

BULLETIN N° 184
ACADÉMIE EUROPEENNE
INTERDISCIPLINAIRE
DES SCIENCES



lundi 7 avril à 17h Maison de l'AX 5 rue Descartes 75005 Paris

Suite des REFLEXIONS SUR LE COLLOQUE AEIS 2014:
"Formation des Systèmes stellaires et planétaires Conditions d'apparition de la vie"
CONFERENCE : Gravitation quantique et complémentarité généralisée
 par notre Collègue Gilles COHEN-TANNOUJJI
EXAMEN de nouvelles candidatures

Prochaine séance :
lundi 5 mai à 17h Maison de l'AX 5 rue Descartes 75005 Paris

Conférence:
"Du Temps à l'Espace-Temps"
 par **Marc Lachièze-Rey**
 Directeur de Recherche CNRS
 APC - Astroparticule et Cosmologie (UMR 7164)
 Université Paris 7 Denis Diderot

ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES

FONDATION DE LA MAISON DES SCIENCES DE L'HOMME

PRESIDENT : Pr Victor MASTRANGELO
VICE PRESIDENT : Pr Jean-Pierre FRANÇOISE
SECRETAIRE GENERAL : Irène HERPE-LITWIN
TRESORIER GENERAL : Claude ELBAZ

MEMBRE S CONSULTATIFS DU CA :

Gilbert BELAUBRE
 François BEGON
 Bruno BLONDEL
 Patrice CROSSA-REYNAUD
 Michel GONDRAN

COMMISSION FINANCES: Claude ELBAZ,
COMMISSION MULTIMÉDIA: Pr. Alain CORDIER

COMMISSION CANDIDATURES: Pr. Jean-Pierre FRANCOISE

PRESIDENT FONDATEUR : Dr. Lucien LEVY (†)
PRESIDENT D'HONNEUR : Gilbert BELAUBRE
SECRETAIRE GENERAL D'HONNEUR : Pr. P. LIACOPOULOS (†)

CONSEILLERS SCIENTIFIQUES :

SCIENCES DE LA MATIERE : Pr. Gilles COHEN-TANNOUJJI
SCIENCES DE LA VIE ET BIOTECHNIQUES : Pr Brigitte DEBUIRE

CONSEILLERS SPECIAUX:

EDITION: Pr Robert FRANCK
AFFAIRES EUROPEENNES: Pr Jean SCHMETS
RELATIONS VILLE DE PARIS et IDF: Michel GONDRAN ex-Président
RELATIONS UNIVERSITES et MOYENS MULTIMEDIA: Pr Alain CORDIER
RELATIONS AX et MÉCENAT : Gilbert BELAUBRE

SECTION DE NICE :

PRESIDENT : Doyen René DARS

SECTION DE NANCY :

PRESIDENT : Pr Pierre NABET

avril 2014

N°184

TABLE DES MATIERES

p. 03 Compte-rendu de la séance du lundi 7 avril 2014

p. 09 Annonces

p. 11 Documents

Prochaine séance :

lundi 5 mai à 17h Maison de l'AX 5 rue Descartes 75005 Paris

Conférence:

"Du Temps à l'Espace-Temps"

par Marc Lachièze-Rey

Directeur de Recherche CNRS

APC - Astroparticule et Cosmologie (UMR 7164)

Université Paris 7 Denis Diderot

ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES
Fondation de la Maison des Sciences de l'Homme, Paris.

Séance du

Lundi 7 avril 2014

Maison de l'AX 17h

La séance est ouverte à 17h sous la Présidence de Victor MASTRANGELO et en la présence de nos Collègues Gilbert BELAUBRE, Gilles COHEN-TANNOUDJI, Alain CARDON, Françoise DUTHEIL, Claude ELBAZ, Jean -Pierre FRANCOISE , Michel GONDRAN, Irène HERPE-LITWIN, Pierre MARCHAIS , Jean SCHMETS,

Etaient excusés François BEGON, Bruno BLONDEL, Michel CABANAC, Alain CORDIER, Daniel COURGEAU, Robert FRANCK, Walter GONZALEZ, Gérard LEVY, Jacques LEVY , Valérie LEFEVRE-SEGUIN , Pierre PESQUIES, Alain STAHL , Jean VERDETTI.

I. REFLEXIONS SUR LE COLLOQUE AEIS 2014:
"Formation des Systèmes stellaires et planétaires
Conditions d'apparition de la vie"

Suite au dernier colloque de février 2014, notre Président nous rappelle qu'il avait été décidé de créer trois commissions (Voir bulletin n° 183 page 10):

1. **Une commission chargée du "recrutement au sens large"** de nouveaux adhérents à l'AEIS avec pour responsable notre Collègue **Jean Pierre FRANÇOISE** qui, avec l'aide de nos Collègues Gilbert BELAUBRE, Alain CORDIER, Irène HERPE-LITWIN, Victor MASTRANGELO et Jean SCHMETS, examinera parmi les conférenciers et participants à nos derniers colloques, les personnalités scientifiques susceptibles de participer à un comité scientifique d'honneur . Ceci nous donnerait ainsi une certaine lisibilité scientifique auprès de la commission européenne et des instances nationales.
2. **Une commission Multimédia** chargée de la mise à niveau de notre site Internet avec pour responsable notre Collègue Alain CORDIER avec la collaboration de nos Collègues Robert FRANCK, Michel GONDRAN, Irène HERPE-LITWIN, Victor MASTRANGELO et Jean SCHMETS capable de rivaliser avec d'autres sociétés savantes. Il lui faudra prendre contact avec des organismes tels l'Université Permanente de Paris, le CERIMES, l'Agence Universitaire de la Francophonie, le service multimédia de l'IN2P3 pour si possible enregistrer nos colloques,...
3. **Une Commission des Finances** chargée de répondre aux appels d'offres d'organismes tels la Mairie de Paris, la Région Ile de France et de collecter les fonds auprès d'institutions telles la Commission Européenne, le M.E.S.R, le CERIMES, le Ministère des A.E, le CEA, l' Agence Universitaire de la Francophonie, la Fondation roi Baudoin (Belgique) etc...La commission est prise en charge par notre trésorier général Claude ELBAZ avec l'assistance de nos Collègues Gilbert BELAUBRE , Françoise DUTHEIL , Michel GONDRAN

Notre Président nous rappelle à ce propos que doivent être vérifiés nos paramètres d'enregistrement sur le site SIMPA de la ville de Paris réalisés par notre Collègue Michel GONDRAN en septembre 2013 et qu'il faut prendre contact avec les nouveaux conseillers de la Ville de Paris après les dernières élections.

II. Conférence de notre Collègue Gilles COHEN-TANNOUDJI : Gravitation quantique et complémentarité généralisée"

A. Notre Collègue nous donne le résumé suivant de son intervention:

La physique quantique est née de la découverte par Planck en 1900 de la loi du rayonnement du corps noir qui fait intervenir deux constantes universelles, la constante k qu'il baptise constante de Boltzmann et la constante h qui a le contenu dimensionnel d'une action, produit d'une énergie par un temps, qui a ensuite été baptisée constante de Planck. Il est rapidement apparu que h est un quantum élémentaire universel d'action : partout, dans tout l'univers il n'y a aucune interaction qui ne mette en jeu une action au moins égale à ce quantum. L'idée de *complémentarité*, introduite par Niels Bohr, est au cœur de l'interprétation, dite de Copenhague, de la physique quantique ; elle permet d'expliquer le comportement paradoxal de la lumière et de la matière, appelé dualité ondes/corpuscules : lorsque la lumière et la matière sont impliquées dans des processus mettant en jeu une action de l'ordre du quantum d'action elles peuvent être décrites aussi bien en termes d'ondes qu'en termes de particules.

La complémentarité a fait l'objet, en 1948, d'un numéro spécial de la revue *Dialectica* dirigée par le mathématicien-philosophe Ferdinand Gonseth, auquel ont participé cinq des pères fondateurs de la physique quantique : Pauli, Bohr, Einstein, Heisenberg et de Broglie. Dans sa contribution, [Gonseth interprète la complémentarité](#) en termes simples au moyen de l'articulation de deux *horizons de réalité* : un horizon apparent, celui de l'expérience relevant de la physique classique, et l'horizon profond, celui de la théorie quantique en construction. Les descriptions ondulatoire et corpusculaire, qui sont contradictoires dans l'horizon apparent sont complémentaires parce que les deux sont nécessaires pour rendre compte de leur unité, voire de leur équivalence dans l'horizon profond.

L'interprétation de Copenhague, basée sur la complémentarité, est un véritable modèle standard interprétatif : elle n'a jamais été invalidée mais elle a pu être intégrée dans un schéma plus large, celui de la théorie quantique des champs intégrant les contraintes de la quantique et celles de la relativité restreinte et pouvant être utilisée aussi bien en physique des particules qu'en cosmologie relativiste. Cette théorie quantique des champs est quelques fois appelée la seconde quantification. J'é mets l'hypothèse que cette appellation se justifierait parce que la théorie quantique des champs prendrait en compte *deux quanta élémentaires universels* : le quantum d'action h et la constante de Boltzmann k qui peut être interprétée comme un quantum élémentaire d'information ou d'entropie. En physique des hautes énergies, la mécanique statistique (quasi) classique et la théorie (quasi) classique des champs constituent l'horizon apparent dans lequel les approches corpusculaire et ondulatoire sont contradictoires, alors que dans l'horizon profond, celui d'une théorie quantique de l'information, qui prendrait en compte simultanément les deux quanta, se révélerait la complémentarité des deux approches.

