



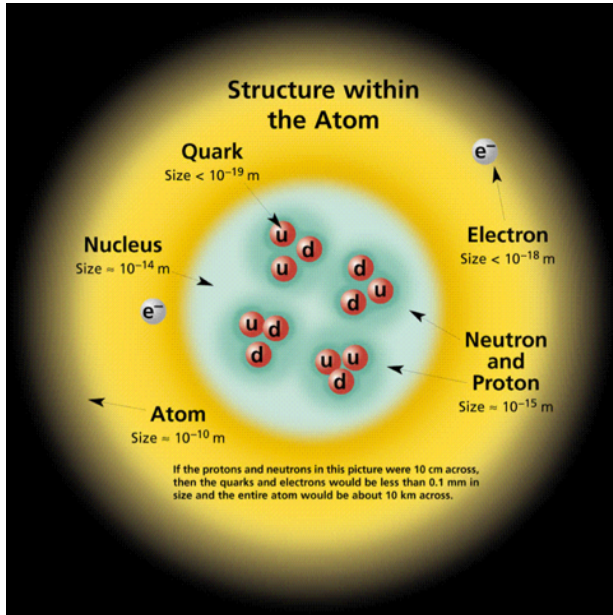
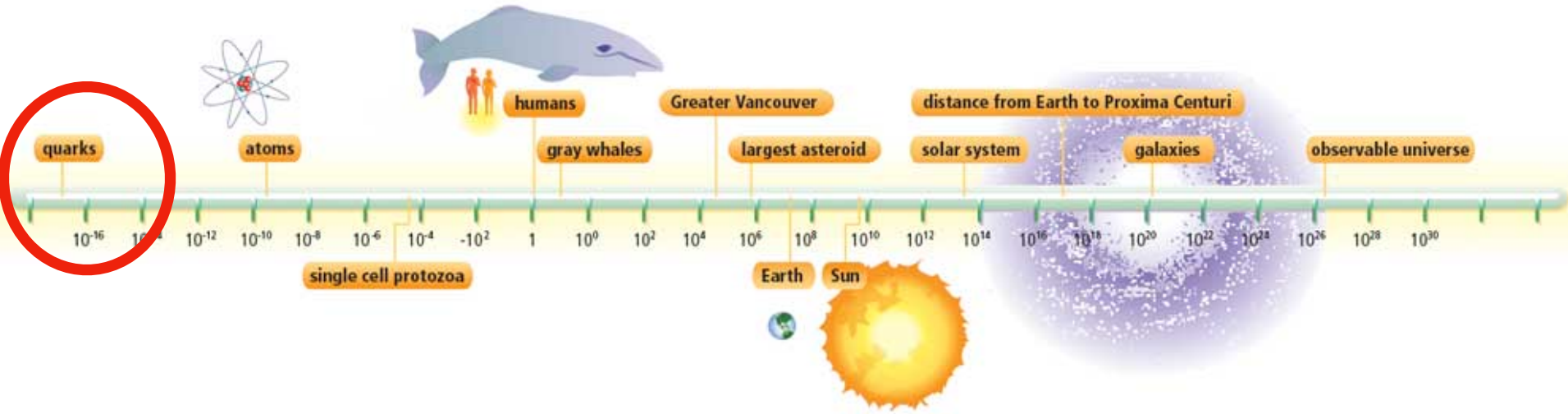
C. Agapopoulou, N. Arnaud, F. Machefert, P. Roudeau, P. Puzo, B. Viaud, L. Serin

- 1) Pourquoi des accélérateurs ?
- 2) Le CERN
- 3) Le LHC
- 4) Les experiences
- 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

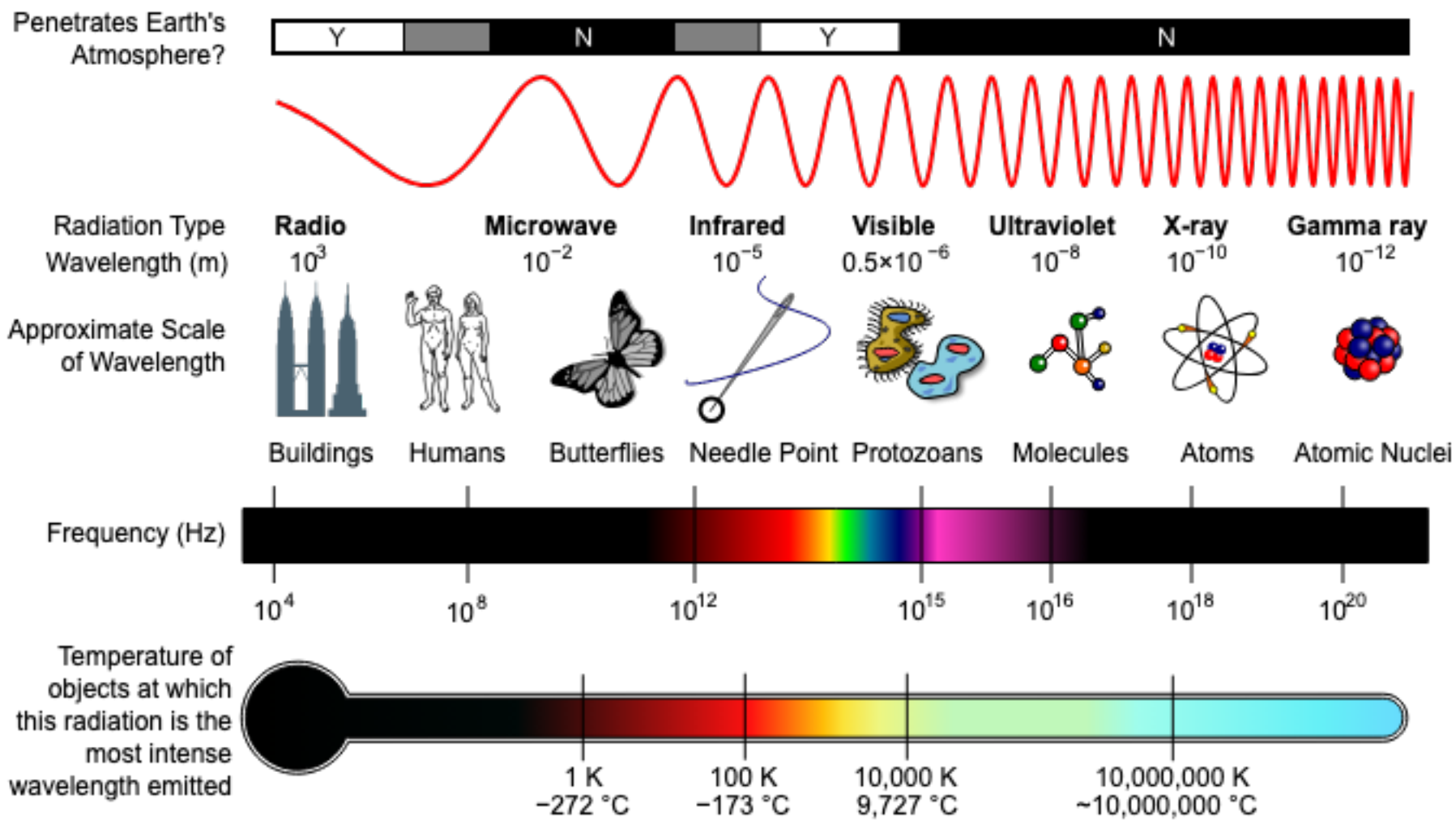
La taille des constituants de la matière



Pourquoi a-t-on besoin d'accélérateurs ?

