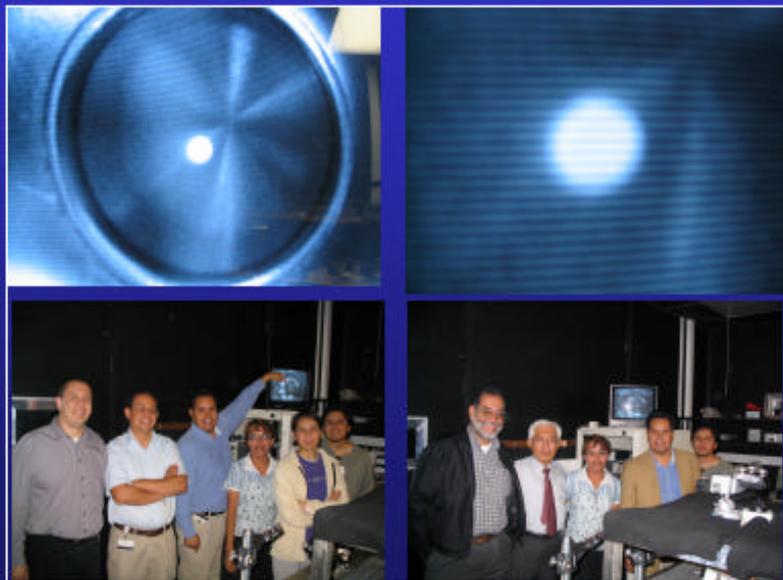




# Relojes atómicos y experimentos con átomos ultrafríos en el CENAM



por  
Mauricio López

## Relojes atómicos y experimentos con átomos ultrafríos en el CENAM

El principio para usar transiciones atómicas como referencia para construir relojes atómicos fue propuesto por primera vez por I. Isaac Rabi de la Universidad de Columbia en los años 1930s.



I. Isaac Rabi



**The Nobel Prize  
in Physics 1944**

## Relojes atómicos y experimentos con átomos ultrafríos en el CENAM

Un gran avance en el desarrollo de los relojes atómicos fue hecho por la invención del método de los campos oscilantes separados y su aplicación en la resonancia magnética nuclear por Norman Ramsey.

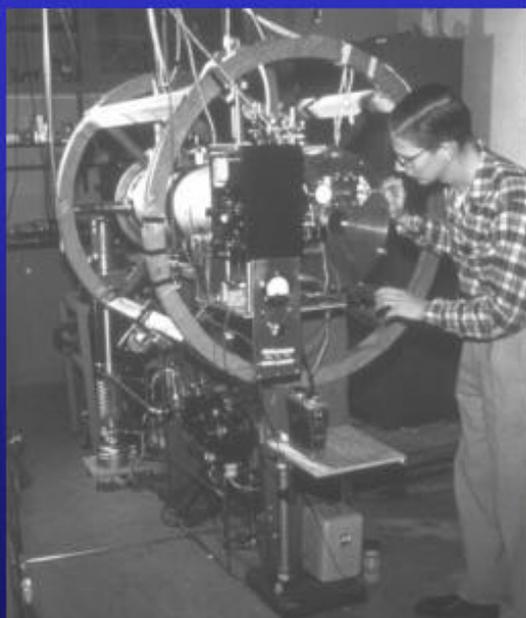


Norman F. Ramsey



**The Nobel Prize  
in Physics 1989**

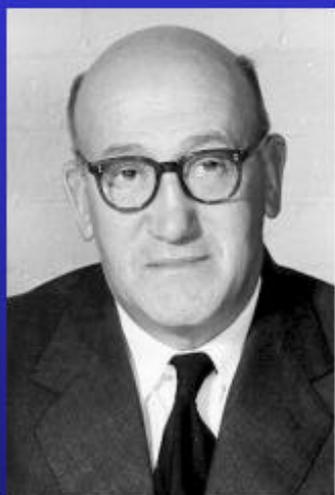
## Relojes atómicos y experimentos con átomos ultrafríos en el CENAM



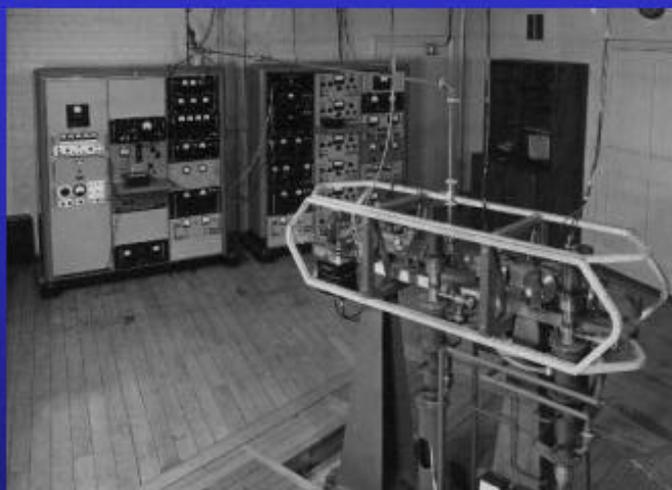
**NBS-1, 1952**

El National Bureau of Standards (NBS) realizó por primera vez en 1952 experimentos encaminados a la construcción de un reloj atómico llamado NBS-1.

