

La Physique des accélérateurs...

...en passant par la physique du quotidien et celle de l'Univers

Phu Anh Phi NGHIEM

Illustré par Aurélie Bordenave



Conçus initialement pour étudier les constituants les plus ultimes de la matière qui nous entoure et dont nous sommes faits, les accélérateurs de particules sont maintenant largement employés dans de très nombreux domaines d'activités de la société humaine. Cela concerne autant les sciences fondamentales et appliquées que l'industrie, la haute technologie, la médecine, la culture et le patrimoine.

Quels sont les principes physiques qui gouvernent le fonctionnement de ces accélérateurs de particules ? Ce livret se propose de raconter en des termes simples les phénomènes physiques mis en œuvre dans un accélérateur pour accélérer les particules et les transporter jusqu'à l'endroit de leur utilisation. On s'apercevra que les mêmes phénomènes physiques sont aussi à l'œuvre dans les objets du quotidien, dans diverses manifestations de la nature, ainsi que dans l'Univers tout entier. Ces différents aspects seront donc aussi abordés.

Avec aucun prérequis nécessaire, laissez-vous simplement guider dans ce récit où la physique des accélérateurs va être expliquée, avec de larges détours par la physique du quotidien et la physique de l'Univers.



Irfu
Institut de recherche
sur les lois fondamentales
de l'Univers



ISBN / 978-2-7272-0231-8



Phu Anh Phi NGHIEM
Illustré par Aurélie Bordenave

La Physique des accélérateurs...

*...en passant par la physique
du quotidien et celle de l'Univers*

De la Physique *avec* les accélérateurs à la Physique *des* accélérateurs

La Physique moderne fascine par sa faculté à pénétrer les constituants ultimes de la matière, des millions de milliards de fois plus petits que l'épaisseur d'un cheveu, ou à remonter le temps jusqu'à une fraction de seconde juste après le Big Bang qui s'est passé il y a 14 milliards d'années. Or ce voyage vers l'infiniment petit dans l'espace ou l'infiniment lointain dans le temps ne devient concret, ne devient réel, en quelque sorte palpable, que grâce aux accélérateurs de particules. Sans eux, les nombreuses théories qui décrivent les quarks ou les bosons resteraient de pures spéculations de l'esprit. Avec eux, les théories prennent corps, trouvent le jalon, la brique, qui les justifie, les valide, et ensuite les guide vers de nouveaux développements. De découverte en découverte avec les accélérateurs, les physiciens ont pu avancer, pu bâtir progressivement avec d'autres briques l'architecture que l'on pense représentative de la structure et des forces régnant dans l'intimité de la matière. Celle qui nous entoure et qui nous fait.



L'accélérateur peut montrer la voie à suivre aux physiciens des particules, perplexes devant plusieurs voies possibles.

Beaucoup d'accélérateurs de particules sont associés à des découvertes historiques en physique nucléaire ou en physique des particules. On estime qu'aujourd'hui il y a 200 grands accélérateurs de par le monde qui servent à la recherche scientifique en général. À ceux-là, il faut ajouter 24 000 accélérateurs qui ont été construits pour des applications industrielles, plus 11 000 conçus exclusivement à des fins de thérapie médicale, depuis le début des accélérateurs il y a 60 ans.

Les accélérateurs ont des champs d'application extrêmement larges et diversifiés. Ils sont les outils privilégiés de beaucoup de domaines de science et de technique. Mais qu'est-ce qu'un accélérateur ? Sur quelle science et sur quelle technique repose leur fonctionnement ?

Nous nous proposons ici d'introduire la Physique qui est à la base du fonctionnement d'un accélérateur. Après une brève présentation des domaines d'utilisation des accélérateurs et de leur répartition dans le monde, la Physique des particules accélérées et des forces électromagnétiques associées va être abordée. On va voir que c'est la même Physique que celle qui gouverne les objets du quotidien ou ceux de l'Univers. Ces derniers aspects vont donc aussi être largement abordés.

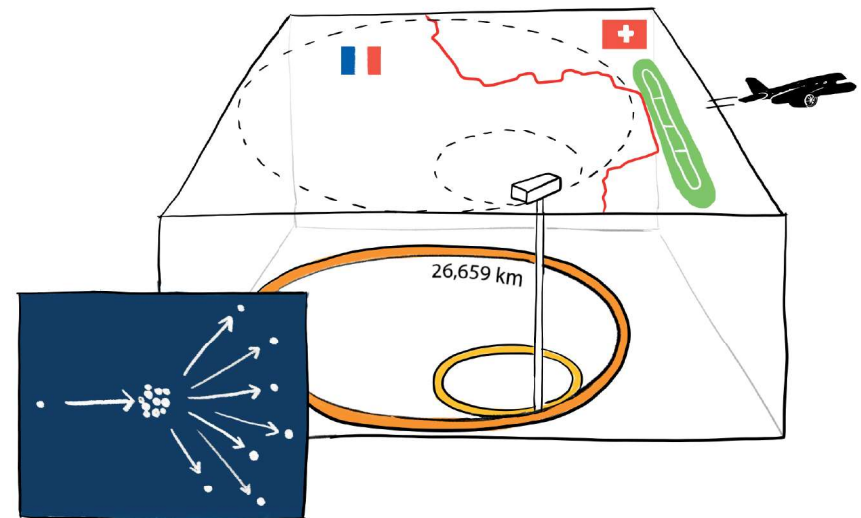
À quoi ça sert un accélérateur ?

Il y a beaucoup de types d'accélérateurs différents, certains sont linéaires, d'autres circulaires, qui peuvent être subdivisés en sous-types, etc. Il y en a aussi de toutes les tailles, de quelques mètres qui tiennent dans une pièce jusqu'à plusieurs dizaines de kilomètres qui s'étendent sur tout un territoire. On peut classer les accélérateurs selon leur type ou leur taille.

Il est très parlant aussi de les classer selon leur utilisation. On peut dénombrer trois utilisations principales, qui suivent à peu près l'historique du développement des accélérateurs : faire collisionner les particules, produire le rayonnement synchrotron, irradier des cibles.

Faire collisionner les particules

À l'origine, les accélérateurs de particules ont été imaginés pour faire collisionner des particules de matière entre elles. L'objectif est de casser celles-ci pour voir ce qu'il y a dedans, ce qui en sort. Il s'agit ici de l'esprit d'analyse, qui est un des piliers de l'esprit scientifique : pour comprendre un système complexe, on le découpe, le décompose en morceaux plus petits pour les étudier séparément, avec l'espoir qu'avec cela on va pouvoir comprendre l'ensemble après. C'est ce que font spontanément les enfants curieux qui, pour comprendre comment marche un appareil donné, commencent souvent par le démonter. On dit ainsi que les scientifiques sont en quelque sorte des « grands enfants ».



Collision de particules. Le LHC à la frontière franco-suisse - l'aéroport de Genève sur le côté droit donne une idée de sa taille.

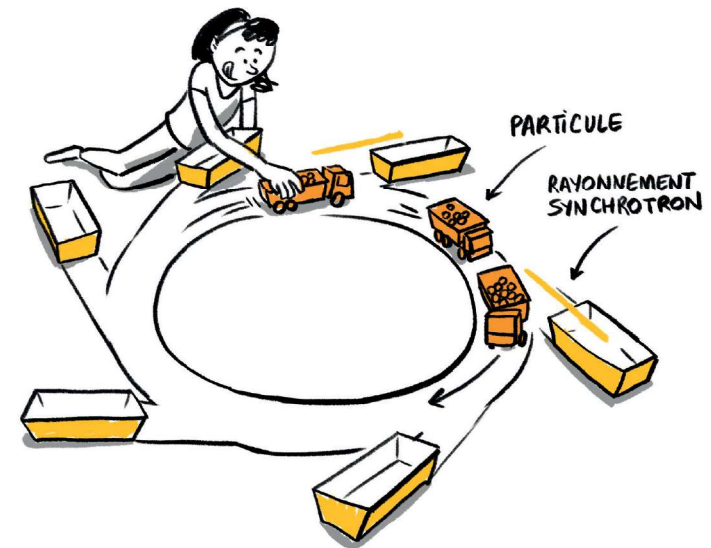
Grâce aux collisions de particules de l'atome et de son noyau, on a pu étudier les constituants les plus intimes de la matière, jusqu'à l'échelle du milliardième du milliardième de mètre. Ce type d'accélérateurs sert donc la recherche fondamentale en physique à travers ses communautés de physiciens des particules et de physiciens nucléaires. Le plus grand accélérateur de ce type est le LHC (Large Hadron Collider) qui se trouve au CERN (Centre Européen de Recherche Nucléaire). Il fait 27 km de circonférence et est installé à cheval sur la frontière franco-suisse. En France, GANIL (Grand Accélérateur National d'Ions Lourds) à Caen est un grand centre d'accélérateurs dédié à l'étude du noyau.

