

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

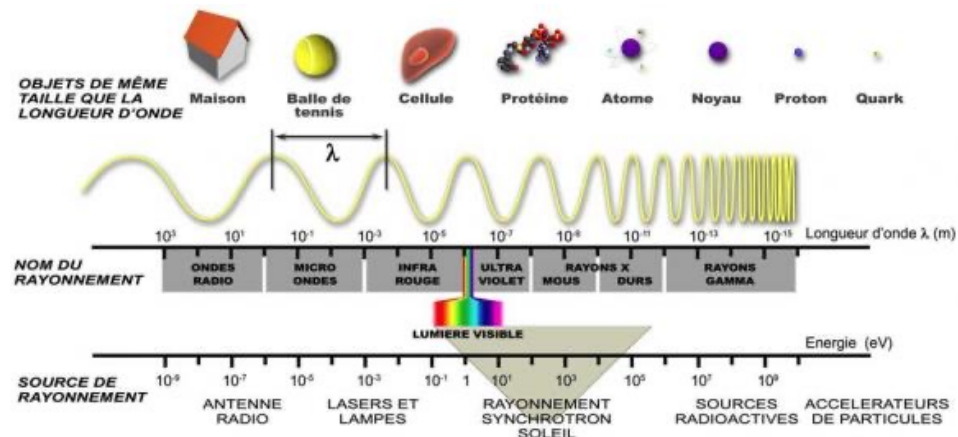
Certains de ces transparents ont trouvé leur inspiration dans une présentation du Prof. Dr Christoph Schäfer (CERN International Relations Office)

- 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

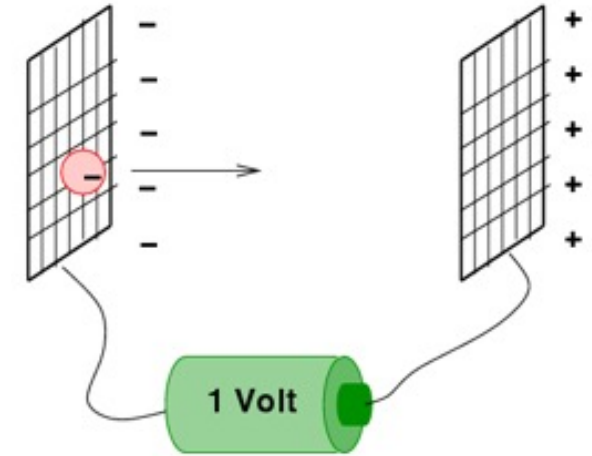
Energie du photon (photon = « particule » de lumière)

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

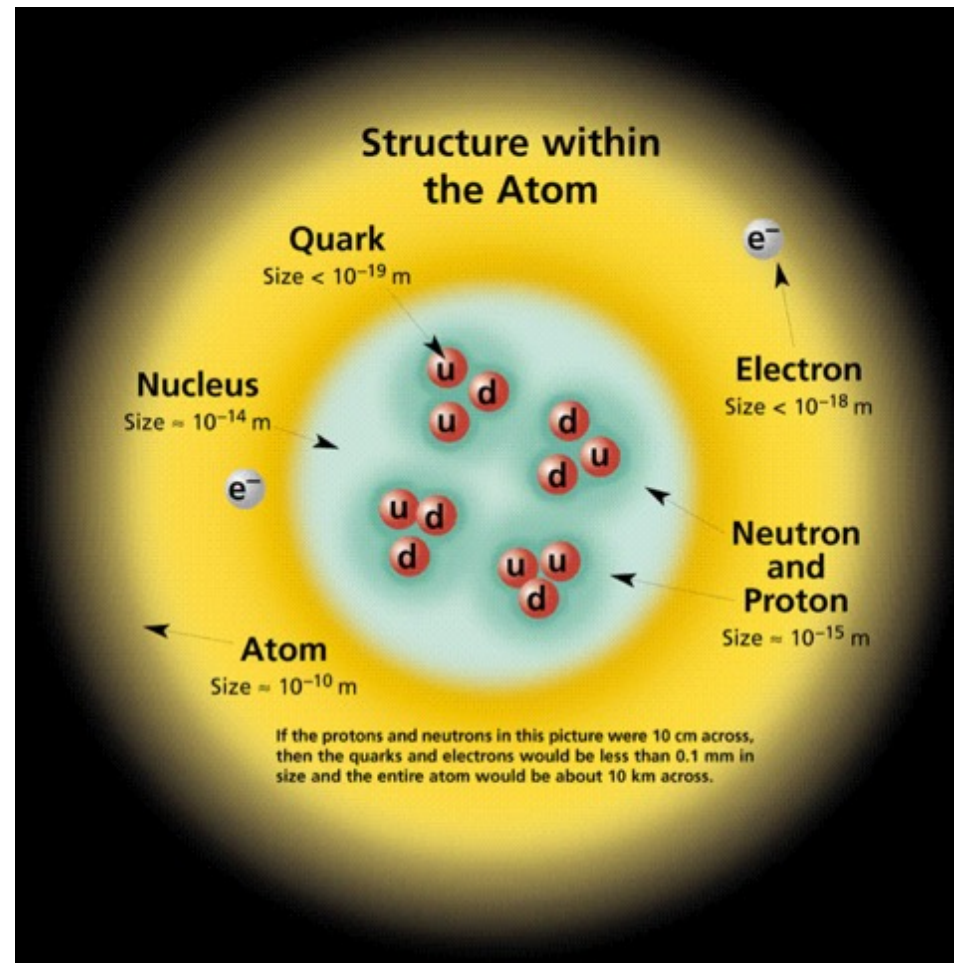
- En augmentant l'énergie on va diminuer la longueur d'onde
- La lumière visible correspond à une énergie de l'ordre de 1 eV

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 ?

