

Lac Léman

Les Alpes

Genève



# LE CERN ET LE LHC

MasterClasses 2023 au Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire

Le Jura

N. Arnaud, F. Machefert, P. Roudeau, P. Puzo et B. Viaud

- 1) Pourquoi des accélérateurs ?
- 2) Le CERN
- 3) Les grandes dates du CERN
- 4) Le LHC
- 5) Les retombées pour la société

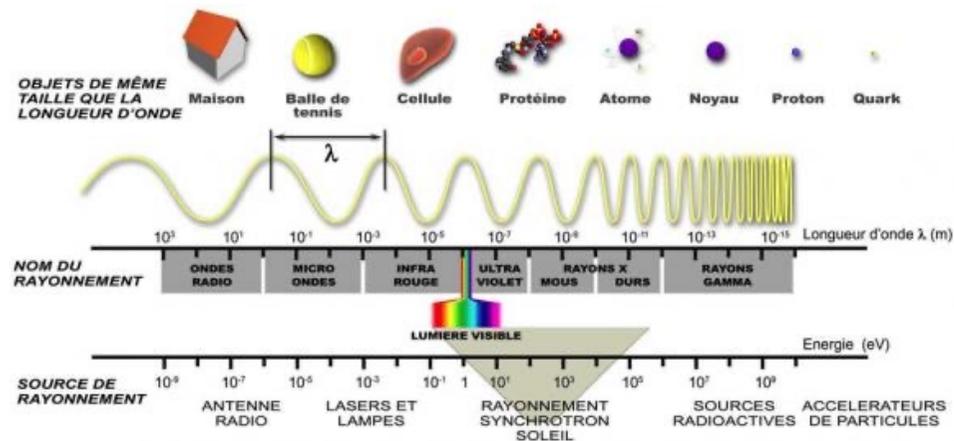
Certains de ces transparents ont trouvé leur inspiration dans une présentation du Prof. Dr Christoph Schäfer (CERN International Relations Office)

- 1) Pourquoi des accélérateurs ?
- 2) Le CERN
- 3) Les grandes dates du CERN
- 4) Le LHC
- 5) Les retombées pour la société

# Pourquoi a-t-on besoin d'accélérateurs ?

- On veut voir des particules élémentaires très petites ( $< 10^{-18}$  m)
- On a besoin d'un microscope de très bonne résolution
- La résolution dépend de la longueur d'onde

Le spectre  
électromagnétique



- Il y a un lien entre la longueur d'onde de la lumière et l'énergie

# Pour des petites dimensions

- La physique quantique nous dit que :

Longueur d'onde de la lumière

Constante de Planck

Vitesse de la lumière

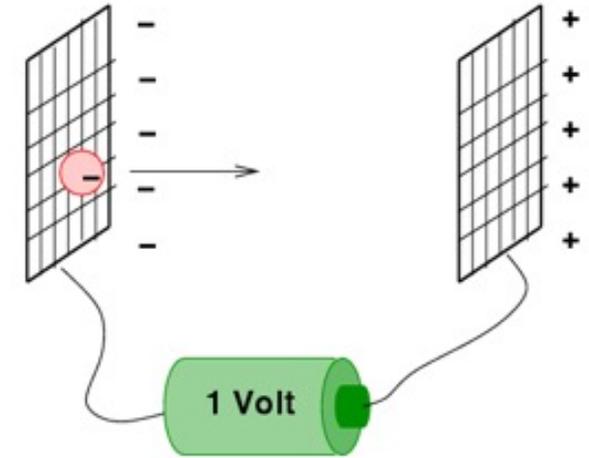
Energie du photon (photon = « particule » de lumière)

$$\lambda = \frac{h c}{E}$$

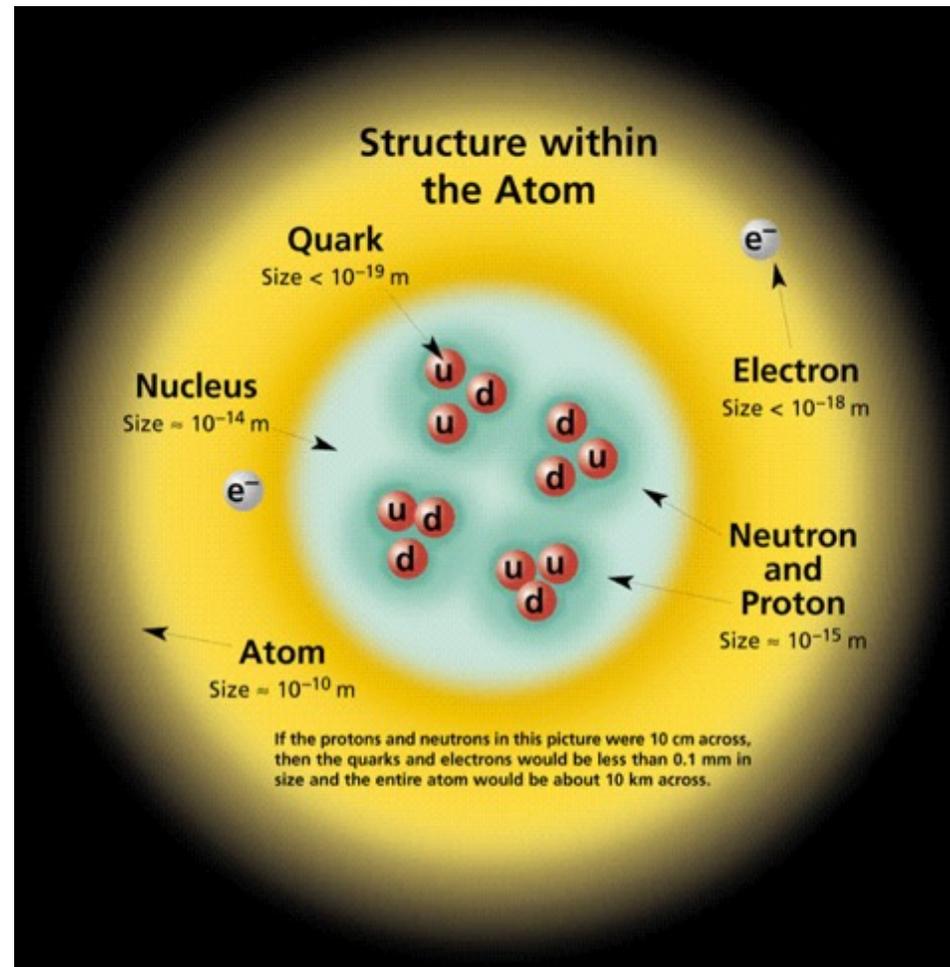
- En augmentant l'énergie on va diminuer la longueur d'onde
- La lumière visible correspond à une énergie de l'ordre de 1 eV

