



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE INDUSTRIA, COMERCIO  
Y TURISMO

Madrid 22 de mayo 2019

**CEM**

CENTRO ESPAÑOL  
DE METROLOGÍA

**9º SEMINARIO INTERCONGRESOS DE METROLOGÍA.  
30 Aniversario del CEM**

# **Metrología Cuántica**

**Miguel A. Martin-Delgado**

**Departamento de Física Teórica I  
Facultad de Ciencias Físicas  
Universidad Complutense Madrid**



gicc

[mardel@ucm.es](mailto:mardel@ucm.es)



gicc

# Mi Agradecimiento al *Centro Español de Metrología (CEM)* por su amable invitación



# ÍNDICE

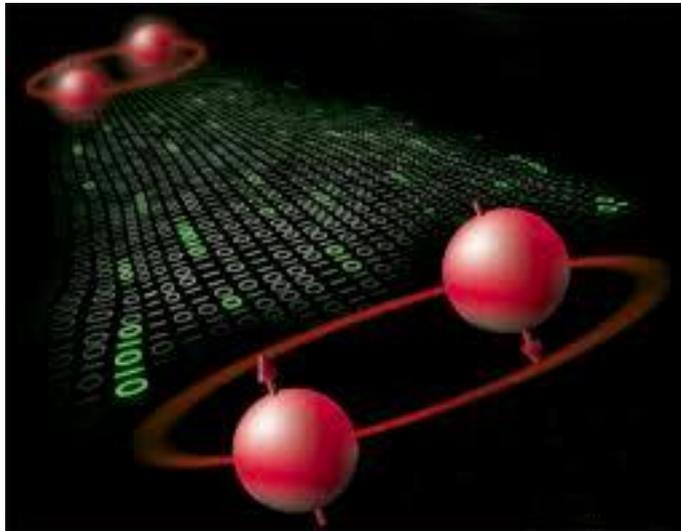
## Metrología Cuántica

- I) **Introducción: Metrología y Cuántica**
- II) **La Medida en la Historia de la Humanidad**
- III) **La Medida en la Mecánica Cuántica**
- IV) **Tecnologías Cuánticas: Segunda Revolución**
- V) **Conclusiones**

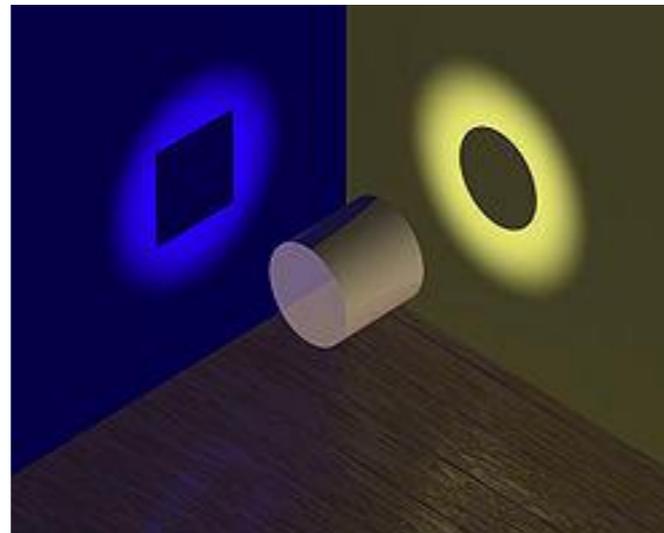
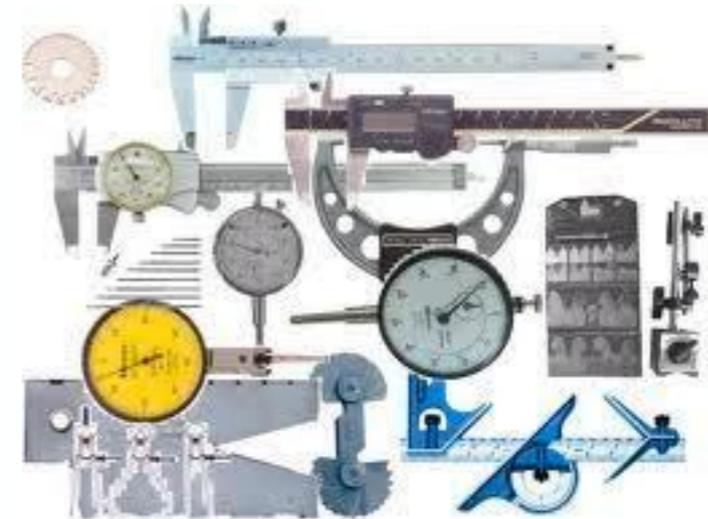
# I. Introducción: Metrología y Cuántica.

¿Qué tiene que ver la Cuántica con la Metrología?

**Cuántica**



**Metrología**



**Veremos que la Cuántica es la Teoría Física más 'metroológica' que existe.**

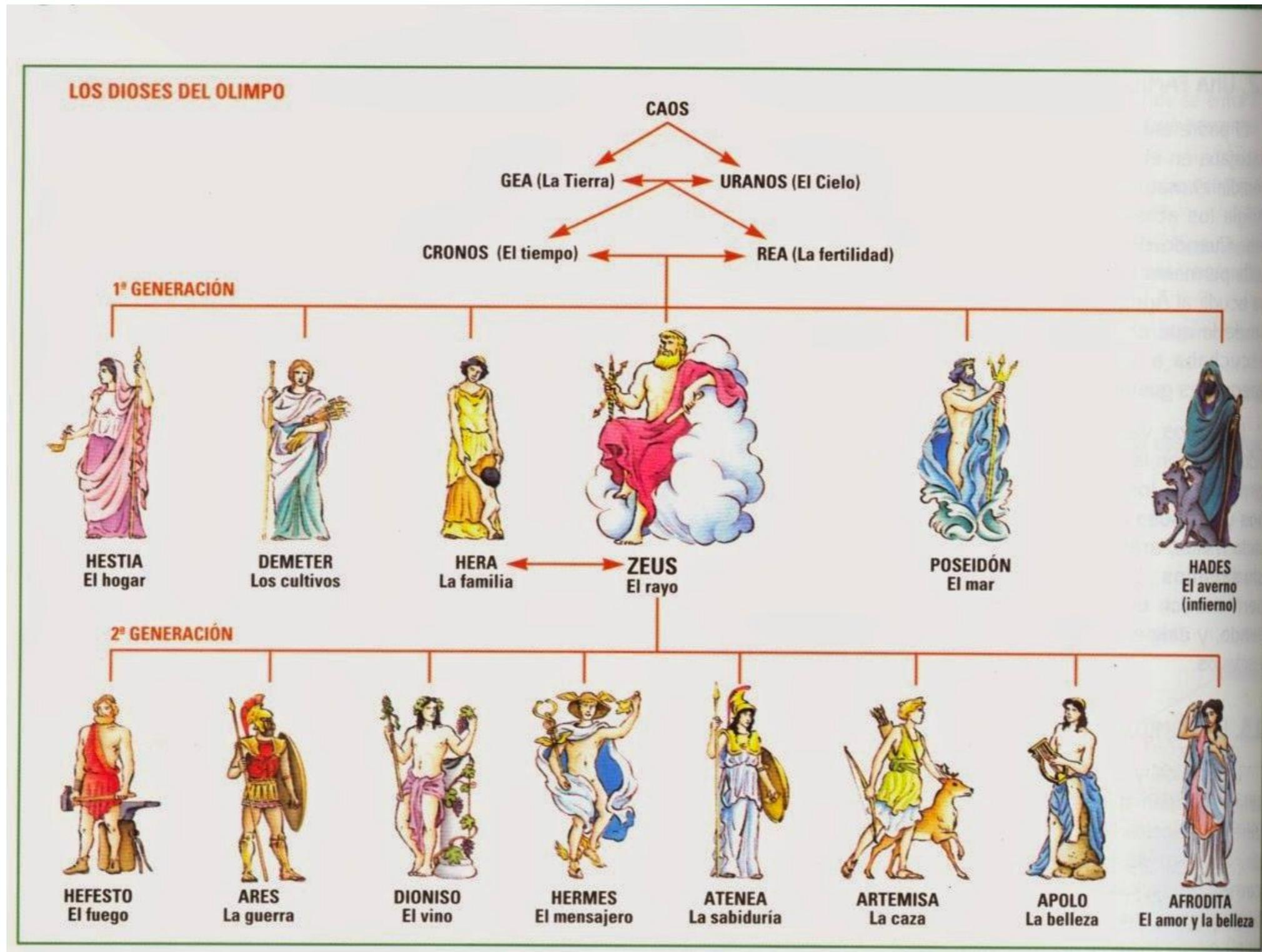
# II. La Medida en la Historia de la Humanidad.

ANTIGUEDAD LEJANA: DIOS(ES) COMO MEDIDA DE TODAS LAS COSAS



# II. La Medida en la Historia de la Humanidad.

## ANTIGUEDAD LEJANA: DIOS(ES) COMO MEDIDA DE TODAS LAS COSAS



# II. La Medida en la Historia de la Humanidad.

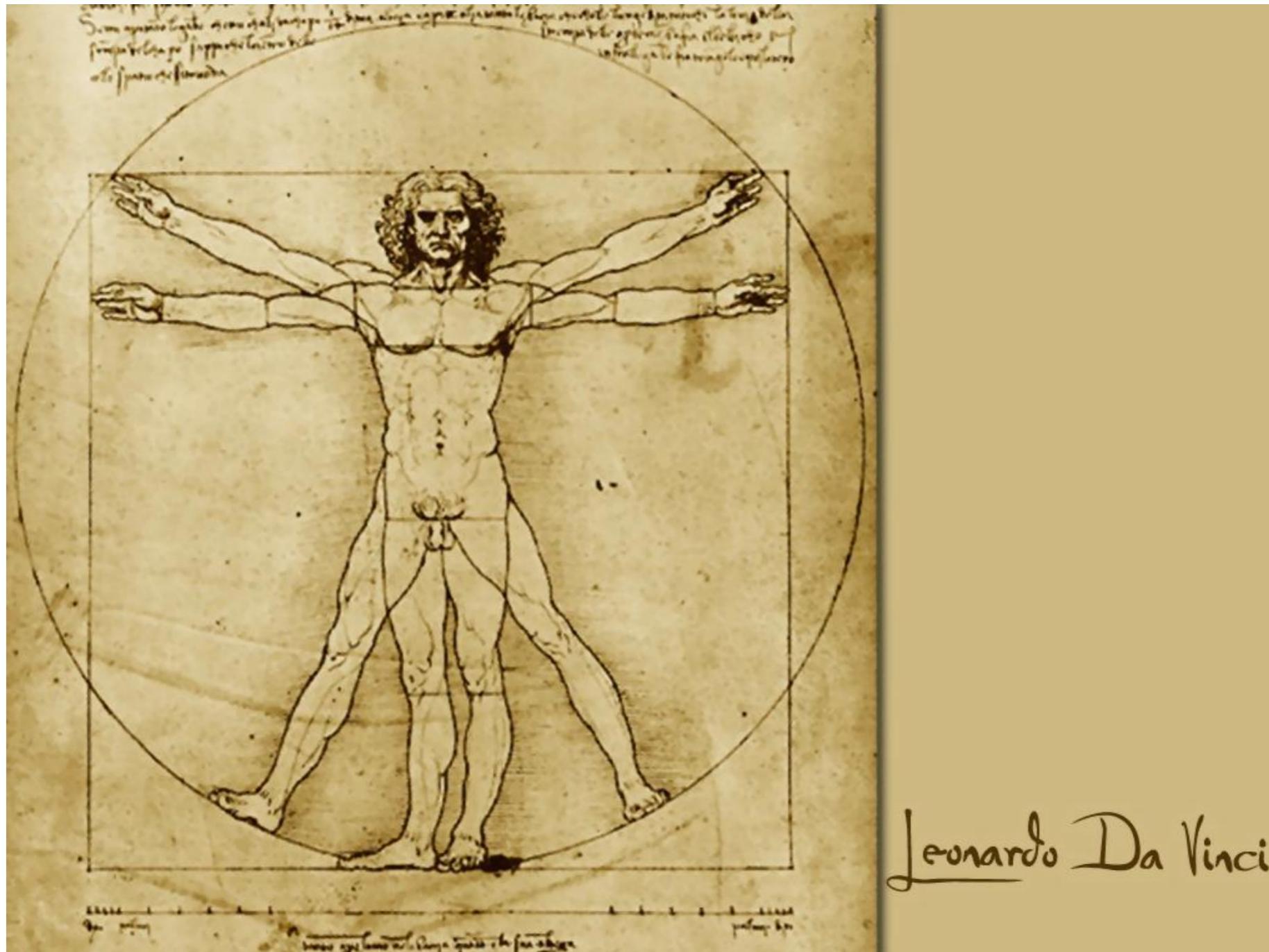
ANTIGUEDAD LEJANA: DIOS(ES) COMO MEDIDA DE TODAS LAS COSAS



DECADENCIA

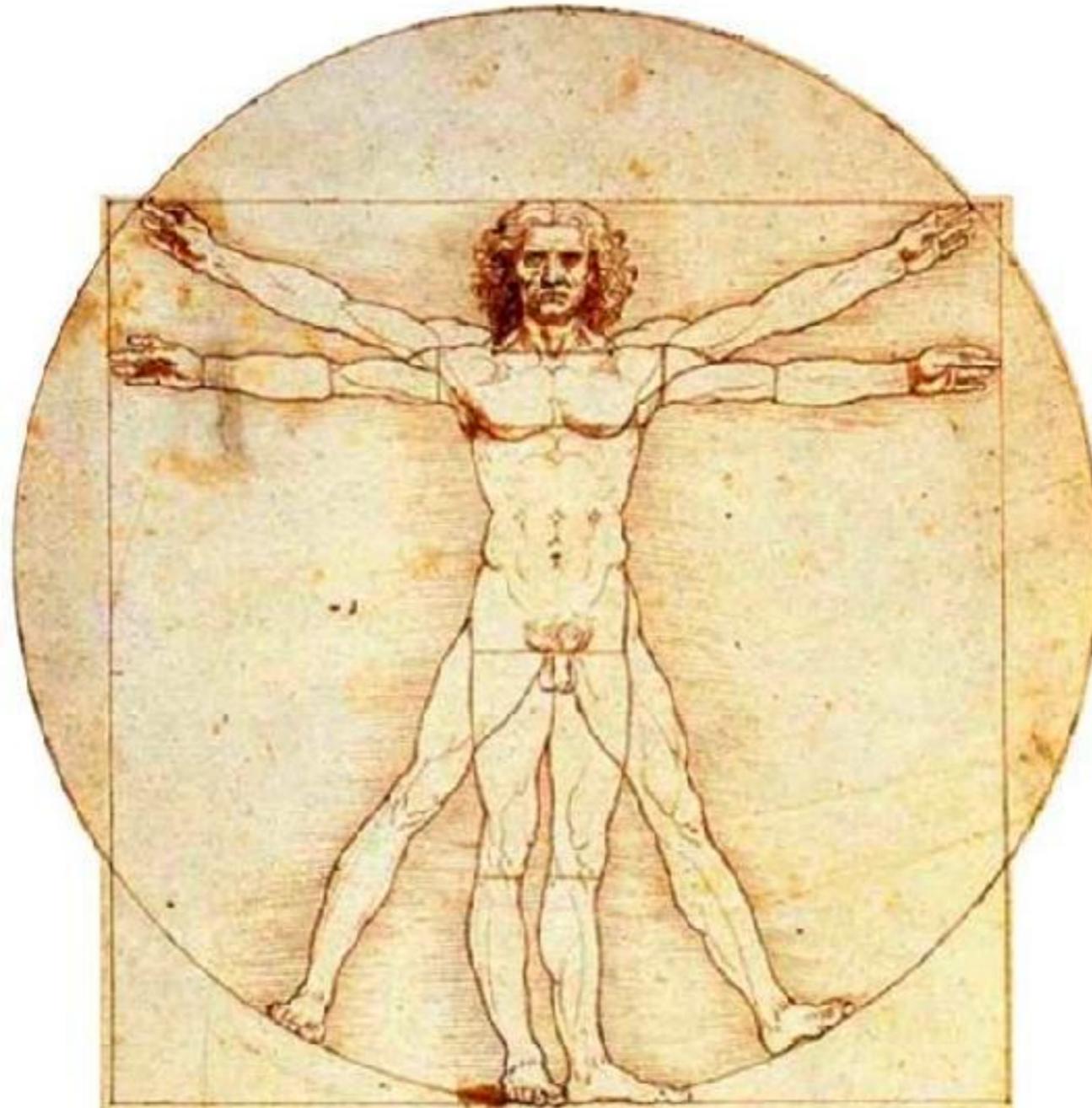
# II. La Medida en la Historia de la Humanidad.

