

Ce que nous devons à Einstein *

Serge HAROCHE

Prix Nobel de Physique (2012)

Professeur au Collège de France

Membre associé de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques

Je suis toujours très heureux de pouvoir revenir au Maroc - et c'est avec plaisir que je retrouve des collègues - et de pouvoir discuter de la science en général et de la physique en particulier. Je sais que c'est le Pr. Albert SASSON qui a eu l'idée d'une conférence sur Einstein. On peut se demander pourquoi parler d'Einstein maintenant? En fait, il y a une bonne raison d'actualité qui a mis Einstein sur le devant de la scène très récemment avec la découverte des ondes gravitationnelles. Einstein a eu bien d'autres contributions et c'est un défi que de vouloir parler de ce que nous devons à Einstein dans le cadre d'une conférence d'une heure.

Je vais essayer de le faire sans être trop spécialisé. En fait, Einstein a joué un rôle essentiel pour notre conception de la nature aussi bien du monde infiniment grand dans son ensemble que de l'infiniment petit. Il a contribué aussi bien à la connaissance de la relativité générale que de la relativité

restreinte, changé notre conception de l'espace et du temps par son rôle essentiel dans l'émergence de la théorie des quantas au début du siècle dernier. Il a, en particulier, en introduisant ce concept de dualisme entre les ondes et les corpuscules, bouleversé nos idées sur le monde microscopique. Déjà, en 1916, il avait prédit l'existence des ondes gravitationnelles. Ce qui a été observé au mois de septembre de l'année dernière n'est autre que la signature d'un événement qui s'est produit il y a 1,3 milliard d'années lumières, un événement cataclysmique consistant en la coalescence (la fusion) de deux trous noirs qui sont le résultat de l'effondrement d'étoiles massives. La résultante de cette coalescence a donc atteint la Terre au bout de 1,3 milliard d'années lumières et a été détectée à l'aide de deux observatoires. L'un se trouve en Louisiane et l'autre sur la côte ouest des Etats-Unis dans l'Etat de Washington. Ces deux antennes sont séparées de 3000 km et ont reçu le signal gravitationnel avec un décalage de quelques millisecondes. Il faut que les deux antennes détectent le signal pour qu'il n'y ait pas de parasite.



C'est la différence entre les ondes gravitationnelles, qui est détectée par ces antennes et les oscillations que l'on observe s'accélérer dans une phase finale. Ce qui est remarquable également, et c'est ce que Einstein avait prévu, c'est que la distance entre les deux miroirs se mesure par une distance extrêmement petite de l'ordre de 1 part/10²¹. Un laser tombe sur une lame semi-réfléchissante qui divise le faisceau en deux parties qui sont envoyées dans deux directions orthogonales. Ces deux faisceaux se réfléchissent sur le miroir et reviennent sur la lame semi-réfléchissante pour se recombinaer à nouveau et ressortent sur un bras détecteur. Ce dispositif mesure la différence

des temps de vol de la lumière dans les deux directions orthogonales. Si la distance est légèrement raccourcie dans une direction et légèrement rallongée dans la direction perpendiculaire, la lumière va mettre un temps légèrement différent pour parcourir les deux chemins. Cette différence de phase va se manifester par une

très petite différence de l'intensité lumineuse. Ce dispositif, que l'on appelle un interféromètre de Michelson, est extrêmement sensible.

Einstein et la relativité, entre «deux expériences de Michelson»...

Une expérience négative en 1887 : Michelson et Moreley cherchent à mesurer la différence des temps de parcours de la lumière dans la direction du «vent de l'éther» et dans la direction orthogonale... et ne trouvent aucune différence : il n'y a pas d'éther, comme Einstein devait l'expliquer 18 ans plus tard dans sa théorie de la relativité restreinte !

Une expérience positive en 2016 : les interféromètres géants de LIGO mesurent la différence des temps de parcours dans deux directions orthogonales et trouvent une petite différence signalant le passage d'une onde de gravitation dont l'existence avait été prédite par Einstein en 1916 !

(*) Texte reproduit à partir de la transcription de l'enregistrement audio.

