

BULLETIN N° 273
ACADÉMIE EUROPÉENNE INTERDISCIPLINAIRE
DES SCIENCES

INTERDISCIPLINARY EUROPEAN ACADEMY OF SCIENCES



Lundi 8 Janvier 2024 à 14h30

**Examen des candidatures comme membres titulaires de l'AEIS
de Philippe MOINGEON et Jean-Pierre MASTRANGELO**

Lundi 8 Janvier 2024 à 15h00

**« LA MESURE EN MECANIQUE QUANTIQUE
VIA LES INTERPRETATIONS »**

Par Michel GONDRAN
Membre de l'AEIS

Notre Prochaine séance aura lieu le lundi 5 Février 2024 de 15h00 à 17h

**Salle Annexe Amphi Burg
Institut Curie, 12 rue Lhomond – 75005 Paris**

Elle sera consacrée à la conférence du Directeur Christophe PICHON

**« L'émergence cosmique des disques galactiques :
l'ordre à partir du chaos »**

Par le Directeur Christophe PICHON

**Directeur de Recherche au CNRS
UMR 7095, Institut d'Astrophysique de Paris**

ACADÉMIE EUROPÉENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES

INTERDISCIPLINARY EUROPEAN ACADEMY OF SCIENCES

PRÉSIDENT : Pr Victor MASTRANGELO
VICE-PRÉSIDENTE : Dr Edith PERRIER
VICE PRÉSIDENT BELGIQUE(Liège) : Pr Jean SCHMETS
VICE-PRÉSIDENT ITALIE(Rome) : Pr Ernesto DI MAURO
VICE-PRÉSIDENT GRÈCE (Athènes) : Pr Anastassios METAXAS

SECRÉTAIRE GENERAL : Eric CHENIN
SECRÉTAIRE GÉNÉRALE adjointe : Irène HERPE-LITWIN
TRESORIERE GÉNÉRALE : Françoise DUTHEIL

MEMBRES CONSULTATIFS DU CA :
 Gilbert BELAUBRE
 Michel GONDRAN

PRÉSIDENT FONDATEUR : Dr. Lucien LÉVY (†)
PRÉSIDENT D'HONNEUR : Gilbert BELAUBRE

CONSEILLERS SCIENTIFIQUES :
SCIENCES DE LA MATIÈRE : Pr. Gilles COHEN-TANNOUDJI
SCIENCES DE LA VIE ET BIOTECHNIQUES : Pr Ernesto DI MAURO

CONSEILLERS SPÉCIAUX :
ÉDITION : Pr Robert FRANCK
RELATIONS EUROPÉENNES : Pr Jean SCHMETS
RELATIONS avec AX : Gilbert BELAUBRE
RELATIONS VILLE DE PARIS et IDF : Jean BERBINAU et Michel GONDRAN
MOYENS MULTIMÉDIA et UNIVERSITÉS : Pr Victor MASTRANGELO et Éric CHENIN
RECRUTEMENTS : Pr Paul Louis MEUNIER (coordination), Jean BERBINAU, Anne BURBAN, Pr Christian GORINI, Pr Jacques PRINTZ,
SYNTHÈSES SCIENTIFIQUES : Dr Jean-Pierre TREUIL, Marie Françoise PASSINI
MECENAT : Pr Jean Félix DURASTANTI (coordination), Jean BERBINAU, Anne BURBAN
GRANDS ORGANISMES DE RECHERCHE NATIONAUX ET INTERNATIONAUX
 Pr Michel SPIRO
THÈMES ET PROGRAMMES DE COLLOQUES : Dr Johanna HENRION-LATCHE et Pr Jean SCHMETS

SECTION DE NANCY :
PRÉSIDENT : Dr Sylvie PIERRE
SECTION DE REIMS :
PRÉSIDENTE : Dr Johanna HENRION-LATCHE

Janvier 2024

N°273

TABLE DES MATIERES

p. 03 Séance du 8 Janvier 2024 :

- Examen de deux candidatures comme nouveaux membres titulaires de l'AEIS
- Conférence de notre collègue Michel GONDRAN

« **LA MESURE EN MECANIQUE QUANTIQUE VIA LES INTERPRETATIONS** »

p. 11 Documents

Prochaine séance : lundi 5 Février 2024 à 15h00 précises
consacrée à la conférence du Directeur Christophe PICHON

**« L'émergence cosmique des disques galactiques :
 l'ordre à partir du chaos »**

Par le Directeur Christophe PICHON

Directeur de Recherche au CNRS
 UMR 7095, Institut d'Astrophysique de Paris

Académie Européenne Interdisciplinaire des Sciences
 Siège Social : 5 rue Descartes 75005 Paris
 Nouveau Site Web : <http://www.science-inter.com>

ACADÉMIE EUROPÉENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES INTERDISCIPLINARY EUROPEAN ACADEMY OF SCIENCES

Séance du Lundi 8 Janvier 2024

La séance est ouverte à 14h30, sous la Présidence de Victor MASTRANGELO

- **Étaient présents physiquement nos Collègues membres titulaires de Paris** Jean BERBINAU, Anne BURBAN, Éric CHENIN, Jean-Félix DURASTANTI, Françoise DUTHEIL, Michel GONDRAN, Irène HERPE-LITWIN, Victor MASTRANGELO, Paul Louis MEUNIER, Jacques PRINTZ, Denise et André PUMAIN et Jean-Pierre TREUIL
- **Était présent physiquement notre Collègue membre correspondant de Paris** Benoît PRIEUR
- **Était excusé physiquement pour raisons de santé notre Collègue** Gilles COHEN-TANNOUDJI
- **Étaient connectés à distance nos Collègues** Gilbert BELAUBRE, Jean-Louis BOBIN, Antoine LONG, Edith PERRIER et Jean SCHMETS

Candidatures, comme membres titulaires de l'AEIS, de Philippe MOINGEON et de Jean-Pierre MASTRANGELO

L'AEIS avait reçu deux candidatures comme membres titulaires, de la part de Philippe MOINGEON et de Jean-Pierre MASTRANGELO. Les deux candidatures étaient dûment étayées par un CV et une lettre de motivation. Ces documents ont été présentés en séance aux membres titulaires présents.

