

Confinement d'un ion unique de Ca^+ pour la métrologie des fréquences optiques

Martina Knoop

Physique des Interactions Ioniques et Moléculaires *Équipe Confinement d'ions et manipulation laser*
U.M.R. 6633, C.N.R.S-Université de Provence, Centre de St.Jérôme, Case C21, 13397 Marseille Cedex 20, France



1

Les ions uniques

- un système de mécanique quantique idéal
- la spectrométrie de masse
- l'information quantique
- le nanoscope, le laser à ion(s) (CQED)
- les étalons de fréquence optique

$^{199}\text{Hg}^+$, $^{171}\text{Yb}^+$, $^{172}\text{Yb}^+$, $^{88}\text{Sr}^+$, $^{115}\text{In}^+$, $^{229}\text{Th}^{3+}$, $^{43}\text{Ca}^+$, ...



2

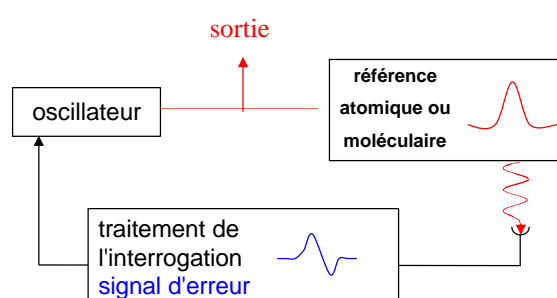
Plan

- un étalon de fréquence optique
- confinement d'un ion de Ca^+
- mesures des durées de vie
- immobilisation de l'ion
- perspectives



3

Un étalon de fréquence



précision : facteur de qualité $Q = n/Dn_{nat}$

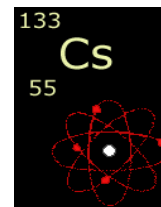
stabilité : quantifiée par la variance d'Allan estimée par $s_y(t) \approx \frac{1}{pQ} \frac{1}{\sqrt{N}} \left(\frac{T_c}{t} \right)^{1/2}$



4

L'horloge atomique

- la seconde est définie à partir de la transition hyperfine dans l'état fondamental du Cs à $\nu = 9.192\,631\,770\text{ GHz}$
- stabilité $s_y(t) \sim 3.5 \cdot 10^{-13} t^{-1/2}$, exactitude $2 \cdot 10^{-14}$,
- définition du temps « officiel »
utilisation pour le trafic, la transmission de données, le GPS, les cookies...
appareils radiocommandés (émetteur de la PTB à Mainflingen/Allemagne)
- améliorations possibles (pompage optique, atomes froids,...)
- fontaine de Zacharias (LPTF),
stabilité $s_y(t) \sim 1.6 \cdot 10^{-14} t^{-1/2}$, exactitude $2 \cdot 10^{-14}$



5

Plus de précision pour ...

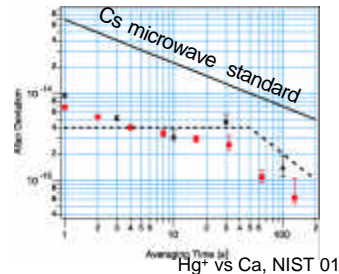
- mesures de constantes fondamentales (da/a, Rydberg,...)
- observation des pulsars ultrastables (PSR1937+21)
- détection d'ondes gravitationnelles (1cycle/an)
- augmentation de la cadence dans les transmission de données
- positionnement de bateaux, camions,... (GPS, Galileo)



6

Un étalon de fréquence optique

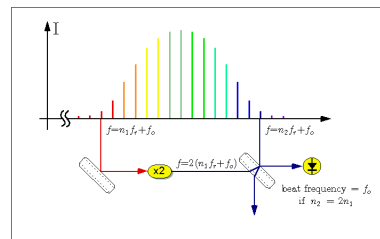
- domaine des fréquences optiques 400-1000THz
- précision $Q > 10^{15}$
- oscillateur: laser ultrastable
- mesure de la fréquence par peigne (2001)



Fig^r vs Ca, NIST 01

$$s_y(t) \approx \frac{1}{pQ} \frac{1}{\sqrt{N}} \left(\frac{T_c}{t} \right)^{1/2}$$

ions, atomes en MOT, atomes piégés

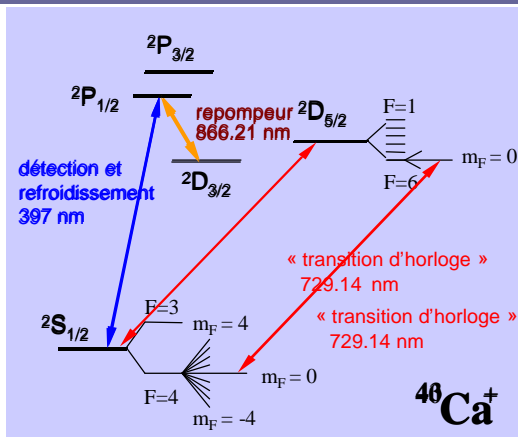


Th.Udem, R.Holzwarth, and T.W.Hänsch, Nature 416, 233 (2002)



7

L'ion Ca⁺ en piège de Paul



étalon de fréquence :

dans le domaine optique

- $t_{3D} \gg 1s \Rightarrow Q \approx 3 \cdot 10^{15}$

- $\tau(4P) \approx 7ns \text{ @ } 4^2S_{1/2} \rightarrow 4^2P_{1/2}$

pour le refroidissement laser

$$\frac{\sum A(4P-3D_j)}{A(4P-4S)} = \frac{1}{17.6} \approx 5.7\%$$

- $\text{® laser pompeur à } 866 \text{ nm}$

- système laser « tout-solide »

- $^{43}\text{Ca}^+ (I=7/2) \text{ ® } m_F=0 \rightarrow m_F=0$

Univ. Mainz; Osaka University; Univ. Innsbruck; MPI für Quantenoptik, Garching; Univ Aarhus; Oxford University; Imperial College; Univ. de Provence, Marseille



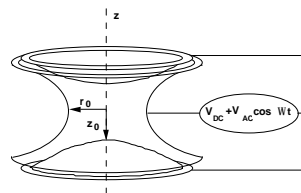
8

- un étalon de fréquence optique
- **confinement d'un ion de Ca⁺**
- mesures des durées de vie
- immobilisation de l'ion
- perspectives

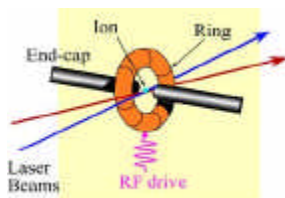


Le piège de Paul

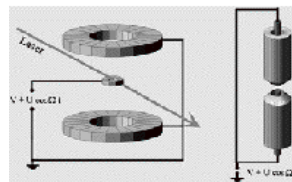
- électrodes métalliques avec application d'un champ
- confinement pendant des durées très longues (*des heures...*)



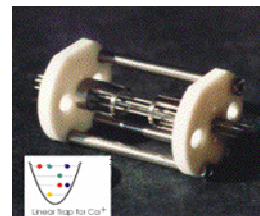
$$f(x, y, z, t) = (U_{DC} + V_{AC} \cos \omega t) \frac{x^2 + y^2 - 2z^2}{2r_0^2}$$



