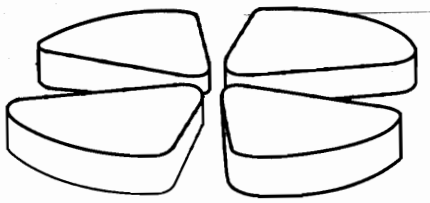
FERMILAB
JAN 3 2001
LIBRARY

35

GANIL

GANIL-P-00-48



Dans l'atome, des mondes quantiques

Philippe CHOMAZ
GANIL, BP 55027, 14076 Caen Cedex 5, France

FERMILAB
JAN 2 2001
LIBRARY

Fermilab Library
0 1160 0089235 0

Colloque "Physique et Interrogations Fondamentales"
Bibliothèque Nationale de France, Novembre 2000, Paris.

NAME

GANIL P 00 48

Dans l'atome, des mondes quantiques

Philippe CHOMAZ

Les quanta sont nés il y a cent ans avec l'introduction de sa célèbre constante h par Planck. Rutherford, Bohr et Schrödinger construiront la nouvelle mécanique quantique au début du XXe siècle pour décrire l'atome. Depuis cette époque c'est un véritable kaléidoscope de structures quantiques qui a été découvert au cœur de l'atome. Noyaux et particules sont un monde de quanta que la physique moderne cherche à appréhender. Après une revue des étapes importantes de la construction de notre connaissance du monde microscopique tant sur le plan théorique qu'expérimental l'exposé mettra en lumière les recherches actuelles. Pour la structure nucléaire, elles remettent en question certaines des connaissances accumulées après un siècle de physique nucléaire.

0) Introduction

Le XXe siècle a été caractérisé par l'exploration de l'infiniment petit.

Ce que nous y avons découvert, c'est un ensemble de structures quantiques d'une étonnante diversité. L'exploration du monde subatomique a commencé avec la radioactivité. Puis ce fut la grande construction du modèle atomique avec son cortège d'électrons en orbite autour d'un noyau central. Ce noyau s'est avéré contenir proton et neutron. Cette étonnante gémellité de particules de charge différente nous a dévoilé l'existence de symétries internes nouvelles ; elle conduira à la construction de notre théorie moderne de la matière et de ses interactions avec les quarks et leptons, possédant isospin faible, saveur et couleur. Cet assemblage de protons et de neutrons qu'est le noyau a d'abord été vu comme un objet désordonné : une goutte liquide. Il fondait ainsi la théorie moderne du chaos quantique. C'est juste après guerre, que l'on comprit que le noyau possédait un ordre quantique semblable à celui de l'atome avec des particules rangées sur des couches successives. Ces couches peuvent aussi conduire à une déformation spontanée des noyaux qui deviennent alors de véritables toupies quantiques.

Ce que la fin du XXe siècle nous a appris, c'est que le noyau est un objet quantique encore plus complexe qu'on ne l'imaginait. Il peut présenter de multiples bosses et déformations. Dans certains cas, les couches peuvent se fondre littéralement. Dans d'autres cas, les noyaux peuvent présenter peau et

même halo de neutrons. Ils peuvent même ressembler à des molécules, analogues à l'eau ou à des polymères.

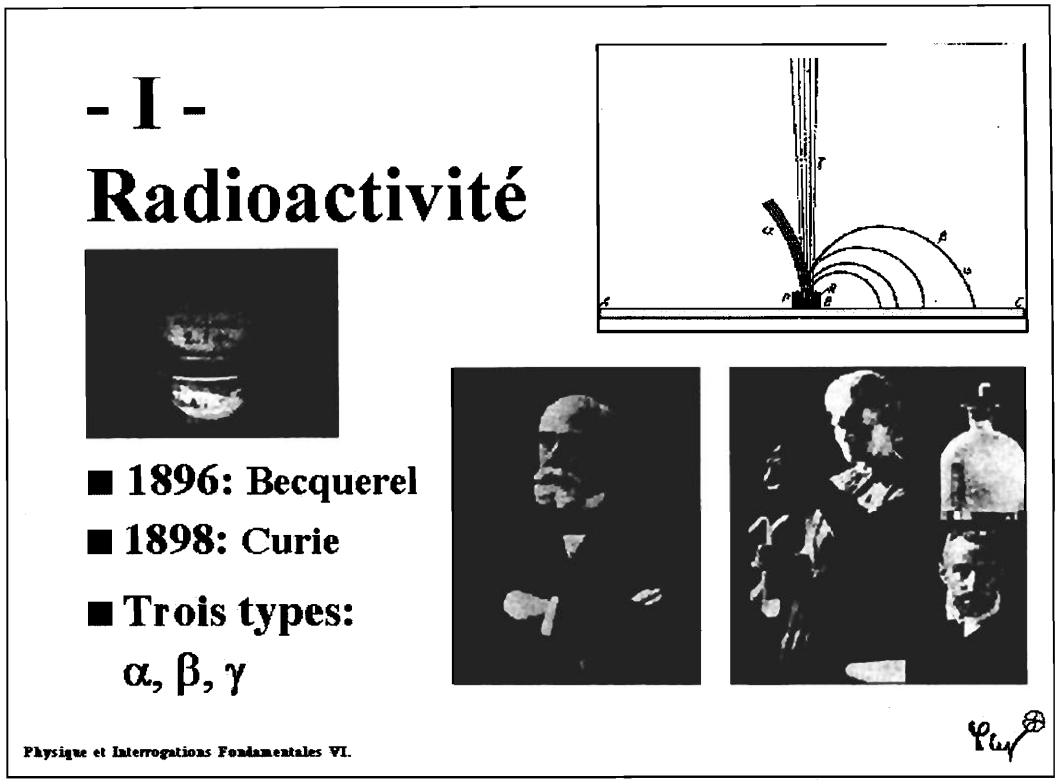


Figure 1 : *Les découvreurs de la radioactivité, avec la photographie d'un peu de radium éclairant naturellement une feuille de papier et un schéma de la thèse de Marie Curie montrant les diverses radioactivités dans un champ magnétique. La radioactivité α correspond à des charges positives (noyaux d'Hélium). Les particules α sont peu déviées dans le champ magnétique vers la gauche sur le diagramme. La radioactivité β correspond à des charges négatives. Ce sont des électrons. Ils sont fortement déviés dans la direction opposée aux particules α. La dernière appelée γ n'est pas affectée par le champ magnétique. Les particules concernées ne sont pas chargées. Ce n'est rien d'autre que des photons très énergétiques.*

1) La radioactivité et ses mystères.

Toute l'histoire commence, il y a un peu plus de cent ans avec la découverte de la radioactivité. En fait, des trois radioactivités α, β et γ comme le montre la figure 1 extraite de la thèse de Marie Curie. La radioactivité α est en fait une émission de noyau d'hélium. La β d'électron. Dans ces deux cas, l'atome est

transmuté en un élément différent. La radioactivité γ est l'émission de photons très énergétiques associés aux deux premières.

C'est Rutherford et Soddy qui comprendront que la radioactivité réalise le vieux rêve des alchimistes, la transmutation. Bethe l'utilisera pour comprendre le fonctionnement des étoiles et la genèse des éléments. L'homme venait de comprendre comment fonctionne le soleil et les étoiles.

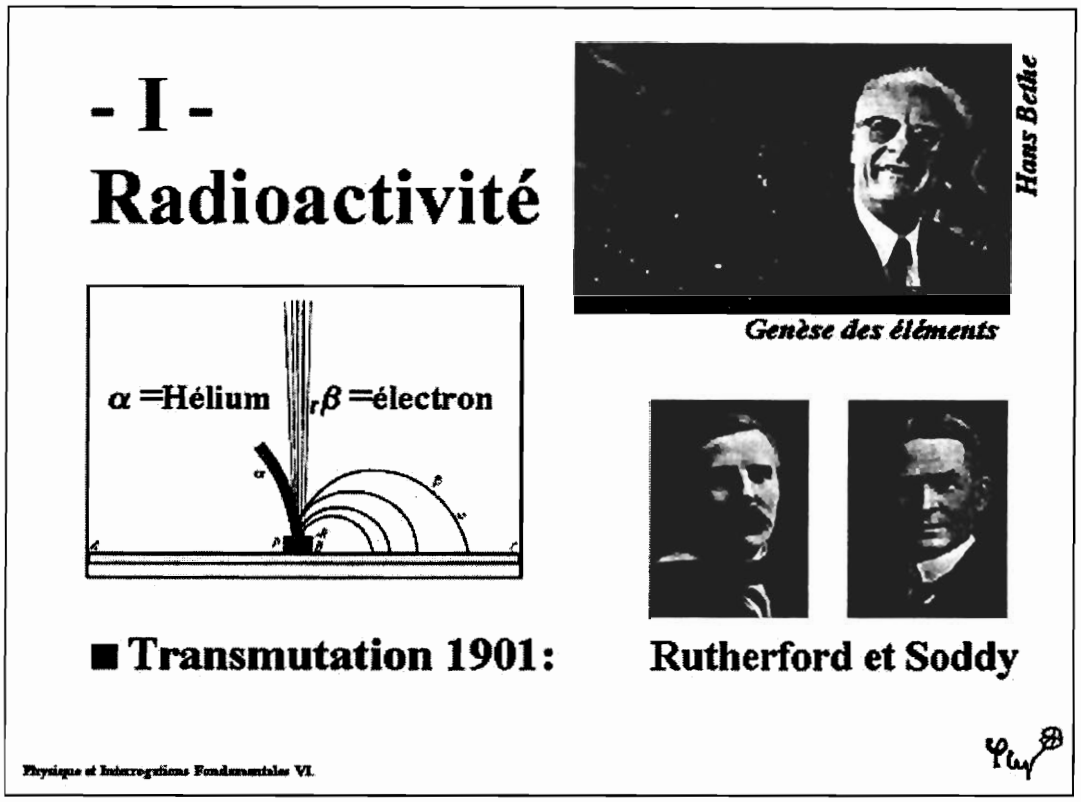


Figure 2 : *Les radioactivités α et β induisent une transmutation de l'élément comme le démontreront Rutherford et Soddy. Bethe comprendra que c'est ce genre de transmutation de la matière qui explique le fonctionnement des étoiles.*

Ce qui rapidement apparut comme mystérieux et fascinant c'est l'aspect probabiliste de la radioactivité. Rutherford observa la décroissance exponentielle du nombre d'atome radioactif. La période, le temps pour que la moitié des éléments d'une espèce radioactive aient disparu est une caractéristique immuable de ce corps. C'est l'aspect probabiliste de la mécanique quantique qui est ainsi patent. L'interprétation du phénomène fut l'un des premiers succès de cette nouvelle mécanique. Si l'on imagine une particule α dans un noyau, la barrière de potentiel entre l'attraction des autres particules du noyau et la répulsion Coulombienne l'empêcherait à tout jamais de sortir. Ce n'est pas le cas en mécanique quantique où la particule est décrite comme une onde. Une onde

évanescente peut se faufiler sous le potentiel et ainsi réussir à sortir. C'est l'effet tunnel. En fait, pendant un temps court, il est possible de violer la conservation classique de l'énergie en respectant un principe d'incertitude d'Heisenberg $\Delta E \Delta T \geq \hbar$. Entre l'effet tunnel et l'aspect probabiliste de la radioactivité il y a le grand paradoxe de la mécanique quantique car, dans un cas, le noyau peut être à la fois le noyau-père et le noyau-fils alors que dans l'autre, il faut qu'il soit, soit le noyau-père, soit le noyau fils. Cela conduisit au célèbre paradoxe du chat de Schrödinger. On imagine qu'un élément radioactif peut déclencher un appareillage. Celui-ci casse alors une fiole de poison qui tue un le chat qui rôdait par là. Dans le premier cas, si la particule est à la fois dedans et dehors, le chat qui se trouverait dans les parages serait une superposition d'un chat vivant et d'un chat mort. C'est là la prédiction quantique prise de façon naïve. Dans l'autre cas, ce serait, soit un chat mort, soit un chat vivant Ce dernier cas correspond plutôt notre perception habituelle du monde.

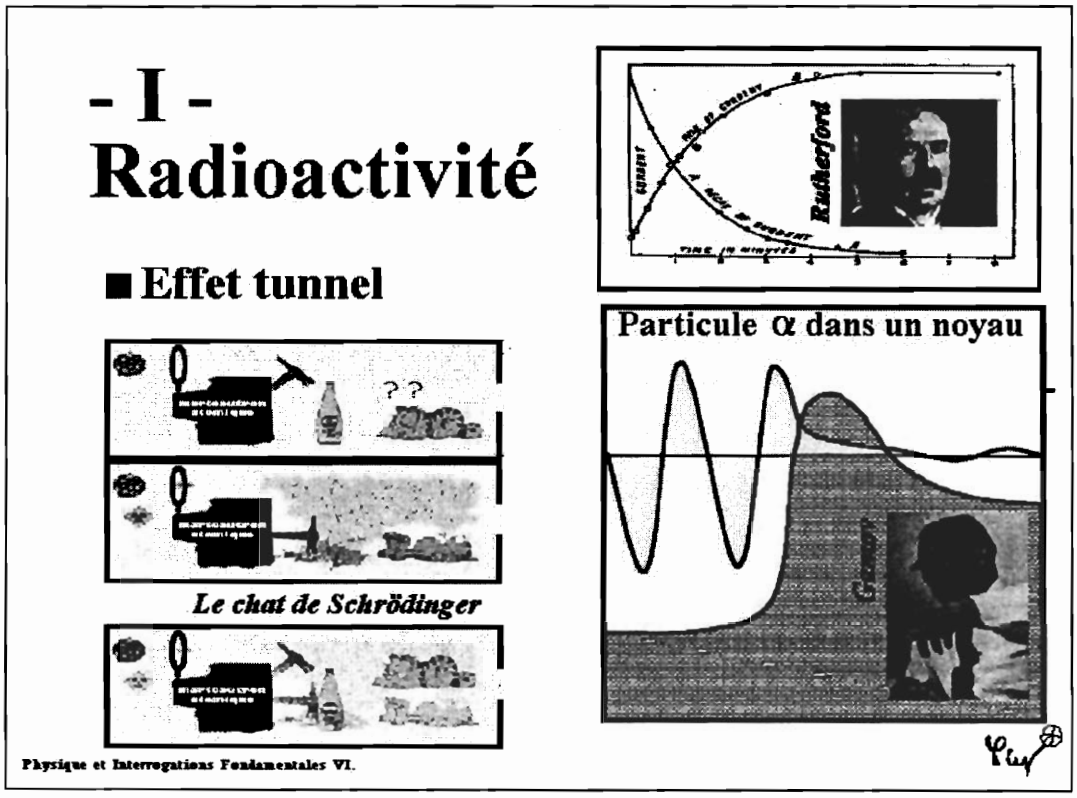


Figure 3 : *La radioactivité α fut interprétée par le concept quantique d'effet tunnel (par Gamov en bas à droite).Une onde peut traverser une barrière de potentiel. Cela permet de comprendre la décroissance exponentielle, du nombre d'atomes radioactifs, observée par Rutherford (en haut à droite). Toutefois l'apparente contradiction entre une mécanique ondulatoire déterministe et un phénomène probabiliste fut à l'origine de beaucoup de débats comme le paradoxe du chat de Schrödinger.*

La vision moderne de la mécanique quantique a réconcilié les deux points de vues par le concept de cohérence. L'aspect ondulatoire disparaît d'autant plus vite que l'objet est complexe. En effet plus l'objet est complexe plus il comporte d'états quantiques. Plus il comporte d'états plus ils peuvent "battre" les uns avec les autres comme le font deux ondes de fréquences décalées. Ainsi la simplicité de l'onde se fond dans la complexité du monde.