On peut souligner comme points saillants, pour Philippe MOINGEON, son expérience dans l'industrie du médicament et des vaccins allée à son parcours académique, y compris aux Etats-Unis, et son appartenance à l'Académie de Pharmacie ; et pour Jean-Pierre MASTRANGELO, son expérience dans l'industrie du logiciel et des sciences des données et le fait qu'il ait beaucoup exercé à l'étranger, en Hollande, puis en Grande Bretagne où il est actuellement et où il se propose de créer une antenne britannique de l'AEIS.

Les deux candidatures, très différentes, ont été jugées particulièrement pertinentes, et elles ont toutes deux été approuvées à l'unanimité.

Conférence de Michel GONDRAN « La mesure en mécanique quantique via les interprétations »

La conférence a débuté à 15h00 et elle a été enregistrée via Zoom. Nous rappelons ci-dessous les résumés en français et en anglais, et nous présentons à la suite une synthèse de la conférence et des riches échanges qui ont suivi, rédigée, dans le cadre du comité des synthèses, par nos collègues Abdel Kenoufi et Jean-Pierre Treuil.

Tous ces documents, ainsi que le support de présentation, et l'enregistrement vidéo de la conférence et des échanges associés, sont disponibles sur le site Web de l'AEIS, dans la rubrique "Comptes-rendus".

Résumé :

La mesure en mécanique quantique via les interprétations

Bien qu'au niveau expérimental, les mesures en mécanique quantique aient atteint une précision exceptionnelle, on se heurte au niveau théorique à des incohérences entre les postulats et le monde macroscopique. Ainsi la fonction d'onde est causale et déterministe et représente toute l'information tandis que le résultat de la mesure est statistique. Alors que l'évolution de la fonction d'onde est linéaire et unitaire, comment les superpositions quantiques peuvent-elles disparaître au niveau macroscopique ?

L'objectif de la conférence est de montrer qu'il existe des interprétations de la mécanique quantique qui permettent de résoudre ces problèmes, mais aussi de rendre la mécanique quantique compréhensive.

On partira du fait expérimental qu'une mesure en mécanique quantique correspond in fine à la mesure de l'impact d'une particule sur un détecteur : c'est-à-dire à une position. Cette position est considérée comme une variable, cachée alors que c'est en fait la seule variable directement mesurée !

Dans une première partie, nous montrerons qu'il existe deux interprétations de la mécanique quantique qui considèrent que la fonction d'onde ne représente pas toute l'information et qu'il faut lui ajouter la position du centre de masse. C'est ce que font l'interprétation de Broglie-Bohm et la théorie de la double échelle, qui correspond à un début de formalisation de la théorie de la double solution de Louis de Broglie.

Dans une seconde partie, nous montrerons qu'il existe deux types de mesure selon les variables mesurées : pour les variables classiques, comme la masse, la position, la charge électrique ou la quantité de mouvement, le résultat de la mesure correspond bien à la valeur de la variable en question. Pour la variable spin, la mesure de Stern et Gerlach ne représente pas la valeur du spin (qui est continu), mais le redressement (et non la projection) du vecteur spin selon l'axe choisi pour la « mesure » (qui est discrète).

Des simulations numériques d'expériences (fentes de Young, Stern et Gerlach, EPR-B) illustreront ces résultats. On montrera que les principales autres interprétations s'expliquent très bien et très simplement dans l'approche de la double échelle.

Références

L. de Broglie, J. Andrade e Silva, *La réinterprétation de la mécanique ondulatoire*, Gauthier-Villars, 1971.

M. Gondran, A. Gondran, C. Noûs, *The double scale interpretation: de Broglie and Schrödinger's external and internal wave functions*, Annales de la Fondation Louis de Broglie 46 (1) (2021) 87–126.

M. Gondran, A. Gondran, *Replacing the Singlet Spinor of the EPR-B Experiment in the Configuration Space with Two Single-Particle Spinors in Physical Space*, Foundations of Physics 46 (9) (2016) 1109–1126, arXiv:1504.04227.

F. Laloé, *Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?* CNRS éditions

Summary:**Measure in quantum mechanics via interpretations**

Although at the experimental level, measures in quantum mechanics have reached an exceptional precision, we still run up at the theoretical level against inconsistencies between postulates and the macroscopic world. For instance, the wave function is causal and deterministic, and represents all the information, whereas the measure's result is statistical. While the wave function's evolution is linear and unitary, how can quantum superimpositions disappear at the macroscopic level?

The objective of the conference is to show that there exist interpretations of quantum mechanics, which enable to solve these problems, and also to make quantum mechanics more comprehensive.

We will start from the fact that a measure in quantum mechanics eventually corresponds to the measure of the impact of a particle on a detector: i.e. to a position. This position is considered as a hidden variable, while it is indeed the only variable measured directly!

In a second part, we will show that exist two interpretations of quantum mechanics, which consider that the wave function does not represent all the information, and that the position of the mass center must be added in. This is done by the interpretation of de Broglie-Bohm and by the double scale theory, which form a first step towards formalizing the theory of the double solution of Louis de Broglie.

In a second part, we will show that there exist two types of measure depending on the measured variables: for classical variables, like mass, position, electrical charge or momentum, the measure's result is indeed the value of the variable in question. As to the spin variable, the measure of Stern and Gerlach does not represent the value of spin (which is continuous), but the *redressement* (and not the projection) of the spin vector along the axis chosen for the "measure" (which is discrete).

