

RELATIVICUANTICA

o

las leyes fundamentales del mundo

J.L.F. Barbón



Instituto de
Física
Teórica

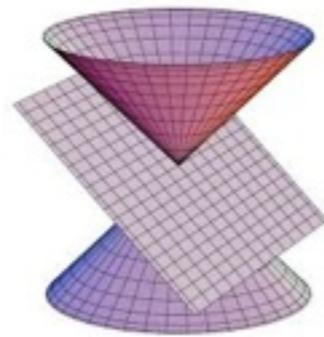
www.ift.uam-csic.es

Φ

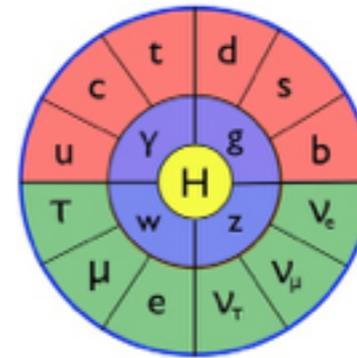
siglo XX

RELATIVIDAD

CUANTICA



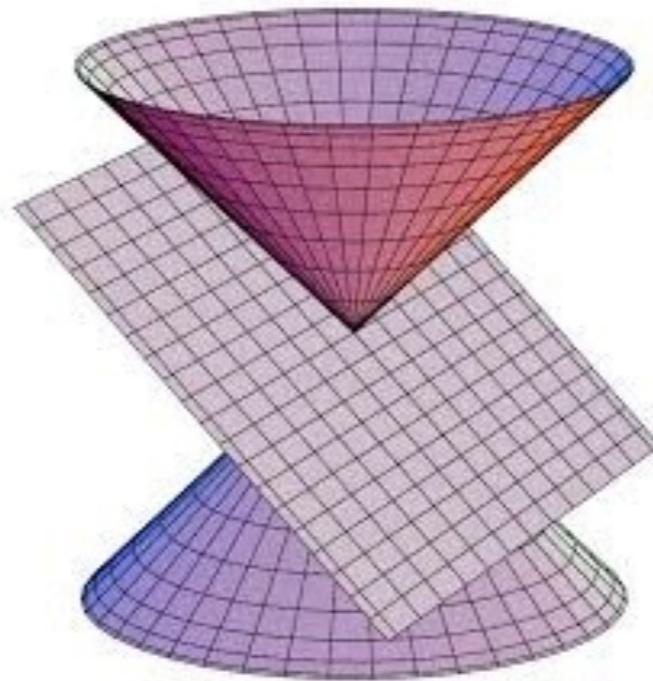
ESPACIO-TIEMPO



PARTICULAS

PARTE 1

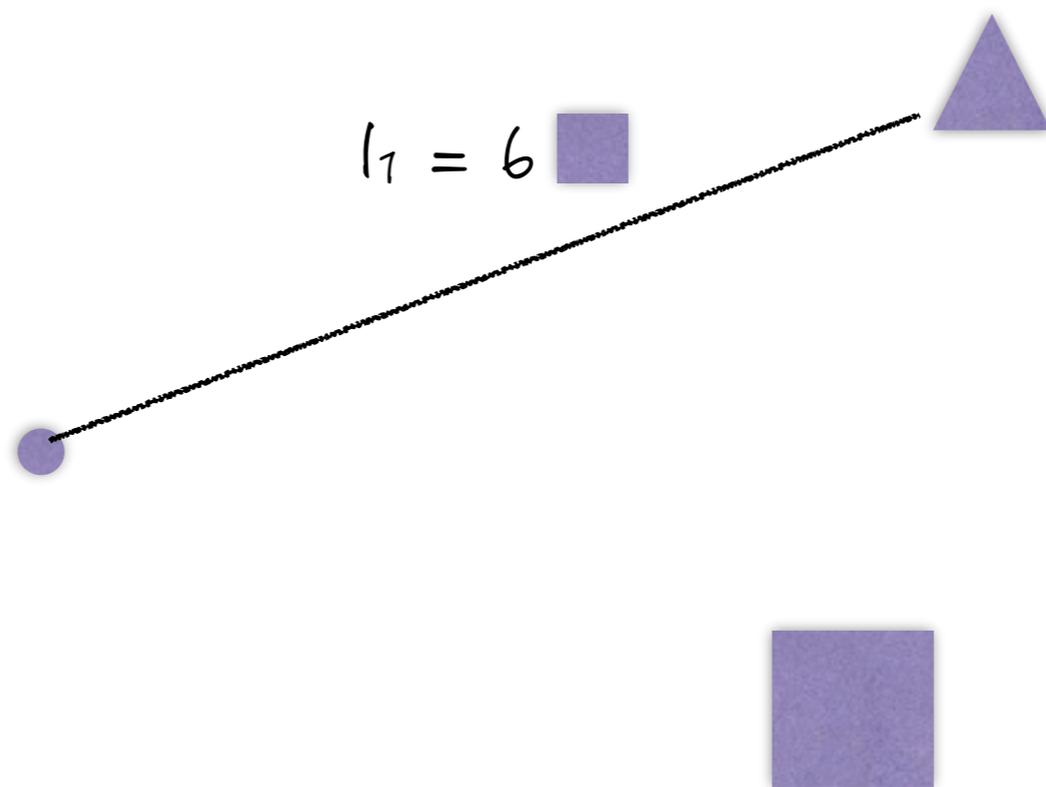
ESPACIO-TIEMPO



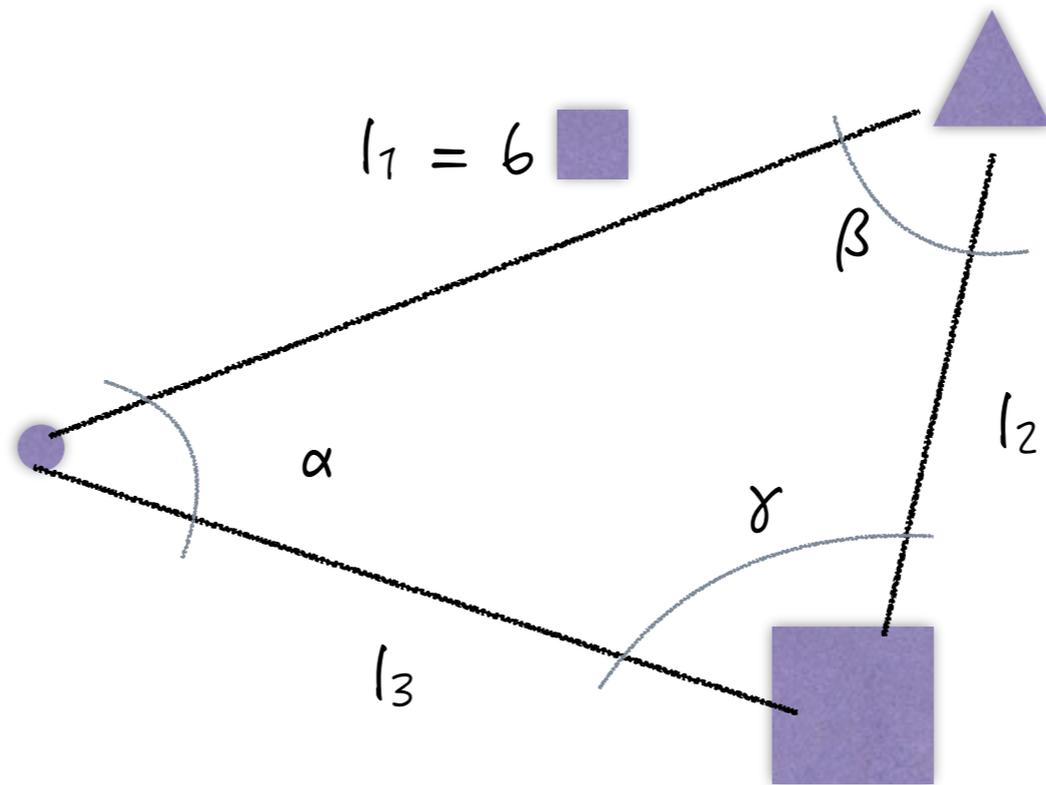
ESPACIO



ESPACIO

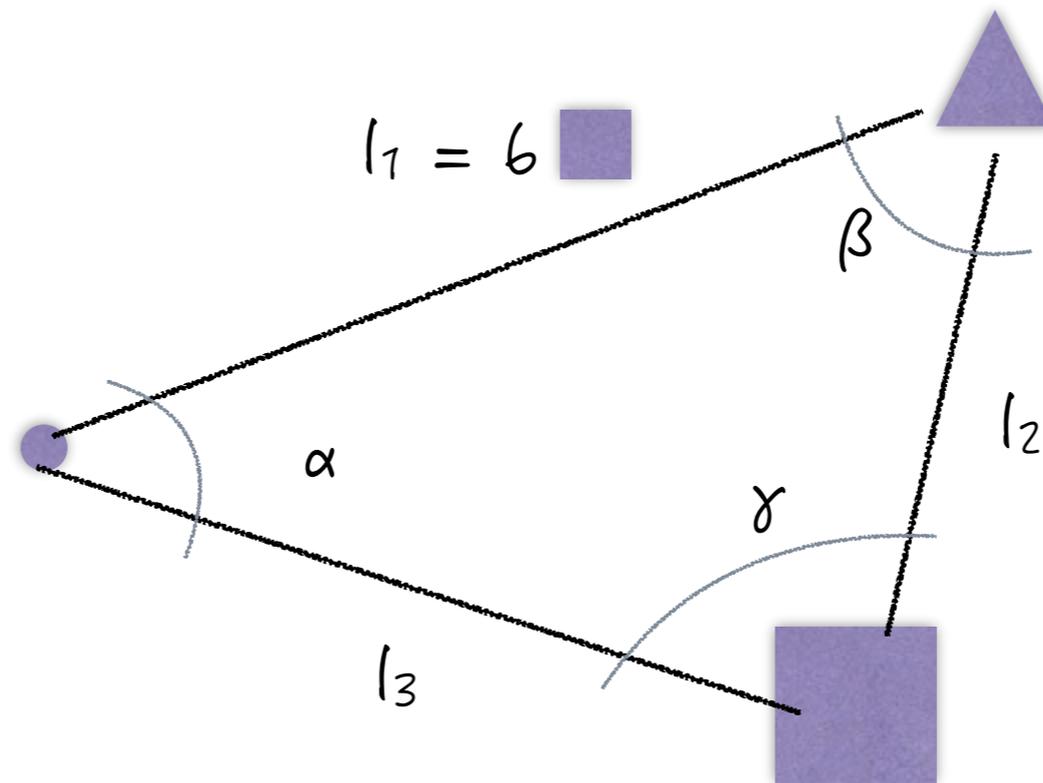


ESPACIO



$$\alpha + \beta + \gamma = \text{media circunferencia}$$

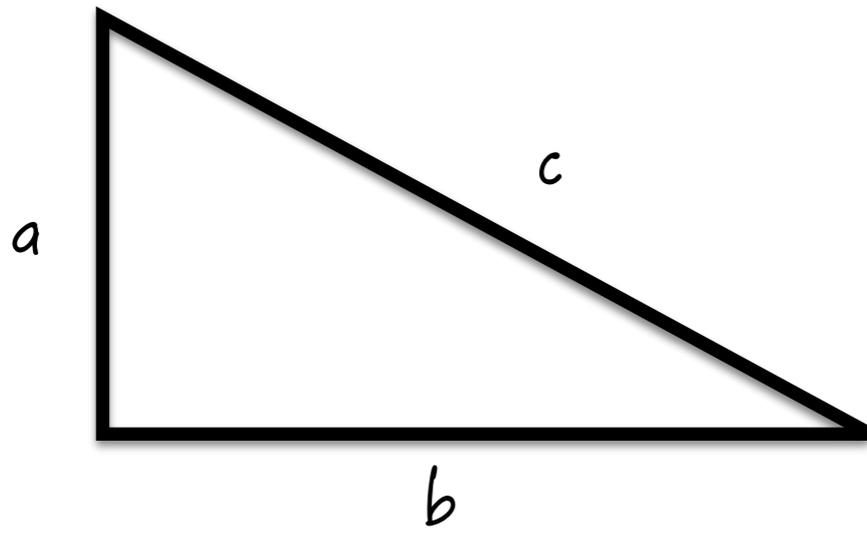
ESPACIO



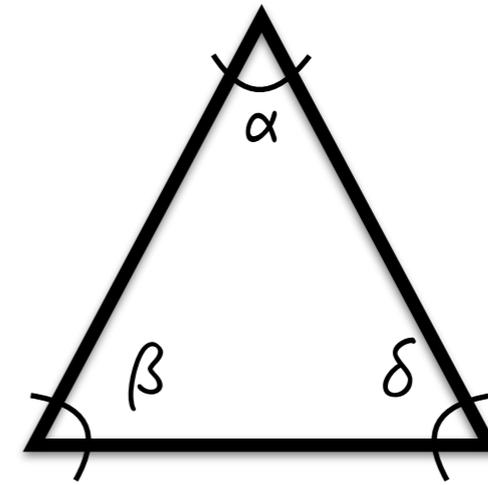
$$\alpha + \beta + \gamma = \text{media circunferencia}$$

Estructura del espacio = GEOMETRIA

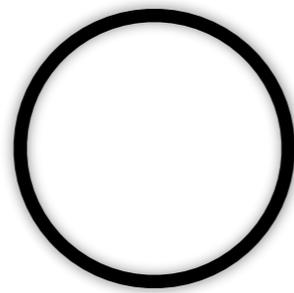
Los teoremas de la geometría clásica ...



$$a^2 + b^2 = c^2$$



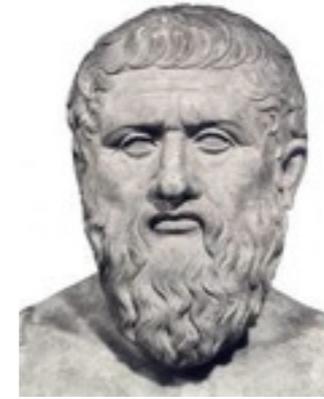
$$\alpha + \beta + \delta = 180^\circ$$



$$\frac{\text{circunferencia}}{\text{diámetro}} = \pi$$

Son propiedades de nuestro mundo físico, localmente medido

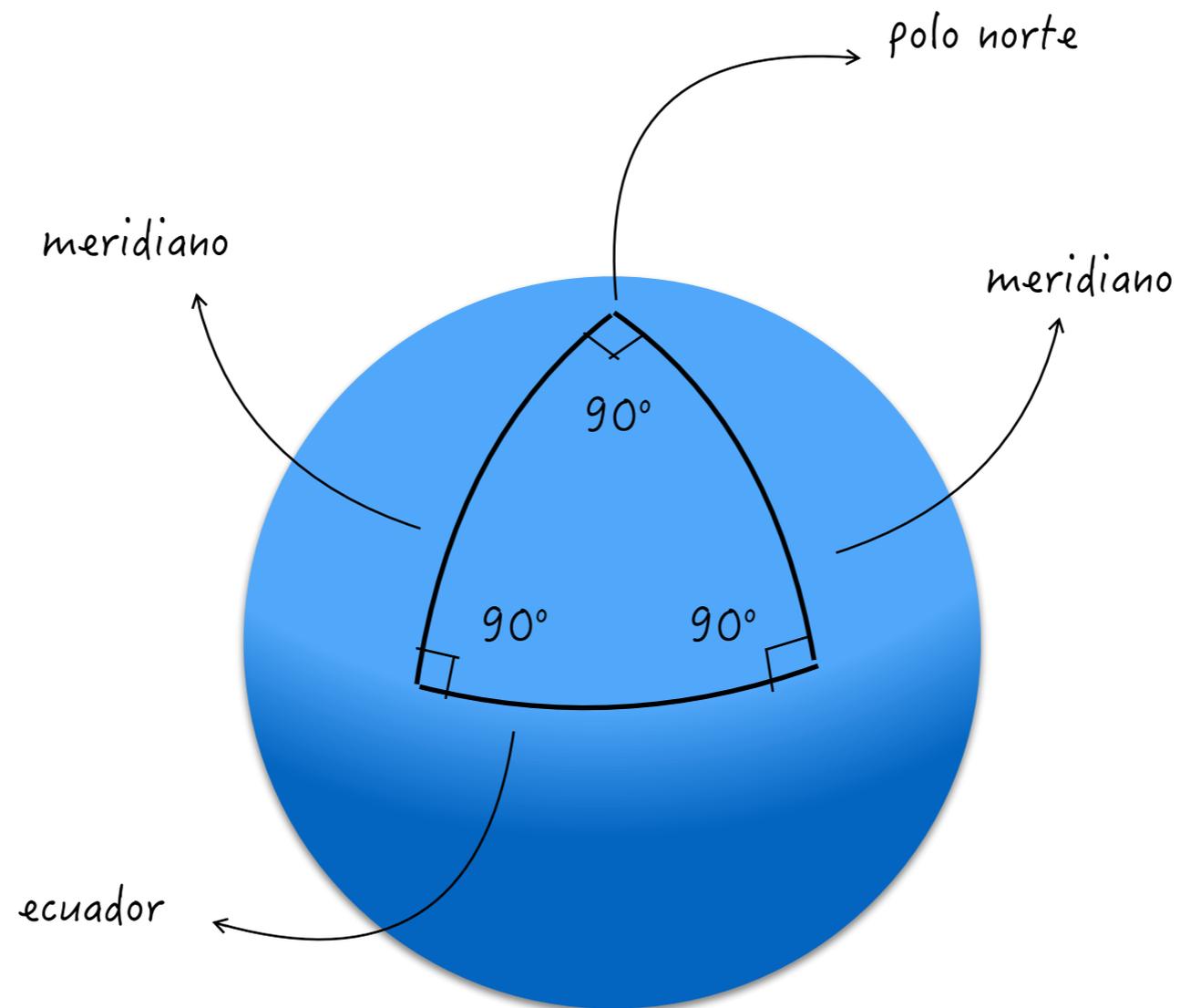
La geometría Euclidiana se interpretó como la estructura *a priori*
del espacio por más de dos milenios



Bolyai y Lobachevsky rompieron por fin el tabú a mediados del siglo XIX



Existen geometrias no Euclidianas

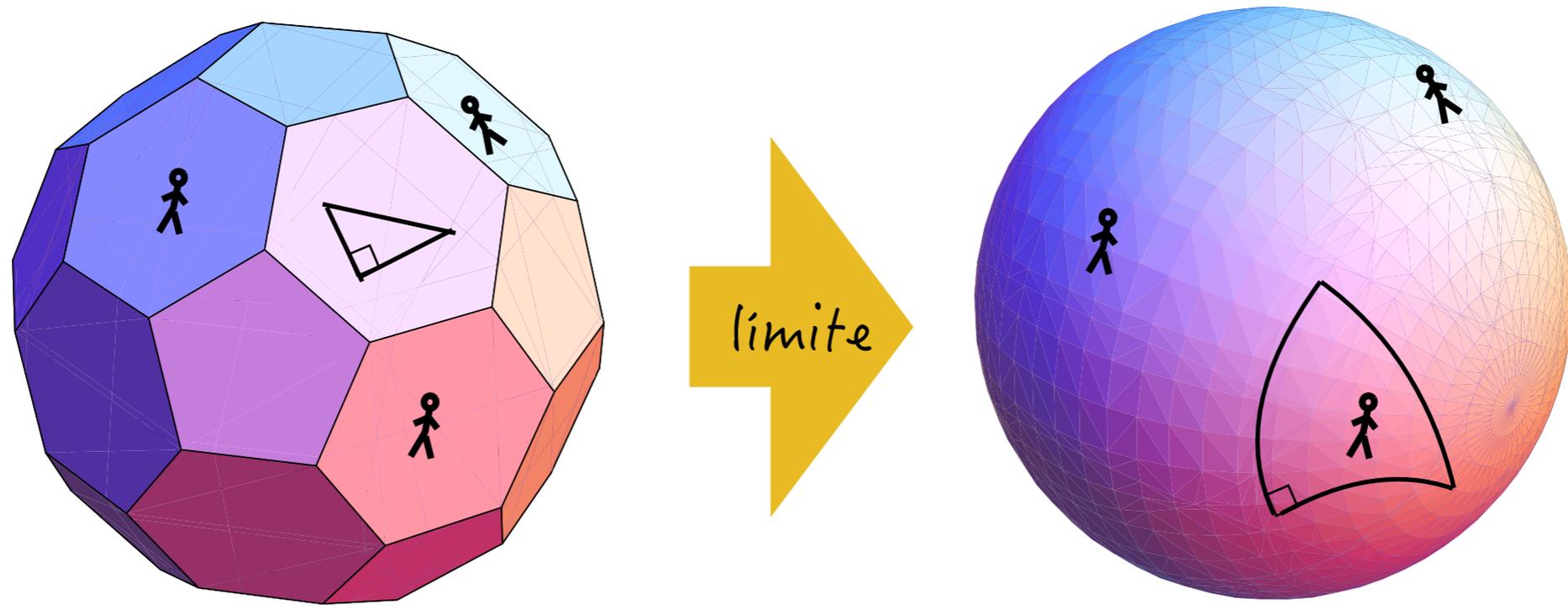


$$\alpha + \beta + \gamma = 270^\circ > 180^\circ$$

La geometria del espacio fisico
es una cuestión experimental



Gauss y Riemann dieron con la descripción general



Una geometría suave NO EUCLIDIANA
se puede construir "pegando" descripciones LOCALMENTE EUCLIDIANAS

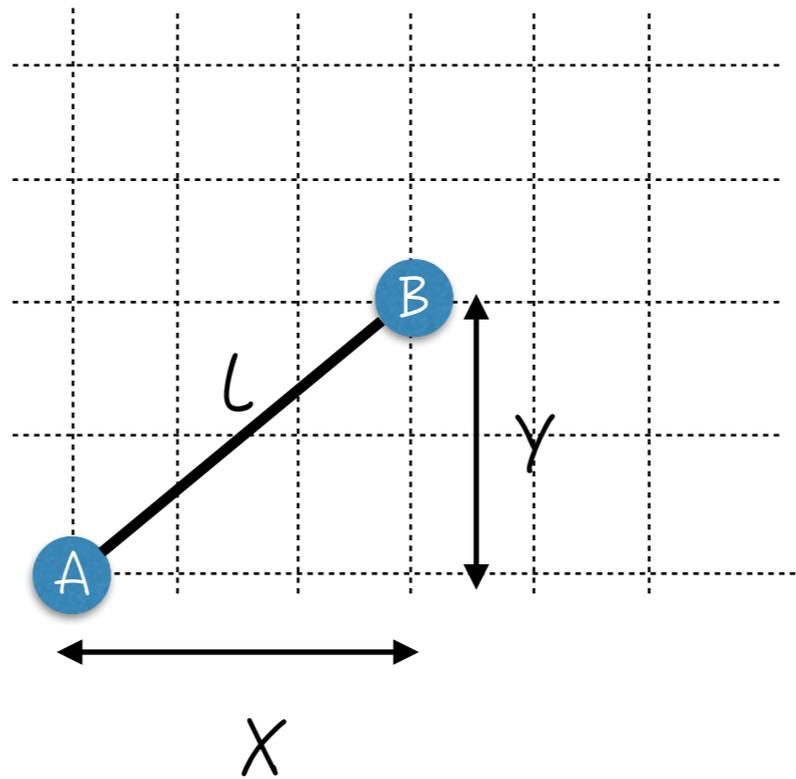
la noción crucial es la CURVATURA

Pero, antes de la revolución no-Euclidiana ...

El método y el lenguaje ya cambiaron
en el siglo XVII, con Descartes



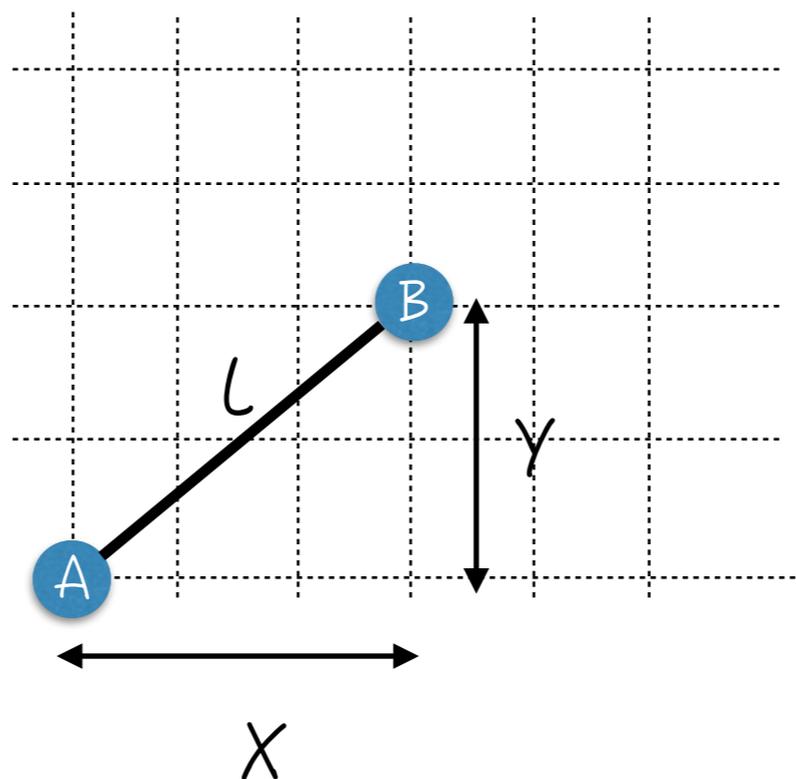
DISTANCIA según DESCARTES



$$L^2 = X^2 + Y^2$$

Descartes redujo la geometria al álgebra

DISTANCIA según DESCARTES



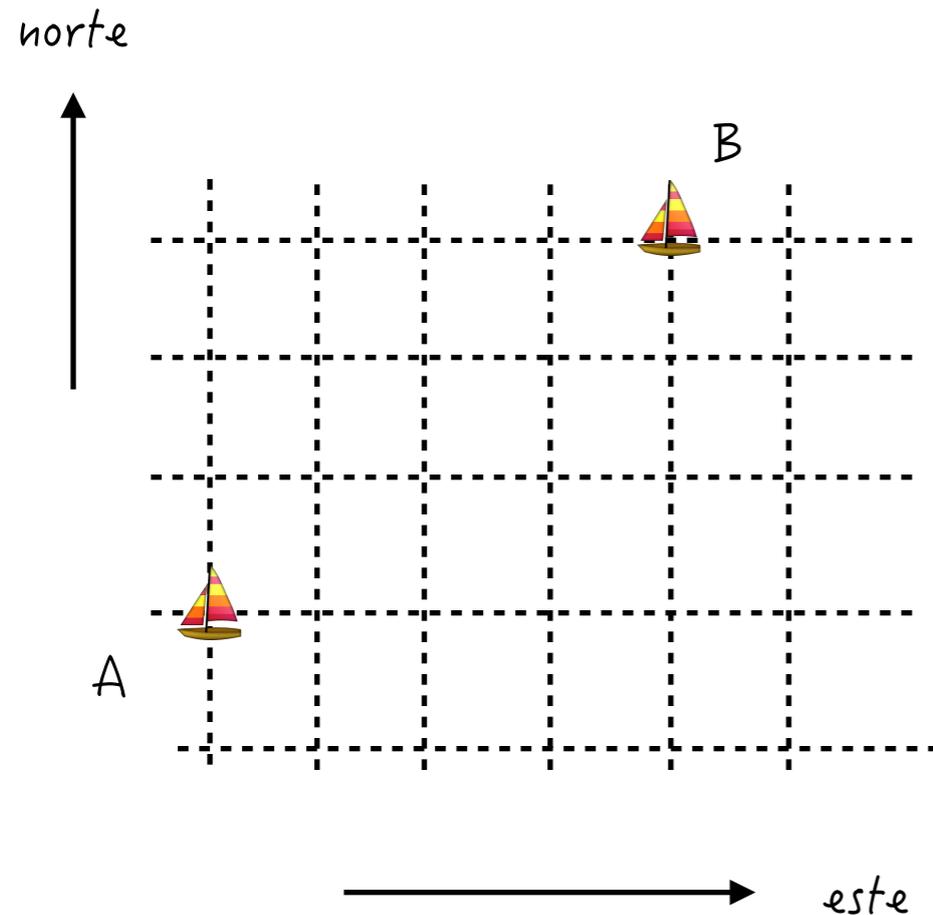
$$L^2 = X^2 + Y^2$$

Descartes redujo la geometria al álgebra

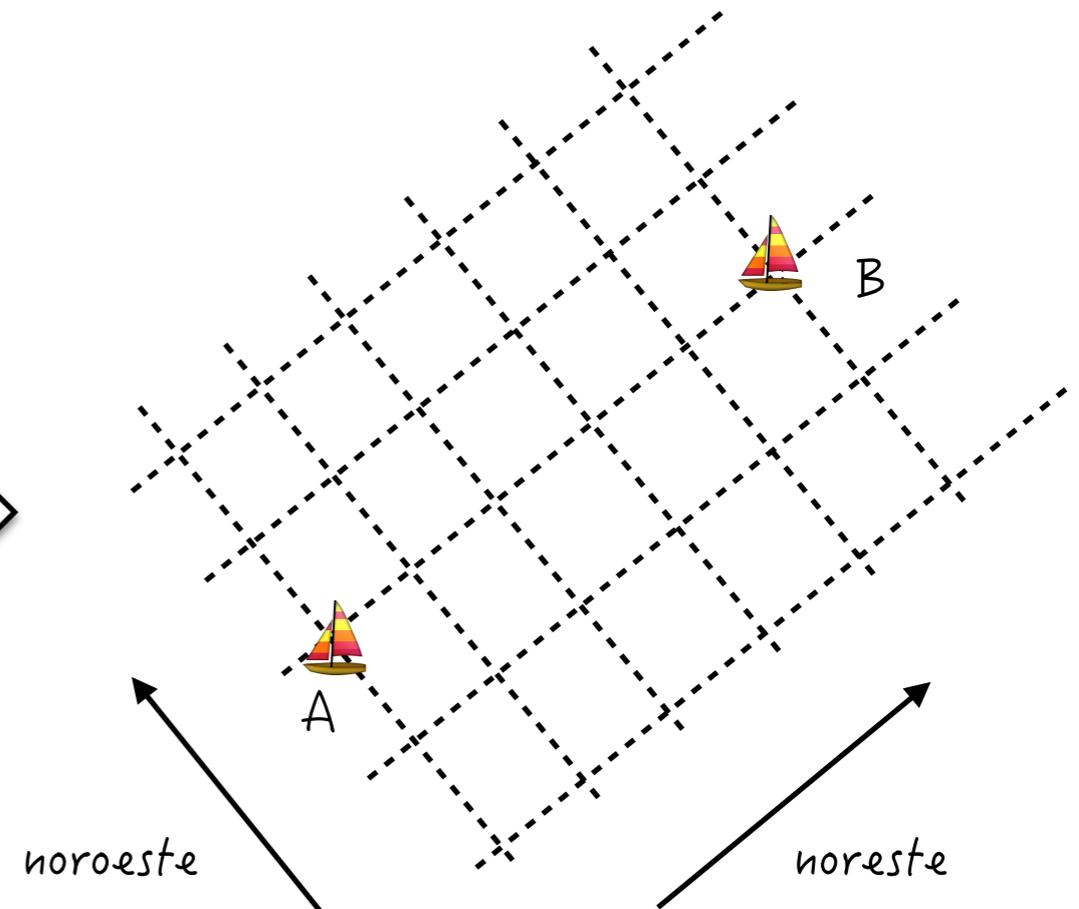
$aX + bY = c$ define una recta

$aX^2 + bXY + cY^2 = d$ define elipses, parábolas o hipérbolas, según los valores de a, b, c, d .

Las coordenadas proporcionan una descripción REDUNDANTE del espacio



$$AB = (4,3)$$



$$AB = (5,0)$$

La rotación preserva la relación Pitagórica

Se introduce así la noción de crucial de **SIMETRÍA**

TIEMPO

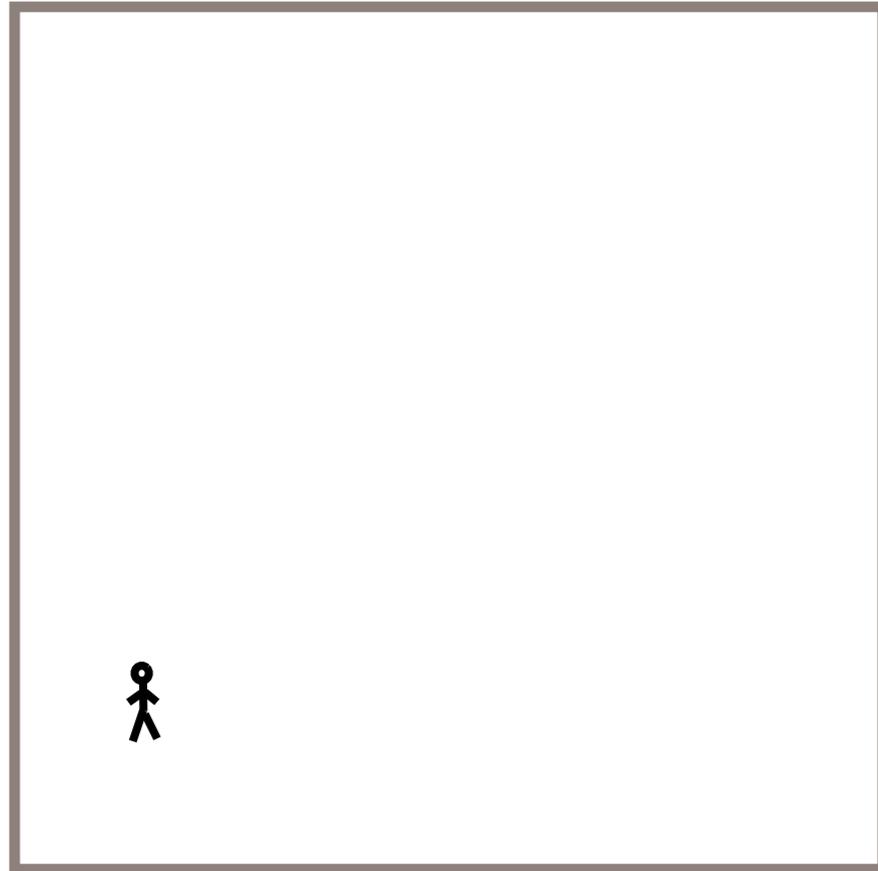


TIEMPO

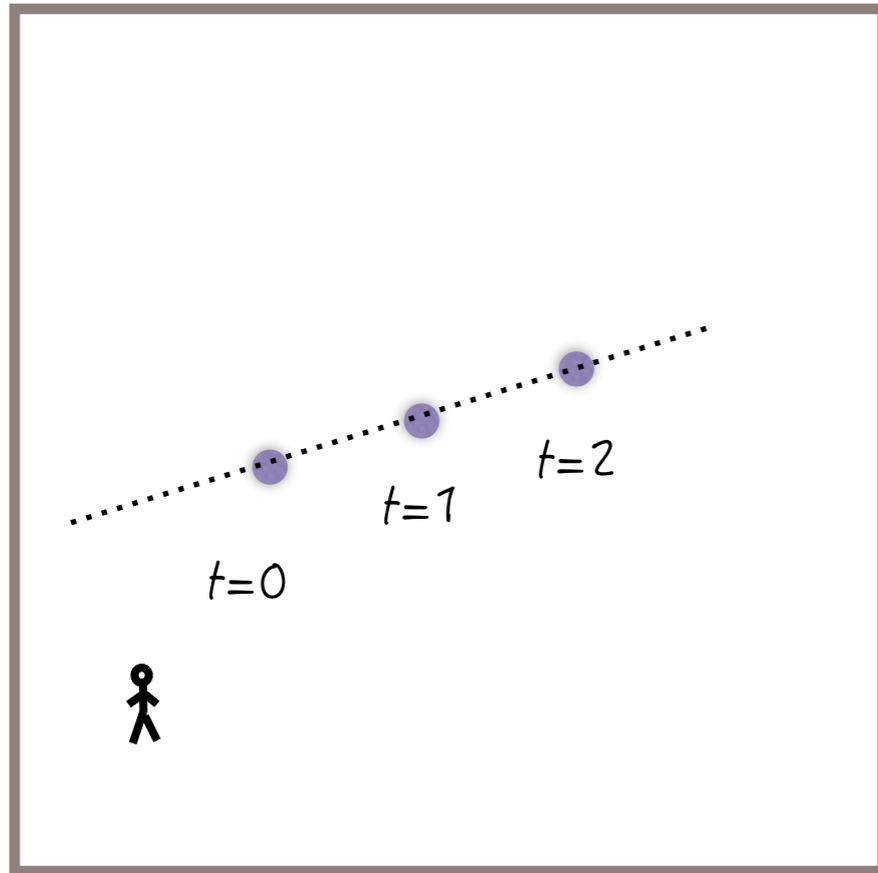


El tiempo está caracterizado por el MOVIMIENTO

Descripción matemática del movimiento

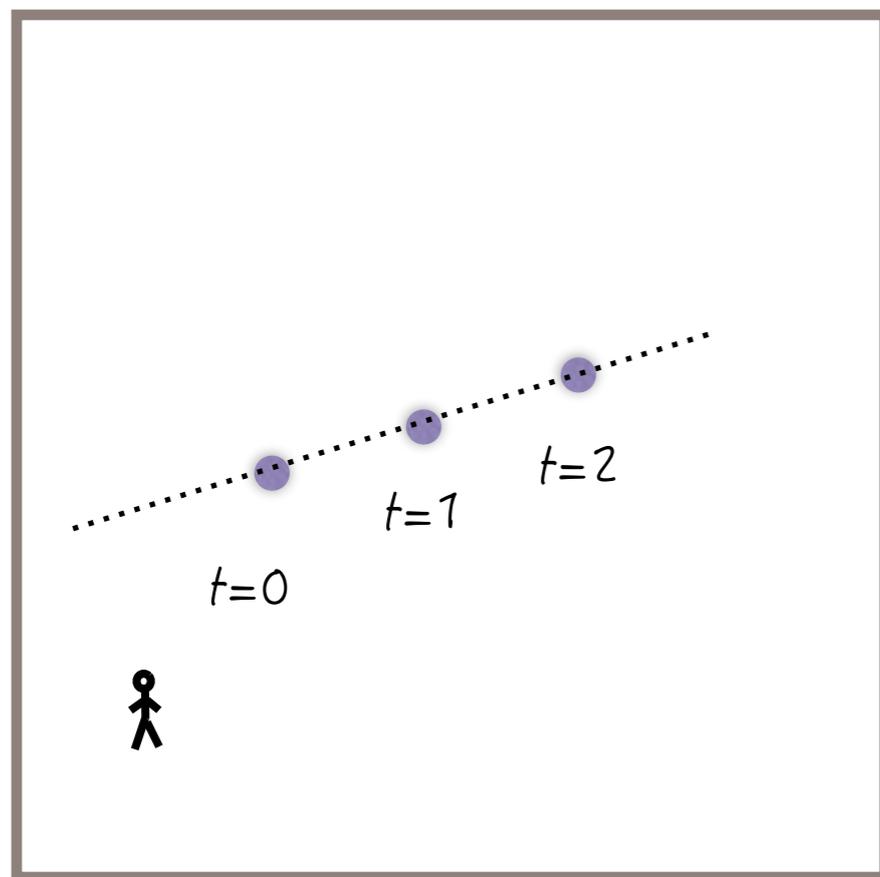


Descripción matemática del movimiento

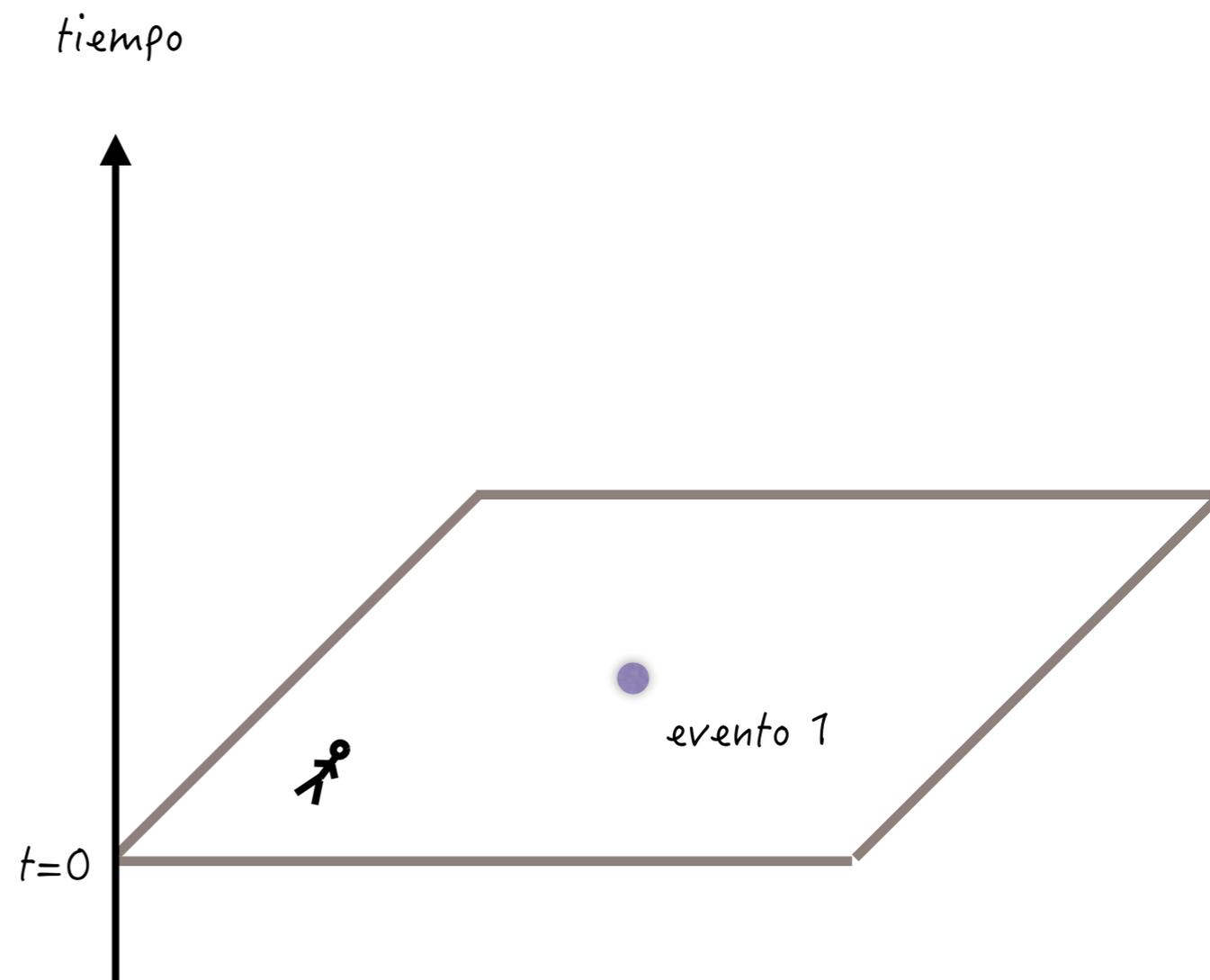


trayectoria en el espacio

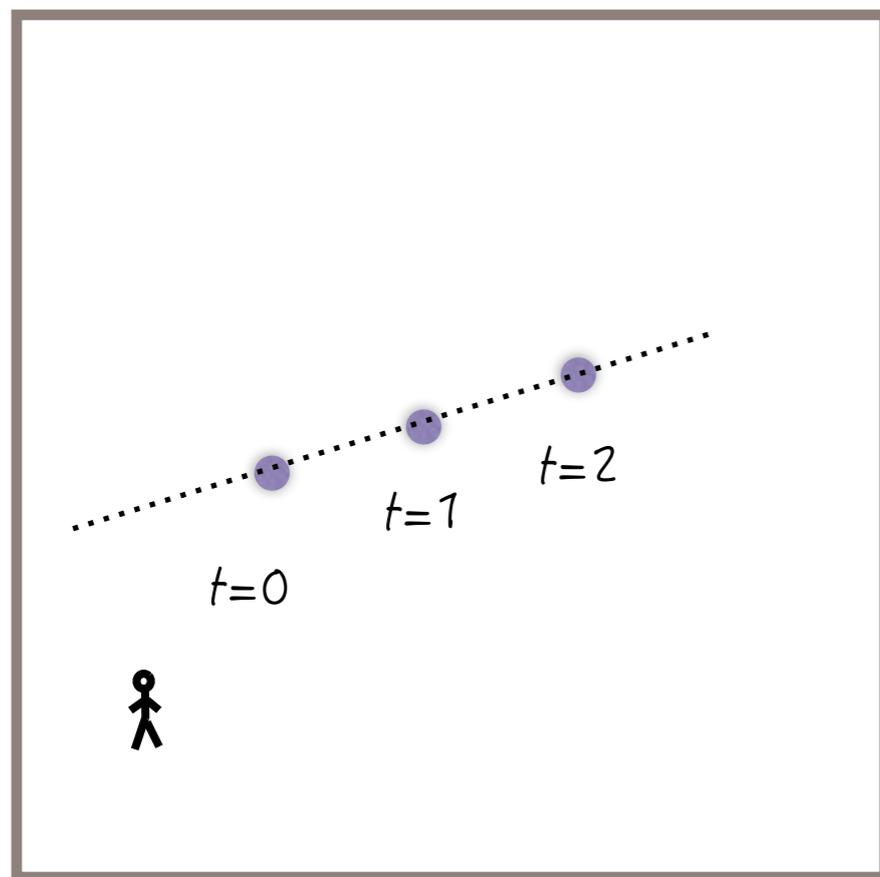
Descripción matemática del movimiento



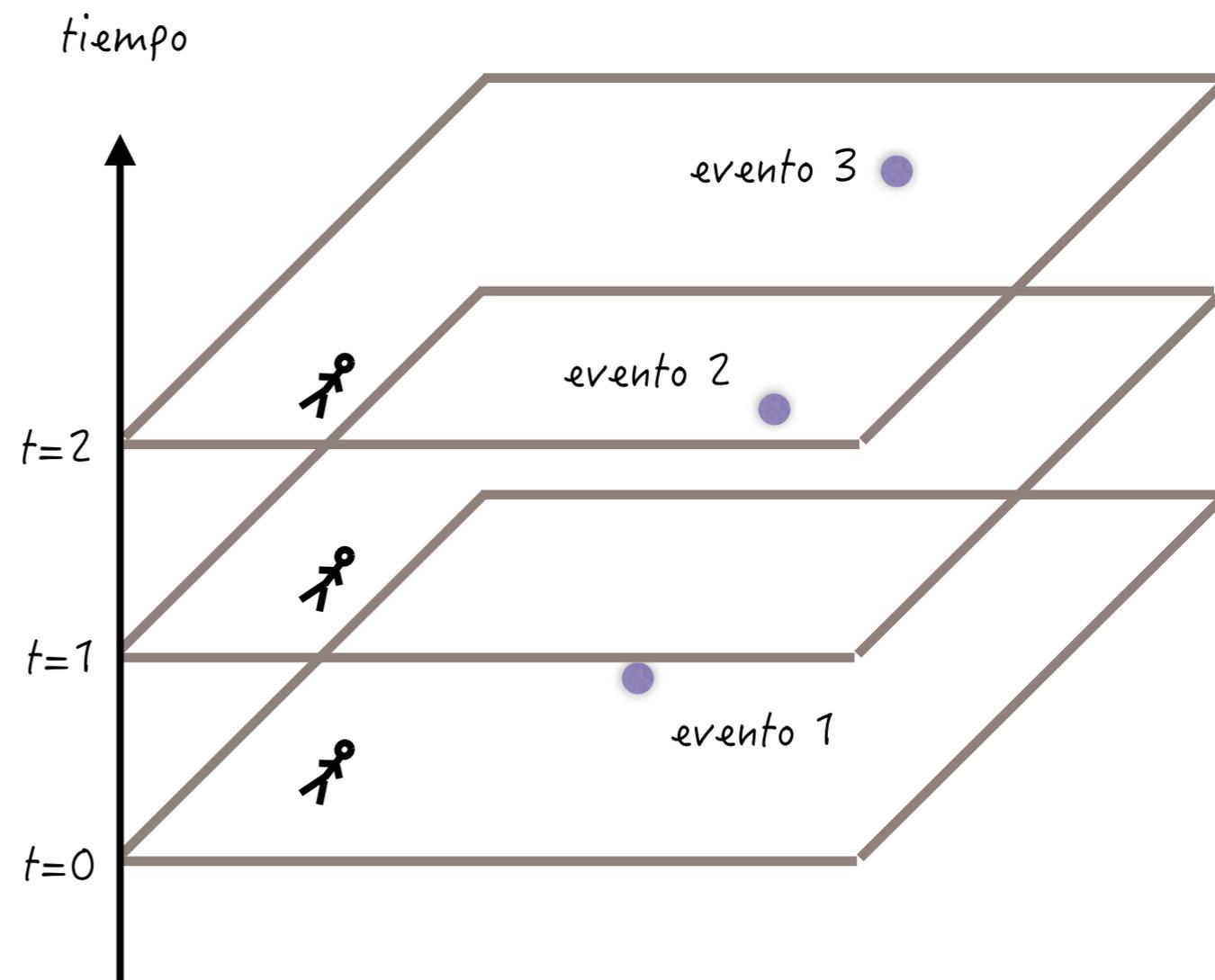
trayectoria en el espacio



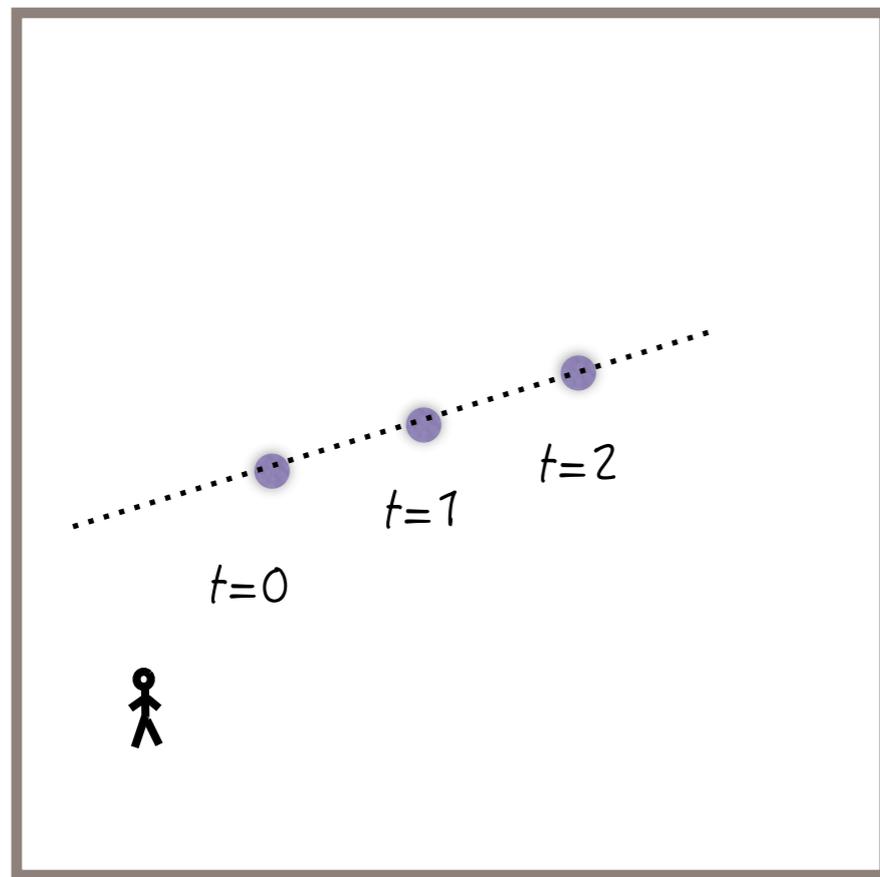
Descripción matemática del movimiento



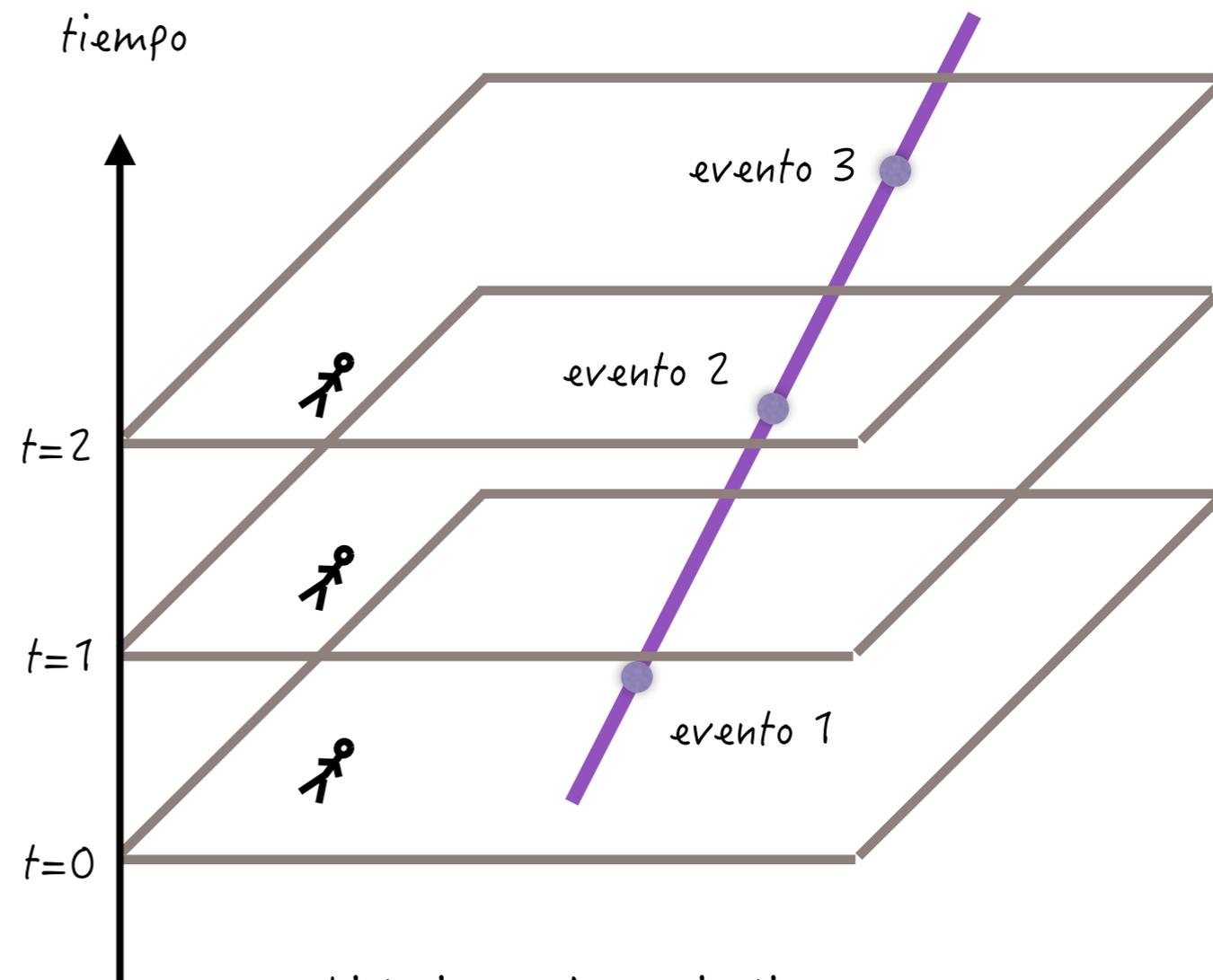
trayectoria en el espacio



Descripción matemática del movimiento



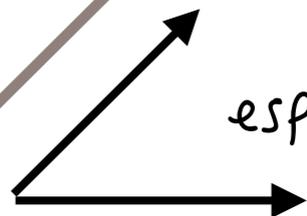
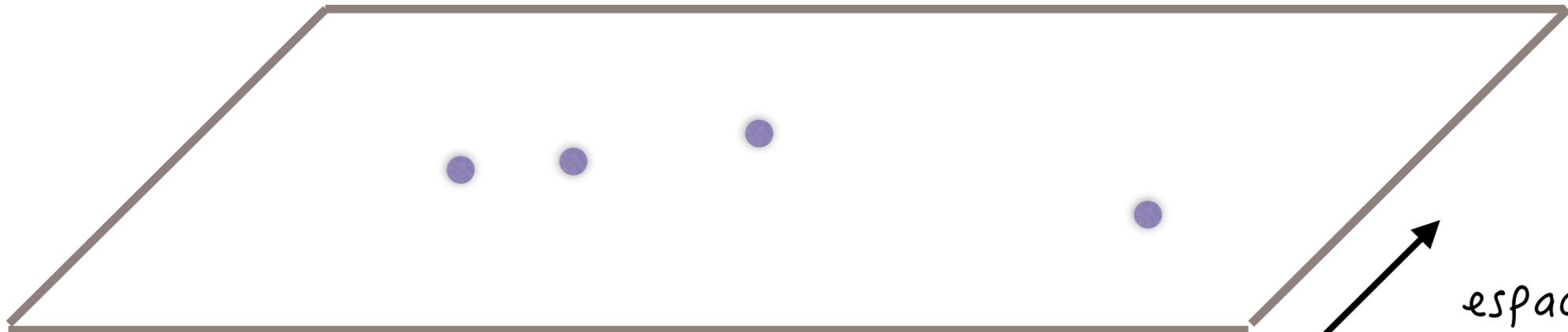
trayectoria en el espacio



historia en el espacio-tiempo

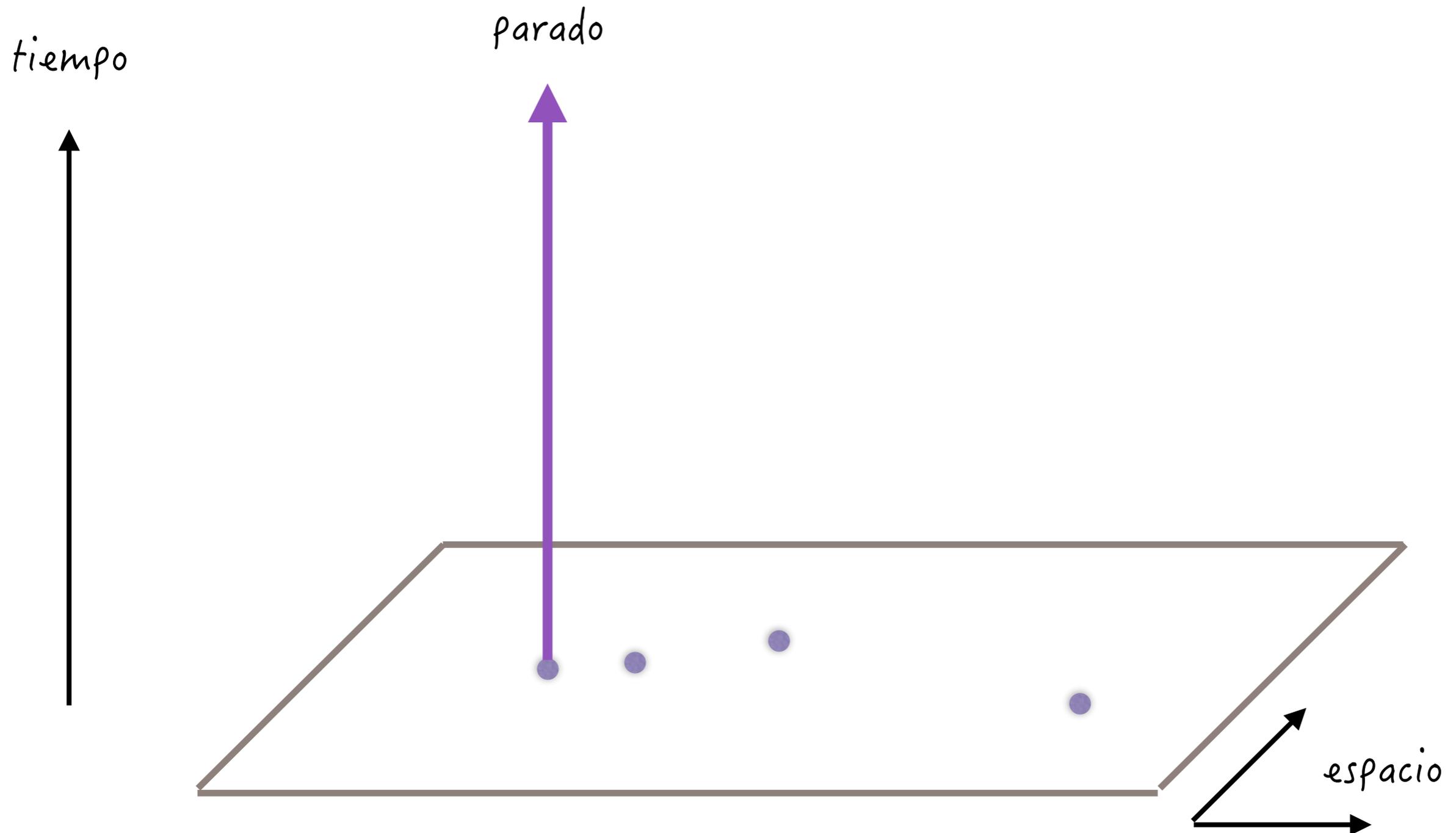
HISTORIAS DE PARTICULAS EN EL ESPACIO - TIEMPO

tiempo

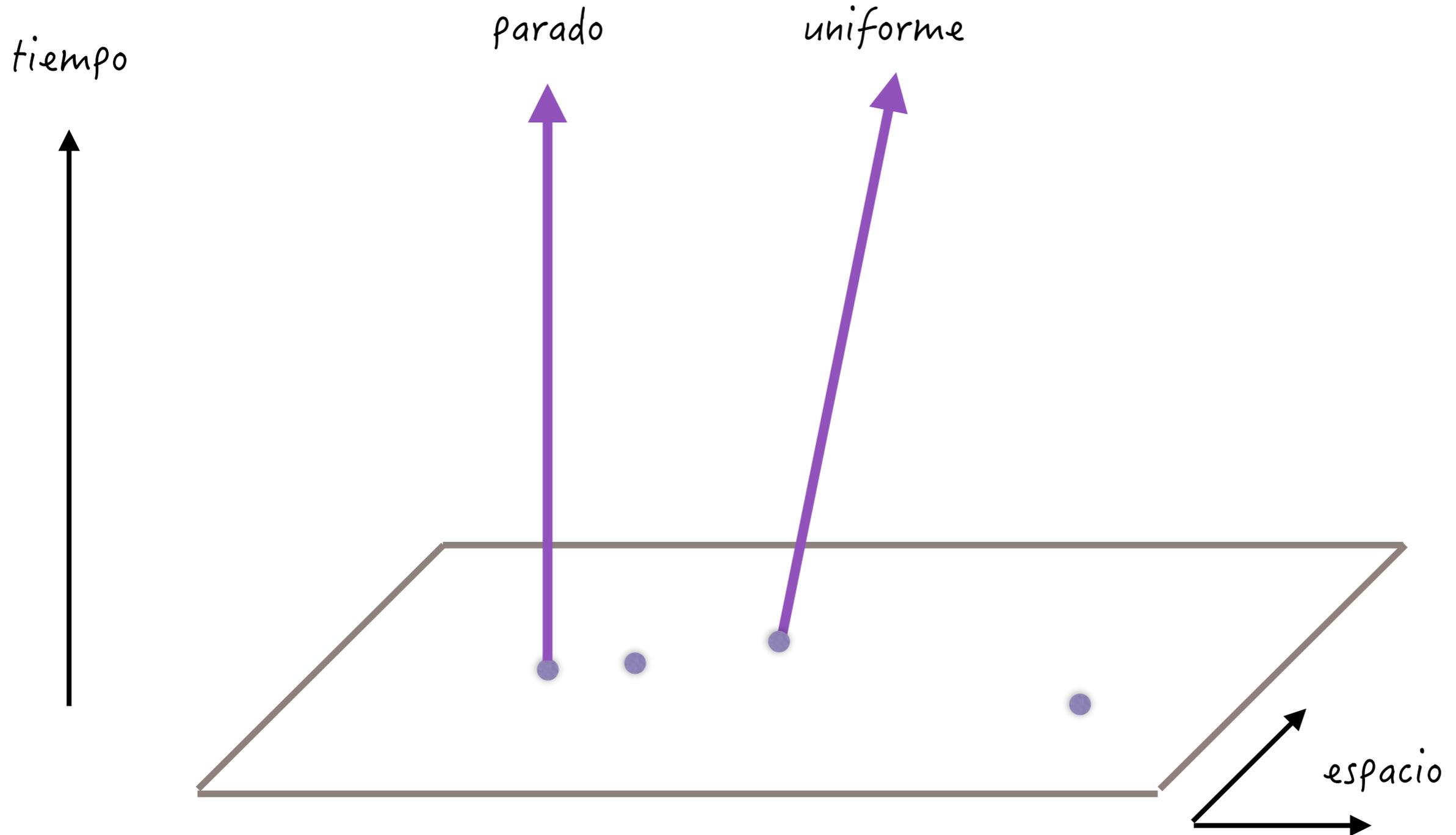


espacio

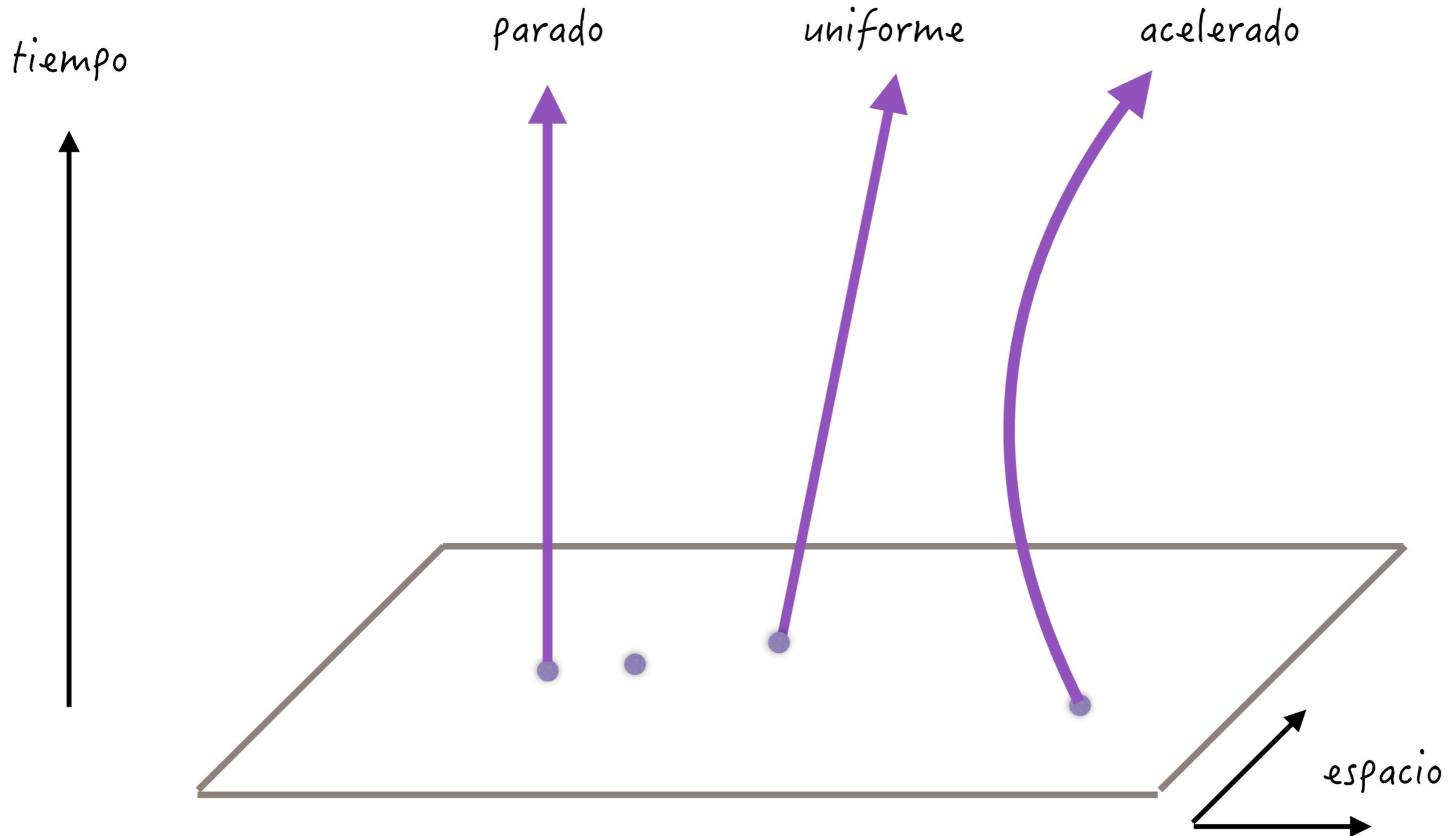
HISTORIAS DE PARTICULAS EN EL ESPACIO - TIEMPO



