

# Un accélérateur de particules, comment ça marche?

Nicolas Delerue

LAL (CNRS et Université de Paris-Sud)

Association Sciences-ACO

# L'accélérateur Linéaire

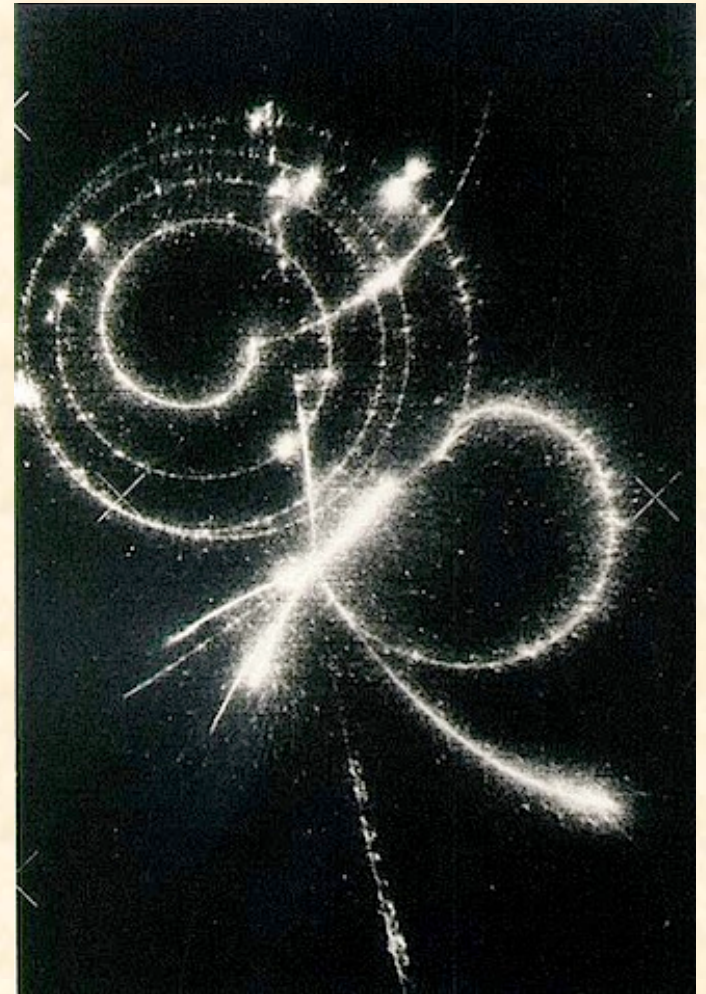
- Bienvenu au Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire (LAL).
- Comme son nom l'indique ce laboratoire a été construit pour héberger un accélérateur de particules linéaire.
- A quoi sert un accélérateur de particules?
- Pourquoi linéaire?



Projet d'accélérateur au Japon  
(source: KEK)

# A quoi sert un accélérateur de particules?

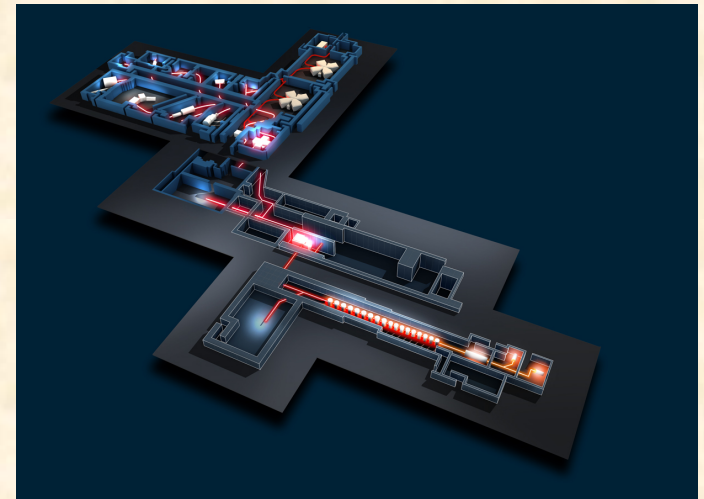
- Un accélérateur de particules permet d'accélérer des électrons, des protons ou des ions jusqu'à de très grandes énergies.
- Lorsque ces particules accélérées tapent sur une autre particule ou sur un noyau atomique elles le cassent.
- Plus l'énergie présente est grande plus les morceaux sont petits.
- Pour explorer la physique de l'infiniment petit il faut donc des accélérateurs d'énergie de plus en plus grande.





# Exemples d'accélérateurs (1)

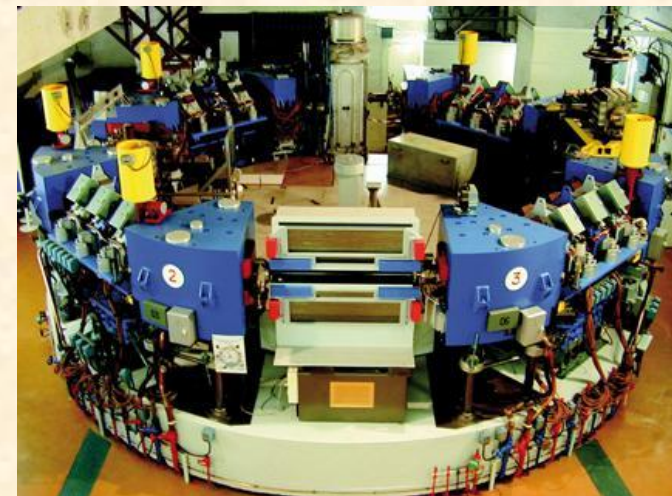
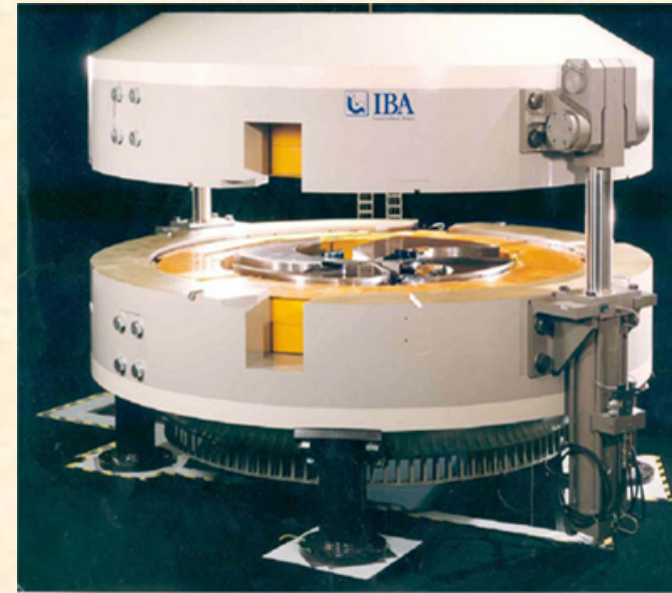
- Le plus grand accélérateur au monde s'appelle le LHC, il est situé à cheval sur la frontière Franco-Suisse près de Genève. Il fait 27km de circonférence. Il est utilisé pour accélérer des protons et des ions plombs. Il permet de chercher des particules nouvelles et d'étudier les lois fondamentales de la physique.
- D'autres accélérateurs sont spécialisé dans l'étude des noyaux nucléaires. Pour faire cela ce sont des ions qui sont accélérés. Il y a un accélérateur comme cela à l'IPN d'Orsay.





# Exemples d'accélérateurs (2)

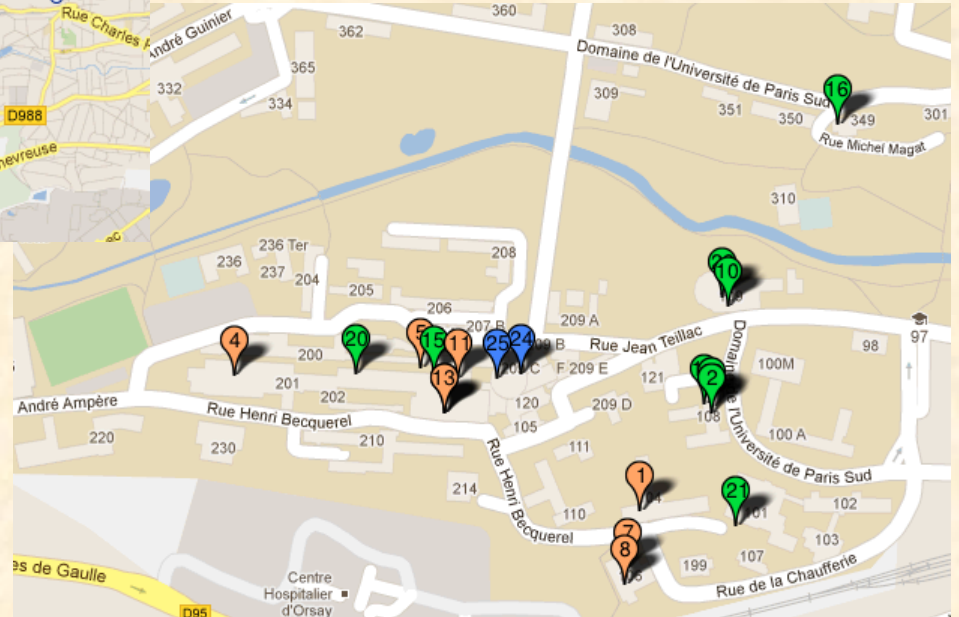
- Le centre de Protonthérapie d'Orsay utilise un petit accélérateur de protons appelé « Cyclotron ». Les protons sont envoyés sur les tumeurs cancéreuses de patients. La dose de radiation délivrée tue la tumeur presque sans abîmer les tissus voisins.
- L'Anneau de Collision d'Orsay d'un rayon de quelques mètres servait à accélérer des électrons et des positrons. A son époque il permettait d'étudier les propriétés « fondamentales » des interactions électrons-positrons. *Nous le visiterons tout à l'heure...*



# Quizz

- Combien d'accélérateurs il y a-t-il (actifs ou à l'arrêt) aux alentours d'Orsay-Bures-Gif-Saclay ?
- (A) Deux
- (b) Moins de 10
- (c) Moins de 20
- (d) Plus de 20

