



# Estudio sobre partículas atrapadas

**Integrantes:** Eduardo Escudero **Fecha:** 4 de julio de 2024

---

## Resumen

En el presente proyecto se buscará crear un repositorio de información sobre partículas atrapadas, partiendo por el estudio teórico para darle un enfoque experimental, generando un camino y una vía de fácil estudio. Para estos tópicos de la Física contemporánea.

## Objetivos de trabajo

### Objetivo general

El objetivo de este repositorio/bitácora es generar el conocimiento necesario para poder empezar o ser de utilidad dentro de un laboratorio de física experimental, principalmente los tópicos van a ser centrados en física de partículas atrapadas. Dado mi propio interés como editor, pero con vistas a un público general de física experimental.

## Proyectos y explicaciones

Lo que buscaría es poder tener diferentes proyectos y poder ir agregándolos poco a poco aquí de manera sirvan como guía de estudio para la gente que este interesada en seguir este campo de estudio.

### "Trampa Paul."ó "Paul Trap"

En este primer proyecto vamos a estudiar la trampa de Paul, la cual consiste básicamente en la manera más común de atrapar átomos o más específicamente iones el principio es bastante básico, dado la existencia de las cargas en un ión este puede ser encapsulado por gradientes eléctricos al generar un punto de menor energía, esto va a permitir que

1. Estudiar principios físicos de la trampa de Paul
2. Estudiar modelos actuales de la trampa de Paul
3. Crear una simulación de una trampa de Paul funcional

### Metodología

Para demostrar como cumplidos estos objetivos lo que vamos a buscar demostrar es poder encontrar los modos normales y las situaciones de equilibrio para 1, 2 y 3 iones atrapados. Los primero de manera analítica y la última de manera numérica. Finalmente compararemos estos dos resultados para poder calcular el margen de nuestra simulación y de nuestros cálculos.

El método de para poder hacer el cálculo numérico que se hará será Runge Kutta, el cuál es un método destinado a poder calcular sistemas de ecuaciones diferenciales lo cual es especialmente útil en la resolución de problemas matemáticos [1], es conocido por ser un método lineal de un paso, lo que significa que solo necesita un punto para empezar a crear una estimación.

Lo que se espera ver durante nuestro estudio es que existan modos normales, equivalentes a sistemas acoplados por lo que finalmente en el modelo de 2 iones encontraremos 2 modos normales por cada orden de libertad, para el modelo de 3 iones encontraremos 3 modos por cada orden. Así como se puede apreciar en la figura 1 donde podemos ver los modos que deberíamos encontrar en los tres objetivos impuestos y buscaremos cuales son las condiciones necesarias para que esto se cumpla.

### Principios de la "Trampa de Paul"ó "Paul Trap"

Primero que nada Wolfgang Paul es uno de los investigadores principales de el descubrimiento de la trampa de Paul, es por ello que esta lleva su nombre. La cuál consiste en una trampa cuadrupolar la cuál fue acreedora del premio nobel de física en 1989.[3]

Para poder entender como funciona la trampa de Paul debemos entender como es la física entre átomos atrapados, lo que se sabe es que independientemente de que los átomos no presenten alguna carga predominante o iones estos presentan

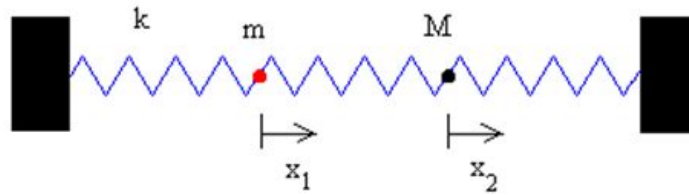


Figura 1: Sistema de resortes acoplados, sus modos normales y sus puntos de equilibrio como hipótesis a encontrar en el comportamiento de "Paul Trap" ó "Trampa de Paul"

