



UPPSALA  
UNIVERSITET

1477

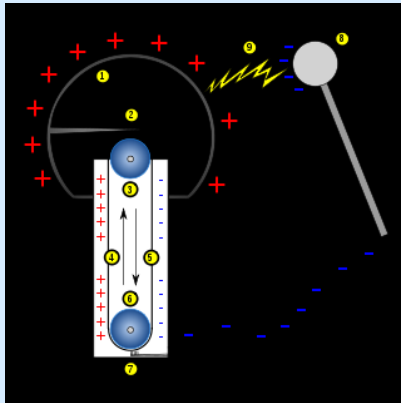


COLLÈGE  
DE FRANCE  
—1530—

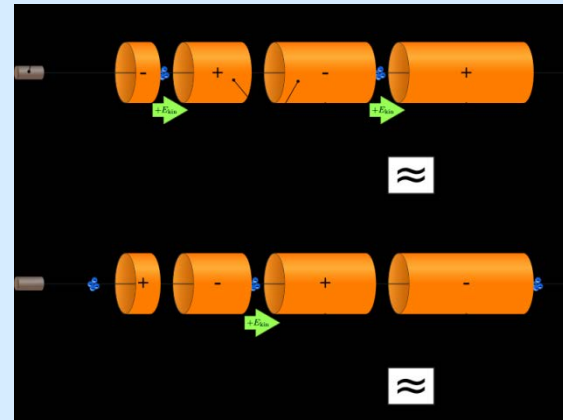
# Accélérateurs de particules pour la science et pour la société

Tord Ekelöf  
Université d'Uppsala

# Qu'est-ce qu'un accélérateur de particules?



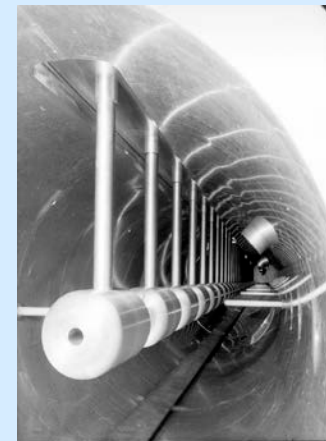
Accélérateur van de Graaff

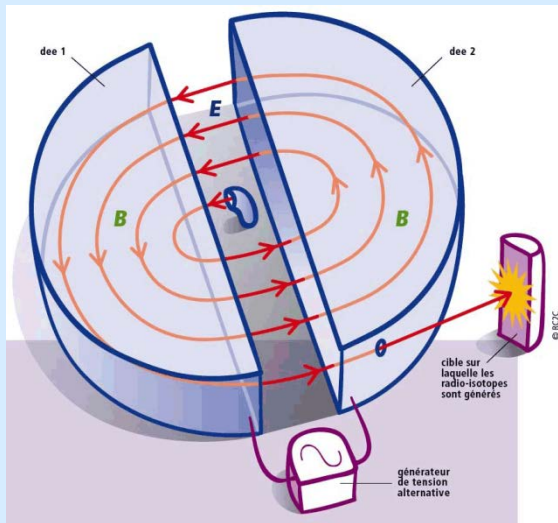


Accélérateur Ising-Wideroe

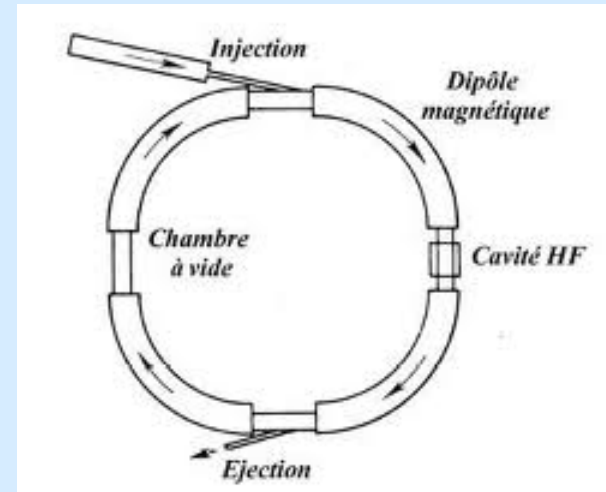


PLATE 24 The Carnegie Institution's two-meter Van de Graaff. Dahl is on the ladder. Tuve in the room. The business end of the discharge tube, deflecting magnets, and pumps are under the floor. Tuve, Halstad, and Dahl. *PR.* 49 (1935), 322.





Cyclotron



Synchrotron



Ernest Lawrence  
cyclotron 1930

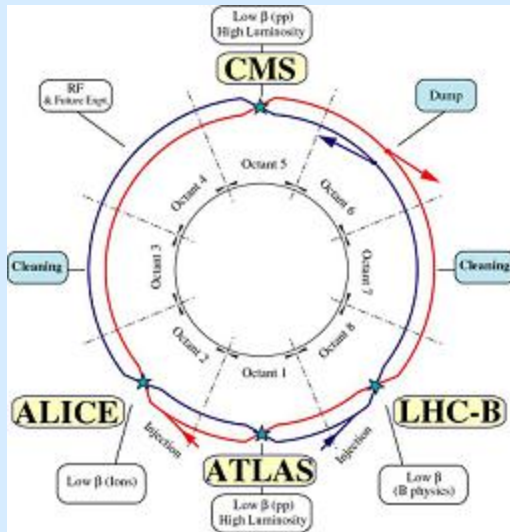


Cyclotron Gustaf Werner



Soleil

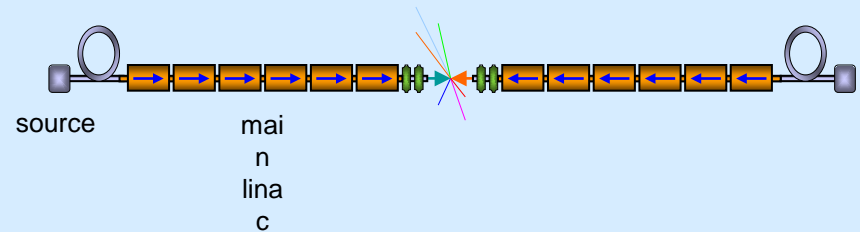
# Collisionneur de particules



Collisionneur circulaire



LHC



Collisionneur linéaire

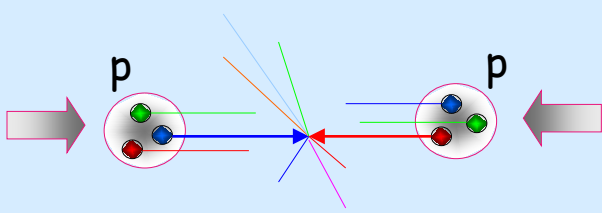


SLAC

# L'importance pour la physique de particules d'atteindre une haute énergie avec les collisionneurs

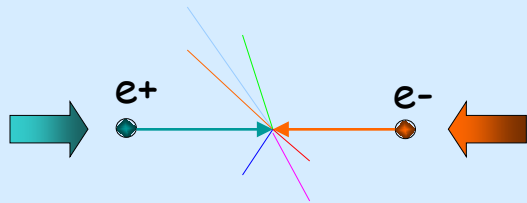
- Selon la mécanique quantique la haute énergie permet d'étudier de petites parties de matière - plus l'énergie est élevée, plus on peut étudier de petits détails.
- Selon la théorie de la relativité on peut créer des particules de matière à partir de l'énergie - plus l'énergie est élevée, plus les particules peuvent être massives.
- Selon la théorie du champ quantique relativiste, le vide est rempli de différents champs élémentaires à partir desquels les particules élémentaires, jusque là inconnues, peuvent se matérialiser, à condition que nous puissions atteindre une densité d'énergie suffisamment élevée.