Numerical simulations of experiments (Young's double slit, Stern and Gerlach, EPR-B) will illustrate these results. We will show that the main other interpretations are very well and very simply explained within the double scale approach.

References

L. de Broglie, J. Andrade e Silva, *La réinterprétation de la mécanique ondulatoire*, Gauthier-Villars, 1971.

M. Gondran, A. Gondran, C. Noûs, *The two-scale interpretation: de broglie and schrödinger's external and internal wave functions*, Annales de la Fondation Louis de Broglie 46 (1) (2021) 87–126.

M. Gondran, A. Gondran, *Replacing the Singlet Spinor of the EPR-B Experiment in the Configuration Space with Two Single-Particle Spinors in Physical Space*, Foundations of Physics 46 (9) (2016) 1109–1126, arXiv:1504.04227.

F. Laloé, *Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?* CNRS Editions

Compte-rendu de la conférence et des échanges qui ont suivi :

(Compte-rendu rédigé par Abdel O. Kenoufi et Jean-Pierre Treuil)

La mesure en mécanique quantique *via* l'interprétation

Michel Gondran

Université Paris Dauphine (LAMSADE)

Exposé à l'Académie Européenne Interdisciplinaire des Sciences

Institut Curie, Paris, France

8 janvier 2024

Compte-rendu rédigé par Abdel O. Kenoufi,

Jean-Pierre Treuil, et Eric Chenin

Michel Gondran (MG) présente des résultats récents d'interprétations sur le fameux problème dit de "la double solution" en mécanique quantique et fruits de recherches entamées il y a plus de vingt ans en collaboration avec Alexandre Gondran (Ecole Nationale de l'Aviation Civile, Toulouse).

Après avoir rappelé parmi d'autres, deux postulats de la mécanique quantique théorique et expérimentale, ainsi que les questions soulevées par la nature non-déterministe et non-intuitive de cette discipline, MG présente le plan de l'exposé lequel sera suivi de questions et de discussions. Dans la première partie, MG rappelle l'existence et la genèse des deux interprétations de la mécanique quantique si les variables de position sont prises en compte : celle de l'onde-pilote de De Broglie-Bohm (dBB) et celle dite de la double solution de De Broglie.

Pour poser le problème et la polémique historique, il cite et lit un extrait d'une lettre d'Albert Einstein à Louis de Broglie datant de 1953. Son auteur reprend la proposition du Prix Nobel de Physique Français de considérer la fonction d'onde Ψ comme le produit de deux solutions de l'équation de Schrödinger $\Psi = \psi \cdot u$, chacune ayant une interprétation physique différente. Ce qui constitue la très fameuse et sujette à débat *Théorie de la Double Solution*. L'exposé de MG a essentiellement pour objectif de reprendre cette dernière et de la revisiter avec un autre point de vue interprétatif où les deux solutions correspondront aux fonctions d'ondes interne et externe. MG propose **trois étapes** pour justifier l'existence de ces deux fonctions d'onde pour un système à N corps : $\Psi^h(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N, t)$ est sa fonction d'onde, paramétrée par la constante de Planck (afin de passer éventuellement à la limite semi-classique), vérifiant l'équation de Schrödinger

$$H\Psi^h(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N, t) = i\hbar \frac{\partial \Psi^h(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N, t)}{\partial t}$$

où l'Hamiltonien dans un champ gravitationnel et prenant en compte des interactions à deux corps (électrostatiques) s'écrit comme $H \equiv \sum_j \left(\frac{\mathbf{p}_j^2}{2m_j} + m_j \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}_j \right) + \sum_{j,k} U_{jk}(\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_k)$, avec pour conditions initiales $\Psi^h(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N, 0) = \Psi_0^h(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N)$.

MG définit les fonctions d'onde internes et externes par les variables sur lesquelles elles opèrent, lesquelles sont

- ✓ Les variables du centre de masse : \mathbf{x}_G , M et \mathbf{p}_G respectivement la position du centre de masse, la masse et l'impulsion totale.
- ✓ Les variables relatives au centre de masse : \mathbf{x}'_i et \mathbf{p}'_i .

D'où l'Hamiltonien

$$H \equiv \frac{\mathbf{p}_G^2}{2M} + M\mathbf{g} \cdot \mathbf{x}_G + \sum_i \frac{\mathbf{p}'_i{}^2}{2m_i} + \sum_{i,j} U_{ij}(\mathbf{x}'_i - \mathbf{x}'_j) \equiv H_{ext} + H_{int}.$$

Ces fonctions d'onde internes $\varphi_{int}^h(\mathbf{x}'_1, \mathbf{x}'_2, \dots, \mathbf{x}'_N, t)$ et externe $\psi_{ext}^h(\mathbf{x}_G, t)$ sont reliées à la fonction d'onde globale par $\Psi^h(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N, t) = \psi_{ext}^h(\mathbf{x}_G, t) \varphi_{int}^h(\mathbf{x}'_1, \mathbf{x}'_2, \dots, \mathbf{x}'_N, t)$, avec $\Psi_0^h(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N) = \psi_0^h(\mathbf{x}_G) \varphi_0^h(\mathbf{x}'_1, \mathbf{x}'_2, \dots, \mathbf{x}'_N)$,

- ✓ où $\psi_{ext}^h(\mathbf{x}_G, t)$ est la solution de l'équation externe de Schrödinger avec la condition initiale : $\psi_{ext}^h(\mathbf{x}_G, 0) = \psi_0^h(\mathbf{x}_G)$.
- ✓ où $\varphi_{int}^h(\mathbf{x}'_1, \mathbf{x}'_2, \dots, \mathbf{x}'_N, t)$ est la solution de l'équation interne de Schrödinger avec la condition initiale : $\varphi_{int}^h(\mathbf{x}'_1, \mathbf{x}'_2, \dots, \mathbf{x}'_N, 0) = \varphi_0^h(\mathbf{x}'_1, \mathbf{x}'_2, \dots, \mathbf{x}'_N)$.