Tels des enfants qui veulent des jouets toujours plus beaux et plus puissants, les scientifiques demandent des accélérateurs toujours plus puissants, accélérant les particules à des énergies plus élevées, pouvant casser plus profondément la matière afin d'étudier les constituants qui y sont les plus profondément enfouis. C'est pour cette raison qu'on a imaginé les machines circulaires qui devraient pouvoir rester petites quand on veut augmenter en énergie car les particules y circulant en rond, reçoivent une accélération supplémentaire à chaque fois qu'elles repassent par le même dispositif d'accélération. Or un processus physique est venu contrarier cette idée : les particules chargées entrant dans un virage perdent toujours de l'énergie sous la forme d'un rayonnement (lumière), à l'image d'un camion entrant dans un virage qui perd un peu de sa cargaison de cailloux. C'est pour cela qu'on est obligé de faire des accélérateurs plus grands, les virages y sont moins prononcés, quand on veut atteindre des énergies plus élevées. Le rayonnement perdu, appelé rayonnement synchrotron, était donc considéré comme un phénomène parasite que l'on veut minimiser.

Produire le rayonnement synchrotron

On s'est cependant assez rapidement aperçu que le rayonnement synchrotron possède des propriétés exceptionnelles : jusqu'à 10 000 fois plus brillant que la lumière solaire, contenu dans un faisceau très fin et très directionnel comme la lumière laser, avec en plus une gamme spectrale (gamme de couleurs) très étendue, allant des rayons X aux UV en passant par la lumière visible.

À côté des accélérateurs collisionneurs, un autre type d'accélérateur est conçu, optimisé pour produire le maximum de rayonnement synchrotron. Ces machines vont permettre de sonder, observer, donc étudier les matériaux physiques ou biologiques jusqu'à l'échelle du milliardième de mètre, tel un microscope géant et surpuissant.



Accélérateur à rayonnement synchrotron.

Ces machines ont en général des circonférences de plusieurs centaines de mètres. Elles servent des communautés très vastes de physiciens, chimistes, biologiques mais aussi des industriels, médecins, pharmaciens, historiens de l'art, etc. De par leur taille conséquente mais pas excessive, et leurs communautés d'utilisateurs très diverses, ces accélérateurs représentent les grands instruments de recherche les plus répandus dans le monde. Les pays ou régions qui veulent se doter d'instrument de recherche d'envergure commencent souvent par s'équiper de telles machines.

La lumière synchrotron est aussi émise quand on fait osciller les électrons à faible amplitude, ce qui revient à une série de petits virages, avec un dispositif magnétique périodique appelé onduleur. La brillance ainsi atteinte peut être très élevée grâce à des interférences constructives. En alignant un grand nombre de tels onduleurs, l'amplification est analogue à celui d'un laser, c'est l'effet laser à électrons libres. Les dernières générations d'accélérateur à rayonnement synchrotron à très haute brillance sont des machines linéaires de quelques kilomètres de long qui accélèrent les électrons puis les envoient dans de longs alignements d'onduleurs.

Irradier des cibles

Le faisceau de particules accélérées peut être réglé de façon très précise en direction, en taille et en énergie. Il peut donc être directement utilisé pour

irradier des cibles diverses. Sachant qu'au-delà d'une certaine dose il peut détruire les cellules organiques, on peut l'employer pour détruire les tumeurs malignes ou pour stériliser le matériel médical, les conteneurs alimentaires. Jusqu'à présent, 75 000 patients ont été traités avec succès par protonthérapie (faisceau de protons) ou hadronthérapie (faisceau d'ions), ce qui représente une précieuse alternative à la radiothérapie par rayons X. Ces types d'accélérateurs irradiant une cible donnée sont aussi largement utilisés dans le monde industriel pour le traitement de surface ou la gravure de haute précision. Les historiens les utilisent pour analyser les œuvres d'art du passé. Ces accélérateurs ont en général une taille modeste, de quelques mètres à dizaines de mètres, et sont donc les plus répandus.

Des accélérateurs d'envergure plus conséquente, de l'ordre du kilomètre, linéaires ou circulaires, sont récemment installés dans les centres de recherche scientifique afin d'irradier une cible spécialement conçue pour produire des neutrons (constituant électriquement neutre des noyaux d'atome). Ces faisceaux de neutrons peuvent être eux-mêmes des sujets d'étude ou peuvent servir de sonde pour étudier des matériaux inertes ou organiques. C'est alors une très large communauté d'utilisateurs qui est servie par une palette d'applications couvrant les thématiques aussi bien scientifiques qu'industrielles ou médicales.

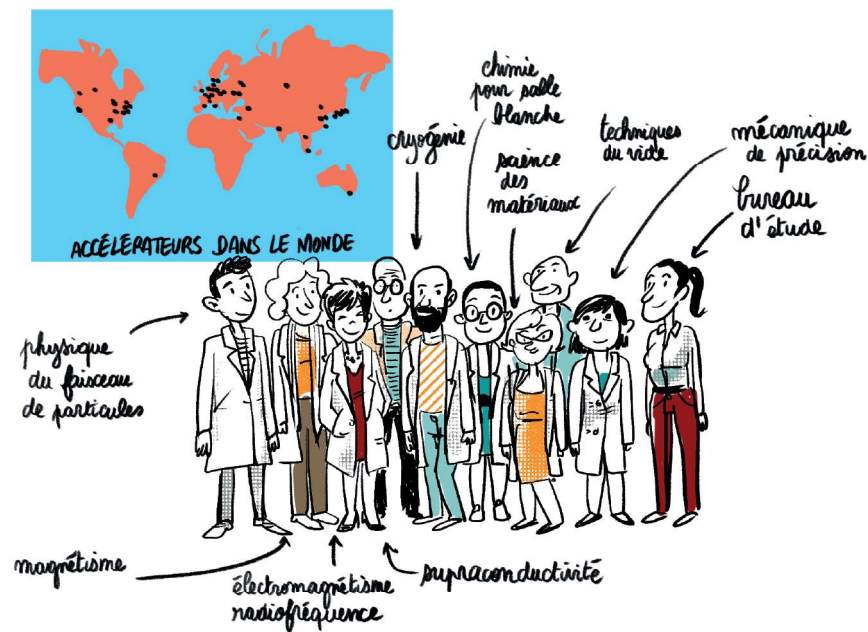
Des sources de neutrons plus compactes existent aussi, avec des accélérateurs linéaires de quelques mètres, destinées à l'analyse neutronique ou à la production d'isotopes pour la médecine nucléaire.

Où se trouvent les grands centres d'accélérateurs?

Les grands centres d'accélérateurs, ceux où plus d'une centaine de chercheurs, ingénieurs, techniciens travaillent en permanence, se trouvent essentiellement en Europe de l'Ouest, en Amérique du Nord, et en Asie de l'Est. En voici une liste non exhaustive :

- France: IRFU/DACM (Saclay), IJClab (Orsay), SOLEIL (Saint Aubin), GANIL (Caen), ESRF (Grenoble)
- Suisse: CERN (Genève), PSI (Villingen)
- Allemagne: DESY (Hamburg), GSI (Darmstadt), COSY (Julich), BESSY (Berlin), ANKA (Karlsruhe)
- Royaume-Uni: DIAMOND (Didcot), RAL (Oxford), STFC (Daresbury)
- Suède: MAX-Lab (Lund), ESS (Lund)
- Italie: ELETTRA (Trieste), INFN (Frascati, Legnaro, Catania)
- Espagne: ALBA (Barcelona), CIEMAT (Madrid)
- Etats-Unis: ALS (Berkeley), FNAL (Batavia), LANL (Los Alamos), SNS (Oak Ridge), ANL (Chicago), SLAC (Stanford), BNL (Upton), CHESS (Cornell)
- Canada: TRIUMF (Vancouver), CLS (Saskatoon)
- Brésil: LNL (Campinas)
- Japon: SPring-8 (Sayo-cho), KEK (Tsukuba), J-PARC (Tokai-mura)
- Chine: SSRF (Shanghai), IHEP, BEPC (Beijing), HLS (Hefei), IMP (Langzhou)
- Corée: PAL (Pohang), PEF (Yueong)
- Thaïlande: SLRI (Nakhon Ratchasima)





Répartition des grands centres de recherche d'accélérateurs dans le monde et corps de métiers impliqués.

Les corps de métier œuvrant sur les accélérateurs sont de natures très diverses : physique du faisceau de particules, magnétisme, électromagnétisme, radiofréquence, supraconductivité, cryogénie, chimie pour salle blanche, science des matériaux, techniques du vide, mécanique de précision, bureau d'études, etc.

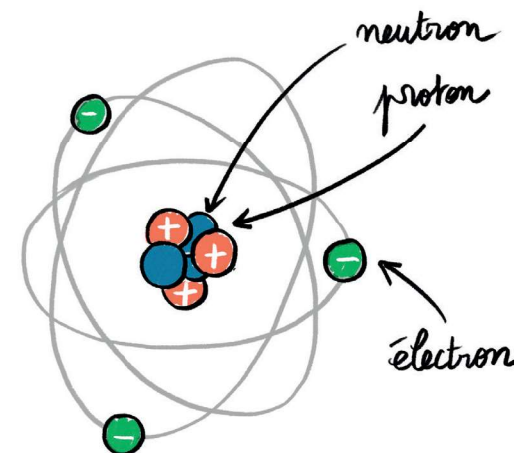
Sachant que les accélérateurs sont omniprésents dans tous les secteurs d'activités de la société moderne, entrons à présent dans le vif du sujet : la Physique des accélérateurs de particules. Autrement dit : comment ça marche un accélérateur ?

