

Quand l'électronique ouvre les portes du monde quantique

Fabrice Wiotte

L'électronique est une science vieille de plus de 200 ans. C'est une partie de la physique qui étudie et utilise les variations de grandeurs électriques (champs électromagnétiques, charges électriques, courants et tensions électriques) pour capter, transmettre et exploiter de l'information. Faraday, Ohm, Joule, Maxwell, Volta, Coulomb, Galvani, Hertz, Tesla... autant de scientifiques illustres qui ont donné depuis le XVIII^e siècle les premiers outils de base de l'électronique. L'invention de la diode par Fleming en 1897 a été le point de départ de plusieurs avancées technologiques qui ont suivi comme la triode, les transistors et les circuits intégrés. Elles ont joué un rôle déterminant dans la popularisation de cette technologie aujourd'hui présente partout dans notre monde.

On peut légitimement se demander si, de nos jours, l'électronique a encore un impact dans la science de pointe? Pas de mystère... la réponse est oui, et plus que jamais! Au-delà des dernières applications comme celles liées à l'Intelligence artificielle qui vont changer notre façon d'appréhender le monde, un magnifique exemple de son influence peut être trouvé dans le domaine de la physique quantique – ensemble de théories physiques qui cherchent à expliquer le comportement des atomes et des particules – et plus particulièrement dans les expériences liées au refroidissement d'atomes par la lumière.

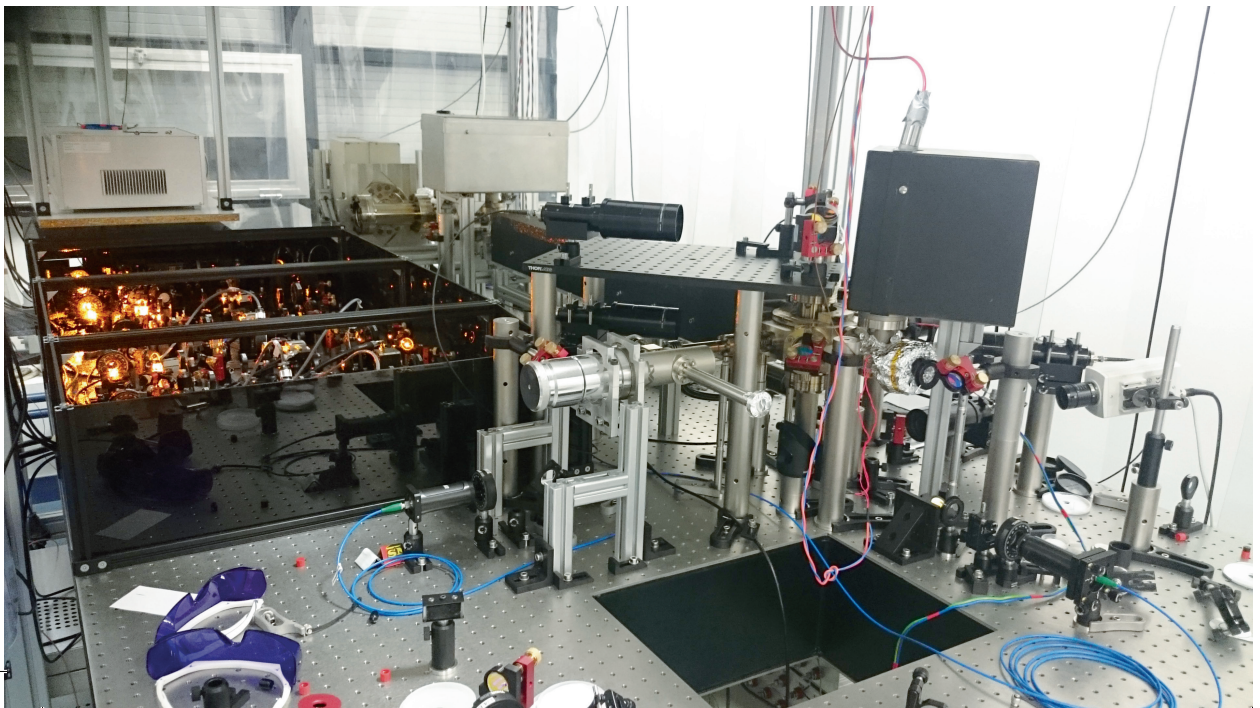
L'exemple du refroidissement d'atomes par la lumière laser