MG commence par la fonction d'onde externe reconnue comme étant l'onde-pilote de De Broglie et de David Bohm pour le centre de masse \mathbf{x}_G et qui vérifie l'équation externe :

$$i\hbar \frac{\partial \Psi_{ext}}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi_{ext} + V_{ext}(\mathbf{x}, t) \Psi_{ext} \text{ avec } \Psi_{ext}(\mathbf{x}, 0) = \Psi_0(\mathbf{x}).$$

On pose $\Psi_{ext}(\mathbf{x}, t) = \sqrt{\rho^{\hbar}(\mathbf{x}, t)} \exp\left(i \frac{S^{\hbar}(\mathbf{x}, t)}{\hbar}\right)$ où $\rho^{\hbar}(\mathbf{x}, t)$ et $S^{\hbar}(\mathbf{x}, t)$ sont respectivement la densité et l'action quantique qui dépendent du paramètre \hbar .

MG énonce ensuite un théorème stipulant que des particules statistiquement préparées et dont les densités de probabilité $\rho^{\hbar}(\mathbf{x}, t)$ et les actions quantiques $S^{\hbar}(\mathbf{x}, t)$ (vérifiant les équations de Madelung) convergent vers leurs pendants classiques $\rho(\mathbf{x}, t)$ et $S(\mathbf{x}, t)$ lorsque $\hbar \rightarrow 0$, lesquelles vérifient les équations d'Hamilton-Jacobi dites statistiques :

$$\begin{cases} \frac{\partial S(\mathbf{x}, t)}{\partial t} + \frac{1}{2m} (\nabla S(\mathbf{x}, t))^2 + V_{ext}(\mathbf{x}, t) = 0 & , \text{ et } S(\mathbf{x}, 0) = S_0(\mathbf{x}) \\ \frac{\partial \rho(\mathbf{x}, t)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho(\mathbf{x}, t) \frac{\nabla S(\mathbf{x}, t)}{m} \right) = 0 & , \text{ et } \rho(\mathbf{x}, 0) = \rho_0(\mathbf{x}). \end{cases}$$

Ce qui permet à MG d'en déduire que pour un ensemble de particules classiques préparées de la même façon, c'est-à-dire pour $\rho_0(\mathbf{x})$ et $S_0(\mathbf{x})$ dans un potentiel $V_{ext}(\mathbf{x})$, ces particules ont des trajectoires données par le champ de vitesse $\mathbf{v}(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{m} \nabla S(\mathbf{x}, t)$ et la position initiale.

Un autre résultat présenté par MG est le suivant : puisque les équations de Madelung (formulation fluide de l'équation de Schrödinger) convergent vers les équations d'Hamilton-Jacobi statistiques à la limite semi-classique ($\hbar \rightarrow 0$), alors l'incertitude sur la position du centre de masse de la particule classique implique une incertitude sur la position de la particule quantique. Il en va de même pour la densité $\rho(\mathbf{x}, t)$ et l'action classique $S(\mathbf{x}, t)$ qui induisent une densité de probabilité quantique $\Psi_{ext}(\mathbf{x}, t)$, la fonction d'onde.

A l'aide de quelques simulations d'interférences au travers des fentes de Young montrant les trajectoires de fullerènes (C_{60}) et d'électrons, caractérisant les fonctions d'onde externes, MG conclut cette première partie par la nécessité de rajouter la position initiale afin d'obtenir les trajectoires de De Broglie-Bohm dont le champ de vitesse serait donné par $\mathbf{v}^{\hbar}(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{m} \nabla S^{\hbar}(\mathbf{x}, t)$. Il propose donc de compléter voire de substituer aux deux postulats présentés en début de l'exposé les suivants :

- ✓ L'état de la particule est donné par la fonction d'onde $\Psi_{ext}(\mathbf{x}, t)$ et la position $\mathbf{x}_G(t)$.
- ✓ Son évolution est décrite par l'Equation de Schrödinger pour $\Psi_{ext}(\mathbf{x}, t)$ et par $\frac{d\mathbf{x}_G(t)}{dt} = \frac{1}{m} \nabla S^{\hbar}(\mathbf{x}, t) |_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_G(t)}$ pour la position $\mathbf{x}_G(t)$.
- ✓ La compatibilité des conditions initiales $\Psi_0(\mathbf{x})$ et $\mathbf{x}_G(0)$ est assurée par la Règle de Born à tout instant $t \geq 0$, $P[\mathbf{x}_G(t) = \mathbf{x}] = |\Psi_{ext}(\mathbf{x}, t)|^2$.

Dans la seconde partie, MG commence par citer les différences fondamentales entre fonctions d'onde internes et externes. Ces dernières s'étalent au cours du temps et peuvent se scinder notamment lors des expériences d'interférences des fentes de Young. Les premières restent spatialement confinées, ne s'étalent pas au cours du temps, ne peuvent se scinder au cours du temps sans changer de nature comme dans une réaction nucléaire ou chimique. Ces différences sont donc selon MG à l'origine des différences d'interprétations de la nature de ces fonctions d'onde et donc des polémiques historiques à leur sujet.

MG reprend la problématique introduite au début de l'exposé sur les problèmes de l'indéterminisme et de l'incohérence des postulats de la mesure en mécanique quantique pour proposer la thèse suivante :

- ✓ L'indéterminisme serait dû au fait que la fonction d'onde externe, ne porte pas toute l'information sur l'état du système.
- ✓ La réduction du paquet d'onde ne concerne que la fonction d'onde interne.