- On veut sonder la matière à très petite échelle pour accéder aux particules élémentaires ($< 10^{-18}$ m)
- On a besoin d'un microscope de très bonne résolution
- La résolution dépend de la longueur d'onde

Spectre électromagnétique



Pour des petites dimensions

- La physique quantique nous dit que :

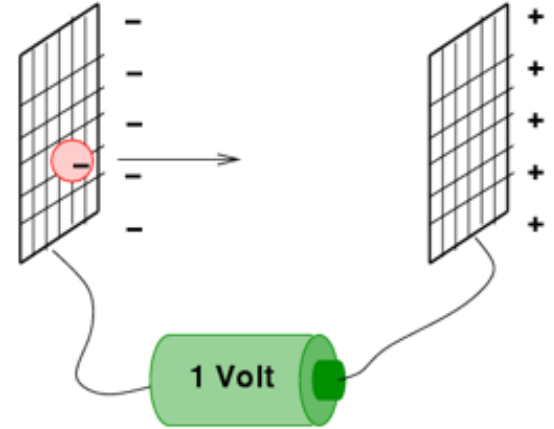
Diagram illustrating the equation $\lambda = \frac{hc}{E}$ and the variables involved:

- λ : Longueur d'onde de la lumière
- h : Constante de Planck
- c : Vitesse de la lumière
- E : Energie du photon (photon = « particule » de lumière)

- 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 :
 - $1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV}$, $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$, $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$,
 $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$



De combien d'énergie a-t-on besoin ?

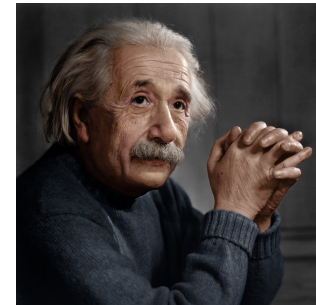
- Pour regarder des objets de 10^{-18} m, il faut environ une énergie de 1 TeV

- 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 ?

Etat initial :

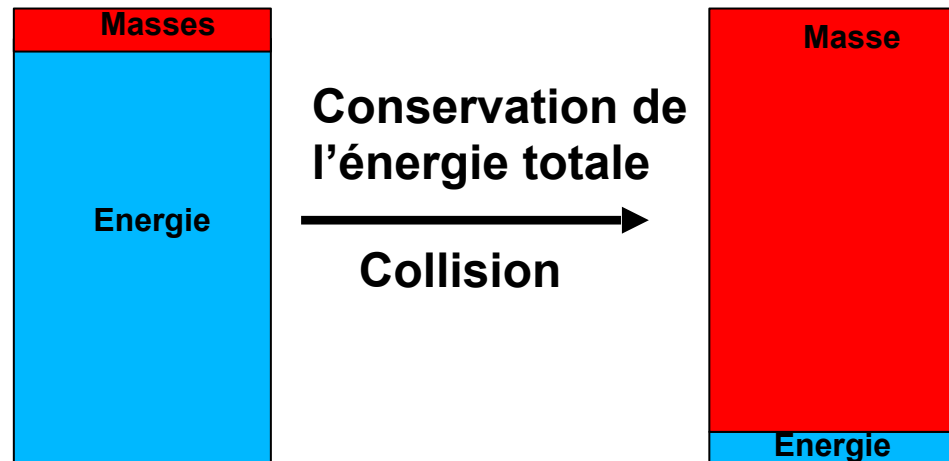
Particules que l'on accélère
Particule relativiste → grande énergie

$$m_0c^2 + E$$

Etat Final :

Particule de grande masse avec peu d'énergie

$$Mc^2 + E'$$



LEP : électrons et positron de 45.5 GeV en collisions
→ production au repos de la particule Z (91 GeV)

Comment faire des collisions ?

« Cible fixe »



La plupart de l'énergie est perdue dans la cible

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

« Collisionneur »

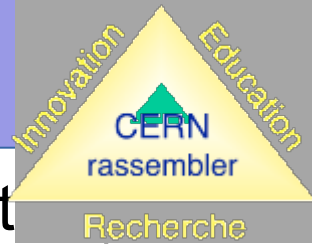


Toute l'énergie est disponible pour la collision

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

C'est pourquoi on utilise maintenant des collisionneurs !

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



- **CERN** : Existe depuis 1954 : **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**: repousser les frontières des connaissances. Les secrets du big bang, à quoi ressemble la matière dans les premiers instants → accélérateurs
 - **Technologie**: faire reculer les limites (Web et grille, médecine...)
 - **Collaborations**: rassembler des personnes de différentes nations et culture autour de la science
 - **Education**: formation les futurs scientifique/ingénieurs

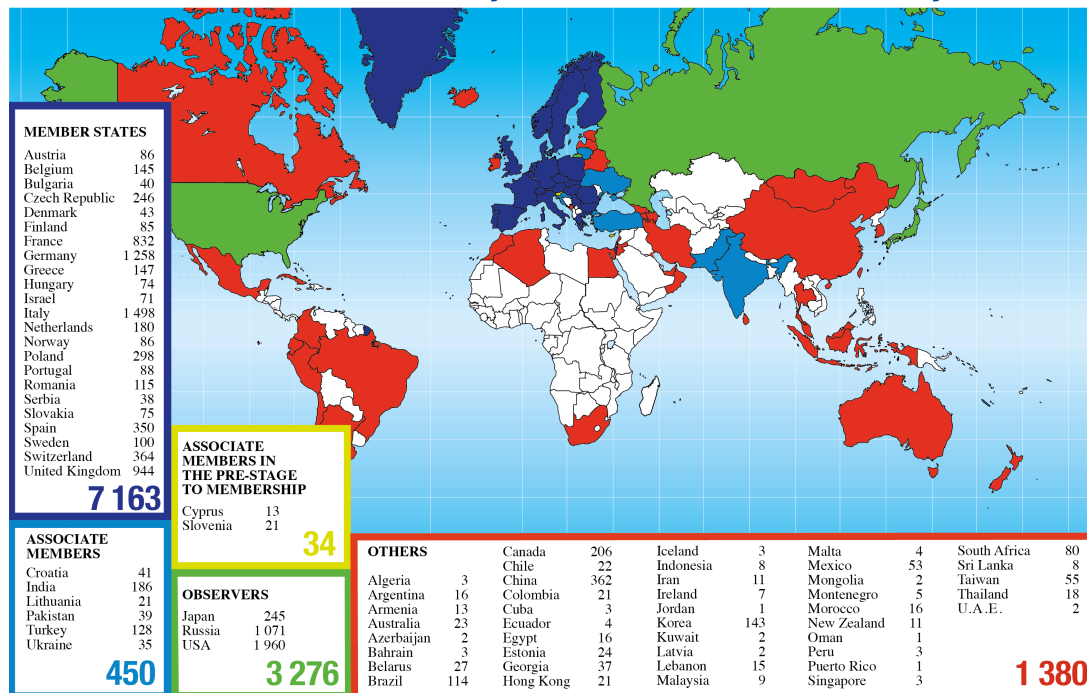
CERN and the LHC

- Plus de **12000** personnes de **600** instituts dans **115** pays
- La maison du plus grand accelerator au monde, the **Large Hadron Collider (LHC)**

