

Les accélérateurs en physique des hautes énergies

Xavier Rouby, CP3, Université Catholique de Louvain

7 mai 2007

1 Introduction

Depuis plus d'un siècle, les scientifiques utilisent des accélérateurs de particules pour étudier la matière. A l'origine de la découverte de l'électron, de telles machines ont permis l'étude de particules éphémères, recrées en laboratoire grâce à l'énergie disponible dans les faisceaux accélérés. En effet, l'énergie cinétique accumulée lors de l'accélération peut être utilisée lors de collisions, sur cibles fixes ou sur d'autres particules accélérées. La limite de résolution des microscopes classiques a pu être dépassée par l'exploitation des microscopes électroniques, dans lesquels des électrons énergétiques remplacent la lumière. En général, les principales avancées sur la connaissance de la matière subatomique ont été réalisées grâce aux accélérateurs de particules.

L'équation liant notre connaissance de la physique quantique et les caractéristiques de ces machines est simple : pour créer de nouvelles particules encore inobservées, pour étudier des structures plus profondes, il faut augmenter l'énergie maximale des particules accélérées. L'âge d'or de la physique des particules, dans les années '50 et '60, a vu de nombreuses avancées théoriques simultanées à la découverte des divers hadrons et de toutes les particules qui constituent le Modèle Standard. Les avancées technologiques dans le contexte des accélérateurs étant directement liées à ces découvertes expérimentales.

Loin de ces laboratoires énergivores, les accélérateurs ont également envahi l'univers de Mr tout le monde. Que ce soit dans le monde industriel ou médical, des machines telles que les cyclotrons ont trouvé leur place. Encore plus proche, les tubes cathodiques des télévisions et des écrans d'ordinateurs sont autant de mini-accélérateurs présents dans chaque maison (même si les technologies des écrans plats vont fortement et rapidement changer cette situation).

Basée sur des concepts simples et intuitifs, nous allons ici introduire les notions nécessaires à la bonne compréhension d'un système d'accélération utilisé depuis plus de cent ans, mais encore terriblement d'actualité. En fait, l'essentiel tient en une seule ligne : la **Force de Lorentz**.

2 Force de Lorentz

L'équation de la force de Lorentz lie le comportement d'une particule de charge q à une influence électromagnétique externe :

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}). \quad (1)$$

Les deux composantes de la force ont une influence complémentaire sur la trajectoire de la particule. Comme nous allons le voir, le champ électrique \vec{E} sert à augmenter l'énergie des particules, tandis que le champ magnétique \vec{B} permet de contrôler leur trajectoire.

2.1 Le champ électrique

Selon l'approche classique, on obtient en effet une accélération directement proportionnelle (et parallèle) au champ électrique :

$$\vec{F} = q\vec{E} = m\vec{a}. \quad (2)$$

Pour augmenter l'énergie d'une particule, il suffit donc de la soumettre à un champ électrique. Qu'il s'agisse d'une *Van der Graaf*, d'un cyclotron, d'un *linac*¹ ou même d'une télévision, la seule manière d'augmenter l'énergie d'une particule repose sur l'application d'un champ électrique. Ces différents instruments diffèrent cependant sur la mise-en-oeuvre technologique de cette application de \vec{E} , liée aux exigences de performances. Si un simple condensateur est suffisant pour un tube cathodique, les intensités nécessaires pour un accélérateur kilométrique imposent des contraintes importantes (risque de claquage si le champ est trop important) et des technologies particulières (les cavités résonnantes sont devenues la norme).

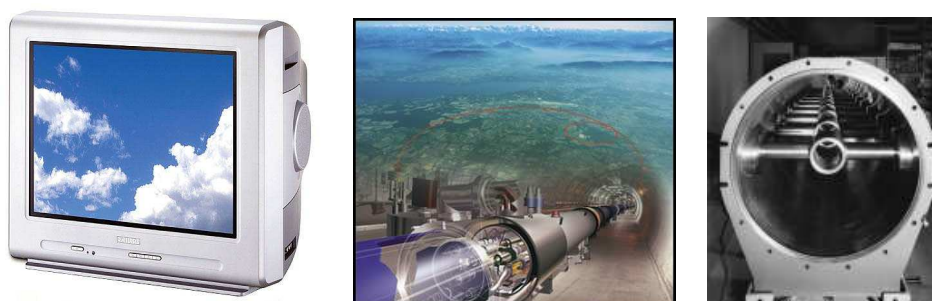


FIG. 1 – Du tube cathodique au LHC, les principes restent identiques, seules les technologies changent...

