

La théorie quantique des champs et le problème de la matière

Matière et matérialisme

Gilles Cohen-Tannoudji
gicotan@club.fr

IHPST Octobre – novembre 2008

Matière et matérialisme

- Interdépendance des conceptions de la matière, de l'espace et du temps
- Diversité des conceptions de la matière en physique.
 - Matière "pondérable" et mouvement
 - États de la matière
 - Matière, espace et temps
 - Matière, forces et interactions
 - Matière et masse, énergie, entropie
- Conceptions en évolution
 - La lumière est-elle une activité de la matière (éther) ou une matière (conception corpusculaire)?
 - Matérialité de la lumière: la lumière subit la gravitation au même titre que la matière pondérable
 - Matière et information: l'information est-elle matérielle, la matière est-elle informationnelle?

- Le matérialisme philosophique
 - Selon le matérialisme philosophique, la matière désigne l'ensemble de la réalité objective, existant indépendamment de et antérieurement à la connaissance que l'on peut en avoir
 - Cette réalité est, en droit et en principe, intelligible, même si cette intelligibilité est toujours partielle, provisoire et révisable.
 - La seule alternative à ce matérialisme est le solipsisme

- Le matérialisme d'Einstein

"Les expériences sensibles forment la **matière** qui nous est donnée; mais la **théorie** qui doit les interpréter **est faite par l'homme.**"

(...)"Ce que nous appelons physique comprend ce groupe de sciences de la nature qui basent leurs concepts sur des **mesures**, et dont les concepts et les propositions se prêtent à être **formulés mathématiquement.**"

Einstein, *Les fondements de la physique théorique*, in *Conceptions scientifiques*, p. 77-78, Champs Flammarion Paris 1990

"*Il y a quelque chose comme l'état réel d'un système qui existe objectivement et indépendamment de toute observation ou mesure, et qui peut, en principe, se décrire par les moyens d'expression de la physique.*"

Pour ceux qui sont prêts à laisser choir cette thèse, ce sera "*une rude tâche d'échapper au solipsisme.*"

A. Einstein, *remarques préliminaires sur les concepts fondamentaux*, in *Louis de Broglie, physicien et penseur*, p. 7, André Georges, Editeur, Albin Michel, 1953

- Critique einsteinienne des concepts classiques de matière, d'espace et de temps
 - Temps **subjectif** (ordre temporel)
 - Changement **d'état** et changement de **position** ("*corrigés par des mouvements arbitraires de notre corps*" -Poincaré-)
 - **Objet matériel**: pas de changement d'état, seulement des changements de position; **objet pratiquement rigide**
 - Notion de position relative, notion de contact, prolongement quasi-rigide
 - **Ensemble des prolongements quasi-rigides=espace infini**
 - Corps de référence et géométrie

- Descartes et la **géométrie**: le carré de la longueur d'un segment est indépendant de sa position et de celle de tous les autres corps.
- **Géométrie euclidienne posée de façon axiomatique**
- *Erreur funeste* de l'oubli de la base empirique de la géométrie euclidienne (préparation à la théorie de la relativité)

– Temps **objectif**

- **Horloges locales** (analogues aux corps rigides)
- Événements dans tout l'espace (avant la relativité, confusion entre ce qui est simultanément vu et ce qui arrive simultanément)

Le(s) problème(s) de la matière

- **Les antinomies:** *"Une antinomie n'est pas simplement une question difficile, encore sans réponse, c'est une question à laquelle il semble qu'on ne puisse répondre sans se mettre en contradiction avec soi-même."* (Ferdinand Gonseth, préface au livre de G. Lemaître, *L'Hypothèse de l'Atome Primitif*)
- **Les antinomies kantienne:**
 - *"Le monde a un commencement dans le temps et il est aussi limité dans l'espace"*
 - *"Le monde n'a ni commencement dans le temps, ni limites dans l'espace, mais il est infini aussi bien dans le temps que dans l'espace."*
- **Le problème de la réalité:** *"La véritable difficulté tient à ce que la physique est une sorte de métaphysique: la physique décrit la "réalité". Or nous ne savons pas ce qu'est la "réalité", nous ne la connaissons qu'à travers la description qu'en donne la physique!"* (Einstein, lettre à Schrödinger, 19 juin 1935)

