

GARDER ET MANIPULER DES ATOMES EN BOÎTE POUR EN FAIRE DES OBJETS QUANTIQUES

Conférence grand public - CPPM - 26 mai 2013

Cycle Mystères au cœur de l'Univers et de la matière

Fernande VEDEL

professeur émérite

Physique des Interactions Ioniques et Moléculaires

UMR 7345 AMU-CNRS

Équipe Confinement d'ions et manipulation laser

Équipe CIML



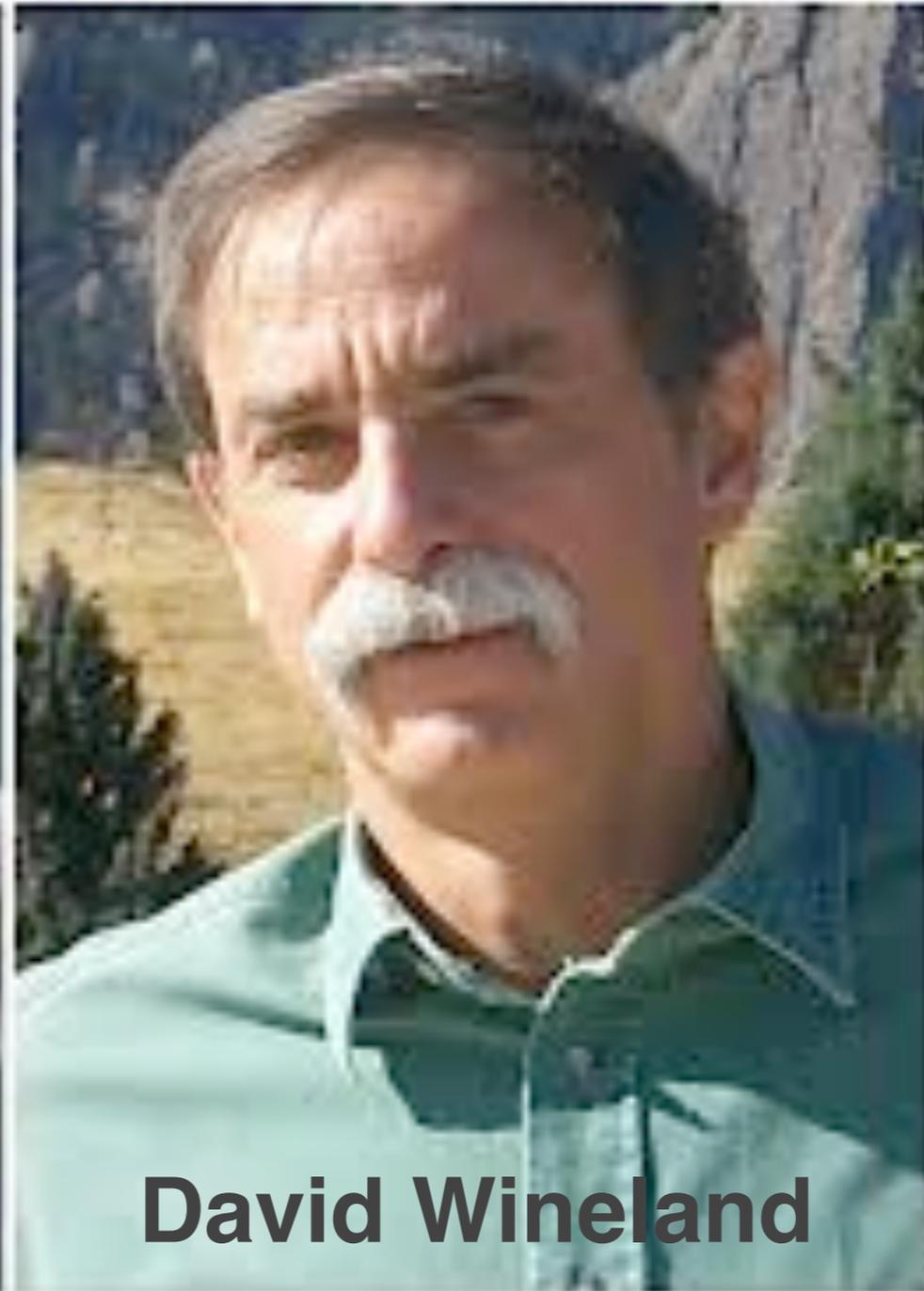
- Martina KNOOP (CR) resp.
- Caroline CHAMPENOIS (CR)
- Marie HOUSSIN (PR)
- Gaetan HAGEL (MCF)
- Joffre PEDREGOSA (MCF)
- Olivier MORIZOT (MCF)
- Marius Kamsap (Thésard)
- Michel VEDEL (ch. bénévo.)
- FV

Recherches mettant en œuvre des **pièges à ions** appliqués à la métrologie des fréquences optiques (horloges atomiques) et à la compréhension de l'organisation de la matière en milieu dilué.

Prix Nobel de Physique 2012



Serge Haroche



David Wineland

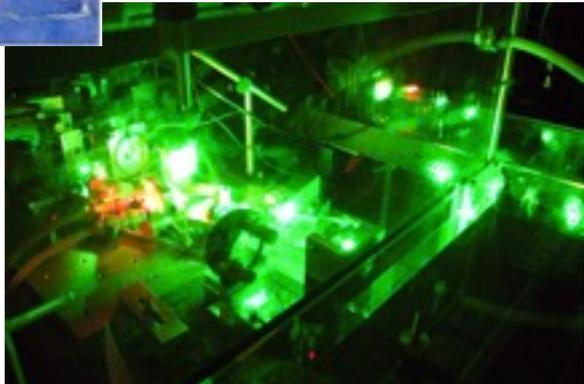
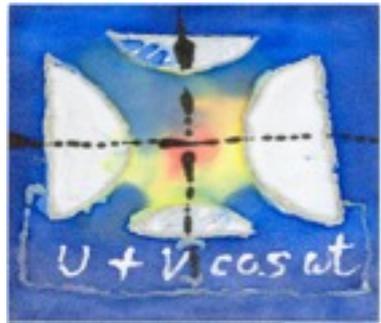
"for ground-breaking experimental methods that enable measuring and manipulation of individual quantum systems"

boîte à **photons**

boîte à **atomes**

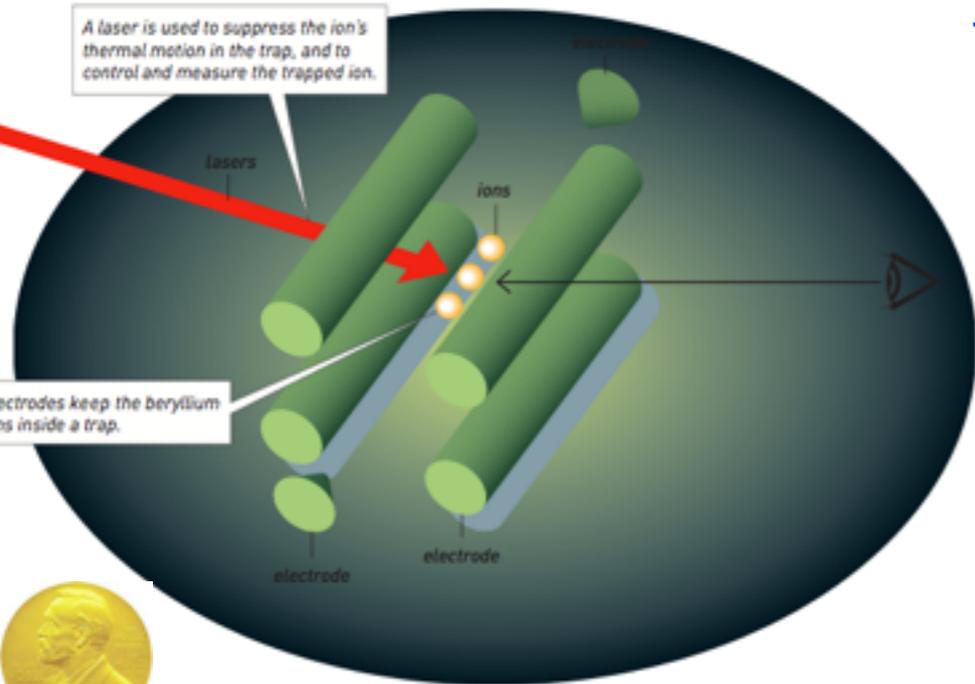
De la boîte, ou piège à ions, vers l'objet quantique

Une histoire sur des dizaines d'années d'interaction lumière-matière



A laser is used to suppress the ion's thermal motion in the trap, and to control and measure the trapped ion.

Electrodes keep the beryllium ions inside a trap.



⊙ l'invention des pièges 1957

- renouveau de la chimie et de la spectrométrie de masse
- des avancées extraordinaires en spectroscopie et en physique atomique

⊙ la venue des lasers et le contrôle des atomes - nombre (de 1 à q. uns) et température

- nouveaux pièges miniatures et atomes froids
- précision extrême

⊙ un contrôle de plus en plus précis de l'environnement et des particules piégées.

- des pièges micrométriques
- des atomes préparés et étudiés comme objets quantiques



Ion piégé unique

comme système quantique individuel

on est capable de créer une particule dans un état pur

Oscillateur
harmonique

états continus

$\approx 10^5$ ions

$T \sim 100 - 10\,000\text{K}$

$\approx \text{eV}$



l'atome est
dans un état **ou**
dans un autre



- utilisation de la charge électrique
- isolement de l'environnement
- contrôle et mesures extrêmement précis

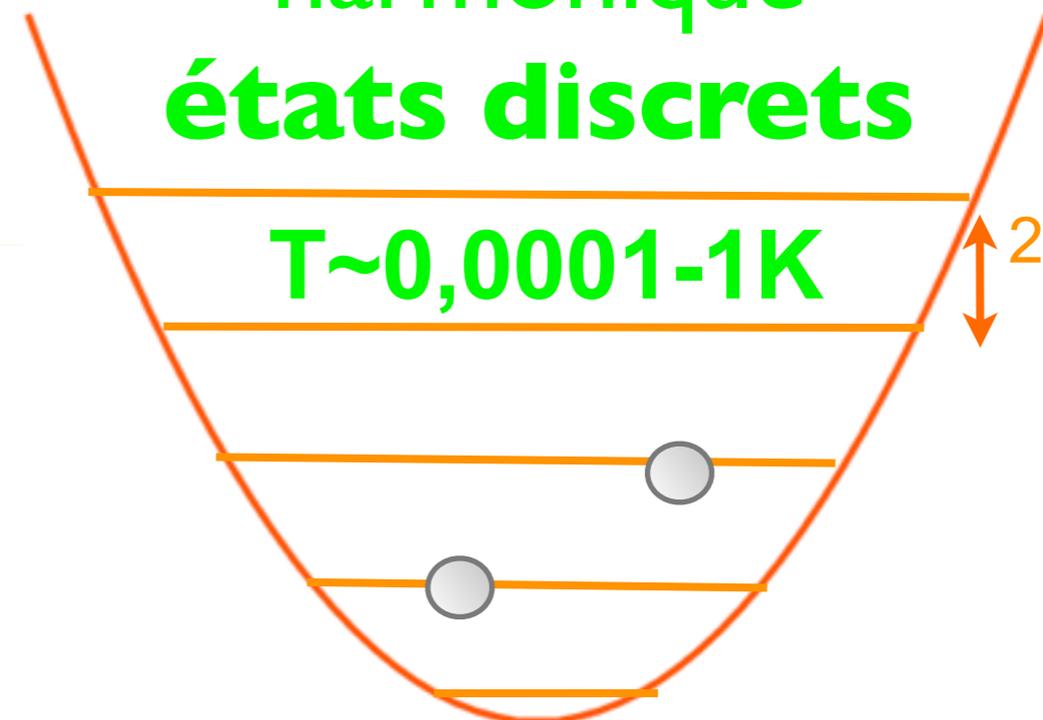
l'atome est
dans un état **et/**
ou dans un
autre

Oscillateur
harmonique

états discrets

$T \sim 0,0001 - 1\text{K}$

$2,5\text{ MHz} \approx$
 $1\mu\text{eV}$



La mesure lève l'ambiguïté :
on a un état ou un autre

L'invention des pièges à ions ou « ion trap »

Wolfgang Paul (Nobel 1987)



physicien



analyseur de masse quadrupolaire (1953),
piège quadrupolaire (1955-56)

Hans G. Dehmelt (Nobel 1987)

physicien

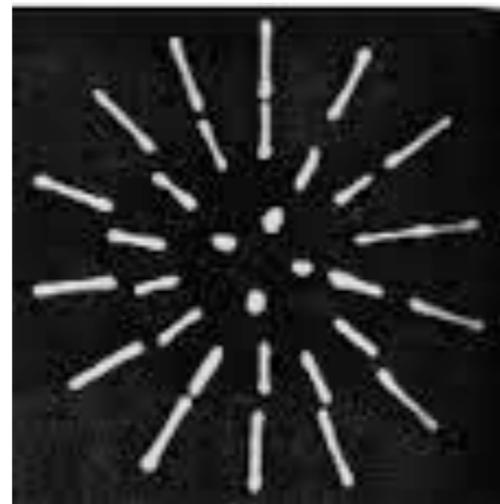
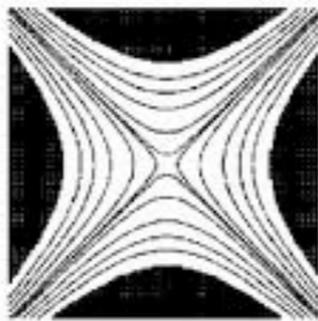
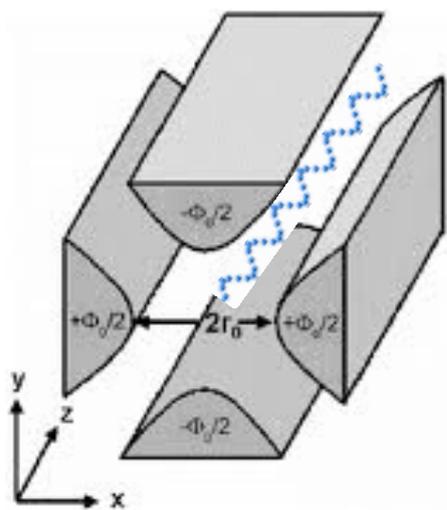


- premières exp. spectrosc.
- piègeage d'un électron isolé pendant 10 mois



Wuerker, Shelton et Langmuir,
chimistes

première réalisation de cristal de Coulomb
avec des particules macroscopiques (1959)



Le principe:

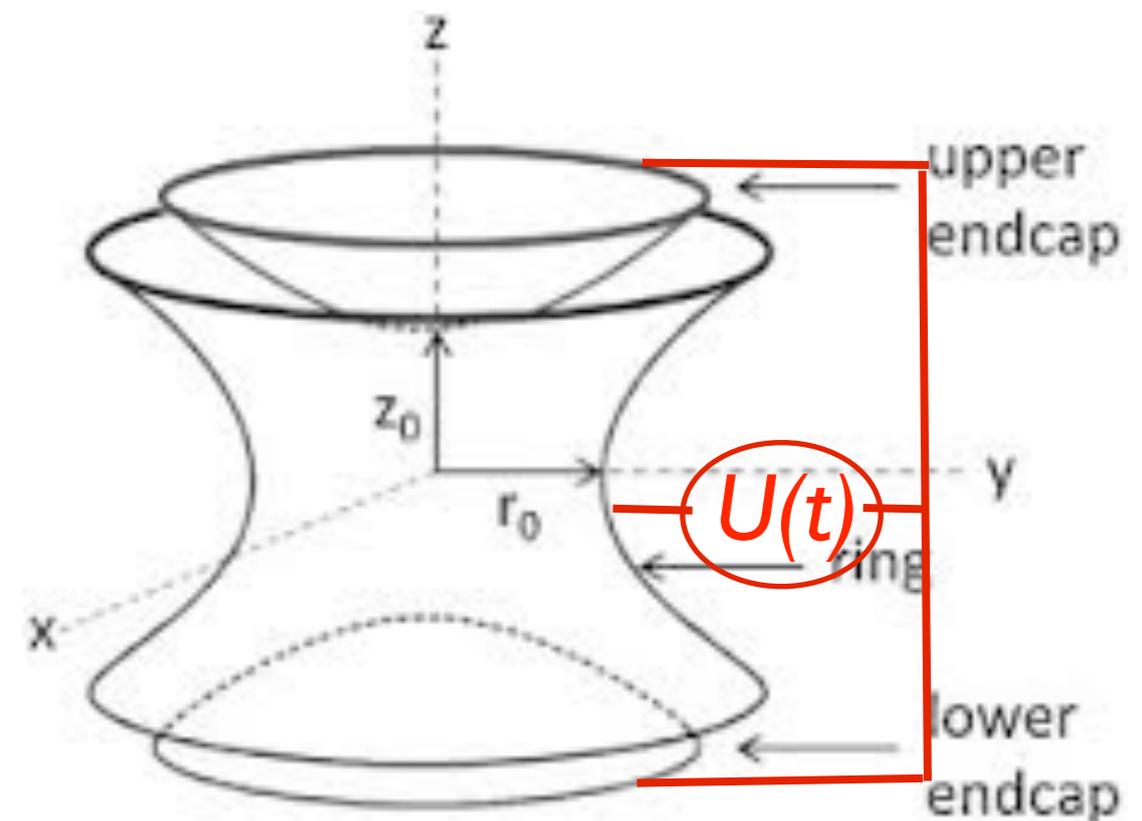
on utilise la charge électrique

- potentiel quadrupolaire:

$$U(x,y,z) = \frac{V}{4z_c^2} (x^2 + y^2 - 2z^2)$$

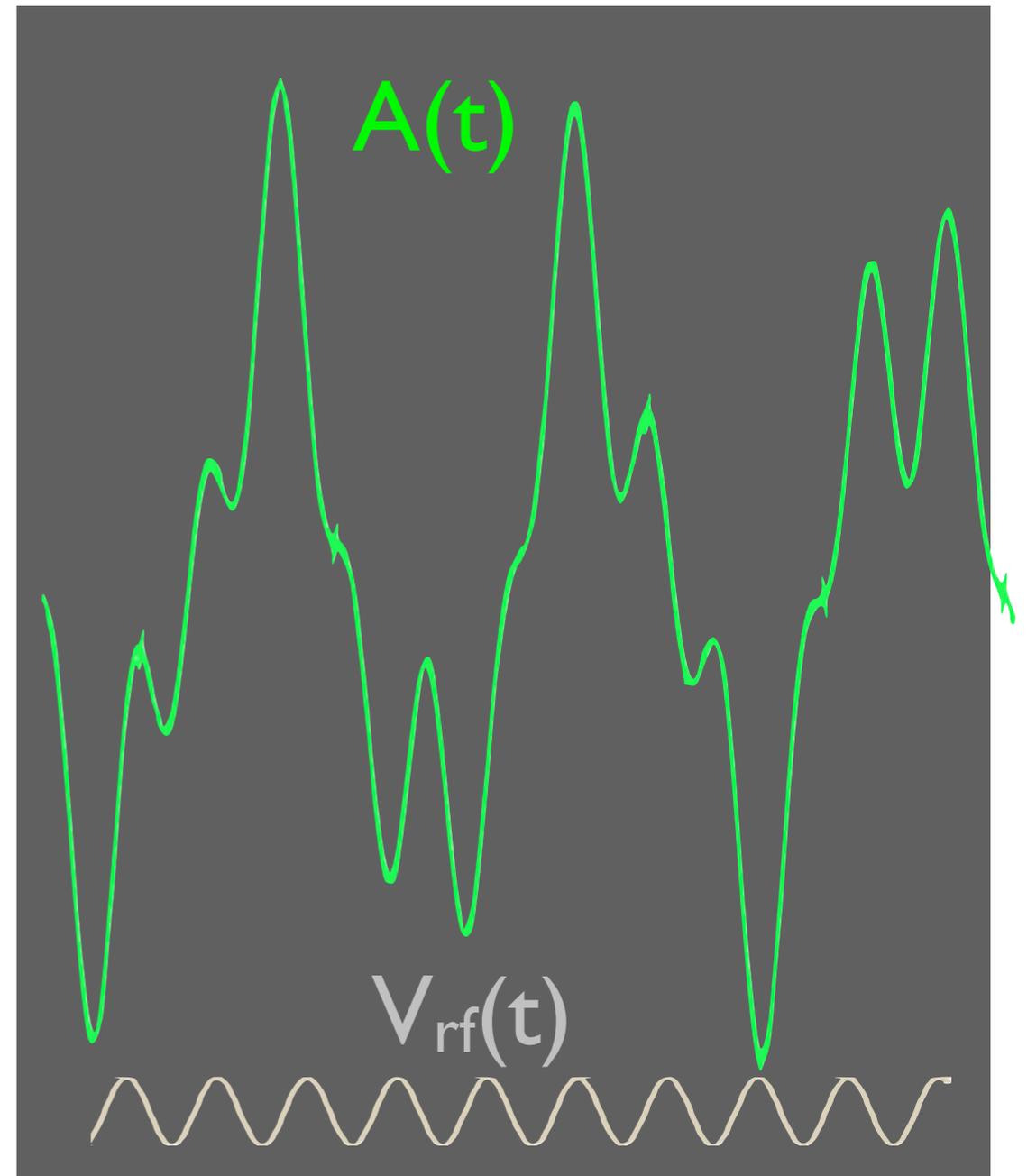
oscillant dans le temps

- ✿ un potentiel «confinant», matérialisé par la forme ad hoc des électrodes (3D ou 2D)
- ✿ modélisation du mouvement
(équation de Mathieu)
- ✿ magnitude (masse, charge) des particules



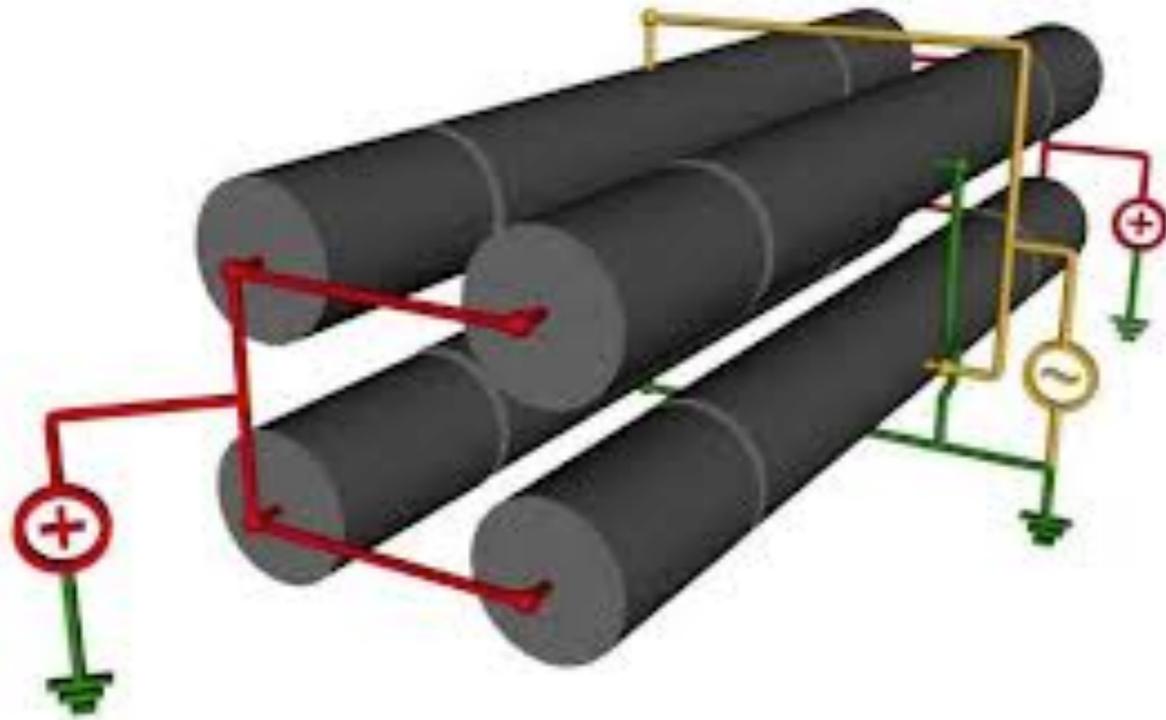
Le mouvement des ions

- la trajectoire des ions est fermée
= confinement
- les ions oscillent suivant deux fréquences :
 - la plus forte (MHz-20 MHz) : micromouvement (fréquence du champ EM appliqué)
 - la plus faible (kHz-MHz) : oscillateur harmonique , signature du rapport e/m
- le choix des tensions et de la fréquence détermine les espèces chimiques qui seront retenues pendant de longues durées



