

# Des accélérateur de particules près de nous et dans notre vie quotidienne

Nicolas Delerue

LAL (CNRS et Université de Paris-Sud)

Association Sciences-ACO

# Sommaire

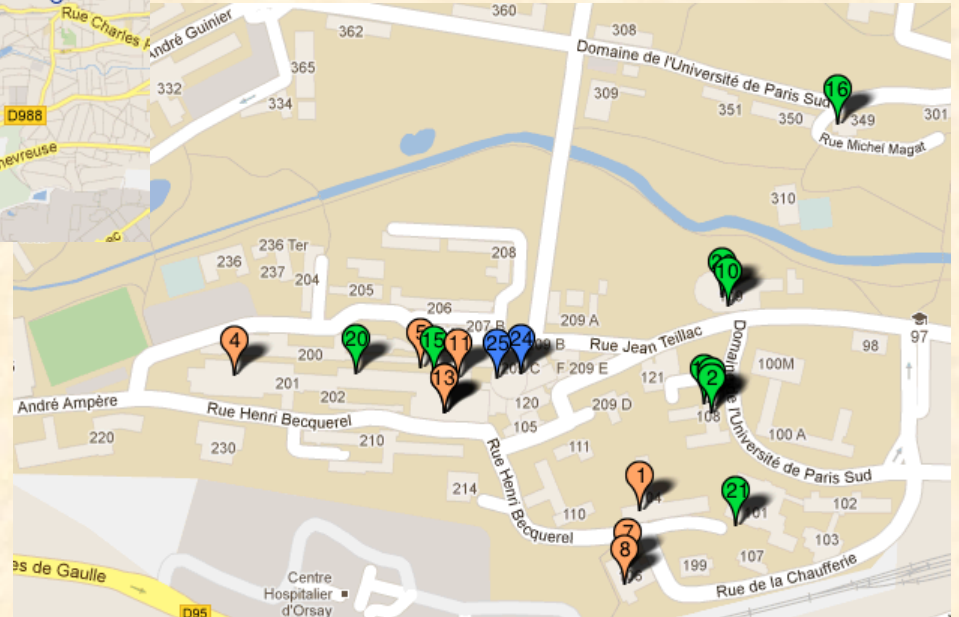
- Accélérateurs près d'ici et dans des lieux insolites
- Quelques exemples d'application
- Qu'est-ce qu'un accélérateur de particules?
- Comment fonctionne un accélérateur de particules?
- Applications:
  - Physique des particules
  - Médecine
  - Biologie/Chimie
  - Archéologie
- Patrimoine à Orsay
- Le future

# Quizz

- Combien d'accélérateurs (\*) sont actifs aux alentours d'Orsay-Bures-Gif-Saclay ?
- (A) Deux
- (b) Entre 2 et 10
- (c) Entre 10 et 20
- (d) Plus de 20

*(\*) Accélérateurs d'une tension de plus de 1MV.*

# Réponse



- (c) Entre 10 et 20!!!
- Dans une dizaine de laboratoires différents...
- Physique, chimie, biologie,...

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

Nicolas Delerue, LAL Orsay,  
Sciences ACO

Accélérateurs de particules

# Accélérateurs près du campus

- Sur le campus d'Orsay, 4 laboratoires utilisent des accélérateurs de particules:
  - Laboratoire de Chimie Physique
  - Institut de Physique Nucléaire
  - CSNSM
  - Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire
- L'institut Curie utilise aussi un accélérateur pour traiter des patients atteints du cancer.
- A proximité du campus, le synchrotron SOLEIL et le CEA utilisent aussi des accélérateurs de particules.
- Mais il y a aussi des accélérateurs dans des lieux plus insolites...

# Le Louvre



- Sous le musée du Louvre il y a un accélérateur de particules!

# Le Louvre



- L'accélérateur AGLAE sert à étudier les œuvres d'art du musée du Louvre...



# Le centre spatial de Kourou



- Avant le lancement d'une fusée ses réacteurs sont chargé d'un mélange extrêmement explosif.
- Pour s'assurer que les réacteurs sont correctement remplis sans créer de chocs un accélérateur de particules est utilisé par la société Regulus comme source de rayons X à 16 MeV.



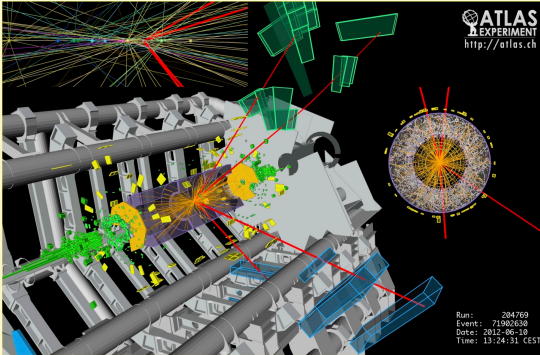
# Les hôpitaux



- Les gros hôpitaux sont équipés d'accélérateurs de particules pour préparer certains médicaments et traiter le cancer...
- La moyenne en France est de 2-3 accélérateurs médicaux pour 100 000 habitants.

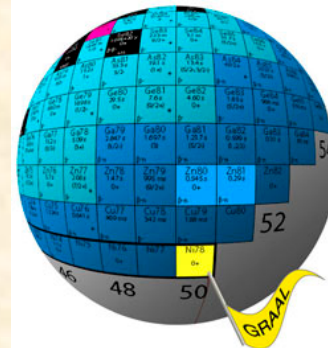


# Quelques applications des accélérateurs de particules...



Boson de Higgs  
et Physique des particules

Structure des molécules



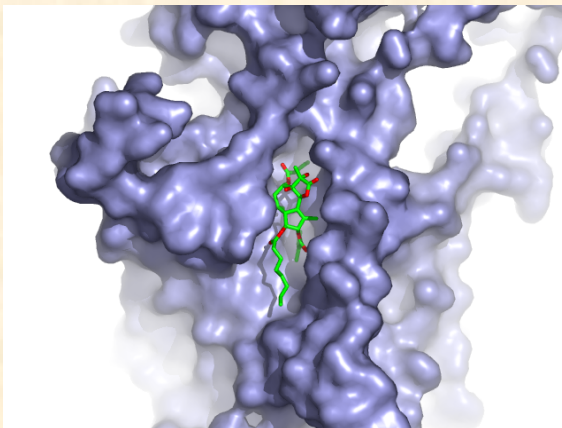
Nickel 78 et  
Physique Nucléaire

Violons de Stradivarius  
et structure des matériaux



Etudes d'objets anciens

Grands crus de Bordeaux  
et lutte anti-fraude



Proteins Sciences ACO



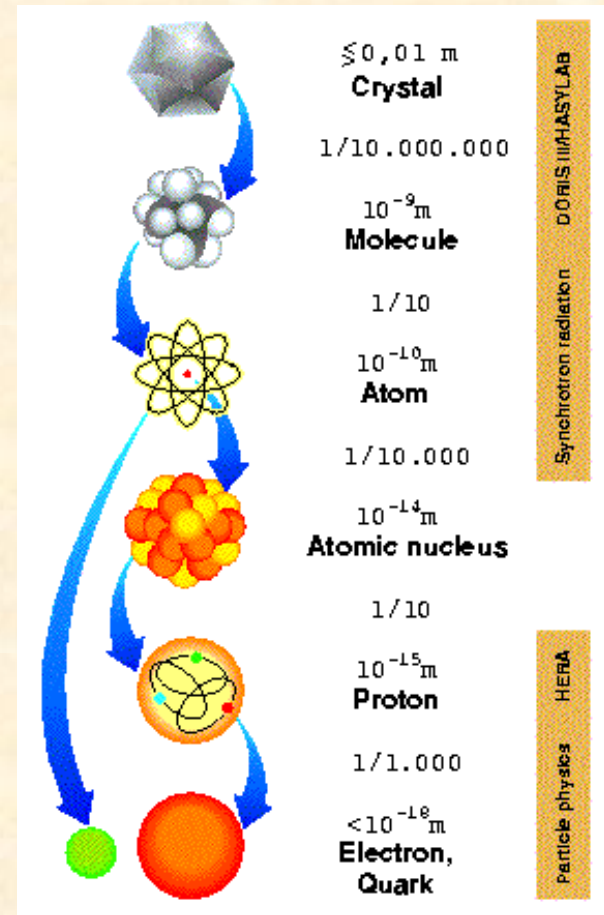
Cliché A. Giordan © Cité de la Musique



Accélérateurs de particules

# Qu'est-ce qu'un accélérateur de particules (1)

- Un accélérateur de particules c'est un outil scientifique le plus souvent utilisé pour explorer la structure de la matière à différentes échelles.
- Pour cela des « particules » sont accélérées par des champs électriques puis elles sont projetées soit sur une cible, soit sur un autre particule, soit sur l'échantillon à analyser.



# Qu'est-ce qu'un accélérateur de particules (2)

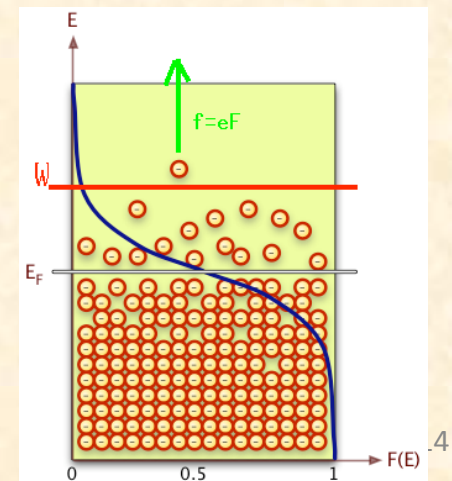
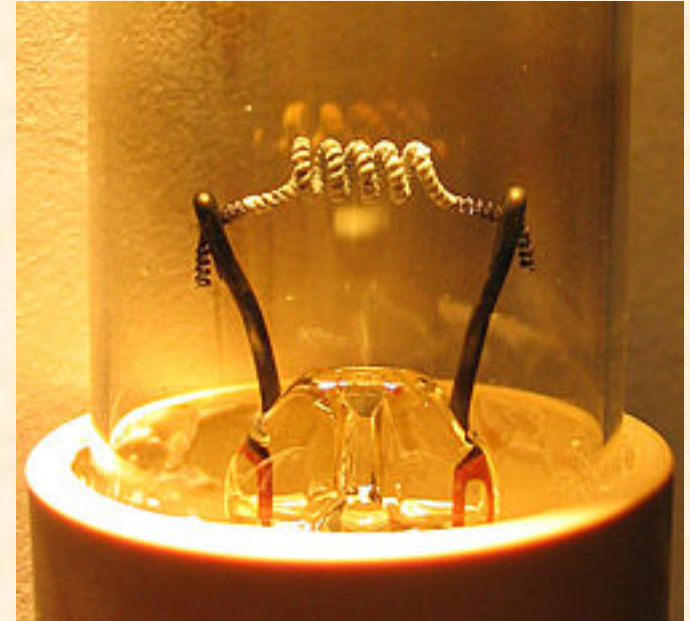
- En France il y a plus de 1000 accélérateurs de particules en service.
- La plupart sont utilisés pour traiter le cancer.
- D'autres (surtout les plus gros) sont utilisés pour la recherche scientifiques.
- Quelques uns sont utilisés à des fins commerciales.

