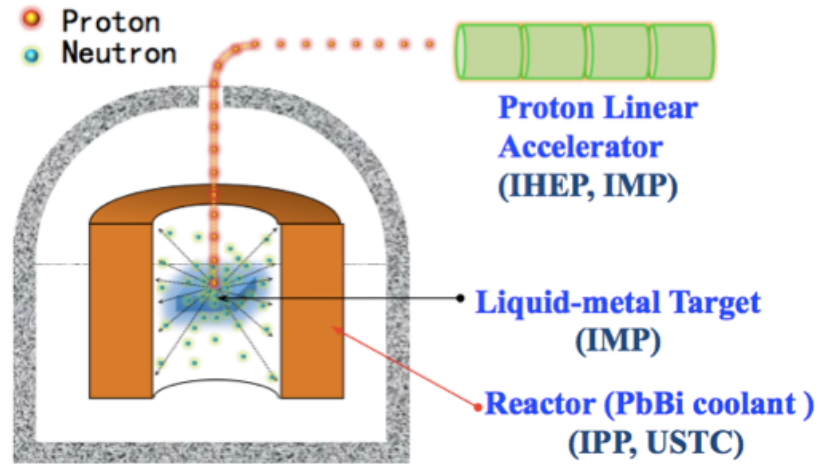
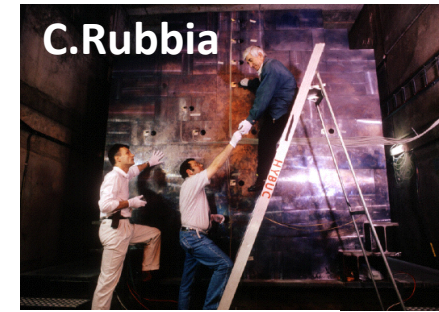
La salle traitement du CNAO (Image: CNAO)

accélérateurs



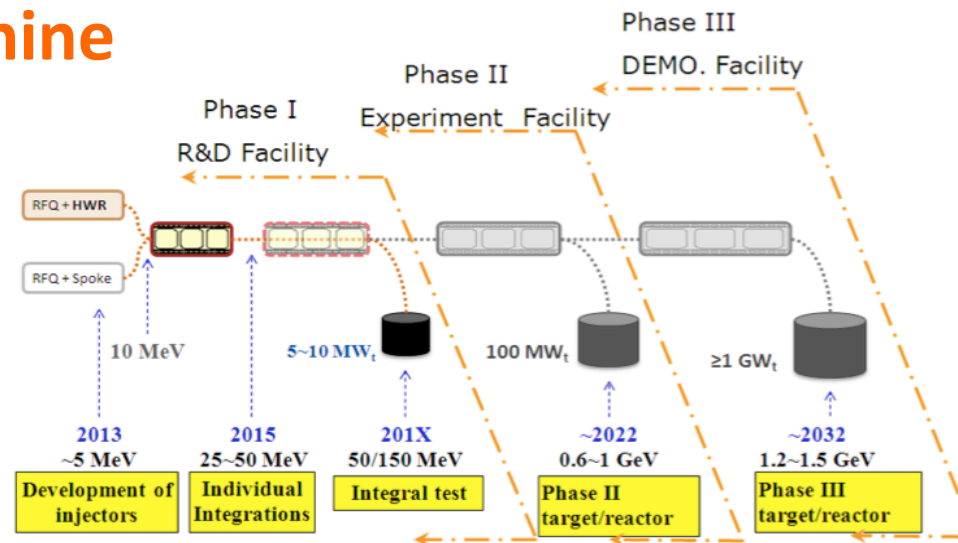
amplificateur d'énergie

réacteur non-critique
contrôlé par accélérateur



Roadmap of C-ADS program

Chine





IBM709 (1960)



Le CRAY (1988)