# Réponse



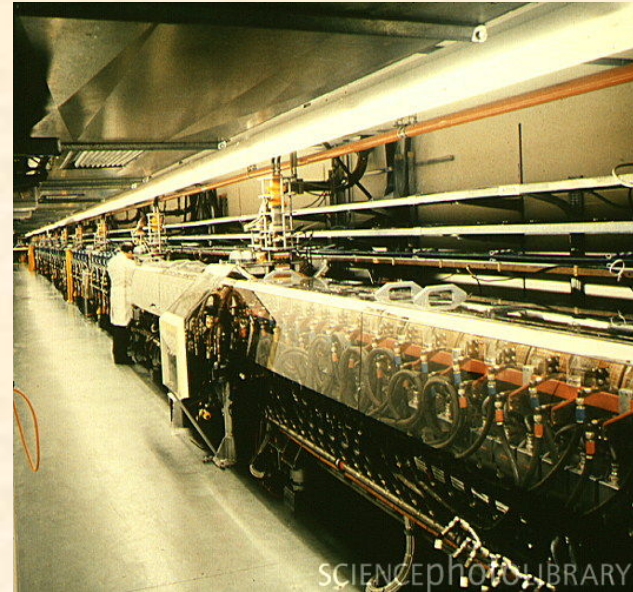
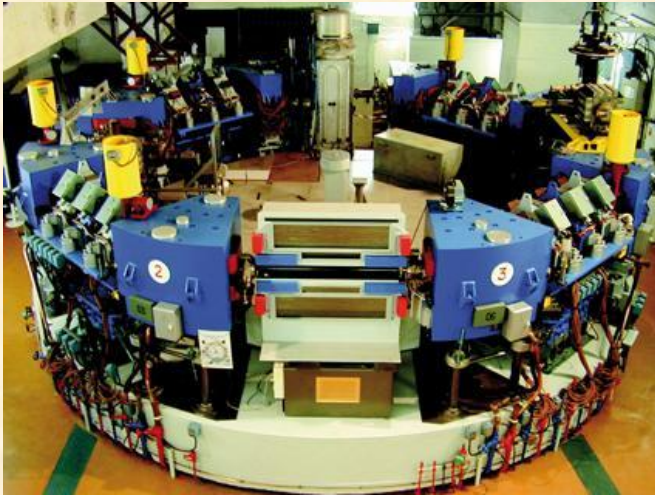
- (d) Plus de 20!!!

[http://lal.delerye.org/vulgarisation/accelerateurs/vallee\\_accelerateurs.php](http://lal.delerye.org/vulgarisation/accelerateurs/vallee_accelerateurs.php)



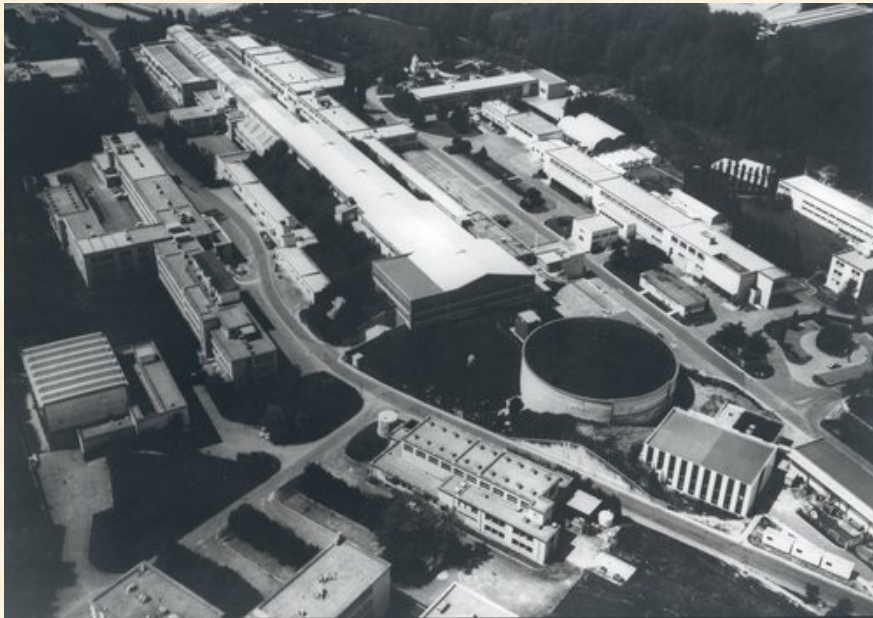
# Pourquoi linéaire?

- Il existe deux technologies d'accélérateurs:
  - Des accélérateurs linéaires
  - Des accélérateurs circulaires
- Les deux technologies ont leurs avantages et leurs inconvénients.
- En 1955 le premier accélérateur construit au LAL fut un accélérateur linéaire car la technologies semblait avoir plus de potentiel.
- Cependant à partir des années 1960 il fut complété par des accélérateurs circulaires qui connurent de grands succès.



# Les origines du LAL

- La construction a commencé en 1955.

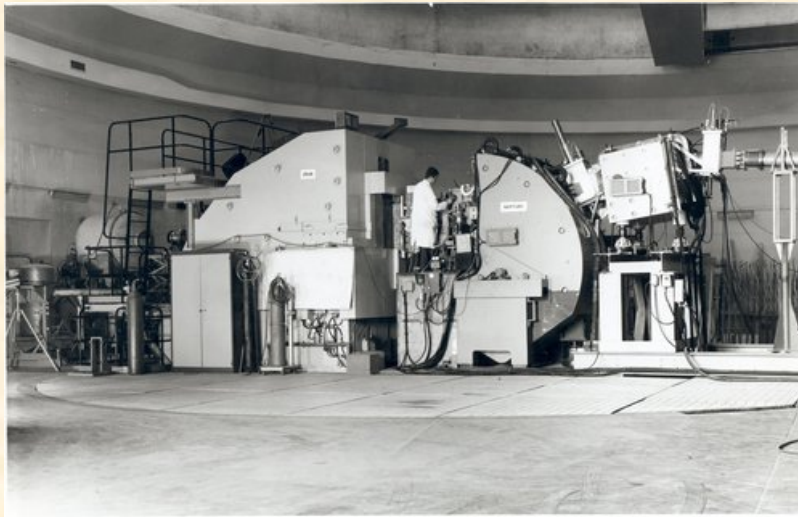


Vue aérienne du bâtiment de l'accélérateur linéaire à Orsay  
le 5 Octobre 1957



# Histoire des accélérateurs du LAL (1)

- A ces début l'accélérateur linéaire fut utilisé pour des expériences sur « cible fixe »: les électrons étaient envoyés sur une cible où ils produisaient des réactions nucléaires.





# Histoire des accélérateurs du LAL (2)

- Au début des années 60 un groupe italien commença la construction d'un anneau où les particules entreraient en collision (AdA). Cependant ils ne disposaient pas de l'infrastructure pour injecter dans cet anneau. Il fut donc apporté au LAL où eurent lieu pour la première fois des collisions  $e^+/e^-$ .



AdA sous une cloche en verre  
au Laboratoire National de Frascati

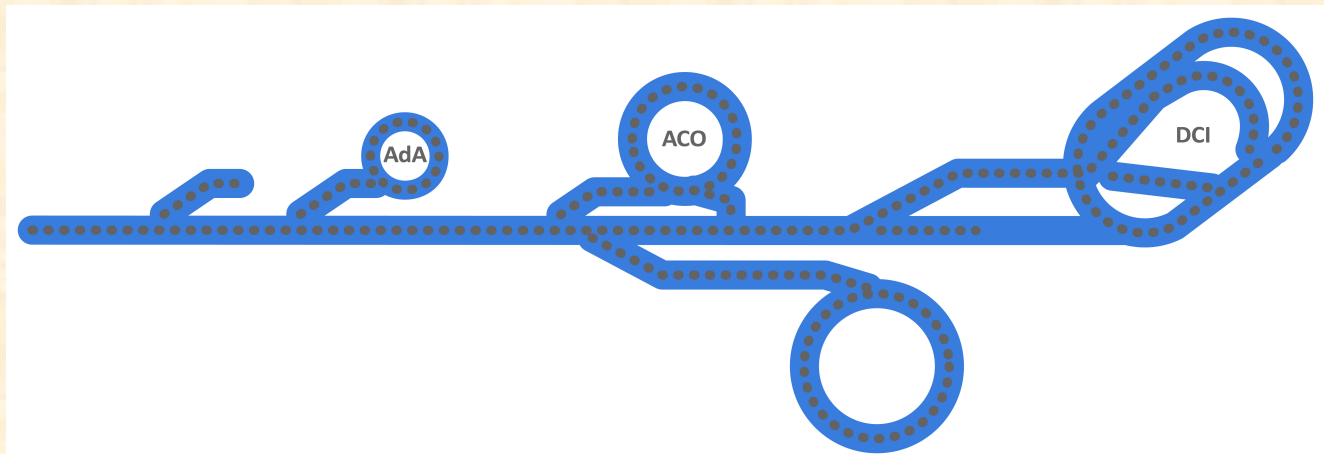
# Histoire des accélérateurs du LAL (3)

- Suite au succès de AdA, le LAL décida de construire son propre anneau de collisions: l'Anneau de Collisions d'Orsay (ACO).
- Cet anneau fut utilisé tout d'abord pour des expériences de physique des particules.
- Cependant dans les années 1970 il fut convertit en source de lumière intense.
- Après ACO un autre anneau appelé « DCI » fut construit pour des expériences de physique des particules à plus haute énergie.
- Plus tard DCI fut à son tour convertit en source de lumière. Un autre anneau sur le site, Super-ACO servait aussi de source de lumière.
- Le dernier de ces accélérateurs fut éteint au début des années 2000...