Si on veut comprendre un peu mieux les apports d'Einstein, il faut faire appel à l'histoire des sciences et de la lumière en particulier, et on va voir qu'Einstein a joué un rôle dans ce domaine. En faisant un retour en arrière vers la fin du 18^{ème} siècle, on se rend compte que la physique reposait sur les 3 piliers de la physique :

- **La mécanique** qui s'intéresse aux mouvements des corps sous l'effet des forces auxquelles ils sont soumis. La mécanique a été créée au 17^{ème} siècle par Newton et par Galilée et elle a eu des succès très remarquables pour les mouvements des planètes.

- **L'électromagnétisme** qui avait triomphé en 1865 lorsque Maxwell a montré que l'électricité, le magnétisme et l'optique relevaient ensemble des mêmes équations, les fameuses équations de Maxwell.

- **La thermodynamique**, c'est-à-dire l'étude des échanges d'énergie et de chaleur entre les différents systèmes. La thermodynamique a culminé par les travaux de Boltzmann, physicien autrichien de la fin du 19^{ème} siècle, qui a défini de façon précise le concept d'entropie. L'entropie mesure le désordre d'un système physique et permet de voir dans quelle direction les échanges d'énergie et de chaleur s'effectuent.

Ces trois piliers ont donné lieu à des succès considérables et, au cours du 19^{ème} siècle, ont permis d'expliquer les problèmes qui n'étaient pas vraiment résolus. Il y avait tout d'abord un conflit conceptuel entre la mécanique et l'électromagnétisme. Les lois de la mécanique sont les mêmes dans tous les référentiels en mouvement uniforme les uns par rapport aux autres. Il n'y a pas de «référentiel privilégié» pour exprimer les lois de la mécanique (relativité Galiléenne). Par contre, les lois de l'électromagnétisme, tels que Maxwell les avait énoncés, permettaient de calculer la vitesse de la lumière et par définition une vitesse se rapportait à un repère particulier. Par conséquent, il était indispensable, par rapport à la physique classique, de définir dans quel repère les équations de Maxwell sont valables. Il y avait donc une dissymétrie entre les lois de la mécanique, qui sont indépendantes d'un référentiel et n'ont pas de référentiel particulier, et les lois de l'électromagnétisme qui sont bien définies par rapport à un référentiel.

Deuxième conflit qui est un conflit entre l'expérience et la théorie, c'est le fait que la thermodynamique et l'électromagnétisme, combinés ensemble, étaient incapables de décrire une propriété extrêmement simple qui est la distribution spectrale des corps chauffés. Lorsqu'on chauffe un

corps quelconque, il va se mettre à rayonner à une certaine température. La découverte de certains instruments au 19^{ème} siècle ont rendu possible la visualisation expérimentale du rayonnement d'un corps chauffé à une température donnée. Cette visualisation est matérialisée par une courbe en cloche. Mais de façon inattendue, lorsqu'on combinait les équations de Maxwell et les lois de la thermodynamique, on n'arrivait pas à cette courbe en cloche. En d'autres termes, il y avait un conflit ou désaccord de la physique expérimentale avec la théorie. Autrement dit, ça n'allait pas bien entre mécanique et électromagnétisme, ni entre électromagnétisme et thermodynamique. C'est pour résoudre ces deux conflits qu'on a dû faire appel à Einstein. Leur résolution a conduit à la révolution de la physique moderne : à la relativité et à la physique quantique.



La conférence de Serge Harroche à la Bibliothèque Nationale du Royaume, Rabat

Tout est parti d'interrogations sur la lumière. Les premières réponses scientifiques furent données au 17^{ème} siècle (à l'époque, l'Académie française des sciences venait d'être créée, il y a maintenant 350 ans). Newton pensait que la lumière était constituée d'un flux de particules alors que Huyghens (scientifique hollandais parmi les premiers membres de l'Académie française des sciences) pensait que la lumière était un phénomène ondulatoire représentée par une perturbation qui se propageait comme des vagues dans l'espace ou des oscillations à la surface d'un liquide. Ces deux théories étaient contradictoires et en concurrence. Une autre question accessoire était formulée ainsi : "est-ce que la lumière se propage de manière instantanée et donc occupe instantanément l'espace ou bien elle se propage à une vitesse finie?". Cette question n'était pas évidente puisque nous savons que la vitesse de la lumière est tellement grande.

