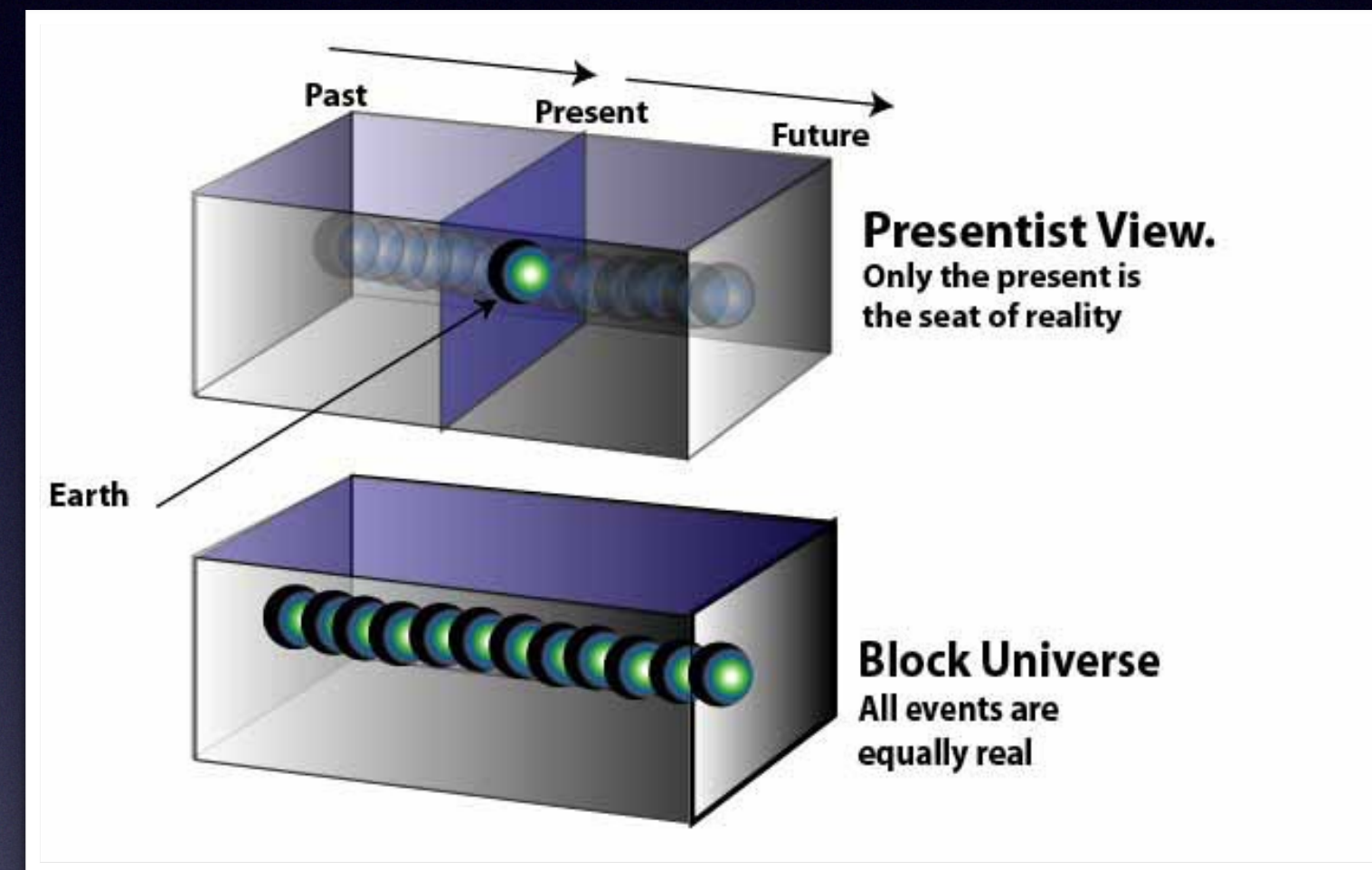


# Filosofía del espacio y el tiempo



**Gustavo E. Romero**

IAR-CONICET/UNLP, Argentina

2021

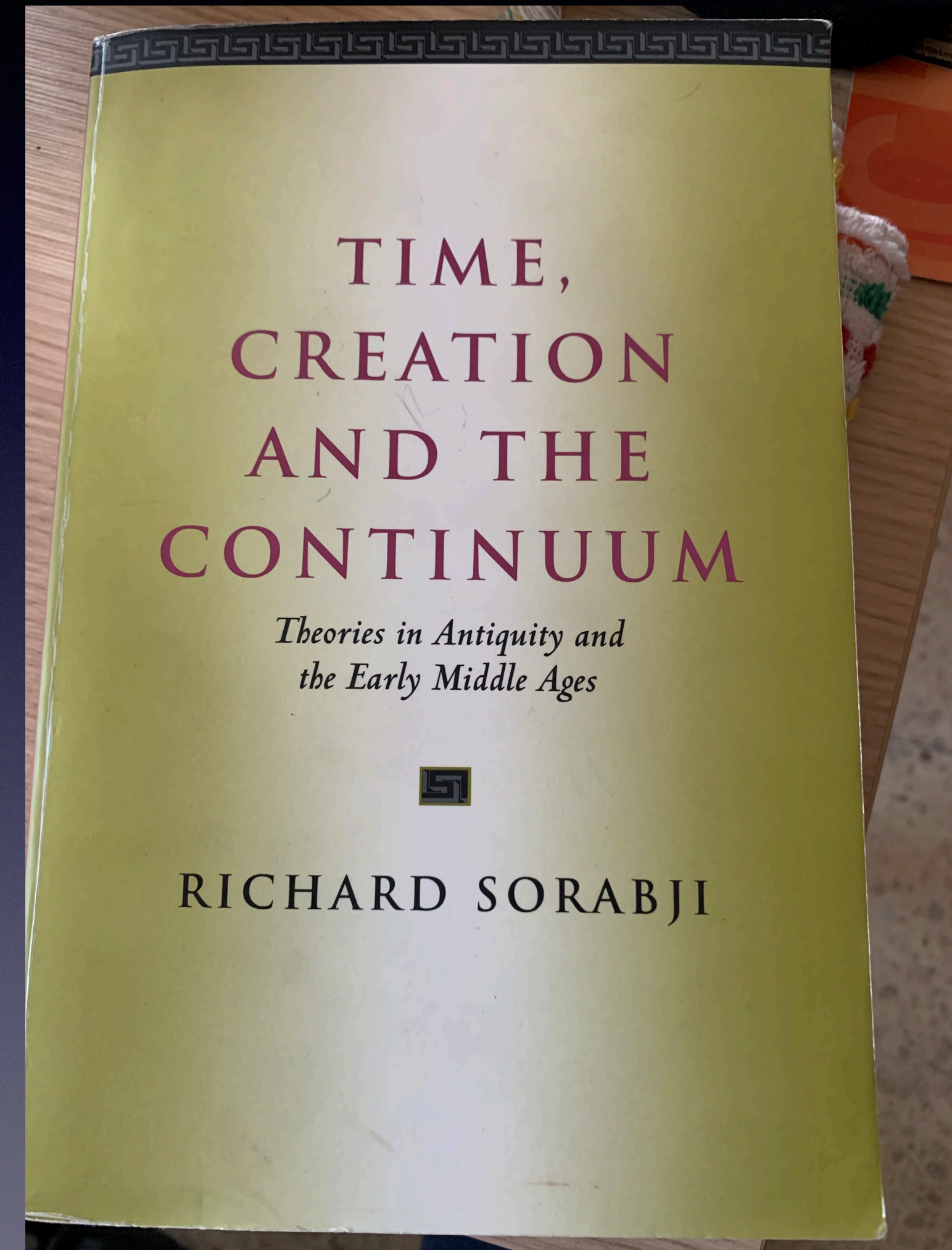