# Plan & Chronologie

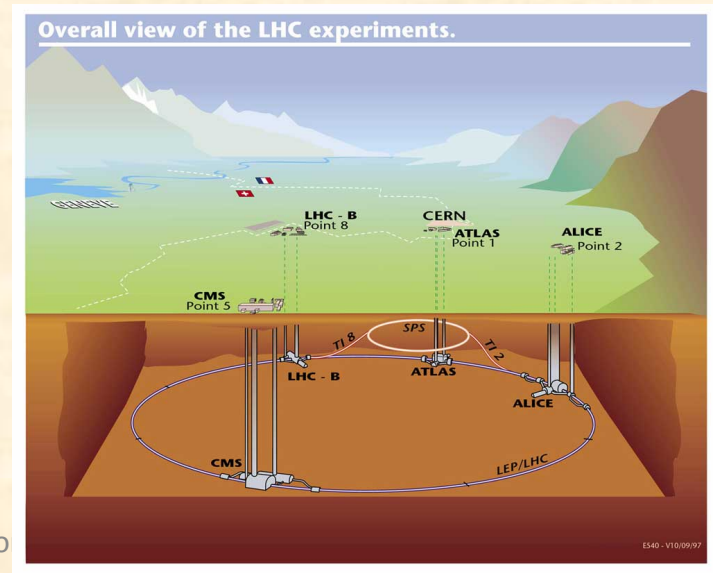
- **Chronologie des activités accélérateurs sur le site du LAL**
- 1950-1954: Petits linacs à l'ENS Ulm (rue de Lhomond)
- 1955:
  - Yves Rocard décide de construire un accélérateur linéaire
  - Accord entre Yves Rocard (ENS Ulm) et Irène et Frédéric Joliot Curie pour la construction d'un site de recherche en physique nucléaire à Orsay.
- 1957: Photos du LAL en construction ([a](#)) et ([b](#))
- 19858 1er faisceaux de l'accélérateur linéaire
- 1960: A Frascati (Italie) Bruno Touschek propose de construire un collisionneur électrons-positrons
- 1961: L'accélérateur linéaire d'un GeV<sup>2</sup> du LAL est terminé
- 1962: Les physiciens de Frascati amènent leur collisionneur, AdA<sup>2</sup> à Orsay pour utiliser le linac du LAL comme injecteur (installé dans la salle 500 MeV<sup>2</sup>).  
Photos: [AdA au LAL](#), [AdA dans la salle 250 MeV](#)
- 1963: L'extension de l'accélérateur à 1,3 GeV<sup>2</sup> est complétée.
- 1964: Construction de l'igloo.
- 1965: Démarrage de l'Anneau de Collision d'Orsay (ACO)  
Photo: [ACO](#)
- 1967: Premières collisions e<sup>+</sup>/e<sup>-</sup> sur ACO
- 1973: Installation de la première ligne de lumière pour réutiliser le rayonnement synchrotron produit par ACO (par le Laboratoire pour l'Utilisation du Rayonnement Electromagnétique, LURE).
- 1975:
  - Fin de la physique des particules sur ACO. ACO est désormais entièrement consacré à l'utilisation du rayonnement synchrotron.
  - Démarrage de DCI (Dispositif de Collision dans l'Igloo)
- 1976: Début de la physique des particules sur DCI.
- 1980-1986: Les équipes accélérateurs du LAL construisent l'injecteur du LEP (LIL) au CERN
- 21 juin 1983: 1ère démonstration au monde d'un laser à électron libre fonctionnant de la visible, sur ACO.
- 1985: Fin de la physique des particules sur DCI qui est reconverti en source de lumière synchrotron.
- 1987: Démarrage de Super-ACO
- 29 avril 1988: Arrêt d'ACO.
- 1992: Démarrage de CLIO, Laser à électrons libres dans l'infrarouge.
- 1999: Démarrage d'Elyse, photoinjecteur construit par les équipes du LAL pour le Laboratoire de Chimie Physique (LCP).
- 2001: Arrêt de DCI et de Super-ACO; Place à SOLEIL.
- 2003: Arrêt définitif du LINAC du LAL (19/12)
- 2009: Démarrage de PHIL, photoinjecteur installé au LAL
- (2016?) Démarrage de ThomX<sup>2</sup>





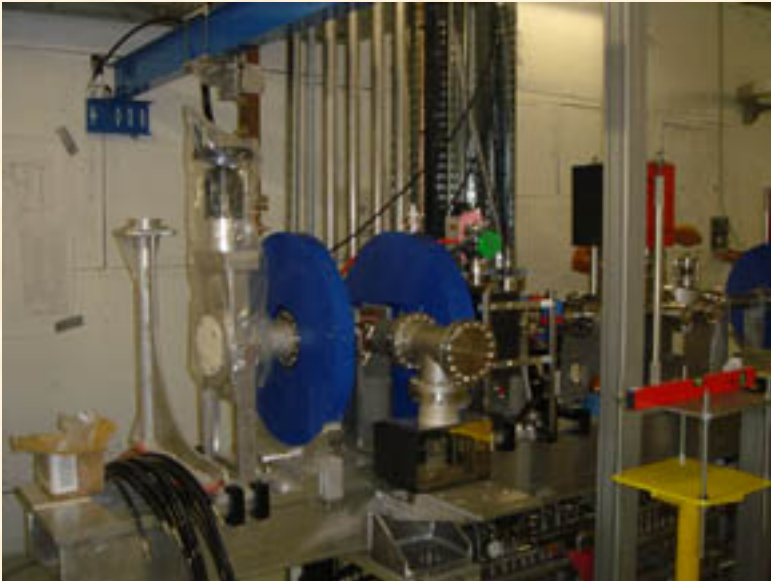
# SOLEIL et le LHC

- L'extinction des accélérateurs du site de LAL ne marqua pas la fin des recherches utilisant des accélérateurs sur le campus.
- Une nouvelle source de lumière, plus grande et plus moderne fut construite à quelques kilomètres d'ici: SOLEIL.
- Les chercheurs du LAL participent activement aux recherches faites au CERN sur le LHC.
- Et nous construisons de nouveaux accélérateurs...

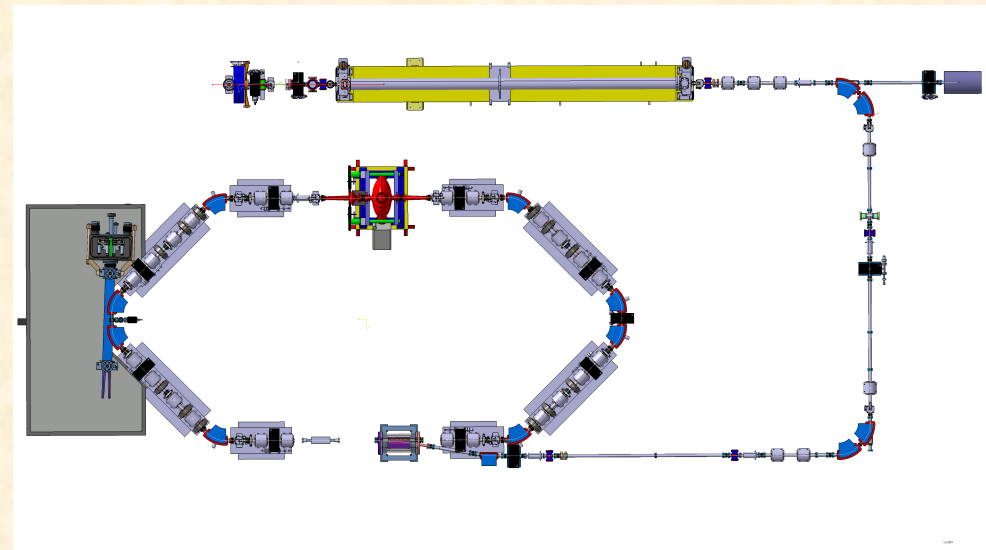


# R&D accélérateurs au LAL

- Le LAL est le principal centre de recherche en accélérateurs à électrons pour la physique des particules en France.
- En ce moment le département accélérateur du LAL test un nouveau type de « canon à électrons » pour produire des faisceaux de meilleure qualité.
- Un projet de construction d'un accélérateur compact pour produire des rayons X a été approuvé l'année dernière.



Nicolas Delerue, LAL Orsay



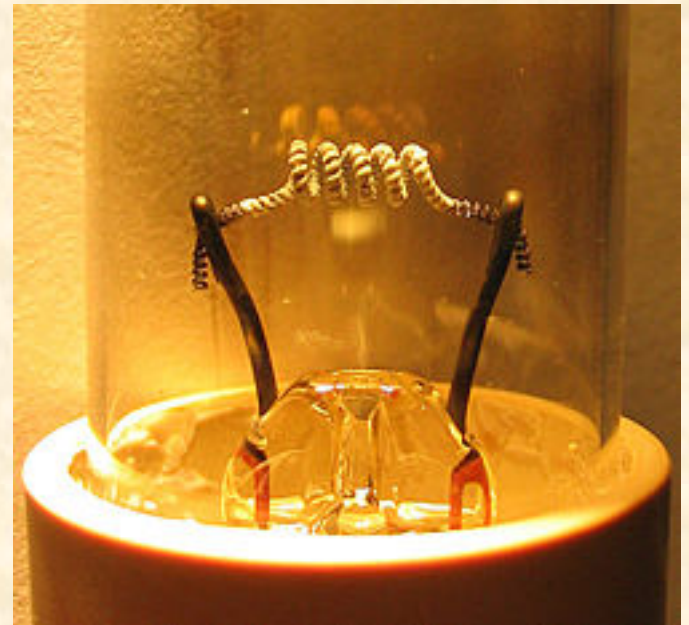
Visites Anneau de Collisions d'Orsay

# Comment fonctionne un accélérateur de particules?



# « Production » de particules: électrons

- Les électrons sont les particules les plus simples utilisées dans les accélérateurs.
- Lorsqu'un morceau de métal est chauffé il émet des électrons.
- Normalement ces électrons retombent tout de suite sur le morceau de métal.
- Cependant si un champ électrique est appliqué ces électrons peuvent être arrachés.
- C'est le principe « thermoïonique » de production des électrons.