Univ. Washington



MPQ, Garching



Univ. Innsbruck



Le piège de Paul

Mouvement d'une particule chargée régi par un système d'*équations de Mathieu*

$$\frac{d^2u}{dt^2} + \frac{\Omega^2}{4}(a_u - 2q_u \cos\Omega t)u = 0 \quad \text{avec } u=x,y,z$$

$$a_x = -\frac{a_z}{2} = \frac{8eU_{dc}}{2ro^2m\Omega^2}, \quad q_x = -\frac{q_z}{2} = \frac{4eV_{ac}}{2ro^2m\Omega^2}$$

$$u(t) = R_u \cos w_u t \left(1 + \frac{q_u}{2} \cos\Omega t\right)$$

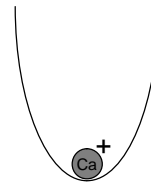
macro-mouvement à ω_u

micro-mouvement à Ω

$$w_u = b_u \Omega$$

Régime de Lamb-Dicke

discrétisation du spectre si $\omega_u > \gamma$

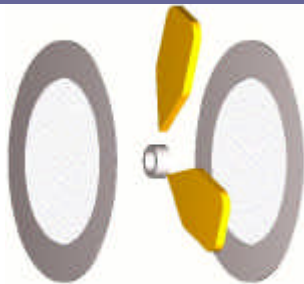


Dans le puits de potentiel harmonique, seul un **ion unique** peut être confiné au centre

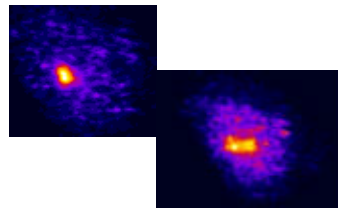
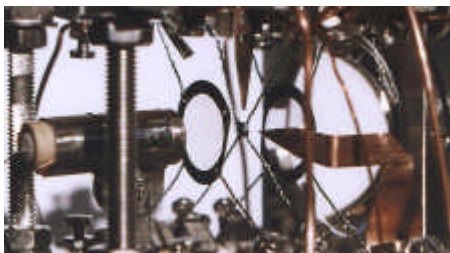


11

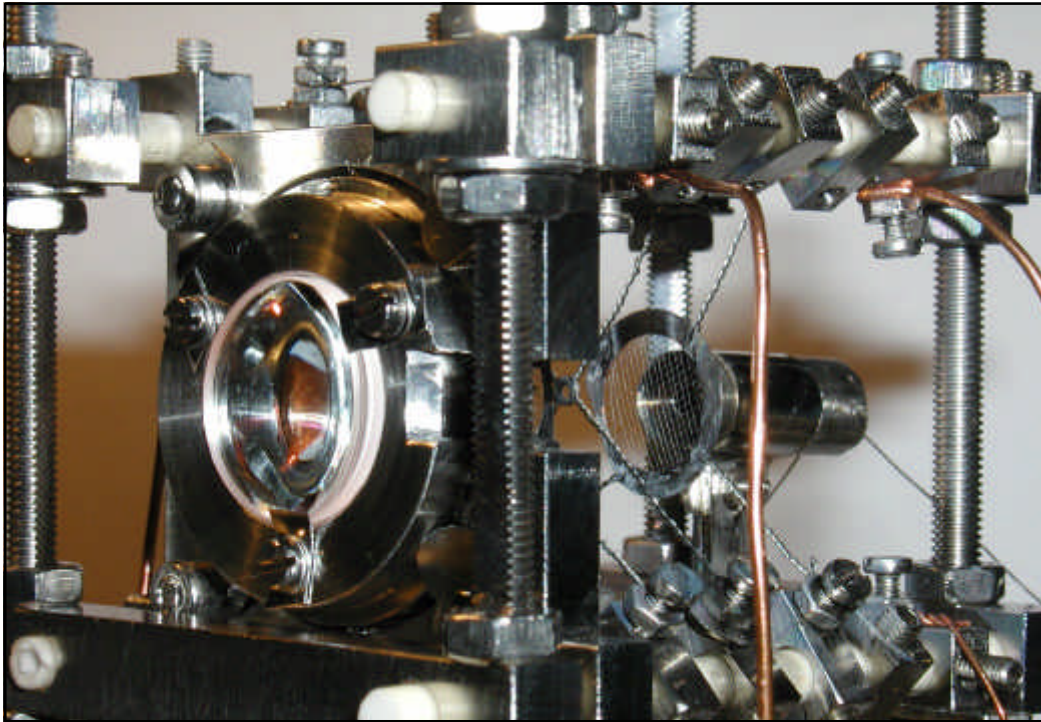
Un piège miniature pour la métrologie



- piège de Paul - Straubel
- $r_{int}=0.7\text{mm}$, $2z_0=0.85\text{mm}$
- en molybdène
- électrodes de compensation en x, y, z (2)
- $\Omega/2\pi \approx 11.7 \text{ MHz}$, $D_{tot} \approx \text{quelques eV}$
- fréquences séculaires $\omega/2\pi \approx 1 - 2 \text{ MHz}$

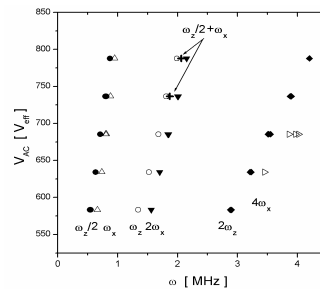
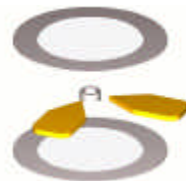
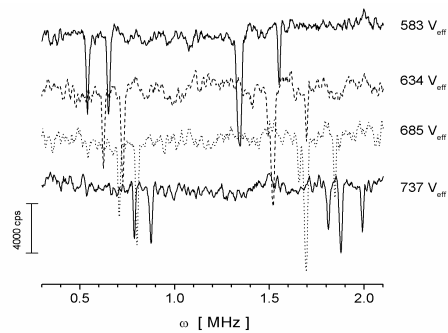


12



Caractérisation du piège miniature

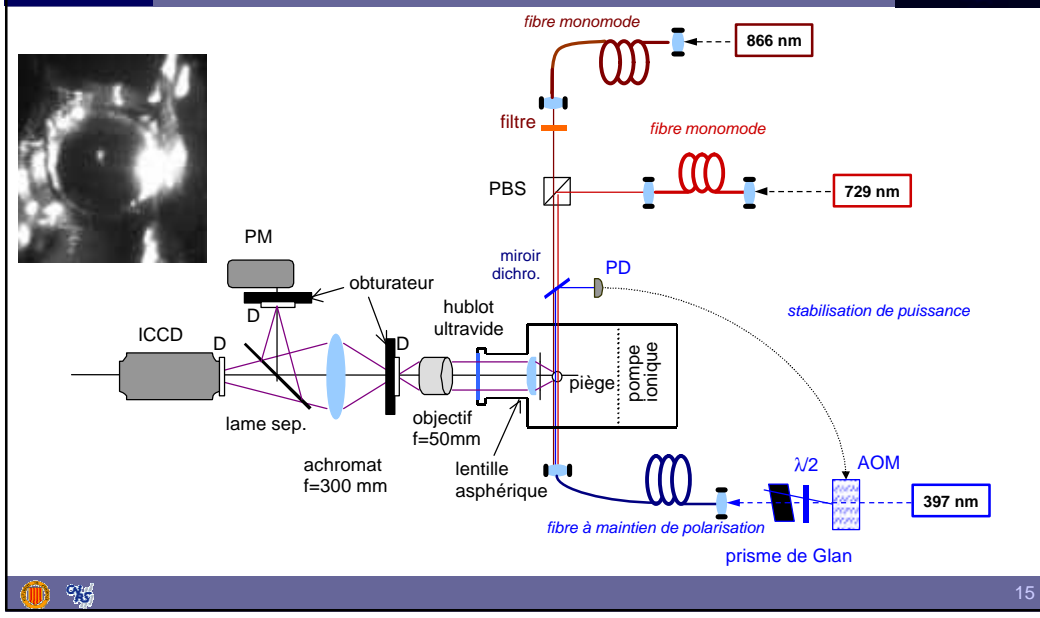
- application d'une tension V_{AC} de petite amplitude (« tickle »)



