

Physique pour tous

Cours 0 : *Introduction*

Antoine Tilloy ^{*}[†]

Résumé

Notes¹ du cours introductif de physique pour tous. On y présente les objectifs du cours, raconte en vitesse l'histoire de la physique, résume l'expérience réalisée en cours et donne quelques détails sur l'organisation. Pas d'inquiétude, les cours suivants seront évidemment plus précis.

1 Objectif du cours

Ce cours s'adresse à un public assez singulier : des élèves brillants, qui réfléchissent vite et sont a priori capables de comprendre les concepts même les plus complexes de la physique moderne, mais dont les études ont été principalement ou exclusivement littéraires, c'est à dire qui ne maîtrisent pas, ou très partiellement, le formalisme mathématique utilisé dans l'enseignement habituel de la physique pour les «scientifique». Le cours dépasse ainsi largement la vulgarisation (sauf dans de rares cas) et j'essaierai dans la mesure du possible de présenter les concepts précisément et de manière aussi rigoureuse que possible. En revanche, il serait bien trop long d'introduire en détail et de manière rigoureuse le formalisme mathématique habituellement appris en licence de sciences et qui permet en général de faire les calculs. J'utiliserais et introduirais le minimum nécessaire à la compréhension qualitative des concepts, des effets, des théories, mais je serai obligé de passer le plus souvent sur les détails quantitatifs, sur les calculs précis, qui ne sont rendus possibles en général que par d'assez longs développements. Je donnerai évidemment quelques formules et ordres de grandeurs mais je ne calculerai presque jamais les pré-facteurs, calculs qui font la joie du taupin mais occupent une fraction non négligeable et souvent majoritaire de son temps. Je proposerai dans la mesure du possible quelques approfondissements plus quantitatifs et faisant une utilisation plus abondante du formalisme à la fin de chaque cours, (ou en annexe des notes) pour les élèves les plus motivés ou qui veulent effectivement faire des calculs par eux mêmes.

D'un point de vue scientifique, ce cours sera donc peut-être un peu plus proche d'une présentation à l'*américaine* (et oui !), faisant passer les concepts avant le formalisme. Ce cours s'adressant principalement à des élèves littéraires souhaitant continuer leurs études littéraires (et pas, par exemple, bifurquer vers une thèse en Cosmologie²) j'essaierai de parler, quand il y en a, des liens entre certains concepts physiques et certaines questions philosophiques. Ce sera le cas tout particulièrement quand on abordera la question du réalisme en Physique Quantique et du temps en Relativité. Les cours de physique traditionnels sont en général aussi assez peu historiques, la généalogie des concepts n'est en effet pas très utile quand l'objectif est de faire un calcul précis. Il suffit pour cela d'utiliser l'état des connaissances présent qui est, en science, a priori toujours supérieur à celui des connaissances passées. Mais s'il s'agit de comprendre les concepts sans avoir les résultats

^{*}Laboratoire de Physique Théorique, École Normale Supérieure, Paris

[†]contact : tilloy@lpt.ens.fr, page web : <http://www.phys.ens.fr/~tilloy/>

1. Dernière modification : 2 octobre 2015

2. La cosmologie est l'étude de l'univers en tant que scène de théâtre (big bang, expansion de l'univers, etc.). Cette branche de la physique n'aurait pas de sens sans la relativité qui fait du théâtre un objet dynamique. L'astrophysique s'occupe quant à elle des acteurs du théâtre, étoiles, galaxies, trous noirs et essaie de les décrire le plus précisément possible.

numériques comme fin et d'en déduire éventuellement des implications philosophiques, il peut être utile de comprendre aussi comment ils sont apparus. Je ferai ainsi de temps en temps un minimum d'histoire de la physique même si le cours restera principalement un cours de physique.

Commençons par faire exactement l'inverse de ce que nous prêchons en brossant un portrait vulgarisé à l'excès de la physique moderne.

2 Panorama de la physique moderne

2.1 Physique Classique

2.1.1 Mécanique

La Physique débute réellement avec le *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* publié par Newton en 1686. Il y introduit le calcul différentiel et les principes fondamentaux de la mécanique. La théorie est simple et d'une pureté remarquable. Les objets fondamentaux sont les points matériels. Ils persistent dans leur mouvement rectiligne uniforme si on ne leur fait rien. La déviation à ce mouvement rectiligne uniforme, l'accélération, est proportionnelle à la force exercée sur le point matériel et inversement proportionnelle à sa masse :

$$m \vec{a} = \vec{f}$$

Newton spécifie ensuite la forme de la force pour l'interaction gravitationnelle : elle décroît avec le carré de la distance d séparant les deux corps et est proportionnelle au produit des masses m_1 et m_2 .

$$f = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

Toute la mécanique fondamentale tient dans ces deux équations (déterministes), tout le reste peut a priori s'en déduire par une suite de raisonnements plus ou moins longs. Indépendamment Leibniz proposera une formulation logiquement équivalente de la mécanique en terme de conservation de l'énergie. On montrera dans la suite du cours que cette formulation est rigoureusement équivalente et souvent plus pratique que les équations de Newton. Il faut noter que si au départ les mathématiques de Newton comme celles de Leibniz étaient très approximatives elles ont été rendues complètement rigoureuses par le développement de l'analyse par Cauchy et Weierstrass.

Le premier cours sera entièrement consacré à la mécanique classique qui servira ensuite de référence quand on cherchera à comprendre ce que la relativité et la mécanique quantique ont de révolutionnaire. Ce sera un peu notre théorie témoin.

2.1.2 Électromagnétisme

Dès les années 1830 on sait avec les expériences de Faraday qu'il existe deux autres forces dans la nature en plus de la gravitation. La force électrique est celle qui fait se dresser les cheveux sur la tête lorsqu'on y passe une règle en plastique préalablement frottée sur un pull. La force magnétique est celle qui fait que les aimants collent sur le réfrigérateur. Ces forces n'ont a priori aucun rapport. En 1861, Maxwell³, découvre en un coup de génie que ces deux forces ne sont que la manifestation d'un unique champ : le champ électromagnétique, décrit par 4 équations :

$$\begin{aligned} \text{rot } \vec{E} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \\ \text{div } \vec{B} &= 0, \\ \text{rot } \vec{B} &= \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \vec{j}, \\ \text{div } \vec{E} &= 4\pi \rho_{\varepsilon} \end{aligned}$$

3. James Clerk Maxwell (1831-1879), physicien écossais. La légende dit qu'il trouva ses célèbres équations ivre de whisky dans son château en Écosse. Il est aussi l'inventeur de la photographie en couleur.

Il n'est évidemment pas nécessaire de comprendre ces équations (on n'en parlera pas pendant le cours). On peut juste remarquer que le champ électrique E et le champ magnétique B sont des deux côtés des équations, ils dépendent l'un de l'autre, se créent l'un l'autre et ne sont ainsi chacun qu'une facette du même phénomène. C'est la première fois (et pas la dernière) qu'a lieu une *unification* en physique, c'est à dire que deux phénomènes distincts sont réunis dans le même formalisme. Cette première unification a une conséquence inattendue. En combinant astucieusement les équations précédentes on obtient deux nouvelles équations surprenantes pour le champ électromagnétique :

$$\vec{\Delta} \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$$

$$\vec{\Delta} \vec{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0$$

Le lecteur n'est évidemment pas supposé comprendre ces équations à ce stade. On peut tout de même essayer de préciser ce qu'elles disent. Ces équations sont des équations d'ondes aussi appelées équations de d'Alembert. Elles décrivent la propagation d'une onde à la vitesse c . Le son vérifie par exemple la même équation où c est remplacé par v_0 la vitesse du son. Ce résultat est très surprenant, Maxwell a montré presque involontairement que le champ électromagnétique n'était pas statique mais se propageait *indépendamment de ses sources* comme une onde à la vitesse de la lumière. Une fois arrivé à ce résultat, les physiciens se sont dit : si ce champ se propage comme une onde à la vitesse de la lumière, c'est peut-être que la lumière n'est qu'une onde de champ électromagnétique. Maxwell écrit en 1864 :

«*L'accord des résultats semble montrer que la lumière et le magnétisme sont deux phénomènes de même nature et que la lumière est une perturbation électromagnétique se propageant dans l'espace suivant les lois de l'électromagnétisme.»*

Comme souvent l'unification est allée beaucoup plus loin qu'on ne le pensait, en unifiant magnétisme et électricité, Maxwell comprend la lumière et fusionne l'ensemble dans une théorie cohérente. En fait le ver est déjà dans le fruit de la physique classique, car une onde doit bien se propager dans quelque chose, quel est ce quelque chose, à quelle vitesse se déplace-t-on par rapport à lui ? Il faudra attendre 1905 pour que ce détail fasse tout exploser.

On ne parlera que très peu d'électromagnétisme pendant le cours car la théorie de Maxwell suppose une connaissance relativement longue à acquérir en analyse vectorielle. De plus, à part l'obtention de l'équation de d'Alembert et la découverte que le champ se propage seul, il n'y a pas de conséquence particulièrement surprenante d'un point de vue conceptuel, et en tout cas rien qui ne justifie de perdre son temps avec des mathématiques un peu lourdes.

