

BULLETIN N° 152
ACADÉMIE EUROPEENNE
INTERDISCIPLINAIRE
DES SCIENCES



Séance du mardi 8 février 2011:

**Présentation par notre Collègue Gilles COHEN-TANNOUJJI,
 Directeur de Recherches émérite**

**Laboratoire de Recherche sur les Sciences de la Matière(LARSIM) CEA Saclay (91):
 « *Une nouvelle révolution scientifique à l'horizon ?* »**

**Prochaine séance mardi 8 mars 2011 de 18h à 20h
 MSH/EHESS 190 avenue de France 75013Paris
 LF salle du conseil B**

**Présentation par Jean-Pierre DESCLES
Directeur du Département de Mathématiques et d'Informatique
de l'Université Paris-Sorbonne de :**

« *Mathématiques et Sciences humaines :Problèmes et Incertitudes* »

ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES

FONDATION DE LA MAISON DES SCIENCES DE L'HOMME

PRESIDENT : Pr Victor MASTRANGELO
PRESIDENT Sortant: Michel GONDRAN
SECRETAIRE GENERAL : Irène HERPE-LITWIN
TRESORIER GENERAL : Bruno BLONDEL
MEMBRES DU CA Patrice CROSSA-RAYNAUD, Claude ELBAZ

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 François BEGON

SECTION DE NICE :
PRESIDENT : Doyen René DARS

SECTION DE NANCY :
PRESIDENT : Pr Pierre NABET

février 2011

N°152

TABLE DES MATIERES

- P. 03 Compte-rendu de la séance du mardi 8 février 2011 avec tableau des transparents
- P. 27 Compte-rendu de la section Nice-Côte d'Azur du 20 janvier 2011
- P. 30 Annonces
- P. 32 Documents

Prochaine séance: mardi 8 mars 2011 de 18h à 20h
Présentation par Jean-Pierre DESCLES
Directeur du Département de Mathématiques et d'Informatique
de l'Université Paris-Sorbonne de :
« *Mathématiques et Sciences humaines : Problèmes et Incertitudes* »

**ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE DES
SCIENCES**

Maison des Sciences de l'Homme, Paris.

**Séance du
Mardi 8 février 2011**

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche (MESR) à 18 h.

La séance est ouverte à 18 h. 00 sous la Présidence de Victor MASTRANGELO et en la présence de nos collègues Gilbert BELAUBRE, Alain CARDON, Gilles COHEN-TANNOUDI, Françoise DUTHEIL, Claude ELBAZ , , Michel GONDRAN, Irène HERPE-LITWIN, Marie-Louise LABAT, Valérie LEFEVRE-SEGUIN, Jacques LEVY, Pierre MARCHAIS Pierre PESQUIES,.

Etaient excusés François BEGON, Bruno BLONDEL, Alain CARDON, Brigitte DEBUIRE, Jean -Pierre FRANCOISE, Walter GONZALEZ , Marie-Louise LABAT, Saadi LAHLOU, Gérard LEVY, Emmanuel NUNEZ, Alain STAHL.

Après avoir encore une fois remercié notre Collègue Valérie LEFEVRE-SEGUIN pour sa collaboration efficace qui nous a permis à deux reprises d'être hébergés à deux reprises par le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, notre Président nous informe des prochains lieux où se tiendront nos séances.

Cette occupation des salles est résumée par le tableau ci-dessous :

date	Adresse	salle	Horaire
8 mars 2011	190 avenue de France Paris 13 ^{ème} Métro Ligne 6 Quai de la Gare	salle du Conseil B	18h-20h
12 avril 2011	Institut Henri Poincaré 11, rue Pierre et Marie Curie Paris 5 ^{ème} RER B station Luxembourg	Salle 01	15h30-18h
10 mai 2011	190, avenue de France Paris 13 ^{ème} Métro Ligne 6 Quai de la Gare	salle 03	18h-20h
14 juin 2011	190, avenue de France Paris 13 ^{ème} Métro Ligne 6 Quai de la Gare	salle 03	18h-20h

Des précisions relatives à l'emplacement des salles vous seront transmises sur la convocation.

Le programme de notre séance appelle ensuite la Présentation, par notre Collègue Gilles COHEN-TANNOUDJI, Directeur de Recherche émérite au Laboratoire de Recherche sur les Sciences de la Matière au CEA- Saclay, du thème :

« Une nouvelle révolution scientifique à l'horizon ? »

Pour vous rappeler la problématique soulevée par Gilles COHEN-TANNOUDJI, nous vous rappelons le résumé de son intervention présentée dans le bulletin précédent de l'AEIS :

« En ce début de 21^{ème} siècle, la situation de la physique n'est pas sans analogie avec celle qui prévalait il y a une centaine d'années, à l'orée de la double révolution scientifique de la relativité et des quanta : d'une part, les progrès récents de la cosmologie observationnelle font penser qu'a été découverte une nouvelle constante universelle, peut-être aussi fondamentale que la vitesse de la lumière ou la constante de Planck : la constante cosmologique, qui pourrait expliquer l'accélération de l'expansion de l'univers, et d'autre part, tout comme les efforts de Planck et Einstein pour réconcilier la thermodynamique et la théorie électromagnétique de la lumière ont débouché sur la mise en chantier de la physique quantique, la découverte inattendue de liens entre la thermodynamique et la relativité générale a fait entrevoir de nouveaux concepts, peut-être annonciateurs d'une nouvelle révolution scientifique, comme celui d'holographie et permis d'envisager une « route thermodynamique vers la cosmologie quantique. »

L'exposé de notre collègue Gilles COHEN-TANNOUDJI comprend quatre grandes parties

Bilan de la révolution scientifique du 20^{ème} siècle

La révolution scientifique du 20^{ème} siècle est basée principalement sur 4 constantes fondamentales : G constante de la gravitation ; c célérité de la lumière ; k constante de Boltzmann (lie, par exemple, l'énergie cinétique et la température d'un système physique) ; h constante de Planck (lie, par exemple, l'énergie d'un photon à sa fréquence). Elles sont à la base des concepts fondamentaux. La physique fondamentale repose sur : la théorie quantique des champs (h et c) ; la relativité générale (G et c). La physique phénoménologique: la thermodynamique statistique (h et k), la cinématique relativiste (c). La théorie quantique des champs (TQC) est considérée comme la synthèse de la relativité restreinte (c) et de la mécanique quantique (h). C'est la base théorique de la physique des particules élémentaires et des interactions fondamentales non gravitationnelles : Champs relativistes, définis en chaque point de l'espace-temps de Minkowski ; champs quantiques, champs d'opérateurs agissant dans un espace de Hilbert provoquant des événements d'émission ou d'absorption de quanta d'énergie. Les quanta d'énergie sont des particules ou des antiparticules (résolution du problème des énergies négatives). Les interactions et couplages locaux : produits de champs évalués au même point d'espace-temps. Le vide: état fondamental du système de champs quantiques dans lequel le nombre de quanta d'énergie est nul, mais où les champs quantiques sont affectés de fluctuations quantiques (par exemple la création puis la désintégration d'une paire particule-antiparticule).

La conséquence de tout ce qui précède est la naissance du modèle standard de la physique qui procure un excellent accord entre les observations et la théorie (à 10^{-11} près). L'électrodynamique quantique (QED: Quantum Electro Dynamics) est une théorie quantique des champs de l'électromagnétisme. Elle possède la propriété d'être « renormalisable ». Une théorie est dite renormalisable si toutes les observables physiques peuvent s'exprimer sans infini à l'aide de paramètres dépendant de l'énergie, redéfinis ou « renormalisés » par l'interaction. Une théorie renormalisable est prédictive. Les paramètres – dont elle dépend – sont en nombre fini et ils peuvent être déterminés expérimentalement. Mais elle n'est pas « fondamentale » ; la valeur des paramètres dépend de la résolution (c'est-à-dire de l'énergie accessible) Cette théorie est efficace (« effective », en anglais) car la dépendance en énergie des paramètres est prédictible, grâce aux équations du groupe de renormalisation.

la relativité Générale et Cosmologie

Einstein voulait un univers statique, il introduisit à cet effet la constante cosmologique dans ses formules afin qu'il en soit ainsi. Puis la supprima, suite aux travaux sur l'expansion de l'Univers, en prétendant par la suite que ce fut sa plus grande erreur. On aboutira ainsi au modèle du « Big Bang ».

L'univers de De Sitter est un univers sans matière mais statique comme celui d'Einstein et avec une constante cosmologique. Einstein le réfute car il est au contraire au principe de Mach. C'est la découverte de l'expansion des galaxies par Hubble, notamment, qui conduit Einstein à supprimer la constante cosmologique. Le modèle le plus simple (FLRW), celui de Friedmann, Lemaitre, Roberston et Walker explique la récession des galaxies et l'abondance des éléments légers. Il prévoit aussi l'existence d'un fond diffus à 3K. Cela va conduire ainsi à la théorie du Big Bang. Mais ce modèle pose quelques difficultés comme : La trop grande homogénéité du fond cosmologique (comment des points aussi distants les uns des autres peuvent ils avoir la même température?); C'est le problème de l'horizon. Il y a aussi le problème de la platitude spatiale de l'Univers, l'Univers semble plat, mais on ne sait pas pourquoi. Un scénario, appelé Inflation a été élaboré pour éliminer ces difficultés.

Les enjeux d'une nouvelle révolution scientifique

Cette révolution a été précédée par de nombreux signes annonciateurs: masse des neutrinos, matière noire, accélération de l'expansion de l'Univers (constante cosmologique non nulle, est-ce une nouvelle constante universelle?); incompatibilité de la TQC avec la RG, et introduction de la gravitation quantique. La constante cosmologique implique l'existence d'un horizon des événements, la densité de l'énergie noire est la densité d'énergie du vide: toute la matière est passée au-delà de l'horizon. Un des adeptes de cette théorie, T. Padmanabhan propose le schéma page 18.

C'est la structure géométrique d'un univers basé sur deux longueurs caractéristiques: la longueur de Planck L_P et la constante cosmologique L_Λ . Un tel Univers passerait la plupart de son temps dans deux phases De Sitter. La première correspondant à l'inflation et la deuxième à la phase d'accélération de l'expansion (période de ré-inflation). Il y aurait une route thermodynamique vers la gravitation quantique.

Une route thermodynamique vers la gravitation quantique

L'idée que la gravité peut être décrite comme un phénomène émergent remonte aux travaux de Sakharov. La connexion gravité-thermodynamique a été découverte par Jacobson qui a utilisé la proportionnalité de l'entropie, de l'aire de l'horizon et le premier principe de la thermodynamique classique pour assimiler l'équation d'Einstein à une équation d'état. Les implications de cette connexion ont été analysées de façon approfondie par Thanu Padmanabhan. Très récemment, cette même connexion a suscité un important regain d'intérêt à la suite d'un article de Erik Verlinde dans lequel il interprète la gravité comme une « force entropique ». Le physicien hollandais Erik Verlinde spécialiste de la théorie des cordes affirme dans un article paru aux Etats-Unis, en 2010, que la force de gravitation, telle qu'elle a été conçue par Newton, puis utilisée pendant trois siècles de cosmologie; cette force n'existe pas sous sa forme habituelle! Selon Verlinde, depuis 30 ans, la physique théorique a pratiqué une « déconstruction » de la gravitation newtonienne telle qu'elle a été conçue comme force fondamentale. Celle-ci aurait même commencé dans les années 1970, sous l'impulsion de Jacob Bekenstein et Stephen Hawking. Ces deux physiciens ont établi des connexions entre le comportement des trous noirs et la thermodynamique¹; lorsque ces trous noirs sont décrits en incorporant des effets quantiques. La célèbre formule de l'entropie du trou noir, désignée comme formule de Bekenstein-Hawking, présente la particularité d'inclure G , c et h , c'est-à-dire trois des constantes les plus fondamentales de la physique. Cette formule permet de calculer la

¹ Stephen Hawking a découvert en 1975 le phénomène d'évaporation des trous noirs. Il a démontré qu'un trou noir n'est pas un objet complètement sombre, mais émet un très faible rayonnement thermique!

fonction d'état S qui n'est autre que l'entropie du système, grandeur fondamentale du deuxième principe de la thermodynamique –qui donne la mesure de l'information (ordre-désordre) contenue dans le système. Cette formule associe les trois branches de la physique moderne que sont la mécanique quantique, la thermodynamique statistique et la cosmologie relativiste, à laquelle on ajoute l'ajustement espace-temps où figure la célèbre constante c de la lumière. Dans le sillon des idées de Hawking, le théoricien Ted Jacobson a proposé en 1995 une hypothèse encore plus hardie. Les équations de la cosmologie relativiste établies par Einstein cacheraient en fait une manière d'exposer et de formuler les lois fondamentales de la thermodynamique. Cette approche a été rendu possible grâce à un principe dit holographique (Susskind et al.) : « Holo » comme le tout, graphique comme une carte. Le principe optique d'holographie permet à partir d'une « photographie » bidimensionnelle de projeter des images tridimensionnelles moyennant l'usage d'un rayonnement cohérent, autrement dit le laser. Quant aux trous noirs émergeant de la cosmologie relativiste, ils ne seraient que des hologrammes dispersés dans l'univers. Plus précisément, l'information « engloutie » par le trou noir serait restituée sur ses bords (ligne d'horizon). Erik Verlinde a été fortement impressionné par le contenu de l'article de Jacobson. Pratiquement aucun physicien dit-il n'a pris la mesure des implications contenues dans ses travaux maintenant datés d'une quinzaine d'années. Erik Verlinde a poussé vers les extrémités les conséquences des travaux de Jacobson. Il reconnaît néanmoins que son analyse est approximative, péchant par déficiences théoriques et qu'il faut persévérer dans cette voie dont le terme final serait d'établir que *la gravitation n'est pas une force particulière mais une « force entropique » découlant des variations d'informations liées aux déplacements des objets et à leur localisation.*

Un article de synthèse sur ces questions vient d'être publié (janvier 2011) aux Etats-Unis par Gilles Cohen-Tannoudji² et al.