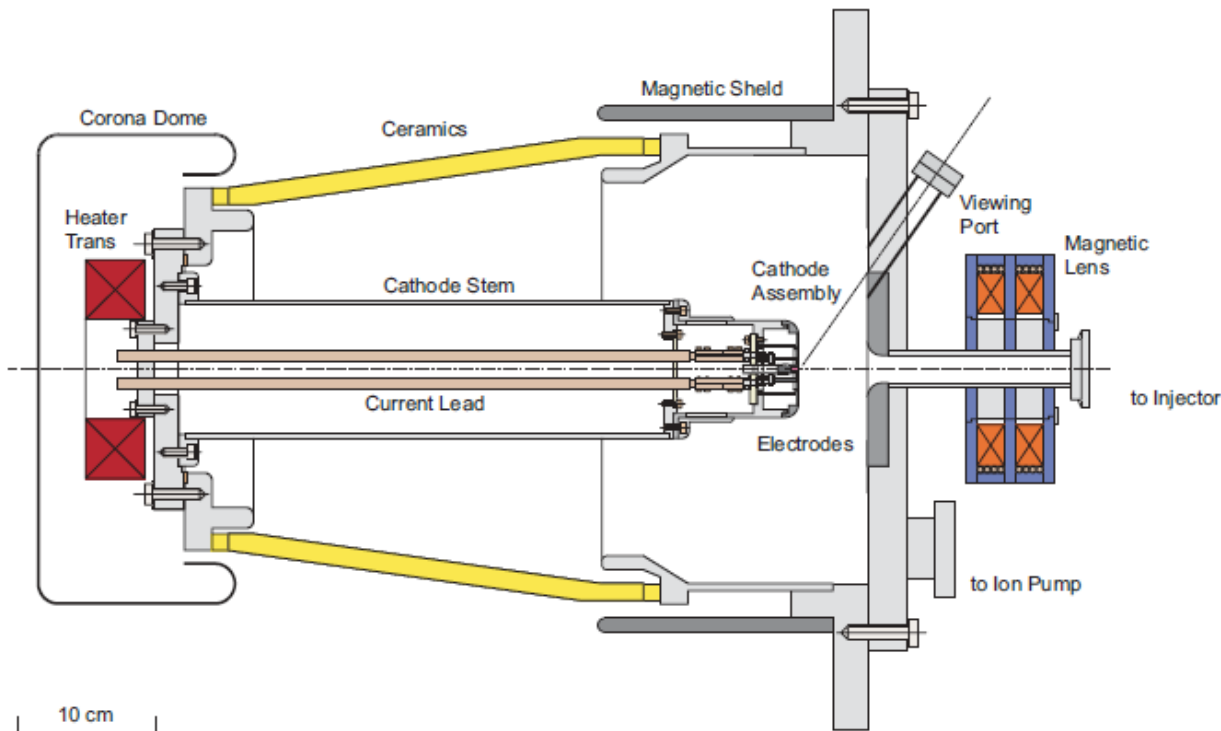


Source de l'image: wikipedia

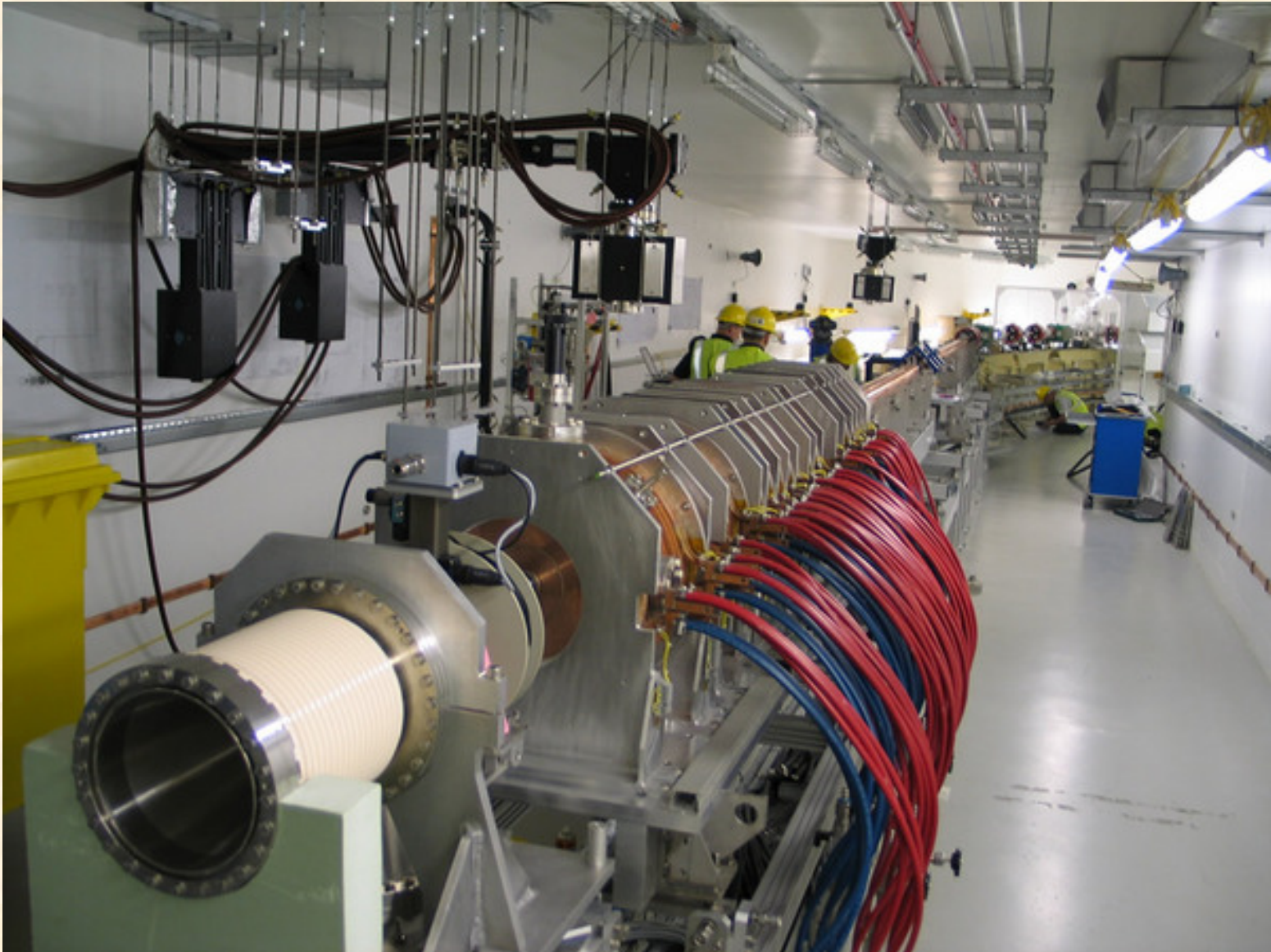
# Exemple de source thermoionique

SCSS

## *500kV Electron Gun*



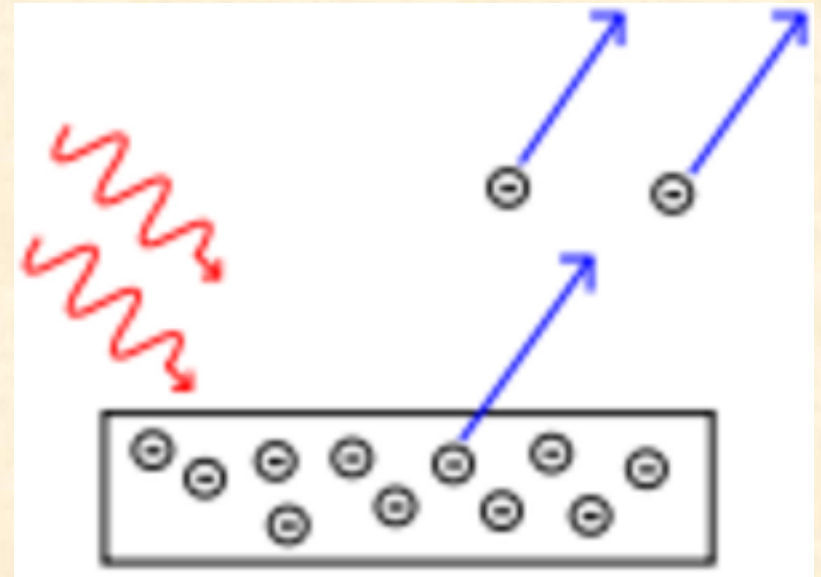
# Exemple de source thermoionique





# « Production » de particules: électrons

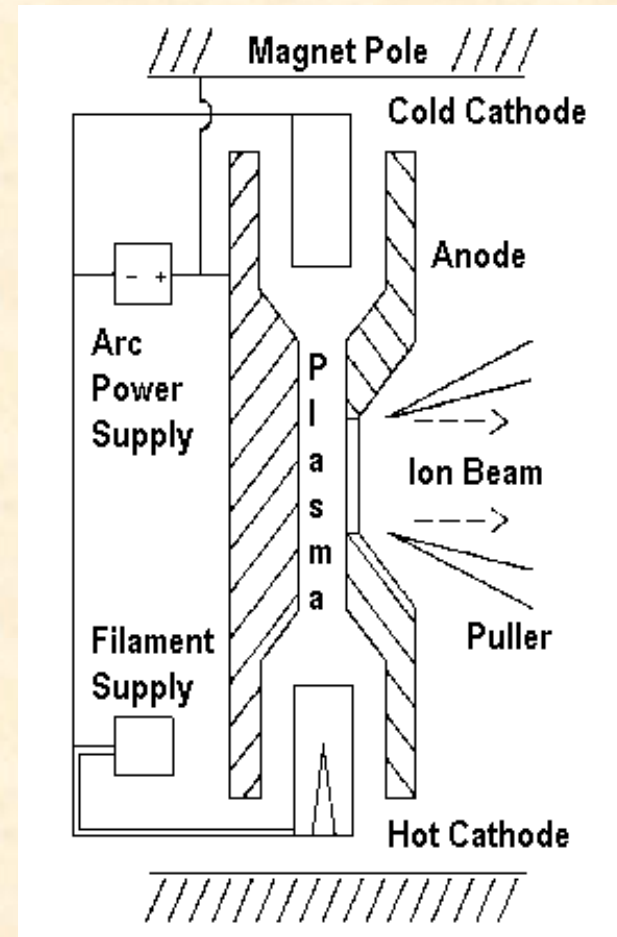
- Au lieu d'attendre que les électrons s'échappent du métal il est possible de les « forcer » à sortir en utilisant un laser et un champ électrique très fort.
- Un tel dispositif s'appelle un « photo-canon HF ».
- Cela permet de produire des paquets d'électrons beaucoup plus intenses et de bien meilleure qualité.
- Au LAL le projet PHIL étudie la conception de photo-canons HF.
- Le LAL a fourni l'un des photo-canons HF du CERN.



