

# Test de la stabilité des constantes fondamentales à l'aide d'horloges atomiques

H. Marion, C. Vian, M. Abgrall, I. Maksimovic, L. Cacciapuoti, D. Chambon, F. Pereira dos Santos, P. Rosenbusch, S. Bize, P. Lemonde, P. Laurent, G. Santarelli, P. Wolf and A. Clairon

[Bureau National de Métrologie – BNM-SYRTE \(UMR CNRS 8630\)](#)

C. Salomon

[Laboratoire Kastler-Brossel](#)

A.N. Luiten and M.E. Tobar

[School of Physics, University of Western Australia](#)

- Motivations et principe des tests
- Descriptions des fontaines atomiques
  - Deux avancées importantes
- Comparaisons récentes entre fontaines de césium
- Comparaisons entre fontaines de  $^{87}\text{Rb}$  et  $^{133}\text{Cs}$ 
  - Test de stabilité des constantes fondamentales

# Test de stabilité des constantes fondamentales (1)

Le Principe d'Équivalence de Einstein est à la base de la Relativité Générale et de la physique moderne

Le Principe d'Équivalence est révisé par nombre de nouvelles théories

La plupart des théories unifiées autorisent ou même prédisent une variation des constantes fondamentales en fonction du temps et de la position

Théorie effective à 4 dimension :  $g_{\mu\nu} \Rightarrow g_{\mu\nu, \varphi, \dots}$  . Les constantes fondamentales dépendent de la valeur locale des champs additionnels  $\varphi$  :  $\alpha(\varphi)$ ,  $m(\varphi)$ , ...

Voir par exemple Damour *et al.*, PRL (02):  $\alpha$  pourrait varier de  $10^{-16}$  par an (si violation de l'universalité de la chute libre proche des limites expérimentales actuelles)

Tests récents sur des échelles de temps cosmologiques

Observation des fréquences d'absorption de nuages interstellaires dans le spectre de QUASARS

KECH

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} = -(0.72 \pm 0.18) \times 10^{-5}, \quad 0.5 < z < 3.5$$

$z = 2 \Leftrightarrow T \sim 10$  Gyr

Webb *et al.*, PRL (01)

VLT

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} = -(0.06 \pm 0.06) \times 10^{-5}, \quad 0.4 < z < 2.3$$

Srianand *et al.*, PRL (04)

Oklo test : Stringent constraint to a variation of  $\alpha$  on geological timescale

# Test de stabilité des constantes fondamentales (2)

Fréquence d'une transition hyperfine en fonction des constantes fondamentales (à l'ordre le plus bas) :

$$\nu_{\text{hfs}}^{(i)} \simeq R_{\infty} c \times \mathcal{A}_{\text{hfs}}^{(i)} \times g^{(i)} \left( \frac{m_e}{m_p} \right) \alpha^2 F_{\text{hfs}}^{(i)}(\alpha)$$

Unité atomique de fréquence

Facteur purement numérique

Facteur de Landé du noyau

Masse électron/masse proton

« corrections » relativistes, fonction de  $\alpha$

Fréquence des transitions électroniques en fonction des constantes fondamentales constants (à l'ordre le plus bas):

$$\nu_{\text{elec}}^{(i)} \simeq R_{\infty} c \times \mathcal{A}_{\text{elec}}^{(i)} \times F_{\text{elec}}^{(i)}(\alpha)$$

Rapport entre fréquences atomiques :

$$\frac{\nu_{\text{elec}}^{(ii)}}{\nu_{\text{elec}}^{(i)}} \propto \frac{F_{\text{elec}}^{(ii)}(\alpha)}{F_{\text{elec}}^{(i)}(\alpha)}$$

$$\frac{\nu_{\text{hfs}}^{(ii)}}{\nu_{\text{elec}}^{(i)}} \propto g^{(ii)} \frac{m_e}{m_p} \alpha^2 \frac{F_{\text{hfs}}^{(ii)}(\alpha)}{F_{\text{elec}}^{(i)}(\alpha)}$$

$$\frac{\nu_{\text{hfs}}^{(ii)}}{\nu_{\text{hfs}}^{(i)}} \propto \frac{g^{(ii)}}{g^{(i)}} \frac{F_{\text{hfs}}^{(ii)}(\alpha)}{F_{\text{hfs}}^{(i)}(\alpha)}$$

Sensibilité aux variations des constantes fondamentales:

$$\delta \ln \left( \frac{\nu_{\text{hfs}}^{(i)}}{R_{\infty} c} \right) \simeq \frac{\delta g^{(i)}}{g^{(i)}} + \frac{\delta(m_e/m_p)}{(m_e/m_p)} + \left( 2 + \alpha \frac{\partial}{\partial \alpha} \ln F_{\text{hfs}}^{(i)}(\alpha) \right) \times \frac{\delta \alpha}{\alpha}$$

$$\delta \ln \left( \frac{\nu_{\text{elec}}^{(i)}}{R_{\infty} c} \right) \simeq \left( \alpha \frac{\partial}{\partial \alpha} \ln F_{\text{elec}}^{(i)}(\alpha) \right) \times \frac{\delta \alpha}{\alpha}$$

