

# Cómo cachar un átomo y jugar con él: trampas iónicas

M. en C. Luis Alberto Nava Rodríguez  
Dr. José Luis Hernández Pozos  
Departamento de Física  
Universidad Autónoma Metropolitana – Iztapalapa



## Resumen

Las trampas iónicas, como herramientas para confinar y reducir el movimiento de partículas con carga eléctrica en pequeñas regiones del espacio y aisladas de interacciones con medios circundantes, han tenido un gran impacto en el estudio de las propiedades, no solo de átomos y moléculas, también de partículas elementales como el electrón y el protón. Dando lugar a mejores y nuevas clases de experimentos y aplicaciones, que son relevantes no solo para la física, también para la química y otras disciplinas. Han sido fuente de nuevos fenómenos, que, de otra manera, tal vez no hubieran podido ser observados. En eso radica la importancia que tienen este tipo de trampas, que han dado un impulso, tanto a la ciencia básica, como al desarrollo de tecnologías aplicables a problemas de la vida común.

**Palabras clave:** Trampas, átomos, iones, láser, enfriamiento.

## Abstract

Ion traps, as tools to confine and to lessen the movement of charged particles into small regions of space and isolated from surrounding media, have become of great importance in the study of properties, of not only atoms and molecules, but also in elementary particles such as electrons and protons. Leading to improved and new kind of experiments and applications that are relevant to physics, chemistry and other disciplines. And as a source to new phenomena, which, otherwise, may not be possible to observe. In all of this lies the importance of this kind of traps that have given a boost to basic science and to the development of technologies with applications to common life problems.

**Keywords:** Traps, atoms, ions, laser, cooling.

## Introducción

Desde la antigüedad, personajes como Demócrito creían en la existencia de constituyentes indivisibles llamados átomos a los que consideraban como los componentes fundamentales de lo que están hechas las cosas, desde objetos inanimados como las rocas hasta organismos complejos como nosotros mismos. Estas ideas perduraron a lo largo de los siglos y hasta finales del siglo XIX se sabía poco de la estructura de estos componentes fundamentales hasta que, en 1911, Geiger y Marsden consiguieran evidencia experimental sobre la estructura de los átomos. Desde entonces se han hecho más esfuerzos teóricos y experimentales para estudiar sus propiedades e interacciones. Tales son el modelo atómico del pudín de Thomson, pasando por el modelo de Bohr y la descripción cuántica del átomo derivada de la ecuación de Schrödinger han sido algunos de los esfuerzos teóricos por describir la estructura del átomo y explicar las observaciones experimentales, en particular, las líneas espectrales de emisión de diferentes átomos, dando lugar así a la descripción de sus niveles de energía.

Cuando se calienta un sólido hasta la incandescencia este emite radiación compuesta por diferentes longitudes de onda y con diferentes intensidades, pero en este caso lo que se estudia es el comportamiento de un conjunto de átomos interactuando de diferentes maneras y no el comportamiento individual del átomo de un elemento. Por otro lado, en una muestra gaseosa los átomos se encuentran en movimiento libre y mucho más separados en comparación a un sólido, y sus inte-

racciones son debidas a colisiones, que, en general, son poco probables. Cuando se excita, el gas emitirá radiación solo en determinadas longitudes de onda, éstas son las líneas del espectro de emisión y son diferentes para cada elemento.

El espectro de emisión consiste en una serie de bandas (o líneas) con diferentes intensidades y a diferentes longitudes de onda  $\lambda$  (o frecuencias  $\nu$ ) relacionadas con las diferentes transiciones energéticas de los átomos, y a cada banda se le asocia un ancho de línea  $\delta\nu$  centrada en  $\nu$ . La diferencia de energía entre dos transiciones está relacionada con la frecuencia a través de la expresión  $\Delta E = h\nu$ , siendo  $h$  la constante de Planck. Con el ancho de línea se puede determinar la vida media teórica de la transición como  $\tau = 1/2\pi\delta\nu$ , y expresa el tiempo promedio que permanece el electrón en el nivel superior antes de regresar al nivel inferior.

Esto, sin embargo, es en el caso ideal donde el átomo está inmóvil y bajo ninguna interacción. En los experimentos con gases, los átomos se están moviendo en direcciones arbitrarias y con diferente rapidez. Existe entonces un cambio en la frecuencia de la radiación emitida debido al efecto Doppler generado por el movimiento relativo entre el átomo y el observador, y el cambio es diferente para cada átomo. Esto genera un ensanchamiento de las bandas de emisión, es decir, incrementa el valor de  $\delta\nu$ , y, por lo tanto, disminuye la resolución en el experimento. El efecto Doppler es la principal causa del ensanchamiento de las líneas espectrales.

