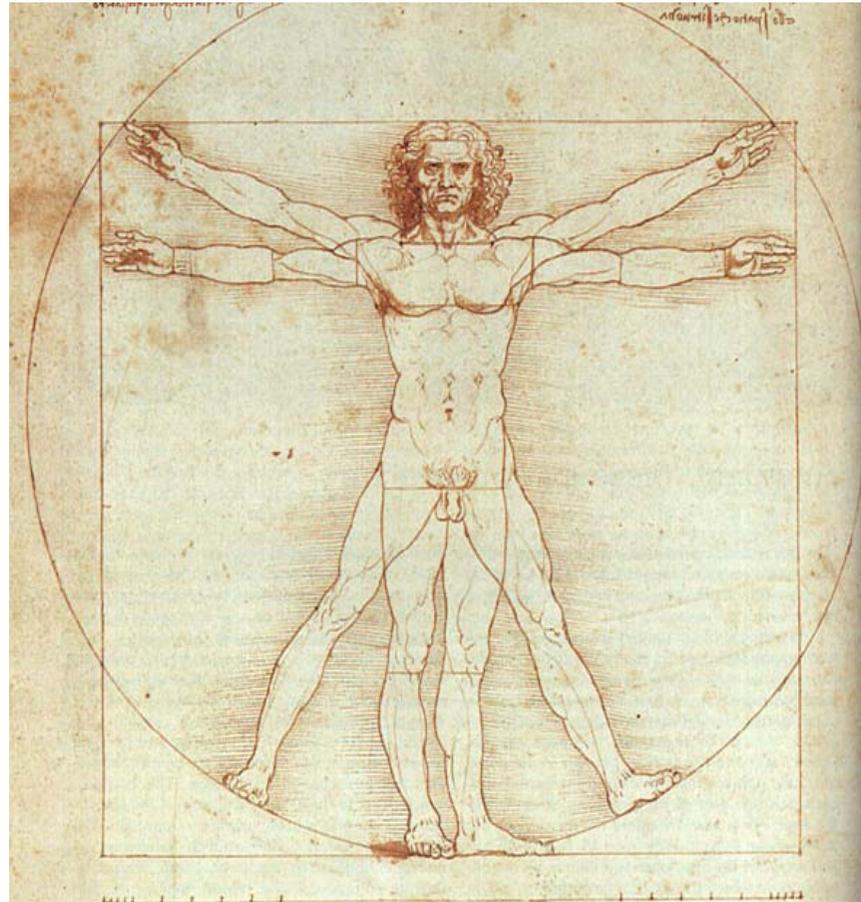


# Constantes Fundamentales

UNA MISMA MEDIDA PARA TODOS LOS HOMBRES PARA TODOS LOS TIEMPOS

Mauricio López Romero



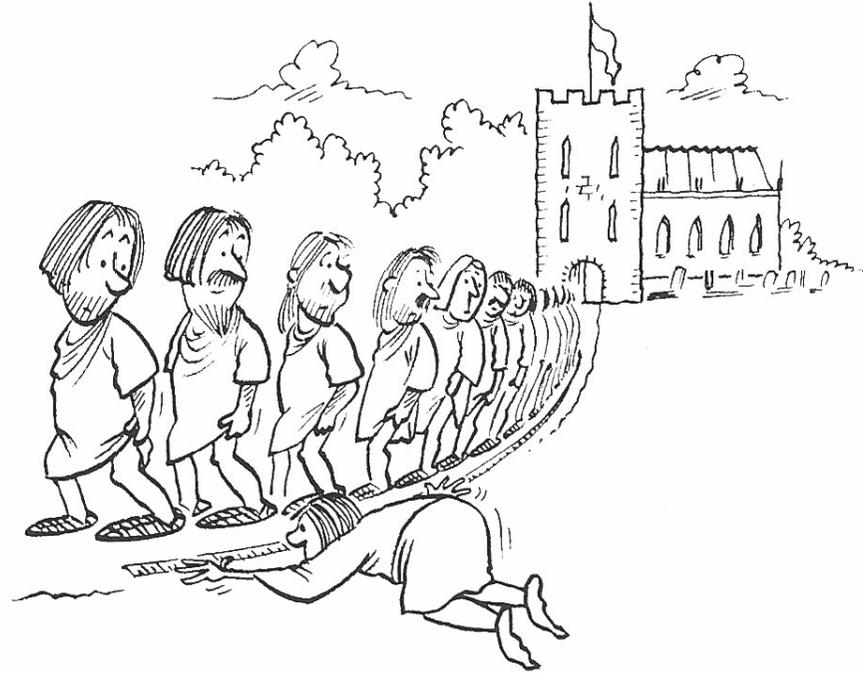


Protágoras (490 a.c.): “El hombre medida de todas las cosas”

## LAS UNIDADES DE MEDIDA EN LA EDAD MEDIA



**Yarda:** distancia entre la punta de la nariz del Rey Enrique I y su dedo pulgar cuando el brazo se extiende horizontalmente.



**Vara:** Promedio de la medida de la longitud del pie izquierdo de los primeros 60 hombres que salen de la iglesia el día domingo por la mañana.

# UNA MISMA MEDIDA PARA TODOS LOS HOMBRES PARA TODOS LOS TIEMPOS

## BRIEF HISTORY OF THE METRE CONVENTION



### The Metre Convention

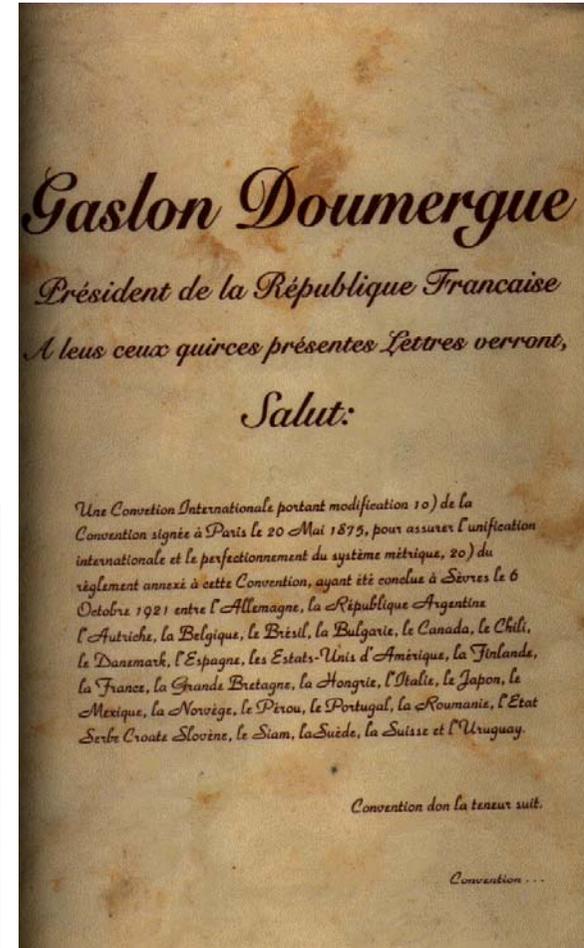
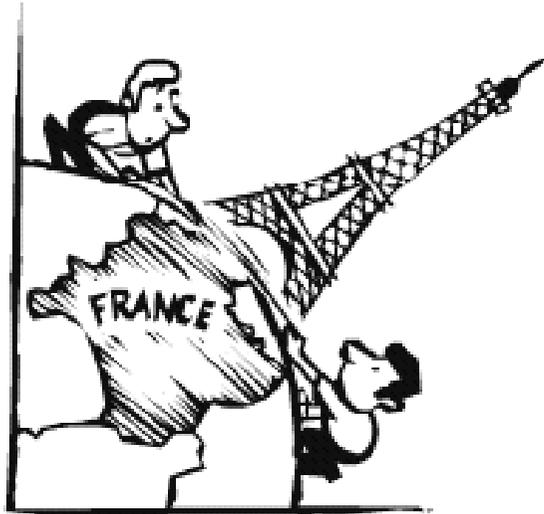
- 1869 - Emperor Napoleon III approved by decree a report of the French Ministry for Agriculture and Trade proposing the creation of an international scientific commission to propagate the use of metric measurements and to facilitate trade and comparisons of measurements between States, and to carry out the construction of an international metre prototype.
- 1870-1872 - The International Metre Commission is held in Paris. Their work led to the foundation of the Metre Convention.
- 20 May 1875 - The Metre Convention is signed in Paris by representatives of 17 nations. It establishes a permanent organizational structure for member governments to act in common accord on all matters relating to units of measurement through the actions of the CGPM, CIPM, and BIPM.

