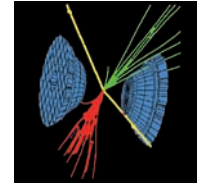


La radioactivité deux-protons



L'émission de deux protons depuis un état fondamental à longue durée de vie d'un noyau radioactif a été découverte expérimentalement en 2002. Cependant aucune étude de la nature du processus d'émission ne pouvait alors être effectuée, notamment pour trancher entre une émission séquentielle avec un état intermédiaire, une émission à trois corps sans corrélations ou avec une corrélation forte entre les deux protons. Récemment, l'observation des protons individuels est devenue possible grâce à une chambre à projection temporelle conçue au CENBG de Bordeaux. Dans cet article nous présentons l'étude de cette radioactivité deux-protons, qui permet de mieux appréhender la structure nucléaire au niveau de la limite d'existence des noyaux et de comprendre les phénomènes d'appariement des nucléons au sein de la matière nucléaire.

Après la découverte des radioactivités classiques α , β , γ et de la fission pendant la première moitié du 20^e siècle, le premier à prédire que d'autres modes de radioactivité pourraient exister fut le physicien russe V. Goldanskii au début des années 1960. D'après ses prédictions, des modes de décroissance exotiques seraient attendus pour des noyaux situés à la *drip-line* des protons – la limite pour laquelle le ou les derniers protons ne sont plus liés – avec l'émission directe d'un proton pour les noyaux avec un nombre de protons Z impair ou de deux protons pour les noyaux à Z pair.

La radioactivité un-proton (1p) a été découverte au début des années 1980 au laboratoire GSI à Darmstadt en Allemagne. Depuis, ce mode de décroissance nucléaire a apporté un grand nombre d'informations concernant la structure des noyaux très exotiques, c'est-à-dire des noyaux dont le rapport entre le nombre de protons et de neutrons est très différent de celui des noyaux stables. Certaines observables telles que la séquence des orbitales ou la composition de la fonction d'onde du noyau émetteur ne sont accessibles que par l'étude de la radioactivité un-proton.

La radioactivité deux-protons (2p), quant à elle, a été prédite pour des noyaux encore plus exotiques, plus difficiles à produire en laboratoire. Ceci est dû au fait que l'appariement nucléaire, qui participe aux forces nucléaires qui règnent au sein du noyau atomique, confère une stabilité accrue aux noyaux qui ont un nombre pair de

protons et/ou de neutrons. Ces noyaux de Z pair peuvent exister avec un déséquilibre plus important entre le nombre de protons et de neutrons et former ainsi des noyaux plus exotiques. Si aujourd'hui les techniques de production de noyaux exotiques permettent de produire chaque minute quelques noyaux émetteurs un-proton, les taux de production pour les émetteurs deux-protons se comptent à une dizaine de noyaux par jour.

Très schématiquement (voir *figure 1*), différents processus d'émission de deux protons sont possibles : une émission séquentielle via un état intermédiaire dans le noyau fils « un-proton », une désintégration à trois corps sans corrélation angulaire entre les protons émis ou l'émission d'une quasi-particule appelée *di-proton*. Le di-proton peut être considéré comme un noyau d'hélium composé de deux protons sans aucun neutron, ${}^2\text{He}$, qu'on désigne par quasi-particule puisque la répulsion coulombienne empêche normalement son existence. On s'attend à des corrélations angulaires et énergétiques entre les deux protons une fois que la quasi-particule ${}^2\text{He}$ se dissocie à l'extérieur du noyau. Ces descriptions très schématiques sont raffinées dans des modèles nucléaires conçus pour la description de la radioactivité deux-protons et décrits plus loin dans cet article.

D'un point de vue expérimental, les premiers émetteurs 2p à avoir été identifiés sont des noyaux dont l'état fondamental a une très courte durée de vie (de l'ordre de 10^{-21} s), comme ${}^6\text{Be}$ et ${}^{12}\text{O}$, pour lesquels une émission

Article proposé par :

Pauline Ascher, ascher@cenbg.in2p3.fr

Laurent Audirac, audirac@cenbg.in2p3.fr

Bertram Blank, blank@cenbg.in2p3.fr

Centre d'études nucléaires de Bordeaux Gradignan, UMR 5797, CNRS/Univ. Bordeaux 1, Gradignan