## RENACIMIENTO: EL HOMRE COMO MEDIDA DE TODAS LAS COSAS



# II. La Medida en la Historia de la Humanidad.

**RENACIMIENTO: EL HOMRE COMO MEDIDA DE TODAS LAS COSAS**

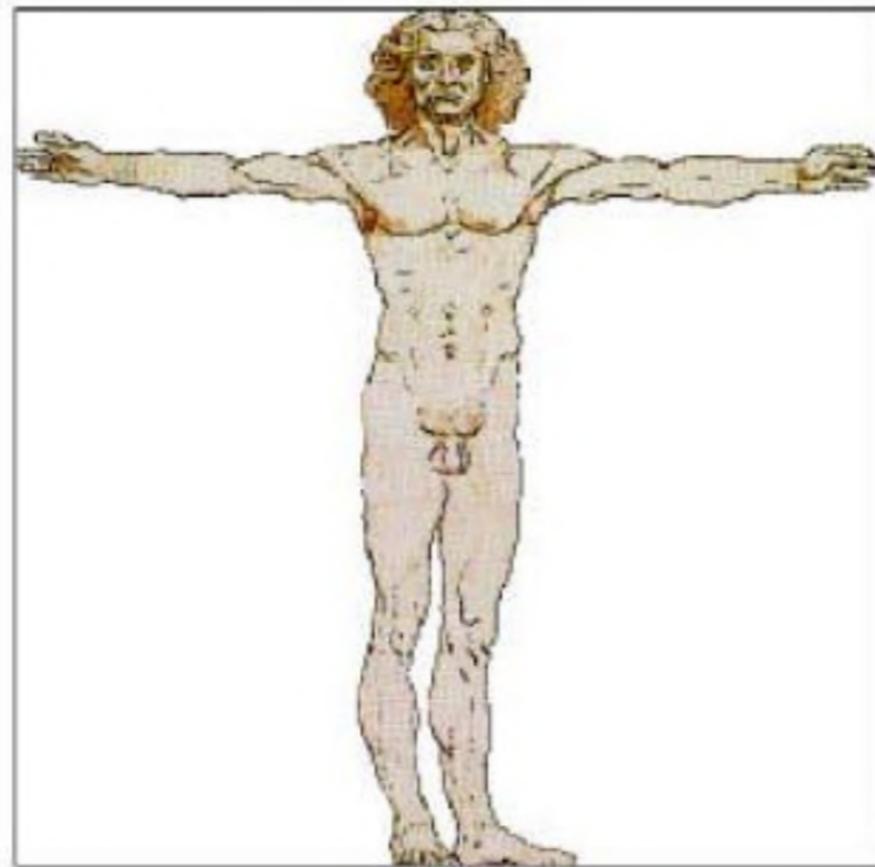


**Mucho antes de que llegara Leonardo, Protágoras ya decía que "el hombre es la medida de todas las cosas"**

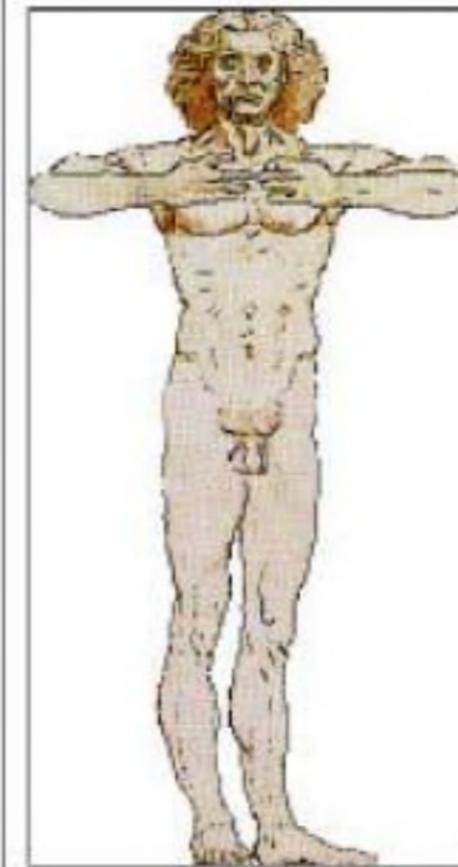
# II. La Medida en la Historia de la Humanidad.

RENACIMIENTO: EL HOMRE COMO MEDIDA DE TODAS LAS COSAS

La braza



La vara



# II. La Medida en la Historia de la Humanidad.

## BACON Y GALILEO: EL HOMBRE COMO MEDIDOR DE TODAS LAS COSAS

### NACIMIENTO DEL METODO CIENTIFICO

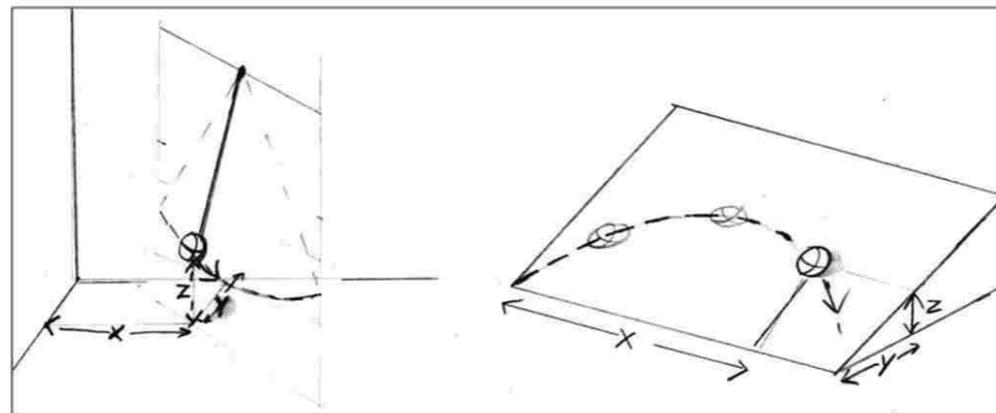
## El método científico



Galileo Galilei  
(1564-1642)



Francis Bacon  
(1561-1626)



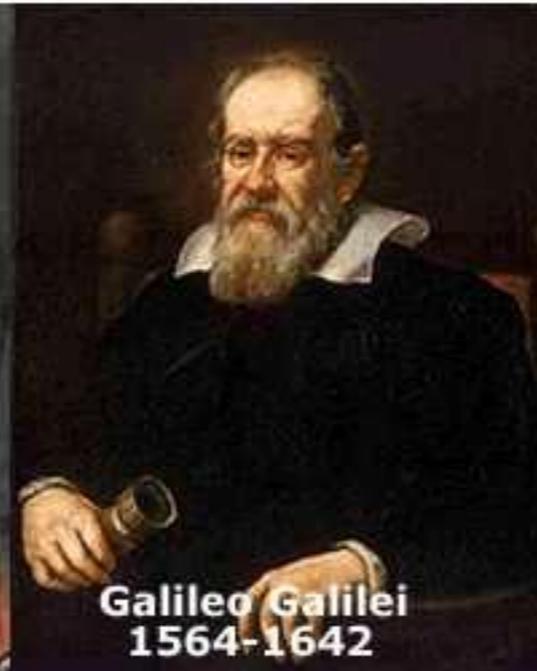
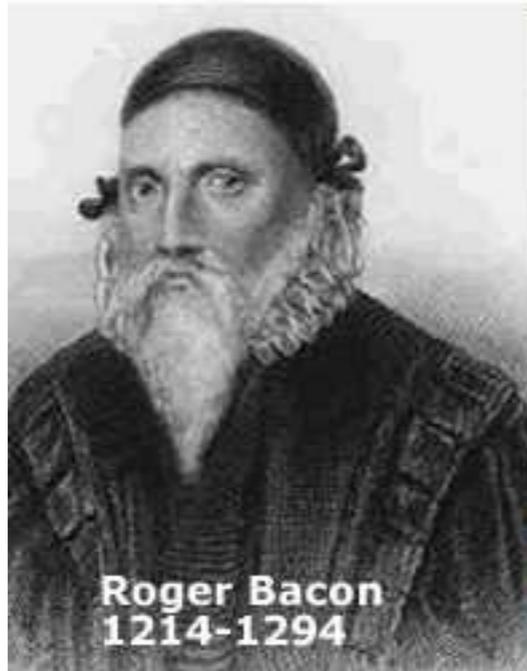
Galileo was essentially comparing the 3d motion of pendulums (X,Y,Z) to the 3d motion of objects moving on an inclined plane. Doing this in full X,Y,Z detail for both objects would work perfectly but produce unnecessarily complicated equations.

# II. La Medida en la Historia de la Humanidad.

**BACON Y GALILEO: EL HOMBRE COMO MEDIDOR DE TODAS LAS COSAS**

**NACIMIENTO DEL METODO CIENTIFICO**

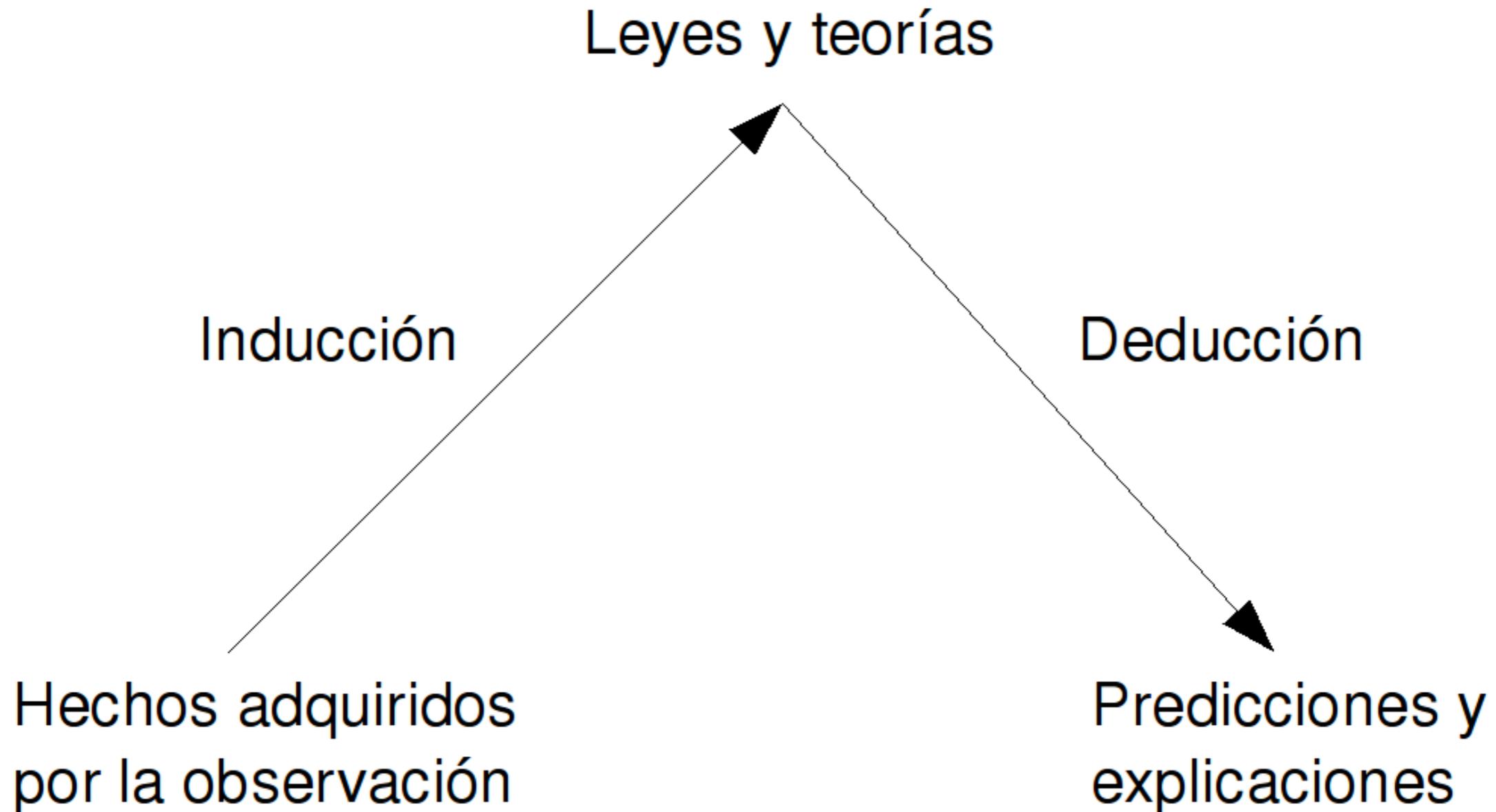
**Del empirismo al racionalismo**



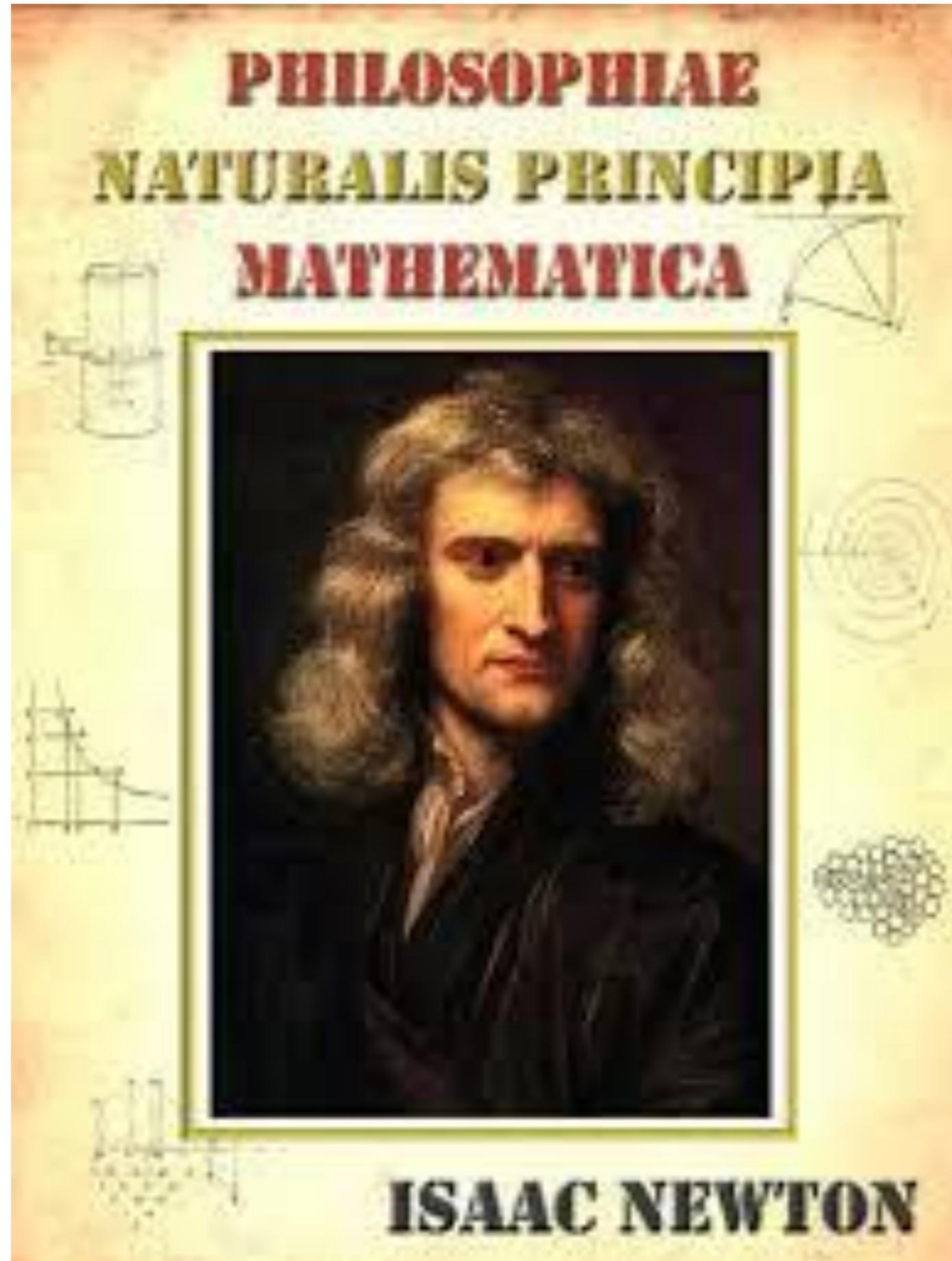
# II. La Medida en la Historia de la Humanidad.

**BACON Y GALILEO: EL HOMBRE COMO MEDIDOR DE TODAS LAS COSAS**

**NACIMIENTO DEL METODO CIENTIFICO**



# II. La Medida en la Historia de la Humanidad.



# II. La Medida en la Historia de la Humanidad.

## REVOLUCION FRANCESA: NACE LA METROLOGIA MODERNA



La Revolución francesa trataba de derribar viejas jerarquías arcaicas y caóticas de la era feudal y rehacer la sociedad teniendo en cuenta los principios igualitarios.

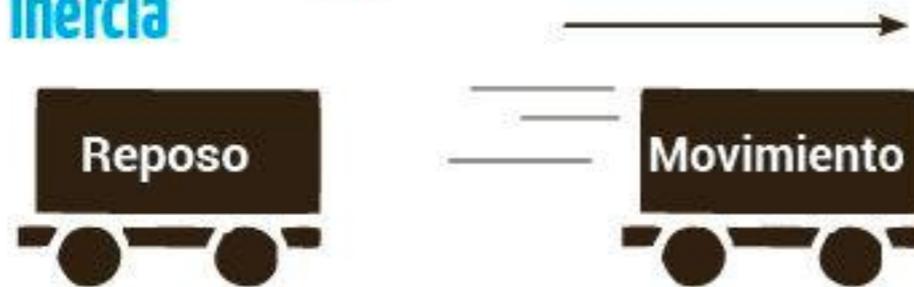
Inspirados por la revolución, los científicos en ese momento querían comenzar con un nuevo y consistente sistema de medición, basando las unidades no en mandatos arbitrarios de los reyes, sino en la NATURALEZA

# III. La Medida en la Mecánica Cuántica.

La medida juega un papel más fundamental en la física cuántica que en la física clásica.

## Primera ley de Newton

Inercia



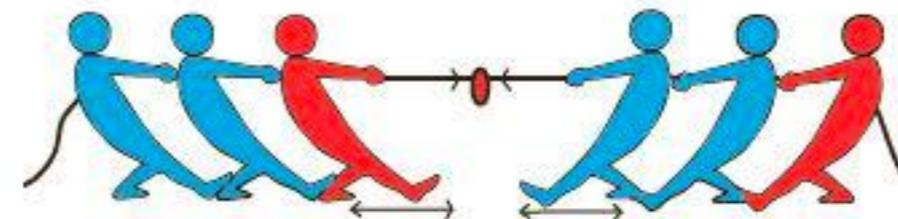
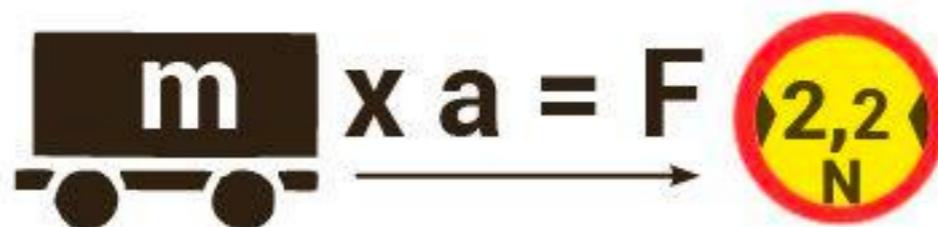
## Tercera ley de Newton

o Ley de acción y reacción.



## Segunda ley de Newton

Fuerza  $F=ma$



La Medida está fuera de las Leyes.