*Amplitude en z, ou x ou y,
en fonction du temps*

Géométries lineaires

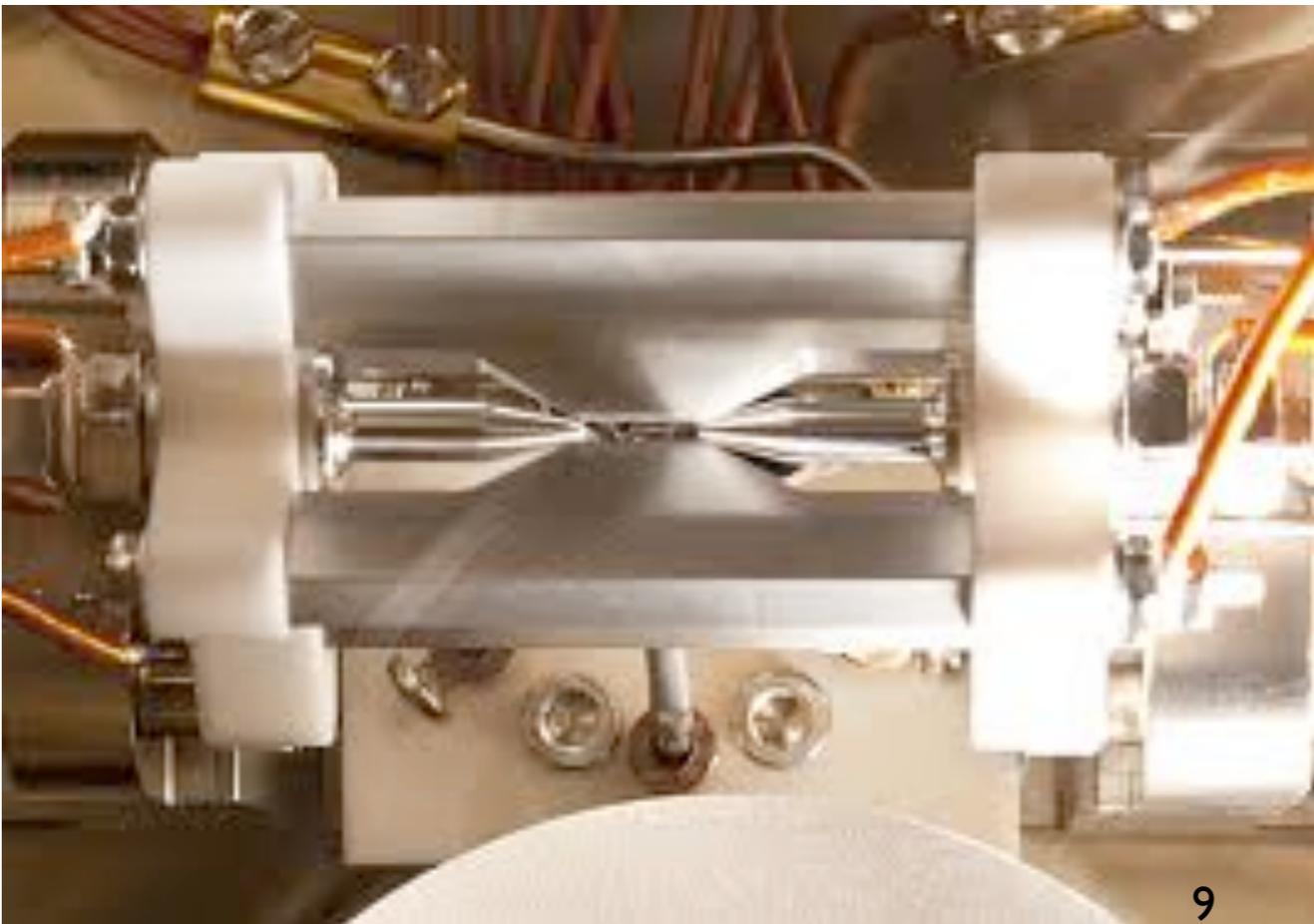


- confinement quadrupolaire ou $2n$ -polaires en x et y
- confinement longitudinal par une tension continue

utilisées maintenant dès que l'on piège plus d'une unité

la géométrie doit permettre l'entrée de faisceaux lasers

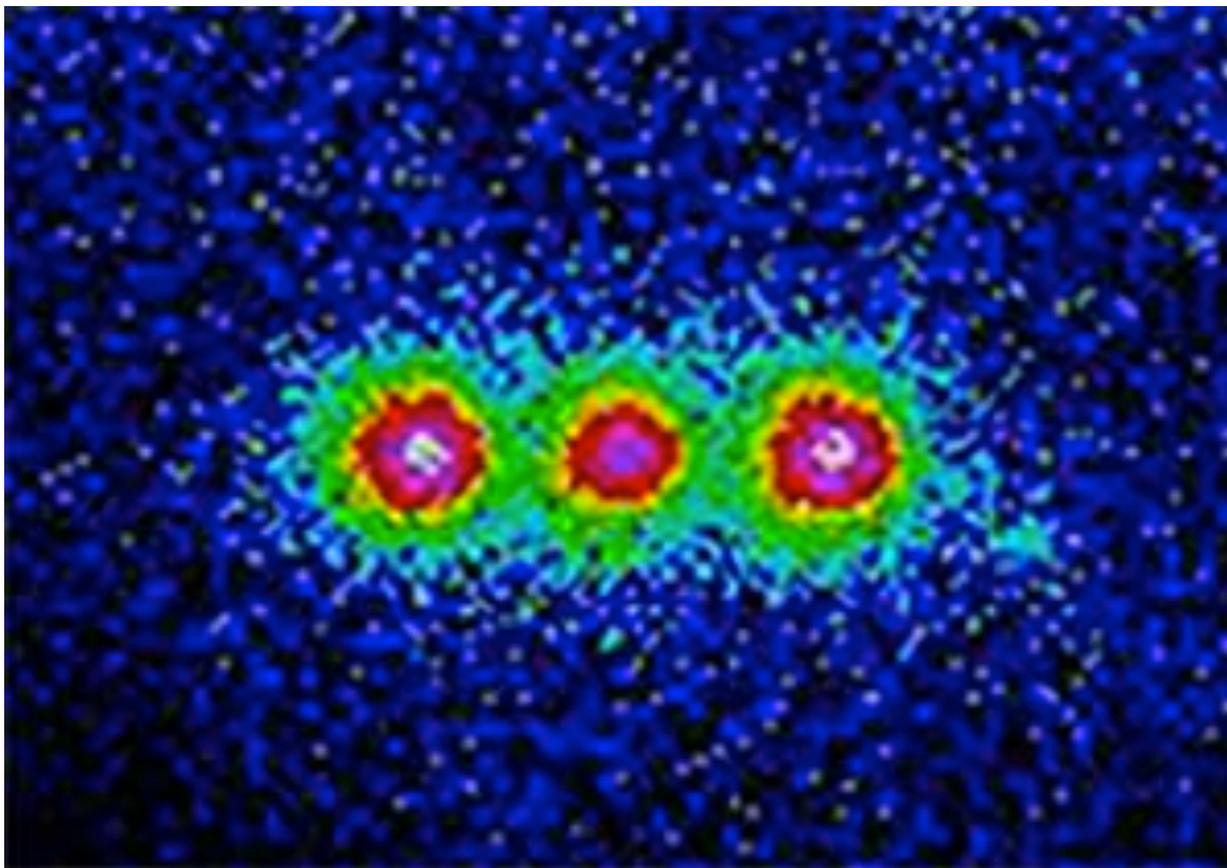
dimensions centimétriques à millimétriques....



Piège à ions en pratique

- **REEMPLISSAGE et IONISATION**

- ★ jet, vapeur
- ★ canon à électrons, photoionisation,...



Trois ions de béryllium

- **DÉTECTION**

- ★ sélective de l'espèce
- ★ lumière émise : fluorescence
 - ◆ *excitation sur une transition «forte» du spectre atomique*
- ★ en utilisant la charge électrique, on agit sur e/m en couplant le piège à un circuit
 - ◆ *excitation résonnante sur le mouvement*
- ★ résolution en masse de l'unité
 - ◆ *séparation isotopique*
- ★ évolution dans le temps
 - ◆ *processus réactionnel*
 - ◆ *phénomènes radiatifs*

Étapes majeures

1. énergie thermique $T = 100 - 10\,000\text{K}$ ou q.q. EV)
 2. refroidissement Doppler $T \approx \text{q.q. K - mK}$
 3. refroidissement sub Doppler $T = \mu\text{K}$, «x» = nm
 4. physique quantique
- ◆ physique mésoscopique

PREMIÈRES APPLICATIONS

- séparer des particules de même masse (m), (e/m)
 - les garder longtemps
 - de très peu à beaucoup (10^5)
 - observer des évolutions sur des temps longs
 - à l'écart de perturbations, sans rencontrer les parois
- ➡ mise en évidence d'espèces chimiques et de réactivité
- ➡ nouveaux protocoles en spectroscopie atomique

Les «nouveaux» spectromètres de masse



- chimie structurale,
- détection fraudes, explosifs, dopage,....
- (MS)_n

Une variante , le piège de Penning



résonance cyclotronique
 $\omega_c = eB/m$

- avec un champ magnétique: mouvement complexe avec trois fréquences dont la fréquence cyclotron
- mesure très précise du facteur de Landé de l'électron, piège à 4K
- e^- : (10 mois) 1973
 Nobel Dehmelt
- nombreuses mesures de masses exotiques au CERN dans des dispositifs ultracompensés (ISOLDE, ...)
- constantes fondamentales

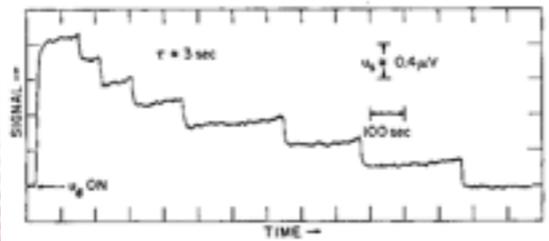
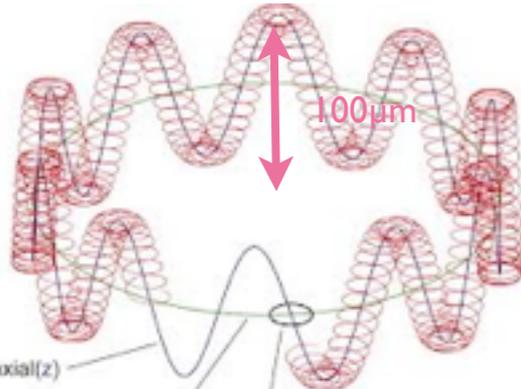
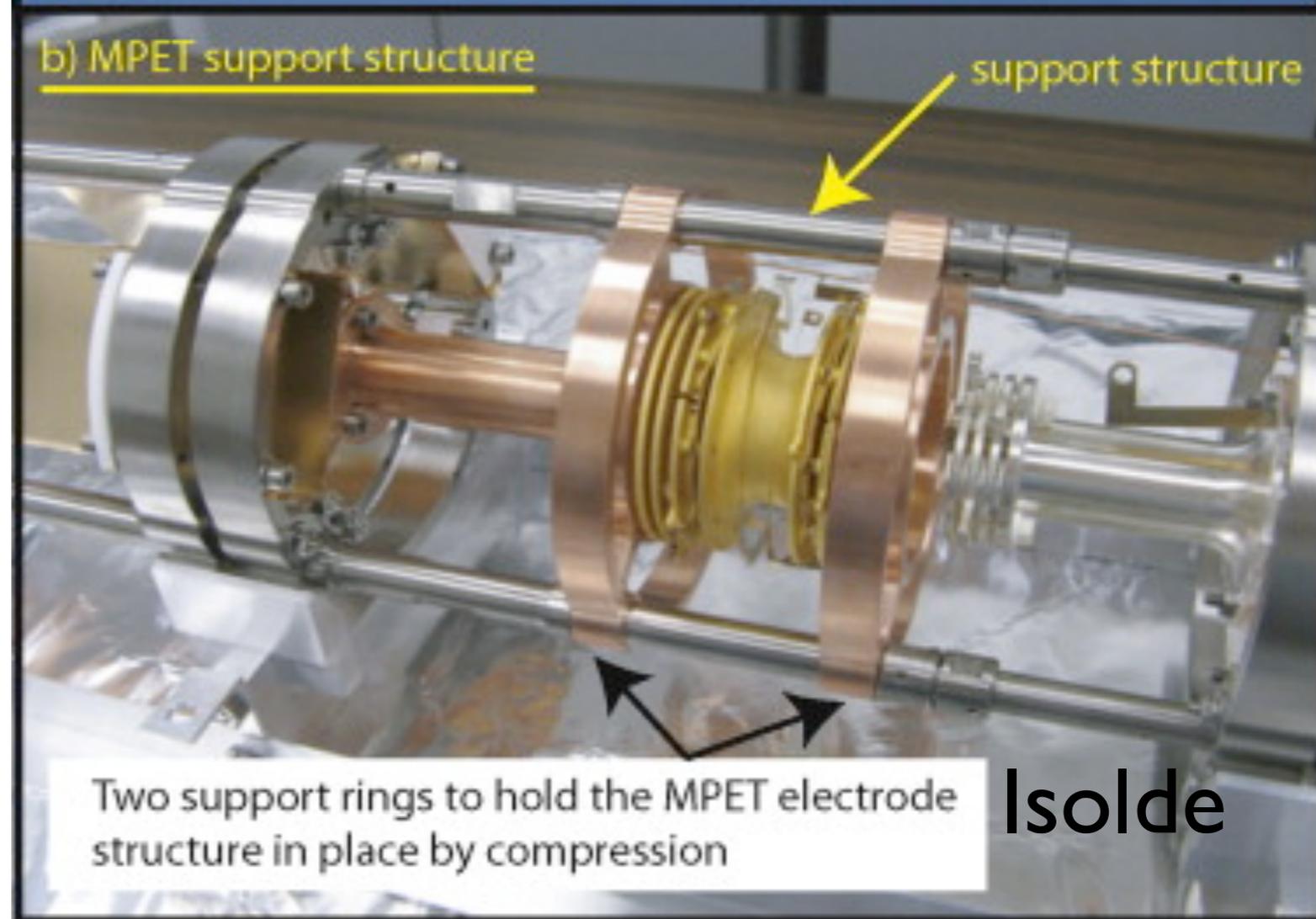
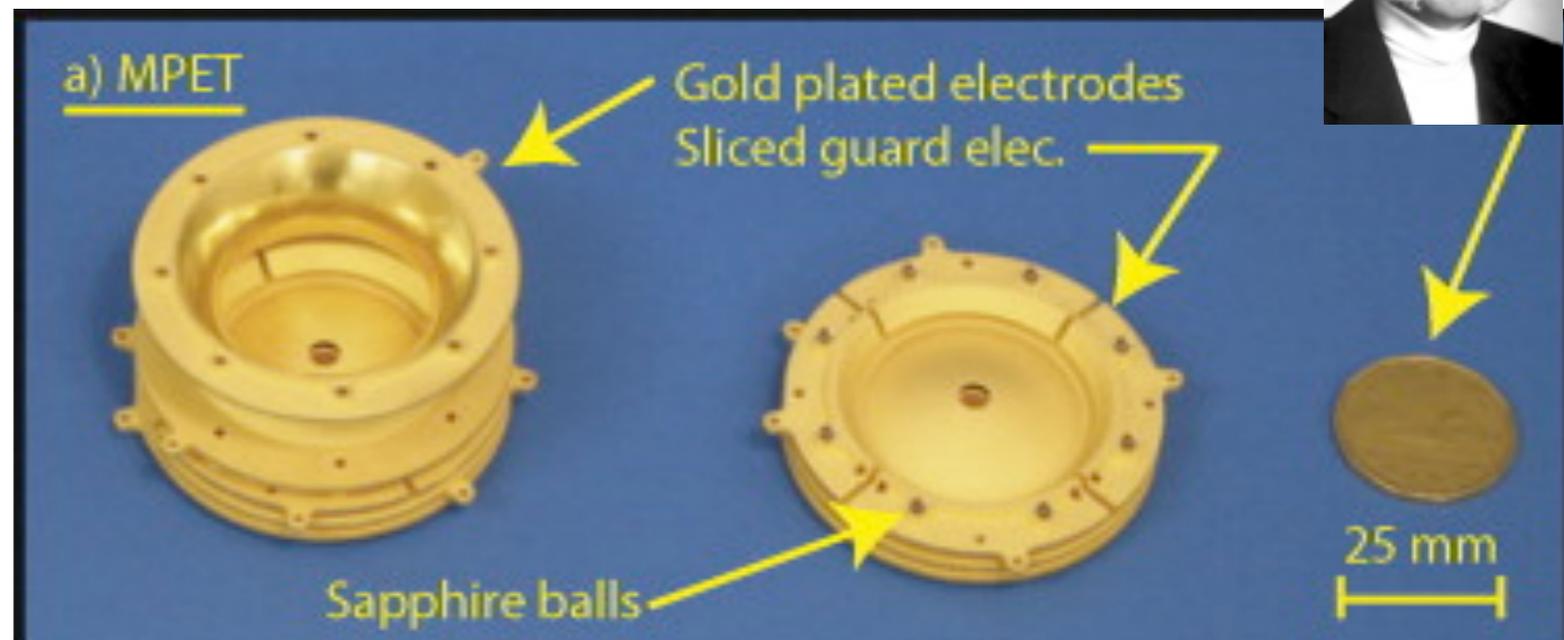


FIG. 2. Recorder trace of forced-oscillation signal versus time. The signal at $\nu_{e0} \approx 55.7$ MHz for an initially injected bunch of electrons decreases discontinuously as the electrons are successively boiled out of the trap by the drive at $\nu_e' \approx 54.7$ MHz. The last plateau corresponds to a single electron.

Spectroscopie atomique

conditions remarquables:

effet Doppler contrôlé, absence de collisions, pas d'effets de paroi,...

durée d'observation

pompage optique, pour mesurer

- des durées de vie de niveau atomique
- des transitions atomiques

Utiliser ce potentiel pour construire de nouvelles horloges atomiques

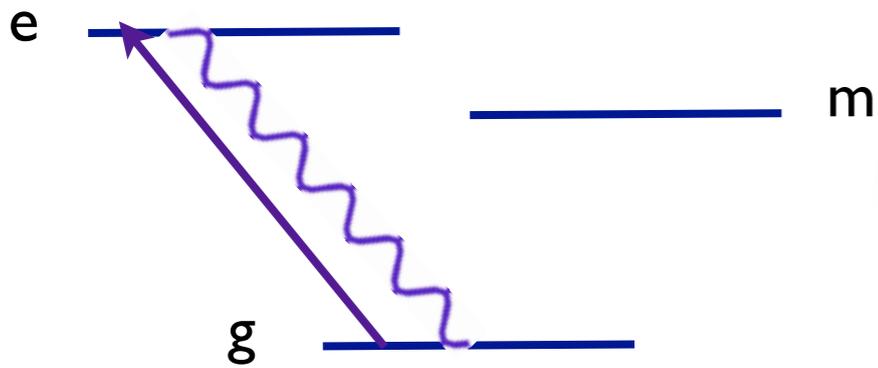
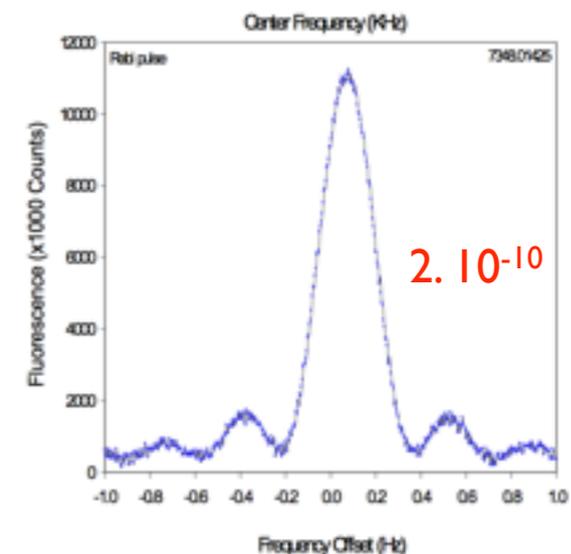
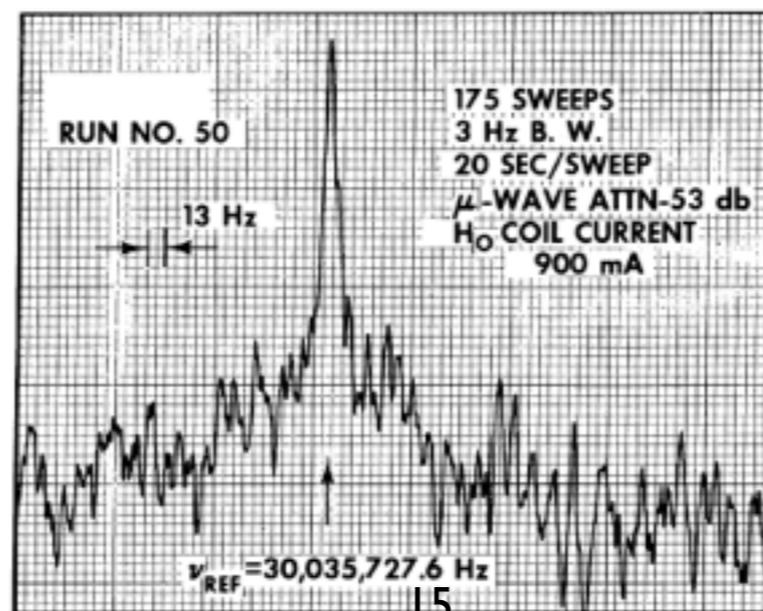
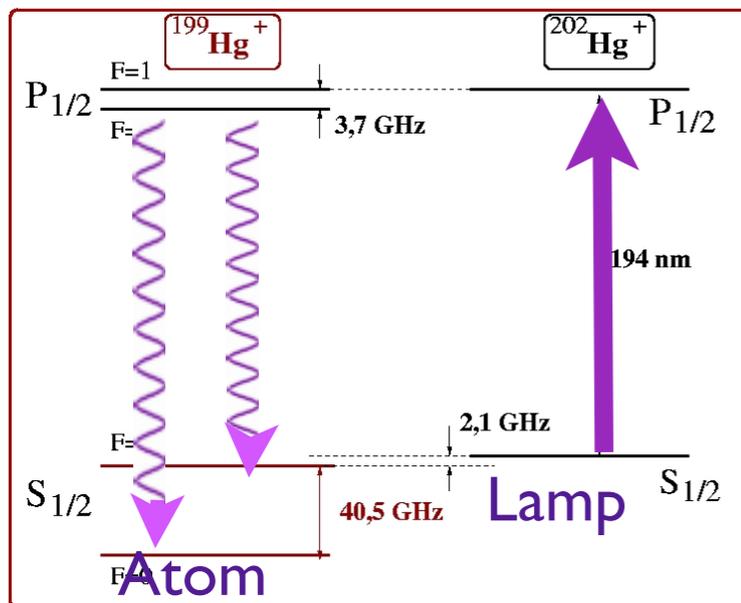
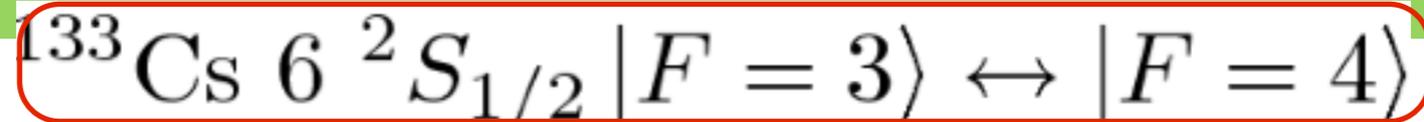


FIG. 2. Apparatus for optically observing hfs microwave transitions in $^{199}\text{Hg}^+$ ions confined in an rf quadrupole electric field.

1973: F.J. Major et G. Werth, NASA Goddard Space Flight Center



Mesure du temps



- * au 17ème siècle, navigation difficile: la «**longitude act**» 1714 met au concours 20 000£ une précision de 120 s , soit 30 milles marins ($\Delta t = 1\text{s} \Rightarrow \Delta d = 1/4$ de mille m. ; GPS: $\Delta t = 10^{-9}\text{s} \Rightarrow \Delta d = 30\text{cm}$!):
- * horloge mécanique à échappement, pendule et ressort spiral, puis quartz
- * en 1967 bascule vers la seconde atomique (9,192 631 770 GHz EXACT) pour éliminer les imperfections dans la rotation de la Terre
 - * l'atome joue le rôle du balancier et les ondes EM de compteur.
 - * on a une référence universelle, indépendante de l'environnement
- * en 1983 abandon du mètre comme unité primaire, car la mesure temps/fréquence est la plus précise.

une incertitude de $\Delta t = 10^{-9}\text{s} \Rightarrow \Delta d = 30\text{cm} \iff$ une stabilité de $\Delta f/f = 10^{-14}$

AVANTAGES: étalon universel, indépendant de l'environnement, de la température, pas de champ magnétique, de champ statique...