CERN Construction at 1954

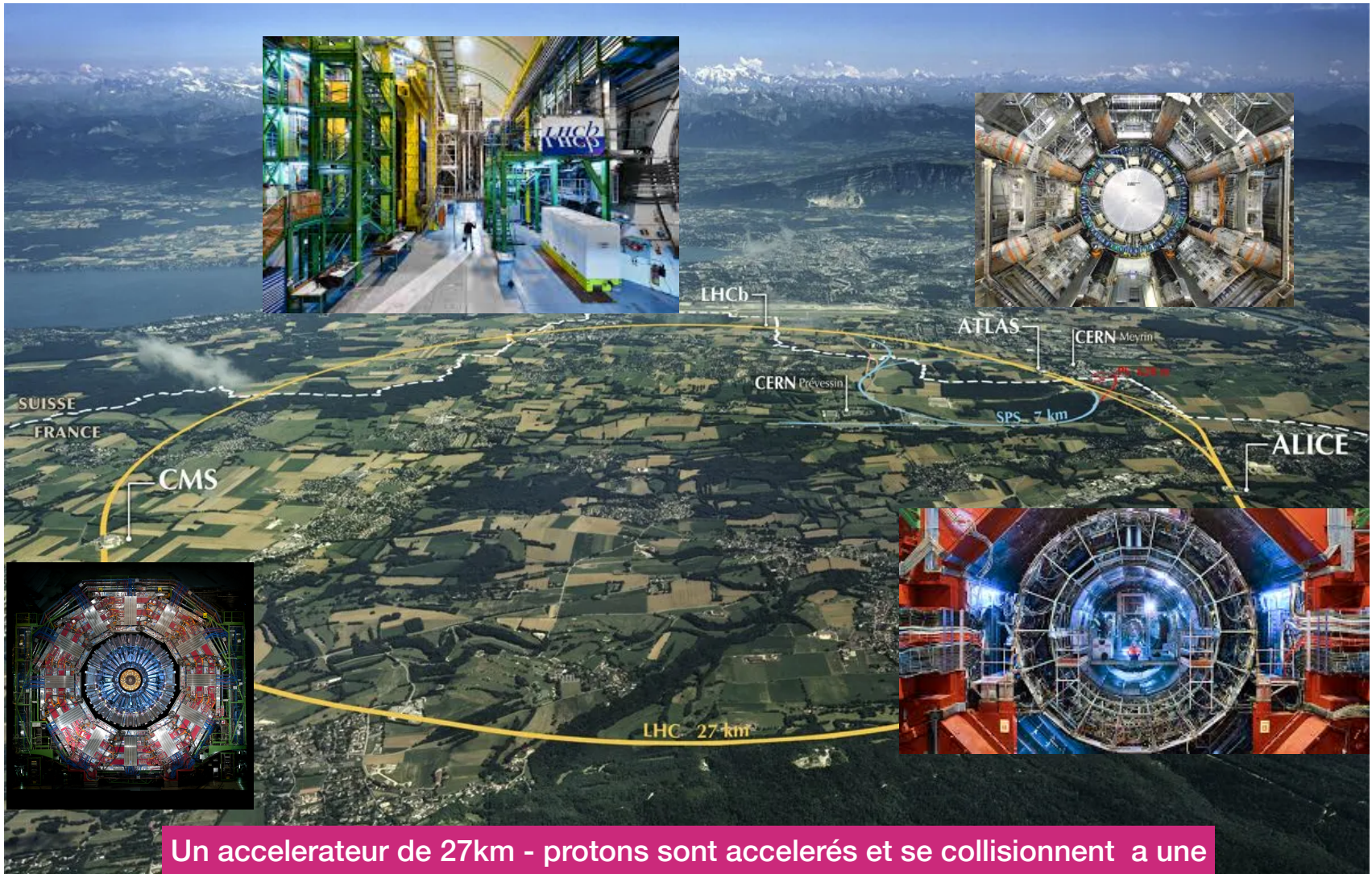


Distribution of All CERN Users by Location of Institute on 27 January 2020



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

Le LHC



La conception du LHC

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



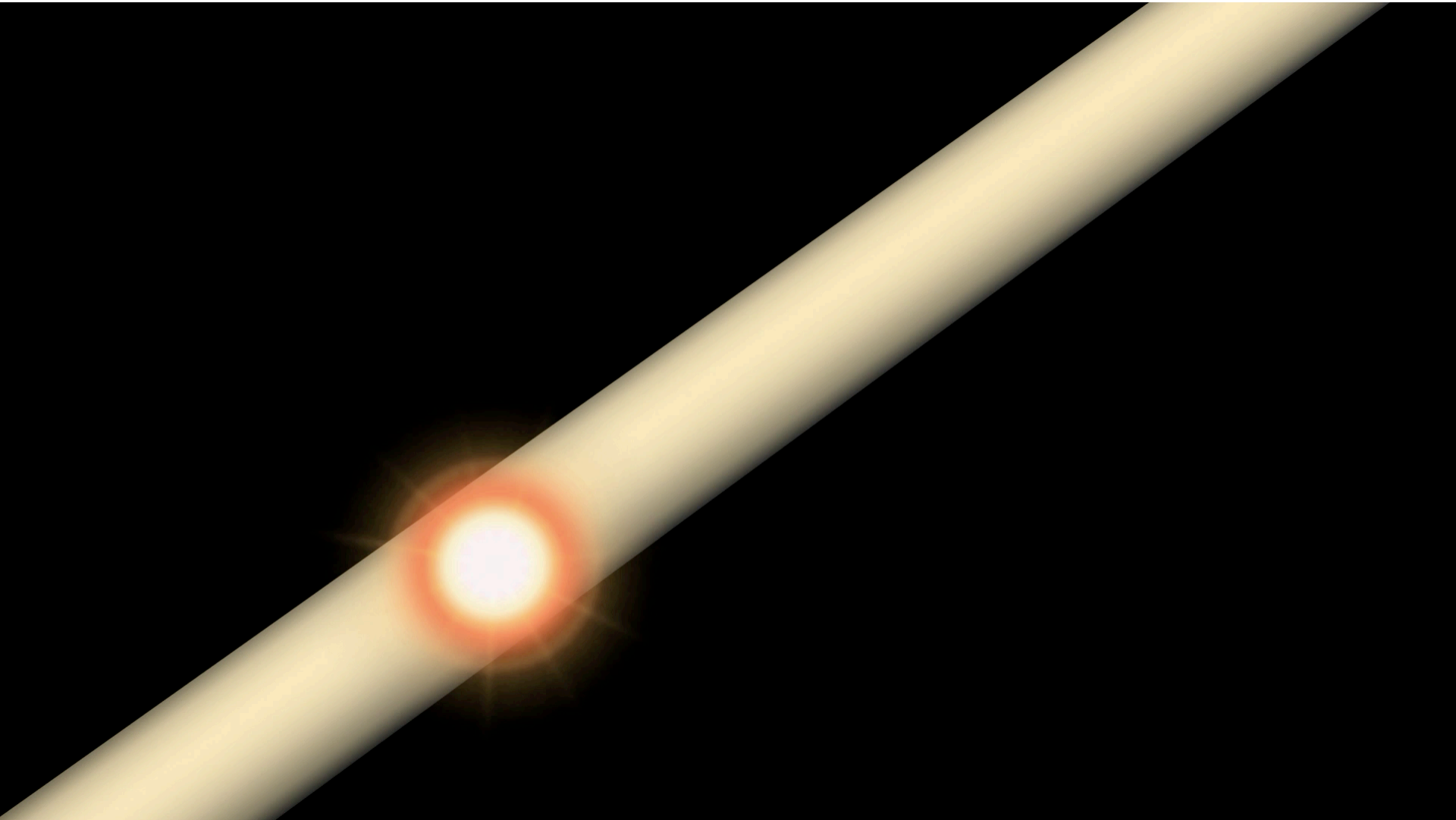
Conçu dans les années 80,
approuvé en 1994, sa
construction débute en 1998.