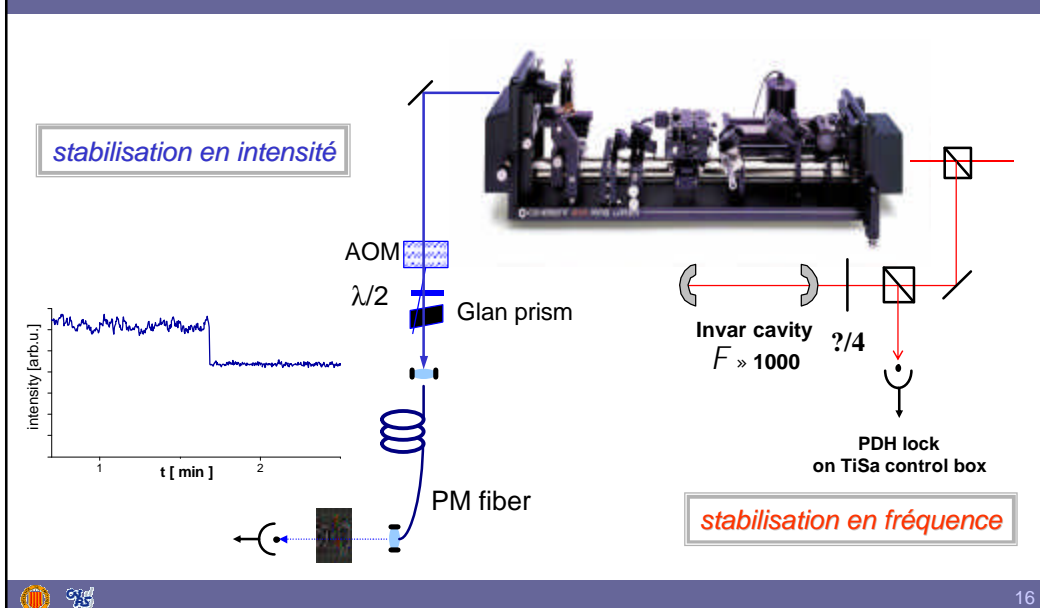
- pour le piège de Paul-Straubel : $a_z = \frac{8eU_{DC}}{m r_1^2 \Omega^2 L}$ et $q_z = -\frac{4eV_{AC}}{m r_1^2 \Omega^2 L}$
- les défauts non symétriques : $a_z L_z = -2a_x L_x$ et $q_z L_z = -2q_x L_x$
- pour $580V_{rms} \leq V_{AC} \leq 790V_{rms}$: $8.0 \geq L_z \geq 7.6$ et $7.0 \leq L_x \leq 7.1$



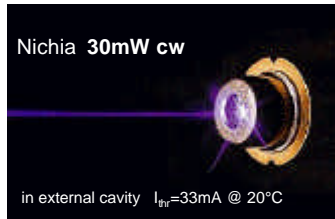
Du nuage à l'ion unique...



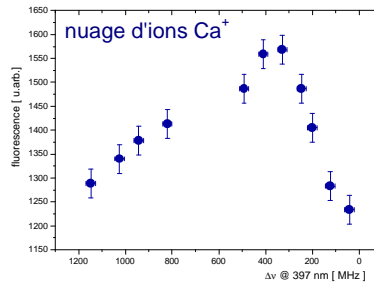
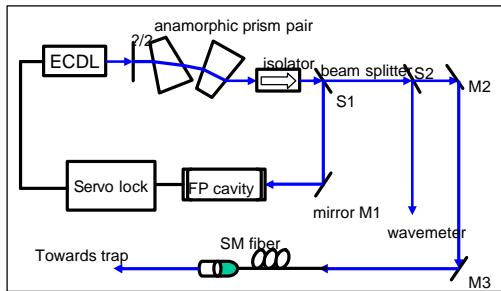
Laser TiSa doublé en fréquence



Diode laser à 397 nm

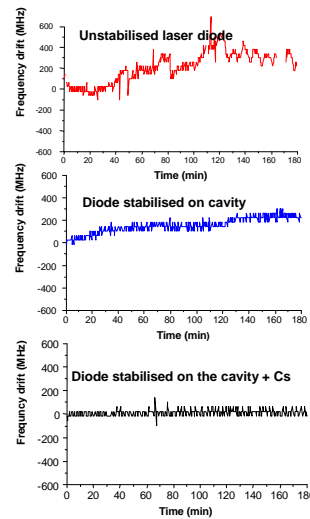
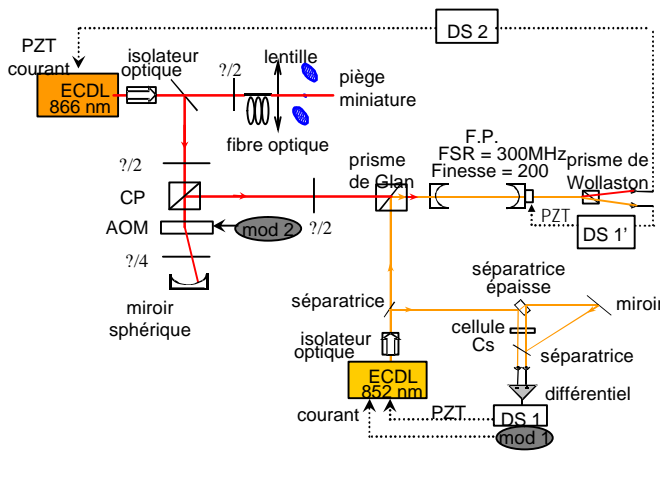


Longueur d'onde : 396,85 nm
Longueur de cavité : 3,5 cm (ISL = 4,25 GHz)
Tuning range : 2.5 GHz



Thèse de T.B. Ekogo

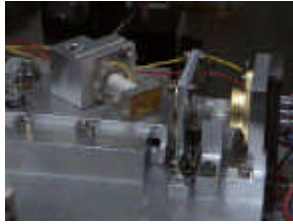
Diode « repompeur » à 866 nm



Thèse de M. Herbane, 2001

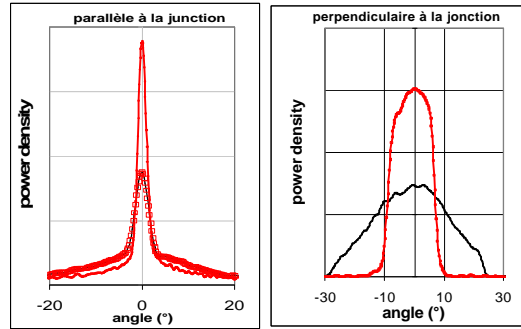
Diode laser à Ruban Large à 729 nm

BAL diode (Applied Optronics)
 $P = 100\text{mW}$, $\Delta\lambda = 2\text{nm}$, multimode



$P = \text{quelques mW}$
 $\Delta\nu = 3\text{-}5\text{ MHz}$
 3.5 GHz plage d'accord
 Monomode spatialement et
 spectralement

cavité + fente: largeur 2mm // jonction, // traits du
 réseau
effet de diaphragme et sélection de mode

