

Top

TEST

Left side

Right side

Bottom

¿Cómo medir el vacío?  
Del barómetro de Torricelli a la vida media  
del antiprotón.

Luis A. Orozco

[www.jqi.umd.edu](http://www.jqi.umd.edu)

Lección 1 en el Instituto de Física UNAM  
Enero-Febrero 2024





<https://www.physics.umd.edu/rgroups/amo/orozco/results/2024/Results24.htm>

Presión: Fuerza por unidad de area

La presión [P] está relacionada por la ley de los gases ideales, mediante [ $k_B$ ] la constante de Boltzman, a la densidad [ $\rho$ ] (número de átomos por unidad de volumen) y a la temperatura [T] (promedio de la energía cinética):  $P = k_B T \rho$

Queremos medir la presión, por lo que lo haremos midiendo una fuerza, una densidad...

El vacío: Presiones inferiores a la atmosférica

Por la relación entre presión y temperatura, la presión (absoluta) siempre va a ser positiva.

Los humanos tomamos en muchas ocasiones la atmósfera como la referencia y entonces las presiones (relativas) negativas son inferiores a la presión atmosférica.

<b>Método</b>	<b>Presión Absoluta</b>
Mundo empírico de los humanos	1 atmósfera, 1 bar $10^5$ Pa
Métodos sencillos	$> 1$ mbar 1 Torr
Métodos mecánicos	$> 10^{-3}$ mbar
Métodos indirectos	$> 10^{-9}$ mbar
Métodos extremadamente indirectos	➤ $10^{-12}$ mbar $10^{-10}$ Pa

## La historia de Torricelli:

El 27 de julio de 1630, Giovanni Battista Baliani escribió una carta a Galileo Galilei explicando un experimento que había hecho en el que un sifón, conducido sobre una colina de unos veintiún metros de altura, no funcionó. Galileo respondió con una explicación del fenómeno: propuso que era el poder de un vacío lo que sostenía el agua, y a cierta altura la cantidad de agua simplemente se volvía excesiva y la fuerza no podía aguantar más, como un cable que puede soportar solo un peso limitado. Esta fue una reafirmación de la teoría del *horror vacui* (La naturaleza aborrece el vacío), que data de Aristóteles, y que Galileo reformuló como “resistenza del vacuo”.

El experimento se repitió en Roma (~1640-43) por Gasparo Berti, con testigos: Raffaele Maggiotti, Nicollo Zucchi y Athanasio Kircher.

Llenando con agua un tubo largo que tenía ambos extremos tapados, luego colocando el tubo en un recipiente ya lleno de agua. El extremo inferior del tubo se abrió y el agua que había estado dentro de él se vertió en la cuenca. Sin embargo, solo una parte del agua en el tubo fluyó, y el nivel del agua dentro del tubo se mantuvo en un nivel exacto, que resultó ser de 10,3 m.

Torricelli en 1643, amigo y estudiante de Galileo, interpretó los resultados de los experimentos de una manera novedosa. Propuso que el peso de la atmósfera, no una fuerza de atracción del vacío, mantenía el agua en el tubo.

René Descartes describió un diseño de un experimento para determinar la presión atmosférica en 1631 pero no hay evidencia que lo haya hecho.



# Introducción

El vacío permite el control del medio ambiente para hacer experimentos

Acelerador de partículas en CERN: Colisiones del haz con el gas remanente limita la vida media del haz

·  
LIGO y VIRGO: fluctuaciones en el índice de refracción por el movimiento de las moléculas equivalen a ruido en el interferómetro.

Estudio de superficies: Una monocapa se forma muy rápido si la presión no es baja.

Física Atómica: haces de átomos, átomos fríos y ultrafríos

## Presión

1 atmósfera  $\sim$  1 bar  $\sim$   $10^5$  Pa (Unidad del SI = 760 Torr (mm Hg))

Número de moléculas de aire (N) por unidad de volumen

<b>Presión</b>	<b>Densidad N/cm<sup>3</sup></b>
1 atm	$2.7 \times 10^{19}$
1 Pa	$2.7 \times 10^{14}$
$10^{-8}$ mbar $10^{-6}$ Pa	$2.7 \times 10^8$
$10^{-12}$ mbar $10^{-10}$ Pa	$2.7 \times 10^4$

Fuentes de gas (por lo general debido a la presencia de aire, agua o hidrógeno (acero inoxidable))

Las superficies adsorben gas ya sea por un proceso químico o un proceso físico.

Es importante minimizar las superficies, que su área efectiva sea lo menor posible, deben ser muy lisas. Si la superficie de acero inoxidable parece espejo es un buen indicador. El vidrio es por lo general muy liso, a veces es necesario utilizar cuarzo. El Acero inoxidable generalmente tiene mucho hidrógeno adsorbido.

Es necesario calentar la superficie para desorber el hidrógeno o el agua.

La grasa de nuestras manos puede crear una fuente de moléculas por mucho tiempo si se quieren vacíos de  $10^{-10}$  mbar

Repaso de la teoría cinética de los gases:

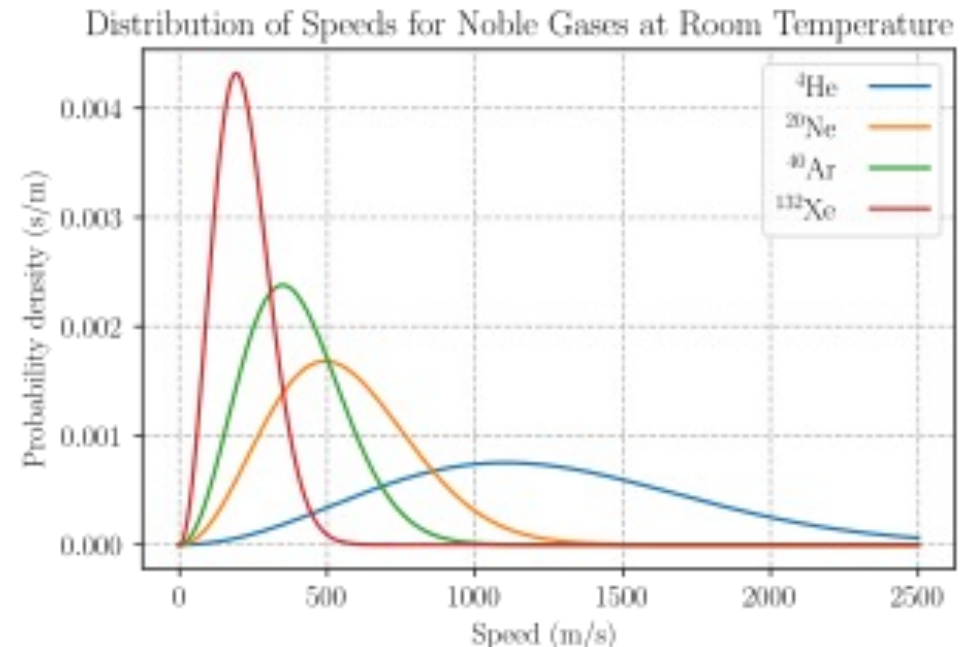
La distribución de Maxwell Boltzmann en 3d es el producto de tres Gaussianas

$$f(v_x) dv_x = \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}} \exp\left(-\frac{mv_x^2}{2kT}\right) dv_x,$$