Avant de présenter la fonction d'onde interne, MG rappelle les tentatives infructueuses d'Erwin Schrödinger pour construire un paquet d'ondes non-dispersif pouvant représenter une particule. Pour ce faire, il introduisit en 1926 la notion d'états cohérents de l'oscillateur harmonique, lesquels sont caractérisés par le fait que les inégalités d'Heisenberg impulsion-position se ramènent à une simple égalité. Malheureusement cette démarche se heurta à des difficultés lorsqu'elle fut appliquée à l'atome d'hydrogène.

Dans le même esprit que Schrödinger, MG suggère de construire une fonction d'onde interne de type

soliton à partir de l'équation dépendante du temps

$$i\hbar \frac{\partial \varphi(\mathbf{x}'_1, \mathbf{x}'_2, \dots, \mathbf{x}'_N, t)}{\partial t} = - \sum_{i=1}^N \left(\frac{\hbar^2}{2m_i} \Delta_{\mathbf{x}'_i} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N U_{ij}(|\mathbf{x}'_i - \mathbf{x}'_j|) \right) \varphi(\mathbf{x}'_1, \mathbf{x}'_2, \dots, \mathbf{x}'_N, t),$$

avec la condition initiale : $\varphi(\mathbf{x}'_1, \mathbf{x}'_2, \dots, \mathbf{x}'_N, 0) = \varphi_0(\mathbf{x}'_1, \mathbf{x}'_2, \dots, \mathbf{x}'_N)$.

En se basant sur le Théorème de Floquet pour les Hamiltoniens périodiques, MG propose alors de faire l'hypothèse que la solution dynamique à N-corps peut s'écrire comme

$$\varphi(\mathbf{x}'_1, \mathbf{x}'_2, \dots, \mathbf{x}'_N, t) = \prod_{j=1}^N \varphi^j(\mathbf{x}'_j, t).$$

En considérant les ordres de grandeur des orbitales atomiques, MG en déduit que les supports des fonctions d'onde individuelles sont disjoints. Les équations de Schrödinger individuelles s'écrivent comme

$$i\hbar \frac{\partial \varphi^j(\mathbf{x}_j, t)}{\partial t} = - \frac{\hbar^2}{2m_j} \Delta_{\mathbf{x}_j} \varphi^j(\mathbf{x}_j, t) + \left(\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N U_{ji}(|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}^i(t)|) \right) \varphi^j(\mathbf{x}_j, t),$$

où $\mathbf{x}^i(t) = \int \mathbf{x} |\varphi^i(\mathbf{x}, t)|^2 d\mathbf{x}$, et avec les conditions initiales $\varphi^j(\mathbf{x}_j, 0) = \varphi_0^j(\mathbf{x}_j)$.

Grâce au Théorème d'Ehrenfest et à l'écriture du Principe Fondamental de la Dynamique pour des forces conservatives $V_j(\mathbf{x}, t) = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N U_{ji}(|\mathbf{x} - \mathbf{x}^i(t)|)$, plus précisément l'application de la Deuxième Loi

de Newton $m_j \frac{d^2}{dt^2} \mathbf{x}^j(t) = -\nabla V_j(\mathbf{x}, t)|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^j(t)}$, MG retrouve les solutions de l'atome d'hydrogène de Bohr et Sommerfeld.

Ainsi, la fonction d'onde interne d'un système est un ensemble de solitons qui remplace une fonction d'onde à $3N$ variables par N fonctions d'onde dans un espace à 3 dimensions.

Dans la troisième partie, MG caractérise plusieurs problématiques de mesure selon le type de fonction d'onde étudiée, interne ou externe. Il considère deux expériences : celle de Stern et Gerlach (1922) pour la mesure des spins d'atome d'argent et le paradoxe EPR pour l'intrication (1935). Dans l'expérience de Stern et Gerlach, en exprimant la fonction d'onde externe sous forme de spineur gaussien en x et z

$$\Psi^0(x, z) = (2\pi\sigma_0^2)^{-\frac{1}{2}} e^{-\frac{(z^2+x^2)}{4\sigma_0^2}} \begin{pmatrix} \cos \frac{\theta_0}{2} e^{i\frac{\varphi_0}{2}} \\ i \sin \frac{\theta_0}{2} e^{-i\frac{\varphi_0}{2}} \end{pmatrix},$$

il en déduit que sans extension spatiale il ne peut y avoir de prise en compte de la position. Introduisant le champ magnétique, il utilise les solutions des équations de Pauli

$$i\hbar \begin{pmatrix} \frac{\partial \psi_+}{\partial t} \\ \frac{\partial \psi_-}{\partial t} \end{pmatrix} = - \frac{\hbar^2}{2m} \Delta \begin{pmatrix} \psi_+ \\ \psi_- \end{pmatrix} + \mu_B \mathbf{B} \boldsymbol{\sigma} \begin{pmatrix} \psi_+ \\ \psi_- \end{pmatrix},$$

pour trouver des solutions pour les trajectoires et les spins

$$\begin{cases} \frac{dX_G(t)}{dt} = \frac{\hbar}{2m\rho} \text{Im}(\Psi^\dagger \nabla \Psi)|_{\mathbf{x}=X_G(t)}, \\ \mathbf{s}(\mathbf{x}, t) = \frac{\hbar}{2\rho} \Psi^\dagger(\mathbf{x}, t) \boldsymbol{\sigma} \Psi(\mathbf{x}, t) = \frac{\hbar}{2} (\sin \theta \sin \varphi, \sin \theta \cos \varphi, \cos \theta). \end{cases}$$

Le spin étant donné sur une trajectoire individuelle par $\mathbf{s} = \mathbf{s}(X_G(t), t)$. A l'aide de simulations numériques, MG interprète l'expérience de Stern et Gerlach comme n'exhibant pas de projections du spin sur l'axe vertical $[Oz)$, mais plutôt ce qu'il dénomme un **redressement** selon le gradient du champ. De plus, selon lui, le résultat dépend du centre de masse dans l'onde et la durée dépend du temps pour redresser le spin. De plus la valeur du spin ne serait pas pré-existante mais contextuelle. les fonctions d'onde considérées ici seraient donc des fonctions d'onde externes.