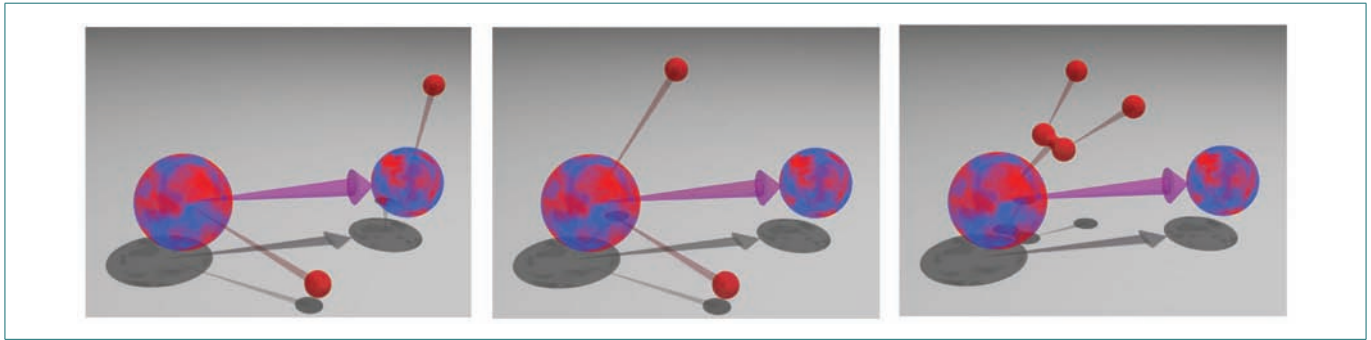


Figure 1 – Description schématique de l'émission de deux protons. *A gauche* : émission séquentielle avec un état quantique intermédiaire. Cette configuration correspond plutôt à deux radioactivités 1p et non pas à une radioactivité 2p. *Au centre* : émission dite « à trois corps » sans corrélation angulaire ou en énergie entre les protons émis. *A droite* : émission de type ${}^2\text{He}$ fortement corrélée.

séquentielle ou bien à trois corps semble entrer en jeu. Ont ensuite été observées des émissions de deux protons depuis des états excités d'un noyau, qui étaient peuplés par une décroissance β^+ à partir d'un noyau père (ce qu'on appelle un processus β^+2p retardée) ou par des réactions nucléaires. Ces décroissances ne sont pas conformes aux critères énoncés par Goldanskii pour la radioactivité deux-protons, c'est-à-dire une décroissance depuis un état fondamental à longue durée de vie ($T_{1/2} > 10^{-12}$ s) pour lequel l'émission d'un proton est énergétiquement interdite, ce qui empêche l'émission séquentielle décrite plus haut d'avoir lieu. La première décroissance nucléaire qui vérifie ces critères est la décroissance de ${}^{45}\text{Fe}$. C'est avec ce noyau que la radioactivité 2p a été découverte.

La découverte de la radioactivité deux-protons

Ce sont les modèles théoriques qui permettent de prédire les noyaux susceptibles de décroître par radioactivité deux-protons. Parmi d'autres, les noyaux ${}^{45}\text{Fe}$, ${}^{48}\text{Ni}$ et ${}^{54}\text{Zn}$ ont ainsi été prédits depuis les années 1960 comme bons candidats. Ces noyaux, particulièrement exotiques et de durée de vie très courte, sont très difficiles à produire. Les techniques des sites expérimentaux permettant de produire et d'étudier de tels noyaux, notamment le GANIL à Caen et le GSI à Darmstadt (Allemagne), ont connu de sensibles progrès ces dernières années. C'est ce qui explique pourquoi les premiers résultats expérimentaux arrivent si longtemps après les premières prédictions théoriques.

Production, identification et détection des noyaux

Les noyaux candidats à la radioactivité deux-protons peuvent être produits au GANIL par des réactions dites de fragmentation du projectile. Le dispositif est illustré sur la *figure 2*. Un faisceau de noyaux stables est accéléré par un ensemble constitué de deux cyclotrons. Le faisceau, qui atteint une énergie de 75 MeV par nucléon

(1 MeV = 10^{-13} Joule), est ensuite envoyé sur une cible de nickel où il y a réaction de fragmentation, c'est-à-dire cassure des noyaux stables, créant ainsi un faisceau secondaire qui contient une multitude de nouveaux noyaux radioactifs plus légers. Parmi la multitude de fragments produits lors de la réaction se trouvent les quelques noyaux d'intérêt. Une fois le faisceau secondaire produit, il convient donc de filtrer les noyaux. Le faisceau est ainsi envoyé dans un séparateur pour sélectionner et identifier en masse et en charge les quelques noyaux qui nous intéressent, grâce à une séquence d'éléments magnétiques et électriques.

Tous ces noyaux ainsi produits et sélectionnés sont enfin envoyés dans le dispositif de détection composé d'une série de détecteurs au silicium, dont un détecteur à pistes où ils sont arrêtés. Avant d'analyser leur mode de décroissance, il convient de les identifier individuellement sans ambiguïté. Pour cela, des mesures de temps de vol sont effectuées le long du parcours de ces noyaux, entre la cible de production et le système de détection, ce qui permet d'en déterminer la masse. En associant ces mesures aux différentes pertes d'énergie dans les détecteurs au silicium du système de détection, qui sont proportionnelles au carré de la charge du noyau, on peut identifier chaque noyau individuellement. La *figure 3* montre une matrice d'identification des noyaux.

Découverte de la radioactivité deux-protons : décroissance de ${}^{45}\text{Fe}$

De nombreuses expériences ont été menées dans le passé pour observer la radioactivité deux-protons. Le noyau ${}^{45}\text{Fe}$ a été observé pour la première fois au cours d'une expérience menée au GSI en 1996, mais aucune information quant à sa décroissance radioactive n'a pu être obtenue. De même en 1999 au GANIL, une expérience a permis de mettre en évidence l'existence du noyau ${}^{48}\text{Ni}$ qui, au-delà de son intérêt pour la radioactivité 2p, présente de nombreuses particularités, comme celle d'avoir une structure qui consiste en couches de protons et de neutrons fermées (ce qu'on appelle un noyau doublement magique), et d'être le noyau qui a le plus grand rapport protons/neutrons de la table des isotopes. Au cours de cette dernière expérience, la décroissance de