En 3d integrando sobre las variables angulares:  $dv_x dv_y dv_z = \sin\theta d\phi v^2 dv$

$$f(v) = \left[\frac{m}{2\pi kT}\right]^{\frac{3}{2}} 4\pi v^2 \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right)$$

la velocidad media es:  $\bar{v} = \left(\frac{8kT}{\pi m}\right)^{1/2}$



El aire con una masa molecular de 30 ua es  $\bar{v} = 500$  m/s

para una molécula viajando a  $\bar{v}$  con diámetro  $\sim \xi$  cubre un cilindro de volumen por segundo de:  $\pi\xi^2 \bar{v}$  donde puede tener una colisión con otra molécula en el camino.

El número de colisiones dada una densidad  $n$  es

$$Z = \sqrt{2}n\pi\xi^2\bar{v}$$

El recorrido libre medio (longitud sin colisiones) independiente de la velocidad (la temperatura)

$$\lambda = \frac{\bar{v}}{\bar{Z}} = \frac{1}{\sqrt{2}n\pi\xi^2}$$

la raíz de 2 toma en cuenta el movimiento relativo

## Dos regímenes para el flujo del gas:

A granel: hay arrastre, colisiones frecuentes  $\lambda <$  tamaño del contenedor. Hay interacciones moleculares, fuerzas viscosas, el gas es un fluido

Molecular:  $\lambda \gg$  tamaño del contenedor.

	Pressure (torr) <sup>a</sup>	Number Density (cm <sup>-3</sup> )	Mean Free Path (cm)	Surface Collision Frequency (cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	Time for Monolayer Formation <sup>b</sup> (s)
One atmosphere	760	$2.7 \times 10^{19}$	$7 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{23}$	$3.3 \times 10^{-9}$
<i>Lower limit of:</i>					
Rough Vacuum	$10^{-3}$	$3.5 \times 10^{13}$	5	$4 \times 10^{17}$	$2.5 \times 10^{-3}$
High Vacuum	$10^{-6}$	$3.5 \times 10^{10}$	$5 \times 10^3$	$4 \times 10^{14}$	2.5
Very High Vacuum	$10^{-9}$	$3.5 \times 10^7$	$5 \times 10^6$	$4 \times 10^{11}$	$2.5 \times 10^3$
7Ultrahigh Vacuum	$10^{-12}$	$3.5 \times 10^4$	$5 \times 10^9$	$4 \times 10^8$	$2.5 \times 10^6$

<sup>a</sup> 1 torr = 1.33 mbarr = 133 Pa

<sup>b</sup> assumes unit sticking coefficient and a molecular diameter of  $3 \times 10^{-8}$  cm

El tipo de flujo, a granel o molecular  
determina el tipo de bomba a utilizar

A granel se puede succionar  
Molecular se necesita atrapar

Mas sobre esto en la segunda lección

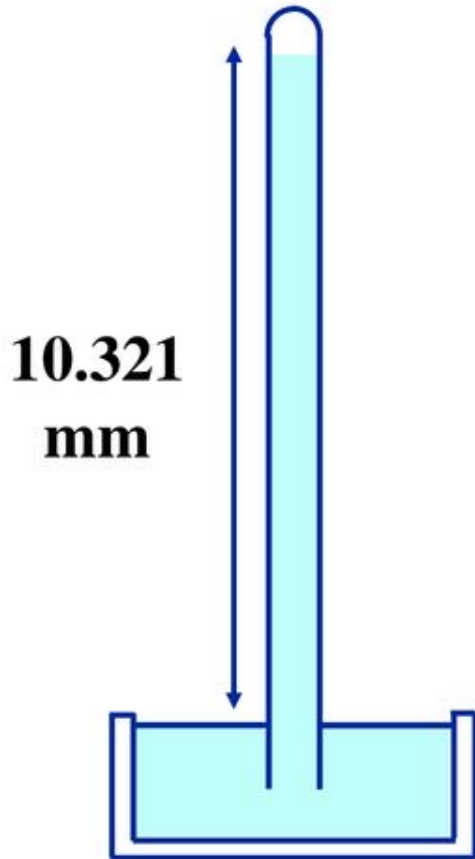


# Métodos para medir la presión

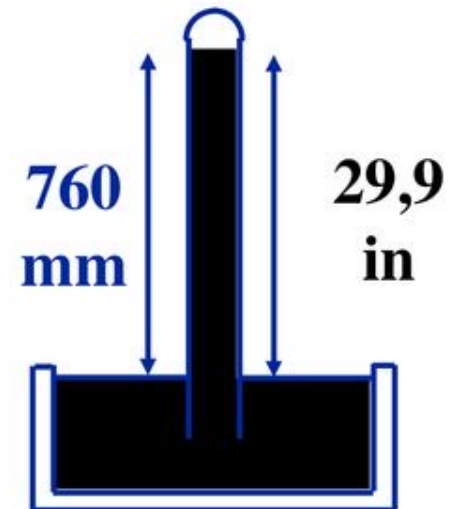
Torricelli hizo el primer Barómetro de mercurio para 1644, con 1 m era suficiente.

Pascal supo del invento y lo repitió exitosamente. Si la idea de Torricelli era correcta, la presión debía depender de la altitud. Un experimento lo confirmó. El peso de la atmósfera cambia con la altura sobre el nivel del mar.