Actuellement, les technologies d'accélération sont arrivées à une période charnière, comparable à la transition entre les machines à vapeur et les machines électriques. Les techniques d'accélération devenues classiques sont poussées à leur limite, j'en prends pour preuve la

¹Linear accelerator : premier étage de toutes les chaînes d'accélérations dans les machines modernes comme le Tevatron ou le LHC.

taille démesurée des accélérateurs nécessaires capables d’atteindre des énergies toujours plus hautes. Ces technologies seront encore utilisées quelques années avec le LHC, son extension² et pour le potentiel Collisionneur Linéaire International (*ILC*). Néanmoins, de nombreuses recherches sont effectuées pour aborder autrement l’accélération des particules et pour trancher le noeud gordien du “plus énergétique donc plus gros”. Parmi ces recherches, la technologie CLIC envisage de plonger un faisceau collimaté à accélérer dans le sillage électrique d’un autre faisceau, qui lui servirait de source d’énergie. Un prototype mettant en oeuvre ces principes existe déjà au CERN (Fig . 2) et donne des résultats encourageants, permettant d’atteindre un gradient de 100 MV/m! Une tout autre approche est à l’étude dans certains laboratoires afin d’accélérer sur quelques millimètres des particules confinées dans un plasma, contrôlé par une demi-douzaine de laser (gradient de l’ordre du TV/m). L’avenir des accélérateurs s’annonce donc changeant, innovant et très prometteur.

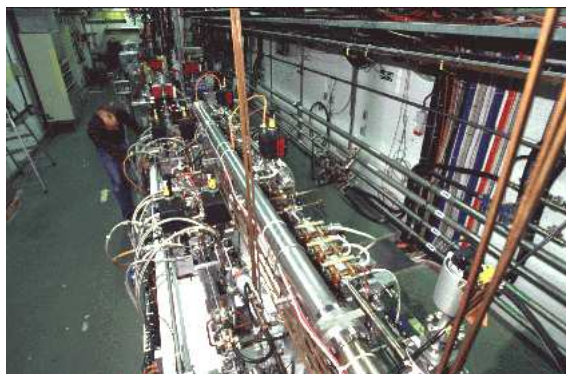


FIG. 2 – La technologie CLIC, basée sur l’accélération d’un faisceau par un autre, serait-elle à la base des prochains accélérateurs ?

2.2 Le champ magnétique

Poursuivons notre approche classique afin de sentir l’influence d’un champ magnétique sur une particule de charge q et de masse m . L’accélération produite par le champ sera toujours perpendiculaire à la vitesse.

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} = m\vec{a}. \quad (3)$$

L’accélération liée à un champ magnétique sera donc toujours centripète, et ne permettra donc jamais de modifier l’énergie d’une particule! En d’autres termes, la puissance liée au champs magnétique sera toujours nulle.

$$\mathcal{P} = \vec{v} \cdot \vec{F} = q\vec{v} \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) = 0. \quad (4)$$

²Le *Super-LHC*, ou *SLHC*, est déjà en cours d’étude. Il s’agirait *simplement* d’une version plus énergétique et lumineuse du LHC. De telles extensions sont habituelles lors de la vie d’un accélérateur, comme ce fut le cas pour le LEP et pour Hera par exemple.

Cette complémentarité³ de l'influence des champs magnétique et électrique permet donc indépendamment de contrôler d'une part la trajectoire d'une particule et d'autre part son énergie.

