

Maurice Goldman

Considérations diverses sur la physique

Elles concernent un certain nombre de points sur la présentation ou la signification de concepts de physique, et n'ambitionnent pas d'être des affirmations péremptoires, mais des entrées en matière de discussions.

1°- Description anthropomorphique.

La toute première introduction d'un concept physique doit nécessairement être de nature anthropomorphique. La raison en est que l'approche scientifique, physique ou autre, ne peut concerner, du moins au début, que le monde sensible: on veut décrire la nature que nous percevons, nous autres humains, et on ne peut pas faire autrement. Si, on peut, mais alors ce n'est plus de la science, c'est, selon les cas, de la métaphysique, de l'illusion, de l'illumination mystique, de la fumisterie, de l'exploration (de la bêtise humaine dont, disait Einstein, rien de tel ne donne une idée de l'infini), ou de la spéculation (essentiellement de la même bêtise humaine, forme à ma connaissance la plus rentable de la spéculation). Ce n'est que plus tard, quand les concepts ont évolué et se sont épurés, que l'on peut par extension devenir plus formel, ou considérer comme « phénomène » un concept issu de la logique des acquis, ou même ceux nécessités par la cohérence des équations. (C'est je crois la raison profonde pour laquelle les termes scientifiques sont souvent les mêmes que les termes de la vie courante, mais souvent avec des significations différentes et beaucoup plus précises. Ceci fait souvent saliver les pseudo-journalistes scientifiques qui se soucient moins de comprendre ce qu'ils disent que d'épater un public dont ils présument qu'il en sait encore moins. Exemples : tout ce qui concerne la « conquête spatiale », les durées cosmologiques, les lasers, « rayons de la mort », les particules « étranges » auxquelles on attribue « un nombre d'étrangeté », l'énergie du vide, les particules « virtuelles », encore que ceci se soit atténué avec l'émergence des images virtuelles). La façon même de présenter les choses dépend du niveau où on se place: enseignement à des débutants incultes ou sans motivation (on se demande alors pourquoi ils sont là, bien qu'il soit connu que beaucoup d'étudiants ne le sont que faute de savoir quoi faire et en tant que trajectoire d'attente, et que Papa est derrière, encore que la plupart de ceux-là font du droit), à de vrais étudiants, débutants motivés ou à différentes étapes de leur formation, ou encore à des professionnels qui désirent un texte de référence. Pour ceux-là, c'est différent, l'auteur commence d'emblée par déclarer que le lecteur n'en est pas à sa première introduction et n'a pas besoin de préliminaires, et il fonce sur le formalisme. Il a raison, le lecteur demande un texte pratique pour professionnel. Exemples: « Classical Mechanics », de Herbert Goldstein, Charles Poole et John Safko, Addison Wesley, 2001, « Classical Electrodynamics », de John David Jackson, Wiley and Sons, 1998, etc. La plupart sont en Anglais, seule langue dans laquelle on peut communiquer avec la communauté scientifique mondiale, avec quelques exceptions, les livres de M.Q. de Cohen-Tannoudji, Dui et Laloë, ou celui de Messiah, dont l'impact s'est fait essentiellement après leur traduction en Anglais. Je connais peu les livres de référence en Français, bien qu'il puisse y en avoir de bons.

2°- Le principe d'inertie.

De mon temps, il n'y avait pas de dispositifs dispendieux prétendant « démontrer » la validité expérimentale de ce principe, pas plus qu'aux temps de Galilée et de Descartes qui