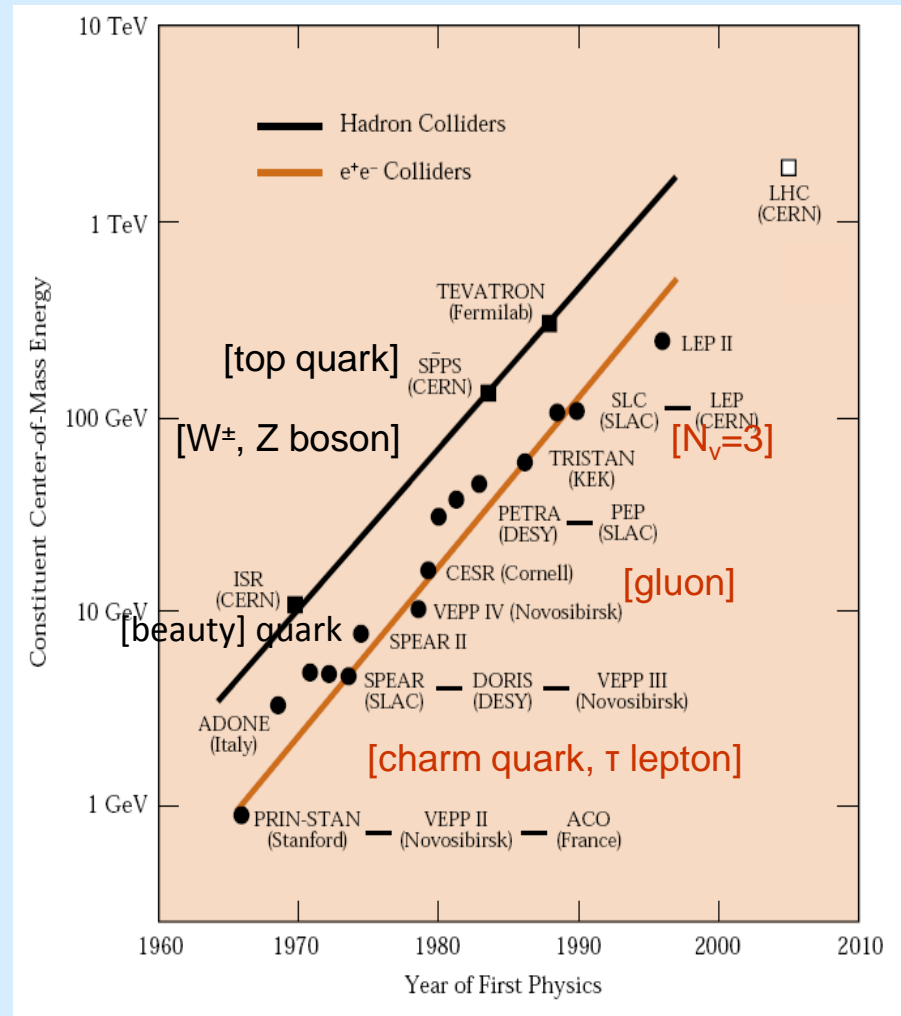
## Collisionneur de protons

- à la frontière de la physique de particules
- énorme bruit de fond QCD
- pas toute l'énergie du proton disponible dans la collision

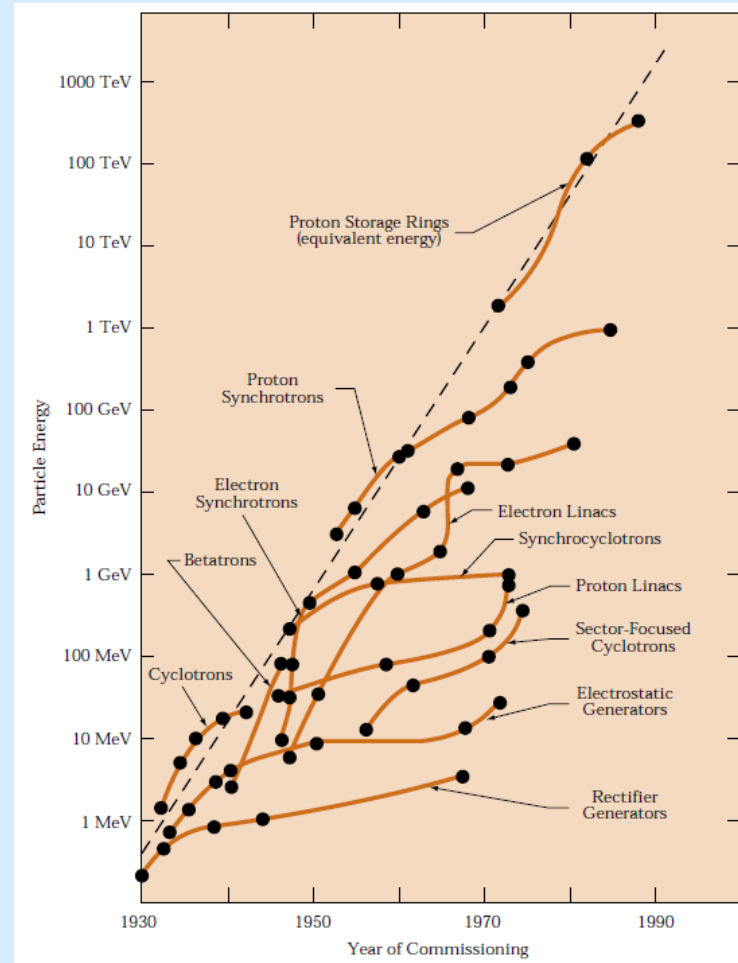


## Collisionneur de $e^+e^-$

- physique de précision
- l'énergie de collision bien déterminée
- toute l'énergie du proton disponible dans la collision
- polarisation possible