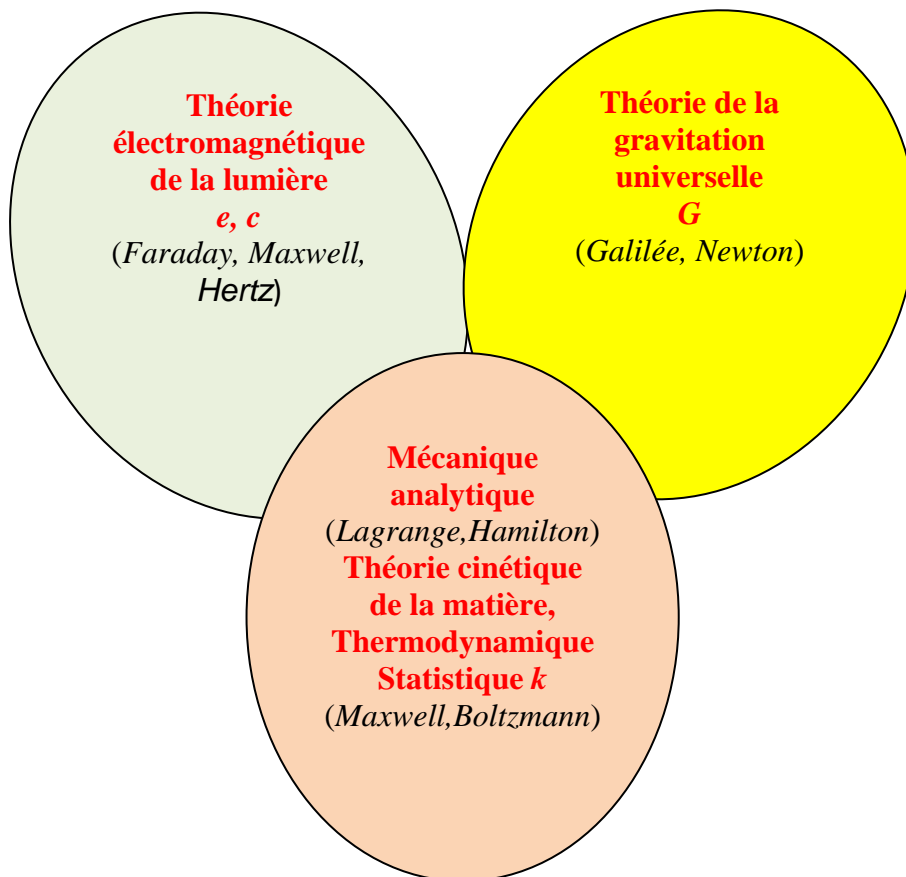
Pour illustrer la présentation de notre collègue Gilles COHEN-TANNOUDJI, on trouvera ci-après le tableau des transparents de la conférence.

² G. Cohen-Tannoudji, S. Hudlet *A New Scientific Revolution at the Horizon?*
[arXiv:1101.1216v1](https://arxiv.org/abs/1101.1216v1) [physics.hist-ph], 2011, Cornell University Library

Une nouvelle révolution scientifique à l'horizon?

Gilles Cohen-Tannoudji
LARSIM CEA-Saclay
AEIS 08/02/2011

L'apogée de la physique classique à la fin du XIXe siècle



Bilan de la révolution scientifique du 20ème siècle

• La révolution scientifique du 20ème siècle

— G, c, k, h : quatre constantes universelles découvertes ou redécouvertes au début du 20ème siècle

- Définissent les **unités fondamentales**
- Traduisent des **principes fondamentaux de limitation**
- Structurent le **cadre général de la physique théorique**

• Le « trépied » de la physique théorique

— Physique « **fondamentale** »

- La théorie quantique des champs (h, c)
- La relativité générale (G, c)

– Physique « **phénoménologique** »: Mécanique et statistique quantiques (h, k), cinématique relativiste (c)

La théorie quantique des champs

• Principes de limitation liés à \hbar et c

— L'existence d'un quantum élémentaire d'action, \hbar exclut toute subdivision des processus quantiques individuels, qui doivent être traités comme des **événements non prédictibles ni reproductibles individuellement**

– La vitesse de la lumière dans le vide, c , est interprétée comme la constante universelle traduisant toujours et partout **l'impossibilité d'action instantanée à distance**

• La théorie quantique des champs

- Mariage de la relativité restreinte (prise en compte de c) et de la mécanique quantique (prise en compte de \hbar)
- Base théorique de la physique **des particules élémentaires** et des **interactions fondamentales non gravitationnelles**
- Champs quantiques
- Champs **relativistes**, i.e. définis en chaque point de l'espace-temps de Minkowski
- Champs **quantiques** i.e. champs d'**opérateurs** agissant dans un **espace de Hilbert** provoquant des **événements** d'émission ou d'absorption de **quanta d'énergie**
- Les quanta d'énergie sont des **particules** ou des **antiparticules** (résolution du problème des énergies négatives)
- Interactions et couplages locaux: **produits de champs évalués au même point d'espace-temps**
- Le **vide**: état fondamental du système de champs quantiques dans lequel le nombre de quanta d'énergie est nul, mais où les champs quantiques sont affectés de **fluctuations quantiques** (par exemple la création puis la désintégration d'une paire particule-antiparticule)

• Le modèle standard de la physique des particules

- Le paradigme de l'électrodynamique quantique (QED)
- Existence d'une limite classique
- Effets des corrections quantiques et relativistes mesurables en physique atomique
- Théorie à **invariance de jauge** (abélienne) locale
- Théorie **renormalisable**
- **Accord théorie/expérience excellent** (10^{-11})
- Généralisation aux autres interactions fondamentales non gravitationnelles: **théories à invariance de jauge non abéliennes, renormalisables**
- Le niveau sub-hadronique d'élémentarité: les **quarks** et les **gluons**
- La **chromodynamique quantique (QCD)**, interaction forte des quarks et gluons
- La **théorie électrofaible** de Glashow, Salam et Weinberg, unification des interactions faible et électromagnétique
- Accord théorie/expérience très bon: 10^{-3} jusqu'à 200 GeV



- Les théories **renormalisables**

- La **localité** des couplages d'interaction induit une **singularité** dans la TQC: les **intégrales** à partir desquelles on obtient les amplitudes de transition **divergent**

- Une théorie est dite **renormalisable** si toutes les observables physiques peuvent s'exprimer sans infini à l'aide de paramètres dépendant de l'énergie, redéfinis (on dit « **renormalisés** ») par l'interaction

Une théorie **renormalisable** est **prédictive** : les paramètres – dont elle dépend sont en nombre fini et ils peuvent être déterminés expérimentalement

- Mais elle n'est pas « fondamentale »: la **valeur des paramètres dépend de la résolution (c'est-à-dire de l'énergie accessible)**

- Cette théorie est efficace (en anglais « **effective** ») car la dépendance en énergie des paramètres est prédictible, grâce aux **équations du groupe de renormalisation**

La relativité générale

• La relativité restreinte

- Équivalence des **référentiels inertiels** en mouvement relatif uniforme
- Invariance de la vitesse de la lumière dans le vide
- **Cinématique invariante de Lorentz dans l'espace-temps quadridimensionnel de Minkowski**
- Élimination de l'éther
- Promotion du concept de **champ** au rang de concept fondamental

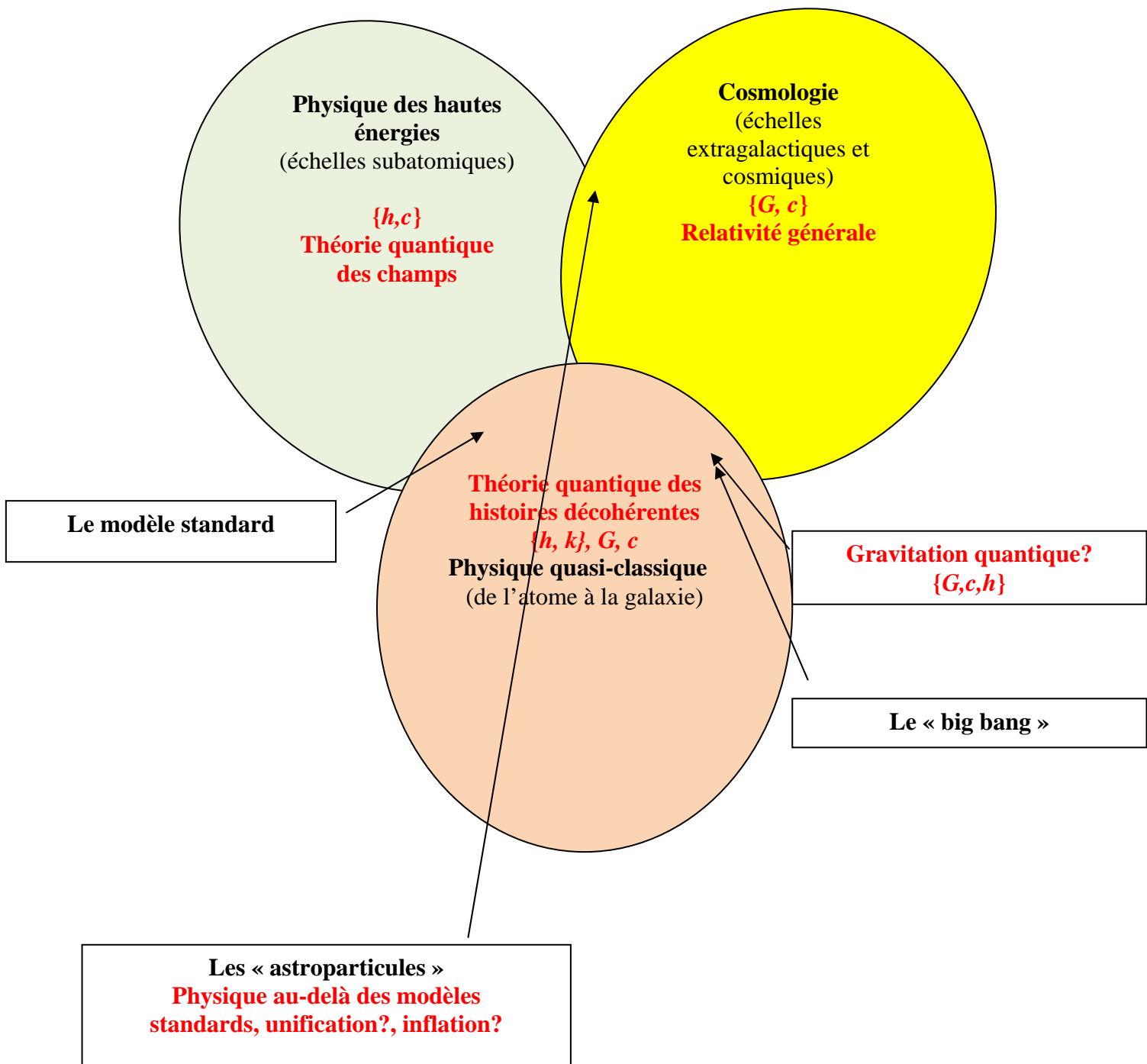
• Covariance générale, principe d'équivalence et théorie géométrique de la gravitation

- Un **changement quelconque de référentiel** peut être remplacé, **localement**, par un **champ gravitationnel adéquat**
- **Le champ gravitationnel** peut être remplacé, **localement**, par un **changement de référentiel adéquat**
- Équation d'Einstein relie le tenseur de Ricci-Einstein lié à la **géométrie non euclidienne** de l'espace-temps au **tenseur énergie-impulsion** décrivant de manière **phénoménologique** les propriétés de la matière
- La constante de proportionnalité entre ces deux tenseurs, est ajustée de façon à redonner la gravitation newtonienne à la limite non relativiste
- La covariance générale implique que ne sont observables que des **événements de coïncidence spatio-temporelle** (par exemple des couplages locaux entre champs quantiques).

• Relativité générale et cosmologie

- L'univers statique d'Einstein
- La relativité générale devient la base théorique de modèles cosmologiques dans lesquels le contenu matériel de l'univers (tenseur d'énergie-impulsion) est modélisé de manière phénoménologique
- La **constante cosmologique** introduite par Einstein: un terme compatible avec la covariance générale, lié à une propriété globale de l'univers (inverse du carré du « rayon » d'un **univers fini et sans bord**), et induisant une « pression négative » capable de contrebalancer l'action de la gravitation et de conduire à un **univers statique**
- L'univers de **de Sitter** serait un univers statique d'Einstein sans matière, mais avec constante cosmologique. Einstein refuse un tel univers qui serait en contradiction avec le « **principe de Mach** » selon lequel la géométrie (par exemple la courbure liée à la constante cosmologique) devrait être induite par la matière.