Source de l'image: wikipedia

# « Production » de particules: protons

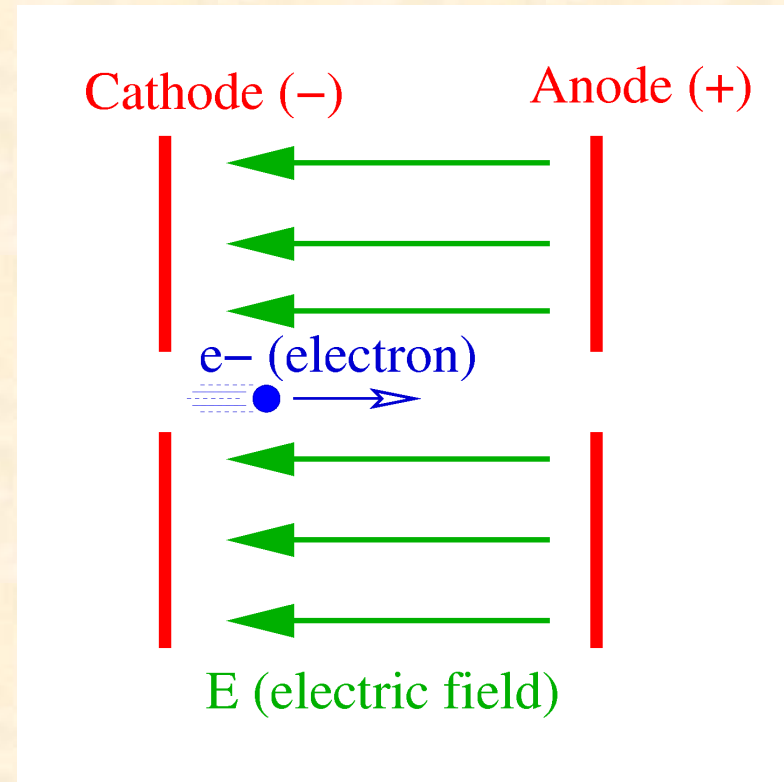
- Le plus grand accélérateur du monde, le LHC, utilise des particules appelées « protons ».
- La production de protons est différente de celle des électrons.
- Un atome d'hydrogène est formé d'un proton et d'un électron.
- En ionisant de l'hydrogène dans un champ électrique intense il est donc possible de produire des protons.



Source de l'image: CERN

# Accélération: champ fixe

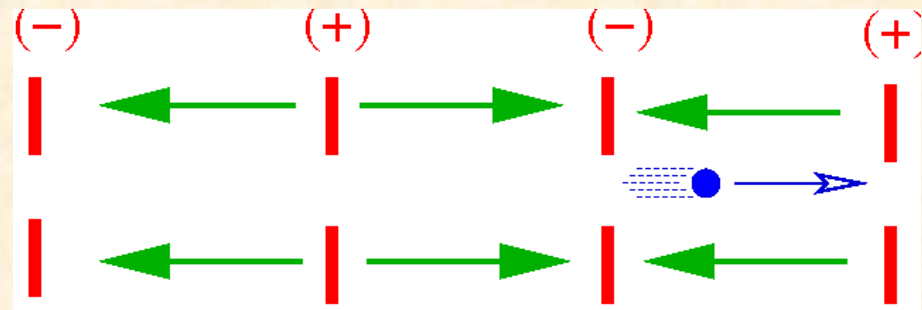
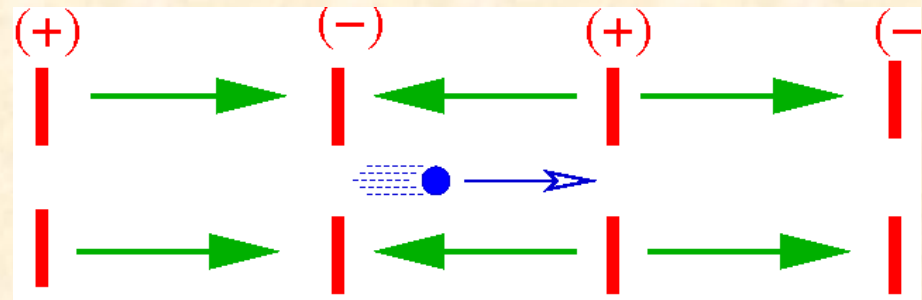
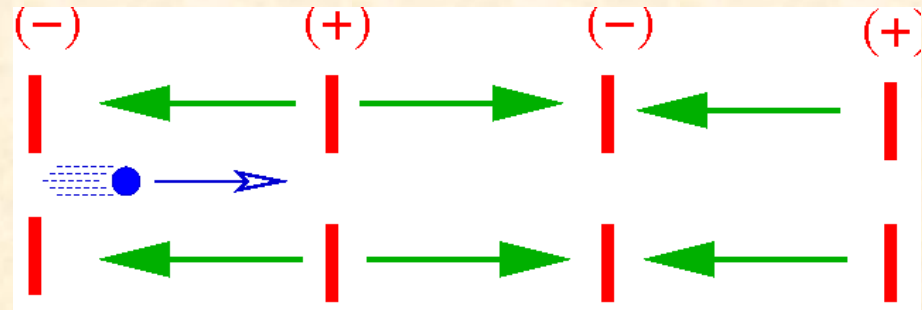
- Une particule chargée placée dans un champ électrique est accélérée.
- Certains accélérateurs de type Van de Graaff utilisent exclusivement ce principe.
- Cependant ils sont limités à des accélérations d'une dizaine de Megavolts.
- Les accélérateurs moderne ont besoin de centaines de Gigavolts!



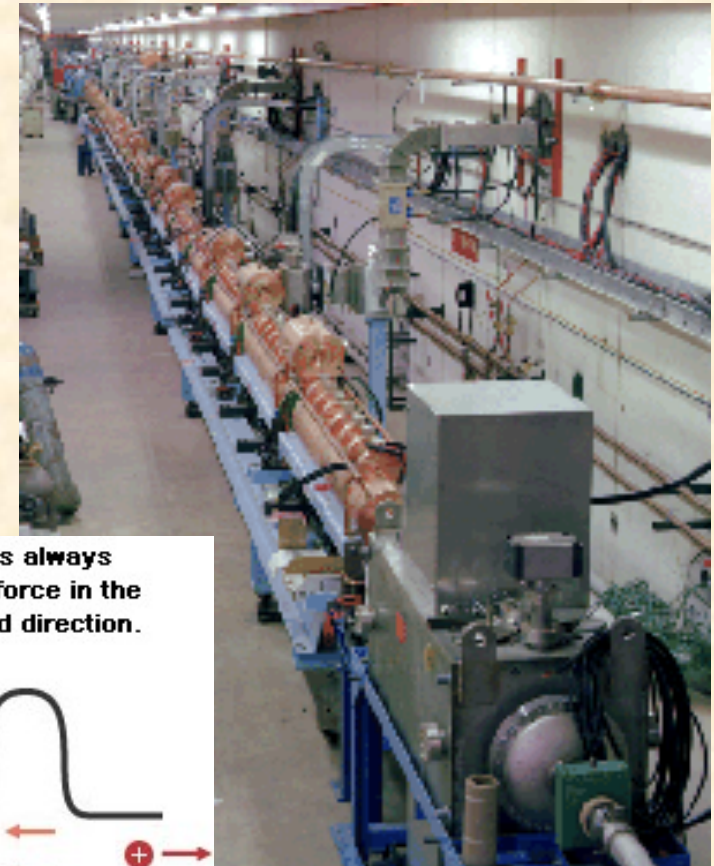
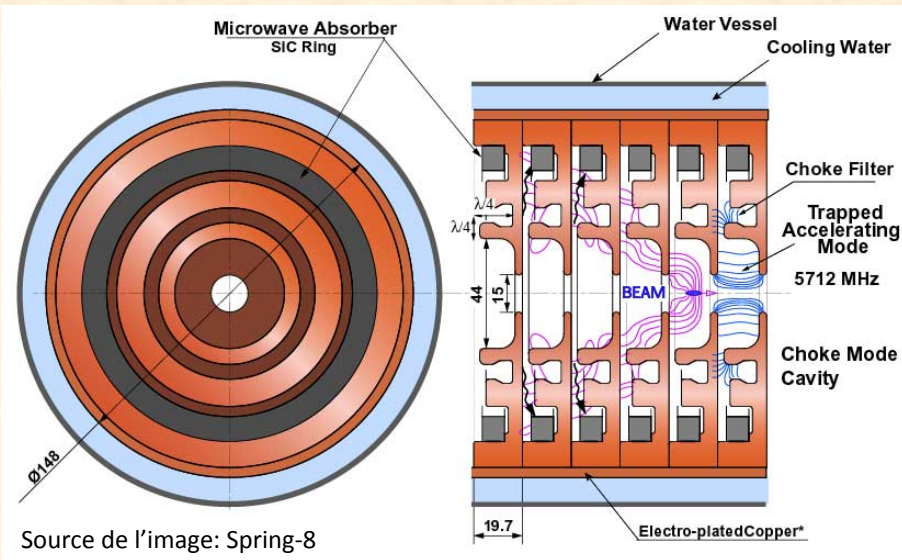


# Accélération: champ alternatif

- Au lieu d'utiliser un champ fixe il est possible d'utiliser un champ alternatif.
- De cette manière les particules peuvent être accélérées jusqu'à des énergies beaucoup plus grandes.
- La plupart des accélérateurs modernes utilisent de telles cavités accélératrices.

