

RELATIVIDAD GENERAL

para principiantes

J.L.F. Barbón



www.ift.uam-csic.es



Una producción Elías Querejeta

Mamá cumple 100 años

con Geraldine Chaplin, Amparo Muñoz, Fernando F. Gómez,
Norman Brisky, Rafaela Aparicio, Charo Soriano, José Vivó,
Angeles Torres, Elisa Nandi, Rita Maiden y Monique Cirón.

Escrita y dirigida por Carlos Saura

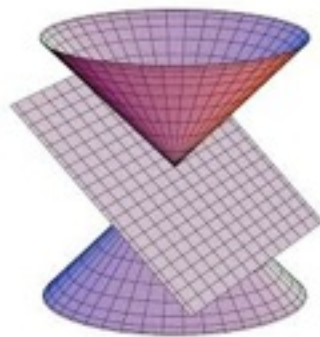
 DOLBY DIGITAL
Dolby International Corporation

Φ

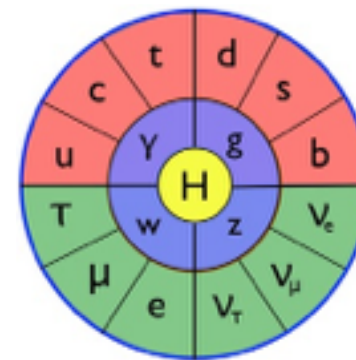
siglo XX

RELATIVIDAD

CUANTICA



ESPACIO-TIEMPO

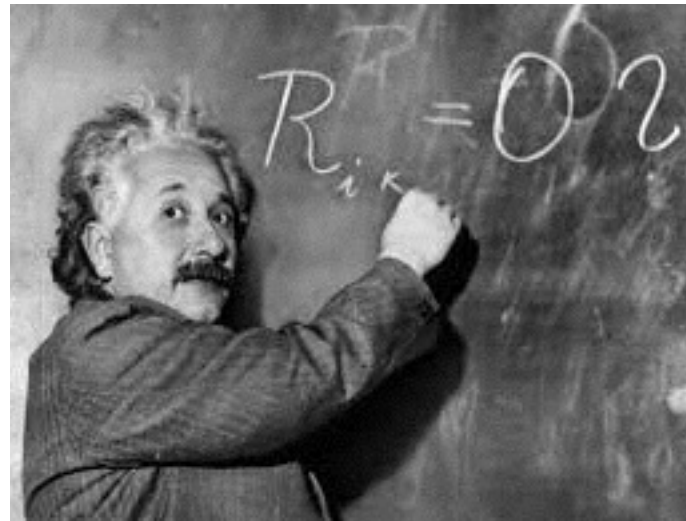


PARTICULAS

tiempo



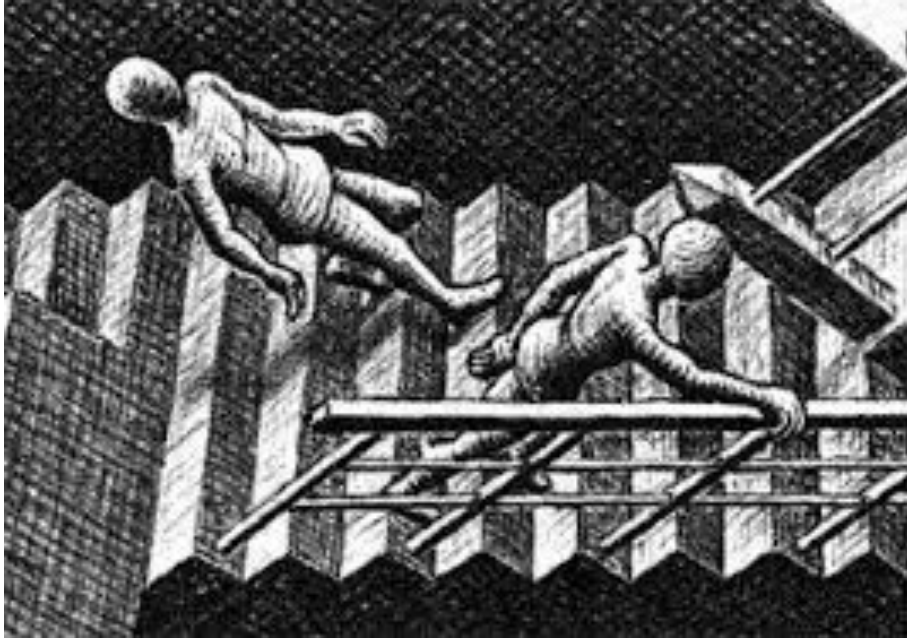
Espacio



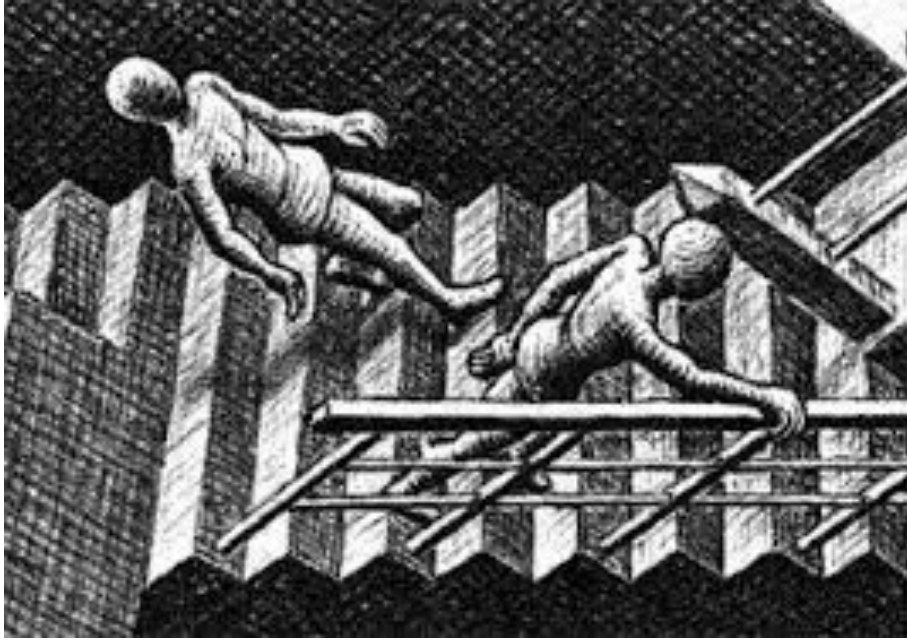
gravitación



Relatividad

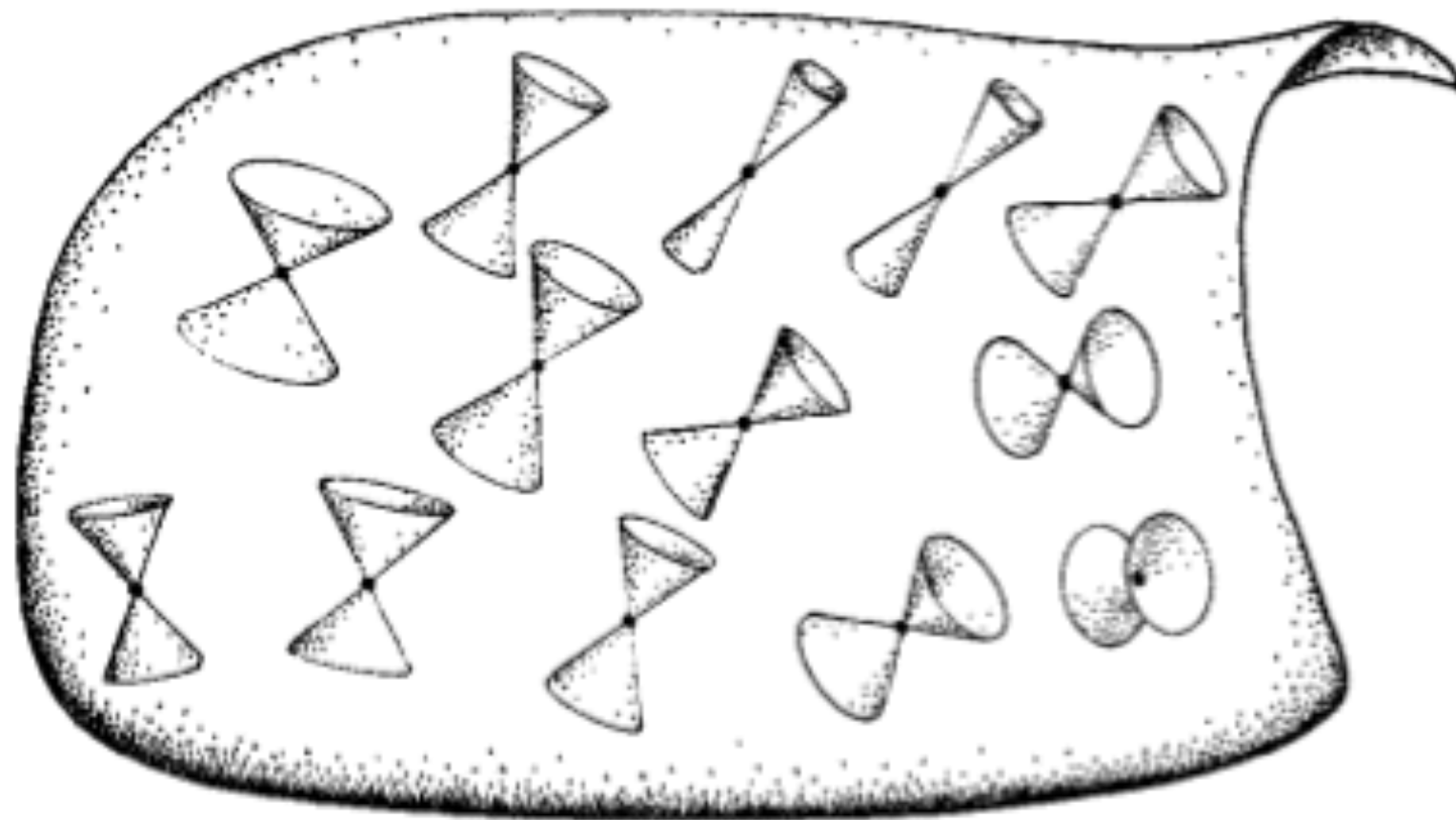


Relatividad

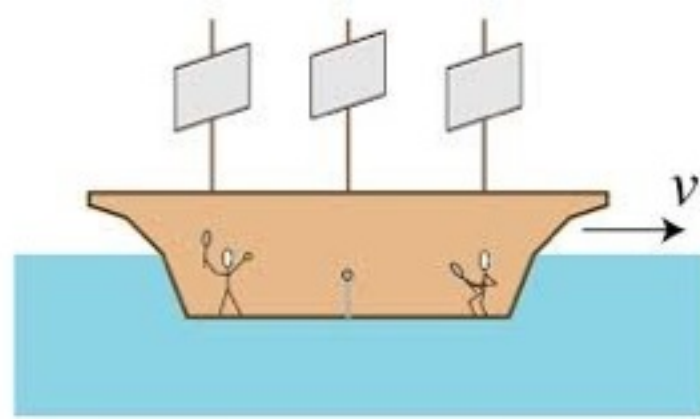
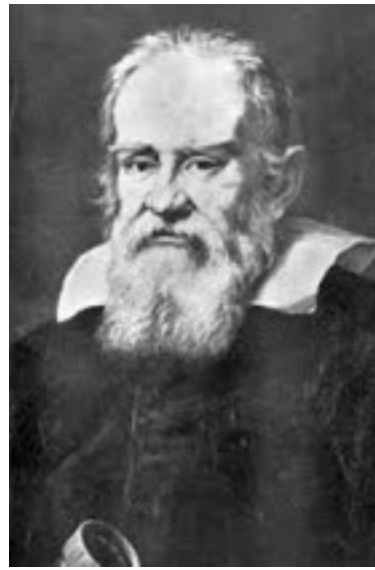


Localidad





Espacio-tiempo de Einstein

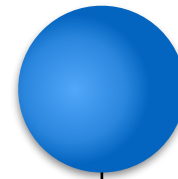
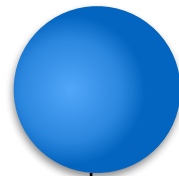


EL MOVIMIENTO (uniforme) NO SE PUEDE DETECTAR "DESDE DENTRO"

Galileo lo estableció para movimientos "naturales" horizontales

Los dos movimientos naturales estudiados por Galileo

horizontal
uniforme



caída
libre



El otro descubrimiento fundamental de Galileo ...



la universalidad de la caída libre

La interpretación de Newton

$$F_{\text{grav}} = \frac{GM_g m_g}{r^2} = m_i a$$

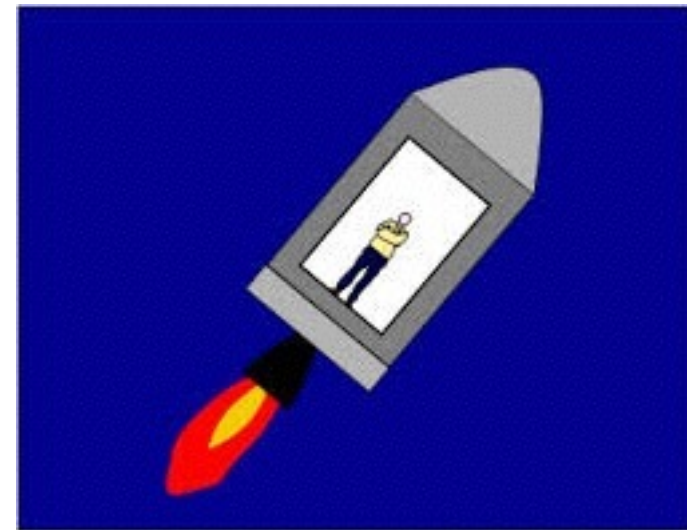
$$m_g = m_i$$

$$MASA_{\text{inercial}} = MASA_{\text{gravitacional}}$$

experimentalmente comprobado hasta una parte en 10^{13}

La interpretación de Einstein

PRINCIPIO DE EQUIVALENCIA entre gravitación e inercia



SIGUEN SIENDO situaciones indistinguibles "desde dentro"

RELATIVIDAD GENERAL

ESLOGAN



La gravitación "no existe"

ESLOGAN



La gravitación "no existe"

... EN CAIDA LIBRE!

ESLOGAN



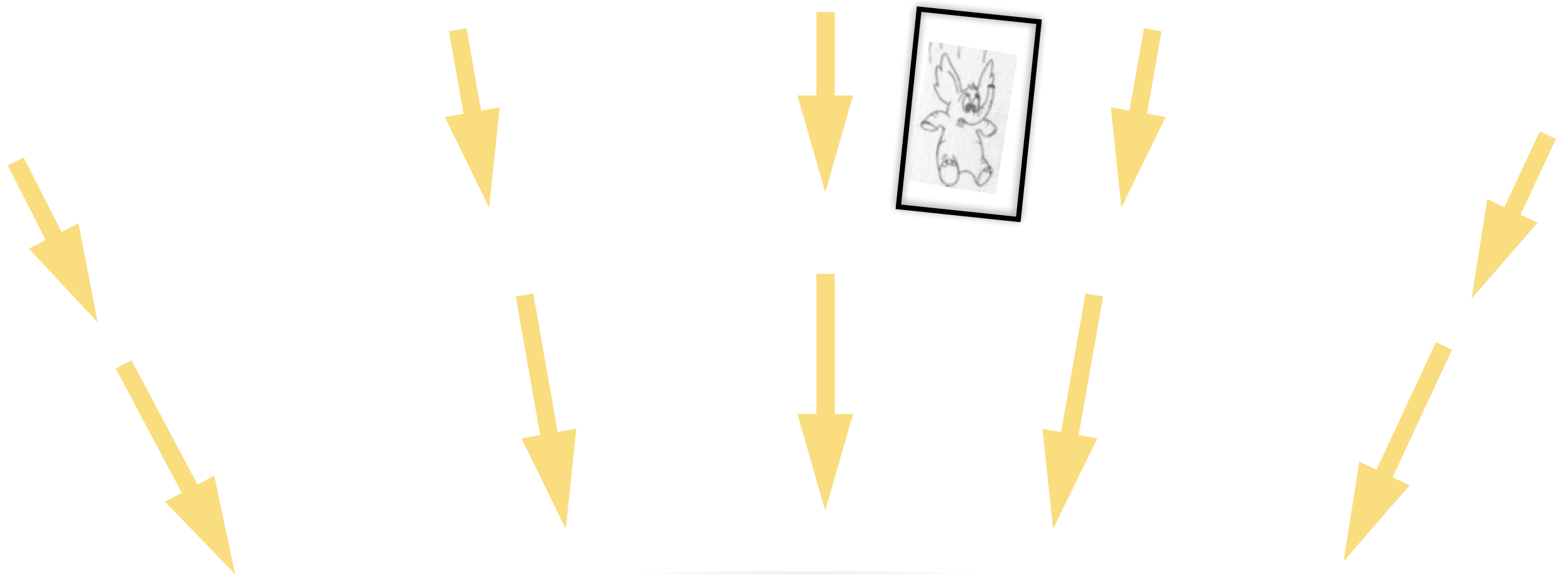
La gravitación "no existe"

... EN CAIDA LIBRE!

Pero ...

La "desaparición" es LOCAL

Sobreviven las "mareas"



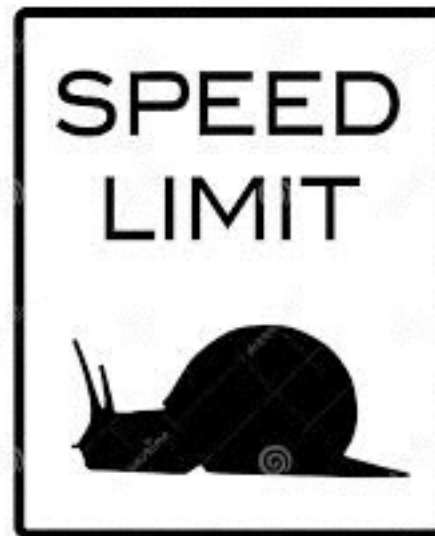


mareas

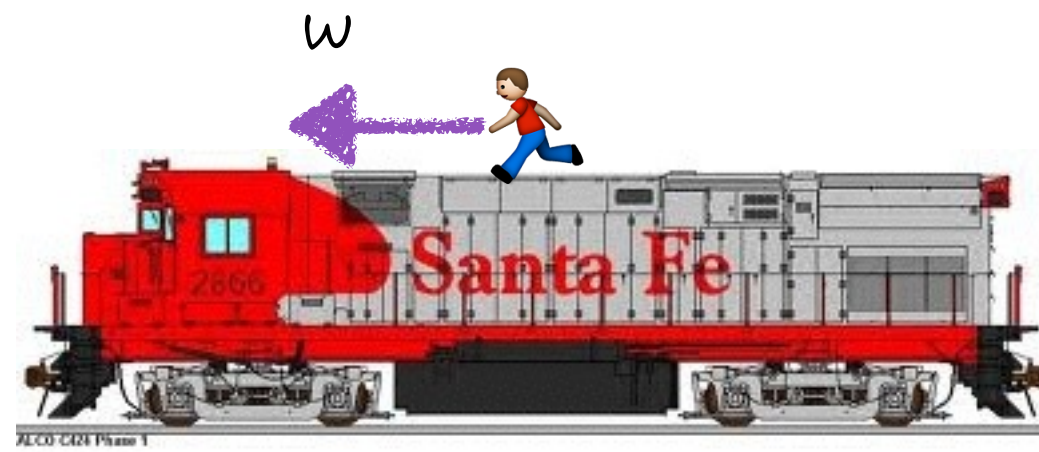


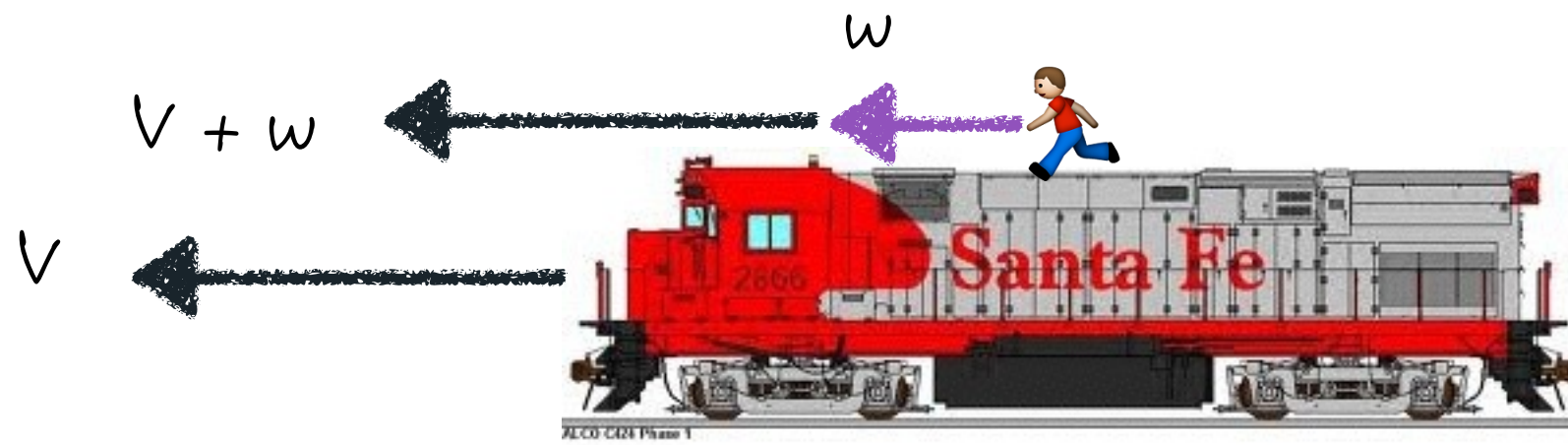
Pero la LOCALIDAD, entendida como PRINCIPIO general,
requiere la existencia una

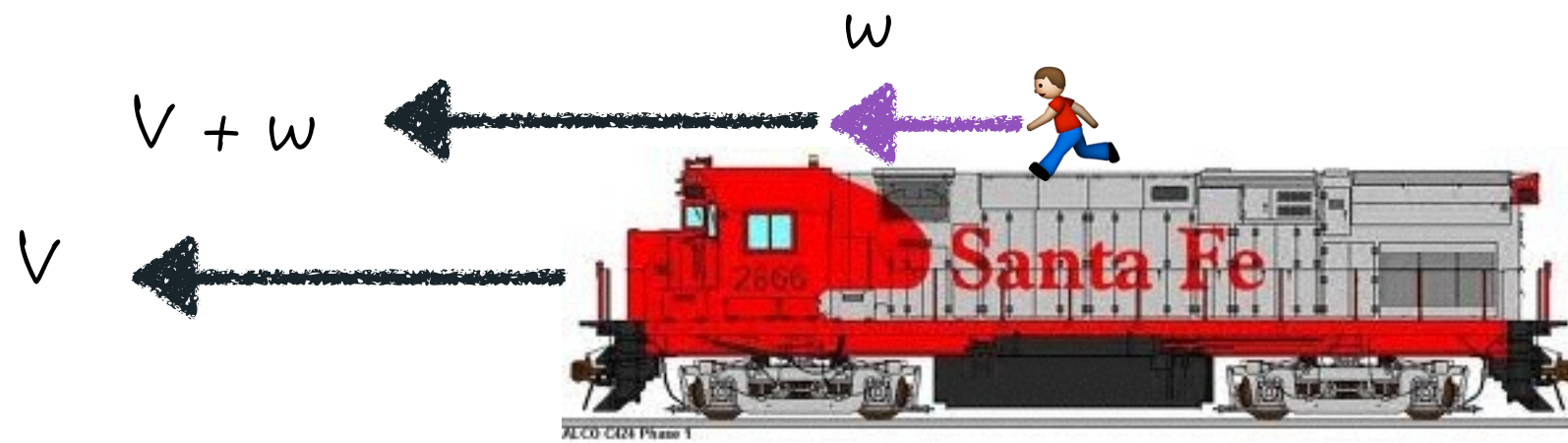
VELOCIDAD MAXIMA











Si las velocidades se suman ...

