Cuando el Universo crea materia

Silvia Pla García

Technical University of Munich (TUM).

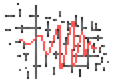
Xornadas de Ciencias no Rural

¿Quién soy?

Me llamo **Silvia Pla García.**

Soy de **Carcaixent**, un pueblo pequeño de la provincia de Valencia.

Trabajo como investigadora asociada en la Universidad Técnica de Múnich.

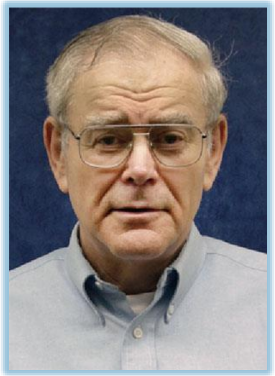
Investigo en física de las altas energías y cosmología  .

¿Por qué esta charla?

El fenómeno del que voy a hablar hoy es fundamental en física.

Es necesario para entender los aspectos *cuánticos* de la teoría inflacionaria y la radiación de Hawking.

No obstante, se sabe muy poco de su descubridor, **Leonard Parker**.



Leonard Parker

Su tesis fue defendida en **1966**, bajo la supervisión de Sidney Coleman.

Su trabajo estableció las **bases conceptuales y matemáticas** de muchos trabajos posteriores.

Fue rápidamente reconocido por grupos de investigación importantes en Moscú y Cambridge. Pero a día de hoy, su nombre es desconocido para muchos expertos.

The Creation of Particles in an Expanding Universe

A thesis presented

by

Leonard Emanuel Parker

to

The Department of Physics

in partial fulfillment of the requirements
for the degree of
Doctor of Philosophy
in the subject of
Theoretical Physics

Harvard University
Cambridge, Massachusetts
September, 1966

The Creation of Particles in an Expanding Universe

A thesis presented

by

Leonard Emanuel Parker

to

The Department of Physics

in partial fulfillment of the requirements
for the degree of
Doctor of Philosophy
in the subject of
Theoretical Physics

Harvard University
Cambridge, Massachusetts
September, 1966

Copyright reserved by the author.

have the boundary condition

$$F^{(a,d)}_{(\vec{p},\vec{x},t)} = \frac{1}{(2\pi)^{3/2}} \sqrt{\frac{\mu}{\omega(\vec{p},t)}}\, u^{(a,d)}_{(\vec{p},t)}\, e^{ia(\vec{p}\cdot\vec{x} - \int_{t_0}^{t}\omega(p,t')dt')} \quad , \quad (t \le t_1) \tag{27}$$

It follows that, in general, we may let

$$F^{(a,d)}_{(\vec{p},\vec{x},t)} = e^{ia\vec{p}\cdot\vec{x}} E^{(a,d)}_{(\vec{p},t)} \quad , \tag{28}$$

where $E^{(a,d)}_{(\vec{p},t)}$ satisfies the equation

$$\left\{ \gamma^0 \frac{d}{dt} + i a R(t)^{-1} \vec{\gamma}\cdot\vec{p} \right\} E^{(a,d)}_{(\vec{p},t)} = -\mu E^{(a,d)}_{(\vec{p},t)} \quad .$$

Multiplying on the left by $\gamma^4 = i\gamma^0$, we obtain

$$i \frac{d}{dt} E^{(a,d)}_{(\vec{p},t)} = \left\{ a R(t)^{-1} \vec{\alpha}\cdot\vec{p} + \mu\beta \right\} E^{(a,d)}_{(\vec{p},t)} \quad , \tag{29}$$

where $\vec{\alpha}$ and β are the usual Dirac matrices,

$$\vec{\alpha} = i\gamma^4\vec{\gamma} \quad , \quad \beta = \gamma^4 \quad .$$

As a consequence of eqs. (28) and (27), when $t \le t_1$, $E^{(a,d)}_{(\vec{p},t)}$ is an eigenvector of $\sigma_{\vec{p}}$ with eigenvalue d. However, just as $\sigma_{\vec{p}}$ commutes with the usual Dirac Hamiltonian, it commutes with the time-displacement operator $\{ aR(t)^{-1}\vec{\alpha}\cdot\vec{p} + \mu\beta \}$. Therefore $E^{(a,d)}_{(\vec{p},t)}$ must be an

$$\eta(\vec{x},t) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2}} \int d^3p \sqrt{\frac{\mu}{\omega(p,t)}} \sum_{a,d} a_{(a,d)}(\vec{p},1) u^{(a,d)}(\vec{p},t) e^{ia(\vec{p}\cdot\vec{x} - \int_{t_0}^{t}\omega(p,t')dt')} \ , (t \le t_1) \ . \tag{25}$$

