

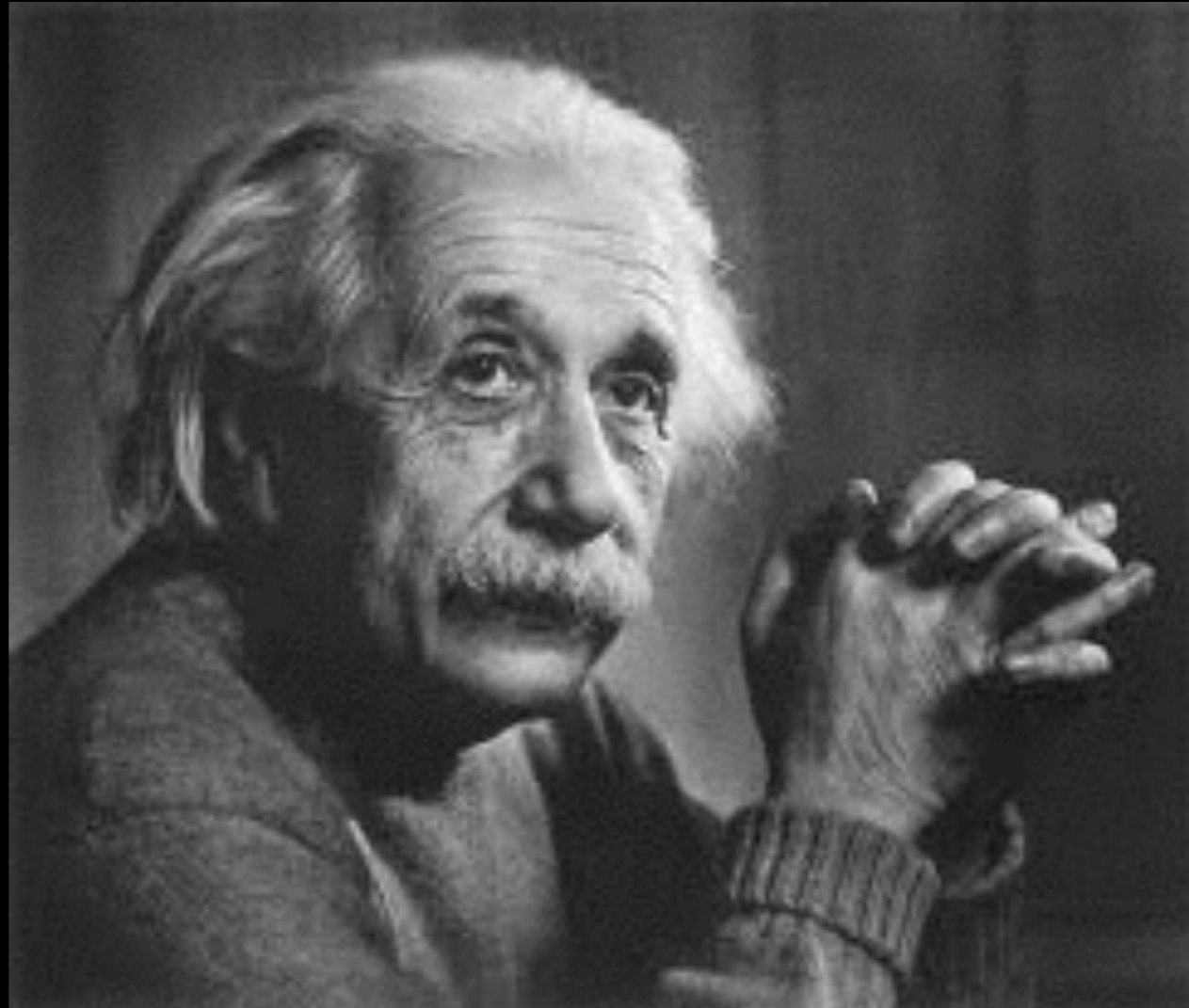
ESPACIOTIEMPO

de los agujeros negros a la
expansión del universo

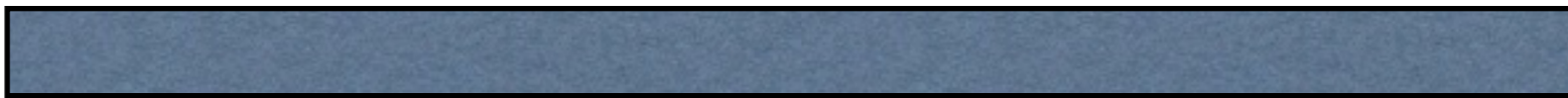
J.L.F. Barbón



Instituto de
Física
Teórica



Φ



RELATIVIDAD

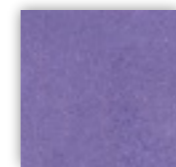
CUANTICA

espaciotiempo

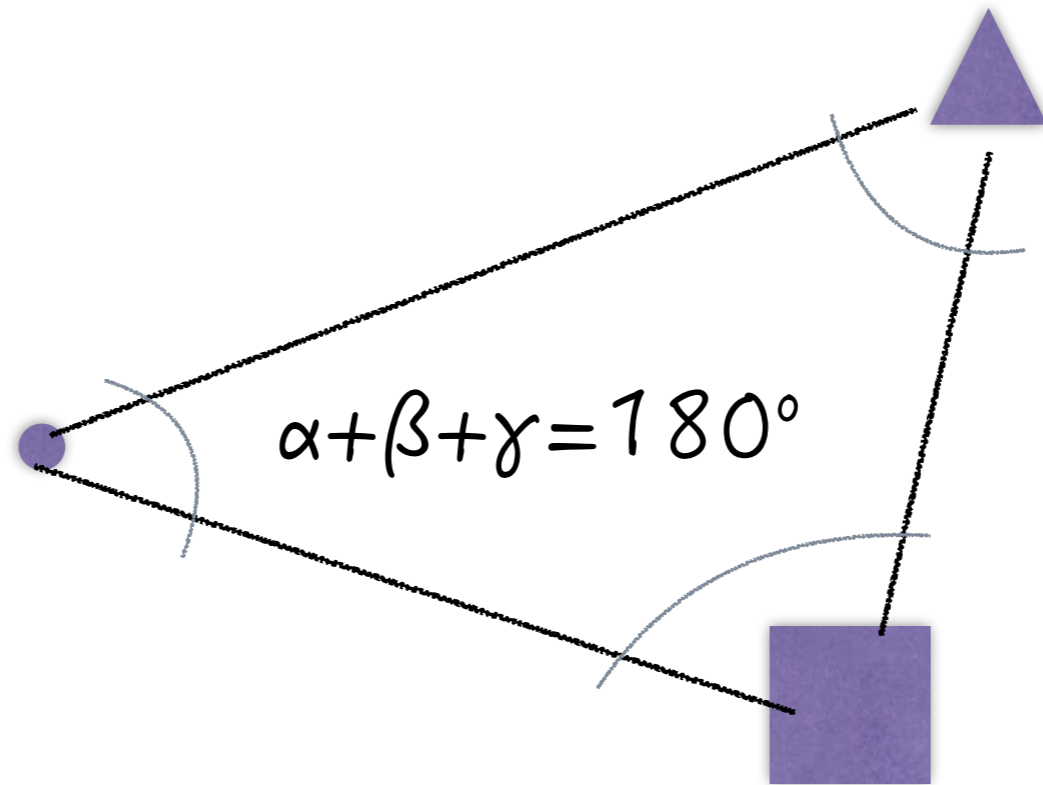
particulas

ESPACIO

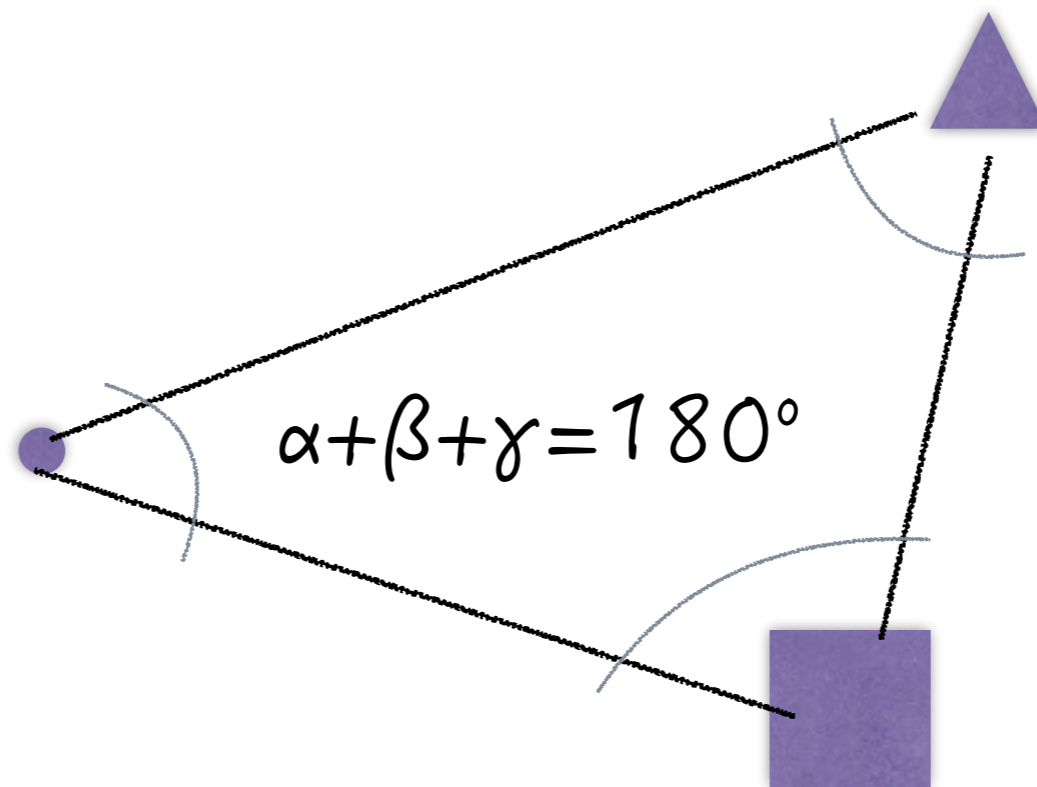
ESPACIO



ESPACIO

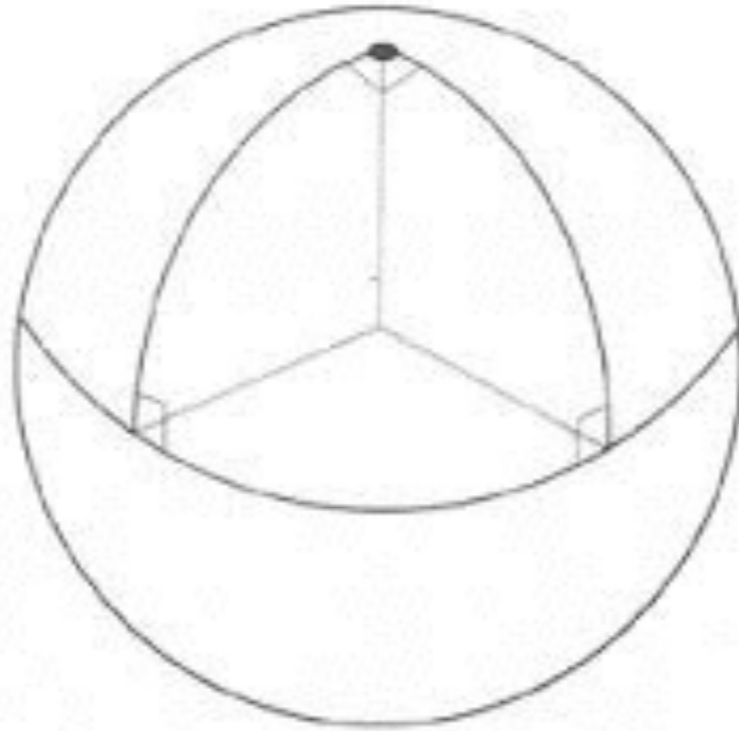


ESPACIO



Estructura del espacio = GEOMETRIA

PERO ...

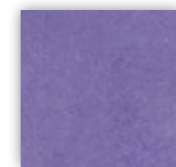


$$\alpha + \beta + \gamma > 180^\circ$$

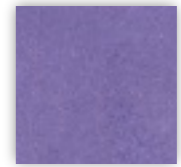
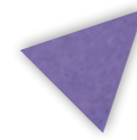
La geometría del espacio físico
es una cuestión experimental

TIEMPO

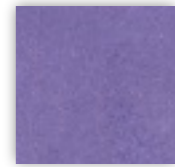
TIEMPO



TIEMPO

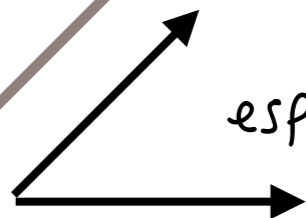
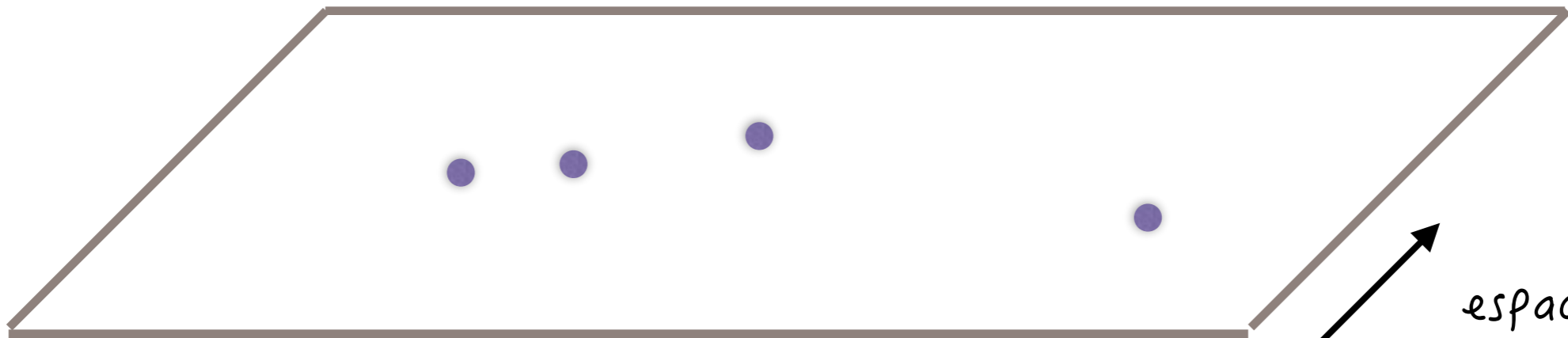


TIEMPO



La estructura del tiempo es la DINAMICA

tiempo

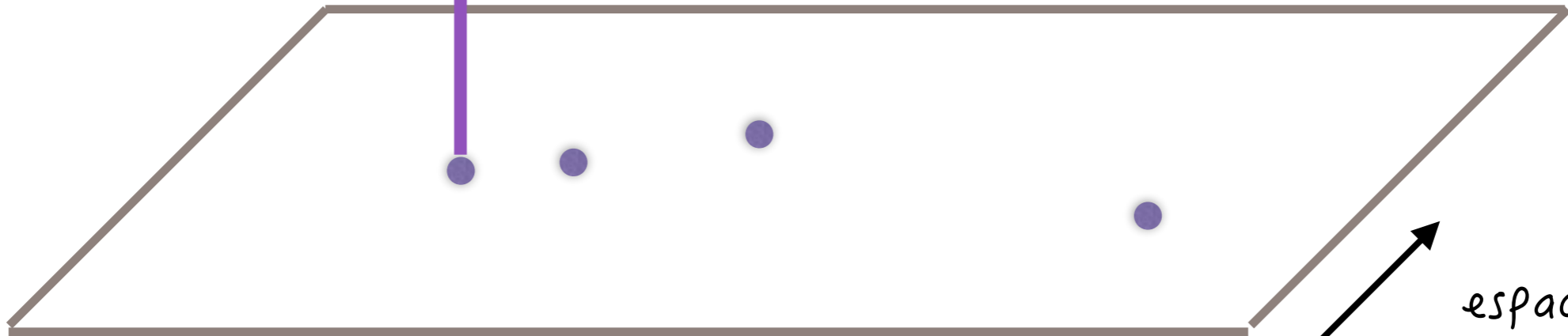


espacio

ESPACIO - TIEMPO

tiempo

parado



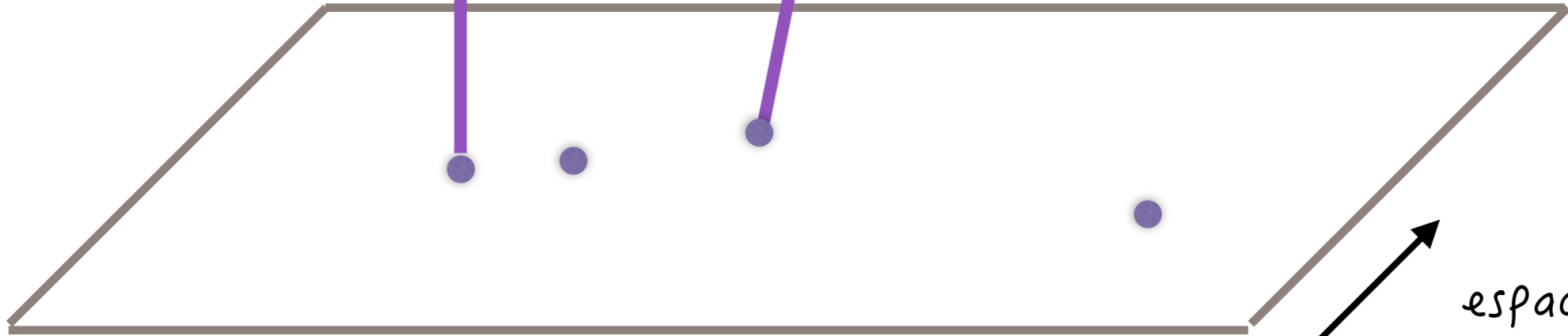
espacio

ESPACIO - TIEMPO

tiempo

parado

uniforme



espacio

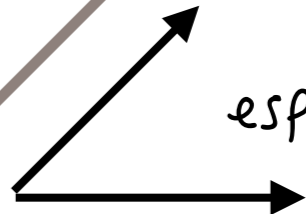
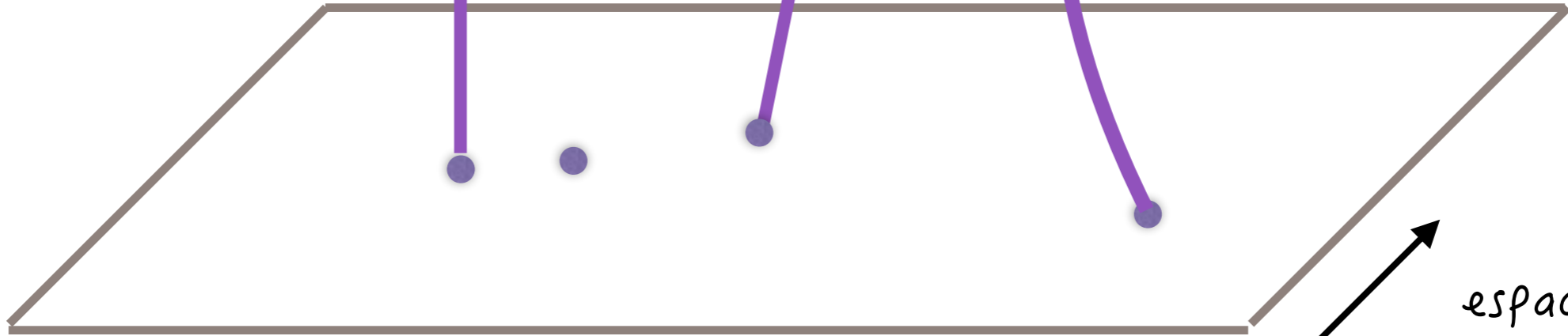
ESPACIO - TIEMPO

tiempo

parado

uniforme

acelerado



espacio

ESPACIO - TIEMPO

tiempo

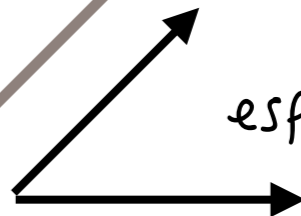
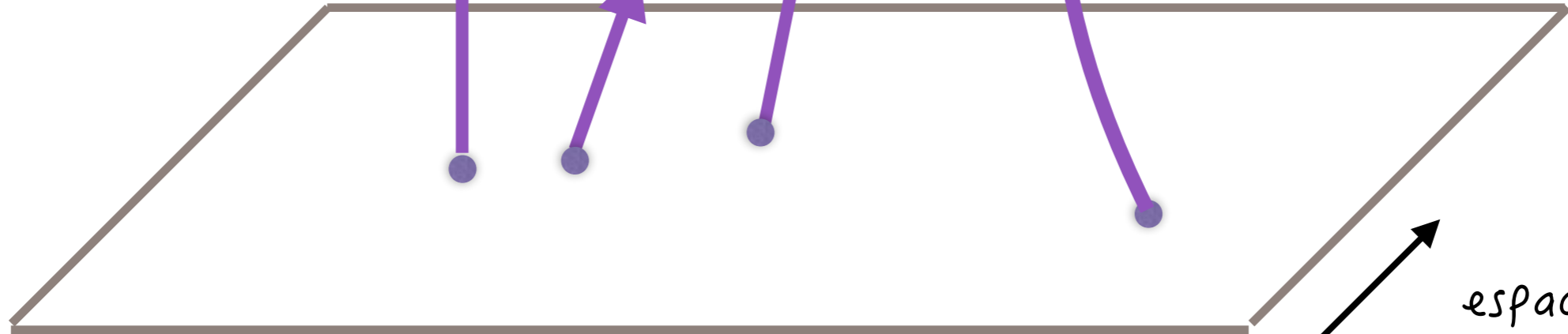
parado

uniforme

acelerado

espacio

ESPACIO - TIEMPO



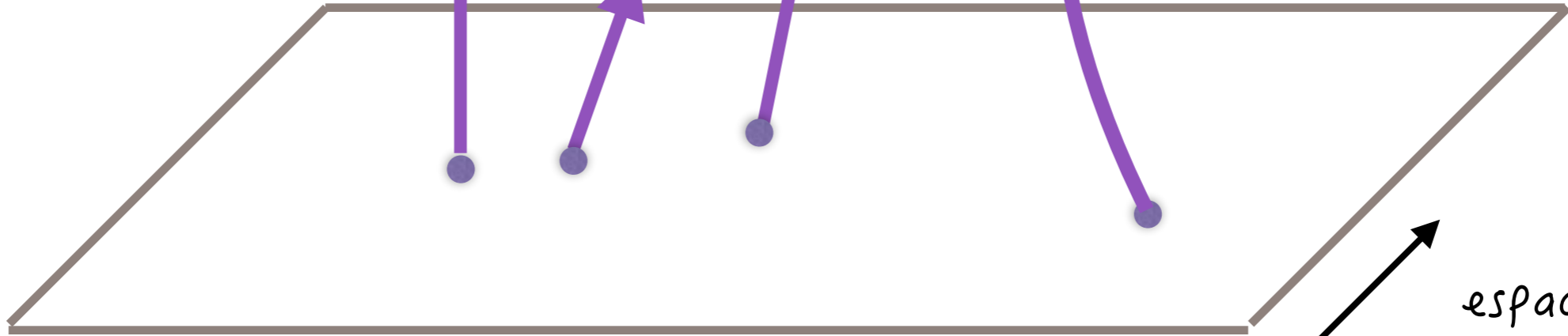
tiempo

¡reloj!

parado

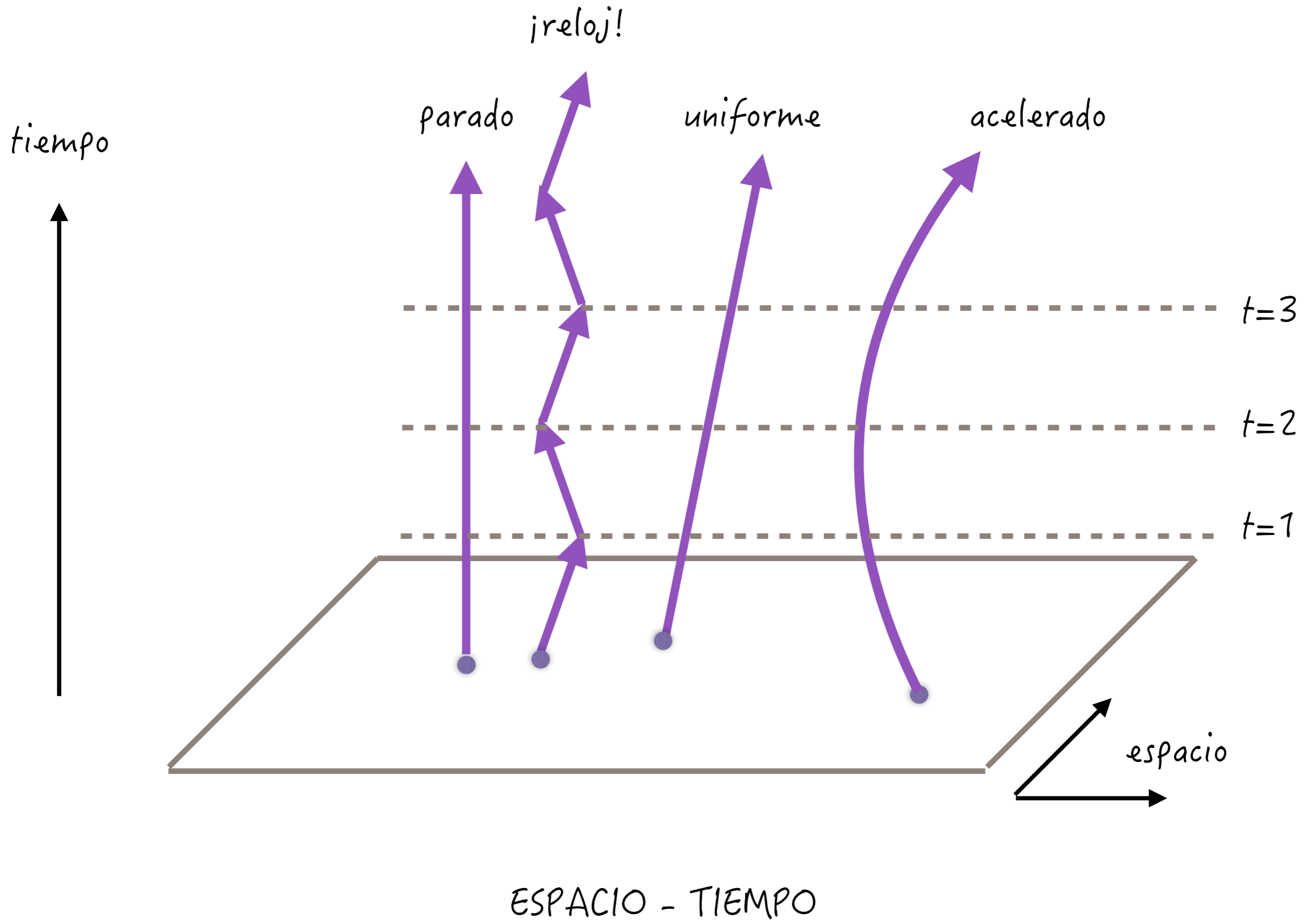
uniforme

acelerado



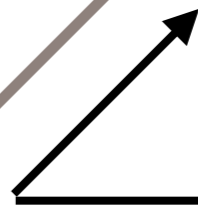
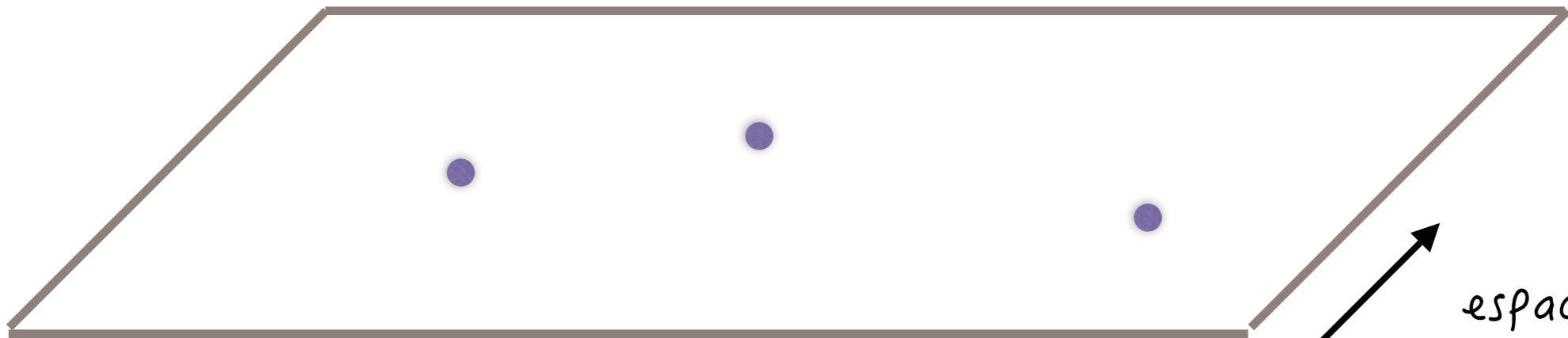
espacio

ESPACIO - TIEMPO



ARISTOTELES

tiempo



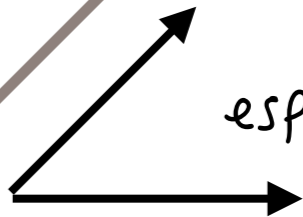
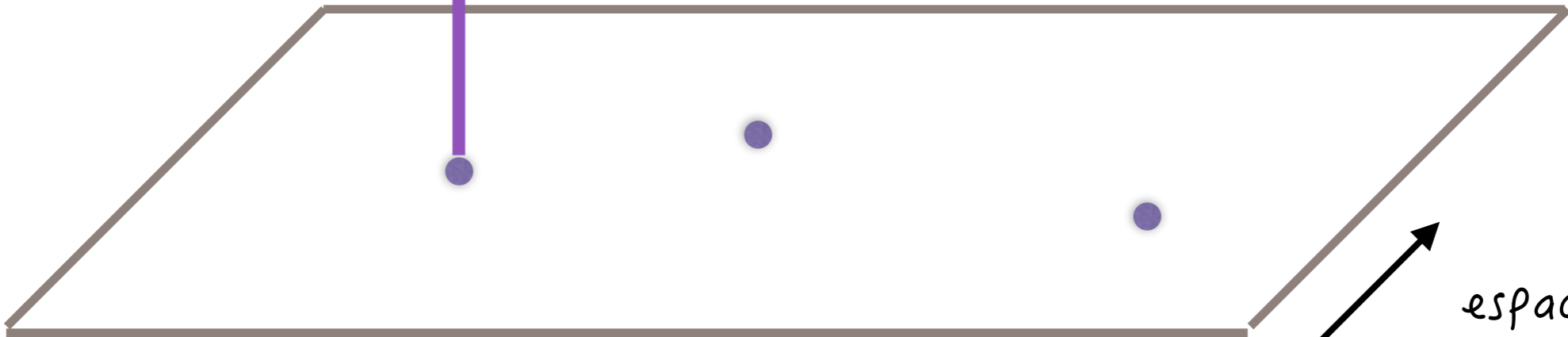
espacio

ARISTOTELES

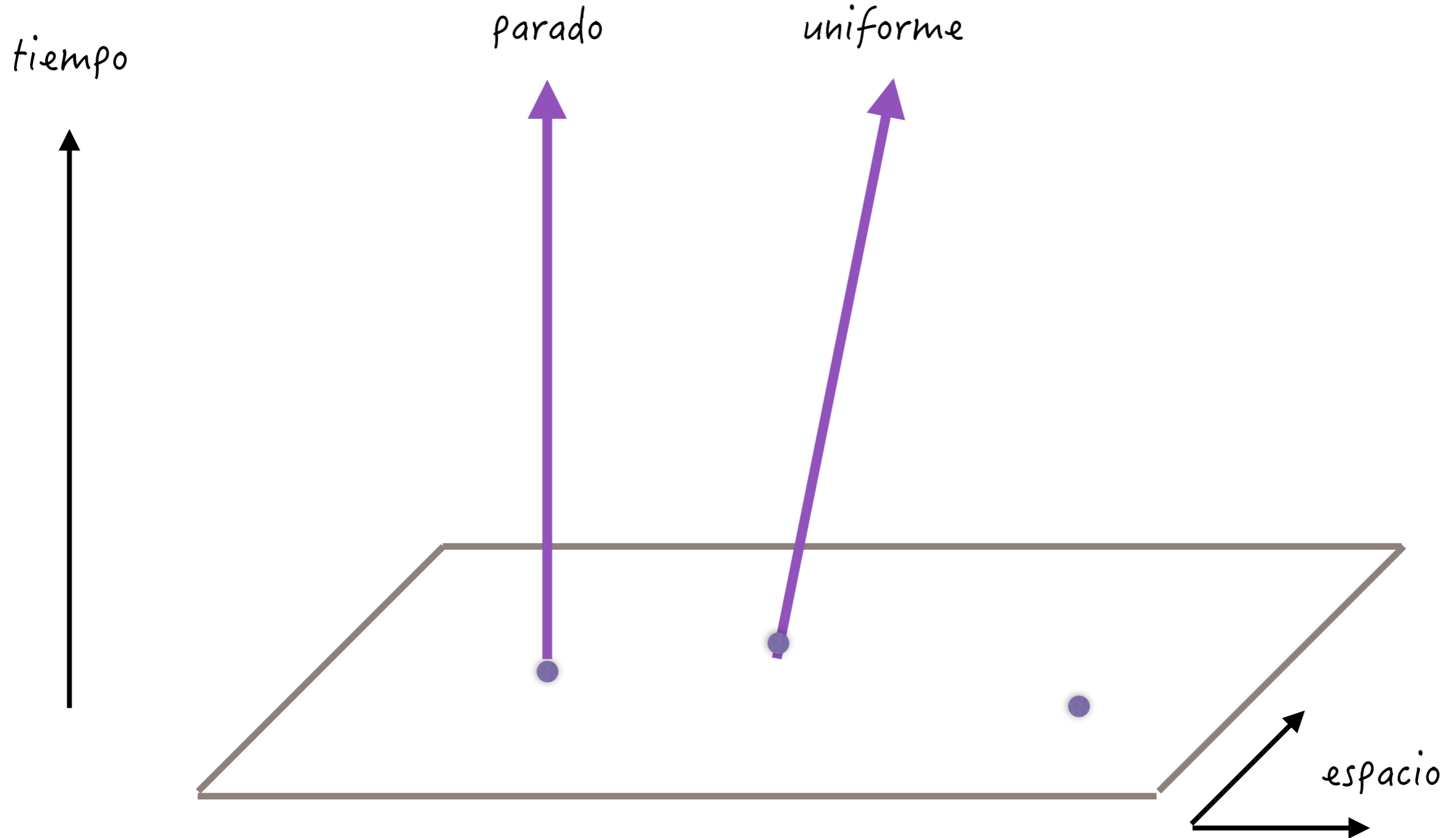
tiempo

parado

espacio



ARISTOTELES

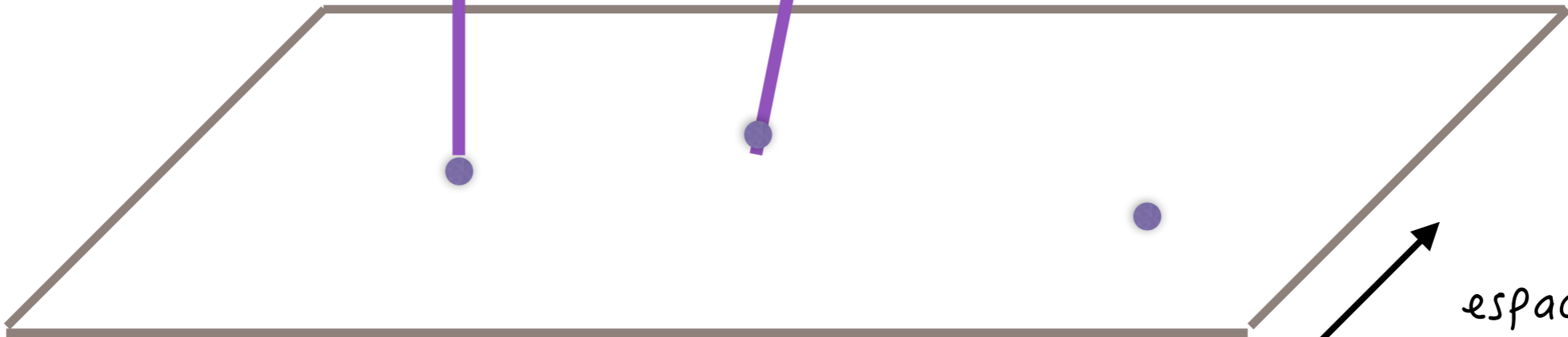
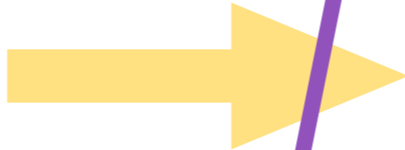
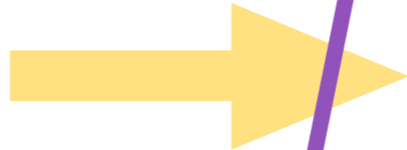
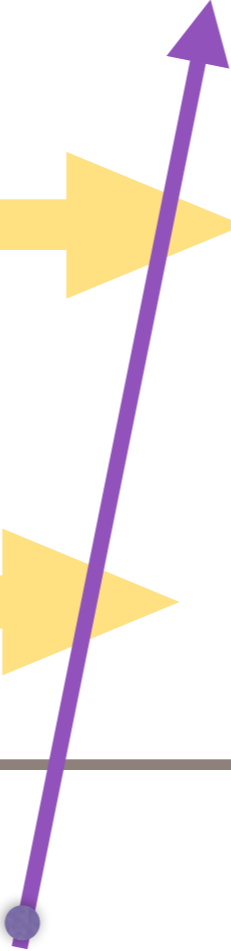


ARISTOTELES

tiempo

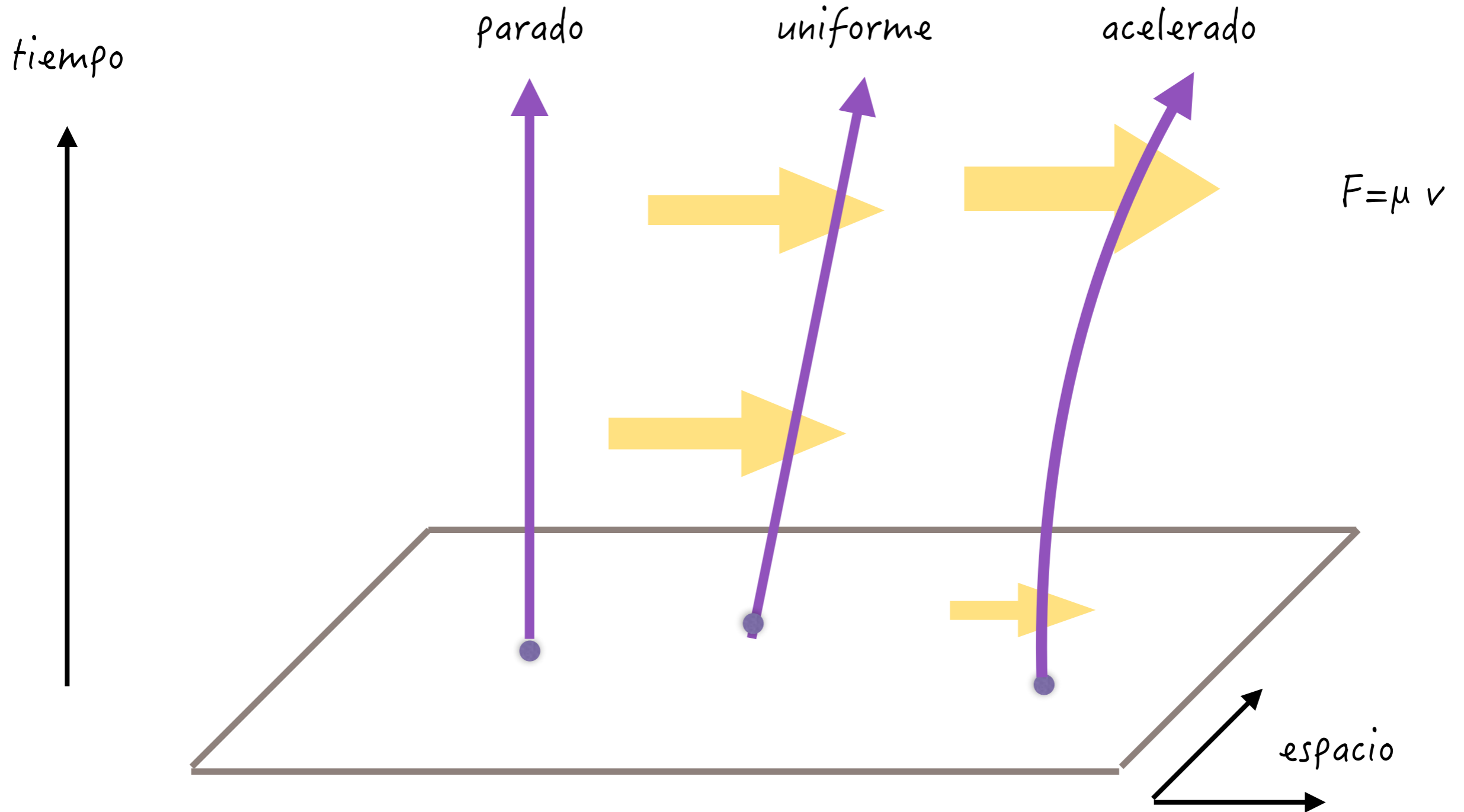
parado

uniforme



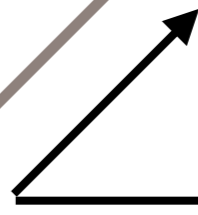
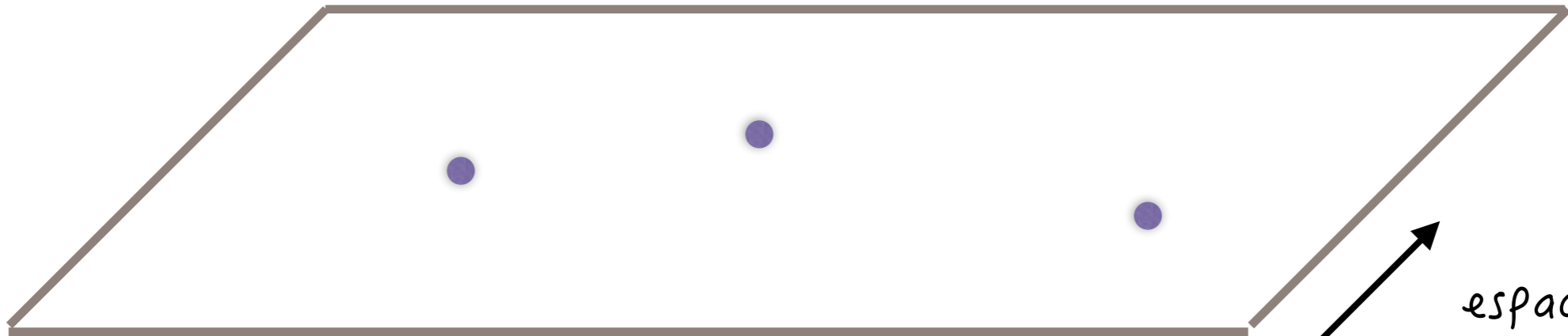
espacio

