

Le potentiel nucléaire moyen dépend de la répartition des nucléons. Lorsqu'on applique une force extérieure pendant un court instant, la position moyenne des nucléons est modifiée, et le potentiel nucléaire moyen se réajuste rapidement. Dès lors, il modifie aussi le mouvement des nucléons, ce qui fait varier le potentiel, et ainsi de suite. Le potentiel nucléaire moyen tend ainsi à ramener les nucléons dans leur position d'origine et les fait osciller autour de celle-ci. C'est lui qui joue le rôle de la force de rappel du ressort (voir la figure 5).

Plus précisément, dans le noyau à l'état fondamental, les protons et les neutrons s'ordonnent sur les niveaux d'énergie du potentiel nucléaire moyen, à l'instar des électrons sur les orbitales atomiques. Chaque niveau comporte un nombre restreint d'états. Suivant le principe d'exclusion de Pauli, deux nucléons ne peuvent occuper le même état. Dans un noyau à l'état fondamental, les états de plus basse énergie sont tous remplis jusqu'à un niveau nommé niveau de

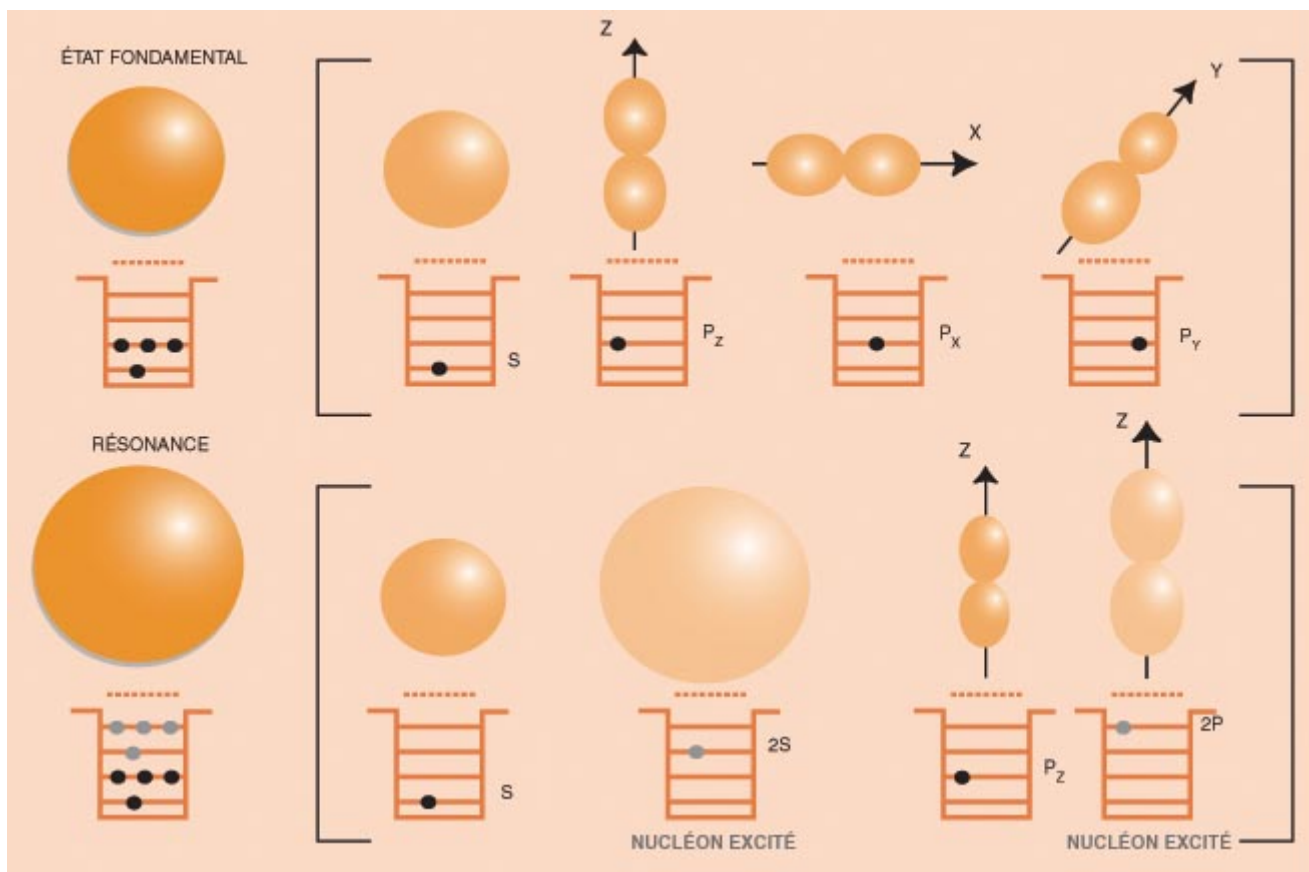
Fermi. Quand un nucléon est sur un niveau défini, il occupe un nuage qui représente une distribution de probabilité de présence, et ce nuage est immobile. Tous les nuages sont immobiles dans le noyau à l'état fondamental : il ne vibre pas.