## EL KILOGRAMO: MASA DE UN CILÍNDRO DE PLATINO IRIDIADO



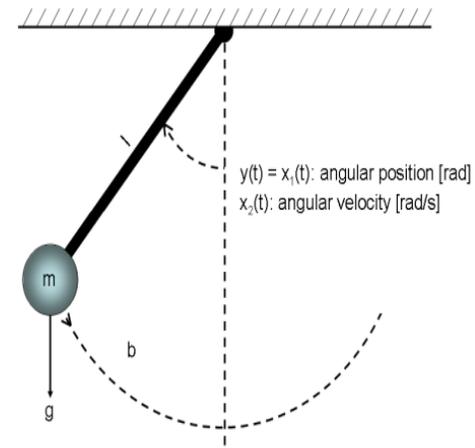
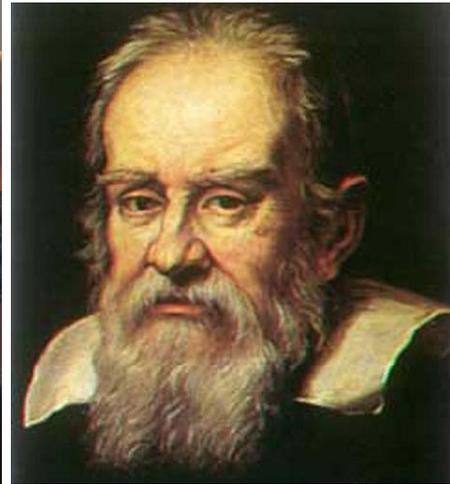
- ✓ **1891** Llega a México el prototipo N° 21 del **kilogramo**.

## EL METRO: LA DIEZMILLONÉSIMA PARTE DE UN CUADRANTE DEL MERIDIANO TERRESTRE



- ✓ **1895** Llega a México el prototipo N<sup>o</sup> 25 del **metro**, asignado a nuestro país en 1893.

# EL SEGUNDO: LAS ESTRELLAS COMO LAS MANECILLAS DEL RELOJ UNIVERSAL

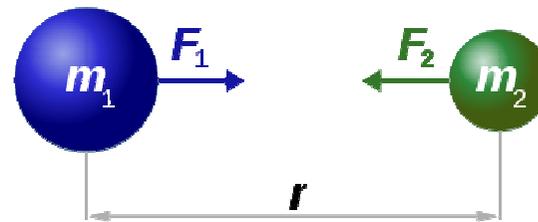
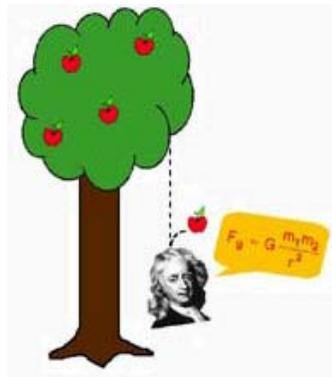


La revolución industrial conduciría al éxito de la física clásica

## La mecánica Newtoniana



Sir Isaac Newton



$$F_1 = F_2 = G \frac{m_1 \times m_2}{r^2}$$

$$F = m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2}$$

$$G = (6.67428 \pm 0.00067) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}.$$

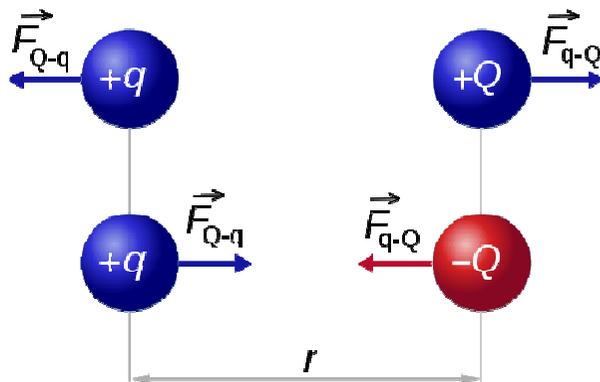
La revolución industrial conduciría al éxito de la física clásica

## El electromagnetismo

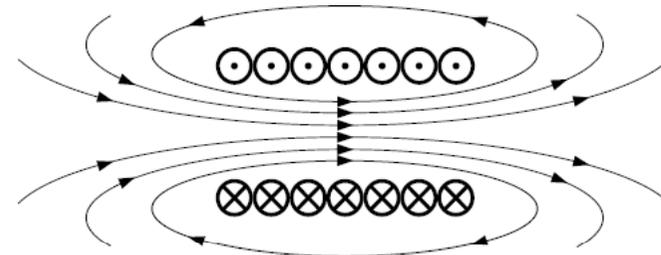
Differential form	Integral form
$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$	$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{Q_S}{\epsilon_0}$
$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$
$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	$\oint_{\partial S} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{\partial \Phi_{B,S}}{\partial t}$
$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$	$\oint_{\partial S} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I_S + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \Phi_{E,S}}{\partial t}$



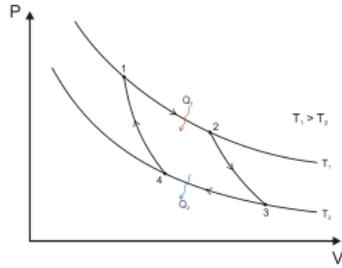
James Clerk Maxwell



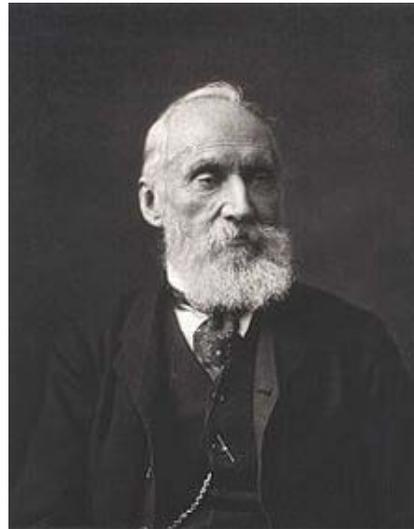
$$|\vec{F}_{q-q}| = |\vec{F}_{q-Q}| = k \frac{|q \times Q|}{r^2}$$



La revolución industrial conduciría al éxito de la física clásica  
**La termodinámica**



Nicolas Léonard Sadi Carnot  
[1796](#) - [1832](#)  
Primera ley de la  
termodinámica



William Thomson – Lord Kelvin  
[1824](#) - [1907](#)  
Segunda ley de la  
termodinámica



Walther Nernst  
[1864](#) - [1941](#)  
Tercer ley de la  
termodinámica

La revolución industrial conduciría al éxito de la física clásica

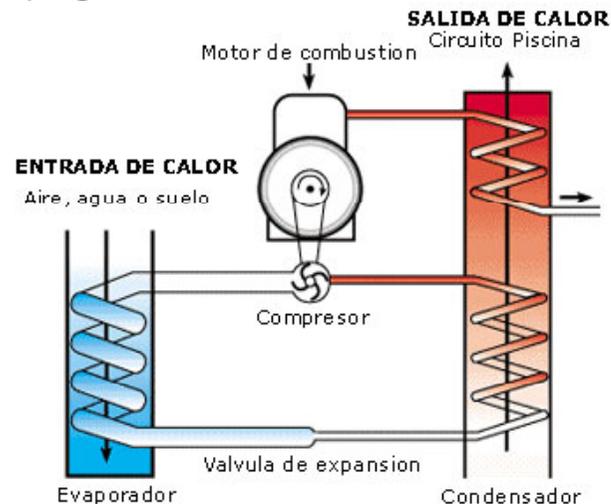
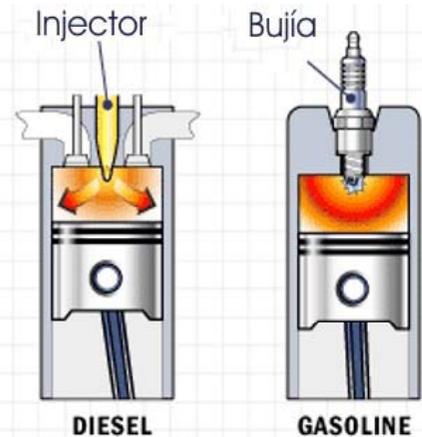
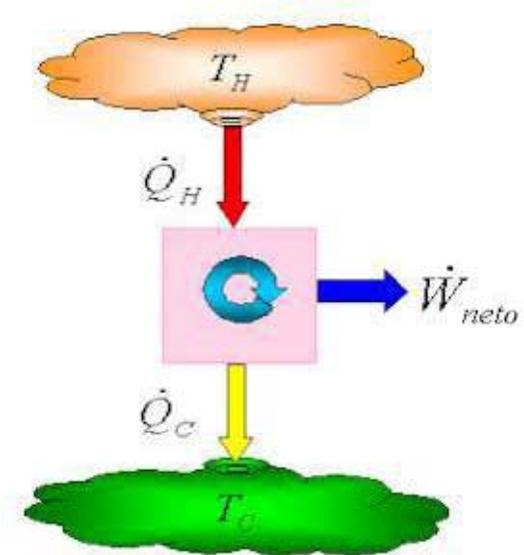
## La termodinámica

Ley cero:  $A \sim B, B \sim C \Leftrightarrow A \sim C$ ;

1ª Ley:  $dU = \delta Q - \delta W$ ;

2ª Ley:  $\oint \frac{\delta Q}{T} \geq 0$

3ª Ley:  $T \rightarrow 0, S \rightarrow C$



# La revolución industrial conduciría al éxito de la física clásica

Entre la comunidad científica hacia finales del siglo XIX se tenía la percepción generalizada de que

**¡Todo estaba descubierto, solamente quedaban cálculos por realizar!**

Había solamente dos o tres mediciones experimentales (“*casos sin mayor trascendencia*”) que eran inconsistentes con los modelos de la física del momento.

