

# Masse et temps : deux grandeurs conjuguées

---

Christian J. Bordé

Académie des Sciences

Je voudrais vous parler du lien très fort qui existe en physique entre les deux concepts de base que sont la masse de tout objet et son temps propre et des conséquences de ce lien. Le temps propre est la variable qui décrit l'évolution interne d'un objet. Pour une horloge c'est le temps qu'elle affiche dans son référentiel propre et à partir duquel on obtient après correction le temps coordonné et pas l'inverse. Je vais vous inviter à le considérer comme une cinquième dimension et à rejoindre la démarche du grand physicien Theodor Kaluza, mais rassurez-vous cela va rester concret.

Mon chemin personnel vers cette cinquième dimension passe par l'interférométrie à ondes de matière. On sait depuis Louis de Broglie (1923) qu'on peut associer une onde à toute particule massive. La phase de cette onde est simplement la masse que multiplie le temps propre de la particule (en plus du facteur de phase spatio-temporel habituel). Ce produit s'appelle l'action et pour donner la phase, il est rapporté à l'unité naturelle d'action qu'est la constante de Planck. Masse et temps propre sont donc des variables quantiques conjuguées (tout comme impulsion et espace ou énergie et temps coordonné) et c'est là la véritable signification de la controverse entre Bohr et Einstein (Solvay 1930) illustrée par la boîte à photons, analogue du microscope de Heisenberg pour le couple temps et masse. On ne peut pas mesurer simultanément ces deux grandeurs avec une précision infinie contrairement à la suggestion d'Einstein.

La conséquence pour le système d'unités de base est la nécessité de coupler les définitions des unités de temps et de masse ce qui n'est pas le cas aujourd'hui.

Comme pour la lumière, on a appris à faire interférer les ondes de matière avec elles-mêmes. Cela consiste à les diviser en 2 grâce à une séparatrice puis à laisser se propager librement les deux modes et enfin à les recombinaison. Suivant leur phase relative les deux ondes vont se renforcer et l'interférence est constructive, ou se neutraliser et l'interférence est destructive. Plus généralement, la mesure du déphasage est représentative des différences de chemin parcouru et permet celle des champs rencontrés par les deux ondes.

Les premières expériences de ce type datent des années 70 avec les paires de Cooper d'électrons dans les matériaux supraconducteurs puis des années 75 avec les neutrons diffractés par des réseaux cristallins de silicium. Nombre d'effets sur ces ondes liés à la gravitation, aux champs d'inertie et aux champs électromagnétiques ont été ainsi démontrés.

Au début des années 80, l'interférométrie atomique et moléculaire a ouvert un nouveau domaine grâce à la possibilité de changement d'état interne et c'est le mouvement interne aux atomes qui rythme leur temps propre qui constitue ma dimension supplémentaire.

Dans un atome chaque état interne correspond à un mode de propagation stationnaire distinct de l'onde électronique autour du noyau et à une énergie interne différente donc aussi à une masse différente de l'atome.

Pour interroger ces degrés de liberté internes à l'atome il faut coupler ces modes au moyen d'une séparatrice et c'est ce que réalise la lumière lors de l'excitation des électrons d'un niveau à un autre. L'interférence produite permet de réaliser une horloge atomique puisque le battement ainsi créé entre un mouvement interne à l'atome engendré par deux états de masses différentes et l'oscillation lumineuse donne accès au temps propre de l'atome.

Mais la lumière fait plus. J'ai pu montrer qu'elle pousse aussi les atomes dans l'espace par échange de quantité de mouvement. Elle peut donc jouer aussi le rôle de séparatrice externe pour les ondes atomiques pour réaliser un interféromètre dans l'espace habituel comparable à l'interféromètre à neutrons. Cet interféromètre atomique est à la base de nombreuses applications et entre autres de la mesure de la masse des atomes  $m/h$  en unités de fréquence.

C'est donc le temps propre conjugué de la masse dans l'expression de la phase qui vient compléter les quatre dimensions usuelles de l'espace-temps et dans cet espace élargi toute l'optique atomique devient identique à l'optique lumineuse habituelle de l'espace-temps classique. Il n'est plus nécessaire d'ajouter arbitrairement à la main l'action comme facteur de phase additionnel introduit par Feynman.

A cinq dimensions, la loi fondamentale de propagation des particules associées à des ondes qu'elles soient lumineuses ou atomiques devient extrêmement simple : la différence de phase totale s'annule sur un trajet.

De plus la gravitation et l'électromagnétisme sont intégrés dans la métrique à 5D. C'est ici que nous retrouvons Theodor Kaluza. Son objectif était précisément d'intégrer l'électromagnétisme dans une généralisation de la Relativité Générale grâce à l'introduction d'une cinquième dimension. Quelle était cette cinquième dimension ? Elle sera interprétée par Oskar Klein comme une dimension compactifiée, c'est-à-dire enroulée sur elle-même sur un rayon très petit ~ longueur de Planck et donc inaccessible à nos sens. Dans le cas de l'électron, l'impulsion selon cette dimension est sa charge électrique. Cette approche théorique a beaucoup intéressé Einstein qui a écrit à Kaluza:

« J'ai le plus grand respect pour la beauté et la finesse de votre conception »

et qui plus tard dira de celui-ci :

« On ne peut encore dire pour l'instant si l'idée de Kaluza sera validée, mais il faut lui reconnaître du génie »

Il a quand même pris deux ans pour recommander la publication du travail de Kaluza en 1921.

J'ai pu faire récemment le lien entre mon optique atomique à 5D et la théorie de Kaluza-Klein en fixant la valeur du champ scalaire de dilaton qui donne le rapport entre la dimension compactifiée et le temps propre. L'optique à 5D avec son lien direct au temps propre est cependant beaucoup plus générale que Kaluza-Klein et s'applique à toute particule massive aussi complexe soit-elle, dont le mouvement interne crée la masse et est donc aussi source du temps propre.

La métrologie fondamentale aujourd'hui s'inscrit parfaitement dans le cadre géométrique de cette optique à cinq dimensions.

Références : <http://christian.j.borde.free.fr>

Ch. J. BORDÉ, [Reforming the international system of units: On our way to redefine the base units solely from fundamental constants and beyond](#) ,

To appear in: The reform of the International System of Units. Philosophical, historical, and sociological perspectives. Journal for General Philosophy of Science, Editors Nadine de Courtenay, Olivier Darrigol, Oliver Schlaudt

<https://arxiv.org/pdf/1602.01752v1.pdf>