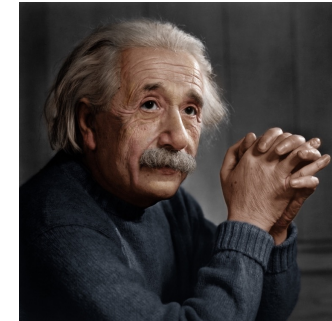
- Pour regarder des objets de 10^{-18} m, il faut environ une énergie de 1 TeV

- Comment faire ?

- On utilise la formule d'Einstein

$$E = m c^2$$

- On convertit la matière en énergie

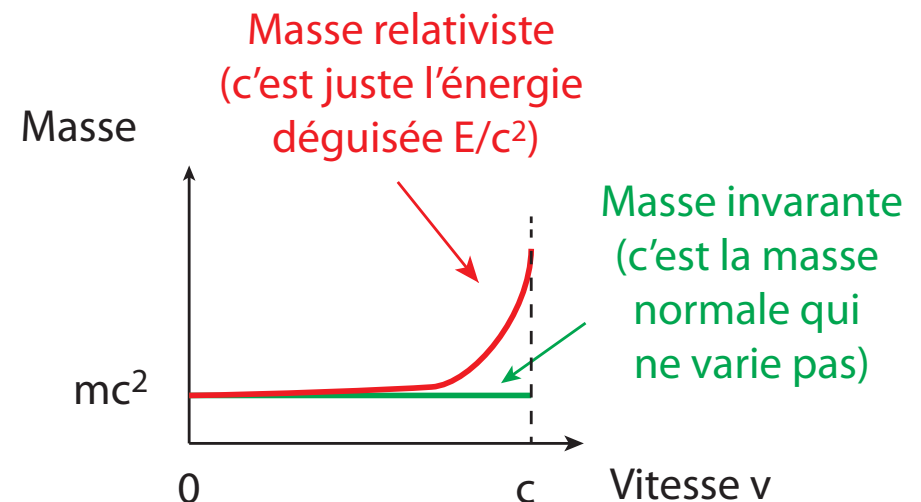


- C'est pour cela qu'on dit qu'un proton correspond à une énergie de 1 GeV

- 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

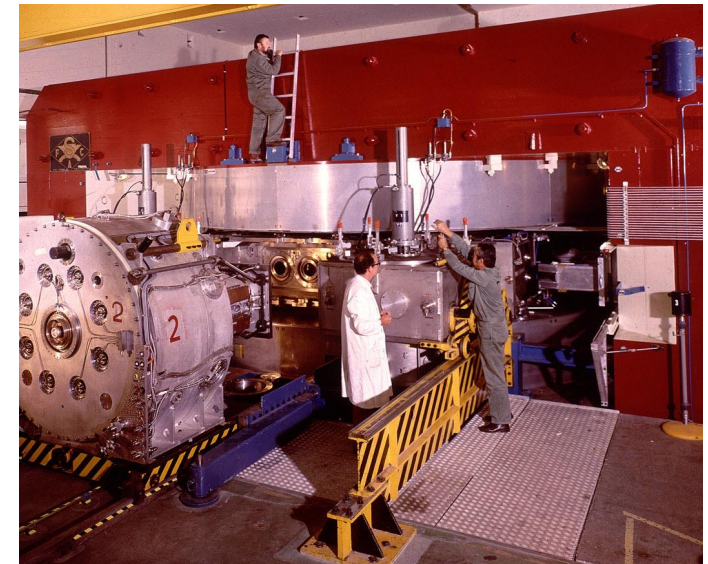
Création du CERN

1957