Comment fonctionne un accélérateur de particules?

# « Production » de particules: électrons

Source de l'image: wikipedia

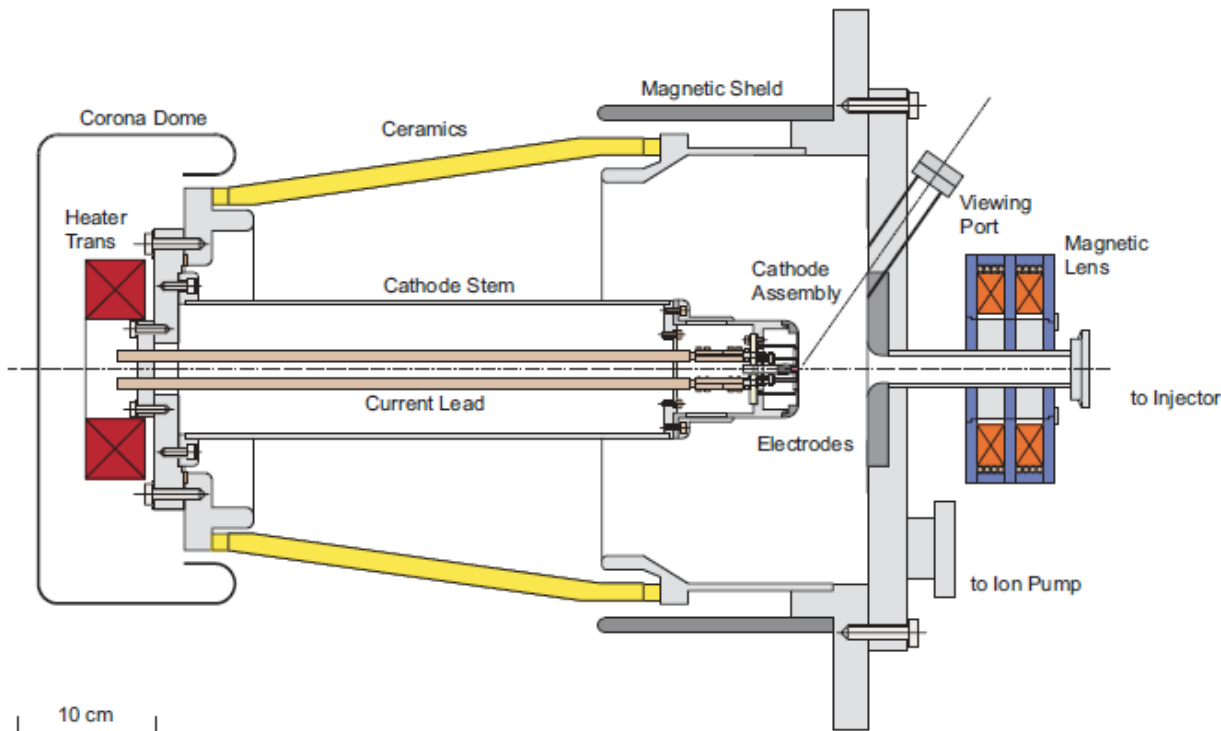
- Les électrons sont les particules les plus simples utilisées dans les accélérateurs.
- Lorsqu'un morceau de métal est chauffé il émet des électrons.
- Normalement ces électrons retombent tout de suite sur le morceau de métal.
- Cependant si un champ électrique est appliqué ces électrons peuvent être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



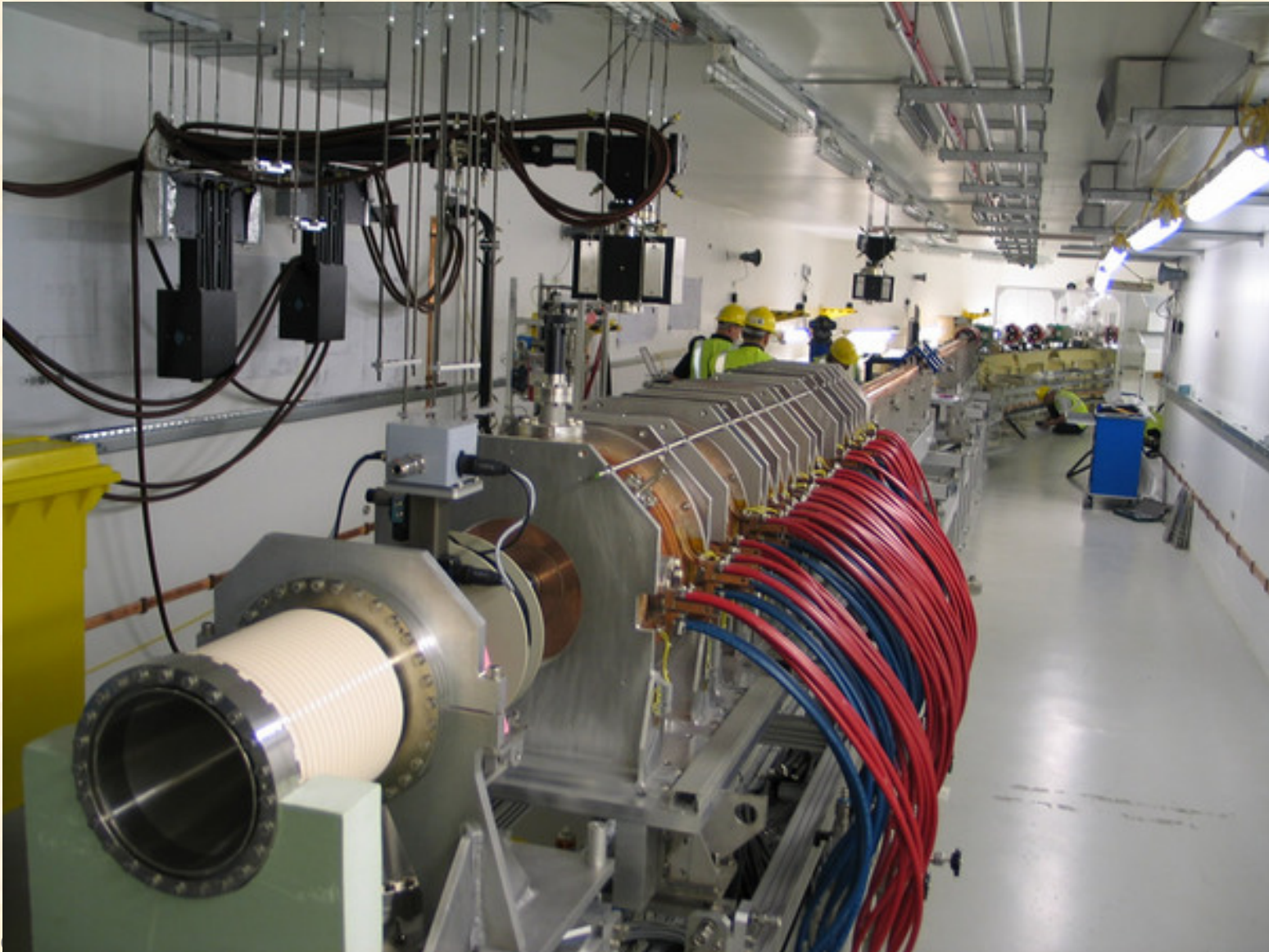
# Exemple de source thermoionique

SCSS

## *500kV Electron Gun*



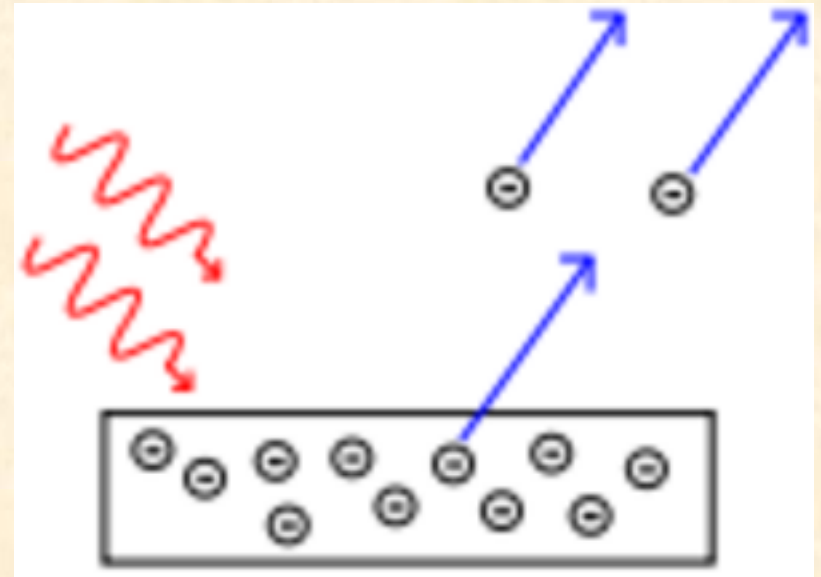
# Exemple de source thermoionique





# « Production » de particules: électrons

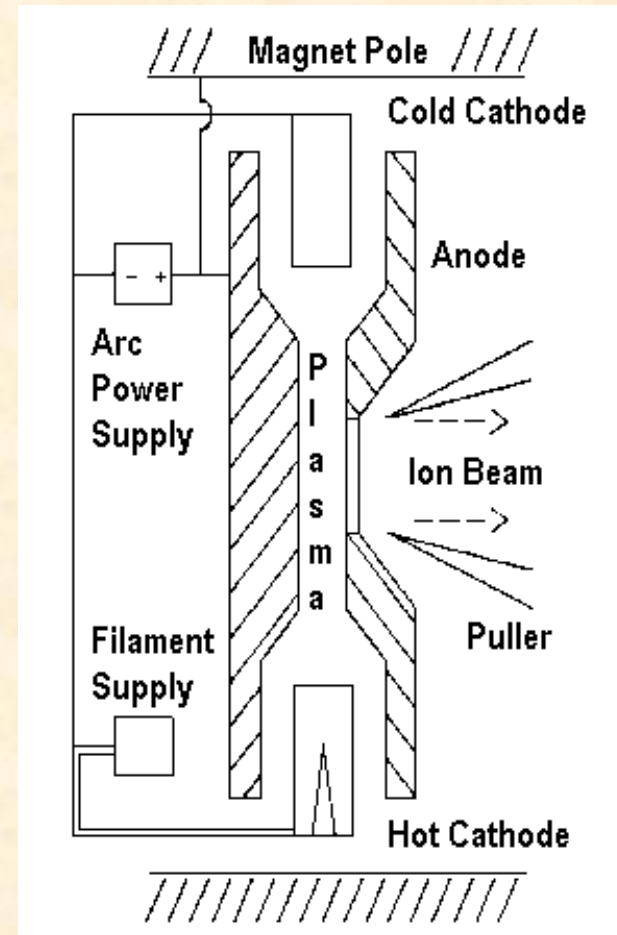
- Au lieu d'attendre que les électrons s'échappent du métal il est possible de les « forcer » à sortir en utilisant un laser et un champ électrique très fort.
- Un tel dispositif s'appelle un « photo-canon HF ».
- Cela permet de produire des paquets d'électrons beaucoup plus intenses et de bien meilleure 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