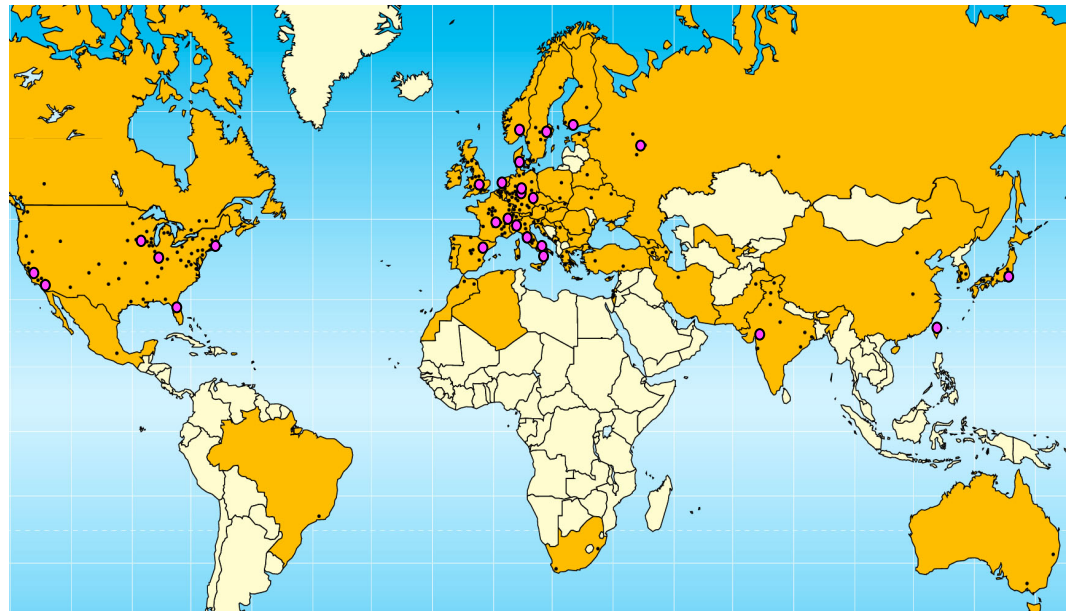


maintenant

D. Williams performance CPU/prix $\times 80\,000\,000$ en 40 ans connectivité externe: de kbps vers 1980 à probablement 100 Gbps au temps du LHC

Du WEB au GRID

LCG prototype service (2003-05)



CERN Computing Center



Data Storage



Internet Exchange Point

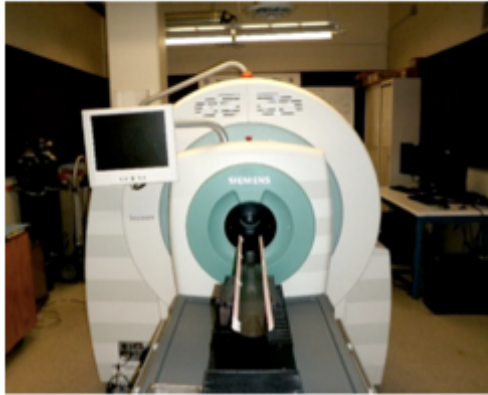


Computing Power	http://sls.cern.ch/sls/service.php?id=dcbynum <ul style="list-style-type: none">- Processors: 17.000- Cores: 85.000
Storage	http://castorold.web.cern.ch/castorold/global_statistics.png http://sls.cern.ch/sls/service.php?id=dcbynum <ul style="list-style-type: none">- Tape: 90 PB- Disk: 120 PB
WLCG grid	http://wlcg.web.cern.ch/ <ul style="list-style-type: none">- 157 sites: CERN + 11 Tier 1 sites + 145 Tier 2 sites- Sites from two main grid infrastructures : European EGI + US OSG- 6000 LHC experiment users worldwide: 40M jobs a month average- 20 PB of data in 2011 + 30 PB of data in 2012- Full copy of data at CERN + replication in 11 Tier 1 sites- CERN grid users consume 99% of CERN resources.- CERN provides 33% of the total resources used by EGI grid users.