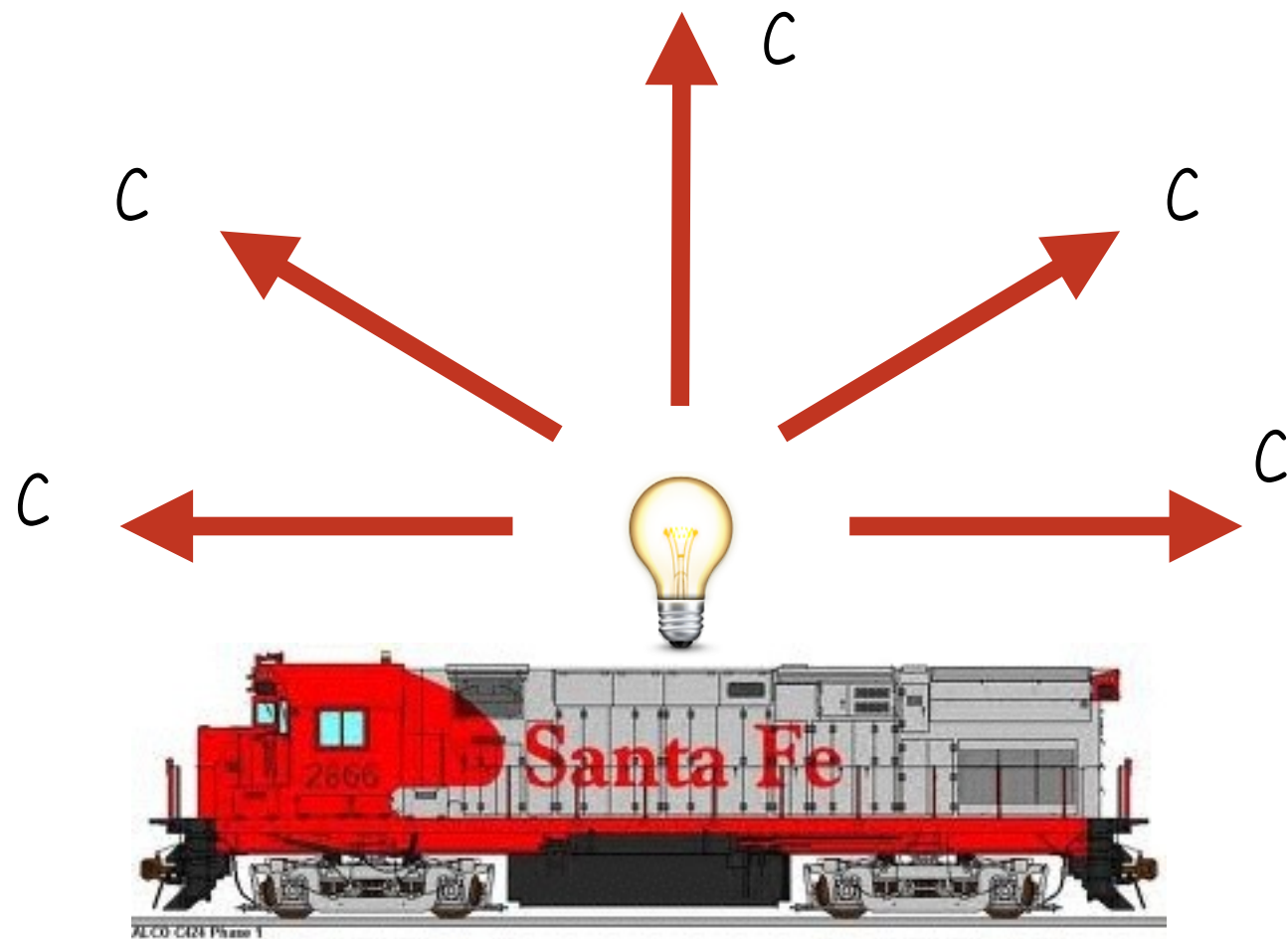


En realidad ...

Velocidad Máxima + Relatividad = Velocidad Absoluta

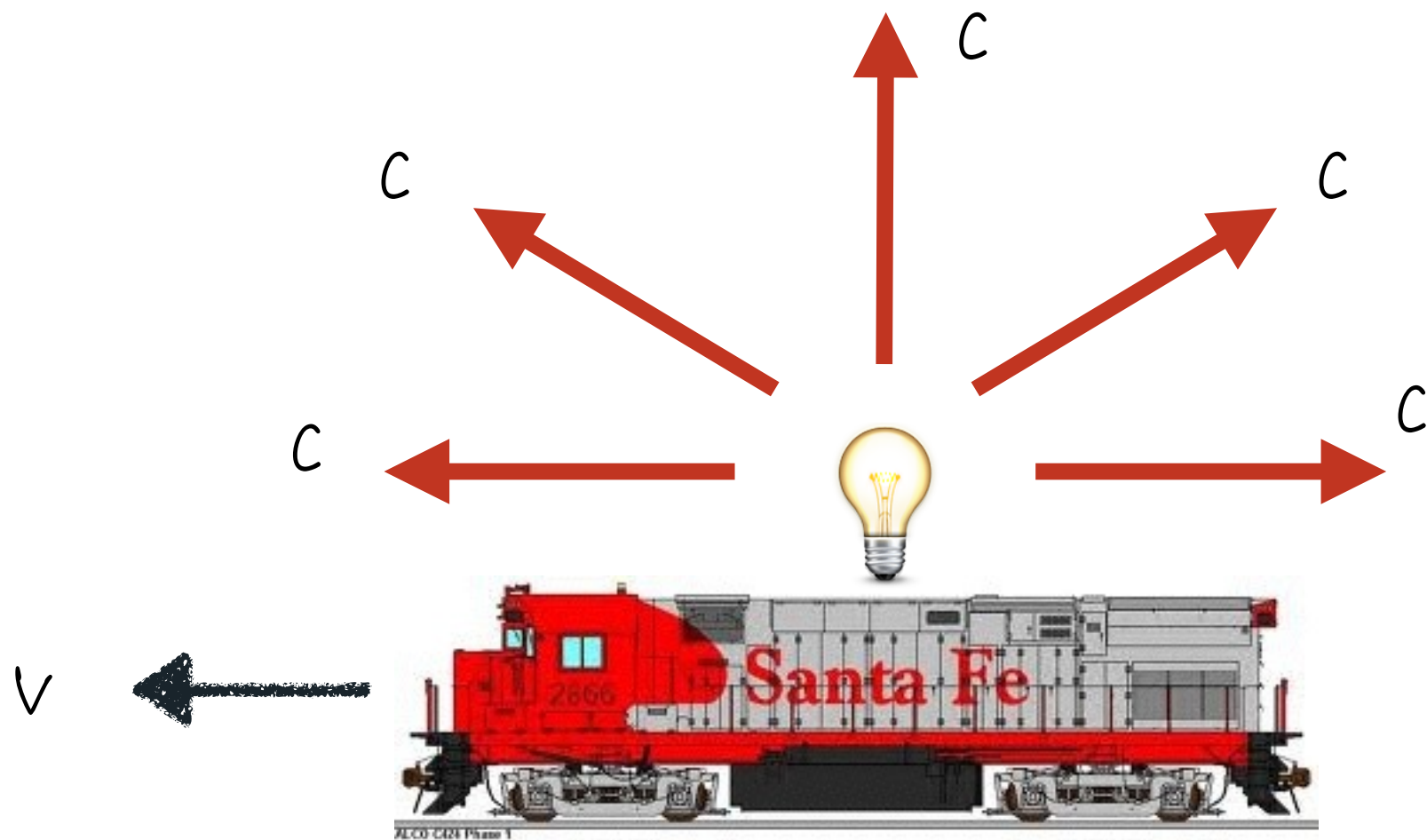
La luz no es "galileana"

LA VELOCIDAD DE LA LUZ ES ABSOLUTA



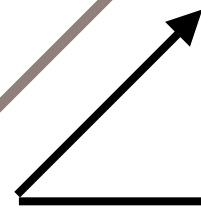
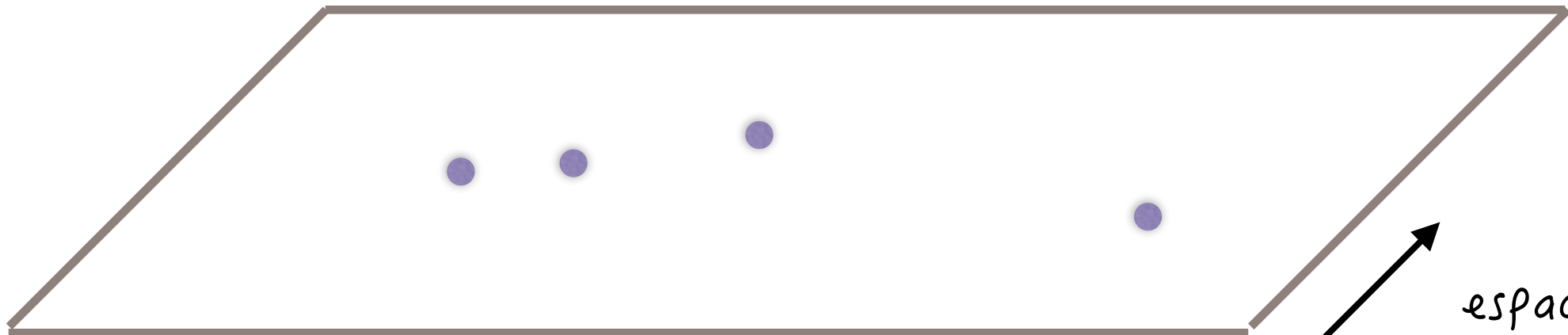
La luz no es "galileana"

LA VELOCIDAD DE LA LUZ ES ABSOLUTA



ESPACIO - TIEMPO = "historia del espacio"

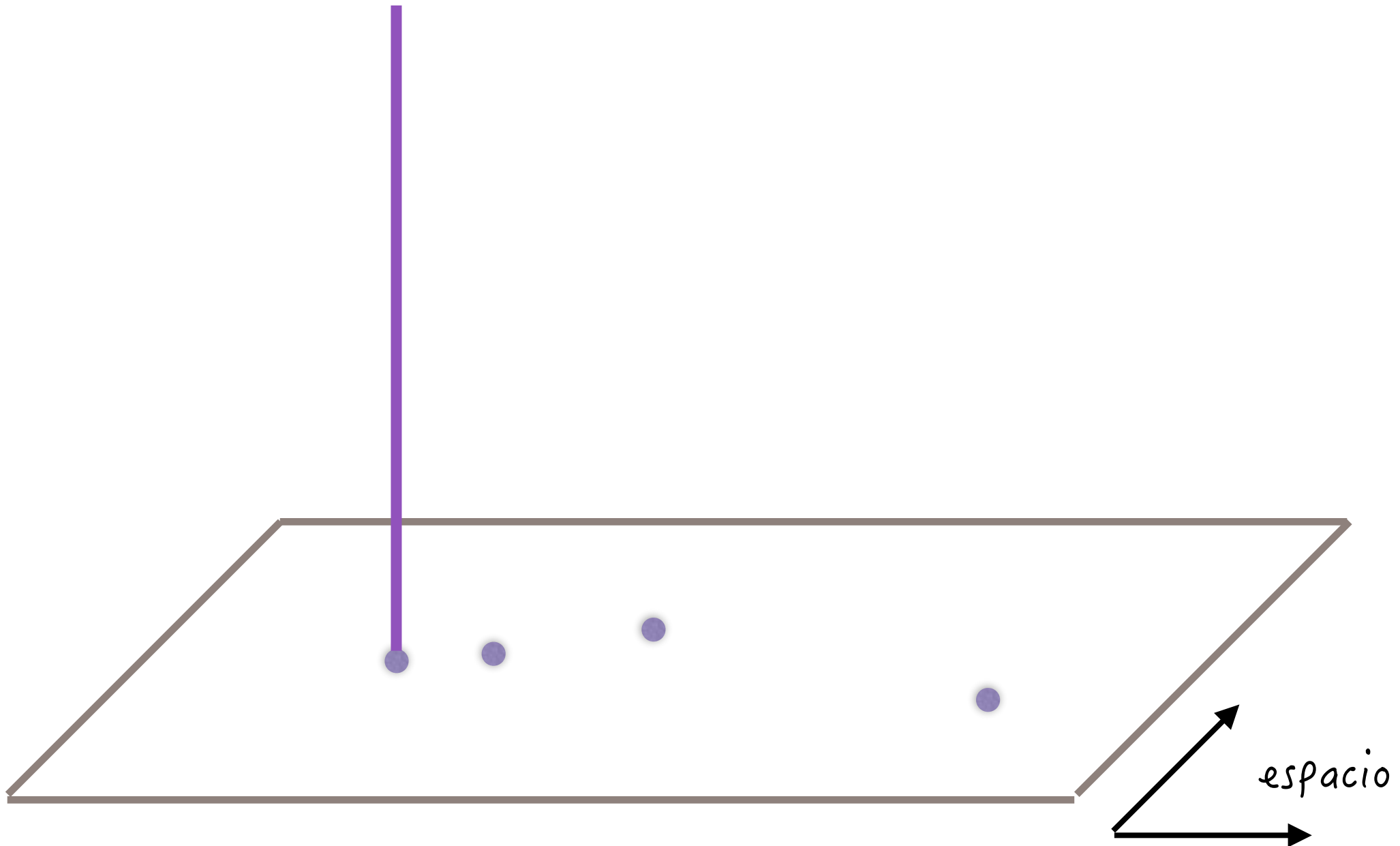
tiempo



espacio

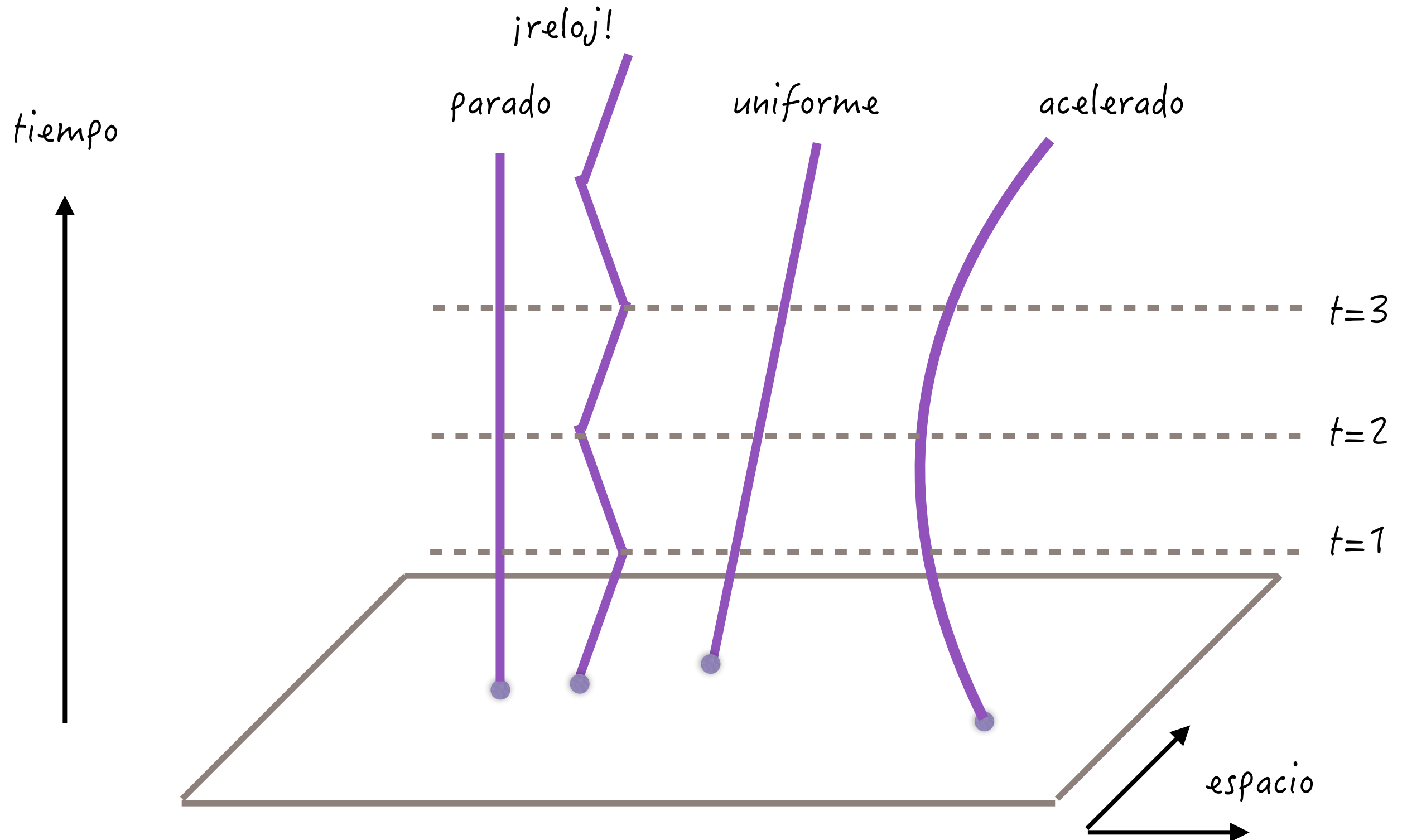
ESPACIO - TIEMPO = "historia del espacio"

