

# Le chat mort-vivant, le parapluie passe-muraille et le nuage moléculaire : *mécanique quantique et astrophysique*

David Viennot, enseignant-chercheur à l'Observatoire de Besançon

*Pilier de la physique moderne, la mécanique quantique regorge d'effets allant contre le sens commun mais prouvés expérimentalement. Cette science des particules, des atomes et des molécules, est aussi un des savoirs fondamentaux de l'astrophysique du XXIème siècle.*

Pour comprendre un "astre", il ne suffit pas à l'astrophysicien d'étudier sa morphologie, sa position et son mouvement (sa *dynamique*), mais il lui faut aussi connaître sa composition et ses processus internes les plus fondamentaux. Comprendre la physique et la chimie des éléments constituant les objets astronomiques est fondamental tant pour étudier les propriétés microscopiques de ces objets que pour les comprendre à l'échelle astronomique. On sait depuis la fin du XIXème siècle, que la matière est composée de particules fondamentales organisées en atomes, eux-mêmes organisés en molécules. Ces objets obéissent à des lois physiques particulières, différentes des lois qui s'appliquent à notre échelle, et qui fondent une théorie appelée *mécanique quantique*. Ces lois ont des conséquences qui peuvent nous apparaître totalement contre-intuitives, découvrant ainsi le voile sur un monde microscopique étrange, peuplé "d'êtres mort-vivants", d'objets se trouvant partout et nulle part à la fois et de particules jouant les passe-murailles. Mais ces effets, observés en laboratoire, permettent de comprendre de nombreux phénomènes physiques et astronomiques. L'équipe de recherches *Dynamique et photophysique des milieux dilués astronomiques* de l'Observatoire de Besançon (intégrée dans la futur équipe *Dynamique et réactivité pour l'environnement et les astromolécules (DREAM)* commune avec le Laboratoire de Physique Moléculaire de l'Université de Franche-Comté) étudie à travers des calculs théoriques de mécanique quantique, la physique des molécules des nébuleuses diffuses (également appelés nuages moléculaires), qui sont de grands ensembles de gaz dans le milieu interstellaire (cf. fig. 1).

La mécanique quantique tire son nom du *principe de quantification*. Celui-ci énonce que certaines propriétés prenant dans le monde macroscopique leurs valeurs dans un "réservoir" continu de possibilités (comme un toboggan), sont limitées à des valeurs discrètes (comme une échelle) dans le monde microscopique. Ainsi, si un satellite peut à priori tourner en orbite autour d'une planète à n'importe quelle



FIG. 1 – Nébuleuse de la lagune ((c) VLT).

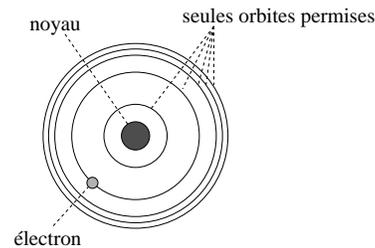


FIG. 2 – Représentation schématique d'un atome d'hydrogène.

distance de celle-ci, l'électron autour du noyau de l'atome d'hydrogène ne peut prendre que certaines orbites particulières à des distances précises du noyau (cf. fig. 2).

Il en est de même pour les molécules qui ne peuvent vibrer que sur des fréquences<sup>1</sup> particulières précises, la vibration d'une molécule étant une succession de compressions et de décompressions des liaisons entre ses atomes (les liaisons entre atomes constitutifs d'une molécule pouvant être assimilées à des petits ressorts). Pour vibrer plus rapidement (et donc pour monter sur un barreau supérieur de "l'échelle des vibrations") une molécule doit absorber de l'énergie sous forme de lumière. Les distances entre les barreaux de l'échelle des fréquences de

<sup>1</sup>nombre de vibrations par unité de temps



FIG. 3 – Illustration d’un spectre d’émission. La répartition des raies suit les écarts entre les barreaux de l’échelle des fréquences de vibration moléculaire. L’axe horizontal correspond aux différentes couleurs de la lumière : infrarouge (faible énergie), rouge, orange, jaune, vert, cyan, bleu, violet et ultra-violet (forte énergie).