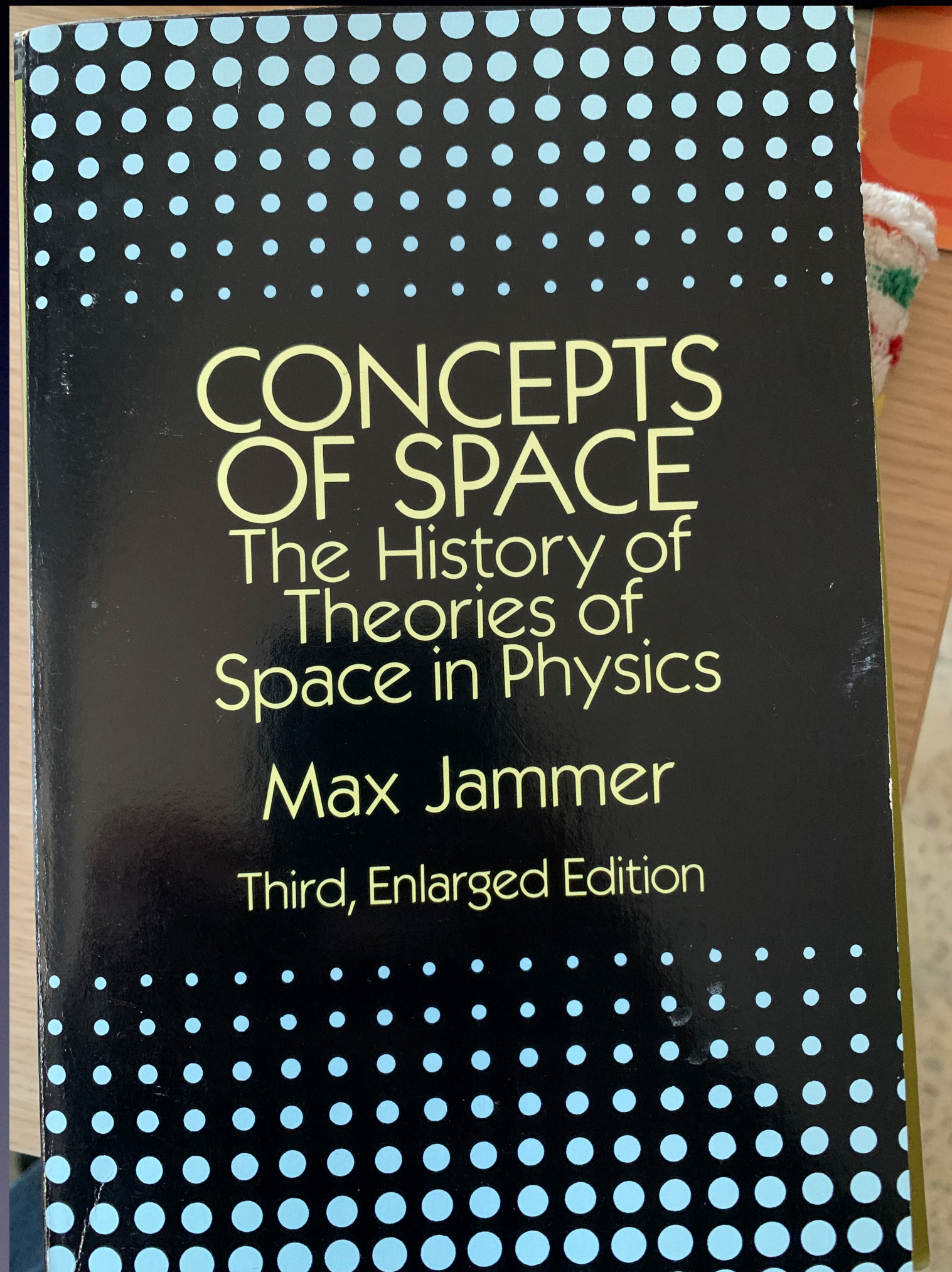


El espacio y el tiempo son presupuestos básicos de todas las teorías físicas. Todas las ecuaciones dinámicas que representan leyes físicas tienen variables espacio-temporales. El espacio y el tiempo son requisitos elementales para formular nuestras teorías físicas.