Après une évocation de ce qu'est un faisceau de particules dans un accélérateur, on présentera les deux acteurs qui peuvent agir sur un tel faisceau : le champ électrique et le champ magnétique. On examinera ensuite comment produire ces champs, comment produire les particules, puis on terminera en montrant les dispositifs dans un accélérateur qui sont utilisés à ces fins. Tout cela par de larges détours vers les objets du quotidien et ceux de l'Univers...

Qu'est-ce qu'un faisceau de particules ?

Précisons tout de suite que le mot « particule » dans un accélérateur, désigne une particule chargée électriquement. Il faut savoir que la matière qui nous entoure et dont nous sommes faits est constituée d'atomes. Chaque atome est composé d'un noyau de charge électrique positive (+) entouré d'électrons de charge électrique négative (-). Les charges de même signe se repoussent, comme entre + et +, ou - et -. Les charges de signes contraires s'attirent, c'est le cas de + et -. C'est le principal principe que vous allez retrouver tout au long de ce fascicule.

Dû à ce principe, un atome stable est globalement neutre électriquement car il y a autant de charges + et -. Grâce à cela, on n'est pas électrocuté lorsqu'on touche un objet autour de nous.



Un atome constitué par un noyau composé de charges électriques positives appelées protons (et de particules non chargées appelées neutrons) entouré de charges électriques négatives appelées électrons.

Lorsqu'on laisse un ensemble de particules chargées à elles-mêmes, elles ont des mouvements aléatoires désordonnés, telle une cour de récréation où les élèves vont et viennent à leur guise. Plus il fait chaud et plus ce mouvement est rapide et les particules vont occuper un espace plus grand. C'est ce qu'on appelle l'**agitation thermique**. L'ensemble néanmoins reste sur place. Dans un accélérateur, on ne s'occupe pas de ce type d'ensemble de particules. On ne s'occupe que de **faisceaux de particules**, c'est à dire de particules dotées d'un mouvement d'ensemble, chacune ayant une vitesse, dirigée dans la même direction, telle une course à pied. C'est ce faisceau de particules qu'on veut produire puis accélérer, c'est-à-dire dont on veut augmenter la vitesse d'ensemble, pour que la course à pied prenne l'allure d'une course automobile.



ENSEMBLE DE PARTICULES



FAISCEAU DE PARTICULES



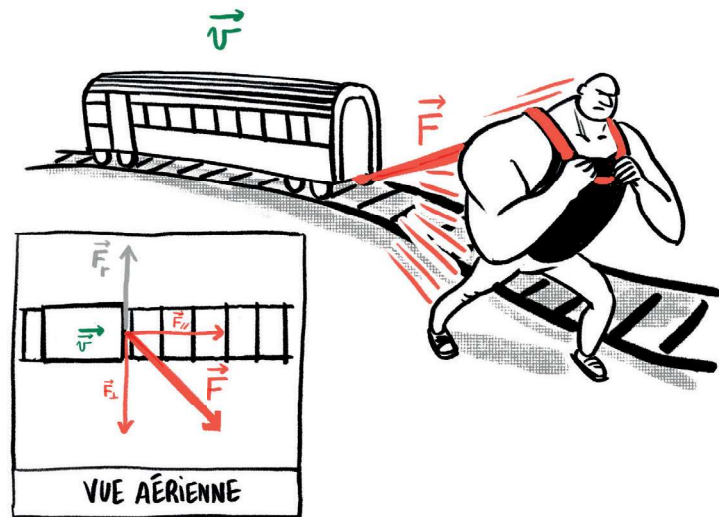
FAISCEAU DE PARTICULES ACCÉLÉRÉ

Ensemble de particules et faisceau de particules.

La vitesse d'ensemble des particules est la principale caractéristique d'un accélérateur. On désigne par « énergie », l'énergie cinétique des particules, c'est-à-dire **l'énergie liée à la vitesse d'ensemble**. Plus la vitesse est élevée, plus l'énergie des particules est grande.

Comment fait-on pour accélérer ?

Pour accélérer un objet, c'est-à-dire augmenter sa vitesse, il faut nécessairement exercer une force sur cet objet. C'est le cas par exemple quand on est à vélo et qu'on veut aller plus vite, il faut se mettre à pédaler plus fort. Représentons la particule par un wagon roulant sur un rail à une **vitesse** donnée représentée par la flèche notée \vec{v} , qui indique la direction de déplacement. Un personnage musclé tire dessus, autrement dit exerce une force dessus pour tenter de l'accélérer. Sa **force**, représentée par la flèche notée \vec{F} peut être décomposée en deux composantes, une parallèle à la vitesse, c'est-à-dire à la direction du mouvement, et une qui lui est perpendiculaire. On sent bien que seule la composante parallèle va servir à l'accélérer. La composante perpendiculaire va contribuer à dévier la trajectoire du wagon (s'il n'y avait pas de rail qui s'oppose à cette déviation).



Force parallèle ou perpendiculaire à la direction de déplacement.

Dans un accélérateur, on a besoin de forces parallèles à la direction de déplacement pour accélérer les particules. Mais on a aussi besoin de forces perpendiculaires afin de les guider vers un endroit donné pour les accélérer, les faire collisionner ou irradier une cible, ou aussi afin de les focaliser (=regrouper), car sinon elles vont très rapidement s'éparpiller dans la nature du fait des forces répulsives entre charges électriques de même signe.

En fait, **un accélérateur doit produire des particules chargées, les accélérer, les focaliser et les guider.** Mais l'appellation « accélérateur-producteur-focalisateur-guideur de particules » est trop longue. C'est pourquoi on utilise la version courte : « accélérateur de particules ». Mais notons que toutes les autres actions sont néanmoins présentes dans un accélérateur.

Nous allons voir comment toutes ces actions sont réalisées et quels sont les dispositifs qui permettent de le faire.

En premier lieu, il faut appliquer une force aux particules chargées, et cela ne peut être fait que de deux façons : utiliser un champ électrique ou un champ magnétique.

On va voir tout de suite l'effet d'un champ électrique, d'un champ magnétique sur une particule chargée, puis comment on produit de tels champs.

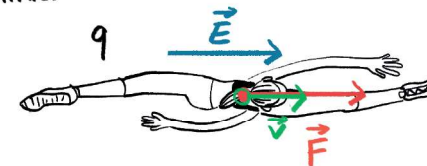
Effet d'un champ électrique et d'un champ magnétique

Les champs électrique ou magnétique ne sont ni quelque chose de visible, ni de palpable. Pourtant, nous tous ainsi que tout objet de l'Univers sommes baignés en permanence dedans. C'est comme le champ de la pesanteur sur Terre, on ne peut ni le voir ni le toucher, et on ne peut le comprendre, l'appréhender que par son effet, la force de la pesanteur qui attire tout objet massif vers le sol.

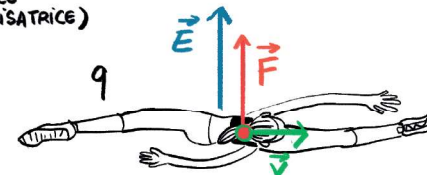
De la même façon, au lieu de tenter de définir précisément ce qu'est un champ électrique ou magnétique, examinons plutôt les effets qu'exercent ces champs sur une particule chargée (électriquement) et voyons comment on produit ces champs pour mieux les appréhender.

On représente le champ électrique ou le champ magnétique par une flèche notée \vec{E} ou \vec{B} . Lorsqu'on met une particule chargée dans un champ électrique représenté par une flèche \vec{E} , la force \vec{F} qu'exerce ce champ sur la particule est parallèle au champ lui-même. Donc si on veut accélérer, il suffit d'appliquer un champ parallèle à la vitesse \vec{v} , et si on veut guider ou focaliser, d'utiliser un champ perpendiculaire à la vitesse. Le champ électrique peut être employé pour accélérer aussi bien que guider ou focaliser des particules chargées.

FORCE ACCÉLÉRATRICE



FORCE DÉVIATRICE (OU FOCALISATRICE)



vitesse de déplacement \vec{v} charge électrique q champ électrique \vec{E} force $\vec{F} = q\vec{E}$

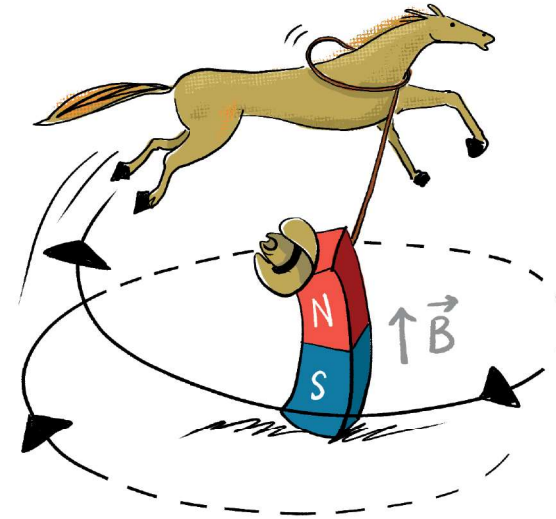
La force du champ électrique peut accélérer, dévier (ou focaliser) les particules.

On serait alors tenté de dire que le champ électrique suffit pour faire toutes les actions qu'on veut. En fait, dans la réalité on ne peut jamais aligner parfaitement un champ sur une vitesse. De toutes petites imperfections inévitables font qu'un champ électrique qu'on aurait voulu accélérateur, va aussi dévier un tout petit peu, et vice-versa.

