

Mesure du temps

Michèle Leduc
Laboratoire Kastler Brossel
ENS, Paris

Châlons en Champagne, le 26 mai 2008

Des HORLOGES ATOMIQUES Pour DEFIER LE TEMPS

- Qu'est ce que le temps
- Comprendre le temps
- Mesurer le temps



Qu'est ce que le temps

?

Platon

(-437, -347)

Le temps est inutile.

Seule compte l'étude des
invariants qui sont des réalités
vraies.

Aristote

(-384,-322)

Le rôle du temps dans les
processus naturels est un fait
essentiel de la réalité du monde.

Pascal

Le temps...

Qui pourra le définir ? Et pourquoi
l'entreprendre, puisque tous les
hommes conçoivent ce qu'on veut
dire en parlant de temps, sans qu'on
le désigne davantage?

Mesurer le temps avec un phénomène linéaire

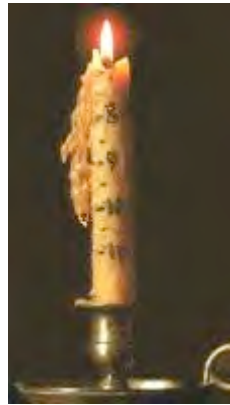
- Ecoulements : clepsydes



sabliers



- Combustion : bougies



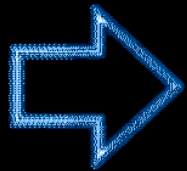
hauteur d'huile



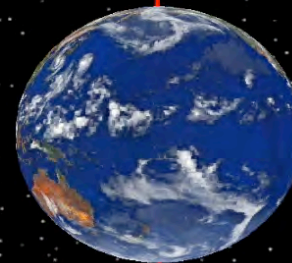
Mesurer le temps : avec un phénomène astronomique



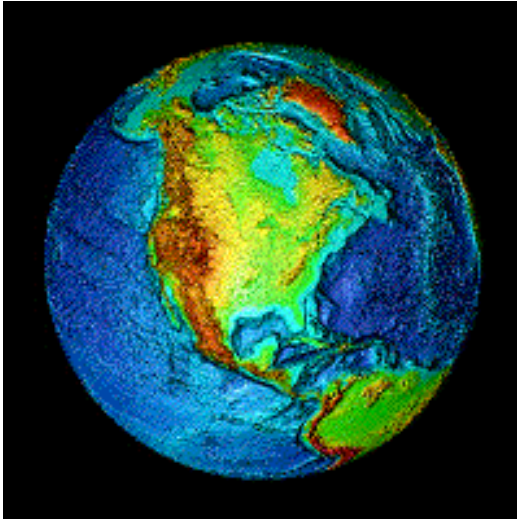
Gnomons et cadrans solaires



... et la Terre n'a pas un mouvement régulier dans l'espace !



Le mouvement périodique de la terre



- Mouvement de grande amplitude
- Identique pour tout le monde

- 2 définitions :

1 période = 86400 secondes

1 révolution solaire = 315 569 258. 9747

s

Les gardiens du temps sont les astronomes.
C'est la référence jusqu'en 1967.

La rotation terrestre

- 19^{ème} siècle : premiers doutes sur la régularité du mouvement terrestre.

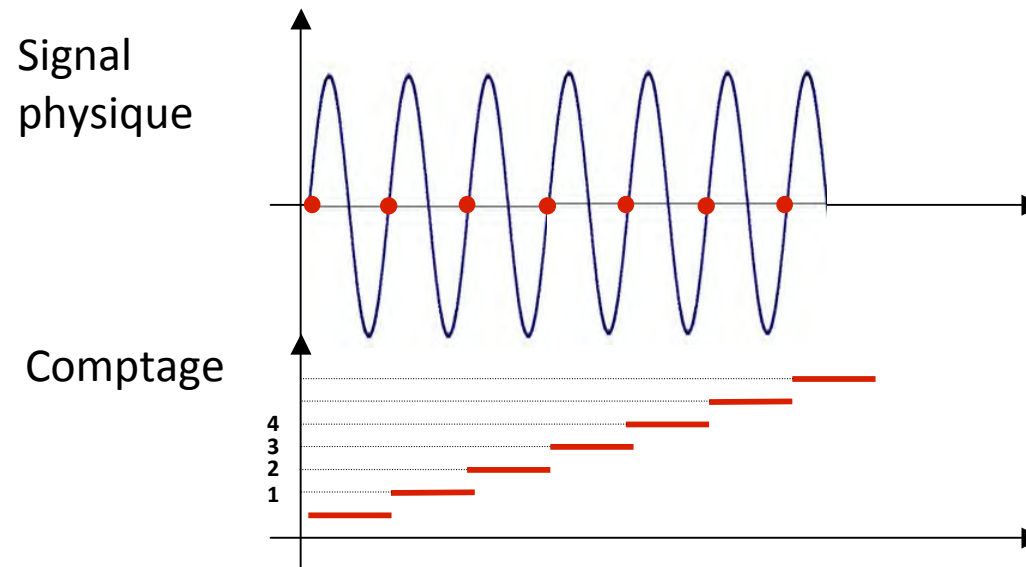
Ce n'est pas un corps rigide, dissipation de l'énergie
➤ ralentissement.

- 1933: mise en évidence des irrégularités terrestres (millisecondes sur plusieurs mois) par comparaison avec des oscillateurs à quartz.

Alors quoi prendre qui conserve l'universalité et la stabilité?

Mesurer le temps : avec un oscillateur

→ On mesure le temps qui passe en comptant le nombre d'oscillations



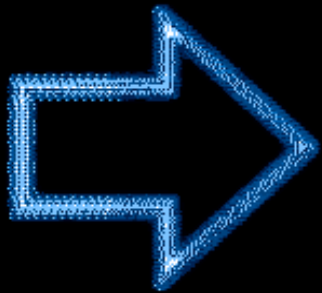
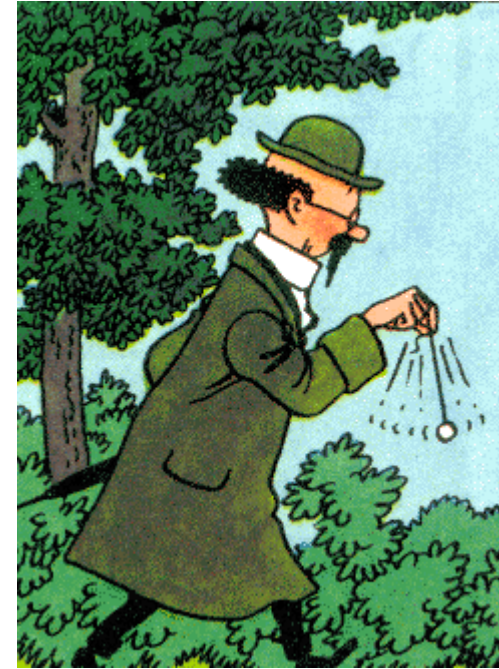
Qualité de la mesure = qualité de la fréquence de l'oscillateur :

Stabilité de la fréquence : évolution dans le temps

Exactitude de la fréquence : connaissance absolue de la valeur

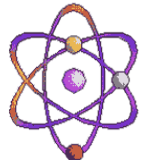
Mesurer le temps avec un oscillateur mécanique

Un exemple : le pendule



Mais la fréquence dépend :

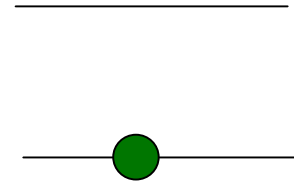
- de la longueur
- du lieu (de l'accélération de la pesanteur)
- de l'environnement : pression, température



L'atome : enfin une référence universelleet (quasi) parfaite

→ un atome est un système qui peut entrer en résonance lorsqu'il interagit avec une onde de fréquence appropriée

→ les fréquences de résonance correspondent à des transitions de l'atome entre des niveaux d'énergie bien particuliers (« carte d'identité » atomique)



→ ces fréquences ne dépendent (a priori...) que des constantes fondamentales

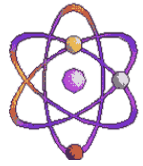
→ un atome ne vieillit pas, ne s'use pas ...



noyau atomique
(protons + neutrons)

électron

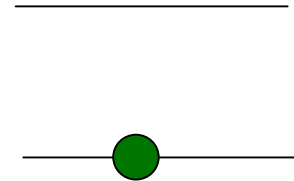
Représentation naïve de l'atome de lithium



L'atome : enfin une référence universelleet (quasi) parfaite

→ un atome est un système qui peut entrer en résonance lorsqu'il interagit avec une onde de fréquence appropriée

→ les fréquences de résonance correspondent à des transitions de l'atome entre des niveaux d'énergie bien particuliers (« carte d'identité » atomique)



→ ces fréquences ne dépendent (a priori...) que des constantes fondamentales

→ un atome ne vieillit pas, ne s'use pas ...

Le césium

- Un métal alcalin, lourd (133), liquide à $28,5^{\circ}\text{C}$, facile à vaporiser.
- 1 seul isotope stable.
- une transition très stable, facile à exciter
- 1955 première horloge à césium



Définition de la seconde

Durée de **9 192 631 770** périodes

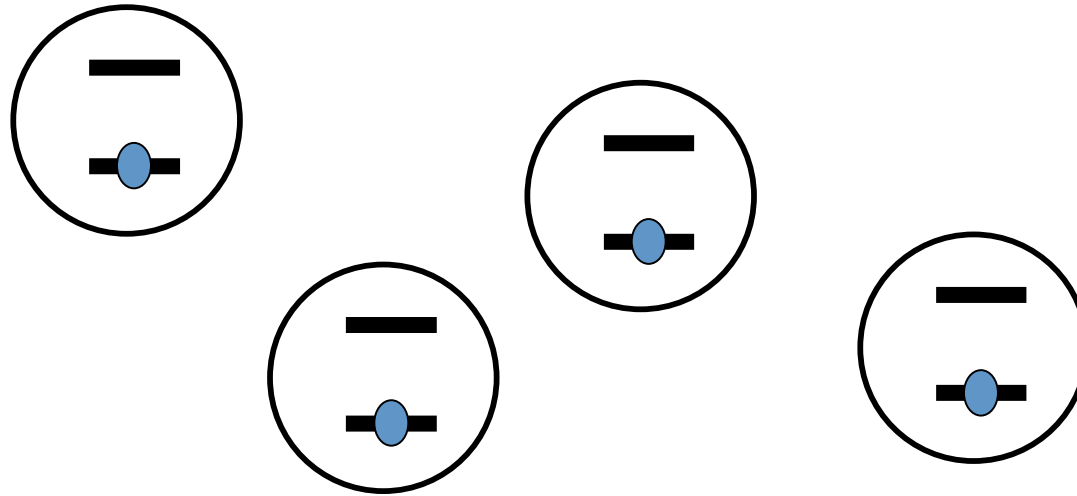
de la radiation correspondant

à la transition entre **deux niveaux**

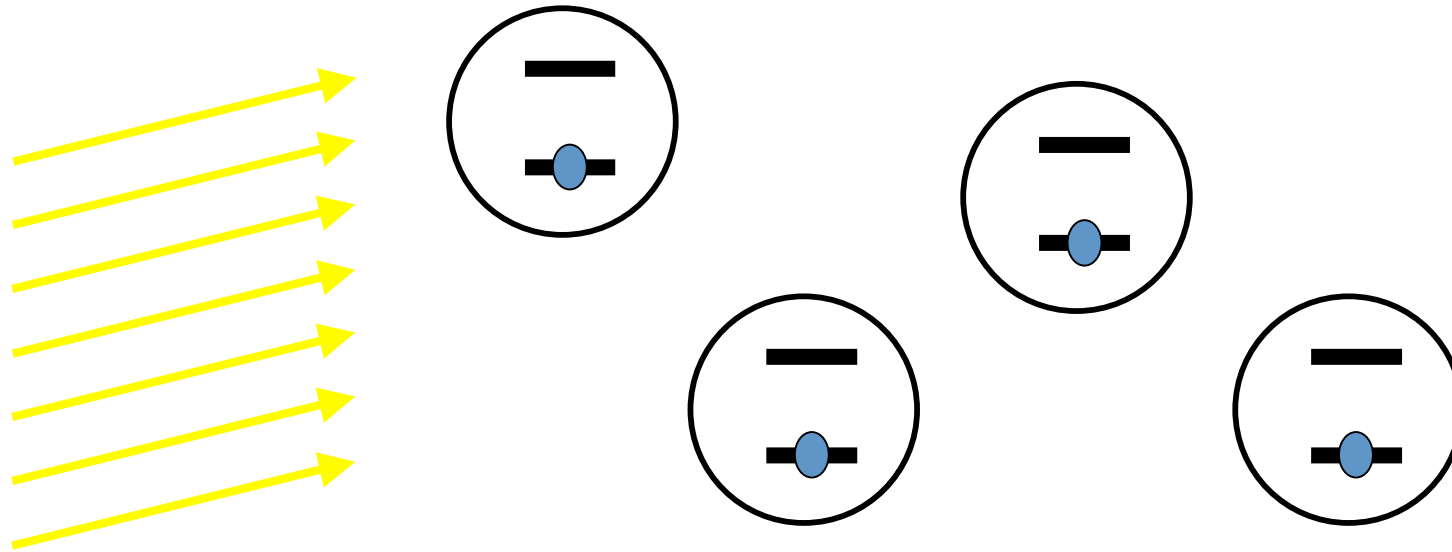
de l'état fondamental

de l'atome de **césium 133**

**On prépare les atomes dans le même
état quantique**



On les excite avec l'onde électromagnétique



On compte les atomes dans le niveau excité
Si le nombre n'est pas maximum alors il faut
corriger la fréquence de l'onde.