La temperatura  $T$  del gas tiene relación con la rapidez media  $v_{rms}$  de los átomos,

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3k_B T}{m}}, \quad (1)$$

donde  $k_B$  es la constante de Boltzmann y  $m$  es la masa de los átomos o partículas. Por esa razón, si se logra reducir la temperatura del gas (o la rapidez de los átomos) disminuye el ensanchamiento Doppler de las líneas espectrales y permite realizar mediciones más precisas.

Esto ejemplifica la necesidad de aislar a los átomos, que se logra al contenerlos en una cámara de vacío, y de reducir su movimiento. Las trampas ofrecen las condiciones necesarias para este propósito y han tenido, desde su invención a la actualidad, una amplia gama de aplicaciones.

### Trampas Iónicas

Las trampas son herramientas que permiten confinar desde una sola partícula a un gran número de ellas en regiones reducidas del espacio, del orden de unos cuantos milímetros. Existen trampas para partículas neutras como las trampas magneto ópticas (MOT), que utilizan la luz láser y campos magnéticos para confinar; y las trampas iónicas para confinar partículas con carga eléctrica. Estas trampas aprovechan la interacción entre la carga  $Q$  del ion con velocidad  $v$ , y los campos eléctricos  $\vec{E}$  y magnéticos  $\vec{B}$  a través de la fuerza de Lorentz,

$$\vec{F} = Q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}). \quad (2)$$

Fueron inventadas a finales de la década de los 50's y en un inicio había dos tipos de trampas, la trampa Penning y la trampa Paul.

A inicios de la década de los 50's el físico alemán Wolfgang Paul había inventado un espectrómetro de masas que consiste en

cuatro electrodos y a los que se aplica una diferencia de potencial entre dos pares de ellos de manera que se genera un potencial cuadrupolar en dos dimensiones,

$$\Phi(x, y) = \frac{\Phi_0}{r_0^2} (x^2 - y^2), \quad (3)$$

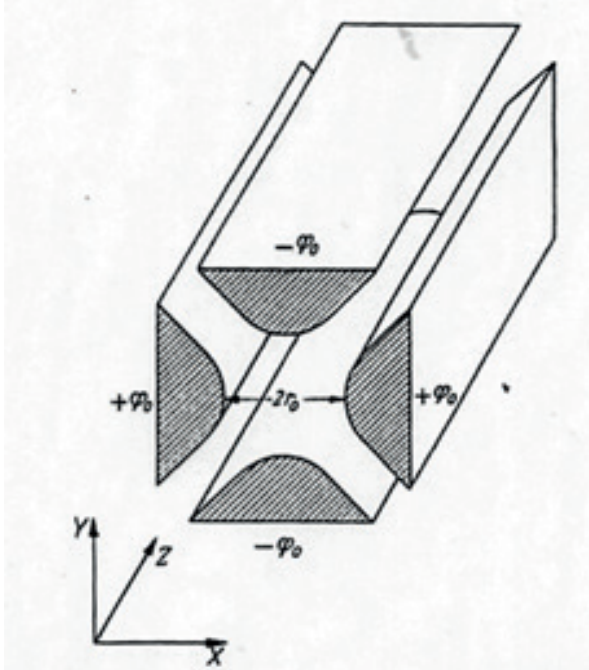


Figura 1. Espectrómetro de masas

donde  $r_0$  es la distancia de los electrodos al centro de la trampa, figura 1. Este potencial es un potencial tipo silla, es decir, una partícula sujeta a este potencial tendrá trayectorias estables a lo largo de un eje, pero inestables a lo largo del otro y por ello este potencial no es suficiente para confinar. Para poder confinar, Paul hizo el potencial (3) dependiente del tiempo con  $\Phi_0(t) = U + V \cos(\Omega t)$ , donde  $U$  y  $V$  son potenciales estáticos y  $\Omega$  es la frecuencia de oscilación (Paul, 1990). De esta forma, el potencial oscilante tiene en promedio un mínimo en el centro de la trampa, las partículas oscilan alrededor de este punto y son confinadas en el plano  $xy$  pero libres de moverse a lo largo del

eje  $z$  o axial. Si se desea confinar también a lo largo del eje axial se pueden colocar dos electrodos en dos extremos del eje con el mismo potencial estático, consiguiendo de esta manera la configuración de una trampa lineal.