Imaginons un ensemble de particules identiques, de charge q et d'impulsion p , subissant localement l'influence d'un champ vertical $B_y(x)$. Il est intéressant de développer ce champ autour d'un point central, multiplié par le rapport $\frac{q}{p}$

$$\frac{q}{p}B_y(x) = \frac{q}{p}B_y + \frac{q}{p}\frac{\partial B_y}{\partial x}x + \frac{q}{p}\frac{1}{2}\frac{\partial^2 B_y}{\partial x^2}x^2 + \dots \quad (5)$$

- Le premier terme, constant, influence de manière identique toutes les particules de notre faisceau. Il est interprété comme l'influence d'un dipôle magnétique faisant tourner la trajectoire des particules avec un rayon de courbure $R = \frac{p}{q} \frac{1}{B_y}$.
- Selon son signe, le second terme va correspondre soit à une focalisation soit à une défocalisation du faisceau, au même titre que ce que l'on entend en optique classique. La particularité est qu'une focalisation dans un plan provoque une défocalisation dans l'autre plan. C'est une conséquence du **théorème de Liouville**. A chaque particule du faisceau, de position \vec{x} et d'impulsion \vec{p} , un associé un point (\vec{x}, \vec{p}) dans l'espace de phase. L'ensemble des particules décrit donc une hyper-surface dans cet espace. Le théorème de Liouville affirme simplement que cette surface doit rester constante (dans certaines hypothèses – fig 3). On peut se le représenter en manipulant un bloc de plasticine. Si l'on aplatit ce volume entre deux plans horizontaux (focalisation), le volume s'étend dans l'autre direction (défocalisation). De la même manière, si un faisceau est fortement concentré en un point (focalisation selon \vec{x}), il sera très divergent (défocalisation selon \vec{p}). Ce terme $k = \frac{q}{p} \frac{\partial B_y}{\partial x}$ est associé à un quadrupôle.

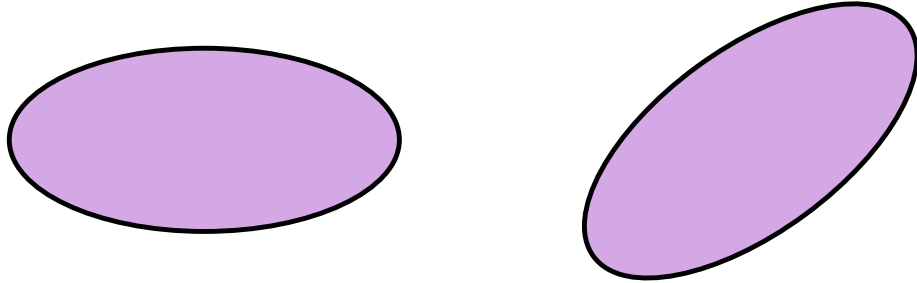


FIG. 3 – D'après le théorème de Liouville, la surface de l'ellipse représentant les particules dans l'espace de phase ne peut pas changer. Par exemple, une focalisation représente une rotation de cette ellipse dans l'espace de phase.

– Les termes d'ordres supérieurs permettent des corrections aux termes précédents. L'appellation en termes de pôles (dipôles, quadrupôles, sextupôles, etc) provient simplement du nombre et de la disposition des bobinages (électroaimants) nécessaires à la création de ces termes du développement de \vec{B} .

³Vu qu'un champ magnétique n'est jamais qu'un champ électrique vu d'un référentiel boosté, ce lien n'est certainement pas dû à un hasard de la nature...

Un accélérateur tel que le LHC est donc constitué d'un grand nombre de dipôles, pour la courbure de la trajectoire, de quadrupôles, pour les focalisations horizontales et verticales, et de pôles d'ordre supérieur pour les corrections des imperfections des champs précédents (Fig 4). De nouveau, depuis 50 ans, seules la taille et la technologie des aimants ont été modifiées (passant de la simple ferraille à des aimants supra-conducteurs fonctionnant à l'hélium superfluide), mais pas leurs principes.