## Relojes atómicos y experimentos con átomos ultrafríos en el CENAM



**Louis Essen**

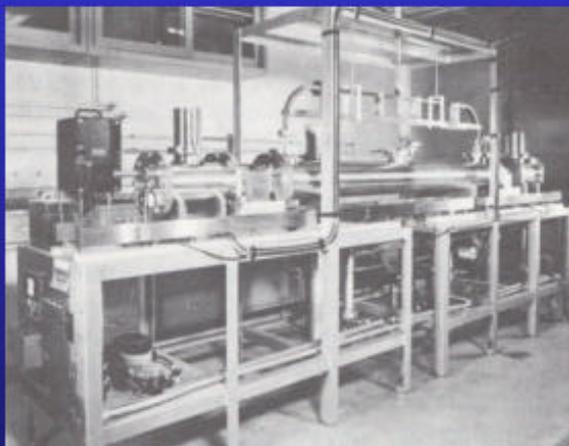


**Caesium I, 1955 (NPL)**

En el National Physical Laboratory (NPL), de Inglaterra, en 1955, se construyó con éxito el primer reloj atómico, llamado Caesium I.



## Relojes atómicos y experimentos con átomos ultrafríos en el CENAM



**NBS-2, 1960**

El National Bureau of Standards (NBS) construyó en 1960 un segundo reloj atómico de grandes dimensiones denominado NBS-2.

## Relojes atómicos y experimentos con átomos ultrafríos en el CENAM



Para 1960, aparece el primer reloj atómico comercial llamado Atómichron construido por la National Company Inc., el cual tenía un costo cercano a los 20 mil dólares.



## Relojes atómicos y experimentos con átomos ultrafríos en el CENAM

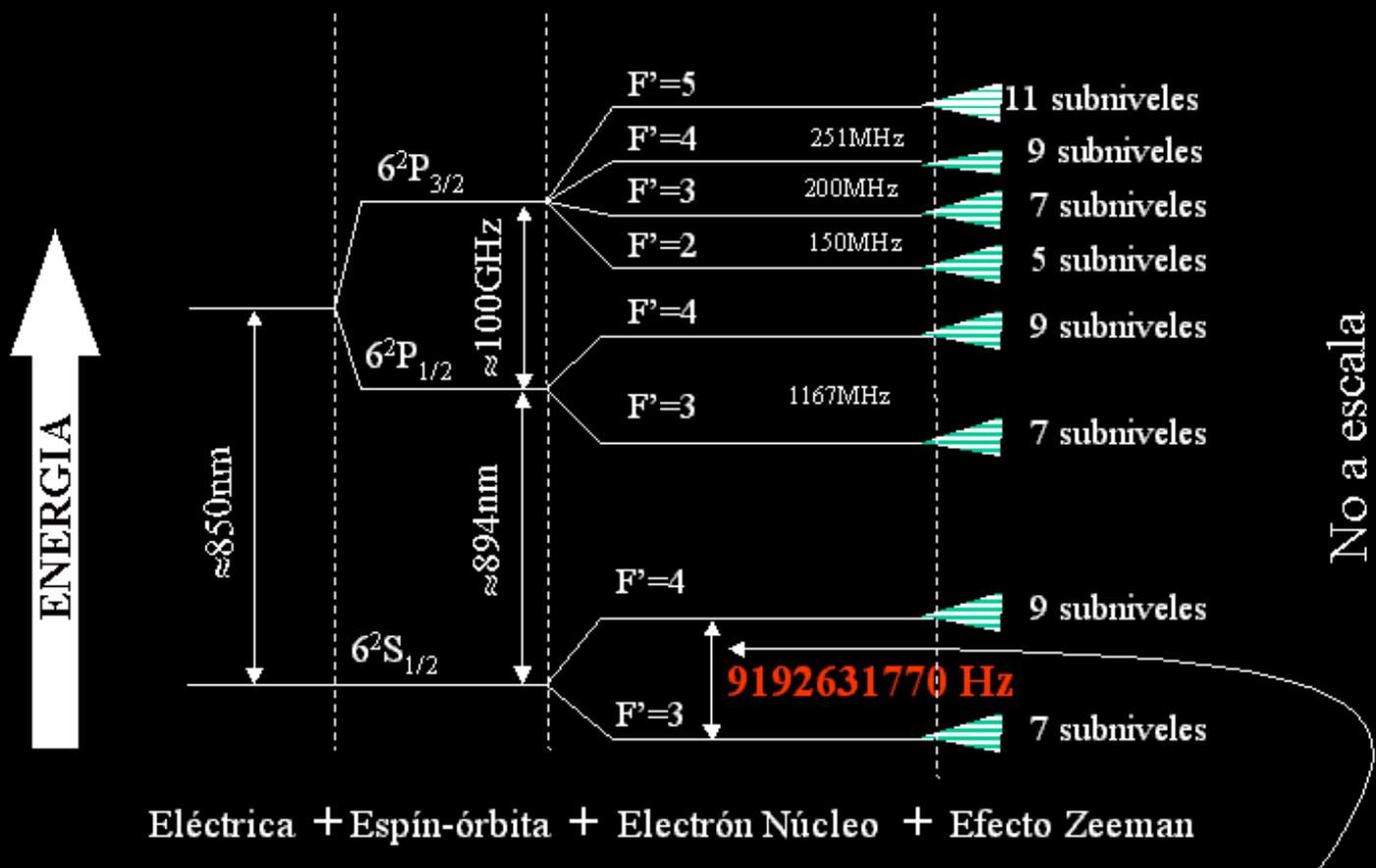
En octubre de 1967, durante la 13a Conferencia General de Pesas y Medidas, se adopta una nueva definición para la unidad de tiempo del Sistema Internacional de unidades, el segundo, en términos de la transición hiperfina del estado base del átomo de Cesio-133.

