Chapitre 1 : présentation

The Nuclear Science Wall Chart[1] a été rédigé dans le but d'expliquer au grand public les concepts fondamentaux de la structure nucléaire, de la radioactivité et des réactions nucléaires mais aussi pour mettre en évidence les thèmes de recherche et d'intérêt actuels dans le domaine. Ce document s'inscrit dans la même lignée que les deux brillantes présentations élaborées précédemment par le Contemporary Physics Education Projet[2] (CPEP). La première se penche sur le modèle standard des particules élémentaires tandis que la seconde aborde le thème de la fusion et de la physique des plasmas. La terminologie nouvelle et les concepts de physique figurant dans la charte sont expliqués dans les chapitres suivants ainsi que dans le glossaire.

Les sciences nucléaires concernent l'étude de la structure, des propriétés et des interactions du noyau atomique, le cœur des atomes, où réside la majeure partie de la masse de la matière ordinaire. Comprendre le comportement de la matière nucléaire en conditions normales et en conditions éloignées de la normale constitue un défi de taille. Des conditions extrêmes qui existaient juste après la création de l'univers, se retrouvent aujourd'hui dans le cœur des étoiles et peuvent être recréées dans les laboratoires lors des collisions entre les noyaux. Les chercheurs en nucléaire procèdent à des expérimentations en mesurant les propriétés, les formes et les désintégrations des noyaux avant et lors des collisions. Différentes questions se posent : pourquoi les nucléons restent-ils dans le noyau ? Quelles combinaisons de protons et de neutrons sont possibles ? Que se passe-t-il quand les noyaux sont comprimés ? Quelle est l'origine des noyaux atomiques que l'on trouve sur terre ? Les chercheurs effectuent des recherches théoriques et expérimentales au moyen d'accélérateurs à haute énergie, de détecteurs innovants et d'équipements informatiques de pointe.

LA CHARTE EN QUELQUES MOTS

1. Le noyau atomique

Le noyau atomique est composé de nucléons, ensemble de protons et neutrons qui sont constitués à leur tour de quarks et dont la cohésion est assurée par la forte interaction générée par l'échange de gluon entre les quarks. Dans les noyaux à multiples nucléons, les interactions fortes effectives peuvent être décrites par l'échange de mésons (particules

[1] La charte des sciences nucléaires
[2] Projet éducatif sur la physique contemporaine

composées de pairs quarks-antiquarks). Un proton est constitué de deux quarks up et un quark down ainsi que d'éléments de courte durée de vie issus des interactions fortes du champ. La composition du neutron est semblable. Cependant, celui-ci présente deux quarks down et un quark up. Si les physiciens sont convaincus que les nucléons sont composés de quarks, aucun n'a encore été isolé de façon expérimentale. L'énergie apportée dans le noyau dans le but de séparer les quarks les renforce. Quand elle est suffisamment importante, un apport supplémentaire d'énergie engendre de nouvelles particules au lieu de libérer des quarks.

2. Carte des nucléides

Dans la Carte des nucléides le noyau atomique est accompagné de son numéro atomique Z et du nombre de neutron N. Chaque case représente un nucléide particulier et son code couleur est choisi en fonction de son premier mode de désintégration. Lesdits « numéros magiques » sont les suivants : 2, 8, 20, 28, 50, 82 et 126. Ils correspondent à la limite des principales couches nucléaires (plutôt comparable aux couches atomiques des électrons) et augmentent la stabilité nucléaire. Les isotopes possédant des protons et des neutrons de même numéro magique sont appelés « doublement magique » et sont d'une stabilité exceptionnelle.

3. Radioactivité

Les atomes sont radioactifs si les protons et les neutrons dans le noyau possèdent une configuration instable. Lorsqu'il y a peu de protons (Z), le nombre de neutrons (N) nécessaire pour maintenir l'équilibre équivaut plus ou moins au nombre des protons. Par exemple, il y a 6 protons et 6 neutrons dans le noyau atomique de la forme la plus commune du carbone. Pour un nombre élevé de protons dans le noyau, la force électrique répulsive entre ces derniers entraîne la stabilité du noyau, ce qui profite aux neutrons. Un noyau stable de plomb contient 126 neutrons et 82 protons. Un atome radioactif qui présente un déséquilibre entre le nombre de protons et le nombre de neutrons cherche une disposition plus stable par la désintégration radioactive. Celles-ci se produisent de façon aléatoire dans le temps, cependant on sait qu'une grande quantité de matière radioactive possède une durée de vie moyenne. Les produits de désintégration habituels sont désignés par les trois premières lettres de l'alphabet grec : alpha (α), beta (β) et gamma (γ). Lors d'une désintégration alpha, le noyau d'hélium s'échappe. L'émission alpha réduit le nombre de protons et de neutrons par deux dans le noyau. La désintégration bêta peut résulter soit d'une émission d'un électron et d'un antineutrino soit d'une émission de leurs antiparticules, un positron et un neutrino. Elle inverse le nombre de

protons et de neutrons dans le noyau et implique la capture d'un électron par un noyau. Au cours de la désintégration gamma une forte énergie de photon se dégage du noyau et lui permet d'atteindre une configuration plus stable et plus faible en énergie. La fission spontanée d'un noyau lourd en produits plus légers est également une forme de radioactivité.

