

# La Unidad de Tiempo, el SI y la Metrología Eléctrica

Mauricio López R.  
División de Tiempo y Frecuencia  
CENAM



**CENAM**  
CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA



Encuentro Nacional  
de Metrología  
Eléctrica  
13, 14 y 15 de junio de 2005

## La Unidad de Tiempo, el SI y la Metrología Eléctrica

# Contenido



Ícono del Fuego Nuevo  
Culturas prehispánicas en Mesoamérica

0. Introducción
1. La unidad de tiempo
2. El SI y el segundo
3. Peines de frecuencia
4. Relojes ópticos

# La Unidad de Tiempo, el SI y la Metrología Eléctrica

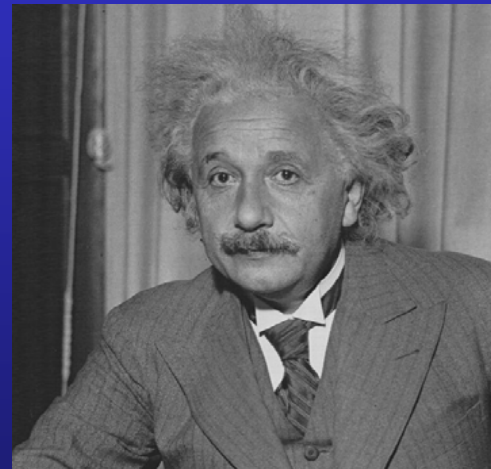
## 0. Introducción

Los antecedentes

## La Unidad de Tiempo, el SI y la Metrología Eléctrica



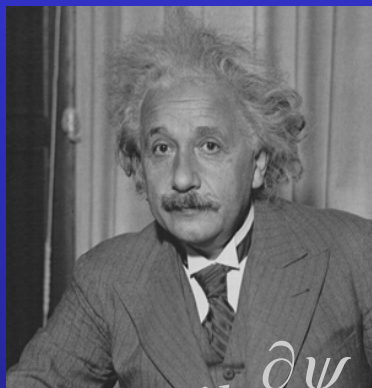
Albert Einstein



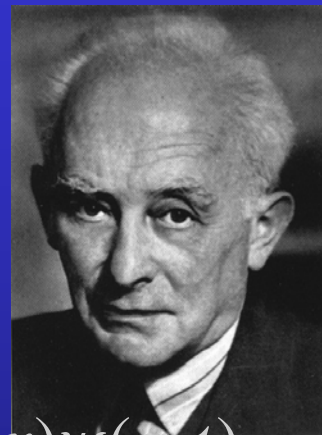
Conmemorando el primer centenario de los  
artículos de Albert Einstein de 1905

## La Unidad de Tiempo, el SI y la Metrología Eléctrica

Albert Einstein

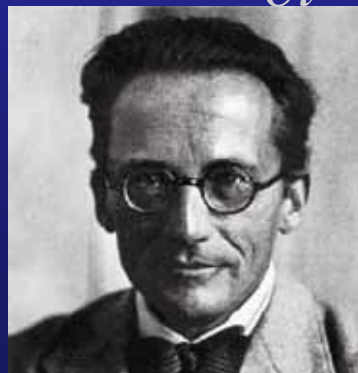


Max Born

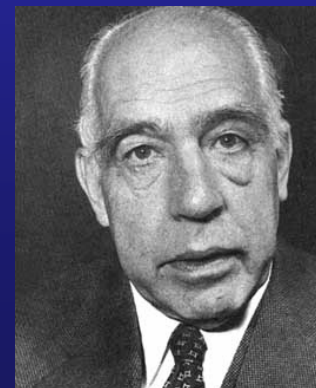


$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + V(x)\psi(x,t)$$

Erwin Schrödinger



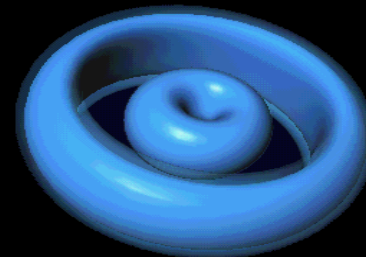
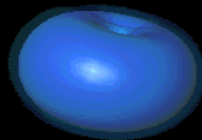
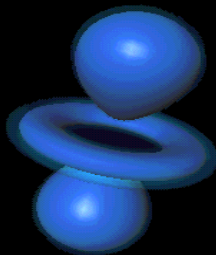
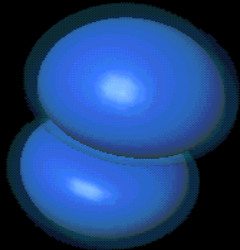
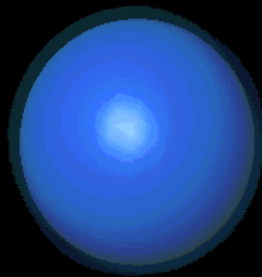
Niels Bohr



La Unidad de Tiempo, el SI y la  
Metrología Eléctrica

*Mecánica Cuántica*

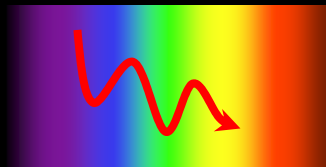
$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + V\Psi$$



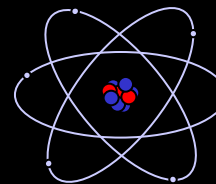
## La Unidad de Tiempo, el SI y la Metrología Eléctrica

# *Interacción Radiación-Materia*

Principio físico de operación de relojes atómicos



*Electromagnetismo/  
Óptica*

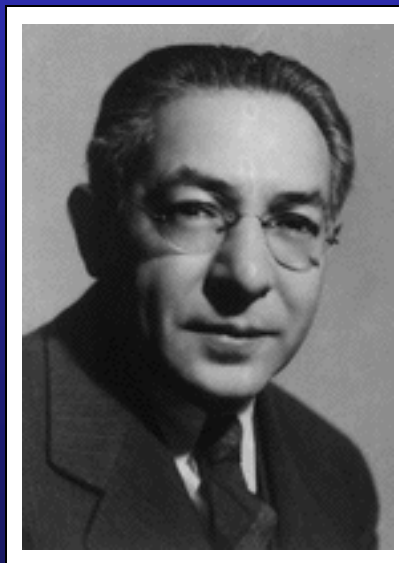


*Física Atómica*

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + V\Psi$$

## La Unidad de Tiempo, el SI y la Metrología Eléctrica

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



I. Isaac Rabi

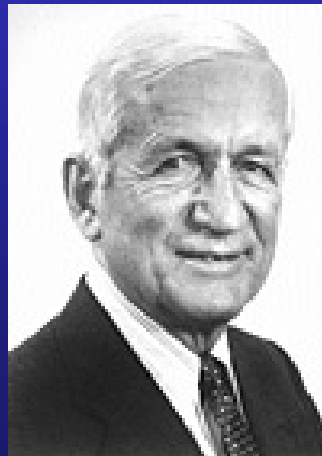


**The Nobel Prize  
in Physics 1944**



## La Unidad de Tiempo, el SI y la Metrología Eléctrica

La invención del método de los campos oscilantes separados y su aplicación en los relojes atómicos fue hecha por Norman Ramsey