# Niveau d'énergie atteint avec différents types d'accélérateur



• LHC

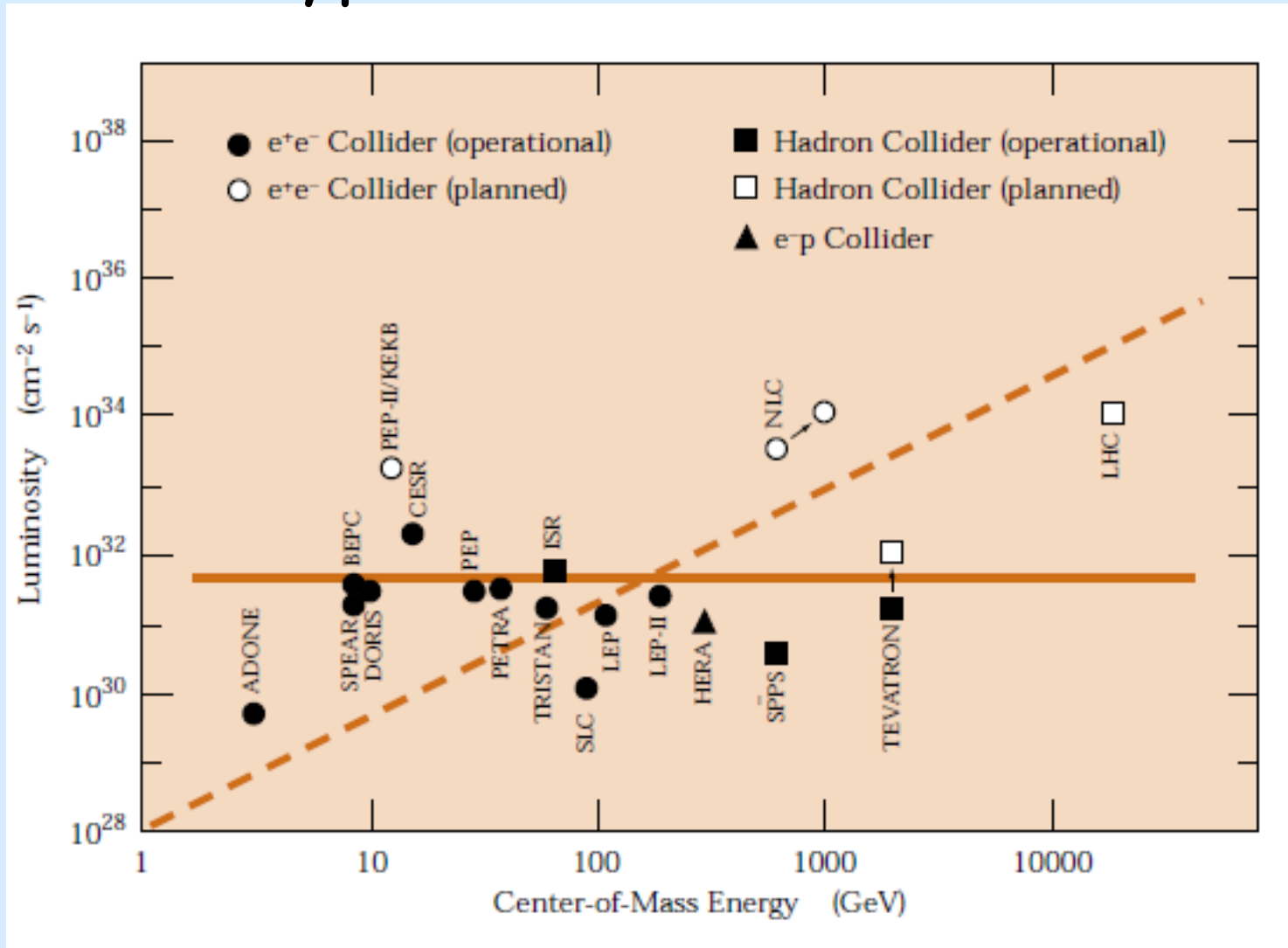
# L'importance pour la physique de particules d'atteindre une haute luminosité avec les collisionneurs

Plus une particule sans extension (=particule élémentaire) est massive, plus la probabilité qu'elle soit produite dans une collision protons/proton ou électron/positron est petite. Il faut donc essayer d'atteindre une très grande fréquence de collisions de particules - ce qu'on appelle la "luminosité" d'un collisionneur - pour produire de nouvelles particules massives.

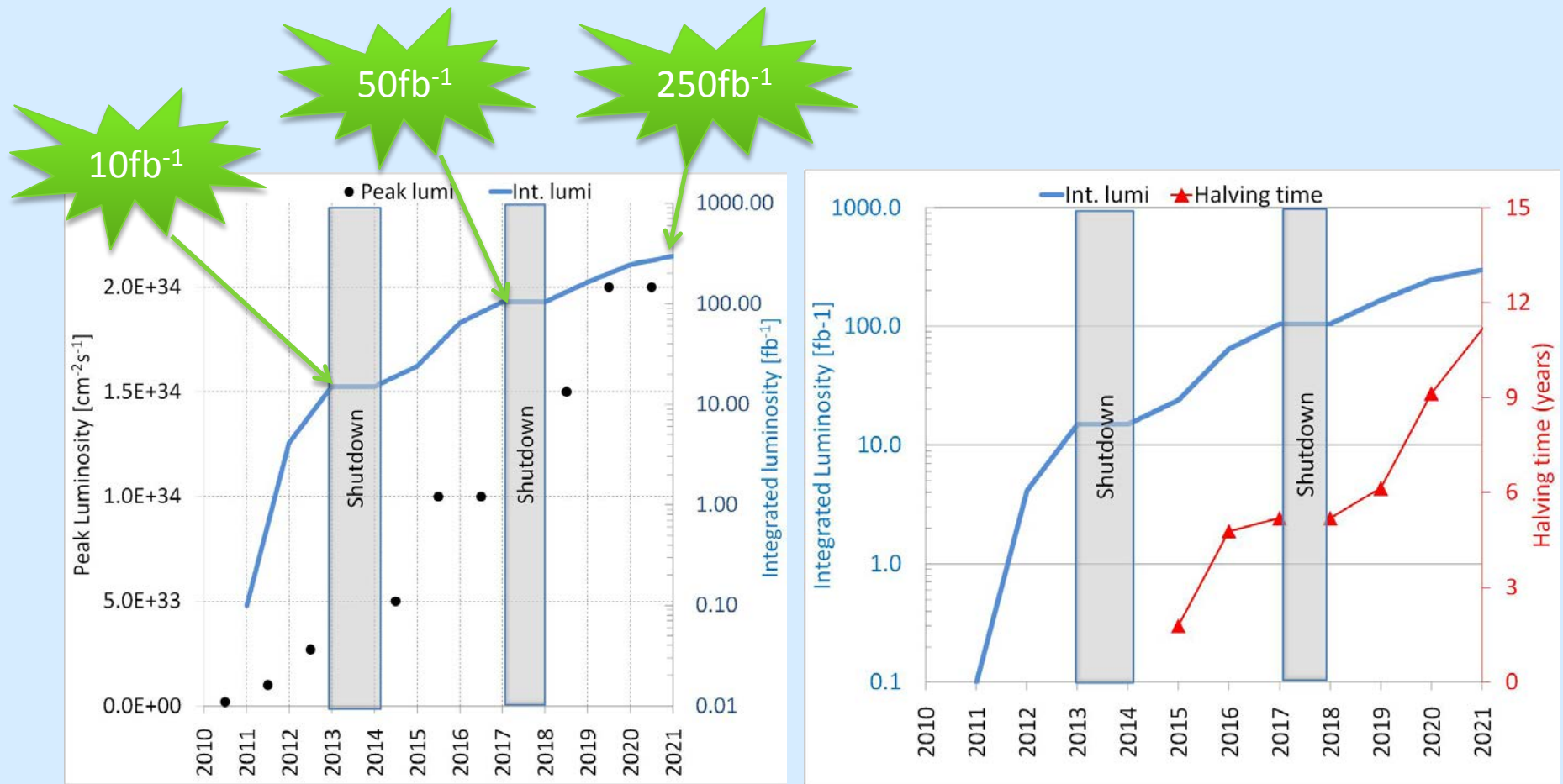
Pour maximiser la luminosité il faut maximiser l'intensité de faisceaux circulant dans le collisionneur et aussi focaliser, en utilisant des aimants quadripôles, les faisceaux le plus possible pour atteindre les plus petites sections des faisceaux au moment de leurs collision.