2.1.3 La physique statistique (classique)

Les lois de Newton et les équations de Maxwell donnent toutes les lois *fondamentales* de la nature mais bien que *déterministes* elles ne permettent pas de décrire directement tous les phénomènes. Les raisons sont d'ordres théorique et pratique. Quand un gaz dans une pièce contient plus 10^{23} molécules d'air, il est hors de portée de prédire son comportement en résolvant les 10^{23} équations de Newton couplées pour toutes les particules. Même si c'était possible et en admettant que ça ait un intérêt, on serait confronté très vite au problème du *chaos déterministe*. Quand un système dynamique possède de nombreux degrés de liberté, ses solutions ont tendance à devenir chaotiques : elles apparaissent erratiques alors qu'elles sont purement déterministes et la moindre méconnaissance des conditions initiales du système rend la prédiction de son évolution future impossible⁴.

4. C'est ce que l'on appelle en général aussi l'*effet papillon* en météorologie. Les mouvements des masses d'air dans l'atmosphère sont décrits par les équations de Navier-Stokes qui sont fortement chaotiques. Une erreur sur la connaissance de la condition initiale est amplifiée exponentiellement au cours du temps ce qui explique qu'il soit impossible de prévoir la météo avec plus de quelques jours d'avance.

Que ferait-on de toute façon de la connaissance de ces 10^{23} trajectoires de particules ? En pratique pour un gaz, on n'est intéressé que par quelques quantités macroscopiques comme la température ou la pression, les détails du mouvement des atomes sont sans importance. La physique statistique essaie de donner des lois effectives pour décrire des systèmes qui sont trop complexes pour être étudiés en résolvant directement les équations de la mécanique ou pour lesquels ça n'aurait de toute façon pas d'intérêt.

Dès le début du XIXe siècle, la thermodynamique, théorie purement phénoménologique des échanges de chaleur, a permis d'optimiser le fonctionnement des machines thermiques et d'introduire le concept fondamental d'entropie qui permet de décrire l'irréversibilité effective de la nature (alors que les lois *fondamentales* sont réversibles). C'est Boltzmann⁵ qui invente la physique statistique à partir de 1870 et retrouve la thermodynamique, cette fois-ci en expliquant l'origine microscopique des lois et en justifiant l'émergence de l'irréversible.

On consacrera deux cours à la physique statistique au milieu du semestre. On utilisera une séance complète pour définir rigoureusement et mathématiquement le concept d'entropie qui est extrêmement utile bien qu'en général affreusement mal vulgarisé⁶ (car invulgarisable ?). On introduira aussi les trois principes fondamentaux de la thermodynamique. La seconde séance devrait être consacrée aux applications des principes à des sujets en physique et à quelques applications hors de la physique.

2.1.4 Une théorie du tout

«*There is nothing new to be discovered in physics now. All that remains is more and more precise measurement.*»

Bien que probablement apocryphe, cette phrase censée avoir été prononcée par Lord Kelvin en 1900 éclaire assez bien sur l'état de la physique juste avant les deux révolutions du début du XXe siècle. La physique possède alors une "théorie du tout", c'est à dire une théorie capable de décrire tous les phénomènes de la nature. Le *théâtre* est un espace temps rigide et immuable, les *acteurs* sont des points matériels obéissant aux lois de Newton et interagissant entre eux via les lois de la gravitation et le champ électromagnétique décrit par les quatre équations de Maxwell. Pendant une vingtaine d'années les physiciens vont ainsi penser avoir atteint la fin de l'histoire. Il reste en fait deux minuscules problèmes. La théorie de Maxwell prévoit que la lumière se propage comme une onde à une vitesse donnée ce qui donne l'impression qu'il existe un référentiel privilégié au repos qu'on appelle alors l'*éther*. L'expérience de Michelson et Morley montre en 1887 que cette hypothèse est intenable, Einstein apporte la solution en 1905 et fait exploser le théâtre. Le second problème semble encore plus dérisoire. La physique statistique classique prédit précisément la couleur des corps chauds en fonction de leur température⁷ (le fer rouge qui blanchit à mesure qu'il chauffe). Les prédictions sont excellentes sauf pour les ultraviolets où la théorie classique se trompe complètement, c'est ce qu'on appelle en 1900 la *catastrophe ultraviolette*. Il faudra la mécanique quantique pour résoudre ce problème mais, dommage collatéral, les acteurs déjà sans théâtre le paieront de leur vie. Il faudra sacrifier la *localité*⁸ pour donner leur couleur aux corps chauds, les physiciens manquent de mesure. Jusqu'à aujourd'hui la physique n'a plus jamais eu de théorie du tout et c'est ce paradis perdu que les physiciens théoriciens continuent à chercher.

5. Ludwig Boltzmann (1844-1906), physicien autrichien. Sa théorie révolutionnaire, archétype de la révolution scientifique de Kuhn, s'appuie sur l'hypothèse atomique qui n'est pas acceptée à l'époque. Déprimé par les critiques assassines qu'il subit, Boltzmann se pend en 1906 sans jamais voir le triomphe de sa théorie qui n'arrivera que quelques années plus tard.

6. On dit en général que l'entropie est une mesure du désordre. On verra qu'il s'agit d'un assez mauvais résumé de ce que ce concept recouvre et qu'il est nécessaire pour bien comprendre d'écrire les choses un peu précisément et rigoureusement.

7. C'est ce qu'on appelle plus pompeusement le spectre de rayonnement du corps noir.

8. C'est à dire le fait que les points, les particules ou les objets ont des propriétés isolables, séparables (même si ce dernier terme possède en mécanique quantique un sens légèrement différent), de l'état d'autres objets très éloignés.

2.2 Relativité restreinte

En 1887 Michelson et Morley montrent avec une expérience interférométrique subtile que la lumière se propage à la même vitesse dans toutes les directions ce qui ne devrait pas être le cas si la terre se déplaçait dans l'éther : quand on avance sur un bateau, les vaguelettes qui se propagent dans le sens de la marche semblent aller moins vite que les vaguelettes qui arrivent de face. On élabore alors à l'époque des théories exotiques pour sauver la face de la physique, on suppose par exemple que l'éther est emporté par la terre dans sa rotation. Rien n'est très convainquant. Einstein propose une solution très contre-intuitive en 1905 : *la lumière se propage à la même vitesse c dans tous les référentiels*. Il faut mesurer ce que cette affirmation a de bizarre, de surprenant, d'absurde presque. Une vitesse dépend traditionnellement du référentiel, si je marche dans le couloir d'un TGV lancé à pleine vitesse, je ne vais qu'à quelques km/h dans le référentiel du TGV mais à plus de 300 km/h pour quelqu'un qui est resté sur le quai. Einstein prétend que les grains de lumière sortant de la lampe de poche que je tiens dans le TGV vont exactement à la vitesse c par rapport à moi qui suis dans le train mais aussi exactement à c par rapport à un voyageur resté sur le quai. C'est absurde, on ne peut pas forcer une vitesse à être identique dans deux référentiels en mouvement l'un par rapport à l'autre ! Einstein se rend compte que c'est en fait possible, à une seule condition : *il faut que le temps ne s'écoule pas à la même vitesse dans les deux référentiels* ! Il ne s'agit pas ici du temps comme simple paramètre dans les équations, sorte de temps mathématique comme le comprit un peu maladroitement Bergson⁹, mais bien du temps physique, du temps vécu, d'un temps que l'on pourrait mesurer aussi bien avec une montre qu'en comptant son nombre de battements cardiaques. Cette relativité du temps impose d'oublier la notion de simultanéité, dire que deux événements arrivent en même temps n'a plus de sens. Le présent le passé et le futur deviennent des notions relatives, locales, qui dépendent du point de l'espace temps et du référentiel choisi, ils ne sont surtout pas suffisants, et il existe des points de l'espace temps qui ne sont ni dans le futur ni dans le présent ni dans le passé, dans *l'ailleurs*.

On traitera la relativité restreinte immédiatement après la physique classique. En deux séances on aura construit à peu près tout ce qui est nécessaire pour comprendre la théorie. On privilégiera une approche géométrique, on dessinera de beaux diagrammes d'espace-temps. L'avantage principal de la théorie de la relativité restreinte est d'être relativement abordable mathématiquement, on pourra ainsi faire quelques calculs simples et ne pas ignorer d'aspects importants de la théorie.