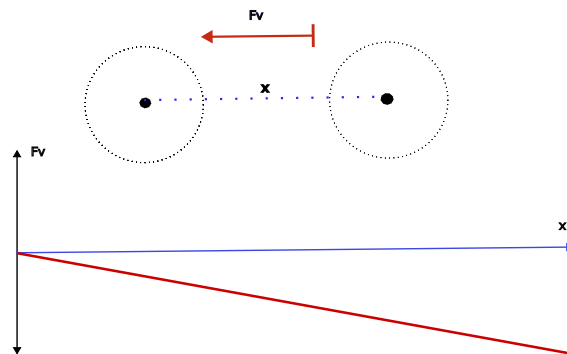


Figura 2: el gráfico indica que a medida que los átomos se alejan la fuerza vinculante va a tender al crecimiento, con ciertos límites debido a la propia repulsión de los mismos.

interacciones más débiles por lo que se puede decir que en partículas atrapadas va a existir una fuerza vinculante ( $F_{vin}$ ) que va a mantener unidos hasta cierto punto a los átomos la cuál crece con la distancia.  $F_{vin} = -cr$

Dado este comportamiento lineal de la fuerza vinculante podemos gracias a la relación de campos conservativos con los potenciales y la fuerza(1) que el potencial( $\phi$ ) de esta fuerza vinculante va a adoptar una forma aproximativa(2) a una parábola cuadrática. La cual trabajando con las simetrías podemos adoptar la expresión(3) donde  $m$  es el número de polos o órdenes de simetría de el potencial dado

$$F(x) = -\frac{dU(x)}{dx} = \frac{d\phi}{dx} \quad (1)$$

$$\phi \approx \alpha x^2 + \beta y^2 + \gamma z^2 \quad (2)$$

$$\phi = r^{m/2} \cos m/2\phi \quad (3)$$

$$(4)$$

### Atrapando partículas cargadas en 2 y 3 dimensiones

Teniendo ya un idea de como nuestros átomos van a actuar podemos pasar a entender de mejor manera como funciona la trampa de átomos planteada por Paul la cuál esta pensada principalmente en el uso de iones.

Entonces ahora lo que queremos construir son barreras de potenciales las cuales nos van a servir como las paredes de un vaso para mantener al interior al átomo y es aquí donde entra estos campos cuadrupolares, el cuál para nuestra geometría va a estar representado con la ecuación (??) la cuál va a estar generada por un potencial inicial( $\phi$ ), generado por una f.e.m (fuente electro motriz) y va a variar dependiendo de la cercanía de los electrodos ( $r_0$ ).

$$\phi = \frac{\phi_0}{r_0^2}(\alpha x^2 + \beta y^2 + \gamma z^2) \quad (5)$$

Ahora este es el comportamiento que queremos que cumple pero cuáles son las condiciones para que esto se cumpla?, para debemos recurrir a técnicas matemáticas en este caso, al tender a una forma circular dado (3) optamos por usar la ecuación de Laplace  $\Delta\phi = 0$  la cuál va a imponer que  $\alpha + \beta + \gamma = 0$  la cuál tiene dos soluciones simples que nos interesan



- $\alpha = 1 = -\gamma, \beta = 0$  lo que significa que sería un campo bidimensional ya que una de las componentes es 0 (7)
- $\alpha = \beta, \gamma = -2$  generando una configuración tridimensional, que puede ser reescrita en coordenadas cilíndricas con la condición de  $2z_0^0 = r_0$  (6)

$$\phi = \frac{\phi^0(r^2 - 2z^2)}{r_0^2 + 2z_0^2} \quad 2z_0^2 = r_0^2 \quad (6)$$

$$\phi = \frac{\phi_0}{2r_0^2}(x^2 - z^2) \quad (7)$$

## Referencias

- [1] [https://www.mathstools.com/section/main/Metodos\\_de\\_Runge\\_Kutta?lang=es](https://www.mathstools.com/section/main/Metodos_de_Runge_Kutta?lang=es)
- [2] Prof. Dr. Wolfgang Paul (1990). Electromagnetic Traps for Charged and Neutral Particles (Nobel Lecture). , 29(7), 739–748. doi:10.1002/anie.199007391
- [3] <https://pubs.aip.org/physicstoday/Online/5813/Wolfgang-Paul>