Collisionneur proton-proton de 7-13 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.)

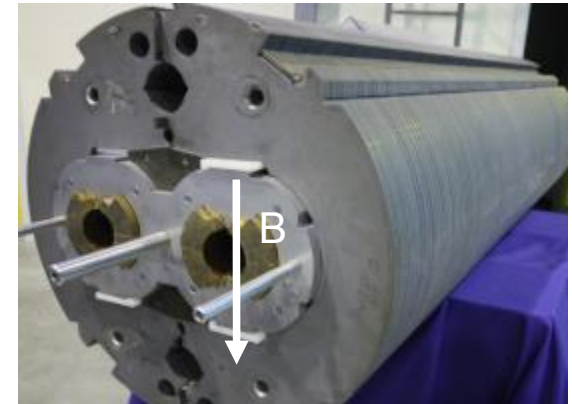
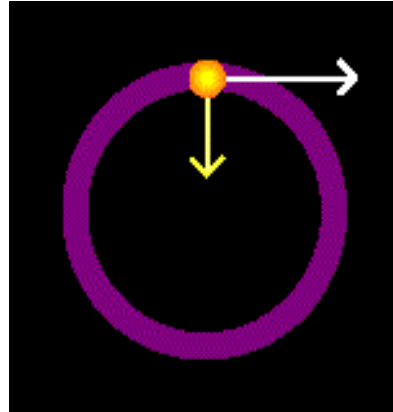
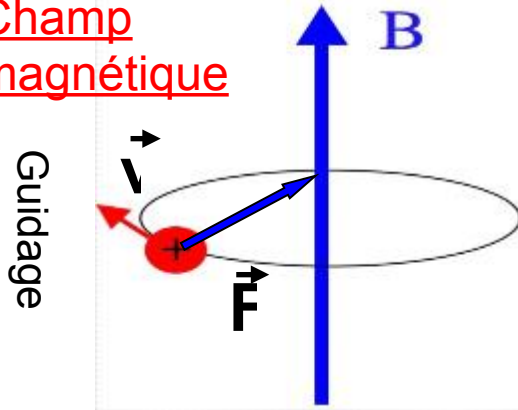


Fonctionnement du LHC : la chaîne d'accélération



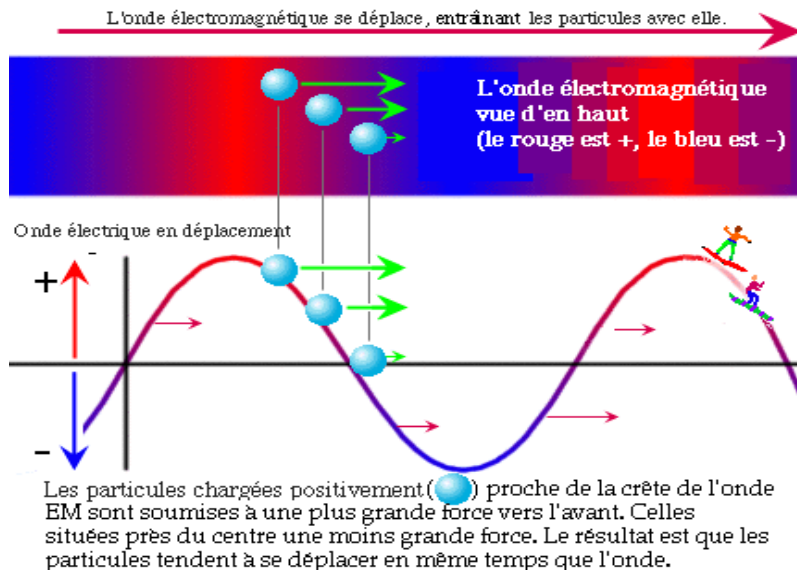
Il faut guider et accélérer les protons

Champ magnétique



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

Accélération



Champ électrique



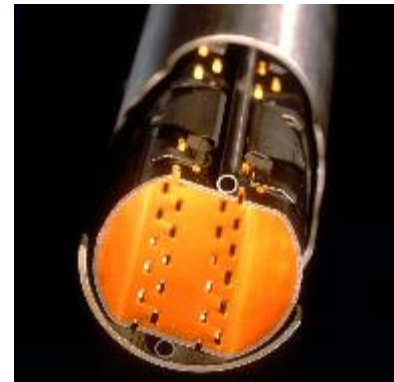
Les particules gagnent 16 MeV par passage (11000 passages par seconde)

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)

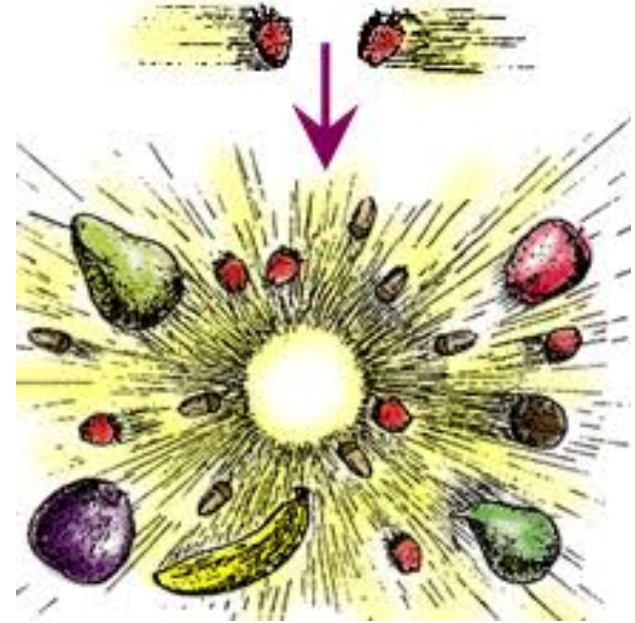
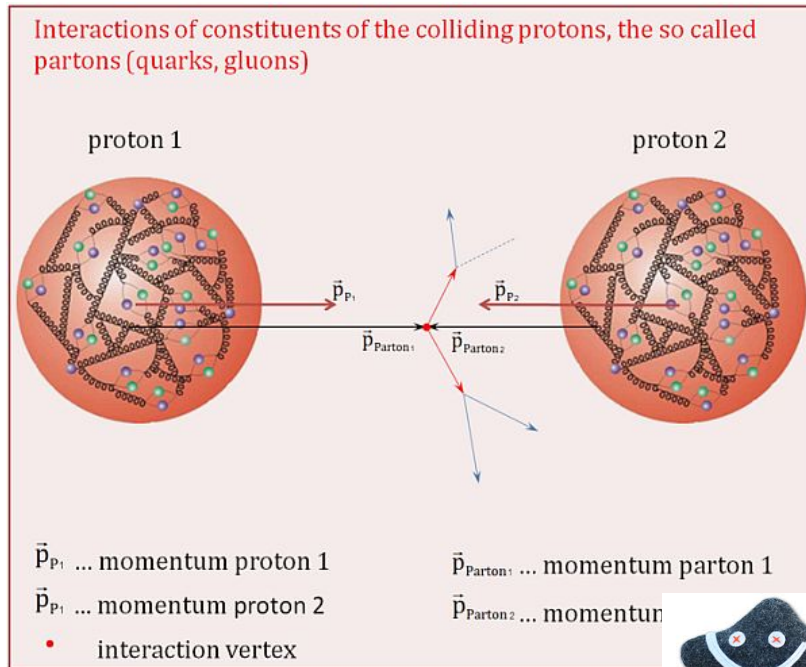
- 1) Pourquoi des accélérateurs ?
- 2) Le CERN
- 3) Le LHC
- 4) Les experiences**
- 5) Les retombées pour la société