vibration sont caractéristiques de la molécule. Il est donc possible en étudiant la lumière passée à travers un gaz moléculaire, de savoir qu’elles sont les molécules présentes dans ce gaz. La “signature” des “barreaux de l’échelle” dans le rayonnement, issue de l’absorption de certaines couleurs de la lumière par les molécules, porte le nom de *spectre d’absorption*. De même, un phénomène inverse, correspondant à de la lumière émise par les molécules cherchant à vibrer plus lentement (“descente de l’échelle”), produit un *spectre d’émission* caractéristique des molécules (cf. fig. 3). C’est en étudiant des spectres issus d’observations de nébuleuses diffuses, qu’il est possible de déterminer la composition moléculaire de celles-ci. Mais la composition des nuages est insuffisante pour comprendre ceux-ci, il est également nécessaire de connaître les *processus dynamiques quantiques* (les mouvements et les interactions des molécules), qui sont également caractérisés par des spectres particuliers.

Un exemple de processus dynamique quantique intéressant pour l’astronomie, est celui des collisions de la molécule d’eau avec des molécules de dihydrogène dans les nuages moléculaires en contraction. Sous l’effet de leur propre poids, les nuages moléculaires se contractent (cf. fig. 4). Cette contraction augmente la densité du gaz, ce qui permet dans certains cas de former au cœur de la nébuleuse des étoiles. Mais en se contractant, la température du nuage devrait augmenter, ce qui devrait arrêter la contraction (car les corps s’échauffant ont tendance à se dilater) et ainsi empêcher la formation des étoiles. Un mécanisme doit donc refroidir le nuage au cours de sa contraction. Le refroidissement radiatif par collisions des molécules d’eau pourrait être ce mécanisme. La température est en fait la manifestation à notre échelle de la vitesse de déplacement des molécules, lors d’une collision une partie de l’énergie cinétique (l’énergie associée à la vitesse), peut être transférée à la rotation de la molécule ou convertie en lumière. Ainsi après un choc ayant produit de la lumière, deux molécules rapides peuvent devenir deux molécules lentes, tournant rapidement sur elles-mêmes. Les collisions devenant de plus en plus fréquentes avec la



FIG. 4 – Nuage moléculaire de la couronne australe ((c) Anglo-australien Observatory, photo par David Malin) : ce nuage en effondrement gravitationnel a été étudié par la mission SWAS du point de vue des molécules d’eau qu’il contient.

contraction du gaz, il est possible que ce mécanisme de conversion de l’énergie thermique (i.e. énergie cinétique des molécules) en énergie de rotation des molécules et en lumière, explique le refroidissement du gaz. Les collisions de la molécule d’eau semblent être les meilleurs candidats pour ce mécanisme, les chercheurs de l’Observatoire de Besançon étudient la signature spectrale des collisions de l’eau avec le dihydrogène (la molécule composant majoritairement les nébuleuses diffuses) afin de mettre en évidence ce phénomène de refroidissement radiatif par collisions moléculaires.

Après la quantification, le deuxième principe le plus important de la mécanique quantique est la *superposition d’états*. On comprend ce principe à travers la parabole du Chat de Schrödinger. Considérons une expérience (de pensée) consistant à mettre dans une boîte, un chat, une fiole de poison, un atome d’uranium qui comme chacun sait est radioactif (c’est à dire que le noyau de l’atome peut se désintégrer en émettant des radiations), et un système prévu pour briser la fiole si le noyau se désintègre (cf. fig. 5). On ferme la boîte pendant 5 min et on suppose que pendant ce laps de temps, il y a une chance sur deux pour que le noyau d’uranium se désintègre. On a donc une chance sur deux pour qu’à la fin de l’expérience en ouvrant la boîte, le chat soit mort, et une chance sur deux pour qu’il soit vivant. La question est : quel est l’état du chat juste avant l’ouverture de la boîte? La réponse naïve à cette question est que le chat est, soit mort, soit vivant (avec autant de chances pour l’un que pour l’autre) l’information nous étant cachée par la boîte close. Or les mathématiques