2.3 Relativité générale

Dès 1905, Einstein sait qu'il va devoir intégrer la gravitation à sa théorie de la relativité. Einstein découvre le principe d'équivalence : *si je suis dans un ascenseur en chute libre sur terre, je ne peux faire aucune expérience à l'intérieur de l'ascenseur qui me prouve que je ne suis pas dans le vide au milieu de l'espace, en apesanteur*. L'interaction gravitationnelle se comporte comme une accélération, elle doit donc avoir une influence sur l'écoulement du temps et la courbure même de l'espace. L'obstacle à ce stade est essentiellement mathématique. Pour intégrer la gravitation à la théorie de la relativité et la rendre ainsi «générale» il est nécessaire d'introduire une artillerie lourde de géométrie différentielle et de calcul tensoriel qu'Einstein apprendra relativement la

9. Henri Bergson (1859-1941), philosophe français (le lecteur de ces notes doit être au courant...). Bergson a essayé de concilier sa vision d'un temps universel avec la relativité en 1922 dans *Durée et simultanéité : à propos de la théorie d'Einstein*. Ce texte qui est malheureusement souvent pris pour une référence sur la relativité par certains philosophes est fondé sur une incompréhension majeure de la relativité restreinte. Einstein écrivit de manière répétée à Bergson pour tenter de lui expliquer son erreur, sans succès. La relativité dit bien que le temps vécu est aussi relatif contrairement à ce que Bergson tente de démontrer tout au long de son texte. Il ne s'agit pas que d'une question d'interprétation, la théorie Bergsonienne du temps est testable et *falsifiée* par l'expérience (ce qui semble être un détail pour certains philosophes qui continuent à disserter sur les mérites des deux approches et «l'apport de Bergson» à la relativité qu'Einstein n'aurait pas compris). Le reste de l'œuvre de Bergson n'est évidemment pas touché par cette incompréhension (ou en tout cas, je suis loin de la connaître suffisamment pour l'affirmer).

borieusement auprès de Marcel Grossman. Après une course effrénée contre Hilbert¹⁰, Einstein trouve en 1915 les équations de la relativité générale qui portent son nom. Ces dernières disent de manière très heuristique que la matière courbe l'espace temps, que la masse modifie l'écoulement du temps et les distances. C'est ensuite la courbure de l'espace-temps qui influence la dynamique des corps qui s'y meuvent et est responsable de la force de gravitation. Einstein a la même surprise que Maxwell avant lui, il obtient que le champ gravitationnel peut aussi se propager en ondes¹¹ indépendamment de ses sources. Einstein résout enfin une énigme vieille de plus de soixante ans et calcule l'avance du périhélie de Mercure qui était inexplicable classiquement.

On n'exposera pas la relativité générale dans toute sa généralité. C'est une tâche trop ardue, les mathématiques sont difficiles (Einstein en a témoigné) bien qu'assez jolies. Néanmoins, Antoine Bourget, mon fidèle co-bureau et ami, infiniment plus compétent que moi sur le sujet, se chargera de présenter la relativité générale dans deux cas particuliers pour lesquels on sait dire des choses sans faire trop de calculs. La première application est le Big-Bang. Les équations de la relativité générale disent comment l'espace temps réagit à la matière et la matière à l'espace temps. En regardant la distribution de matière aujourd'hui et la forme actuelle de l'espace-temps, on peut étudier les équations de la dynamique en faisant filer le temps à l'envers. On en déduit alors à quoi l'univers ressemblait dans le passé. Par le calcul, on peut remonter 13 milliards d'années en arrière jusqu'à atteindre une singularité, le Big Bang, où plein de choses subtiles se produisent (Antoine montrera que non, il ne s'agit pas juste d'une grosse explosion). Cette situation a l'avantage d'être assez simple mathématiquement ce qui permettra de faire des calculs et de voir vraiment ce qui se passe. Cela permettra d'approcher la question du Big Bang de manière précise, quantitative, sans bullshit ni métaphorisation excessive. La deuxième application est le trou noir de Schwarzschild. Il s'agit d'un modèle simplifié de trou noir. Les mathématiques sont un peu plus compliquées que pour les modèles cosmologiques mais Antoine Bourget expliquera ce qu'elles disent sans donner tous les détails des calculs. Cela devrait suffire pour répondre à toutes les questions élémentaires que l'on pourrait avoir sur le sujet (qu'est ce qui se passe quand on franchit l'horizon, est-ce qu'on peut en sortir, qu'est ce qu'on en voit de loin, où partent les choses qui y entrent ? etc.). Encore une fois, l'objectif est qu'il n'y ait que des étapes de calcul à admettre et pas des points fondamentaux de raisonnement.

2.4 Mécanique Quantique

Le contenu comme l'histoire de la mécanique quantique sont si passionnantes qu'il est difficile de les résumer en quelques lignes (mais l'auteur de ces notes est évidemment biaisé). La mécanique quantique part d'une hypothèse anodine pour se terminer sur une modification profonde de la méthode même de la physique et la remise en cause de la notion de réalité. En 1899 Planck introduit une constante h et suppose que les échanges d'énergie sont quantifiés¹² en des multiples de h pour résoudre le problème du corps noir. Planck lui-même ne croit pas trop à son bidouillage mathématique, il donne les bons résultats, c'est tout. Bohr construit un modèle d'atome en 1913 dont les orbites électroniques sont discrètes et font intervenir la constante de Planck. Louis de Broglie montre que les résultats s'interprètent assez bien si l'on attribue aux particules une onde dont la longueur d'onde vaut $\lambda = \frac{h}{\text{masse} \times \text{vitesse}}$. Il raisonne alors par analogie, personne ne comprend alors vraiment ce qui se passe dans le coeur de la matière. Schrödinger propose une équation que doit vérifier cette onde de matière, c'est le début de la *mécanique ondulatoire*. Au même moment, vers 1925, le jeune Heisenberg¹³ développe une théorie

10. David Hilbert (1862-1943), mathématicien allemand. Il a révolutionné les mathématiques en les libérant du monde physique pour leur ouvrir le paradis de la théorie des ensembles et la méthode hypothético-déductive.

11. Il s'agit des ondes gravitationnelles dont la détection est rendue extrêmement difficile par leur faible intensité. Au moment où ces lignes sont écrites, elles n'ont pas encore été détectées de manière certaine.

12. D'où le nom de «quantique» qui sera donné à la nouvelle mécanique

13. Werner Heisenberg (1901-1976), physicien allemand, prix Nobel à 31 ans (avant d'être le héros de *Breaking Bad*)

complètement différente, la mécanique matricielle, qui permet de *prédirer* les résultats des expériences sans avoir besoin de décrire ce qu'il s'y passe vraiment. Schrödinger comprend dès 1926 que malgré leur apparence distincte, ces théories donnent les mêmes résultats et prédisent avec succès les résultats de l'expérience de Stern et Gerlach de 1922. Dès 1926 Von Neumann¹⁴ travaille sur une axiomatisation de la théorie qui est publiée en 1930 et unifie rigoureusement les visions d'Heisenberg et Schrödinger : la mécanique quantique ne changera plus de forme. C'est à cette période, alors que la théorie commence à être à peu près bien formulée que commencent les terribles joutes qui opposeront les réalistes menés par Einstein et les opérationnalistes réunis derrière Bohr. Il s'agit probablement d'une des périodes les plus fascinantes pour l'histoire des sciences. Là où la relativité a été presque immédiatement acceptée, l'interprétation de la mécanique quantique continue de faire débat (même si ses succès expérimentaux, eux, ne sont pas contestés). La théorie quantique telle qu'elle est formalisée par Von Neumann se distingue des précédentes théories physiques en ce qu'elle ne *décrit* pas la réalité ni ne dit ce qui *est* mais se contente de *prédirer* les résultats d'expériences, et donc de dire ce qui est *observable* (en d'autres termes, la théorie n'a pas d'ontologie). Les corps n'ont pas de propriétés objectives et leurs caractéristiques sont plus créées que révélées par la mesure. C'est cette vision (et pas l'indéterminisme comme on le croit souvent) que va contester Einstein en 1935 dans un article écrit avec Podolsky et Rosen (souvent abrégé EPR). Dans cet article, Einstein recourt à une expérience de pensée pour prouver que la mécanique quantique est incomplète. Bohr répond presque immédiatement à la critique en explicitant l'interprétation aujourd'hui dominante de la mécanique quantique : *l'interprétation de Copenhague* (du nom de l'université où enseignaient Bohr et Heisenberg). Le contenu du débat sera précisé dans la suite du cours, mais pour simplifier, en 1935 Einstein, qui a pourtant été le pionnier de la théorie des quanta, est vaincu par Copenhague. Les débats théoriques sont ensuite oubliés, tous les pionniers de la mécanique quantique étant occupés pendant la guerre soit par le projet *Manhattan* à Los Alamos, soit par l'*Uranprojekt* en Allemagne.