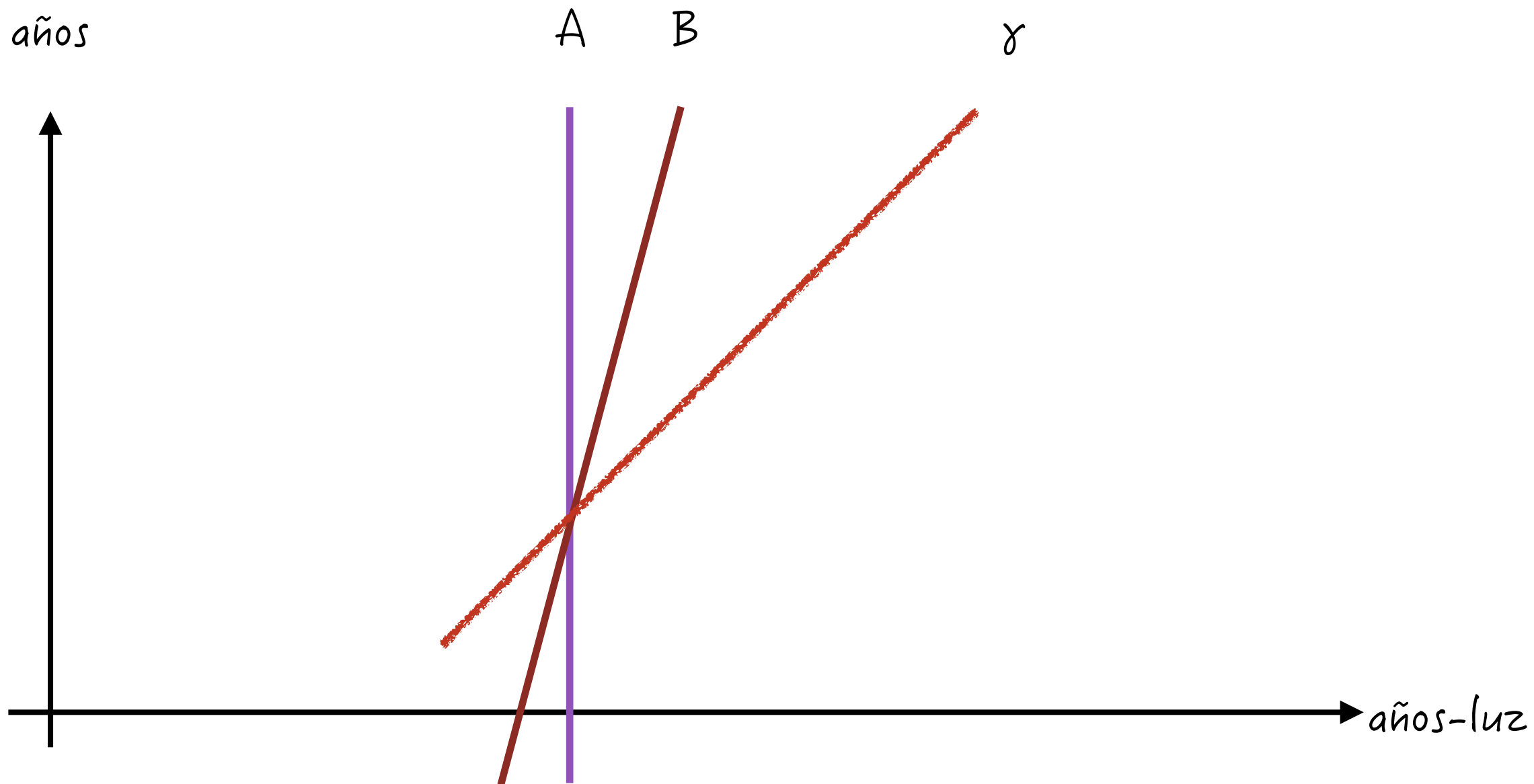
tiempo

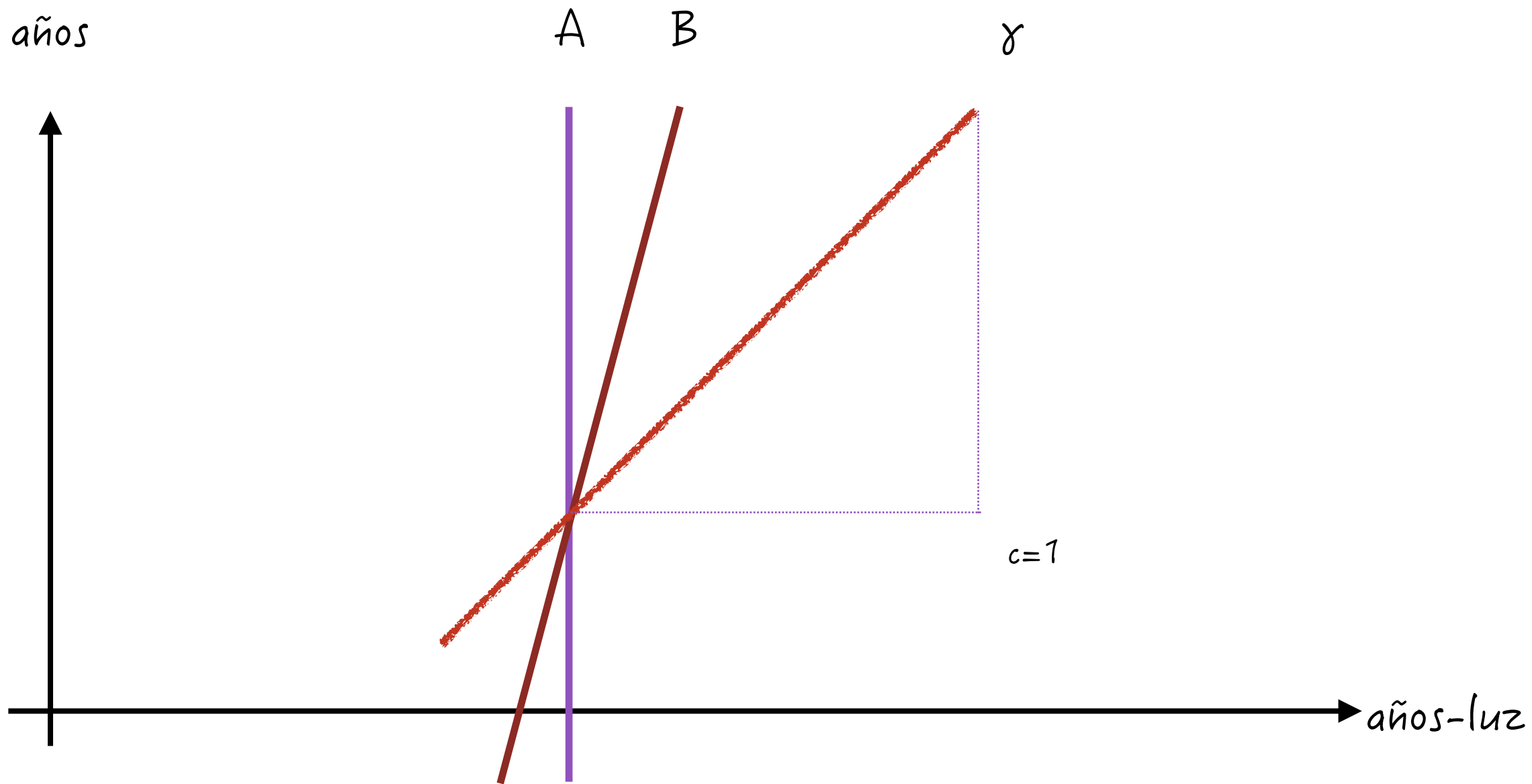


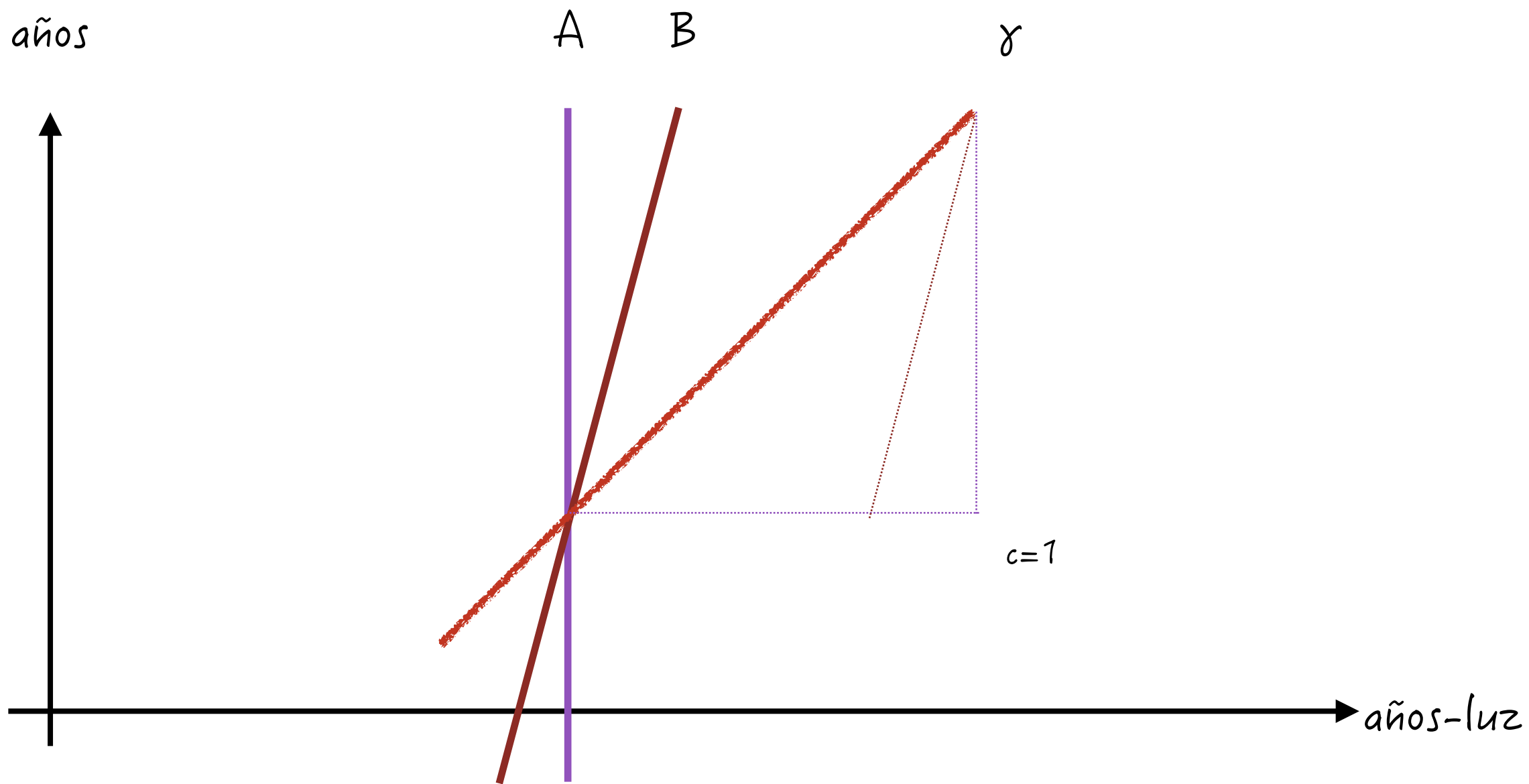
espacio

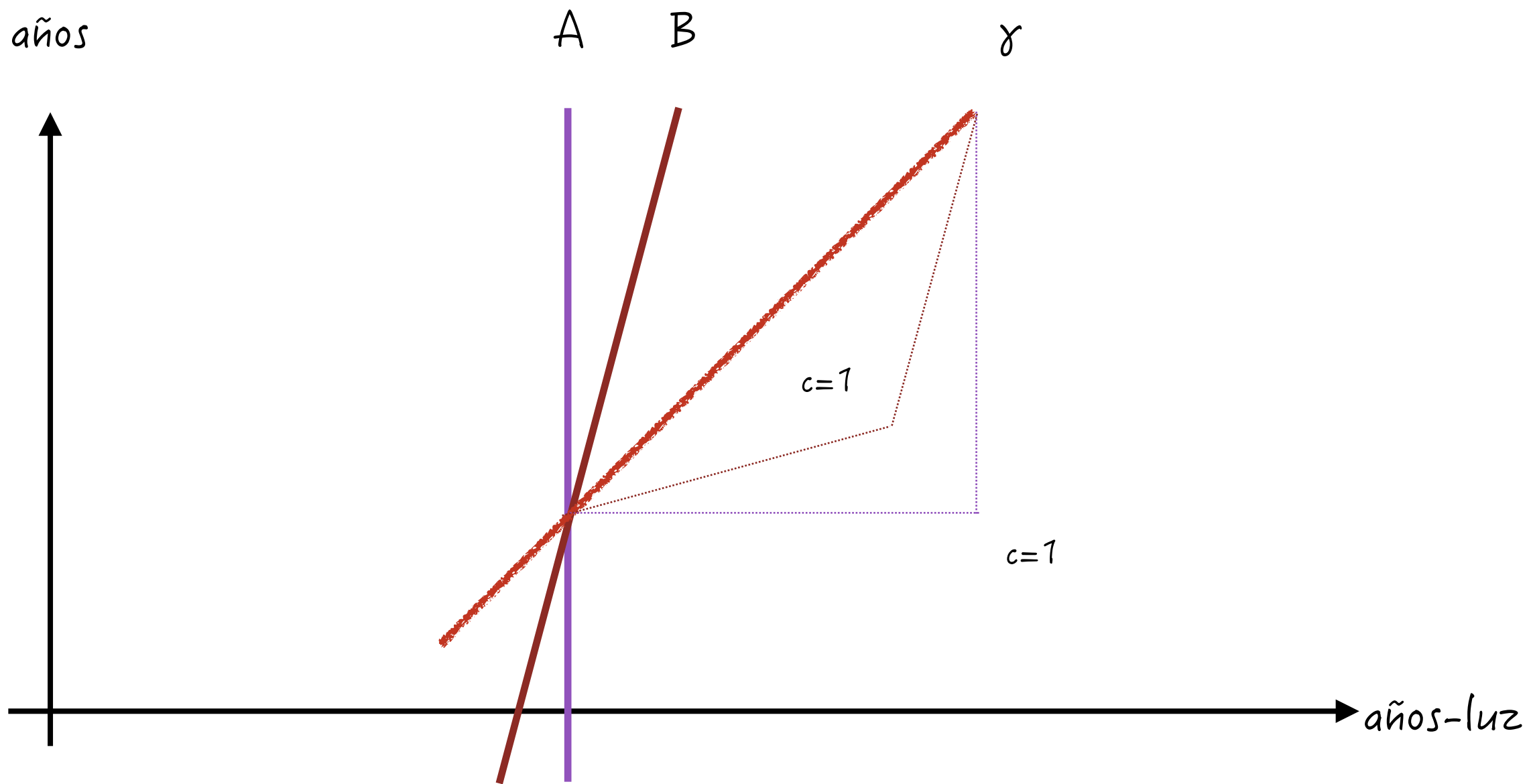
ESPACIO - TIEMPO = "historia del espacio"

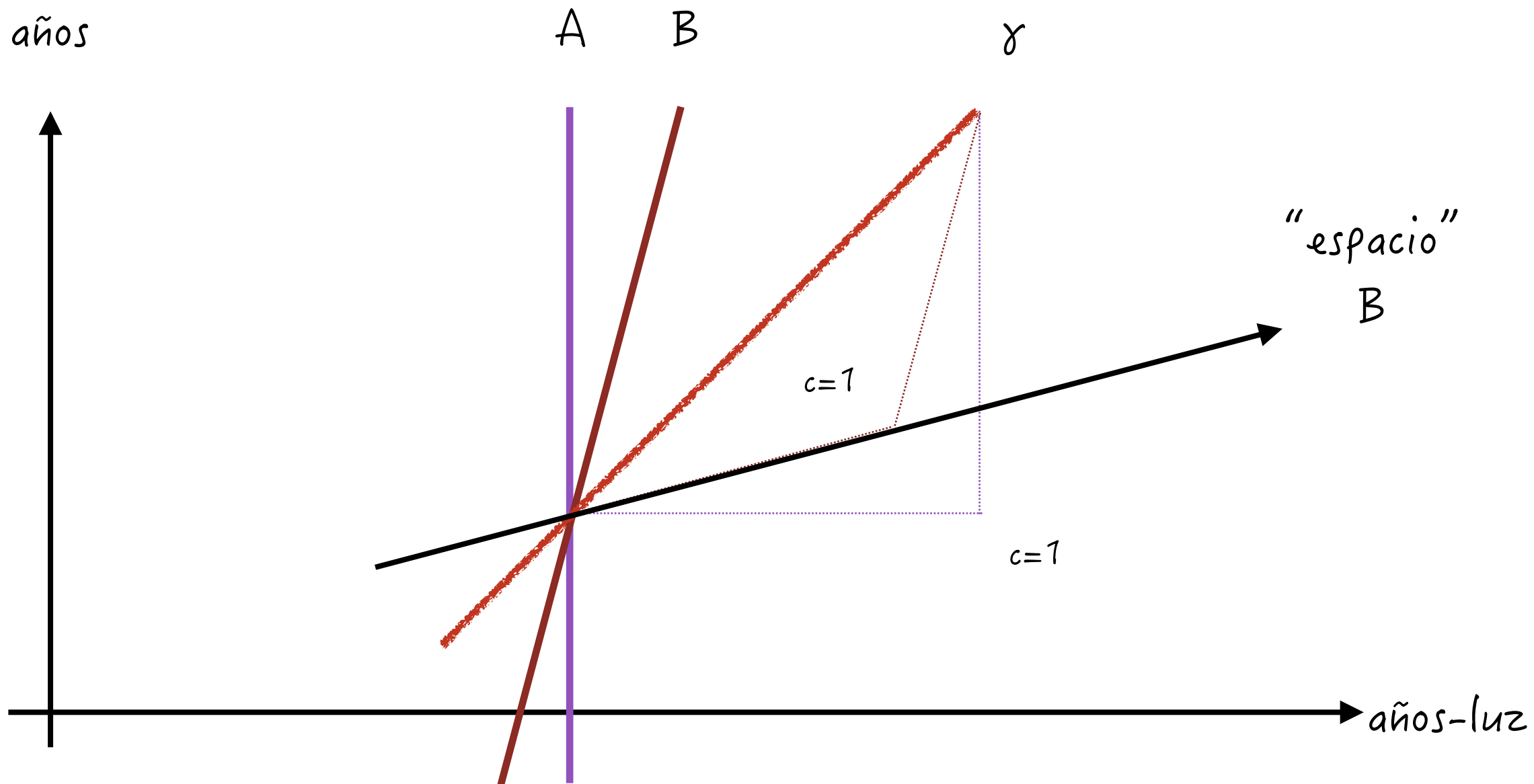


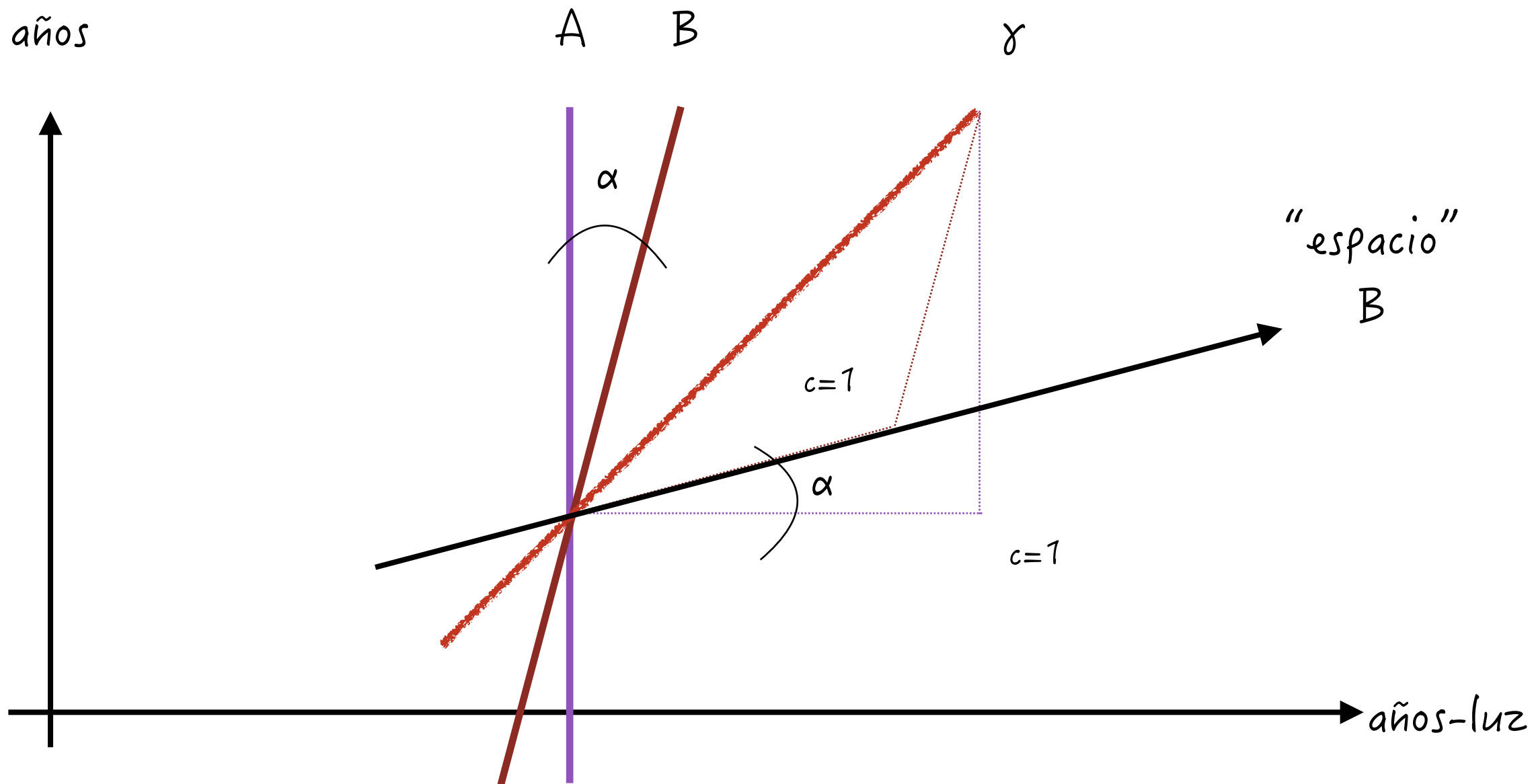




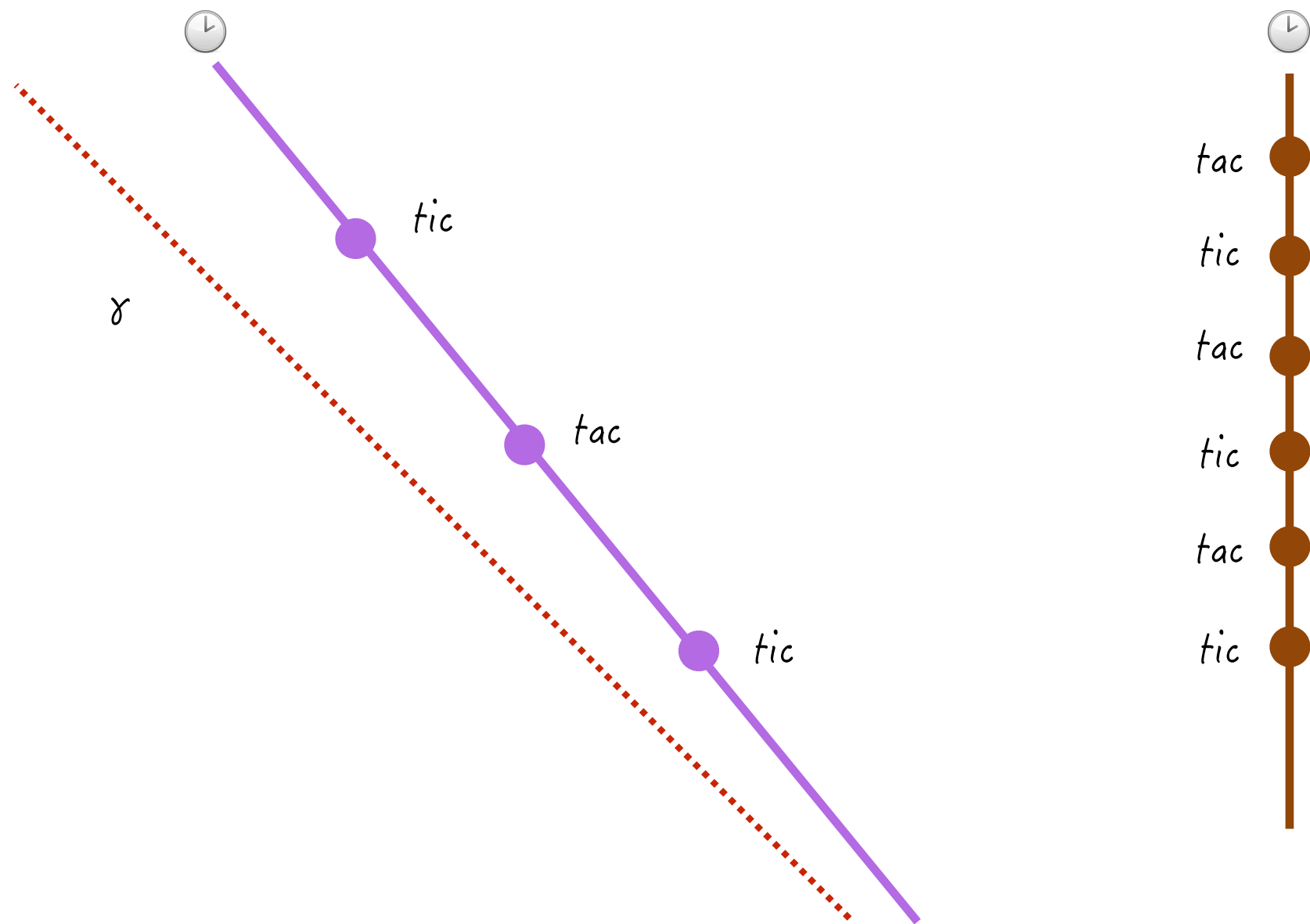








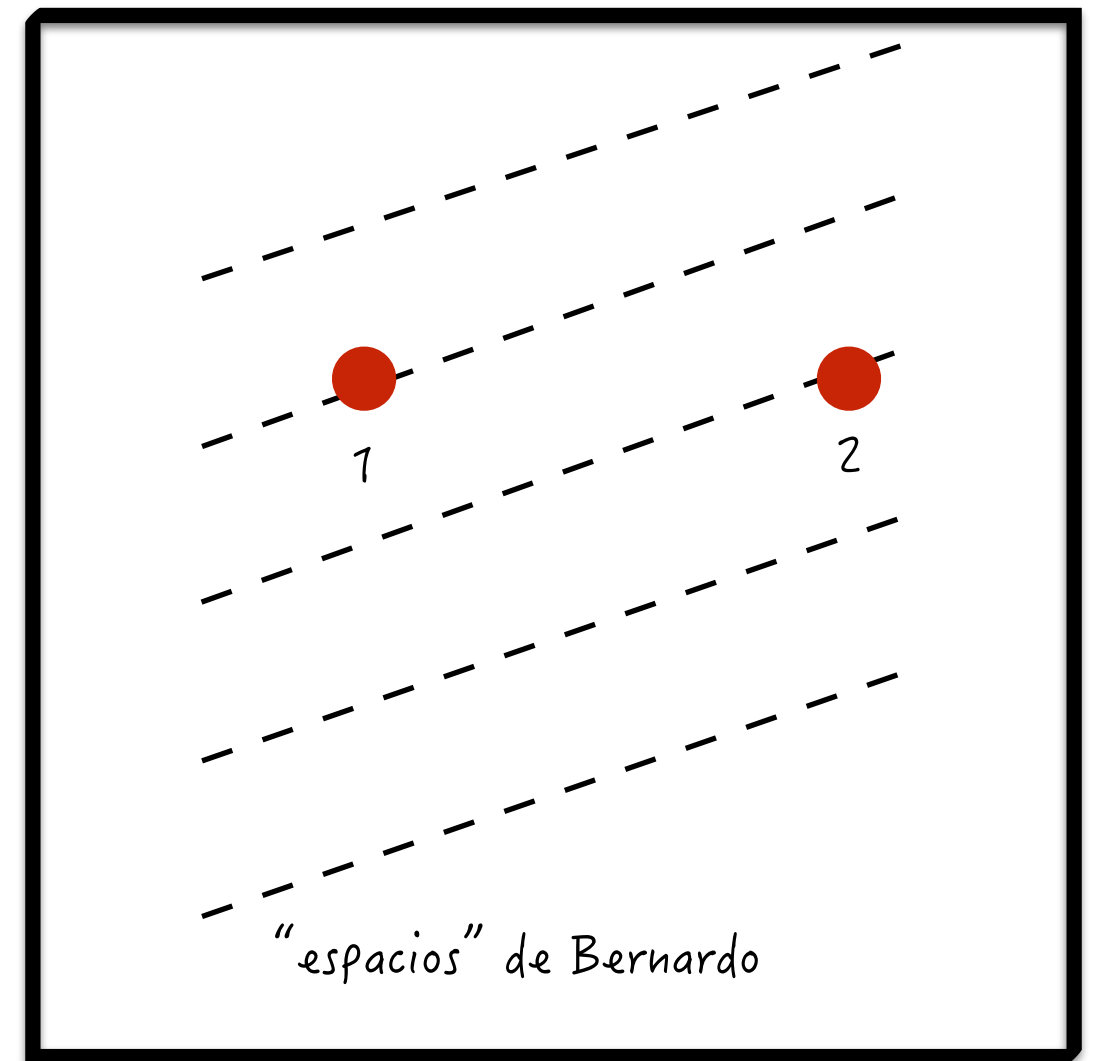
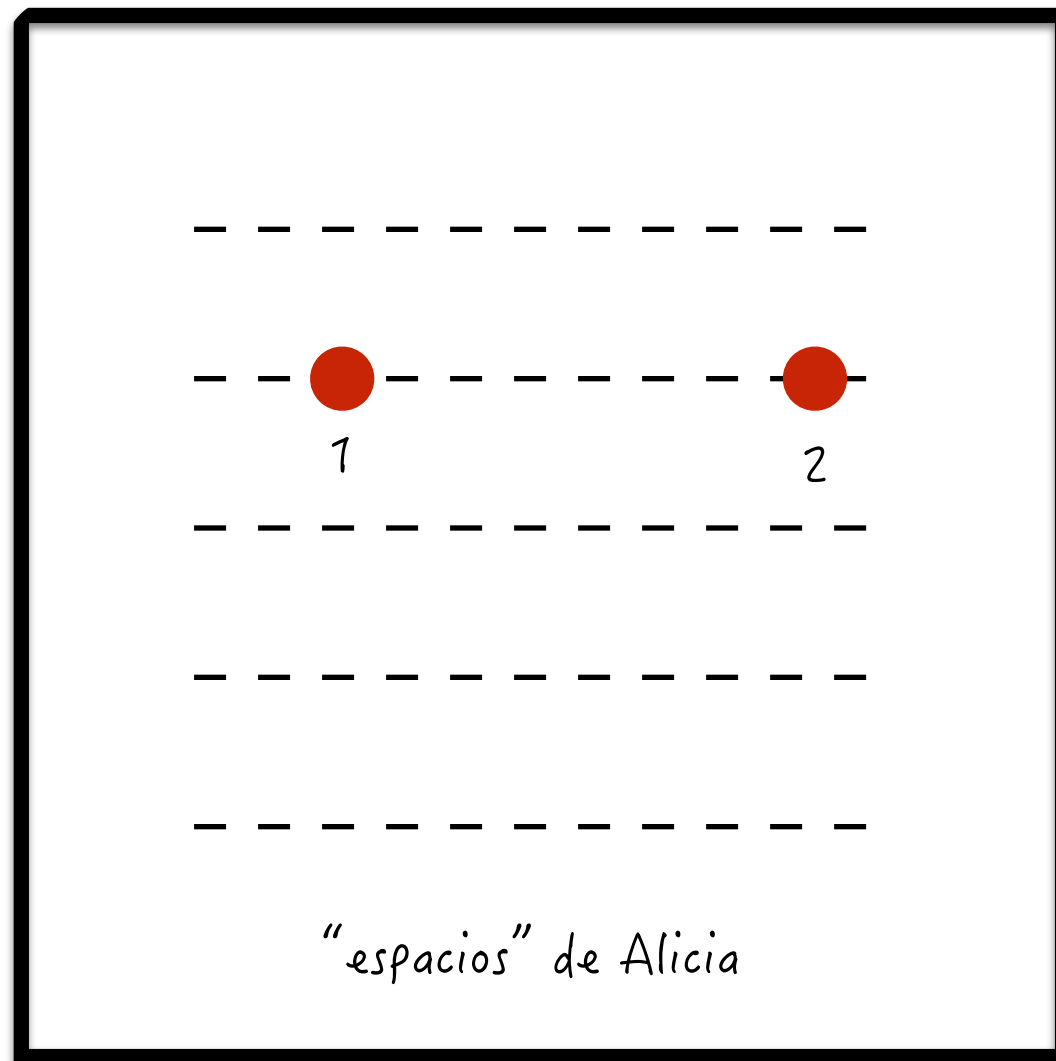
LA LEY FUNDAMENTAL DEL ESPACIO-TIEMPO



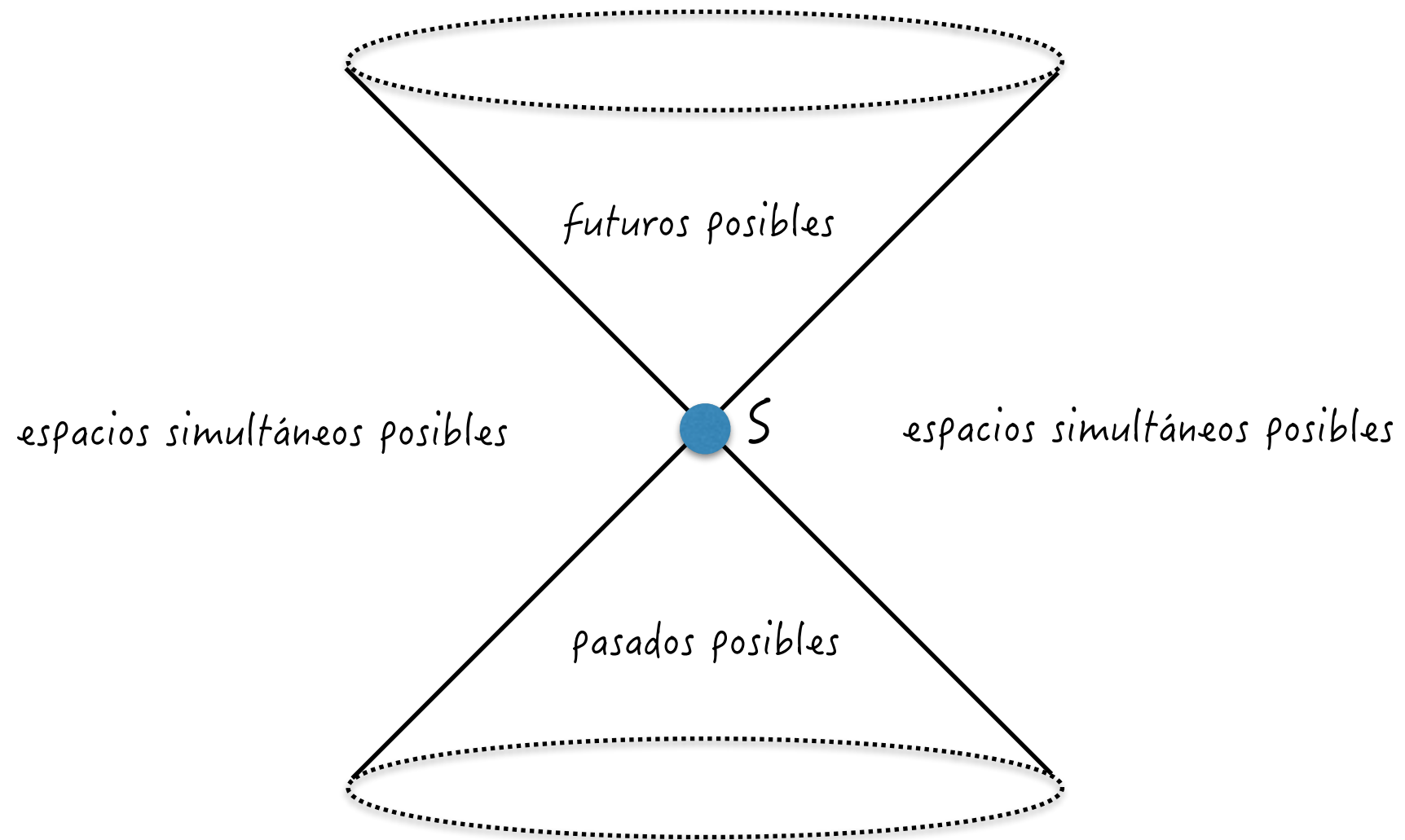
$$(\text{tiempo propio})^2 = (\text{tiempo})^2 - (\text{distancia})^2$$