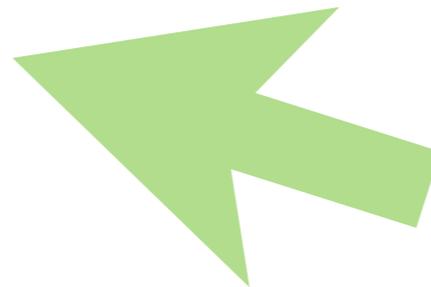
Fonctionnement d'une horloge atomique



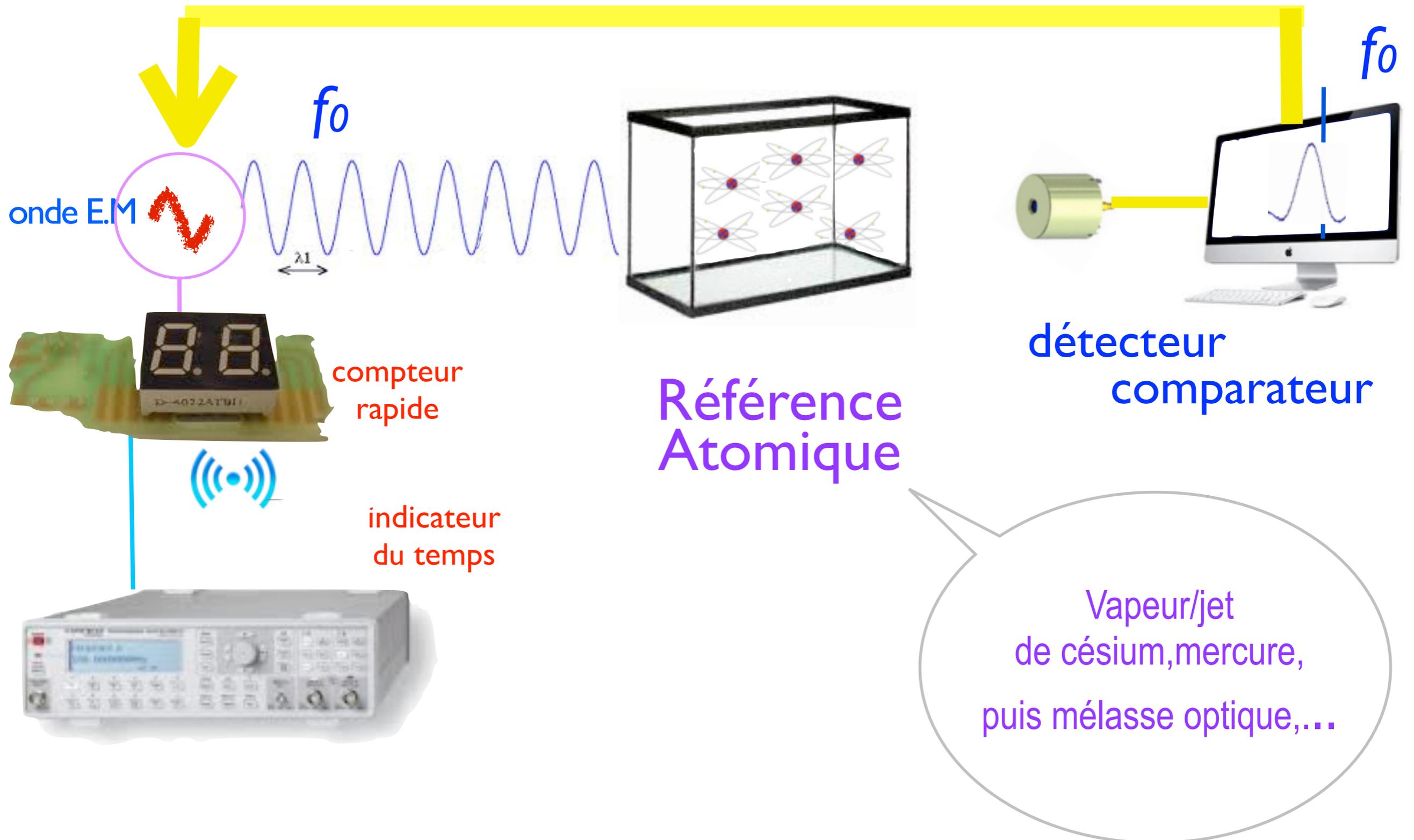
TicTac

compteur

indicateur
du temps



boucle de rétroaction



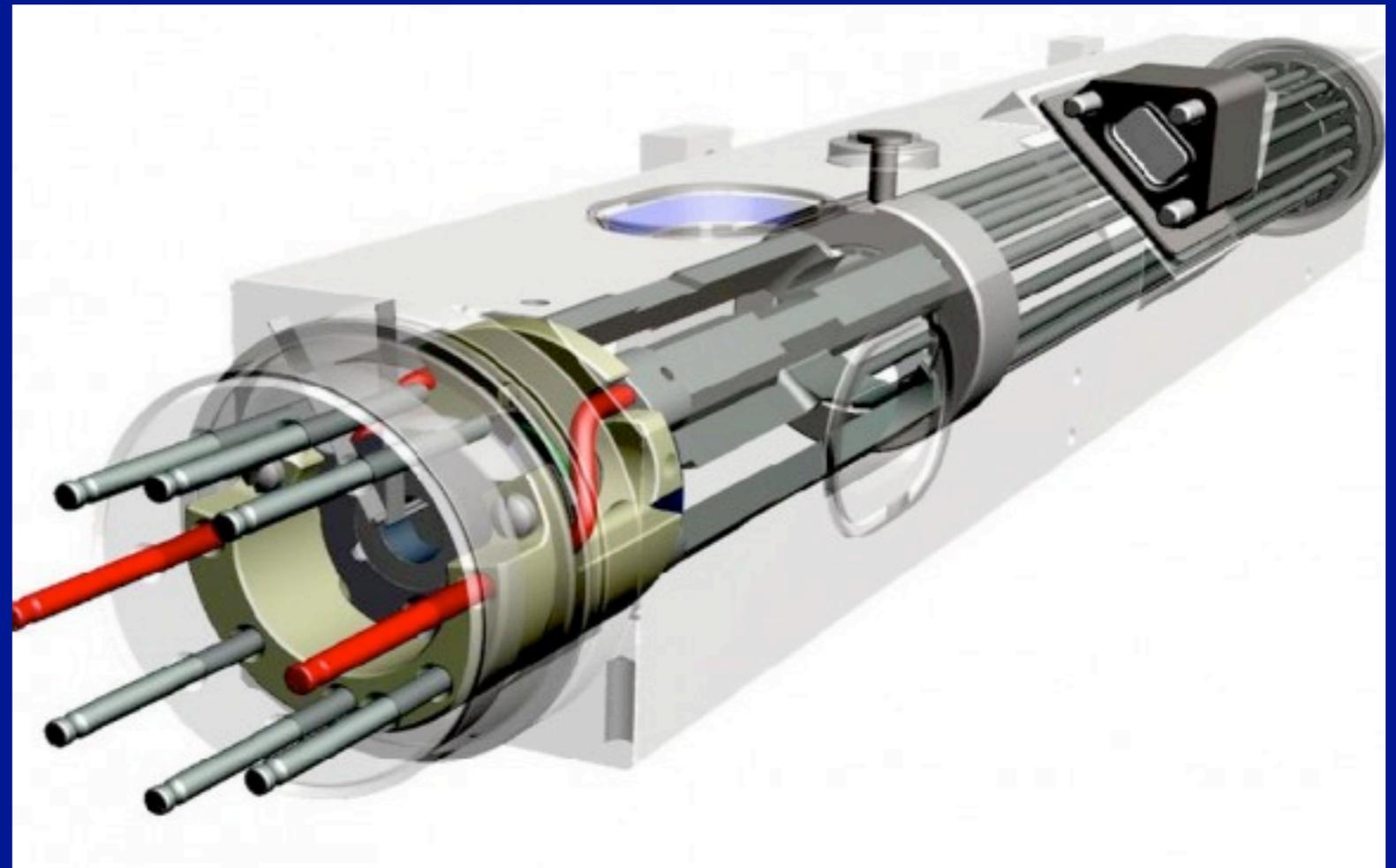
Horloge atomique à ion mercure

- performances comparables aux horloges à césium standard
- moins encombrante, pas de lasers
- embarquable sur satellites et pour les missions lointaines

NASA to Fly Atomic Clock to Improve Space Navigation

- piège linéaire

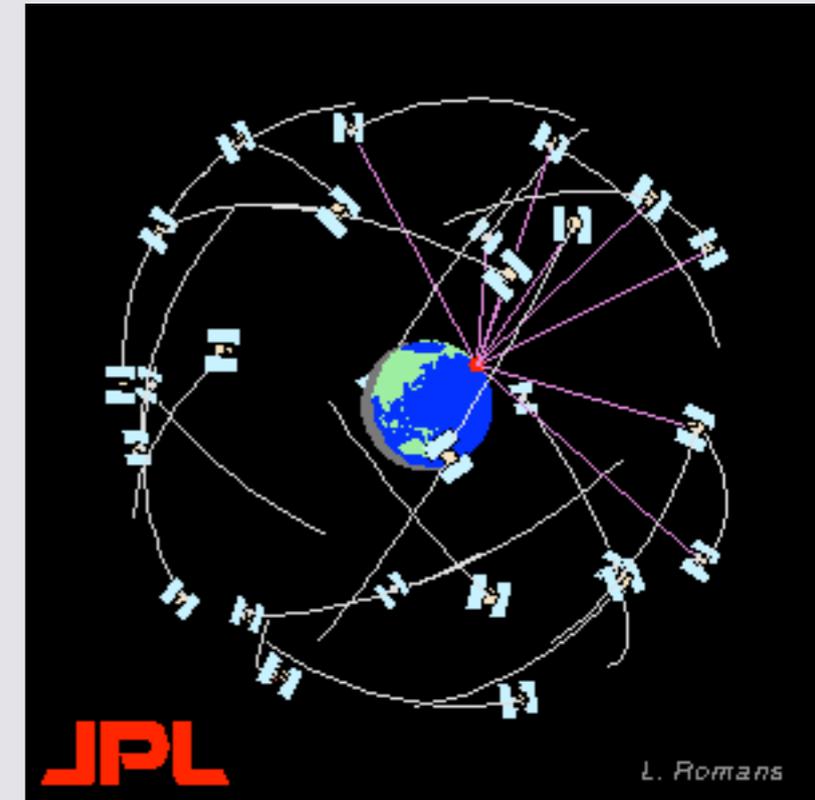
stabilité 10^{-9} sur 10j



évolution: du microonde vers l'optique: le «balancier» bat plus vite:
plus d'oscillations par seconde = plus précis

Pourquoi des horloges plus précises?

- phys fondamentale:
 - stabilité des constantes fondamentales
 - relativité générale, théorie des cordes
 - astronomie
 - spectroscopie haute résolution
 - interférométrie à très longue base
- applications
 - géodésie
 - veille sismique, mesure niveau mer
 - recherche pétrolière, étude des nappes phréatiques
 - carte champ magnétique

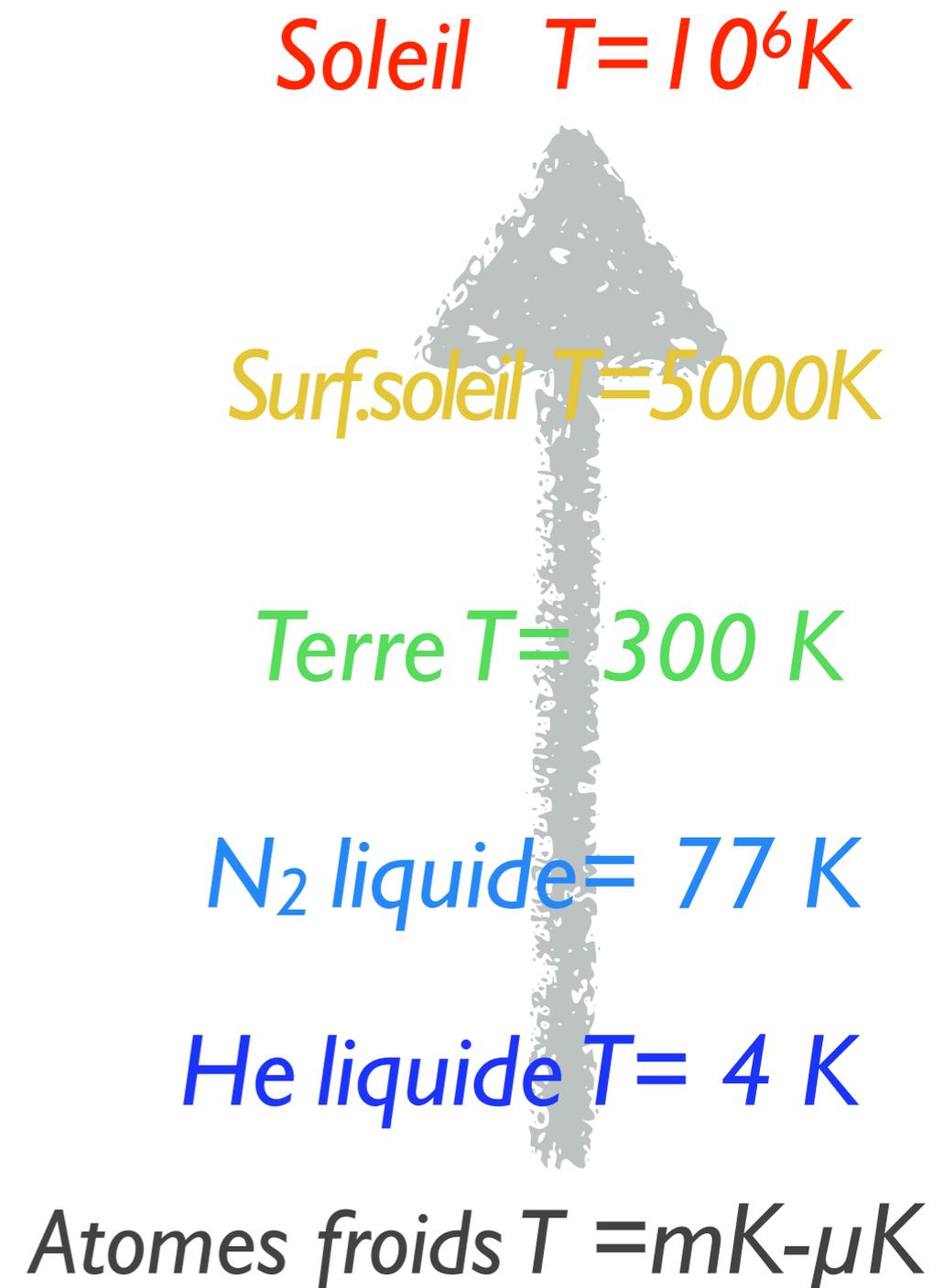


Précision!
Stabilité!

© proposition de nouvelles horloges atomiques dans le domaine optique, redéfinition de la seconde, et des autres unités qui y sont associées

Étapes majeures

1. énergie thermique $T = 100 - 10\,000\text{K}$
ou q.q. eV)
 2. refroidissement Doppler $T \approx \text{q.q. K} - \text{mK}$
 3. refroidissement sub Doppler $T = \mu\text{K}$,
«x» = nm
 4. physique quantique
- ◆ physique mésoscopique



CONTRÔLE DES IONS

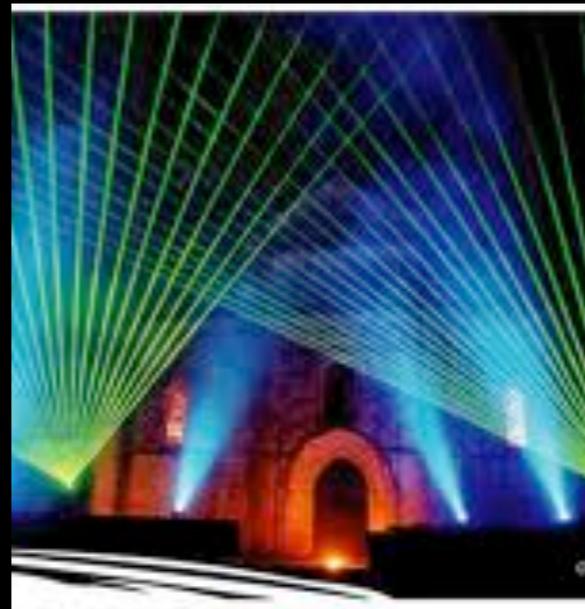
Grâce à la lumière cohérente du LASER

comment ?

- contrôle de l'énergie interne plus précise
- contrôle de l'énergie cinétique :

refroidissement laser
(nobel CCT)

- *on isole un ion unique en 1980*



caractéristiques

- ici laser continu
fréquence très bien définie
- accessibilité des longueurs d'onde

techniques complémentaires

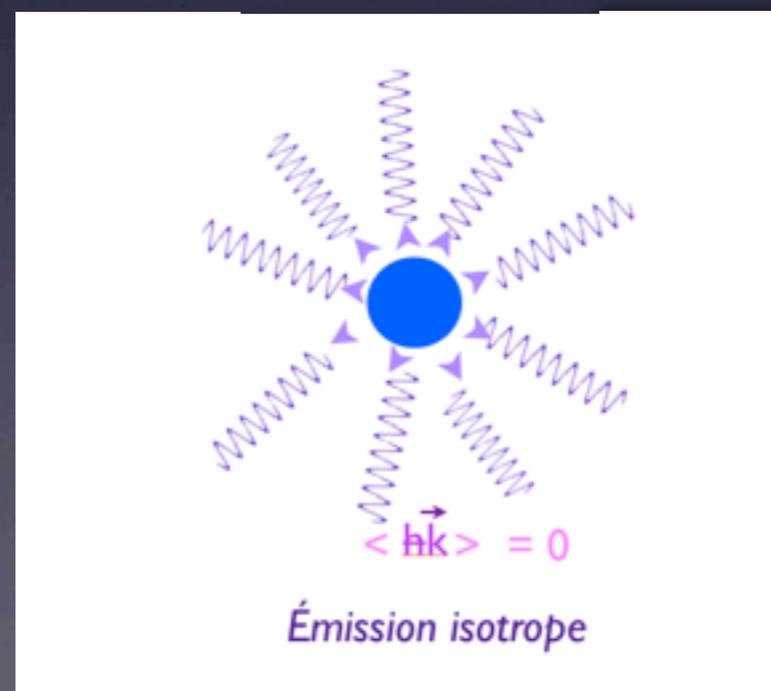
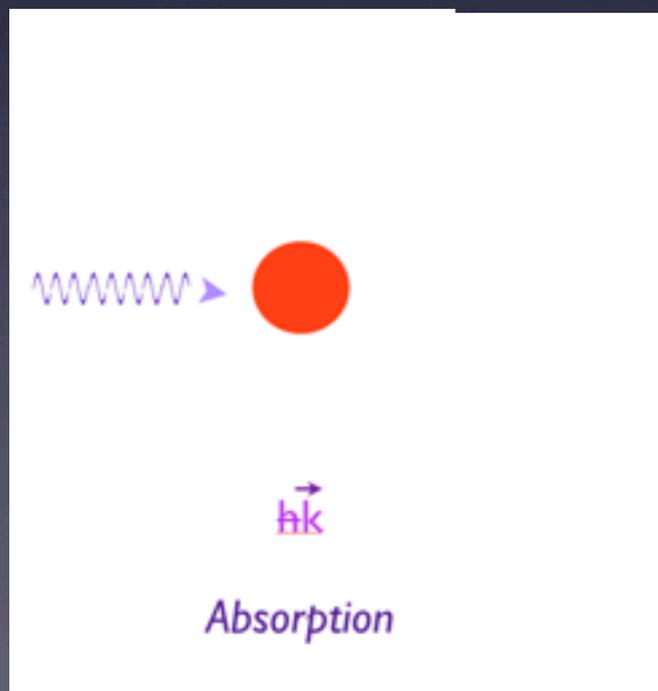
- façonnage de l'impulsion
- détection faible flux; comptage photons,
- imagerie sensible/dynamique, caméra CCD
- utilisation fibres optiques

Le refroidissement laser

pour appliquer les avantages incontestable du piégeage à la métrologie des fréquences au domaine des fréquences optiques

On excite l'atome sur une transition optique. Les photons laser absorbés par l'atome ont une énergie $E=h\nu$ et une quantité de mouvement $p=h\nu / c$. Le transfert de cette quantité de mouvement aux atomes donne naissance à une force radiative s'exerçant sur les atomes et permettant de les ralentir et de les refroidir

proposition simultanée 1975 sur les atomes neutres par Hänsch et Schawlow et sur les ions piégés par Wineland et Dehmelt

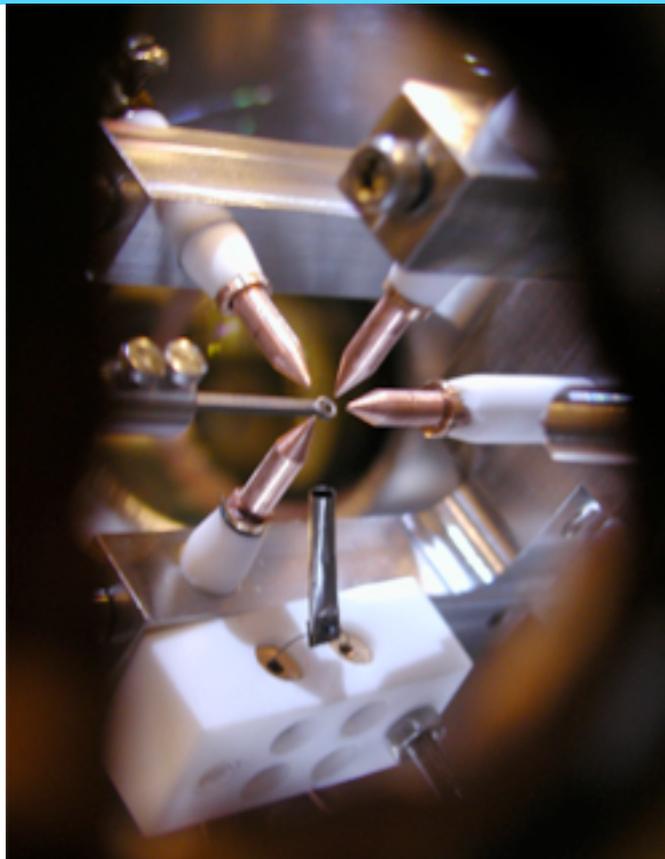


Ralentissement à chaque processus élémentaire : **q.q. m/s**

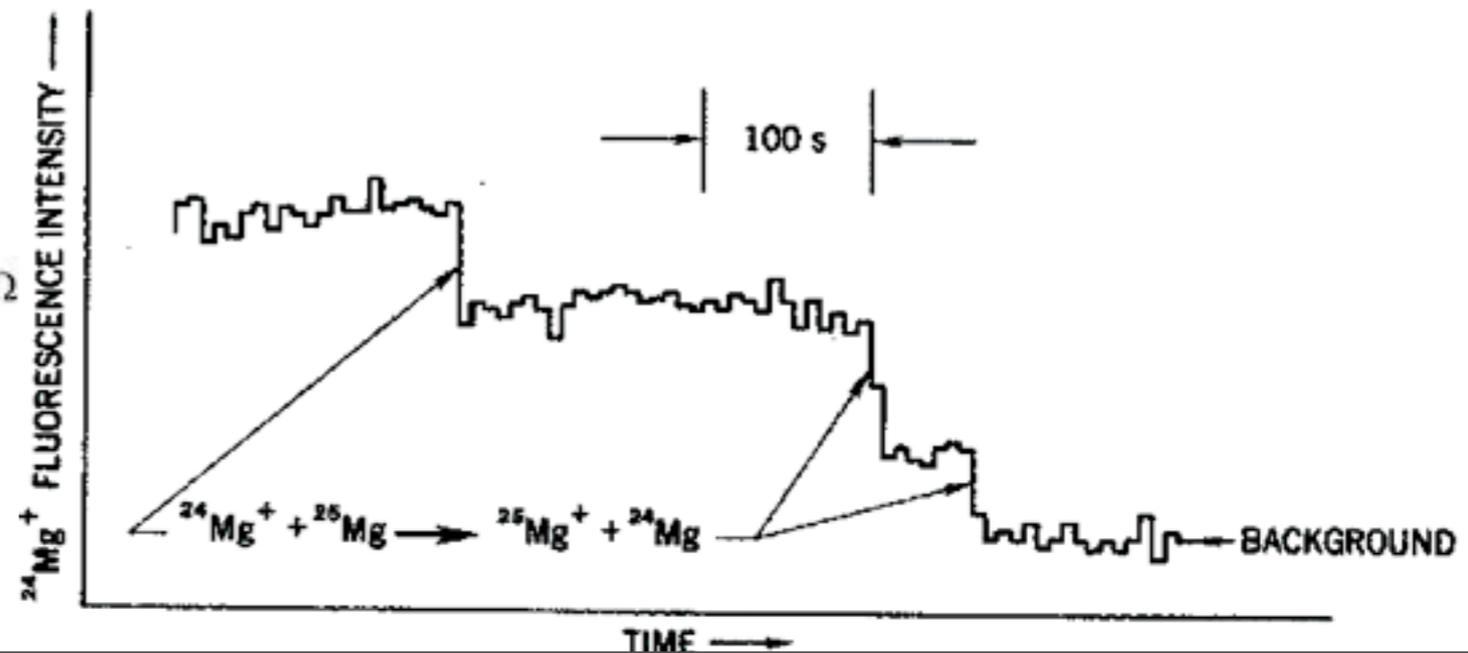
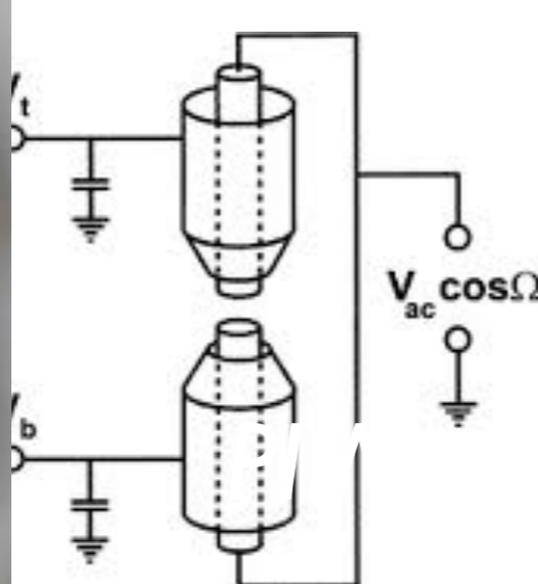
Temp. limite atteinte en **q.q. μ s.**

$T_{\text{Doppler}} \simeq \text{mK}$

Création et détection d'un ion unique, fluorescence et imagerie



- La manipulation laser est plus aisée dans de petits volumes,
- on utilise des pièges millimétriques.
- L'atome a un mouvement de q.q. microns. La forme des électrodes «quadrupolaires est moins cruciales: on utilise des géométries plus faciles à usiner et permettant l'entrée du faisceau laser et l'observation de la fluorescence.