l'ont énoncé. Pourtant, j'avais été convaincu par la façon dont on me l'avait introduit, de façon purement associée à une expérience de pensée, c'est-à-dire vulgairement anthropomorphique, comme voici. Considérons une table horizontale, c'est-à-dire telle qu'une boule posée dessus ne se mette pas à rouler, et un palet poli posé dessus. Par intuition de la troisième Loi de Newton, le palet n'est soumis à aucune sollicitation (aucune force). Si on le pousse à la main puis le lâche, il glisse sur une certaine distance, puis s'arrête. Si on recommence avec une table et un palet plus polis, le palet ira plus loin. Avec encore plus de poli de la table et du palet il ira encore plus loin. Par extrapolation d'une table et d'un palet infiniment polis, ce dernier, poussé et abandonné à lui-même continuera indéfiniment à glisser à vitesse constante jusqu'à l'infini. Ce n'est pas cher et c'est convaincant. Cela dit, l'expérience avec coussin d'air n'est pas mauvaise, à condition de la traiter comme vous l'avez fait, en démontrant aux élèves que toute expérience physique est entachée d'incertitudes incontournables et que la « vérification » expérimentale d'une loi est toujours approximative et que cette dernière ne résulte toujours que d'une idéalisation, ce qui constitue une autre leçon de physique (que j'ai beaucoup aimée). A ce propos, les critiques de votre livre par un certain Bouyrie, à la suite de sa présentation sur le forum de l'Udppc sont particulièrement...critiquables. Parler de « mesures » est aride? Mais vos élèves ont été passionnés et ont découvert qu'ils étaient loin d'être idiots, et la physique est quantitative ou n'est pas (cf. Galilée entre autres). Il s'étonne que Kepler se soit soucié d'un écart de 8'', mais il avait confiance dans la précision à 1'' près des mesures de Tycho Brahé, et sans ce souci nous en serions peut-être encore à Ptolémée. Quant au pourquoi d'insister parfois sur l'accumulation des décimales, cela dépend des cas. Par exemple, la mesure du rapport gyromagnétique de l'électron, dont l'écart à 2 provient de la polarisation du vide (jargon des physiciens des champs, qui a une signification précise), elle se relie à la constante de structure fine de l'électrodynamique quantique, mesurée de façon indépendante, et leur accord à 10^{-9} prouve qu'il y a quelque chose sous cette théorie et par extension sous l'ensemble de la théorie quantique des champs, même si on pense actuellement que ce n'est pas le dernier mot (Voir le site BIPM pour des chiffres : $g = -2,002\ 319\ 304\ 3622\ (15)$; $\alpha = 7,297\ 352\ 5376\ (50) \times 10^{-3}$). D'ailleurs, c'est précisément la raison pour laquelle les physiciens des champs s'acharnent sur les décimales, car comme me l'avait dit un ami grand théoricien : « C'est triste à dire pour un théoricien, mais ce dont nous avons besoin maintenant c'est de nouveaux résultats expérimentaux ». Pourquoi triste ? Les théoriciens ont effectivement besoin de savoir où exactement est la limite de validité du Modèle Standard, pour avoir une ouverture sur une nouvelle physique. Jamais auparavant ont les théoriciens eu tant envie que les résultats expérimentaux contredisent leurs prévisions théoriques. Une façon d'y parvenir est de faire effectuer par les expérimentateurs toutes les mesures possibles de phénomènes que l'on sait calculer pour voir jusqu'où ça marche. C'est ce à quoi a servi l'accélérateur LEP au CERN, pour « traquer » la validité de la théorie des interactions électrofaibles, en étudiant en détail les propriétés des bosons intermédiaires, surtout le Z^0 , mais aussi les W^+ et W^- . Tous les résultats ont collé avec les prévisions théoriques de façon écœurante. Une autre façon de faire est de pousser la limite des mesures de ce qui est calculable et mesurable de façon la plus précise possible, dans l'espoir qu'une nouvelle physique surgisse du désaccord d'une décimale élevée, d'où les mesures de g et de α . Un sous-produit inattendu est qu'il est devenu possible, au moyen du « geonium », inventé par Dehmelt (idem Prix Nobel pour ça), de mesurer avec la même précision extrême le facteur g d'électrons individuels. Le fait que toutes les valeurs coïncident aux erreurs d'expérience près prouve que tous les électrons sont tous identiques. Cela allait sans dire ; cela va encore mieux en le disant. Est-ce que le dédain méprisant basé sur l'ignorance complète de ce dont on parle serait la marque des enseignants de science ? Certainement pas, vous en êtes un contre-exemple.

3°- Le concept de force.

Il y a un avantage à introduire le concept de force sans immédiatement faire appel à l'accélération, c'est de montrer par une voie plausible de l'évolution de la pensée de Newton que sa Seconde Loi, l'Equation Fondamentale de la Dynamique, est une théorie minimale. En premier lieu, je ne trouve rien de choquant à faire appel à notre intuition de la force par analogie avec l'effort musculaire, à cause de la similitude des effets produits, en particulier de la force à distance exercée par la terre qui fait tomber les cailloux quand on les lâche. Si la marque de la respectabilité d'une grandeur physique est la possibilité de l'étalonner, ceci se fait couramment par la déformation d'un ressort (le peson), linéaire dans un certain domaine, ou par une balance, à bras de levier égaux (Roberval) ou inégaux (balance romaine). Alors que le concept de force par contact était courant, on a reproché à Newton d'avoir introduit des forces à distance à travers le vide, sans intermédiaire matériel. Ce n'est que partiellement vrai, car Archimède l'a pratiquement fait, avec sa théorie des leviers puis son principe hydrostatique. Galilée aussi, plus ou moins, encore qu'ils ne parlaient que de poids, mais Newton est le premier à avoir expressément utilisé le nom et le concept de force à distance. Encore que...Je rappelle la citation de Newton dans une lettre à un ami en 1693, copiée en VO dans mon message du 27 Mai, que je traduis, au mieux du sens, de l'anglais tricentenaire de Newton:

Il est inconcevable que la matière brute inanimée puisse, sans la médiation d'autre chose, non matériel, agir sur, et affecter une autre matière sans contact mutuel, comme elle devrait le faire si la gravitation dans le sens d'Epicure était essentielle et inhérente en elle. Et ceci est une des raisons pour laquelle j'ai désiré que vous ne m'attribuiez pas la gravité innée. Que la gravité puisse être innée, inhérente et essentielle à la matière, de telle sorte qu'un corps soit capable d'agir sur un autre à distance à travers le vide, sans l'intermédiaire de quoi que ce soit d'autre, par et à travers quoi leur action et force puissent être transmise de l'un à l'autre, est pour moi une grande absurdité, et je crois qu'aucun homme qui possède en matière philosophique une faculté de penser avec compétence, ne puisse jamais y tomber. La gravité doit être causée par un agent agissant constamment selon certaines lois ; mais la question de savoir si cet agent est matériel ou immatériel, je l'ai laissée à l'appréciation de mon lecteur.

On dirait de l'Aristote, ou à tout le moins du Descartes! Ceci montre que la furie manifestée par les Cartésiens de l'époque à l'égard de Newton était basée sur une méconnaissance de ses écrits. Il ne considérait manifestement sa théorie que comme une formulation heuristique dont le seul mérite était qu'« elle marchait », mais qu'elle ne touchait pas le fond des choses. Ce sont ses continuateurs qui, devant les succès grandissant des prévisions de la théorie, en ont donné une autre interprétation (En Mécanique Quantique, ils ont fait la même chose). Il faut remarquer que « l'horreur du vide » s'est perpétuée, non seulement pour l'hydrostatique de Pascal, mais aussi en électromagnétisme où on s'est cru contraint d'invoquer un éther comme milieu de propagation des ondes (éther transparent et infiniment rigide, pour que les ondes e.m. soient purement transversales). Ce n'est qu'avec la relativité, restreinte d'abord, que le vide a été réhabilité de façon un peu artificielle au prix d'une redéfinition de l'espace-temps.

4°- L'équation fondamentale de la dynamique.

L'effet d'une force résultant d'un agent causatif sur le mouvement d'un corps ayant un caractère indépendant de cet agent, on peut considérer une force en général sans préciser ce qui la provoque. On peut deviner une pensée fictive conduisant à l'équation fondamentale de la dynamique de façon suivante. Comme en vertu du principe d'inertie le mouvement uniforme d'un corps n'implique pas de force, l'effet d'une force sur le mouvement doit être de modifier ce mouvement. La manifestation de cette force ne peut donc pas être la vitesse instantanée mais ce qui caractérise sa variation, c'est-à-dire a priori sa vitesse de variation, l'accélération, la vitesse de variation de cette dernière, etc. (soit les termes successifs du développement de Taylor du mouvement instantané). La théorie minimale de la dynamique consiste alors en deux hypothèses, à savoir :

- 1- La seule grandeur caractéristique du mouvement instantané intervenant dans la description de l'effet d'une force sur le mouvement est l'accélération.
- 2- Cette accélération est proportionnelle à la force, avec un coefficient de proportionnalité dépendant du corps, mais indépendant de la vitesse, dont l'inverse est caractéristique de son inertie et est appelé sa masse :

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a}$$

On doit remarquer que la force et l'accélération sont des vecteurs parallèles. L'équation fondamentale ne concernant que la composante du mouvement parallèle à la force, la vitesse de la composante normale n'est pas affectée.

La dynamique d'un corps sous l'influence d'une force s'écrit donc au moyen d'équations différentielles du second ordre par rapport au temps.

Le développement de Taylor ne pouvait pas être connu de Newton, qui a quand même soupçonné le rôle du mouvement instantané dans la dynamique et inventer pour cela le calcul différentiel. Il est probable qu'il n'a pu concevoir au-delà de la vitesse que l'accélération, ce qui constitue déjà un bel exploit. Il se peut aussi qu'il ait calculé la dérivée seconde de la variation expérimentale de Galilée sur la chute des corps, extrapolée à partir des résultats relatifs aux plans inclinés.

