

El Vacío en la Física

Adolfo Huet

Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Querétaro

11 de agosto del 2016

Contenido

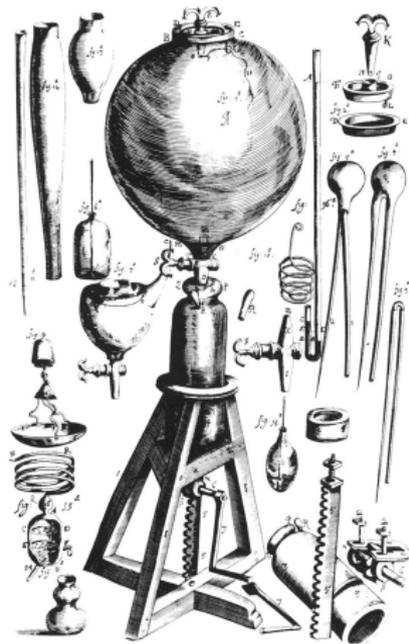
- 1 El Vacío en el Siglo XVII
- 2 La Teoría Cuántica y El Vacío
- 3 Retos Actuales

El Vacío

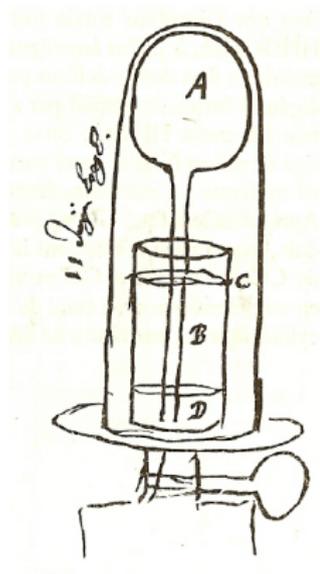


- Hoy en día el vacío es un concepto común, pero en el Siglo XVII esto no era así.

La Bomba de Vacío de Boyle



El Tubo de Torricelli y la Cohesión



¿Qué quedaba dentro de la Cámara?



- Nada, solo es un espacio vacío (Boyle).



- Un fluido etereo (Hobbes).

¿Qué quedaba dentro de la Cámara?



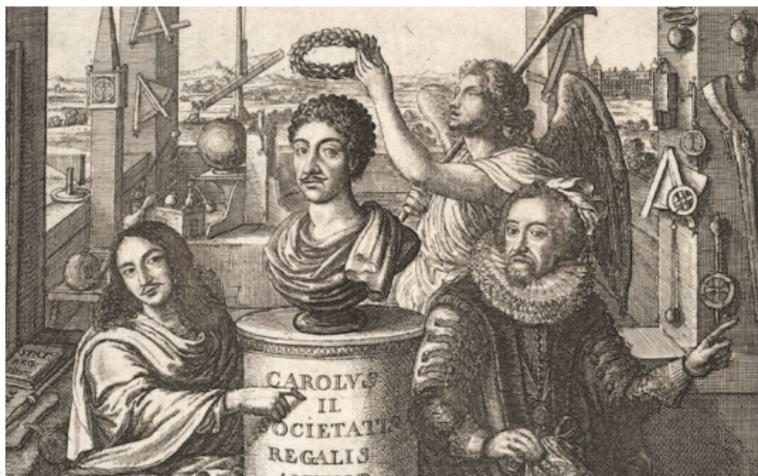
- Nada, solo es un espacio vacío (Boyle).



- Un fluido etereo (Hobbes).

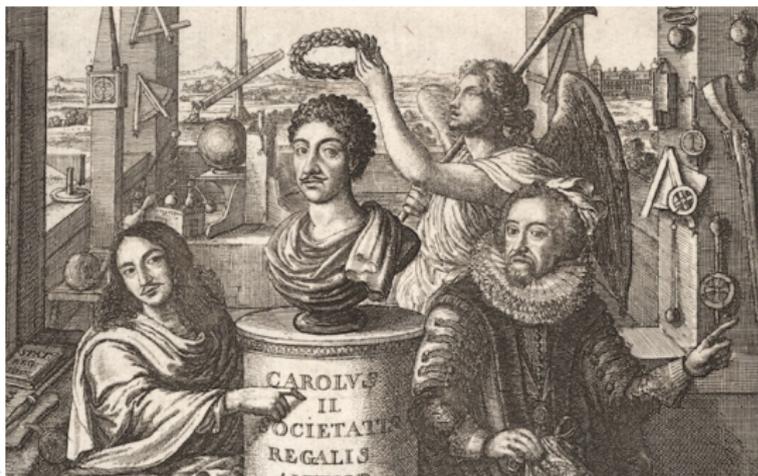
La Royal Society

- La Primera Regla de la Royal Society: Habla solo de lo que puedas demostrar.
- La Segunda Regla de la Royal Society: Habla solo de lo que puedas demostrar.