1^{er} accélérateur (SC) à 0,6 GeV
fonctionne jusqu'en 1990

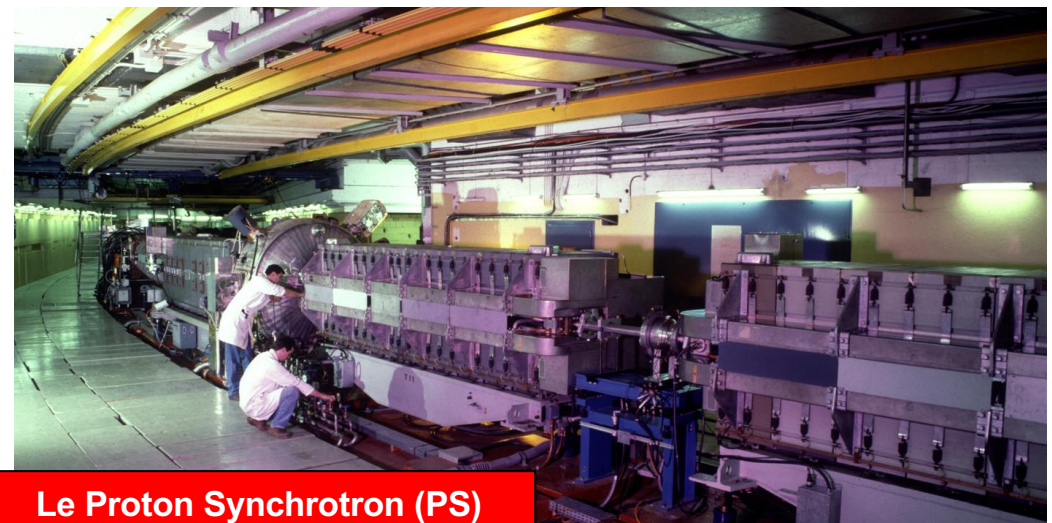
1959

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

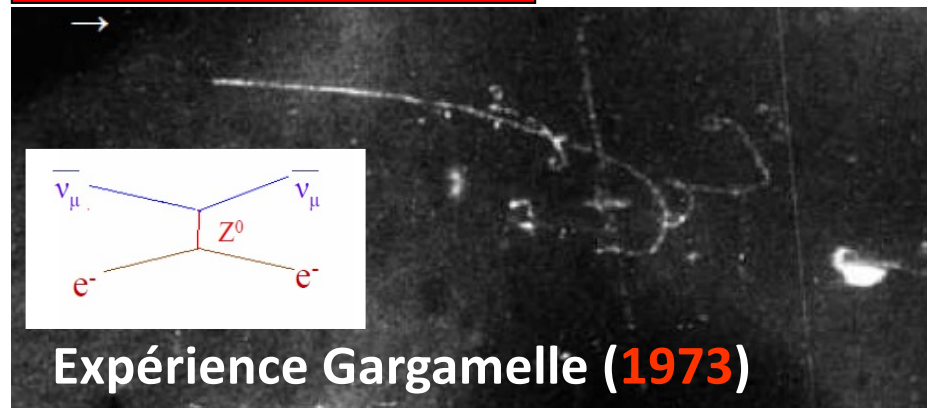


La chambre à bulles *Gargamelle*



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

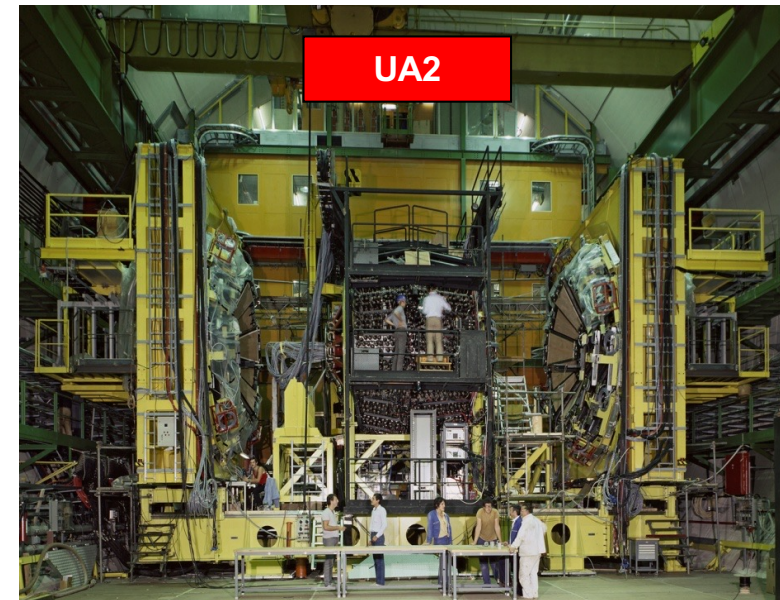
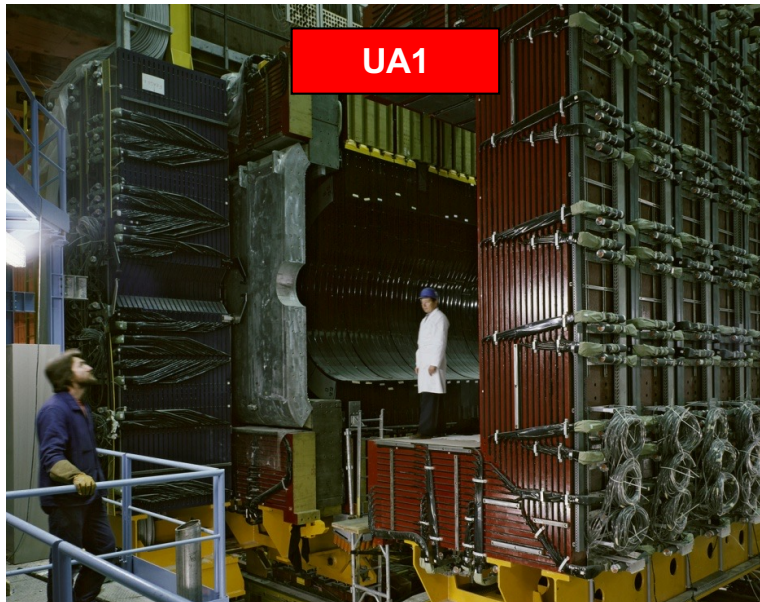
Démarrage du SPS : collisionneur de protons (450 GeV) reconverti à partir de 1979 en collisionneur proton-antiproton

