

Le noyau atomique : du liquide quantique à la molécule

J.-P. EBRAN / CEA-DAM Île-de-France

E. KHAN / Institut de physique nucléaire, Orsay, France

T. NIKŠIĆ - D. VRETENAR / Université de Zagreb, Croatie

Dans le cadre des approches de type théorie de la fonctionnelle de la densité (DFT) appliquées à la physique nucléaire, une nouvelle condition influençant la formation d'agrégats de nucléons dans le noyau atomique a été mise en exergue. La profondeur du potentiel moyen dans lequel évoluent les nucléons a une incidence directe sur la localisation des orbitales nucléoniques. Le degré de localisation de ces orbitales, relativement à la distance moyenne des nucléons dans le noyau, conditionne la phase dans laquelle se trouve celui-ci : liquide quantique ou cristal de Wigner. Il permet en outre d'interpréter l'état moléculaire des noyaux comme une phase hybride, intermédiaire entre le liquide quantique et le solide.

Goutte liquide, molécule, halo, bulle... Autant de manifestations de la richesse des systèmes nucléaires, conséquence de la nature particulière des interactions entre nucléons – une partie d'entre elles est une réminiscence des interactions fortes entre quarks et gluons – dans un contexte de problématique à N corps où les effets de taille finie sont importants. Aussi, la représentation du noyau atomique en termes d'une assemblée de nucléons se répartissant de façon quasi homogène dans le volume nucléaire, autrement dit d'un liquide quantique, n'est-elle pas toujours adaptée. En particulier, les nucléons peuvent s'arranger en agrégats (clusters) [1], sous-structures liées au sein même du noyau. À l'heure actuelle, l'origine du phénomène d'agrégation dans les systèmes nucléaires est mal comprise. Dans un travail récent [2], une nouvelle condition nécessaire à la formation de structures agrégées dans

les noyaux atomiques a été mise en évidence dans le cadre d'une approche de type DFT apte à traiter, dans un cadre unifié, leurs natures liquide quantique et agrégat.

Liquide quantique ou agrégat ?

Les approches de type DFT telles qu'elles sont employées en physique nucléaire représentent le système de A nucléons en interaction par un système de A quasi-particules indépendantes, évoluant dans un potentiel moyen prenant en compte les corrélations nucléoniques de courtes portées. La profondeur de ce potentiel confinant les nucléons à l'intérieur du noyau pilote le degré de dispersion des orbitales nucléoniques, de sorte qu'un potentiel d'autant plus profond conduit à de telles orbitales d'autant plus localisées, favorisant l'émergence de structures en agrégats dans les systèmes nucléaires concernés.

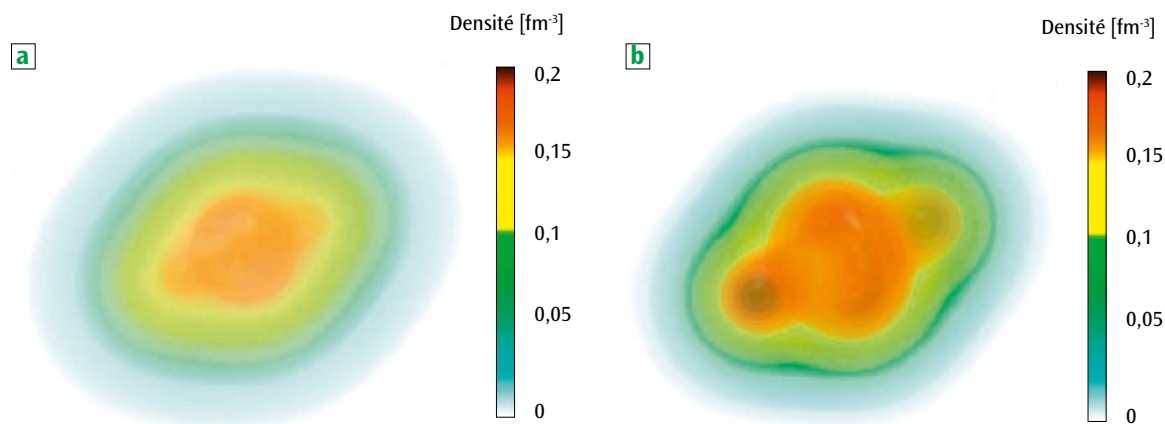


Figure 1. Densité du néon-20 dans son état fondamental issue d'une approche de type DFT non relativiste (a) et de son homologue relativiste (b).