# Nos unités de mesure de l'énergie

- Par définition: l'énergie acquise par un électron qui voit une différence de potentiel de 1 V est 1 eV
- Donc  $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$
- L'eV est trop petit pour être utilisé, donc on en utilise des multiples :
  - $1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV}$ ,  $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ ,  $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$ ,  
 $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$



# La taille des constituants de ma matière



# De combien d'énergie a-t-on besoin ?

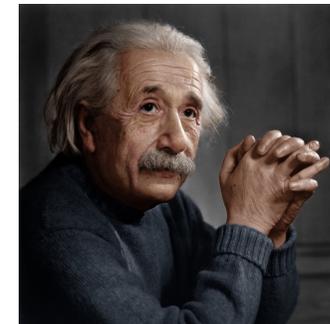
- Pour regarder des objets de  $10^{-18}$  m, il faut environ une énergie de 1 TeV

- Comment faire ?

- On utilise la formule d'Einstein

$$E = m c^2$$

- On convertit la matière en énergie

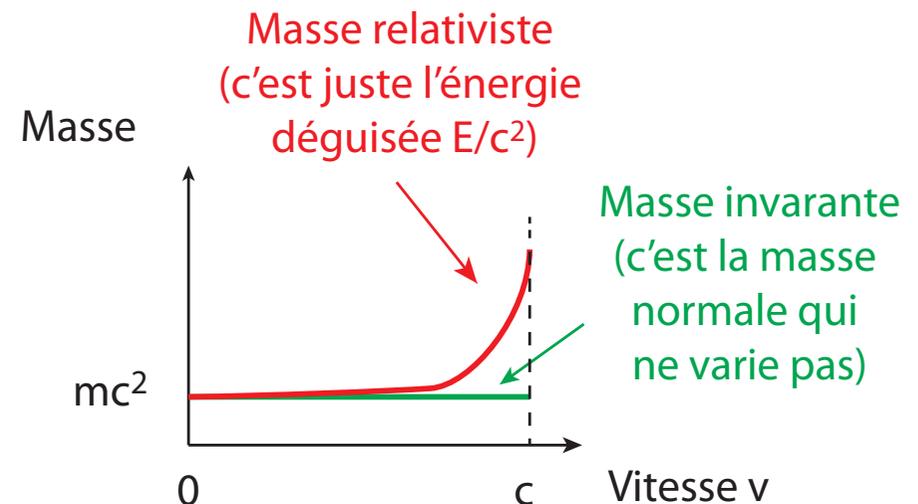


- C'est pour cela qu'on dit qu'un proton correspond à une énergie de 1 GeV

- Mais on a besoin de x 1000 plus d'énergie..

# Comment fait-on ?

- On crée de la matière à partir d'énergie
- Pour comprendre, on doit répondre à une question : qu'est-ce que l'accélération ?
  - Augmenter la vitesse ? **NON**
- D'après la théorie de la relativité, c'est augmenter l'énergie !
- Dans les accélérateurs, on augmente l'énergie des particules qu'on accélère
  - Donc elles deviennent plus lourdes !!



# Comment faire des collisions ?

« Cible fixe »



La plupart de l'énergie est perdue dans la cible

$$E_{total} \approx \sqrt{E_{faisceau}}$$

« Collisionneur »



Toute l'énergie est disponible pour la collision

$$E_{total} = 2 E_{faisceau}$$

C'est pourquoi on utilise maintenant des collisionneurs !

# Plan

- 1) Pourquoi des accélérateurs ?
- 2) Le CERN**
- 3) Les grandes dates du CERN
- 4) Le LHC
- 5) Les retombées pour la société

- **CERN** : Existe depuis 1952 : **C**onseil (puis Organisation) **E**uropéen(ne) pour la **R**echerche **N**ucléaire
  - Installé à Genève
  - Pas de recherche sur la bombe nucléaire ou les centrales nucléaires mais sur les processus physiques
  - Les résultats sont publics
- Missions :
  - **Recherche**: questions concernant l'Univers en utilisant des accélérateurs
  - **Technologie**: faire reculer les limites
  - **Collaborations**: rassembler les nations autour de la science
  - **Education**: formation des scientifiques

# Qui travaille au CERN ?

- Le Directeur Général (actuellement Mme Fabiola Gianotti) nommé pour 5 ans par le Conseil
- 2400 personnes, 1 milliard d'euros de budget annuel
- 23 états membres (votent au Conseil)  
Allemagne, Autriche, Belgique, Bulgarie, Danemark, Espagne, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Israël, Italie, Norvège, Pays-Bas, Pologne, Portugal, République slovaque, République tchèque, Royaume-Uni, Roumanie, Serbie, Suède, Suisse
- Les observateurs (assistent au Conseil)  
Commission européenne, Inde, Japon, Fédération de Russie, Turquie, UNESCO, États-Unis d'Amérique
- Les autres



10 000 visiteurs  
608 instituts, 113 nationalités

# Plan

- 1) Pourquoi des accélérateurs ?
- 2) Le CERN
- 3) Les grandes dates du CERN**
- 4) Le LHC
- 5) Les retombées pour la société

