

Rapport de TAI de champ-magnétique : Les accélérateurs de particules

Page | 1

Plan du résumé

- I. Un accéléraquoi ?!
 - i. Introduction des accélérateurs de particules
 - ii. Fonctionnement des accélérateurs

- II. Evolution de l'accélérateur de particules
 - i. Le cyclotron
 - ii. Le synchrocyclotron
 - iii. Le synchrotron

- III. Etat de l'art
 - i. La science d'aujourd'hui
 - ii. Les prévisions de demain

Un accéléraquoi ?

1.1) Introduction sur les accélérateurs de particules

Page | 2

Les accélérateurs de particules sont de grandes infrastructures dans des complexes scientifiques, qualifiés généralement de « *super-outils* » ou « *instruments de grandes tailles* », dont le but premier est d'étudier la matière via l'**analyse comportementale des particules élémentaires**. En se servant des propriétés physiques des électrons, par exemple, et des *champs électriques* ou *magnétiques*, les accélérateurs de particules génèrent un faisceau dont les électrons se déplacent extrêmement vite et ont gagné en masse.

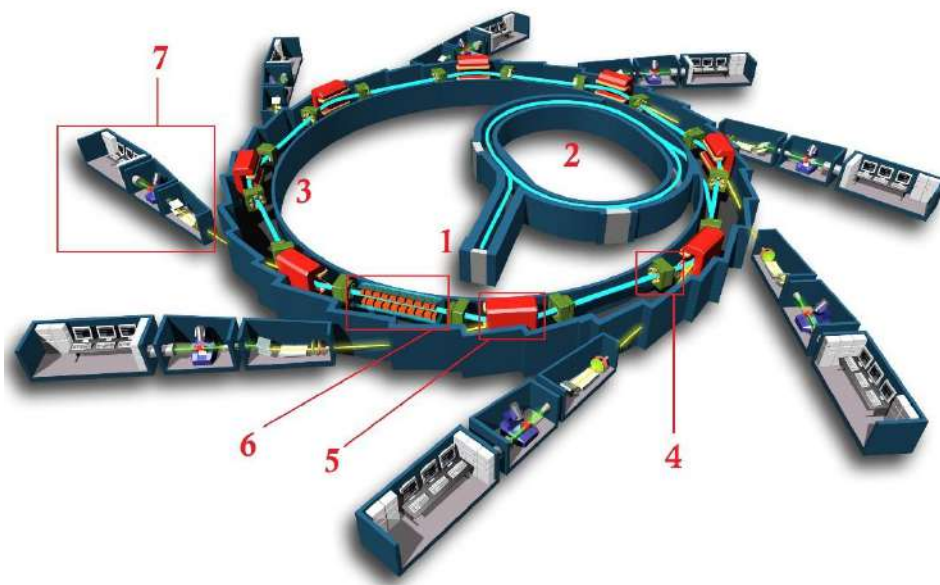
Les accélérateurs peuvent servir à l'analyse primordiale de la matière, comme le fait le CERN qui essaie d'étudier et refaire certains paramètres de l'origine de la création de la matière – le Big-Bang –, mais servent également à effectuer des tests sur des matériaux pour l'industrie, comme le fait l'ESRF (l'accélérateur de particules de type synchrotron, localisé à Grenoble).

Exemple : Le CERN est un complexe circulaire de 27 kilomètre de circonférence, à double tube, dans lesquels circulent des protons allant à 99,9999991% de la vitesse de la lumière, chargés d'une énergie de **7 Terra électron-Volts**. Lors des croisements de ces deux tubes, les protons à contre-sens se percutent et leurs émissions sont analysées.

2.2) Fonctionnement d'un accélérateur de particule.

Nous verrons par la suite qu'il existe 3 types majeurs d'accélérateurs de particules (cyclotron, synchrocyclotron et synchrotron). Cette partie ayant pour but d'expliquer schématiquement le fonctionnement et la finalité d'un accélérateur de particules, nous avons fait le choix de présenter le déroulement d'une expérience au sein d'un accélérateur de type synchrotron.

Voici l'infrastructure d'un accélérateur de particules de type synchrotron :



1. A l'entrée de ce tunnel se situe le LINAC : une source introduisant de l'hydrogène à une fréquence cadencée, cet hydrogène va voir ses électrons arrachés pour ne garder que les noyaux. On se servira de leur charge positive pour accélérer les particules via des champs électriques.

Page | 3

2. **L'anneau préliminaire**, dans lequel les particules vont être accélérées, recentrées puis introduites dans l'anneau de taille supérieure quand elles auront atteint **91,6%** de la vitesse de la lumière.