Une collision des protons

$E=mc^2$: Conversion de l'énergie en masse, et de la masse en énergie

Nous créons de nouvelles particules

Mais pas les memes chaque fois ! Il y a de particules communes et de particules rares

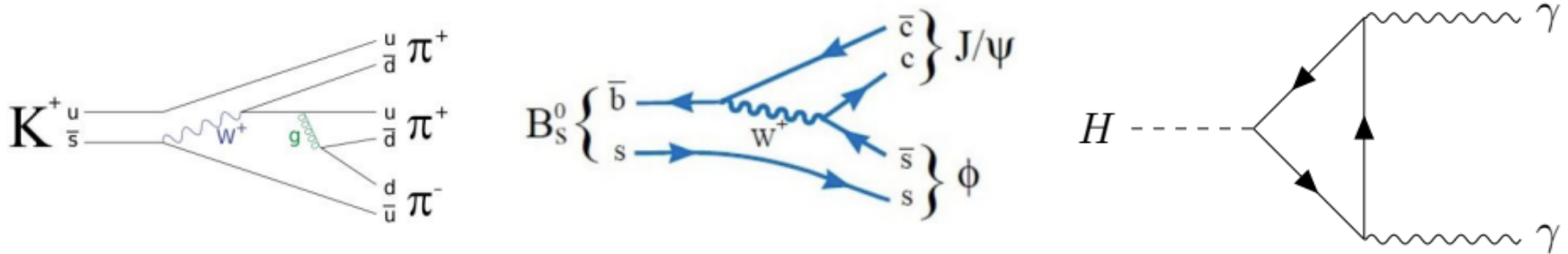


- Comment trouver les particules les plus rares? Répéter l'exercice!
- Pour trouver le boson de Higgs, il fallait **~8 milliard collisions de protons**
- equivalent a 7.4 PB de stockage!



Desintegrations de particules

- Le plupart des particules subatomiques sont instables (stats excités) - ils se désintègrent dans d'autres particules (en observant les lois de conservation)
- Chaine de desintegrations successifs afin d'arriver aux particules **stables** (particules qui se désintègrent pas sans une force extérieure)



Le temps de vie des particules subatomiques est **extrêmement court**: 10^{-10} - 10^{-25} seconds. Il y a très peu des particules qui peuvent arriver a nos experiences!

- Comment on peut observer les particules avec la vie la plus courte?
- Lois de conservation d'énergie et d'impulsion + Einstein



$$E = \sqrt{m^2 c^4 + p^2 c^2} \implies mc^2 = \sqrt{(E_1 + E_2 + E_3 + \dots)^2 - (p_1 + p_2 + p_3 + \dots)^2 c^4}$$

Nous retrouvons le particules originaux en mesurant l'énergie et l'impulsion de leur produits de désintégration!

Desintegrations de particules

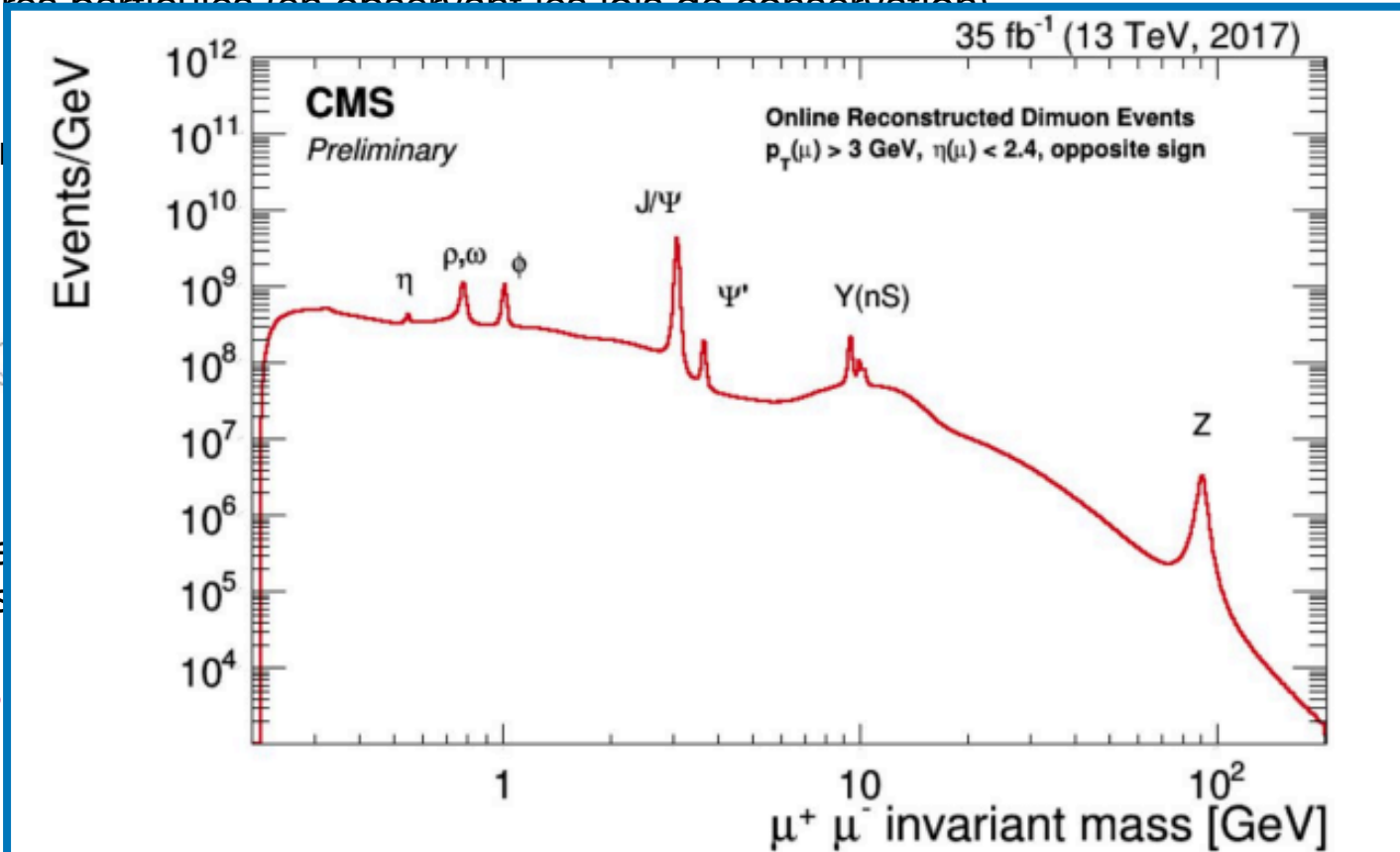
- Le plupart des particules subatomiques sont instables (stats excités) - ils se désintègrent dans d'autres particules (en observant les lois de conservation)