La deuxième avancée conceptuelle fondamentale de la mécanique quantique est faite en 1964 par Bell. Partant de l'expérience de pensée d'EPR, il démontre que toute théorie locale, c'est à dire toute théorie supposant que le monde est constitué d'objets possédant des propriétés indépendantes de celles des autres objets éloignés (hypothèse raisonnable) est en désaccord avec les prédictions de la mécanique quantique, plus précisément ces théories doivent vérifier une inégalité qui est violée par la mécanique quantique. Le débat de 1935 qui était presque métaphysique devient testable. En 1982, Aspect¹⁵ teste expérimentalement les inégalités de Bell et trouve exactement la violation prédicta par la mécanique quantique. C'est la fin de tous les espoirs de construction d'une réalité locale naïve qui constitue une description sous-jacente aux prédictions de la mécanique quantique. En révélant que la mécanique quantique elle-même contient une forte dose de non localité (ce qui semblait naïvement incompatible avec la relativité), Bell va aussi relancer la recherche de théories descriptives réalistes, mais cette fois ci non locales et donc plus subtiles, permettant d'expliquer les prédictions de la mécanique quantique (car quand on a tout perdu il n'y a plus rien à perdre). Même si elles sont compliquées, de telles théories existent ce qui montre finalement que ni Bohr ni Einstein n'avaient raison (Bohr avait tort car il est possible de construire une réalité expliquant les résultats de la mécanique quantique, Einstein avait tort car il voulait que cette réalité soit locale, pensant que toute interaction à instantanée à distance avait quelque chose de mystique).

On consacrera 4 séances à la mécanique quantique, ce sera le plus gros challenge du

14. Jon Von Neumann (1903-1957) mathématicien hongrois puis américain. Un des plus grands génies du siècle, il a unifié la mécanique quantique, inventé l'informatique, inventé la théorie des jeux, révolutionné de nombreux domaines des mathématiques fondamentales (notamment l'analyse fonctionnelle). Personnage trouble, il a contribué à réalisation de la bombe au plutonium qu'il proposa de lancer sur Kyoto plutôt que sur Nagasaki, pour raser le centre culturel du Japon. Quand Robert Oppenheimer, directeur du projet Manhattan déclara qu'avec la bombe A la physique avait connu le péché, Von Neuman répondit impossible : «Parfois on confesse un péché pour s'en attribuer le crédit». Il est aujourd'hui surtout connu du grand public pour avoir inspiré le docteur Folamour de Kubrick.

15. Alain Aspect, physicien français à moustache et à l'accent du Béarn. Bon prof d'optique quantique (à l'X et à l'Institut d'Optique), légitimement frustré de ne pas avoir eu le prix Nobel.

cours. La première sera consacrée aux succès expérimentaux de la théorie et à une liste de résultats surprenants qu'il faudra ensuite expliquer. On construira ensuite le formalisme en adoptant un point de vue plus proche de la mécanique ondulatoire. On démontrera l'inégalité de Bell et on essaiera sans garantie de prouver qu'un système quantique peut les violer (ou on se contentera plus modestement de donner les résultats de l'expérience d'Aspect). On discutera au dernier cours des interprétations possibles de la théorie. Tout risque d'aller un peu vite, mais au moins on ne dissertera pas sur du vide.

2.5 Théorie Quantique des champs

Dès que la mécanique quantique a été correctement formulée, on a immédiatement remarqué, enfin c'était même une évidence, qu'elle n'était pas relativiste (la mécanique quantique utilise un temps absolu), ce qui rendait son domaine d'application limité. C'est cette unification entre la relativité restreinte et la mécanique quantique que réalise la théorie quantique des champs. Si les précédentes sections faisaient déjà dans la vulgarisation hâtive, ce qui suit s'enfonce encore un peu plus loin dans ce travers.

2.5.1 La construction initiale

Dès 1926 Schrödinger avait proposé une équation d'onde relativiste mais de manière surprenante, c'est l'équation non relativiste qui était conforme aux prédictions expérimentales (en fait il avait trouvé l'équation relativiste de certaines particules exotiques, mais pas celles du gros de la matière). C'est Dirac¹⁶ qui propose la première équation cohérente de ce qu'on appelle à l'époque la mécanique quantique relativiste. Le problème apparaît alors de manière crue, le nombre de particules ne se conserve pas. C'est le résultat principal de la fusion entre relativité et quantique. Il faut admettre que des particules et anti-particules puissent émerger du vide en échange d'énergie. La description traditionnelle qui donnait une fonction d'ondes aux particules ne tient plus et il faut passer à des champs qui permettent à la quantité de matière de varier, c'est le début de la théorie quantique des champs qui sera développée principalement par Dirac et Feynman¹⁷. D'un seul coup, la complexité mathématique de la physique explose. La théorie quantique des champs n'a toujours pas de construction mathématique rigoureuse tant la physique est allée vite. Pire, les infinis y prolifèrent (la réponse naïve que fournit la théorie quantique des champs à la question : «Que vaut telle quantité» est très souvent «l'infini»). Une grande partie du travail a consisté à développer des méthodes (mélange d'intuition physique et de recettes de cuisine) permettant de tirer des prédictions finies de ce formalisme pathologique apparemment inévitable. Malgré ce cadre mathématique un peu branlant, Feynman calcula avec la théorie le facteur gyromagnétique de l'électron (la signification de cette quantité importe peu) avec plus de 12 chiffres après la virgule, tous confirmés par l'expérience, premier triomphe de la théorie quantique des champs.

2.5.2 L'ajout des forces via les théories de jauge

La théorie quantique des champs est un formalisme très général qui peut décrire à peu près n'importe quoi. Il faut ensuite spécifier ce que l'on veut décrire comme particules et comme forces. Pour cela, les physiciens vont utiliser un argument de symétrie appuyé sur une intuition géométrique assez proche de celle de la relativité générale : la symétrie de *jauge*. Difficile d'en dire beaucoup plus sans entrer dans les détails. La plus simple des symétries de jauge, $U(1)$ permet d'introduire l'électromagnétisme de Maxwell dans la théorie, c'est l'électrodynamique quantique qui donnera à Feynman, Schwinger et Tomonaga le prix Nobel en 1965. Depuis le début du siècle on sait déjà qu'il existe d'autres forces dans la nature, les interactions faibles et fortes qui se manifestent essentiellement

16. Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984), physicien britannique. Tous les physiciens des années 50 s'accordaient pour dire que Dirac était le plus brillant d'entre eux même s'il était si cérébral qu'il en devenait glacial et très souvent cassant. Dirac était un peu le Juppé de la physique quantique.

17. Richard Feynman (1918-1988), physicien américain. Théoricien génial et facétieux il fut aussi un brillant pédagogue (ce qui est plus rare) et on ne perd pas son temps en lisant ou regardant les *Feynman Lectures on Physics*. Wigner aurait dit de lui : "He is a second Dirac, only this time human".

dans les réactions nucléaires. Les physiciens utilisent alors deux symétries de jauge : $SU(2)$ qui permet de décrire l'interaction faible et donne le prix Nobel à Glashow, Salam et Weinberg, et $SU(3)$ qui permet de décrire l'interaction forte (la chromodynamique quantique). 't Hooft, Gross, Politzer et Wilczek auront le prix Nobel pour des résultats liés à cette seconde théorie.

2.5.3 Le modèle standard

Le modèle standard est l'assemblage cohérent de toutes ces théories de jauge particulières en une seule grosse théorie permettant de décrire toutes les particules connues et leurs interactions. Jusqu'en 2012 l'ensemble était cohérent à l'exception d'un petit problème. Il restait à trouver une dernière particule prévue par le modèle et sans laquelle tout l'édifice s'écroulait. Cette particule, le boson de Higgs, permet de briser partiellement les symétries précédentes et de donner leur masse aux particules (pour simplifier, les symétries de jauge étaient très belles, mais sans cette particule inobservée, elles imposaient que la masse de tous les corps élémentaires soit nulle, ce qui est ennuyeux). Confiant dans leur modèle, les physiciens ont poursuivi leur recherche et affiné le modèle standard. Finalement il a bien fallu trancher, on a construit un accélérateur de particules de 27 kilomètres, le *Large Hadron Collider* pour plus de 9 milliards d'euros. L'objectif : créer des collisions entre des protons très rapides pour faire émerger le boson de Higgs du vide pendant une fraction de secondes. Deux détecteurs indépendants, CMS et Atlas, situés aux deux extrémités de l'accélérateur ont tous les deux détecté le boson de Higgs avec certitude en 2012 donnant le prix Nobel 2013 à Englert et Higgs qui avaient prédit l'existence de cette particule 50 ans plus tôt. Depuis 2013, on considère ainsi que le *modèle standard de la physique* (comprendre la physique des particules) est complet et cohérent. Trois forces fondamentales, la relativité restreinte et la mécanique quantique sont réunies dans un unique modèle. La gravitation, qui n'est aujourd'hui décrite que par la relativité générale, fait encore de la résistance.

