



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*



www.onera.fr

Technologies quantiques pour les applications spatiales: une introduction

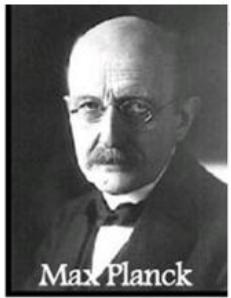
Sylvain Schwartz

Journée « Technologies spatiales en Occitanie »

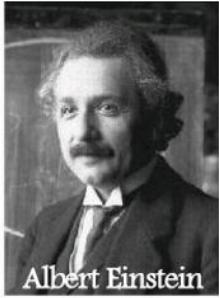
17/12/2025 – Toulouse



Retour en arrière: la première révolution quantique



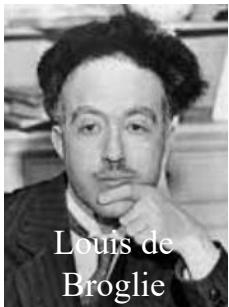
Max Planck



Albert Einstein

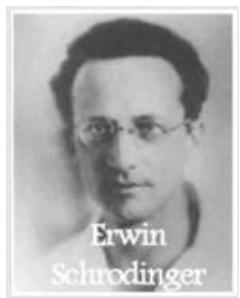
Le rayonnement électromagnétique est formé de grains d'énergie (1905)

→ « dualité onde-corpuscule » (1909)

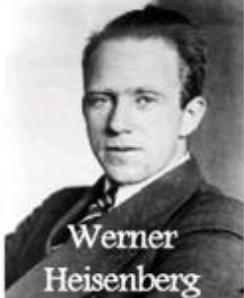


Louis de Broglie

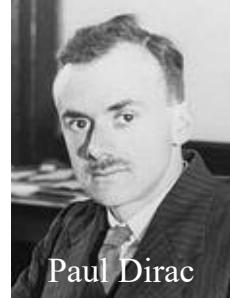
Ce concept s'applique aussi aux particules matérielles ! (années 1920)



Erwin Schrödinger



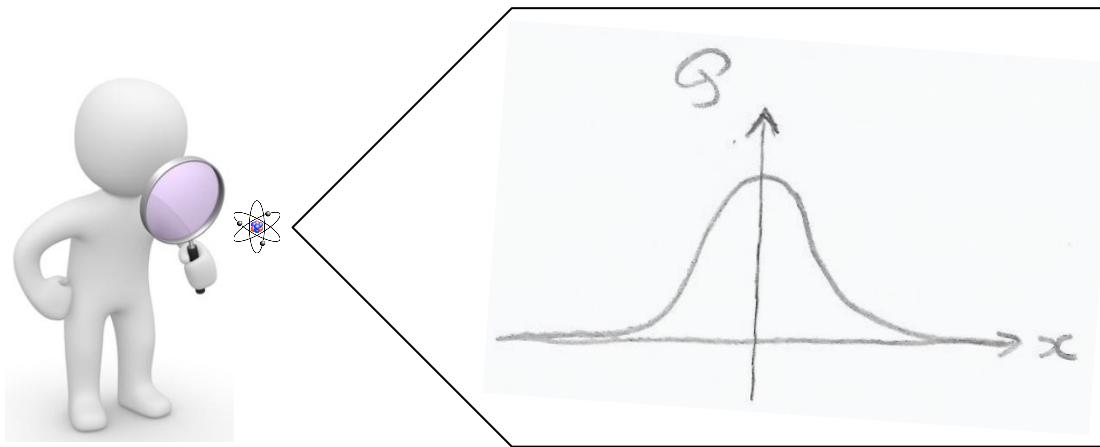
Werner Heisenberg



Paul Dirac

Elaboration du formalisme de la théorie quantique (début des années 1930)

La dualité onde-particule

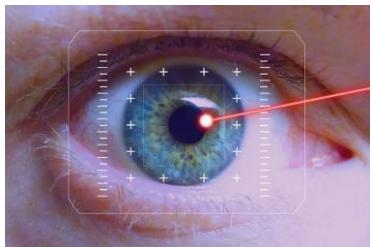


- L'onde décrit la densité de probabilité de présence de la particule
- En fonction de l'expérience réalisée, on est sensible au caractère corpusculaire ou ondulatoire
- Description probabiliste du monde, qui ne plaisait pas à Einstein (*« Dieu ne joue pas aux dés ! »*) mais qui a depuis été prouvée expérimentalement depuis

Quelques succès de la première révolution quantique...

- **Stabilité de la matière**
- **Liaisons chimiques**
- **Propriétés de conduction électrique des corps (conducteurs, isolants, semi-conducteurs)**
- **Echange entre la matière et le rayonnement**
- **Supraconductivité**
- **Superfluidité...**

Quelques succès de la première révolution quantique...



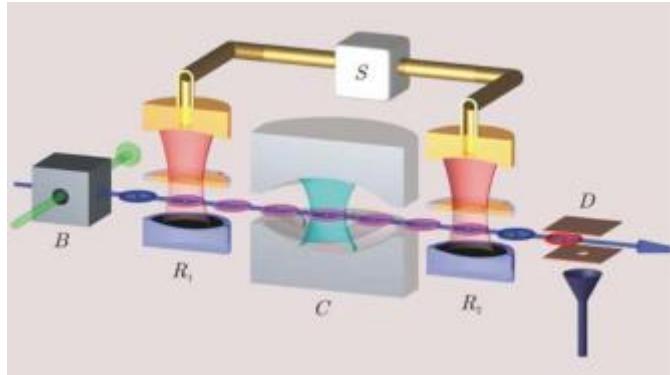
- Stabilité de la matière
- Liaisons chimiques
- Propriétés de conduction électrique des corps (conducteurs, isolants, semi-conducteurs)
- Echange entre la matière et le rayonnement
- Supraconductivité
- Superfluidité...



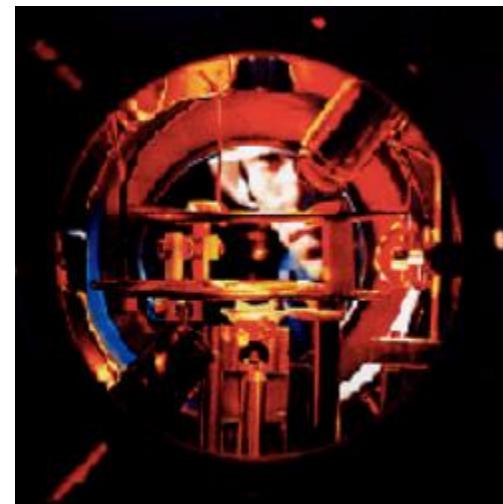
Vers un contrôle accru des systèmes quantiques...