ARISTOTELES



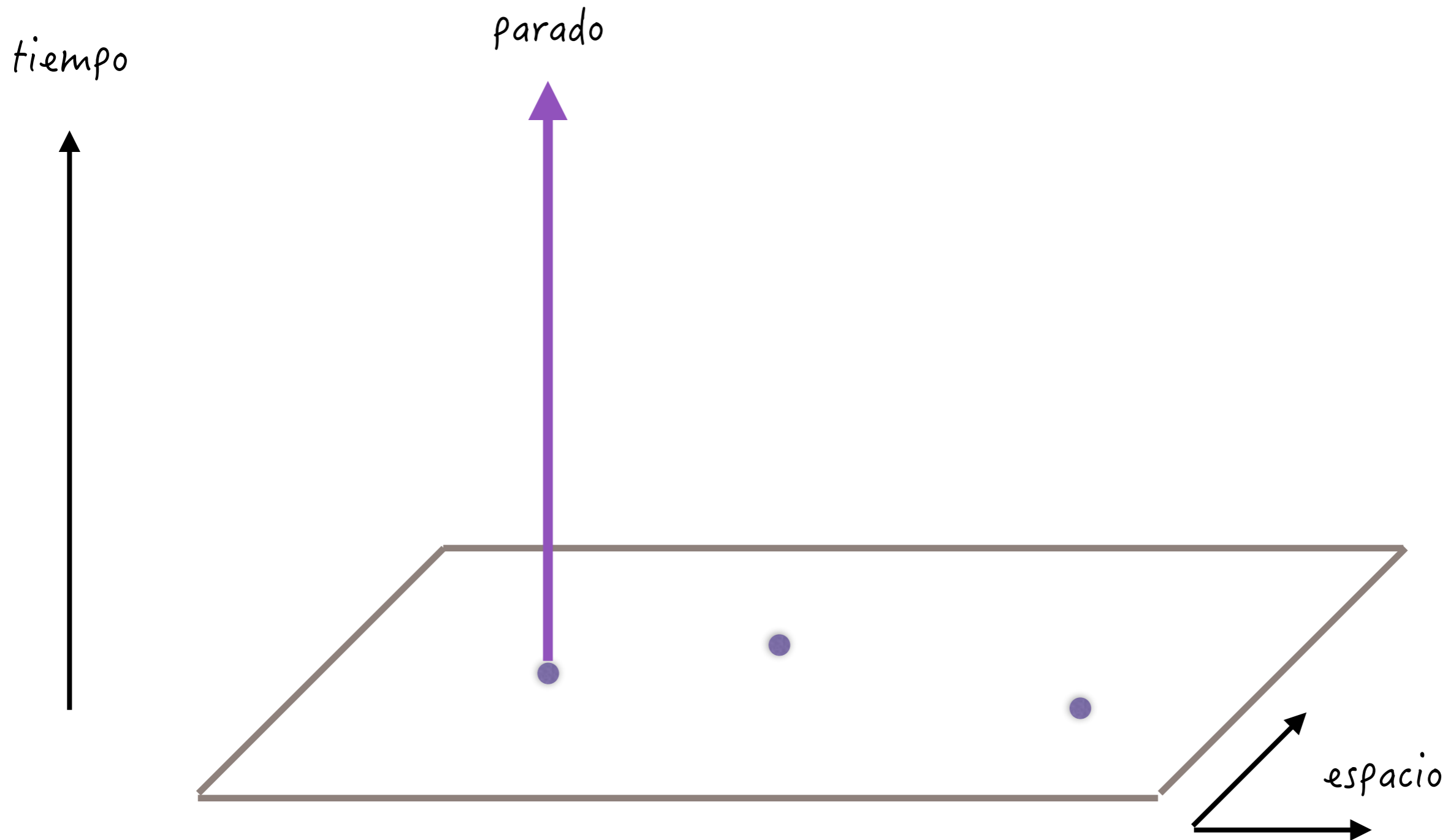
GALILEO & NEWTON

tiempo

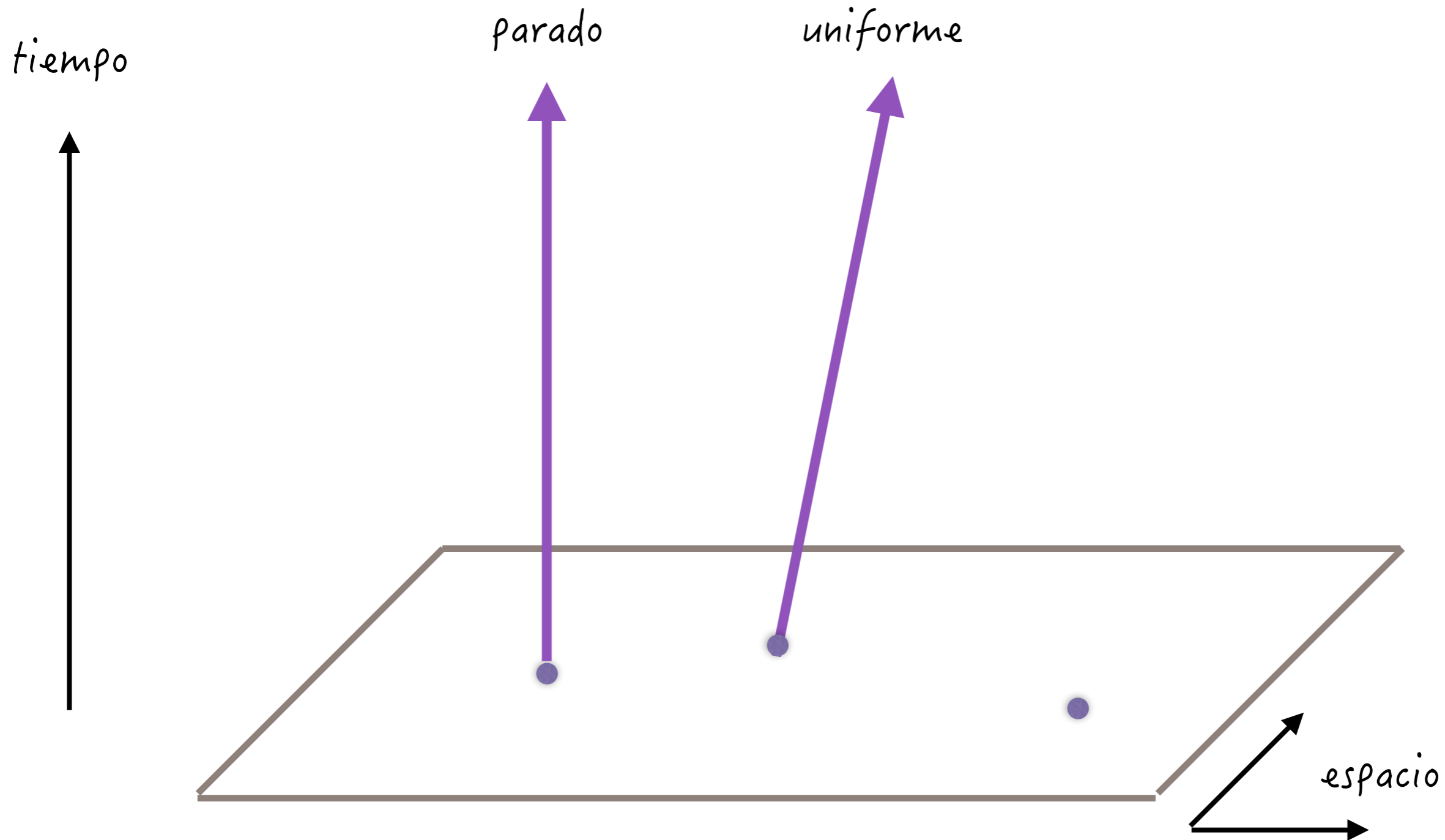


espacio

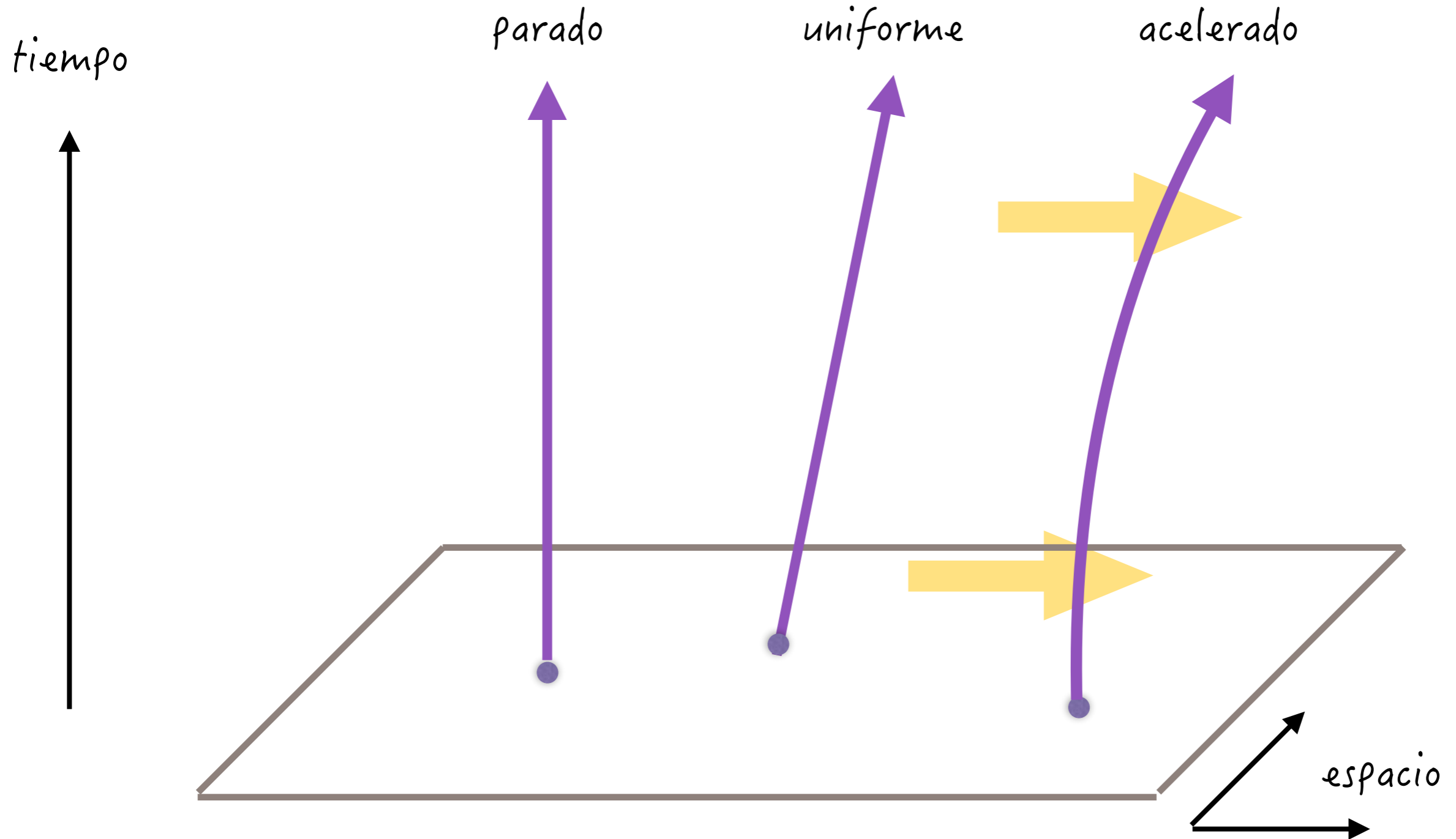
GALILEO & NEWTON



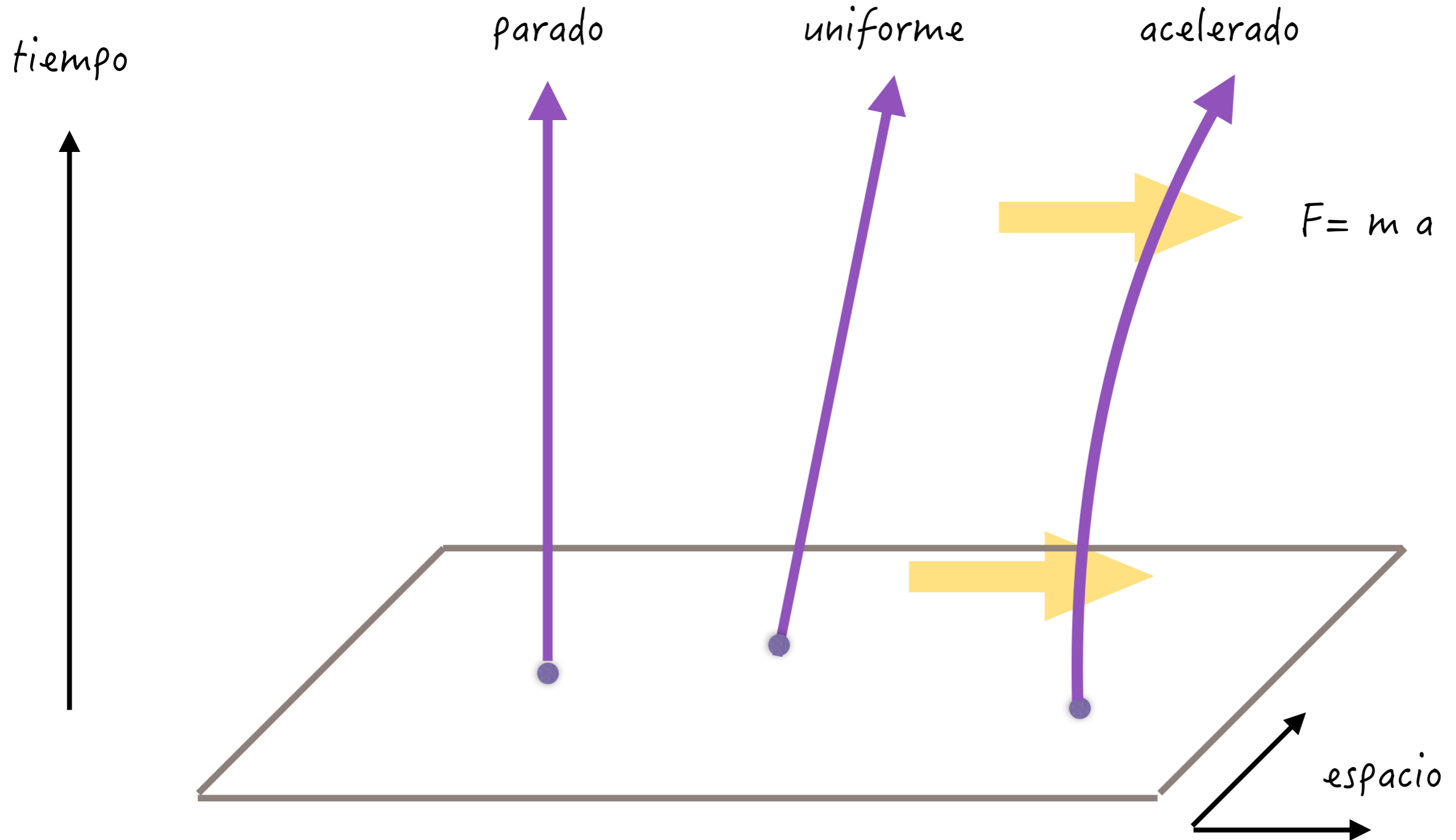
GALILEO & NEWTON



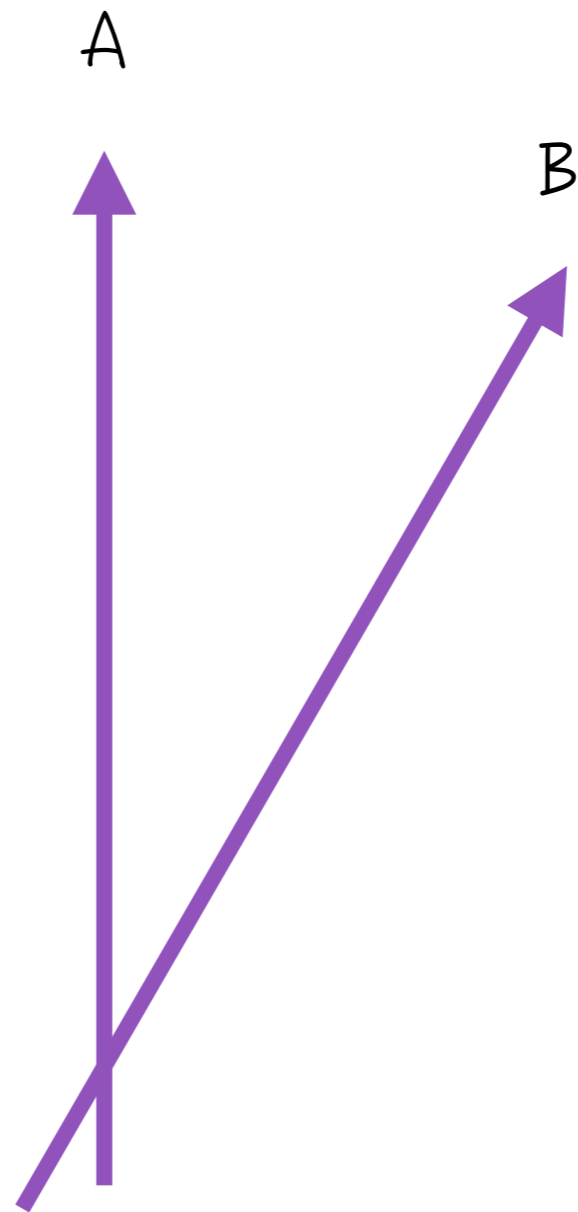
GALILEO & NEWTON



GALILEO & NEWTON

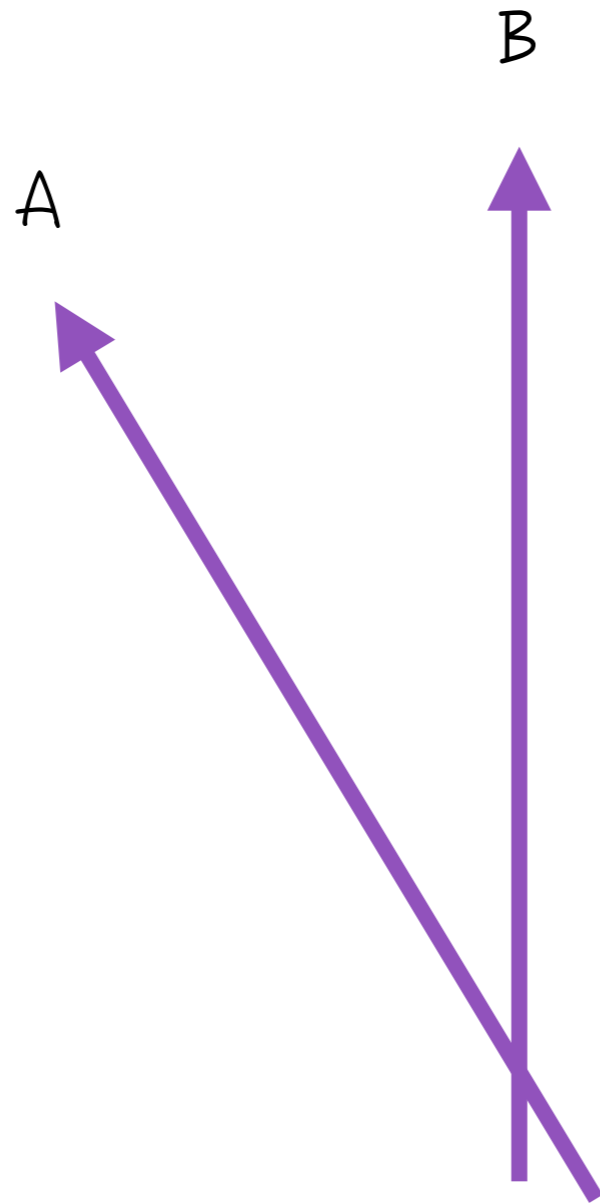


Según Alicia ...



Bernardo se mueve con velocidad V

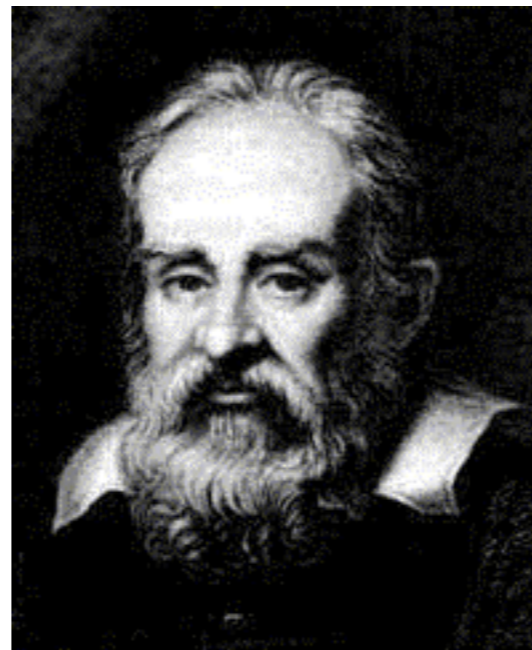
Según Bernardo ...



Alicia se mueve con velocidad $-V$

PRINCIPIO DE RELATIVIDAD

El movimiento uniforme no se puede detectar "desde dentro"



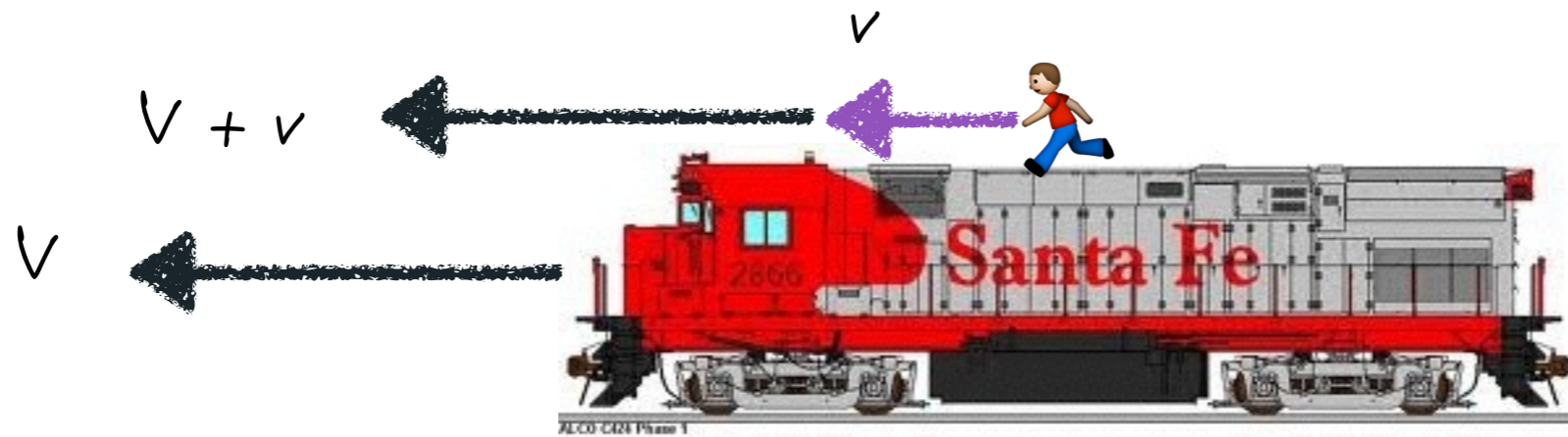
propiedad fundamental



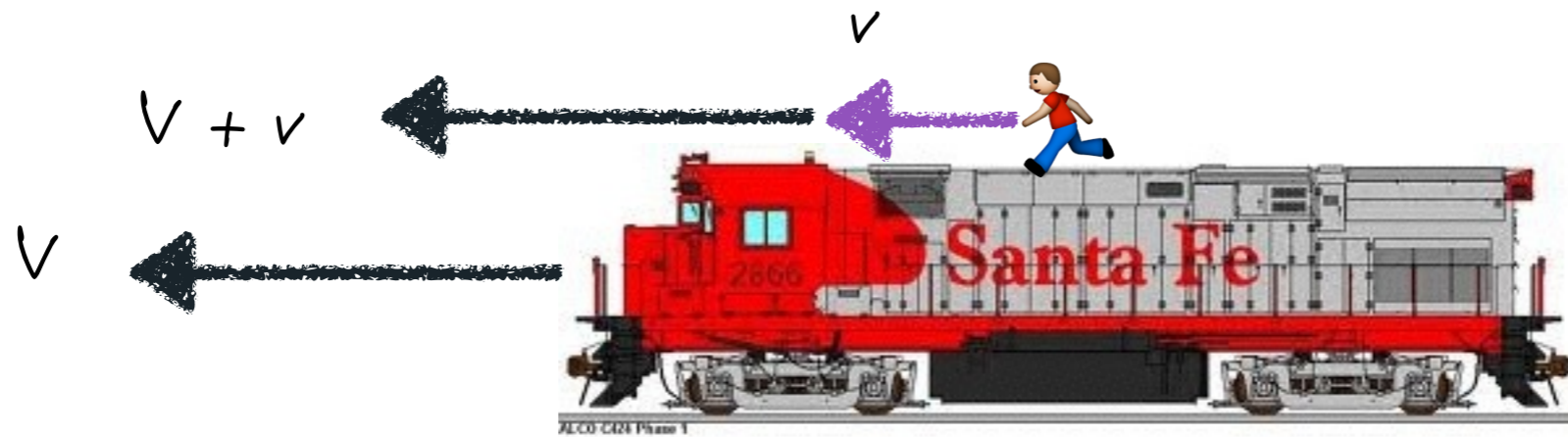
propiedad fundamental



propiedad fundamental



propiedad fundamental



Las velocidades relativas se suman

EN ESTE CASO...

NO PODRIA EXISTIR UNA VELOCIDAD LIMITE

No existiría una noción precisa de

LOCALIDAD

LOCALIDAD \longleftrightarrow VELOCIDAD LIMITE

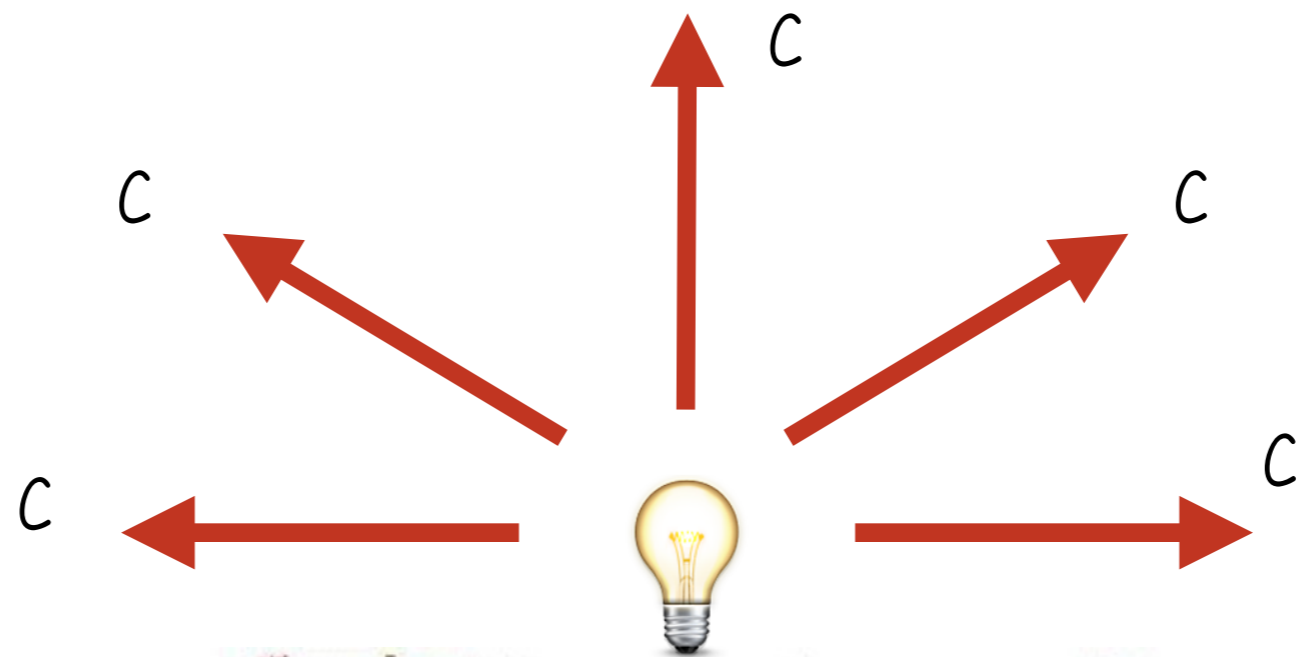
Si existe una velocidad máxima ...

El principio de relatividad IMPLICA que

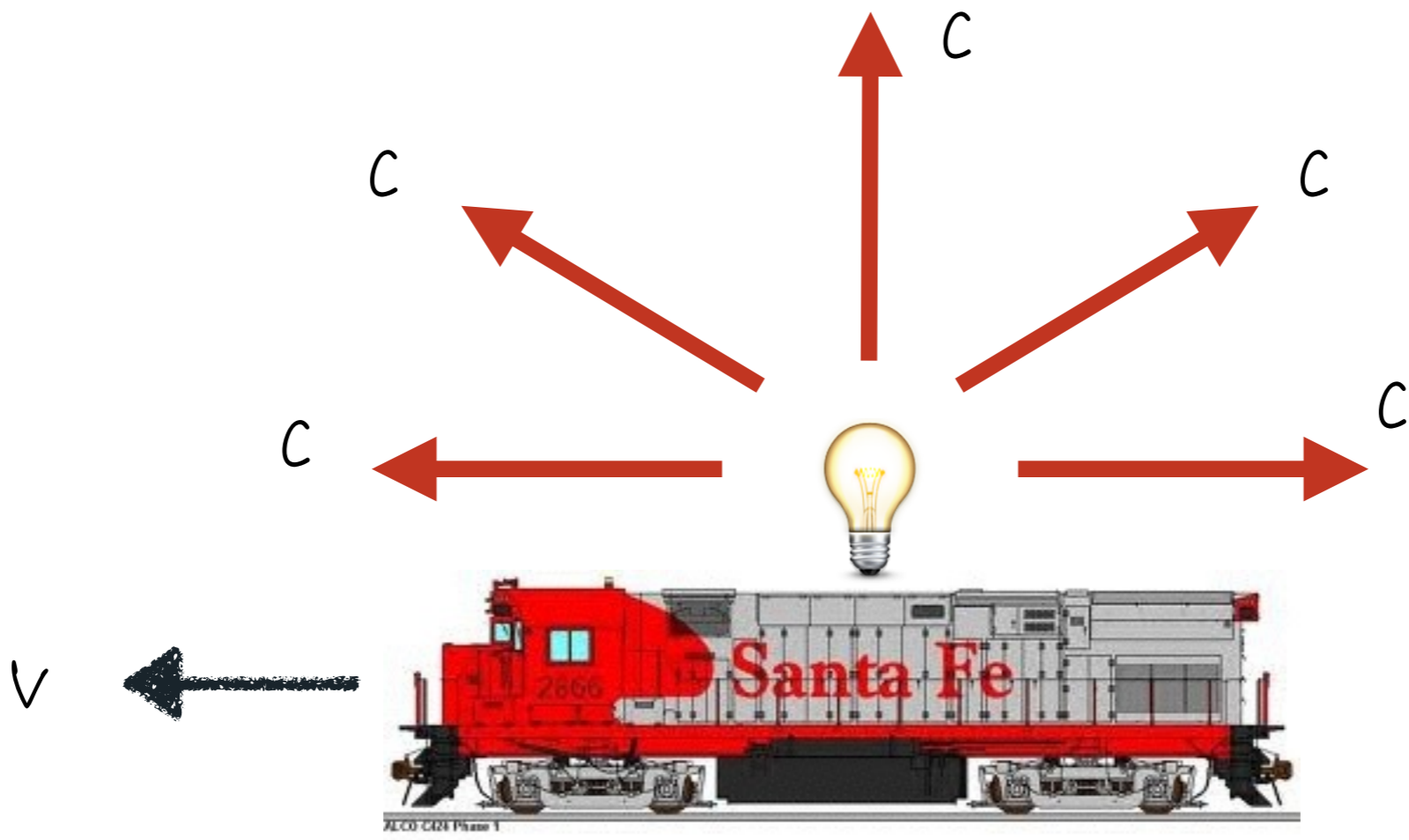
Necesariamente es una constante UNIVERSAL

UNA VELOCIDAD MAXIMA ABSOLUTA VIOLARIA EL TEOREMA DE SUMA DE VELOCIDADES

Exactamente esto es lo que se descubrió durante el siglo XIX
en el comportamiento de la luz