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



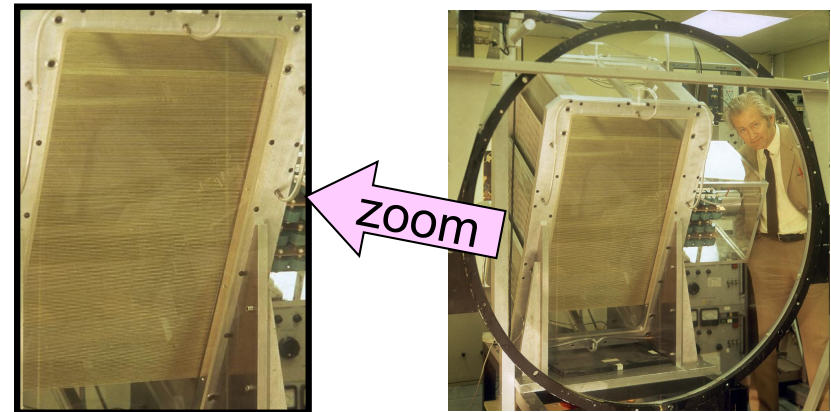
Les grandes dates du CERN

1970's

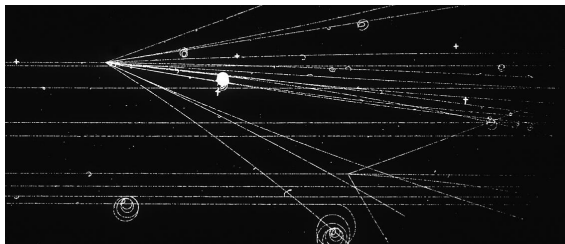
Saut technologique : G. Charpak invente la chambre à fils

1992

Prix Nobel de physique à G. Charpak



Avant: Analyse de photos



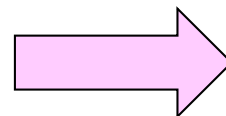
Interactions de protons du PS avec de l'hydrogène (1960)

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

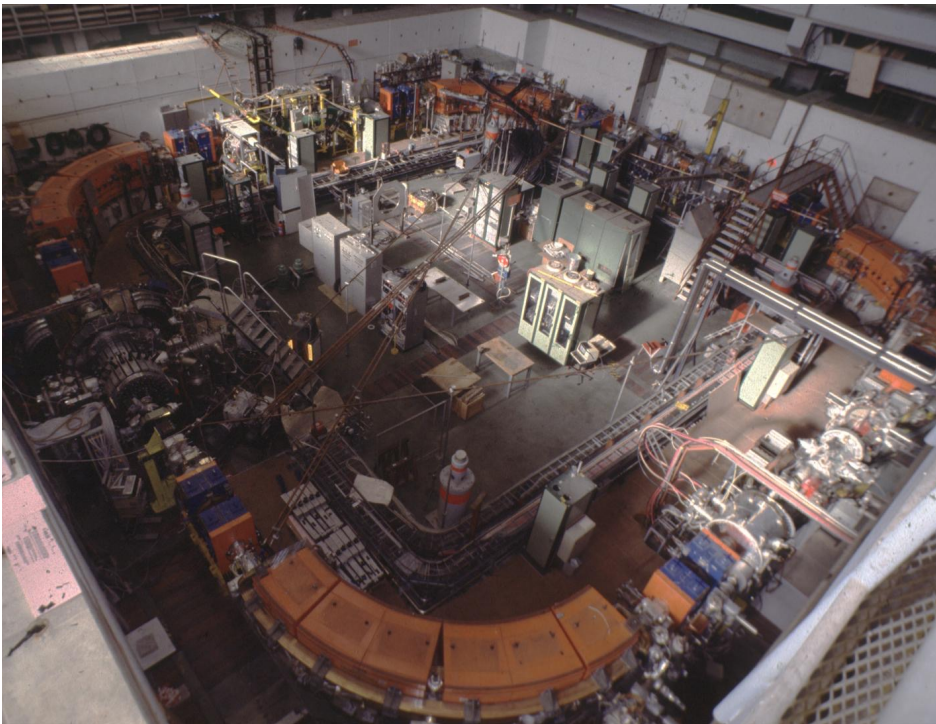
Prix Alan Turing à T. Berners-Lee



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

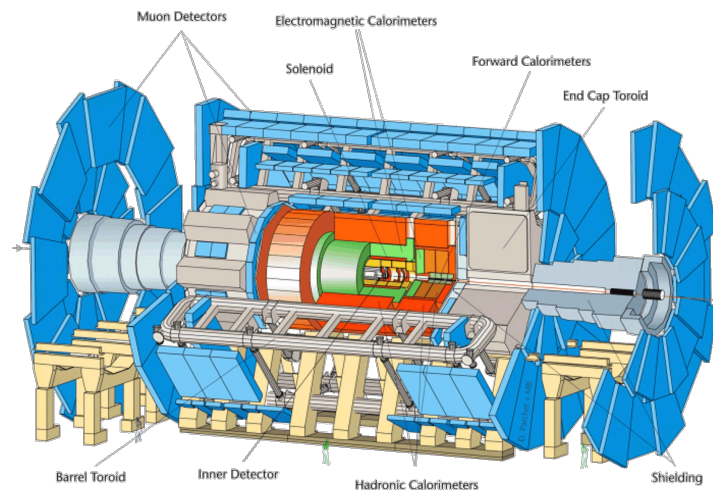
Les expériences ATLAS et CMS y découvrent le boson de Higgs