Exactitude: 1 seconde sur 1 million d'années...

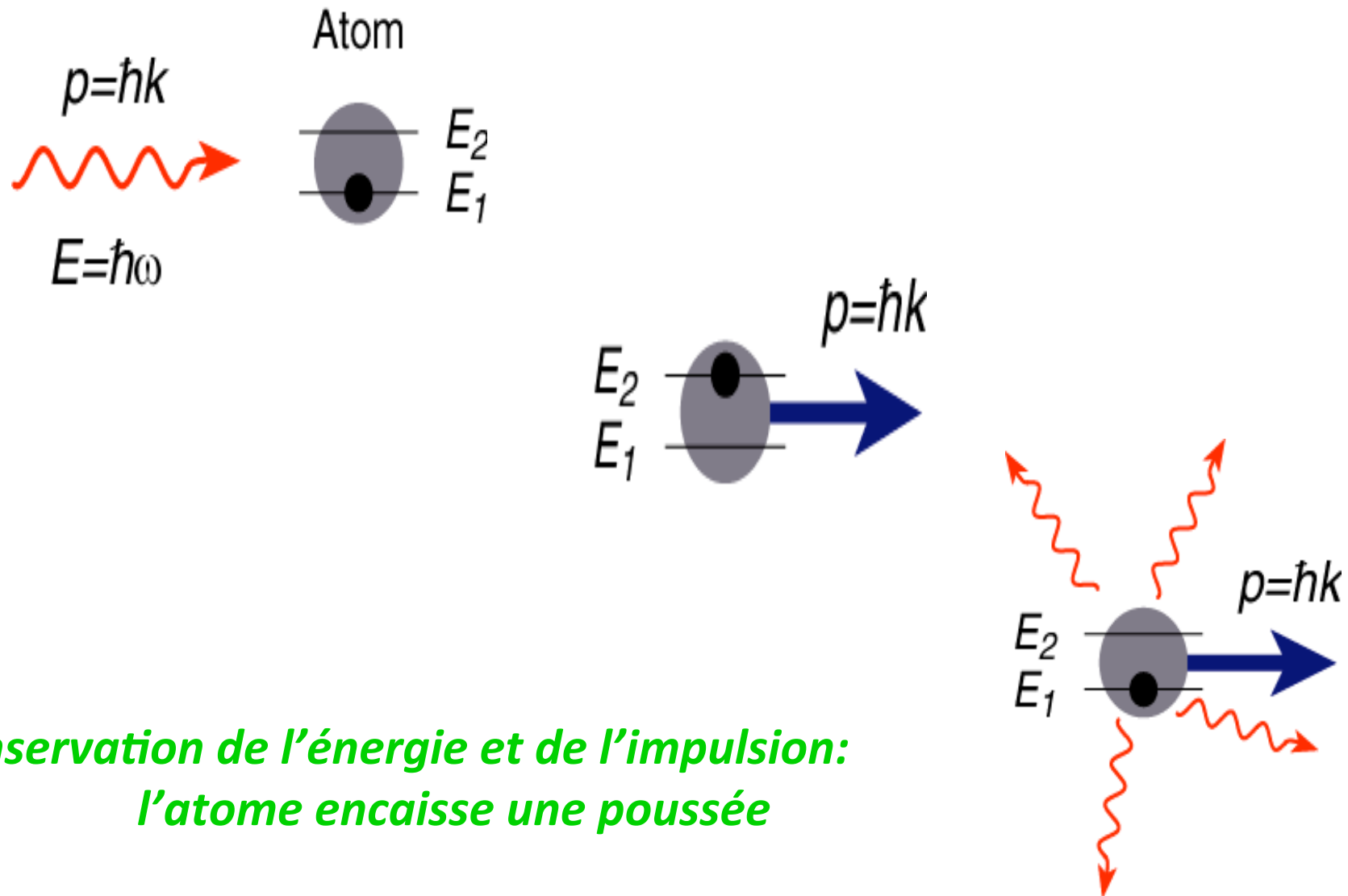
Principale limitation

Le temps d'observation des atomes:

Vous voulez une information précise (la valeur de la fréquence), **il faut y passer du temps.**

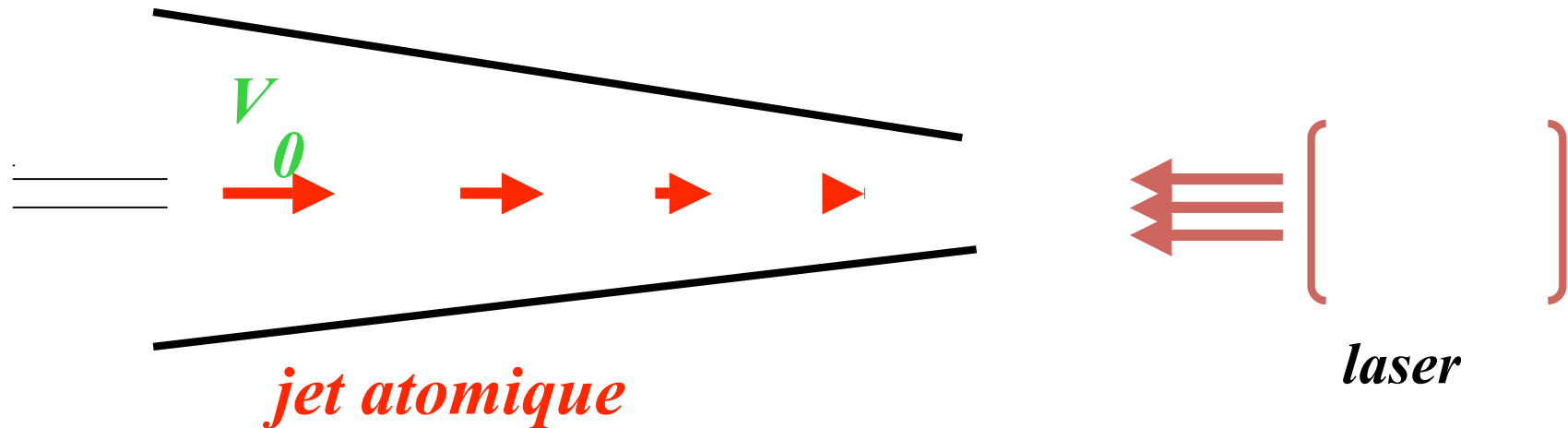
➤ Il faut donc **ralentir les atomes**
tout en les maintenant isolés