- L'univers statique d'Einstein, comme celui de de Sitter, comporte une singularité apparente: les rayons lumineux issus d'un point d'espace-temps convergent vers un point conjugué qui peut être confondu avec le point de départ (espace elliptique) qui apparaît comme une **singularité** analogue à la singularité dans un trou noir de Schwarzschild . Cependant un tel univers comporte un **horizon des événements** qui masque cette singularité
 - Des arguments **observationnels** (mouvement de **récession des galaxies lointaines** – **Hubble** – infirmant l'hypothèse du caractère statique de l'univers) et **théoriques** (**instabilité** de l'équilibre entre pression négative et gravitation, possibilité, avec l'équation d'Einstein sans constante cosmologique, d'obtenir un univers statique, ou en expansion ou en contraction – **Friedman** –) conduisent Einstein à abandonner la constante cosmologique
 - **Échelles de Planck** et horizon de la **gravitation quantique**
-
- **Le modèle cosmologique du « big bang »**
 - Le modèle « simple » du big bang (**Lemaître, Friedman, Robertson, Walker**)
 - Récession des galaxies lointaines, loi de Hubble
 - Abondance relative des éléments légers (nucléosynthèse primordiale)
 - Rayonnement diffus de fond cosmologique (RDFC) à environ 3 degrés Kelvin, détecté en 1965
 - Constante cosmologique mise à zéro
 - Les difficultés du modèle du big bang
 - Trop grande **homogénéité** du RDFC (problème d'**horizon**)
 - Problème de la **platitude spatiale** de l'univers (problème d'ajustement fin)
 - **Scénario de l'inflation** imaginé pour lever ces difficultés



Les enjeux d'une nouvelle révolution scientifique

Les signes annonciateurs de cette nouvelle révolution scientifique

- Renouveau de l'interprétation de la physique quantique faisant jouer un rôle décisif au concept d'information
(« **seconde révolution quantique** »)
- Indication de physique au-delà du modèle standard (**masse des neutrinos**)
- Deux découvertes majeures de la cosmologie observationnelle
 - La **matière sombre** dont l'explication exigerait une physique au-delà du modèle standard
 - **L'accélération de l'expansion de l'univers** pouvant s'expliquer à l'aide d'une **constante cosmologique** non nulle
- **Une cinquième constante universelle?**
- Crise de l'incompatibilité de la TQC et de la RG et horizon de **la gravitation quantique**

- **Le dépassement du modèle standard du big bang, la « concordance » et la redécouverte de la constante cosmologique**
 - **Importants progrès observationnels au début des années 2000**
- Mesure des distances à l'aide des **super novae de type 1A**
- Détermination avec une grande précision de la carte du RDFC (**COBE, WMAP, bientôt Planck**)
 - **Dépassement du modèle du big bang**
- Mise en **concordance** de toutes les données observationnelles
- **Validation de l'hypothèse de l'inflation** expliquant la platitude spatiale observée
- Détermination précise des paramètres fondamentaux de la cosmodynamique (**âge de l'univers, composantes de la densité d'énergie**)
- Mise en évidence de composantes non standard inévitables de la densité d'énergie (**matière sombre et énergie sombre**)
- **Interprétation** des fluctuations observées dans le RDFC comme le résultats de fluctuations intervenues dans l'ère de la **gravitation quantique, amplifiées par l'inflation**, pouvant produire les **grandes structures observées dans la distribution des galaxies** (filaments, vides, ...)
- **Retour de la constante cosmologique**

La métrique de Friedman, Lemaître, Robertson, Walker

$$ds^2 = dt^2 - a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \right]$$

$$H_0 \equiv (\dot{a}/a)_0$$

$$\frac{\dot{a}^2 + k}{a^2} = \frac{8\pi G \rho}{3}; \quad d(\rho a^3) = -p da^3$$

$$k = 0 \Rightarrow \rho = \rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G} \quad \Omega_i = \rho_i / \rho_c.$$

Implications de la **constante cosmologique**

- Existence d'un **horizon des événements** de rayon

$$L_\Lambda = \sqrt{3/\Lambda}$$

- **Pression négative** $p_\Lambda = -\rho_\Lambda$

$$t \rightarrow \infty \Rightarrow H \rightarrow H_\infty = 1/L_\Lambda; \rho_c \rightarrow \frac{3}{8\pi L_\Lambda^2 G} = \rho_{DE}; \Omega_{DE} \rightarrow 1$$

- **La densité d'énergie sombre**

est bien la densité

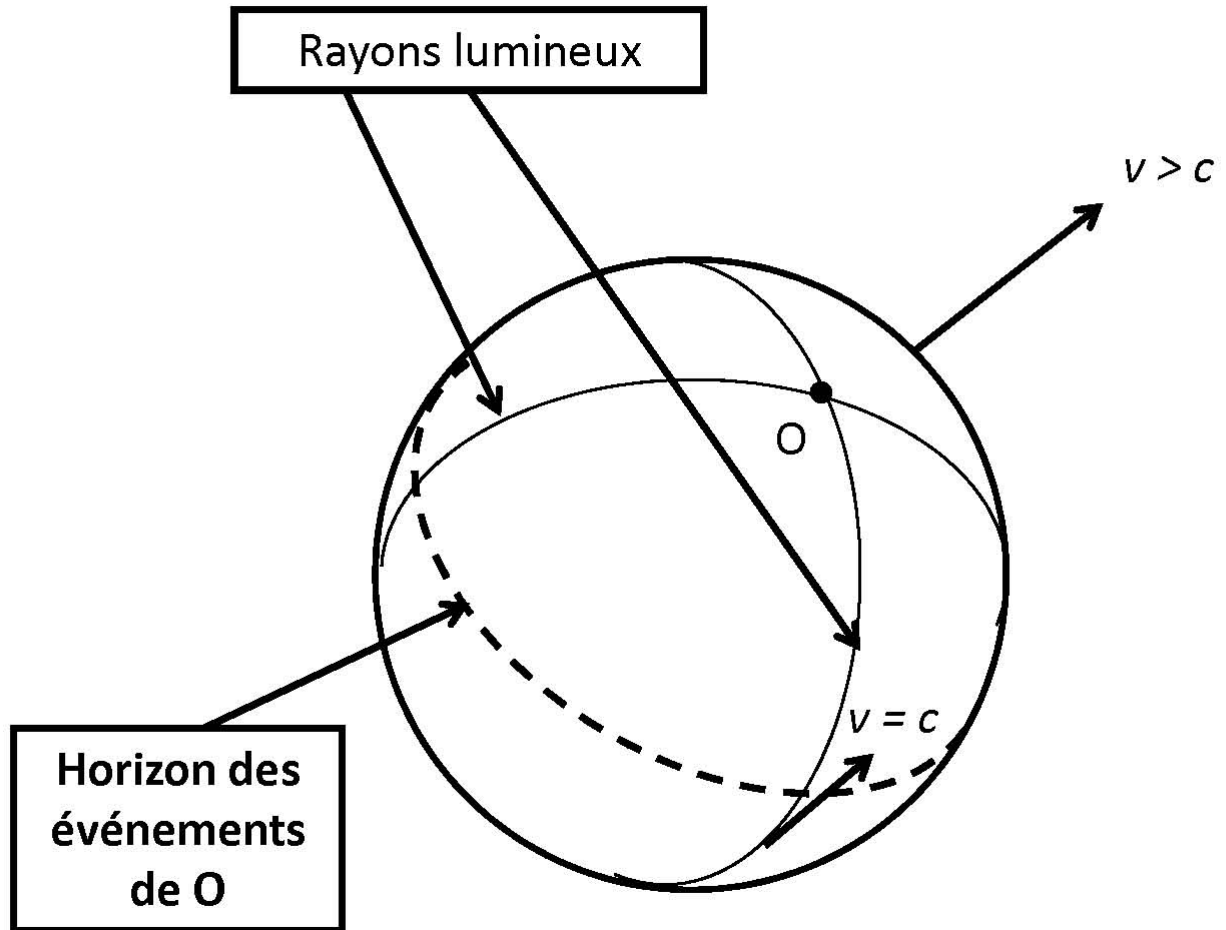
En unités naturelles

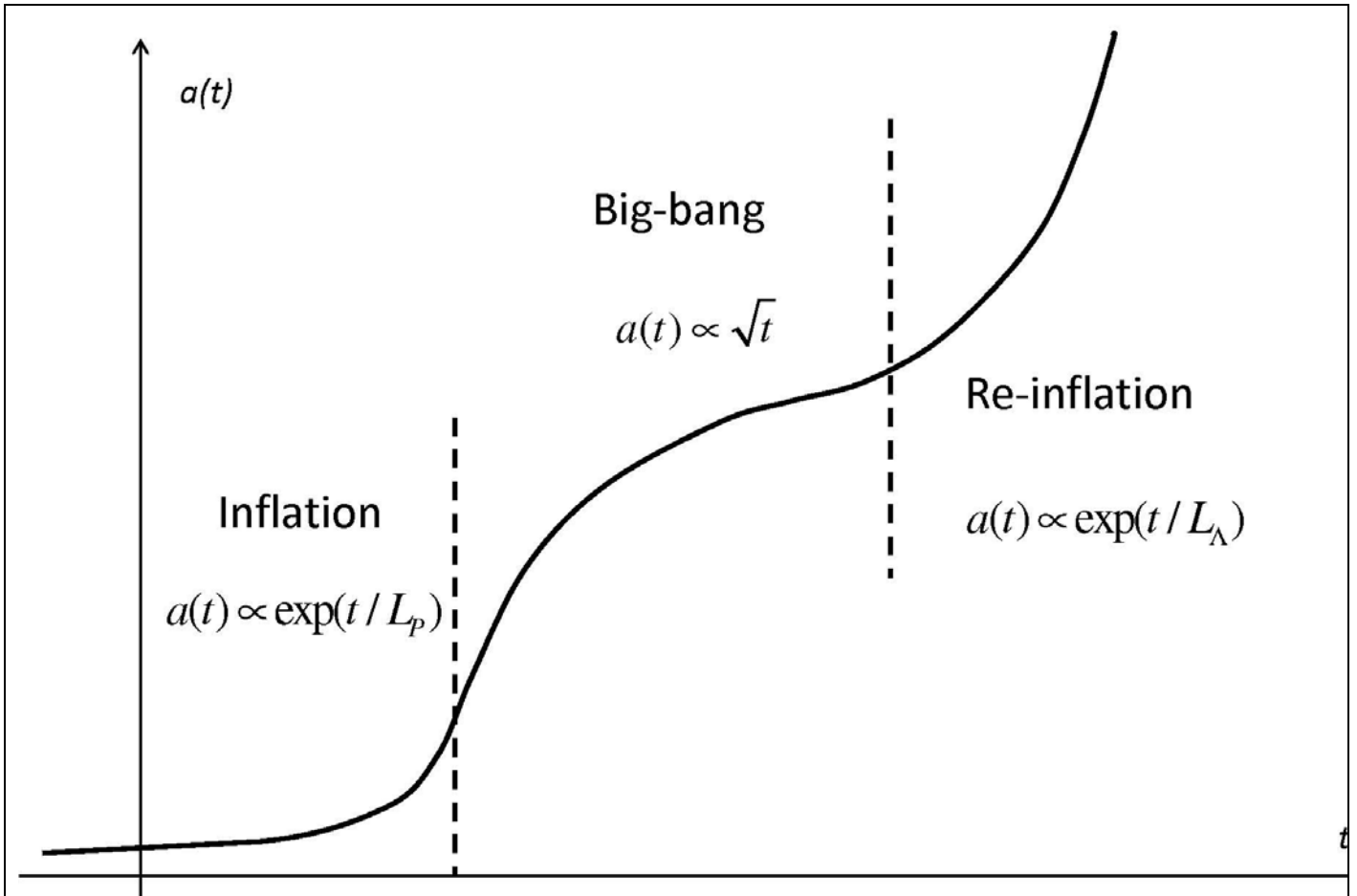
d'énergie du vide:

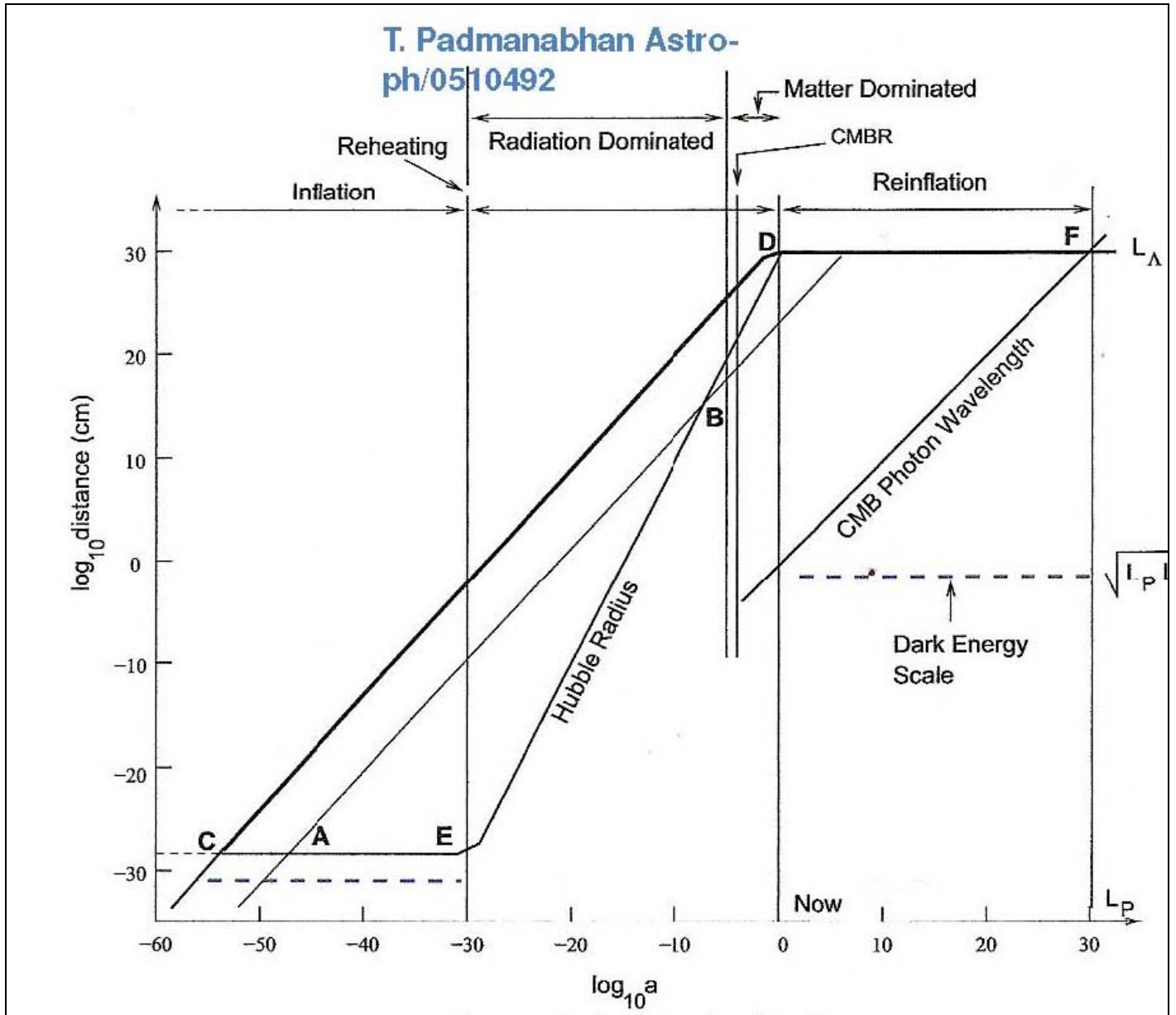
toute la matière est passée au-delà
de l'horizon !!

$$(\hbar = c = 1) G = L_P^{-2}; \rho_{DE} \propto \frac{1}{L_\Lambda^2 L_P^2}$$

Espace-temps de de Sitter à deux dimensions d'espace







Thermodynamique des trous noirs

— Entropie de Bekenstein

– Analogie entre mécanique des trous noirs et thermodynamique

(Bekenstein, Hawking)

