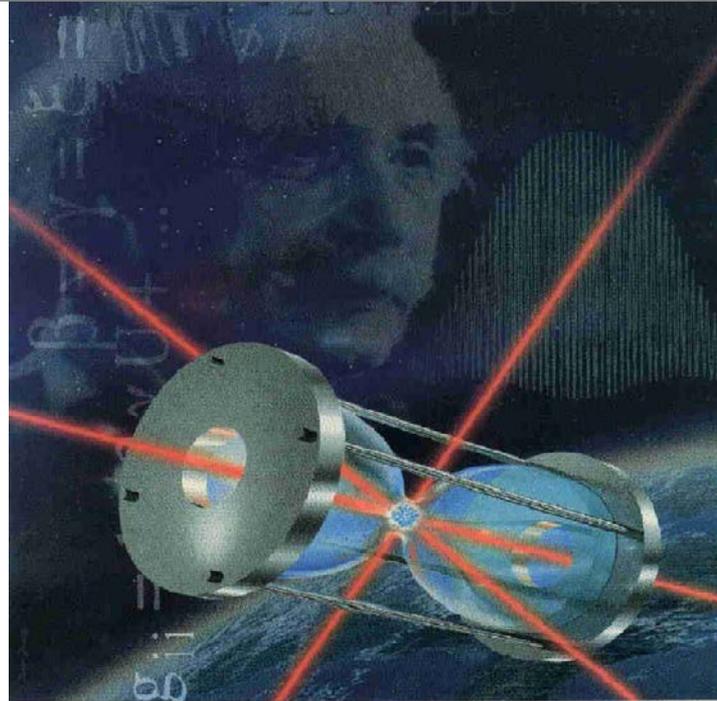


# Tests de physique fondamentale

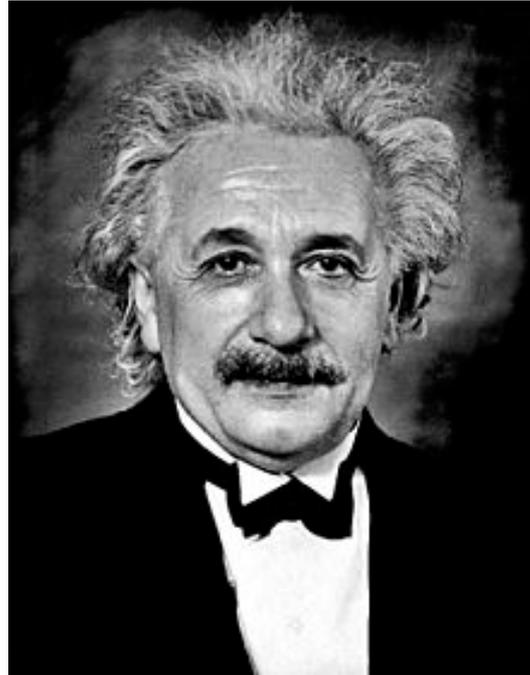


C. Salomon



Ecole Normale Supérieure, Paris, France  
La seconde atomique a 50 ans  
Observatoire de Paris, 13 octobre 2017

# Le temps existe-t-il ?



A la suite des travaux de Minkovski, Poincaré, Lorentz  
la réponse d'Einstein est: Non !

L'espace et le temps forment un bloc indissociable  
avec quatre dimensions, 3 d'espace et une de temps

Cet Espace-Temps est déformé continûment par la matière.  
L'ensemble Espace-Temps-Matière-Energie est décrit par les équations  
de la relativité générale (1915)

# Une horloge: une réalisation locale du temps propre

Chaque observateur muni d'une horloge locale peut mesurer des intervalles de temps. Ces intervalles peuvent être comparés à ceux d'une autre horloge dans un champ de gravitation différent, et généralement ne donneront pas le même intervalle de temps. **Il y a donc autant de temps que d'observateurs !**

Le temps et son inverse, la fréquence, sont les quantités physiques qui peuvent être mesurées avec la plus grande précision.

Toutes les unités de mesure peuvent se ramener à des mesures de fréquence



Never measure anything but frequency !

Le conseil d'Arthur Schawlow  
à ses étudiants à Stanford  
Prix Nobel 1981

# Et au-delà de la relativité ?

- Unifier théorie quantique et relativité

- Théorie des cordes, initiée par G. Veneziano en 1968, développée depuis par de nombreux théoriciens, et étendue aux membranes, dites « branes ».

- Particules remplacées par des « cordes » élastiques, quantifiées.

- Cosmologie

Damour, Polyakov, ....

Nouvelles particules ? exemple du dilaton:

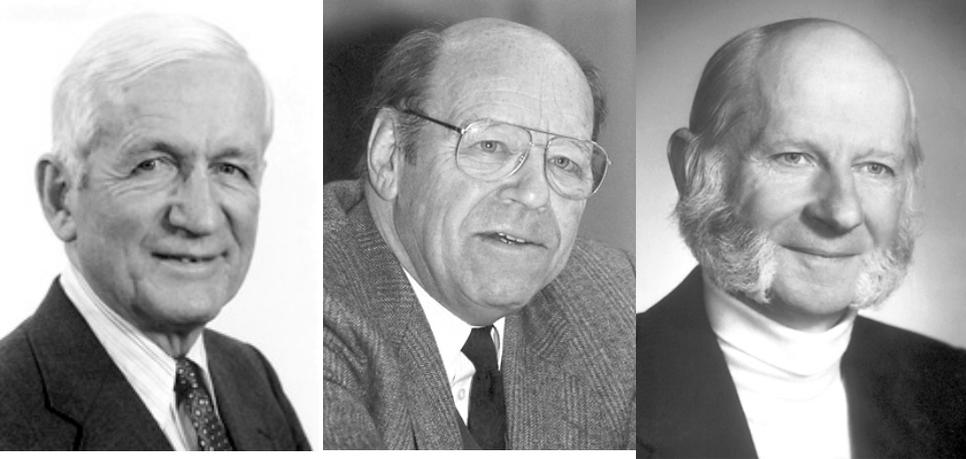
- Evolution temporelle des constantes fondamentales, qui peut être testée avec des horloges

- Violation du principe d'équivalence: microscope

- Recherche de matière noire

mais si le temps universel n'existe pas, pourquoi fabriquer tant d'horloges aujourd'hui ?





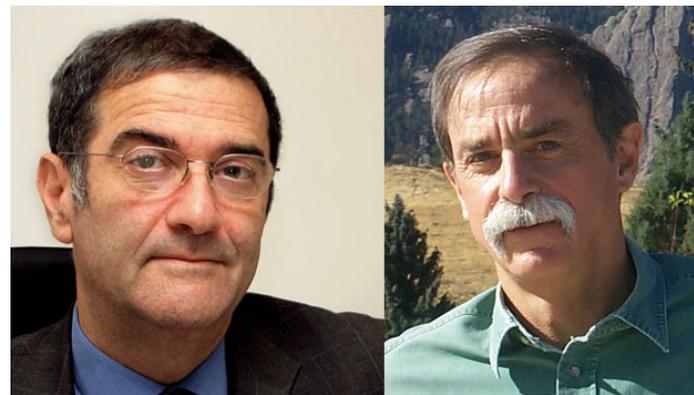
**1989: N. Ramsey, W. Paul, H. Dehmelt**  
**Separated oscillatory fields method**  
**for atomic clocks, ion trap techniques**



**S. Chu, C. Cohen-Tannoudji, W. Phillips**  
**1997: Laser manipulation of atoms**

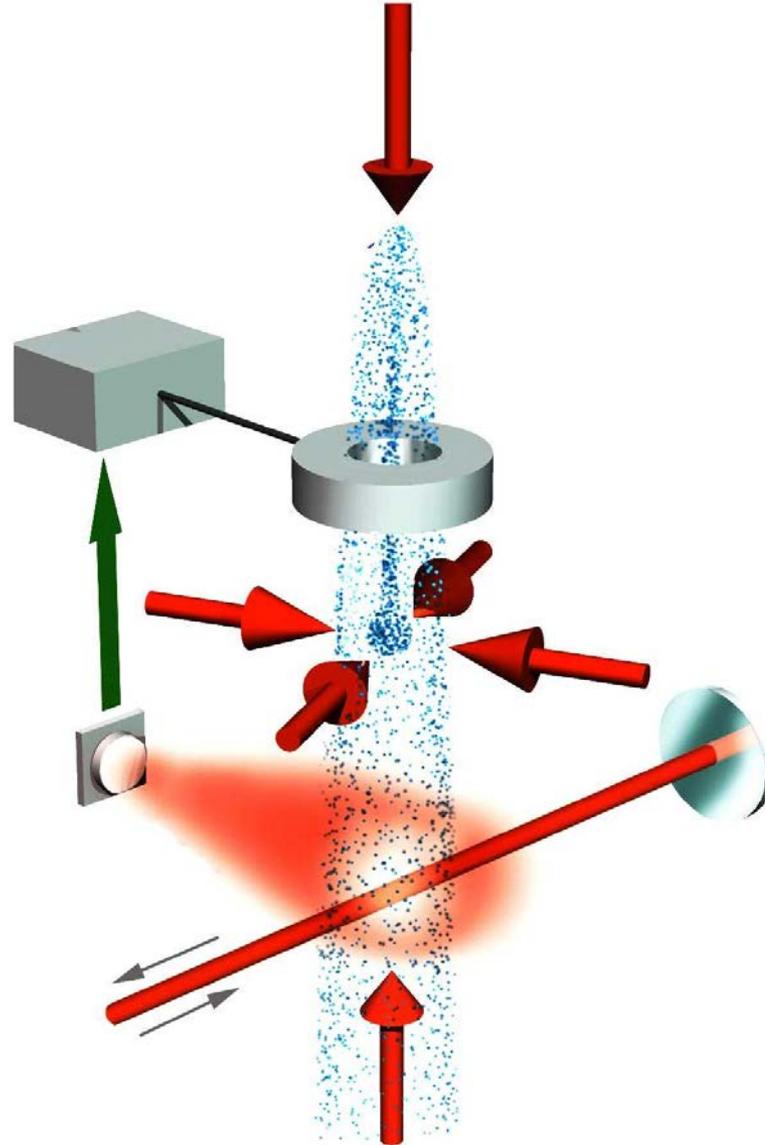


**2005: J. Hall, T. Haensch, R. Glauber**  
**Laser precision spectroscopy**  
**Optical frequency comb**  
**Quantum optics**