La plupart des tentatives actuelles de réconcilier quantique et relativité générale, c'est-à-dire d'élaborer une théorie quantique de la gravitation, semblent faire intervenir un troisième quantum élémentaire universel, qui serait un quantum d'aire d'espace (ou d'espace-temps), une aire, dite aire de Planck, obtenue par une combinaison des trois constantes universelles, h , G (constante de la gravitation) et c (vitesse de la lumière) : $A_P = hG/c^3$. Mais si, maintenant on a trois quanta élémentaires, on peut imaginer qu'on aurait trois théories à deux quanta (h, k) , (h, A_P) et (k, A_P) qui formeraient l'horizon profond, celui de la théorie quantique de la gravitation à élaborer, que l'on pourrait articuler à l'aide de ce que j'appelle [la conjecture de la complémentarité généralisée](#), à un horizon apparent formé par des approches phénoménologiques ou heuristiques prenant en compte les trois quanta un à un.

Notre Collègue Gilles COHEN-TANNOUDJI a étayé ceci au moyen d'un ensemble de diapositives exposées dans le tableau ci-dessous:

GRAVITATION QUANTIQUE ET COMPLEMENTARITE GENERALISEE

(AEIS 07/04/14)

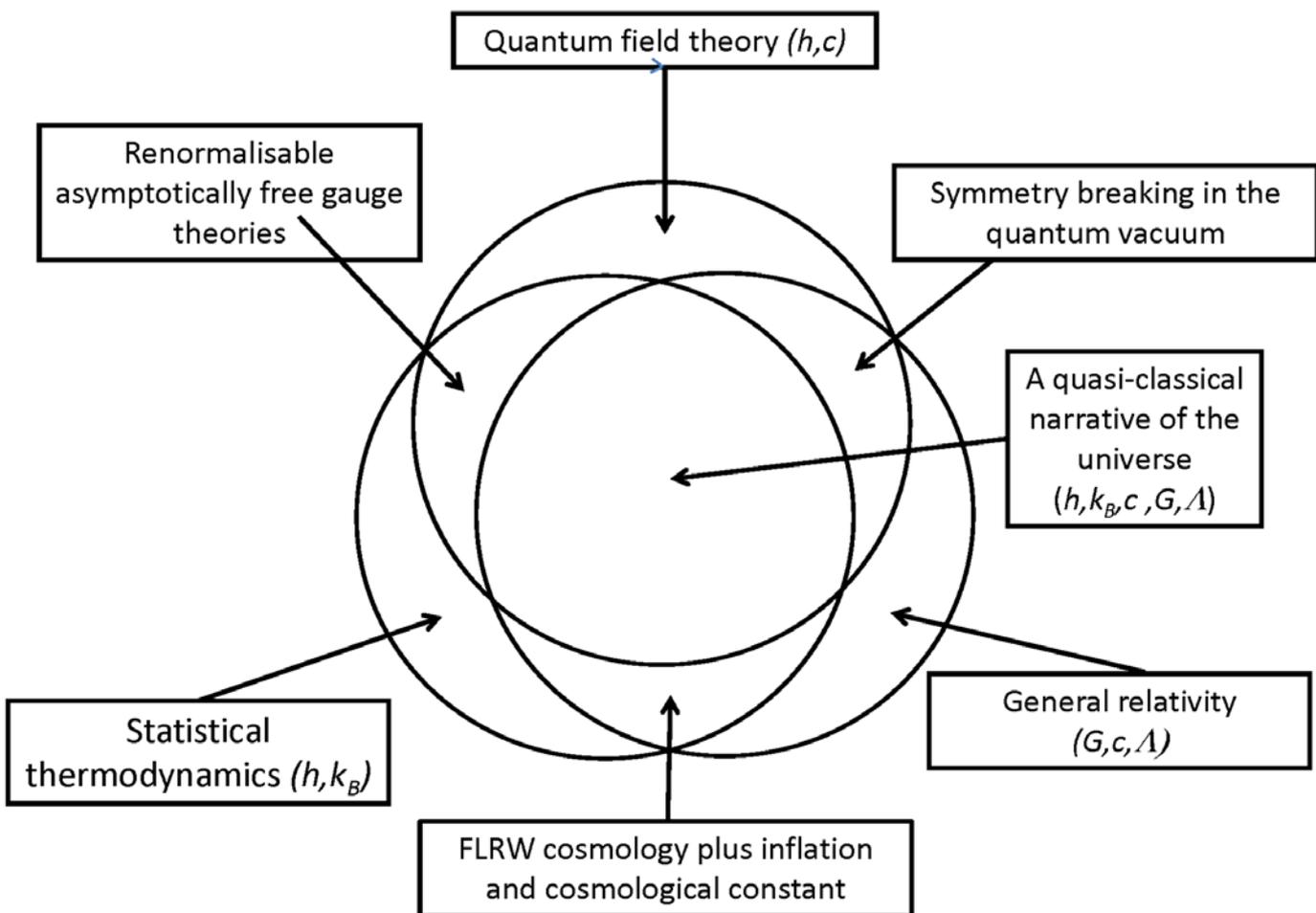
Gilles Cohen-Tannoudji

Laboratoire de recherche sur les sciences de la matière (LARSIM) CEA-Saclay

www.gicotan.fr

The current consolidated standard model and its robustness

- **In particle physics**
 - Discovery of the last missing link and corner stone of the standard model: the BEH boson
- **In cosmology**
 - Shift from the simple big bang model to a new standard model of cosmology: the “concordance” or “ Λ CDM” standard model
- **Consolidation of the two standard models**
 - A quasi-classical narrative of the universe



07/04/2014

Gravitation quantique et complémentarité généralisée

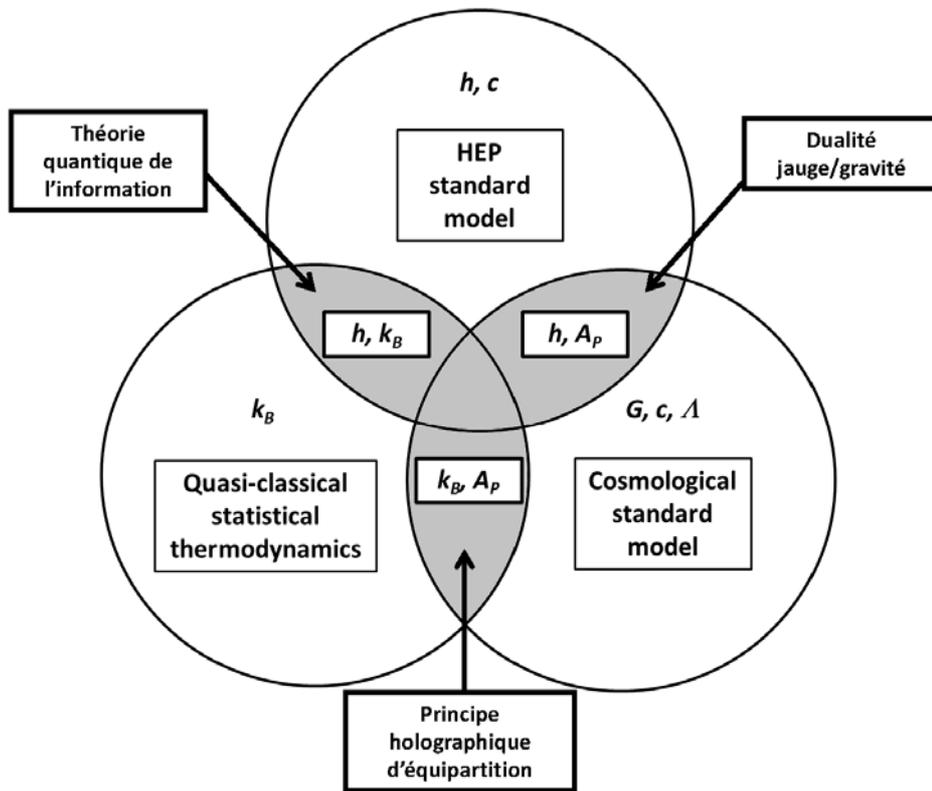
3

«Les tentatives visant à appliquer les méthodes statistiques de la théorie des quanta aux champs, c'est-à-dire à des systèmes à une infinité de degrés de liberté» sont confrontées à des difficultés qu'il qualifie de «terrifiantes» si on se limite à la relativité restreinte, et qui «s'élèveront jusqu'à la hauteur du ciel, si l'on veut satisfaire aux exigences de la théorie de la relativité générale, dont le bien-fondé fondamental n'est mis en doute par personne» *Einstein , physique et réalité (in Conceptions scientifique, Champs Flammarion, p. 68*

The “terrifying” difficulties have been overcome by means of **quantum field theory** applied to non gravitational interactions.