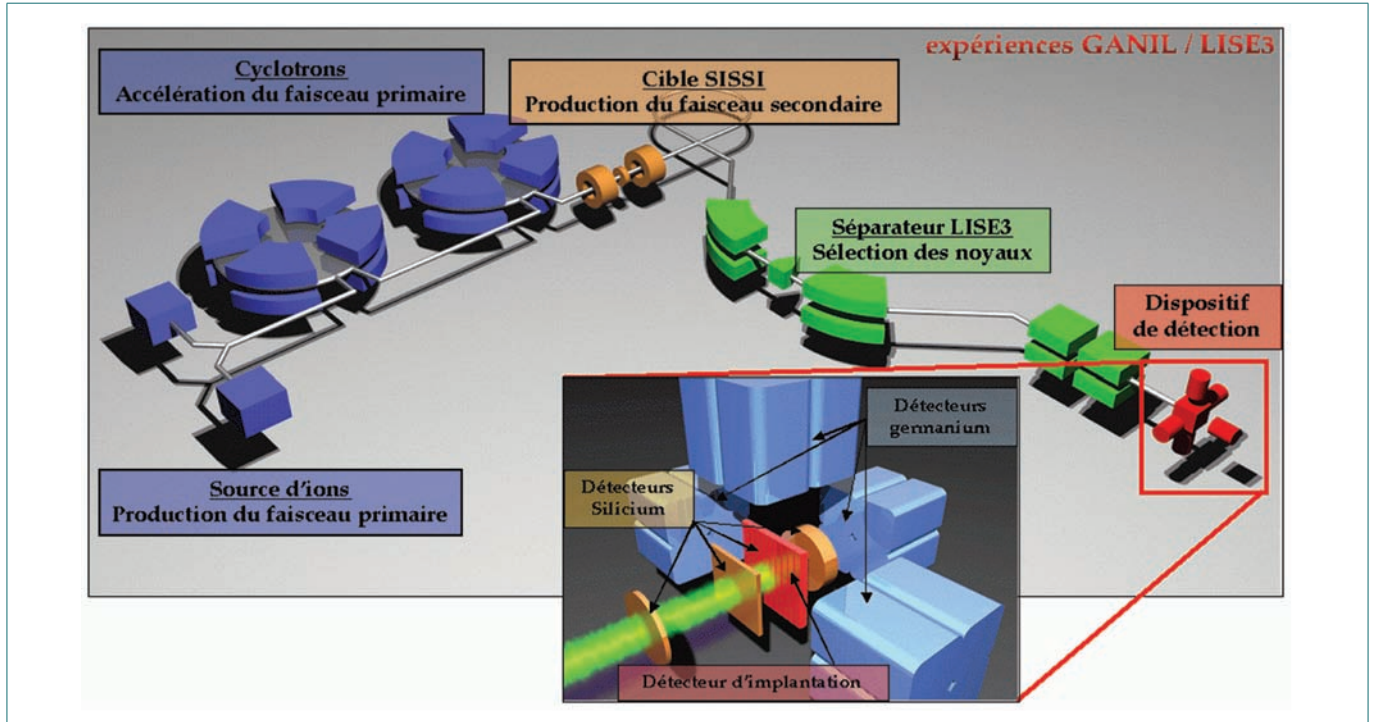


Figure 2 – Dispositif expérimental de production et de sélection des ions radioactifs de la ligne SISSI/LISE3 au GANIL. En bleu, la source d'ions et les deux cyclotrons qui accélèrent le faisceau primaire ; en orange, le dispositif SISSI de production des noyaux par réaction de fragmentation sur une cible ; en vert, le séparateur LISE3 constitué d'un dipôle magnétique, d'un dégradeur, d'un deuxième dipôle, puis d'un filtre de vitesse, et enfin, en rouge, le dispositif de détection qui est illustré sur la figure en insert. Il est constitué de plusieurs détecteurs au silicium, dont un détecteur à pistes dans lequel est implanté le noyau, ainsi que de détecteurs au germanium. Les détecteurs au silicium assurent l'identification des noyaux et la détection des particules chargées émises lors de leur désintégration. Les détecteurs au germanium permettent l'observation du rayonnement γ émis lors de la décroissance.

noyaux voisins tels que ^{42}Cr ou ^{49}Ni , également candidats à la radioactivité 2p, a pu être observée mais indiquait une décroissance β .

Une expérience menée en 2000 au GANIL et une expérience similaire au GSI en 2001 ont finalement permis l'observation de l'émission de deux protons de ^{45}Fe . Au GANIL, 22 noyaux de ^{45}Fe ont été sélectionnés et arrêtés dans le dispositif de détection décrit ci-dessus. Sur ces 22 implantations identifiées grâce à des matrices d'identification (figure 3), 17 événements de décroissance ont été observés. Un résultat similaire a été obtenu au GSI. Il n'y a que deux décroissances radioactives possibles pour ce noyau : soit il émet deux protons, soit il se désintègre par radioactivité β^+ , suivie de l'émission d'un ou plusieurs protons (radioactivité βp , β2p ...). Les événements de décroissance ont donc été analysés afin de discriminer une radioactivité 2p d'une radioactivité β^+ .