4. Expansion de l'univers

La création de l'univers remonte à 15 milliards d'années lors de ce que l'on appelle le Big Bang. Environ une microseconde plus tard, l'univers comptait principalement des quarks et des gluons. Tandis qu'il était en continuelle expansion, la température, elle, ne cessait de chuter pour finalement être suffisamment basse et permettre aux quarks et aux gluons de se condenser dans les nucléons, qui par la suite donnèrent naissance à l'hydrogène et à l'hélium. On trouve encore des restes d'hydrogène et d'hélium primitifs dans l'espace interstellaire. Finalement, les inhomogénéités de densité ont permis aux interactions gravitationnelles de former d'importants nuages d'hydrogène. Les inhomogénéités locales de ces nuages sont à l'origine de la création et de l'accumulation des étoiles dans des galaxies. Depuis le Big Bang, l'univers n'a cessé de s'étendre et de se refroidir. Sa température actuelle est de seulement 2,7 Kelvin.

Une fois l'hydrogène et l'hélium, issus du Big Bang, condensés dans les étoiles, des réactions nucléaires en série se produisent dans le cœur des étoiles géantes générant davantage de noyaux lourds jusqu'à obtenir l'élément fer. À la mort d'une étoile, lors d'explosions de supernovae, des noyaux plus lourds se forment. Ces éléments se dispersent dans l'espace où ils se mélangent par la suite à des gaz interstellaires pour former de nouvelles étoiles et leurs planètes. La Terre et ses occupants, qu'ils soient vivants ou non vivants, sont issus de ces processus astrophysiques nucléaires.

5. Phases de la matière nucléaire

Nous savons que l'eau existe sous trois états ou phases : solide, liquide et gazeux, que l'on connait comme la glace, l'eau et la vapeur. C'est la température et la pression qui déterminent l'état des molécules d'eau. De la même manière, les protons et les neutrons se rencontrent également sous différentes formes selon la densité et la température nucléaire locale. Les noyaux atomiques normaux se trouveraient à l'état liquide.

On trouve de la matière nucléaire dans les étoiles à neutrons, à la création de l'univers ou dans le plasma quark-gluon. Les scientifiques étudient ces états en faisant entrer en collision des faisceaux de particules accélérées afin de reproduire des conditions extrêmes. Jusqu'à présent, aucune expérience n'a pas pu recréer le plasma quark-gluon.

6. Noyau atomique instable

Si la Carte des nucléides recense environ 2500 nucléides différents, des modèles actuels estiment que 4000 autres peuvent encore être découverts. La « drip line » ou ligne d'instabilité de protons et de neutrons détermine le stade où les noyaux avec un rapport protons/neutrons (N/Z) extrême

présenteraient une instabilité telle que les forces nucléaires ne pourraient plus former. Des scientifiques s'efforcent de tester la limite de ce rapport et tentent de découvrir les éléments les plus lourds de la Carte des nucléides. L'élément 118 (dont le nom reste à déterminer) est l'élément non naturel le plus lourd jamais créé. Le produit issu de sa chaîne de désintégration alpha a permis d'identifier le noyau atomique parent uniquement à partir de quelques noyaux.

7. Energie nucléaire

Il y a *fission* lorsque le noyau atomique d'un atome se divise en deux noyaux plus petits. Elle se produit spontanément mais elle peut également être induite par la capture d'un neutron. Par exemple, l'état d'excitation de l'uranium (provoqué par la capture neutronique) peut engendrer deux noyaux « filles » plus petits. Les *produits de fission* émettent généralement des neutrons car le rapport N/Z est plus important avec Z plus élevé. Une configuration adéquate d'atomes d'uranium permet aux neutrons issus de la première fission d'être capturés et de provoquer ainsi davantage de fission de noyaux d'uranium. Ce processus de « réaction en chaîne » augmente exponentiellement le nombre de ces atomes. Chacun d'entre eux, libère une quantité considérable d'énergie. Ce phénomène est contrôlé au sein des réacteurs nucléaires, où les barres de commande capturent l'excès de neutrons, les empêchant d'être capturés par d'autres noyaux d'uranium et de provoquer une autre fission. Les réacteurs nucléaires sont conçus pour que la libération d'énergie soit lente et permette d'en faire une source de production exploitable contrairement à une bombe atomique où la réaction en chaîne est d'une rapidité explosive.

La fusion se produit lorsque deux noyaux s'assemblent pour former un noyau plus grand. La fusion de noyaux contenant peu de protons dégage une quantité d'énergie considérable : la source d'énergie du soleil. Quatre noyaux d'hydrogène (protons) s'assemblent lors d'un processus en plusieurs étapes pour donner lieu à un noyau d'hélium. Il existe des processus de fusion plus complexes encore qui impliquent des noyaux plus lourds. L'énergie nécessaire pour supporter une répulsion électrique mutuelle de deux noyaux est colossale. C'est pourquoi la fusion ne peut se produire que dans des conditions extrêmes comme celles que l'on trouve dans le cœur des étoiles et dans les accélérateurs de particules nucléaires. La fusion de noyaux possédant un numéro atomique plus élevé nécessite des conditions encore plus extrêmes telles que l'on trouve dans les novae ou les supernovae. Les étoiles sont en fin de compte à l'origine de tous les éléments de la classification périodique. La fusion étant un processus qui nécessite des conditions extrêmes, il est difficile de recréer une réaction nucléaire sur terre. On la retrouve dans les armes thermonucléaires, où elle est incontrôlée. On a déjà pu recréer la fusion contrôlée libérant de l'énergie, cependant aucune méthode commerciale viable n'a été mise au point pour générer de l'électricité.

8. Application

La recherche fondamentale en nucléaire a mis en évidence des bénéfices dont les retombées dépassent les attentes des recherches poursuivies initialement et souvent de manière tout à fait inattendue. La science nucléaire continue d'avoir un impact conséquent sur les autres domaines comme la science, la technologie, la médecine, la production énergétique et la sécurité nationale. Les techniques de diagnostique nucléaire ont trouvé de nombreuses applications comme la datation d'objets en archéologie, l'étude des matériaux et la surveillance des changements de l'environnement.