To overcome the “difficulties raising up to the heaven” we conjecture that the elaboration of a theory of quantum gravity does not imply to question the validity of general relativity or the one of quantum field theory, but rather

- to further generalize both of them: **generalization of quantum theory** involves beside the elementary quantum of action h , the Boltzmann constant k_B as an elementary quantum of information (or entropy), and the Planck's spacetime area AP as an elementary quantum of horizon area
- **“generalization” of general relativity** consists in recognizing that the concepts of horizon, entropy (or information), and even the whole Hilbert space (including the vacuum) are relative in the sense that they depend on the state of motion of the observer.
- To introduce three theoretical schemata involving **couples of quanta** The **gauge/gravity schema** relating the quantum of action to the quantum of space time area
- The **entanglement thermodynamics schema** relating the quantum of action to the quantum of information
- The **thermodynamic route to quantum gravity schema** relating the quantum of information to the quantum of space time area



07/04/2014

Gravitation quantique et complémentarité
généralisée

7

References :

Spacetime thermodynamics without hidden degrees of freedom Carlo Rovelli et AlarXiv:1401.5262v1 [gr-qc] 21 Jan 2014
 General Relativity from a Thermodynamic Perspective T. Padmanabhan
[arXiv:1312.3253](https://arxiv.org/abs/1312.3253) [gr-qc]
 Gauge/gravity duality G.T. Horowitz, J. Polchinsky arXiv:gr-qc/0602037

III. EXAMEN des nouvelles candidatures:

Suite au succès enregistré par notre précédent Colloque , huit demandes d'adhésion à l'AEIS nous sont parvenues émanant de :

1. Jean-Pierre BESSIS
2. Jean-Louis BOBIN
3. Juan Carlos CHACHQUES
4. Ernesto DI MAURO
5. Antoine LONG
6. Claude MAURY
7. Edith PERRIER
8. Jean-Pierre TREUIL

Après lecture de la lettre de motivation et du CV de chaque impétrant, chaque candidature est soumise au vote des membres de l'AEIS. Toutes les candidatures ont été acceptées à l'unanimité des participants.

Après cette très riche séance, nos travaux prennent fin.

Irène HERPE-LITWIN

Annonces

Notre Collègue, le Professeur Henri de LUMLEY de l'Institut de Paléontologie nous fait part de la manifestation suivante:



**COLLÈGE DES
BERNARDINS**

CNRS EDITIONS



*Le Collège des Bernardins, CNRS Éditions et l'Institut de Paléontologie Humaine
sont heureux de vous inviter à la présentation de l'ouvrage*

LE BEAU, L'ART ET L'HOMME

Émergence du sens de l'esthétique

au Collège des Bernardins

Grand auditorium

Mercredi 21 mai 2014

De 20h00 à 21h30

A la suite du cycle de conférences organisé au Collège des Bernardins en février 2013 sur le thème « L'émergence du sens de la beauté. Une caractéristique de l'Homme », un ouvrage « Le Beau, l'Art et l'Homme », édité par CNRS Editions, réunit l'ensemble des interventions et des discussions données dans ce cycle de conférences.

L'Homme a profondément donné toute liberté à son imagination, à ses rêves, à ses émotions, révélant ainsi combien le sens de la beauté est une des aspirations les plus profondes de la nature humaine à la recherche de la transcendance.

Comment la conscience du Beau s'est-elle imposée ? Comment le sens de l'harmonie a-t-il émergé ? Quelle est donc la signification du Beau ?

C'est à ces questions essentielles que répondent Henry de Lumley et ses collaborateurs composés d'historiens, de physiciens, de mathématiciens, d'artistes, de philosophes et de théologiens.

Cet ouvrage publié par CNRS Editions, à la suite de « L'Univers, la Vie et l'Homme » qui

reprendait également un cycle de conférences du Collège des Bernardins, a pour but de mettre en perspective l'Homme au sein de l'Histoire de l'Univers et de la Vie.

ACCUEIL

Père de l'Épine, Collège des Bernardins
 Jacques Baudouin, Directeur général chez CNRS Editions
 Henry de Lumley, Directeur de l'Institut de Paléontologie Humaine, Fondation Albert Ier
 Prince de Monaco.

INTERVENANTS

Jean-Claude AMEISEN, Emmanuel ANATI, Edmond COUCHOT, Chantal DELSOL, Mgr
 André DUPLEIX, Etienne GUYS, Aude de KERROS, Etienne KLEIN, Pierre LENA, Jean-
 Marie LE TENSORER, Jean-Pierre LUMINET, Henry DE LUMLEY, Jean-François MATTEI
 †, Alain MEROT, Yves QUERE, Francine SAUNIER, Christine SOURGINS.

Une séance de dédicaces aura lieu à l'issue des échanges.

INFORMATIONS PRATIQUES

Adresse :

Collège des Bernardins
 20, rue de Poissy
 75005 Paris

www.collegedesbernardins.fr

Tarifs :

Entrée libre, réservation obligatoire.

Inscriptions et informations :

+ (33) 1 55 43 27 20

Rep: +(33) 1 55 43 27 53

iph@mnhn.fr



Sheryne Grosset-Picazo
 Institut de Paléontologie Humaine
 Fondation Albert Ier de Monaco
 11 rue René Panhard
 FR-75013 Paris
 Tel 00 33 (0) 1 55 43 27 20
 Fax 00 33 (0) 1 43 36 73 08
<http://www.fondationiph.org>

Documents

Pour préparer la conférence de Marc LACHIEZE-REY, nous vous proposons:

p.12 un extrait de sa conférence CONFÉRENCE MENSUELLE DE LA SAF "L'ESPACE, LE TEMPS, L'ESPACE-TEMPS ET LA NOUVELLE PHYSIQUE" issu de planetastronomy.com

p.18 L'introduction de son livre "Au-delà de l'Espace et du temps" publié aux Editions du Pommier en 2008.

p. 21 Un article de Marc LACHIEZE REY, publié dans le n°474 de La Recherche, intitulé "Le statut du vide pose problème"

Dans le cadre des toutes dernières recherches sur les ondes gravitationnelles, notre Collègue Gilles COHEN-TANNOUDJI, nous a transmis le "preprint" d' un article qu'il compte publier dans une revue scientifique TBD portant sur "BICEP2 I: DETECTION OF B-mode POLARIZATION AT DEGREE ANGULAR SCALES". Nous vous en présentons donc le résumé et l'introduction :

p.25 : BICEP2 I: DETECTION OF B-mode POLARIZATION AT DEGREE ANGULAR SCALES, résumé et introduction.



Mise à jour le 17 Décembre 2011

CONFÉRENCE MENSUELLE DE LA SAF "L'ESPACE, LE TEMPS, L'ESPACE-TEMPS ET LA NOUVELLE PHYSIQUE"

Par Marc LACHIEZE-REY
Directeur de recherche CNRS,
APC (AstroParticules et Cosmologie) Paris VII
[Au FIAP](#), 30 rue Cabanis, 75014 Paris (métro Glacière).
Le Mercredi 14 Décembre 2011 à 20H30



Marc Lachèze-Rey est un de nos plus grands astrophysiciens, il travaille au centre APC, Astro Particules et Cosmologie qui dépend de l'Université Paris VII.

Il a publié de nombreux ouvrages à la fois très spécialisés mais aussi certains, plus à la portée du grand public. Voir en bas de ce compte rendu.

Il nous parle (sans notes !!) de l'évolution des notions d'espace et de temps dans la physique et dans quelles directions on compte de les faire évoluer aujourd'hui.

Tout commence avec Aristote, pour lui pas de notion d'espace, mais uniquement de lieu. Son savoir ainsi que le savoir Grec nous est transmis par les Arabes.

Isaac Newton est le créateur de la physique moderne ; il introduit un cadre pour la physique qui comprend un espace et un temps.

Il y a un espace physique qui se décrit par un espace géométrique. Pour lui, l'Univers est un espace infini.

L'espace est homogène (pas de centre pas frontière) et isotrope (pas de direction privilégiée).

Il introduit la loi de la gravitation universelle qui agit dans l'espace isotrope et définit une direction privilégiée.

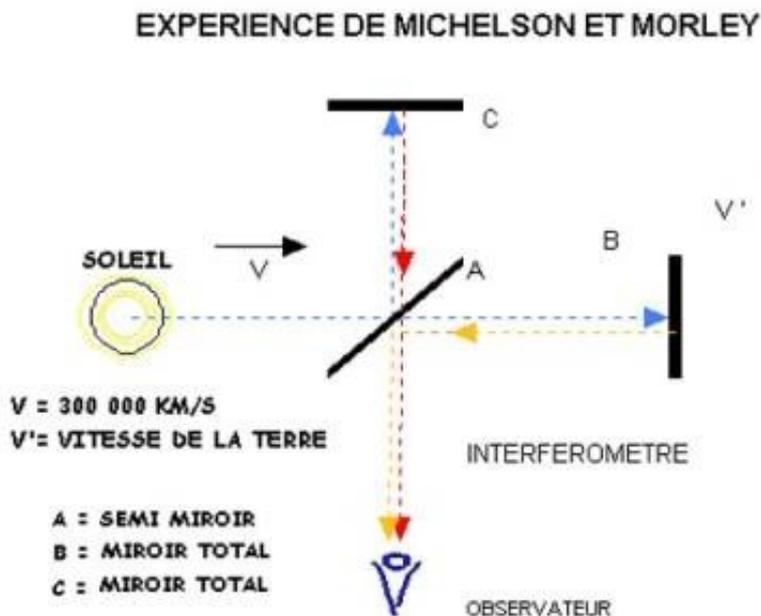
La vie de tous les jours est régie par les lois de Newton.