2013

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

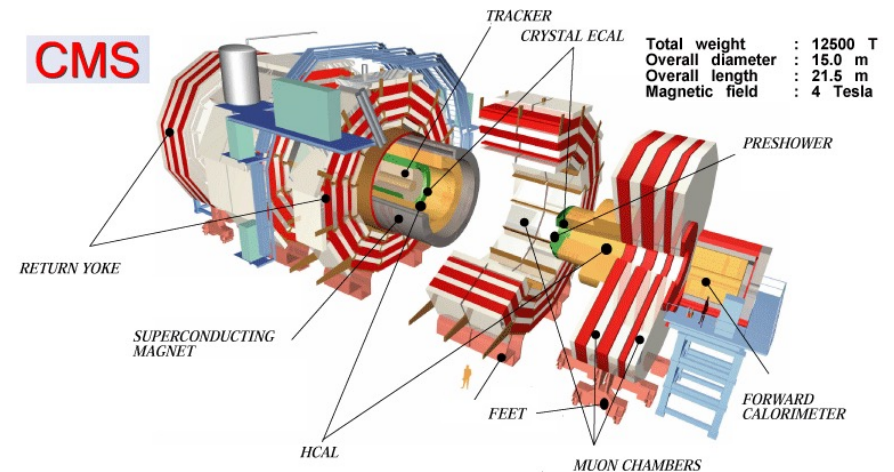
ATLAS

(L x l = 44 m x 22 m – 7000 t)



CMS

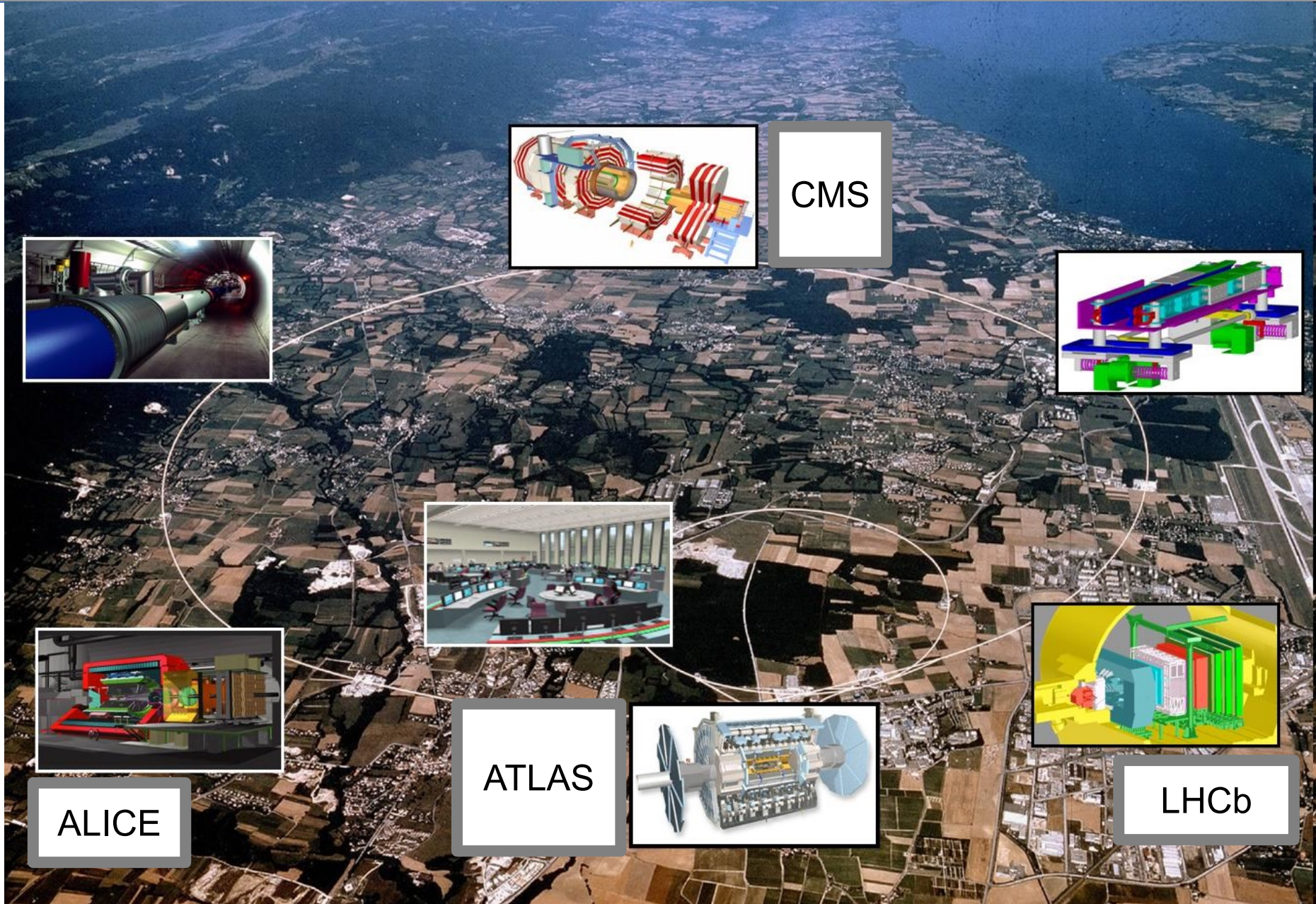
(L x l = 22 m x 15 m – 14500 t)



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.