Chapitre 2 : le noyau atomique

La quête de la particule élémentaire du monde matériel a été le fil conducteur de la recherche scientifique à travers les époques. Beaucoup de grands philosophes antiques issus d'horizons très distincts se sont penchés sur les conséquences de la sous-division d'objets tangibles à structure régulière en éléments de plus en plus petits jusqu'à devenir invisibles. Nombreux d'entre eux étaient persuadés qu'ils obtiendraient ainsi une unité de matière indivisible fondamentale que le grec ancien désigne sous le terme ατομοσ (atome) et dont le sens est "non divisible". Les atomes sont-ils effectivement ces éléments indivisibles tant cherchés du monde matériel?

L'atome

Dès le début du XXème siècle, des preuves irréfutables ont été apportées pour dire que la matière pouvait s'expliquer à partir des atomes. Autrement dit qu'elle est composée de quelques particules élémentaires que nous appelons atomes. Cette théorie a fourni une explication d'ensemble cohérente pour tous les processus chimiques connus à l'époque. Cependant, il reste certains points que la théorie atomiste ne peut expliquer. En 1896, A.H. Becquerel découvre le rayonnement pénétrant. En 1897, J.J. Thomson démontre que les électrons possèdent une charge électrique négative et proviennent de la matière ordinaire. Celle-ci ne peut être neutre d'un point de vue électrique qu'en présence de charges positives. La question qui se pose alors est : où se trouvent ces charges et quel élément en contient ?

En 1911, Ernest Rutherford et ses paires firent une avancée incroyable lors d'une expérience destinée à déterminer l'angle de dispersion d'un faisceau de particules alpha (noyau d'hélium) après avoir traversé une fine feuille d'or.

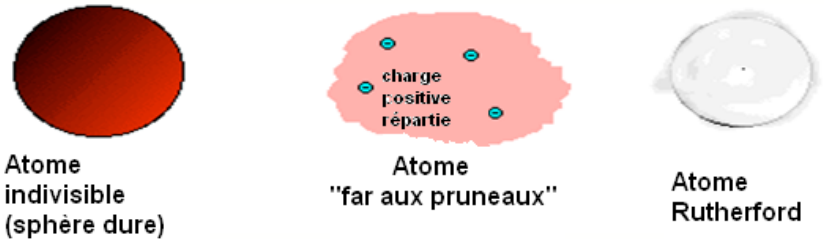


Fig.2-1. Les modèles de l'atome. Le point au centre de l'atome Rutherford représente le noyau. Sa taille a été agrandie afin de pouvoir être visible sur le dessin.

Quels résultats pourrait-on attendre d'une telle expérience ? Tout dépend de la structure de l'atome. Le modèle de Thomson ou « far aux pruneaux », modèle de l'atome qui faisait autorité à l'époque, soutient que les électrons chargés négativement (les pruneaux) baignent dans la charge positive (le far). Ce modèle explique la neutralité de la masse ainsi que la description des flux des charges électriques. D'après ce modèle, les particules alpha ne devraient que légèrement se disperser voire pas du tout pour la grande majorité.

Les résultats mis en évidence dans l'expérience de Rutherford sont incroyables. La plupart des particules alpha réagirent comme prévu et se sont à peine dispersée. Cependant, certaines ont été déviées à plus de 90 degrés, phénomène tout à fait improbable si l'on en croit le modèle du far aux pruneaux. Cette expérience fut incontestablement la preuve de l'existence d'un noyau dans le modèle de l'atome. Le seul modèle valable à la lumière de l'expérience de Rutherford est celui d'un petit noyau central abritant une charge positive ainsi que la plupart de la masse atomique tandis que la majorité du volume de l'atome contient des électrons discrets en orbite autour du noyau central.

La théorie électromagnétique classique affirme qu'une charge qui se déplace sur une trajectoire circulaire perd de l'énergie. Si dans le modèle de Rutherford, les électrons décrivent une orbite autour du noyau comme le font les planètes autour du soleil, il échoue, cependant, à expliquer pourquoi les forces de Coulomb n'a aucun effet sur l'affaiblissement énergétique des électrons et leur chute dans le noyau. Ce problème de stabilité a été résolu par Niels Bohr en 1913 grâce à la mise au point d'un nouveau modèle qui justifie ce phénomène par des orbites particulières et expliquerait pourquoi les électrons tomberaient

de façon hélicoïdale dans le noyau. Ce modèle est non seulement à l'origine de la physique quantique, laquelle permet d'expliquer de nombreuses propriétés des atomes, mais il reste aujourd'hui une bonne façon de décrire les niveaux d'énergie des atomes d'hydrogène.

Le noyau atomique

De nos jours, on décrit le noyau atomique comme un système quantique composé de protons et de neutrons, particules de masse quasi égale et de même moment angulaire intrinsèque (spin) de ½. Le proton porte une unité de charge électrique positive tandis que le neutron est dépourvu de toute charge. Le terme nucléon est utilisé aussi bien pour désigner un proton qu'un neutron. L'hydrogène est le noyau le plus simple ; il est formé d'un seul proton tandis que le noyau le plus lourd jamais étudié se compose de prés de 300 nucléons. On détermine un noyau atomique par son numéro atomique Z (par exemple, le nombre de protons), le nombre de neutrons N et le nombre de masse A, (A = Z+N).