On ne peut bien sûr pas savoir si les idées ci-dessus sont réalistes ou du simple roman, mais leur principe me plaît assez, et les raconter à des élèves, en parallèle avec des définitions plus formelles et rigoureuses, pourrait leur montrer que la théorie implique plus que ce qu'ils pourraient imaginer. De toute façon, il est bon de présenter les choses sous plusieurs angles, qui se complètent. Pour que cela ne perturbe pas les étudiants, il est peut-être mieux de leur fait d'abord un cours « carré » où tout est bien net et déterminé, et ce n'est qu'à la fin, et après des exercices d'application de la théorie qu'on peut se permettre de leur présenter d'autres aspects des mêmes phénomènes dans une perspective historique ou historiquement plausible.

L'intuition de Hamilton lui a permis d'arriver à une formulation équivalente à celle de Newton, mais plus générale, en introduisant le concept mathématique de l'action et celui du principe de moindre action. A partir de là, les mathématiques se sont déchainées et ont aboutit à ce qu'on appelle la Mécanique analytique avec comme point d'orgue les équations d'Euler-Lagrange. Pour la mécanique proprement dite, c'est-à-dire la prévision du mouvement des corps soumis à des forces données, elle n'est la plupart du temps pas nécessaire, mais elle est mathématiquement élaborée, ce que les théoriciens adorent, et de plus elle s'est transposée à tous les types d'interactions et constitue en particulier l'ossature, semble-t-il indispensable, de la théorie quantique des champs. C'est en ceci qu'elle constitue une « culture ».

5°- La loi de la gravitation universelle.

C'est je crois un exemple de la déduction d'une loi physique par idéalisation et abstraction des résultats expérimentaux. Ce n'est pas évident et résulte d'un processus réel

d'invention. Chacun ne peut pas inventer la loi de la gravitation (Laplace : « Monsieur Newton a eu bien de la chance. Il n'existait qu'un seul système du Monde, et c'est lui qui l'a découvert»), mais c'est une expérience commune à tous les chercheurs (du moins je crois), qu'après chaque découverte, théorique ou expérimentale, que l'on fait on a l'impression qu'elle était visible à tous mais qu'on ne la voyait pas (comme « la lettre cachée » d'Edgar Poe) et qu'on l'a simplement mise à jour, en lumière, « découverte » au sens de sortie de l'ombre. Ceci est en contradiction avec les opinions de Popper (hargneuses et complètement fausses), ou d'Einstein dans son article d'avant-guerre que je vous ai transmis (Je reviendrai sur le « Cas Einstein »). Je détaille ci-dessous les divers arguments qui sont plus en parallèle qu'à la suite, mais on ne peut pas écrire en parallèle.

- Newton a montré que la seconde loi de Kepler, la loi des aires, implique que la force de gravitation soit centrale.

- L'observation par Galilée que les corps lâchés sur terre tombent tous à la même vitesse, par extrapolation de milieux de chute de moins en moins visqueux, conduit à la conclusion que la force de gravitation produite par la Terre sur un corps est proportionnelle à la masse du corps. Par symétrie, elle doit aussi être proportionnelle à la masse de la Terre. Par extension, la gravitation est une force d'attraction entre deux corps massifs quelconques (d'où sa qualification d'universelle). Pour des corps de petite taille par rapport à leur distance, assimilables en première approximation à des points matériels de masses respectives m_1 et m_2 , la loi de gravitation est donc de la forme :

$$\mathbf{F}_{1/2} = - m_1.m_2. f(r_{1,2}) .(\mathbf{r}_2.-\mathbf{r}_1)/r_{1,2}$$

où \mathbf{r}_1 et \mathbf{r}_2 sont les cotes des deux points matériels, $r_{1,2}$ le module de leur distance, et f une fonction positive ne dépendant que de la distance et a priori décroissante de celle-ci . On étend la loi aux corps étendus par sommation, c'est-à-dire par une intégration, que Newton a inventée dans la foulée. Ceci nécessite de connaître la forme de la fonction $f(r)$, mais Newton a deviné, avant de le démontrer, que pour des corps étendus de forme sphérique (la Terre), le résultat est le même que pour un point de même masse et situé au centre de l'objet.

- En comparant l'accélération d'objets tombant sur terre et celle de la Lune en mouvement pratiquement circulaire autour de la Terre, compte tenu de ce que la taille de la Terre, la distance de la Lune et sa période orbitale étaient connues, il en a conclu que la fonction $f(r)$ était proportionnelle à $1/r^2$. Ce résultat a été confirmé pour les planètes tournant autour du Soleil en utilisant la troisième loi de Kepler reliant le demi-grand axe de l'orbite à la période de révolution.

6°- Simplification ?