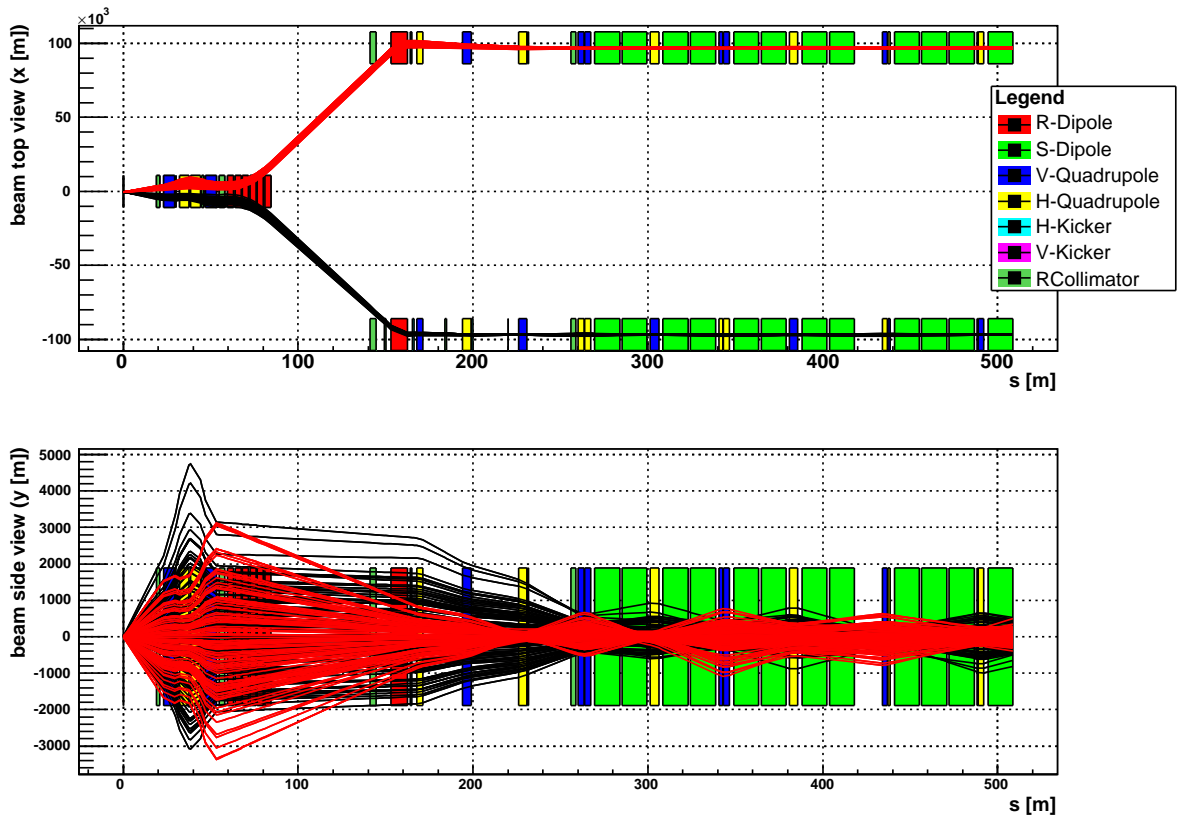


FIG. 4 – Représentation schématique des deux faisceaux du LHC d'un côté de l'expérience CMS. L'influence des dipôles et des quadrupôles y est clairement visible.

Nous avons vu que les décharges (claquages) limitent la valeur maximale des gradients de champ électrique accessibles et donc les possibilités d'accélération. De la même manière, le rayonnement lié à l'accélération empêche en pratique d'utiliser un champ magnétique trop important pour incurver la trajectoire des particules d'un faisceau. Une particule qui subit une accélération a une certaine probabilité de perdre de l'énergie, sous forme d'un photon. Ce principe peut d'ailleurs être utilisé par exemple pour la production de rayons-X. Dans le cadre d'un accélérateur circulaire, on parle de **rayonnement synchrotron**, qui dans le cas du LEP était un des facteurs limitant quant à sa limite en énergie.

$$\delta E = \frac{4\pi}{3} \frac{q^2}{R} \beta^3 \gamma^4. \quad (6)$$

L'équation précédente nous montre le lien entre l'énergie perdue et le rayon R de courbure de la trajectoire, pour une particule décrite par les fonctions relativistes β et γ . Le passage d'une machine électronique (électrons et/ou positrons) à une machine hadronique (protons ou ions lourds) permettant d'améliorer cette situation, aux dépend de la "propreté" des événements étudiés⁴.