This evolves into

$$\eta(\vec{x},t) = \int d^3p \sum_{a,d} a_{(a,d)}(\vec{p},1) F^{(a,d)}(\vec{p},\vec{x},t) \ , \tag{26}$$

for $t \ge t_1$. Now

$$\{a_{(a,d)}(\vec{p},1)^\dagger, \eta(\vec{x},t)\} = F^{(a,d)}(\vec{p},\vec{x},t)$$

satisfies the same differential equation (6) as does $\eta(\vec{x},t)$, since $a_{(a,d)}(\vec{p},1)^\dagger$ is independent of t and $\vec{x}$. For $t \le t_1$, we have the boundary condition

$$F^{(a,d)}(\vec{p},\vec{x},t) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2}} \sqrt{\frac{\mu}{\omega(p,t)}} u^{(a,d)}(\vec{p},t) e^{ia(\vec{p}\cdot\vec{x} - \int_{t_0}^{t}\omega(p,t')dt')} \ , (t \le t_1) \ . \tag{27}$$

It follows that, in general, we may let

$$F^{(a,d)}(\vec{p},\vec{x},t) = e^{ia\vec{p}\cdot\vec{x}} E^{(a,d)}(\vec{p},t) \ , \tag{28}$$

where $E^{(a,d)}(\vec{p},t)$ satisfies the equation

$$\left\{ \gamma^0 \frac{d}{dt} + iaR(t)^{-1}\vec{\gamma}\cdot\vec{p} \right\} E^{(a,d)}(\vec{p},t) = -\mu E^{(a,d)}(\vec{p},t) \ .$$

Multiplying on the left by $\gamma^4 = i\gamma^0$, we obtain

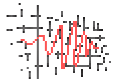
$$i\frac{d}{dt} E^{(a,d)}(\vec{p},t) = \{ aR(t)^{-1}\vec{\alpha}\cdot\vec{p} + \mu\beta \} E^{(a,d)}(\vec{p},t) \ , \tag{29}$$

where $\vec{\alpha}$ and β are the usual Dirac matrices,

$$\vec{\alpha} = i\gamma^4\vec{\gamma} \quad , \quad \beta = \gamma^4 \ .$$

As a consequence of eqs. (28) and (27), when $t \le t_1$, $E^{(a,d)}(\vec{p},t)$ is an eigenvector of $\sigma_{\vec{p}}$ with eigenvalue d. However, just as $\sigma_{\vec{p}}$ commutes with the usual Dirac Hamiltonian, it commutes with the time-displacement operator $\{aR(t)^{-1}\vec{\alpha}\cdot\vec{p} + \mu\beta\}$. Therefore, $E^{(a,d)}(\vec{p},t)$ must be an eigenvector of $\sigma_{\vec{p}}$ with eigenvalue d at all times. At any time t, $E^{(a,d)}(\vec{p},t)$ may thus be written as a linear combination of $u^{(a,d)}(\vec{p},t)$ and $u^{(-a,d)}(\vec{p},t)$. It

Objetivo de la charla

Entender qué significa que **el universo cree materia**  .

¿A qué me refiero con
el universo?

¿Y con **materia**?

¿Cómo puede el universo
crear materia?

¡Advertencia! ⚠

La charla va a tener un **enfoque teórico/conceptual**.

Es decir, me voy a centrar en explicar cómo modelamos y entendemos la realidad (mediante el uso de las matemáticas).

Esto es solo el primer paso. Un enfoque *multidisciplinar*, que incluya **fenomenología**, **observaciones** y **experimentos** es necesario.

Parte I

El universo

universo, sa

Artículo

Sinónimos o afines

Del lat. *universus.*

1. adj. **universal.**

   SIN.: **universal**, **ecuménico**.

2. m. **mundo** (‖ conjunto de todo lo existente).