ALCO C42 Phase 1



SI LA VELOCIDAD MAXIMA ES
ABSOLUTA

EL TIEMPO ES NECESARIAMENTE
RELATIVO

Según Alicia, L y R son simultáneos



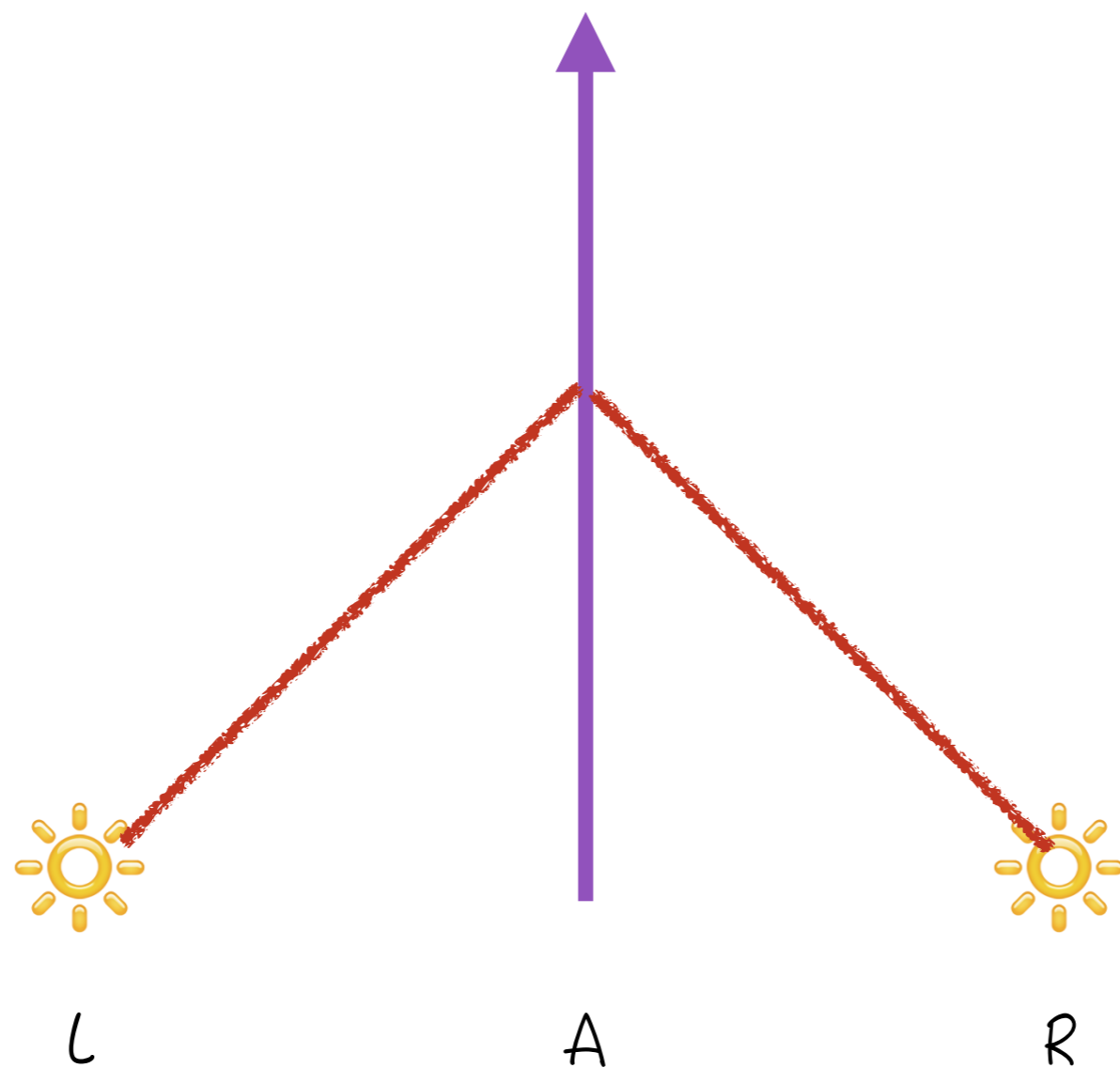
L

A

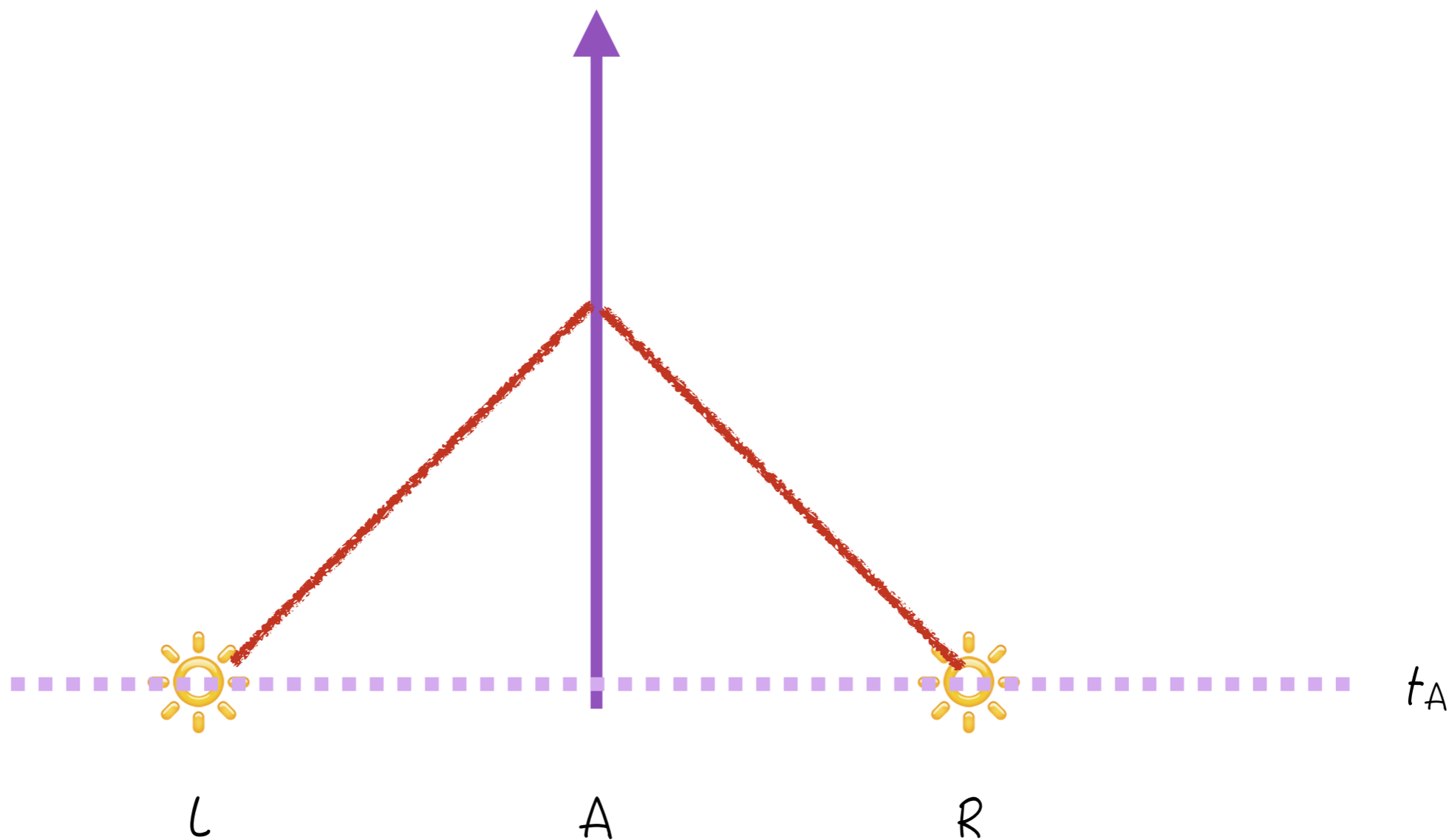


R

Según Alicia, L y R son simultáneos



Según Alicia, L y R son simultáneos



Según Bernardo, R ocurre antes que L



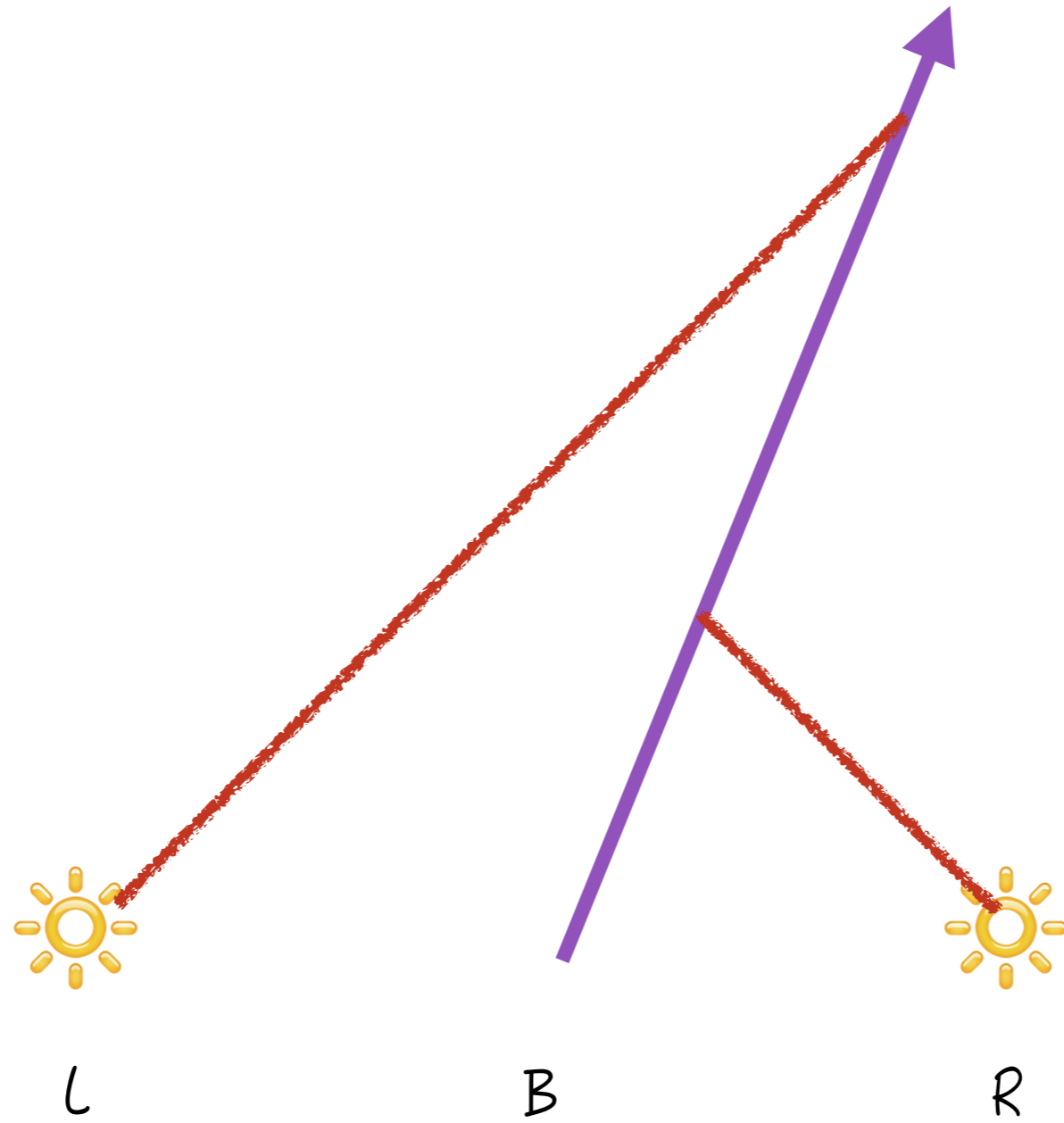
L

B

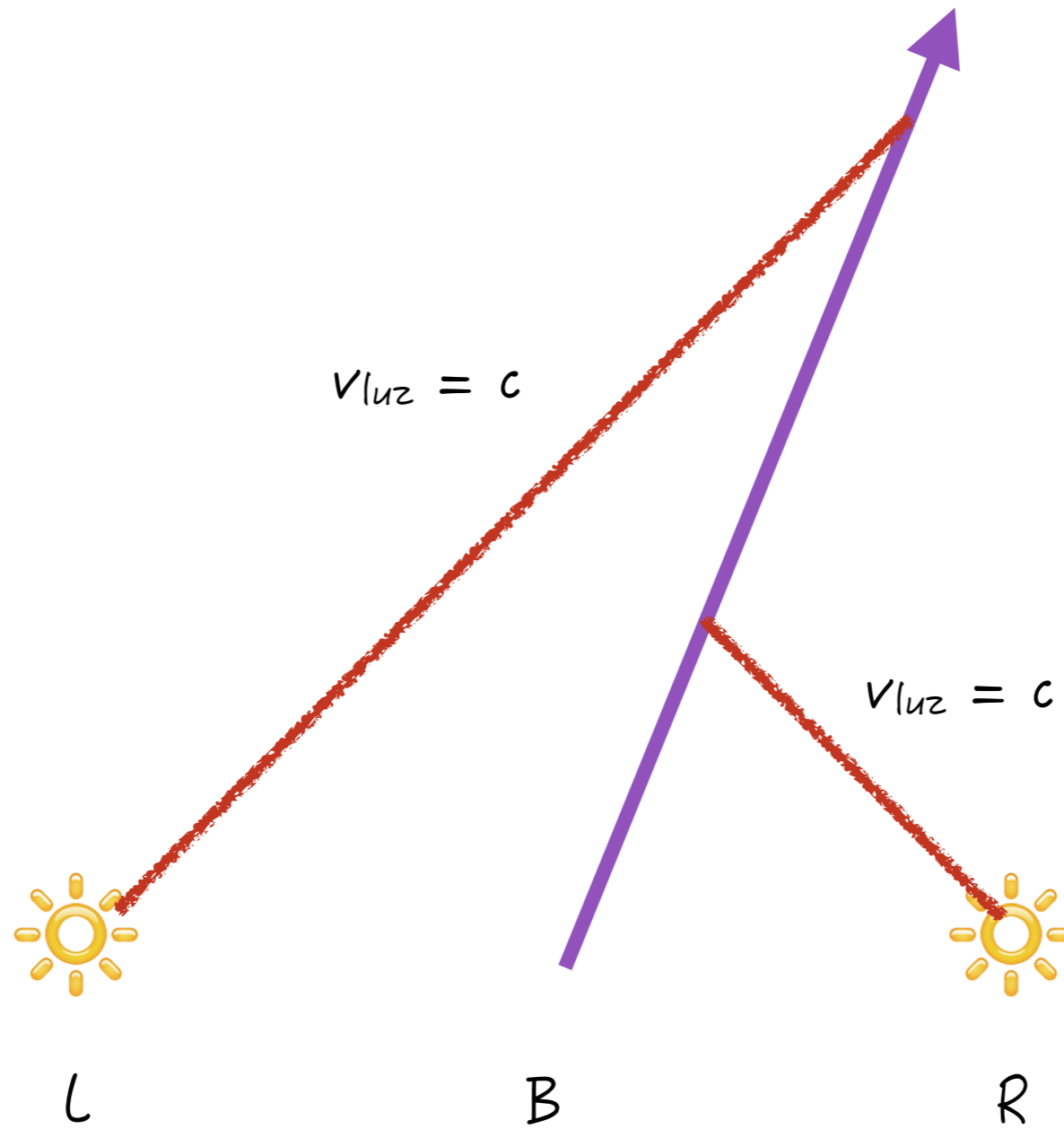


R

Según Bernardo, R ocurre antes que L



Según Bernardo, R ocurre antes que L



El punto de vista de Bernardo en la teoría no relativista

L ve más tarde porque la luz de L es más lenta



L

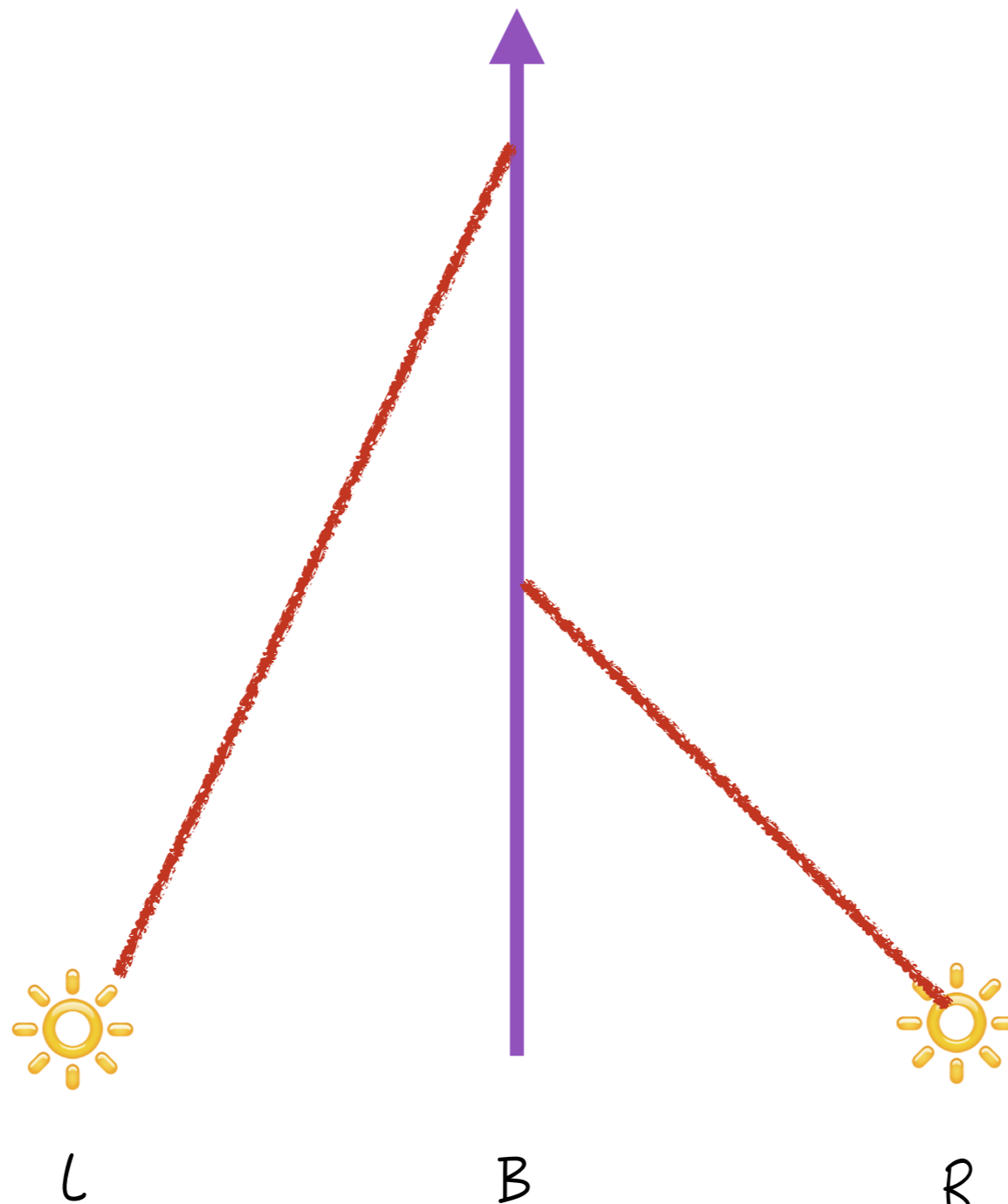
B



R

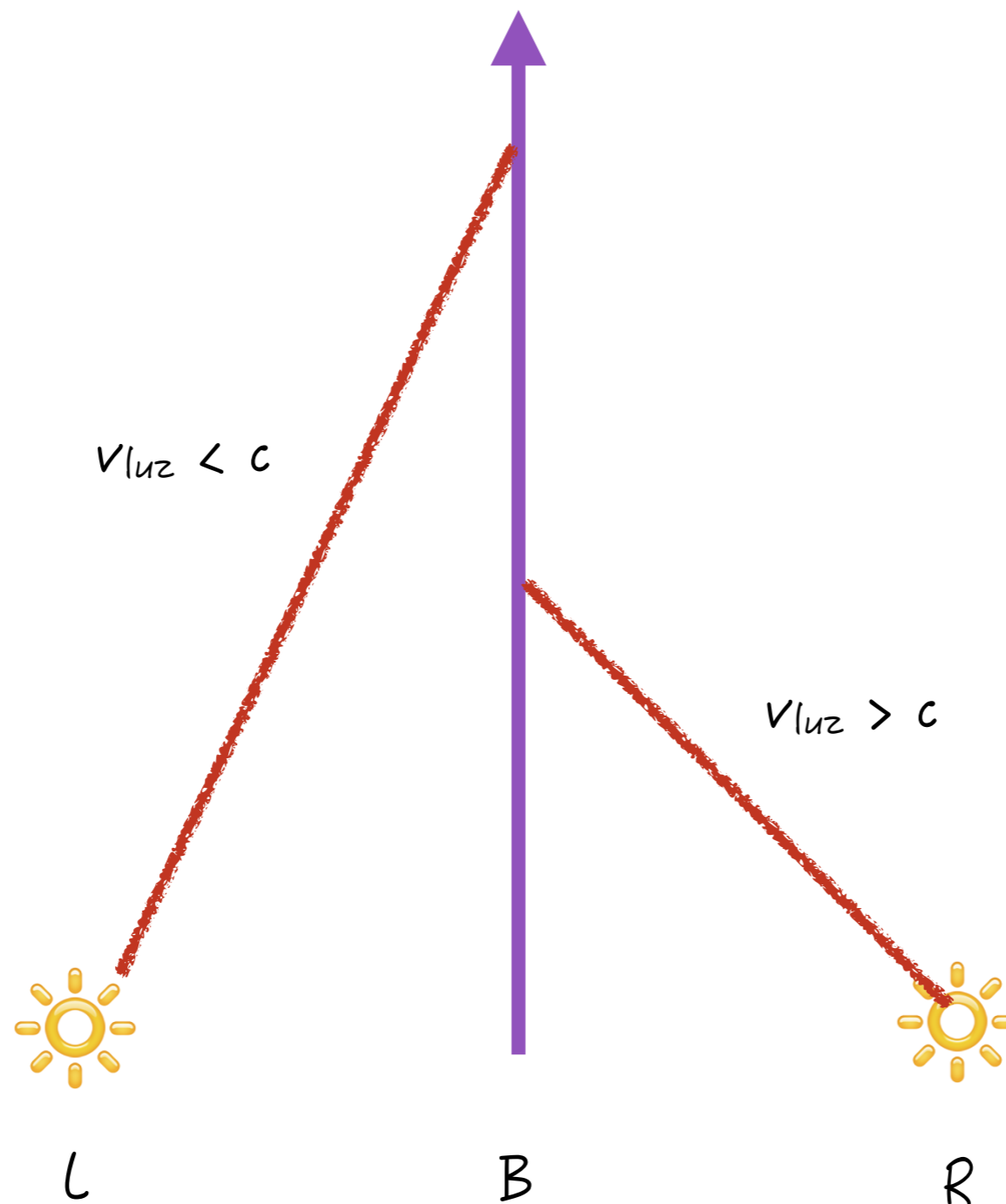
El punto de vista de Bernardo en la teoría no relativista

L ve más tarde porque la luz de L es más lenta



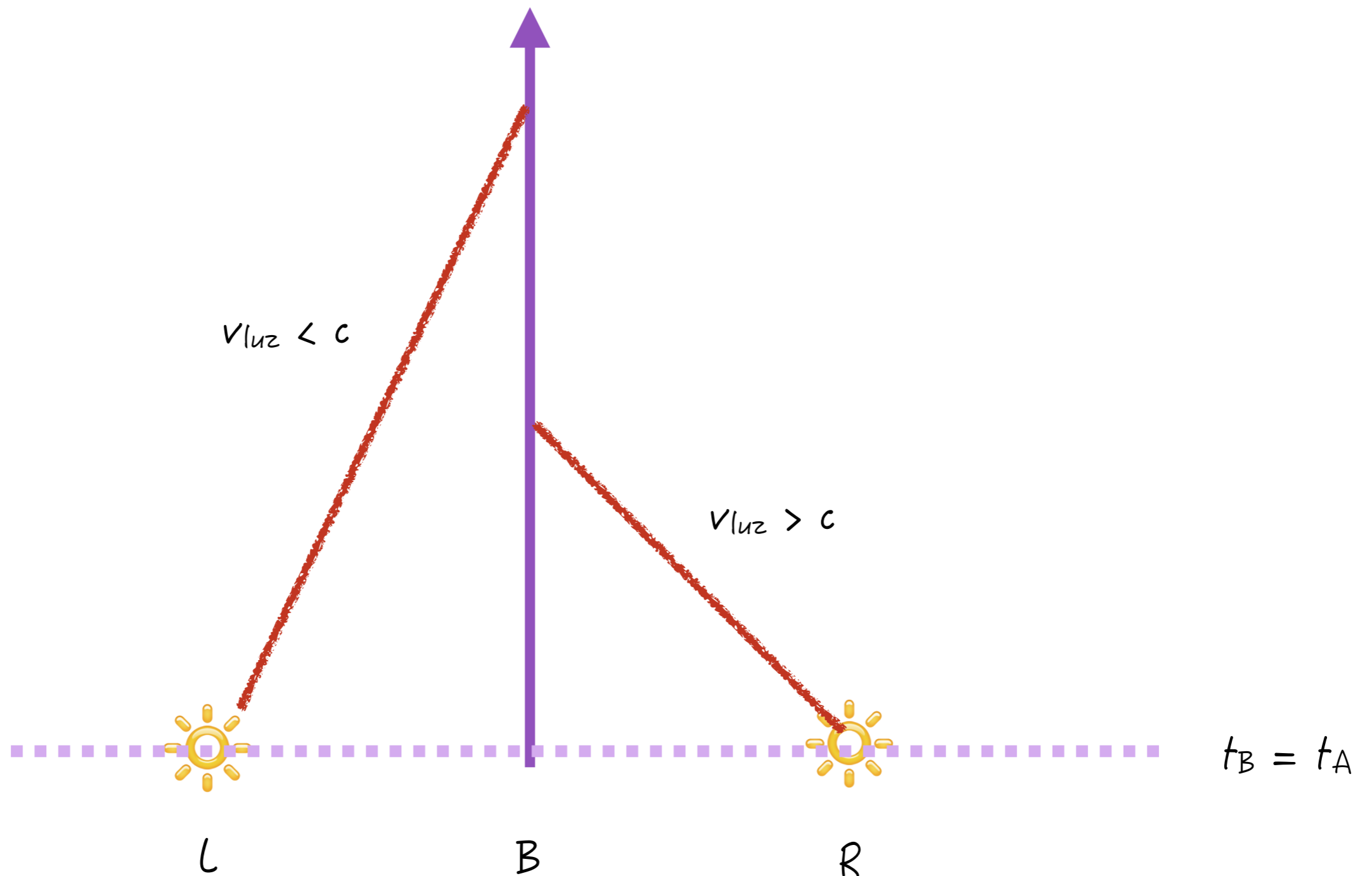
El punto de vista de Bernardo en la teoría no relativista

L ve más tarde porque la luz de L es más lenta



El punto de vista de Bernardo en la teoría no relativista

L ve más tarde porque la luz de L es más lenta



El punto de vista de Bernardo en la teoría relativista

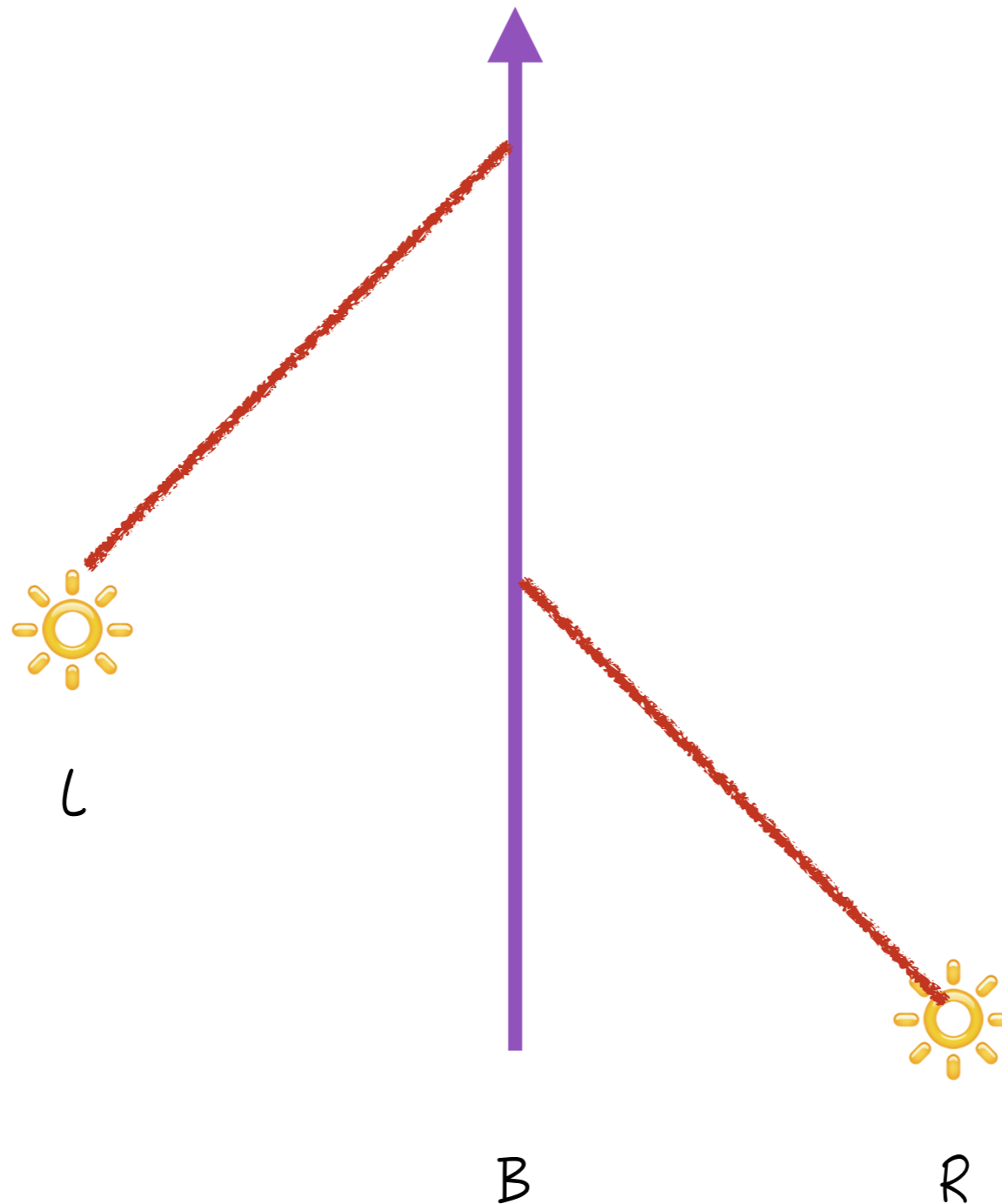
B



R

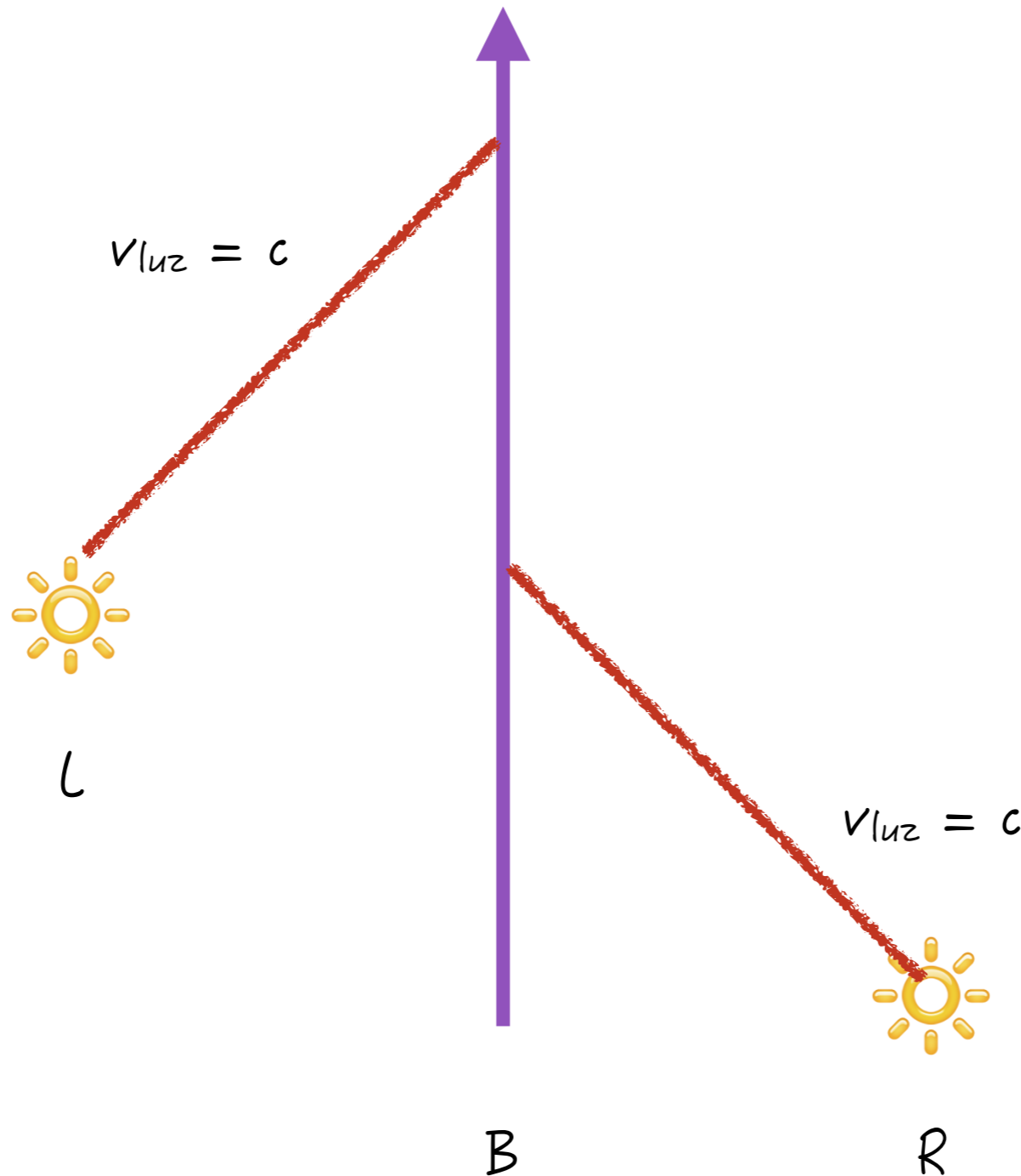
El punto de vista de Bernardo en la teoría relativista

L se ve después porque OCURRE más tarde que R



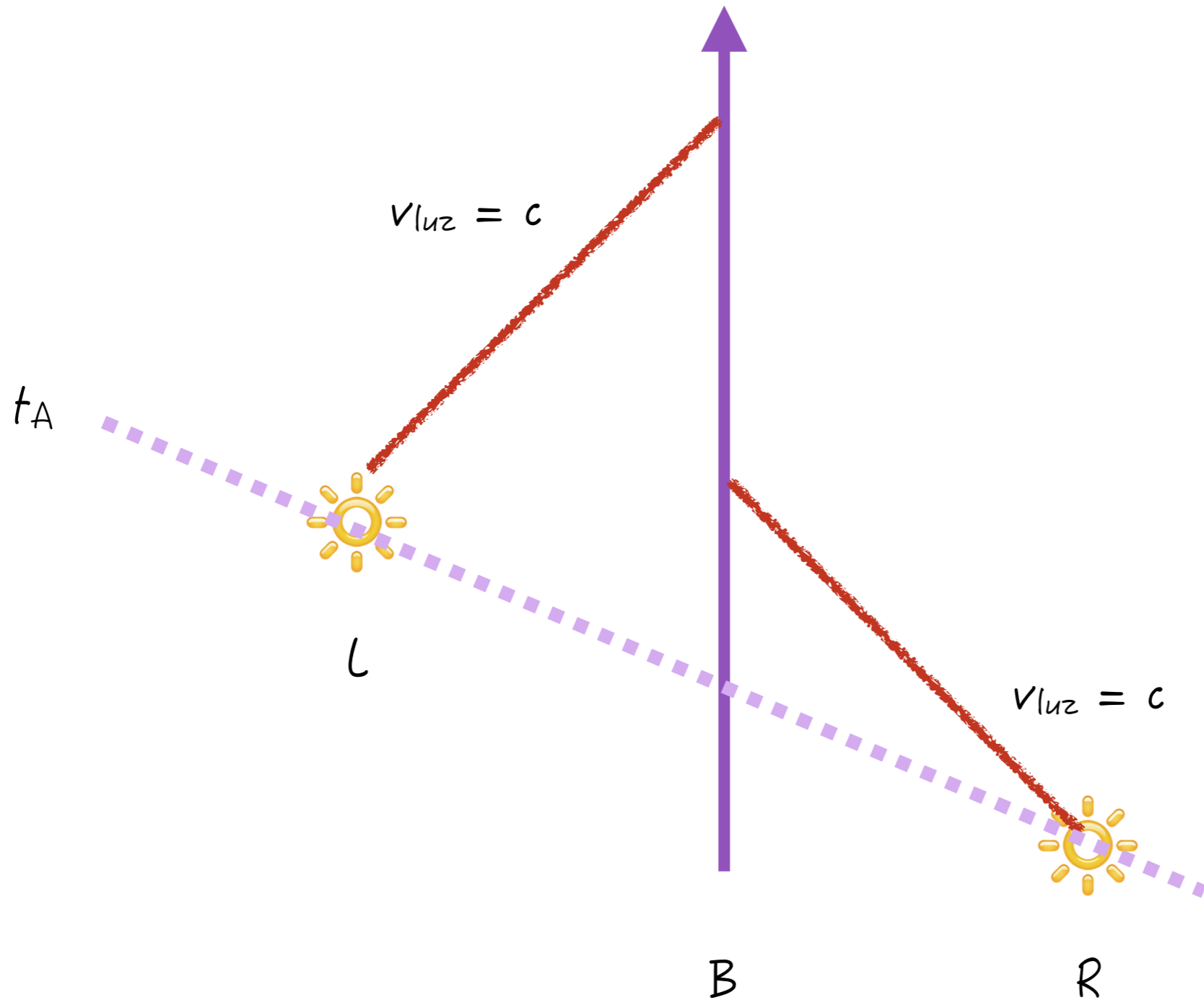
El punto de vista de Bernardo en la teoría relativista

L se ve después porque OCURRE más tarde que R



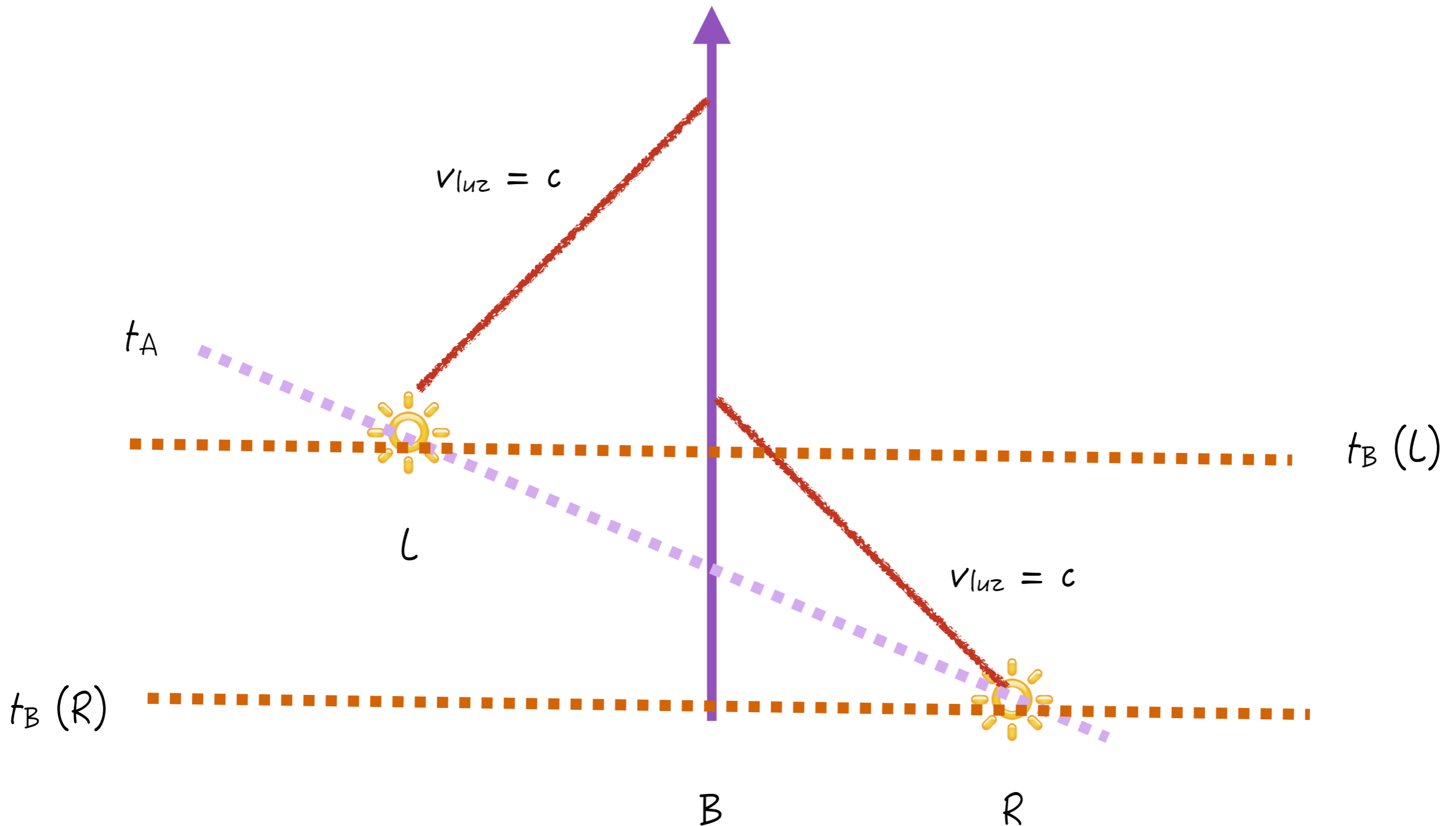
El punto de vista de Bernardo en la teoría relativista

L se ve después porque OCURRE más tarde que R



El punto de vista de Bernardo en la teoría relativista

L se ve después porque OCURRE más tarde que R



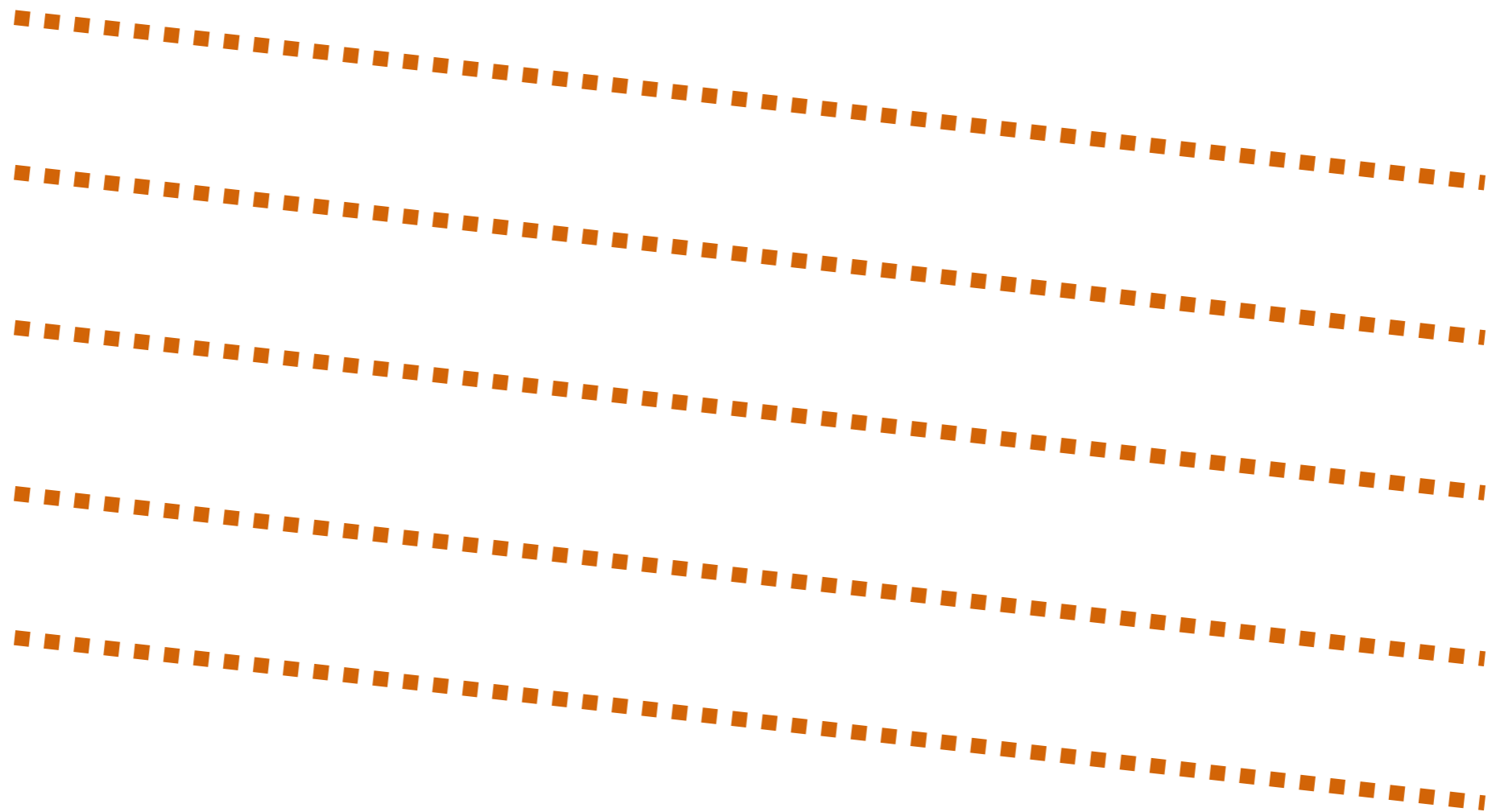
El movimiento relativo afecta a la partición entre
espacio y tiempo

El movimiento relativo afecta a la partición entre
espacio y tiempo



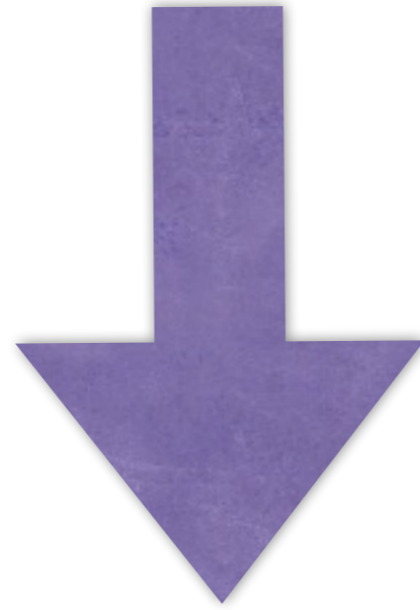
partición espacial de Alicia

El movimiento relativo afecta a la partición entre
espacio y tiempo



partición espacial de Bernardo

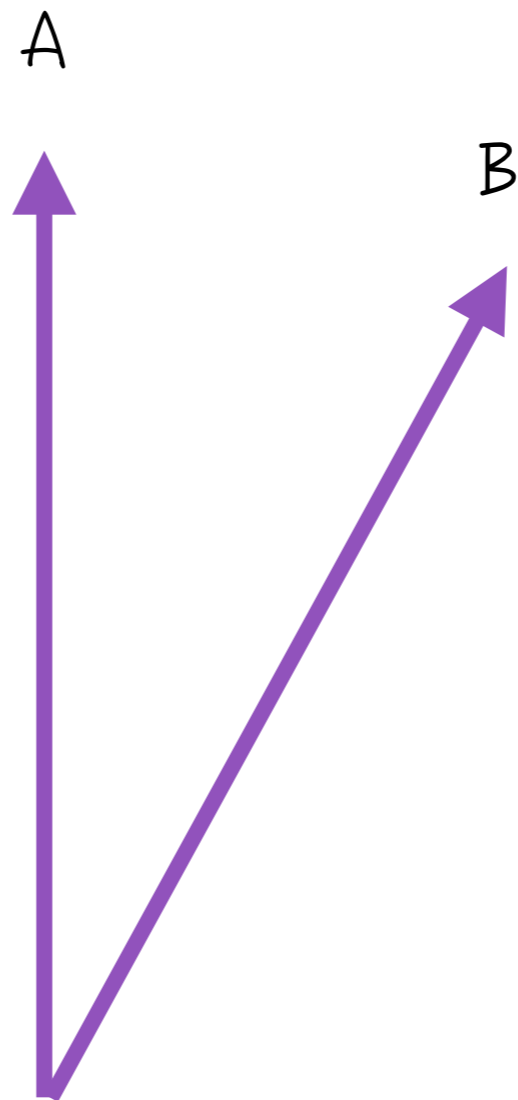
ESPACIO Y TIEMPO SE MEZCLAN EN



ESPACIOTIEMPO

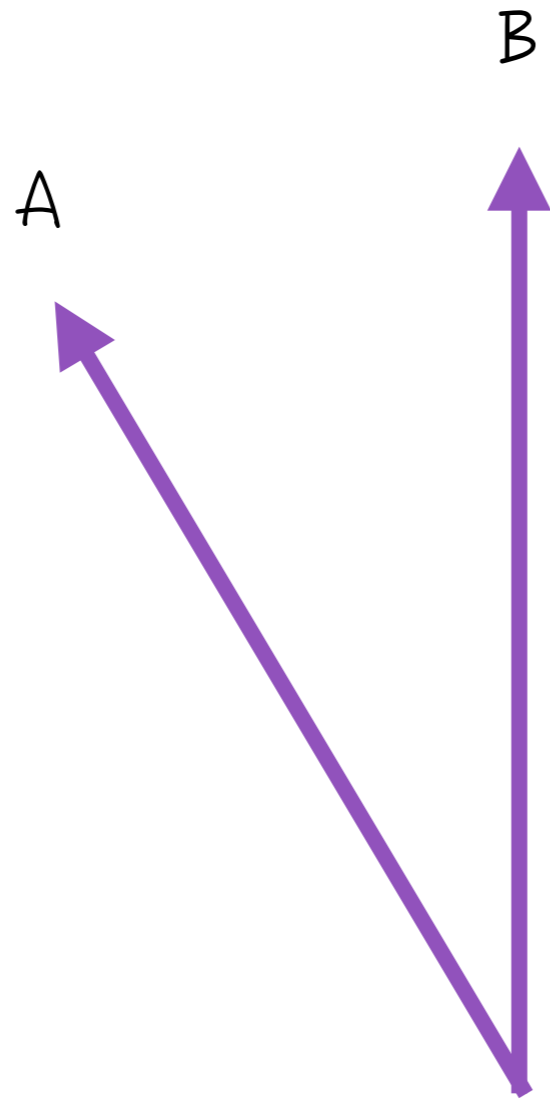
¿RELATIVIDAD GENERAL?

Según Alicia ...



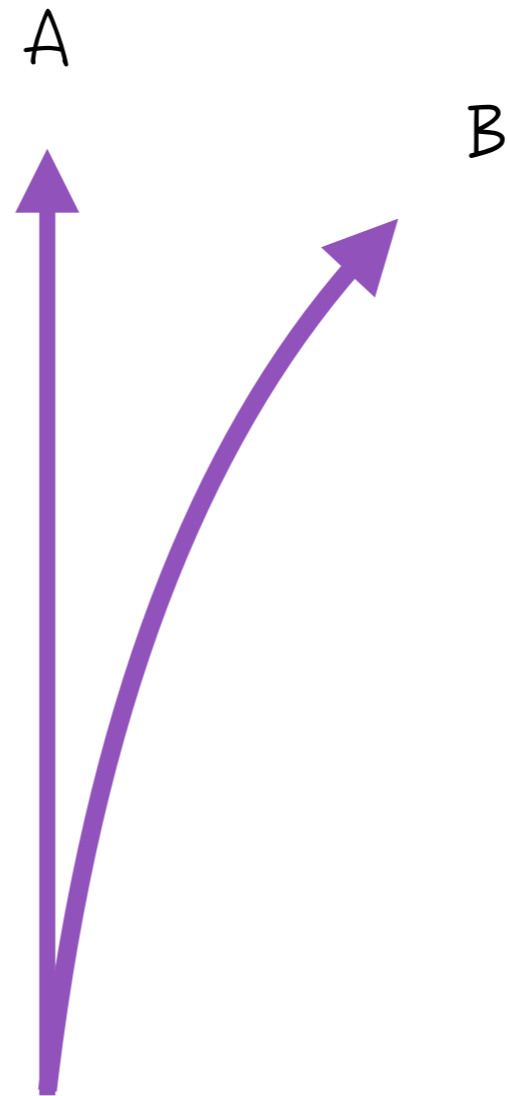
Bernardo se mueve con velocidad V

Según Bernardo ...

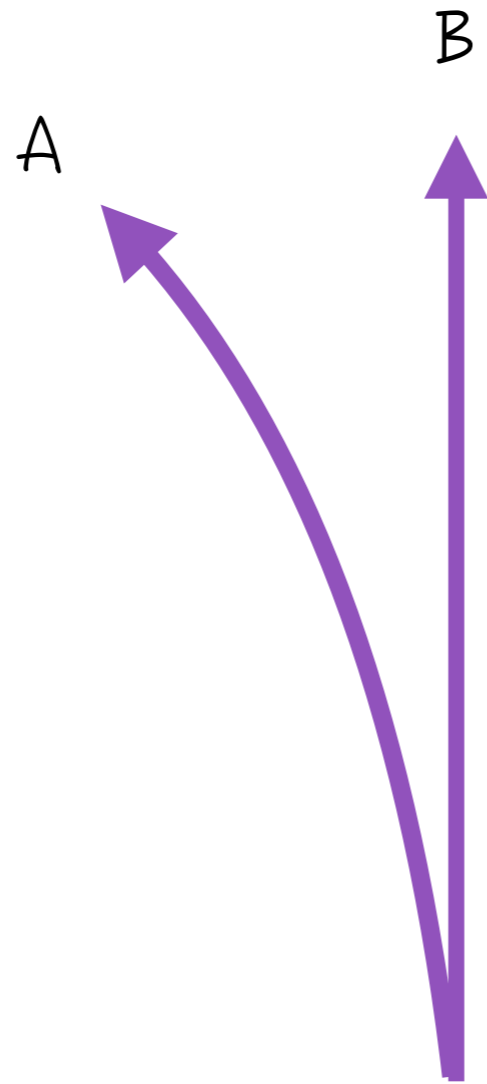


Alicia se mueve con velocidad $-V$

¿Qué pasa si Bernardo acelera?

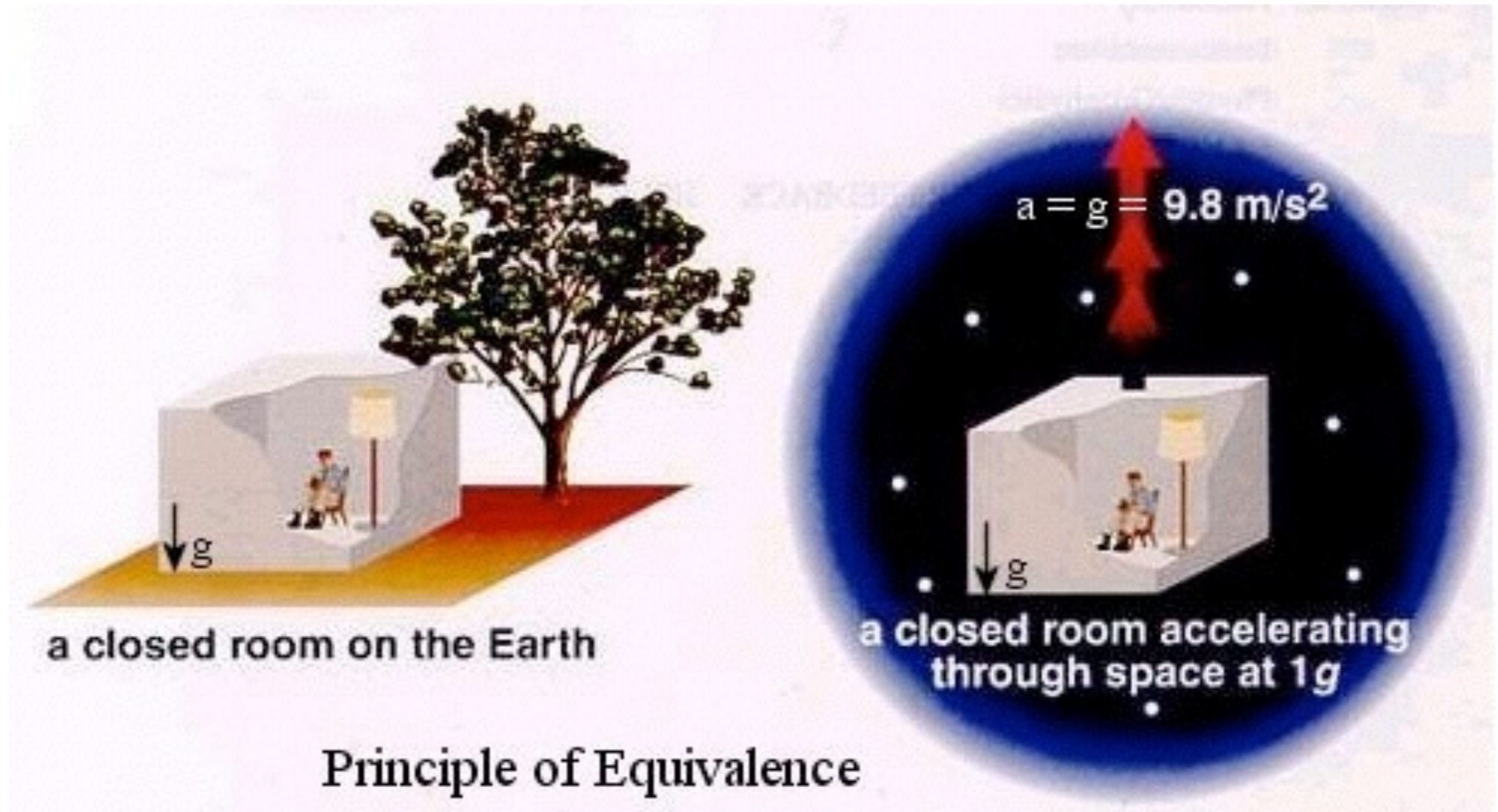


Aparentemente...