El espacio y el tiempo en sí mismos son estudiados por las teorías más generales acerca de lo que existe, esto es, por la proto-física u ontología.



Lecturas para la historia de las teorías sobre el espacio y el tiempo.

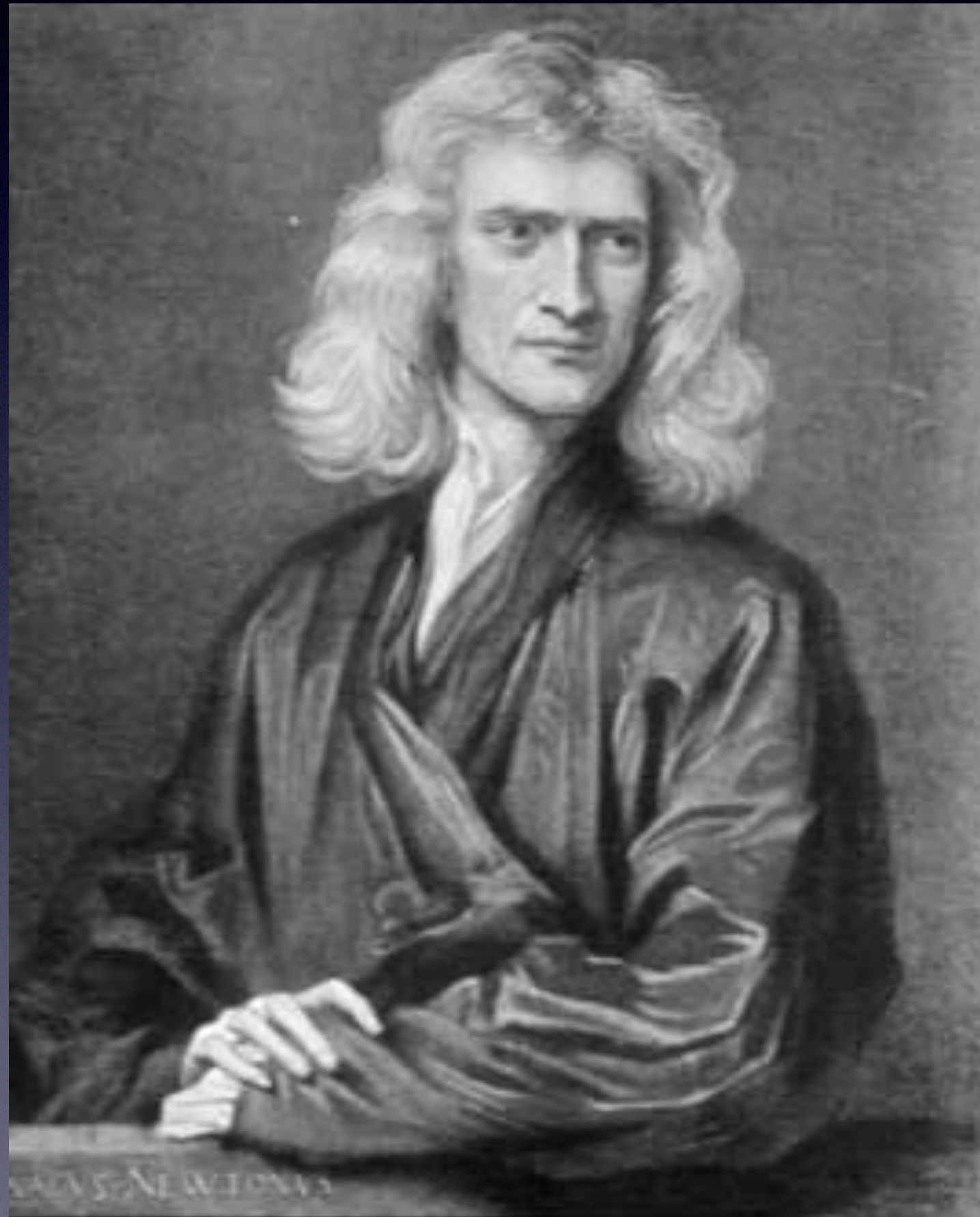




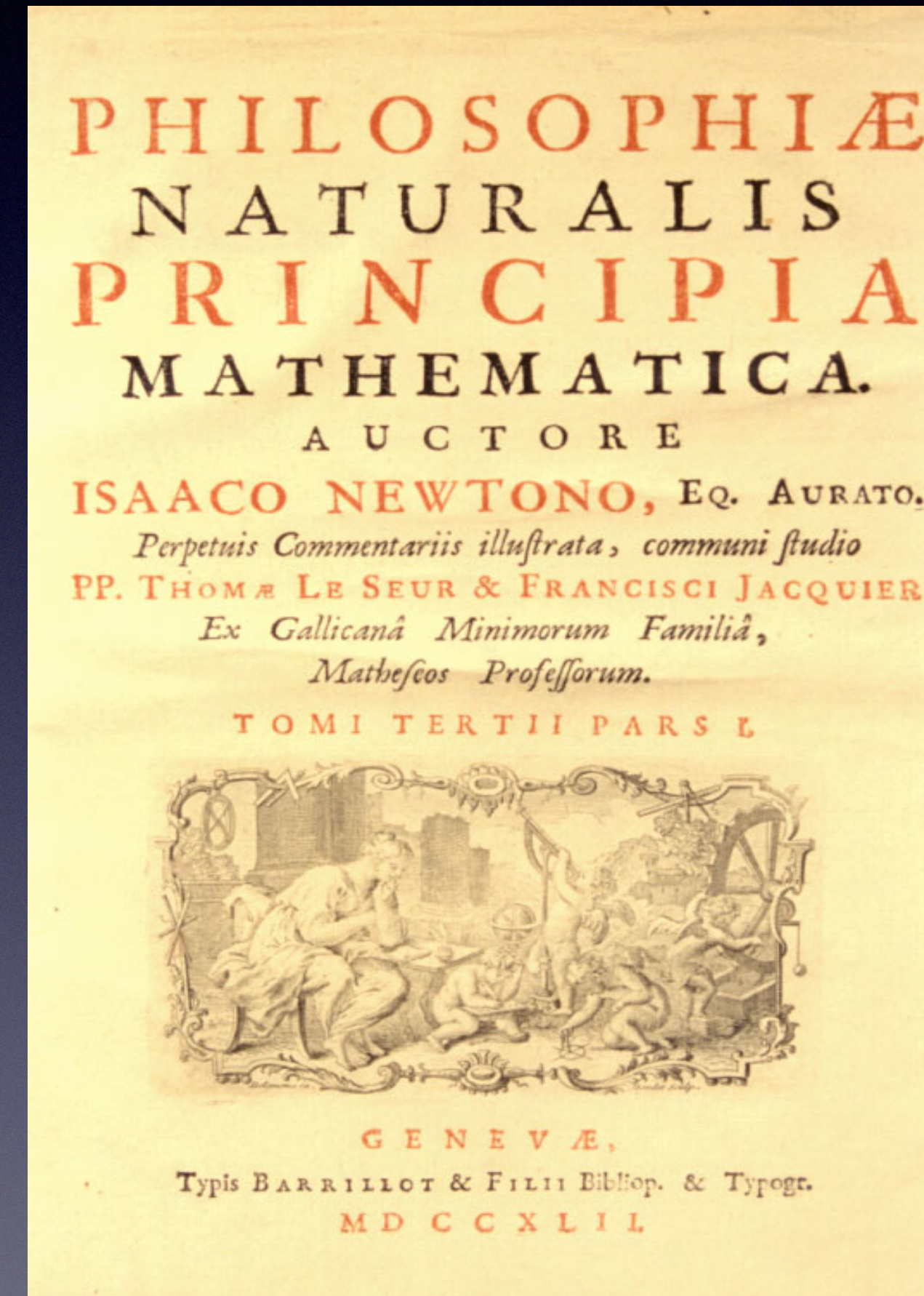
- **Problemas ontológicos:** ¿qué son el espacio y el tiempo?  
El debate entre Newton y Leibniz.  
Espacio, tiempo, y espacio-tiempo.
- **Problemas epistemológicos:** ¿Cómo podemos conocer la geometría que describe correctamente al mundo?  
Predicción y determinismo.
- **Problemas inter-teóricos:** La no-localidad cuántica y la teoría de la relatividad.  
Orígen de la irreversibilidad.