Le chat de Schrödinger : la superposition d'états

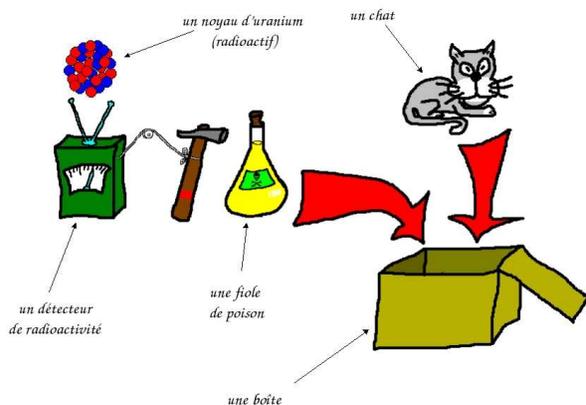


FIG. 5 – Expérience du chat de Schrödinger.

nous donnent un critère, dénommé “*inégalités de Bell*” qui permet avec certaines expériences tests que l’on ne détaillera pas ici, de déterminer s’il y a ou non de l’information cachée dans un système (ici la boîte). Or des expériences de physique atomique menées par le physicien français Alain Aspect, ont montrées que la mécanique quantique violait les inégalités de Bell. Ainsi dans le problème qui nous concerne, la conclusion de ces expériences est qu’il n’y a pas d’information cachée dans la boîte. Pour répondre à la question sur l’état du chat, on doit donc considérer que tant que la boîte est fermée, le chat est à la fois mort et vivant<sup>2</sup> (cf. fig. 6). L’image du chat mort-vivant peut se transposer au problème de la photodissociation d’une molécule. On appelle photodissociation la rupture d’une liaison entre deux atomes d’une molécule (la rupture du ressort) sous l’effet d’une lumière trop intense (la vitesse de vibration du “ressort” ne pouvant croître indéfiniment, lorsqu’on lui communique trop d’énergie celui-ci se “brise”). Mais comme les molécules sont soumises aux lois de la mécanique quantique, celles-ci peuvent être dans une superposition entre un état brisé et un état non-brisé (comme le chat qui est dans une superposition entre l’état de mort et l’état de vie). La superposition n’étant pas forcément à 50%-50%, mais pouvant prendre toutes les combinaisons possibles, il est important de calculer les taux de la superposition des états brisées et non-brisées, pour différentes espèces moléculaires soumises à différents rayonnement lumineux, ce afin de comprendre les mécanismes de destruction de ces molécules dans

<sup>2</sup>il s’agit là d’une interprétation possible de la superposition d’états, dite “école de Copenhague”, d’autres interprétations sont possibles, mais sont tout aussi paradoxales qu’un chat mort-vivant.

Le chat de Schrödinger : la superposition d'états

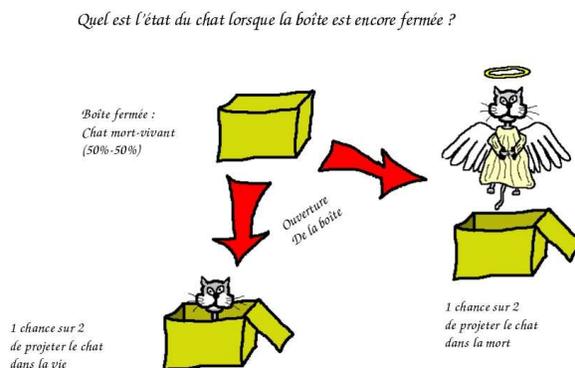


FIG. 6 – Chat mort-vivant dans la boîte fermée.

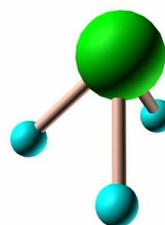


FIG. 7 – Représentation “naïve” de la molécule d’ammoniac.

les nébuleuses. C’est là un des thèmes de recherche majeur des chercheurs en astrophysique moléculaire de l’Observatoire de Besançon.