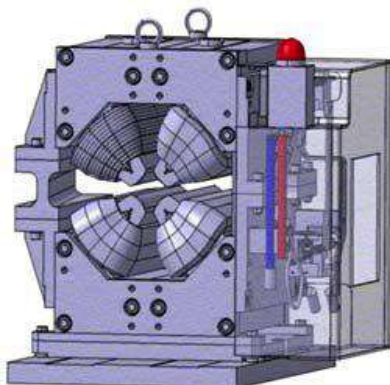
3. **L'anneau final** dans lequel le faisceau atteindra sa vitesse maximale de **99,9999997%** de la vitesse de la lumière, et dispose de 3 différentes machines. Egalement, le vide présent dans l'anneau est environ $10^{-10} hPa$ plus faible qu'à 400 000 kilomètres de la Terre.

4. Le faisceau va passer entre 4 **aimants de focalisation** qui vont avoir pour but d'exercer un champ de manière à recentrer le faisceau afin d'éviter sa distorsion lors du parcours de l'anneau. Ce type de machine se répète à plusieurs endroits de la structure.

5. A cet endroit, le faisceau va être dévié via des **aimants de courbures** afin de garder une allure plus ou moins circulaire (bien qu'en réalité le chemin se rapproche plus réellement d'un polygone lissé que d'un anneau totalement circulaire)

6. Dernier élément nécessaire au faisceau : **les cavités accélératrices**, qui vont augmenter la vitesse du faisceau en utilisant la **propriété positive des protons**, puis la maintenir à vitesse constante lorsque le seuil sera atteint.

7. Fin de vie du faisceau : plusieurs laboratoires sont disposés en tangente de l'anneau afin de pouvoir étudier le faisceau et effectuer les tests finaux. On y récupère les lignes de lumières pour les analyser.



Un exemple de quadripôle, où apparaissent très nettement les aimants appliquant un champ électromagnétique pour aplanir et recentrer le rayon.

Évolution de l'accélérateur de particules

Dans les années 1920, il apparut évident que l'étude approfondie de l'atome, de son noyau et de la structure de la matière allait nécessiter de très hautes énergies. Il était alors déjà connu que l'énergie (**E**) d'une particule dans un champ électrique correspond au produit de sa charge (**q**) par la tension (**U**) dudit champ : $E = q \cdot U$

Une solution permettant d'augmenter considérablement cette énergie fut donc proposée. Il s'agissait d'accélérer les particules dans un tube à vide soumis à une très forte tension. La charge des particules serait alors augmentée, de par leur accélération, ce qui, couplé à la très haute tension, décuplerait l'énergie de chaque particule. **Deux problèmes se posent alors :**

- Comment accélérer les particules ?
- Comment obtenir une tension suffisamment élevée ?

Un premier succès fut accordé à **John Cockcroft** et **Ernest Walton** qui utilisèrent un multiplicateur de tension créé sur la base du montage **Greinacher**, constitué de condensateurs et de redresseurs. Finalement, le principe encore connu et utilisé de nos jours fut inventé par **Ernest Orlando Lawrence**. Celui-ci résolu les deux problèmes en accélérant les particules grâce à un système d'impulsions électriques alternatives successives, générées par un puissant électroaimant. C'est ainsi qu'est né le **cyclotron**.

2.1) Le cyclotron

Fonctionnement : Le cyclotron est un accélérateur de particules circulaire où les particules suivent une trajectoire en forme de spirale. Cette machine est constituée de deux électrodes en forme de « D », et d'un **champ magnétique appliqué perpendiculairement** à celles-ci, ayant pour fonction de fournir la force centripète aux particules, nécessaire au maintien de leur trajectoire circulaire. Les portions rectilignes des **électrodes** sont placées face à face et espacées par un intervalle. Une tension alternative appliquée entre les deux électrodes génère un champ électrique dans cet intervalle, qui a pour fonction **d'accélérer les particules à chacun de leurs passages**.

(www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Meca/Charges/cyclotron.html)

Utilité : Le cyclotron permet aujourd'hui l'accélération de protons, qui, par irradiation, permettent la **production d'isotopes radioactifs**, notamment utilisés en **médecine**.

Il est admis que la fréquence du champ électrique dans le cyclotron peut être exprimée comme suit :

$$f = \frac{Bq}{2\pi m}$$

Avec **f** la fréquence, **B** le champ magnétique, **q** la charge des particules et **m** leur masse.