Suivant la théorie de Newton, si la lumière était constituée d'un flux de particules, elle irait plus

vite dans un milieu transparent que dans l'air. Inversement, si la lumière était un phénomène ondulatoire, elle se propagerait moins vite dans un milieu transparent que dans l'air.

Au début du 19^{ème} siècle, la découverte des interférences semble donner raison à la théorie de Huyghens et infirmer celle de Newton. La mesure précise de la vitesse de la lumière dans l'air et dans un milieu matériel aboutit à la confirmation de la théorie ondulatoire de la lumière.

Ampère avait repris l'expérience d'Oersted (1820) et il a regardé quelles étaient les forces entre deux courants. Il a montré que les deux courants interagissent entre eux (s'attirent et se repoussent) par l'intermédiaire de champs magnétiques. Un premier courant crée un champ magnétique comme Oersted l'avait constaté et ce champ magnétique avait un effet sur un deuxième courant. En fait, Ampère travaillait chez lui dans son appartement, et c'était une époque fantastique où on pouvait faire des découvertes fondamentales en travaillant chez soi avec un petit montage de ce genre. Il fallait bien sûr être un Ampère pour cela ou un Faraday qui travaillait dans des conditions analogues en Angleterre. Alors qu'Ampère avait montré qu'un champ électrique crée un champ magnétique, Faraday avait montré qu'une variation de champ magnétique dans une bobine induisait un courant électrique dans une autre bobine: c'est le départ des moteurs électriques.

Ampère et Faraday étaient des empiristes qui ont été compris profondément, quelques années plus tard, par Maxwell. Ce dernier avait montré que les résultats d'Ampère et de Faraday avaient révélé que les champs électromagnétiques s'induisaient mutuellement: un champ électrique crée un champ magnétique et un champ magnétique induit un champ électrique, et ces deux champs se propagent dans l'espace. Maxwell a écrit les fameuses équations qui décrivent le champ électromagnétique et permettent de calculer la vitesse des ondes électromagnétiques. Cette vitesse dépend de deux paramètres essentiels: la force du champ électromagnétique (ϵ), qui intervient pour le calcul de la force entre deux champs, et la permittivité magnétique (μ), qui intervient pour le calcul de la force entre deux courants. ϵ et μ étaient connus par les expériences d'Ampère. En les mettant ensemble, Maxwell a trouvé pour la vitesse des ondes électromagnétiques un résultat très proche de la vitesse de la lumière et a conclu que la lumière est une onde électromagnétique. Il dit qu'il y a deux valeurs qui sont très proches 298.000 km/s (résultat de l'expérience de Foucault) alors que

la valeur qu'il a trouvée était de 300.000 km/s. Il conclut que l'accord montré par ces résultats semble montrer que la lumière et le magnétisme sont des phénomènes de même nature et que la lumière est une perturbation électromagnétique qui se propage à travers l'espace suivant les lois de l'électromagnétisme.

La lumière visible pour nos yeux s'étend entre 0,8 μ et 0,4 μ . En deçà, on trouve les ondes radio, dont l'importance pour les télécommunications n'est plus à démontrer. Au-delà, on trouve les rayons X et les rayons Gamma qui ont des applications en médecine comme en cristallographie et autres domaines. Les équations de Maxwell ont ouvert la voie à un bond technologique; toutes les technologies du 20^{ème} siècle sont liées à la compréhension de ces équations. Mais elles ont conduit également à des questions fondamentales qui ont donné naissance à la relativité et à la théorie du quantum; et c'est là qu'Einstein intervient.

Une question cruciale s'est posée à Einstein dès qu'il a pris connaissance des équations de Maxwell: dans quel repère la vitesse de la lumière est de 300.000 km/s? Maxwell nous dit que la lumière se déplace à cette vitesse mais dans quel système de référence? A quoi ressemblerait-elle si on pouvait voler aussi vite qu'elle? Est-ce qu'on peut rattraper un rayon de lumière?

