

1924-2024 : un siècle de physique vu à travers la vie d'un scientifique centenaire

« Pour moi une explication est belle lorsqu'elle est simple »



Michel Fabre de la Ripelle
Chercheur théoricien

Il est rare qu'une trajectoire scientifique individuelle épouse, aussi étroitement qu'ici, un siècle de bouleversements conceptuels. Né en 1924, Michel Fabre de la Ripelle appartient à la première génération de scientifiques formés dans l'ombre des fondateurs de la mécanique quantique. Poursuivant son activité encore maintenant, la vie scientifique de ce physicien théoricien recouvre presque exactement l'histoire de la physique quantique moderne, depuis l'émergence de la dualité onde-corpuscule jusqu'aux approches contemporaines des systèmes à plusieurs corps fortement corrélés, en passant par les expériences d'intrication quantique (1982) et les calculs numériques à grande échelle sur des supercalculateurs. Ayant rencontré et échangé avec des figures majeures telles que Louis de Broglie, Hideki Yukawa, Irène et Frédéric Joliot-Curie, il a été à la fois témoin et acteur de transformations concep-

tuelles profondes touchant la physique des particules, la physique nucléaire et les fondements de la quantification.

Cette chronique propose une relecture d'un siècle fondateur et structurant pour la physique des particules, basée sur une hypothèse simple : la longue vie de Michel Fabre de la Ripelle permet de révéler des continuités conceptuelles que des récits fragmentés pourraient laisser dans l'ombre. À travers les choix théoriques de ce scientifique centenaire, ses résistances intellectuelles et ses orientations méthodologiques, se dessine une lecture de l'évolution de la physique des particules : un modèle centré sur la structure globale et cohérente des systèmes de la nature, plutôt que sur la seule juxtaposition des théories élémentaires ¹.

Dès la fin du XIX^{ème} siècle, l'atome n'est plus cette chose insécable, chère à Démocrite

De quoi parle-t-on ici ? De l'atome, cette chose d'un dixième de milliardième de millimètre, à la base de tout ce dont la nature est constituée (si on ôte le vide). Démocrite l'avait conçu insécable. A la fin du XIX^{ème} siècle, l'atome est devenu un noyau atomique plus ou moins massique avec Z électrons gravitant autour (le modèle de Rutherford, et plus tard celui de Bohr). Puis l'on découvrira que les composants du noyau de l'atome – tous des nucléons – sont de deux types : des protons avec une charge

positive ou des neutrons de charge nulle. Poursuivons ce zoom dans l'infiniment petit, avec, en parallèle, la vie de ce chercheur centenaire.

1924–1934 : l'énergie des composants d'un atome ne peut pas prendre n'importe quelle valeur

La naissance de la mécanique quantique dans les années 1920 ² marque un premier tournant : à cette échelle, la nature – les atomes qui la constituent et les grains de lumière – n'est pas continue mais discrète. Les valeurs de son énergie sont des quantités : des multiples de l'énergie de Planck. Puis l'hypothèse des ondes de matière de Louis de Broglie (1924) poursuit la même idée révolutionnaire : la quantité de mouvement de l'atome, que l'on peut associer à une longueur d'onde, est aussi discontinue ou quantique.

Une vingtaine d'années après, Michel étudie le calcul des probabilités, la mécanique quantique et ondulatoire, la radioactivité et l'électronique ; il rejoint le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), à l'Institut du radium, où il soutient sa thèse de doctorat sous la direction d'un certain... Louis de Broglie (qui aura reçu le prix Nobel de physique en 1929). Cette filiation intellectuelle entre les deux hommes se retrouvera plus tard dans l'idée que la mécanique quantique est surtout une théorie de structures ondulatoires dans un espace abstrait à plusieurs dimensions.

¹ Chromodynamique quantique QCD, électrodynamique quantique QED, théorie du champ moyen nucléaire EFT, etc.

² L'expression « mécanique quantique » fut utilisée pour la première fois en 1924 par Max Born

... 1934–1964 : la composition d'un noyau atomique, les mésons reliant les nucléons, la radioactivité

La période suivante (1934-1964) voit la physique nucléaire devenir un laboratoire conceptuel majeur. En 1934, Hideki Yukawa met au point la théorie des mésons, qui établit que « *au sein du noyau atomique, protons et neutrons sont liés par une force [qui deviendra la force nucléaire forte, l'une des quatre forces fondamentales], médiée par l'échange d'autres particules appelés mésons* ». En 1935, Frédéric et Irène Joliot-Curie obtiennent le prix Nobel de chimie « *en reconnaissance de leur synthèse de nouveaux éléments radioactifs* ». Et en 1964, deux physiciens Murray Gell-Mann et George Zweig suggèrent que d'importantes propriétés des particules soumises à l'interaction forte pourraient s'expliquer si celles-ci étaient constituées d'autres particules plus petites, aujourd'hui connues sous le nom de quarks.