2.6 Les tentatives d'unification

Le problème majeur de la physique fondamentale aujourd'hui est que le modèle standard et la relativité générale fonctionnent merveilleusement bien dans leurs domaines respectifs bien que ces deux théories soient incompatibles au niveau le plus fondamental. Les tentatives naïves d'intégrer la relativité générale à la théorie quantique des champs ont été un échec¹⁸. Il y a plusieurs possibilités, soit l'une des deux théories initiales, la mécanique quantique ou la relativité générale, est fausse, ou du moins a un domaine de validité restreint, soit la technique pour les rassembler (ici la théorie quantique des champs) n'était pas la bonne. La communauté des physiciens théoriciens penche, je crois, en majorité pour la dernière hypothèse et développe depuis 30 ans la *théorie des cordes*. Même si cette théorie a longtemps été prometteuse il faut souligner qu'elle n'a pour le moment produit aucune prédition testable malgré l'infinité débauche d'intelligence qui est venue l'irriguer. Il n'est désormais plus si clair que la théorie des cordes soit la théorie ultime que cherchaient les physiciens (comme en témoigne le relatif désintérêt des étudiants pour ce sujet jadis si populaire). On peut citer comme alternatives la *gravité quantique à boucles*, la *géométrie non commutative*, la *gravité asymptotiquement libre*, les *ensembles causaux* théories qui sont à peine à l'état d'embryon. La physique fondamentale n'a pas atteint la fin de l'Histoire.

2.7 Les échecs

La brève histoire de la physique précédente peut donner l'impression d'une progression très linéaire et guidée uniquement par la beauté mathématique. On peut mentionner

18. Plus précisément, intégrer la gravitation au modèle standard avec la théorie quantique des champs, comme s'il s'agissait d'une force comme les autres, fournit une théorie "non-renormalisable", terme technique qui signifie que les astuces usuelles permettant de protéger la théorie des infinis qui y prolifèrent ne fonctionnent pas. Telle quelle, la théorie est par conséquent vide en terme de prédictions et il faut lui trouver une alternative.

rapidement quelques théories qui étaient belles mathématiquement (peut-être plus belles que la physique actuelle) et qui pourtant ont été démenties par l'expérience et par conséquent abandonnées.

S-matrix bootstrap Le «S-matrix bootstrap» (S pour «scatering») était un programme de recherche visant à reconstruire la théorie des champs de manière axiomatique en utilisant uniquement des raisonnements sur les symétries de la Nature. Après beaucoup d'efforts, on s'est finalement rendu compte que les symétries contraignaient trop peu la théorie dans le cas général pour être suffisantes. Cette approche, du moins dans son acceptation d'origine, a été abandonnée au profit de la QCD pour la description des interactions fortes. C'est un exemple je trouve assez éclairant car il montre (comme le montre l'exemple de $SU(5)$ qui suit) que le programme «fort» visant à tout construire sur les symétries n'est pas suffisant. Les symétries ne fixent pas tout, la physique ne se réduit pas à une classification mathématique de ce que les symétries permettent comme phénomènes.

Les théories de Grande Unification (GUT) ont pour objectif de reproduire l'exploit de Maxwell (fusionner le magnétisme et l'électricité en une seule force) en unifiant toutes les forces du modèle standard avec une unique symétrie de jauge. Dans ce formalisme, toutes les forces de la nature apparemment différentes ne sont que les multiples facettes d'un même phénomène. L'objectif principal est d'expliquer la grande différence d'intensité entre les forces, qu'on appelle le problème de la hiérarchie. La plus simple et la plus populaire des GUT, $SU(5)$ devait être le chef d'oeuvre des mathématiques et l'accomplissement de l'utilisation des symétries en physique. Elle prédisait que les protons devaient pouvoir se désintégrer même si le phénomène était rare. On a alors construit d'immenses piscines d'eau sous les montagnes, à l'abri des rayons cosmiques, et on a attendu, longtemps, des années même, et puis finalement rien, aucun proton ne s'est désintégré. Rien n'a été perdu car ces expériences ont du même coup permis de faire des avancées énormes sur la physique des neutrinos. Néanmoins après l'échec cuisant de leur meilleur champion, $SU(5)$, les théories de grande unification ont été presque complètement abandonnées.

La théorie de Kaluza-Klein unifie dans un même formalisme géométrique la relativité générale et l'électromagnétisme de Maxwell. Le champ électromagnétique n'est plus que la manifestation d'une 5e dimension de l'espace-temps. En généralisant un peu la théorie, on peut même intégrer les autres forces fondamentales à la description et donner une théorie où les 4 forces sont unifiées dans un formalisme élégant. La théorie elle-même n'a finalement rien donné même si elle a été fortement soutenue par Einstein. Elle a néanmoins fortement inspiré la théorie des cordes qui a récupéré l'idée des dimensions supplémentaires.

La supersymétrie (?) La supersymétrie est un concept qui a été introduit au début des années 70. Il s'agit d'une (hypothétique) symétrie cachée reliant deux types de particules, les bosons et les fermions. En 1977, Pierre Fayet¹⁹ a construit le *Minimal Supersymmetric Standard Model*, une extension du modèle standard contenant cette symétrie additionnelle et résolvant, notamment, le problème de la hiérarchie. Depuis, et après presque 40 ans, la supersymétrie s'est imposée comme un outil fondamental dans la construction de nouvelles théories (elle est indispensable, notamment, en théorie des cordes et dans tous les théories qui ont le préfixe «super»²⁰ dedans). Le problème, c'est que lorsqu'elle est vue comme une extension du modèle standard, la supersymétrie prédit l'existence de superpartenaires à toutes les particules élémentaires connues, bref la supersymétrie fait des prédictions a priori facilement falsifiables. Pour le moment, on n'a toujours pas trouvé de superpartenaires, même avec l'énergie colossale du Large Hadron

19. Physicien brillant et discret du laboratoire de physique théorique de l'ENS.

20. Au passage, le choix des mots est important. On peut se demander si le concept aurait si bien pris dans la communauté avec un nom plus neutre.

Collider. Rien n'exclut, a priori, que les superpartenaires se trouvent à une énergie encore plus élevées, mais pour cela on doit fixer les paramètres du modèle loin de ce qui semble «naturel». Le «run 2» du LHC, qui a commencé à une énergie deux fois supérieure est la dernière chance avant une falsification douce²¹ de la théorie. Après 40 ans d'hégémonie, la supersymétrie vue comme théorie physique applicable en physique des particules a peut-être vécu. La supersymétrie resterait un concept utile notamment pour définir correctement certaines théories des champs simplifiées que l'on sait résoudre exactement (sorte de *toy model* de théories des champs réelles) ou pour rendre la théorie des cordes cohérente, mais probablement rien qui ne justifie a posteriori une telle débauche d'énergie.

2.8 La physique statistique moderne

L'histoire jusqu'à maintenant n'a concerné que la physique fondamentale, c'est à dire la physique qui s'occupe de trouver les lois fondamentales microscopiques de la nature. La physique statistique moderne cherche comme son ancêtre à obtenir des lois pour des systèmes complexes, composites, mésoscopiques ou macroscopiques en partant si possible des lois microscopiques (c'est à dire aujourd'hui essentiellement de la mécanique quantique non relativiste). L'objectif principal est d'essayer de prédire les propriétés de la matière pour pouvoir éventuellement inventer de nouveaux matériaux aux caractéristiques surprenantes. D'énormes progrès ont été accomplis à la fois pour améliorer la thermodynamique classique du XIXe siècle avec la dérivation de formules plus précises que les lois de la thermodynamique traditionnelle (égalité de Jarzynski, théorème de Galavotti-Cohen) et pour intégrer la mécanique quantique et ses effets qui défient l'intuition. Une grande partie de l'effort a aussi consisté à extraire des méthodes génératrices dans un domaine qui utilisait beaucoup de techniques ad-hoc. La physique statistique a ainsi profité d'un outil qui avait été développé au départ par la physique fondamentale pour la théorie quantique des champs : *le groupe de renormalisation* qui est une sorte de méthode générale pour dézoomer et obtenir les lois effectives à grande échelle (la phénoménologie) pour un système dont on connaît les lois microscopiques. La physique statistique a encore plein de problèmes non résolus et intéressants. Son modèle le plus élémentaire, adapté à très nombreuses situations, le modèle d'Ising, n'a de solution analytique exacte qu'en dimension 1, 2 ou > 4 , un problème théorique fondamental est de réussir à en trouver une solution en 3 dimensions²². D'un point de vue plus pratique, un gros problème est l'incapacité que la physique a encore aujourd'hui à comprendre la supraconductivité à haute température (qui est le sujet de l'expérience qui suit). La superfluidité et plus généralement les nouvelles phases de la matière purement quantiques comme les condensats de Bose-Einstein sont aussi des sujets d'investigation très actifs.

3 L'expérience du cours

3.1 Une très courte histoire de la supraconductivité

La résistance des métaux décroît avec la température. Il s'agit d'un résultat qui est connu depuis presque toujours et qui est expliqué par la physique statistique classique. En 1911 Heike Kamerlingh Onnes, qui a trouvé une méthode pour faire du froid de manière performante (il a réussi à liquéfier l'hélium), entreprend de tester les propriétés de la matière, notamment la conductivité des métaux, à basse température. Il observe que la résistance du mercure baisse à peu près linéairement avec la température jusqu'à 4.2K où elle disparaît brutalement. Le même phénomène est ensuite observé pour d'autres métaux à d'autres températures. On découvre aussi l'effet Meissner, qui fait que les supraconducteurs repoussent le champ magnétique des aimants et flottent ainsi en équilibre au-dessus

21. J'entends par là que si les superpartenaires ne sont pas découverts à cette énergie, la plupart des physiciens considéreront qu'elle a été falsifiée sur une plage de paramètres suffisamment large pour être très peu probable.