   SIN.: **mundo**, **cosmos**, **orbe**, **globo**, **creación**, **naturaleza**.

3. m. Conjunto de individuos o elementos cualesquiera en los cuales se consideran una o más características que se someten a estudio estadístico.

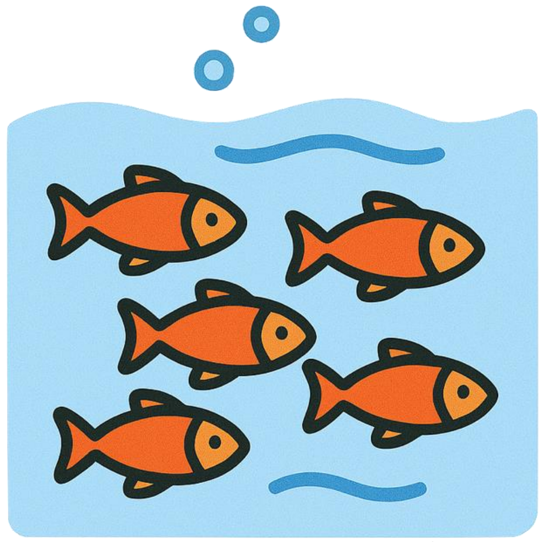
El contenido y el continente

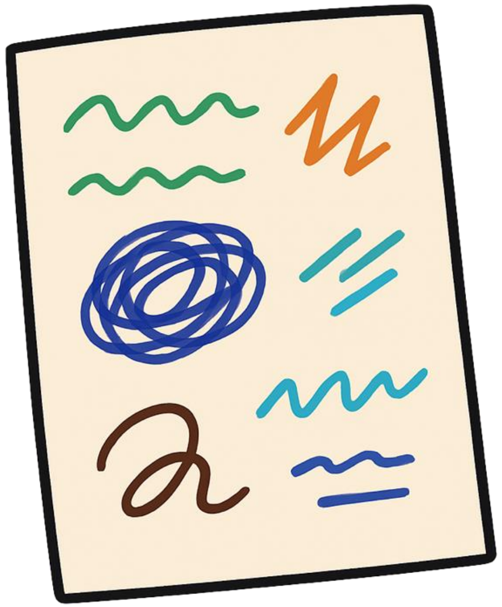
En física, solemos distinguir entre:

- **Contenido:** materia, radiación, partículas, etc.
- **Continente:** el “lugar” donde ocurre.

Es una herramienta que usamos para modelar sistemas físicos...

Algunos ejemplos.