**2012: S. Haroche, D. Wineland**  
**Control of individual quantum objects**  
**Photons and atoms**

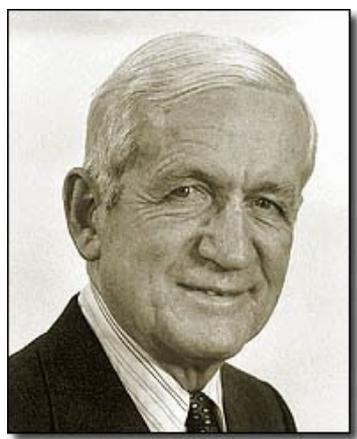
# Définition de la seconde fontaine à atomes de césium



A. Clairon

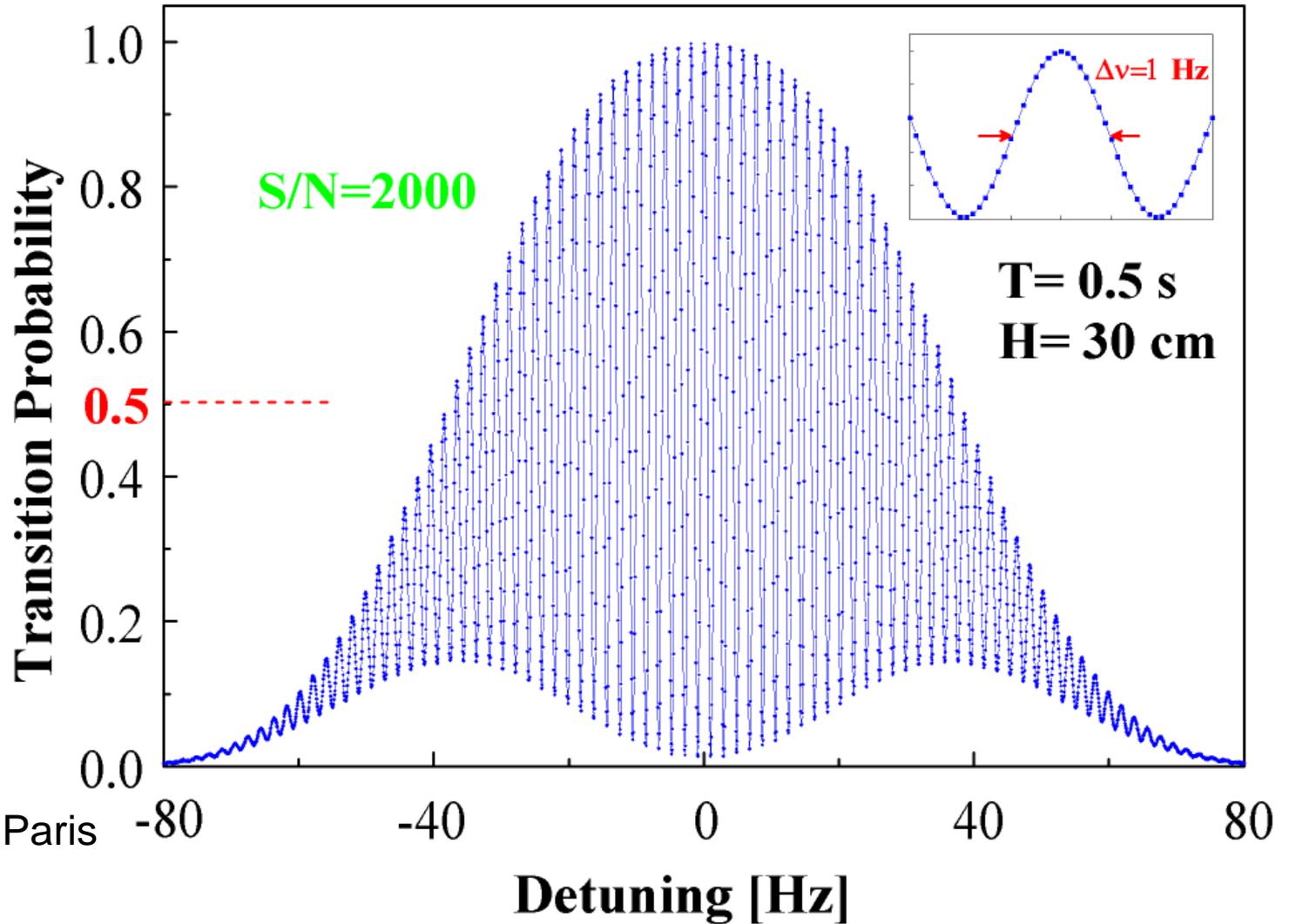


# Résonance de Ramsey



Prix  
Nobel  
1989

LNE-SYRTE  
Observatoire de Paris



limite actuelle: bruit de projection quantique:  $S / B \propto 1 / \sqrt{N_{at}}$

# Variabilité des constantes fondamentales ?

Motivation: théories d'unification,...

Veneziano, Damour, Polyakov, Marciano,....

$\alpha_{elm}$ ,  $m_e/m_p$ ...

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c}$$

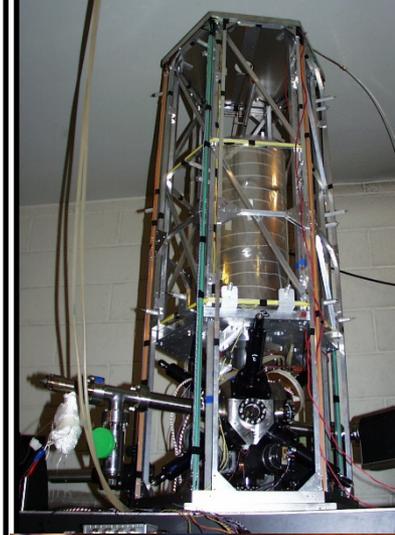
**Principe** : Comparer deux ou plusieurs horloges de nature différente en fonction du temps

Horloge micro-onde/micro-onde:  $\alpha$ ,  $m_e/m_p$ ,  $g^{(i)}$

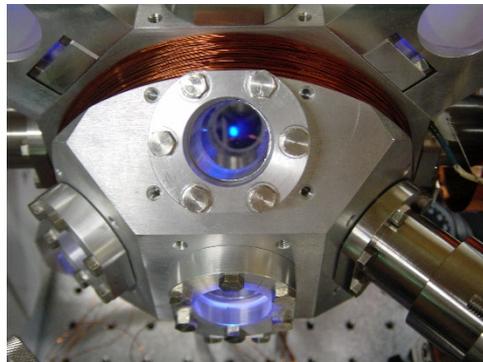
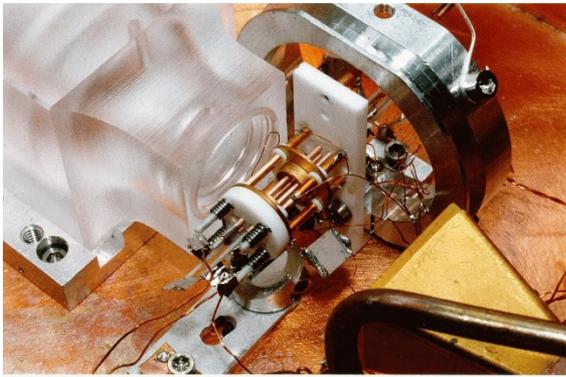
rubidium and cesium

Micro-onde / Optique :  $\alpha$ ,  $m_e/m_p$ ,  $g^{(i)}$

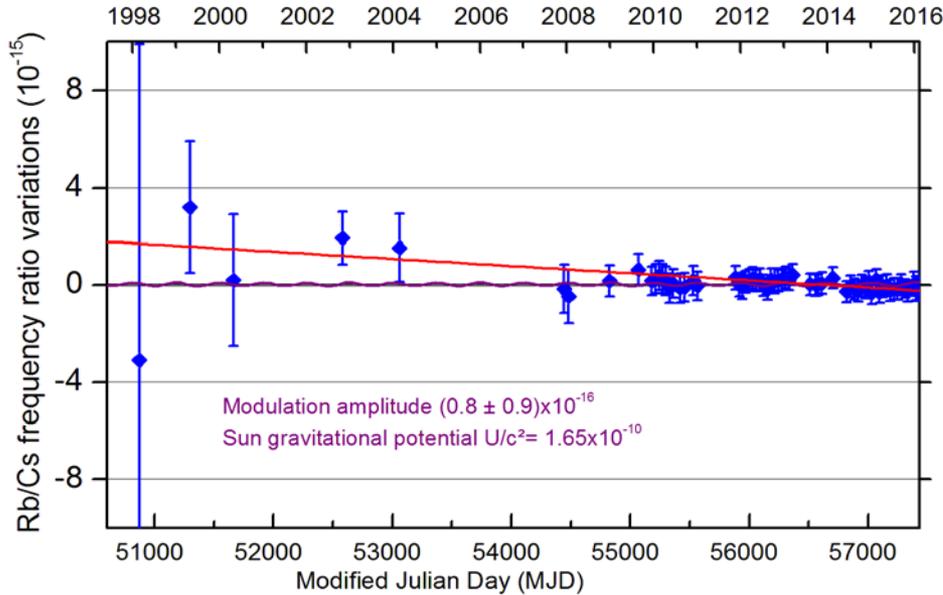
Optique / Optique:  $\alpha$



The ovens and electrodes of the NPL strontium ion end-cap trap.



