

Ressources énergétiques du noyau atomique

« Mais la spontanéité du rayonnement est une énigme, un sujet d'étonnement profond. Quelle est la source d'énergie des rayons de Becquerel ? »

Marie et Pierre Curie, Rapports au Congrès international de physique, Paris, 1900.

Introduction

L'interrogation initiale des observateurs de la radioactivité résonne encore à nos oreilles et questionne notre maîtrise prométhéenne du feu nucléaire : est-il possible de brûler des tumeurs ou bien d'exploiter macroscopiquement l'énergie nucléaire ? Au-delà des contingences sociales, cette maîtrise repose en premier lieu sur notre compréhension factuelle de la radioactivité, mécanisme libérant les ressources énergétiques du noyau.

Les quatre forces de la nature sont présentes dans le noyau atomique : forte, faible, électromagnétique, et même la gravitation si l'on considère les étoiles à neutrons, sortes de noyaux géants tournoyant dans l'espace. De ce tumulte d'interactions naissent les transformations d'un noyau père en un noyau fils, accompagné d'une émission énergétique de particules.

Pourquoi la radioactivité est-elle propre au noyau atomique ? i) La variété des interactions impliquées engendre des transformations internes au noyau et des barrières (Coulombienne, de fission) qui retardent l'émission de particules et accentuent son caractère aléatoire (ou spontané) propre à la physique quantique. ii) Le noyau est composé de neutrons et de protons (les nucléons) ; il n'est donc pas élémentaire et peut ainsi se désexciter en émettant un rayonnement. iii) Les neutrons et protons du noyau sont des fermions qui se répartissent sur des couches nucléaires, modifiant ainsi leur énergie au sein du noyau. iv) L'énergie libérée lors d'une désintégration radioactive est environ un million de fois supérieure à celle d'une réaction chimique.

L'énergie dont dispose le noyau atomique fut emmagasinée lors de sa synthèse, quelques minutes après le Big Bang, ou bien dans les étoiles, ou encore en laboratoire. Cette ressource énergétique se restitue sous plusieurs formes, comme la radioactivité, la fission nucléaire, ou les modes de désexcitation du noyau, ayant en commun le passage d'un état initial à un état final, à l'aide d'une des interactions de la nature.

On dénombre aujourd'hui plus d'une dizaine de radioactivités différentes, bien au-delà des trois premières lettres de l'alphabet grec : émission de clusters, radioactivité à un ou deux protons, etc. La radioactivité alpha, découverte il y a plus d'un siècle, joue toujours un rôle singulier : elle permet de signer la synthèse de nouveaux éléments de la table de Mendeleïev, ayant plus d'une centaine de protons. L'existence d'un énigmatique état excité du noyau de carbone-12 se désintégrant en trois particules alpha, permet de décrire la synthèse du carbone dans les étoiles, étape nécessaire à la production de tous les éléments plus lourds et donc de la vie sur Terre.

La fission nucléaire peut aussi être considérée comme une radioactivité du noyau atomique. Dans ce domaine, la production d'énergie reposant sur la transformation d'un noyau fertile en un noyau fissile est à l'étude. De plus, le couplage d'un accélérateur avec un réacteur permet d'envisager la transmutation de déchets nucléaires.

Enfin, la synthèse de noyaux exotiques en laboratoire montre l'émergence de nouveaux modes d'excitation nucléaire, comme les résonances pygmées. Ces modes sont autant de nouvelles niches énergétiques que peut offrir le noyau atomique.

Une dizaine de radioactivités

Les désintégrations radioactives correspondent à l'émission d'une particule par le noyau. L'expression de cette ressource énergétique se fait de manière spontanée. Si la stabilité nucléaire est définie comme l'absence de radioactivité, cette notion reste délicate pour un noyau dont la vie moyenne est de l'ordre (ou supérieur) à l'âge de l'Univers (10^{10} ans). Ainsi en 2003, des mesures de haute précision ont montré que le noyau de bismuth-209, jusqu'alors considéré expérimentalement comme stable, est en fait un noyau sujet à la radioactivité α , de vie moyenne 10^{19} ans [1] : la frontière entre stabilité et instabilité devient poreuse pour les très longues durée de vie.