¡SIMULTANEIDAD PERDIDA!

mismo espacio-tiempo

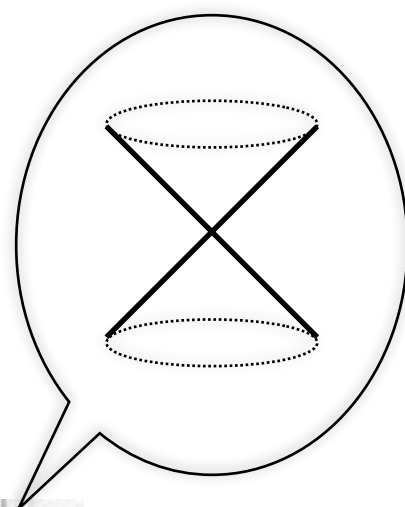


LA ESTRUCTURA LOCAL DEL ESPACIO-TIEMPO



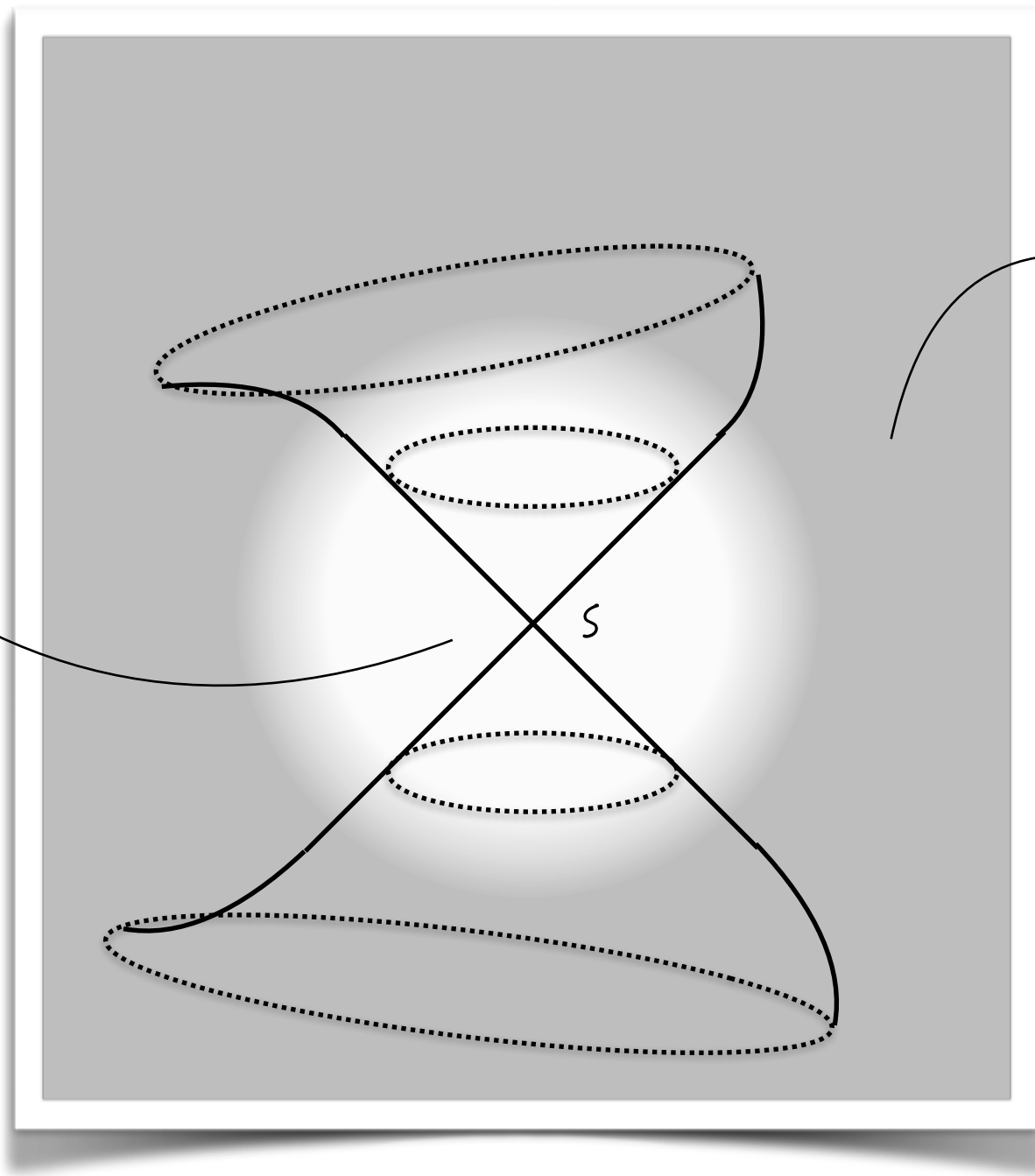
ESTA ESTRUCTURA ESTA EXPERIMENTALMENTE PROBADA HASTA LOS
 10^{-17} cm



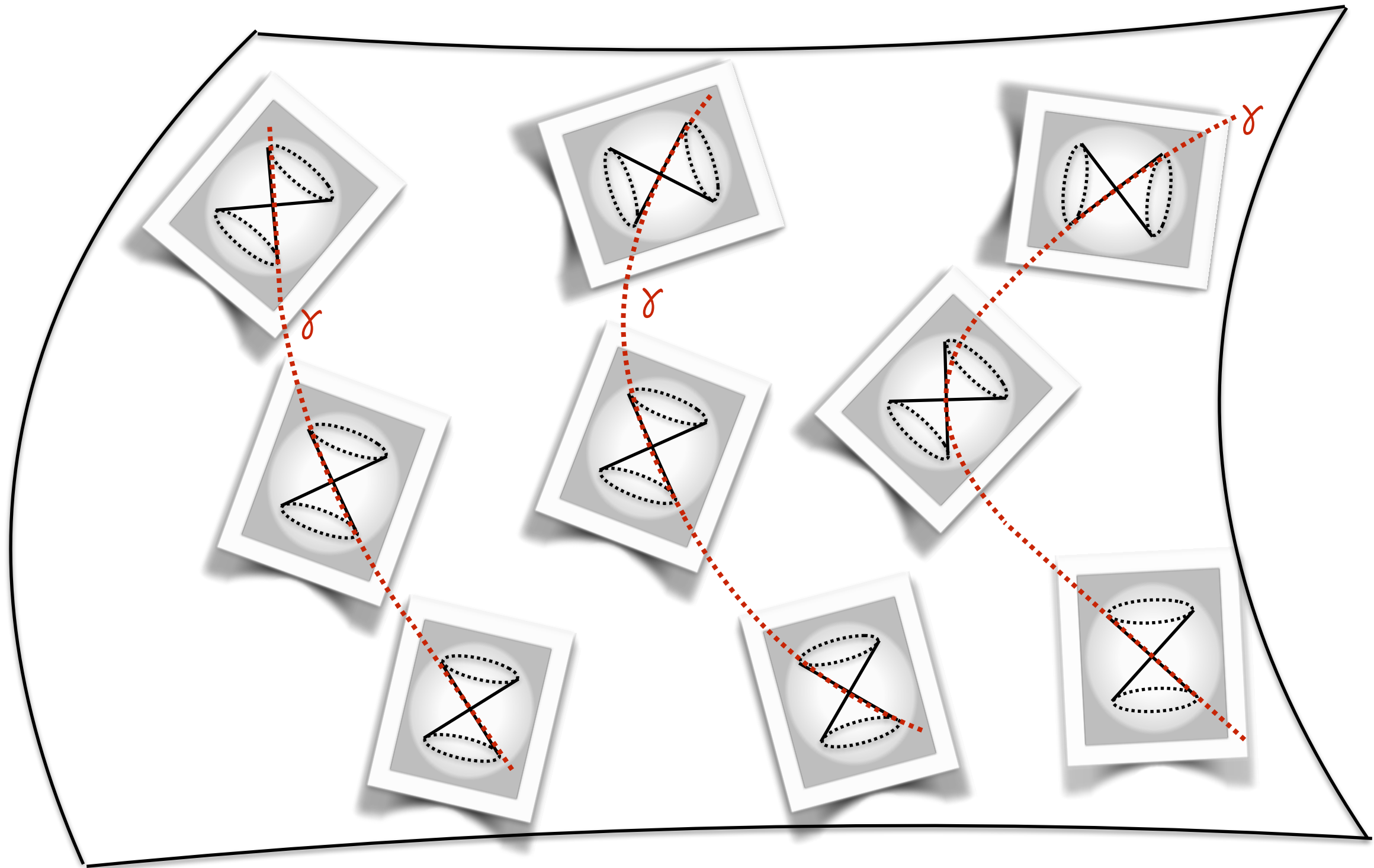


LA LUZ Y LAS MAREAS

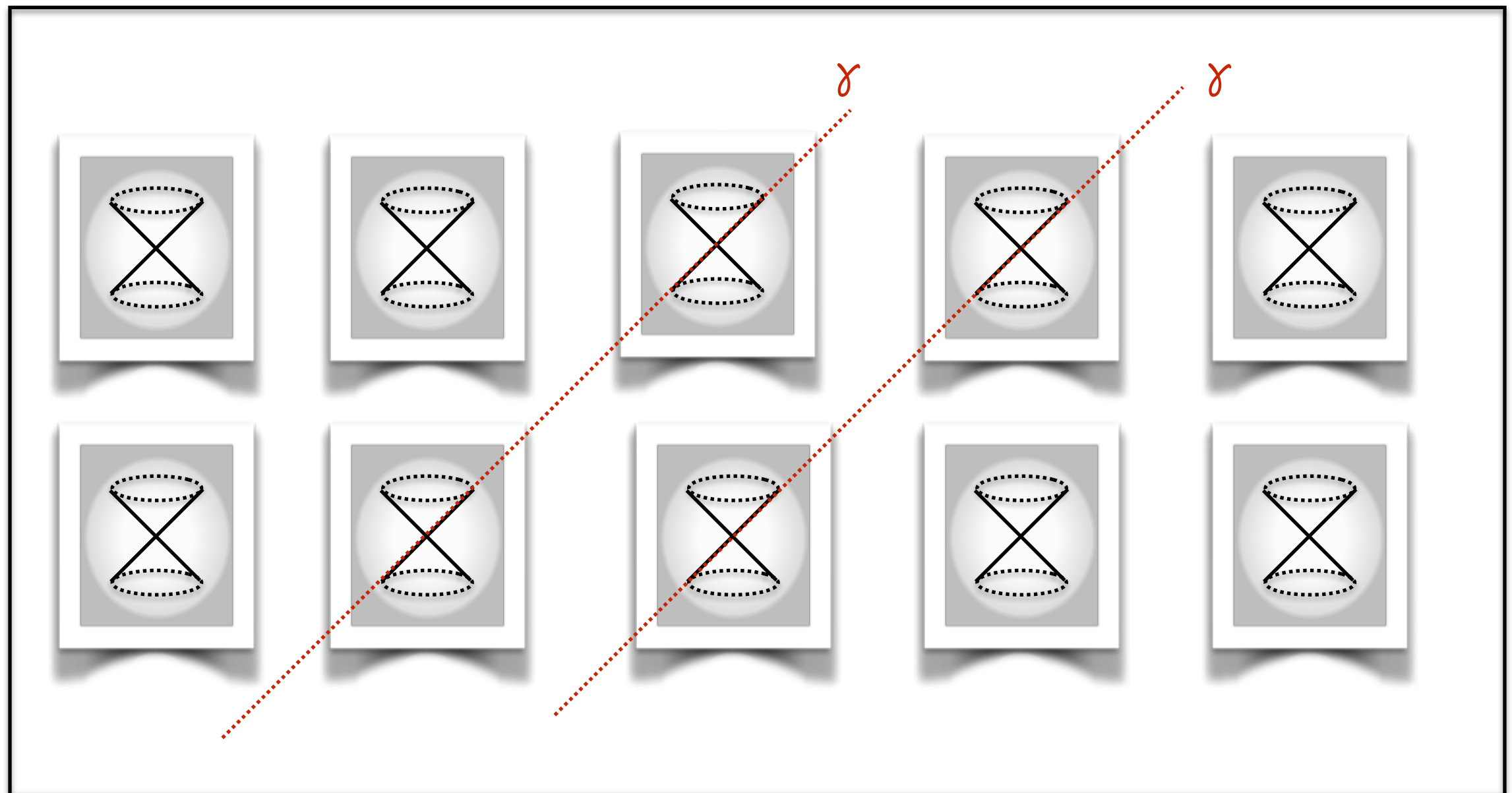
zona de
caída libre,
"ingrávica"



zona
de marea



Espacio-tiempo DECONSTRUIDO

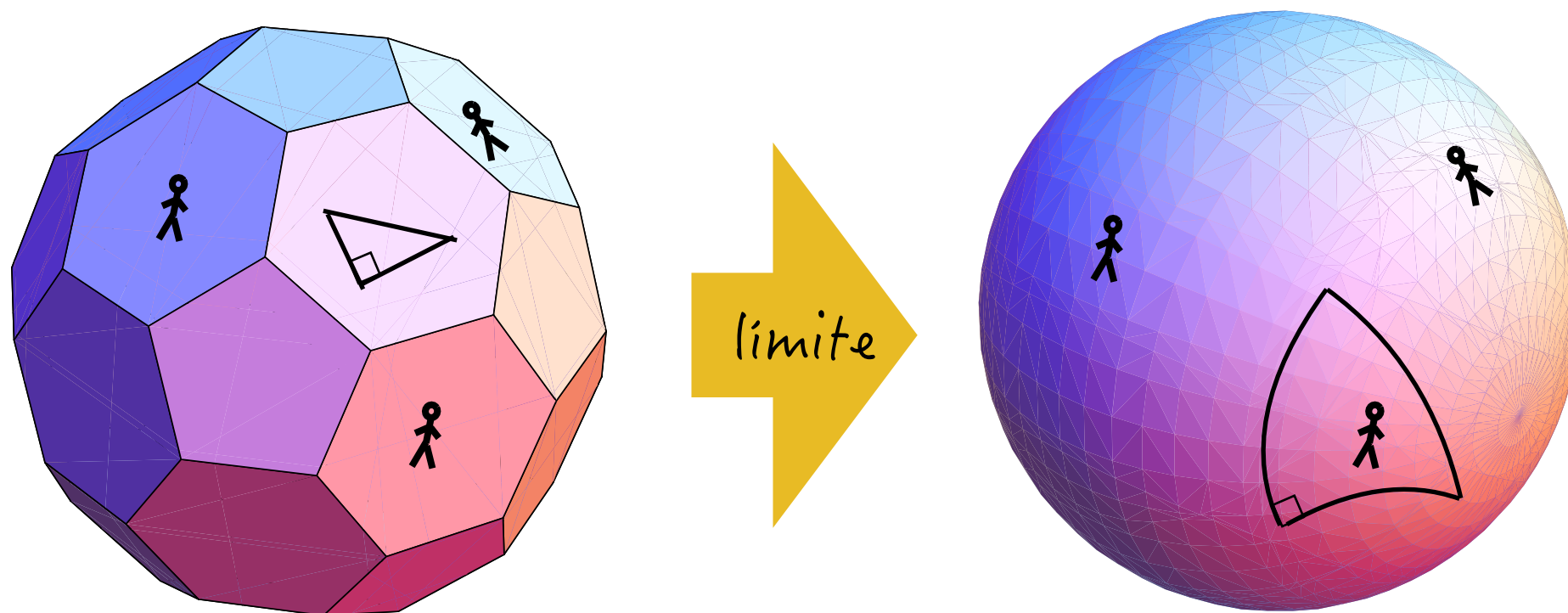


sin mareas, los conos de luz locales "encajan"

Einstein había visto esta estructura antes

en el trabajo de Gauss y Riemann en el siglo XIX

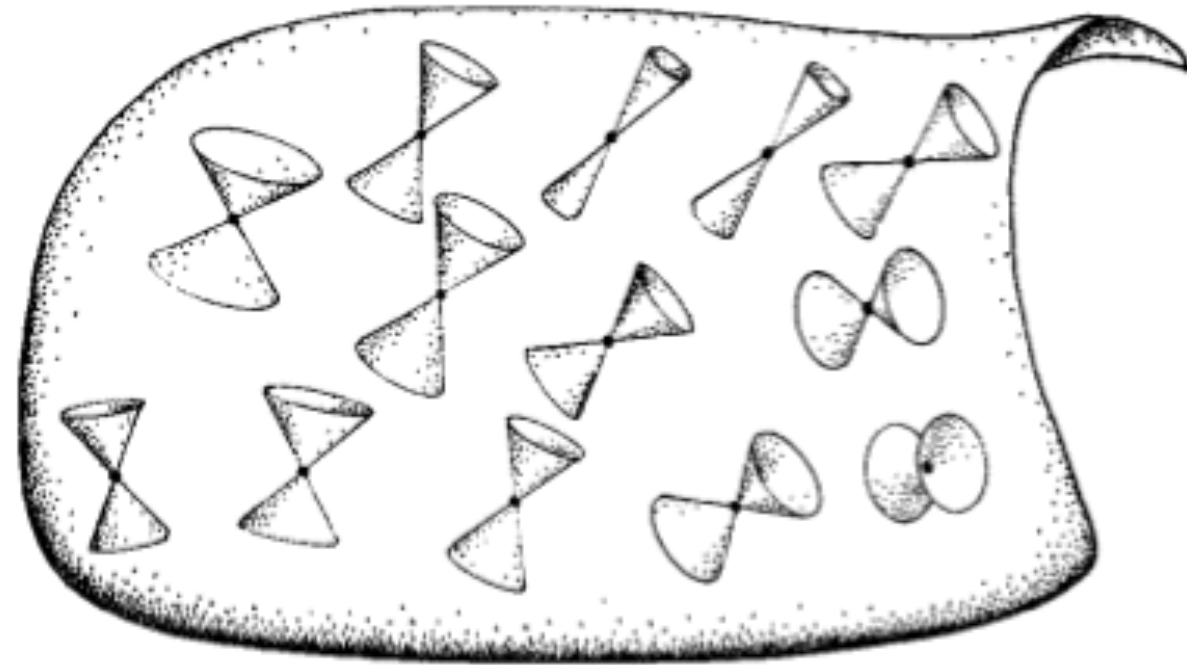
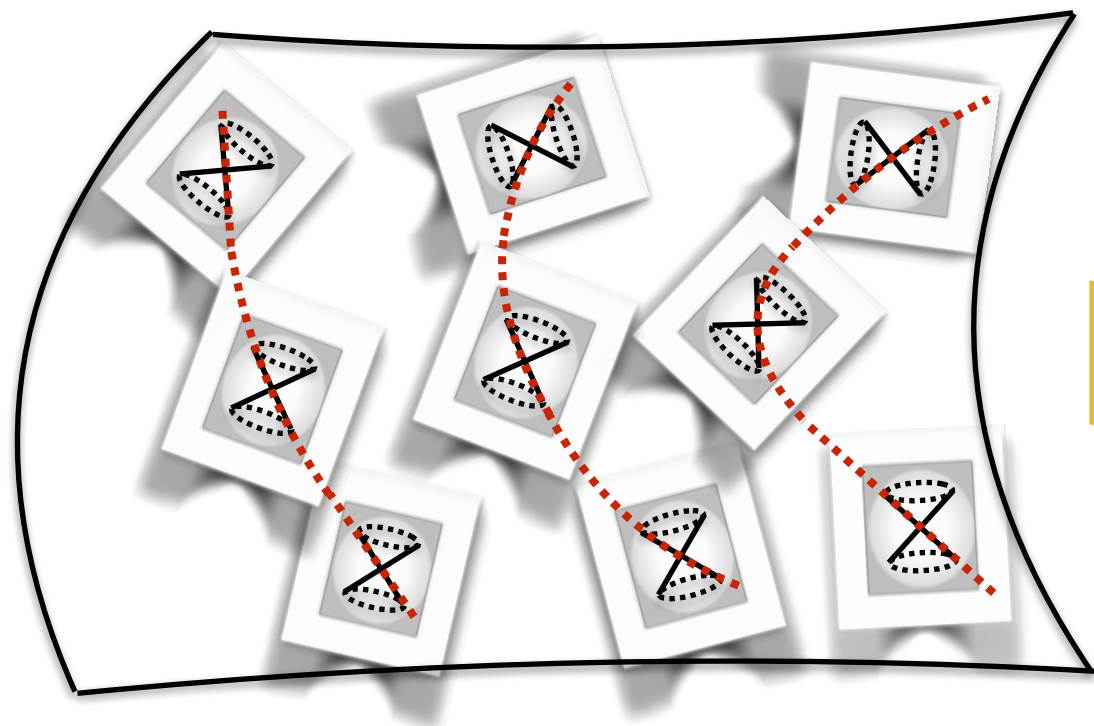




Una geometría *suave* NO EUCLIDIANA
se puede construir "pegando" descripciones LOCALMENTE EUCLIDIANAS

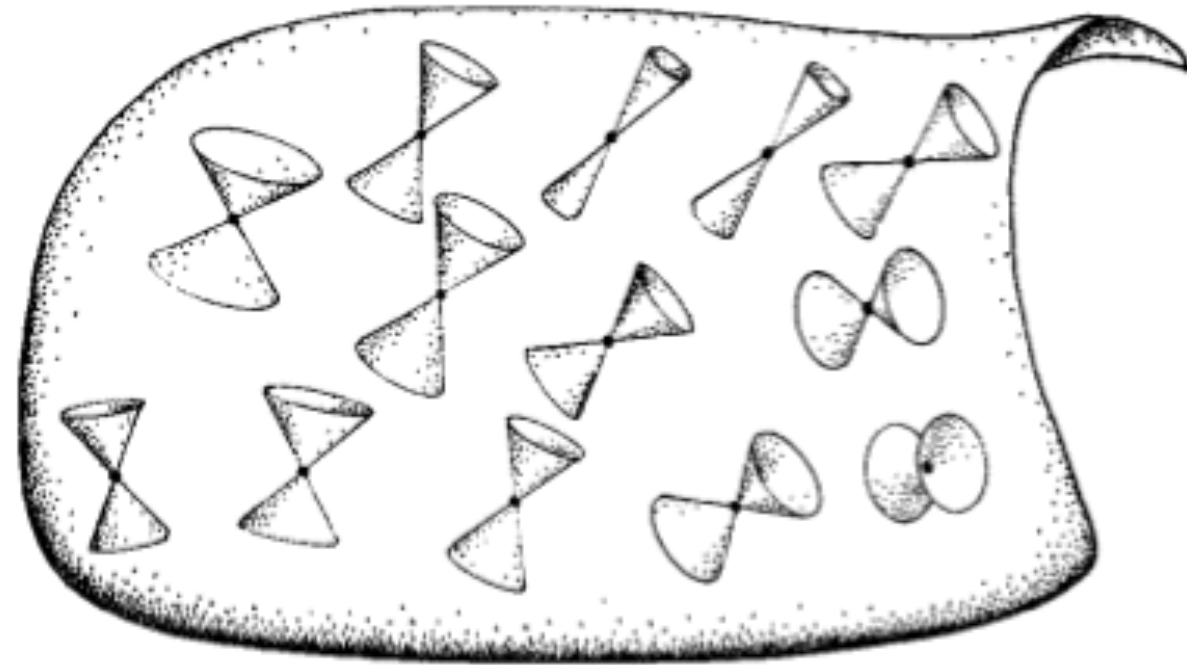
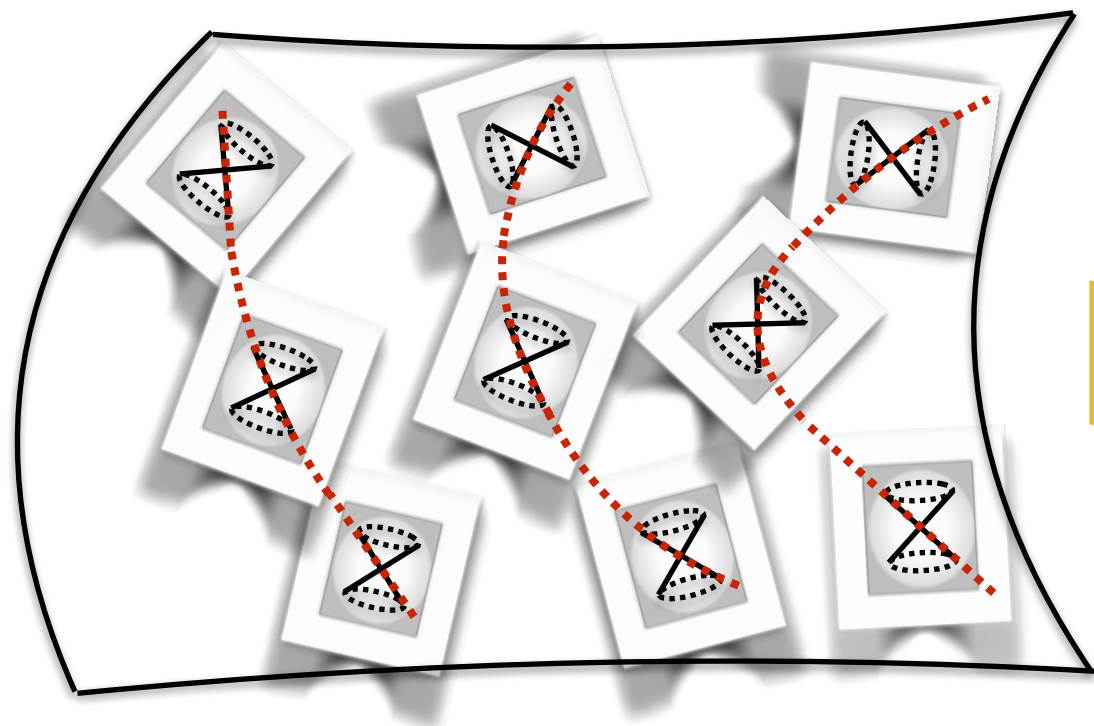
la noción crucial es la CURVATURA = $1/(\text{radio de curvatura})^2$

La idea de Einstein es completamente análoga



¿Quién controla la cantidad de curvatura?