Atomes froids

Photons uniques



Haroche group



Phillips group



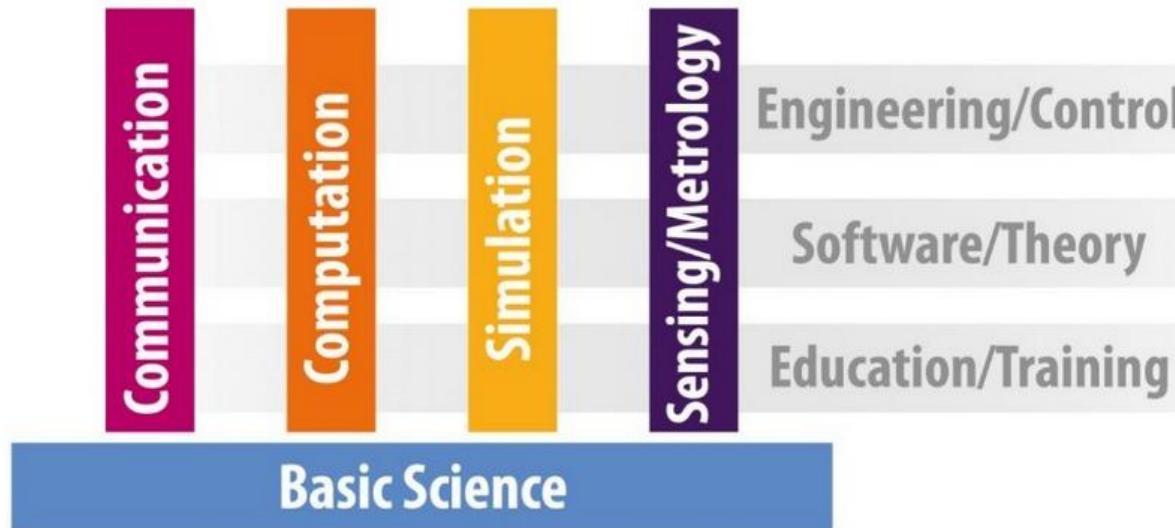
Serge Haroche,
Prix Nobel 2012

Claude Cohen-Tannoudji
Prix Nobel 1997



La deuxième révolution quantique

Nouvelles applications fondées sur la manipulation des particules uniques et de leurs propriétés quantiques



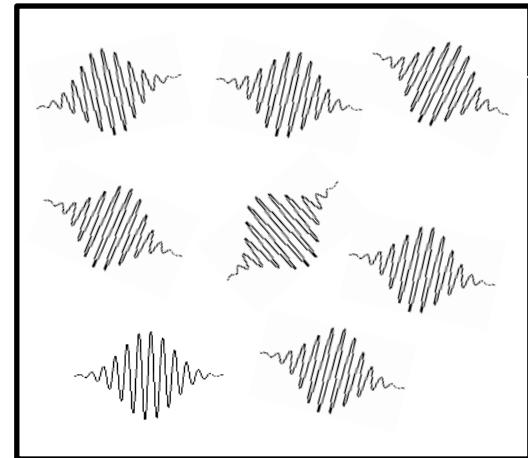
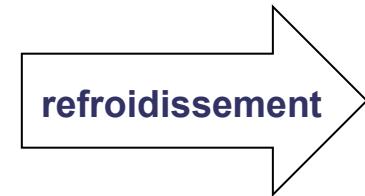
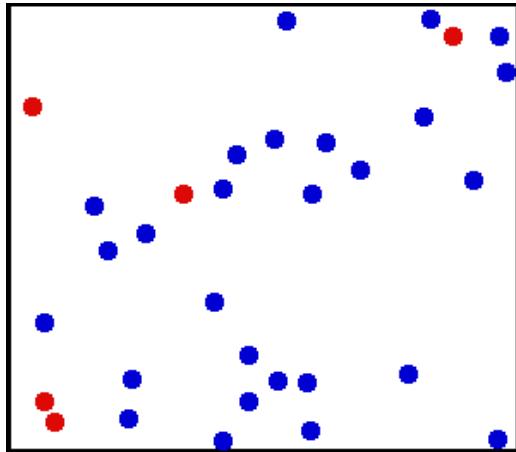
Source: Commission Européenne

Un premier exemple: les capteurs à atomes froids



$$k_B T = mv^2$$

température → agitation thermique ←



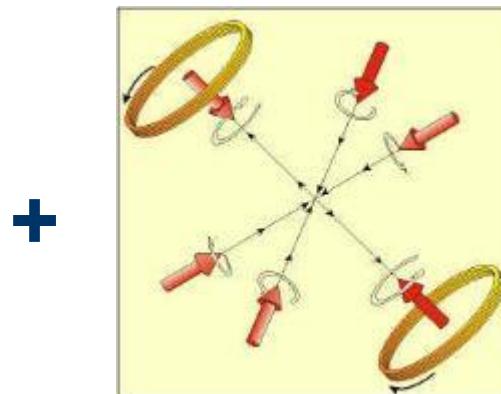
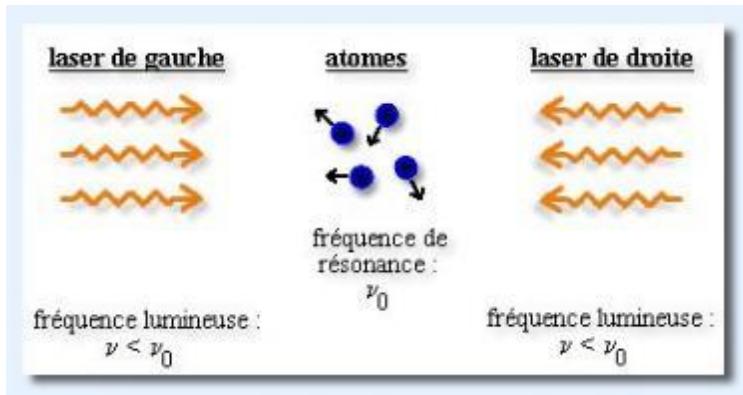
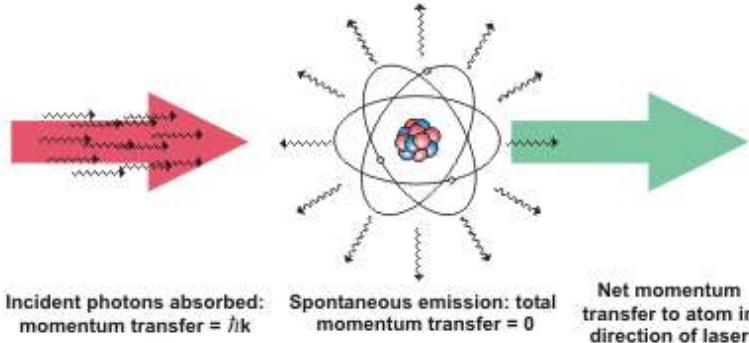
$$0 \text{ K} = -272,15 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Comment refroidir des atomes par laser ?



$$k_B T = mv^2$$

Principe de base:
la pression de
radiation

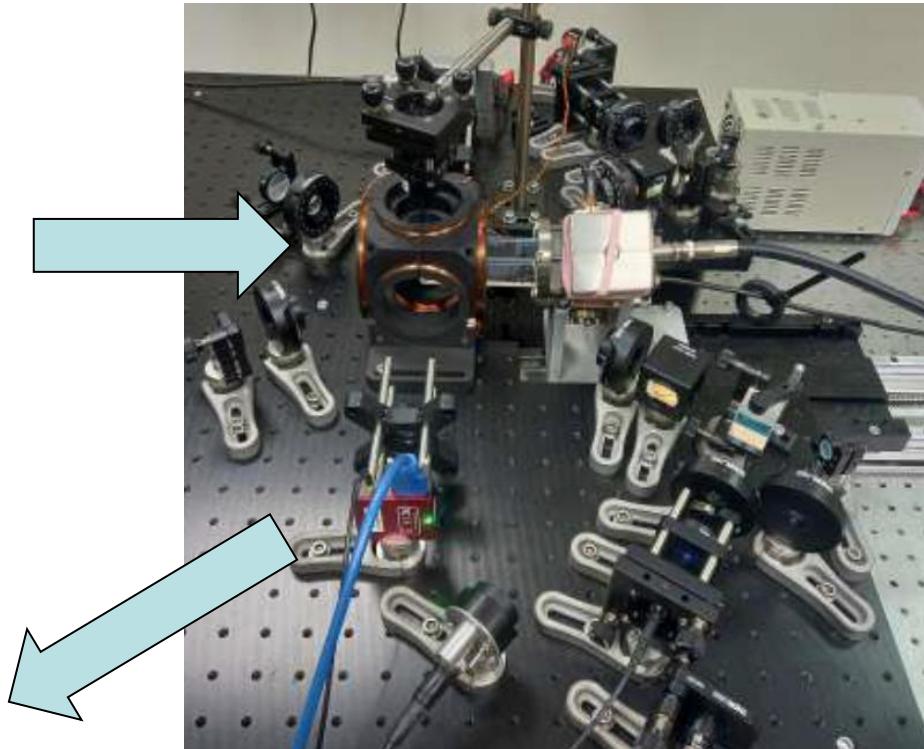
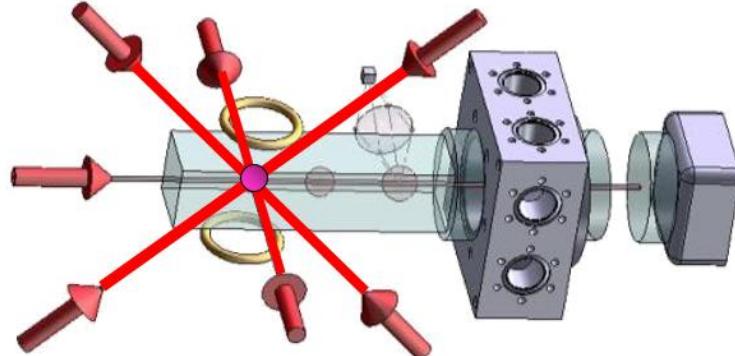