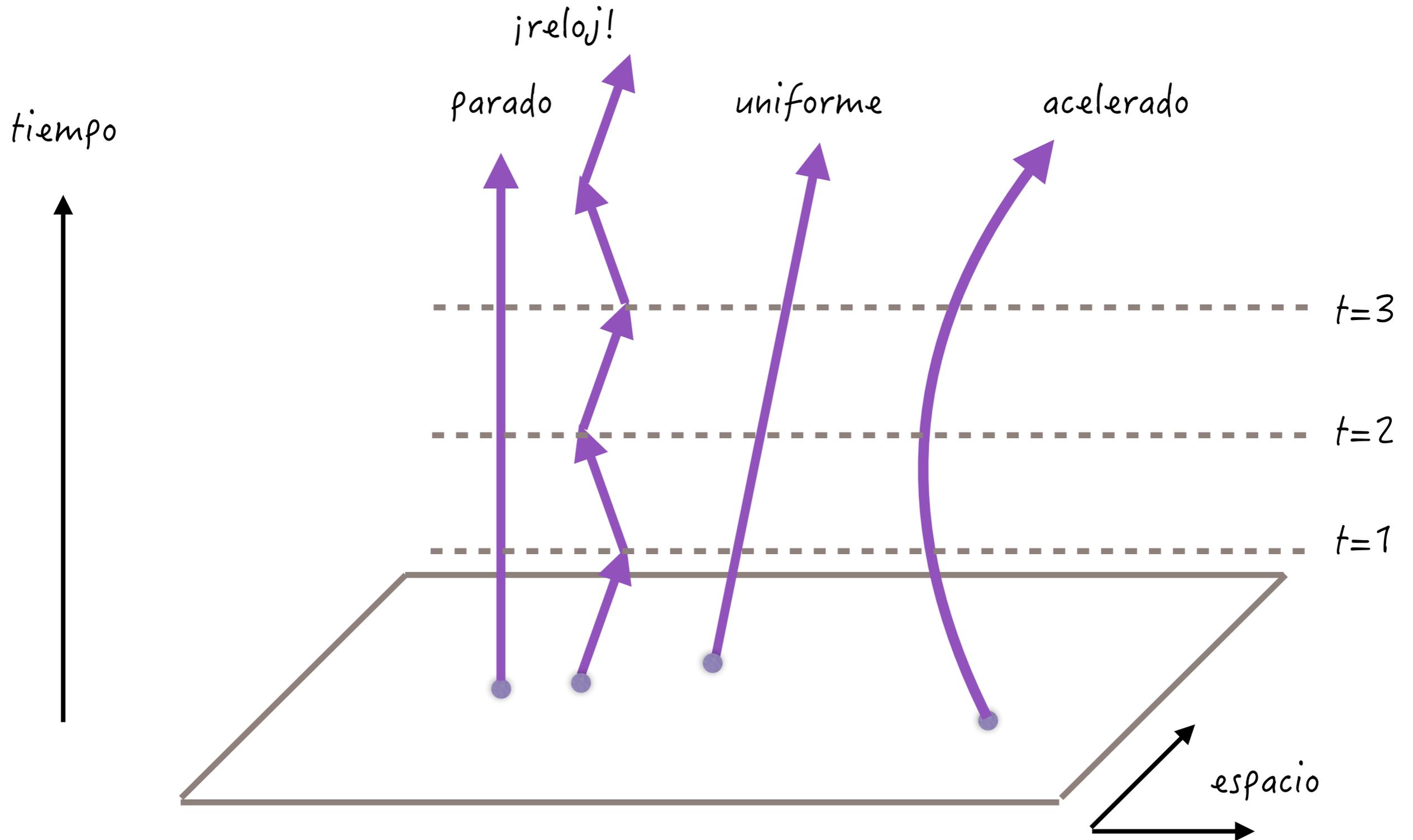
HISTORIAS DE PARTICULAS EN EL ESPACIO - TIEMPO



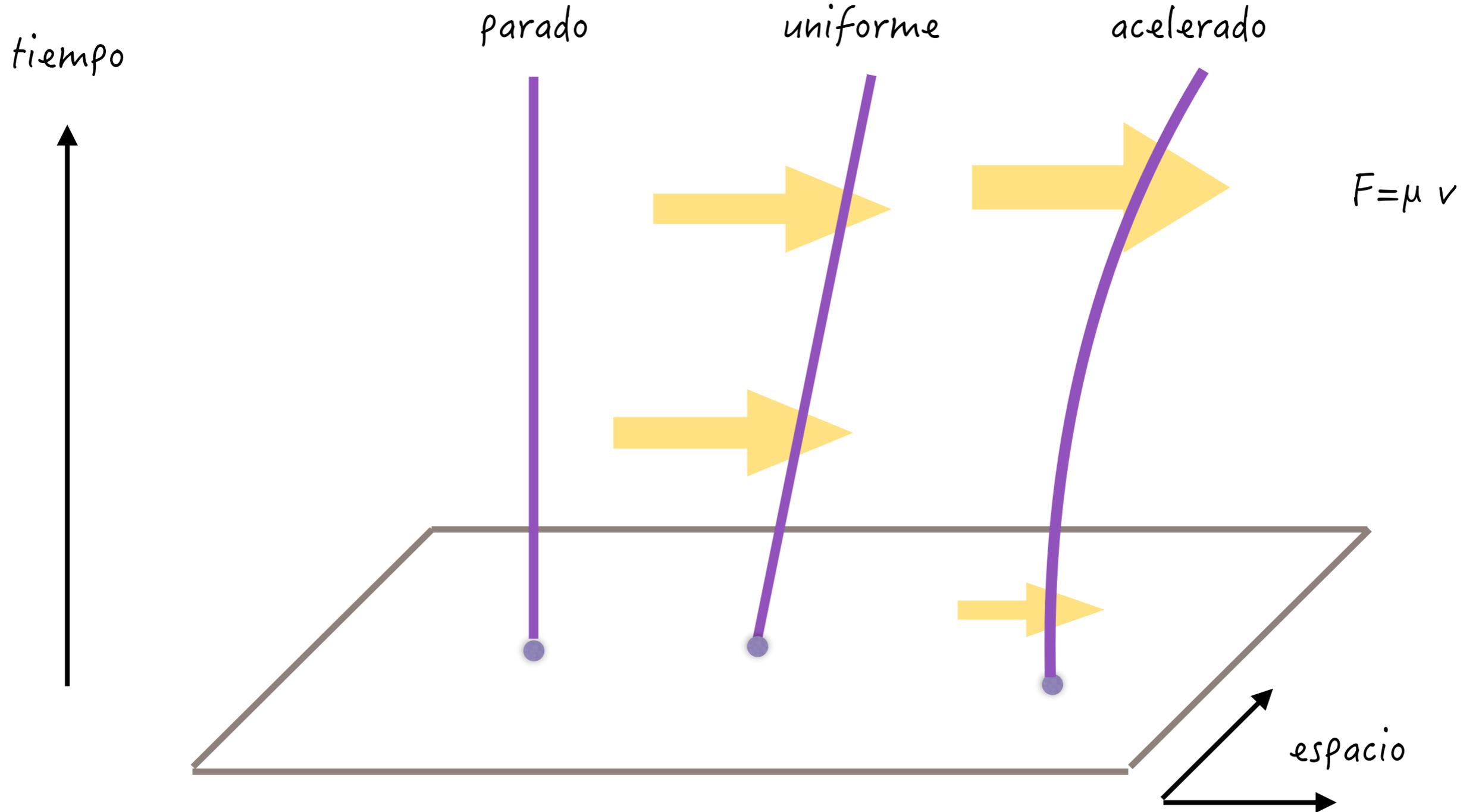
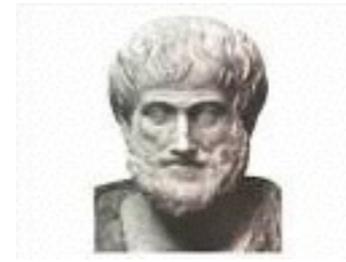
HISTORIAS DE PARTICULAS EN EL ESPACIO - TIEMPO

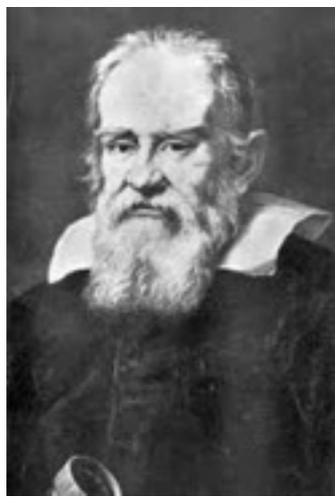


HISTORIAS DE PARTICULAS EN EL ESPACIO - TIEMPO

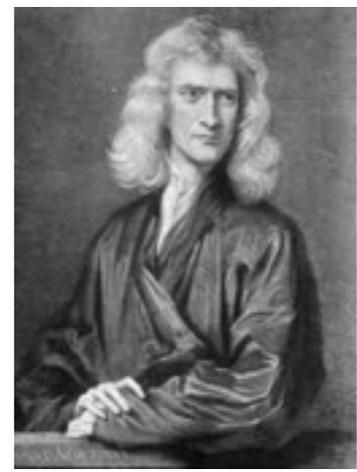


ARISTOTELES





GALILEO & NEWTON



tiempo

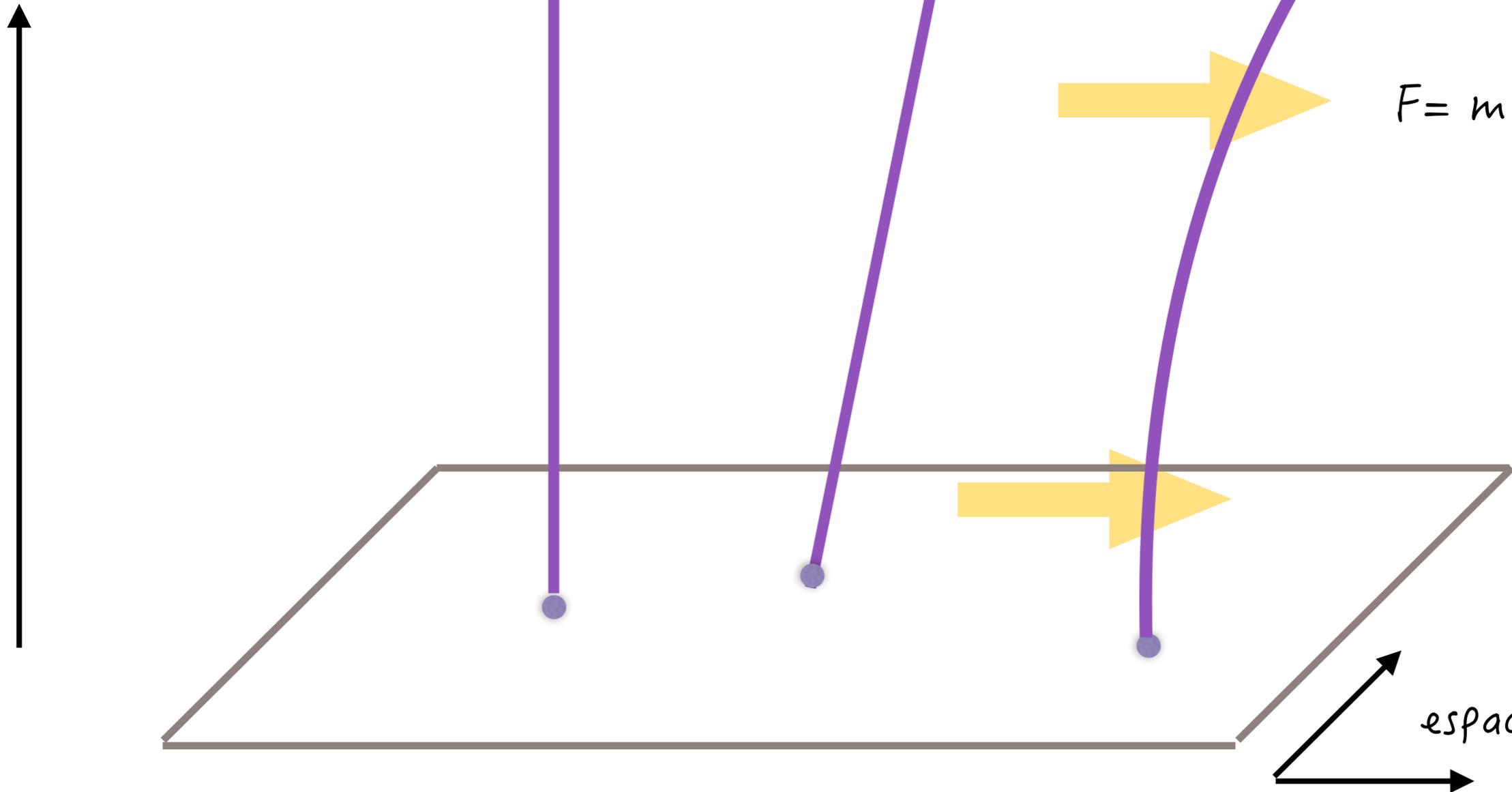
parado

uniforme

acelerado

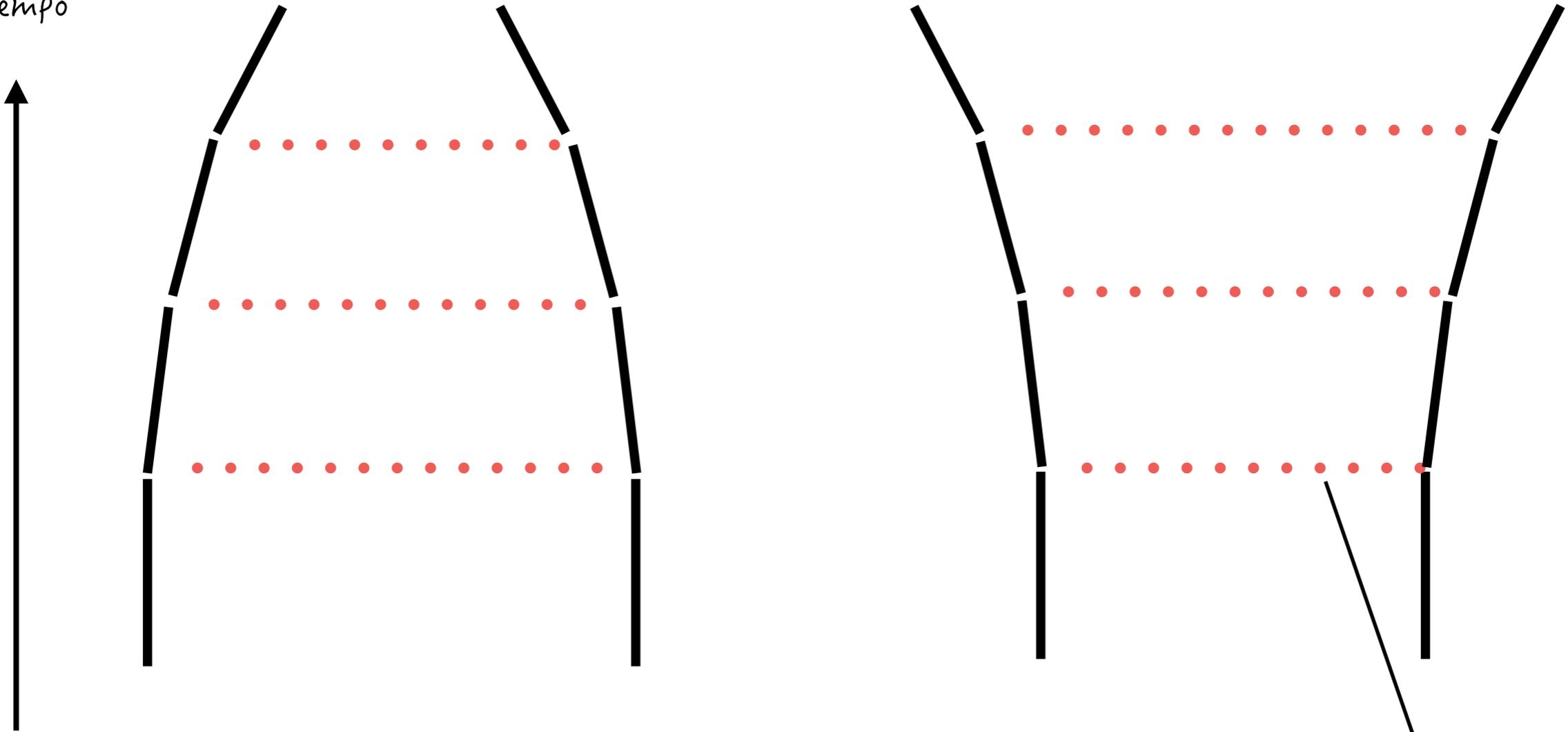
$$F = m a$$

espacio



FUERZAS NEWTONIANAS

tiempo

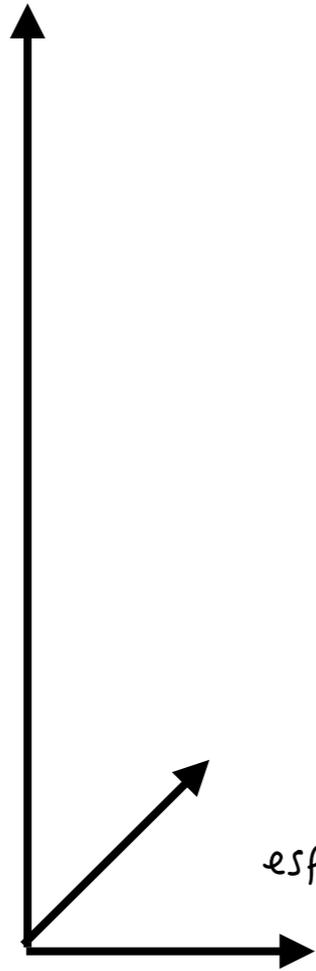


$$\text{Impulso} = (\text{masa}) (\text{velocidad})$$

$$\text{Fuerza} = \Delta(\text{Impulso}) / \Delta(\text{tiempo})$$

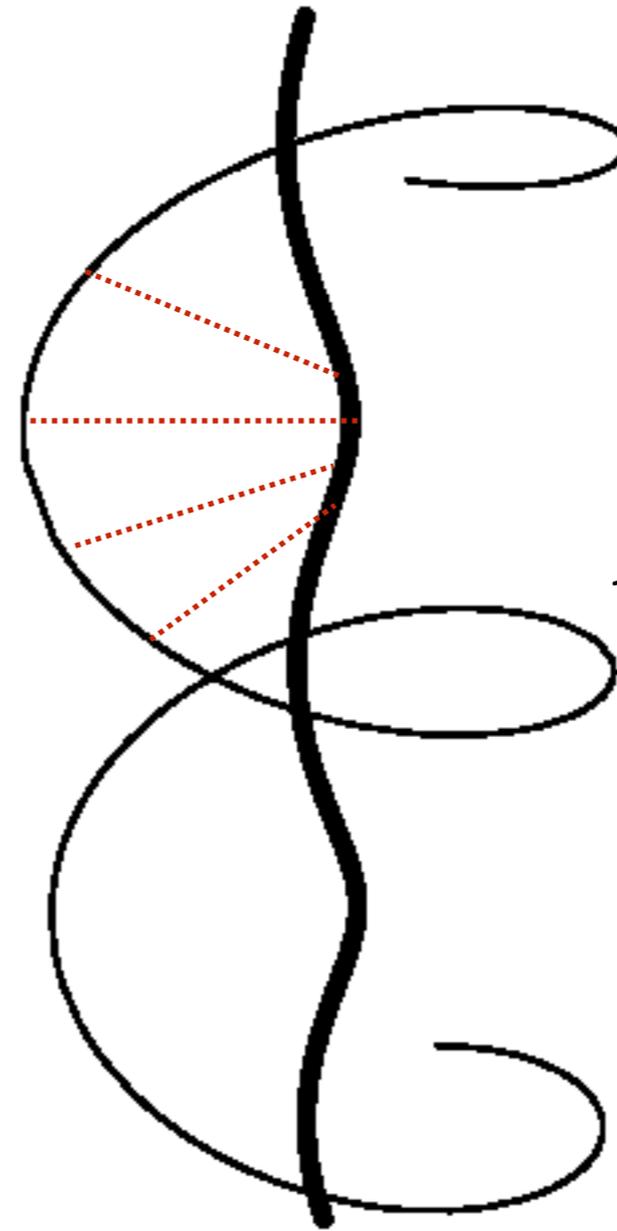
¡impulso instantáneo!

tiempo



espacio

Sol



Tierra



$$F_g = -\frac{GM_{\odot}M_{\oplus}}{d^2}$$

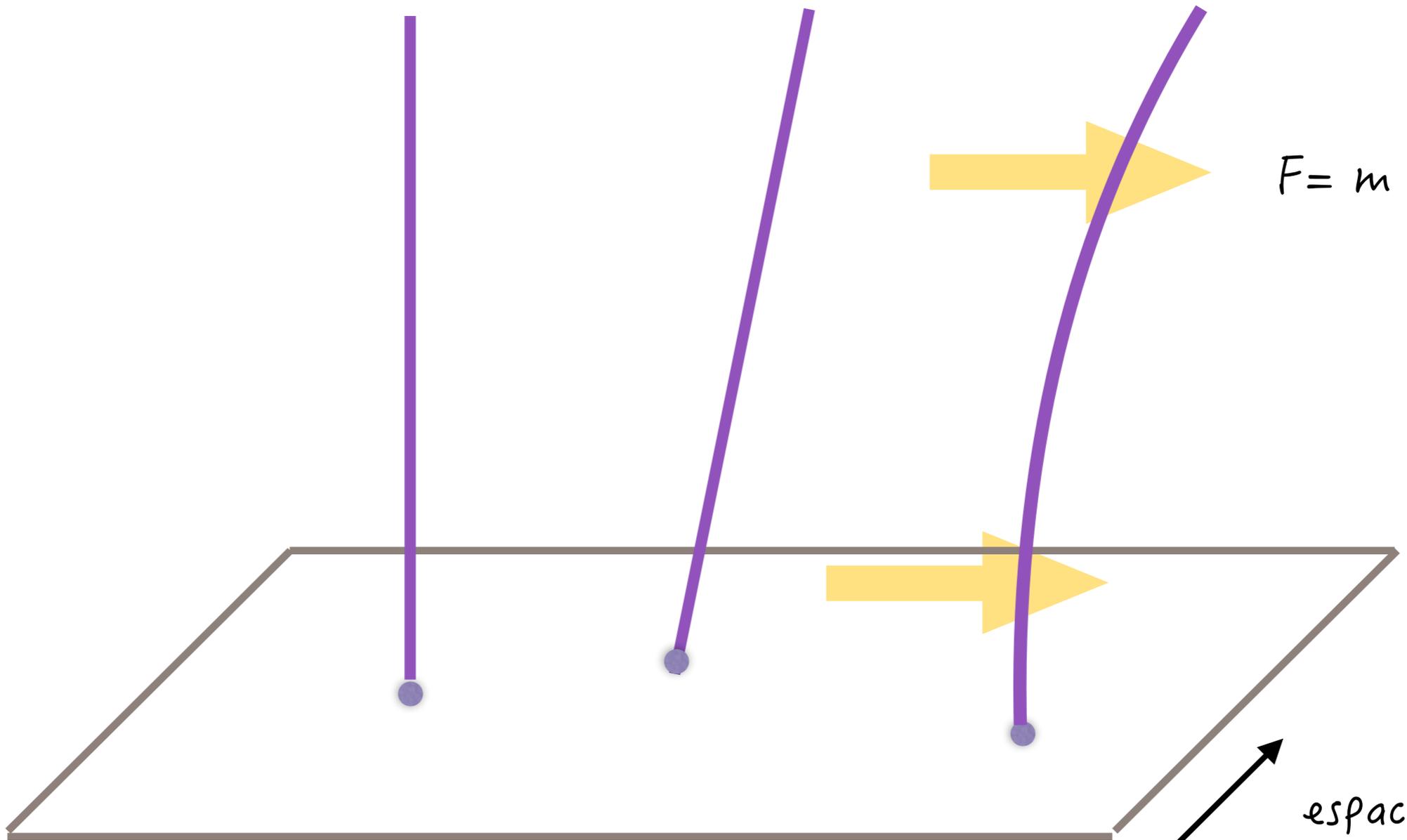
¿Qué tienen de especial?

parado

uniforme

acelerado

tiempo



$$F = m a$$

espacio

¿Qué tienen de especial?

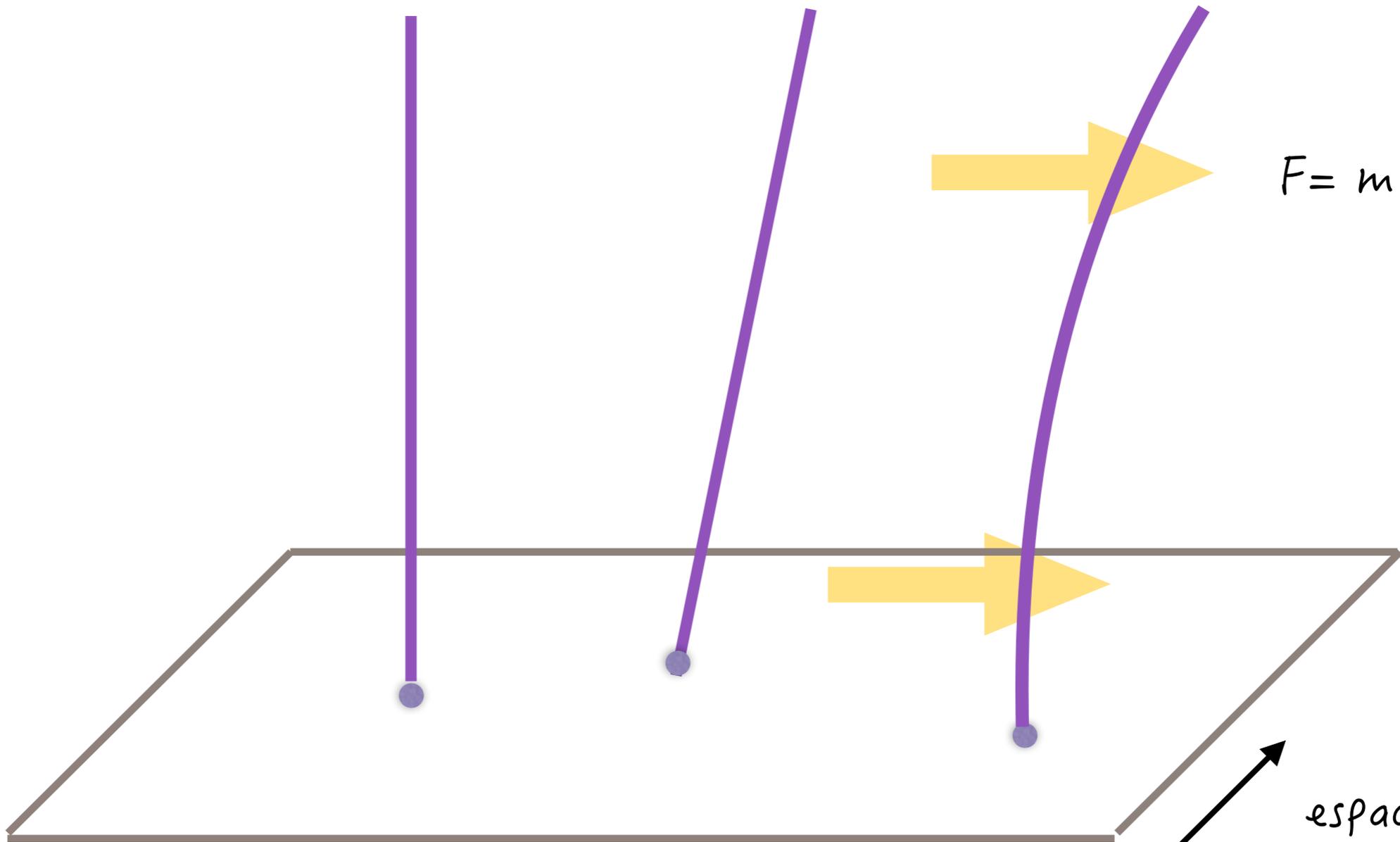
¡simetría!

parado

uniforme

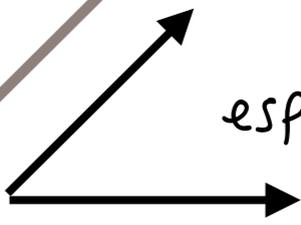
acelerado

tiempo



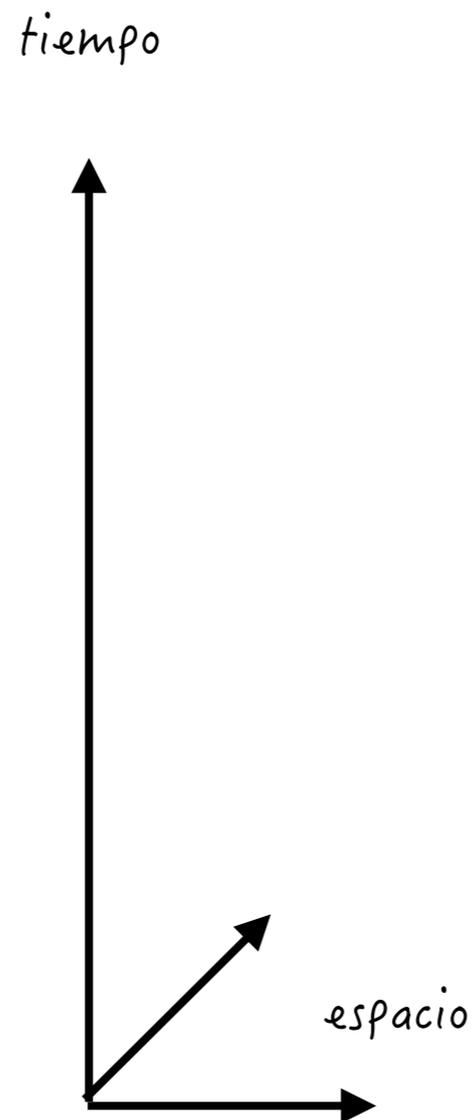
$$F = m a$$

espacio



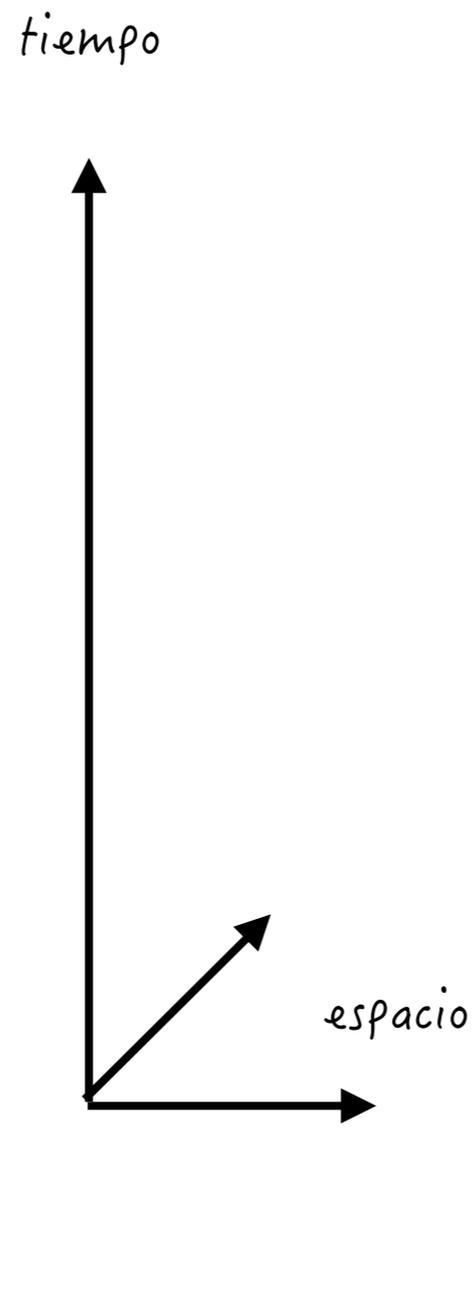
¿CUALES SON LAS SIMETRIAS DEL ESPACIO-TIEMPO?

1. No hay instantes privilegiados en el tiempo
2. No hay posiciones privilegiadas en el espacio
3. No hay direcciones privilegiadas en el espacio
4. No hay direcciones privilegiadas en el espacio-tiempo



¿CUALES SON LAS SIMETRIAS DEL ESPACIO-TIEMPO?

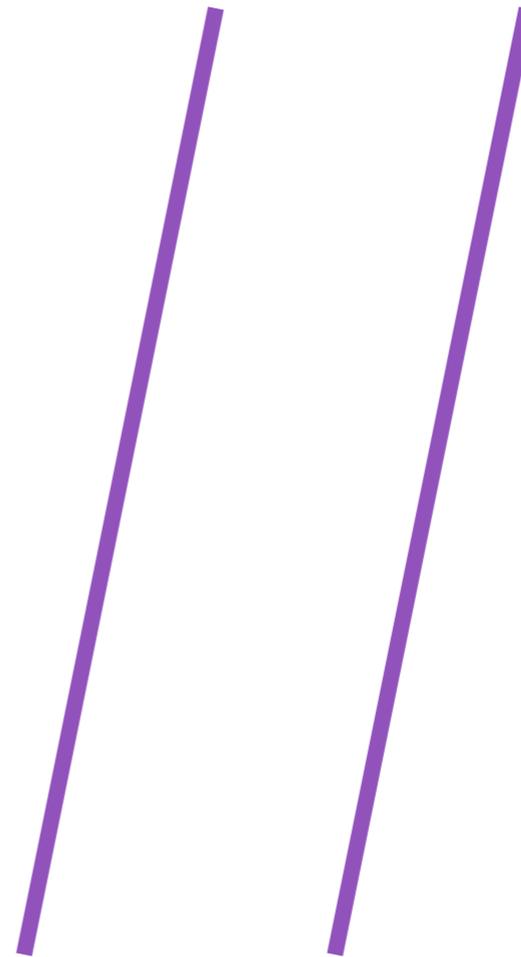
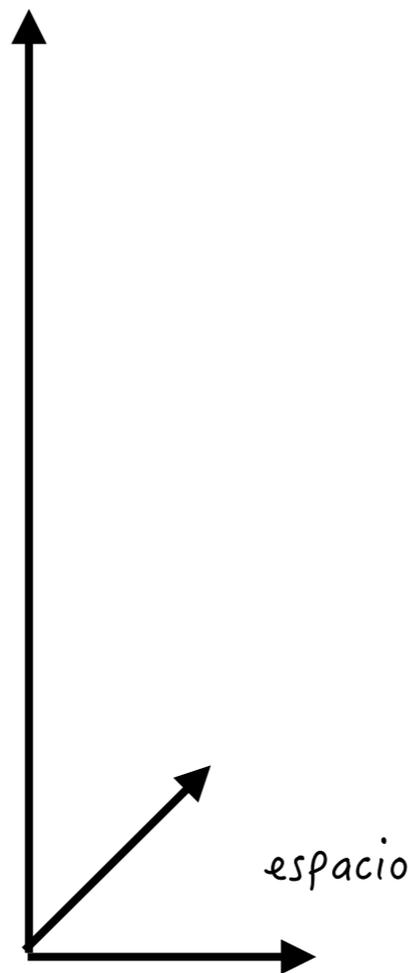
1. No hay instantes privilegiados en el tiempo
2. No hay posiciones privilegiadas en el espacio
3. No hay direcciones privilegiadas en el espacio
4. No hay direcciones privilegiadas en el espacio-tiempo



¿CUALES SON LAS SIMETRIAS DEL ESPACIO-TIEMPO?

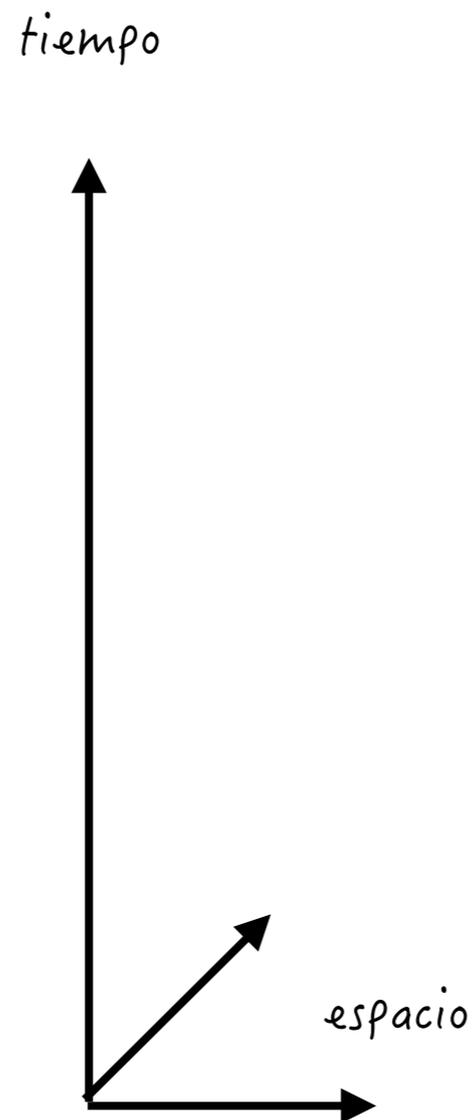
1. No hay instantes privilegiados en el tiempo
2. No hay posiciones privilegiadas en el espacio
3. No hay direcciones privilegiadas en el espacio
4. No hay direcciones privilegiadas en el espacio-tiempo

tiempo



¿CUALES SON LAS SIMETRIAS DEL ESPACIO-TIEMPO?

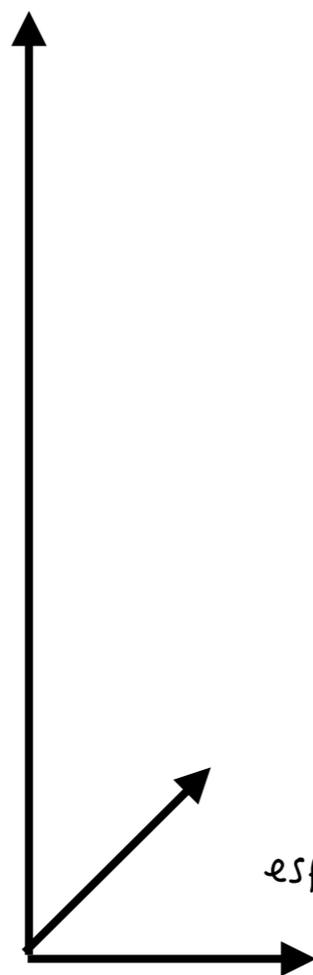
1. No hay instantes privilegiados en el tiempo
2. No hay posiciones privilegiadas en el espacio
3. No hay direcciones privilegiadas en el espacio
4. No hay direcciones privilegiadas en el espacio-tiempo



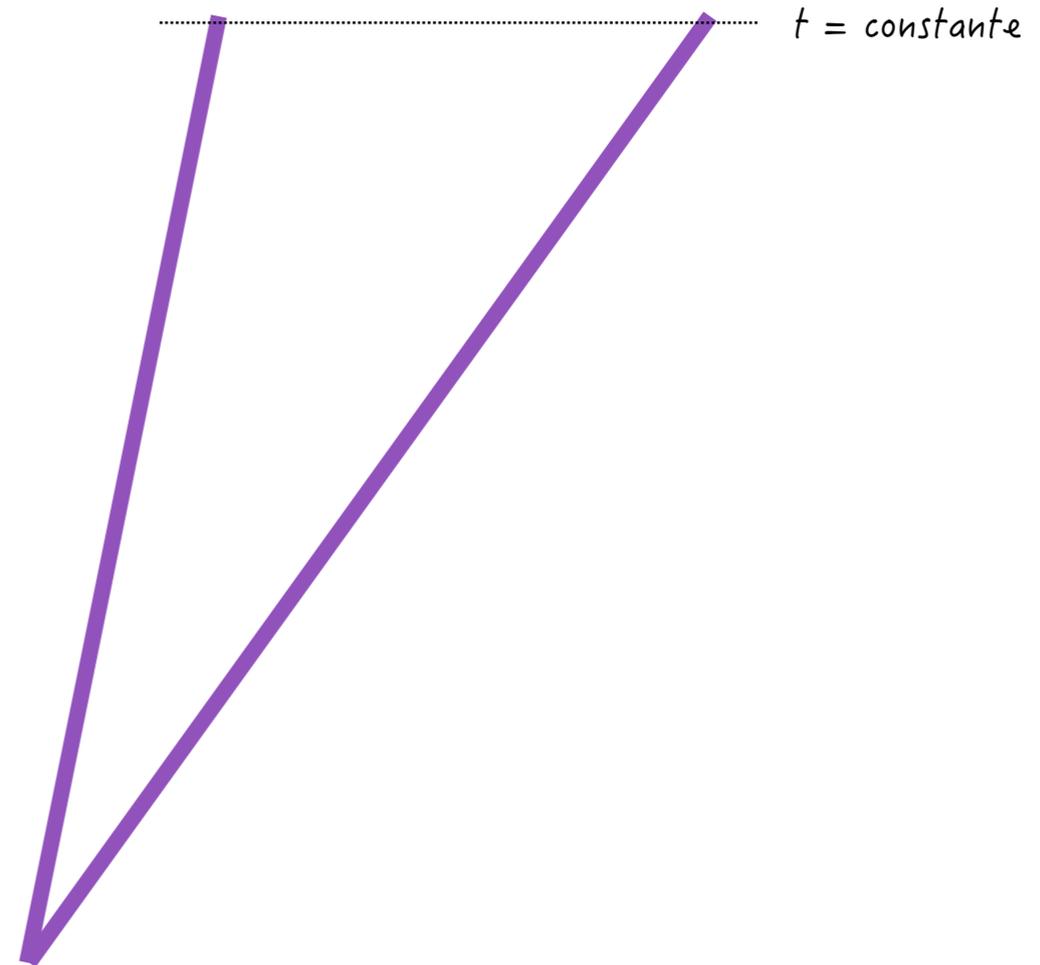
¿CUALES SON LAS SIMETRIAS DEL ESPACIO-TIEMPO?

1. No hay instantes privilegiados en el tiempo
2. No hay posiciones privilegiadas en el espacio
3. No hay direcciones privilegiadas en el espacio
4. No hay direcciones privilegiadas en el espacio-tiempo

tiempo



espacio

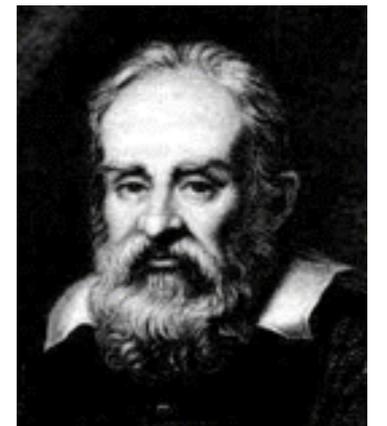


La cuarta simetría es la más interesante, pues mezcla el espacio
y el tiempo

Equivale a la idea de que no hay una velocidad privilegiada

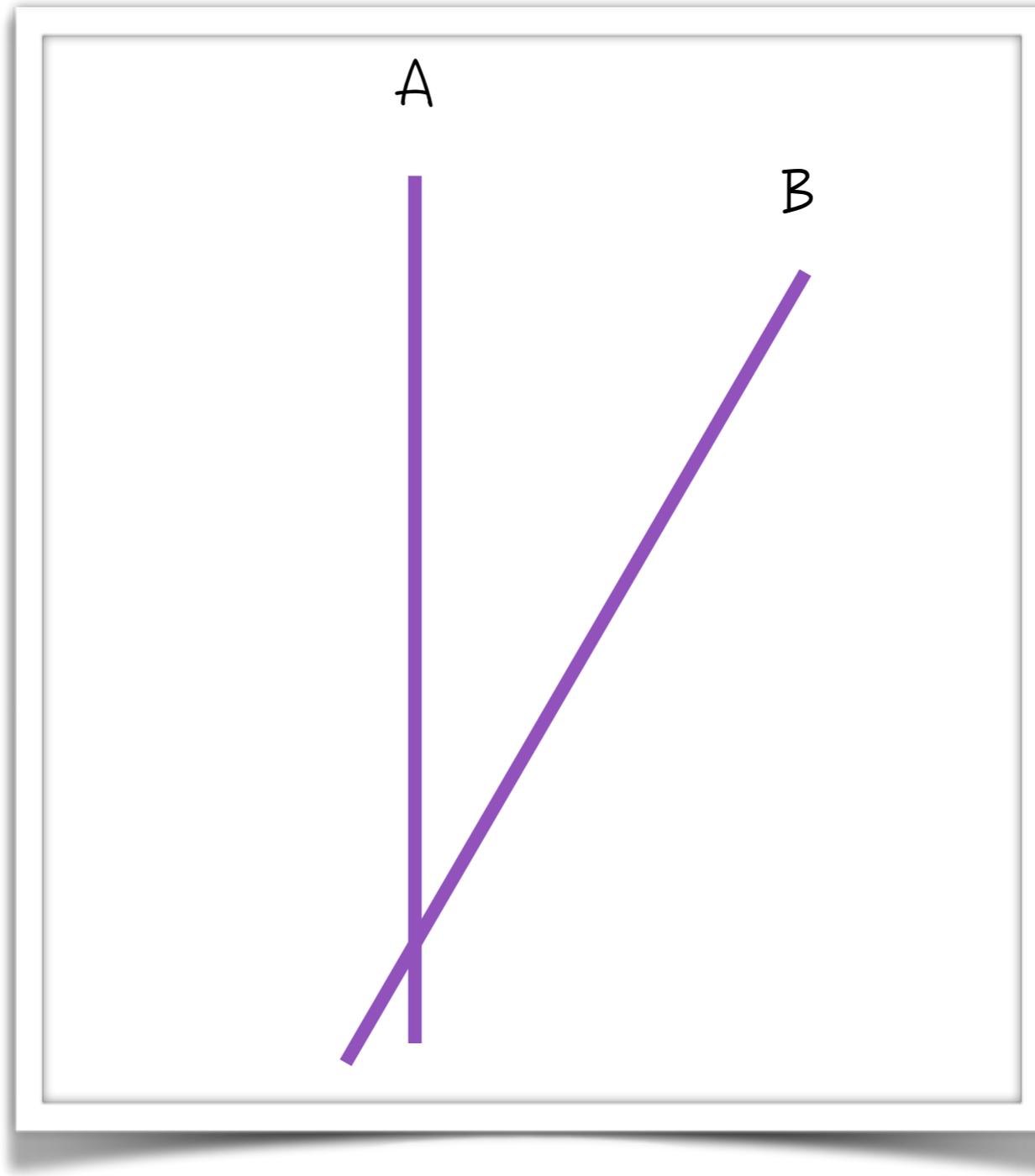
una formulación práctica es el

PRINCIPIO DE RELATIVIDAD



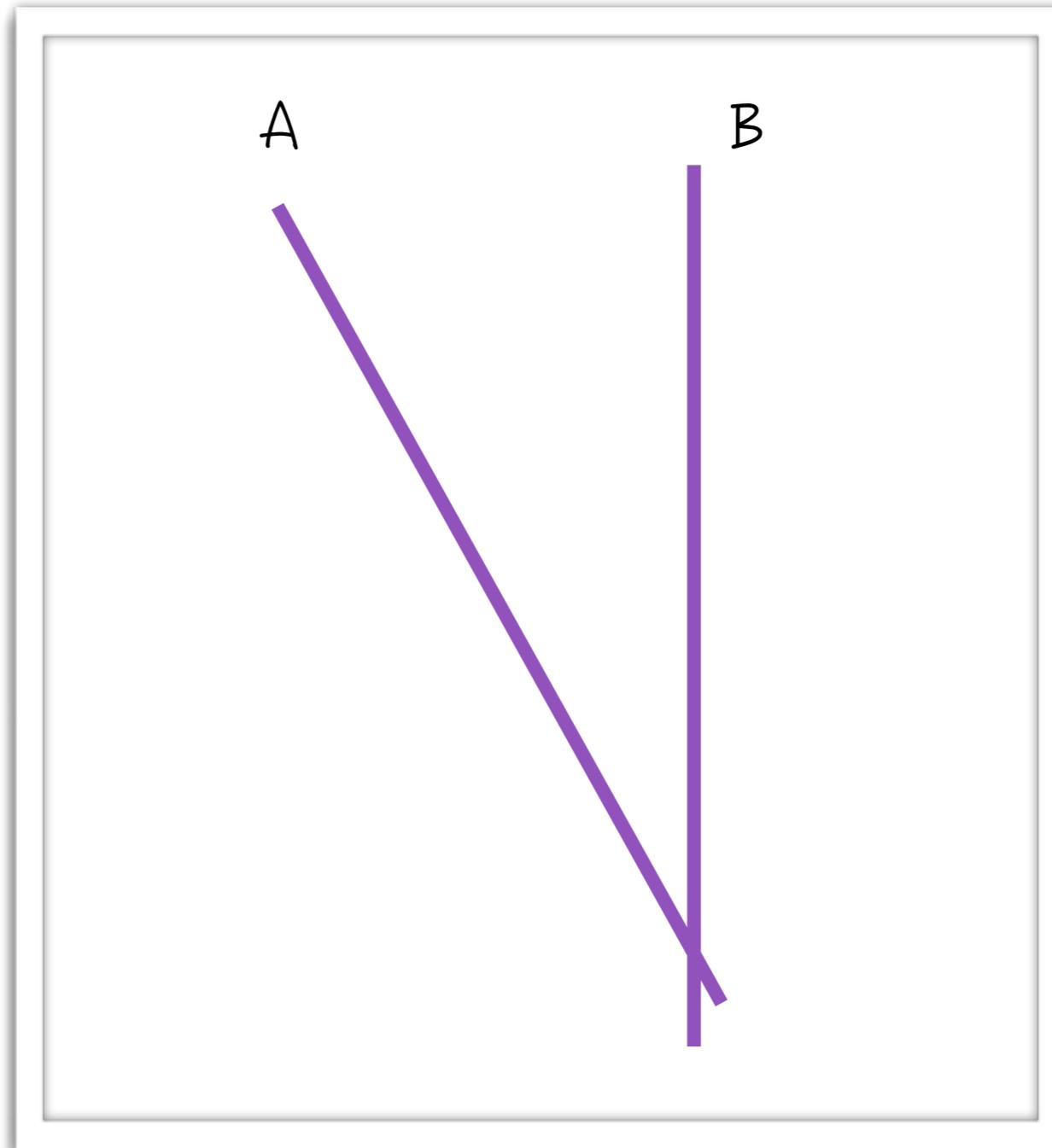
El movimiento uniforme de un laboratorio
no se puede detectar "desde dentro"