D'un autre côté, l'emploi d'un champ magnétique, représenté par une flèche notée \vec{B} , est plus efficace quand l'énergie cinétique de la particule est plus élevée car la force qu'il produit est proportionnelle à la vitesse de la particule. Précisons aussi que cette force est toujours perpendiculaire à la vitesse. Donc un champ magnétique est employé exclusivement pour guider ou focaliser les particules. Une chose à retenir dès à présent est qu'un champ magnétique ne peut en aucun cas donner de l'énergie (ou en reprendre) aux particules.

Mais quel est donc le mouvement des particules dans un champ magnétique ? Une chose bonne à savoir est qu'un objet soumis à une force perpendiculaire à sa vitesse exécute obligatoirement un mouvement de rotation. Ceci est facile à comprendre. Imaginez un cowboy très doué du lasso. Un cheval court en ligne droite devant lui. Il lance son lasso, l'attrape et tire dessus : il exerce à ce moment une force perpendiculaire à la direction de déplacement du cheval. Imaginez que le cheval est très têtu, un peu comme nos particules chargées... il continue à courir comme avant, à la même vitesse, sans broncher. Le cheval va alors devoir tourner autour du cowboy, tout en n'ayant pas perdu de son énergie. C'est ce qui se passe avec les particules chargées : elles tournent, ou spiralent autour des lignes de champ magnétique.

Ce principe est employé dans les accélérateurs. Pour faire faire un virage d'un angle précis au faisceau de particules, on exerce un champ magnétique sur une longueur précise du parcours. Pour focaliser les particules, on exerce un champ magnétique qui les oblige à spiraler autour du champ. Plus le champ est fort, plus elles doivent spiraler proches du centre et donc se regrouper.



Champ magnétique guideur ou focaliseur comme un cowboy attrapant un cheval au lasso. Les particules chargées s'enroulent autour des lignes de champ magnétique.

Comment produire un champ électrique ?

Le premier moyen qui vient à l'esprit est d'amasser des charges de signes opposés, + et -, sur deux plaques conductrices séparées par un isolant. C'est ce qui est fait pour une pile, une batterie ou un condensateur, avec un pôle + et un pôle -. Une particule chargée + placée entre ces deux plaques va être repoussée par la plaque chargée + et attirée par celle chargée -. C'est la preuve qu'elle subit une force électrique et qu'un champ électrique a été créé entre les deux plaques.

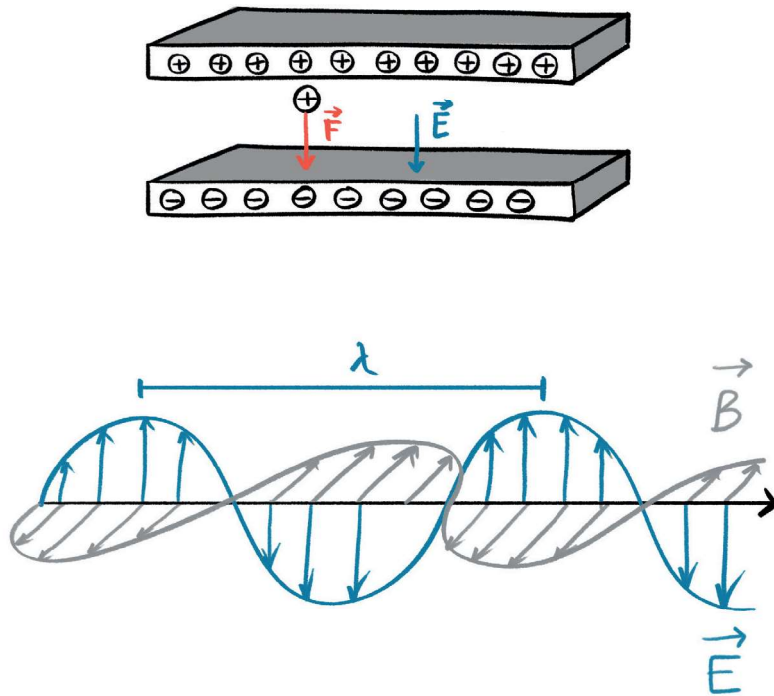
Ce principe simple est employé dans les premiers accélérateurs. Or, comme dit précédemment, les scientifiques demandent des dispositifs toujours plus puissants. Pour cela, il faut amasser plus de charges sur les deux plaques, mais ceci a une limite au-delà de laquelle le dispositif est cassé : les charges de signes opposés s'attirant de plus en plus fortement, un éclair se crée entre les plaques et les charges se rejoignent dans un grand fracas. C'est le phénomène de claquage qui peut être très violent, à l'image des éclairs d'orage dans la nature quand le bas des nuages et le sol sont très fortement chargés.

Pour accéder à des champs électriques plus élevés, on emploie alors le principe d'ondes électromagnétiques piégées.

Qu'est-ce qu'une onde électromagnétique ? L'onde la plus visuelle est la houle sur la surface de la mer. C'est une onde de matière, où on voit la matière, en l'occurrence l'eau, osciller régulièrement et se propager sur une grande distance. Dans une onde électromagnétique, c'est le champ électrique et le champ magnétique qui oscillent et qui se propagent. La lumière en est une, de même que les ondes radio, télévision, téléphone, Bluetooth, wifi, etc. L'Univers aussi nous envoie une flopée de telles ondes qu'on appelle ondes cosmiques. Vous avez compris, nous sommes en permanence baignés dans diverses ondes électromagnétiques qui portent des noms différents mais qui sont toutes de même nature.

Quels sont les principes qui gouvernent de telles ondes ? Depuis le début, on a parlé de champ électrique et de champ magnétique comme si c'était deux phénomènes complètement séparés. Ils sont en fait liés, et leurs comportements sont décrits par les très belles lois dites de Maxwell, un scientifique anglais du 19^e siècle de l'Université de Cambridge. Ces lois disent qu'à chaque fois qu'il y a un phénomène électrique qui varie dans le temps, il va être accompagné d'un phénomène magnétique, et vice-versa. On utilise par exemple une antenne le long de laquelle on fait osciller des charges électriques pour produire une onde électromagnétique.

Pour accélérer les particules, on utilise la composante électrique de l'onde que l'on peut amplifier très fortement en la piégeant dans une cavité résonante. Ceci se fait couramment pour les ondes sonores, une oscillation et une propagation des particules d'air qui, arrivées à notre oreille font vibrer le tympan et nous permettent d'entendre le son. Tous les instruments de musique, qu'ils soient à corde, à vent ou de percussion sont dotés de caisses de résonance sans lesquelles leurs sons non amplifiés ne pourraient pas être entendus de si loin. Dans les accélérateurs, on emploie une série de cavités dites radiofréquence (RF), pour accélérer les particules à des énergies de plus en plus élevées. Pour pouvoir supporter des champs électriques très élevés et donc des courants de surface de plusieurs milliers d'ampères (signalons que le courant domestique est de l'ordre de quelques ampères), ces cavités doivent être refroidies à une température cryogénique proche du zéro absolu.

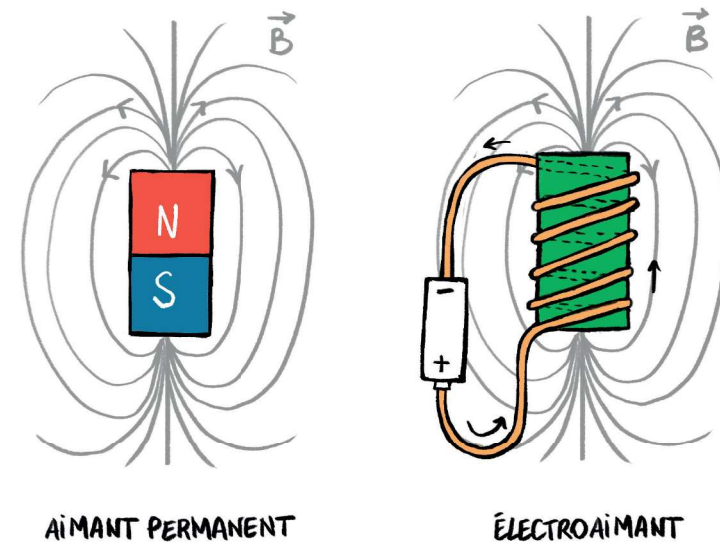


Champ électrique statique entre deux plaques chargées ou oscillant dans une onde électromagnétique.

Comment produire un champ magnétique?