Le passage d'un état nucléaire à un autre est caractérisé par une probabilité, dont on déduit la vie moyenne de l'état initial. La probabilité de transition se calcule à partir de l'état initial (noyau père), de l'état final (noyau fils), et de l'interaction impliquée (forte, faible ou électromagnétique). Historiquement les désintégrations radioactives furent l'un des premiers phénomènes quantiques directement observables, plusieurs décennies avant l'avènement de la physique quantique. Le caractère aléatoire ces transitions fut empiriquement constaté en établissant des lois de décroissance. Nous connaissons désormais l'origine de cet aspect aléatoire des désintégrations radioactives, qui n'est rien d'autre que les probabilités de transition prédites par la physique quantique, en utilisant de nos jours des approches microscopiques.

Quel phénomène déclenche cette restitution de la ressource énergétique du noyau ? La nature compte quatre interactions fondamentales : la gravitation, et les interactions forte, faible et électromagnétique. Chacune, sauf la gravitation qui est trop peu intense à l'échelle des masses microscopiques, engendre ses propres désintégrations radioactives. Comme le montre le tableau ci-dessous, il convient donc de classer les différentes désintégrations radioactives par l'interaction responsable, plutôt que par les trois premières lettres de l'alphabet grec. On distingue ainsi l'émission de photons (interaction électromagnétique, comme l'émission gamma qui correspond à une désexcitation du noyau), l'émission de leptons - électrons et neutrinos - (interaction faible, comme l'émission β) et l'émission de baryons - à base de nucléons - (interaction forte, comme l'émission alpha, l'émission de nucléons, de clusters, et à la limite, la fission).

Les désintégrations par interaction électromagnétique permettent la transition d'un état excité du noyau vers un état de plus basse énergie, comme l'état fondamental. On dénombre deux processus : l'émission gamma et la conversion interne où le noyau transfère son énergie de désexcitation à un électron du cortège atomique. Cet électron est expulsé de l'atome puisque l'énergie de désexcitation nucléaire est de plusieurs ordres de grandeurs supérieure à l'énergie de liaison au cortège atomique.

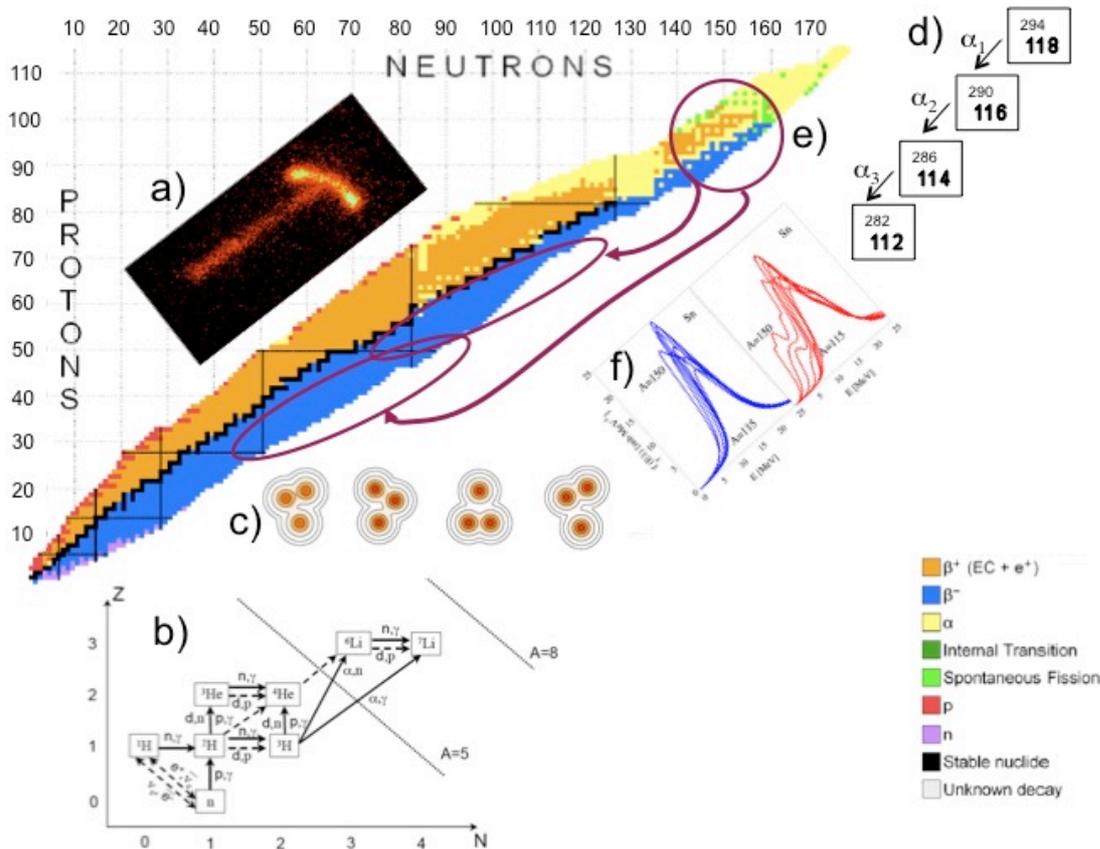
Interaction	Nom de la radioactivité (date de découverte)	Particule(s) émise(s) par le noyau
Electromagnétique	γ (1900)	photon
	Electron de conversion (1938)	e^-
Faible	β^- (1898)	e^-, ν_e
	β^+ (1933)	e^+, ν_e
	Capture électronique (1937)	ν_e
	Double β (1980)	$2e^-, 2\nu_e$
Forte (+ELM)	α (1896)	${}_2^4\text{He}$
	n, p (1970), 2p (2000)	n ou p ou 2p
	Clusters (1984)	${}^{14}\text{C}$ ou ${}^{24}\text{Ne}$ ou ${}^{32}\text{Si}$, ...
	Fission (1939)	n, noyau lourd (${}^{90}\text{Zr}$, ${}^{132}\text{Sn}$, ...)