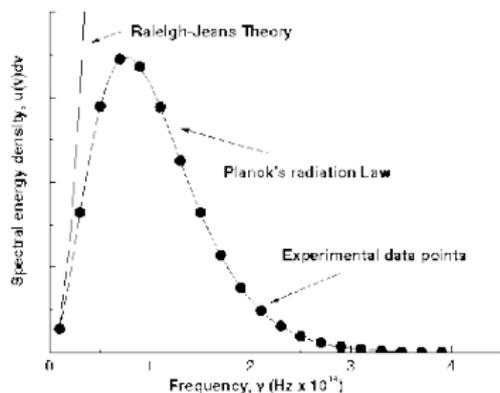
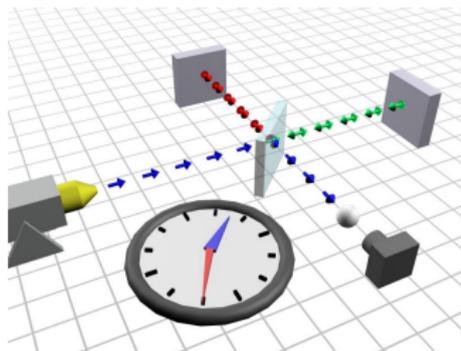


La Royal Society

- La Primera Regla de la Royal Society: Habla solo de lo que puedas demostrar.
- La Segunda Regla de la Royal Society: Habla solo de lo que puedas demostrar.

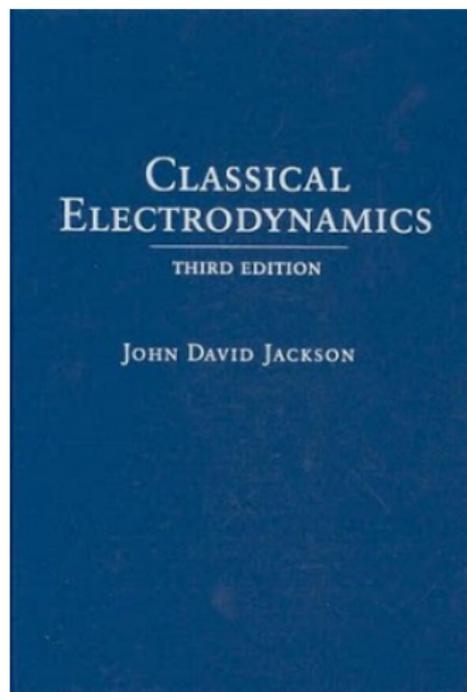


La Física asume una Forma Moderna



- Las revoluciones en la Física al final del siglo XIX se construyeron sobre *resultados experimentales*.
- El problema del vacío detonó la transformación de La Física en una ciencia fundamentalmente experimental.

Los Límites de la Electrodinámica Clásica



- $\mathcal{L}_{Maxwell} = \frac{1}{8\pi}(\vec{E}^2 - \vec{B}^2)$
- $\implies \nabla \cdot \vec{E} = 0,$
 $\nabla \times \vec{B} - \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = 0,$
 $\nabla \times \vec{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0,$
 $\nabla \cdot \vec{B} = 0.$

El Campo Electromagnético y el Vacío Cuántico

- En 1936 Euler, Heisenberg y Weisskopf estudian el corrimiento de los espectros de energía de las ecuaciones de Dirac y Klein-Gordon.