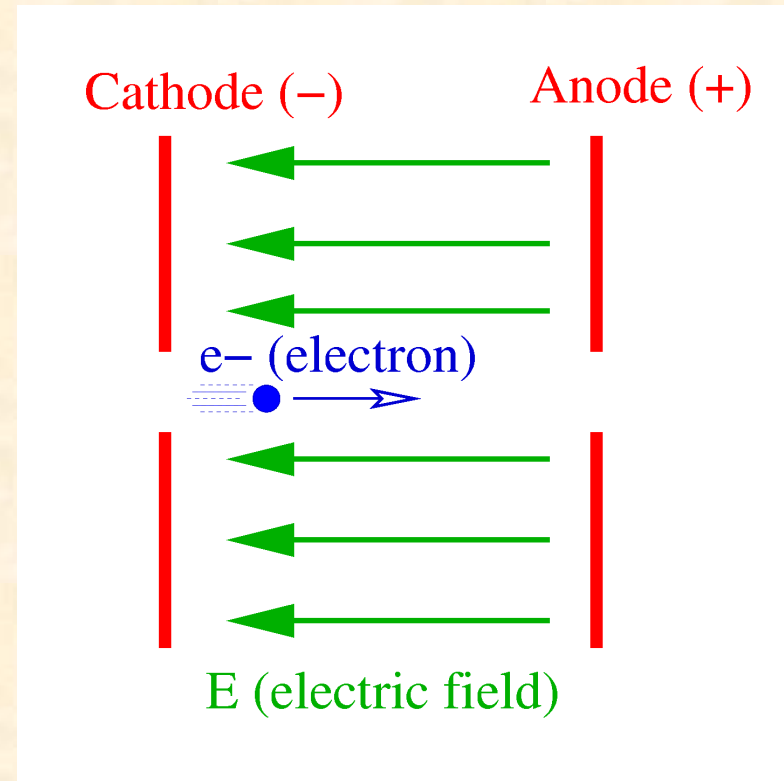
# « Production » de particules: protons

- 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, c'est à dire en séparant l'électron du noyau, dans un champ électrique intense il est donc possible de produire des protons.



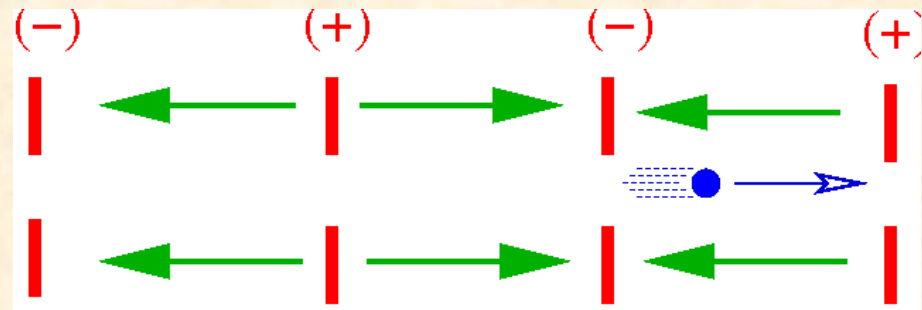
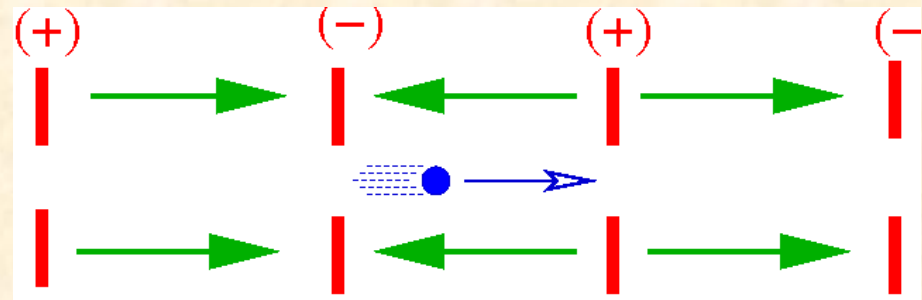
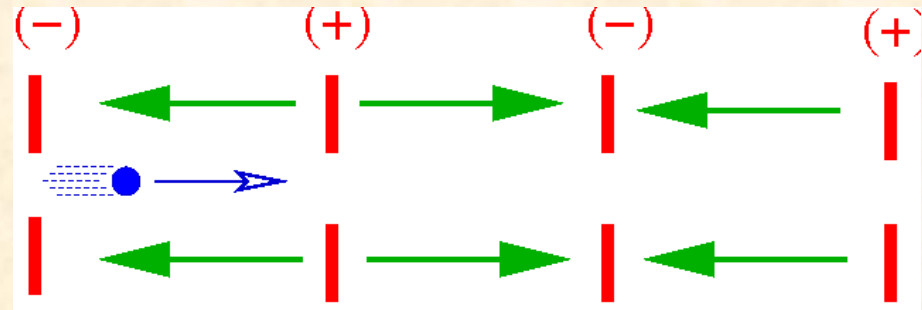
# Accélération: champ fixe

- 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!

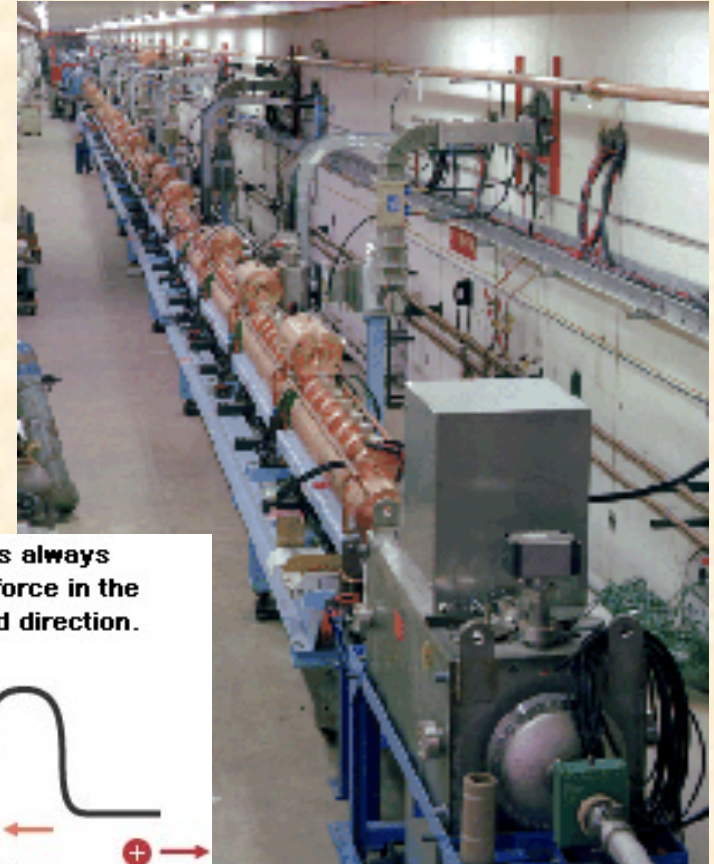
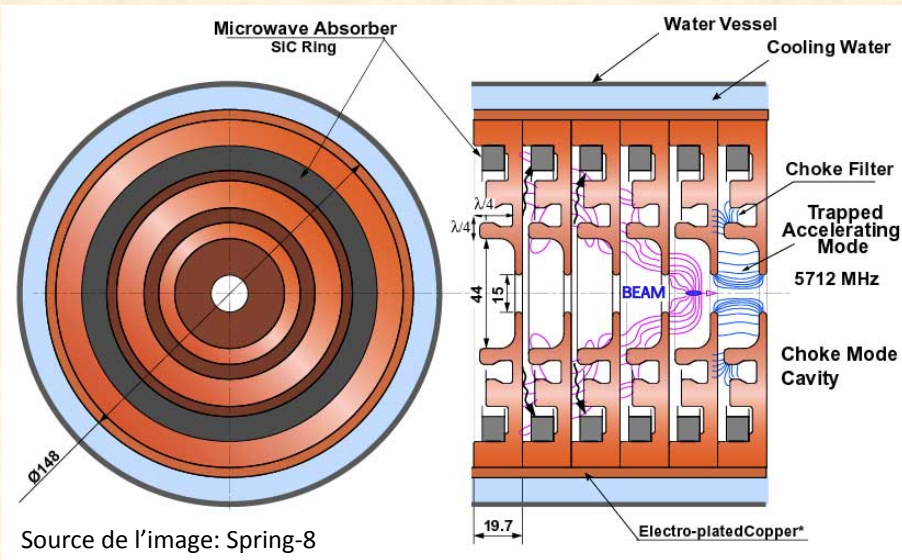


# Accélération: champ alternatif

- 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.

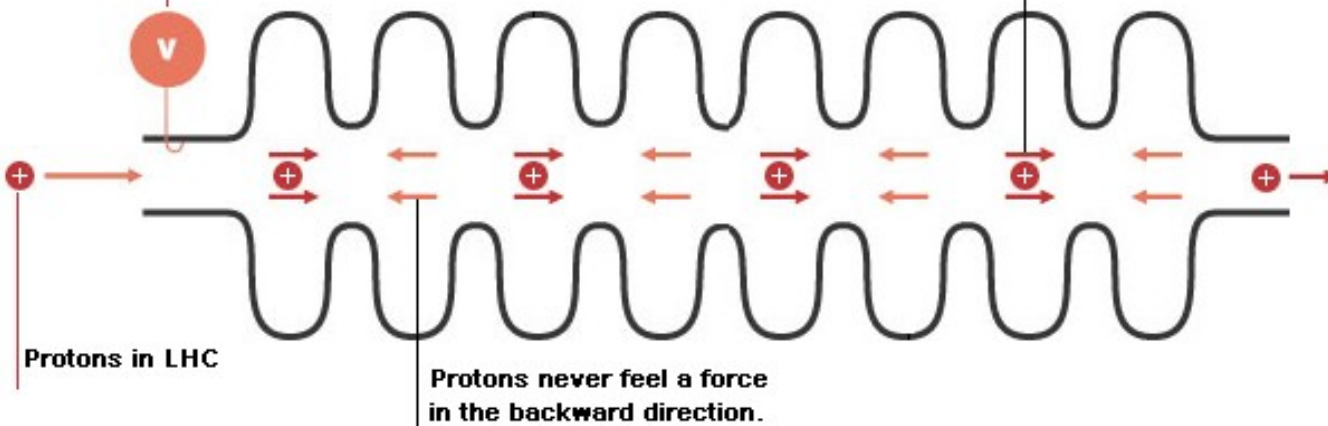


# Cavités accélératrices



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

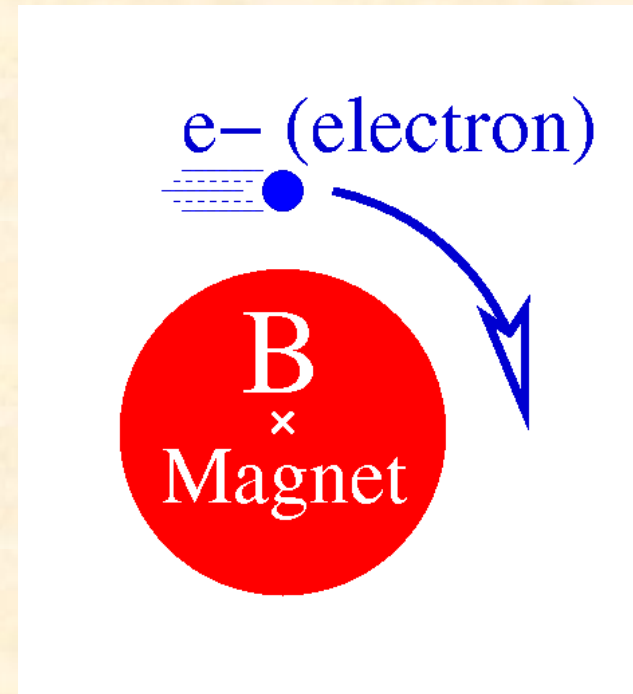
Protons always feel a force in the forward direction.