# Barómetro



Agua  $\rho=1 \text{ kg/m}^3$



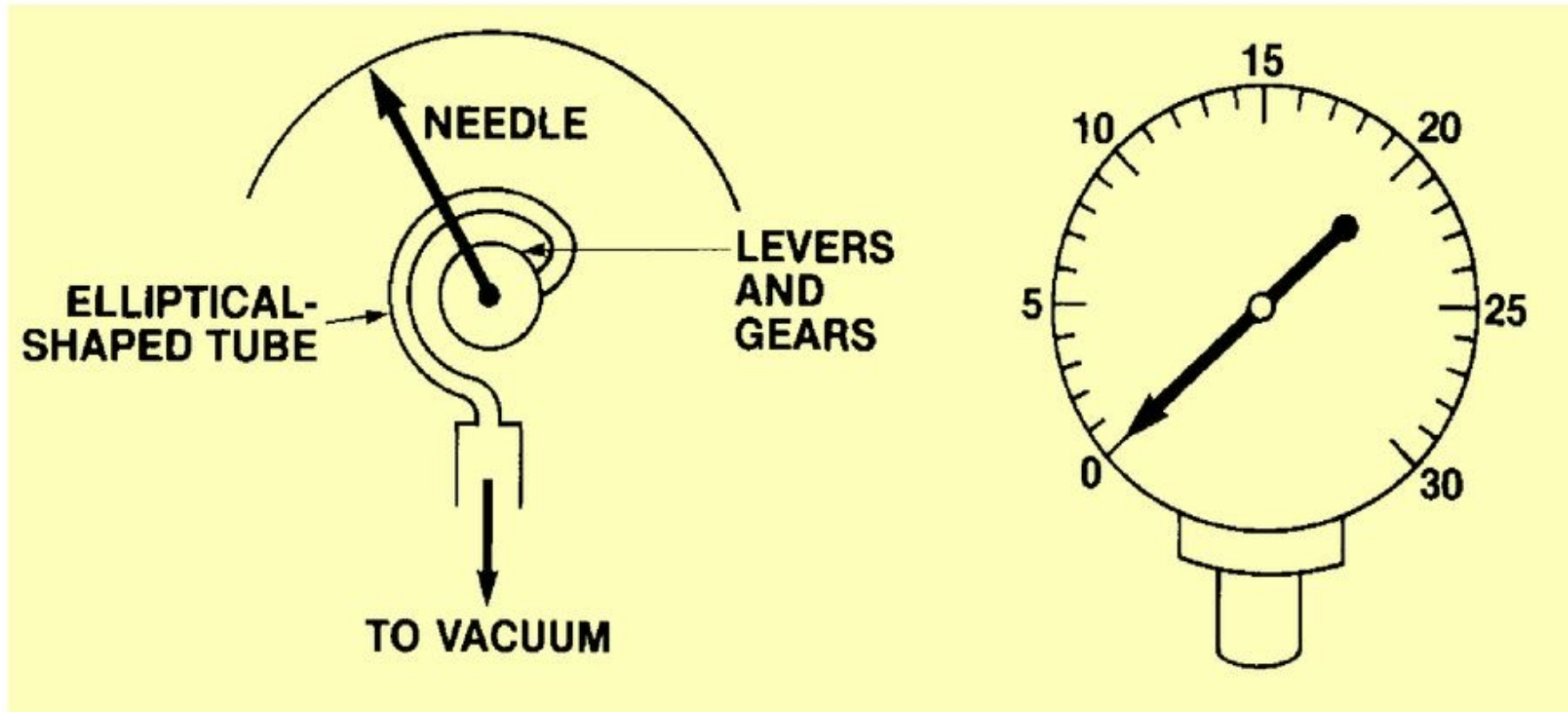
Mercurio  $\rho=13.58 \text{ kg/m}^3$

1 Atm = 760 mm Hg = 760 Torr

Mayor sensibilidad con agua

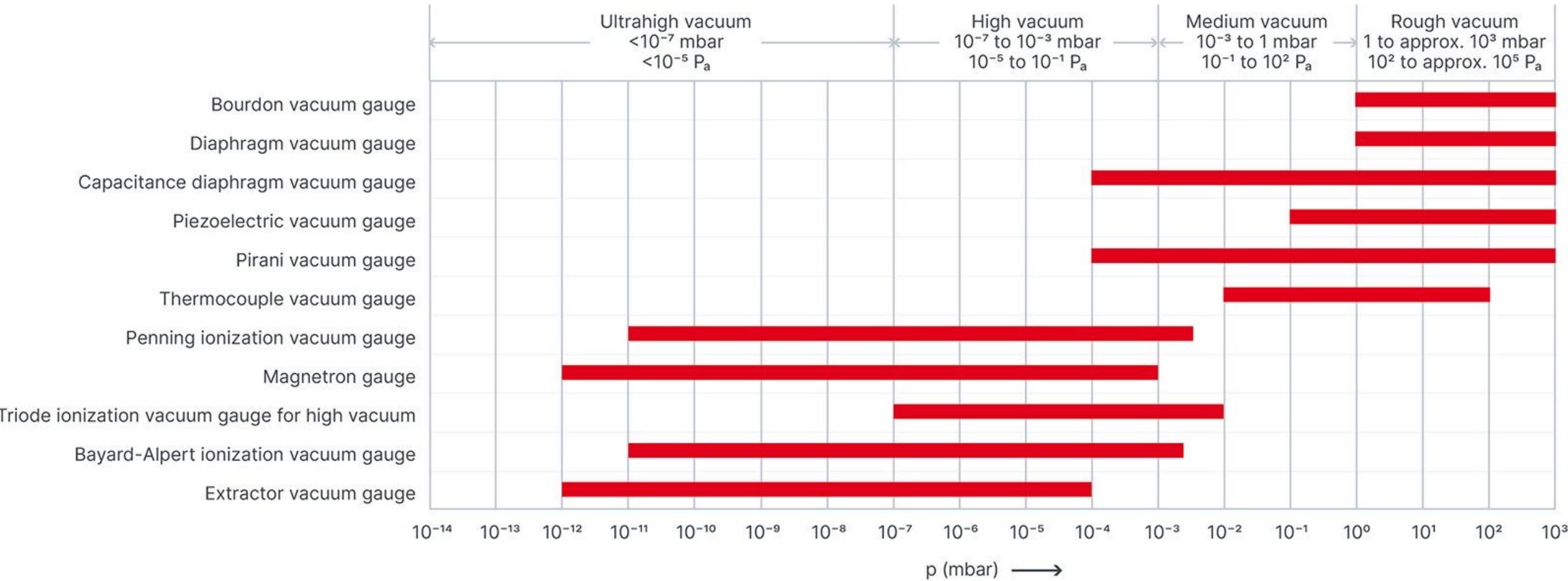
Problema del vapor de presión del material

## Otro ejemplo mecánico



	<b>Límites [mbar]</b> <b>1 mbar=0.76 Torr</b>	<b>Límites[Pa]</b>
<b>Low Vacuum LV</b> <b>Bajo</b>	$10^3-1$	$10^5-10^2$
<b>Medium Vacuum</b> <b>MV Medio</b>	$1-10^{-3}$	$10^2-10^{-1}$
<b>High Vacuum HV</b> <b>Alto</b>	$10^{-3}-10^{-9}$	$10^{-1}-10^{-7}$
<b>Ultra High vacuum UHV</b> <b>Ultra alto</b>	$10^{-9}-10^{-12}$	$10^{-7}-10^{-10}$
<b>Extreme Vacuum</b> <b>XHV</b> <b>Extremo</b>	$<10^{-12}$	$<10^{-10}$

# Rangos de operación



The customary limits are indicated in the diagram.