L'expérience EPR (Einstein-Podolsky-Rosen) est considérée dans sa version dite B (Bohm-Bell), ou EPRB. MG pose les fonctions d'ondes initiales de A et B comme $\Psi_0^A(\mathbf{x}_G^A, \theta_0^A, \varphi_0^A)$ et $\Psi_0^B(\mathbf{x}_G^B, \theta_0^B, \varphi_0^B)$ avec

des spins opposées : $\theta_0^B = \pi - \theta_0^A$, $\varphi_0^B = \varphi_0^A - \pi$. Il écrit ensuite la fonction d'onde singulet avec une extension spatiale

$$\Psi_0(\mathbf{x}_G^A, \mathbf{x}_G^B) = \frac{1}{\sqrt{2}} f(\mathbf{x}_G^A) f(\mathbf{x}_G^B) \left(|+_A\rangle |-_B\rangle - |-_A\rangle |+_B\rangle \right).$$

MG exhibe des simulations numériques qui montrent les orientations du vecteur spin le long de la trajectoire, la position de la particule existant avant la mesure.

Avant de passer aux questions et discussions, MG propose une conclusion et une liste de perspectives. Il reprend la thèse selon laquelle la fonction d'onde externe ne porte pas toute l'information sur le système et que la réduction du paquet d'onde ne concerne que la fonction d'onde interne et que de plus, le spin a une valeur contextuelle et qu'il effectue un redressement selon le gradient du champ lors d'expérience de mesures. Il termine sa conclusion en indiquant que son approche permettrait de mieux comprendre d'autres interprétations telles que celles de Born sur la fonction d'onde externe, les mondes d'Everett, ... Enfin, il liste les éléments d'une grille de lecture pour d'autres problèmes tels que la gravitation quantique, la théorie quantique des champs, ...

Jean-Pierre Treuil ne pose pas de questions, mais fait remarquer que le problème de la mesure se pose dans toutes les sciences autres que les mathématiques. Il émet le souhait d'un exposé futur sur les problèmes de la mesure dans les différentes interprétations de la mécanique quantique, et suggère de prendre de la hauteur par rapport à ces problèmes de mesures, inhérents à toutes les disciplines liées à l'expérience.

MG continue la discussion en expliquant que l'Ecole Française ne valide que les théories et méthodes issues de l'Ecole de Copenhague, et qu'elle néglige voire élude le point de vue de De Broglie-Bohm, et ce, jusque dans l'enseignement de la mécanique quantique. Il continue en introduisant le problème de la validité des expériences d'interférences de type Young et propose des expériences qui valideraient les simulations effectuées pour les molécules de fullerènes.

Benoît Prieur continue la discussion en rétorquant qu'une bactérie qui contient un nombre très grand de molécules et une très grande quantité d'informations, ne peut être vue comme une onde, car dans une expérience d'interférence de type Young, il n'est pas réaliste d'imaginer qu'elle puisse se reconstituer après le passage par les fentes. Il pose qu'il existe un biais cognitif de déni d'une réalité dont l'origine remonterait à au physicien W. Pauli en 1927 lors de l'élaboration des modèles de l'électron. Le problème de la mesure serait donc dû à un biais cognitif.

Françoise Dutheil évoque la perspective présentée en fin d'exposé par MG de quantification de la gravitation grâce à son approche des fonctions d'onde internes/externes. MG répond qu'il a publié un article pour la fondation De Broglie montrant qu'il pouvait retrouver les équations de la gravitation classique en partant de la mécanique quantique, et en tenant compte des fonctions d'onde internes, appliquées à l'équation d'Einstein de la gravitation.

Jean-Pierre Treuil revient sur la potentielle expérience des fentes de Young avec des molécules de fullerènes afin de bien comprendre le dispositif expérimental et sur les résultats attendus. On verra des figures d'interférences si l'écran est suffisamment éloigné. La discussion continue sur l'interprétation de Copenhague de l'ubiquité de l'électron lors du passage au travers des fentes dans l'expérience de Young.

Après différentes remarques d'Edith Perrier sur la pédagogie et l'apprentissage de la mécanique quantique, Benoît Prieur et MG relatent quelques anecdotes d'Histoire et de Philosophie des sciences, notamment sur le Positivisme.

Abdel Kenoufi indique ensuite comment l'équation de Schrödinger dépendante du temps avec un potentiel ne dépendant pas du temps, devient l'équation indépendante du temps qui est un problème aux valeurs propres bien connu. Il fait aussi noter quelques différences importantes entre différents ouvrages de mécanique quantique d'auteurs français, Albert Messiah, Claude Cohen-Tannoudji par exemple. Il reprend les remarques de Benoît Prieur sur le positivisme et explique que l'Ecole de Copenhague a été fortement influencée, N. Bohr en particulier par les Sciences Sociales et certains courants philosophiques du premier quart de siècle. Il fait enfin la comparaison entre les contenus de l'enseignement de la mécanique quantique entre différents pays où il a vécu et enseigné (Danemark, Etats-Unis, Russie, France, Suisse), leurs positionnements vis-à-vis de la polémique interprétative Ecole de De Broglie-Bohm *versus* Ecole de Copenhague. Enfin, il demande si les simulations sont *ab initio*, autrement dit, basées sur la résolution des équations de Schrödinger, MG répond par la négative arguant du fait qu'il ne simule que les comportements des solutions basées sur le centre de gravité.