- Chaine de désintégration

$K^+_{u\bar{s}}$

Le temps de
très peu des

- Does this
- NO! Lois**



qui se

~~~~~  $\gamma$

~~~~~  $\gamma$

ds. Il y a



$$E = \sqrt{m^2 c^4 + p^2 c^2} \Rightarrow mc^2 = \sqrt{(E_1 + E_2 + E_3 + \dots)^2 - (p_1 + p_2 + p_3 + \dots)^2 c^4}$$

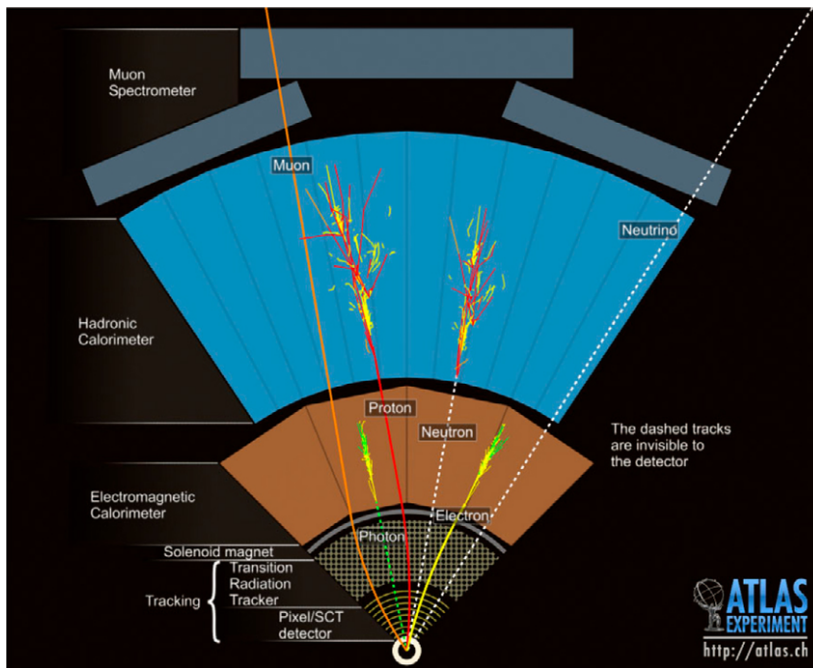
Nous retrouvons le particules originaux en mesurant l'énergie et l'impulsion de leur produits de désintégration!

Fonctionnement des expériences

Les particules subatomiques sont des millions de fois plus petites que ce que les microscopes les plus puissants au monde peuvent détecter... alors comment les trouver ?

➡ En les faisant interagir avec de la matière et en convertissant cette interaction en signaux électroniques !

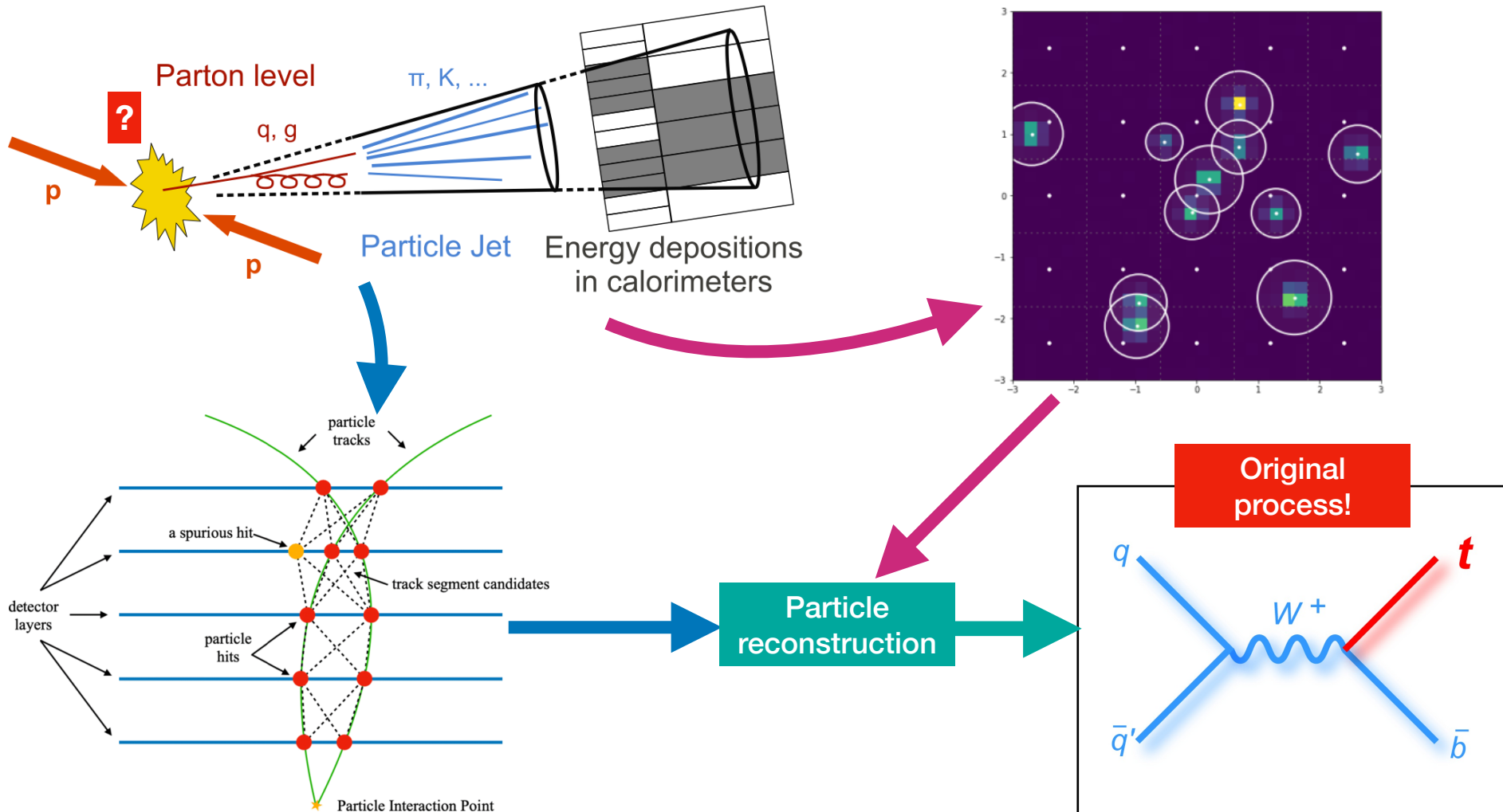
- Différents types de particules ont différentes interactions avec la matière -



matériaux spécialisés en forme “onion” pour détecter plusieurs types de particules