# SYRTE Comparison between Rubidium and Cesium Hyperfine Structure over ~ 18 years



Weighted least square fit to a line

$$\frac{d}{dt} \ln\left(\frac{\nu_{Rb}}{\nu_{Cs}}\right) = (-1.07 \pm 0.49) \times 10^{-16} \text{ yr}^{-1}$$

*J. Guéna et al., SYRTE  
and Phys. Rev.Lett. 109 (2012)*

- With QED calculations:

*J. Prestage, et al., PRL (1995), V. Dzuba, et al., PRA (1999)*

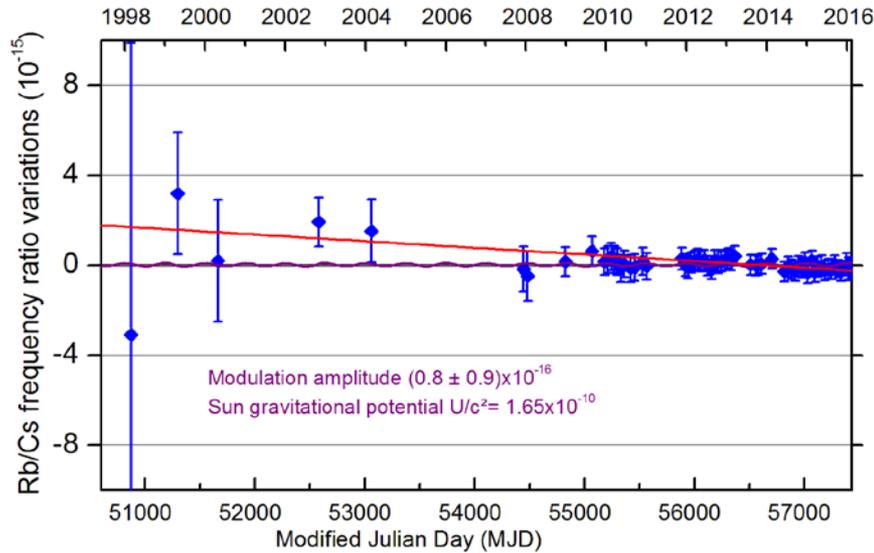
$$\frac{d}{dt} \ln\left(\frac{g_{Rb}}{g_{Cs}} \alpha^{-0.49}\right) = (-1.07 \pm 0.49) \times 10^{-16} \text{ yr}^{-1}$$

- With QCD calculations:

*T.H. Dinh et al., PRA79 (2009)*

$$\frac{d}{dt} \ln\left[\alpha^{-0.49} \left(m_q / \Lambda_{QCD}\right)^{-0.021}\right] = (-1.07 \pm 0.49) \times 10^{-16} \text{ yr}^{-1}$$

# SYRTE Comparison between Rubidium and Cesium Hyperfine Structure over ~ 18 years



Weighted least square fit to a line

$$\frac{d}{dt} \ln\left(\frac{\nu_{Rb}}{\nu_{Cs}}\right) = (-1.07 \pm 0.49) \times 10^{-16} \text{ yr}^{-1}$$

Or search for a modulation at Earth rotation frequency

Differential redshift test  $d\nu/\nu = (1 + \beta)dU/c^2$

$$\beta(^{87}\text{Rb}) - \beta(^{133}\text{Cs}) = (-4.7 \pm 5.3) \times 10^{-7}$$

*J. Guéna et al., SYRTE  
and Phys. Rev.Lett. 109 (2012)*

- With QED calculations:

*J. Prestage, et al., PRL (1995), V. Dzuba, et al., PRA (1999)*

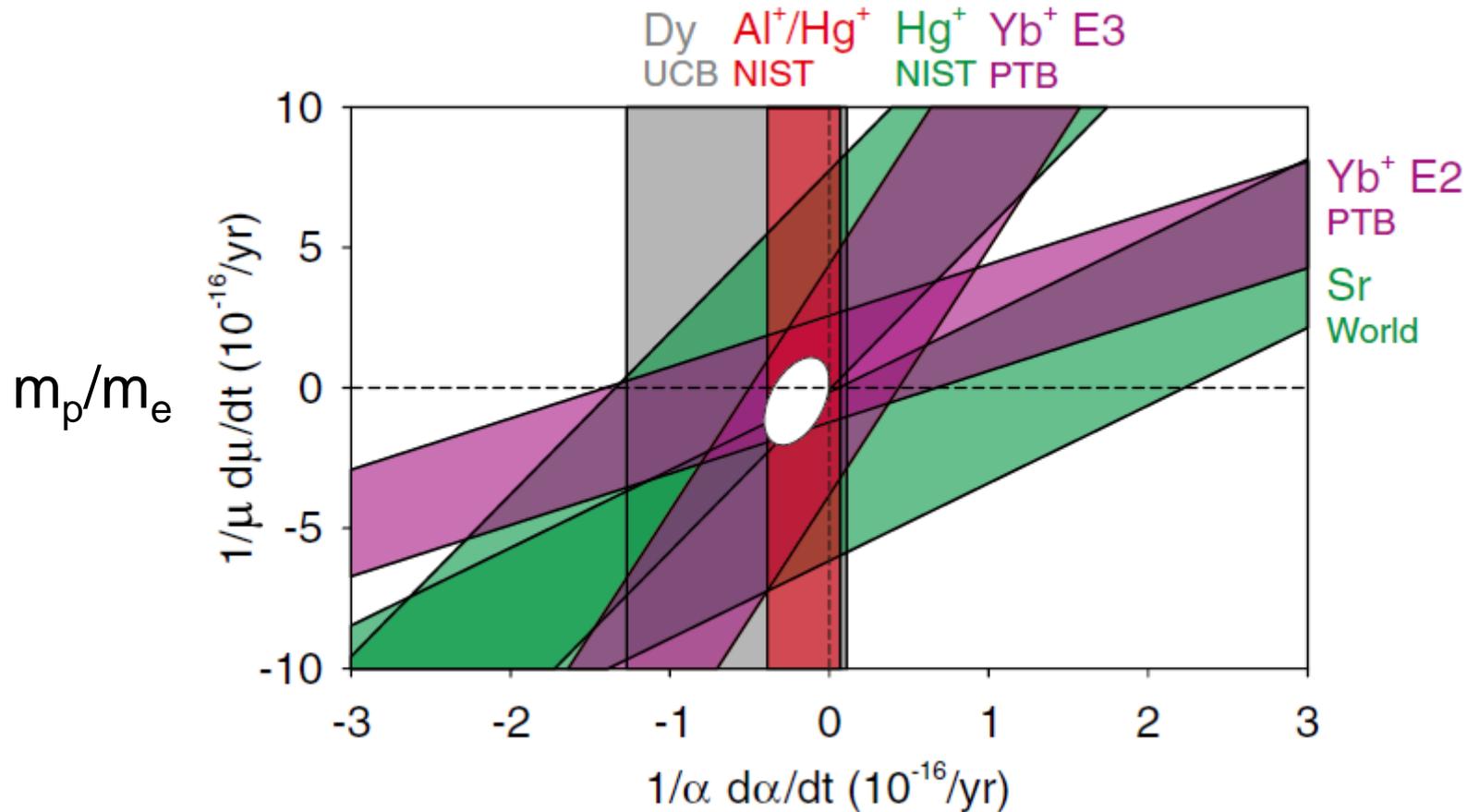
$$\frac{d}{dt} \ln\left(\frac{g_{Rb}}{g_{Cs}} \alpha^{-0.49}\right) = (-1.07 \pm 0.49) \times 10^{-16} \text{ yr}^{-1}$$

- With QCD calculations:

*T.H. Dinh et al., PRA79 (2009)*

$$\frac{d}{dt} \ln[\alpha^{-0.49} (m_q / \Lambda_{QCD})^{-0.021}] = (-1.07 \pm 0.49) \times 10^{-16} \text{ yr}^{-1}$$