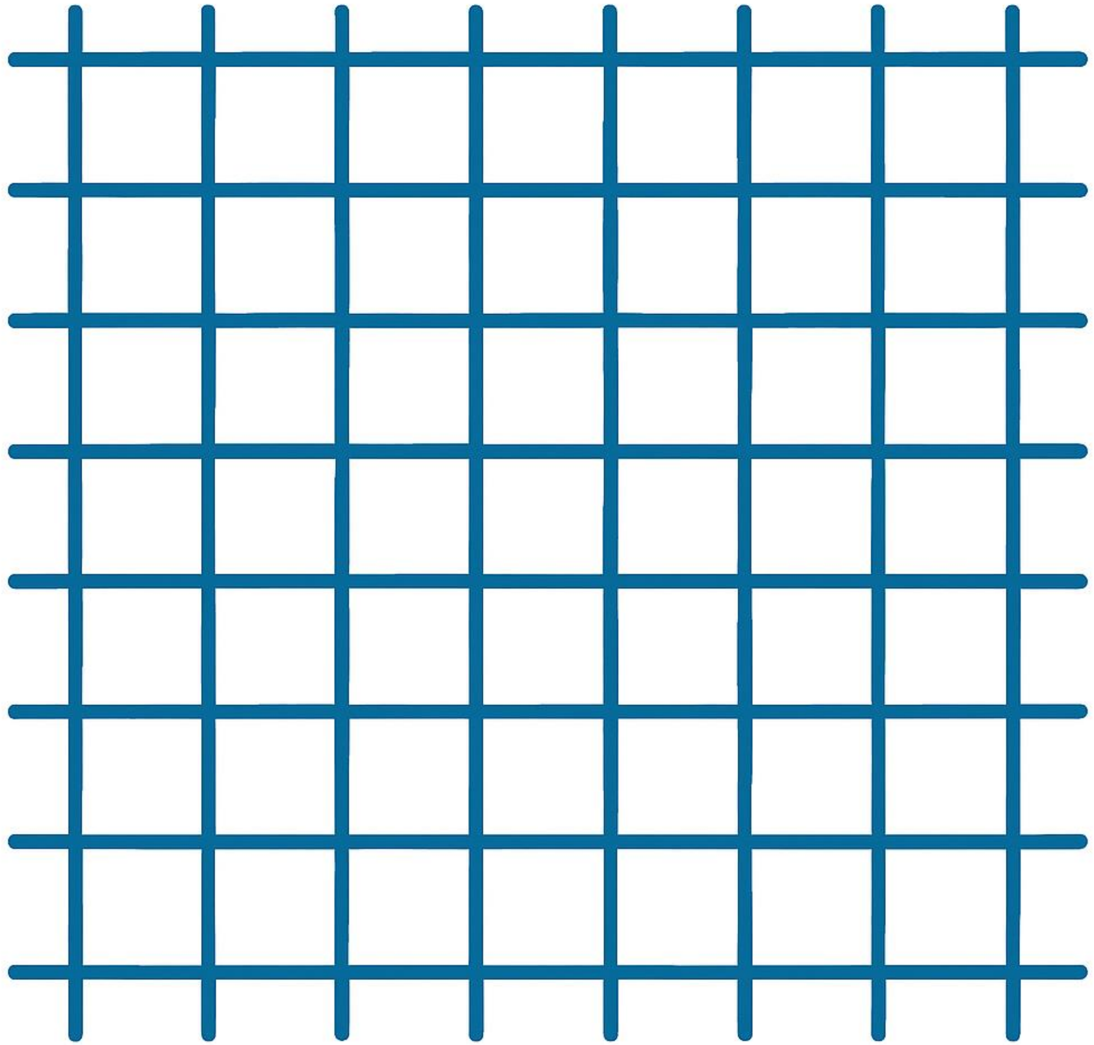
El contenido y el continente

El sistema **contenido/continente** depende del problema.

- En *cosmología*, el continente es el *espacio-tiempo* $\longrightarrow$ **el universo**.
- En otros contextos puede ser un medio material (como un fluido o un cristal).

El universo

En este sentido, toda la **materia** existente es *el contenido* y **el universo** es *el continente*.



Las ecuaciones de Einstein

Aunque el espacio-tiempo no sea algo tangible, tiene estructura y evoluciona.

Las ecuaciones de Einstein nos dicen cómo evoluciona *el continente* en función del *contenido*.

Analogía:

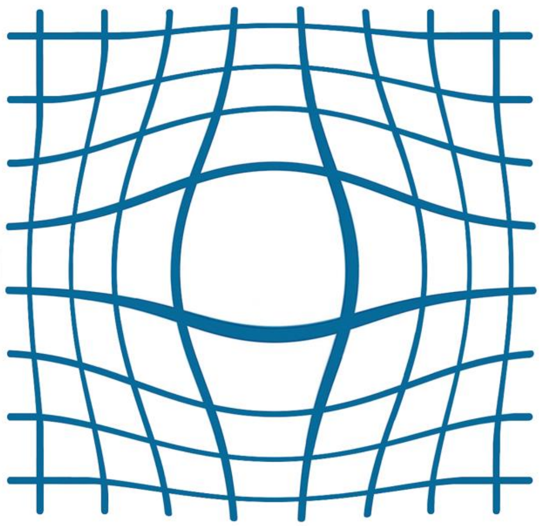
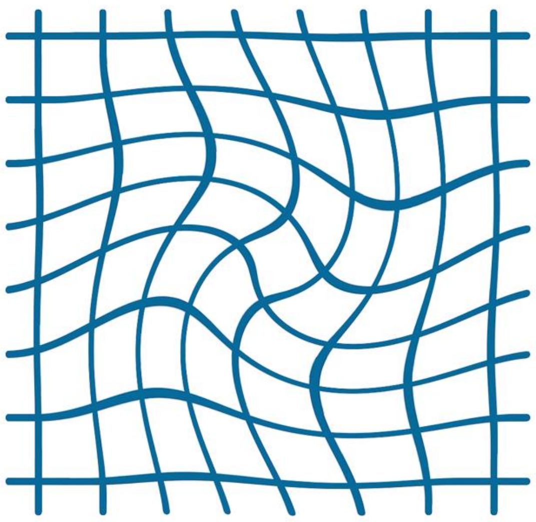
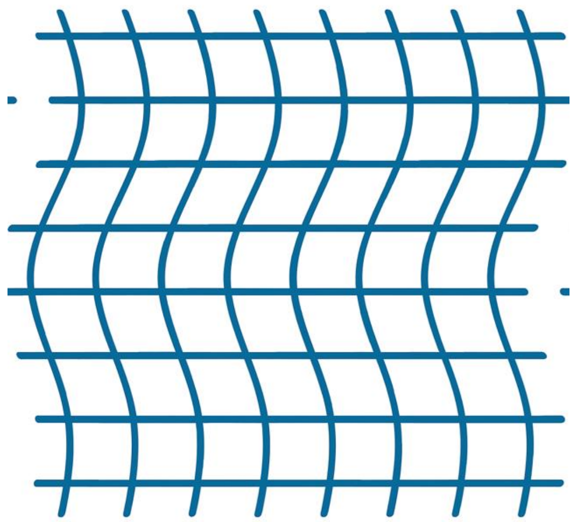
- Si pongo una bola de billar sobre una lona elástica, la lona se hunde.
- Igual pasa con el espacio: la materia lo deforma.