La figure 4 à gauche représente le spectre d'énergie des événements de décroissance qui suivent les implantations de ^{45}Fe . On remarque un pic prononcé à une énergie voisine de 1,1 MeV. Cette énergie correspond bien à la valeur prédite par les différents modèles théoriques et laisse donc supposer que ces événements à 1,1 MeV sont des événements de décroissance 2p. De plus, aucune particule β n'a été détectée en coïncidence avec ces événements dans les détecteurs adjacents, ce qui permet de confirmer que ce ne sont pas des protons provenant de décroissances βp ou β2p . Une dernière preuve que ces événements sont bien issus d'une émission 2p est l'observation de la

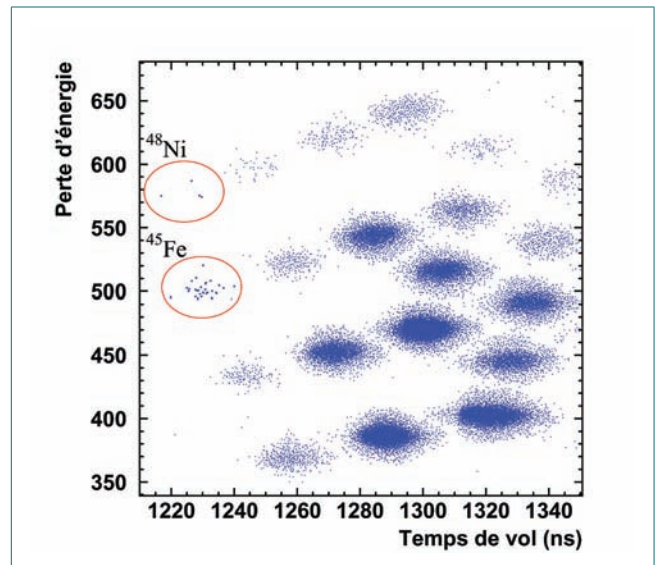


Figure 3 – Spectre bidimensionnel d'identification des noyaux produits par réaction de fragmentation. Sur les axes sont portés la perte d'énergie dans le premier détecteur au silicium et le temps de vol des noyaux observés entre la cible de production et le détecteur au silicium. L'utilisation des paramètres de perte d'énergie et de temps de vol permet une identification individuelle des noyaux sans ambiguïté. Les zones entourées correspondent aux noyaux de ^{45}Fe , pour lequel l'émission de deux protons a été observée, et de ^{48}Ni , un autre candidat à l'émission 2p.

décroissance du noyau ^{43}Cr , noyau fils par émission de deux protons de ^{45}Fe . En effet, comme le montre la figure 4 à droite, la durée de vie mesurée pour les noyaux fils n'est compatible qu'avec la durée de vie du ^{43}Cr .



Encadré

Comparaison théorie – expérience

Les données recueillies lors des premières campagnes expérimentales ont permis d'effectuer des comparaisons entre données expérimentales et prédictions théoriques. En effet, plusieurs modèles ont été mis au point pour interpréter les résultats pour la décroissance 2p. Le premier parmi eux était le modèle dit « di-proton » qui considère deux protons « collés » ensemble pour former une particule sans structure interne. Ce di-proton traverse ensuite la barrière coulombienne et centrifuge lors de l'émission. Cependant rien n'est prévu dans ce modèle quant à la formation de ce di-proton ou son devenir après émission. Néanmoins ce modèle simple donne les bons ordres de grandeur en termes de durée de vie et de probabilité d'émission. Ce modèle a été ensuite raffiné en incluant la résonance proton-proton via leur interaction dans les états finaux. Avec cette amélioration, ce modèle de la matrice R reproduit raisonnablement bien les résultats expérimentaux (voir *figure E1*, « matrice R »).

Le modèle de la matrice R inclut à un niveau relativement élevé la structure interne des noyaux participants. Cependant il ignore complètement la dynamique du processus d'émission. Cette dynamique est mieux décrite aujourd'hui dans le modèle dit « à trois corps ». Il définit

l'interaction entre les deux protons et entre ceux-ci et le cœur, c'est-à-dire par exemple le ^{43}Cr pour la radioactivité 2p de ^{45}Fe , et calcule ensuite l'évolution temporelle de ce système à trois corps. En revanche, la structure interne des noyaux n'est prise en compte qu'au niveau du moment angulaire des orbitales participant à la désintégration. De ce fait, on s'attend à ce que les résultats expérimentaux se situent entre la prédiction de ce modèle pour un moment angulaire plus petit – qui donne une durée de vie trop courte – et une prédiction pour un moment angulaire plus grand – qui rend une durée de vie trop longue. Ceci est en effet le cas (voir *figure E1*, « 3-corps »).

Le modèle *SMEC* (Shell Model Embedded in the Continuum, modèle en couches avec couplage avec le continuum) tient compte du fait que certains nucléons peuvent être très faiblement liés, ce qui change la structure de ces noyaux par rapport à des noyaux « normalement » liés. Ce modèle, qui inclut actuellement uniquement la structure nucléaire a en principe aussi la possibilité de traiter la dynamique. Cependant ce travail, loin d'être trivial, reste encore à faire. Malgré cette restriction, ce modèle arrive à bien reproduire les données expérimentales (voir *figure E1*, « SMEC »).