Se puede medir con precisión infinita

# III. La Medida en la Mecánica Cuántica.

## LEYES DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

La medida aparece explícitamente en las leyes de la Mecánica Cuántica, pero no en las de la Mecánica Clásica

**LEY I: “DE LOS ESTADOS”**  $|\Psi\rangle \in \mathcal{H}$      $|\Psi_1\rangle + |\Psi_2\rangle \in \mathcal{H}$

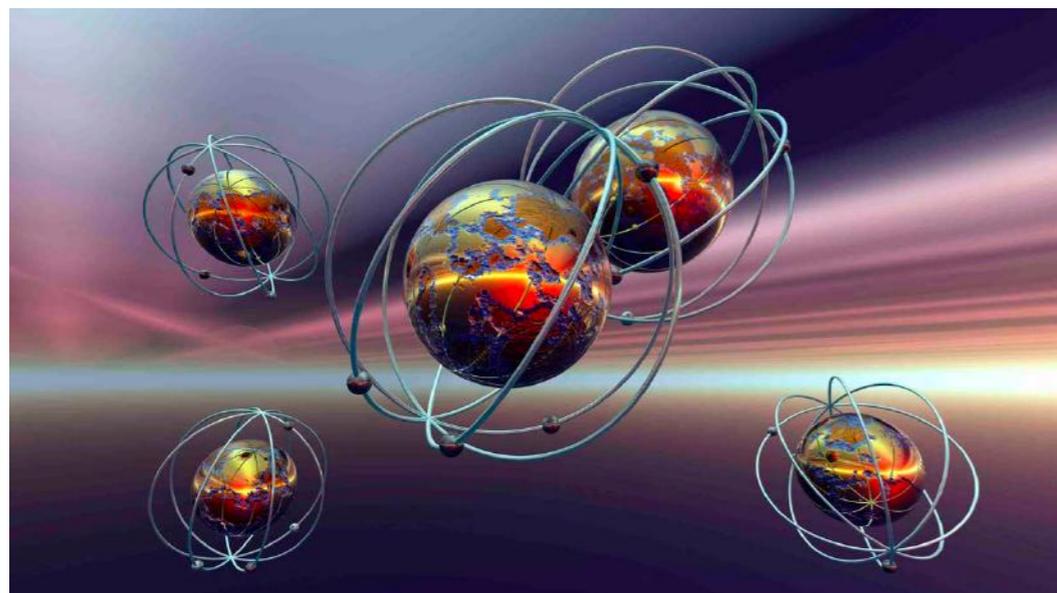
**LEY II: “DE LOS OBSERVABLES”**  $Q^\dagger = Q$

$$|\Psi\rangle = \sum_n c_n |\Psi_n\rangle,$$

$$Q|\Psi_n\rangle = q_n |\Psi_n\rangle$$

$$P(q_n) = |\langle \Psi | \Psi_n \rangle|^2$$

**LEY III: “DE LA EVOLUCIÓN TEMPORAL”**



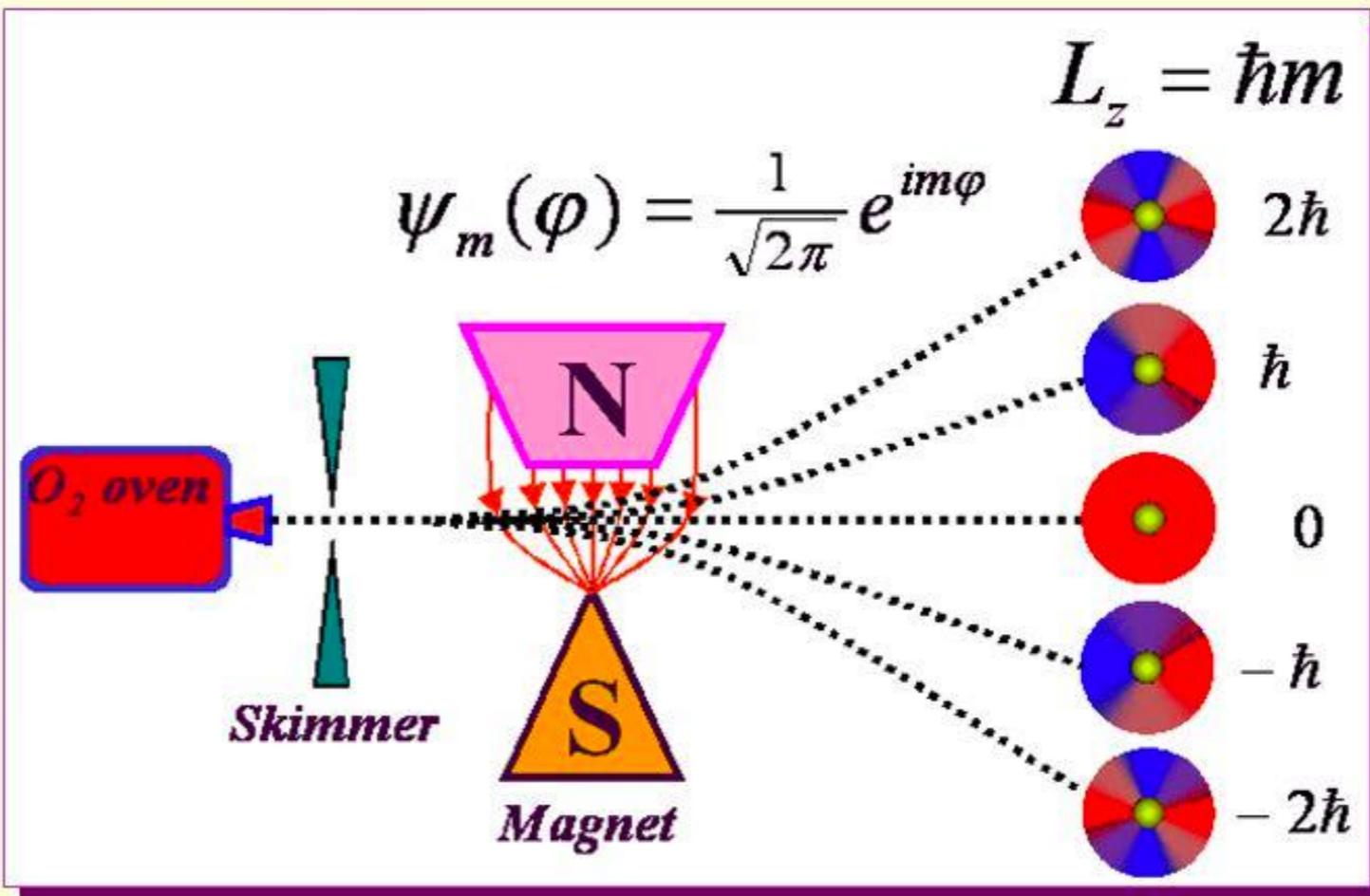
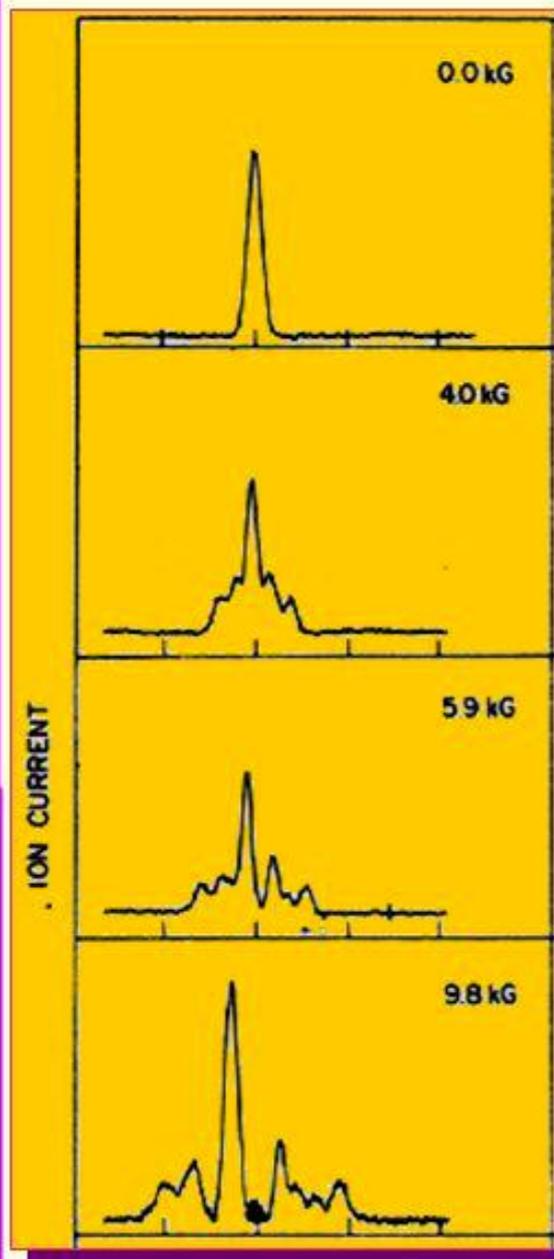
$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\Psi\rangle = H |\Psi\rangle$$

**La Mecánica Cuántica es la Teoría Física más ‘metrológica’ que existe.**

# III. La Medida en la Mecánica Cuántica.

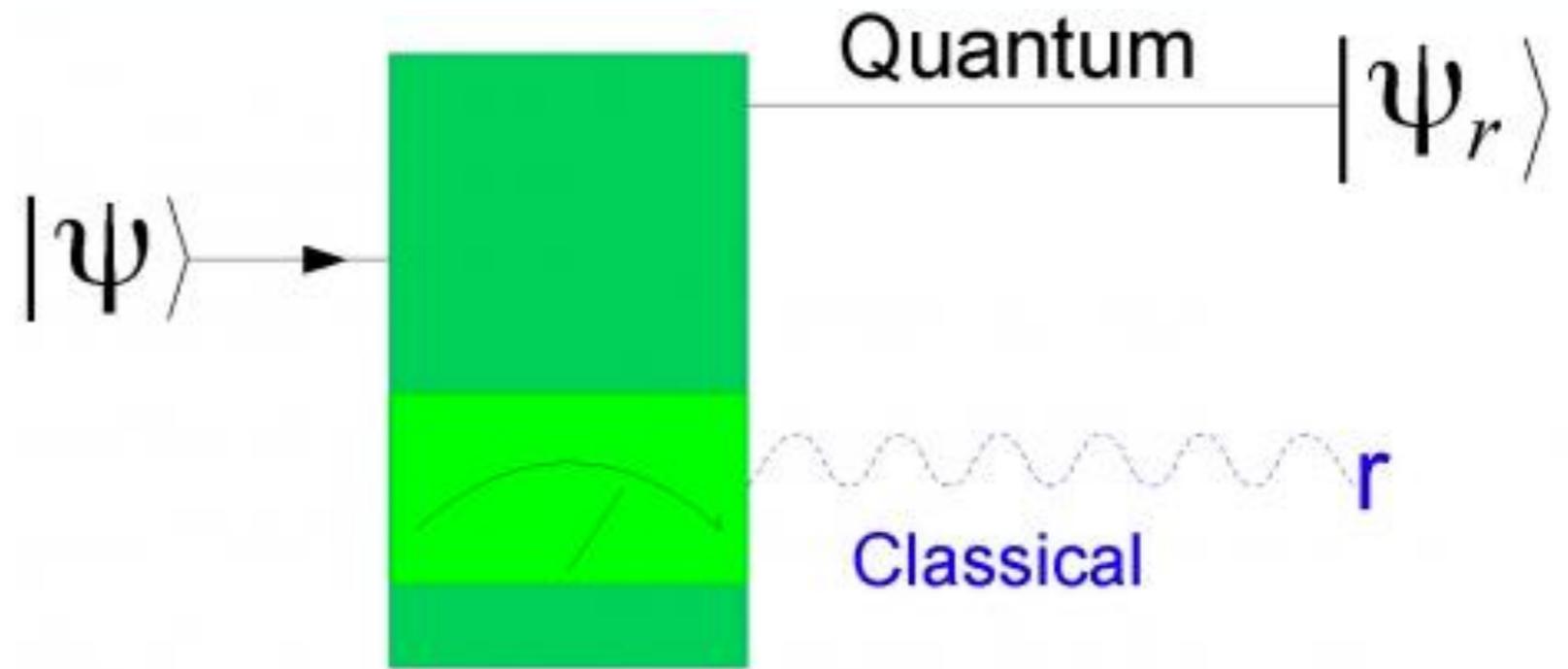
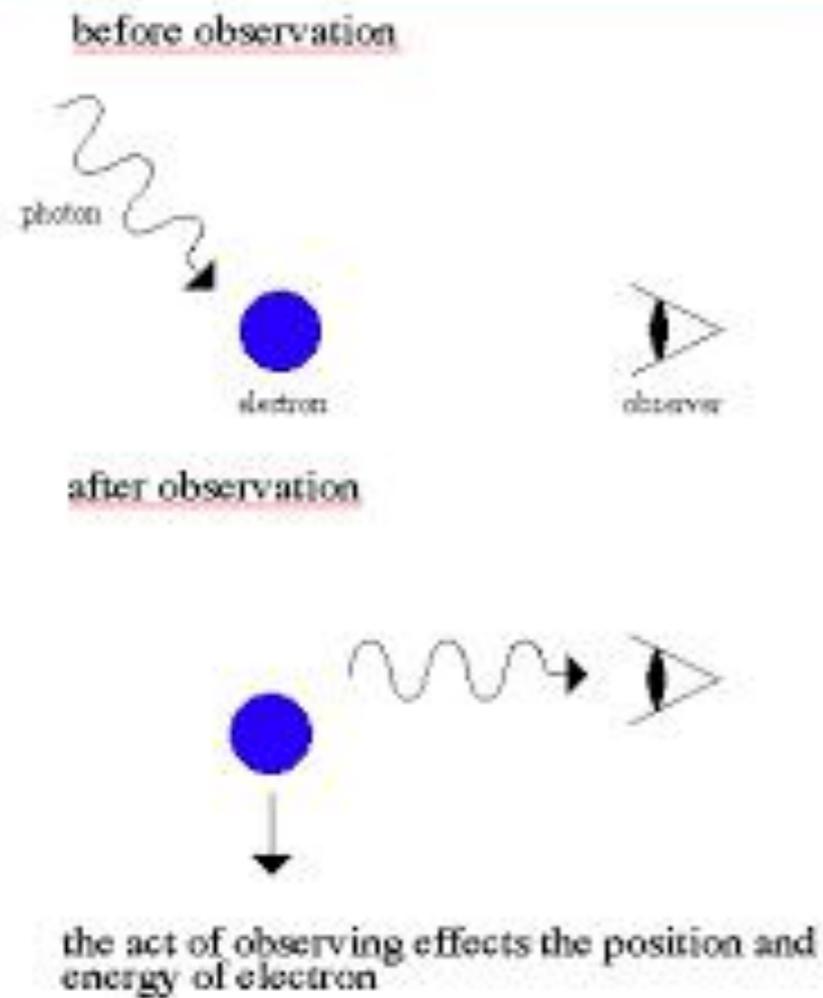
## Measurement in Quantum Mechanics

Measuring is equivalent to decomposing down the system state to its basis states. What are the basis states for a specific measurement? What values are obtained in the measurement?



# III. La Medida en la Mecánica Cuántica.

## Measurement Problem in Quantum Mechanics



$$|\Psi\rangle = \sum_n c_n |\Psi_n\rangle, \quad P(q_n) = |\langle \Psi | \Psi_n \rangle|^2$$

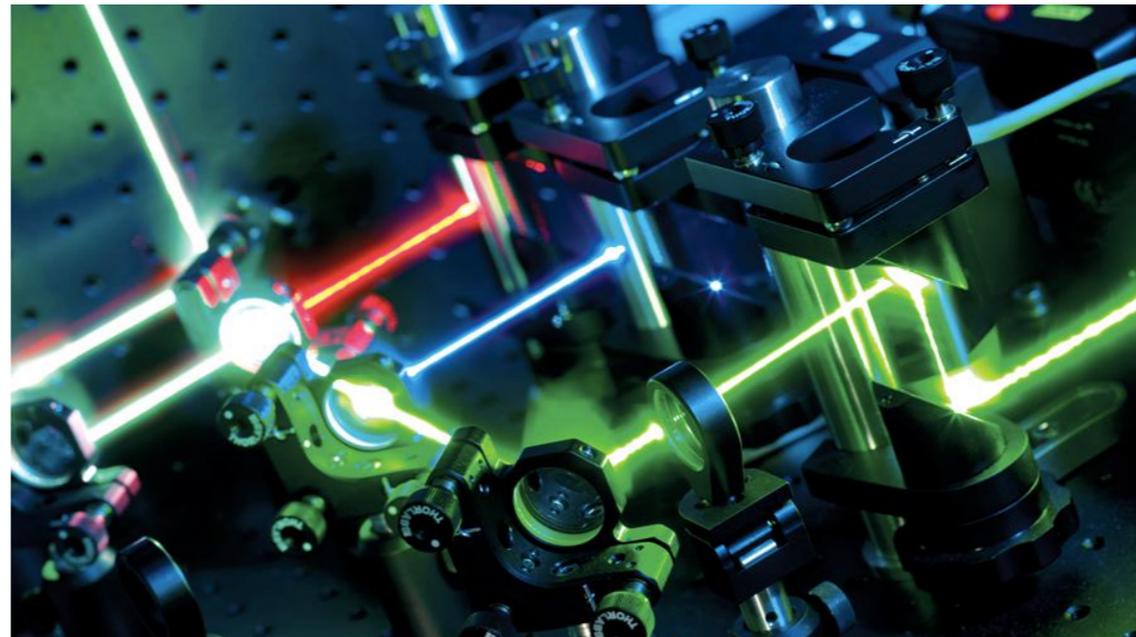
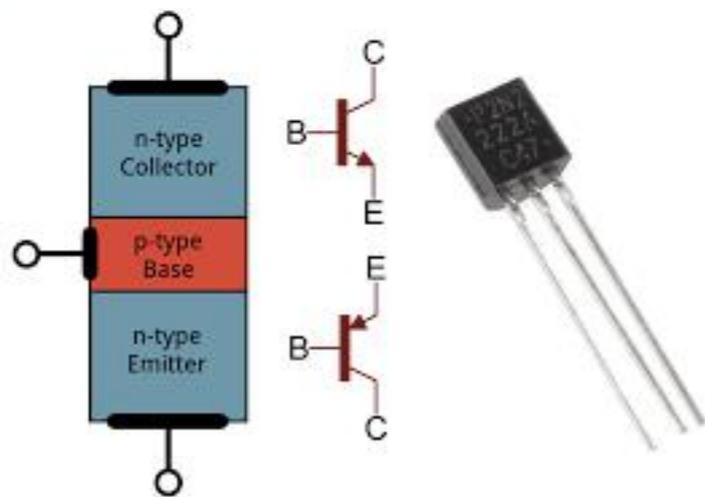
# IV. Tecnologías Cuánticas: Segunda Revolución.

## Revoluciones Cuánticas

### La primera revolución cuántica:

*La comprensión y aplicación de las leyes físicas de la esfera microscópica  
Mecánica Cuántica*

Resultó en tecnologías innovadoras tales como el **transistor** y el **láser**.



El impacto de esta primera revolución cuántica en nuestra sociedad difícilmente se puede subestimar. Ahora, nuestra creciente capacidad para manipular a los efectos cuánticos en sistemas y materiales personalizados está allanando el camino para una segunda revolución cuántica.

# IV. Tecnologías Cuánticas: Segunda Revolución.

## Revoluciones Cuánticas

### La segunda revolución cuántica:

Nuestra capacidad de manipular los efectos cuánticos en sistemas y materiales personalizados está allanando el camino para una segunda revolución cuántica, que conduce a la teoría cuántica a nuevas consecuencias tecnológicas.