Las ecuaciones de Einstein

Aunque su forma escrita es compacta, estas ecuaciones son complejas:

$$G_{\mu\upsilon} = \kappa \, T_{\mu\upsilon}$$

💡 Son **10 ecuaciones diferenciales** que contienen muchísima información.

¿Está el espacio rotando? **¿Fluctúa?** ¿Se dilata o se contrae? **¿Se distorsiona?**

Las ecuaciones de Einstein pueden, en principio, responder a todas estas preguntas.

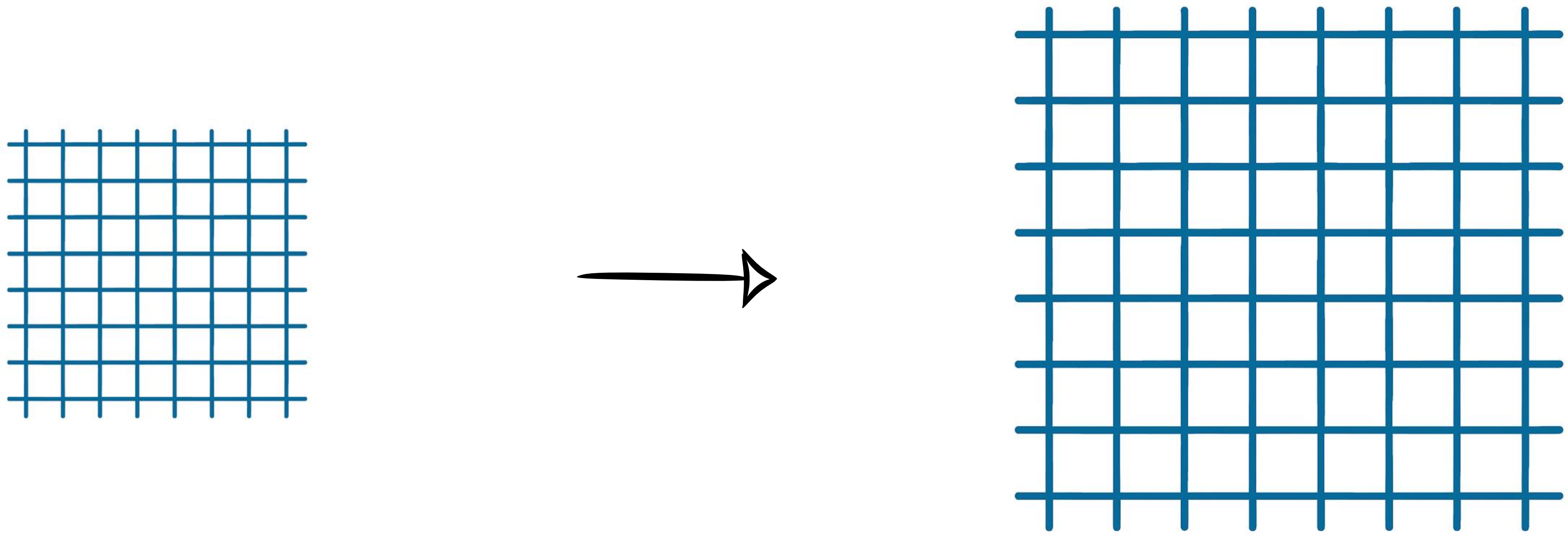
¿Simplificaciones?