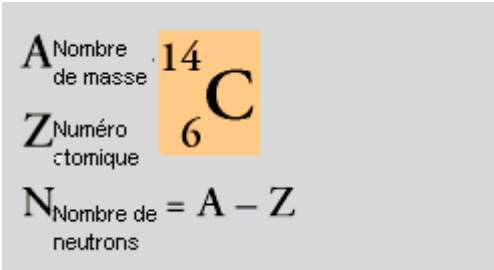


Fig. 2-2. Le noyau atomique est désigné par son numéro atomique Z et son nombre de masse A, ainsi que par son symbole chimique. Le nombre de neutrons est obtenu par l'opération N = A – Z.

Que savons-nous d'autre à propos du noyau atomique ? En plus de son numéro et de son nombre de masse, il est également caractérisé par sa taille, sa forme, son énergie de liaison, son moment angulaire et sa demi-vie (s'il est instable). Une des meilleures façons de déterminer la taille d'un noyau atomique est de disperser les électrons de haute énergie. La répartition angulaire de ces électrons dépend de la répartition des protons. Celle-ci peut être caractérisée par le rayon moyen qui mesure 1-10 x 10^{-15} m. Ce rayon est bien plus petit que celui de l'atome, lequel atteint généralement 10^{-10} m. Par conséquent, le noyau atomique occupe un volume extrêmement petit au sein de l'atome. Certains sont de forme sphérique, d'autres possèdent des formes plus étendues ou aplaties.

L'énergie de liaison d'un noyau atomique correspond à l'énergie qui maintient ses éléments constitutifs ensemble. Cette énergie varie d'un noyau à l'autre et augmente en même temps que A. En raison des variations de l'énergie de liaison, certains noyaux sont instables et se désintègrent pour donner naissance à d'autres noyaux. Le rythme de désintégration est lié à la durée de vie moyenne des noyaux en désintégration. Le temps nécessaire à la moitié d'une population de noyaux instables pour se désintégrer est appelé demi-vie. Leur durée peut varier de quelques fractions de secondes à des milliards d'années.

Les isotopes de l'hydrogène

Il est souvent intéressant d'étudier les éléments les plus simples. C'est pourquoi, l'hydrogène a fait l'objet de recherches approfondies. Les isotopes de l'hydrogène présentent beaucoup d'effets que l'on retrouve sur les noyaux plus complexes. (Le terme isotope fait référence à un noyau doté d'un même nombre de protons mais possédant une masse atomique différente).

Il existe trois isotopes de l'élément hydrogène : hydrogène, deutérium et tritium. Comment faire pour les différencier ? Chacun d'entre eux possède un seul proton (Z = 1), mais ils se distinguent par le nombre de neutrons. L'hydrogène ne dispose d'aucun neutron, le deutérium en compte un et le tritium en possède deux. Les isotopes de l'hydrogène présentent respectivement un nombre de masse de 1, 2 et 3. Leur symbole nucléaire est donc ^{1}H, ^{2}H et ^{3}H. Les atomes de ces isotopes ont un électron pour équilibrer la charge de leur proton. Étant donné que la chimie dépend des interactions des protons et des électrons, les propriétés chimiques des isotopes sont pratiquement les mêmes.

L'énergie peut être libérée tel un « paquet » de radiations électromagnétiques, le photon. Les photons créés lors d'un processus nucléaire sont dits rayons gamma (désignés par la lettre grecque gamma γ). Par exemple, lorsqu'un proton et un neutron s'assemblent pour former du deutérium, la réaction peut être écrite sous la forme $^{1}n + {}^{1}H \rightarrow {}^{2}H + \gamma$. Cette équation requiert que l'énergie soit équilibrée. La masse peut être écrite en unités de masse atomique (u) ou en mégaélectronvolts divisés par le carré de la vitesse de la lumière (MeV)/c2 (issu de l'équation équivalence masse énergie d'Einstein E = mc2, u = 931,5 MeV/c2). La masse d'un noyau de deutérium (2.01355 u) est inférieure à la somme des masses du proton (1.00728 u) et du neutron (1.00866 u) qui est égale à 2,01594 u. Où est donc passé le reste de la masse (soit 0,00239 u) ? La force nucléaire attractive entre les nucléons crée une énergie potentielle nucléaire négative (l'énergie de liaison E_B) qui a un impact sur la masse manquante, Δ m (la différence entre deux masses). Le photon libéré en formant le deutérium

dégage une énergie de 2,225 MeV, égale au 0,00239 u nécessaire pour séparer le proton et le neutron et pour les transformer à nouveau en particules libres. Les photons issus de la désintégration nucléaire libèrent, en général, une énergie plus grande que ceux qui sont créés lors de processus atomiques. Lorsque le deutérium se transforme en tritium par l'ajout d'un neutron, $^{1}n + {}^{2}H \rightarrow {}^{3}H + \gamma$, une plus grande quantité d'énergie est libérée (6,2504 MeV). L'énergie de liaison plus importante du tritium par rapport au deutérium montre bien que l'énergie potentielle nucléaire n'augmente pas simplement en ajoutant des nucléons (l'énergie de liaison totale est plus ou moins proportionnelle à A).

L'énergie de liaison par nucléon augmente à mesure que le nombre de protons et de neutrons se rajoute pour former un noyau atomique plus important. Il faut savoir que la limite est environ de 8 MeV par nucléon et qu'elle est atteinte quand le nombre de masse est environ égal à 60. Au-delà, l'énergie de liaison moyenne par nucléon diminue lentement. Comment un noyau atomique, composé jusqu'à près de 100 protons, peut-il se maintenir ? Pourquoi ne se disperse t-il pas sous l'action de la répulsion électrique existant entre toutes ces charges positives ? Une force d'attraction suffisamment puissante doit être exercée pour surmonter les forces répulsives de Coulomb entre les protons. Des expériences et des théories sont parvenues à mettre en évidence une interaction nucléaire attractive qui agit entre les nucléons quand ils sont suffisamment proches (lorsque la portée est assez courte). L'équilibre entre l'électromagnétique et les forces nucléaires limite la croissance du noyau.