– Accroissement de l'aire de l'horizon d'un trou noir par ajout d'un bit d'information (L. Susskind, *the black hole war*, Brown and company, 2008)

• Rayon de l'horizon $R_S = 2MG/c^2$

• Un bit d'information: un photon de $\lambda = R_S$ jeté dans le trou noir

• $\Delta M c^2 = \Delta E = hc/R_S \rightarrow \Delta M = h/cR_S$

• $\Delta R_S = 2\Delta MG/c^2 \rightarrow \Delta A_H = 2\Delta R_S R_S = 4hG/c^3 = 4A_p$

— Rayonnement d'accélération et évaporation des trous noirs

$$T = \frac{\hbar}{k_B c} \frac{c^4}{8\pi G M}; U = \frac{\hbar}{k_B c} \quad (\text{constante de Unruh})$$

• Les principes d'holographie et de complémentarité des horizons des événements

— **Principe holographique:** Toute l'information contenue dans un trou noir est égale au quart de l'aire de son horizon exprimée en unité d'aire de Planck

– D'après Susskind, ce principe holographique, joint à celui de **complémentarité**

des trous noirs permettrait de résoudre le **paradoxe de la non conservation de l'information** (Hawking) qui rendrait caduque toute la physique quantique

– **Ces principes d'holographie et de complémentarité pourraient être étendus**

à tout horizon des événements et ainsi conduire à une théorie quantique de la gravitation



Une route thermodynamique vers la gravitation quantique

« **Horizons** are an inevitable feature of any geometrical theory of gravity. **Thermal** nature of horizons cannot arise without the spacetime having a **microstructure**

Just as a solid cannot exhibit thermal phenomenon if it does not have microstructure, horizons cannot exhibit thermal behavior if spacetime has no microstructure

Just as thermodynamics provides a link between statistical mechanics and (zero temperature) dynamics of a solid, **horizons link certain aspects of microphysics with the bulk dynamics**

Gravity is an emergent phenomenon like elasticity and the field equations should be derivable from an alternative paradigm

The gravitation action is '**holographic**' with the same information being coded in both the bulk and the surface terms »

T. Padmanabhan *Gravity as an emergent phenomenon: A conceptual description* arXiv:0706.1654v1 [gr-qc]

$$g_{00} = 1/g_{rr} = -f(r) \quad \kappa = (c^2/2) f'(a); (f'(a) \neq 0)$$

$$f(r=a) = 0$$

$$T = \frac{hcf'(a)}{4\pi k} = \frac{1}{2\pi} \frac{h}{kc} \kappa$$

$$(1-f) - rf'(r) = -(8\pi G/c^4) Pr^2$$

$$r = a \quad \frac{c^4}{G} \left[\frac{1}{2} f'(a)a - \frac{1}{2} \right] = 4\pi Pa^2$$

$$\frac{c^4}{2G} f'(a)ada - \frac{c^4}{2} da = P(4\pi a^2 da)$$

$$\underbrace{\frac{h}{kc} \frac{c^2 f'(a)}{4\pi}}_T \underbrace{\frac{kc^3}{Gh} d\left(\frac{1}{4} 4\pi a^2\right)}_{dS} - \underbrace{\frac{1}{2} \frac{c^4 da}{G}}_{-dE} = \underbrace{Pd\left(\frac{4\pi}{3} a^3\right)}_{PdV}$$

Constante de Bekenstein

Constante de Unruh

Constante de Newton



Sur l'origine de la gravité et des lois de Newton

E. Verlinde, arXiv:1001.0785

$$\Delta S = 2\pi k_B \text{ quand } \Delta x = \frac{\hbar}{mc} \text{ (Bekenstein)}$$

$$\Delta S = 2\pi k_B \frac{mc}{\hbar} \Delta s$$

$$F \Delta x = T \Delta S$$

$$k_B T = \frac{1}{2\pi} \frac{\hbar a}{c} \text{ (Unruh)}$$

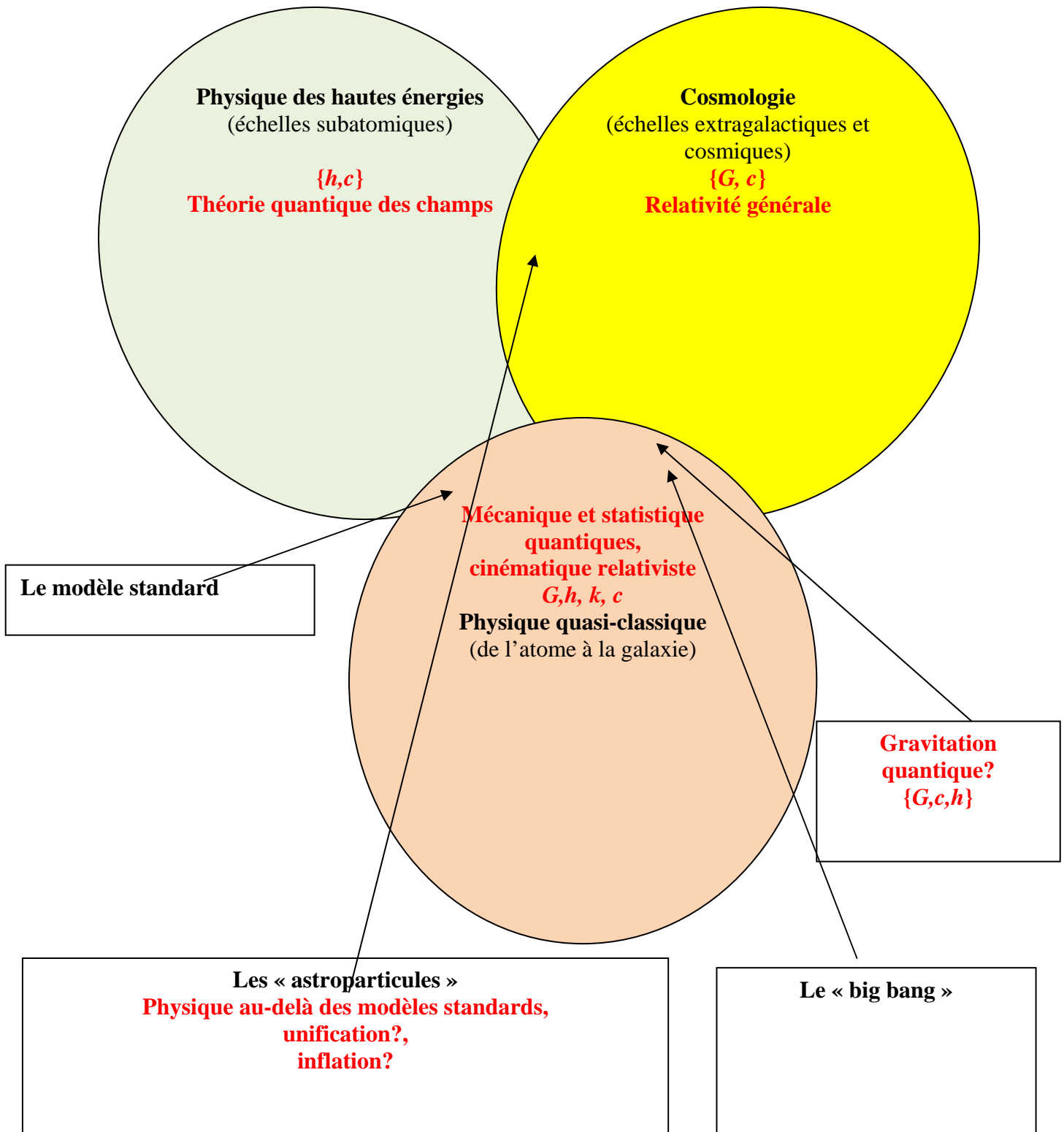
$$F = ma$$

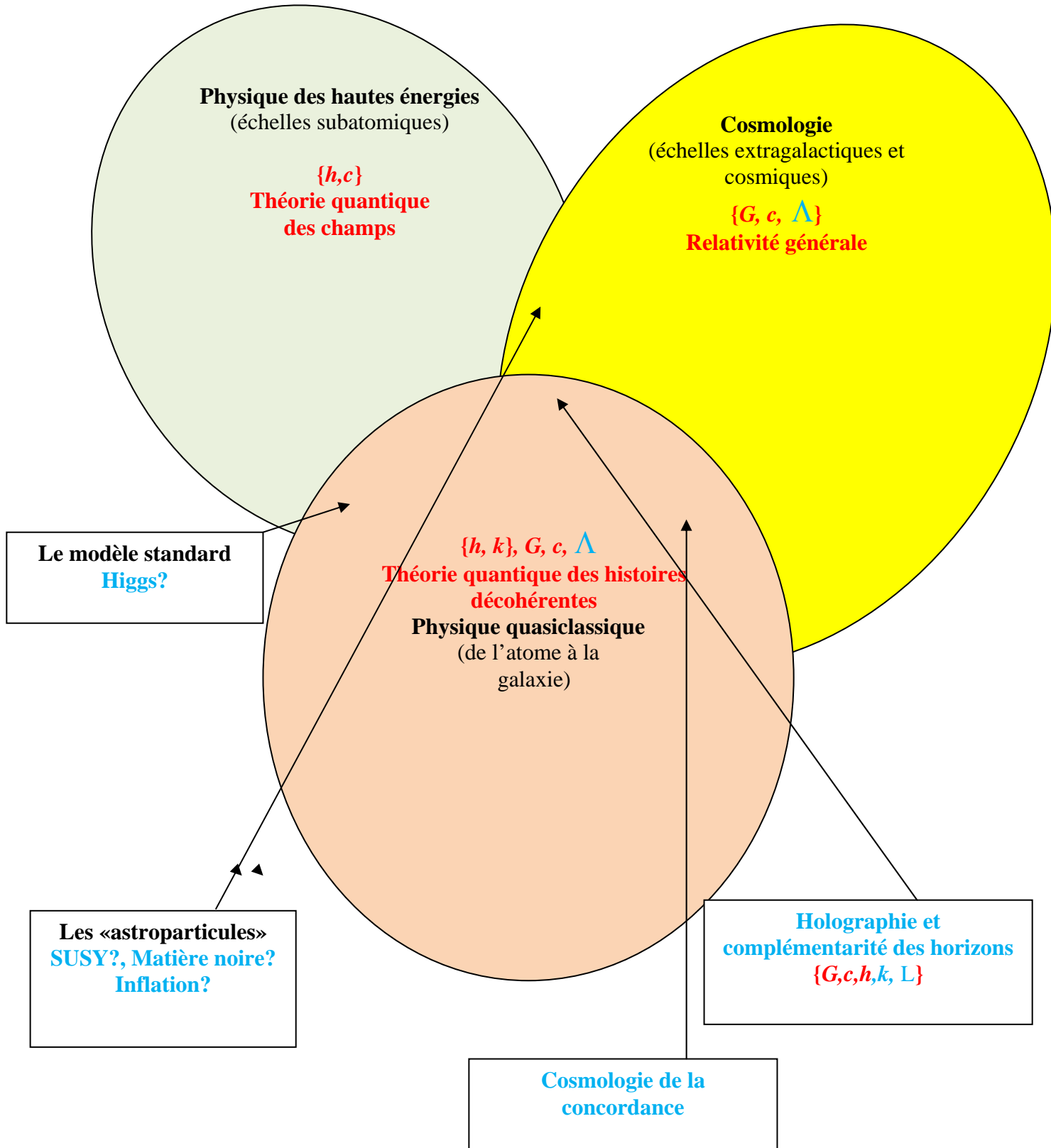
$$N = \frac{Ac^3}{G\hbar}$$

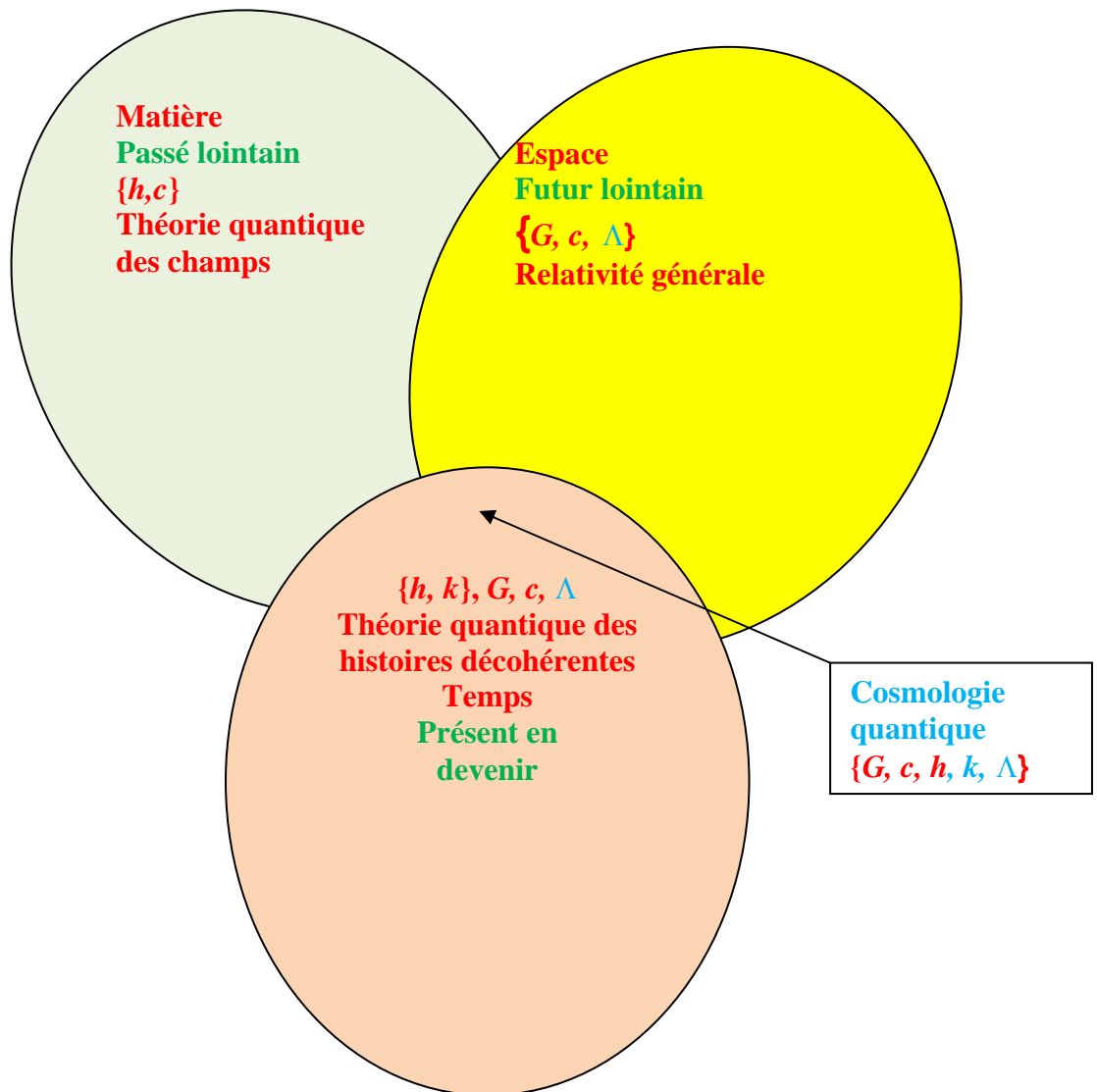
$$E = \frac{1}{2} N k_B T; E = Mc^2$$

$$A = 4\pi R^2$$

$$F = G \frac{Mm}{R^2}$$







Après ce riche exposé et de nombreuses questions, la séance prend fin.