Absorption et émission de photons par les atomes



*Conservation de l'énergie et de l'impulsion:
l'atome encaisse une poussée*

Ralentissement des atomes par laser

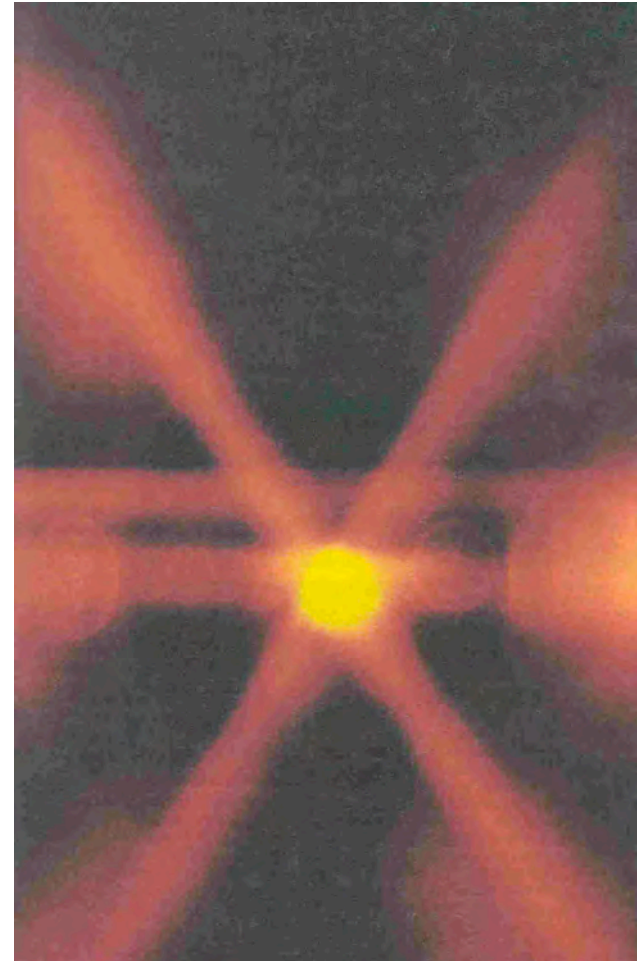


Décélération $a = 10^6 \text{ m/s}^2$

Temps de décélération $v_0/a = 1 \text{ ms}$

Distance de décélération $L = v_0^2/2a = 50 \text{ cm}$

Une mélasse optique



S. Chu, Scientific American, 174, 1992

Cooling and trapping of atoms

Refroidissement et piégeage des atomes par laser



1997 Physics Nobel prize

W. Phillips, S. Chu and C. Cohen-Tannoudji



Mélasses optiques

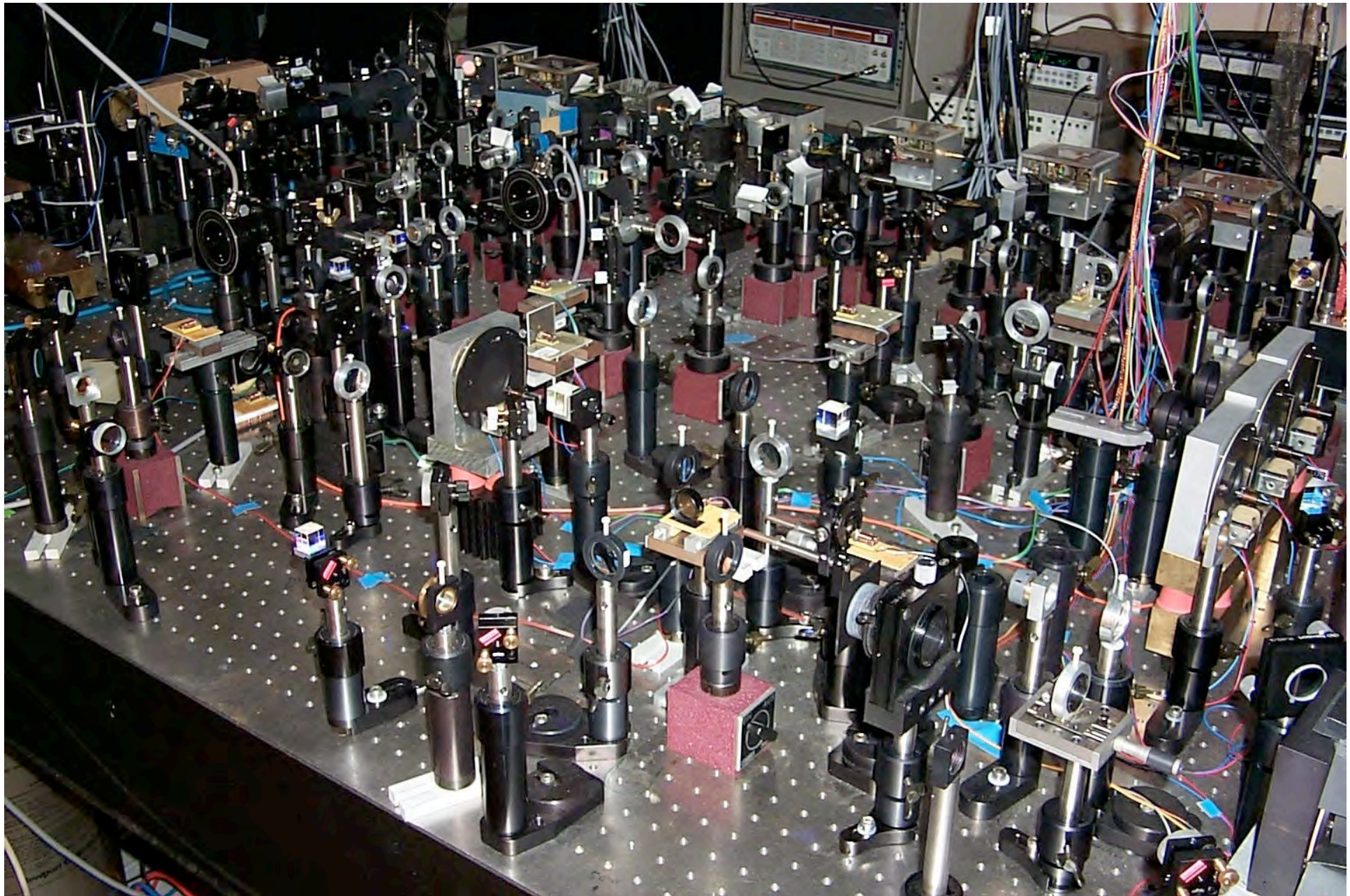


Première réalisation
d'un piège magnéto-optique

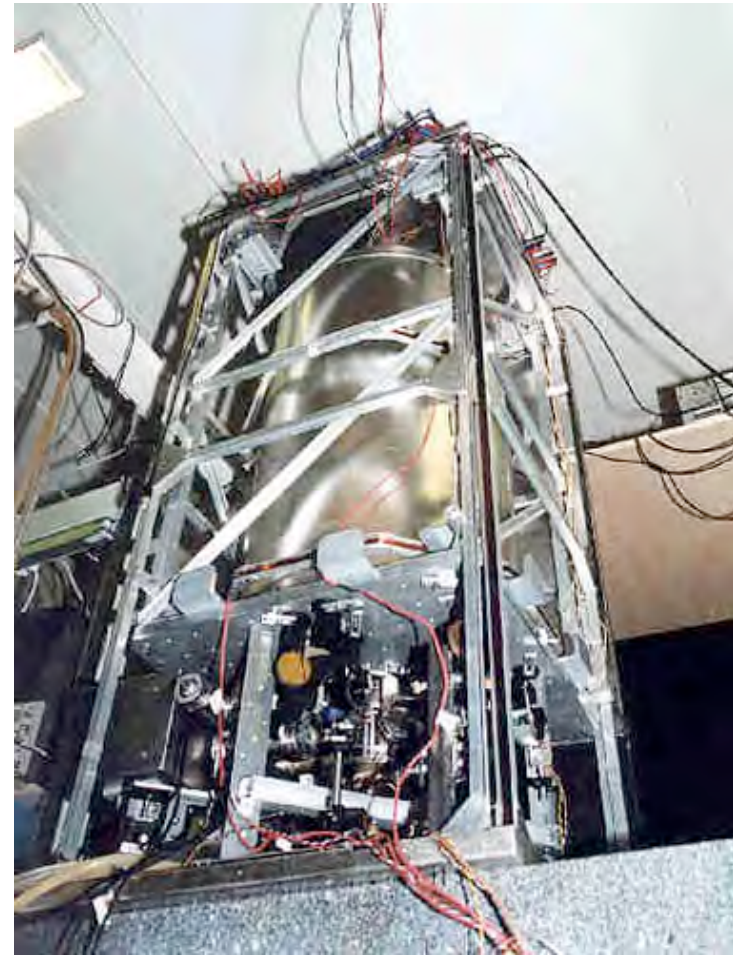
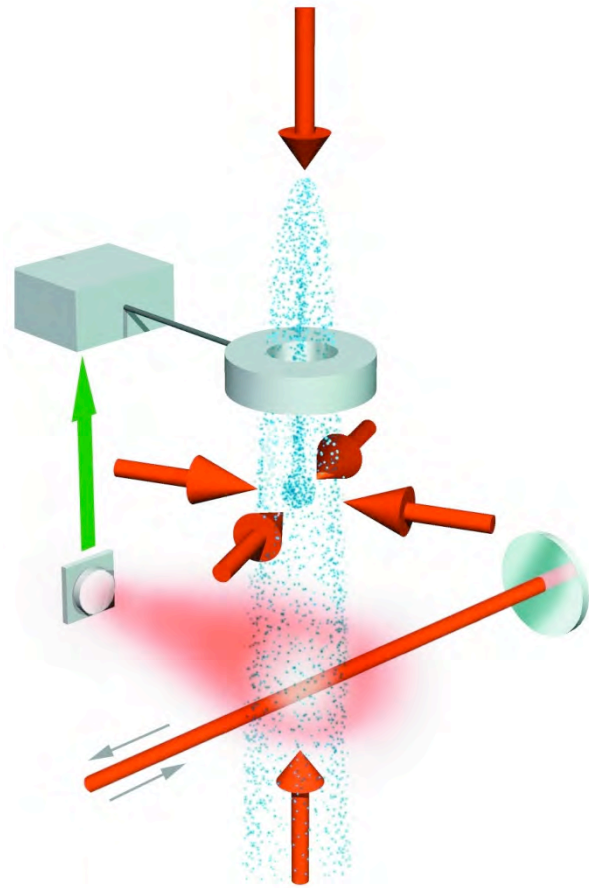


Mécanisme de
refroidissement
Sub-Doppler

Avec un peu d'optique et d'électronique...

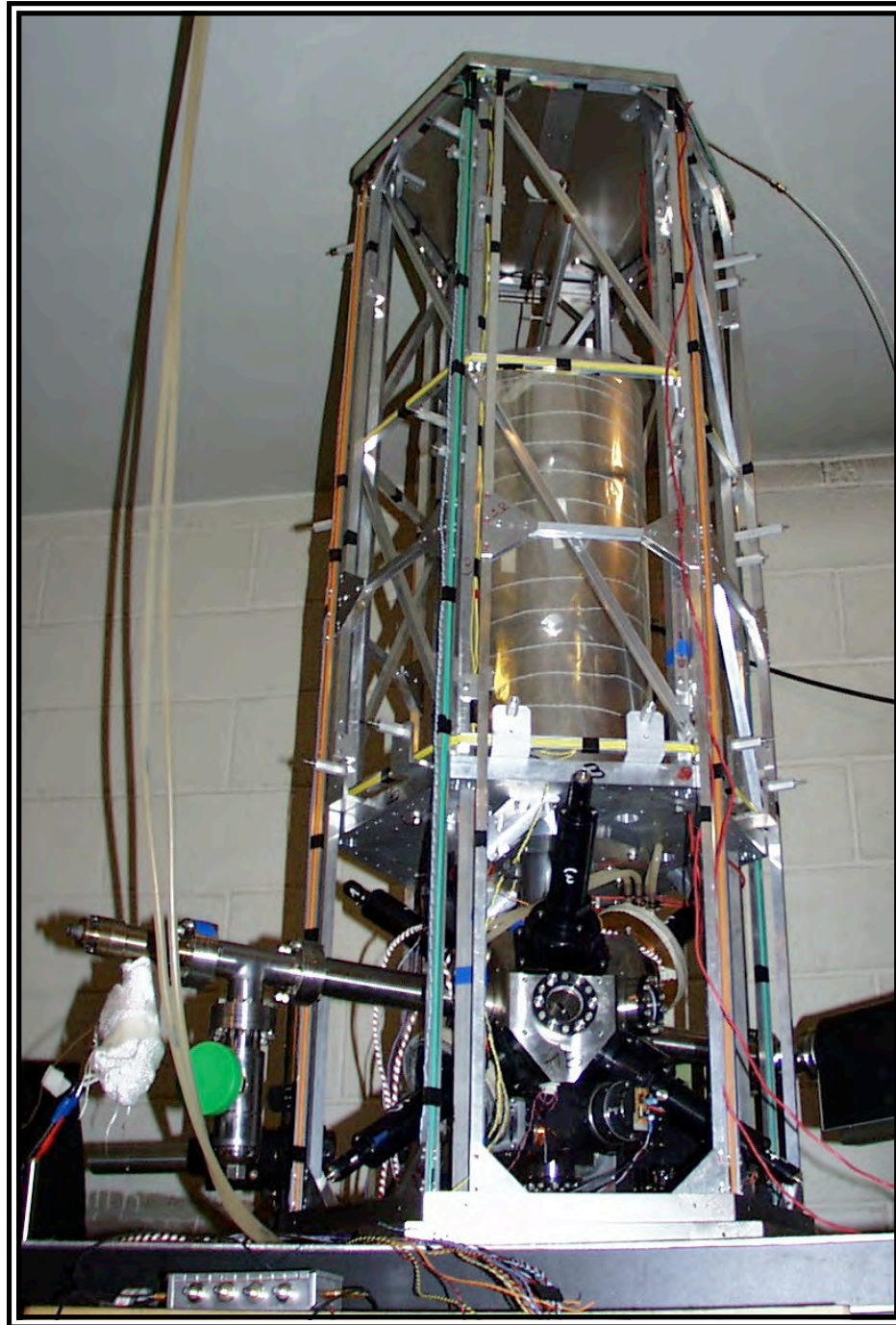


La fontaine atomique



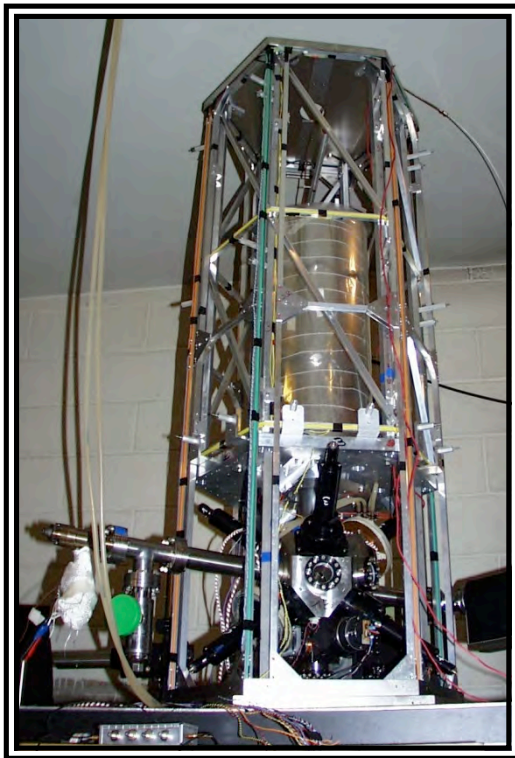
La première horloge césium en fontaine
SYRTE, Observatoire de Paris, 1994.

**Fontaine à
atomes froids
du BNM-
SYRTE
Observatoire
de Paris**



Fontaines à atomes

8 fontaines en opération. Plus de 15 en construction.



