



HORLOGES OPTIQUES

Jérôme Lodewyck



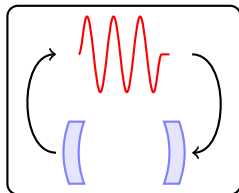
Systèmes de Référence Temps-Espace

PRINCIPE D'UNE HORLOGE ATOMIQUE

■ Oscillateur :

→ onde électromagnétique (micro-onde : 9,2 GHz, **laser** : 429 THz)

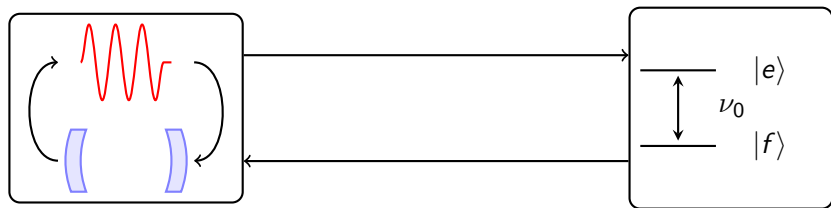
→ asservie sur un résonateur macroscopique (oscillateur cryo., **cavité FP de grande finesse**)



PRINCIPE D'UNE HORLOGE ATOMIQUE

■ Oscillateur :

- onde électromagnétique (micro-onde : 9,2 GHz, **laser** : 429 THz)
- asservie sur un résonateur macroscopique (oscillateur cryo., **cavité FP de grande finesse**)



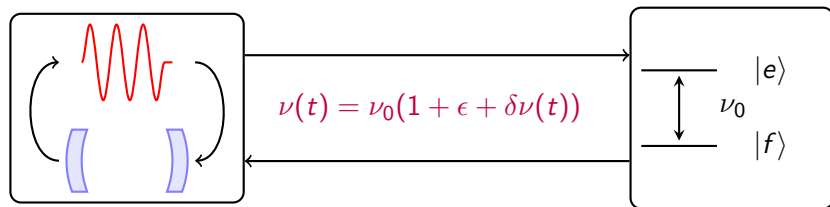
■ Référence de fréquence :

- transition atomique (micro-onde : Cs, Rb; **optique** : Sr...)

PRINCIPE D'UNE HORLOGE ATOMIQUE

■ Oscillateur :

- onde électromagnétique (micro-onde : 9,2 GHz, **laser** : 429 THz)
- asservie sur un résonateur macroscopique (oscillateur cryo., **cavité FP de grande finesse**)



■ Référence de fréquence :

- transition atomique (micro-onde : Cs, Rb; **optique** : Sr...)

■ Performances :

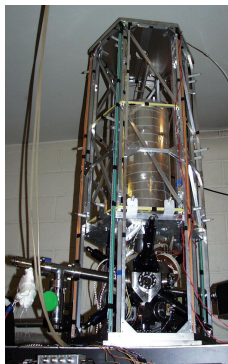
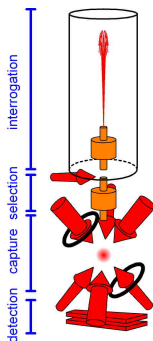
- **exactitude** = incertitude sur les effets **systematiques** ϵ
- **stabilité** = **fluctuations** résiduelles de fréquence $\delta\nu(t)$

- 1 ÉTAT DE L'ART
- 2 OSCILLATEUR ULTRA-STABLE
- 3 HORLOGES À RÉSEAU OPTIQUE : EFFETS DU PIÈGE
- 4 COMPARAISON D'HORLOGES OPTIQUES
- 5 STABILITÉ : PERSPECTIVES

- 1 ÉTAT DE L'ART
- 2 OSCILLATEUR ULTRA-STABLE
- 3 HORLOGES À RÉSEAU OPTIQUE : EFFETS DU PIÈGE
- 4 COMPARAISON D'HORLOGES OPTIQUES
- 5 STABILITÉ : PERSPECTIVES