# Test de stabilité des constantes fondamentales (3)

$g^{(i)}$  and  $m_p$  ne sont pas des paramètres “fondamentaux” mais peuvent être reliés (au moins en principe) à 3 paramètres fondamentaux:

Échelle de masse de la QCD:  $\Lambda_{\text{QCD}}$       Masses des quarks:  $m_q = (m_u + m_d)/2$       and       $m_s$

V.V. Flambaum, et al., PRD (2004)

Toute comparaison entre horloges atomiques peut être interprétée comme testant la stabilité d'un ou plusieurs des 4 paramètres fondamentaux :

$$\alpha, \frac{m_e}{\Lambda_{\text{QCD}}}, \frac{m_q}{\Lambda_{\text{QCD}}}, \frac{m_s}{\Lambda_{\text{QCD}}}$$

Sensibilité faible : peut être raisonnablement négligé en première approche

On peut également faire l'hypothèse  $\delta m_q = \delta m_s$

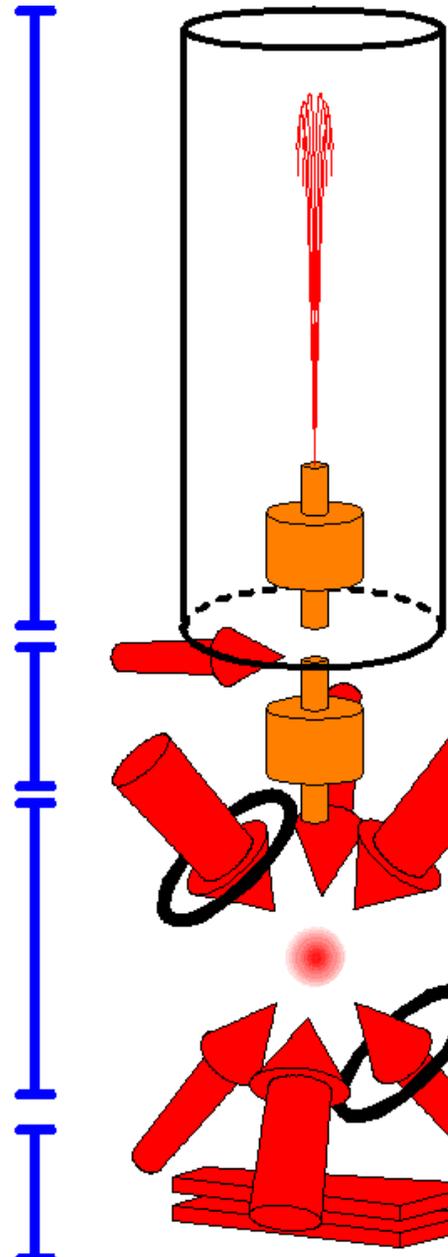
Avec 4 horloges atomiques bien choisies, on peut contraindre la stabilité de 3 rapports de fréquence indépendants et tester indépendamment la stabilité de :