Heisenberg



Euler



Weisskopf

El Vacío Cuántico Fluctúa

- El Vacío Cuántico fluctúa creando pares electrón-positrón durante un intervalo de tiempo corto dado por:

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

- Esto tiene, por si mismo, consecuencias físicas notables.
- Además, los campos externos cambian el espectro de la ecuación de Dirac. Por ejemplo para un campo magnético (Niveles de Landau) tenemos una corrección en los niveles para los pares virtuales:

$$\Delta E_n = (2n + 1)B \mp B$$

El Vacío Cuántico Fluctúa

- El Vacío Cuántico fluctúa creando pares electrón-positrón durante un intervalo de tiempo corto dado por:

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

- Esto tiene, por si mismo, consecuencias físicas notables.
- Además, los campos externos cambian el espectro de la ecuación de Dirac. Por ejemplo para un campo magnético (Niveles de Landau) tenemos una corrección en los niveles para los pares virtuales:

$$\Delta E_n = (2n + 1)B \mp B$$

El Vacío Cuántico Fluctúa

- El Vacío Cuántico fluctúa creando pares electrón-positrón durante un intervalo de tiempo corto dado por:

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

- Esto tiene, por si mismo, consecuencias físicas notables.
- Además, los campos externos cambien el espectro de la ecuación de Dirac. Por ejemplo para un campo magnético (Niveles de Landau) tenemos una corrección en los niveles para los pares virtuales:

$$\Delta E_n = (2n + 1)B \mp B$$

El Vacío Cuántico Fluctúa

- El Vacío Cuántico fluctúa creando pares electrón-positrón durante un intervalo de tiempo corto dado por:

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

- Esto tiene, por si mismo, consecuencias físicas notables.
- Además, los campos externos cambien el espectro de la ecuación de Dirac. Por ejemplo para un campo magnético (Niveles de Landau) tenemos una corrección en los niveles para los pares virtuales:

$$\Delta E_n = (2n + 1)B \mp B$$

El Lagrangiano de Euler-Heisenberg

- Entonces el cambio en el espectro afecta a estos pares y modifica el Lagrangiano de Maxwell.

$$\mathcal{L}_{\text{eff}} = \mathcal{L}_{\text{Maxwell}} + \frac{2(\hbar/mc)^3}{45mc^2} \left(\frac{e^2}{4\pi\hbar c} \right)^2 [(\vec{E}^2 - \vec{B}^2)^2 + 7(\vec{E} \cdot \vec{B})^2] + \dots$$

- La corrección es un efecto cuántico-relativista.
- La corrección es no-lineal.
- La corrección es usualmente pequeña.

El Lagrangiano de Euler-Heisenberg

- Entonces el cambio en el espectro afecta a estos pares y modifica el Lagrangiano de Maxwell.

$$\mathcal{L}_{\text{eff}} = \mathcal{L}_{\text{Maxwell}} + \frac{2(\hbar/mc)^3}{45mc^2} \left(\frac{e^2}{4\pi\hbar c} \right)^2 [(\vec{E}^2 - \vec{B}^2)^2 + 7(\vec{E} \cdot \vec{B})^2] + \dots$$

- La corrección es un efecto cuántico-relativista.
- La corrección es no-lineal.
- La corrección es usualmente pequeña.

El Lagrangiano de Euler-Heisenberg

- Entonces el cambio en el espectro afecta a estos pares y modifica el Lagrangiano de Maxwell.

$$\mathcal{L}_{\text{eff}} = \mathcal{L}_{\text{Maxwell}} + \frac{2(\hbar/mc)^3}{45mc^2} \left(\frac{e^2}{4\pi\hbar c} \right)^2 [(\vec{E}^2 - \vec{B}^2)^2 + 7(\vec{E} \cdot \vec{B})^2] + \dots$$

- La corrección es un efecto cuántico-relativista.
- La corrección es no-lineal.
- La corrección es usualmente pequeña.

El Lagrangiano de Euler-Heisenberg

- Entonces el cambio en el espectro afecta a estos pares y modifica el Lagrangiano de Maxwell.

$$\mathcal{L}_{\text{eff}} = \mathcal{L}_{\text{Maxwell}} + \frac{2(\hbar/mc)^3}{45mc^2} \left(\frac{e^2}{4\pi\hbar c} \right)^2 [(\vec{E}^2 - \vec{B}^2)^2 + 7(\vec{E} \cdot \vec{B})^2] + \dots$$

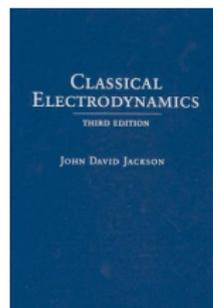
- La corrección es un efecto cuántico-relativista.
- La corrección es no-lineal.
- La corrección es usualmente pequeña.

¿Consecuencias Físicas?