=

Piège
magnéto-
optique

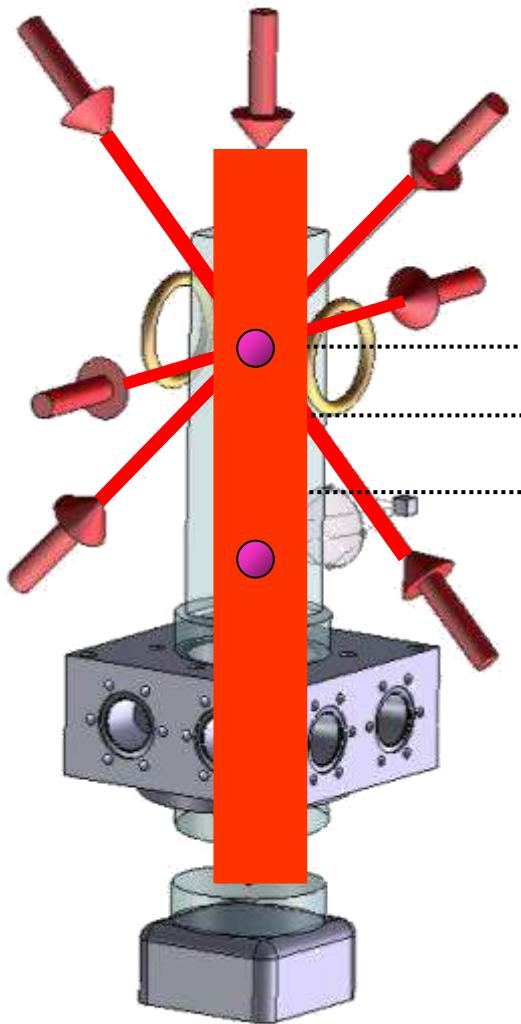
Typiquement 10^8 atomes avec $T < 1\text{mK}$

A quoi ressemble une expérience d'atomes froids?



Typiquement 10^8 atomes avec $T < 1\text{mK}$

Le gravimètre à atomes froids

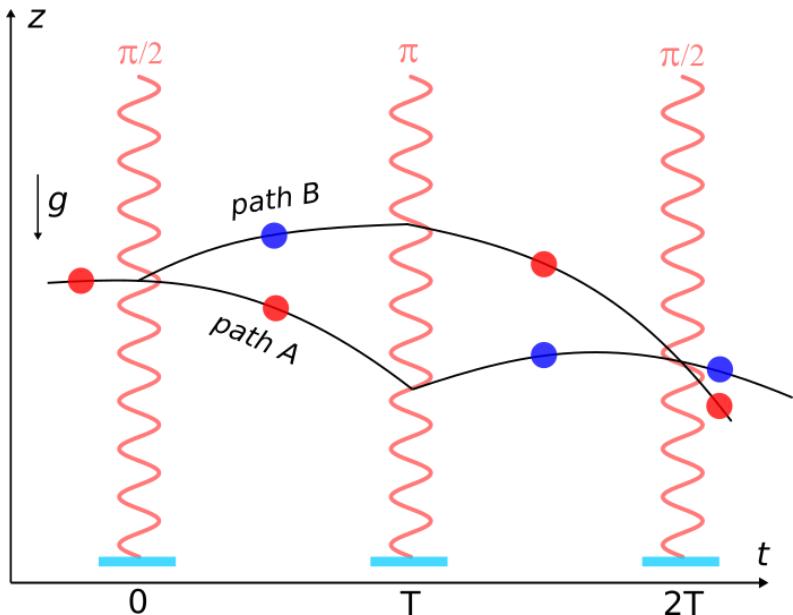
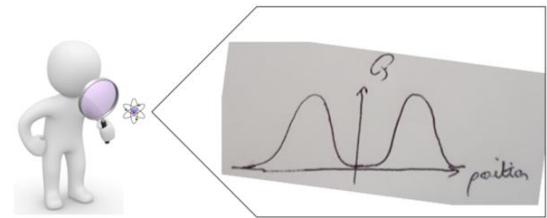


Principe de base

- Des atomes de rubidium sont refroidis et piégés par 6 faisceaux laser dans une enceinte à vide
- Leur mouvement de chute libre le long d'un laser vertical de référence est mesurée par interférences quantiques



Le gravimètre à atomes froids



principe de superposition

Nombre d'atomes relatif dans un des deux états internes:

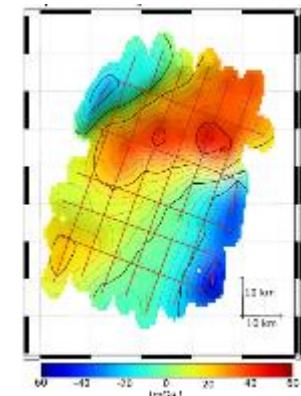
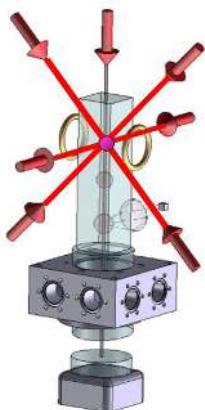
$$P = \frac{N_2}{N_1 + N_2} = P_0 + C \cos(\Delta\phi)$$

Déphasage: $\Delta\phi = \vec{k} \cdot \vec{g} T^2$



- Mesure absolue
- Précision en statique $\approx ng$
- Précision en embarqué $\approx \mu g$
- Taux de répétition $\approx 10 \text{ Hz}$

Gravimètre embarqué de l'ONERA (GIRAFE)



Relief sous-marin
dans l'Atlantique

2000: Premières expériences à l'ONERA sur les gravimètres à atomes froids

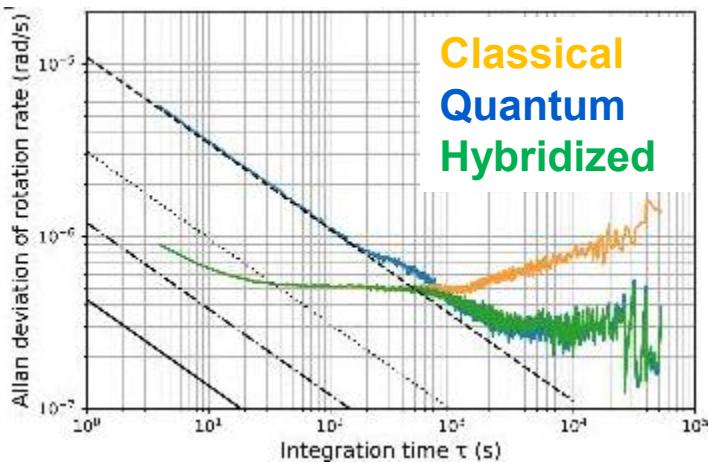
2020: La DGA commande à l'ONERA plusieurs exemplaires de gravimètres à atomes froids pour la Marine Nationale



