

vibration est élevée. Ainsi, les fréquences des résonances géantes atteignent 10^{22} hertz, soit 64 octaves au-dessus du «la» du diapason. L'énergie minimale pour exciter une résonance est égale à cette fréquence multipliée par la constante de Planck, soit entre 10 et 20 millions d'électronvolts.

Mettre un noyau en vibration

Trois méthodes existent pour faire vibrer un noyau atomique (voir la figure 3). La première consiste à le plonger dans un champ électromagnétique externe oscillant. C'est ainsi qu'est excitée la résonance géante dipolaire. Dès que la fréquence du champ est égale à la pulsation de la résonance, les photons sont absorbés par le noyau, ce qui met les protons en mouvement et déclenche la vibration du noyau.

Dans la deuxième méthode, dite «de l'échange de charge», un faisceau incident, constitué de particules chargées, bombarde les noyaux que l'on étudie. Une particule du faisceau incident pénètre dans le noyau et y dépose une

charge positive, par exemple, qui transforme un des neutrons en un proton. Cette opération crée un déséquilibre des charges dans le noyau. Les protons et les neutrons se mettent alors en mouvement. Les résonances induites sont analogues à celles excitées par des champs électromagnétiques.

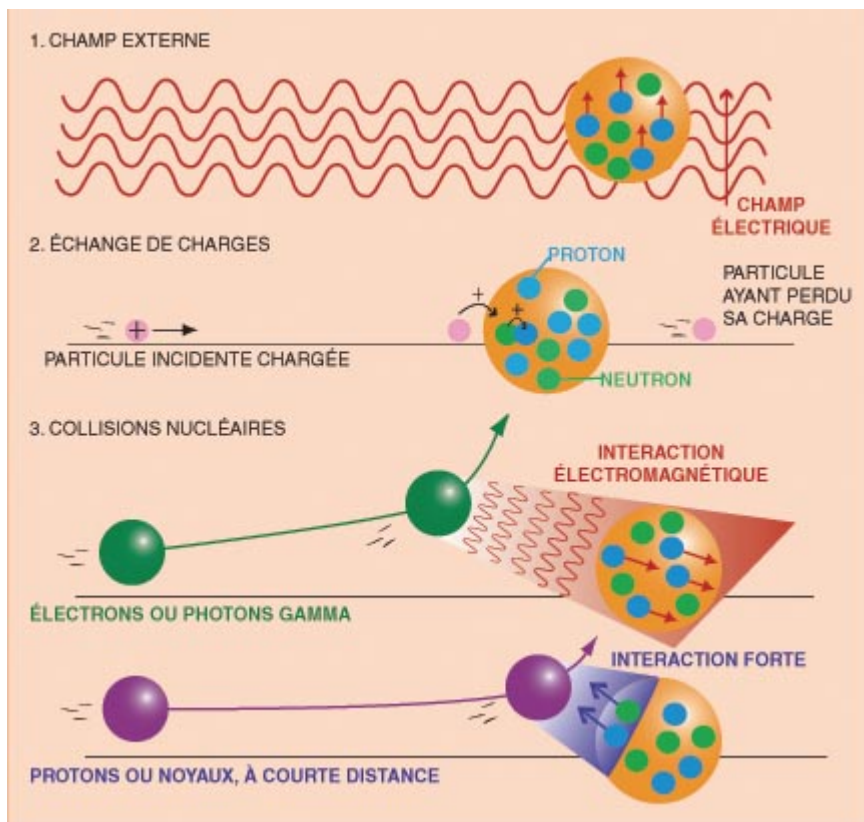
La dernière méthode, la plus employée, consiste à bombarder le noyau avec des projectiles, tels des électrons, des nucléons ou des noyaux, pour provoquer une collision. Cela revient à lancer des billes pour déclencher le mouvement d'un ressort ou la vibration d'une cloche : il faut viser juste. Si la collision est trop violente, le noyau se brise. Il ne peut plus vibrer. Plus question qu'il vibre. Le projectile doit seulement effleurer le noyau. Cela suffit à le faire vibrer, car les projectiles n'ont pas d'action mécanique, mais agissent par l'intermédiaire d'un champ électromagnétique ou de l'interaction forte. L'interaction électromagnétique agit à longue distance. L'interaction forte n'est possible qu'avec les protons, les particules alpha (noyaux d'hélium)

et autres noyaux. À courte distance, elle domine l'interaction coulombienne et agit indépendamment de la charge : elle s'applique de façon symétrique sur les protons et les neutrons, qui lui apparaissent comme des jumeaux quasi identiques. Dans ce cas, la «collision» nucléaire excite principalement les résonances où protons et neutrons vibrent ensemble, comme les résonances monopolaires et quadrupolaires. Ainsi, suivant sa vitesse et sa nature, le projectile provoque différentes résonances qui se superposent ; un peu comme lorsqu'on tape sur une cymbale, qui produit alors plusieurs sons. Après la collision, le projectile est dévié et il a perdu une partie de son énergie, qui a été transférée au noyau. En pratique, on mesure cette énergie pour déterminer l'énergie de la résonance (voir l'encadré de la page 37).

Si les électrons et les protons sont des projectiles considérés comme des billes, on bombarde aussi les noyaux avec des boules. Ces boules, ce sont des ions lourds dont l'utilisation a engendré des progrès notables à partir des années 1980. Les ions lourds sont des atomes lourds ionisés. Leur noyau est composé d'un grand nombre de protons et de neutrons. Par conséquent, les forces électromagnétiques et nucléaires qu'ils font subir au noyau cible sont plus élevées que celles qu'exerce un simple proton. La probabilité d'excitation des résonances géantes est donc beaucoup plus importante, ce qui facilite leur étude.