Concernant le temps, Newton l'assimile à une droite. À chaque instant on peut définir la durée par rapport à une origine.

La propriété essentielle du temps newtonien est que l'on peut associer une date à n'importe quel événement.

Donc, on peut définir la simultanéité de deux événements, ce qui sera nié plus tard par Einstein.

Newton énonce aussi le principe d'inertie et en cinématique la loi d'addition des vitesses.



Le XIX^{ème} siècle arrive, et on s'aperçoit que la lumière n'obéit pas à la loi d'addition des vitesses, il existe une limite absolue, la vitesse de la lumière.

Ceci sera démontré par la célèbre [expérience de Michelson et Morley](#).

À l'époque on pensait que la lumière se déplaçait dans un milieu qu'on appelait l'éther. Afin de savoir si notre Terre se déplaçait dans cet éther, on monta cette expérience d'interférométrie. Si c'était le

cas, on aurait dû avoir des figures d'interférences différentes pour les miroirs correspondants au mouvement dans le sens de l'orbite de la Terre et perpendiculaire à celle-ci.

Ce ne fut pas le cas. L'éther n'existe pas !

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \left(\frac{v^2}{c^2}\right)}}$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \frac{t - \left(\frac{vx}{c^2}\right)}{\sqrt{1 - \left(\frac{v^2}{c^2}\right)}}$$

[Hendrik Lorentz](#), physicien néerlandais et [Henri Poincaré](#) mathématicien français, se sont attelés au problème de la composition des vitesses qui tiendrait compte de la limite finie de la vitesse de la lumière.

Cela aboutit vers les années 1920, aux célèbres [transformations de Lorentz](#), qui se réduisent aux formules newtoniennes pour la vie de tous les jours.

C'est Einstein qui plus tard va réellement comprendre et expliquer ces formules.

Il prétend que l'espace et le temps n'existent pas, et que par conséquence la simultanéité n'existe pas non plus.

[Albert Einstein](#), en 1905, publie sa théorie de la Relativité Restreinte (RR restreinte car sans gravitation, en anglais special relativity) où il n'y a pas d'espace ni de temps.

Cette théorie nous sert tous les jours avec le GPS !!

Quand la vitesse d'un objet est proche de celle de la lumière, il se passe des phénomènes qui vont contre le sens commun :

- Le temps ralentit
- Les distances se contractent

- La masse des objets augmente.

Elle est aussi la base du paradoxe [des jumeaux de Langevin](#).

On considère deux jumeaux, l'un fait un voyage dans l'espace à une vitesse proche de la vitesse de la lumière et revient sur Terre, l'autre reste sur Terre.



Au départ disons qu'ils ont 20 ans tous les deux.

Au retour sur Terre, le jumeau resté sur Terre a 40 ans, le jumeau astronaute 30 ans !

Il y a eu dilatation du temps. Pour le jumeau resté sur Terre, la durée de l'absence de son frère est supérieure au temps passé par celui qui voyage.

Mais contrairement à ce que l'on pourrait croire, ils ont vécu pendant le voyage, chacun réellement 20 ans et 10 ans biologiques que l'on peut vérifier aussi sur une montre.

C'est la preuve que le temps n'existe pas !

Le temps et l'espace sont remplacés par l'espace-temps, qui est différent de la simple réunion de l'espace et du temps !

Cette entité s'appelle [l'espace-temps de Minkowski](#), car c'est Hermann Minkowski, mathématicien russe, qui a modélisé cet espace à 4 dimensions rendant compte de la RR.

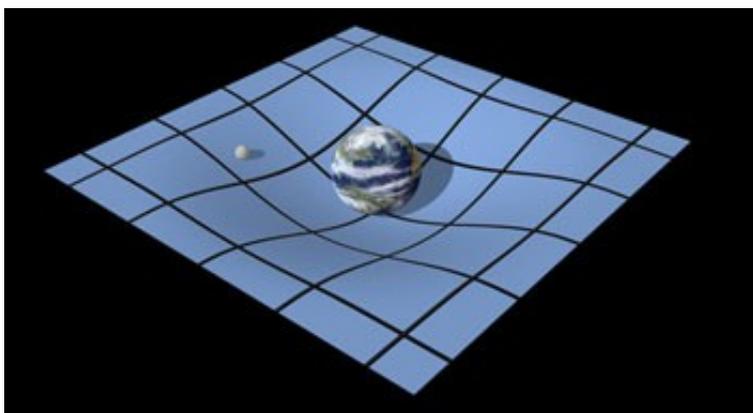
Mais il existe aussi d'autres géométries, par exemple celle de Riemann.

L'espace-temps de Minkowski est plat. Une particule décrit une droite dans cet espace, c'est le principe d'inertie.

Mais l'espace-temps de Minkowski de la Relativité Restreinte, ne prend pas en compte la gravitation.

Albert Einstein veut intégrer la gravitation dans sa théorie.

La gravitation va devenir une propriété de l'espace-temps qui introduit une courbure de cet espace- temps.



Les objets suivent la forme de l'espace-temps, ils suivent la courbure, leurs trajectoires ne sont plus des droites mais ce que l'on appelle [des géodésiques](#).

Géodésique entre deux points est la trajectoire dont la durée est la plus longue (alors que pour une droite c'est la distance la plus courte).

La masse déforme l'espace-temps en créant une courbure de celui-ci.

C'est la théorie de la Relativité Générale (RG).

Ce sont les équations d'Einstein qui vont permettre de calculer la courbure de l'espace-temps.

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Cette équation lie la géométrie de l'espace-temps à la répartition de matière et d'énergie.

R est le tenseur de Ricci qui caractérise la courbure spatio-temporelle. T est le tenseur énergie- matière.

Ces équations sont valables dans tout l'Univers ; mais il est bien évident que dans notre système solaire, la physique newtonienne en découle pour tout ce qui est très inférieur à c et pour des masses relativement faibles.

La seule exception est Mercure qui est si proche du Soleil, Soleil qui est une masse énorme et qui déforme l'espace-temps de la première planète.

Ce sera une grande victoire d'Einstein d'expliquer grâce à sa nouvelle théorie, [l'avance du périhélie de Mercure](#).

Une question se pose : existe-t-il une solution globale à l'équation d'Einstein ?

Einstein lui-même a cherché, puis Dirac, d'autres aussi en introduisant des géométries différentes.

À l'époque d'Einstein, [Théodor Kaluza et Oskar Klein](#) ont essayé d'unifier les deux interactions fondamentales que sont la gravitation et l'électromagnétisme. Ils introduisent une cinquième dimension (qui serait tellement petite et repliée sur elle-même que l'on ne pourrait pas l'appréhender).

Les équations d'Einstein correspondent à l'espace-temps à 4 dimensions. Et ça marche pas mal !

Mais à la même époque, la physique quantique est découverte.



La lumière qui était suivant les savants soit ondes (Huygens) soit corpuscules (Newton) devient à la fois ondes et corpuscules, c'est la dualité onde-corpuscule (De Broglie).

Des objets nouveaux sont introduits : les quantas qui dans certaines conditions sont soit ondes soit particules.

Illustration :© Zach Weiner

Cela va donner naissance à une nouvelle géométrie, [la géométrie non commutative](#). (développée par [Alain Connes](#)).

$A \times B$ différent de $B \times A$).

(non commutatif signifie dans notre monde que par exemple

Puis au cours du XX^{ème} siècle on découvre [les 4 forces de la nature](#) :

- l'interaction gravitationnelle, responsable de la pesanteur, ou encore des phénomènes astronomiques, portée illimitée
- l'interaction électromagnétique, responsable de l'électricité, du magnétisme, de la lumière etc transportée par le photon
- l'interaction forte, responsable de la cohésion des noyaux atomiques, très puissante..
- l'interaction faible, responsable de la [radio-activité bêta](#), qui permet au Soleil de briller. Rayon d'action très court.

Ceci a donné naissance au [Modèle Standard de la physique](#).

C'est une solution inélégante et compliquée d'après Marc Lachièze Rey, car la gravitation n'est pas incluse dans ce cadre.

On est en présence de deux mondes, l'infiniment petit avec la Mécanique Quantique et son Modèle Standard, et l'infiniment grand avec la Relativité Générale et la gravitation. Ces deux mondes sont incompatibles et s'ignorent, alors qu'indépendamment ils fonctionnent.

On sent bien qu'il manque quelque chose.

Ce sera l'objet de la Nouvelle Physique de réconcilier ces deux mondes. Pourra-t-on les réunir en une seule théorie ? C'est le but ultime de la physique actuelle.

Il y a différentes pistes pour y aboutir. Citons-en deux principales :



• [La théorie des cordes](#) (string theory en anglais) qui introduit de nombreuses dimensions supplémentaires.

• [La gravité quantique à boucle](#) (loop quantum gravity en anglais) où on essaie de quantifier la gravitation. C'est très prometteur.