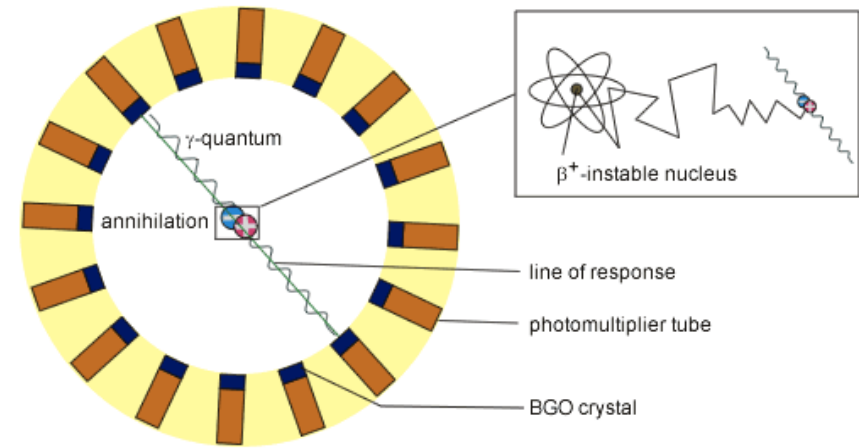
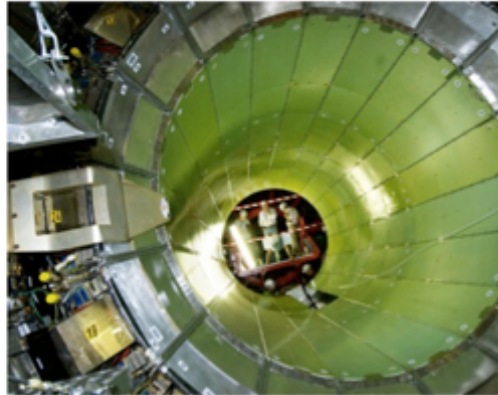


De L3 ou CMS à la tomographie par émission de positrons

Inveon preclinical PET scanner



CMS ECAL barrel



many more similarities than it might look at first glance !



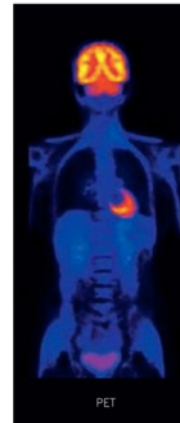
Une meilleure résolution en temps peut aider

Combining PET with MRI - part 1

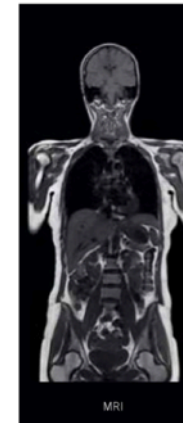
PET
map of radioactive tracer concentration
functional
excellent sensitivity
molecular information

MRI
map of the local transverse magnetization of the H nuclei
morphological
excellent resolution
soft tissue contrast

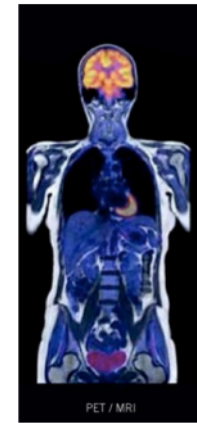
PET/MRI



+



=



PET is potentially quantitative !

Chiara Casella, ETH IPP - CHIPP Annual Meeting - 30.06.2015

- 5

PMT
high gain
good timing
not MR compatible



APD (Avalanche Photo Diodes)

insensitive to magnetic field / compact / low gain
=> worse timing perms
=> need of very low noise FE electronics



SiPM

insensitive to magnetic field / compact
gain ~ PMT
excellent timing

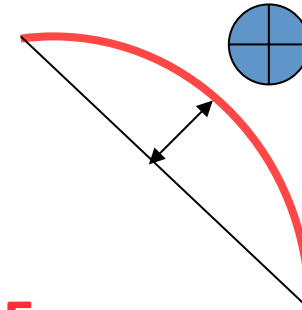
Pourquoi si grand?

On veut atteindre la plus haute énergie possible pour produire les particules nouvelles éventuelles les plus lourdes et pour obtenir les plus petites longueurs d'onde afin de sonder le plus fin possible.