 Working range for special models or special operating data

Manómetros que utilizan la transferencia de calor

Esta depende de la densidad

Manómetro de termopar

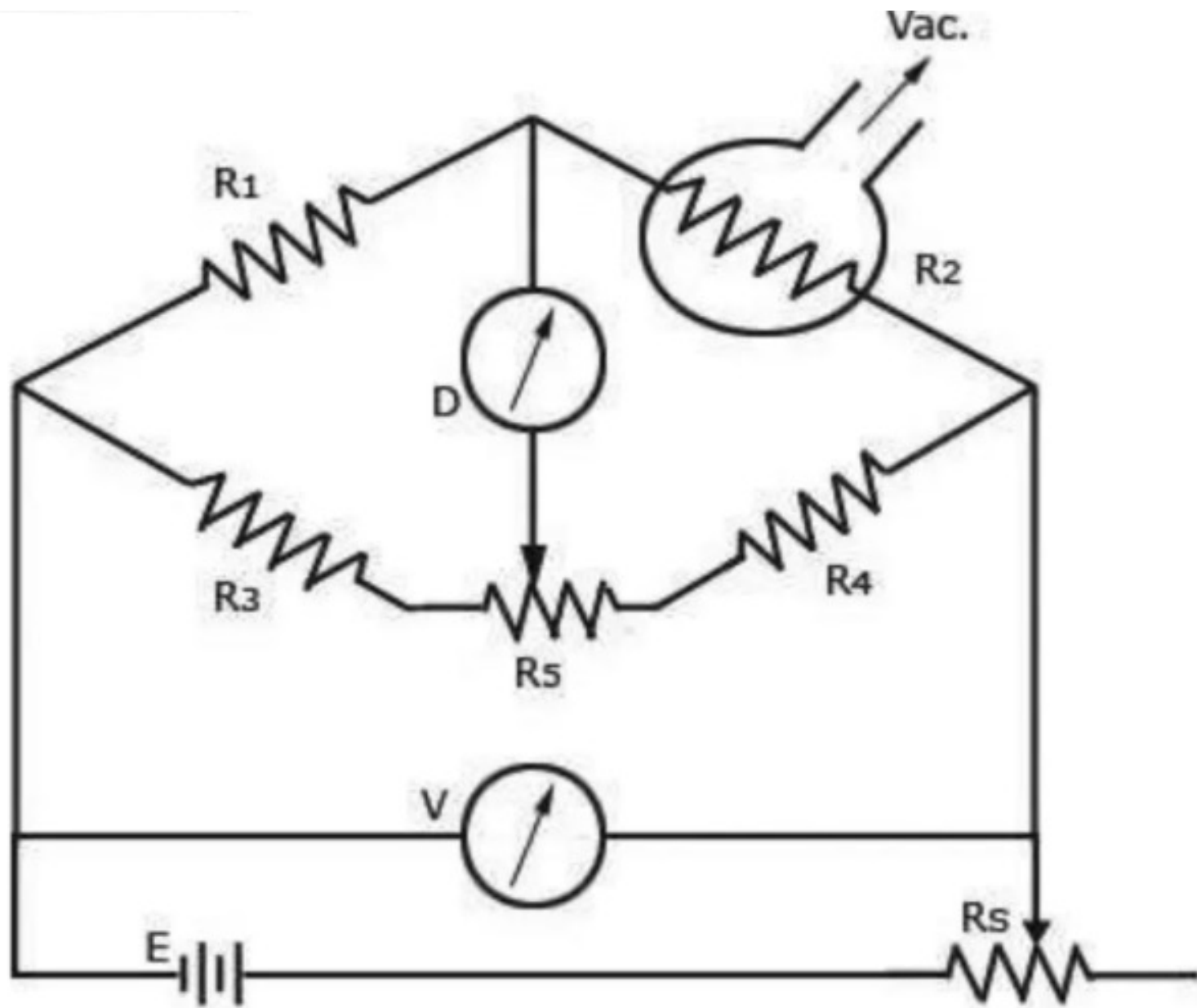
Manómetro Pirani (Convectron)



## Manómetro de Pirani

Medidor bastante utilizado para medir un vacío moderado de hasta  $10^{-3}$  Torr. En estos medidores, la corriente se utiliza para calentar un cable. Este cable calentado pierde calor continuamente.

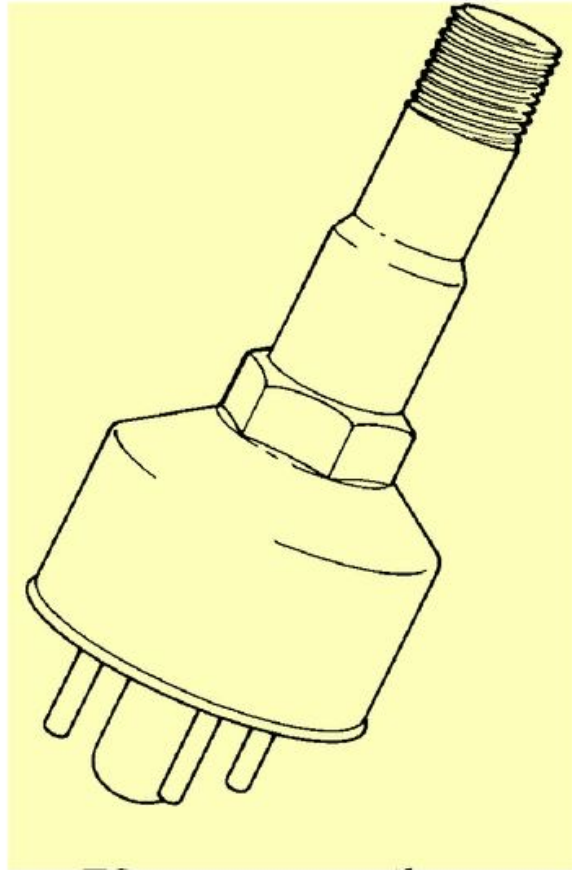
La tasa de pérdida de calor depende de la presión a su alrededor. Si la presión a su alrededor es baja (alto vacío), la pérdida de calor será menor. La temperatura del cable a su vez cambia su resistencia. El cambio en la resistencia que indica el nivel de vacío se mide ya que el cable calentado es parte del circuito del puente.

