

ONDES MATIERES et UNIVERS

Relativité générale, physique quantique et perspectives en biophysique

RECUEIL DES RESUMES



Introduction générale au colloque

Présidente du colloque

Pr. Françoise BALIBAR

Université Paris Diderot

C'est à juste raison, d'un point de vue strictement chronologique, que ce colloque est organisé au mois de janvier 2016, alors que l'année 2015 vient juste de s'achever. Car la seconde période « miraculeuse » d'Einstein, dix ans après l' *annus mirabilis* de 1905, s'étend à cheval sur deux années légales, 1915 et 1916. Associer à l'article final de la théorie de la relativité générale celui portant sur la théorie quantique du rayonnement, c'est une manière de rappeler d'une part que l'héritage d'Einstein ne se réduit pas à la théorie de la relativité, restreinte puis générale, aussi féconde se soit-elle révélée « à l'usage » ; d'autre part, que la participation d'Einstein à la construction de la théorie quantique ne s'est pas arrêtée en 1905 et ne s'est pas limitée par la suite à l'expression courroucée de désaccords théoriques souvent plus justifiés qu'il n'y paraissait sur le moment. C'est rappeler, comme le montre amplement la liste des titres donnés aux contributions prévues, qu'Einstein se distingue des autres physiciens de son époque par l'importance qu'il a, dans le sillage de Boltzmann (*der Boltzmann ist ganz grossartig*), accordée aux raisonnements statistiques en tant qu'instrument de recherche. « Il était passé maître dans l'interprétation des écarts quadratiques moyens », écrit l'un de ses biographes avertis, Abraham Pais. En prélude aux exposés qui suivront, je donnerai quelques exemples de cette maîtrise et j'essaierai de comprendre pour quelle(s) raison(s), cette méthode « heuristique » s'est révélée si fructueuse.

The timing of this conference is perfect from the historical point of view ; just hundred years have elapsed since Einstein's second *annus mirabilis* (starting in November 1915 with three papers that contain the essentials of the final theory of general relativity, ending with the Zürich Conference on the quantum theory of radiation on August 24 of 1916). The list of contributions presented to this conference testifies to the fact that Einstein's heritage cannot be restricted to his work on relativity and cosmology and does include an active participation to the elaboration of quantum physics, which in turn does not consist only in « inventing » quanta of energy in 1905 and then expressing (rightly so) dissatisfaction at the way the theory was evolving around 1930. Einstein's attachment to statistical arguments (along Boltzmann's lines) as heuristic tools cannot be underestimated. As Abraham Pais puts it : « Better than anyone before and after him, he knew how to make use of statistical fluctuations ». As a prelude to some of the contributions to come I shall present some exemples of Einstein's « unmatched skill » (A. Pais, again) in such matters.

SESSION 1. *Relativité, Ondes de l'Univers*

Pr Jean ZINN-JUSTIN

Membre de l'Institut
Université Paris-Saclay
CEA/IRFU
Centre de Saclay

De la nature du vide: de Galilée à l'énergie noire

(Résumé provisoire)

Quoique l'existence du vide ait déjà été un sujet de débat dans la Grèce antique, elle n'est devenue une question proprement scientifique qu'au dix-septième siècle avec des personnages comme Galilée ou Torricelli. Dans cet exposé nous essaierons de montrer que, sous des formes variées, l'existence et la nature du vide ont toujours été liées à des questions fondamentales de la science, autrefois par exemple à la présence de l'éther, aujourd'hui par exemple à la nature de la matière noire proposée pour expliquer la dynamique des galaxies ou de l'énergie noire qui influence l'expansion de l'univers.

About vacuum nature: from Galileo to the dark energy (titre: traduction AEIS)

Though the existence of a vacuum was already a matter of debate for the Ancient Greeks, it has become a truly scientific topic only in the seventeenth century with scholars like Galileo or Torricelli. In this talk we try to show that, in varying forms, the existence and nature of the vacuum has always been tied to fundamental scientific questions, in the past, for example, the existence of ether, more recently, for example, the nature of dark matter as proposed to explain the dynamics of galaxies or of the dark energy that influences the expansion of the universe.

Jean-Philippe UZAN

CNRS/Institut d'Astrophysique de Paris & Institut Henri Poincaré

Lentilles gravitationnelles faibles-Applications en cosmologie/

La compréhension de la propagation de la lumière est cruciale en cosmologie. Elle rentre dans la détermination des distances mais aussi dans la structure causale de notre univers. Cet exposé résumera les effets de lentilles gravitationnelles ainsi que certaines applications récentes, qui ont permis de formuler des nouveaux tests de la théorie de la relativité générale et de l'isotropie de l'expansion cosmique. Pour finir, il s'attachera à expliquer un nouveau formalisme visant à décrire l'effet des petites structures et leur importance pour l'interprétation du diagramme de Hubble.