# Le fil conducteur

- Découvrir des particules toujours plus lourdes
- Etudier des interactions toujours plus rares
- Pour cela il faut :
  - Construire des accélérateurs toujours plus puissants (augmenter l'énergie) et toujours plus intenses (augmenter le nombre de collisions par seconde)
  - Construire des détecteurs de plus en plus sophistiqués
  - Acquérir et analyser toujours plus de données

# Les grandes dates du CERN

1954

Création du CERN

1957

1<sup>er</sup> accélérateur (SC) à 0,6 GeV  
fonctionne jusqu'en 1990

1959

Démarrage du PS (protons à  
28 GeV)



Le Synchrocyclotron (SC)

Vue du CERN en 1964



Le Proton Synchrotron (PS)

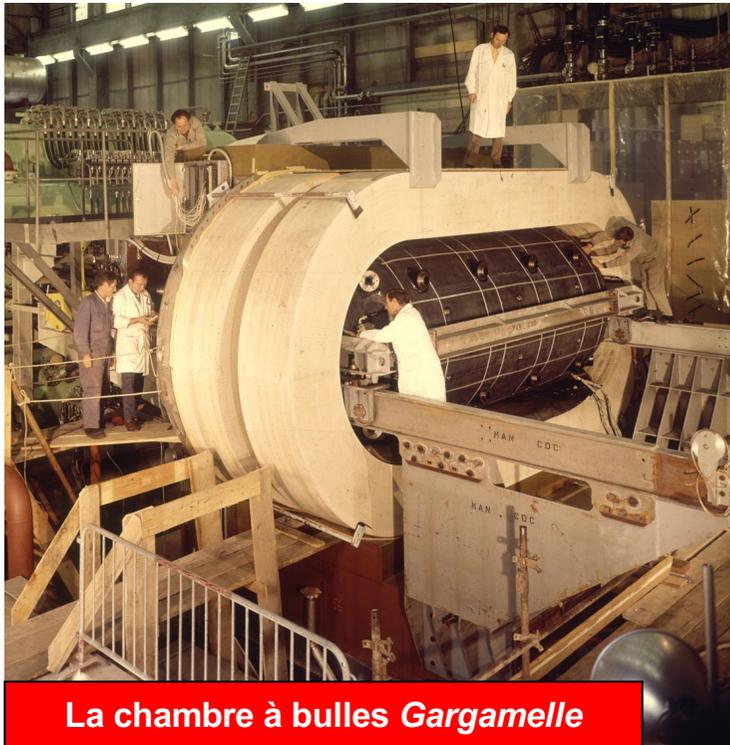
# Les grandes dates du CERN

1971

ISR : premier collisionneur proton-proton au monde

1973

Découverte des “courants neutres” : unification de l'électromagnétisme et de la force faible

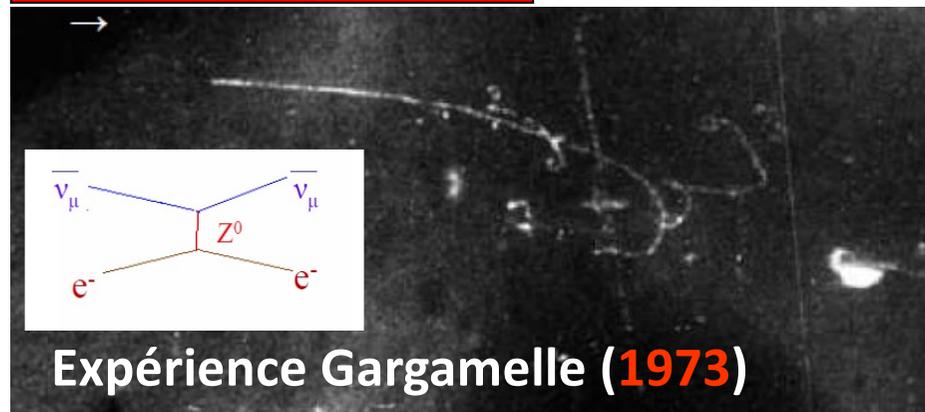


La chambre à bulles *Gargamelle*



A. Lagarrigue (1924-1975)

Photo de la réaction  $\bar{\nu}_\mu e \rightarrow \bar{\nu}_\mu e$



Expérience Gargamelle (1973)

# Les grandes dates du CERN

1976

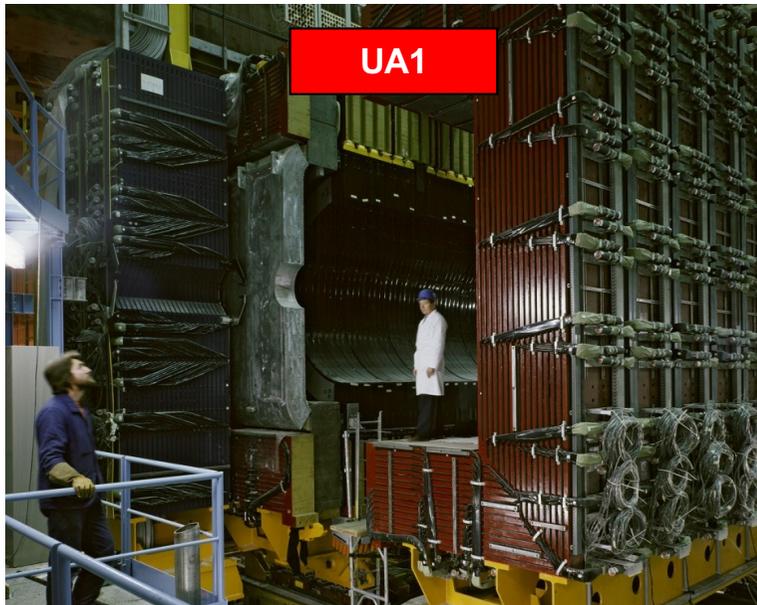
Démarrage du SPS : collisionneur de protons (450 GeV) reconverti à partir de 1979 en collisionneur proton-antiproton

1983

Les expériences UA1 et UA2 y découvrent les particules médiatrices de la force faible:  $W^\pm$  et  $Z^0$