Podemos simplificar las ecuaciones imponiendo condiciones que debe satisfacer el sistema a estudiar.

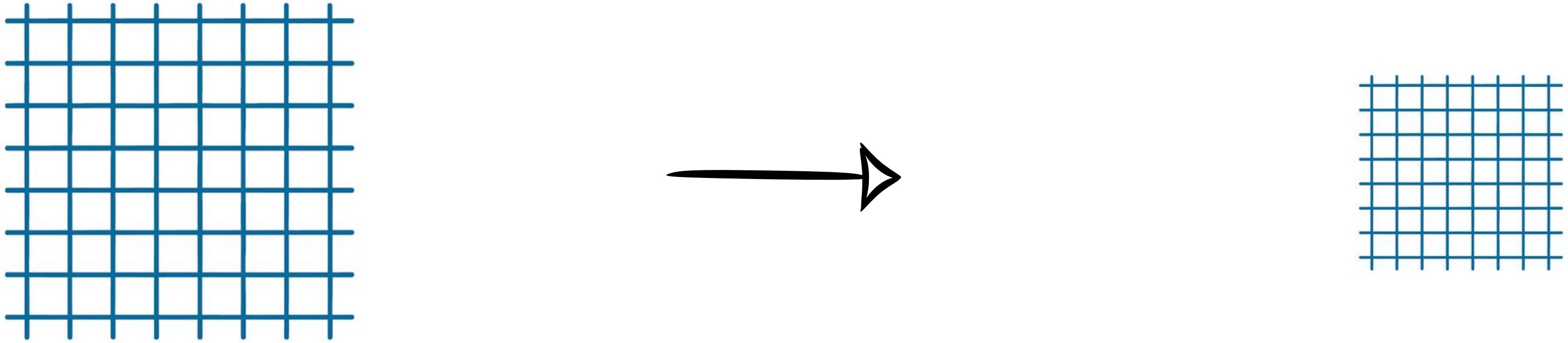
Para entender cómo evoluciona el universo a gran escala, suponemos que es **homogéneo e isótropo.** Esto significa que:

- Es igual en todas partes (homogeneidad).
- Y en todas direcciones (isotropía).

¿El universo se expande?



¿O… se contrae?



El universo se expande

Las **observaciones** nos dicen que el **universo se expande**.

- Las galaxias se alejan unas de otras.
- Cuanto más lejos están, más rápido se alejan.

Puede resultar contraintuitivo, ya que la gravedad es atractiva. Entonces...
¿Por qué todo se aleja?

Energía oscura.

Parte II

La materia

materia

Artículo

Sinónimos o afines

Del lat. *materia.*

1. f. Realidad espacial y perceptible por los sentidos de la que están hechas las cosas que nos rodean y que, con la energía, constituye el mundo físico.

2. f. materia física diferenciada de las demás por una serie de propiedades determinadas. *La materia del casco debe ser dura.*

   Sin.: **sustancia**, **material**.

3. f. Ser que tiene existencia física, por oposición a *espíritu.*

   Sin.: **cuerpo**.