Dispositivos cuánticos con un rendimiento muy superior y capacidades para la detección, medición y proyección de imagen; para la comunicación, la simulación y la computación.

- **Metrología Cuántica**
- **Sensores Cuánticos**
- **Criptografía Cuántica**
- **Simulación Cuántica**
- **Computación Cuántica**

# IV. Tecnologías Cuánticas: Segunda Revolución.

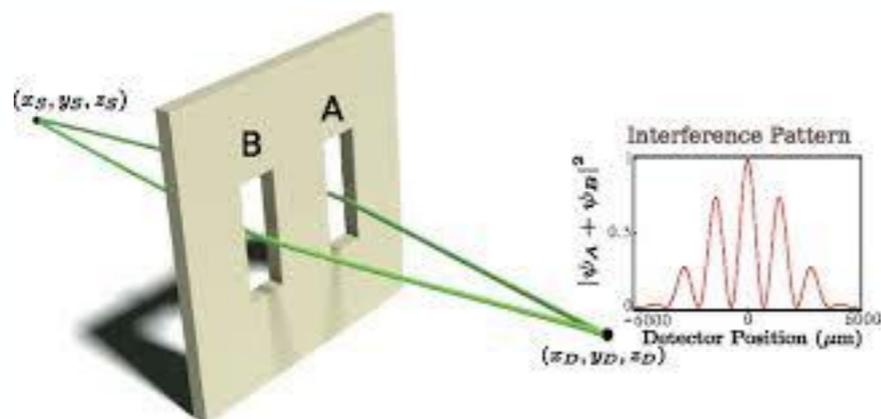
## Revoluciones Cuánticas

La **Primera Revolución** se basó en las propiedades DISCRETAS de la naturaleza cuántica: los cuantos de energía, momento angular etc.



	Atom	Quantum dot	Josephson junction
$E = 0$			
$E \neq 0$			

La **Segunda Revolución** se basa en el PRINCIPIO DE SUPERPOSICION de los estados cuánticos donde se almacena información y una consecuencia es el Entanglement.



# IV. Tecnologías Cuánticas: Segunda Revolución.

## Áreas Fundamentales de Trabajo

- **Metrología Cuántica**
- **Sensores Cuánticos**
- **Criptografía Cuántica**
- **Simulación Cuántica**
- **Computación Cuántica**

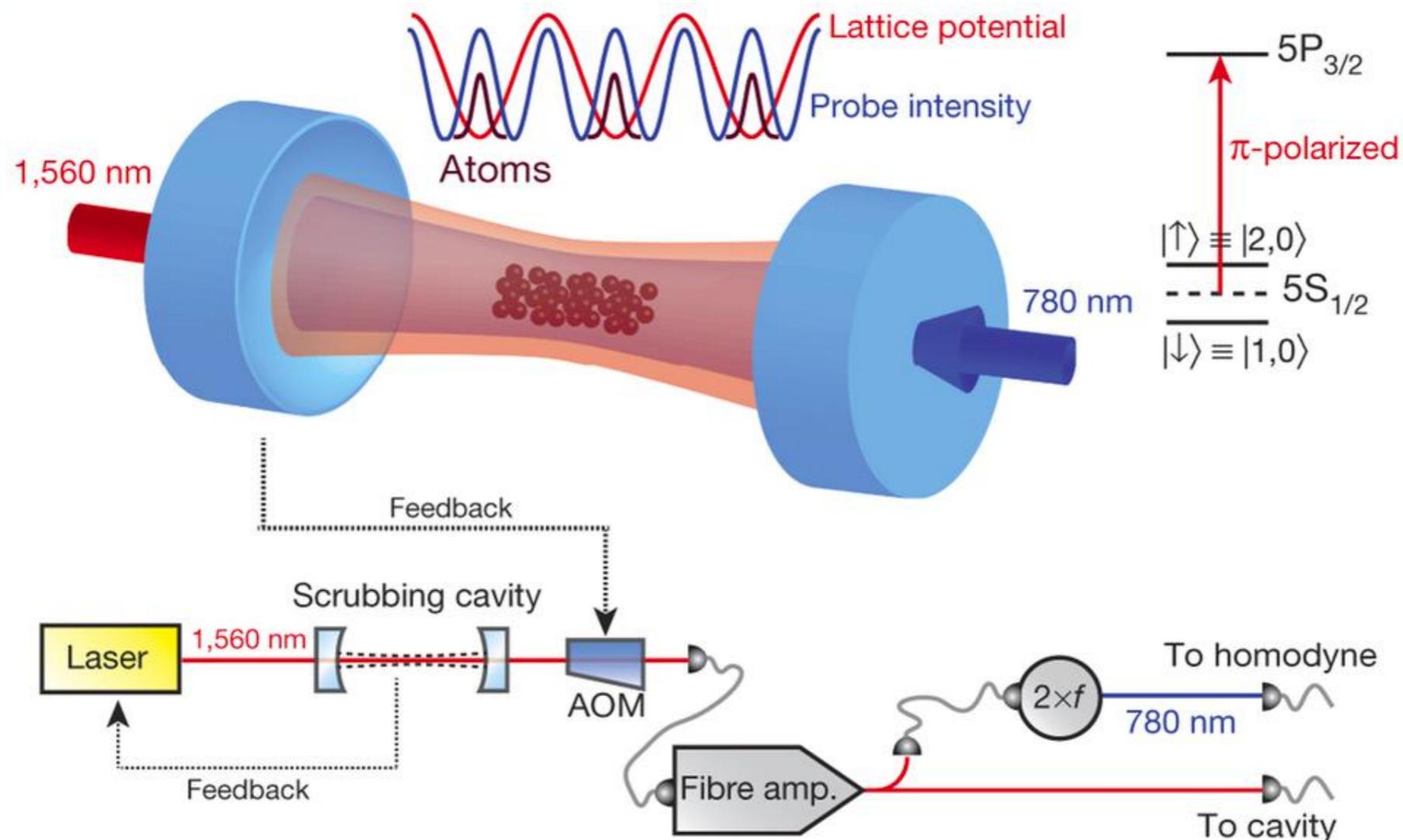
*Complejidad*



# IV. Tecnologías Cuánticas: Segunda Revolución.

## Metrología Cuántica

Estudio para realizar mediciones de alta resolución y altamente sensibles de parámetros físicos utilizando la mecánica cuántica, especialmente explotando el entrelazamiento cuántico.



# IV. Tecnologías Cuánticas: Segunda Revolución.

## Metrología Cuántica

**Pregunta Clave:** ¿cómo la precisión, es decir, la varianza de la estimación del parámetro, escala con el número de partículas  $N$  o repeticiones del experimento?

Los interferómetros clásicos no pueden superar el límite de shot-noise

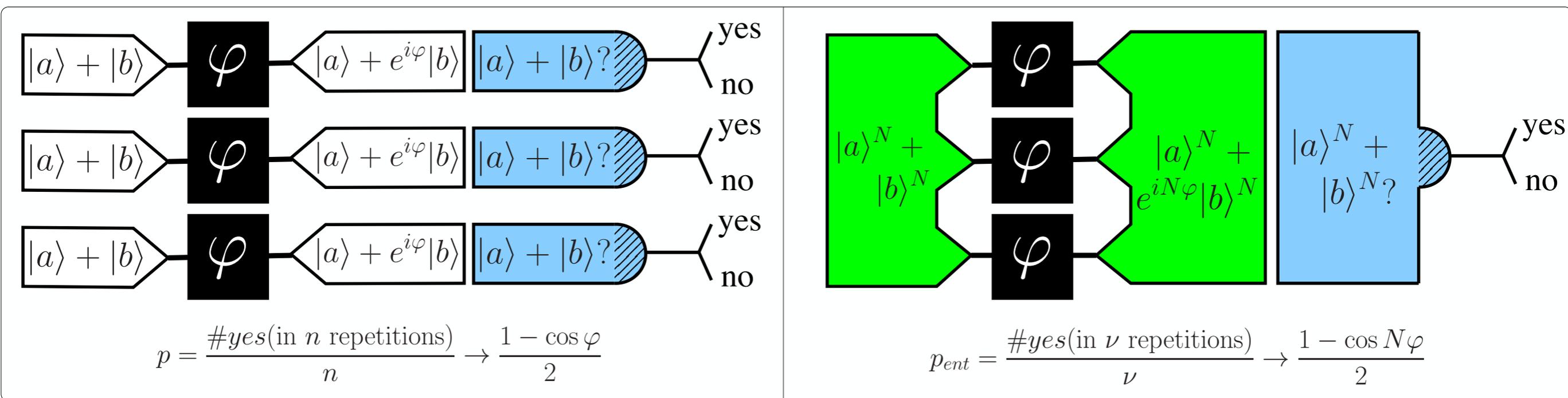
$$(\Delta\theta)^2 \geq \frac{1}{N}$$

La metrología cuántica puede alcanzar el límite de Heisenberg dado por

$$(\Delta\theta)^2 \geq \frac{1}{N^2}$$

# IV. Tecnologías Cuánticas: Segunda Revolución.

## Metrología Cuántica



$$(\Delta\theta)^2 \geq \frac{1}{N}$$

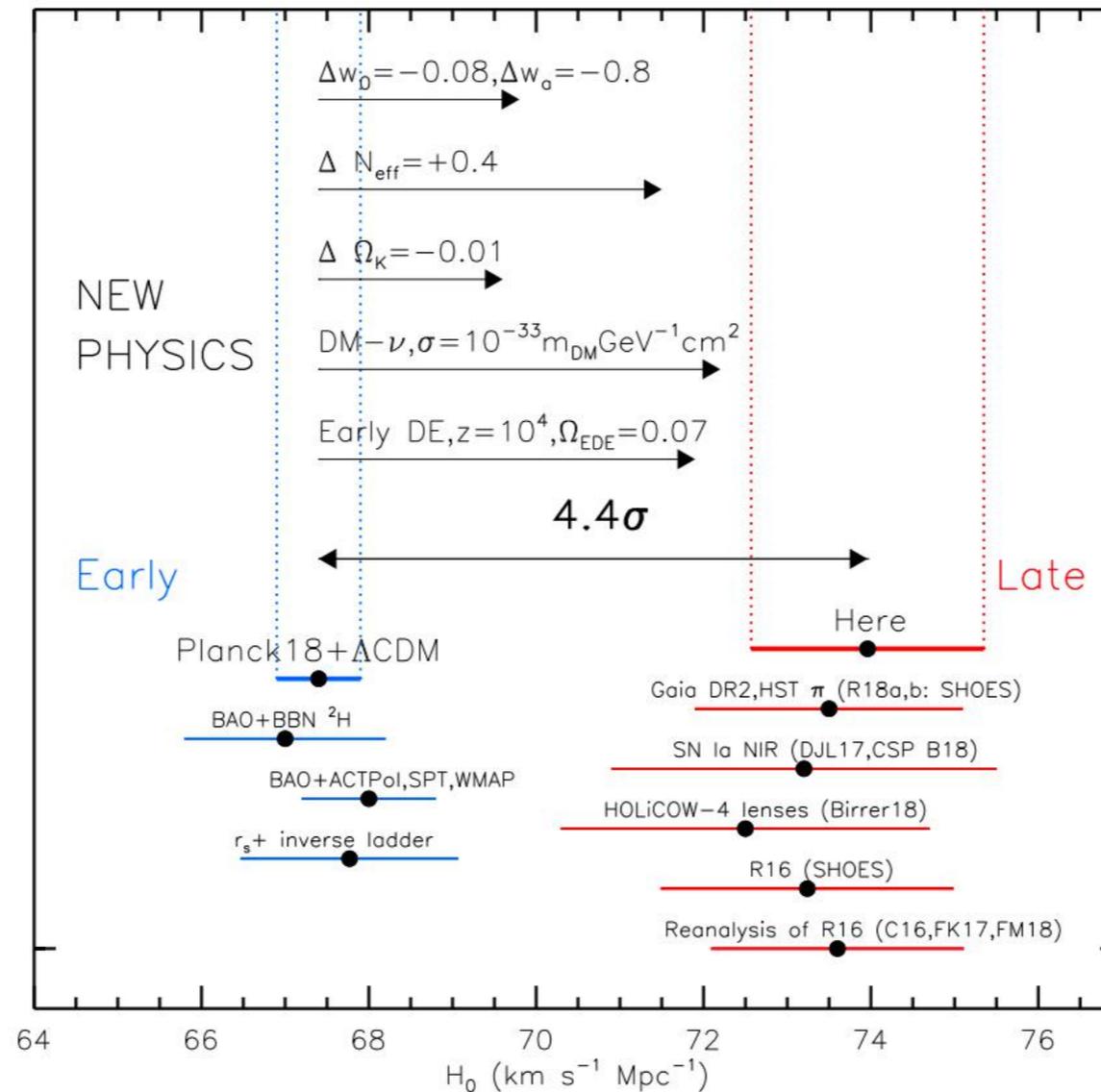
$$(\Delta\theta)^2 \geq \frac{1}{N^2}$$



# IV. Tecnologías Cuánticas: Segunda Revolución.

## Metrología Cuántica

El problema de la constante de Hubble crece hasta las 4.4 sigmas actuales de discrepancia



Las estimaciones del valor actual de la llamada constante de Hubble ( $H_0$ ) dependen del método de medida. La extrapolación al momento actual usando datos cosmológicos (Planck18 +  $\Lambda$ CDM),  $H_0 = 67.4 \pm 0.5 \text{ km/s/Mpc}$ , difiere a 4.4 sigmas (99.999%) de la estimación mediante la escalera de distancias usando cefeidas y supernovas Ia,  $H_0 = 74.03 \pm 1.42 \text{ km/s/Mpc}$ .

# IV. Tecnologías Cuánticas: Segunda Revolución.

## Metrología Cuántica

Se empieza midiendo distancias con altísima precisión ...

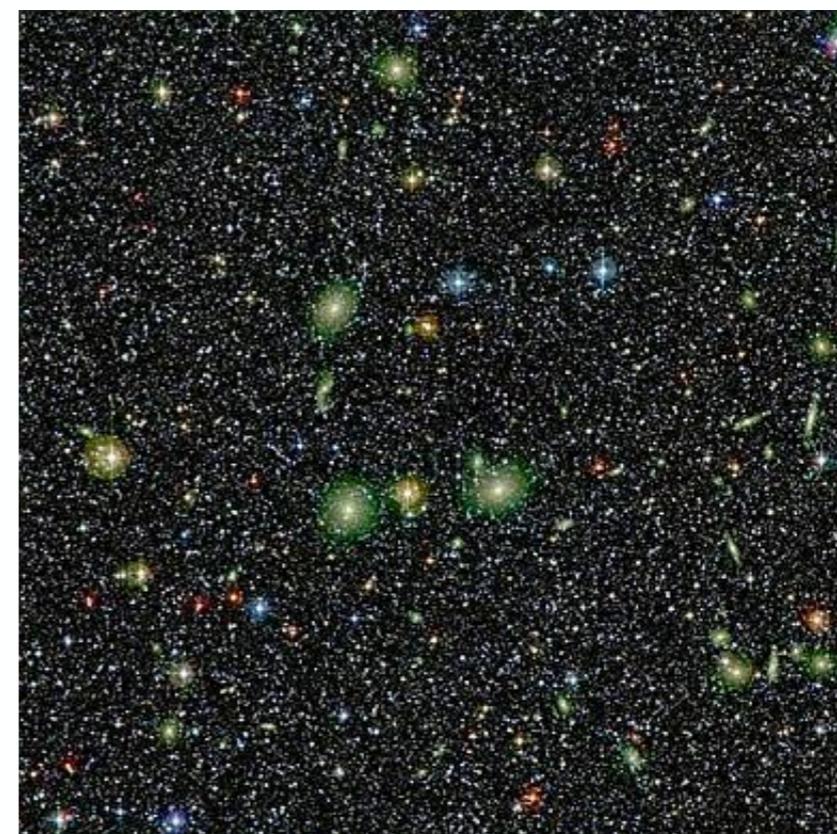
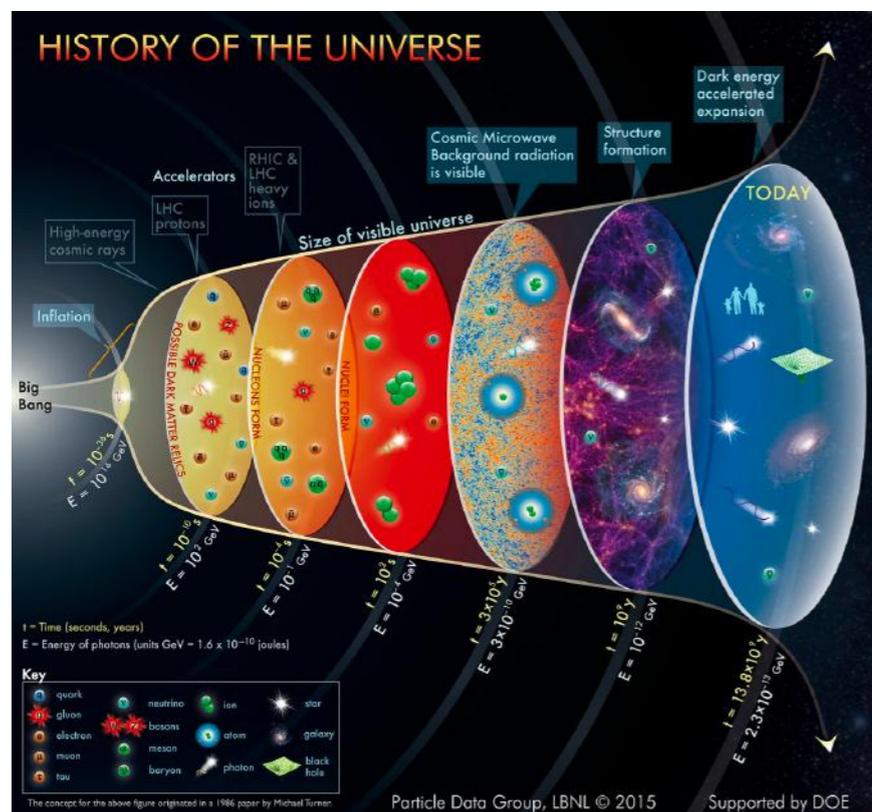
Y se termina determinando el Modelo Cosmológico del Universo

¿modificar el modelo cosmológico?

(Planck18 +  $\Lambda$ CDM),  $H_0 = 67.4 \pm 0.5$  km/s/Mpc



$H_0 = 74.03 \pm 1.42$  km/s/Mpc (cefeidas y supernovas Ia=)



¿energía oscura es dinámica?