Bien amicalement à vous,

Irène HERPE-LITWIN

Compte-rendu de la section Nice-Côte d'Azur

Une opinion se doit de rester une hypothèse tant qu'elle n'est pas vérifiée dans chacun de ses aspects et de ses conséquences. Le doute se doit de persister et ne céder qu'aux preuves.

Christian Amatore, 2011.

Séance du 20 janvier 2011
(144^{ème} séance)

Présents :

Richard Beaud, René Blanchet, Patrice Crossa-Raynaud, René Dars, Yves Ignazi, Michel Lazdunski, Jacques Lebraty, Maurice Papo.

Excusés :

Jean Aubouin, Alain Bernard, Sonia Chakhoff, François Cuzin, Guy Darcourt, Jean-Pierre Delmont, Jean-Paul Goux, Jean-François Mattéi.

1- Approbation du compte rendu de la 143^{ème} séance.

Le compte rendu est approuvé à l'unanimité des présents.

2- Réception d'un nouveau confrère.

Notre Académie a le plaisir d'accueillir aujourd'hui notre nouveau confrère, le Professeur Raoul Caruba, de l'Université de Nice-Sophia Antipolis, créateur et organisateur du symposium international annuel de l'eau de Cannes (*Water symposium*).

Notre nouveau confrère a, en outre, accepté de faire, mercredi 26 janvier 2011, une conférence au MAMAC dans le cadre de notre cycle : « *La diversité du monde minéral : de l'atome au cristal* ».

3- Le mois écoulé.

Nous avons eu déjà trois conférences sur la diversité et nous sommes à la recherche de nouveaux sujets, mis à part ceux qui sont déjà programmés :

- La diversité psychique chez l'Homme par le Professeur Guy Darcourt,
- Management et diversité par le Professeur Jacques Lebraty.

Notre confrère Sonia Chakhoff a contacté M. Sosno qui est disposé à intervenir. On pourrait lui proposer « *La diversité des arts dans les cultures* ».

On a proposé également « *La diversité dans la musique* » et le nom de M. Peyrègne a été avancé si celui-ci peut être contacté. Il y a également une connaissance de Richard Beaud qui donne des conférences à l'UNIA que l'on pourrait contacter.

Richard Beaud propose d'intervenir sur le travail de l'Homme dès qu'il a pris conscience de lui-même. C'est la partie la plus passionnante de l'archéologie. Cette prise de conscience se traduit notamment dans les arts, dans les religions, etc., donc dans la diversité. Son travail en égyptologie l'amène à découvrir le fonctionnement des grands mythes et du temps. Le but des rites inventés par l'Homme est que le tout continue de fonctionner dans le cosmos et sur terre dans sa diversité.

Patrice Crossa-Raynaud propose alors de faire d'abord une conférence sur « *La place de la femme dans des mythologies méditerranéennes* » qui serait élargie, le mois suivant, par l'exposé de Richard Beaud.

4- La complexité.

L'interactivité d'agents autonomes au sein d'un groupe ou d'un réseau, la complexité des relations qui en découle et les conséquences sont parfois totalement inattendues.

Les règles des réseaux complexes s'appliquent aux organismes vivants, aux réseaux sociaux ou aux écosystèmes.

Les insectes sociaux et en particulier les fourmis ont beaucoup inspiré les chercheurs en systèmes complexes. Un des plus connus est Lorenz avec la théorie du chaos en climatologie : « l'effet papillon » en 1967.

Depuis 1637, avec Descartes, nous vivons avec un modèle de compréhension du réel « un paradigme » que l'on appelle le réductionnisme. Le second « principe de la méthode » consiste à diviser chacune des difficultés en autant de parcelles pouvant chacune être résolues.

Le principe de Descartes a permis de faire une multitude de découvertes pendant trois siècles mais il semble avoir atteint ses limites particulièrement en biologie, en écologie, en sociologie.

Le nouveau paradigme, le holisme, considère un système dans son ensemble et donne une importance prépondérante aux liens entre les parties.

Patrice Crossa-Raynaud : Il est certain qu'à vouloir ramener un phénomène complexe à quelques facteurs seulement, on court le risque d'aboutir à des conclusions discutables. Un bon exemple est celui de la prévision du climat futur de la planète.

Yves Ignazi : Les entreprises ont tendance à aller vers de plus en plus de complexification pour faire face à des problèmes de plus en plus complexes. Mais la complexification ne donne pas de sens et il arrive un moment où l'entreprise ne sait plus très bien où elle va et met alors en place des marges qui disent : « *Où est le cœur de notre travail, à quoi sert notre travail ?* » Elle doit définir une stratégie.

Patrice Crossa-Raynaud : Michel Bloch cite Pascal qui écrivait, au 17^{ème} siècle : « *Pour comprendre le tout il faut comprendre les parties et pour comprendre les parties, il faut comprendre le tout* ». Le réductionnisme et le holisme se complètent.

La biologie moderne est le prototype de cette double approche puisqu'elle progresse grâce à des recherches microscopiques pour comprendre le fonctionnement des cellules et, d'autre part, à des études globales de l'organe ou de l'organisme pour donner sens à ces découvertes. Les travaux de notre confrère François Cuzin illustrent cela parfaitement.

Le mot « émergence » familier à notre confrère Coulet est l'objet de multiples interprétations scientifiques et philosophiques. Selon Bloch, cette discipline est déjà très féconde dans tous les domaines : biologie, médecine (cancer ...), écologie, géographie, sciences sociales, économie, marketing, physique, chimie ...

Et Michel Bloch conclut : « Avec la complexité, nous évoluons de la causalité stricte linéaire à la causalité partielle et bouclée, du prévisible à l'imprévisible, et nous découvrons que les comportements chaotiques sont fréquents et que de petites causes peuvent avoir de grands effets ».

Les responsables politiques n'ont pas encore intégré ce changement de perspective (Bouazizi s'immolant par le feu à Sidi Bouzid ...), alors que toutes leurs décisions portent sur des situations de plus en plus complexes.

Les principaux outils qui sont mis à leur disposition reposent sur la simplicité et l'intention ; ce sont de mauvaises conseillères pour les systèmes complexes dont les réactions sont souvent contre-intuitives, chaotiques et imprévisibles.

5- Distinction.

Notre confrère, le Professeur Michel Lazdunski a reçu la médaille d'or pour la médecine de la Fondation Jung pour la Science et la Recherche. C'est la première fois qu'un Français est ainsi honoré. Elle récompense les recherches de notre ami sur les canaux ioniques qui ont mené à des découvertes fondamentales dans les domaines de la physiologie, de la pharmacologie et de la pathologie. Notre confrère est le fondateur à Nice en 1973, de l'Institut de pharmacologie moléculaire et cellulaire (en 1989 à Sophia Antipolis) et de l'Institut de neuromédecine moléculaire (en 2000 à Sophia Antipolis).

Toutes nos félicitations très amicales.

Prochaine réunion
le jeudi 17 février 2011 à 17 heures
au siège : Palais Marie Christine - 20 rue de France
06000 NICE

Prochaine conférence au MAMAC
le mercredi 24 février 2011 de 16 à 18 heures
« *Diversité psychique et santé mentale* »
par le Professeur Guy Darcourt

Annances

I) FESTIVAL PSY « MIROIR des Rêves » 1/2/3 juillet à Paris

Notre Collègue Antoine FRATINI nous informe de la tenue, sous l'égide de l'Association Européenne de Psychanalyse (AEP, du premier FESTIVAL PSY à Paris organisé par REGIMEDIA qui se tiendra à Paris les 1/2/3 juillet 2011.

Le festival est intitulé « LE MIROIR DES REVES ».

Les conférences se tiendront à la salle Guyot, ASIEM, 6 rue Albert de Lapparent – 75007 Paris

Pour plus de renseignements on peut consulter :

- Le site de l'Association européenne de Psychanalyse : <http://www.aepsi.fr/index2.htm>

Pour les inscriptions on peut contacter :

- Le Président de l'AEP, Antoine FRATINI : a.fratini@libero.it
- Le Délégué pour la France, Jean-Luc MAXENCE : godme@free.fr tel : 01 45 70 83 84

II) CHANTIERS DE FOUILLES PREHISTORIQUES DANS LE MIDI

Le Pr Henry de LUMLEY, Professeur émérite au Muséum d'Histoire Naturelle, Directeur de l'Institut de Paléontologie Humaine, 1 rue René Panhard 75013PARIS, iphn@mnhn.fr nous informe des possibilités de stage dans des chantiers de fouilles paléontologiques dans le midi de la France. Des renseignements peuvent être obtenus pour les divers chantiers en consultant pour chacun d'entre eux :

- Chantier de Caune de l'Arago du 1^{er} avril au 31 août 2011 :
iphn@mnhn.fr ou perrenoud@mnhn.fr courrier : A l'attention de Pr Henry de Lumley, Centre Européen de recherches préhistoriques ; , avenue Léon-Jean Grégory, 66720 TAUTAVEL-
tel : 01 43 31 62 91
- Grotte du Lazaret, Mont Bego: secretariat@lazaret.unice.fr ; courrier Laboratoire départemental de Préhistoire du Lazaret 33bis boulevard Franck Pilatte 06300Nice ; tel : 04 92 00 17 37 ; site : <http://www.lazaret.unice.fr>

Renseignements généraux : <http://www.fondationiph.org/spip.php?rubrique6>

III) « SUR LES TRACES DES DOMESTICATIONS ET DES MIGRATIONS EN AGRICULTURE »

L'Académie d'Agriculture de France annonce, à l'occasion de son 250^{ème} anniversaire une séance commune avec l'Académie des Sciences qui aura lieu 23 quai de Conti Paris 6^{ème}, le 22 mars prochain, sur le thème annoncé ci-dessus

Des informations complémentaires peuvent être obtenues :

- Courrier : Académie d'Agriculture de France (AAF) 18, rue de Bellechasse 75006 PARIS

- Téléphone 01 47 05 10 37
- Site internet : www.academie-agriculture.fr

Documents

Dans le cadre d'une réflexion portant sur les nouvelles théories en physique notre Collègue Claude ELBAZ nous propose :

P. 33 : une réflexion intitulée, « Le Programme d'Einstein ».

En introduction à sa conférence, Jean-Pierre DESCLES nous propose :

P. 45 : « Mathématiques et Sciences humaines : résumé de l'Intervention »,

Le programme d'Einstein.

Introduction.

- La physique du 20ème siècle a été extraordinairement féconde sur le plan de ses applications technologiques qui font désormais partie de notre quotidien : elles ont changé notre façon de vivre.

- Avec les deux théories, relativiste et quantique, cette physique est révolutionnaire par rapport à celle qui l'avait précédée.

- En 1905, le rôle d'Einstein a été prépondérant dans les deux révolutions, relativiste et quantique. Il en est la figure emblématique.

Pourtant, toute sa vie, s'est opposé à la mécanique quantique et à son interprétation probabiliste. Cette conviction très forte, l'a conduit à se tenir à l'écart du développement de la mécanique quantique, et à se consacrer, sans succès, à la recherche d'une théorie unitaire plus complète, et qui engloberait à la fois la mécanique quantique et la relativité générale.

Il avait reconnu son échec. Mais il nous a laissé un programme, dans lequel il indiquait la voie qu'il convenait de suivre pour y parvenir. Il s'était basé sur ses propres recherches, qui, comme on le sait, avaient été d'une extraordinaire fécondité, et l'avaient conduit à de nombreuses et importantes découvertes. Einstein est considéré comme le plus grand physicien du 20ème siècle, au point que l'année 2005 a été désignée comme l'Année Mondiale de la Physique. Elle avait été choisie par l'UNESCO pour célébrer les sciences physiques dans le monde entier, exactement cent ans après la parution des travaux révolutionnaires d'Albert Einstein de 1905.

En se démarquant de la voie quantique suivie par la majorité des physiciens, le problème qu'il soulevait, au-delà de la physique fondamentale, n'est pas seulement une affaire de spécialistes. Il nous concerne tous dans la mesure où il s'agit de savoir si, comme le soutenait Einstein, le monde physique est ordonné, et non le résultat du hasard, et s'il est intelligible, et compréhensible à l'aide de modèles simples, sans le recours préalable aux mathématiques. Il déborde par conséquent le cadre de la physique, et même de la science.

Dans son programme, Einstein proposait de faire d'un champ unitaire, continu et emplissant tout l'espace, la base fondamentale de l'univers physique.