La relativité générale va nettement plus loin puisqu'elle a rendu les masses responsables d'une courbure de l'espace-temps dans lequel les corps suivent des géodésiques. Il n'y a plus de problème, puisqu'il n'y a plus de force (Si, il reste un problème car on ne peut pas éliminer les autres forces, pour les interactions électriques, faibles ou fortes). Cette courbure est décrite par les équations tensorielles d'Einstein, qui sont aussi une espèce de théorie minimale, et qui comportent des dérivées secondes, si bien que par continuité elles s'étendent au vide où, dans la limite des faibles courbures, on retrouve les équations de Newton. C'est plus que ce qu'exigeait la cohérence, qui était simplement de retrouver les résultats de Newton. Aussi, lorsque de bons esprits prétendent que la théorie de Newton est fausse et a été dépassée par la relativité générale, ils sont totalement dans l'erreur, pour ce qui est de son domaine de pertinence, celui des faibles énergies. Ce que dit Einstein est que des approches conceptuelles aussi différentes que celle de Newton (fausse) et la sienne (vraie) conduisant aux mêmes résultats (à faible énergie), démontre l'erreur de l'opinion selon

laquelle c'est son accord avec l'expérience qui valide une théorie. Il a tort en ce qui concerne Newton car l'approche de ce dernier n'était pas conceptuelle mais empirique et à son propre avis provisoire. Il faut remarquer que la relativité, restreinte ou générale, causerait du chagrin à Newton, puisqu'elle maintient le concept de vide, même s'il est déformé par la présence de masses.

7°- Fin de la simplification.

Il y a pire, dans les théories quantiques des champs, où le vide, défini comme de milieu dans lequel le nombre de quanta de champ est nul, a une énergie non nulle, dite énergie de point zéro. On a bien essayé de l'éliminer en redéfinissant l'origine des énergies, mais elle est observable, dans l'Effet Casimir: entre deux plaques conductrices très proches (1μ) existe une force attractive. Elle est due au fait que les modes propres électromagnétiques possibles dans l'intervalle ne sont que ceux satisfaisant des conditions aux limites, et ils sont donc moins nombreux qu'à l'extérieur. La pression de radiation des modes du vide est supérieure à l'extérieur qu'entre les plaques, d'où l'attraction. Comme l'énergie du vide existe, on peut calculer la densité d'énergie du vide due aux interactions électromagnétiques, faibles et fortes, et la courbure de l'espace-temps qu'elle devrait induire, et qui se traduirait par l'existence d'une constante cosmologique, initialement introduite dans sa théorie par Einstein, puis ensuite rejetée. Le résultat du calcul est supérieur à ce que l'on pourrait observer de 120 ordres de grandeur! On (eux, pas moi qui n'y connais que peu de chose) a alors pensé qu'il existait un principe physique inconnu qui interdisait la production d'une telle courbure, et que la constante cosmologique devait être rigoureusement nulle.

C'est là que le satellite WMAP a fait des siennes (Il a un site internet très riche, mais, comme d'habitude ...en Anglais, sorry). Ce satellite a comme mission d'étudier le rayonnement cosmique fossile, en particulier les écarts éventuels de sa variation spectrale à celle d'un corps noir, l'amplitude et la distribution spatiale des fluctuations de sa température, sa polarisation, etc. Il vient de rendre public le résultat combiné de cinq années d'observations. L'univers est plat, sa composition en densité est de 4,6% de matière baryonique, la seule que nous connaissons et à laquelle s'appliquent nos théories physiques (Quelqu'un a écrit que c'était la culmination du principe de Copernic : non seulement ne sommes nous pas au centre du monde, mais la matière qui nous entoure et dont nous sommes faits est minoritaire dans ce qui existe) , de 23% de « matière noire froide», de nature inconnue, et dont la seule manifestation de sa présence est l'attraction gravitationnelle (mais les théoriciens ont des idées, peut-être même un peu trop. Comme je l'ai entendu à propos des astronomes : « Often in error but never in doubt »). Le reste, soit 72%, est constitué d' « énergie noire », ainsi qu'il est révélé par l'accélération de l'expansion au cours du temps, et la bien meilleure adéquation du modèle à l'observation de la formation des galaxies et amas de galaxies. Le meilleur candidat (dixerunt) pour l'origine de cette énergie est l'énergie du vide, sous forme de constante cosmologique. Comme dit plusieurs fois à propos de nouvelles découvertes déconcertantes : « Who ordered that ? ».

Voilà pour l'originalité de la nature du « vide », cher (mais pas tant) à Newton et répugnant à d'autres.

Il y a d'autres choses rigolotes, comme la découverte récente que les neutrinos ont des masses non nulles, mais ridiculement faibles. Pourquoi ? Comment ? Il faut bien laisser du travail à nos successeurs.