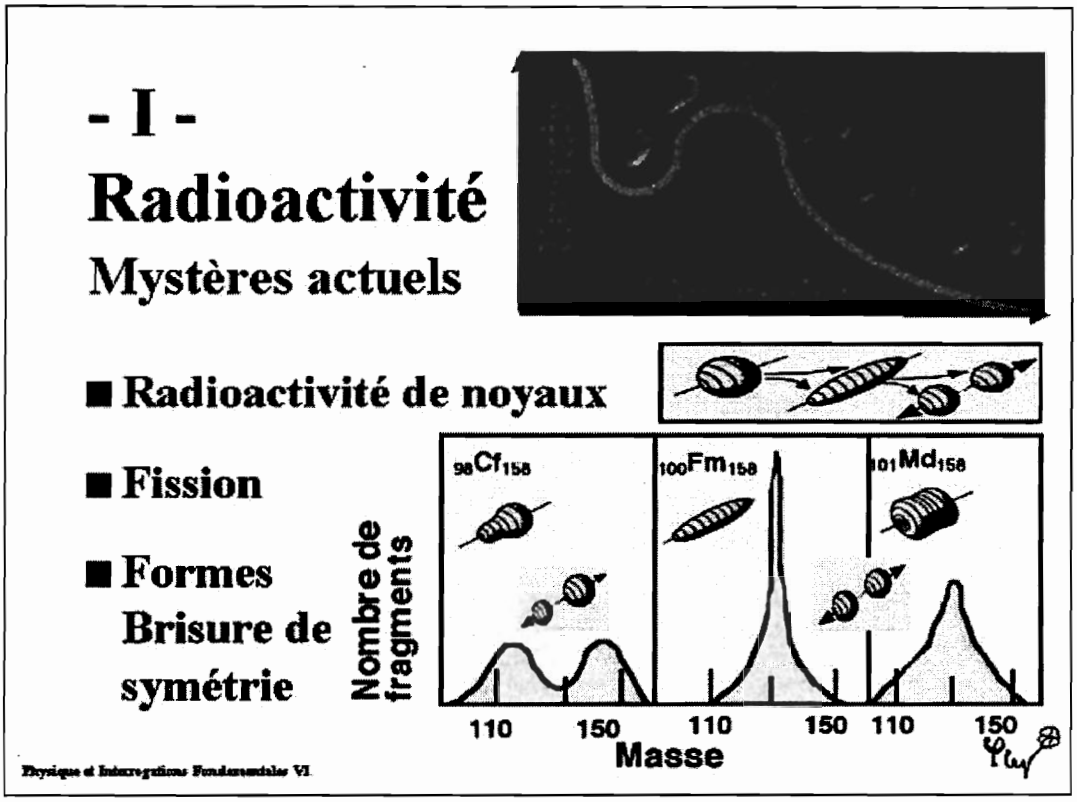


Figure 4 : *Plusieurs mystères demeurent aujourd'hui. La radioactivité α peut être accompagnée d'autres radioactivités comme l'émission de Carbone 14. Elle ressemble donc à la fission découverte avant-guerre. Notre compréhension actuelle demande d'imaginer un noyau qui se déforme et peu à peu se scinde en deux fragment. Il lui faut pour cela traverser une barrière de potentiel par effet tunnel. Mais ici c'est un objet complexe (un fragment) qui passe cette barrière. Si maintenant nous regardons les tailles des deux fragments de cette fission nous nous rendons compte que leurs propriétés peuvent changer drastiquement d'un noyau à l'autre. Cela pourrait être dû à la multitude des formes prise par le noyau lors de la scission. Ces brisures spontanées des symétries des noyaux est encore mal comprise.*

Aujourd'hui encore, la radioactivité α reste un mystère. Elle suppose une préformation de structures à l'intérieur des noyaux. Le mystère s'est même épaissi dans les années 80 avec la mise en évidence de la radioactivité de Carbone 14 et d'autres particules complexes. Ainsi la radioactivité ressemblerait à la fission découverte avant-guerre qui, elle aussi, est encore mal comprise. Pour fissionner, il faut que le noyau se déforme et brise ses symétries. La figure 4 montre quelques les distributions de la taille des fragments de fission pour plusieurs noyaux voisins comportant 158 neutrons. Elles sont extrêmement diverses. Ici les fragments sont de masses inégales alors que là, non. Cela pourrait trahir des déformations très différentes le long du chemin vers la fission ici en poire, là en fuseau ou en bobine.

2) L'atome, la construction d'un monde quantique

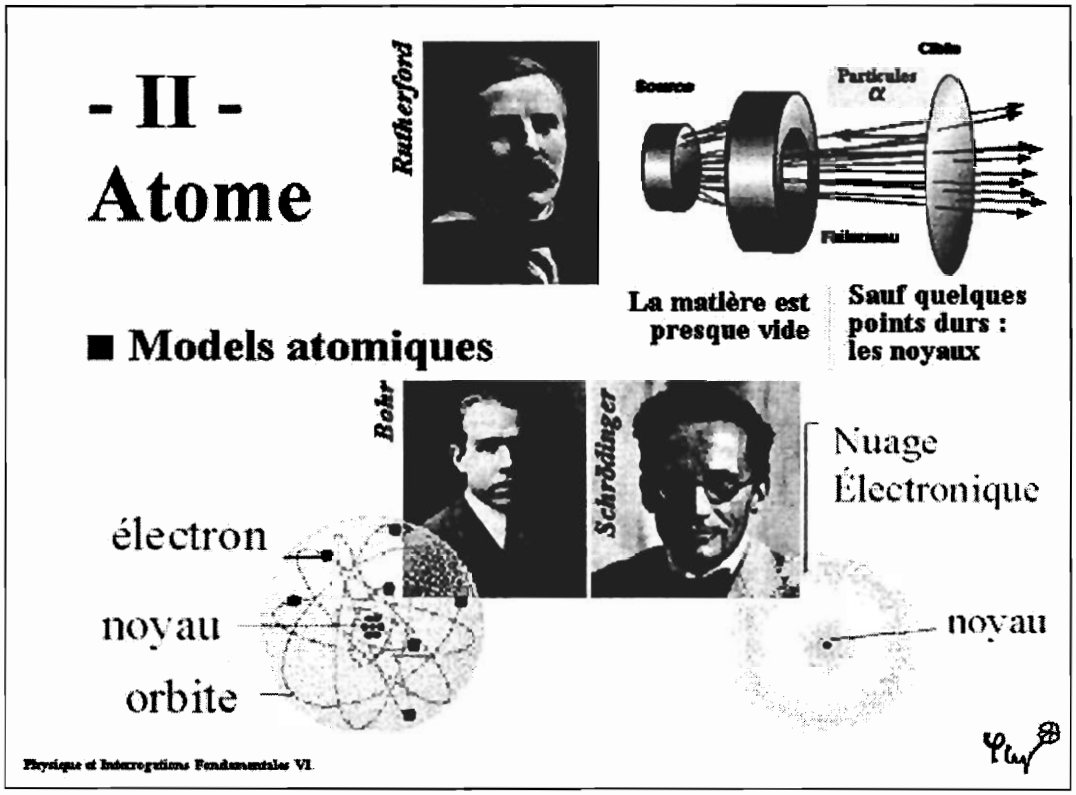


Figure 5 : *Figure schématique de l'expérience de Rutherford qui bombarda une cible avec les rayonnements d'une source. Il observa que la majorité des rayons traversaient sans encombre la matière. Elle était quasiment vide. Dans de rares cas, les projectiles rebondissaient violemment trahissant la présence d'un noyau concentrant presque toute la masse de l'atome dans un objet de rayon cent mille fois plus petit.*

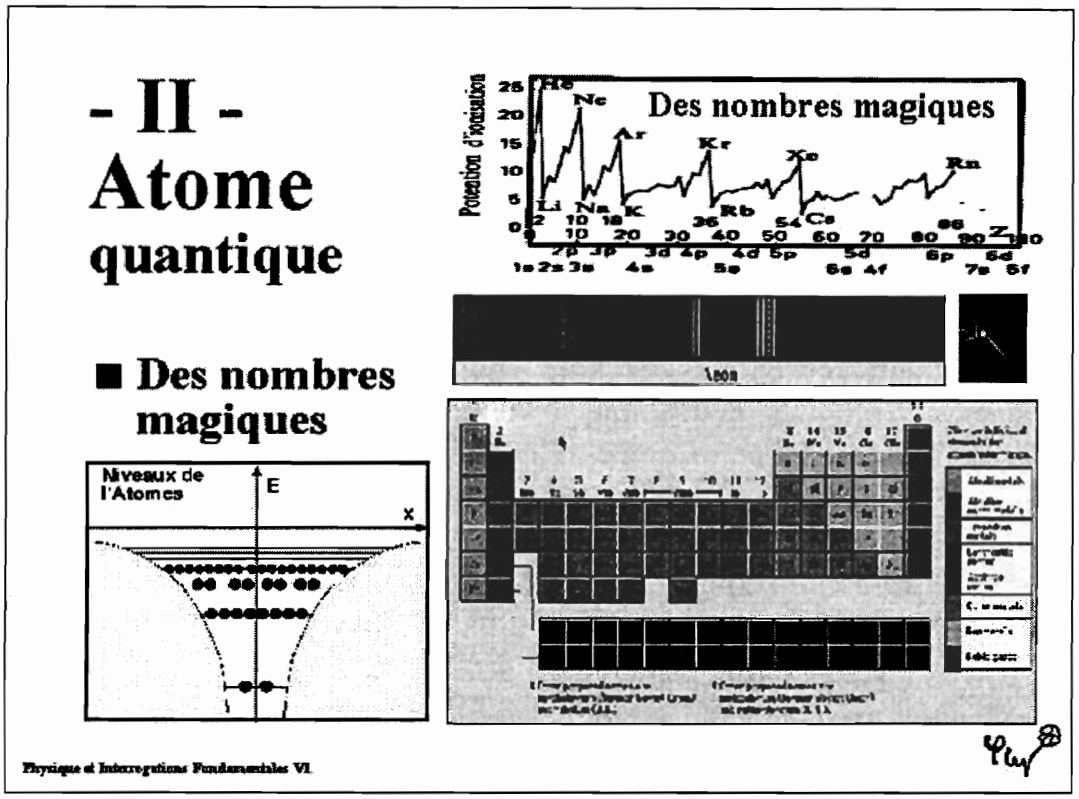


Figure 6 : *Le modèle quantique de l'atome nous montre que les électrons sont rangés sur des niveaux d'énergies. Pour exciter un atome il faut déplacer un électron d'un niveau sur l'autre. L'énergie de cette transition prend des valeurs discrètes. L'atome émet ou absorbe des photons d'énergie (donc de couleur) spécifiques. Cela explique le mystère des raies de couleurs associées à différents corps. Chaque niveau peut contenir un nombre maximum d'électrons. Quand une couche est pleine l'électron supplémentaire doit être mis sur un niveau moins lié. Il est plus facilement arraché (l'atome est ainsi ionisé). C'est ainsi que l'on explique les nombres magiques atomiques que l'on observe clairement sur la figure du haut donnant le potentiel d'ionisation en fonction du nombre d'électrons. Finalement, comme des orbitales semblables se retrouvent régulièrement parmi les niveaux de l'atome et que les propriétés des orbitales conditionnent les propriétés chimiques des éléments ces dernières se retrouvent régulièrement. C'est l'explication de la table périodique de Mendeleïev.*

Revenons à l'exploration du monde atomique et subatomique. Une des premières applications de la radioactivité a été son utilisation pour sonder la matière. En 1911, Rutherford observe que les rayonnements α traversent la matière sans presque jamais rencontrer d'obstacles. La matière est faite de vide. Seulement de

temps en temps, les rayonnements ricochent sur des sortes de points durs et massifs. Il vient de découvrire les noyaux atomiques. Dès cette découverte, Rutherford propose un modèle d'atome avec un noyau au centre d'un atome. Puis vint le modèle planétaire de Bohr. Finalement, Schrödinger allait inventer la mécanique quantique en proposant un modèle d'atome avec un noyau central entouré d'un nuage quantique d'électrons.

De multiples mystères sont ainsi éclaircis, les électrons occupants des niveaux d'énergie, leurs excitations sont quantifiées. Les transitions entre niveaux libèrent ou absorbent seulement l'énergie égale à la différence entre deux niveaux. Les raies atomiques, l'émission ou l'absorption de lumières de couleur immuable par les atomes, sont expliquées. Chaque couche apparaissant plusieurs fois on comprend la table périodique des éléments construit empiriquement au siècle précédent par Mendeleïev. Les couches pouvant accueillir un nombre maximum de particules, on comprend les nombres magiques atomiques. Les atomes dont les couches sont pleines, sont plus liés, moins réactifs que leurs voisins.

3) Proton et neutron, une gémellité quantique.

L'atome possède donc un noyau incroyablement petit et dense. L'atome lui-même ne fait qu'un dix millionième de millimètre, le noyau est cent mille fois plus petit. Pourtant, il concentre presque toute sa masse ce qui lui donne une densité incroyable : de plusieurs centaines de milliards de tonnes par centimètres cubes. En 1919, Rutherford découvre que le noyau contient des noyaux d'hydrogène : les protons. Il fallut attendre 1932, pour que sir Chakwick découvre qu'il contient aussi une particule jumelle du proton le neutron. La différence entre ses deux particules résident essentiellement dans leur charge. Les protons sont chargés positivement d'une charge opposée à celle de l'électron, alors que le neutre neutron est neutre (sic). Heinsenberg eut l'idée d'introduire une symétrie entre ses deux particules en proposant un formalisme analogue à celui du spin découvert peu avant. Le spin isotopique (appelé ainsi car il différencie différents isotopes), l'isospin, était né.

C'était une symétrie révolutionnaire car toute les "gémellités" découvertes jusqu'alors faisaient intervenir des symétries connues. Même le spin, cette orientation intrinsèque, interne aux particules, même le spin qui avait défrayé la chronique quelque temps auparavant est moins étonnant. En effet, il est lié à la symétrie par rotation de notre espace. Il suffit de briser cette symétrie, par exemple en plongeant la particule dans un champ magnétique, pour différencier ces homozygotes de spin.

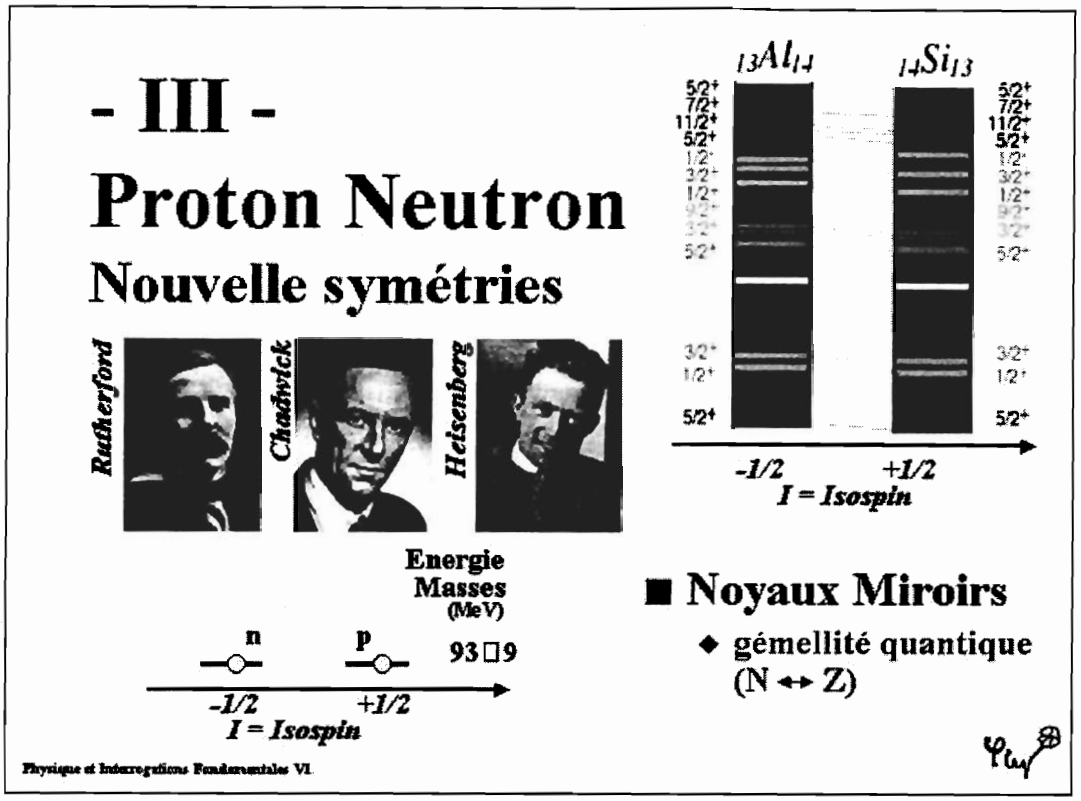


Figure 7 : *Le proton et le neutron ont pratiquement même masse. Cette gémellité cache une symétrie plus profonde. Par exemple, les noyaux miroir, toutes les paires de noyaux correspondant l'un à l'autre par échange des protons et des neutrons, ont de structures parfaitement jumelle comme le montre le schéma des niveaux présenté à droite.*

L'isospin, quant à lui, était profondément novateur car ce nouveau nombre quantique exprimait une symétrie entre des particules de charges différentes. Elle implique l'existence d'un nouvel espace dans lequel les "rotations" correspondraient à changer les charges des particules. Bien que presque choquante, cette symétrie semble fortement respectée par la matière. En physique nucléaire, les niveaux d'énergie de nombreux noyaux peuvent être regroupé en fratries (on dit plutôt multiplets) d'isospin différents. C'est en particulier le cas pour les noyaux dit miroir, noyaux de masse identique mais symétrique dans l'échange des protons en neutrons. Leurs spectres de niveaux sont identiques, tous parfaitement jumeaux. Étonnamment, il n'y a pas que des jumeaux d'isospin, on observe aussi des triplés (on dit plutôt triplets) et quadruplés (on dit quadruplets) en fait, toutes sortes de multiplets de niveaux identiques dans des noyaux de masse égale mais de charge différente.

