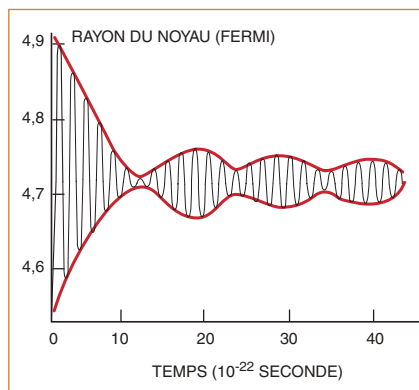
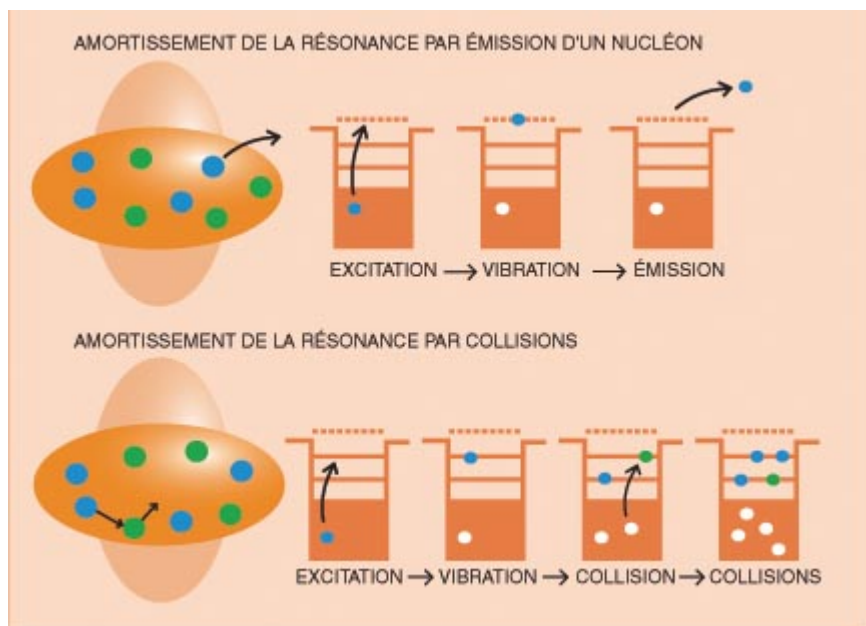


nous venons d'étudier la décroissance de la résonance géante de l'isotope 40 du calcium. Une cible de cet élément est bombardée d'ions de calcium. Les noyaux de la cible entrent en résonance quadrupolaire. Chaque noyau en résonance se désexcite en émettant un proton. Les noyaux fils obtenus sont donc 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.



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.

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.

Détecter les particules

La première étape dans les expériences de résonance consiste à **accélérer les projectiles par des champs électriques**. Ces projectiles, des ions positifs, sont dirigés par des champs magnétiques. L'accélérateur du GANIL (Grand Accélérateur National d'Ions Lourds), à Caen, est constitué de plusieurs cyclotrons qui confèrent aux projectiles une vitesse allant jusqu'à la moitié de celle de la lumière. Puis les projectiles sont dirigés vers la cible.

Lors d'une collision peu violente, les noyaux vibrent. Pour mettre en évidence les résonances géantes, on mesure la perte d'énergie du projectile après collision avec une précision supérieure à 1/10 000. Une telle précision nécessite l'utilisation d'un spectromètre magnétique à perte d'énergie ou Speg (voir la figure ci-contre). Un aimant d'analyse disperse le faisceau incident avant la cible. Les ions les plus rapides sont moins déviés et se retrouvent à l'extérieur du virage imposé par l'aimant. Après la cible, un deuxième aimant, dit de focalisation, dévie à nouveau les particules diffusées. Les particules les plus énergétiques étant à l'extérieur de la trajectoire, elles traversent une partie plus longue de ce deuxième aimant et sont donc plus déviées. À l'inverse, les particules initialement moins énergétiques traversent une partie plus courte de l'aimant de focalisation et sont moins déviées. Toutes les particules, quelle que soit leur énergie initiale, se croisent dans un plan focal. L'équivalent optique de ces deux aimants est un objectif photographique. Tous deux sont dit achromatiques, car le plan de focalisation ne dépend pas de l'énergie de la lumière, c'est-à-dire de sa longueur d'onde.