22. Il est amusant que la seule dimension dans laquelle on ne sait pas faire le calcul soit la seule dimension intéressante en pratique.

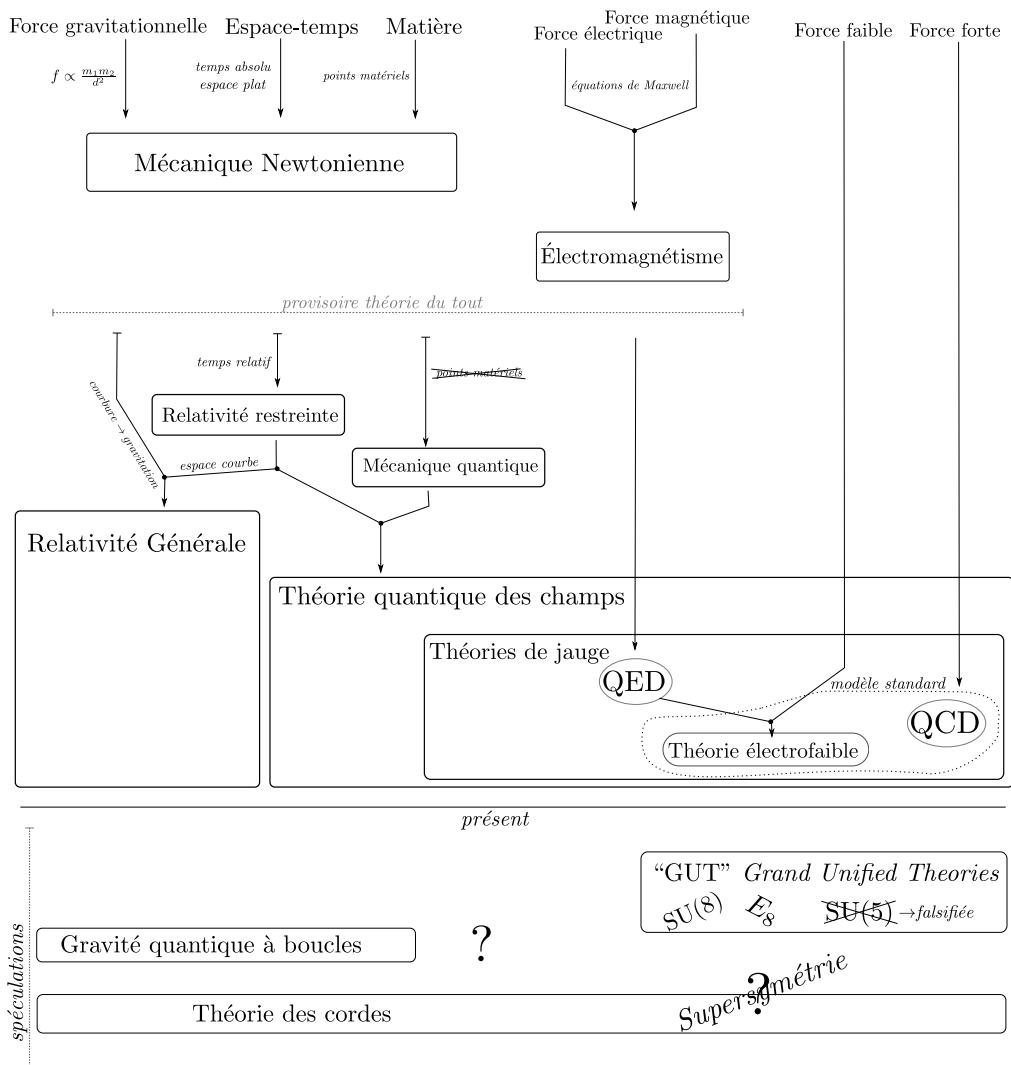


FIGURE 1 – Panorama des théories en physique *fondamentale*.

d'une plaque aimantée. La théorie de Ginzburg-Landau²³ donne en 1950 une description phénoménologique de la supraconducteur qui reçoit ensuite une fondation microscopique utilisant pleinement la mécanique quantique en 1957 par John Bardeen, Leon Cooper et John Schrieffer (théorie BCS). Tout le monde obtient un prix Nobel (sauf Landau qui est mort depuis, mais qui a déjà eu le prix Nobel pour sa compréhension de la superfluidité de l'hélium liquide). Le travail des physiciens est ensuite assez simple : utiliser la théorie BCS pour fabriquer des alliages qui soient supraconducteurs à une température de plus en plus élevée²⁴. On réalise quelques progrès jusqu'à atteindre un relatif optimum autour de 39K (i.e. on a trouvé un matériau supraconducteur au dessous de 39K au lieu de 4K).

Ça n'est pourtant pas la fin de l'histoire. En 1986 Johannes Bednorz et Karl Müller découvrent par hasard qu'une céramique qui devrait être complètement inutile d'après la théorie BCS devient supraconductrice à 35K. Ils ont immédiatement le prix Nobel. On remplace l'année suivante le lanthane par l'yttrium dans cette céramique et on obtient un supraconducteur à 92 K (qui est celui qu'on utilise dans l'expérience!). C'est une énorme avancée car on a désormais un matériau supraconducteur à une température certes froide mais atteignable par l'azote liquide qui est relativement bon marché. Néanmoins aucune théorie n'explique pourquoi ces céramiques fonctionnent si bien. La recherche en matière condensée est aujourd'hui dominée par la quête du matériau qui sera supraconducteur à température ambiante. Les chimistes cherchent un peu au hasard et dans toutes les directions et les physiciens peinent à construire une théorie valable de cette nouvelle forme de supraconductivité (dite de type II par opposition à la supraconductivité de type I décrite par la théorie BCS). Pour rêver un instant et comprendre pourquoi celui qui trouvera la solution aura très probablement un prix Nobel, on peut donner quelques applications possibles de la supraconductivité à température ambiante :

- Le transport d'électricité sans pertes, à basse tension et donc sans danger, dans des câbles fins et légers qu'on pourrait presque poser sur le sol.
- Des skates flottant au-dessus du sol comme dans retour vers le futur (et la même chose pour les voitures!).
- Des roulements sans contact grâce à la lévitation et donc plus d'usure dans de nombreux appareils à pièces mobiles.
- La fabrication d'IRMs pour un coût dérisoire et donc la résolution immédiate d'un énorme problème de santé publique.
- Le lecteur doit avoir d'autres idées...

3.2 Explication de l'expérience

On verse de l'azote liquide sur une céramique supraconductrice de type II. L'azote liquide est à 77K (-196C) et la température critique du supraconducteur est de 92K. Ce dernier refroidit au contact du liquide et sa température tombe jusqu'à 77K, c'est à dire au dessous de sa température critique et il devient supraconducteur. Ensuite on ne sait qu'approximativement ce qui se passe car la théorie BCS ne décrit pas très bien ce matériau. La description qui suit est très heuristique et légèrement incorrecte (mais on peut difficilement faire mieux à ce stade). La longueur d'onde de de Broglie des électrons du supraconducteur devient très grande à mesure que la température diminue et les *vagues* d'électrons s'interpénètrent ; l'ensemble des électrons bouge alors comme une seule et unique onde quantique complètement délocalisée : la mécanique quantique domine. On pose au dessus du supraconducteur (qui est plongé dans l'azote liquide) un aimant permanent très puissant au niobium. Il crée un champ magnétique fort qui est repoussé par la mer d'électrons quantiques. C'est en fait ce qui se passerait si notre céramique était bien décrite par la théorie BCS, en fait le champ magnétique est tellement fort que des trous se forment dans l'onde d'électrons et le champ traverse le supraconducteur par les

23. Théorie similaire à la théorie quantique des champs mais appliquée à la physique statistique

24. On cherche à trouver des matériaux qui soient supraconducteurs sans avoir besoin d'être trop froids, car produire du froid extrême est difficile et surtout très cher. Tant qu'on a besoin d'hélium liquide à 4K pour avoir un supraconducteur, la technologie ne peut que rester confinée aux laboratoires de recherche

vortex (appelés vortex d'Abrikosov²⁵) ainsi créés. Le supraconducteur est alors lié par ces fils de champ magnétique à l'aimant ; il ne se contente pas de flotter, il est complètement piégé. Cet effet, le *quantum-locking* est un des phénomène observables à notre échelle les plus bizarres de la physique et sa description à l'aide de la physique quantique et de la physique statistique moderne n'est pas encore complète. On ne décrira évidemment pas ce matériau bizarre en détails dans la suite du cours, mais les concepts dont on discutera en physique statistique et en physique quantique permettront d'en comprendre certains aspects.