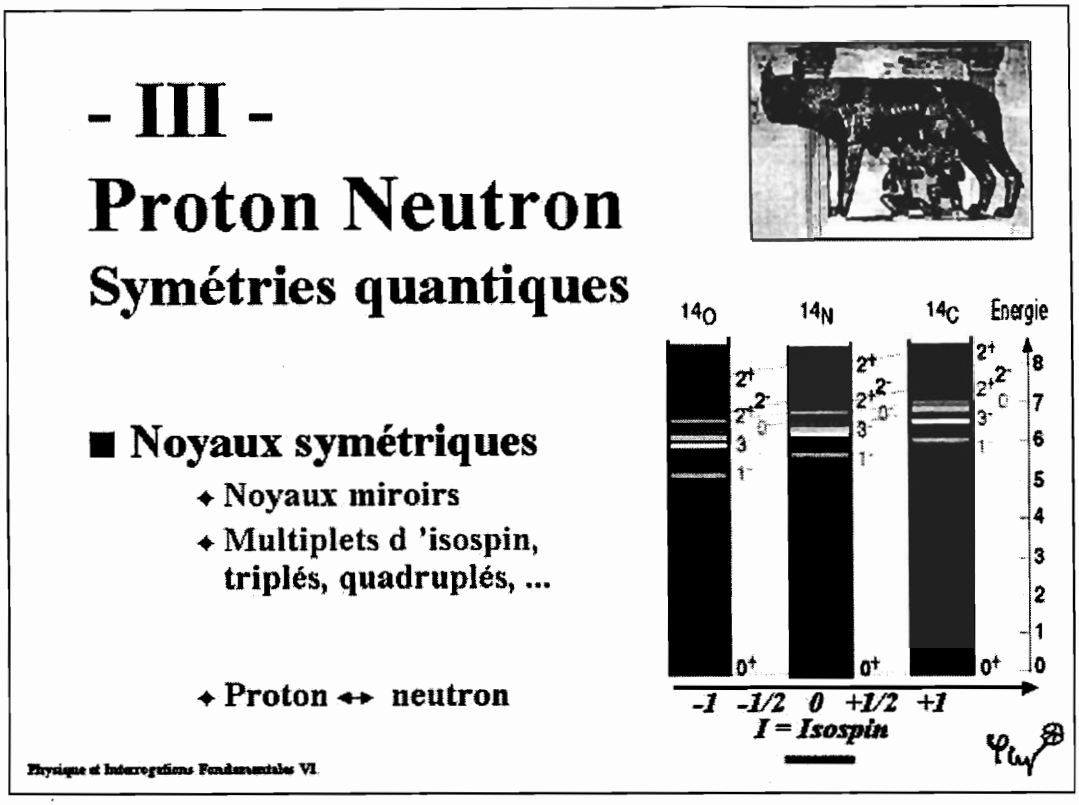


Figure 8 : *les noyaux miroir ne sont pas les seuls à présenter des gémellités étonnantes. Tous les noyaux de masse identique présentent des similitudes de structure. Des niveaux d'énergie aux propriétés analogues se retrouvent dans tous ces noyaux. Ils forment de grandes fratries ne se différentiant les uns des l'autres que par leur charge (ou de façon équivalente que par leur isospin). Ces centaines et centaines de multiplets démontrent la pertinence de cette symétrie d'isospin.*

La symétrie d'isospin correspond bien à une propriété du monde subatomique. Elle déboucha ou ouvrit la voie à de nombreuses théories et découvertes. Tout d'abord, la radioactivité β fait clairement appel à la transformation dans l'espace d'isospin permettant à un neutron de devenir proton. L'isospin faible allait bientôt être introduit. Fermi puis Weinberg, Salm et Glashow allaient l'utiliser pour construire la théorie actuelle des interactions faibles. L'unification électrofaible, les théories de Jauge peuvent être vues comme des petits-enfants de l'isospin.

Mais la symétrie entre proton et neutron n'allait pas arrêter là sa révolution de notre compréhension du monde. À la fin des années soixante, Gell Man allait refaire le coup des gémellités pour regrouper les particules en multiplets. Il faut dire que l'exploration de l'infiniment petit avait conduit à la découverte de pléthore de particules nouvelles. Elles se rangeaient en groupes de particules identiques ne différant que par leur charge. Gell Man eut l'idée de regrouper plusieurs de ces familles ayant des propriétés similaires, même spin et parité,

énergies proches. Pour les différencier, il utilisa un nouveau nombre quantique, l'hypercharge qui correspond à deux fois la charge moyenne des particules de chaque famille. La nouvelle symétrie ainsi mise à jour trahissait une structure composite des particules. Les trois premiers quarks venaient d'être dévoilé. Leur nom devint la "saveur". Nous en connaissons aujourd'hui six. Les nucléons sont constitués de trois quarks. Pour comprendre la structure composite des particules, il fallut invoquer un autre nombre quantique "la couleur" dans la même veine sue l'isospin. La théorie actuelle des interactions fortes était née.

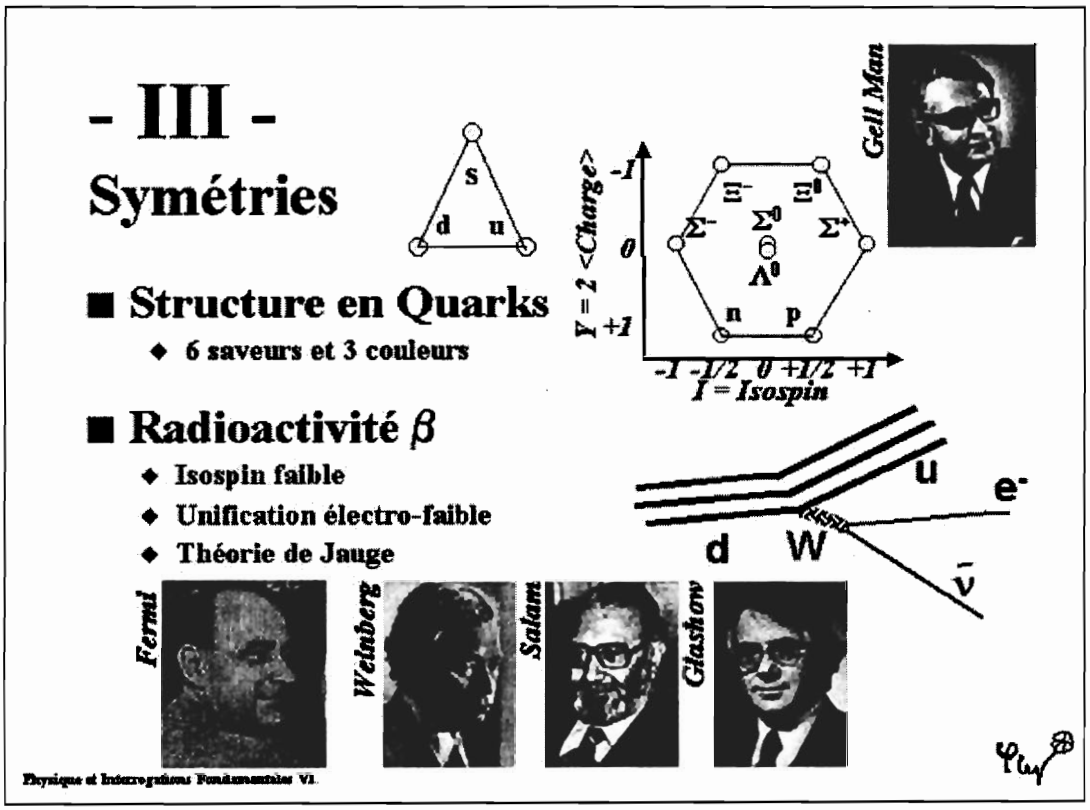


Figure 9 : *En regroupant les particules de masses proches et de propriétés analogues, Gell-Man découvrit qu'elles se rangeaient en multiplets. En utilisant un nouveau nombre quantique, l'hypercharge qui peut être vu comme la charge moyenne des particules de masse tres proches dans chaque classe, il observa des forment géométriques caractéristiques d'une symétrie sous jacente (hexagone en haut à droite). Il venait de découvrir que les particules étudiées sont formées à partir de trois quarks (triangle à gauche). Pour les différencier, il les baptisa haut (u), bas (d), étrange (s). Les trois premières "saveur" venaient d'être nommées, trois autres allaient suivre. Dans la décroissance β, un quark d devient un quark u. Un électron et un (anti)neutrino sont émis (diagramme en bas).*

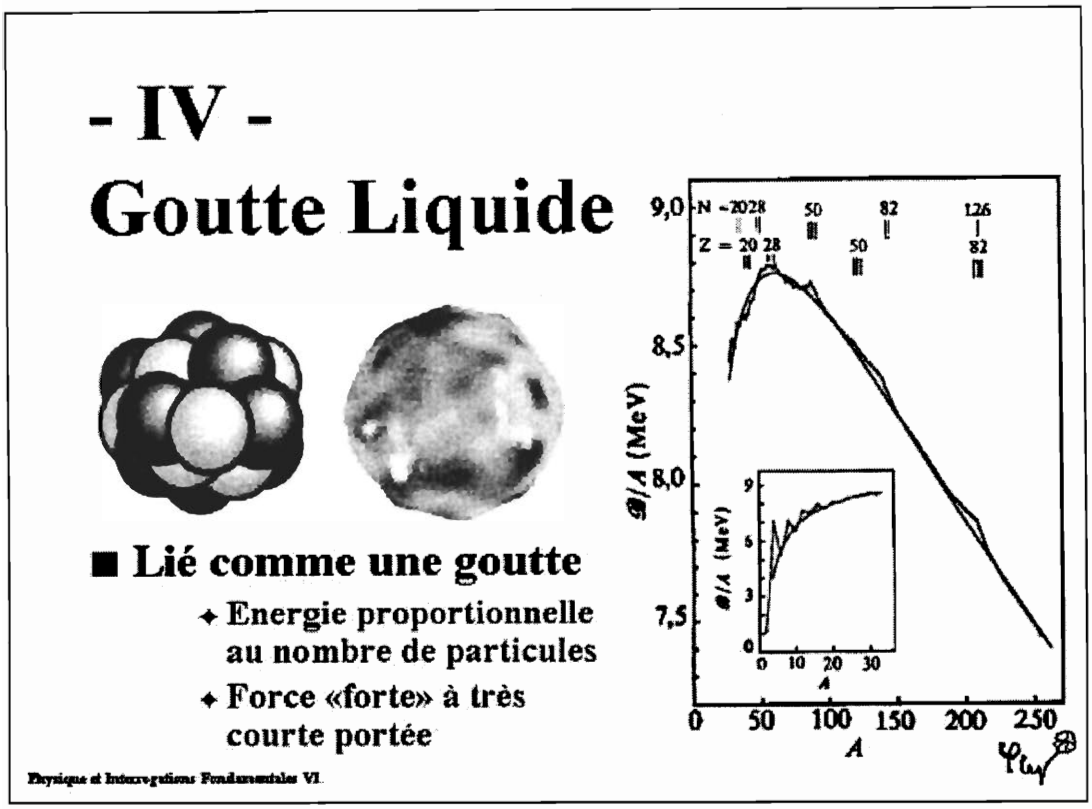


Figure 10 : *L'énergie qu'il faut fournir pour séparer tous les nucléons d'un noyau s'appelle énergie de liaison. Elle est pratiquement la même dans tous les noyaux, approximativement 8 milliards d'électron volts. On peut la comprendre grâce à un modèle identifiant le noyau à une goutte liquide. À une énergie totale proportionnelle au nombre de nucléons (terme de volume), il faut soustraire une correction due à la présence d'une surface (équivalente à une tension superficielle) et une autre due à la répulsion coulombienne des protons comme pour une goutte chargée.*

4) Goutte liquide et chaos quantique

Le noyau est ainsi composé de protons et de neutrons. Comme la force forte est à courte portée, c'est pratiquement une force de contact, pendant toute la première moitié du Xxe siècle on pensa que le noyau était une goutte liquide. L'énergie de chaque noyau est celle d'une goutte chargée comportant un terme de volume, un autre de surface et un dernier de répulsion coulombienne.

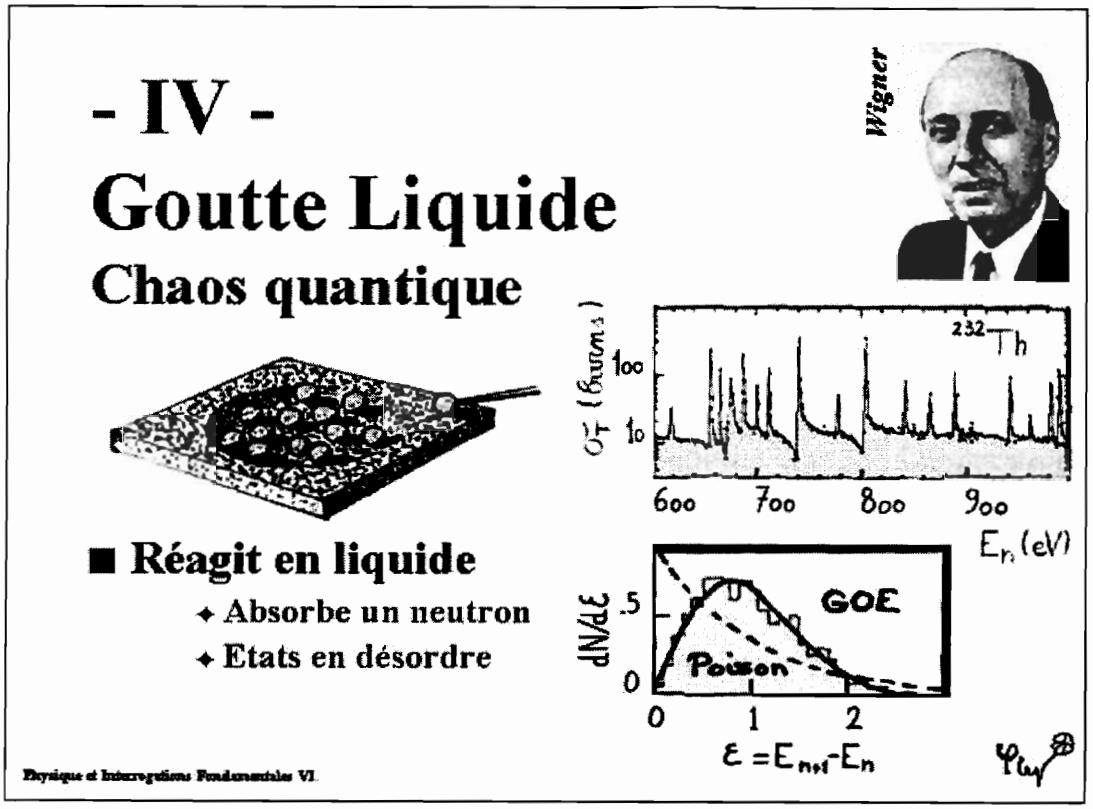


Figure 11 : Probabilité de capture d'un neutron en fonction de l'énergie de celui-ci. On observe sur cette figure un grand nombre d'états (figure au milieu à droite). Si l'on étudie les espacements entre deux états consécutifs, ils présentent une distribution (figure du bas à droite) caractéristique du chaos quantique. Elle correspond en effet à la distribution des états d'une interaction complètement aléatoire, une distribution de Wigner. Le noyau ressemble à une sorte de billard chaotique quantique comme l'avait imaginé Bohr.