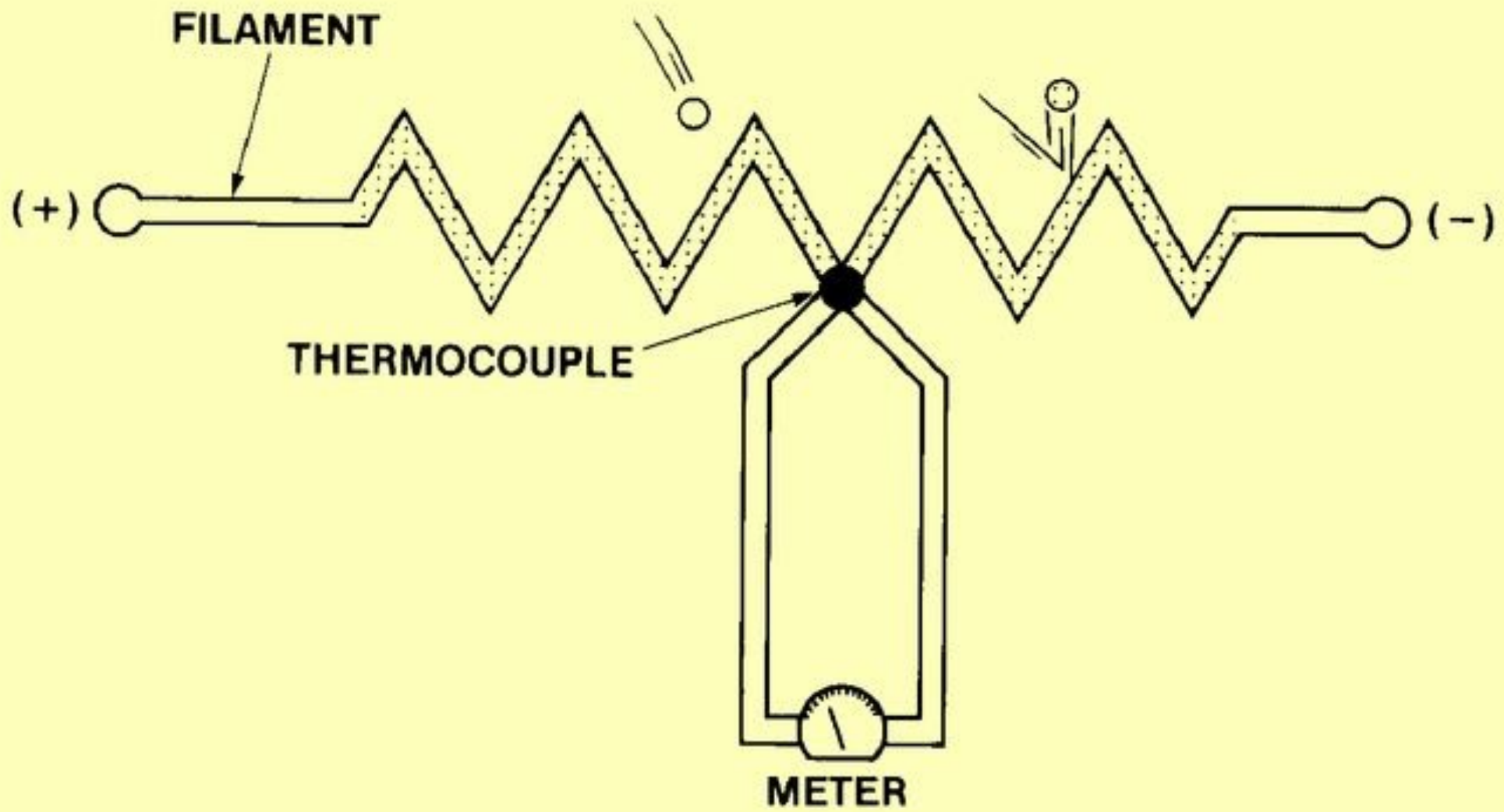


Ventaja: es un medidor simple y efectivo que es bastante sensible.

Desventaja: este medidor depende del gas en el sistema y no puede medir alto vacío.