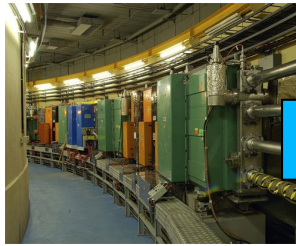
Conçu dans les années 80,
approuvé en 1994, sa
construction débute en 1998.

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

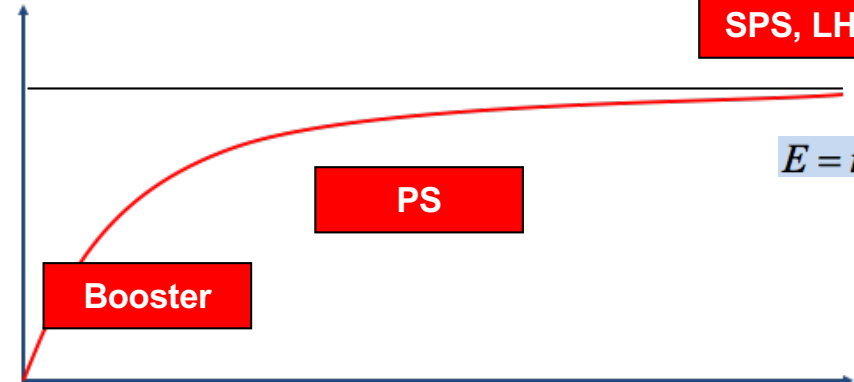
SPS

LHC

Tout démarre de là ..

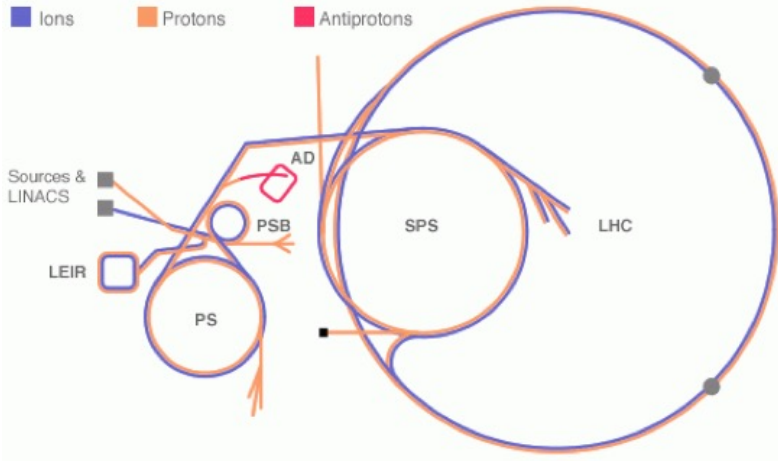
Vitesse

Vitesse de la lumière

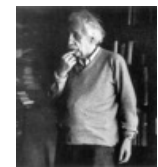


$$E = \frac{1}{2}mv^2$$

$$E = mc^2$$



Newton

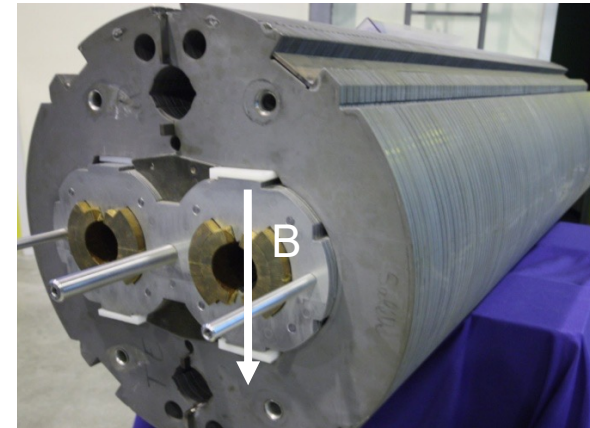
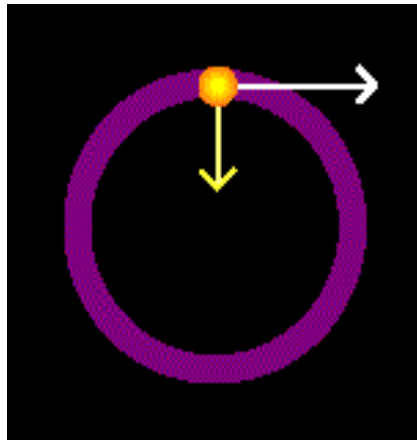
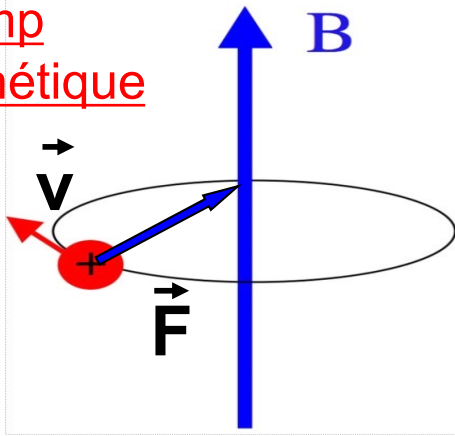