Algunas de ellas:

- Cambios en el Potencial de Coulomb a escala atómica.
- Dispersión de luz por luz.
- Emisión espontánea.
- Birefringencia del vacío.
- Producción de pares de Schwinger.
- Fuerzas de Casimir.

Cambios en el Potencial de Coulomb

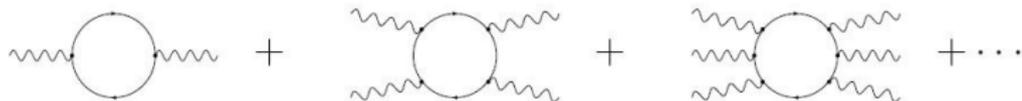


Página 12: "Vacuum polarization is manifest by a modification of the interaction between charges at short distances, described as screening of the *bare* charges with distance, or..."

$$\Delta V(r) = \hbar c \frac{Z_1 Z_2 \alpha}{r} \left[1 + \frac{2\alpha}{3\pi} \int_{2m}^{\infty} dk \frac{\sqrt{k^2 - 4m^2}}{k^2} \left(1 + \frac{2m^2}{k^2} \right) e^{-kr} \right]$$

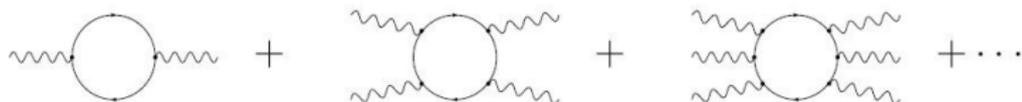
Dispersión de Luz por Luz

- La serie perturbativa del Lagrangiano Efectivo:



Dispersión de Luz por Luz

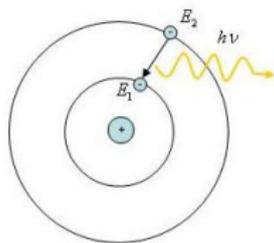
- La serie perturbativa del Lagrangiano Efectivo:



¿Aplicaciones?



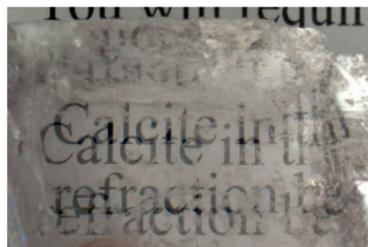
¿Porqué ocurre la Emisión Espontánea?



Welton 1948: "[Spontaneous emission] can be thought of as forced emission taking place under the action of the fluctuating field."

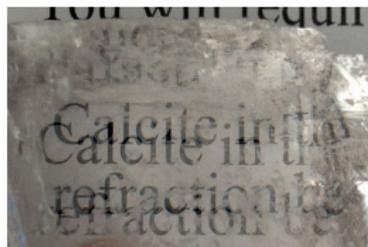
Sin embargo, la emisión espontánea también se ha estudiado desde otro punto de vista.

Birefringencia del Vacío



- Significa que un rayo de luz se refracta en distintas direcciones, por sus componentes polarización (ocurre en cristales).
- El Lagrangiano de Euler-Heisenberg predice que el vacío vuelve birefringente bajo un campo magnético constante suficientemente fuerte.

Birefringencia del Vacío



- Significa que un rayo de luz se refracta en distintas direcciones, por sus componentes polarización (ocurre en cristales).
- El Lagrangiano de Euler-Heisenberg predice que el vacío vuelve birefringente bajo un campo magnético constante suficientemente fuerte.

Producción de Pares de Schwinger

El lagrangiano de Euler-Heisenberg es para un campo eléctrico constante es:

$$\mathcal{L}_{\text{EH}}(E) = -\frac{1}{16\pi^2} \int_0^\infty \frac{dT}{T^3} e^{-m^2 T} \left\{ \frac{TeE}{\sin(TeE)} - 1 - \frac{(TeE)^2}{6} \right\}$$

- Esta expresión tiene una *parte imaginaria*.
- Esto significa que *el vacío se vuelve inestable* bajo campos eléctricos suficientemente fuertes.

Producción de Pares de Schwinger

El lagrangiano de Euler-Heisenberg es para un campo eléctrico constante es:

$$\mathcal{L}_{\text{EH}}(E) = -\frac{1}{16\pi^2} \int_0^\infty \frac{dT}{T^3} e^{-m^2 T} \left\{ \frac{TeE}{\sin(TeE)} - 1 - \frac{(TeE)^2}{6} \right\}$$

- Esta expresión tiene una *parte imaginaria*.
- Esto significa que *el vacío se vuelve inestable* bajo campos eléctricos suficientemente fuertes.