Source de l'image: CERN

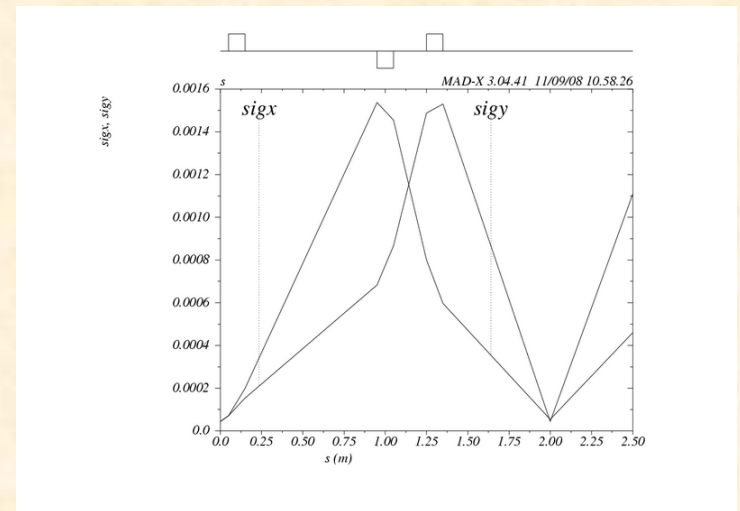
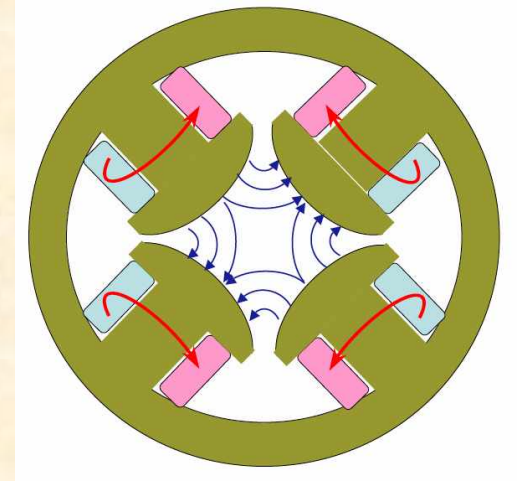
# Contrôle des particules

- 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.



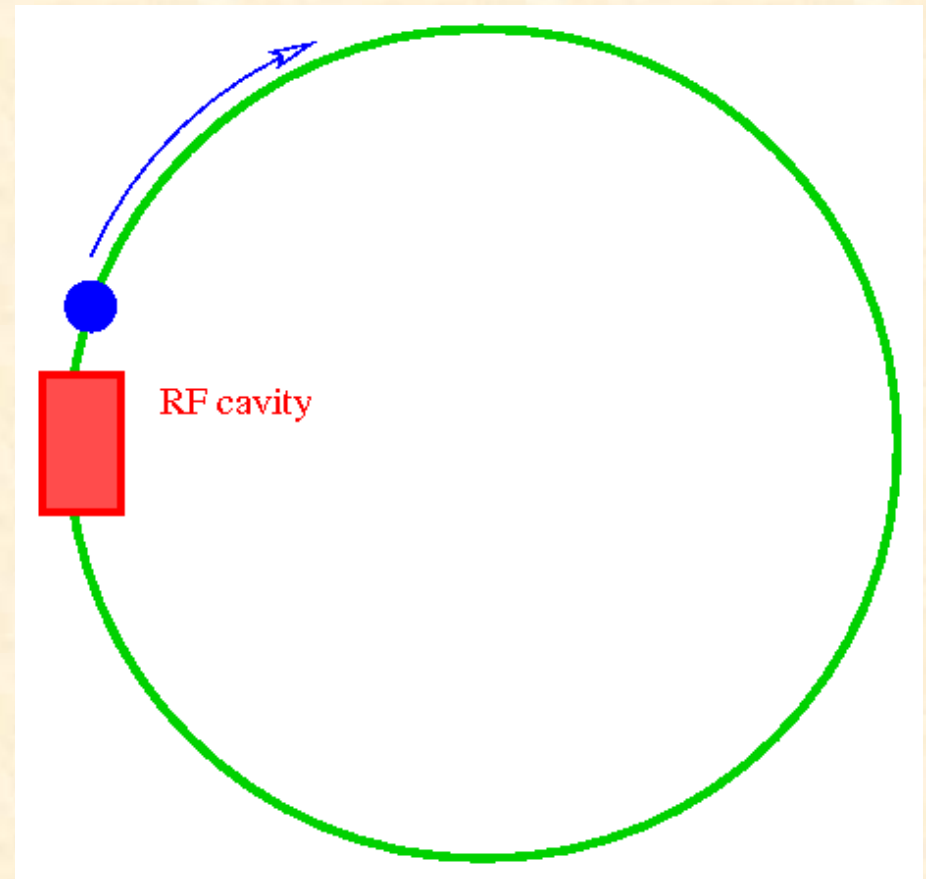
# Contrôle des particules: focalisation

- 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 ».



# Synchrotron - Accélérateurs circulaires

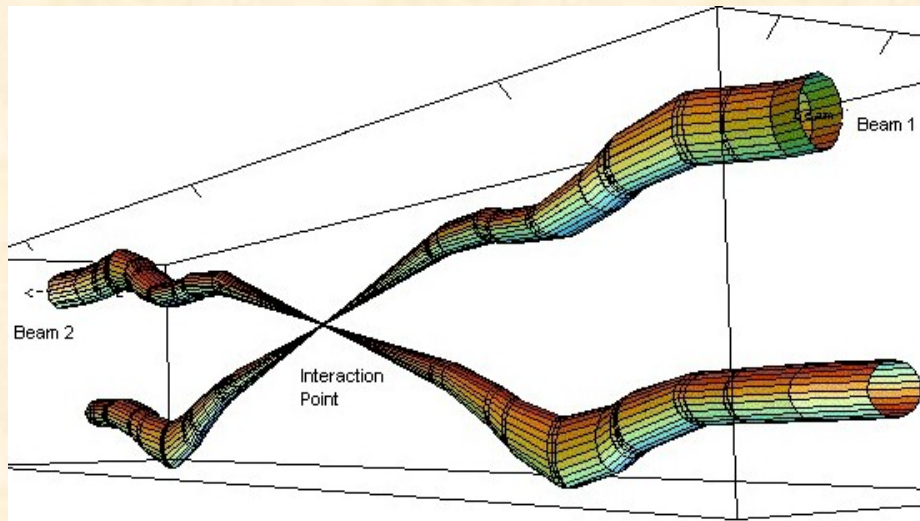
- En utilisant des aimants il est possible de faire tourner les particules en ronds.
- Cela permet de réutiliser une cavité accélératrice plusieurs fois.
- La plupart des grands accélérateurs modernes sont des accélérateurs circulaires.





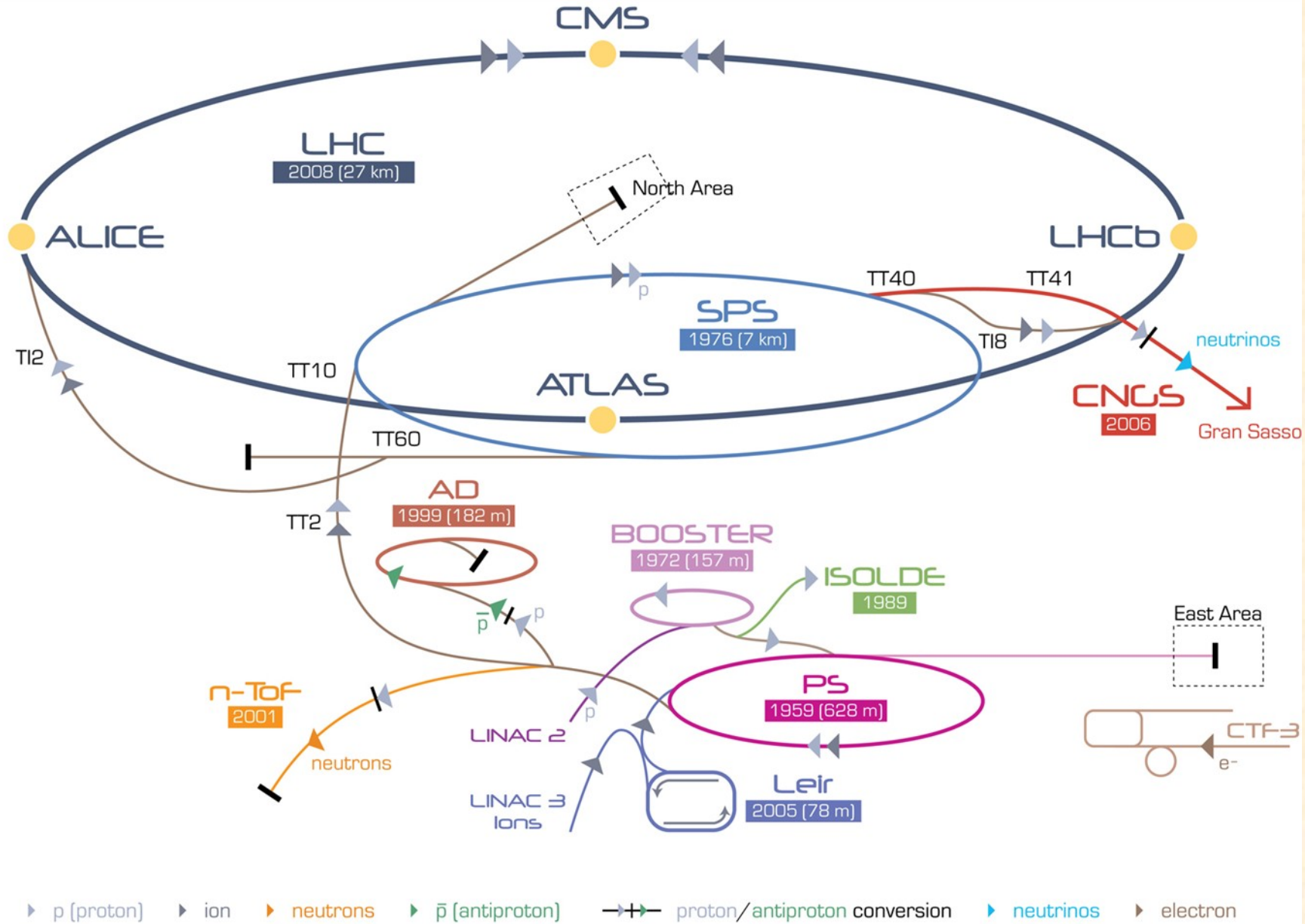
# Le point de collision

- Après avoir accéléré les particules, il est possible de les faire entrer en collision.
- Un paquet de particules dans un accélérateur peut contenir des milliards de particules, cependant seulement quelques dizaines vont entrer en collision.
- Dans d'autres accélérateurs les particules sont envoyées sur une cible ou un échantillon.