# Niveau de luminosité atteint avec différents types d'accélérateur



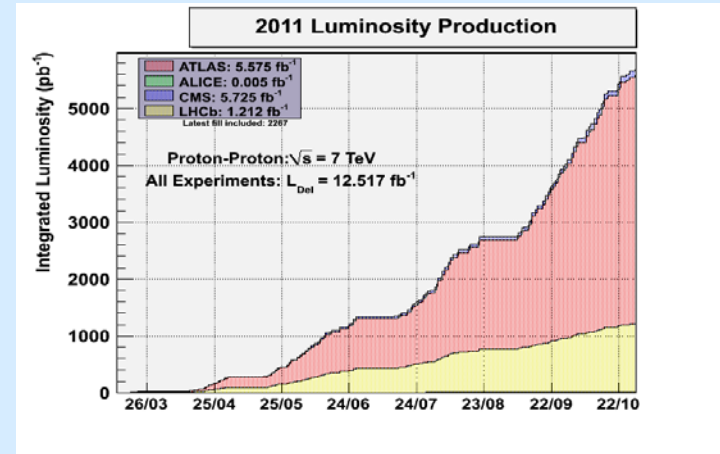
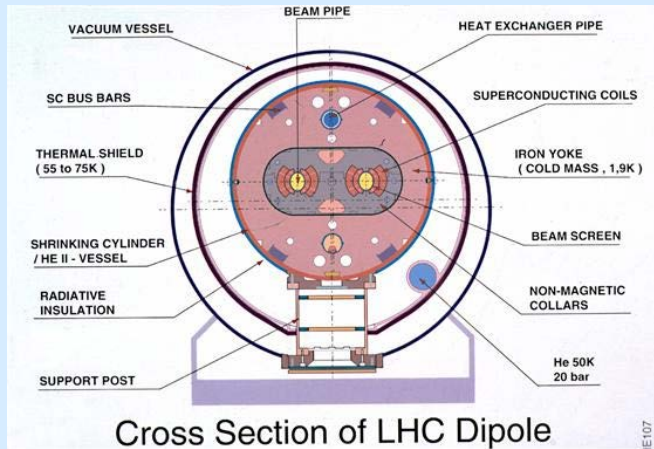
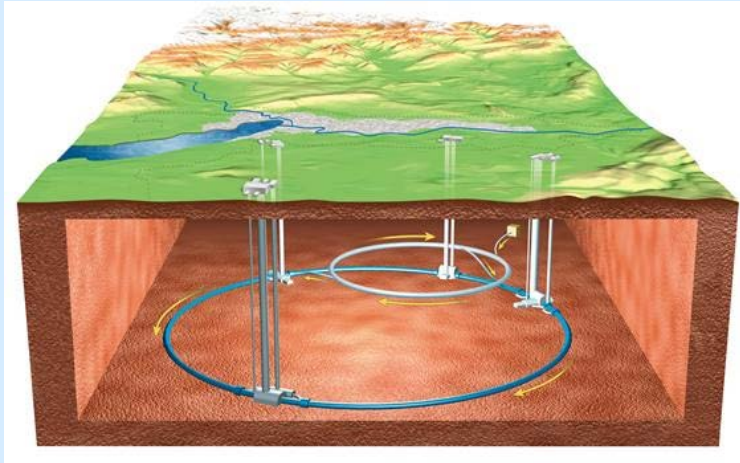
# L'évolution de la luminosité du collisionneur LHC



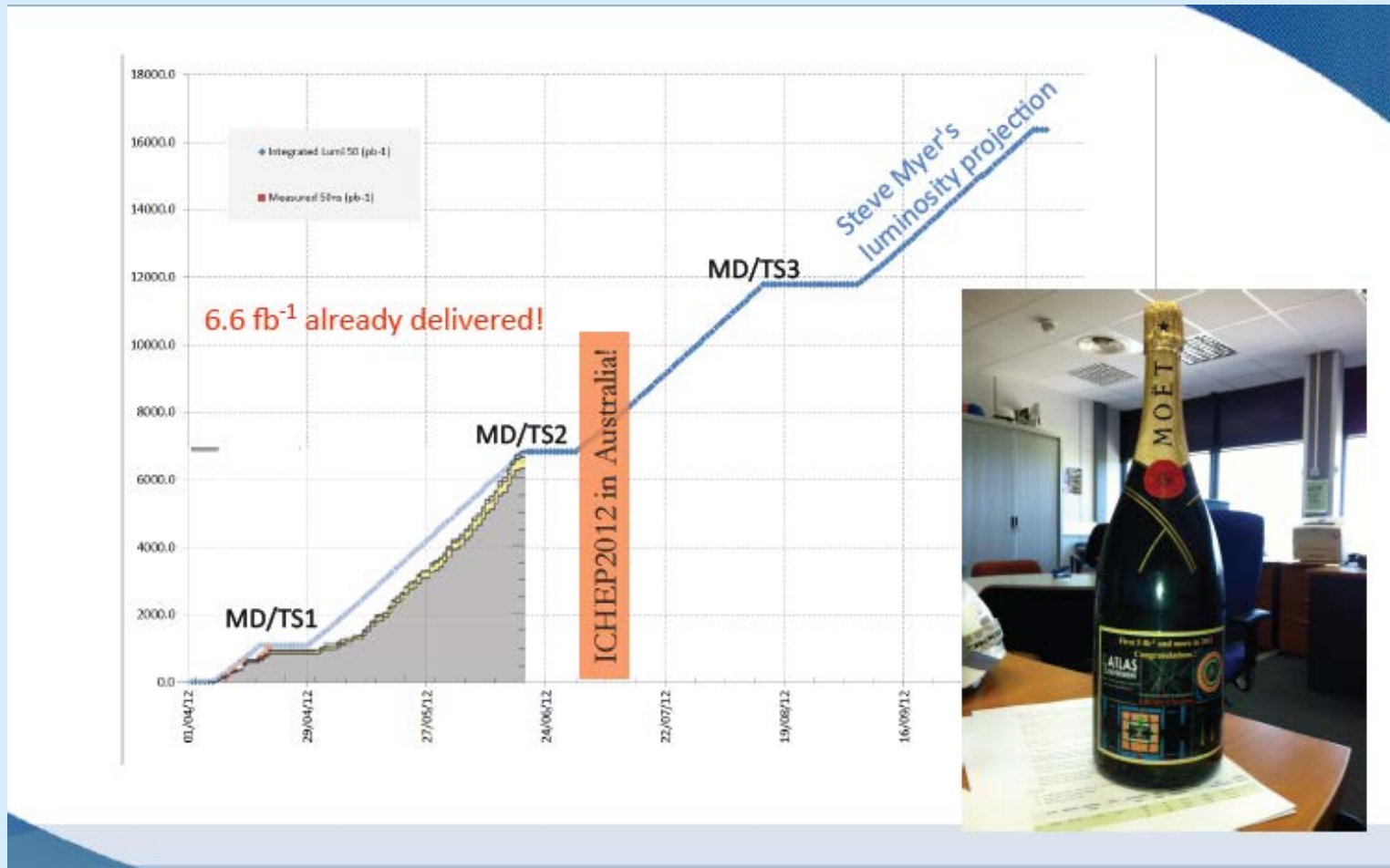
A luminosité constante il faut augmenter le temps de prise de données 4 fois pour fournir une luminosité intégrée qui réduit de moitié les erreurs statistiques.