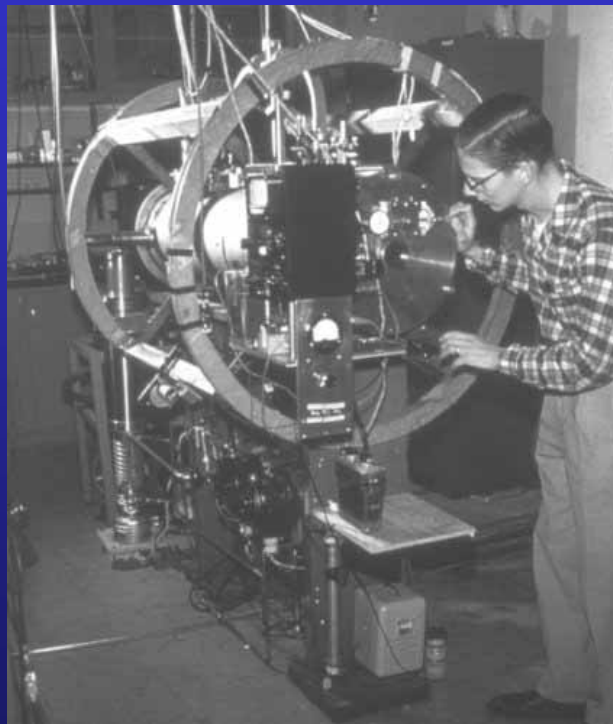


Norman F. Ramsey



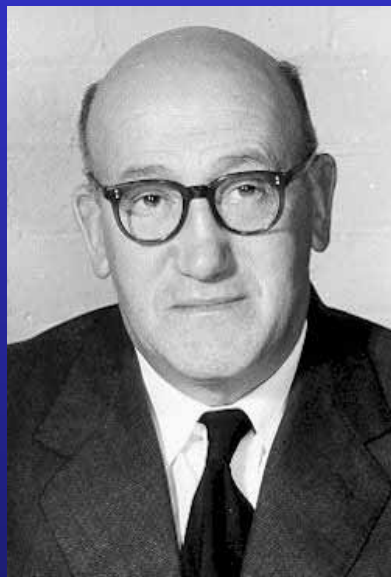
**The Nobel Prize  
in Physics 1989**

## La Unidad de Tiempo, el SI y la Metrología Eléctrica

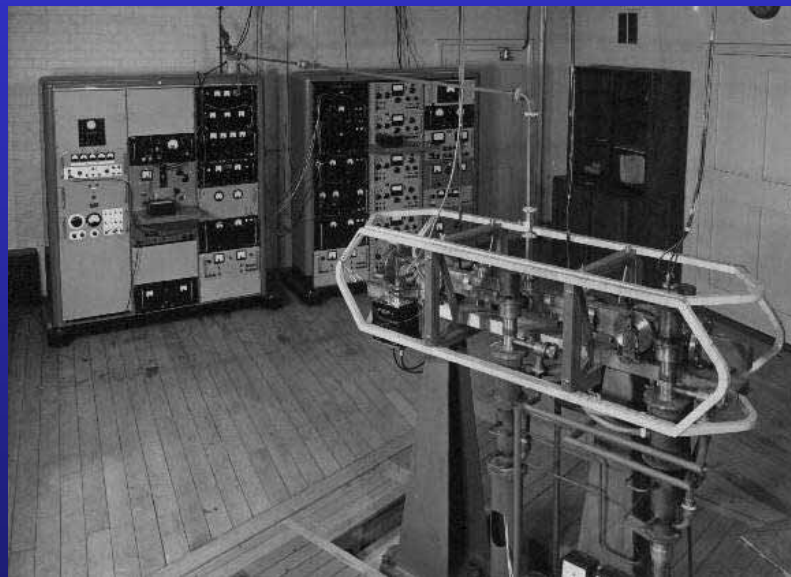


NBS-1, 1952

## La Unidad de Tiempo, el SI y la Metrología Eléctrica

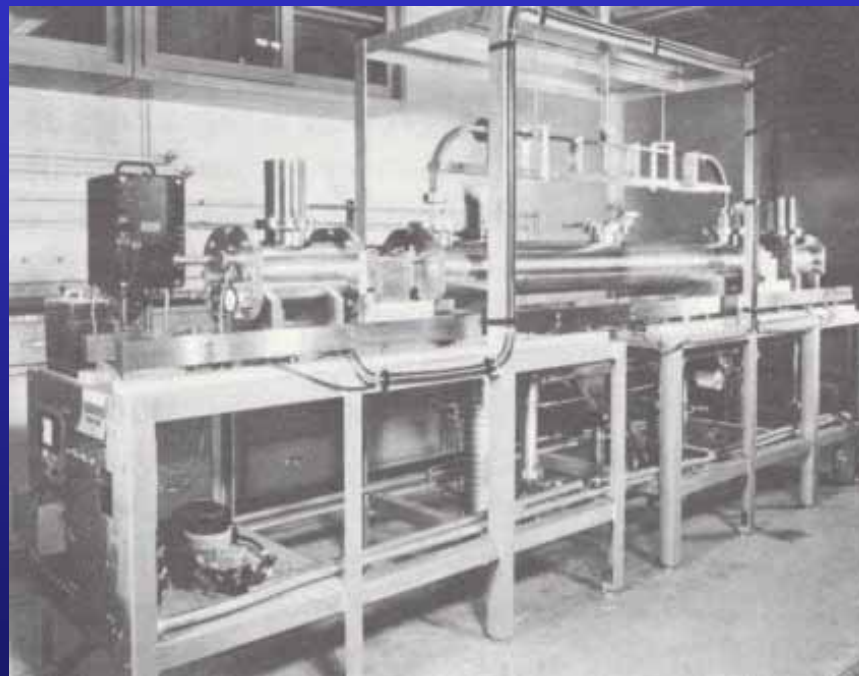


Louis Essen



Caesium I, 1955 (NPL)

## La Unidad de Tiempo, el SI y la Metrología Eléctrica



NBS-2, 1960

## La Unidad de Tiempo, el SI y la Metrología Eléctrica

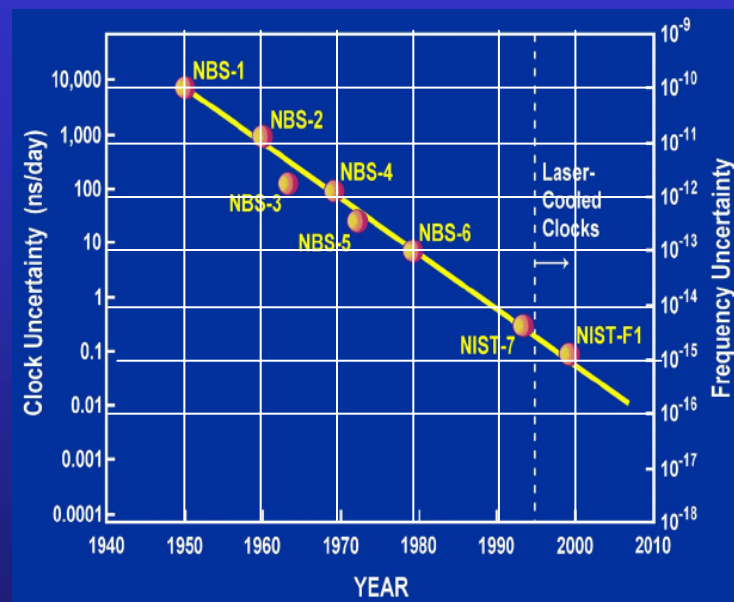


**Atomichron (Atomic-Cesium) Clock, 1960**  
National Company, Inc  
Malden, Massachusetts  
USD 20,000

# La Unidad de Tiempo, el SI y la **Metrología Eléctrica**

## **1. La unidad de tiempo**

## La Unidad de Tiempo, el SI y la Metrología Eléctrica



La realización de la unidad de tiempo muestra, en términos generales, una mejora en el nivel de incertidumbre de un orden de magnitud por década. El gráfico muestra la evolución del nivel de exactitud de los patrones primarios de frecuencia desarrollados por el National Institute of Standards and Technology (NIST).