# Variabilité des constantes fondamentales: limites actuelles

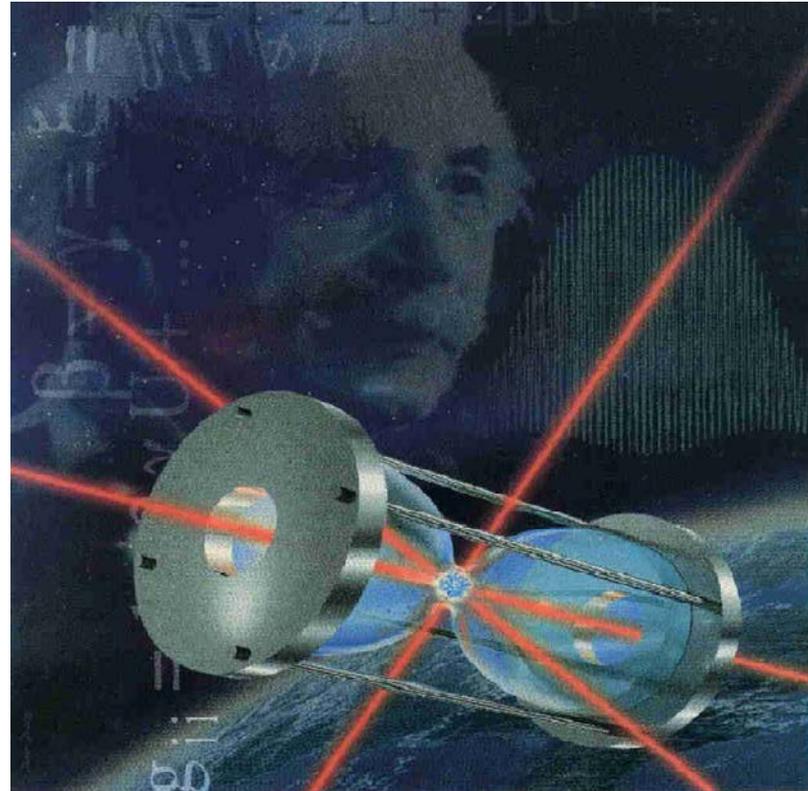


N. Huntemann et al., PRL 113, 210802 (2014)

# Quelques perspectives

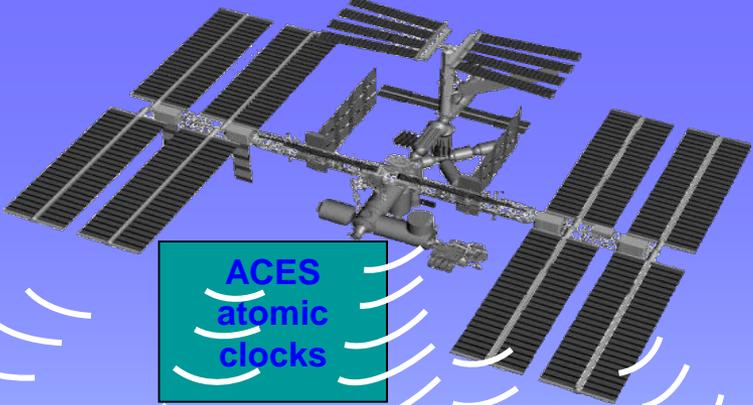
# La mission spatiale PHARAO/ACES

1997

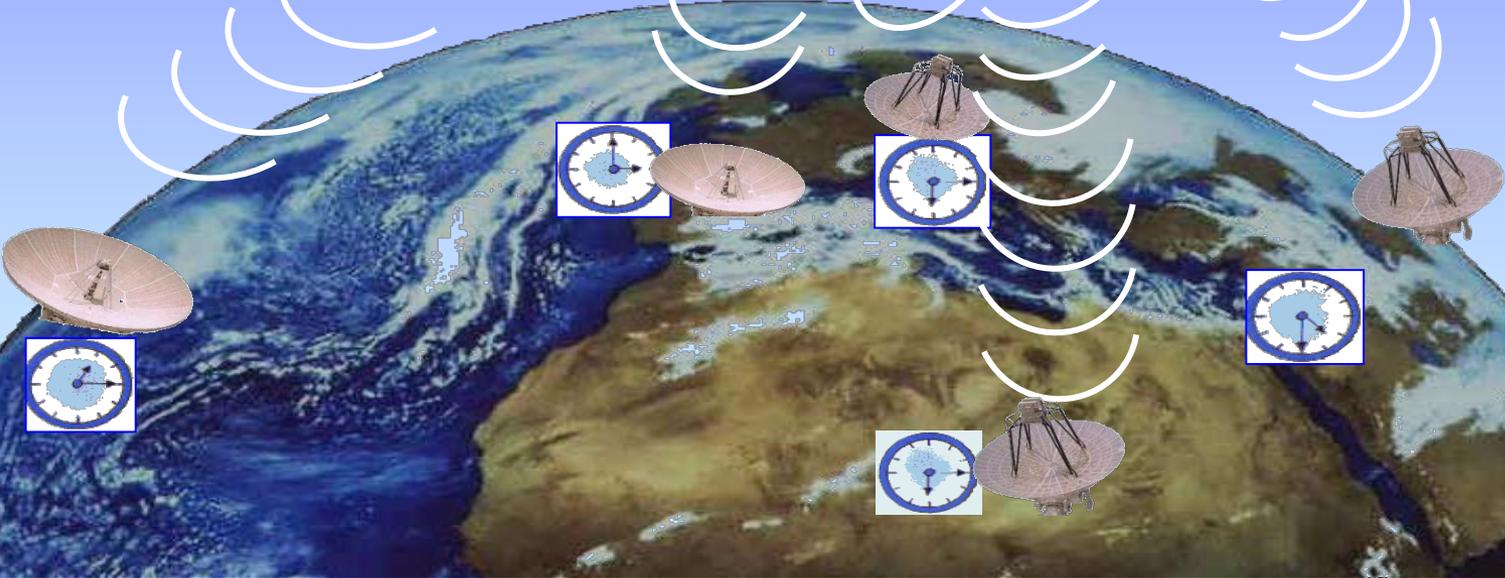


The logo for ACES (Atomic Clock Ensemble in Space) features the acronym "ACES" in a bold, blue, sans-serif font. To the right of the text is a stylized graphic of a globe with latitude and longitude lines, rendered in a light blue color.

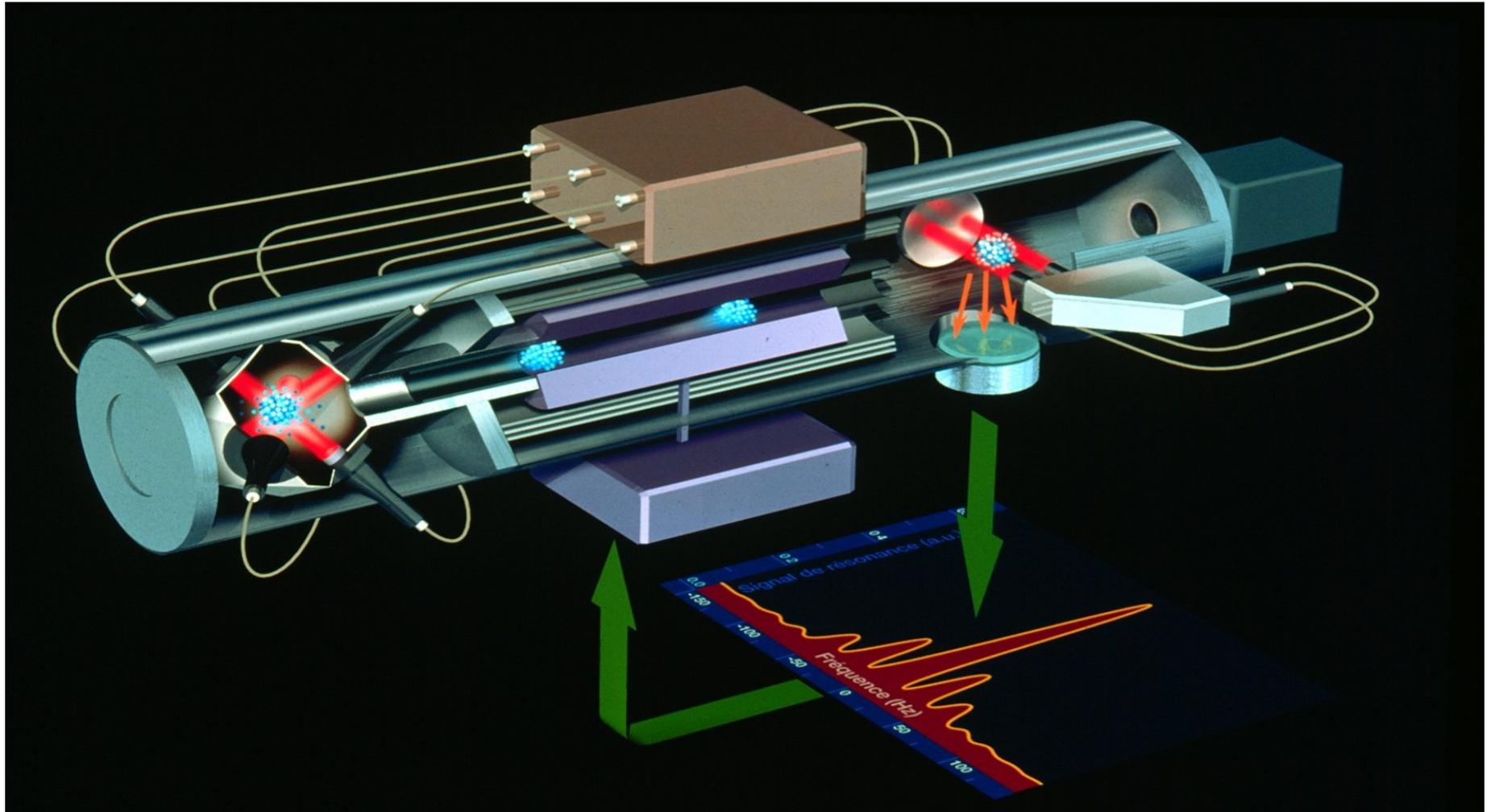
**ACES**

A detailed illustration of the ACES satellite in orbit above Earth. The satellite is a complex structure with multiple solar panel arrays and various instruments. A green rectangular box is superimposed on the satellite, containing the text "ACES atomic clocks".

