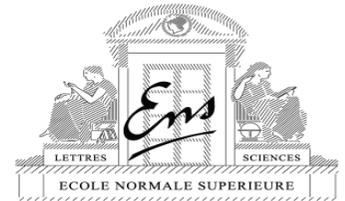




COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —



Les grandes questions ouvertes et enjeux fondamentaux de la physique

Quelques enjeux en physique quantique

*Serge Haroche
Collège de France*

Congrès général des 150 ans de la Société Française de Physique, 5 Juillet 2023

L'enjeu de la précision en métrologie

Des horloges optiques sensibles à la courbure de l'espace temps sur leur propre dimension!



Incertitude relative $< 10^{-20}$

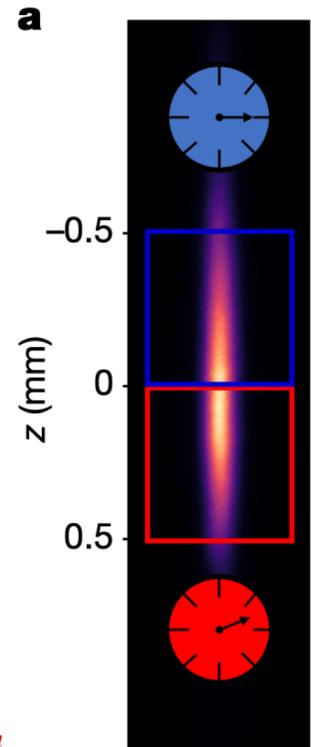
1/100 seconde sur l'âge de l'Univers!

Un gain de précision d'un million sur les horloges du GPS!

Sensible au red-shift gravitationnel sur une différence d'altitude de 1mm!

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{gH}{c^2} = 10^{-19} \quad (H = 1\text{mm})$$

Atomes de Sr (ou Yb) froids piégés dans réseau optique et interrogés par laser ultrastable. Un laser « peigne de fréquence » divise la fréquence optique et la ramène dans le domaine des microondes



Tests de théories fondamentales: dérive des constantes de la physique: $\alpha = \frac{e^2}{\hbar c}$; $m_{\text{électron}} / m_{\text{proton}}$

Arrivera-t-on à une sensibilité à la courbure de l'espace temps sur des dimensions atomiques ($\Delta\nu/\nu = 10^{-25}$)?

L'enjeu de la sensibilité dans la chasse aux nouvelles particules: le moment dipolaire de l'électron

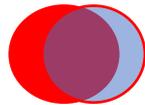
Spectroscopie Ramsey sur des ions moléculaires de fluorure de Hf piégés et interrogés par radiofréquence

$$\Delta\nu = \pm d_e \cdot E / h$$

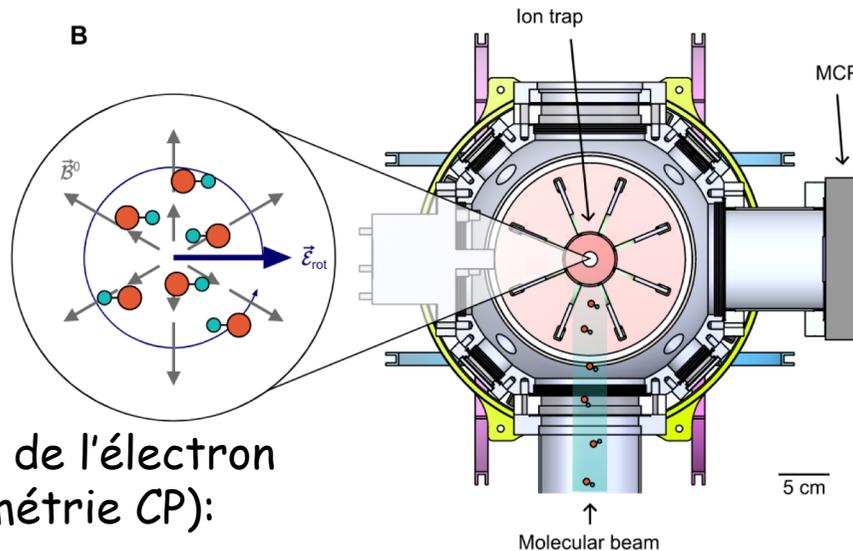
Limite du moment dipolaire électrique de l'électron (recherche d'une violation de la symétrie CP):

$$d_e < 4.1 \times 10^{-30} \text{ e cm}$$

$$\frac{\Delta r}{r} < 10^{-17}$$



Si l'électron classique avait la taille de la Terre, le dipôle serait dû à des distributions de charges + et - dont les centres de gravité seraient distants de moins de la taille d'un atome!