1985

Prix Nobel de physique à C. Rubbia et S. Van der Meer



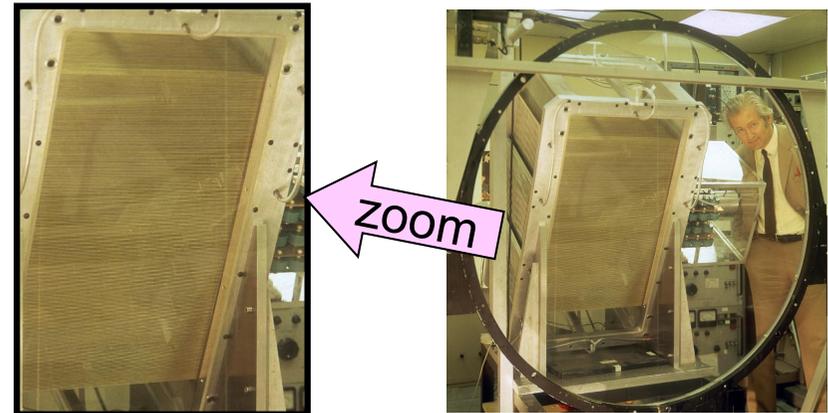
# Les grandes dates du CERN

1970's

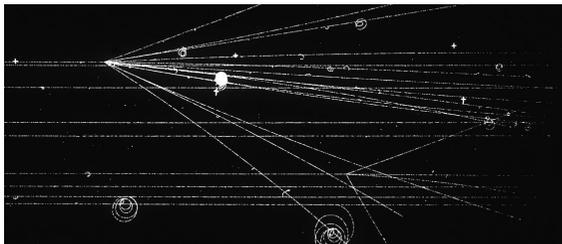
Saut technologique : G. Charpak invente la chambre à fils

1992

Prix Nobel de physique à G. Charpak



Avant: Analyse de photos



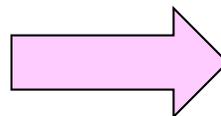
Interactions de protons du PS avec de l'hydrogène (1960)

Après: reconstruction électronique et informatique



Boson vecteur dans UA1 (80s)

Ère manuelle



Ère électronique (au moins 1000 fois plus rapide)

# Les grandes dates du CERN

1985

Début du creusement d'un tunnel de 27 km pour un nouveau collisionneur électron-positron : le LEP

1989-2000

Fonctionnement du LEP (50 puis 100 GeV) : 4 expériences étudient les propriétés du  $Z^0$  et des  $W^+/W^-$



2001 : collaboration Delphi devant le détecteur

1990

La gestion des données prend un nouvel essor : invention du Web par T. Berners-Lee

2017

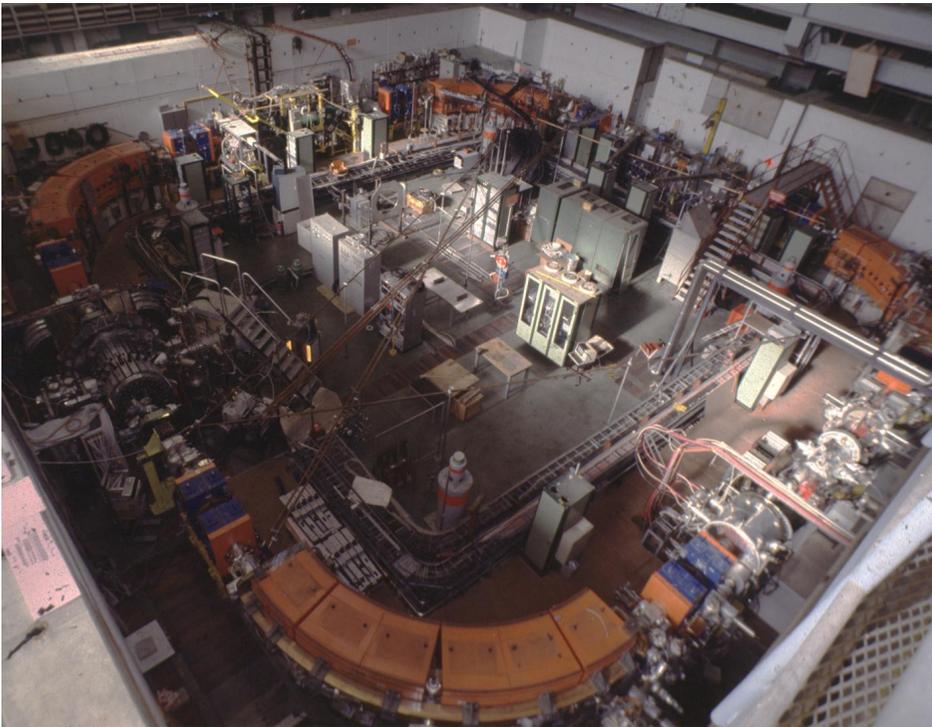
Prix Alan Turing à T. Berners-Lee



# Les grandes dates du CERN

1990's

Des technologies de mieux en mieux maîtrisées pour contrôler aussi des particules de basse énergie