Il existe aussi d'autres théories trop compliquées pour être expliquées ce soir comme la théorie des catégories.

Bref, en conclusion, la physique c'est de la géométrie d'après Marc Lachièze-Rey !

POUR ALLER PLUS LOIN.

[Vers la Gravitation Quantique](#) : CR de la conférence SAF de M Lachièze Rey du 14 Janvier 2006
[Les transformations de Lorentz](#) avec tous les détails.

http://fr.wikipedia.org/wiki/Paradoxe_des_jumeaux

[Les jumeaux de Langevin](#) par A. Moatti.

[Le paradoxe de Langevin](#), CR de la conférence SAF de B Christophe.

[Construction de l'espace-temps de Minkowski](#) par R Bouzerar.

[L'espace-temps de Minkowski](#) par Nathalie Deruelle.

[H. Minkowski et le scandale de l'espace-temps](#) par Scott Walter de l'Université de Nancy, présentation pdf.

[Cours de relativité générale](#) par Éricourgoulhon du LUTH Observatoire de Paris

[Discussion critique autour des principes fondamentaux de la cosmologie moderne](#) par JM Alimi du LUTH.

[Les équations de la cosmologie](#) par A Mertz de la SAF.

[Kaluza Klein Gravity](#) par J. M. Overduin

[La théorie quantique des champs](#) par G Cohen-Tannoudji, présentation ppt

« [D'où venons-nous ? Ou allons-nous ? Les grands défis cosmologiques du 21ème siècle](#) » Gabriele VENEZIANO, Professeur au Collège de France à la BNF.

[The official string theory website.](#)

[La Théorie des Cordes](#) par le club Orion.

[La théorie des cordes](#) par Alexandre Depire de l'Institut Henri-Poincaré, à voir c'est bien introduit.

"[LE SIÈCLE D'ALBERT EINSTEIN](#)" COLLOQUE DU 11 AU 15 JUILLET 2005 à l'UNESCO Paris

[La magie du Cosmos](#) par Brian Greene

[La gravitation quantique](#) par Carlo Rovelli

Voir [sa page spéciale](#) sur ses livres.

Au-delà de l'Espace et du temps

La nouvelle Physique

par Marc Lachièze-Rey
Editions le Pommier octobre 2008

Introduction

Une physique parfaite ?

La physique d'aujourd'hui semble aller à merveille. Le comportement du monde microscopique se conforme parfaitement aux lois de la physique quantique. La gravitation est décrite par la théorie de la relativité générale, dont on vérifie de mieux en mieux les prédictions. Et les modèles de big bang décrivent notre Univers avec une précision remarquable, inespérée.

Cela pourrait laisser croire que la tâche de la physique théorique est terminée. Il n'y aurait plus de nouvelles lois à trouver, il suffirait d'appliquer celles que nous connaissons aux circonstances variées que nous présentent la nature ou nos appareillages.

Mais le regard de l'historien nous incite à la prudence : à quelques détails « insignifiants » près, tout fonctionnait parfaitement dans la physique de la fin du XIX^{ème} siècle, pourtant sur le point de subir un double bouleversement avec les irruptions successives de la relativité et de la physique quantique. Ne serions-nous pas aujourd'hui dans une situation comparable ?

Nous avons deux raisons de le penser. En premier lieu, certains résultats d'expériences ou d'observations ne correspondent apparemment pas tout à fait aux prédictions, ou ne s'accordent pas entre eux. Ces résultats sont rares et, le plus souvent, controversés, de nombreux physiciens estimant qu'il s'agit de simples erreurs d'expériences ou d'interprétation ; mais d'autres les considèrent comme les indices d'un dysfonctionnement qui suggère des bouleversements à venir. En second lieu, la physique d'aujourd'hui nous offre une vision insatisfaisante du monde : nous n'arrivons pas à réconcilier les concepts qui sous-tendent les approches quantique et relativiste. Ils devraient pourtant s'appliquer au même monde, le nôtre. À cause de cette dichotomie, qui constitue le sujet des trois premières parties de ce livre, la physique ne nous offre pas une vision cohérente du monde. La dernière partie de cet ouvrage est consacrée aux tentatives pour y remédier.

Les questions les plus lancinantes de la cosmologie subsistent depuis des millénaires : dans quel monde vivons nous ? pourquoi est-il tel qu'il est ? est-il fait pour nous ? pourrait-il être différent ? Les cosmologues s'accordent aujourd'hui pour décrire l'Univers selon les modèles de big bang. Mais ils se demandent quelle mystérieuse substance le remplit : masse cachée, énergie du vide, quintessence, mystérieuses et hypothétiques substances encore inconnues ? Ils tentent d'imaginer la forme de l'espace : plat ou courbe ? Ils ne savent toujours pas s'il *est* fini ou infini. Ils tentent d'estimer son âge et ignorent même s'il a un début. Ils envisagent son destin : expansion éternelle ou recontraction future ? À l'aube du XXI^e siècle, de nouvelles interrogations ont d'ailleurs surgi : l'Univers n'aurait-il pas plus de quatre dimensions ? La matière est-elle vraiment faite de particules ? L'espace et le temps pourraient-ils fluctuer à l'échelle microscopique ?

Toutes ces questions, antiques ou récentes, sont reliées entre elles. Ce livre leur est consacré, ainsi qu'aux réponses que l'on tente de leur apporter, par la mise en place d'une nouvelle physique, dépassant la nôtre !

La première partie de cet ouvrage met en place le décor que constitue notre physique d'aujourd'hui : décor historique, puisque l'évolution des idées de nos prédécesseurs y est évoquée, jusqu'aux concepts contemporains ; décor physique, puisqu'il s'agit de présenter les théories et les modèles actuels ; décor géométrique enfin, puisque nous montrons comment cette physique repose entièrement sur des notions géométriques. Le lecteur familier de la géométrie pourra survoler cette première partie. Les autres y trouveront exposées les conceptions géométriques qui sous-tendent la physique relativiste et quantique, ainsi que la cosmologie contemporaine.

Cette cosmologie est-elle satisfaisante ? C'est la question abordée dans la partie II. Ensuite, la partie III examine les deux volets, quantique et relativiste, de notre physique : leurs oppositions, mais aussi leurs similitudes cachées. Ces analyses montrent la nécessité d'élaborer des approches géométriques neuves pour construire une nouvelle vision du monde.

Les efforts actuels engagés dans ce but sont détaillés dans la partie IV. On y voit comment des approches comme la supersymétrie, les cordes et supercordes, les nouvelles géométries, la gravité et la cosmologie quantiques...éclairent les notions cruciales de symétrie et de dimension, nous permettant ainsi de prolonger nos connaissances. Plutôt que d'analyser leurs développements techniques, nous exposerons leurs fondements et la manière dont elles utilisent de nouvelles notions géométriques pour élaborer ce qui constituera peut-être la physique de demain.

Que nul n'entre ici s'il n'est géomètre

Pour décider ce que sera cette physique à venir, il est opportun d'analyser celles d'aujourd'hui et des siècles passés.

Leur nature nous apparaît essentiellement géométrique. Cinq siècles avant Jésus-Christ, en Grèce, les pythagoriciens invoquaient déjà le rôle fondamental des nombres et de la géométrie pour décrire et comprendre le monde. Près d'un siècle plus tard, Platon et Aristote en proposaient une conception construite et cohérente : une physique et une cosmologie en partie fondées sur ces préceptes. Cette vision géométrique du monde, qui faisait grand usage de cercles et de sphères, prévalut pendant plus de deux millénaires.

Après la Renaissance, le renouvellement des idées aboutit à la révolution newtonienne. C'est la naissance de la physique moderne, toujours de nature profondément géométrique, mais d'une manière différente. Elle pose un acte essentiel en introduisant l'espace géométrique dans la physique, dans l'astronomie et dans la cosmologie : les dimensions de l'espace et du temps, enfin libérées, commencent une carrière aux nombreux rebondissements, encore loin d'être terminée.

L'épisode suivant se déroule au xix^e siècle. Les mathématiciens découvrent de nouvelles géométries, dites « non euclidiennes » : l'espace euclidien, que Newton avait assimilé à l'espace physique, ne constitue plus une unique possibilité : une multitude de géométries nouvelles, riches et complexes, s'offre désormais. Leur introduction dans la physique, au début du XX^e siècle, donne lieu à de nouveaux et profonds bouleversements.

En 1905, Albert Einstein énonce la théorie de la *relativité restreinte*, nouvelle description du monde et de la physique. Synthèse entre les dimensions de l'espace et celle du temps, elle se concrétise par une nouvelle entité géométrique à quatre dimensions, l'espace-temps. Si la nouvelle théorie déroutait, son expression géométrique est pourtant très simple. Elle se révèle particulièrement harmonieuse et unificatrice. Depuis un siècle, ses conséquences physiques, de portée immense, n'ont cessé d'être vérifiées par les expériences, avec de plus en plus de précision.