Principal avantage par rapport aux autres technologies de gravimètre: mesure absolue, pas besoin de calibration

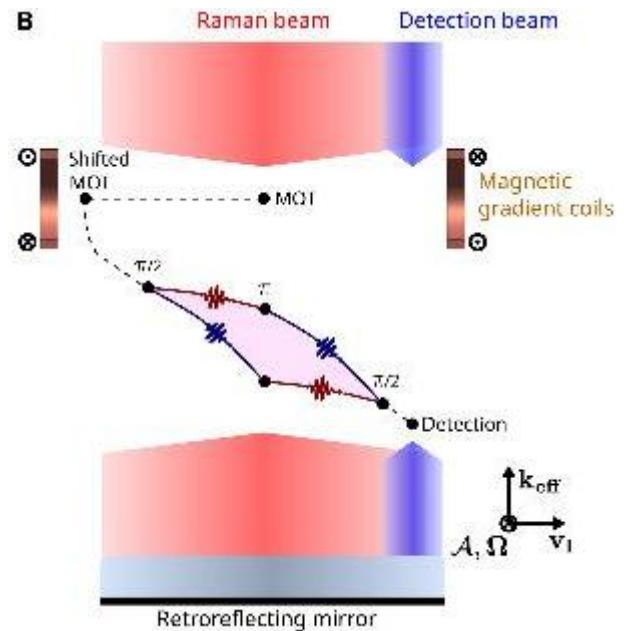
Récents développements sur les capteurs inertIELS

- Vers une centrale inertIELLE hybride à atomes froids
 - accélération verticale (gravité)
 - accélération horizontale ($3.3 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$)
 - 1ère mesure de rotation (1 axis) : atomes lancés magnétiquement



Salducci et al., *Science Advances*, **10**, 44 (2024)

Perrin et al., *Phys. Rev. A*, **100**, 053618 (2019)
Bernard et al., *Phys. Rev. A*, **105**, 033318, (2022)



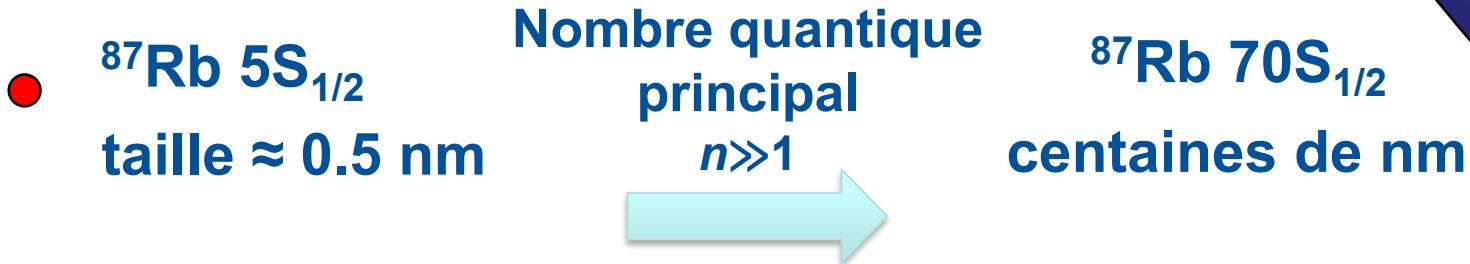
Scale factor stability :
700 ppm

Bias stability :
 $4 \times 10^{-7} \text{ rad/s}$

- Vers des accéléromètres spatiaux: hybridation de la technologie atomes froids avec les accéléromètres spatiaux électrostatiques de l'ONERA, projet CARIOQA

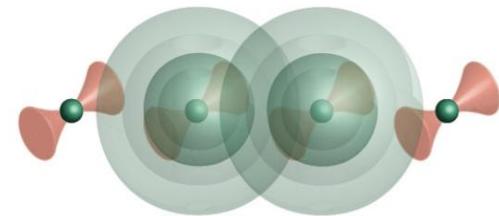
Zahzam et al., *Remote Sens.*, **14**, 3273 (2022)

Capteurs à atomes de Rydberg



➤ Fortes interactions dipole-dipole

- exploitées pour la simulation quantique



A. Browaeys, PASQAL...

➤ Fort couplage au champ électromagnétique

- exploité pour la mesure des champs électromagnétiques



Capteurs à atomes de Rydberg

Avantages potentiels

Mesures absolues, reliées aux constantes atomiques

Accordabilité : MHz → THz

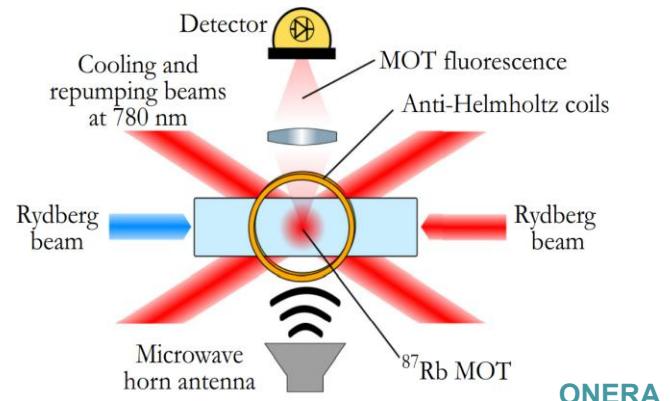
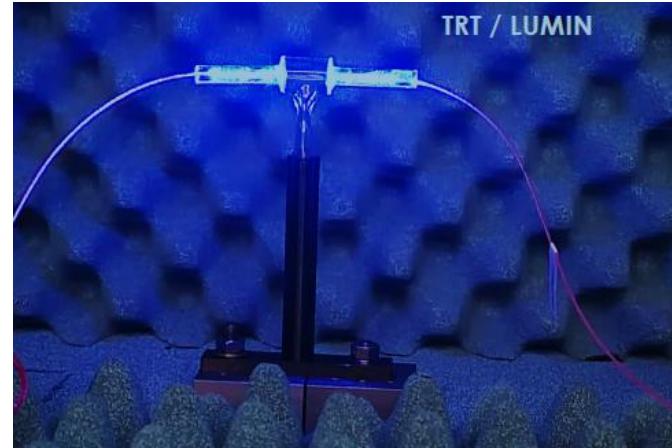
Sensibilité, stabilité et reproductibilité

Résolution spatiale, images

Taille du capteur indépendante de la longueur d'onde du signal

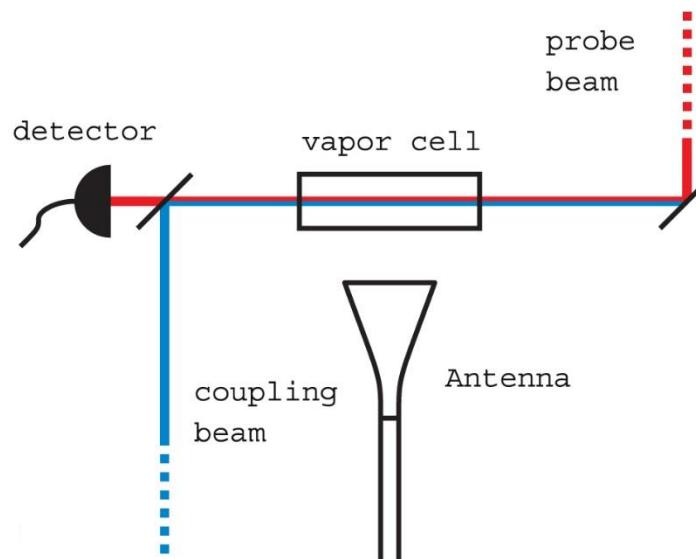
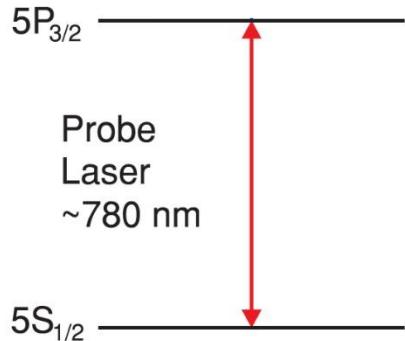
Possibilité de remonter à diverses caractéristiques du champ: amplitude, fréquence, phase, angle d'incidence, polarisation