L'atome serait constitué d'un noyau autour duquel gravitent Z électrons ; le noyau atomique est constitué d'un ensemble de Z protons et de N neutrons ³ reliés entre eux par l'interaction forte (des mésons) ; chaque proton / neutron est composé de 3 quarks, dont le confinement est assuré par des gluons.

Mais comment intégrer ce qui allait devenir le modèle standard de la physique des particules avec la mécanique quantique ? Quelle énergie peut-on, doit-on quantifier ? C'est l'époque où s'impose une tension durable entre deux visions : l'approche fondamentale, fondée sur des champs et des symétries, et l'approche effective, reposant sur des potentiels et des

³ $Z + N = A$, le nombre de masse de l'atome

“ Croisant le couple Joliot-Curie à l'institut du radium, puis travaillant avec Hideki Yukawa à l'institut de Kyoto, Michel poussera bientôt sa propre réflexion en s'appuyant sur la légitimité d'un modèle à particules indépendantes : les systèmes à N corps.”

modèles phénoménologiques. Les premières descriptions du noyau atomique oscillent entre ces deux pôles, sans qu'une théorie unifiée ne parvienne à s'imposer : théories des champs d'une part, modèles effectifs d'autre part.

Croisant le couple Joliot-Curie à l'institut du radium, puis travaillant avec Hideki Yukawa à l'institut de Kyoto, Michel poussera bientôt sa propre réflexion en s'appuyant sur la légitimité d'un modèle à particules indépendantes : les systèmes à N corps.

1964–1984 : les éléments du noyau atomique forment-ils des couches ?

Les décennies 1964–1984 sont marquées par une double explosion : celle du « zoo » des particules élémentaires, celle des modèles nucléaires à succès empirique, en particulier le modèle en couches ⁴. Ce dernier organise les nucléons au sein du noyau atomique, prenant l'hypothèse d'un potentiel moyen effectif par nucléon et s'appuyant sur un couplage ⁵ entre le moment cinétique orbital du nucléon et son spin intrinsèque.

C'est dans ce contexte que naît une question critique : les structures en couches des nucléons dans le noyau atomique sont-elles des propriétés fondamentales ou des manifestations émergentes liées à des choix de représentation ? Cette question, centrale dans l'œuvre de Michel

Fabre de la Ripelle, annonce une rupture méthodologique.

1984–2004 : et si le noyau atomique agissait comme un système à N corps, ici des nucléons ?

À partir des années 1980, la physique nucléaire entre dans l'ère des systèmes à plusieurs corps fortement corrélés. Les méthodes de L.D. Faddeev et O. A. Yakubovsky ⁶, les développements hypersphériques ⁷ et les approches variationnelles avancées ⁸ offrent de nouvelles perspectives.

L'approche hypersphérique développée par ce physicien repose sur une idée simple et radicale : la structure des états quantifiés et les effets de type “couches” à l'intérieur du noyau atomique peuvent émerger du comportement de l'opérateur d'énergie cinétique dans un espace de configuration de grande dimension, sans recourir à un potentiel moyen effectif par nucléon.

⁶ L. D. Faddeev, 'Mathematical Aspects of the Three-Body Problem in Quantum Scattering Theory', Israel Program for Scientific Translations (1965) ; O. A. Yakubovsky, 'On the integral equations in the theory of N particle scattering', Sov. J. Nucl. Phys. 5, 937 (1967).

⁷ J. Avery, 'Hyperspherical Harmonics: Applications in Quantum Theory', Kluwer Academic Publishers (1989); Y. Suzuki, K. Varga, 'Stochastic Variational Approach to Quantum-Mechanical Few-Body Problems', Springer (1998) ; M. Fabre de la Ripelle, 'The hyperspherical approach to the nuclear many-body problem', Lecture Notes in Physics 273, Springer (1986).

⁸ R. Jastrow, 'Many-body problem with strong forces', Phys. Rev. 98, 1479 (1955), S. Fantoni, S. Rosati, 'Nuclear matter theory', Nuovo Cimento 25, 593 (1975).