# Les grands accélérateurs actuellement existants ou projetés pour la physique des particules

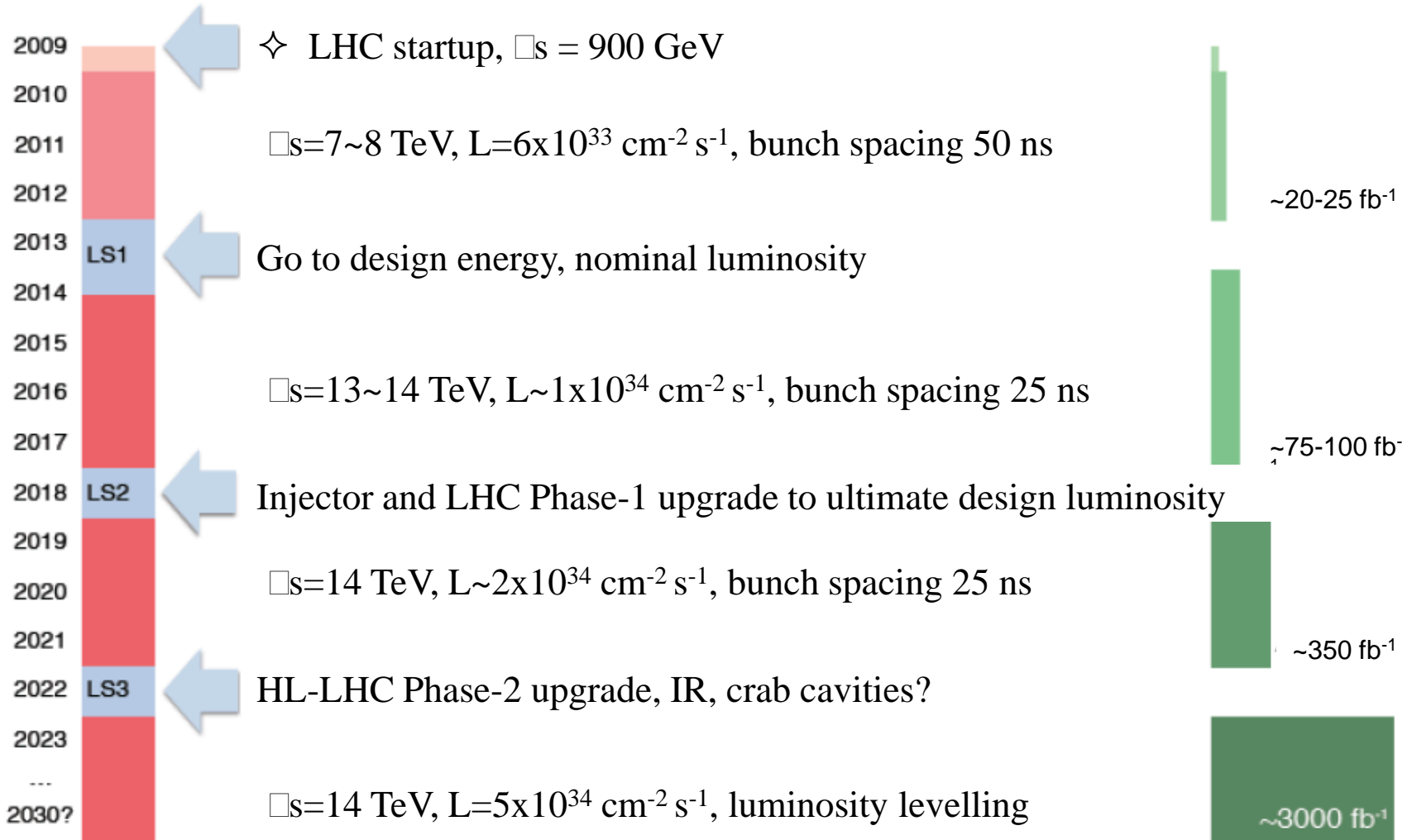
# Le collisionneur LHC



# Cette semaine la luminosité collectée à LHC en 2011 a déjà été doublée



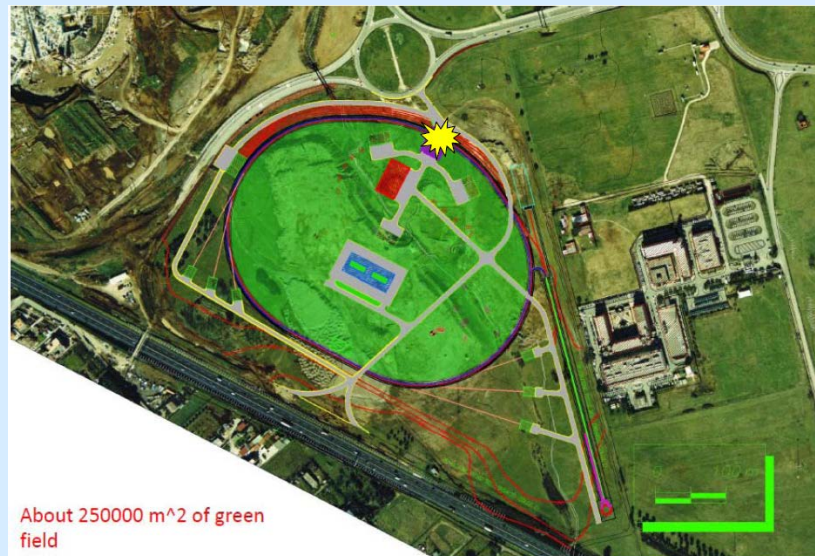
# L'évolution de la luminosité et de l'énergie du LHC au delà de 2012