La idea de Einstein es completamente análoga

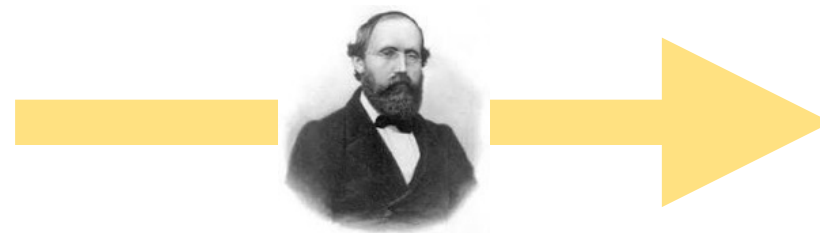


¿Quién controla la cantidad de curvatura?



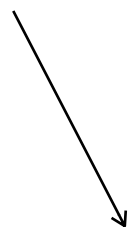
LA LEY FUNDAMENTAL DE LA DINAMICA DEL ESPACIO-TIEMPO

$$\text{CURVATURA}_{\text{espacio-tiempo}} = \frac{8\pi G}{c^4} \text{DENSIDAD}_{\text{energía-impulso}}$$



ESLOGAN

G aparece como un "coeficiente de elasticidad" del espacio

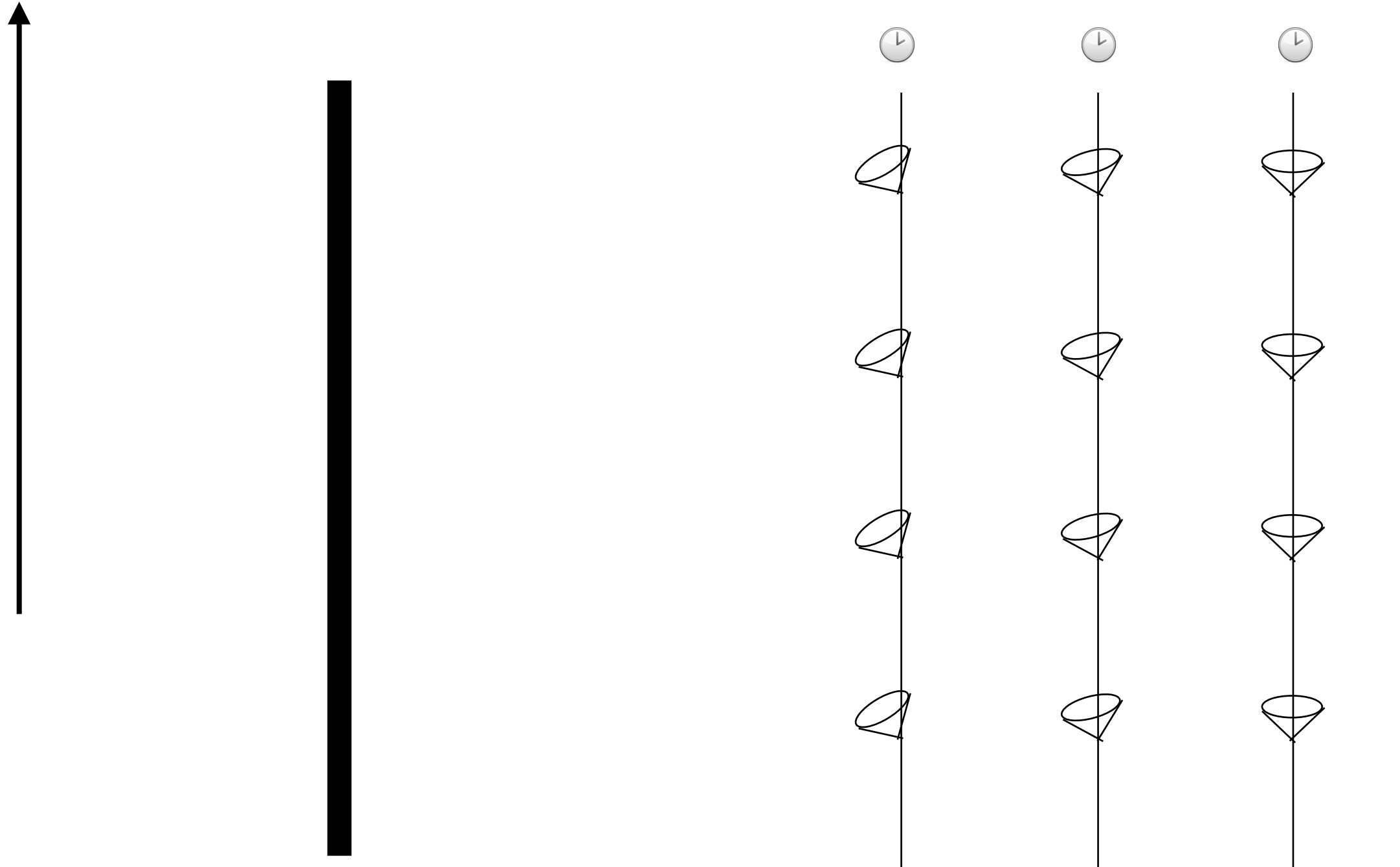


(existen ondas gravitacionales)

Curvatura en torno a una masa = "caída" de los conos de luz

tiempo

altura



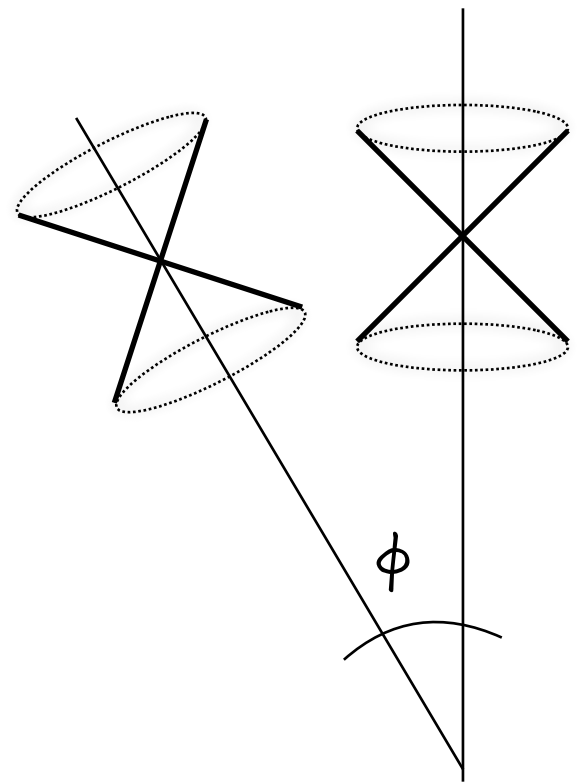
M

relojes en reposo respecto a M atrasan
con la profundidad

¿ CUANTA CURVATURA ?

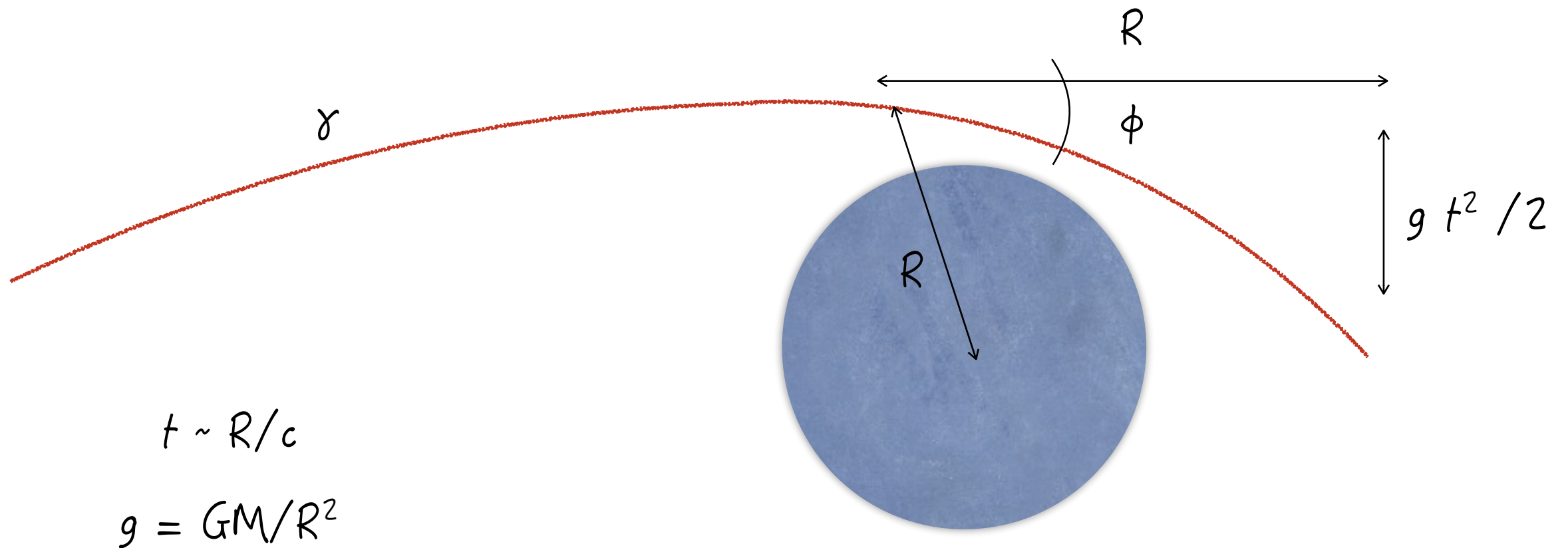
$$\phi = \frac{GM}{c^2 R}$$

$$\phi \sim \left(\frac{V_{\text{típica}}}{c} \right)^2$$



¿ CUANTA CURVATURA ?

La caída de los conos a altura R está controlada por el ángulo de caída de un rayo de luz

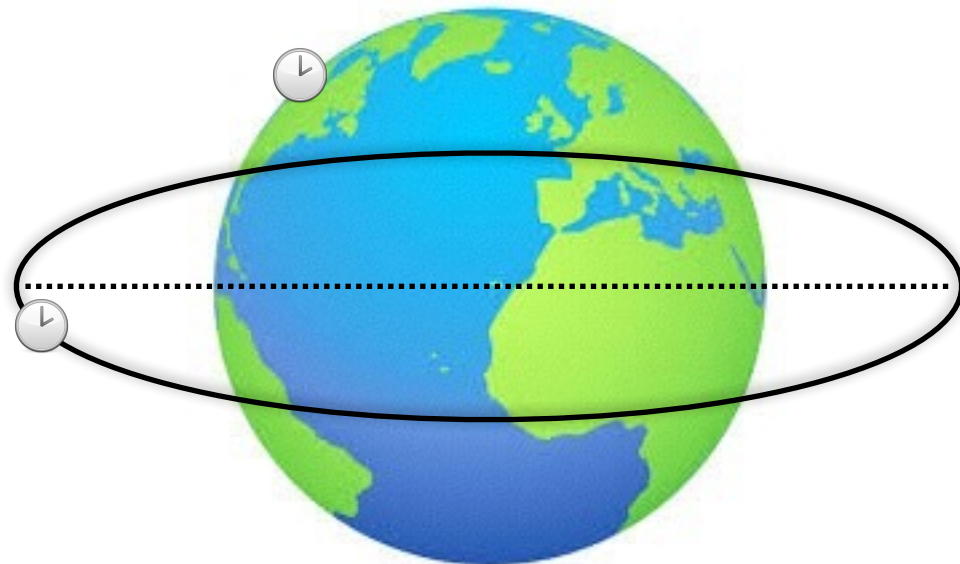


$$t \sim R/c$$

$$g = GM/R^2$$

$$\phi \sim GM / c^2 R$$

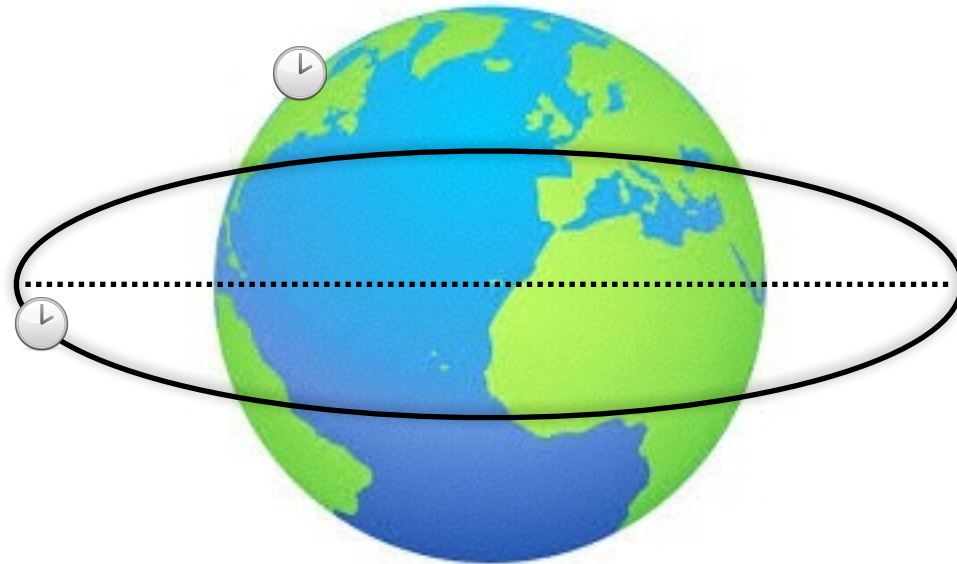
¿ CUANTA CURVATURA ?



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

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

¿ CUANTA CURVATURA ?



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

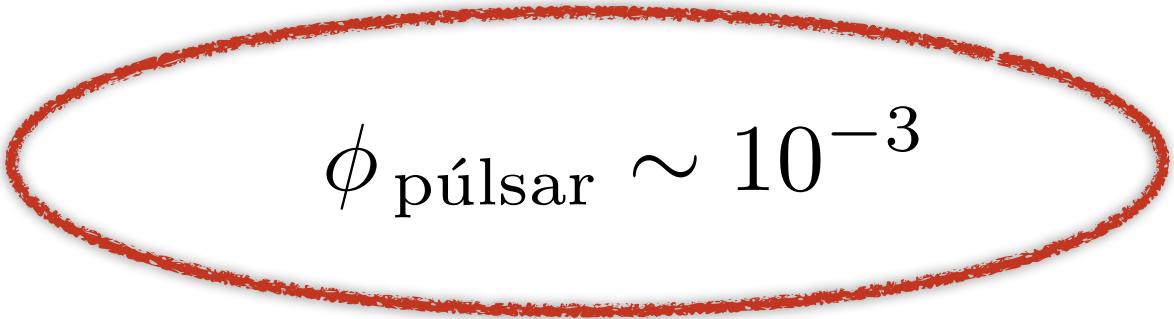
$$\frac{T_{\text{alto}}}{T_{\text{bajo}}} \approx 1 + \phi_{\oplus} \sim 1 + 10^{-9} \quad \text{iGPS!}$$


$$\phi_{\oplus} \sim 10^{-9} \quad \phi \text{ órbita Mercurio} \sim 10^{-6} \quad \phi_{\odot} \sim 10^{-5}$$

tests "clásicos" OK al 1/1000


$$\phi_{\oplus} \sim 10^{-9} \quad \phi_{\text{órbita Mercurio}} \sim 10^{-6} \quad \phi_{\odot} \sim 10^{-5}$$

tests "clásicos" OK al 1/1000


$$\phi_{\text{púlsar}} \sim 10^{-3}$$

test "moderno" OK al 1/100

$$\phi_{\oplus} \sim 10^{-9} \quad \phi_{\text{órbita Mercurio}} \sim 10^{-6} \quad \phi_{\odot} \sim 10^{-5}$$

tests "clásicos" OK al 1/1000

$$\phi_{\text{púlsar}} \sim 10^{-3}$$

test "moderno" OK al 1/100

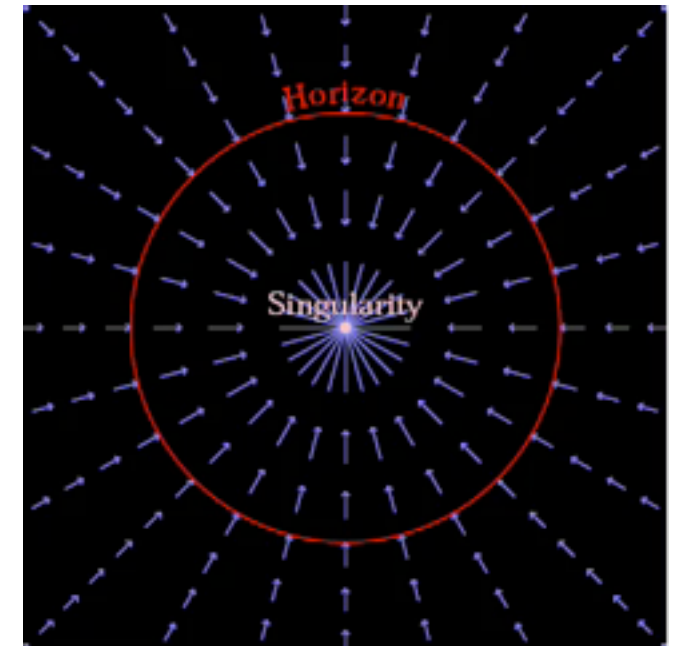
$$\phi_{\text{agujero negro}} \sim 1$$

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

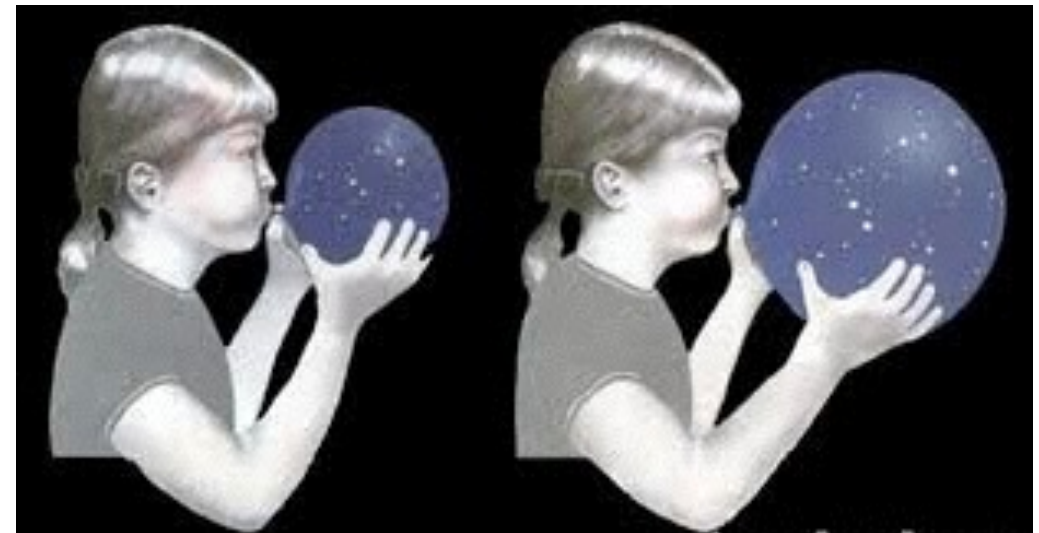
aparecen fenómenos cualitativamente nuevos