BNM-SYRTE, France



PTB, Allemagne



NIST, Etats-Unis

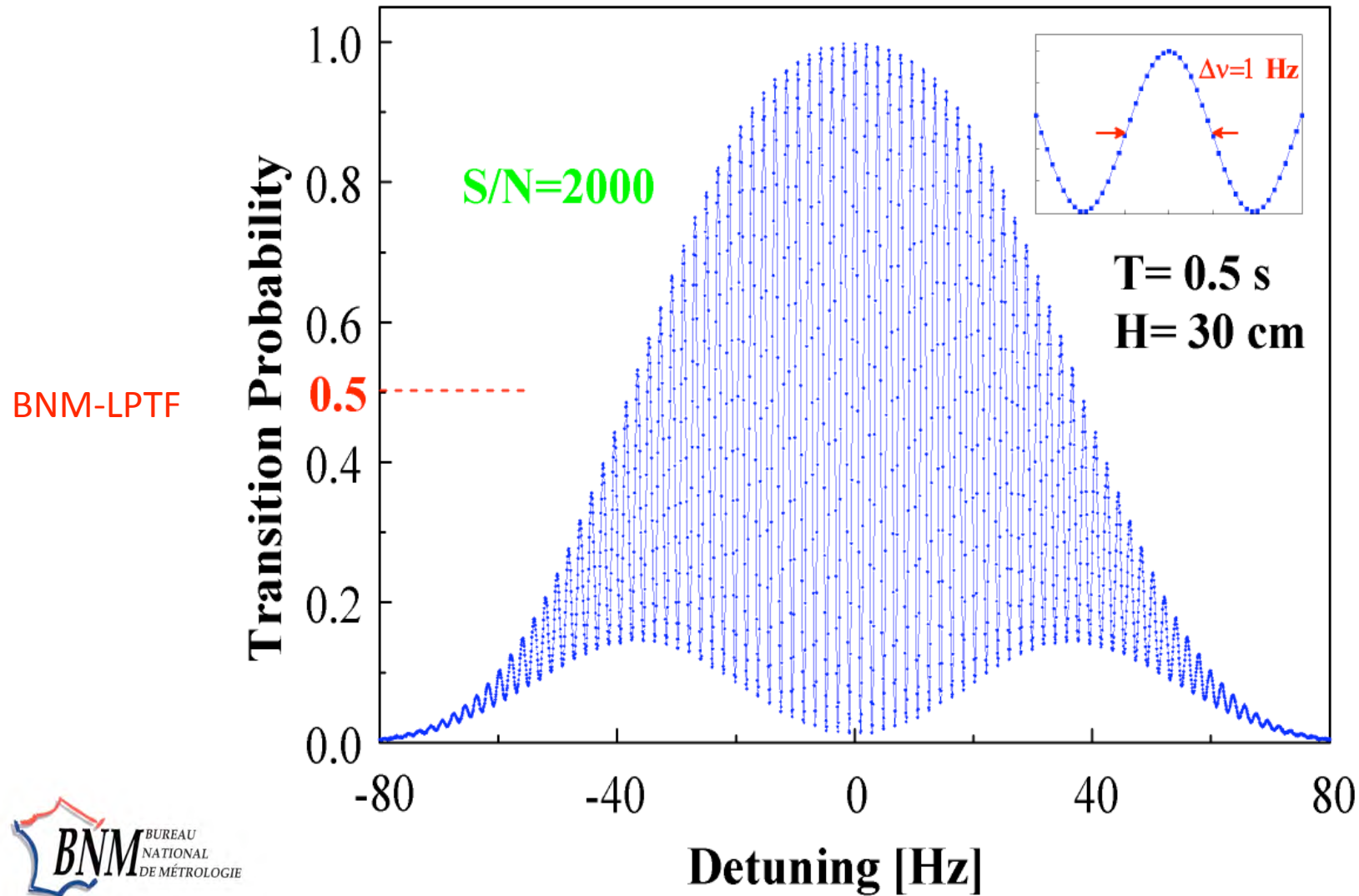
Performances

- Aujourd'hui une dizaine de fontaines dans le monde (3 en France).

- Les meilleures :

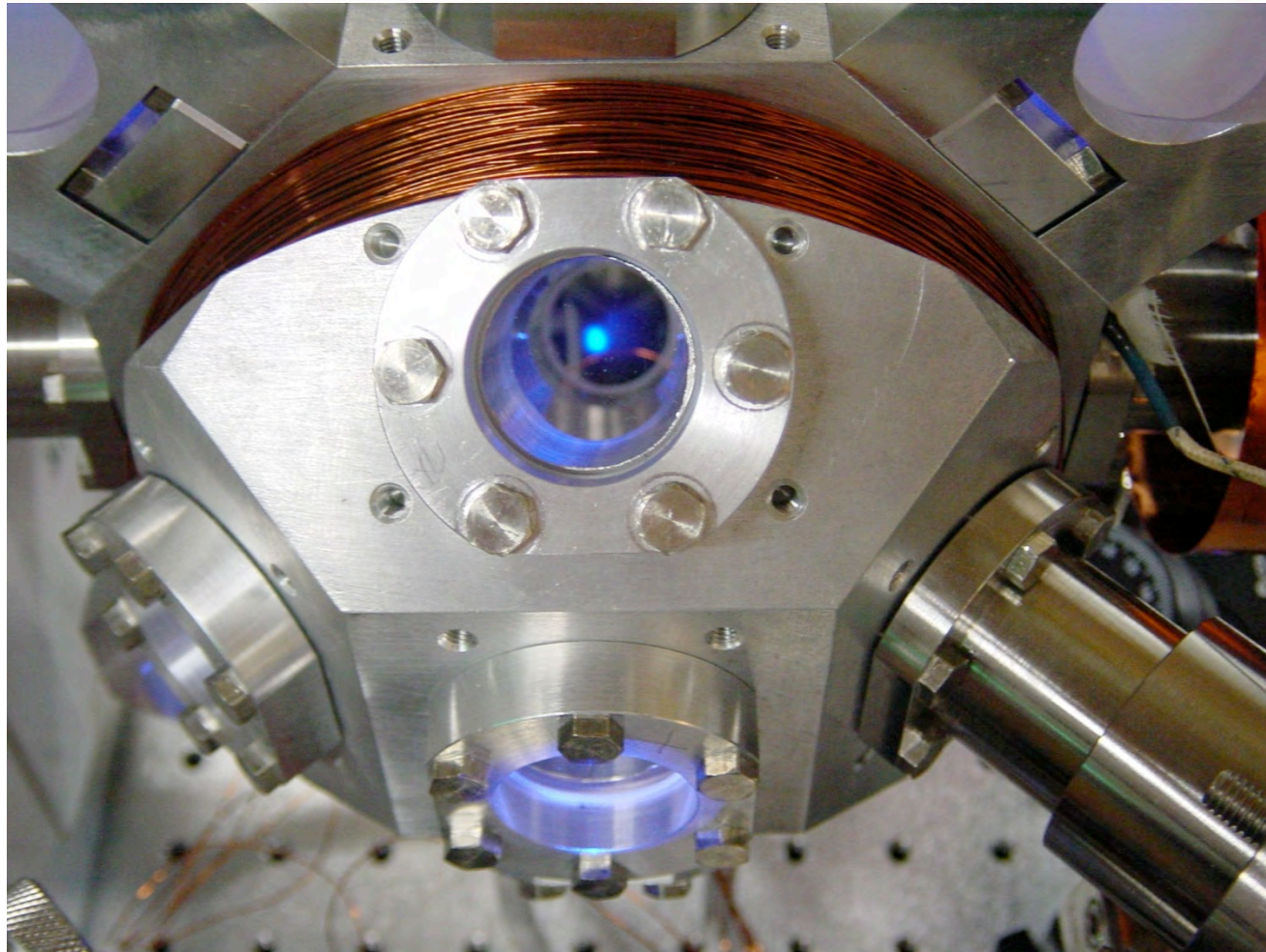
**précision de 1 seconde
sur 100 millions d'années**

Franges de Ramsey dans une fontaine atomique



G. Santarelli et al., PRL 82, 4619 (1999)

Horloges à atomes froids de strontium (dans le visible)



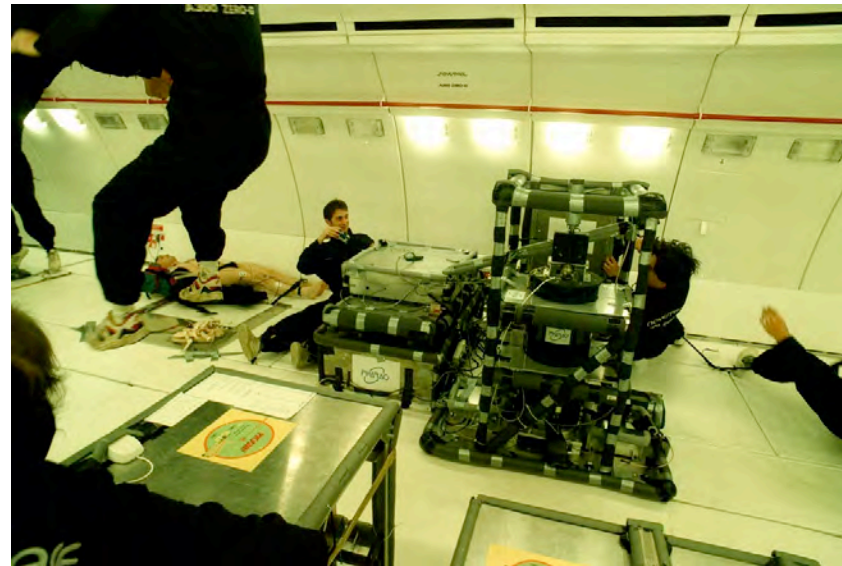
P. Lemonde, I. Courty, A. Quessada, R. Kovacich, BNM-SYRTE
 $\lambda = 689 \text{ nm}$

Comment faire mieux?

**Interroger les atomes pendant
plus longtemps**

Atomes froids dans l'espace

- Sans gravité, le temps d'observation n'est plus que limité par la chute des atomes sous l'effet de la pesanteur
- 1993 : le CNES lance le projet PHARAO
- 1997 : vols de démonstration d'un prototype
- 2009 : lancement dans l'espace?