**ACES  
atomic  
clocks**

- 
- A diagram showing the Earth from space. Several ground stations are depicted as large parabolic dish antennas. Each dish is connected to a small square icon containing a clock face, representing an atomic clock. White curved lines radiate from the satellite towards the ground stations, indicating the transmission of signals. The Earth's surface shows continents and oceans in realistic colors.
- **Horloge à atomes froids dans l'espace**
  - **Tests de physique fondamentale**
  - **Accès mondial**

# L'horloge PHARAO

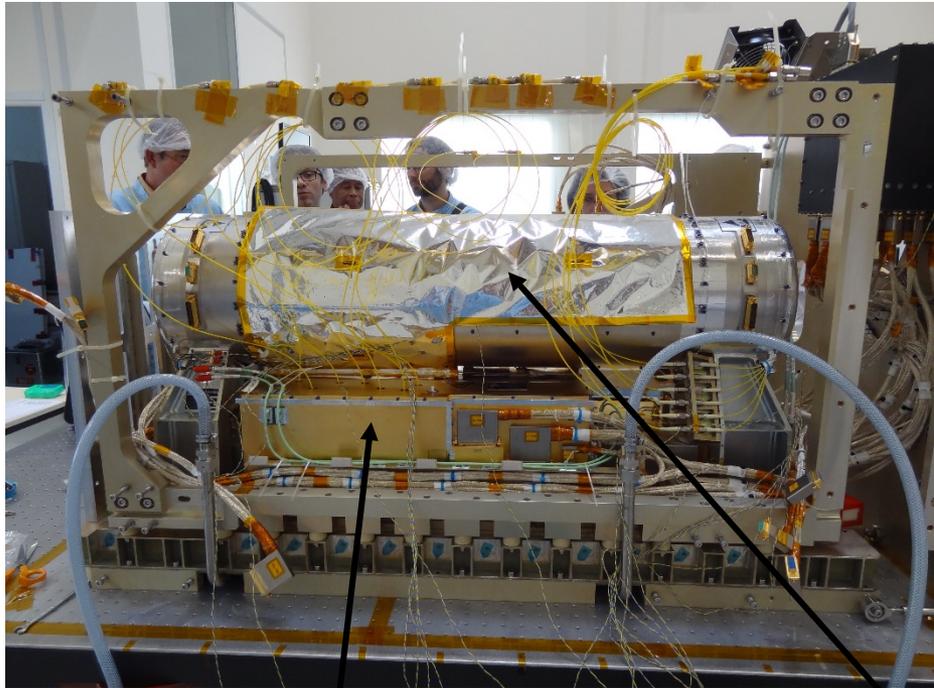


# L'équipe PHARAO à Toulouse



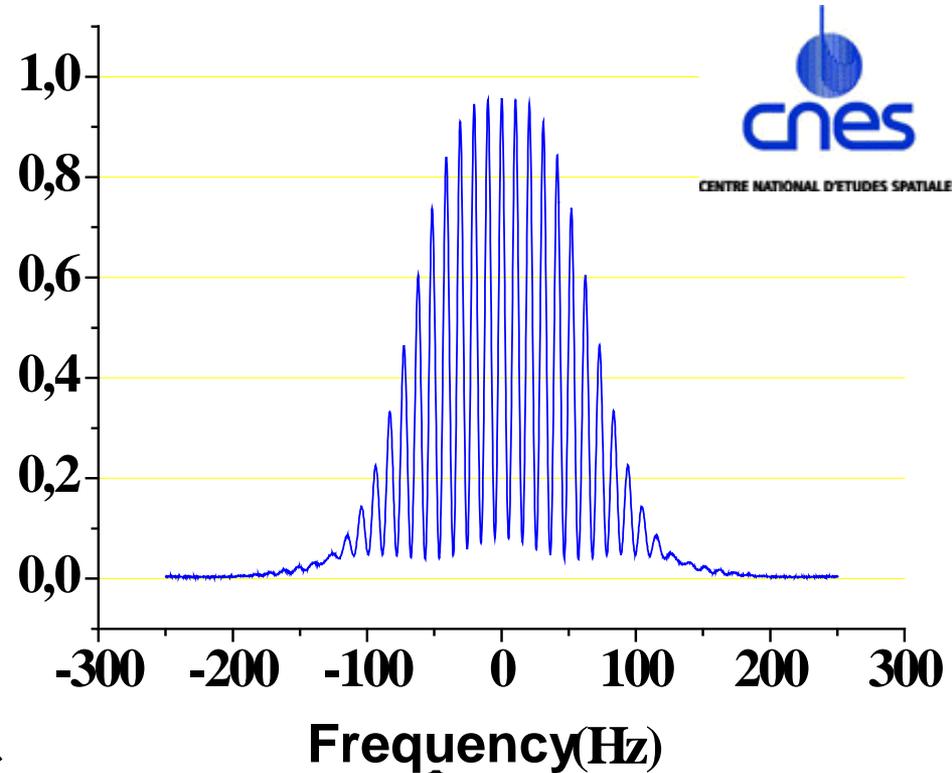


# L'horloge spatiale à atomes froids PHARAO



source laser

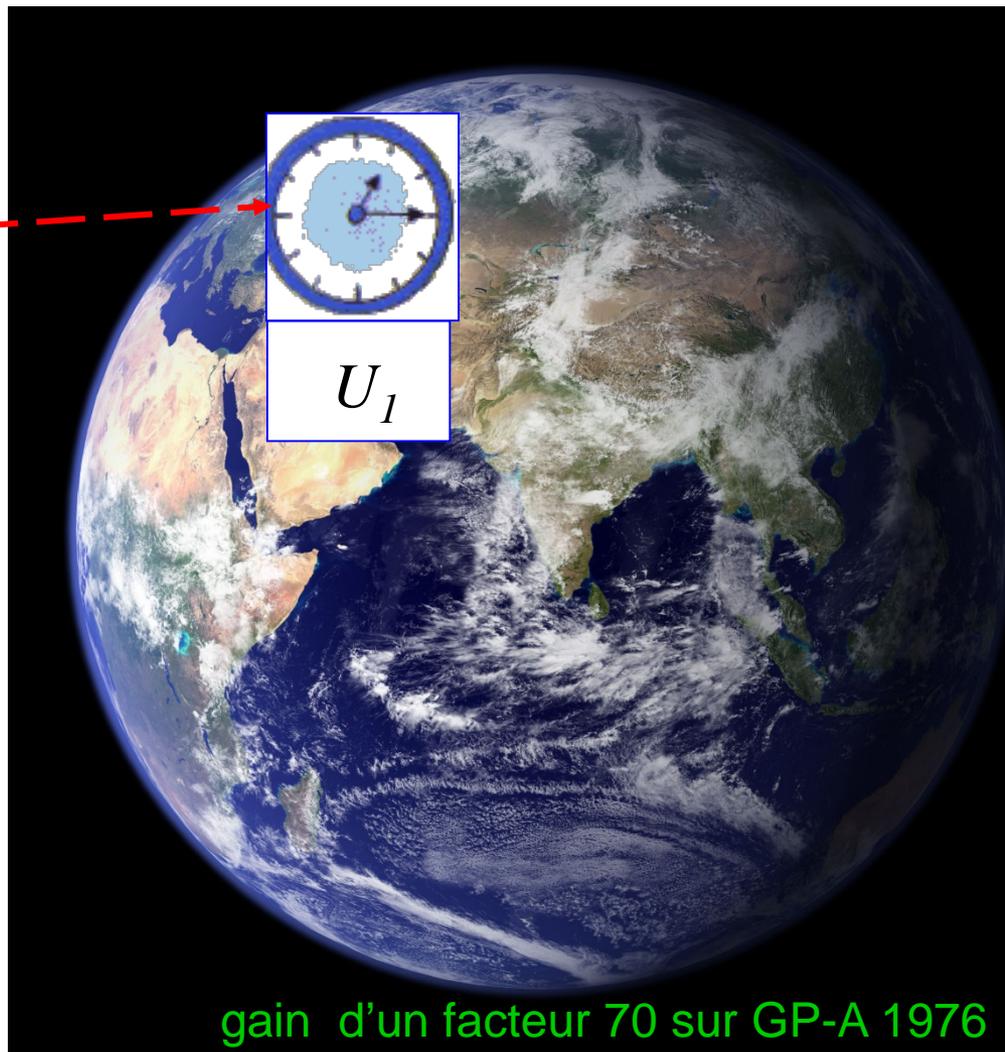
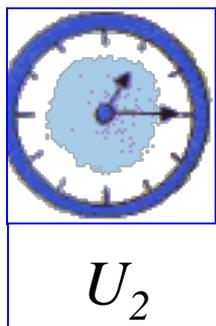
tube césium



Tests du modèle de vol terminés. Stabilité et exactitude attendues dans l'espace:  $10^{-16}$   
Livré à l'ESA en Juillet 2014