Weak lensing and some of its applications in cosmology

The understanding of light propagation is central in cosmology. It enters the determination of distances but also the causal structure of our universe. This seminar summarizes the properties of weak lensing and some of its new applications that allow us to formulate new tests of general relativity as well as the isotropy of the cosmic expansion. To finish, it will detail a new formalism in order to deal with the effects of the small scale structures and of their importance in the analysis of the Hubble diagram

François R. BOUCHET

Directeur de recherche CNRS à l'Institut d'astrophysique de Paris (IAP, CNRS/UPMC)

Cosmologie avec le satellite Planck: des fluctuations quantiques du vide de l'univers primordial aux grandes structures de l'Univers qui nous entourent

La cosmologie a connu au cours du siècle passé un développement remarquable. Nous savons maintenant que la voie lactée et les autres galaxies ne sont pas distribuées au hasard dans le cosmos : leur distribution spatiale révèle le squelette d'une structure complexe de la distribution de la matière, similaire à celle de l'ossature d'une éponge ! Les scientifiques ont maintenant bien compris l'évolution de cette structure, depuis les premiers instants après le Big Bang jusqu'à aujourd'hui. Un outil s'est révélé particulièrement puissant, l'analyse de la lumière émise 380 000 ans après le Big Bang, fossile d'une époque chaude et dense et quasi-homogène, à laquelle on se réfère communément sous l'appellation de « rayonnement de fond cosmologique ». Cette lumière résiduelle, accessible aux longueurs d'onde millimétriques, est un témoin privilégié des premiers instants de l'univers, quand fut initiée la croissance de toutes les structures connues, des étoiles aux amas de galaxies. L'étude du rayonnement cosmologique permet notamment de déterminer le contenu de l'Univers, son taux d'expansion, d'en savoir plus sur la fin de l'âge sombre quand les premiers objets compacts se sont formés, et d'analyser les conditions initiales qui ont engendré cette évolution. Les résultats récents du satellite Planck confirment avec une précision inégalée des prédictions théoriques avancées au cours des années 1980 et permettent plus généralement d'aborder expérimentalement la physique dans un domaine d'échelles d'espace, de temps, et d'énergie autrefois inaccessibles. Après une brève description du dispositif expérimental, je présenterai quelques résultats-clé pour notre compréhension de l'univers, concernant en particulier sa géométrie spatiale et les caractéristiques des fluctuations quantiques du vide primordial qui ont servi de germe initial pour la croissance des grandes structures de l'univers.

Cosmology and Cosmic Microwave Background measurements - What we learnt from Planck (some)

Cosmology enjoyed a remarkable development over the last century, which revealed that galaxies like ours own are not distributed at random into space, but rather delineate a complex structure reminiscent of the skeletal framework of a sponge! We now have developed a compelling model of how these large scale structures developed over time, and trace their origin to the earliest moment of the Big Bang. Most effective into this lightning progress has been the study of the background light called the Cosmic microwave background. This residual light, from early times when the universe was hot, dense, and very homogeneous, bear witness to the infancy of these structures. Its study allows us to determine the content of the Universe and to study the process which initiated their growth. It brings amazing confirmation of ideas put forward in the 80's and opens a window on physics in a range of scales, time and energies which was hitherto inaccessible. The most powerful tool we used so far in this endeavour is the Planck satellite mission which we entirely devoted to the study of this residual light, and which released its latest results a few months ago. I will overview some of the main cosmological results we got, with some emphasis on those concerning the very early Universe.

Pr Patrice HELLO

Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire, Université Paris-Sud et CNRS/IN2P3, Orsay.

Les ondes gravitationnelles : une nouvelle fenêtre sur l'Univers.

Les ondes gravitationnelles sont prédites par la Relativité Générale et leur existence a été établie grâce à l'étude du pulsar binaire 1913+16 par J. Taylor et ses collaborateurs. Pour détecter directement ces ondes gravitationnelles, plusieurs interféromètres géants ont été construits à la fin des années 90 : Virgo (Italie) et LIGO (deux sites aux USA). Après une première phase (2005-2011) qui a vu les détecteurs Virgo et LIGO atteindre leurs sensibilités nominales, mais insuffisantes pour une première détection, les deux collaborations internationales se sont lancées dans une phase d'amélioration des détecteurs (Advanced Virgo et Advanced LIGO) dont le but est de gagner un ordre de grandeur en sensibilité.

Je commencerai par rappeler la nature des ondes gravitationnelles et leur effet sur la matière puis je passerai en revue les sources astrophysiques intéressantes pour LIGO et Virgo. Je décrirai ensuite la détection interférométrique des ondes gravitationnelles (avec Virgo pour exemple principal) en m'attachant aux principales sources de bruit et aux solutions techniques choisies pour y remédier. Je donnerai ensuite quelques résultats scientifiques importants, en particulier ceux obtenus avec la dernière prise de données scientifiques (fin 2015).

Je ferai finalement le point sur l'actualité et sur les perspectives des deux expériences (Advanced Virgo et (Advanced) LIGO).