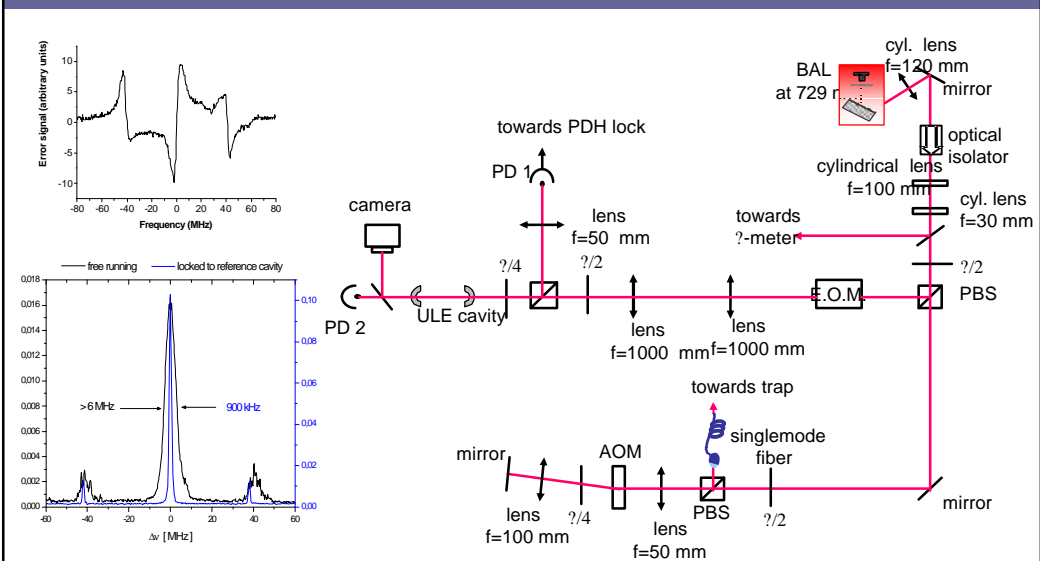


profils en champ lointain, $P=1\text{mW}$
 sans fente, avec fente



19

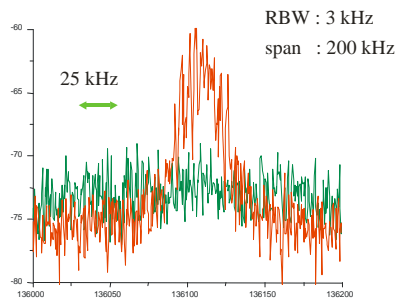
Stabilisation de fréquence à 729 nm



20

BAL à 729 nm

Mesure de largeur par auto-corrélation
(fibre monomode 10km)



Fluctuations instantanées de fréquence
réduites à moins de 50 kHz

MAIS

fond d'émission spontanée dir. (ASE) d'environ 15 – 20%

⇒ influence le signal d'erreur

⇒ limite la stabilité

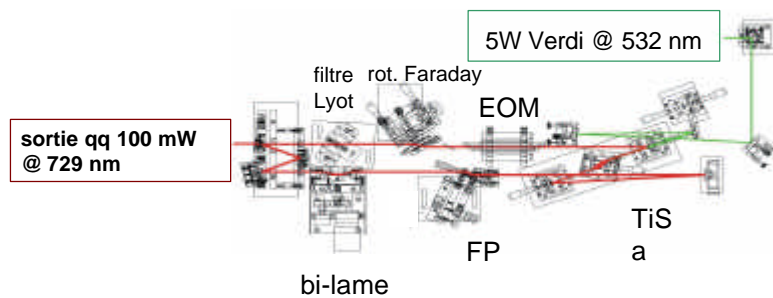
cavité ULE non stabilisée



21

La suite à 729 nm

- largeur spectrale < 50 kHz ⇒ pour des mesures non critiques
- stabilisation de la cavité ULE : *sous vide*
isolation thermique
isolation vibrationnelle
- nouvelle cavité ULE ($F \sim 100\,000$)
- laser TiSa



22

- un étalon de fréquence optique
- confinement d'un ion de Ca⁺
- **mesures des durées de vie**
- immobilisation de l'ion
- perspectives

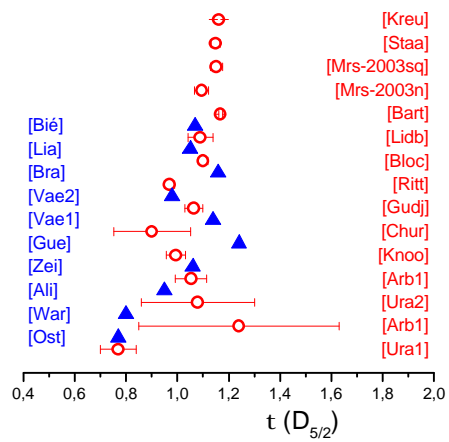


23

Mesure de la durée de vie de l'état $D_{5/2}$

intérêt

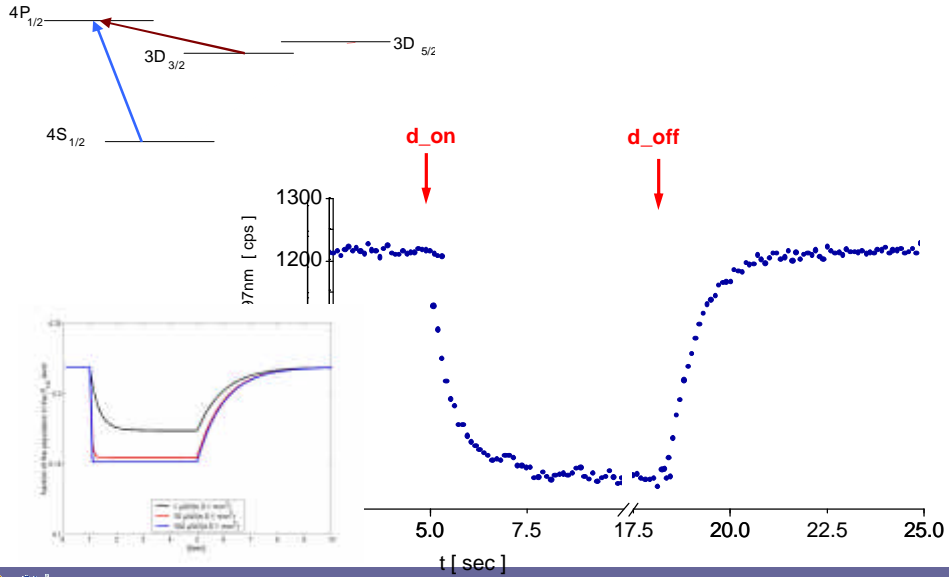
- largeur ultime de la transition d'horloge
- évaluation des effets systématiques
- comparaison avec la théorie



24

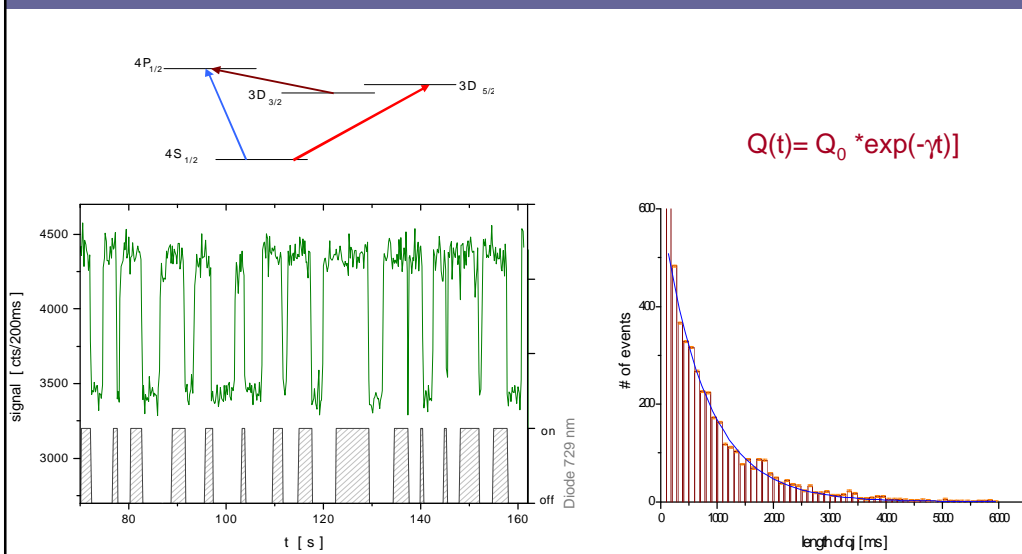
« electron-shelving » dans un nuage d'ion