Einstein

Il faut guider et accélérer les protons

Champ magnétique

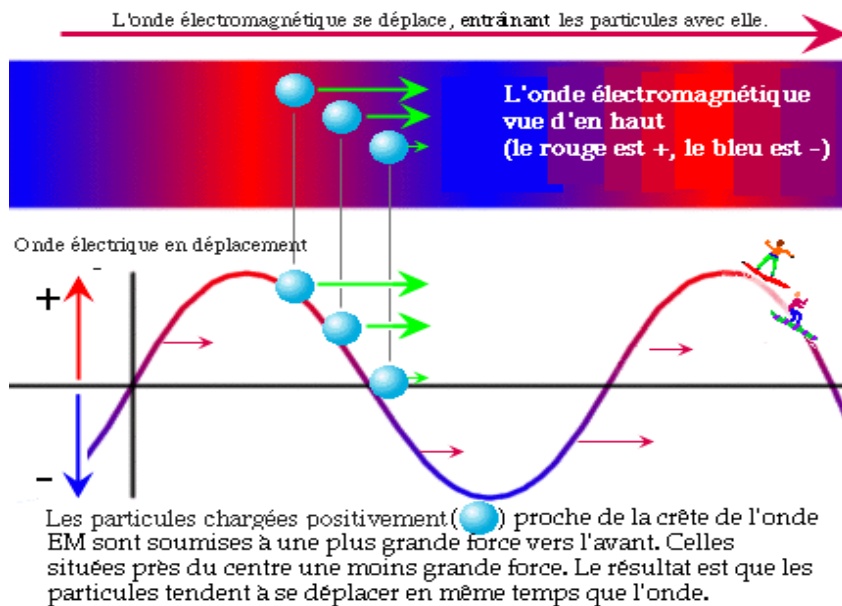
Guidage



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} m^2

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

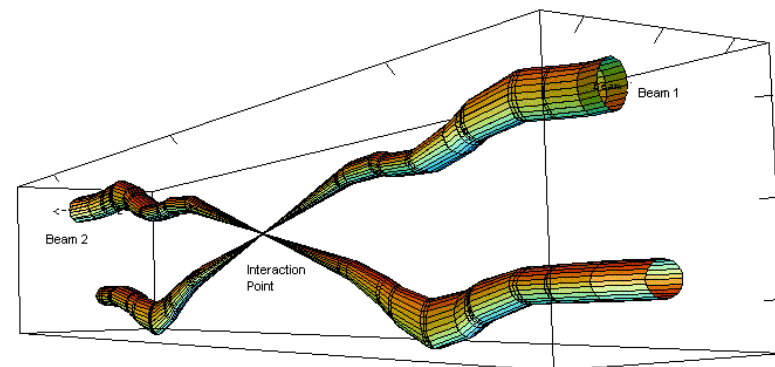
Énergie totale des faisceaux :

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

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

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

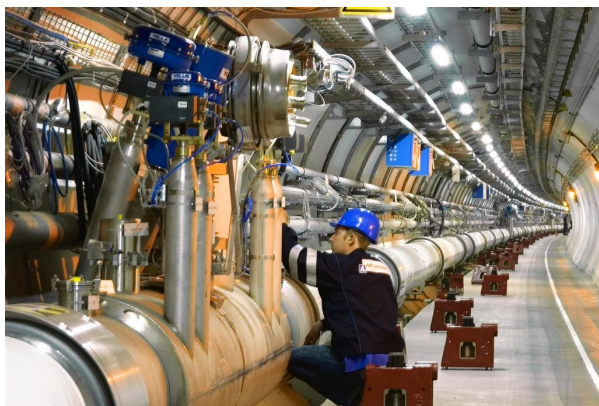


Relative beam sizes around IP1 (Atlas) in collision

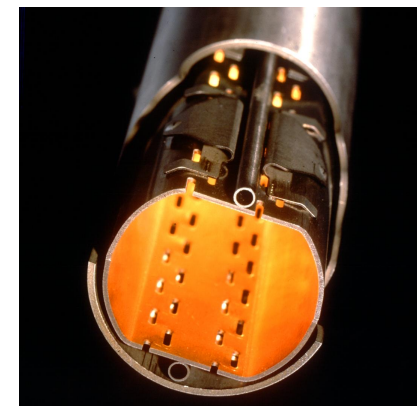
Croisement des faisceaux à un point de collisions

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° C)