Il faut courber les trajectoires par des champs magnétiques

rayon de courbure $\sim E / B$

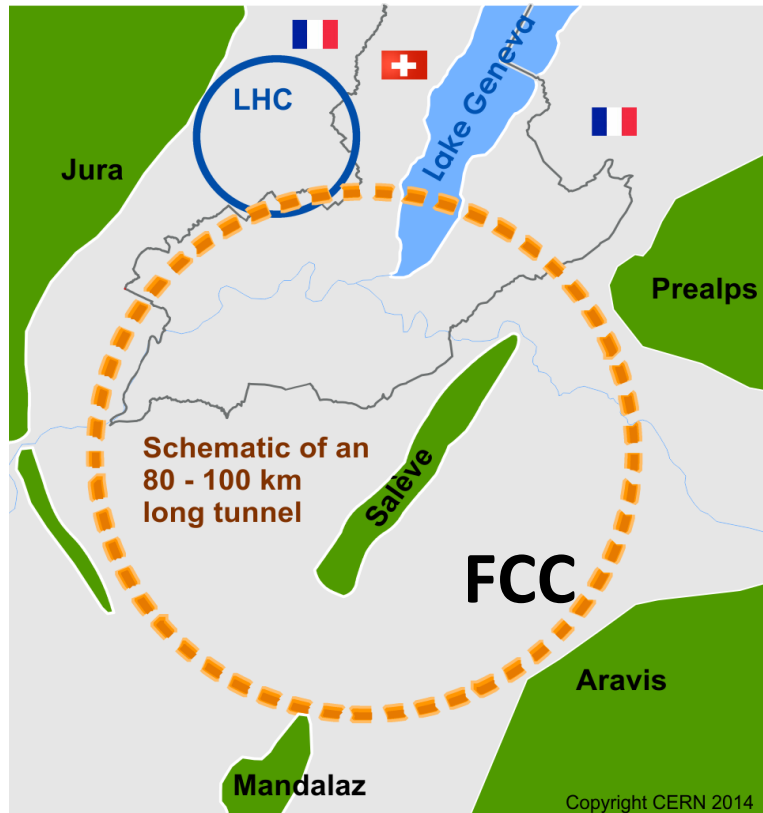
angle de déviation $\sim B L / E$ flèche $\sim L^2 B / E$



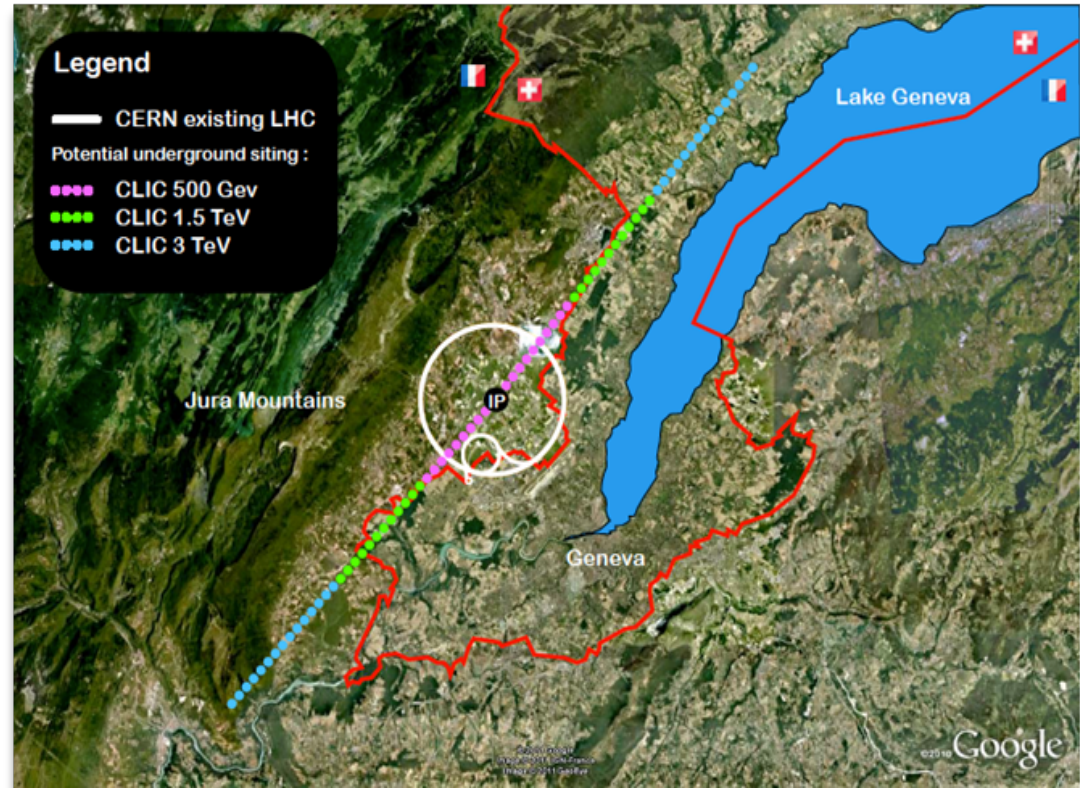
A présent il est impossible d'obtenir plus que 10 Tesla dans les aimants de la machine. Donc il faut que l'anneau ait un grand rayon.