Dans ce cadre, les corrélations entre nucléons sont traitées explicitement, la géométrie globale du noyau atomique prime sur la décomposition en orbitales individuelles, et la quantification des niveaux d'énergie du noyau à N corps ou nucléons apparaît comme une propriété collective et cinématique.

2004–2024 : ces modèles de l'atome sont-ils réalistes ou seulement calculatoires ?

Les travaux expérimentaux d'Alain Aspect et d'autres sur l'intrication quantique ont ravivé l'intérêt pour les fondements de la mécanique quantique, rappelant la confrontation des écoles d'il y a un siècle : la mécanique quantique ne décrit-elle que des probabilités liées à l'acte de mesure, sans réalité physique définie avant l'observation (École de Copenhague) ? Ou la théorie est-elle incomplète, les phénomènes quantiques correspondant à une réalité objective préexistante, indépendante de l'observateur (En particulier A. Einstein) ?

Cette évolution résonne fortement avec l'approche hypersphérique de Michel qui met l'accent sur le caractère global et collectif de la description, la primauté des conditions d'orthogonalité et le rôle structurant de l'espace de configuration. Les coordonnées hypersphériques⁹ ne violent aucune localité physique, ni ne postulent un effet instantané à distance ; elles décrivent le système dans un espace de configuration globale. L'approche de ce théoricien rejoint l'école de Copenhague.

⁹ Les coordonnées hypersphériques sont un système de coordonnées collectives qui paramètrent l'espace de configuration d'un système à N corps au moyen d'un rayon global mesurant son extension et d'angles décrivant la géométrie relative des constituants, permettant une séparation naturelle des degrés de liberté collectifs et corrélés.

“ À travers un siècle de transformations, la physique quantique et la physique des particules ont multiplié les théories, les modèles et les niveaux de description, sans parvenir à une unification complète de l'organisation des quarks, nucléons et électrons au sein de l'atome. ”

La critique d'Alain Aspect et de la “réalité non locale”

Interrogé sur les apports récents de la physique quantique, Michel Fabre de la Ripelle réagit sans détour à propos du prix Nobel Alain Aspect et rejette l'interprétation selon laquelle les équations quantiques décriraient une “réalité non locale”. Pour lui, toutes ces structures mathématiques et statistiques ne sont pas des entités réelles ; il faut distinguer la formulation mathématique d'une théorie, et la réalité ontologique. Ce n'est pas parce qu'une équation fonctionne et prédit admirablement bien les résultats qu'elle “dit le vrai” au sens métaphysique.

Ainsi, un siècle après de Broglie, certaines intuitions fondatrices retrouvent une actualité renouvelée.

Une trajectoire scientifique comme miroir d'un siècle

La cohérence de l'œuvre de ce chercheur en physique théorique tient à une fidélité rare à quelques principes directeurs : la quantification comme propriété globale des éléments de la nature, la méfiance envers les constructions trop dépendantes de potentiels effectifs, la recherche de formulations géométriques et

cinématiques comme solutions de l'équation de Schrödinger.

C'est dans ce paysage scientifique, souvent dominé par la spécialisation et la fragmentation, que Michel Fabre de la Ripelle introduit en 1969, à l'université d'été de Predeal (Roumanie), les polynômes multidimensionnels hypersphériques.

Conclusion

À travers un siècle de transformations, la physique quantique et la physique des particules ont multiplié les théories, les modèles et les niveaux de description, sans parvenir à une unification complète de l'organisation des quarks, nucléons et électrons au sein de l'atome. L'œuvre de Michel Fabre de la Ripelle s'inscrit dans cet espace de tension, en proposant une voie originale où la quantification et les structures collectives - des quarks formant un nucléon, des nucléons formant un noyau atomique - émergent de la géométrie et de l'énergie cinétique de systèmes à N corps : modéliser un potentiel en $r^{-2/3}$ entre les quarks permettant ainsi de reproduire la structure des états excités des nucléons¹⁰.

Cet article voudrait rendre hommage non seulement à une carrière exceptionnelle, mais aussi à une manière de faire de la physique théorique : patiente, conceptuelle, et résolument tournée vers des principes fondateurs. ■

Fabrice Dupuy,
Membre senior de la SEE

¹⁰ M. Fabre de la Ripelle « A confining potential for quarks », Phys. Lett. B 205 (1) 97-102, (1988).