Modèles théoriques

La physique nucléaire vise à expliquer les propriétés de la structure et les mouvements internes du noyau en termes de modèles mathématiques. Trois modèles nucléaires principaux ont été proposés à savoir, le modèle de la goutte liquide, le modèle en couches (développés par Maria Goeppert-Mayer et Hans Jensen) qui insistent sur les orbites de chaque nucléon dans le noyau et le modèle collectif (mis au point par Aage Bohr et Bne Mottleson), qui vient compléter le modèle en couches en incluant des mouvements du noyau entier tels que les rotations et les vibrations.

Le modèle de la goutte liquide considère le noyau comme un liquide. Les propriétés nucléaires, telles que l'énergie de liaison sont décrites en termes de volume d'énergie,

compressibilité, etc. (les paramètres qui sont généralement associés à un liquide). Ce modèle est parvenu à décrire la façon dont un noyau se déforme et subit la fission.

Le modèle en couches est semblable au modèle atomique dans lequel les électrons se disposent en couches autour du noyau. Les électrons les plus écartés des autres (dans une couche incomplète) sont appelés les électrons de valence car ils peuvent participer aux échanges ou aux réarrangements, c'est-à-dire aux réactions chimiques. La structure en couches est due à la nature quantique des électrons et tient au fait que ces derniers sont des fermions (particules à spin demi entier). Les particules à spin entier sont appelés les bosons. Un groupe de bosons a tendance à occuper le même état (généralement l'état avec l'énergie la plus basse) contrairement aux fermions de même nombre quantique, qui s'évitent. Par conséquent, les fermions dans un système limité remplissent progressivement les états disponibles : d'abord l'état le plus faible, puis l'état libre de plus en plus élevé et ainsi de suite jusqu'à atteindre la couche de valence. Dans les atomes, par exemple, les électrons obéissent au principe d'exclusion de Pauli qui explique le nombre d'électrons observé dans chaque état possible (deux au plus) caractérisé par les nombres quantiques n, l et m. C'est le principe de Pauli (dû à la nature fermionique des électrons) qui donne la structure périodique à la fois aux propriétés nucléaires et aux propriétés atomiques.

Etant donné que les neutrons et les protons sont également des fermions, ils remplissent les états énergétiques du plus faible vers le plus élevé à mesure qu'ils s'intègrent au noyau. Dans le modèle en couches, les nucléons en orbite à un moment angulaire donné remplissent chaque état énergétique. Il s'agit de niveaux d'énergie distincts pour les protons et les neutrons. L'état fondamental du noyau abrite tous les protons et neutrons au niveau énergétique le plus bas possible. Les états excités des noyaux sont par conséquent décrits comme une ascension des nucléons vers des niveaux énergétiques plus élevés. Ce modèle a permis d'expliquer les propriétés nucléaires basiques. Comme c'est le cas pour les atomes, de nombreuses propriétés nucléaires (moment angulaire, moment magnétique, forme, etc.) sont influencées par la dernière couche de valence, pleine ou vide. Le modèle collectif souligne le comportement logique de tous les nucléons. Parmi les différents types de mouvements collectifs pouvant se produire dans un noyau on distingue les rotations ou les vibrations, et ce, sur tout le noyau. D'ailleurs, les propriétés nucléaires peuvent être comparées à une goutte liquide chargée électriquement et suspendue dans l'espace. Le modèle collectif peut ainsi être vu comme un prolongement du modèle de la goutte liquide, car tout deux proposent un bon point de départ pour comprendre le phénomène de fission.
En plus de la fission, le modèle collectif a permis de décrire une variété de propriétés nucléaires, en particulier, les niveaux énergétiques du noyau avec un nombre pair de

protons et de neutrons. Ces niveaux d'énergie montrent les caractéristiques des systèmes de rotation et de vibration attendues par la loi de la physique quantique. Les propriétés habituellement mesurées de ces noyaux, qui incluent l'ensemble des systèmes des états énergétiques excités, le moment angulaire, les moments magnétiques et les formes nucléaires, peuvent être comprises à partir du modèle collectif.

Le modèle en couches et le modèle collectif représentent les deux extrêmes des comportements des nucléons dans le noyau. Des modèles plus réalistes, considérés comme étant des modèles unifiés, tentent d'inclure les deux types de comportements.

Structure interne des nucléons et approche moderne du noyau

Les protons et les neutrons ont-ils une structure interne ? La réponse est oui. Grâce à la mise au point d'accélérateurs de particules de plus en plus perfectionnés, les physiciens ont découvert que les nucléons sont des objets complexes dotés d'une structure interne intéressante. L'émergence du modèle standard des interactions fondamentales est une des plus grandes avancées de la physique moderne. Ce modèle affirme que le monde matériel est composé de deux catégories de particules, les quarks et les leptons ainsi que de leurs antiparticules. Les leptons sont soit neutres (tout comme le neutrino) soit ils portent une unité de charge, e (tel que l'électron, muon et tau). Les quarks, particules composées de points possédant une charge de 1/3 e ou 2/3 e, sont des particules à spin demi entier et donc des fermions, tout comme les électrons. On peut classer les quarks et les leptons en trois familles. Les quarks up et down avec les électrons et les électrons neutrino appartiennent à la famille qui compose la matière ordinaire. Les deux autres familles génèrent des particules d'une durée de vie très courte et n'ont pas de grande influence sur le noyau. Il faut savoir que c'est le nombre de famille existant sur terre qui a déterminé l'évolution de l'univers : on n'en compte trois en tout et pour tout (un nombre supérieur aurait donné un monde tout à fait différent).