3 Luminosité

Les expériences actuelles sont basées sur le comptage d'événements *rare*s (c'est à dire donc la **section efficace** σ est petite), et surtout très peu nombreux par rapport à des processus largement étudiés et connus. Il est donc important à la fois de produire un grand nombre d'événements, et de ne conserver que ceux qui sont les plus intéressants. Le tri et le stockage des événements sont des problèmes techniques, liés à l'électronique et à l'informatique d'analyse des diverses expériences autour des cibles ou des points de collision de l'accélérateur. Par contre, la production d'un grand nombre d'événements dépend directement des caractéristiques de l'accélérateur. La **luminosité** est ce paramètre, lié au nombre d'événements produits N par l'équation suivante :

$$N = \mathcal{L} \times \sigma \tag{7}$$

La focalisation aux points d'interactions, le nombre de paquets de particules⁵ et la fréquence de collisions sont autant de composantes accessibles pour augmenter la luminosité des accélérateurs. La luminosité du LHC devrait monter jusque $10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$. Bien que nécessaire pour atteindre des processus extrêmement rares, l'augmentation de la luminosité, en touchant d'autres facteurs que la focalisation ou la fréquence de collision, peut avoir des désavantages tels que l'augmentation des interactions simultanées (*pile-up*). Ces interactions simultanées superposent aux états finaux intéressants des hits dans les détecteurs, correspondant à des événements de basse énergie et non désirés. Cette situation contraint d'autant plus les algorithmes de tri et de sélection d'événements. Il faut noter que lors de la phase de *haute luminosité*, il y aura au LHC jusqu'à 20 interactions simultanées à chaque croisement de faisceau (Fig. 5)!

4 Ouvertures

Outre les trajectoires des particules, si l'on veut simuler le comportement d'un faisceau, il faut tenir compte de l'ouverture géométrique (*aperture*) du tube à vide dans lequel il se

⁴Non seulement l'état initial n'est pas parfaitement connu lors de collisions hadroniques, vu que les partons interagissant possèdent une fraction inconnue de l'énergie de la particule-mère, mais en plus ces interactions sont généralement accompagnées de jets liés à la désintégration des particules-mères. Nous sommes loin des quelques particules connues et mesurées, présentes lors d'une collision telle qu'au LEP..

⁵Un faisceau est généralement composé d'un grand nombre de paquets (*bunches*), eux-mêmes constitués d'un grand nombre de particules.

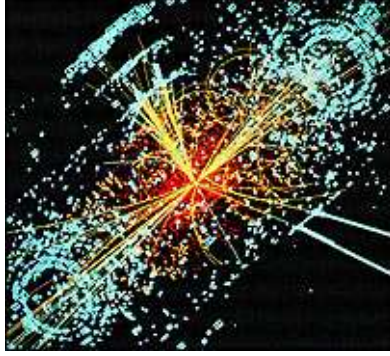


FIG. 5 – Représentation des signaux lors de la production d’un boson de Higgs au LHC. Les particules finales sont diluées dans la grande activité due aux interactions simultanées.

propage, que ce soit en dehors ou au sein d’un élément d’optique (cavité, aimant, etc). Ces ouvertures géométriques sont surtout critiques au niveau des éléments d’optiques tels que les quadrupôles (là où l’extension du faisceau est maximale), car il faut éviter que le faisceau n’entre en contact avec la paroi. Au contraire, afin de nettoyer le faisceau de certaines particules secondaires, il existe également des collimateurs, qui n’ont pour objectif que d’arrêter certaines particules polluantes ou irrécupérables pour le faisceau. De tels collimateurs peuvent être constitués de mâchoires mobiles. La bonne description des ouvertures est nécessaire pour une utilisation correcte de détecteurs secondaires, qui complètent le long de la ligne de faisceau les détecteurs principaux.