Diélectrique

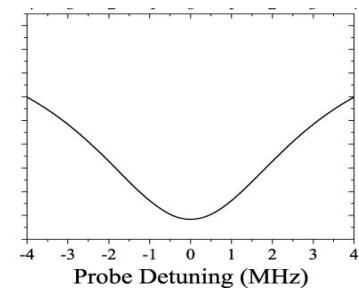


Duverger et al, Physical Review Applied, 22, 044039 (2024)

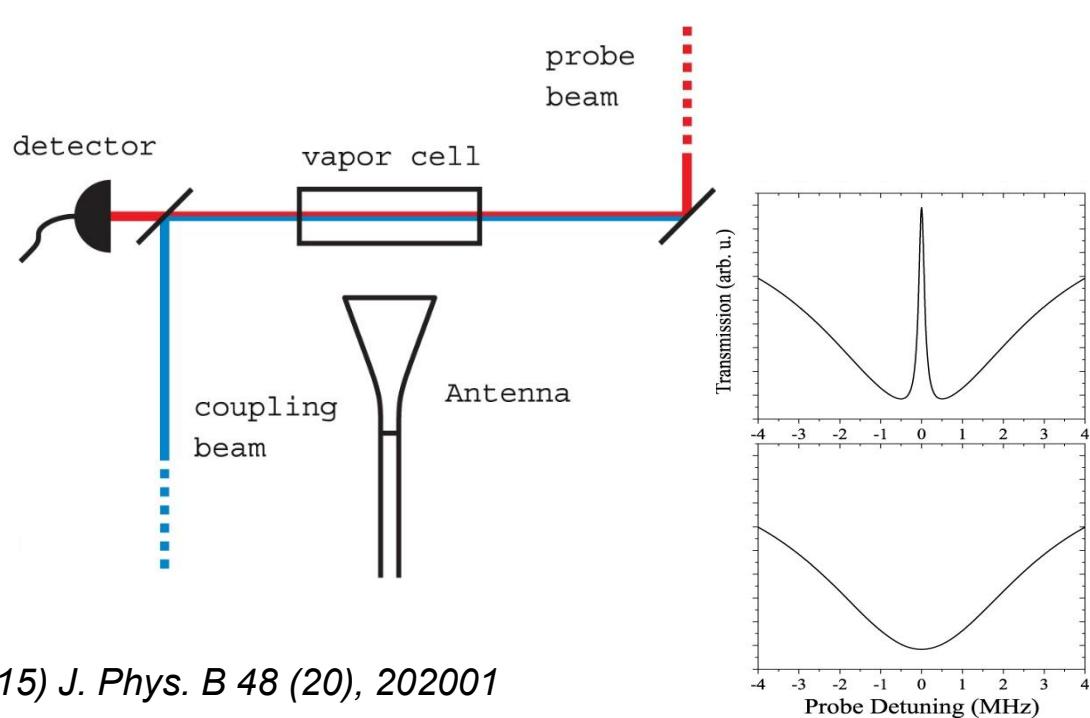
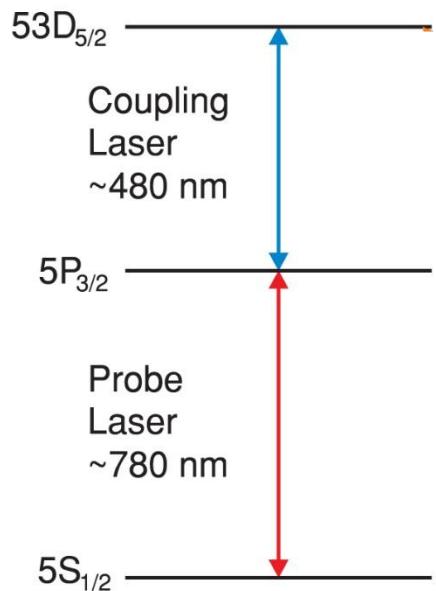
Principe de fonctionnement des capteurs Rydberg



Fan et al (2015) J. Phys. B 48 (20), 202001

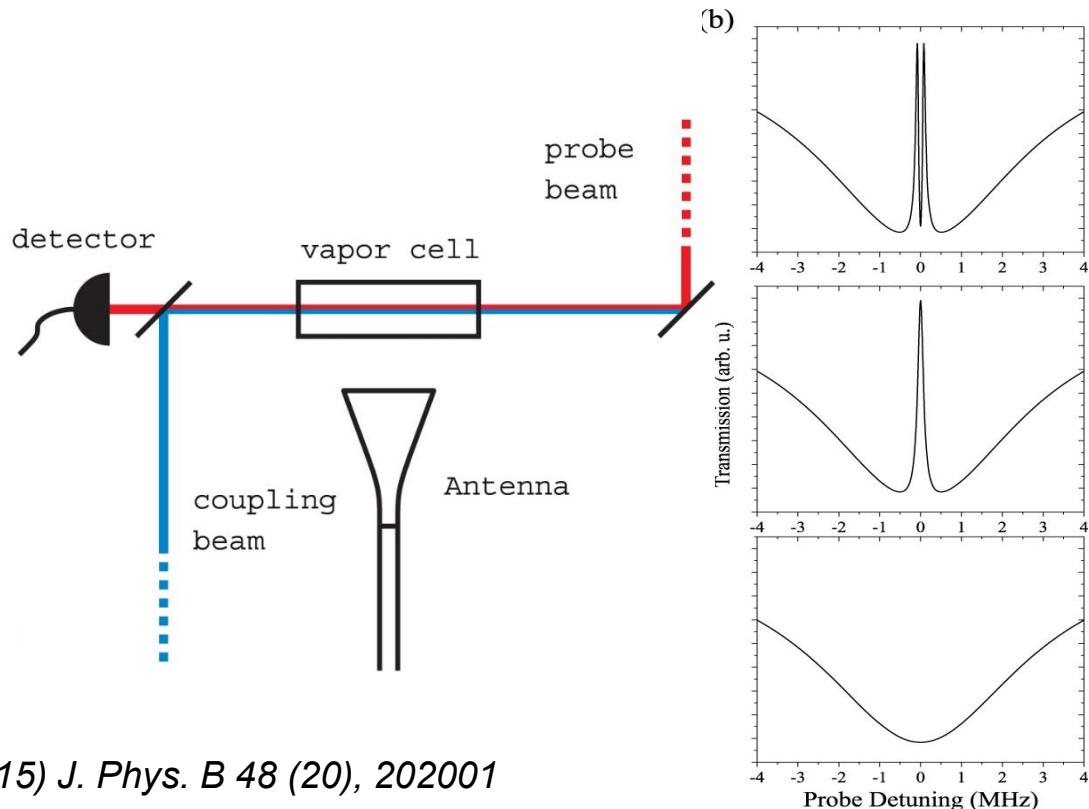
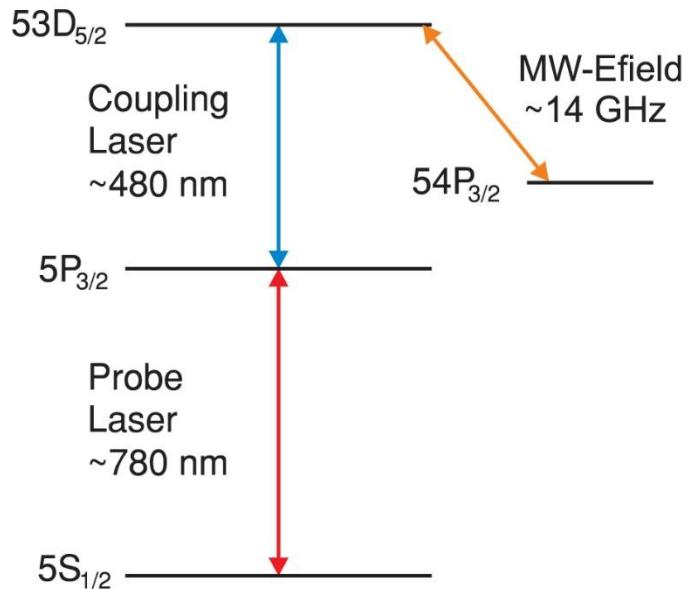