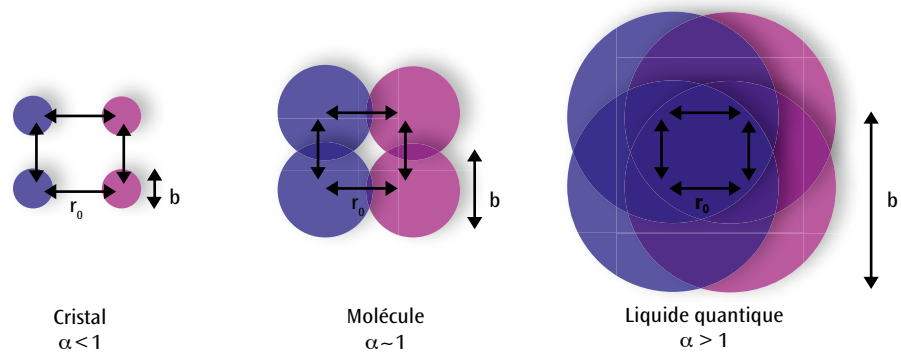


Figure 2. Schéma des phases thermodynamiques associées au paramètre α , rapport de la dispersion b des orbitales nucléoniques et de la distance moyenne r_0 des nucléons dans le noyau.

Pour illustrer cette propriété, il est possible de faire appel à deux classes d'approche de type DFT intervenant en physique nucléaire. La première traite le noyau comme un système de nucléons non relativistes. La seconde estime importante la prise en compte des symétries de Lorentz pour l'étude des systèmes nucléaires. La dynamique des nucléons dans le noyau est alors décrite dans un cadre covariant, leurs interactions dans le milieu nucléaire étant représentées par l'échange de mésons effectifs. La **figure 1** présente les profils de densité nucléonique du néon-20 obtenus à partir de ces deux classes d'approche. Alors que toutes deux reproduisent avec succès les observables du néon-20, la densité nucléonique de l'approche non relativiste est caractéristique d'un liquide quantique (répartition homogène des nucléons dans le volume nucléaire déformé), tandis que celle de l'approche relativiste correspond à une structure en agrégat α - ^{12}C - α . La différence principale entre les deux approches réside dans la profondeur du potentiel moyen, plus grande dans le cas relativiste.

Les données expérimentales ne fournissent pas de contraintes sur la profondeur de potentiel. En revanche, elles renseignent sur la valeur du potentiel spin-orbite, une des contributions au potentiel d'interaction entre nucléons dans le milieu. Or, contrairement au cas non relativiste qui ajoute la contribution spin-orbite de façon *ad hoc*, cette dernière émerge naturellement dans un formalisme covariant et se trouve reliée au potentiel central. Par conséquent, dès lors que l'on adopte une description relativiste de la dynamique nucléonique, une bonne reproduction des propriétés inhérentes au potentiel spin-orbite nous assure un traitement réaliste du potentiel central, et donc une profondeur de potentiel correcte.

Une mesure du degré de localisation des orbitales nucléoniques est donnée par le rapport de la dispersion moyenne de ces dernières et de la distance moyenne des nucléons dans le noyau (**figure 2**). Lorsque ce rapport est grand devant 1,

les nucléons sont délocalisés dans le noyau. Leurs orbitales occupent une grande partie du volume nucléaire et présentent un chevauchement important résultant en une densité totale homogène : le noyau est dans une phase de type liquide quantique. Dans celle-ci, les fluctuations quantiques restent significatives même dans l'état fondamental en raison d'un potentiel d'interaction trop faible relativement à sa portée pour localiser les nucléons dans le noyau. Au contraire, un rapport petit devant 1 correspond à une phase de type cristal de Wigner dans laquelle les nucléons se trouvent localisés aux sites d'un réseau. Lorsque le rapport est proche de 1, le noyau se trouve dans une phase hybride dans laquelle peuvent émerger des structures en agrégats, pourvu que d'autres conditions soient réalisées (déformation et proximité du *continuum* entre autres). La phase thermodynamique correspondante maximise la probabilité pour que deux protons et deux neutrons se retrouvent dans un espace de taille suffisamment restreinte pour que les corrélations nucléoniques en forment un état lié.

Conclusion

La reproduction de structures en agglomérats dans les approches de type DFT met en avant la capacité de ces dernières à traiter, dans un cadre unifié, les natures liquide quantique et agrégat des noyaux atomiques. En outre, l'influence démontrée de la profondeur de potentiel sur l'émergence de telles structures rend possible l'affinement des potentiels moyens intervenant au sein des approches non relativistes.

Références

- [1] C.F.V. WEIZSÄCKER, "Neuere Modellvorstellungen über den Bau der Atomkerne", *Naturwissenschaften*, **26**, p. 209-217 (1938).
- [2] J.-P. EBRAN, E. KHAN, T. NIKSIC, D. VRETNAR, "How Atomic Nuclei Cluster", *Nature*, **487**, p. 341-344 (2012).