Les premières réactions de capture de neutrons allaient confirmer cette vision d'un noyau comme une goutte, les niveaux d'énergie présentant un désordre certain. Cela confirmait l'intuition de Bohr qui rapprochait un noyau d'un billard chaotique. Wigner étudia les caractéristiques des espacements de niveaux (énergie qui sépare deux niveaux consécutifs) et fit le pont avec une théorie d'un désordre quantique où les interactions sont totalement aléatoires. Le noyau introduisait ainsi pour la première fois en physique le chaos quantique.

5) Nombres magiques : un ordre quantique

C'est seulement après guerre, en utilisant des données recueillies par le projet Manhattan que Maria Goeppert-mayer découvrit que le noyau lui aussi possédait des nombres magiques de protons et de neutrons lui procurant une grande

stabilité. Ainsi, à l'instar des électrons dans l'atome, protons et neutrons se rangent sur des couches dans un potentiel nucléaire.

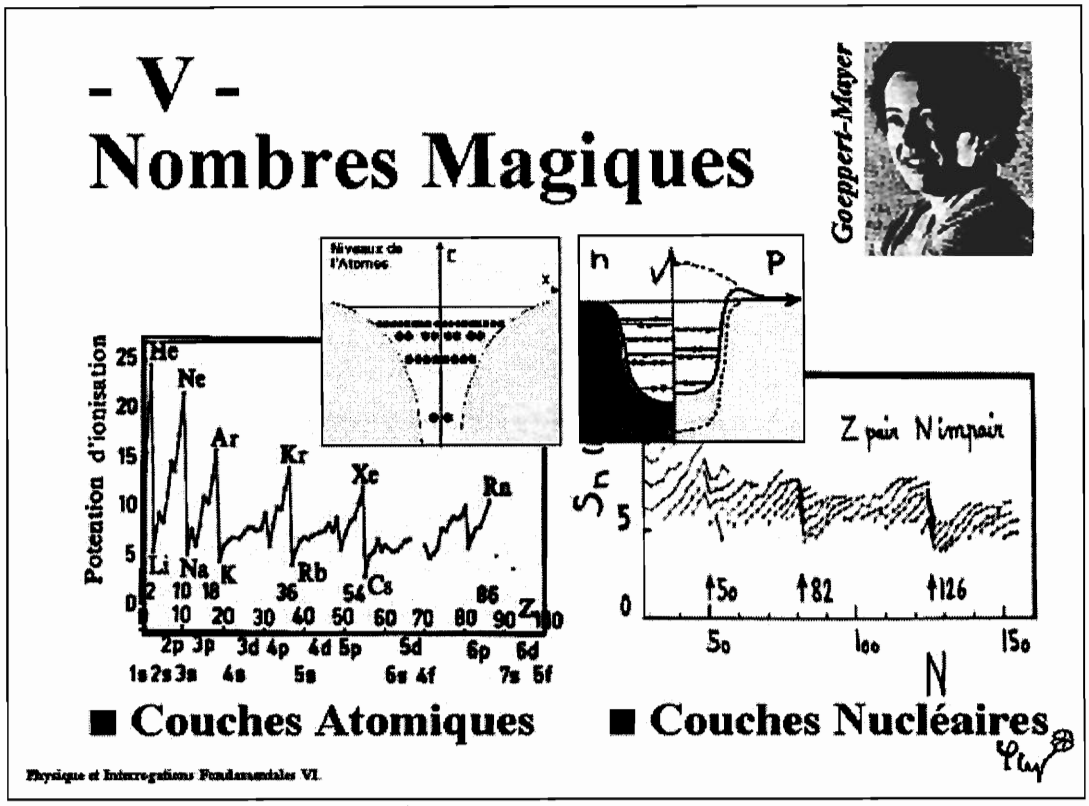


Figure 12 : Maria Goeppert-Mayer découvrit que les noyaux aussi possédaient des couches. La figure fait le parallèle entre l'énergie qu'il faut pour arracher un électron à un atome (à gauche) et celle qu'il faut pour enlever un neutron à un noyau (à droite). Toutes deux présentent des structures régulière qui trahissent la présence de couches. Les niveaux d'énergie des atomes et des nucléons sont aussi schématiquement représentés.

Toutefois, dans le cas du noyau, il faut que les nucléons génèrent eux-mêmes le potentiel dans lequel ils s'organisent. C'est là une grande différence avec l'atome qui est ordonné par le champ électrique de son noyau central. Cela est d'autant plus mystérieux que la force forte qui "colle" protons et neutrons dans les noyaux est presque une force de contact.

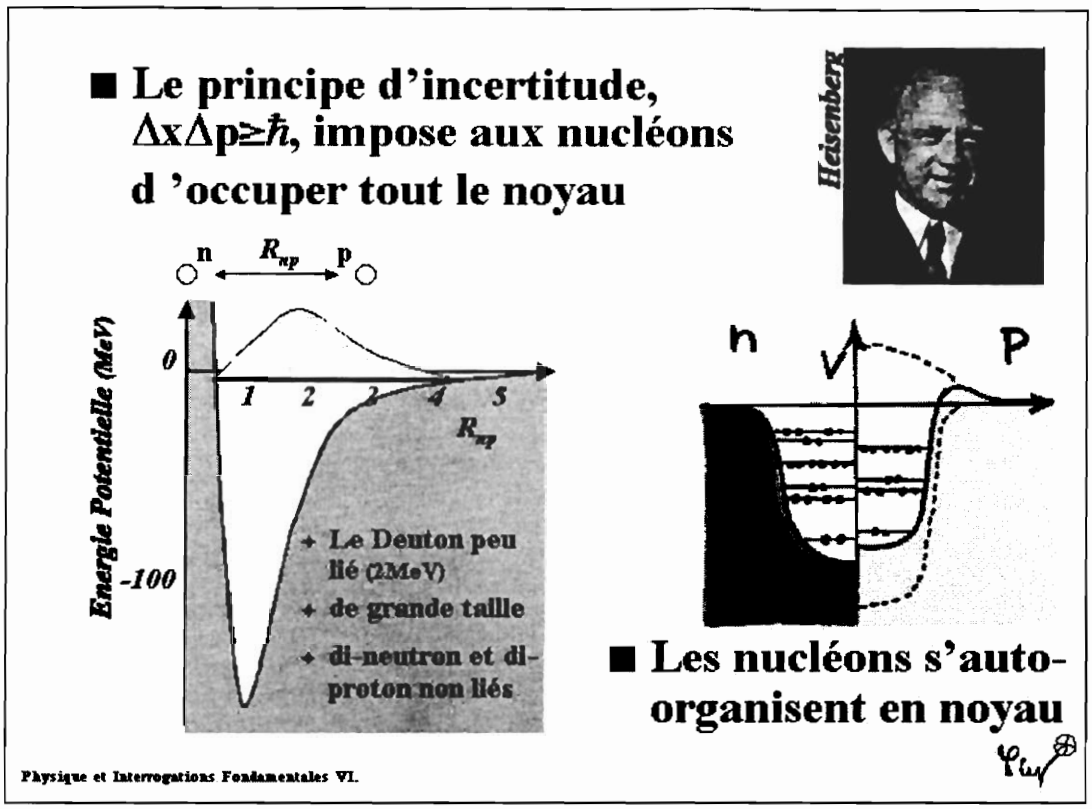


Figure 13 : *Cette figure fait le parallèle entre le potentiel nucléaire et l'interaction entre deux nucléons. Une particule quantique occupe une certaine région de l'espace. Le principe d'incertitude nous dit que l'agitation de cette particule est inversement proportionnelle à la taille du nuage associé. Localiser une particule au fond du puit permet de gagner de l'énergie d'interaction, mais fait augmenter l'énergie cinétique due à l'agitation accrue. Entre ces deux effets opposés, il peut y avoir un équilibre suffisamment localiser pour que l'interaction soit forte mais pas trop pour pas que l'énergie cinétique diverge : c'est l'état fondamental. Cela montre que le niveau fondamental ne peut être localisé au fond du puits de potentiel. Dans le cas du noyau, cet effet est si fort que, bien que les forces nucléaires soient attractives, le deutéron est la seule paire de nucléons liée, et encore par seulement quelques pour cents de l'énergie d'interaction disponible. Les nucléons sont donc délocalisés dans tout le noyau. Ils sont alors tous en interaction les un avec les autres. Ils agissent de concert comme un potentiel unique, moyenne des interactions deux à deux. C'est dans ce champ moyen que les nucléons s'organisent en couches.*

C'est le principe d'incertitude qui permet de comprendre le phénomène. En effet, on ne peut, en mécanique quantique, localiser précisément une particule sans devoir le payer en agitation selon le principe d'incertitude, $\Delta x \Delta p \geq \hbar$. Le noyau

est si petit que localiser les nucléons à l'intérieur de noyau coûterait trop d'énergie. Les nucléons doivent être délocalisé.

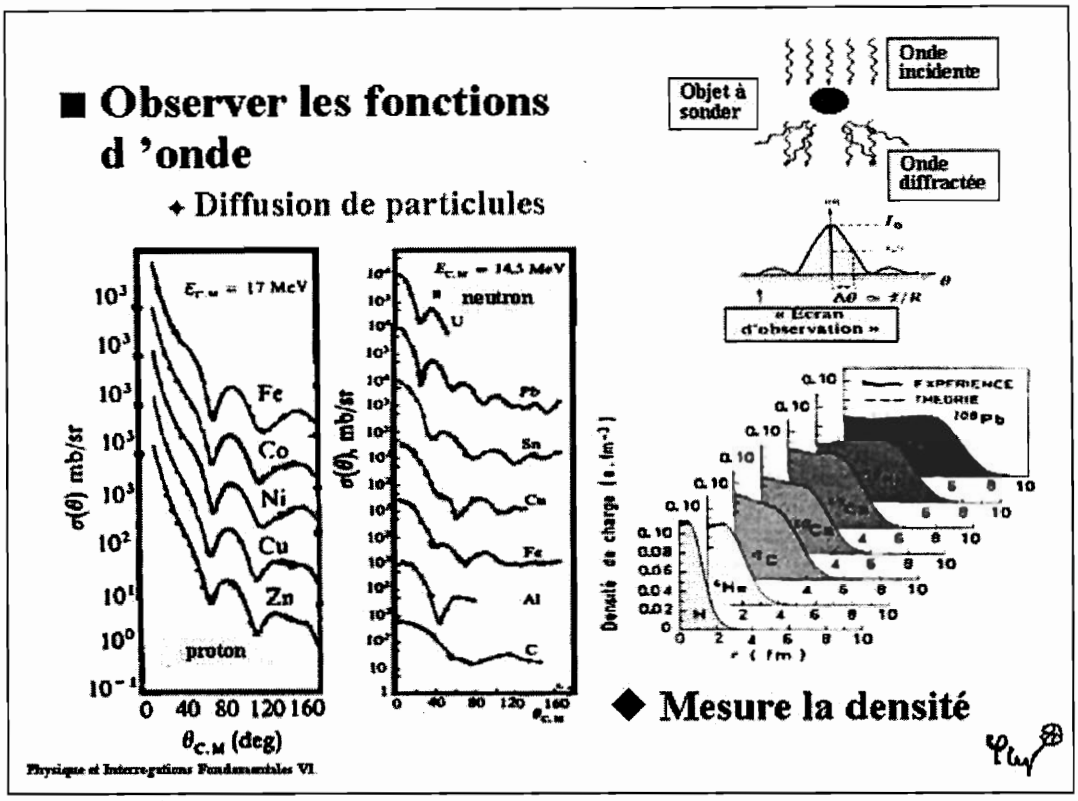


Figure 14 : *Toutes particules est associée à une onde. Lorsqu'elle bombarde un objet comme un noyau d'atome une partie des ondes incidentes est difractée. Cela donne naissance à une figure d'interférence caractéristique de l'objet bombardé en particulier de sa taille et de sa transparence. Les figures de gauche montrent des exemples de ces figures d'interférence obtenues avec des faisceaux de protons et de neutrons bombardant divers noyaux. les figures d'interférence sont clairement visibles. On peut aussi utiliser d'autres projectiles comme en particulier des électrons. Ces expériences permettent de remonter à la distribution des nucléons à l'intérieur des noyaux. La figure de droite montre la densité de charge ainsi déduite.*

L'exemple le plus parlant est les systèmes à deux nucléons. Le principe d'incertitude leur interdit d'être collé l'un au l'autre. Bien que l'attraction entre deux nucléons soit considérable, le deutéron est à peine lié et les systèmes à deux neutrons ou protons ne le sont pas du tout. Les fonctions d'onde sont forcées de ne pas être collé au fond du puit attractif mais d'être délocalisées dans un espace très grand. Ainsi le deutéron est très large. Pour deux nucléons identiques, l'agitation imposée par le principe d'incertitude se trouve être plus forte que l'attraction (pourtant forte) nucléaire. Deux nucléons identiques ne

parviennent pas à rester lier l'un à l'autre. Dans un noyau, cette agitation impose aux nucléons d'être délocalisés dans tous l'espace disponible. Ils ne sont donc pas seulement en interaction avec leurs proches voisins comme le seraient des particules classiques mais ressentent l'attraction de tous les nucléons du noyau. Ils baignent ainsi dans un potentiel moyen qu'ils créent eux-mêmes. Ils en occupent les niveaux d'énergie engendrant ainsi des couches.

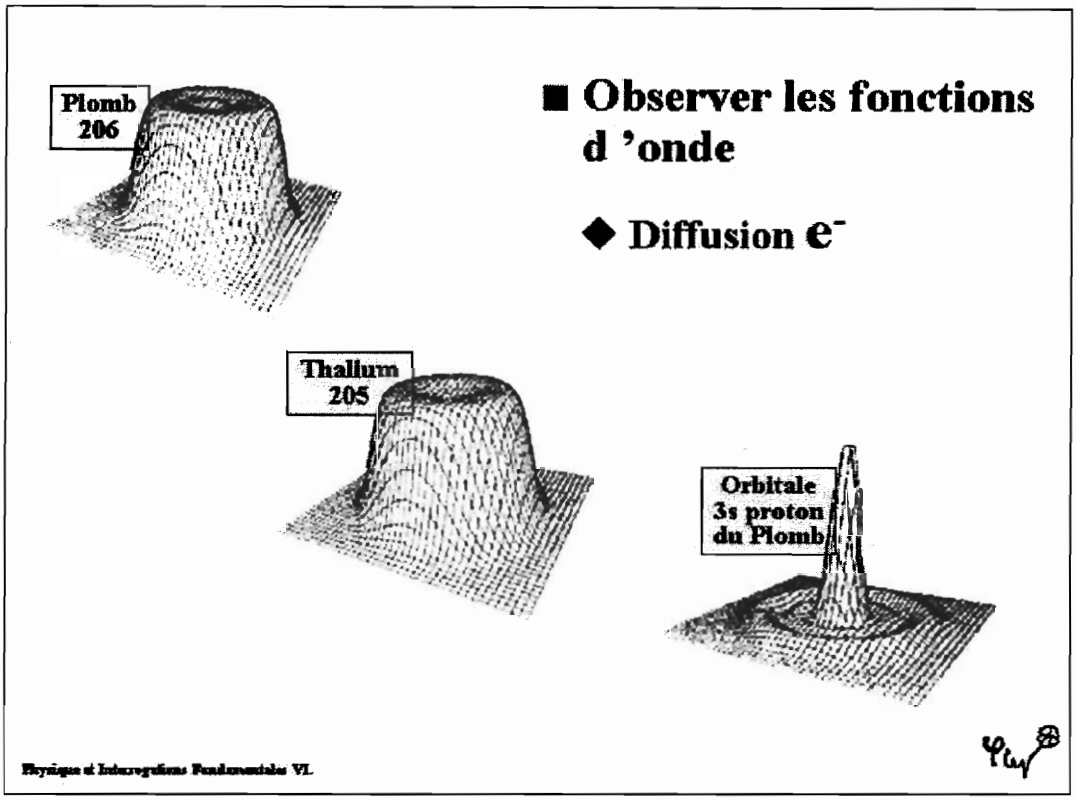


Figure 15 : *Pour obtenir la probabilité de présence d'un seul nucléon à une distance donnée il suffit de comparer les distributions de nucléons obtenues pour deux noyaux ne différant que par la présence de ce nucléon. C'est ce qui a été fait pour le dernier proton du plomb. En soustrayant la densité de charge du Bismuth 205 à celle du Plomb 206 on obtient la fonction d'onde du dernier nucléon du Plomb. Les résultats trouvés dans les années 80 avec l'accélérateur d'électrons de Saclay montrent que cette distribution est bien une orbitale 3s comme le prédit le modèle des couches et l'illustre la figure.*

Ce modèle en couche a été confirmé par de très nombreuses expériences comme, par exemple, la diffusion de particules permettant de mesurer la distribution de matière ou de charge dans le noyau. Une onde incidente est diffractée par un objet. La figure d'interférence observée est caractérisée par la taille de l'objet.