Pero Bernardo puede detectar su aceleración "desde dentro"

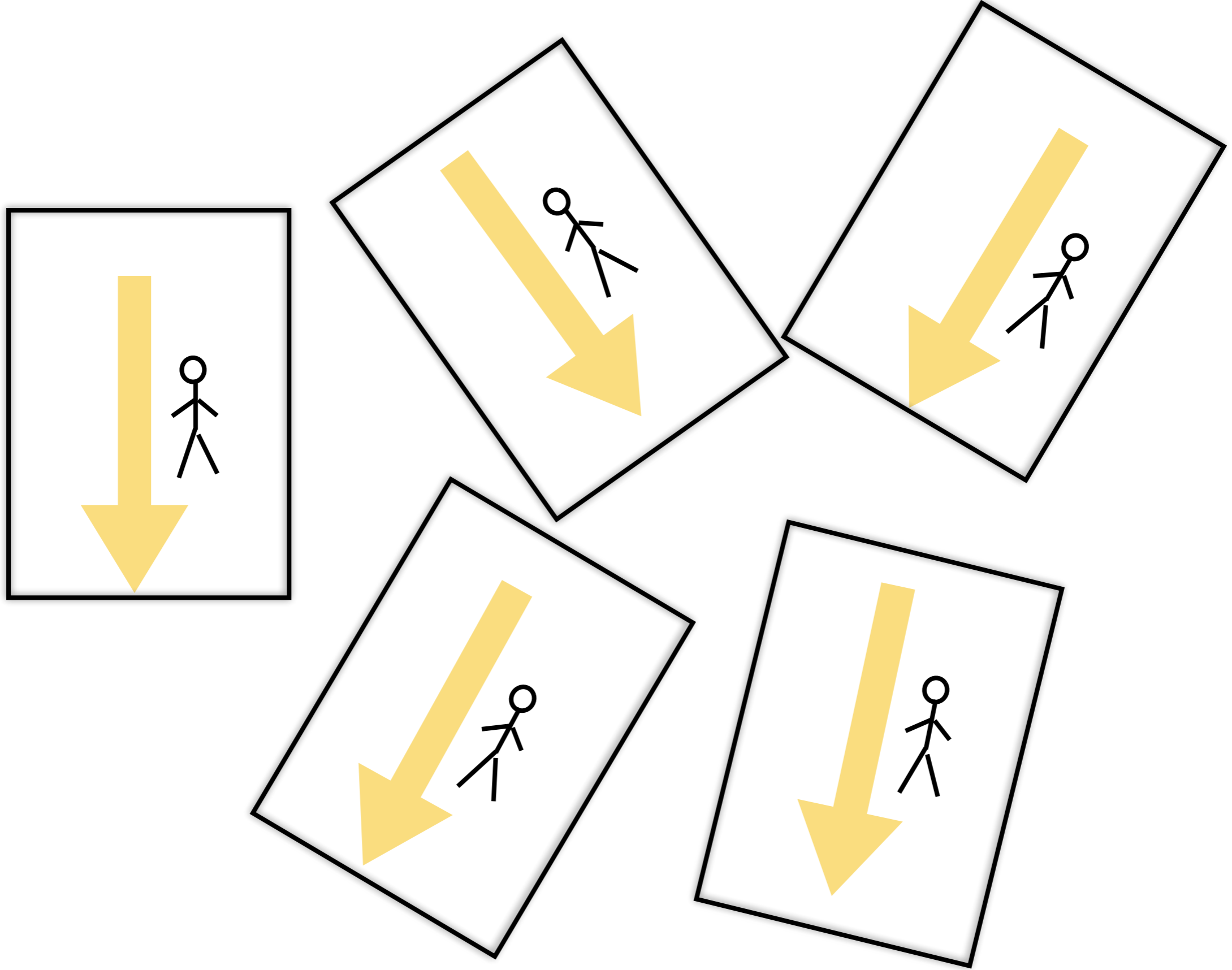
PRINCIPIO DE EQUIVALENCIA



Einstein salva así el principio de relatividad

... lo convierte en el principio de relatividad general

... y construye una teoría de la gravitación sobre esta base

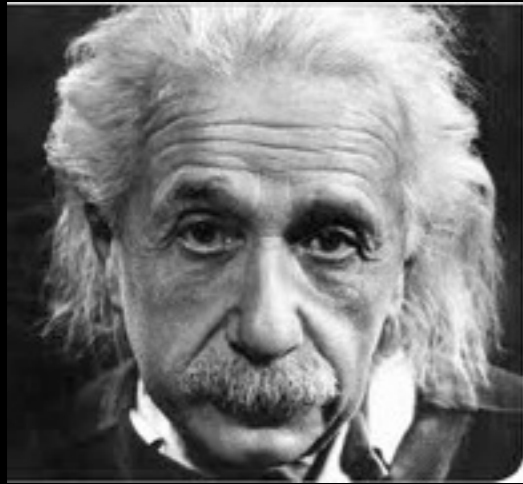


En cada caja, en caída libre, no se nota el campo gravitacional, que solo aparece al "pegar" las cajas.





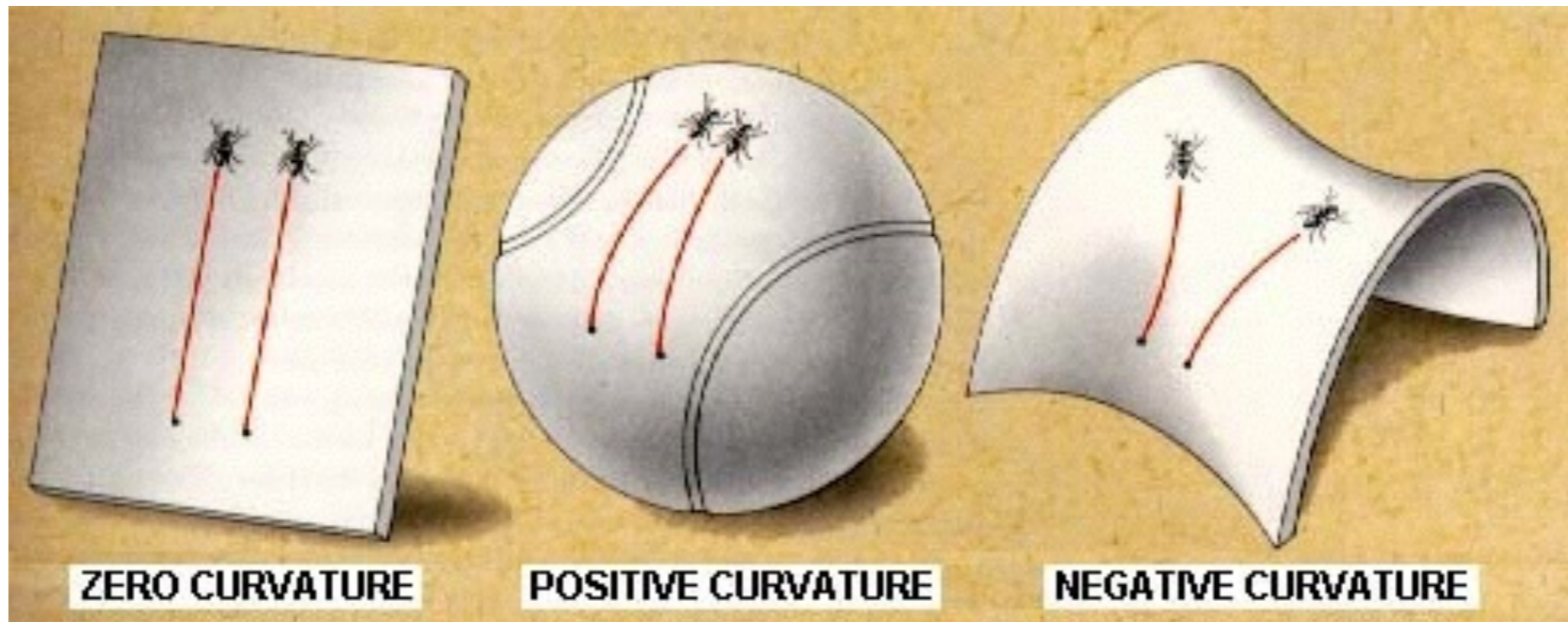
iCURVATURA!



ESLOGAN

Gravitación \approx "curvatura" del espacio-tiempo

LA CURVATURA ESPACIAL CAMBIA LA GEOMETRIA DEL ESPACIO

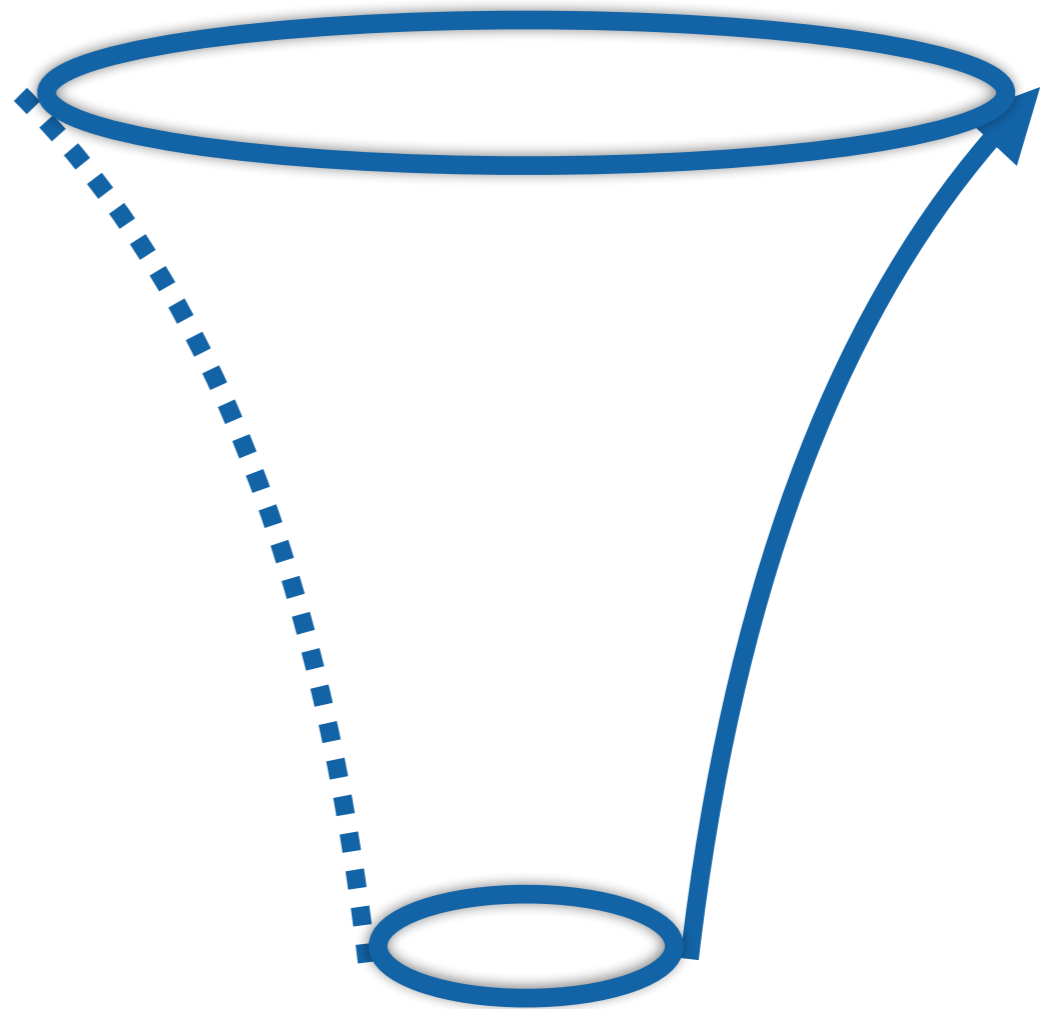


LA CURVATURA TEMPORAL CAMBIA LA VELOCIDAD DE EXPANSION DEL ESPACIO

LA CURVATURA TEMPORAL CAMBIA LA VELOCIDAD DE EXPANSION DEL ESPACIO

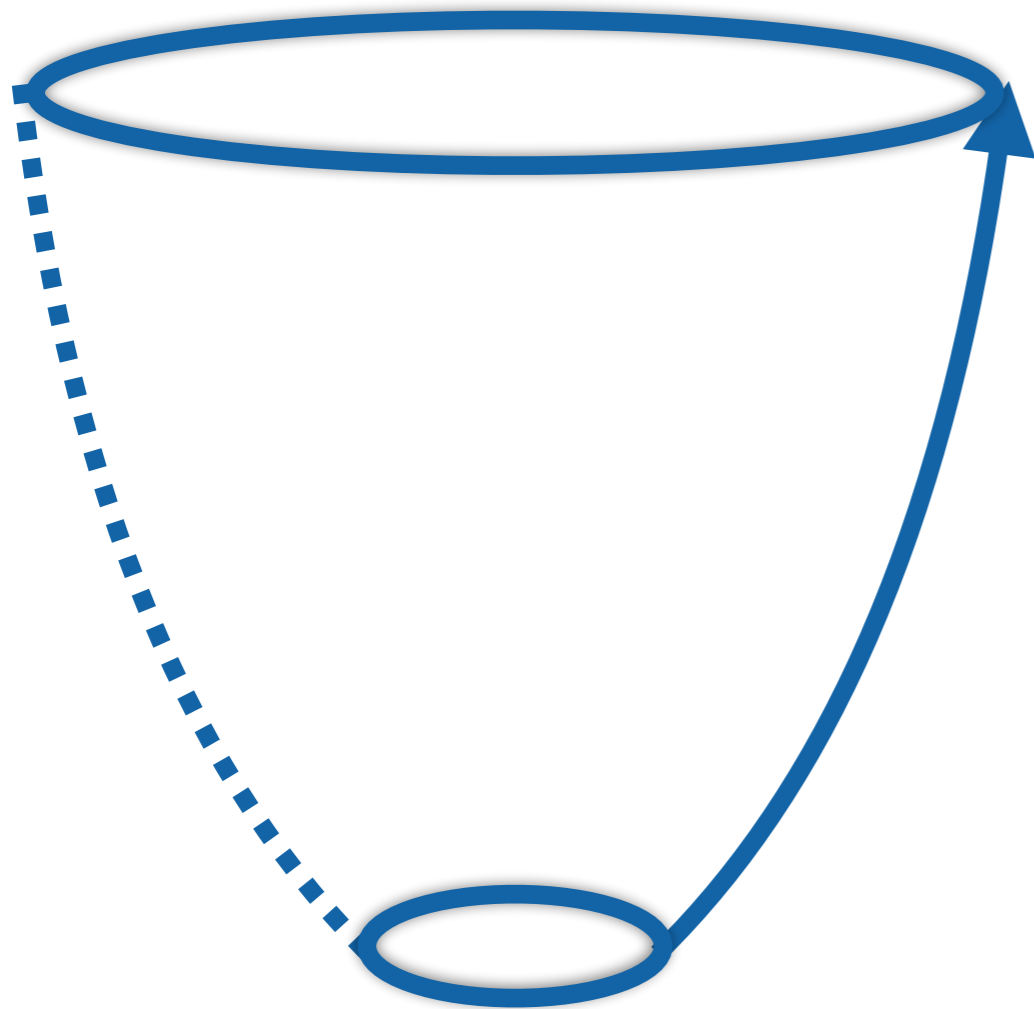


LA CURVATURA TEMPORAL CAMBIA LA VELOCIDAD DE EXPANSION DEL ESPACIO

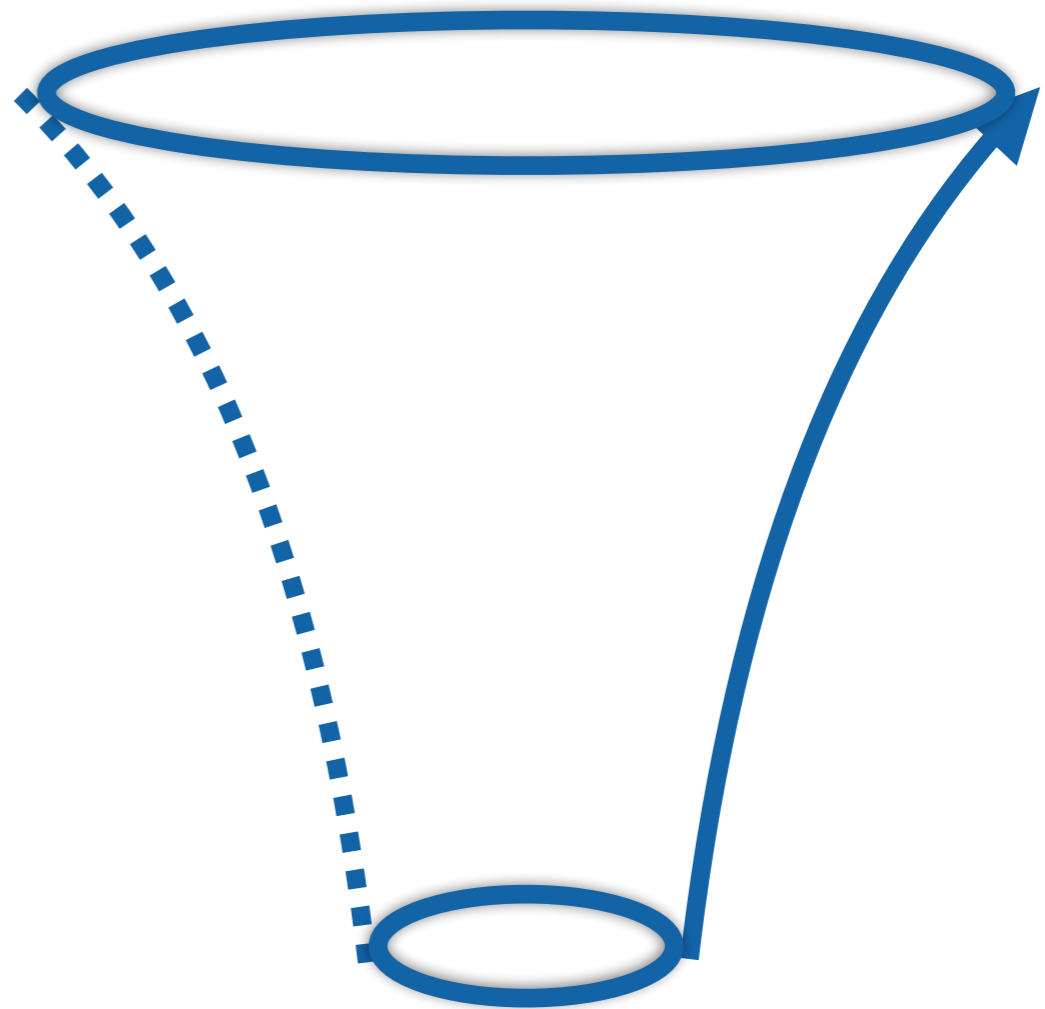


EXPANSION ACELERADA

LA CURVATURA TEMPORAL CAMBIA LA VELOCIDAD DE EXPANSION DEL ESPACIO



EXPANSION DECELERADA



EXPANSION ACELERADA

SIN CURVATURA TEMPORAL

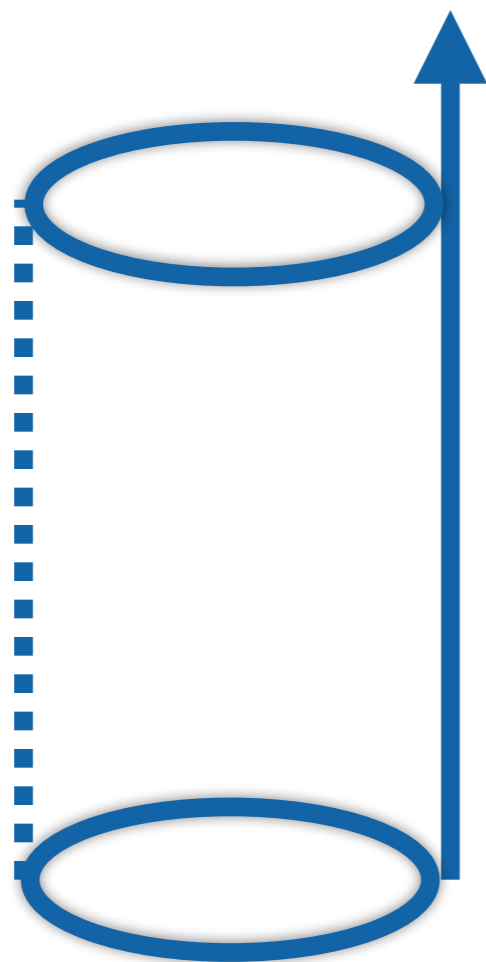
SIN CURVATURA TEMPORAL



SIN CURVATURA TEMPORAL

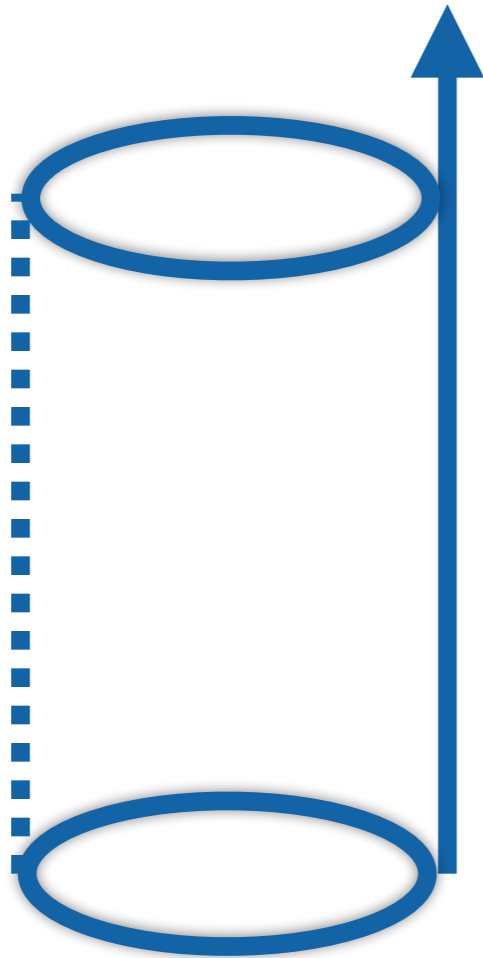


SIN CURVATURA TEMPORAL



ESTATICO

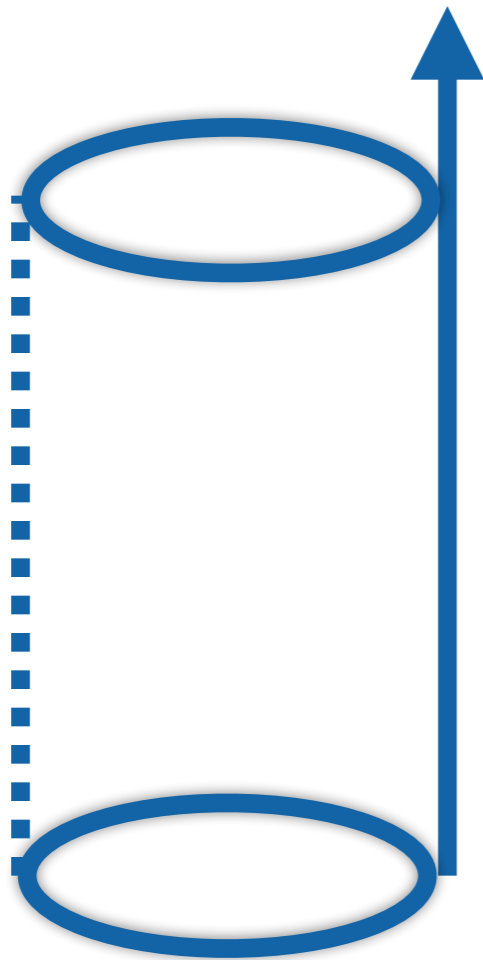
SIN CURVATURA TEMPORAL



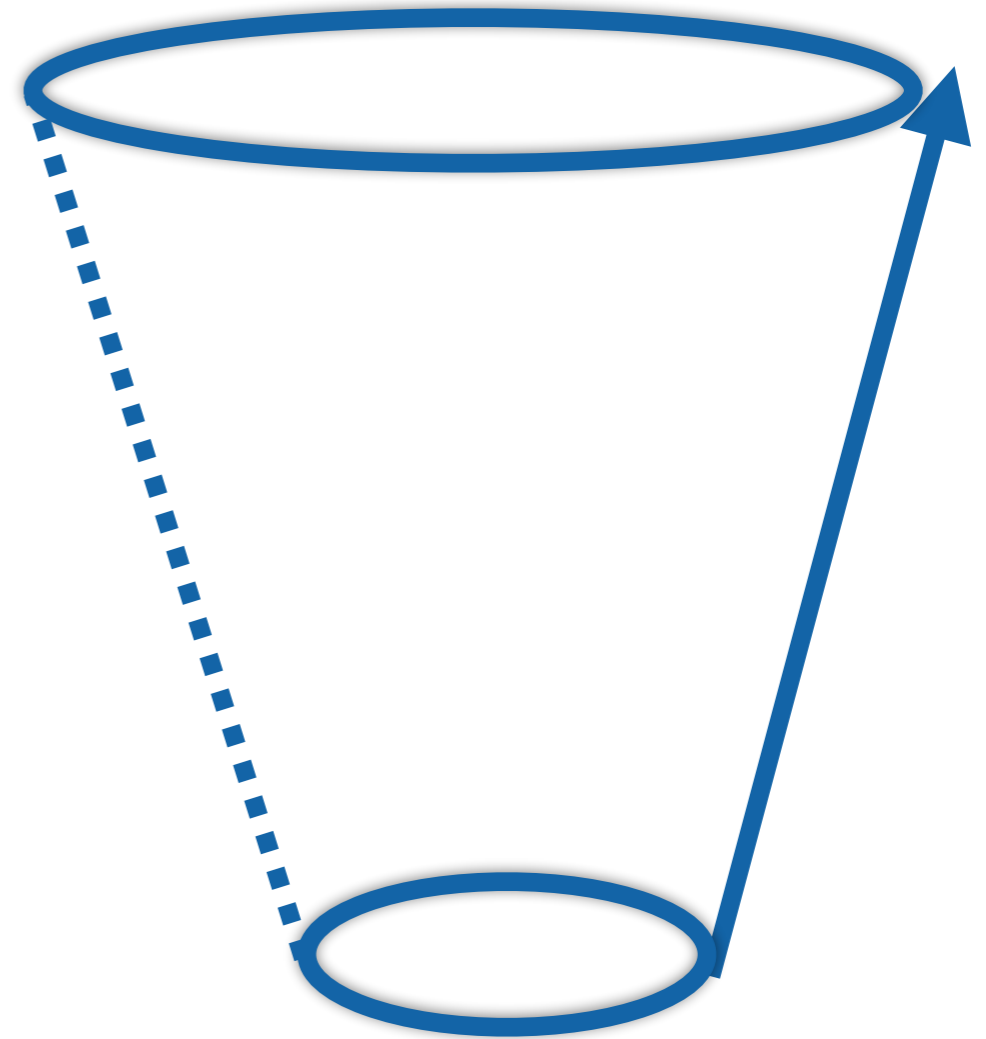
ESTATICO



SIN CURVATURA TEMPORAL



ESTATICO



EXPANSION UNIFORME

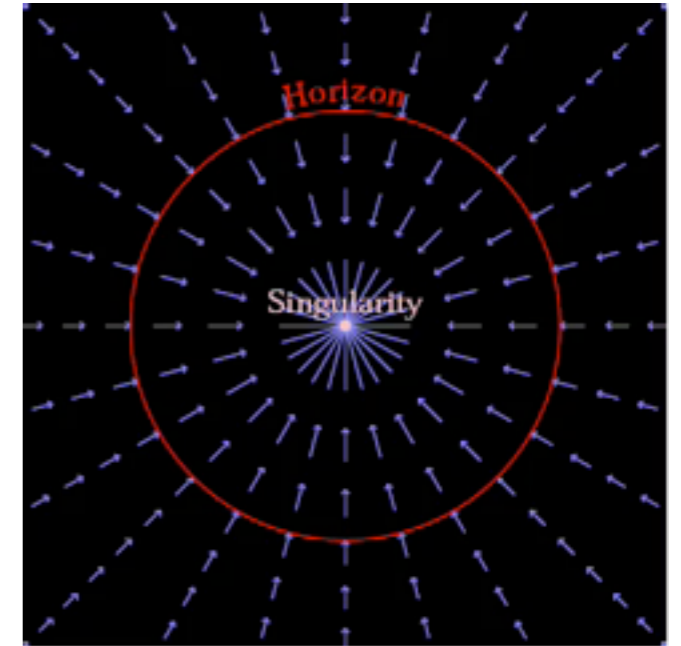
El efecto combinado es una CURVATURA del
ESPACIOTIEMPO

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

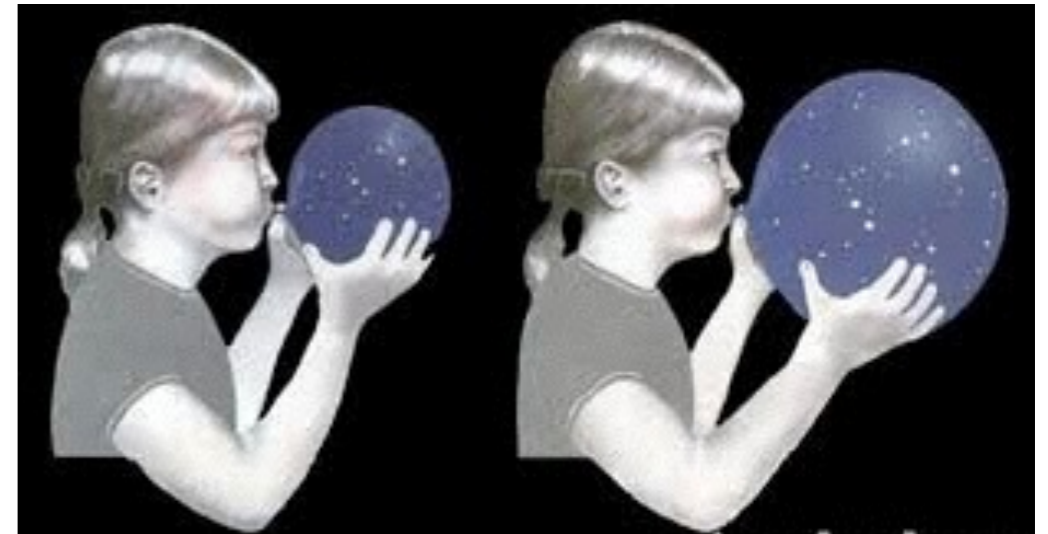
ECUACIONES DE EINSTEIN

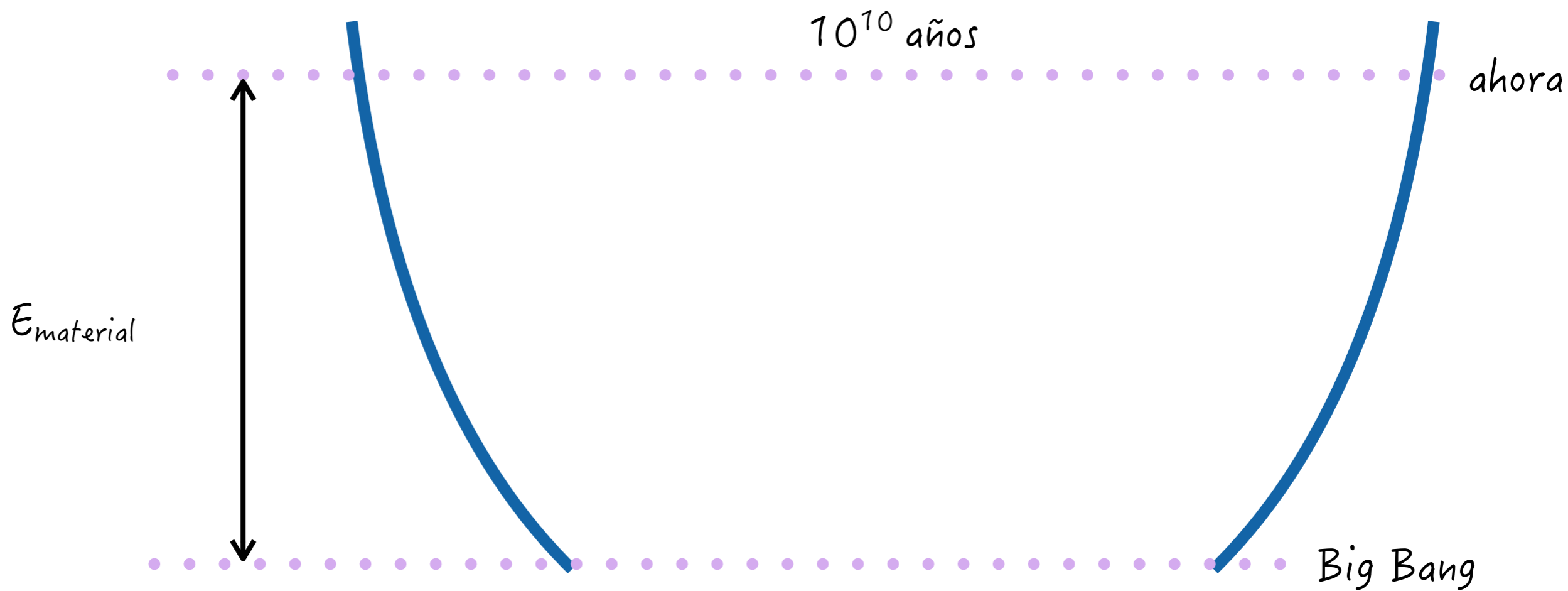
CURVATURA_{espacio-tiempo} = G (DENSIDAD DE ENERGIA)

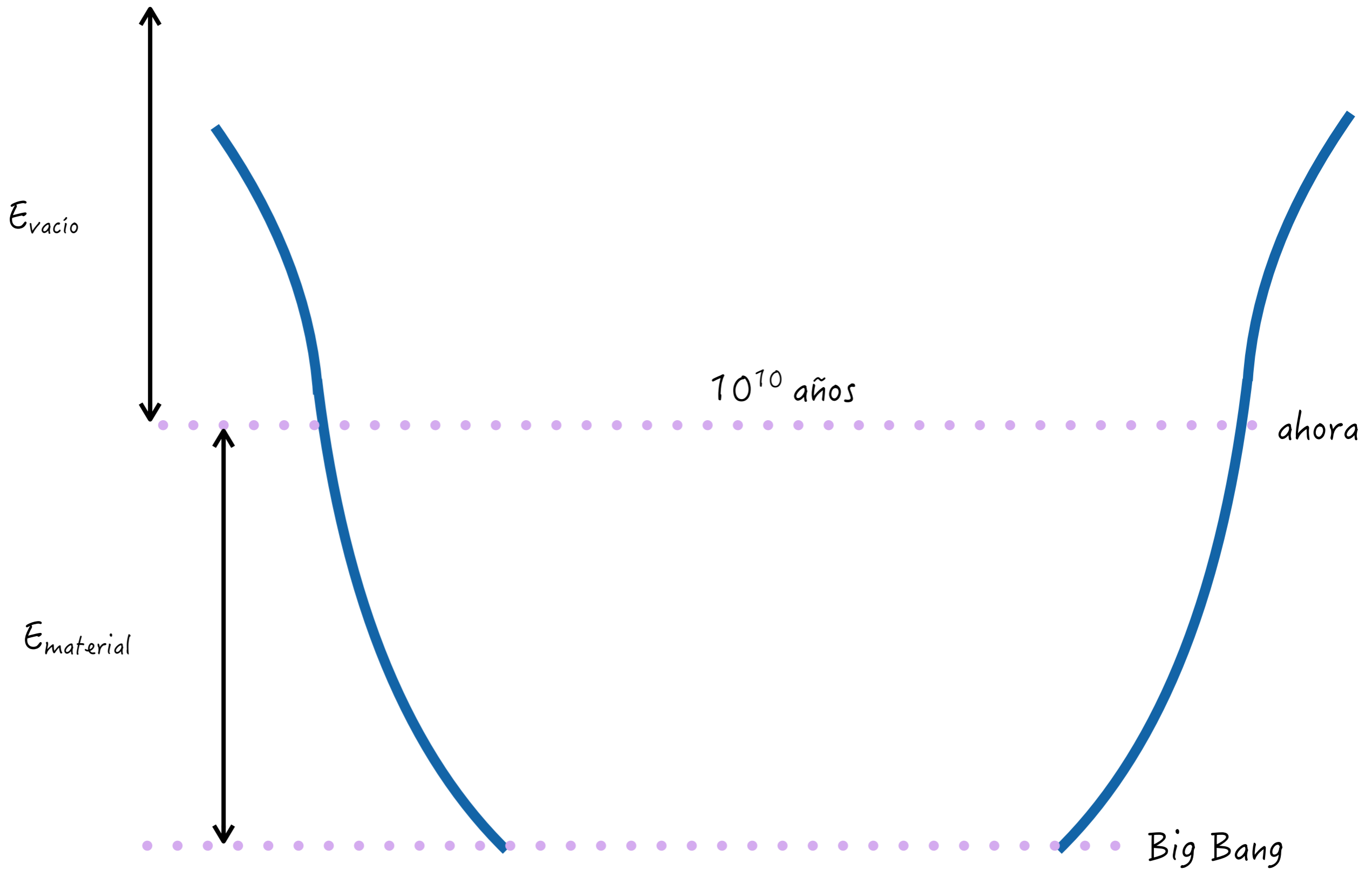
La energía "material" tiende a contraer el espacio