# Radiación de cuerpo negro

## The Nobel Prize in Physics 1918

"in recognition of the services he rendered to the advancement of Physics by his discovery of energy quanta"

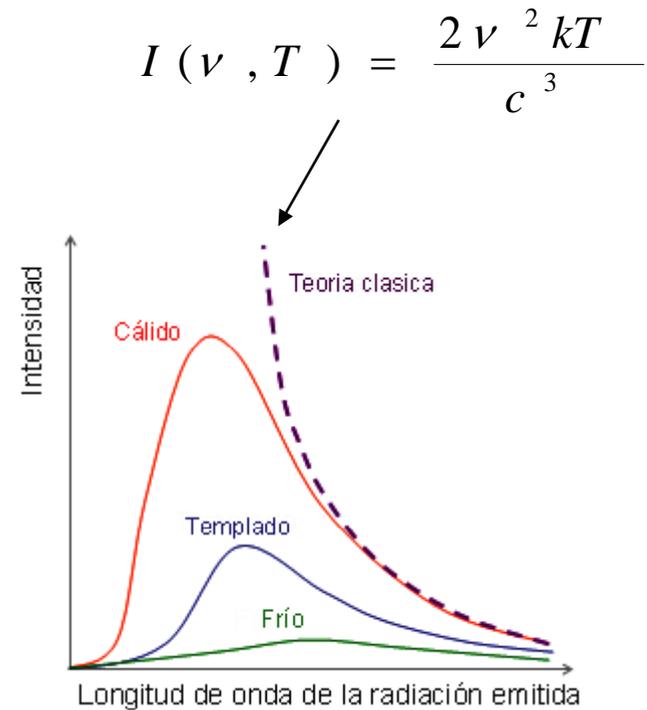
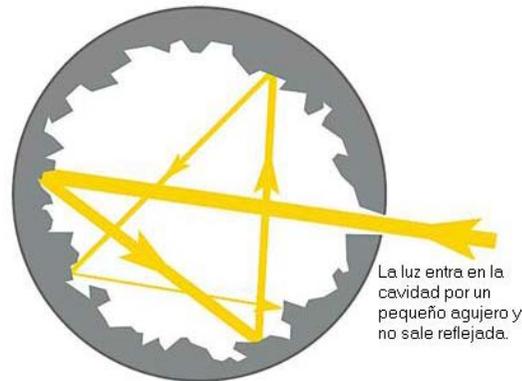


Max Karl Ernst Ludwig Planck

Germany

Berlin University  
Berlin, Germany

b.1858  
d.1947

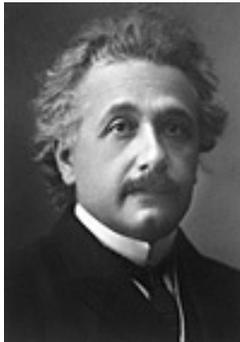


$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

# Efecto fotoeléctrico

## The Nobel Prize in Physics 1921

"for his services to Theoretical Physics, and especially for his discovery of the law of the photoelectric effect"

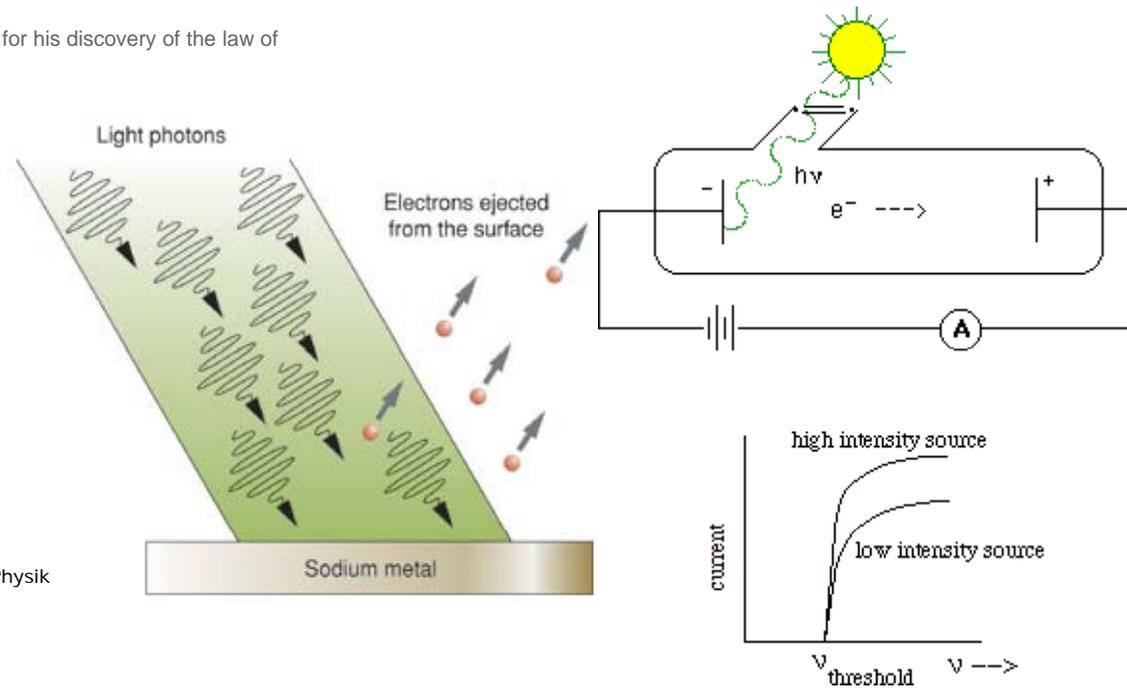


**Albert Einstein**

Germany and Switzerland

Kaiser-Wilhelm-Institut (now Max-Planck-Institut) für Physik  
Berlin, Germany

b. 1879  
d. 1955



# El problema del ether

## The Nobel Prize in Physics 1907

"for his optical precision instruments and the spectroscopic and metrological investigations carried out with their aid"

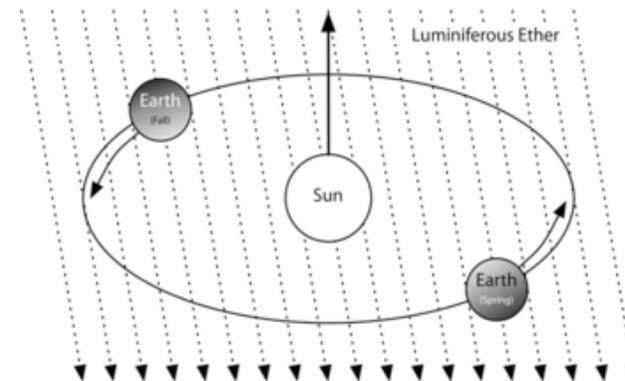


Albert Abraham Michelson

USA

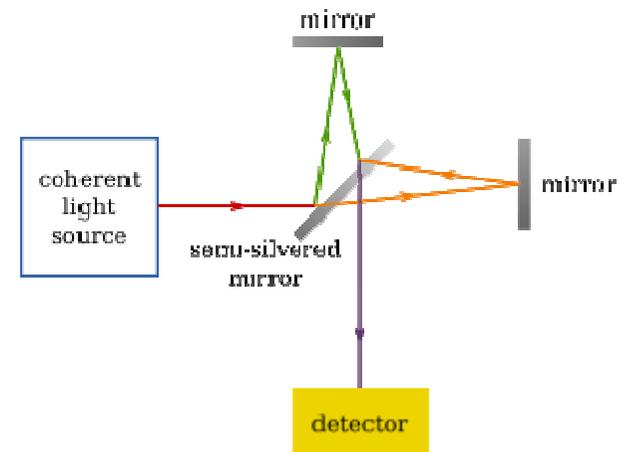
Chicago University  
Chicago, IL, USA

b. 1852  
d. 1931



$$L_1 = L_2 \sqrt{1 - \left(\frac{v^2}{c^2}\right)}$$

$$T = \frac{t'}{t} = \frac{\sqrt{c^2 - v^2}}{c}$$



# Nace la Mecánica Cuántica

## The Nobel Prize in Physics 1918

"in recognition of the services he rendered to the advancement of Physics by his discovery of energy quanta"