En el marco de referencia de Alicia, ella se ve a sí misma en reposo



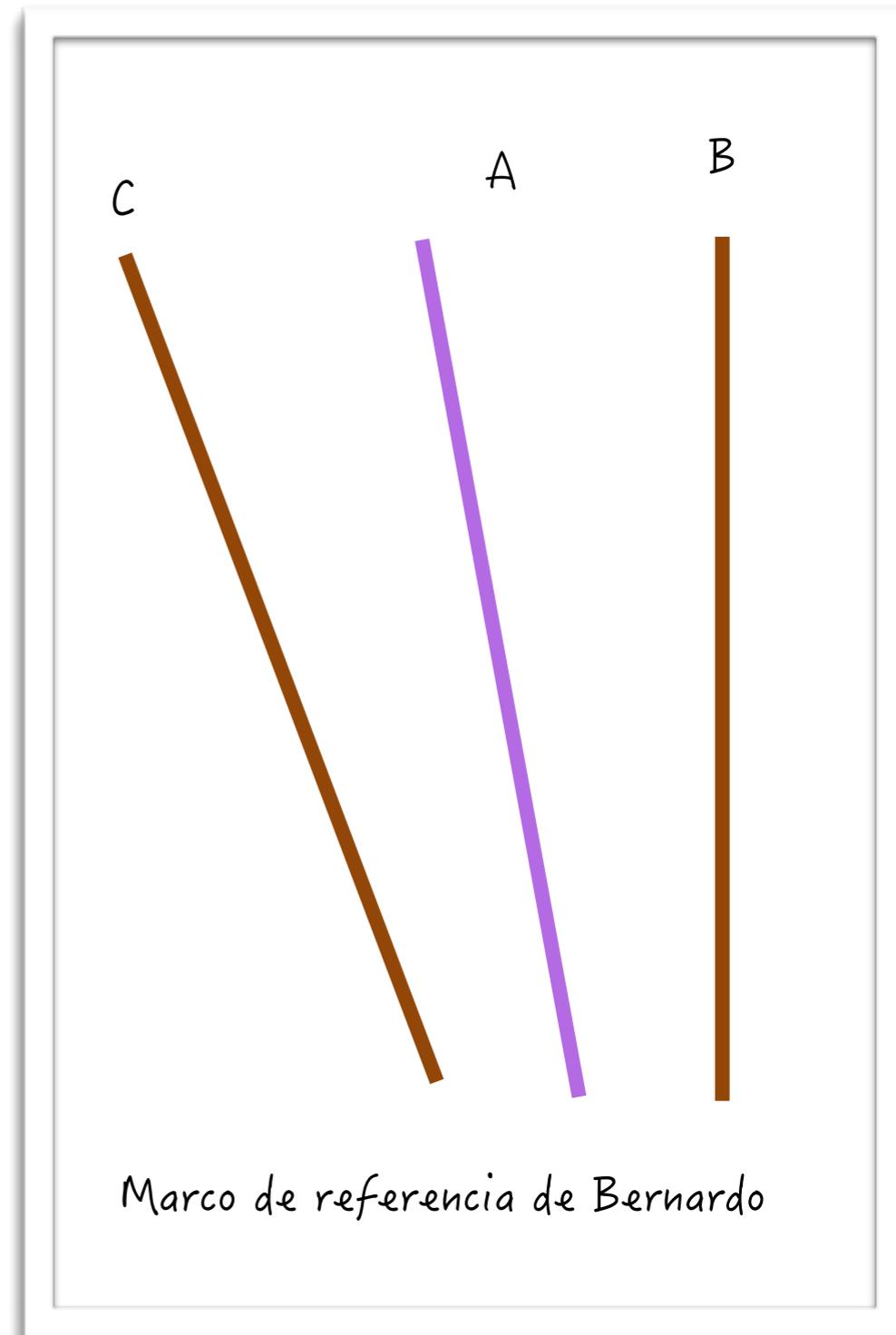
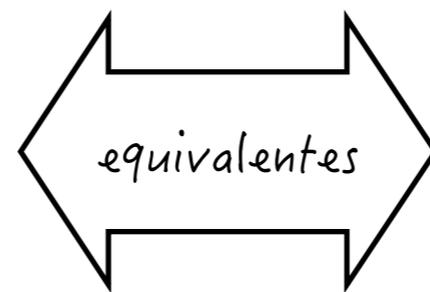
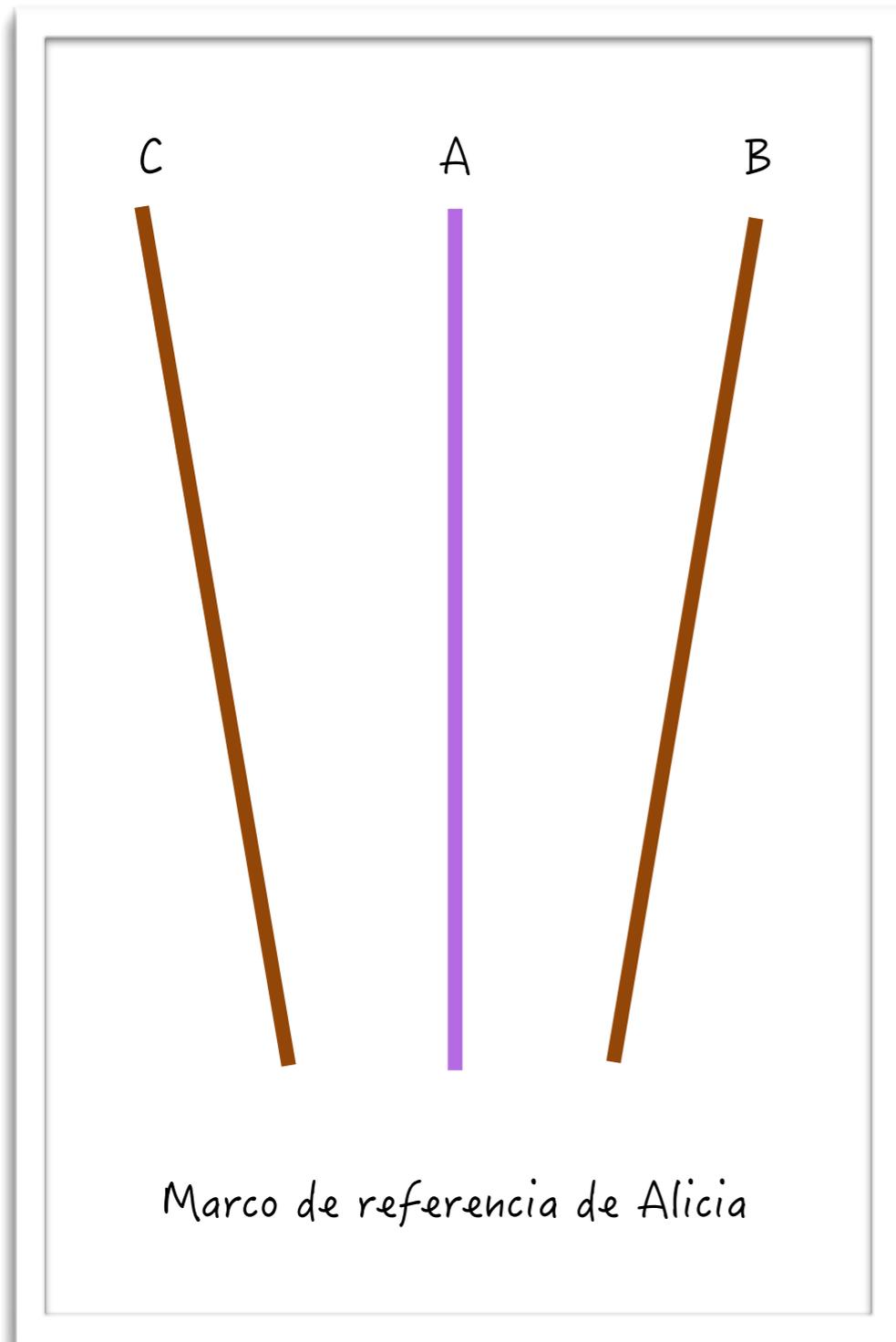
mientras Bernardo se mueve con velocidad V

En el marco de referencia de Bernardo, él se ve a sí mismo en reposo

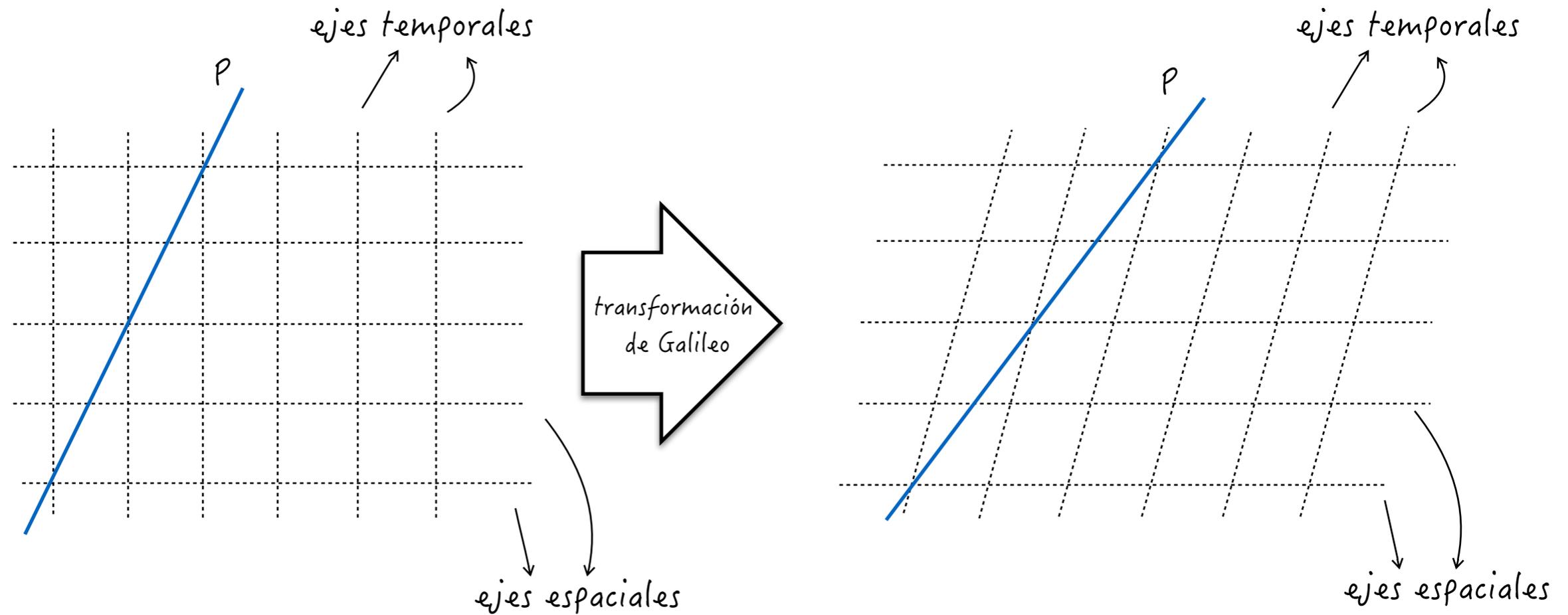


mientras Alicia se mueve con velocidad $-V$

La TRANSFORMACION DE GALILEO



LA TRANSFORMACION DE GALILEO

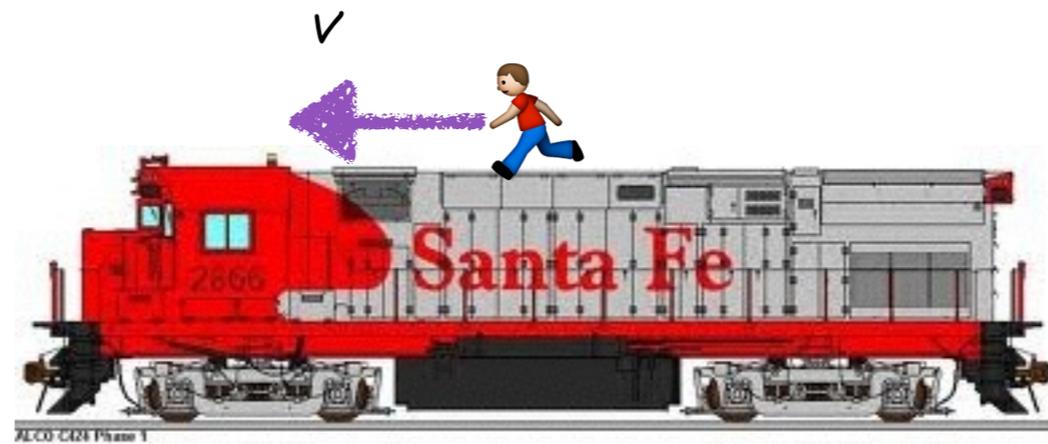


los ejes temporales se "tumban", pero los ejes espaciales se quedan intactos

La propiedad fundamental de la relatividad de Galileo



La propiedad fundamental de la relatividad de Galileo



La propiedad fundamental de la relatividad de Galileo

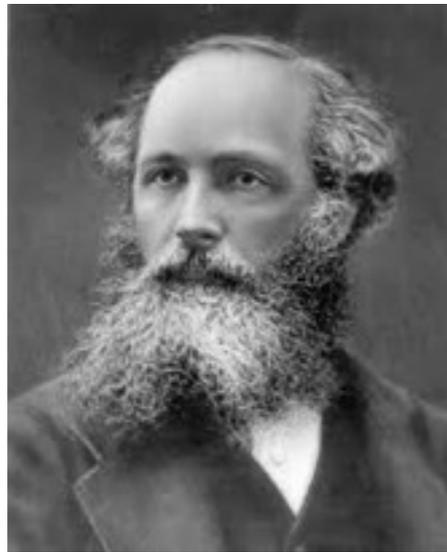


La propiedad fundamental de la relatividad de Galileo



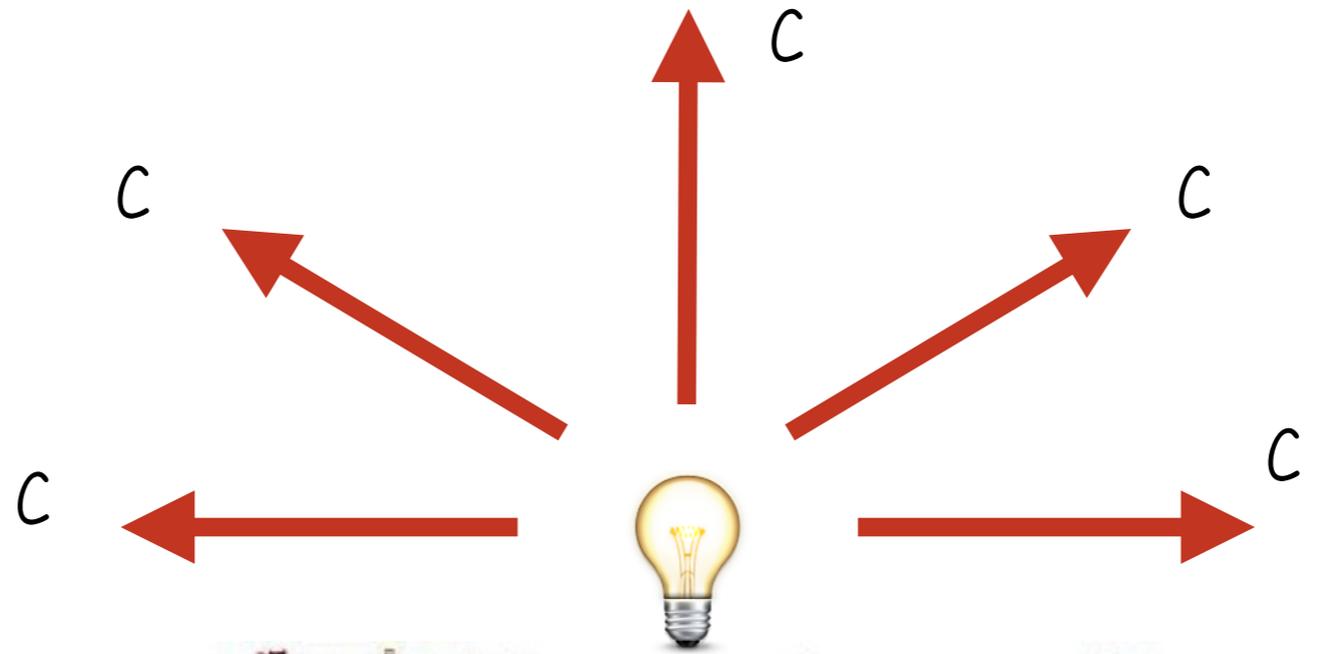
es que las velocidades relativas se suman

Durante todo el siglo XIX, se gestaría un drama que acabaría en una crisis de fundamentos: el problema de la velocidad de la luz

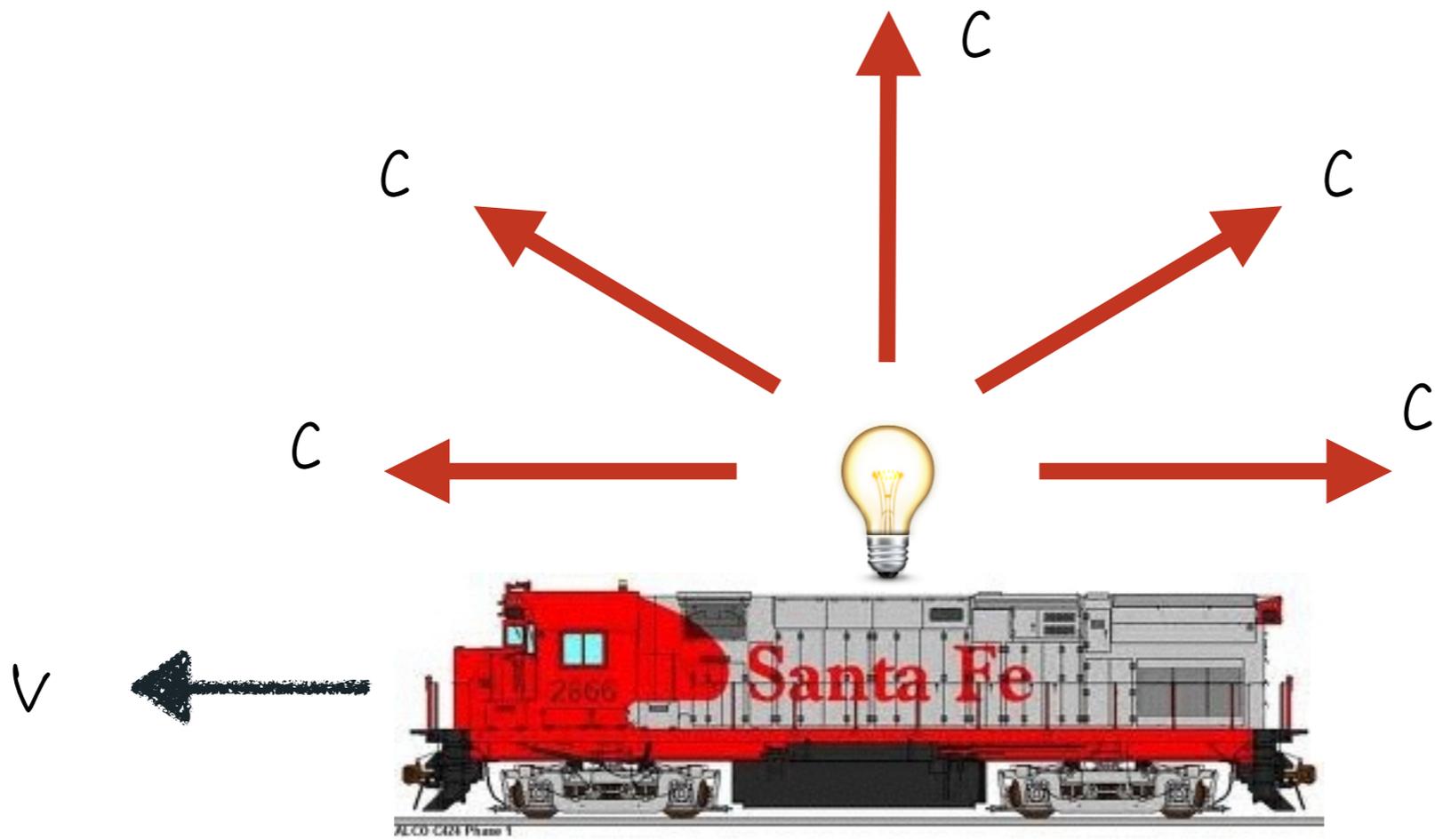


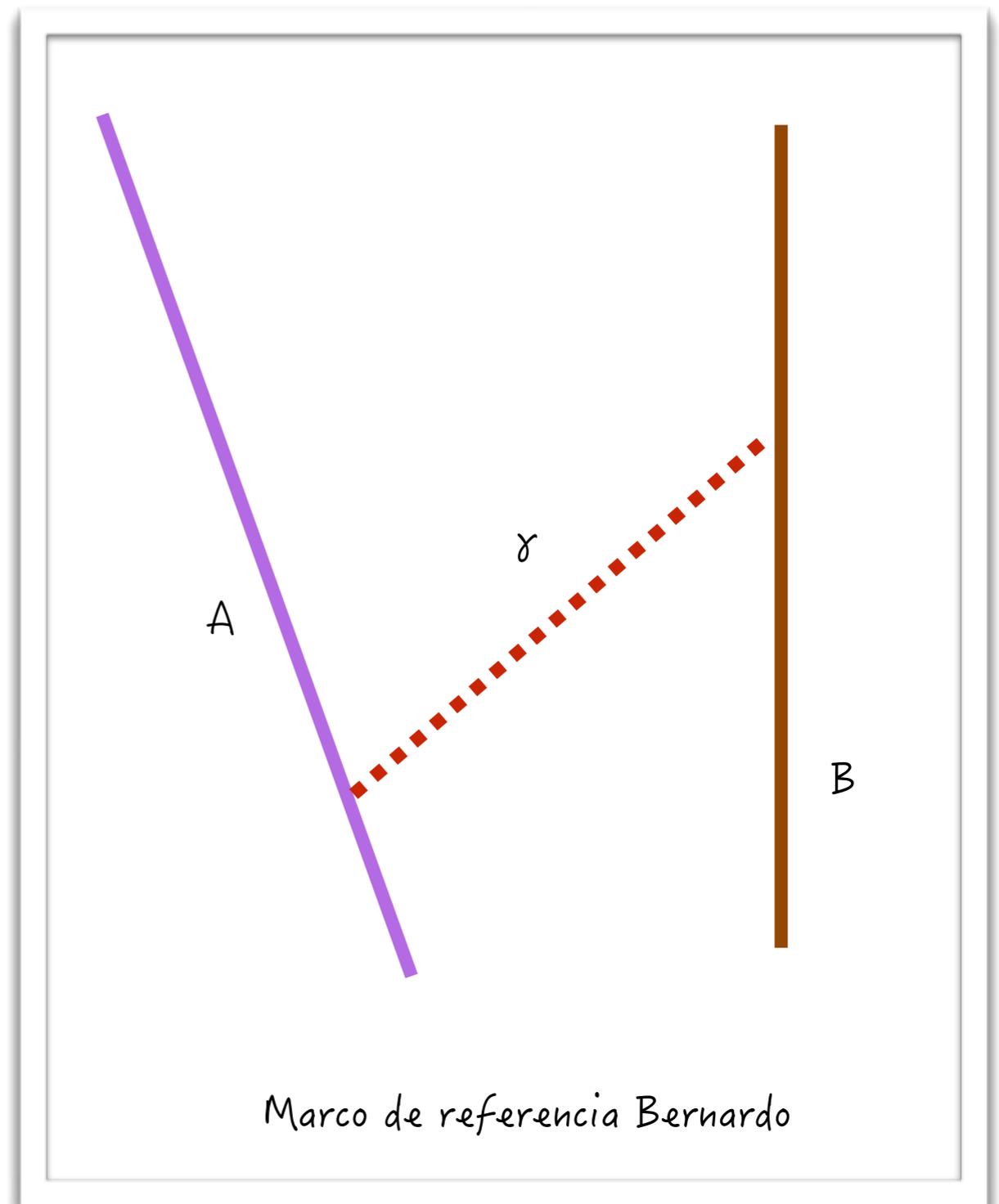
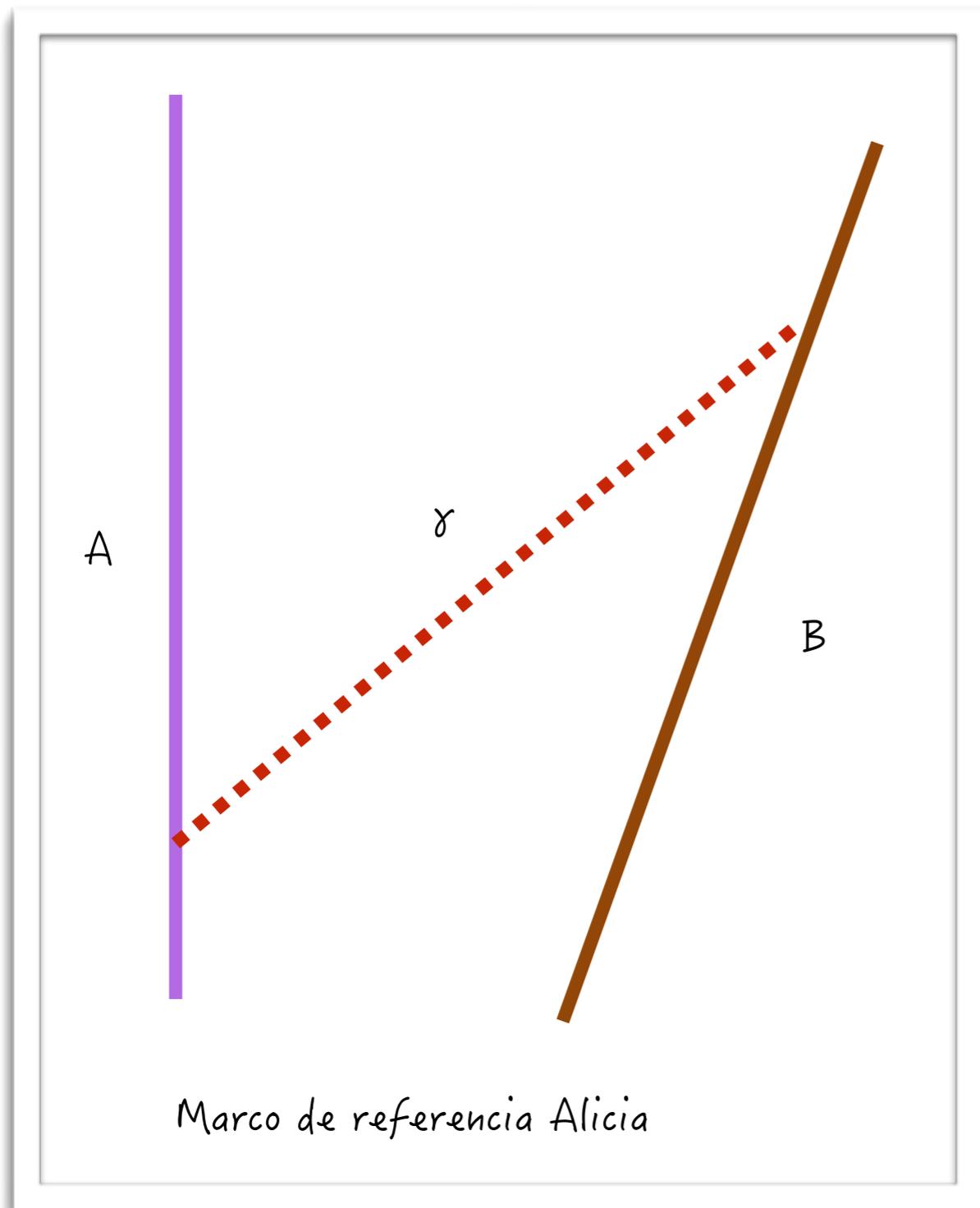
A finales de siglo, los famosos experimentos de Michelson y Morley dejaron claro que la velocidad de la luz es ABOSOLUTA.

¡No se suma ni se resta a la velocidad del emisor o el receptor!



ALCO C421 Photo 1



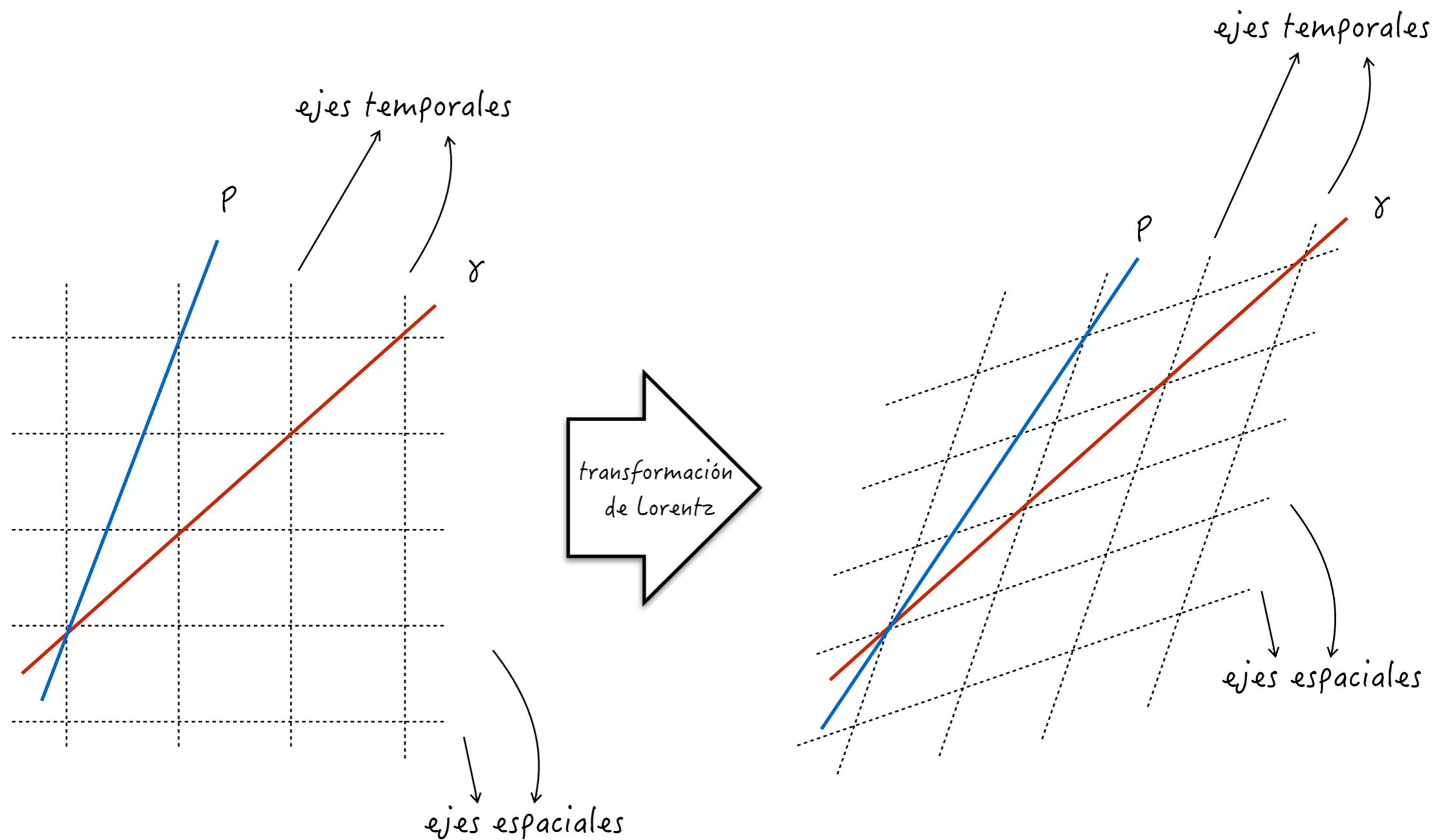


¡La inclinación de la historia del rayo de luz, γ , no varía al cambiar de marco!

EINSTEIN

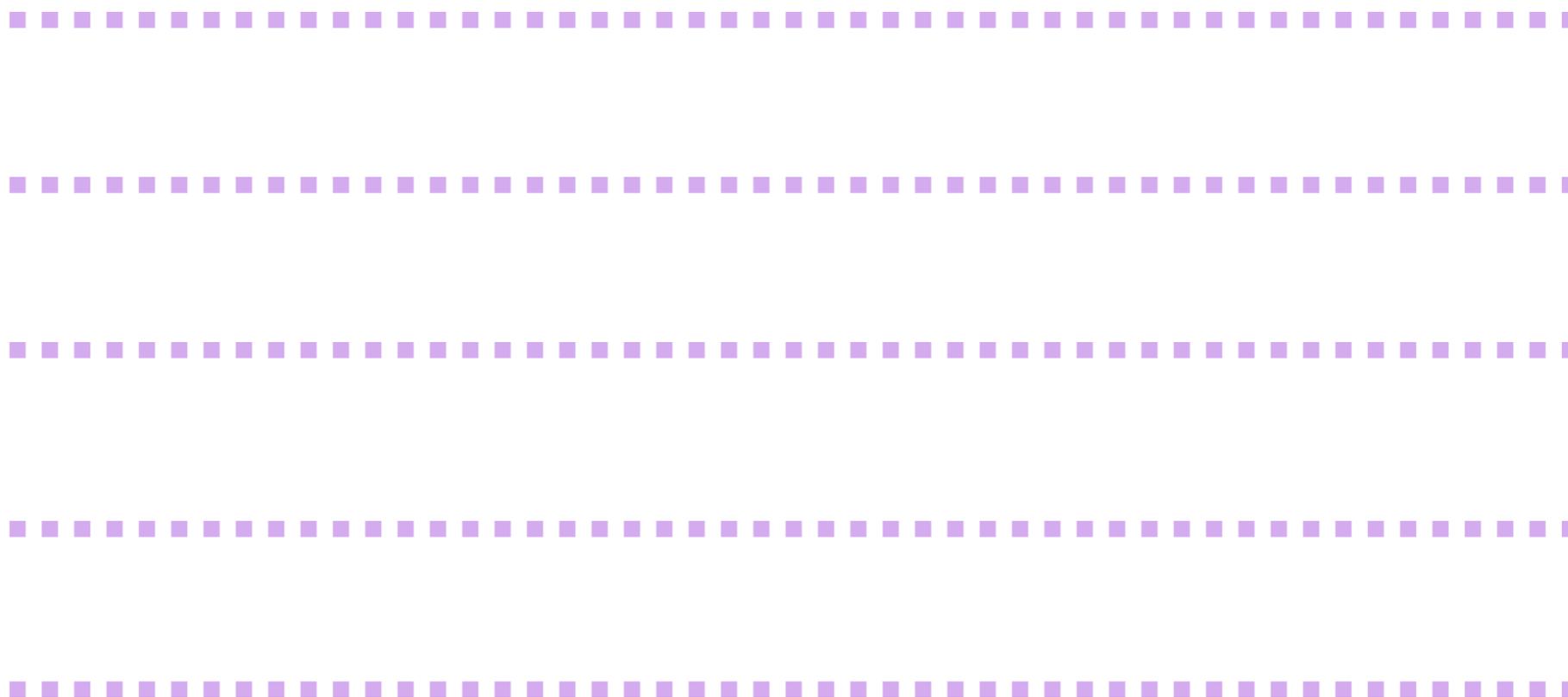


LA TRANSFORMACION DE LORENTZ



los ejes espaciales se inclinan justo lo necesario para asegurar que la historia del rayo de luz (línea γ) no sufre inclinación al deslizar los ejes temporales.

El movimiento relativo afecta a la partición entre
espacio y tiempo



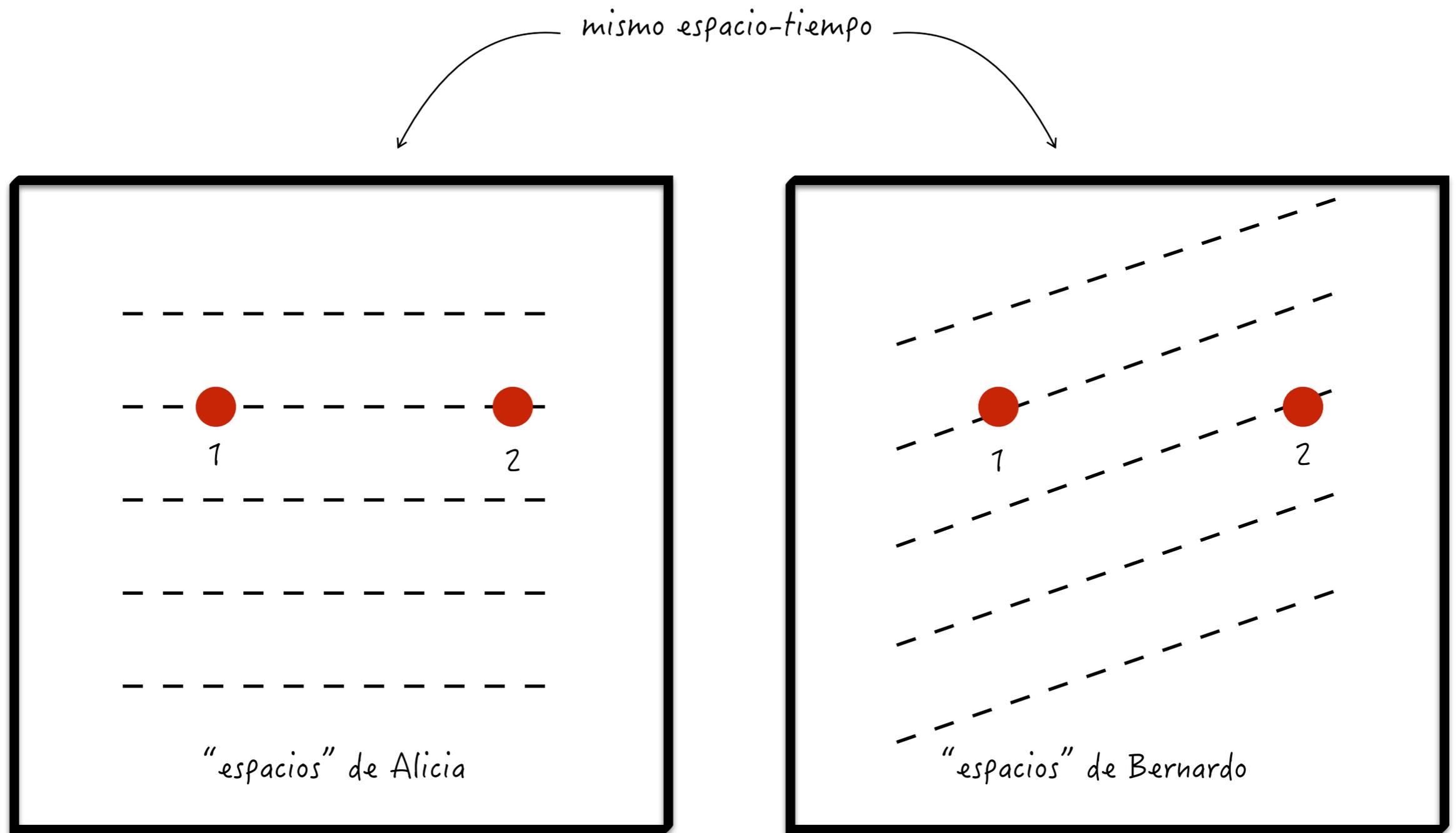
partición espacial de Alicia

El movimiento relativo afecta a la partición entre
espacio y tiempo



partición espacial de Bernardo

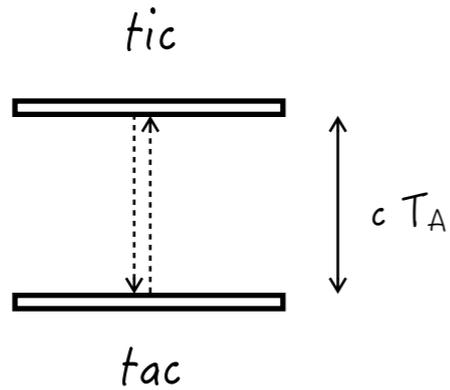
¡SIMULTANEIDAD PERDIDA!



Alicia y Bernardo realizan diferentes particiones del mismo espacio-tiempo en espacios de simultaneidad.

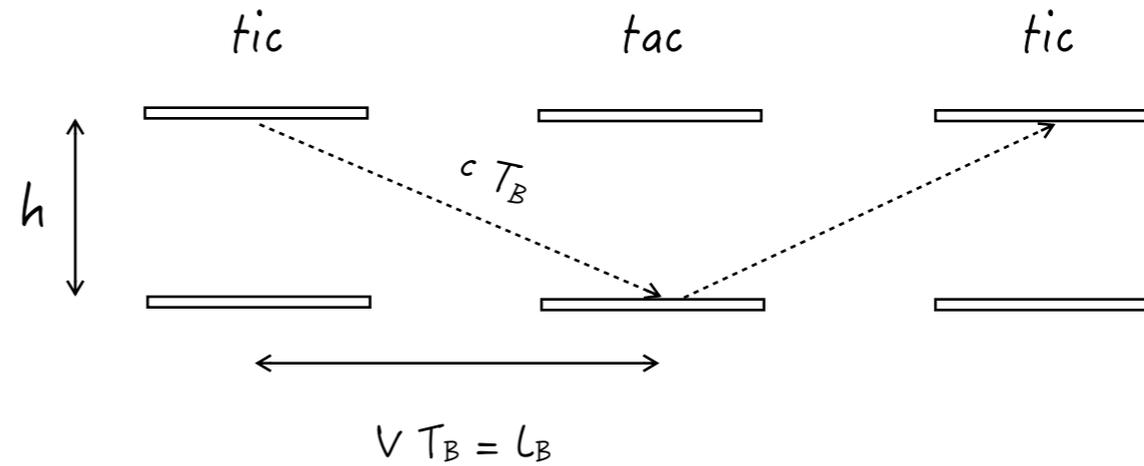
FORMULILLAS ...

reloj fotónico en reposo



Trayectoria del fotón de Alicia,
visto por Alicia

reloj fotónico en movimiento



Trayectoria del fotón de Alicia,
visto por Bernardo

$$(cT_B)^2 - (vT_B)^2 = h^2 = (cT_A)^2$$

$$T_A = T_B \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

$$c^2 T_A^2 = c^2 T_B^2 - L_B^2$$

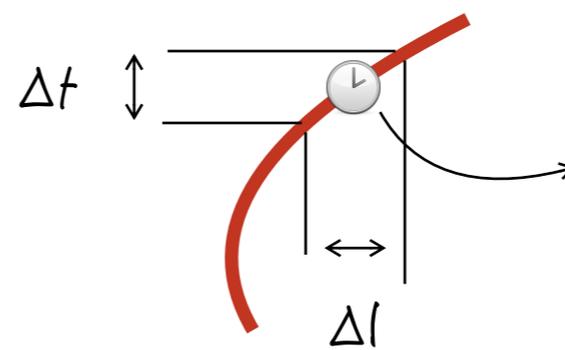
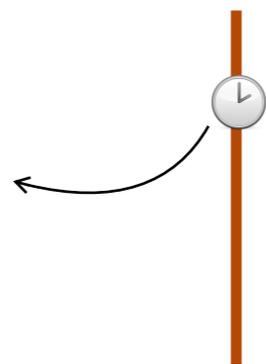
LA LEY FUNDAMENTAL DEL ESPACIO-TIEMPO

$$c^2 (\text{tiempo propio})^2 = c^2 (\text{tiempo})^2 - (\text{distancia})^2$$

$$c^2 \Delta\tau^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta l^2$$

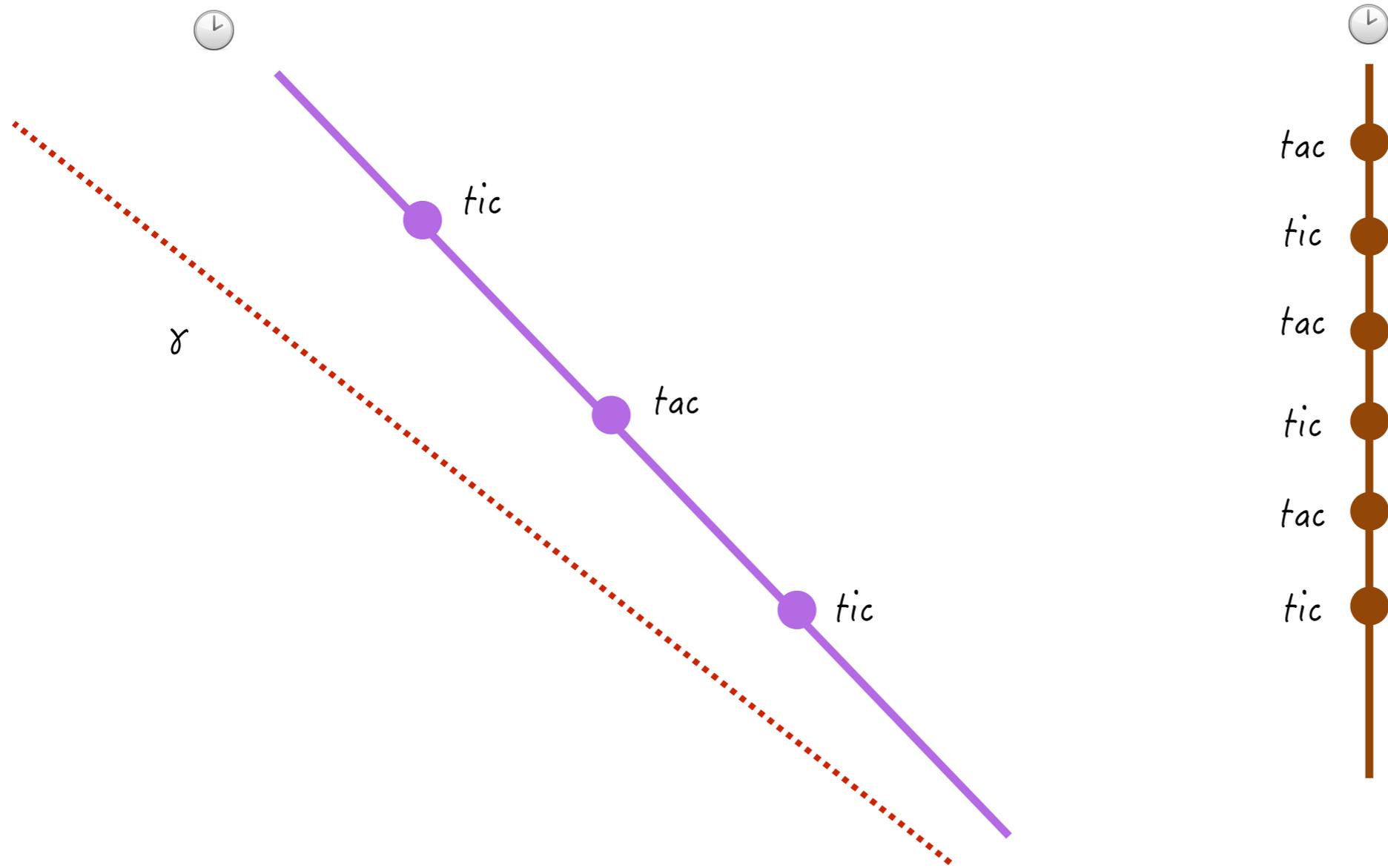
su validez LOCAL nunca ha sido cuestionada

Δt es el intervalo de tiempo marcado por el reloj de referencia en reposo



$\Delta\tau$ es el intervalo de tiempo marcado por el reloj móvil

LA DILATACION DEL TIEMPO



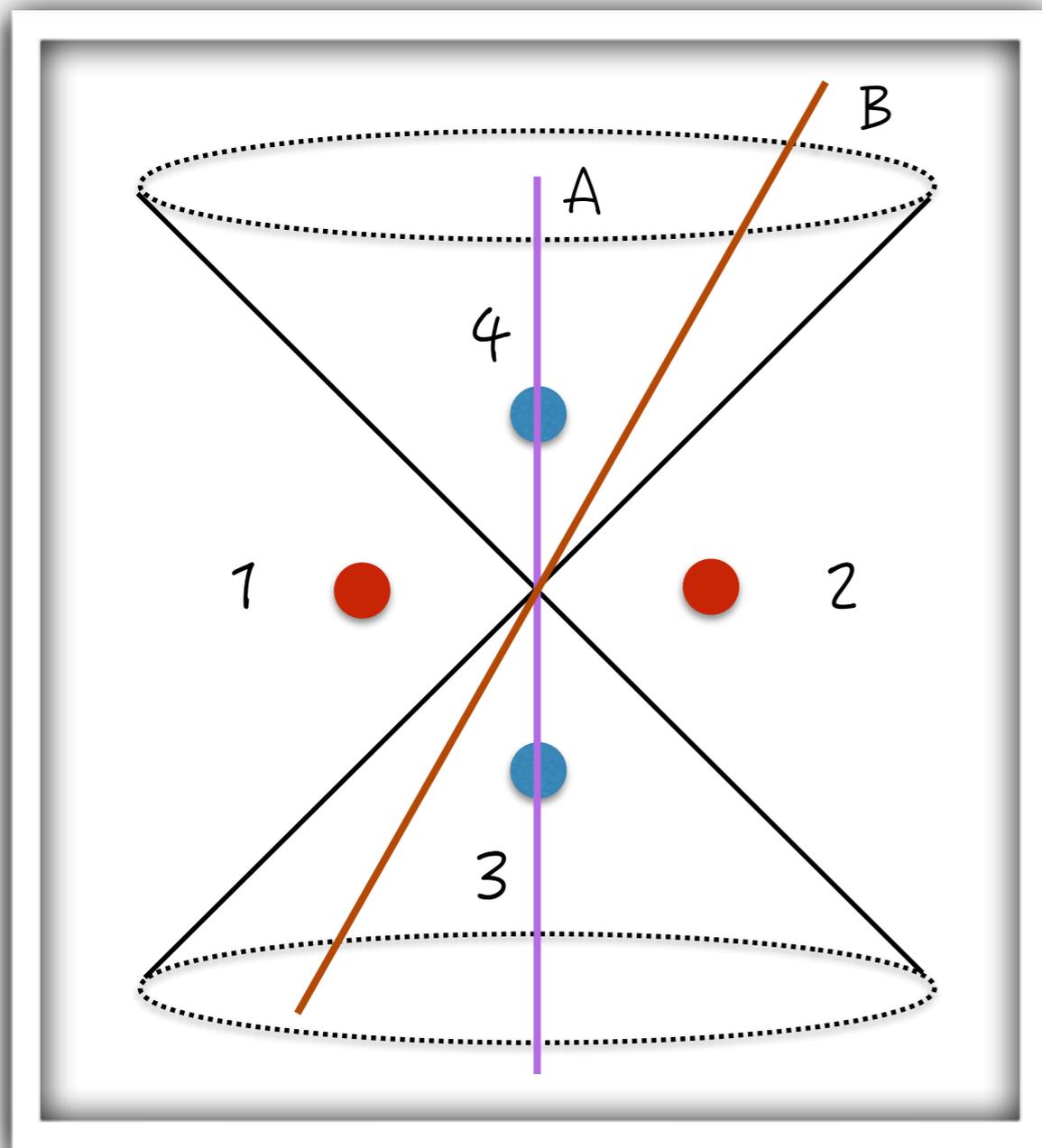
Los relojes internos son más lentos cuanto más inclinada es su historia en el espacio-tiempo, es decir, cuanto más se aproximan a la velocidad de la luz.

La mezcla espacio-tiempo implica la mezcla energía-impulso
y la interpretación de la masa como "energía condensada"

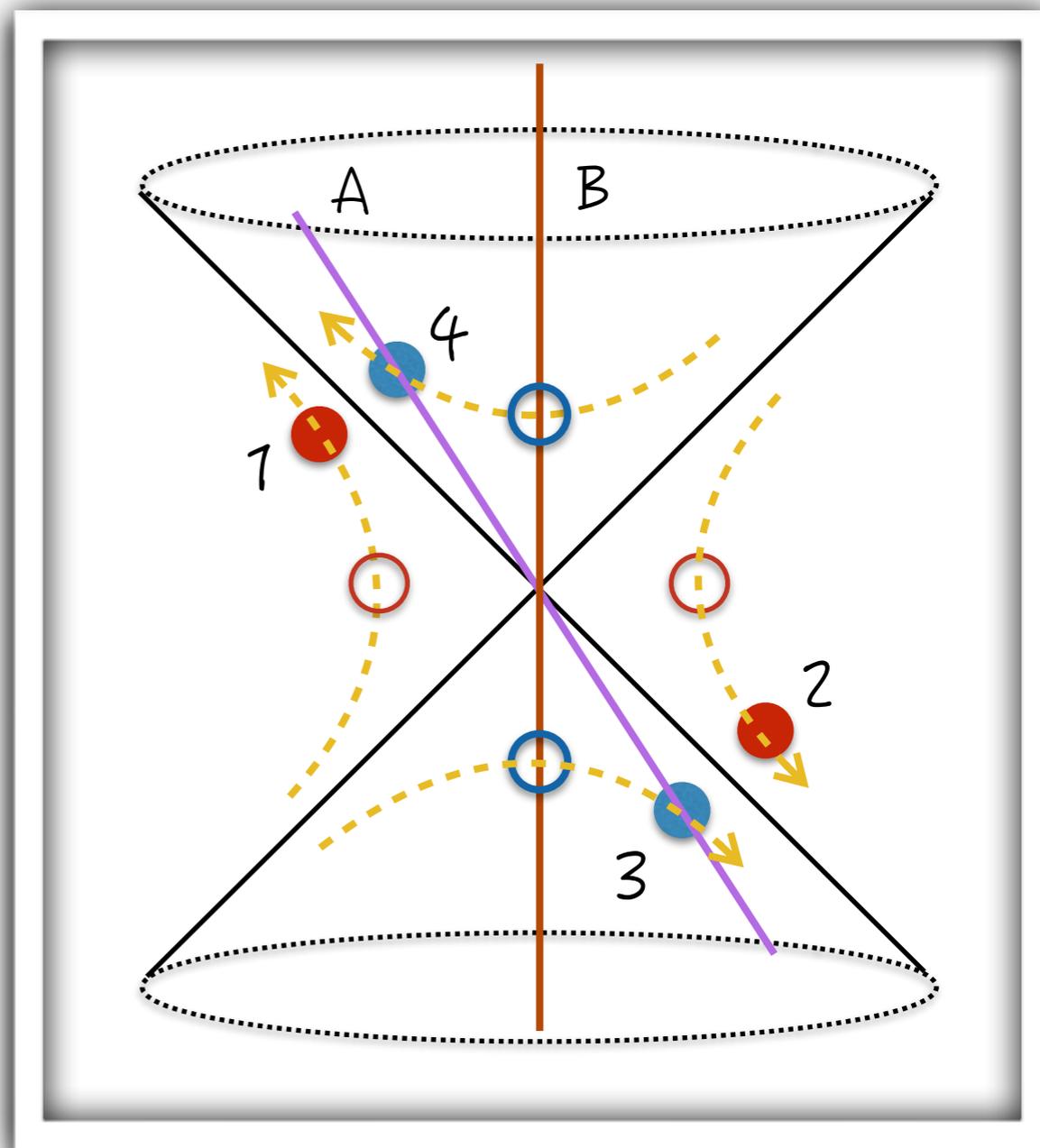
$$(\text{masa})^2 c^4 = (\text{Energía})^2 - (\text{impulso})^2 c^2$$

La versión general de la famosa ecuación de las camisetas...

$$E = m c^2$$



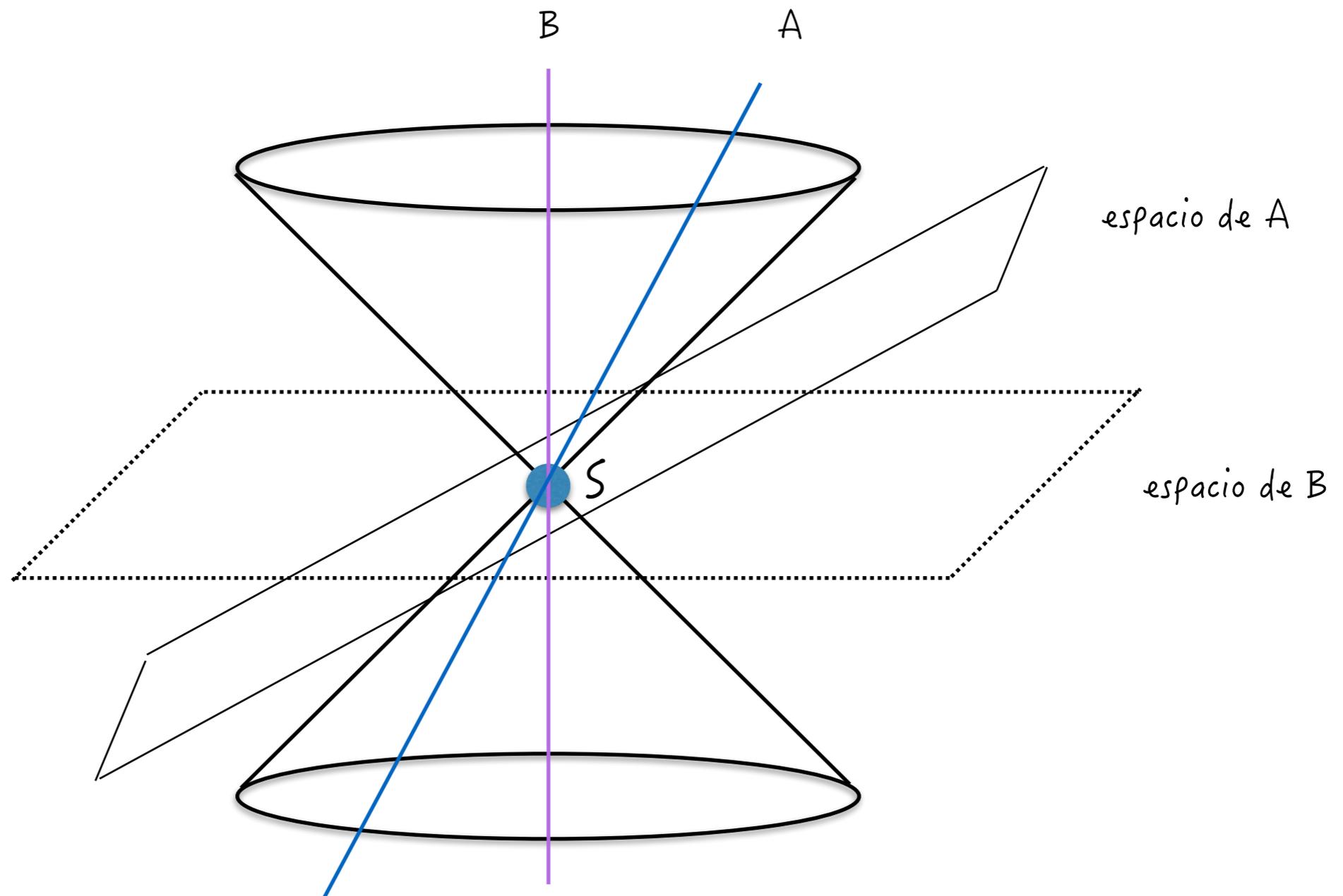
Marco de referencia de Alicia



Marco de referencia de Bernardo

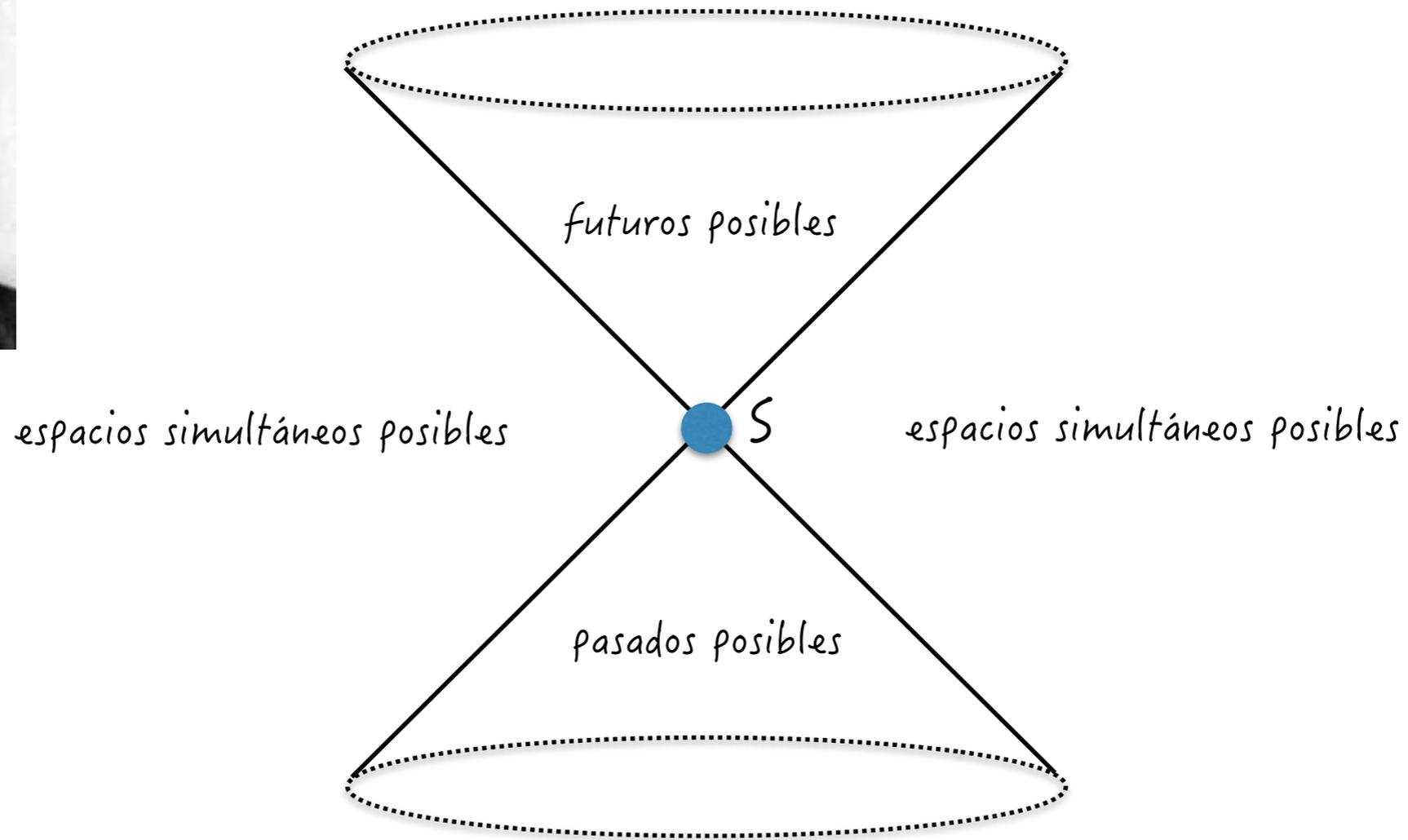
Al cambiar de marco, los sucesos cambian de coordenadas, pero el cono de luz permanece "invariante"

El espacio-tiempo cerca de un suceso S



El interior del cono de luz contiene el futuro y el pasado de S .
El exterior del cono de luz contiene todos los posibles "ahoras" de los que el evento S puede formar parte.