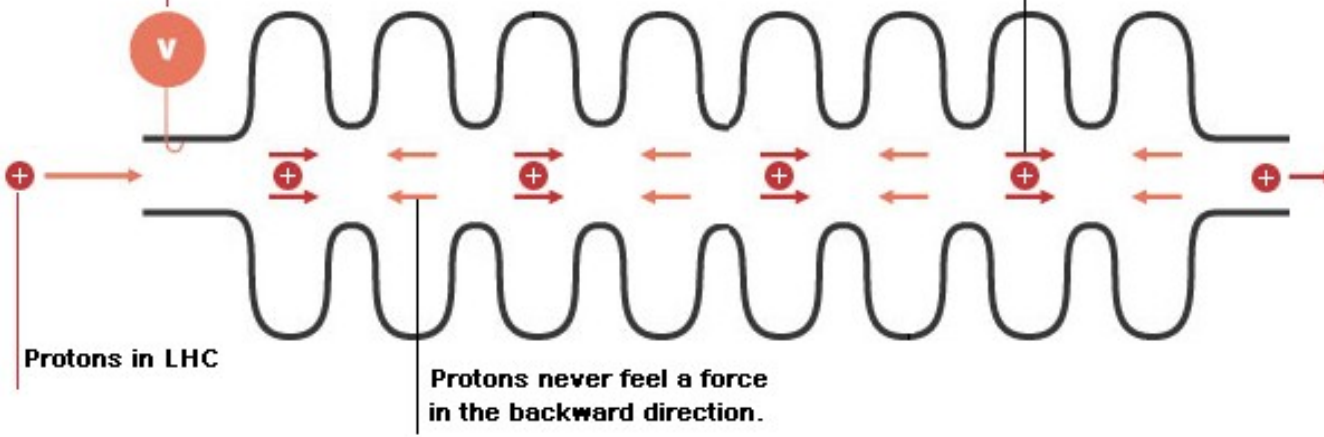


# Cavités accélératrices



A voltage generator induces an electric field inside the RF cavity. Its voltage oscillates with a radio frequency of 400 MHz.

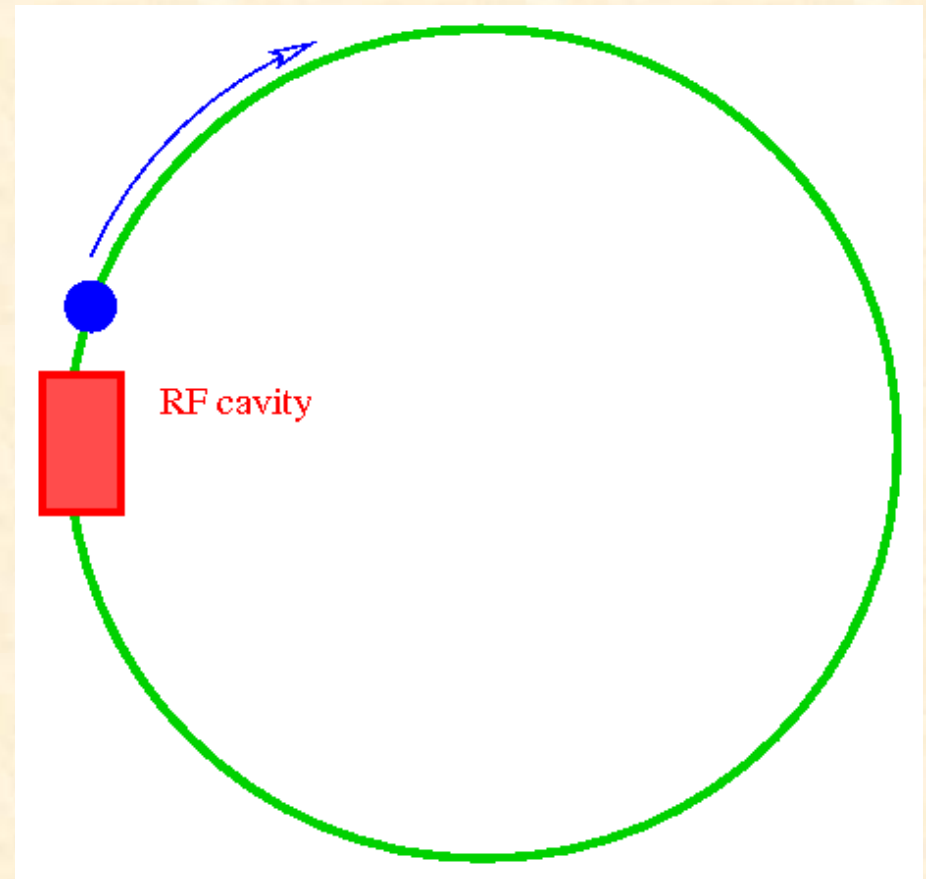
Protons always feel a force in the forward direction.



Source de l'image: CERN

# Synchrotron - Accélérateurs circulaires

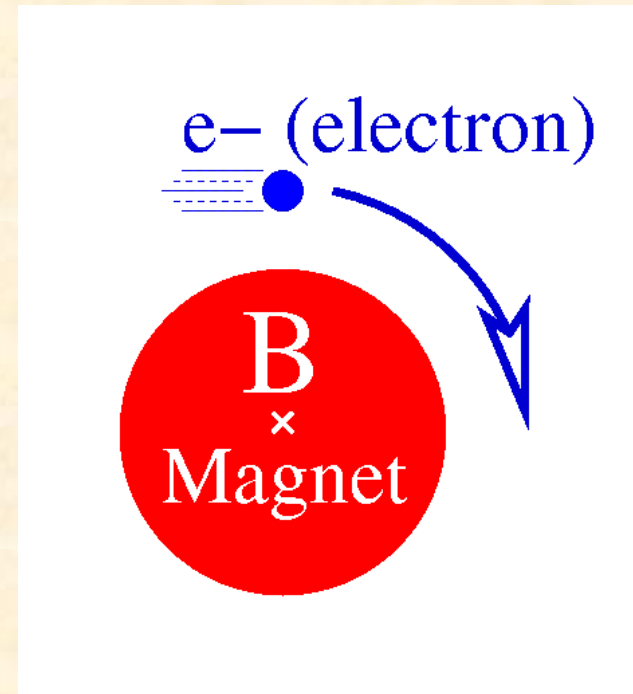
- Il est possible de réutiliser une cavité accélératrice plusieurs fois en utilisant un accélérateur circulaire.
- La plupart des grands accélérateurs modernes sont des accélérateurs circulaires.





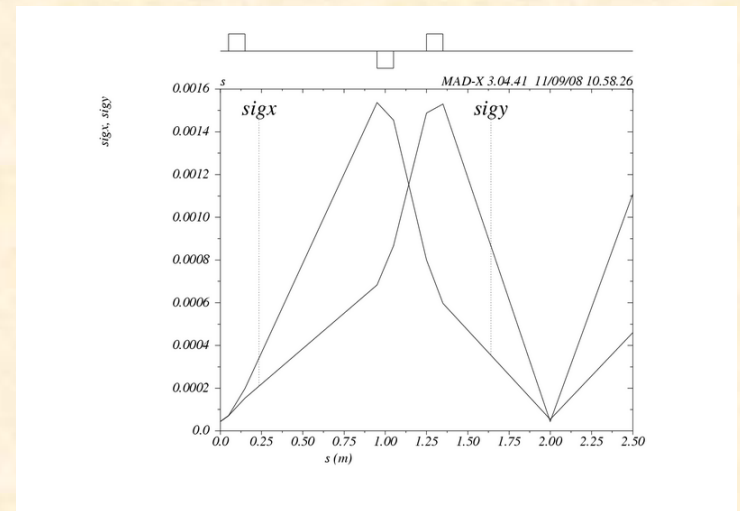
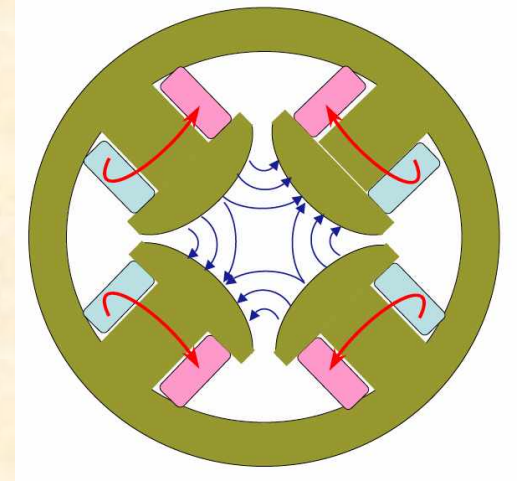
# Contrôle des particules

- Pour contrôler la direction des particules (par exemple pour les faire tourner en rond) il est possible d'utiliser soit un champ électrique, soit un champ magnétique.
- Dans la plupart des cas il est beaucoup plus économique d'utiliser un champ magnétique.
- Un accélérateur utilise donc de très gros électro-aimants pour contrôler la direction des particules.