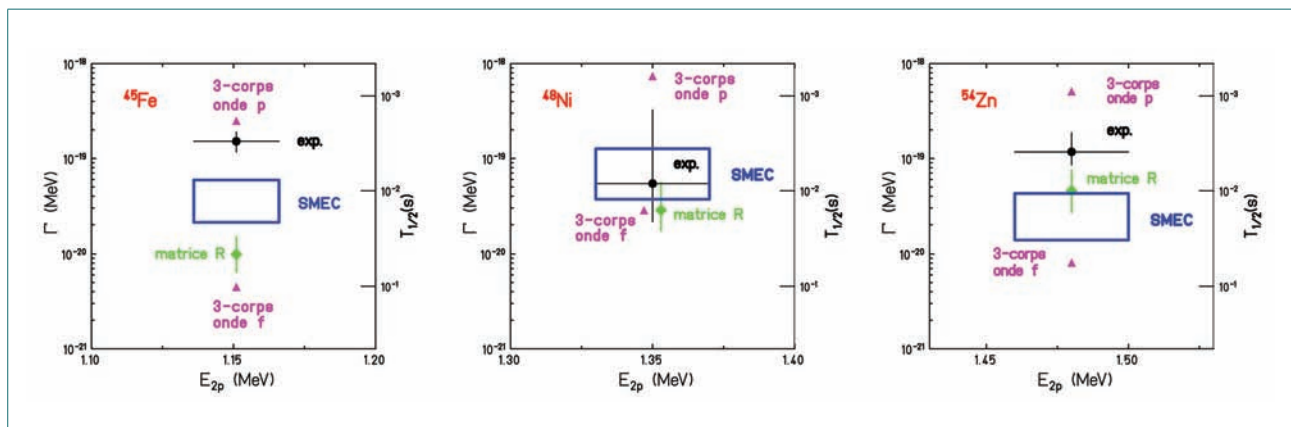


Figure E1 – Comparaison entre résultats expérimentaux et prédictions théoriques. Les trois modèles décrits dans le texte reproduisent bien les résultats disponibles à l'heure actuelle pour les trois noyaux ^{45}Fe , ^{48}Ni , ^{54}Zn . Le modèle de la matrice R, comme le modèle à trois corps, utilisent l'énergie expérimentale E_{2p} pour prédire une durée de vie Γ . Le SMEC propose différents résultats pour différentes énergies de décroissance. Comme il y a un mélange d'ondes p et f, on s'attend à ce que le résultat expérimental se situe entre les résultats des calculs avec des ondes p et f du modèle à trois corps.

Toutes ces informations expérimentales ont permis de conclure à l'observation de la radioactivité deux-protons de ^{45}Fe , et d'exclure tout autre mode de décroissance.

D'autres émetteurs 2p : le noyau ^{48}Ni et le noyau ^{54}Zn

Comme évoqué précédemment, la chasse au noyau doublement magique ^{48}Ni a abouti en 1999 au GANIL. Quatre événements ont été clairement identifiés. Cependant, aucun événement de décroissance n'a pu être clairement attribué au ^{48}Ni . C'est lors d'une expérience similaire au GANIL en 2004 qu'un événement de

décroissance ayant toutes les caractéristiques d'un événement de radioactivité 2p a pu être observé. Néanmoins, une meilleure statistique est à espérer pour des expériences futures, ce qui permettrait de vérifier que ^{48}Ni décroît principalement par émission 2p, comme le prédisent les modèles théoriques. Cela devrait être possible dans un avenir proche, grâce aux efforts constants dans le développement technique des sources d'ions et des accélérateurs.

Le noyau ^{54}Zn est également un noyau qui avait été prédit comme candidat à la radioactivité 2p. Une expérience menée en 2004 au GANIL a permis de le produire pour la première fois et d'observer sa décroissance. De même que pour le ^{45}Fe , les observables qui ont pu être