Il ne s'agit cependant que d'une première étape, qui n'exploite pas encore la richesse et la complexité des géométries non euclidiennes : les dimensions de l'espace et du temps restent encore « sages ». Le pas suivant est accompli à nouveau par Einstein : la *relativité générale* se fonde sur la géométrie non euclidienne, dans laquelle la caractéristique principale des objets géométriques est la courbure. Devant Einstein, les dimensions de l'espace-temps se courbent et conduisent à une nouvelle vision géométrique du monde. Rapidement confirmée par l'observation, la théorie est vite acceptée. Après une période de désaffection, elle est aujourd'hui en pleine gloire. Sur le plan conceptuel, elle reste le prototype d'une théorie physique "magnifique ». Elle constitue le point de départ et le modèle de toute réflexion sur la nature de l'espace et du temps pour la constitution d'une nouvelle physique, sujet de ce livre.

Si la relativité générale a bouleversé notre vision du monde, c'est aussi un outil indispensable à l'analyse des phénomènes physiques : interprétation des observations astronomiques et description de la propagation des signaux électromagnétiques dans le système solaire, mais aussi communication avec les satellites artificiels ou utilisation d'un système de repérage de type GPS (Global Positioning System) ... Enfin, la relativité générale permet d'aborder les questions cosmologiques dans toute leur ampleur et leur richesse. Elle actualise sans doute plus que jamais la vision du monde des anciens Grecs, puisque la physique et la cosmologie qu'elle propose sont de nature essentiellement géométrique.

Dès le début du xxe siècle, s'est ainsi élaborée une cosmologie scientifique nouvelle, relativiste, combinant réflexions épistémologiques et résultats d'observation remarquables. Elle a abouti aux modèles de big bang, qui offrent aujourd'hui une vision cosmique d'une grande cohérence, extrêmement bien corroborée par les observations astronomiques.

Physique quantique

Dès les premières décennies du xxe siècle, l'introduction de la physique quantique a représenté un bouleversement d'ampleur comparable à celui déclenché par la relativité. Au départ, la physique quantique opérait encore dans le cadre de la géométrie de Newton, où l'espace euclidien et le temps étaient séparés. Adaptée par la suite à l'espace-temps, c'est-à-dire au cadre de la relativité restreinte, elle prit sa forme moderne de *théorie quantique des champs*, grande pourvoyeuse de prix Nobel.

La grande déception des physiciens du XXe siècle, à commencer par Einstein, vint de l'antagonisme entre relativité générale et physique quantique, que nous évoquerons longuement. Les tentatives de réconciliation entre ces deux approches constituent aujourd'hui la tâche essentielle des physiciens théoriciens. Elles s'identifient à la recherche d'une nouvelle physique, sous la forme d'une théorie unifiée. La partie IV de ce livre évoquera ces approches et leurs limites.

Beaucoup partagent l'espoir qu'elles apporteront en même temps une réponse aux insuffisances reconnues de la physique quantique et, en premier lieu, à l'apparition dans les calculs de quantités infinies indésirables, appelées « divergences ». En outre, l'« interprétation » de la physique quantique constitue le sujet d'exaspérants débats depuis presque un siècle, à propos des questions de réalité, de déterminisme, de localité ... De nombreux théoriciens espèrent qu'un cadre physique plus large permettra de les résoudre ou même de les faire disparaître.

Outre cet espoir, la réconciliation entre les deux points de vue devrait permettre une description commune et unifiée de toute la physique, à la fois des particules et des interactions, ce que certains évoquent peu modestement sous l'expression « théorie du tout ». Comme celle d'aujourd'hui, la future physique sera très probablement de nature géométrique. C'est en tout cas le pari de la majorité des chercheurs et le point de vue développé ici. Il s'agit de rien moins que de dévoiler la véritable géométrie de l'Univers.

"Le statut du vide pose problème"

La Recherche 1 AVRIL 2013 N° 474

PAR Marc Lachièze-Rey,

Directeur de recherche (CNRS)

au laboratoire Astroparticule et Cosmologie de l'université Paris-VII Denis-Diderot.

Entretien La relativité générale et la mécanique quantique ne décrivent pas le vide de la même façon. Il faudra les réconcilier pour expliquer complètement l'origine et la répartition de la matière dans l'Univers.

L'essentiel

- > EN RELATIVITÉ la gravitation, l'espace-temps vide est courbé de façon constante.
- > EN THÉORIE QUANTIQUE, le vide correspond à l'état fondamental d'un système.
- > LES FLUCTUATIONS qui le composent peuvent être amplifiées et seraient associées à des phénomènes impossibles à observer, tel le rayonnement des trous noirs.

LA RECHERCHE *Pour les physiciens, le vide parfait n'existe pas. Qu'est-ce que cela signifie?*

MARC LACHIEZE-REY: Cela signifie que le vide n'est pas « rien ». Il y a toujours quelque chose. Mais ce quelque chose dépend de la conception physique dans laquelle on se place. Le vide tel qu'il est conçu par la théorie de la relativité est ainsi bien différent du vide défini dans le cadre de la théorie quantique. Les propriétés que la relativité accorde au vide s'harmonisent mal avec ce qu'en déclare la physique quantique, et réciproquement, de telle sorte que les deux théories ne peuvent pas être vraies simultanément. De plus, dans les deux cas, le statut du vide pose problème, tout comme ses propriétés.

Comment est présenté le vide en relativité générale?

M.L. R. En relativité, le vide a à voir avec ce qu'on appelle la constante cosmologique. Il s'agit d'un paramètre ajouté par Einstein, en 1917, à ses équations de la relativité générale¹. Elle correspond en fait à la courbure moyenne de l'espace-temps, supposée précisément constante dans le vide de la théorie. La matière vient superposer des modifications locales à cette courbure moyenne.

Et comment la théorie quantique décrit-elle le vide ?

M.L. R. Elle décrit le contenu de l'Univers par des champs quantiques. Un état de l'Univers est un état des champs quantiques. Mais un tel état quantique est localisé dans la totalité de l'espace-temps, c'est-à-dire qu'il est en fait non localisé. À chaque espèce de matière (ce que l'on appelle couramment un type de particule) est associé un champ quantique correspondant, de sorte que la réalité matérielle se constitue de la superposition des champs des différentes espèces, avec des règles d'interaction. Chaque champ est dans un certain état. La théorie permet de classer les différents états possibles. L'un d'eux se distingue essentiellement par ses propriétés de symétrie maximale : il s'agit de l'état fondamental, qu'on appelle aussi vide quantique.

Quelles sont les caractéristiques de ce vide quantique ?

M.L. R. Il ne contient aucune particule à proprement parler, car on appelle précisément particule ce qui fait la différence entre le vide état fondamental, et les autres états, dits "excités". Cela ne veut pas

¹ A. Einstein, SPAW, 742, 1917.

dire qu'il ne contient rien. On considère qu'il est le siège d'incessantes fluctuations, et les propriétés de ces fluctuations du vide ressemblent (mais pas tout à fait) à celles de particules. Les physiciens ont pris l'habitude d'évoquer des « particules virtuelles ».

Si l'on analyse les fluctuations du vide en termes de particules virtuelles, on doit admettre qu'elles n'ont pas vraiment de réalité. On dit par exemple qu'elles s'annihilent à peine créées, sans avoir le temps d'engendrer aucun effet observable. C'est du moins ce qui se produit dans une situation « normale ». Toutefois, on doit tenir compte de leur présence dans tous les calculs. Dans des circonstances très particulières, il est même possible d'agir sur elles : une influence extérieure – comme un apport d'énergie sous l'effet d'un champ électrique intense – peut les conduire à se matérialiser sous la forme de paires de particule et d'antiparticule² – un électron et un antiélectron par exemple –, qui disparaissent aussitôt.

Existe-t-il des situations où ces paires de particules ne disparaissent pas immédiatement?

M.L.-R. On pense que oui, dans des circonstances très particulières : en présence d'un champ gravitationnel intense ou, si l'on préfère, dans le langage de la relativité, d'une forte courbure de l'espace-temps. Ainsi, au voisinage d'un trou noir, le champ gravitationnel est si intense qu'il empêche normalement toute forme de matière ou de rayonnement de s'en échapper. Pourtant, en 1974, Stephen Hawking, de l'université de Cambridge, au Royaume-Uni, a montré que ce n'était pas toujours le cas. En appliquant la théorie quantique des champs (modifiée à dessein) à l'espace-temps courbé de la relativité générale, il a découvert que les trous noirs peuvent émettre un rayonnement, contrairement aux prédictions de la physique non quantique³. On peut considérer que, après la création d'une paire particule-antiparticule, l'antiparticule serait attirée dans le trou noir où elle irait se perdre ; tandis que la particule correspondante, ayant perdu son partenaire avec lequel s'annihiler, continuerait à exister et participerait à ce rayonnement du trou noir [fig. 1]. En quelque sorte, un trou noir amplifie les fluctuations du vide, qui se matérialisent.

Retrouve-t-on une telle amplification des fluctuations du vide dans d'autres secteurs de la physique ?

M.L.-R. Oui, en cosmologie par exemple. La question du vide y est cruciale. Il semble bien qu'elle doive être évoquée pour expliquer l'accélération de l'expansion cosmique que nous dévoilent les observations astronomiques. Certains physiciens attribuent en effet cette accélération à l'influence dynamique du vide quantique, auquel ils associent une énergie (et une pression), ce que l'on évoque sous le nom d'énergie noire.