8°- Là ça se complique !

Pour ce qui est des concepts de vide, de masse et d'énergie (c'est la même chose), qui sont au cœur de la Mécanique il y a encore mieux (ou pire). Dans la théorie quantique des champs, les interactions (les forces) résultent d'échange de particules virtuelles, des bosons en l'espèce (on pourra y revenir). Pour l'interaction électromagnétique, ce sont des photons, de masse nulle, et ça va très bien. Pour les interactions faibles et fortes ces bosons sont massifs, ce qui explique leur faible portée (Théorie de Yukawa, confirmée par l'expérience). Ceci pose un grave problème. En effet, les théories praticables conduisent toutes à des divergences, auxquelles on ne peut remédier qu'en utilisant la « renormalisation » (on pourra en reparler si ça vous intéresse), laquelle ne marche pas avec des bosons massifs. Le remède a été trouvé par t'Hooft (Prix Nobel pour ça) : utiliser des bosons de masse nulle, renormaliser puis conférer une masse à ces nouveaux bosons. Comment ? En supposant que l'espace (le vide) baigne dans un champ, appelé « champ de Higgs » du nom de son inventeur, en état de rupture de symétrie spontanée, et qui par interaction faible avec les bosons sans masse leur confère une énergie sous forme de masse effective. Le champ de Higgs doit bien sûr être quantifié. Sous sa forme la plus simple, il doit conduire à un « boson de Higgs » dont l'existence a peut-être été détectée (sous forme de boson virtuel) au cours des dernières manipulations du Lep, l'accélérateur du CERN à collision d'électrons et de positrons, qui a permis en particulier une étude approfondie des bosons intermédiaires de l'interaction électrofaible Z^0 et W^+ , W^- . C'est dans le tunnel du Lep (27 km de circonférence, et non de diamètre comme ont dit les médias) qu'a été construit le nouvel accélérateur LHC (Large Hadron Collider), collisionneur de protons et d'antiprotons qui vient de démarrer et sur lequel les médias s'empressent de dire des bêtises. Les physiciens du CERN ont réussi à retarder d'un mois l'arrêt du Lep pour s'assurer de la réalité de leur détection du boson de Higgs, mais ça n'a pas suffi et le directeur du projet LHC a refusé de proroger la prolongation, au grand dam des physiciens qui craignaient que leurs concurrents de Fermilab à Chicago s'empressent de faire la découverte eux-mêmes, maintenant qu'ils savaient où chercher. Toujours rien de ce côté. Pour en revenir au LHC, son ambition première et primordiale est de découvrir « le » boson de Higgs réel, et s'il ne servait qu'à ça, ce serait déjà une grande réussite. Il n'empêche que le champ de Higgs ressemble fort au « deus ex machina » de la tragédie grecque pour résoudre le dilemme de la masse nulle pour renormaliser et de la masse non nulle pour rendre compte des résultats expérimentaux. Je l'ai dit à chaque fois que j'ai entendu une conférence sur le sujet, et à chaque fois on m'a répondu que c'était l'hypothèse la plus simple. On saura bientôt.

Dans ces théories, les masses de toutes les particules : bosons lourds, quarks, électrons, neutrinos, sont dues au mécanisme de Higgs. Comme je suis un perturbateur professionnel, chaque fois que j'ai entendu une conférence sur les difficultés que rencontrent les théoriciens pour quantifier la gravitation, j'ai demandé s'ils ne se trompaient pas de problème, si la véritable origine de la gravitation n'était pas dans le champ de Higgs, et si sa manifestation telle que décrite avec succès par la théorie de la relativité générale n'était pas un effet secondaire analogue à l'interaction de van der Waals. En général, le conférencier s'en tirait par une pirouette, mais le dernier, il y a quelques semaines, m'a répondu que certains théoriciens se penchaient sur cet aspect de la question.

Finalement, les questions de masse, d'énergie, de vide, de force, sont légèrement plus compliquées que ce qu'un vain peuple pense.

9° - Le cas de l'électromagnétisme.

Il constitue un véritable cas d'école de ce que les théories physiques peuvent découler directement des observations expérimentales, contrairement aux affirmations d'Einstein, encore !