$$\alpha, m_q/\Lambda_{\text{QCD}}, m_e/\Lambda_{\text{QCD}}$$

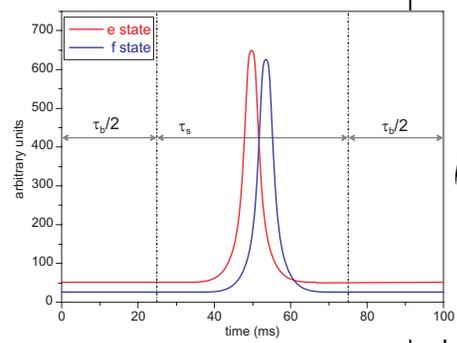
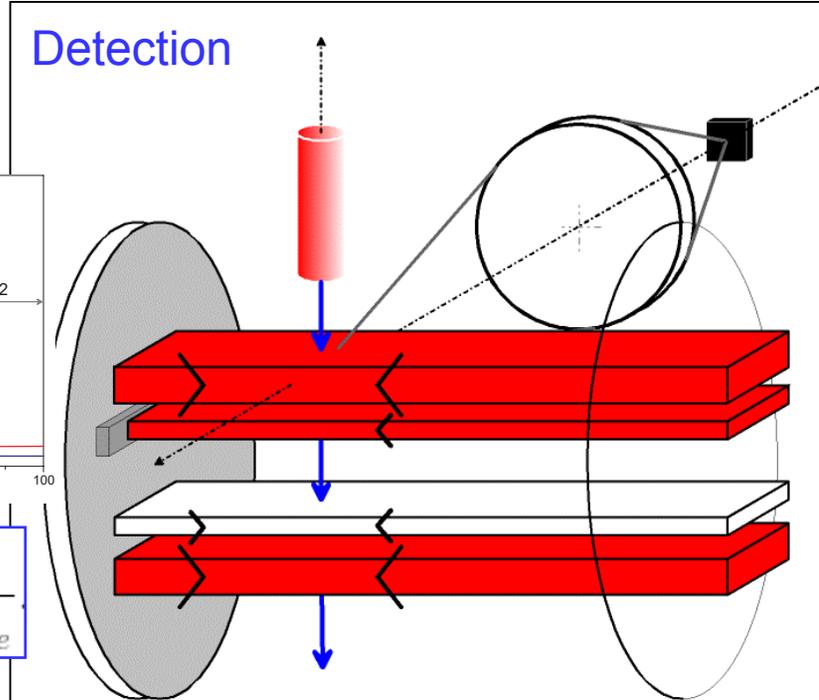
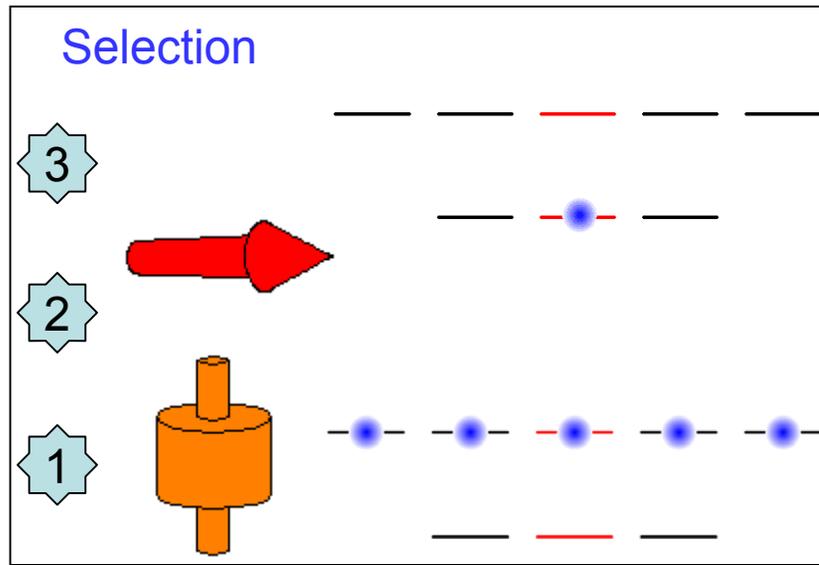
Avec des horloges supplémentaires, ces tests peuvent être redondants et fournir des signatures claires dans le cas où un effet non nul serait observé