On peut ainsi imaginer appréhender la structure des protons et des neutrons en termes de particules fondamentales comme décrites dans le modèle standard. Sous l'action de l'interaction forte (l'interaction qui retient les quarks et par conséquent maintient les différents éléments du noyau ensemble), les protons et les neutrons de la matière ordinaire se retrouvent dans la catégorie des particules composites connue comme les hadrons. Les hadrons qui atterrissent dans la catégorie inférieure, celle des baryons, sont composés de trois quarks. Les protons, formés de deux quarks up et un quark down et les neutrons (un

quark up et deux quarks down) appartiennent à la catégorie des baryons. Il existe également des hadrons appelés mésons qui sont composés de pairs quark-antiquark, tel que le pion.

En raison de leur structure interne faite de quark, les baryons et les mésons peuvent être excités, de la même manière que les atomes et les noyaux. Il faut pour cela qu'ils reçoivent de l'énergie. Le premier état d'excitation du proton, généralement désigné par le baryon delta 1232 (où 1232 MeV/c_2 correspond à la masse de la particule) illustre bien cela. Dans le Delta, un des quarks recevrait de l'énergie en tournant son spin par rapport aux deux autres. Au sein de l'atome, l'énergie nécessaire pour déplacer un électron dans un état plus excité est de l'ordre de quelques milliers d'électronvolts. En comparaison, dans un noyau, l'excitation d'un seul nucléon nécessite un mégaélectronvolt (10_6 eV) tandis que dans un proton, il faut environ 300 MeV pour tourner le spin d'un quark. Ce type d'énergie supplémentaire ne s'obtiendrait qu'en bombardant des particules énergétiques sur un proton à l'aide d'un accélérateur.

La recherche nucléaire et la physique des particules étudient activement la possibilité d'une description théorique valide des états excités des baryons et des mésons. En raison de leur courte durée de vie, les baryons et les mésons sont souvent difficiles à identifier. Les outils de recherche du laboratoire Jefferson, nouvellement accrédité, ont été spécialement conçus pour regarder dans le spectre des mésons et des baryons. Le laboratoire national Brookhaven (Brookhaven National Laboratory) et beaucoup d'autres laboratoires travaillent également sur ce projet. Pour étudier le modèle standard, ils ont souvent recours à des accélérateurs qui produisent des faisceaux énergétiques bien plus élevés. Parmi ces infrastructures on distingue le Fermilab, près de Chicago, le SLAC à Stanford et le CERN à Genève. Les accélérateurs destinés à la physique nucléaire sont traités plus en détails dans le chapitre 11.

Chapitre 13 : …mais à quoi sert la science nucléaire?

Comme dans les autres domaines scientifiques, les chercheurs en nucléaire portent généralement un grand intérêt et font preuve d'une grande motivation pour la science. Comprendre les particules élémentaires de la nature et les lois de la physique qui les gouvernent est le but ultime. Par ailleurs, les contribuables qui financent la majeure partie de la recherche pour la science fondamentale, souhaitent, bien évidemment, voir des résultats

concrets ressortir de ses investissements, à savoir des résultats qui profiteraient à la société. Au cours du siècle où Rutherford découvrit le noyau, de nombreuses applications se sont développées grâce : 1) aux propriétés du noyau, 2) aux techniques de mesure développées en physique nucléaire, 3) aux accélérateurs de particules et 4) aux autres outils de la science nucléaires tels que les détecteurs.

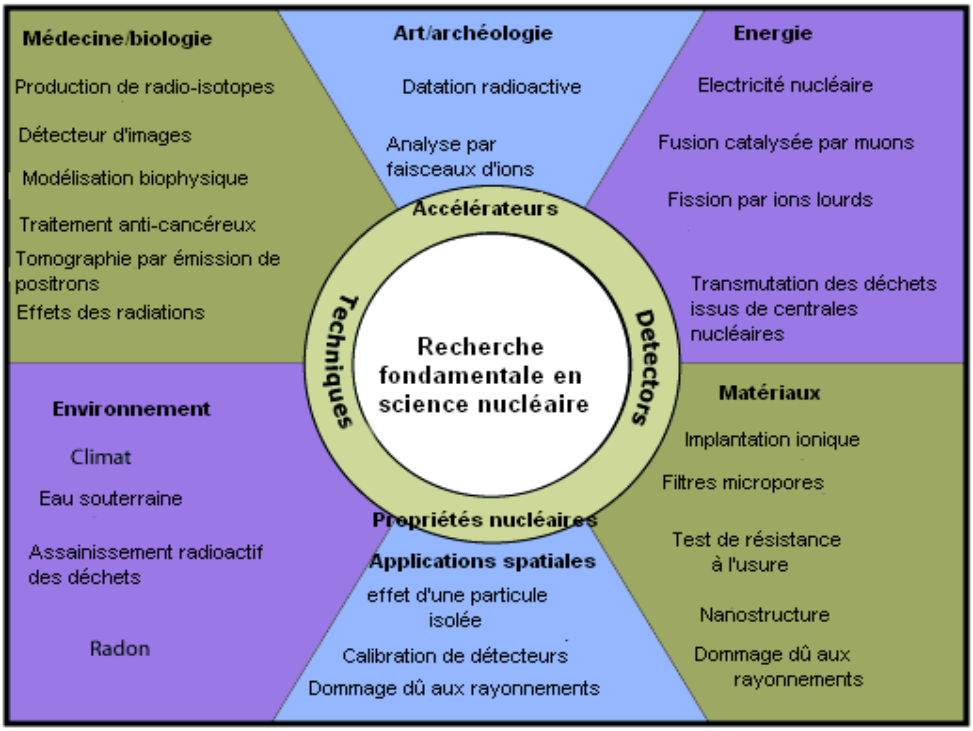


Figure. 13-1. Applications de la science nucléaire.