LA ESTRUCTURA LOCAL DEL ESPACIO-TIEMPO

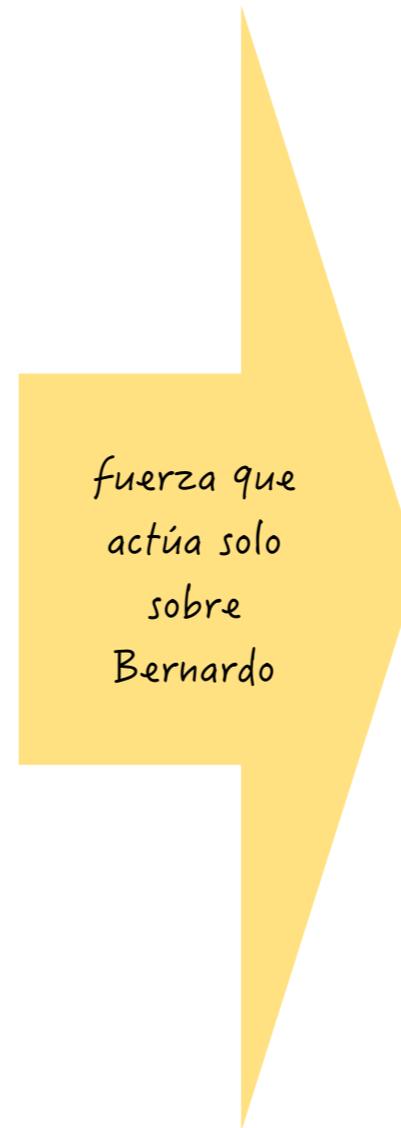
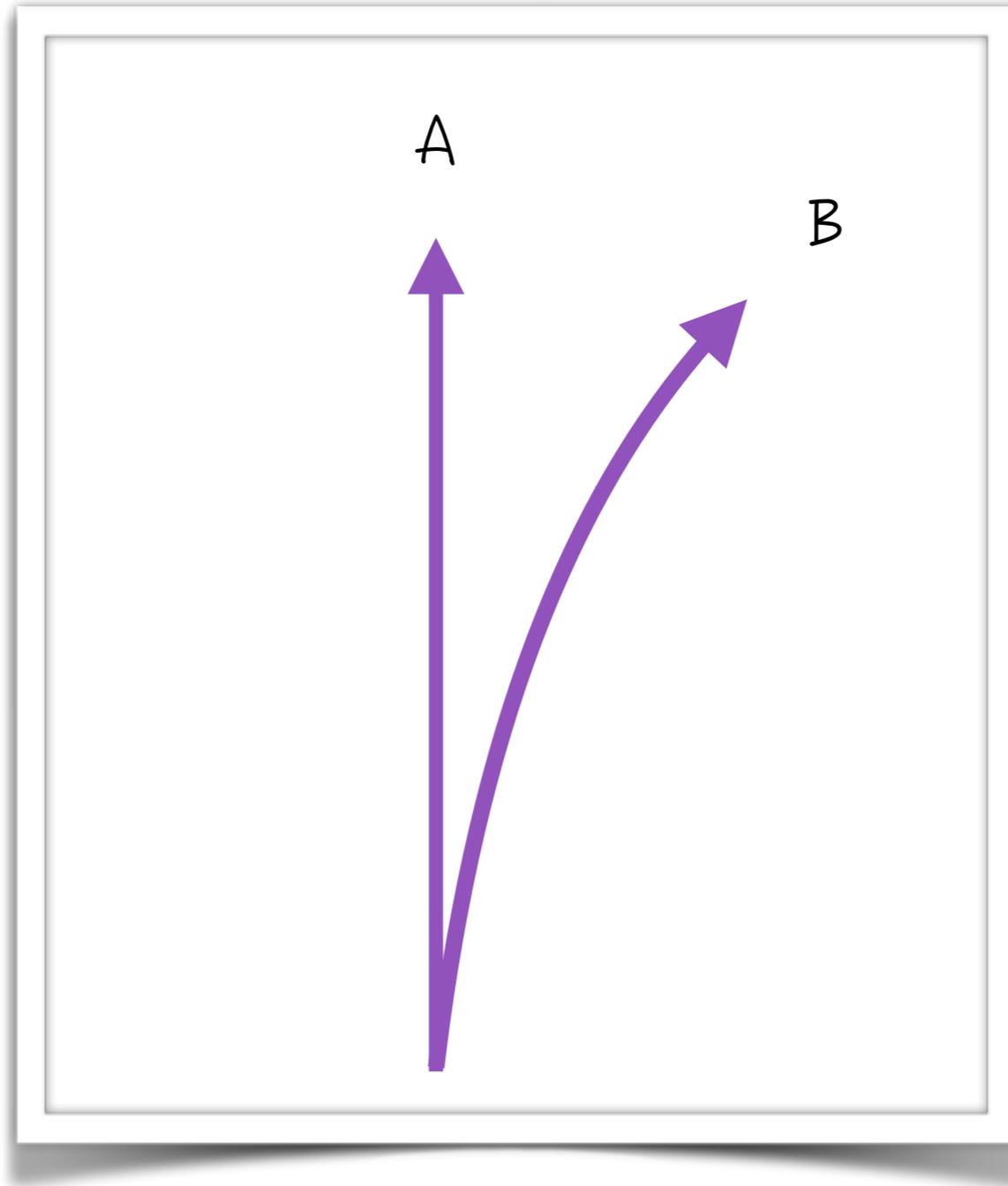


En la vecindad de un suceso S , el espacio-tiempo se divide en regiones según su relación causal con S .

ESTA ESTRUCTURA ESTA EXPERIMENTALMENTE PROBADA HASTA LOS 10^{-17} cm, aproximadamente $D_{\text{proton}} / 1000$

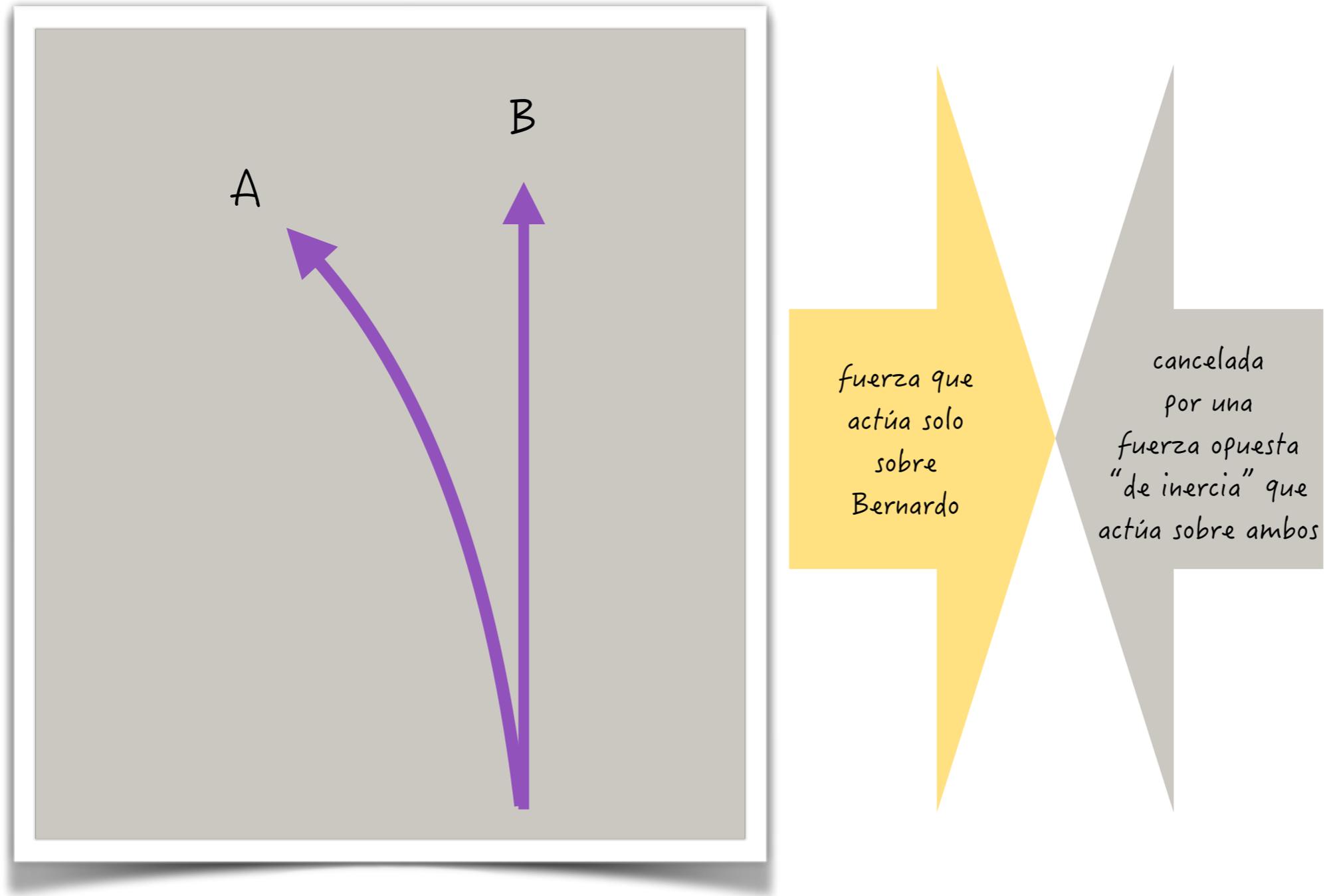
¿Qué ocurre si Bernardo enciende los motores de su nave?

pues acelera ...



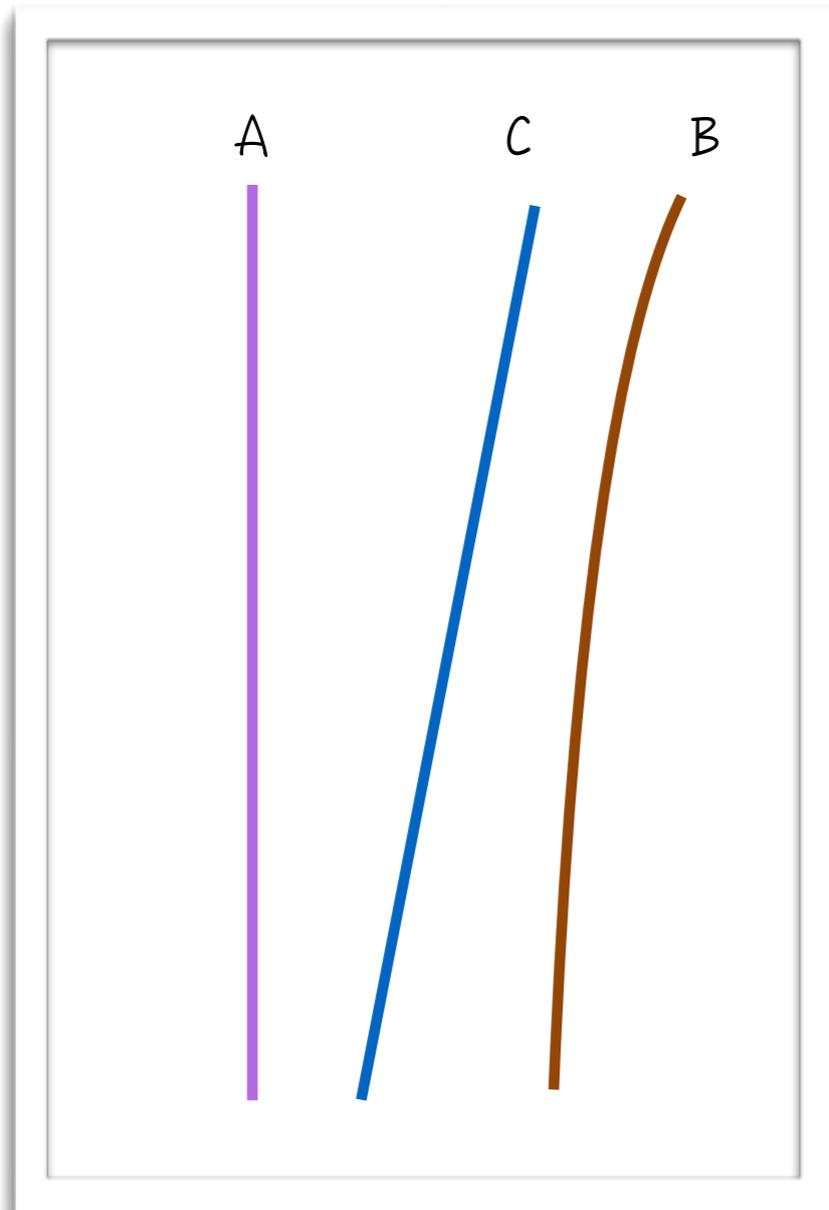
Newton diría que hay una fuerza actuando sobre Bernardo

Pero en el marco de Bernardo

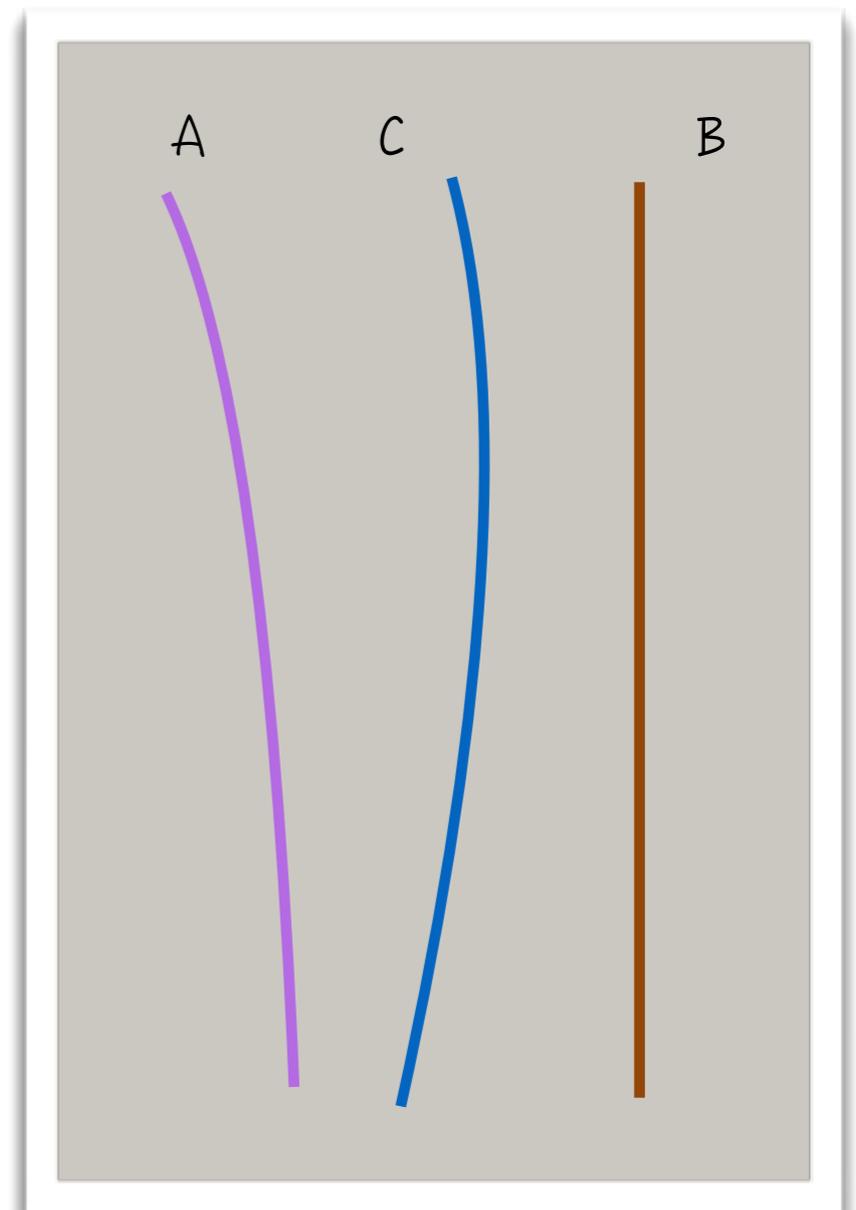


Los marcos con fuerzas de inercia aparecerán sombreados

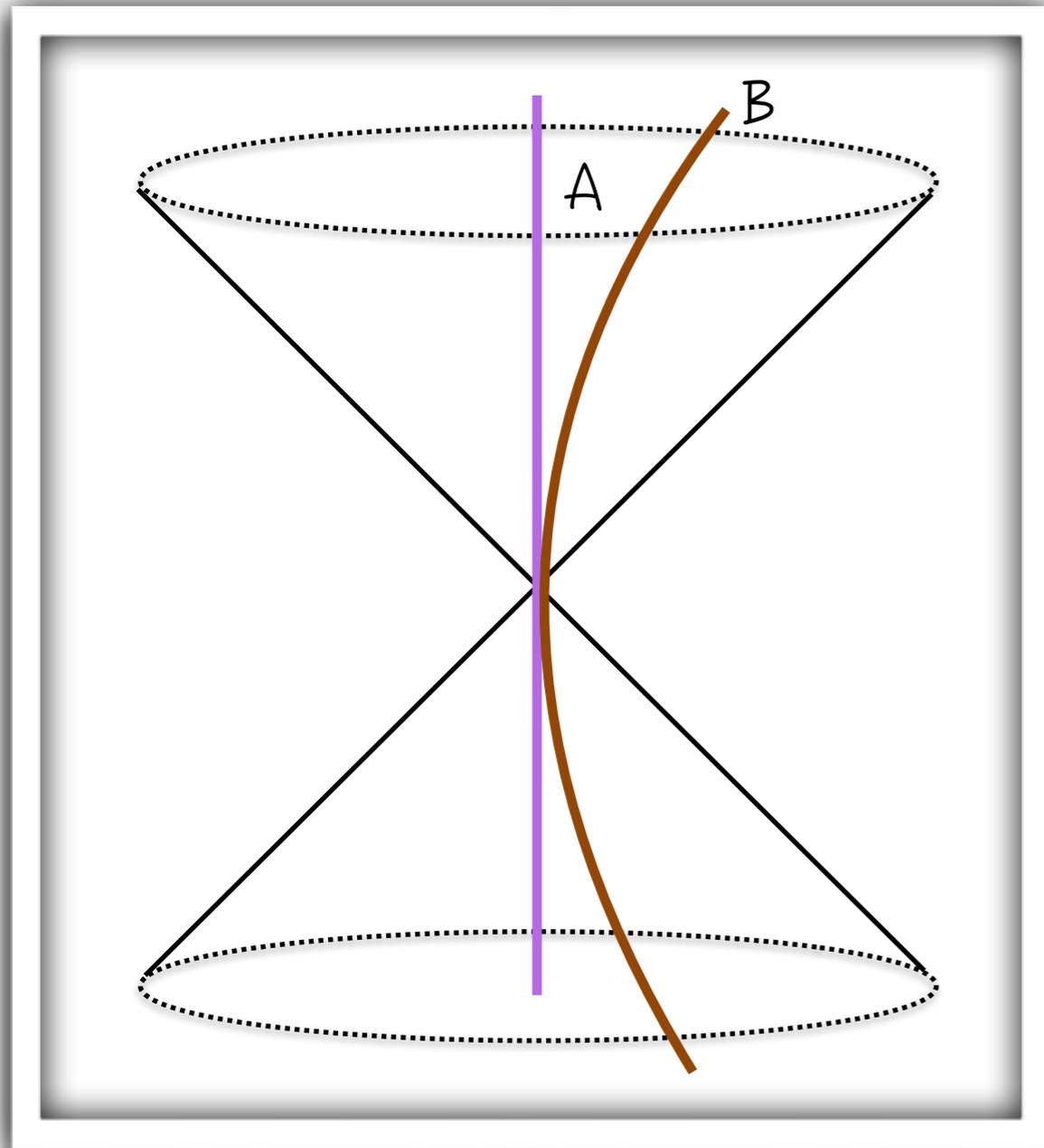
Las aceleraciones curvan las historias rectas (y viceversa)



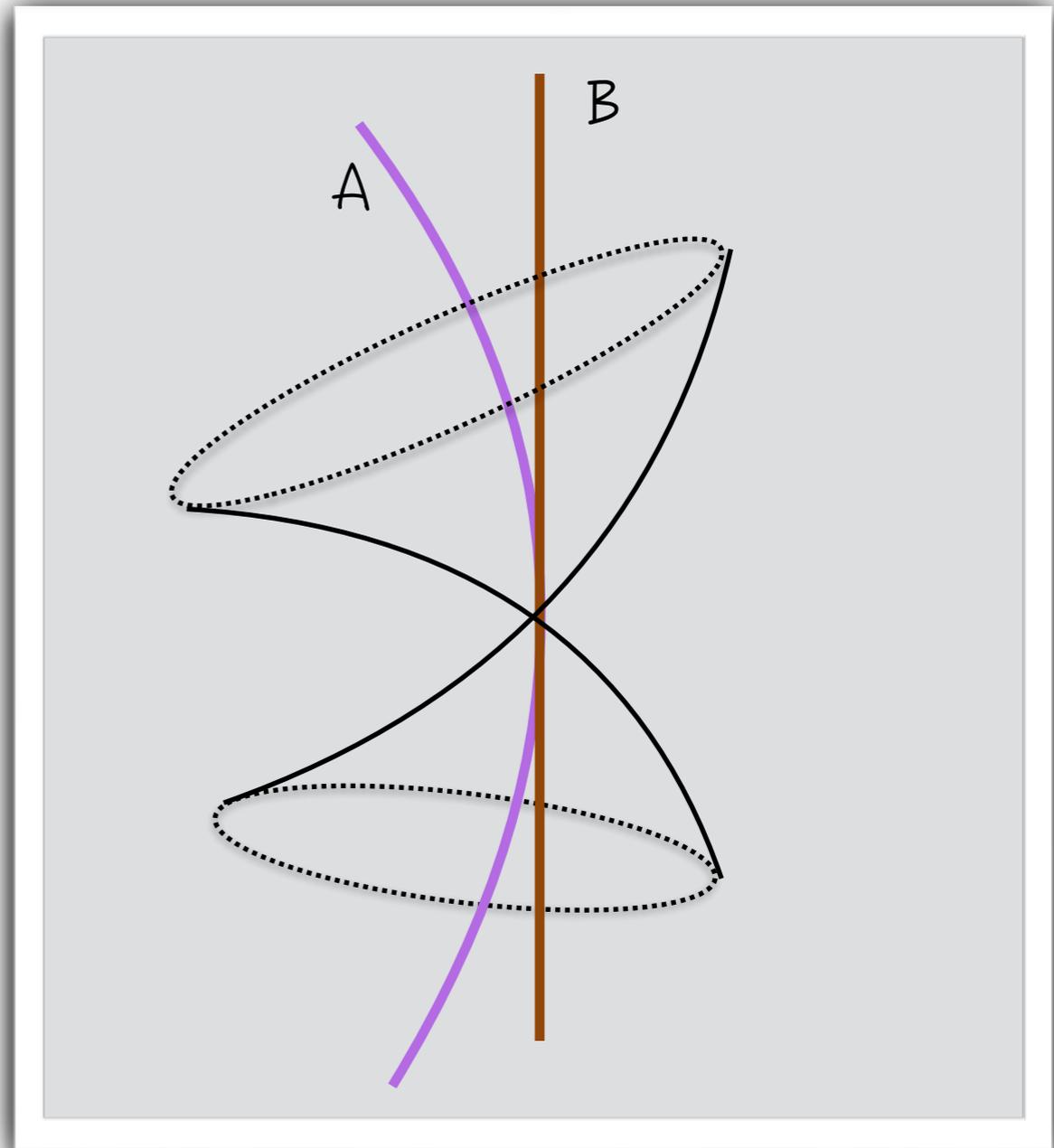
Marco inercial de Alicia



Marco acelerado de Bernardo



Marco inercial de Alicia



Marco acelerado de Bernardo

¡Incluidos los rayos de luz!

Da la impresión de que el principio de relatividad de Galileo
no se puede extender a aceleraciones...

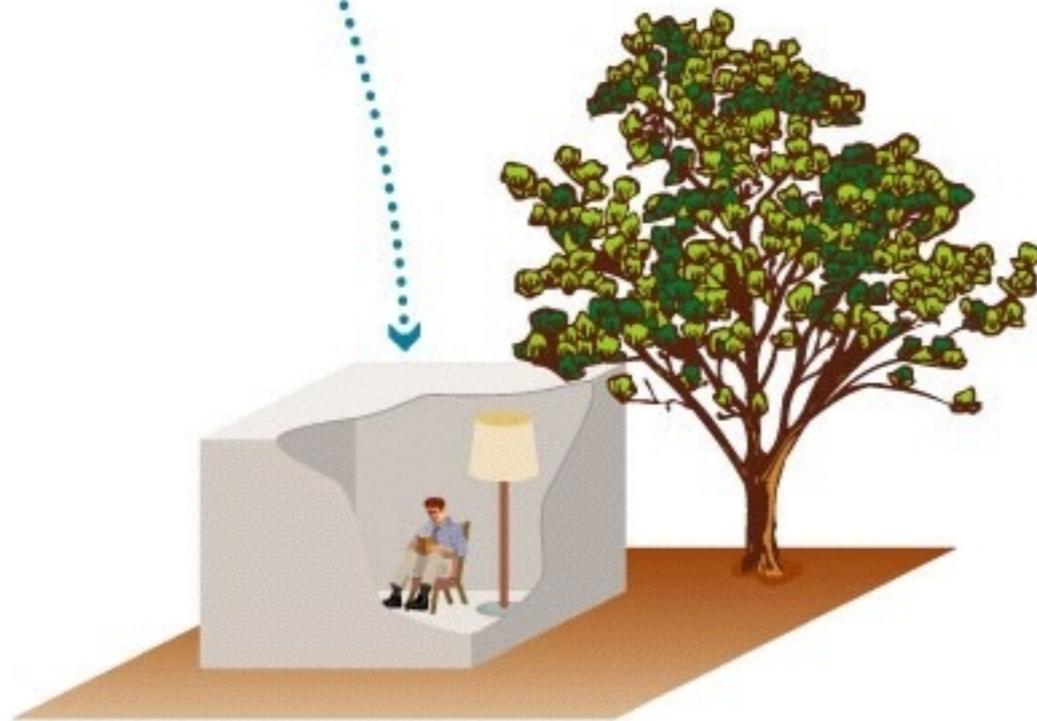
¡Pero Einstein logró salvarlo!

¡gracias a otro principio descubierto por Galileo!

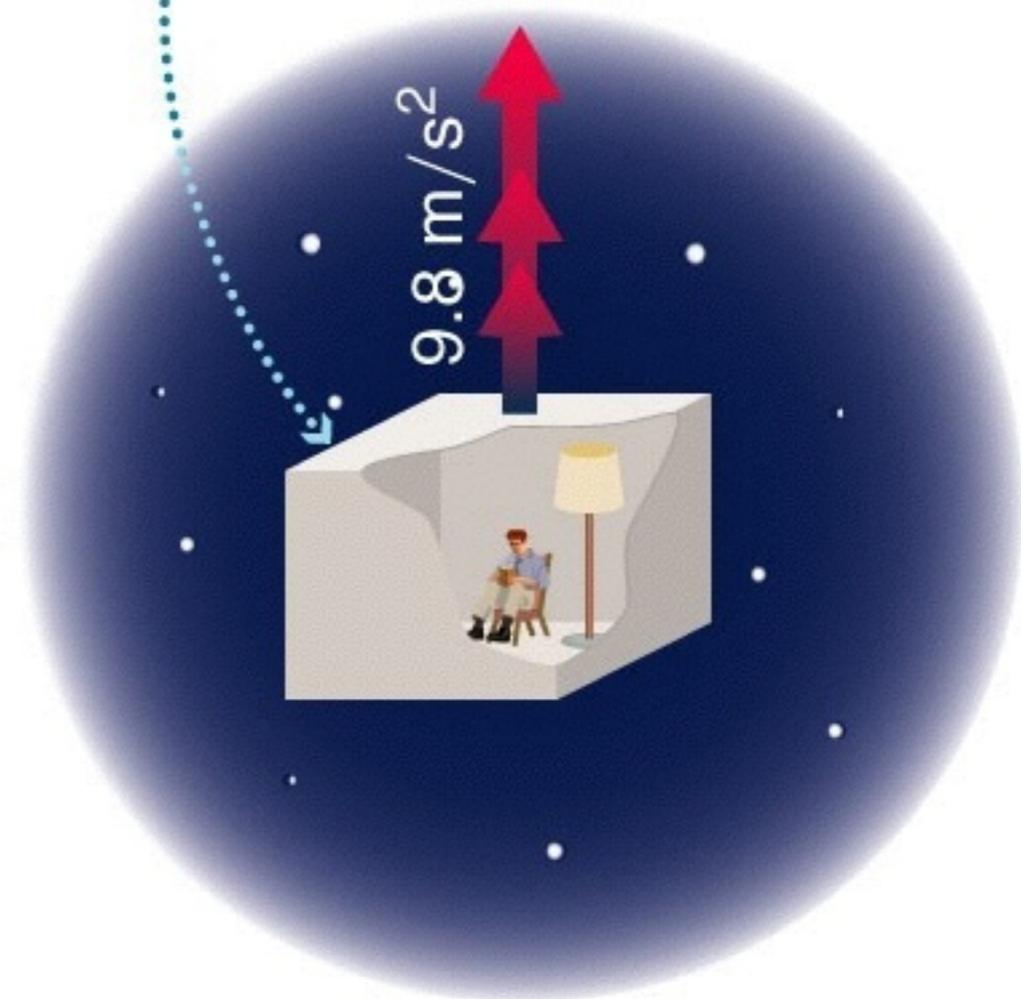
PRINCIPIO DE EQUIVALENCIA

The Equivalence Principle

You cannot tell the difference between being in a closed room on Earth . . .



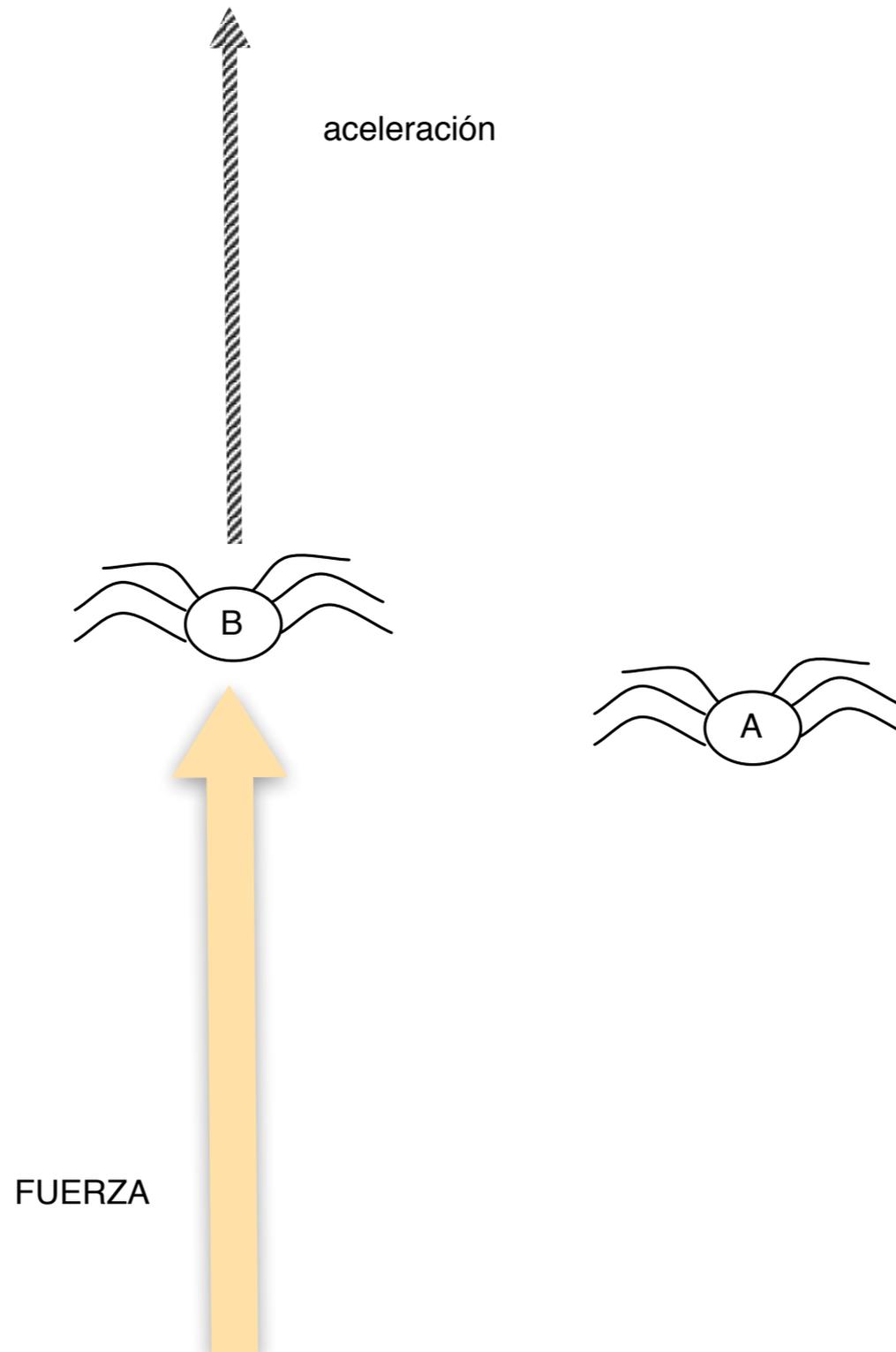
. . . and being in a closed room accelerating through space at 1g.



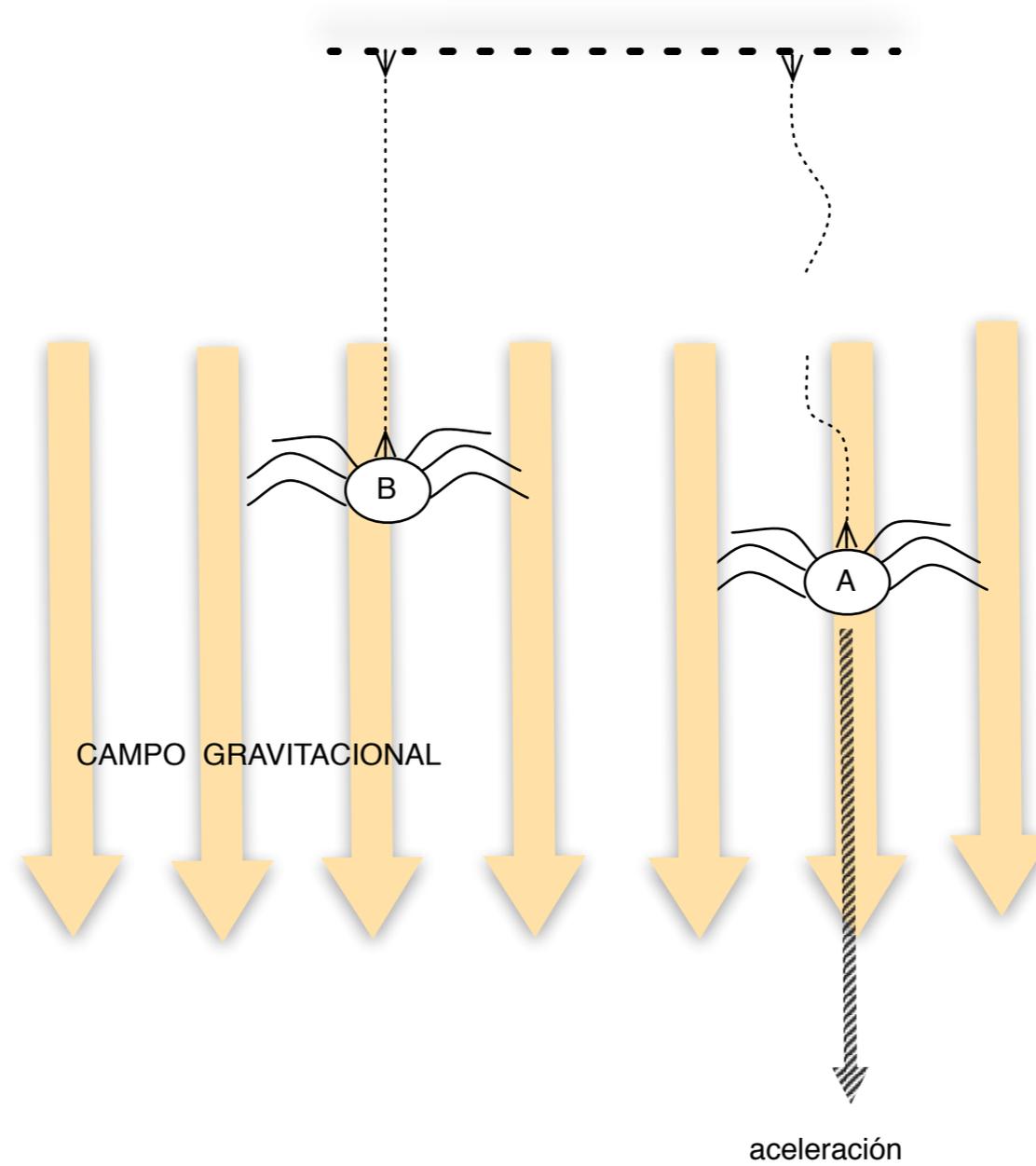
El principio de Equivalencia es una propiedad característica de la fuerza gravitacional, que no es compartida por otras fuerzas.

Durante mucho tiempo se consideró una mera curiosidad, hasta que Einstein la tomó como idea clave que permite relacionar a la gravitación con la estructura del espacio-tiempo

El punto de vista de Alicia

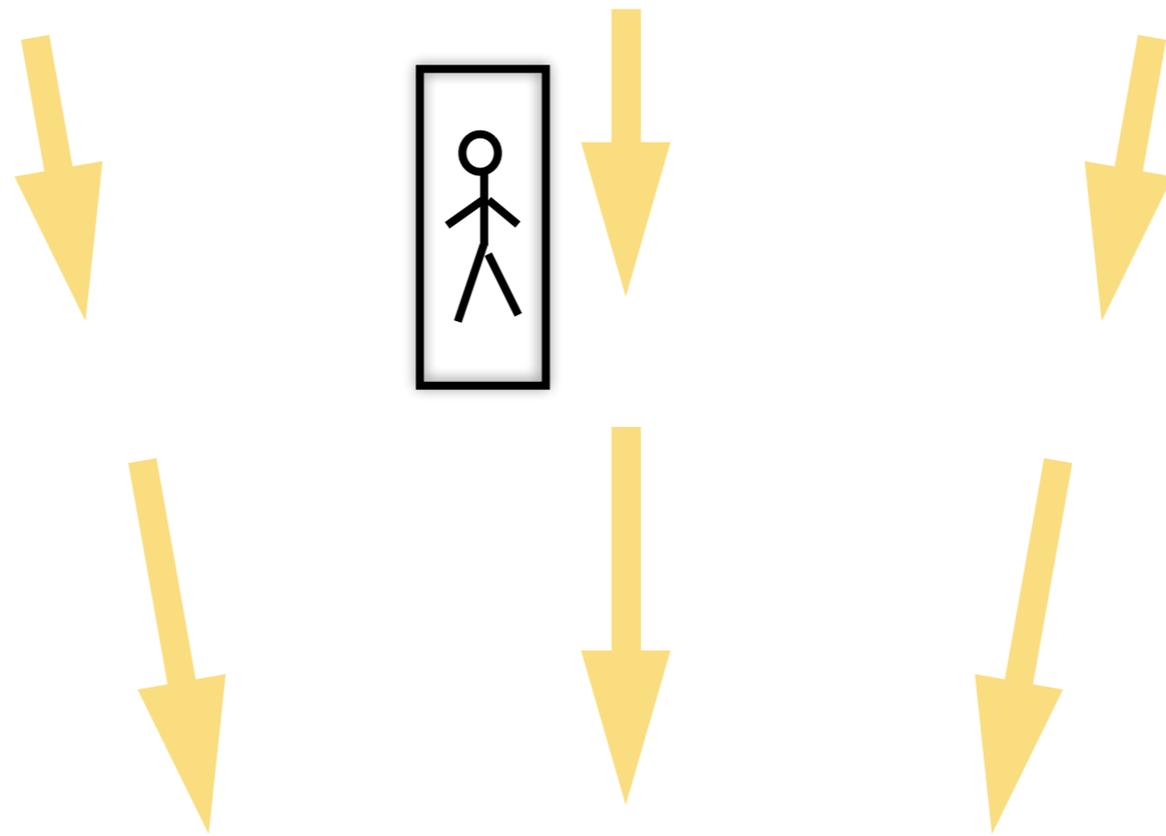


El punto de vista de Bernardo

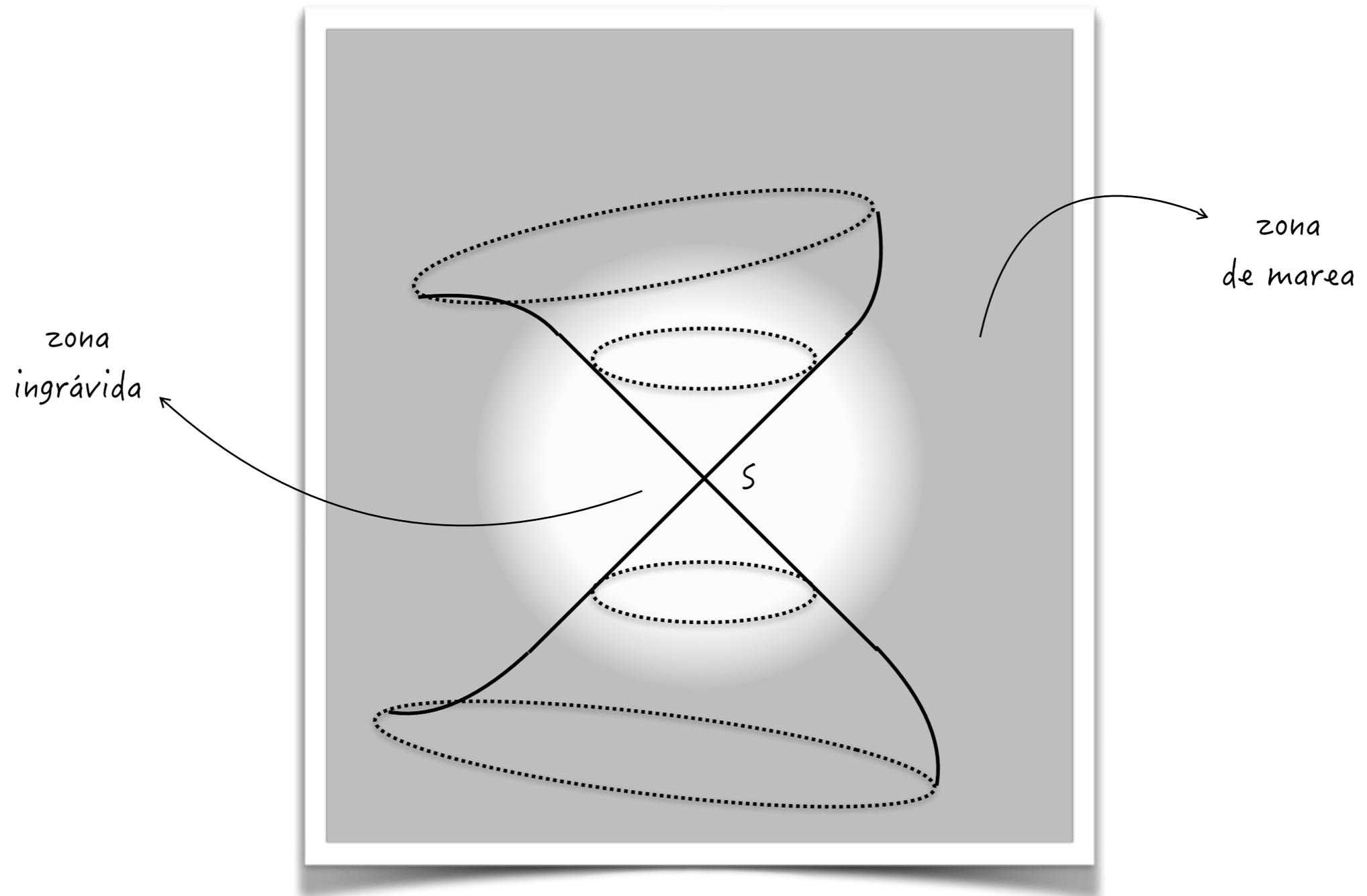


Si una fuerza gravitacional sentida por Bernardo se puede simular mediante una aceleración, entonces la gravitación "desaparece" para un observador en caída libre, como Alicia

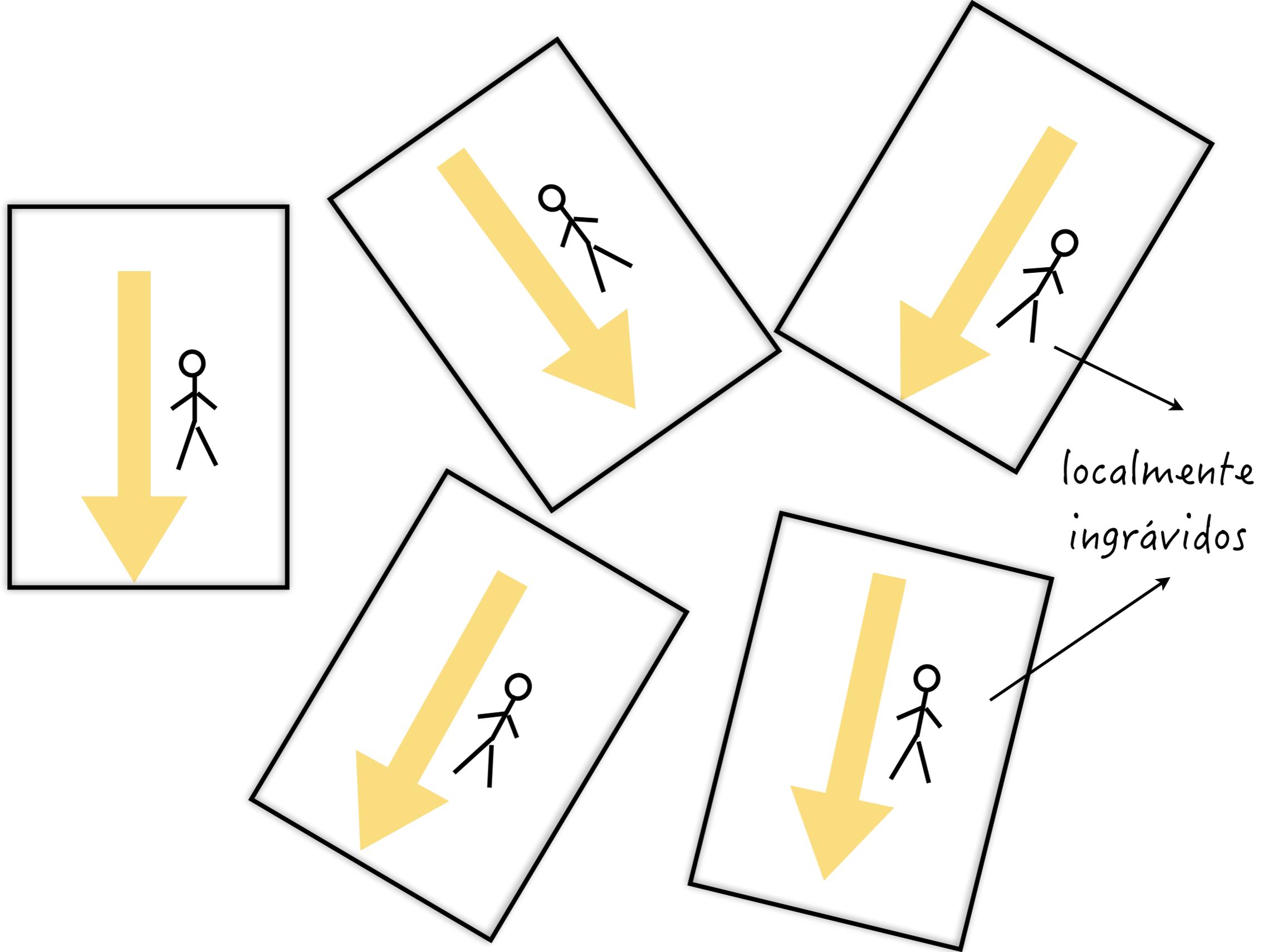
Esto es cierto localmente. Globalmente sobreviven las aceleraciones residuales o "de marea"



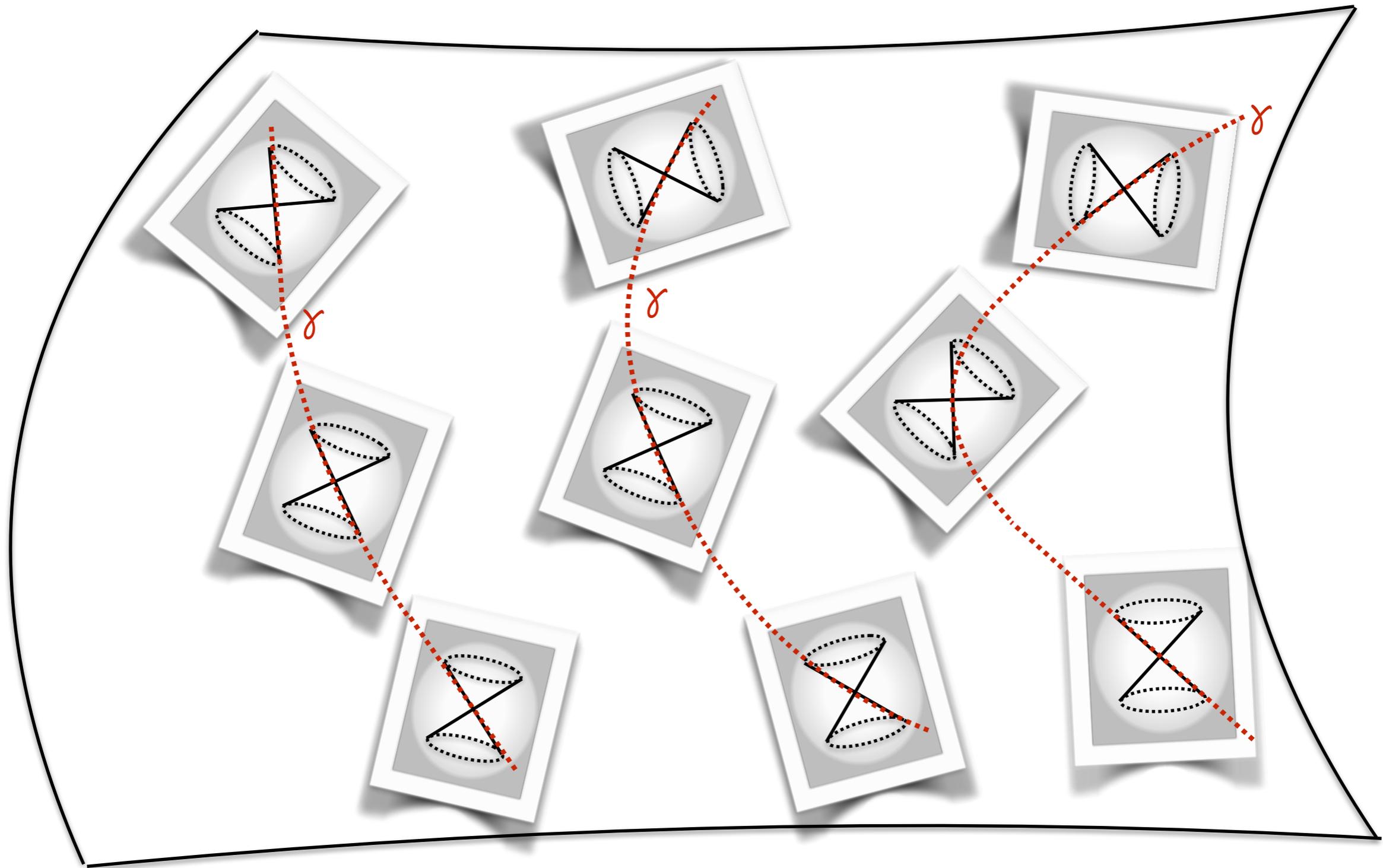
El principio de equivalencia y los conos de luz



El principio de equivalencia implica que el cono de luz siempre se puede "rectificar" en una región pequeña alrededor de un suceso arbitrario S

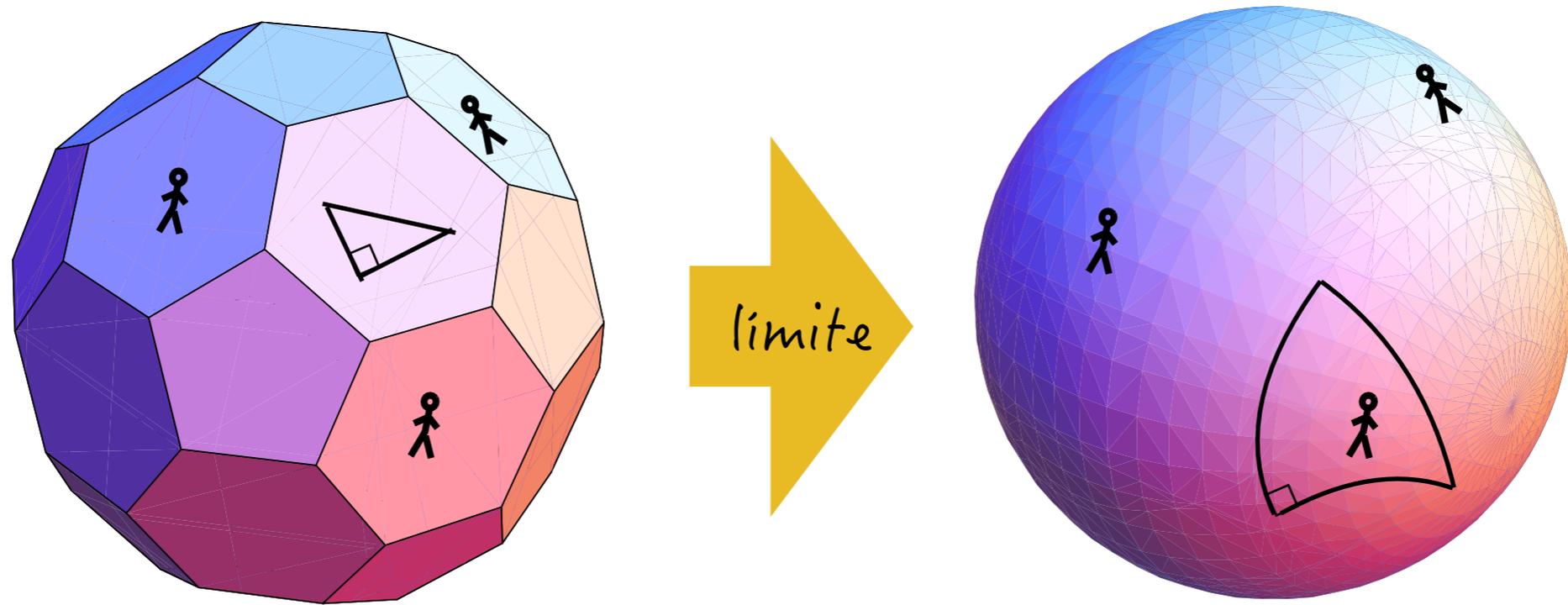


En cada caja, en caída libre, no se nota el campo gravitacional, que solo aparece a través de las "fuerzas de marea", al "pegar" las descripciones locales.



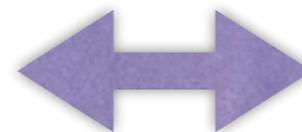
Espacio-tiempo genérico obtenido "pegando" entornos de caída libre

¡PERO ESTA IDEA YA APARECIO ANTES!