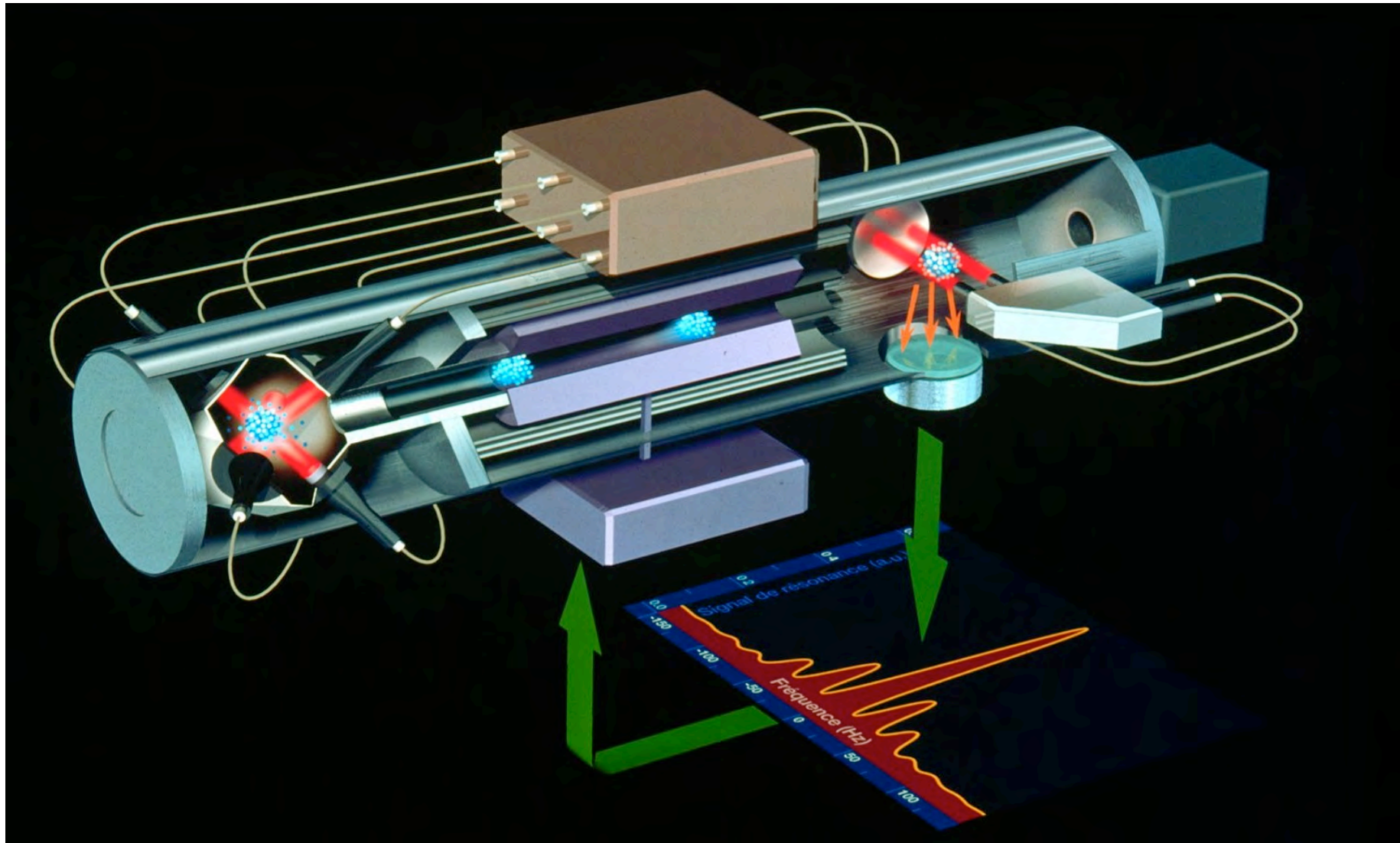


PHARAO en vols paraboliques dans l'Airbus ZeroG



Mai 1997

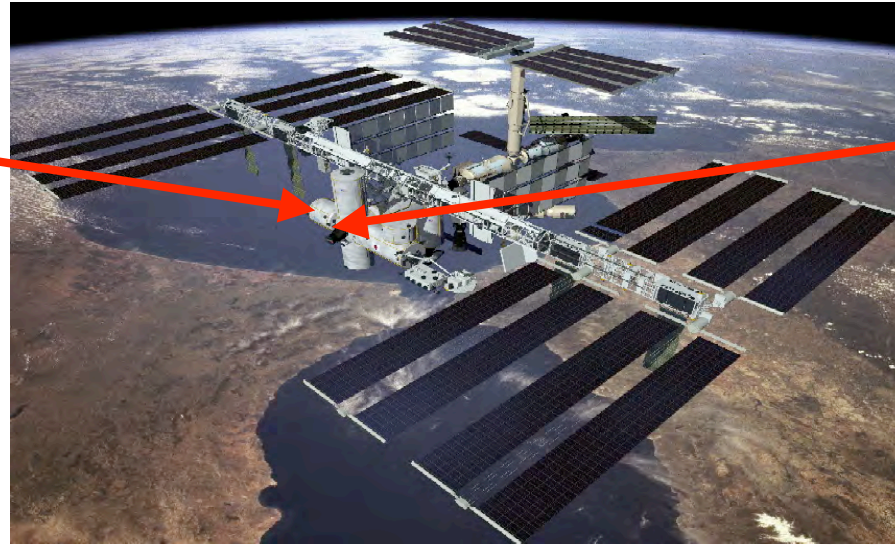
L'horloge PHARAO



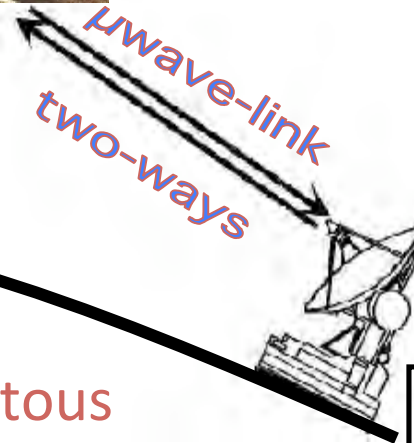
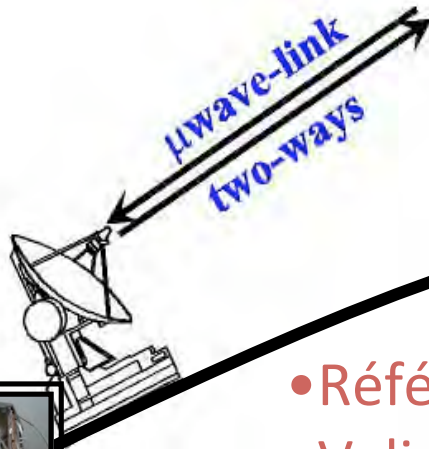
ACES: Atomic Clocks on the ISS

PHARAO

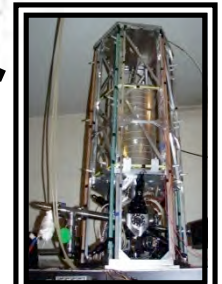
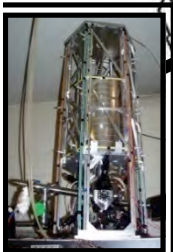
H-MASER



Proposal to ESA:
1997

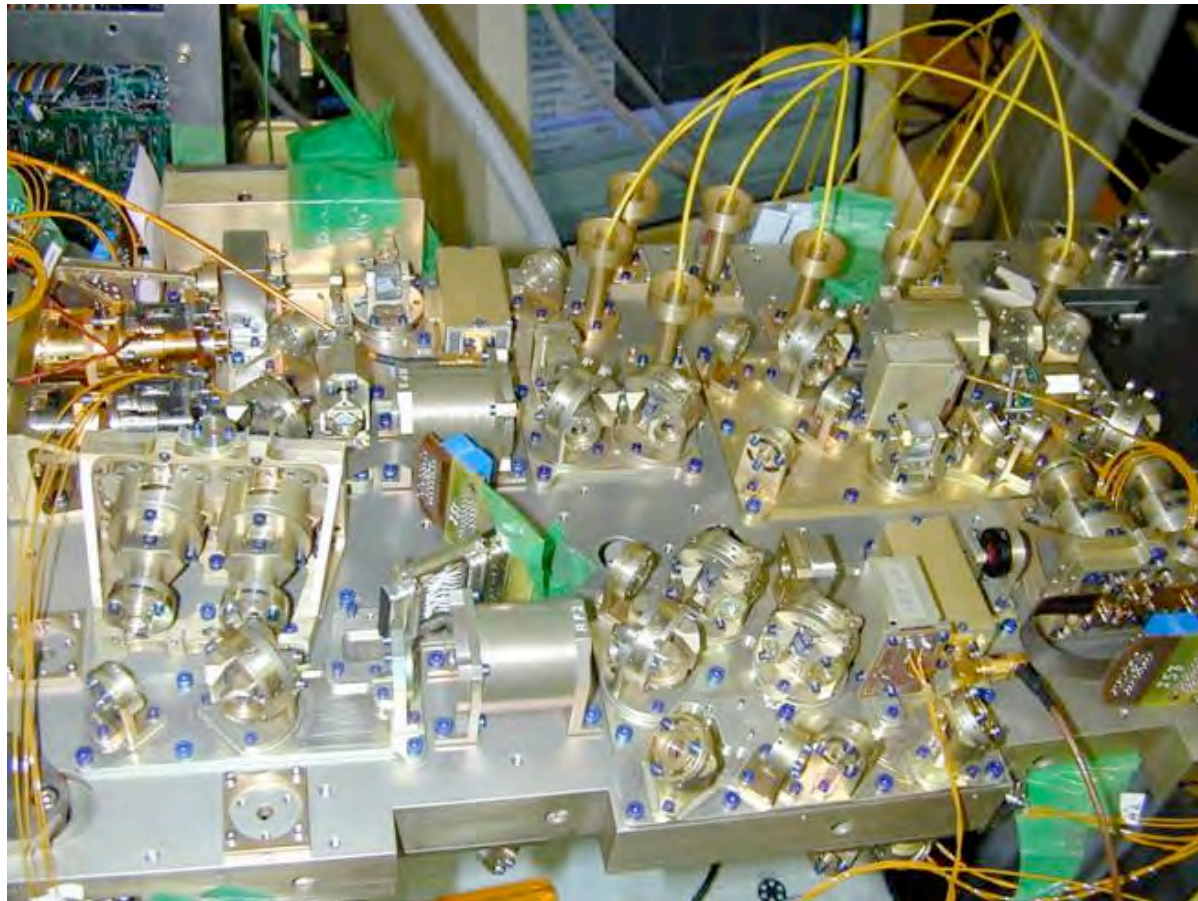


- Référence de temps accessible à tous
- Validation des horloges spatiales
- Tests de physique fondamentale

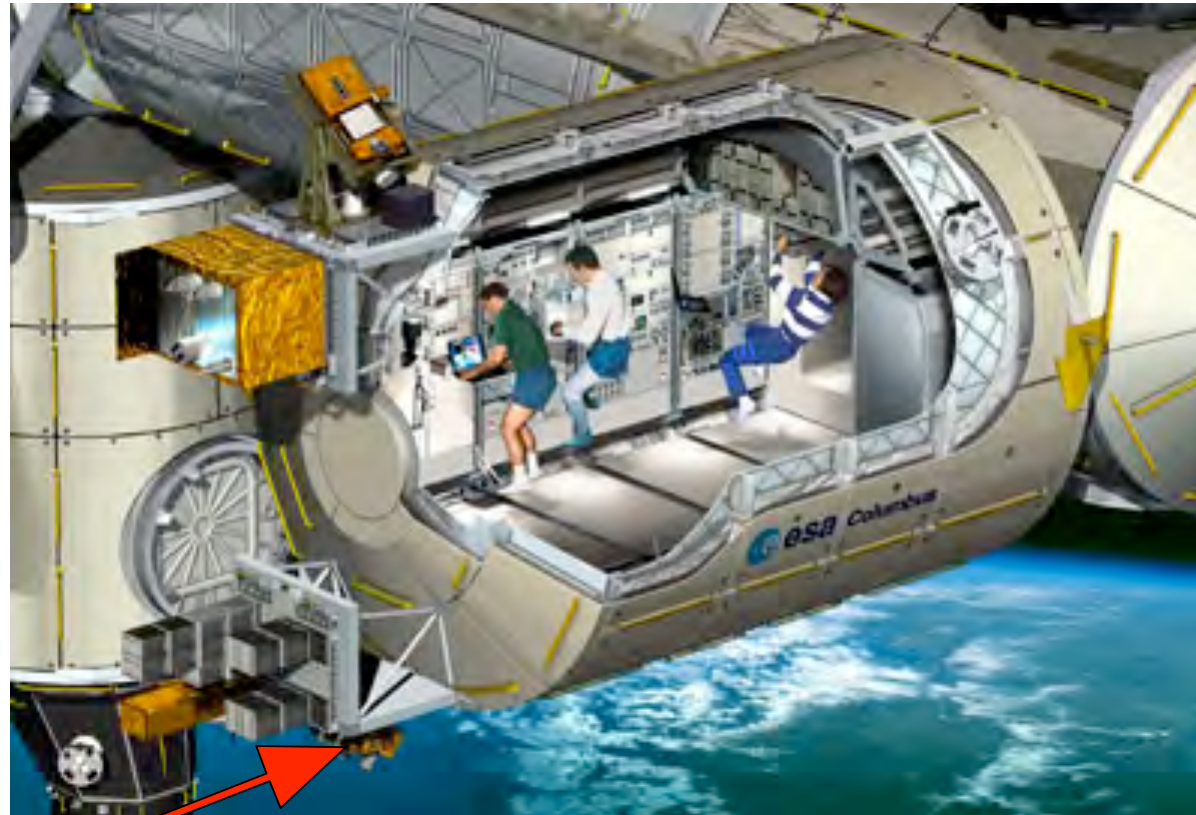


Défi technologique

Techniques laser pour le
refroidissement des atomes



ACES ON COLUMBUS EXTERNAL PLATFORM



ACES

$M = 227 \text{ kg}$

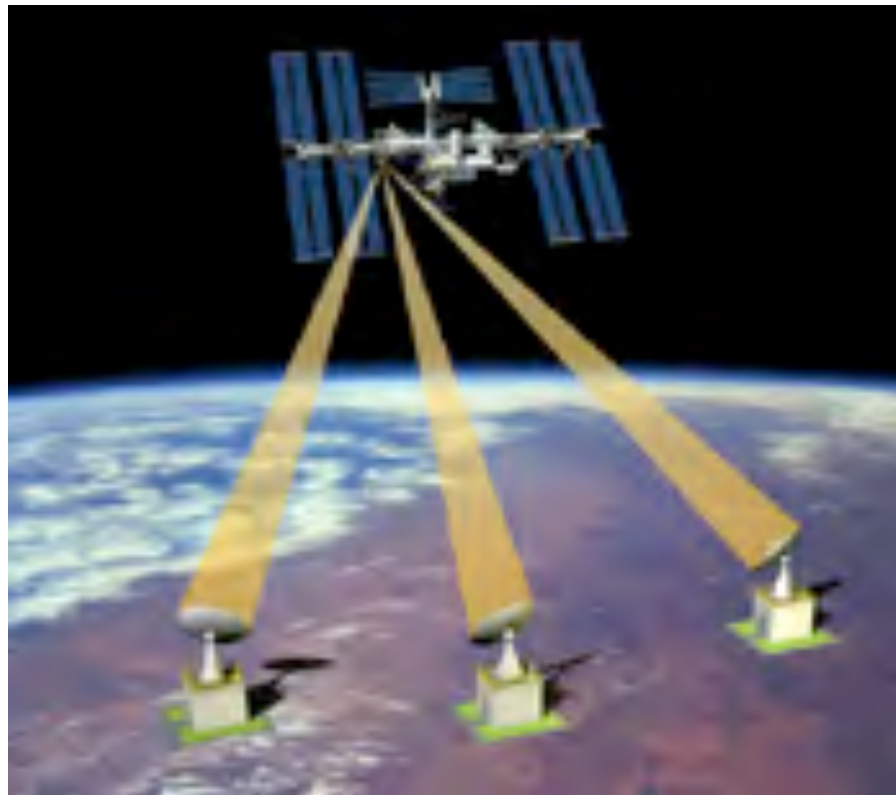
$P = 450 \text{ W}$

date de lancement : fin 2009
durée de la mission : 18 mois



Objectifs

Comparer l'horloge à bord avec différentes horloges au sol disséminées sur le globe