Localized visible Ba⁺ mono-ion oscillator

W. Neuhauser, M. Hohenstatt, and P. E. Toschek

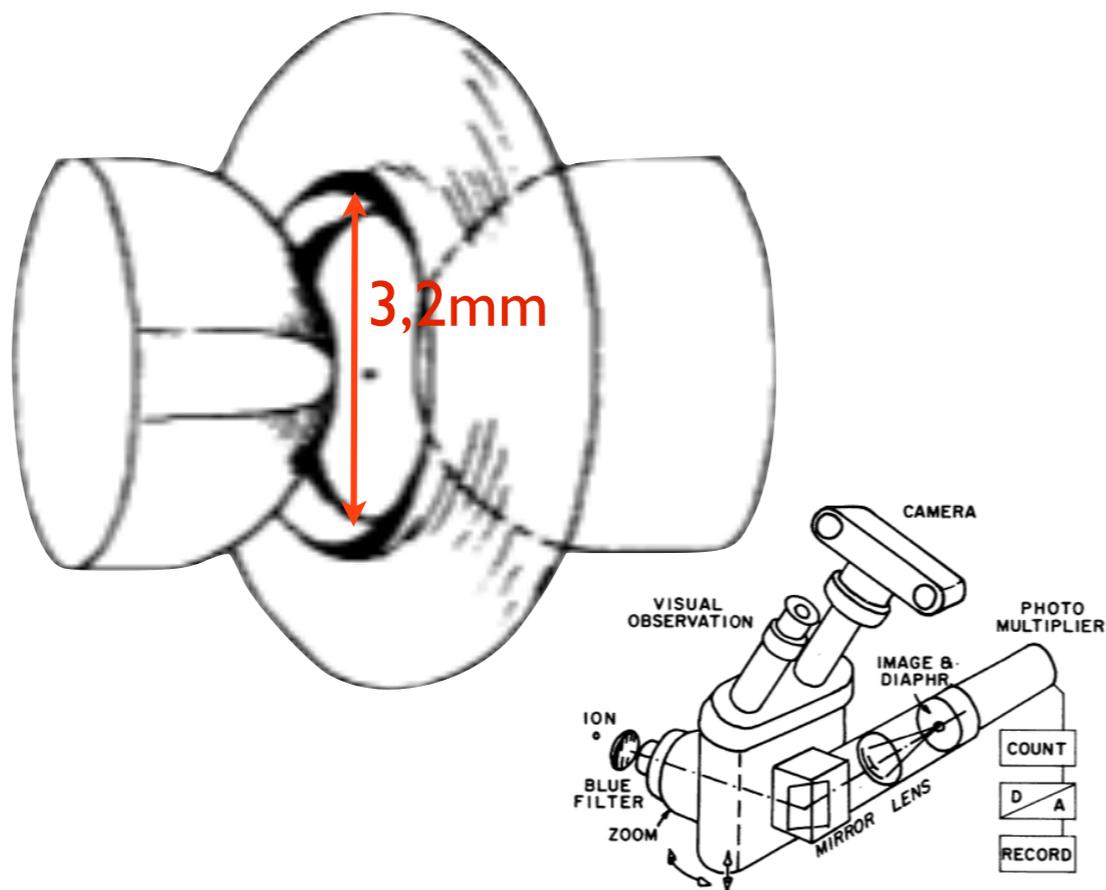
Institut für Angewandte Physik I der Universität Heidelberg, D-69 Heidelberg, Federal Republic of Germany

H. Dehmelt

Department of Physics, University of Washington, Seattle, Washington 98195

(Received 11 September 1979)

An individual barium ion, continuously observed by laser fluorescence, has been isolated in a Paul rf quadrupole trap at room temperature. By optical sideband cooling its microscopically measured image has been reduced in thickness to $\sim 2 \mu\text{m}$ in the object plane, the diffraction limit. Estimated ion temperatures reached are $T_i \simeq 10$ to $< 36 \text{ mK}$. With cooling, the ion could be held indefinitely, without cooling $\sim 30 \text{ s}$. In the future the technique seems capable of attaining kinetic temperatures $\sim 10^{-8} \text{ K}$, much lower than realized so far by other means, with corresponding far-reaching implications.

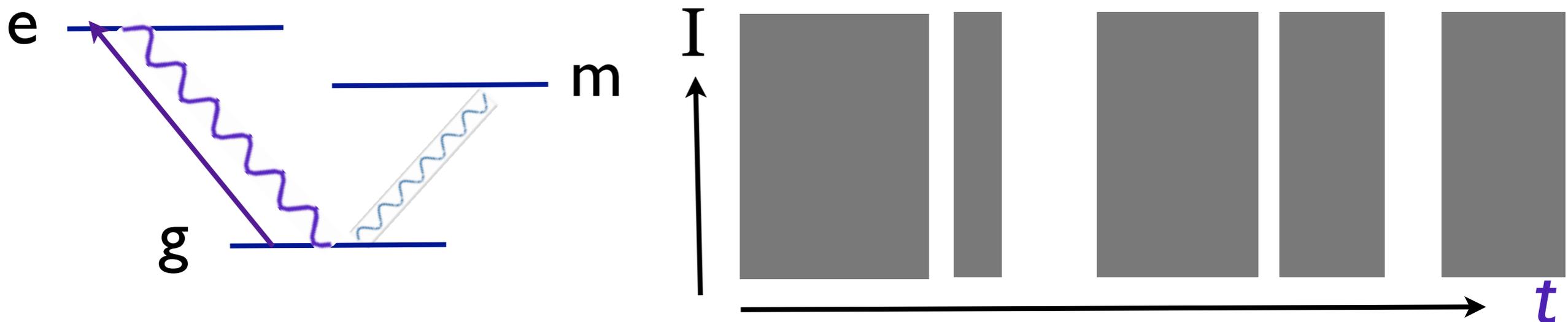


Première photo d'un atome isolé Heidelberg 1978

Ion piégé unique

signature de SQL: les sauts quantiques

- ◆ l'atome change d'état de manière discontinue (modèle de Bohr)
sauts entre niveaux d'énergie interne
- ◆ on sonde cette propriété avec une lumière **en résonance** avec l'atome
- ◆ on observe la réponse d'un système isolé : émission de lumière ou non, contrairement à un signal continu avec une assemblée d'atomes



Quantum Jumps of a Single Ion

Quantum Jumps I (1990 release)

Des résultats spectaculaires ont été obtenus sur des ions piégés et refroidis. Plusieurs équipes, notamment H Dehmelt, P. Toschek et D. Wineland ont pu observer un ion unique piégé grâce à la lumière de fluorescence que cet ion réémet sous l'effet de l'irradiation laser qui le refroidit. **Un nouveau type de spectroscopie** est en train de naître consistant à opérer sur un seul ion, un seul atome pratiquement immobile dans une petite région de l'espace et qu'on peut observer aussi longtemps qu'on le désire en ayant rendu négligeables toutes les perturbations liés à l'effet Doppler ou à des collisions contre une paroi ou d'autres atomes.

Claude Cohen-Tannoudji, BUP, n679 p265 env.1985

Étapes majeures

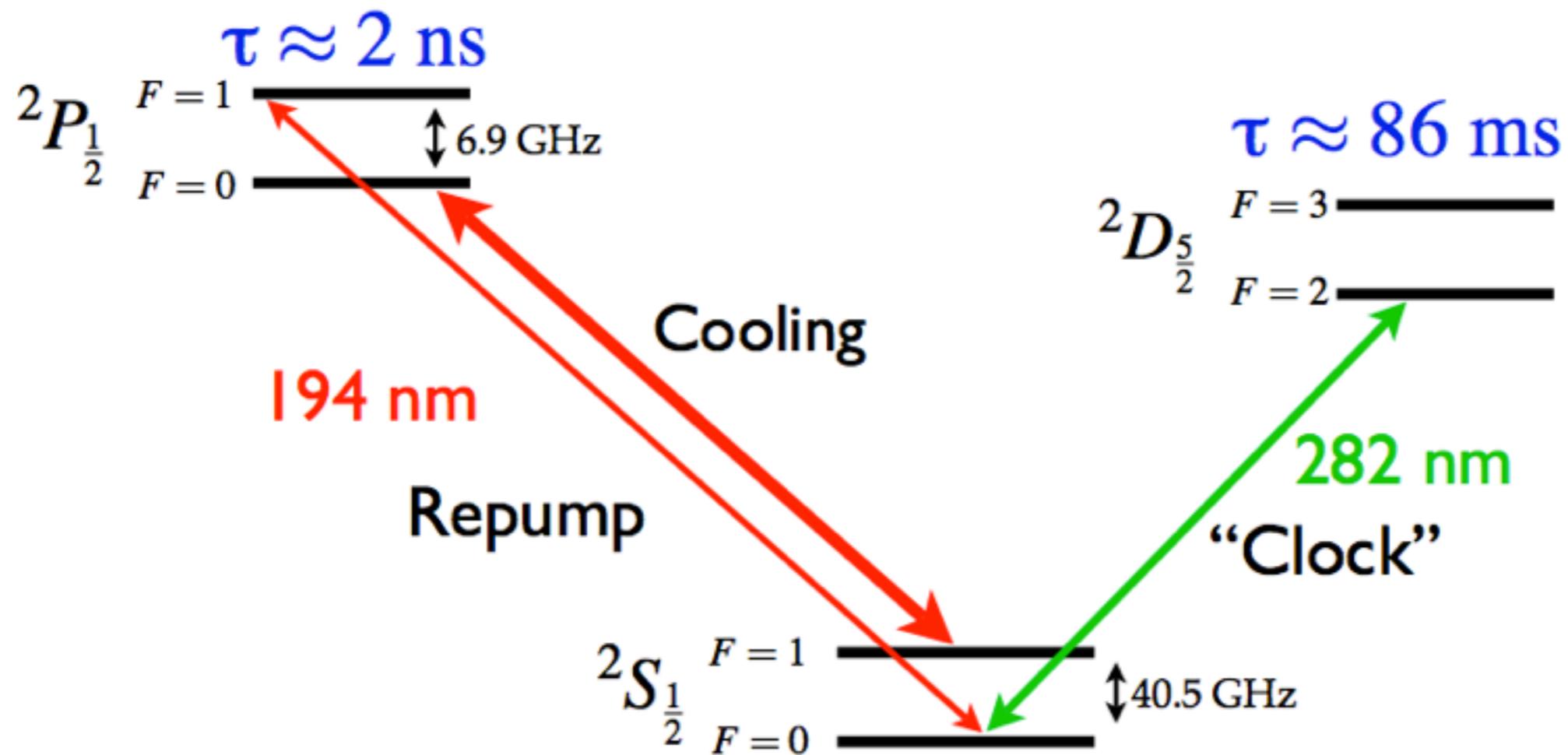
1. énergie thermique
 2. refroidissement Doppler
 3. refroidissement sub Doppler
 4. physique quantique
- ◆ physique mésoscopique

vers un contrôle encore plus précis

- contrôle de la position/température
 - ▶ autres méthodes de refroidissement mettant à profit le mouvement oscillant dans le puits de potentiel harmonique
*refroidissement Raman ou par **bande latérale*** (Dehmelt et Wineland, 1975, etc.)
- mesure de la fréquence
 - ▶ technique du **Peigne de fréquence** (T. Hänsch, J. Hall, Th. Udem)
- contrôle des excitations lasers
 - ▶ stabilisation remarquable - **Pound-Drever-Hall** - inférieure au Hz: J. Bergquist/ J. Hall (PN 2005) pour suivre la transition atomique de référence ultra étroite
 - ▶ façonnage des impulsions lasers p.ex. fabriquer des pulses définis à des fractions de fréquences de Rabi (\approx MHz)

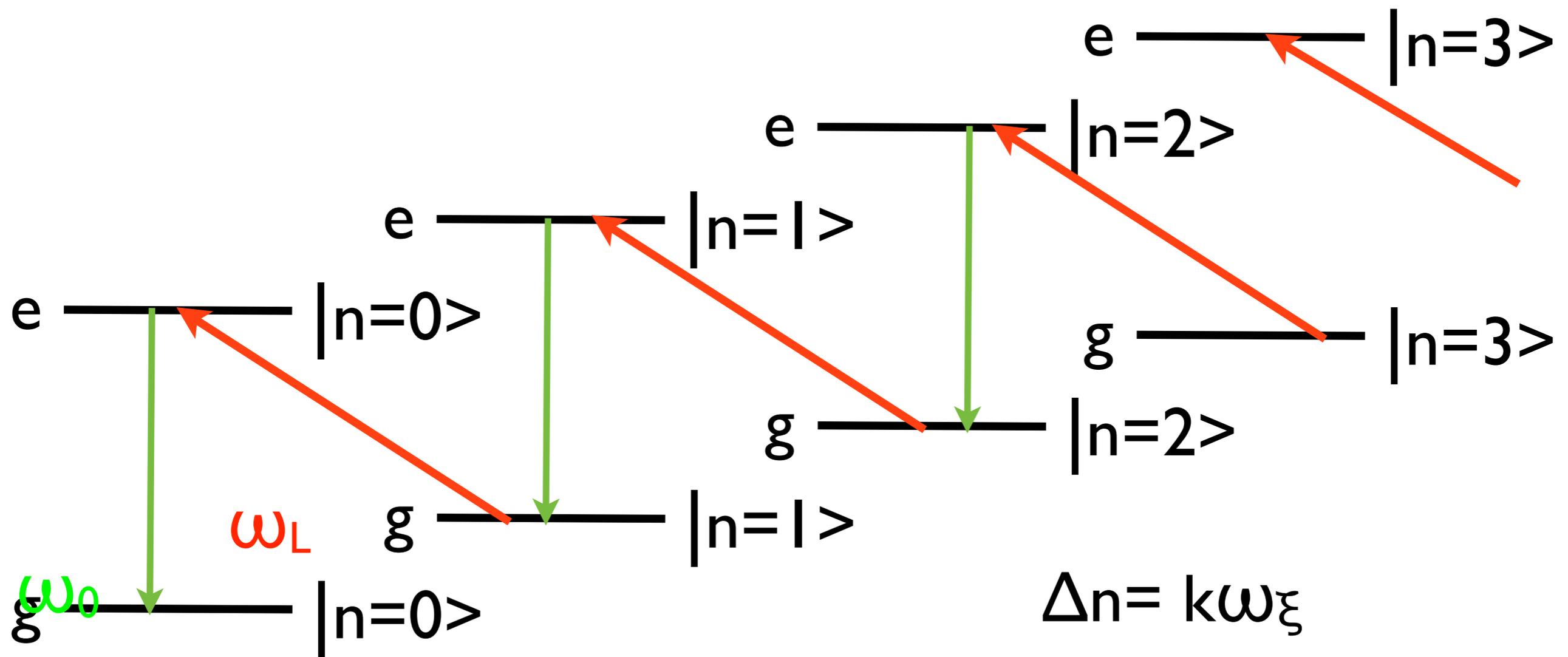
Horloge atomique à ion unique

$^{199}\text{Hg}^+$ Energy Levels



- Atomic line $Q \approx 1.5 \times 10^{14}$

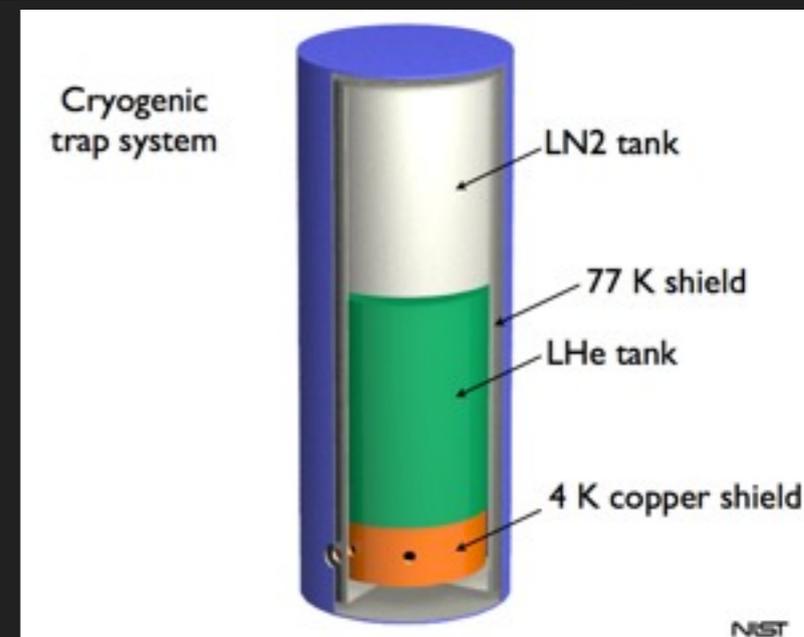
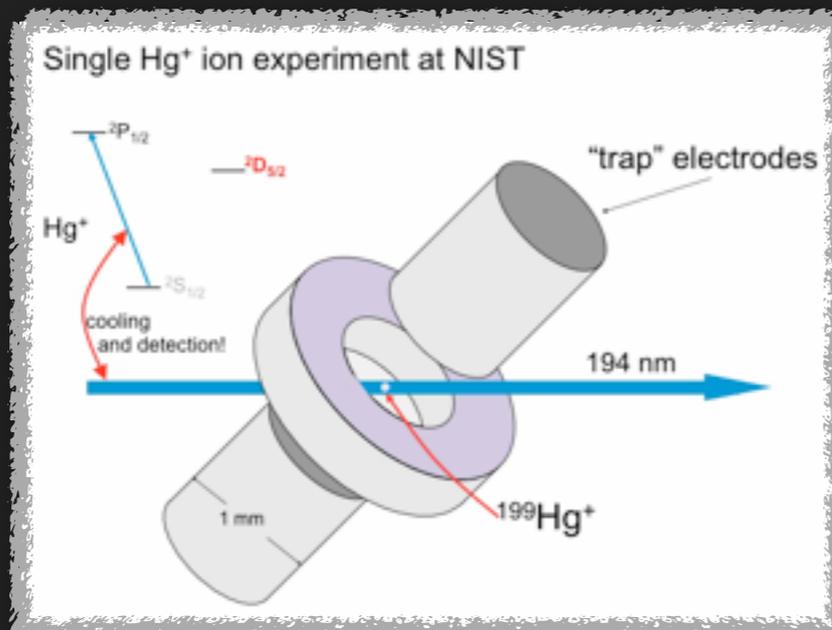
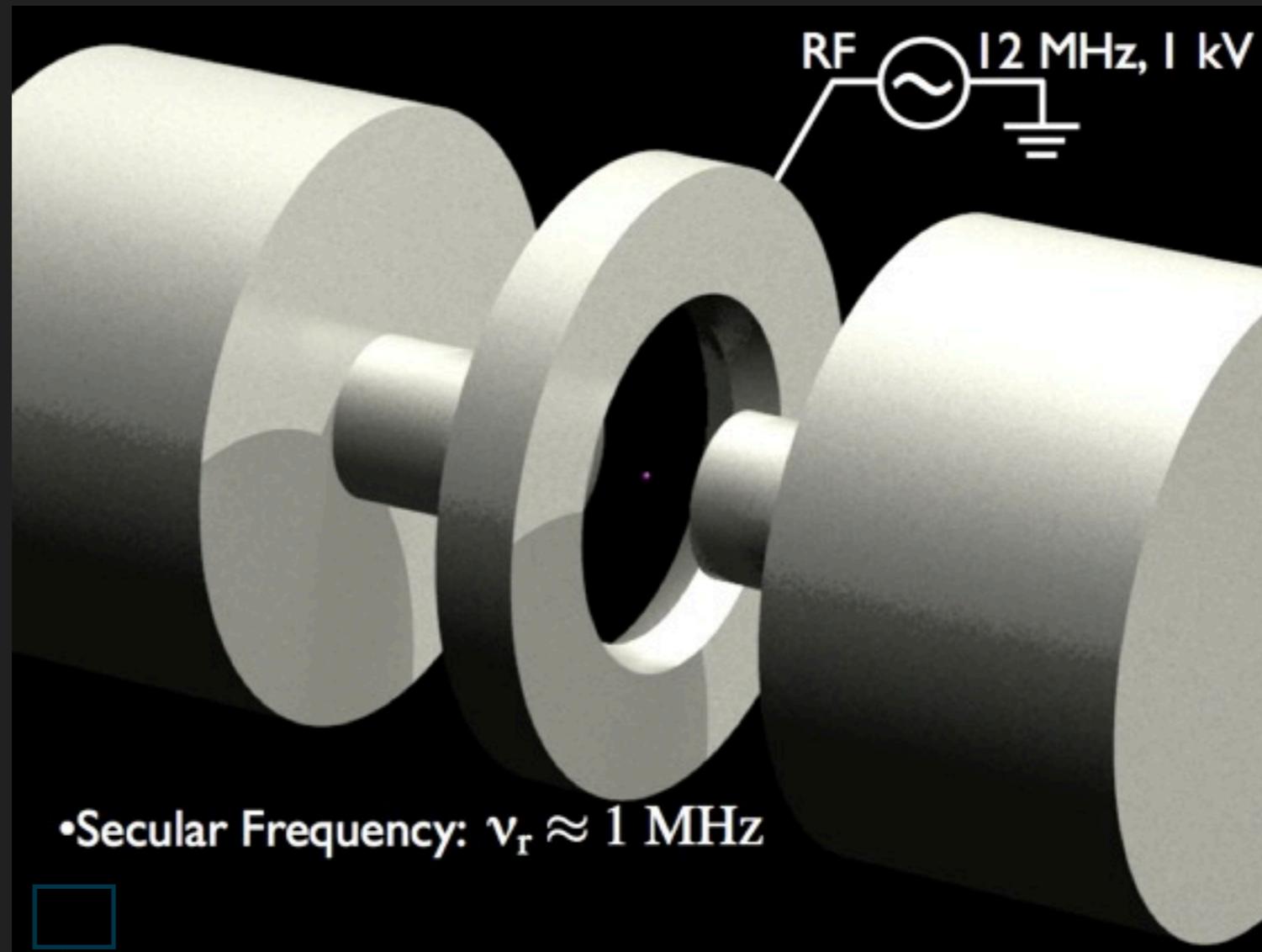
Refroidissement par bande latérale



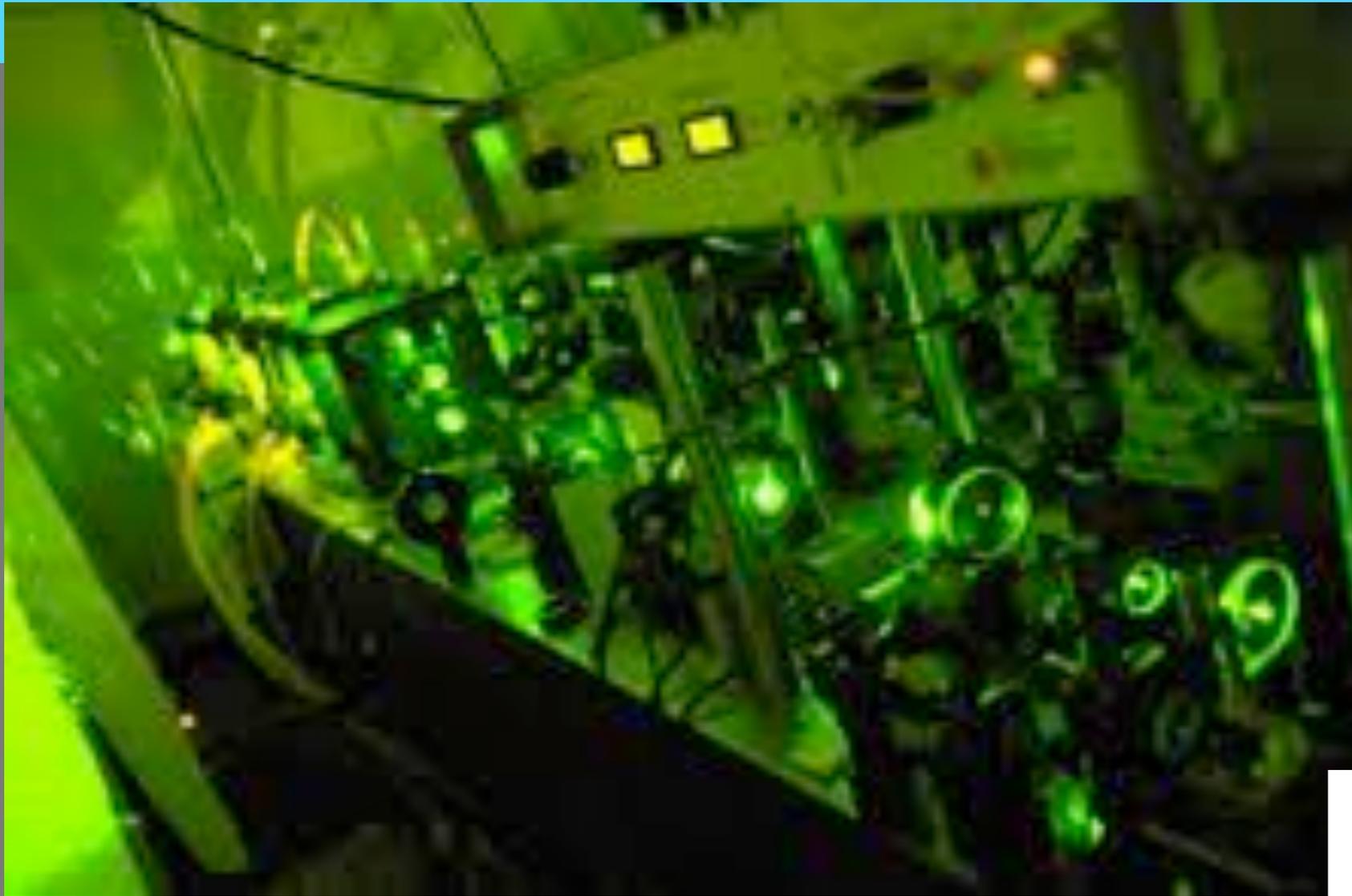
première bande latérale rouge: $\omega_L = \omega_0 - \omega_\xi$