Il est impossible d'obtenir plus de 2 à 4 Tesla dans les aimants des expériences. Il est également impossible de mesurer la flèche d'une trajectoire à mieux que 100 microns environ. Donc une mesure précise de l'énergie réclame une grande longueur de champ magnétique, et par conséquent des détecteurs de grand rayon.

un anneau de 100 km de tour permettant des collisions proton-proton jusqu'à 100 TeV
challenge: aimants de 15-20 T
 e^+e^- jusqu'à 350 GeV (Usine à Higgs)

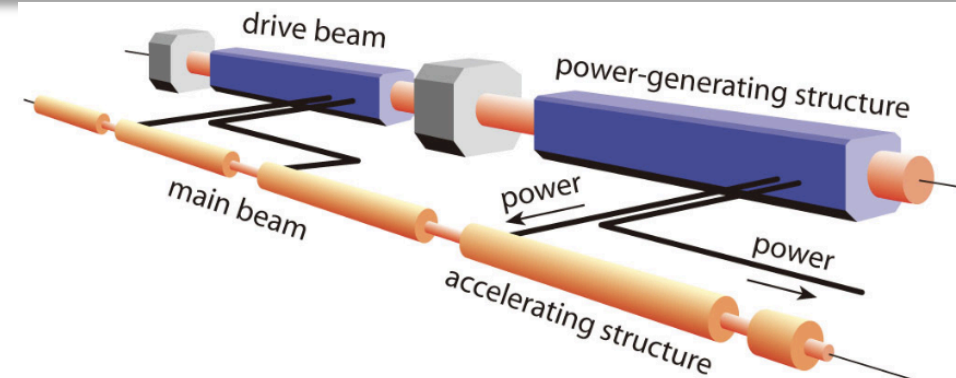


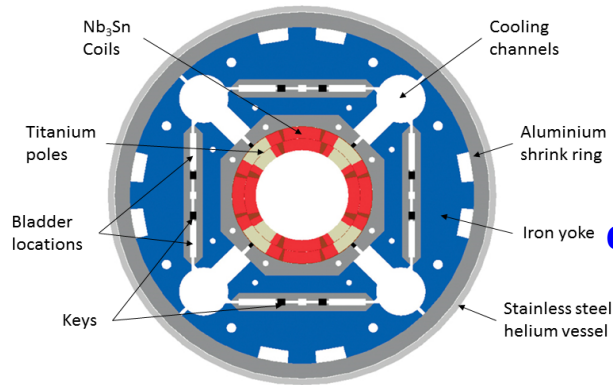
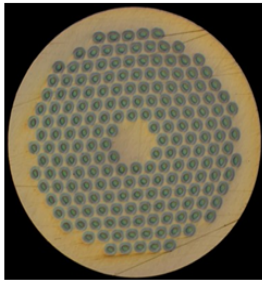
Un collisionneur linéaire électron-positron jusqu'à 3 TeV CLIC
 challenges: 100 MV par mètre
 collisions au nanomètre