Principe de fonctionnement des capteurs Rydberg



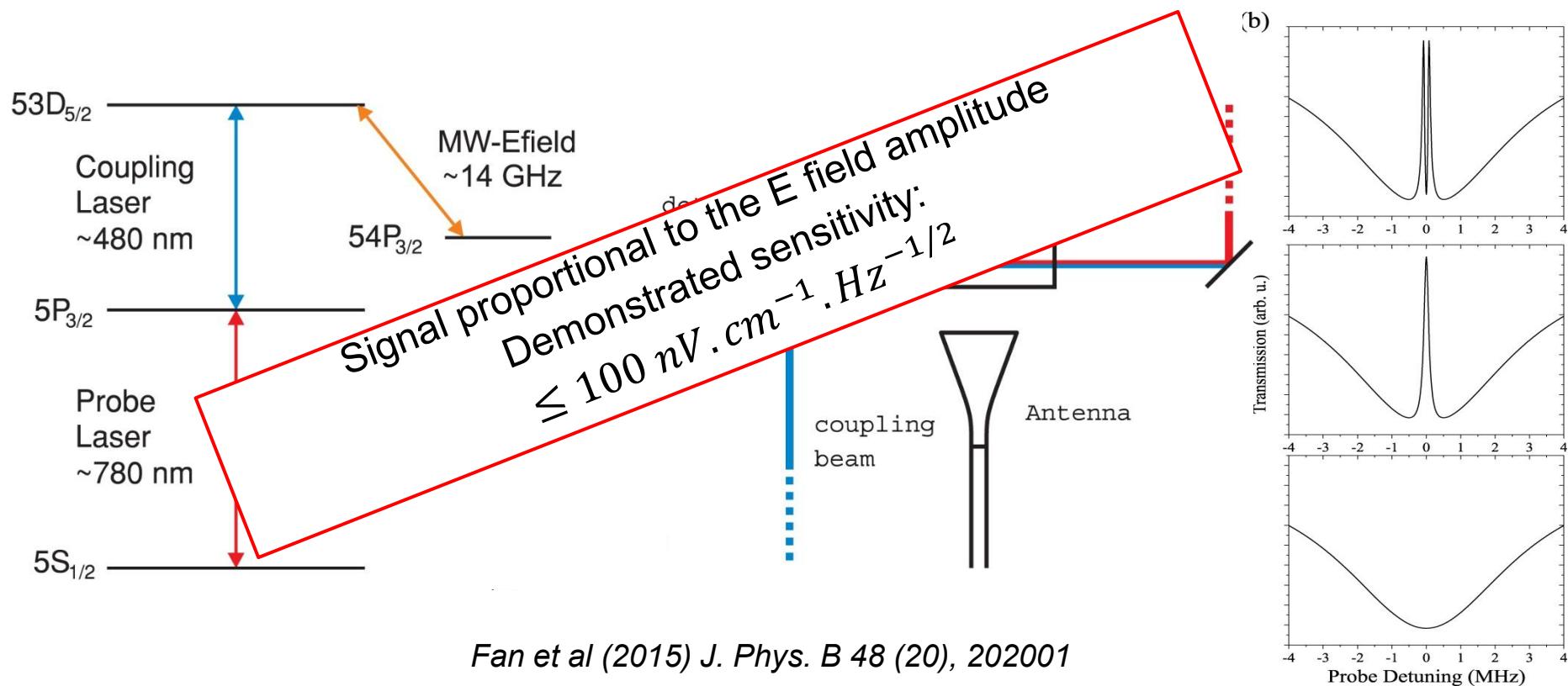
Fan et al (2015) J. Phys. B 48 (20), 202001

Principe de fonctionnement des capteurs Rydberg



Fan et al (2015) J. Phys. B 48 (20), 202001

Principe de fonctionnement des capteurs Rydberg



Applications possibles des capteurs Rydberg...

Telecommunications



Credit : National Institute of Standards (NIST)

Modulated signal reception :

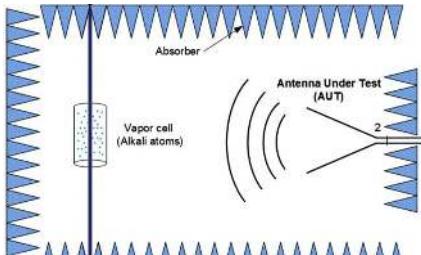
Anderson et al. (2020) IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 69(5), 2455-2462.

Meyer et al. (2018), Applied Physics Letters, 112(21).

Multichannel detection :

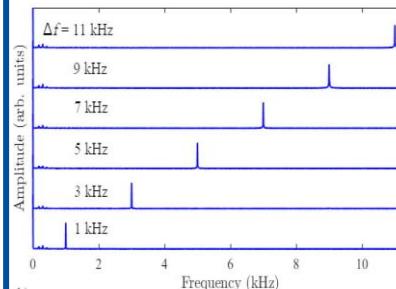
Allison et al. (2024) Physical Review Research, 6(2), 023317.

New standards of antenna calibration and characterization



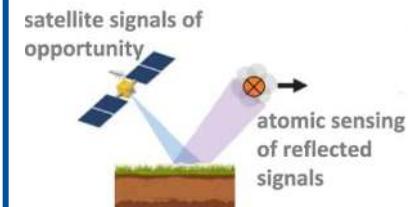
From : Song et al. (2017), IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 16, 1589-1592.

New concepts of radars



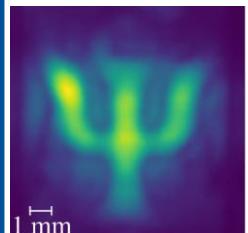
From : Simons et al. (2019), Applied Physics Letters, 114(11).

Remote sensing for earth/atmosphere monitoring



From : Arumugam et al. (2024), Scientific Reports, 14(1), 18025

THz imaging



← From : Downes et al. (2020) Physical Review X, 10(1), 011027.

Chen et al. (2022), Optica, 9(5), 485-491.

Blackbody radiation measurement in atomic clocks



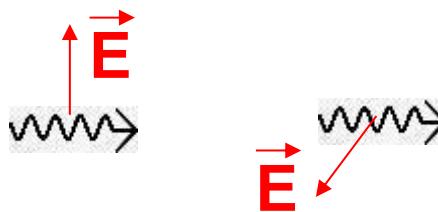
From : Ovsianikov et al. (2011) Physical review letters, 107(9), 093003.