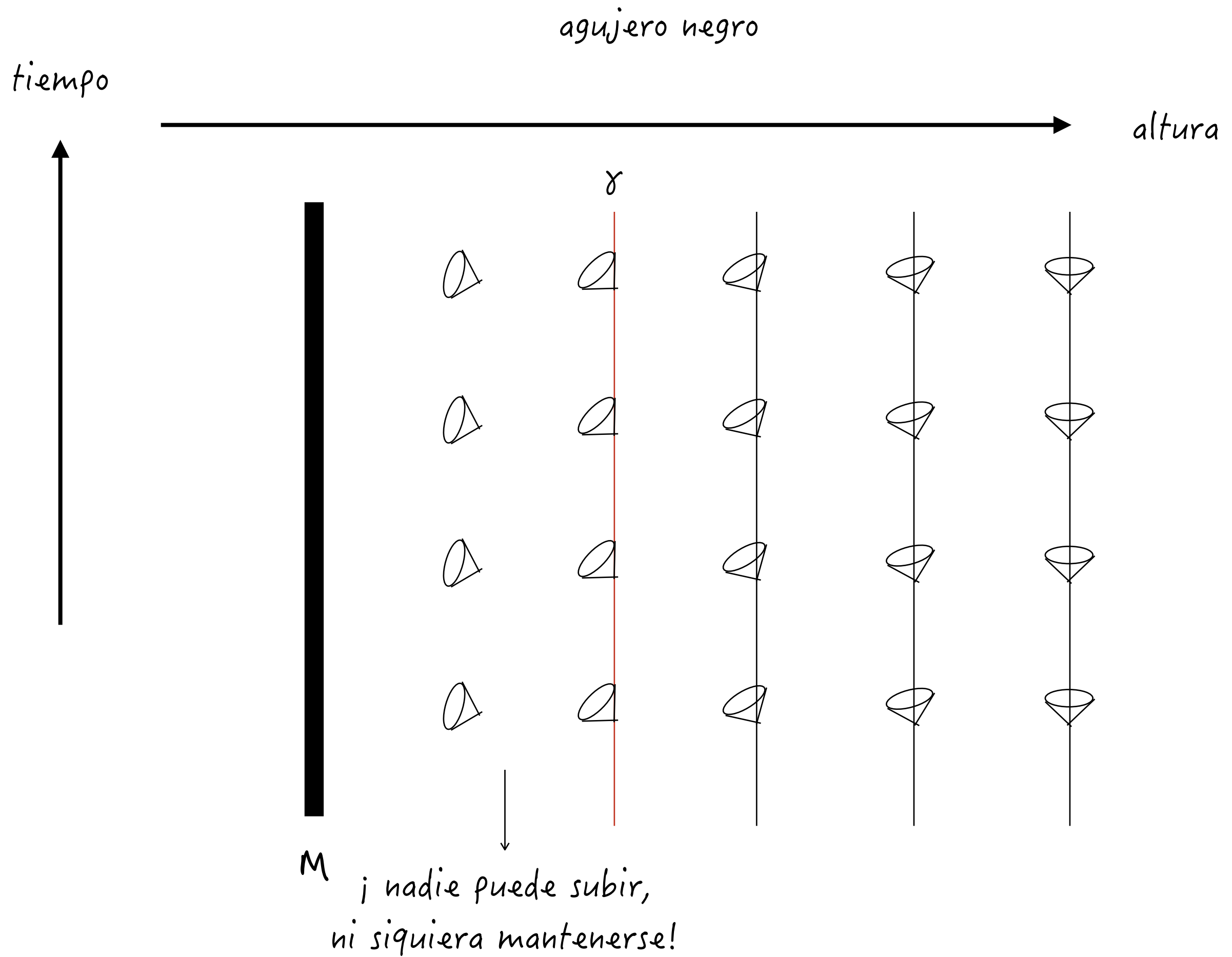
EN LOS CASOS EXTREMOS

La energía "material" positiva
tiende a contraer el espacio

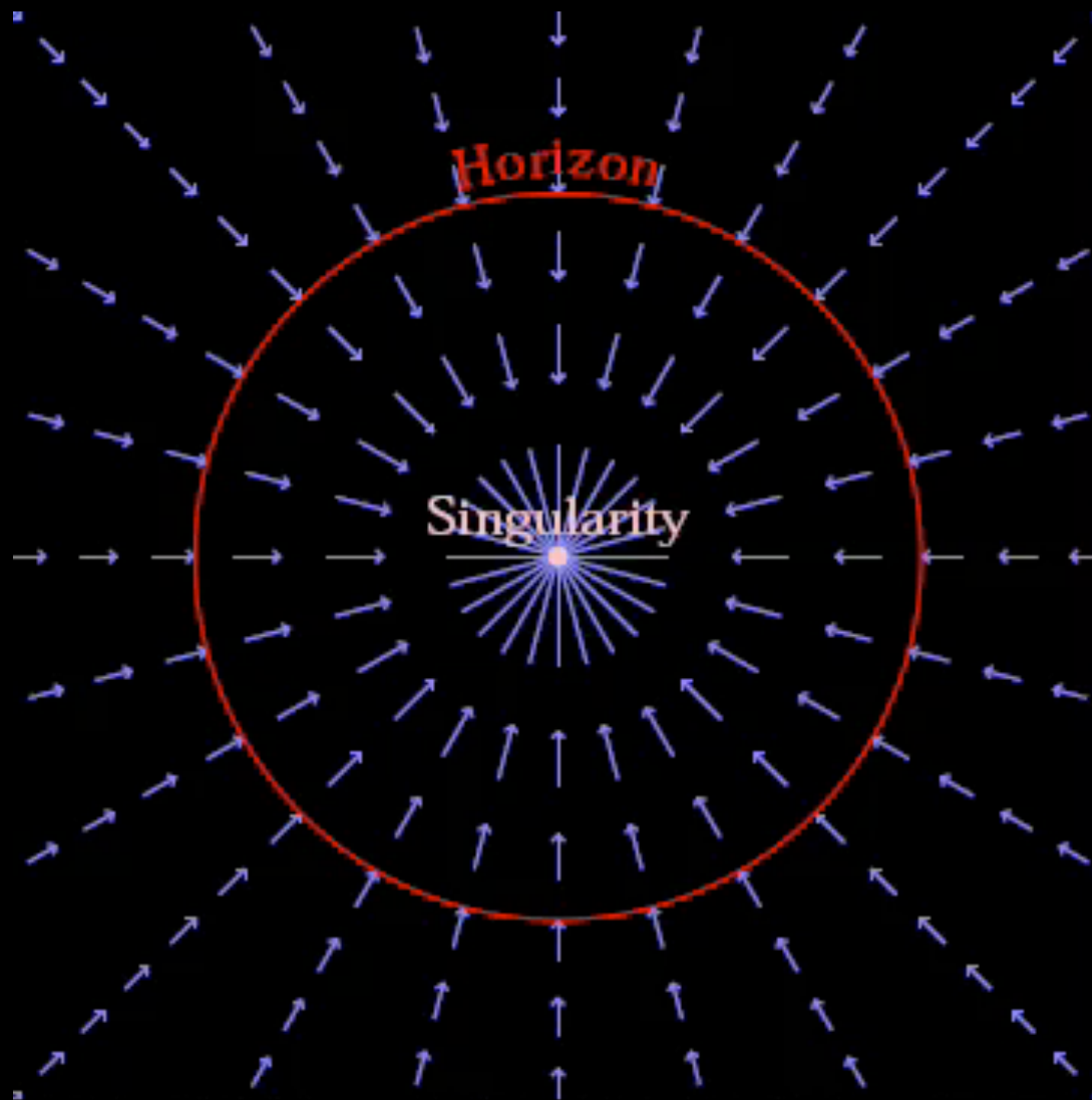


La energía de "vacío"
positiva tiende a estirar
el espacio



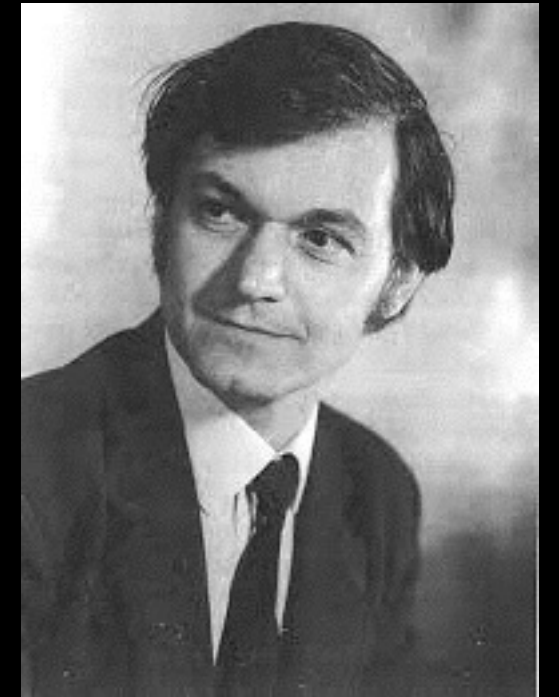
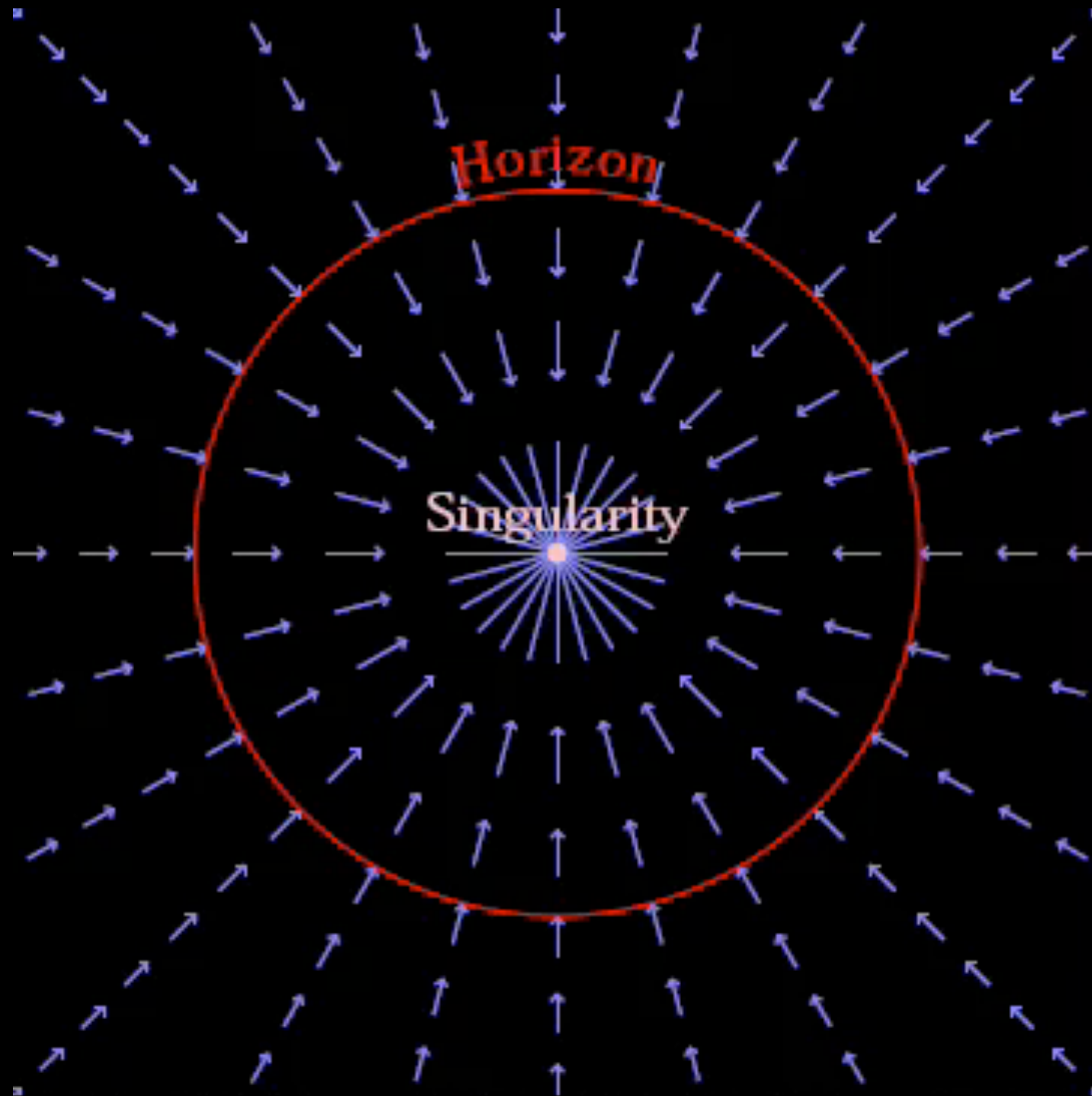


AGUJERO NEGRO



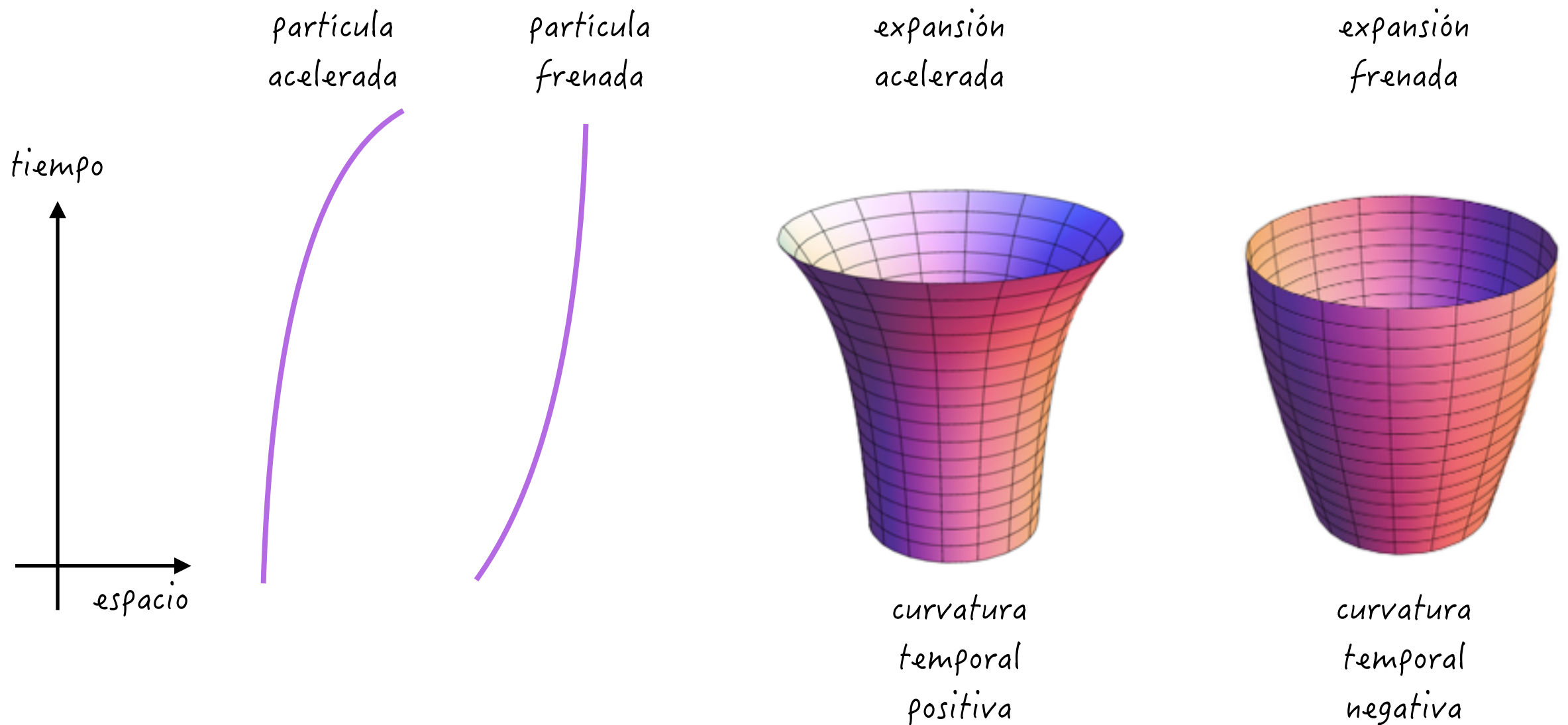
En ausencia de otras fuerzas que se opongan a la gravitación, la materia provoca la "autodestrucción" del espacio-tiempo en el interior de un "horizonte"

AGUJERO NEGRO



En ausencia de otras fuerzas que se opongan a la gravitación, la materia provoca la "autodestrucción" del espacio-tiempo en el interior de un "horizonte"

Historias de curvatura temporal

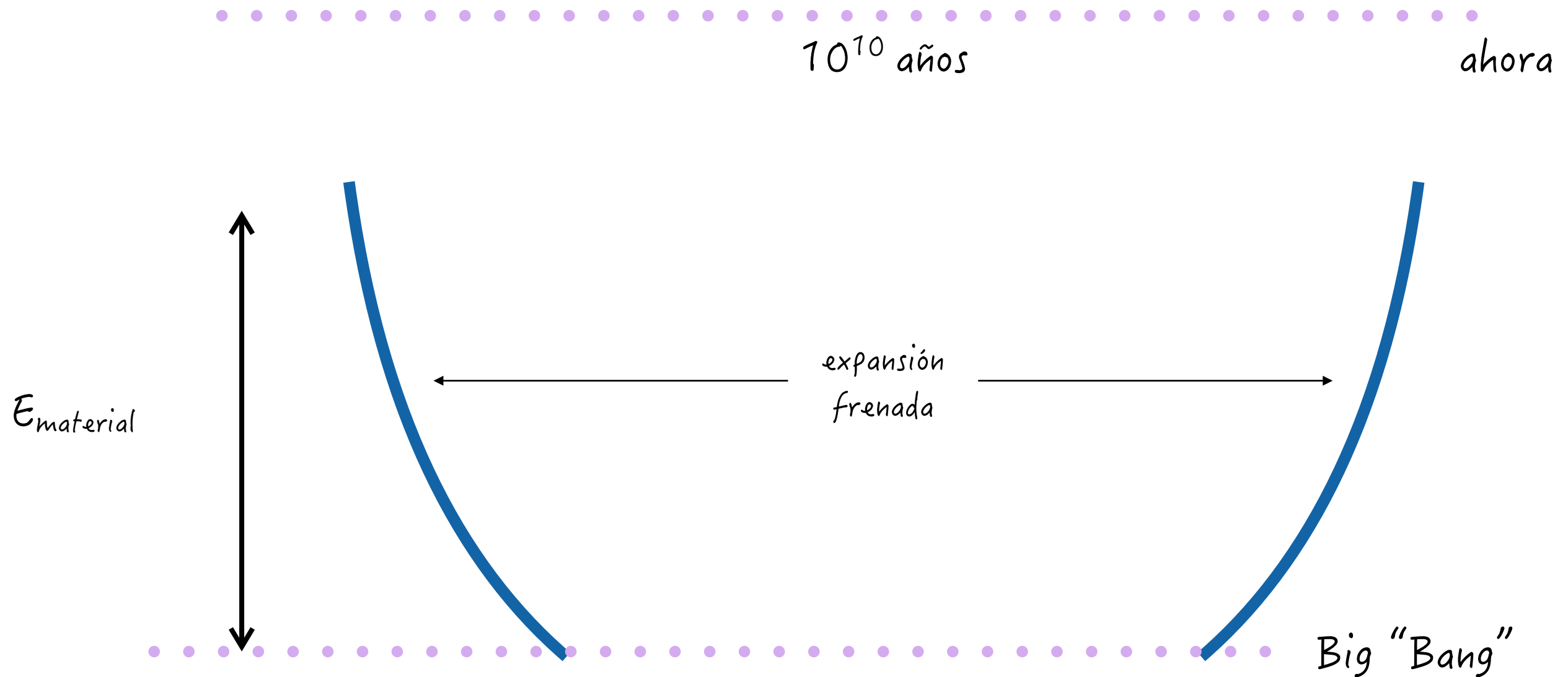


$$\text{CURVATURA}_{\text{espacio-tiempo}} = \pm (\text{ACELERACION}_{\text{espacio}})^2$$

Historia de nuestro universo



Historia de nuestro universo



Historia de nuestro universo

$E_{\text{vacío}}$

expansión
acelerada

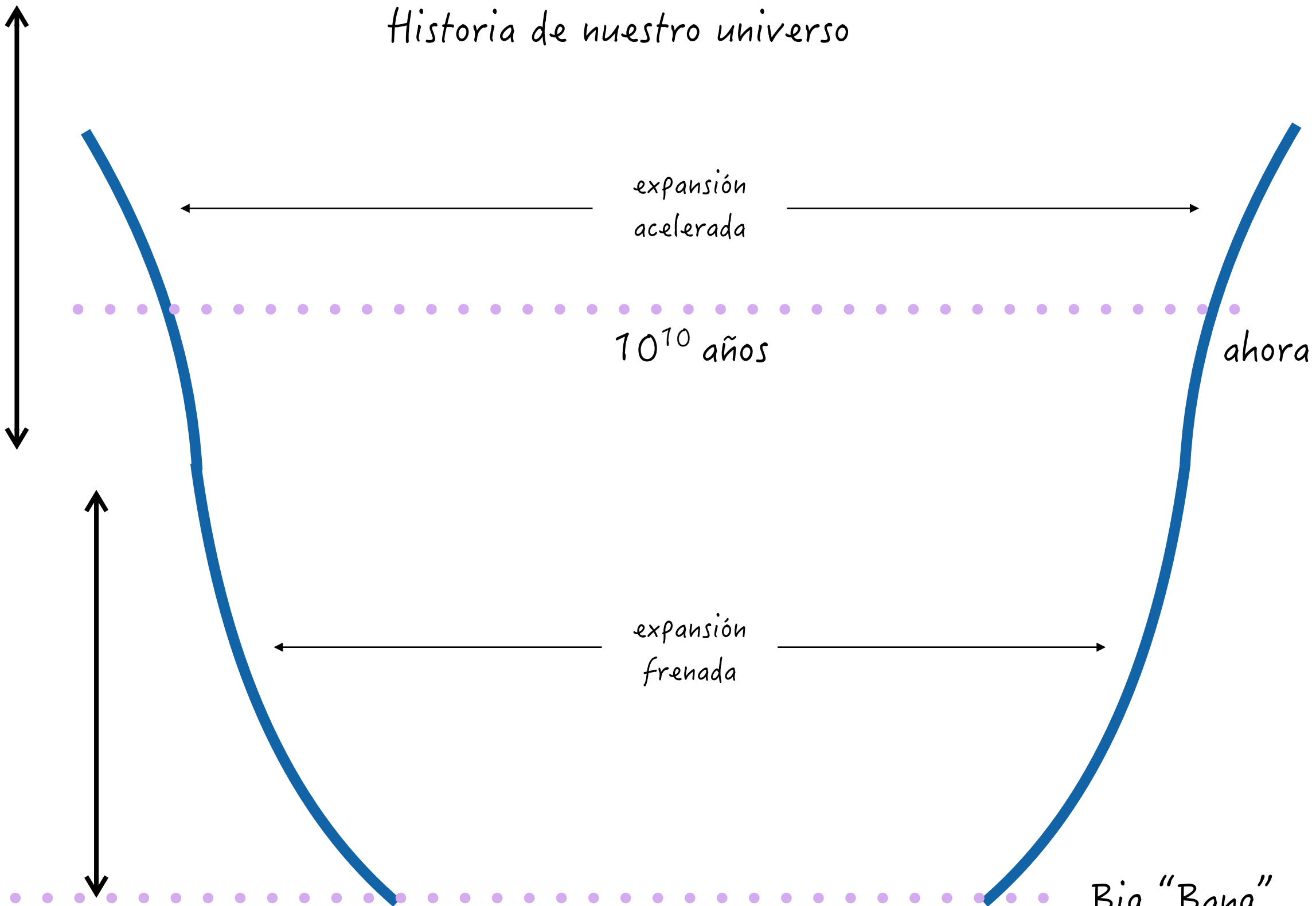
10^{10} años

ahora

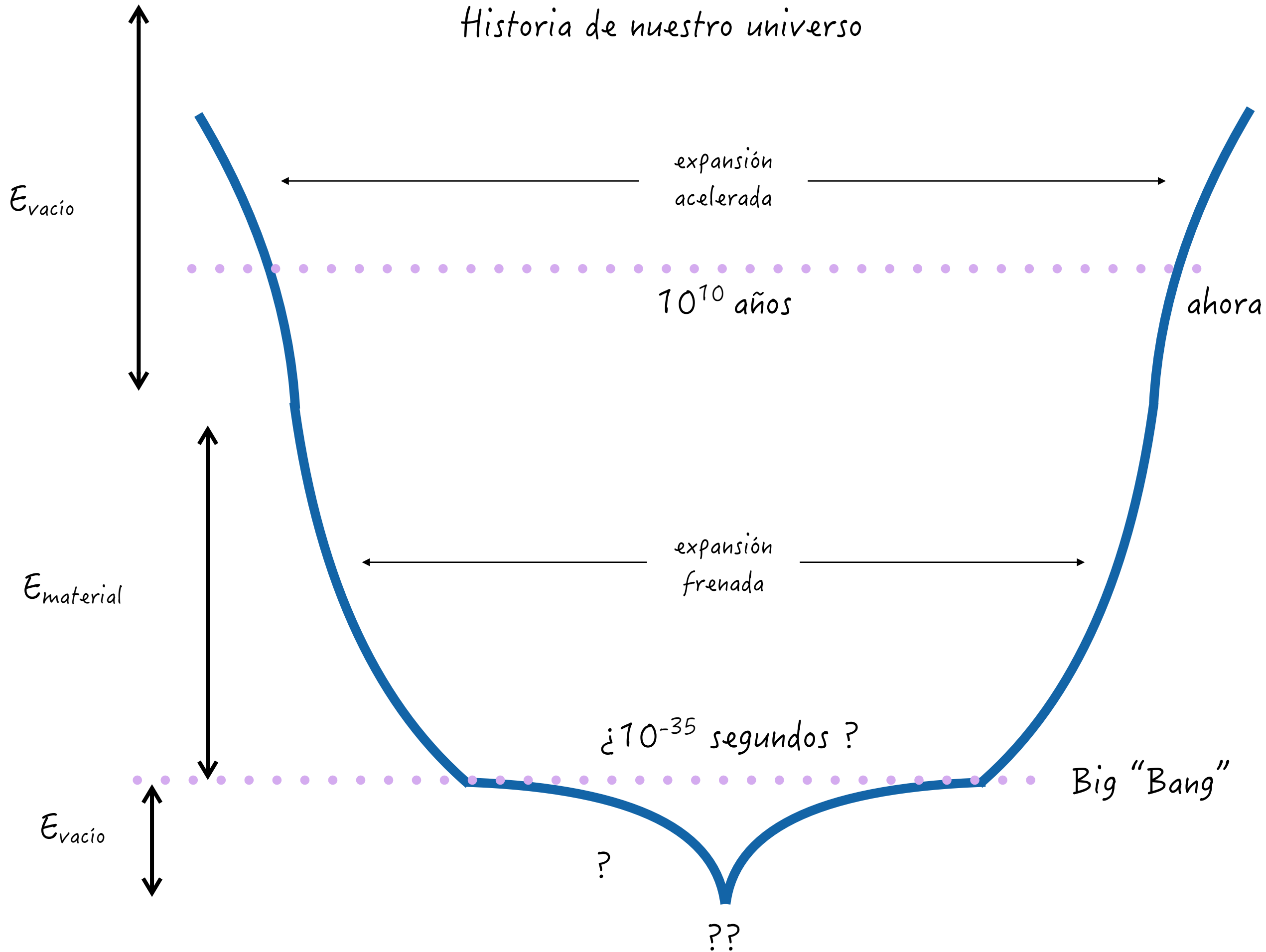
E_{material}

expansión
frenada

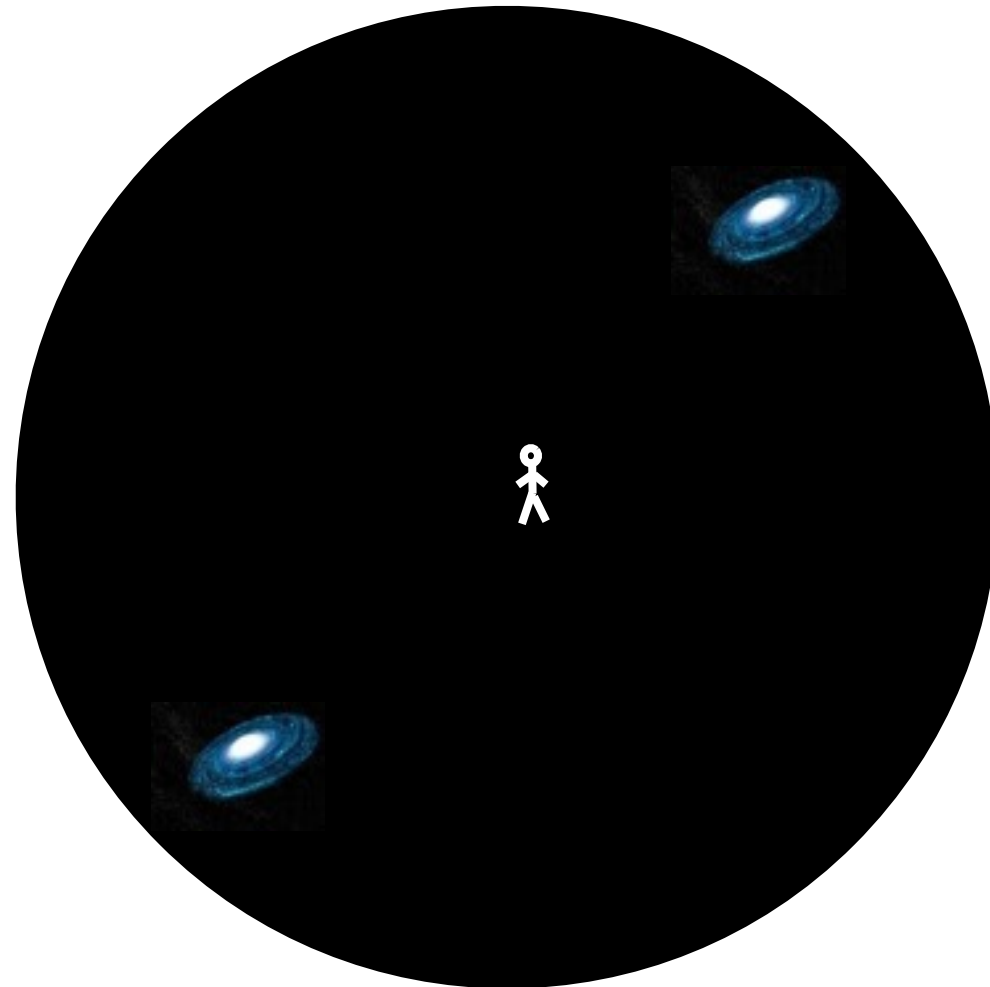
Big "Bang"