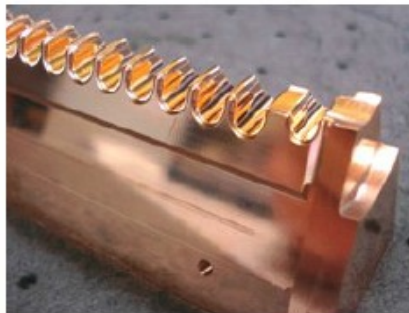
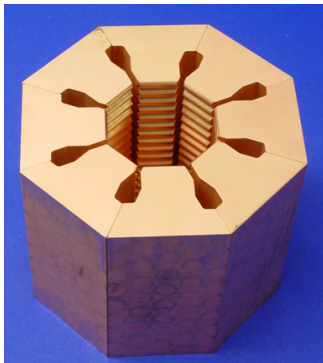
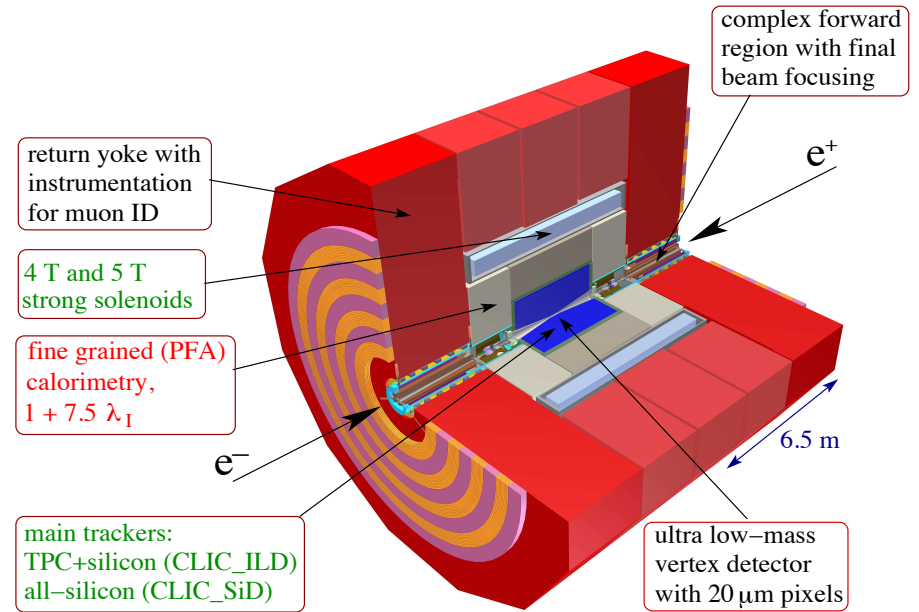
une découverte de nouvelle physique au LHC aiderait...

*résonance à 750 GeV en 2 photons?
 rendez-vous dans 1 an*



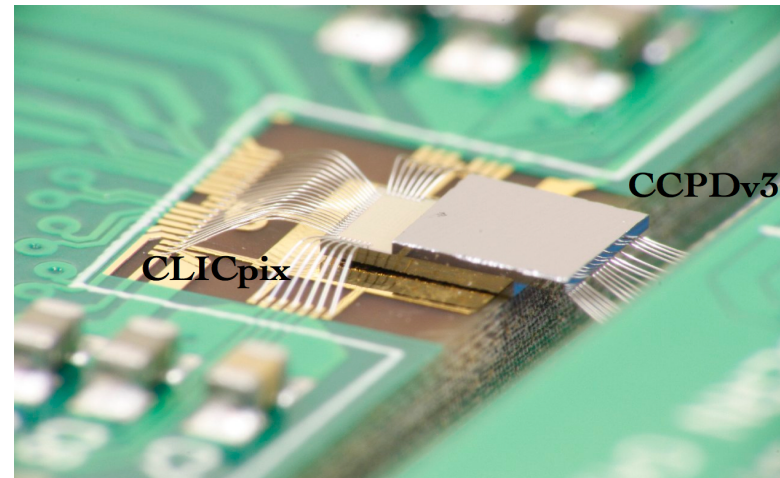


FCC
 passer au
 niobium-étain
 et supra chauds



CLIC
 Cavités
 accélératrices
 à 12 GHz

détecteurs très ambitieux...