$$E = h\nu$$



**Max Karl Ernst Ludwig Planck**

Germany  
Berlin University  
Berlin, Germany

b.1858  
d.1947

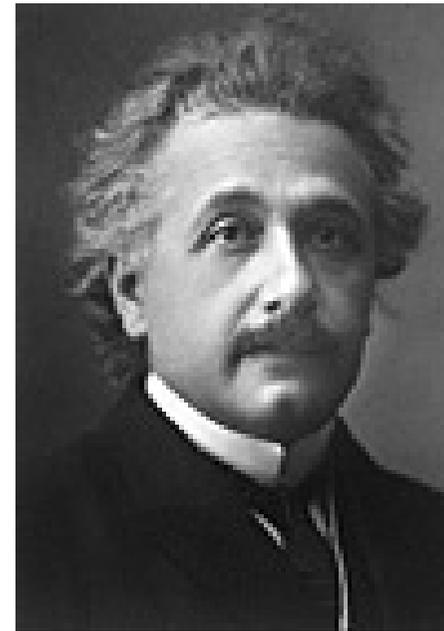
# Nace la Mecánica Cuántica

## The Nobel Prize in Physics 1921

"for his services to Theoretical Physics, and especially for his discovery of the law of the photoelectric effect"

$$E = mc^2$$

“Dios no juega a los dados”



**Albert Einstein**

Germany and Switzerland

Kaiser-Wilhelm-Institut (now Max-Planck-Institut) für Physik  
Berlin, Germany

b. 1879

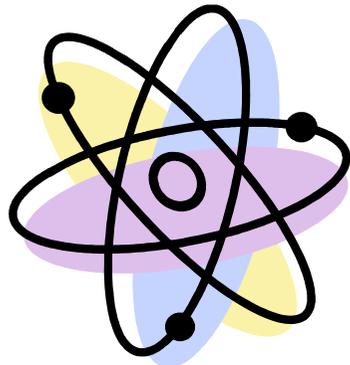
d. 1955

# Nace la Mecánica Cuántica

## The Nobel Prize in Physics 1922

"for his services in the investigation of the structure of atoms and of the radiation emanating from them"

$$E = E_2 - E_1$$



Modelo atómico de Bohr



**Niels Henrik David Bohr**

Denmark  
Copenhagen University  
Copenhagen, Denmark  
b.1885  
d.1962

# Nace la Mecánica Cuántica

**The Nobel Prize in Physics 1929**

"for his discovery of the wave nature of electrons"

$$\lambda = \frac{h}{p}$$



**Prince Louis-Victor Pierre  
Raymond de Broglie**

France

Sorbonne University, Institut Henri Poincaré

Paris, France

b.1892

d.1987

# Nace la Mecánica Cuántica

**The Nobel Prize in Physics 1932**

"for the creation of quantum mechanics, the application of which has, inter alia, led to the discovery of the allotropic forms of hydrogen"

$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar / 2$$

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar / 2$$

“La fobia de la naturaleza  
por ser medida”



**Werner Karl Heisenberg**

Germany

Leipzig University

Leipzig, Germany

b.1901

d.1976

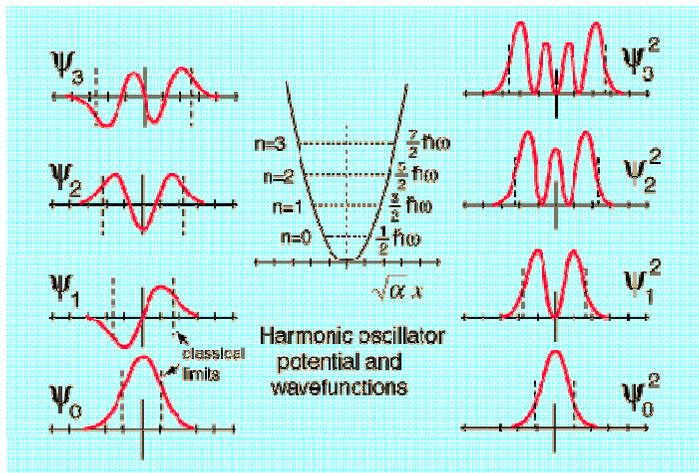
# Nace la Mecánica Cuántica

The Nobel Prize in Physics 1933

"for the discovery of new productive forms of atomic theory"

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\mathbf{r}, t) = \mathbf{H}\Psi(\mathbf{r}, t);$$

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{p}^2}{2m} + \mathbf{V}_o$$



**Erwin Schrödinger**

🏆 1/2 of the prize  
Austria  
Berlin University  
Berlin, Germany  
b.1887  
d.1961



**Paul Adrien  
Maurice Dirac**

🏆 1/2 of the prize  
United Kingdom  
University of Cambridge  
Cambridge, United Kingdom  
b.1902  
d.1984

# Constantes fundamentales

## LA METROLOGÍA DE DIOS

Velocidad de la luz:  $c_0$

Constante de planck:  $h$

Constante gravitacional:  $G$

Masa del electrón:  $m_e$

Constante de Boltzmann:  $k_B$

Constante de stefan-Boltzmann:  $\sigma$

Constante de Avogadro:  $N_A$

Masa del protón:  $m_p$

Constante de estructura fina:  $\alpha$

Permitividad del vacío:  $\epsilon_0$

Permeabilidad del vacío:  $\mu_0$

Constante de Rydberg:  $R$

Carga del electrón:  $e$

# Constantes fundamentales

Existen relaciones entre algunas de estas constantes de manera que unas pueden ser expresadas en función de otras, por ejemplo:

$$\alpha = \frac{\mu_0 c_0 e^2}{2h}$$

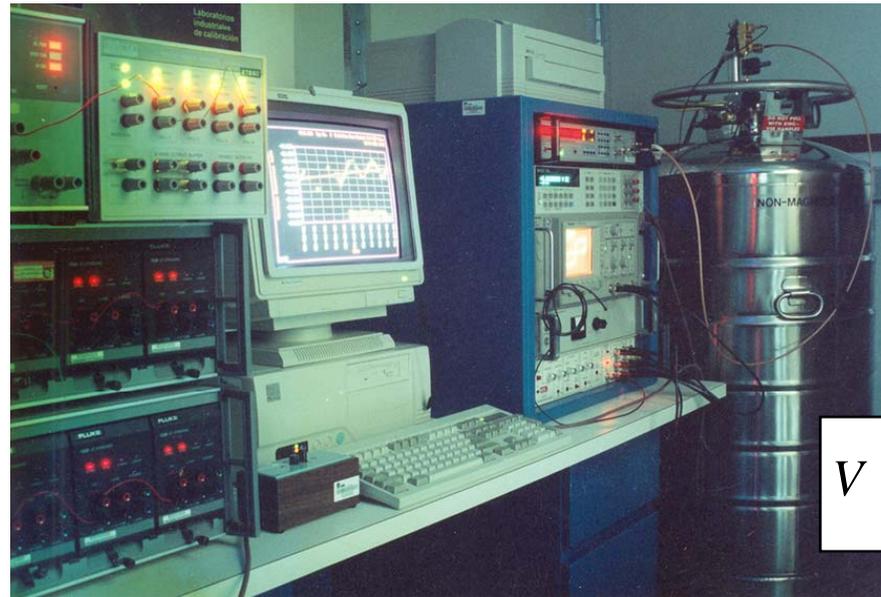
$$R_\infty = \frac{m_e c_0 \alpha^2}{2h}$$

$$c_0 \varepsilon_0 \mu_0 = 1$$

La consistencia entre las relaciones de constantes fundamentales pone a prueba la validés de los modelos fundamentales de la física