# Un test de l'effet Einstein



$$\frac{\nu_2}{\nu_1} = \left( 1 + \frac{U_2 - U_1}{c^2} \right)$$

Décalage de fréquence

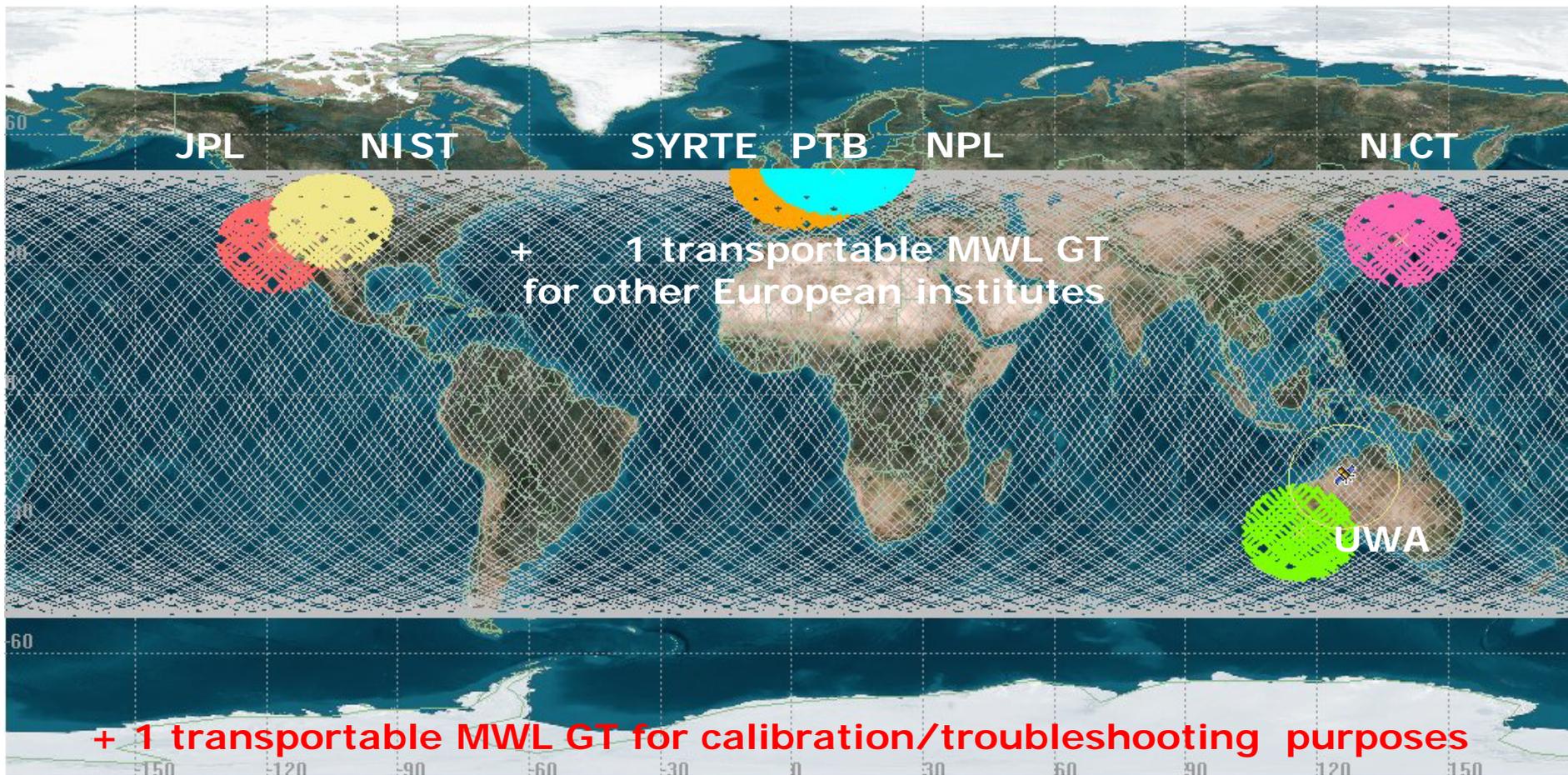
$4.59 \cdot 10^{-11}$

Horloges d'exactitude  $10^{-16}$

Test à  $2 \cdot 10^{-6}$

gain d'un facteur 70 sur GP-A 1976

# ACES Network of Ground Institutes



First MWL Ground terminal delivered to PTB in 2015

# ACES sur la plateforme externe de Columbus

S12ZE009893

L'ISS



esa



**ACES**

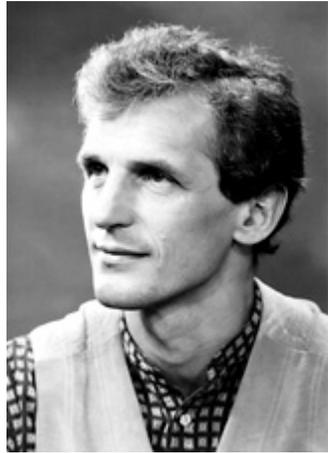
**date de lancement prévue: fin 2018**  
**durée de la mission : 18 à 36 mois**

# Tests fondamentaux avec des gaz quantiques

# Nouvelle frontière: mesures de précision et physique à N corps



E. Cornell



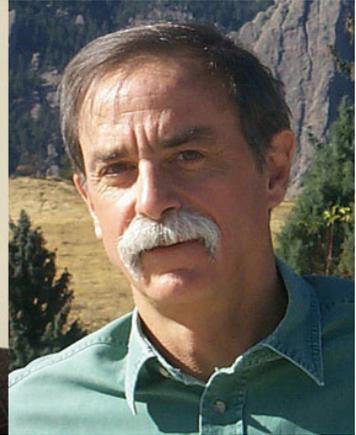
W. Ketterle



C. Wieman



S. Haroche



D. Wineland

Nobel prize 2001: Bose-Einstein condensation

Nobel prize 2012: quantum systems

Les interactions entre atomes: une limite à la précision

Exemple: fontaines à césium ou Rubidium

Utiliser la statistique quantique ou les interactions entre atomes

Pour améliorer la précision

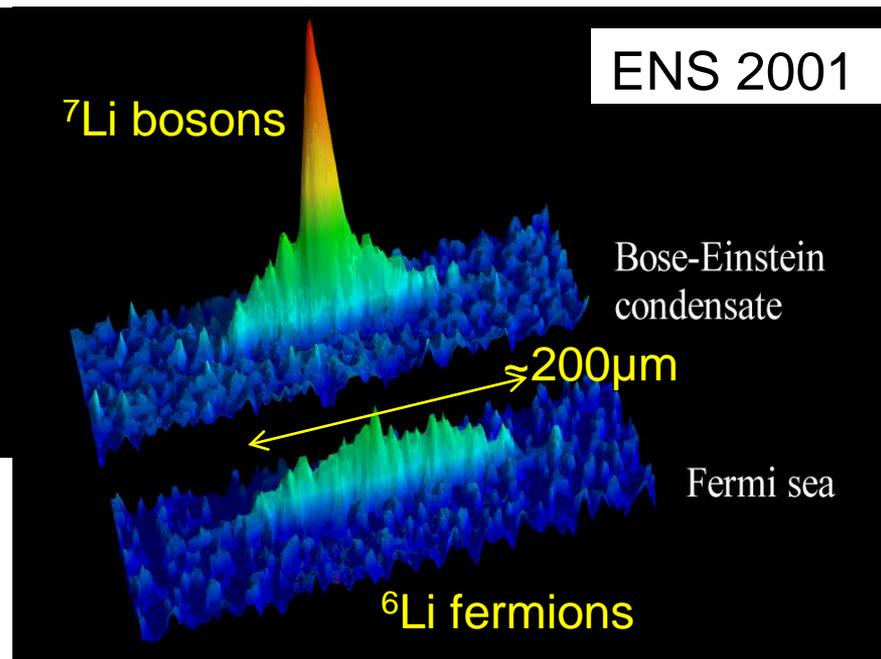
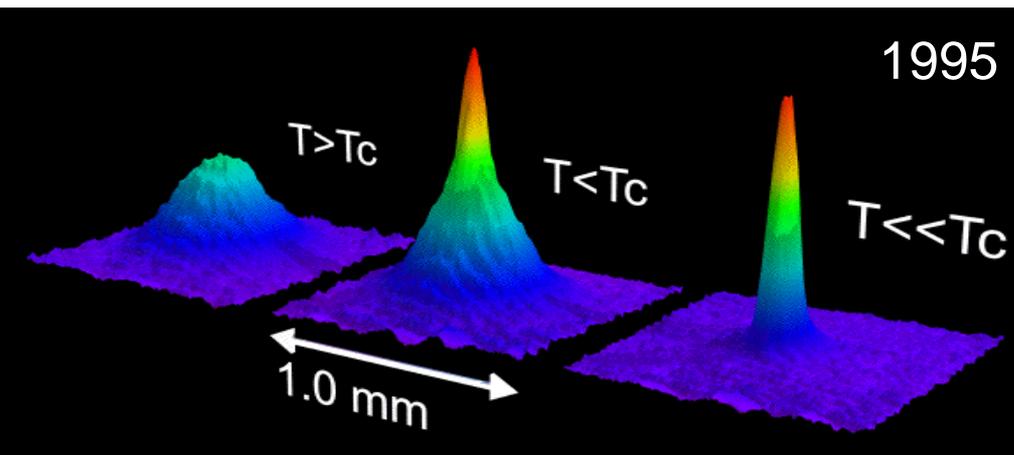
Spin squeezing, lasers à atomes, interférométrie

# Bosons et fermions ultrafroids

## Condensation de Bose-Einstein et fermions dégénérés

Science, 269, 198 (1995)  
E. Cornell and C. Wieman,  
Phys. Rev. Lett. 75, 3969 (1995)  
W. Ketterle

F. Schreck et al.,  
Phys. Rev. Lett. 87, (2001)

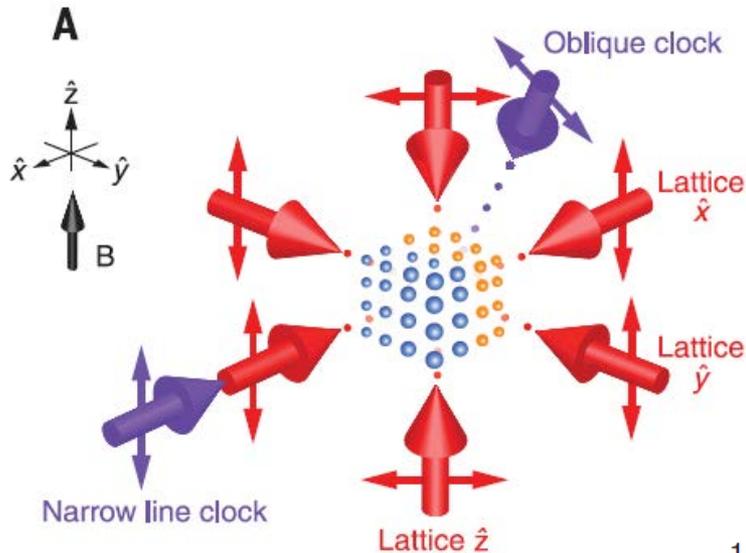


Janvier 2017:  
premier condensat de Bose – Einstein  
dans l'espace.  
Vers des atomes au picoKelvin !  
E. Rasel, W. Ertmer, Hannover