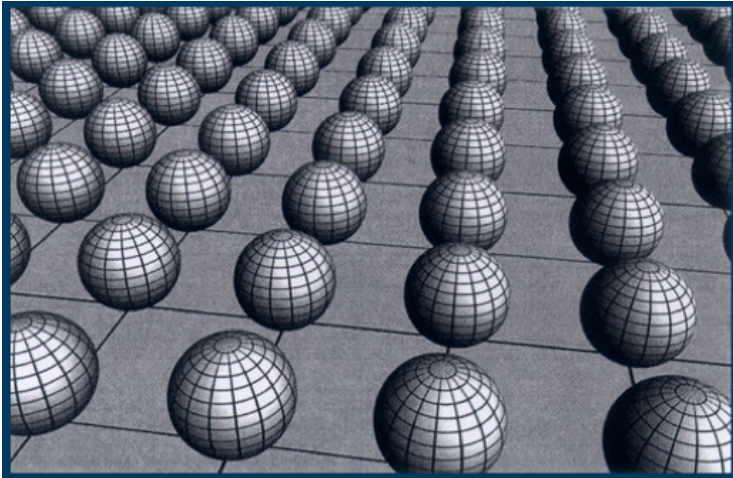
Conclusions personnelles

Le CERN et ses grandes machines, dont le LEP et le LHC, doivent leur succès à:

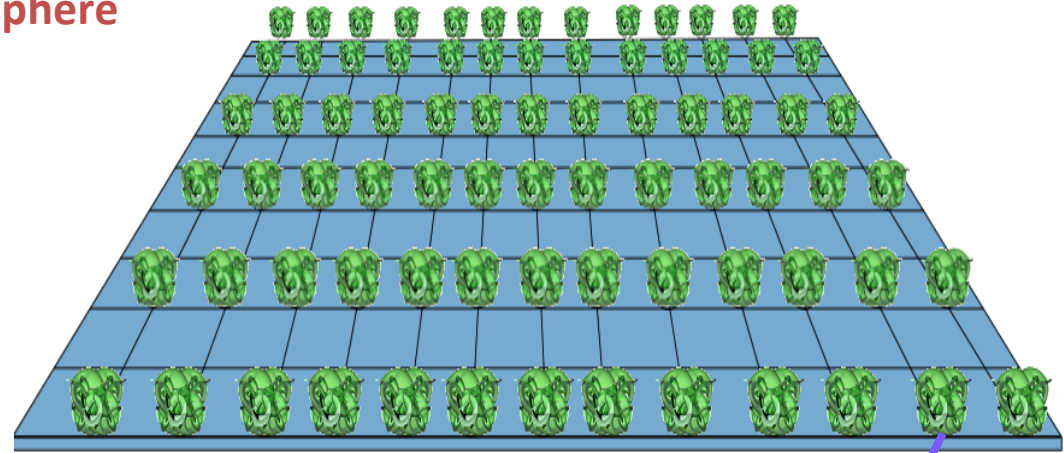
- une définition intelligente des règles: finacement stable, juste retour “modéré”
- 60 ans de progrès régulier, continu et soutenu
- une variété de compétences “à la maison”
ne pas abuser de la sous-traitance
- de bons rapports avec les mondes industriel et universitaire
- de la vision à très long terme e.g. séquence LEP-LHC dans le même tunnel
- la réutilisation/amélioration des machines et des infrastructures
- des programmes scientifiques jugés par des comités à *Peer reviews*
- des programmes vigoureux et quasi permanents de R&D
*ex.1987 LHC doit avoir 10 fois plus de luminosité que prévu jusque là
d'où très gros programme de R&D machine et détecteurs*
- le fait que les dernières en date des grandes machines mondiales sont au CERN

Bien sûr le mérite est largement celui des instituts et des scientifiques extérieurs qui sont les principaux acteurs des expériences menées au CERN