**Un segundo es la duración de 9 192 631 770  
períodos de la radiación asociada a la transición  
hiperfina del estado base del átomo de Cesio-133**

13a Conferencia General de Pesas y Medidas  
Octubre de 1967



# Primeros niveles de energía del átomo de Cesio-133



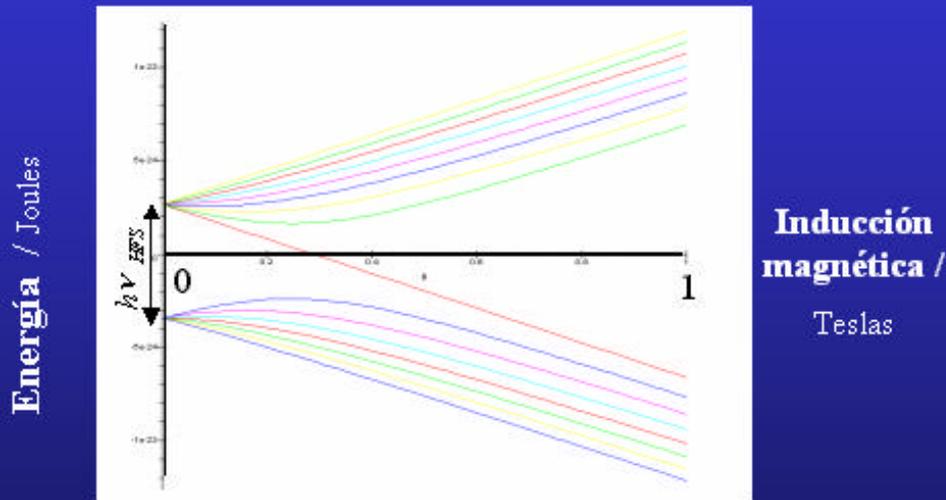
Eléctrica + Espín-órbita + Electrón Núcleo + Efecto Zeeman

**INTERACCION** →

Transición que define a la unidad de tiempo del Sistema Internacional de unidades, el segundo