expériences préliminaires sur un nuage de Ba^+ par Dehmelt en 78

Horloge à ion mercure



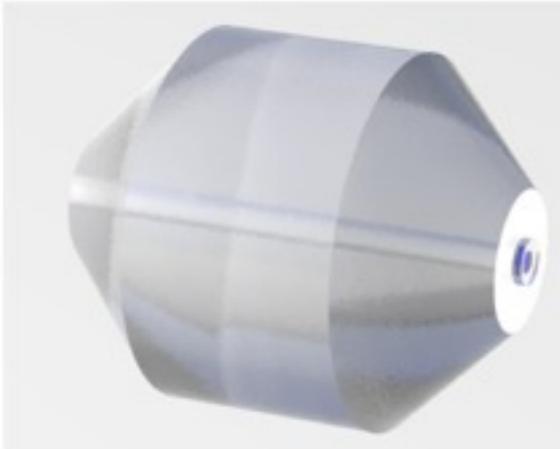
Stabilisation extrême de laser



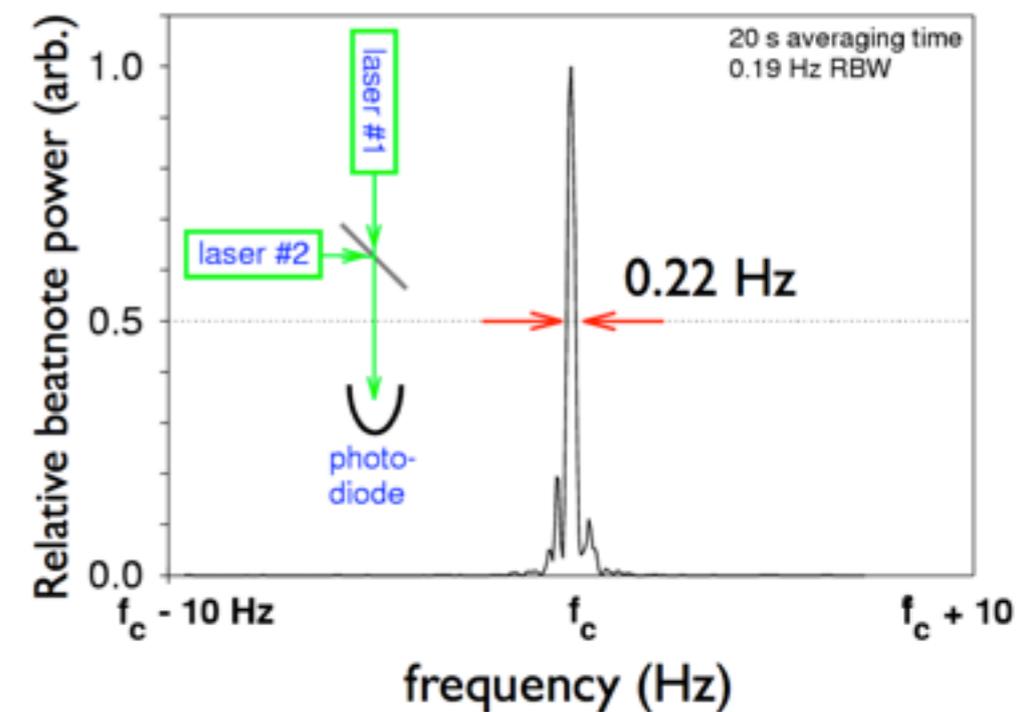
J. Bergquist,
NIST, Boulder

Isolated Cavities

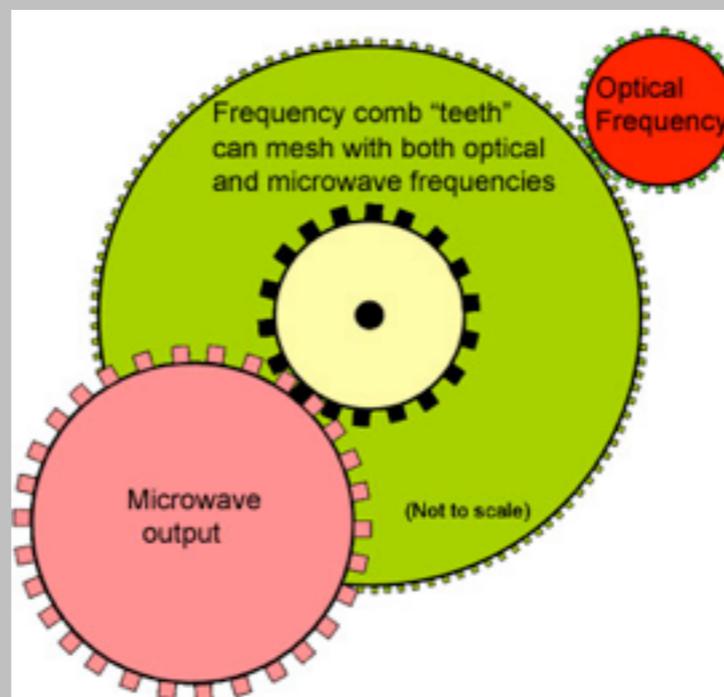
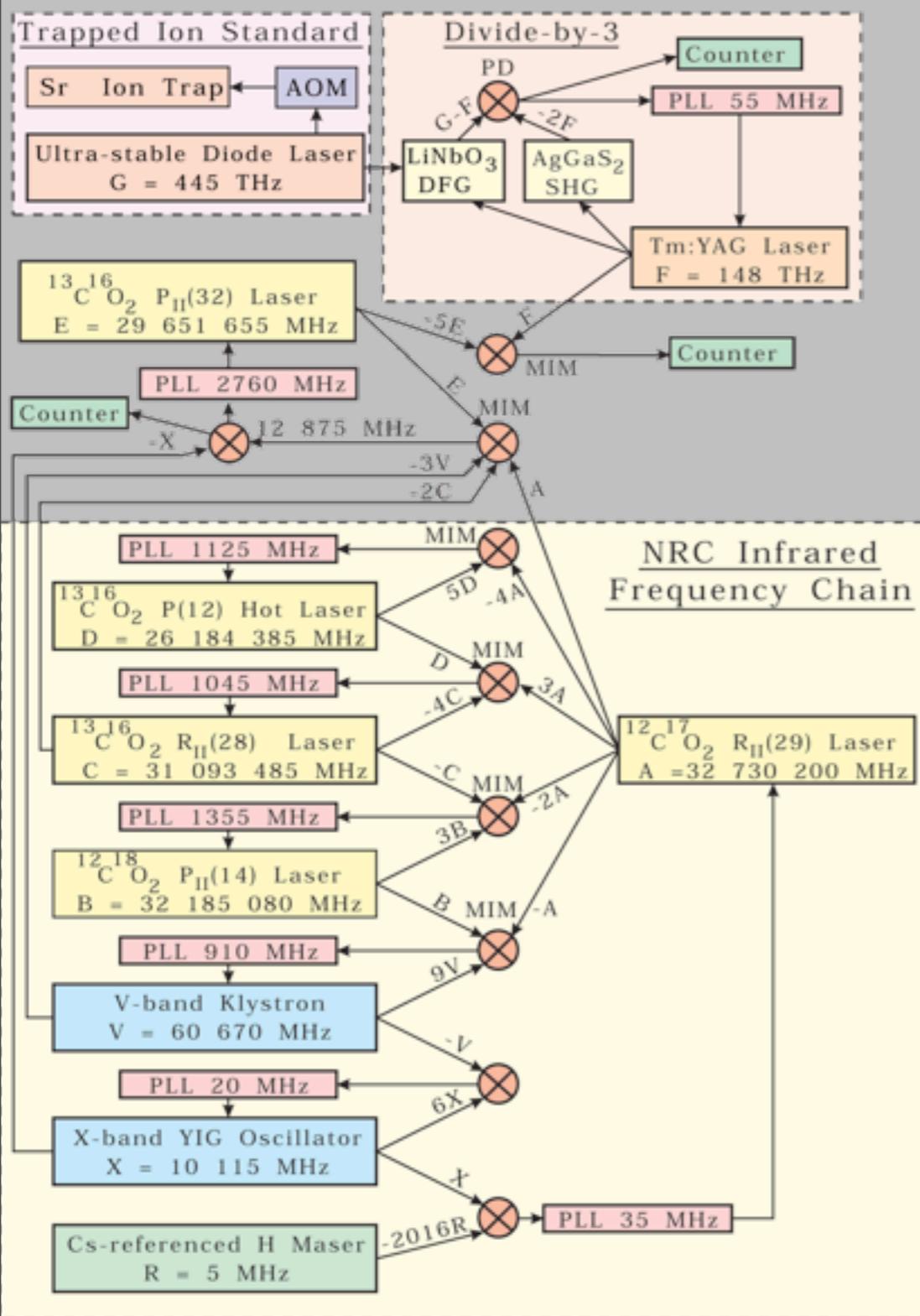
- ULE Spacer
25 cm
- $F \approx 200\,000$



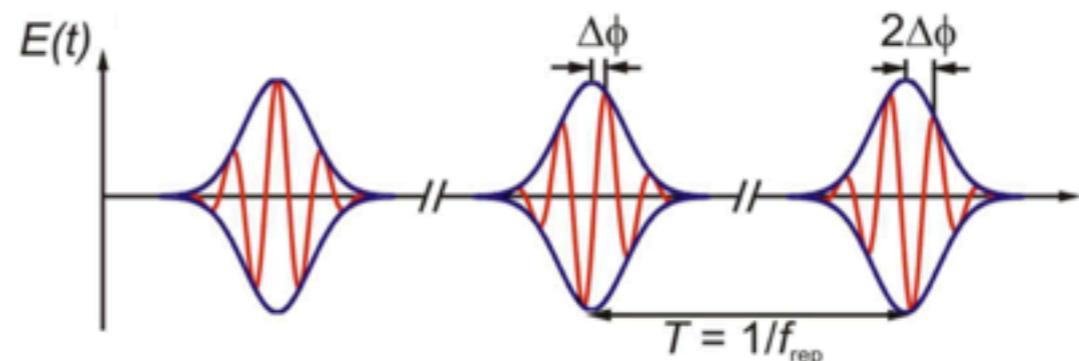
stabilized to independent cavities



MESURER LES FRÉQUENCES OPTIQUES

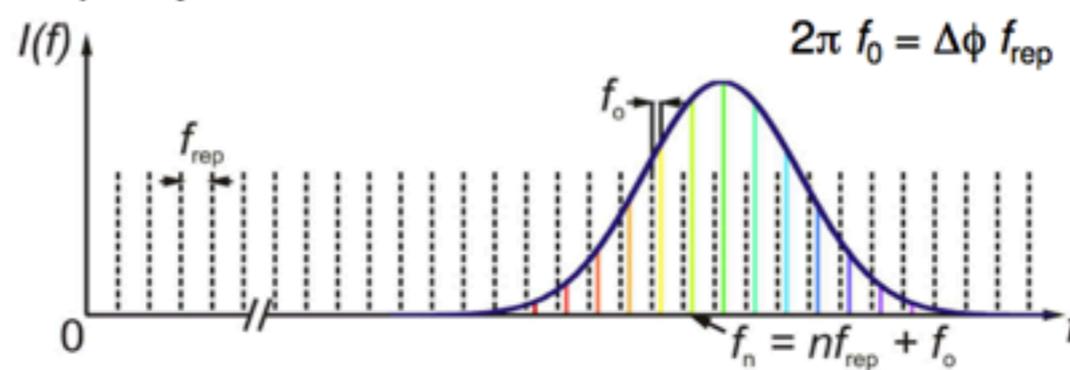


Time domain



Repetitive train of ultrashort pulses

Frequency domain



Broad comb of equally spaced optical frequencies

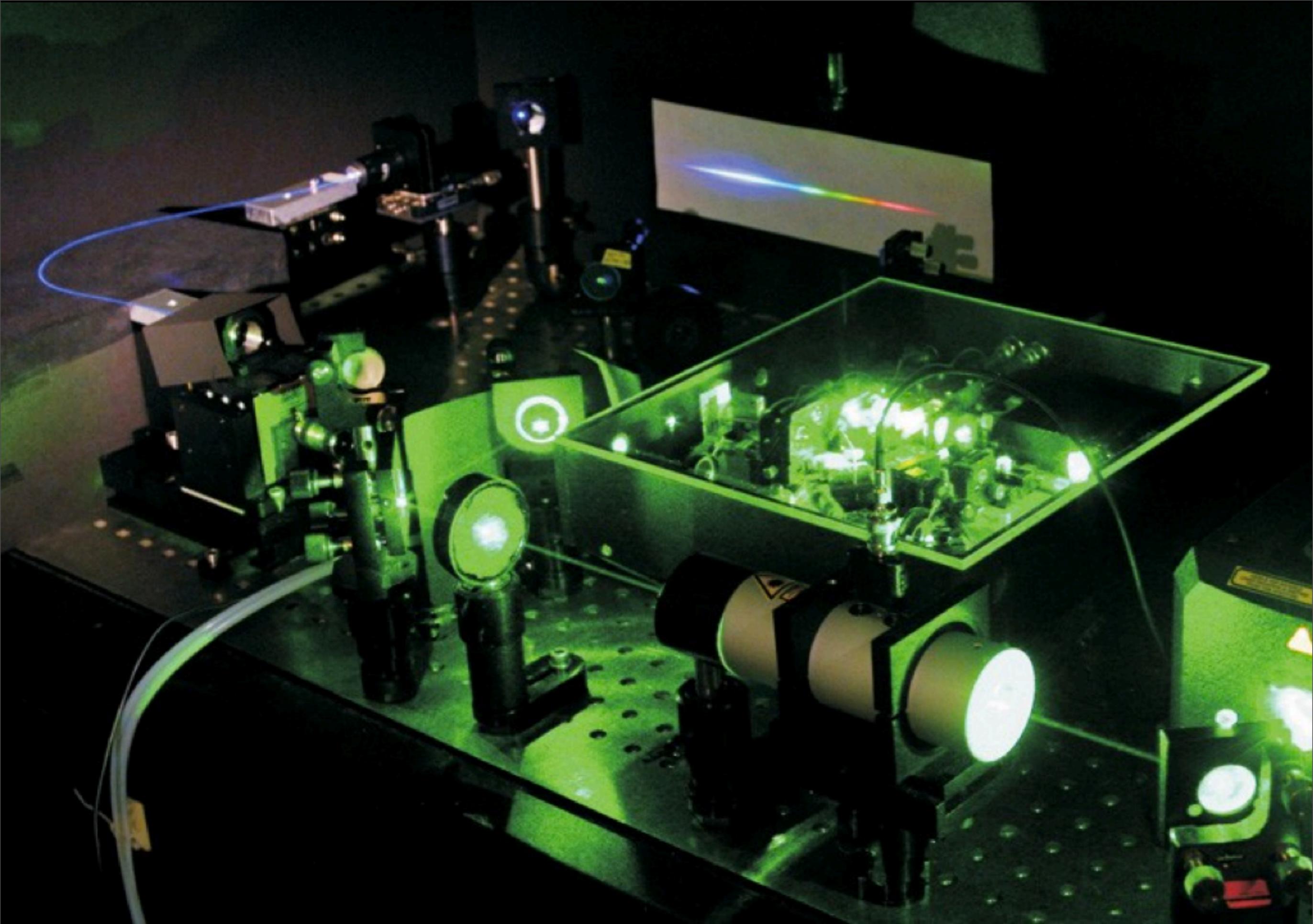
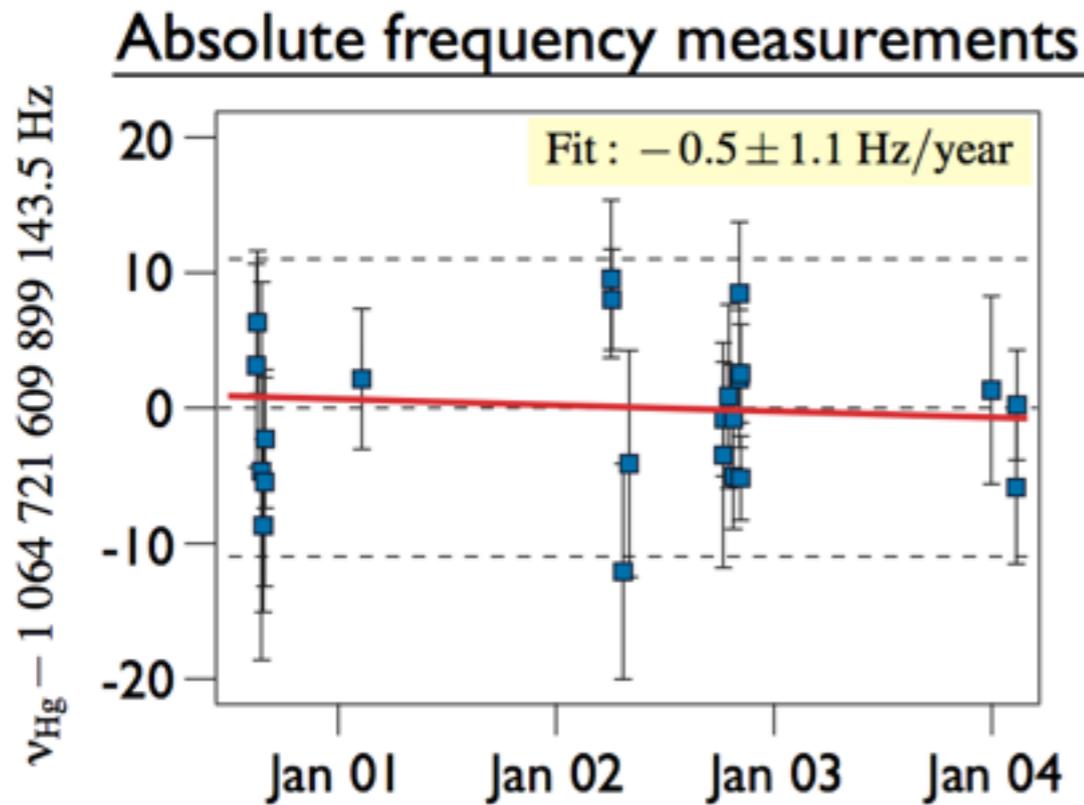


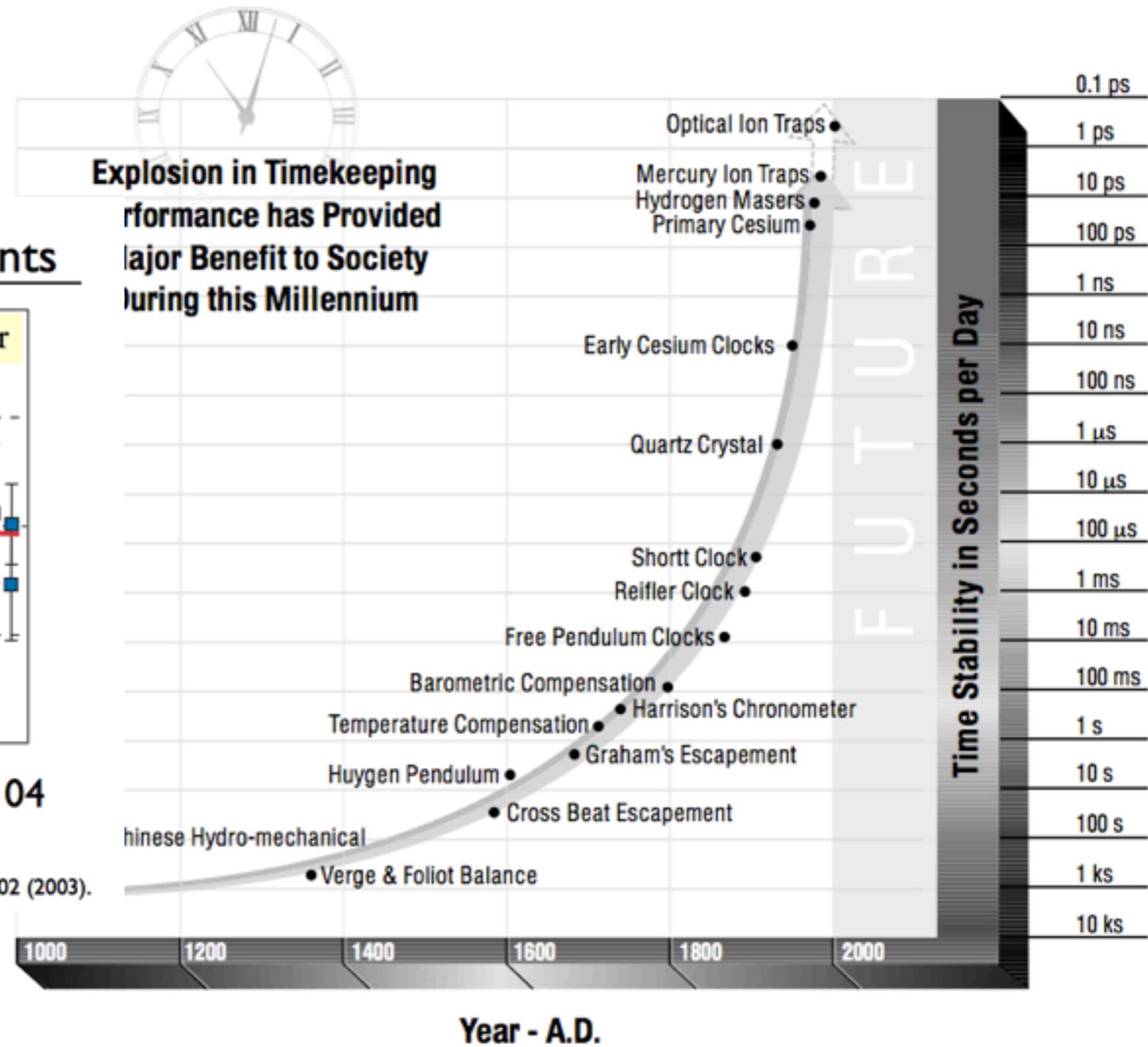
Image: Max Planck Institute of Quantum Optics

Performances



(Statistical error bars only)

S. Bize et al., PRL **90**, 150802 (2003).



Variation of fundamental constants

	Timescale	Precision
Quasar absorption spectra	10^{10} yr $z = 0.5 - 3.5$	10^{-16} yr $^{-1}$
Oklo natural fission reactor	2×10^9 yr $z = 0.2$	10^{-17} yr $^{-1}$
Laboratory spectroscopy	10 yr $z = 10^{-10}$	10^{-17} yr $^{-1}$

See e.g., J.-P. Uzan, *Rev. Mod. Phys.* **75** 403-455 (2003)

$$\frac{\dot{\alpha}}{\alpha}$$

Étapes majeures

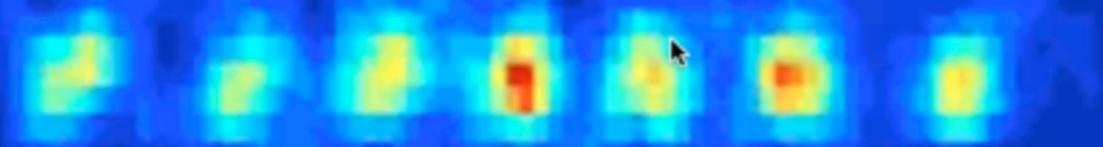
1. énergie thermique
 2. refroidissement Doppler $T \approx \text{q.q. K}$
 3. refroidissement sub Doppler
 4. physique quantique
- ◆ physique mésoscopique

systemes de particules piégées

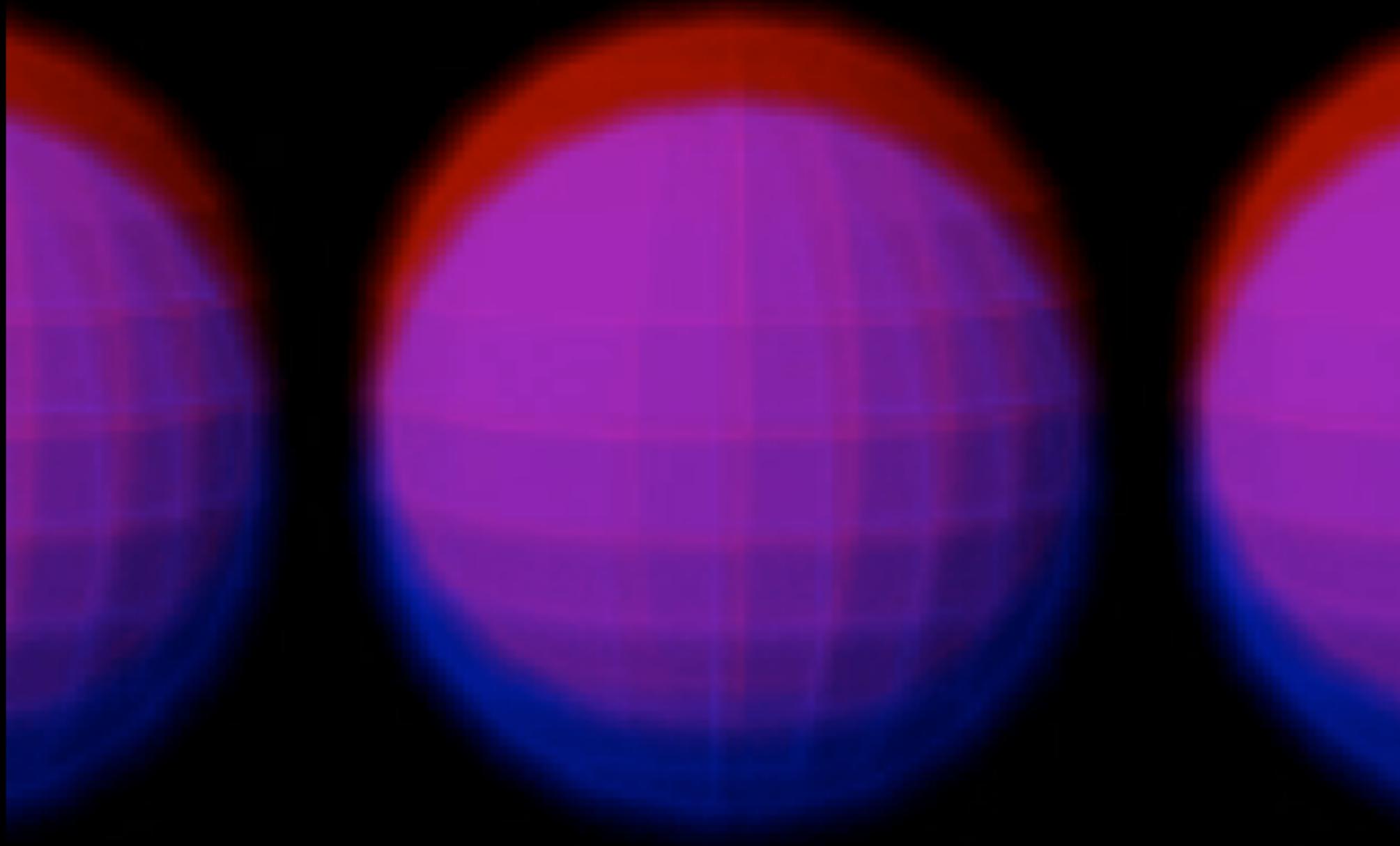
- soit un ion unique
- soit un ensemble d'ions:
- les ions ne sont pas indépendants, mais organisés en cristal de coulomb , dont la forme dépend de celle des électrodes:
pièges linéaires: chaînes d'ions