# 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 quadripôles pour contrôler les faisceaux.
  - Point de collision.
- 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 supra-conducteur. Le LHC est à une température de 1.9K, plus froid que l'espace intergalactique!



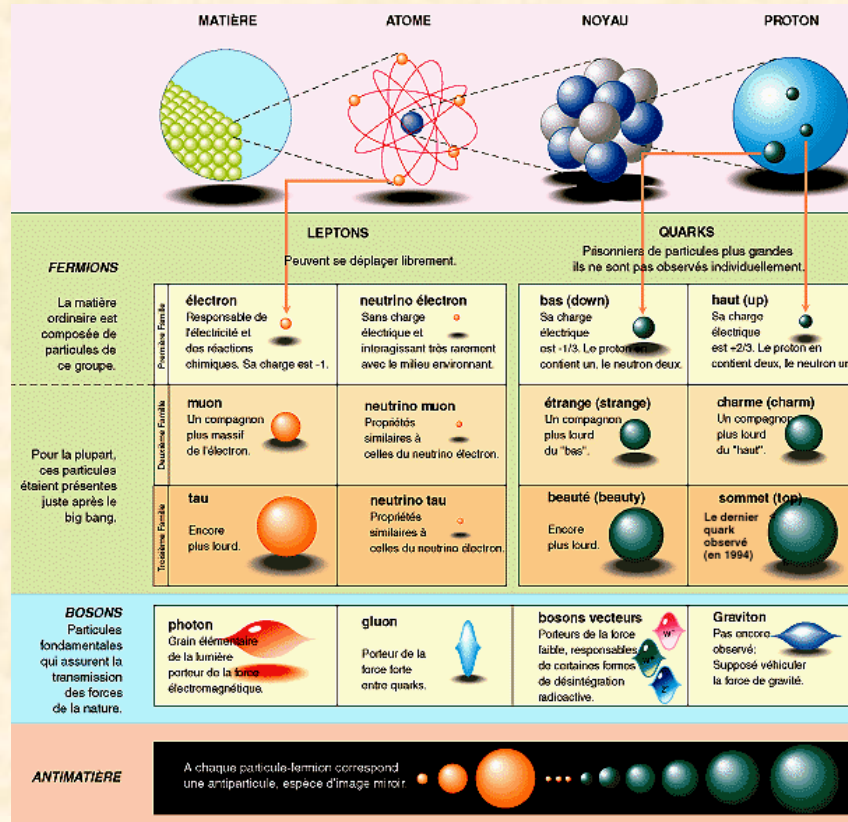


# Taille des accélérateurs de particules

- Le LHC a une circonférence de 27km. C'est le plus grand accélérateur de particules au monde.
- Tous les accélérateurs de particules ne sont pas aussi gros.
- Certains des accélérateurs du campus font quelques mètres ou une dizaine de mètres.
- Les accélérateurs médicaux font quelques mètres.
- Le synchrotron SOLEIL à Saint Aubin fait 354m de circonférence.

A quoi servent les accélérateurs  
de particule?

# Physique des particules

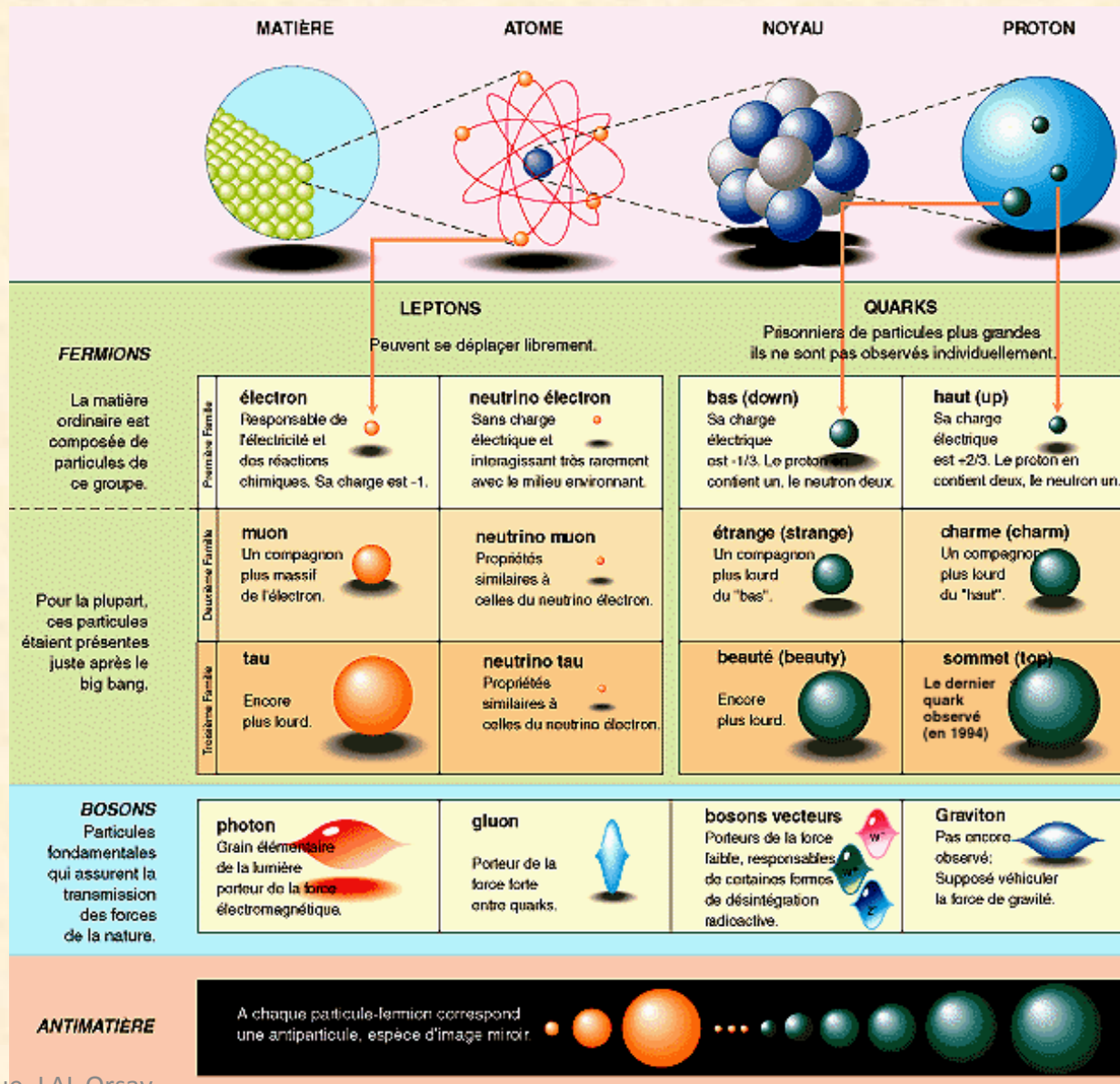


Lorsque les particules entrent en collisions entre elles de nouvelles particules peuvent être créées.

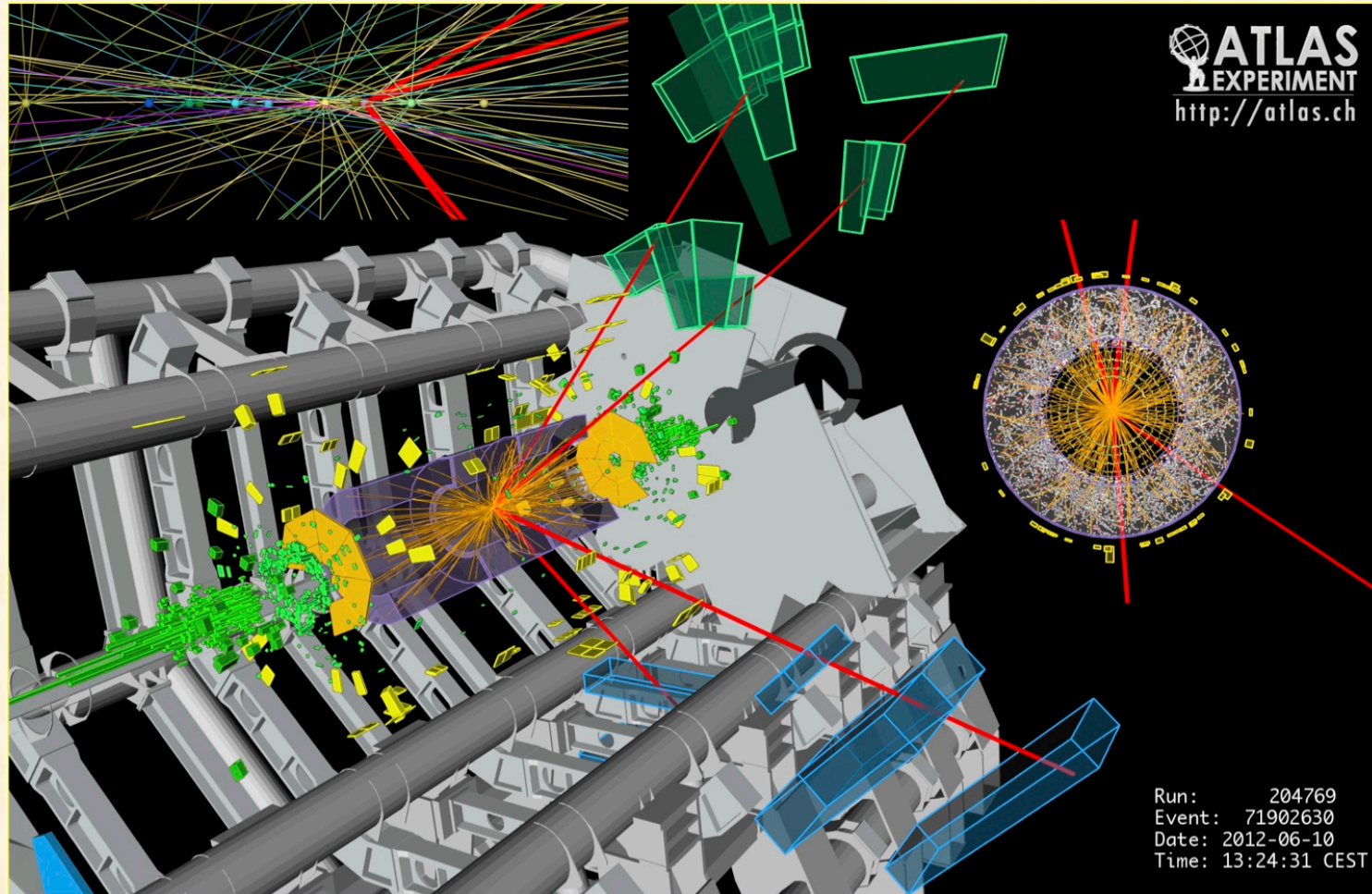
C'est comme cela que la physique des particules étudie les particules les plus petites connues.