## Relojes atómicos y experimentos con átomos ultrafríos en el CENAM

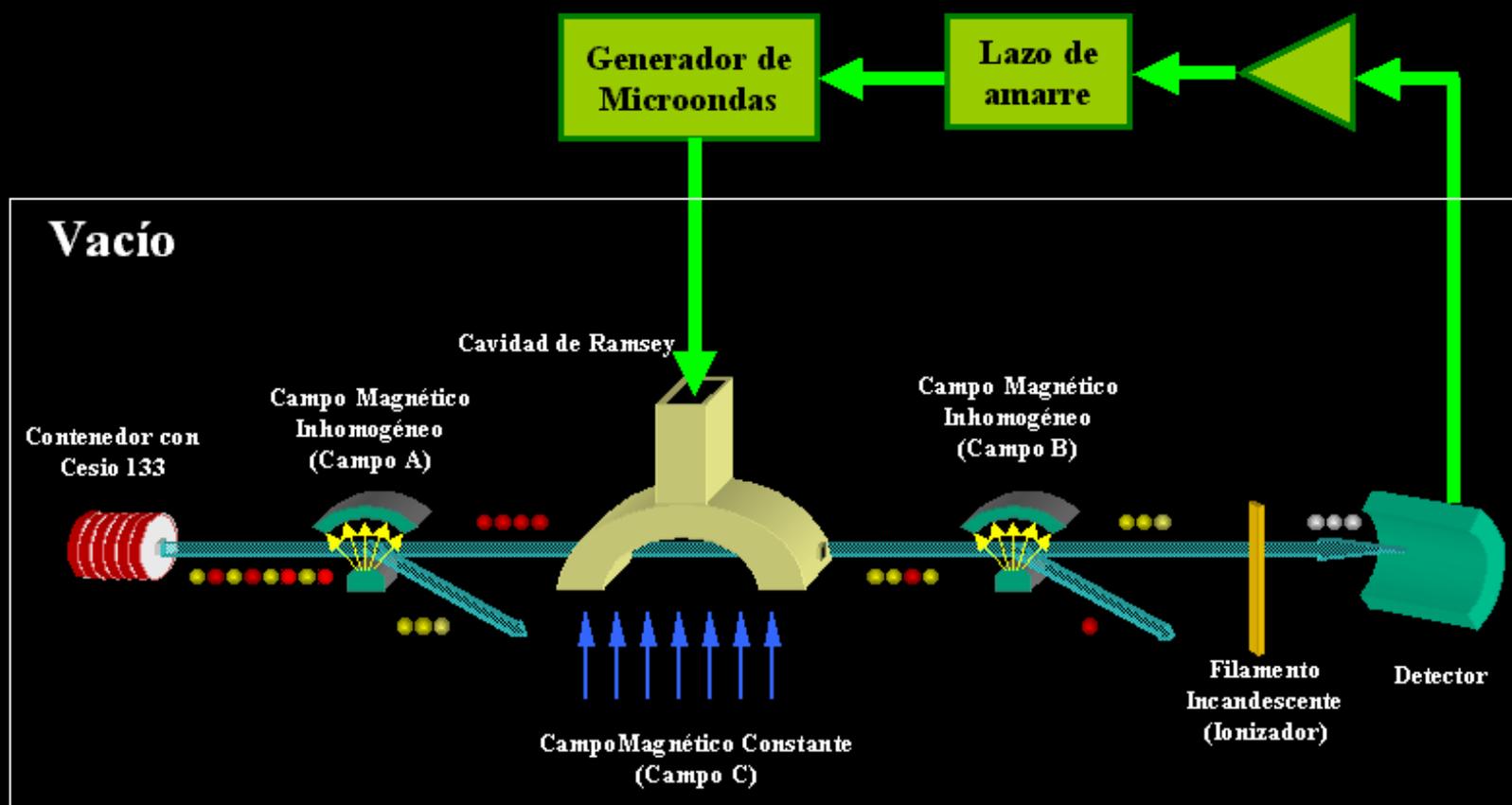


$$\Delta E = -\frac{h\nu_{HFS}}{2(2I+1)} - g_I \mu_B m_F B_0 \pm \frac{1}{2} h\nu_{HFS} \sqrt{1 + \frac{4m_F}{2I+1} \frac{\mu_B (g_I + g_J)}{h\nu_{HFS}} B_0 + \frac{\mu_B^2 (g_I + g_J)^2}{h^2 \nu_{HFS}^2} B_0^2}$$

La estructura energética del átomo de Cesio se multiplica en presencia de un campo magnético externo. En esta estructura compleja de estados cuánticos se llevan a cabo los experimentos para realizar la unidad de tiempo del Sistema Internacional de unidades, el segundo.



En la arquitectura clásica de los relojes atómicos de Cesio se usan campos magnéticos inhomogeneos como filtros para separar los niveles Zeeman en la transición que define a la unidad de tiempo del Sistema Internacional de unidades, el segundo.



## Relojes atómicos y experimentos con átomos ultrafríos en el CENAM

Entre los laboratorios a nivel internacional con una larga tradición en la construcción de relojes atómicos con filtros magnéticos está el National Research Council (NRC) de Canadá.



CsV, NRC

## Relojes atómicos y experimentos con átomos ultrafríos en el CENAM

Otro de los laboratorios con una larga tradición en la construcción de relojes atómicos con filtros magnéticos es el Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB) de Alemania.



**Relojes atómicos de selección magnética del PTB**

## Relojes atómicos y experimentos con átomos ultrafríos en el CENAM

El descubrimiento y desarrollo de métodos ópticos para el estudio de resonancias de radio en átomos fue llevado a cabo por Alfred Kastler.