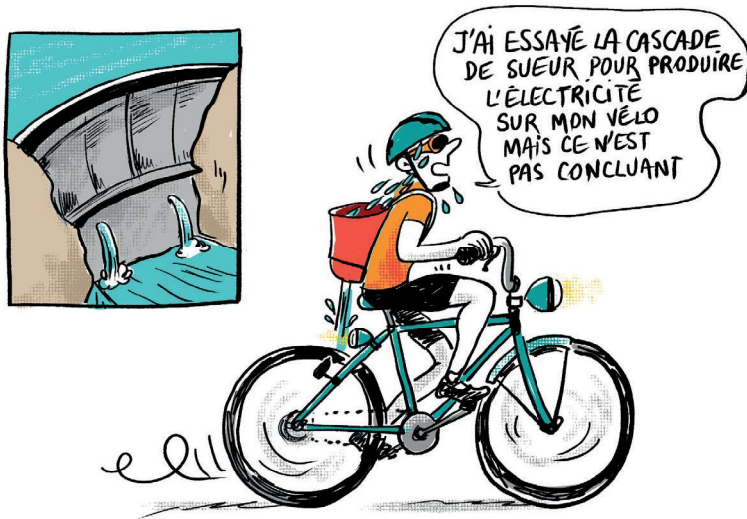
Le champ magnétique peut être produit par des aimants permanents, comme les barres aimantées qui font partie des jouets des enfants. Le champ magnétique est orienté du pôle Nord au pôle Sud à l'extérieur de l'aimant. On peut fabriquer des aimants produisant un champ jusqu'à 10 000 gauss, ce qui est déjà très puissant comparé au champ magnétique terrestre de 0.5 gauss. Mais on ne peut pas obtenir des champs plus élevés avec cette technique et, plus pénalisant encore, leur amplitude est fixe, interdisant toute flexibilité ou variation.

La plupart des accélérateurs ont besoin de champs magnétiques réglables à volonté et utilisent pour cela des électroaimants. En faisant circuler un courant électrique, donc phénomène électrique variable dans le temps, dans une bobine électrique constituée d'enroulements de câble conducteur, on produit, comme prédit par les lois de Maxwell évoquées ci-dessus, un phénomène magnétique qui est le champ orienté dans l'axe de la bobine. En termes de jargon, on appelle une telle bobine un solénoïde. Ces bobines peuvent développer un champ jusqu'à 100 000 gauss, à condition de les refroidir à des températures cryogéniques proche du zéro absolu.



Champ magnétique fixe d'un aimant permanent, ou variable d'un électroaimant.

Un électroaimant n'est en fait rien d'autre qu'une dynamo inversée. Les vélos sont souvent équipés d'une dynamo, un minuscule dispositif produisant de l'électricité pour faire fonctionner une lampe. La dynamo est simplement constituée par une bobine électrique équipée en son centre d'un petit aimant qui tourne, entraîné par la roue du vélo. Ce phénomène magnétique variable dans le temps produit le courant électrique désiré. À une échelle plus grande, les compagnies d'électricité qui fabriquent l'électricité et la délivrent à domicile chez nous, emploient des dynamos similaires mais de taille plus grande. Cette fois-ci, l'aimant est mû par une chute d'eau tombant d'un barrage dans le cas d'une centrale hydraulique ou par la vapeur d'eau à haute pression dans le cas d'une centrale thermique, à charbon ou nucléaire.

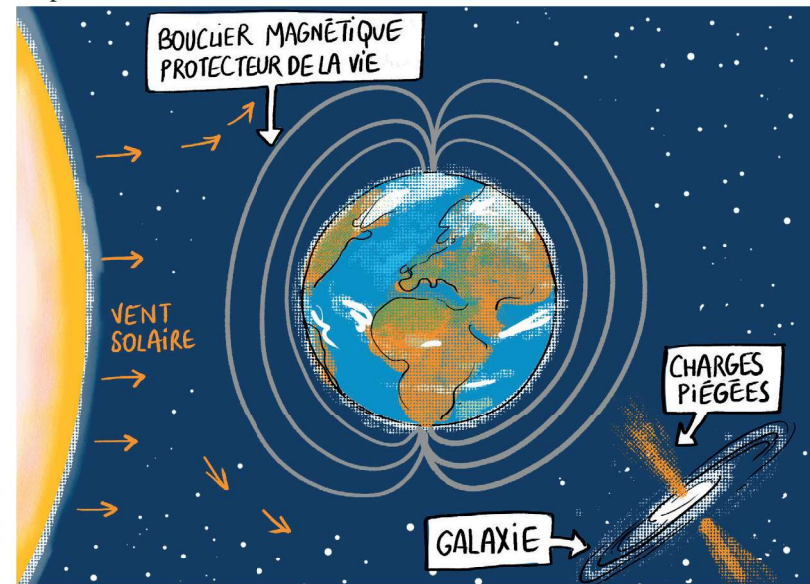


Production de courant électrique par dynamo, pour un vélo ou une centrale hydraulique.

À une échelle plus grande encore, examinons le champ magnétique terrestre évoqué ci-dessus, qui nous permet de nous orienter avec une boussole. À quoi est-il dû ? Il faut savoir que le centre de la Terre est très chaud, avec une température autour de 5000 °C. L'agitation thermique y est donc très forte, ce qui fait que les atomes sont disloqués, les charges électriques sont alors toutes séparées. Comme la Terre tourne sur elle-même, le système équivaut à une bobine géante parcourue par un courant électrique qui crée un champ magnétique à grande échelle. D'une dynamo inversée géante résulte un électroaimant géant.

Allons encore un peu plus loin. Le Soleil étant encore beaucoup plus chaud et tournant aussi sur lui-même, abrite des phénomènes magnétiques d'une ampleur colossale. Il expulse aussi dans tout l'espace et notamment vers la Terre des quantités énormes de particules chargées qui, si elles avaient touché la Terre sur un long terme, auraient soufflé son atmosphère ainsi qu'endommagé fortement les cellules organiques et empêché l'apparition et l'évolution de la vie telle qu'on la connaît. Mais ces particules sont piégées par le champ magnétique terrestre qui, tel un cowboy les attrapant avec son lasso, les oblige à spiraler autour des lignes de champ et repartir vers le côté opposé. C'est seulement lors de fortes tempêtes solaires que ces particules en plus grand nombre et plus grande énergie, peuvent atteindre la surface de la Terre, surtout dans les parties polaires à la racine des lignes de champ, produisant les aurores boréales. Des tempêtes solaires plus fortes encore permettent aux particules solaires plus énergétiques de pénétrer plus profondément dans l'atmosphère terrestre. Elles peuvent causer des dégâts importants à nos satellites spatiaux et aux infrastructures électriques au sol. C'est ce qui s'est passé le 13 mars 1989, où le système électrique du Québec au Canada s'est effondré, privant d'électricité 6 millions d'utilisateurs durant 9 heures.

Sans le champ magnétique terrestre appelé pour la circonstance bouclier magnétique, nous ne serions pas ici et aujourd'hui pour discuter de tous ces phénomènes.



Dynamo inverse et piégeage de particules chargées dans le cas du bouclier magnétique terrestre et des galaxies.

Ces interactions entre particules chargées et champ magnétique s'observent aux échelles encore plus grandes dans l'Univers. Par exemple, certaines galaxies, ces ensembles de milliards de milliards d'étoiles qui chacune est l'équivalent de notre Soleil, ressemblent à un objet lumineux constitué par un disque un peu diffus avec une traînée rectiligne dans l'axe du disque (voir image). La raison est que la galaxie tournant sur elle-même, un champ magnétique axial est généré, piégeant les particules et faisant de cet axe une voie privilégiée d'entrée ou de sortie de la galaxie pour ces particules. Comme ces dernières sont obligées de tourner autour de cet axe, elles émettent de la lumière synchrotron qui rend cet axe lumineux.

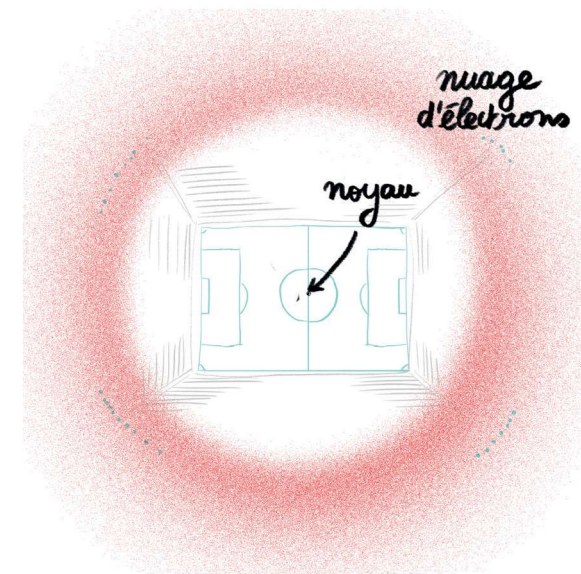
On voit bien que les ingrédients rencontrés dans les accélérateurs, à savoir particules chargées, courant électrique, champ magnétique, dynamo, dynamo inverse, et rayonnement synchrotron, se retrouvent à toutes les échelles de notre quotidien et de l'Univers.

Comment produire les particules chargées?

Il était dit plus haut que les atomes sont électriquement neutres car les protons chargés + dans le noyau et les électrons chargés - autour s'y neutralisent étant donné qu'ils sont liés par la force électrique qui attire l'une vers l'autre les charges de signes opposés. Produire les particules chargées revient à séparer ces charges.

Les électrons sont en fait très éloignés des protons. Si on agrandit par la pensée le noyau jusqu'à lui donner la taille d'un ballon de football, alors les électrons sont à la place des spectateurs aux derniers rangs d'un grand stade de football. Du coup la force qui les attire l'un vers l'autre est très faible. Il suffit d'une petite pichenette pour les séparer. Il suffit de frotter, chauffer ou agiter un peu. Remarquez que ces trois actions reviennent au même, car frotter dégage de la chaleur (comme lorsqu'on se frotte les mains) et la chaleur induit l'agitation thermique comme discuté plus haut.