# Physique des particules

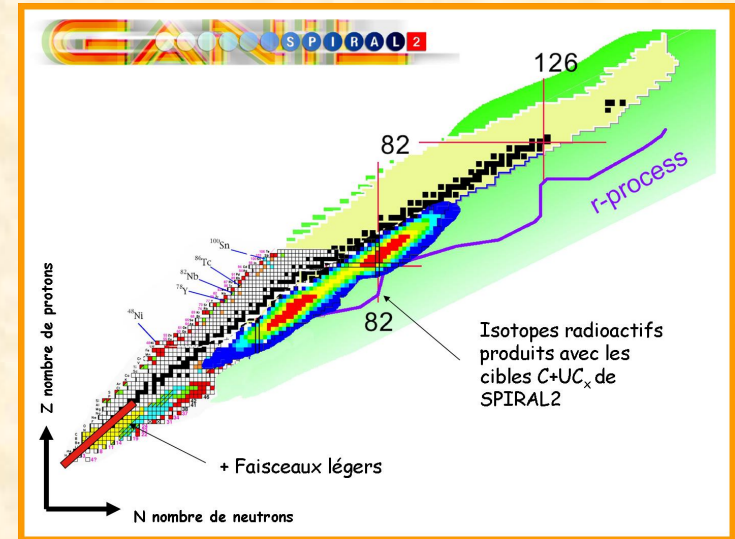


# Y compris le boson de Higgs...



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

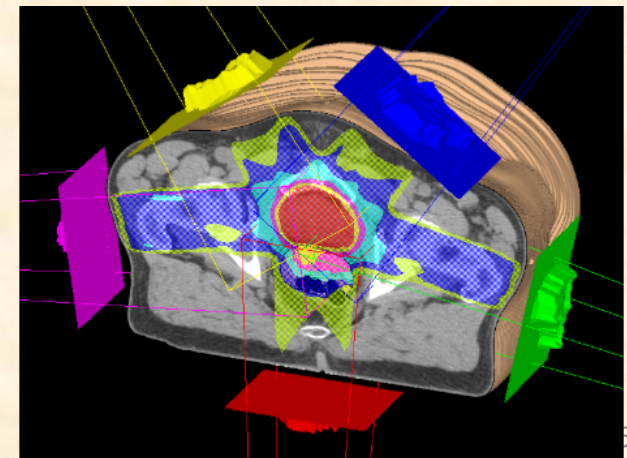
# Physique Nucléaire



- En tapant sur des noyaux atomiques il est possible de les casser (ou parfois de les fusionner). Cela permet d'étudier la structure et les propriétés de ces noyaux.

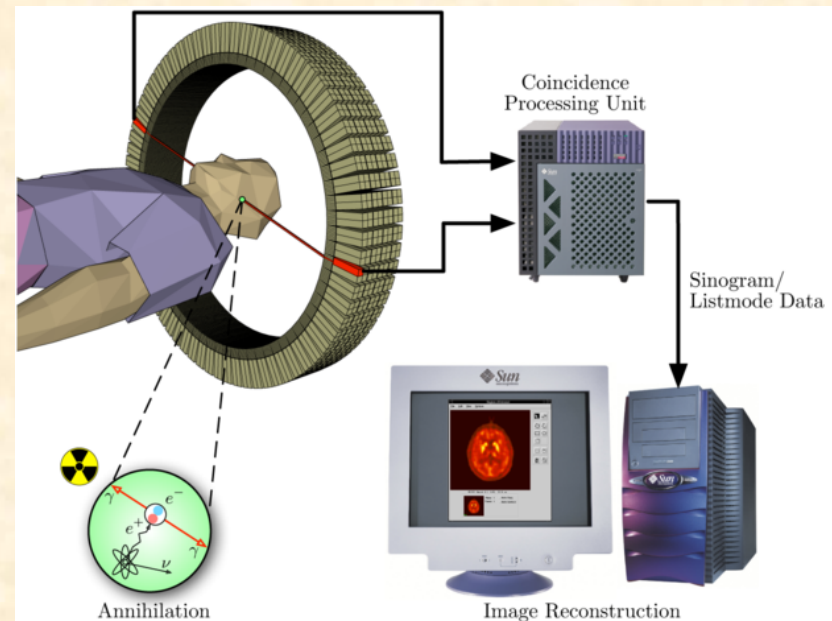
# Médecine (1)

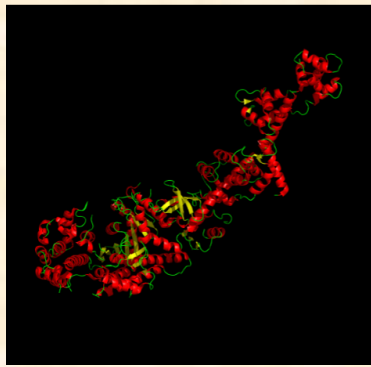
- Traitement du cancer (radiothérapie et protonthérapie).
- Lorsque des particules entrent dans le corps elle peuvent tuer les cellules se trouvant sur leur passage.
- Grâce à un accélérateur de particules il est possible de viser précisément l'endroit où se trouve une tumeur cancéreuse pour la tuer.
- Plusieurs angles d'attaque sont utilisés pour ne pas limiter les dégâts dans les cellules saines alentours.



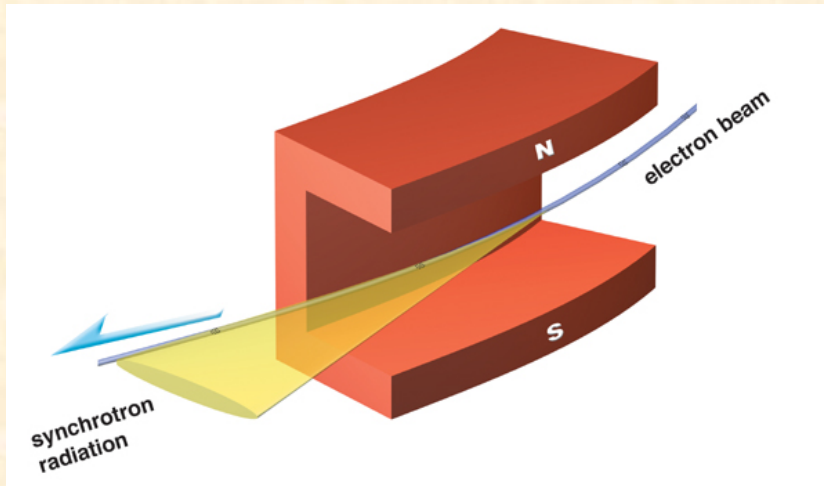
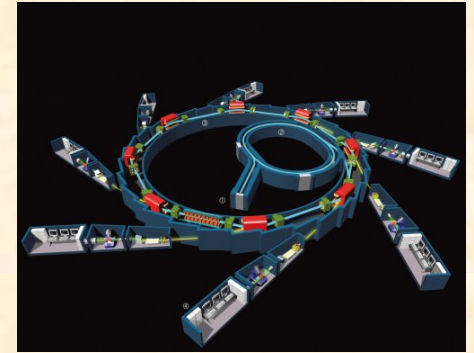
# Médecine

- Certains traitements médicaux nécessitent des médicaments radioactifs.
- C'est le cas par exemple de la tomographie par émission de positons.
- Pour limiter la dose délivrée au patient il faut des médicaments à demi-vie très courte.
- L'installation de cyclotrons près (ou dans) des hôpitaux permet de fournir de tels médicaments.

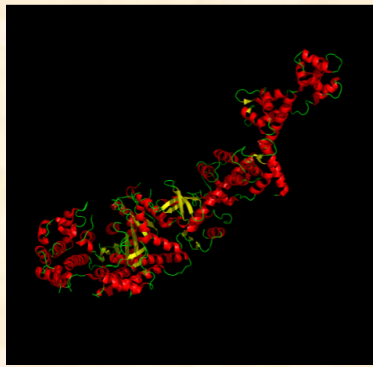




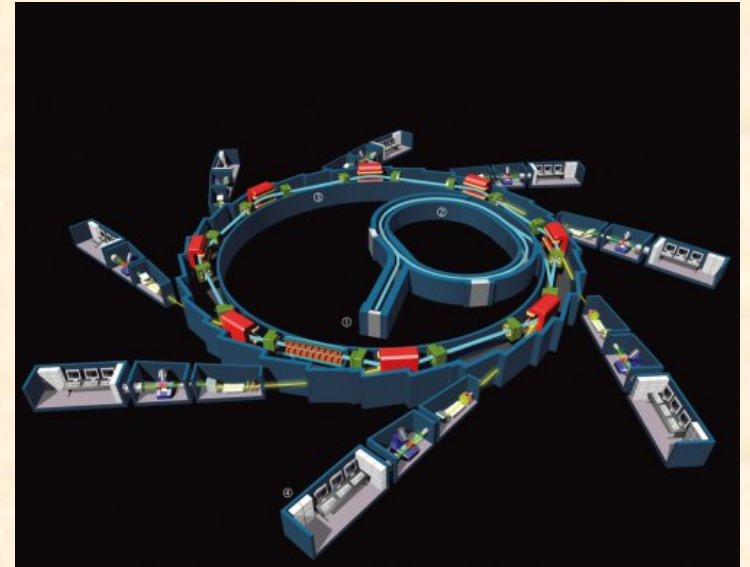
# Etude de la matière par rayonnement synchrotron



- Lorsque des électrons passent dans un aimant ils émettent de la lumière.
- Cette lumière, qui va de l'infrarouge au rayons X peut-être utilisée pour sonder la matière.
- L'un des accélérateurs pionniers dans ce domaine était le LURE à Orsay.
- Le LURE a été remplacé par le synchrotron SOLEIL à Saint-Aubin.



# Rayonnement synchrotron



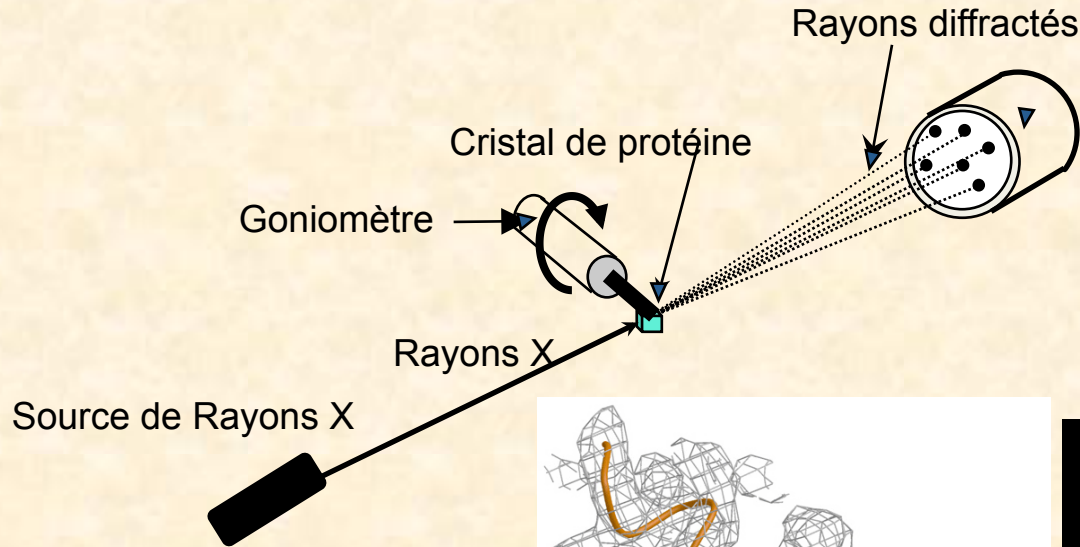
- Structure de matériaux, de cristaux...
- Composition de matériaux