L'anneau LEAR d'antiprotons à basse énergie

1995

Premiers atomes (9)  
d'anti-hydrogène

2002

Des milliers d'atomes  
d'anti-hydrogène

# Les grandes dates du CERN

2008

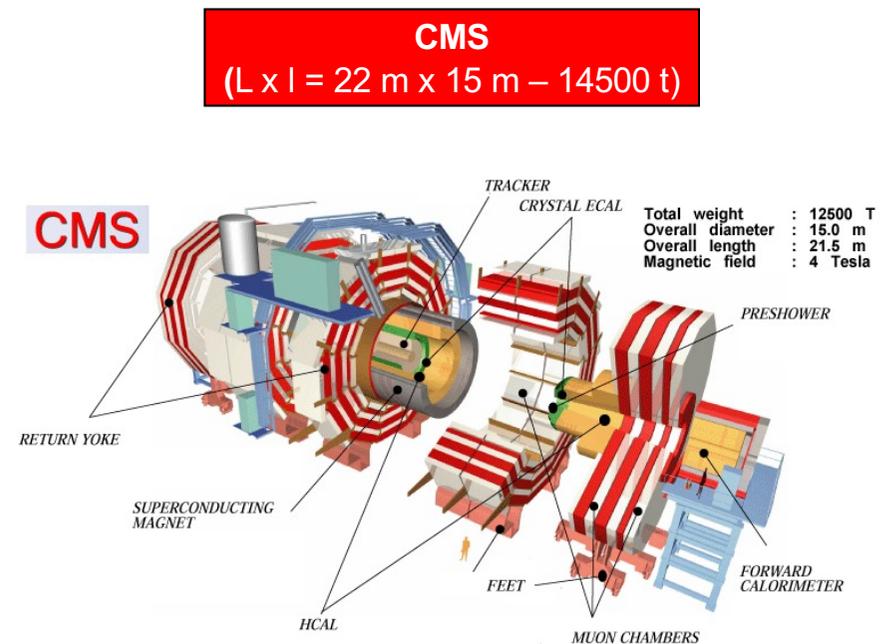
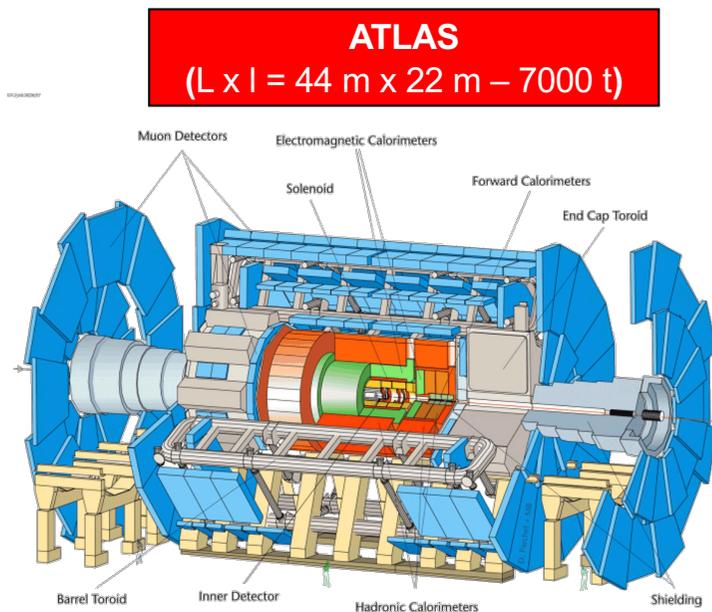
Démarrage du LHC : collisionneur de protons

2012

Les expériences ATLAS et CMS y découvrent le boson de Higgs

2013

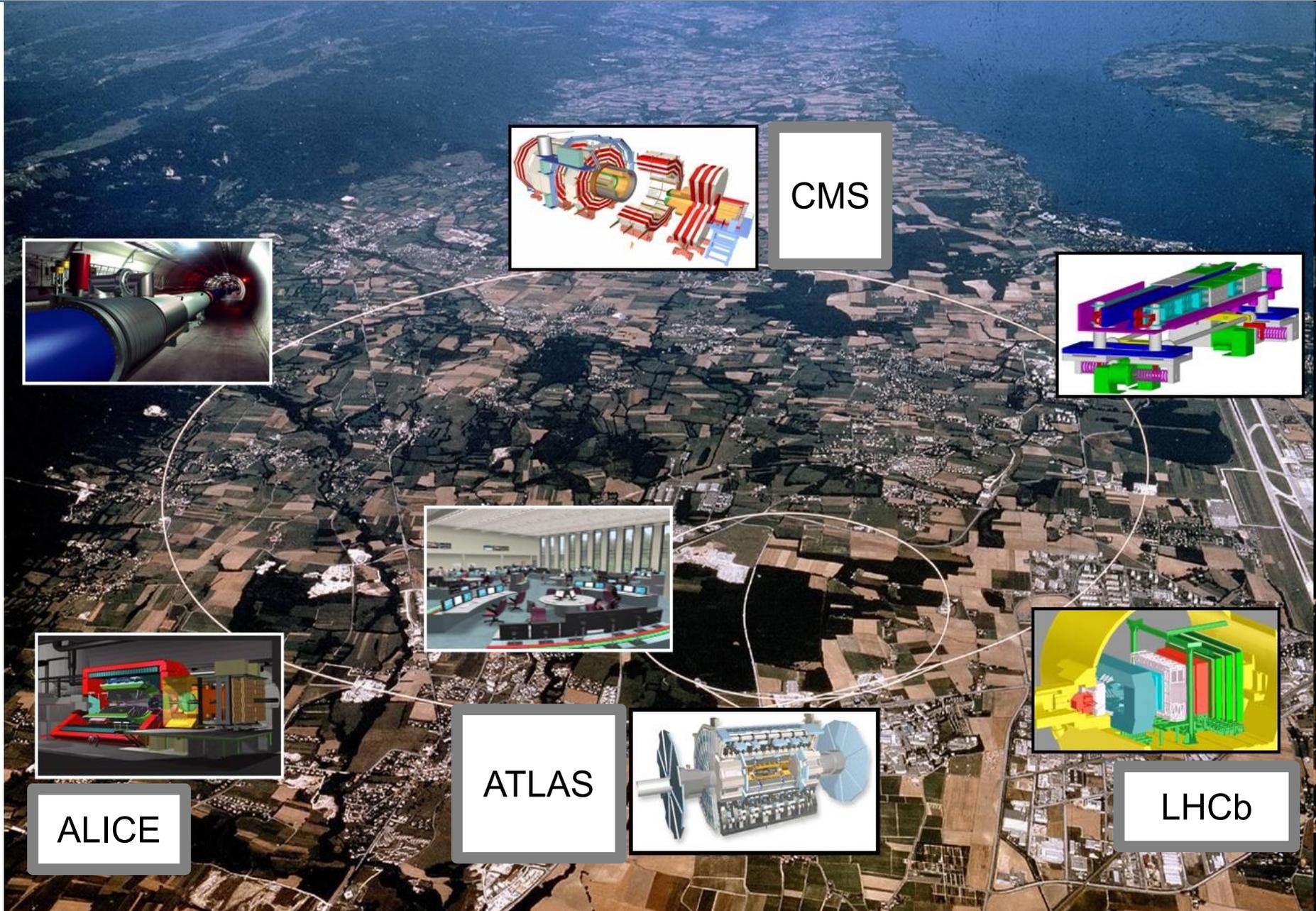
Prix Nobel de physique à P. Higgs et F. Englert



# Plan

- 1) Pourquoi des accélérateurs ?
- 2) Le CERN
- 3) Les grandes dates du CERN
- 4) Le LHC**
- 5) Les retombées pour la société

# Les grandes dates du CERN : le LHC en 2008



# La conception du LHC

Construit dans un tunnel de 27 km, ~5 Milliards d'Euros.