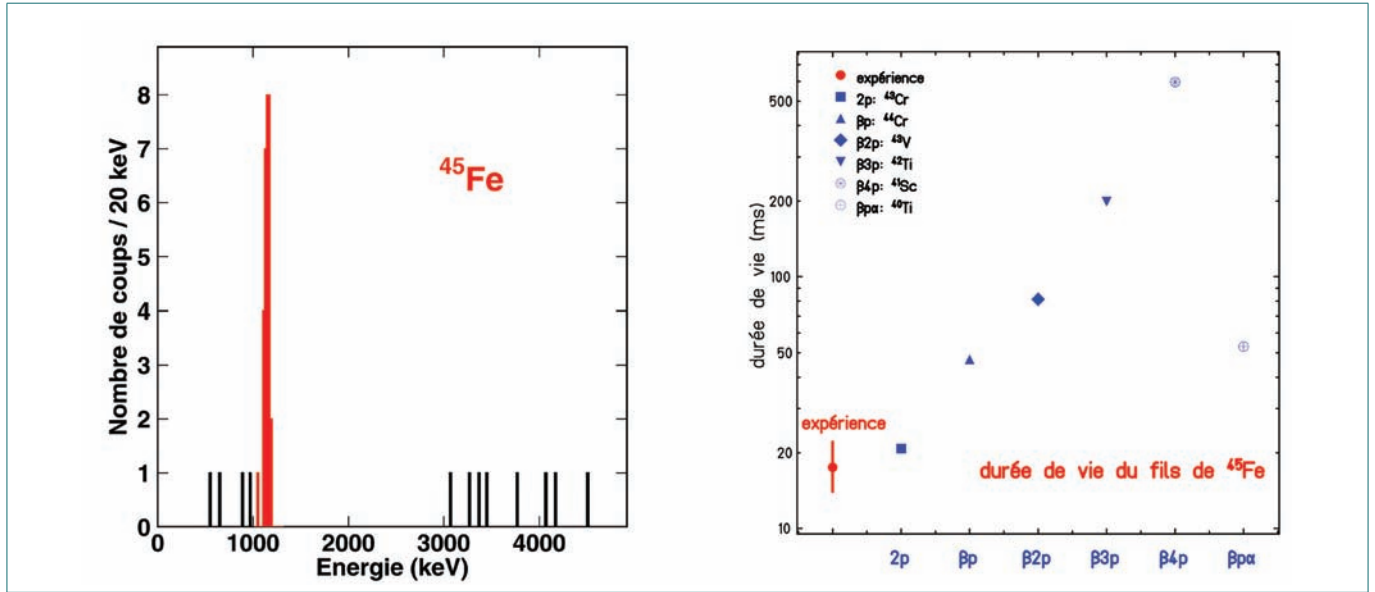


Figure 4 – *A gauche*, spectre d'énergie des événements de radioactivité après implantation d'un ^{45}Fe obtenu lors de deux expériences au GANIL. Le pic à environ 1,1 MeV correspond aux événements de la décroissance par émission 2p de ^{45}Fe . Aucun des événements de ce pic n'est accompagné d'une particule β . *A droite*, la durée de vie observée du noyau fils obtenu après la décroissance de ^{45}Fe à partir des événements du pic à 1,1 MeV est comparée avec les durées de vie des différents noyaux fils possibles. Seule la durée de vie de ^{43}Cr , le noyau fils après désintégration 2p, est en accord avec la valeur expérimentale.

déterminées comme la durée de vie du noyau de ^{54}Zn , l'énergie des deux protons ou le rapport d'embranchement 2p (c'est-à-dire la probabilité pour que le noyau se désintègre par émission 2p plutôt que par désintégration β^+) sont en très bon accord avec les modèles théoriques (voir encadré).

Observation directe de la radioactivité deux-protons

Lors des expériences décrites précédemment, le dispositif expérimental ne permettait pas de détecter individuellement chaque proton émis, ce qui apporterait des informations supplémentaires importantes pour mieux comprendre le mécanisme de décroissance qui gouverne la radioactivité 2p.

De nouvelles expériences ont donc été menées sur les noyaux ^{45}Fe et ^{54}Zn dans le but de mesurer individuellement les énergies et surtout l'angle relatif d'émission des deux protons afin de déterminer la cinématique complète, ceci afin de confronter les mesures expérimentales au modèle théorique à trois corps qui décrit la dynamique de l'émission. Des détecteurs spécifiques ont été développés, à savoir des chambres à projection temporelle (TPC, time projection chamber). L'une a été développée au CENBG (Centre d'études nucléaires de Bordeaux-Gradignan) et repose sur un détecteur de type gazeux dont le volume

actif est constitué d'un mélange d'argon et de méthane. La *figure 5* montre le principe de son fonctionnement. Lorsqu'une particule traverse le gaz, elle y dépose son énergie en ionisant les atomes du gaz. Un champ électrique appliqué au moyen d'électrodes de dérive permet de diriger les électrons d'ionisation vers la matrice de détection. Celle-ci est constituée de deux jeux orthogonaux de 768 pistes espacées de 200 μm .

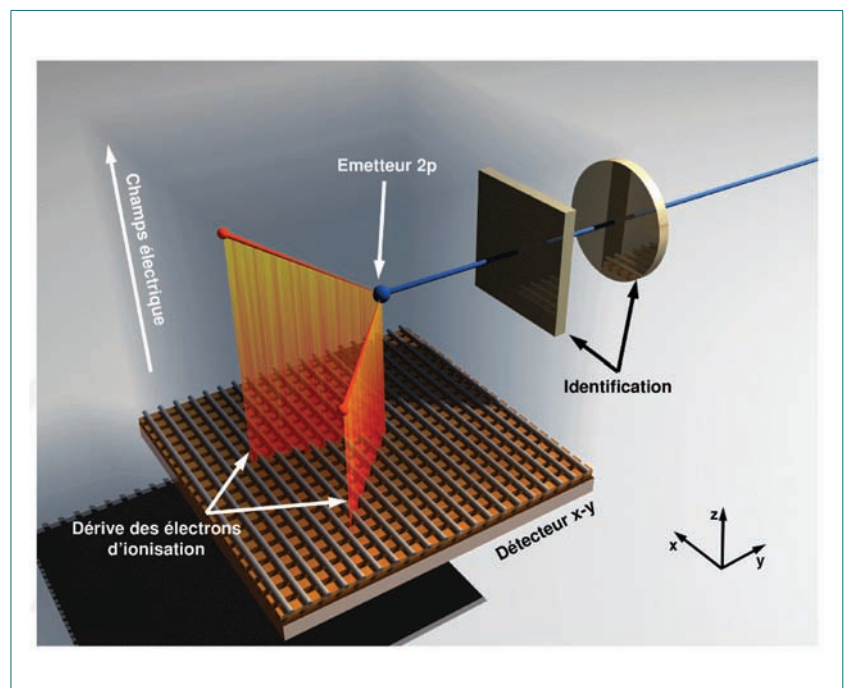


Figure 5 – Schéma de principe du fonctionnement du détecteur TPC : les ions sont arrêtés au sein de la chambre où leurs décroissances sont alors observées. Les électrons d'ionisation, produits par l'interaction des particules chargées avec les atomes constituant le gaz, dérivent au sein du champ électrique vers le plan de détection bidimensionnel.



Chaque piste donne une information en énergie par la quantité de signal reçue et une information en temps d'arrivée du signal, obtenue par la différence de temps entre le déclenchement de la piste et un déclenchement commun à toutes les pistes. Les signaux d'énergie permettent de déterminer les trajectoires projetées sur le plan X-Y de détection, en donnant une information en position. Connaissant la vitesse de dérive des électrons, les signaux de temps donnent une information sur la troisième dimension Z. La trajectoire en trois dimensions peut ainsi être reconstruite.