# Contrôle des particules: focalisation

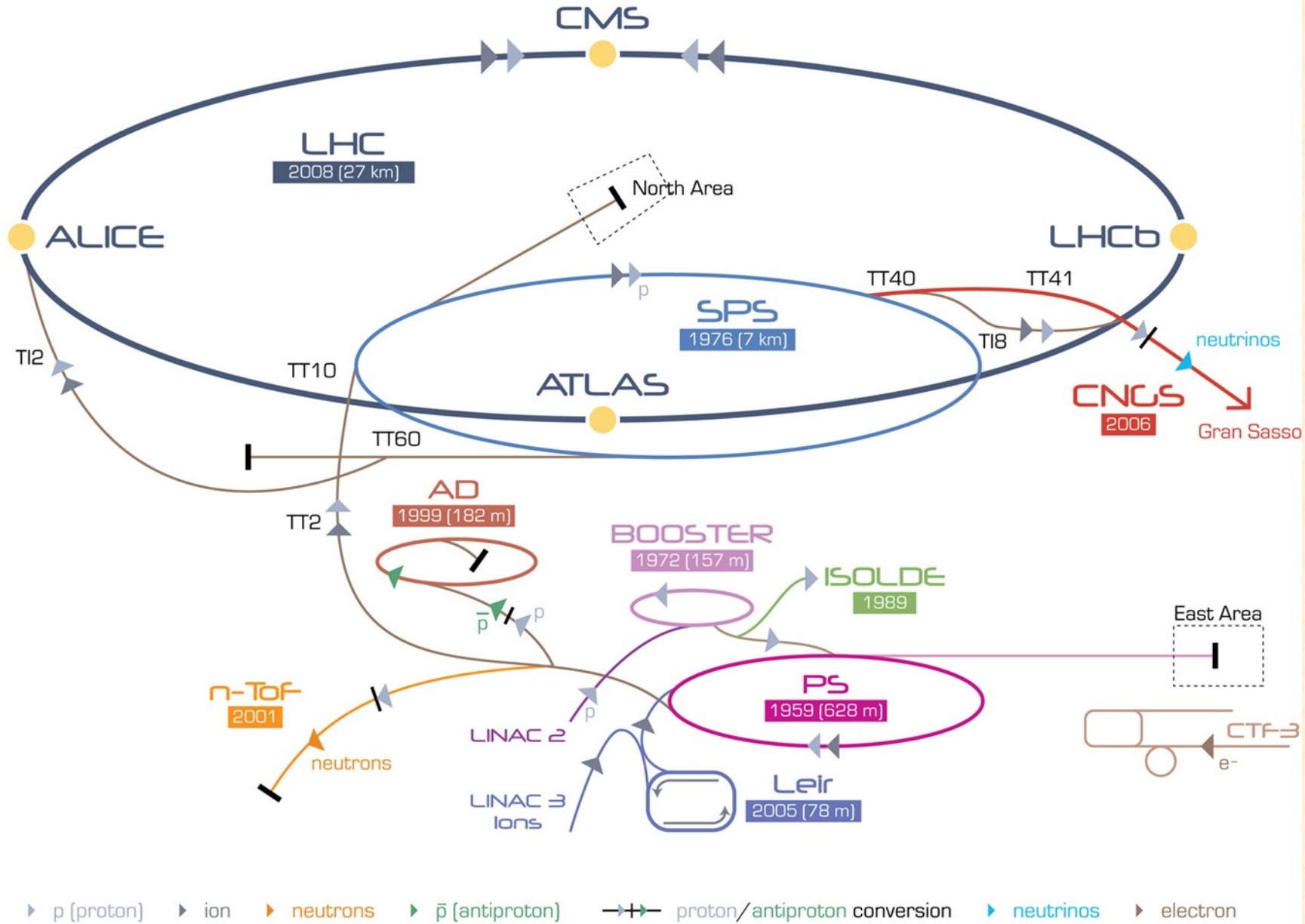
- En plus de contrôler la direction des particules il faut aussi contrôler la taille du faisceau de particules.
- Cela se fait grâce à un assemblage spécial d'aimants appelé « quadrupôle ».



# Un accélérateur de particules: comment ça marche?

- Maintenant vous connaissez tous les éléments nécessaires à la construction d'un accélérateur:
  - Canon thermoïonique ou photo-canon HF pour les électrons,
  - Canon à plasma pour les protons,
  - Champs électriques et cavités accélératrices pour l'accélération,
  - Champs magnétiques, aimants dipôles et aimants quadrupôles pour la contrôler les faisceaux.
- Regardons maintenant le plus gros complexe d'accélérateurs du monde: le CERN.





**LHC** Large Hadron Collider    **SPS** Super Proton Synchrotron    **PS** Proton Synchrotron

**AD** Antiproton Decelerator    **CTF-3** Clic Test Facility    **CNCS** Cern Neutrinos to Gran Sasso    **ISOLDE** Isotope Separator OnLine DEvice

**LEIR** Low Energy Ion Ring    **LINAC** LINear ACcelerator    **n-ToF** Neutrons Time Of Flight

# Le Large Hadron Collider

- Le LHC (Grand Collisionneur de Hadrons) est l'accélérateur le plus grand du monde.
- Il fait 27km de circonférence et les protons y voyagent à une vitesse très proche de celle de la lumière, donc il y font près de 10000 tours par seconde!
- Le LHC est construit à la frontière entre la France et la Suisse. 7km du LHC sont en Suisse, le reste est en France.
- Pour économiser de l'énergie les aimants du LHC sont supraconducteur. Le LHC est à une température de 1.9K, plus froid que l'espace intergalactique!