La energía de "vacío" tiende a estirar el espacio







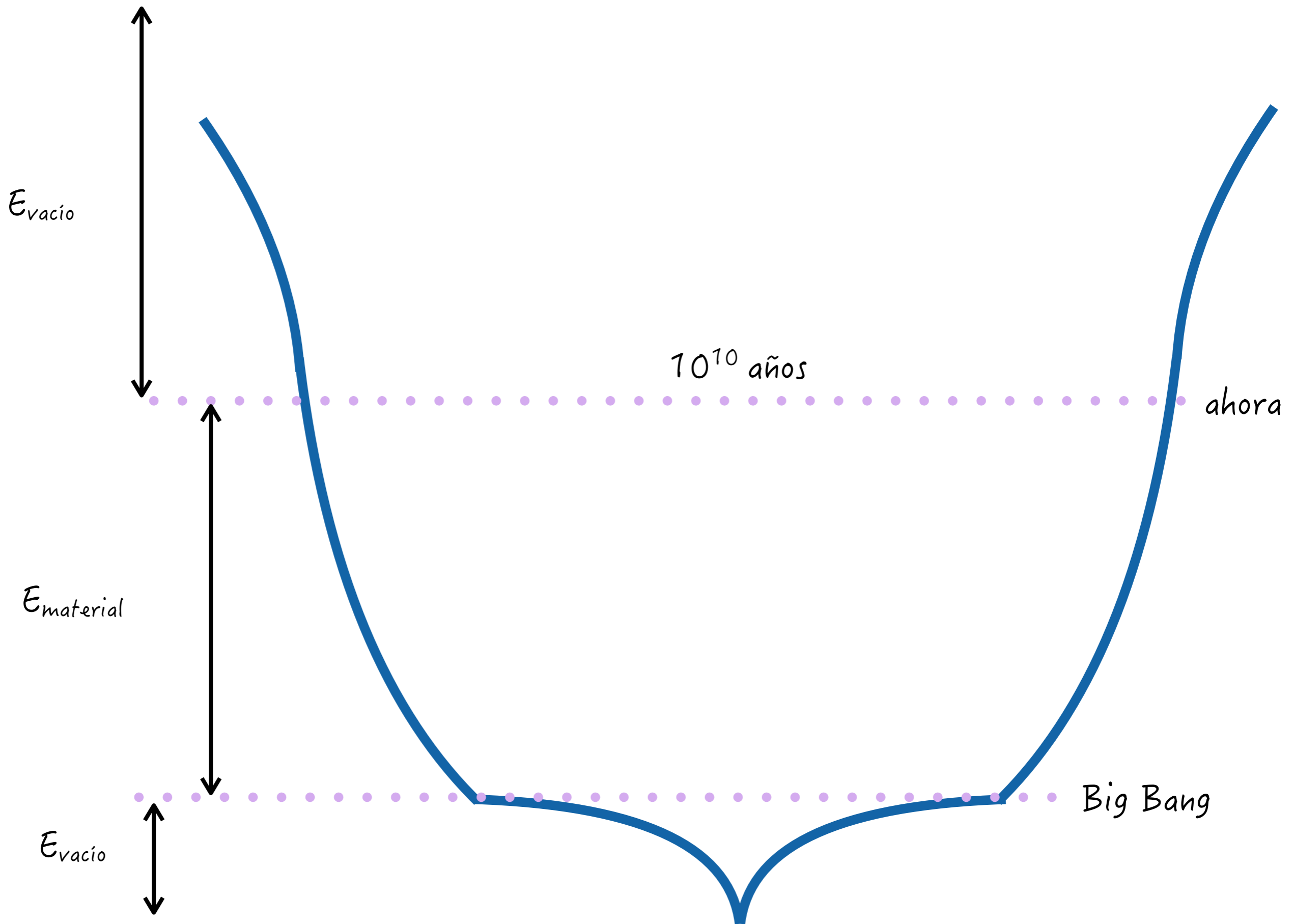
$E_{\text{vacío}}$

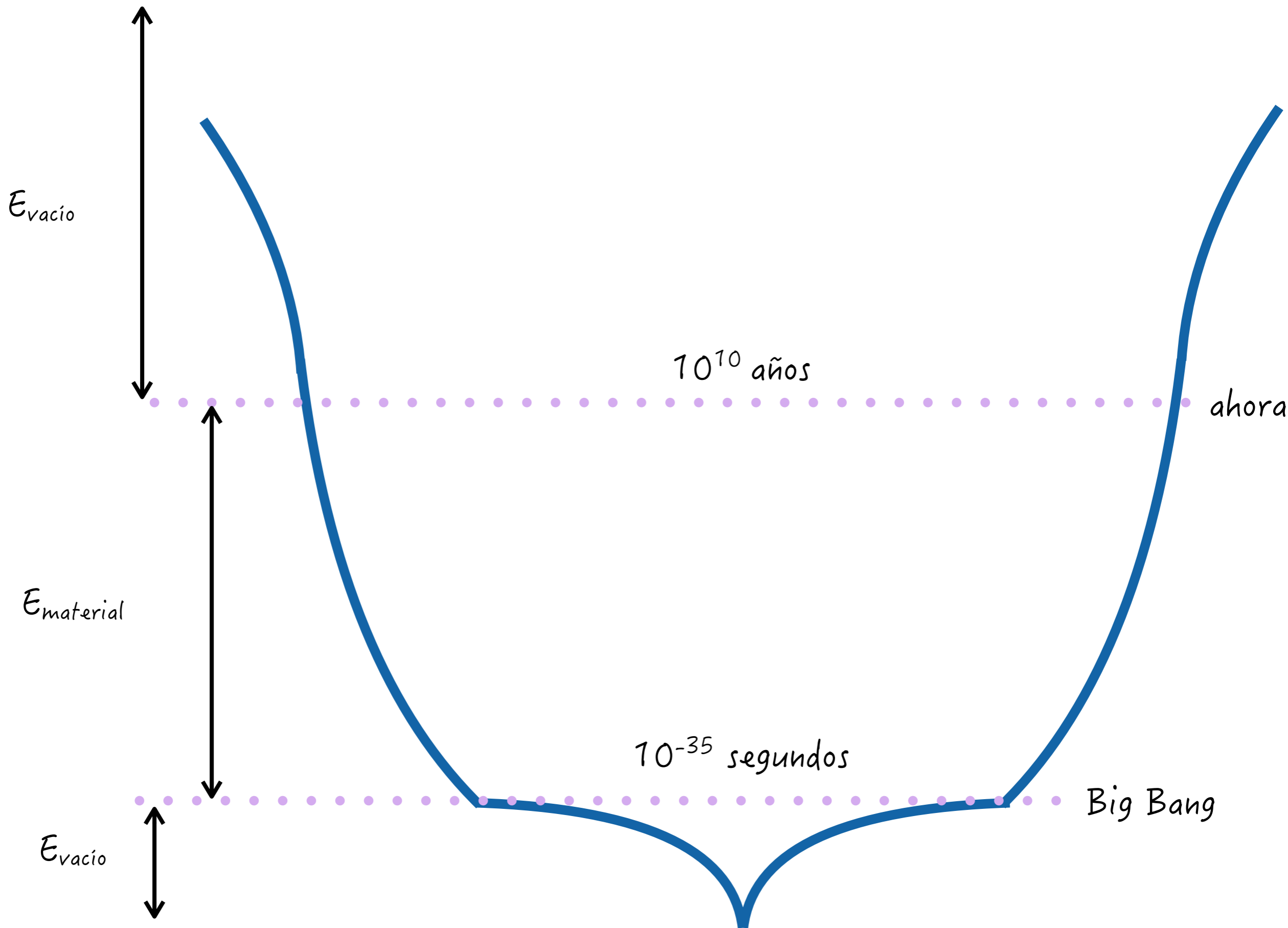
10^{10} años

ahora

E_{material}

Big Bang





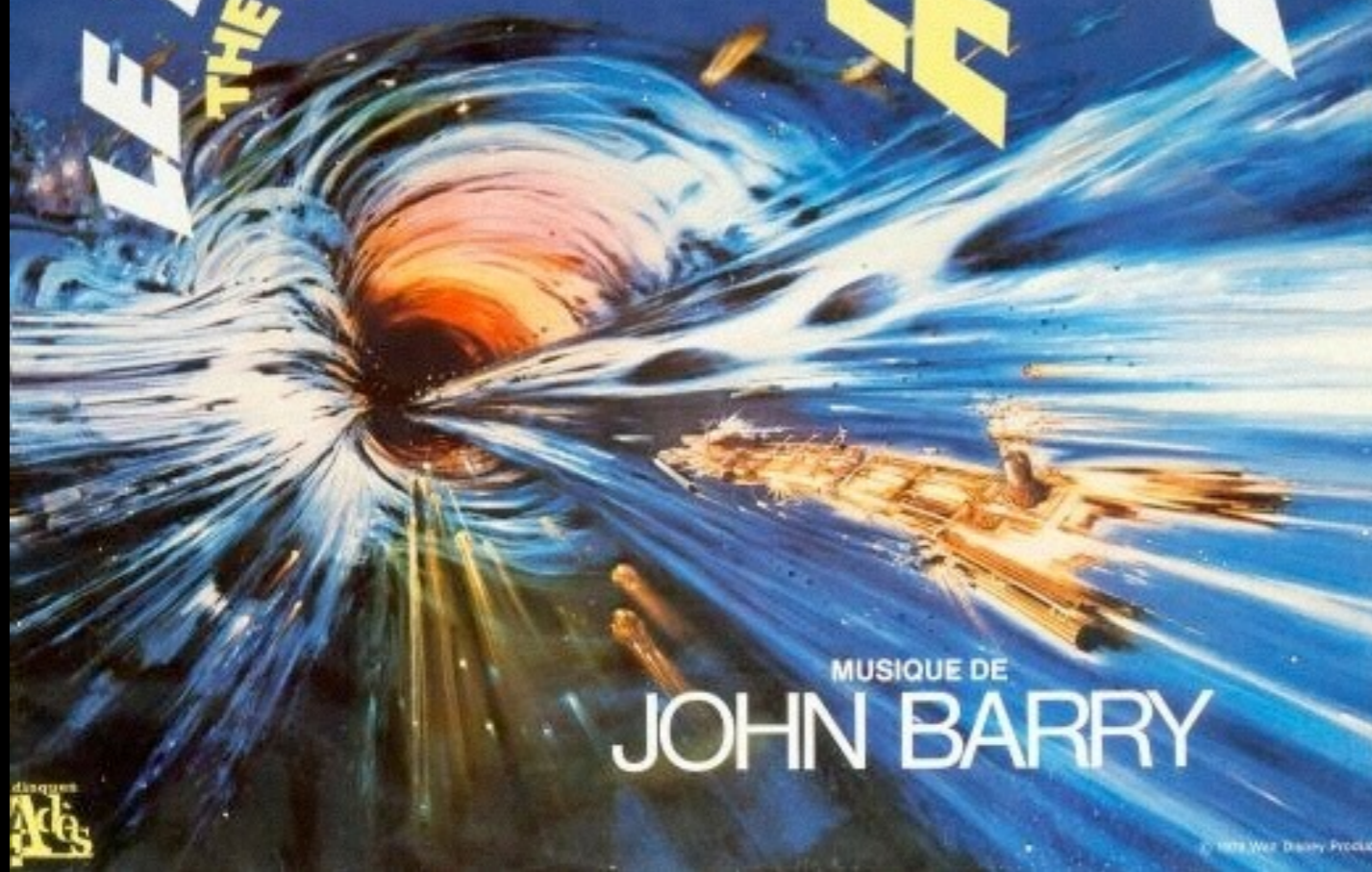
BANDE ORIGINALE DE LA MUSIQUE DU FILM
ORIGINAL MOTION PICTURE SOUNDTRACK



VS-9603 F

LE TROU NOIR

THE BLACK HOLE



MUSIQUE DE
JOHN BARRY



© 1974 Walt Disney Records

BANDE ORIGINALE DE LA MUSIQUE DU FILM
ORIGINAL MOTION PICTURE SOUNDTRACK

Disneyland
RECORDED

VS-9603 F

LE TROU NOIR

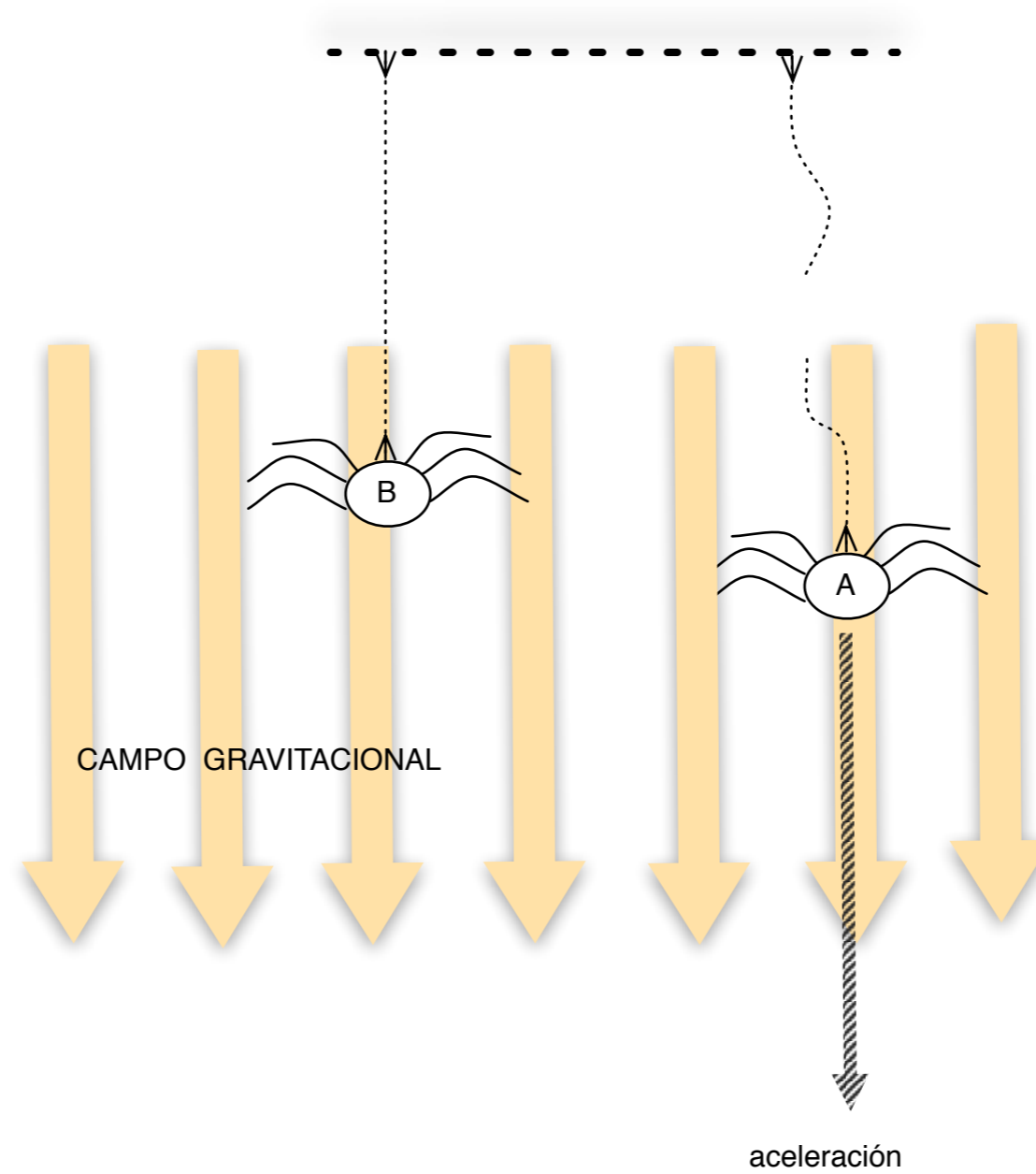
THE BLACK HOLE

JOHN WILLIAMS

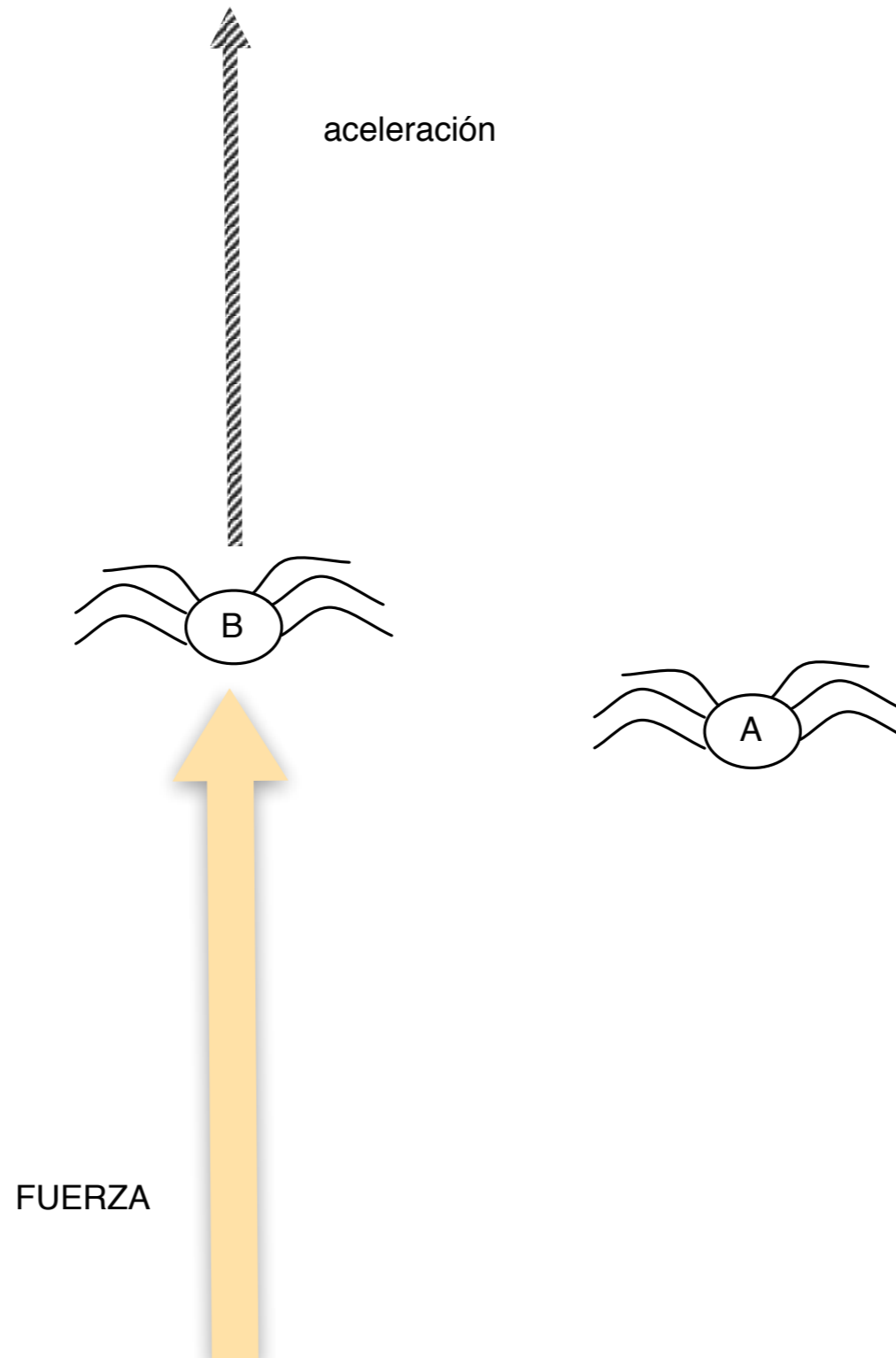
Adès



El punto de vista de Bernardo



El punto de vista de Alicia



El punto de vista de Alicia

t_A



espacio A

El punto de vista de Alicia

t_A

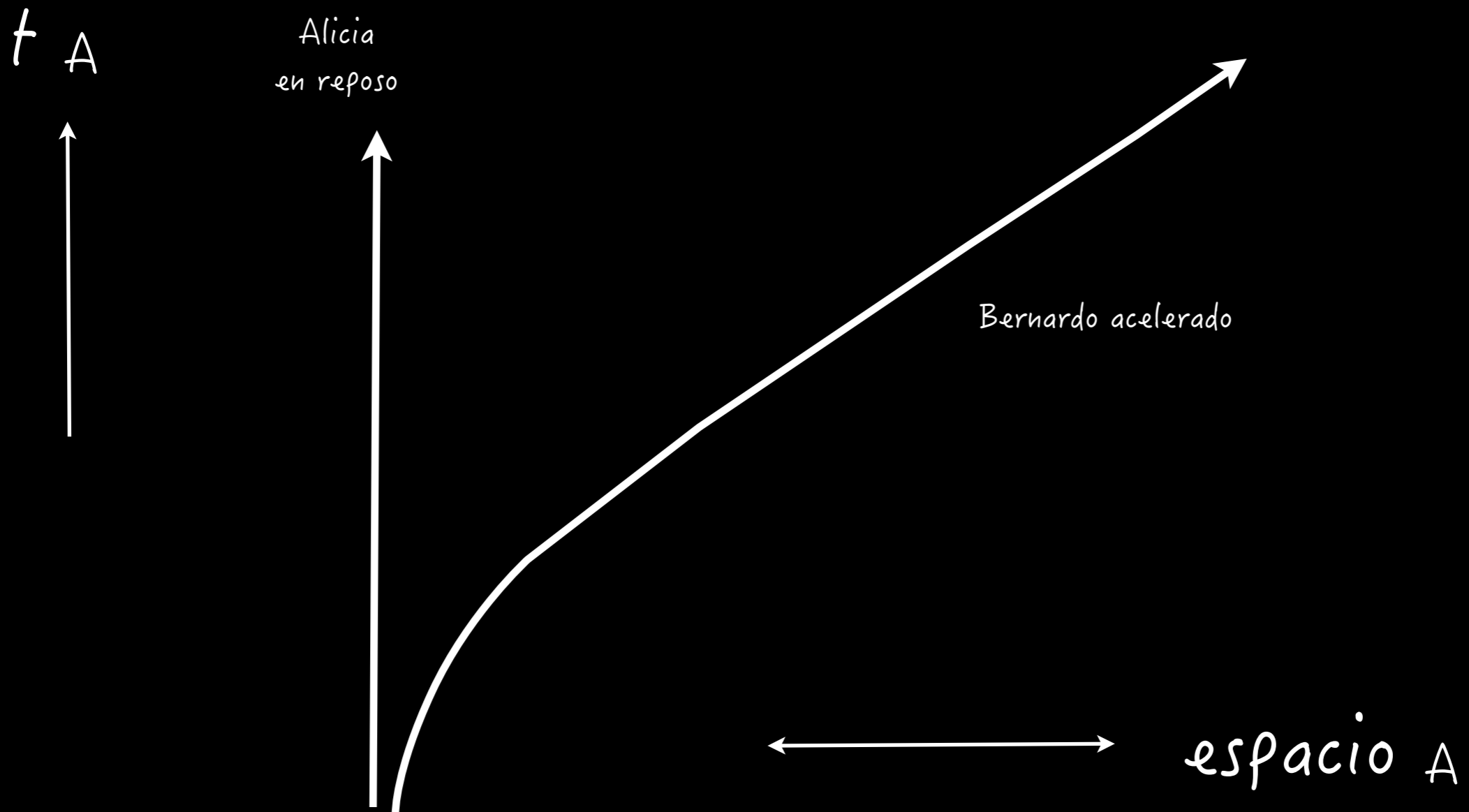


Alicia
en reposo

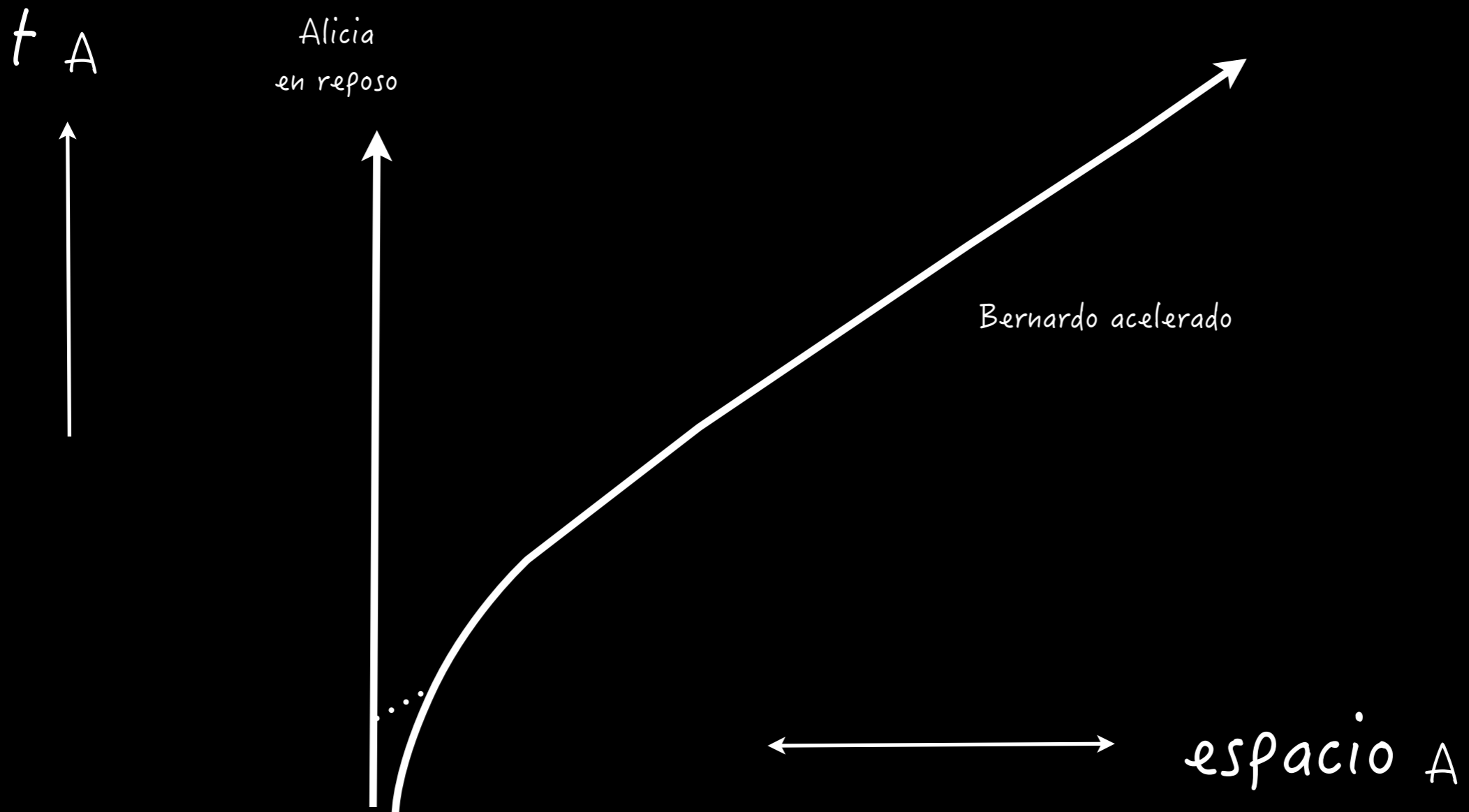


espacio A

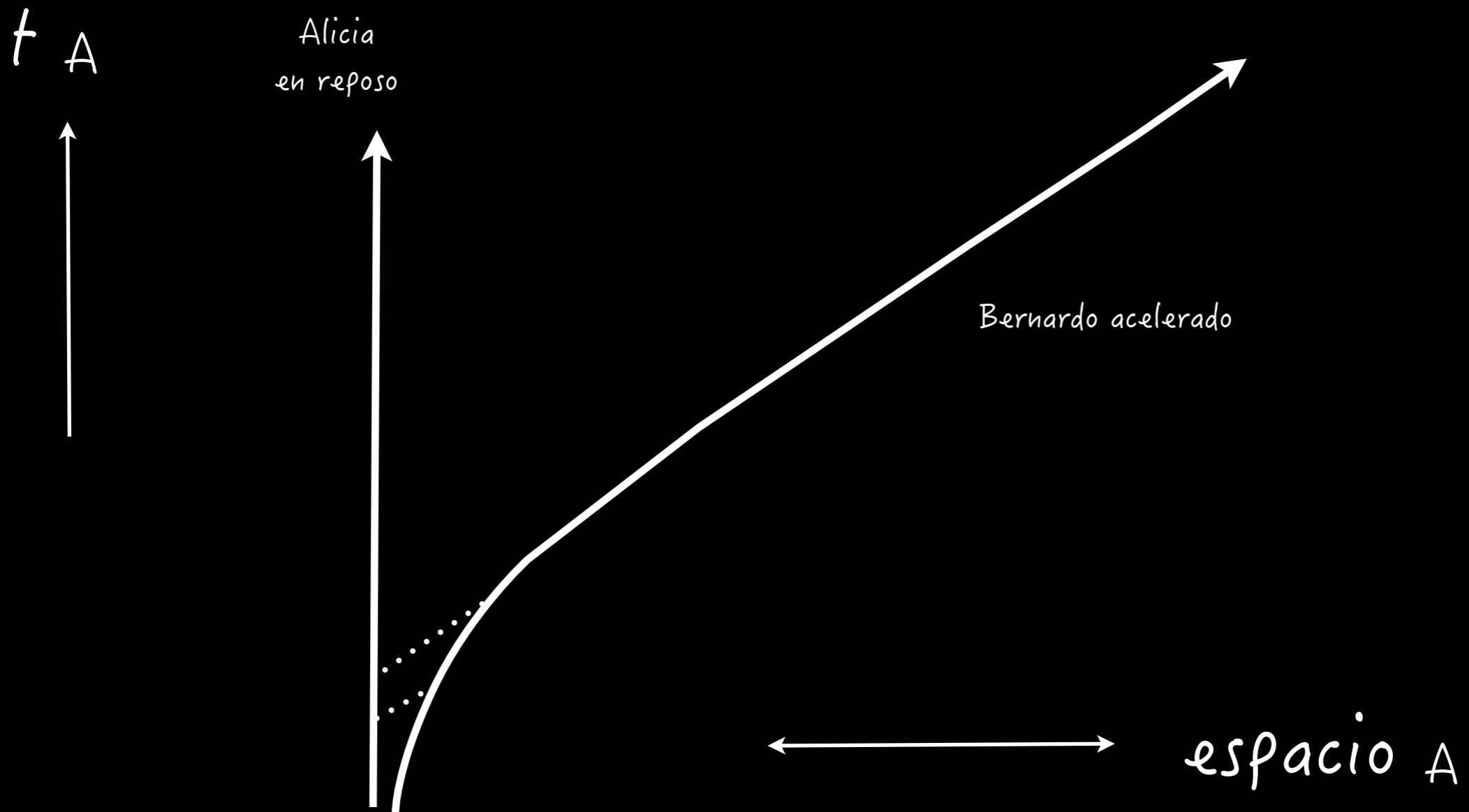
El punto de vista de Alicia



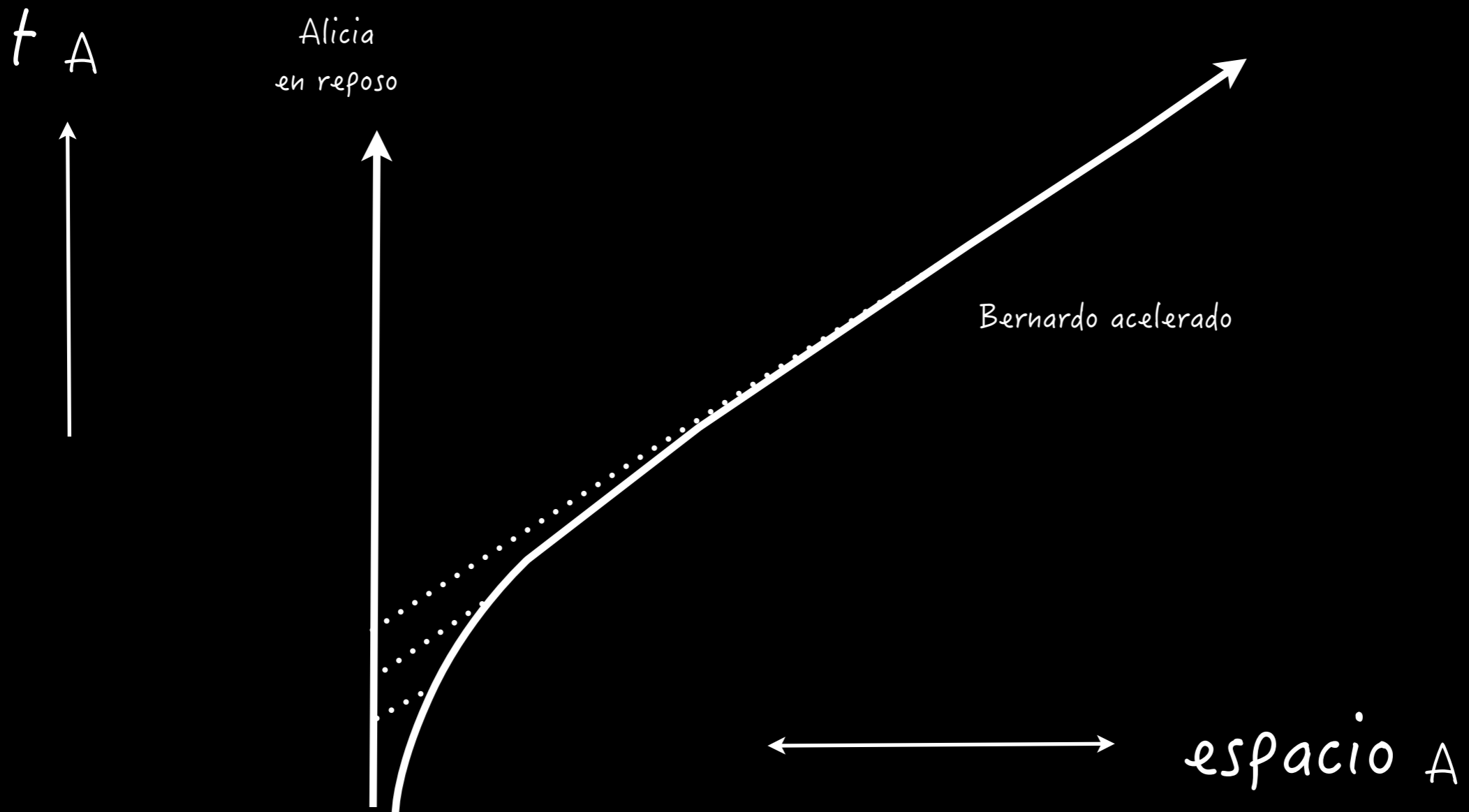
El punto de vista de Alicia



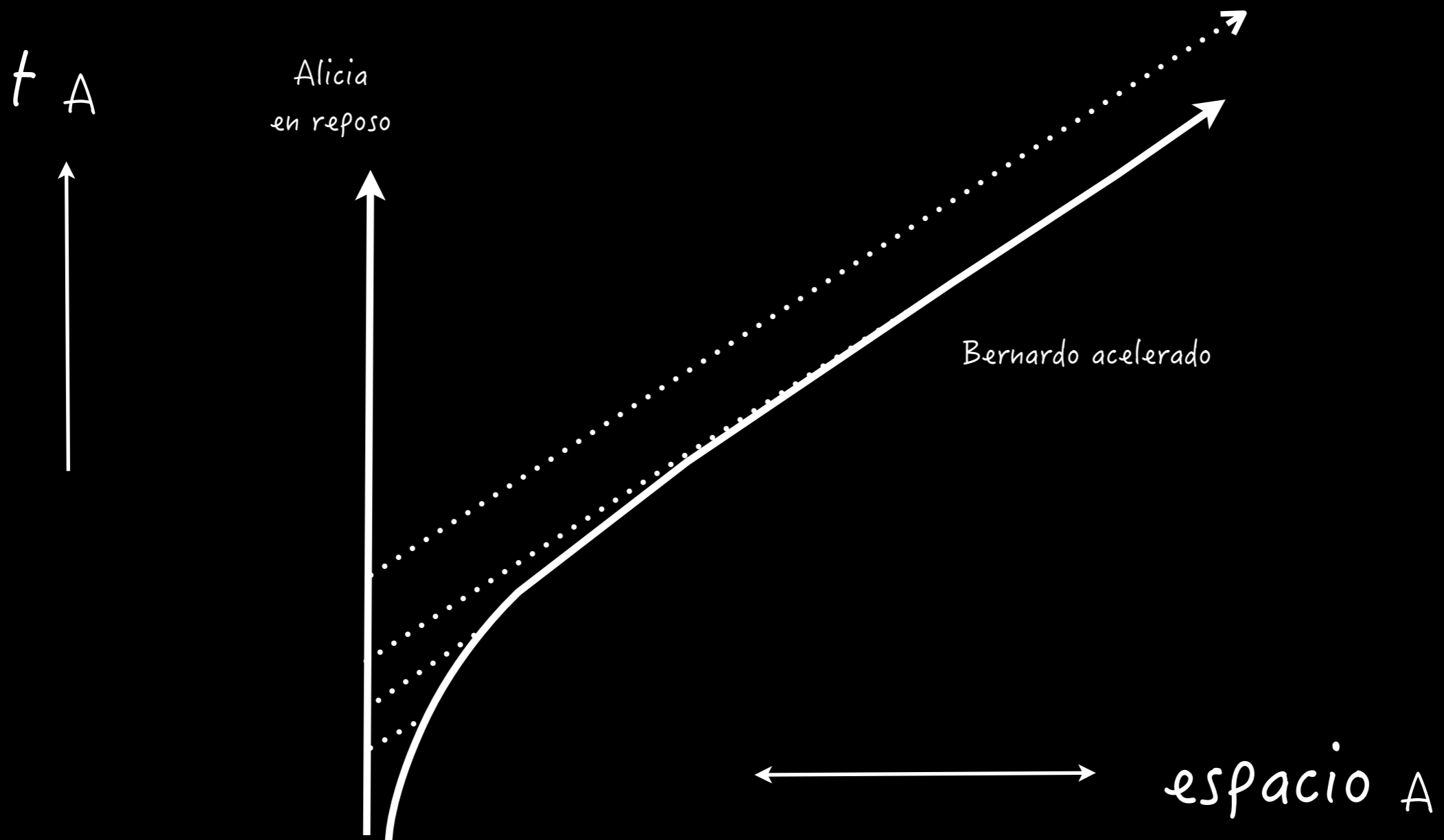
El punto de vista de Alicia



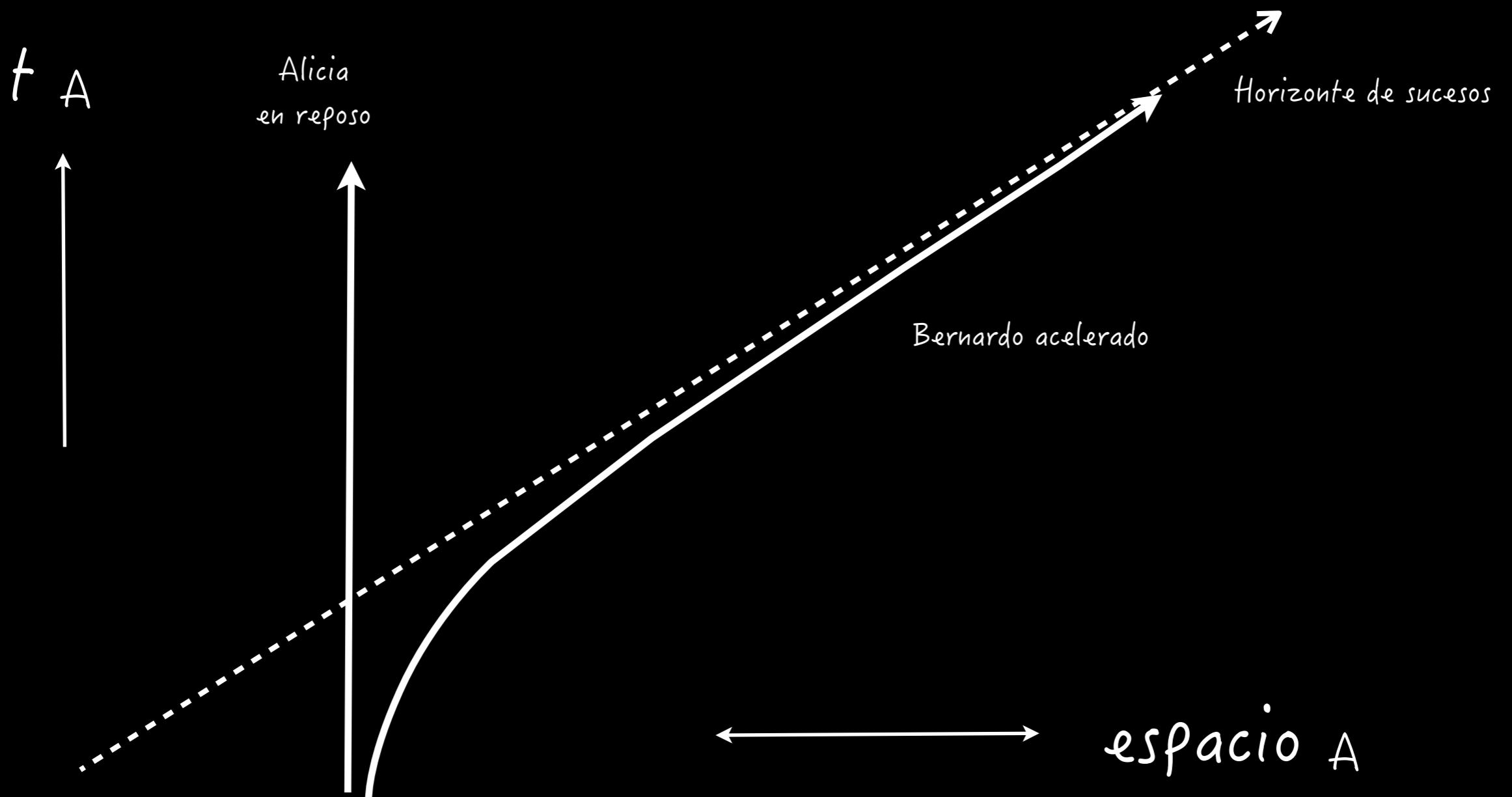
El punto de vista de Alicia



El punto de vista de Alicia



El punto de vista de Alicia



El punto de vista de Bernardo

t_B



espacio B

El punto de vista de Bernardo

t_B

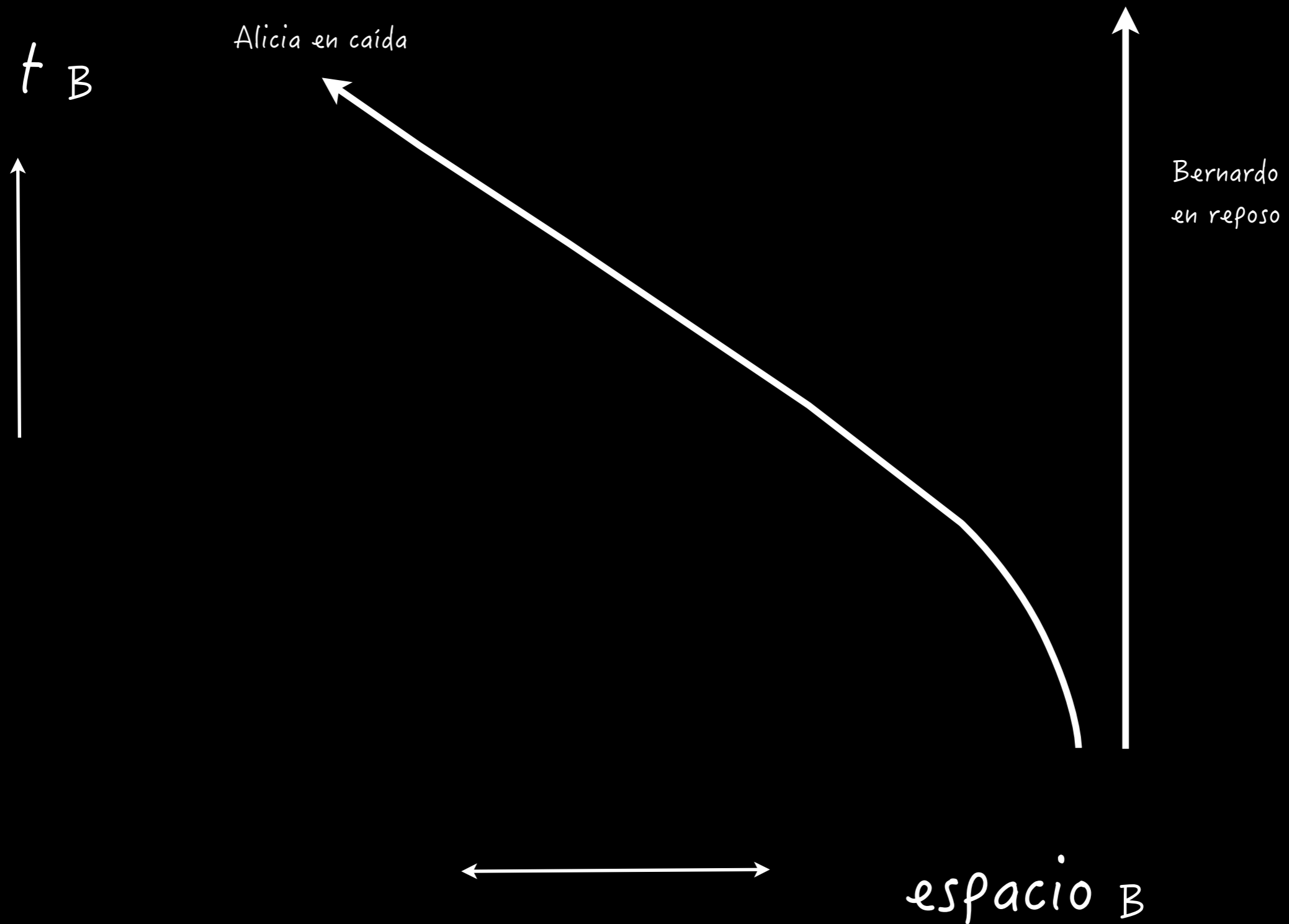


Bernardo
en reposo

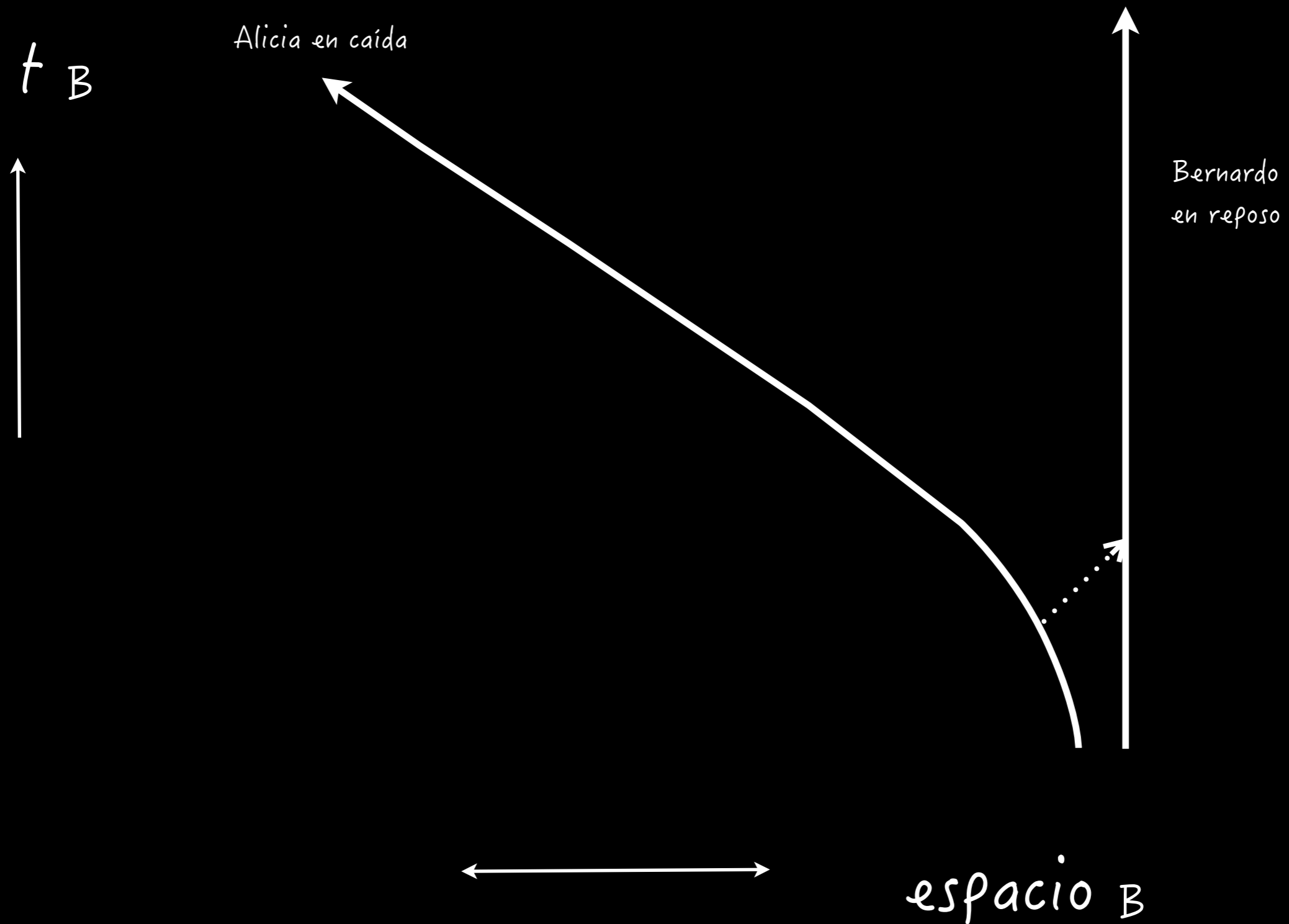


espacio B

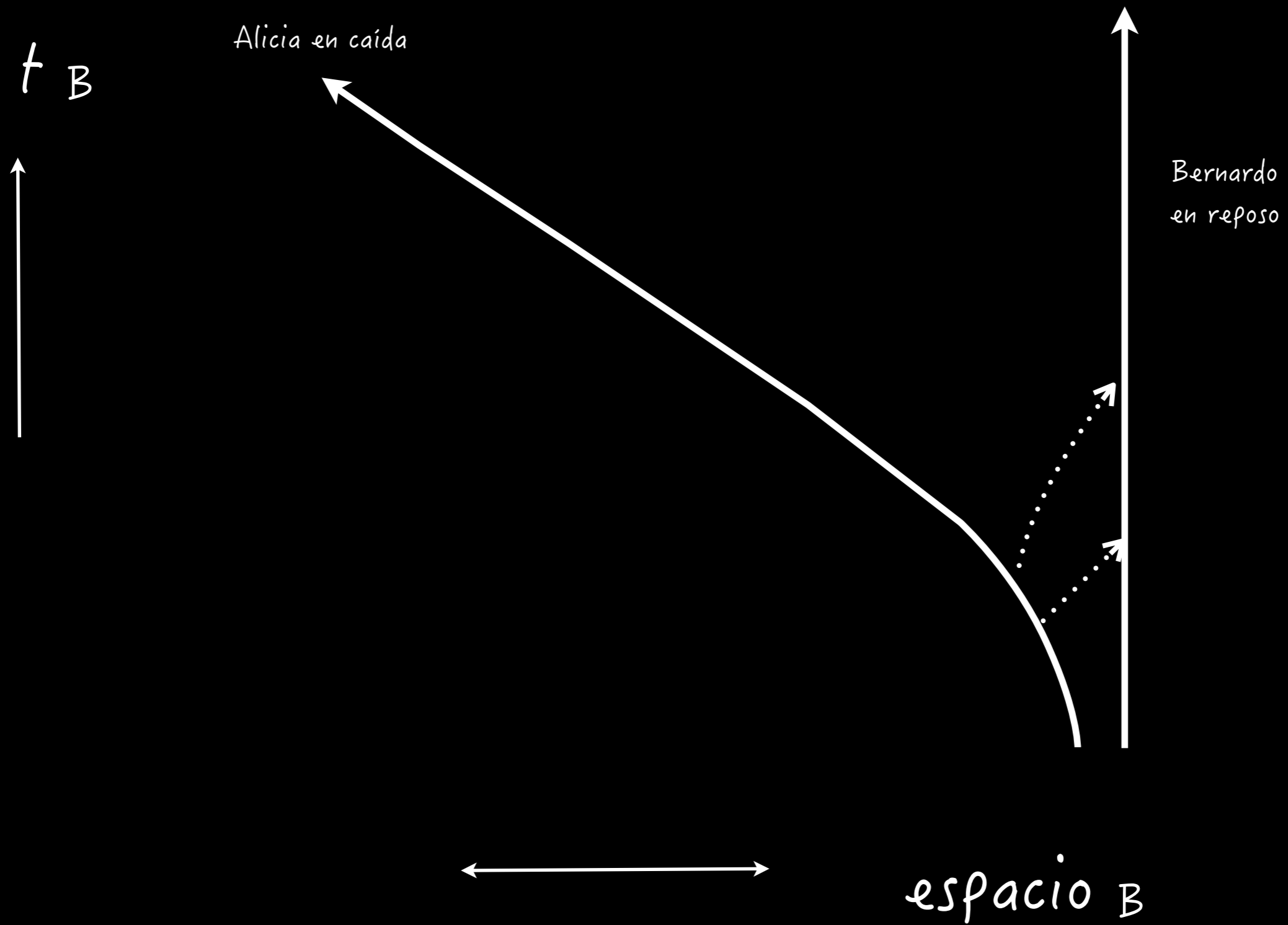