De ce fait, nous tous produisons tous les jours des particules chargées. Il suffit de marcher en frottant un peu ses chaussures sur la moquette pour produire des particules chargées qui se répartissent ensuite sur tout le corps, ce qui fait qu'on reçoit une décharge électrique lorsqu'on se serre la main ou se fait la bise!



Atome et stade de foot.

Un jeu assez prisé des enfants consiste d'ailleurs à frotter une règle en plastique et de l'approcher des petits morceaux de papier pour les faire danser et sautiller. Ce sont les particules chargées produites lors du frottement du plastique qui attirent celles de charge opposée du papier.

Un autre exemple rencontré au quotidien est le fait que lorsqu'on enlève son pull en le passant par-dessus la tête, on a aussitôt tous les cheveux qui se hérissent. C'est l'œuvre des charges de même signe produites lors du frottement du pull sur les cheveux qui se repoussent entre elles. Dans le cas où il y a suffisamment de charges produites, on peut aussi entendre de petits crépitements « crac, crac », voire de petits éclairs, autant au niveau des cheveux que du pull. C'est le fait des charges de signes opposés qui arrivent à se frayer un chemin dans l'air pour se rejoindre, malgré le caractère isolant de l'air.

Ces phénomènes, désignés sous le terme d'électricité statique, se retrouvent aussi à toutes les échelles. C'est le cas des orages par exemple. Les orages éclatent très souvent dans les pays tropicaux quand il fait chaud et humide, parfois à des heures bien précises en fin d'après-midi. C'est parce qu'il s'agit d'un phénomène de production et d'accumulation de particules chargées qui se déclenche dès qu'il y en a suffisamment. Lorsqu'il fait très chaud et que le Soleil tape très fort, le sol absorbe le plus l'énergie solaire et est chauffé à blanc. La couche d'air au contact avec le sol est donc plus chaude

que les couches d'air supérieures. L'agitation thermique y est plus forte, l'air gonfle et occupe un volume plus grand. Sa densité, c'est-à-dire le nombre de molécules d'air dans un volume donné, diminue. Cet air plus chaud va alors monter très rapidement dans l'air ambiant moins chaud.

C'est le phénomène appelé poussée d'Archimède, du nom du scientifique grec qui a vécu il y a 2300 ans. La légende raconte qu'Archimède un jour dans sa baignoire, en se posant la question de savoir pourquoi le morceau de savon coule au fond de l'eau alors que l'éponge flotte à la surface, a compris qu'un corps moins dense remonte et flotte sur celui qui est plus dense: l'éponge est moins dense que l'eau contrairement au savon qui est plus dense. Il était tellement content qu'il était sorti en l'état dans la rue en criant « Eureka! » (J'ai trouvé!). Sans aller jusque-là, chacun peut par exemple faire l'expérience dans une piscine en tentant d'enfoncer une bouée remplie d'air au fond de l'eau. Non seulement ce n'est pas facile, il faut exercer une force conséquente, mais une fois qu'on a réussi et qu'on a lâché prise, on va voir la bouée remonter à la surface avec une très grande vitesse.

C'est ce qui se passe pour notre couche d'air plus chaude et moins dense: elle va monter très rapidement dans l'atmosphère pour former des nuages colossaux chargés d'eau, en ayant au passage produit énormément de particules chargées par frottement avec les couches d'air environnantes. L'air à ce moment est alors bien chargé en électricité. Mais c'est surtout les nuages qui accumulent de plus en plus de charges. Ceux-ci vont attirer les charges de signe opposé qui vont à leur tour s'accumuler au niveau du sol. On a l'équivalent des deux plaques de condensateur comme évoqué auparavant pour produire le champ électrique. À partir d'un certain seuil, l'air ne peut plus jouer son rôle d'isolant, les charges se frayent un chemin pour se rejoindre: c'est l'éclair d'orage qui se déclenche avec grand fracas. Ce phénomène est identique à celui avec le pull et les cheveux plus haut, sauf qu'au lieu de quelques centaines de volts développés dans ce cas, on est en présence de centaines de millions de volts dans la nature (pour rappel, l'électricité domestique fonctionne à 220 volts). Au lieu de faire « crac, crac », ça fait « boum, boum ».

L'orage, c'est la nature qui enlève son pull. Mais le pull est à son échelle, c'est-à-dire plutôt colossal.



Différentes manifestations de particules chargées.

Les dispositifs de production, d'accélération, de guidage et de focalisation de particules chargées

Après cette petite diversion qui nous montre encore une fois que les phénomènes physiques se retrouvent à des échelles très différentes, retournons vers les accélérateurs pour voir comment on produit les particules chargées dans des dispositifs appelés canon à électrons (charge $-$) ou source d'ions (charge $+$, car c'est un atome neutre auquel on a enlevé quelques électrons).

Pour les électrons, qui sont beaucoup plus légers que les ions, un fil conducteur (tungstène par ex.) chauffé à blanc permet de donner suffisamment d'agitation thermique aux électrons pour qu'ils soient éjectés du conducteur. Une plaque conductrice chargée positivement et dotée d'une ouverture est ensuite utilisée pour attirer les électrons dans une direction donnée afin de former un premier faisceau accéléré.

Une source d'ions quant à elle fonctionne de façon très similaire au four microonde utilisé pour réchauffer les aliments: l'agitation (ou le chauffage) est fourni par une onde électromagnétique dont la composante électrique oscillante va séparer les électrons des noyaux. Pour produire beaucoup d'ions de cette manière, il ne suffit pas d'augmenter la puissance microonde. On sait que dans ces fours, augmenter inconsidérément la puissance va faire que les aliments vont chauffer plus vite certes mais ils vont aussi gonfler (eh oui, toujours le même effet dû à l'agitation thermique) jusqu'à exploser et aller se coller sur les parois du four. Pour éviter ce phénomène, on ajoute autour de la source d'ions des bobines électriques produisant un champ magnétique axial obligeant les ions à spiraler proche de l'axe pour ne pas aller se perdre sur les parois. Une ouverture dotée de plaques conductrices chargées négativement va permettre ensuite d'extraire les ions de la source et de former un premier faisceau accéléré.

L'accélération la plus efficace se fait par la suite avec des trains de cavités résonantes où une onde électromagnétique est piégée. Le faisceau de particules doit être auparavant découpé en petits paquets qui vont passer à la queue leu leu à travers ces cavités pour être accélérés. C'est un peu comme dans les parcs d'attraction où on divise les gens en petits groupes et les met dans des petits chariots qui vont les accélérer dans les structures de type montagne russe. Dans les cavités résonantes, la composante électrique utilisée est oscillante. Elle est tantôt dans le même sens que celui du faisceau et pourrait donc l'accélérer, tantôt opposé et pourrait le décélérer. Cette oscillation se fait à la fréquence de l'onde radiofréquence qui est de plusieurs millions de fois par seconde. Pour que cette composante soit toujours accé-

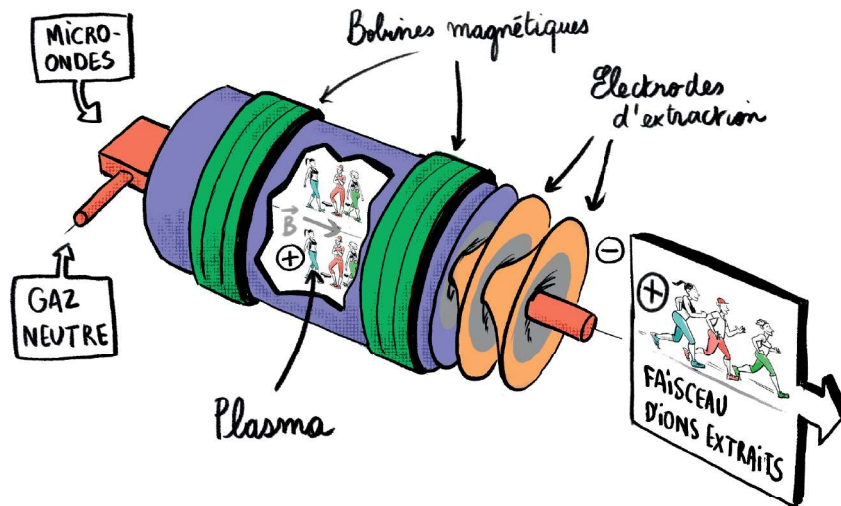
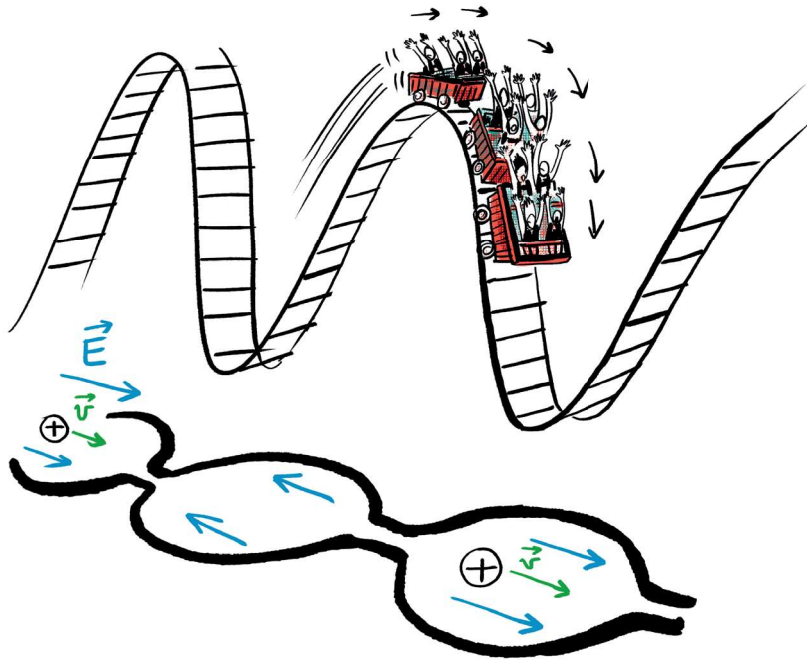