Un seul fermion par état  
quantique du piège  
Horloges à fermions dégénérés:  ${}^{87}\text{Sr}$

# Une horloge optique avec des fermions dans un réseau optique à 3 dimensions

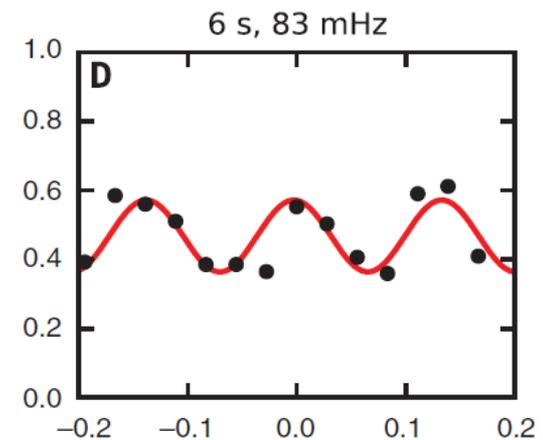
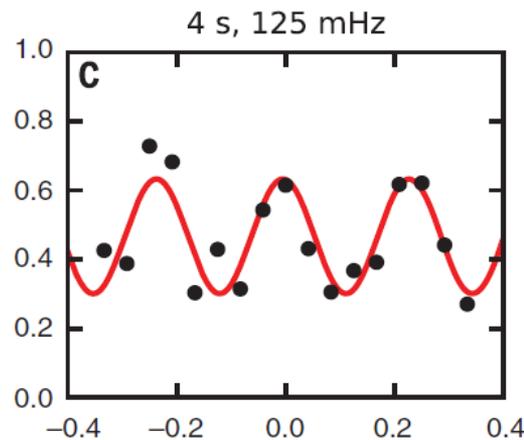
S.L. Campbell et al., JILA, Science, Oct 6th, 2017



Seulement 0, 1, 2 ou 3 atomes par site

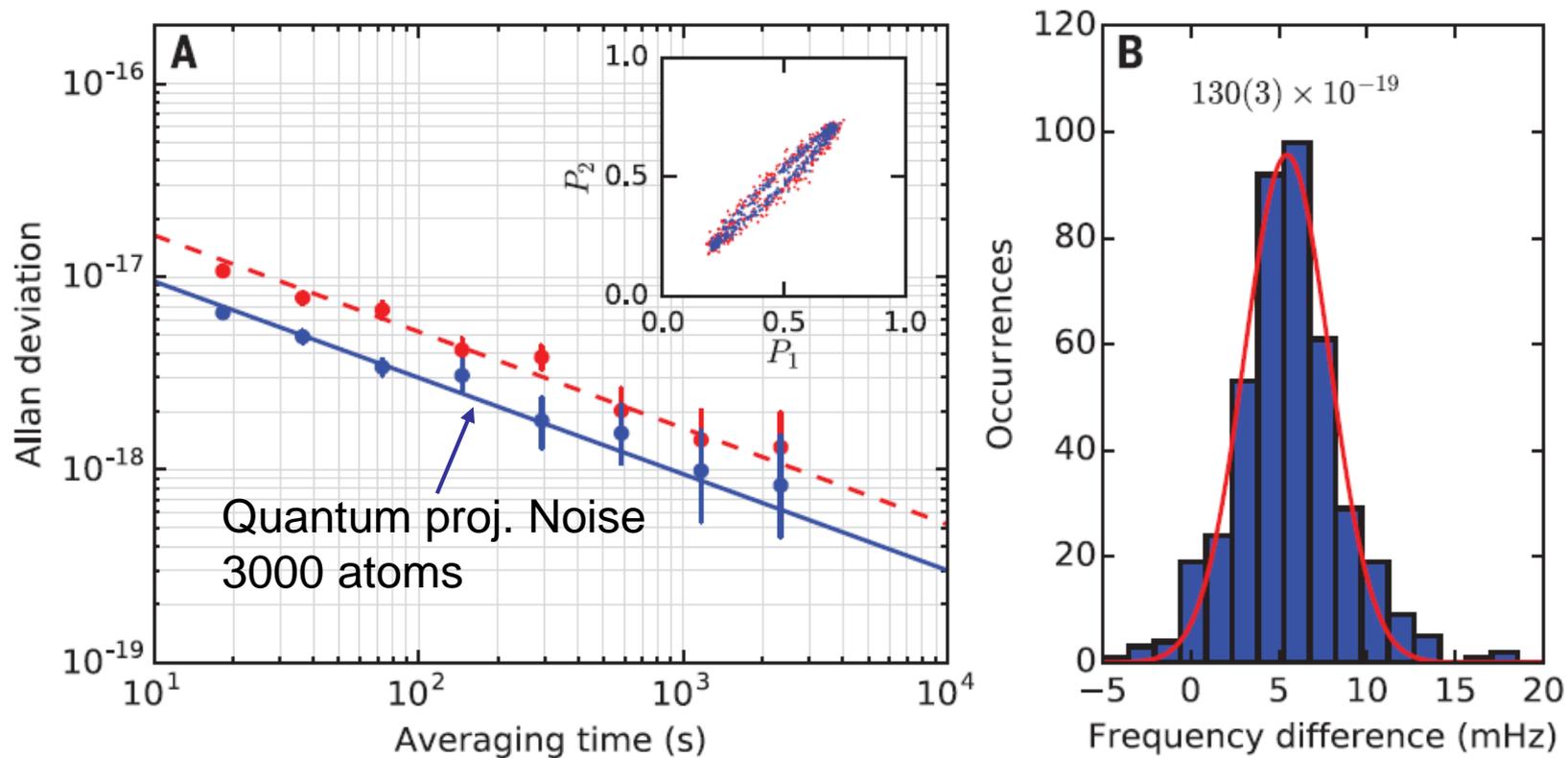
Résonance très étroite: l'énergie d'interaction pour 2 ou 3 atomes par site est résolue.  
Pour 1 at/ site: pas de décalage en fréquence

Long temps de cohérence:  
4s ou 6s



Detuning (Hz)

# Une horloge optique avec des fermions $^{87}\text{Sr}$ dégénérés (2)



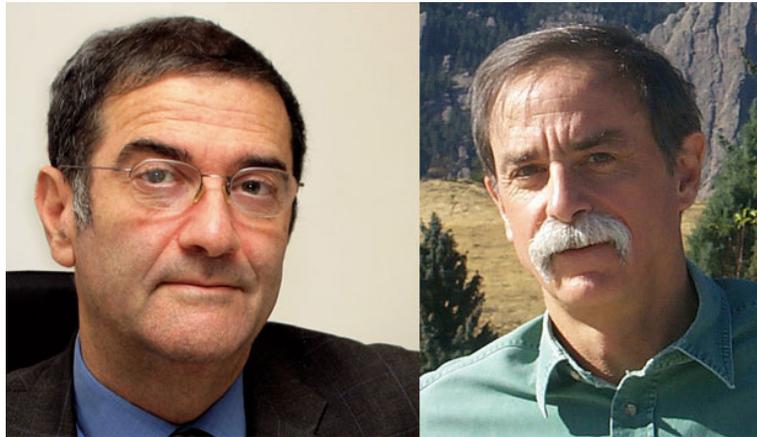
Deux zones du piège sur la même image: le bruit du laser est en mode commun.  
Sensibilité différentielle sur une image:  $3 \cdot 10^{-17}$  @1s et  $3 \cdot 10^{-19}$  @10 000 s soit le QPN

Possibilité de mesurer le décalage gravitationnel  
entre le haut et le bas du nuage d'atomes sur 3 mm !

# Une révolution en marche

## La métrologie quantique

Utiliser l'intrication quantique entre particules pour améliorer la précision des mesures



S. Haroche

D. Wineland

Prix Nobel 2012

# Vers la limite de Heisenberg

Les fontaines atomiques fonctionnent au bruit de projection quantique:  
atomes non corrélés: LQS : stabilité de fréquence proportionnelle à  $1/N^{1/2}$

N atomes à 2 niveaux: un ensemble de spin  $1/2$ , formant un spin collectif  $|J| = N/2$