Un autre effet étrange en mécanique quantique, est l’effet tunnel. Lorsqu’à notre échelle on envoie une balle contre un mur, celle-ci sera invariablement réfléchi (la balle rebondit sur le mur). Mais à l’échelle microscopique, une particule, un atome ou une molécule, peuvent être transmis par le mur. Transmis au sens que l’objet “passe à travers le mur” sans “dommages” pour celui-ci. Ce phénomène est similaire à la lumière par rapport à une vitre, une partie de la lumière peut être transmise par la vitre et une autre réfléchi. L’effet tunnel est particulièrement important pour l’étude de la molécule d’ammoniac. Cette molécule se compose d’un atome d’azote relié à trois atomes d’hydrogène de tel sorte que la molécule ressemble à un trépieds (cf. fig. 7). Du fait des liaisons (des ressorts) entre les atomes d’hydrogène et l’atome d’azote, le plan des atomes d’hydrogène est un véritable mur pour l’atome d’azote. Si les lois de la mécanique classique

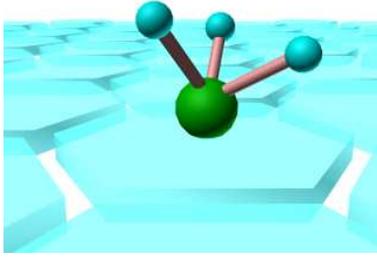


FIG. 8 – Molécule d’ammoniac accrochée à la surface de graphite (cristaux hexagonaux) d’un grain de poussière interstellaire.

s’appliquaient, la géométrie en parapluie de la molécule s’opposerait à toute tentative de faire passer l’azote à travers le plan des atomes d’hydrogène. Mais avec la mécanique quantique, le “parapluie” peut s’inverser par effet tunnel. Ainsi, si l’on pouvait voir la molécule d’ammoniac, on la verrait osciller, l’atome d’azote passant régulièrement par effet tunnel de part et d’autre du plan des hydrogènes.

L’étude de la molécule d’ammoniac est très importante en astrophysique, car la photodissociation de celle-ci produit une terminaison composée d’un atome d’azote relié à deux hydrogènes, qui entre dans la structure des acides aminés, les briques élémentaires de la vie. Il est donc très important d’étudier ce phénomène pour comprendre les origines des éléments qui permirent l’apparition de la vie. Or la capacité de la lumière à briser la molécule d’ammoniac dépend du mouvement d’oscillations par effet tunnel de celle-ci. De plus la formation d’acides aminés dans le milieu interstellaire, est sans doute favorisée si la molécule d’ammoniac et les autres molécules constitutives des acides aminés, se trouvent accrochées à un grain de poussière (cf. fig. 8). Le grain permet en effet aux molécules qui lui sont accrochées, de rester à proximité les unes des autres, donnant ainsi à la réaction chimique créant les acides aminés, le temps de se dérouler. Le problème est que la compréhension de l’oscillation du parapluie de l’ammoniac accrochée à la surface d’un grain, est un problème délicat, puisque la surface va gêner ces oscillations. Des chercheurs de l’Observatoire de Besançon se sont donc intéressés aux oscillations de l’ammoniac par effet tunnel gênées par une surface. L’étape suivante de ces recherches, va être dans un proche avenir, la simulation de la photodissociation de la molécule accrochée sur un grain de poussière interstellaire.

Ces phénomènes issus de la mécanique quantique et les applications en astrophysique qui s’y rattachent ne sont que quelques exemples parmi tant d’autres, choi-

sis ici par rapport aux recherches menées à l’Observatoire de Besançon. Le rôle de la mécanique quantique en astrophysique ne se limite pas à l’étude des nébuleuses, elle intervient également par exemple dans l’étude des étoiles (à travers les plasmas solaires), des comètes et des planètes (à travers les atomes et les molécules des atmosphères planétaires), et de l’Univers primordiale (à travers les astroparticules). En dehors de l’astronomie, cette science a également eu, et aura encore, des applications considérables et visibles dans la vie courante, par exemple avec l’informatique (la mécanique quantique est à la base de la physique des semi-conducteurs composant les processeurs de nos ordinateurs), les lasers (que l’on trouve dans nos lecteurs de CD et de DVD par exemple), ou en médecine (avec l’imagerie par résonance magnétique, les IRM).