Gravitational waves: a new window on the Universe.

Gravitational waves are predicted by the theory of the General Relativity and their existence has been confirmed by the study of the binary pulsar 1913+16 by J. Taylor and his collaborators. Several giant interferometers have been built during the 90's in order to directly detect them: Virgo (in Italy) and LIGO (two sites in the USA). After a first period (2005-2011), the LIGO and Virgo detectors have reached their nominal sensitivity but this was still not enough for a first detection. The two collaborations are now improving the detectors (Advanced LIGO and Advanced Virgo) with the goal of gaining one order of magnitude in sensitivity.

I will first recall the nature of gravitational waves and their effect on matter and then I will review the interesting astrophysical sources for LIGO and Virgo. I will then describe the interferometric detection of gravitational waves (with main examples from Virgo) with the main noise sources and the means to mitigate them. I will finally give some important scientific results, especially those obtained with the last data taking (end of 2015).

I will end by the status (as of beginning of 2016) and prospects of Advanced LIGO and Advanced Virgo.

SESSION 2. Dualité Ondes/Corpuscules de la Physique quantique

Christophe SALOMON

Directeur de Recherche
Laboratoire Kastler Brossel, 24 rue Lhomond,
Ecole Normale supérieure, Paris, France

La mesure du temps et tests de physique fondamentale

Il y a exactement 100 ans, Albert Einstein publiait ses fameuses équations de la relativité générale, liant espace-temps, matière et énergie. Sa théorie a bouleversé les concepts de temps et d'espace absolus qui prévalaient jusque-là. Depuis cette époque, les tests de relativité générale se sont multipliés avec une précision croissante et ont tous confirmé ses prédictions. Pourtant, la connaissance de notre univers est loin d'être complète et la compréhension de la matière noire et de l'énergie noire constituent des défis pour la physique de notre époque. Les horloges jouent un rôle central dans la plupart des tests de relativité et les horloges atomiques ont fait des progrès considérables au cours des dernières décennies. Les horloges modernes les plus stables présentent une erreur qui n'excède pas une seconde sur l'âge de l'univers ! Dans cet exposé, nous décrirons leur principe de fonctionnement et leurs performances. Ces instruments ultra-précis possèdent de nombreuses applications et permettent de réaliser des tests très fins de physique fondamentale. Nous en donnerons deux exemples, la recherche d'une éventuelle dérive des constantes fondamentales, comme la constante de structure fine décrivant l'intensité de l'interaction électromagnétique, et un test de l'effet Einstein avec une horloge à atomes refroidis par laser en satellite dans le cadre de la mission spatiale européenne ACES/PHARAO. Nous terminerons par quelques perspectives et applications.

The Measurement of Time and Tests in Fundamental Physics

Exactly 100 years ago, Albert Einstein published his famous equations on General Relativity linking space-time, matter and energy. His theory overturned the concepts of absolute time and space that were prevailing at the time. Since then, experimental tests of general relativity have multiplied with ever-increasing precision and, up to now, they have all confirmed Einstein's theory. However our knowledge of the Universe is far from complete and the understanding of dark matter and dark energy are challenges for present-day physicists. In most tests of General Relativity clocks play a central role and atomic clocks have made spectacular progress over the last decades. Today's best clocks are so stable that they would accumulate an error of less than one second over the age of the Universe. In this talk, we will describe their principle of operation and performances. These ultra-stable instruments have a wide range of applications and enable one to perform refined tests in fundamental physics. We will focus on two examples, the search for a drift of fundamental physical constants such as the fine structure constant characterizing the strength of electromagnetic interaction, and a test of the Einstein effect (the clock gravitational shift) using a laser cooled atomic clock onboard a satellite in the frame of the European mission ACES/PHARAO. We will conclude with a few perspectives and future applications

Pr Serge HAROCHE
Prix Nobel Physique 2012
Pr Collège de France, ENS, UPMC

**Dualisme ondes particules, superposition d'états et intrication:
l'étrangeté quantique en action**

La physique quantique est basée sur la notion contre-intuitive du dualisme onde-particule. Les principes de superpositions d'états et d'intrication et le hasard quantique en découlent. L'exposé rappellera la période historique du premier quart du siècle dernier, au cours de laquelle ces concepts ont émergé, avec les contributions essentielles d'Einstein, Bohr, De Broglie, Heisenberg et Schrödinger. La physique qui en est résulté explique une large gamme de phénomènes physiques, de l'infiniment petit (structure des atomes et des molécules, modèle standard des particules élémentaires) à l'infiniment grand (rayonnement cosmologique) en passant par certaines propriétés essentielles des objets macroscopiques (structure des solides et des semi-conducteurs, supraconductivité..).