**Alfred Kastler**

France

École Normale Supérieure, Université de Paris  
Paris, France

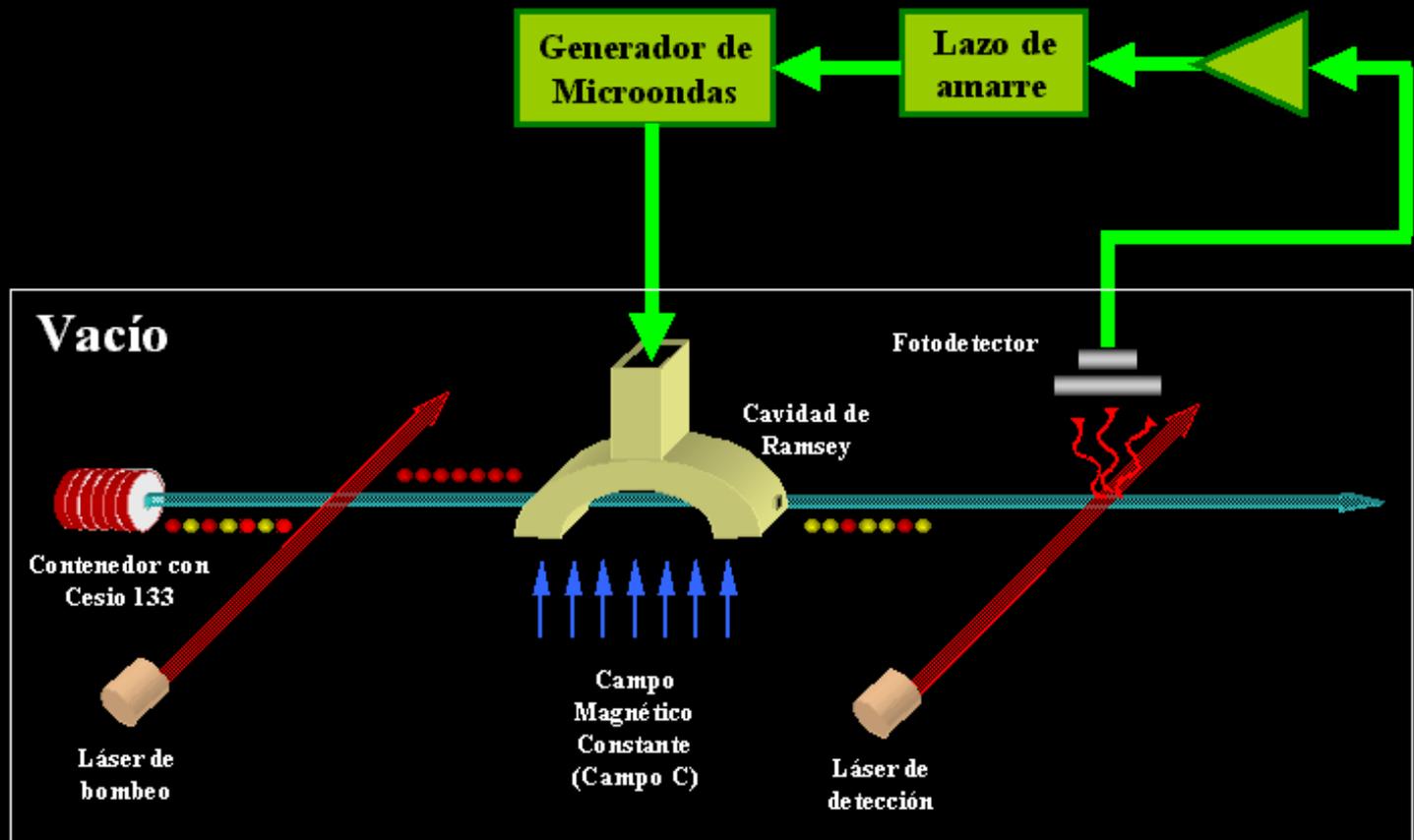
b. 1902  
d. 1984



**The Nobel Prize  
in Physics 1966**

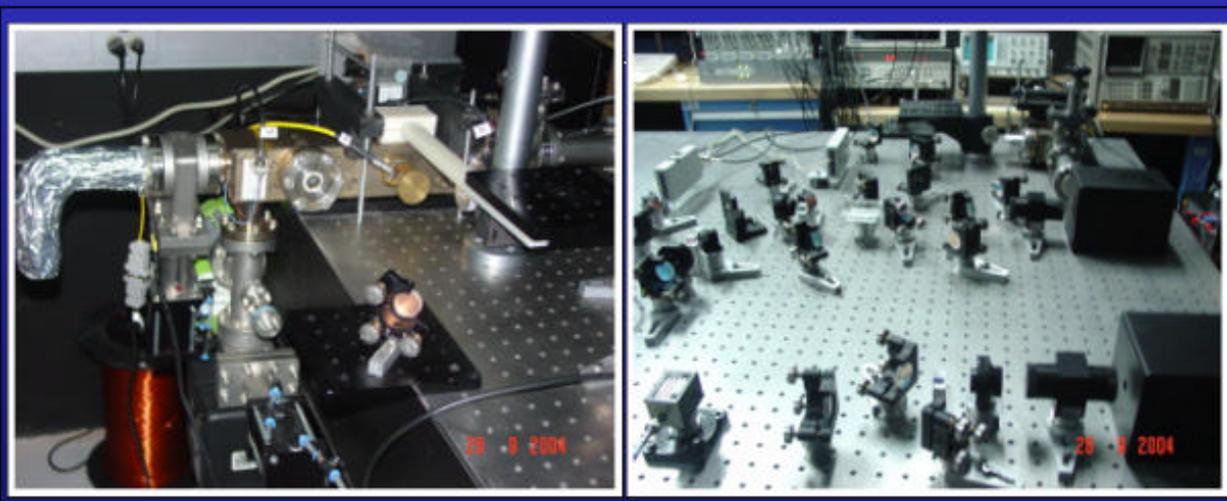


El Centro Nacional de Metrología (CENAM) ha desarrollado un reloj atómico de Cesio que incorpora las técnicas de bombeo óptico desarrolladas por Alfred Kastler. Usando el bombeo óptico los filtros magnéticos son substituidos por láseres semiconductores estabilizados en frecuencia a la línea D2 del Cesio-133.