« Nous avons deux réalités : *la matière et le champ*. Il est hors de doute que nous ne pouvons pas à présent concevoir que toute la physique puisse être bâtie sur le concept de matière, comme le croyaient les physiciens du début du 19ème siècle...Ne pourrions-nous rejeter le concept de matière et construire une physique basée uniquement sur le champ ?... Nous pourrions regarder la matière comme des régions dans l'espace où le champ est extrêmement intense. Il n'y aurait pas de place, pour notre nouvelle physique, tout à la fois pour le champ et pour la matière, le champ étant la seule réalité. Cette conception nouvelle est suggérée par les grandes conquêtes de la physique du champ...On pourrait, de cette façon, créer un arrière-plan philosophique nouveau. » [1]

Les différents éléments de notre connaissance des propriétés de la nature que les physiciens ont rassemblés, et qui nous paraissent disjoints, voire contradictoires, comme justement le déterminisme et le probabilisme ou encore les particules et le champ continu, au cœur du programme et de la controverse d'Einstein, sont très certainement l'expression d'une origine commune plus profonde. Est-il encore nécessaire, et indispensable, de trouver d'autres éléments, pour avoir une approche commune de la physique? Cette lacune expliquerait qu'Einstein ait consacré, en vain, la majeure

partie de sa carrière scientifique à la recherche d'une théorie unitaire. Mais il avait estimé que cela n'était pas nécessaire : les données en sa possession étaient déjà, estimait-il, suffisantes. Il avait comparé l'activité du physicien théoricien à celle d'un détective³. « Il arrive un moment où l'investigateur a recueilli tous les faits dont il a besoin pour arriver au moins à une certaine étape de la solution. Ces faits semblent tout à fait étranges, incohérents et n'avoir aucun rapport entre eux. Le grand détective se rend pourtant compte que, pour le moment, il n'est pas nécessaire de pousser l'investigation plus loin, et que seule la réflexion pure pourra établir une corrélation entre les faits recueillis. Il se met ainsi à jouer du violon, ou s'installe commodément dans son fauteuil en fumant une pipe et, ô surprise ! il l'a trouvé. Et non seulement il a trouvé une relation entre les fils conducteurs qu'il tient en main, mais il sait aussi que certains autres événements ont dû se produire. Et comme maintenant il voit maintenant de quel côté exactement il faut chercher, il peut sortir, s'il lui plaît, pour recueillir de nouvelles confirmations de sa théorie. »

Il n'est pas difficile de lire entre les lignes pour se convaincre qu'Einstein n'avait fait que décrire sa propre démarche, à l'origine de son programme. Les faits à expliquer étaient les différents phénomènes physiques, déjà coordonnés dans les deux théories de la relativité et de la mécanique quantique. En défiant le sens commun, ils semblent effectivement tout à fait étranges, incohérents, et n'avoir aucun rapport entre eux. Pour trouver la solution cherchée sous la forme d'une théorie unitaire, Einstein s'était rendu compte que, pour le moment, il n'était pas nécessaire de pousser l'investigation plus loin, et que seule la réflexion pure pourrait établir une corrélation entre les faits recueillis. On sait qu'il jouait très bien du violon. Nous pouvons donc comprendre que la solution unitaire qui lui était apparue, de manière tout à fait intuitive, était basée sur le champ continu, se propageant à la vitesse de la lumière. Il lui restait à le démontrer rigoureusement, en en faisant le fondement formel, et logique, de la relativité et de la mécanique quantique.

Nous sommes alors partagés entre deux attitudes contradictoires. D'un côté, nous pouvons conclure que si, malgré tous ses efforts ; il n'avait pas réussi à formuler une physique basée uniquement sur le champ, c'est qu'il est inapte à décrire la constitution de l'univers. Cette voie ne mènerait nulle part. Mais d'un autre côté, si on considère qu'il avait mis tout le poids de sa renommée en jeu, alors qu'il pouvait se contenter de se reposer sur des lauriers très largement justifiés par ses découvertes, c'est que la voie indiquée représente très probablement un filon extrêmement riche, mais inexploité, parce qu'il est profondément enfoui à la base de la relativité et de la mécanique quantique.

Actualité du programme.

On constate que l'évolution de la physique et de la technologie s'effectue dans le sens entrevu par Einstein, en privilégiant le champ continu au détriment de la matière discontinue.

Domaine expérimental : les étalons de mesures.

Les étalons électromagnétiques de longueur et de temps, qui servent de références internationales légales, ont remplacé les anciens étalons matériels. Par conséquent, toutes les mesures en physique doivent être faites, conceptuellement par des horloges et des règles de lumière, et pratiquement par des méthodes et des appareils qui en dérivent plus ou moins directement.

La réalisation de mesures les plus précises est une des exigences les plus importantes du domaine expérimental. D'où le recours à des étalons de mesures les plus rigoureux et les plus fiables. C'est pourquoi les physiciens ont rejeté les étalons de matière et choisi des étalons définis à base de champ (électromagnétique), continu et ondulatoire, pour la mesure des longueurs et des temps. L'intuition d'Einstein s'est ainsi trouvée vérifiée.

Dans les années 1930, à l'époque où le programme avait été énoncé, les étalons de longueur, de masse, et de temps, étaient définis de manière essentiellement matérielle.

Pour la longueur, l'étalon international était réalisé avec une règle en alliage de platine et d'iridium. Depuis 1960, c'est à dire après la disparition d'Einstein, il est défini par la longueur d'onde d'un rayonnement électromagnétique émis dans le vide par l'atome de krypton 86. Il a remplacé l'étalon matériel.

Pour le temps, l'étalon international est, depuis 1967, défini par la période d'un rayonnement électromagnétique émis par l'atome de césium 133. Il a remplacé l'étalon de temps à base matérielle, qui était défini en prenant comme référence la durée d'une année de révolution de la terre autour du soleil en 1900.

Mais ce processus de perfectionnement par substitution de la matière par le champ n'est pas terminé. L'étalon international de masse est toujours matériel : c'est le kilogramme, défini par une certaine quantité de matière en platine déposé au Bureau International des Poids et Mesure à Sèvres (France). Mais les physiciens sont bien conscients de sa relative imprécision actuelle en comparaison des deux autres étalons.

Par conséquent, du point de vue expérimental, sur les trois étalons de mesures fondamentales de la mécanique, deux ont d'ores et déjà été adoptés, et réalisés, en privilégiant le champ au détriment de la matière, conformément à la recommandation prévisionnelle d'Einstein dans son programme. Mais il n'était pas resté seulement au stade de l'idée. Il a contribué à sa mise en oeuvre puisqu'il a été indirectement à l'origine de l'adoption des nouveaux étalons basés sur le champ électromagnétique. Dans un rapport de 1927 du comité international sur la coopération intellectuelle, qu'il avait signé conjointement avec M. Curie et H.A. Lorentz, [2], il avait préconisé « L'établissement d'un bureau international de métrologie ». Presque deux décennies plus tard, en 1955, année de la disparition d'Einstein, l'Organisation Internationale de Métrologie Légale sera effectivement créée. Elle définira les nouveaux étalons de longueur en 1960 et de temps en 1967.

Outre les étalons de longueur et de temps, pour lesquels le champ (électromagnétique, se propageant à la vitesse de la lumière) a supplanté la matière comme base de référence, la vitesse de la lumière elle-même, est définie de manière fondamentale depuis 1983, à partir des propriétés ondulatoires du champ. La 17ème conférence des poids et mesures a décidé que la vitesse de la lumière dans le vide était désormais fixée à 299.792.458 mètres par seconde, en se basant sur les mesures de fréquence et de longueur d'onde de la lumière émise par un laser hélium-néon.

Ainsi, en métrologie, le champ, continu et ondulatoire, sert de base fondamentale pour toutes les mesures de longueur et de temps de la physique.

- sa vitesse de propagation, ou vitesse de propagation de la lumière dans le vide, est définie, et sa valeur fixée, de manière fondamentale depuis 1983.

- sa nature ondulatoire, caractérisée par une longueur d'onde et par une fréquence d'oscillation, est fondamentale depuis 1960 : les mesures de toutes les longueurs et de tous les temps sont respectivement basées sur la longueur d'onde et la fréquence d'un rayonnement électromagnétique.

Par conséquent, toutes les mesures de longueurs et de temps effectuées en physique, peuvent servir de garanties expérimentales, ou de preuves, de l'importance du champ continu, à la base du programme d'Einstein.

De manière générale, les nouvelles technologies remplacent progressivement les outils matériels mécaniques traditionnels par des outils électroniques et électromagnétiques, incomparablement plus performants. Elles entraînent l'émergence d'un arrière-plan philosophique nouveau, avec, par exemple, une globalisation de notre rapport au monde réel, ou encore l'apparition d'un univers virtuel plongé dans un espace numérique.

Le programme d'Einstein comme guide.

En prenant le programme d'Einstein comme guide de recherches, il est possible d'obtenir certains résultats nouveaux, en particulier sur les bases physiques de la relativité et de la mécanique quantique. Ils peuvent être considérés comme des premiers éléments qui prouvent la pertinence du programme, et sa fécondité. Ils ont été publiés séparément et successivement dans des revues scientifiques : Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, et Annales de la Fondation Louis de Broglie, (France), Physics Letters (Europe), Journal of Physics (Grande Bretagne). Ils viennent de faire l'objet d'une première synthèse, publiée dans une revue internationale de mathématiques, Asymptotic Analysis [3].

On constate que les propriétés du champ continu, qui décrit la propagation de la lumière, fournit un cadre commun qui permet de regrouper et de retrouver les propriétés mécaniques et électromagnétiques de la matière. Dans le résumé on peut lire en effet :

« Pour un champ qui se propage à la vitesse de la lumière, les propriétés cinématiques et dynamiques des ondes presque stationnaires, de fréquence presque constante, sont formellement identiques aux propriétés mécaniques de la matière. Toutes deux sont décrites par des équations qui ont la même structure mathématique. Le principe de la conservation de l'énergie découle de la stabilité dans le temps, tandis que le principe variationnel (moindre action) découle de la stabilité dans l'espace. Les équations de la mécanique classique relativiste correspondent à l'approximation de l'optique géométrique, valable pour les fréquences très grandes. Les conditions aux limites, nécessairement associées, sont exprimées par les relations de Fourier, sous une forme homogène vis à vis du champ. Les équations de la mécanique quantique correspondent à l'approximation de l'optique ondulatoire. Les conditions aux limites sont exprimées par les relations de Heisenberg, sous une forme homogène vis à vis de la matière, par transposition des relations de Fourier ».

L'opposition d'Einstein à la mécanique quantique.

Malgré les succès, incontestables, de la mécanique quantique, et qu'il reconnaissait, Einstein avait délibérément choisi de maintenir une attitude critique à son égard, en assumant pleinement sa position de minoritaire vis à vis de la communauté scientifique. C'est donc essentiellement du point de vue de ses opposants, très largement majoritaires, que son comportement a été en général interprété.

Ainsi, dans l'ouvrage publié en hommage à Einstein pour ses soixante dix ans [4], Born lui reproche son « aversion pour la physique moderne », et Pauli regrette qu'il maintienne une opinion différente de la majorité. En réponse dans le même volume, Einstein regrette leur accusation inamicale d'« adhésion rigide à la théorie classique »

Dans un échange privé qui avait suivi, ses deux correspondants avaient été ensuite beaucoup plus critiques [5]. Pauli écrit : « Une chose dont on ne peut rien savoir existe-t-elle vraiment, on devrait s'en soucier aussi peu que de la vieille question de savoir combien d'anges peuvent tenir sur la pointe d'une épingle. Il me semble pourtant que les questions d'Einstein sont en dernière analyse toujours de ce type. » En écho, Born avait écrit: « Les lettres de Pauli me montrent à l'évidence que mon projet de réponse à l'article d'Einstein dans mon « hommage » était parfaitement insuffisant ; je n'avais pas compris ce qui était important pour lui. Me demandant aujourd'hui, après douze ans, comment ce fut possible, je ne trouve qu'une seule explication : j'étais un partisan résolu et un apôtre du jeune Einstein; je ne pouvais pas imaginer qu'Einstein, devenu vieux, avait changé d'idée....La théorie des quantaest une idée hardie,

fondamentale...Il m'était apparemment inconcevable qu'Einstein se refusât à en reconnaître la validité...qu'il persistât à prétendre que la théorie devait répondre à des questions du genre « combien d'anges peuvent tenir sur la pointe d'une épingle ? » ; car c'est à cela que revient, comme Pauli le démontre très bien, sa thèse selon laquelle un état physique doit exister objectivement. »

Les physiciens quantiques étaient d'autant plus irrités par le refus persistant d'Einstein, qu'ils reconnaissaient l'avoir pris comme modèle, et avoir suivi son exemple pour s'affranchir des idées majoritaires, et s'engager dans la nouvelle voie de ce qui allait devenir à son tour la mécanique quantique majoritaire.

Ainsi, dans le même article d'hommage à Einstein, Born avait commencé par reconnaître sa valeur, avant de regretter son entêtement. : « A mon avis, il serait l'un des plus grands physiciens théoriciens de tous les temps, même s'il n'avait pas écrit une seule ligne sur la relativité- une supposition dont je dois m'excuser tant elle est absurde. Car la conception du monde physique qu'avait Einstein ne peut pas être divisée en compartiments étanches, et il est impossible d'imaginer qu'il aurait pu laisser passer un seul des problèmes fondamentaux de l'époque...Il a vu, mieux que quiconque, l'arrière-plan statistique des lois de la physique, et il fut un pionnier dans la lutte pour la conquête des terres vierges des phénomènes quantiques. Cependant plus tard, quand de ses propres travaux émergea une synthèse des principes statistiques et quantiques qui semblait acceptable pour la majorité des physiciens, il est resté à l'écart et sceptique. Plusieurs d'entre nous regardent ceci comme une tragédie, pour lui car il poursuivit son chemin dans la solitude, et pour nous, qui avons perdu notre leader et porte-étendard. »

Pour sa part, Heisenberg rapporte comment Einstein, à qui il avait présenté en 1925 ses premières recherches fondatrices de la mécanique quantique, s'était montré critique vis à vis de leur orientation même, bien avant leur formalisation [6].