5 Détecteurs vers l’avant

La ligne de faisceau d’un accélérateur est souvent instrumentée. Il peut s’agir de *beam position monitors*, servant à contrôler la position du faisceau. D’autres appareils de mesure sont également nécessaires pour estimer la luminosité avec une précision plus ou moins grande. Mais de plus, les accélérateurs sont souvent garnis de détecteurs complémentaires aux détecteurs centraux (tels que CMS et ATLAS au LHC). Il peut s’agir aussi bien de calorimètres que de trajectographes. Ces détecteurs sont utiles pour *refermer* autant que possible la couverture angulaire⁶ accessible par le détecteur. En effet, l’espace nécessaire au passage du tube du faisceau ne pouvant être instrumenté, les détecteurs centraux ne sont pas capables d’observer toutes les particules d’un événement. Il existe donc souvent des projets expérimentaux permettant de combler plus ou moins bien ces zones d’ombres.

Les détecteurs vers l’avant fournissent également leurs propres champs de recherche, complémentaires à ceux des détecteurs centraux. Par exemple, les collisions élastiques entre protons au LHC seront mesurées par l’expérience TOTEM (la cinquième expérience du

⁶Plutôt que de l’angle θ , on parle plus généralement en termes de *pseudo rapidité* η . Cet invariant relativiste, varie de 0 (pour une particule centrale) à l’infini (pour une particule qui sort horizontalement dans le tube du faisceau) : $\eta = -\ln(\text{tg}(\theta/2))$.

LHC), constituée de plusieurs stations de détecteurs allant de 20 à 220m de part et d'autre de CMS. D'autres champs, comme la physique diffractive, basée sur l'échange de particules non colorées (pomérons et oddérons), ou les collisions gamma-gamma (entre photons) sont également accessibles grâce aux détecteurs vers l'avant (Fig 6).

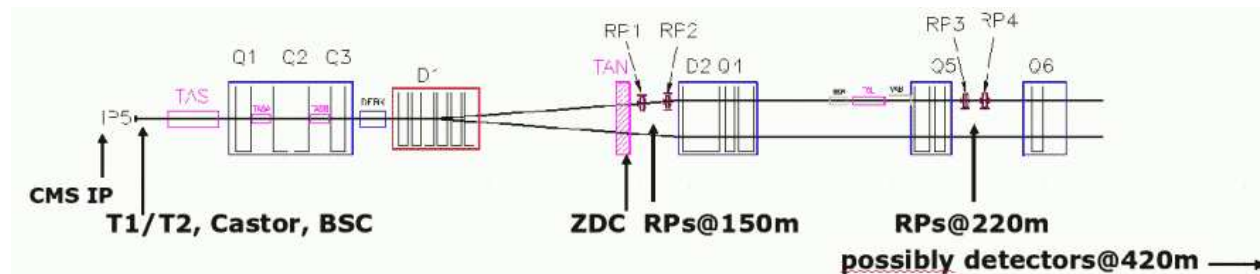


FIG. 6 – Disposition des divers détecteurs *vers l'avant* autour de l'expérience CMS.

Conclusions

A la base des résultats directs des différentes expériences en physique des particules, les accélérateurs sont des machines maîtresses de l'avancement de nos connaissances en physique fondamentale. Parfois dans l'ombre de résultats et de découvertes spectaculaires, ils sont le théâtre de recherches technologiques importantes, malgré des principes de fonctionnement très simples et bien connus. La physique des accélérateurs a été continuellement éprouvée au fil du siècle passé. Cependant, entre les innovations technologiques et les instrumentations toujours plus poussées, il semble que leur avenir n'ait jamais été aussi prometteur.

Références

Le lecteur trouvera sans peine de nombreux ouvrages sur les accélérateurs, comme “The physics of particles accelerators, an introduction” de Klaus Wille (Oxford University Press 2000), ou la série de cours de la “CERN Accelerator School” (<http://cas.web.cern.ch>). Les images dans ce document proviennent soit du serveur de document du CERN (<http://cds.cern.ch>) soit d'une publicité (télévision Sony [TM]). Enfin le schéma des faisceaux du LHC a été réalisée par le software Hector, écrit conjointement avec Jérôme de Favereau (UCL).