à très basses températures la répulsion coulombienne l'emporte sur l'agitation thermique et l'effet des forces électriques: on obtient un cristal

modes communs de vibration



R. Blatt et al. Univ
Innsbruck, 2004

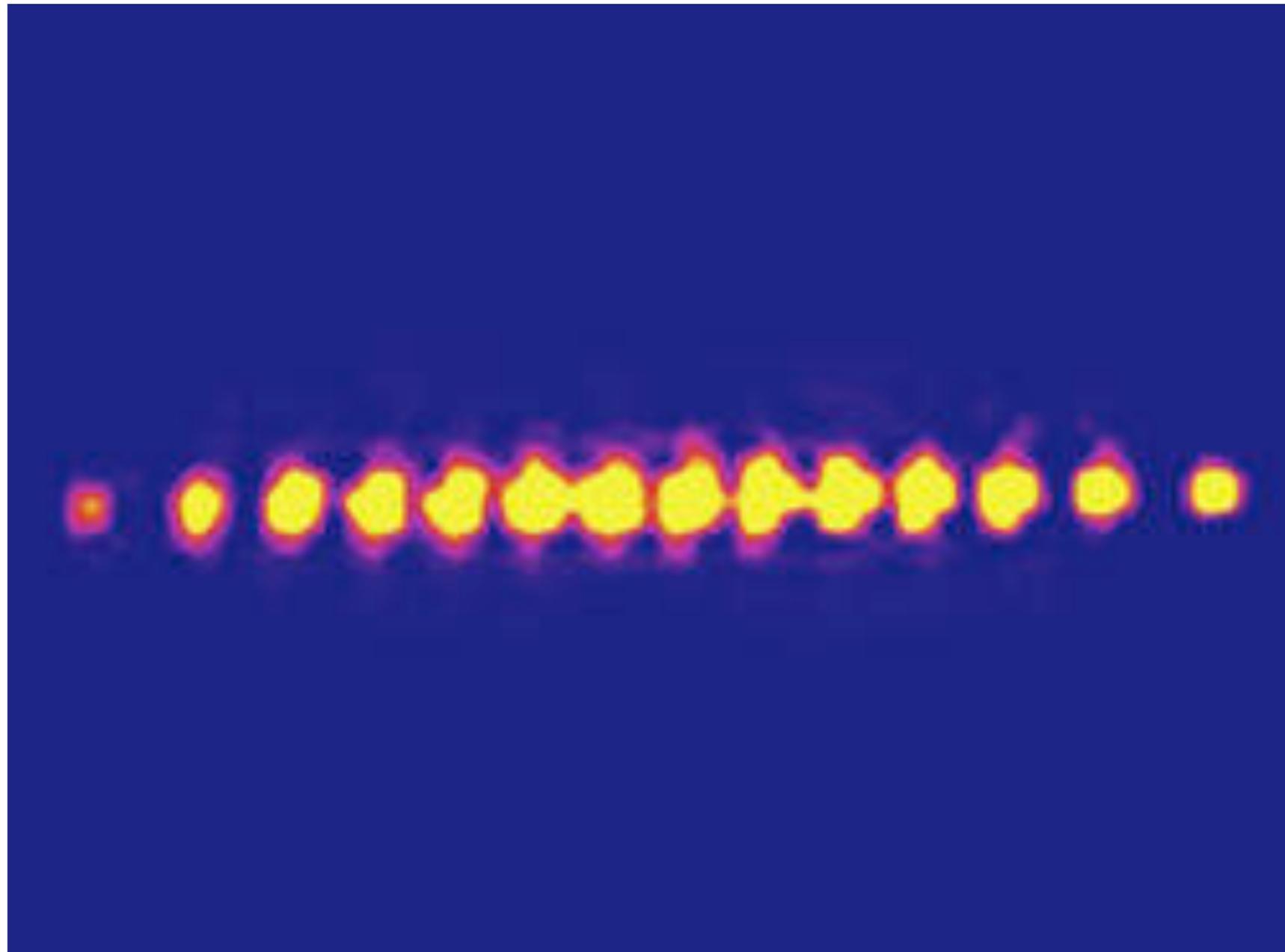


NIST- Nature **438** 639(2005)

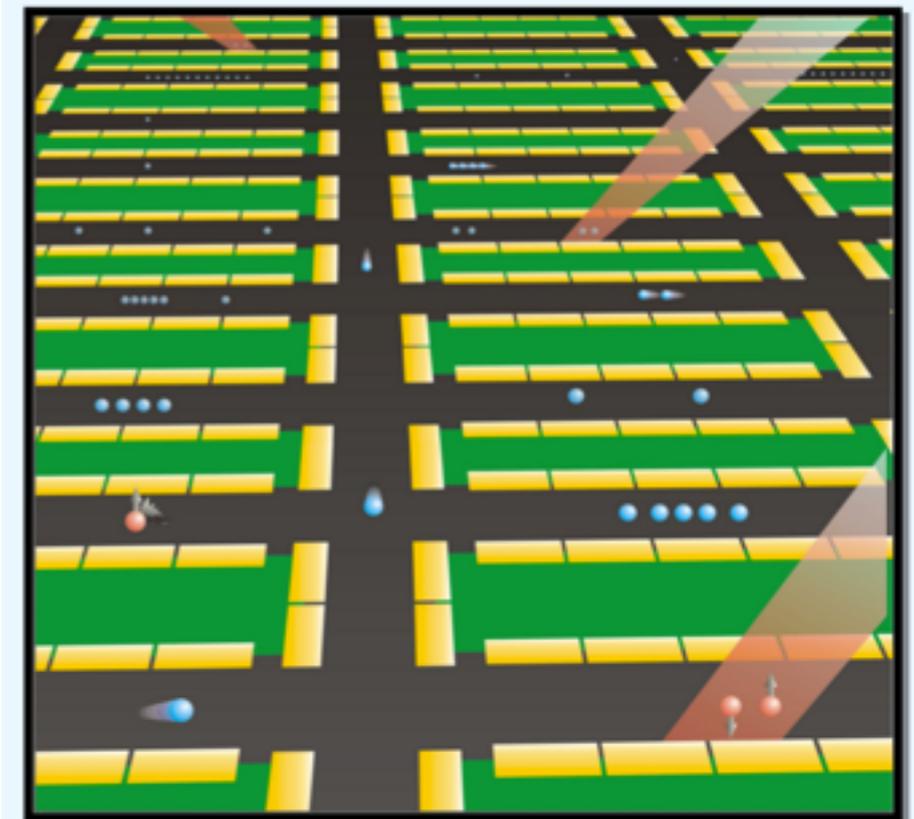
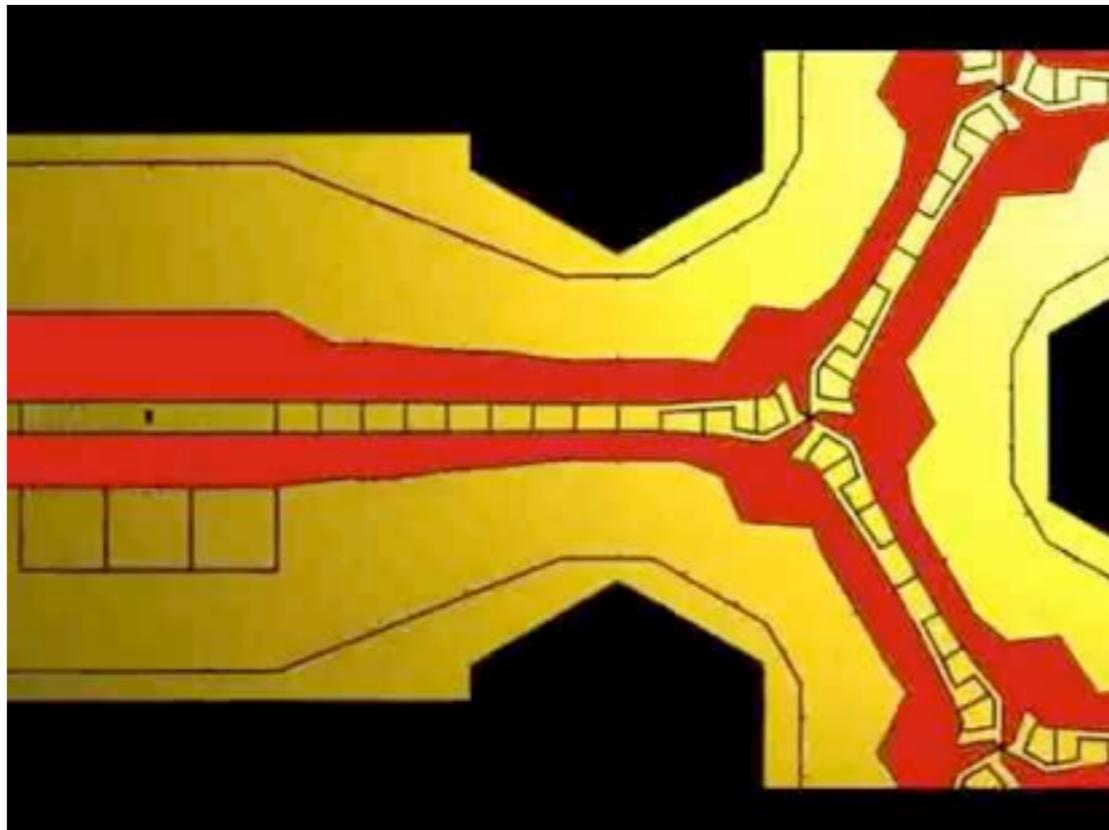
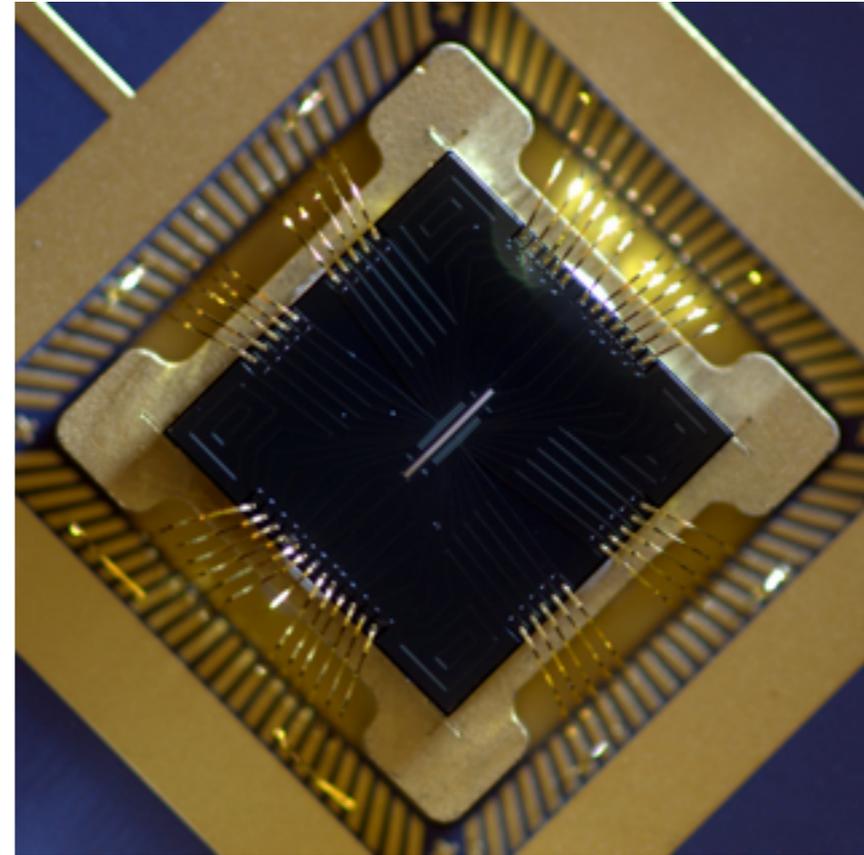
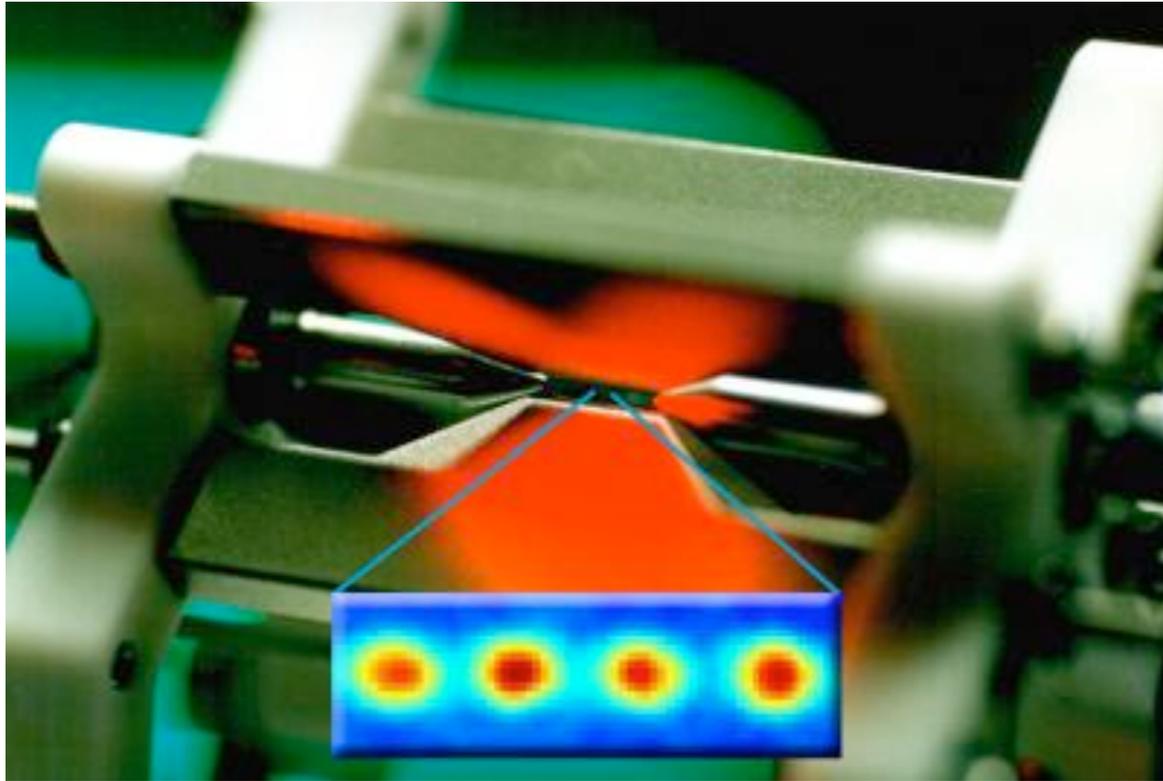
D. Leibfried¹, E. Knill¹, S. Seidelin¹, J. Britton¹, R. B. Blakestad¹, J. Chiaverini¹[†], D. B. Hume¹,
W. M. Itano¹, J. D. Jost¹, C. Langer¹, R. Ozeri¹, R. Reichle¹ & D. J. Wineland¹

qubits et ordinateurs q.

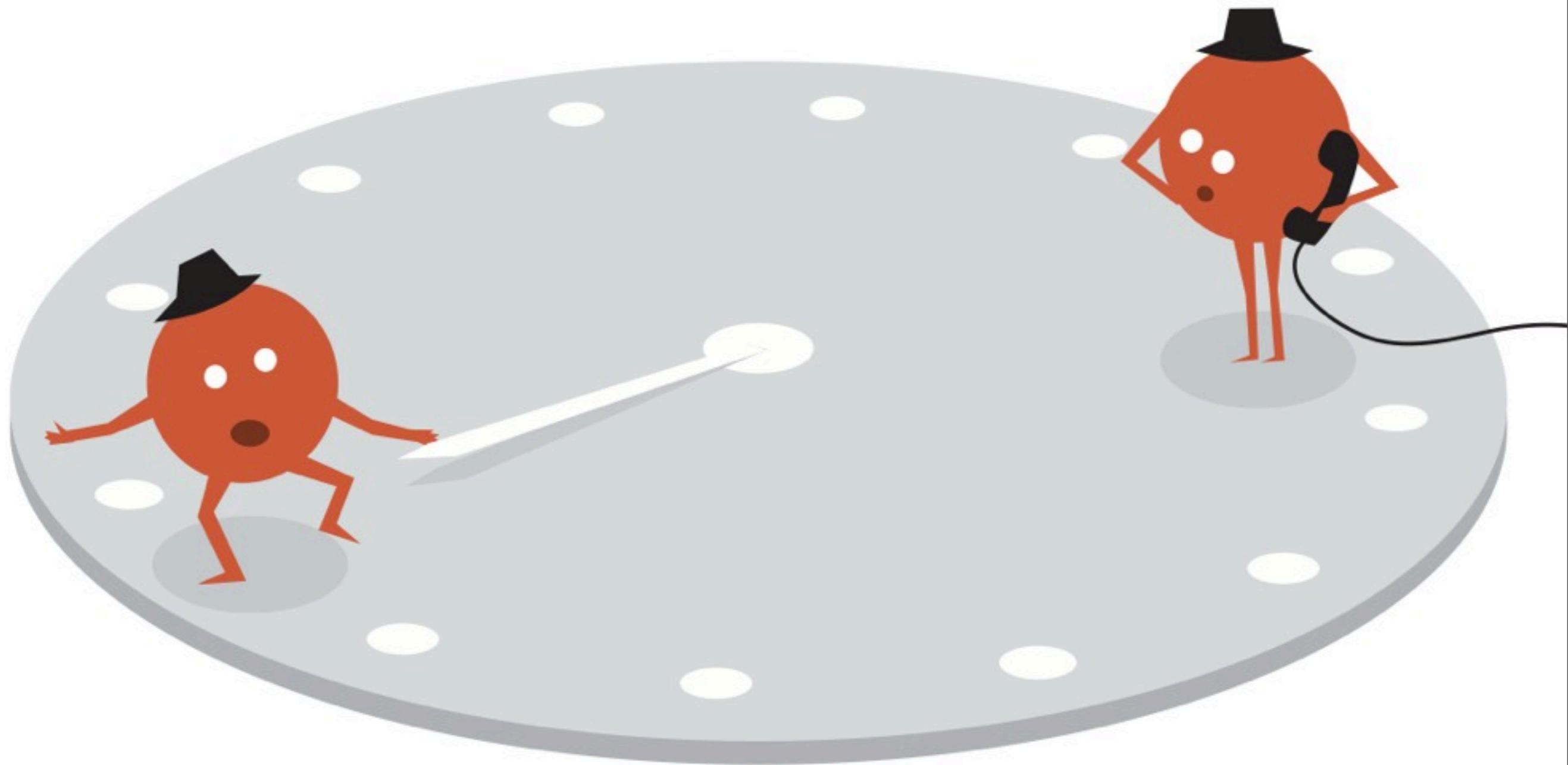
- écriture/lecture
- dédié à des calculs spécifiques
- des simulations Q. ou à la cryptographie quantique
- pas pour demain, mais on sait intriquer jusqu'à 14 ions (Innsbruck- 2011)



trapologie



Horloge logique



Nobel Doc -2012

Quantum Logic Spectroscopy

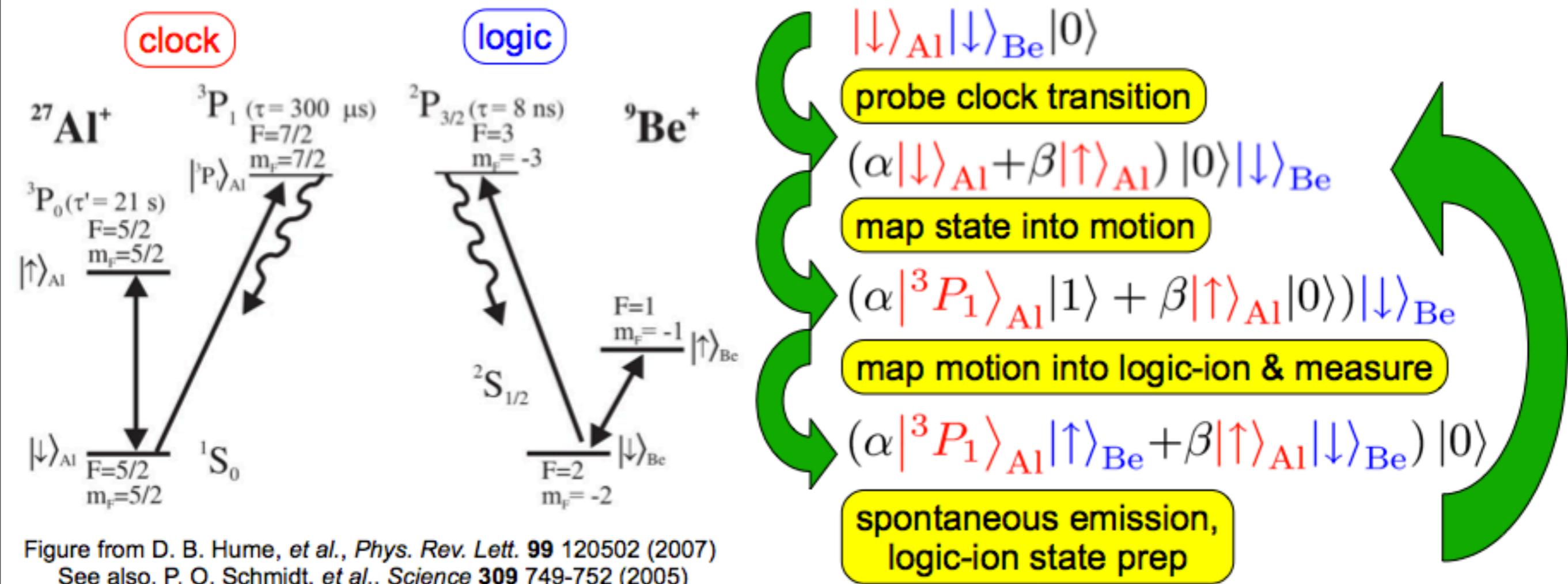


Figure from D. B. Hume, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **99** 120502 (2007)
 See also, P. O. Schmidt, *et al.*, *Science* **309** 749-752 (2005)

- Co-trap “clock” and “logic” ion species
- Use motion as an information bus
- Quantum nondemolition measurement

CYCLE D'INTERROGATION

- ▶ Refroidissement par bande latérale vers le niveau fondamental de l'ion Be^+
- ▶ Interrogation de la transition d'horloge de l'ion Al^+
- ▶ Transfert de l'information sur l'état interne de Al^+ dans le mode commun
- ▶ Transfert de l'information sur le mode commun dans l'état interne de Be^+
- ▶ Lecture de l'état interne de Be^+