MG clôt la conférence en montrant et commentant quelques vidéos montrant des simulations numériques des expériences citées précédemment.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier vivement Mr Yann TRAN et Mme Annabelle POIRIER de l'Institut Curie pour la qualité de leur accueil.

Documents

p.12 : Résumés en français et en anglais de la conférence de Christophe PICHON

p.13 : Article proposé pour vous familiariser avec le thème de la conférence de Christophe PICHON : « *Le grément des halos de matière noire* », Compte-rendu de la conférence de Christophe PICHON organisée par la Société Astronomique de France le 14 Mai 2011.

Conférence de Christophe PICHON en séance de l'AEIS le 5 Février 2024

Résumé :

L'émergence cosmique des disques galactiques : l'ordre à partir du chaos

Une modélisation précise de la diversité morphologique des galaxies en fonction du temps cosmique est essentielle pour contraindre notre modèle cosmologique avec précision. Alors que la résilience des disques galactiques minces est une énigme dans le cadre du scénario hiérarchique, il apparaît maintenant que leur autorégulation par dissipation est essentielle pour expliquer leur survie. Leur morphologie initiale est déterminée par l'acquisition de moment angulaire, provenant d'échelles plus grandes, qui sont moins denses, donc plus stationnaires. Cette accretion cosmique crée un réservoir d'énergie libre dans le milieu circum-galactique, à partir duquel les disques construisent spontanément une boucle de contrôle par effets de marées qui les maintient proche de leur stabilité marginale. Les disques galactiques minces sont donc des structures émergentes, maintenues par auto-organisation critique.

Summary:

Cosmic emergence of galactic discs: order from chaos

A precise modelling of galaxies' morphological diversity along cosmic time is essential to accurately constrain our cosmologic model. While resilience of thin galactic discs is an enigma within the hierarchical scenario, it now appears that their self-regulation through dissipation is essential to explain their survival. Their initial morphology is determined by the acquisition of an angular momentum, coming from larger scales, which are less dense, thus more stable. This cosmic accretion creates a reservoir of free energy in the circum-galactic environment, from which discs spontaneously build a control loop through tidal effects which maintain them close to their marginal stability. Thin galactic discs are thus emergent structures, maintained through critical self-organization.

Article proposé pour vous familiariser avec le thème de la conférence de Christophe PICHON :

« Le grément des halos de matière noire »,

Compte-rendu de la conférence de Christophe PICHON organisée par la Société Astronomique de France le 14 Mai 2011.

Mise à jour le 25 Mai 2011



CONFÉRENCE de [Christophe PICHON](#)
Astrophysicien IAP
"LE GRÉEMENT DES HALOS DE MATIÈRE NOIRE"
Organisée par la SAF
Dans ses locaux, 3 rue Beethoven, Paris XVI

Le Samedi 14 Mai à 15H00
à l'occasion de la réunion de la Commission de Cosmologie.

Photos : JPM pour l'ambiance. (les photos avec plus de résolution peuvent [m'être demandées directement](#))
Les photos des slides sont de la présentation de l'auteur. Voir les crédits des autres photos si nécessaire
(Christophe Pichon a eu la gentillesse de nous donner sa présentation complète (en pdf) elle est disponible sur le site de la SAF et également disponible [sur ma liaison ftp](#) au téléchargement et s'appelle. [Pichon-SAF-2011.pdf](#). elle est dans le dossier COSMOLOGIE SAF de la saison 2010-2011,). Elle est aussi [disponible sur le site](#) de C. Pichon (peut être, plus rapide à télécharger).

Ceux qui n'ont pas les mots de passe doivent [me contacter avant](#).

Pour info les actualités cosmo présentées ce jour là sont aussi disponibles sur [le site de la commission](#).

BREF COMPTE RENDU

CR succinct étant donné que la présentation de l'auteur est disponible en ligne et que le sujet était plutôt très technique !



Christophe Pichon est astrophysicien à l'IAP, il s'intéresse aux grandes structures ; il a notamment travaillé sur des simulations numériques d'Univers, comme le projet Horizon ou le projet Mare Nostrum.

Il nous parle aujourd'hui de son dernier enfant : le squelette (Skeleton).

C'est un outil utilisé pour analyser la topologie des grandes structures.

Son collègue Thierry Sousbie du Centre de Recherche Astrophysique de Lyon à l'époque (avec lequel il a publié un article à ce sujet, « la cartographie de l'Univers », dans le dernier numéro spécial de [Pour la Science](#) sur la face cachée de l'Univers) décrit succinctement les méthodes utilisées avec cet outil dans [l'introduction de sa thèse](#) ; je lui laisse la parole :

LE SQUELETTE DE L'UNIVERS: Un outil d'analyse topologique des grandes structures

La distribution de la matière dans l'Univers est supposée homogène et isotrope à très grande échelle mais l'observation de la distribution des galaxies lors de grandes campagnes de recensements comme le SDSS nous montre un véritable réseau d'amas et de filaments sur des échelles de plusieurs centaines de mégaparsecs.

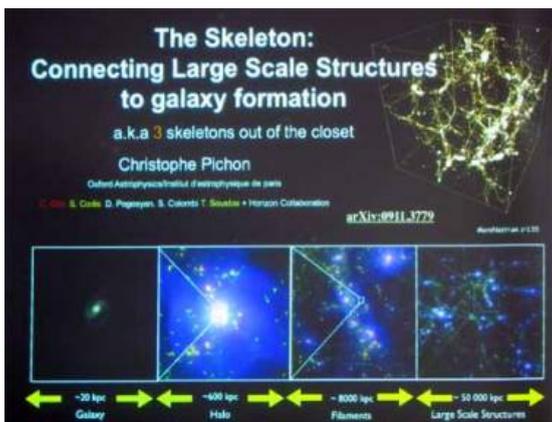
De nombreuses méthodes ont été développées dans le but de caractériser cette distribution et nous nous proposons dans cette thèse de présenter l'adaptation en trois dimensions d'un nouvel outil: le squelette. Cette méthode vise à donner une définition mathématique claire des filaments ainsi qu'un algorithme numérique robuste permettant leur identification ainsi que le calcul de leurs propriétés.