# Constantes fundamentales y Metrología

## Efecto Josephson

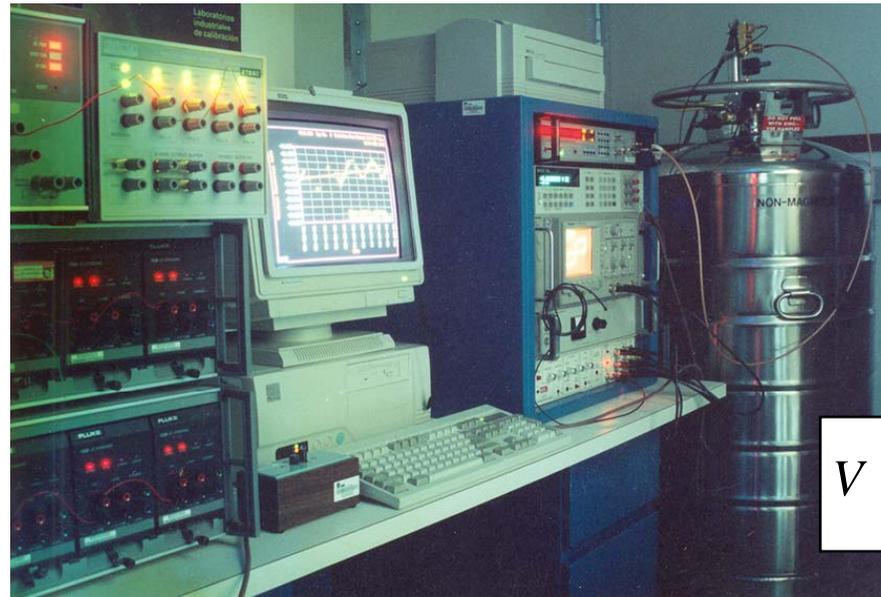


$$V = n \frac{h\nu}{2e}$$

## Efecto Josephson

# Constantes fundamentales y Metrología

## Efecto Josephson

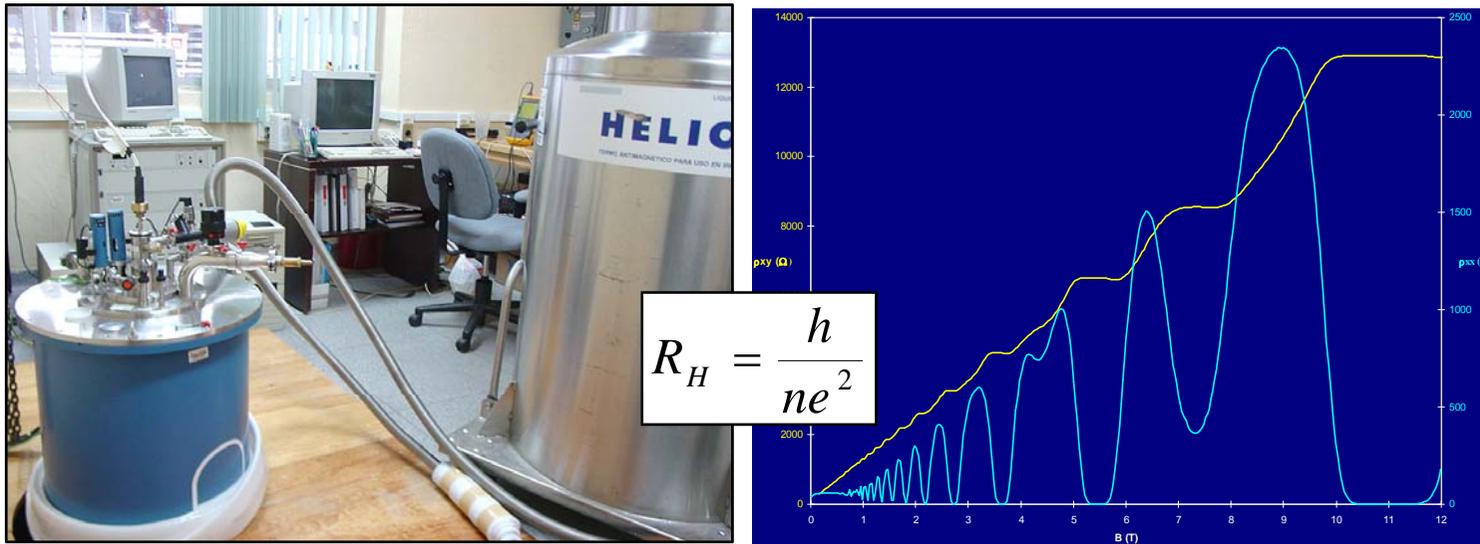


$$V = n \frac{h\nu}{2e}$$

## Efecto Josephson

# Constantes fundamentales y Metrología

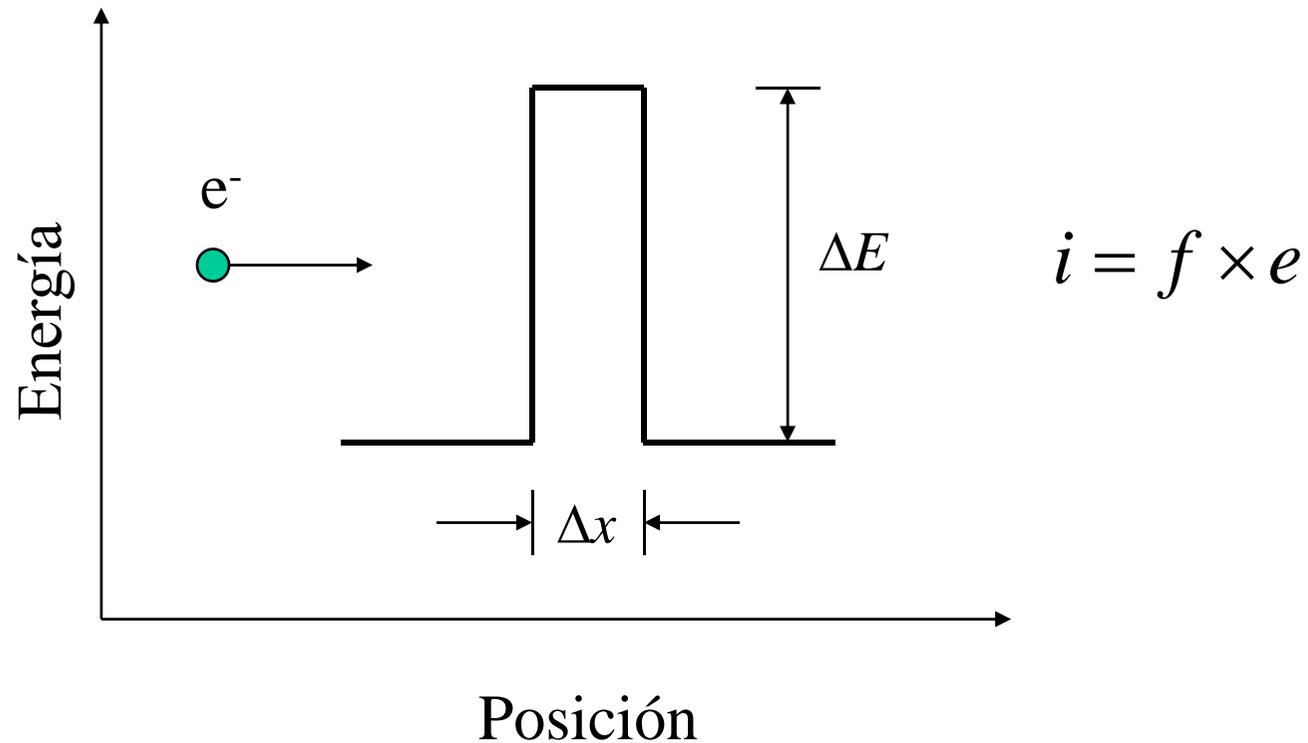
## Efecto Hall cuántico



**Efecto Hall Cuántico**

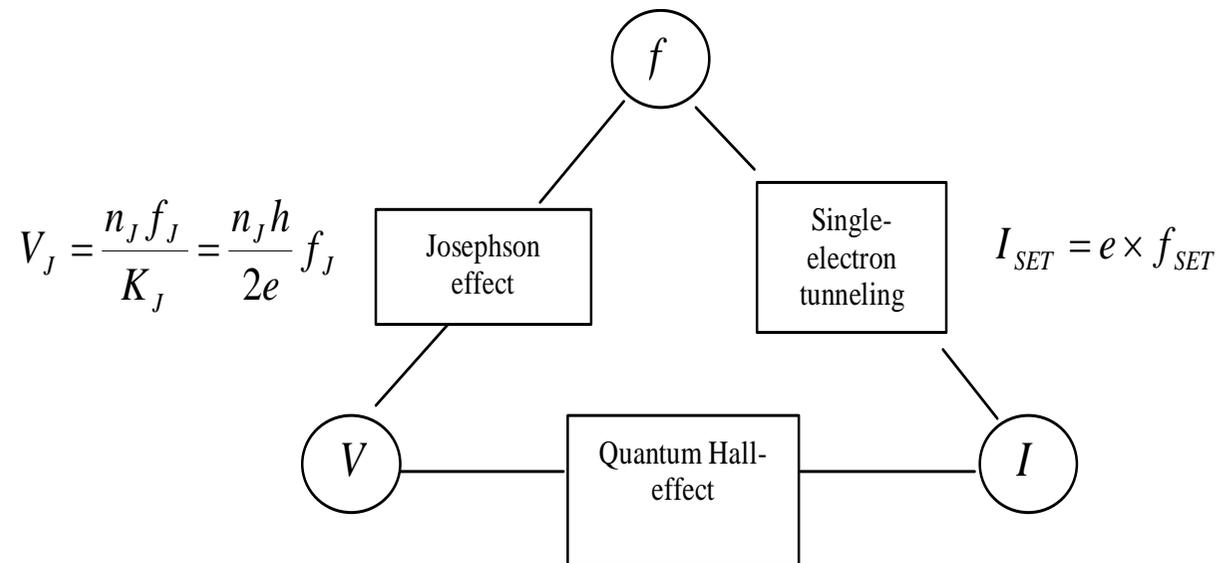
# Constantes fundamentales y Metrología

Tuneleo de electrones



# Constantes fundamentales y Metrología

## El triángulo cuántico

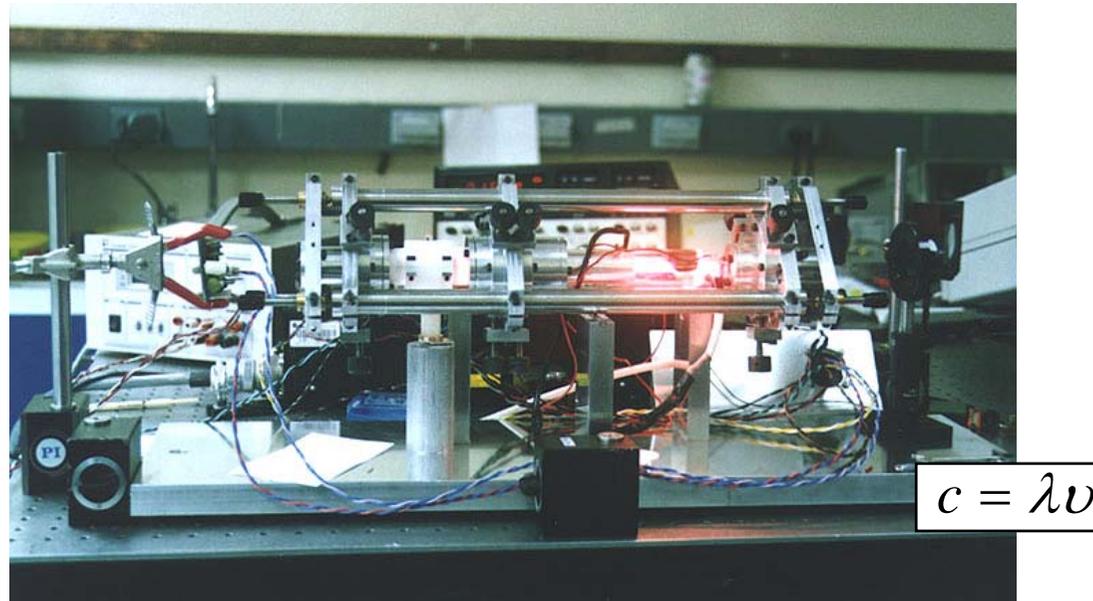


$$V = R_H I = \frac{h}{n_H e^2} I$$

(Ley de Ohm)