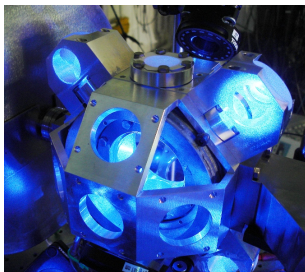
MOTIVATION POUR LES FRÉQUENCES OPTIQUES

- HORLOGES MICRO-ONDE (fontaines) à leurs performances ultimes
exactitude = $3,8 \times 10^{-16}$, stabilité = $1,6 \times 10^{-14} / \sqrt{\tau}$
- Tests de variation des constantes fondamentales (α , PRL 90 150801)



MOTIVATION POUR LES FRÉQUENCES OPTIQUES

- **HORLOGES MICRO-ONDE** (fontaines) à leurs performances ultimes
exactitude = $3,8 \times 10^{-16}$, stabilité = $1,6 \times 10^{-14} / \sqrt{\tau}$
- **HORLOGES OPTIQUES** : fréquence 10^4 à 10^5 fois plus élevée
⇒ en valeur relative, les effets sont réduits !
- **Mais** Les effets motionnels (Doppler) restent. . .
⇒ piégeage nécessaire.



DEUX MÉTHODES DE PIÉGEAGE

IONS PIÉGÉS :

Piégeage d'un **ion** dans un piège de paul (champ RF)

- Piège peu perturbateur
⇒ **excellente exactitude**
 Al^+ NIST : 9×10^{-18}
- **Stabilité à l'état l'art**
 $(3 \times 10^{-15} / \sqrt{\tau})$
Mais limitée par le bruit de projection quantique (1 seul ion)

DEUX MÉTHODES DE PIÉGEAGE

IONS PIÉGÉS :

Piégeage d'un **ion** dans un piège de paul (champ RF)

- Piège peu perturbateur
⇒ **excellente exactitude**
 Al^+ NIST : 9×10^{-18}
- **Stabilité à l'état l'art**
 $(3 \times 10^{-15} / \sqrt{\tau})$
Mais limitée par le bruit de projection quantique (1 seul ion)

En développement :

- NIST : Al^+ , Al^+ , Hg^+
- Europe : PTB, NPL, ...
- France : Université de Provence
(Ca^+)

DEUX MÉTHODES DE PIÉGEAGE

IONS PIÉGÉS :

Piégeage d'un **ion** dans un piège de paul (champ RF)

- Piège peu perturbateur
⇒ **excellente exactitude**
 Al^+ NIST : 9×10^{-18}
- **Stabilité à l'état l'art**
 $(3 \times 10^{-15} / \sqrt{\tau})$
Mais limitée par le bruit de projection quantique (1 seul ion)

En développement :

- NIST : Al^+ , Al^+ , Hg^+
- Europe : PTB, NPL, ...
- France : Université de Provence (Ca^+)

ATOMES NEUTRES : Horloges à **réseau optique** développées depuis 2003

- **Piège intense** ⇒ perturbateur, mais **contrôlé**
- Exact. : 2×10^{-16} , en progrès
- Grand nombre d'atomes (10^4)
⇒ **stabilité ultime élevée**
Actuellement $2 \times 10^{-15} / \sqrt{\tau}$

DEUX MÉTHODES DE PIÉGEAGE

IONS PIÉGÉS :

Piégeage d'un **ion** dans un piège de paul (champ RF)

- Piège peu perturbateur
⇒ **excellente exactitude**
 Al^+ NIST : 9×10^{-18}
- **Stabilité à l'état l'art**
 $(3 \times 10^{-15} / \sqrt{\tau})$
Mais limitée par le bruit de projection quantique (1 seul ion)

En développement :

- NIST : Al^+ , Al^+ , Hg^+
- Europe : PTB, NPL, ...
- France : Université de Provence (Ca^+)