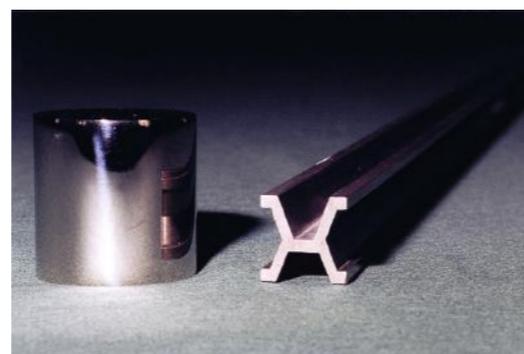
# IV. Tecnologías Cuánticas: Segunda Revolución.

## • Metrología Cuántica



El Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) es el responsable de definir el SI de unidades. Desde 1967, el segundo ha sido definido en función de la frecuencia de resonancia del átomo de cesio:

El segundo es la duración de 9192631770 períodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de cesio 133.



# IV. Tecnologías Cuánticas: Segunda Revolución.

## Reloj Óptico con Lógica Cuántica

Una de las primeras aplicaciones 'reales' de la Computación Cuántica



Los relojes atómicos eran hasta el momento los más precisos y los mejores patrones de frecuencia conocida:  
típicamente 1s en 30 millones años

Se utilizan como:

- i/ patrones primarios para servicios internacionales de distribución de tiempo,
- ii/ para controlar la frecuencia de onda de las emisiones de televisión,
- iii/ en los sistemas mundiales de navegación por satélite como el GPS.

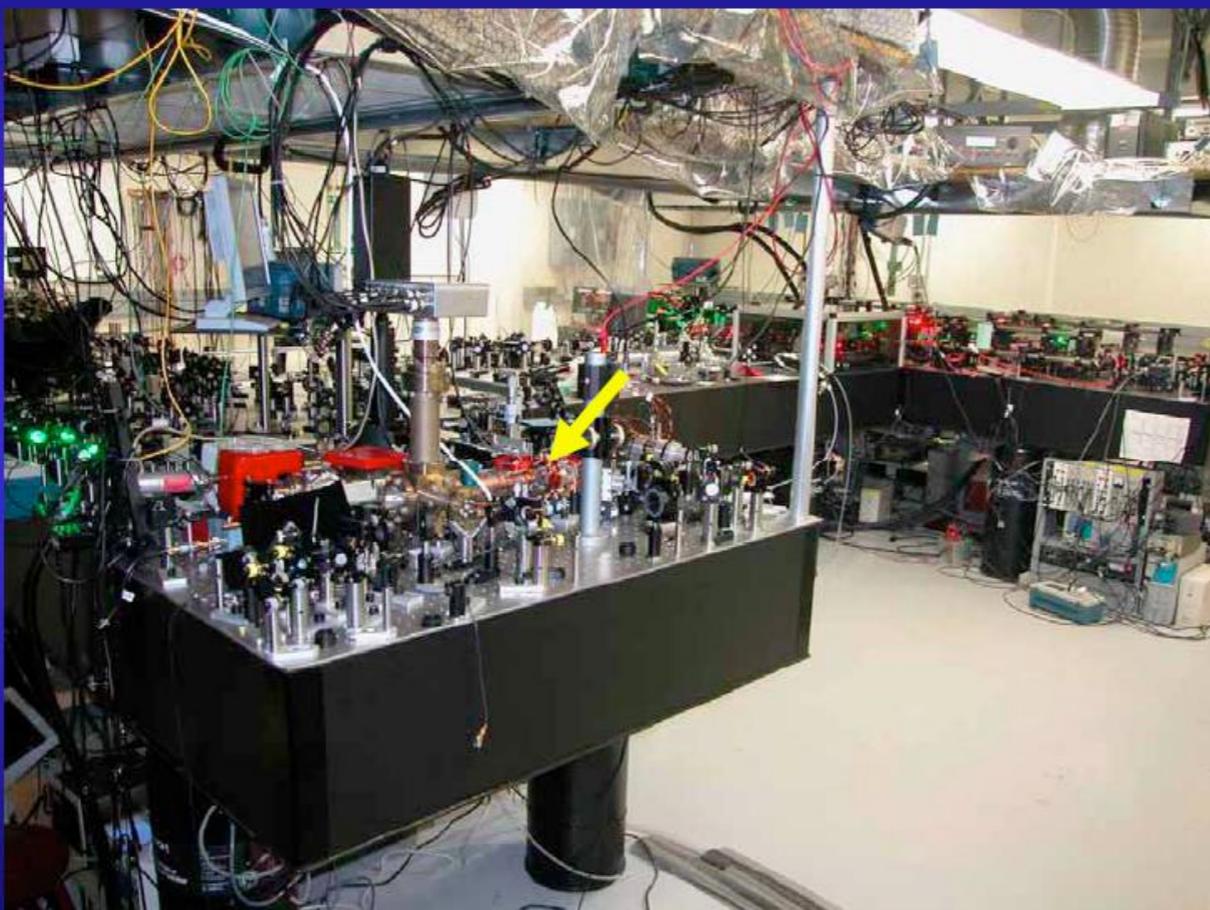
# IV. Tecnologías Cuánticas: Segunda Revolución.

- **Metrología Cuántica**

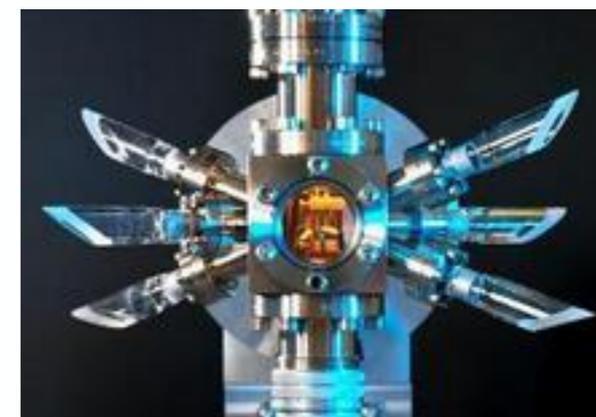
La precisión de un reloj atómico depende de la anchura y la frecuencia intrínseca de la transición electrónica. Las frecuencias más altas y las líneas estrechas aumentan la precisión.

## Relojes con Iones Atrapados

**Al<sup>+</sup> Laboratory @ NIST/Boulder**



February 2005



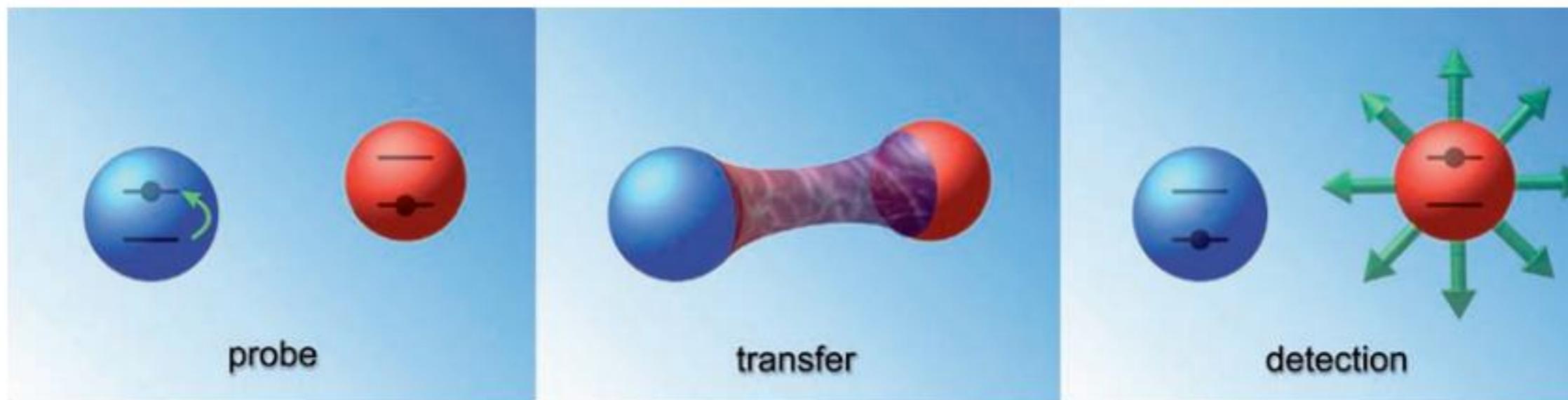
# IV. Tecnologías Cuánticas: Segunda Revolución.

## Relojes con Iones Atrapados

### Medidas con Lógica Cuántica

Debido al fuerte acoplo entre los iones y los modos vibracionales, hace que el enfriamiento por laser del ion 'logico' (Mg ó Be) se transfiera por simpatía (proximidad) al ión 'espectroscópico' (Al).

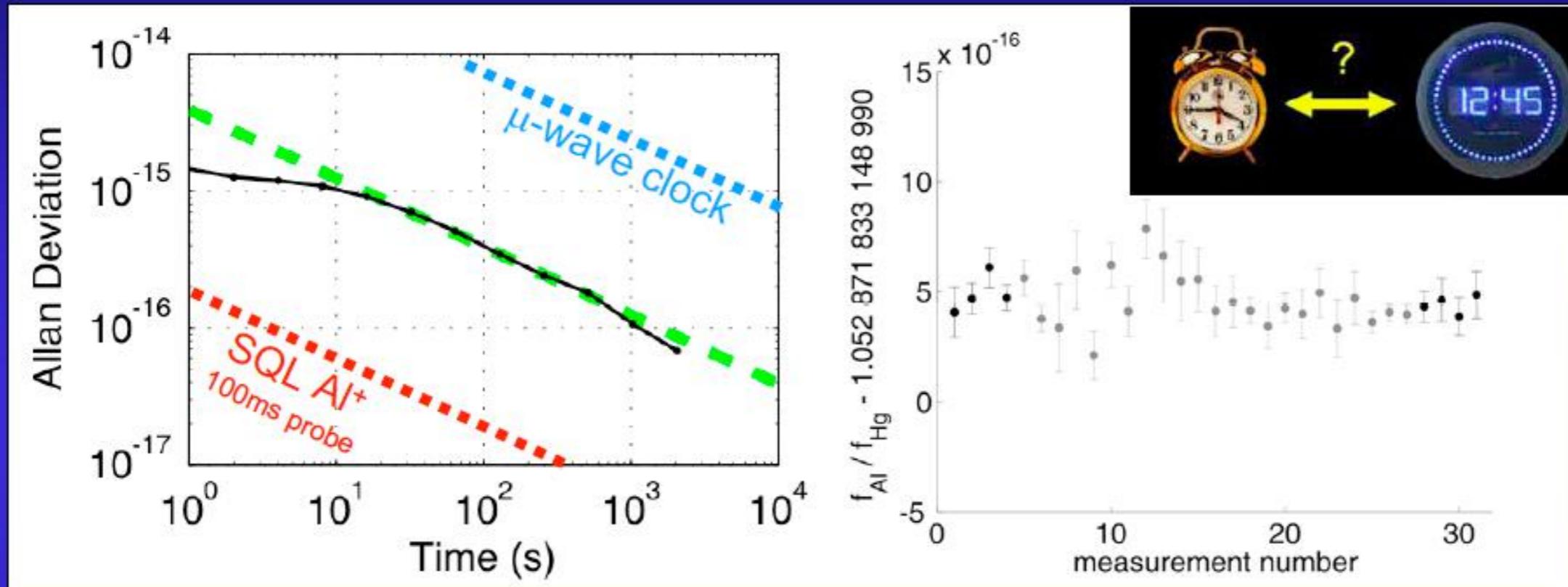
Usando protocolos de computación cuántica, la información sobre el estado interno del ión espectroscópico (Al) despues de sondear su transición puede ser fielmente transferido al ión lógico (Mg ó Be), en donde esta información puede ser detectada con eficiencia casi del 100%.



Esta técnica espectroscópica es particularmente prometedora para iones con transiciones ciclicas en el rango del ultravioleta donde no hay fuentes laser disponibles, y para iones atómicos o moleculares con una estructura muy compleja de niveles atómicos/moleculares (con muchos canales posibles de desexcitación.)

# IV. Tecnologías Cuánticas: Segunda Revolución.

## Al<sup>+</sup>/Hg<sup>+</sup> Comparison



Al<sup>+</sup>:  $2.3 \times 10^{-17}$  systematic uncertainty

First comparison of  
frequency standards  
at the 17<sup>th</sup> digit

# IV. Tecnologías Cuánticas: Segunda Revolución.

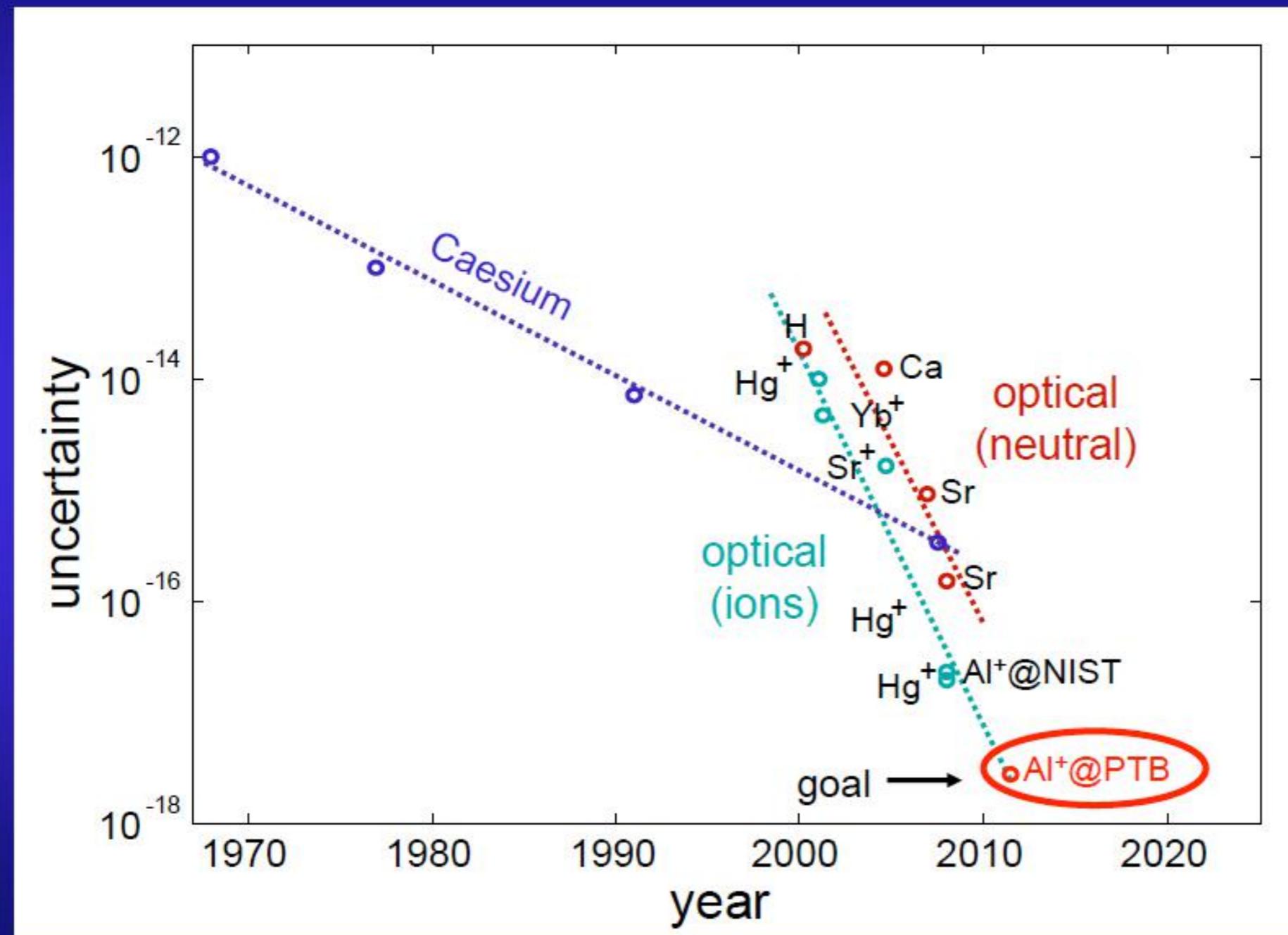
## Qué Significa $10^{-17}$

- 1:100,000,000,000,000,000
- 50x better than Cs fountain clocks
- 1 s deviation in 3 billion years
- 1<sup>st</sup> order Doppler shift: 3 nm/s or 300  $\mu\text{m}/\text{Jahr}$
- Distance measurement earth-sun to 1/100 of the diameter of a hair