Cette question a beaucoup intrigué le jeune Einstein et un élément de réponse donné par Galilée stipulait que "les lois de la mécanique sont les mêmes pour tous les observateurs en translation à vitesse uniforme": c'est la relativité du mouvement. Cette invariance doit s'appliquer à l'électromagnétisme (et à toute la physique): c'est la théorie de la relativité restreinte. Depuis Copernic, on savait que la Terre se déplace à une vitesse de 30 km/s. Le fait de renoncer à l'existence d'un repère privilégié, c'est une partie du renoncement à l'anthropocentrisme que l'on considérait au Moyen Age comme le centre du monde. Einstein a décidé de considérer que la relativité Galiléenne pouvait s'appliquer à l'électromagnétisme et, à partir de là, la suite vient très facilement. Si la vitesse de la lumière est une propriété de la nature, elle doit être la norme pour tous les repères. Ainsi, l'espace et le temps ne sont pas considérés comme deux concepts indépendants mais plutôt combinés en un concept espace-temps.

Einstein a montré que si l'espace et le temps sont liés, il en est de même pour la masse et l'énergie ($E = mc^2$) le corps étant au repos. La lumière,

de masse nulle, transporte de l'énergie mais transporte également de l'impulsion. En 1915, Einstein a généralisé le principe de la relativité pour tenir compte, non seulement de ce qui se passe dans des repères en mouvement uniforme mais également ce qui se passe lorsque les repères sont accélérés. Ceci a conduit Einstein à relier la force de gravité aux forces d'inertie qui se produisent dans des repères accélérés. Ceci a donné naissance à la théorie de la relativité générale qui relie le concept de masse et d'énergie au concept de masse et de temps. La masse et l'énergie déforment l'espace-temps et cet espace-temps déformé dicte à la matière comment se mouvoir. La lumière, qui se déplace en ligne droite en l'absence de masse, va se trouver courbée (voir ses rayons défléchis). La gravitation, comme la lumière, ne peut se propager instantanément, elle va se propager à une vitesse finie, c'est ce qu'on appelle les ondes de gravitation qui vont à la vitesse de la lumière. De la même façon, si une horloge se rapproche d'une masse pesante, elle va ralentir en l'absence d'un champ de gravitation et donc les horloges ralentissent au voisinage d'objets massifs. Tout ceci relève des lois de la relativité générale, qui est à la base de la cosmologie ou l'histoire de l'univers. Elle a en particulier prédit l'existence de phénomènes particuliers ou de singularités et notamment l'existence des trous noirs. C'est l'éclipse de 1919 qui a permis de vérifier la déflexion d'un rayon lumineux tangentant le soleil et, ainsi, a vu le jour le premier texte (d'Einstein) sur la relativité générale.

J'en viens maintenant à la deuxième révolution qui est celle de la physique des quanta et, à nouveau, Einstein a joué un rôle fondamental là dedans, déjà en 1905, la même année où il a fini ses papiers sur la relativité restreinte.

La question que j'ai déjà évoquée tout à l'heure, c'est pourquoi il y a une courbe en cloche dans la lumière émise par les corps chauffés? Si on applique simplement la thermodynamique et l'électromagnétisme, on trouve que l'intensité rayonnée doit diverger de plus en plus lorsqu'on va vers l'ultra-violet. C'est ce qu'on appelait à la fin du 19^{ème} siècle 'la catastrophe ultra-violet', catastrophe puisqu'il y avait un conflit entre l'expérience et la théorie qu'on n'arrivait pas à résoudre. Il y avait un deuxième conflit, dont je n'ai pas parlé pour l'instant, qui est comment comprendre l'effet photoélectrique : lorsqu'on éclaire un métal avec de la lumière, des électrons sont éjectés (les électrons venaient d'être découverts par le physicien anglais Thomson à la fin du 19^{ème} siècle). Les propriétés de cet effet photoélectrique sont très bizarres : l'énergie des électrons éliminés ne dépendait pas