On constate que la fréquence f du champ électrique ne dépend pas du rayon de la trajectoire des particules, et reste donc constante tout au long du processus. Ceci reste valable tant que la masse des particules reste **constante**.

Or, lorsque la vitesse des particules avoisine celle de la lumière (l'énergie atteinte est alors comprise entre **10 et 20 MeV**), celles-ci subissent une augmentation de leur masse, ce qui demande un ajustement de la fréquence du champ électrique. Cette opération peut être effectuée dans un **synchrocyclotron**.

2.2) Le synchrocyclotron

Fonctionnement : Un synchrocyclotron est en réalité un cyclotron capable de faire varier la **fréquence de son champ électrique interne**, ceci afin de compenser le fait que les **particules gagnent en masse** à l'approche de la vitesse de la lumière (diminution de la fréquence lors de l'augmentation de la masse des particules). Il diffère du cyclotron également de par sa structure, puisque qu'il ne comporte qu'une seule électrode en forme de « D ». Sa taille globale est également changée, la taille de l'électroaimant étant liée à l'énergie désirée en sortie. Le synchrocyclotron permet d'atteindre des énergies de l'ordre de centaines de MeV (**max 1000 MeV**).

Utilité : Le synchrocyclotron est notamment utilisé pour la recherche dans le domaine de la physique nucléaire et atomique. Mais son utilisation est également médicale, puisqu'essentielle à la pratique de l'hadronthérapie (bombardement des tumeurs lors du traitement du cancer).

La taille de l'électroaimant étant liée à l'énergie finale désirée, il n'est pas concevable de dépasser le stade des 1000 MeV. L'obtention d'énergie supérieure n'est possible que grâce à l'utilisation d'un **synchrotron**.

2.3) Le synchrotron

Fonctionnement : Les particules accélérées par un synchrotron ne suivent plus une trajectoire en forme de spirale mais une trajectoire **circulaire**.

En effet, les énergies obtenues grâce à cette machine lui imposent une taille sensiblement grande. C'est la raison pour laquelle il n'est plus possible d'utiliser un simple synchrocyclotron, puisque cela impliquerait un électroaimant inconcevablement gigantesque.

Une trajectoire circulaire (à rayon constant donc) permet d'avoir un champ magnétique présent seulement sur une **couronne centrée** sur ledit cercle, plutôt que sur toute la surface du cercle (comme dans le cyclotron et le synchrocyclotron). L'**électroaimant** est donc remplacé par plusieurs secteurs magnétiques disposés tout le long de la trajectoire (et donc tout le long du cercle).

Etat de l'art : la science actuelle et à venir

Page | 6

3.1) Actuellement

Actuellement, les accélérateurs de particules sont utilisés dans de nombreux domaines : **physique des particules**, **théorique**, **atomique**, **nucléaire**, en **biologie**, en **chimie**, en **médecine**, etc... De nombreux domaines assez improbables se servent des applications générales d'accélérateurs de particules. On y trouve également **l'archéologie**, qui se sert de la capacité de **spectrométrie de masse** par les accélérateurs pour la **datation** d'artefacts trouvés.

3.2) Les prévisions

Actuellement, les accélérateurs de particules ont le vent en poupe depuis **2012 / 2013** avec la découverte du **boson de Higgs** (particule élémentaire prédite théoriquement au 20^{ième} siècle) de manière expérimentale au **CERN**. Cette découverte a généré une attention médiatique importante, apportant de l'attention, et donc des fonds, pour les accélérateurs de particules (du moins les plus conséquents).

Parmi les prévisions, d'ici 2 ans, les complexes de type synchrotrons vont essayer de joindre leurs efforts de recherche pour créer des **supers faisceaux de neutrino** via un **accélérateur de protons** de haute intensité.

Dans la continuité de la **recherche sur les neutrinos**, le CERN va se lancer dans la réalisation, théorique dans un premier temps, d'un **accélérateur d'ions radioactifs** pour soutenir la physique nucléaire (et celle des neutrinos).

Enfin, d'ici 2020, la recherche va tenter de concevoir un accélérateur de muons pour réaliser un faisceau de neutrinos encore plus brillant (projet **Neutrino factory**), puis ensuite un collisionneur de muons vers l'année 2025.

Ainsi, que pourrions-nous réaliser entre 2025 et 2035 ?

Sources :

- <http://www.futura-sciences.com/magazines/matiere/infos/dico/d/physique-rayonnement-synchrotron-840/>
- <http://www.lhc-france.fr/>
- http://fr.wikipedia.org/wiki/Organisation_europ%C3%A9enne_pour_la_recherche_nucl%C3%A9aire