# IV. Tecnologías Cuánticas: Segunda Revolución.

## History of Clock Uncertainties



courtesy: T. Rosenband, NIST

# IV. Tecnologías Cuánticas: Segunda Revolución.

## Laboratorio de Metrología Cuántica



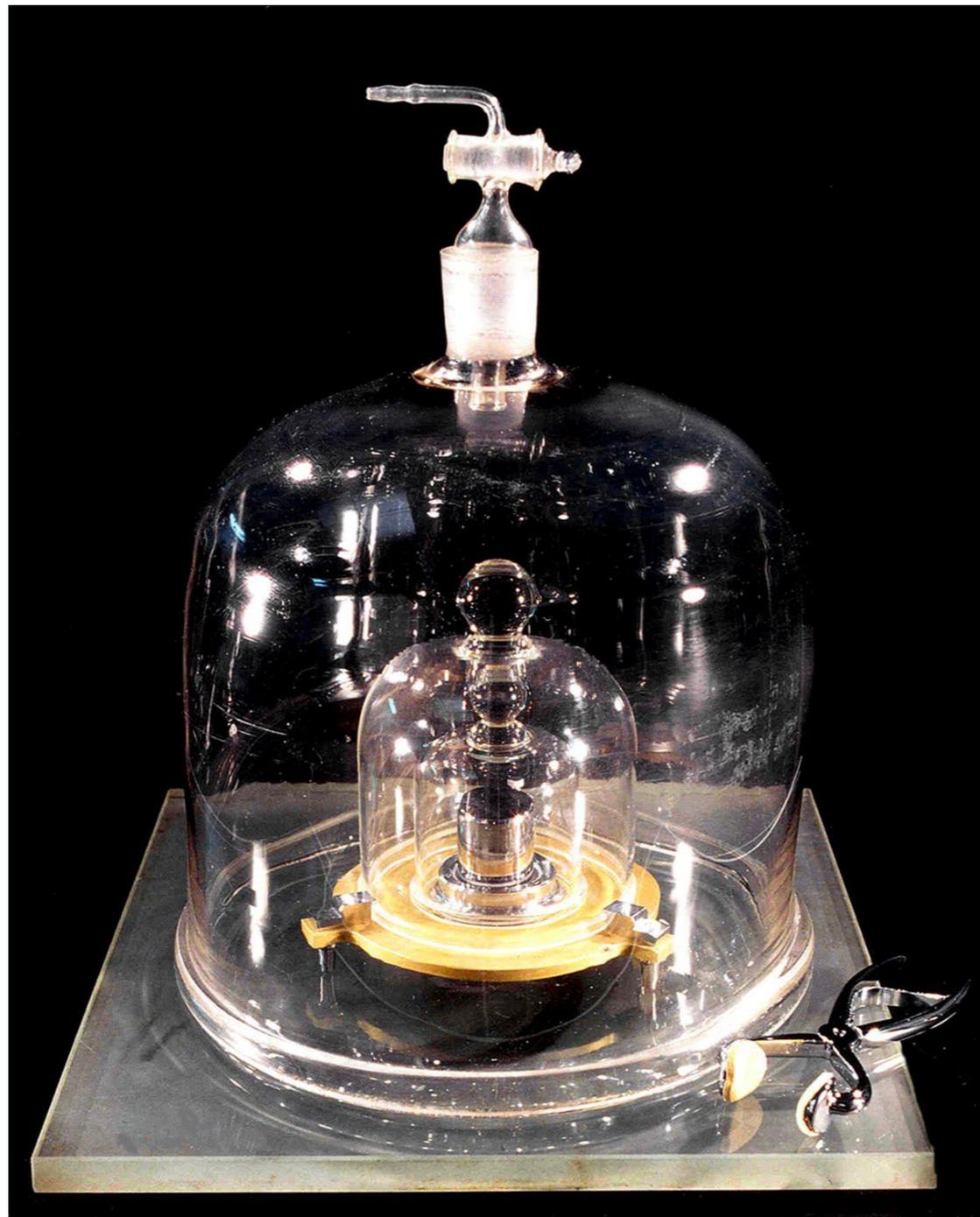
**SITIO EN CONSTRUCCIÓN!**



# IV. Tecnologías Cuánticas: Segunda Revolución.

## Kilo Cuántico

**El artefacto: International Prototype of the Kilogram (IPK)**



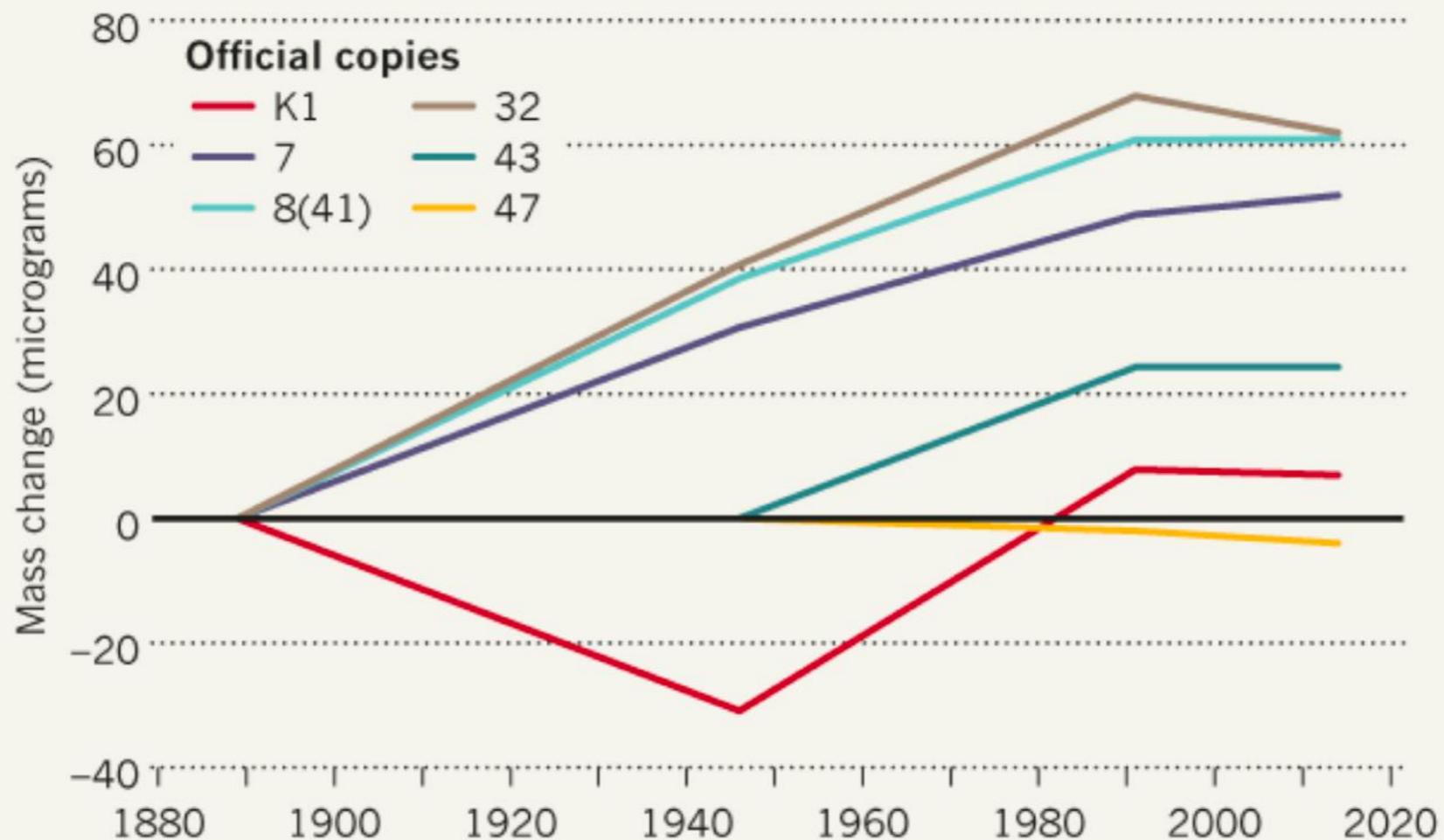
# III. Revisión del SI basada en Ctes. Fundamentales.

## El kilo IPK, le Grand K o Big K

### La Mecánica Cuántica pone a dieta al IPK kilo patrón

#### THE UNSTABLE KILOGRAM

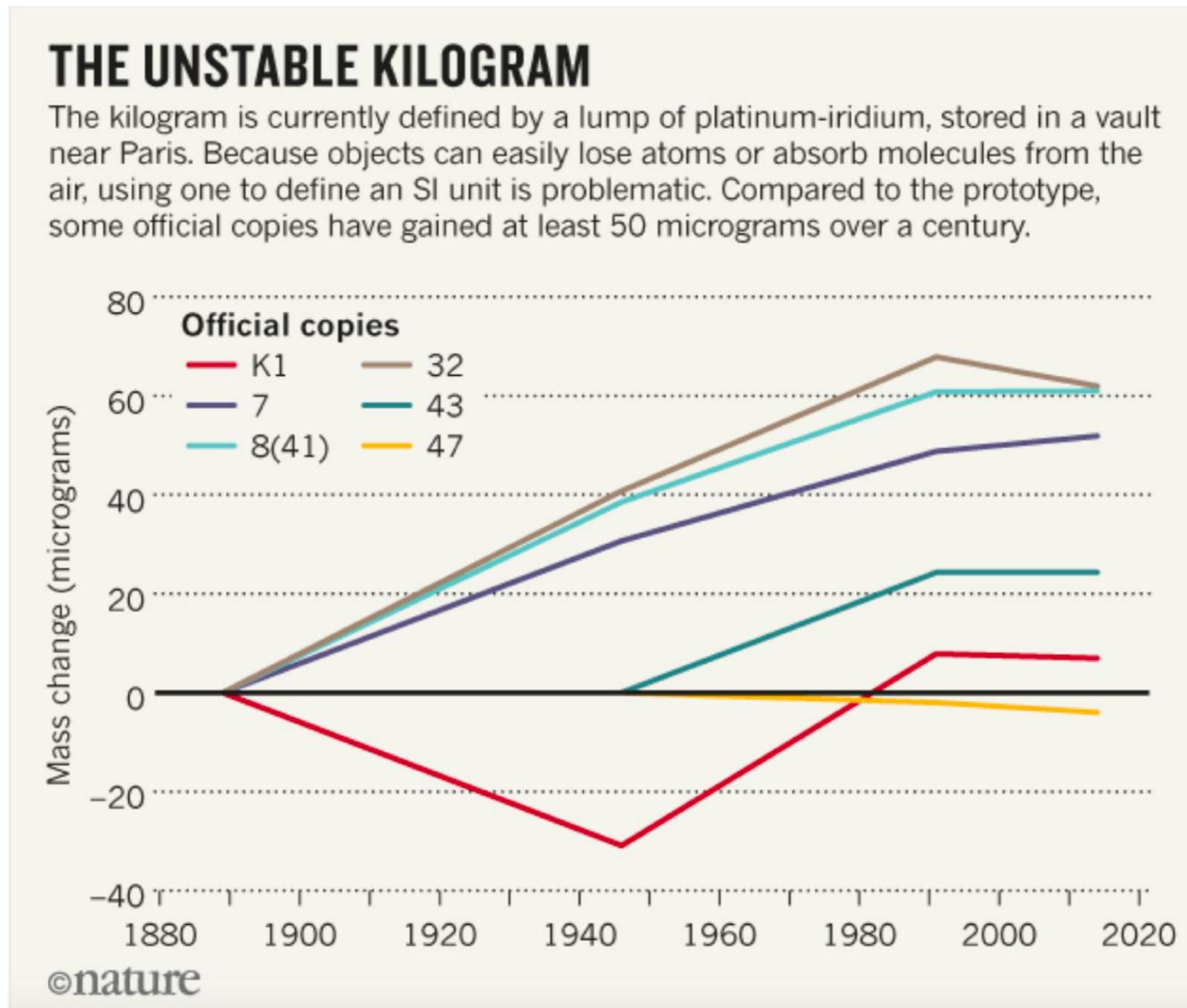
The kilogram is currently defined by a lump of platinum-iridium, stored in a vault near Paris. Because objects can easily lose atoms or absorb molecules from the air, using one to define an SI unit is problematic. Compared to the prototype, some official copies have gained at least 50 micrograms over a century.



# III. Revisión del SI basada en Ctes. Fundamentales.

## El kilo IPK, le Grand K o Big K

El IPK es muy coqueto: aunque gane o pierda peso ... siempre tiene el mismo, **POR DEFINICIÓN!**



# **IV. Tecnologías Cuánticas: Segunda Revolución.**

## **Kilo Cuántico**

**Una razón importante para el cambio es que Big K no es constante. Ha perdido alrededor de 50 microgramos (aproximadamente la masa de una pestaña) desde que se creó. Pero, de manera frustrante, cuando Big K pierde masa, sigue siendo exactamente un kilogramo, según la definición actual.**

**Cuando Big K cambia, todo lo demás tiene que ajustarse. O incluso peor: si se robara Big K, nuestro sistema mundial de medición de masas sería arrojado al caos.**

**En un mundo donde todo parece estar siempre en movimiento, estos científicos ahora se han asegurado de que el kilogramo nunca cambie.**

# IV. Tecnologías Cuánticas: Segunda Revolución.

## El kilo

**Detrás de su definición está una ‘constante universal’:  
La constante  $h$  de Planck y la Mecánica Cuántica**

El kilogramo, símbolo kg, se define al fijar el valor numérico de la constante de Planck,  $h$ , en  $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ , cuando se expresa en la unidad J s, igual a  $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$ ,  
Donde el metro y el segundo se definen en función de  $c$  y  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$

Esta definición equivale a la relación exacta

$$h = 6,62607015 \times 10^{-34} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1} \quad \text{de donde}$$

$$1\text{kg} = \left( \frac{h}{6,62607015 \times 10^{-34}} \right) \text{m}^{-2} \text{s} = 1,475521 \dots \times 10^{40} \frac{h\Delta\nu_{\text{Cs}}}{c^2}$$

# IV. Tecnologías Cuánticas: Segunda Revolución.

## Kilo Cuántico



**La balanza Kibble es una máquina increíblemente complicada y hermosa que compara la potencia mecánica con la potencia eléctrica.**

# IV. Tecnologías Cuánticas: Segunda Revolución.

## Kilo Cuántico



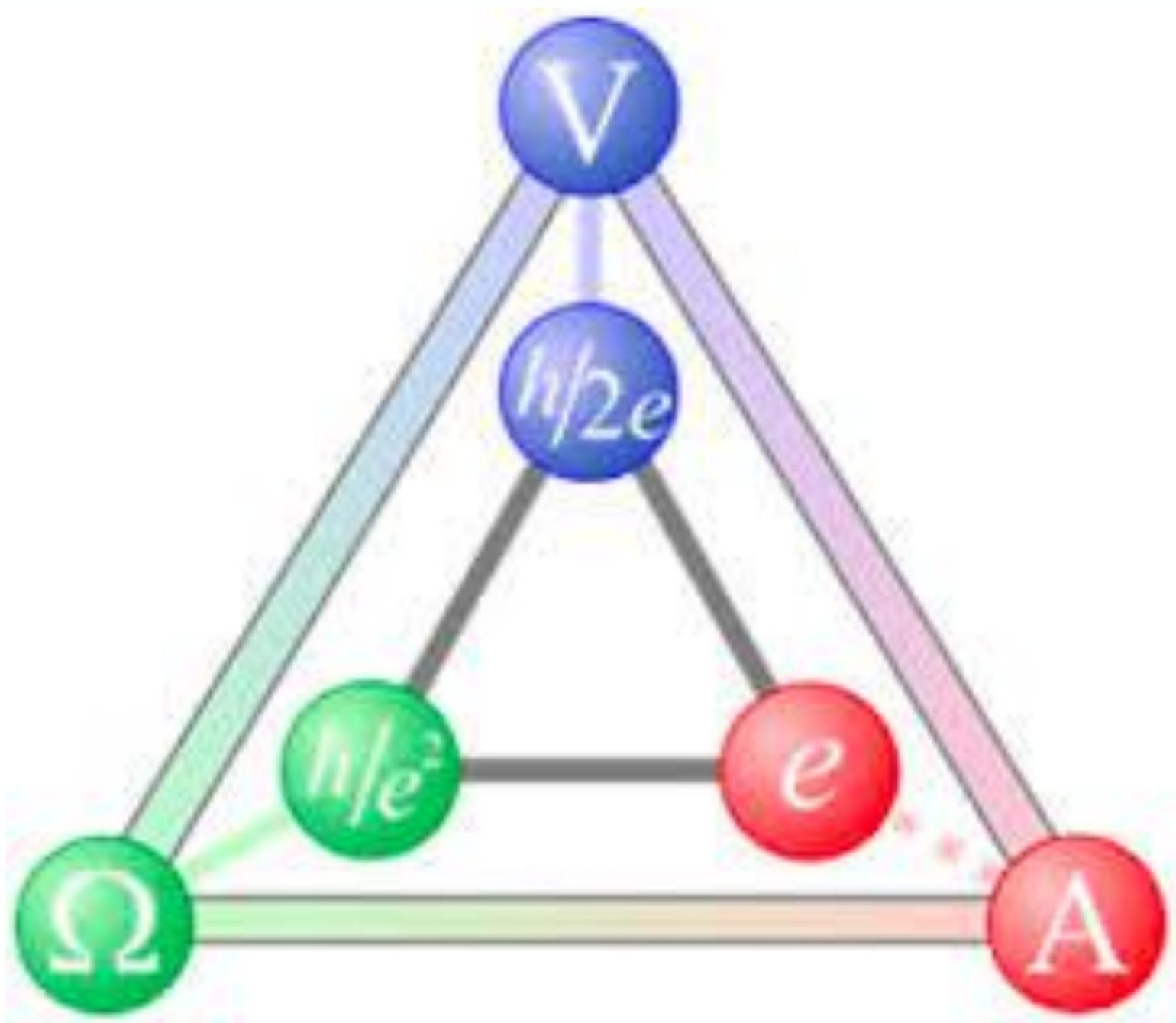
¿Qué hace la balanza de Kibble ahora que está definida la constante de Planck?

**El kilogramo ahora está definido por la física fundamental del universo,  
no por una maquinación humana.**

# IV. Tecnologías Cuánticas: Segunda Revolución.

## Triángulo Cuántico Metrológico

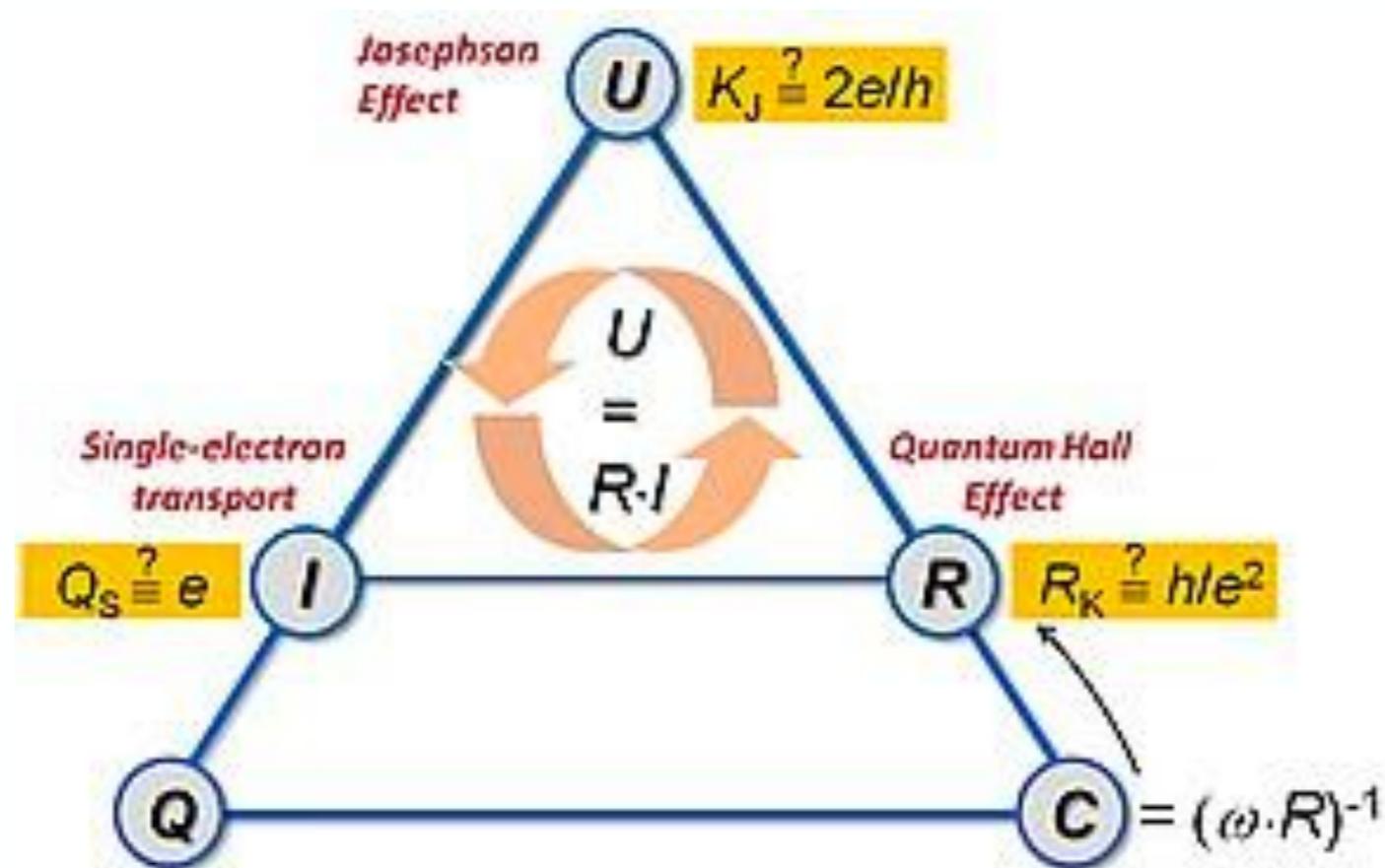
El Sector Eléctrico del SI es el más cuántico de todos



# IV. Tecnologías Cuánticas: Segunda Revolución.

## Triángulo Cuántico Metrológico

La redefinición de las unidades SI: representar las unidades eléctricas directamente mediante estándares cuánticos eléctricos.