de l'intensité lumineuse. Si l'on éclairait de plus en plus fort, les électrons n'allaient pas plus vite, seulement on en produisait plus. Einstein a montré que ces deux difficultés pouvaient être résolues si l'on admettait que la lumière, finalement, était formée de grains discrets qu'il a appelé les quanta à l'époque et qu'on appelle maintenant les photons. La lumière se manifestait sous forme de quantités discrètes : les photons. Chaque photon porte une énergie proportionnelle à l'intensité de la lumière et, puisque l'énergie et l'impulsion sont liées, si chaque photon transporte une énergie $h\nu$ il va avoir une impulsion $h\nu/c$ ou encore h/λ où λ est la longueur d'onde. On voit que Huyghens et Newton seraient réconciliés par Einstein qui a établi que la lumière était formée d'ondes et de particules. C'est sans doute un dualisme qui les aurait surpris... et qui surprenait aussi Einstein. Ondes et particules apparaissaient comme irréconciliables pour un physicien classique. L'onde est délocalisée dans l'espace partout à la fois, une particule est localisée dans un endroit bien précis.

Comment peut-on réconcilier ces deux notions?

L'expérience d'interférence de Young permet de comprendre plus facilement ce qui se passe dans ce nouveau formalisme : dualisme onde-particule et principe de superposition. On va faire cette expérience dans des conditions où l'intensité est tellement faible de sorte que les particules traversent l'interféromètre un à la fois. Le principe est basé sur : une source, deux fentes, la lumière passe par les deux fentes et ensuite elle est recueillie sur un deuxième écran.

La question qui se pose est : "si les photons traversent l'interféromètre un à un, comment se fait-il qu'ils arrivent seulement un à un sur l'écran?"

Pour essayer de comprendre cela, il faut admettre que chaque photon passe par les deux fentes à la fois et donc il n'y a plus de trajectoire au sens classique. C'est ce qu'on appelle le principe de superposition de la physique quantique, la particule est dans un état superposé. Le même dilemme existe pour la matière : les atomes, les électrons et les molécules sont à la fois des ondes et des particules (de Broglie, 1923) et le principe de superposition s'applique à eux aussi. Lorsqu'on généralise tout ça, on arrive au fameux paradoxe de «chat de Schrödinger».

Pour résumer, la physique quantique est basée sur le dualisme onde-particule. Einstein (1905) nous a dit que la lumière est une onde et un ensemble de photons. De Broglie (1923) a généralisé : les atomes sont des particules et aussi des ondes de

matière. Une façon d'exprimer ce paradoxe : **Light is a WAVE / Light is a particle.**

Pour de Broglie (1920), qui a introduit la notion de complémentarité, l'état observé d'une particule dépend du dispositif expérimental. Les ondes que l'on étudie en physique quantique sont des ondes de probabilité. L'intensité de l'onde, c'est la probabilité de trouver la particule. En d'autres termes, un autre aspect de la physique quantique, c'est le hasard. Chaque détection est aléatoire.

Contribution d'Einstein au développement du laser

Le développement du laser (laser à photons et laser à atomes) est également une idée d'Einstein qu'il a développée en 1916. Il y a deux mécanismes par lesquels les atomes peuvent émettre de la lumière. Le premier mécanisme, c'est ce qu'on appelle le mécanisme spontané, découvert par Niels-Bohr : si un atome est excité, les électrons sont portés sur une orbite possédant plus d'énergie; l'atome peut retomber dans un état fondamental sub-quantique par ce qu'on appelle un saut quantique, en émettant un photon, et ce photon est émis dans une direction aléatoire.

Einstein a essayé de retrouver les lois du rayonnement thermique en décrivant le bilan des échanges d'énergie entre un ensemble d'atomes et la lumière. Il a tout de suite compris que pour faire cela, il fallait ajouter à ce mécanisme d'émission spontanée d'autres mécanismes qu'on appelle l'émission stimulée. Si un atome est excité et si un photon tombe sur cet atome, l'atome pourra émettre un autre photon dans le même mode que le premier (même direction, même polarisation, même fréquence ...). C'est un phénomène d'amplification de la lumière: un photon entraîne l'émission d'un second photon identique, etc... et ce phénomène là s'ajoute au phénomène d'émission spontanée. Lorsqu'on combine ces deux phénomènes, alors on peut retrouver les lois du rayonnement thermique qui constitue la base d'un laser.