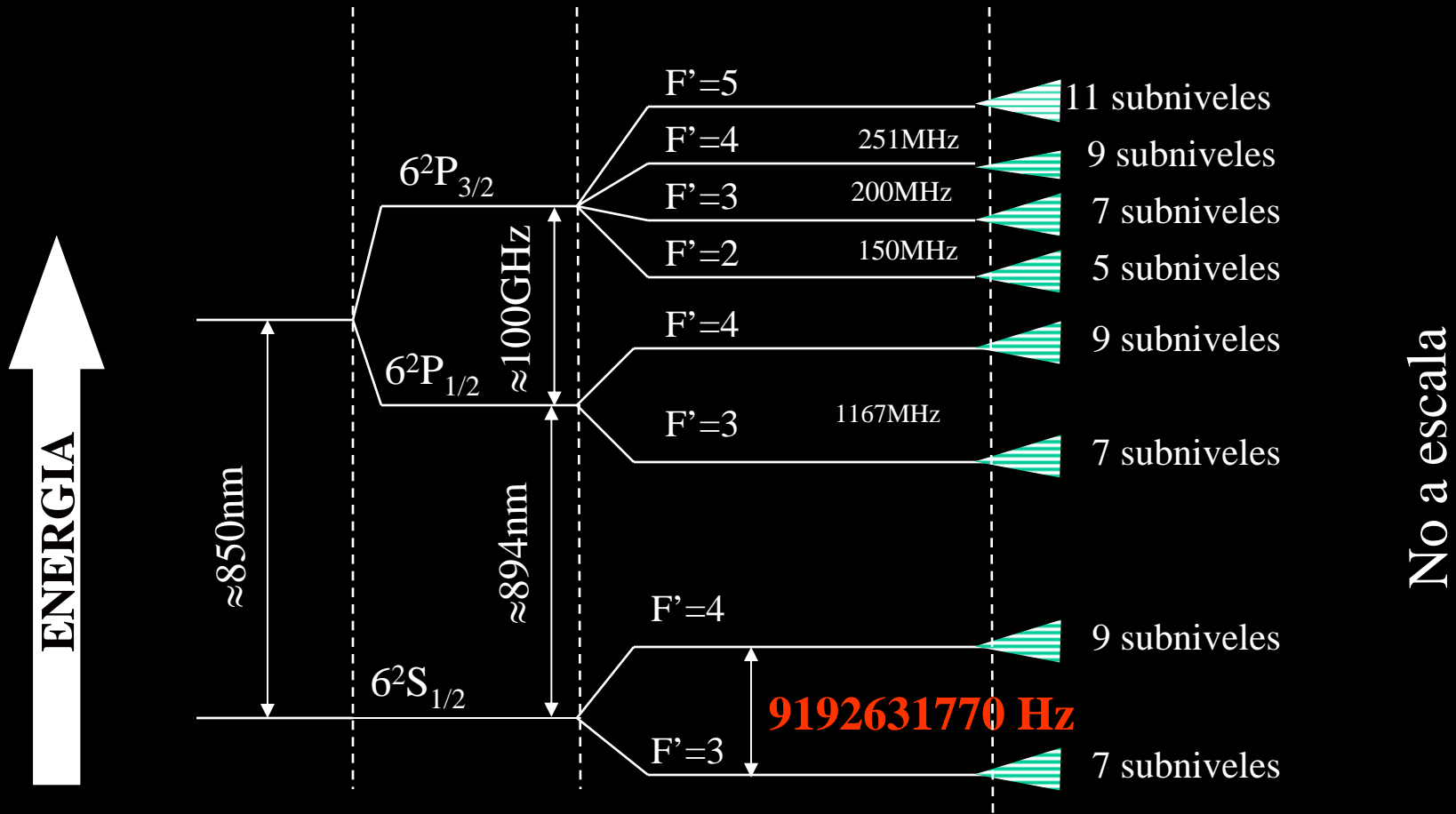
## La Unidad de Tiempo, el SI y la Metrología Eléctrica

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

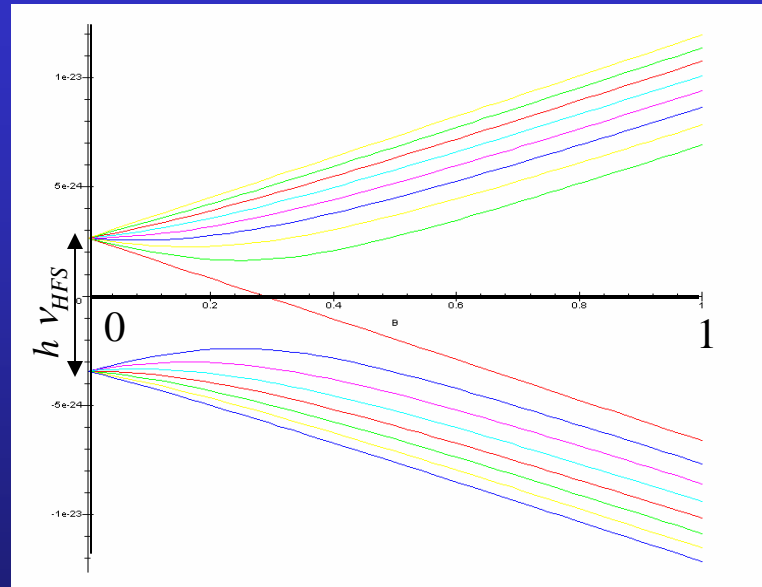


Eléctrica + Espín-órbita + Electrón Núcleo + Efecto Zeeman

INTERACCION

## La Unidad de Tiempo, el SI y la Metrología Eléctrica

Energía / Joules



Inducción  
magnética /  
Teslas

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

# **La Unidad de Tiempo, el SI y la Metrología Eléctrica**

## **Relojes atómicos de selección magnética**



**CENAMI**  
CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA



**Encuentro Nacional  
de Metrología  
Eléctrica**  
13, 14 y 15 de junio de 2005

## La Unidad de Tiempo, el SI y la Metrología Eléctrica



CsV, NRC

## La Unidad de Tiempo, el SI y la Metrología Eléctrica



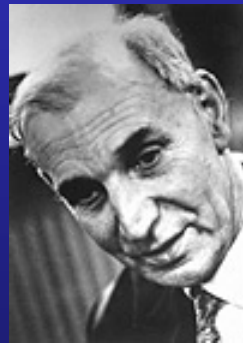
Relojes atómicos de selección magnética del PTB