L'interaction faible s'autorise des désintégrations interdites par les autres interactions. Ainsi, lors de la synthèse de la matière consécutive au Big-Bang, les canaux de désintégration par interaction faible aboutissent au nucléon le plus léger, le proton, qui est stable dans le cadre du modèle standard. A l'inverse, le neutron peut se désintégrer en proton car il est plus lourd. Cette stabilité du proton et évanescence du neutron n'ont plus cours au sein du noyau : la nature fermionique des protons et neutrons leur permet d'atteindre des états d'énergie variée, à l'instar des couches électroniques. Un proton peut donc se situer sur une couche nucléaire d'énergie supérieure à celle des neutrons et ainsi devenir instable pour se désintégrer en neutron au sein du noyau, par interaction faible. A l'inverse, dans ces mêmes noyaux riches en protons, les neutrons peuvent devenir stables si l'état final est énergétiquement déjà occupé par un proton (principe d'exclusion de Pauli). Comme l'interaction faible est trop faible pour séparer des nucléons liés par interaction forte, ces désintégrations sont dites isobariques, c'est-à-dire que le nombre de total de nucléons A reste inchangé entre le noyau père et le noyau fils.

On compte ainsi trois désintégrations par interaction faible dans le noyau: β^+ , β^- , et la capture électronique. La radioactivité β^- correspond à l'émission d'un électron et d'un anti-neutrino, alors que la radioactivité β^+ engendre de l'antimatière chargée (le positron) et un neutrino. La capture électronique correspond à la capture d'un électron du cortège atomique par le noyau.

La vie moyenne des noyaux pères émetteurs β varie en général de la milliseconde à quelques jours. Comme un noyau est lié par l'interaction forte, du point de vue de la structure, les noyaux instables par désintégration β sont décrits par les mêmes approches que les noyaux stables. Mais expérimentalement ces noyaux β -instables, dits exotiques, n'existent plus sur Terre sauf ceux de vie moyenne supérieure à quelques milliards d'années comme le potassium-40. Sur Terre les noyaux exotiques sont donc produits et étudiés dans des accélérateurs. La figure ci-dessous montre la carte des noyaux produits jusqu'à présent. Chaque noyau est caractérisé par un nombre de protons (Z) et de neutrons (N), il est donc représenté par une case sur ce graphique. Les noyaux stables forment une minorité (la ligne foncée au centre de la carte) : il y a environ 300 noyaux stables, sujet principal d'étude de la

physique nucléaire au XX^{ème} siècle. Depuis une trentaine d'années, plus de 3000 noyaux exotiques ont été produits dans les accélérateurs, notre connaissance étant encore très partielle sur la majorité de ces noyaux. Le nombre de noyaux liés par interaction forte est de plus estimé à 6000, ce qui montre l'étendue de l'exploration nucléaire qu'il reste à entreprendre. Ainsi 95 % des noyaux sont instables par interaction faible et leur étude permet d'appréhender la structure nucléaire dans toute sa généralité.