Conçu dans les années 80,  
approuvé en 1994, sa  
construction débute en 1998.

Collisionneur proton-proton de 7 TeV,  
supraconducteur  
(-271,3° C, **plus froid que le vide spatial**)  
très intense  
(600 millions de collisions par seconde)

Consommation électrique: 120 MW  
(équivalente à celle d'une ville de 150 000 hab.)



# Fonctionnement du LHC : la chaîne d'accélération



**Booster**

**PS**

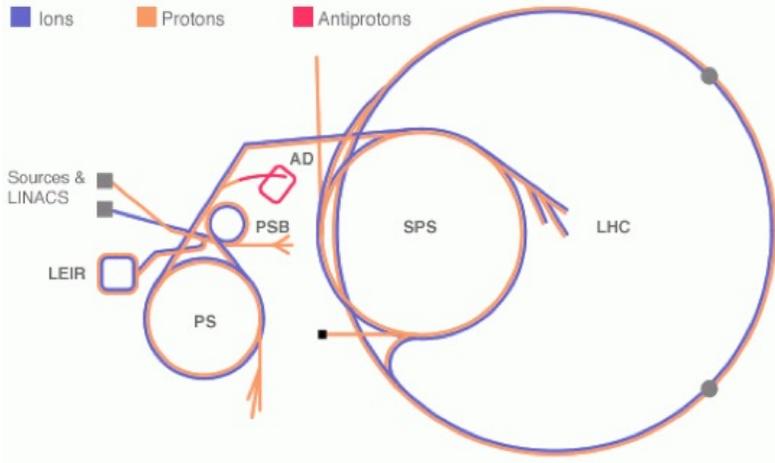
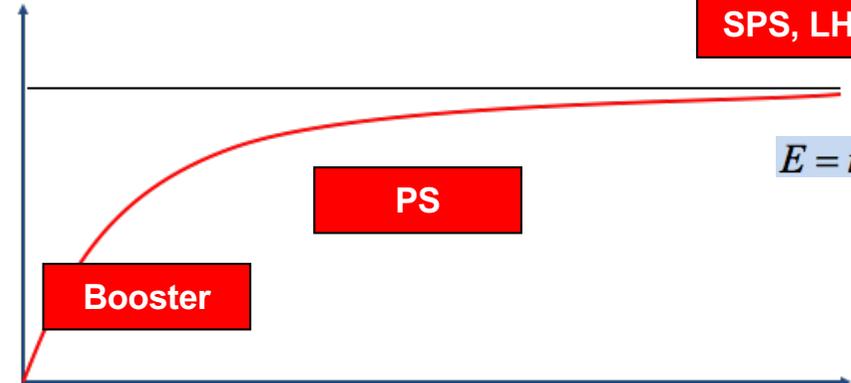
**SPS**

**LHC**

Tout démarre de là ..

Vitesse

Vitesse de la lumière



Newton

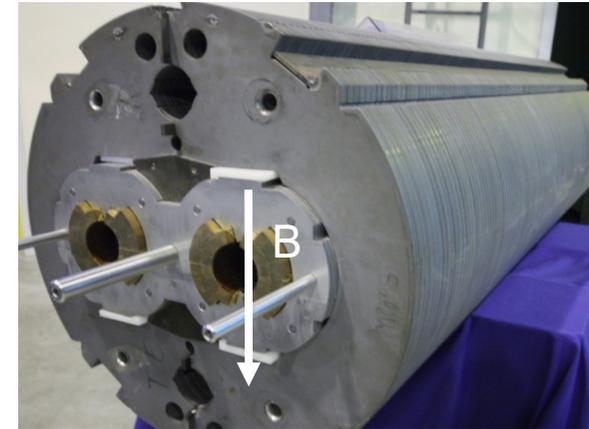
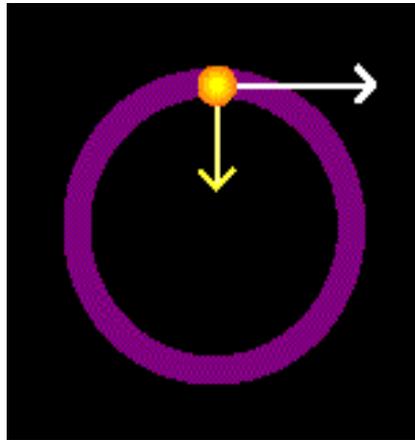
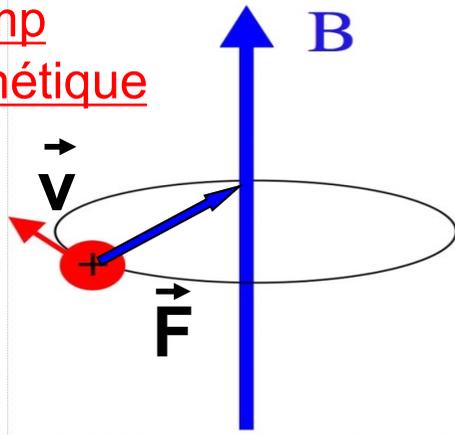