# Fontaines atomiques : Principe de fonctionnement

interrogation  
capture selection  
detection

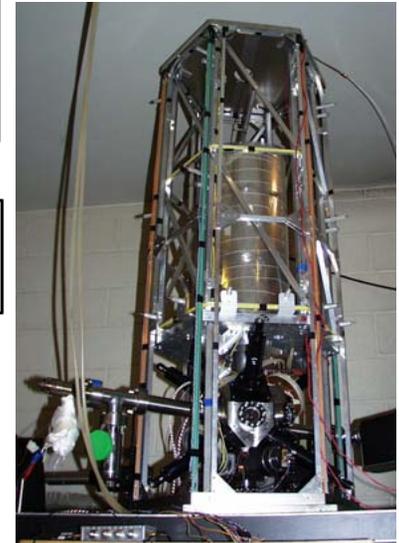
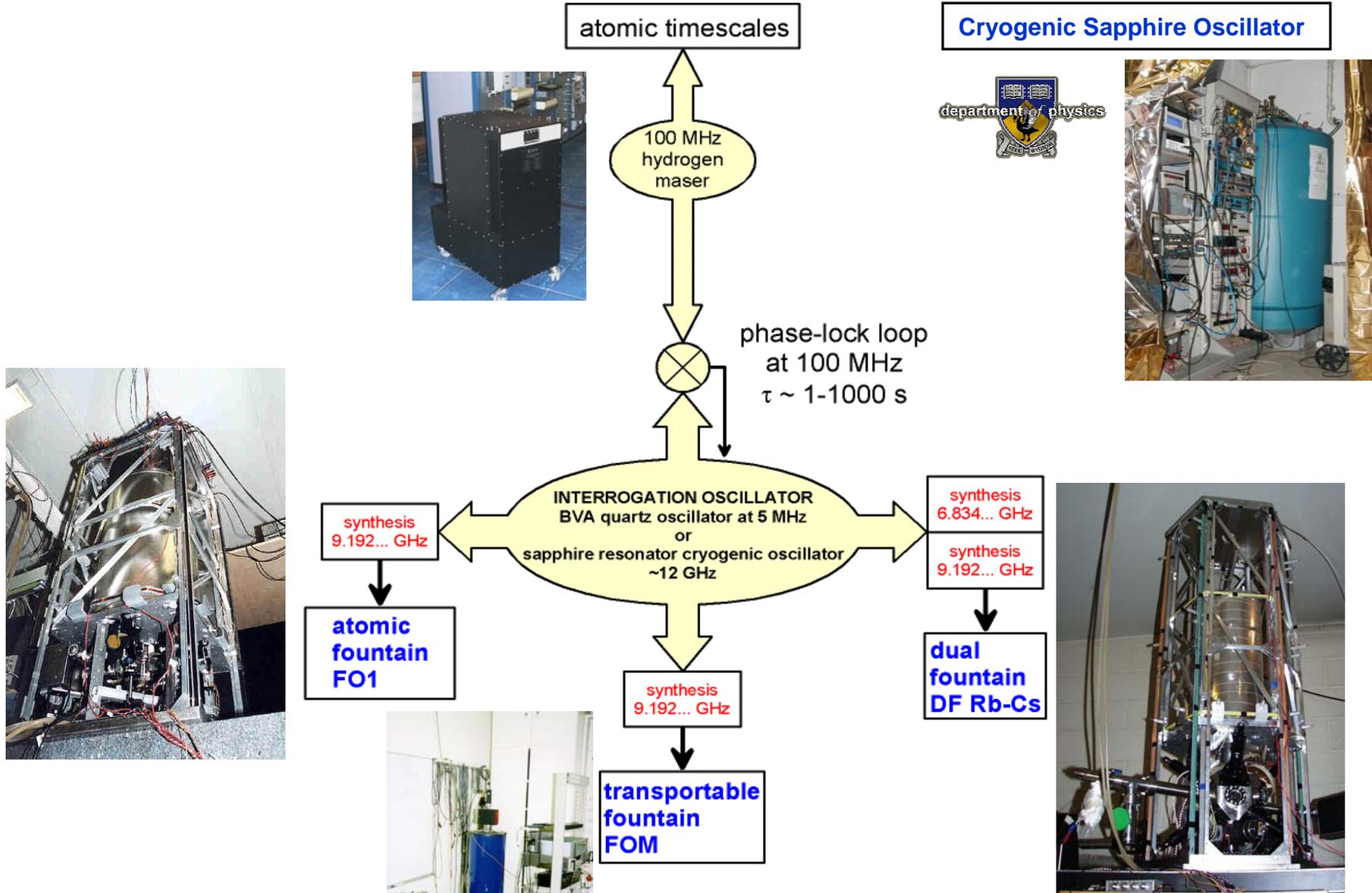


$N_{at} \sim 2 \times 10^9$   
 $\sigma_r \sim 1.5 - 3 \text{ mm}$   
 $T \sim 1 \mu\text{K}$   
 $\Delta V \sim 2 \text{ cm.s}^{-1}$   
  
 $V_{launch} \sim 4 \text{ m.s}^{-1}$   
 $H \sim 1 \text{ m}$   
 $T \sim 500 \text{ ms}$   
  