L'Europe (et les pays hôtes) doivent bien réaliser ce qu'est le CERN



sphère



espace à 7 dimensions

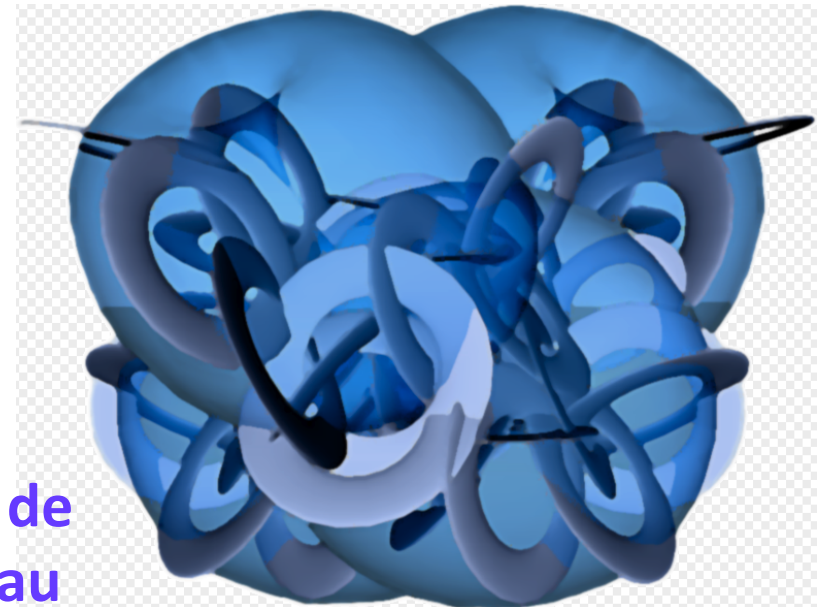
A chaque point de l'espace-temps,
attacher un espace supplémentaire



vue d'artiste



variétés de
Calabi-Yau



une conjecture audacieuse: le monde comme hologramme?

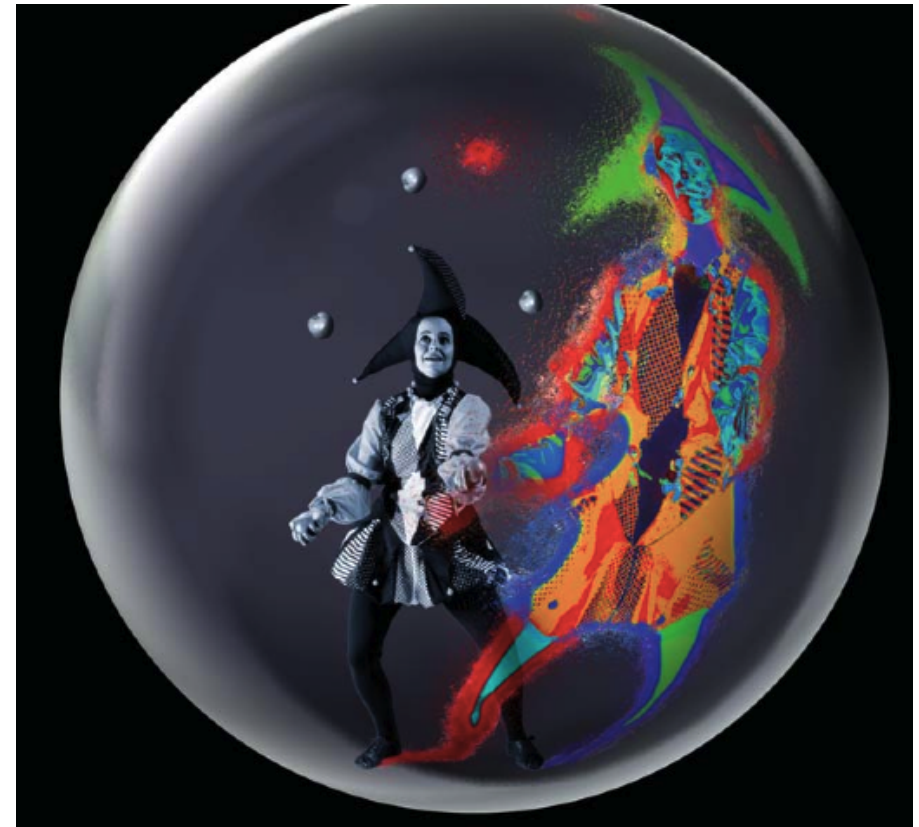
J.Maldacena, Scientific American, nov 05

La Théorie Holographique relie un ensemble de lois physiques agissant dans un volume à un autre ensemble de lois physiques agissant sur la surface qui borde ce volume.

Les lois de surface impliquent des particules quantiques ayant des charges de “couleur” et interagissant à peu près comme les quarks et gluons de la physique des particules standard.

Les lois de volume sont une forme de la théorie des cordes et incluent la gravité, difficile à décrire en terme de mécanique quantique.

En dépit de leurs descriptions radicalement différentes, la physique sur la surface et celle de l'intérieur sont complètement équivalentes



espace
“anti-de-Sitter”
(projeté)

l'espace-temps à
courbure négative
le plus simple