H.G.Dehmelt, *Bull. Am. Phys. Soc.*, **20** (1975) 60



25

« electron-shelving » avec un ion unique



26

Différents effets de désexcitation

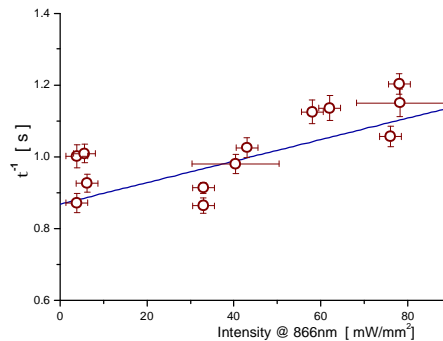
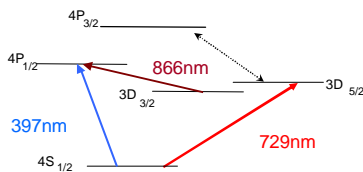
$$g_{meas} = \frac{1}{t_{nat}} + n_B (\Gamma_{quench} + \Gamma_{mix}) + g_{heat} + g_{loss} + g_{coup}$$

	nuage d'ions	ion unique
collisions avec le gaz résiduel $p_{tot} < 5 \times 10^{-10}$ mbar, $p_{H_2} < 2 \times 10^{-9}$ mbar	$\Gamma_{quench} = (37 \pm 14) \times 10^{-12} \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$ $\Gamma_{5/2 \rightarrow 3/2}(\text{H}_2) = (30 \pm 22) \times 10^{-11} \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$ <i>[Knoop et al., PRA 1998]</i> quenching $n_B G_{quench} \approx (1.8 \pm 0.7) \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ j-mixing $n_B G_{mix} \approx (14 \pm 10) \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$	observation de sauts quantiques sans laser à 729nm: ~1 saut/5min $n_B G_{coll} \approx 3 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$
réchauffement	moins que la moitié du nuage est excité $g_{heat} < 10^{-3} \text{s}^{-1}$	10-30 points dans le cycle de refroidissement après chaque excitation
perte d'ions	négligeable au cours d'un scan unique $g_{loss} < 7 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$...
couplage de l'état $4S_{1/2}$ à l'état $3D_{5/2}$	laser coupé	laser coupé, l'évaluation ne tient pas compte des sauts < 5 points



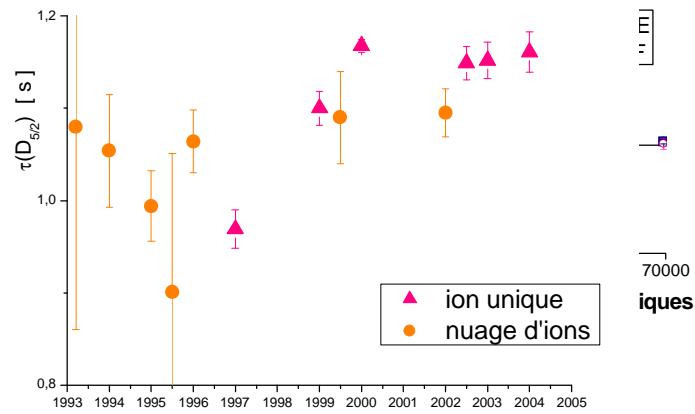
27

Effets de désexcitation : puissance @ 866nm



28

« electron-shelving » - analyse des données -

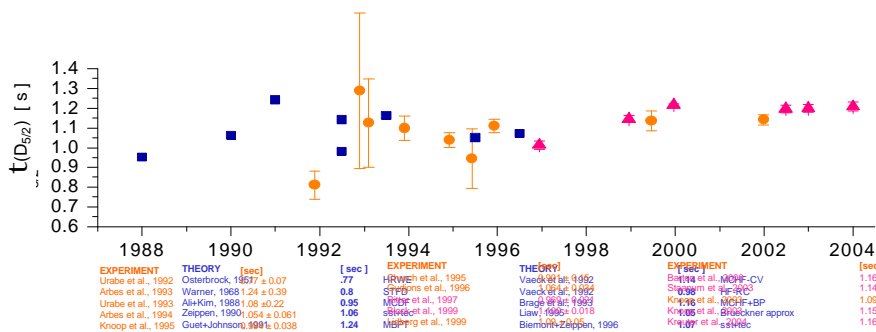


M. Knopp, C. Champenois, G. Hagel, M. Houssin, C. Lisowski, M. Vedel, F. Vedel, *Eur. Phys. J. D* 29, 163-171 (2004)



Mesure de la durée de vie métastable

- mesure de la durée de vie de **très bonne précision**
- dans un petit **nuage** et avec un **ion unique**
- **excellent contrôle** des paramètres expérimentaux dans les expériences et des simulations
- à compléter par la mesure de la durée de vie du $D_{3/2}$ (Thèse C. Lisowski, en cours)

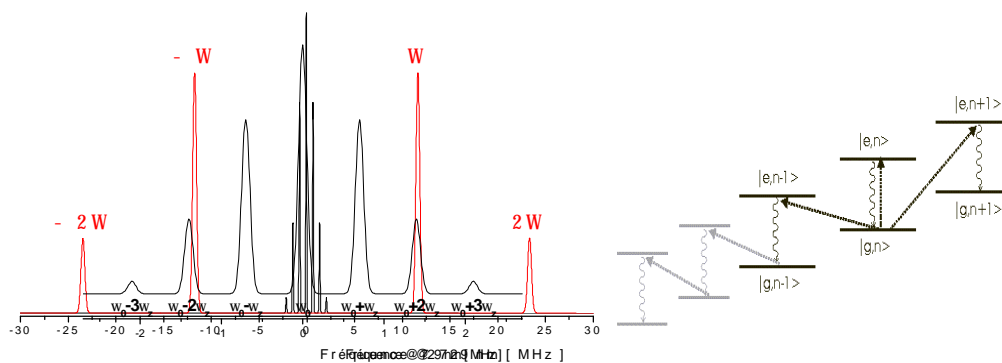


- un étalon de fréquence optique
- confinement d'un ion de Ca^+ - pureté des tensions
 - par déviation spatiale
- mesures des durées de vie
 - par la largeur $4S_{1/2}-4P_{1/2}$
- immobilisation de l'ion
 - par corrélation RF
- perspectives
 - par les résonances noires



31

Le régime de Lamb-Dicke



Etat énergétique de l'ion décrit par $\langle n \rangle$

- macromouvement ω_u : refroidi par laser

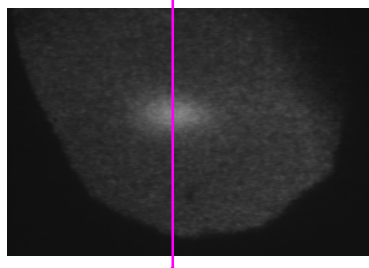
limite Doppler $T_{\text{limit}} = \hbar / (2k_B t_{\text{nat}})$
 (Ca^+ : 0.55mK @ 23MHz)