Système complexe auto-organisé

Que se passe-t-il lors d'une résonance géante? Dans le noyau à l'équilibre, les nucléons n'occupent pas, d'après le principe d'incertitude d'Heisenberg, une position précise. On calcule, d'après l'ordre de grandeur de l'interaction forte entre les nucléons (plusieurs millions d'électronvolts) et de leur masse, qu'un nucléon a une vitesse égale au tiers de celle de la lumière et que chaque proton et neutron occupe le noyau entier. Il interagit donc avec tous les autres nucléons et subit une force moyenne exercée par l'ensemble des particules. Ces forces moyennes sont à l'origine d'un champ, nommé potentiel nucléaire moyen.



3. COMMENT METTRE UN NOYAU EN VIBRATION? Le plonger dans un champ électromagnétique (1), lui donner ou lui retirer une charge (2), ou provoquer une collision nucléaire (3). Dans ce cas, les ions lourds utilisés comme projectiles sont les plus efficaces. Ils agissent à la fois par interaction électromagnétique et par l'interaction forte, selon leur nature et la distance avec le noyau cible.

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

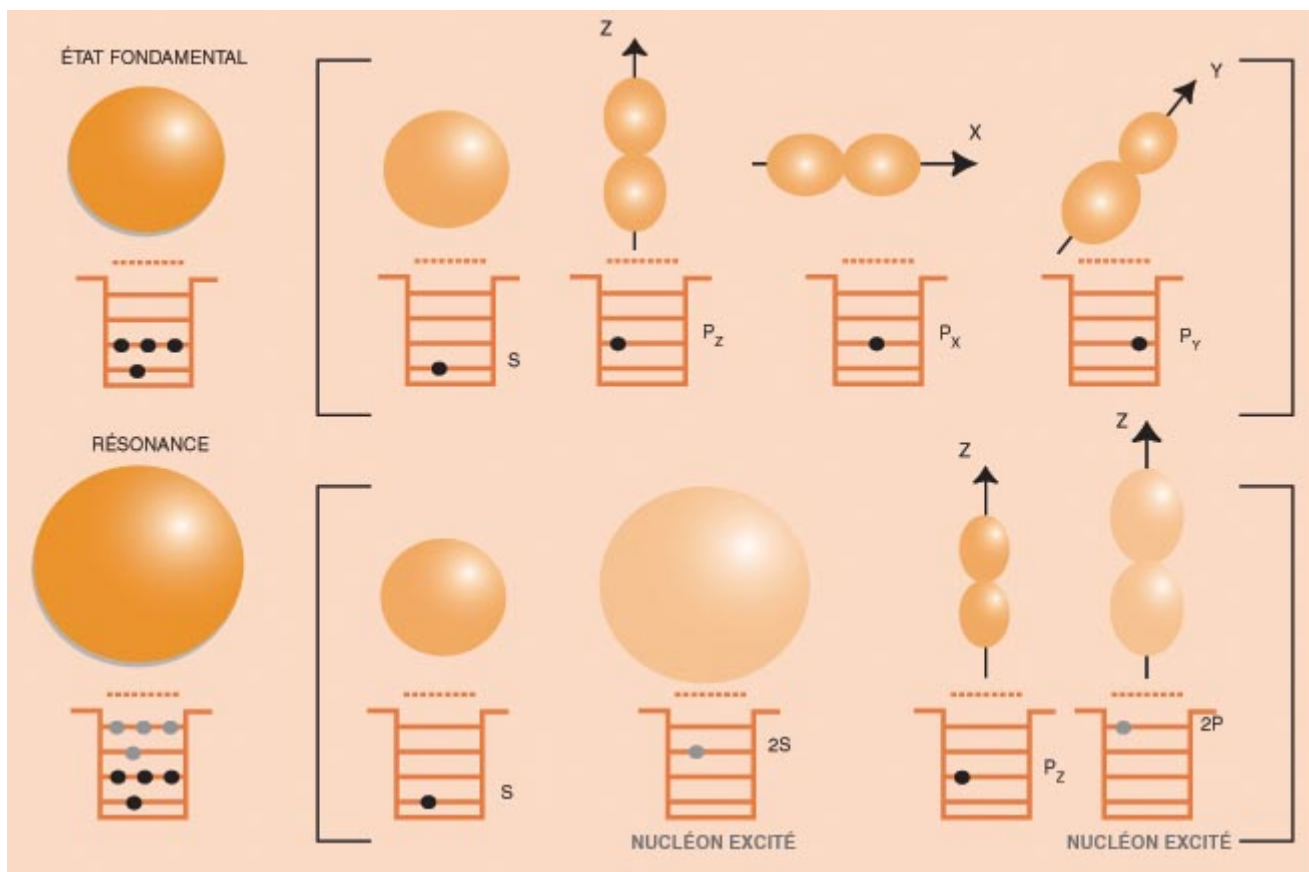
Fermi. Quand un nucléon est sur un niveau défini, il occupe un nuage qui représente une distribution de probabilité de présence, et ce nuage est immobile. Tous les nuages sont immobiles dans le noyau à l'état fondamental : il ne vibre pas.

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.