Producción de Pares de Schwinger

El lagrangiano de Euler-Heisenberg es para un campo eléctrico constante es:

$$\mathcal{L}_{\text{EH}}(E) = -\frac{1}{16\pi^2} \int_0^\infty \frac{dT}{T^3} e^{-m^2 T} \left\{ \frac{TeE}{\sin(TeE)} - 1 - \frac{(TeE)^2}{6} \right\}$$

- Esta expresión tiene una *parte imaginaria*.
- Esto significa que *el vacío se vuelve inestable* bajo campos eléctricos suficientemente fuertes.

Producción de Pares de Schwinger

- La parte imaginaria de la Acción Efectiva se obtiene a partir de los polos del integrando y nos da la *razón de producción de pares*:

$$\text{Im}\Gamma^1 = \frac{V}{16\pi} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \left(\frac{eE}{k\pi}\right)^2 e^{-m^2 \frac{k\pi}{eE}}$$

- El primer término es dominante:

$$\text{Im}\Gamma^1 \approx -\frac{V}{16\pi^3} (eE)^2 e^{-m^2 \frac{\pi}{eE}}$$

- ¡La razón de producción es detectable solo a intensidades del orden $\mathcal{O}(10^{19} \text{ V/m})$!

Producción de Pares de Schwinger

- La parte imaginaria de la Acción Efectiva se obtiene a partir de los polos del integrando y nos da la *razón de producción de pares*:

$$\text{Im}\Gamma^1 = \frac{V}{16\pi} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \left(\frac{eE}{k\pi}\right)^2 e^{-m^2 \frac{k\pi}{eE}}$$

- El primer término es dominante:

$$\text{Im}\Gamma^1 \approx -\frac{V}{16\pi^3} (eE)^2 e^{-m^2 \frac{\pi}{eE}}$$

- ¡La razón de producción es detectable solo a intensidades del orden $\mathcal{O}(10^{19} \text{ V/m})$!

Producción de Pares de Schwinger

- La parte imaginaria de la Acción Efectiva se obtiene a partir de los polos del integrando y nos da la *razón de producción de pares*:

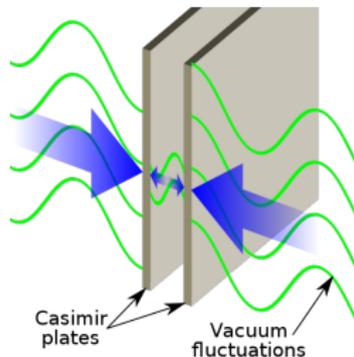
$$\text{Im}\Gamma^1 = \frac{V}{16\pi} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \left(\frac{eE}{k\pi}\right)^2 e^{-m^2 \frac{k\pi}{eE}}$$

- El primer término es dominante:

$$\text{Im}\Gamma^1 \approx -\frac{V}{16\pi^3} (eE)^2 e^{-m^2 \frac{\pi}{eE}}$$

- ¡La razón de producción es detectable solo a intensidades del orden $\mathcal{O}(10^{19} V/m)$!

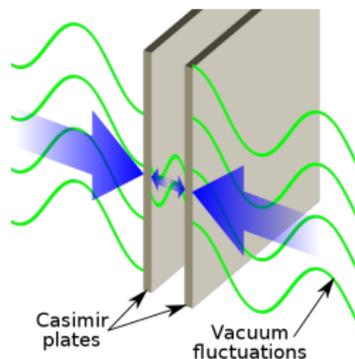
Fuerzas de Casimir



- Consideramos la energía total de las *fluctuaciones del vacío* tomando en cuenta las regiones dentro y fuera de las placas.

- Se obtiene $\frac{F_c}{A} = -\frac{\hbar c \pi^2}{240 a^4}$.

Fuerzas de Casimir



- Consideramos la energía total de las *fluctuaciones del vacío* tomando en cuenta las regiones dentro y fuera de las placas.
- Se obtiene $\frac{F_c}{A} = -\frac{\hbar c \pi^2}{240 a^4}$.