Pulse $\pi/2$ sur bande rouge ou bleue intrique qubit et vibration

Pulse π sur bande rouge ou bleue copie état qubit sur vibration

cours Collège de F., S. Haroche 2006

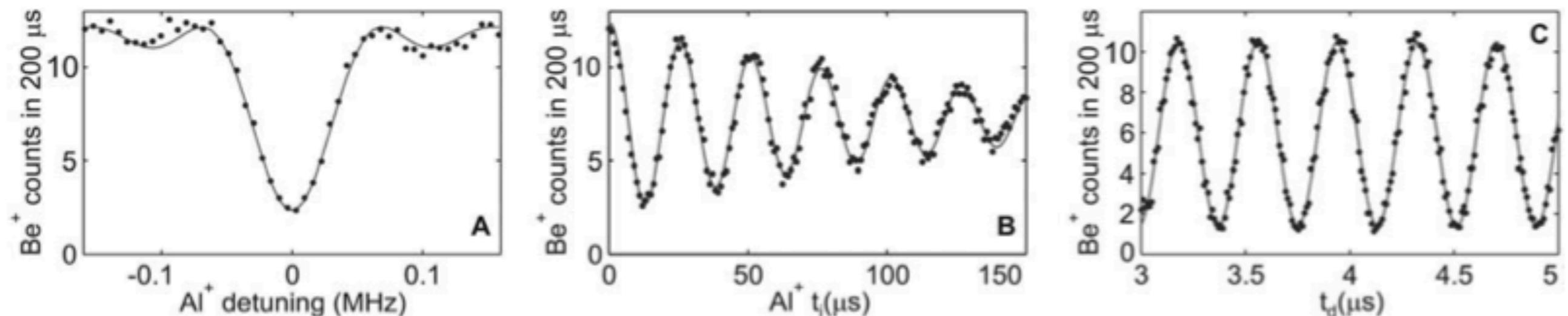
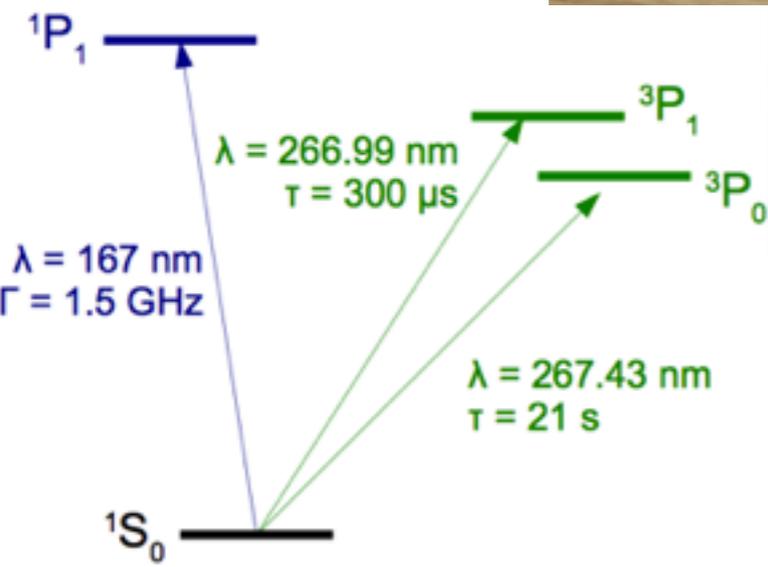
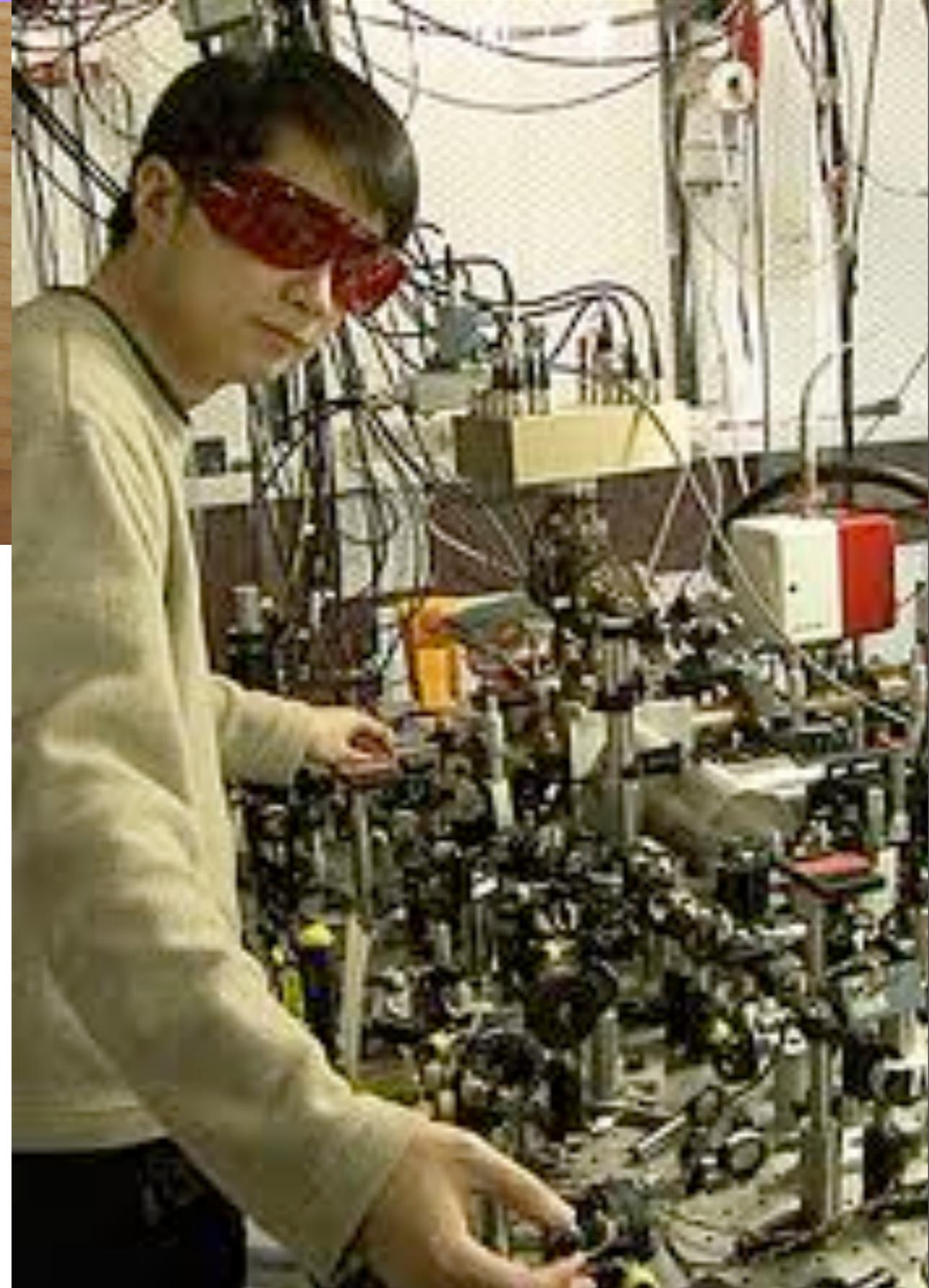
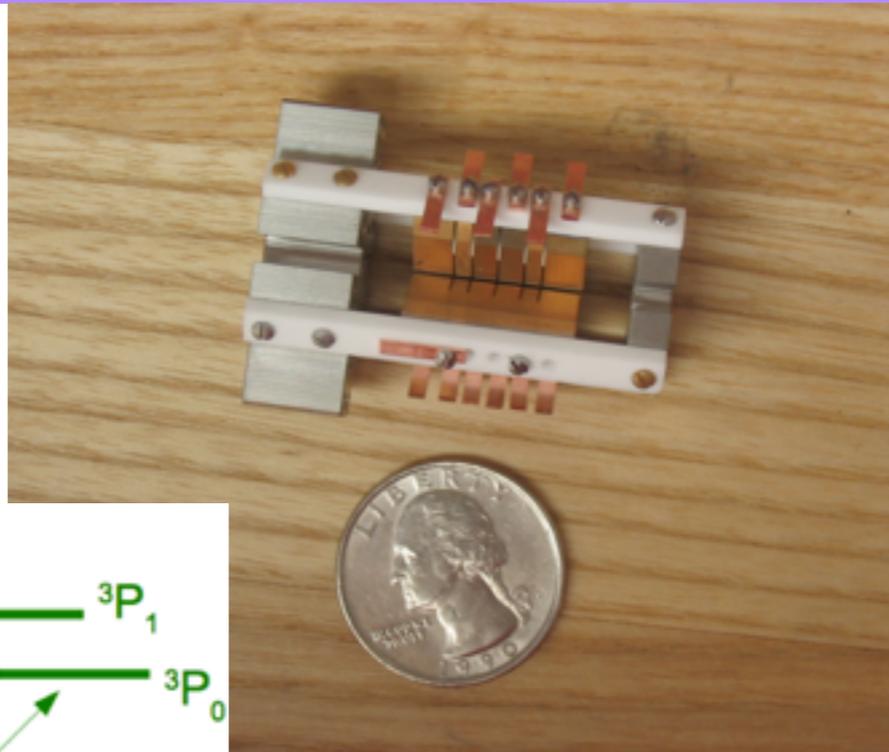


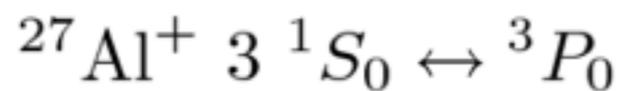
Fig. 3. (A) Rabi spectroscopy of the $|^1S_0, F = 5/2, m_F = 5/2\rangle \rightarrow |^3P_1, F' = 7/2, m_{F'} = 7/2\rangle$ transition in $^{27}\text{Al}^+$, showing a frequency scan across the resonance. The data (black circles) are fit by the theoretically expected probability $P_{\downarrow, S}$ of finding $^{27}\text{Al}^+$ in the ground state after applying the

probe pulse. (B) Rabi flopping at the center frequency of the transition in (A). The data are fit by an exponentially damped sinusoidal function. (C) Two-ion Ramsey time scan. The data are fit by a sinusoidal function.

Horloge Al⁺

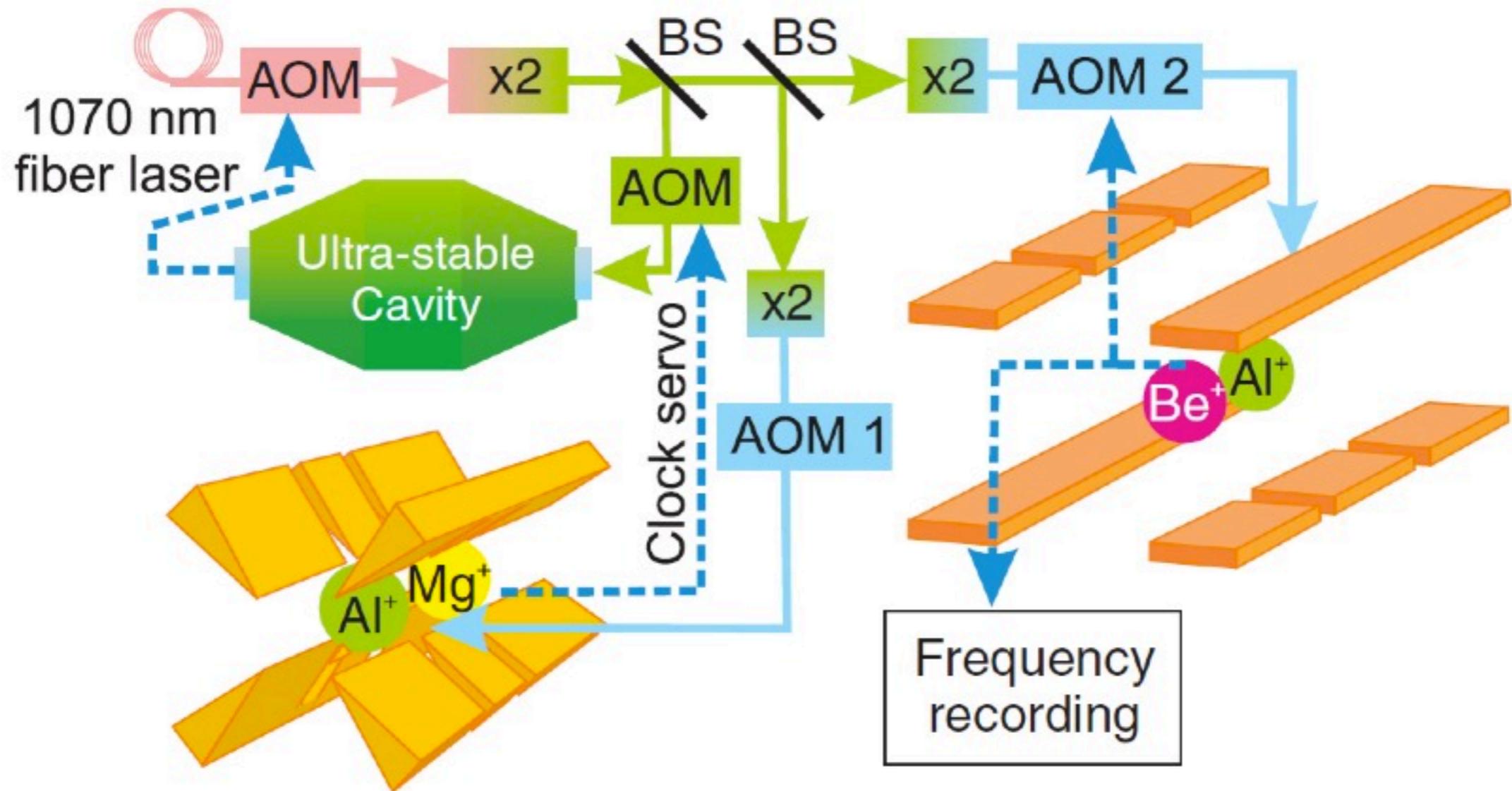


1 121 015 393 207 857.4(7) Hz



NIST's Second Quantum Logic Clock Based on Aluminum Ion is Now World's Most Precise Clock
NIST image gallery

$^{27}\text{Al}^+$ vs. $^{27}\text{Al}^+$



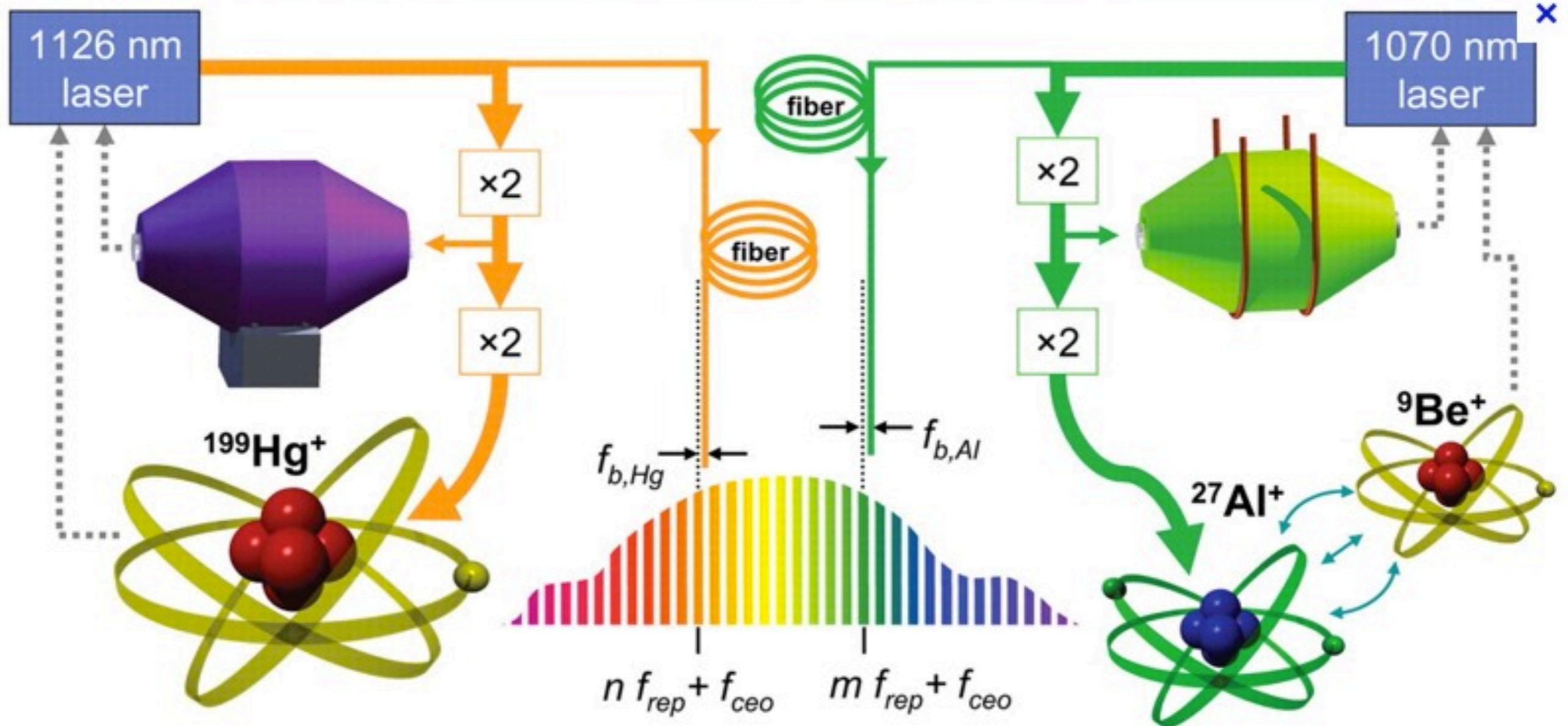
C.-W. Chou, *et al.*
PRL 104, 070802 (2010)

Comparing two single ion clocks
(David Wineland group at NIST)

Frequency Ratio of Al^+ and Hg^+ Single-Ion Optical Clocks; Metrology at the 17th Decimal Place

T. Rosenband,^{*} D. B. Hume, P. O. Schmidt,[†] C. W. Chou, A. Brusch, L. Lorini,[‡] W. H. Oskay,[§] R. E. Drullinger, T. M. Fortier, J. E. Stalnaker,^{||} S. A. Diddams, W. C. Swann, N. R. Newbury, W. M. Itano, D. J. Wineland, J. C. Bergquist

National Institute of Standards and Technology, 325 Broadway, Boulder, CO 80305, USA.



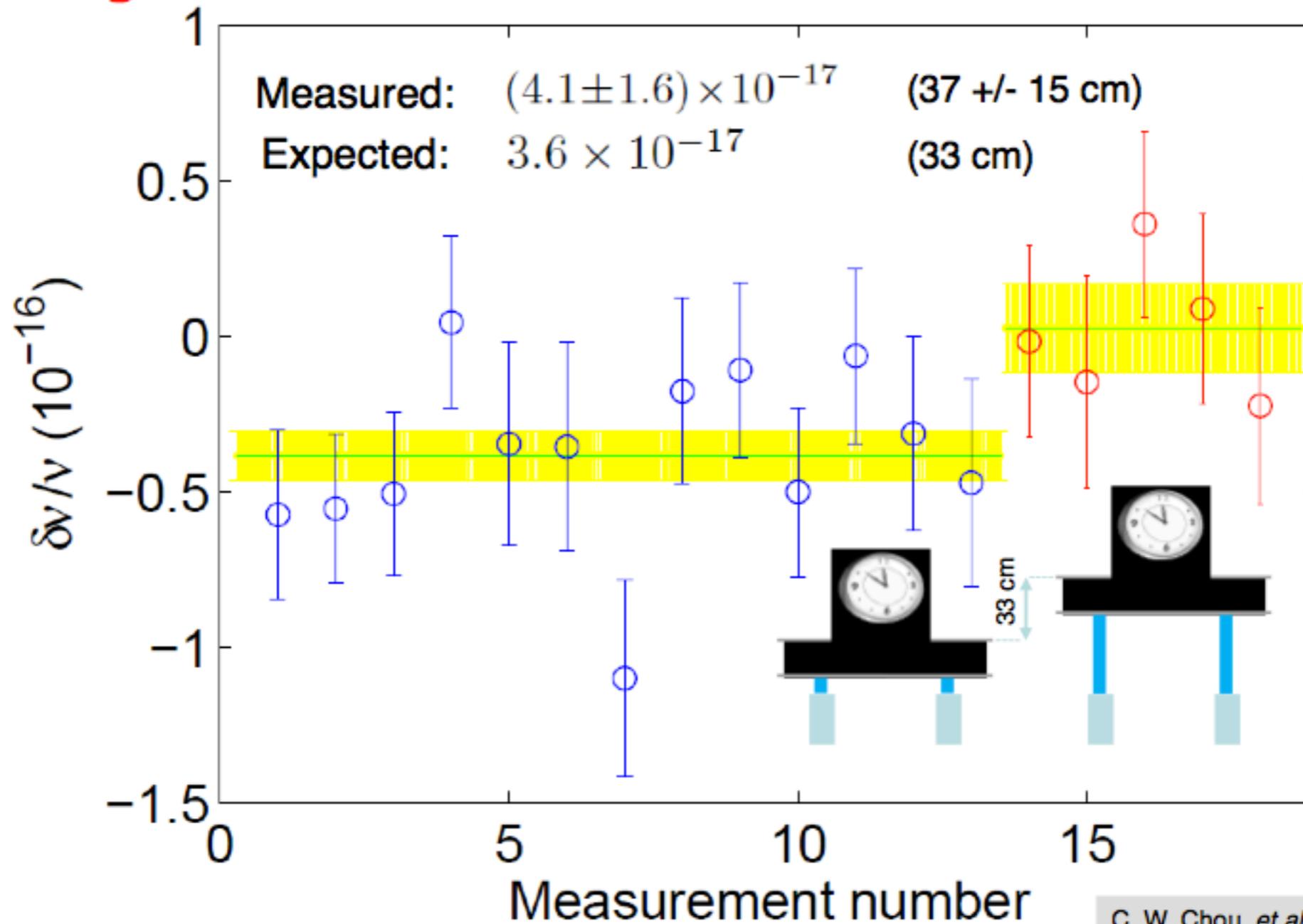
Al⁺ vs Hg⁺

Table 1. $^{27}\text{Al}^+ \ ^1\text{S}_0 \leftrightarrow \ ^3\text{P}_0$ and $^{199}\text{Hg}^+ \ ^2\text{S}_{1/2} \rightarrow \ ^2\text{D}_{5/2}$ clock shifts ($\Delta\nu$), and uncertainties (σ) in units of 10^{-18} of fractional frequency.

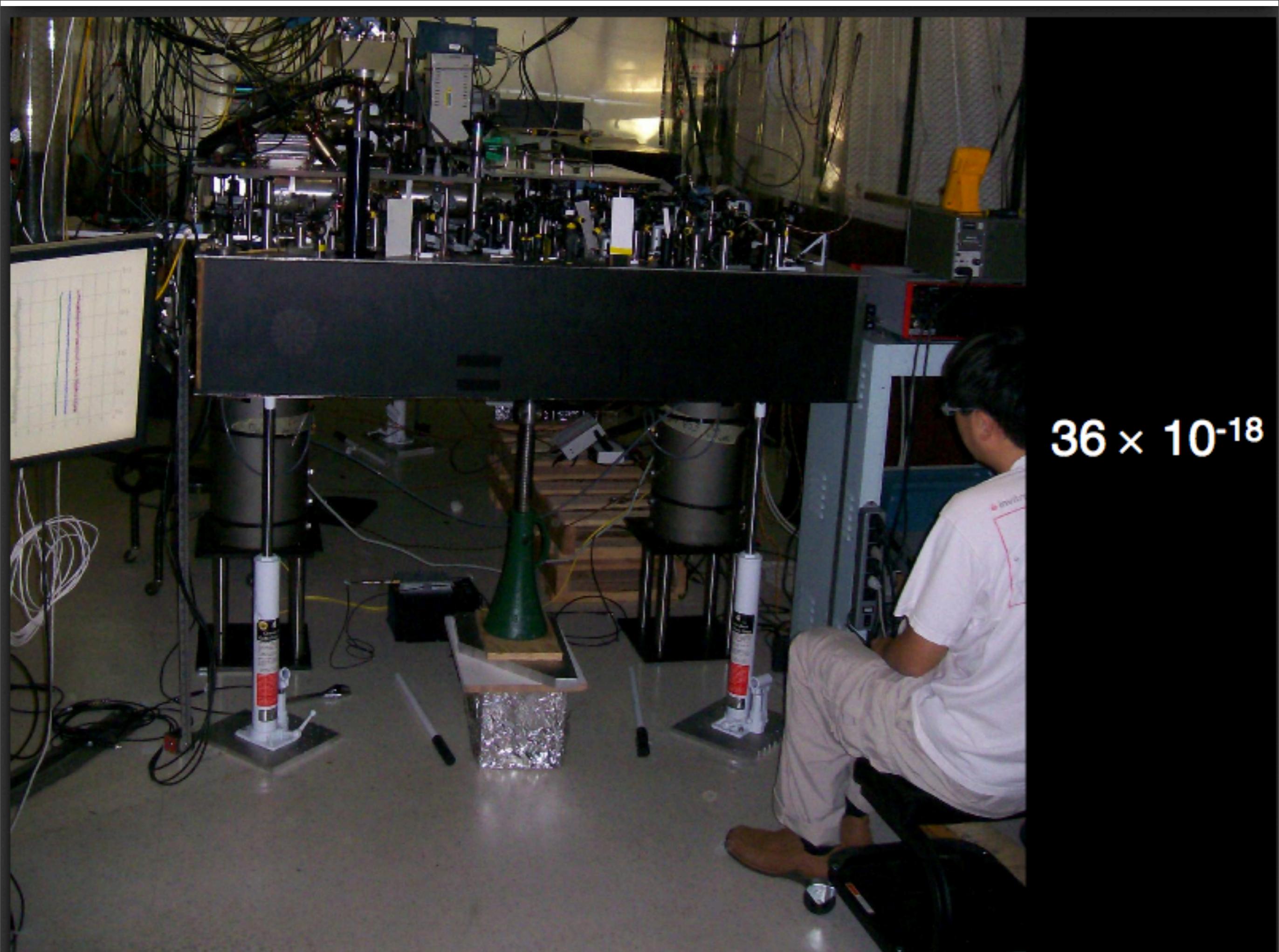
Shift	$\Delta\nu_{\text{Al}}$	σ_{Al}	$\Delta\nu_{\text{Hg}}$	σ_{Hg}	Limitation
Micromotion	-20	20	-4	4	Static electric fields
Secular motion	-16	8	-3	3	Doppler cooling
Blackbody rad.	-12	5	0	0	DC polarizability
313 nm Stark	-7	2	-	-	Polarizability, intensity
DC quad. Zeeman	-453	0.5	-1130	5	B-field calibration
AC quad. Zeeman	0	1	0	10	Trap RF B-fields
Electric quadrupole	0	0.5	0	10	B-field orientation
First order Doppler	0	1	0	7	Statistical imbalance
Bkg. gas collisions	0	0.5	0	4	Collision model
AOM phase chirp	0	0.1	0	6	RF power
Grav. red shift	-5	1	-	-	Clock height
TOTAL	-513	23	-1137	19	

Effet de la gravité à $\Delta h = 30$ cm

General relativity test: clocks 33 cm apart in gravitational fields tick at different rates!

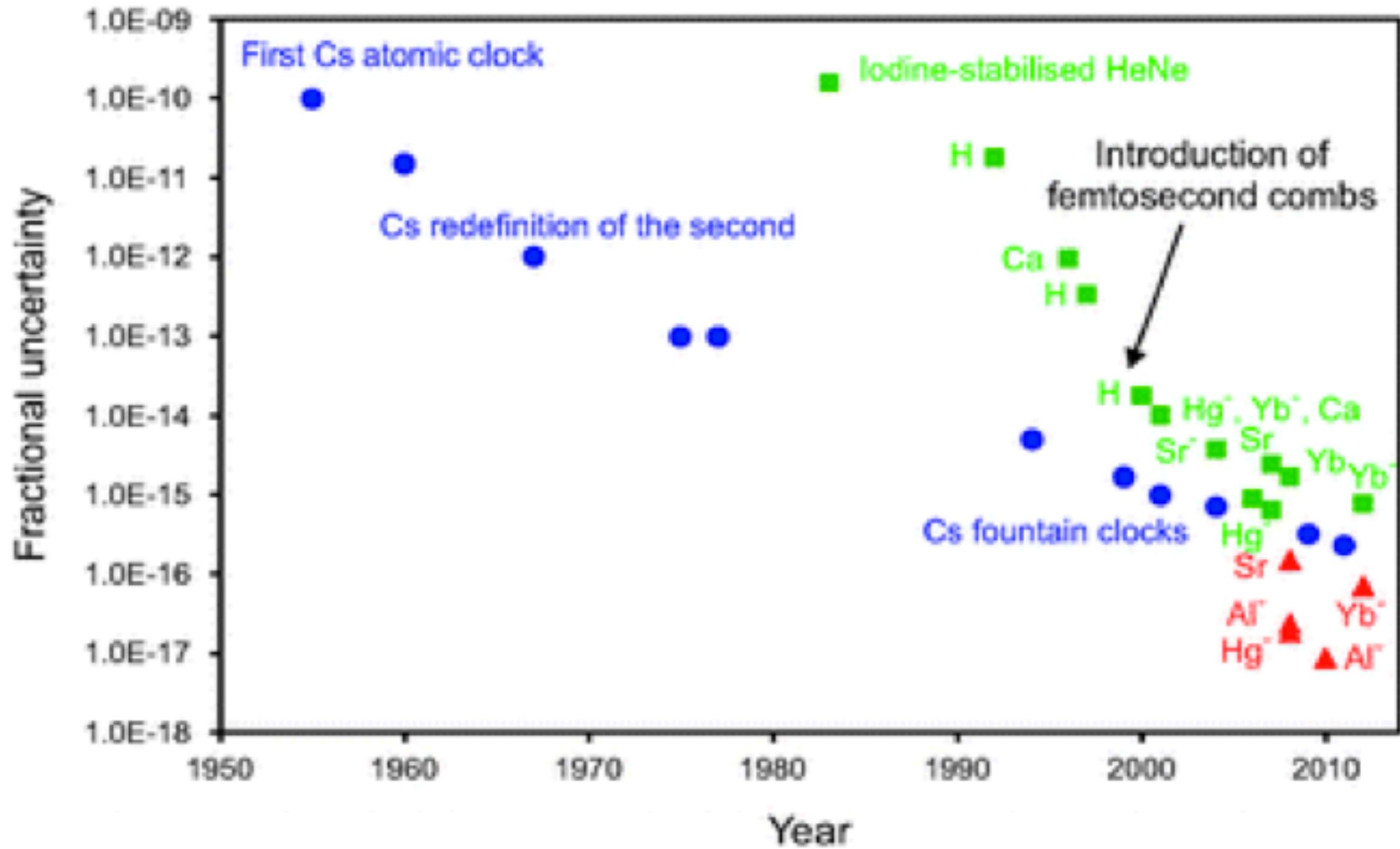


C. W. Chou, *et al.*
Science **329**, 1630 (2010)



36×10^{-18}

Performances (suite)



Success story

- contrôle simultané de l'énergie interne et de l'énergie externe de la particule, les deux énergies étant quantifiées

on peut amener l'ion ou des chaînes d'ions à rester dans un volume inférieure au mm^3 .