 $T_c \sim 0.8 - 2 \text{ s}$

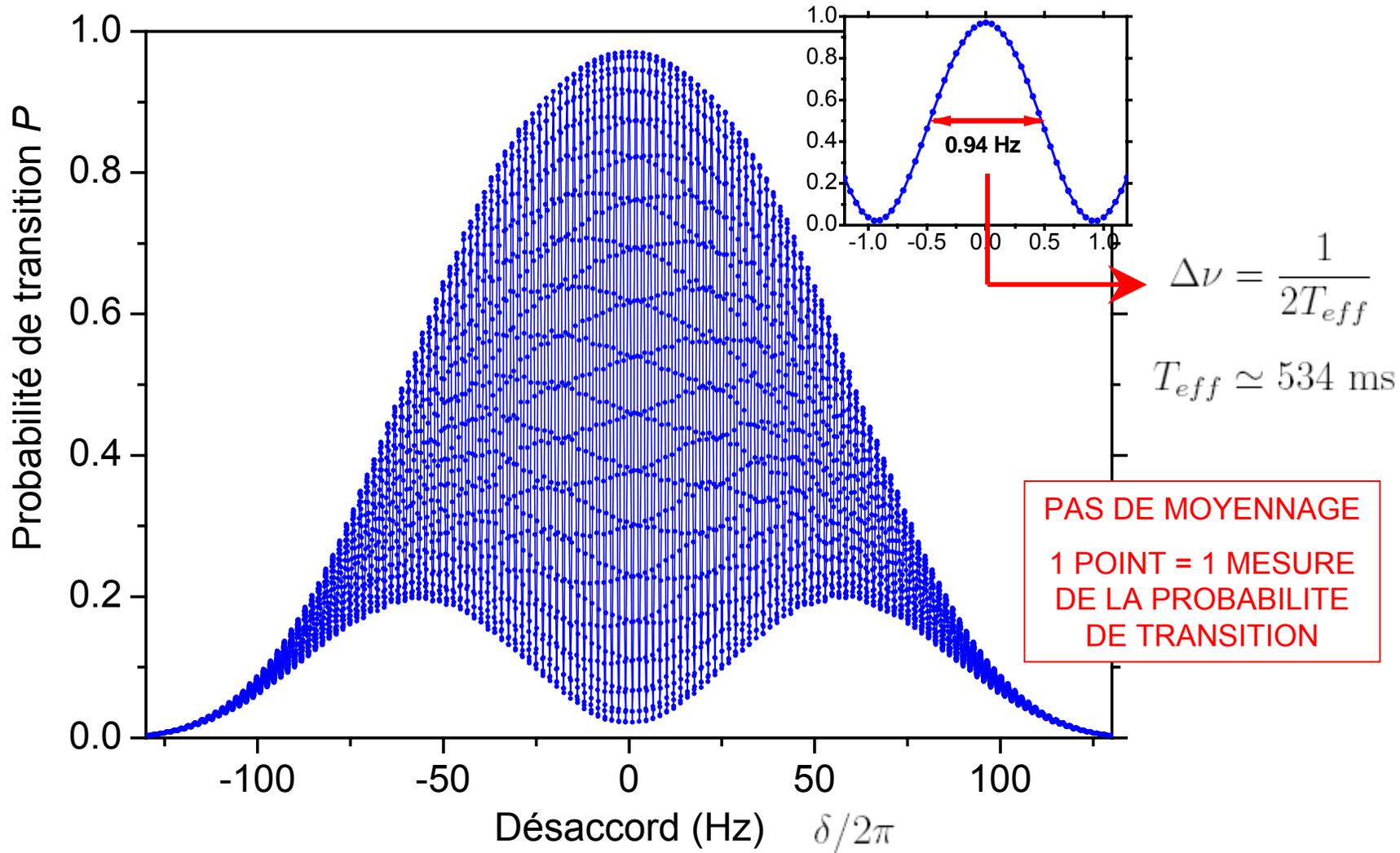


$$P = \frac{A_e}{A_f + A_e}$$

# Ensemble de fontaines atomiques au BNM-SYRTE



# Franges de Ramsey



Facteur de qualité atomique:  $Q_{at} = \nu_{ef}/\Delta\nu \simeq 9.8 \times 10^9$

Fluctuations de la probabilité de transition:  $\sigma_{\delta P} \simeq 2 \times 10^{-4}$

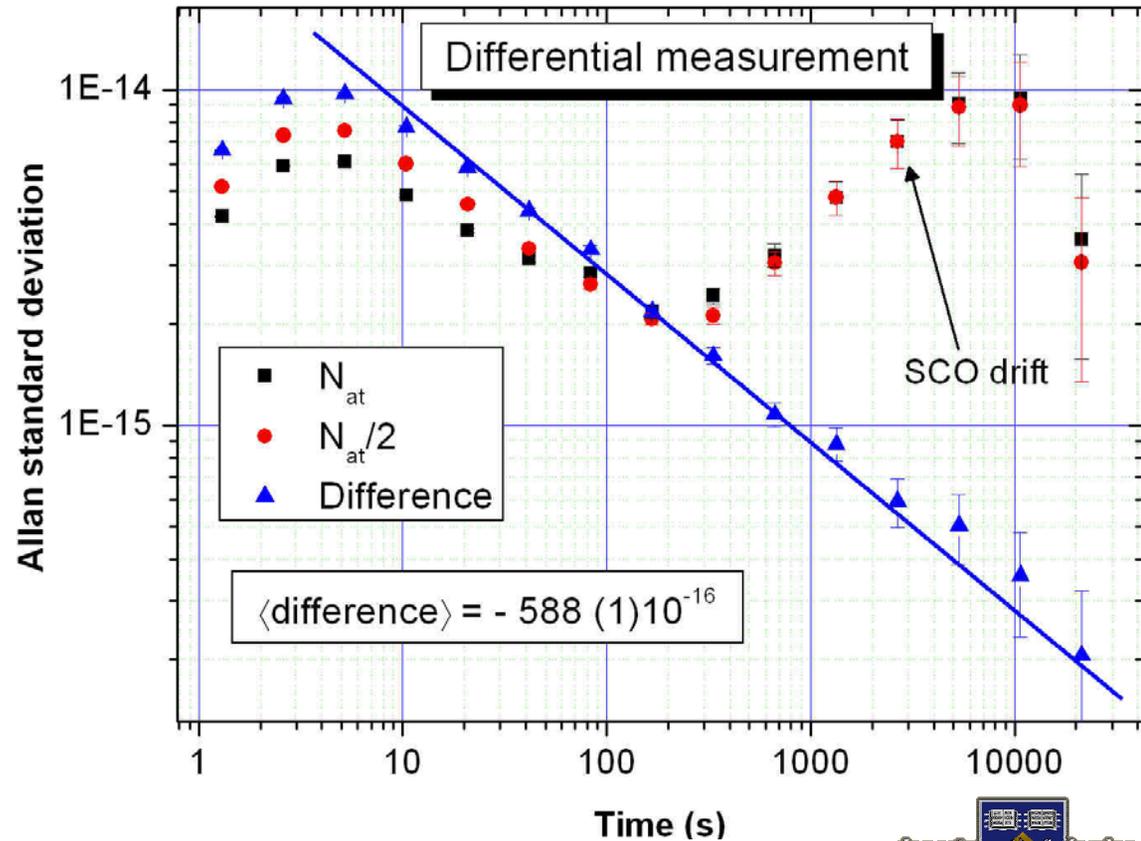
# Instabilité de fréquence : Fontaine vs OCRS