Equipe de France des capteurs Rydberg (projet CARMELS, PEPR Quantique)



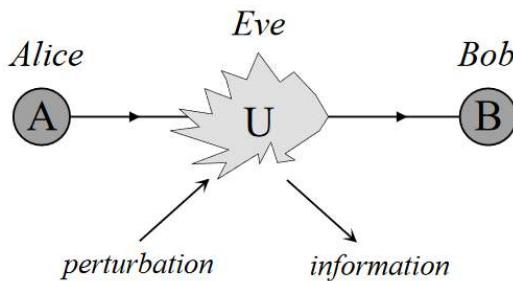
Les communications quantiques

Ingrédient de base: le photon



➤ Non-clonage quantique

Distribution de clé quantique



0		
1		

photons uniques

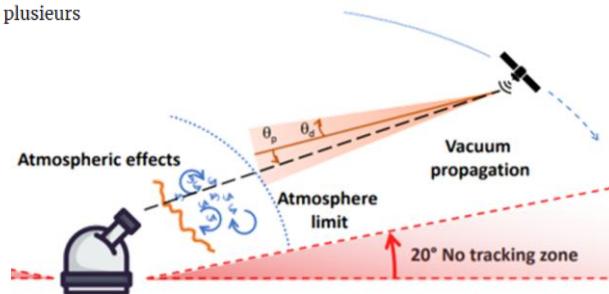


Pékin réussit une liaison quantique depuis l'espace et fait un pas décisif vers un Internet inviolable

La Chine a réussi la première transmission quantique de données depuis l'espace et vers plusieurs stations au Tibet, distantes de plus de 1.000 km.

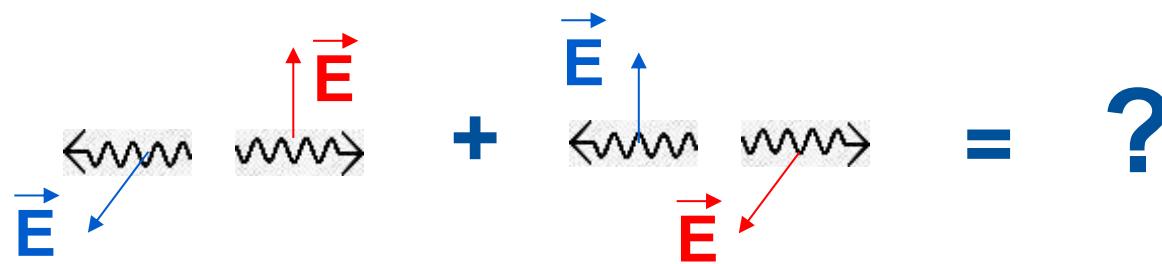
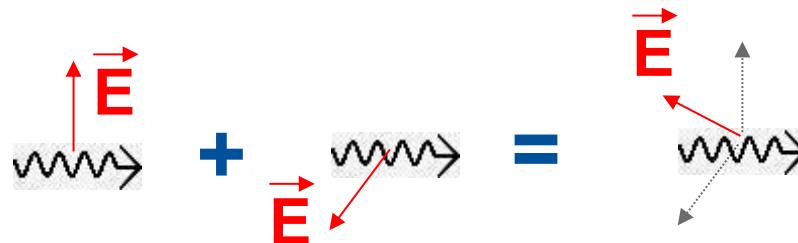
Source: Les Echos
16 juin 2017

Activité ONERA: correction de la turbulence atmosphérique pour des états quantiques (partenaires: TAS, Université Paris Cité...)



Au-delà des particules uniques: l'intrication quantique

Cas simple:
superposition
d'états à un photon



- Paire de photons intriqués
- Corrélations qu'il n'est pas possible de produire classiquement
- Einstein ne croyait pas à l'existence de tels états, mais ils ont été produits expérimentalement depuis

QUANDELA

Principe du calcul quantique...

Calcul classique: bits valant 0 ou 1 + portes logiques

ET	a	b	s
	0	0	0
	0	1	0
	1	0	0
	1	1	1

NAND	a	b	s
	0	0	1
	0	1	1
	1	0	1
	1	1	0

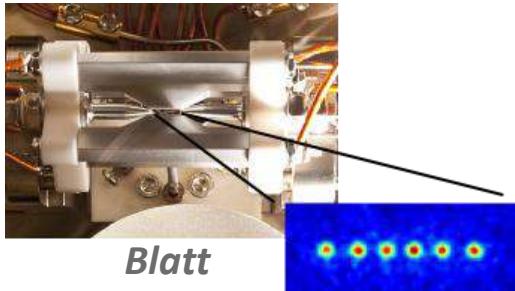
NOR	a	b	s
	0	0	1
	0	1	0
	1	0	0
	1	1	0

...

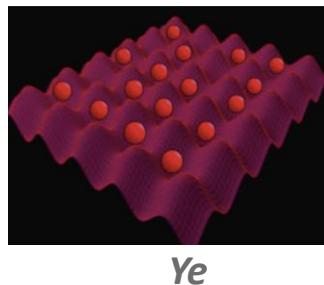
- Bit quantique: système à 2 niveaux appelés $|0\rangle$ et $|1\rangle$
- Portes quantiques sur le modèle des portes classiques
- Différence fondamentale: superpositions d'états, chaque bit peut prendre toutes les valeurs $\alpha|0\rangle+\beta|1\rangle$
- Idée du ‘parallélisme quantique’
- Exemple: algorithme de Shor pour la factorisation des nombres premiers
- Difficulté: fidélité des portes, fragilité des états intriqués

La boîte à outils quantique...

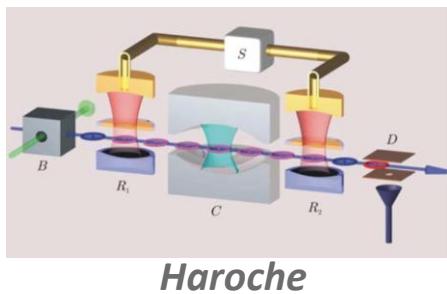
Ions



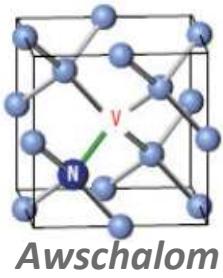
Neutral Atoms



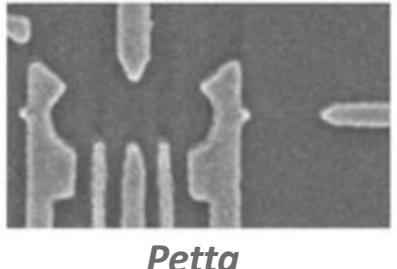
Photons



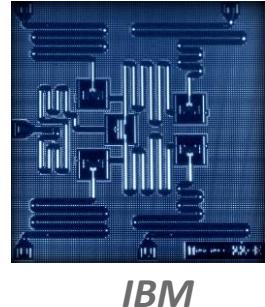
Color centers



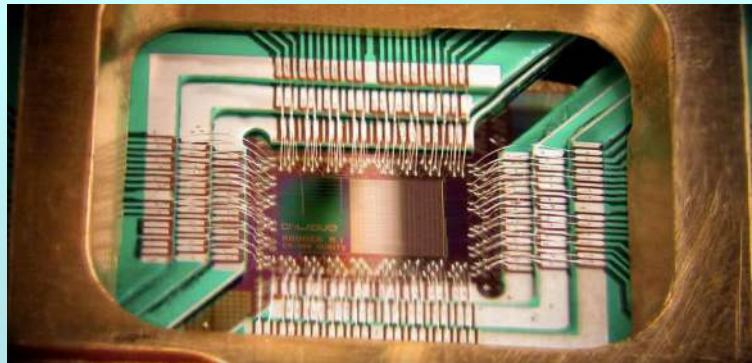
Quantum dots



Superconducting circuits

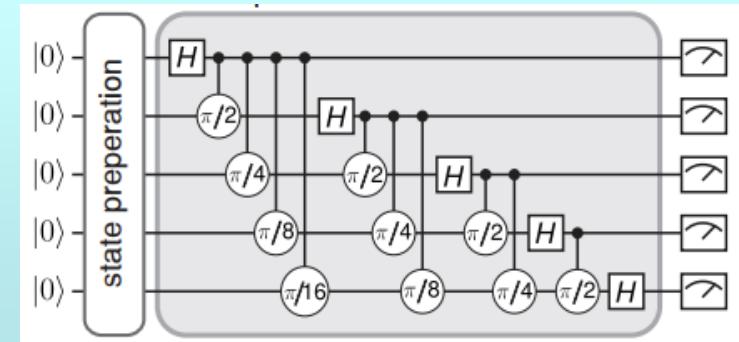


Scalability:



D-Wave Systems

Controllability:



Quantum Fourier transform circuit (Monroe)

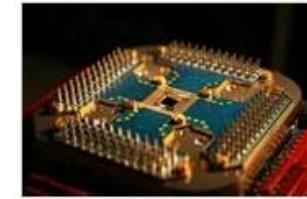
La course à la « suprématie quantique »

2007 : première machine D-Wave



Octobre 2019
Google

Quantum computing at 16 qubits



Quantum Computing

On “Quantum Supremacy”

IBM Blog

Because the original meaning of the term “quantum supremacy,” as proposed by John Preskill in 2012, was to describe the point where quantum computers can do things that classical computers can’t, this threshold has not been met.