Un deuxième détecteur de type TPC a été développé à Varsovie et repose sur une technique de lecture optique au moyen d'une caméra digitale qui donne l'information énergétique et d'un tube photomultiplicateur qui enregistre l'information temporelle du signal créé dans la chambre.

Les études expérimentales menées sur ^{45}Fe

Afin d'observer directement la radioactivité deux-protons de ^{45}Fe , une expérience a été menée au GANIL en 2006 sur le séparateur LISE3 avec la TPC du CENBG. Les noyaux d'intérêt ont été produits par fragmentation d'un faisceau primaire de ^{58}Ni sur une cible de nickel naturel.

Au cours de cette expérience, 10 événements de décroissance 2p de ^{45}Fe ont pu être observés. A partir de l'analyse des spectres d'énergie, il est possible de reconstruire les trajectoires suivies par les deux protons, projetées sur le plan de détection bidimensionnel. La *figure 6*, à gauche, montre le résultat obtenu pour un événement.

Le noyau ^{45}Fe a également été étudié avec la TPC optique de Varsovie lors d'une expérience menée à Michigan State University (Etats-Unis). Cette expérience a permis pour la première fois de mesurer le dépôt énergétique des protons individuellement au cours de leur trajectoire ainsi que leur angle d'émission relatif. Un tel événement est montré sur la *figure 6*, à droite.

La statistique obtenue avec la TPC optique a permis des comparaisons avec les modèles théoriques tant du point de vue des corrélations énergétiques que des corrélations angulaires. Les résultats ont montré notamment un partage équitable de l'énergie disponible entre les deux protons et une distribution angulaire qui présente une structure à deux bosses (*figure 7*). Cette structure en double bosse est due au fait que les deux protons sont émis de deux orbitales bien distinctes, les orbitales nucléaires $1f_{7/2}$ et $2p_{3/2}$, donnant lieu chacune à un maximum distinct de la distribution angulaire. Les résultats des deux expériences sont en accord, malgré la faible statistique obtenue au GANIL.

L'expérience sur le noyau ^{54}Zn

Une deuxième expérience a été effectuée sur le séparateur LISE3 au GANIL en juillet 2008 pour étudier la décroissance 2p de ^{54}Zn avec la TPC du CENBG. Malgré la difficulté à produire ce noyau très exotique, une quinzaine d'ions ont pu être implantés dans la chambre et leurs décroissances 2p ont été clairement observées. L'analyse des résultats permettra de comparer les données à celles obtenues pour ^{45}Fe et aux prédictions du modèle à trois corps.

Les études futures

La radioactivité deux-protons a été découverte dans des expériences au GANIL et au GSI au début des années 2000. Cependant actuellement seulement deux émetteurs 2p, ^{45}Fe et ^{54}Zn , sont clairement identifiés, avec possiblement un troisième ^{48}Ni . Cette radioactivité est loin d'être comprise d'un point de vue théorique. De ce fait, beaucoup de chemin reste à faire avant que cette radioactivité soit un outil puissant pour les études de la structure nucléaire tel que la radioactivité un-proton l'est aujourd'hui.

Pour arriver à ces fins, de nouveaux émetteurs deux-protons sont à trouver et à étudier, les meilleurs candidats

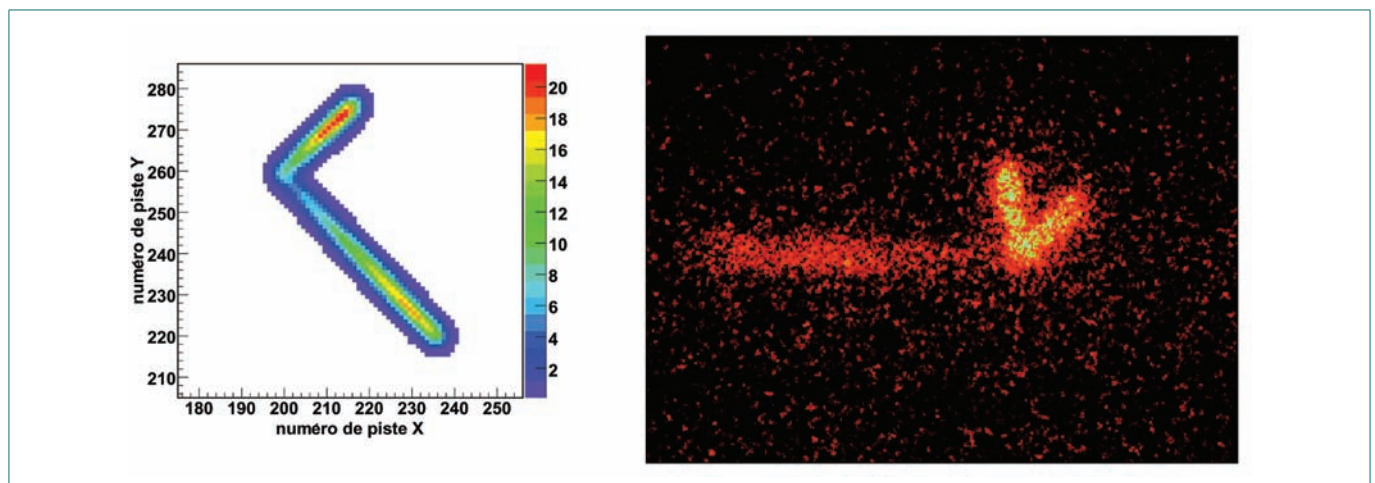


Figure 6 – *A gauche* figure la projection bidimensionnelle sur le plan de détection des trajectoires suivies par les deux protons émis lors de la désintégration d'un ion ^{45}Fe telle qu'obtenue avec la TPC du CENBG. Le code de couleur est relatif à l'énergie déposée le long de la trajectoire. *A droite* est représentée l'image obtenue avec la TPC optique. On distingue la trace horizontale laissée par l'ion ^{45}Fe et les traces brillantes relatives aux deux protons émis.