Le signal de l'OCRS (~12GHz) divisée pour atteindre to 9.2 GHz au lieu de multiplier une référence à 100 MHz reference

Le bruit de phase et la pureté spectrale résultants sont excellents :  
Instabilité de fréquence :  $\sim 3 \times 10^{-15}$  à 1s

Instabilité de fréquence résultante entre la fontaine FO2(Cs) et l'OCRS :

$$\sigma_y(\tau) = 1.6 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$$



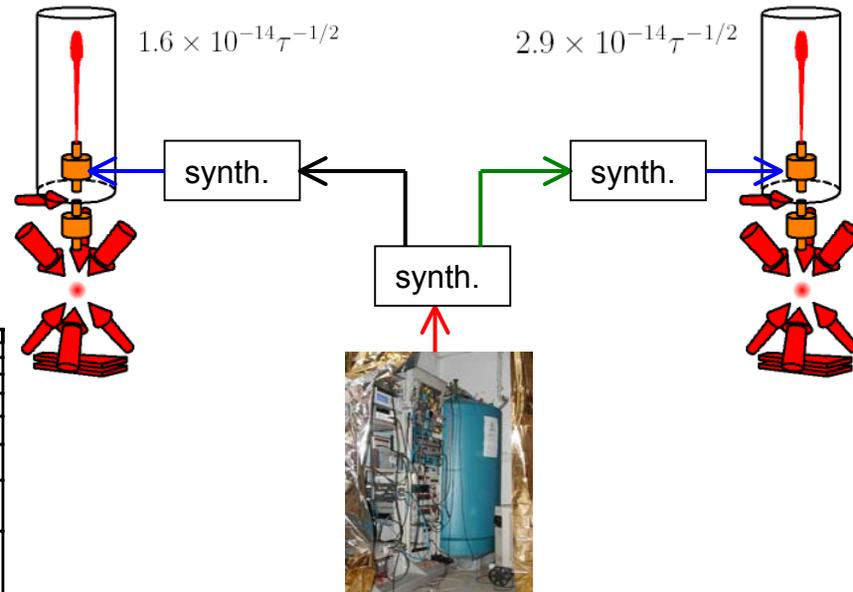
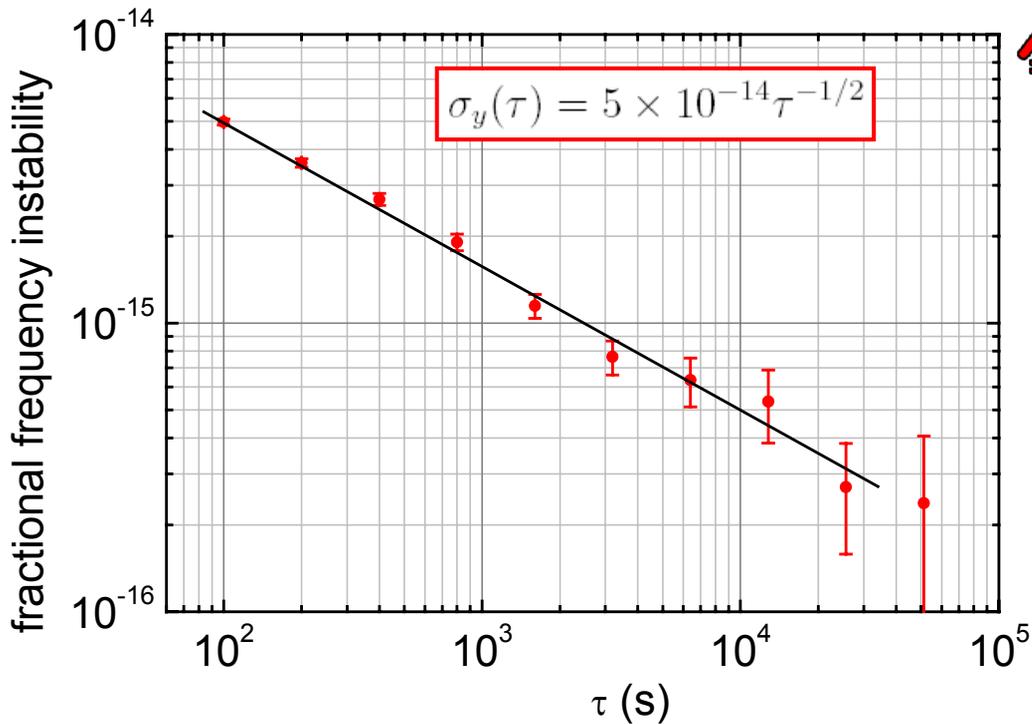
Presque 10 fois mieux qu'avec une synthèse « traditionnelle » (basée sur un oscillateur à quartz BVA)