Fuerzas de Casimir

- La fuerza de Casimir fue medida experimentalmente en 1997 por Lamoreaux.
- La fuerza de Casimir decae rápidamente con la distancia pero a distancias del orden de 10nm es comparable al efecto de una atmósfera.
- ¡Hay controversia sobre el vacío Siglo XXI! En 2005, Jaffe presentó cálculos de éste efecto desde otro punto de vista: "Casimir effects can be formulated and Casimir forces can be computed without reference to zero-point energies. They are relativistic, quantum forces between charges and currents..."

Fuerzas de Casimir

- La fuerza de Casimir fue medida experimentalmente en 1997 por Lamoreaux.
- La fuerza de Casimir decae rápidamente con la distancia pero a distancias del orden de 10nm es comparable al efecto de una atmósfera.
- ¡Hay controversia sobre el vacío Siglo XXI! En 2005, Jaffe presentó cálculos de éste efecto desde otro punto de vista: "Casimir effects can be formulated and Casimir forces can be computed without reference to zero-point energies. They are relativistic, quantum forces between charges and currents..."

Fuerzas de Casimir

- La fuerza de Casimir fue medida experimentalmente en 1997 por Lamoreaux.
- La fuerza de Casimir decae rápidamente con la distancia pero a distancias del orden de 10nm es comparable al efecto de una atmósfera.
- ¡Hay controversia sobre el vacío Siglo XXI! En 2005, Jaffe presentó cálculos de éste efecto desde otro punto de vista: "Casimir effects can be formulated and Casimir forces can be computed without reference to zero-point energies. They are relativistic, quantum forces between charges and currents..."

Algunos Retos para la Teoría

- Calcular la acción efectiva en un campo de fondo dado es un problema complejo. Los campos de fondo que corresponden a situaciones realistas presentan un gran reto.
- Las Fuerzas de Casimir siguen siendo difíciles de calcular salvo para situaciones sencillas.
- Nuevos planteamientos como el formalismo *Worldline* están permitiendo nuevos avances en estos campos.

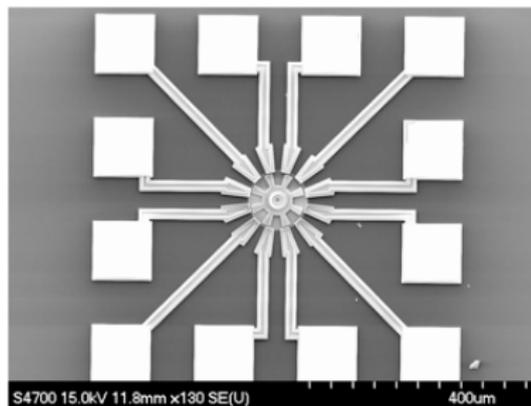
Algunos Retos para la Física Experimental

- El experimento PVLAS (Italia) está dedicado al estudio de la Birefringencia del Vacío.



Algunos Retos para la Física Experimental

- Actualmente el diseño de MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems) y otros nano-dispositivos esta facilitando el estudio experimental de las Fuerzas de Casimir.



Resumen

- Hay muchos fenómenos físicos muy interesantes en torno al vacío.
- Aún existe controversia sobre el significado e implicaciones de las fluctuaciones del vacío.
- El estudio de los fenómenos físicos en torno al vacío ha motivado y seguirá motivando avances fundamentales tanto en la física teórica como en la experimental.

Gracias

Resumen

- Hay muchos fenómenos físicos muy interesantes en torno al vacío.
- Aún existe controversia sobre el significado e implicaciones de las fluctuaciones del vacío.
- El estudio de los fenómenos físicos en torno al vacío ha motivado y seguirá motivando avances fundamentales tanto en la física teórica como en la experimental.

Gracias

Resumen

- Hay muchos fenómenos físicos muy interesantes en torno al vacío.
- Aún existe controversia sobre el significado e implicaciones de las fluctuaciones del vacío.
- El estudio de los fenómenos físicos en torno al vacío ha motivado y seguirá motivando avances fundamentales tanto en la física teórica como en la experimental.

Gracias

Resumen

- Hay muchos fenómenos físicos muy interesantes en torno al vacío.
- Aún existe controversia sobre el significado e implicaciones de las fluctuaciones del vacío.
- El estudio de los fenómenos físicos en torno al vacío ha motivado y seguirá motivando avances fundamentales tanto en la física teórica como en la experimental.

Gracias