Carte représentant les noyaux en fonction de leur nombre de neutrons et de protons. Les noyaux stables sont en noir. a) observation d'une radioactivité à 2 protons du ^{45}Fe [4]. b) Réactions de synthèse des noyaux légers quelques minutes après le Big Bang. c) Densités de l'état de Hoyle du ^{12}C [6], dans lequel on distingue 3 particules α . d) Chaîne de décroissance α de l'élément superlourd Z=118. e) Région de la carte correspondant à la fission en deux fragments. f) Résonance géante dipolaire dans les noyaux montrant la résonance pygmée à basse énergie.

Les désintégrations par interaction forte correspondent à l'émission de nucléons sous diverses formes : émission de neutron, de proton, de deux protons, d'alphas (noyau de ^4He), de clusters (noyaux de carbone, silicium, ...), jusqu'à la fission. Parmi toutes ces désintégrations, la particule alpha joue un rôle prépondérant : ses deux neutrons et deux protons (noyau de hélium-4) résident sur une fermeture de couche nucléaire (noyau dit doublement magique). Il en résulte une masse plus faible, et cette particule peut facilement se « préformer » au sein du noyau. Pour être émise, cette particule doit traverser la barrière coulombienne par effet tunnel. La barrière Coulombienne représente le fait que la particule alpha doit s'extraire d'un potentiel attractif de courte portée, généré par l'interaction forte, pour être expulsé par la répulsion électromagnétique, une fois une distance plus grande atteinte. Historiquement c'est donc d'abord la radioactivité alpha qui a été mise en évidence, et il a fallu attendre presque un siècle pour détecter d'autres types de radioactivité par interaction forte, comme l'émission de clusters (voir le tableau des radioactivités).

Analysons brièvement les différentes radioactivités par interaction forte, par masse croissante de la particule émise en commençant par l'émission d'un nucléon. Pour s'extraire du noyau, le nucléon doit surmonter la barrière centrifuge et aussi la barrière Coulombienne s'il possède une charge électrique. Dans certains noyaux lourds, le proton est confiné dans le noyau suffisamment longtemps par ces barrières pour obtenir une vie moyenne du noyau père de l'ordre de la microseconde. C'est la radioactivité à un proton, découverte en 1970, comme celle du noyau césium-113 [2]. Dans le cas des noyaux à nombre de protons pair, la superfluidité nucléaire rend à priori impossible l'émission d'un seul proton : les protons restent appariés, de manière analogue à deux électrons en supraconductivité. Une radioactivité simultanée de deux protons (découverte en 2000) est cependant possible [3]. Un tel événement de radioactivité à deux protons par le noyau de fer-45 est montré sur la partie a) de la carte des noyaux [4]. Il a été détecté dans une chambre à fils, dont le principe fut inventé par G. Charpak.

La préformation d'une particule alpha au sein du noyau conduit à l'idée séduisante que certains états du noyau se comportent comme des molécules nucléaires, composées d'alphas ou de clusters plus gros, comme des noyaux de carbone, avec éventuellement des neutrons ou des alphas de valence qui les lient entre eux. Les noyaux dans leur état fondamental peuvent aussi émettre des clusters plus lourds que les alphas (radioactivité cluster découverte en 1984) [5], également par effet tunnel à travers la barrière Coulombienne. Les clusters émis par ces noyaux lourds, comme le thorium-230, présentent une grande variété : du carbone-14 au silicium-32. La vie moyenne typique du noyau père est de l'ordre de 10^7 ans, ce qui correspond à une probabilité d'émission très faible.

Finalement le noyau peut émettre un fragment si gros qu'il semble se couper en deux (asymétriquement en un fragment lourd et un plus léger) : c'est la fission (découverte en 1939). Ainsi les diverses désintégrations par interaction forte se présentent plutôt comme un continuum entre l'émission à un nucléon et la fission : les nombres de masse (nucléons) des fragments émis observés jusqu'à présent sont typiquement $A=1,2,4,14,24,25,28,30,32,90,132$.