Paul, sin embargo, no utilizó esta configuración lineal para confinar en tres dimensiones, en cambio usó una que genera un potencial cuadrupolar en tres dimensiones que consiste en una configuración de 3 electrodos: un anillo circular y otros dos a modo de tapas, figura 2. Cuando se aplica una diferencia de potencial  $\Phi_0(t)$  entre el anillo y las dos tapas se genera en el espacio entre los electrodos el potencial cuadrupolar

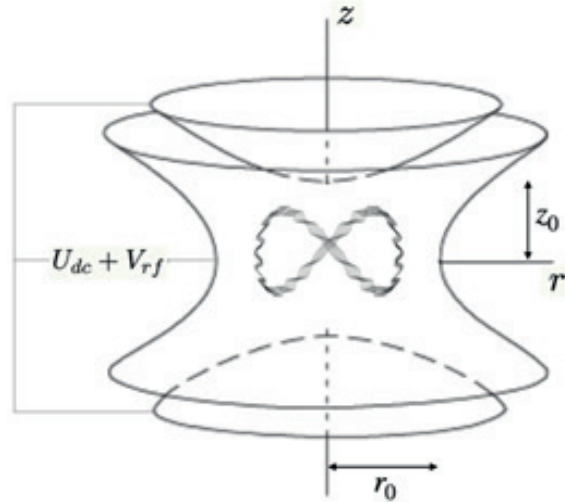


Figura 2. Trayectoria de un ion en una trampa Paul.

$$\Phi(r, z) = \frac{\Phi_0}{2r_0^2} (r^2 - 2z^2), \quad (4)$$

con  $r=x^2+y^2$ . De igual manera al caso bidimensional, con el potencial oscilante se genera un potencial efectivo con un mínimo en el centro de la trampa y las partículas son confinadas en tres dimensiones. La figura 3 muestra una secuencia del potencial cua-



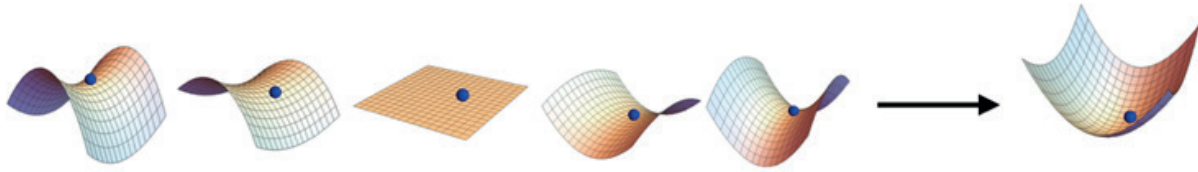


Figura 3. Confinamiento de un ion por el potencial efectivo resultante del potencial oscilante.

drupolar oscilante, donde la partícula cargada oscila alrededor del centro de la trampa.

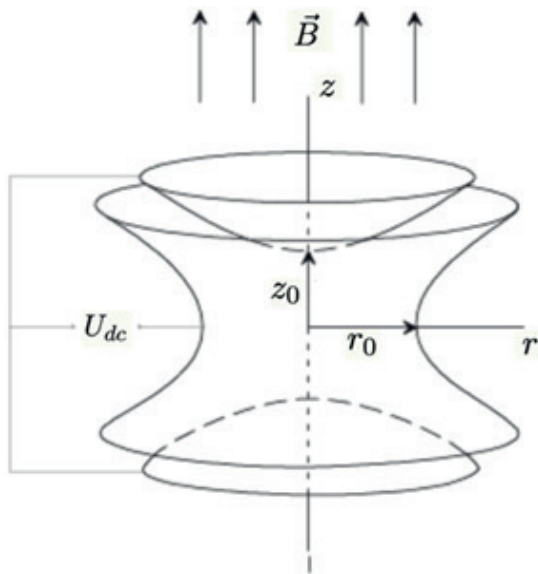


Figura 4. Trampa Penning (Blaum et al, 2010).

Prácticamente fue al mismo tiempo que el otro tipo de trampa fue diseñada por Hans Dehmelt y su configuración es la misma que en la trampa Paul, pero en este caso la diferencia de potencial que se aplica es estático, de manera que una partícula cargada quede confinada en el eje axial.