Ils invoquent un effet similaire pour justifier les théories d'inflation. L'idée est que l'Univers aurait pu, dans son extrême jeunesse, subir une brève mais intense influence dynamique du vide quantique. Elle aurait déclenché, pendant une très brève période, une accélération gigantesque de l'expansion cosmique : l'inflation. Ce phénomène – qui n'est encore qu'une hypothèse, difficile à concilier avec la physique d'aujourd'hui – aurait pu être à l'origine de l'apparition des grandes structures comme les galaxies. Pour résumer, cette apparition résulterait d'une amplification, durant cette phase, des fluctuations du vide.



² une ANTIPARTICULE possède les mêmes caractéristiques physiques que la particule matérielle à laquelle elle est associée, sauf la charge électrique, qui se fait de signe opposé.

³ S. Hawking, *Nature*, 248, 30, 1974.

D'autres attribuent plutôt l'accélération cosmique à l'influence du vide gravitationnel. Us évoquent alors la constante cosmologique, manifestation de la courbure du vide, dont la théorie indique qu'elle se manifesterait exactement comme une accélération cosmique.

Entre les deux versions, la communauté des physiciens est partagée. La solution de la constante cosmologique semble aujourd'hui favorisée par les observations. Elle a le mérite d'être naturellement conforme à notre physique actuelle. Néanmoins, certains rechignent à lui accorder une réalité physique.

Peut-on imaginer d'observer directement des phénomènes comme le rayonnement de Hawking?

M.L.-R. Cela paraît impossible. En effet, il est probable que, si le rayonnement de Hawking existe, son intensité est bien trop faible pour être détectée. Dans les cas où son intensité ne serait pas trop faible, il ne durerait qu'une fraction de seconde, trop peu pour nous laisser le temps de l'observer. Pourrait-on déclencher en laboratoire un phénomène similaire ? Notre technologie est loin de permettre de produire un champ électrique ou gravitationnel suffisamment intense pour faire apparaître une paire particule-antiparticule. Certains physiciens ont toutefois eu l'idée de s'intéresser à des systèmes physiques d'un tout autre domaine, mais obéissant à des équations similaires: des systèmes analogues qui sont, eux, manipulables. C'est le cas de William Unruh et de son équipe, de l'université de Colombie-Britannique, au Canada, ou de Christoph Westbrook et de son groupe, du laboratoire Charles-Fabry, à l'institut d'optique, à Palaiseau (lire « Le vide n'est pas vide », p. 44).

Sur quels principes se fondent ces expériences analogues?

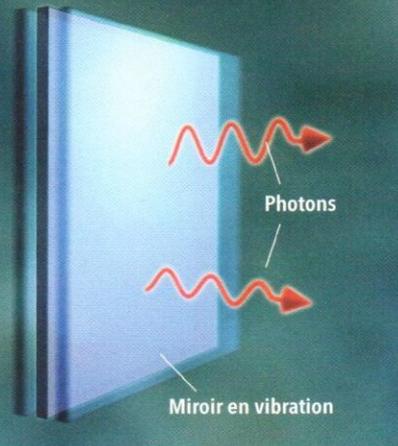
M.L.-R. L'idée est d'identifier un autre processus, dans un autre domaine de la physique, qui relève d'équations similaires, et d'analyser son comportement. Par exemple, William Unruh a observé, au début des années 1980, une correspondance très intéressante entre le mécanisme du rayonnement de Hawking à l'horizon d'un trou noir et le comportement d'ondes dans un fluide. En poursuivant son travail, il a découvert que l'analogie fonctionnait aussi entre le rayonnement de Hawking et des ondes à la surface d'un liquide en mouvement. Très récemment, lui et ses collaborateurs ont ainsi reproduit en laboratoire un phénomène qui mime le mécanisme d'amplification des fluctuations du vide. Pour cela, ils se sont servis d'un écoulement hydrodynamique dans un bassin rectangulaire, d'un obstacle et d'un générateur de vagues, et ont obtenu des résultats significatifs⁴ (lire « Un trou blanc au laboratoire », p. 42).

⁴ S. Weinfurtner *et al.*, arXiv :1302.0375v1, 2013

Fig.2 L'effet Casimir dynamique

UN MIROIR VIBRE ET INTERAGIT avec les fluctuations du vide, où se trouvent des photons virtuels. Si le miroir se déplace très rapidement, il peut communiquer suffisamment d'énergie à ces photons pour qu'une paire se matérialise (flèches rouges). Cet effet est connu sous le nom d'effet Casimir dynamique.

© INFOGRAPHI



Que permettent d'observer précisément ces expériences analogues?

M.L.-R. L'expérience mise au point par Christoph Westbrook et ses collègues ⁵ a pour but de simuler l'effet Casimir dynamique, que certains interprètent comme une amplification des fluctuations du vide quantique [fig. 2]. Nous sommes en fait assez loin de la notion de vide, quantique ou non, ou de la cosmologie. Cela permet de mettre en évidence de manière réelle quelques propriétés physiques des solutions des équations de cet effet irréalisable en pratique. Cependant, ces simulations analogiques ne permettent évidemment pas de valider ou non l'existence de l'effet quantique.

•Propos recueillis par Vincent Glavieux

⁵ C.Jaskula *et al.*, *PRL*, 709,220401, 2012.

BICEP2 I: DETECTION OF B-mode POLARIZATION AT DEGREE ANGULAR SCALES

BICEP2 COLLABORATION - P. A. R. ADE¹, R. W. AIKIN², D. BARKATS³, S. J. BENTON⁴, C. A. BISCHOFF⁵, J. J. BOCK^{2,6}, J. A. BREVIK², I. BUDER⁵, E. BULLOCK⁷, C. D. DOWELL⁶, L. DUBAND⁸, J. P. FILIPPINI², S. FLIESCHER⁹, S. R. GOLWALA², M. HALPERN¹⁰, M. HASSELFIELD¹⁰, S. R. HILDEBRANDT^{2,6}, G. C. HILTON¹¹, V. V. HRISTOV², K. D. IRWIN^{12,13,11}, K. S. KARKARE⁵, J. P. KAUFMAN¹⁴, B. G. KEATING¹⁴, S. A. KERNASOVSKIY¹², J. M. KOVAC^{5,16}, C. L. KUO^{12,13}, E. M. LEITCH¹⁵, M. LUEKER², P. MASON², C. B. NETTERFIELD⁴, H. T. NGUYEN⁶, R. O'BRIENT⁶, R. W. OGBURN IV^{12,13}, A. ORLANDO¹⁴, C. PRYKE^{9,7,16}, C. D. REINTSEMA¹¹, S. RICHTER⁵, R. SCHWARZ⁹, C. D. SHEEHY^{9,15}, Z. K. STANISZEWSKI^{2,6}, R. V. SUDIWALA¹, G. P. TEPLY², J. E. TOLAN¹², A. D. TURNER⁶, A. G. VIAREGG^{5,15}, C. L. WONG⁵, AND K. W. YOON^{12,13}

to be submitted to a journal TBD

ABSTRACT

We report results from the BICEP2 experiment, a Cosmic Microwave Background (CMB) polarimeter specifically designed to search for the signal of inflationary gravitational waves in the B-mode power spectrum around $l \sim 80$. The telescope comprised a 26 cm aperture all-cold refracting optical system equipped with a focal plane of 512 antenna coupled transition edge sensor (TES) 150 GHz bolometers each with temperature sensitivity of $\approx 300 \mu\text{K}_{\text{CMB}} \sqrt{\text{s}}$. BICEP2 observed from the South Pole for three seasons from 2010 to 2012. A low-foreground region of sky with an effective area of 380 square degrees was observed to a depth of 87 nK-degrees in Stokes Q and U. In this paper we describe the observations, data reduction, maps, simulations and results. We find an excess of B-mode power over the base lensed- Λ CDM expectation in the range $30 < l < 150$, inconsistent with the null hypothesis at a significance of $> 5\sigma$. Through jackknife tests and simulations based on detailed calibration measurements we show that systematic contamination is much smaller than the observed excess. We also estimate potential foreground signals and find that available models predict these to be considerably smaller than the observed signal. These foreground models possess no significant cross-correlation with our maps. Additionally, cross-correlating BICEP2 against 100 GHz maps from the BICEP1 experiment, the excess signal is confirmed with 3σ significance and its spectral index is found to be consistent with that of the CMB, disfavoring synchrotron or dust at $2:3\sigma$ and $2:2\sigma$, respectively. The observed B-mode power spectrum is wellfit by a lensed- Λ CDM + tensor theoretical model with tensor/scalar ratio $r = 0.20^{+0.07}$, with $r = 0$ disfavored at 7.0σ . Subtracting the best available estimate for foreground dust modifies the likelihood slightly so that $r = 0$ is disfavored at 5.9σ .