La compréhension et l'exploitation de ces phénomènes ont conduit au développement des technologies nouvelles qui ont révolutionné notre vie (ordinateurs, imagerie médicale par résonance magnétique, horloges atomiques, GPS, lasers...). Bien que la physique quantique joue un rôle essentiel dans le fonctionnement de ces appareils, les manifestations des superpositions d'états et de l'intrication n'y sont pas directement observées car elles sont voilées par le phénomène de décohérence qui donne une apparence classique aux objets macroscopiques.

Pour mettre en évidence directement l'étrangeté quantique, il faut manipuler et contrôler des objets quantiques individuels, atomes ou photons, dans un environnement qui les protège de la décohérence. Ces manipulations, longtemps considérées comme étant du domaine des expériences de pensée, sont devenues possibles grâce au développement des technologies modernes. Les lasers, les ordinateurs et la cryogénie y jouent un rôle essentiel. On peut maintenant contrôler et observer en temps réel, sans les détruire, de petits ensembles d'atomes ou de photons, ou encore des petits circuits supraconducteurs se comportant comme des atomes artificiels. Les superpositions d'états, l'intrication et le hasard quantique sont directement observés et quantitativement étudiés dans des expériences qui conduiront sans doute au développement de technologies nouvelles exploitant directement l'étrangeté quantique (information, communication et métrologie quantiques).

***Wave-particle, dualism, superposition of states and entanglement:
the quantum weirdness in action***

Quantum physics is based on the counter-intuitive notion of wave-particle dualism from which result the principles of superposition of states, of entanglement and of quantum randomness. The presentation will survey the historic period of the first quarter of the last century, in the course of which these concepts have emerged, with the essential contributions of Einstein, Bohr, de Broglie, Heisenberg, and Schrödinger. The physics which resulted from it explains a wide range of physical phenomena, from the infinitely small (structure of atoms and molecules, standard model of elementary particles) to the infinitely large (cosmological radiation) through some essential properties of macroscopic objects (structure of solids and semi-conductors, superconductivity..).

The understanding and the making use of these phenomena have led to the development of new technologies that have revolutionized our lives (computers, medical imaging by magnetic resonance, atomic clocks, GPS, lasers...). Although quantum physics plays an essential role in the operation of these devices, the manifestations of the superposition of states and of the entanglement are not directly

observed because they are veiled by the phenomenon of decoherence which gives a classical appearance to the macroscopic objects.

To highlight directly the quantum weirdness, one must manipulate and control individual quantum objects, like atoms or photons, in an environment that protects them from decoherence. These manipulations, long regarded as belonging to the realm of thought experiments, have become possible thanks to the development of modern technologies. Lasers, computers and cryogenics play an essential role for them. One can now monitor and observe in real time, without destroying them, small ensembles of atoms or photons, or even of small superconducting circuits behaving as artificial atoms. The superposition of states, the entanglement and the quantum randomness are directly observed and quantitatively studied in experiments which will no doubt lead to the development of new technologies directly making use of their quantum weirdness (quantum information, communication and metrology).

Franck LALOË

Directeur de recherches émérite au Laboratoire Kastler Brossel de l'ENS

La mécanique quantique: historique, interprétations.

La mécanique quantique est l'une des plus grandes réussites de toute l'histoire des sciences. Ses prédictions ont été vérifiées dans un très grand nombre de cas, avec parfois une précision fantastique de 10^{-12} . Historiquement, la mécanique quantique s'est développée en plusieurs étapes distinctes, chacune d'entre elles impliquant des interprétations différentes, parfois opposées. Puis s'est dégagée une version dite standard, dans la ligne des travaux de von Neumann et de Dirac, qui est généralement celle présentée dans les ouvrages et enseignée. Mais de réelles difficultés conceptuelles subsistent; nous sommes loin d'un consensus universel sur la meilleure façon d'interpréter la nature de la fonction d'onde, la mesure, etc. et leur relation (éventuelle) avec la "réalité physique". C'est pourquoi de nombreuses présentations et/ou interprétations de la mécanique quantique ont été proposées. L'exposé en décrira quelques unes: bien sûr celle dite de Copenhague (Bohr), l'interprétation statistique (à laquelle on attache souvent le nom d'Einstein), etc.. avec également les trois interprétations non-standard les plus célèbres: dBB (de Broglie-Bohm), GRW/CSL (équation de Schrödinger stochastique), Everett (parfois dite "des mondes multiples").

Quantum mechanics: historical development, interpretations.

Quantum mechanics is one of the most successful theories of all physics. Its predictions have been verified in a huge number of situations, sometimes with a fantastic accuracy of 10^{-12} . Historically, quantum mechanics was developed in several stages, each of them implying a different interpretation, sometimes opposite of the others. A "standard" version then emerged, in the line of the contributions of von Neumann and Dirac, which is the version generally found in textbooks. Nevertheless, real conceptual difficulties remain: we are far from a universal consensus concerning the best way to interpret the nature of the wave function, the measurement process, etc. and their possible relation with "physical reality". This is the reason why many interpretations of quantum mechanics have been proposed. A few will be described during the talk: the Copenhagen interpretation (Bohr), the statistical interpretation (Einstein, Ballentine, etc.) as well as the three most famous non-standard interpretations: dBB (de Broglie Bohm), GRW/CSL (Stochastic Schrödinger dynamics) and Everett (sometimes described as "many worlds").