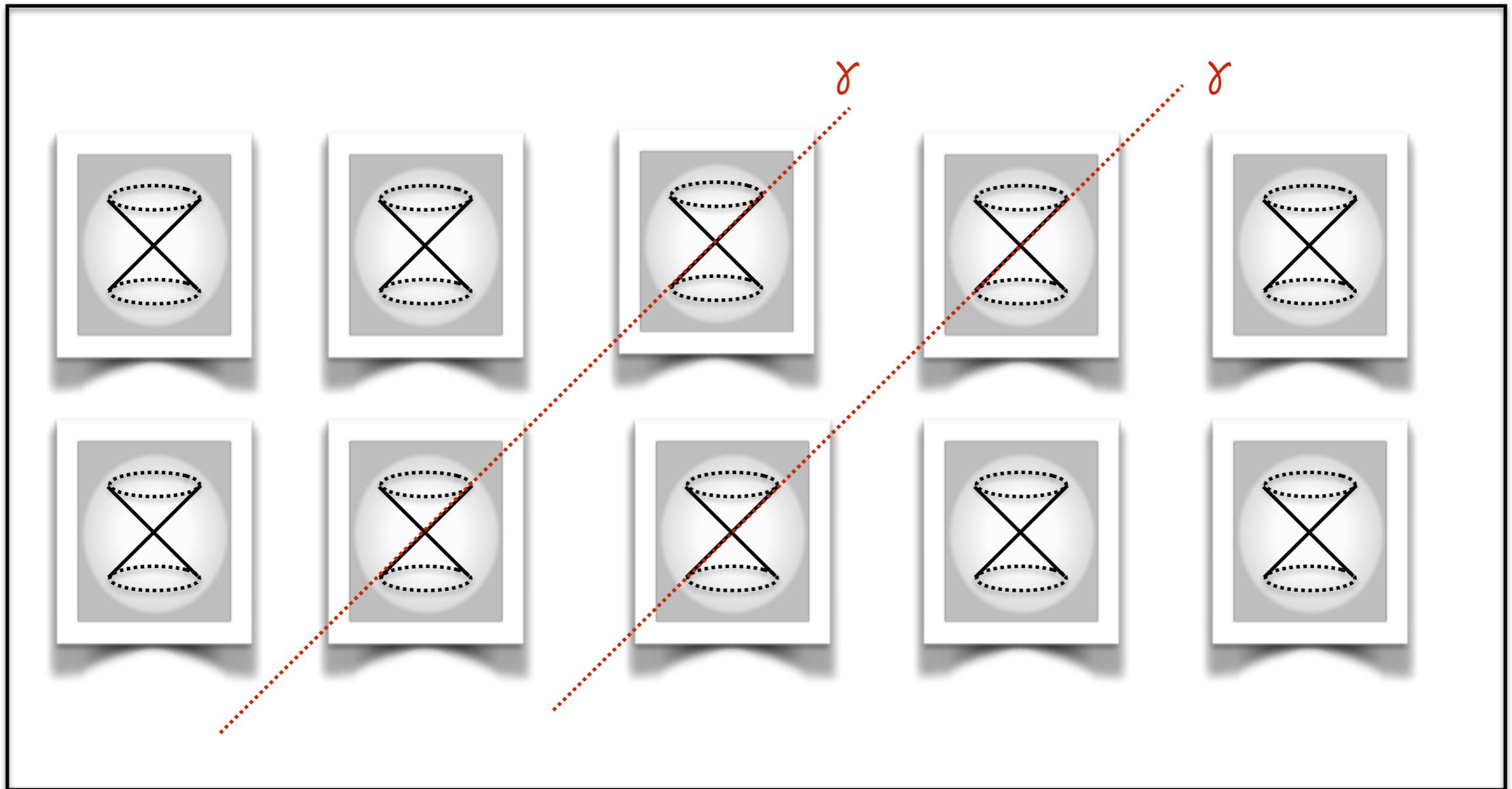


De Gauss & Riemann a Einstein:

Curvatura del espacio-tiempo



Marea gravitacional



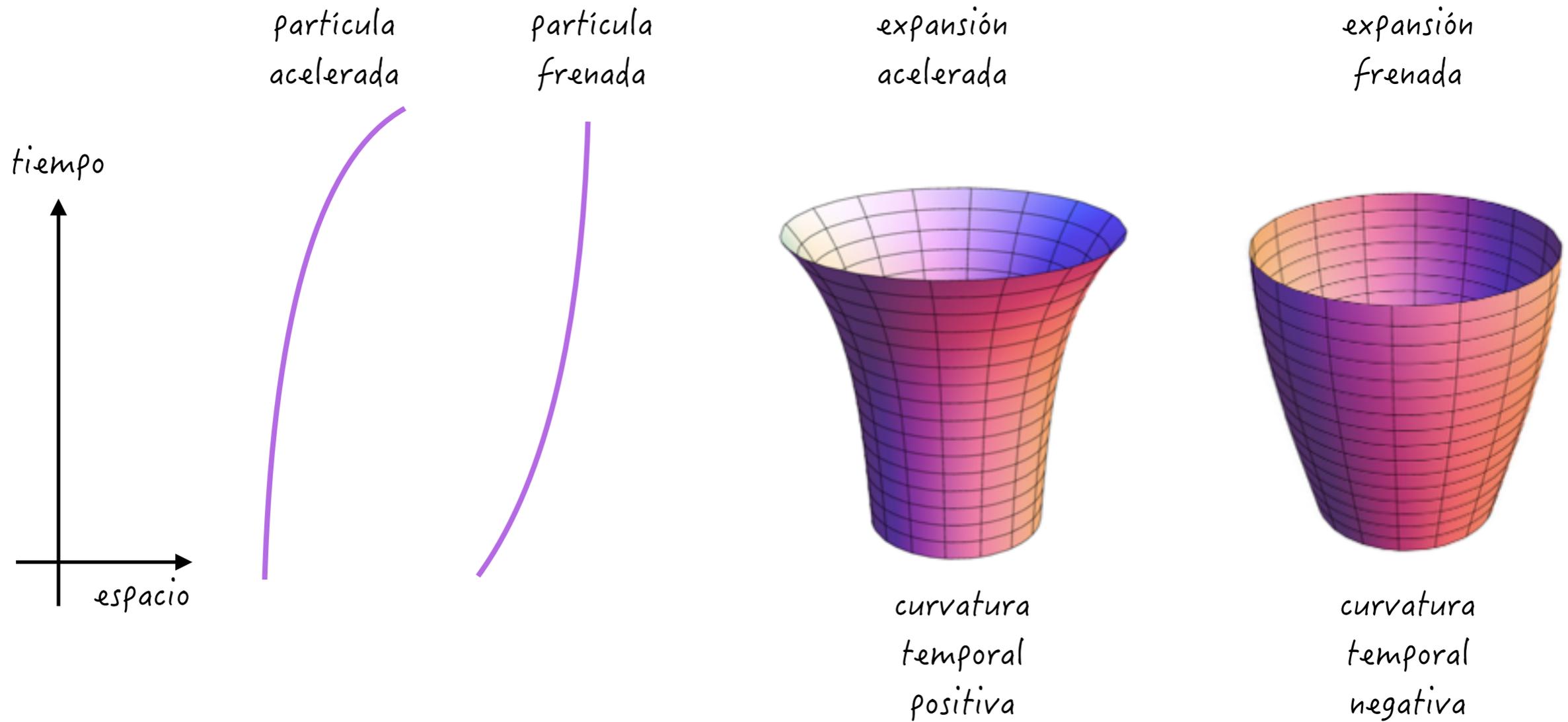
Espacio-tiempo sin curvatura = gravitación ficticia

En total, hay 20 formas independientes de "deformar" el espacio-tiempo en las proximidades de un suceso. Es decir, la curvatura del espacio-tiempo de cuatro dimensiones tiene 20 "radios de curvatura" diferentes

La curvatura del espacio-tiempo tiene componentes puramente espaciales, pero en la práctica las más importantes son las componentes temporales

La componente temporal de la curvatura del espacio-tiempo es análoga a la curvatura de la historia de una partícula

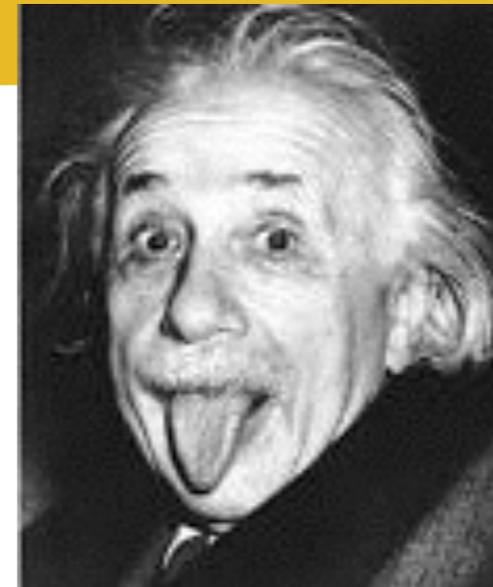
ESPACIO-TIEMPO = HISTORIA DEL ESPACIO



$$\text{CURVATURA}_{\text{espacio-tiempo}} = \pm (\text{ACELERACION}_{\text{espacio}})^2$$

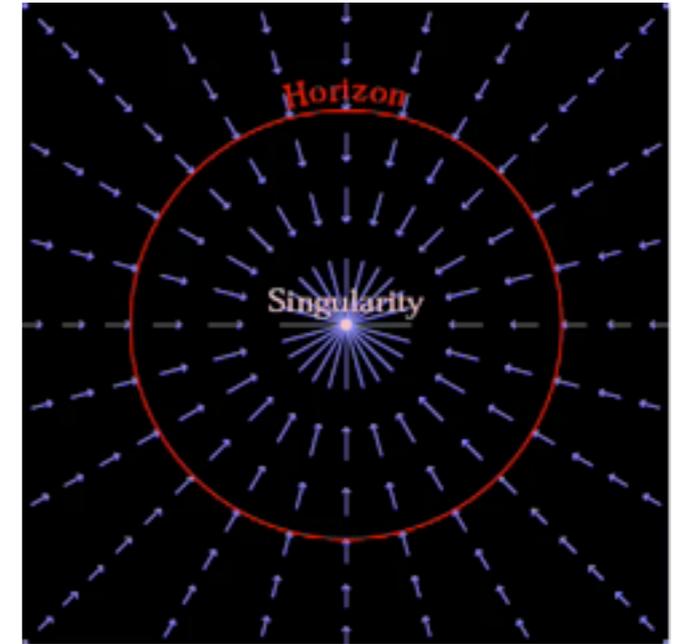
PRINCIPIO FUNDAMENTAL DE LA DINAMICA DEL ESPACIO-TIEMPO

$$\text{CURVATURA}_{\text{espacio-tiempo}} = G \text{ (DENSIDAD DE ENERGIA)}$$

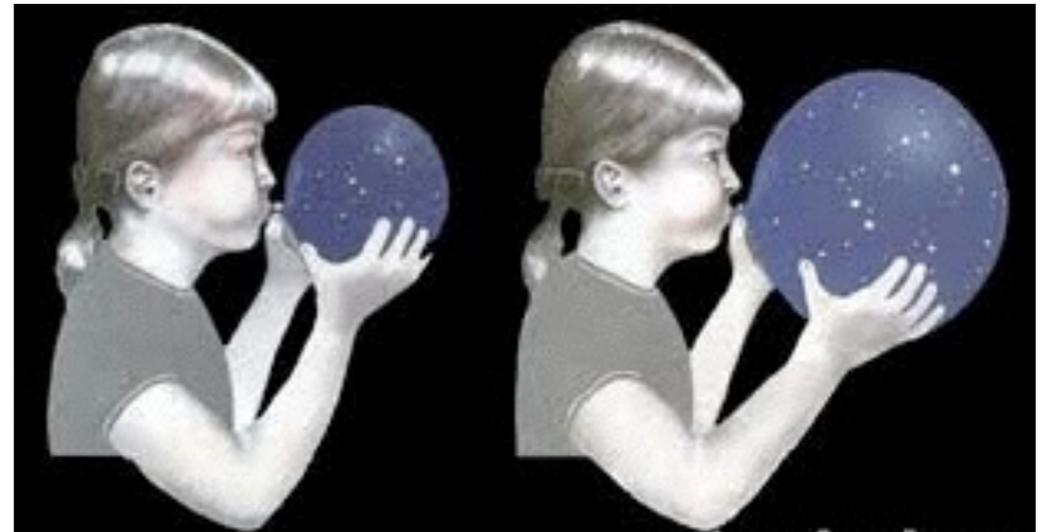


G es un "coeficiente de elasticidad" del espacio-tiempo

La energía "material" positiva
tiende a contraer el espacio



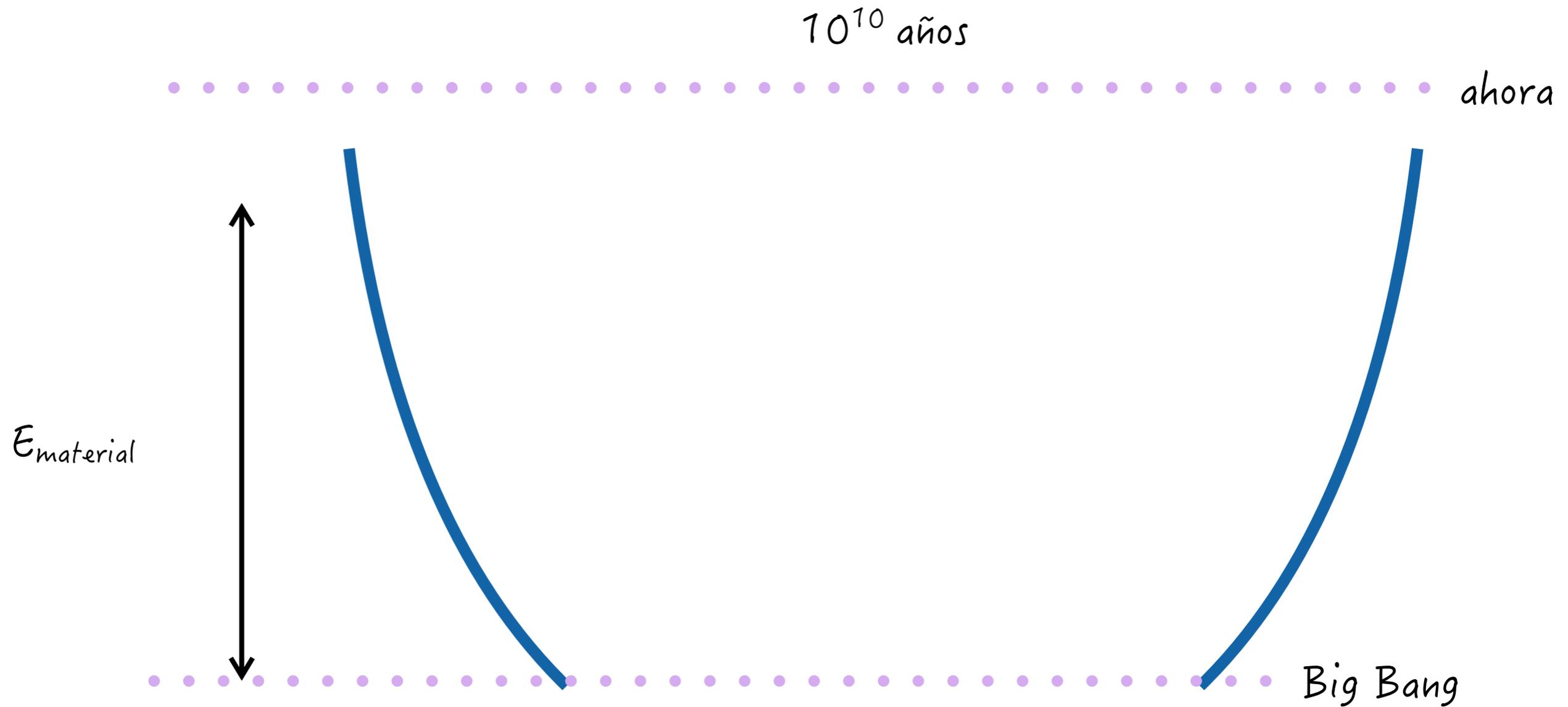
La energía de "vacío"
positiva tiende a estirar
el espacio



COSMOLOGIA = NUESTRO ESPACIO-TIEMPO A GRAN ESCALA



COSMOLOGIA = NUESTRO ESPACIO-TIEMPO A GRAN ESCALA



COSMOLOGIA = NUESTRO ESPACIO-TIEMPO A GRAN ESCALA

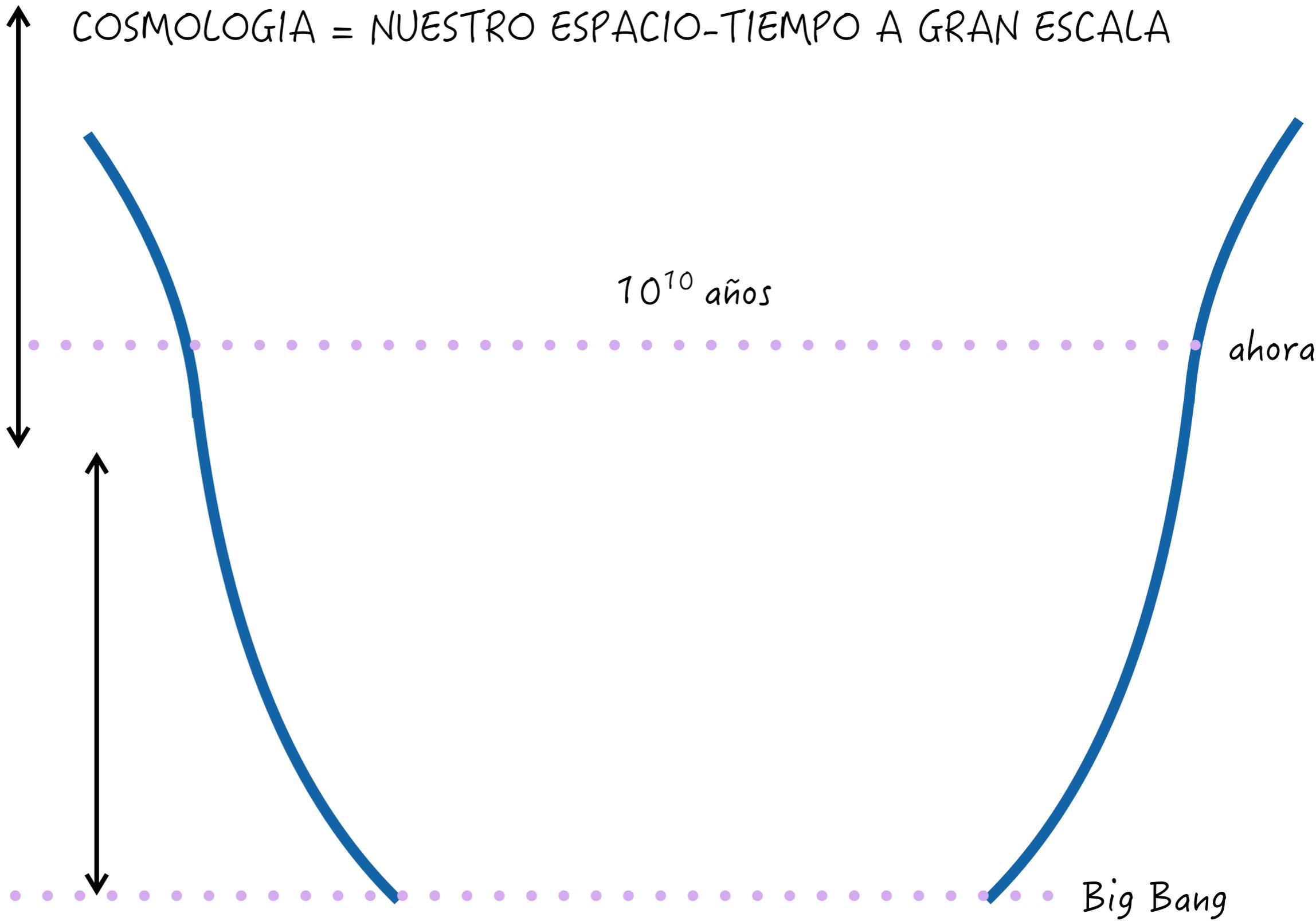
$E_{\text{vacío}}$

10^{10} años

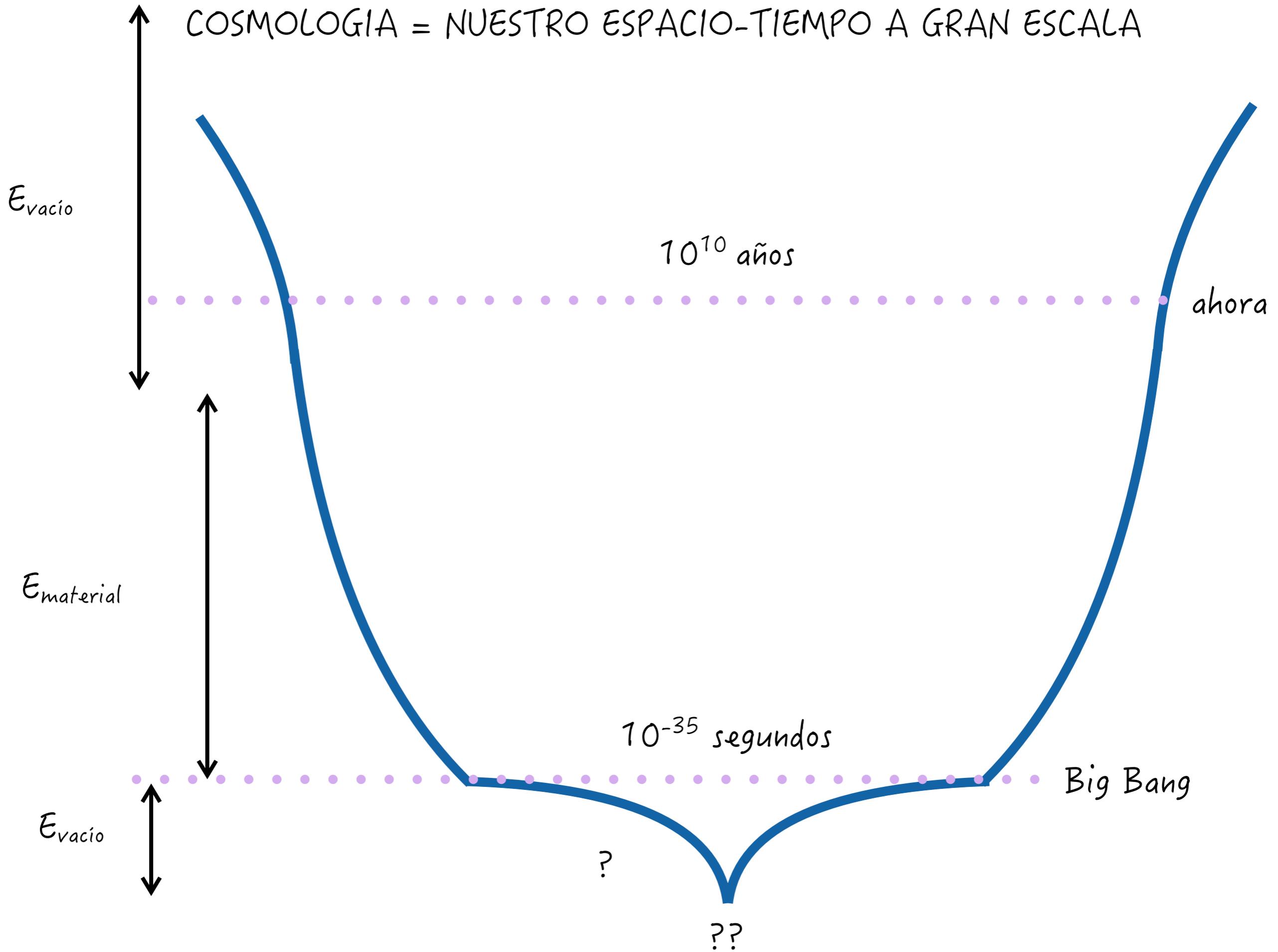
ahora

E_{material}

Big Bang

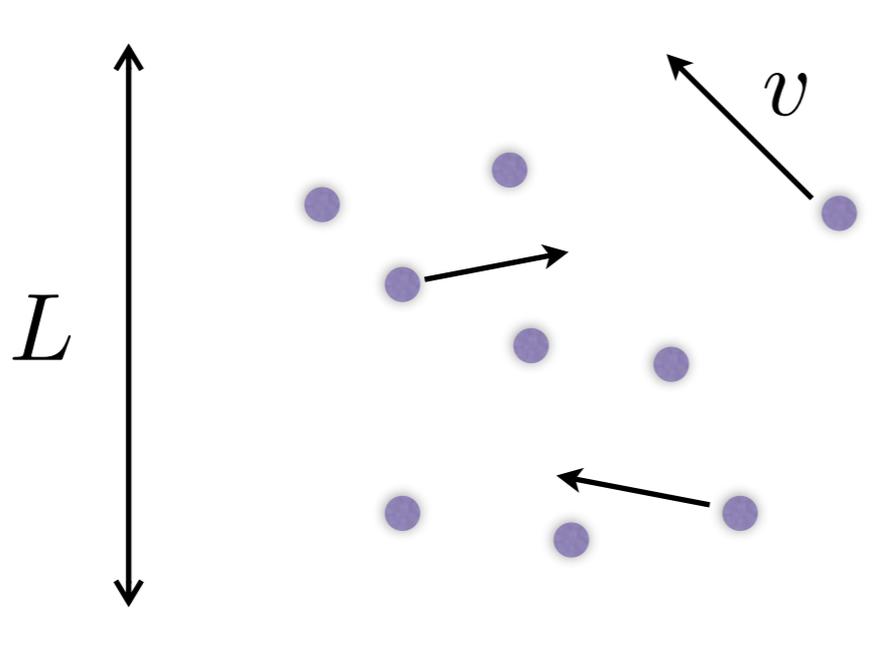


COSMOLOGIA = NUESTRO ESPACIO-TIEMPO A GRAN ESCALA



Importancia práctica de la curvatura del espacio-tiempo

Partículas de masa total M con velocidad típica V en una región de tamaño L



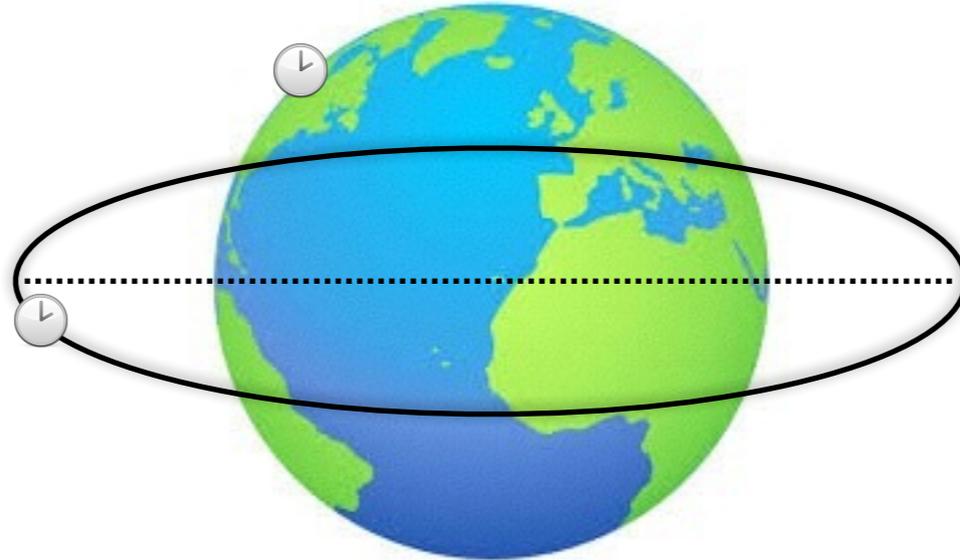
The diagram shows a cluster of approximately 10 purple dots representing particles. A vertical double-headed arrow on the left is labeled L , indicating the size of the region. Three arrows originate from different dots, representing their velocities. One arrow is labeled v .

$$v^2 \sim \frac{GM}{L}$$
$$\phi = \frac{v^2}{c^2} \sim \frac{GM}{c^2 L} = \frac{L_g}{L}$$

La curvatura del espacio-tiempo producida por la nube de partículas es de orden

$$\text{CURVATURA} \sim \phi / L^2$$

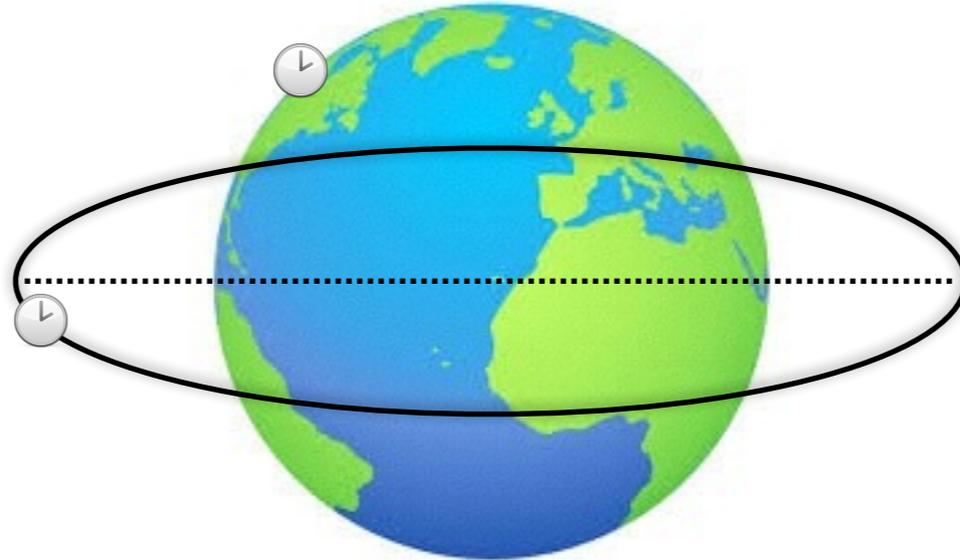
¿Cuánta curvatura?



$$\frac{\text{circunferencia}}{\text{diámetro}} \approx \pi + \phi_{\oplus} \sim \pi + 10^{-9}$$

$$\frac{T_{\text{alto}}}{T_{\text{bajo}}} \approx 1 + \phi_{\oplus} \sim 1 + 10^{-9}$$

¿Cuánta curvatura?



$$\frac{\text{circunferencia}}{\text{diámetro}} \approx \pi + \phi_{\oplus} \sim \pi + 10^{-9}$$

$$\frac{T_{\text{alto}}}{T_{\text{bajo}}} \approx 1 + \phi_{\oplus} \sim 1 + 10^{-9} \quad \text{iGPS!}$$

$$\phi_{\oplus} \sim 10^{-9}$$

$$\phi_{\text{órbita Mercurio}} \sim 10^{-5}$$

$$\phi_{\odot} \sim 10^{-6}$$

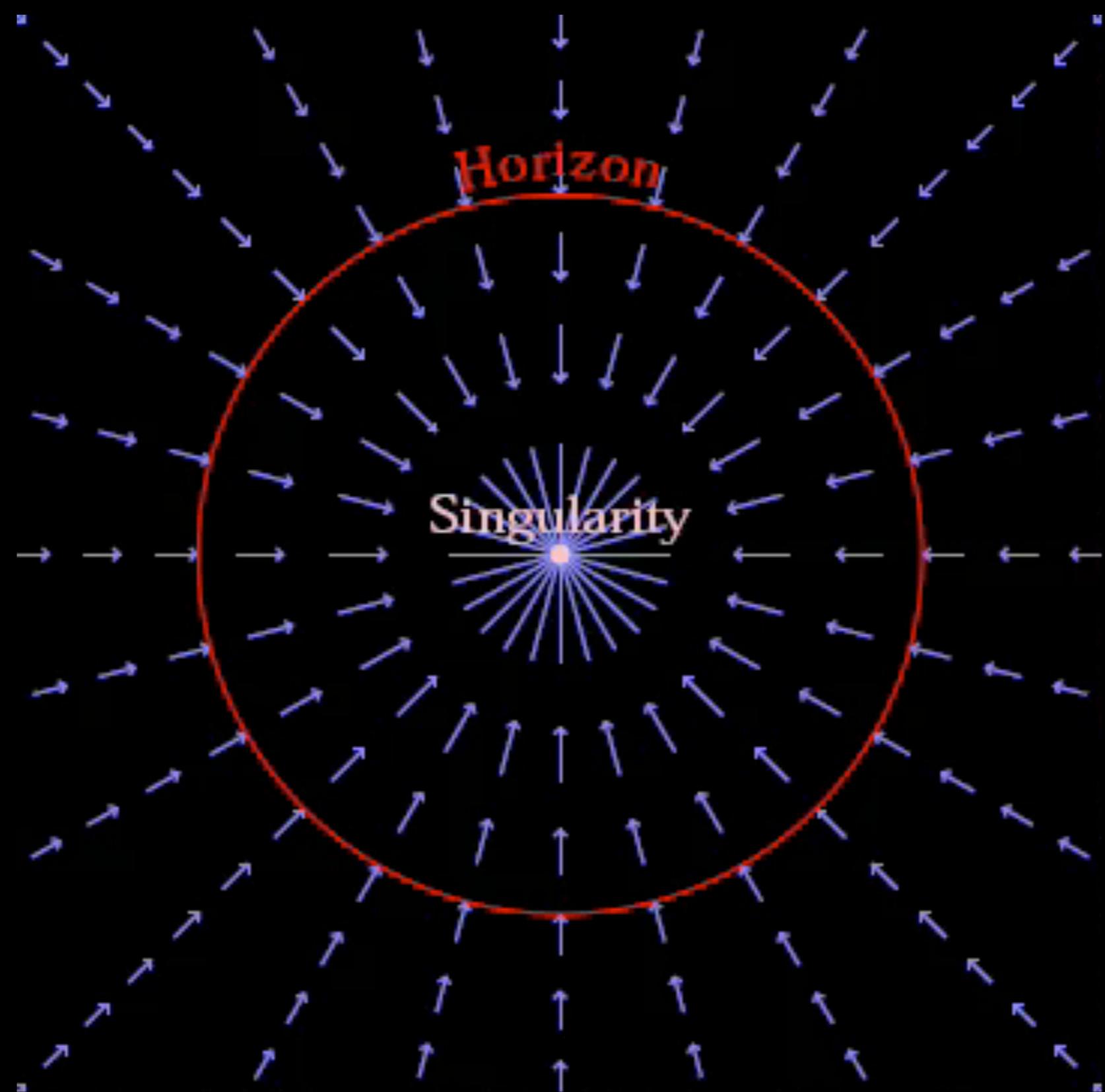
$$\phi_{\text{órbita púlsar}} \sim 10^{-2}$$

$$\phi_{\text{estrella neutrones}} \sim 10^{-1}$$

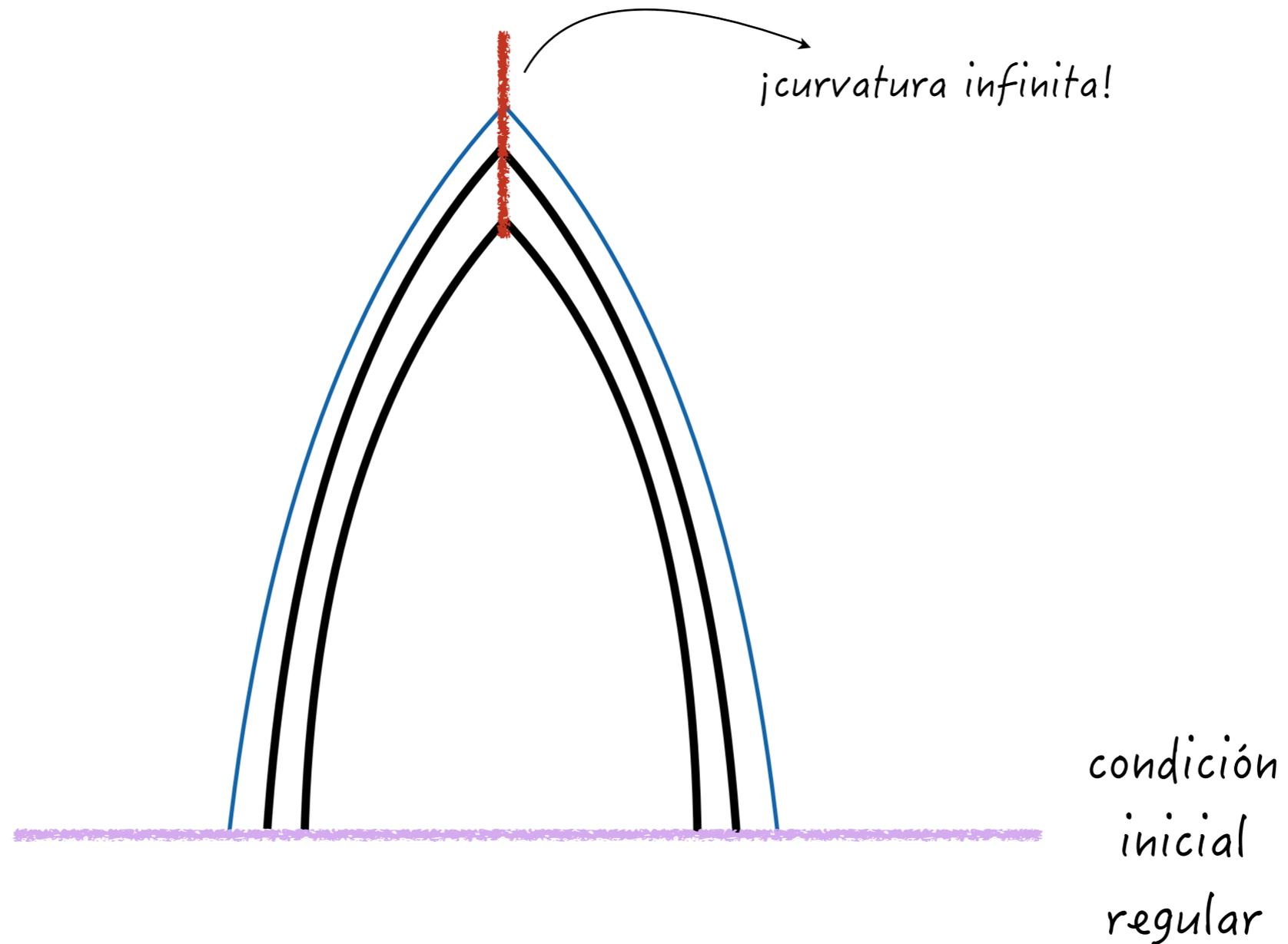
$$\phi_{\text{agujero negro}} \sim 1$$

$$\phi_{10^{28} \text{ cm de vacío}} \sim 1$$

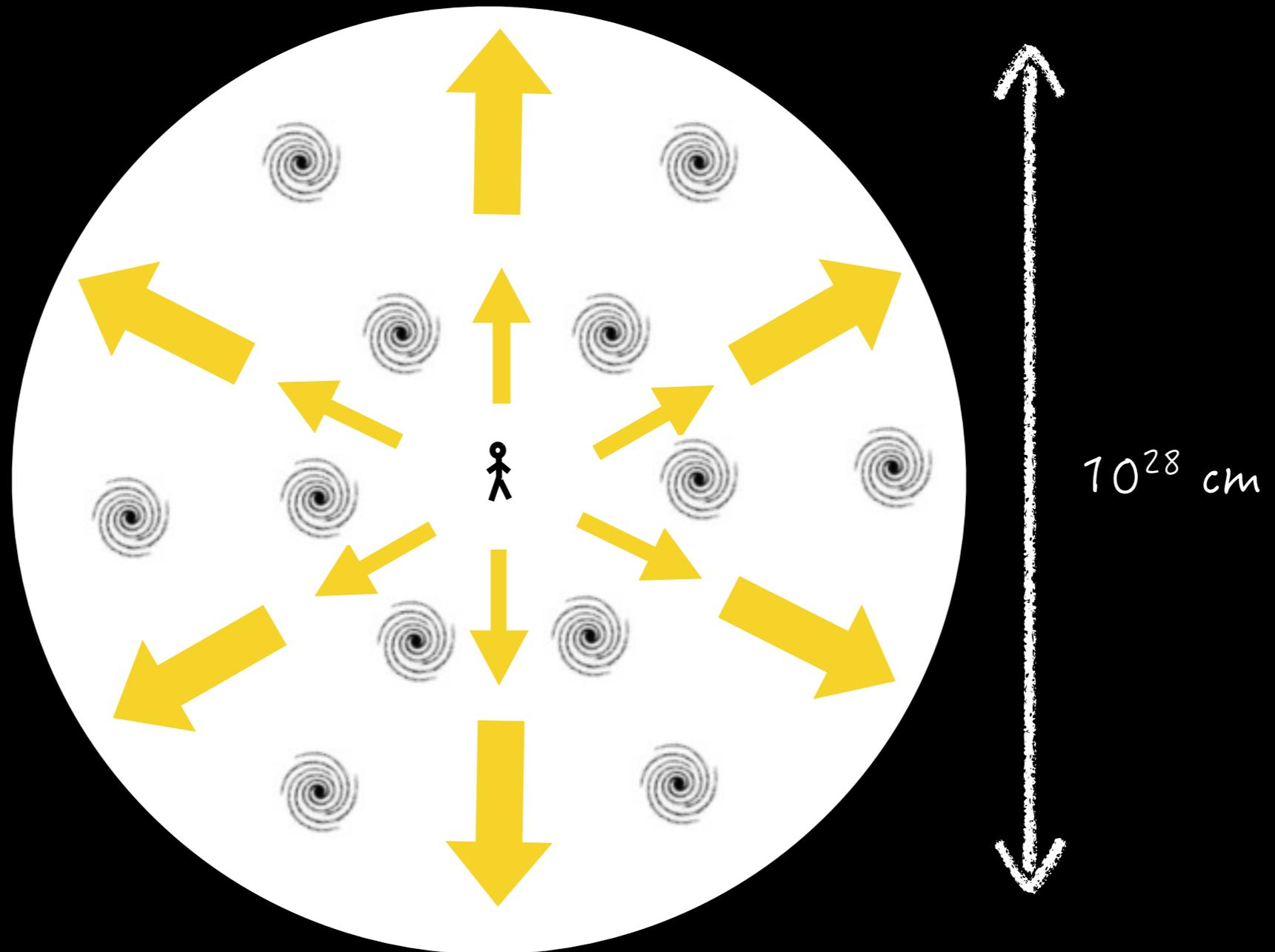
AGUJERO NEGRO



La descripción de Einstein del espacio-tiempo NO es completamente consistente, pues se pueden desarrollar singularidades de curvatura infinita



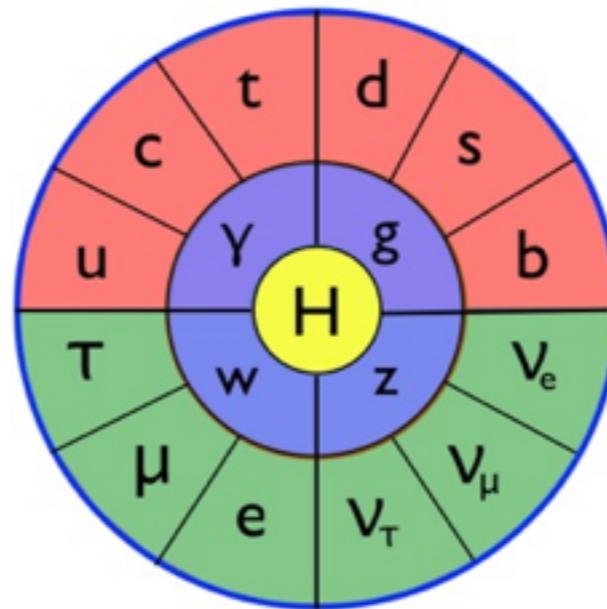
Esto sucede en los agujeros negros



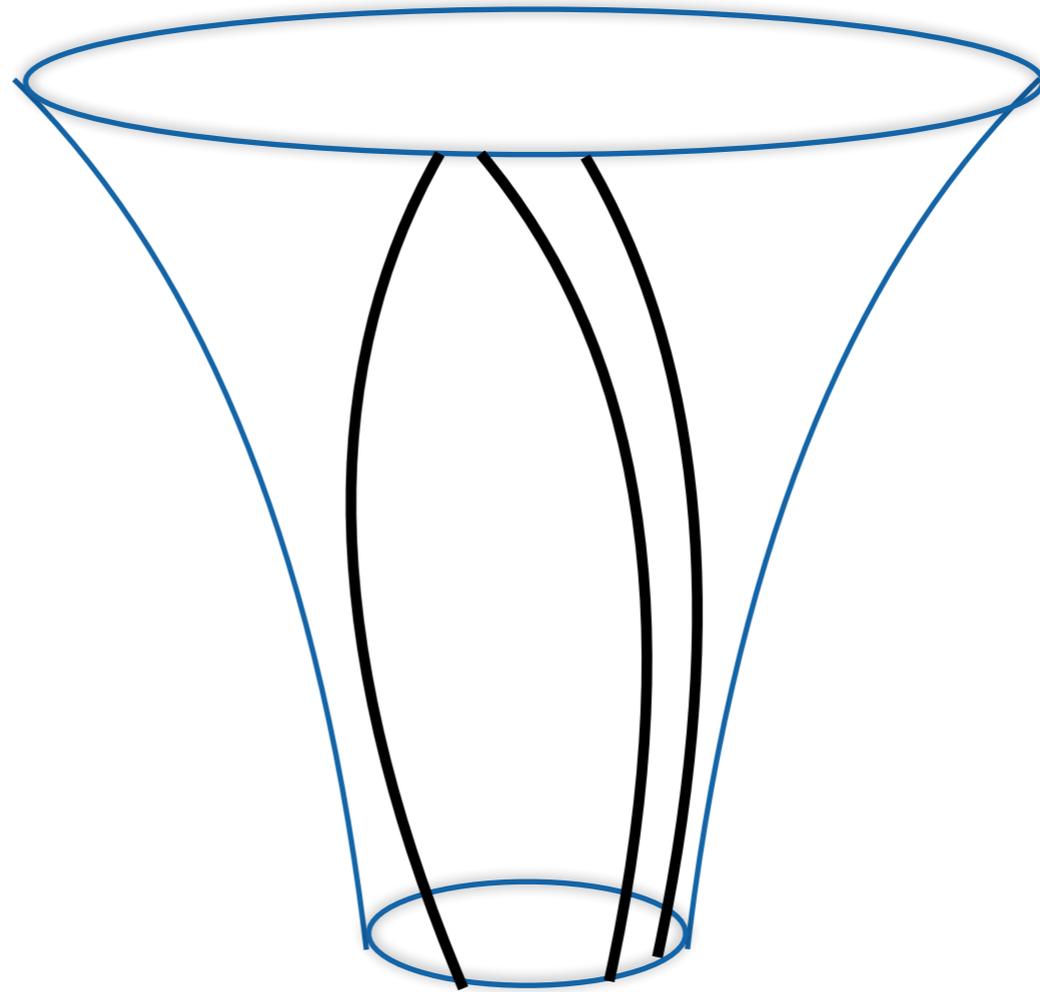
En un Universo dominado por energía de vacío positiva, el horizonte de sucesos cosmológico rodea por completo al observador.

PARTE 2

PARTICULAS CUANTICAS



El problema central de la física clásica consiste en la especificación de la historia de las partículas **EN** y **CON** el espacio-tiempo.



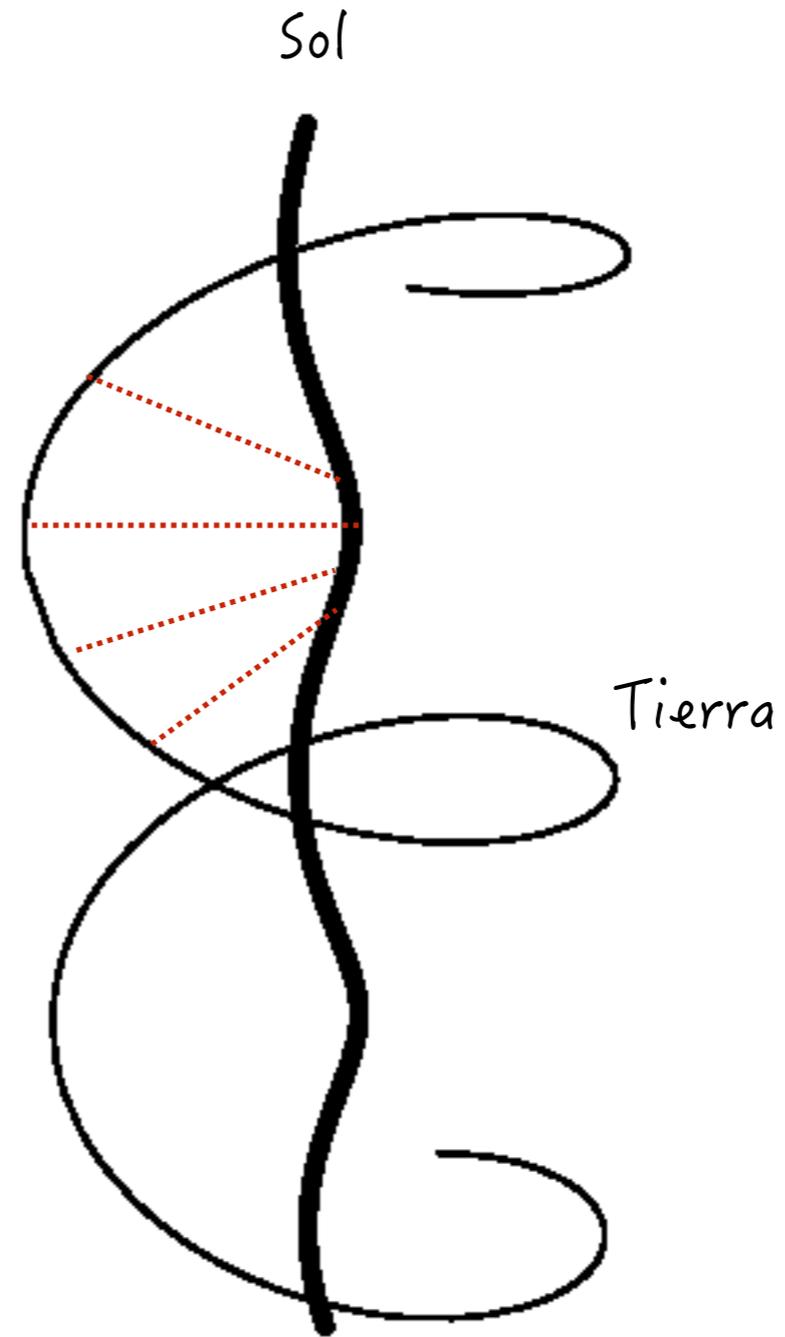
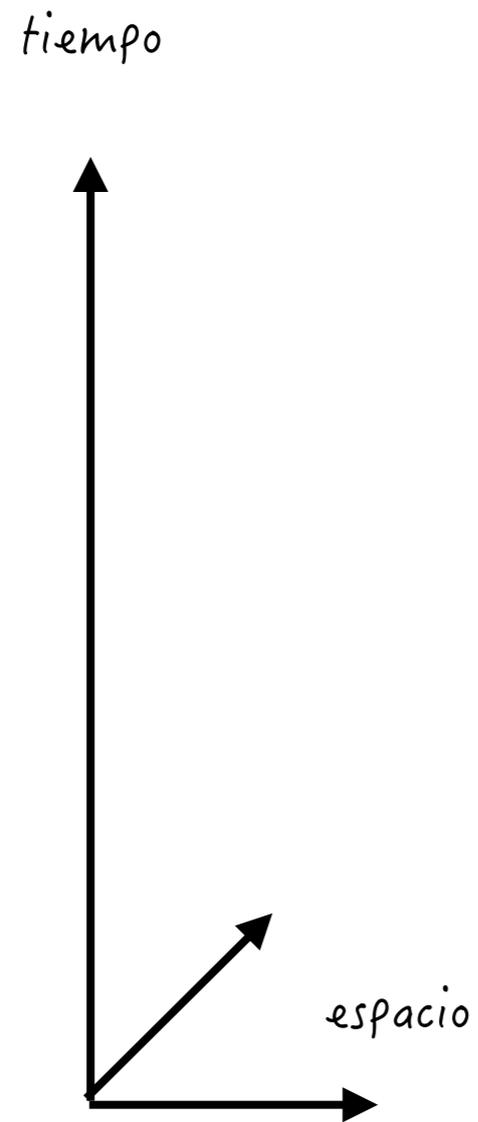
El carácter universal de la física clásica es el **DETERMINISMO**



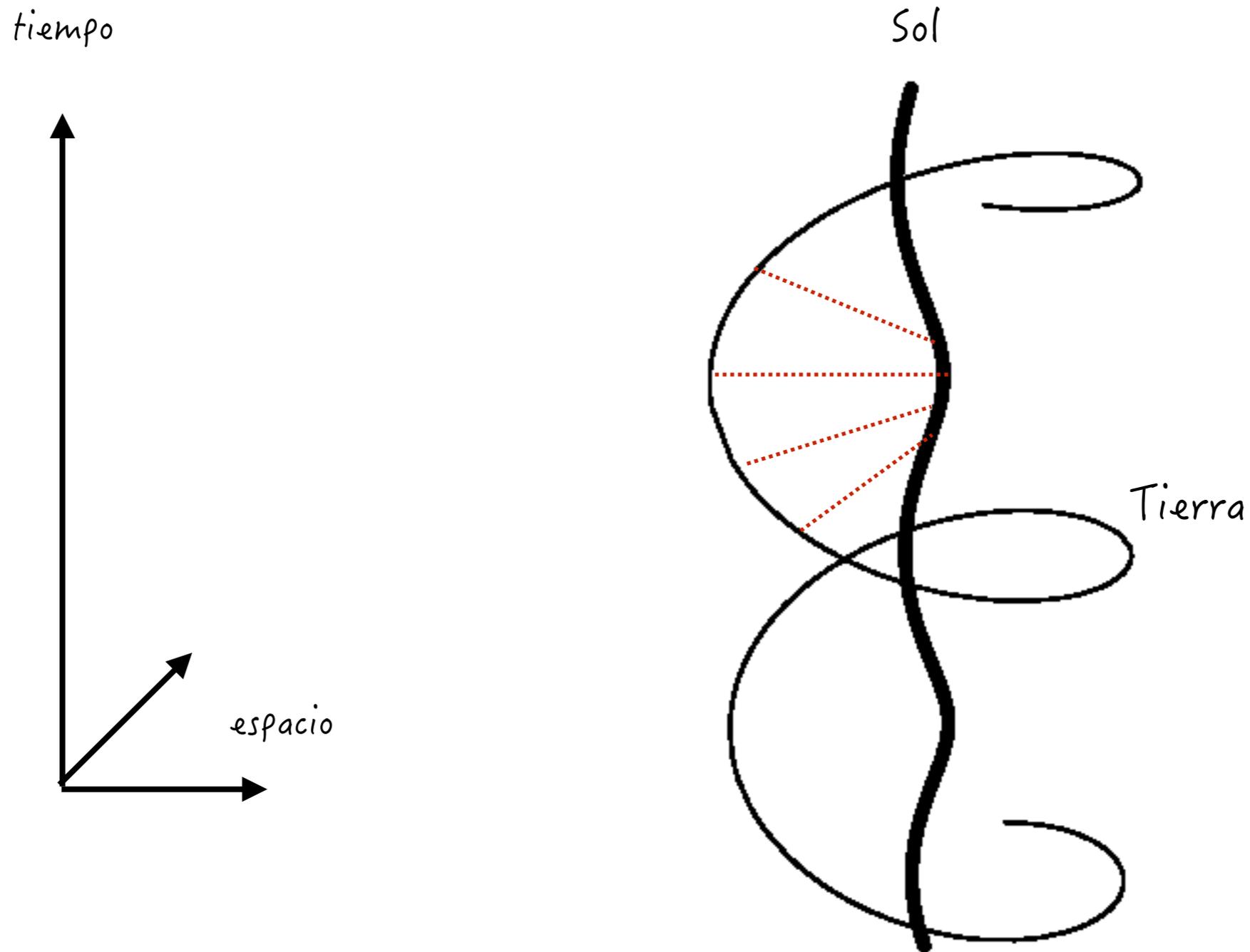
El carácter universal de la física cuántica es el **INDETERMINISMO**



¿Existe una formulación de la física clásica que "esconde" el determinismo?

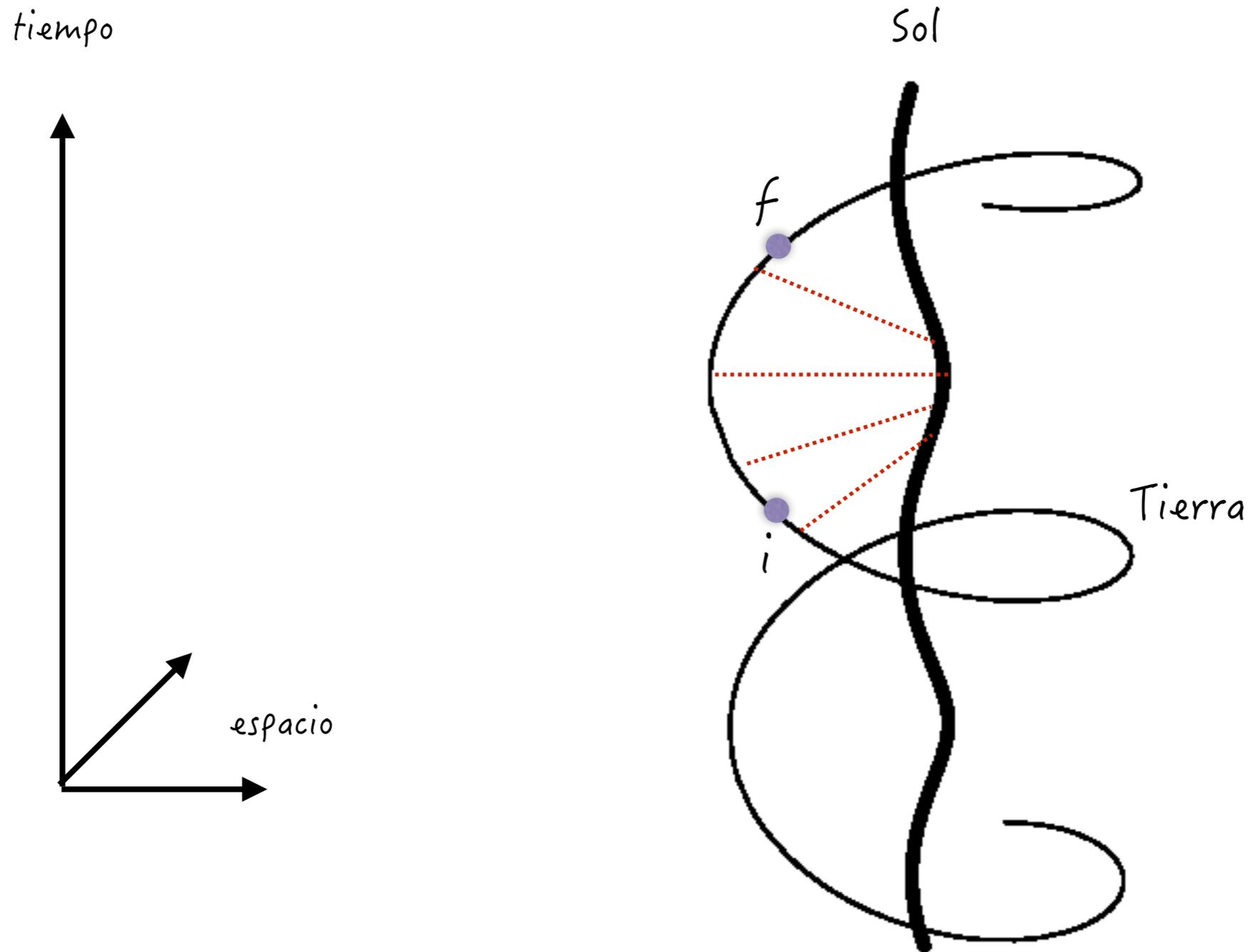


¿Existe una formulación de la física clásica que "esconde" el determinismo?