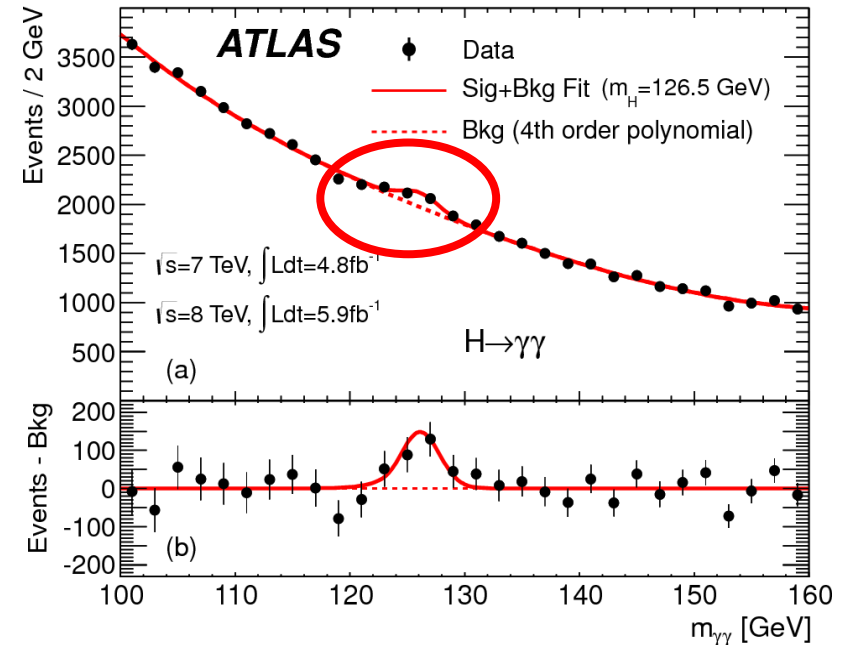
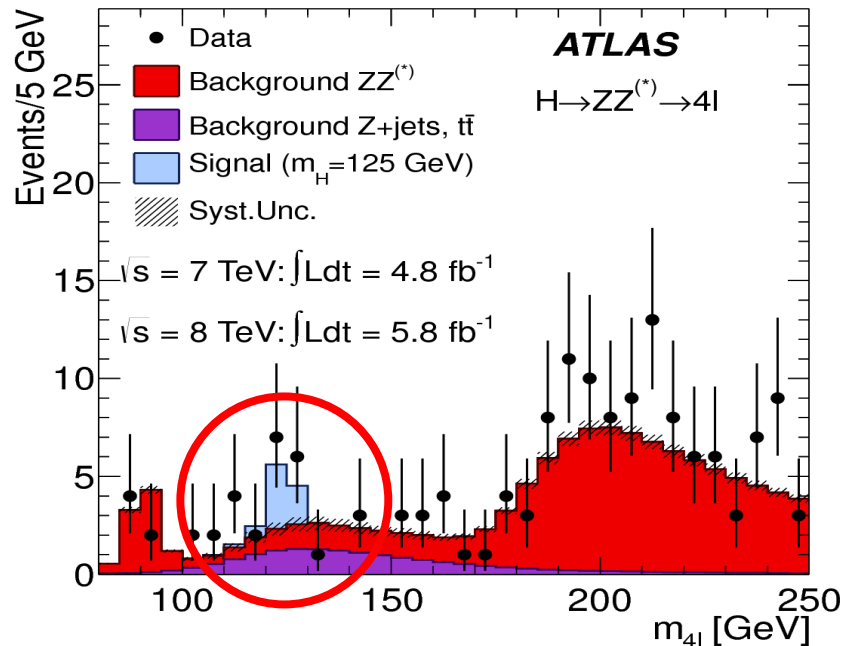


Ligne cryogénique avant la pose des aimants



Chambre à vide du LHC (en coupe)

La découverte du boson de Higgs au LHC



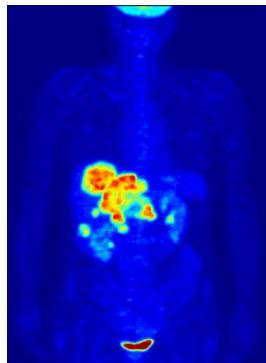
- La découverte d'une nouvelle particule est un moment très important dans l'histoire du CERN
- Ingrédient fondamental dans la compréhension de l'Univers
 - Etude détaillée des propriétés du Higgs (permet d'expliquer pourquoi les particules ont une masse)

Plan

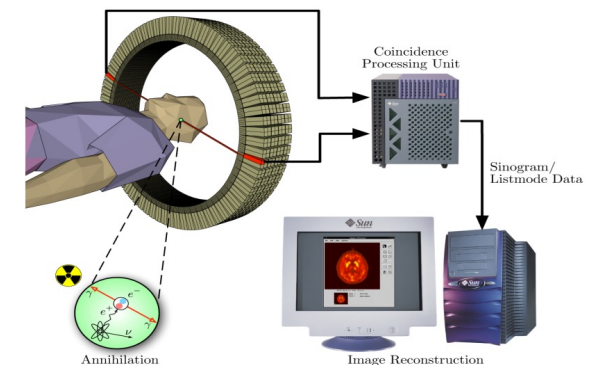
- 1) Pourquoi des accélérateurs ?
- 2) Le CERN
- 3) Les grandes dates du CERN
- 4) Le LHC
- 5) Les retombées pour la société**

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

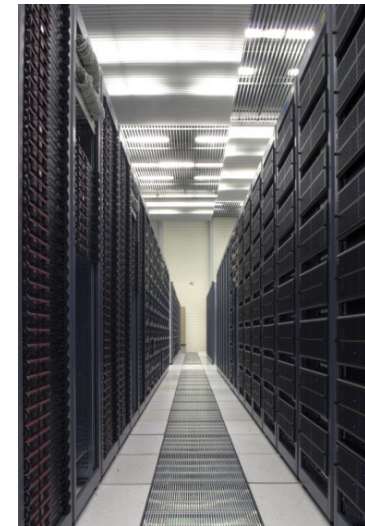


Systeme de tomographie à émission de positons



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 !