Une particule doublement magique contrarie l'origine cosmique des éléments

La particule alpha joue un rôle capital dans la nucléosynthèse. Quelques minutes après le Big Bang, à des températures de l'ordre de quelques milliards de degrés, les nucléons s'assemblent pour former des noyaux, composés de neutrons et de protons, car la température n'est plus assez élevée pour que les photons du rayonnement cosmologique ne leur arrache des nucléons. La partie b) de la figure de la carte des noyaux illustre les principales réactions qui synthétisent les éléments légers (hydrogène, hélium, lithium) lors de cette nucléosynthèse primordiale.

Mais aucun noyau ayant 5 nucléons, ni 8 nucléons n'est suffisamment stable pour continuer ce processus de fusion nucléaire vers les noyaux plus lourds. En effet $A=5$ impose un nombre impair de protons ou de neutrons, ce qui est défavorisé par la superfluidité nucléaire (les nucléons préfèrent s'apparier, comme deux électrons en supraconductivité). $A=8$ est aussi défavorisé car un tel noyau gagne de l'énergie en se désintégrant en deux noyaux doublement magiques d'hélium-4. La fusion de deux noyaux d'hélium échoue donc. La nucléosynthèse primordiale du Big Bang s'arrête ainsi aux noyaux légers mentionnés ci-dessus, et il est nécessaire de trouver un autre mécanisme pour décrire la présence d'éléments plus lourds dans l'Univers et sur Terre, comme le carbone, l'oxygène ou le plomb.

Les étoiles sont en quelque sorte des machines à remonter le temps : grâce à leur températures et densités élevées, elles achèvent la synthèse de la matière que le Big Bang ne put réaliser. Au cœur des étoiles, formées après des centaines de millions d'années par la lente accrétion gravitationnelle, la densité est environ cent fois plus grande que lors de la nucléosynthèse du Big Bang. Ceci permet aux noyaux d'hydrogène (les protons) de fusionner en surmontant leur répulsion électromagnétique. Grâce à l'énergie dégagée l'étoile compense la pression gravitationnelle et brille (l'énergie solaire provient donc de la fusion thermonucléaire). Les cœurs d'étoiles contiennent ainsi de l'hélium, provenant de la nucléosynthèse du Big Bang, mais aussi de la fusion de l'hydrogène en leur sein.

La réaction clé pour synthétiser les éléments plus lourds que $A=8$ au cœur des étoiles est la fusion de trois noyaux d'hélium-4, donnant un noyau de carbone-12. Ce noyau est produit dans un état excité (appelé état de Hoyle), crucial pour la nucléosynthèse. La voie est alors ouverte à la fusion nucléaire donnant des noyaux de plus en plus lourds accompagnés de processus stellaires que nous ne décrirons pas ici. Ainsi l'oxygène-16 est synthétisé par fusion d'un noyau d'hélium-4 avec le carbone-12, etc. Les noyaux fusionnent ainsi jusqu'au fer ($A=56$). Au-delà, fusionner des noyaux lourds engendre des systèmes composés de trop de protons, et la répulsion électromagnétique défavorise leur production. Le processus n'est donc plus exo-énergétique, et l'étoile n'est plus en équilibre. D'autres processus stellaires permettent alors d'expliquer la formation de noyaux plus lourds que le fer, comme le plomb.

L'existence du carbone-12 (et de tous les noyaux plus lourds) est la meilleure preuve que les noyaux peuvent se comporter comme des molécules nucléaires. En effet l'état de Hoyle du carbone-12 est actuellement décrit comme d'un état moléculaire de particules alphas de forme triangulaire, comme montré sur la partie c) de la carte des noyaux. De récents travaux montrent cet état pourrait être interprété comme un condensat où les trois particules alphas, qui sont des bosons, seraient dans le même état et formeraient un gaz dilué [6,7]. Par extension vers les noyaux plus lourds, les physiciens nucléaires sont désormais à la recherche d'un condensat de dix alphas dans le calcium-40.