Références

Do we really understand quantum mechanics? Cambridge University Press (2012).

Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?

EDPSciences Collection :Savoirs Actuels mai 2011

SESSION 3. Ondes, matière et quantification

Pr Jean DALIBARD

Collège de France et Académie des Sciences
Ecole Polytechnique École normale supérieure
Département de Physique/ Laboratoire Kastler Brossel

Atomes et lumière en équilibre thermique : de l'argument d'Einstein aux mélasses optiques

En 1916-17, Einstein étudie comment un rayonnement de type corps noir peut imposer sa température à une collection d'atomes. A partir des trois processus d'absorption, d'émission dirigée et d'émission spontanée, il montre que la lumière crée une force de friction sur un atome en mouvement. En utilisant ensuite des arguments empruntés à la théorie du mouvement brownien, il explique comment l'assemblée atomique atteint le même état d'équilibre thermique que le corps noir de départ.

Près de soixante ans après le travail d'Einstein, les physiciens Hänsch et Schawlow d'une part, Wineland et Dehmelt d'autre part, ont proposé d'exploiter la lumière des lasers accordables pour créer de nouveaux équilibres thermodynamiques. Comme chez Einstein, l'effet Doppler est à la base de la force de friction qui permet de refroidir les atomes. Les températures atteignables dans ces « mélasses optiques », spectaculairement basses, se situent dans le domaine du microkelvin. Quand ce refroidissement est mis en œuvre au laboratoire, il conduit à une nouvelle matière quantique, aux propriétés radicalement différentes des fluides ordinaires, et qui permet de jeter un éclairage nouveau sur les phénomènes de superfluidité et de supraconductivité.

Atoms and light in thermal equilibrium: From Einstein's argument to optical molasses

In 1916-17 Einstein studied how black body radiation can impose its temperature onto an assembly of atoms. Starting from the three elementary processes, absorption, directed emission, spontaneous emission, Einstein showed that light exerts a friction force on a moving atom. Then using arguments based on Brownian motion theory, he explained how the atomic assembly reaches the same thermal state as the black body he started with.

Nearly sixty years after Einstein's work, the physicists Hänsch and Schawlow on the one hand, and Wineland and Dehmelt on the other hand proposed to use laser light to create new thermodynamic equilibriums. As in Einstein's analysis, Doppler effect is at the basis of the friction force that leads to the cooling of the atomic gas. The temperatures that can be reached in these "optical molasses" are remarkably low, in the microkelvin domain. When this cooling is implemented in the lab, it leads to a novel type of quantum matter, whose properties dramatically differ from those of usual fluids, and which allows one to shed a new light on superfluidity and superconductivity phenomena.

Références:

Einstein, Albert (1916), « Strahlungs-emission und absorption nach der quantentheorie », in Deutsche Physikalische Gesellschaft 18, pp. 318–323.

Einstein, Albert (1917), « Zur Quantentheorie der Strahlung [traduction française par F. Balibar, B. Jech et O. Darrigol] », in Physikalische Zeitschrift 18, p. 121.

Hänsch, T. W. & A. L. Schawlow (1975), « Cooling of gases by laser radiation », in Optics Comm. 13, p. 68.

Wineland, D. J. & H. Dehmelt (1975), « Proposed $10^{14} \Delta\nu < \nu$ laser fluorescence spectroscopy on Ti^+ mono-ion oscillator III », in Bulletin of the American Physical Society 20, p. 637.

Pr Gabriele VENEZIANO

CERN, Collège de France
Università La Sapienza

Un Univers Quantique avant le(s) Big Bang(s)?

Les prédictions de la relativité générale ont été désormais vérifiées avec précision dans de multiples situations, ce qui a permis d'établir de fortes contraintes sur toutes sortes de théories alternatives de la gravitation. Néanmoins, cette magnifique révolution d'il y a cent ans n'est sans doute qu'une approximation d'une théorie plus complète. Les théoriciens cherchent en effet à faire lien entre la relativité générale, qui traite du cosmos et de l'infiniment grand, et la physique quantique, qui décrit d'une façon remarquable l'infiniment petit de particules élémentaires.

Or ces deux mondes se rapprochent de plus en plus l'un de l'autre comme on remonte le temps jusqu'au big bang. Mais, en effet, la cosmologie moderne a révolutionné l'ancien paradigme du big bang. Nous devons désormais parler de deux (big ?) bangs. Si nous savons pas mal des choses sur celui plus proche de nous, situé à la fin de l'inflation, nous en savons beaucoup moins sur celui qui aurait eu lieu bien avant comme commencement du temps. Il est escompté que la mécanique quantique joue un rôle essentiel dans ces questions ; malheureusement, une théorie unifiée de la gravitation et de la mécanique quantique paraît encore un objectif lointain. Trouver cette synthèse et la confirmer expérimentalement sera sûrement l'un des grands défis de la physique du 21^e siècle.