# Cristallographie des protéines



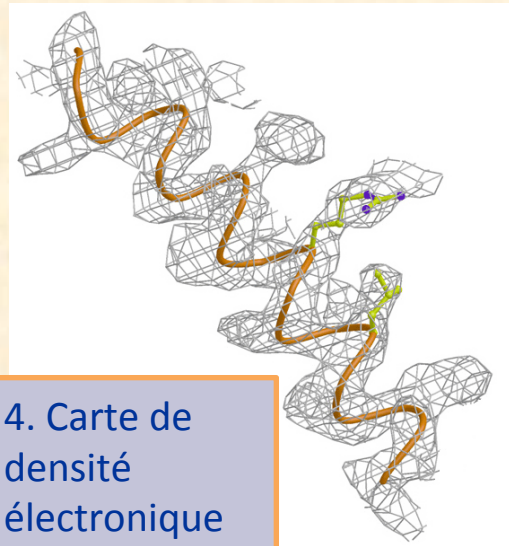
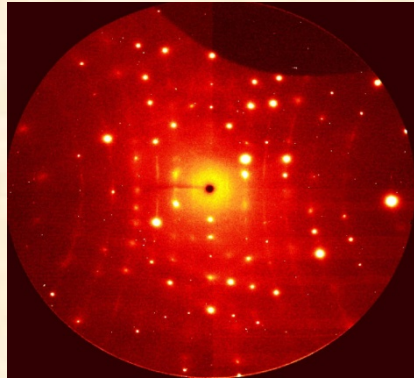
1. Cristal



2. Diffraction



3. Enregistrement et traitement des clichés



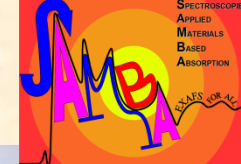
4. Carte de densité électronique



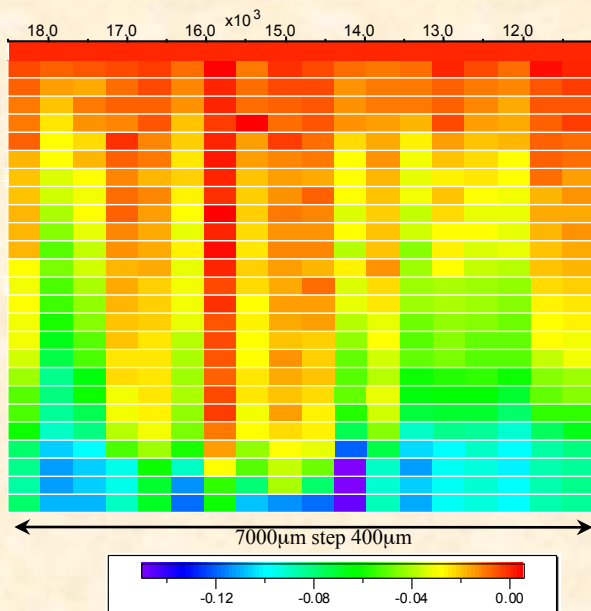
5. Reconstruction de la structure 3 D  
Structure secondaire



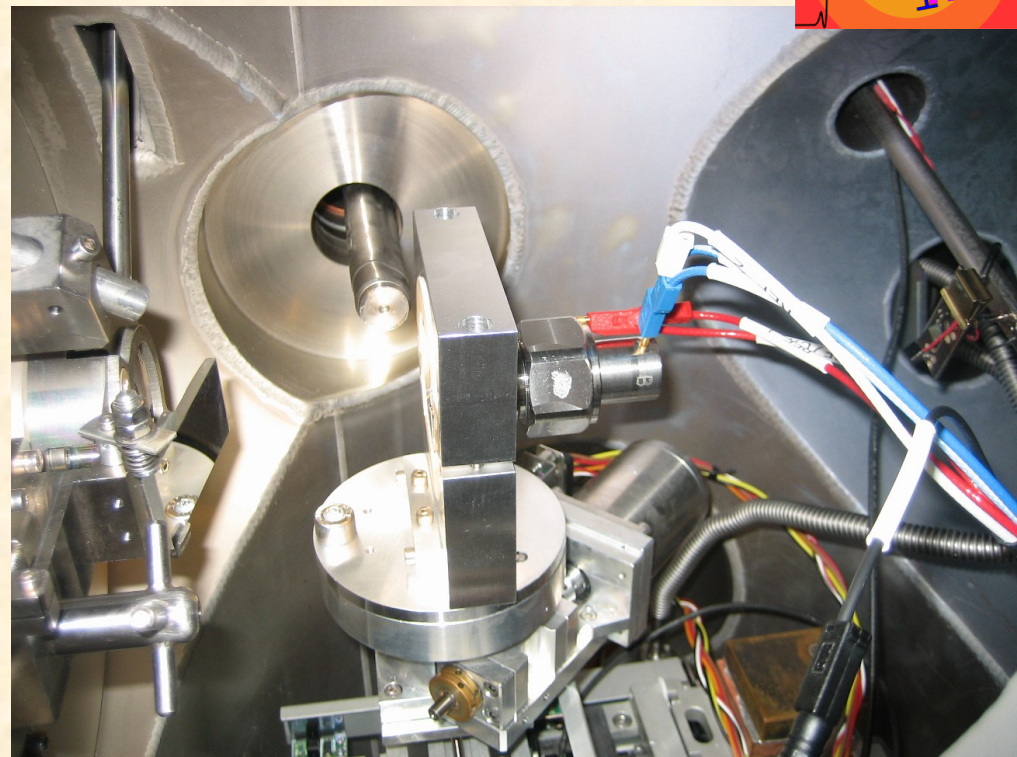
# Étude de batteries au Lithium en fonctionnement



Chaque colonne correspond à l'évolution, au cours de la charge, d'un point de l'électrode de  $7\ \mu\text{m} \times 7\ \mu\text{m}$ .



Évolution  
durant la  
charge de la  
quantité d'ions  
 $\text{Fe}^{2+}$



**Ligne SAMBA**

*Absorption de rayons X et fluorescence X*

L'électrode positive de la batterie est constituée de  $\text{LiFePO}_4$ .  
Durant la charge, des ions  $\text{Li}^+$  partent de l'électrode et, corrélativement, les ions  $\text{Fe}^{2+}$  sont oxydés en  $\text{Fe}^{3+}$ . La variation de la quantité d'ions  $\text{Fe}^{2+}$  renseigne sur l'avancement de la charge.

Projet **PULSSE** lignes associées **SAMBA, ODE, LUCIA, CRISTAL**

Source: Synchrotron SOLEIL

# The varnish of Stradivari



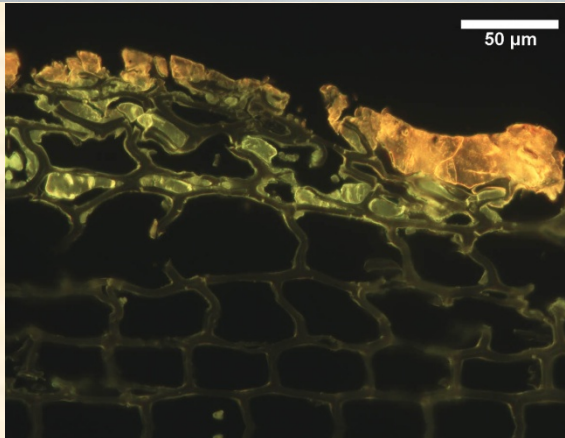
Five Stradivarius Violins, kept in the Musée de la musique of Paris. From left to right, the "Davidoff" (1708), the "Tua" (1708), the "Longuet" (around 1692), the "Provigny" (1716) and the "Sarasate" (1724).

Cliché A. Giordan © Cité de la Musique

Cross-section of the varnish of the « Provigny » violin, from bottom to top :

- cellular structure of the wood,
- first layer (white), oil-based, barely impregnates the wood
- second layer (yellow), a mixture of oil and pine-resine, and various paint pigments

Cliché J.-P. Echard © Cité de la Musique

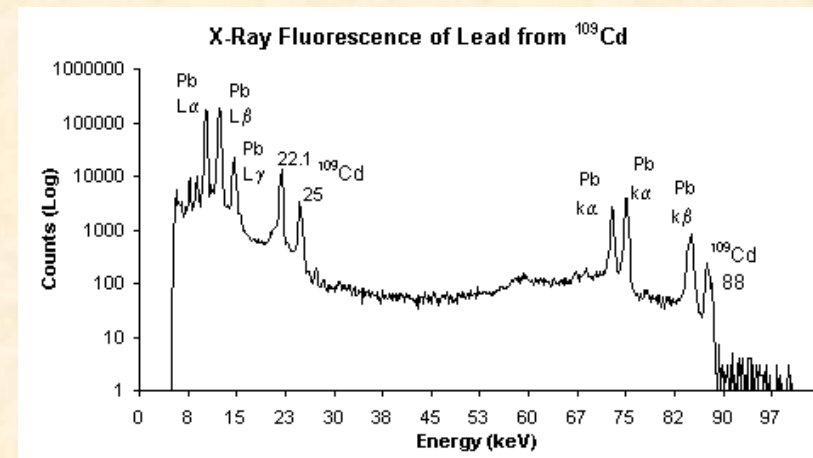
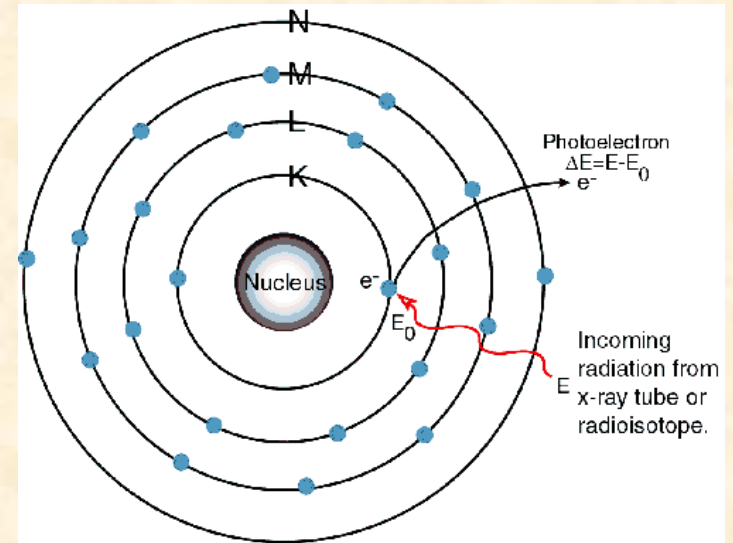


This picture of the cross-section of the Provigny violin was obtained by infrared microscopy.

Cliché L. Bertrand © Synchrotron SOLEIL

# Fluorescence

- Un rayon-X ou un proton peut déloger un électron d'une couche intérieure d'un atome.
- Il est beaucoup plus probable que cela se produise à certaines énergies caractéristiques.
- Ces énergies caractéristiques sont unique pour chaque élément.  
=> identification de la composition d'un échantillon.