La particule alpha émise par un noyau, exprimant ainsi sa ressource énergétique, permet aussi de signer la production de noyaux superlourds par la méthode dite des corrélations génétiques. Les noyaux superlourds correspondent aux éléments situés aux confins de la table de Mendeleïev : quel est le nombre maximum de protons que peut contenir le noyau ? Si le noyau possède trop de protons, il ne peut se maintenir lié en raison de la répulsion électromagnétique, sauf si les fermetures de couches nucléaires (magie) le stabilisent [8]. Récemment les noyaux ayant $Z=116$, 117 et 118 protons ont été produits par fusion de calcium sur californium [9]. Le noyau ainsi produit est implanté dans un détecteur, qui mesure par la suite l'énergie et le temps d'émission des particules alphas de décroissance jusqu'à un noyau connu. Remonter cette chaîne de décroissance permet de signer la production d'un noyau superlourd, comme illustré sur la partie d) de la figure de la carte des noyaux. Notons que les effets stabilisateurs de couches permettent au noyau de retarder l'émission de particule alpha au point d'engendrer une « île de stabilité », prédite à l'extrémité de la carte des noyaux. Par ailleurs, des méthodes indirectes de mesure de temps de réaction nucléaires ont montré que des noyaux avec $Z=124$ protons auraient été produits [10]. La limite de la table de Mendeleïev ne semble toujours pas atteinte.

L'énergie nucléaire

La fission nucléaire est un cas extrême de radioactivité, et donc de l'expression de la ressource énergétique du noyau. Pour fissionner, un noyau doit comporter un nombre élevé de protons, qui facilitent la répulsion des deux fragments de fission. Les noyaux lourds fissionnant, il en résulte une grande variété de fragments potentiellement produits, comme illustré sur partie e) de la carte des noyaux. L'exploitation en chaîne de réactions de fission produit donc à l'échelle macroscopique un nombre important et varié de noyaux radioactifs, constituant les déchets nucléaires. Ceux-ci posent un problème quant à l'application sociale de l'énergie nucléaire (sûreté et stockage). Pour permettre un débat éclairé sur ce mode de production d'énergie, il est nécessaire de poser un cadre de base, en tant qu'universitaire possédant une connaissance du noyau, et par définition peu impliqué dans l'énergie nucléaire, réservée principalement à d'autres organismes.

Certains ordres de grandeurs doivent rester à l'esprit : le Becquerel (Bq) correspond à une désintégration radioactive par seconde. Notre corps humain renferme du potassium-40, produits dans les étoiles, de vie moyenne de l'ordre du milliard d'années. Nous sommes donc radioactifs, avec une activité de 4000 Bq environ, émettant chaque seconde plusieurs milliers d'électrons, photons et neutrinos. Cet ordre de grandeur doit être comparé à celui d'une source d'irradiation externe, pour évaluer au premier ordre son impact : quelques dizaines de Bq restent négligeables par rapport à notre radioactivité propre. Un Sievert (Sv) correspond, pour les rayonnements les plus fréquents (photons et électrons) au dépôt dans le corps humain d'un joule par kg : cela correspond, en ordre de grandeur, à l'énergie d'un claquement de main par kg, ce qui est considérable. A titre de comparaison, la radioactivité interne du corps humain nous irradie de quelques μSv par semaine. La situation normale n'est donc pas une absence de radioactivité. Rappelons aussi que des irradiations ciblées de tumeurs sont utilisées en physique médicale pour soigner des patients. Ainsi le centre de protonthérapie d'Orsay utilise un synchrocyclotron initialement développé pour des études nucléaires. La dose délivrée dans la tumeur par le faisceau de protons issu de l'accélérateur est de quelques dizaines de Sv. Cette technique s'avère efficace puisque le taux de circonscription de la tumeur, cinq ans après l'irradiation, est de 96%.

Afin de transmuter les déchets (produits de fission) des réacteurs nucléaires en noyaux moins radioactifs, le couplage d'un accélérateur au réacteur est envisagé. Dans ce scénario, les déchets fissionnent eux-mêmes en fragments moins radioactifs sous l'effet de neutrons produits par irradiation d'une cible de plomb avec un faisceau de protons de haute énergie (spallation). Ces neutrons de spallation peuvent aussi améliorer le rendement énergétique du réacteur en accroissant le taux de fission du combustible nucléaire. Dans le cas où le développement de l'énergie nucléaire continue à l'échelle mondiale, la raréfaction des ressources d'uranium conduit à considérer des scénarios alternatifs, où un noyau fertile et abondant (comme le thorium-232) capture des neutrons pour donner un noyau fissile (l'uranium-233), qui en fissionnant, dégage de l'énergie et aussi se reproduit par capture des neutrons de fission sur le noyau fertile (régénération).