Ces applications profitent à de nombreuses disciplines aussi diverses que la médecine, la biologie, l'art, l'archéologie, l'énergie, la science des matériaux, l'exploration spatiale et l'environnement. Beaucoup d'entre elles sont détaillées dans la figure 13-1. Seules quelques-unes seront présentées dans ce chapitre. Les applications énergétiques seront décrites à part dans le chapitre 14.

Les exemples suivants illustrent parfaitement la grande variété d'applications permises par la science nucléaire. Si certaines restent limitées à des domaines bien précis et ne se retrouvent pas dans notre quotidien, beaucoup d'autres, en revanche, sont présentes partout. Il y a de grandes chances que l'électricité que vous consommiez provienne d'un réacteur nucléaire, que vous ayez recours à des détecteurs de fumée pour protéger votre maison et que vous soyez soumis à la géopolitiques des armes nucléaires.

Détecteurs de fumée

La plupart des détecteurs de fumée contiennent une petite quantité de ^{241}Am, un isotope radioactif produit et récupéré dans les réacteurs nucléaires. Les particules alpha issues de sa désintégration ionisent l'air (séparent les molécules d'air en électrons et en ions positifs) et génèrent un faible courant électrique qui est mesuré par un circuit de détection de courant. Lorsque la fumée pénètre dans le détecteur, les ions restent accrochés aux particules de fumée, ce qui provoque une baisse de courant du détecteur et déclenche une alarme. Ces détecteurs permettent d'alerter les gens en cas d'incendie et de les faire évacuer. Beaucoup de vies ont ainsi pu être sauvées grâce à leur utilisation.

La distance que parcourent les particules alpha est tellement courte qu'il n'y a aucun risque d'être exposé à des radiations lorsqu'on possède un détecteur de fumée chez soi. Dans la mesure où les détecteurs de fumée par ionisation contiennent des matières radioactives, ils doivent être recyclés ou éliminés comme un déchet radioactif. Au moment de les jeter, il est important de suivre les instructions qui accompagnent le dispositif.

Médecine nucléaire

Diagnostiquer et traiter par radio-isotopes

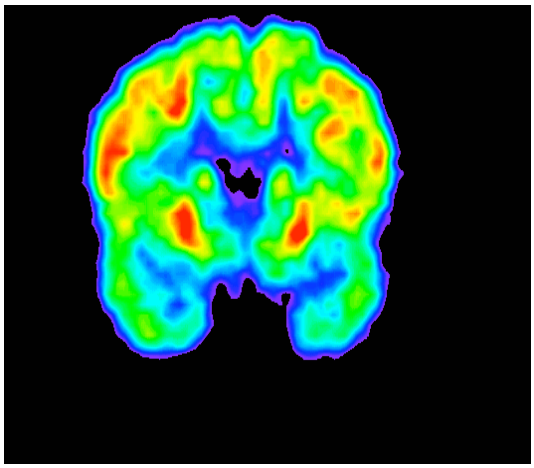
La médecine nucléaire représente le domaine où les radio-isotopes sont le plus utilisés. Parmi les 30 millions de personnes hospitalisées chaque année aux Etats-Unis, 1/3 est traité grâce à la médecine nucléaire. Plus de 10 millions d'interventions sont pratiquées et plus de 100 millions d'essais sont réalisés chaque année rien qu'aux États-Unis. On compte autant d'interventions de ce type dans le monde.

Il existe près d'une centaine de radio-isotopes dont le rayonnement beta et/ou gamma est utilisé pour diagnostiquer, traiter et faire des recherches dans le domaine de la médecine nucléaire. Les radio-isotopes les plus employés ont été découverts avant la Seconde guerre mondiale grâce aux premiers cyclotrons d'Ernest Lawrence dont les premières applications en médecine ont été développées par son frère John Lawrence. Le ^{131}I (découvert en 1938), le ^{60}Co (1937), le ^{99}mTc (1938) et le ^{137}Cs (1941) sont quelques exemples de radio-isotopes les plus connus découverts par Glenn Seaborg et ses collègues. Dès 1970, 90% des 8 millions de radio-isotopes administrés chaque année aux États-Unis se réalisait avec du ^{131}I, du ^{60}Co ou encore du ^{99}mTc. Aujourd'hui, le ^{99}mTc dont la demi-vie dure 6 heures, est devenu le cheval de trait de la médecine nucléaire et représente plus de 10 millions de

méthodes de diagnostic à l'année aux États-Unis. On l'utilise pour l'imagerie du cerveau, des os, du foie, de la rate, des reins, des poumons et de la thyroïde ainsi que pour les études du flux sanguin.

Les troubles thyroïdiens sont diagnostiqués et soignés à l'aide du ^{131}I, dont la demi-vie atteint 8 jours. La mère de Seaborg fut une des premières à bénéficier du radio-isotope découvert par son fils. Gravement atteinte d'hyperthyroïdisme (maladie semblable à celle qui emporta sa sœur), elle a été diagnostiquée et soignée jusqu'à totale guérison grâce au ^{131}I et a finalement vécu de longues années. L'ancien président George Bush et la première dame Barbara Bush, tous deux souffrants de la maladie de Graves, maladie thyroïdienne, ont été traités avec succès au ^{131}I. Le traitement à l'iode radioactif a permis des résultats d'une telle efficacité qu'il a pratiquement remplacé la chirurgie de la thyroïde.

a) b)



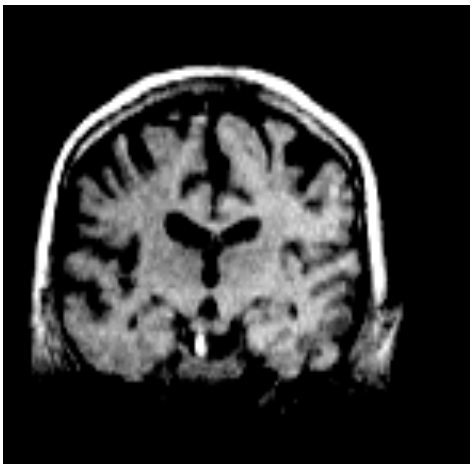


Figure 13-2. Image de diffusion par TEP d'un cerveau humain. Image par résonance magnétique d'un cerveau humain.