# Constantes fundamentales y Metrología

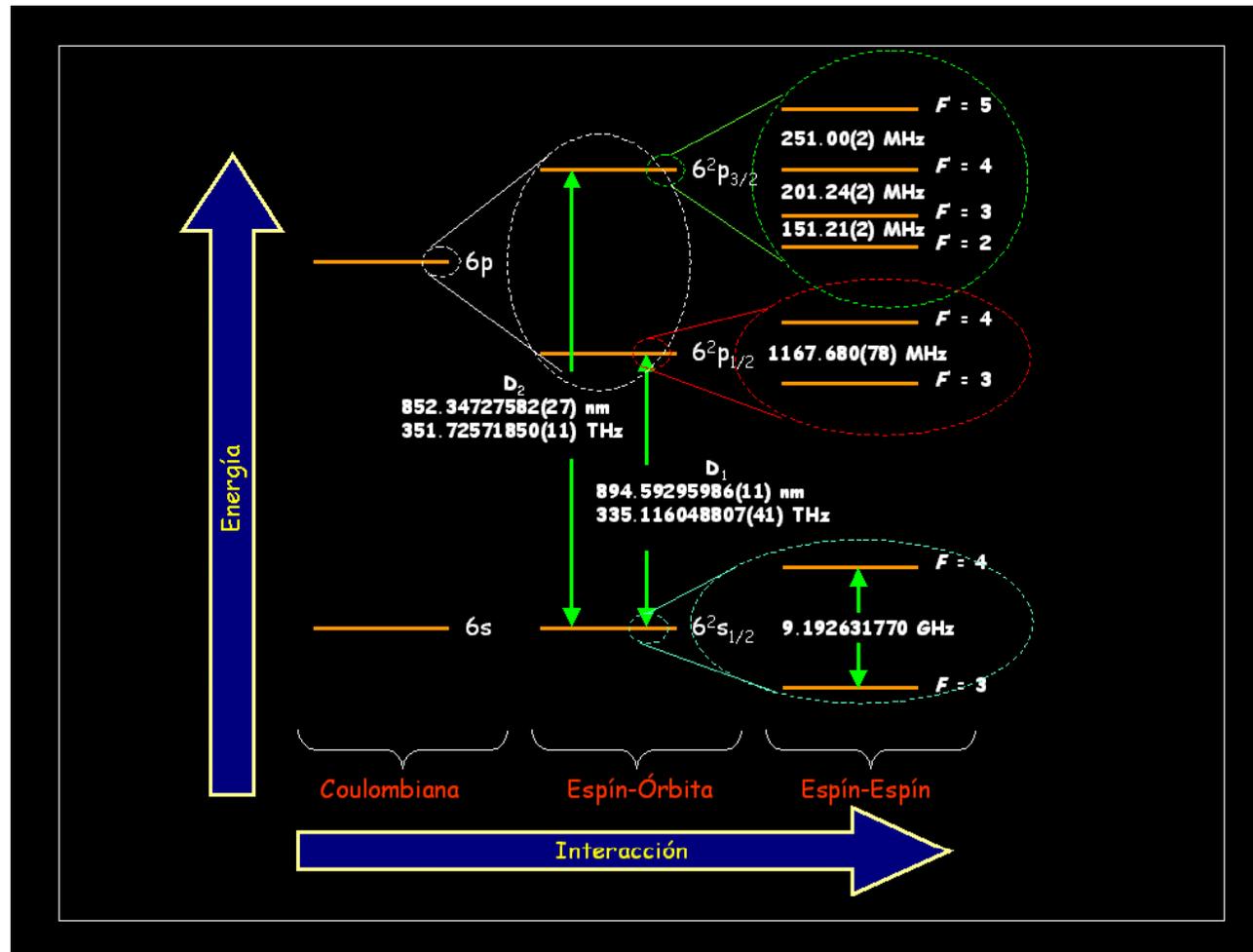
## Definición del metro



**Láser de HeNe estabilizado al Yodo para la realización de la unidad de longitud**

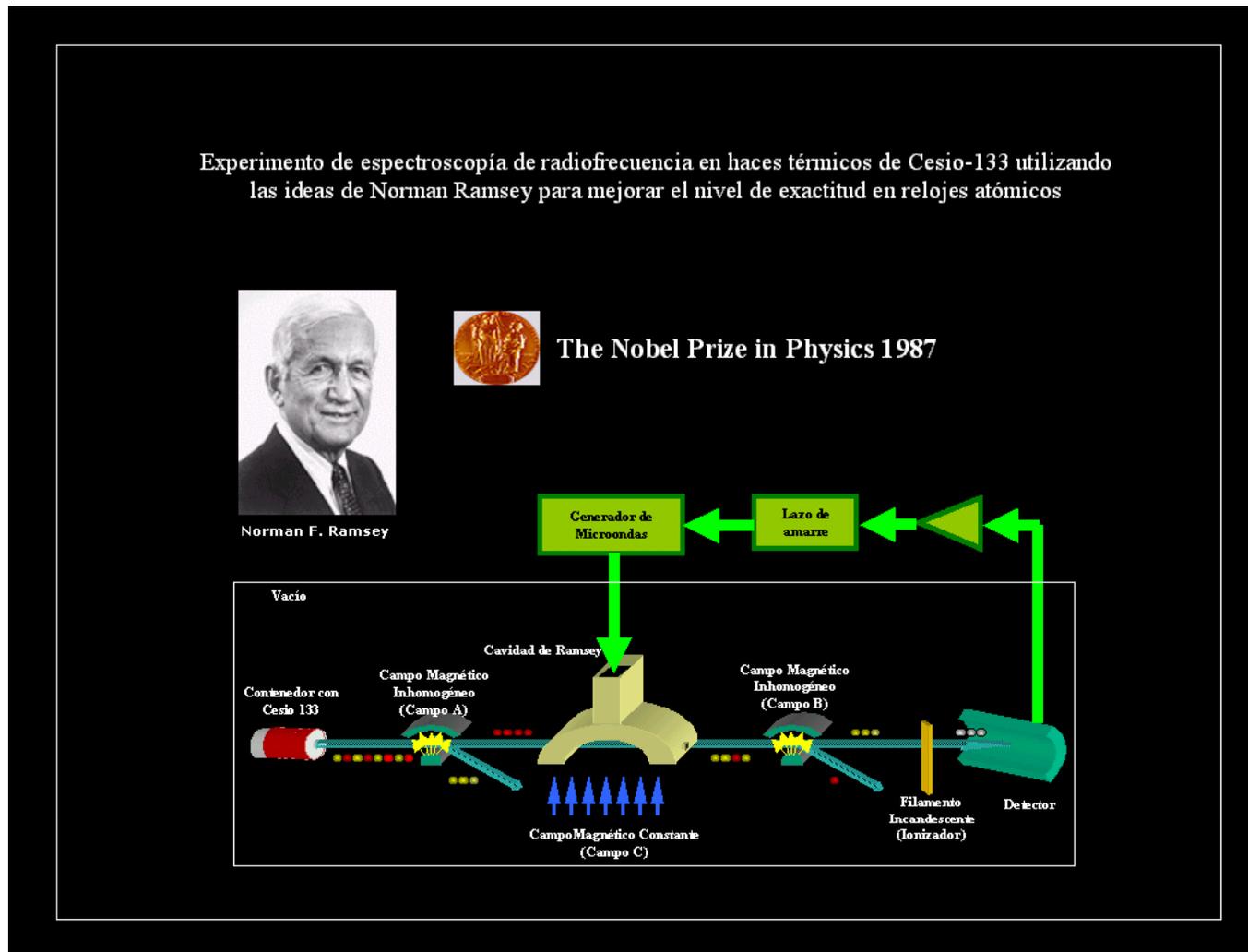
# Constantes fundamentales y Metrología

## Definición del segundo



# Constantes fundamentales y Metrología

## Definición del segundo



# Constantes fundamentales y Metrología

## Definición del segundo

### Métodos ópticos para congelar átomos

En la primera 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

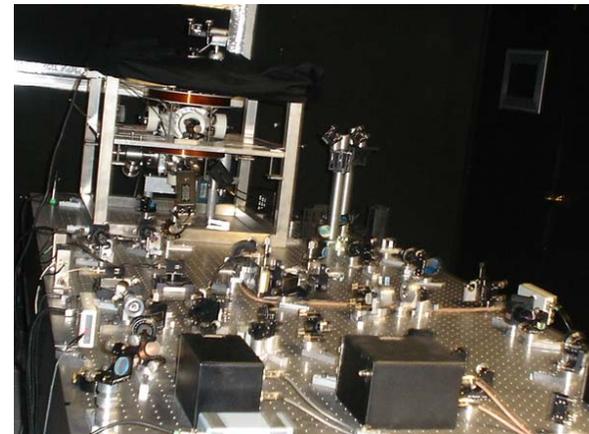
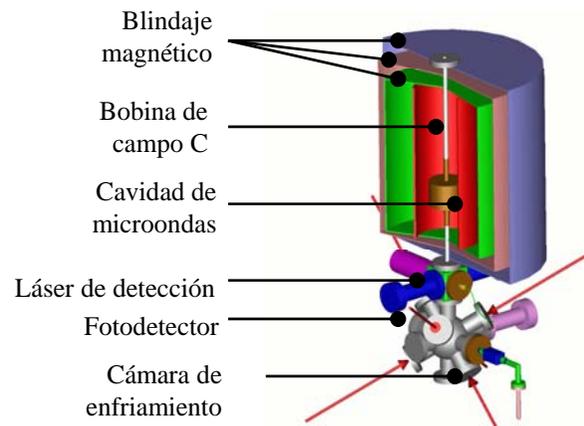
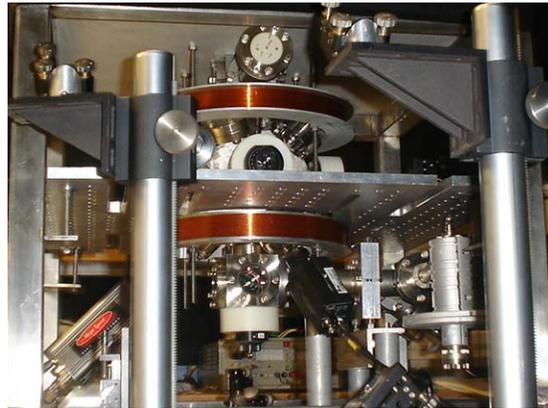


**The Nobel Prize  
in Physics 1997**

# Constantes fundamentales y Metrología

## Definición del segundo

El CENAM desarrolla una Trampa Magneto-Óptica para congelar átomos de Cesio-133 como primer paso en el desarrollo de un reloj de fuente atómica