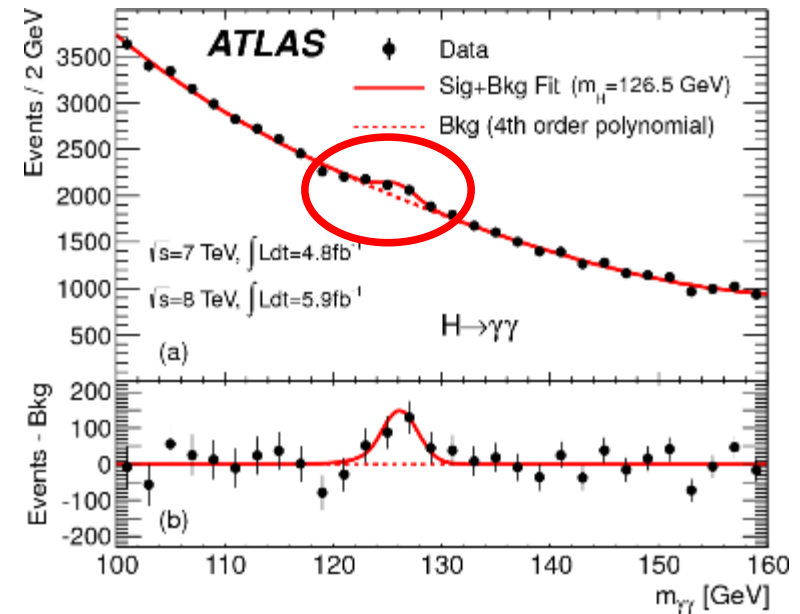
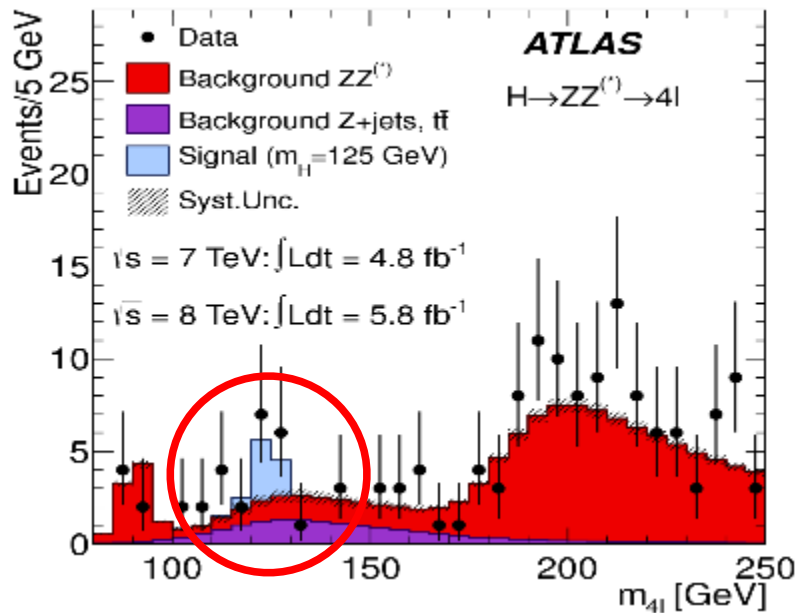
Du détecteur a la mesure

On collectionne des signaux électroniques - comment on arrive a “voir” les particules



Algorithmie de reconstruction - comme fait notre cerveau avec les signaux de nos yeux

La découverte du boson de Higgs au LHC

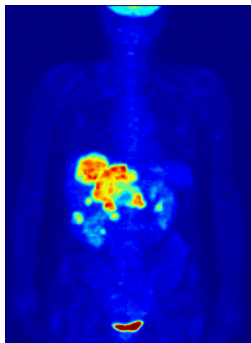


- La découverte d'une nouvelle particule est un moment très important dans l'histoire du CERN
- Ingrédient fondamental dans la compréhension de l'Univers
 - Etude détaillée des propriétés du Higgs (permet d'expliquer pourquoi les particules ont une masse)

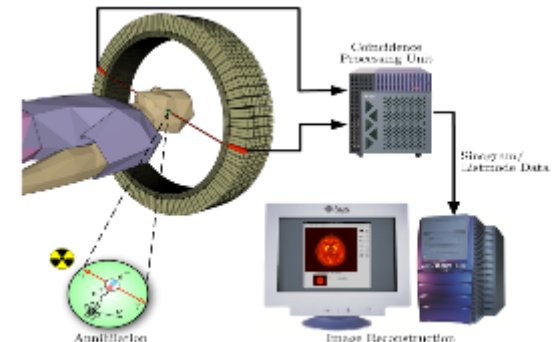
- 1) Pourquoi des accélérateurs ?
- 2) Le CERN
- 3) Le LHC
- 4) Les experiences
- 5) Les retombées pour la société**

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



Système de tomographie à émission de positons



Les apports pour la société : les retombées indirectes

- La recherche a 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 DVD 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 !

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

- Découvrir des nouvelles particules (souvent 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

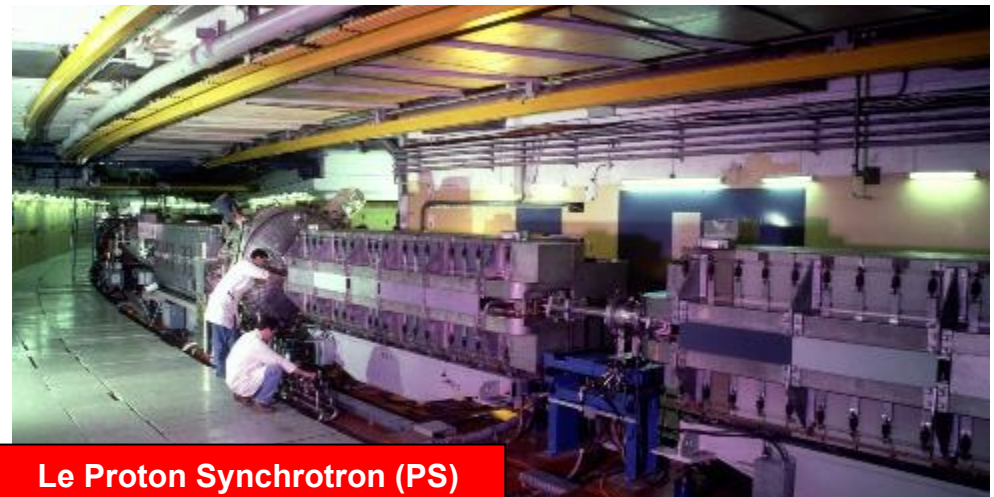
1959

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

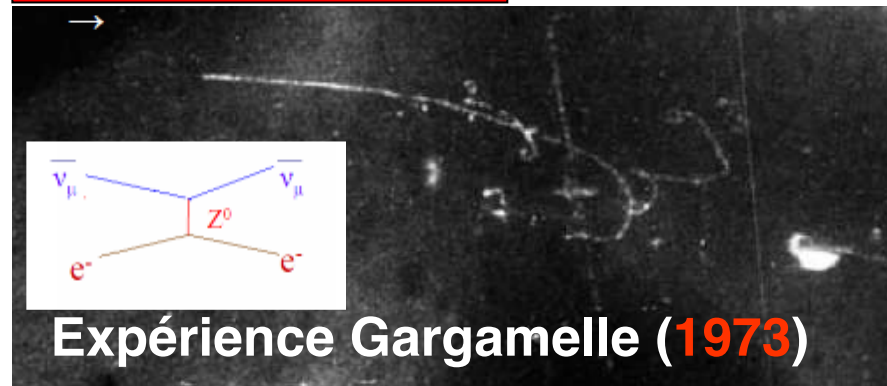


A. Lagarrigue (1924-1975)



La chambre à bulles Gargamelle

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

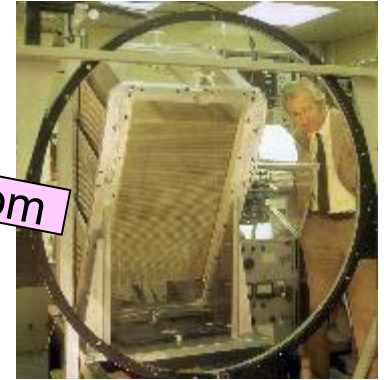
Prix Nobel de physique à C. Rubbia et S. Van der Meer