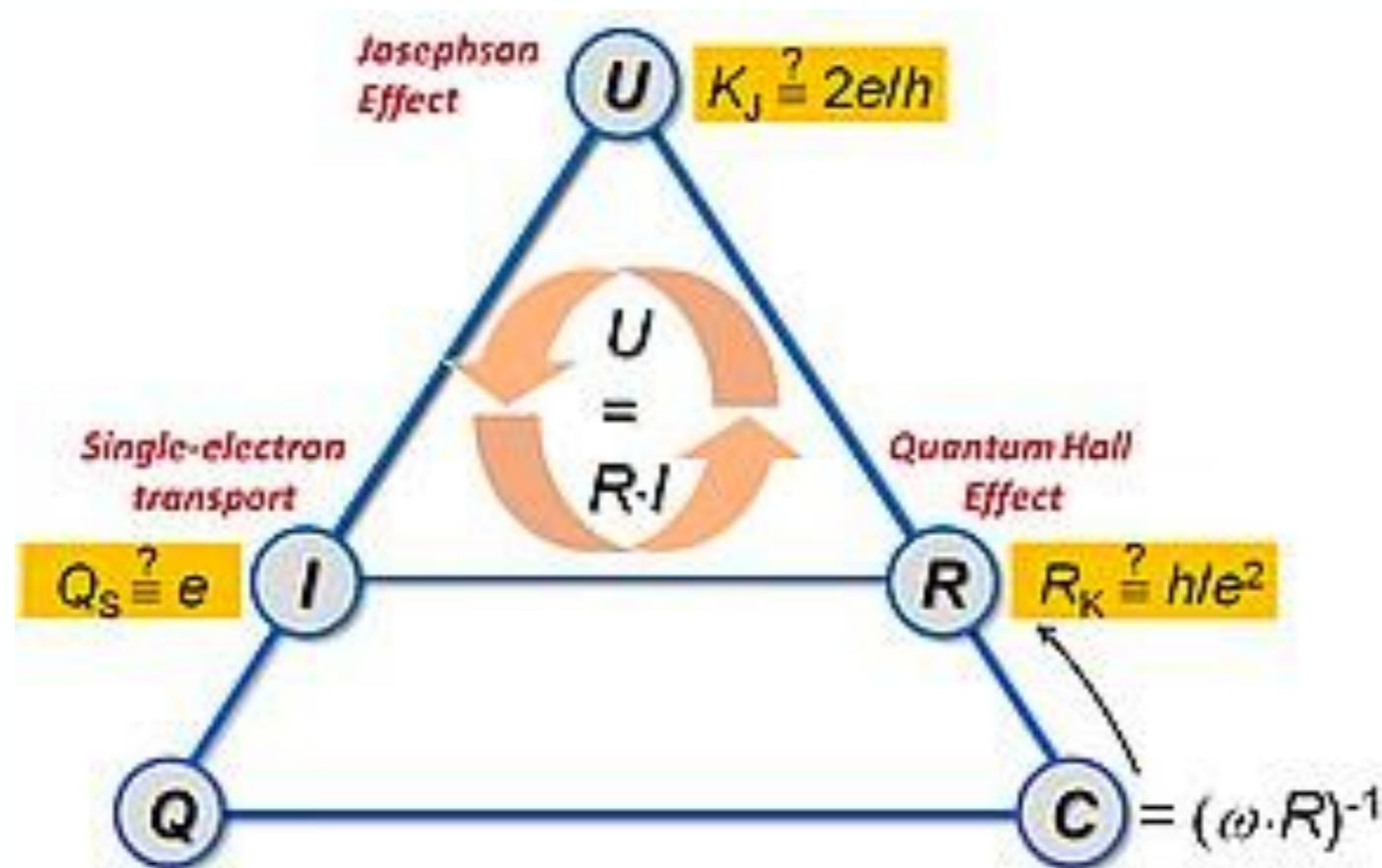


Se puede obtener información fundamental sobre posibles correcciones de estas relaciones a través de pruebas de consistencia que combinan el efecto Josephson y el efecto Hall cuántico junto con el efecto de transporte de un solo electrón (SET).

# IV. Tecnologías Cuánticas: Segunda Revolución.

## Triángulo Cuántico Metrológico

La redefinición de las unidades SI: representar las unidades eléctricas directamente mediante estándares cuánticos eléctricos.

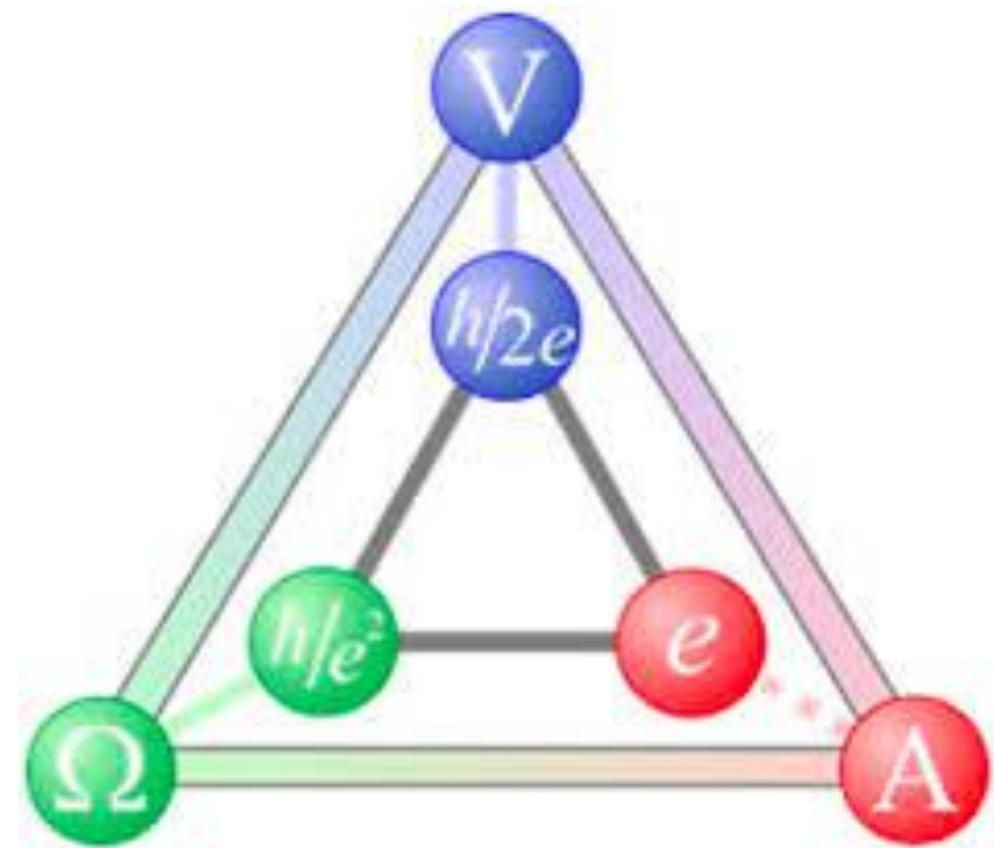
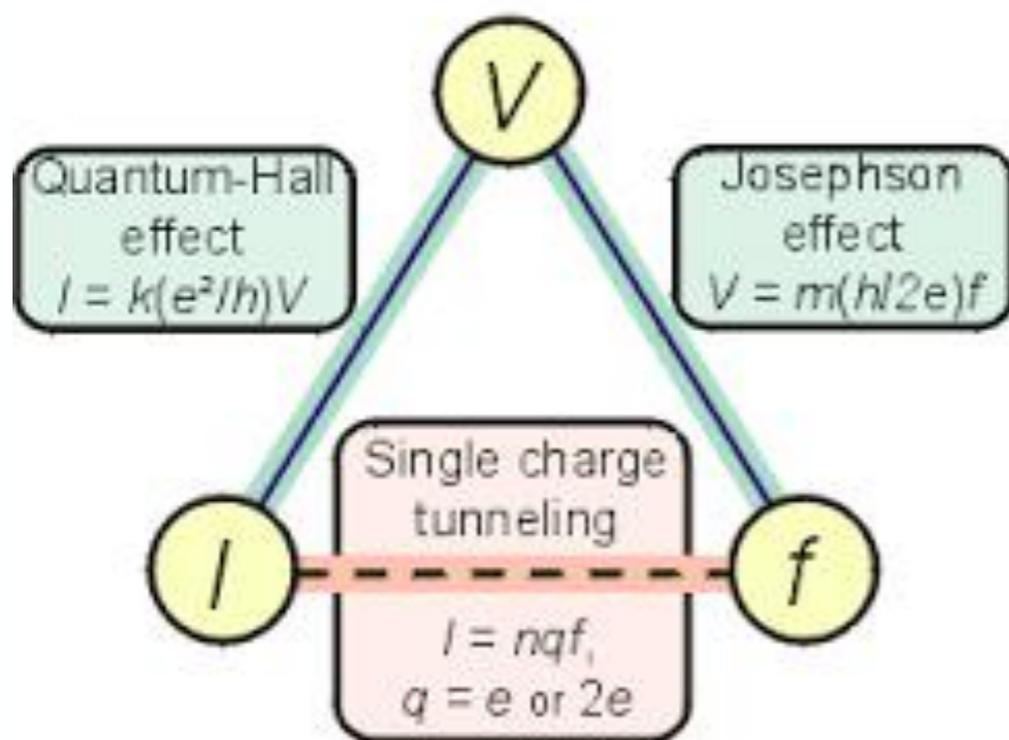


Si tal experimento se realiza con una incertidumbre relativa de menos de aproximadamente una parte en un millón, esto tendrá un impacto en la comprensión de los efectos cuánticos eléctricos y, por lo tanto, asegurará aún más los cimientos del futuro sistema de unidades SI basado en constantes fundamentales.

# IV. Tecnologías Cuánticas: Segunda Revolución.

## Triángulo Cuántico Metrológico

The Metrology Triangle

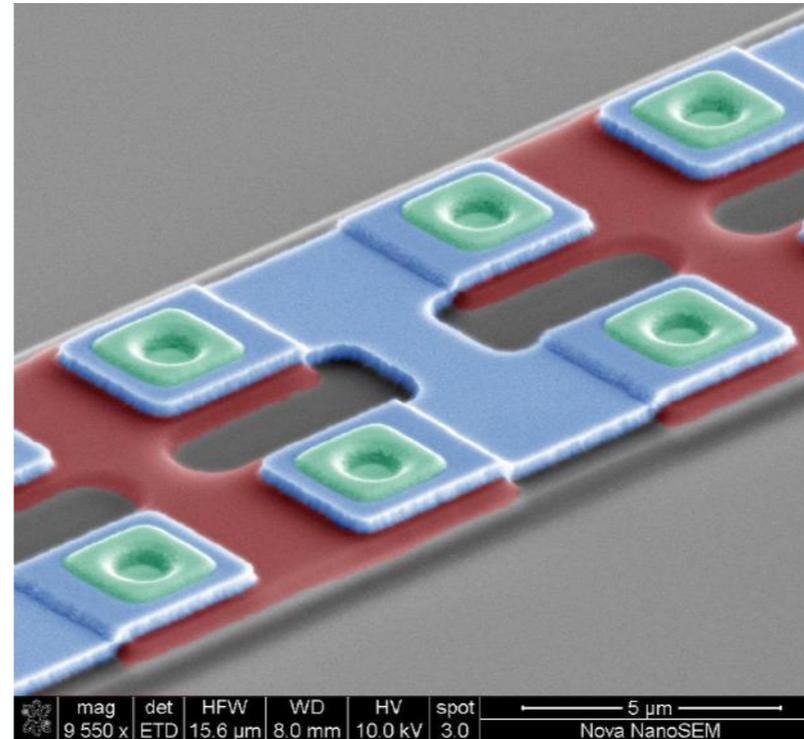


Cuando el amperio se redefine en términos de  $e$ , los tres componentes de la ley de Ohm finalmente se interconectarán formalmente solo por dos constantes fundamentales:  $h$  y  $e$ . Los científicos podrán usar el Triángulo de Metrología Cuántica (la ley de Ohm en términos cuánticos) para verificar los valores de corriente, voltaje y resistencia usando dos unidades para determinar el valor de la tercera. Eso revelará, por ejemplo, si la constante de Josephson realmente es exactamente igual a  $2e/h$ . Cualquier discrepancia tendría un gran impacto en la metrología eléctrica, sin mencionar la teoría cuántica en sí misma.

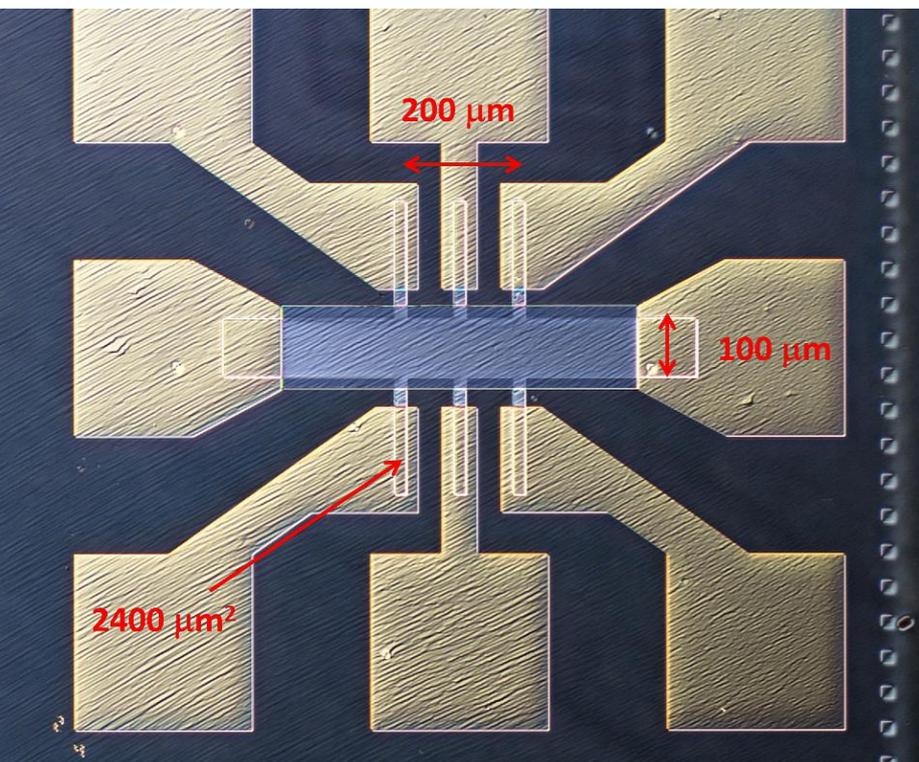
# IV. Tecnologías Cuánticas: Segunda Revolución.