A Quantum Universe before the Big Bang(s)?

The predictions of general relativity have been verified by now in a variety of different situations, setting strong constraints on any alternative theory of gravity.

Nonetheless, there are strong indications that general relativity has to be regarded as an approximation of a more complete theory. Indeed theorists have long been looking for ways to connect general relativity, which describes the cosmos and the infinitely large, to quantum physics, which has been remarkably successful in explaining the infinitely small world of elementary particles. These two worlds, however, come closer and closer to each other as we go back in time all the way up to the big bang. Actually, modern cosmology has changed completely the old big bang paradigm: we now have to talk about (at least) two (big?) bangs. If we know quite something about the one closer to us, at the end of inflation, we are much more ignorant about the one that may have preceded inflation and possibly marked the beginning of time. No one doubts that quantum mechanics plays an essential role in answering these questions: unfortunately a unified theory of gravity and quantum mechanics is still under construction. Finding such a synthesis and confirming it experimentally will no doubt be one of the biggest challenges of this century's physics.

Pr Simone SPEZIALE

CNRS/Centre de Physique théorique de Marseille

Espace-temps quantique, gravité quantique à boucles et explosions de trous noirs

La relativité générale et la mécanique quantique partagent une naissance proche et un degré élevé de confirmation expérimentale. Les deux théories s'appliquent à des domaines très différents de la nature, et utilisent une structure conceptuelle et mathématique profondément différentes. Néanmoins, il y a dans l'univers des régions où les phénomènes quantiques sont cruciaux pour comprendre la physique gravitationnelle, notamment le big bang et les trous noirs. Dans cet exposé je parlerai des motivations et des difficultés d'une théorie unifiée de la relativité générale et de la mécanique quantique, et plus précisément, de la théorie de la gravité quantique à boucles et la notion d'espace-temps quantique à elle

associée. Enfin, je présenterai des travaux récents sur de possibles conséquences phénoménologiques de cette théorie pour le destin ultime des trous noirs.

Quantum spacetime, loop quantum gravity and exploding black holes

General relativity and quantum mechanics share a similar birthdate, and an equal extraordinary amount of empirical confirmation. They apply to very different domains of nature, and are formulated in both conceptual and mathematical terms that are profoundly different. Yet, there are regions of spacetime where quantum mechanical effects are expected to be strong and crucial to understand gravitational phenomena, in particular the big bang and black holes. In this talk I will briefly review some of the key motivations and difficulties in reconciling general relativity and quantum mechanics, and present the notion of quantum spacetime arising in loop quantum gravity. Then, I will discuss recent work on the possible phenomenological implication of the theory for the ultimate fate of black holes.

Pr Jean BRICMONT

Faculté des sciences/Institut de recherche en mathématique et physique (IRMP)
Université de Louvain

La théorie de de Broglie-Bohm comme complétion rationnelle de la mécanique quantique.

La mécanique quantique, telle qu'elle est habituellement formulée, se limite à prédire les "résultats de mesure" et ne dit rien sur le monde en dehors des laboratoires. La théorie de de Broglie-Bohm, par contre, donne une dynamique de la matière en mouvement, où les particules sont guidées par une onde, qui est solution de l'équation de Schrödinger. Cette théorie permet de retrouver les prédictions habituelles de la mécanique quantique et explique ce qui se passe lors de "mesures", qui sont en fait des interactions entre un système macroscopique et le système quantique "mesuré", interactions qui sont entièrement décrites par la théorie, sans faire de la "mesure" un *deus ex machina*, comme c'est le cas dans la présentation usuelle de la mécanique quantique.

The de Broglie-Bohm theory as a rational completion of quantum mechanics

Quantum mechanics, as it is ordinary formulated, limits itself to predict "results of measurements" and does not speak of the world outside of laboratories. On the other hand, the de Broglie-Bohm theory, gives a dynamics of matter in motion, where particles are guided by the wave that solves Schrödinger's equation. This theory recovers the usual predictions of quantum mechanics and explains what happens during "measurements", the latter being interactions between a macroscopic system and a measured quantum system, interactions that are entirely described by the theory, without turning measurements into *deus ex machina*, as is done in the usual presentations of quantum mechanics.