En absence de cible, le plan focal arrête toutes les particules du faisceau incident en un seul point. Une fois la cible en place, les noyaux projectiles perdent de l'énergie dans les collisions avec les noyaux cibles. Alors, ils sont plus déviés par le deuxième aimant et sont focalisés dans le plan focal à une position différente, qui nous renseigne sur la perte d'énergie cinétique du noyau projectile, donc sur l'énergie communiquée à la cible. L'énergie, la largeur et le type de résonances géantes excitées sont déterminés ainsi. Pour les caractériser avec plus de précision, nous étudions leur décroissance à l'aide de multidétecteurs.

Les résonances géantes s'atténuent par émission de protons ou de neutrons. Or des nucléons sont émis en abondance lors de multiples réactions nucléaires qui accompagnent une résonance géante. Il faut donc détecter à la fois le projectile responsable de la résonance et les nucléons de décroissance de cette résonance.

Pour détecter les nucléons de décroissance, les chercheurs travaillant au GANIL ont construit Pacha et Indra, destinés à la détection des protons et autres particules chargées, Eden et Demon, conçus pour la détection de neutrons.

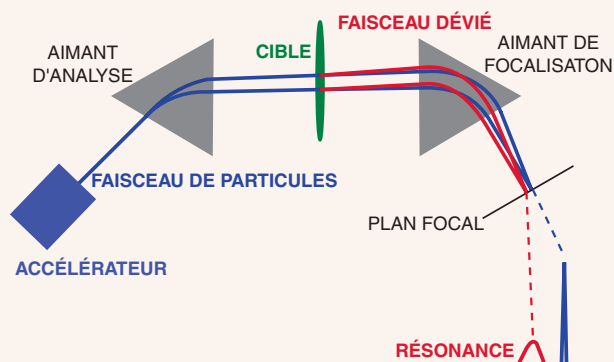
Dans le détecteur *Pacha*, 50 cristaux scintillants d'iodure de césium sont couplés à des photomultiplicateurs qui transforment le signal lumineux en impulsion électrique. La particule détectée est arrêtée dans le cristal et transfère son énergie en excitant les atomes environnants. Ces atomes excités émettent à leur tour de la lumière, convertie en électrons par la photocathode du photomultiplicateur. La spécificité de l'iodure de césium est d'émettre deux composantes de lumière dont le rapport dépend de la nature de la particule détectée. On distingue ainsi les protons des autres particules. Le multidétecteur *Indra* est fondé sur le même principe et il possède en outre des détecteurs au silicium ou à gaz. Son avantage? Couvrir toutes les directions possibles. Conçu pour étudier la fragmentation des noyaux, nous l'utilisons aussi pour rechercher le troisième phonon.

Les neutrons n'interagissent avec un détecteur que par la force nucléaire. Leur détection est plus difficile, car cette force est à très courte portée et les neutrons ne perdent pas toute leur énergie lors de l'interaction. On mesure alors le temps qu'ils ont mis pour parcourir la distance entre le noyau cible et le détecteur. On déduit de cette mesure de temps de vol leur vitesse et leur énergie cinétique.

Ainsi, le projectile initial, et les nucléons de décroissance, protons et neutrons, sont caractérisés. On identifie alors sans ambiguïté la résonance du noyau.



La cible contient une très fine feuille d'atomes de calcium. Une fois en place, elle sera bombardée par les particules du faisceau.



Le faisceau de particules issu de l'accélérateur GANIL (sur le schéma, à gauche, en bleu) traverse l'aimant d'analyse où chaque particule est déviée en fonction de son énergie. En l'absence de cible, le second aimant (de focalisation) focalise toutes les particules en un point du plan focal. En présence d'une cible, les particules incidentes qui ont déclenché une résonance perdent de l'énergie et sont déviées. Après l'aimant de focalisation, elles convergent en un point différent du point de focalisation des autres particules.