ATOMES NEUTRES : Horloges à **réseau optique** développées depuis 2003

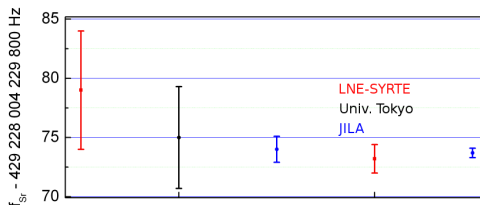
- **Piège intense** ⇒ perturbateur, mais **contrôlé**
- Exact. : 2×10^{-16} , en progrès
- Grand nombre d'atomes (10^4)
⇒ **stabilité ultime élevée**
Actuellement $2 \times 10^{-15} / \sqrt{\tau}$

En développement :

- Sr : Tokyo, JILA, SYRTE, PTB
- Yb : NIST, NMIJ, INRIM
- Hg : SYRTE
- Sr : Chine, Japon, NPL, Florence, Birmingham...

HORLOGES À RÉSEAU OPTIQUE : ÉTAT DE L'ART

FRÉQUENCE DES HORLOGES STRONTIUM



PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT démontré au niveau de 10^{-17} (Sr, Yb)

Limite fondamentale : rayonnement du corps noir

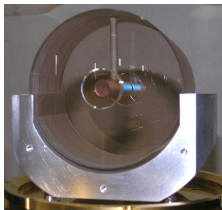
- Horloge Hg (SYRTE) $\rightarrow 10^{-18}$
- Cryogénie

TESTS DE GRAVITATION NON-RELATIVISTE couplage des constantes au champ gravitationnel PRL 100 140801

- 1 ÉTAT DE L'ART
- 2 OSCILLATEUR ULTRA-STABLE
- 3 HORLOGES À RÉSEAU OPTIQUE : EFFETS DU PIÈGE
- 4 COMPARAISON D'HORLOGES OPTIQUES
- 5 STABILITÉ : PERSPECTIVES

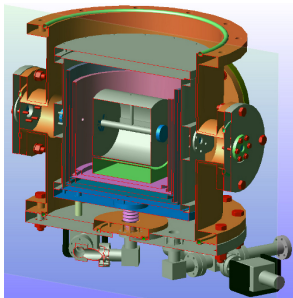
CAVITÉ DE GRANDE FINESSE

Laser asservi sur une cavité Fabry-Perot de grande finesse

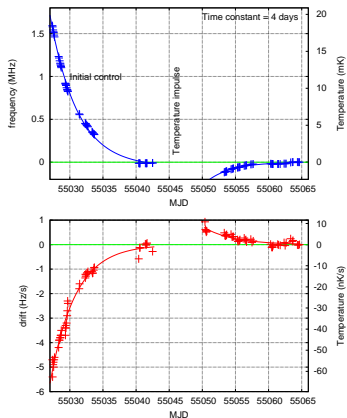


- Disposition horizontale (Sr), verticale (Hg)
- Corps en ULE, **miroirs en silice**
- Finesse = 568 000

- Double système à vide
- 3 **boucliers thermiques** dorés
- Compensation des vibrations

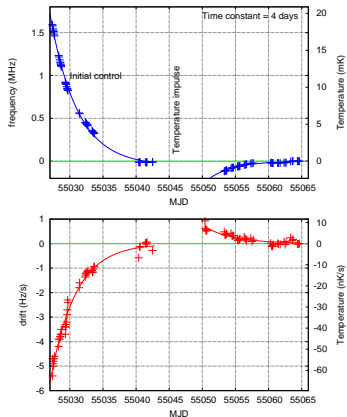


Stabilité thermique :



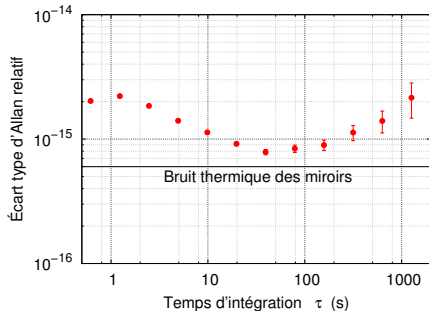
dérive < 100mHz/s
prédictible

Stabilité thermique :