Si se aplica un campo magnético  $B$  homogéneo en la dirección positiva de este eje, con la interacción del ion y este campo se logra confinar radialmente, figura 4. Dehmelt la llamó trampa Penning en honor a los primeros trabajos sobre confinamiento con campos magnéticos realizados por Frans Penning en 1936.

La figura 5 muestra una sección de los electrodos de la trampa cuadrupolar.

### Enfriamiento láser

Como consecuencia del confinamiento la velocidad de las partículas disminuye, pero para la mayoría de los experimentos es necesario disminuir aún más el movimiento. El caso ideal sería donde la velocidad de las partículas es cero y por lo tanto la temperatura del gas es cero, en este caso se dice que se ha llegado al cero absoluto de temperatura. Sin embargo, las leyes de la termodinámica nos dicen que no es posible conseguir una temperatura igual a cero, pero lo que sí se puede hacer es acercarse bastante.

Existen diferentes maneras de reducir la velocidad de partículas confinadas, con diferentes límites de temperatura que se pueden conseguir y la aplicabilidad de las técnicas dependerá del tipo de partícula y experimento a realizar.

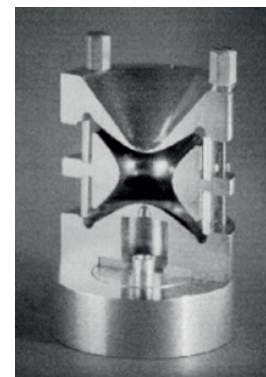


Figura 5. Sección de una trampa cuadrupolar (March, 2009).

Para el caso de átomos las de enfriamiento láser son las más utilizadas. De éstas, la técnica más simple y común es la del enfriamiento Doppler, que aprovecha la interacción de los átomos con los fotones de un haz láser. Ésta fue implementada por primera vez en 1978 (Wineland, 1978) y valió el premio nobel en 1997. Con ella se logran temperaturas del orden de cientos de micro Kelvin.

Si un haz se propaga a través del gas, cuando la luz es absorbida ejerce una fuerza de radiación sobre los átomos y su magnitud tendrá dependencia con la frecuencia del láser. Por lo tanto, si un átomo se mueve en la dirección opuesta al haz, su velocidad va a disminuir y para evitar el aumento de la velocidad en átomos moviéndose en la dirección opuesta es necesario colocar un segundo haz contra propagándose al primero.

Conforme disminuye la velocidad de los átomos, por efecto Doppler, la frecuencia del láser ya no será la correcta para que la luz sea absorbida y es necesario sintonizarla a la par con los cambios por efecto Doppler para continuar con el proceso de enfriamiento. Esta técnica es suficiente para mucha clase de experimentos, pero para los que requieren temperaturas menores, por ejemplo, aquellos diseñados para observar fenómenos cuánticos, es necesario utilizar otros métodos conocidos como enfriamiento sub-Doppler, donde se pueden alcanzar temperaturas entre diez y cien veces más bajas.

### Usos y aplicaciones

El confinamiento y enfriamiento de átomos han encontrado aplicaciones en diferentes disciplinas de la ciencia, incluso en aquellas relacionadas con problemas de la vida común. Han propiciado el diseño de expe-

rimentos para la búsqueda y estudio de fenómenos, que, sin estas herramientas, tal vez no hubiera sido posible observar.

### *Espectrometría de masas*

Una de las primeras aplicaciones de estas trampas fue la espectrometría de masas para separar o detectar iones con diferentes relaciones de carga y masa  $Q/m$ . Cuando se hace pasar una muestra de diferentes iones a través del espectrómetro de masas como el de la figura 1, se pueden seleccionar los valores de  $U$ ,  $V$  y  $\Omega$  de manera que solo los iones con una determinada relación  $Q/m$  puedan pasar a través del instrumento y hacia un detector. El resto no puede ser confinado en el plano  $xy$  y es capturado por los electrodos. De manera similar se puede hacer esto con una trampa Paul. Como espectrómetros de masas se les han encontrado usos, por ejemplo, relacionados con detección de explosivos, en la detección de isótopos en una muestra del mismo átomo, la detección de contaminantes en muestras ambientales e incluso en la exploración espacial donde se incluyó un espectrómetro cuadrupolar en el Curiosity Mars Rover para el análisis de la atmósfera de marte.