Afin de pouvoir comparer les résultats obtenus à partir des simulations N-corps de matière noire aux observations, une nouvelle méthode, baptisée MoLUSC, spécialisée dans la création de catalogues virtuels de galaxies a aussi été élaborée. Elle se base sur les modèles semi-analytiques et est particulièrement efficace pour la fabrication de catalogues de grande taille simulant de manière suffisamment réaliste les propriétés galactiques.

Les utilisations de ces deux outils sont nombreuses et nous montrons par exemple qu'il est possible en mesurant la densité de longueur des filaments à une échelle donnée de contraindre la quantité de matière dans l'univers.

Ces méthodes peuvent aussi être appliquées avec succès à la mesure statistique des propriétés du flux de matière noire le long des filaments, une mesure inédite.

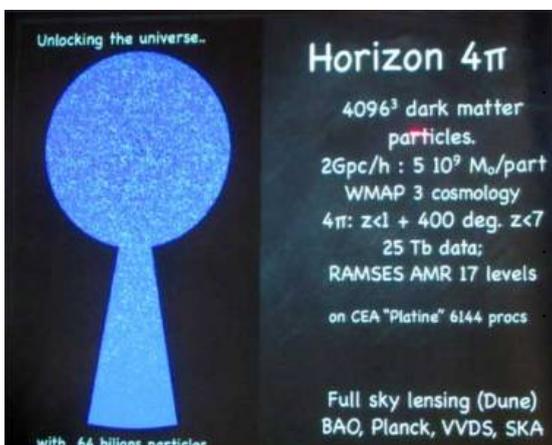
Nous présentons enfin de nombreuses applications possibles dont les résultats préliminaires sont très encourageants.



Cette présentation établit le lien entre les propriétés morphologiques des galaxies et les grandes structures dans lesquelles elles sont plongées.

On sait qu'à grande échelle, l'Univers présente une structure filamentaire que l'on voit particulièrement bien dans cette [étude SDSS](#) (Sloan Digital Sky Survey).

On peut s'en rendre compte [avec ce petit film](#) de la simulation Millenium.



Des simulations numériques sur de puissants calculateurs ont été effectuées comme :

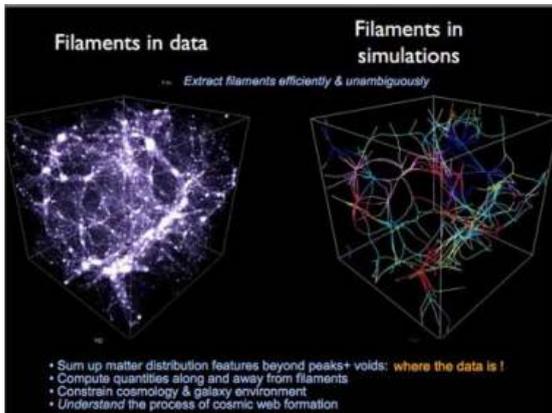
[Le projet Horizon](#) du CEA, qui compte 70 milliards de particules et 140 milliards de mailles, et couvre une « largeur » de 6 milliard d'al. Cette simulation a utilisé une nouvel ordinateur du CEA qui a fait tourner 6144 processeurs pendant deux mois ! (aurait nécessité mille ans sur un ordinateur normal !). [Film](#).

[La simulation Mare Nostrum](#) à Barcelone, a nécessité un mois de calculs. On peut voir [des images ici](#).

[La simulation Millenium](#), du MPE comptait 10 milliards de particules

De telles simulations ont même été reproduites [dans une station du RER](#).

Toutes ces simulations aboutissent à des filaments et à des zones vides.
Les filaments sont les produits de la gravitation en fonction du contenu de l'Univers.



C. Pichon et ses collègues ont mis au point un outil pour étudier cette toile cosmique, qu'ils ont baptisé le squelette (skeleton en anglais).

Une comparaison : les filaments sont comme la ligne de crêtes des montagnes.

Ici on voit à gauche, la simulation 3D d'une zone d'univers, à droite, le squelette servant à la fabrication des grandes structures.

Pour plus de détails techniques, se reporter à la présentation de l'auteur qui est disponible au téléchargement ou sur son site.

Merci à Christophe Pichon de nous avoir tenu au courant des derniers aspects en cette matière.

POUR ALLER PLUS LOIN.

[The Skeleton: Connecting Large Scale Structures to Galaxy Formation](#), article sur le sujet en pdf de C. Pichon et al.

[The Marenstrum Universe](#) sur le site de C. Pichon.

[Zoomons dans le plus profond de l'Univers.](#)

Et sur votre site préféré :

[les grands sondages de l'Univers](#) : CR de la conférence de O Lefèvre du LAM à l'IAP le 4 Dec 2007

[Les vides cosmiques et murs de galaxies](#) : CR de la conf de V de Lapparent à l'IAP le 8 Sep 2009

[Romain TEYSSIER](#) : La matière noire et la formation des struct ; CR conf. du 6 Juillet 2009 à l'UNESCO.

[Les vides cosmiques et murs de galaxies](#) : CR de la conf de V de Lapparent à l'IAP le 8 Sep 2009

Bon ciel à tous

Jean Pierre **Martin** SAF Commission de Cosmologie
www.planetastronomy.com

[Abonnez-vous gratuitement aux astronews](#) du site en envoyant votre e-mail.