Les isotopes radioactifs qui émettent des positrons de courte durée de vie tels que le ^{11}C, ^{13}N, ^{15}O ou ^{18}F sont très utiles dans la Tomographie à émission de positrons. Incorporés dans les éléments chimiques qui migrent sélectivement vers les organes spécifiques du corps, le diagnostique est établi par la détection de l'annihilation des rayons gamma (deux rayons gamma de même énergie émis lorsqu'un positron et un électron s'annihilent). Ces rayons gamma ont la particularité d'émettre des rayons dans des directions complètement opposées. Lorsque les deux sont détectés, un système informatique peut reconstituer l'endroit où s'est produite l'annihilation. En fixant un émetteur de positrons sur une protéine ou une molécule de glucose et s'assurant que le corps la métabolise, il est possible d'étudier le fonctionnement d'un organe tel que le cerveau humain. L'image de diffusion par TEP montre où l'absorption de glucose s'est produite.

L'imagerie de diffusion par TEP peut encore aller plus loin lorsque l'image fonctionnelle peut être comparée à l'image anatomique. L'imagerie par résonance magnétique (IRM), désignée auparavant sous le terme d'Imagerie à résonance magnétique nucléaire, permet d'obtenir des images très précises de l'anatomie comme le montre la seconde image de la figure 13-2b. Ces techniques facilitent le travail des chercheurs pour différencier un tissu sain d'un tissu malade.

Datation radioactive

La datation radioactive est une technique qui consiste à comparer les rapports de teneur d'isotopes radioactifs à un isotope de référence pour déterminer l'âge d'un matériau. De nombreux isotopes ont été étudiés pour sonder ainsi des échelles de temps très étendues. L'isotope ^{14}C, une forme radioactive du carbone, est produit dans la haute atmosphère par la collision de neutrons contre le noyau ^{14}N. Le neutron est capturé par ce dernier puis expulse un proton. On obtient ainsi un nouvel élément, le ^{14}C. Cet isotope est transporté de la même manière que le $^{14}CO^2$ c'est-à dire qu'il est absorbé par les plantes et ingéré par les animaux. Si nous devions mesurer aujourd'hui le rapport de ^{14}C avec le ^{12}C, nous trouverions une valeur d'un ^{14}C pour un billon d'atomes ^{12}C.

Ce rapport est identique pour tous les organismes vivants (aussi bien pour les humains que pour les arbres ou les algues). Lorsqu'un être vivant meurt, il ne peut plus échanger de carbone avec l'environnement. Sachant que l'isotope ^{14}C est radioactif et que les désintégrations beta ont une demi-vie de 5730 ans, il restera à peine la moitié de ^{14}C et seulement un quart au bout de 11 460 ans. Ainsi, le ^{14}C par rapport au ^{12}C passera d'un billion au moment du décès à ½ billon 5730 années plus tard et à ¼ billon 11 460 années après (diminue de moitié tous les ans). Il est possible de déterminer le moment du décès d'organismes autrefois vivants grâce à des mesures très précises de la quantité de ^{14}C restante, obtenues soit par l'étude de la désintégration beta soit par l'utilisation de la spectrométrie de masse par accélérateur (à l'aide d'un accélérateur de particules pour séparer ^{12}C de ^{14}C et calculer ainsi le nombre de chacune d'entre elles).

Peut-être avez-vous déjà entendu parler de l'homme des glaces, un homme vivant dans les Alpes qui à sa mort resta prisonnier des glaces jusqu'à ce que la fonte permette sa récente découverte. Le corps de l'homme était couvert d'un tissu, dont les fragments ont permis d'étudier à l'aide de la spectrométrie de masse par accélérateur quelle était la teneur en carbone 14. La période la plus précise qui ressort de cette technique de datation situe

l'existence de l'homme entre 3350 et 3000 avant J-C. Le bateau d'un pharaon découvert dans une crypte scellée a été reconstitué dans un musée près des pyramides (voir photo 13-3). D'après la technique du carbone 14, son bois serait vieux de 4500 ans.

Fig. 13-3. Le bateau mortuaire du pharaon. © National Geographic Society

Il existe d'autres méthodes de datation pour les organismes non-vivants. Le ^{40}K se désintègre en ^{40}Ar en une demi-vie de 1,3 x 10^9 années et peut être emprisonné dans la roche. La méthode de datation au potassium argon, développée en 1966, mesure la quantité de ^{40}Ar provenant de la désintégration du ^{40}K et la compare à la quantité de ^{40}K restant dans la roche. Ce rapport permet de calculer combien de temps s'est écoulé depuis sa formation.

L'âge de notre galaxie et de la terre peut également être calculé à partir de la datation radioactive. En se basant sur la désintégration de l'uranium et du thorium, l'âge de la galaxie se situerait entre 10 et 20 milliards d'années. Celui de la terre est estimé à 4,6 milliards d'années. L'univers doit être encore plus ancien que la galaxie. Prenant en compte une possible erreur expérimentale, on pense que son âge s'élèverait à 15 milliards d'années.