### *Espectrometría*

Con las trampas se ha logrado hacer espectroscopía de alta resolución. Debido a que las velocidades de los iones confinados y enfriados son muy bajas, el ensanchamiento de sus líneas espectrales causado por el efecto Doppler se ve reducido al grado tener anchos de línea medidos cercanos al natural.

### *Estándares de frecuencia*

Ya se mencionó que debido a la baja velocidad de los iones confinados es posible hacer mediciones con mayor precisión. Mu-

chas de estas mediciones se logran debido a que las frecuencias se pueden medir con mucha precisión. Ejemplos son la medición de vidas medias de las transiciones energéticas o sus frecuencias de resonancia, de las cuales, algunas pueden ser utilizadas para desarrollar relojes atómicos.

#### Medición de constantes

Se han podido medir con gran precisión constantes de la naturaleza como el momento magnético del electrón y la constante de la estructura fina (Hanneke et al, 2010). Al igual que masas atómicas y nucleares.

#### Antimateria

Las trampas Penning son muy utilizadas para el confinamiento y estudio de partículas de antimateria como los positrones y antiprotones, al igual que la síntesis de átomos de anti hidrogeno (Baker et al, 2021).

#### Salto cuántico

En 1980 se logró confinar por primera vez un solo ion y así realizar experimentos con átomos individuales, en este caso, iones  $Ba^+$  (Neuhauser et al. 1980). Esto llevó en 1986 a la primera observación de los saltos cuánticos (Sauter et al. 1986), figura 6.

En un gas, la fluorescencia producida por los iones debida a un haz láser sintonizado a la frecuencia de absorción entre dos niveles  $|1\rangle$  y  $|2\rangle$  es el resultado de múltiples procesos de emisión espontánea ocurriendo simultáneamente cuando los electrones regresan al nivel inferior  $|1\rangle$ , de forma que es imposible observar directamente este proceso.

Con las trampas es posible observar este fenómeno físico con la fluorescencia proveniente de un solo ion. En este caso la fluorescencia disminuye o “se apaga” cuando

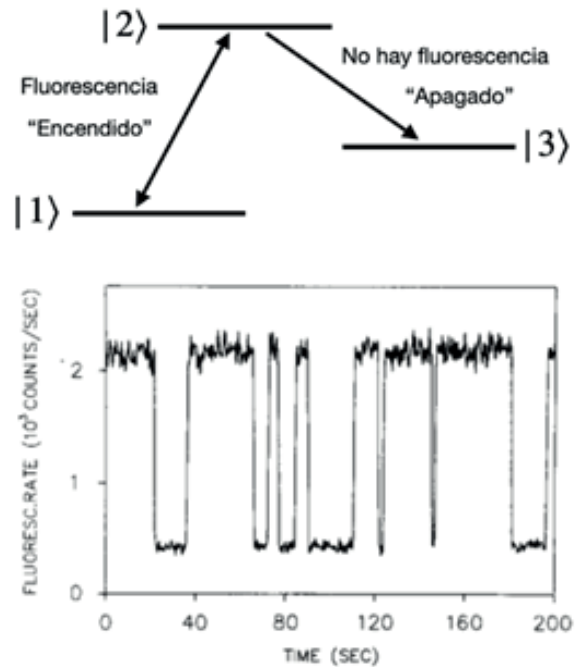


Figura 6. Saltos cuánticos (Sauter et al. 1986).

el electrón realiza una transición del nivel  $|2\rangle$ , con una cierta probabilidad de ocurrencia, a un nivel intermedio  $|3\rangle$ , donde permanece un cierto tiempo hasta regresar al nivel  $|1\rangle$  y continuar con el proceso de fluorescencia, que es cuando se “enciende” de nuevo. Estos brincos en la intensidad son evidencia del proceso que se conoce como salto cuántico.

#### Cristales iónicos

Las trampas también se han utilizado para formar lo que se conocen como cristales iónicos o de Coulomb. Estas estructuras resultan cuando en el proceso de enfriamiento se llega a un punto donde la energía térmica de los iones es menor a su energía de interacción coulombiana y toman posiciones fijas respecto de los otros. Los cristales pueden contener desde unos pocos a cientos de iones en estructuras lineales, como el caso de la figura 7, en un plano e incluso en estructuras tridimensionales.