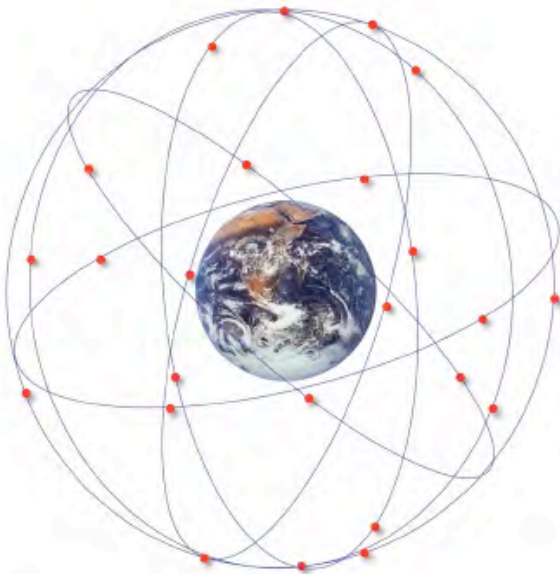


et dans l'espace (satellites du GPS)

Qu'est-ce que le GPS ?

19

- La constellation GPS est constituée de 24 **satellites NAVSTAR** placés sur 6 orbites circulaires
- l'altitude de ces satellites : 20184 km. Ils font ainsi un tour d'orbite en 12 h.
- la position de chaque satellite est connue avec une précision < 1 m



A quoi vont servir ces « super » horloges?



Métrologie du temps :

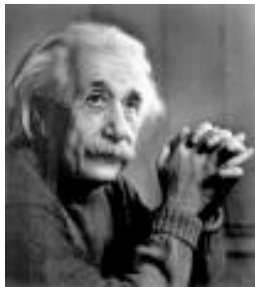
Temps légal français (horloge parlante)

Temps atomique international



Positionnement par satellites :

GPS, GALILEO → qq cm de résolution



Tests de physique fondamentale :

Mesure de la relativité du temps (plusieurs mètres d'erreur pour le GPS)

Les constantes fondamentales ne sont pas constantes !



Conclusion

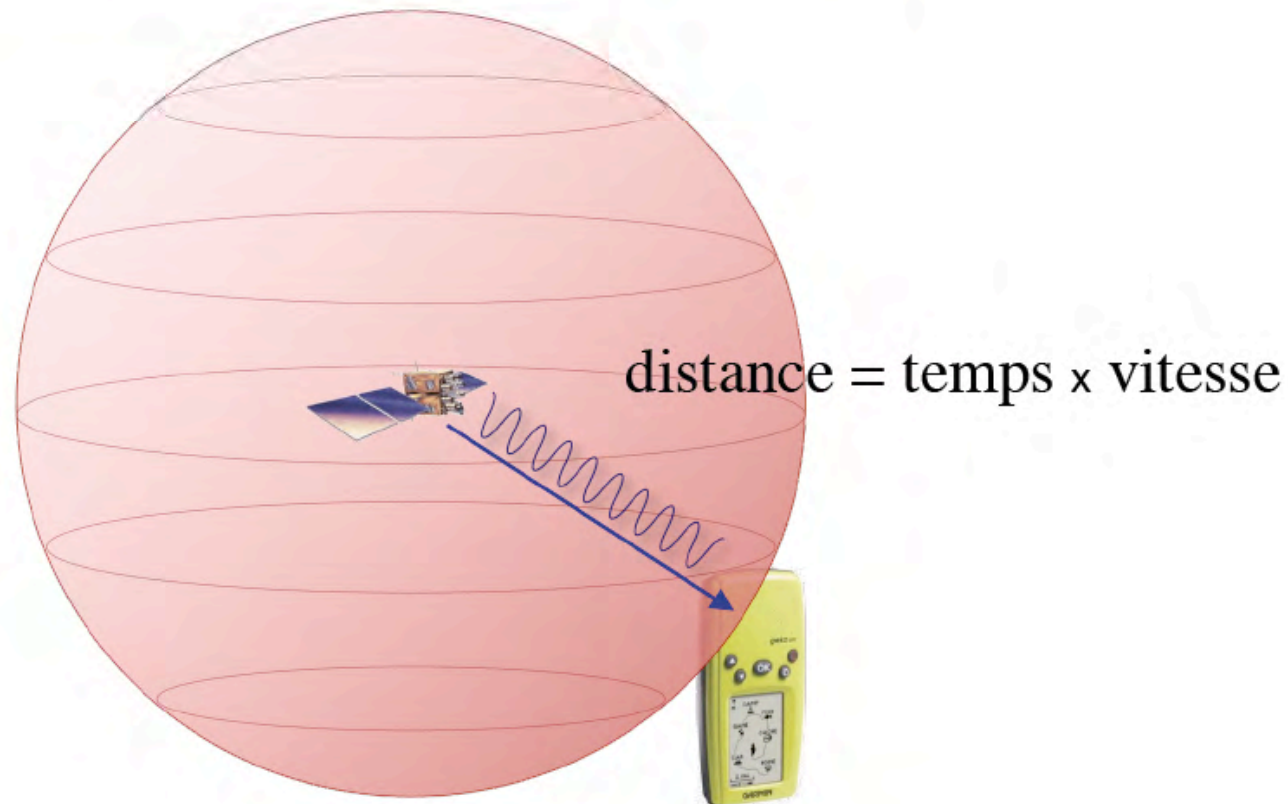
L'âge de l'Univers est estimé à
10 milliards d'années.

Sur cette même durée une horloge atomique
ne bougerait que de quelques dizaines de secondes

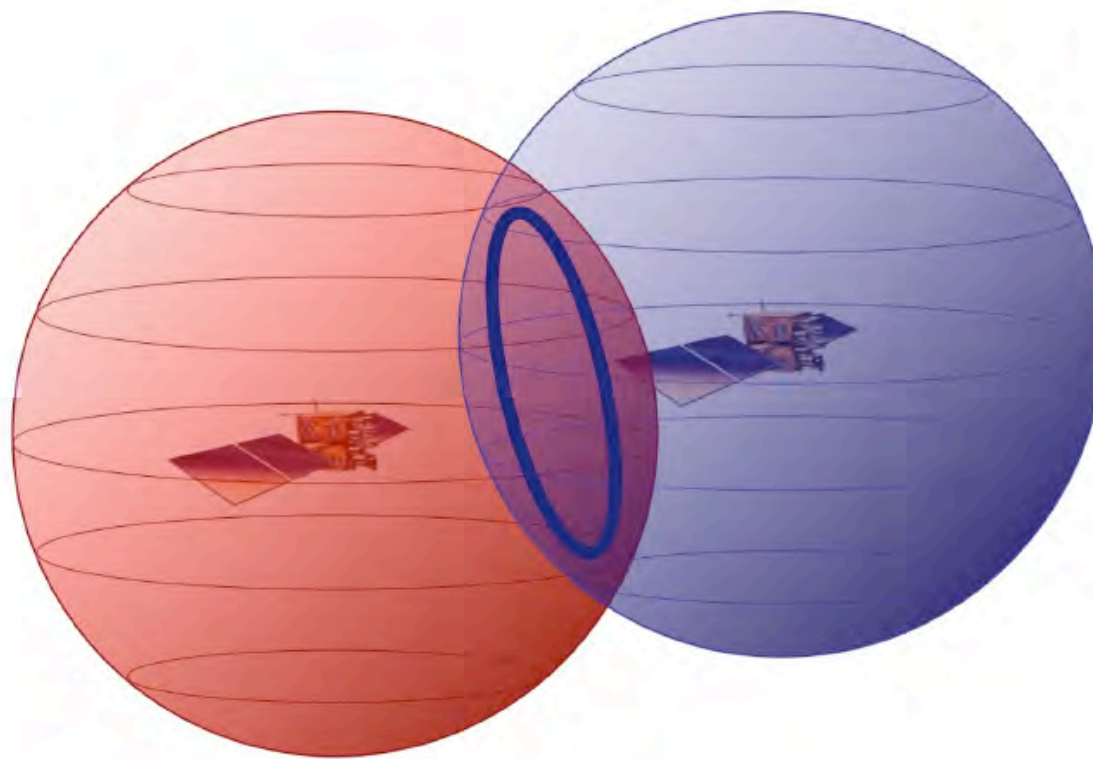
Si les lois physiques évoluent avec l'univers
alors
la résolution atteinte par les horloges atomiques
permettra de le voir sur une durée
à l'échelle humaine

Le GPS calcule la position par **triangulation** :

- le satellite émet une onde électromagnétique de vitesse connue
- le récepteur calcule le temps mis par cette onde pour l'atteindre
- le récepteur sait alors qu'il se trouve sur une sphère centrée sur le satellite



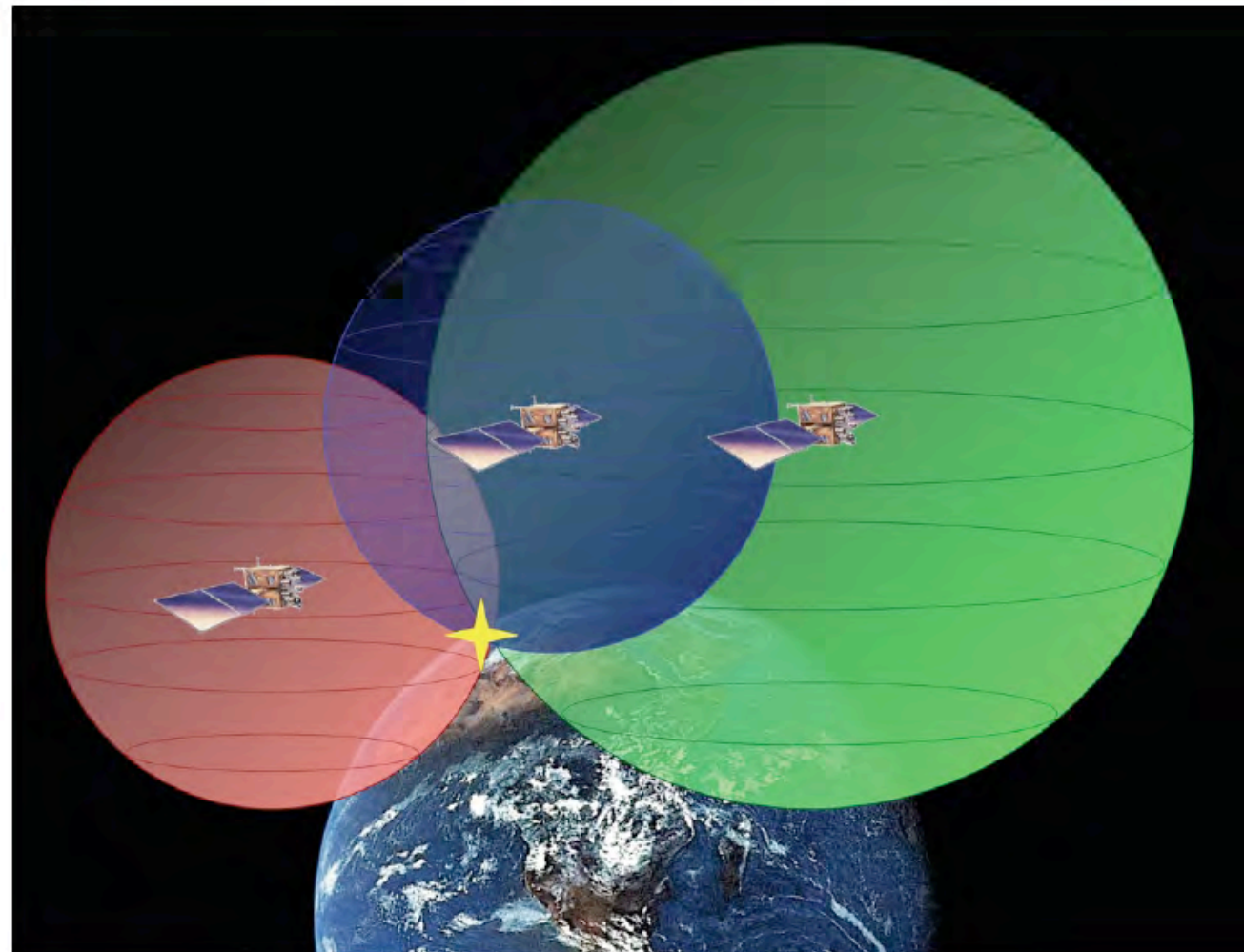
- En recoupant les informations de **2 satellites**, le lieu géométrique du récepteur devient un cercle