## La Unidad de Tiempo, el SI y la Metrología Eléctrica

### Relojes atómicos de bombeo óptico

## La Unidad de Tiempo, el SI y la Metrología Eléctrica

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

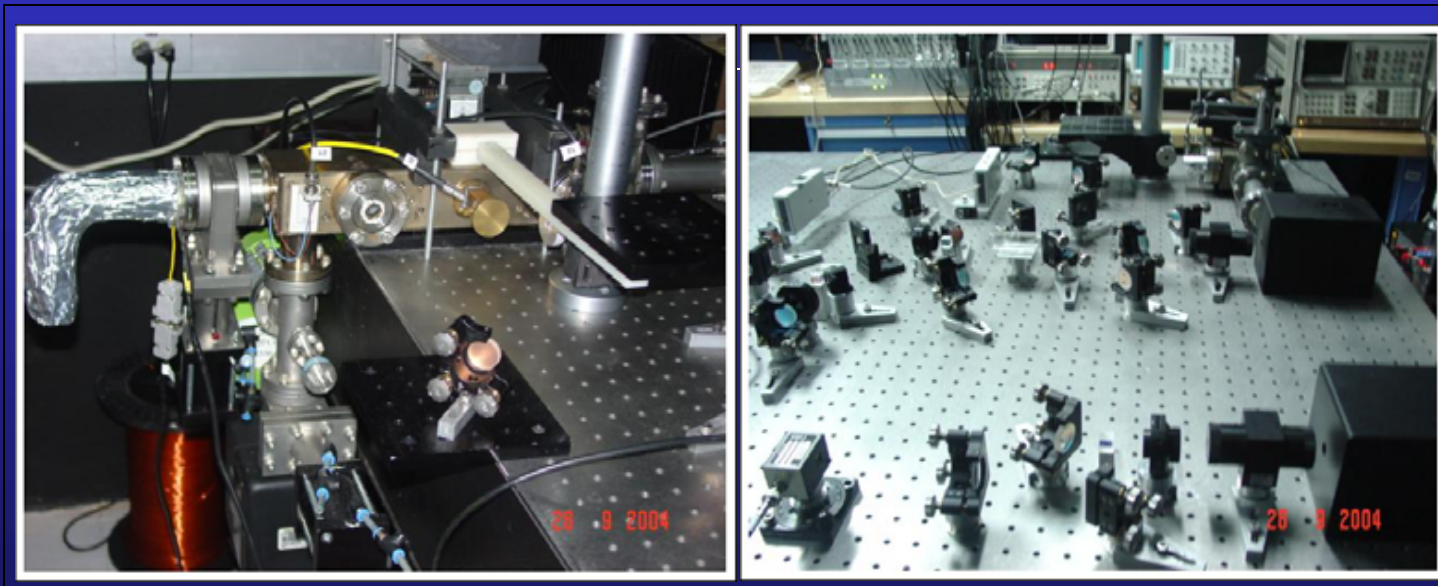
École Normale Supérieure, Université de Paris  
Paris, France

b. 1902  
d. 1984



**The Nobel Prize  
in Physics 1966**

## La Unidad de Tiempo, el SI y la Metrología Eléctrica

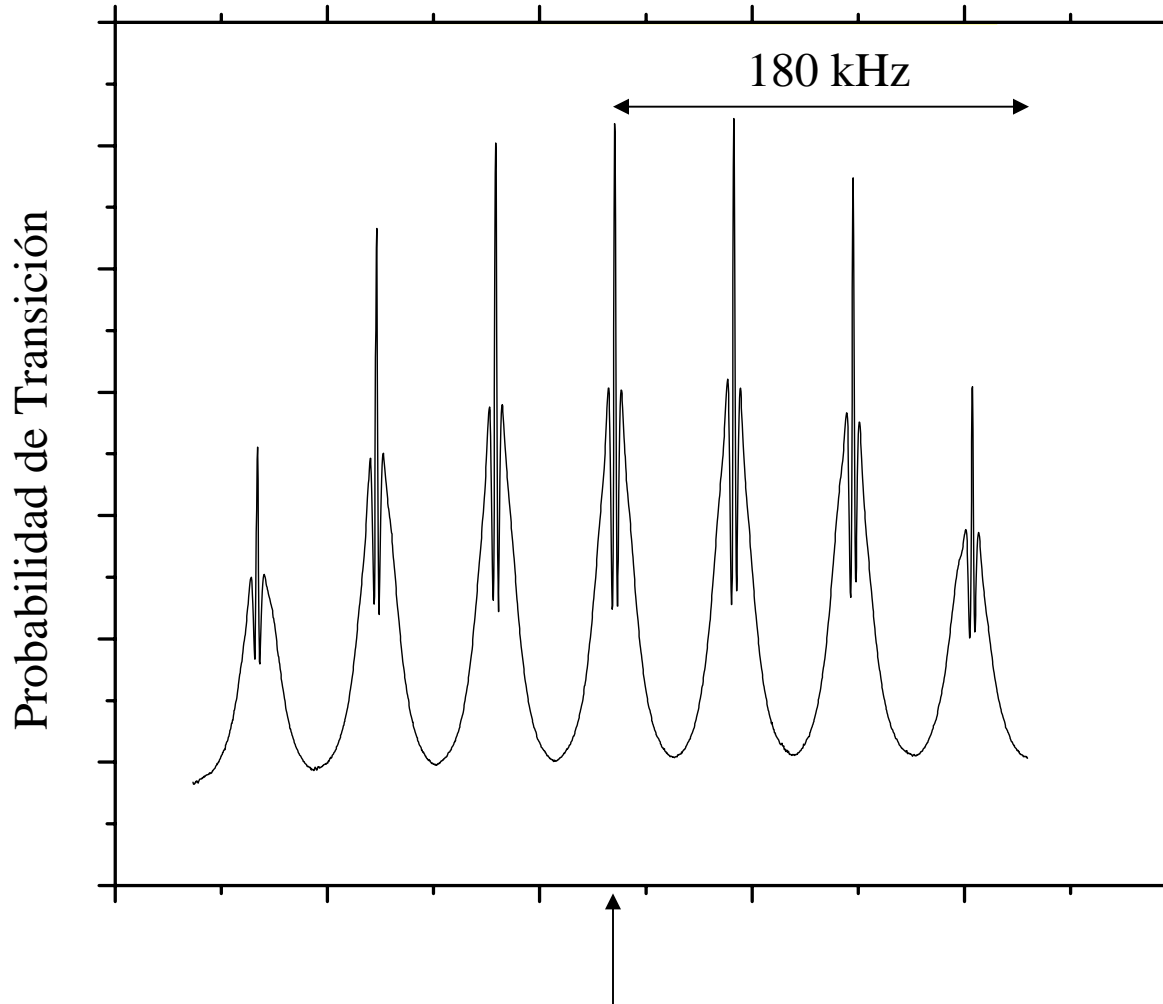


CsOp-1, CENAM





## Espectro de Ramsey del CsOp-1

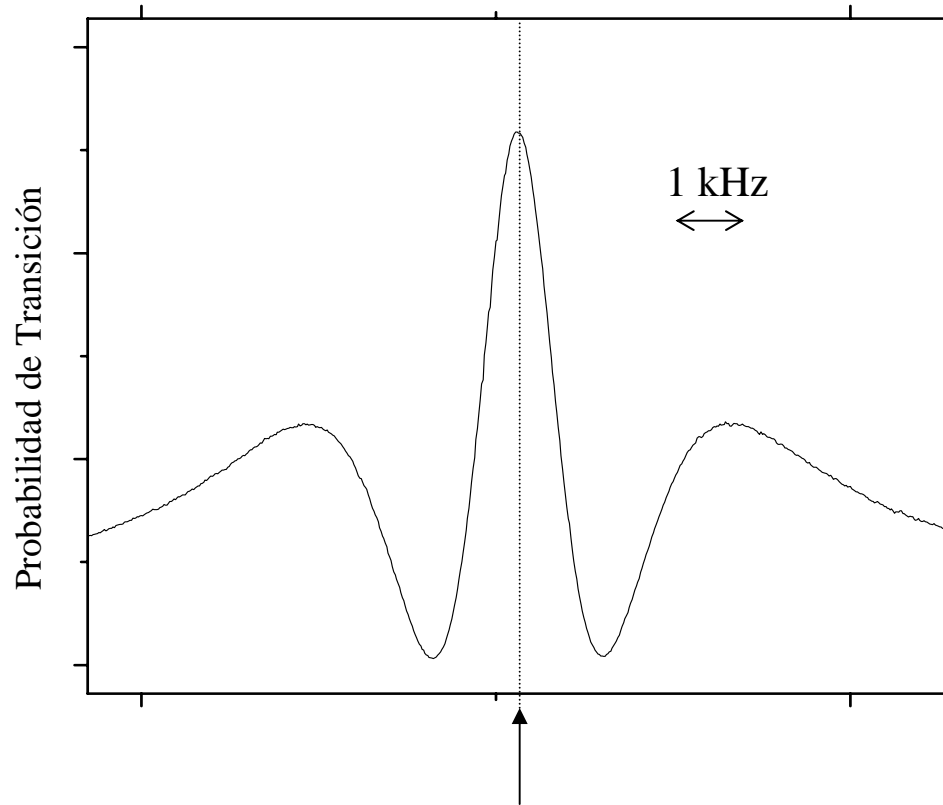


Frecuencia que define a la  
unidad de



# Franja de Ramsey del CsOp-1

(línea central del espectro de Ramsey)