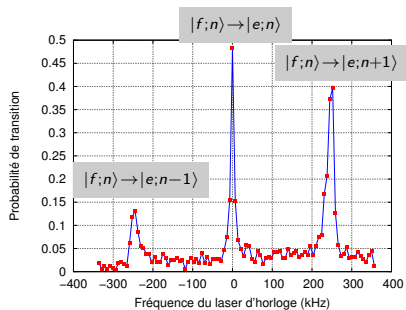


dérive $< 100\text{mHz/s}$
prédictible

Stabilité de fréquence du laser asservi (mesurée par rapport aux atomes) :

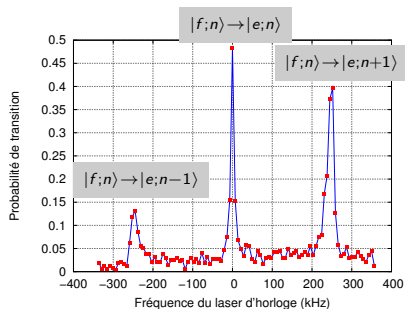


BANDES LATÉRALES MOTIONNELLES



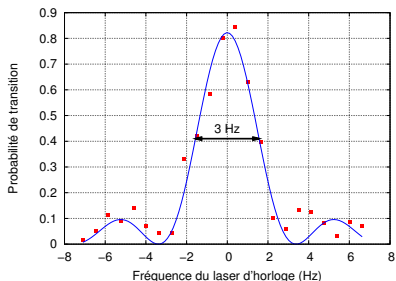
$$T_{\parallel} = 10 \mu\text{K}$$
$$T_{\perp} = 20 \mu\text{K}$$

BANDES LATÉRALES MOTIONNELLES



$$T_{\parallel} = 10 \mu\text{K}$$
$$T_{\perp} = 20 \mu\text{K}$$

RÉSONANCE D'HORLOGE

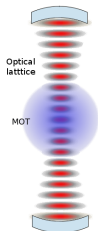


$$Q = 10^{14}$$

- 1 ÉTAT DE L'ART
- 2 OSCILLATEUR ULTRA-STABLE
- 3 HORLOGES À RÉSEAU OPTIQUE : EFFETS DU PIÈGE
- 4 COMPARAISON D'HORLOGES OPTIQUES
- 5 STABILITÉ : PERSPECTIVES

PIÉGEAGE D'ATOMES NEUTRES : EFFETS DU PIÈGE

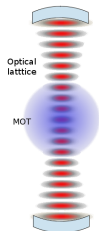
PIÉGEAGE DIPOLAIRE DANS UN RÉSEAU OPTIQUE



- Régime de **Lamb-Dicke** \Rightarrow effets motionnels négligeables
- **Mais déplacement de ν** qui dépend de l'intensité et de la polarisation du piège (ex. 100 kHz, ou 10^{-11}).
 \rightarrow **difficilement contrôlable**

PIÉGEAGE D'ATOMES NEUTRES : EFFETS DU PIÈGE

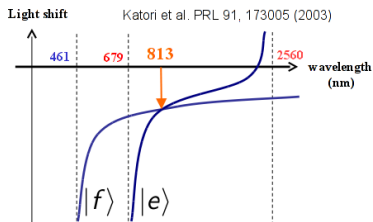
PIÉGEAGE DIPOLAIRE DANS UN RÉSEAU OPTIQUE



- Régime de **Lamb-Dicke** \Rightarrow effets motionnels négligeables
- **Mais déplacement de ν** qui dépend de l'intensité et de la polarisation du piège (ex. 100 kHz, ou 10^{-11}).
 \rightarrow **difficilement contrôlable**

SOLUTION :

- Transition $J = 0 \rightarrow J = 0$: **peu sensible à la polarisation.**
- $\exists \lambda_{\text{piège}}$ telle que les **déplacements** des deux niveaux d'horloges sont **identiques.**
- Alcalino-terreux : Sr, Yb, Hg,