Einstein

# Il faut guider et accélérer les protons

## Champ magnétique

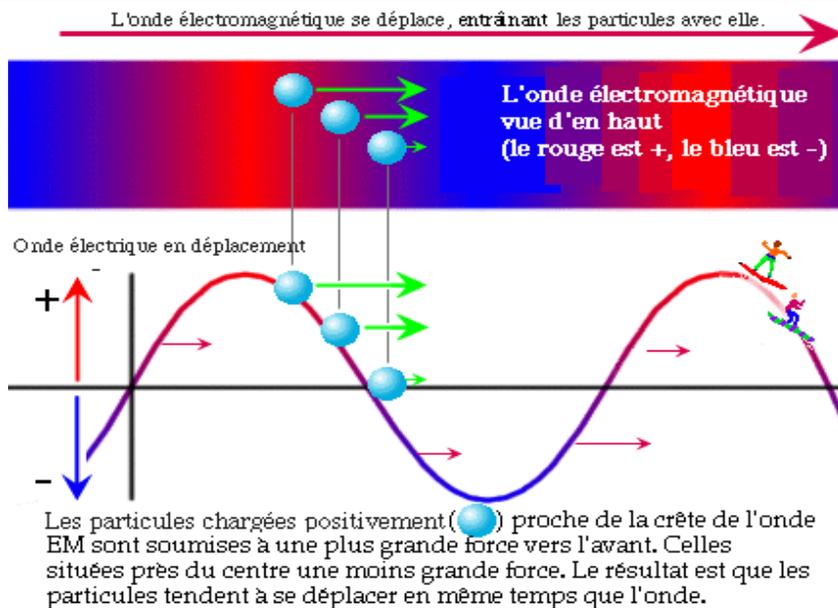
Guidage



Dans un champ B, les particules suivent une orbite circulaire, mais ne gagnent pas d'énergie

## Champ électrique

Accélération



Les particules gagnent 16 MeV par passage (11000 passages par seconde)

# Le faisceau du LHC

2600 paquets contenant chacun 100 milliards de protons.

Chaque paquet est séparé de ses voisins immédiats par au moins 7 m

A notre échelle, l'énergie d'une particule est très faible :

**Exemple d'une abeille** lancée à pleine vitesse (1 g à 1 m/s) :

$$E_{\text{Abeille}} \sim 10^{-3} \text{ J}$$

**Exemple du LHC** : l'énergie d'une collision est :

$$E_{\text{LHC}} = 6,5 \text{ TeV} + 6,5 \text{ TeV} \sim 2.1 \times 10^{-6} \text{ J}$$

sur une surface infime  $10^{-30} \text{ m}^2$

**$\sim 10^{24} \text{ J/m}^2$  : considérable**

Énergie totale des faisceaux :

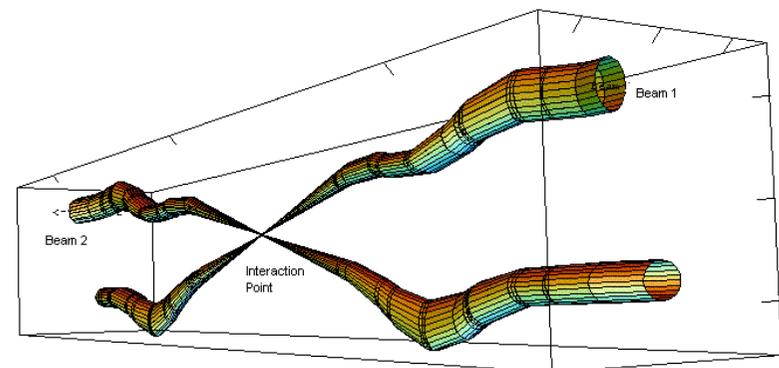
$6,5 \text{ TeV} \times N_p \sim 650 \text{ millions de Joules}$

$\sim 1 \text{ TGV à } 160 \text{ km/h}$

Paquets : quelques cm de long transversalement  $\sim \text{mm}$

Taille transverse au point de collision (expériences) :  $16 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$

**$\sim$  diamètre d'un cheveu**



Relative beam sizes around IP1 (Atlas) in collision

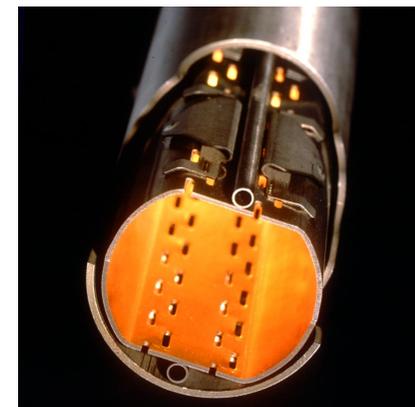
**Croisement des faisceaux à un point de collisions**

# Le LHC en chiffres

- La plus grande machine du monde (9300 aimants, 10000 t d'azote, 120 t d'Helium) → le plus grand frigo de la planète
- Les protons effectuent 11245 tours de la machine par seconde (vitesse  $\sim 99.999993\%$  c)
- Vide très poussé à l'intérieur de la chambre à vide (1/10 de la pression sur la lune)
- On y trouve les points les plus “chauds” (100000 fois la température interne du soleil) dans un espace minuscule et dans un anneau plus froid que le vide sidéral ( $-271.3^\circ\text{C}$ )