De son côté, Bohr avait considéré avec sérieux les critiques d'Einstein. Il les avait prises comme un stimulant pour préciser sa pensée et progresser dans l'établissement de ce qui deviendra la mécanique quantique [4]. « Au congrès Solvay, Einstein fut, dès le début une des figures les plus proéminentes, et plusieurs parmi nous, vinrent à la conférence avec de grandes attentes pour apprendre sa réaction au dernier stade de développement qui, de notre point de vue, allait très loin dans la clarification de problèmes que lui-même avait découverts de manière si ingénieuse...(De plus), L'implication et les critiques d'Einstein nous fournissaient une incitation, très forte pour nous, à réexaminer les différents aspects de la situation, du point de vue de la description des phénomènes atomiques. »

Il est donc certain que l'attitude critique d'Einstein vis à vis de la mécanique quantique n'est pas due à l'âge, puisqu'elle est antérieure à son formalisme, nouveau et particulier, et à son contenu épistémologique. Elle n'est donc pas due au fait que son esprit était déjà quelque peu rigidifié. Les raisons de son opposition sont beaucoup plus profondes, et de son point de vue, plus fondamentales. Elles ne sont surtout pas d'ordre personnel, puisque, en même temps que lui, Planck, Louis de Broglie, et Schrödinger, s'étaient opposés à l'orientation prise par la mécanique quantique. Or, ils avaient en commun d'avoir eu le prix Nobel pour leurs contributions déterminantes à l'origine de l'élaboration de la physique quantique.

Le programme d'Einstein est l'aboutissement d'un courant de pensée, jalonné de découvertes révolutionnaires, qui vont de la découverte de la quantification de la lumière par Planck, à la longueur d'onde de l'électron, et à ses propriétés ondulatoires par Louis de Broglie, conduisant au microscope électronique, et à l'équation d'onde de Schrödinger, à la base de la mécanique ondulatoire et de la mécanique quantique. Tout le long de ce courant, la contribution d'Einstein est déterminante, directement d'une part, avec l'introduction du photon, et avec la relativité, qui sert de base incontournable à la physique quantique, et indirectement d'autre part, dans sa participation à l'émergence de la mécanique ondulatoire.

L'évolution historique.

Au début des années 1920, le contenu physique de la Relativité Générale qu'il venait d'élaborer, avait peu à peu convaincu Einstein que le champ continu devait jouer un rôle fondamental en physique. Il apparaissait comme plus important et plus général que l'énergie localisée, associée à la matière dans les particules ou à la lumière dans les quanta. Cela l'avait conduit à un véritable renversement de paradigme conceptuel et à un revirement opératoire.

Du point de vue opératoire, dans les articles de 1905, Einstein avait commencé par subordonner la théorie à l'expérience. C'était pour décrire les propriétés mécaniques de la matière chargée électriquement, en mouvement relatif dans un champ magnétique, qu'il avait remis en cause nombre de notions considérées jusqu'ici comme acquises, comme celles de temps absolu et de la simultanéité des mesures, pour élaborer la théorie de relativité restreinte. C'était pour expliquer l'effet photoélectrique expérimental, qu'il avait admis que la lumière était constituée de particules, les quanta de lumière, désignés ensuite comme photons. La primauté de l'expérience sur la théorie y est explicitement soulignée par le terme *heuristique* dans le titre même de l'article.

Dans l'élaboration de la mécanique quantique, Bohr reconnaît avoir suivi l'exemple d'Einstein. [4] « La nécessité, en physique atomique, d'un examen renouvelé du fondement pour un usage non ambigu des idées physiques élémentaires, rappelle dans un certain sens la situation qui avait conduit Einstein à sa révision originale des bases de toutes les applications des concepts d'espace-temps qui, par son insistance sur l'importance primordiale du problème de l'observation, a conduit à une telle unité dans l'image de notre monde. » Quant à Heisenberg, il avait directement fait part en 1925 à Einstein de son étonnement, pour son changement de méthode, et de sa perplexité. [6]

« A. Einstein : Vous ne croyez tout de même pas sérieusement que l'on ne peut inclure dans une théorie physique que des grandeurs observables.

W. Heisenberg. Je pensais que c'est vous, précisément qui avez fait de cette idée la base de votre théorie de la relativité. Vous avez souligné qu'on ne peut pas parler de temps absolu, car on ne peut pas observer le temps absolu...

A.E : peut-être en effet ai-je utilisé cette sorte de philosophie. Mais il n'en est reste pas moins qu'elle est absurde...Mais sur le plan des principes il est tout à fait erroné de vouloir baser une théorie uniquement sur des grandeurs observables. Car en réalité, les choses se passent de façon exactement opposée. C'est seulement la théorie qui décide de ce qui peut être observé. »

Einstein avait donc opéré un revirement complet de mode opératoire entre 1905 et 1925, allant jusqu'à critiquer fortement sa propre approche précédente. Il ne faisait alors que rester égal à lui-même, c'est à dire un chercheur individuel, n'hésitant pas à remettre en cause les idées reçues, à commencer par les siennes. Il n'est donc pas étonnant qu'il n'était pas toujours facile de le suivre. Dans son cheminement intellectuel, était-il, comme il le pensait, en avance sur les autres, ou au contraire, comme les physiciens quantiques en étaient persuadés, en retard sur eux? Ce qui est certain, c'est qu'il ne s'agissait pas de sa part, seulement de spéculations pures, puisqu'il s'appuyait sur des résultats incontestables : l'élaboration des équations de la théorie de la Relativité Générale, avec leurs vérifications expérimentales très fines. Ce qui est également certain, c'est que, au vu d'un tel revirement de sa part, on pouvait éventuellement l'accuser de versatilité, mais certainement pas d'« aversion » envers, ou d'« adhésion rigide » à, une méthode déterminée.

***Du point de vue conceptuel*, le renversement de paradigme au profit du rôle fondamental joué par le champ continu en physique, auquel la Relativité Générale l'avait conduit, et culminant dans l'énoncé de son programme, explique la divergence avec ses contemporains physiciens.**

L'évolution générale de la physique.

Un bref aperçu de l'évolution générale de la physique, nous permet de situer les positions successives qu'Einstein avait évoquées nombre de fois.

Pendant plus d'un siècle, entre le 17^{ème} et le 18^{ème} siècles, avec les travaux de Newton, le paradigme corpusculaire s'était imposé auprès des physiciens, pour interpréter les équations de la mécanique et de l'optique. La matière et la lumière étaient constituées, en définitive et de manière ultime, de particules entourées de vide. Les particules étaient les constituants fondamentaux de l'univers.

Au 19^{ème} siècle, un basculement vers le caractère ondulatoire de la lumière s'est opéré avec les travaux de Young sur les interférences, mais surtout avec ceux de Fresnel sur la diffraction. L'optique ondulatoire, avec la propagation par ondes continues, expliquait l'ensemble des propriétés de la lumière. L'optique géométrique, avec la propagation par rayons, est alors devenue un cas particulier, valable dans l'approximation des longueurs d'ondes très petites. Les corpuscules de lumière ont alors disparu. Les équations de Maxwell, qui synthétisaient les actions électriques et magnétiques sous la forme d'un champ électromagnétique continu se propageant à la vitesse de la lumière, ont ensuite confirmé cette approche, en identifiant la lumière à une onde électromagnétique. Les actions électriques ne s'exerçaient plus à distance de manière instantanée, mais de proche en proche et progressivement. Comme une onde représente une déformation qui se propage dans un milieu continu, il fallait supposer l'existence d'un tel milieu pour l'électromagnétisme : c'était l'éther.

De son côté, la matière était toujours considérée comme un assemblage de points matériels: le fait qu'elle se déplace dans un milieu dense, et non dans le vide, posait des problèmes d'entraînement et de freinage qu'on cherchait à mettre en évidence par différents moyens.

Ainsi, la physique du 19^{ème} siècle faisait coexister deux entités physiques distinctes et hétérogènes: le champ continu, manifestation physique des interactions électromagnétiques qui se propageaient à la vitesse de la lumière, et la matière localisée, support à la fois des masses et des charges électriques.

Au 20^{ème} siècle, on a commencé à se diriger vers un nouveau paradigme corpusculaire après la découverte de l'électron en 1897 et de la quantification de l'énergie du rayonnement électromagnétique par Planck en 1900. Pour sa part, le courant atomique allait dans le même sens avec les travaux convergents de chimie quantitative, de thermodynamique statistique, de théorie cinétique des gaz. La découverte des particules chargées, confirmait que la matière était formée d'éléments discontinus. Les différentes approches fournissaient même les moyens d'en préciser les dimensions.

C'est dans ce contexte que se situent les premiers travaux importants d'Einstein en 1905. Il s'était alors positionné à l'avant-garde du nouveau courant corpusculaire. « Mon but principal était de trouver des faits qui garantiraient le mieux possible l'existence des atomes de dimension finie bien déterminée... L'accord entre ces considérations et l'expérience, conjointement avec la détermination par Planck de la vraie dimension moléculaire des lois du rayonnement (aux hautes températures), ont convaincu les sceptiques, qui étaient assez nombreux à cette époque, de la réalité des atomes. ».[4]

C'est ainsi qu'il avait expliqué l'effet photoélectrique en introduisant l'idée que la lumière devait être considérée comme constituée de particules, désignées ensuite par le terme de photons. L'aspect corpusculaire sous-jacent de la matière est implicite et nécessairement présent en relativité restreinte, même s'il n'apparaît pas directement [7]. Le modèle de particule dans le vide s'est trouvé conforté par la disparition de l'éther qu'elle a entraîné chez les physiciens, à cause de l'invariance de la vitesse de lumière dans les déplacements de la matière, et en conformité avec l'expérience négative de Michelson-Morley pour mettre en évidence le mouvement de la Terre par rapport à l'éther. Einstein écrivait alors: « La seule issue qui s'offre, est de considérer comme admis le fait que l'espace a la propriété physique de transporter les ondes électromagnétiques, sans se soucier beaucoup de la signification de cette affirmation. Nous pouvons toujours nous servir du mot « éther », mais seulement exprimer une certaine propriété physique de l'espace. » [1] Pour bien montrer le paradigme corpusculaire sous-jacent, rappelons que l'article sur l'effet photoélectrique, où la lumière devait être considérée comme constituée de particules, avait précédé de quelques mois seulement celui sur la relativité. De plus, l'utilisation de la lumière pour les mesures précises en

relativité restreinte, nécessite qu'elle soit constituée de signaux extrêmement brefs, et localisés dans les rayons, à la manière de particules ponctuelles sur leur trajectoire.

Par conséquent, Einstein avait commencé ses recherches en étant un partisan résolu des particules. La première théorie de la relativité était une théorie cohérente du discontinu, à la fois pour la matière et pour la lumière : l'espace, débarrassé de l'éther, devait être considéré comme vide, et sans aucune propriété physique. Seules les particules de lumière et de matière, douées de propriétés physiques, y avaient une existence. Elles étaient séparées par du vide. Les publications d'Einstein en 1905 ont très fortement contribué à faire admettre que la matière et la lumière existaient sous une forme discontinue.

Une décennie plus tard, avec la théorie de la relativité générale, un basculement complet s'est effectué dans son esprit. Cette fois, c'est l'espace qui s'étendait entre les masses matérielles qui jouait un rôle fondamental. Einstein n'a pas été jusqu'à réintroduire formellement l'éther, mais il a été obligé d'attribuer des propriétés physiques à l'espace. « L'espace vide n'est ni homogène, ni isotrope,...ces faits ont définitivement écarté la conception que l'espace serait physiquement vide. Par là, la notion d'éther a de nouveau acquis un contenu précis, contenu certes qui diffère notablement de celui de l'éther de la théorie ondulatoire mécanique de la lumière. L'éther de la théorie de la relativité générale est un milieu privé de toutes les propriétés mécaniques et cinématiques, mais qui détermine les phénomènes mécaniques et électromagnétiques. » [1]

Mais du coup, l'unité conceptuelle sous jacente de la nature était compromise. La théorie de la relativité générale fait en effet coexister deux entités physiques distinctes et hétérogènes: le champ continu, manifestation physique des interactions qui se propagent à la vitesse de la lumière, et la matière localisée, support à la fois des masses et des charges électriques, et qui se déplace à une vitesse toujours inférieure à la vitesse de la lumière. C'est pourquoi Einstein restait insatisfait. Pour lui, c'était désormais le continu qui devait prévaloir partout, et servir de base d'unification générale. « mais on ne saurait prétendre que les parties de la relativité générale qui peuvent aujourd'hui être considérées comme achevées aient doté la physique de fondements complets et satisfaisants ; en premier lieu, le champ total y apparaît être composé de deux parties sans lien logique: la gravitation et l'électromagnétisme... Pourtant, ce qui me paraît certain, c'est que dans une théorie cohérente, ne doit apparaître, à côté du concept de champ, le concept de particule. La théorie toute entière doit être basée uniquement sur des équations aux dérivées partielles, et leurs solutions sans singularité. » [1]

Quel peut être le sens de l'opposition d'Einstein ?

Dans ces conditions, quel peut être le sens de l'opposition d'Einstein à la mécanique quantique, et en quoi son programme peut-il être utile en suscitant des connaissances nouvelles ?

Les critiques d'Einstein.

Du point de vue conceptuel, les critiques d'Einstein ne portaient pas sur l'existence des particules, mais sur leur fondement en relation avec le champ continu. A son époque, il ne connaissait pas les différentes familles de particules quantiques, découvertes depuis, ainsi que leurs nombreuses caractéristiques. Par contre, il connaissait l'électron et le positron, le proton, le neutron, le photon. Au-delà de leurs différences de masse, de charge, de spin, elles sont toutes caractérisées par une localisation d'énergie qui subsiste dans leurs déplacements, en vérifiant, pour les particules matérielles, la relation $E=mc^2$. Habituellement, on les caractérise en prenant pour référence non leur masse mais leur énergie comme grandeur physique, exprimée en électron-volts : elles sont alors toutes de même nature. C'est pour cette raison que, malgré leur différence de nature physique, et malgré la très grande diversité de leurs propriétés caractéristiques, elles

peuvent interagir entre elles en échangeant leur énergie. Aussi, dans son programme, la particule n'est pas différenciée à l'intérieur de la matière. Au-delà de leur diversité, c'est leur unicité commune sous-jacente que recherchait Einstein. « Mon propre intérêt dans ces années, était moins concerné par les conséquences détaillées des résultats de la loi de Planck, aussi importants fussent-ils. Ma question essentielle était : quelle conclusion générale peut-on tirer de la formule du rayonnement concernant la structure même du rayonnement, et plus généralement, le fondement électromagnétique de la physique » [1]. De ce point de vue, le questionnement d'Einstein reste toujours actuel lorsque, au-delà des différences entre les familles de particules quantiques, on s'interroge sur *La* particule comme concentration locale d'énergie.