EFFETS PLUS PETITS

- Décalage vector shift
- Décalage tensor shift
- Hyperpolarizabilité
- Décalage M1/E2

EFFETS PLUS PETITS

- Décalage vector shift : première observation
- Décalage tensor shift : première observation (précision de 6%)
- Hyperpolarizabilité : borne supérieure améliorée $60\times$
- Décalage M1/E2 : première borne supérieure
- Détermination de la longueur d'onde magique améliorée $10\times$

Tous ces effets sont au niveau 10^{-17} pour un piège assez profond ($150 E_r$)

PIÉGEAGE D'ATOMES NEUTRES : EFFETS DU PIÈGE

EFFETS PLUS PETITS

- Décalage vector shift : première observation
- Décalage tensor shift : première observation (précision de 6%)
- Hyperpolarizabilité : borne supérieure améliorée $60\times$
- Décalage M1/E2 : première borne supérieure
- Détermination de la longueur d'onde magique améliorée $10\times$

Tous ces effets sont au niveau 10^{-17} pour un piège assez profond ($150 E_r$)

APPLICATIONS

- Repousse le niveau des perturbations aux faibles profondeurs
- Facilité d'utilisation à grande profondeur
- Possibilité de contrôler certains effets systématiques :
 - Collisions entre atomes froids favorisées par l'effet tunnel
 - Déplacement de la résonance par les bandes latérales motiionnelles

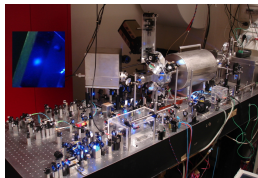
- 1 ÉTAT DE L'ART
- 2 OSCILLATEUR ULTRA-STABLE
- 3 HORLOGES À RÉSEAU OPTIQUE : EFFETS DU PIÈGE
- 4 COMPARAISON D'HORLOGES OPTIQUES
- 5 STABILITÉ : PERSPECTIVES

- Horloge Hg en développement au SYRTE :
 - Caractérisation de la longueur d'onde magique
 - Vers l'observation de résonances fines
- Comparaison à distance :
 - Liens fibrés
 - Projet ACES

COMPARAISON D'HORLOGES

- Horloge Hg en développement au SYRTE :
 - Caractérisation de la longueur d'onde magique
 - Vers l'observation de résonances fines
- Comparaison à distance :
 - Liens fibrés
 - Projet ACES

⇒ **Nouvelle horloge** à réseau optique au strontium

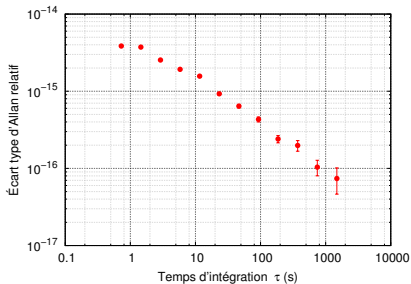


Excellent outil pour la **caractérisation des effets systématiques**

- Comparaison directe (pas besoin d'un laser femto-seconde)
- Écart de fréquence nul attendu

COMPARAISON STRONTIUM 1 VS STRONTIUM 2

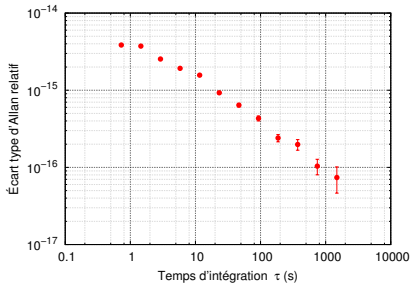
STABILITÉ



→ Niveau de 10^{-16} en 1000 s

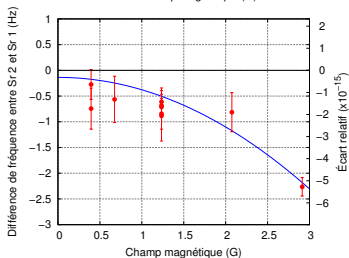
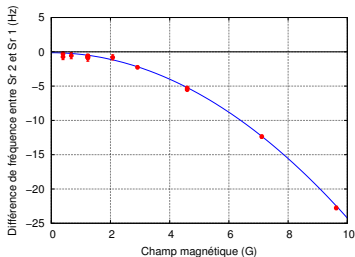
COMPARAISON STRONTIUM 1 VS STRONTIUM 2