El punto de vista de Bernardo



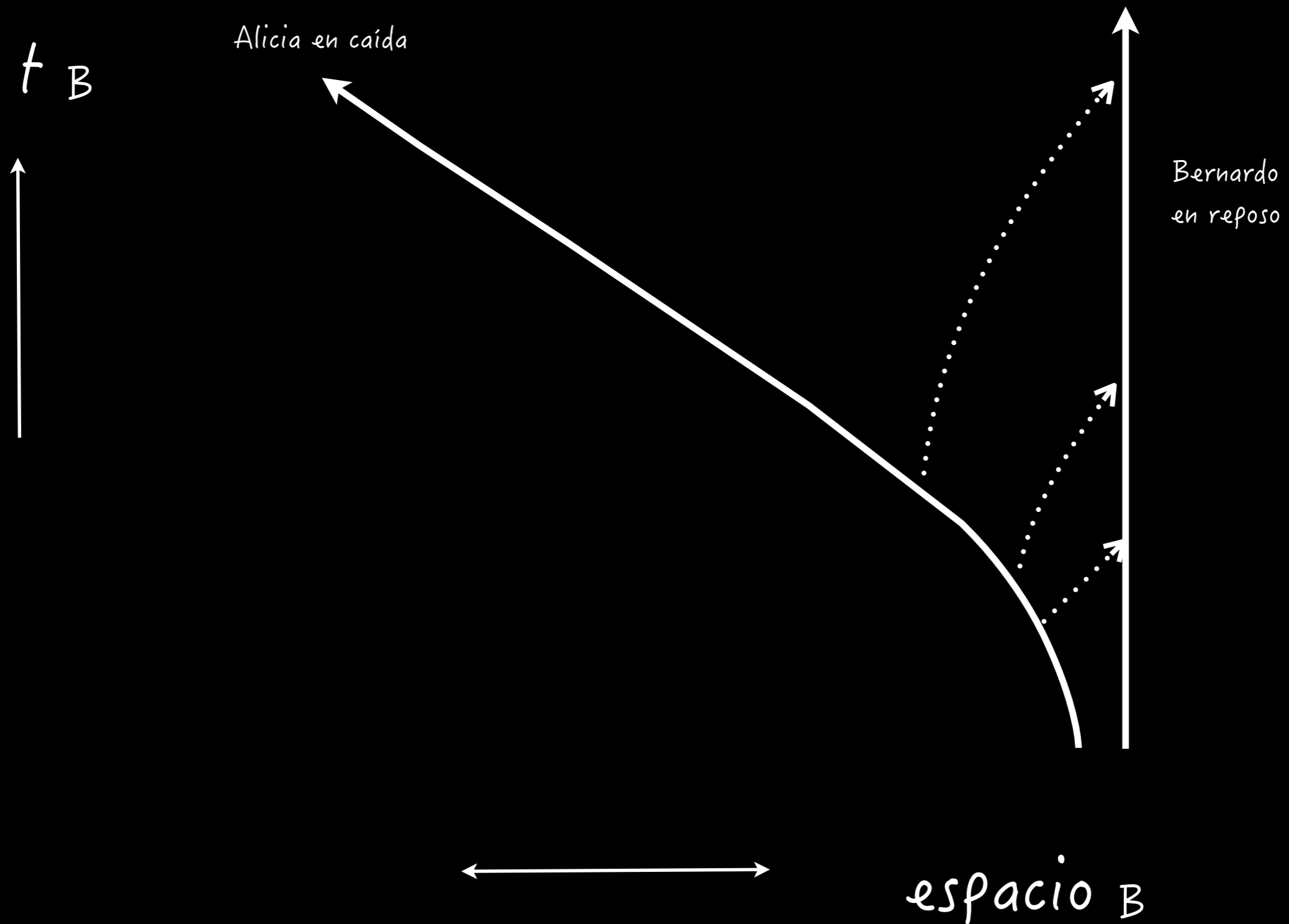
El punto de vista de Bernardo



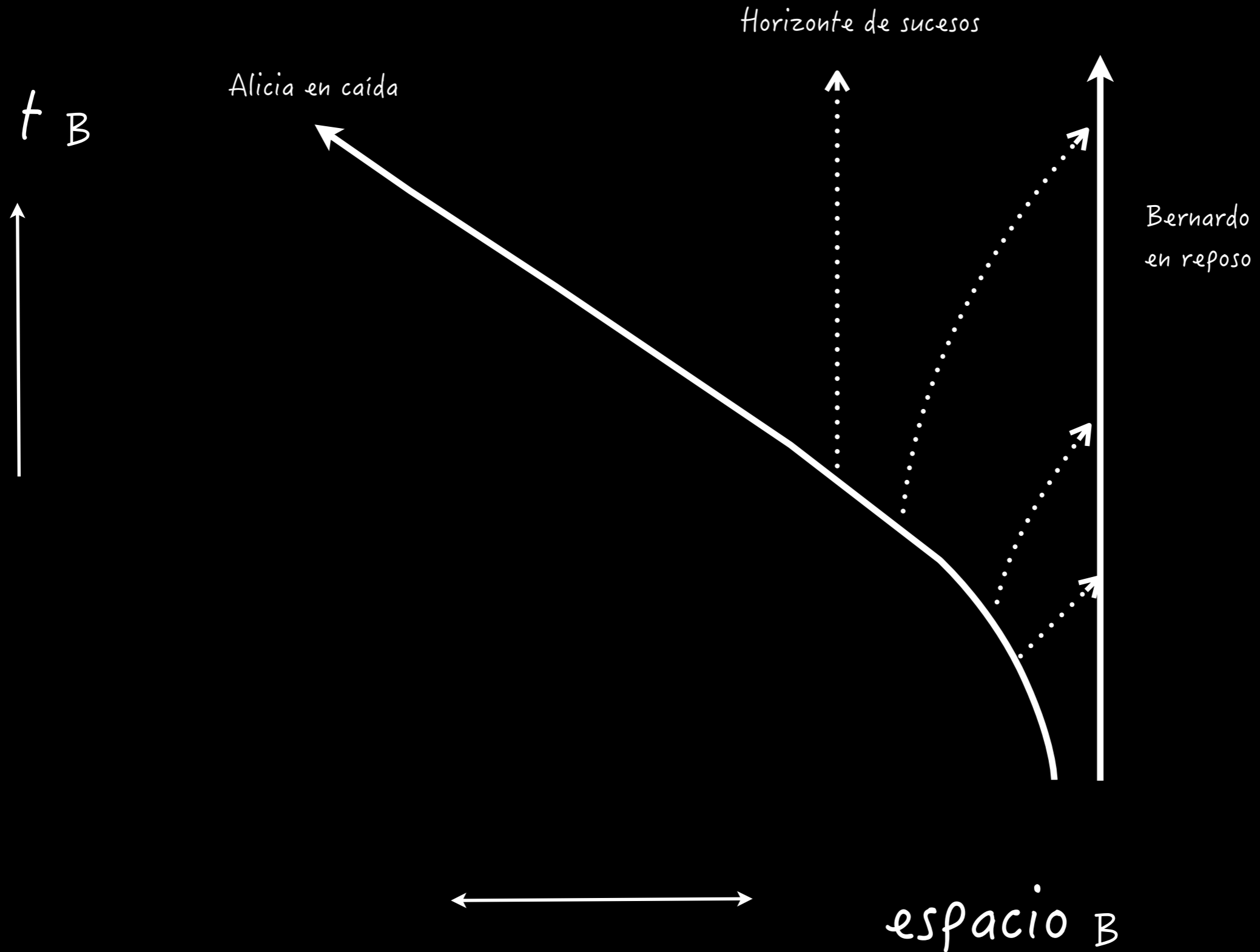
El punto de vista de Bernardo



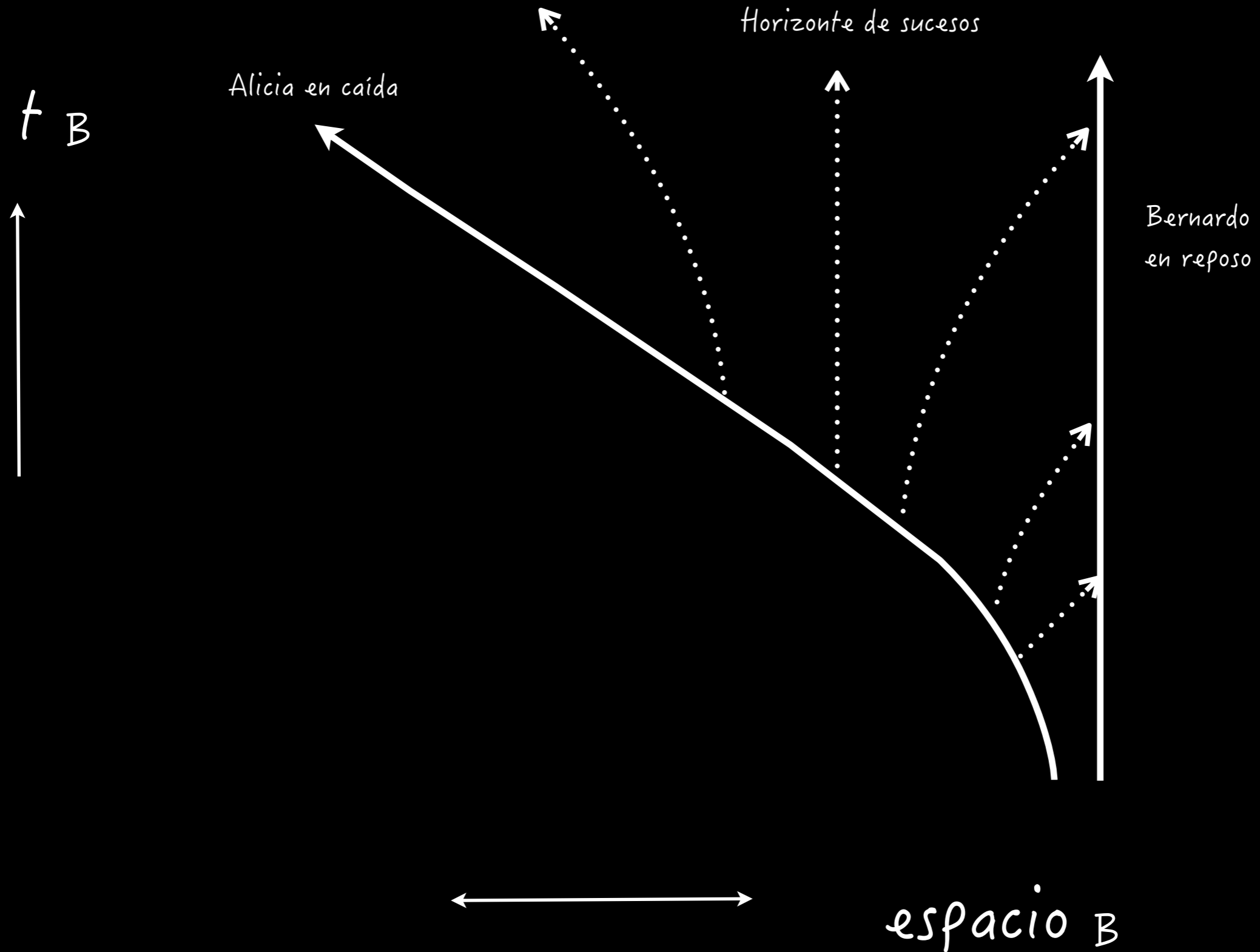
El punto de vista de Bernardo



El punto de vista de Bernardo



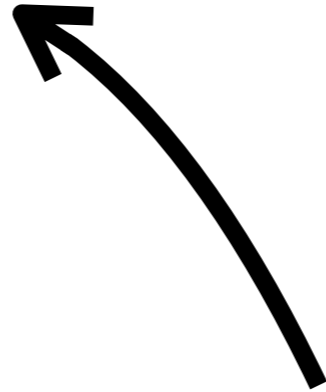
El punto de vista de Bernardo





Bernardo
en
reposo

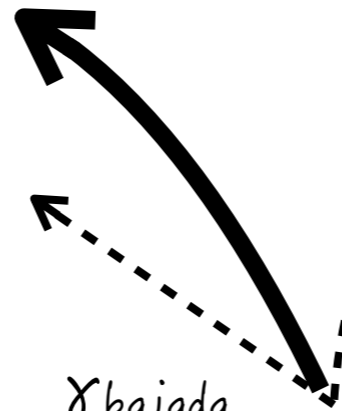
Alicia cae



Bernardo
en
reposo

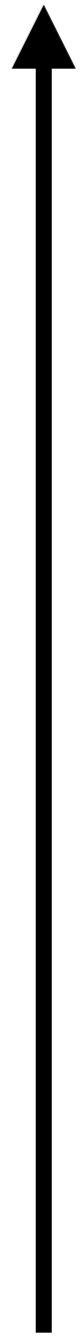


Alicia cae

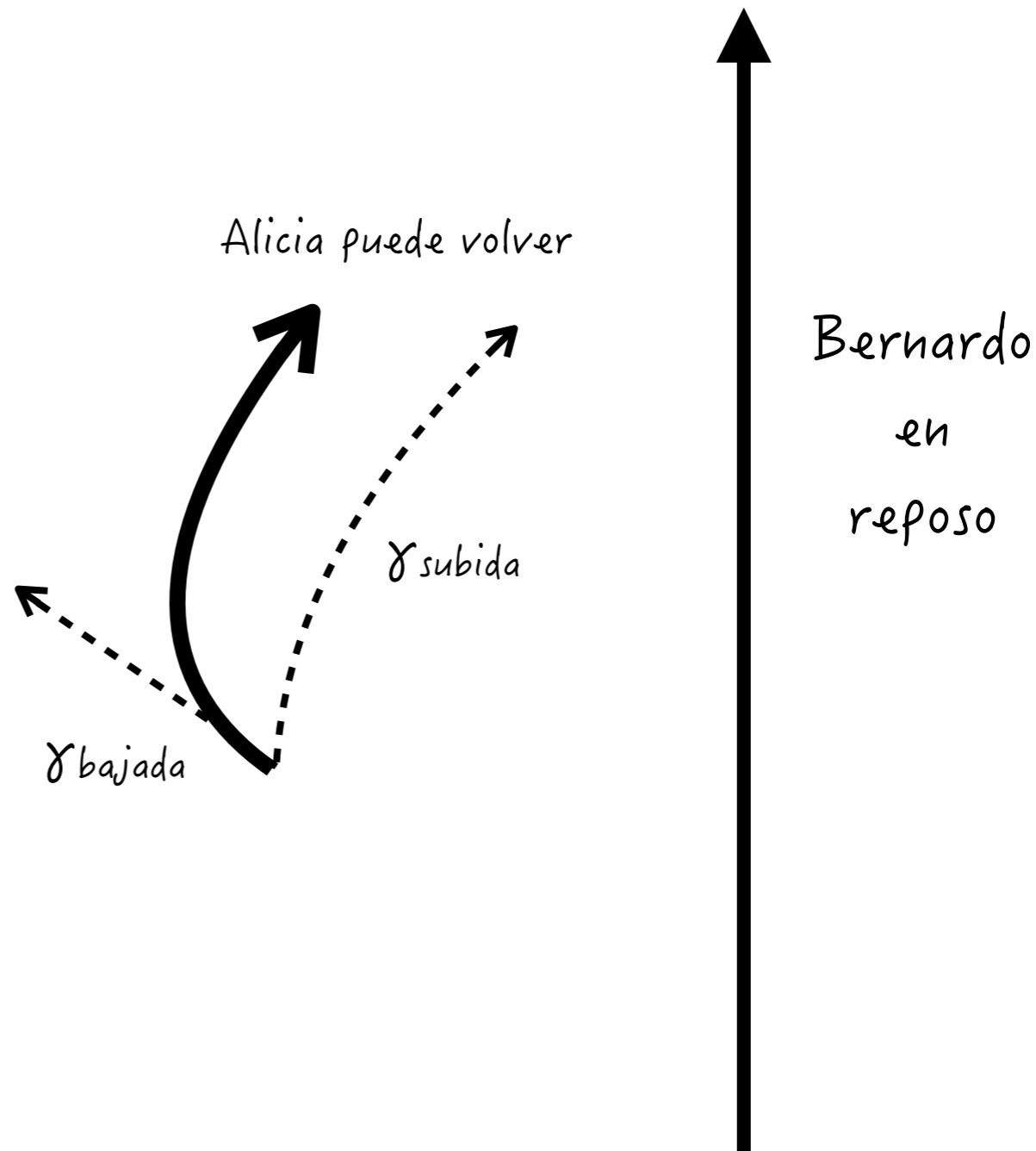


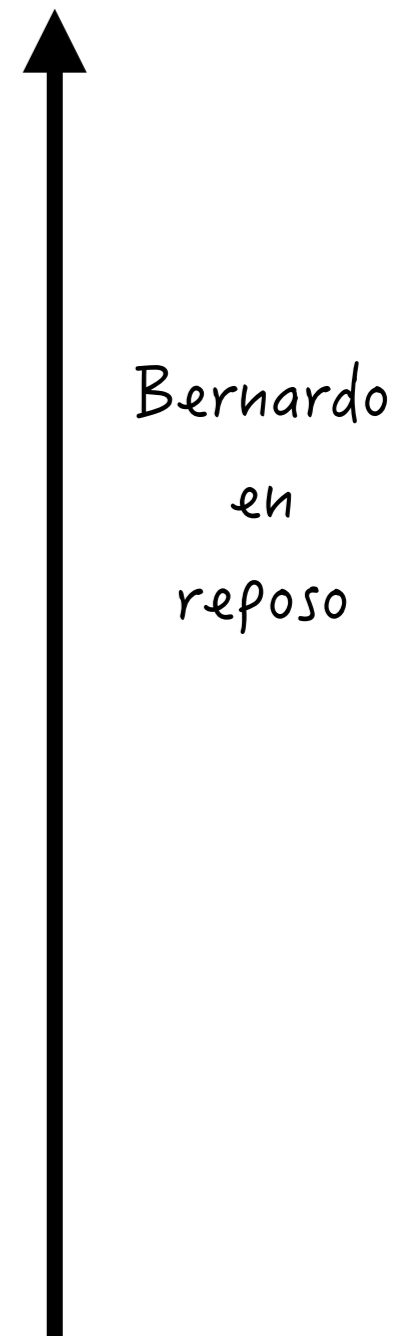
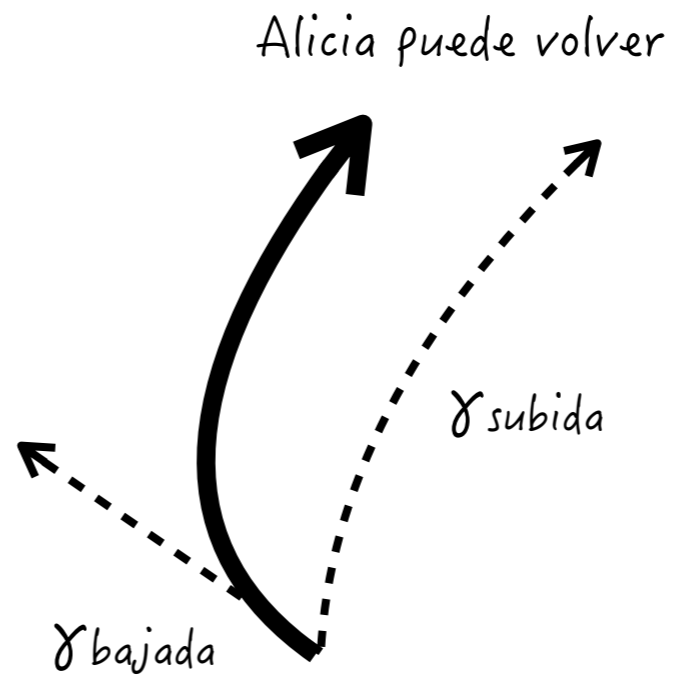
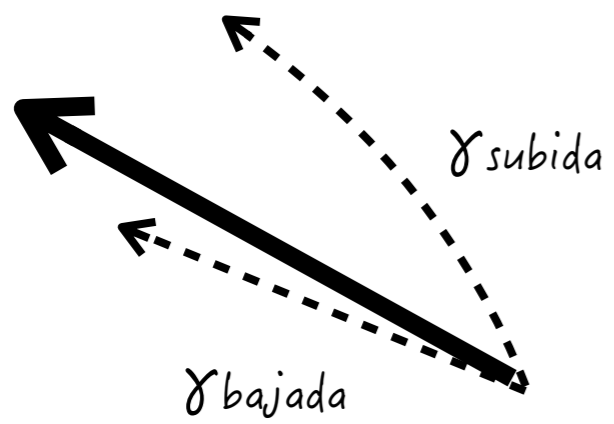
γ subida

γ bajada

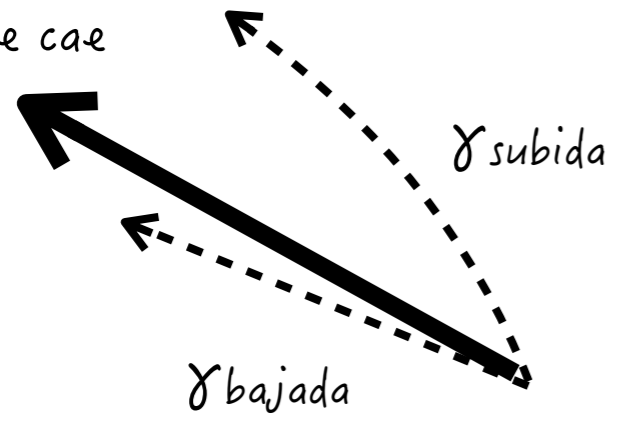


Bernardo
en
reposo





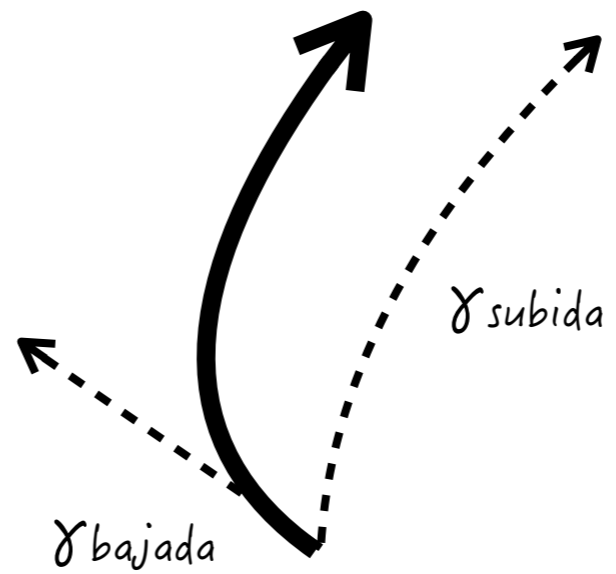
Alicia
siempre cae



γ_{subida}

γ_{bajada}

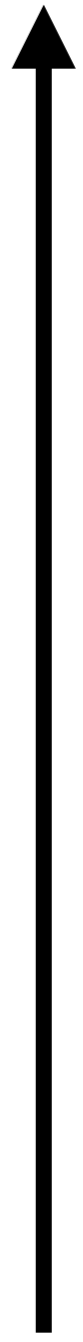
Alicia puede volver



γ_{subida}

γ_{bajada}

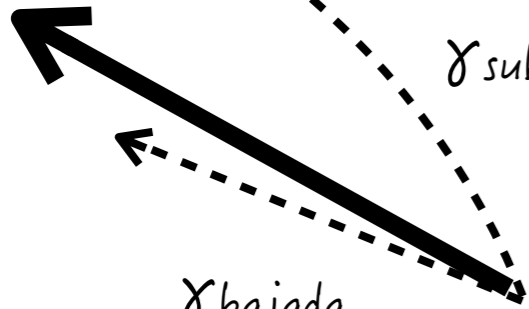
Bernardo
en
reposo



horizonte



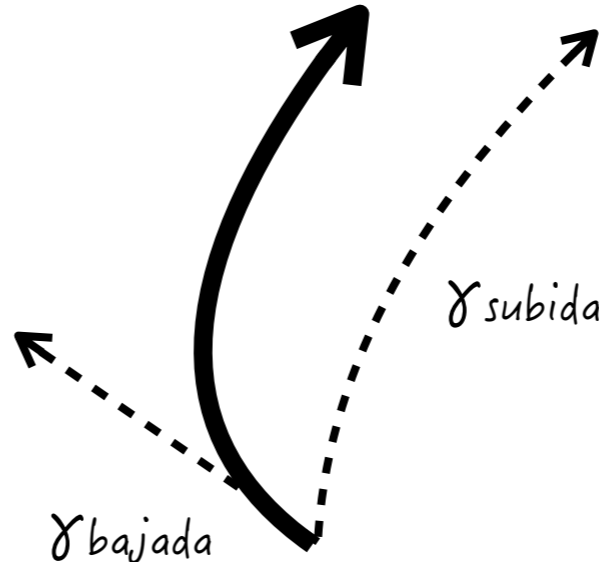
Alicia
siempre cae



γ subida

γ bajada

Alicia puede volver

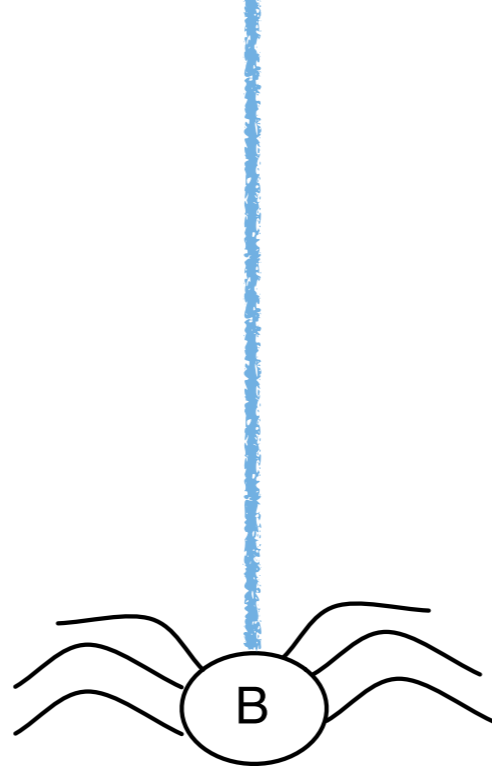


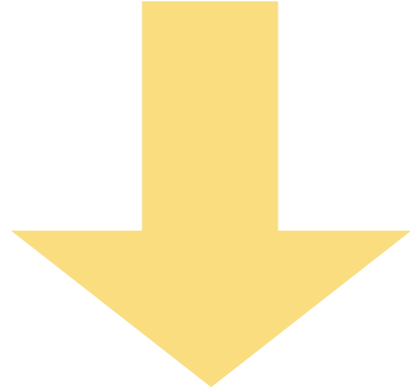
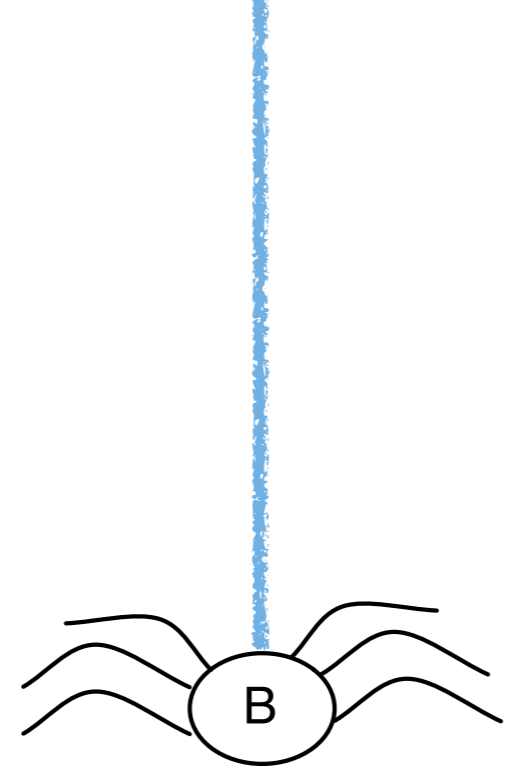
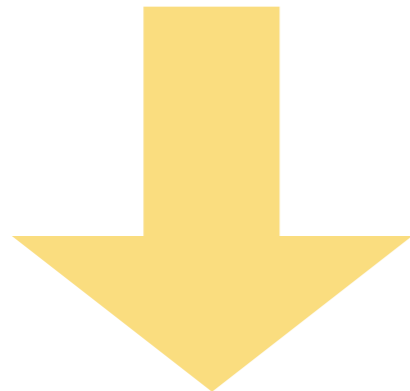
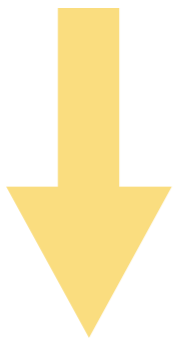
γ subida

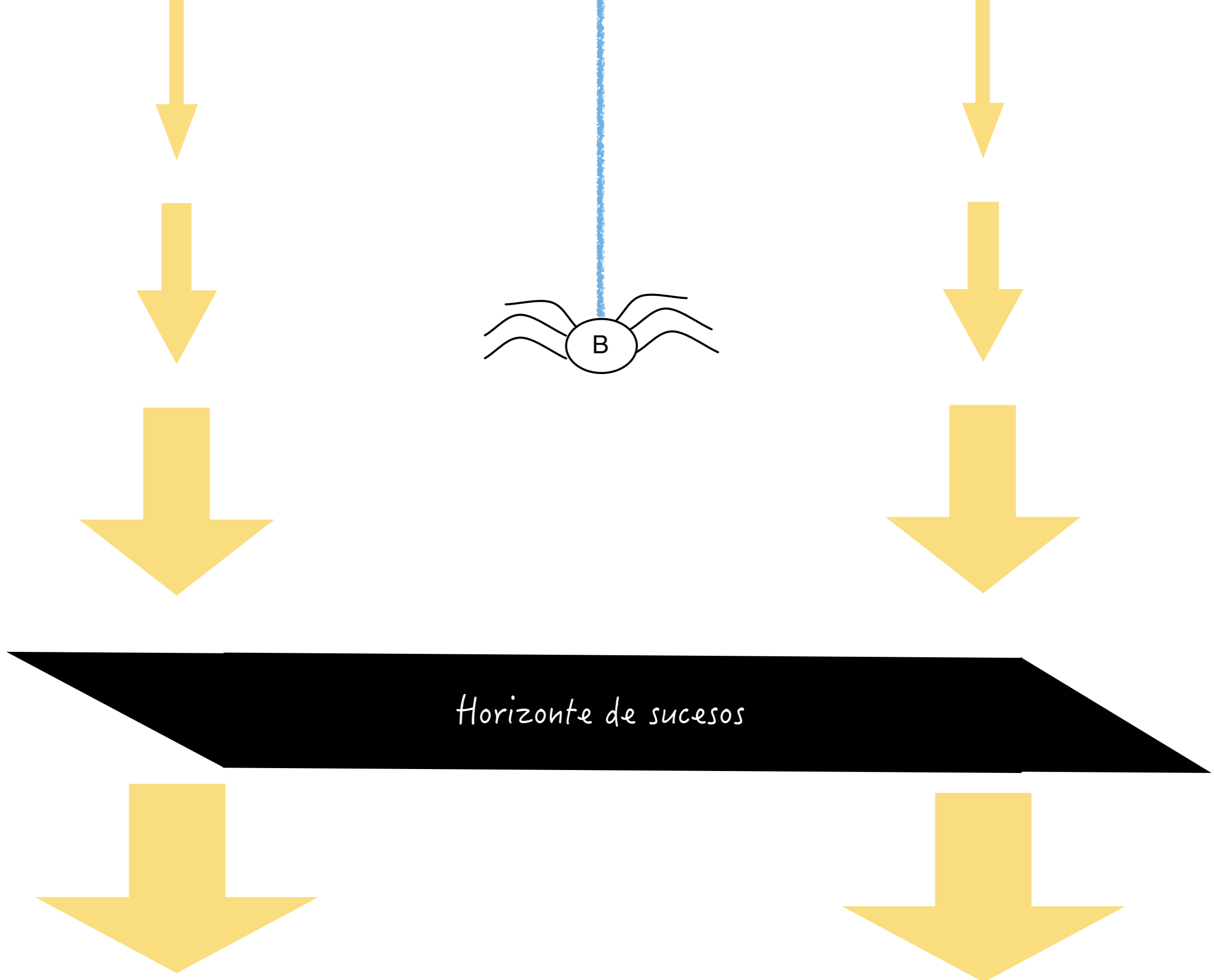
γ bajada

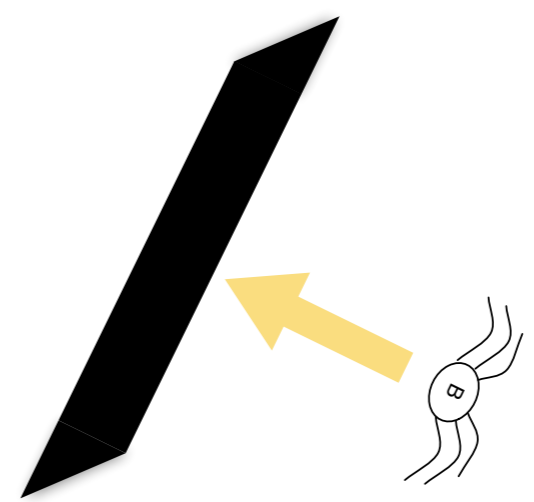
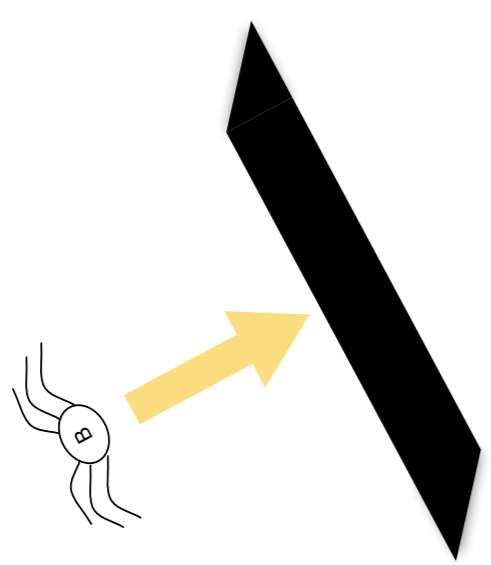
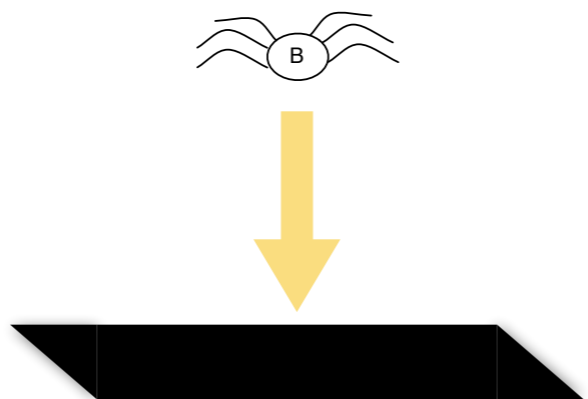