Luc BLANCHET

Directeur de Recherche, CNRS,
IAP (Gravitation et Cosmologie : GReCO)

La matière noire aux échelles galactiques & MOND

Le modèle standard de la cosmologie Lambda-CDM (CDM = : "*Cold Dark Matter*" ou en français "*matière noire froide*") est généralement reconnu comme une excellente description de la réalité aux grandes échelles cosmologiques. Cependant subsistent quelques problèmes fondamentaux: (i) Si on se place dans une perspective de champ quantique la valeur mesurée de la constante Lambda semble

inappropriée; (ii) Les particules interagissant faiblement envisagées comme pouvant être la matière noire froide (CDM) n'ont toujours pas été détectées en laboratoire.; (iii) Le modèle Lambda-CDM échoue dans sa tentative d'explication des régularités observées dans les propriétés des halos de DM ("*Matière noire*") situés autour des galaxies. La vision qui prévaut concernant le problème (iii) est qu'il sera résolu dès que nous comprendrons les processus baryoniques complexes qui affectent la formation et l'évolution des galaxies. Cependant cette explication est mise en question par le fait que les données concernant les galaxies s'accordent parfaitement avec les formules empiriques de la Dynamique Newtonienne modifiée (MOND). Dans cette présentation nous allons passer en revue la phénoménologie de la matière noire (DM) à l'échelle des galaxies et discuter de quelques théories alternatives au modèle standard Lambda-CDM.

Dark matter at galactic scales & MOND

The standard model of cosmology Lambda-CDM is widely held to be an excellent description of reality at large cosmological scales. However some fundamental issues remain: (i) The measured value of the cosmological constant Lambda looks unnatural from a quantum field perspective; (ii) The weakly interacting particles envisaged as candidates for the cold dark matter (CDM) are still undetected in the laboratory; (iii) The model Lambda-CDM falls short in explaining the observed regularities in the properties of DM halos around galaxies. The prevailing view regarding the issue (iii) is that it should be resolved once we understand the complicated baryonic processes that affect galaxy formation and evolution. However, this explanation is challenged by the fact that galactic data are in excellent agreement with the MOND (MODified Newtonian Dynamics) empirical formula. In this talk we shall review the phenomenology of DM at galactic scales and discuss some alternatives to the standard model Lambda-CDM.

SESSION 4. *Perspectives en Biophysique*

Pr Rienk VAN GRONDELLE (texte à confirmer)

Université d' Amsterdam
Département de Biophysique

La conception quantique de la photosynthèse''(Traduction AEIS)

La photosynthèse a trouvé un moyen ultra rapide et efficace de conversion de l'énergie solaire en énergie électrochimique. L'énergie solaire est récoltée par des complexes *collecteurs de lumière* (LHC = Light-Harvesting Complex) puis elle est transférée vers un *centre de réaction* (Reaction Center RC) dans laquelle l'énergie d'excitation est convertie en un état de séparation des charges avec presque 100% d'efficacité. Cette séparation des charges crée un gradient électrochimique à travers la membrane de photosynthèse qui, en définitive, actionne l'organisme photosynthétique. La compréhension des mécanismes moléculaires de collecte de la lumière et de séparation des charges procurera une matrice de conception de systèmes efficaces de conversion artificielle de l'énergie solaire.

Suite à une excitation du système photosynthétique l'énergie est délocalisée sur divers cofacteurs créant des états excités collectifs (*excitons*) qui fournissent des voies efficaces et ultra rapides de transfert d'énergie utilisant les principes de la mécanique quantique. Dans le centre de réaction se produit un mélange de caractères de transfert de charge (CT) des excitons (états d'exciton CT) qui fournissent des voies ultra rapides pour le transfert de charges. Cependant, autant le LHC (dispositif de collecte de la lumière) que le RC (Centre de Réaction) doivent se confronter à un effet antagoniste: le désordre. Les mouvements lents de protéines (désordre statique-) produisent des structures légèrement différentes qui, en retour, modulent les énergie des états des excitons-CT . Dans ce scénario, dans certains des complexes LHC/RC, au sein de l'ensemble pris en exemple, l'énergie pourrait être piégée dans certains états improductifs conduisant à des pertes d'énergie inacceptables.

Je vais montrer ici que les LHC (*Complexes collecteurs la lumière*) et RC (*Centres de réaction*) ont trouvé une solution unique pour remédier à ce problème: Ils utilisent les principes de la mécanique quantique pour tester simultanément de nombreuses voies possibles et pour sélectionner la plus efficace d'entre elles à l'égard de l'état du désordre . Ils utilisent la cohérence électronique pour le transfert ultrarapide de l'énergie et de l'électron et ils ont sélectionné des vibrations spécifiques pour rendre possibles ces cohérences. C'est ainsi que le transfert d'énergie et la séparation de charge de la photosynthèse ont réussi leur performance étonnante . Simultanément ces mêmes interactions servent à protéger le système contre des effets secondaires indésirables de collecte de lumière et de séparation de charge en cas d'exposition à une intensité lumineuse élevée.

The Quantum Design of Photosynthesis

Photosynthesis has found an ultrafast and highly efficient way of converting the energy of the sun into electrochemical energy. The solar energy is collected by Light-Harvesting complexes (LHC) and then transferred to the Reaction Center (RC) where the excitation energy is converted into a charge separated state with almost 100% efficiency. That separation of charges creates an electrochemical gradient across the photosynthetic membrane which ultimately powers the photosynthetic organism. The understanding of the molecular mechanisms of light harvesting and charge separation will provide a template for the design of efficient artificial solar energy conversion systems.