Fonctionnement du GPS

27

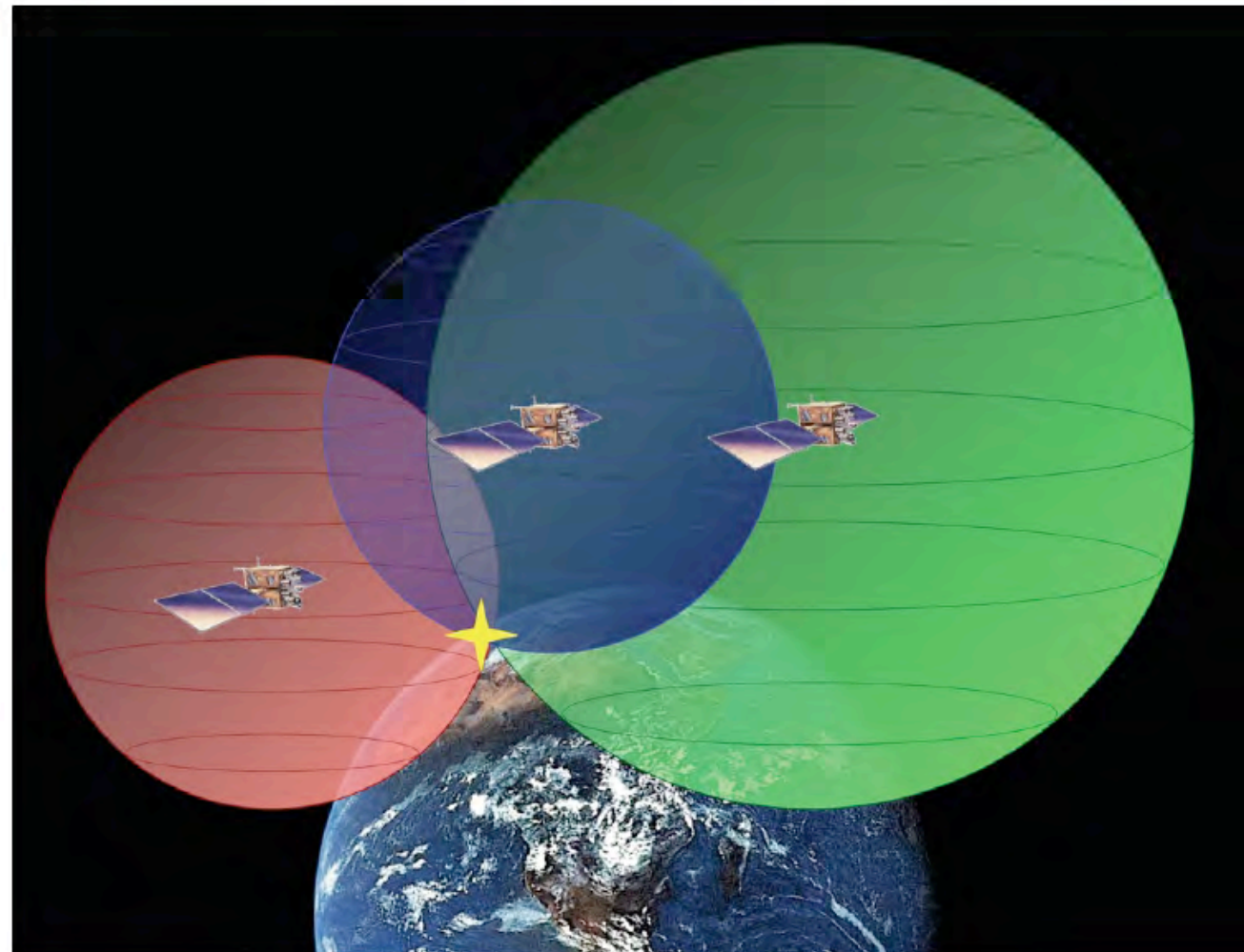
- Avec 3 satellites, l'intersection se réduit à un (ou 2) points



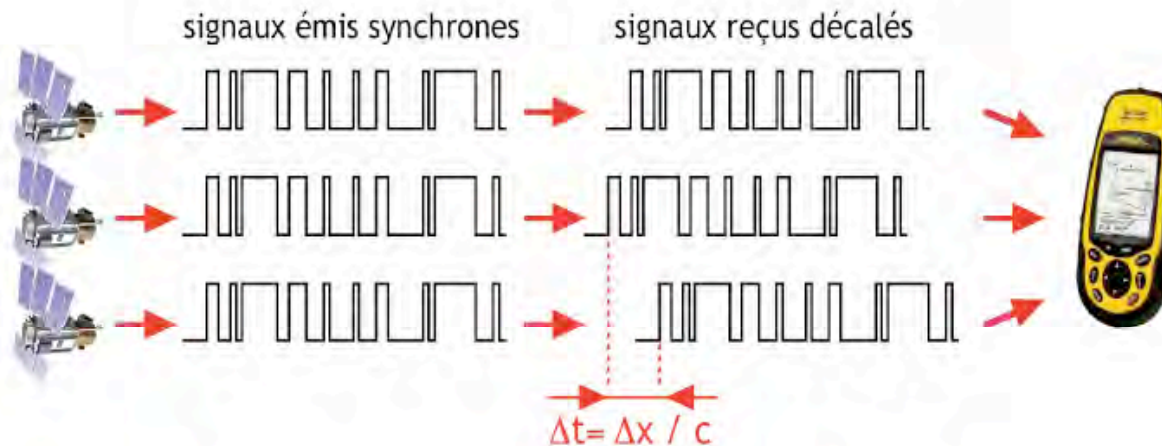
Fonctionnement du GPS

27

- Avec 3 satellites, l'intersection se réduit à un (ou 2) points



Fonctionnement du GPS



Les signaux se propagent à la vitesse de la lumière

$$\text{distance} = \text{durée} \times 2.9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

1 μs de retard = 300 m de distance $\rightarrow$ il faut une précision de 1 ns pour atteindre une résolution de l'ordre du mètre

Fonctionnement du GPS

Le récepteur n'a pas l'heure exacte et ne connaît donc que l'écart relatif par rapport aux 3 satellites

→ **il faut un 4^e satellite** pour figer la position exacte :

- Chaque satellite NAVSTAR possède plusieurs horloges atomiques, ce qui lui garantit une heure précise.

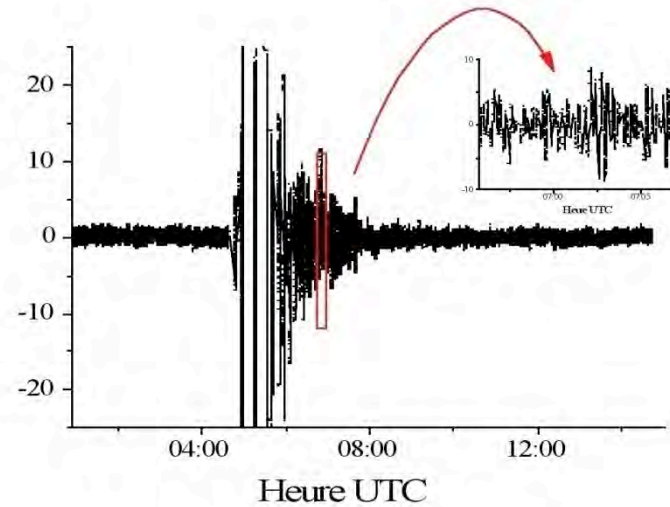




Senseurs inertiels à atomes froids



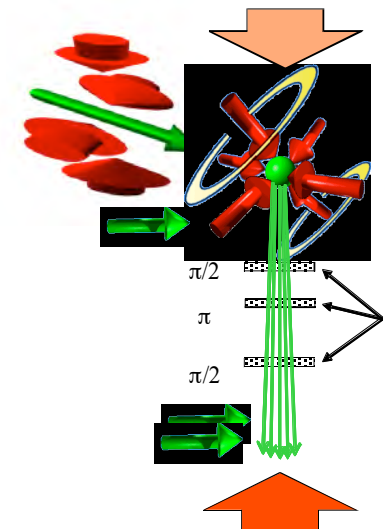
Gyromètres



Signal enregistré par le gravimètre à atomes froids de l'Observatoire de Paris lors de l'éruption des Iles Kuril le 13 janvier 2007