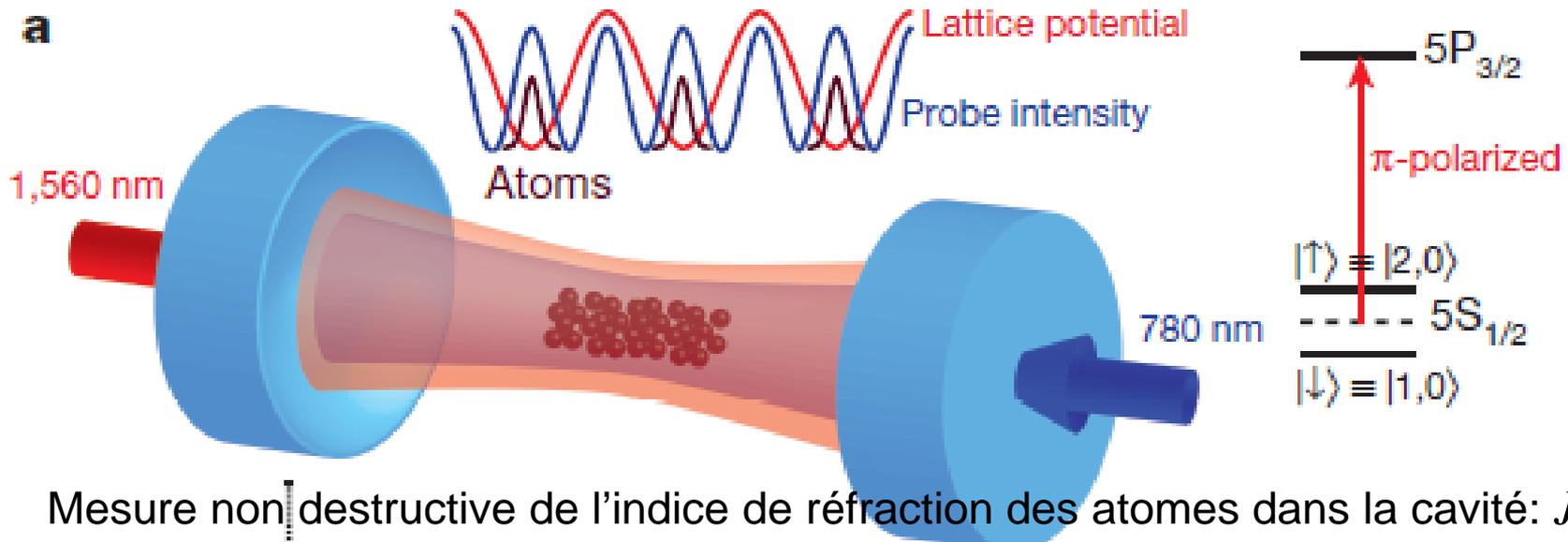
$$\Delta J_z \cdot \Delta J_y \geq |J_x / 2|$$

Spin squeezing: réduire la variance dans une direction, la direction utile pour la mesure  
Kitagawa et Ueda, 1993, Wineland et al. 1994, approcher  $1/N$

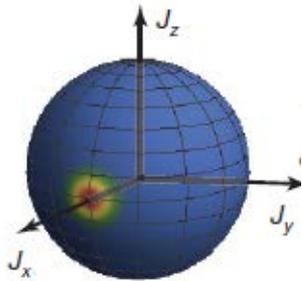
LETTER

Nature 2016

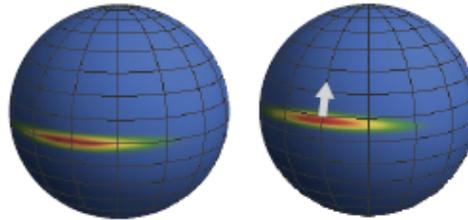
doi:10.1038/nature16176



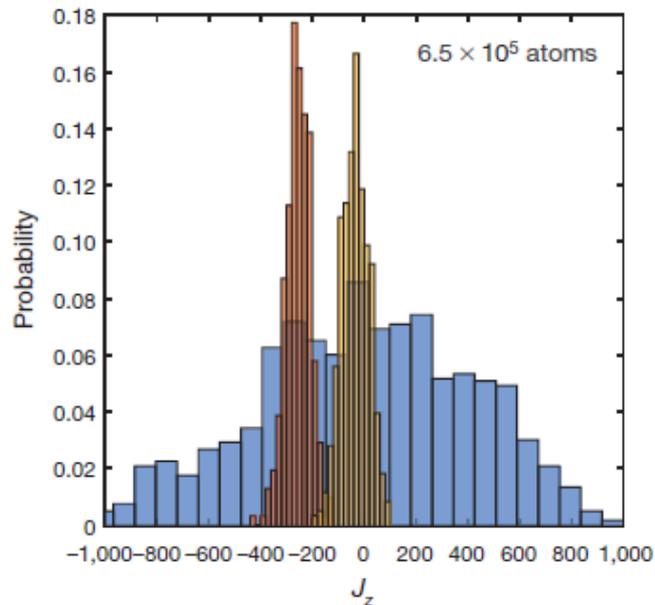
# Méetrologie quantique



**b**

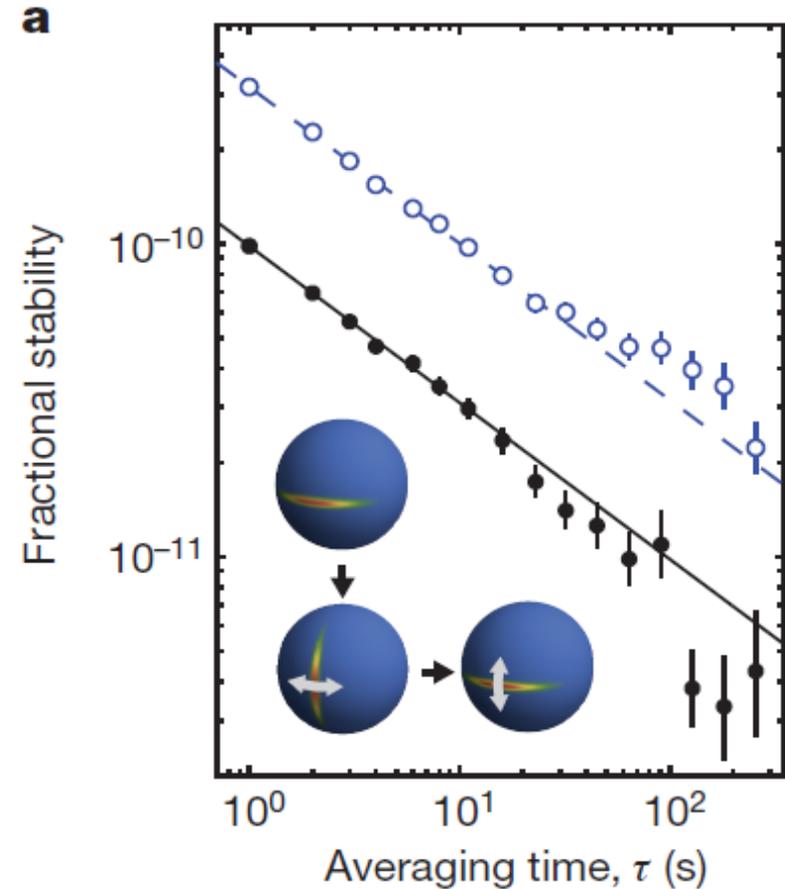
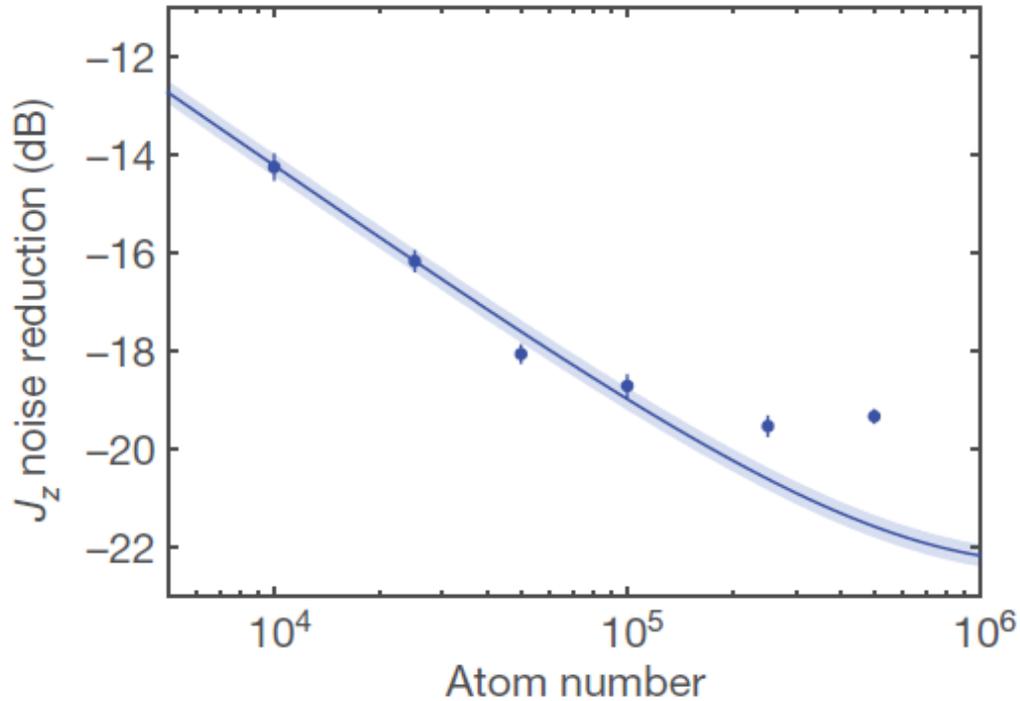


Rotation de  $660 \mu\text{rad}$



Gain en rapport signal sur bruit : facteur 10 pour  $5 \times 10^5$  atomes  
Sensibilité en phase: 147 microradians par cycle  
Ceci implique l'intrication quantique d'au moins 680 particules

# Vers une horloge à états corrélés



Il « reste » à augmenter le temps d'interaction au-delà de  $228 \mu\text{s}$  tout en préservant les corrélations quantiques

# Perspectives

- 1) Les horloges optiques présentent des fluctuations de temps inférieures à 1 picoseconde par jour. Nouvelle définition de la seconde requise. Progrès rapides.
- 2) Un temps précis délivré par satellites et fibres optiques terrestres avec une stabilité de la nano à la picoseconde.
- 3) Effet Einstein: un test fondamental et géodésie relativiste
- 4) Les fluctuations du potentiel gravitationnel vont limiter la précision du temps au sol à  $10^{-18}$ - $10^{-19}$  (soit du cm au mm):  
Solution: mettre les horloges de références en orbite haute où ces fluctuations sont fortement réduites
- 5) Utiliser l'intrication quantique pour améliorer la précision des mesures, horloges et senseurs inertiels