Frecuencia que define a la  
unidad de tiempo del SI

## La Unidad de Tiempo, el SI y la Metrología Eléctrica



NIST-7, NIST

# La Unidad de Tiempo, el SI y la Metrología Eléctrica

## Relojes de átomos fríos de Cs-133

# La Unidad de Tiempo, el SI y la Metrología Eléctrica

Manipulación 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

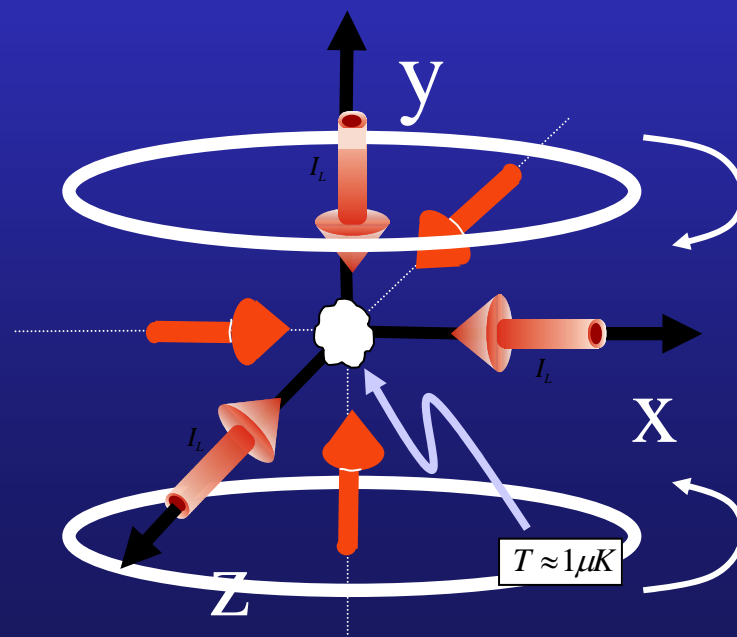
b. 1948



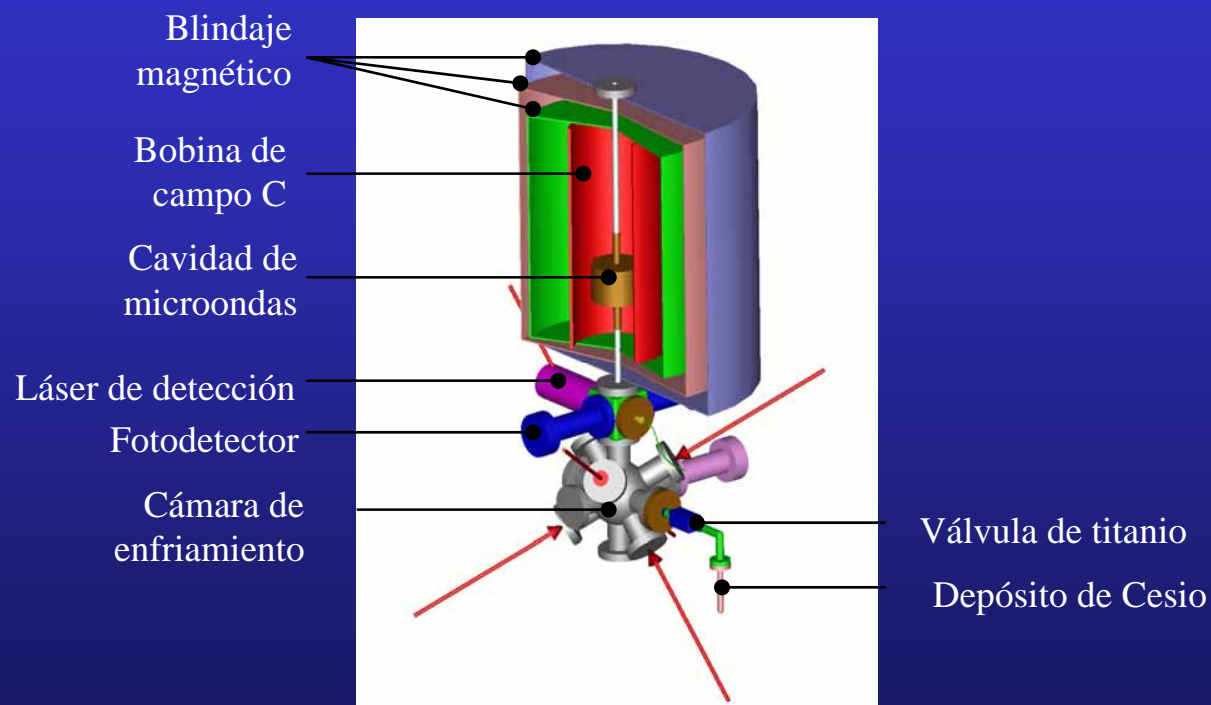
**The Nobel Prize  
in Physics 1997**

# La Unidad de Tiempo, el SI y la Metrología Eléctrica

## Trampa Magneto-óptica Fuerzas tipo fricción

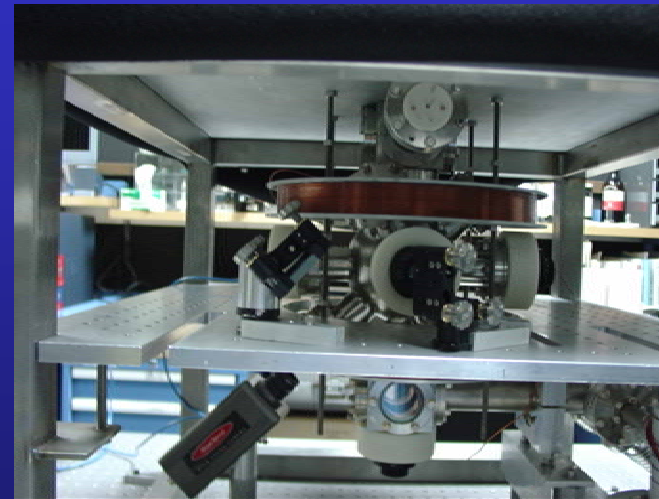
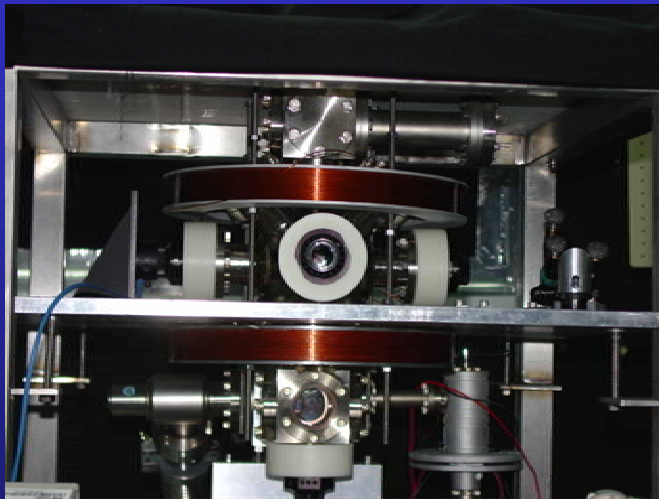