Une résolution relative de  $10^{-16}$  est atteinte en  $\sim 6$  heures d'intégration



# Comparaison entre FO1 et FO2 (1)

Instabilité relative de fréquence entre 2 fontaines (la mesure en temps réel du déplacement collisionnel est incluse)



Améliorations à venir :

- liens activement compensés à 1 GHz entre fontaines
- amélioration d'un facteur 2 de la stabilité entre fontaines

# Comparaison entre FO1 et FO2 (2)

Corrections et incertitudes associées ( $\times 10^{16}$ )

	FO1	FO2
Quadratic Zeeman shift	$-1199.7 \pm 4.5$	$-1927.3 \pm 0.3$
Blackbody radiation shift	$162.8 \pm 0.8$	$168.2 \pm 2.5$
Cold collision & Cavity pulling	$197.9 \pm 2.4$	$357.7 \pm 2.0$
Microwave spectral purity & leakage	$< 3.3$	$< 4.3$
First order Doppler effect	$< 3.0$	$< 3.0$
Ramsey & Rabi pulling	$< 1.0$	$< 1.0$
Microwave recoil	$< 1.4$	$< 1.4$
Background collisions	$< 1.0$	$< 1.0$
Total uncertainty	7.2	6.5

← 200 nG sur 5 semaines

← Composante linéaire du gradient de phase mesurée et annulée

différence de fréquence entre les deux fontaines :  $4 \times 10^{-16}$ , bien compatible avec les incertitudes ci-dessus

Amélioration à venir:

- Comparaisons approfondies entre chaînes de synthèses micro-onde
- Homogénéisation de la température au niveau de qq 0.1 K
- Etude approfondie des gradients de phase résiduels
- Travaux vers une fiabilité accrue

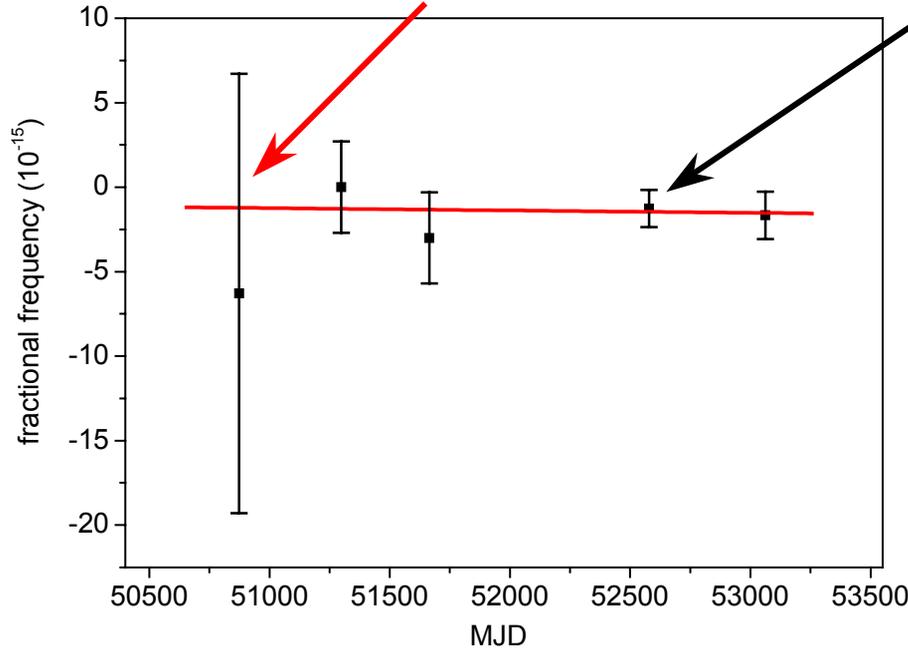
# Résumé des comparaisons entre fontaines Rb et Cs

*Phys. Rev. Lett. 90, 150801 (2003)*

Comparaisons entre les fréquence hyperfine de  $^{87}\text{Rb}$  et  $^{133}\text{Cs}$  sur plus de 5 années:

Première mesure avec des fontaines à  $1.3 \times 10^{-14}$  près. Amélioration d'un facteur  $10^4$

un point résume typiquement ~2 mois de mesures comportant l'évaluations des effets systématiques connus