Du point de vue formel, les critiques d'Einstein portaient, non pas sur le développement et les résultats de la mécanique quantique, mais sur son origine; non pas sur les conséquences de ses équations fondamentales, mais sur leur fondement. D'ailleurs, ces mêmes critiques s'étendaient également à la relativité, aussi bien restreinte que générale, puisqu'il cherchait à tout synthétiser dans une théorie unitaire. [Pour mémoire, on peut rappeler que la gravitation est toujours rebelle à toute unification avec les autres interactions, en particulier avec l'électromagnétisme, et que le graviton, comme particule, n'a toujours pas été mis en évidence expérimentalement. Jusqu'à preuve du contraire, la gravitation est donc toujours une théorie classique, décrite par un champ continu, au sens d'Einstein.]

Des clés pour comprendre l'opposition d'Einstein.

Pour comprendre l'opposition d'Einstein à la mécanique quantique, il faut se référer à ses différentes explications, mais surtout aux mots-clés d'*heuristique* et de *conjecture* qu'il avait employés dans ses deux articles de 1905, fondateurs respectivement de la théorie quantique, et de la relativité, et à celui de *structure*, qu'il avait alors utilisé, et ensuite explicitement cité pour la relativité générale.

-Le premier mot-clé, est l'adjectif *heuristique*.

Il est présent dans le titre même du premier article, « *Sur un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière* ». Alors que la lumière était considérée comme une onde continue, Einstein avait admis qu'elle se comportait *comme si* elle était constituée de particules, les quanta d'énergie. Cela permettait d'expliquer l'effet photoélectrique. Mais cela ne prouvait pas leur existence effective, ou réelle, puisqu'il ne pouvait pas annuler tout l'acquis théorique et expérimental qui justifiait le comportement ondulatoire de la lumière. Par la suite, les quanta de lumière ont été considérés comme des particules, les photons. Pour sa part, Einstein s'en est toujours tenu au caractère heuristique: il considérait le problème de la dualité champ/particule comme ouvert.

-Le deuxième mot-clé est celui de *conjecture*.

Il figure dans l'article de 1905, fondateur de la relativité: "Les lois de l'électrodynamique et de l'optique seraient également valables pour tous les systèmes de référence dans lesquels les équations de la mécanique sont valables. Nous érigerons cette *conjecture* en postulat ... »

En mathématique, une conjecture admet comme vraie une relation que l'on peut vérifier dans ses applications, mais que l'on ne sait pas démontrer dans le cas général. C'est par un saut dans le raisonnement, et donc explicitement sous forme de *conjecture*, qu'Einstein avait admis que la matière neutre en mouvement se comportait comme la matière chargée électriquement, qui était décrite par les équations de Maxwell. C'est ainsi que la vitesse de la lumière, de nature électromagnétique, intervenait de manière générale. C'est donc par anticipation d'une démonstration, toujours en attente, que la vitesse de la lumière joue le rôle de constante fondamentale en relativité. Le terme *conjecture*, explicite dans l'article fondateur de 1905, explique l'attitude d'Einstein, qui demeurera toute sa vie en attente d'une solution satisfaisante sur le fondement de la relativité. Pour lui, la rupture formelle, ou logique, de la relativité vis à vis de la physique classique, était provisoire.

(Par exemple, depuis le 17^{ème} siècle, Fermat avait énoncé dans une conjecture qu'il est impossible de généraliser la relation $3^2 + 4^2 = 5^2$ pour d'autres nombres entiers, avec des exposants plus grand que deux. Chacun a pu la vérifier sur de nombreux cas, au besoin par ordinateur. Il a fallu cependant attendre plus de trois siècles, pour qu'elle soit démontrée, et qu'elle passe du statut de conjecture à celui de théorème.)

-Le troisième mot-clé est celui de *structure*.

Il a été utilisé par Einstein pour caractériser la relativité générale. Ainsi, précise-t-il, « Les équations de la gravitation ont la forme de lois de *structure*, qui est exigée pour toutes les lois physiques depuis les grandes conquêtes de la théorie du champ. » Mais, de manière implicite, le concept est à la base des deux articles de 1905. En effet, c'est en s'appuyant sur l'identité des structures mathématiques de leurs équations respectives qu'il a pu étendre celles de l'électromagnétisme à la mécanique, d'une part, pour fonder la relativité, et celles de la mécanique à l'optique, d'autre part, pour fonder la particule quantique.

Critiques constructives.

Les mots clés, d'*heuristique*, de *conjecture* et de *structure* montrent qu'Einstein a conservé une certaine distance, vis à vis des révolutions quantique et relativiste, qu'il avait engagées en 1905. Ils justifient son attitude, restée insatisfaite, à l'égard de leurs fondements.

Celui d'*heuristique* traduit son attitude non entièrement déterminée en faveur d'une conception ondulatoire ou corpusculaire. Du point de vue du comportement physique, et de sa description mathématique, tout se passe *comme si*. Certes, la mécanique quantique a également adopté une position *heuristique*, et les témoignages de ses initiateurs comme Heisenberg ou Bohr, montrent que le précédent établi par Einstein n'y était pas étranger. C'est d'ailleurs pourquoi, afin d'éviter de rester prisonnière d'une conception, elle s'est affranchie de la signification physique des équations en les considérant comme abstraites.

Celui de *structure* va de pair avec le fait qu'Einstein, a, pour sa part, toujours attaché une grande importance à la signification physique des équations et à leur représentation pour décrire les phénomènes. "Les théories physiques essaient de former une image de la réalité et de la rattacher au vaste monde de nos impressions sensibles. Ainsi, nos constructions mentales se justifient seulement si, et de quelle façon, nos théories forment un tel lien..... Aussi longtemps que nous nous occupons seulement d'idées physiques fondamentales, nous pouvons nous passer du langage mathématique.Mais pour suivre ces idées de près, il faut être en possession d'une technique très raffinée d'investigation. Les mathématiques comme instrument de raisonnement sont nécessaires si nous voulons tirer des conclusions qui peuvent être comparées avec l'expérience » [1]. Cela permet, en exploitant leur analogie ou identité de *structure*, de les transposer, d'un domaine physique à un autre, et d'atteindre des propriétés physiques plus profondes. C'est ainsi qu'il avait transposé les lois de l'électromagnétisme et de l'optique à celles de la mécanique pour fonder la relativité, et que, inversement, il avait transposé les lois de la mécanique à celles de l'optique pour introduire le photon. Dans les deux cas, le but était de retrouver, et d'expliquer, des propriétés expérimentales : le comportement de la matière électriquement chargée dans son mouvement par rapport à un champ magnétique, et le comportement de la lumière dans l'effet photoélectrique.

Celui de *conjecture* traduit l'attitude critique et insatisfaite d'Einstein vis à vis des fondements de la mécanique quantique, alors même qu'il reconnaissait la fécondité de son formalisme et la confirmation expérimentale de ses conséquences théoriques. C'est justement le propre d'une conjecture mathématique, d'être vérifiée dans toutes ses applications, bien que son énoncé ne repose sur aucune démonstration, et

soit arbitraire. Elle est admise, sous réserve que l'on ne trouve aucune conséquence directe, la plus minime, qui la contredise. Dans ce cas elle est invalidée, même si, auparavant, de très nombreux d'exemples étaient venus la justifier. Dans cette perspective, dès lors qu'on admet, comme Einstein, que « la science n'est pas, et ne sera jamais, un livre achevé », sa déclaration sur le caractère provisoire de la mécanique quantique trouve sa légitimité. « Cette double nature du rayonnement (et des corpuscules matériels) est une propriété majeure de la réalité, qui a été interprétée par la mécanique quantique avec succès d'une façon ingénieuse et stupéfiante. Cette interprétation, qui est considérée comme essentiellement finale par presque tous les physiciens contemporains, m'apparaît seulement comme une issue temporaire. » Bien mieux, l'attitude d'Einstein est conforme à celle des physiciens au cours de l'histoire. Il leur avait suffi d'un petit résultat expérimental contradictoire, à propos d'un phénomène marginal, pour contre-balancer toutes les nombreuses validations expérimentales précédentes, et leur faire abandonner les théories les mieux établies, comme l'optique géométrique au profit de l'optique ondulatoire, la mécanique classique de Newton au profit de la mécanique relativiste, la mécanique céleste de Newton au profit de la relativité générale, l'électrodynamique classique, au profit de l'électrodynamique quantique, l'électron corpusculaire au profit de l'électron ondulatoire, et ensuite au profit de l'électron quantique onde et particule, etc. Toutefois, dans tous les cas, les acquis précédents n'avaient pas été annulés mais intégrés en bloc, sous la forme d'une approximation particulière dans la nouvelle approche.

Le mot-clé de *conjecture* fournit un éclairage positif sur le sens de l'opposition d'Einstein. De sa part, il ne s'agissait pas de nier la validité de la mécanique quantique, de la rejeter en l'éliminant ou en la détruisant, mais de la dépasser en l'intégrant. C'était bien le sens de sa recherche d'une théorie unitaire. Il permet de comprendre que l'on puisse s'interroger sur les fondements de la mécanique quantique sans remettre en cause l'ensemble de toutes ses conséquences théoriques et de leurs vérifications expérimentales.

Pour le programme d'Einstein, les équations de base ne sont que des conjectures au sens des mathématiciens. Elles ne font qu'exprimer les conséquences logiques découlant de propriétés communes sous-jacentes plus profondes, mais encore inconnues, de la Nature. Le lien est provisoirement inaccessible. C'est pourquoi on ne sait pas établir les équations de base en les démontrant.

Références.

[1] Albert EINSTEIN & L. Infeld **The Evolution of Physics: The growth of Ideas From Early Concepts to Relativity and Quanta**, N.Y. 1938 , traduction française Flammarion Paris, p 8, 33, 35, 144, 164, 229, 232, 258

[2] **Science, new serie, vol 65, pp 415-417.**

[3] C. Elbaz., Asymptotic Analysis, Vol 68; 1-2; p 77-88 (2010). Dynamic properties of almost monochromatic standing waves.

[4] Albert EINSTEIN : **philosopher, scientist ; Cambridge university press, London, 1949 & 1970;Autobiographical notes, Volume I p 3 à 94,**

[5] **La Recherche,20, fév. 1972, p 143]**

[6] **W.Heisenberg : La partie et le tout, Albin Michel 1972, V 87-102”**

[7] L.Landau et E.Lifchitz, Théorie du Champ, Mir, 1966, p 184

[8] A. Einstein, L'éther et la théorie de la relativité ; Gauthier-Villard Paris 1963 p 9.

Mathématiques et sciences humaines : problèmes et interactions

Jean-Pierre Desclés
 Professeur (Informatique appliquées aux sciences humaines)
 Université de Paris-Sorbonne

Résumé de l'intervention.

L'interaction entre les mathématiques et les sciences humaines (Maths-SHS) est lointaine : les Pythagoriciens et les proportions rationnelles, les recherches sur la musique et l'arithmétique ; les motifs géométriques réguliers dans les décorations chez les arabes ; la théorie de carillons... D'un point de vue plus moderne, on peut citer l'invention du calcul des probabilités avec B. Pascal ; la théorie des jeux avec J. von Neumann ; l'utilisation des groupes finis et les structures de parenté (C. Lévi-Strauss, A. Weil) ; la théorie des groupements en psychologie et des groupes de transformations (J. Piaget, J.B. Grize ; L. Frey) ; la loi de Zipf-Mandelbrodt en linguistique ; la théorie des grammaires formelles et des automates (N. Chomsky et M.P. Schützenberger)... Nous dresserons un panorama rapide qui sera présenté sous la forme d'une « carte » établissant les interactions actuelles les plus importantes entre d'une part, les sciences humaines (ethnologie, anthropologie, linguistique, psychologie cognitive, sociologie, philosophie) et d'autre part, certains secteurs mathématiques (graphes, structures - ordonnées, algébriques, topologiques... - ; les logiques - classique et non classiques -, l'informatique et les statistiques et probabilités - analyse des données, lois statistiques ...-.

Dans la seconde partie, à propos de l'analyse de la sémantique cognitive, de la psychologie cognitive et de la philosophie, nous développerons brièvement, quelques aspects actuels liés à mes travaux plus personnels touchant directement aux interactions Maths-SHS sur les thèmes suivants :

1°) temporalité et spatialité analysées à l'aide d'opérations topologiques et quasi-topologiques ;

2°) la logique combinatoire typée de Curry, qui est une logique d'opérateurs et de *compositions intrinsèques* d'opérateurs, permet de montrer comment une unité complexe, d'un certain niveau d'analyse, est le résultat d'un processus de synthèse d'un schème interprétatif d'un niveau plus profond, permettant ainsi de construire une théorie de la signification. Nous prendrons des exemples pris dans : (a) le domaine du temps et des aspects dans les langues ; (b) le domaine de la philosophie (analyse de l'*unum argumentatum* d'Anselme) ;

3°) Les problèmes de la catégorisation, formalisés par une nouvelle logique, la Logique de la Détermination des Objets (LDO), où l'on raisonne sur des objets plus ou moins indéterminés, pour rendre compte de ce qui est considéré comme typique et comme atypique. Ces différents thèmes seront simplement évoqués sans développements techniques. Nous en dégagerons quelques principes épistémologiques nécessaires à toute interdisciplinarité, où mathématiques, représentations logiques, et traitements informatiques interviennent dans la modélisation de problèmes. Nous conclurons sur les problèmes pragmatiques actuels des Maths-SHS qui, sous la pression de l'informatique (Web-sémantique, « ontologies », systèmes à apprentissage, applications à très court terme, course aux publications ...), tendent à préférer utiliser les logiciels et algorithmes actuels, sans revenir sur une réflexion plus approfondie sur les fondements des disciplines qui sont mises en relation .

NB : Un développement très complet de l'analyse de la notion de variable d'un point de vue sémiotique et formel par Jean-Pierre DESCLES est accessible sur la toile à l'adresse suivante : <http://www.ehess.fr/revue-msh/pdf/N174R1243.pdf>