## La Unidad de Tiempo, el SI y la Metrología Eléctrica



CsF-1, CENAM

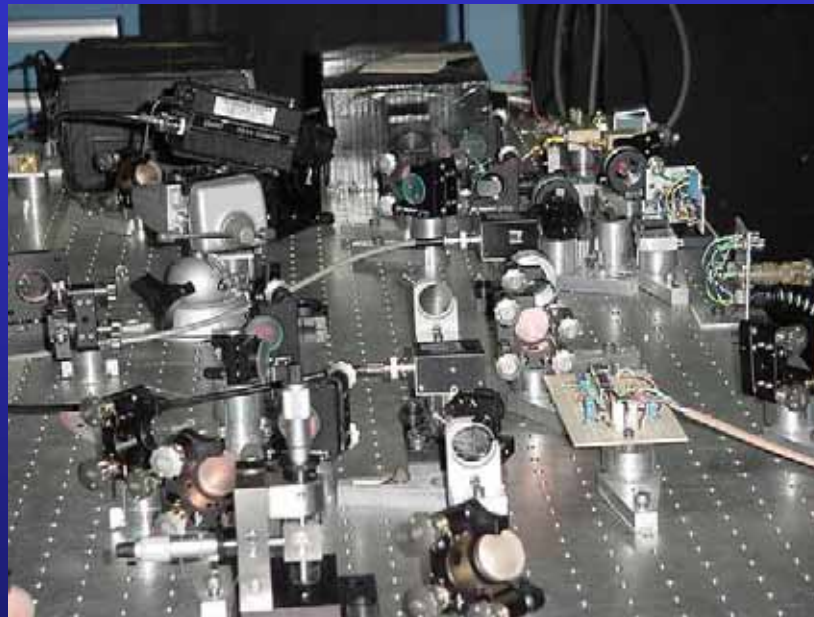
## La Unidad de Tiempo, el SI y la Metrología Eléctrica