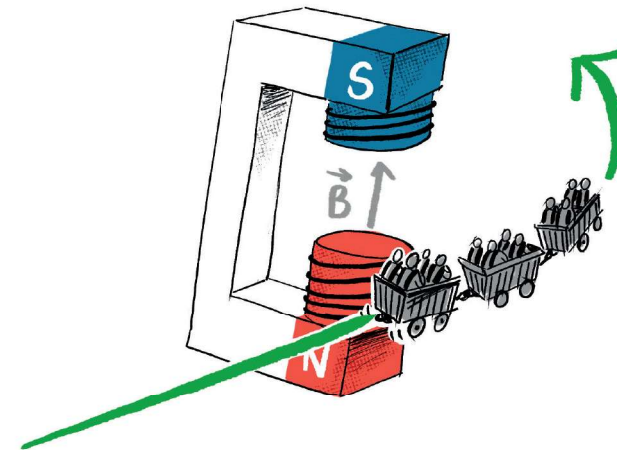
Schéma d'une source d'ions.

lératrice pour le faisceau, les paquets de particules doivent arriver à la même fréquence que l'onde, synchronisée avec celle-ci de manière à toujours voir le champ électrique orienté dans le sens de l'accélération. Signalons de plus que les particules dans un même paquet n'ont pas rigoureusement la même vitesse. Si on donne la même énergie à tout le paquet, les particules un peu plus énergétiques vont être de plus en plus en avance et celles qui sont un peu moins énergétiques de plus en plus en retard, le faisceau va progressivement s'allonger et à terme la structure bien agencée en paquets pourrait être détruite pour ne laisser qu'un faisceau continu. Pour éviter cela, on doit synchroniser l'arrivée du faisceau de telle sorte que les particules les premières arrivées voient un champ électrique un peu plus faible que la moyenne et celles qui arrivent un peu plus tard voient un champ un peu plus élevé que la moyenne. Les particules d'un paquet sont de cette manière regroupées longitudinalement.



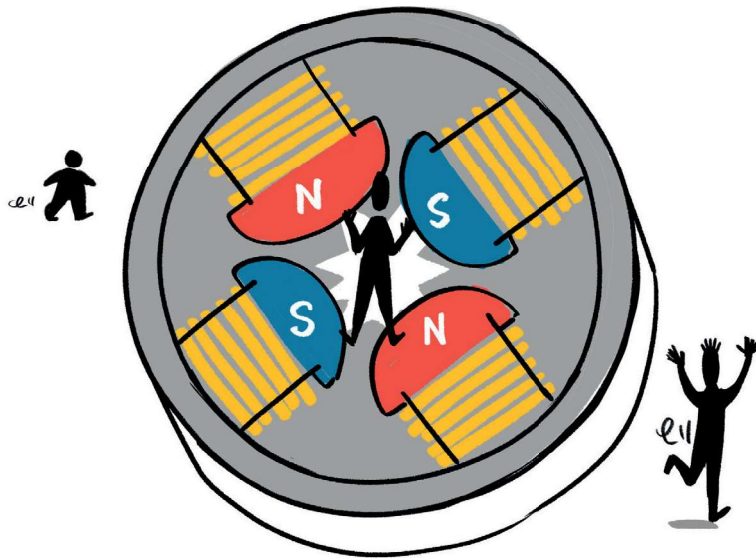
Accélération des particules avec un train de cavités RF résonantes.

Le faisceau de particules doit aussi être dévié, guidé vers des endroits précis, soit pour être accéléré, soit pour être utilisé comme faire des collisions, ou produire du rayonnement synchrotron, ou irradier une cible. On utilise pour cela un dipôle, c'est-à-dire un électroaimant pourvu de deux bobines conductrices créant ainsi un champ magnétique associé aux deux pôles magnétiques Sud et Nord. En général un champ magnétique vertical est généré et le faisceau va être contraint de s'enrouler autour, donc dévié dans le plan horizontal, d'un angle précis correspondant à une longueur précise de champs magnétique non nul.



Guidage des particules avec un dipôle magnétique.

N'oublions pas que le faisceau de particules doit aussi être régulièrement regroupé transversalement, autrement dit focalisé, pour au moins contrebalancer les forces répulsives qui s'exercent entre les charges de même signe. On emploie pour cela des électroaimants, soit comme un solénoïde qui oblige les particules à s'enrouler autour de son champ magnétique axial, soit comme un quadrupôle pourvu de 4 bobines conductrices qui génère une structure de champ magnétique à quatre pôles. Avec une telle structure, le faisceau est focalisé dans un plan donné (par ex. horizontal) et défocalisé dans le plan perpendiculaire (par ex. vertical). Comme avec les lentilles dans l'optique classique pour les téléobjectifs, une succession de quadrupôles focalisants et défocalisants judicieusement placés permettent d'obtenir une très forte focalisation. On peut aussi utiliser des électroaimants à 6 pôles, 8 pôles, 10 pôles, etc. pour focaliser le faisceau plus sur le bord qu'au centre.



Un quadrupôle focalisant le faisceau en horizontal et le défocalisant en vertical.

Pour les ions à faible énergie juste après la sortie de la source, les forces répulsives interparticules sont encore très importantes et les dispositifs d'accélération et de focalisation séparés ne conviennent pas. En effet, les particules seraient déjà dispersées alors qu'elles ne sont qu'à peine accélérées. On emploie alors un dispositif spécial appelé cavité RFQ (radiofréquence quadrupolaire). C'est une cavité électromagnétique résonante dotée de quatre pôles très précisément usinés de telle manière que le champ électrique sur l'axe est successivement parallèle puis perpendiculaire à la direction du faisceau, tous les quelques centimètres. Une telle cavité, longue de plusieurs mètres, permet tout d'abord de mettre en paquet le faisceau continu sorti de la source, puis d'accélérer et focaliser le faisceau alternativement tous les quelques centimètres, jusqu'à une énergie où les forces répulsives deviennent négligeables, où les tâches d'accélération et de focalisation peuvent-être exécutées plus efficacement par les cavités et électroaimants qui eux, font plusieurs dizaines de centimètres de long.

Et le faisceau de particules dans tout cela ?

Signalons tout d'abord que le faisceau de particules d'un accélérateur circule dans un tuyau où un vide très poussé est réalisé, de telle manière qu'il y a des millions de fois moins de particules d'air que dans l'atmosphère, dans le but de réduire au minimum les collisions entre les particules du faisceau avec celles de l'air qui engendreraient leur perte. En effet, les pertes de particules accélérées doivent être souvent limitées à un millionième ou milliardième du faisceau, afin de limiter l'activation des matériaux qui génère par la suite des rayonnements nocifs pour l'Homme, ou de limiter le réchauffement des équipements refroidis à des températures cryogéniques qui enveloppent le faisceau à quelques centimètres de distance.

Les actions de tous les dispositifs décrits précédemment doivent donc se faire avec une très grande précision. Or l'évolution du faisceau dans cet environnement est intrinsèquement complexe. Le faisceau s'enroule autour de l'axe dans un solénoïde; est focalisé dans un plan et défocalisé dans l'autre au passage d'un quadrupôle; va plus vite tout en étant focalisé dans le plan longitudinal au passage d'une cavité accélératrice, et fait un peu tout cela dans une cavité RFQ.

De plus, ce comportement complexe se passe dans un espace à 6 dimensions qui ne peut être humainement visualisé. Chacune des milliards de particules d'un paquet peut être décrite par sa position dans l'espace à 3 dimensions, plus les 3 dimensions d'angles, toutes nécessaires pour savoir d'où vient une particule et où elle va aller. De même, un paquet de particules est caractérisé par sa taille dans les 3 plans, plus sa divergence dans les 3 mêmes plans. Le centre du paquet, lui, évolue dans les 6 dimensions comme le ferait une particule fictive. Sous l'action des dispositifs d'accélération et de focalisation, le centre du paquet oscille dans les 6 dimensions autour de la trajectoire idéale théorique, et les particules oscillent dans les 6 dimensions autour de ce centre, chacun et chacune à son propre rythme, à sa propre fréquence. Un comportement qui change assez violemment, qualitativement et quantitativement, à la traversée de chaque dispositif.

On peut qualifier la Physique du faisceau d'accélérateur comme « délicieusement complexe ». Son étude est en soi passionnante. Le physicien travaillant dans ce domaine s'apparente à un dompteur de fauves-particules, qui ne sont pas particulièrement féroces mais au comportement complexe. Surtout lorsqu'il y en a des millions ou des milliards à dompter.