Ainsi a-t-on pu mesurer la distribution des nucléons dans les noyaux. Si maintenant on prend deux noyaux ne différents, que par une particule, en soustrayant les densités mesurées, on obtient la fonction d'onde de ce nucléon. Le résultat montre un parfait accord avec les prédictions du modèle des couches (figure 15).

6) Déformations spontanées : une auto-organisation quantique

La nature n'ayant pas de direction privilégiée on pouvait penser que ces infimes gouttes de matière que sont les noyaux étaient sphériques. Pourtant il n'en est ainsi que pour quelques noyaux tels le plomb 208 ou le Calcium 40. En effet, la plupart des noyaux sont déformés et peuvent prendre des formes de ballon de rugby, de soucoupe, d'amende, de poire ou même de cacahuète. Le modèle des couches s'est beaucoup développé depuis les années cinquante. Il permet aussi de comprendre la déformation spontanée des noyaux. Chaque niveau d'énergie, chaque couche, correspond à plusieurs orientations d'une même forme. Quand une couche est complètement occupée, le nuage de nucléons associé n'a plus de direction privilégiée, car toutes les orientations possibles y sont représentées. C'est une sphère parfaite. En revanche, si seulement quelques orbitales (les ondes des nucléons) sont occupées par des nucléons, comme celles-ci ont souvent des formes particulières, elles peuvent imposer une déformation au noyau. Ainsi, la forme des fonctions d'onde occupée modifie celle du potentiel dans lequel les nucléons s'ordonnent. Tous les autres nucléons à l'intérieur du noyau vont subir cette déformation, leurs ondes vont alors réagir à cette modification en changeant de forme. Cette réaction peut alors amplifier le phénomène jusqu'à ce que le noyau retrouve un certain équilibre. Le noyau sera alors spontanément déformé. On peut même observer de nouveaux nombres magiques quand les orbitales occupées stabilisent fortement une déformation du noyau.
La figure 16 illustre (de façon schématique) l'influence de la déformation du noyau sur les niveaux d'énergie des nucléons : suivant les caractéristiques de formes de chaque orbite la déformation augmente ou diminue son énergie. On peut ainsi voir apparaître des regroupements de niveaux appelés couches. Chaque fois qu'une couche est remplie, la particule suivante doit aller sur la couche au-dessus. Cette particule, isolée sur un niveau moins lié au noyau, le fragilise. En conséquence, les noyaux à couche pleine sont plus stables que leurs voisins. Nous voyons ici qu'il peut y avoir des couches qui, quand le noyau est déformé, stabilisent cette déformation des noyaux.

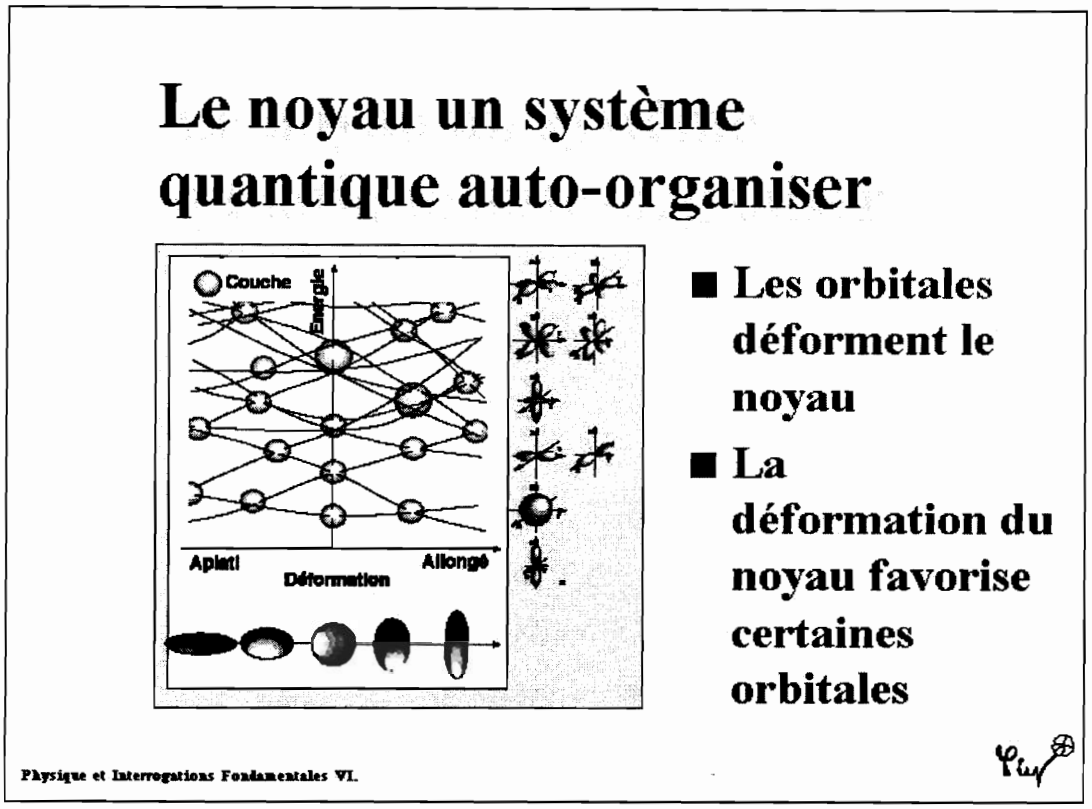


Figure 16 : *Illustration schématique des niveaux d'énergies des nucléons dans le noyau en fonction de la déformation ellipsoïdale. Suivant la ressemblance (le recouvrement) entre la forme du noyau et celle de l'orbitale cette dernière peut voir son énergie accrue ou diminuée par la déformation. Quand les niveaux se regroupent, les noyaux qui ont tous ces niveaux occupés ont une stabilité plus forte que leurs voisins. Il y a donc des couches dans des noyaux sphériques et déformés.*

La brisure spontanée de la symétrie sphérique va être favorisée par un nombre important de protons, car les protons étant chargés positivement ils se repoussent. Pour les gros noyaux, cette tendance vers l'auto-déformation des systèmes complexes peut même les conduire vers la rupture, la brisure physique du noyau en deux : c'est la fission. Toutefois, lorsque la déformation du noyau augmente, les énergies des nucléons dans le noyau varient en suivant les lois de la mécanique quantique. Ces variations d'énergie sont intimement liées à la forme de chaque orbitale et à son adéquation avec la forme du noyau. L'énergie totale du noyau doit prendre en compte ces variations d'énergie appelées correction de couches. Ces effets de couche ont une influence prépondérante et génèrent des situations dans lesquelles l'énergie totale est minimisée : ils peuvent ainsi stabiliser une déformation sur le chemin vers la fission. On appelle ces états d'équilibre des isomères de fission. Ce sont des noyaux piégés pour un « certain » temps dans une position d'équilibre très déformée. Leur forme est celle d'un ballon de rugby

(ellipsoïde dont le grand axe est environ deux fois plus grand que les deux autres). On dit qu'ils sont superdéformés. C'est ce qui a été observé pour la première fois en 1962, dans le cas des noyaux lourds avec un nombre de nucléons autour de A=225 - 250.

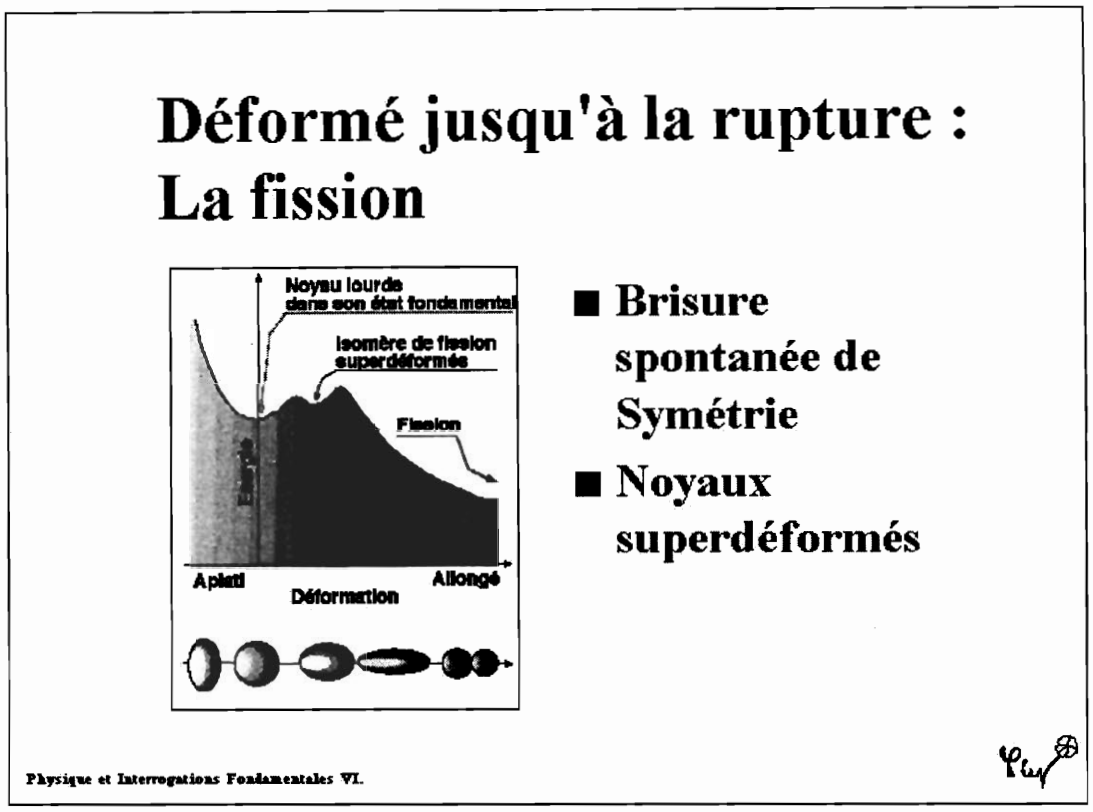


Figure 17 : *La figure ci-dessus illustre le phénomène de fission en montrant l'énergie totale d'un système lourd suivant sa déformation. À cause de la forte répulsion des charges positives des protons, le système veut se partager en deux. Toutefois quand le système est très compact, la force forte peut contrebalancer la répulsion mutuelle des protons et stabiliser le noyau (petit minimum à déformation nulle). Pour comprendre le comportement du système il faut imaginer le diagramme ci-dessus comme la coupe d'une montagne sur laquelle le système se déplacerait. Sur le chemin vers la fission, le noyau peut se retrouver près d'une couche fermée déformée. Cela peut le stabiliser dans une forme oblongue. C'est un isomère de fission super déformé.*

Nous venons de voir que, dans de nombreux cas, les déformations extrêmes menaient à la fission du noyau atomique ; à sa brisure en deux fragments. Toutefois, tout en s'allongeant le noyau peut prendre une forme différente d'un ellipsoïde, il peut en particulier préférer énergétiquement une déformation en forme de poire (forme octupolaire). Cette asymétrie droite-gauche modifie considérablement le processus de fission : alors qu'une élongation symétrique (quadrupolaire) aboutit à

une fission en deux fragments de masses très voisines (fission symétrique), une déformation en forme de poire induit une forte asymétrie dans la masse des fragments de fission. Cet effet a été observé et cette brisure de symétrie des fragments de fission nous permet d'avancer l'hypothèse d'une brisure spontanée de la symétrie droite-gauche lors de la déformation des noyaux sur le chemin vers la fission.

Une autre façon de générer des états superdéformés et de faire tourner les noyaux très rapidement sur eux-mêmes. Les forces centrifuges induites par cette rotation peuvent favoriser, provoquer ou stabiliser une déformation. Ainsi, depuis une dizaine d'années, des déformations considérables ont pu être identifiées.

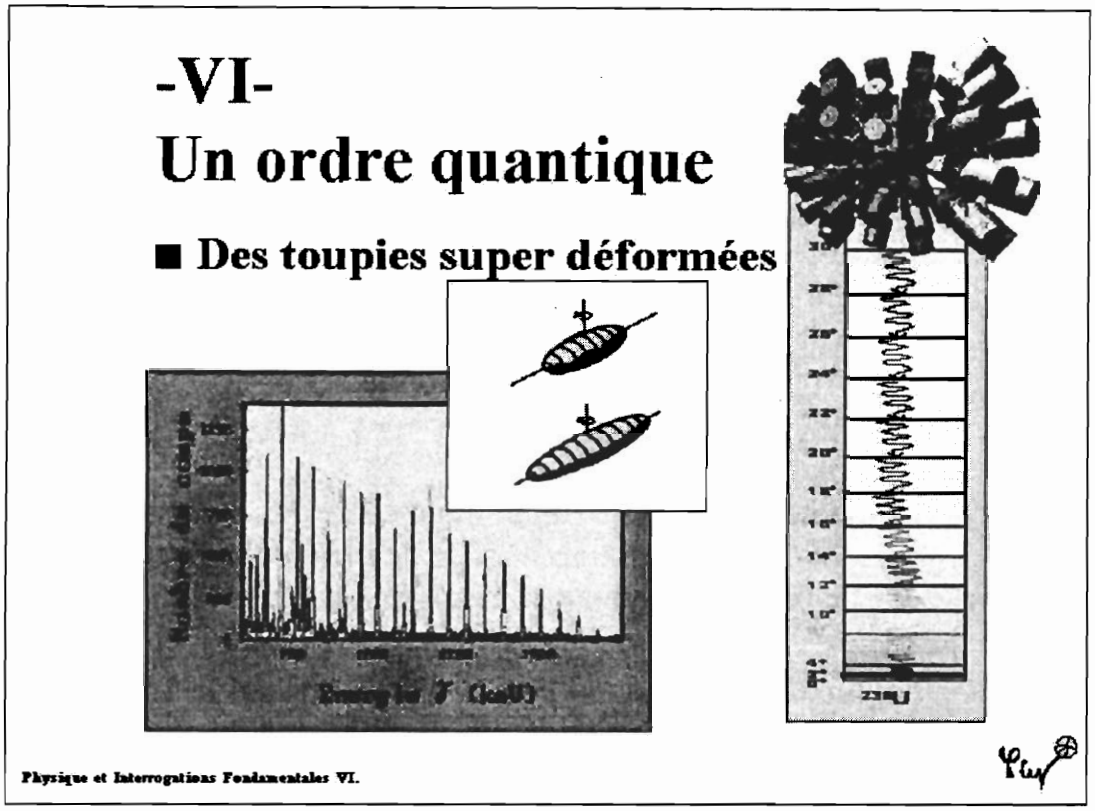


Figure 18 : *Cette figure montre (à droite) les étonnantes régularités observées dans ce monde de quanta, i.e. de niveaux d'énergie et de transitions entre niveaux par émission de photons de haute énergie. À gauche la distribution de ces photons (cf. décomposition spectrale de la lumière) montrant des émissions dont les énergies sont très régulièrement espacées. Chaque pic correspond à une énergie γ très précise. Ces rayonnements électromagnétiques caractérisent le fait que le noyau est très déformé deux fois plus long que large et qu'il tourne à très grande vitesse suivant un axe qui n'est pas son axe de symétrie. C'est la superdéformation. Le schéma en haut à droite représente le multi-détecteur EUROGAM.*

Expérimentalement, ces noyaux superdéformés sont révélés par l'observation d'étonnantes régularités dans les spectres des rayonnements électromagnétiques, les rayons γ (rayonnements apparentés à la lumière mais de beaucoup plus grande énergie), émis par des noyaux très excités. Cet ordre est spectaculaire dans des systèmes que l'on attendrait complètement désordonné vu leur forte excitation. Il démontre l'existence de véritables toupies quantiques, des noyaux superdéformés.
Lorsqu'une toupie classique tourne autour d'un axe avec une vitesse angulaire, elle possède une énergie $E = \mathrm{I}\omega^2/2 = I^2/2\mathrm{I}$ où I est le moment angulaire et I le moment d'inertie de la toupie. Le moment d'inertie est intimement lié à la répartition des masses par rapport à l'axe de rotation i.e. la géométrie de la toupie. Dans le cadre de la mécanique quantique le moment angulaire doit être un multiple entier de la constante de Planck $I^2 = j(j+1)\hbar^2$, on obtient les niveaux d'énergies associés à cette toupie rigide $E_j = j(j+1)\hbar^2/2\mathrm{I}$. Ici j, le moment angulaire, est un entier qui correspond à un spin. En observant des niveaux d'énergies qui suivent cette loi on peut ainsi identifier des toupies quantiques. L'énergie de rotation étant inversement proportionnelle au moment d'inertie I, on peut même déduire de l'observation d'une bande rotationnelle l'inertie du noyau. On peut ainsi avoir une information sur la répartition des masses en mouvement et ainsi de la forme.