Les grandes dates du CERN

1970's

Saut technologique : G. Charpak invente la chambre à fils

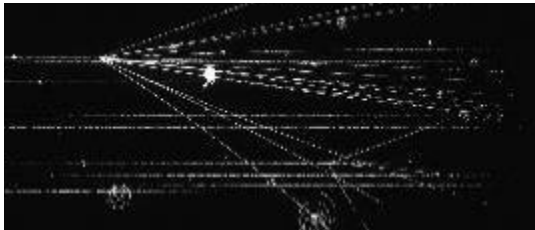


zoom

1992

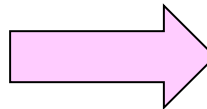
Prix Nobel de physique à G. Charpak

Avant: Analyse de photos



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

Ère manuelle



Après: reconstruction électronique et informatique



Boson vecteur dans UA1 (80s)

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

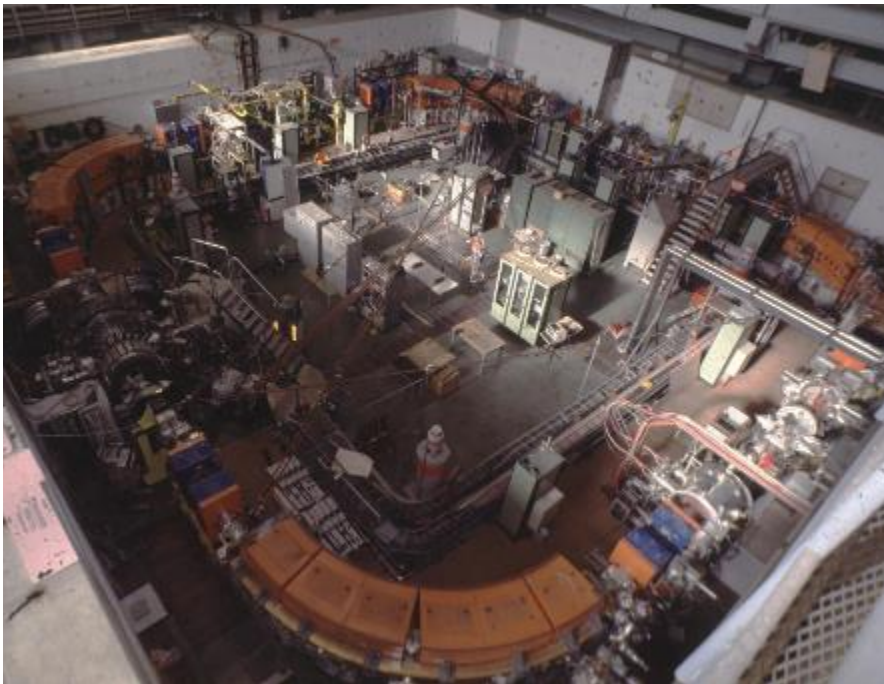
Prix Alan Turing à T. Berners-Lee



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

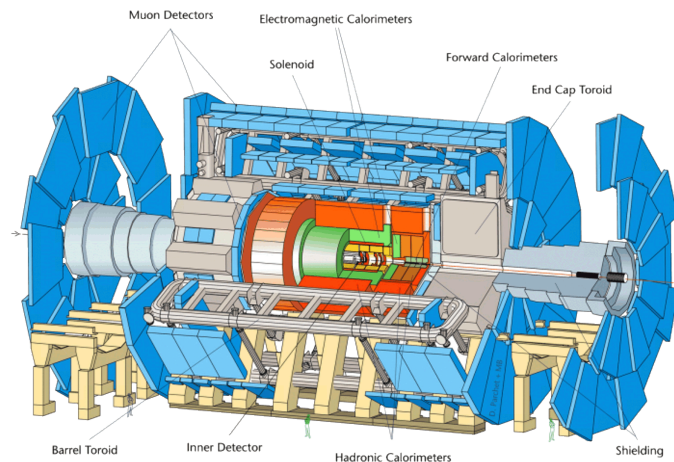
Les expériences ATLAS et CMS y découvrent le boson de Higgs

2013

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

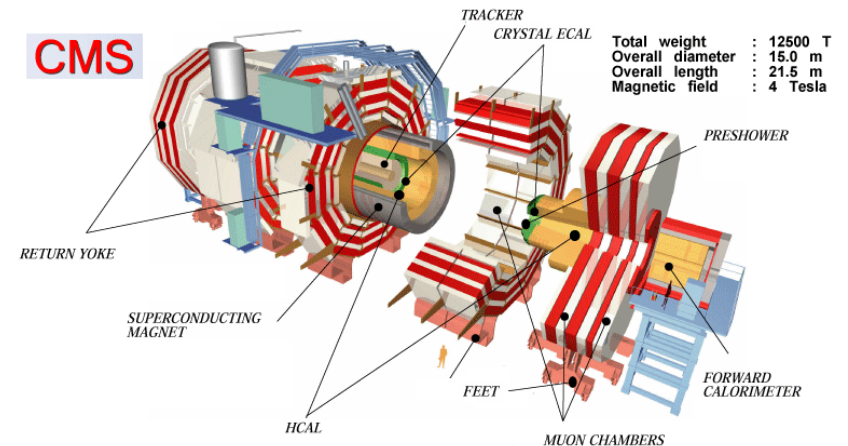
ATLAS

(L x l = 44 m x 22 m – 7000 t)



CMS

(L x l = 22 m x 15 m – 14500 t)



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 :

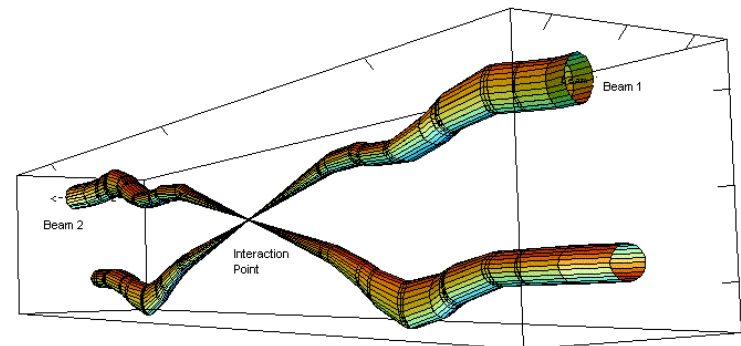
$$6,5 \text{ TeV} \times N_p \sim 650 \text{ millions de Joules}$$

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

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