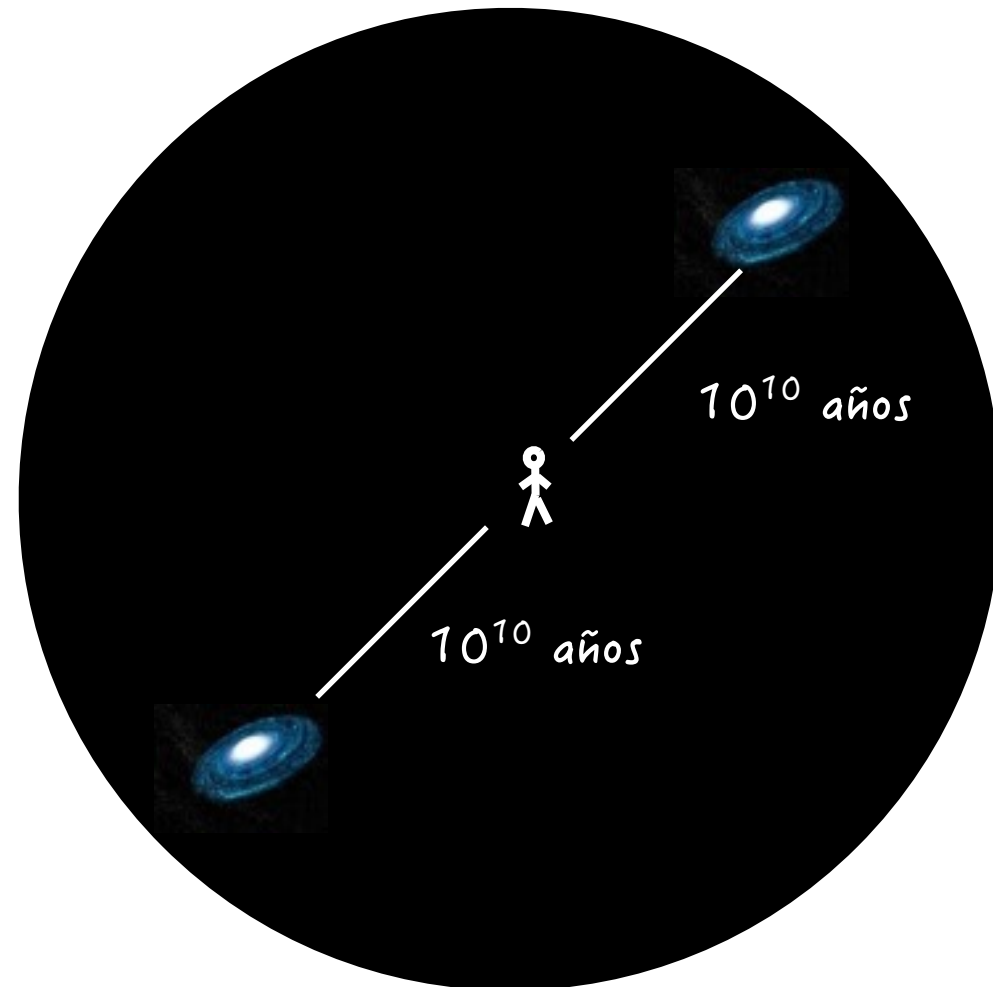
Historia de nuestro universo



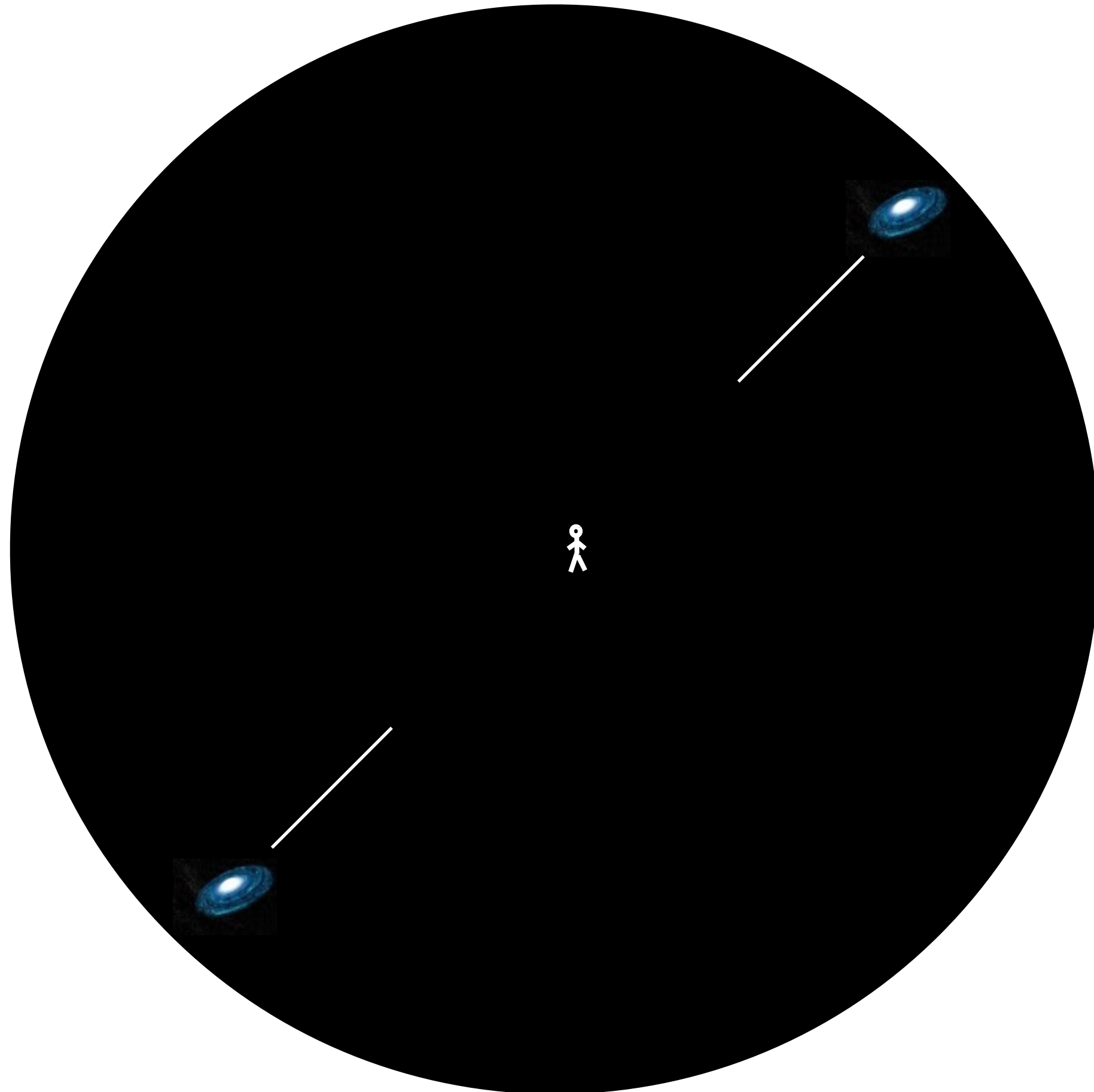
Galaxias a 10^{10} años luz de nosotros



Galaxias a 10^{10} años luz de nosotros

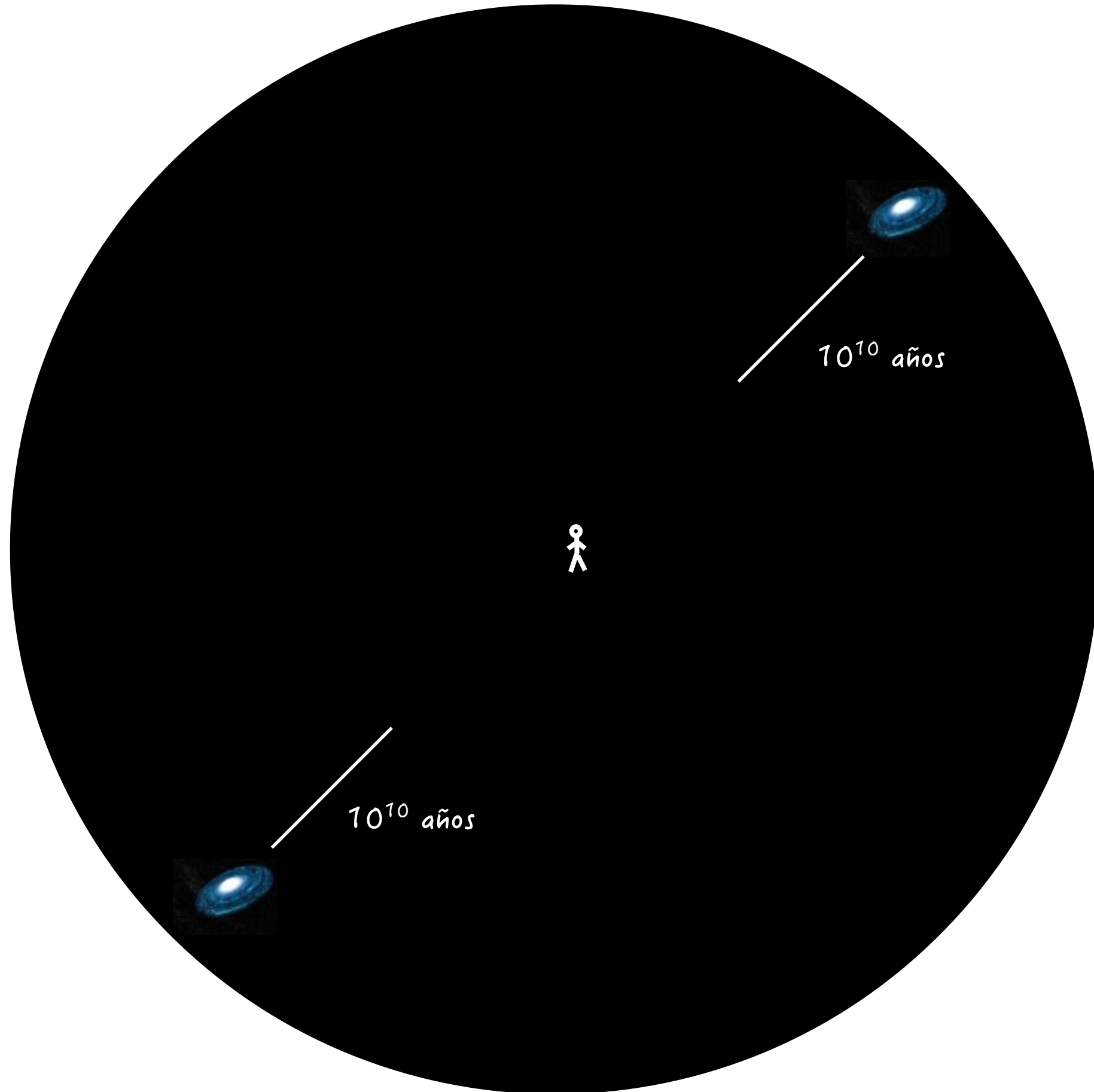


Si la "cantidad de espacio" se dobla cada 10^{10} años

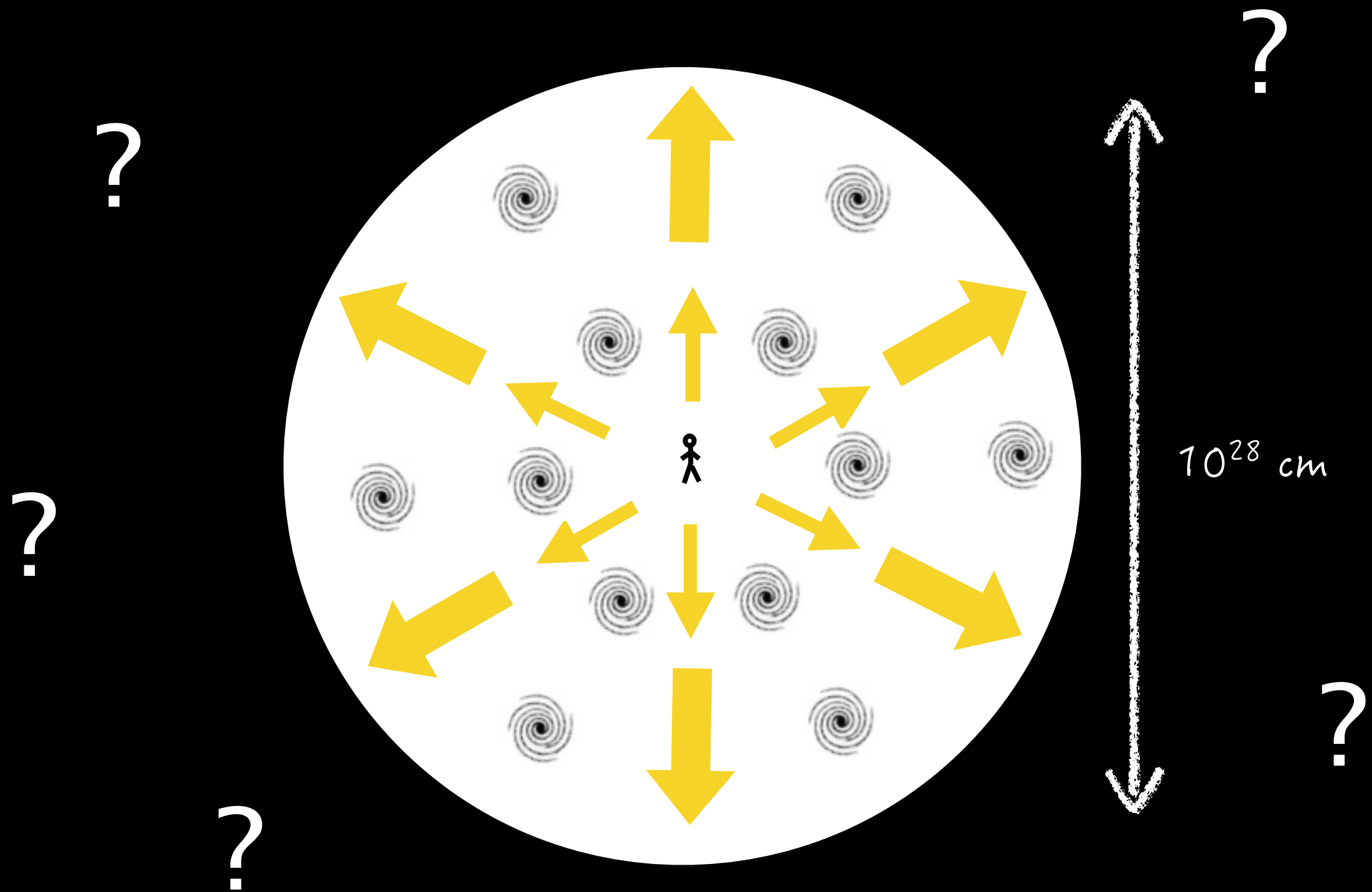


la luz nunca llegará

Si la "cantidad de espacio" se dobla cada 10^{10} años



la luz nunca llegará



En un Universo dominado por energía de vacío positiva, no hay singularidad pero
sí un "horizonte envolvente"

EPILOGO



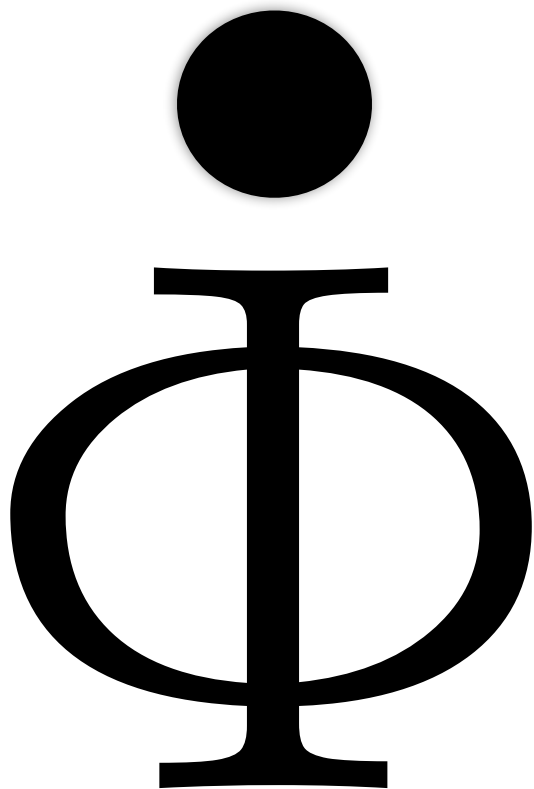
¿DONDE ESTA SU PUNTO DEBIL?