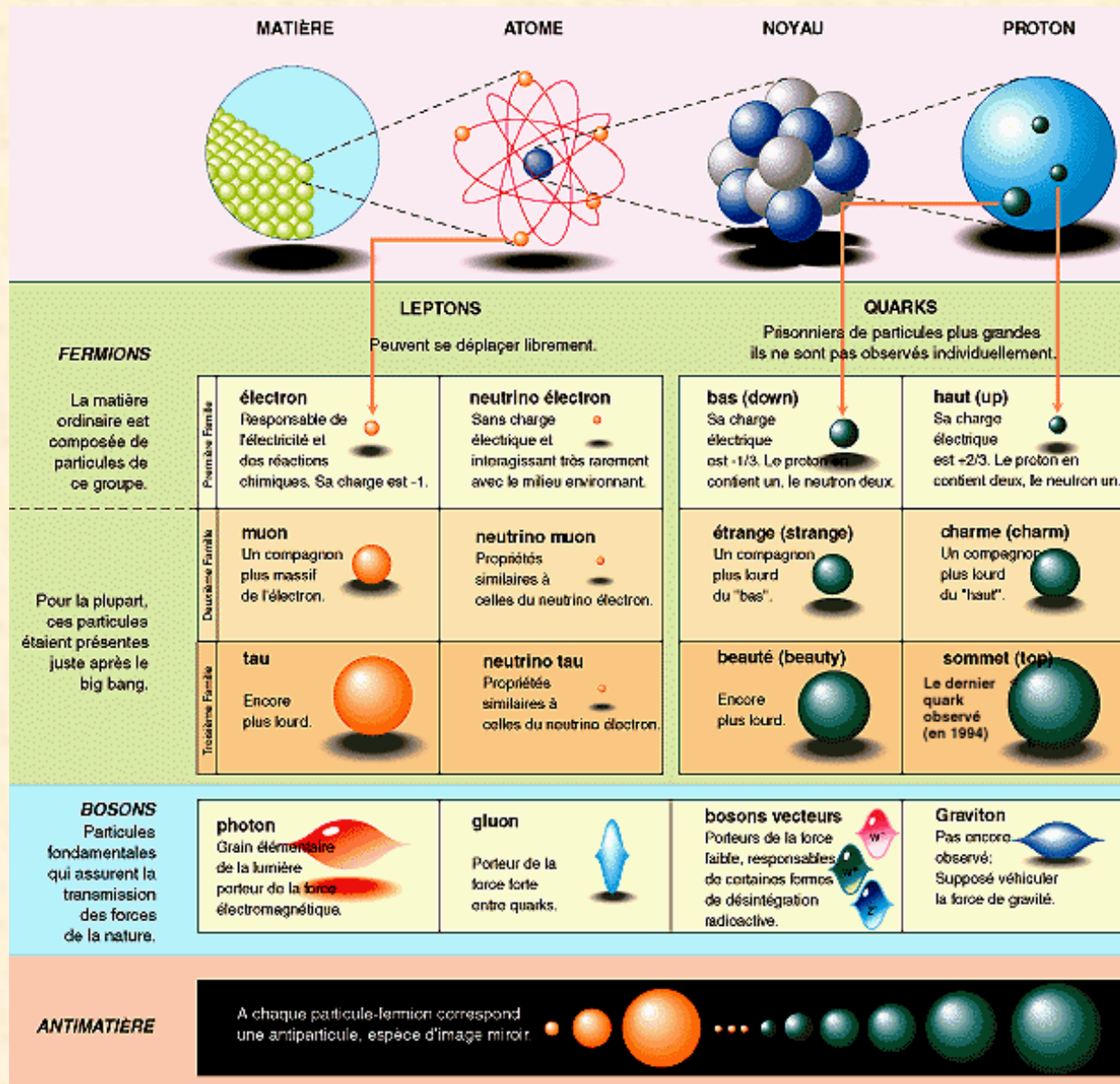




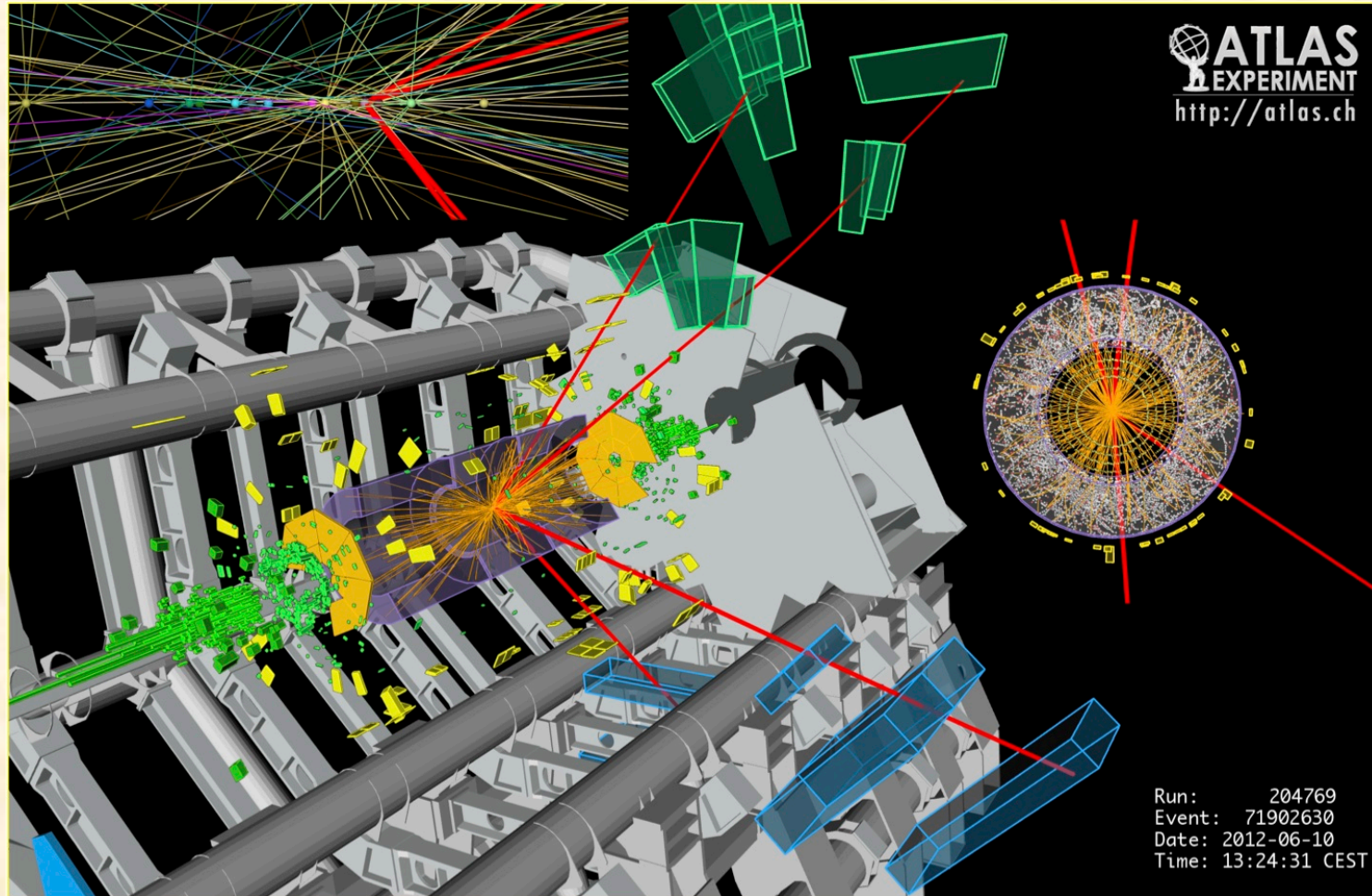


# A quoi servent les accélérateurs de particule?

# Physique des particules



# Y compris le boson de Higgs...

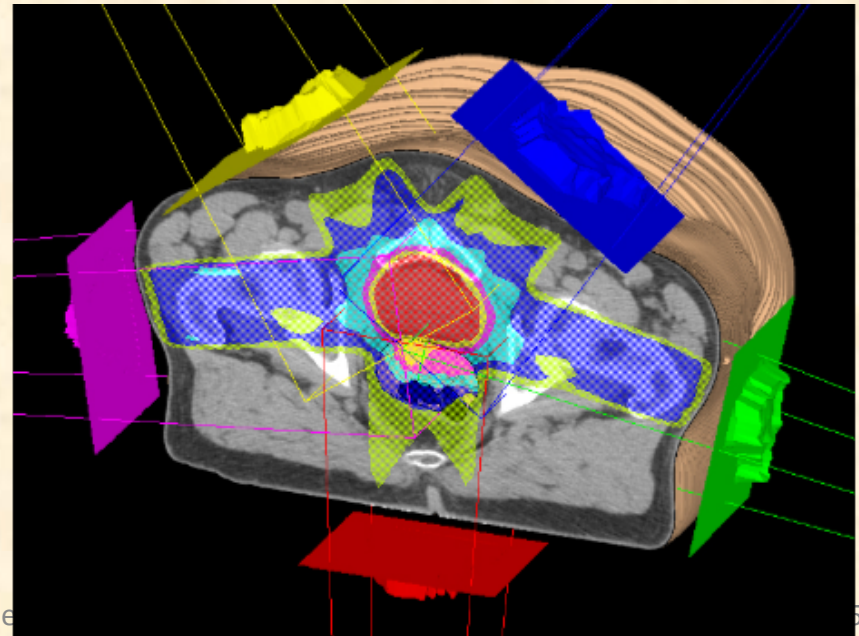
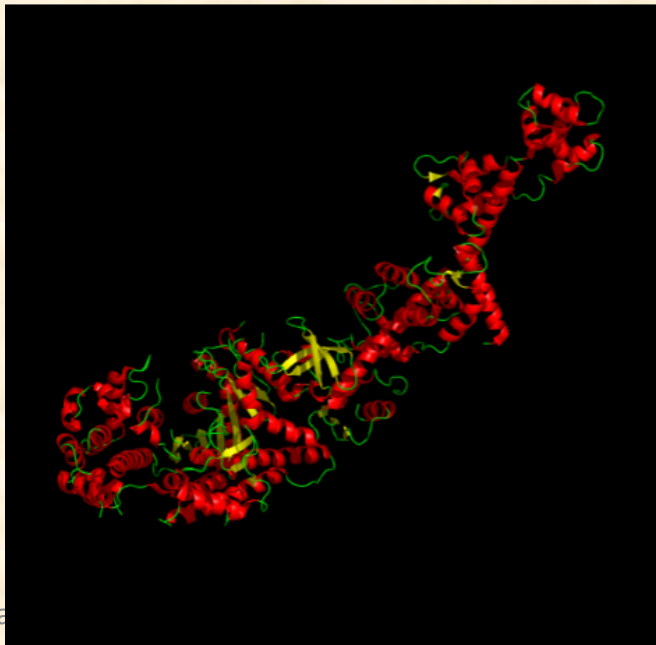


- Observation possible de la désintégration d'un Boson de "Brout-Engler-Higgs".

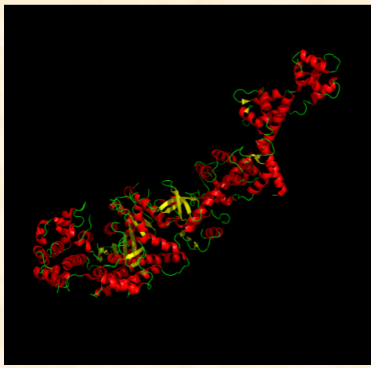


# Médecine

- Traitement du cancer (radiothérapie et protonthérapie)
- Structure des protéines
- Isotopes radioactifs

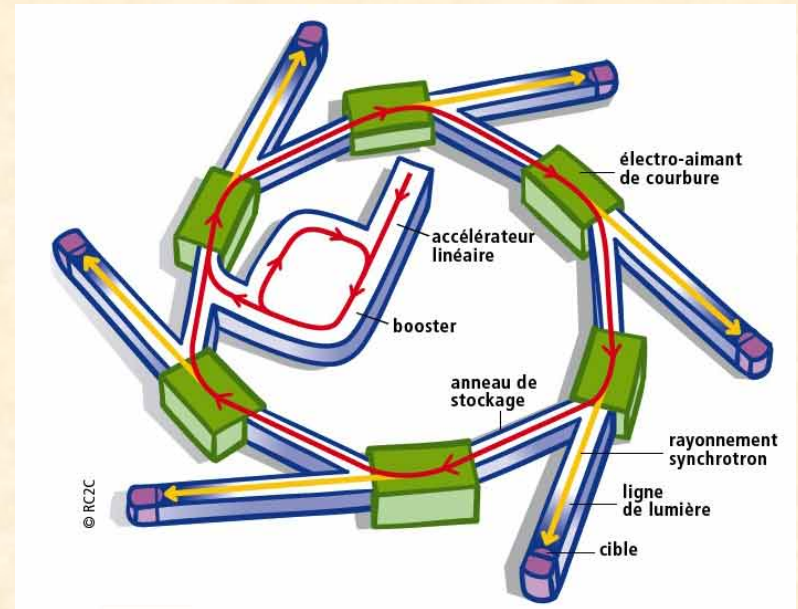






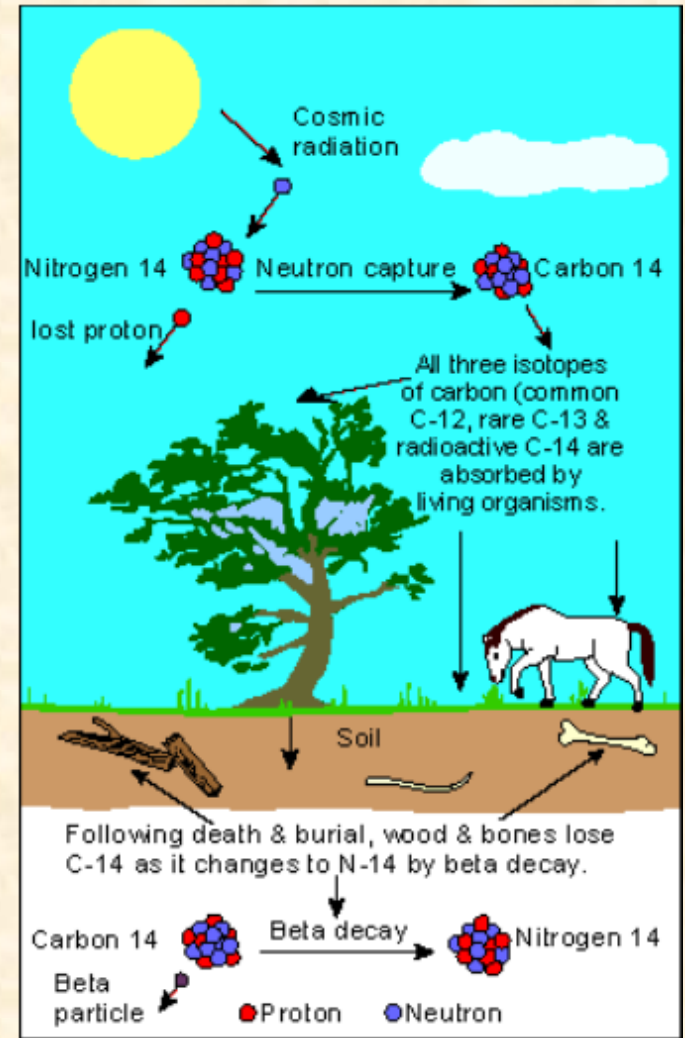
# Etude de la matière

- Structure de matériaux, de cristaux...
- Composition de matériaux



# Datation d'objets anciens

- Datation au carbone 14 par spectrométrie de masse.
- Etude des techniques de fabrication de matériaux ou de leur composition.



# Emplois autour de la recherche au LAL

- Environ 300 personnes travaillent au LAL.
- La moitié sont des chercheurs.
- Cependant il y a de nombreux métiers associés (ingénieurs, techniciens, administratifs):
  - Il faut construire les structures mécaniques des accélérateurs et des détecteurs associés  
=> service mécanique
  - Il faut construire l'électronique de contrôle  
=> service électronique
  - Il faut gérer des moyens de calcul informatique puissant  
=> service informatique
  - Il faut aussi gérer les finances, les achats, ...  
=> services administratifs

# Un lieu d'histoire et de recherche

- Nous allons maintenant visiter l'accélérateur ACO, inscrit à l'inventaire supplétif des monuments historiques.
- Les accélérateurs du site qui a participé aux progrès de notre compréhension de l'Univers pendant 50 ans.
- La laboratoire est toujours très actif même si les accélérateurs sont principalement ailleurs.
- Il y a des nombreux métiers associés qui contribuent au succès de nos recherches.