Octobre 2019 : la réponse d'IBM

Physicists in China challenge Google's 'quantum advantage'

Photon-based quantum computer does a calculation that ordinary computers might never be able to do.

Décembre 2020

A CNRS collaboration achieves quantum supremacy

Février 2021

Activité ONERA: identifier les algorithmes les plus prometteurs pour les applications aéronautique espace défense, en lien avec les acteurs du domaine (startups...)

voir présentation Julien Zylberman / Clément Hinderer sur le calcul quantique

Le laboratoire QTech de l'ONERA (w3.onera.fr/qtech)



- **Environ 30 ingénieurs-chercheurs concernés, répartis sur 3 sites (Palaiseau, Châtillon, Toulouse)**
- **Lancé officiellement le 8 février 2022**



Comité scientifique :

- Chairman: Alain Aspect (Prix Nobel de Physique 2022)
- Membres: Cyril Allouche (ATOS), Fabien Bretenaker (CNRS, LuMIn), Fabrice Devaux (UFC-Besançon, FEMTO-ST), Eleni Diamanti (CNRS, LIP6), Stephan Roche (IC2N, Barcelone), Pierre Rouchon (Mines ParisTech), Sébastien Tanzilli (CNRS, Institut de Physique de Nice), Christophe Voisin (LPENS, Université Paris Cité)

QTech = laboratoire des technologies quantiques de l'ONERA

Axe 1 : Communications quantiques (DOTA)

Correction des turbulences atmosphériques pour communications sécurisées entre stations sol et satellites

Axe 2 : Optronique quantique (DPHY/DOTA)

Etats quantiques pour l'imagerie et les capteurs optiques : ghost imaging and spectroscopy - propagation en milieux turbides - détecteurs quantiques à base de matériaux nanostructurés

Axe 3 : Calcul quantique (DAAA/DMPE/DTIS)

Etude et mise en œuvre d'algorithmes quantiques pour les applications AED : combustion - équations aux dérivées partielles...

Axe 4 : Capteurs atomiques (DPHY/DEMR)

Gravimètres et capteurs inertIELS à atomes froids. Capteurs de champs électromagnétiques à atomes de Rydberg

Axe 5 : Nanomatériaux et composants pour les technologies quantiques (LEM/DMAS/DPHY)

Matériaux basse dimension (C - BN) pour les qubits et les photons uniques - impact des radiations sur les qubits supraconducteurs

Groupe de travail « technologies quantiques » du GIFAS

Définir les apports majeurs pour la filière des technologies quantiques, les applications ciblées et les horizons calendaires associés ainsi que d'éventuelles recommandations pour la filière et pour le coordinateur national pour la stratégie quantique. Le sous-groupe Technologies quantiques animé par l'Onera et rassemblant une douzaine de sociétés du Gifas sera sollicité pour mener ces réflexions en coordination avec la Commission R&D



CryoConcept
an Air Liquide affiliate



AIRBUS
DEFENCE & SPACE



Rapport du GT technos quantiques du GIFAS

14 réunions plénières entre février 2021 et mars 2024

Coordinateur : Sylvain Schwartz (ONERA)

Sous-groupe capteurs quantiques

Coordinateur : Philippe Dejean (SAFRAN)

Participants : Daniel Dolfi et Arnaud Brignon (Thales TRT), Mathilde Portais et Romain Kukla (Naval Group), Oriane Lelièvre et Sébastien Laux (Thales MIS), Alexandre Kotenkoff et Léo Dumas (MBDA), Philippe Millet (Nexter), Alexandre Bresson et Hervé Verriele (ONERA)

Sous-groupe communications quantiques

Coordinateur : Mathias van den Bossche (Thales Alenia Space)

Participants : Andrew Thain (ADS), Philippe Millet (Nexter), Jean-Marc Conan (ONERA), Cyrille Laborde (Thales Alenia Space)

Sous-groupe calcul quantique

Coordinateurs : Alain Refloch (ONERA) et Frédéric Barbaresco (Thales)

Participants : Robert Wang, Olivier Hess et Philippe Duluc (Eviden/Atos), Denys Quesneau (Ariane Group), Edouard Debry et Leo Dumas (MBDA), Gilles Zalamansky (Dassault Aviation), Marc Contat (ADS)

Sous-groupe technologies habilitantes

Coordinateurs : Gilles Triay (GROUPEADF) et Delphine Roma (Air Liquide)

Remise du rapport le 20 mars 2024



Rapport disponible sur w3.onera.fr/qtech

Quelques messages clés du rapport GIFAS

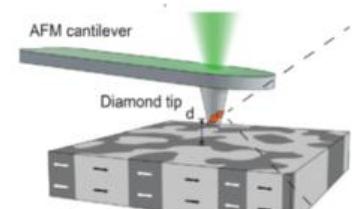
- Les capteurs sont les plus susceptibles d'apporter un avantage quantique à court terme sur des applications bien identifiées (inertie, horloges, magnétomètres et capteurs RF)
- Le développement d'un réseau d'information quantique nécessite un soutien étatique fort
- Sur les capteurs et les réseaux quantiques, les membres du GIFAS sont à la fois fabricants et utilisateurs
- Pour le calcul quantique, forte activité sur le développement du hardware mais nécessité d'investir dans la recherche sur les algorithmes quantiques pour nos applications. Nécessité de poursuivre les efforts de *benchmarking* des différentes technologies, et de faciliter l'accès des industriels aux machines quantiques (heures de calcul...)
- Fortes synergies au niveau des technologies habilitantes entre capteurs, réseaux et calcul quantiques (laser, cryogénie, micro-ondes, techniques du vide...) Importance de disposer d'une stratégie d'acquisition pérenne pour chaque technologie clé
- Risque de pénurie de main d'œuvre qualifiée dans le quantique: nécessité de développer de nouvelle filières de formation, y compris aux niveaux technicien et formation continue

Conclusion: les multiples formes de l'avantage quantique...

- Réduire la classe de complexité de certains algorithmes (ordinateurs quantiques)
- Simuler des systèmes physiques complexes plus efficacement que les ordinateurs classiques (simulateurs quantiques)
- Sécuriser les transmissions (communications quantiques)
- Fournir des mesures absolues auto-calibrées sur les atomes (horloges atomiques et gravimètres à atomes froids)
- Mesurer des champs magnétiques avec une résolution spatiale inégalée (centres NV, de l'ordre du μT et du nm)
- Mesurer des champs électromagnétiques du MHz au THz sans changer la taille du capteur (atomes de Rydberg)
- Améliorer l'imagerie et la détection optique avec des états quantiques de la lumière (états comprimés, interféromètres non-linéaires)



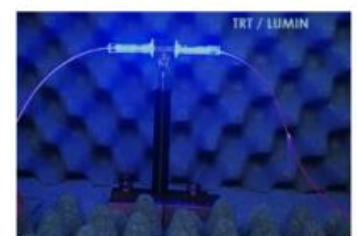
VIRO gravitational wave detector



Nanoscale sensing with a single NV center



ONERA's embarkable cold atom gravimeter



RF sensing with Rydberg atoms (TRT/LUMIN)

Merci pour votre attention!