Champ électrique intramoléculaire $E=23\text{GV/cm}$

Jun Ye, E. Cornell (JILA)

arXiv:2212.11841

Aussi à Harvard, Imperial College...

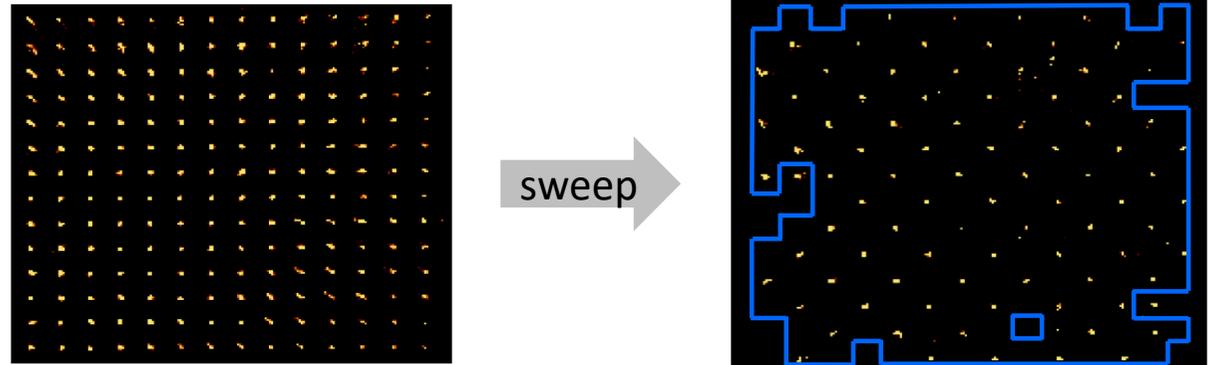
Recherche de particules supersymétriques

$$d_e \sim \frac{ea_0\alpha}{2} \frac{g^2}{2\pi} \sin \phi_{CP} \frac{m_e^2}{M^2}$$

La limite actuelle semble placer M au-delà de ce que peut produire le LHC!

L'enjeu du contrôle de la complexité quantique

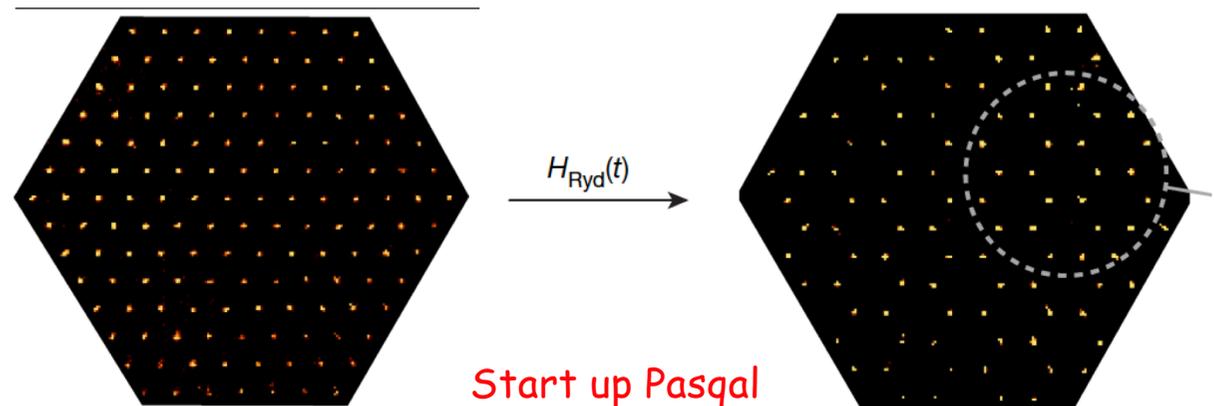
Un exemple: réseaux holographiques de pinces optiques piégeant des atomes neutres évoluant entre état fondamental (visible par fluorescence) et état de Rydberg (invisible) pour émuler des transitions ferro-antiferromagnétiques dans la matière condensée



Antoine Browaeys et al, Institut d'Optique, Palaiseau

Simulation quantique pour physique fondamentale et applications (ingénierie de couplage entre atomes pour émuler des hamiltoniens dont l'état fondamental répond à un problème d'optimisation)