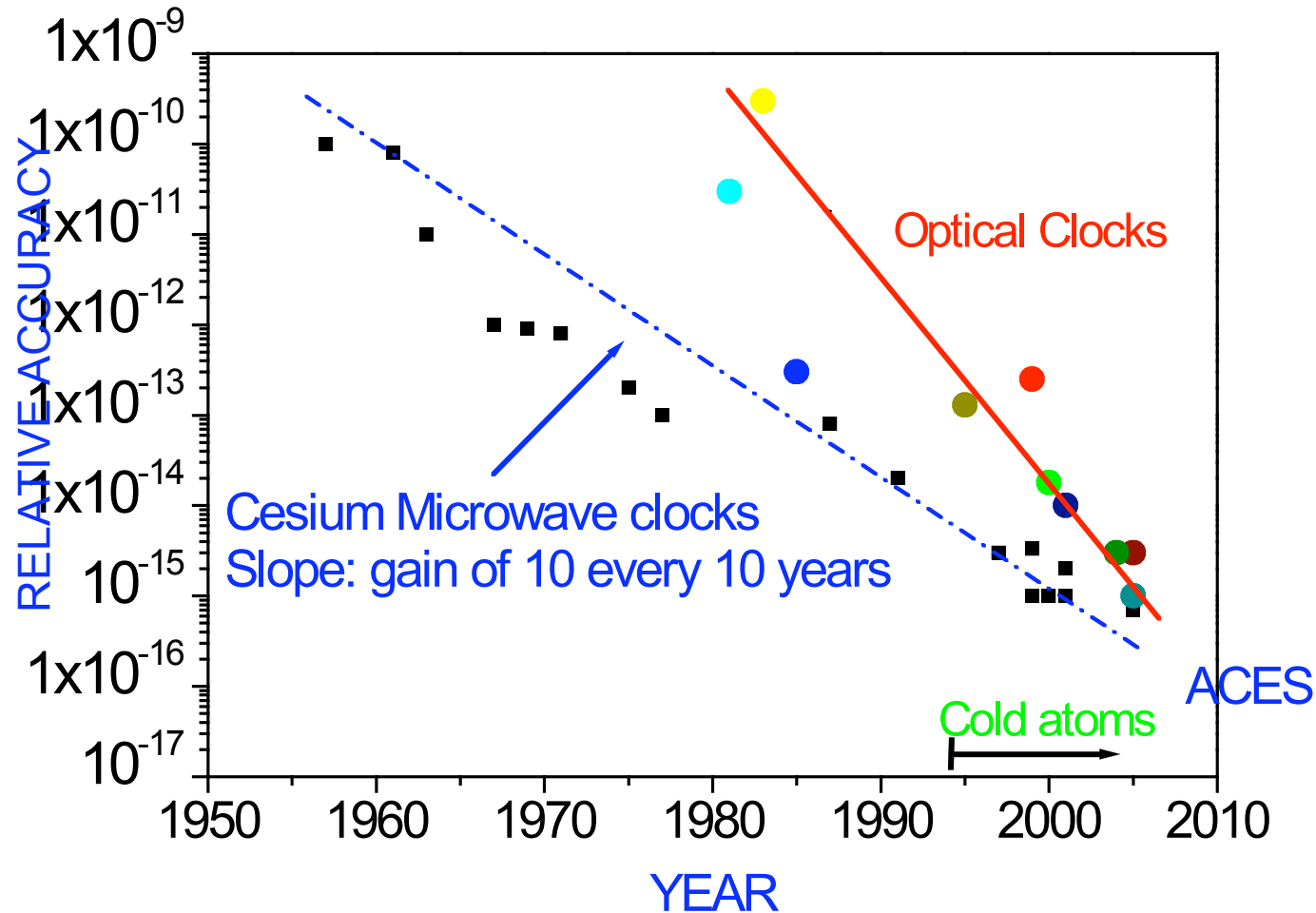
F.Pereira, laboratoire SYRTE

Gravimètres



Accuracy of the atomic time

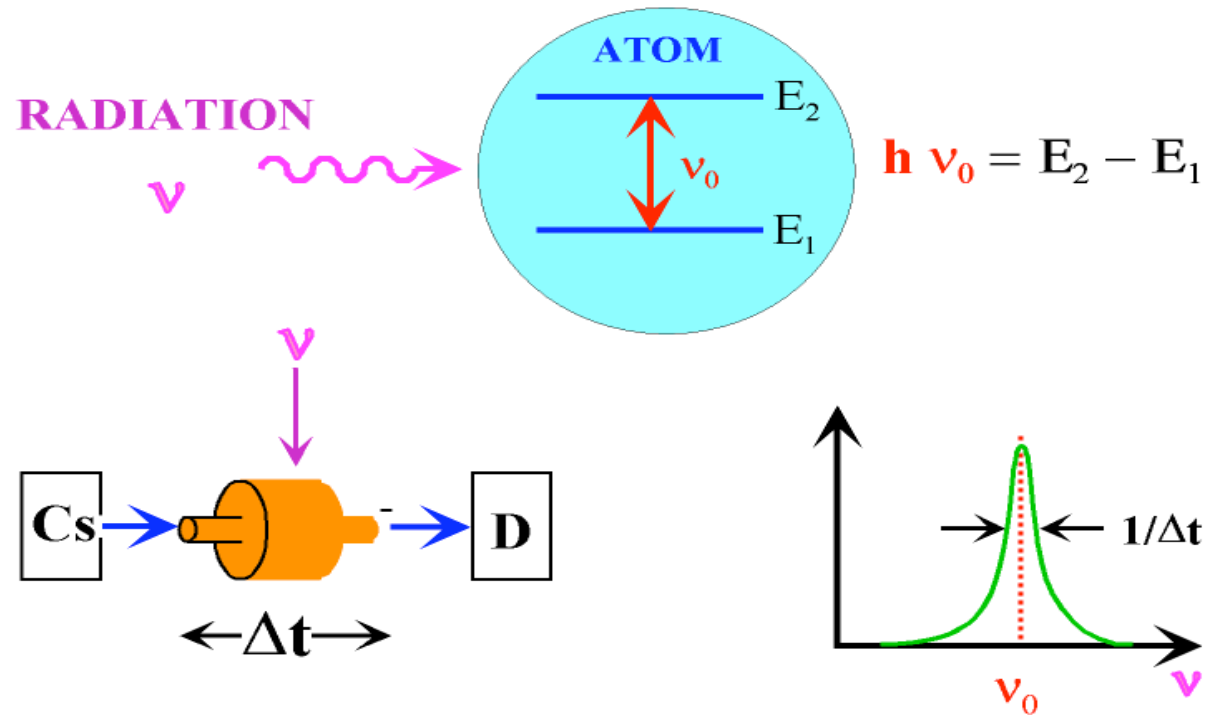
ACCURACY OF THE ATOMIC TIME



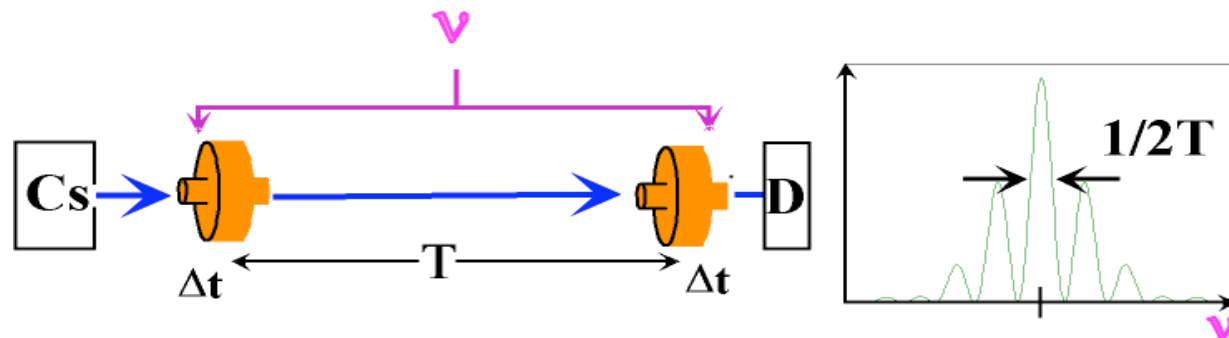
Current accuracy: 7×10^{-16}
Target: 1×10^{-16}



Principe d'une horloge



Ramsey method



INSTITUT HENRI POINCARÉ Centre Emile Borel

Accueil IHP > Centre Emile Borel

Program

Gaz quantiques

23 avril - 20 juillet 2007
Organizing committee: G.Shlyapnikov, Y.Castin, A.Leggett, T.-L.Ho

Home page program
Lecture and Seminar Schedule
Poster

Registration

To register for **the trimester**, complete this form

For the workshops, please see the workshop pages beside

To receive updates of the scientific program of the session, send to infoqg-request@ihp.jussieu.fr an e-mail containing the single word **subscribe** in the message body

CEB organization assistant

Sylvie LHERMITTE

Contact: qg@ihp.jussieu.fr
Phone number: 01 44 27 67 75

Workshops

Recent progress in the studies of quantum gases June, 27th - 30th, 2007

"There will be a poster session organized at the conference. Applicants who wish to present a poster are kindly requested to send the title and the list of authors of the poster, together with a few lines of abstract, by e-mail to the address Qg@ihp.jussieu.fr"

EUROPEAN SCIENCE FOUNDATION
SETTING SOURCE ACCELERATING EUROPE

INTERCAN

Recherche sur les Atomes Froids
IFRAF

Manifestations scientifiques nationales de l'IFRAF



Home Program Maps & Travel Podcast

Symposium en l'honneur d'Alain Aspect à l'occasion de ses 60 ans

From Entangled Photons to Atom Lasers

14 Septembre 2007

AUDITORIUM DE L'INSTITUT D'OPTIQUE GRADUATE SCHOOL
CAMPUS POLYTECHNIQUE
2 AVE AUGUSTIN FRESNEL
91127 PALAISEAU CEDEX
FRANCE

Avec le soutien de

Renseignements et inscriptions
francoise.chavel@institutoptique.fr
ou par fax au 01 64 53 31 84

Et la participation de

INSTITUT D'OPTIQUE

ÉCOLE DE PHYSIQUE
LES HOUCHES

UNIVERSITÉ JOSEPH FOURIER
Grenoble

INP Grenoble

Ecole Prédoctorale de Physique des Houches

INTERCAN and IFRAF PreDoc School

Refroidissement Laser et Condensation de Bose-Einstein

28 septembre - 10 octobre 2008 [English Version](#)

Le refroidissement d'atomes par laser a connu ces dernières années un développement rapide et spectaculaire. En particulier, il a permis de mettre tout un échantillon macroscopique d'atomes dans un même état quantique, phénomène connu sous le nom de condensation de Bose-Einstein. Une des originalités de ce domaine vient de ce qu'il a été beaucoup étudié dans le contexte de la matière condensée (superfluidité, supraconductivité) et qu'aujourd'hui il est plus orienté vers la physique atomique.

L'importance prise par ce domaine très pointu qu'est la condensation de Bose-Einstein ne doit pas faire oublier les bases indissolubles sur lesquelles reposent les domaines connexes (mécanique quantique et

60 ans d'Alain Aspect à l'institut d'Optique



Médaille d'or
CNRS
2006

5 prix Nobel de physique présents pour cette journée..

Aristote

(-384,-322)

le rôle du temps dans les processus
naturels est un fait essentiel de la
réalité du monde.

Principe de base

1. Prendre une résonance entre 2 états d'énergie très stables d'un atome.

Dans mon horloge cette résonance va jouer le rôle de régulateur (moyennant un circuit d'asservissement)

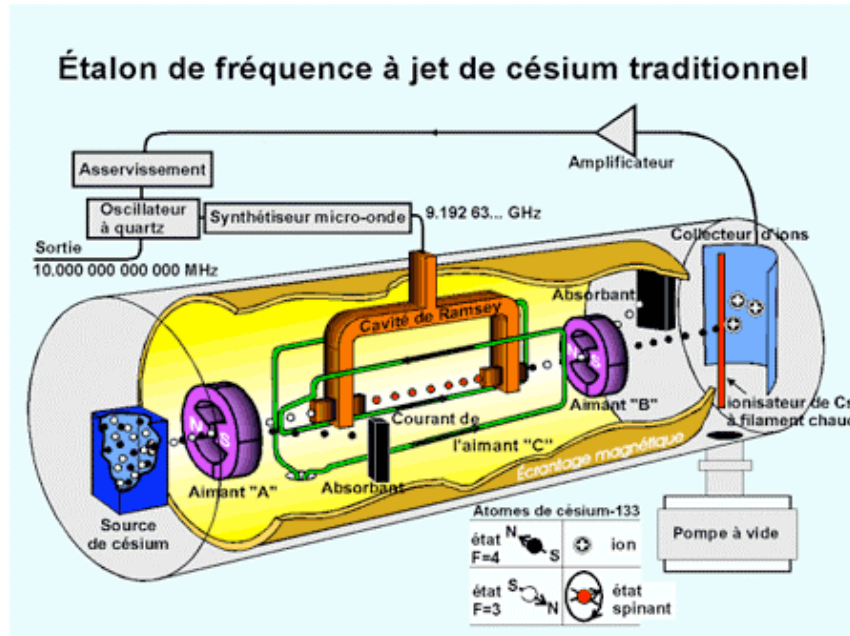
2. Il faut un échappement : Un générateur (oscillateur).
le signal de sortie excite la résonance atomique

3. Le rouage utilise le signal de sortie de l'oscillateur et fournit le signal de référence.

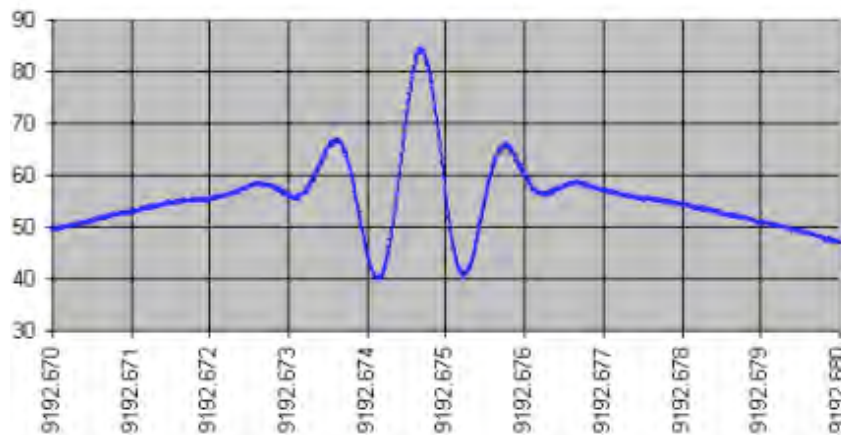
4. Le moteur sera une prise de courant.

Horloge à jet thermique

Asservissement d'un oscillateur (à quartz) sur la résonance atomique



- Un jet thermique continu peu dense
- Une préparation des atomes dans le même état quantique
- Une interaction avec l'onde de l'oscillateur
- Un comptage du nombre d'atomes qui sont passés dans l'état excité



- Une retro-action sur l'oscillateur pour maintenir sa fréquence sur la fréquence atomique en maximisant le nombre d'atomes excités.
- Le signal électrique de l'oscillateur est donc un signal périodique très stable et utilisable