## Relojes atómicos y experimentos con átomos ultrafríos en el CENAM

La imagen muestra una vista parcial del reloj atómico de bombeo óptico desarrollado en el CENAM, denominado CsOP-1. A la derecha de la imagen se aprecia parte del arreglo óptico, mientras que en la parte izquierda se muestra y la cavidad de vacío.

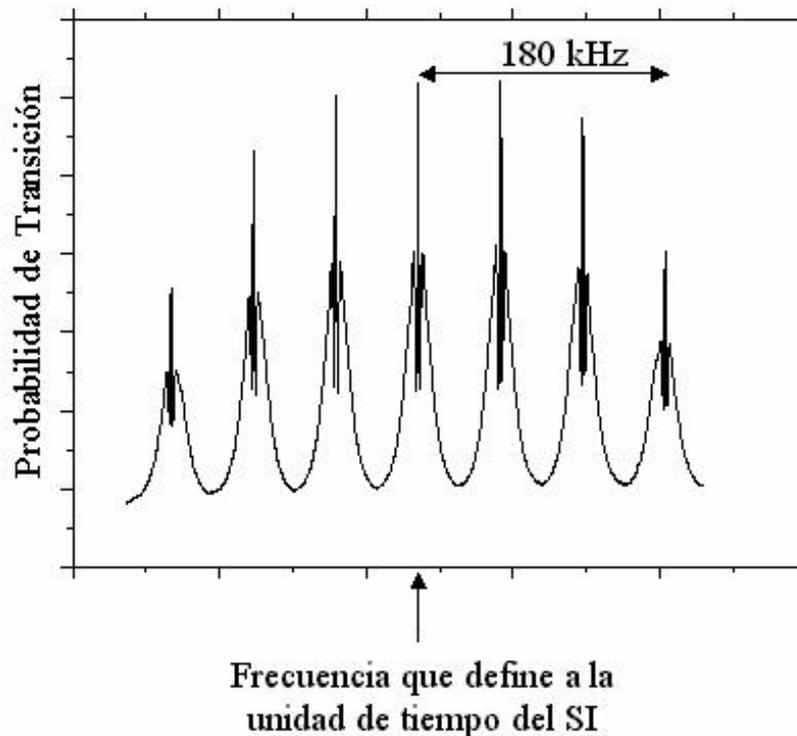


CsOp-1, CENAM



## Relojes atómicos y experimentos con átomos ultrafríos en el CENAM

### Espectro de Ramsey del CsOp-1



La imagen muestra el espectro de resonancias del reloj atómico de bombeo óptico construido en el CENAM, denominado CsOP-1.