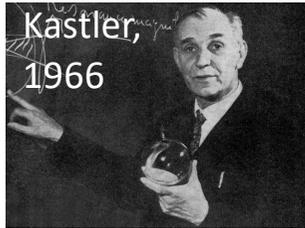
M.Brune et al, LKB-Collège de France



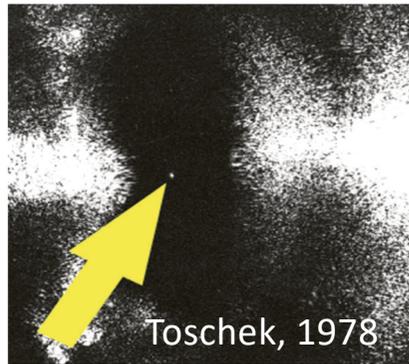
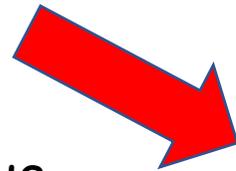
Start up Pasqal

L'extraordinaire évolution de la physique atomique au cours de ma carrière: des grands ensembles aux particules uniques, puis retour aux ensembles.....

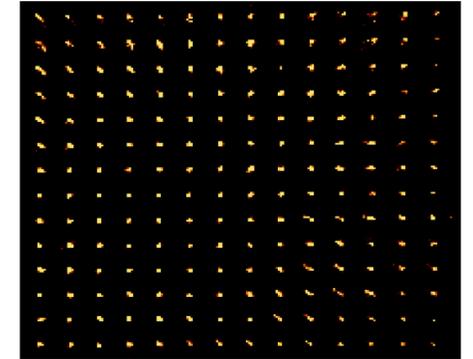
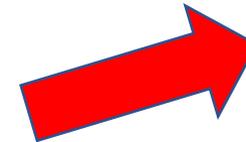
Grâce aux lasers!



Physique atomique dans les gaz: ensembles statistiques



Manipulation de particules uniques et tests fondamentaux de MQ



Ensembles ordonnés d'atomes, manipulables et observables individuellement pour faire de information quantique

Et l'ordinateur quantique?

Physics Today
Juin 1996

Gare à la
décohérence!

DREAM OR NIGHTMARE?

The principles of quantum computing were laid out about 15 years ago by computer scientists applying the superposition principle of quantum mechanics to computer operation. Quantum computing has recently become a hot topic in physics, with the recognition that a two-level system can be presented as a quantum bit, or "qubit," and that an interaction between such systems could lead to the building of quantum gates obeying nonclassical logic. (See PHYSICS TODAY, October 1995, page 24 and March 1996, page 21.)

Recent experiments have deepened our insight into the wonderfully counterintuitive quantum theory. But are they really harbingers of quantum computing? We doubt it.

Serge Haroche and Jean-Michel Raimond

two interacting qubits: a "control" bit and a "target" bit. The control remains unchanged, but its state determines the evolution of the target: If the control is 0, nothing happens to the target; if it is 1, the target undergoes a well-defined transformation.

Quantum mechanics admits additional options. If the control is in some coherent superposition of 0 and 1, the output of the gate is entangled. That is to say, the two qubits are strongly correlated in a nonseparable state, analogous to the particle pairs of the Einstein-Podolsky-Rosen paradox. The

Il y a eu depuis beaucoup d'inventivité lexicale:

Quantum supremacy

Quantum advantage

NISQ: Noisy Intermediate Scale Quantum computing....

...et beaucoup d'hyperbole !



Le quantique : un « Big Bang » technologique

Le raccourcissement des temps de calcul d'un facteur de un milliard, qu'apporteront les ordinateurs quantiques d'ici 5 à 10 ans, constitue une rupture technologique majeure. L'industrie bénéficiera de nouveaux outils de simulation et d'optimisation avec des impacts sociétaux importants, notamment en matière de santé, environnement ou énergie, grâce à la possibilité de simuler dynamiquement les molécules et leur action, ouvrant une nouvelle ère de la chimie, ou encore de prédire finement les propagations épidémiques ou d'optimiser le trafic de manière systémique en temps réel. Par ailleurs, les techniques d'ultra-refroidissement des atomes permettront de dépasser la précision de nos horloges atomiques et les capteurs quantiques bouleverseront nos futurs champs de bataille, en apportant de nouvelles fonctionnalités de navigation sans satellite, ou encore des capacités de détection inédites.

**Courage! Il n'y a plus
que 3 à 8 ans à
attendre!**

Ne pas oublier que la recherche fondamentale est motivée avant tout par la curiosité. Ce ne sont pas les «road maps» de ce genre qui la font vraiment avancer!