# Manómetro de termopar



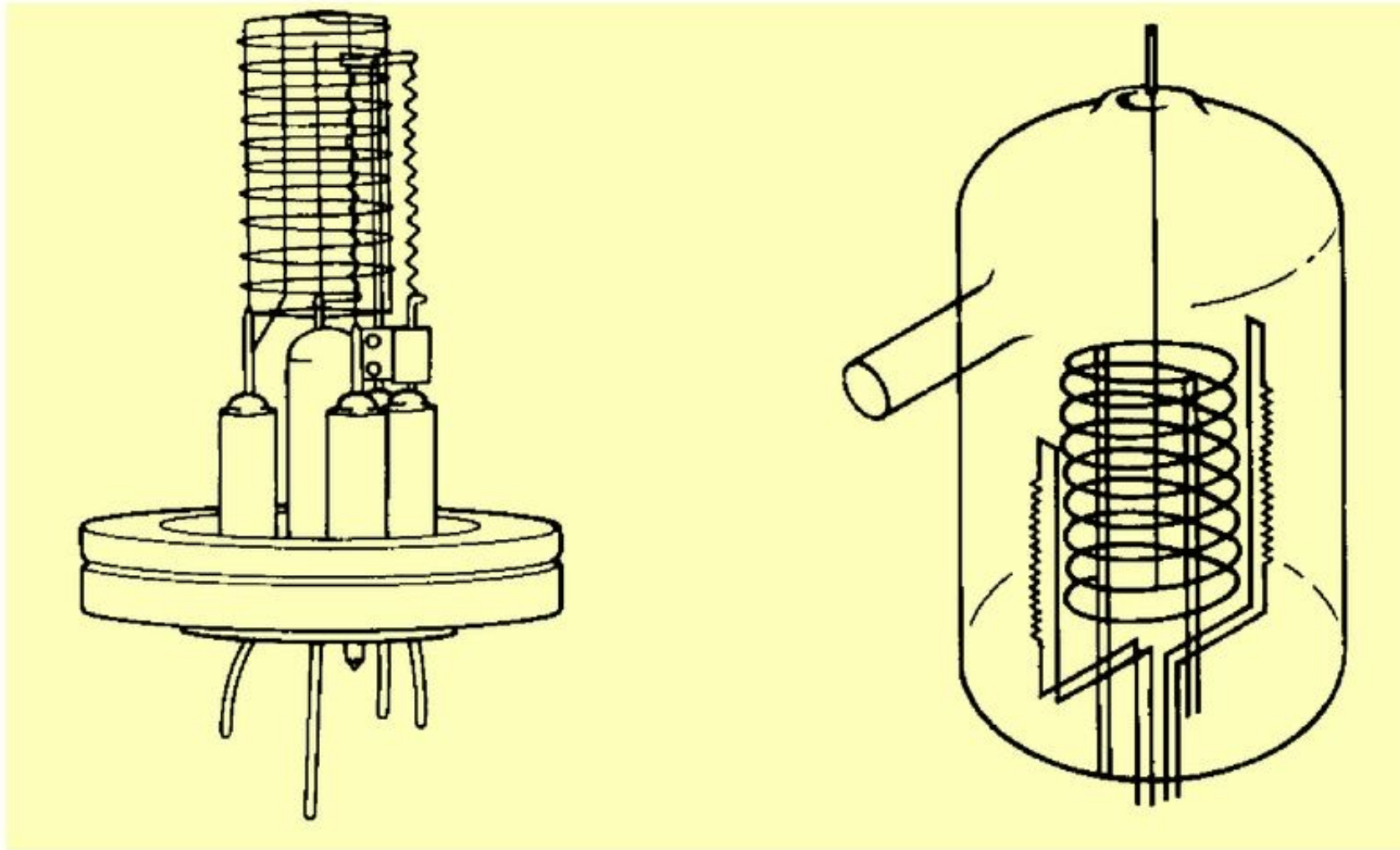


## Medidor de termopar

Es muy similar al medidor de Pirani, excepto que en un medidor de termopar un termopar está soldado por puntos directamente al cable calentado, por lo que se toma una medición directa de temperatura que se convierte en medición de vacío.

Las ventajas y desventajas de este medidor son las mismas que las del de Pirani.

# Medidores de iones



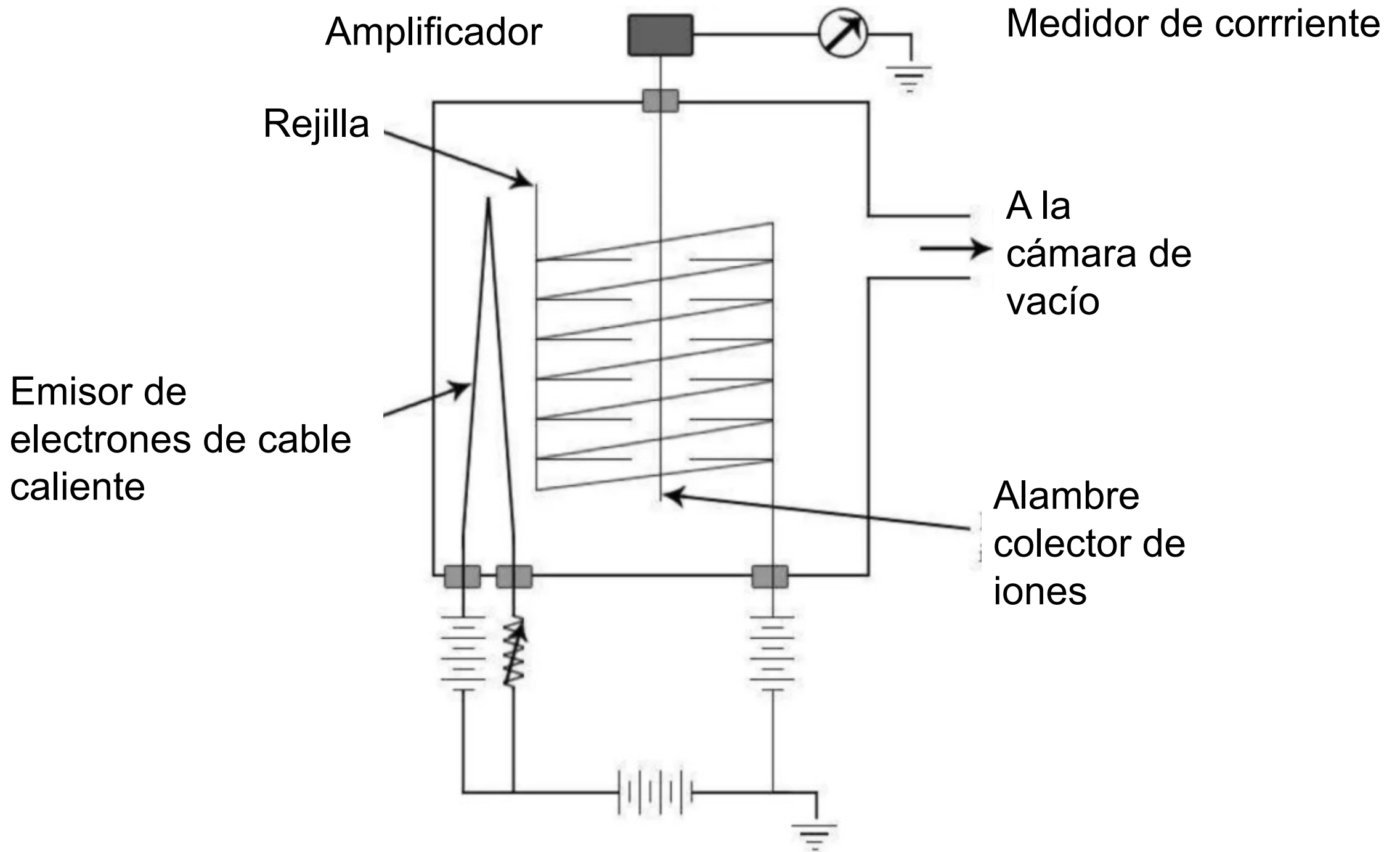
Medidor de ionización de cátodo caliente:

Esto también se llama un medidor o manómetro de iones. En este medidor se utiliza un cable caliente para producir electrones por emisión termiónica. Los electrones así producidos son atraídos por el ánodo que está en forma de rejilla. La corriente de iones dependerá de la densidad nivel de vacío. Por lo tanto, la medición de la corriente indica el nivel de vacío.

Ventaja: este medidor puede medir con precisión el vacío de hasta  $10^{-11}$  Torr. Dado que este medidor no depende de la descarga incandescente, también puede medir el vacío pequeño. Funciona como bomba de vacío con una velocidad de bombeo inferior a 1 l/s

Desventaja: requiere mantenimiento frecuente. El filamento de alambre caliente puede dañarse si no se ha alcanzado el nivel de vacío adecuado y el medidor está encendido.





## Precauciones generales con medidores de vacío:

1.- La posición del medidor es muy importante para una lectura precisa. Por ejemplo, si un medidor se coloca en línea con la entrada de gas, está obligado a dar una lectura alta falsa. El medidor debe, en la medida de lo posible, estar en el centro de la cámara de vacío. Un medidor en una esquina lejana no responderá rápidamente al cambio de vacío.