Trampa Magneto-Óptica del CsF-1, CENAM

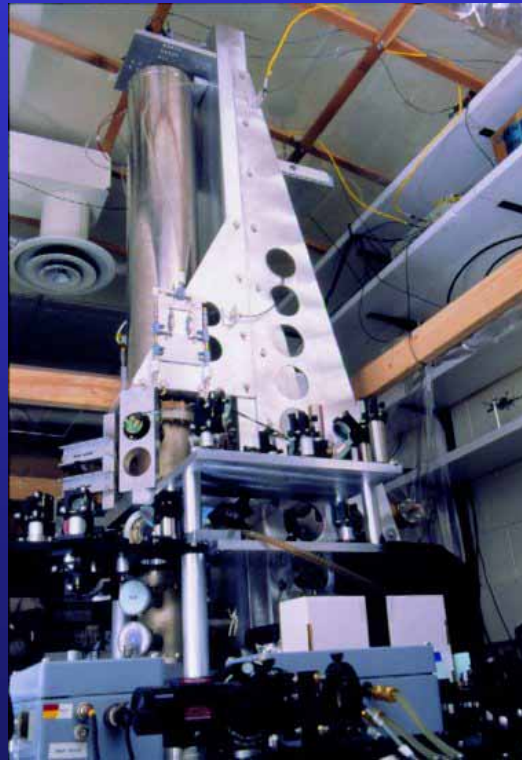


## La Unidad de Tiempo, el SI y la Metrología Eléctrica



Sistema Óptico del CsF-1

## La Unidad de Tiempo, el SI y la Metrología Eléctrica



NIST-F1

## La Unidad de Tiempo, el SI y la Metrología Eléctrica

# 2. El SI y la Unidad de tiempo

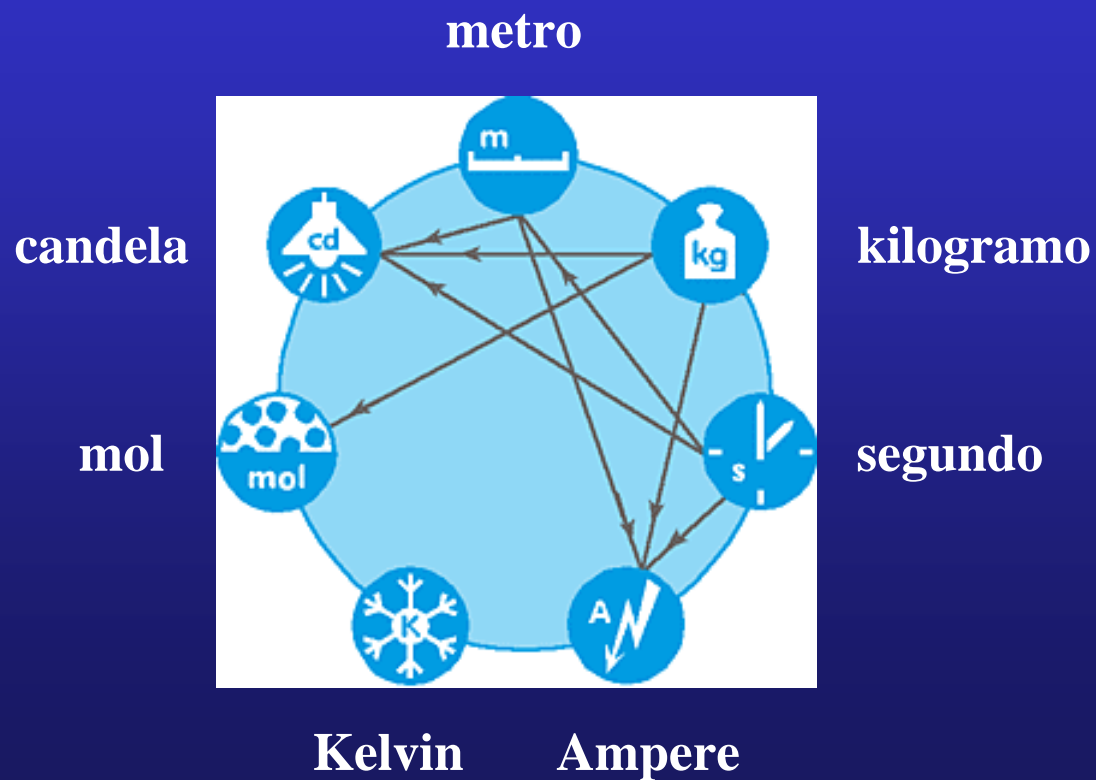


**CENAMI**  
CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA

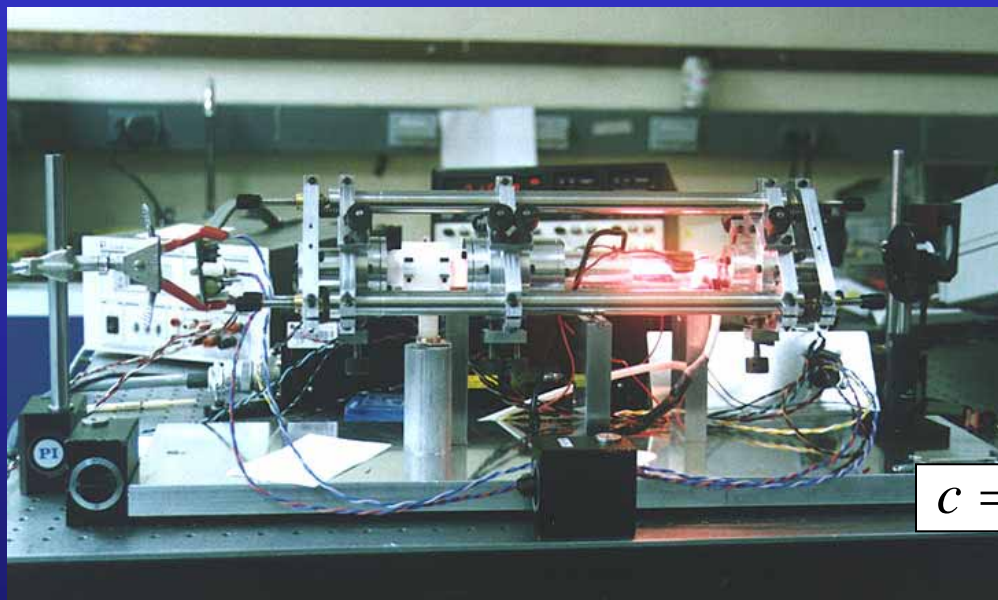


Encuentro Nacional  
de Metrología  
**Eléctrica**  
13, 14 y 15 de junio de 2005

## La Unidad de Tiempo, el SI y la Metrología Eléctrica



## La Unidad de Tiempo, el SI y la Metrología Eléctrica



$$c = \lambda \nu$$

Láser de HeNe estabilizado al Yodo para la realización de la unidad de longitud. En la realización de la unidad de longitud se requiere la medición de la frecuencia de radiación de los láseres estabilizados

## La Unidad de Tiempo, el SI y la Metrología Eléctrica



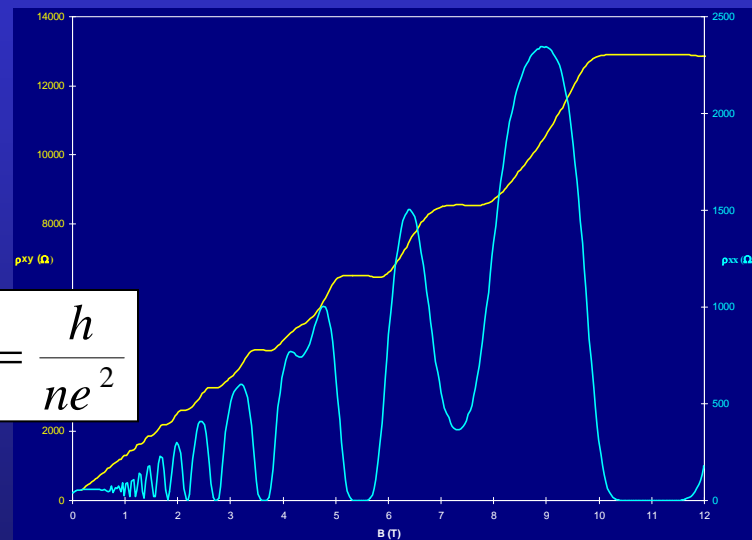
$$V = nf \frac{h}{2e}$$

En la reproducción de la unidad de tensión eléctrica por medio del efecto Josephson se requiere la medición de la frecuencia de radiación con la cual se generan los pares de cooper en el dispositivo Josephson

## La Unidad de Tiempo, el SI y la Metrología Eléctrica



$$R_H = \frac{h}{ne^2}$$



La unidad de tiempo interviene de manera indirecta en el Efecto Hall Cuántico por medio de la unidad de tensión eléctrica

## La Unidad de Tiempo, el SI y la Metrología Eléctrica



$$\nu_0 = \frac{1}{2\pi} \gamma B_0$$

En las mediciones de densidad de flujo magnético, por medio de la técnica de resonancia magnética nuclear, la unidad de tiempo interviene a través de la medición de la frecuencia de precesión del momento magnético nuclear alrededor del campo magnético



## La Unidad de Tiempo, el SI y la Metrología Eléctrica

### 3. Peines de Frecuencia

## La Unidad de Tiempo, el SI y la Metrología Eléctrica

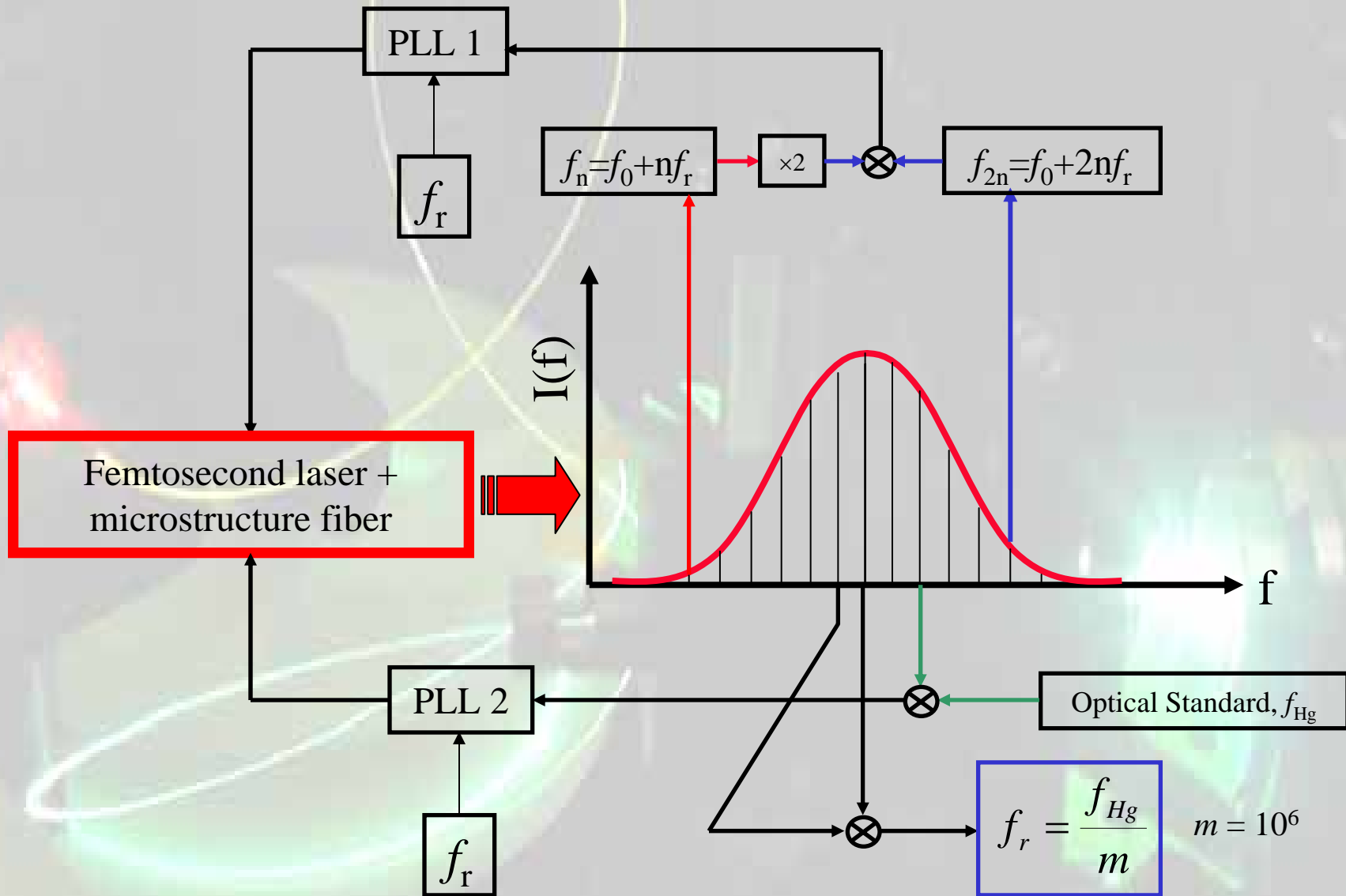
### Peines de Frecuencia



Los peines de frecuencia permiten calibrar frecuencias ópticas usando como referencia los relojes atómicos de Cesio-133