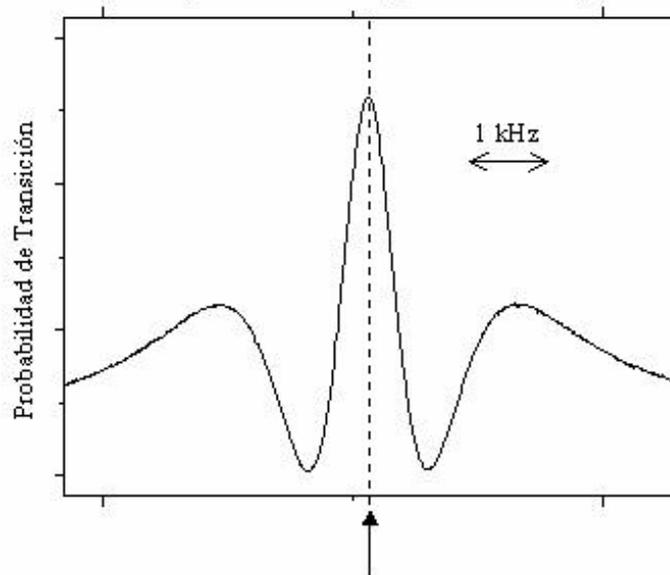




## Relojes atómicos y experimentos con átomos ultrafríos en el CENAM

### Franja de Ramsey del CsOp-1

(línea central del espectro de Ramsey)



Frecuencia que define a la  
unidad de tiempo del SI

La imagen muestra la parte central del espectro de resonancias del reloj atómico de bombeo óptico construido en el CENAM, el CsOP-1.



## Relojes atómicos y experimentos con átomos ultrafríos en el CENAM

En la segunda mitad de la década de los 90's Stephen Chu, Claude Cohen-Tannoudji y William Phyllips, entre otros, desarrollaron las técnicas de enfriamiento de átomos con luz.



**Steven Chu**

USA

Stanford University  
Stanford, CA, USA

b.1948



**Claude Cohen-Tannoudji**

France

Collège de France; École  
Normale Supérieure  
Paris, France

b.1933



**William D. Phillips**

USA

National Institute of  
Standards and Technology  
Gaithersburg, MD, USA

b.1948

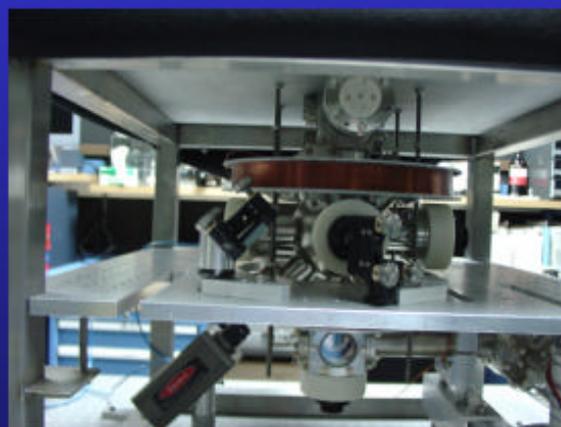
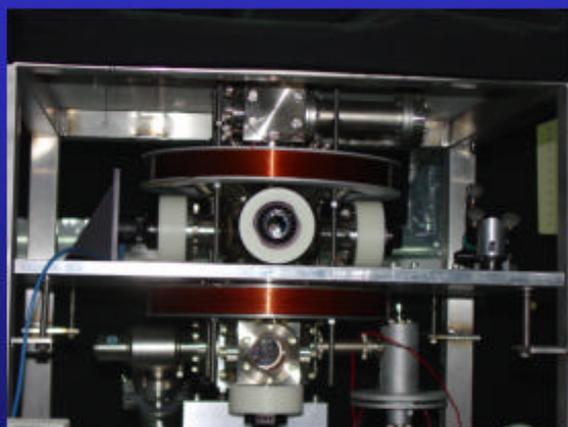


**The Nobel Prize  
in Physics 1997**



## Relojes atómicos y experimentos con átomos ultrafríos en el CENAM

El CENAM ha desarrollado experimentos de manipulación de átomos con luz aplicando las técnicas de enfriamiento de átomos descubiertas por Stephen Chu, Claude Cohen-Tannoudji y William Phyllips.