2.- El uso de aceites de bomba de vacío de buena calidad como el aceite de bomba de difusión de silicona de alto vacío y el aceite de bomba rotativa sintética de triple molecular: ayuda a extender la vida útil de los medidores de vacío y reduce el requisito de mantenimiento en el sistema de vacío.

3.- El mantenimiento adecuado del medidor, que es principalmente la limpieza de la "cabeza", debe realizarse periódicamente para obtener una lectura precisa y una larga vida útil de los medidores.

Mantener algunos medidores de repuesto ayuda mucho. Antes de ir a una búsqueda de fugas de vacío, a veces el cambio del medidor en sí mismo resuelve el problema.

4.- El medidor siempre debe estar bien fijo a la línea de vacío. También se debe usar grasa de silicona de alto vacío y/o cinta de teflón en la unión del medidor de vacío y la línea de vacío. Esto ayuda a prevenir cualquier fuga en el cruce.

5.- Para facilitar la búsqueda de fugas, el sistema de vacío debe tener muchos medidores en diferentes ubicaciones del sistema para que el aislamiento y la verificación de vacío sean más fáciles.

6.- Los medidores termopar, Pirani, Iones, generalmente están calibrados pensando en aire, una mezcla de nitrógeno y oxígeno, pero las propiedades pueden ser muy diferentes si el gas principal es argón o helio.

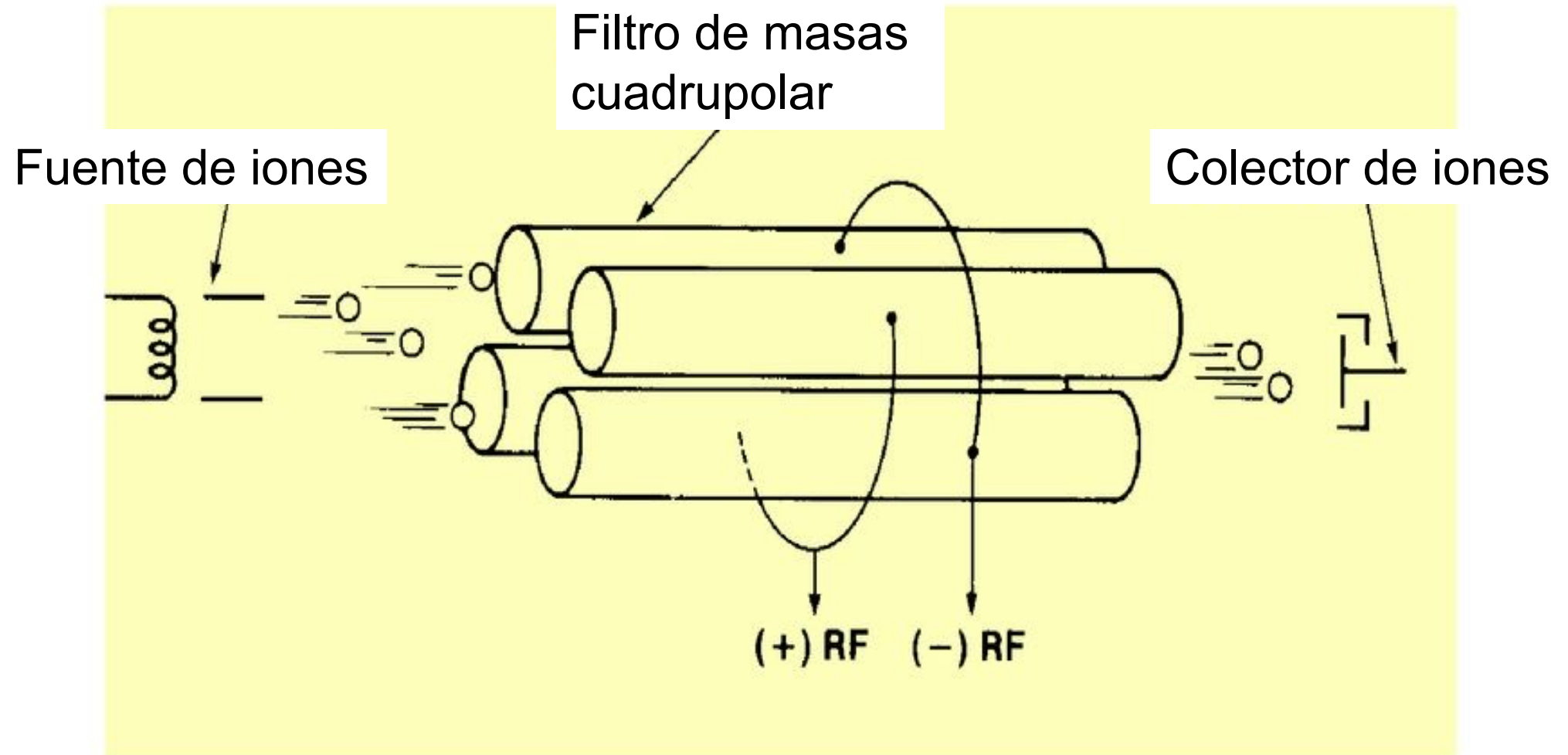
Gas	Formula	Multiplicative Factor <sup>a</sup>
Air		1.0
Nitrogen	N <sub>2</sub>	1.0
Oxygen	O <sub>2</sub>	0.9
Hydrogen	H <sub>2</sub>	2.4
Carbon dioxide	CO <sub>2</sub>	0.7
Methane	CH <sub>4</sub>	0.7
Hydrocarbons	C <sub>4</sub> and up	0.2
Argon	Ar	0.9
Neon	Ne	3.5
Helium	He	6.8

<sup>a</sup> Calibrated for air. Recommended values based primarily upon the survey published by R. L. Summers, *NASA Tech. Note: TN D-5285*, and an assumed nominal acceleration potential of 150V.

7.- Los medidores pueden ser sensibles a la posición como se montan en el sistema.

8.- Los medidores de iones son sensibles a campos magnéticos pues la corriente de iones puede ser desviada.