Un laser est constitué par un ensemble d'atomes dans une cavité formée de miroirs: vous excitez ces atomes pour les porter dans un état de grande énergie. Les premiers photons sont émis de façon aléatoire et sont amplifiés par le passage sur d'autres atomes. Il a fallu attendre une cinquantaine d'années entre la conception du principe du système par Einstein et la réalisation du premier laser en 1960.

Dans le cas de la lumière classique (soleil, lampe), les atomes émettent spontanément des radiations de phase, fréquence et directions aléatoires. Au contraire, dans un rayon laser, les atomes émettent de façon stimulée du rayonnement '**au pas**', ils rayonnent tous avec la même phase, la même fréquence, la même direction; c'est une **lumière ordonnée** en comparaison avec la lumière désordonnée des lampes. Les faisceaux lumineux d'un rayon laser ont des propriétés extraordinaires : intenses, directifs, monochromatiques, cohérents, qui permettent de faire des choses extraordinaires. Par exemple, on peut concentrer la lumière d'un faisceau laser et faire fondre un métal, dissocier complètement le métal et former des plasmas de l'ordre des températures qui existent à l'intérieur du soleil (des dizaines de millions de degrés). On peut inversement utiliser l'équation de radiation pour refroidir la matière aux températures les plus basses que l'on sait. Les faisceaux laser sont exceptionnellement stables, les oscillations de la lumière laser peuvent ne pas rater une seule oscillation sur des propagations sur des dizaines de milliers, voire des millions de kilomètres. Donc, c'est un outil très flexible pour les recherches fondamentales en physique, en chimie, en biologie et les applications à la métrologie, en médecine, en télécommunications et autres domaines.

Einstein, en 1925, a eu l'idée de remplacer les photons par des atomes à des températures très basses pour obtenir de la matière cohérente. Ces atomes que l'on peut ainsi refroidir sont appelés des Bosons: ce sont des atomes formés d'un nombre pair de particules élémentaires. Si on ajoute le nombre de photons, de neutrons et d'électrons et que l'on obtient des nombres pairs, nous avons alors des atomes qui ont un comportement grégaire d'être tous dans le même état quantique. Mais il a fallu attendre soixante-dix ans pour que l'on puisse avoir les moyens de refroidir les atomes suffisamment pour observer ces effets.

Enfin, je voudrais revenir sur la mesure du temps. D'après la théorie de la relativité, le temps ne s'écoule pas de la même façon suivant l'endroit où l'on se trouve par rapport à une phase gravitationnelle ou suivant la vitesse à laquelle on se déplace. Jusqu'au milieu du 20^{ème} siècle, les horloges n'étaient pas assez précises pour observer cet effet. Ceci est devenu possible avec les horloges atomiques qui utilisent les propriétés quantiques et permettent donc de mesurer les effets qu'Einstein avait prévus dans le cadre de la théorie de la relativité. Pour cela je vais conclure par une brève histoire de la mesure du temps.



Comment on mesurait le temps au moyen âge?

Réponse: à l'aide d'une **horloge à tour** suspendue dans la tour de l'église qui a évolué en horloge à pendule (développée par Galilée et Huyghens au 17^{ème} siècle) par le remplacement du fil à oscillation par un pendule. Dans ce cas, on mesurait le nombre d'oscillations à l'aide d'un mécanisme d'échappement. Au 18^{ème} siècle, le pendule mécanique a été remplacé par un ressort et, ainsi, a contribué à l'apparition des premières montres à ressort et des chronomètres de marine (Harrison) très importants pour la navigation. Au 20^{ème} siècle, on a remplacé les oscillations mécaniques par les oscillations piézoélectriques (des diapasons en quartz). Dans tous les cas, le principe est toujours le même: on doit avoir un oscillateur mécanique ou piézoélectrique qui doit être couplé à un mécanisme d'échappement capable de compter les périodes pour mesurer le temps.