L'électromagnétisme est entièrement décrit par les équations de Maxwell, plus la formule de la force de Lorentz. Ceci est très bien traité, entre autres, dans les Feynman Lectures on Physics, tome II. Chaque loi expérimentale, obtenue par extrapolation des résultats approximatifs des observations, donne lieu à une équation de Maxwell par passage à la limite infinitésimale avec un peu d'élaboration mathématique (le théorème de Gauss, conséquence triviale de la loi de Coulomb, et la théorie des fonctions de point, fruit direct du développement de l'électromagnétisme): théorème de la divergence (que j'ai appris sous le nom de théorème d'Ostrogradsky), théorème de Stokes, formules de Green. Ceci est bien décrit dans le tableau 18.1 de Feynman, tome II, chap. 18. Quant à la force de Lorentz, qui semble arriver en supplément imprévu, on la déduit des équations de Maxwell dans la formulation relativiste de la théorie, en conséquence de ce que le potentiel électrique et le potentiel vecteur forment ensemble un quadrivecteur dont la les composantes varient par transformation de Lorentz de la même façon que celles du quadrivecteur espace-temps. Ceci est également détaillé dans Feynman.

10°- Le « Cas Einstein ».

Einstein est un des plus grands physiciens de tous les temps, et ce n'est pas un hasard que l'on ait choisi 2005 comme Année mondiale de la physique, car c'était le centenaire de son « annus mirabilis » où il a effectué (à tout le moins publié) trois travaux fondamentaux, la théorie du mouvement Brownien, la théorie des photons et la relativité restreinte (complétée par son quasi-corollaire, l'équivalence masse-énergie). Les deux premiers étaient basés sur la thermodynamique statistique, dont sa maîtrise était phénoménale. Le troisième était d'inspiration complètement différente, basée sur des considérations de symétrie et d'invariance des lois naturelles. Il semble que ce ne soit pas le résultat des expériences de Michelson-Morley, mais plutôt le fait que l'effet du mouvement relatif d'une bobine et d'un aimant soit décrit par des équations différentes selon que c'est la bobine qui se déplace par rapport à l'aimant immobile, ou le contraire. Son exigence était que la forme des équations décrivant les phénomènes physiques reste inchangée par translation d'espace à vitesse constante. Elle concernait au départ l'électromagnétisme, dont les équations de Maxwell le décrivant étaient relativistes sans le savoir. C'était une exigence de cohérence logique, et c'est pourquoi il a affirmé en obtenant ses équations (essentiellement celles de la transformation de Lorentz, la métrique de Minkowski étant arrivée plus tard) qu'elles décrivaient une structure de l'espace-temps valable pour tous les phénomènes physiques, modifiant ainsi et la cinématique et la dynamique de la théorie de Newton sous l'effet d'une translation de vitesse uniforme.

Dix ans plus tard, après un début en 1907, est arrivée la relativité générale, bouleversant la théorie de la gravitation, basée elle aussi sur des considérations et des exigences générales de symétrie et d'invariance sur les propriétés de l'espace-temps en présence de densité locale d'énergie (de masse). Son retentissement mondial (tout est relatif, disaient d'un air inspiré les plombiers-zingueurs en buvant leur fine au bistrot le matin), assorti d'une certaine animosité (voir J.-M. Vigoureux : « La quête d'Einstein », Ellipses 2005), n'était motivé que par deux accords expérimentaux : l'excès de précession du périhélie de Mercure et l'observation par Eddington de la courbure de la lumière par le Soleil au cours de l'éclipse totale de 1919, après quoi la théorie de la relativité générale, considérée comme conduisant à des corrections minimes et sans intérêt pratique de celle de Newton, est pratiquement tombée en sommeil, sinon dans l'oubli. Le premier test « moderne » date de 1960, avec la célèbre expérience de « red-shift gravitationnel » par Pound et Rebka (J'ai connu Robert Pound en 1957. C'est non seulement un physicien remarquable mais un homme charmant. Il paraît qu'il n'est pas doué pour donner des cours, qui auraient été d'une

décourageante obscurité. J'ai entendu dire que pour faire son éloge à l'occasion de sa présentation pour un prix scientifique, le présentateur a eu cette formule malheureuse : « He stands alone in his class », qui collait de trop près à la réalité objective). Depuis, les tests se sont multipliés grâce aux vols spatiaux, et la théorie s'est révélée indispensable non seulement en Cosmologie, mais aussi pour le GPS, car s'il n'en tenait pas compte il mous enverrait dans le mur.

En tirant la philosophie de ces spectaculaires succès de ses deux théories de la Relativité, toutes deux issues de la méthode prônée par Descartes dans son « Discours de la méthode » : on prend sa tête dans les mains et on réfléchit jusqu'à ce que la Vérité s'impose à son esprit, Einstein avait trouvé le « truc ». Il le dit explicitement dans son texte que j'ai envoyé par courriel le 19 Juin 2008, dont je reproduis une partie (sa page 169, voir aussi le haut de la page 170) :

A un certain point de vue, je tiens aussi pour vrai que la pensée pure est capable de saisir la réalité, comme les anciens y ont songé.