- micromouvement Ω : mouvement forcé

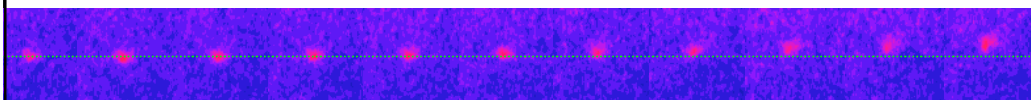


32

Réduction du micromouvement - 1



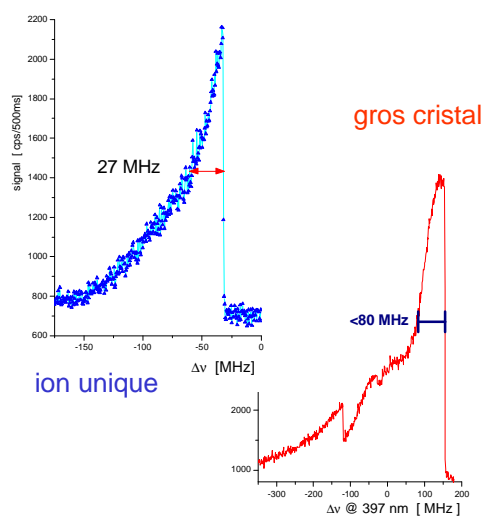
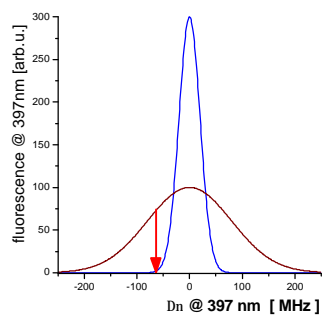
Variation de la profondeur du puits de potentiel de 5,9 à 1,7 eV



33

Réduction du micromouvement - 2

Le principe

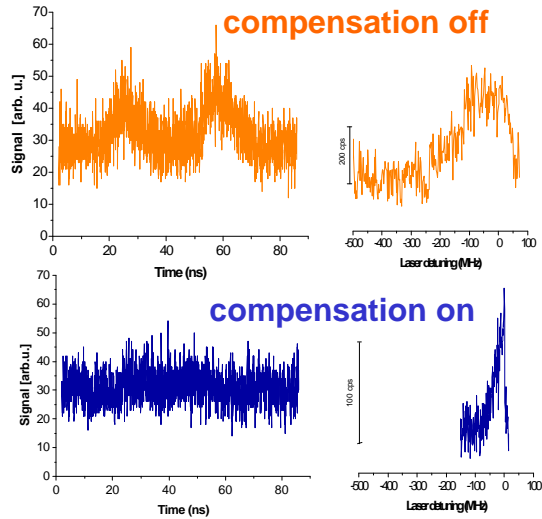
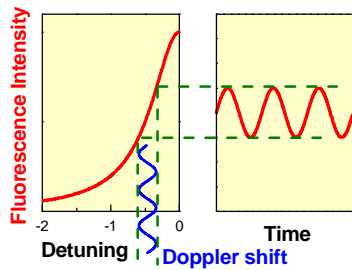


34

Réduction du micromouvement - 3

corrélation photons - RF

RF-modulated fluorescence



35

Résonances noires

Modélisation

mouvement des ions

$$u(t) = (R_u \cos \omega_u t + D_u) \left(1 + \frac{q_u}{2} \cos \Omega t \right)$$

R_u : amplitude du mouvement à ω_u , micromouvement à $\Omega/2\pi$.
 D_u : déplacement de l'ion du centre

si l'atome bouge \Rightarrow correction par les Doppler shift

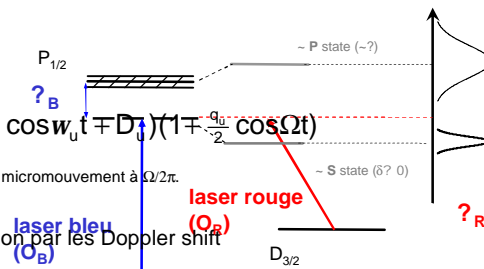
$$\Delta_B - \frac{k_B p}{m} = \Delta_R + \frac{k_R p}{m}$$

Le mouvement des ions est pris en compte de façon classique par les **Doppler shifted laser detunings**.

$\omega_B \gg \omega_R$: atome habillé par des photons bleus

$$\Delta(t) = \Delta^0 \pm kV_0 (\sin \omega_r t (1 + \frac{q}{2} \cos \Omega t) + \sqrt{2} \cos \omega_r t \sin \Omega t + \frac{D_r}{R_r} \sqrt{2} \sin \Omega t)$$

avec $V_0 = \omega_r R_r$ et $\omega_r = q_r \Omega / (2\sqrt{2})$



$$D_B = D_R$$

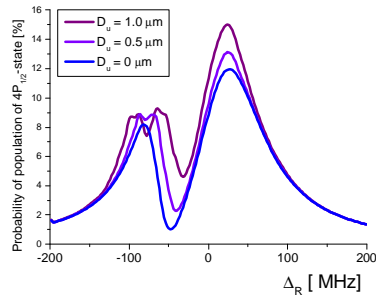


36

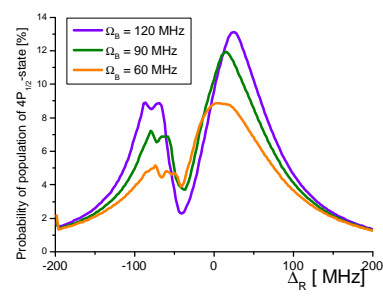
Résonances noires - simulations numériques