### Computación cuántica

La computación cuántica ha sido un tema de mucho interés en los últimos años debido a su carácter revolucionario y las trampas iónicas han tomado su lugar en el desarrollo de estas tecnologías. En particular, las trampas lineales proporcionan las condiciones necesarias para realizar las operaciones básicas de una computadora cuántica, donde los iones confinados son utilizados como las unidades básicas de información o qbits. En las trampas lineales se hicieron las primeras demostraciones de operaciones lógicas con iones. En la actualidad se han rediseñado las trampas para construir las a pequeñas escalas y conseguir arreglos de qbits para realizar procesos computacionales.

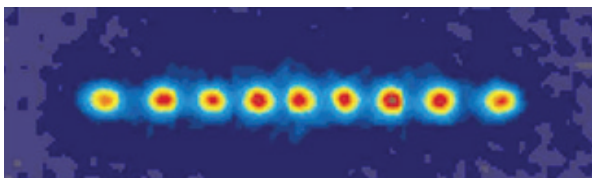


Figura 7. Átomos de  $\text{Ca}^+$  confinados en una trampa Paul lineal (Nägerl et al, 1998).

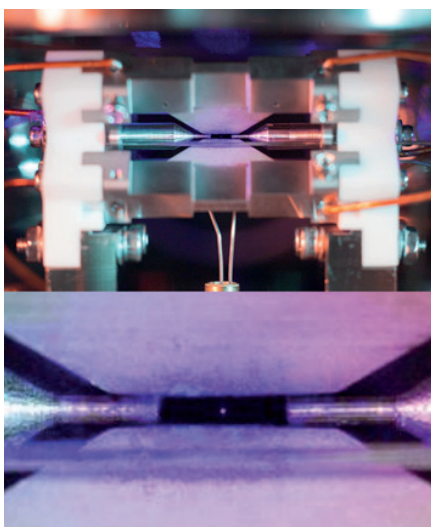


Figura 8. Un ion confinado en una trampa lineal. (David Nadlinger, universidad de Oxford).

### Conclusión

Desde su invención a la actualidad se han diseñado y construido muchos tipos diferentes de trampas iónicas, ya sea por su geometría, tamaño o la forma de confinar. La figura 8 muestra la variación a una trampa lineal donde se logró confinar un solo ion. Otros cambios son derivados de la necesidad de simplificar su construcción, como el caso de la trampa cilíndrica o las trampas planares; o por requerimientos de los tipos de experimentos como las micro trampas utilizadas para computación cuántica (Auchter et al, 2022). Esta continua evolución tanto en su diseño como en los usos y aplicaciones que se les puede dar es donde encontramos la importancia de estas herramientas que han aportado mucho al avance de la ciencia desde su invención hace poco más de medio siglo, y por ello, sus creadores recibieron el premio nobel de física en 1989.

### Referencias

- Auchter, S., et al. Industrially microfabricated ion trap with 1 eV trap depth. *Quantum Sci. Technol.*, 7, 035015. 2022.
- Baker, C. J., et al, Sympathetic cooling of positrons to cryogenic temperatures for antihydrogen production. *Nature Communications* 12, 6139. 2021.
- Blaum, K., Novikov, Y. N. y Werth, G., Penning traps as a versatile tool for precise experiments in fundamental physics. *Contemporary physics*, 51 (2). 2010.
- Hanneke, D., Fogwell, S. y Gabrielse, G., New Measurement of the Electron Magnetic Moment and the Fine Structure Constant. *Phys. Rev. Lett.* 100, 120801. 2008.
- March, R. E., Quadrupole ion traps. *Mass Spectrom. Rev.*, 28, 961– 989. 2009.



Nägerl, H. C., Bechter, W., Eschner, J., Schmidt-Kaler, F., Blatt, R., Ion strings for quantum gates. *Appl. Phys. B* 66, 603–608. 1998.

Neuhauser, N., Hohenstatt, M., Toschek, P. E. y Dehmelt, H., Localized visible  $\text{Ba}^+$  mono-ion oscillator. *Physical Review A*, 22(3),1137. 1980.

Paul, W. Electromagnetic traps for charged and neutral particles. *Reviews of modern physics*, Vol. 62, No. 3. 1990.

Wineland, D., Drullinger, R. E. y Walls, F. L., Radiation pressure cooling of bound resonant absorbers, *Phys. Rev. Lett.*, 40, 1639. 1978.

Sauter, T. H., Blatt, R., Neuhauser, W. y Toschek, P. E., Quantum jumps observed in the fluorescence of a single ion. *Optics Communications*, 60(5):287–292. 1986.