Toutefois, suivant les symétries de cette toupie nous allons voir que toutes les valeurs de j ne sont pas permises.

Considérons par exemple un ellipsoïde quantique de révolution (un « ballon de rugby quantique » !). La symétrie dans un miroir de l'ellipsoïde impose que le spin j soit pair. En effet pour un ellipsoïde symétrique la réflexion dans le miroir revient à une rotation de 180 degrés. Or un état de moment angulaire (spin) j change j fois de signe lors d'une rotation de 180°. Si j est pair, l'état ne change pas de signe et la symétrie est respectée. Par contre, si l'état avait un spin j impair, il changerait de signe lors d'une rotation de 180 degrés et la symétrie dans le miroir lui interdirait d'exister. Il faut donc que j soit pair pour un ellipsoïde symétrique.

En fait les physiciens n'observent pas directement les niveaux mais les transitions entre deux niveaux. La toupie chargée émet alors des rayonnements électromagnétiques (des rayons γ) que l'on peut détecter. L'énergie de ces photons γ est alors la différence d'énergie entre deux niveaux $(4j-2)\hbar/2\mathrm{I}$. La signature expérimentale d'une telle bande rotationnelle pour un noyau superdéformé est donné figure 18.

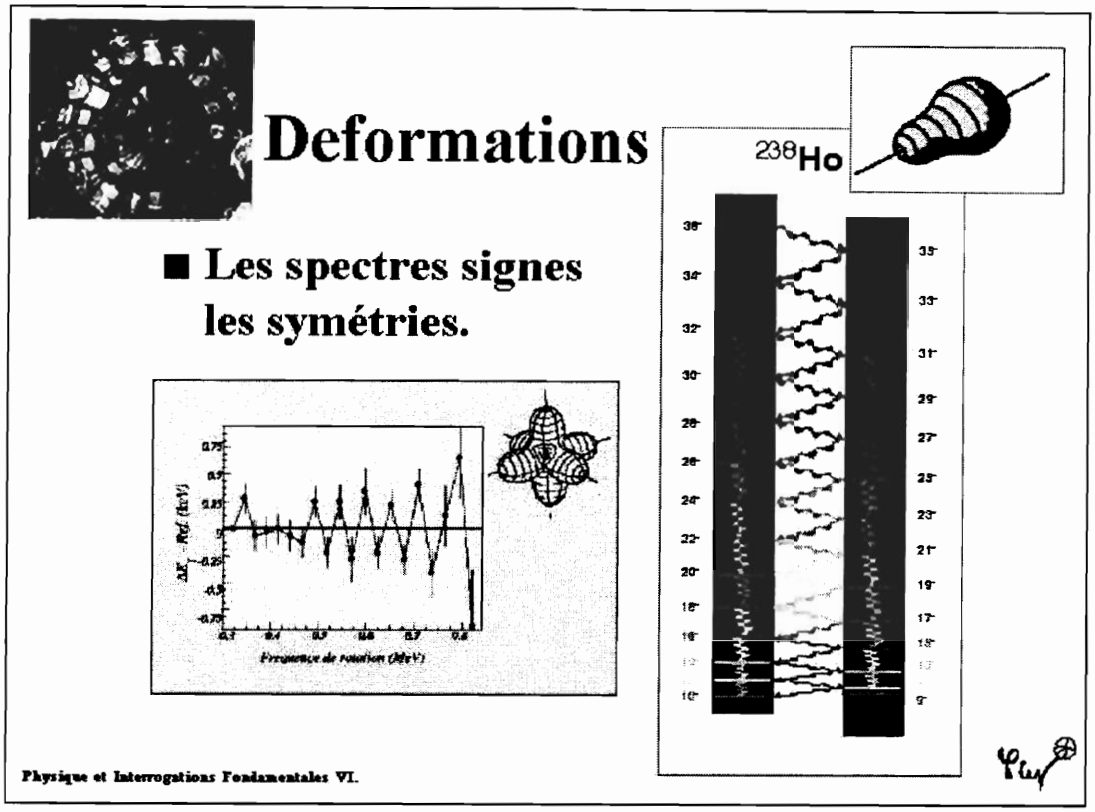


Figure 19 : *La figure de gauche montre les étonnantes oscillations observées dans les énergies des états d'une bande rotationnelle d'un noyau (i.e. d'une toupie nucléaire quantique). Ces oscillations de période* $\Delta j = 4$ *pourraient être dues à une déformation des noyaux analogue à celle de la molécule de* SF_6 *montrée en insert. La figure de droite montre une double série de niveaux qui peuvent être identifiés comme la partie de spin pair et celle de spin impair d'une bande de rotation. Le fait que les spins impairs soient présents* $\Delta j = 1$ *montre que l'objet en rotation n'a pas de symétrie droite gauche : il est en forme de poire(i.e. ayant une déformation octupolaire) montrée en insert. La photographie en haut à gauche représente le multi-détecteur EUROGAM.*

Si la symétrie droite-gauche est brisée par exemple pour un noyau en forme de poire alors plus rien n'oblige les spins à être seulement pair. Une seconde bande rotationnelle avec des spins impairs doit être présente. C'est exactement ce qui a été observé (voir figure 19).

Récemment, des mesures extrêmement précises des rayonnement émis par un noyau tournant ont permis de révéler un comportement inattendu. En comparant en fonction du spin ou de façon équivalent de la fréquence de rotation l'écart qui existe entre les énergies mesurées et un comportement moyen de référence, on constate une l'oscillation régulière dont la périodicité est $\Delta j = 4$. L'origine de cet effet est un

problème ouvert. Une des pistes les plus sérieuses est la encore, celle d'une symétrie ! En effet, nous avons dit que les bandes rotationnelles étaient caractérisées par l'existence d'une invariance par rotation de 180° autour d'un petit axe de l'ellipsoïde; cela implique que l'on n'observe que des spin j multiple de 2. Par analogie, la périodicité $\Delta j = 4$ suggère une invariance par rotation de 90°. Les exemples d'une telle symétrie existent en chimie comme dans le cas de la molécule de SF_6.

7) Noyaux exotiques : une Terra Incognita quantique

Les couches et les nombres magiques, cet ordre quantique semblent une propriété bien établie des noyaux. On peut ainsi prédire les propriétés de tous les noyaux avec ce modèle standard de la physique nucléaire.

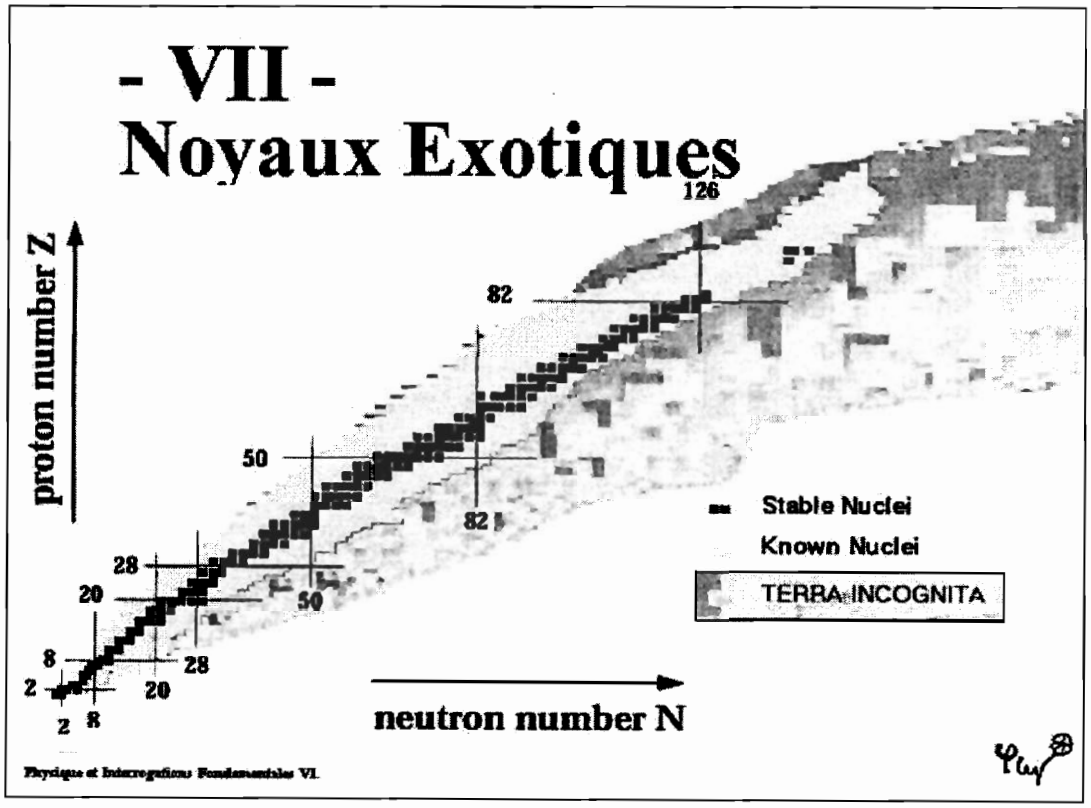


Figure 20 : Carte des noyaux en fonction de leur nombre de neutrons et de protons. Les cases noires sont les noyaux stables. La zone coloriée représente les noyaux que l'on prédit être liés par l'interaction nucléaire forte. Les lignes montrent la position des nombres magiques nucléaires.

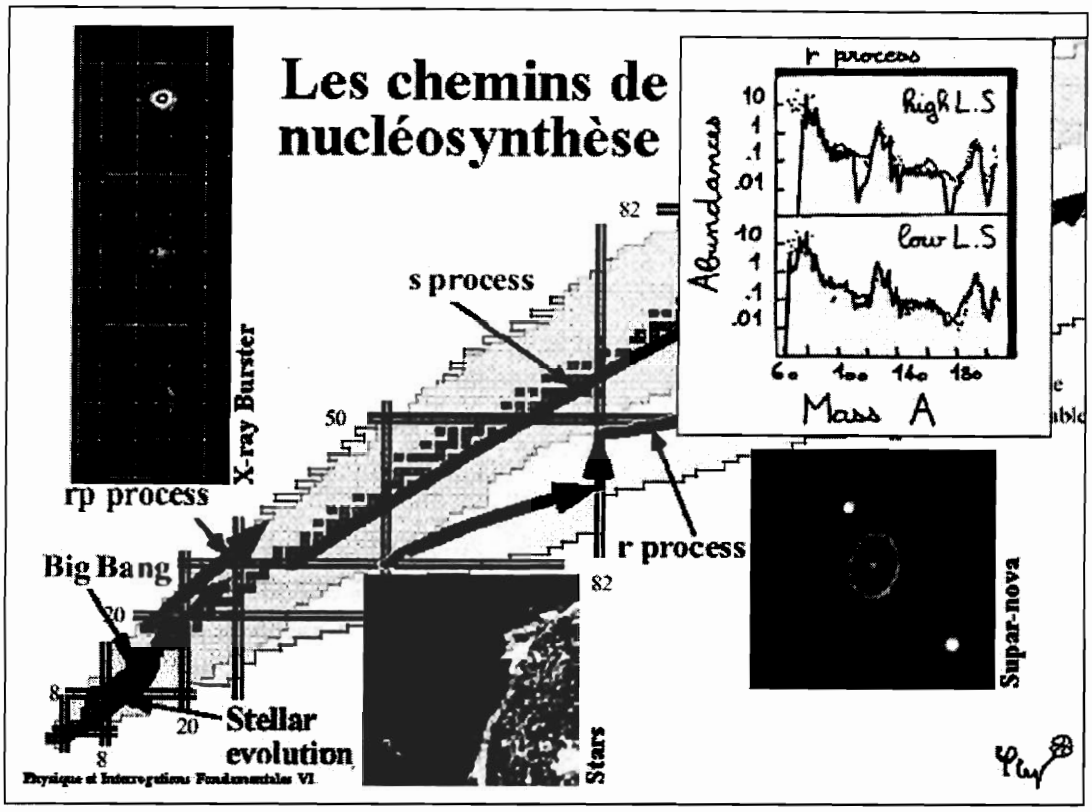


Figure 21 : *Sur la carte des noyaux sont représentés plusieurs types de nucléosynthèses depuis le Big Bang qui n'a formé que les noyaux les plus légers. La combustion stellaire qui crée les éléments plus légers que le Fer. Les réactions associées au éclair X qui donnent des noyaux riches en protons par absorption rapide de ceux-ci. La capture lente (processus s) ou rapide (processus r) de neutrons qui forme les noyaux les plus lourds. La dernière a lieu dans les supernovae. Les abondances associées au processus r sont comparées aux prédictions théoriques. Les surabondances de certains éléments sont dues à la présence des couches. Lors de la capture rapide de neutrons, le noyau augmente de masse rapidement. Quand il est trop riche en neutron l'un d'eux se transforme en proton par radioactivité β. Lorsqu'un nombre magique de neutrons est atteint la capture d'un neutron supplémentaire est rapidement suivi d'une décroissance radioactive pour que le noyau retrouve un nombre magique de neutrons. Le chemin de la nucléosynthèse suit ainsi les lignes magiques. Quand le processus s'achève, tous les noyaux laissés en chemin retourne vers la stabilité. Les fils et filles des noyaux magiques seront en surabondance. Pourtant pour comprendre les observations il faut réduire l'importance des couches (comparaisons entre les données (points) et les deux calculs (ligne) avec le modèle des couches standard (haut) et un modèle aux couches affaiblies (bas)).*

Prenons la carte où, en abscisse, on porte le nombre de neutrons et en ordonnée celui de protons et marquons tous les noyaux dont les nucléons sont liés par l'interaction forte. Il y en a plus de 5 000 à 7000 suivant les modèles nucléaires. Sur cette carte, les nombres magiques sont un principe structurant essentiel. Toutefois, cette vision du noyau a été construite en étudiant les noyaux que l'on trouve à l'état naturel sur terre. Ce sont les carrés noirs sur la figure ci-dessous ; il y en a seulement 250. Tous les autres sont des noyaux extraterrestres. On les dit exotiques.
On peut légitimement se poser la question de savoir si notre modèle construit sur à peine 5 % des noyaux possibles est réellement pertinent. C'est pour cela que depuis la découverte des premiers noyaux de synthèse par Frédérique et Irène Joliot-Curie, on étudie activement ces noyaux artificiels.
Le cosmos ne nous a pas attendu pour explorer cette carte. Différents chaudrons cosmiques produisent en abondance des isotopes stables ou radioactifs. Le Big Bang, les étoiles, les systèmes binaires, les novæ et supernovae ... sont ou ont été des usines à nucléosynthèse. La formation de nouveau noyau s'y fait en suivant des chemins bien spécifiques. Si l'on modélise l'un de ces chemins de la nucléosynthèse, on calcule le genre de trajectoires présentées sur la figure 21. Par exemple, dans les supernovae, de grosses étoiles dont le cœur de Fer implose sous l'action de la gravité et dont les couches externes sont soufflées par le choc, on prédit de très forts flux de neutrons. Les noyaux les capturent et grossissent. Les décroissances β les enrichissent en protons. Lorsqu'ils rencontrent un nombre magique, ils ont du mal à dépasser ce surcroît de stabilité et se mettent à suivre la ligne correspondante jusqu'à réussir à s'en échapper. Il y a ainsi accumulation d'isotopes près de ces nombres magiques. C'est ce que l'on observe sur les abondances isotopiques. Les surabondances de certains éléments sont bien en rapport avec la magicité de leurs parents. Seul problème : notre "modèle standard" prédit un trop fort effet des nombres magiques. Pour comprendre nos observations, il faut artificiellement réduire l'importance des couches. Les noyaux exotiques cacheraient-ils un nouveau mystère ?