# Fluorescence (2)

- Grâce à la fluorescence avec des rayons X il est possible d'identifier la composition, par exemple d'une peinture ou d'un objet ancien.
- Voir même de voir sous la peinture ou de connaître la composition d'une bouteille de vin!

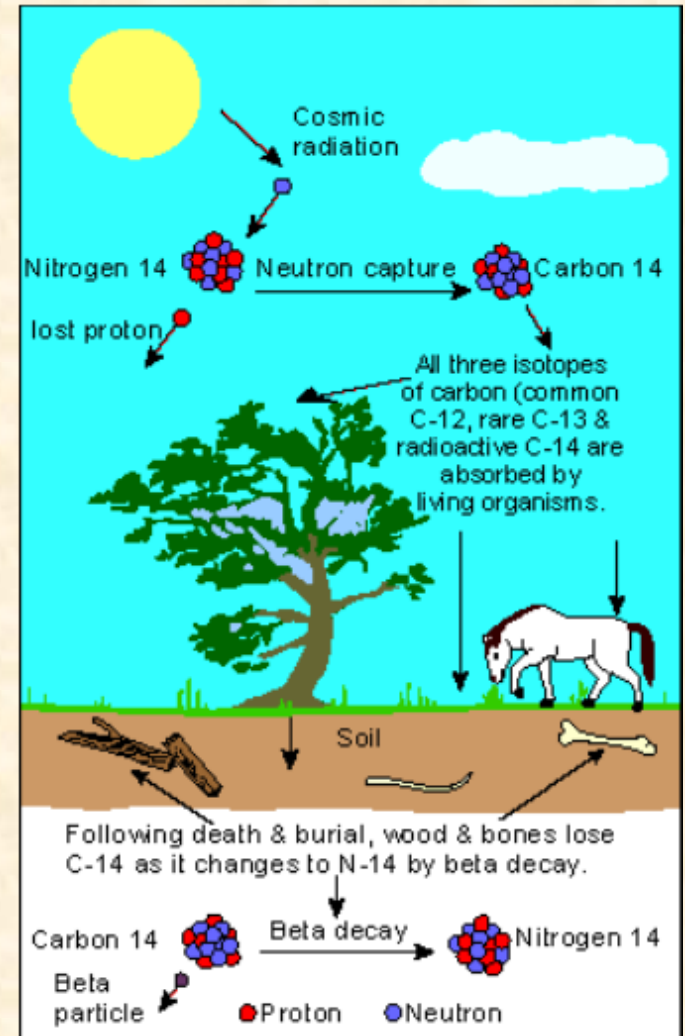
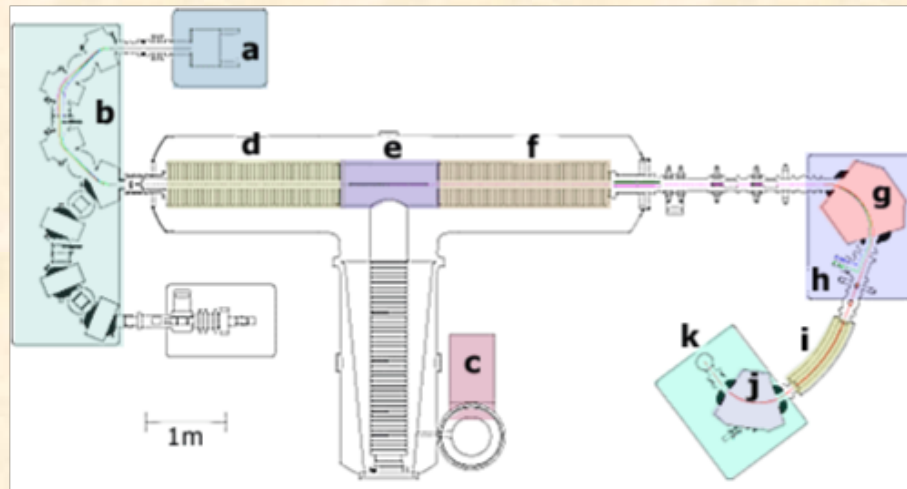


J. Dik et al., *Analytical Chemistry*, 2008, 80, 6436  
<http://www.vangogh.ua.ac.be/>



# Datation d'objets anciens

- Datation au carbone 14 par spectrométrie de masse: en comparant le nombre d'atomes de Carbone 14 (radioactif) avec ceux de Carbone 13 (stable) il est possible de connaître l'âge d'un objet.



# Datation au carbone 14

- La datation au carbone 14 est utilisée pour estimer la date « de vie » de nombreux objets anciens.



Accélérateurs de particules

# Un patrimoine unique à Orsay

- Le site d'Orsay a été choisi dans les années 1950 pour abriter des accélérateurs qui ne pouvaient pas être installés à Paris.

=> Institut de Physique Nucléaire

=> Laboratoire de l'accélérateur linéaire

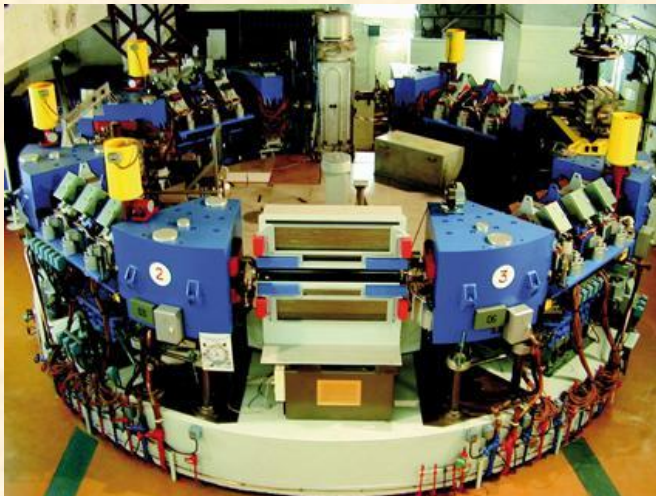
- De nombreuses premières scientifiques y ont eu lieu.



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

# Patrimoine des accélérateurs à Orsay

- 1962: AdA (collaboration avec Frascati), premier collisionneur à électrons au monde!
- 1983: Sur ACO, premier laser à électrons libres au monde!
- Et beaucoup d'autres découvertes scientifiques!



Nicolas Delerue, LAL Orsay,  
Sciences ACO

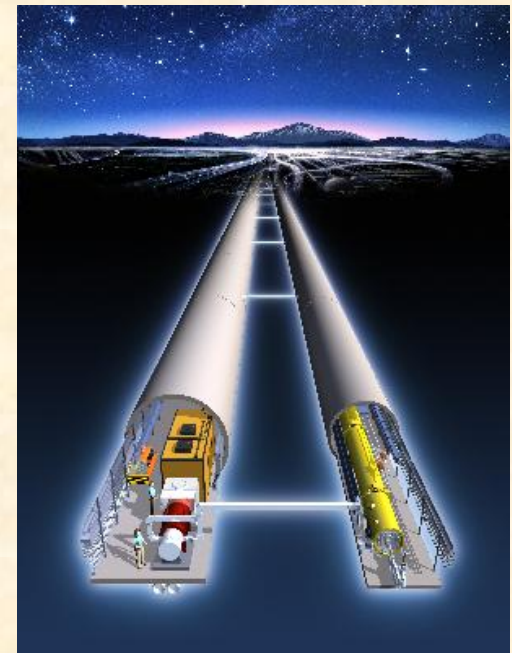
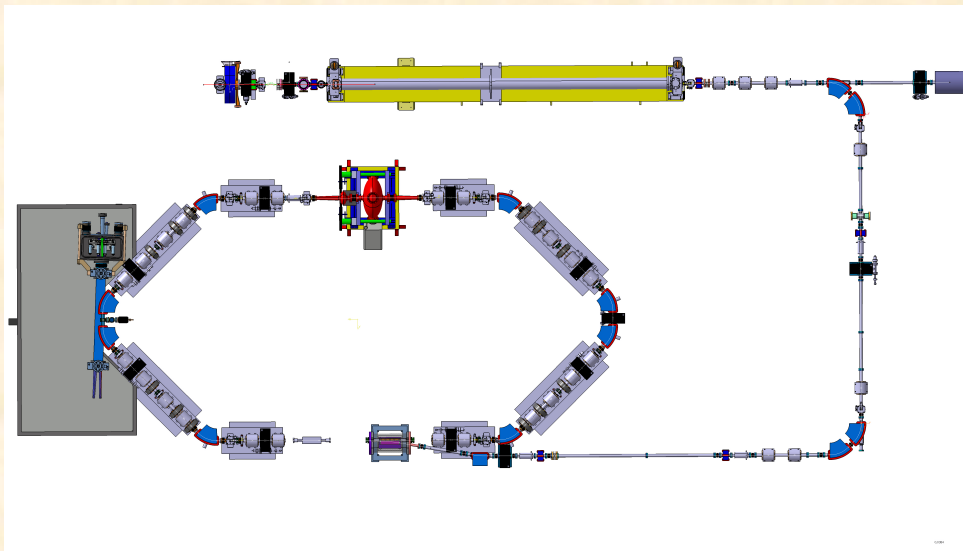


Accélérateurs de particules



# De nouveaux accélérateurs dans le futur

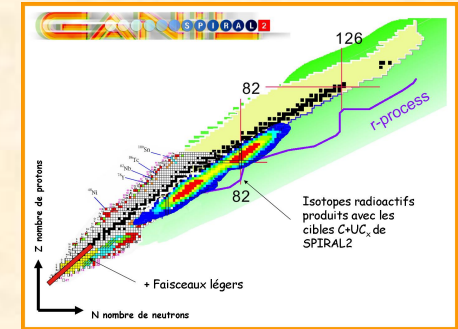
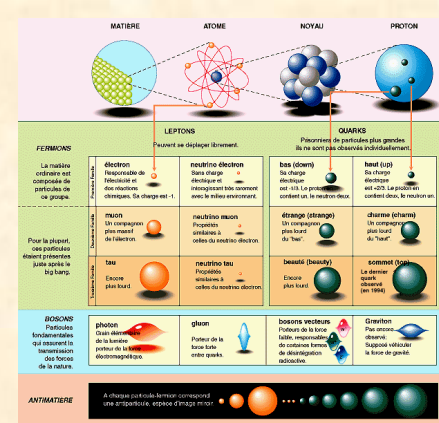
- Sur le campus, deux nouveaux accélérateurs ont été financé en partie par les projets Equipex: ThomX and Andromède. Il seront situés dans l'Igloo près du bâtiment 200.
- Il y a un projet de collisionneur en cours d'élaboration au Japon pour compléter les résultats du LHC.





# Résumé

- Les accélérateurs ont de nombreuses applications dont certaines liées à notre vie quotidienne.
- En France il y a 2-3 accélérateurs pour 100000 habitants.
- Près de Paris-Sud il y a une dizaine d'accélérateurs actifs pour des recherches dans des domaines très variés.



Nicolas Delerue, LAL Orsay, Sciences ACO



# Visites

- Des visites de l'Anneau de Collision d'Orsay sont prévues le 17 janvier et le 7 février à 16h30.
- Inscription préalable requise.
- Rendez-vous devant le bâtiment 201.
- Visites possibles à d'autres dates sur rendez-vous auprès de [visites@sciencesaco.fr](mailto:visites@sciencesaco.fr)