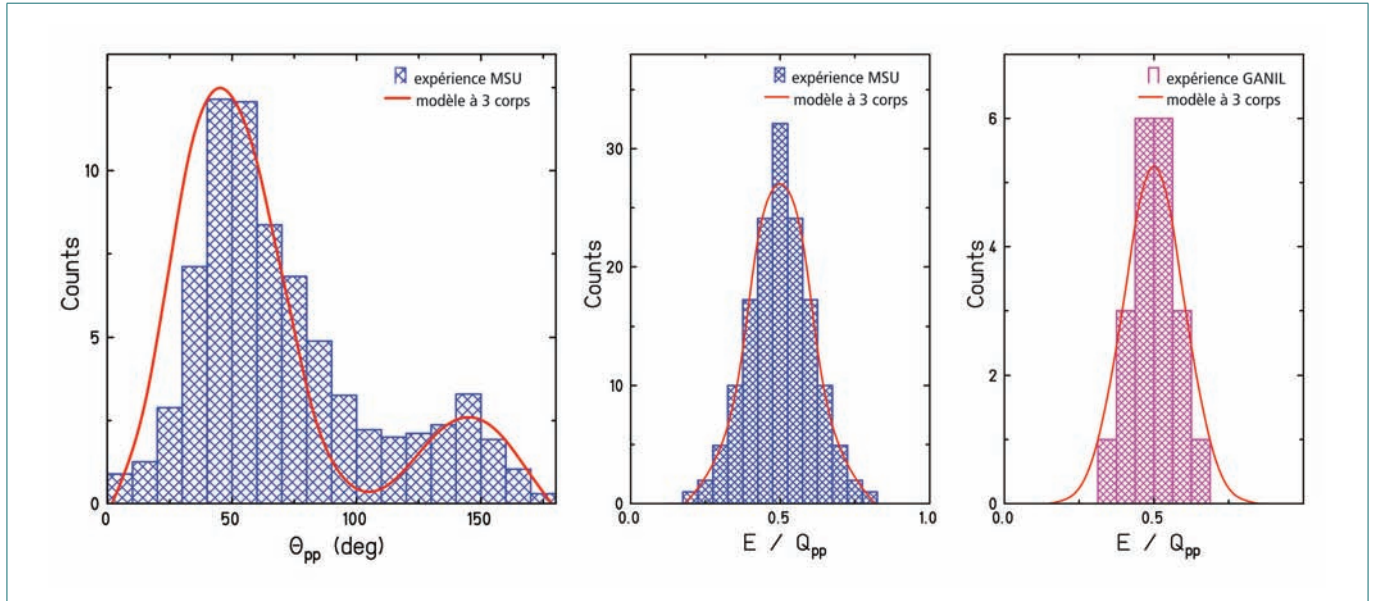


Figure 7 – Ces histogrammes montrent les résultats obtenus lors des expériences menées sur ^{45}Fe . A gauche figurent les corrélations angulaires des événements de décroissance $2p$ (Θ_{pp} est l'angle entre les deux protons) et au centre les corrélations énergétiques obtenues à MSU (Q_{pp} est l'énergie totale disponible pour la décroissance et E l'énergie des protons individuels). Les corrélations énergétiques mesurées lors de l'expérience au GANIL sont présentées à droite. La ligne rouge permet la comparaison avec le modèle théorique à trois corps. Ce dernier reproduit bien les données expérimentales.

étant ^{59}Ge , ^{63}Se , ^{67}Kr . Ces noyaux doivent être étudiés avec des détecteurs de type silicium, qui permettent de mesurer avec précision leur énergie de décroissance, les rapports d'embranchement et les durées de vie, mais aussi avec des détecteurs de type TPC qui donnent accès aux trajectoires des protons et ainsi aux observables de corrélation proton-proton. En parallèle, un effort théorique est aussi nécessaire pour améliorer la description théorique du processus d'émission de deux protons et notamment pour développer des modèles qui sont capables d'inclure la structure nucléaire aussi bien que la dynamique d'émission. Avec ces évolutions théoriques et expérimentales, la radioactivité deux-protons peut devenir un outil unique pour la physique nucléaire.

POUR EN SAVOIR PLUS

- Blank B., Ploszajczak M., *Rev. Prog. Phys.* 71, 046301 (2008).
- Giovinazzo J. *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 89, 102501 (2002).
- Pfützner M. *et al.*, *Eur. Phys. J. A*14, 279 (2002).
- Blank B. *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 94, 232501 (2005).
- Dossat C. *et al.*, *Phys. Rev. C* 72, 054315 (2005).
- Giovinazzo J. *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 99, 102501 (2007).
- Miernik K. *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 99, 192501 (2007).