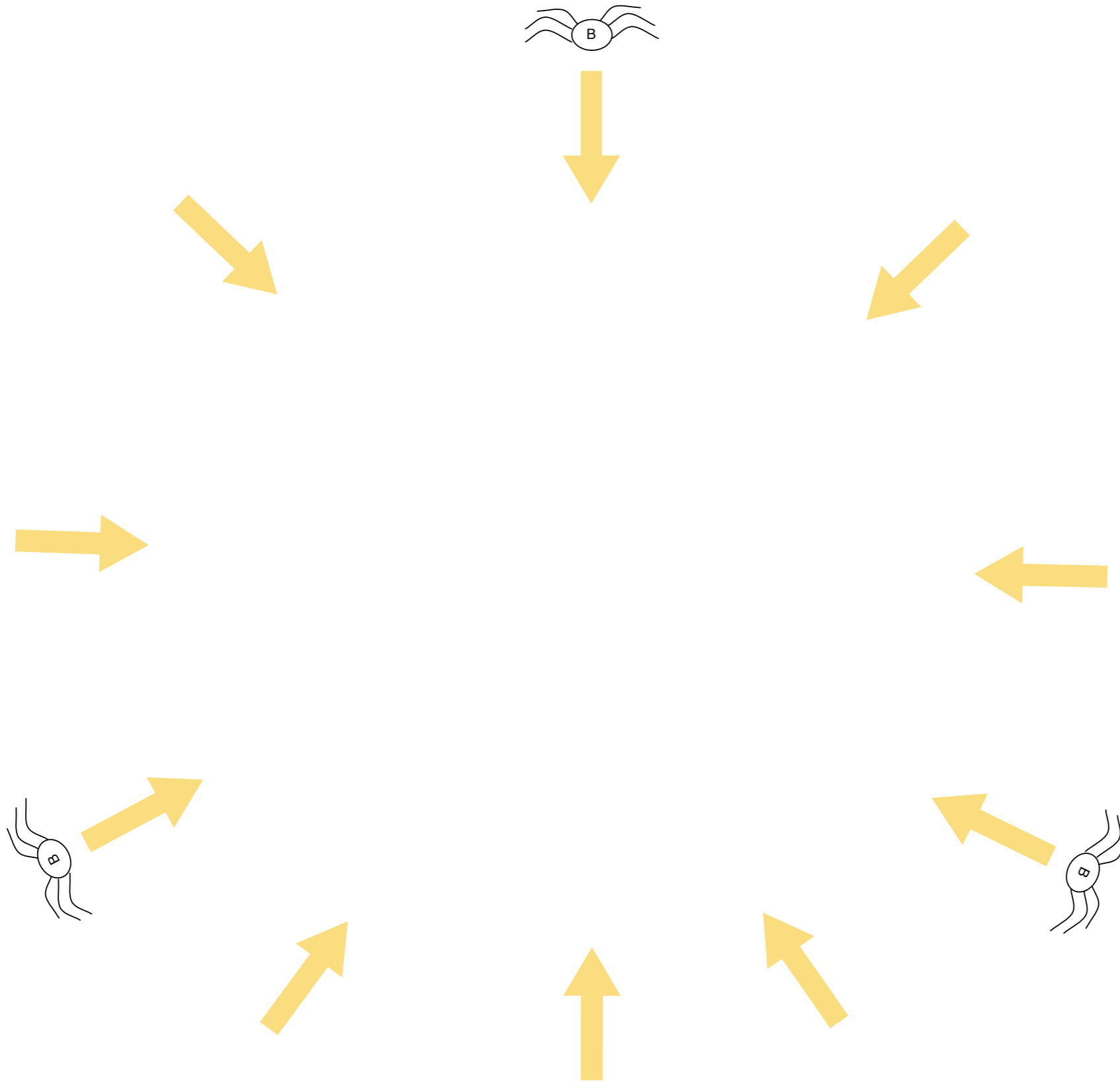
Bernardo
en
reposo

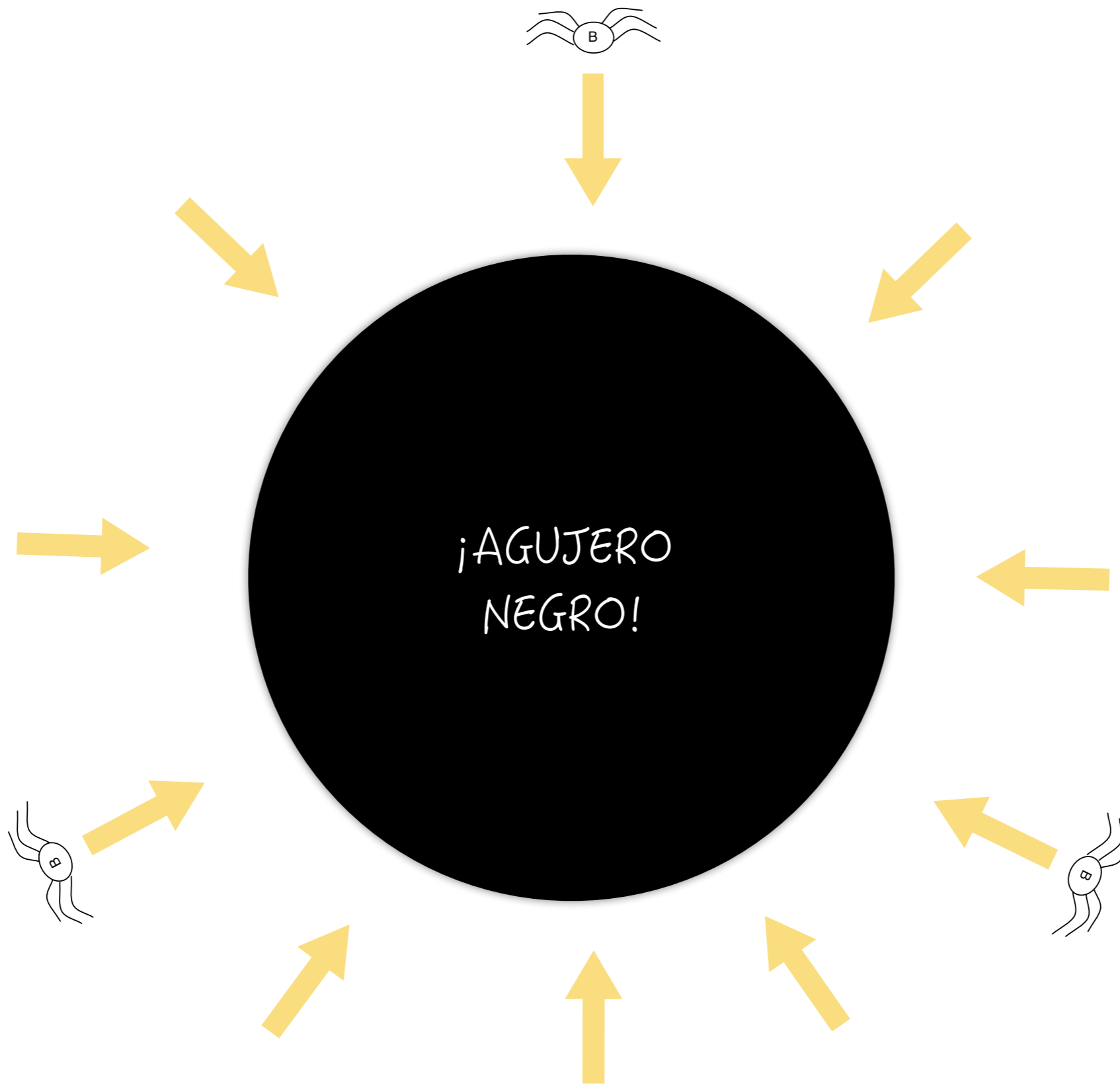




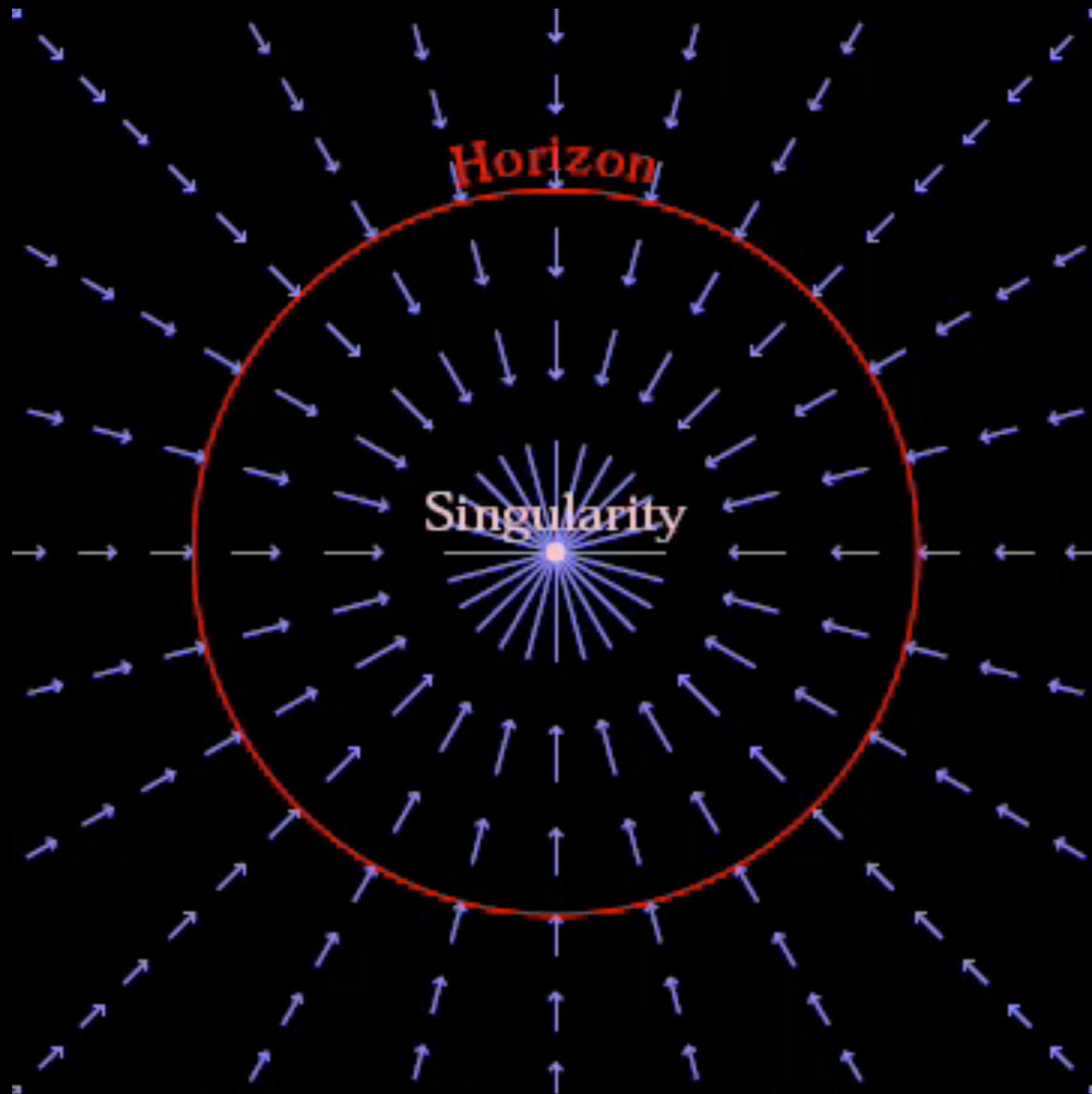




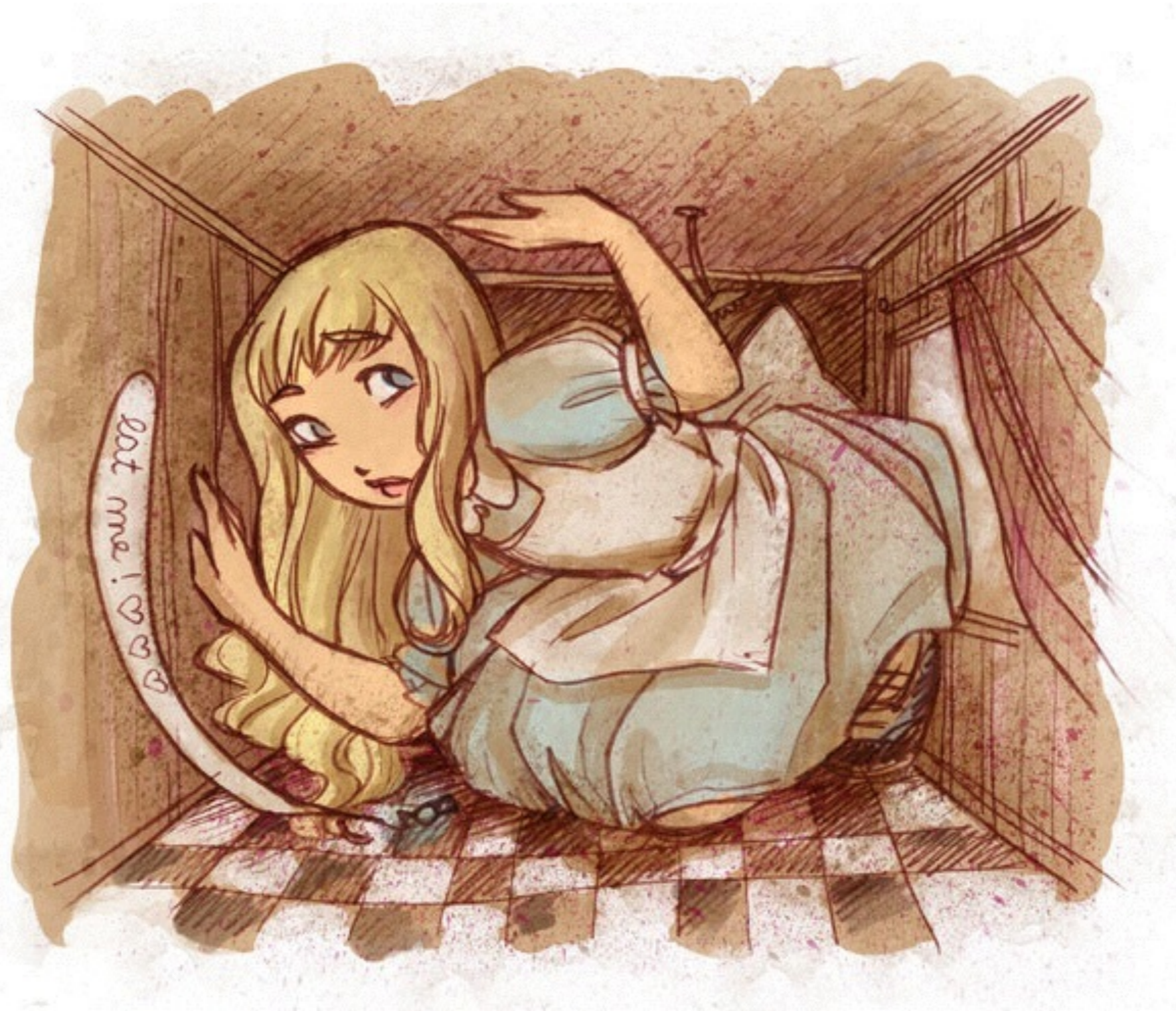




El espacio queda "aplastado" en la singularidad

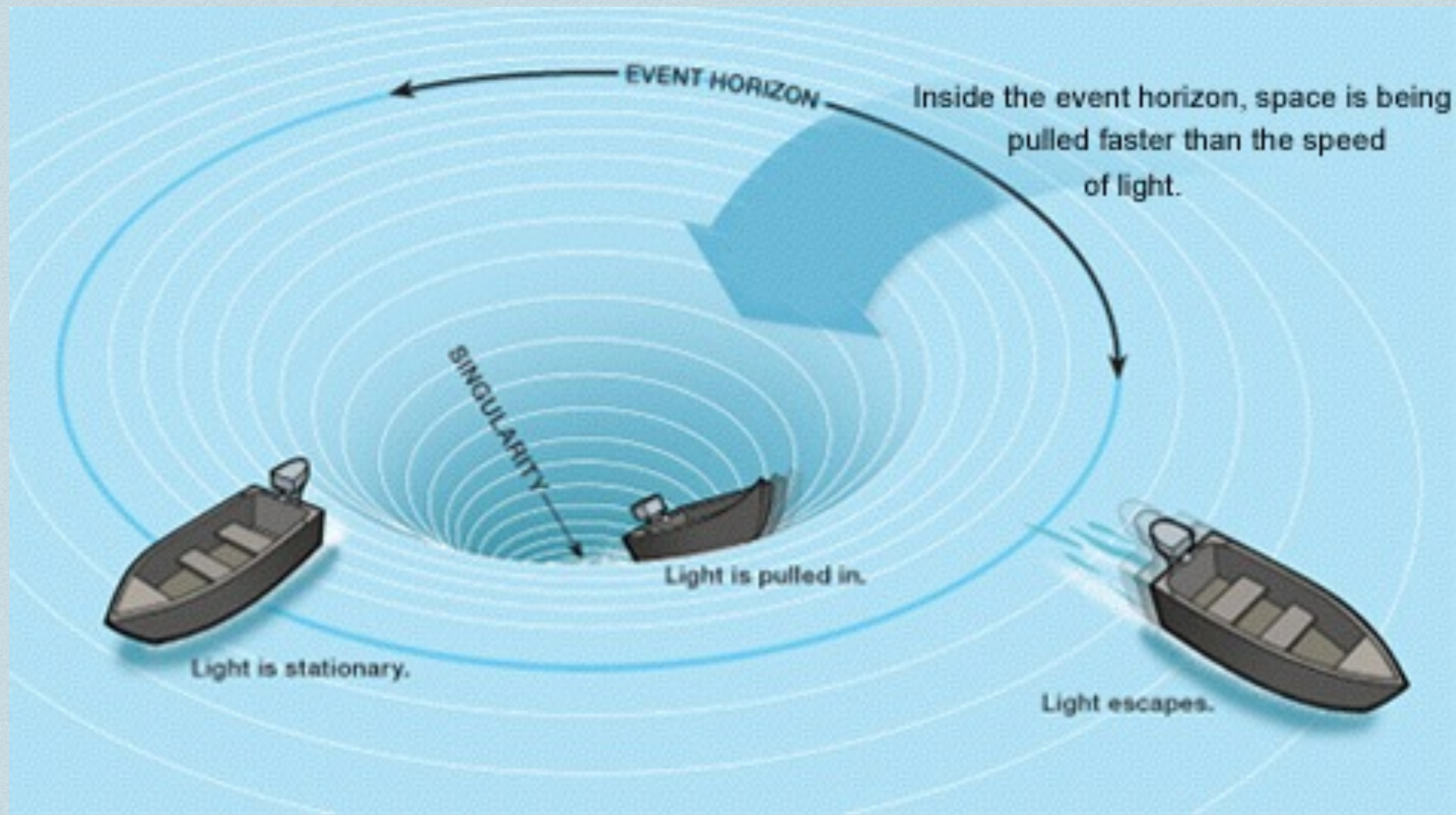


VIDA INTERIOR



VIDA INTERIOR

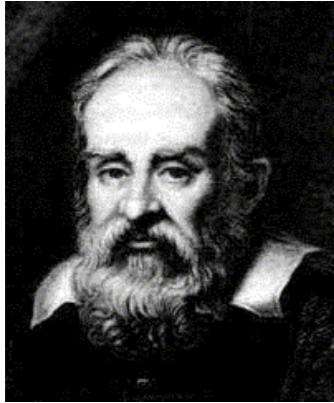
...es como un
Big Bang
al revés





Maelstrom!!!

Velocidad de escape



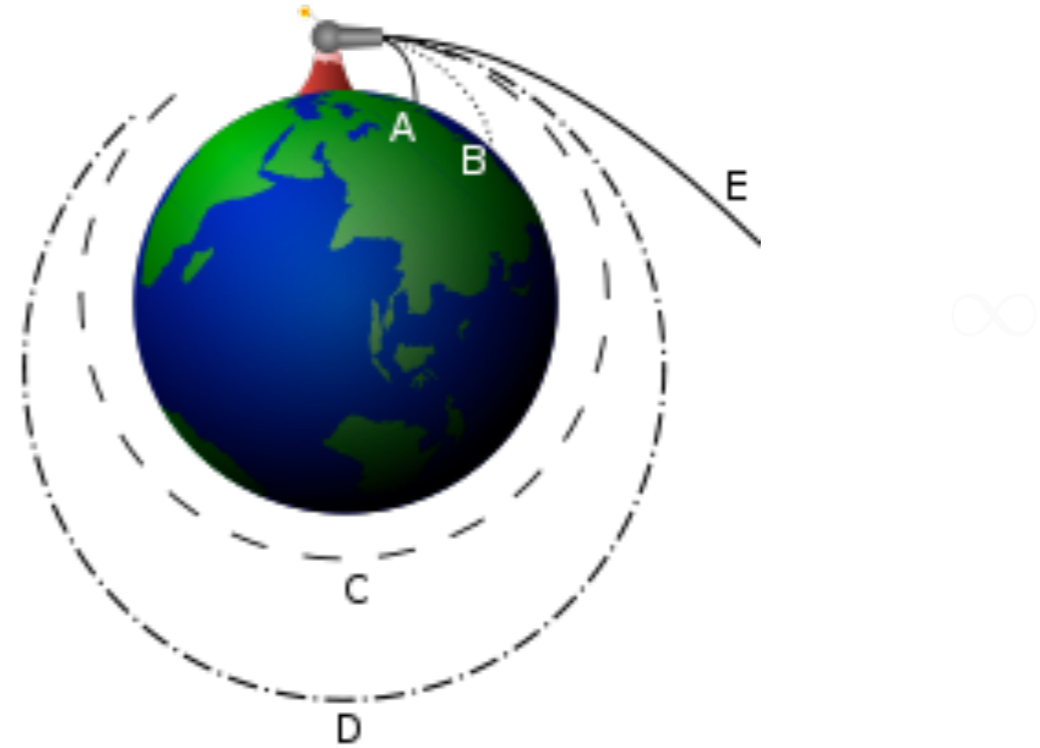
Galileo



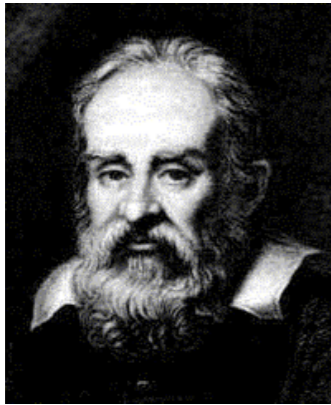
Kepler



Newton



Velocidad de escape



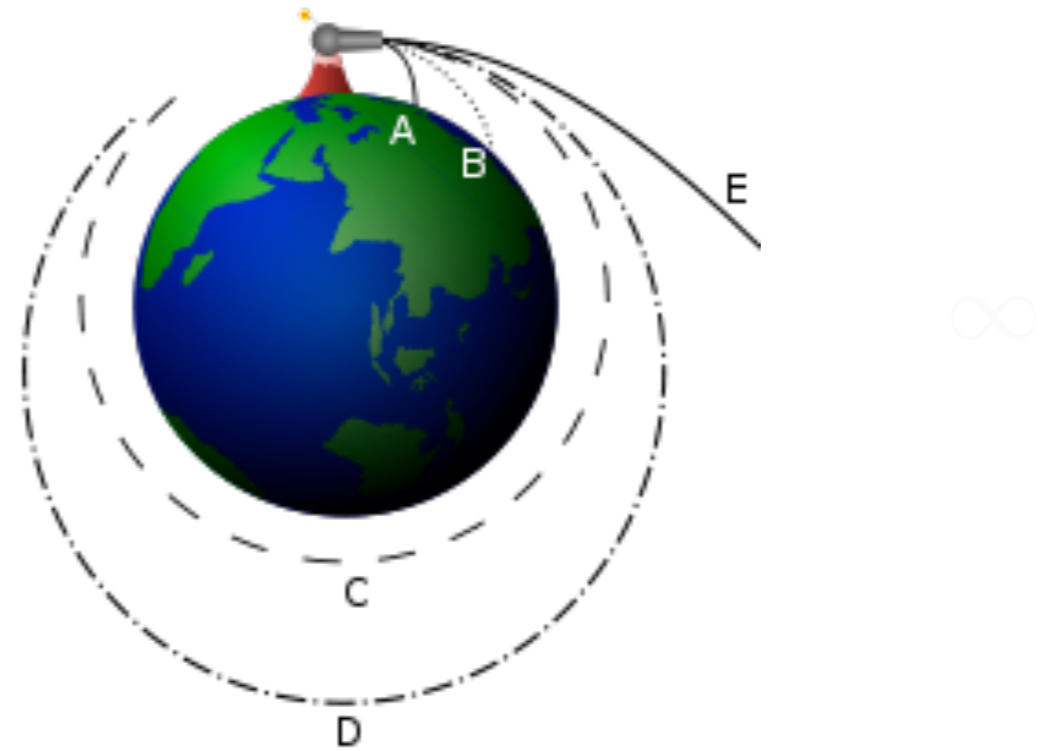
Galileo



Kepler

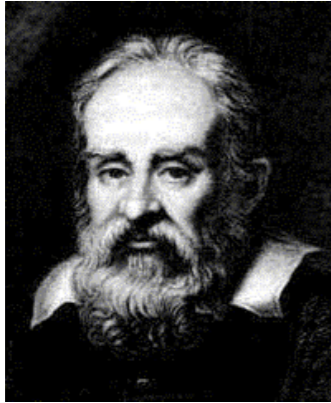


Newton



$$V_{\text{escape}} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

Velocidad de escape



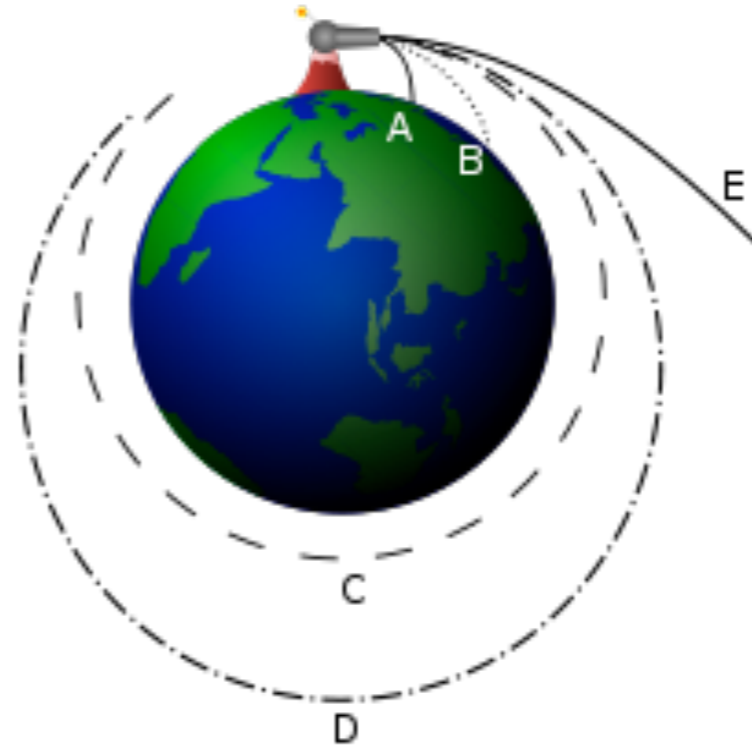
Galileo



Kepler



Newton



$$V_{\text{escape}} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

$$V_{\text{escape}} (\text{🌍}) \sim 11 \text{ Km/s}$$

¿Qué tamaño debería tener la Tierra para que su velocidad de escape fuera igual a la velocidad de la luz?

RADIO DE SCHWARZSCHILD



velocidad de escape = velocidad de la luz

$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

RADIO DE SCHWARZSCHILD

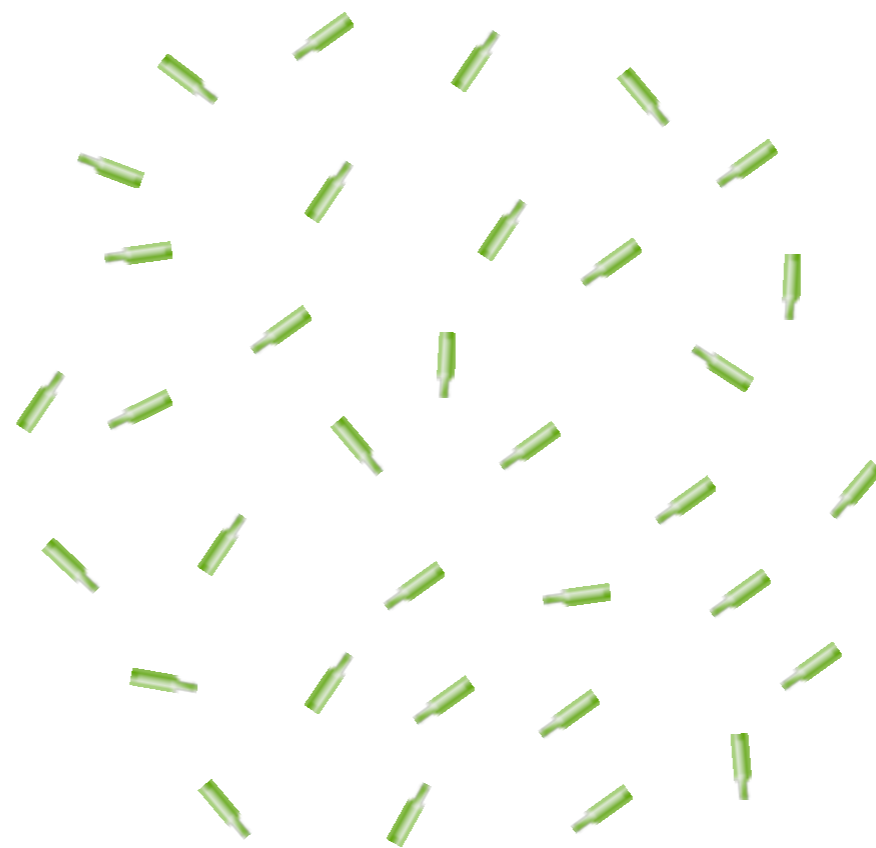


velocidad de escape = velocidad de la luz

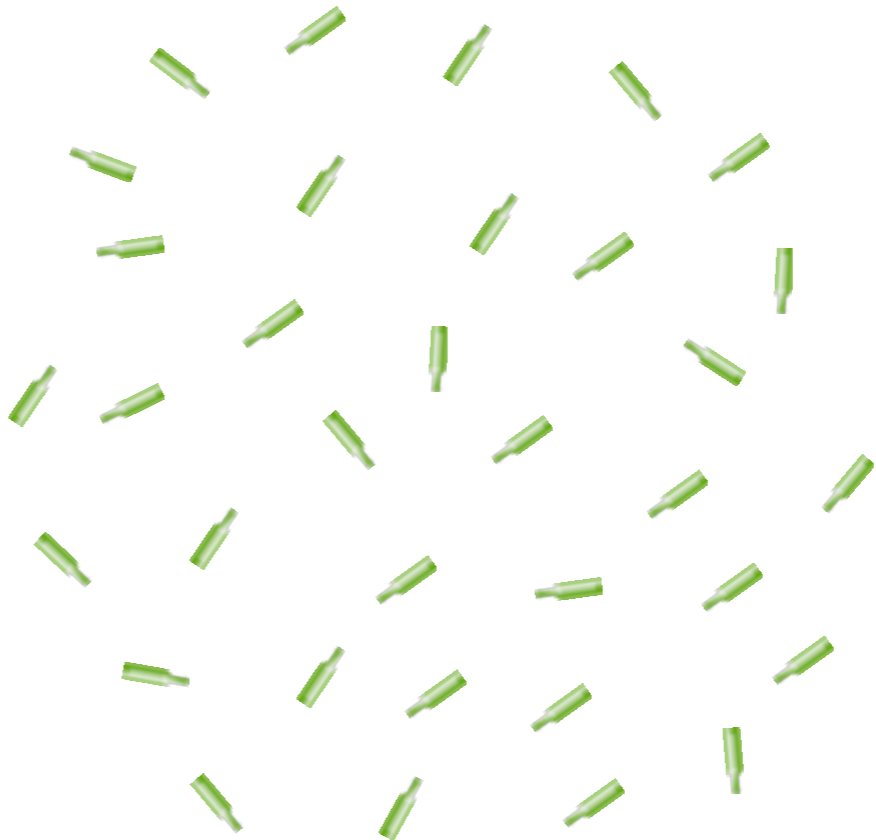
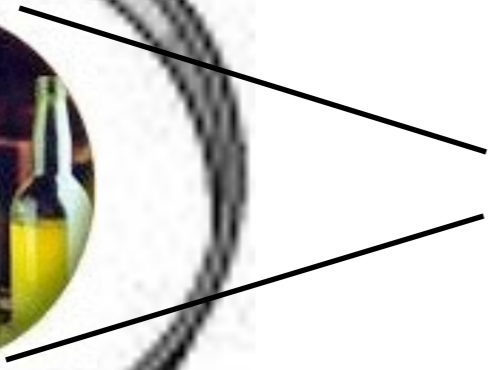
$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

$$R_s(\text{🌍}) \sim 3 \text{ cm}$$

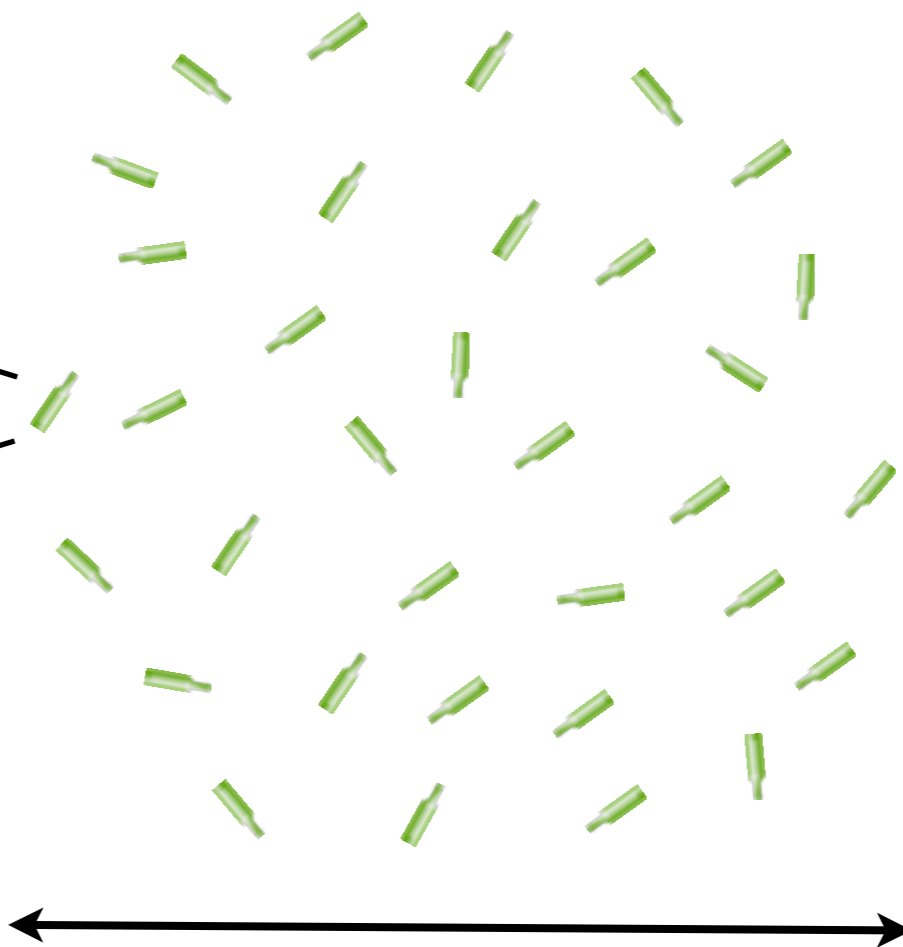
$$R_s(\text{☀️}) \sim 3 \text{ Km}$$



10 botellas/m³



10 botellas/m³



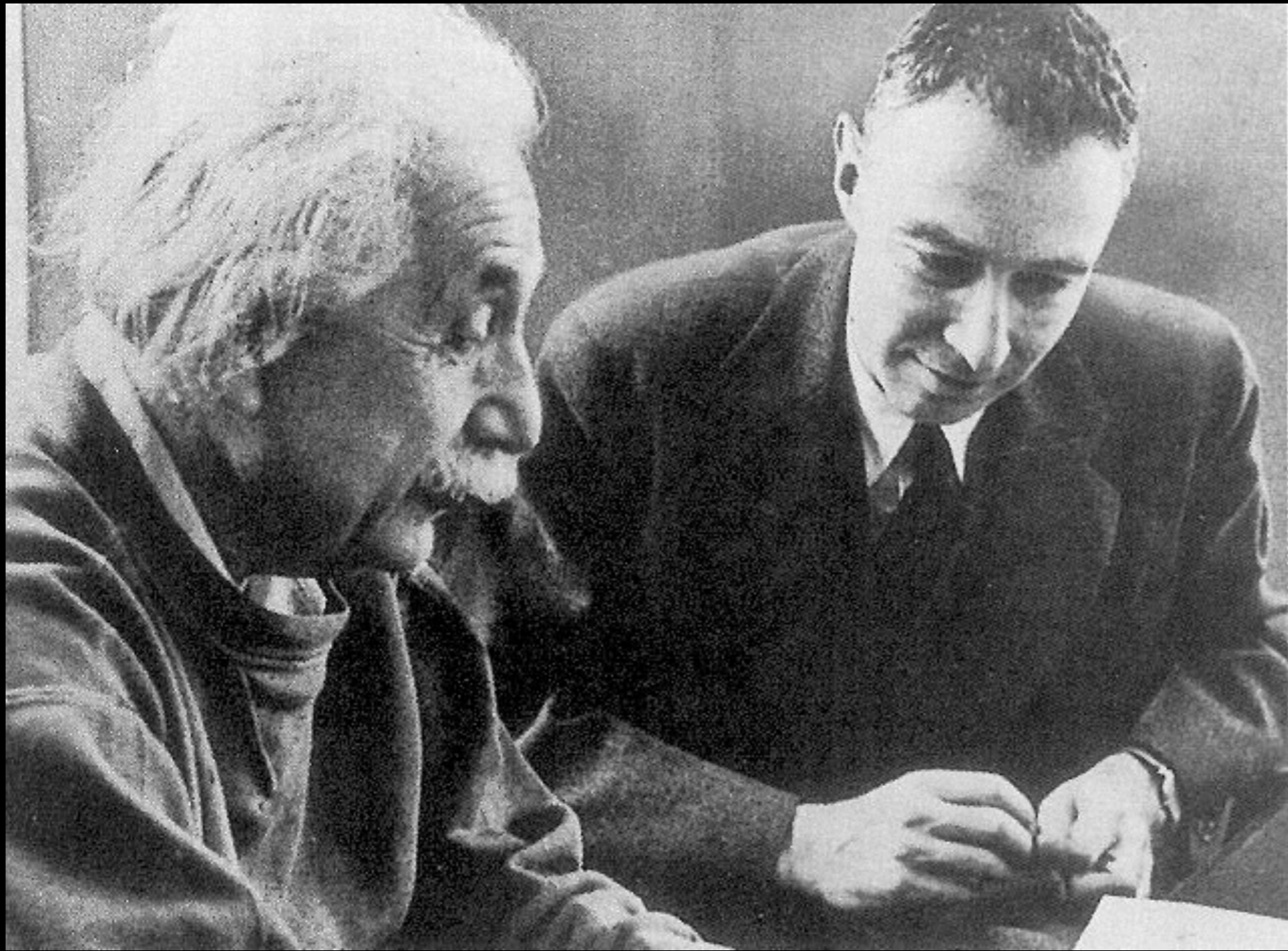
10 botellas/m³

órbita de Urano ~ 

$$M_{\text{botellas}} \sim 10^9 M_{\text{Sol}}$$



¡No se precisan situaciones extremas!





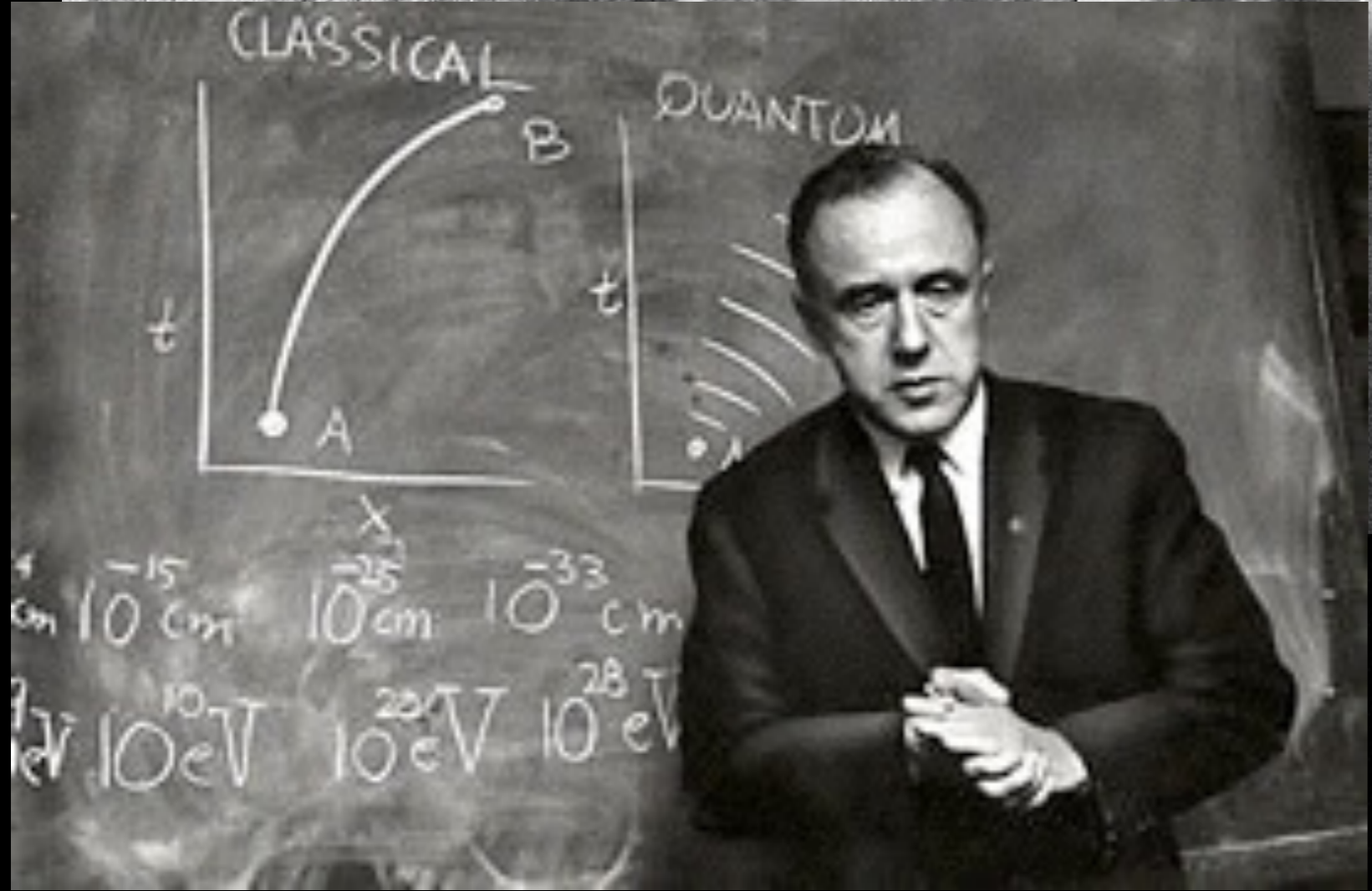
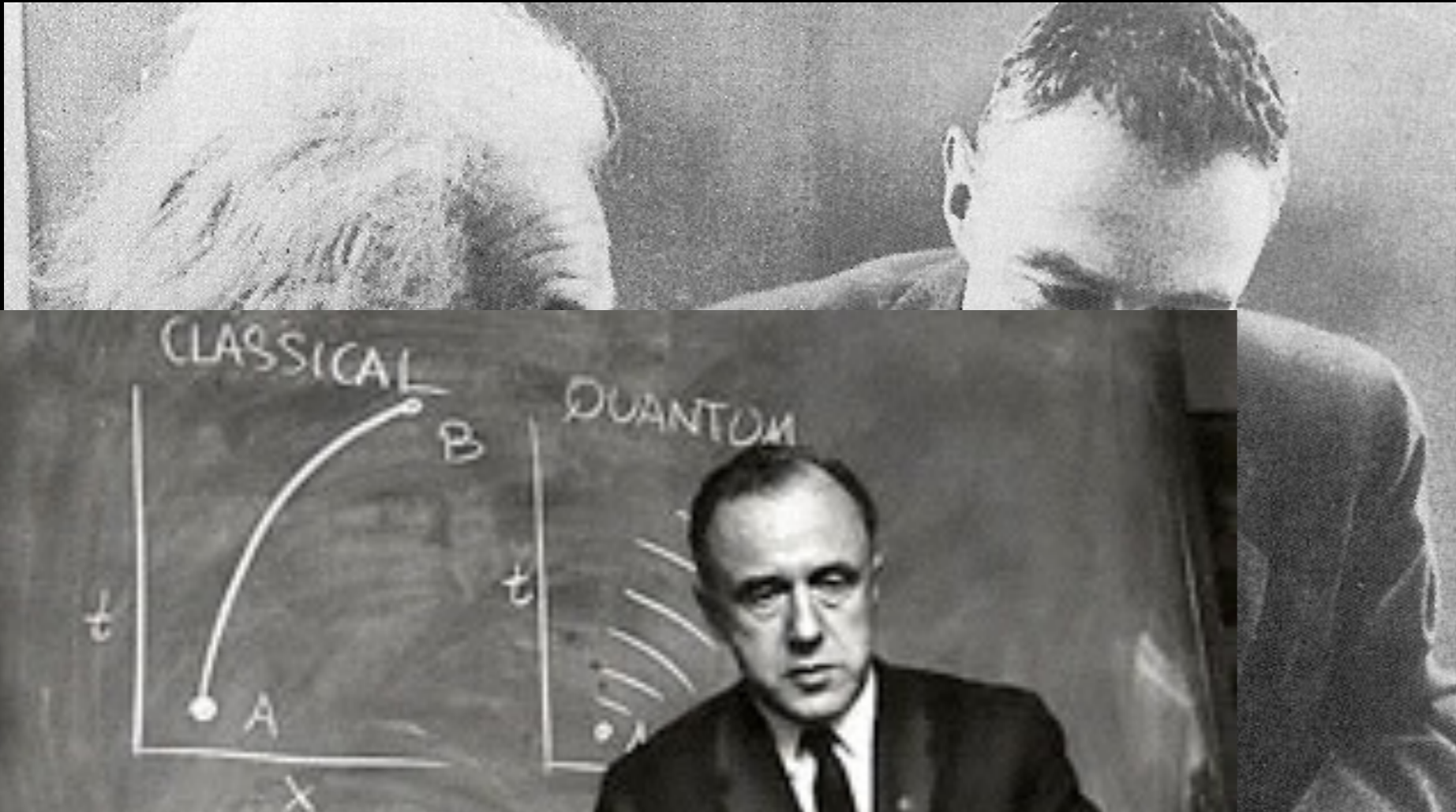
CLASSICAL

QUANTUM

λ

10^{-15} cm	10^{-25} cm	10^{-33} cm
10^{10} eV	10^{20} eV	10^{28} eV

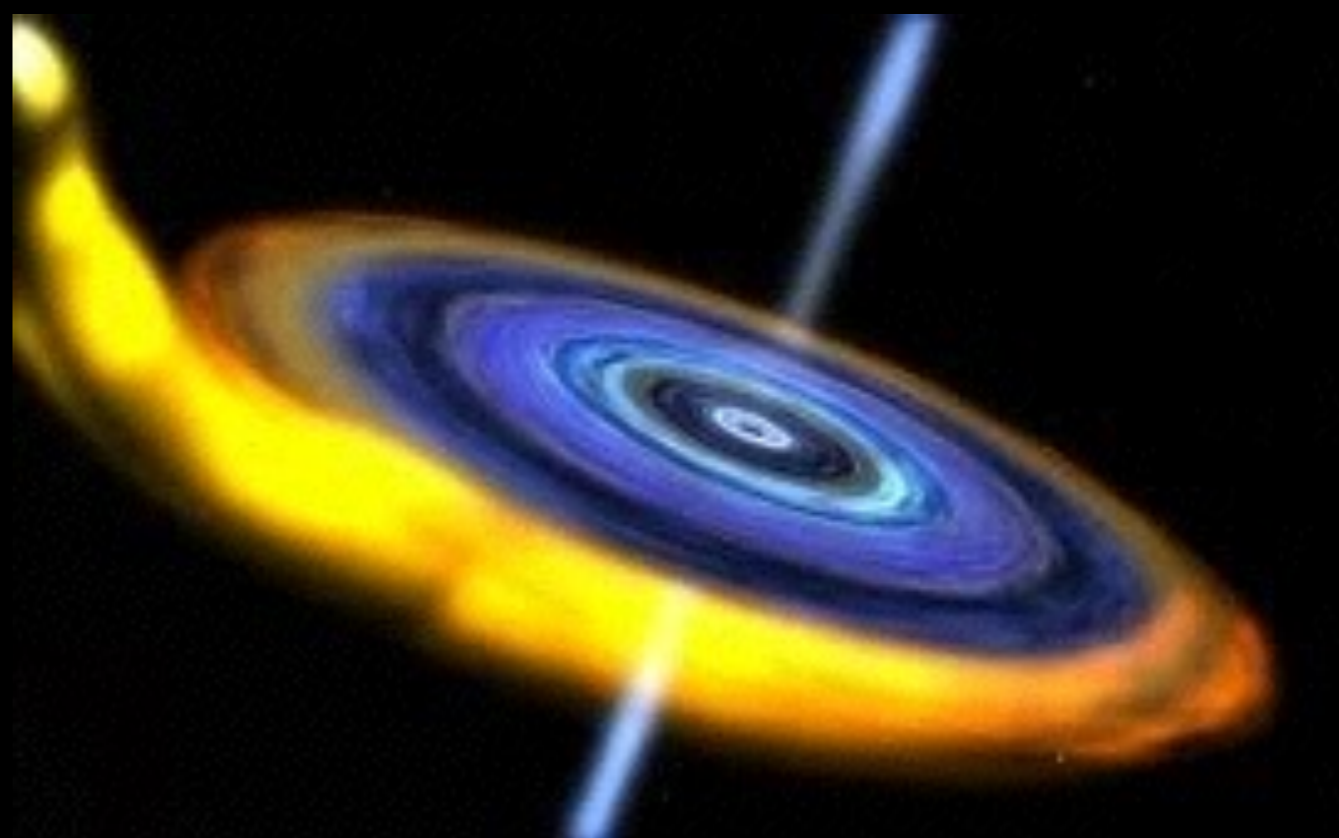
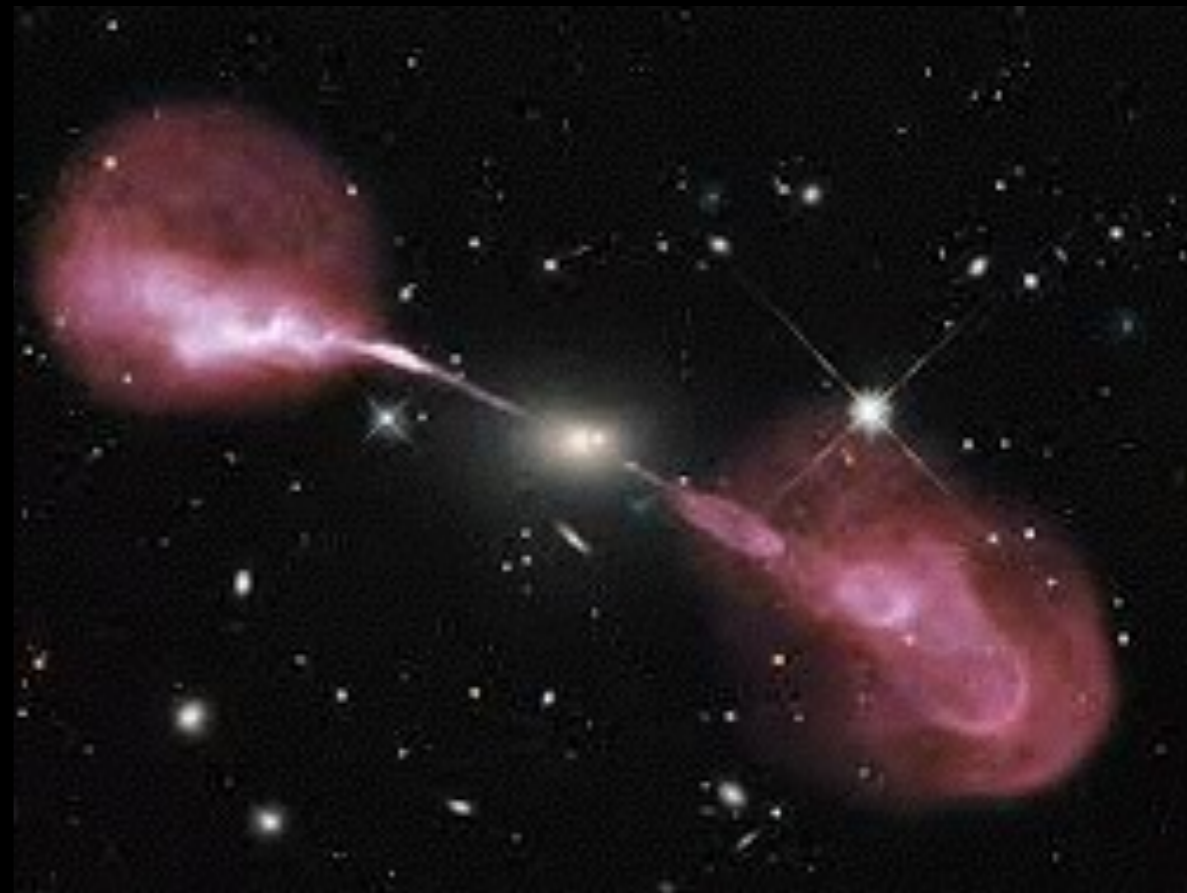
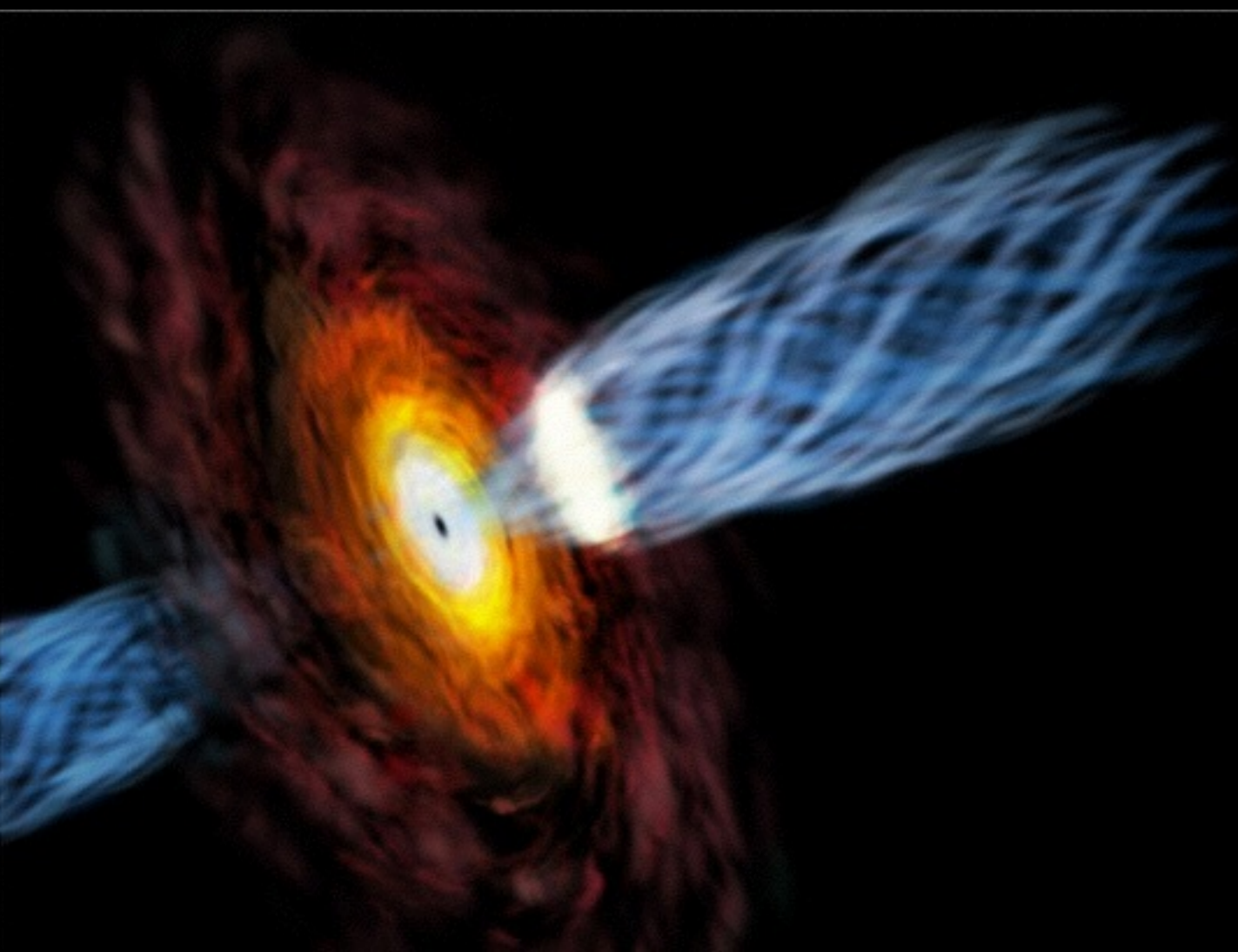