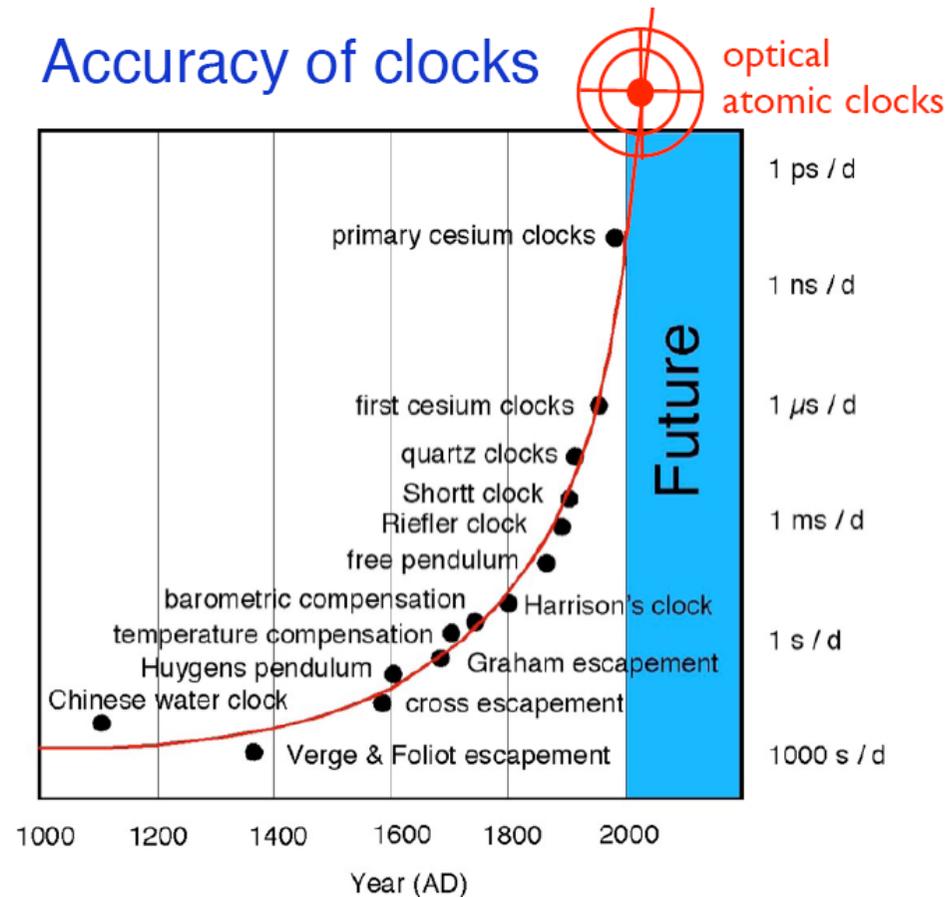


# Constantes fundamentales y Metrología

## Definición del segundo

Se vislumbran nuevos horizontes

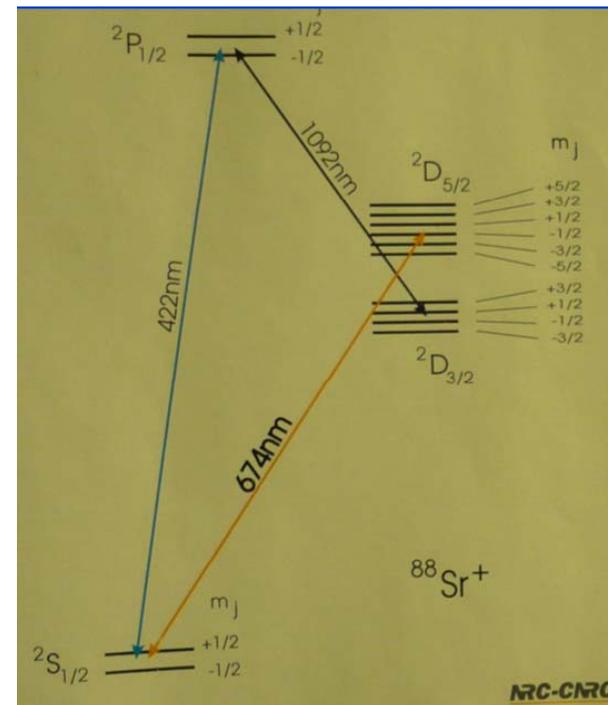
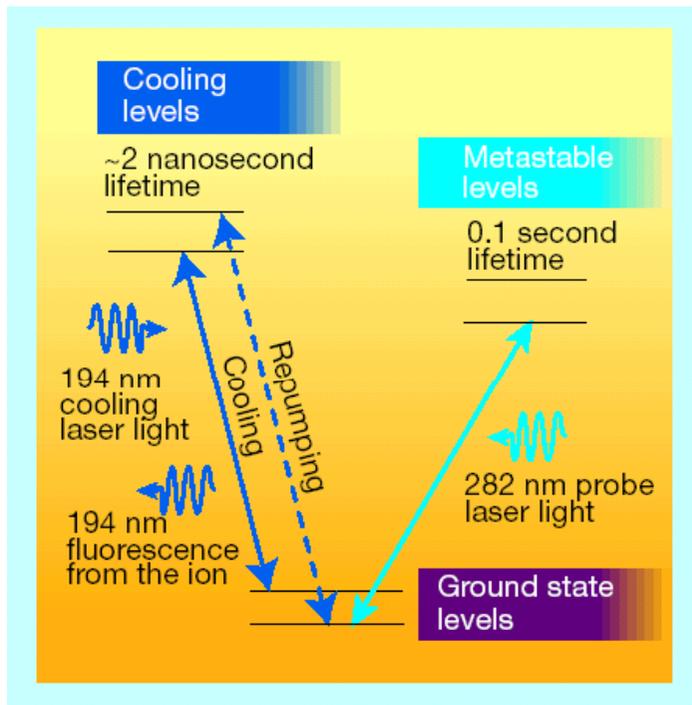
Los relojes atómicos de mayor exactitud en el futuro serán relojes atómicos ópticos



# Constantes fundamentales y Metrología

Hacia una nueva definición del segundo

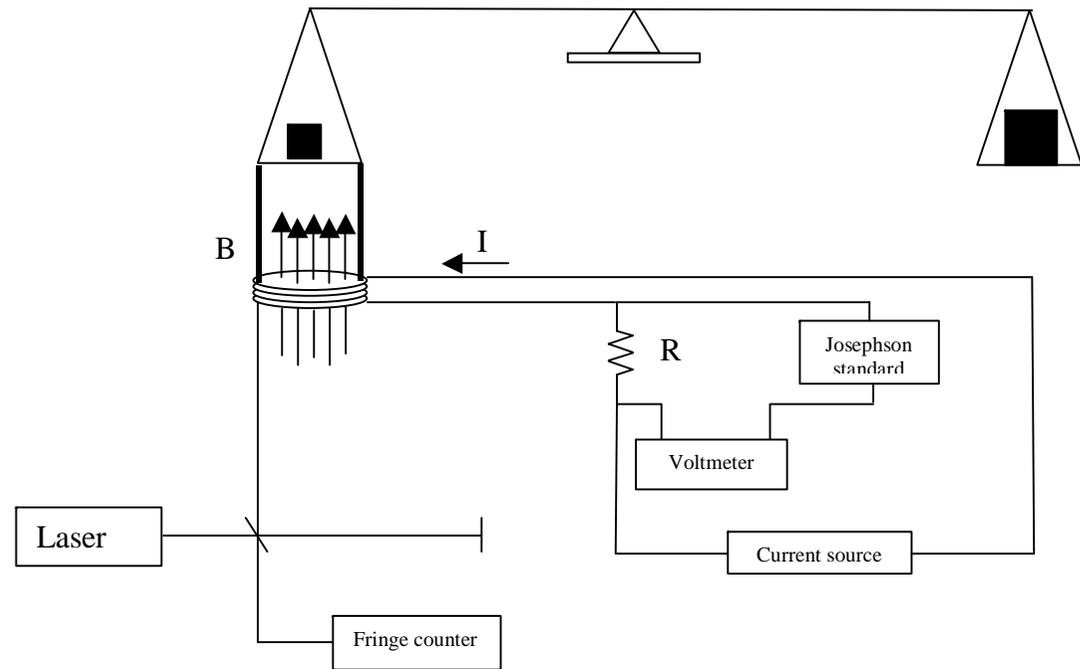
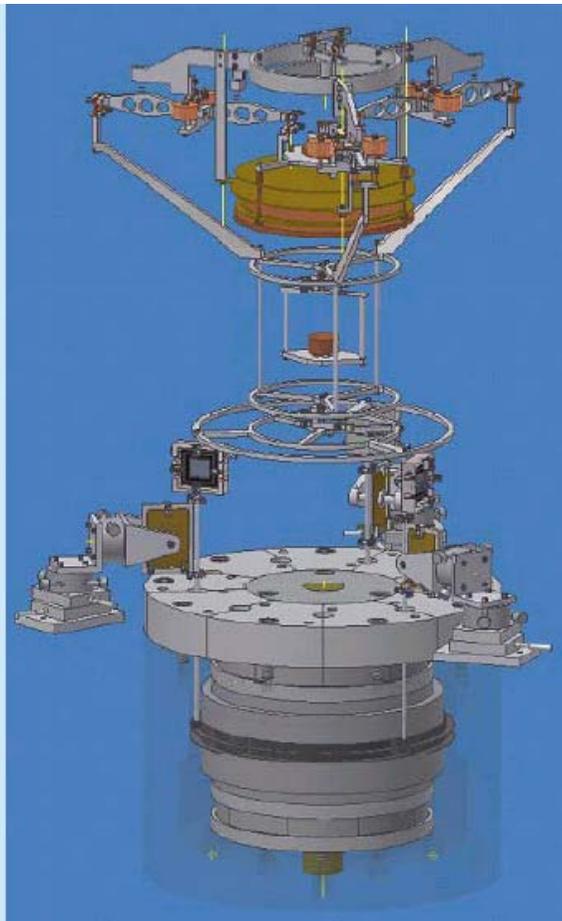
## Mercury and Strontium ion clocks



¡1 segundo en la vida del universo!

# Constantes fundamentales y Metrología

Hacia una nueva definición del kilogramo



# ¿Son realmente constantes las “*constantes*” *fundamentales*?

- Dirac’s large number hypothesis (1938) : *gravitational constant* decrease with a rate of about  $0.5 \times 10^{-10} \text{yr}^{-1}$



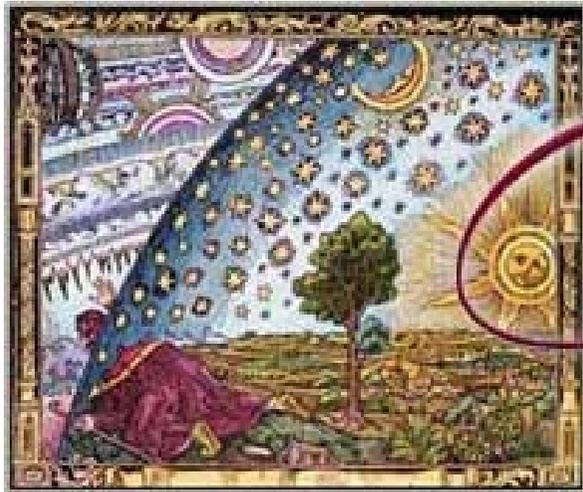
**E.Teller**

- E.Teller *et al.* (1948) : *fine structure constant* might vary as time in order to save the idea of Dirac. (It increase with a rate of about  $0.3 \times 10^{-12} \text{yr}^{-1}$ ).



**P. Dirac**

# ¿Tenemos mediciones que no coinciden con los modelos de la física?



La concepción de la tierra y del universo en la edad media



La concepción moderna del universo

La rapidez con la que se expande el universo no coincide con la cantidad de energía observada. Parece que conocemos menos del universo de lo que pensábamos. El 95% del universo está oculto a nuestros ojos. Para explicar lo anterior se ha propuesto la existencia de la energía oscura.

# ¿Tenemos mediciones que no coinciden con los modelos de la física?

La mecánica cuántica y la relatividad general son incompatibles. No tenemos una teoría cuántica de la gravedad. Lo anterior impide hacer estimaciones del comportamiento del universo durante los primeros tres segundos después del big bang.

Esto parece ser un problema menor, al igual que hacia finales del siglo XIX la radiación de cuerpo negro, el efecto fotoeléctrico y el experimento de Michelson parecían problemas menores.

¿Estamos ante los albores de una nueva  
revolución científica?

No lo sabemos con certeza

Lo que si sabemos es que las constantes fundamentales se  
presentan ante nosotros como los patrones de medida con los que  
*Dios hizo el universo*. Fincaremos la metrología de las décadas por  
venir en los fundamentos del universo en busca de

**¡UNA MISMA MEDIDA PARA TODOS LOS HOMBRES PARA  
TODOS LOS TIEMPOS!**