En guise de conclusion

Il est parfois plus intéressant de conclure une discussion en l'élargissant que d'en faire le résumé, et le domaine de la physique des accélérateurs s'y prête.

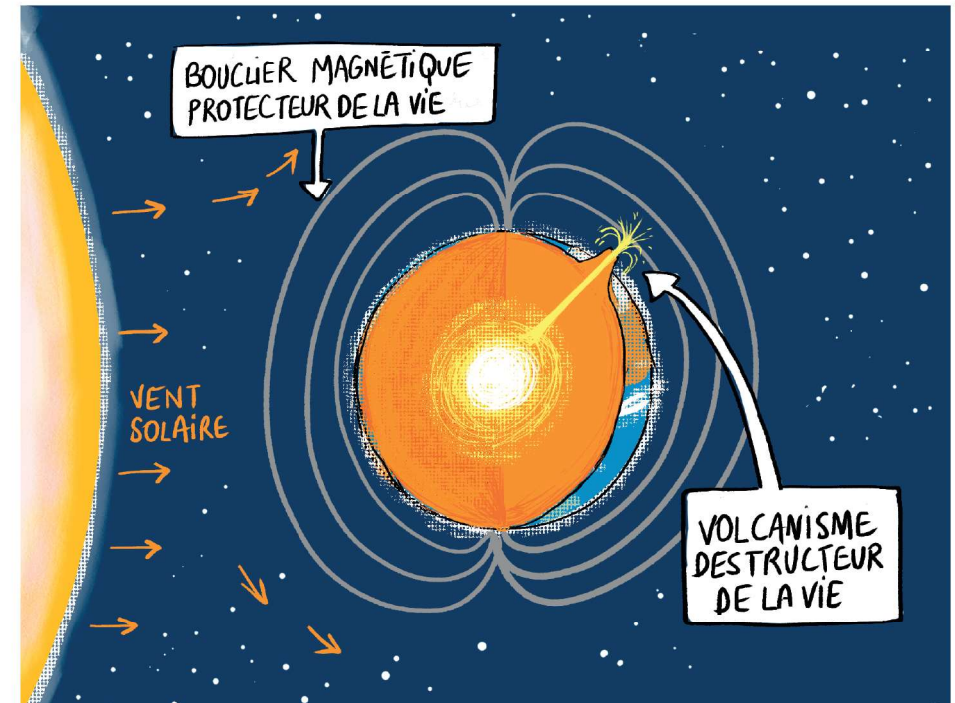
On a vu qu'en voulant s'initier à la physique des accélérateurs, dont on pourrait penser a priori qu'elle est très spécifique, on s'est initié en même temps à celle du quotidien et de l'Univers. Il est vrai qu'un collégien qui vient d'apprendre un phénomène physique bien spécifique à l'école peut s'apercevoir en rentrant à la maison qu'il peut comprendre plein d'autres choses qui ne sont en fait que des manifestations différentes, parfois à des échelles différentes, du même phénomène physique. Ceci est sans doute vrai pour la science en général. Les scientifiques s'imposent à eux-mêmes le très strict principe de parcimonie qui revient à décrire le maximum de phénomènes avec le minimum de lois. Dit d'une autre façon, les lois scientifiques doivent couvrir un domaine le plus large possible, ce qui en un mot veut dire qu'elles visent à être universelles. Pour l'humain qui, curieux par nature, cherche toujours à comprendre, plus et encore, la science est passionnante car grâce à elle, il arrive à comprendre beaucoup de choses, de l'infiniment petit à l'infiniment grand, avec pourtant peu de connaissances à la base.

Il est néanmoins curieux de constater que le rapport de l'humain à la science est assez complexe. Il est ressenti que les connaissances scientifiques ont ouvert la voie à l'humain pour fabriquer des produits artificiels, donc non naturels. Cette opposition artificiel/naturel semble tellement évidente qu'on peut dans la foulée leur attribuer de façon automatique des jugements de valeur opposés, souvent d'ailleurs au détriment de l'artificiel. Prenons comme exemple un accélérateur de particules, un objet de taille plutôt imposante, entièrement fabriqué par l'humain, donc artificiel par définition. On a vu cependant que toute la physique employée est la même que celle qui gouverne les objets de la nature. Entrons encore plus dans le détail pour examiner chaque composant, chaque matériau d'un accélérateur. C'est bien en partant d'un matériau existant dans la nature, transformé grâce à des lois de la nature, qu'on obtient le matériau cryogénique le plus sophistiqué. De façon beaucoup plus générale, la science, qu'elle soit physique, chimique, biologique ou autres, rend compte exclusivement des lois de la nature. Aucune des lois scientifiques n'est inventée ou fabriquée par l'humain. Enfin, l'humain lui-même, jusqu'à preuve du contraire, est un produit de la nature. Il est alors très difficile, voire impossible, de concevoir qu'un pur produit de la nature qui utilise des produits naturels associés à des lois naturelles peut produire des objets qui sont automatiquement contre-nature. Cette opposition artificiel/naturel n'est-elle pas purement d'origine anthropocentrique ?

Qui donne une place beaucoup plus importante à l'humain dans la nature qu'elle ne l'est en réalité? On peut en tout cas penser que cette opposition naturel/artificiel est plutôt ... artificielle.

Mais la science en elle-même, est-ce bien ou est-ce mal? Vaste question. Examinons-la seulement dans le cadre de notre discussion. On a par exemple signalé que le centre de la Terre est très chaud. Cela a généré le bouclier magnétique qui protège la vie à la surface de la Terre. Mais cela fait aussi que les matériaux au centre de la Terre sont liquéfiés. Les plaques solides de surface flottent librement sur ce liquide, et lorsqu'elles se collisionnent ou se séparent provoquent des tremblements de terre ou des volcans, qui détruisent la vie! De façon plus générale, tout phénomène naturel quel qu'il soit, sans exception, la pluie, le vent, le rayonnement cosmique, la rotation des galaxies, etc. peut protéger autant que détruire un objet ou un phénomène donné. Dépendamment du contexte, la protection ou bien la destruction peut être plus importante, favorisant ou inhibant le développement de cet objet ou de ce phénomène. Un simple objet tranchant, qu'il soit fabriqué par l'humain ou pas, peut servir à nous défendre, à découper les aliments qui nous nourrissent, mais aussi à nous blesser. En bref, les phénomènes naturels (ou artificiels, peu importe) produiront toujours des effets potentiellement bonnes et mauvaises pour un sujet donné; la science permet de distinguer qualitativement et quantitativement ces effets; la conscience enfin peut, elle seule, trier et choisir les effets désirés.

Ainsi, la physique des accélérateurs, de par les phénomènes naturels traités, peut mener à la physique du monde qui nous entoure, et même aux réflexions sur nos relations avec ce monde.



Deux manifestations du noyau chaud de la Terre: bouclier magnétique protecteur de la vie et volcanisme destructeur de la vie.

Remerciements

Un très grand remerciement va à Angèle Sene, qui a inlassablement encouragé et facilité l'écriture puis l'édition de ce livret. Que soient aussi chaleureusement remerciés pour leur relecture critique et amicale: Claire Antoine, Philippe Briet, Manuel Durand-Barthez, Sophie Kerhoas-Cavata, Angèle Sene, Didier Uriot. L'édition de ce livret a bénéficié du soutien financier du réseau de laboratoires d'excellence P2IO (Physique des 2 Infinis et des Origines).

L'auteur

Phu-Anh-Phi NGHIEM a effectué ses travaux de recherche scientifique dans les domaines de physique des plasmas, astrophysique et physique des accélérateurs, au CNRS puis au CEA. Il a publié plus de 120 articles scientifiques dans des revues spécialisées ou des conférences internationales. Expert CEA en physique des accélérateurs, il a été responsable de la conception d'accélérateurs d'envergure nationale ou internationale.

L'illustratrice

Aurélie BORDENAVE est illustratrice indépendante. Elle collabore avec de nombreux acteurs de la scène scientifique française afin de présenter leurs travaux de recherche à de multiples publics, sous différentes formes: motion design, bande dessinée, livret illustré... Son site web expose son actualité, ses productions et ses créations artistiques visuelles (autoédition d'albums jeunesse, tirages limités en sérigraphie). *AurilieBordenave.fr*

Pour en savoir plus

Site web du CEA

- cea.fr/comprendre/Pages/matiere-univers/accelerateurs-de-particules.aspx

Quelques sites d'accélérateur en France

- ganil-spiral2.eu
- synchrotron-soleil.fr/fr/qui-sommes-nous/quest-ce-que-soleil
- www.ijclab.in2p3.fr/poles-scientifiques/physique-des-accelerateurs
- france-hadron.fr/fr/projets/hadrontherapie.html

Crédits

Conception : Aurélie Bordenave illustratrice & graphiste, et Phu-Anh-Phi Nghiem physicien au CEA.

Licence : ce livret est mis à disposition sous licence "Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 2.0 France". Pour voir une copie de cette licence, visitez le site web : creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/fr/

Achevé d'imprimer et relié en juin 2020 par DFS+ Imprimerie numérique, à Aix-en-Provence.

ISBN / 978-2-7272-0231-8