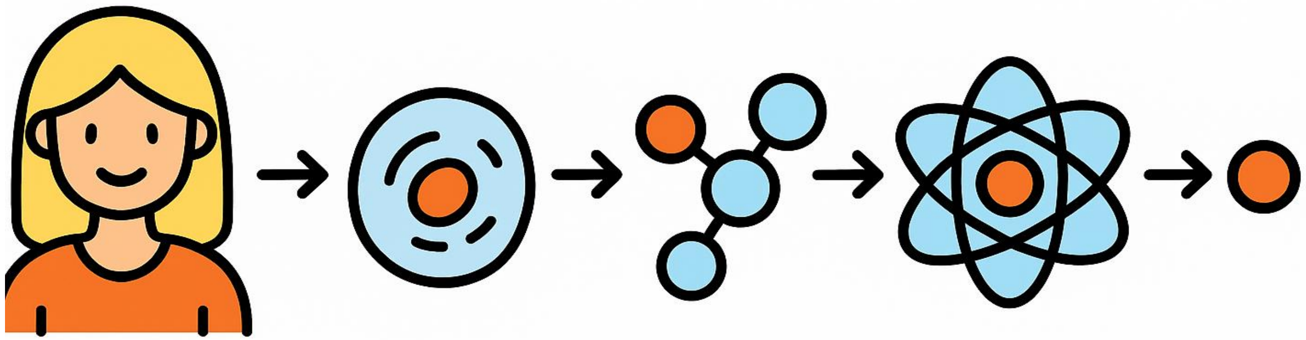
4. f. Idea o hecho central en torno a los cuales gira una obra literaria, científica o de otro tipo.

   Sin.: **asunto**, **tema**, **idea**, **motivo**.

¿Qué es la materia?

La materia es **el contenido**.

Las *personas* estamos formadas por *células*, que están formadas por *moléculas*, que están formadas por *átomos*, que están formados por *partículas elementales*.



La materia

¿Cómo podemos describir la materia?

Depende de las preguntas que queramos responder.

Por ejemplo. Si queremos saber a qué temperatura hierve el agua, podemos usar las *leyes de la termodinámica*. Pero si queremos saber *por qué* pasa, necesitamos algo más.

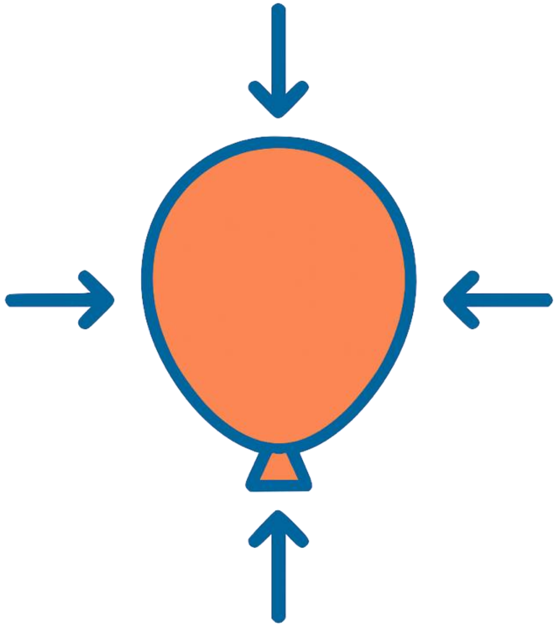
Ejemplo: la ley de los gases

Imaginad que tenemos un globo lleno de aire.
Podemos usar una ecuación simple para describirlo:

$$p\,V = n\,R\,T$$

Esta ley nos dice cómo se relacionan la presión, el volumen y la temperatura del globo.

Pero no nos dice qué **es** la temperatura.

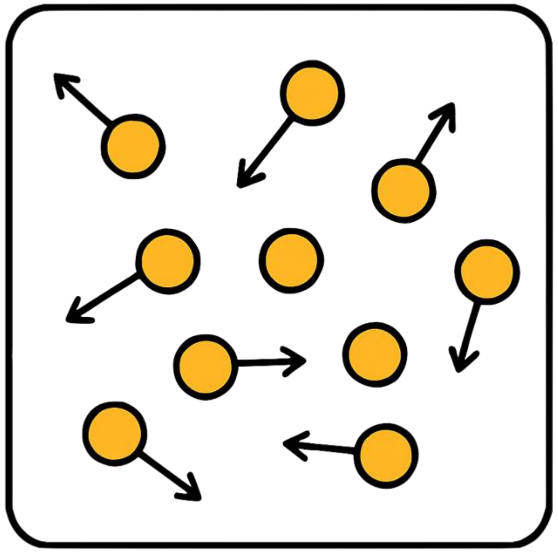


Ejemplo: la ley de los gases

Podemos representar el gas que está dentro del globo como un conjunto de bolitas que se mueven y que chocan entre con las paredes del globo.

La *energía cinética* de estas partículas microscópicas está relacionada directamente con la **temperatura**.