# Analizador residual de gases



## **Thousandfold Improvement in the Measured Antiproton Mass**

G. Gabrielse, X. Fei, L. A. Orozco, and R. L. Tjoelker

*Department of Physics, Harvard University, Cambridge, Massachusetts 02138*

J. Haas and H. Kalinowsky

*Institut für Physik, Universität Mainz, 6500 Mainz, West Germany*

T. A. Trainor

*Department of Physics, University of Washington, Seattle, Washington 98195*

W. Kells

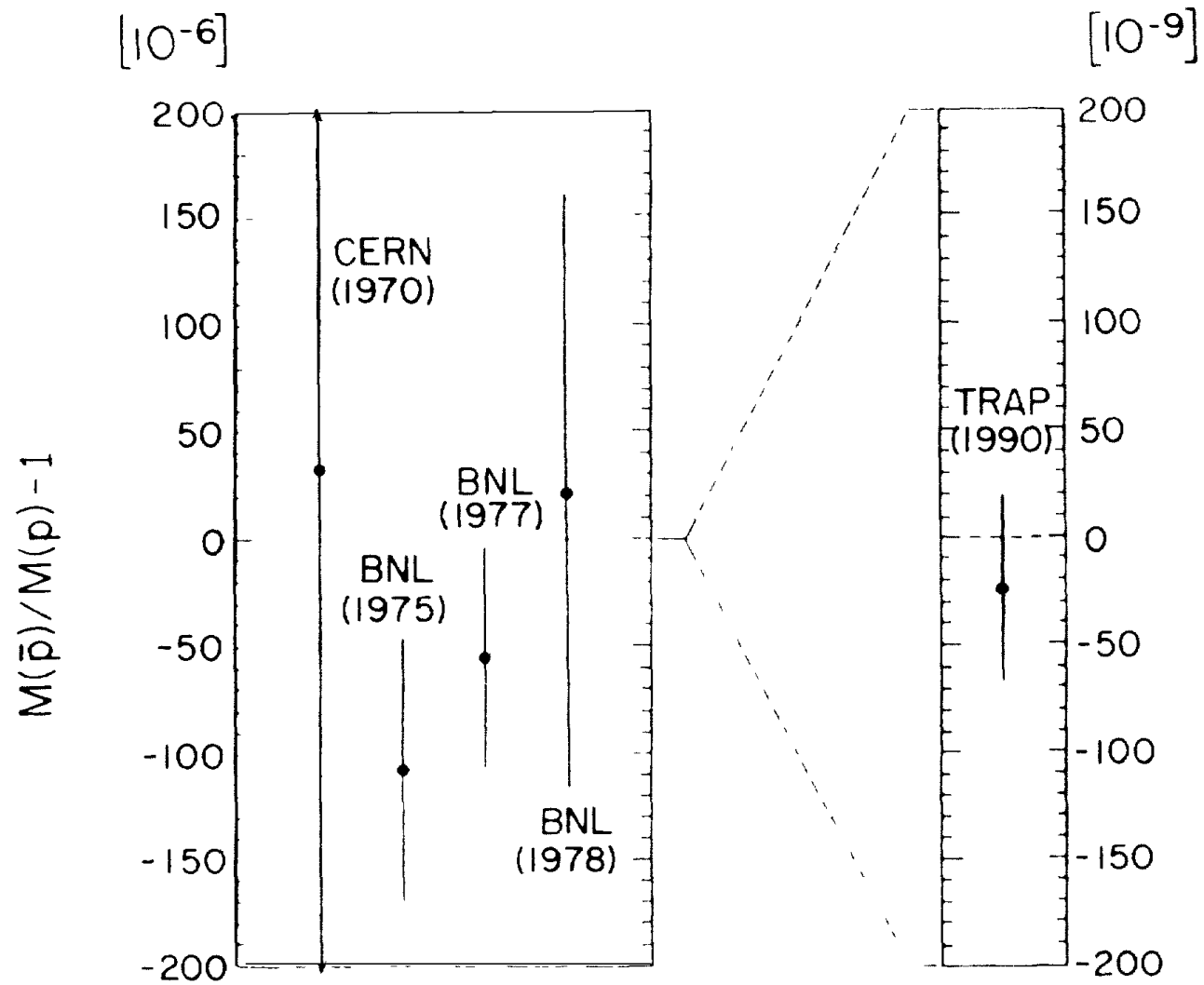
*Institute for Boson Studies, Pasadena, California 91107*

(Received 11 June 1990)

Phys. Rev. Lett. 65, 1317 (1990)

Comparisons of antiproton and proton cyclotron frequencies yield the ratio of inertial masses  $M(\bar{p})/M(p) = 0.999999977 \pm 0.000000042$ . The fractional uncertainty of  $4 \times 10^{-8}$  is 1000 times more accurate than previous measurements of this ratio using exotic atoms and is the most precise test of *CPT* invariance with baryons. Independent comparisons to electrons yield the mass ratios  $M(\bar{p})/M(e^-) = 1836.152660 \pm 0.000083$  and  $M(p)/M(e^-) = 1836.152680 \pm 0.000088$ . Cryogenic antiprotons (near 4 K) stored in a Penning trap for 2 months establish directly a lifetime greater than 3.4 months.





tons.<sup>17</sup> Based upon calculated annihilation cross sections at low energy,<sup>18</sup> our containment lifetime limit above requires a background gas density less than 100 atoms/cm<sup>3</sup>. For an ideal gas at 4.2 K this corresponds to a pressure less than  $5 \times 10^{-17}$  Torr. The low pressure is attained by cooling the trap and its sealed container to 4.2 K.

Para medir la vida media de los antiprotones necesitamos saber:

Cuantos atrapamos. conocemos la eficiencia.

Al final cuantos quedaron, detector por aniquilación

Esperamos 103 días, 3 meses

No está limitada por la presión de vapor del H ni del He a presión atmosférica pues la trampa esta cerrada a un vacío ya cercano a  $10^{-9}$  Torr

La pérdida se puede deber a violacion del teorema CPT.

La pérdida se puede deber a problemas de vacío.

La materia y la antimateria se aniquilan.  $E=mc^2$

El proceso a baja energía es mas complicado

Los remanentes pueden ser moléculas de hidrógeno y átomos de helio

La temperatura ambiente es 4 K, las velocidades son bajas < de 200 m/s

Sección eficaz depende inversamente de la energía del proyectil a baja energía.

$$\sigma = 3\pi\alpha_0^2\sqrt{E_0/E}$$

Presión debida al hidrógeno sería:  
 $1.8 \times 10^{-17}$  Torr,  $\sim 50$  átomos/cm<sup>3</sup>

Presión debida al helio sería:  
 $4.1 \times 10^{-17}$  Torr,  $\sim 100$  átomos/cm<sup>3</sup>

Presión atmosférica  $10^{19}$  átomos/cm<sup>3</sup>

## Referencias:

Leybold Fundamentals of Vacuum Technology, en internet

J. H. Moore, C. C. Davis M. A. Copland S. C. Greer  
Building Scientific Apparatus  
Cambridge University Press.  
Fourth Edition 2009

La página sobre vacío, presión de vapor, de la NASA

Gracias