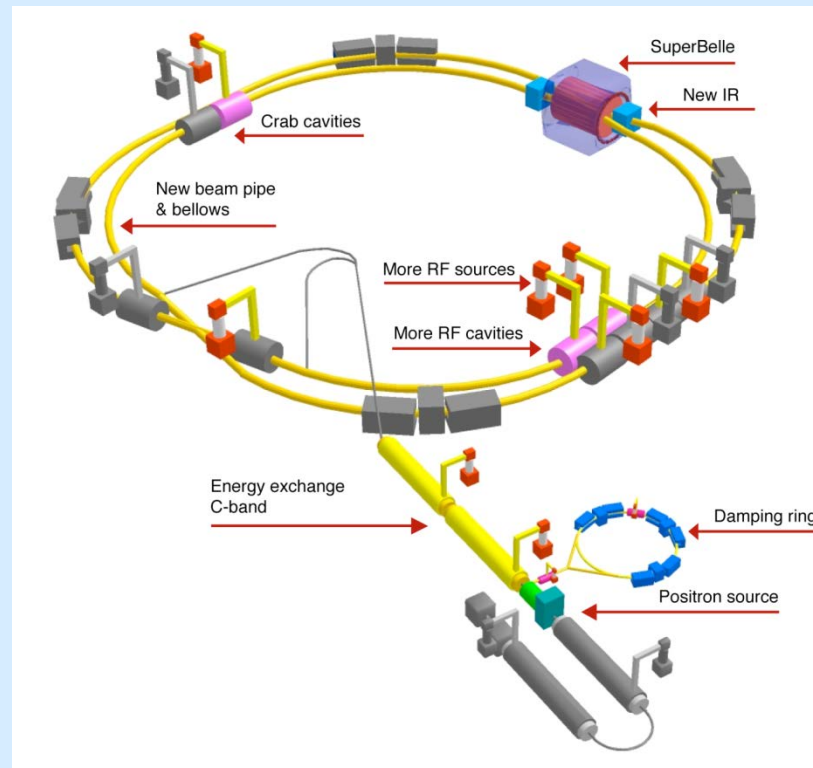
# SuperB

Le SuperB sera un collisionneur  $e^+e^-$  d'une énergie de production de particules de ca 11 GeV et d'une luminosité de  $10^{36} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ , ce qui va permettre la production de ca 1000 mesons B par seconde. Cela est environ 100 fois plus que la génération de collisionneurs B antérieurs (Dafne, KEKB) et sera réalisé en, entre autres, réduisant la dimension verticale des faisceaux de 4 micromètre à 0.04 micromètre. La construction de SuperB à Tor Vergata, en Italie a été décidée en 2010 et sera terminée ~2015.



# SuperKEKB

SuperKEKB est un projet d'accélérateur au KEK au Japon dont la construction a aussi commencé et qui est similaire au projet SuperB en Italie avec les même buts scientifiques, en premier lieu de mesurer des désintégrations rares du meson B et la violation de la symétrie CP dans le secteur de mesons B.



A KEK au Japon il y a aussi tout un complexe d'accélérateurs nommé J-PARC donc le plus grand est un synchrotron de protons de 50 GeV et de très haute intensité

**J-PARC Accelerators**

PARTICLE PHYSICS  
JOINT LAB  
JAPAN - FRANCE

Materials & Life Science  
Experimental Facility

The Hadron Hall

50 GeV MR  
A round=1,568m

Neutrino

3.50BT

3GeV RCS  
A round=348m

Area for  
Transmutation  
Experimental Facility

Linac  
(330m)

These were the newest information on 13, May  
1. Gates for access to 50Gev MR tunnel should be closed on 14, May  
2. 50Gev MR operation would be started on 18, May

[Feb. 2006]

(Nobuhiro KIMURA The 2nd FJPL workshop held at Paris - 15-16/May/2008)

3

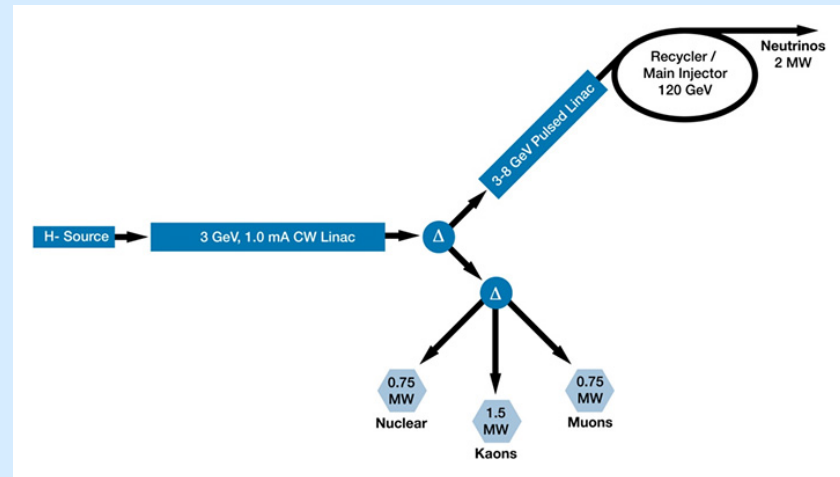


# JPARC est utilisé pour la production d'un faisceau de neutrinos très intense pour l'étude des oscillations de neutrinos



# Project X

Aux États-Unis le grand collisionneur de proton-antiproton 1+1 TeV TEVATRON à FERMILAB à Chicago a été fermé en 2011 à cause de la concurrence avec le collisionneur proton-proton 4+4 TeV LHC. Actuellement on planifie la mise au point d'un complexe d'accélérateur nommé Project X au FERMILAB qui vise la production de faisceaux de différentes sortes de particules (neutrino, kaon, muon) à relativement basse énergie mais à très haut intensité

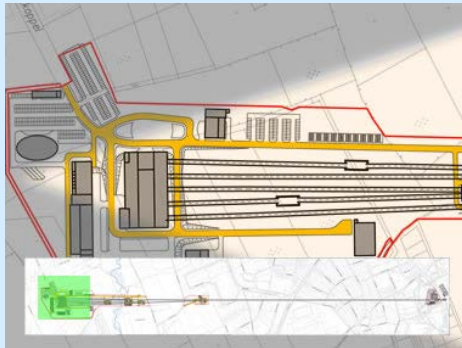
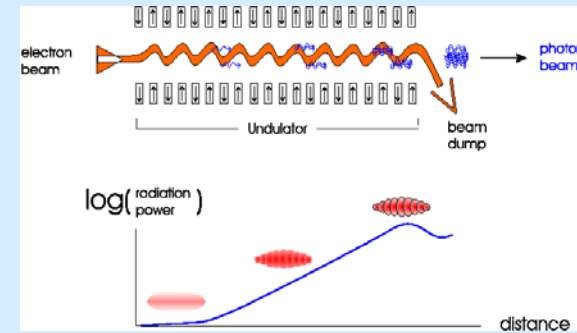
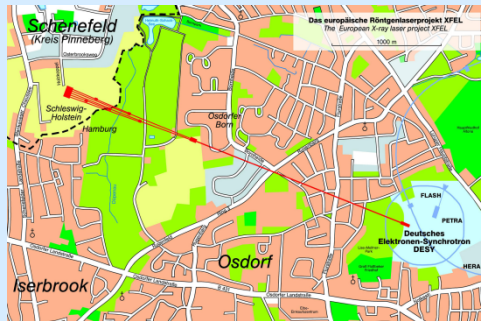