STABILITÉ



→ Niveau de 10^{-16} en 1000 s

EXACTITUDE



- 1 ÉTAT DE L'ART
- 2 OSCILLATEUR ULTRA-STABLE
- 3 HORLOGES À RÉSEAU OPTIQUE : EFFETS DU PIÈGE
- 4 COMPARAISON D'HORLOGES OPTIQUES
- 5 STABILITÉ : PERSPECTIVES

3 SOURCES DE BRUITS contribuent à la stabilité :

- Le **bruit de projection quantique**

- croît comme $1/Q\sqrt{N}$

- limitant au niveau de $10^{-15}/\sqrt{\tau}$ pour les horloges à ions

- au niveau de $10^{-17}/\sqrt{\tau}$ pour les horloges à réseau optique

3 SOURCES DE BRUITS contribuent à la stabilité :

■ Le bruit de projection quantique

→ croît comme $1/Q\sqrt{N}$

→ limitant au niveau de $10^{-15}/\sqrt{\tau}$ pour les horloges à ions

→ au niveau de $10^{-17}/\sqrt{\tau}$ pour les horloges à réseau optique

■ Le bruit de détection

→ au niveau de $10^{-16}/\sqrt{\tau}$

STABILITÉ : PERSPECTIVES D'AMÉLIORATION

3 SOURCES DE BRUITS contribuent à la stabilité :

- Le **bruit de projection quantique**
 - croît comme $1/Q\sqrt{N}$
 - limitant au niveau de $10^{-15}/\sqrt{\tau}$ pour les horloges à ions
 - au niveau de $10^{-17}/\sqrt{\tau}$ pour les horloges à réseau optique
- Le **bruit de détection**
 - au niveau de $10^{-16}/\sqrt{\tau}$
- L'**effet Dick** : échantillonnage du bruit du laser
 - conversion du bruit haute fréquence du laser d'horloge
 - **Effet prédominant** pour les horloges à réseau optique :
 $2 \times 10^{-15}/\sqrt{\tau}$

STABILITÉ : PERSPECTIVES D'AMÉLIORATION

3 SOURCES DE BRUITS contribuent à la stabilité :

- Le **bruit de projection quantique**
 - croît comme $1/Q\sqrt{N}$
 - limitant au niveau de $10^{-15}/\sqrt{\tau}$ pour les horloges à ions
 - au niveau de $10^{-17}/\sqrt{\tau}$ pour les horloges à réseau optique
- Le **bruit de détection**
 - au niveau de $10^{-16}/\sqrt{\tau}$
- L'**effet Dick** : échantillonnage du bruit du laser
 - conversion du bruit haute fréquence du laser d'horloge
 - **Effet prédominant** pour les horloges à réseau optique :
 $2 \times 10^{-15}/\sqrt{\tau}$

POSSIBILITÉS D'AMÉLIORATION

- Amélioration du **rapport cyclique** de l'horloge (réduction des temps morts)
- Nouvelles cavités (plus longues, refroidies)

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

CONCLUSION

- Comparaison d'horloges à réseau optique
- → stabilité remarquable

PERSPECTIVES

Encore un ordre de grandeur sur la stabilité et l'exactitude :

- Limite pour l'exactitude : **BBR**, $\simeq 10^{-17}$
→ Horloge Hg, cryogénie
- Stabilité de $\simeq 10^{-16}/\sqrt{\tau}$ avec une séquence optimisée

APPLICATIONS

Participation au segment sol de **Pharao/ACES**

- **Comparaisons internationales** d'horloges
- Tests de **physique fondamentale** (relativiste)