4 Remarques pratiques

4.1 Que lire en complément du cours ?

Le cours lui même a été écrit spécifiquement pour être conceptuellement rigoureux sans être formel et n'a pas d'équivalent direct (il ne s'appuie pas sur un manuel particulier, manuels qui sont en général soit très mathématiques, soit purement heuristiques). Bref, il n'existe pas de bonne référence générale adaptée au public de ce cours (et c'est aussi pour ça qu'il existe). Malgré tout on peut quand même trouver quelques livres intéressants et à peu près dans l'esprit de certains des cours.

Pour une introduction ou les questions d'ordre général on peut lire :

- *The Character of Physical Law* de Feynman
- *La science et l'hypothèse* de Poincaré
- *L'évolution des idées en physique* de Einstein et Infeld

Pour la relativité restreinte on peut lire Einstein directement dans *La Relativité*. Pour la mécanique quantique rien n'est évident. On peut essayer le tome des *Feynman lectures* qui y est consacré. Les B/L ou ceux qui ont fait plus de mathématiques peuvent tenter le livre de Dalibard et Basdevant *La mécanique quantique* qui est accessoirement le cours de l'X donc ça peut être un peu sportif. Éviter autant que possible de commencer par des introductions philosophiques, surtout de philosophes français. Avant de disserter, il faut connaître la théorie. Sur les questions d'interprétation, il y a quelques bons articles de Bell, Bricmont ou Laloë que je peux chercher pour ceux qui sont intéressés. Pour rêver un peu on peut parcourir *Le plus grand des hasards* sous la direction de Jean-François Dars et Anne Papillault qui recueille les avis de brillants physiciens sur la mécanique quantique. On peut peut-être aussi aller voir du côté des MOOCs, en particulier ceux des universités américaines. Les cours introductifs de première et deuxième année de «college» devraient être accessibles à tous et pas excessivement mathématisés.

4.2 Qu'étudier en maths ?

Le cours n'a aucun pré-requis en mathématiques. De temps en temps on fera malgré tout quelques remarques facultatives qui nécessitent un peu plus de mathématiques pour être comprises. A priori pour les B/L tout est OK, pour les A/L on peut éventuellement se documenter sur les sujets suivants :

Les nombres complexes : Il s'agit d'une extension des ensembles de nombres usuels : l'ensemble des nombres réels auquel on ajoute les multiples du nombre imaginaire i tel que $i^2 = -1$. Ces nombres ont l'air inutiles car sans support intuitif (il n'y a pas d'objets de longueur $2 + 3i$ cm dans le monde réel), pourtant ils sont utilisés massivement en mécanique quantique.

La géométrie euclidienne élémentaire : On va l'étendre en relativité restreinte mais il est bon de se souvenir ce que dit la géométrie "standard". Il est bon de se souvenir du théorème de Pythagore et surtout du calcul de la distance entre deux points arbitraires (conséquence de Pythagore).

25. Alekseï Alekseïevitch Abrikosov (1928-) physicien américain d'origine soviétique, prix Nobel 2003

La dérivation et l'intégration : Il n'est pas nécessaire d'être un virtuose de la dérivation et de l'intégration de fonctions compliquées. Il faut surtout une bonne intuition de ce à quoi ces opérations correspondent. La dérivation est le calcul du taux d'accroissement local d'une fonction, l'intégration le calcul de l'aire algébrique sous la courbe et la seconde opération est pour simplifier l'inverse de la première.

Les équations différentielles : Il s'agit des équations dans lesquelles apparaissent une fonction et une ou plusieurs de ses dérivées successives (par contraste avec les équations algébriques dans lesquelles on a juste une ou plusieurs inconnues). On rencontre ces équations tout le temps en physique. Le cœur de la mécanique quantique, l'équation de Schrödinger, est une équation différentielle. Ceux qui n'ont pas fait de Terminale S peuvent regarder ce qu'on dit dessus dans les livres de lycée. L'idéal serait de se documenter un peu sur les fonctions exponentielle et logarithme qui apparaissent naturellement quand on résout ces équations et qu'on utilisera un peu (la définition rigoureuse de l'entropie nécessite le logarithme que l'on redéfinira).

5 Pour le prochain cours

Pas de devoirs obligatoires mais on peut quand même faire les choses suivantes pour préparer la suite :

- Relire le panorama de la physique moderne pour avoir une première idée d'un domaine dans lequel chercher un sujet d'exposé.
- Répondre à la question : si deux personnes jouent au ping-pong dans un train lancé à pleine vitesse, est-ce que l'un des deux joueurs est avantageé ?
- Répondre à la question : est-ce qu'une fusée peut accélérer en projetant dans l'air des gaz qui vont moins vite qu'elle (par rapport au référentiel de l'air) ?
- Répondre à la question : Si la force électrique est plus forte que la force gravitationnelle, pourquoi ne considère-t-on que la force gravitationnelle à l'échelle des planètes ?
- Répondre à la question : On a parlé de 4 forces fondamentales (gravitation, force électromagnétique, force faible, force forte), pourquoi n'a-t-on pas parlé de la force de contact ? (la force qui s'exerce quand je touche quelque chose ou que je m'appuie sur quelque chose)
- Ne surtout pas acheter de livre des Bogdanov et encourager ses proches à faire de même. Maintenant qu'ils sont à Fort Boyard, leur capacité de nuisance et leur crédibilité sont limitées mais on ne sait jamais.

Appendices

Quelques bonus pour ceux qui s'ennuient, mélange hétérogène de réflexions de comptoir sur la physique moderne qui se veulent des réponses aux questions un peu générales posées par les élèves les années précédentes.

A Méta-théories/Théories/modèles et réductionnisme

On entend constamment les physiciens parler de «théories» et de «modèles» et il faut avoir à l'esprit que leur sens diffère légèrement du sens courant. Une théorie est un ensemble de concepts, de définitions, de principes, doublés en général d'un formalisme mathématique les résumant. Une théorie peut décrire comme ne pas décrire le monde physique (le terme n'a pas de connotation de ce point de vue là). Un modèle est une instance d'une théorie, ou une spécification d'une théorie, adaptée à une situation physique particulière. En général, on n'utilise le terme modèle que pour quelque chose qui décrit la réalité, fusse de manière volontairement approchée et simplifiée.

On peut illustrer cette distinction avec quelques exemples. La théorie des champs est un outil mathématique assez général que l'on peut utiliser pour plein de choses, le modèle standard est une théorie des champs particulière qui est notre meilleur outil prédictif pour les expériences de physique des particules. La théorie des cordes a été instanciée dans de nombreux modèles et c'est la trop grande abondance des modèles compatibles avec n'importe quelle réalité qui rend la théorie elle-même difficile à falsifier globalement.

Certaines théories ont un statut de généralité tel qu'elles font presque office de métathéories (le terme n'est pas universel). Il s'agit sortes de paradigmes supérieurs que doivent respecter toutes les théories physiques et qui sont des sortes de guides pour les construire. Je pense notamment à la théorie quantique dont la théorie quantique des champs et la théorie des cordes sont des représentantes, des réalisations. Les principes de la thermodynamique (conservation de l'énergie et augmentation de l'entropie²⁶), l'invariance de la vitesse de la lumière, font aussi partie de ces paradigmes auxquels on accorde une validité supérieure.

Même si cette introduction a surtout été consacrée à la physique fondamentale et donc à une approche réductionniste de la physique qui consiste à chercher les lois auxquelles obéissent les particules élémentaires, il faut souligner que c'est loin d'être la seule voie en physique (et c'est même peut-être loin d'être la voie principale). La plupart des modèles que l'on construit sont *phénoménologiques*, c'est à dire qu'ils cherchent à décrire une situation donnée de manière approchée avec des équations, un formalisme, qui décrit la réalité avec de plus gros grains. Le modèle peut avoir une justification microscopique mais ça n'est pas nécessairement le cas. La thermodynamique, par exemple, n'avait initialement pas de justification microscopique et cette justification est venue plus tard avec la physique statistique de Boltzmann. Depuis une trentaine d'années, avec la théorie quantique des champs, certains physiciens ont d'ailleurs fini par penser que toute théorie était forcément la théorie effective de quelque chose d'inconnu, que les théories sont une suite de poupées russes sans plus petite à la fin. Pour eux l'approche réductionniste est simplement la quête d'une phénoménologie à une échelle de plus en plus petite. Le point de vue est séduisant et trouve un écho favorable dans le grand public car il fait passer le physicien pour quelqu'un de très modeste. Néanmoins, il est souvent utilisé pour justifier l'absence d'ontologie précise et pour exonérer la physique du besoin cohérence globale. De plus il est souvent présenté comme inévitable pour des raisons fondamentales, ce qui n'est pas le cas : notre compréhension de la théorie quantique des champs suggère que ce n'est pas une théorie vraiment fondamentale, mais qu'il s'agit de la théorie effective de quelque chose de plus profond, mais cet exemple ne prouve rien en général et la régression pourrait très bien s'arrêter juste après. Bref je pense que la question mérite de rester ouverte.

26. Je lâche le mot innocemment mais on en reparlera plus tard dans le cours.

B Quel niveau de rigueur mathématique atteint la physique moderne ?