# Peines de Frecuencia



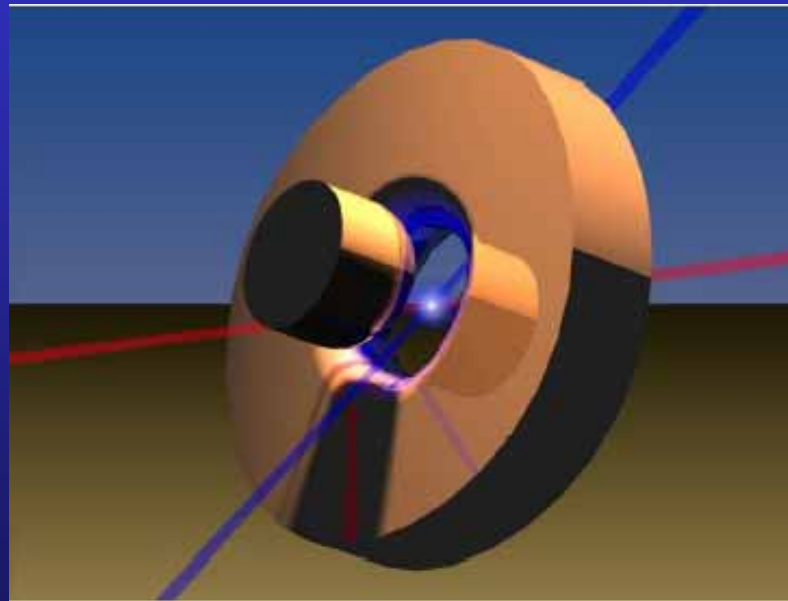
## La Unidad de Tiempo, el SI y la Metrología Eléctrica

### 4. Relojes Ópticos

El desarrollo de los peines de frecuencia han abierto un panorama muy interesante para el desarrollo de relojes ópticos, esto es, relojes cuya transición de referencia se encuentre en la parte visible del espectro electromagnético

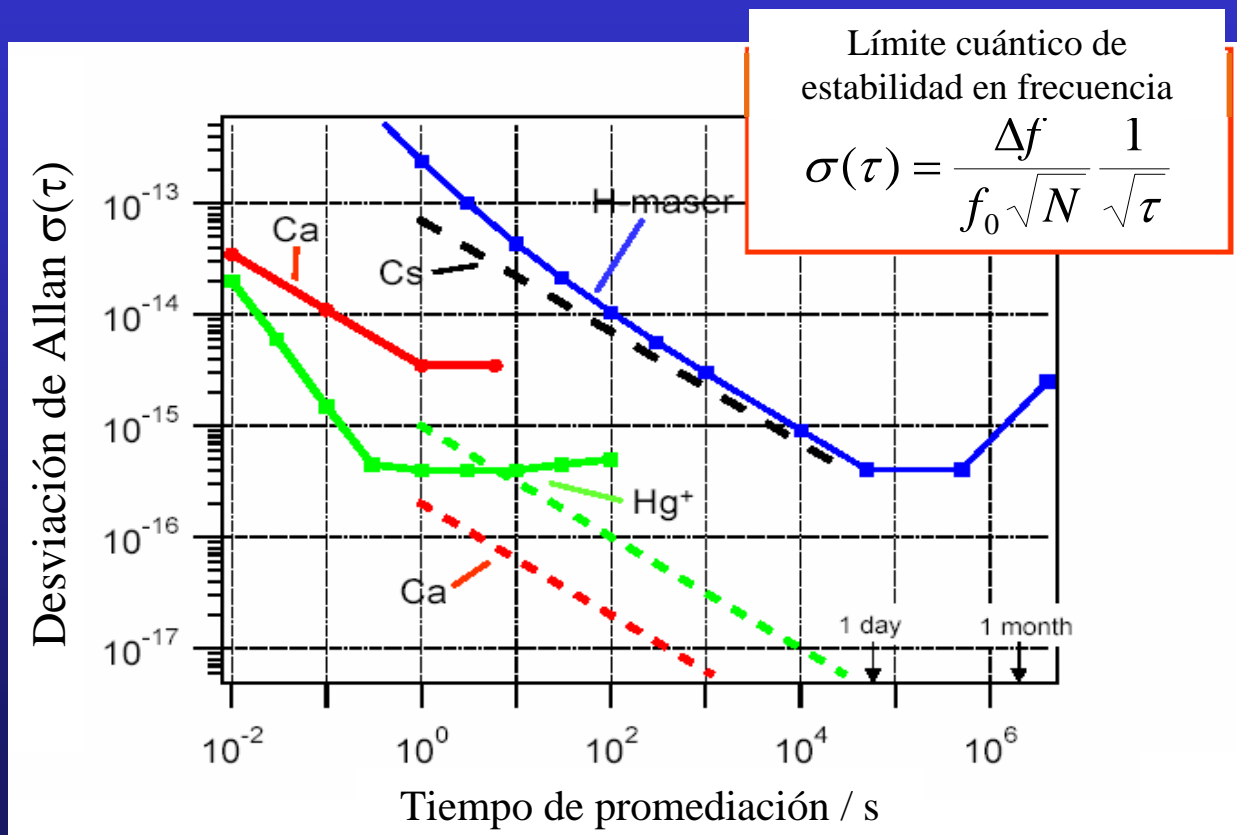
# La Unidad de Tiempo, el SI y la Metrología Eléctrica

## Relojes Ópticos

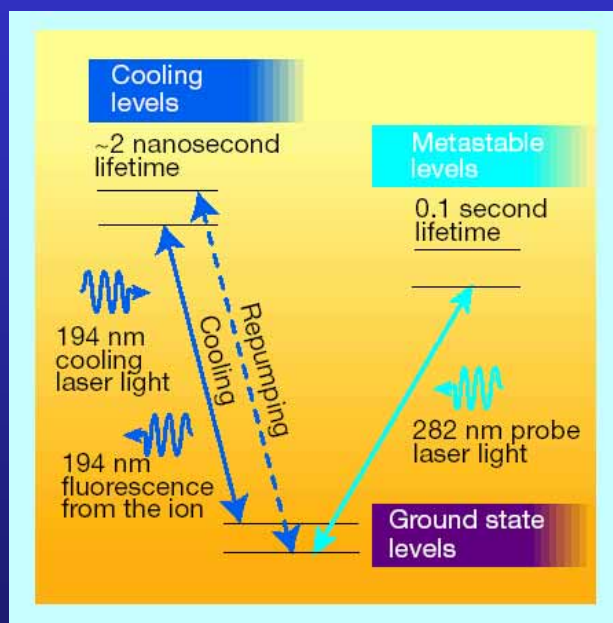


Trampa de iones de estroncio del NRC

## La Unidad de Tiempo, el SI y la Metrología Eléctrica



## La Unidad de Tiempo, el SI y la Metrología Eléctrica



Niveles de energía de iones de mercurio



## La Unidad de Tiempo, el SI y la Metrología Eléctrica

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Uub	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuc
		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb		
		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No		

Elementos químicos usados en los relojes ópticos



# La Unidad de Tiempo, el SI y la Metrología Eléctrica

GRACIAS

Mauricio López R.  
División de Tiempo y Frecuencia  
CENAM