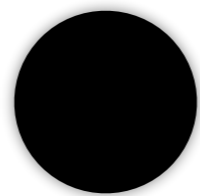


1967

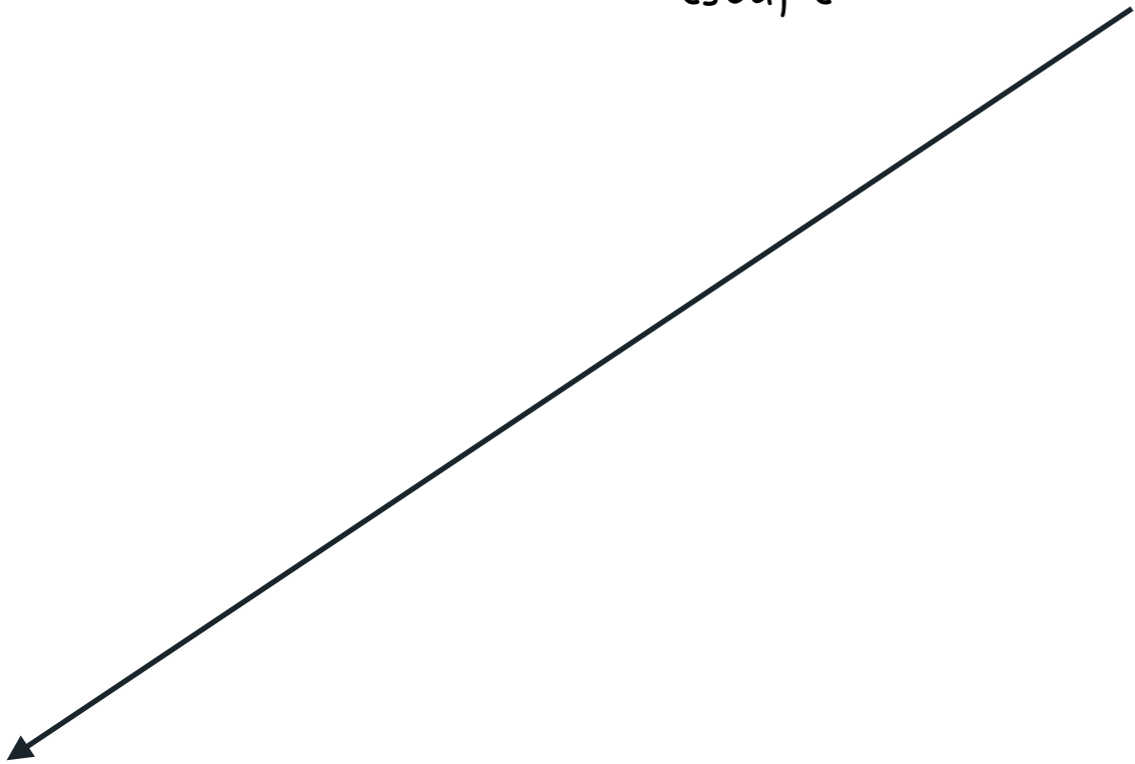
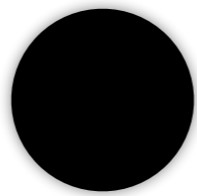


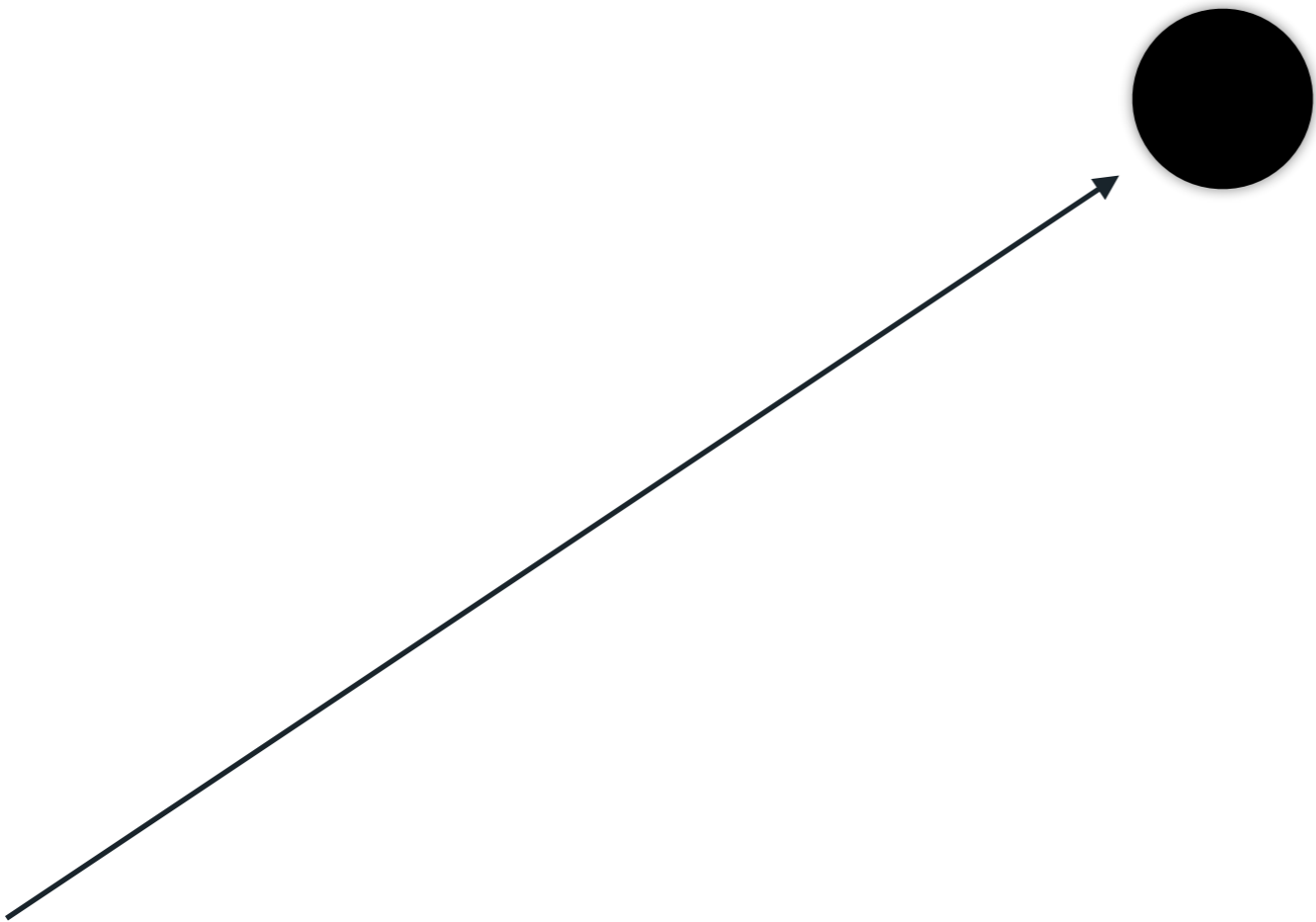




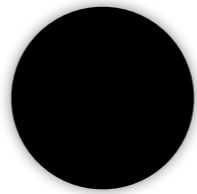


$$v_{\text{escape}} \sim c$$

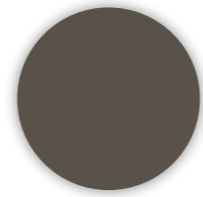




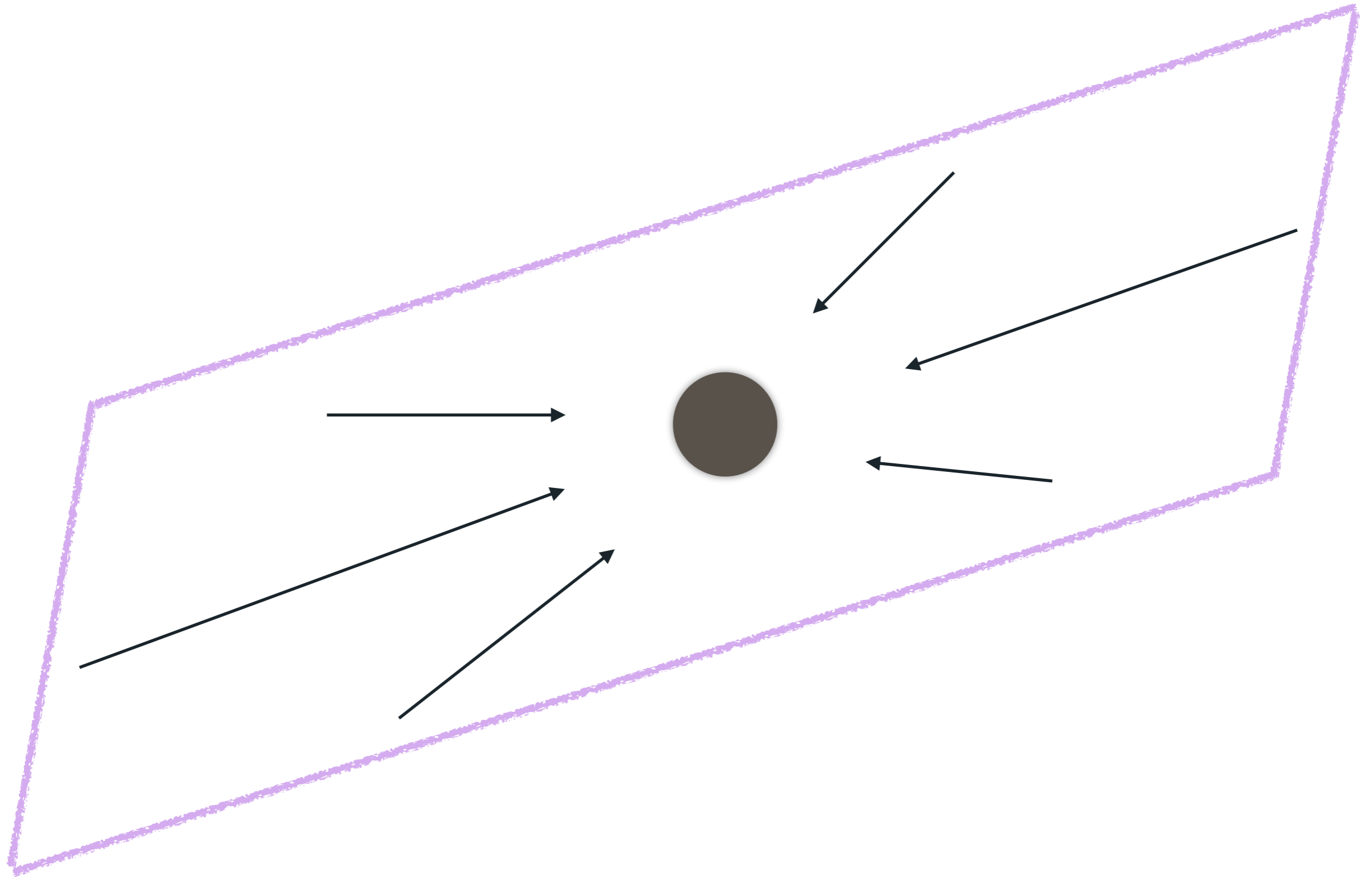
$V_{\text{impacto}} \sim c$



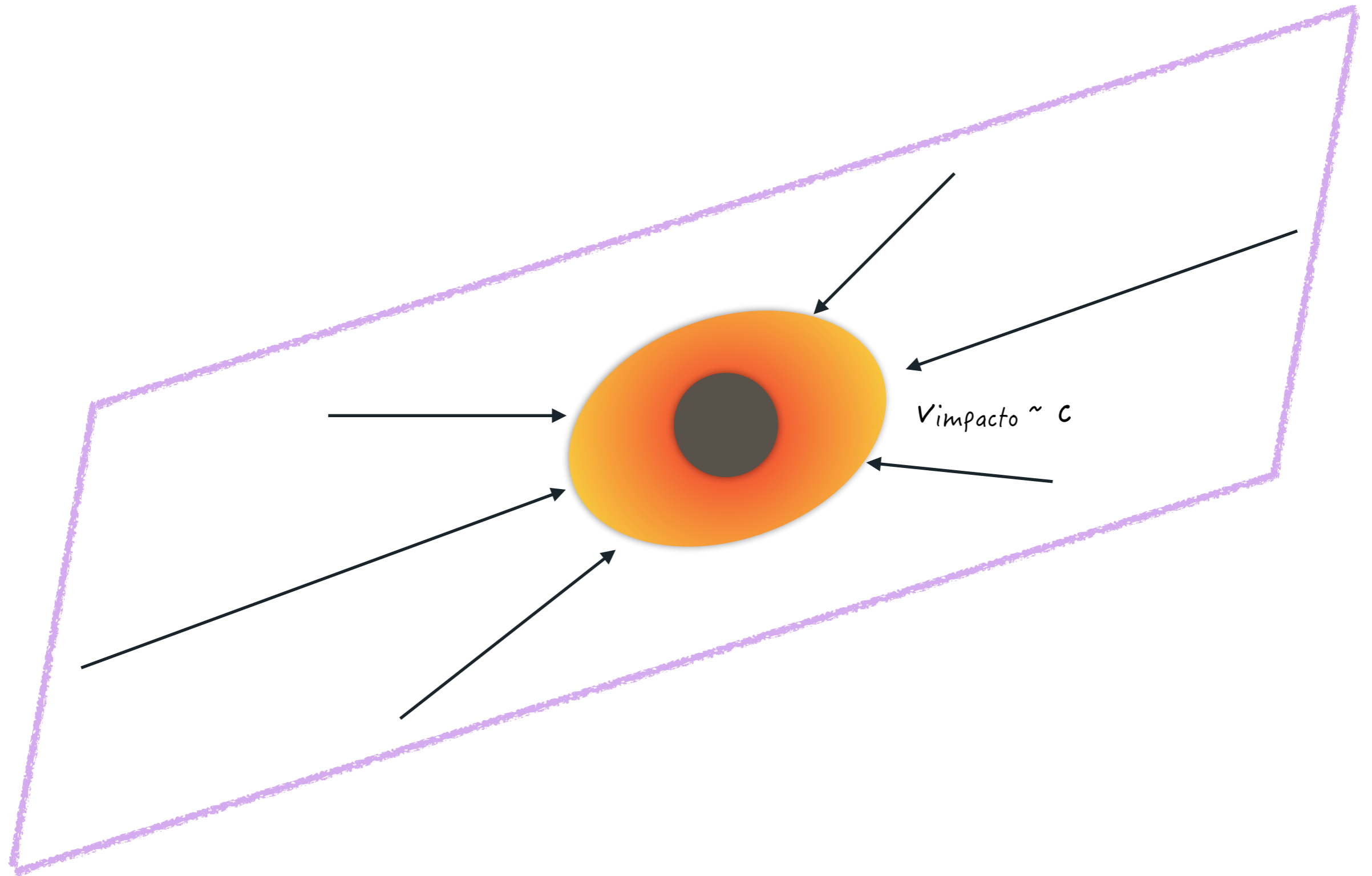
MOTORES GRAVITACIONALES



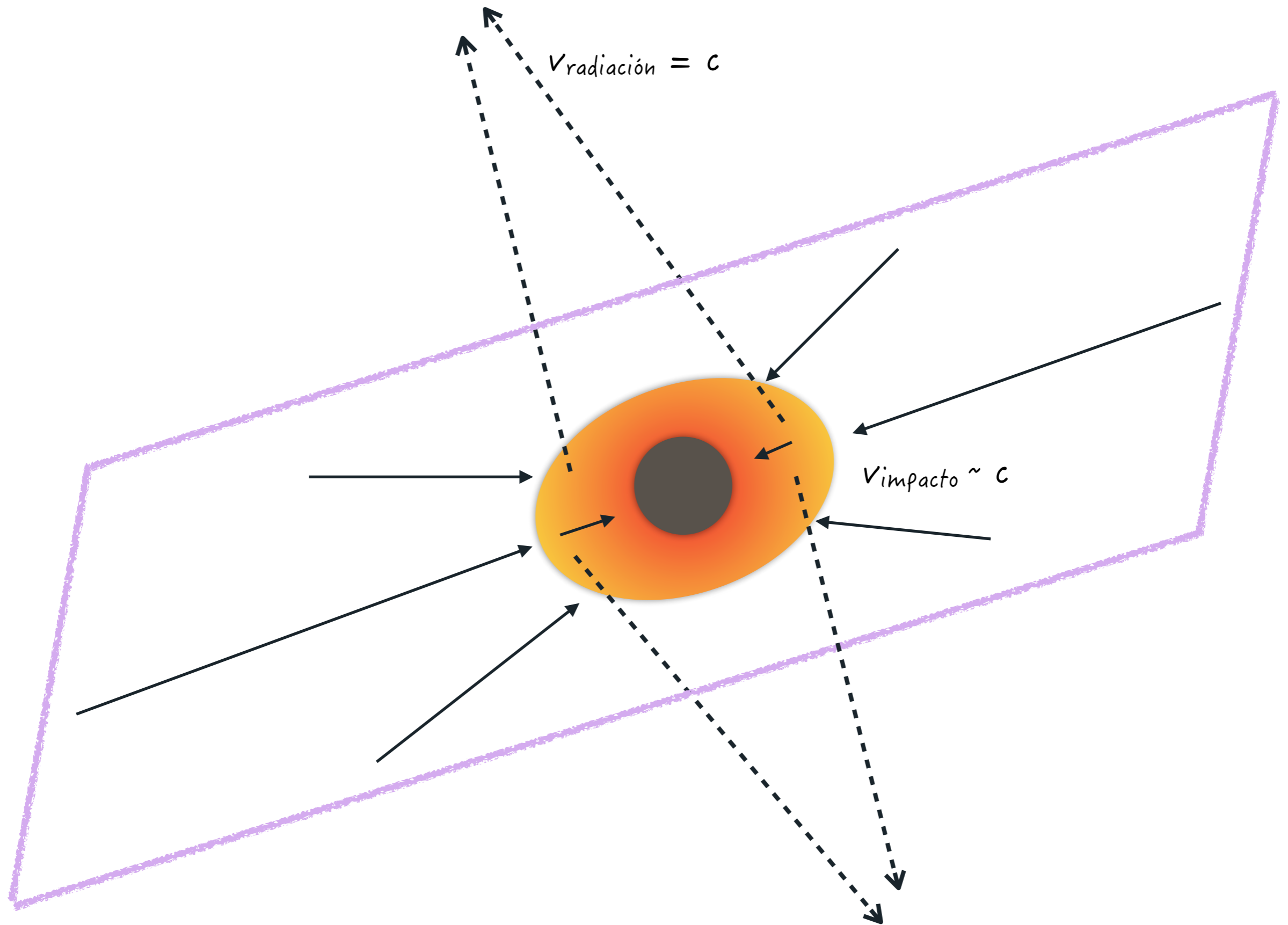
MOTORES GRAVITACIONALES

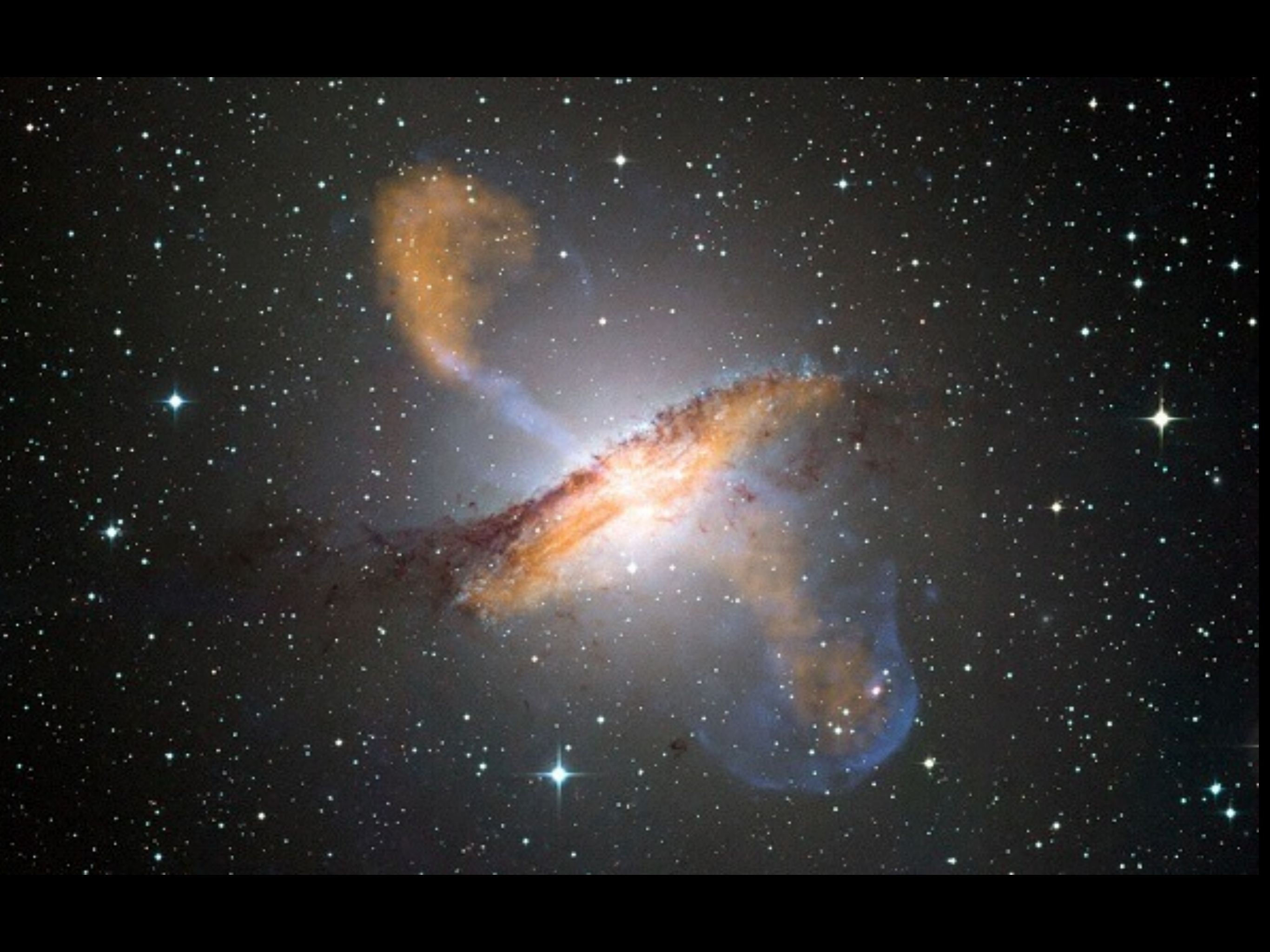


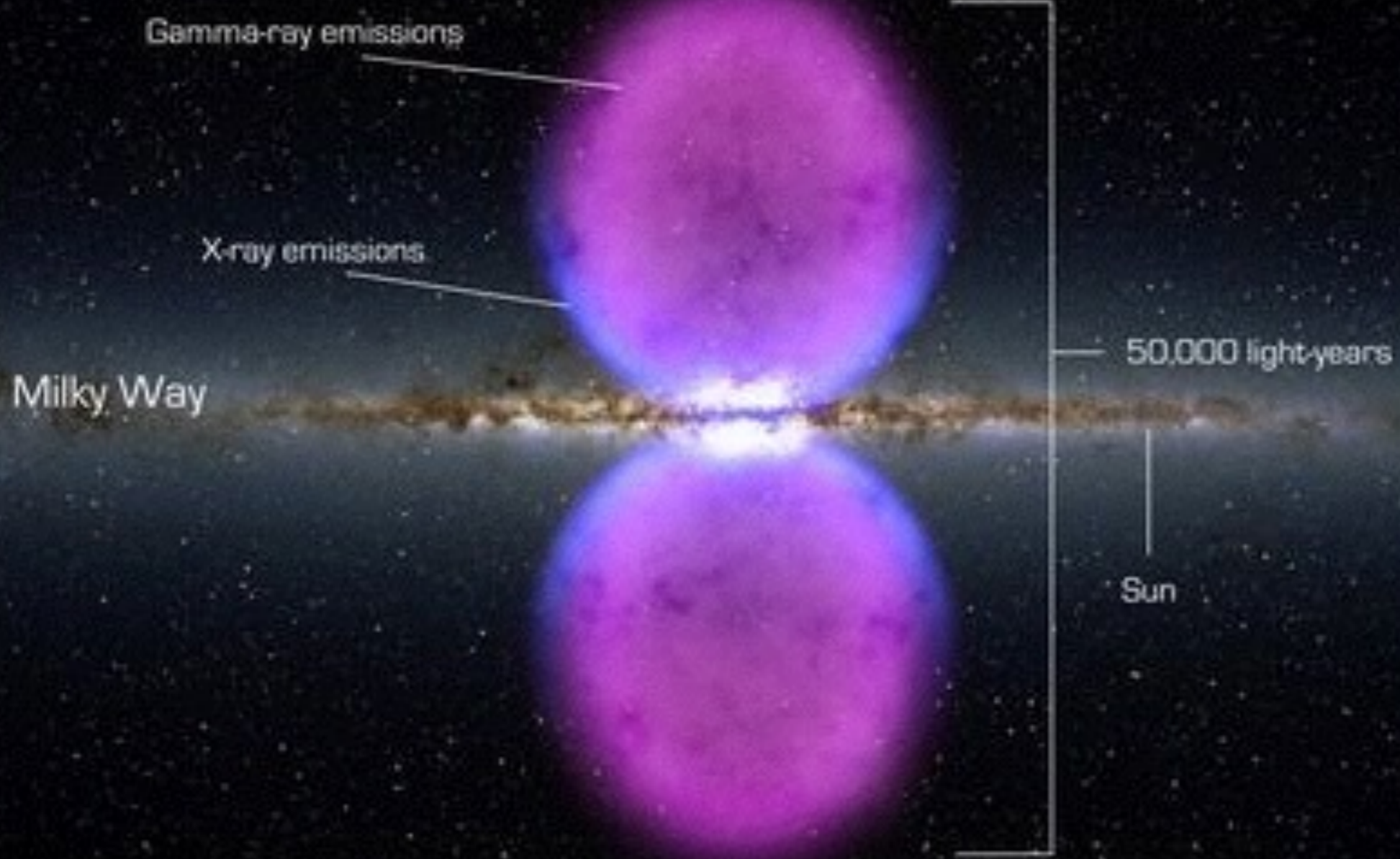
MOTORES GRAVITACIONALES



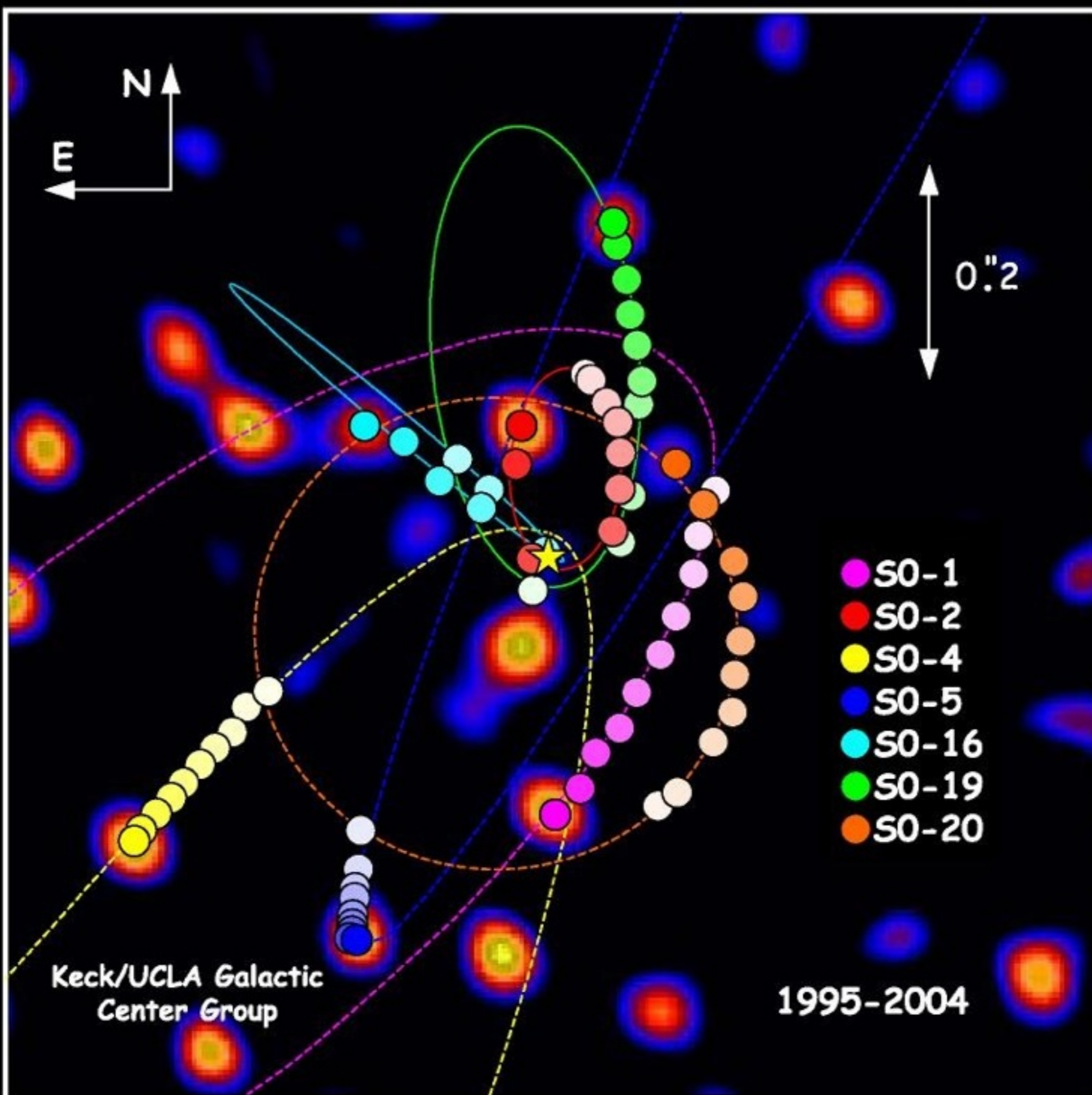
MOTORES GRAVITACIONALES







$10^6 M_{\text{sol}}$





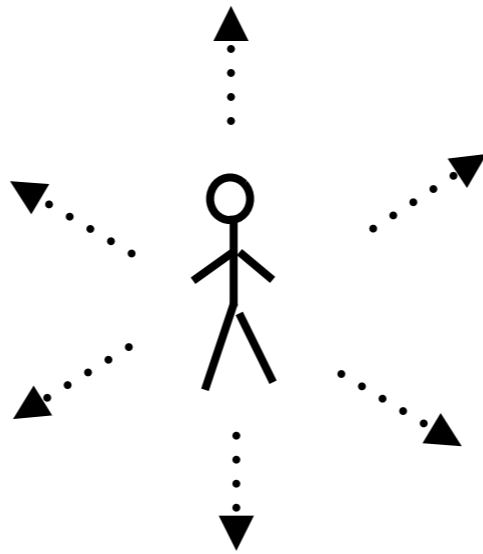
$10^9 M_{\text{sol}}$



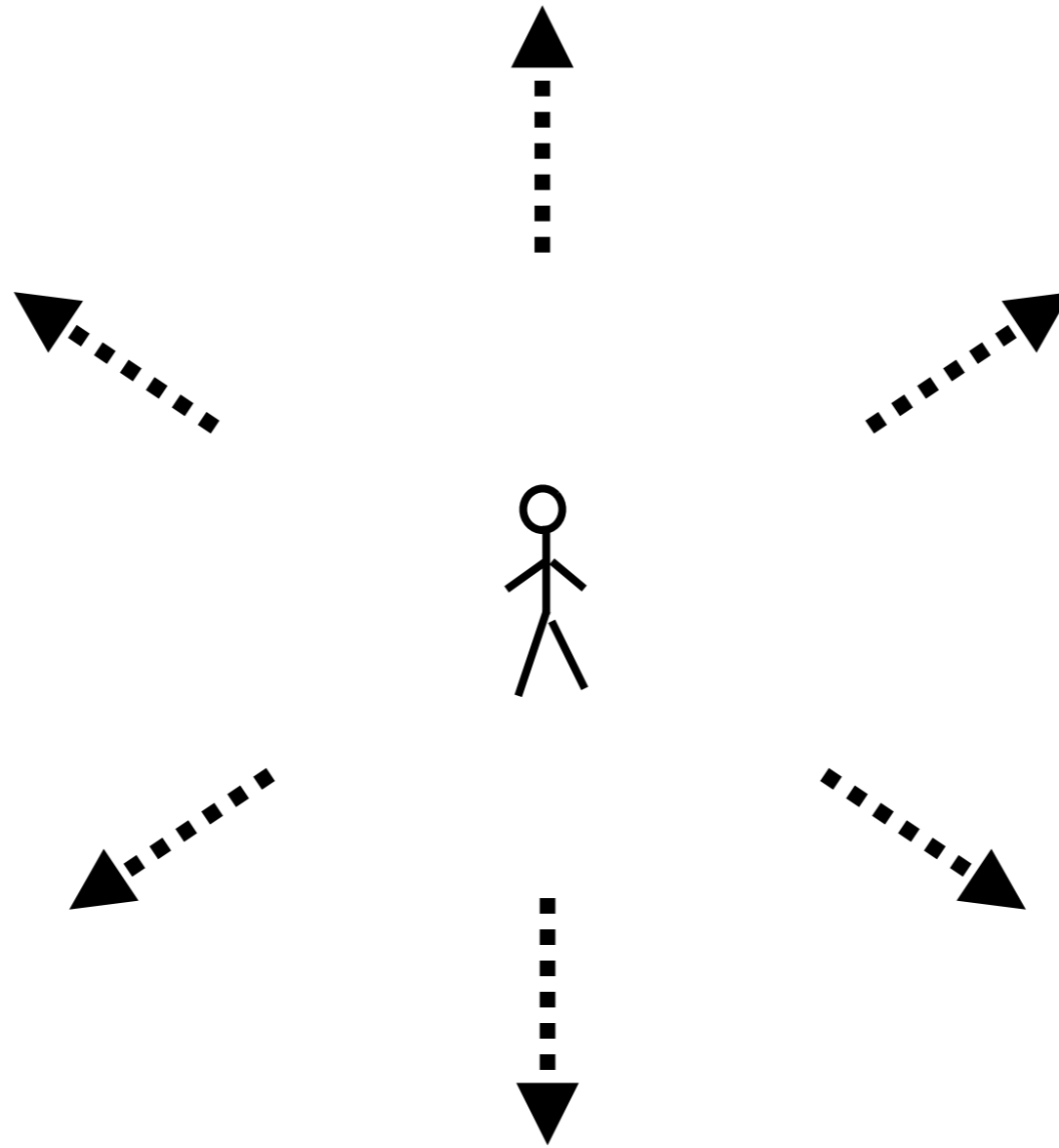
EPILOGO

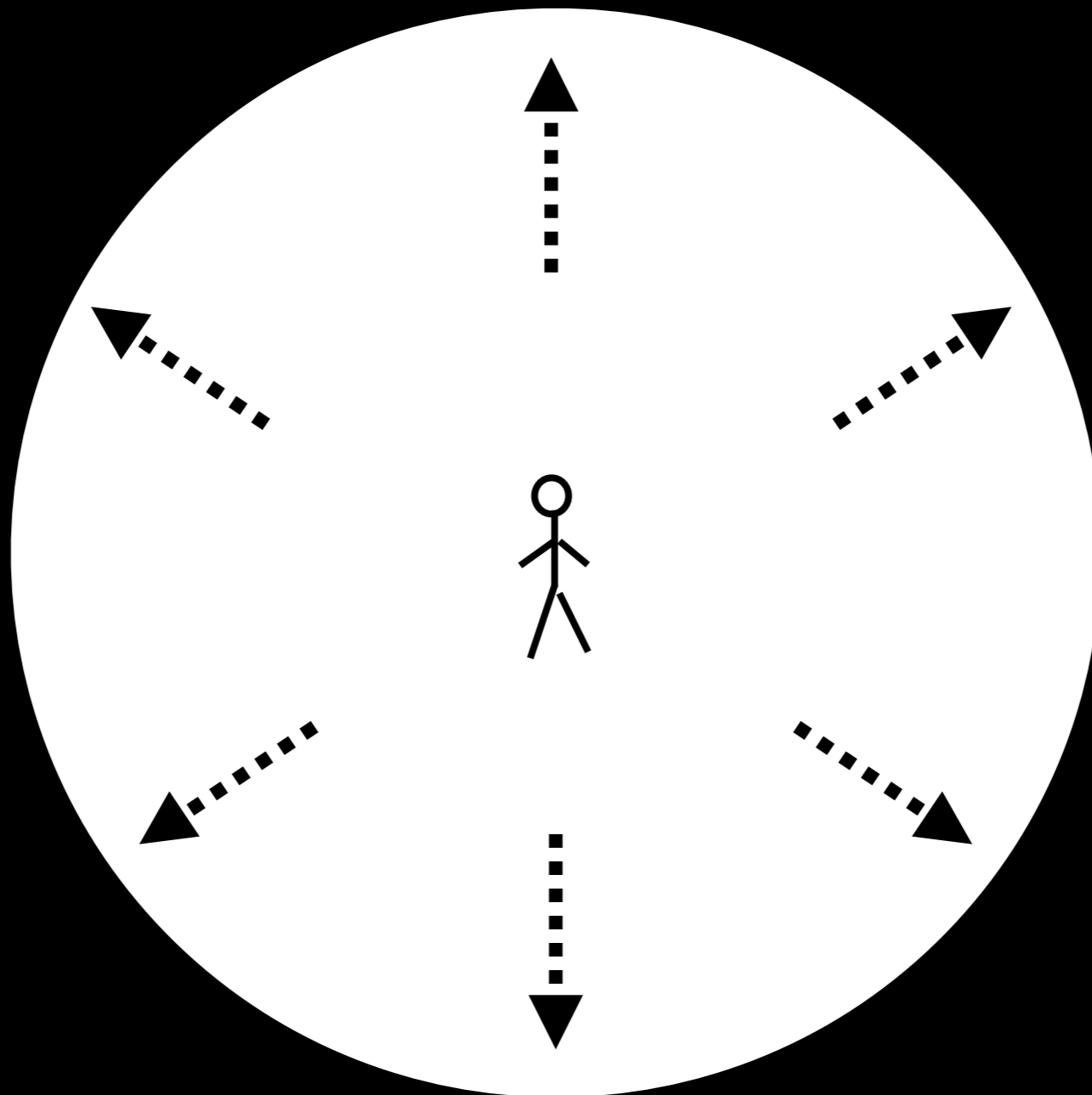


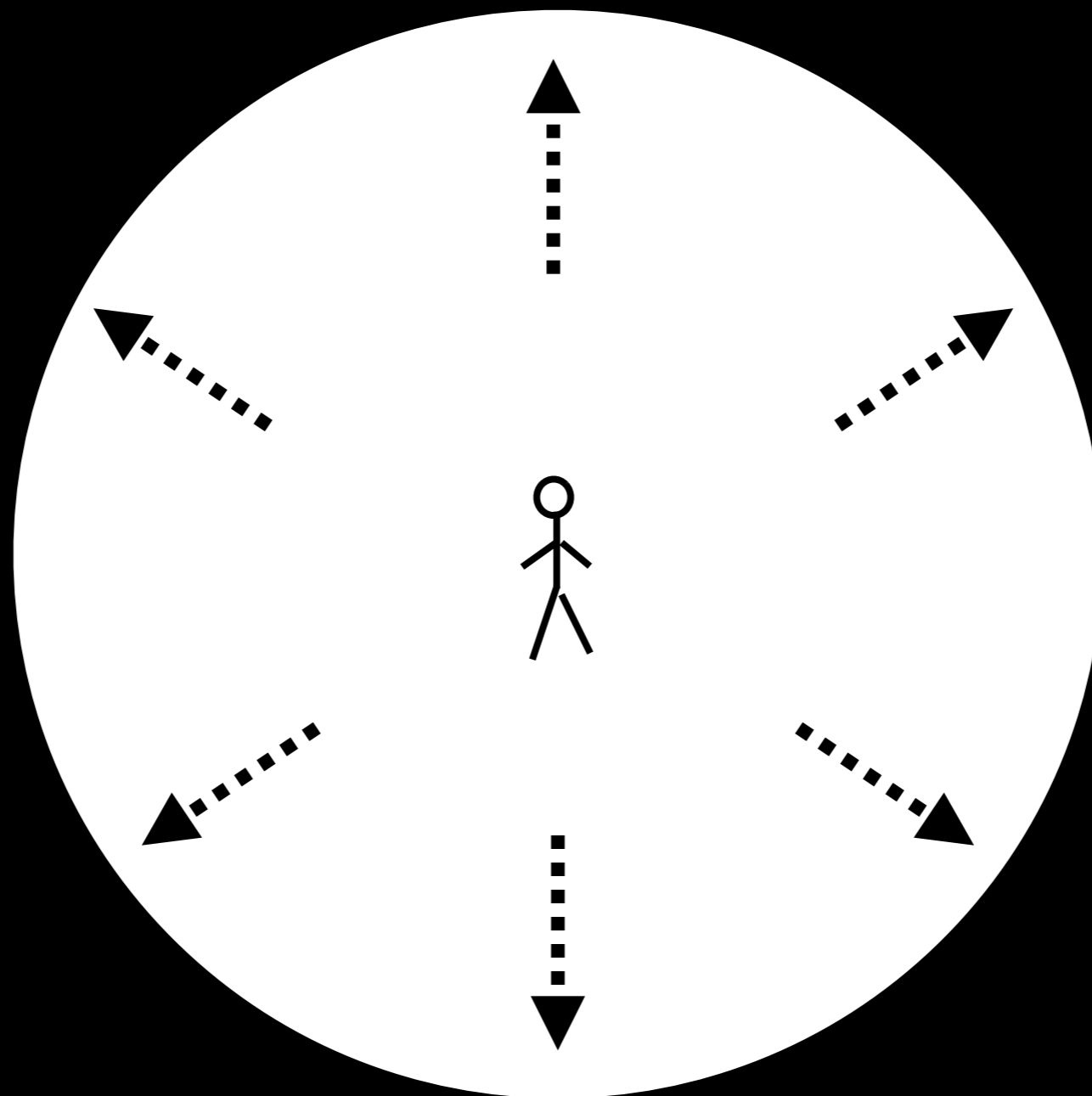
EPILOGO



EPILOGO







10^{28} cm



¡GRACIAS!