- **L'identité des constituants élémentaires de la matière:** *"La Science est incompétente lorsqu'il s'agit de raisonner sur la création de la matière elle-même à partir de rien. Nous avons atteint la limite de notre faculté de pensée lorsque nous avons admis que parce que la matière ne peut pas être éternelle et auto-existante elle doit avoir été créée."* (Maxwell, *Molecules*, Conférence présentée à Bradford devant la *British association*.)
- **Le dualisme du champ et du point matériel:** *"Ce qui me paraît certain, c'est que dans une théorie de champ cohérente, ne doit pas apparaître à côté du concept de champ, le concept de particule. La théorie tout entière doit être basée uniquement sur des équations aux dérivées partielles et leurs solutions sans singularités."* (Einstein, *La physique et la réalité*, 1936)
- **"Dieu ne joue pas aux dés":** *"Y a-t-il réellement un physicien qui croie que nous n'arriverons jamais à nous faire une idée de ces changements importants dans les systèmes individuels, de leur structure et de leurs connexions causales, et cela malgré le fait que que ces processus individuels nous sont devenus si proches grâce aux merveilleuses inventions de la chambre de Wilson et du compteur Geiger? Certes cela est sans contredit logiquement possible, mais c'est tellement contraire à mon instinct scientifique que je ne peux pas renoncer à la recherche d'une manière de voir plus complète."* (Einstein, *La physique et la réalité*, 1936).

- **Le point matériel:** *"La notion de point matériel est fondamentale pour la mécanique. Si maintenant nous voulons obtenir la mécanique d'un objet matériel – et, rigoureusement parlant, tout objet "perceptible par nos sens" est de cette catégorie – alors la question suivante se pose: Comment devons-nous nous représenter l'objet constitué par des points matériel et quelles forces devons-nous supposer comme agissant entre eux?"*
- **Le triomphe de la mécanique:** *"A mon avis, le plus grand exploit de la mécanique de Newton réside dans le fait que son application systématique a conduit à dépasser ce point de vue (phénoménologique), particulièrement dans le domaine des phénomènes calorifiques. Ceci s'est produit grâce à la théorie cinétique des gaz et, d'une manière générale, grâce à la mécanique statistique." (Einstein, *La physique et la réalité*, 1936)*
- **La relativité et le dépassement du concept de point matériel:** *"It appears therefore more natural to think of physical reality as a four-dimensional existence, instead of, as hitherto, the evolution of a three-dimensional existence." (Einstein, appendice n° 5 à *relativité*, 1952)*

- **La relativité et « l'existence quadri-dimensionnelle »**: *"It appears therefore more natural to think of physical reality as a four-dimensional existence, instead fo, as hitherto, the evolution of a three-dimensional existence."* (Einstein, appendice n° 5 a *relativité*, 1952)
 - Passage de la mécanique - mouvement d'une « existence tri-dimensionnelle », $x(t), y(t), z(t)$ – à la théorie des champs relativiste des champs – « existence quadri-dimensionnelle », $\phi(x, y, z, t)$
 - Le « point matériel d'espace-temps » est un événement survenant à l'instant t au point de coordonnées spatiales x, y, z .

Histoire de la conception de la matière en physique

- **Le paradigme newtonien**

- Matière "pondérable" = corps rigides (à la limite, ensemble de **points matériels**)
- **Espace absolu**
- **Temps absolu. Pas de flèche du temps**
- **Forces** : données extérieures à la théorie ("hypotheses non fingo") Gravitation : **action instantanée à distance**
- Lumière : **conception corpusculaire**
- Mathématiques : "langage dans lequel est écrit le livre de la Nature"

- **Thermodynamique et physique des états de la matière**

- Energie et entropie et les deux principes de la thermodynamique (Carnot et Clausius)

- Théorie cinétique (ou moléculaire) de la matière (Maxwell et Boltzmann)