prob($4P_{1/2}$) en suivant l'évolution de la matrice densité

variation du déplacement D_u



variation de W_B

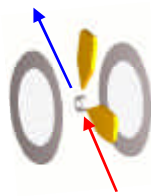


37

Résonances noires - géométrie des faisceaux laser -

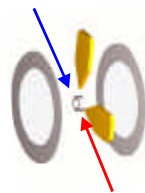
Co-propagating

$$d\nu = \frac{d}{k_B - k_R}$$

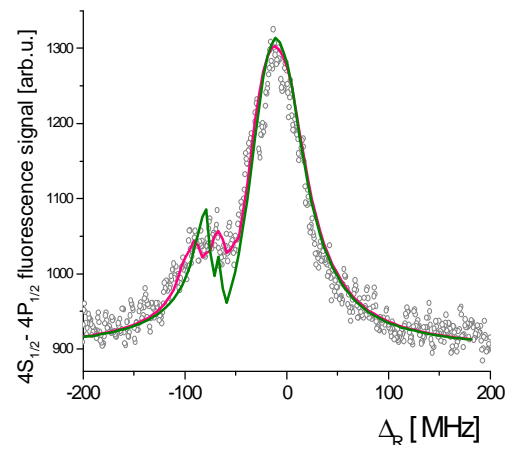


Counter-propagating

$$d\nu = \frac{d}{k_B + k_R}$$

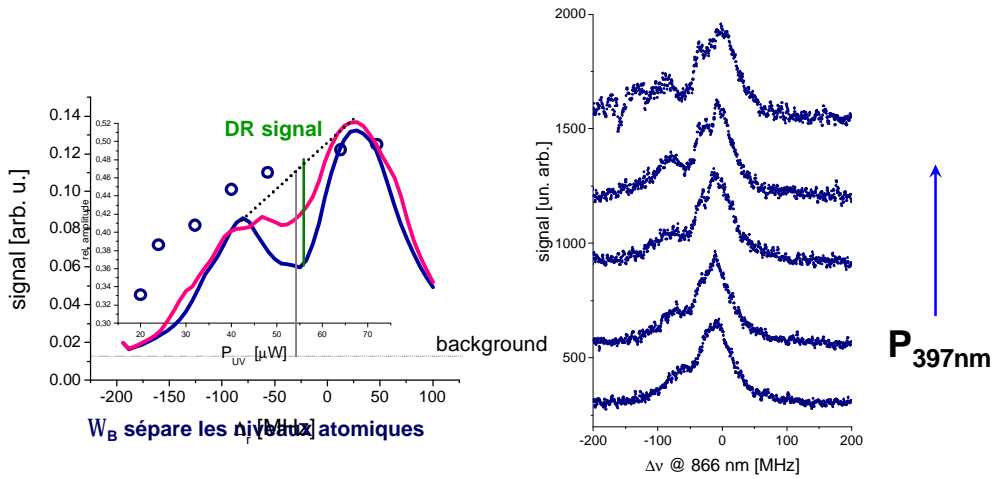


$$\text{Ca}^+: k_B \sim 2k_R \Rightarrow d\nu_p \sim 3 \cdot d\nu_{ap}$$



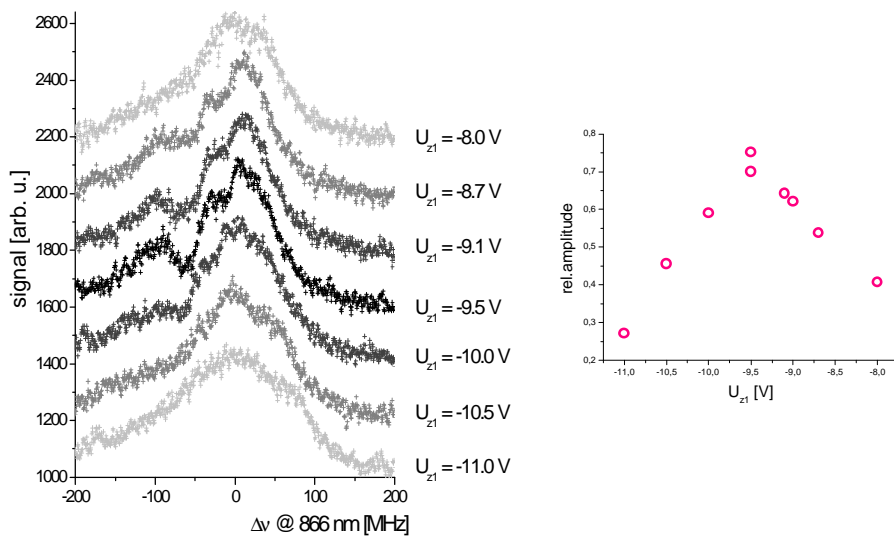
38

Résonances noires - influence de W_B -



39

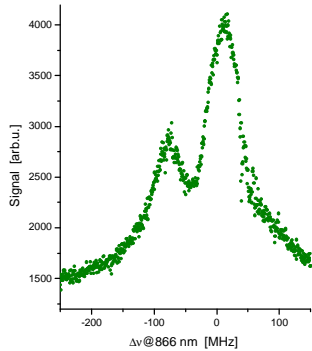
Résonances noires - influence du micromouvement -



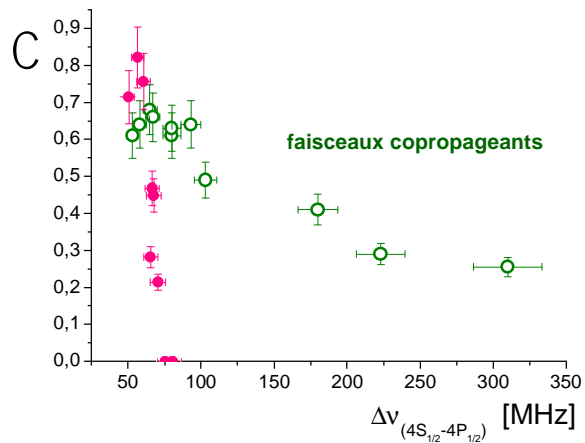
40

Résonances noires - choix de la géométrie -

3 ions – faisceaux laser copropageants



faisceaux contrapropageants

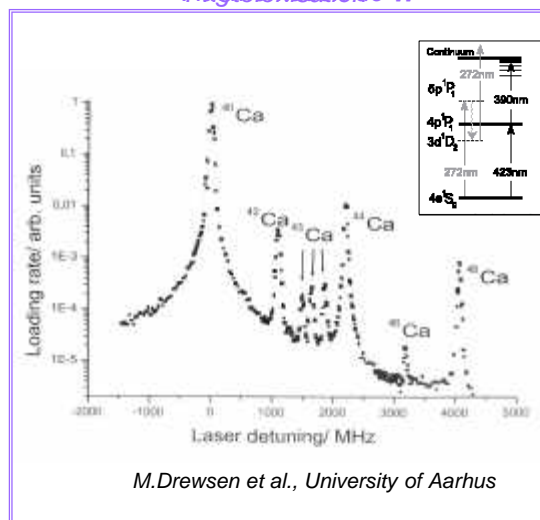


41

Immobilisation de l'ion

- quantification de l'immobilisation uniquement par mesure du spectre d'excitation sur la transition $4S_{1/2}-3D_{5/2}$ à 729 nm (**bandes latérales**)
- mise en évidence du régime de **Lamb-Dicke**
- accès optiques supplémentaires
- **augmentation de Ω**
- **photoionisation**

Photoionisation de W



42

- un étalon de fréquence optique
- confinement d'un ion de Ca^+
- mesures des durées de vie
- immobilisation de l'ion
- **perspectives**



43

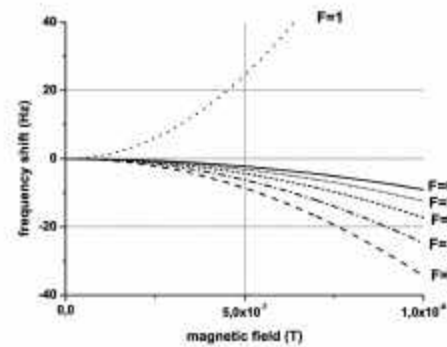
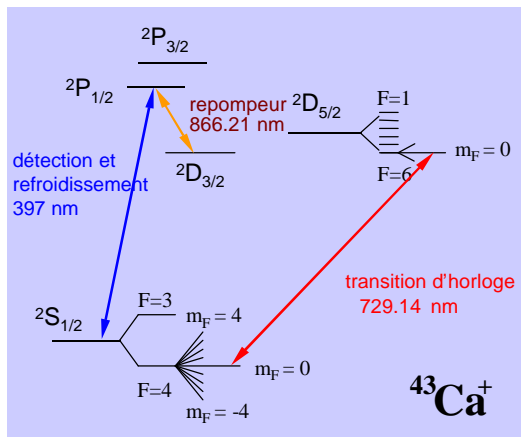
Perspectives

- $^{43}\text{Ca}^+$
- **étude expérimentale des effets systématiques**
- **mesure de la fréquence à 729 nm**



44

Effets systématiques



transition $2S_{1/2}, F=4, m_F=0 \rightarrow 2D_{5/2}, F=6, m_F=0$



45

Effets systématiques - contraintes expérimentales -

$$\Delta\nu_{\text{nat}}/\nu \approx 3 \cdot 10^{-16}$$

pour atteindre 1Hz sur 411 THz ($2.4 \cdot 10^{-15}$) il faut

ion à la limite Doppler, $\langle n \rangle \approx 10$	<i>Doppler 2^e ordre</i>
un champ magnétique $< (0.1 \pm 0.05 \mu\text{T})$	<i>Zeeman quadratique, AC Stark</i>
un champ électrique résiduel $< 1\text{V/mm}$	<i>DC Stark</i>
gradient de champ électrique $< 1\text{V/mm}$ sur 1 mm (piège sphérique)	<i>moment quadrupolaire</i>
3 accès optiques (orthogonaux)	<i>mesure du moment quadrupolaire</i>
$T = 300\text{K}$	<i>DC Stark (rayonnement du corps noir)</i>
$P < 0.75 \mu\text{W/mm}^2$ @ 729nm	<i>AC Stark (dépl. lumineux)</i>



46

Merci, CIML !