La lumière est utilisée pour éclairer, chauffer ou transporter de l'information dans les fibres optiques dans le domaine des télécommunications. Bien que cela puisse paraître paradoxal, elle permet également de refroidir la matière. Les physiciens ont montré que dans des

conditions très particulières, les atomes peuvent atteindre des températures proches du zéro absolu, soit $-273,15\text{ °C}$. Ils sont partis du principe que la température d'un gaz augmente avec la vitesse d'agitation des atomes qui le composent ; et ils ont eu l'idée de ralentir ces atomes (donc de les refroidir) en exploitant la force qu'exerce sur eux des faisceaux de lumière.

Le refroidissement et la manipulation d'atomes nécessitent cependant des sources bien particulières émettant une lumière caractérisée par une fréquence extrêmement précise et stable dans le temps : les lasers. Leur fréquence (ou longueur d'onde) qui détermine l'énergie des photons (c'est-à-dire la couleur de la lumière) peut être ajustée en fonction des fréquences d'absorption de l'atome que l'on cherche à refroidir. À ces ultra-basses températures, les observations des effets quantiques de la matière sont multiples. On peut y étudier par exemple des phénomènes comme la supraconductivité ou l'intrication quantique, travaux de recherche auréolés du prix Nobel de physique 2022.

Expérience d'atomes froids sur puce de Sodium impliquant de nombreux dispositifs optiques et mécaniques. L'objectif de cette expérience est de réaliser un condensat de Bose Einstein de sodium sur puce. Des champs de radiofréquences et de micro-ondes sont inclus sur une puce de Sodium afin de manipuler le gaz dégénéré et contrôler ses propriétés d'interaction et sa dimensionnalité. Photo Aurélien Perrin.



L'électronique bas bruit pour une stabilité maximale de la fréquence laser

Dans ce domaine des atomes froids, le contrôle de la stabilité de la fréquence d'émission du laser est un des paramètres les plus importants pour le succès des expériences. Or, il existe une multitude de sources de bruits qui peuvent produire des fluctuations de cette fréquence. Le cahier des charges typique est que les fluctuations du laser doivent rester inférieures au milliardième par rapport à la fréquence du laser... Atteindre de telles précisions et stabilités est une véritable gageure et nécessite l'utilisation de systèmes de contrôle très particuliers.

Mais quelles sont ces sources de bruits à l'origine des fluctuations de fréquences? Elles sont de diverses origines et liées à la conception et à l'environnement de l'expérience. En premier lieu, les inévitables fluctuations de température de la salle d'expérience et même les bruits sonores entraînent des difficultés significatives pour garder stable la fréquence d'émission du laser. Il faut par exemple que la température du système laser soit réglée autour de la température ambiante (20 à 25°C), mais avec des variations aussi petites que 0,010°C.

La fréquence d'émission s'avère être également très dépendante du courant et de la qualité du générateur utilisé pour apporter la source d'énergie électrique nécessaire au fonctionnement du laser. Ces systèmes sont sensibles au bruit électronique, qui est une variation non contrôlée des grandeurs physiques. C'est un signal parasite qui varie en fonction de la tension et du courant, du circuit réalisé et de son alimentation. Ce bruit est généré par les composants électroniques et peut fluctuer de manière significative. Il peut être produit par différents effets : le bruit de grenaille et le bruit thermique, par exemple, sont inhérents à quasiment l'ensemble des composantes électroniques : ce sont des bruits fondamentaux. Le bruit de grenaille a une origine quantique. Il est causé par le fait que le courant électrique n'est pas continu mais constitué de porteurs de charges élémentaires (ici, les électrons). Le nombre effectif d'électrons mesuré