# Quelques grands accélérateurs actuellement projetés pour la radiation de synchrotron et les neutrons



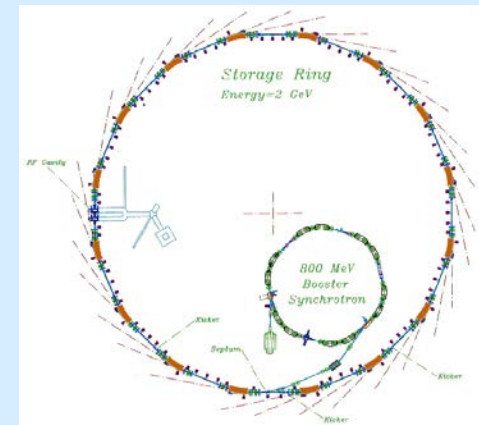
# XFEL

Dans le laboratoire de DESY à Hamburg on est en train de construire un accélérateur linéaires d'électron d'un longueur de 3.4 km de 20 GeV et de très hautes intensité. Ce faisceau sera conduit dans des onduleurs dans lesquels sera produit une radiation très cohérente et très intense de rayons X avec lesquels on pourra faire des investigations nouvelles, entre autres dans la physique de matières et la biologie moléculaires. Le XFEL sera opérationnel en 2016.



# SESAME

En Jordanie on est en train de construire une synchrotron d'électron 2.3 GeV pour la productions de la lumière de synchrotron. Ce projet international est, comme le CERN, un projet sous le auspices de l'UNESCO. La plupart des Etats du Moyen Orient sont membres de SESAME, entre autres la Jordanie, Israël, la Palestine et l' Irak. Ce projet va apporter au Moyen Orient une base de recherche expérimentale en science fondamentale en physique de matière solide et biologie moléculaire, essentielle pour l'industrie moderne, et également contribuer au processus de la paix dans la région. Le début de l'opération de SEAME est prévu pour 2015.



# European Spallation Source EES



A Lund en Suède on projette la construction d'une source de neutrons dite de "spallation". Pour cela on va construire un accélérateur linéaire de protons de 2.5 GeV et d'une puissance de 5 megawatt, ce qui donnera le faisceau de protons le plus intense dans le monde construit jusqu'à maintenant. Le début de l'utilisation de l'EES est prévu pour 2019.



# A quoi peut-on utiliser les neutrons de spallation?...

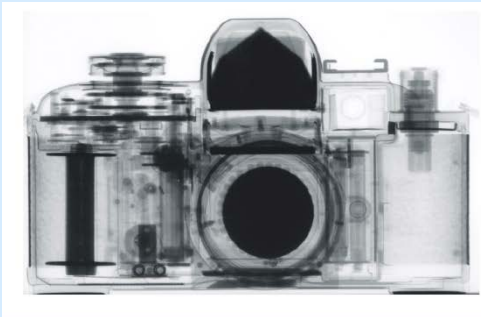
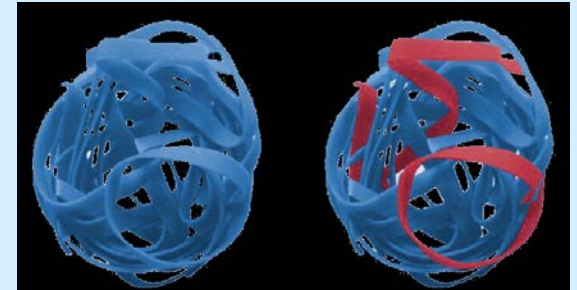


Fig. a: Neutron radiography of a camera

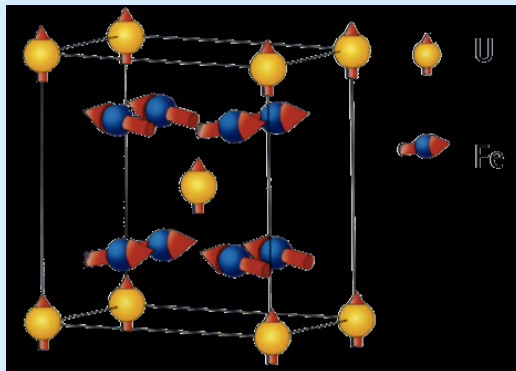


Fig. b: Radiographic image of a camera made X-rays

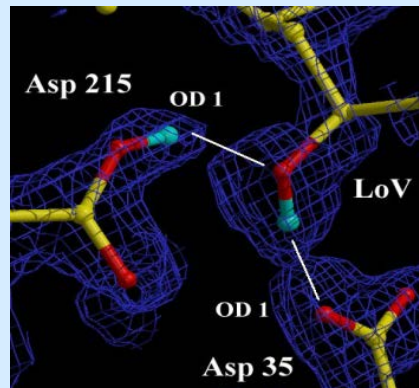
..voir à l'intérieur de choses



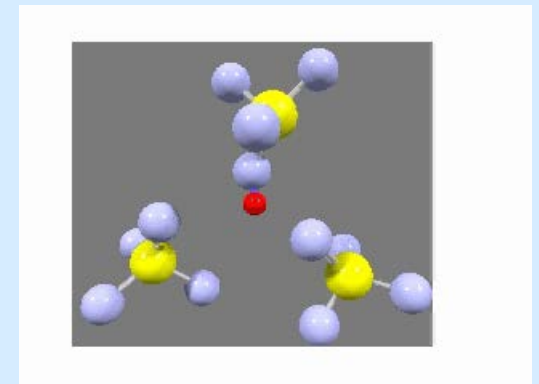
..voir les isotopes



..voir les spins des atomes

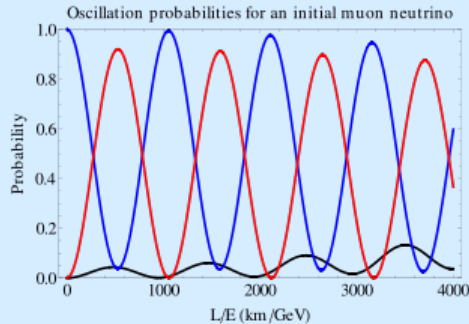


..voir des atomes legers



..voir les atomes en mouvement

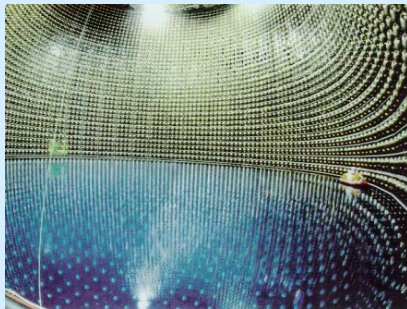
# ESS sera la source la plus importante non seulement de neutrons mais aussi de neutrinos



Oscillations de neutrinos



800 m en profondeur dans la Zinkgruvan



Détecteur Cherenkov à eau de neutrino Superkamiokande



Distances des détecteurs de Lund

Zinkgruvan mine 360 km  
1200 m deep

Oskarshamn 270 km  
500 m deep

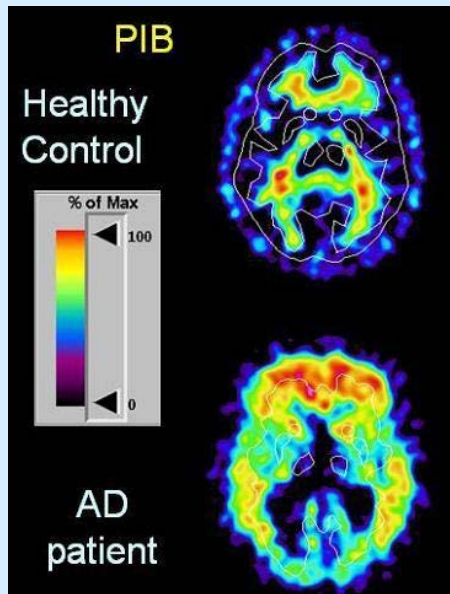
Pour un faisceau de  $\nu_\mu$  de 300 MeV le premier maximum d'oscillation  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  est à une distance de 140 km et le second maximum à 430 km.