- Thermodynamique statistique

- Atomisme : les atomes sont les points matériels
- Problème de l'observabilité des atomes
- Entropie et flèche du temps

- **La théorie électromagnétique de la lumière**
 - Faraday et le concept de **champ**
 - **Synthèse** de l'électricité, du magnétisme et de l'optique dans la théorie de **Maxwell**
 - Reformulation de la théorie et vérification expérimentale par **Hertz**
 - Triomphe de la **conception ondulatoire de la lumière**
 - Le modèle de **l'éther** et ses difficultés

- **Bilan de la conception de la matière à la fin du 19^e siècle**
 - Succès de la théorie de la gravitation universelle
 - Axiomatisation de la mécanique rationnelle (mécanique analytique et formulation lagrangienne)
 - Deux composantes dans la matière :
 - Les atomes ou molécules, assimilés à des points matériels de masse et éventuellement de charge invariable
 - L'éther, milieu hypothétique aux étranges propriétés supposé porter les ondes électromagnétiques ou lumineuses
 - Conception classique de l'espace et du temps
 - Conception subjectiviste de la flèche du temps (démon de Laplace)

– Des problèmes non résolus

- Avance du périhélie de Mercure
- Effet photo-électrique
- Loi du rayonnement du corps noir
- Chaleur spécifique des corps poly-atomiques
- Inobservabilité des atomes ou molécules
- Impossibilité de mettre en évidence le mouvement relativement à l'éther

- **La révolution de 1905**
 - L'année miraculeuse d'Einstein
 - Mars 1905 : Effet photoélectrique (les quanta d'énergie)
 - Mai 1905 : Mouvement brownien (la réalité des atomes)
 - Juin 1905 : Electrodynamique des corps en mouvement (la relativité)
 - Deux avancées majeures
 - La réalité des atomes
 - La matérialité de la lumière

Le mouvement brownien et la réalité des atomes



"Si le mouvement discuté ici peut effectivement être observé (en même temps que ses lois), alors la thermodynamique classique ne pourra plus être considérée comme applicable avec précision à des corps visibles au microscope; une détermination exacte des dimensions réelles des atomes sera alors possible. Si, par contre, la prédiction de ce mouvement se révélait incorrecte, alors un argument de poids pourrait être opposé à la théorie cinétique moléculaire de la chaleur." [Einstein, Ann. D. Phys. 17, p. 549, 1905](#)

- Matérialité de la lumière et relativité
 - La relativité selon Poincaré et Lorentz
 - Principe de relativité
 - Invariance de Lorentz des équations de Maxwell (contraction des longueurs, dilatation du temps)
 - Dualité du temps (temps "vrai", par rapport à l'éther, et temps "local")
 - Maintien de l'éther
 - Modèle de l'électron déformable

– La relativité restreinte

- « La théorie de la **relativité restreinte** est basée sur deux **suppositions fondamentales**:
 - Les lois physiques sont les mêmes dans tous les systèmes de coordonnées en mouvement uniforme les uns par rapport aux autres;
 - La vitesse de la lumière a toujours la même valeur.
- De ces **suppositions, pleinement confirmées par l'expérience**, sont déduites les propriétés des règles et des horloges en mouvement, où la longueur des premières et le rythme des dernières changent avec la vitesse.
- **La théorie de la relativité modifie les lois de la mécanique.** Les anciennes lois ne sont pas valables si la vitesse d'une particule s'approche de celle de la lumière. Les nouvelles lois, telles qu'elles ont été formulées par la théorie de la relativité, ont été confirmées avec éclat par l'expérience.
- Une autre conséquence de la théorie de la relativité (restreinte) est la **connexion entre la masse et l'énergie**. La masse est énergie et l'énergie a une masse. Les deux lois de conservation sont combinées en une seule, la loi de conservation de la masse-énergie. » *Einstein, Infeld L'évolution des idées en physique*

Les quanta de lumière

"Dès lors que l'entropie d'un rayonnement monochromatique dépend du volume de la même façon que s'il était un milieu discontinu consistant en quanta d'énergie de grandeur $h\nu$, le pas évident à franchir est d'investiguer si les lois de l'émission et de la transformation de la lumière sont telles qu'elles puissent être interprétées ou expliquées en considérant que la lumière consiste en de tels quanta. Nous examinerons cette question dans ce qui suit."