En 2002 : mesure à  $1.3 \times 10^{-15}$  près:

$$\nu_{\text{Rb}}(2002) = 6\,834\,682\,610.904\,324(4)(7) \text{ Hz}$$

$$\frac{d}{dt} \ln \left( \frac{\nu_{\text{Rb}}}{\nu_{\text{Cs}}} \right) = (-0.5 \pm 5.3) \times 10^{-16} \text{ yr}^{-1}$$

$$\frac{d}{dt} \ln \left( \frac{g_{\text{Cs}} \alpha^{0.49}}{g_{\text{Rb}}} \right) = (0.5 \pm 5.3) \times 10^{-16} \text{ yr}^{-1}$$

$$\frac{d}{dt} \ln \left( \alpha^{0.49} [m_q / \Lambda_{\text{QCD}}]^{0.174} [m_s / \Lambda_{\text{QCD}}]^{0.027} \right) = (0.5 \pm 5.3) \times 10^{-16} \text{ yr}^{-1}$$

*V.V. Flambaum, et al., PRD (2004)*

Dans le cadre des modèles de Grande Unification, les variations de  $\alpha$ ,  $\Lambda_{\text{QCD}}$ ,  $m_e$ ,  $m_q$  et  $m_s$  sont liées :  $\delta \ln(m / \Lambda_{\text{QCD}}) \sim 35 \times \delta \ln(\alpha)$

Dans ce cadre, le résultat ci-dessus contraint les variations de  $\alpha$  au niveau de  $7 \times 10^{-17} \text{ an}^{-1}$

*Calmet & Fritzsch, Eur; Phys. J. C (2002)*  
*Langacker et al., Phys. Lett. B (2002)*  
*Flambaum, et al., Phys. Rev. D (2004)*

# Principaux résultats obtenus avec des horloges atomiques

Mg (fine structure) vs  $^{133}\text{Cs}$  à l'IEN

$$\left| \frac{d}{dt} \ln \left( g_{\text{Cs}} \frac{m_e}{m_p} \alpha^{0.8} \right) \right| < 5.4 \times 10^{-13} \text{ yr}^{-1}$$

Godone *et al.*, (1993)

$^{199}\text{Hg}^+(\text{opt})$  vs H(hfs) au JPL

$$\left| \frac{d}{dt} \ln \left( g_{\text{Hg}^+} \frac{m_e}{m_p} \alpha^{2.2} \right) \right| < 7 \times 10^{-14} \text{ yr}^{-1}$$

Prestage *et al.*, (1995)

$^{87}\text{Rb}$  vs  $^{133}\text{Cs}$  au BNM-SYRTE

$$\frac{d}{dt} \ln \left( \frac{g_{\text{Cs}}}{g_{\text{Rb}}} \alpha^{0.49} \right) = (0.5 \pm 5.3) \times 10^{-16} \text{ yr}^{-1}$$

Marion *et al.*, (2003)

$^{199}\text{Hg}^+(\text{opt})$  vs  $^{133}\text{Cs}$  au NIST

$$\left| \frac{d}{dt} \ln \left( g_{\text{Cs}} \frac{m_e}{m_p} \alpha^{6.0} \right) \right| < 7 \times 10^{-15} \text{ yr}^{-1}$$

Bize *et al.*, (2003)

$^{171}\text{Yb}^+$  vs  $^{133}\text{Cs}$  à la PTB

$$\frac{d}{dt} \ln \left( g_{\text{Cs}} \frac{m_e}{m_p} \alpha^{1.95} \right) = (1.2 \pm 4.4) \times 10^{-15} \text{ yr}^{-1}$$

Peik *et al.*, (2004)

H(1S-2S) vs  $^{133}\text{Cs}$  au MPQ avec la fontaine transportable du BNM-SYRTE

$$\frac{d}{dt} \ln \left( g_{\text{Cs}} \frac{m_e}{m_p} \alpha^{2.83} \right) = (3.2 \pm 6.3) \times 10^{-15} \text{ yr}^{-1}$$

Fischer *et al.*, (2004)

Ensemble, ces expériences contraignent indépendamment les variations temporelles de l'interaction électromagnétique et de l'interaction forte

=> variations de  $\alpha$  contraintes au niveau de  $2 \times 10^{-15}$  par an

# Perspectives

Les fontaines atomiques atteindront des exactitudes de 1 à  $2 \times 10^{-16}$  prochainement

Passage en mode opérationnel permettant une utilisation quasi-continue sur plusieurs années.

A terme, gain d'au moins un ordre de grandeur sur l'exactitude des tests actuels (=> gamme des  $10^{-17}$  par an)

De nombreux laboratoires développent activement une nouvelle génération d'horloges optiques. Exactitudes visées  $< 10^{-17}$ .

Au BNM-SYRTE :

- horloge optique à atomes de strontium proche de performances métrologiques
- projet d'horloge optique à atomes de mercure

Mission spatiale PHARAO/ACES du CNES et de l'ESA (prévue en 2007-2008)

- des sous-systèmes du modèle d'ingénierie sont en cours de tests
- la mission permettra des comparaisons entre horloges distantes à  $\sim 10^{-16}$  près  
=> enrichissement des tests de stabilité des constantes fondamentales
- amélioration de la mesure du déplacement vers le rouge (facteur  $\sim 30$ ) et autres tests de la Relativité