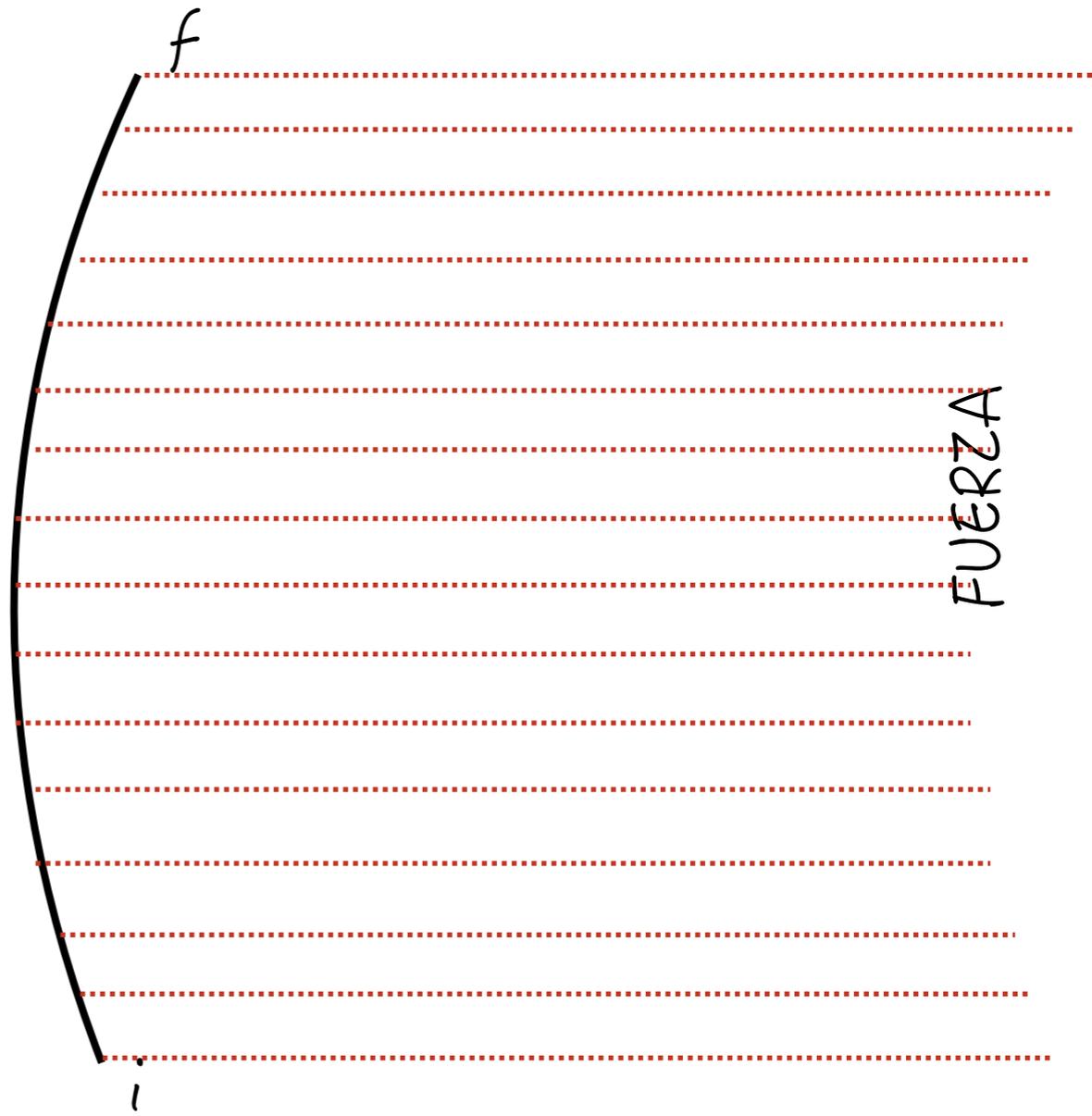


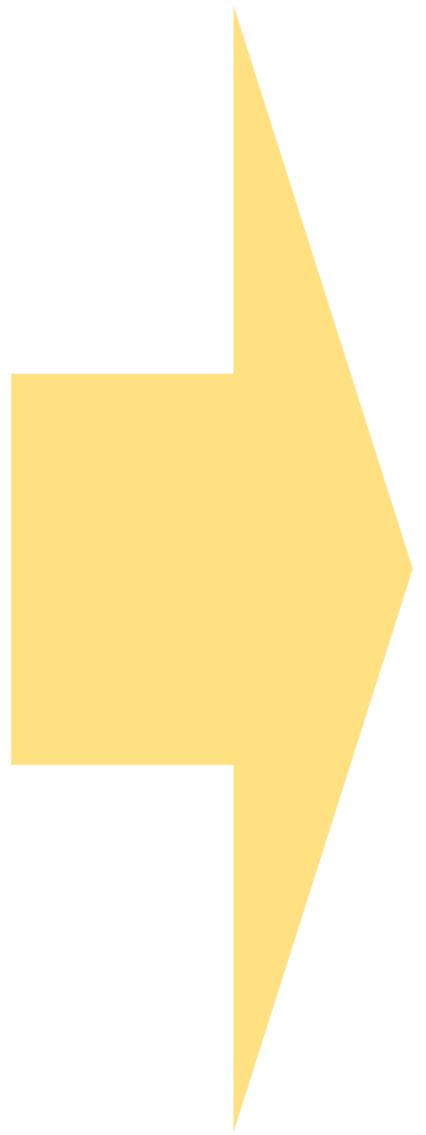
Sorprendentemente, la respuesta es **SI**

¿Existe una formulación de la física clásica que "esconde" el determinismo?

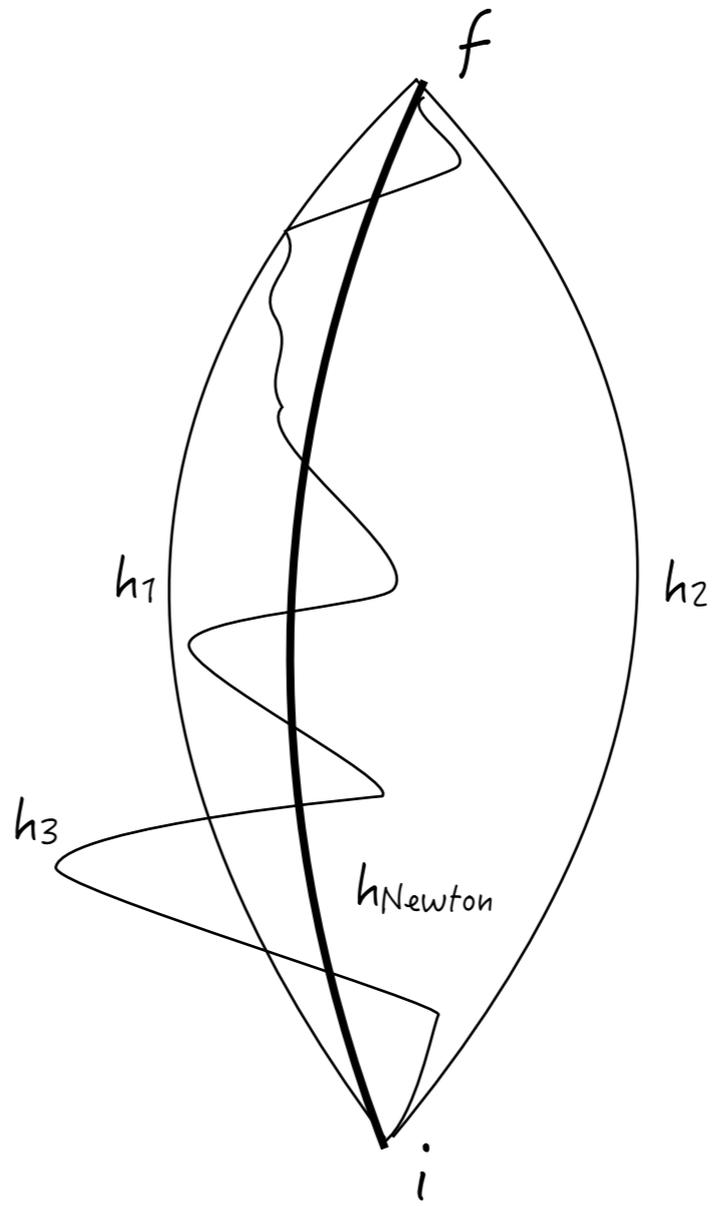


Sorprendentemente, la respuesta es **SI**



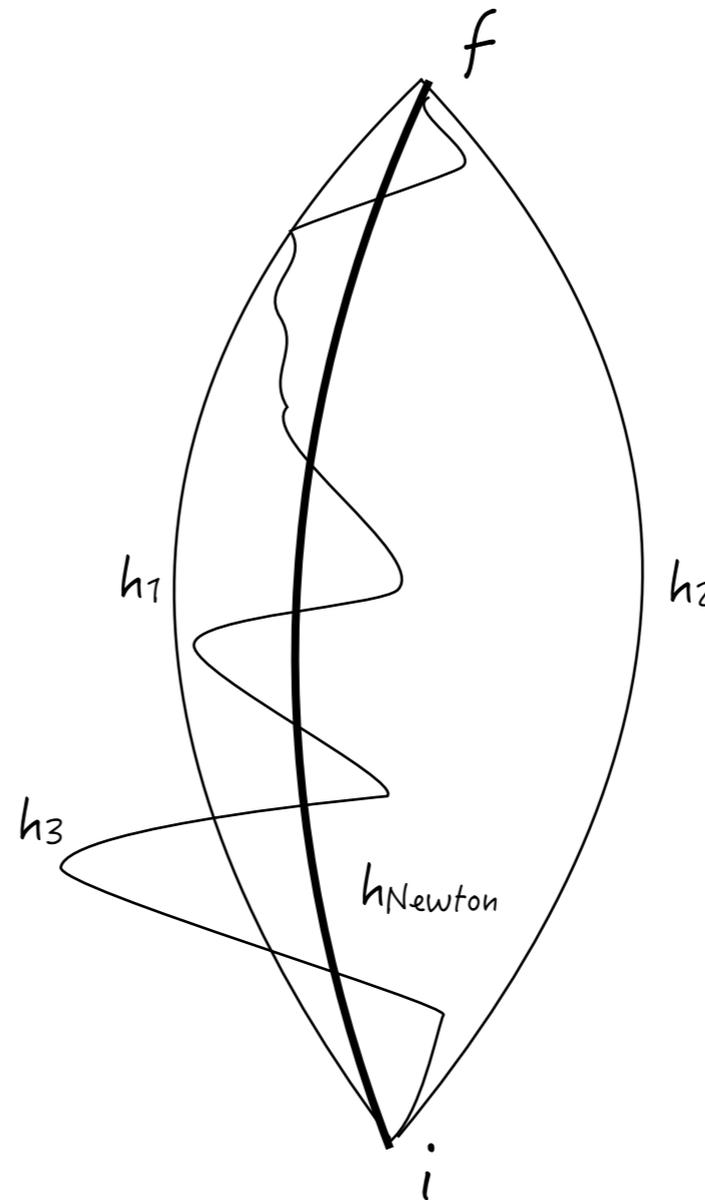


FUERZA



FUERZA

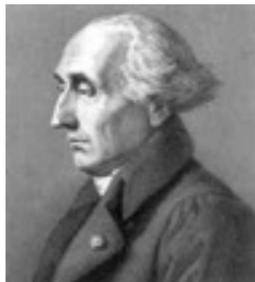
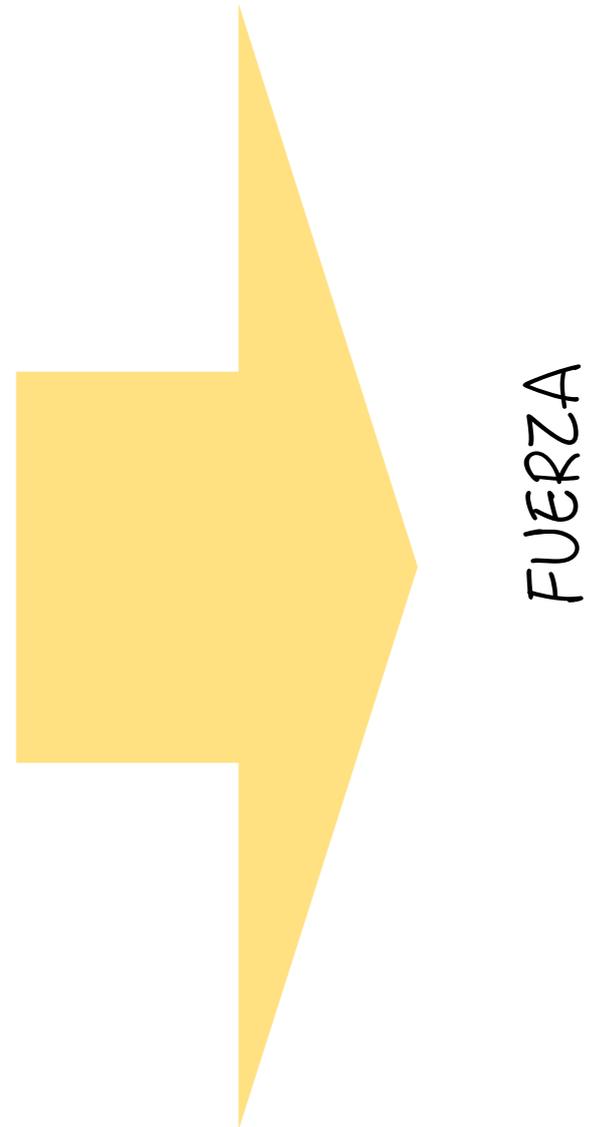
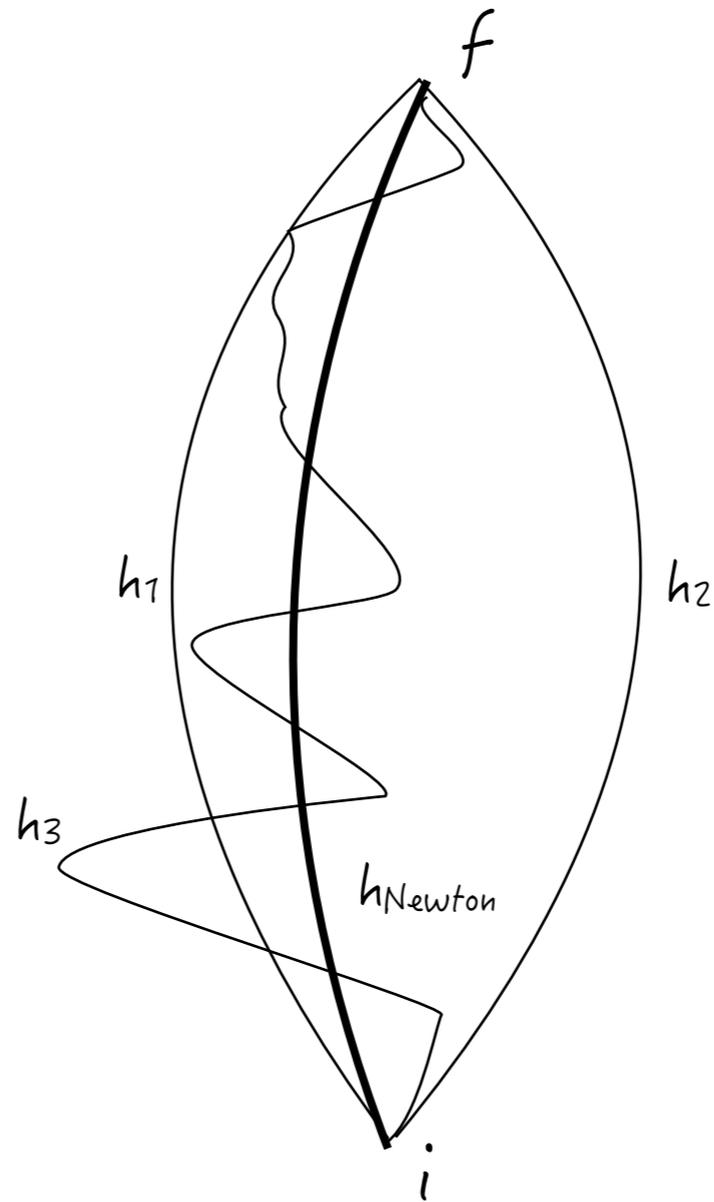
Acción historia =
 $(E_{K_{media}} - E_{P_{media}}) (\text{tiempo})$



La historia que satisface la ley Newtoniana
 es la que minimiza la acción



Acción historia =
 $(E_{K_{media}} - E_{P_{media}}) (\text{tiempo})$



La historia que satisface la ley Newtoniana
es la que minimiza la acción



¿Por qué existe una formulación de la física clásica
que NO es manifiestamente determinista?

Cuando una misma teoría admite dos formulaciones radicalmente diferentes, rara vez es por casualidad ...

¿acaso la partícula "olfatea" las historias alternativas y decide tomar la más económica en términos de acción?

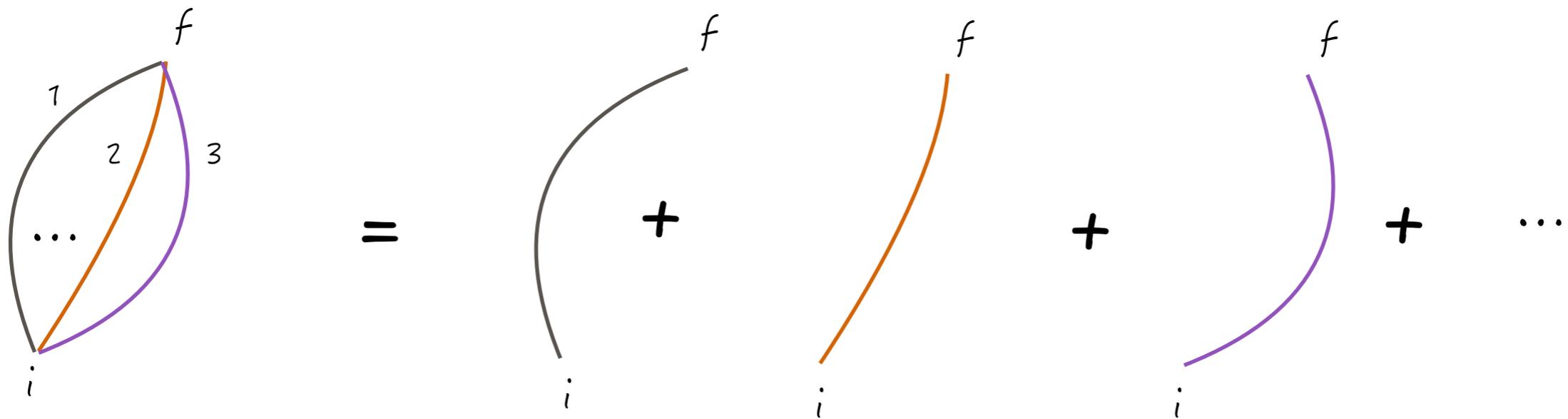
LA FISICA CUANTICA CONSISTE EN INTRODUCIR TODAS LAS HISTORIAS ALTERNATIVAS EN PIE DE IGUALDAD

DE FORMA QUE SE TIENE UN "PROMEDIO CUANTICO"

EL PRINCIPIO FUNDAMENTAL CUANTICO

TODAS las historias alternativas CONTRIBUYEN con un peso "estadístico" relativo proporcional a

$$e^{i \frac{\text{Acción}(h)}{\hbar}}$$



$$\text{Amplitud } i \rightarrow f = e^{\frac{iA_1}{\hbar}} + e^{\frac{iA_2}{\hbar}} + e^{\frac{iA_3}{\hbar}} + \dots$$

La relación entre el promedio cuántico (amplitud) y las cantidades físicas MEDIBLES es un tanto indirecta, pero matemáticamente precisa

$$\text{Amplitud} = \sum_{\text{historias}} e^{i(\text{Acción}_h)/\hbar}$$

$$\text{Probabilidad}[i \rightarrow f] = |\text{Amplitud}_{i \rightarrow f}|^2$$

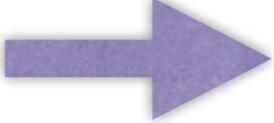


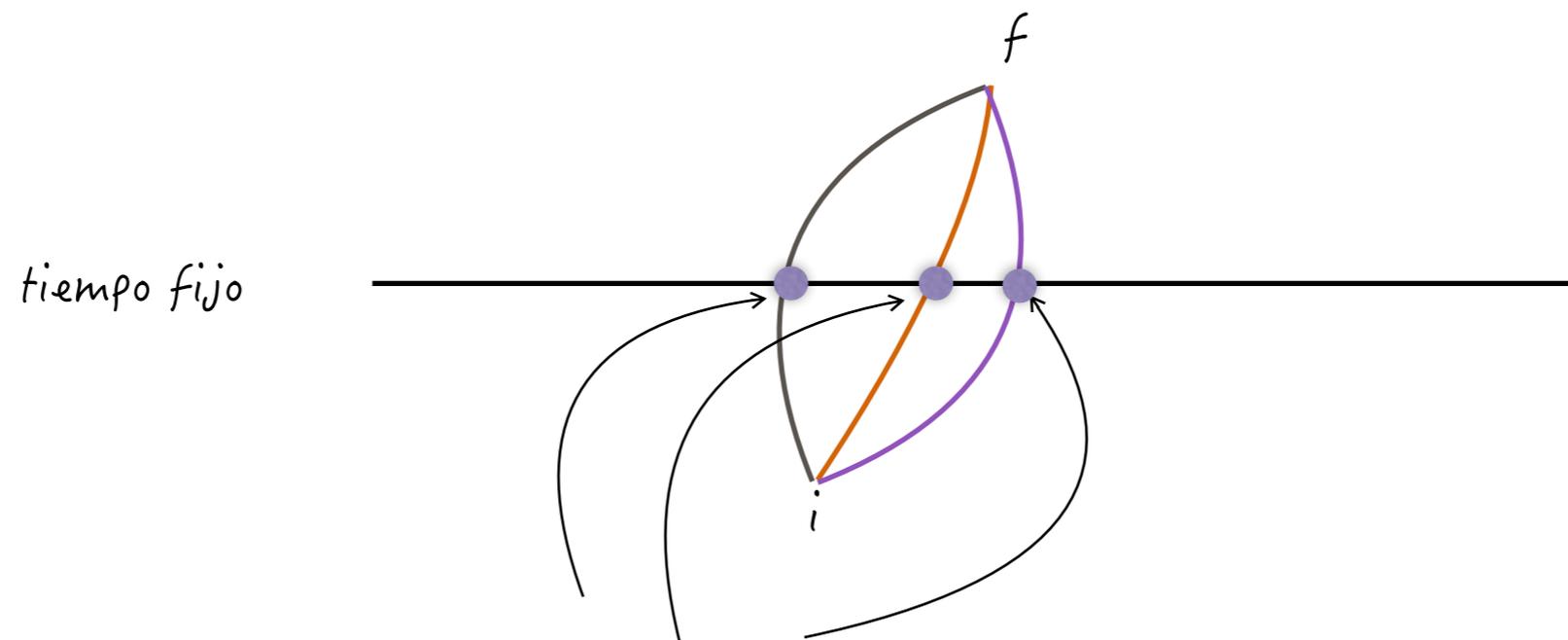
$$\text{Energía promediada en tiempo } T = \frac{i\hbar}{T} \log(\text{Amplitud}_T)$$



LAS PARTICULAS CUANTICAS SON LOS "LADRILLOS" BASICOS DE LA ENERGIA DISTRIBUIDA EN EL ESPACIO-TIEMPO

$$E = 2\pi \hbar (\text{frecuencia})$$

Historias alternativas  FLUCTUACIONES instantáneas



posiciones "fluctuantes" ALTERNATIVAS

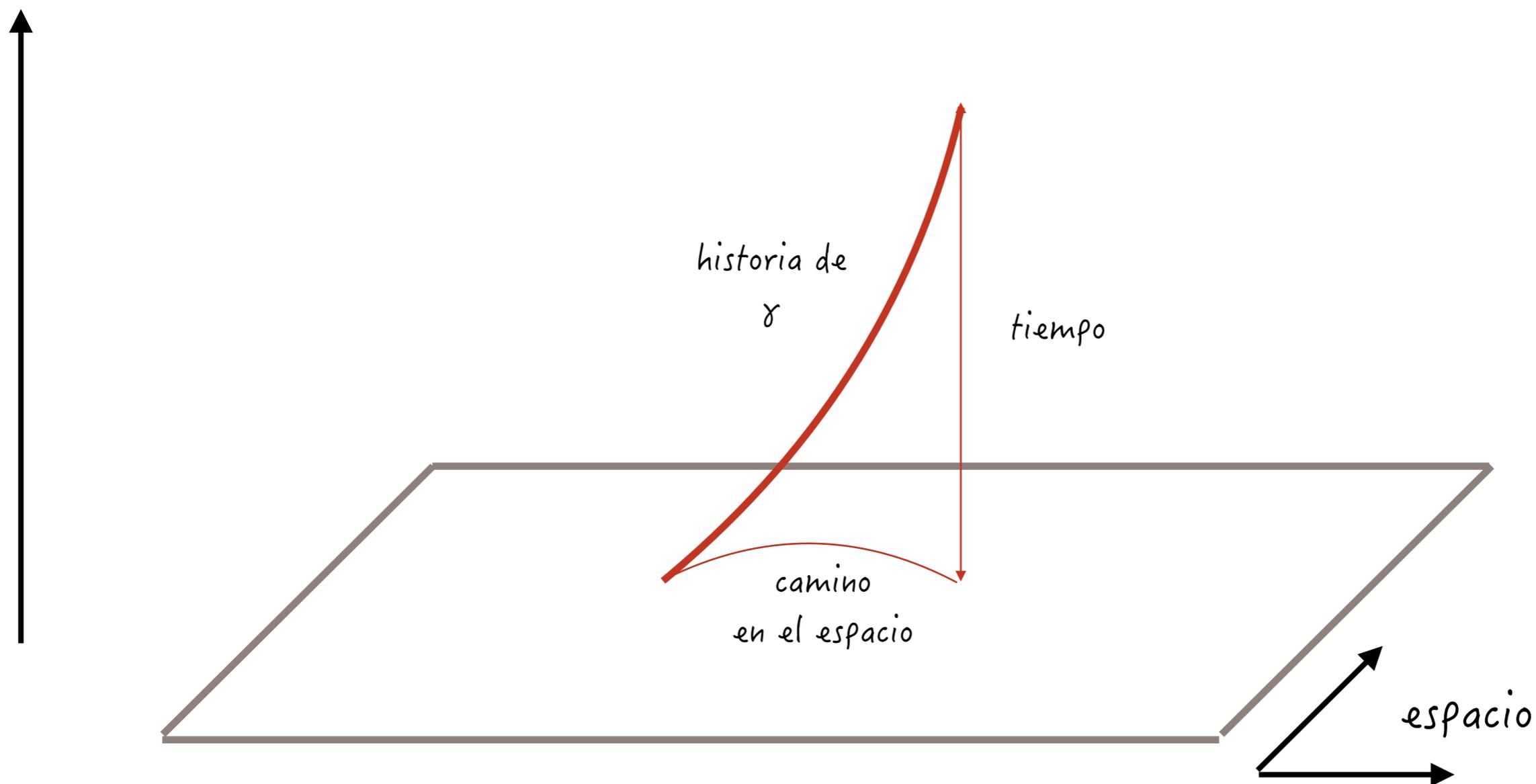
El "oficio" de un físico cuántico consiste en

1. Determinar la acción de una historia alternativa arbitraria
2. Calcular la suma sobre todas las historias alternativas
3. Cuando esto no es posible, encontrar aproximaciones para ambas

Ejemplo: para un fotón emitido por un buen láser, la acción es aproximadamente

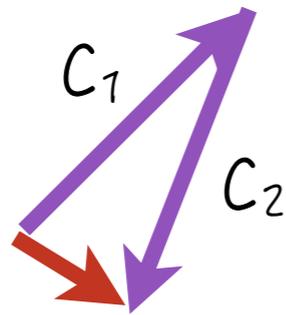
$$\text{Acción}(h) = E_\gamma (\text{tiempo})_h = E_\gamma L_{\text{camino}} / c$$

tiempo

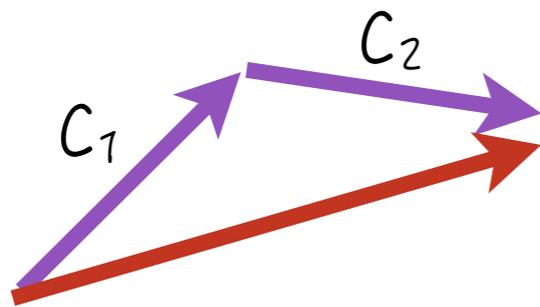


$$e^{i \frac{\text{Acción}(h)}{\hbar}}$$

es una flecha que gira un número de veces proporcional a la longitud del camino en el espacio



C₁ y C₂ se "cancelan" mutuamente y la amplitud resultante es pequeña

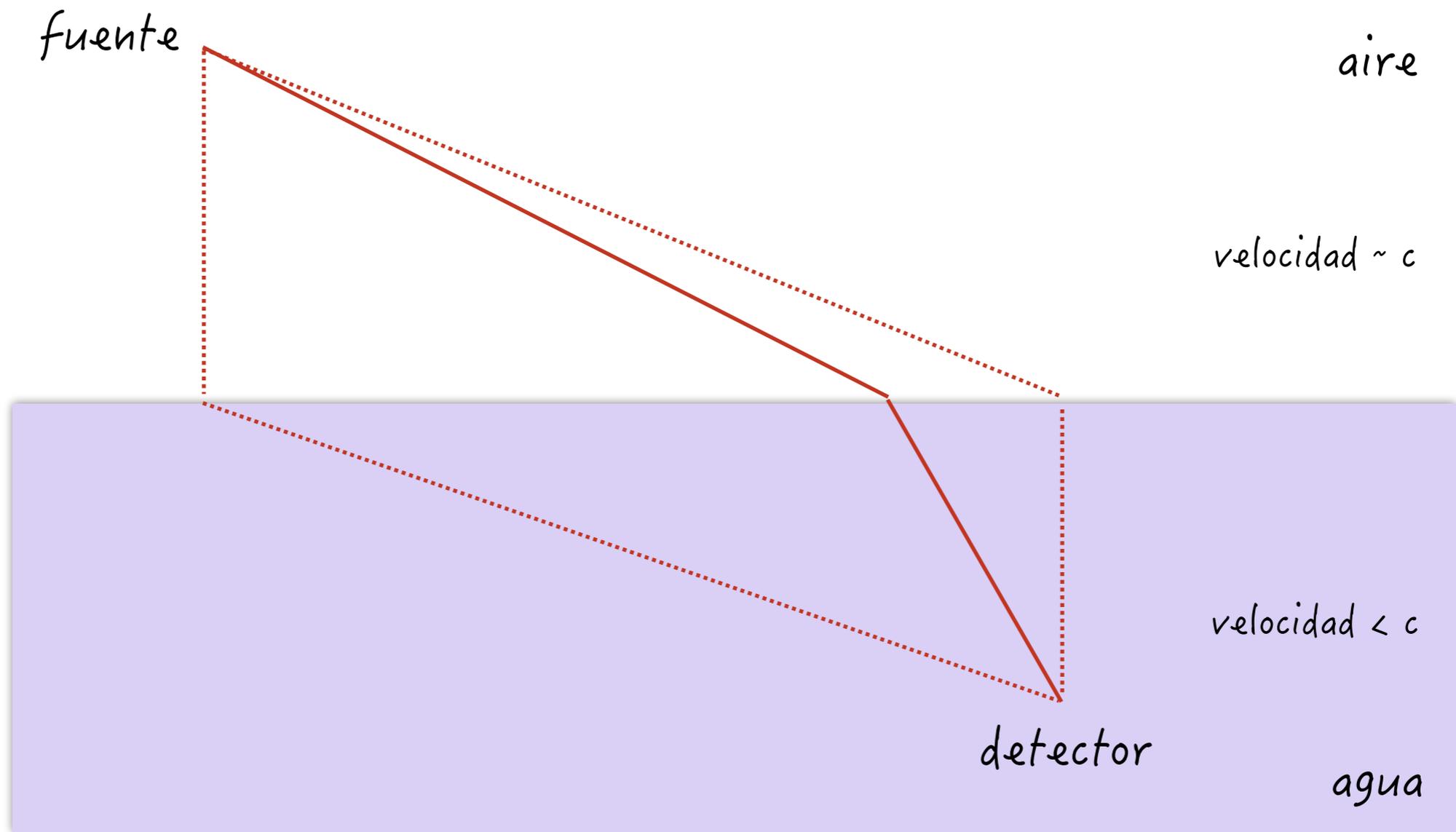


C₁ y C₂ se "refuerzan" mutuamente y la amplitud resultante es grande

Al sumar las flechas para todos los caminos, dominan aquellas correspondientes a caminos próximos al mínimo de I_h , porque se "refuerzan" mutuamente

El fenómeno de refuerzo o cancelación de las fluctuaciones es genuinamente cuántico y se denomina INTERFERENCIA CUANTICA

¡LA REFRACCION DE LA LUZ ES CUANTICA!



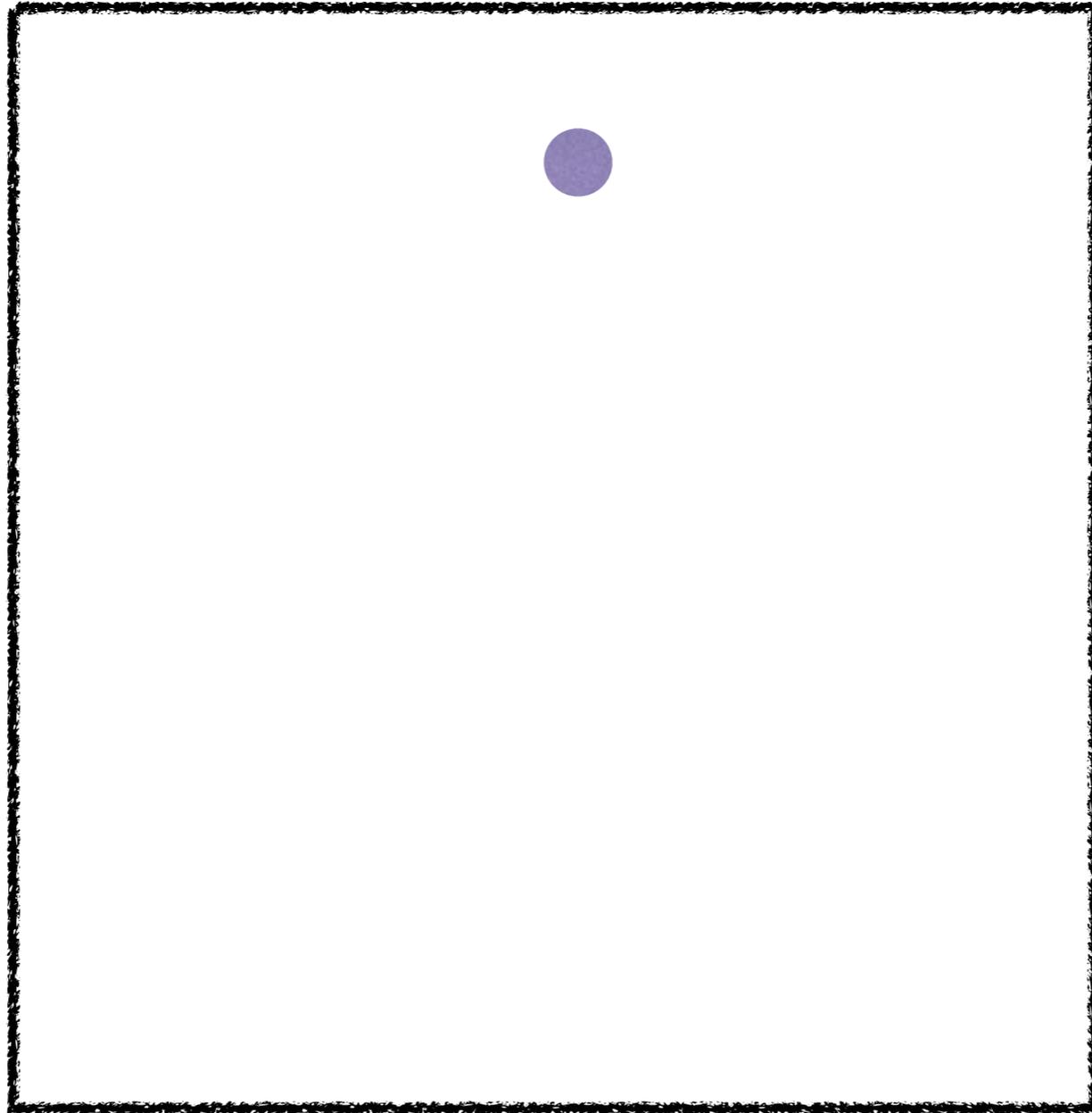
La trayectoria de un único fotón γ minimiza el tiempo de recorrido

¿cómo "escoge" la correcta desde el principio?

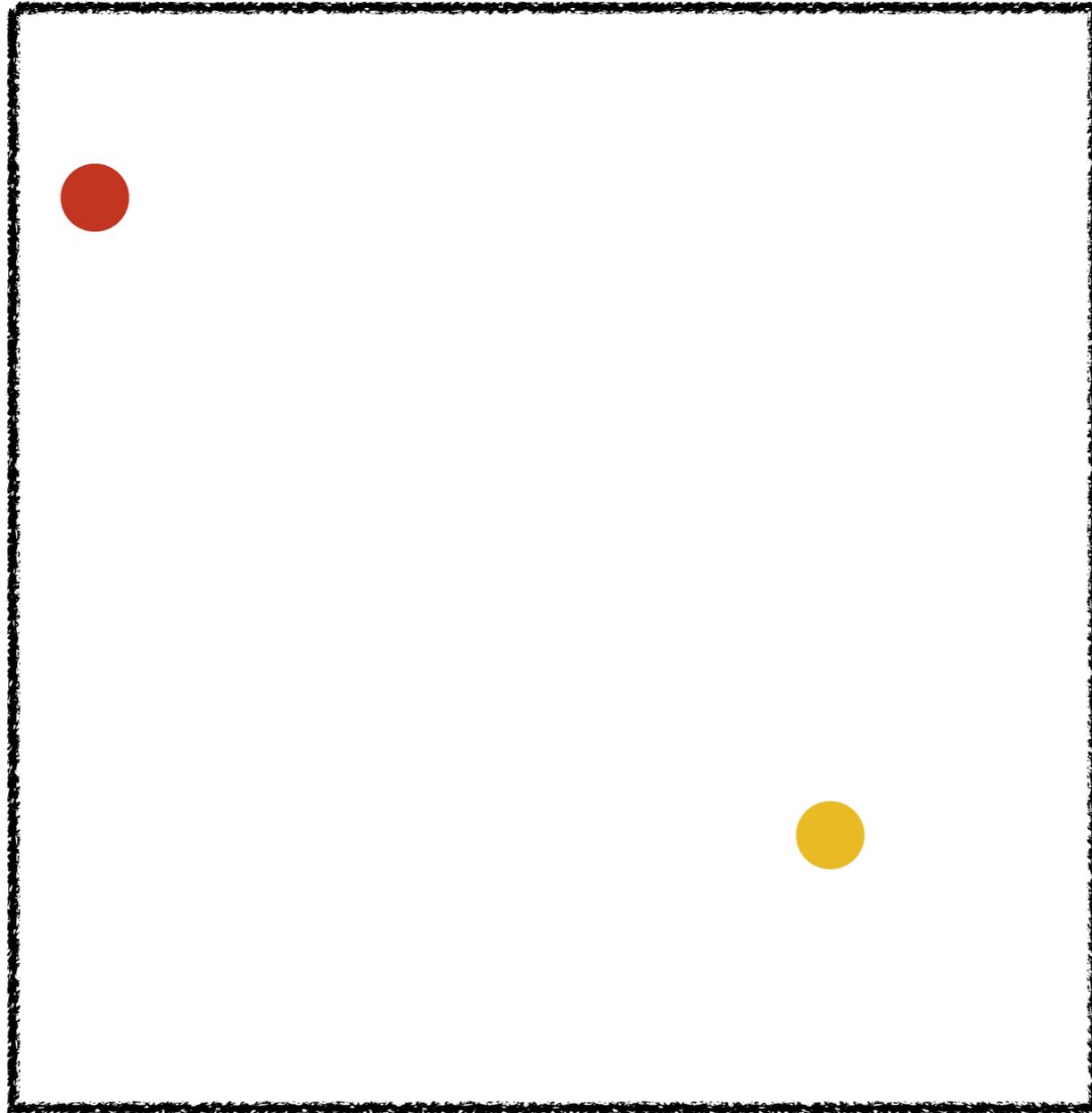
Simplemente, ¡probándolas todas simultáneamente!

El promedio sobre está dominado por aquella que minimiza el tiempo de vuelo

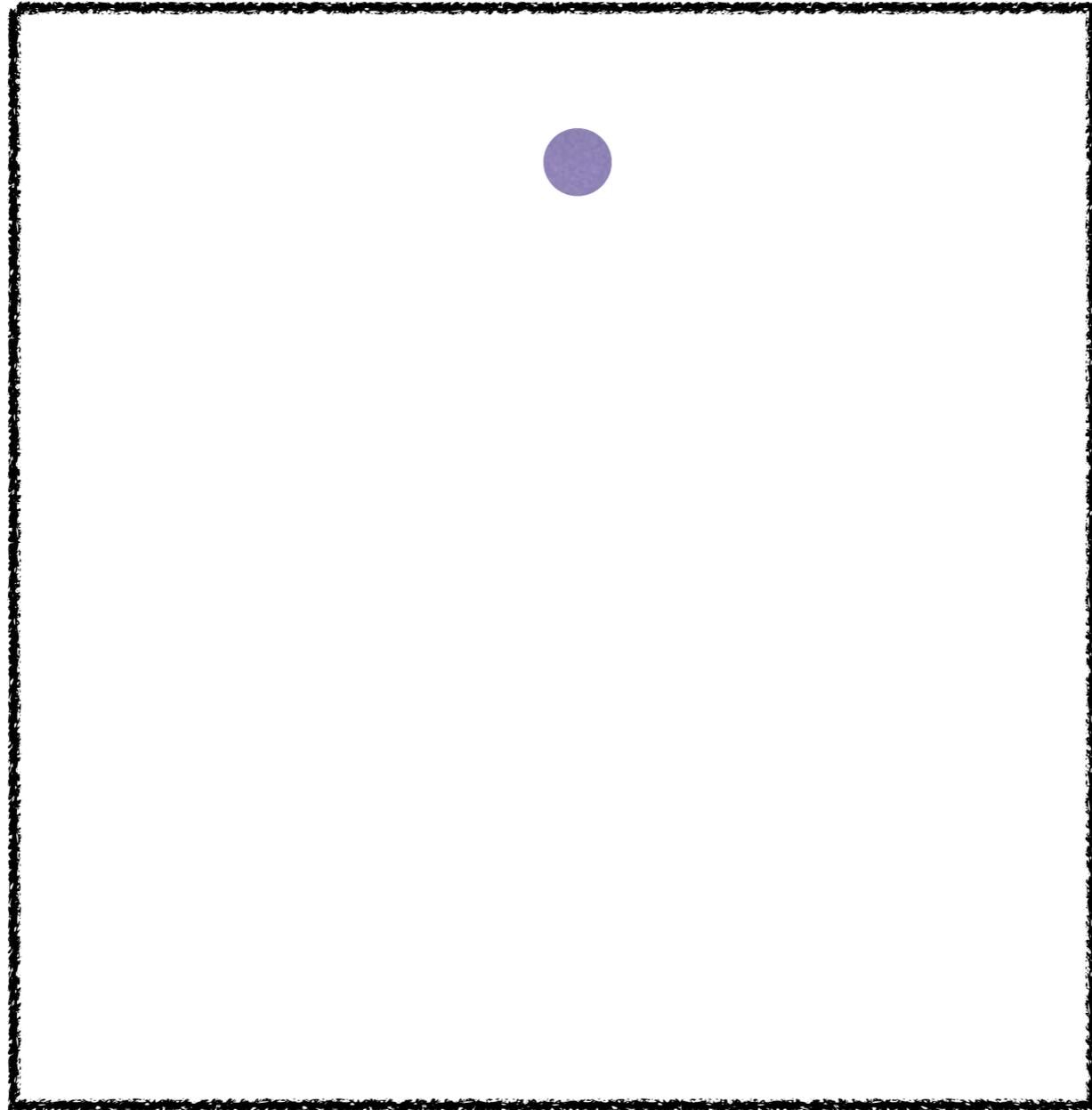
Eslogan: las partículas cuánticas fluctúan en su movimiento
y en su identidad



Eslogan: las partículas cuánticas fluctúan en su movimiento
y en su identidad

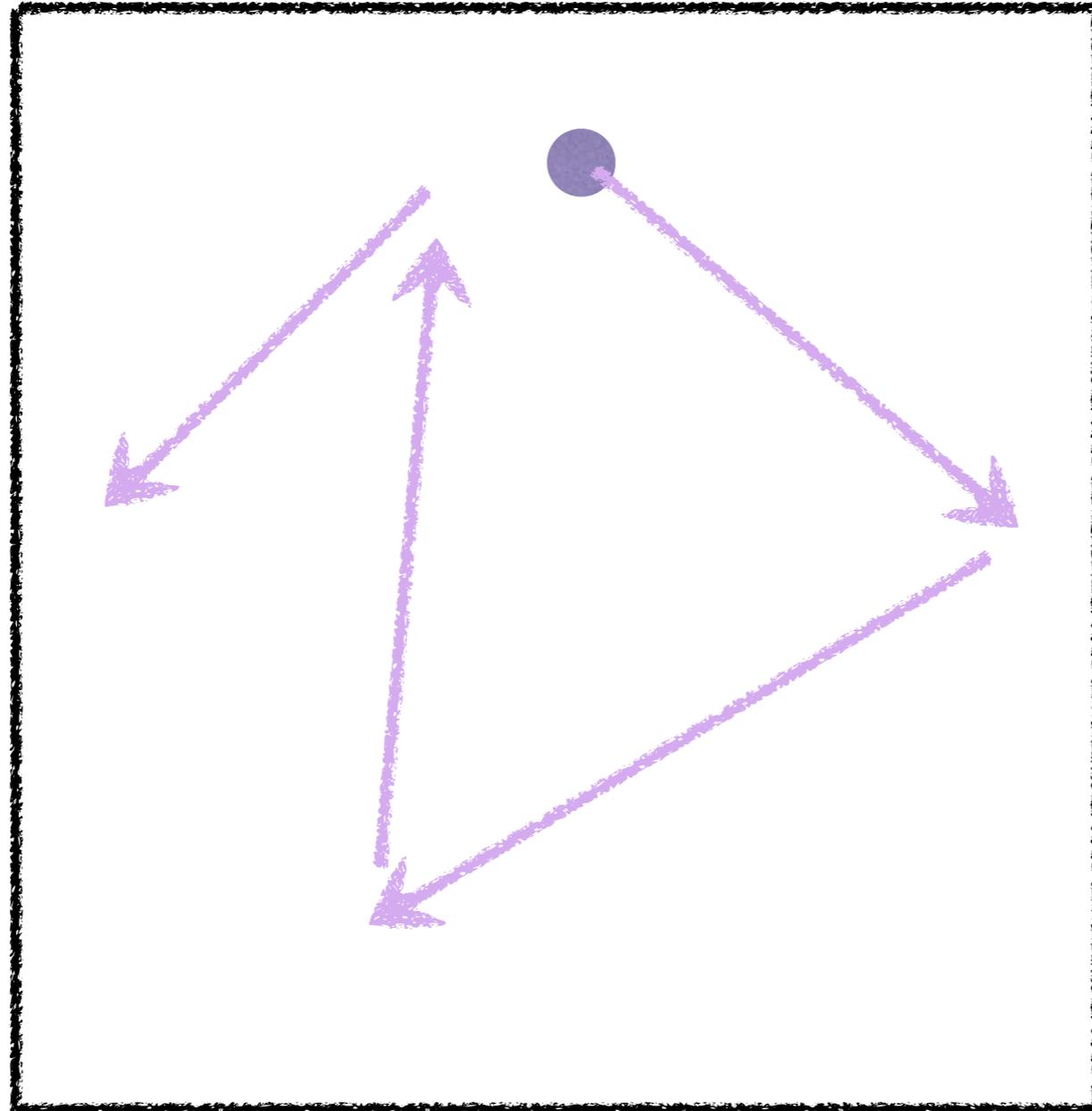


a BAJA ENERGIA las fluctuaciones son
LENTAS y AMPLIAS



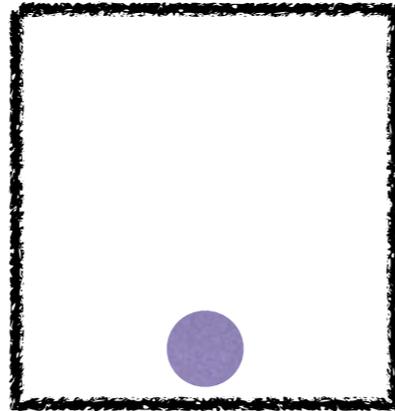
sin cambios de "identidad" significativos

a BAJA ENERGIA las fluctuaciones son
LENTAS y AMPLIAS

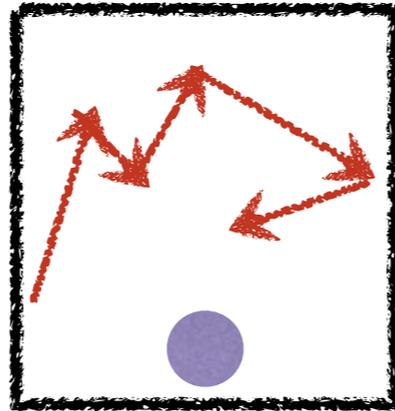


sin cambios de "identidad" significativos

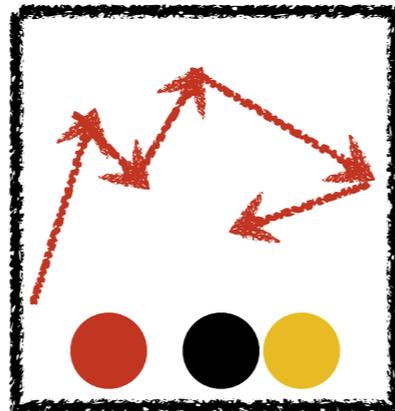
a ALTA ENERGIA las fluctuaciones son
RAPIDAS y de longitud CORTA



a ALTA ENERGIA las fluctuaciones son
RAPIDAS y de longitud CORTA



a ALTA ENERGIA las fluctuaciones son
RAPIDAS y de longitud CORTA

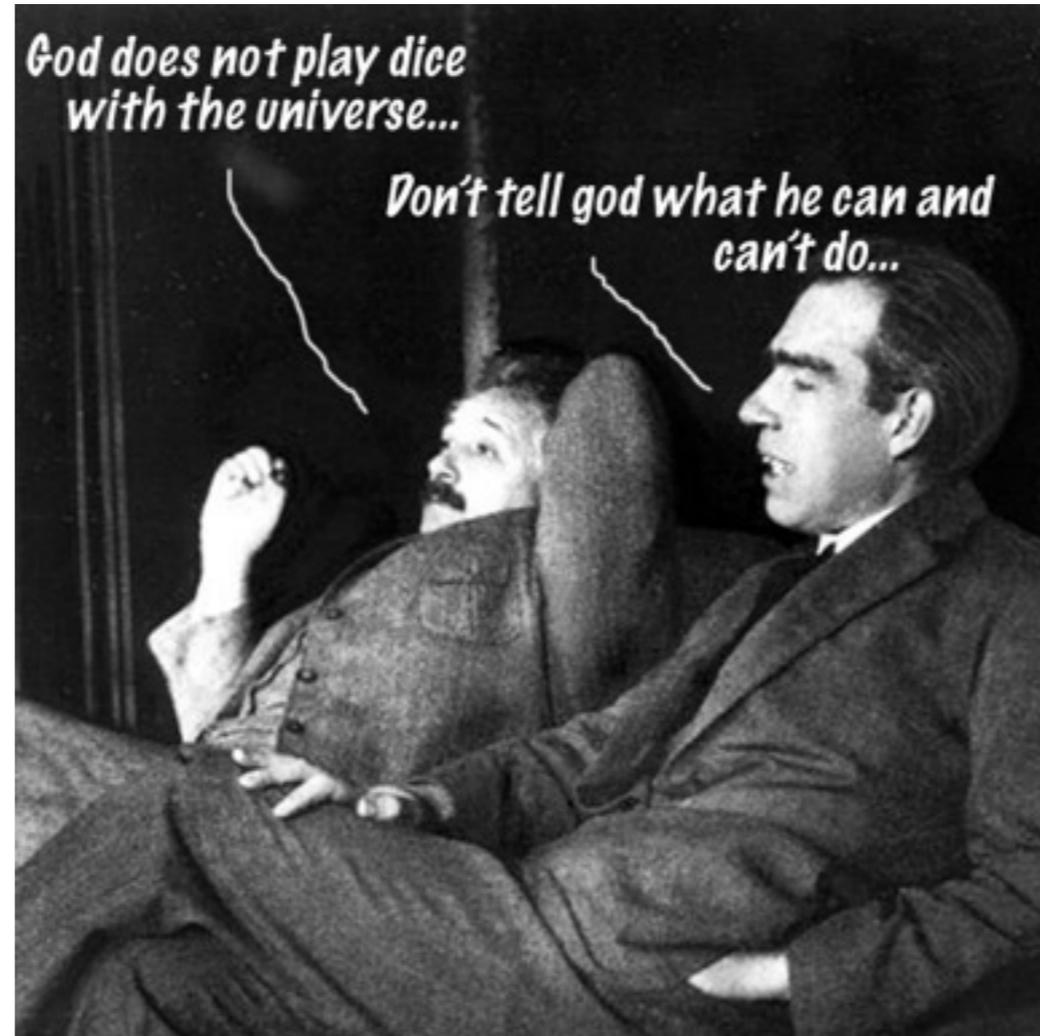


¡LAS FLUCTUACIONES CON ENERGIA MAYOR QUE

$$m c^2$$

PUEDEN CREAR NUEVAS PARTICULAS!

El indeterminismo fundamental de la FQ llevó a Einstein, uno de sus fundadores, a la frustración: "No puedo creer que Dios juega a los dados"



La respuesta de Bohr: "Deja de decirle a Dios lo que tiene que hacer"

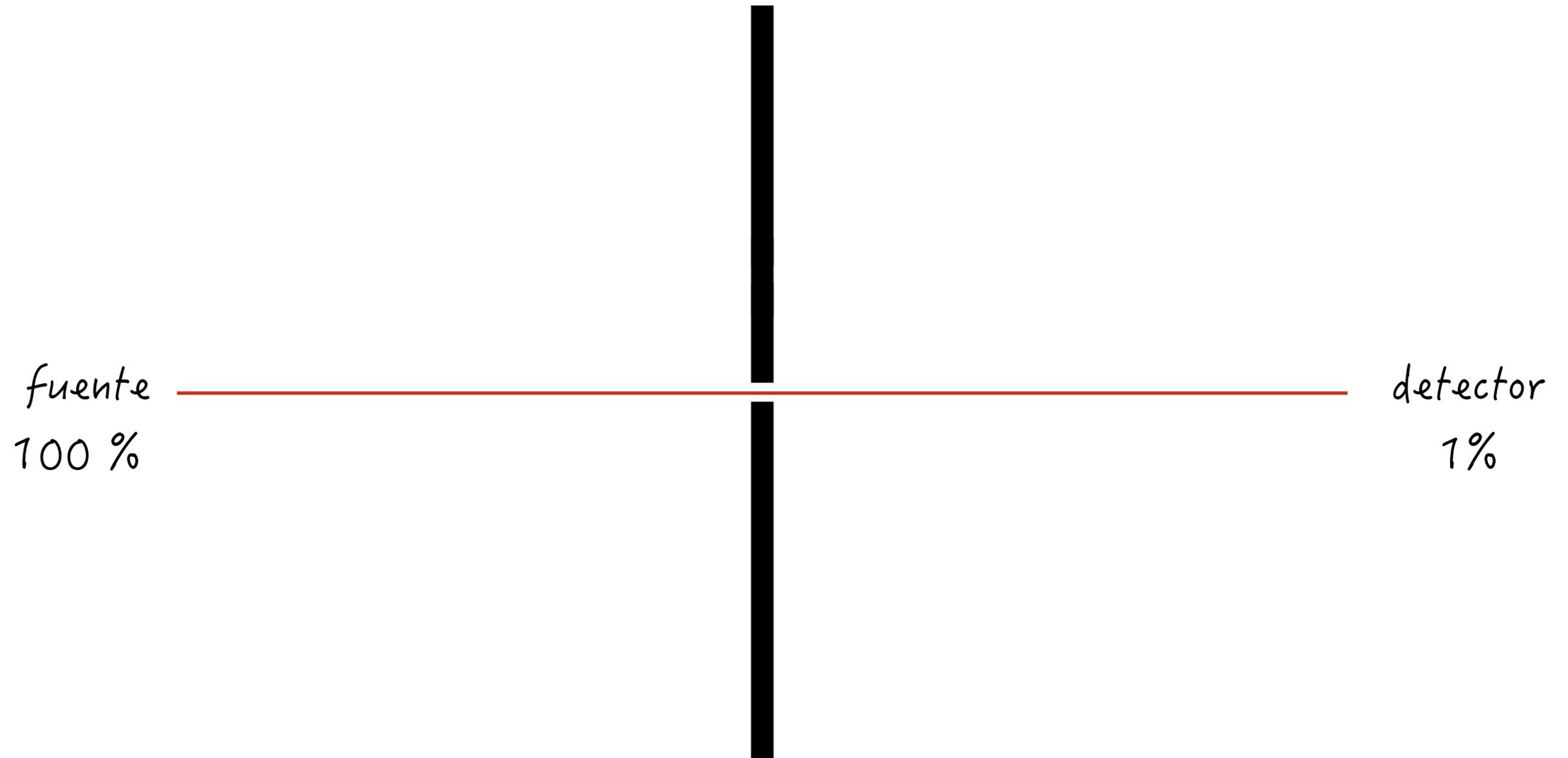
Es incluso "perverso", pues esconde su mano...

fuelle
100 %

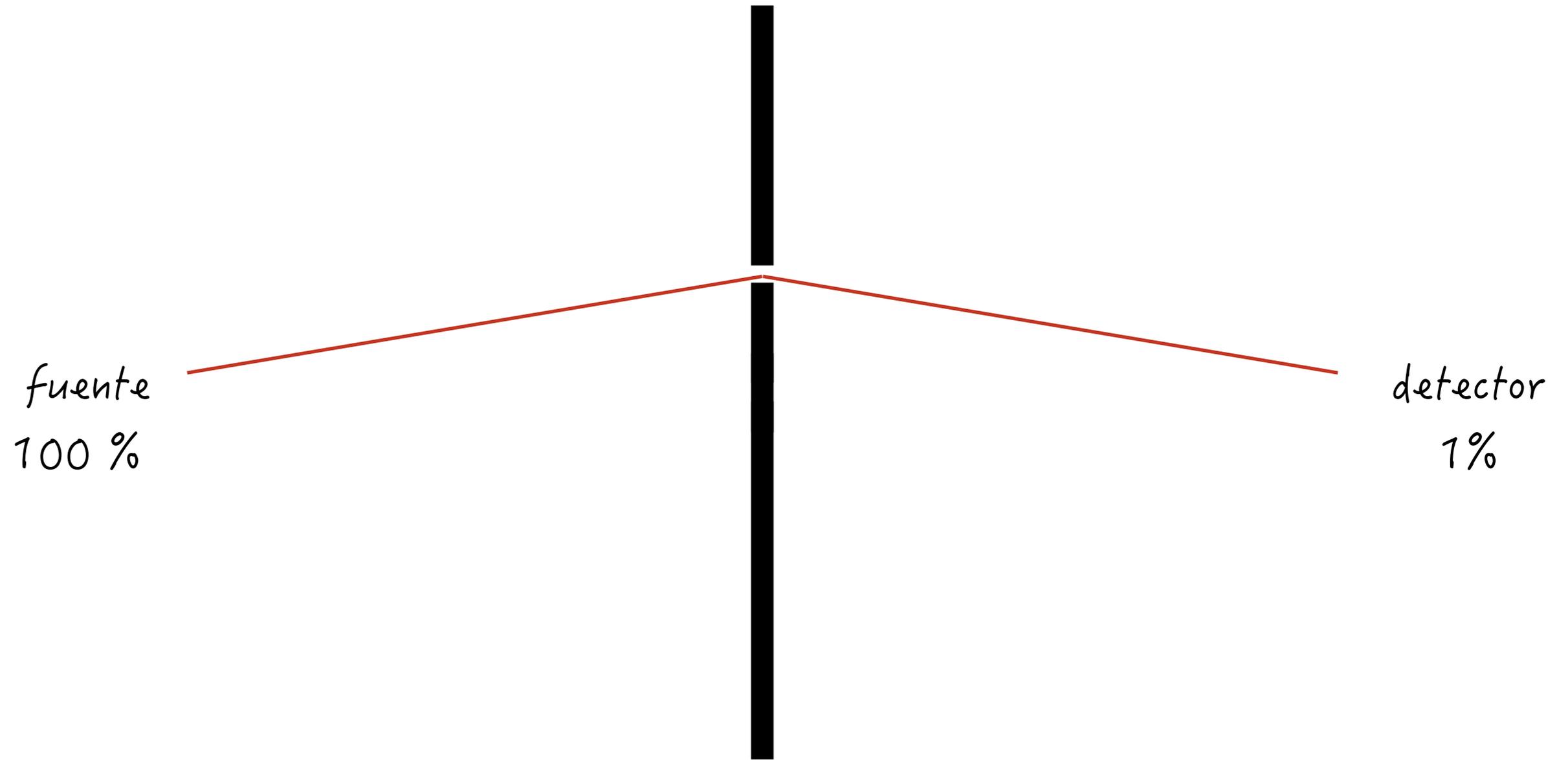


detector

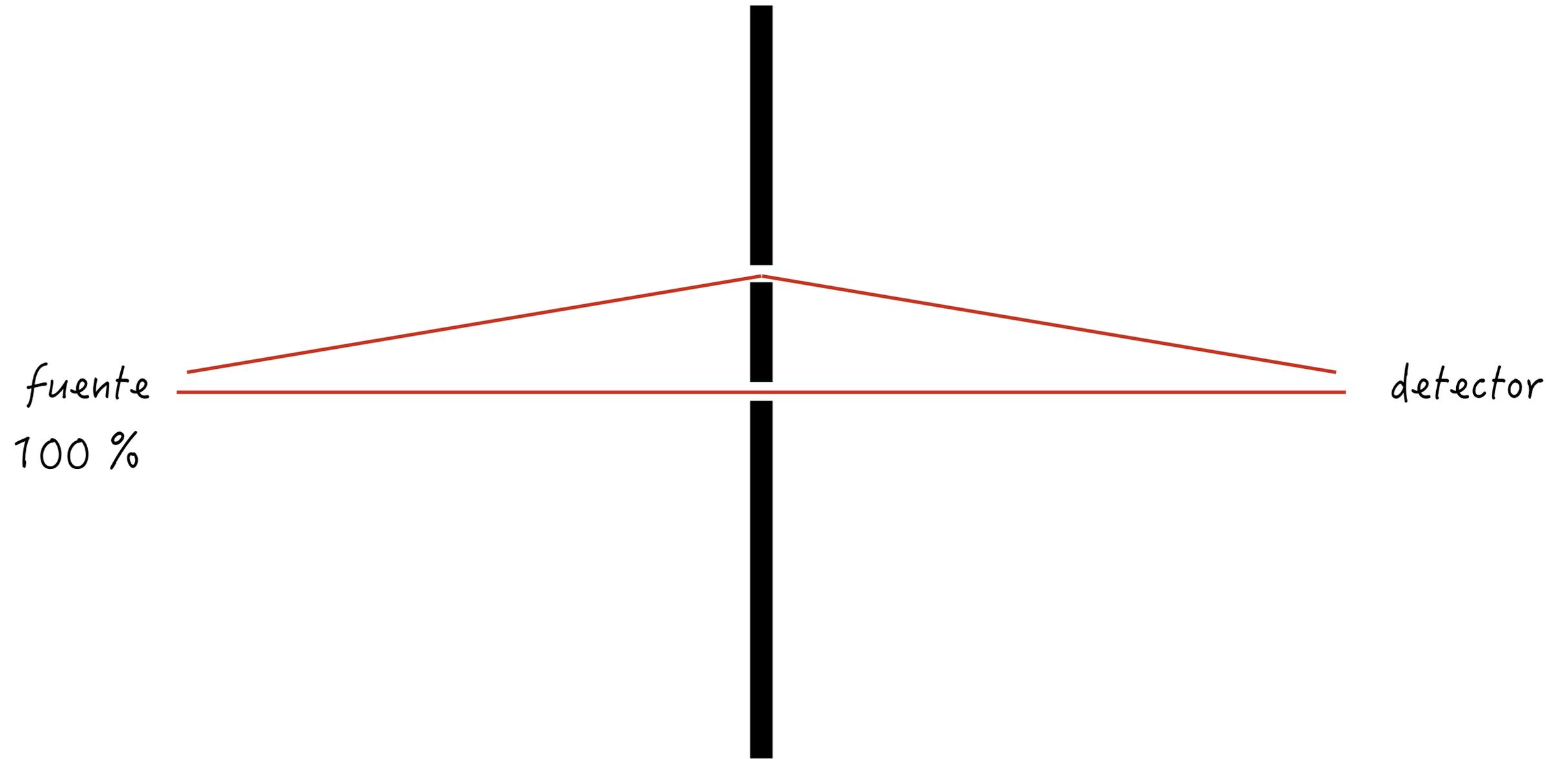
Es incluso "perverso", pues esconde su mano...