Upon excitation of the photosynthetic system the energy is delocalized over several cofactors creating collective excited states (excitons) that provide efficient and ultrafast paths for energy transfer using the principles of quantum mechanics. In the reaction center the excitons become mixed with charge transfer (CT) character (exciton-CT states), which provide ultrafast channels for charge transfer. However, both the LHC and the RC have to cope with a counter effect: disorder. The slow protein

motions (static disorder) produce slightly different conformations which, in turn, modulate the energy of the exciton-CT states. In this scenario, in some of the LHC/RC complexes within the sample ensemble the energy could be trapped in some unproductive states leading to Unacceptable energy losses.

Here I will show that LHCs and RCs have found a unique solution for overcoming this barrier: they use the principles of quantum mechanics to probe many possible pathways at the same time and to select the most efficient one that fits their realization of the disorder. They use electronic coherence for ultrafast energy and electron transfer and have selected specific vibrations to sustain those coherences. In this way photosynthetic energy transfer and charge separation have achieved their amazing efficiency. At the same time these same interactions are used to photoprotect the system against unwanted byproducts of light harvesting and charge separation at high light intensities.

Table Ronde

Une nouvelle révolution scientifique à l'horizon ?

En clôture du colloque AEIS-2016, cette table ronde, à visée prospective, permettra à la salle et aux personnalités qui ont accepté d'y participer de donner leur opinion et de débattre à propos de la pertinence de la notion de révolution scientifique pour caractériser l'état de la science en 2016.

Claude Cohen-Tannoudji, prix Nobel de physique, est avec Franck Laloë et Bernard Diu l'auteur de l'ouvrage de référence en mécanique quantique, grâce auquel, de par le monde, des générations entières d'étudiants se sont formées à la pratique de la physique quantique. Ces auteurs mettent actuellement la dernière main à l'actualisation de leur ouvrage au moyen d'un troisième tome qui intégrera les développements et approfondissements les plus récents de la mécanique quantique.

Alain Aspect, justement, a réalisé, avec ses collaborateurs, plusieurs des expériences qui ont relancé les débats sur l'interprétation de la mécanique quantique et ont contribué au renouveau actuel qu'il qualifie lui-même de seconde révolution quantique.

Dominique Lambert, mathématicien philosophe, s'interroge, dans le prolongement de sa thèse sur la « déraisonnable » efficacité des mathématiques en physique, sur le rôle que les mathématiques contemporaines pourraient jouer dans l'établissement d'une « biologie théorique », à l'origine d'une possible nouvelle révolution scientifique.

Michel Serres, de l'Académie française, considère que la rupture technologique du numérique, largement redevable de la physique quantique, est à l'origine d'une mutation anthropologique, comparable à celles induites par les inventions de l'écriture et de l'imprimerie.

Françoise Balibar, présidente du colloque, a été avec Jean-Marc Lévy-Leblond, auteure d'un ouvrage d'initiation à la mécanique quantique, et a coordonné pour le CNRS, l'édition des œuvres choisies d'Einstein. Après avoir introduit notre colloque, elle pourra le conclure

A new scientific revolution at the horizon?

Round Table at the AEIS-2013 symposium

Waves, matters, universe, animated by Gilles Cohen-Tannoudji

In closing of the symposium AEIS-2013, this round table, with a prospective aim, will allow the room and the personalities who have accepted to participate to give their opinion and debate about the relevance of the concept of scientific revolution to characterize the state of the science in 2016.

Claude Cohen-Tannoudji, winner of the Nobel Prize for physics, is with Franck Laloë and Bernard

Diu the author of the reference textbook in quantum mechanics, thanks to which, by the world, whole generations of students are trained in the practice of quantum physics. These authors are currently finalizing the updating of their work by means of a third volume which will integrate the most recent developments and deepening of quantum mechanics.

Alain Aspect, precisely, has carried out, with his collaborators, several experiments that have revived the debate on the interpretation of quantum mechanics and have led it to the current revival that he himself calls of a *second quantum revolution*.

Dominique Lambert, mathematician-philosopher, wonders, in the wake of his thesis on the "unreasonable" effectiveness of mathematics in physics, on the role that the contemporary mathematics could play in the establishment of a "theoretical biology", possibly at the origin of a new scientific revolution.

Michel Serres, of the French Academy, considers that the disruption induced by digital high technologies, widely liable to quantum physics, is at the origin of an anthropological mutation, comparable to those induced by the inventions of the writing and the printing.

Françoise Balibar, President of the symposium, was with Jean-Marc Lévy-Leblond, author of a book of initiation to the quantum mechanics, and coordinated for the CNRS, the edition of the selected works of Einstein. After having introduced our colloquium, she can conclude it.