Lorsqu'on provoque une collision ou qu'on applique un champ, on apporte de l'énergie au noyau. Elle est utilisée par un nucléon pour quitter son niveau et sauter sur un niveau inoccupé. Le nucléon qui a changé de niveau laisse derrière lui un trou dans la mer des états occupés. Ce passage est nommé «excitation particule-trou». Chaque nucléon a une probabilité de passer d'un niveau occupé à un niveau vide. Il est à la fois sur deux niveaux, d'un point de vue quantique. Cette superposition des excitations microscopiques particule-trou, engendre les mouvements des nucléons : les nuages ne sont plus immobiles. Par conséquent, le noyau vibre (voir la figure 4). Une résonance est caractérisée par le mélange d'excitations particule-trou qui la provoque.

Les empreintes d'une géante

Une fois la résonance déclenchée, le noyau ne vibre pas éternellement. Les noyaux oscillent avec des amplitudes de plus en plus faibles, et la résonance finit par s'amortir, au bout d'un temps, de l'ordre de 10^{-20} seconde. Cette décroissance provient de l'émission d'un nucléon hors du noyau. Dès lors, le noyau retourne vers son équilibre, et la vibration disparaît. Cette particule provient d'une des excitations particule-trou qui constituent la résonance. On mesure l'énergie du nucléon émis (voir l'encadré de la page 37) et on en déduit l'énergie du trou associé. En général, le nucléon éjecté peut provenir de plusieurs orbitales, avec des probabilités différentes, et donc être associé à plusieurs trous sur des orbitales déterminées. Ces trous sont caractéristiques de la nature d'une résonance pour un noyau donné et constituent, en quelque sorte, ses empreintes digitales.

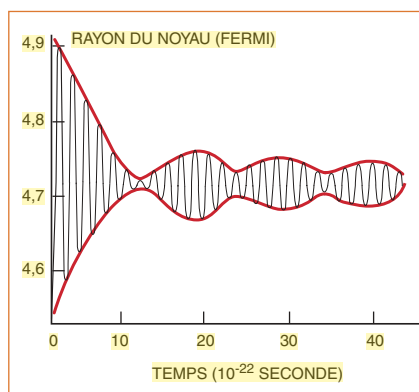
Par exemple, au GANIL (Grand accélérateur national d'ions lourds), à Caen,



4. LE NOYAU DANS SON ÉTAT FONDAMENTAL (ici l'oxygène 16) : les nucléons occupent l'orbitale sphérique s et les orbitales à deux lobes p, orientées dans les directions x, y et z. Dans l'état excité (résonance), un nucléon passe de son niveau occupé à un état vide : un trou apparaît dans les états initialement occupés. Ce nucléon pro-

vient de l'orbitale s ou des orbitales p (seule l'orbitale p dans la direction z est représentée sur la figure). L'état du noyau en résonance est la superposition de toutes les configurations possibles, c'est-à-dire de toutes les excitations particule-trou. Cette superposition engendre les mouvements de vibration macroscopique du noyau.

nous venons d'étudier la décroissance de la résonance géante de l'isotope 40 du calcium. Une cible de cet élément est bombardée d'ions de calcium. Les noyaux de la cible entrent en résonance quadrupolaire. Chaque noyau en résonance se désexcite en émettant un proton. Les noyaux fils obtenus sont donc des noyaux de potassium. On mesure les énergies des protons de décroissance et on obtient deux pics. Le pro-



5. ÉVOLUTION DU RAYON D'UN NOYAU INITIALEMENT COMPRIMÉ. Elle est calculée en résolvant l'équation de Schrödinger pour chaque nucléon plongé dans le potentiel nucléaire moyen créé par tous les autres nucléons. Le potentiel tend à ramener les nucléons dans leur position d'origine. Un mouvement d'oscillation autour de cet équilibre apparaît. La figure est caractéristique de battements entre deux oscillations superposées.

ton laisse un trou qui peut être sur deux niveaux possibles. Ces deux trous sont caractéristiques de la décroissance directe de la résonance géante quadrupolaire.

Un autre type de dissipation participe à la décroissance des résonances géantes : les collisions entre nucléons (voir la figure 6). Dans leur mouvement oscillatoire, les nucléons entrent en collision les uns avec les autres. Après un choc, les trajectoires des nucléons sont déviées. Le mouvement collectif des nucléons en vibration s'en trouve altéré. Le désordre remplace l'ordre, et l'oscillation disparaît. Le noyau chauffe, puis il se refroidit en émettant des particules. Ces émissions aléatoires sont calculées et soustraites aux mesures.