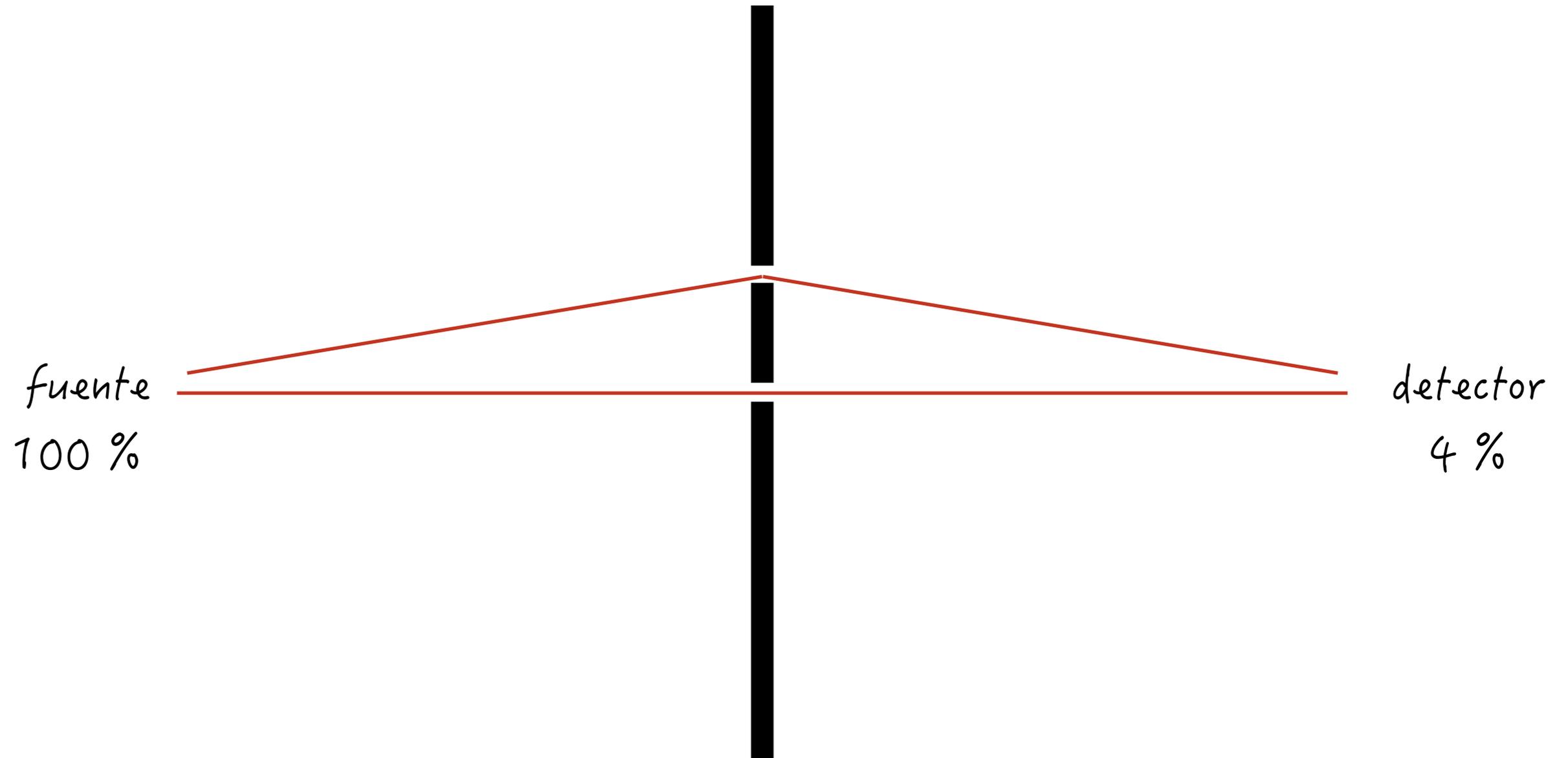
Es incluso "perverso", pues esconde su mano...



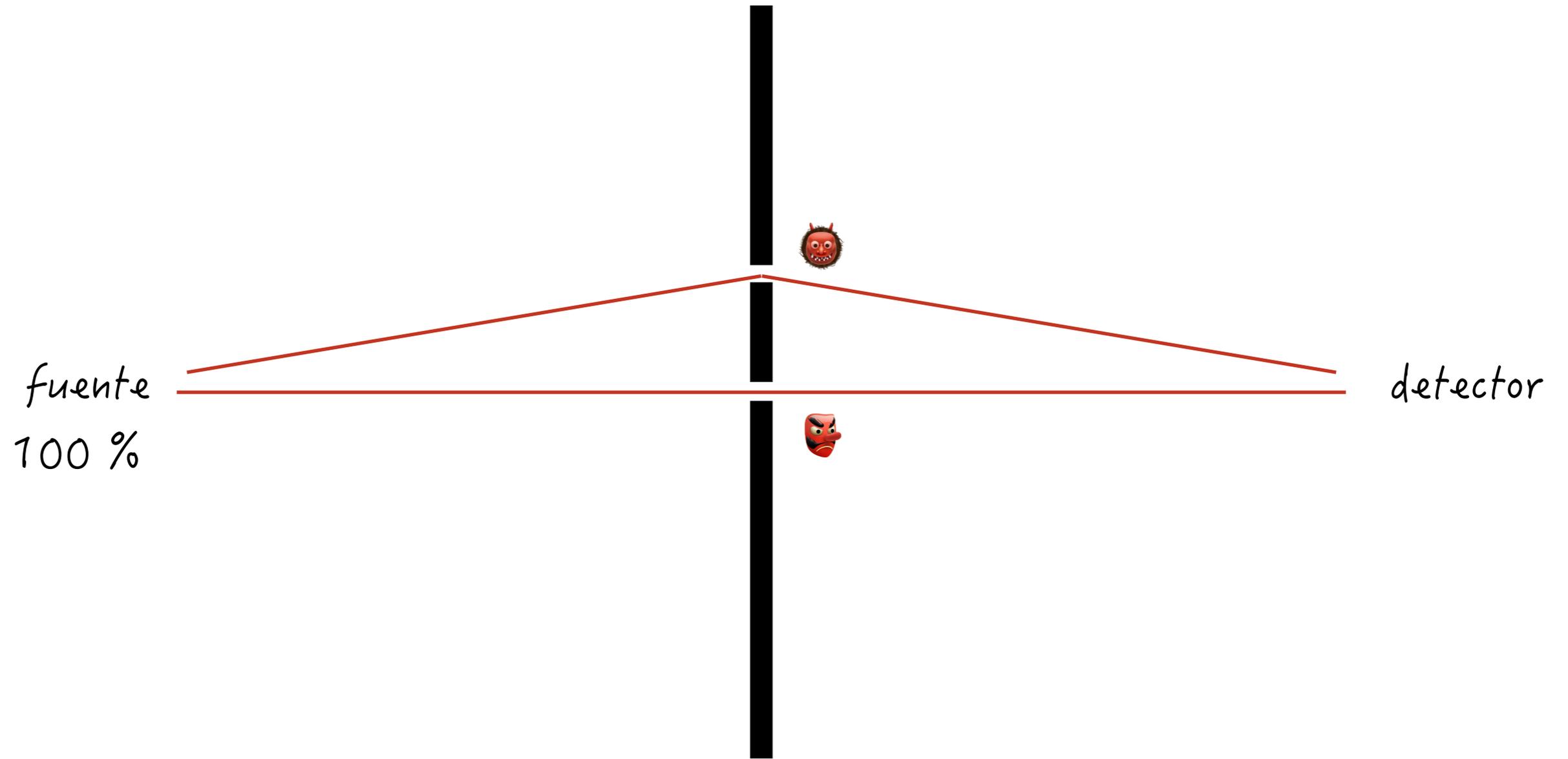
Es incluso "perverso", pues esconde su mano...



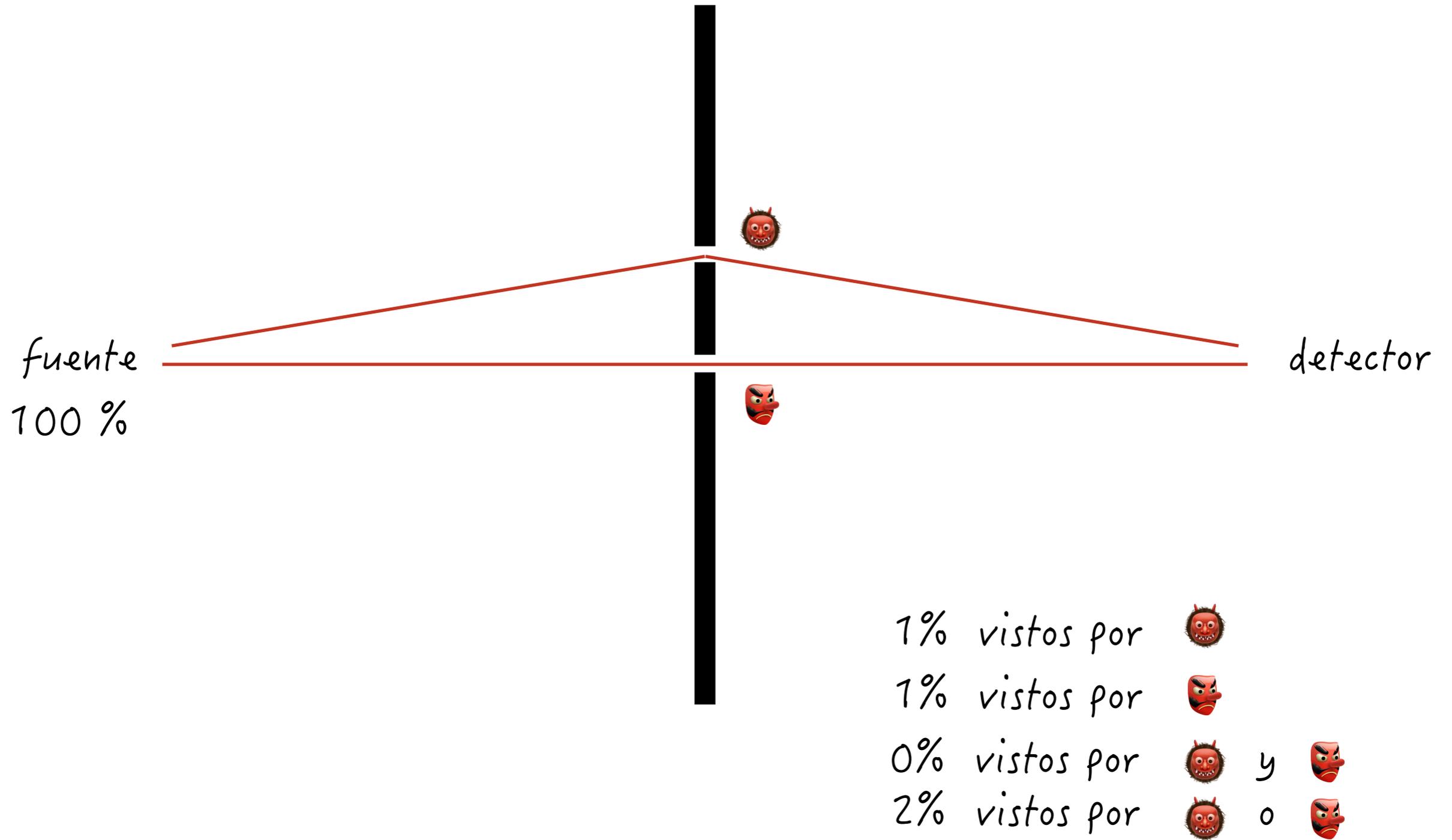
Es incluso "perverso", pues esconde su mano...



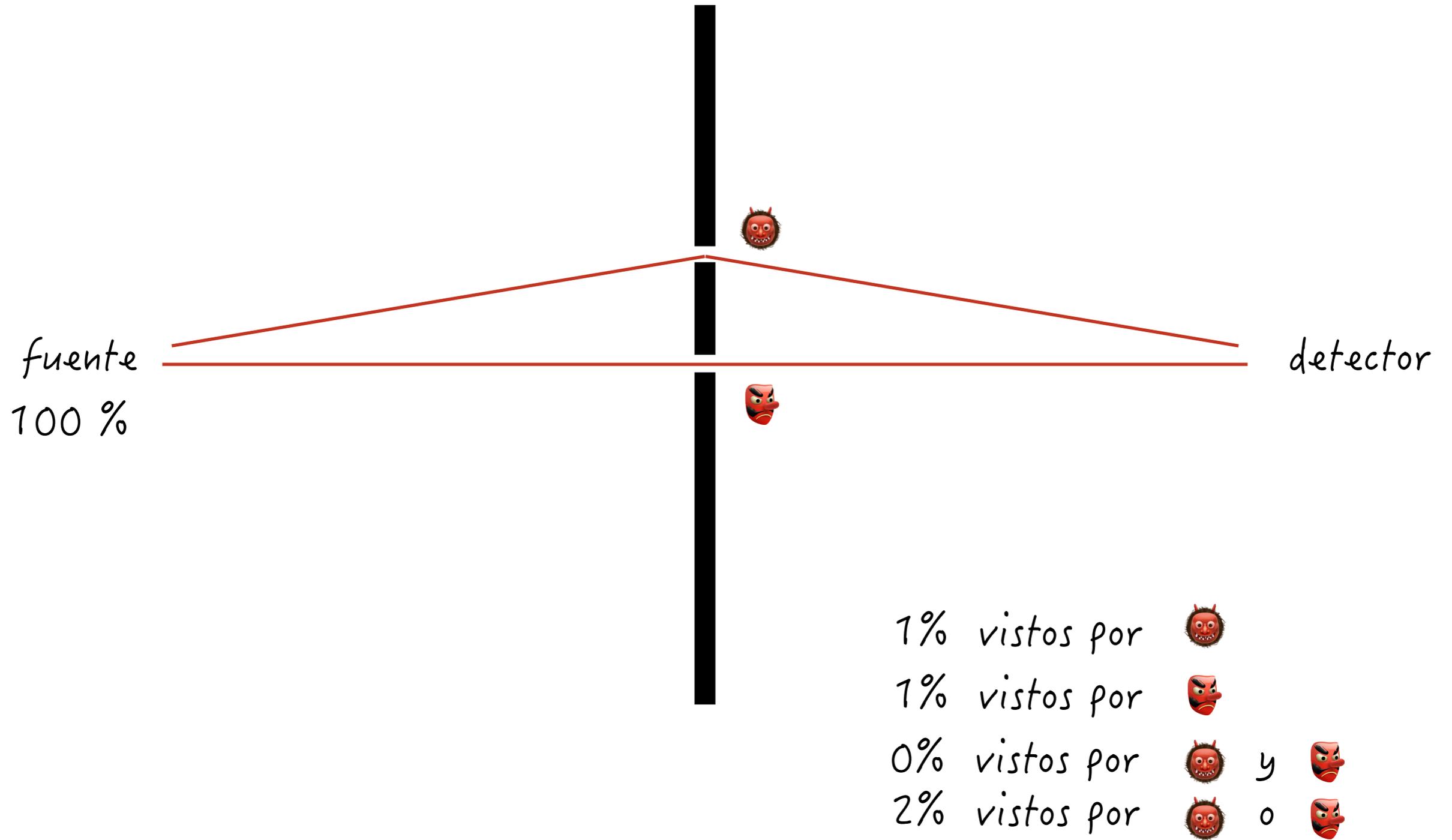
Es incluso "perverso", pues esconde su mano...



Es incluso "perverso", pues esconde su mano...



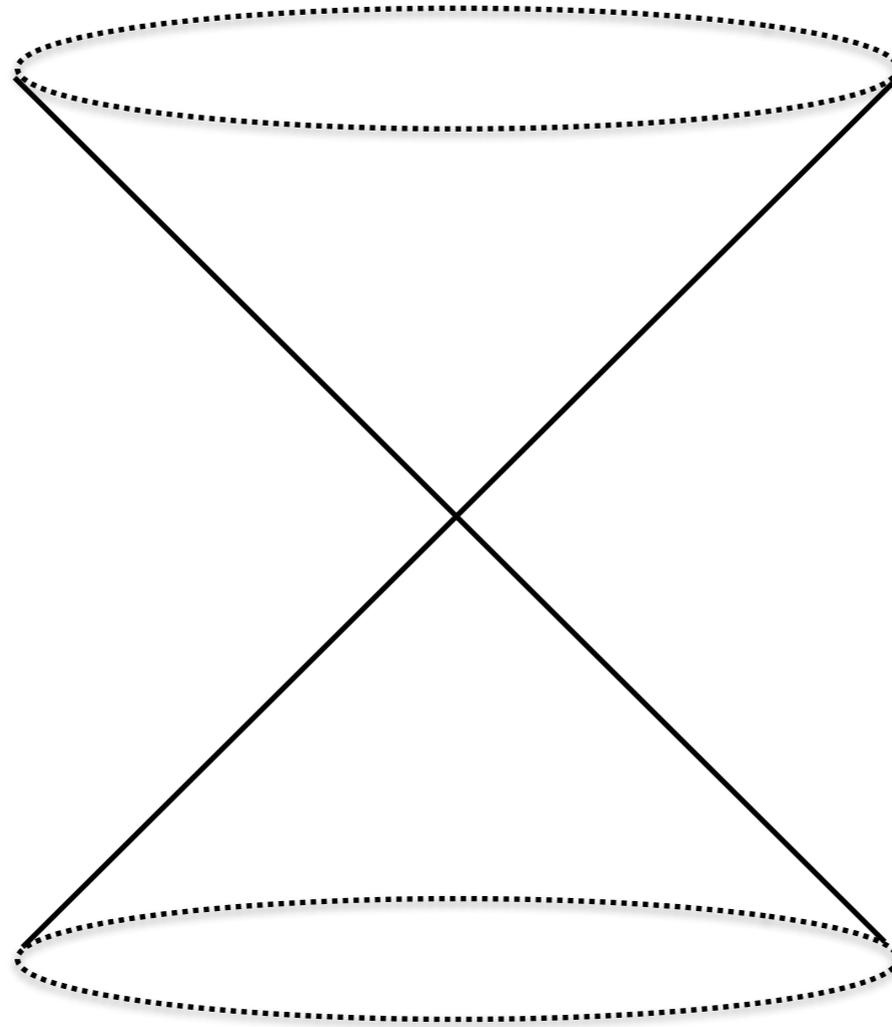
Es incluso "perverso", pues esconde su mano...



Si los demonios son ineficientes, digamos solo ven el 90%, solo aquellos fotones que no han sido detectados por los demonios "interfieren" cuánticamente

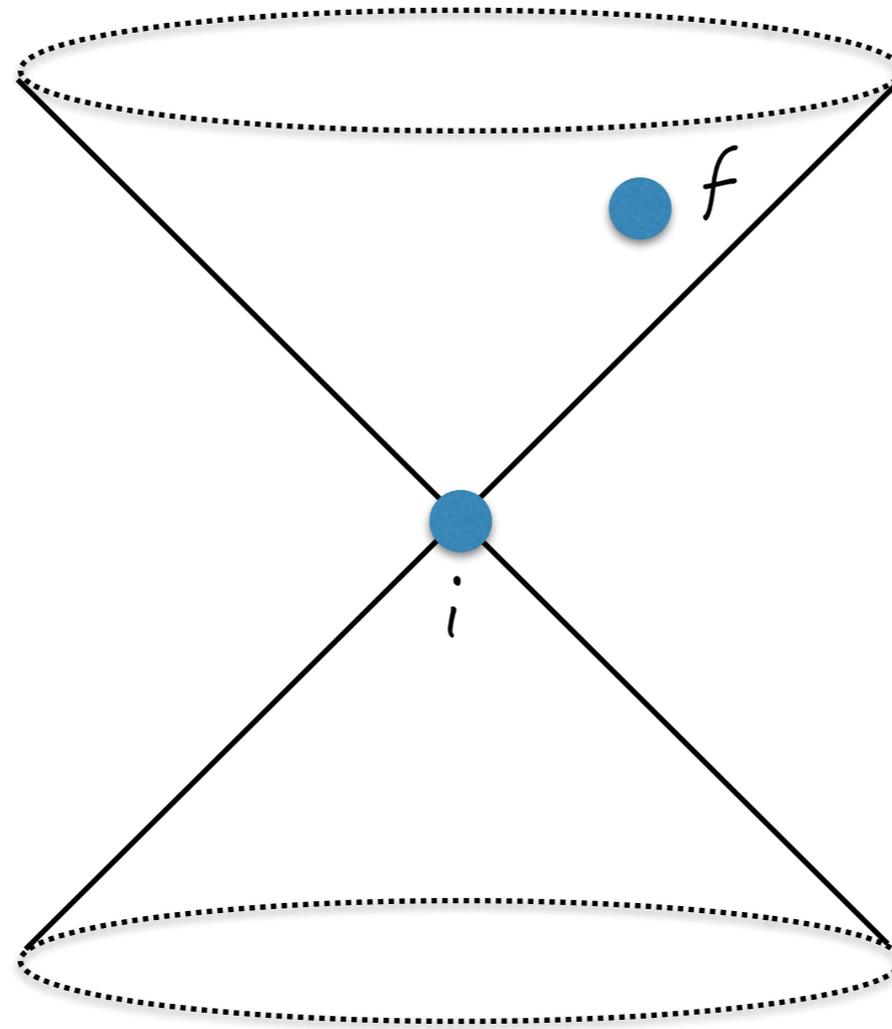
¿COMO SE COMBINAN EL PROMEDIO CUANTICO CON EL ESPACIO-TIEMPO DE EINSTEIN?

Una hipótesis natural sería que las fluctuaciones fuera del cono de luz están prohibidas



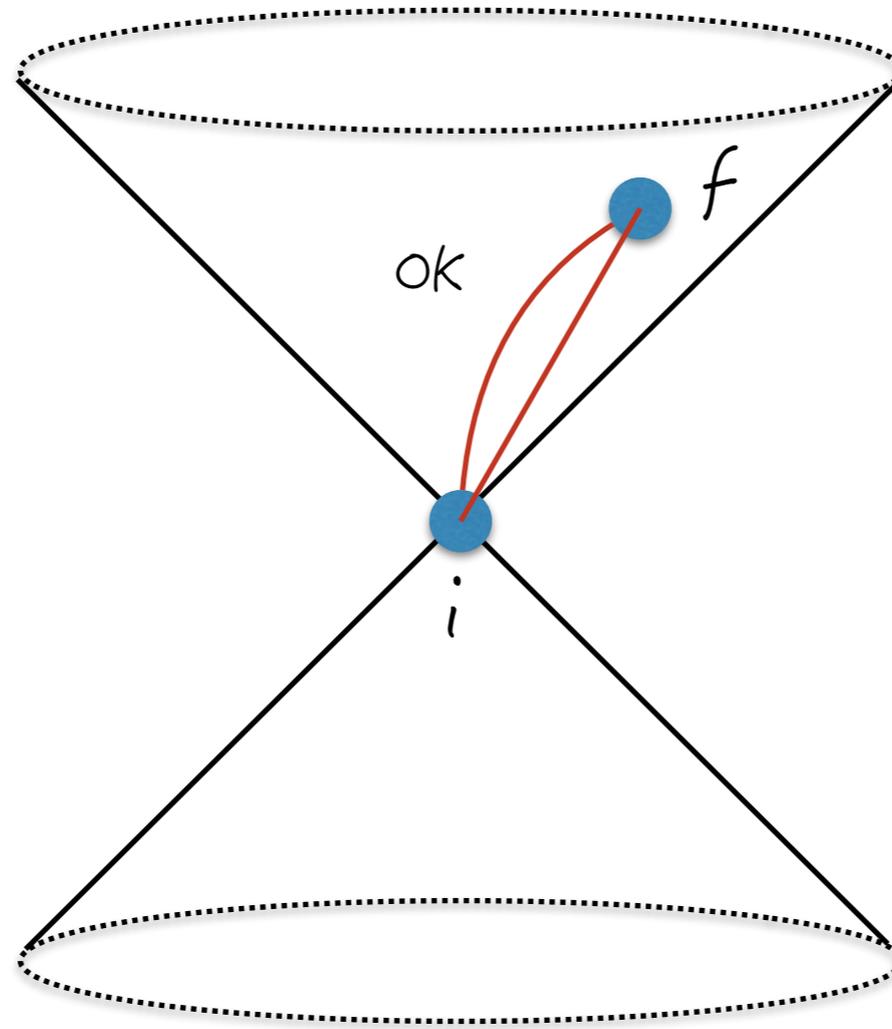
¿COMO SE COMBINAN EL PROMEDIO CUANTICO CON EL ESPACIO-TIEMPO DE EINSTEIN?

Una hipótesis natural sería que las fluctuaciones fuera del cono de luz están prohibidas



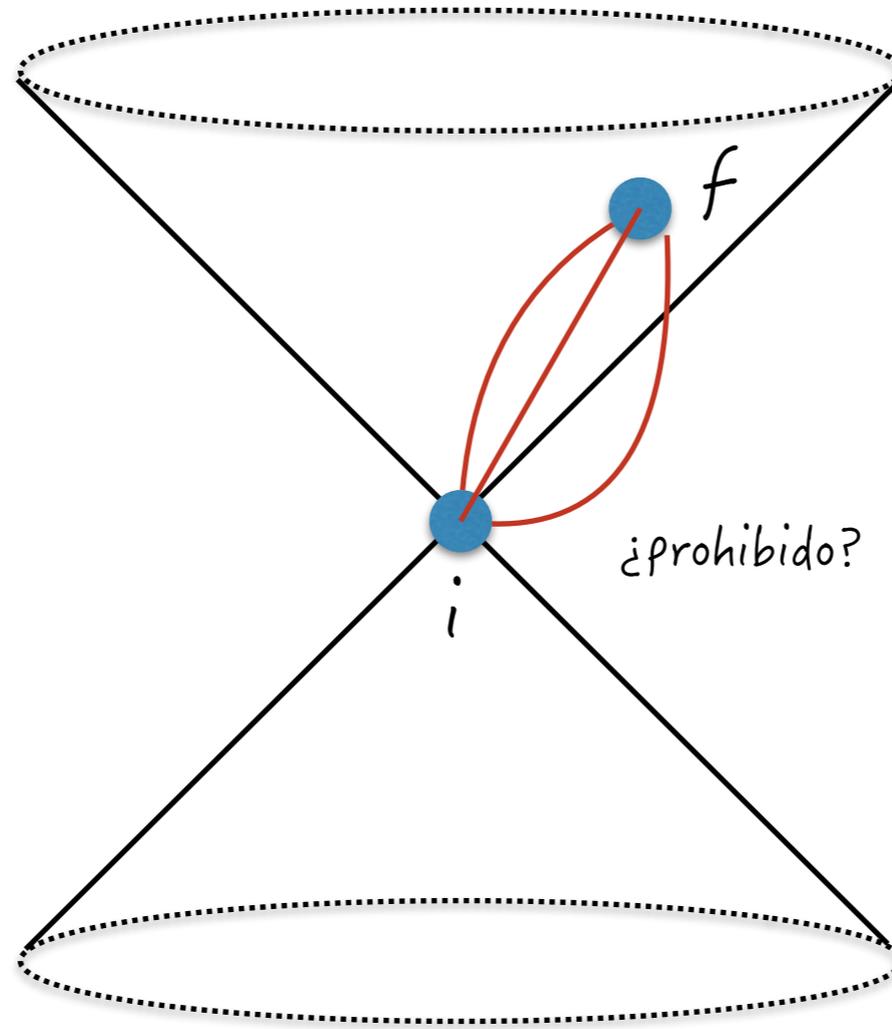
¿COMO SE COMBINAN EL PROMEDIO CUANTICO CON EL ESPACIO-TIEMPO DE EINSTEIN?

Una hipótesis natural sería que las fluctuaciones fuera del cono de luz están prohibidas



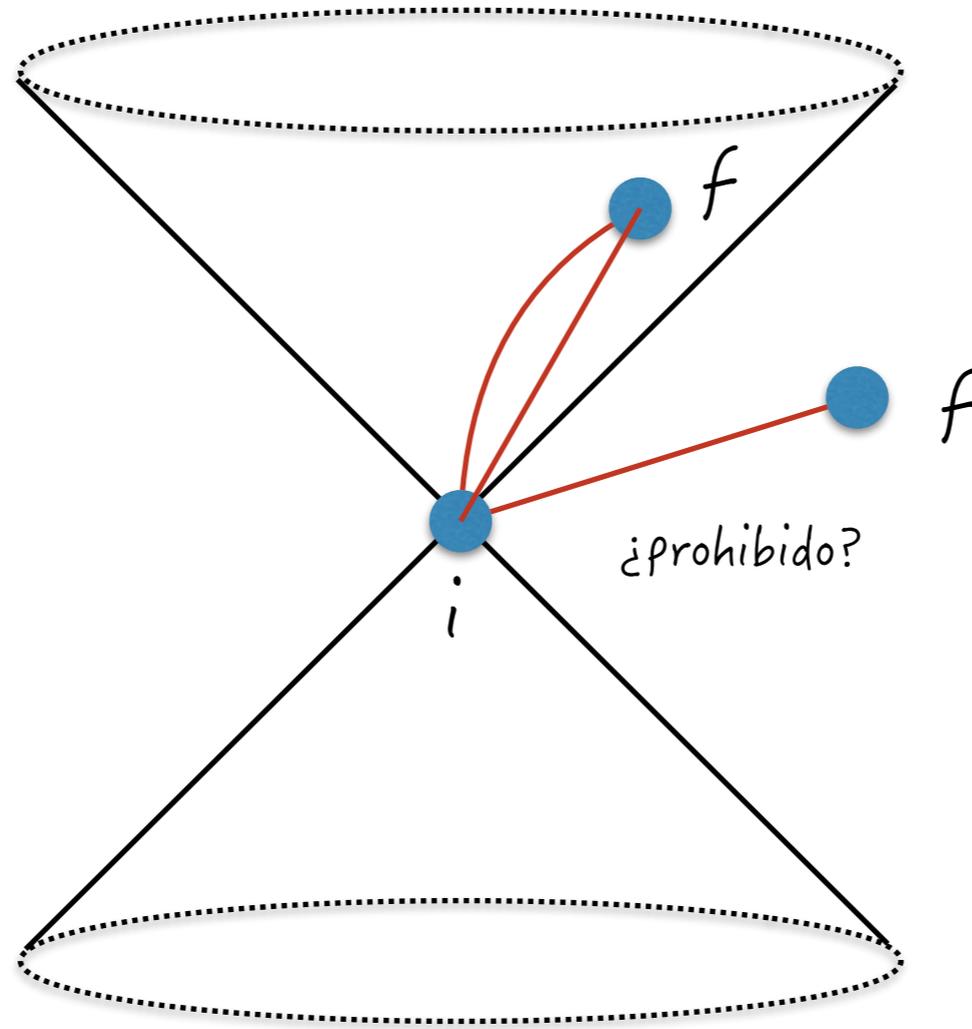
¿COMO SE COMBINAN EL PROMEDIO CUANTICO CON EL ESPACIO-TIEMPO DE EINSTEIN?

Una hipótesis natural sería que las fluctuaciones fuera del cono de luz están prohibidas



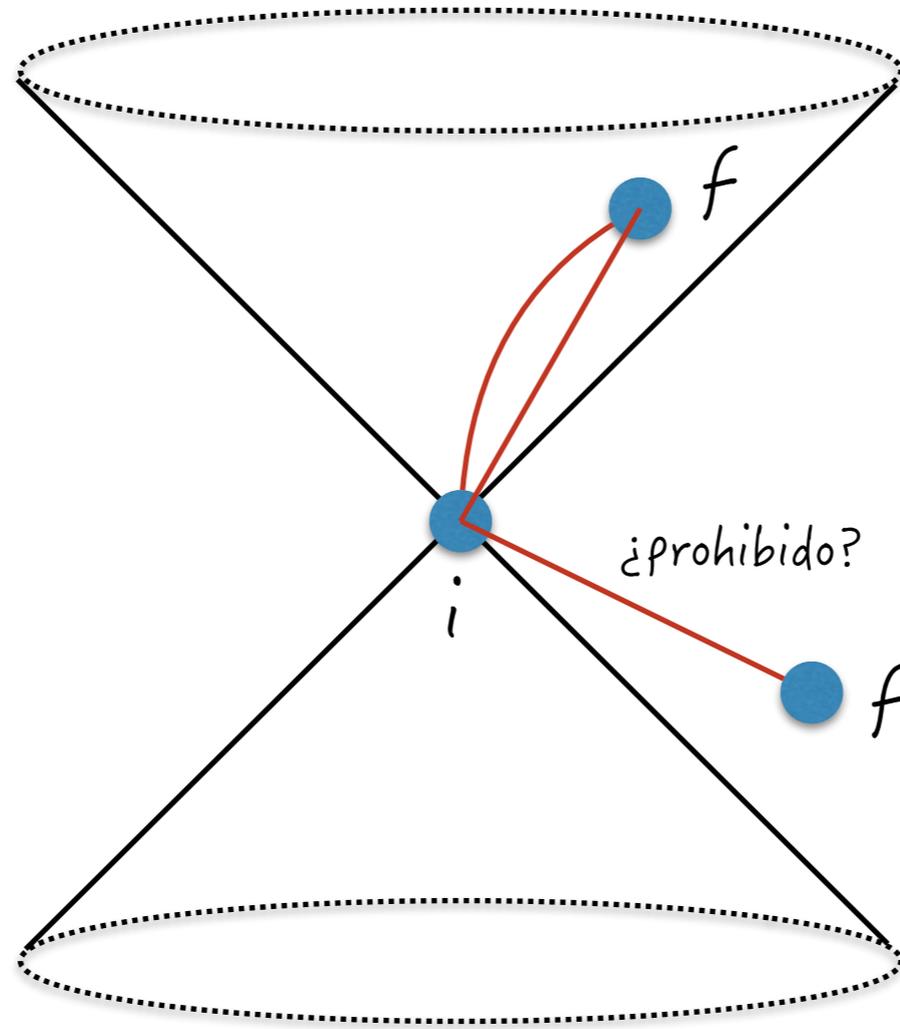
¿COMO SE COMBINAN EL PROMEDIO CUANTICO CON EL ESPACIO-TIEMPO DE EINSTEIN?

Una hipótesis natural sería que las fluctuaciones fuera del cono de luz están prohibidas



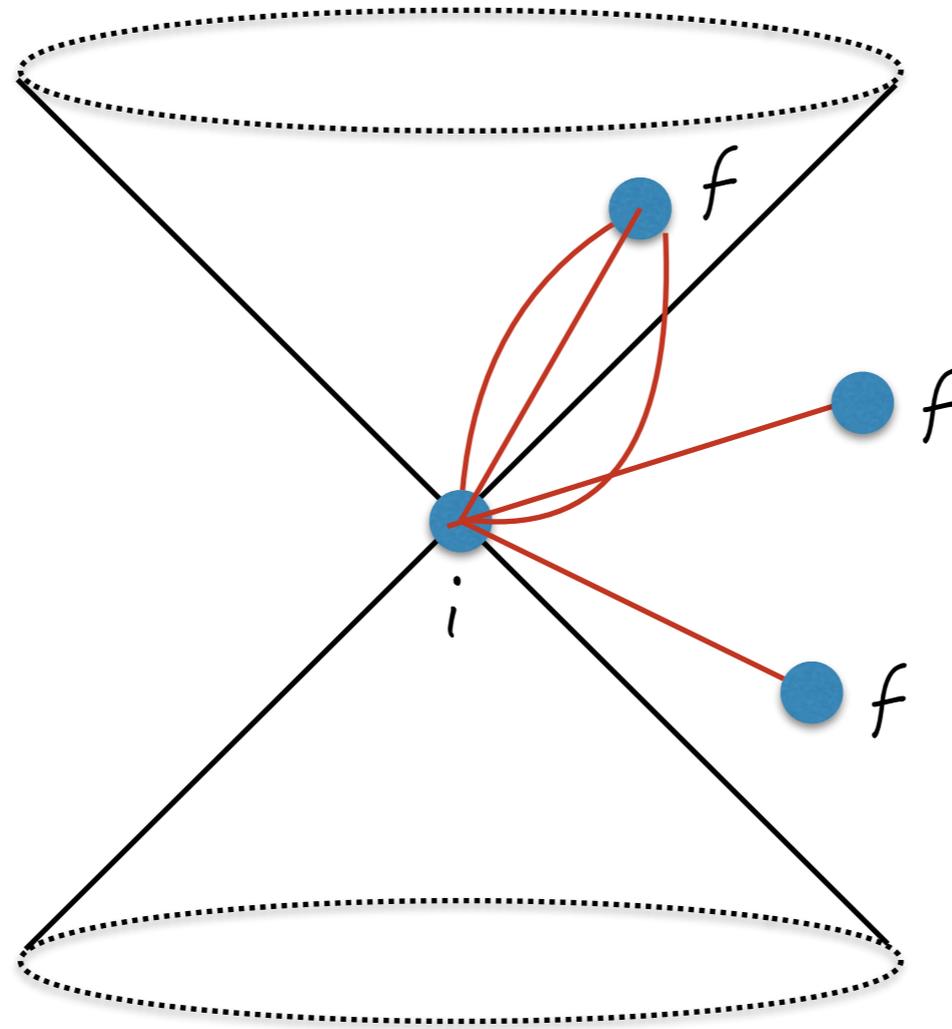
¿COMO SE COMBINAN EL PROMEDIO CUANTICO CON EL ESPACIO-TIEMPO DE EINSTEIN?

Una hipótesis natural sería que las fluctuaciones fuera del cono de luz están prohibidas



¿COMO SE COMBINAN EL PROMEDIO CUANTICO CON EL ESPACIO-TIEMPO DE EINSTEIN?

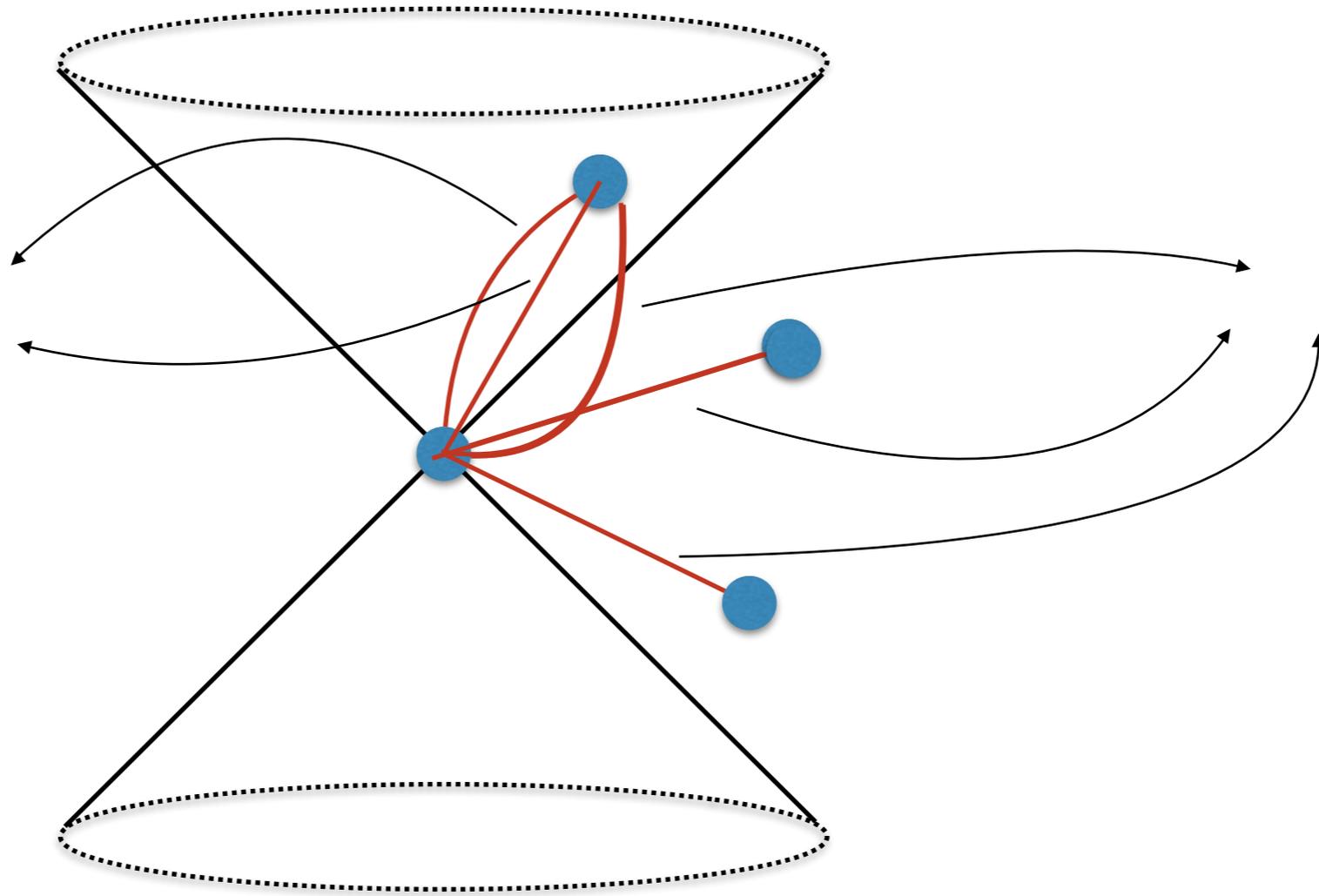
Una hipótesis natural sería que las fluctuaciones fuera del cono de luz están prohibidas



¡NO! ¡TODAS SON LEGALES!

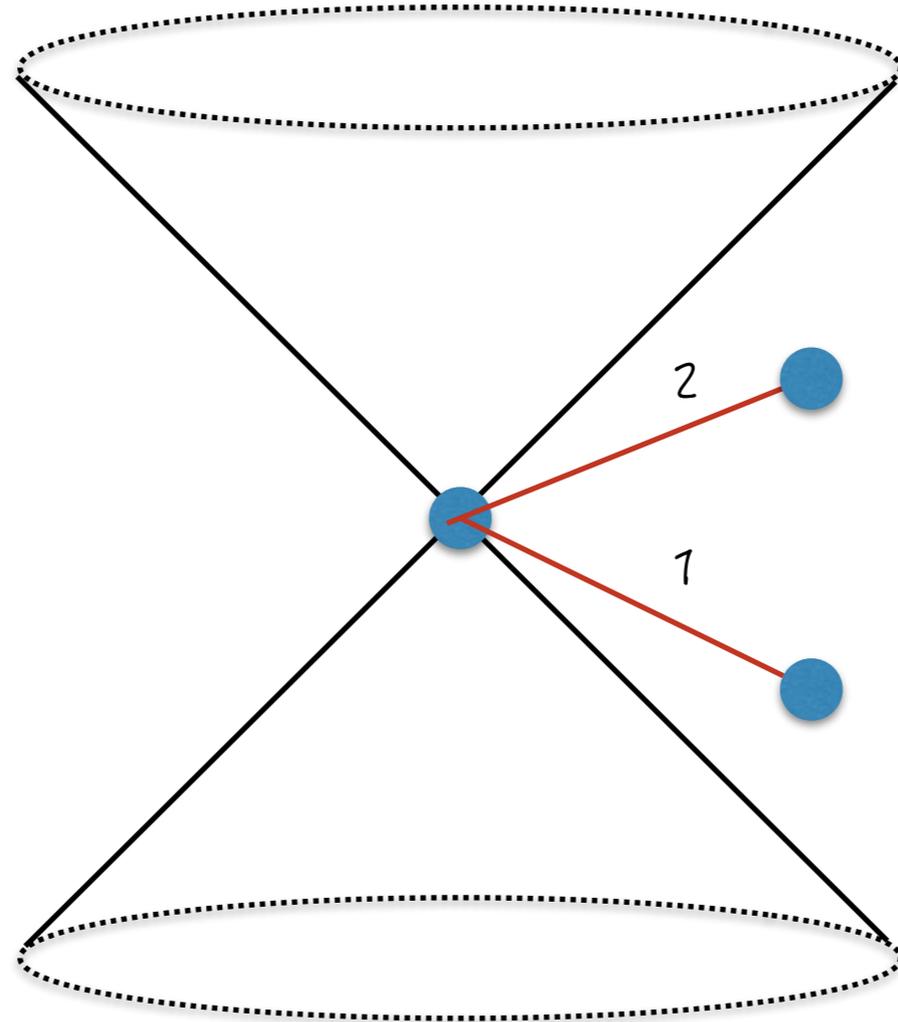


SIEMPRE
dominan
a tiempos
grandes



NUNCA
dominan
a tiempos
grandes

CAUSALIDAD

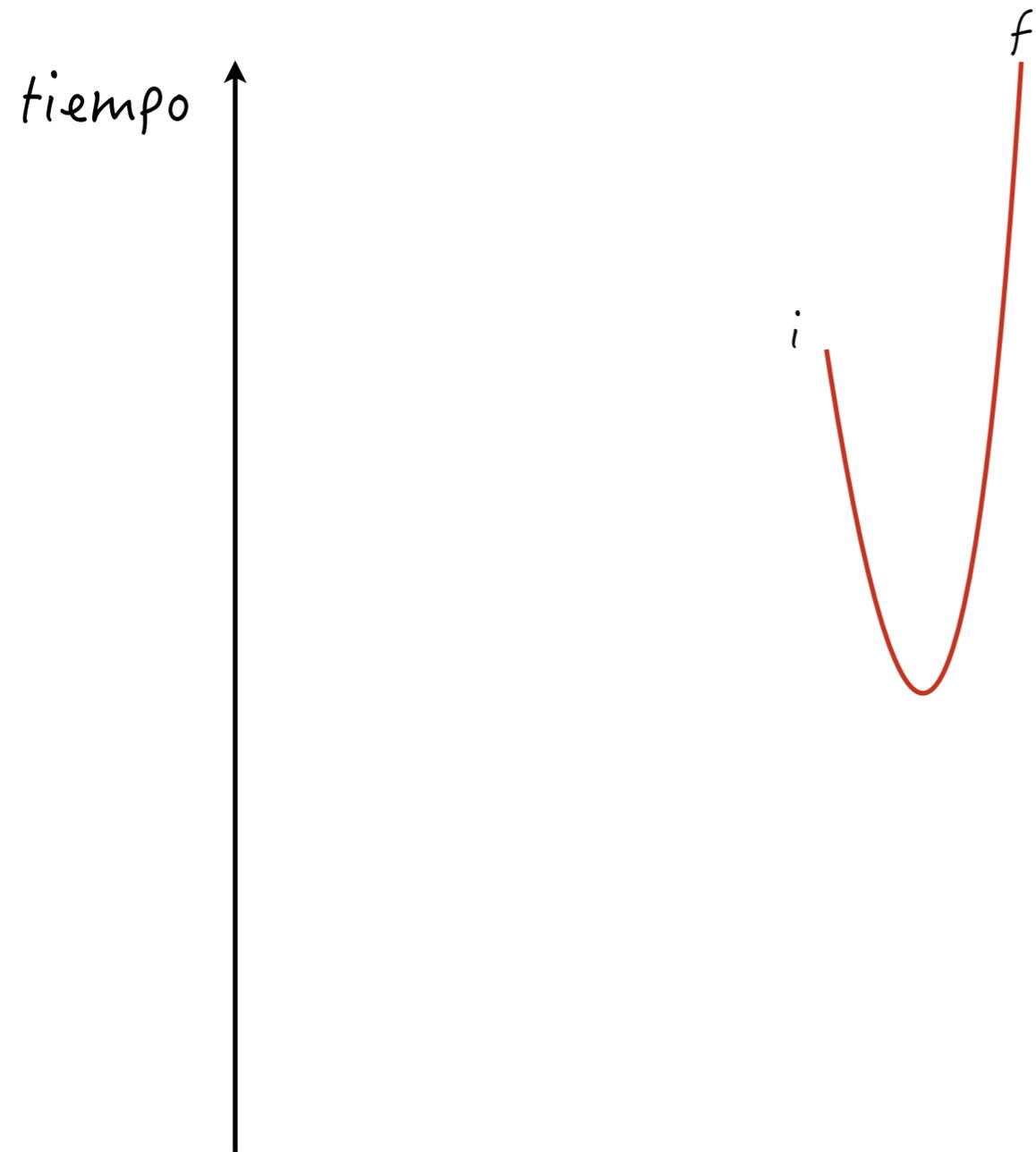


$$A_1 = A_2$$

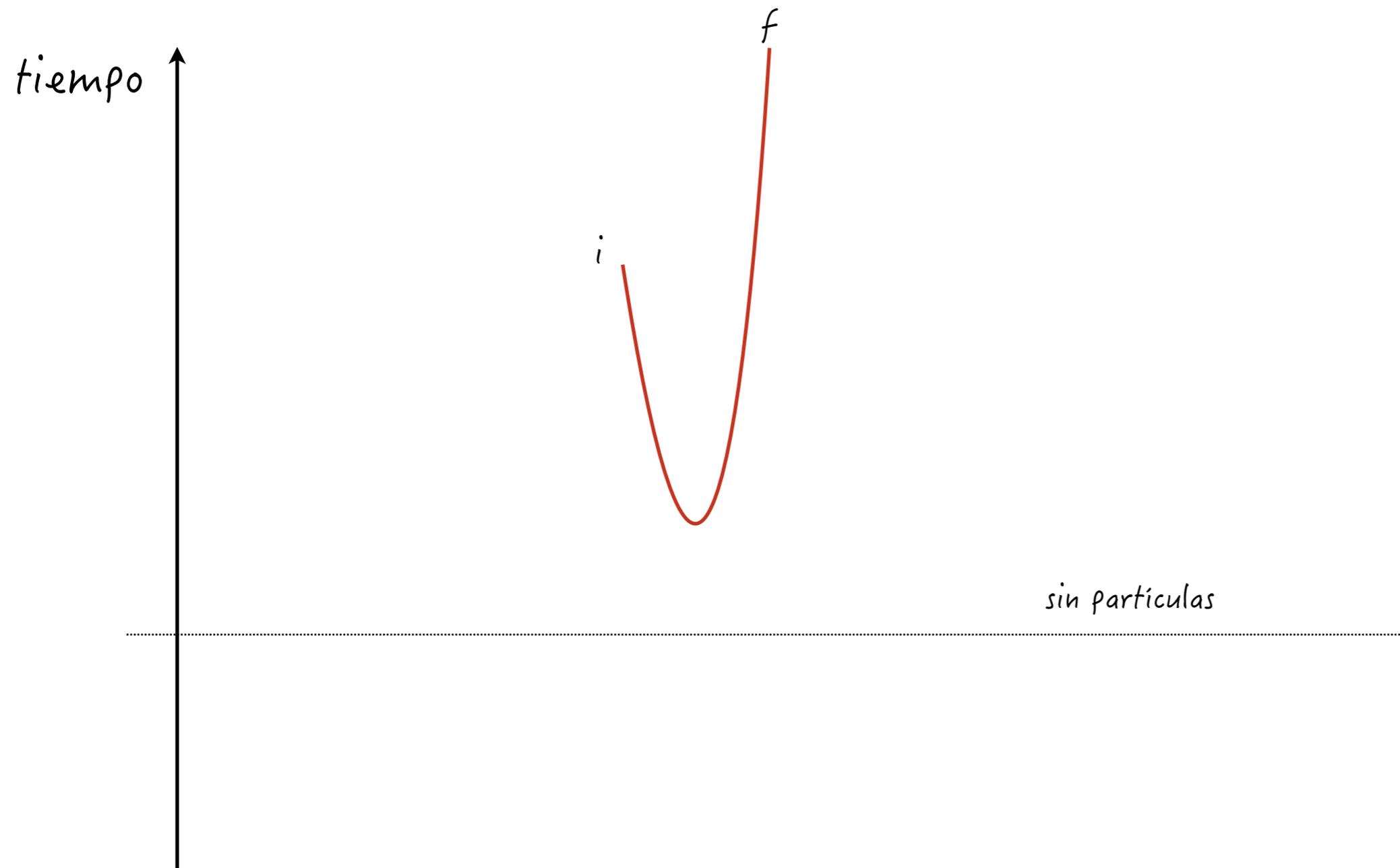
Las historias 1 y 2 son la misma, vista por dos observadores en movimiento relativo

El Principio de Relatividad, junto a $A_1 = A_2$ implica que estas amplitudes representan CORRELACION, no CAUSACION

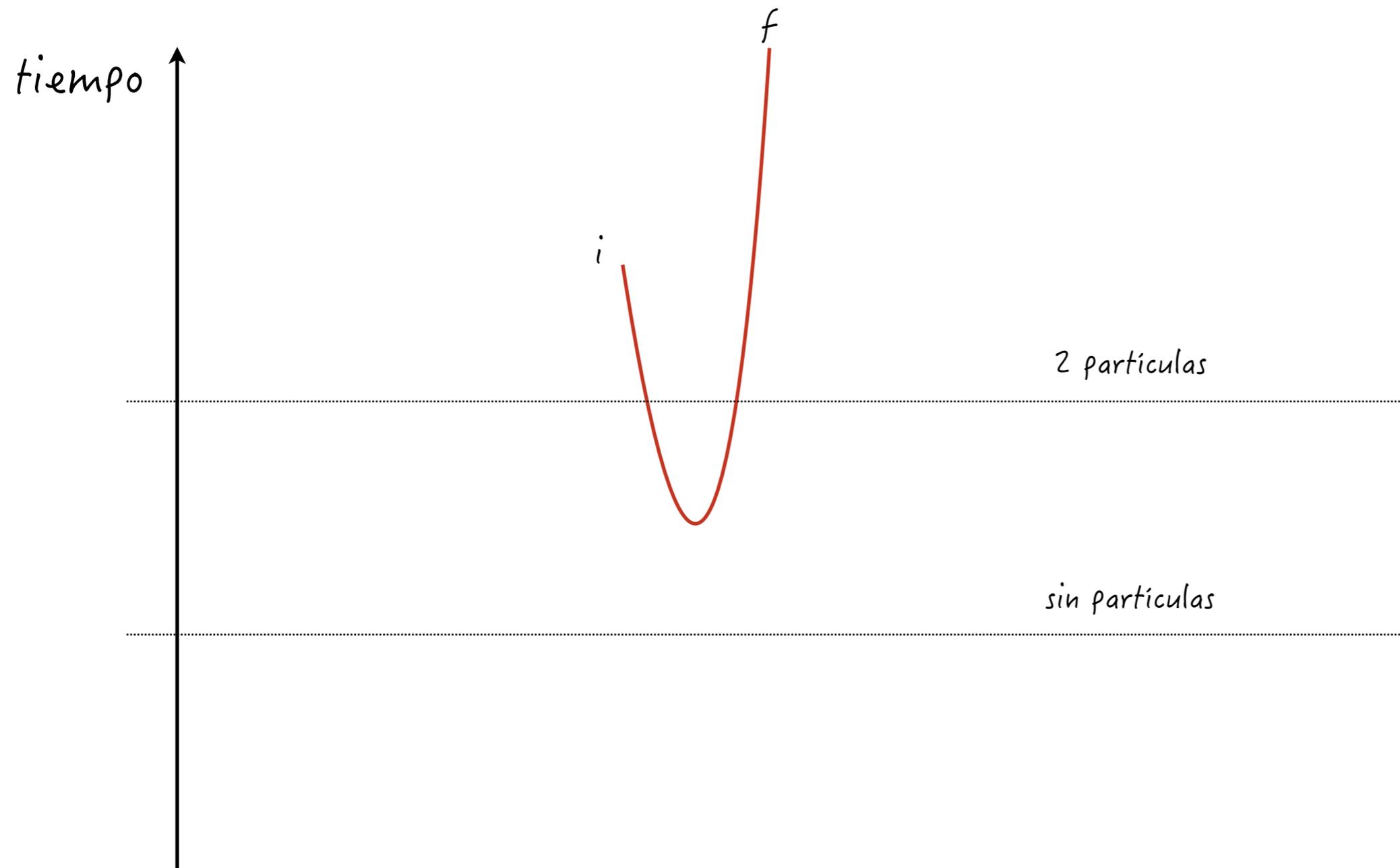
¿Qué significa para una partícula "retroceder" en el tiempo?