Voilà pourquoi une machine comme le GANIL à CAEN cherche à explorer les propriétés de ces noyaux depuis une quinzaine d'années. Nous allons voir que c'est là une véritable Terra Incognita qui nous a réservée moult surprises et qui recèle encore bien des mystères.

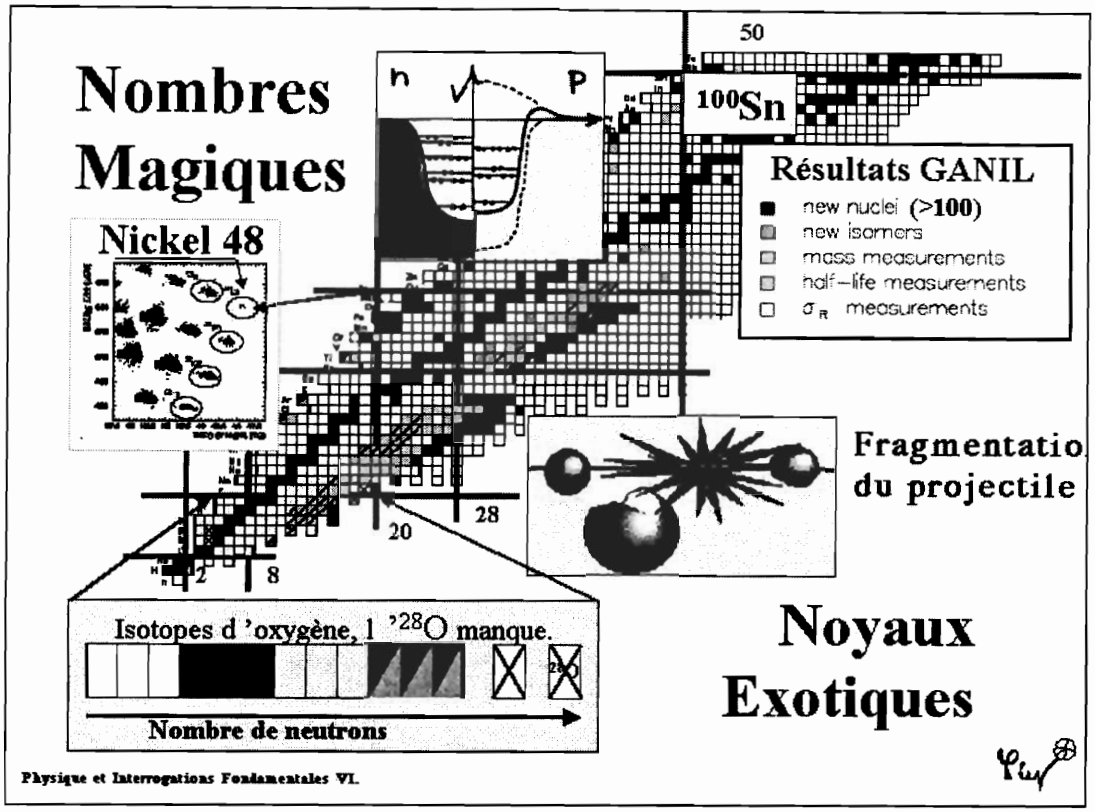


Figure 22 : *Partie basse de la carte des noyaux présentant avec un code de couleur les diverses premières et découvertes faites au GANIL. En particulier plus de 100 noyaux y ont été synthétisés pour la première fois comme en particulier les deux noyaux doublement magiques d'Etain 100 et de Nickel 48. Tous ces noyaux exotiques sont formés en fracassant les noyaux des faisceaux du Ganil sur des noyaux cible. La figure du bas illustre le fait que les physicien du GANIL ont pu démontrer que le noyau d'oxygène 28 n'est pas lié.*

Comment produit-on ces noyaux exotiques ? très simplement, en fracassant deux noyaux, l'un sur l'autre. Ainsi a-t-on découvert ne serait-ce qu'à GANIL, plus de cent noyaux nouveaux dans les dix dernières années. De nouveaux isomères en pagaille. La masse, la durée de vie, la taille de plusieurs centaines de noyaux ont été mesurées pour la première fois. Un important sujet d'étude est le contrôle la pertinence et de la persistance des nombres magiques loin des noyaux stables. Ainsi l'étain 100 a été découvert en 1995 et le nickel 48 en 1999, deux noyaux doublement magiques. Ce dernier a été une réelle surprise car la plupart des modèles nucléaires le prévoyaient non lié. À l'inverse, l'oxygène 28 avec un nombre magique de protons (8) et un nombre magique de neutrons (20) s'est avéré non lié contredisant de nouveau la plupart des modèles. Les observations de la famille des oxygènes sont encore plus étonnantes car non seulement l'oxygène 28 n'existe pas, mais le dernier des oxygènes est l'oxygène 24. Il semblerait que le nombre 16 soit devenu magique.

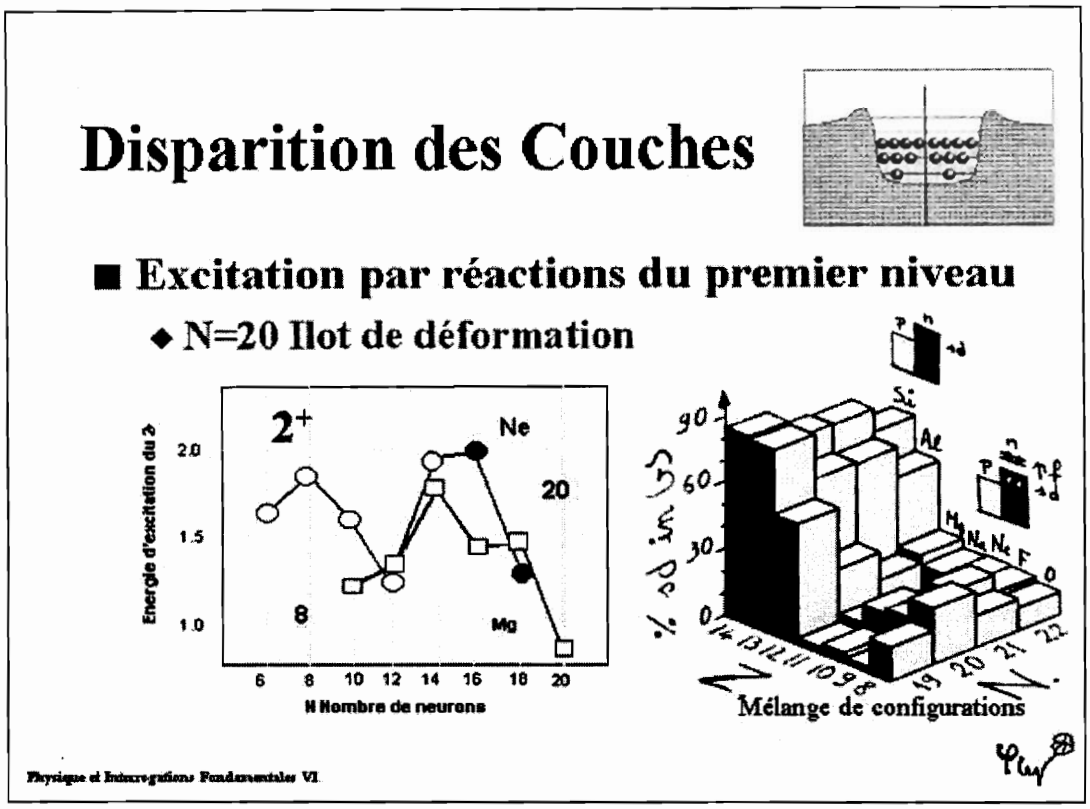


Figure 23 : *La figure illustre la disparition de la couche à 20 neutrons dans les noyaux très pauvres en protons (très exotiques). Un noyau magique doit être difficilement excitable. L'énergie nécessaire pour atteindre le premier niveau (de spin et parité 2^+) doit donc être très élevée. La figure de gauche montre que ce n'est pas le cas pour les Magnésiums et les Néons. Ils ne sont donc pas magiques. La figure de droite présente les résultats d'un calcul très sophistiqué qui prend en compte toutes les répartitions des nucléons sur les différents niveaux. La figure présente la chance de trouver la répartition prévue par le modèle des couches. Pour les noyaux très exotiques, la configuration du modèle en couche n'est plus du tout la plus importante. La magicité a disparu.*

En fait c'est bien le nombre magique 20 qui disparaît quand on s'éloigne de la stabilité. Tous les noyaux comportant vingt neutrons ne semblent pas être magiques lorsqu'ils sont pauvres en protons. En particulier, un noyau magique, de par sa robustesse, est très difficile à exciter. L'énergie de son premier niveau doit donc être élevée. La figure 23 démontre que ce n'est pas le cas pour les magnésiums ou les néons qui présentent un premier niveau excité à très basse énergie. On le comprend aujourd'hui comme la conséquence de la déformation de ces noyaux exotiques, les deux derniers neutrons préférant aller occuper des niveaux d'énergie supérieure les interactions entre particule permettant à ces

configurations d'avoir une énergie plus basse que celle que prédit le modèle des couches. Les noyaux exotiques sont complexes et leur magicité s'évanouit.
L'exploration des noyaux exotiques nous a révélé des structures encore plus étonnantes : des noyaux à halo ou des peaux de neutrons, des noyaux Borroméens, des noyaux en forme de molécules, des dimères et des polymères. Les modèles actuels cherchent à prendre en compte ces nouvelles structures. C'est tout un foisonnement d'idée qui agite la physique nucléaire théorique à la suite des avancées expérimentales.

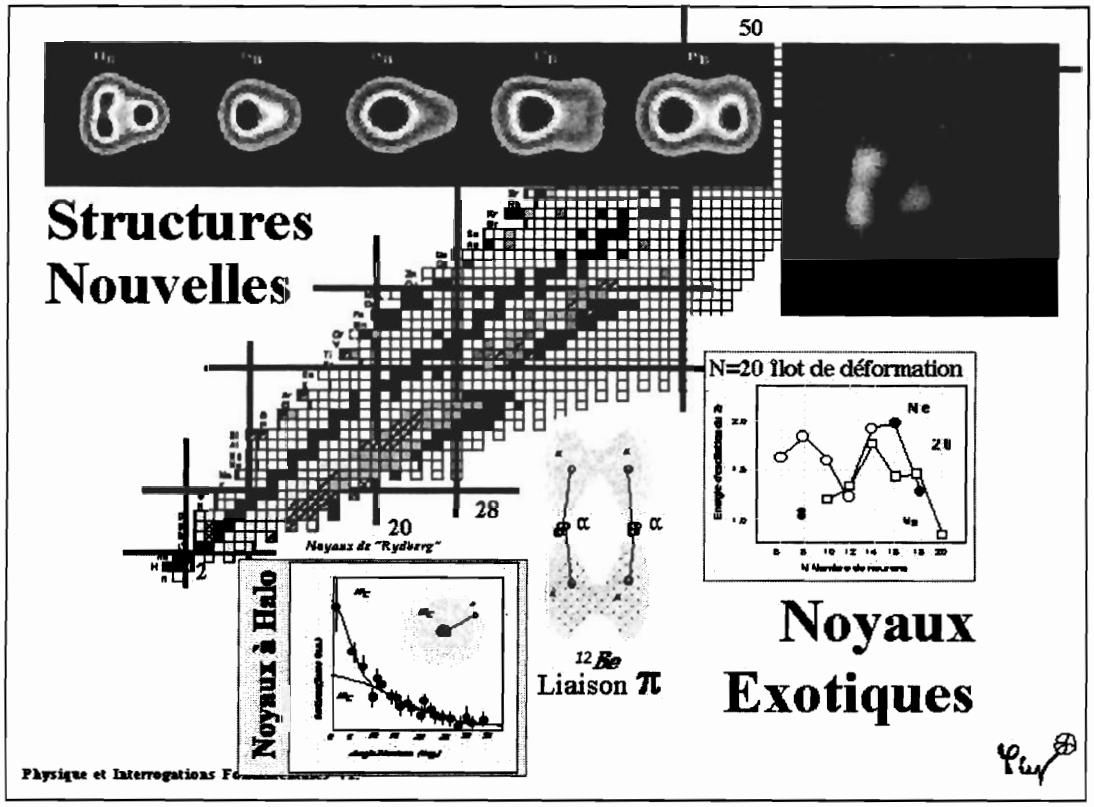


Figure 24 : *Sur la carte des noyaux découverts et étudiés au GANIL on présente quelques résultats essentiels : des noyaux à halo (bas à gauche), des noyaux moléculaires (bas milieu), des noyaux déformés (centre droit)... Des résultats typiques des nouvelles approches théoriques sont aussi présentés en hauts.*

Prenons comme exemple la découverte des noyaux à halo. En 1985, un jeune physicien, Isao Tanihata cherchait à explorer les propriétés des noyaux exotiques. Il eut l'idée de refaire l'expérience de Rutherford pour en mesurer la taille. Sa surprise fut grande de découvrir que les noyaux légers, très exotiques étaient beaucoup plus gros que prévus. En fait, le noyau de Lithium 11 est deux à trois fois plus gros que ses voisins. Aussi gros qu'un plomb qui a pourtant vingt fois plus de particules. La figure 25 démontre que ce gonflement des noyaux exotiques est une propriété générale, en tout cas pour les noyaux légers.

C'est la mécanique quantique qui fournit une première clef à ce phénomène. Les derniers nucléons étant peu liés leurs fonctions d'onde s'étendent très loin du noyau. Une onde évanescente pénètre très loin sous le potentiel nucléaire.

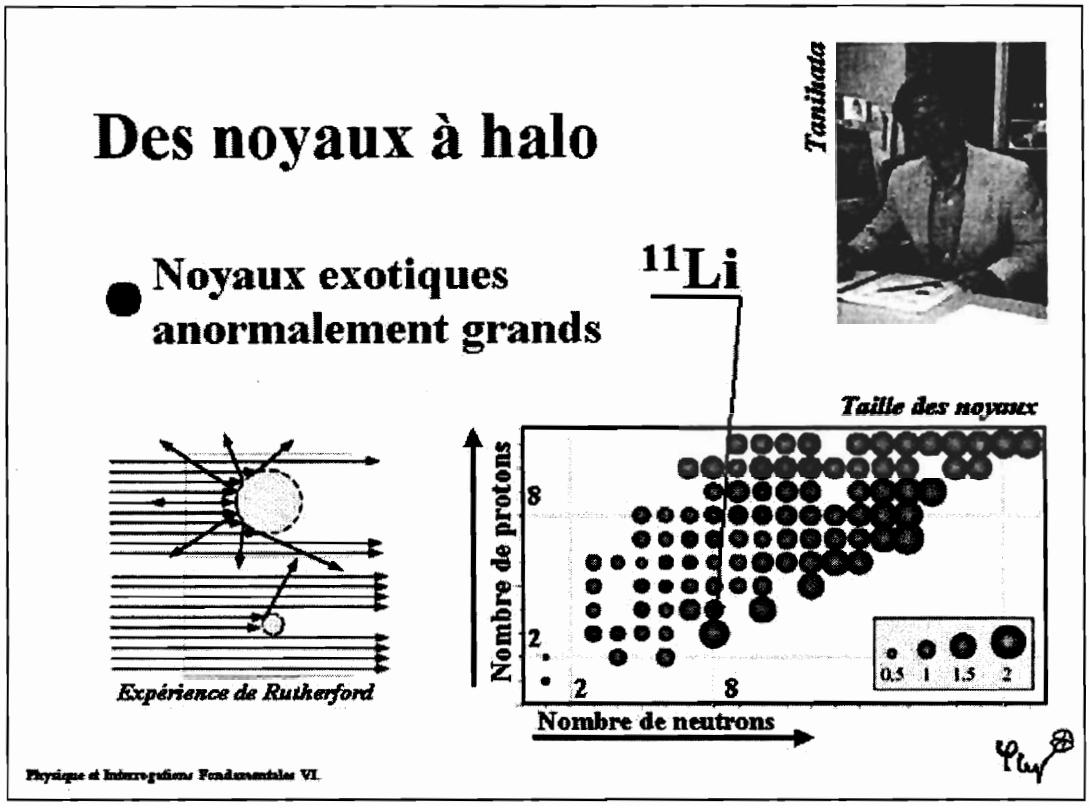


Figure 25 : *La figure de gauche rappelle comment le taux de collision est proportionnel à la taille des obstacles. C'est ainsi que la figure de droite a pu être obtenue. Elle donne la taille réduite des noyaux ($r_0=R/A^{1/3}$) pour chaque noyau. On observe que tous les noyaux très éloignés des noyaux stables (en bleu) sont de taille anormalement grande. C'est ce que Isao Tanihata a découvert en 1985.*

En dissociant rapidement de tels noyaux, en les projetant violemment sur une cible, on peut mesurer directement la fonction d'onde des neutrons du halo (figure 25). Les neutrons poursuivent en effet leur route après le choc en conservant la distribution de vitesse qu'ils avaient dans le noyau. La faible dispersion des neutrons autour de leur direction initiale signifie qu'ils présentaient peu d'agitation avant la réaction. S'ils s'agitaient peu, c'est qu'ils étaient très délocalisés nous apprend le principe d'incertitude d'Heisenberg. Ils forment bien un halo étendu autour d'un cœur.