# Les applications de la technologie des accélérateurs pour la médecine, l'énergie et pour l'industrie



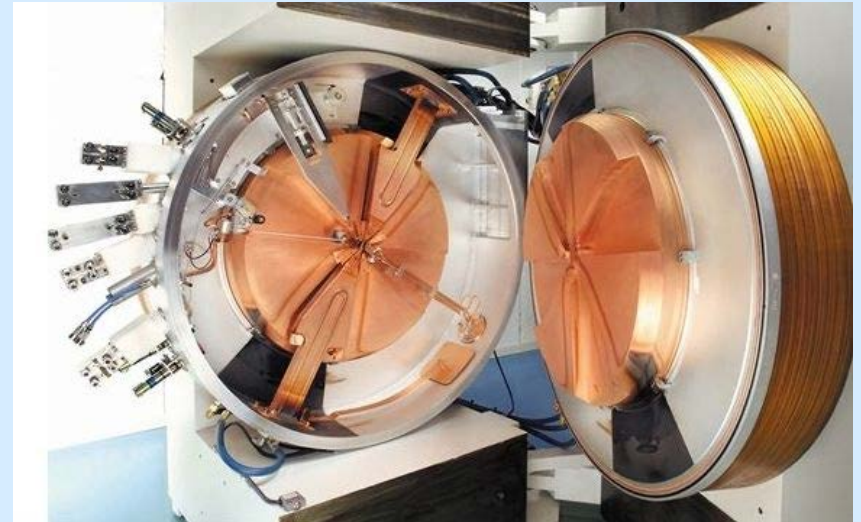
# Diagnostic médical par TEP

Centre de tomographie par émission de positons (TEP) à l'Hôpital Académique à Uppsala



Comparaison de l'image TEP d'une personne en bon santé (en haut) et d'une personne avec un syndrome Parkinson (en bas)

Cyclotron pour la production des isotopes émetteurs de positons pour TEP à General Electric Healthcare at Husbyborg, Uppsala



Le plus grand producteur dans le monde de cyclotrons pour cette utilisation

# Traitement proton de cancer



Commencé à Uppsala par Börje Larsson au laboratoire The Svedberg dans les années 1950



Traitements cliniques fait encore aujourd'hui au laboratoire The Svedberg à Uppsala



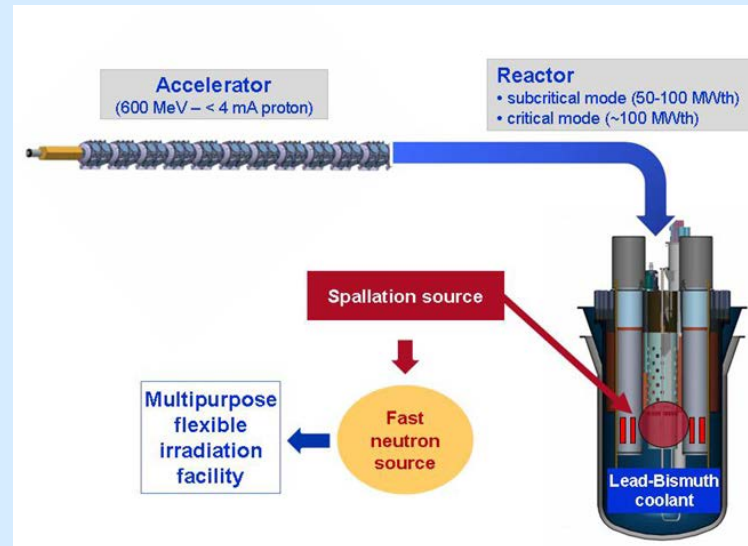
Le centre pour le traitement proton du cancer Scandion actuellement en construction à l'Hôpital Académique à Uppsala - il suffira pour tous les besoins de traitement de protons en Scandinavie



Croquis artistique d'une salle de traitement proton à Scandion

# MYRRHA pour la réduction de la toxicité des déchets radioactifs

Le projet MYRRHA vise à développer, construire et mettre en service un accélérateur linéaire de proton couplé à un réacteur de recherche multi-disciplinaire d'ici 2023 à Mol (Belgique). Un des objectifs principaux du projet est de démontrer la faisabilité de la réduction de la toxicité des déchets radioactifs par transmutation. L'accélérateur de 600 MeV devra délivrer un flux continu très intense de protons (4mA), avec une exigence de fiabilité très élevée.





# Technologie des composants d'accélérateurs

Les générateurs d'impulsions de tension (appelé modulateurs) nécessaires pour de nombreux types d'accélérateurs et d'autres systèmes industriels, produits par ScandiNova Systems AB à Ulltuna, Uppsala. Basé sur la technologie de l'état solide (patentée).



# Utilisation de la dosimétrie de radiation, développée auprès des accélérateur



Dans l'espace...



Dans les hôpitaux...



Dans les réacteurs nucléaires...



Dans les avions...



## Accélérateurs cliniques

- radiothérapie d'ion
- radiothérapie d'électron
- radiothérapie de hadron (proton/ion)



## Accélérateurs industriels

- implantation d'ion
- coupage & soudage par faisceau d'électron
- irradiateurs d'électron et de rayons X
- production de radioisotopes

Application	Nombre de systems (2007) approx.	Systems vendus/ année	Vente /année (\$M)	Prix /système (\$M)
Thérapie de cancer	9100	500	1800	2.0 - 5.0
Implantation d'ion	9500	500	1400	1.5 - 2.5
Coupage /soudage par électrons	4500	100	150	0.5 - 2.5
Irradiateurs d'électron et de rayons X	2000	75	130	0.2 - 8.0
Production de radioisotopes	550	50	70	1.0 - 30
Des tests non-destructives	650	100	70	0.3 - 2.0
Analyse par faisceau d'ion	200	25	30	0.4 - 1.5
Générateurs de neutrons	1000	50	30	0.1 - 3.0
<b>Total</b>	<b>27500</b>	<b>1400</b>	<b>3680</b>	

**La vente des accélérateurs augment chaque année de 10%**



# Conclusion

Les accélérateurs de particules jouent un rôle fondamental pour les sciences expérimentales comme la physique des particules et nucléaire, la physique atomique et moléculaire et la biologie moléculaire et comme instrument diagnostique et thérapeutique dans les hôpitaux, pour le développement de nouvelles sources d'énergies plus propres et pour beaucoup d'applications dans l'industrie