Einstein, *Ann. D. Phys.* 17, 132, 1905

- **Matière et quanta**

- Principales étapes du développement de la théorie quantique

- 1900 Planck et le rayonnement du corps noir
- 1905 Einstein et les quanta de lumière
- 1908 Rutherford et le noyau de l'atome
- 1913 L'atome de Bohr
- 1916 Einstein et l'émission induite
- 1924 Statistique de Bose -Einstein
- 1926 Statistique de Fermi-Dirac

- Crise conceptuelle majeure

- Discontinu dans les relations causales : crise de la causalité
- Inégalités de Heisenberg : crise de l'objectivité
- Indéterminisme : matérialité et stochasticité
- Intrication et procès en incomplétude intenté par Einstein

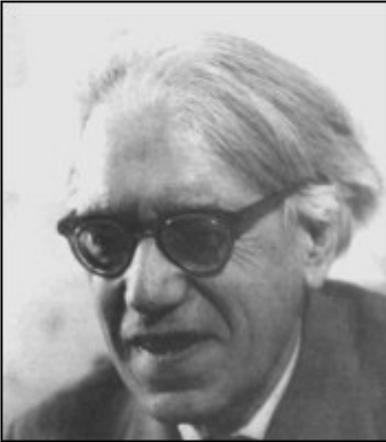
- La mécanique quantique (fin des années 20)
 - Formalisme de l'espace de Hilbert
 - Interprétation de Copenhague
- Acquis
 - Solution des problèmes laissés en suspens par la physique classique : radioactivité, rayonnement du corps noir, effet photoélectrique, chaleur spécifique des corps polyatomiques
 - Stabilité des atomes
 - Identité des atomes d'une même espèce
 - Explication complète de tous les phénomènes atomiques, moléculaires, ...
 - Consolidation de la thermodynamique statistique (troisième principe)

La physique du 20^{ème} siècle, une authentique révolution scientifique

- La **relativité** et les **quanta**, la crise de la physique au début du 20^{ème} siècle.
- Élaboration des **modèles standards** de la **physique des particules** et de la **cosmologie**.
- **Consolidation** de ces modèles standards et apogée à la fin du 20^{ème} siècle.
- Apparition de signes avant-coureurs annonciateurs d'une **nouvelle révolution scientifique**.
- Un champ « d'**expérimentation** » sans précédent pour la philosophie des sciences

Ferdinand Gonseth, un mathématicien-philosophe, témoin engagé de cette révolution scientifique

- Ferdinand Gonseth (1890-1975), mathématicien professionnel, familier des problèmes de la physique théorique (travaux avec **Gustave Juvet**).
- Itinéraire philosophique allant de la philosophie des mathématiques à la philosophie des sciences puis à la philosophie en général.
- Ami très proche de **Michele Besso**, lui-même ami le plus proche d'**Einstein**; grande influence philosophique sur **Georges Lemaître**.
- L' « **idonéisme** », une philosophie **dialectique ouverte à l'expérience**



Un regard sur l'horizon de réalité

<http://www.logma.ch/afg/fghr/fg.htm>

De la mesure du temps à la méthode de la recherche

<http://gicotan.club.fr/tempsetmethode.htm>

Voir en particulier l'article N° 5:

« Comment la recherche peut-elle se donner sa méthode? »

Les grands acquis de la physique du 20^{ème} siècle

- Les ingrédients de base de l'univers sont des **champs quantiques** dont la théorie est validée par le modèle standard de la physique des particules élémentaires et des interactions fondamentales non gravitationnelles.
- La **relativité générale** est la base théorique du modèle standard de la gravitation et de la cosmologie.
- À partir de la **statistique quantique** est établie la **consolidation phénoménologique de ces deux modèle standards**, débouchant sur une **cosmogonie scientifique**.