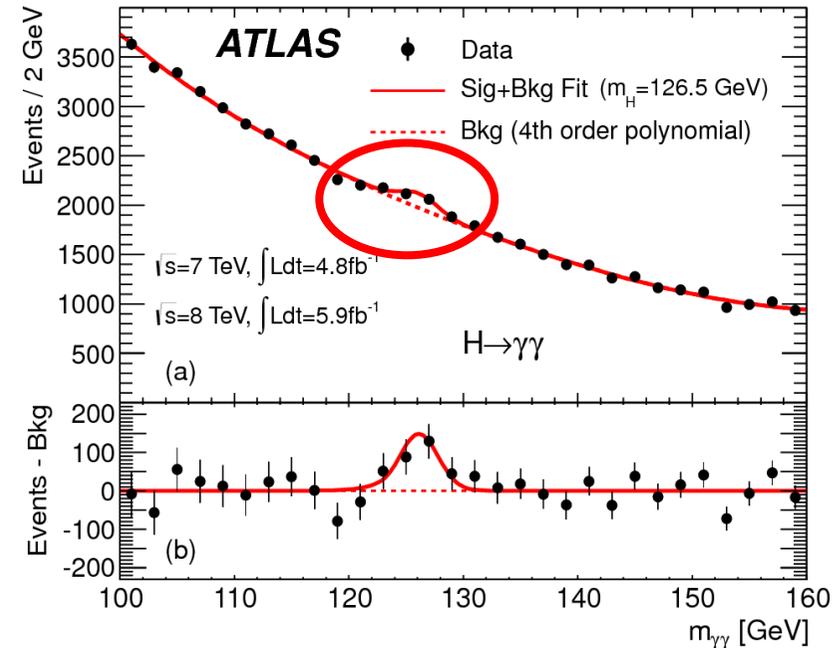
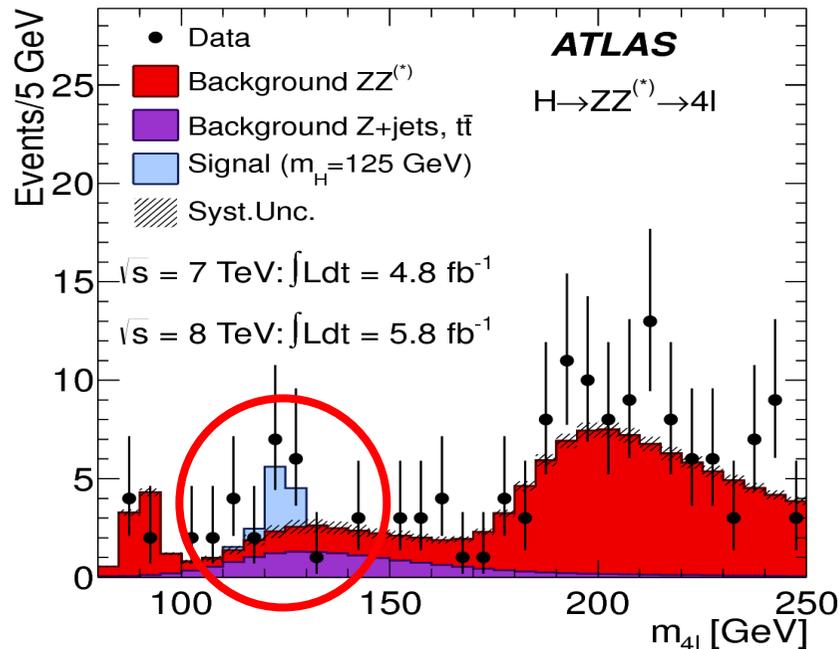


Ligne cryogénique avant la pose des aimants



Chambre à vide du LHC (en coupe)

# La découverte du boson de Higgs au LHC



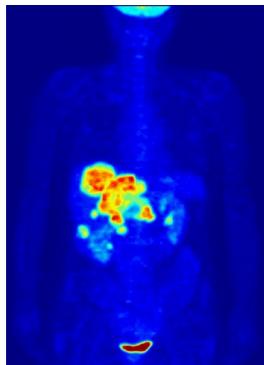
- La découverte d'une nouvelle particule est un moment très important dans l'histoire du CERN
- Ingrédient fondamental dans la compréhension de l'Univers
  - Etude détaillée des propriétés du Higgs (permet d'expliquer pourquoi les particules ont une masse)

# Plan

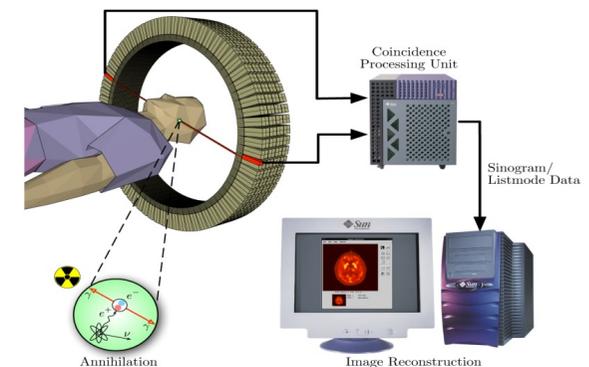
- 1) Pourquoi des accélérateurs ?
- 2) Le CERN
- 3) Les grandes dates du CERN
- 4) Le LHC
- 5) Les retombées pour la société**

# Les apports pour la société : les retombées directes

- Les découvertes en science fondamentale permettent les grandes avancées :
  - Les **transistors** ont été inventés car on avait découvert la physique quantique
  - Le **GPS** utilise la relativité générale
  - La **protonthérapie** permet de soigner des cancers à l'aide d'un accélérateur de protons
  - L'**imagerie médicale** utilise les technologies de détection de la physique des particules

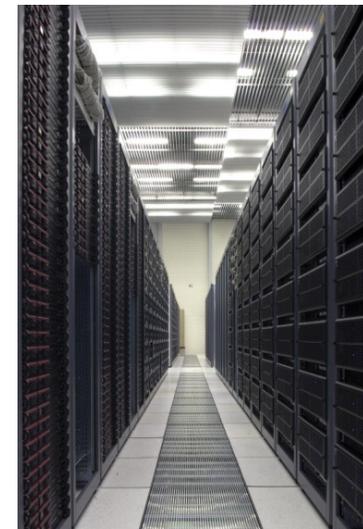


Systeme de tomographie à émission de positons



# Les apports pour la société : les retombées indirectes

- La recherche à des besoins spécifiques. Elle développe de nouvelles technologies qui servent ensuite à tout le monde :
  - Les premiers **écrans tactiles** ont été conçus au CERN
  - Le **Web** a été inventé au CERN
  - Les données du LHC occuperaient chaque année une pile de CD de 20 km. De nouveaux moyens de stockage et de calculs ont été développés : la **grille** ou **cloud**



“Ferme” de PC au CERN (2006)

Je vous remercie de votre attention !