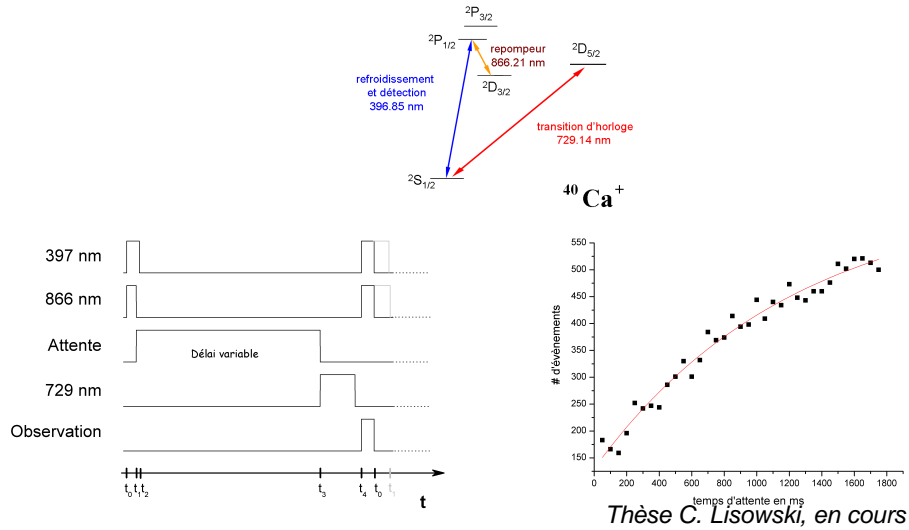


47



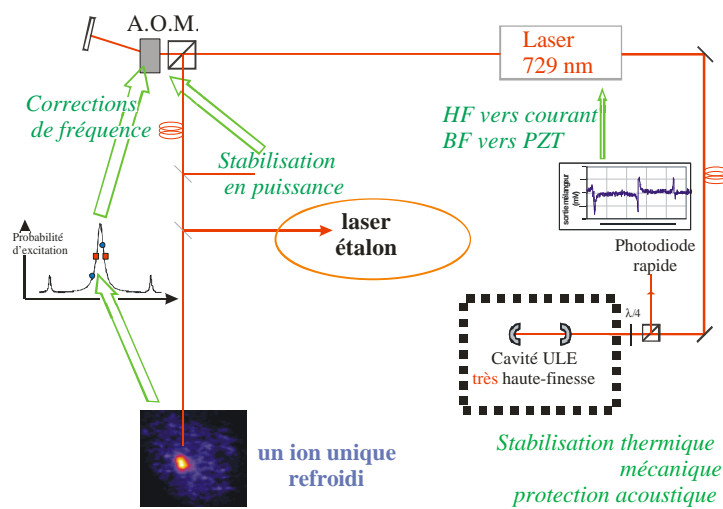
48

Mesure de la durée de vie métastable $D_{3/2}$



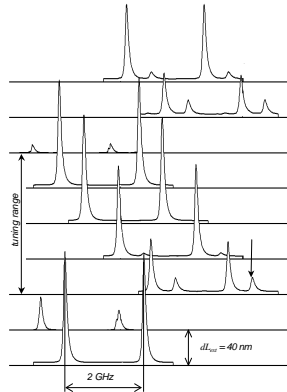
Thèse C. Lisowski, en cours

Laser @ 729 nm à long terme



Laser diode at 397nm

Wavelength : 396,85 nm
Cavity length : 3,5 cm (ISL = 4,25 GHz)
Tuning range : 2.5 GHz



51

Description of modeling

The **ion motion** is described by $u(t) = (R_u \cos \omega_u t + D_u) \left(1 + \frac{q_u}{2} \cos \Omega t\right)$

R_u : amplitude of motion at secular frequencies ω_u and the (driven) micromotion at the frequency of the trapping field $\Omega/2\pi$. D_u is the ion's displacement from the center of the trap causing "excess" micromotion.

In the case of a moving atom, the **dark resonance condition** must be **corrected by the Doppler shifts** :

$$\Delta_B - \frac{k_B p}{m} = \Delta_R - \frac{k_R p}{m}$$

We study the system via the **evolution of its density matrix**:

The motion of the ion is taken into account classically through the **Doppler shifted laser detunings**

$$\Delta(t) = \Delta^0 \pm k V_0 (\sin \omega_r t (1 + \frac{q_r}{2} \cos \Omega t) + \sqrt{2} \cos \omega_r t \sin \Omega t + \frac{D_r}{R_r} \sqrt{2} \sin \Omega t)$$

with $V_0 = \omega_r R_r$ and $\omega_r = q_r \Omega / (2\sqrt{2})$

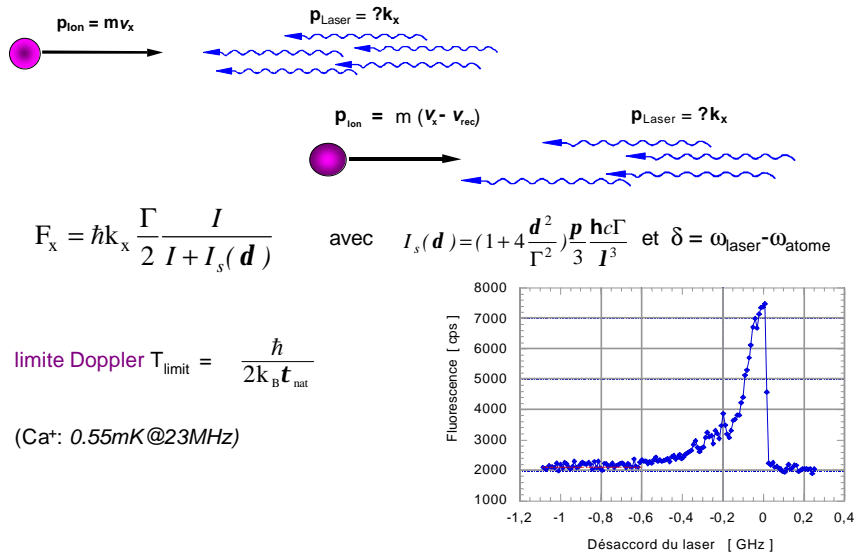
Since the **timescales** of the internal and external evolution of the system are of the same order, the evolution of the density matrix has to be followed over several oscillation periods until **convergence**.

Dark resonances are visualized by representing the **probability for the $4P_{1/2}$ -state** to be populated



52

Refroidissement laser



53

Effets systématiques - ⁴³Ca⁺

effet	proportionnel à	condition	df [Hz]	df/f
DC Stark (corps noir)	$5.7 + 2.1 \times \frac{1}{2} (3 \cos^2 \theta - 1)$	1V/mm T=300K	0.39±0.27	9.5(±6.5)×10⁻¹⁶
quadrupole shift	$-8.1 \times 10^{-7} \left(\frac{1}{2} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \right) \Pi$	1V/mm sur 1mm (piège sphérique) 3 mesures	+/-0.1	+/- 2.5×10⁻¹⁶
AC Stark (dépl.lumineux)		0.75μW/mm² @ 729nm et 0.1μT	±0.006	± 1.5×10⁻¹⁷
Doppler 2 ^e ordre	$-\frac{1}{2} v^2/c^2$	Doppler limit, <n>≈10	-1×10⁻⁴	-2.5×10⁻¹⁹
Zeeman linéaire			0	0
Zeeman quadr.	$-9.05 \text{ Hz}/\mu\text{T}^2$	(0.1±0.05 μT) stabilité	-0.09±0.09	-2.2(±2.2)×10⁻¹⁶
TOTAL			+0.3±0.4	(+7±10)×10⁻¹⁶

54