Les modes d'excitation du noyau atomique

Le noyau est sujet à des excitations collectives, impliquant l'ensemble des ses neutrons et protons : pour un noyau proche de la vallée de stabilité, les résonances géantes correspondent à des vibrations du noyau [11]. Avec l'étude des noyaux exotiques, des modes d'excitation

spécifiques apparaissent. Ainsi dans un noyau riche en neutrons, une peau de neutrons enveloppe le noyau. Cette peau peut se translater autour d'un cœur composé de neutrons et de protons, constituant ainsi un mode de vibration de basse fréquence, c'est à dire une excitation de basse énergie : c'est la résonance pygmée [12], illustrée sur la partie f) de la carte des noyaux.

L'apparition du mode pygmée a un impact sur la nucléosynthèse stellaire des éléments lourds, au delà du fer. Lors d'explosions d'étoiles en fin de vie (supernovae), un intense flux de neutrons est capturé par des noyaux comme le fer. Le noyau ainsi enrichi en neutrons peut se trouver dans un état de basse énergie comme le mode pygmée, avant de se désexciter par émission de photons. Ainsi le mode pygmée favorise la capture de neutrons et donc la synthèse des éléments lourds qui nous entourent comme le plomb ou le mercure. Notons qu'il existe une diversité d'autres ressources énergétiques du noyau qui sont à l'étude: résonance pygmée de protons, état isomériques, modes de vortex, vibrations d'appariement [12].

Conclusions

Les ressources énergétiques du noyau atomique sont variées et nombreuses. La radioactivité en est la première expression, et on en dénombre aujourd'hui une dizaine, incluant la fission nucléaire. Les mécanismes radioactifs nous renvoient à nos origines cosmiques : la synthèse des noyaux par la nature est un processus complexe hérité du Big Bang et qui a aussi lieu dans les étoiles. Notre corps humain restitue en permanence les ressources énergétiques du potassium-40, d'origine stellaire.

L'utilisation macroscopique des ressources énergétiques du noyau atomique doit être débattue, et on peut mettre en regard les applications médicales et l'énergie nucléaire : comment utilisons-nous l'outil radioactivité ? La production de noyaux inconnus de la nature est révélée par la radioactivité alpha, dessinant peu à peu la limite de la table de Mendeleïev. Enfin des modes spécifiques d'excitation apparaissent dans les noyaux exotiques. La structure du noyau renferme encore bien des mystères.

- [1] P. de Marcillac et al., *Experimental detection of α -particles from the radioactive decay of natural bismuth*, Nature 422, 876, (2003).
- [2] T. Faestermann et al., *Evidence for proton radioactivity of ^{113}Cs and ^{109}I* , Phys. Lett. B 137, 23 (1984).
- [3] J. Giovinazzo et al., *Two proton radioactivity of ^{45}Fe* , Phys. Rev. Lett. 89, 102501 (2002).
- [4] K. Miernik et al., *Two-proton correlations in the decay of ^{45}Fe* , Phys. Rev. Lett. 99, 192501 (2007).
- [5] H.J. Rose, G.A. Jone, *A new kind of natural radioactivity*, Nature 307, 245 (1984).
- [6] A. Tohsaki et al., *Alpha cluster condensation in ^{12}C and ^{16}O* , Phys. Rev. Lett. 87, 192501 (2001).
- [7] M. Chernykh et al., *Structure of the Hoyle state in ^{12}C* , Phys. Rev. Lett 98, 032501 (2007).
- [8] S. Cwiok, P.-H Heenen, W. Nazarewicz, *Shape coexistence and triaxiality in the superheavy nuclei*, Nature 433, 705 (2005).
- [9] Y.T. Oganessian et al., *Synthesis of a new element with atomic number $Z=117$* , Phys. Rev. Lett. 104, 142502 (2010).
- [10] M. Morjean et al., *Fission time measurement : a new probe into superheavy element stability*, Phys. Rev. Lett. 101, 072701 (2008).
- [11] M. Harakeh, A. Van der Woude, *Giant Resonances*, Clarendon Press, Oxford (2001).
- [12] N. Paar, D. Vretenar, E. Khan, G. Colo, *Exotic modes of excitation in atomic nuclei far from stability*, Rep. Prog. Phys. 70, 691 (2007).