## Triángulo Cuántico Metrológico

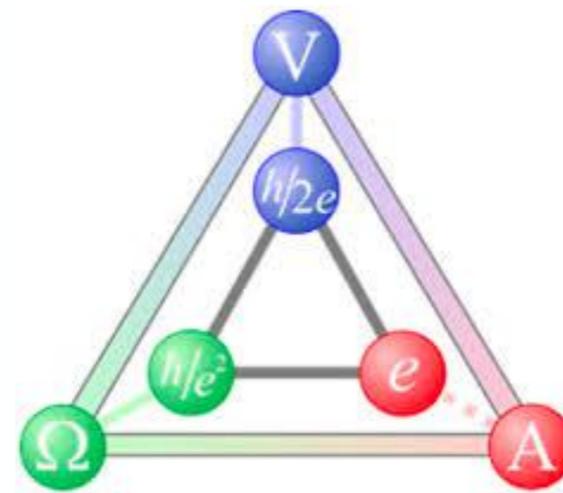
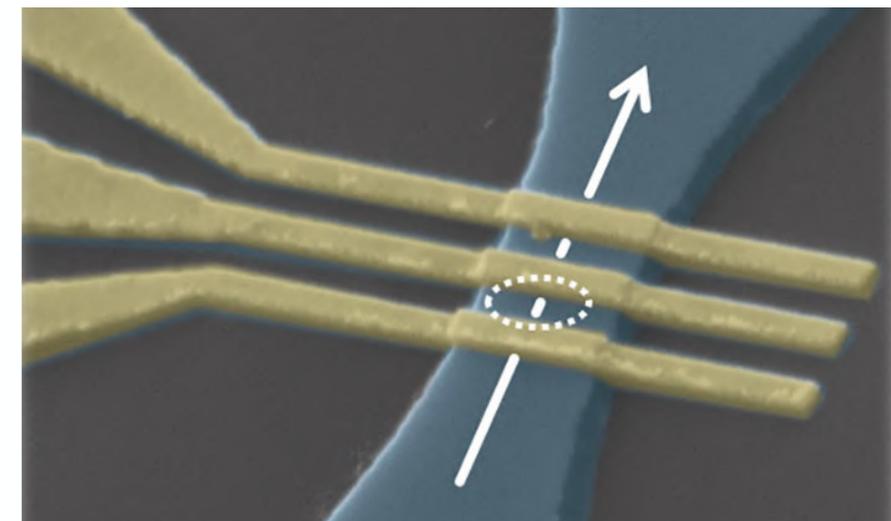
### Unión Josepson



### Barra Hall



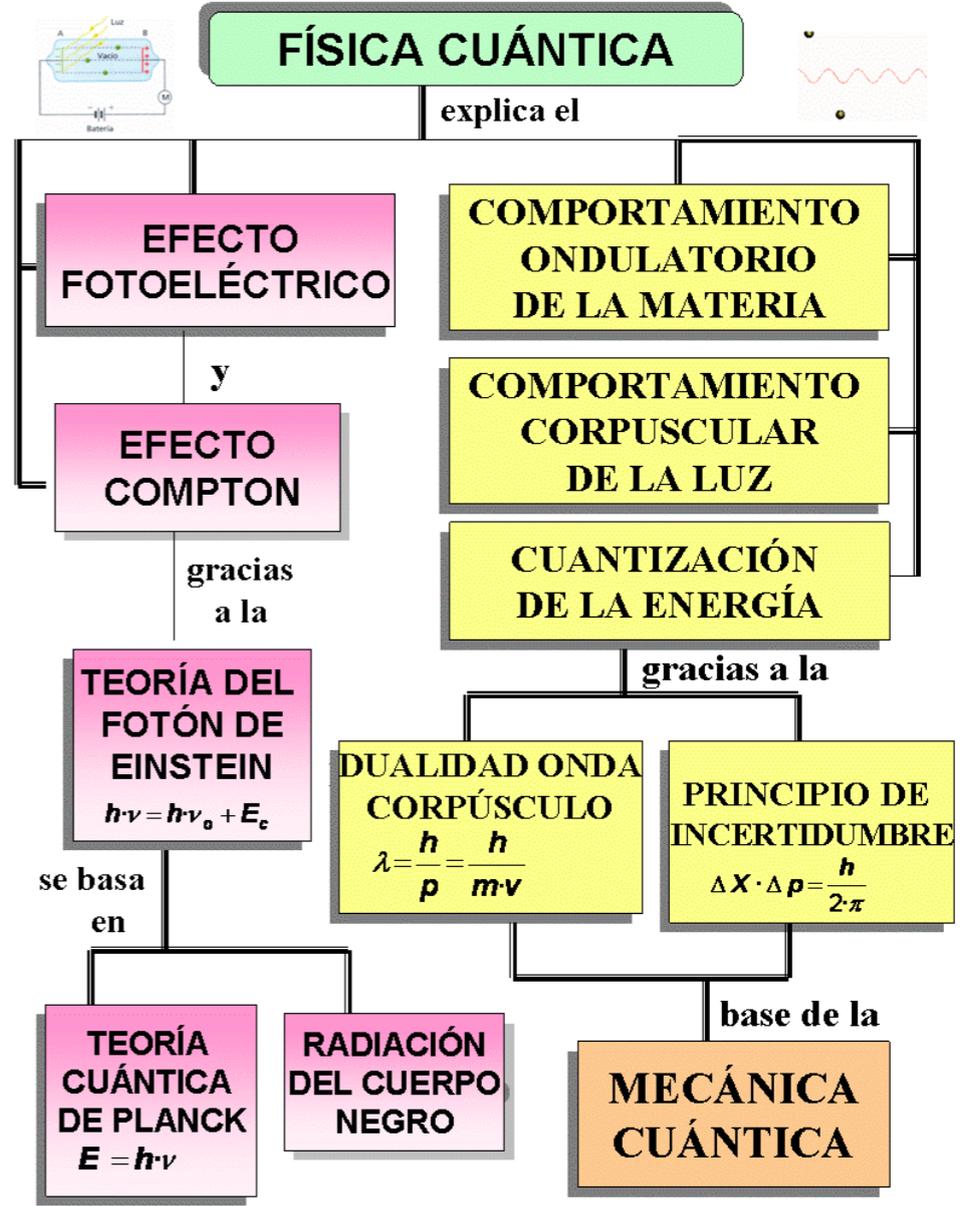
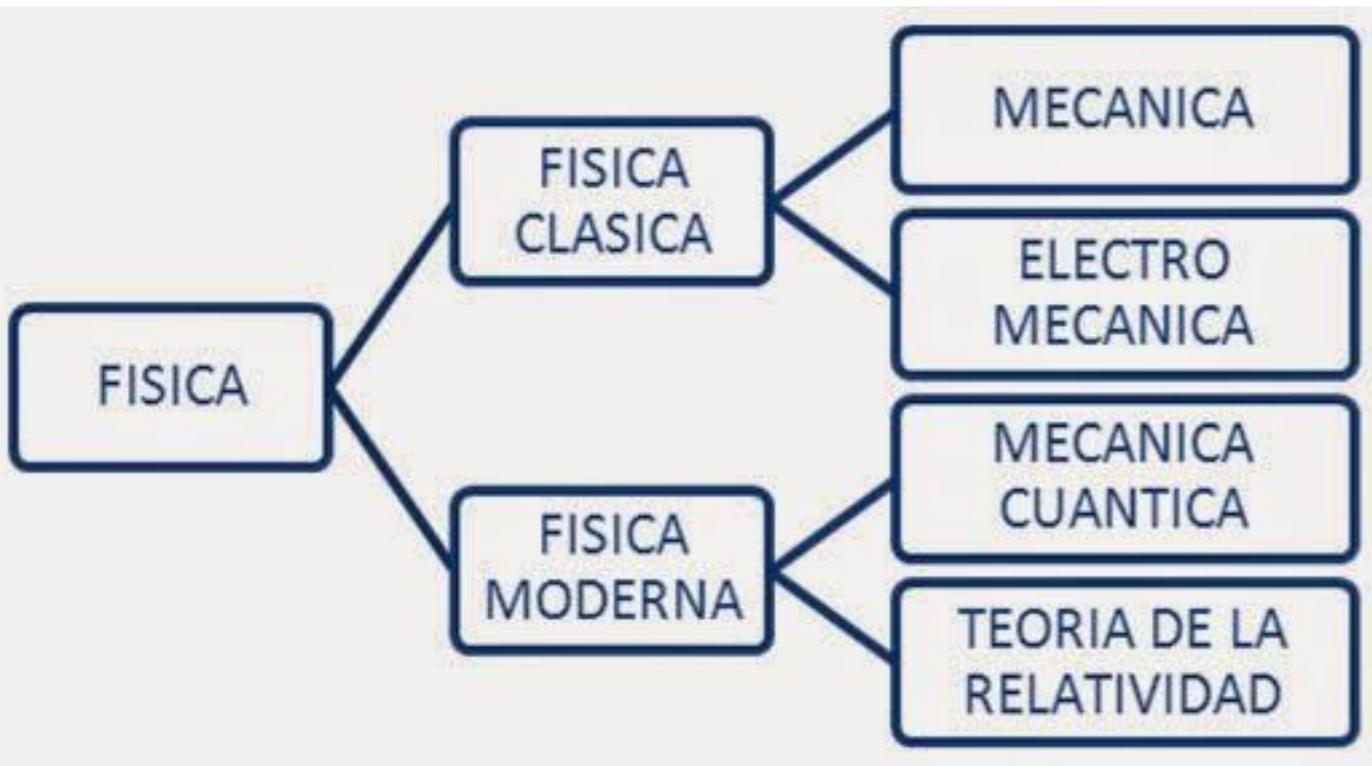
### Transistor uni-electrón



# V. Conclusiones.

LA METROLOGIA TIENE UNA DOBLE MISION:

1) MANTENER LOS PATRONES DE LAS UNIDADES Y SUS DEFINICIONES COMPATIBLES CON LAS LEYES ACTUALES DE LA FISICA

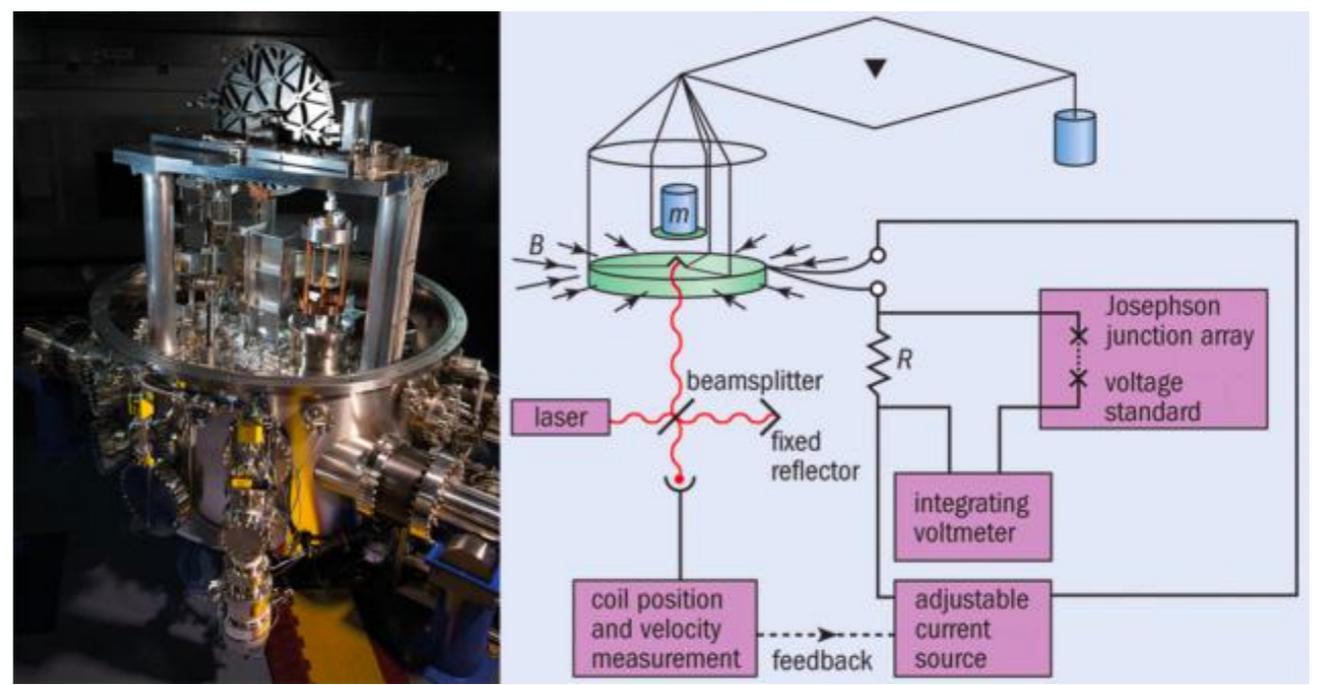
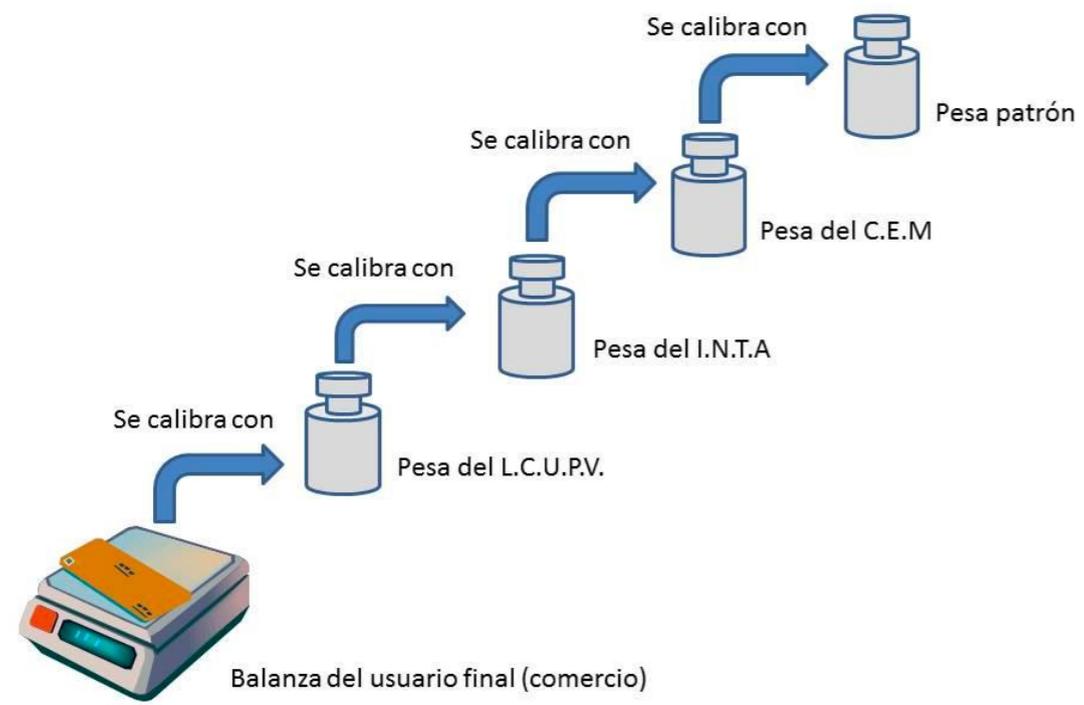


# V. Conclusiones.

LA METROLOGIA TIENE UNA DOBLE MISION:

1) MANTENER LOS PATRONES DE LAS UNIDADES Y SUS DEFINICIONES COMPATIBLES CON LAS LEYES ACTUALES DE LA FISICA

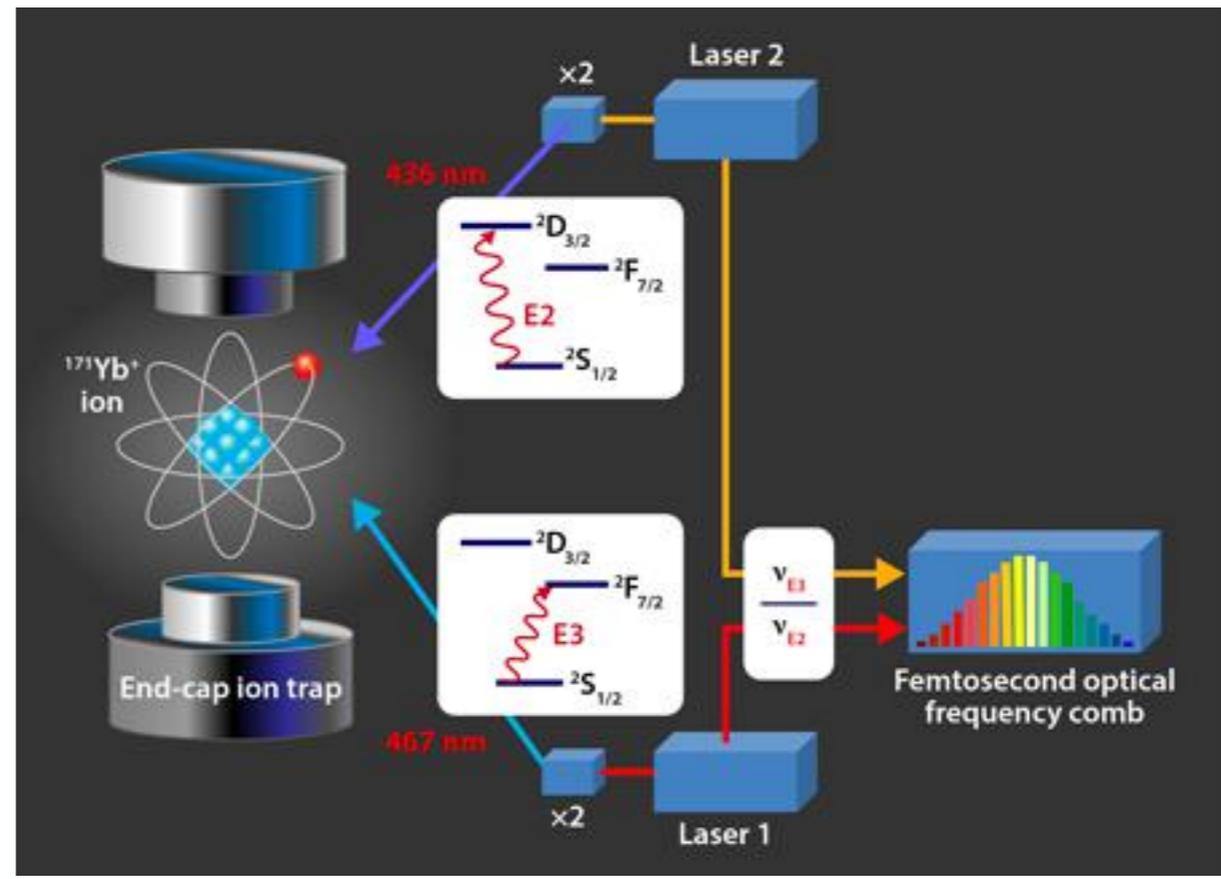
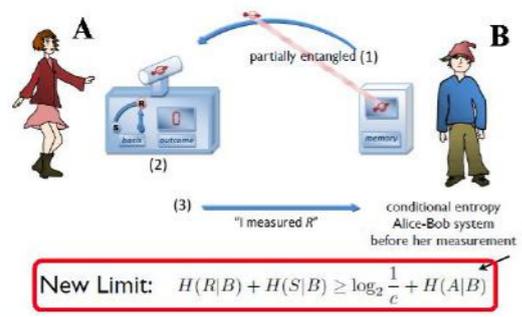
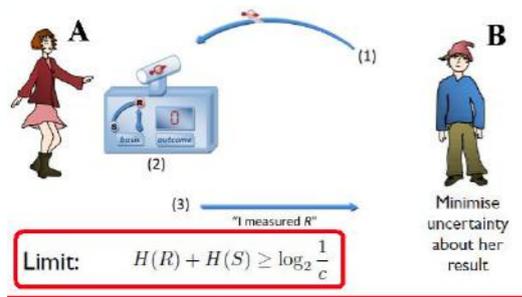
## CADENA DE TRAZABILIDAD



# V. Conclusiones.

LA METROLOGIA TIENE UNA DOBLE MISION:

2) MEDIR CON CADA VEZ MAYOR PRECISION ABRIENDO NUEVAS PUERTAS A NUEVAS LEYES DE LA FISICA



## **V. Conclusiones.**

**Las unidades físicas ahora están definidas por la física fundamental del universo, no por una maquinación humana.**

**Pero las constantes fundamentales del Universo,  
¿De quién son una maquinación?  
¿Porqué son las que son? ¿Y hasta cuándo?  
HEMOS LLEGADO A LA PREGUNTA MÁS  
FUNDAMENTAL DE LA FÍSICA**

**Por eso la Metrología realmente va más allá de mantener los patrones de medida.**

# V. Conclusiones.

Por eso la Metrología realmente va más allá  
de mantener los patrones de medida.

Por eso el CEM tiene que ser un Instituto de Investigación



**CEM una OPI, ¡YA!**

**OPI = Organismo Público de Investigación**

**Por el momento, eso es todo!**

**Muchas gracias por la atención**

**FIN**