En physique tout est permis. Sachant que les théories elles mêmes n'ont de légitimité que leur capacité à décrire le monde, les physiciens n'ont aucune raison de demander une rigueur excessive et ils en profitent largement. Non seulement les physiciens utilisent de manière peu rigoureuse des mathématiques existantes, mais ils développent aussi toute une technologie de méthodes non rigoureuses, non validées par les mathématiciens, pour explorer des problèmes hors de portée de la magie blanche des mathématiques. À part dans de rares domaines, les mathématiques suivent la physique plus qu'elles ne la précèdent et la plupart des méthodes qu'inventent les physiciens ne sont validées rigoureusement que bien plus tard, voire jamais. On peut proposer un exemple particulièrement significatif. Malgré les énormes efforts qui ont été fournis depuis les années 80 pour construire une approche rigoureuse à la théorie quantique des champs, l'objectif est toujours hors d'atteinte. Les physiciens se sortent de leur théorie mal définie avec une artillerie de méthodes et d'arguments qu'on peut regrouper sous le nom de «renormalisation» et dont on est incapable de prouver la validité. Pire on peut démontrer que la méthode puissante et standard qu'utilisent les physiciens en pratique pour faire des calculs approchés en théorie des champs, «les développements perturbatifs en diagrammes de Feynman», peut décroître en précision à mesure qu'on affine les calculs, c'est à dire faire exactement l'inverse de ce qu'on lui demande. Cette situation peut sembler désespérante, la physique moderne tient mathématiquement sur du sable. Il faut néanmoins garder à l'esprit ce que cette magie noire de mathématiques à la louche a permis d'avancées. In-fine, les physiciens sont jugés sur la qualité prédictive de leurs théories, pas sur leur beauté mathématique.

Ceci étant dit, l'absence de construction rigoureuse implique parfois que l'on n'est pas sûr que la théorie soit cohérente, c'est à dire qu'elle ne possède pas de prédictions contradictoires ou ridicules. Devant une prédition absurde, une infini qui sort d'une équation, on n'est pas sûr que ce soit la théorie ou sa formalisation mathématique non rigoureuse qui soit en cause. C'est toujours vrai pour la théorie quantique des champs où la communauté est partagée entre ceux qui pensent que les difficultés mathématiques rencontrées sont anecdotiques, que la théorie est heuristiquement claire même si certains détails mathématiques sont à clarifier, et ceux qui pensent que les échecs de construction rigoureuse traduisent une faille plus ou moins profonde dans la théorie elle même, dans son contenu physique. On rencontre un spectre de points de vue analogue sur la théorie des cordes qui utilise essentiellement le même type de magie noire que la théorie des champs. C'est ce problème qui rend nécessaire la physique mathématique, cette branche de la physique dont l'objectif est d'augmenter a posteriori la rigueur des théories et d'étudier précisément leurs équations. Les physiciens mathématiciens s'imposent une rigueur intermédiaire entre celle de la physique standard et celle des mathématiques. Ils prouvent les résultats avec un niveau de rigueur tel que «personne ne doute qu'ils soient vrais» sans qu'ils soient pour autant forcément prouvés au sens mathématique du terme (c'est à dire en principe dérivables de la théorie des ensembles).

C Qu'est ce qui manque pour l'unification ?

J'ai expliqué plus haut qu'il y avait une incompatibilité fondamentale dans la Physique moderne. On possède une théorie fiable de la gravitation (la Relativité Générale), qui permet essentiellement de décrire les gros objets comme les étoiles, les galaxies et l'espace-temps lui même et une théorie fiable permettant de décrire les particules élémentaires à l'échelle microscopique, la mécanique quantique, plus précisément la théorie quantique des champs (avec laquelle on peut construire un modèle décrivant notre monde, le modèle standard). Cela signifie que dans une situation où les deux théories apportent séparément des corrections substantielles à la physique classique (ie typiquement au coeur d'un trou noir ou au moment du Big Bang), on ne possède tout simplement pas de théorie pour

décrire ce qui se passe, on ne sait pas ce que sont les lois ni à quoi elles s'appliquent²⁷. Heureusement, cela n'est pas très gênant en pratique car les situations où une théorie unifiée serait nécessaire ne sont jamais rencontrées expérimentalement. Ce dernier point est aussi terrible car il implique que l'on a très peu d'indices expérimentaux pour savoir à quoi la théorie ultime pourrait ressembler.

C'est un problème majeur de la physique fondamentale et beaucoup de physiciens s'y attaquent. Néanmoins, de manière assez surprenante a priori, la plupart des physiciens, ce qui inclue ceux qui travaillent sur ce sujet, ont une compréhension assez confuse de l'origine du problème. À la question : «Pourquoi est-il difficile de marier relativité générale et mécanique quantique ?» les physiciens trop souvent restent muets, répètent ce qu'on leur a appris ou répondent à côté.

La réponse simple que j'ai faite plus haut est la réponse standard. Appliquer les méthodes usuelles de la théorie quantique des champs à la gravitation, comme s'il s'agissait d'une force comme les autres, fournit une théorie vide en terme de prédictions pour une raison d'ailleurs a priori plus technique que fondamentale (on dit que la théorie est non renormalisable). Ça c'est un fait. Voilà, mais pourquoi donc est-on embêté ? Après tout, on pourrait simplement imaginer décrire l'espace-temps et la gravitation avec la relativité générale et décrire la matière avec la mécanique quantique, en superposant en quelque sorte les deux théories (sans vouloir rendre la gravité elle-même quantique). Peut-être que cela ne mériterait pas le titre de théorie «unifiée» mais ce serait a priori une théorie cohérente ce qui serait déjà bien.

Il y a je crois deux objections (relativement mauvaises) qui sont usuellement faites à cette proposition. La première c'est que la mécanique quantique doit être vue comme une méta-théorie, une sorte de paradigme général permettant de construire des théories physiques. Selon ce point de vue, assez courant, la mécanique quantique possède un statut analogue à celui de la logique ou de la théorie des probabilités dont elle serait une sorte de dépassement. Cette objection me semble assez absurde. Le succès de la mécanique quantique est mystérieux, qu'une théorie en apparence si bizarre produise des résultats si précis conduit à la sacrifier à outrance et à rêver que ses prescriptions soient universelles. Je ne crois pas qu'il faille pour autant s'imposer ce carcan par principe en général.

L'autre objection est un peu un argument de «l'homme de paille». Elle consiste à noter que la méthode la plus simple permettant de lier relativité générale et mécanique quantique sans rendre la gravité elle-même quantique produit tout un tas d'absurdités. Le problème vient du fait que la relativité générale relie explicitement la structure de l'espace temps et là matière (non quantique) qui y réside via l'équation d'Einstein. Si on souhaite lier la structure de l'espace temps à de la matière cette fois-ci quantique, alors la relativité générale ne dit pas a priori comment faire, il n'y a pas d'équation d'Einstein dans ce cas. Il y a une méthode simple et assez naturelle, pour étendre l'équation d'Einstein et c'est cette méthode qui conduit à des anomalies. Les physiciens déduisent de cet échec, peut-être un peu vite²⁸, qu'il n'existe aucune méthode permettant de faire une extension de l'équation d'Einstein cohérente. Bref, les physiciens pensent que scotcher les deux théories ne peut pas marcher ou que même si ça marchait ce ne serait pas très joli et donc cherchent à unifier les deux théories.

Pour résumer, rendre la gravité elle-même quantique ne marche pas avec la méthode standard de la théorie quantique des champs pour des raisons qui apparaissent essentiellement techniques et recoller simplement gravité et mécanique quantique est jugé peu crédible pour les raisons (un peu faiblardes) que j'ai citées. La quasi totalité de la recherche s'est désormais concentrée sur la gravité quantique, c'est à dire sur le programme consistant à «rendre quantique» la gravitation. Plusieurs voies de recherche sont explorées, les plus populaires étant la théorie des cordes, qui a pour ambition de tout unifier,

27. C'est d'ailleurs pour ça qu'il faut un peu se méfier des affirmations grandiloquentes qui peuvent paraître dans la presse scientifique grand public sur le coeur des trous noirs ou l'avant Big Bang : en l'absence de théorie faisant consensus, il s'agit uniquement de spéculations.

28. Je ne suis pas tout à fait neutre (et même absolument pas) car j'ai récemment proposé, avec le physicien hongrois Lajos Diosi, un modèle permettant de faire ce recollement dans un cas particulier et simplifié dans lequel on est capable de montrer qu'il n'y a pas d'anomalies. Le modèle perd probablement sa pertinence dans le cas général. Il permet néanmoins de montrer que recoller grossièrement deux théories n'est pas impossible en principe. J'arrête ici cette indécente auto-promotion.

et la gravité quantique à boucles, qui a l'ambition plus modeste d'unifier gravitation et mécanique quantique sans s'occuper des autres forces du modèle standard. Sans rentrer dans les détails, on peut dire sans risque que ces programmes sont encore loin du but et qu'aucun n'a atteint, de loin, un stade suffisant de développement et de tests pour qu'on puisse dire qu'il décrit la nature.