- transférer des superpositions d'états internes \longleftrightarrow externes et ainsi transporter de l'information vers un autre atome
- réalisation de chatons de Schrödinger, états de Focks,
- expériences fondamentales pour l'information quantique: portes CNOT, Cirac-Zoller, Sørensen-Mølmer
- horloges atomiques optiques les plus précises 10^{17} , ion unique ou couple ion métrologique et ion logique (5s sur l'âge de l'univers-14 milliards d'années)

de nombreuses étapes ont été fructueuses par elles-même et sources de progrès dans d'autres domaines.

rôle moteur de D.J.Wineland dans toute la communauté depuis les années 70 et synergie remarquable des différents groupes dans tous les continents.

Étapes majeures

1. énergie thermique
2. refroidissement Doppler $T \approx \text{q.q. K}$
3. refroidissement sub Doppler
4. physique quantique
- ◆ physique mésoscopique

cristaux d'ions de Coulomb

applications:

- dynamique de systèmes complexes
- ordinateurs quantiques
- simulateurs quantiques

Ion Trap Group - M. Drewsen- Univ-Aarhus

50

EXPERIMENTS WITH COLD TRAPPED MOLECULAR IONS

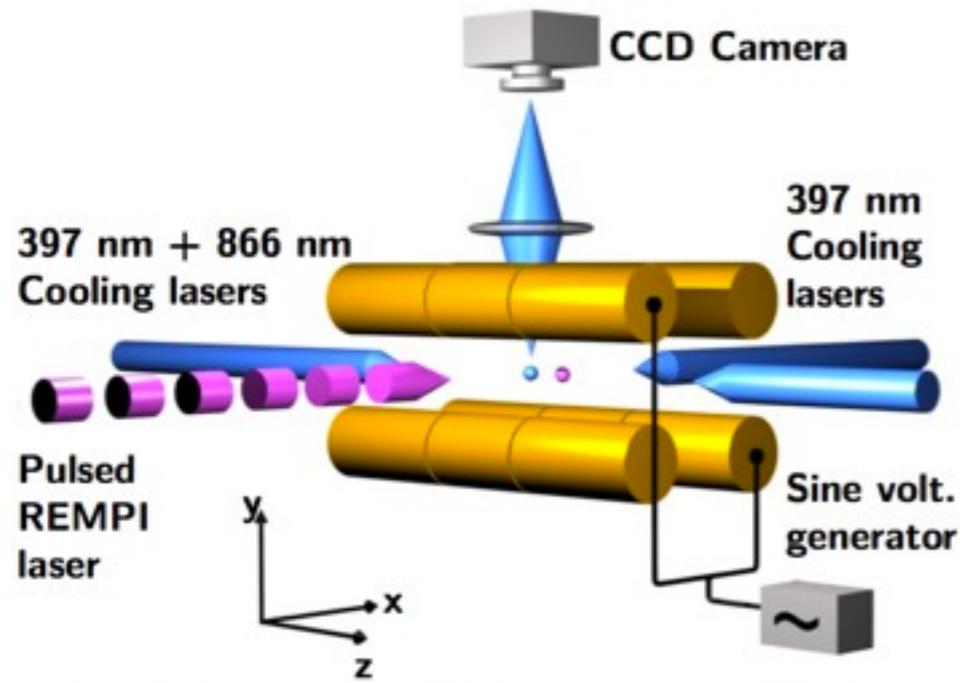


Figure 4.1 Sketch of the experimental setup. Seen in the sketch is the linear Paul trap, three cooling laser beams, a pulsed REMPI beam, the CCD camera and the modulation voltage generator.

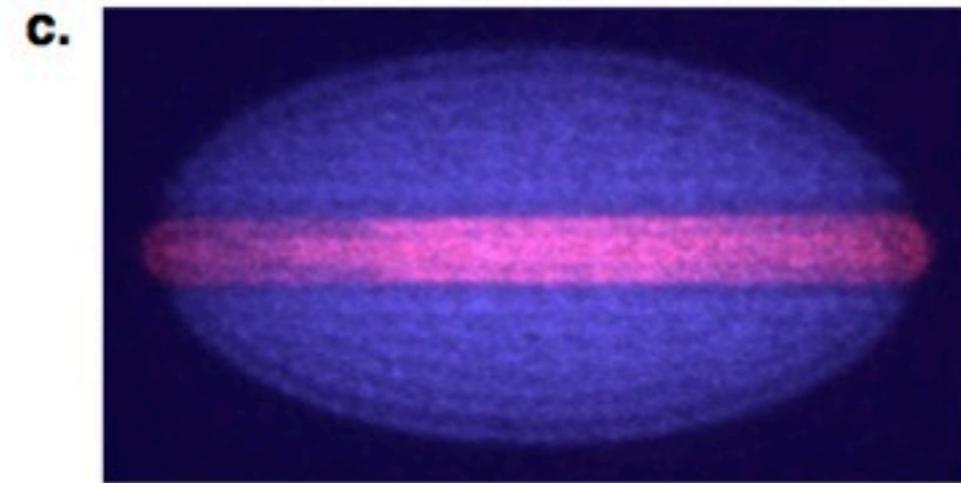
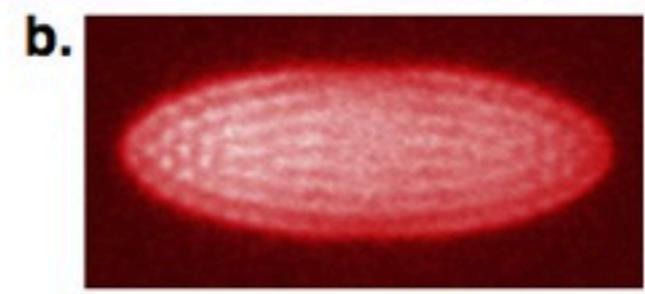
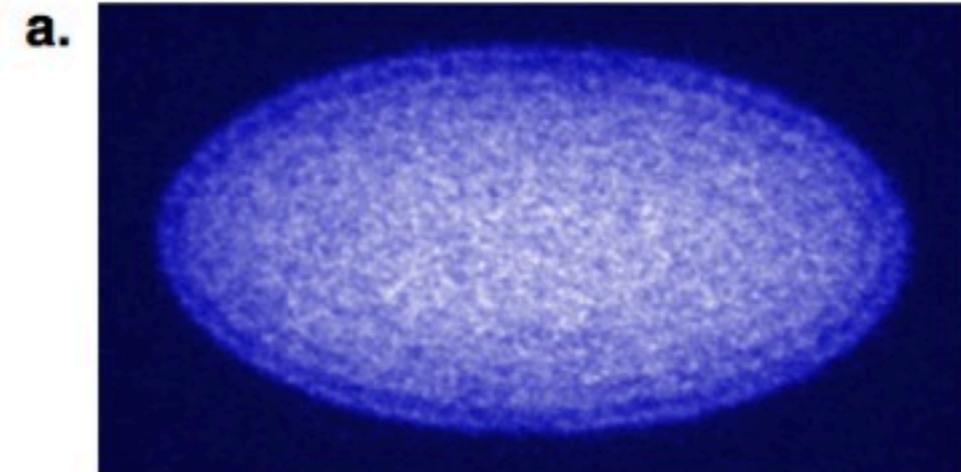
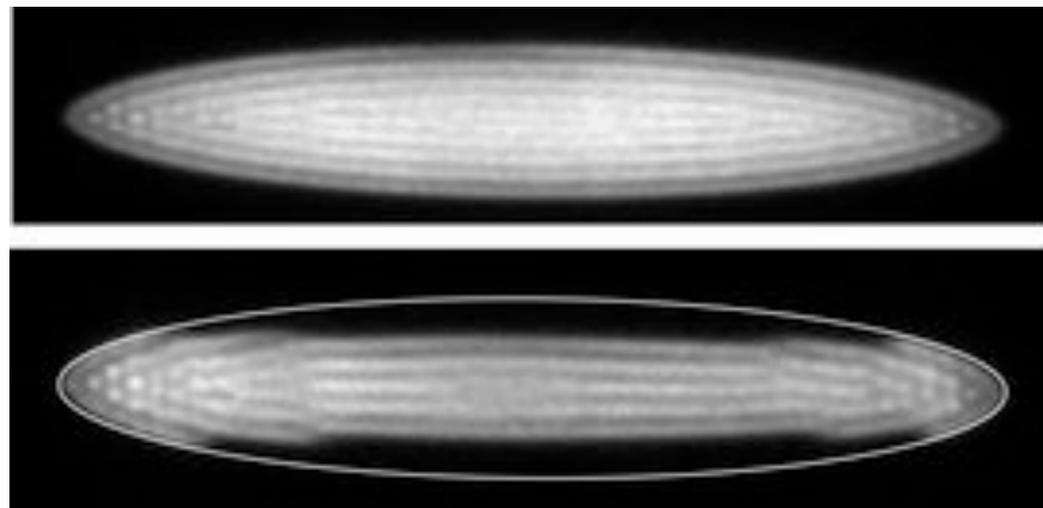
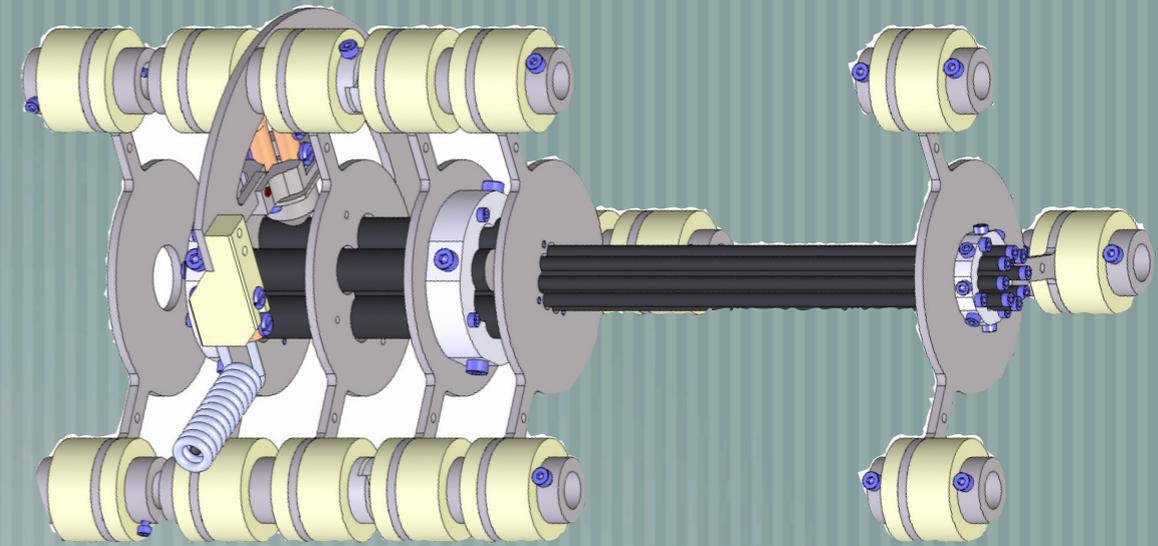
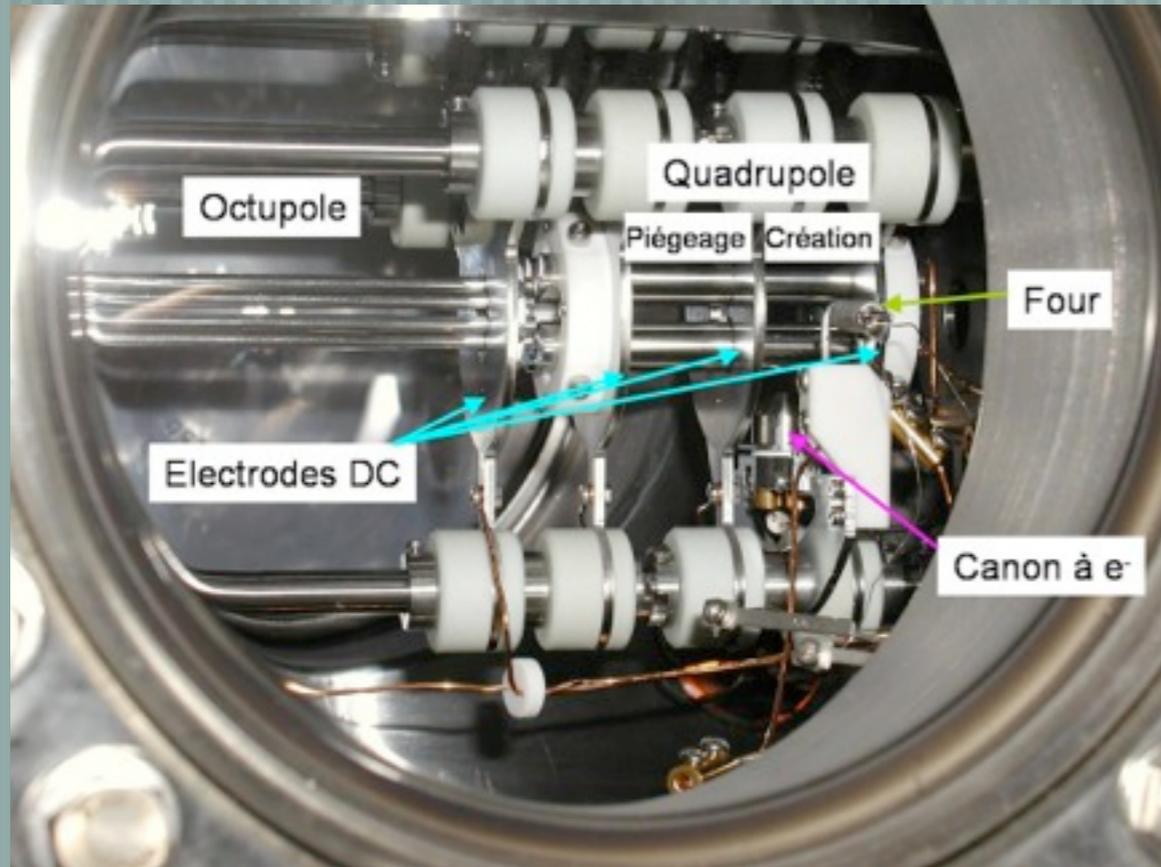


Figure 6.2: a. $^{40}\text{Ca}^+$ crystal of aspect ratio $\alpha = 0.51$, containing approximately 3200 ions at $U_{RF} = 60 \text{ V}$, $U_{E-C} = 3.9 \text{ V}$. b. $^{24}\text{Mg}^+$ crystal of aspect ratio $\alpha = 0.34$, containing approximately 650 ions, at the same RF and E-C fields as a. c. Bi-crystal formed by loading approximately 320 $^{24}\text{Mg}^+$ ions into the $^{40}\text{Ca}^+$ ion crystal shown in a. Same RF and end-cap fields.

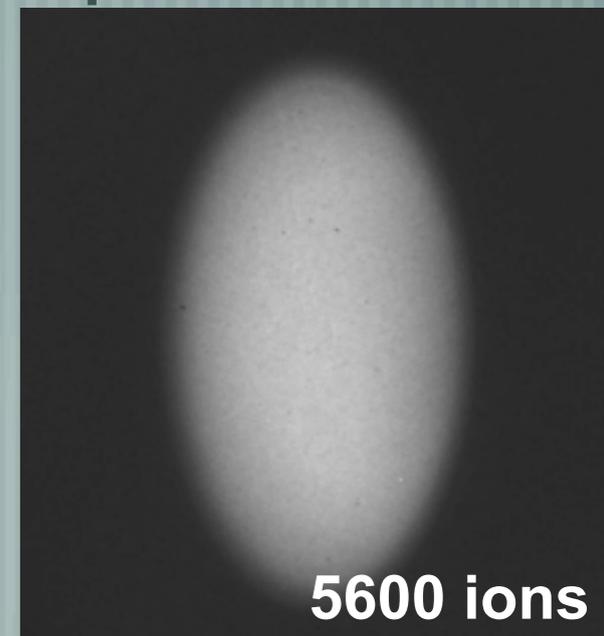
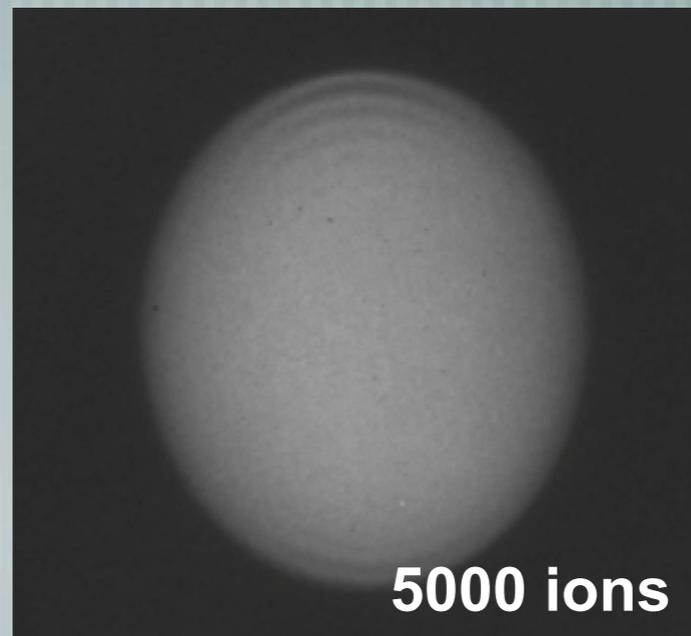
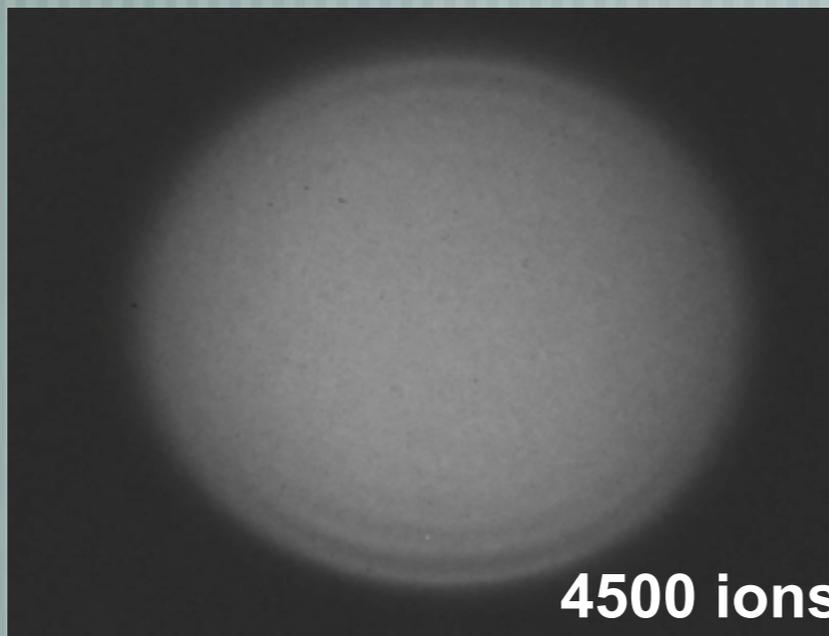
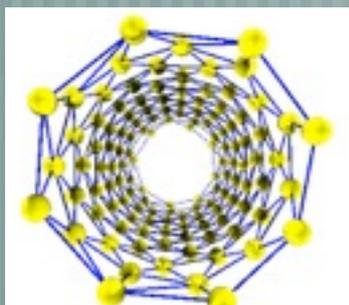
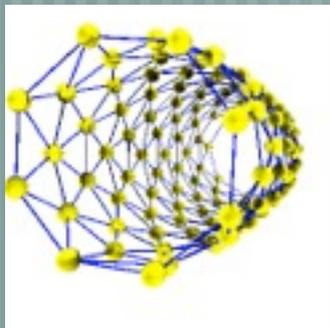
Ph D: L.Hornekær (2000)

Expérience TADOTI

projet ANR jeune chercheur CIML-PIIM-AMU - CNRS



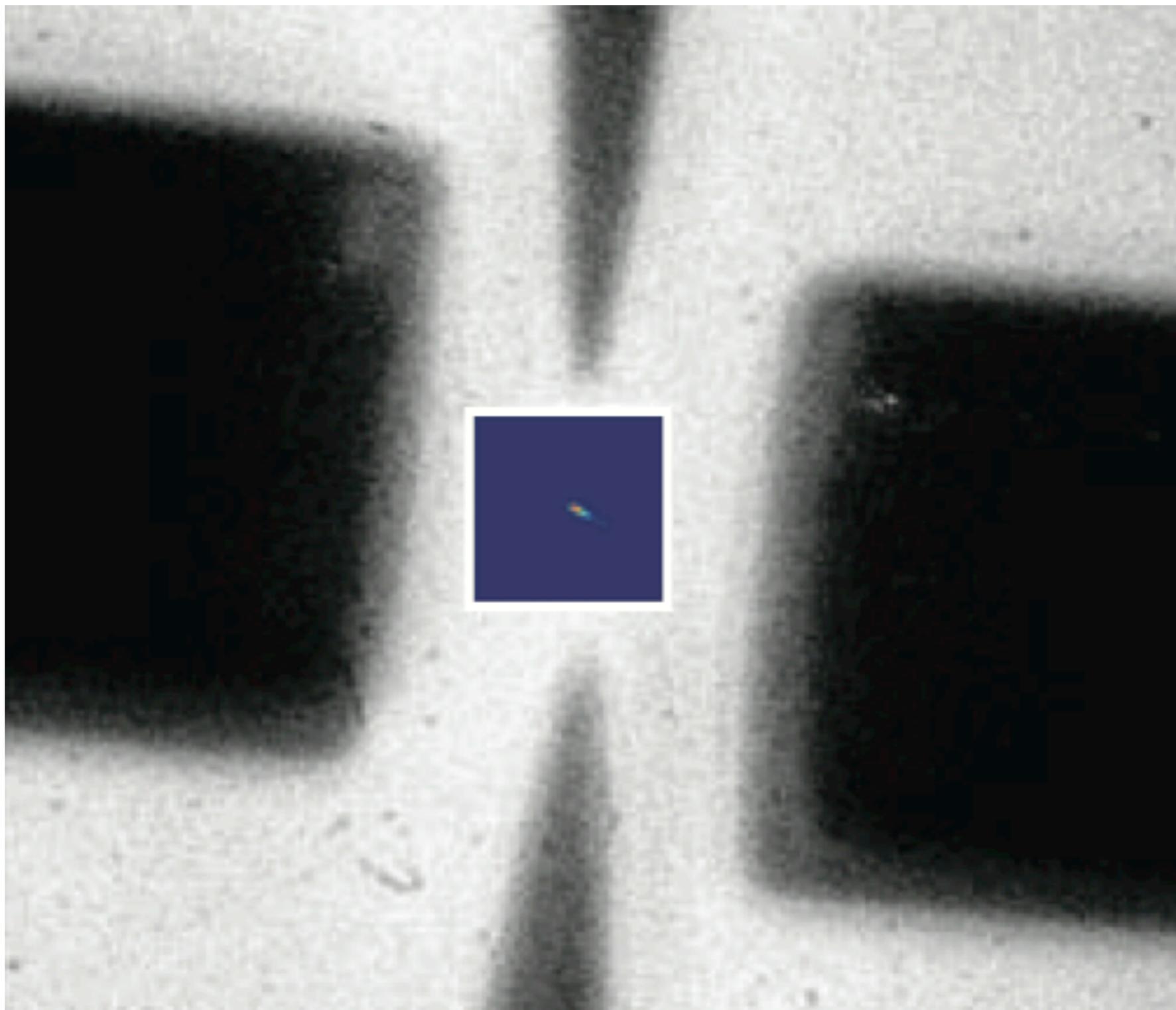
- les lasers
- un double piège linéaire
- nuage ou cristaux d'ions
- transport



CONCLUSION

- Physique fondamentale = projets sur le long terme
- Feedback permanent entre :
fondamental , appliqué , technologie
- Bénéfice des autres disciplines

- Les Gedankenexperiment deviennent réalité
- La familiarisation de la physique quantique permet de proposer de nouvelles idées et de nouvelles techniques en information quantique, **métrologie temps-fréquence**



M. Steiner *et al.*, Phys. Rev. Lett. (2013): **Trapped with a photon.** A single ion (fluorescence image in blue square) is trapped by electric fields generated by ten electrodes (only two pointy ones shown) in an optical cavity formed by the ends of two optical fibers encased in metal sleeves (squarish items at right and left). The ion continuously absorbs and emits a single photon of a wavelength determined by the length of the cavity.