A partir de là, il a passé pratiquement le reste de sa vie à chercher par « pensée pure » une théorie unifiée de la gravitation et de l'électromagnétisme, et ceci indépendamment de la nature quantique découlant de toutes les observations au niveau microscopique, non plus que des autres interactions fondamentales, faibles et fortes, des diverses symétries et principes de conservation, ni de toutes les nouvelles particules découvertes. Il se savait seul mais n'en a pas moins persévéré et n'est arrivé à rien.

Il a fait quelques apports importants à la physique quantique, en introduisant les concepts de transition stimulée et spontanée, en ajoutant un potentiel chimique à la formule de Bose pour la statistique des photons de façon à l'adapter aux systèmes de particules-bosons et tenir compte de la conservation de leur nombre, et en faisant la théorie de ce qu'on appelle la condensation de Bose, effectivement observée et étudiée depuis quelques années.

A côté de cela, il a en 1935 publié avec ses élèves Podolsky et Rosen un article où il décrit en tant qu'expérience de pensée le célèbre « Paradoxe EPR » (d'après les initiales des auteurs) destiné à montrer que la Mécanique Quantique, bien que fournissant des prédictions correctes et vérifiées expérimentalement, ne pouvait pas être une théorie complète car position et impulsion d'une particule ne pouvaient pas être des attributs aléatoires mais déterminés par de nouvelles variables ignorées de la théorie. Bohr a répondu, et la question en est restée au niveau des arguments jusqu'en 1964. C'est à cette date que John Bell, théoricien du CERN, a modifié le schéma expérimental d'EPR en remplaçant les mesures de position et d'impulsion par celles de la projection de spins $\frac{1}{2}$ le long d'axes déterminés. Il a montré que les hypothèses d'EPR, appelées depuis déterminisme local et séparabilité, impliquant l'existence de variables cachées, entraînaient des inégalités tout à fait générales, et indépendantes de la nature exacte de ces variables cachées, et connues comme « les inégalités de Bell ». Le plus important est que ces inégalités étaient en contradiction avec les prévisions de la Mécanique Quantique pour certaines expériences réalistes. On sortait ainsi du domaine des arguments pour celui de tests expérimentaux cruciaux. Ceci a été fait et refait sur des systèmes variés : dissociation de molécules d'hydrogène dans l'état para, cascade de deux photons corrélés dans une désexcitation atomique, plus récemment pour des paires de photons produits par d'autres méthodes (la « down-conversion »). Les résultats unanimes et sans appel sont de double nature : les inégalités de Bell sont violées, c'est-à-dire que toutes les théories à variables cachées sont fausses, et les prévisions de la Mécanique Quantique vérifiées. La

première expérience de précision sérieuse, effectuée en 1982 par mon confrère et ami Alain Aspect et ses collègues à l'Institut d'Optique à Orsay, correspondait à un écart type de l'incertitude statistique des résultats de moins de 2% de l'écart à la limite imposée par les inégalités de Bell, entre autres résultats d'importance. On a fait bien mieux depuis. Je ne sais pas si vous êtes au courant de ces inégalités et de ces résultats, mais sinon et si ça vous intéresse, je peux vous faire un topo écrit là-dessus, mais pas tout de suite. Pour « éclairer » des collègues avec qui j'en ai discuté il y a quelques années, j'ai trouvé une façon de démontrer les inégalités de Bell que je trouve particulièrement simple, et eux aussi, et si ça vous dit,... mais ce n'est absolument pas une obligation, la lecture de ce qui précède ayant peut-être été assez rassasiante.

Il a surgi de ces études le concept d'« états intriqués » et aujourd'hui de nombreux laboratoires s'y intéressent, dans l'espoir de fabriquer des ordinateurs quantiques et des dispositifs de cryptographie quantique. Je pense, et je ne suis pas le seul, que ça ne marchera jamais, mais ils s'amusent bien.

Le lien avec Einstein est la mise en évidence de ce que ses idées sur ce que devait être la réalité physique, basées sur son principe de simplicité mathématique conceptuelle, qui lui avait si bien réussi auparavant, ne collaient absolument pas avec la réalité expérimentale. La nature est encore plus compliquée. La conception selon laquelle « Je suis prêt à accepter tout ce que les phénomènes naturels veulent être, à condition qu'ils se conforment à certaines règles que je choisis moi » ne marche pas à tous les coups. Ceci ne retire rien à l'extraordinaire stature scientifique d'Albert Einstein, ça le rend simplement plus humain.