Subject headings: cosmic background radiation — cosmology: observations — gravitational waves — inflation—polarization

¹ School of Physics and Astronomy, Cardiff University, Cardiff, CF24 3AA, UK

² Department of Physics, California Institute of Technology, Pasadena, CA 91125, USA

³ Joint ALMA Observatory, ESO, Santiago, Chile

⁴ Department of Physics, University of Toronto, Toronto, ON, Canada

⁵ Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, 60 Garden Street MS 42, Cambridge, MA 02138, USA

⁶ Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA 91109, USA

⁷ Minnesota Institute for Astrophysics, University of Minnesota, Minneapolis, MN 55455, USA

⁸ SBT, Commissariat à l’Energie Atomique, Grenoble, France

⁹ Department of Physics, University of Minnesota, Minneapolis, MN 55455, USA

¹⁰ Department of Physics and Astronomy, University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada

¹¹ National Institute of Standards and Technology, Boulder, CO 80305, USA

¹² Department of Physics, Stanford University, Stanford, CA 94305, USA

¹³ Kavli Institute for Particle Astrophysics and Cosmology, SLAC National Accelerator Laboratory, 2575 Sand Hill Rd, Menlo Park, CA 94025, USA

¹⁴ Department of Physics, University of California at San Diego, La Jolla, CA 92093, USA

¹⁵ University of Chicago, Chicago, IL 60637, USA

¹⁶ Corresponding authors: pryke@physics.umn.edu and jmkovac@cfa.harvard.edu

INTRODUCTION

The discovery of the Cosmic Microwave Background (CMB) by Penzias & Wilson (1965) confirmed the hot big bang paradigm and established the CMB as a central tool for the study of cosmology. In recent years, observations of its temperature anisotropies have helped establish and refine the “standard” cosmological model now known as Λ CDM, under which our universe is understood to be spatially flat, dominated by cold dark matter, and with a cosmological constant (Λ) driving accelerated expansion at late times. CMB temperature measurements have now reached remarkable precision over angular scales ranging from the whole sky to arcminute resolution, producing results in striking concordance with predictions of Λ CDM and constraining its key parameters to sub-percent precision (e.g. Bennett et al. 2013; Hinshaw et al. 2013; Story et al. 2013; Hou et al. 2014; Sievers et al. 2013; Das et al. 2013; Planck Collaboration XV 2013; Planck Collaboration XVI 2013).

Inflationary cosmology extends the standard model by postulating an early period of nearly exponential expansion which sets the initial conditions for the subsequent hot big bang. It was proposed and developed in the early 1980s to resolve mysteries for which the standard model offered no solution, including the flatness, horizon, smoothness, entropy, and monopole problems (Brout et al. 1978; Starobinsky 1980; Kazanas 1980; Sato 1981; Guth 1981; Linde 1982, 1983; Albrecht & Steinhardt 1982; see Planck Collaboration XXII 2013 for a review). Inflation also explains the universe’s primordial perturbations as originating in quantum fluctuations stretched by this exponential expansion (Mukhanov & Chibisov 1981; Hawking 1982; Guth & Pi 1982; Starobinsky 1982; Bardeen et al. 1983; Mukhanov 1985), and thus to be correlated on superhorizon scales. The simplest models further predict these perturbations to be highly adiabatic and Gaussian and nearly scale-invariant (though typically slightly stronger on larger scales). These qualities, though not necessarily unique to the inflationary paradigm, have all been confirmed by subsequent observations (e.g., Spergel & Zaldarriaga 1997; Peiris et al. 2003, and references above). Although highly successful, the inflationary paradigm represents a vast extrapolation from well-tested regimes in physics. It invokes quantum effects in highly curved spacetime at energies near 10^{16} GeV and timescales less than 10^{-32} s. A definitive test of this paradigm would be of fundamental importance.

Gravitational waves generated by inflation have the potential to provide such a definitive test. Inflation predicts that the quantization of the gravitational field coupled to exponential expansion produces a primordial background of stochastic gravitational waves with a characteristic spectral shape (Grishchuk 1975; Starobinsky 1979; Rubakov et al. 1982; Fabbri & Pollock 1983; Abbott & Wise

1984; also see Krauss & Wilczek 2013). Though unlikely to be directly detectable in modern instruments, these gravitational waves would have imprinted a unique signature upon the CMB. Gravitational waves induce local quadrupole anisotropies in the radiation field within the last-scattering surface, inducing polarization in the scattered light (Polnarev 1985). This polarization pattern will include a “curl” or B -mode component at degree angular scales that cannot be generated primordially by density perturbations. The amplitude of this signal depends upon the tensor-to-scalar ratio, r , which itself is a function of the energy scale of inflation. The detection of B -mode polarization of the CMB at large angular scales would provide a unique confirmation of inflation and a probe of its energy scale (Seljak 1997; Kamionkowski et al. 1997; Seljak & Zaldarriaga 1997).

The CMB is polarized with an amplitude of a few μK , dominated by the “gradient” or E -mode pattern that is generated by density perturbations at last scattering. These E -modes peak at angular scales of $\sim 0.2^\circ$, corresponding to angular multipole $R \approx 1000$. They were first detected by the DASI experiment (Kovac et al. 2002). Since then multiple experiments have refined measurements of the EE power spectrum, including CAPMAP (Barkats et al. 2005; Bischoff et al. 2008), CBI (Readhead et al. 2004; Sievers et al. 2007), BOOMERANG03 (Montroy et al. 2006), WMAP (Page et al. 2007; Bennett et al. 2013), MAXIPOL (Wu et al. 2007), QUAD (Pryke et al. 2009; Brown et al. 2009), BICEP1 (Chiang et al. 2010; Barkats et al. 2014), and QUIET (QUIET Collaboration et al. 2011, 2012).

Gravitational lensing of the CMB’s light by large scale structure at relatively late times produces small deflections of the primordial pattern, converting a small portion of E -mode power into B -modes. The lensing B -mode spectrum is similar to a smoothed version of the E -mode spectrum but a factor ~ 100 lower in power, and hence also rises toward sub-degree scales and peaks around $R \approx 1000$. The inflationary gravitational wave (IGW) B -mode, however, is predicted to peak at multipole $R \approx 80$ and this creates an opportunity to search for it around this scale where it is quite distinct from the lensing effect.⁶

A large number of current CMB experimental efforts now target B -mode polarization. Evidence for lensing B -mode polarization at sub-degree scales has already been detected by two experiments in the past year, first by the SPT telescope (Hanson et al. 2013) and more recently by POLARBEAR (POLARBEAR Collaboration et al. 2013a,b, 2014). The search for inflationary B -modes at larger scales will also be a goal of these experiments, as well as other ongoing experimental efforts in the US that include the ABS (Hilman et al. 2009), ACTPOL (Niemack et al. 2010), and CLASS (Eimer et al. 2012) ground-based telescopes and the EBEX (Reichborn-Kjennerud et al. 2010), SPIDER (Fraisse et al. 2013), and PIPER (Kogut et al. 2012) balloon experiments, each employing a variety of complementary strategies. It is also a major science goal of the ESA *Planck* satellite mission.

The BICEP/Keck Array series of experiments have been specifically designed to search for primordial B -mode polarization on degree angular scales by making very deep maps of relatively small patches of sky from the South Pole. The BICEP1 instrument initiated this series (Keating et al. 2003), observing from 2006 to 2008. Its initial results were described in Takahashi et al. (2010) and Chiang et al. (2010) (hereafter T10 and C10), and final results were recently reported in Barkats et al. (2014) (hereafter B14) yielding a limit of $r < 0.70$ at 95% confidence.

In this paper we report results from BICEP2 — a successor to BICEP1 which differed principally in the focal plane where a very large increase in the detector count resulted in more than an order of magnitude improvement in mapping speed. The observation field and strategy were largely unchanged, as were the telescope mount, observation site etc. Using all three seasons of data taken

⁶ This is the so-called “recombination bump”. There is another opportunity to search for the IGW signal at $l < 10$ in the “reionization bump” but this requires observations over a substantial fraction of the full sky.

with BICEP2 (2010–2012) we detect B - mode power in the multipole range $30 < R < 150$, finding this power to have a strong excess inconsistent with lensed Λ CDM at $> 5\sigma$ significance.

The structure of this paper is as follows. In §2 and §3 we briefly review the BICEP2 instrument, observations and low-level data reduction deferring details to a companion paper BICEP2 Collaboration II (2014) (hereafter the Instrument Paper). In §4 we describe our map making procedure and present signal and signal-differenced “jackknife” T , Q and U maps which have unprecedented sensitivity. This section introduces “deprojection” of modes potentially contaminated through beam systematics which is an important new technique. In §5 we describe our detailed timestream-level simulations of signal and pseudo-simulations of noise. In §6 we describe calculation of the power spectra, including matrix-based B -mode purification. In §7 we present the signal and jackknife power spectrum results for TE , EE , BB , TB and EB . In §8 we discuss and summarize the many studies we have conducted probing for actual and potential sources of systematic contamination, and argue that residual contamination is much smaller than the detected B -mode signal. Full details are deferred to a companion paper BICEP2 Collaboration III (2014) (hereafter the Systematics Paper). In §9 we investigate foreground projections based on external data and conclude that it is implausible that the B -mode signal which we see is dominated by dust, synchrotron or any other known foreground source. In §10 we take cross spectra of the BICEP2 maps with those from BICEP1 (as presented in B14) and find that the spectral signature of the signal is consistent with the CMB. Finally in §11 we calculate some simple, largely phenomenological, parameter constraints, and conclude in §12.