L'énigme des phonons manquants

Tout va pour le mieux dans le monde de l'infiniment petit, régi par la mécanique quantique : les nucléons se répartissent sur des niveaux d'énergie, la résonance provient d'une superposition d'états quantiques et elle s'amortit par émission d'un nucléon. Dans cette représentation, les vibrations du noyau aussi sont bien sûr quantifiées, comme le sont toutes les vibrations, en particulier celles du

champ électromagnétique. Depuis 100 ans, on sait en effet que la lumière apparaît sous forme de grains : les photons. De même, les vibrations des solides apparaissent sous forme de phonons, des «paquets d'énergie de vibration» en quelque sorte.

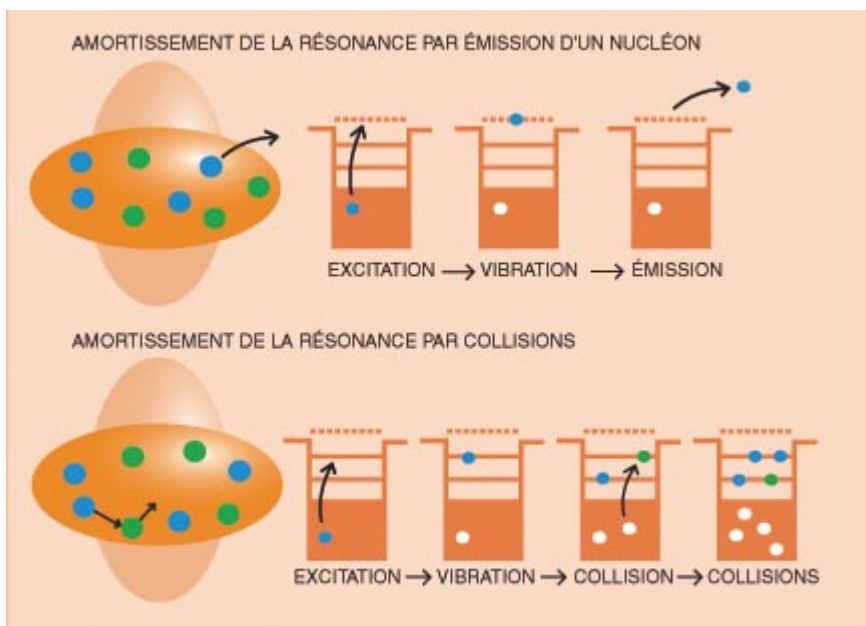
L'existence de phonons dans les noyaux se heurtait, jusqu'à ces dernières années, à deux obstacles : le premier relevait de la théorie. Les nucléons sont des fermions, particules qui ne peuvent occuper simultanément un même état, selon le principe d'exclusion de Pauli. Les phonons, comme les photons, sont des bosons. Or, les bosons sont grégaires : ils tendent à se trouver dans le même état. Un système quantique, composé de plusieurs dizaines de fermions, peut-il s'auto-organiser pour présenter des modes collectifs qui se comportent comme des bosons? Cela semble paradoxal.

La seconde difficulté était d'ordre expérimental. Toutes les résonances géantes, observées jusqu'à présent, étaient des résonances à un phonon. L'énergie du noyau en résonance valait, dans tous les cas, un phonon, soit la valeur du «paquet d'énergie de vibration» élémentaire. Les résonances géantes à deux phonons (elles ont les mêmes formes que celles à un phonon, mais leur déformation est plus élevée) n'avaient jamais été observées, ni pour la résonance monopolaire, ni pour aucune autre. Les résonances à «multiphonons», n'ont jamais été détectées non plus. Les physiciens s'étaient-ils trompés? Tant que le deuxième phonon n'est pas observé, ils ne peuvent être certains que les noyaux oscillent vraiment. Ils pourraient tourner, ou avoir n'importe quel mouvement autre qu'une vibration.

Les noyaux vibrent bel et bien, et la preuve a été établie au début des années 1990, grâce à trois expériences, qui ont mis sans ambiguïté en évidence les états à deux phonons.

La preuve par trois

Au Gsi (*Gesellschaft für Schwerionenforschung*), le laboratoire allemand concurrent du GANIL, l'équipe de J. Ritman a entamé, en 1993, une série d'expériences où des projectiles très lourds sont lancés à une vitesse, proche de celle de la lumière. Ces noyaux, fortement chargés, créent sur leur passage des perturbations électromagnétiques d'autant plus fortes que leur vitesse est grande.



6. LA RÉSONANCE S'ATTÉNUÉ, soit en éjectant un nucléon, soit par collision des nucléons. Prenons l'exemple de la décroissance de la résonance quadrupolaire géante. Elle se produit quand un proton est éjecté du noyau. Il emporte l'énergie de la résonance et laisse derrière lui un trou. Le noyau perd alors son excitation. La résonance peut aussi s'amortir par collisions entre les nucléons. La collision dévie les nucléons et modifie leur énergie. Elle provoque aussi l'éjection d'un nucléon de son orbitale stable. Il laisse un trou derrière lui. Peu à peu, des états très complexes apparaissent et le mouvement devient désordonné. Cet amortissement chauffe le noyau, qui émet du rayonnement.