Trampa Magneto-Óptica (MOT) del CENAM

## Relojes atómicos y experimentos con átomos ultrafríos en el CENAM

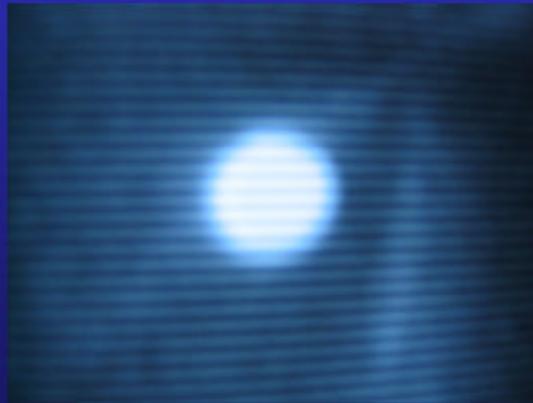
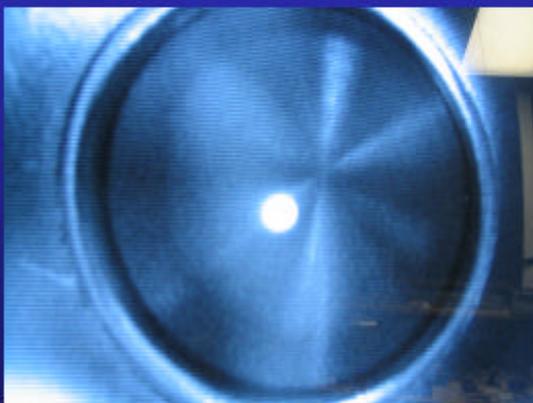
La imagen muestra una vista parcial del arreglo óptico de la Trampa Magneto-Óptica del CENAM. El desarrollo de la MOT forma parte de un proyecto mayor del CENAM en el cual se construye un reloj atómico de átomos fríos. Dicho reloj necesitaría operar por más de 10 millones de años para acumular un segundo de error.



**Sistema Óptico de la Trampa Magneto-Óptica del CENAM**

## Relojes atómicos y experimentos con átomos ultrafríos en el CENAM

Imagen de la nube de gran tamaño formada por átomos fríos en la Trampa Magneto-Óptica del CENAM. La nube tiene una temperatura cercana a 1 microKelvin sobre el cero absoluto, presenta una simetría esférica muy buena y un tamaño cercano a 6 milímetros de diámetro. El número de átomos que forman la nube es de 100 millones aproximadamente. Estos objetos son los más fríos del universo.

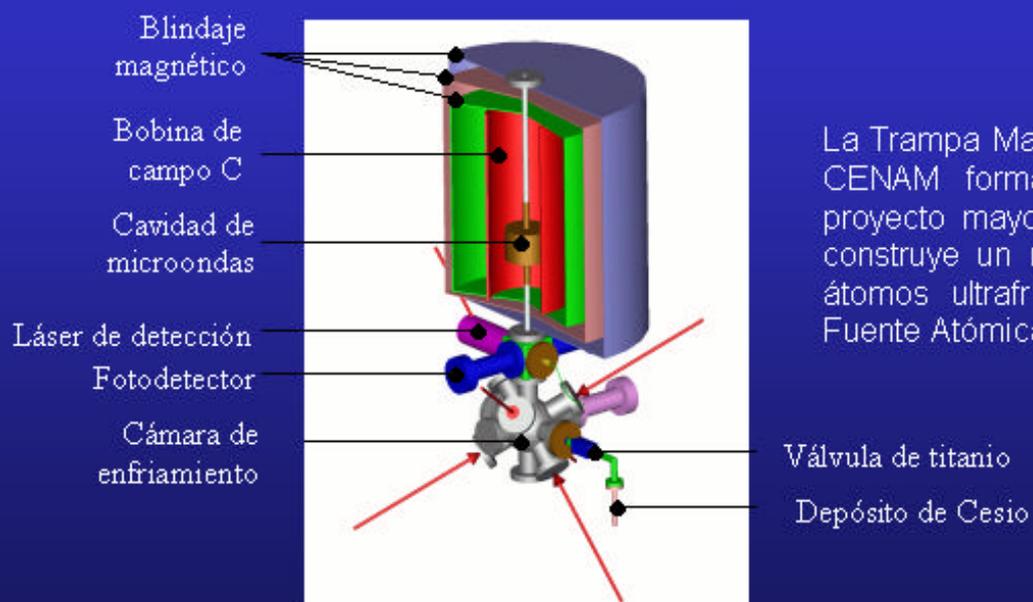


## Relojes atómicos y experimentos con átomos ultrafríos en el CENAM

La Trampa Magneto-Óptica del CENAM opera en la configuración de cuatro haces de luz horizontales y dos haces de luz verticales. Los diámetros de los haces de luz son de 1 cm aproximadamente y una potencia de 10 mW por haz. Se usan dos bobinas en configuración antiHelmholtz para crear una botella magnética que confina la nube de átomos fríos por largos períodos de tiempo.



## Relojes atómicos y experimentos con átomos ultrafríos en el CENAM



La Trampa Magneto-Óptica del CENAM forma parte de un proyecto mayor en el cual se construye un reloj atómico de átomos ultrafríos denominado Fuente Atómica, el CsF-1.

CsF-1, CENAM