Este puente entre lo microscópico y lo macroscópico es lo que hace la física estadística.



¿Cómo modelamos la creación de materia?

En esta charla queremos entender *cómo se puede crear materia en un universo en expansión*.

💡 Para modelar este fenómeno no basta con una teoría como las que hemos visto.

Necesitamos una herramienta más potente: **la teoría cuántica de campos.**

La teoría cuántica de campos

La **teoría cuántica de campos** es nuestra mejor descripción de la naturaleza a nivel fundamental.

Según esta teoría:

- Los **campos cuánticos** son los objetos fundamentales: cada tipo de partícula está asociado a un campo que existe en todo el espacio.
- Las **partículas** no son entidades independientes, sino “excitaciones” de estos campos.

El **vacío** tiene estructura.

El vacío *cuántico*

El vacío no es trivial. No es “la nada”. Tiene **estructura**.

¿Cómo es posible?¿Qué significa?

- Fluctuaciones cuánticas.
- Depende del **observador**.
  Lo que está vacío para un observador puede no estarlo para otro.

En un espacio-tiempo dinámico se pueden generar **partículas** a partir del vacío.

Parte III

El universo que crea materia

El universo que crea materia

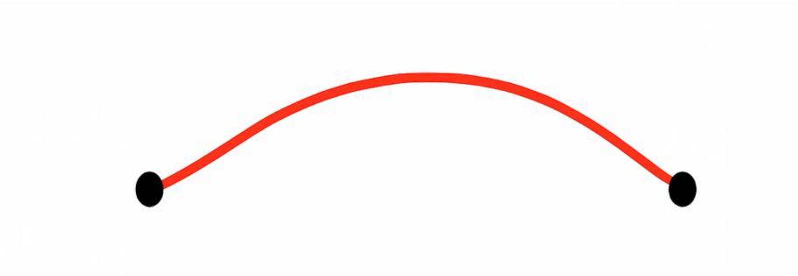
Cuando el universo se expande, los campos cuánticos se ven afectados por ese cambio.

Esto puede tener **consecuencias físicas reales**.

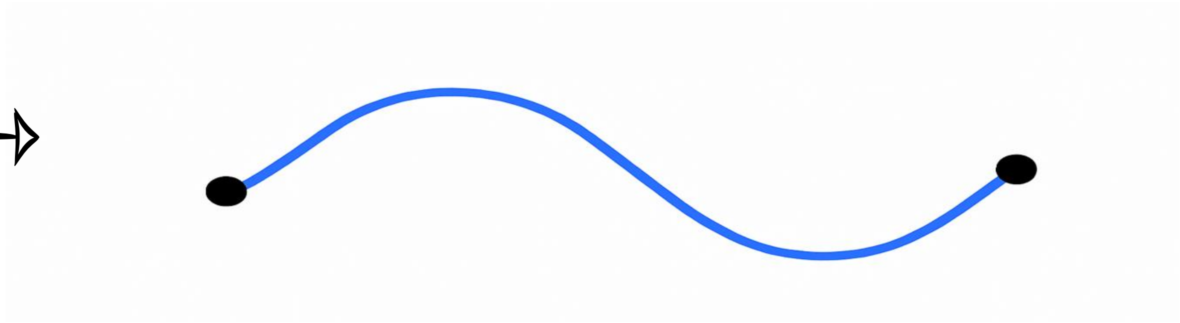
En situaciones extremas, el campo responde creando partículas.

Una analogía: la cuerda que vibra

¿Existe algún efecto parecido en otro contexto? **¡Si!**



Modo fundamental



Primer modo excitado

¿Matemáticas o física?

¿Es esto un simple cálculo matemático? ¿O puede pasar en la vida real?

¡Puede pasar!

(en condiciones extremas)

Este mecanismo está detrás de fenómenos tan importantes como la **generación de materia** en el universo primitivo o la *radiación de Hawking*.

Ideas clave

El universo, al expandirse, puede crear materia a partir del vacío.

- Para entender este fenómeno, necesitamos **combinar relatividad y teoría cuántica**.
- El vacío cuántico tiene **estructura** y puede producir partículas.
- Leonard Parker fue quien **descubrió este fenómeno**, abriendo un nuevo campo de estudio.

¡Muchas gracias!