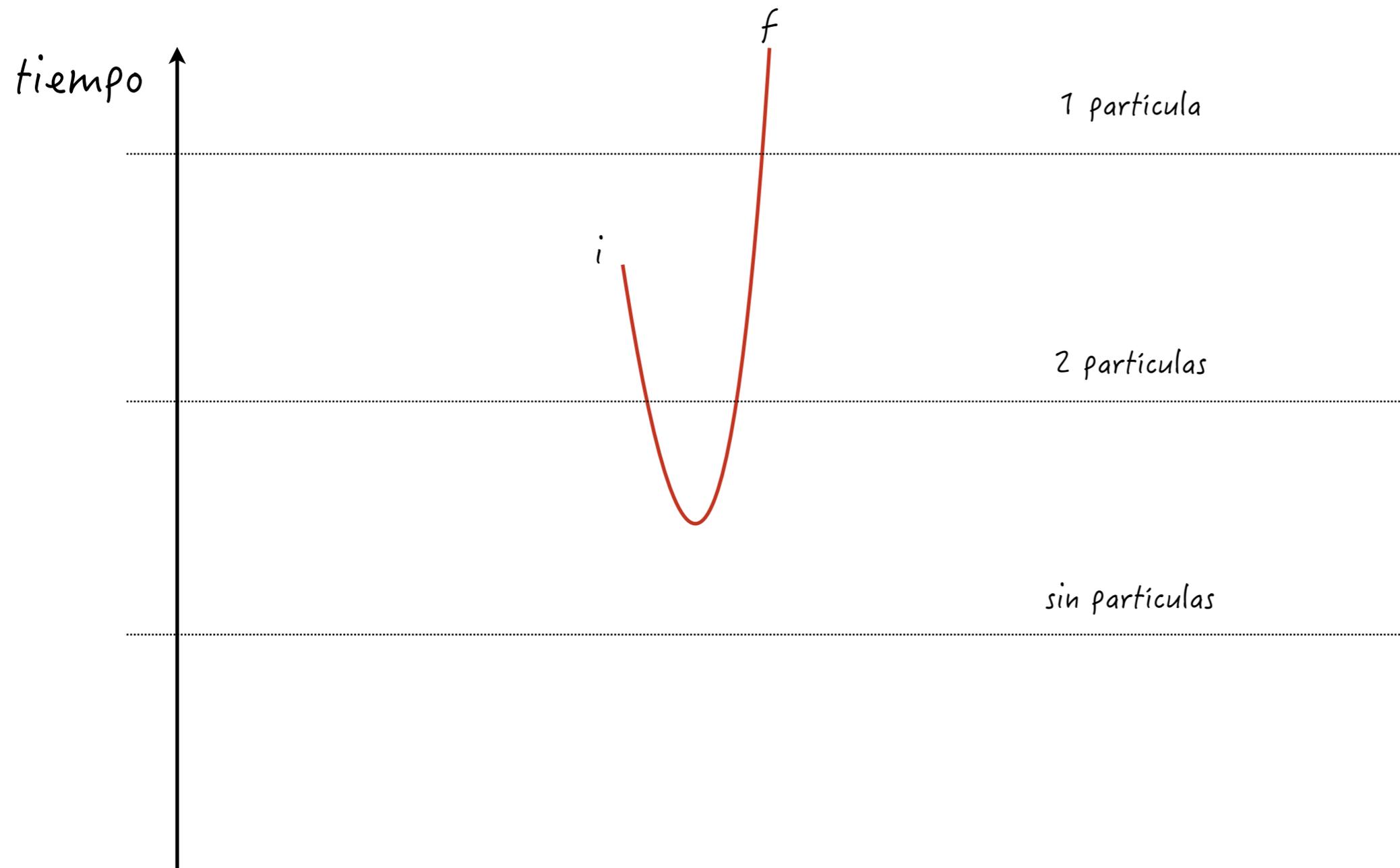
¿Qué significa para una partícula "retroceder" en el tiempo?



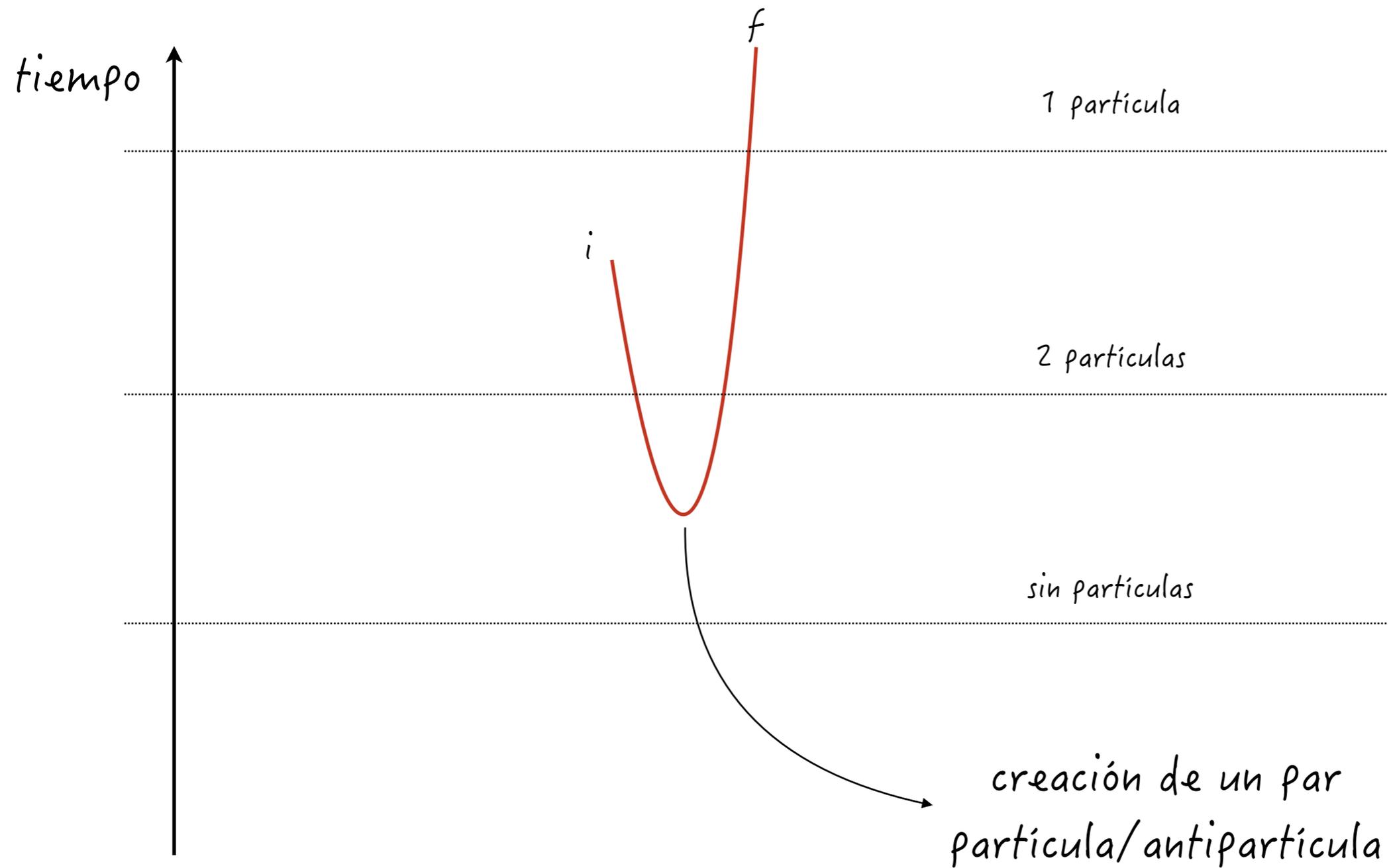
¿Qué significa para una partícula "retroceder" en el tiempo?



¿Qué significa para una partícula "retroceder" en el tiempo?



¿Qué significa para una partícula "retroceder" en el tiempo?

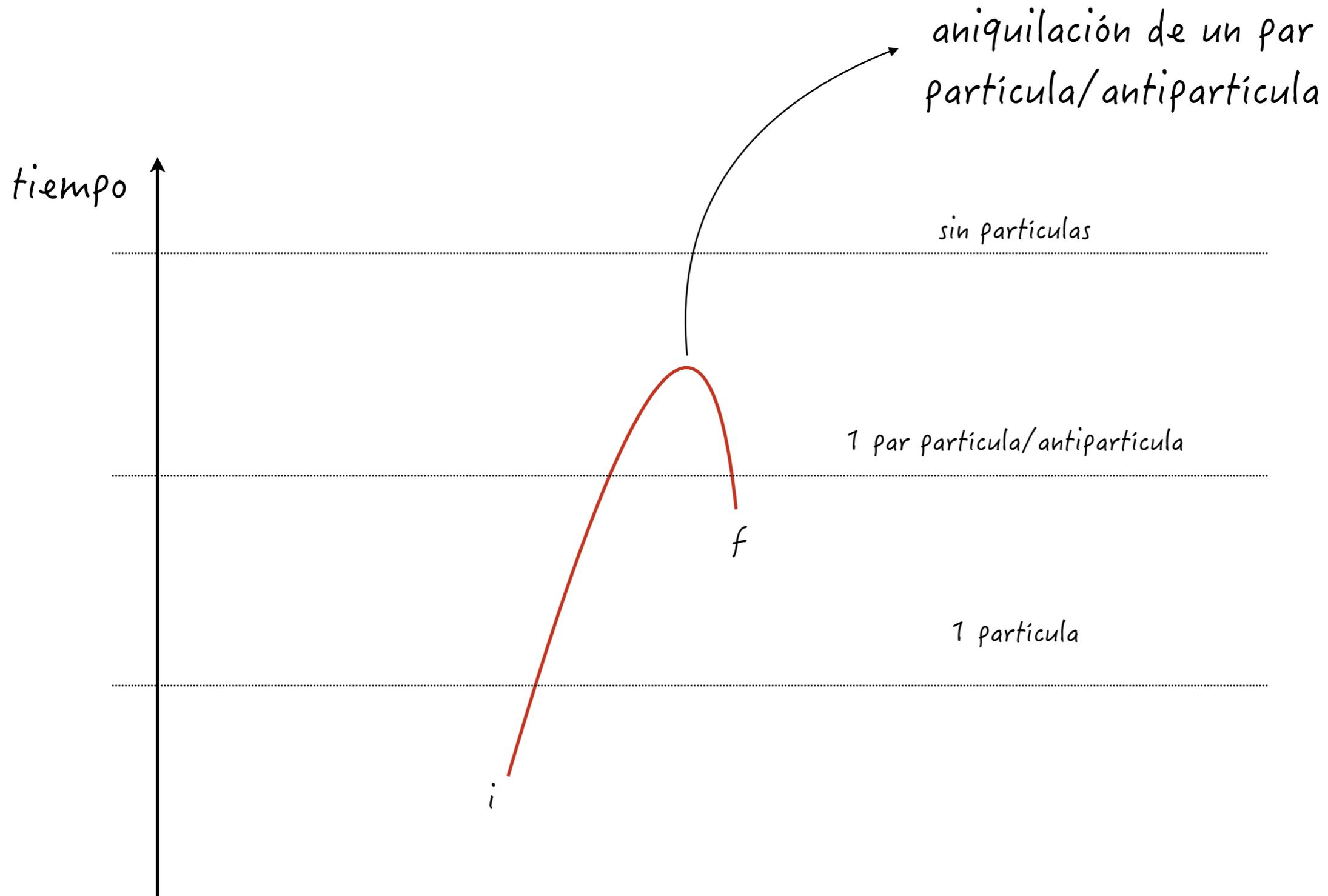


¡La existencia de antimateria es una
CONSECUENCIA NECESARIA
de la unificación consistente de la mecánica cuántica
y la relatividad!

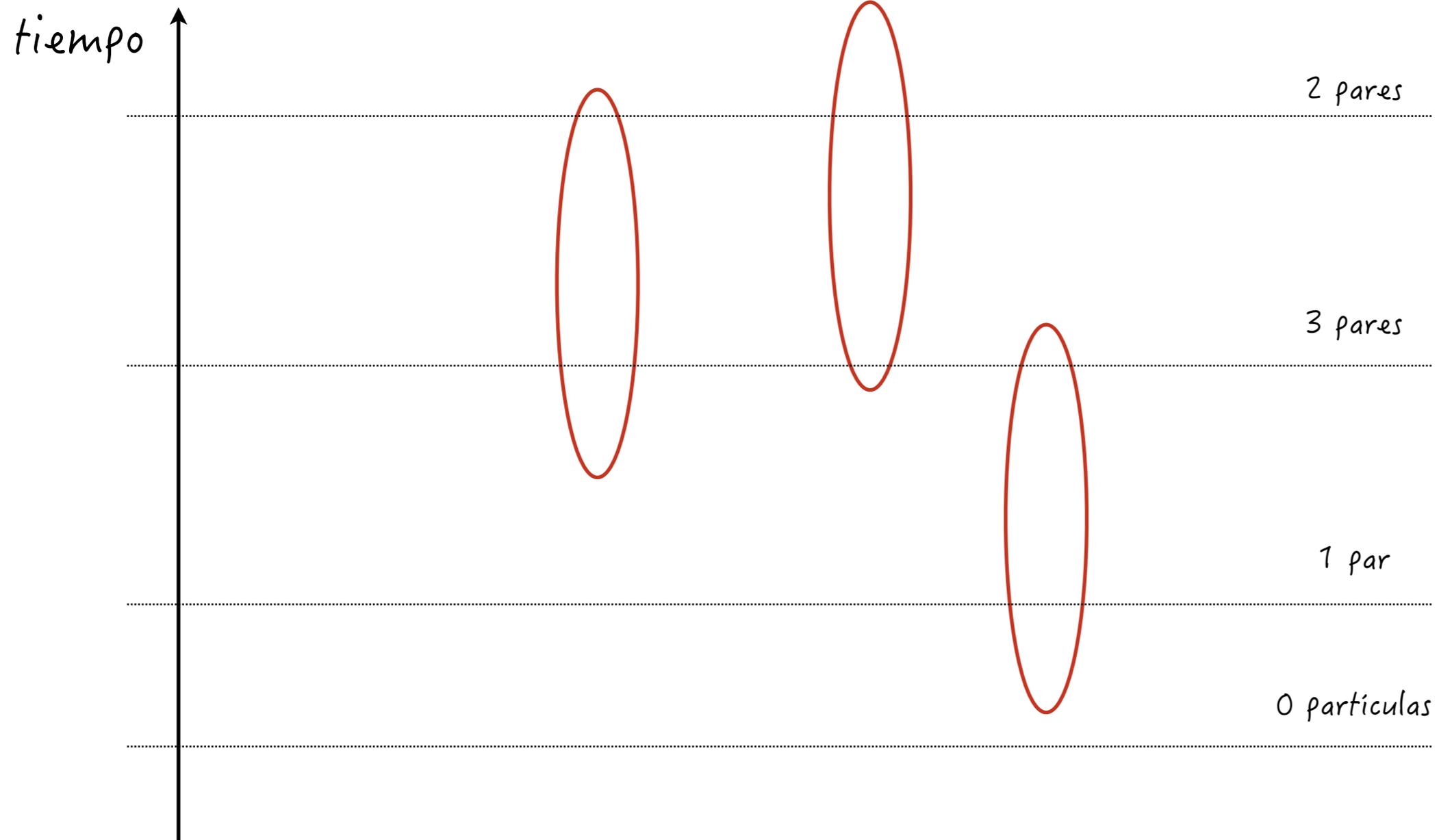
¡La existencia de antimateria es una
CONSECUENCIA NECESARIA
de la unificación consistente de la mecánica cuántica
y la relatividad!



Si los pares partícula/antipartícula se pueden crear espontáneamente en el vacío, también se pueden aniquilar

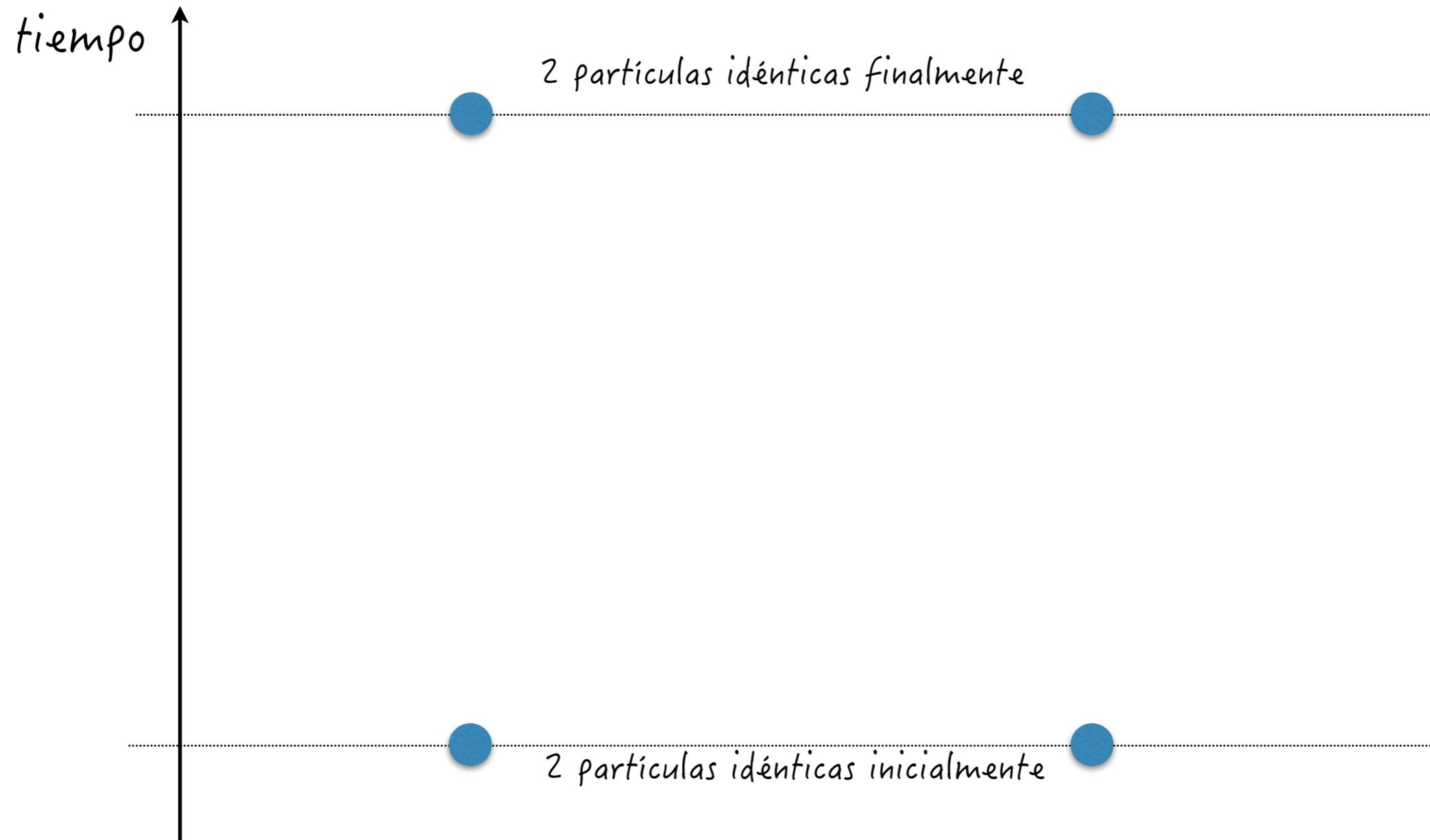


y el vacío puede fluctuar sobre si mismo

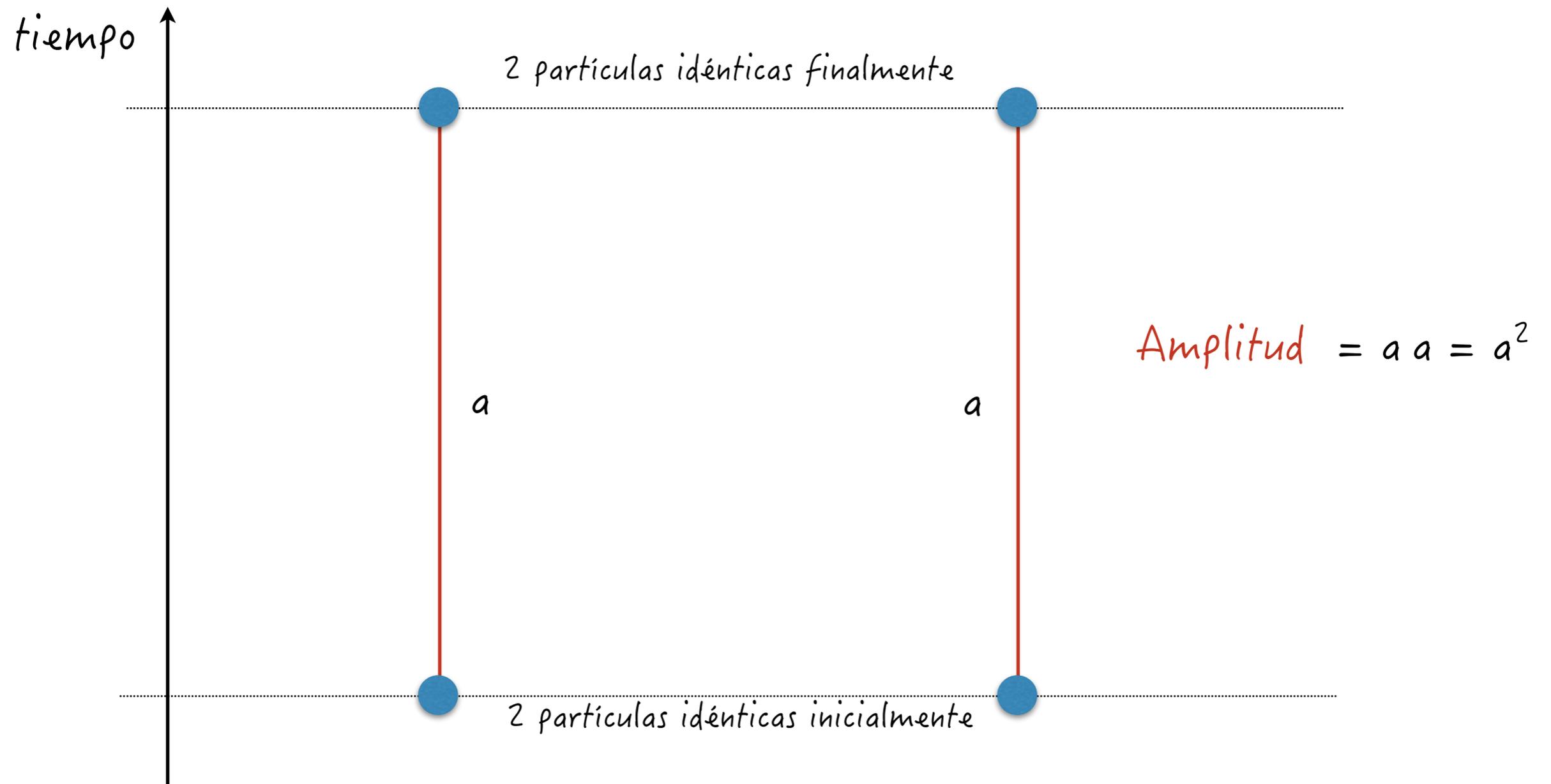


ESTAS FLUCTUACIONES CONTRIBUYEN A LA
ENERGIA DEL VACIO

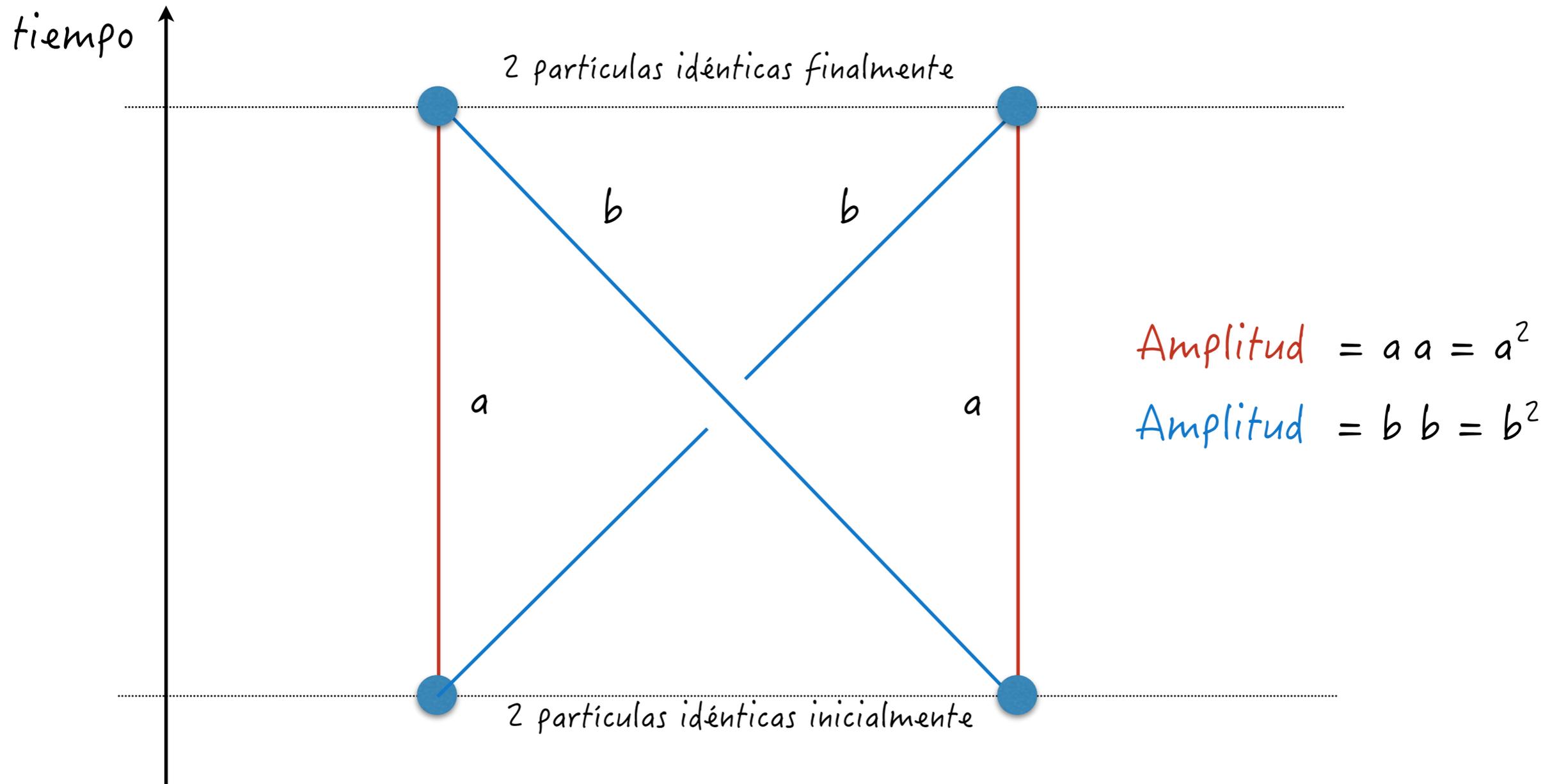
EL PROMEDIO CUANTICO TIENE UN COMPONENTE "SOCIAL"



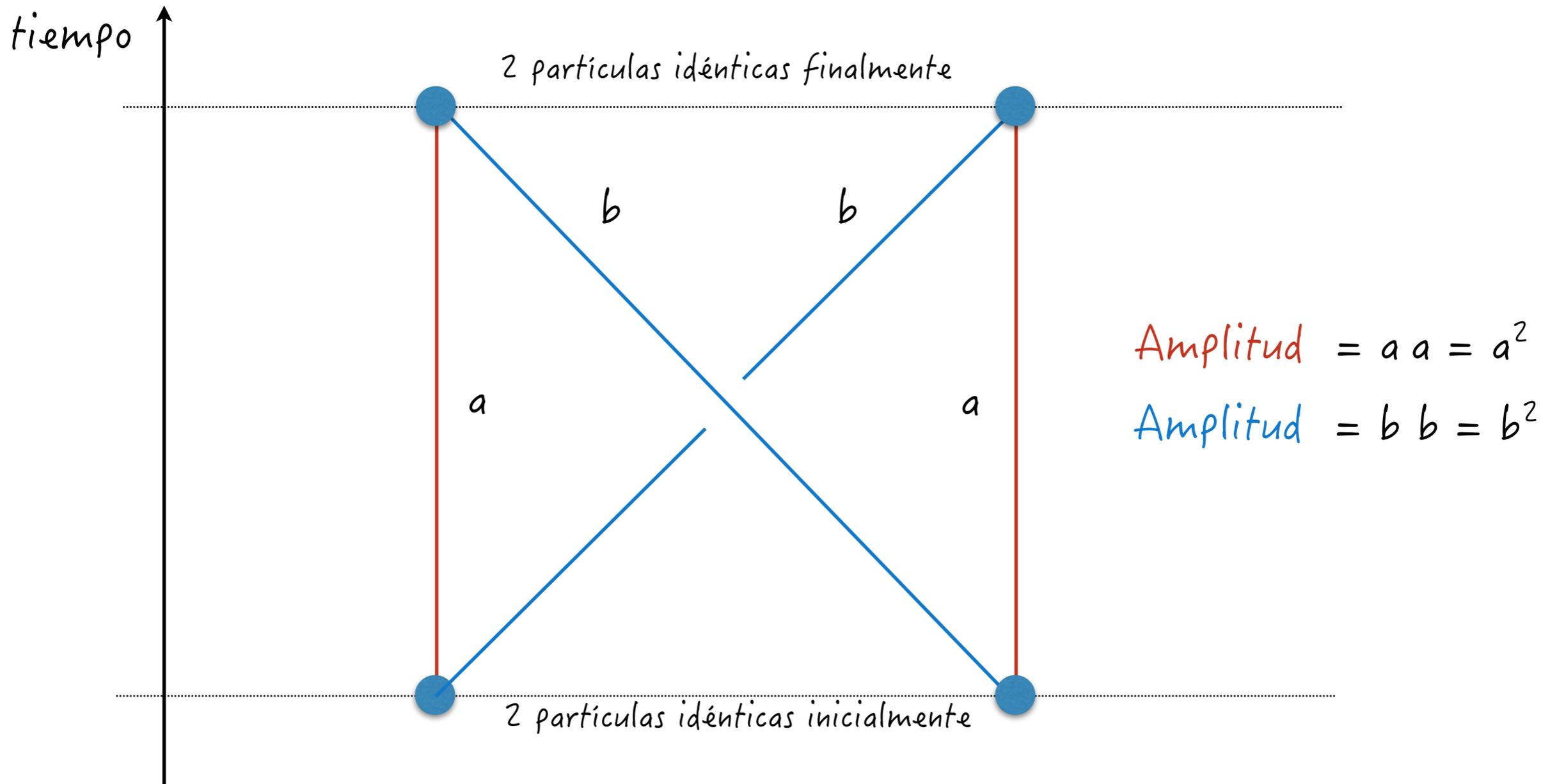
EL PROMEDIO CUANTICO TIENE UN COMPONENTE "SOCIAL"



EL PROMEDIO CUANTICO TIENE UN COMPONENTE "SOCIAL"

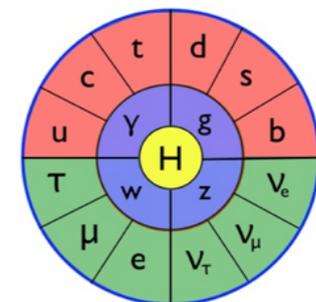


EL PROMEDIO CUANTICO TIENE UN COMPONENTE "SOCIAL"

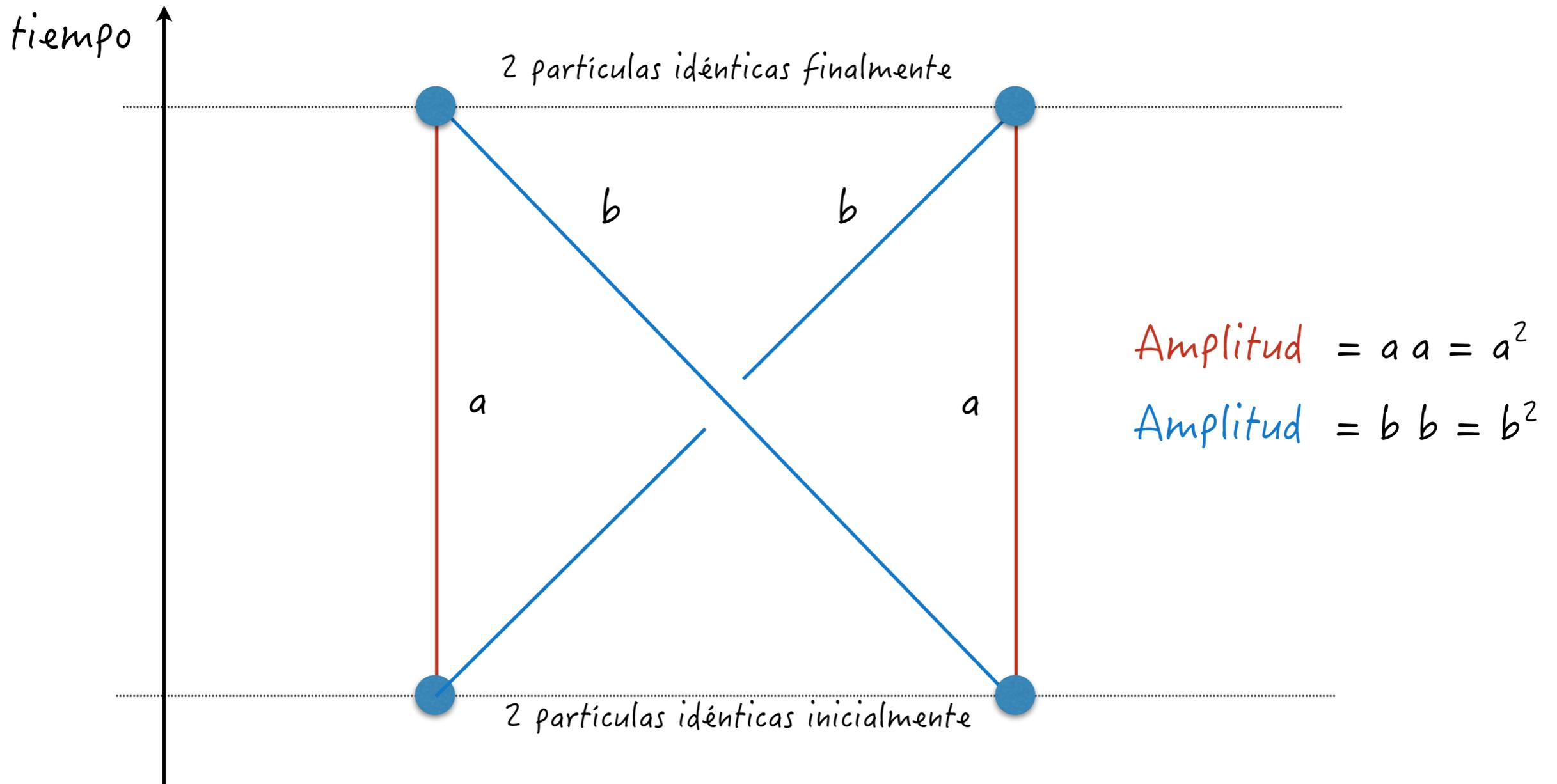


$$\text{Amplitud total} = A + A$$

bosones

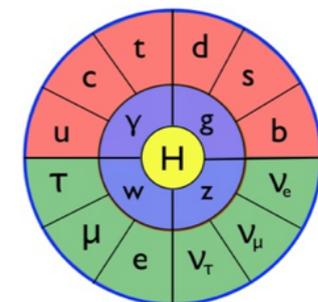


EL PROMEDIO CUANTICO TIENE UN COMPONENTE "SOCIAL"

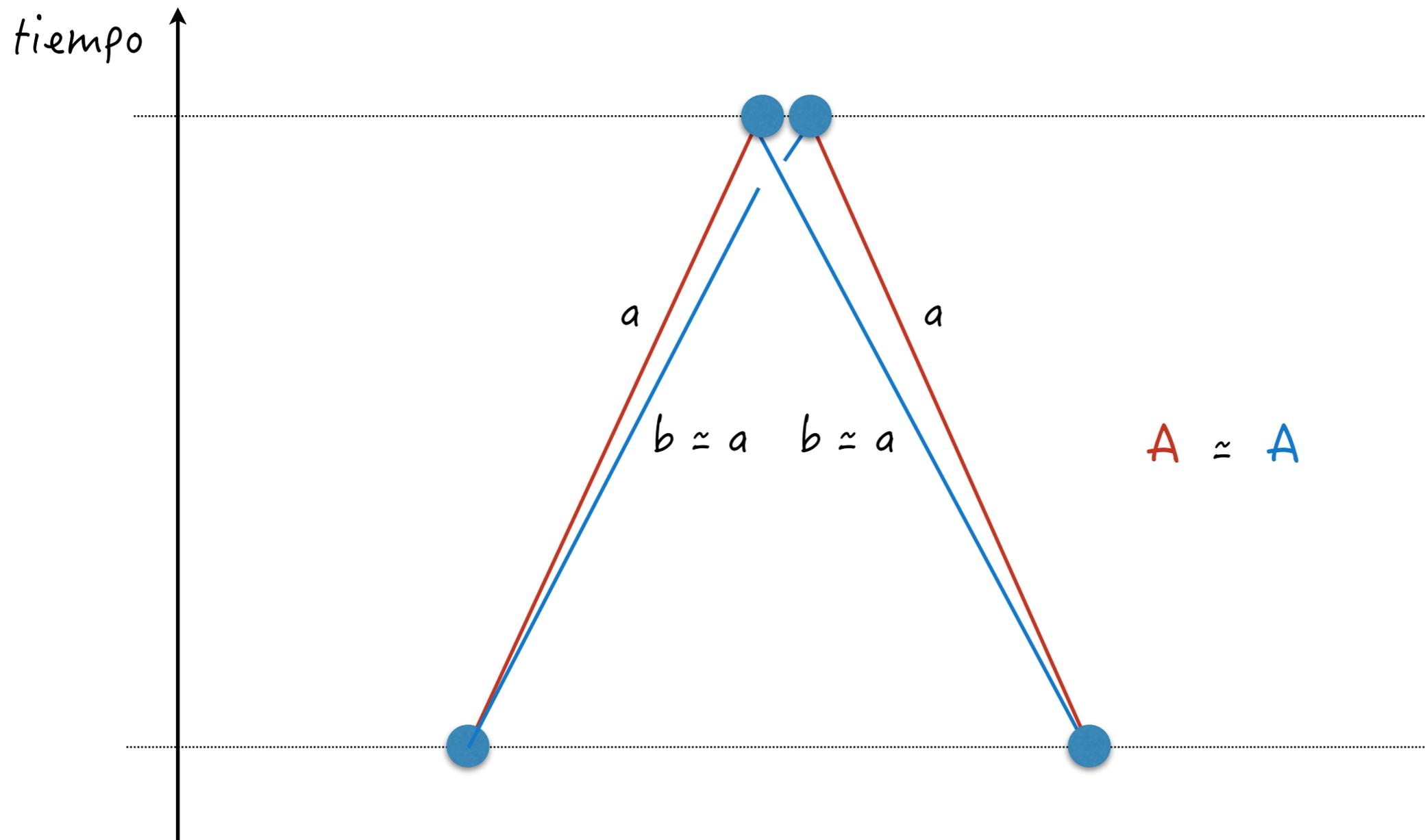


Amplitud total = $A - A$

fermiones



si las partículas finales coinciden en el mismo estado



Amplitud total de bosones = $2 a^2$
Amplitud total de fermiones = 0

Los fermiones no pueden compartir el mismo estado

PRINCIPIO DE EXCLUSIÓN de Pauli



que explica la estabilidad de los átomos

Los bosones prefieren compartir el mismo estado

Esto explica el funcionamiento del láser

Bifurcaciones

Las fluctuaciones que crean y aniquilan partículas a partir de otras llevan un coeficiente de amplitud llamado "constante de acoplamiento"

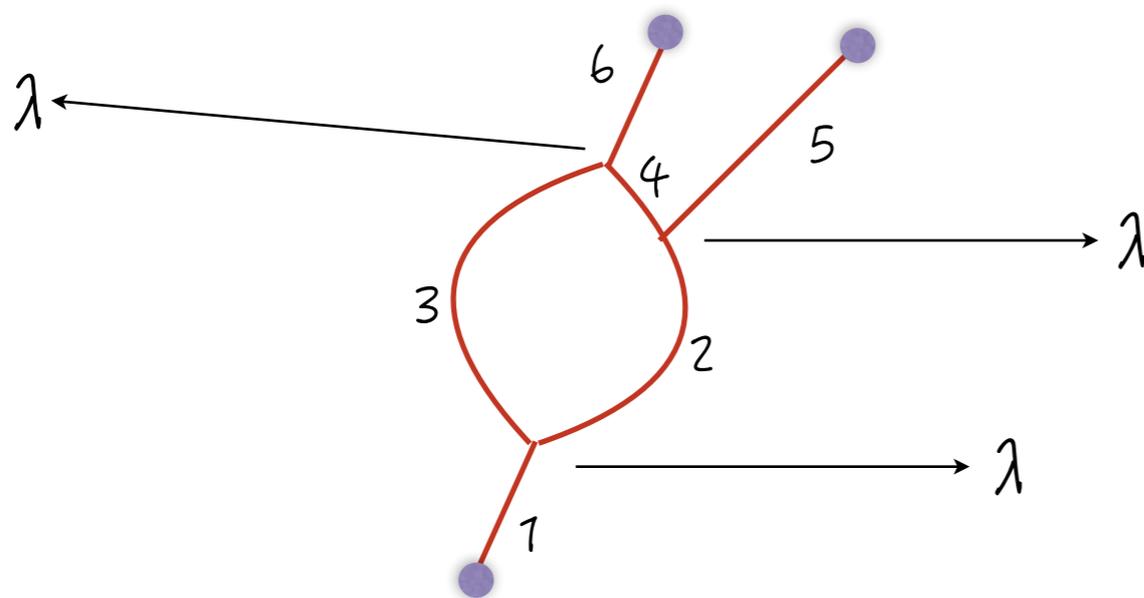


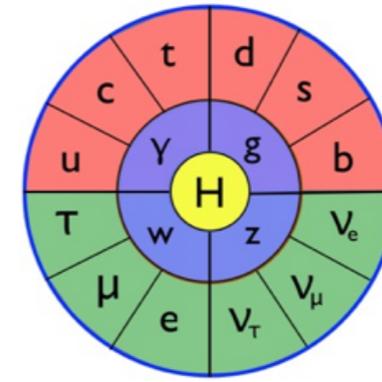
Diagrama
de
Feynman



$$\text{Amplitud} = \sum_{\text{bifurcaciones}} \lambda^3 \cdot \text{Propagador}(1) \cdot \text{Propagador}(2) \dots$$

$$\text{Propagador} = \sum_{1\text{-historias}} e^{-im(\text{tiempo propio})}$$

El Modelo Estándar queda determinado dando la lista de las masas y los acoplamientos de todas las partículas que aparecen en la "tabla periódica"



$$10^{-12} m_{\text{proton}} < m_{\text{leptones}} < 2 m_{\text{proton}}$$

$$10^{-3} m_{\text{proton}} < m_{\text{quarks}} < 173 m_{\text{proton}}$$

$$m_W, m_Z \sim 100 m_{\text{proton}}$$

$$m_\gamma = m_g = 0$$

$$m_{\text{Higgs}} \sim 125 m_{\text{proton}}$$

$$\alpha = \frac{\lambda^2}{4\pi\hbar c}$$

$$\alpha_\gamma = 1/137$$

$$\alpha_g \sim 1/10$$

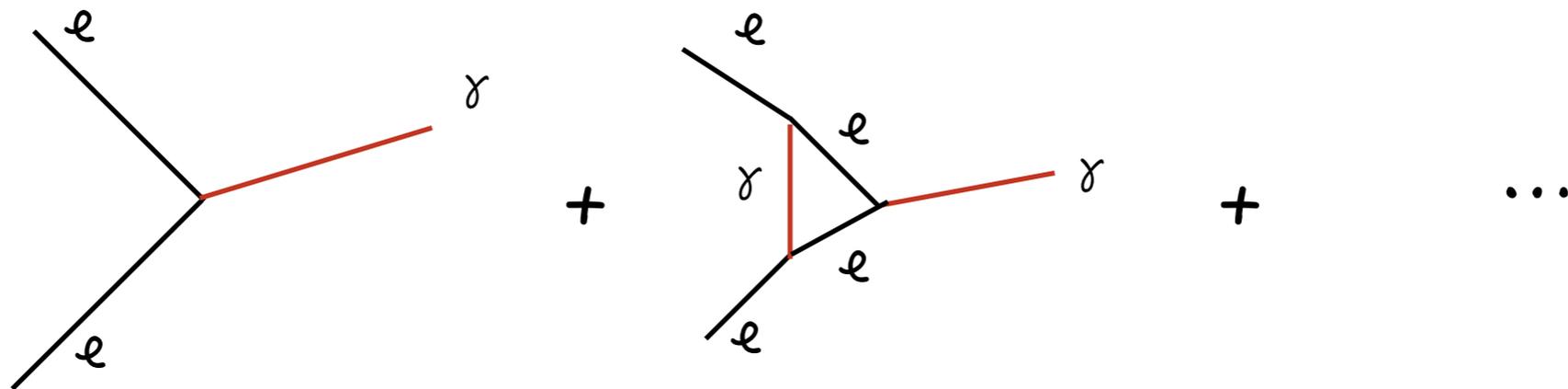
$$\alpha_W \sim 1/60$$

$$\alpha_G \sim 10^{-36}$$

El Modelo Estándar está experimentalmente comprobado al 1% global

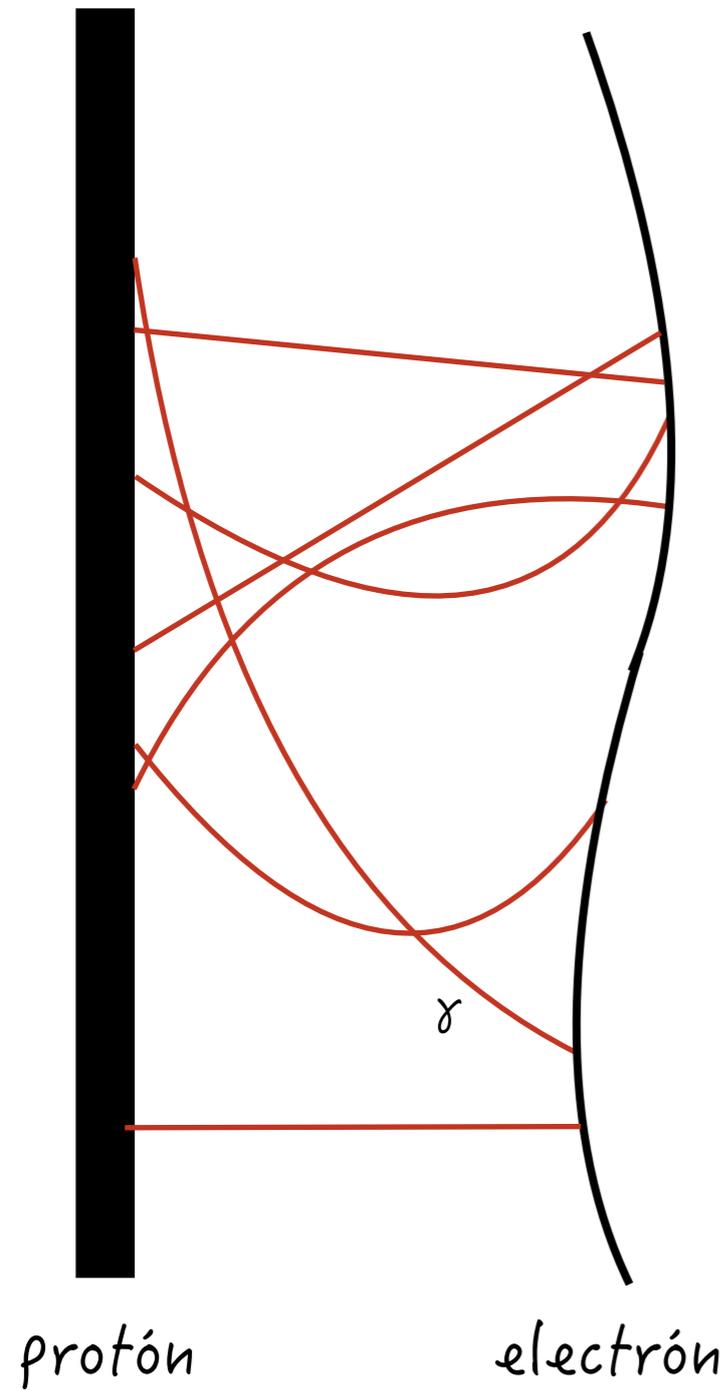
Pero algunas de sus esquinas tienen el récord histórico de precisión

¡Los detalles de la interacción entre electrones y fotones están de acuerdo con el experimento con una precisión de una parte en mil millones!

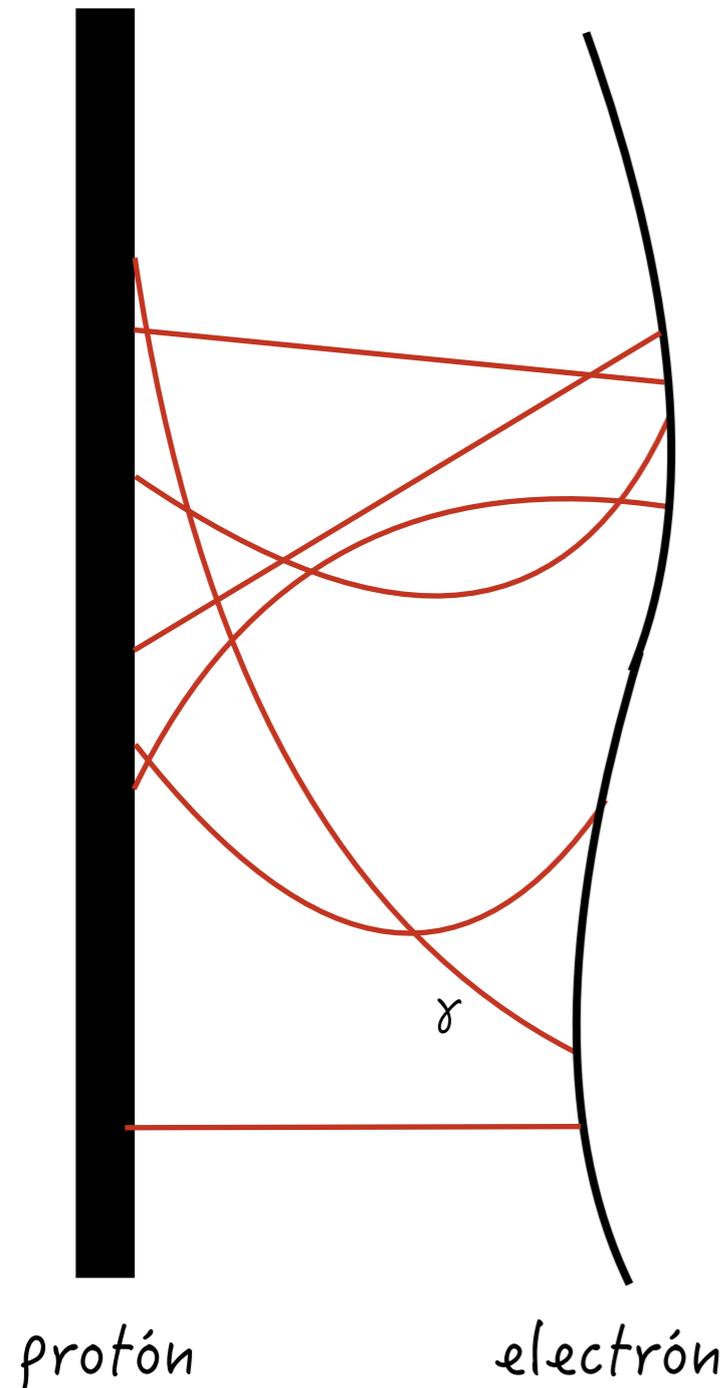


$$| \text{teoría} - \text{experimento} | < 0,000000000001$$

Bifurcaciones = interacciones = fuerzas



Bifurcaciones = interacciones = fuerzas

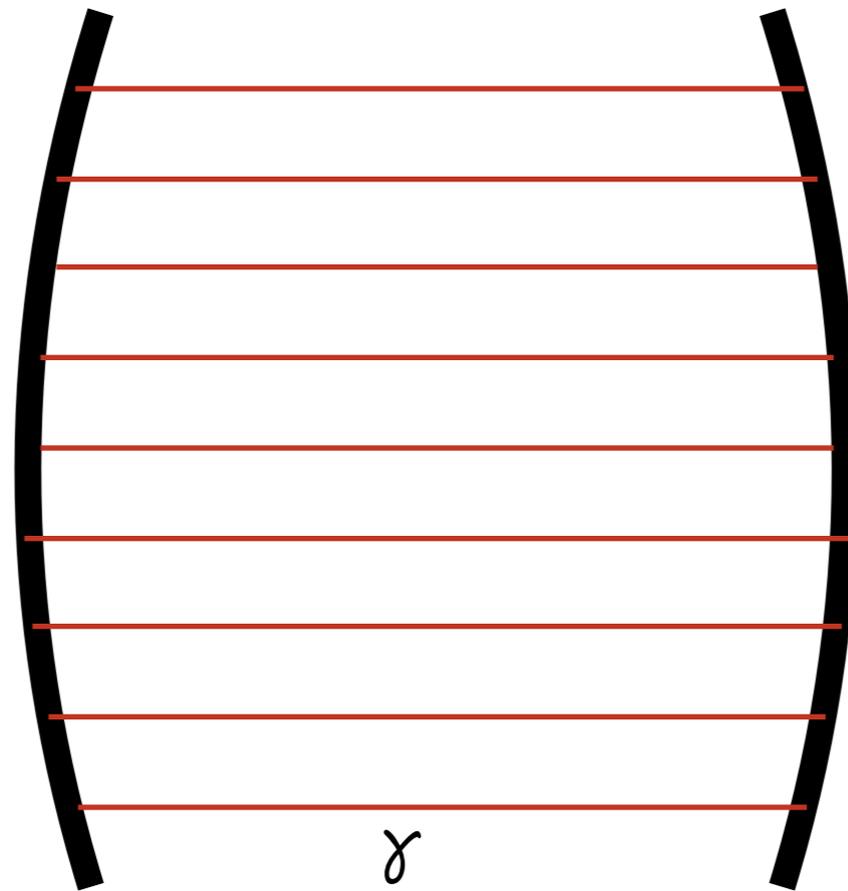


del intercambio incesante de fotones entre protones y electrones se sigue la estructura de casi todo

En el límite en que dos partículas son muy pesadas, con acciones $\gg \hbar$

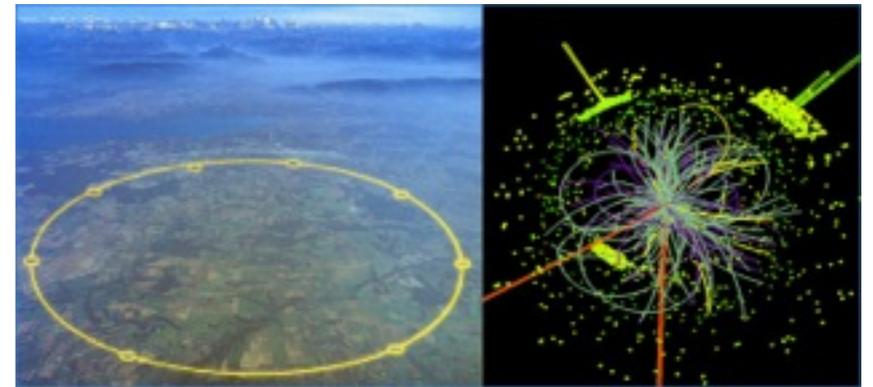
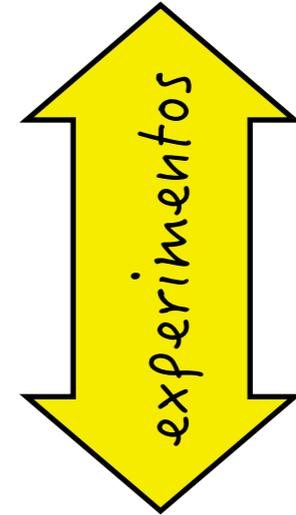
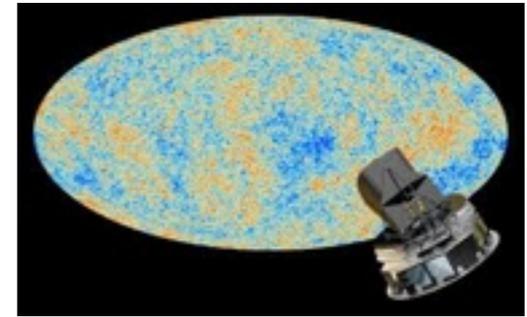
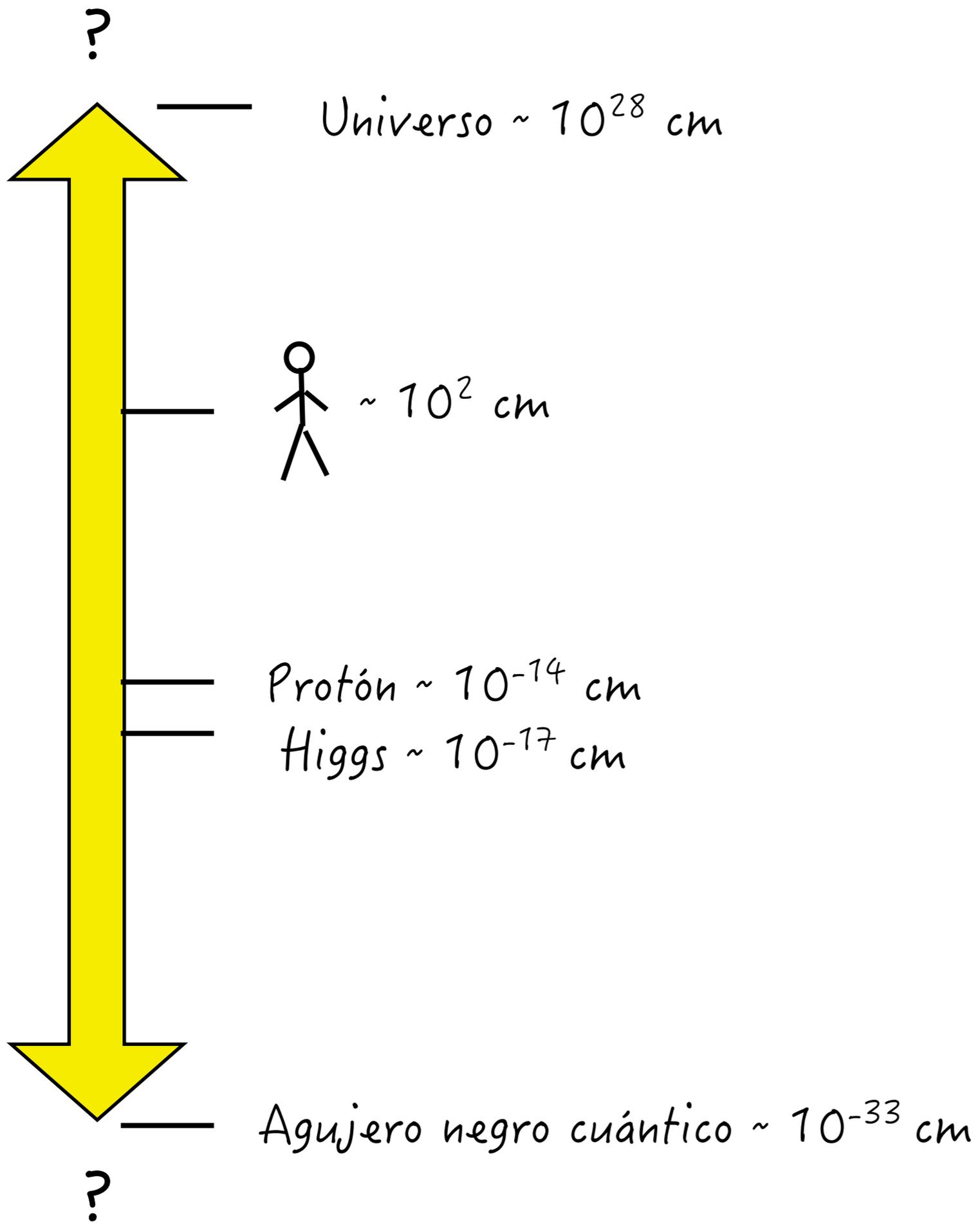
Los diagramas de Feynman que dominan la interacción son

¡los de intercambio instantáneo!



¡Las fuerzas newtonianas son un fenómeno cuántico!

las líneas de impulso instantáneo tienen una interpretación física como fotones "virtuales"



GRACIAS