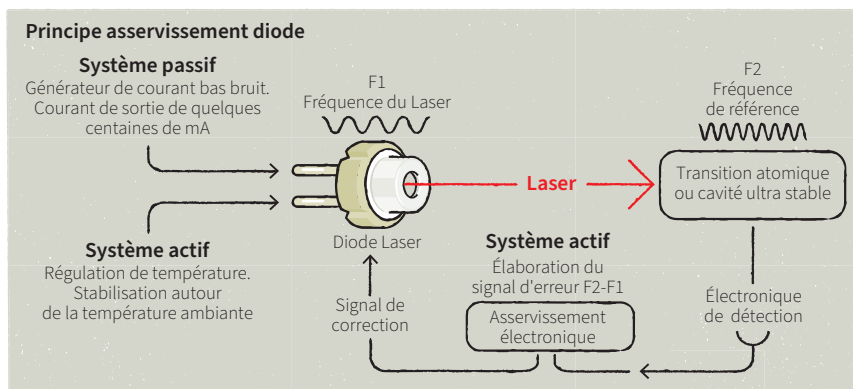
est aléatoire, car ils n'arrivent pas régulièrement mais en ordre dispersé selon une probabilité constante par unité de temps. Le bruit thermique, lui, existe même sans que l'on alimente le composant. Il est lié à l'agitation thermique des électrons dans une résistance en équilibre thermique. Les générateurs de courant bas bruit utilisés par les scientifiques des atomes froids permettent d'atteindre des niveaux de bruit inférieurs à une centaine de pico-ampères par rapport à la centaine de milli-ampères du courant injecté! Le principe de fonctionnement de ces générateurs bas bruits est basé sur une électronique analogique simple. C'est une boucle d'asservissement de courant contrôlé en tension. La première difficulté dans la réalisation de ce type de générateur est qu'un amplificateur à faible facteur de bruit avec des composants analogiques périphériques est nécessaire. L'autre est qu'il faut être capable de mesurer et de quantifier le bruit de courant résultant de cette électronique et ce pour chaque dispositif développé.

Toute une panoplie de systèmes électroniques est ainsi utilisée pour traquer et limiter les sources de bruits. Aux générateurs de courant passifs bas bruit, des systèmes électroniques actifs d'asservissement de la température et de la fréquence laser sont ajoutés. Dans le cas de l'asservissement de la fréquence laser, un système bouclé avec un dispositif de détection (une photodiode qui récupère le signal d'interférence du laser ou de la cavité ultra-stable) génère un signal d'erreur, qui représente l'écart entre la fréquence du laser et la fréquence de transition atomique ou de la cavité ultra-stable. Le système actif permet de maintenir en temps réel l'écart de fréquence et stabilise efficacement la fréquence du laser.

De même, l'exécution successive d'actions sur les différentes parties de l'expérience nécessite un contrôle temporel des séquences réalisées avec une précision au millionième de seconde! Ce contrôle s'opère à l'aide d'un ordinateur central. Cependant, malgré sa puissance de calcul, l'ordinateur ne peut seul assurer l'envoi des informations et des signaux analogiques et numériques. Un système électronique est donc nécessaire, qui va piloter de manière synchrone les instruments sur l'expérience et notamment les nombreux obturateurs (mécaniques, réagissant en quelques millisecondes, ou

optoélectroniques en quelques microsecondes) pour couper très efficacement la lumière des lasers et agir sur bien d'autres dispositifs qui permettent la reproductibilité de l'expérience.

Ce rapide exemple de l'impact de l'électronique sur les expériences d'atomes froids montrent que cette technologie continue de jouer un rôle primordial dans les expériences à la pointe de la recherche scientifique. La vieille dame se porte bien et n'a pas encore dit son dernier mot.



Contrôle d'expérience d'atomes froids. La flèche rouge matérialise grossièrement le chemin optique du faisceau laser. Sur le chemin optique, on retrouve en général des miroirs, des séparateurs de faisceaux, des lames à retard qui modifient la polarisation de la lumière laser, des isolateurs optiques, des photodiodes...