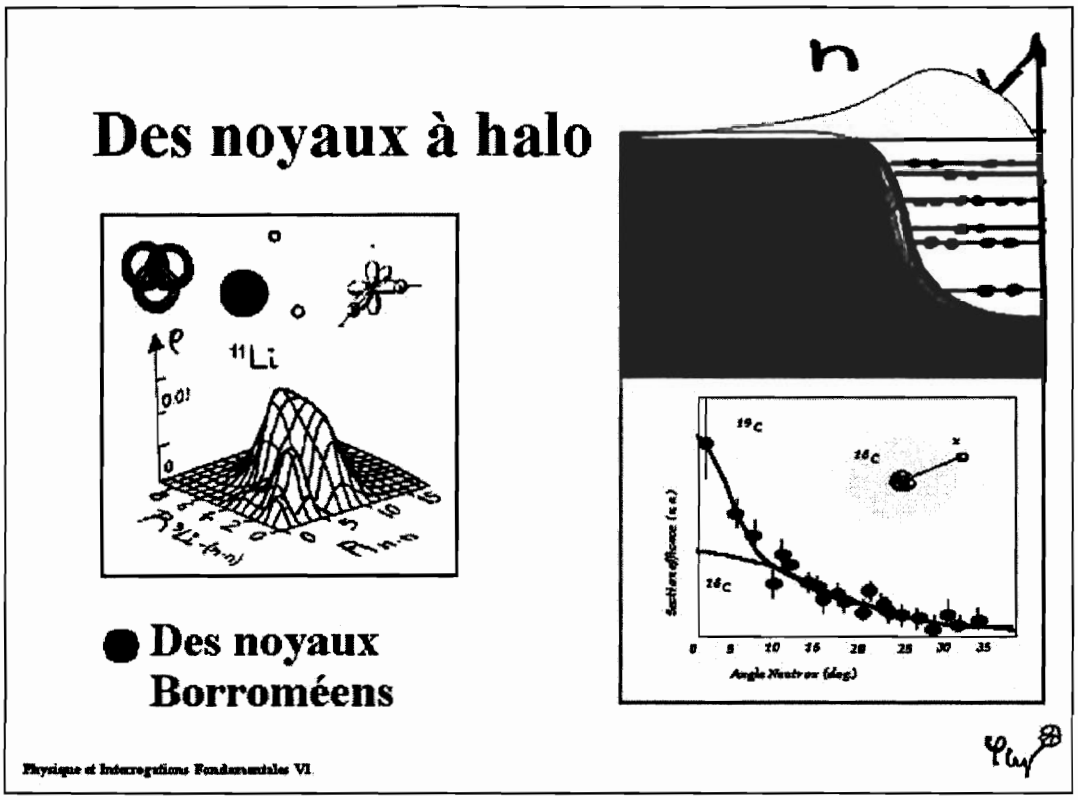


Figure 26 : *Les noyaux à halo les plus simples se comprennent comme une conséquence de la très faible liaison du dernier neutron. La fonction d'onde du dernier neutron s'étend très loin du cœur et forme le halo. Par la taille et la faible liaison, le halo présente une certaine analogie avec un niveau de Rydberg de l'atome. Cette grande extension peut être démontrée en dissociant rapidement les neutrons. Comme les couverts qui restent en place sur la table si l'on tire d'un coup sec la nappe une collision violente peut expulser le noyau cœur d'un noyau à halo tout en laissant le neutron restant avec la distribution de vitesse qu'il avait dans le noyau. L'observation d'une distribution en vitesse étroite démontre la grande taille de l'orbite du neutron du halo. En effet, le principe d'incertitude stipule que l'extension en position est inversement proportionnelle à la dispersion en vitesse. La figure de gauche montre un cas beaucoup plus étonnant du Lithium 11 qui est l'archétype des noyaux dit Borroméens. En effet comme les trois anneaux entrelacés de la famille Borromée, ils sont formés de trois composantes (ici un Lithium 9 et deux neutrons) qui ne sont plus liées si l'on retire l'une d'entre elles. Cette stabilité anormale peut être comprise en résolvant le problème quantique à trois corps. La probabilité de trouver à la fois une distance $r_{Li\text{-}nn}$ entre le Lithium 9 et la paire de neutrons et une distance $r_{n\text{-}n}$ entre les deux neutrons est présentée à gauche. Ce calcul montre que ces trois corps ont tendance à se placer aux trois coins d'un triangle un peu à la manière des atomes dans la molécule d'eau.*

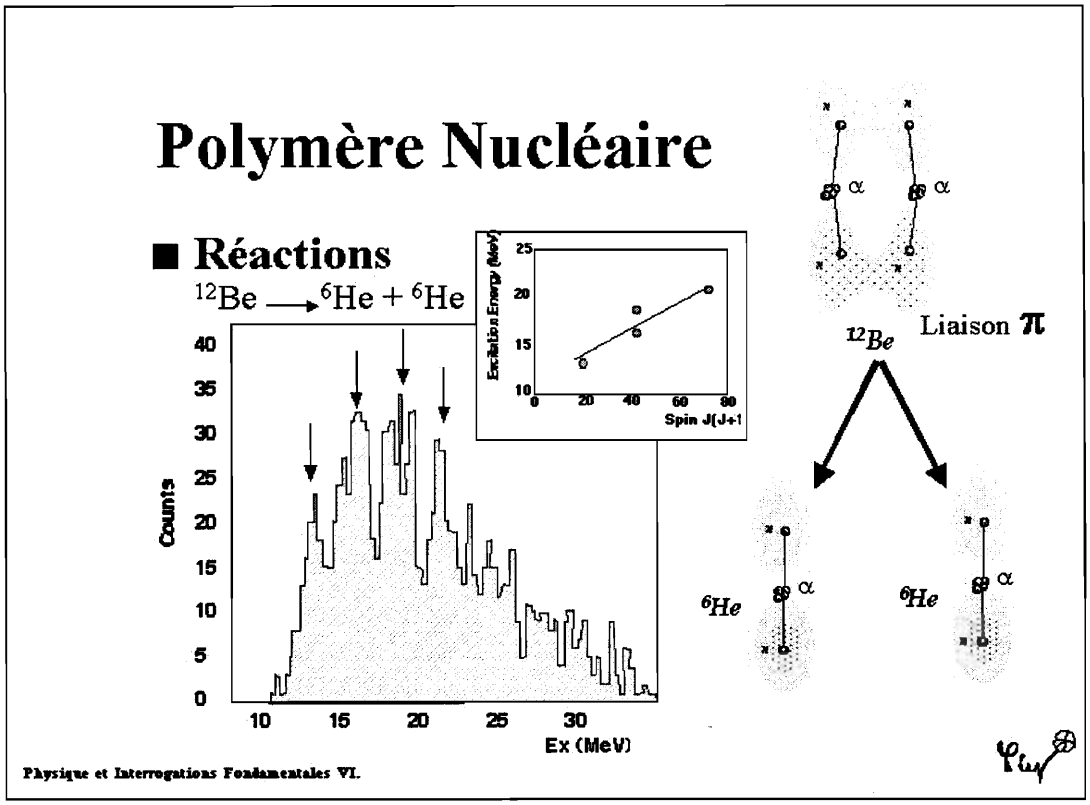


Figure 27 : *La figure de gauche montre la probabilité de trouver le Béryllium 12 dans un état d'énergie Ex lorsqu'il se case en deux noyaux à halo d'Hélium 6. Les pics présents sur cette figure suivent les lois caractéristiques d'états en forme de molécule en rotation (voir l'insert qui reprend les énergies des pics et les portent en fonction de leur spin). Les états observés correspondent au schéma de droite où l'on voit deux noyaux d'Hélium 6 qui ont hybridé les neutrons de leur halo pour former un état moléculaire du Béryllium 12 à la manière de monomère qui hybride leurs électrons de valence pour former des dimères.*

Des noyaux encore plus bizarres ont été observés et c'est le cas du fameux lithium 11 qui est un cœur de Lithium 9 entouré de 2 neutrons. En effet, c'est un système très particulier car ni le système à deux neutrons ni le lithium 10 ne sont liés. Ce phénomène est impossible en mécanique classique. C'est la mécanique quantique du système à trois composantes qui permet de comprendre la structure (et même l'existence) du lithium 11. Le calcul prédit qu'il ressemble à une molécule d'H_2O. Des noyaux en forme de molécule !cela peut paraître étonnant.
Récemment, les premiers polymères nucléaires ont pu être isolé. Des Bérylliums 12 excités présentent toutes les caractéristiques d'un système de deux noyaux à halo d'hélium 6 ayant hybridé les orbitales de leur halo pour créer une liaison (de type π) entre eux. Les neutrons remplacent les électrons dans cette liaison

"chimique" d'un nouveau genre. C'est cette nouvelle diversité du noyau atomique que les modèles nucléaires essayent de cerner aujourd'hui (figure 28).

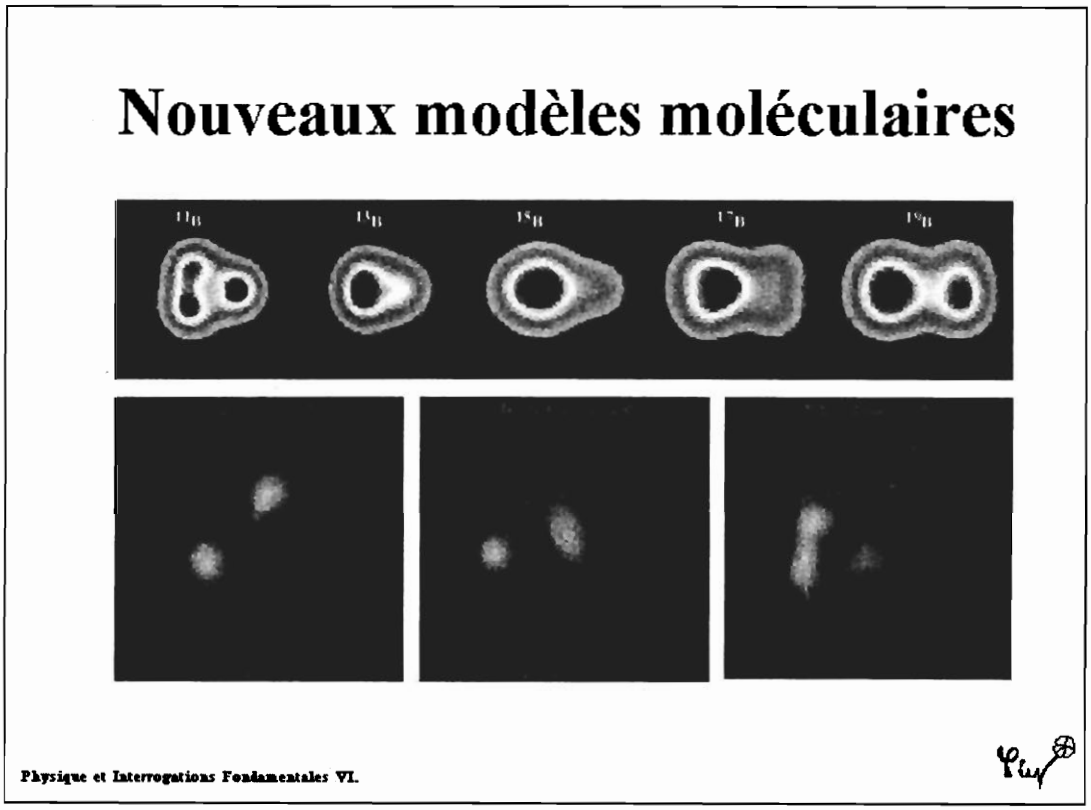


Figure 28 : *Cette figure présente quelques exemples de résultats obtenus avec deux modèles récents de noyaux moléculaires : AMD en haut et FMD en bas.*

8) Conclusion : Le noyau un kaléidoscope d'univers quantiques.

Ainsi les noyaux se sont révélés des objets quantiques d'une extraordinaire diversité. Ils semblent être aujourd'hui des systèmes quantiques complexes granulaires. L'exploration du monde subatomique a participé de façon essentielle à la genèse de la mécanique quantique. Sa structure n'est pourtant pas encore comprise et l'étude des noyaux exotiques nous révèle chaque jour de nouvelles facettes de ce système complexe qu'est le noyau. La révolution des quanta dans le monde subatomique n'est pas encore achevée.

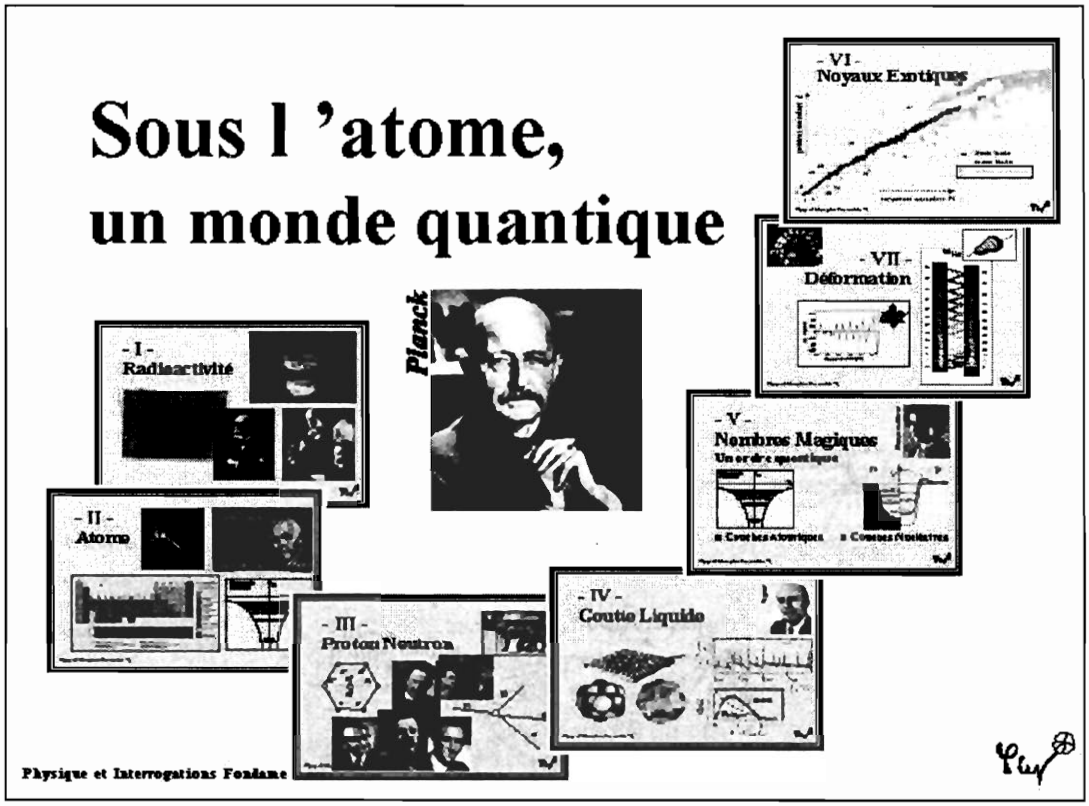


Figure 29 : *Autour de Planck qui inventa les quanta une ronde de phénomène ou d'Univers quantiques dans l'atome.*