Qu'est-ce qu'on peut dire de l'incertitude?

Les horloges du moyen âge avaient une incertitude de 1%: chaque jour il fallait corriger le système d'environ un quart (1/4) d'heure. Les pendules (Galilée et Huyghens) ont une précision de l'ordre de 10^{-4} c'est-à-dire environ 1 mn à quelques secondes par jour. Les chronomètres de marines (10^{-6}) c'est-à-dire on arrive à la seconde par mois et les horloges à quartz à peu près une seconde par an. Quoique des progrès énormes aient été réalisés en quatre siècles, ces horloges sont encore trop peu précises pour observer les effets relativistes, 10^{-8} est encore insuffisant, il faut arriver à 10^{-13} voire 10^{-14} pour observer les effets.

Je voudrais également conclure en disant qu'il y a eu en 6 siècles beaucoup moins de progrès que durant les 50 dernières années. En fait qu'est ce que c'est qu'une horloge atomique? C'est une horloge qui mesure les oscillations dans un atome. La période d'oscillation est fixée par les lois de la physique quantique et elle est d'une stabilité absolument extraordinaire. Une horloge atomique utilise des atomes de césium (N. Ramsay), dont les franges d'interférence sont liées à deux probabilités quantiques, et possède une incertitude d'une seconde sur un million d'années. Ce principe se retrouve dans la technologie des GPS. Les horloges atomiques, embarqués sur des satellites, s'échangent les signaux mutuellement ainsi qu'avec les récepteurs terrestres (ordinateurs ou boîtiers GPS) et, par triangulation, définissent l'endroit de votre position avec une erreur de 1 mètre.

Les horloges atomiques corrigent les effets de relativité restreinte et de relativité générale. Les horloges atomiques actuelles sont basées sur des fréquences micro-ondes, mais il existe encore des fréquences encore beaucoup plus élevées dans les horloges optiques qui vont signer une précision encore plus grande. Il existe de types d'horloges atomiques qui sont en compétition pour redéfinir la seconde et on arrive à des précisions de l'ordre de 10^{-17} - 10^{-18} , ce qui correspondrait à une erreur d'une seconde sur 14 milliards d'années.

Je voudrais insister, pour conclure, sur l'observation de la coalescence de deux trous noirs dans des ordres de grandeur vertigineux. Elle correspond à la fusion respectivement de 36 et 29 masses solaires et aboutit à 62 masses solaires, ce qui fait que 3 masses solaires sont rayonnées en ondes gravitationnelles. En près de $2/10^{66}$ de seconde, il y a eu autant d'énergie gravitationnelle rayonnée que celle de la lumière émise par 3000 soleils en 3.10^{17} secondes. C'est un événement d'une puissance inouïe, plus grande que la puissance rayonnée par toutes les étoiles de l'Univers ensemble. Ce genre d'événement doit être statistiquement fréquent et l'astronomie gravitationnelle ouvre une nouvelle fenêtre sur l'observation de l'Univers. Au delà des interféromètres terrestres (LIGO-Virgo) on prévoit d'aller fabriquer des interféromètres dans l'espace, le projet LISA (Laser Interferometer Space Antenna) est un projet gigantesque en cours de développement. LISA est composé de trois satellites qui vont aller graviter autour du soleil, maintenir leurs distances stables, pour voir comment ces distances varient lorsque les ondes gravitationnelles passent sur le système. C'est un projet pharaonique de l'astrophysique qui est en développement actuellement.

En conclusion, à la question «**Que devons-nous à Einstein?**», on peut dire : **BEAUCOUP**. La relativité restreinte a changé notre conception de l'espace-temps, la relativité générale nous a donné les bases de la cosmologie et la théorie des quanta a ouvert la voie à toute la physique du monde microscopique, avec ses innombrables applications aux technologies nouvelles. Mais Einstein n'était pas satisfait par tout ça, en particulier par la physique quantique. Il n'aimait pas les idées de hasard quantique et de non-localité. Il était plus convaincu que la théorie quantique devrait laisser la place à une théorie plus générale dans laquelle la réalité classique reprendrait ses droits... Mais ceci est une autre histoire...