Φ

LOCALIDAD

RELATIVIDAD

CUANTICA

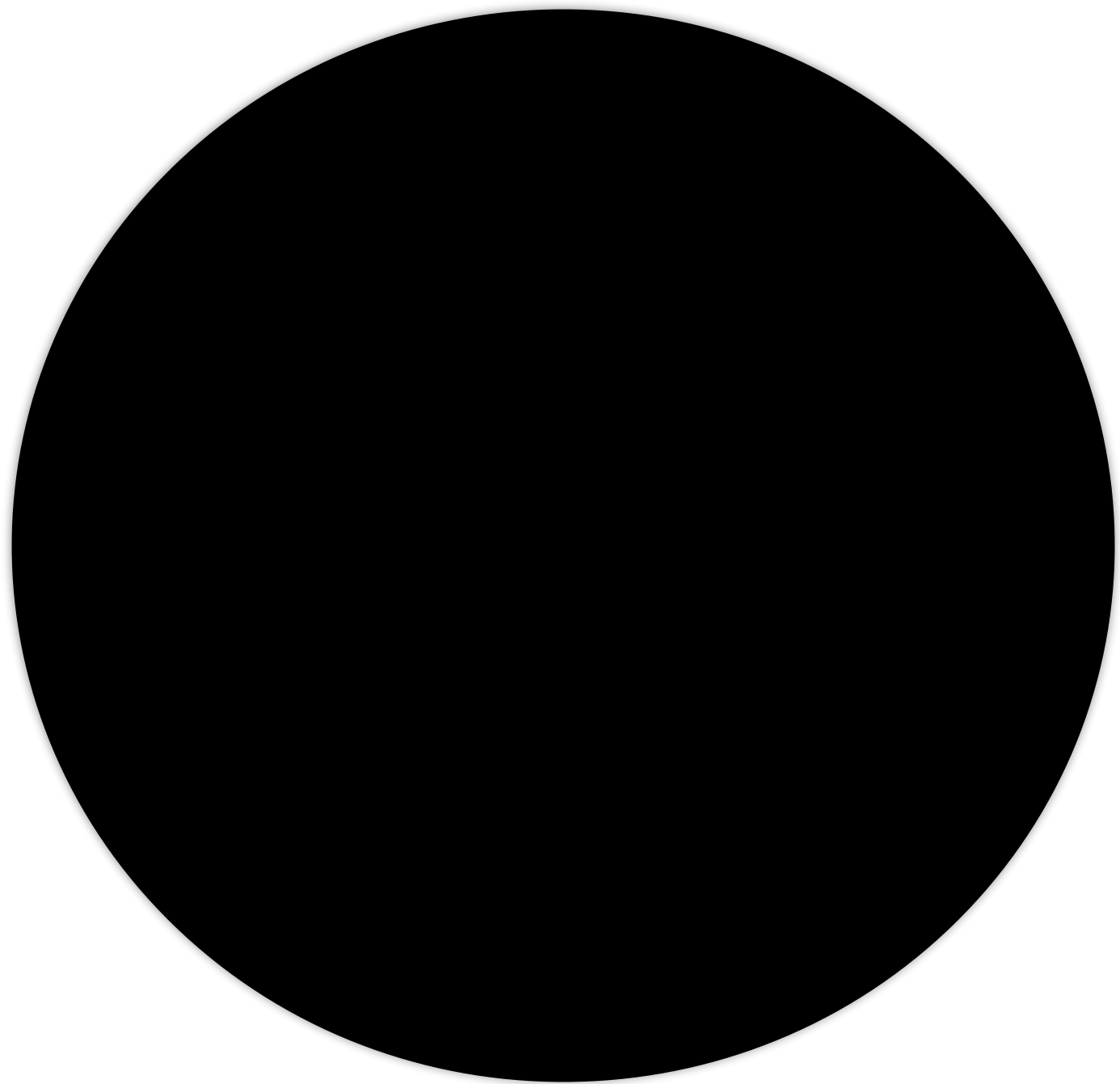


LOCALIDAD

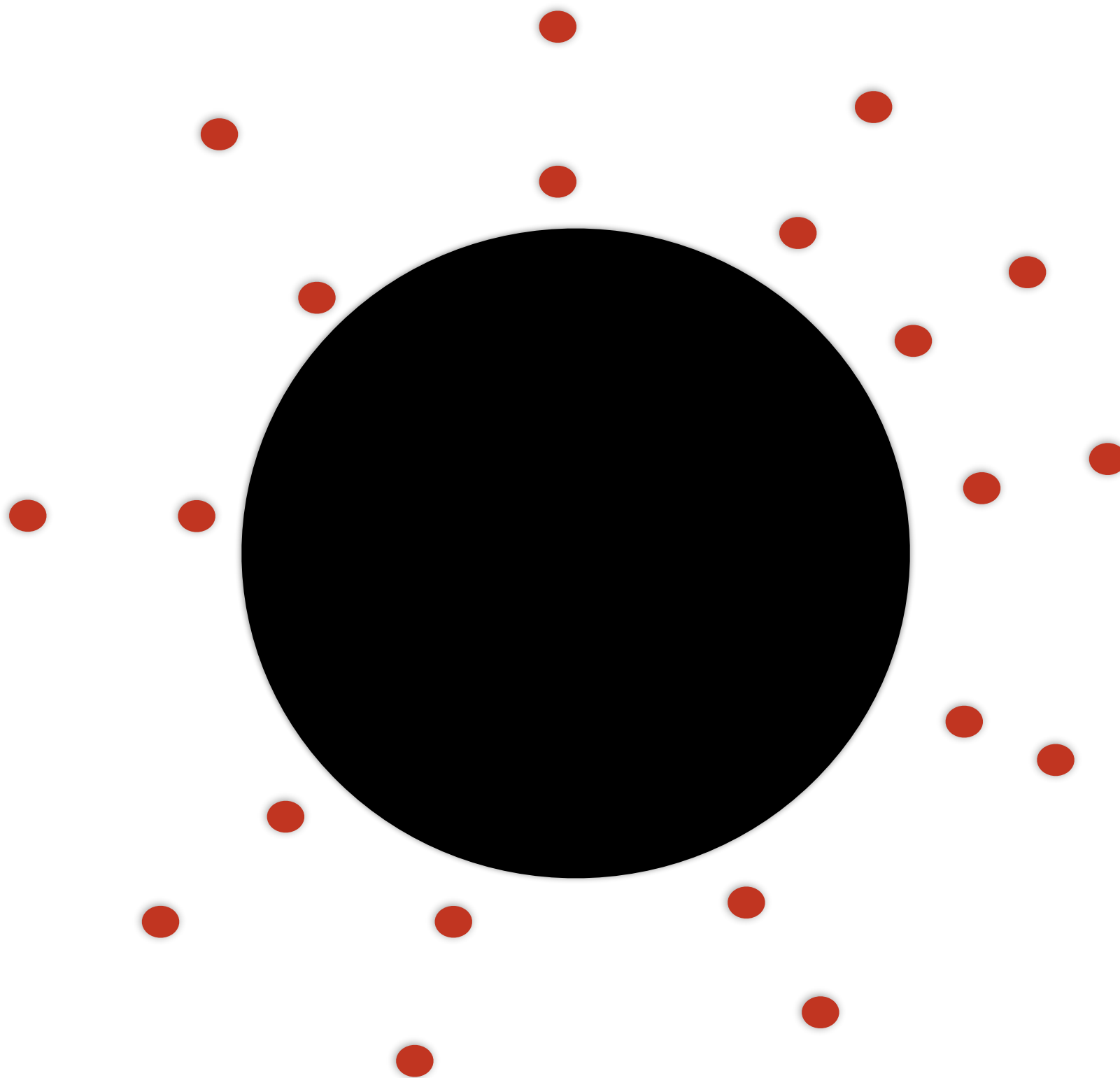
RELATIVIDAD

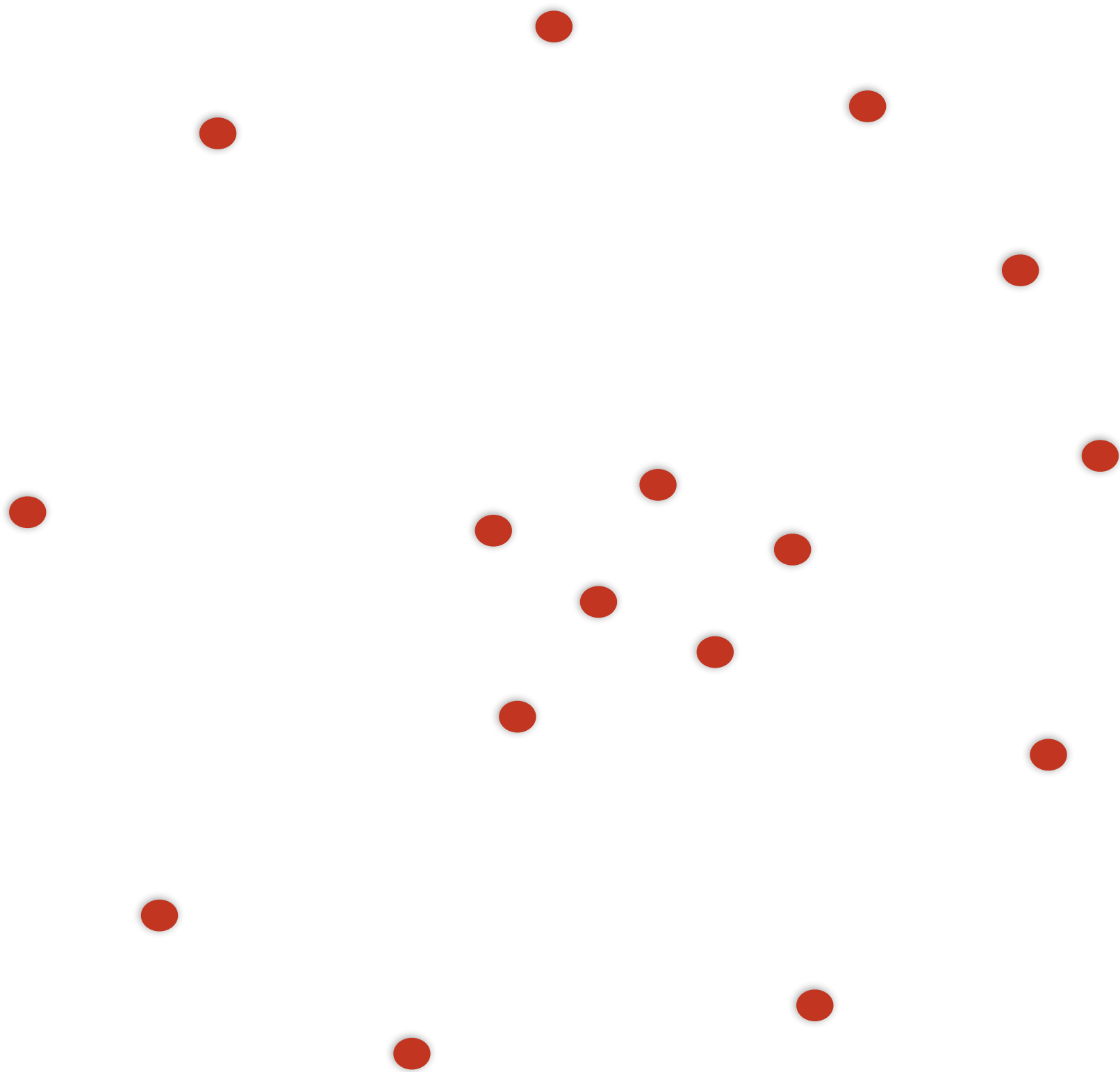
CUANTICA

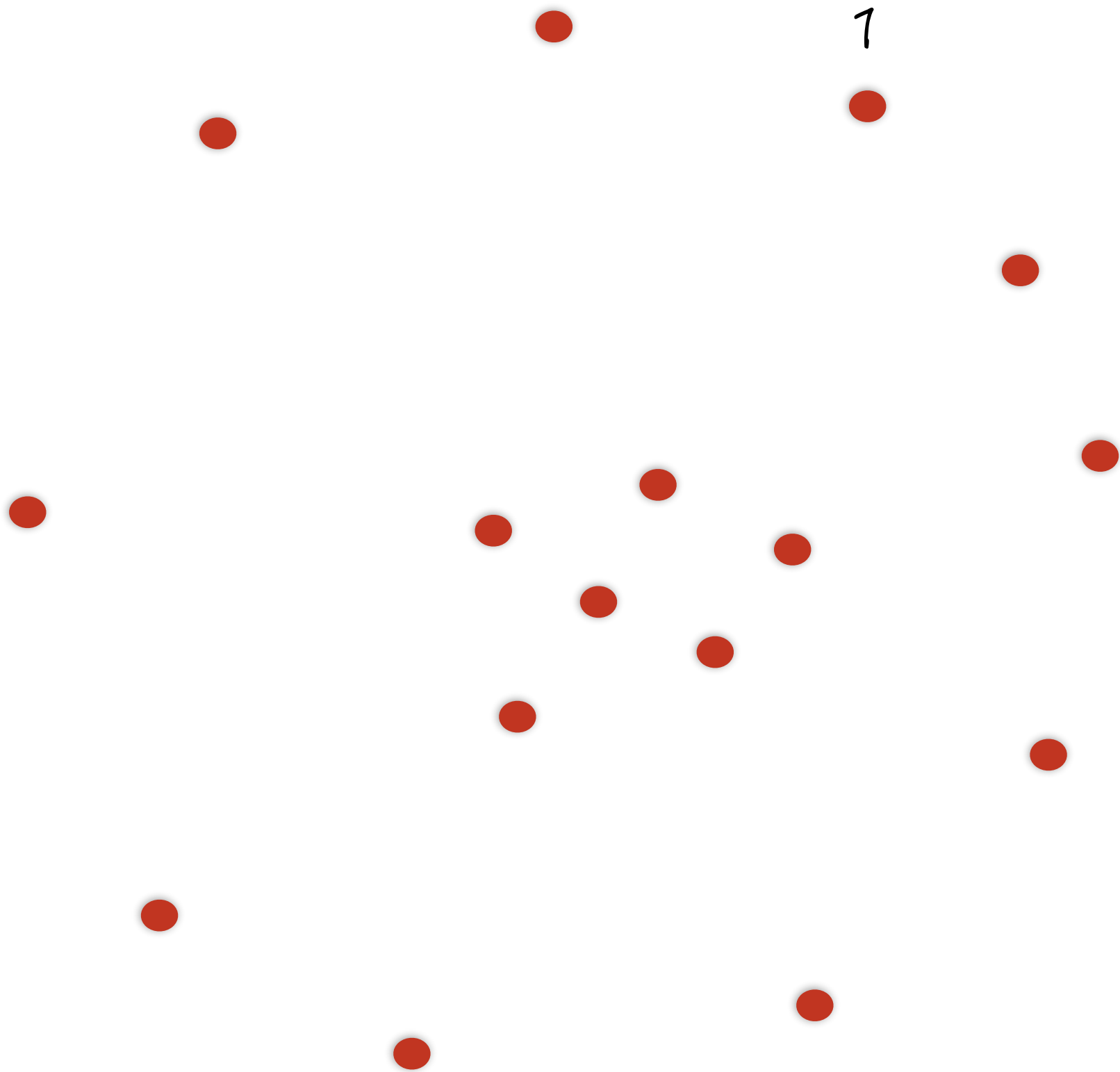


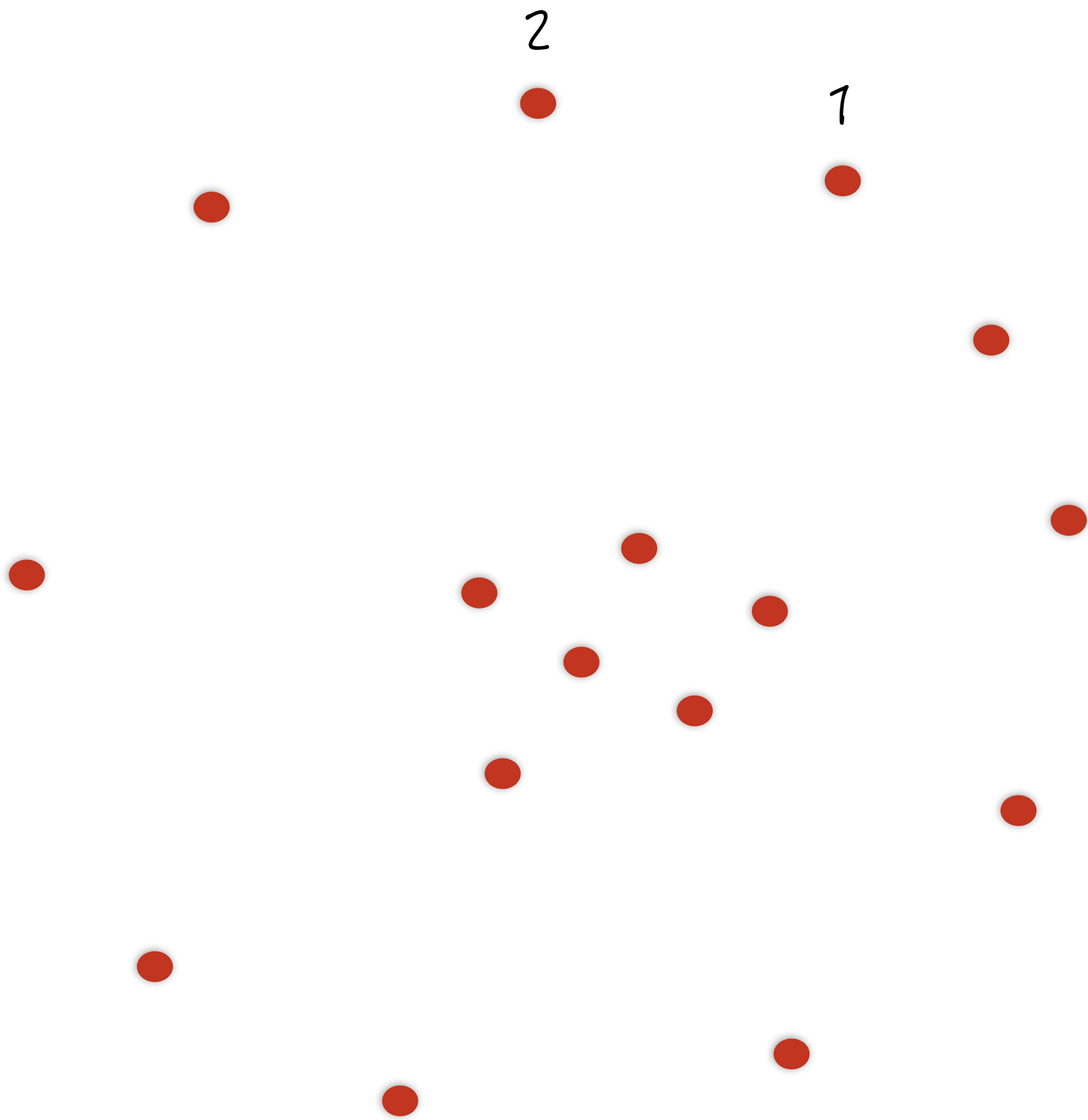


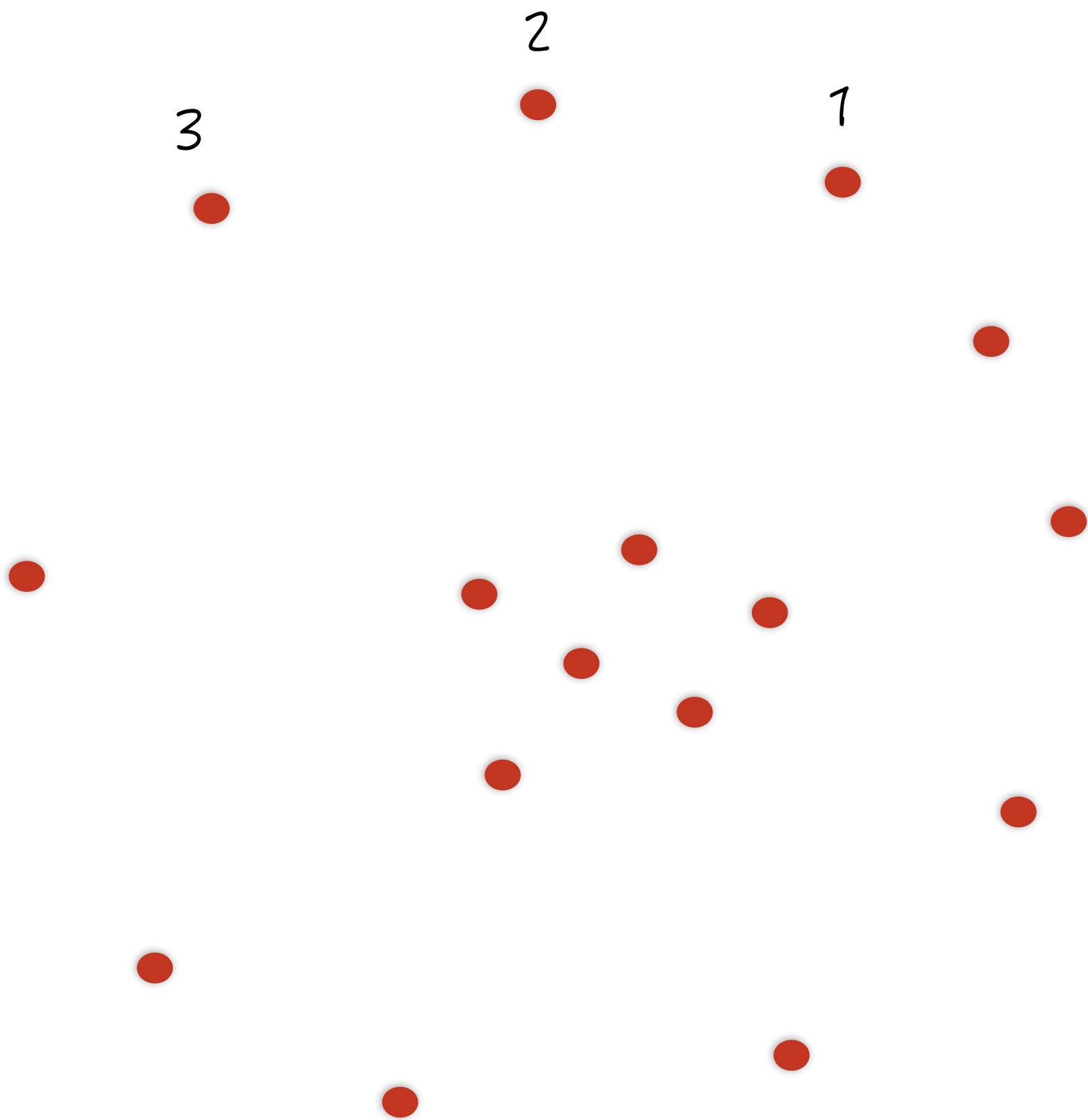


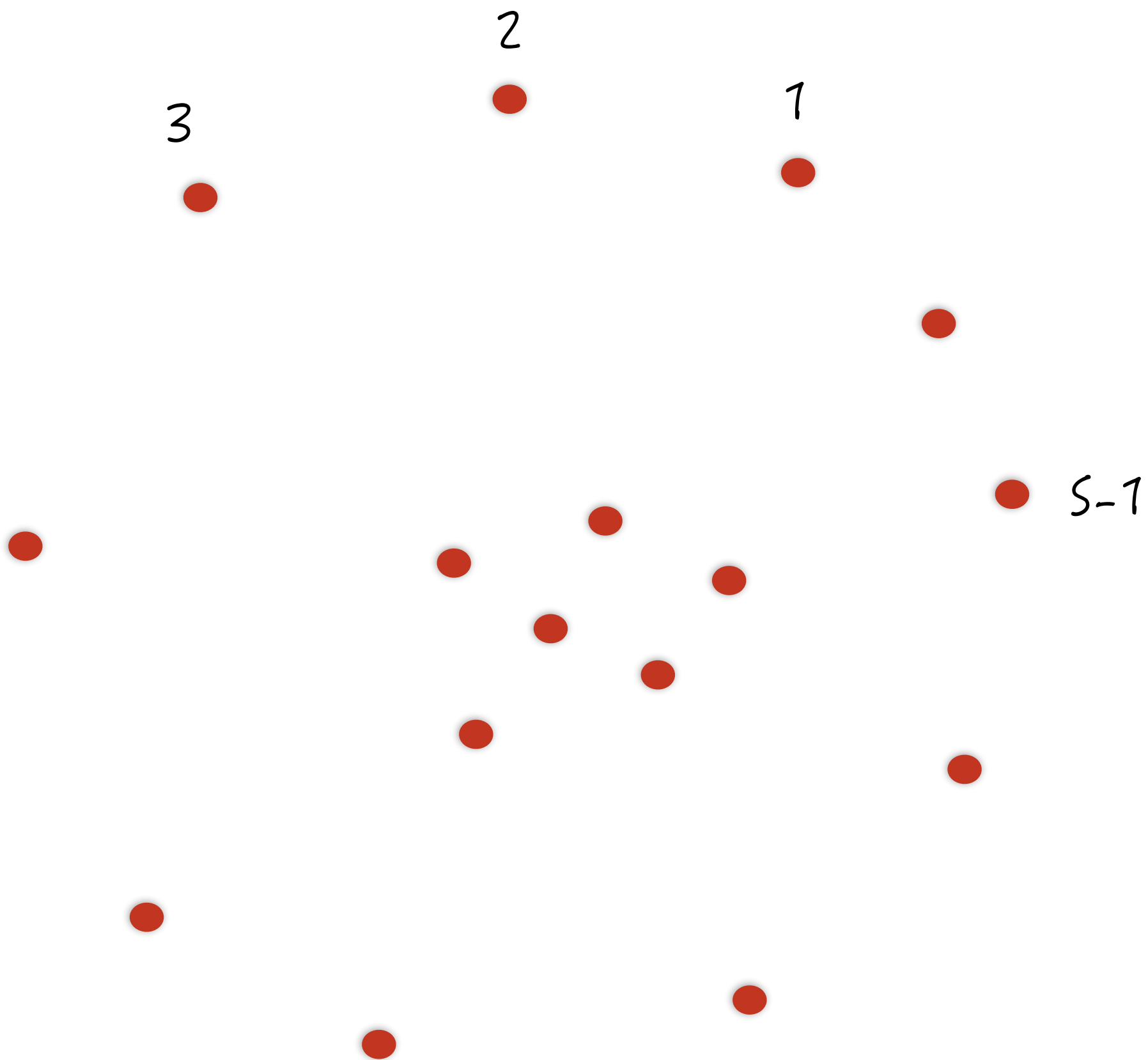


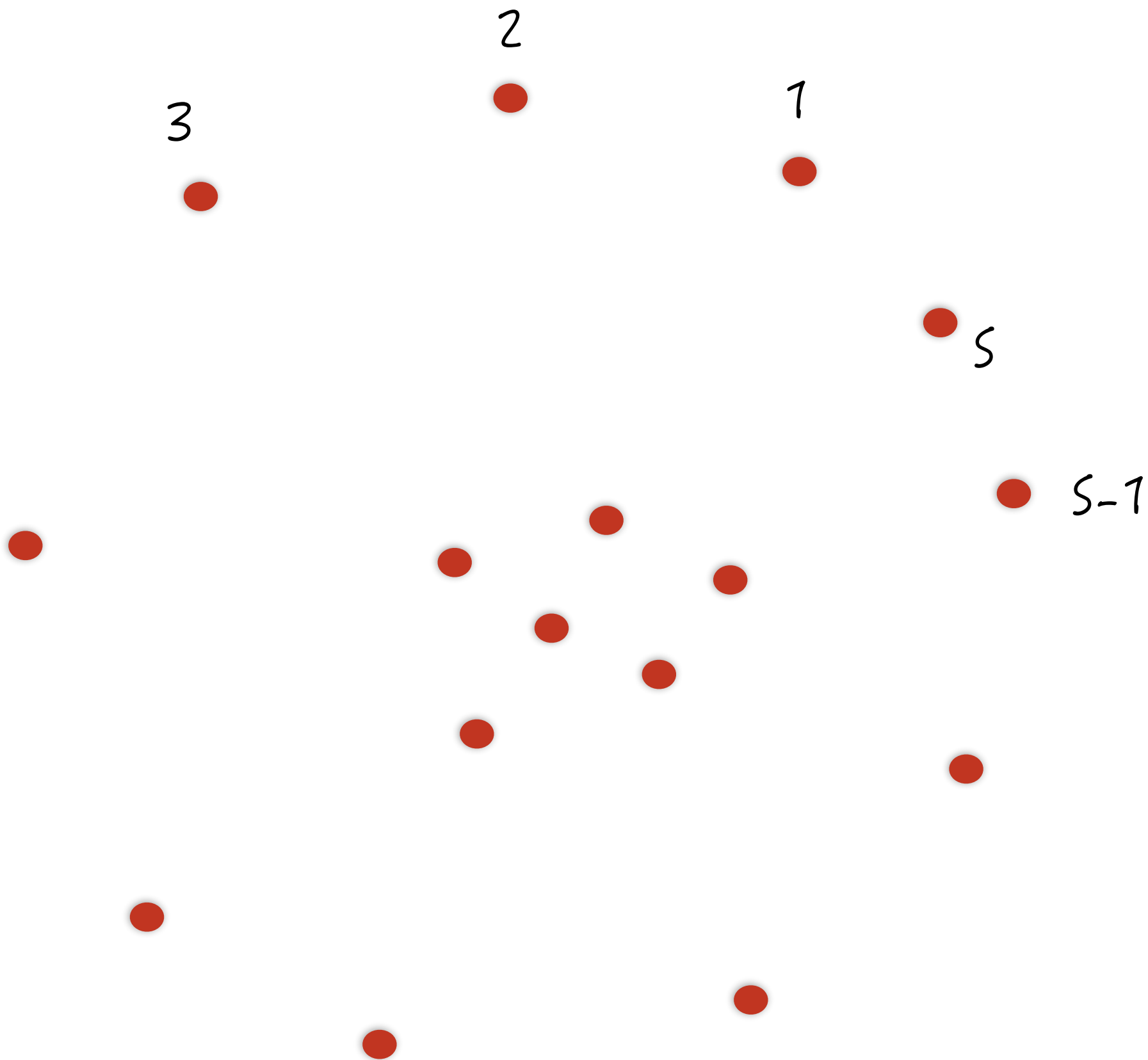






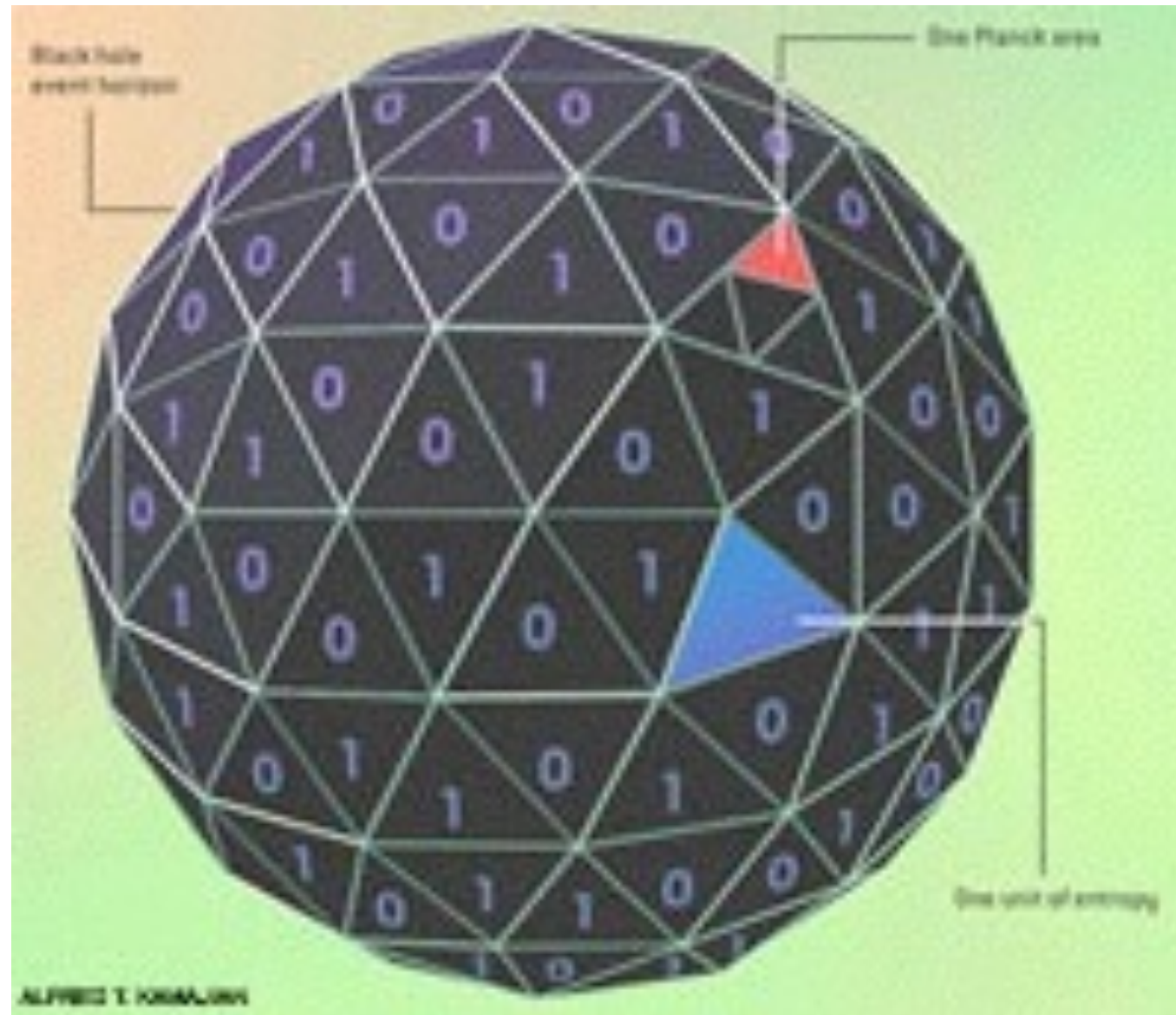






$$S \sim \text{Entropía} = \frac{\text{Área agujero}}{4G}$$

$$S \sim \text{Entropía} = \frac{\text{Área agujero}}{4G}$$



...si el interior del espacio-tiempo fuera emergente?



EL PRINCIPIO HOLOGRAFICO

pase lo que pase en los próximos 100 años,
siempre será recordada ...



*pase lo que pase en los próximos 100 años,
siempre será recordada ...*



como la joya de las clásicas