# Newton's *Principia*



Isaac Newton (1643-1727)





## Newton's Space

### Absolute Space (True, Mathematical)

“In its own nature, without regard to anything external, remains always similar and immovable “

- Space as a real entity
- Space as a ‘huge container’ of all the objects of the Universe
- All things are placed in space as to order of situation
- Order of the parts of space immutable



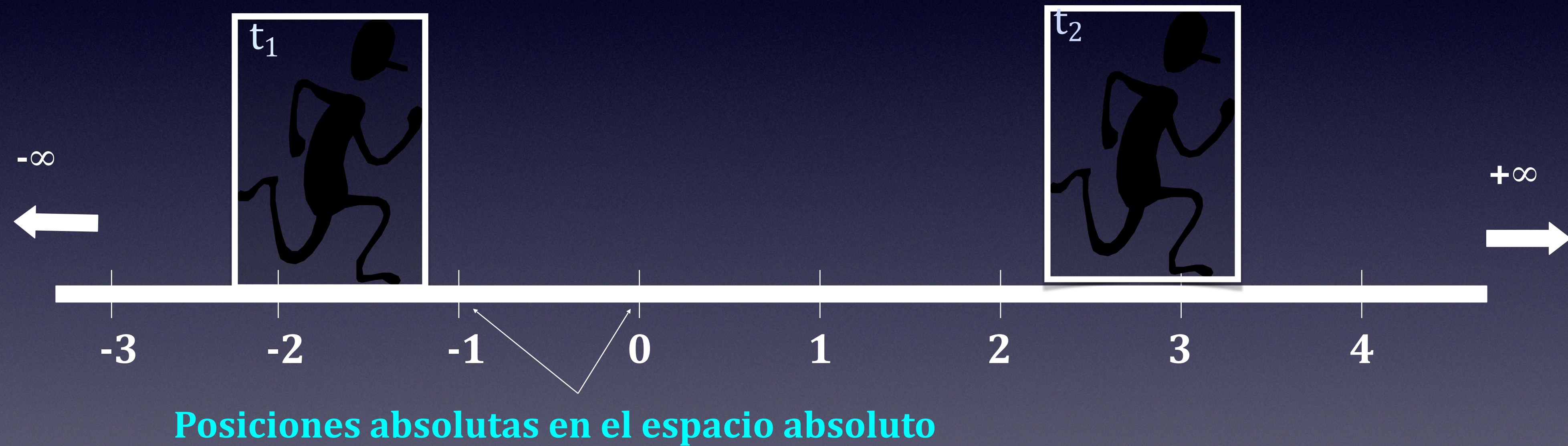
## Newton's Time

### Absolute Time (True, Mathematical)

- Flows equably without regard to anything external
- Progress of absolute time is liable to not change
- All things are placed in time as to order of succession
- Order of the parts of time immutable



Según Newton, el movimiento absoluto es movimiento relativo al espacio absoluto.

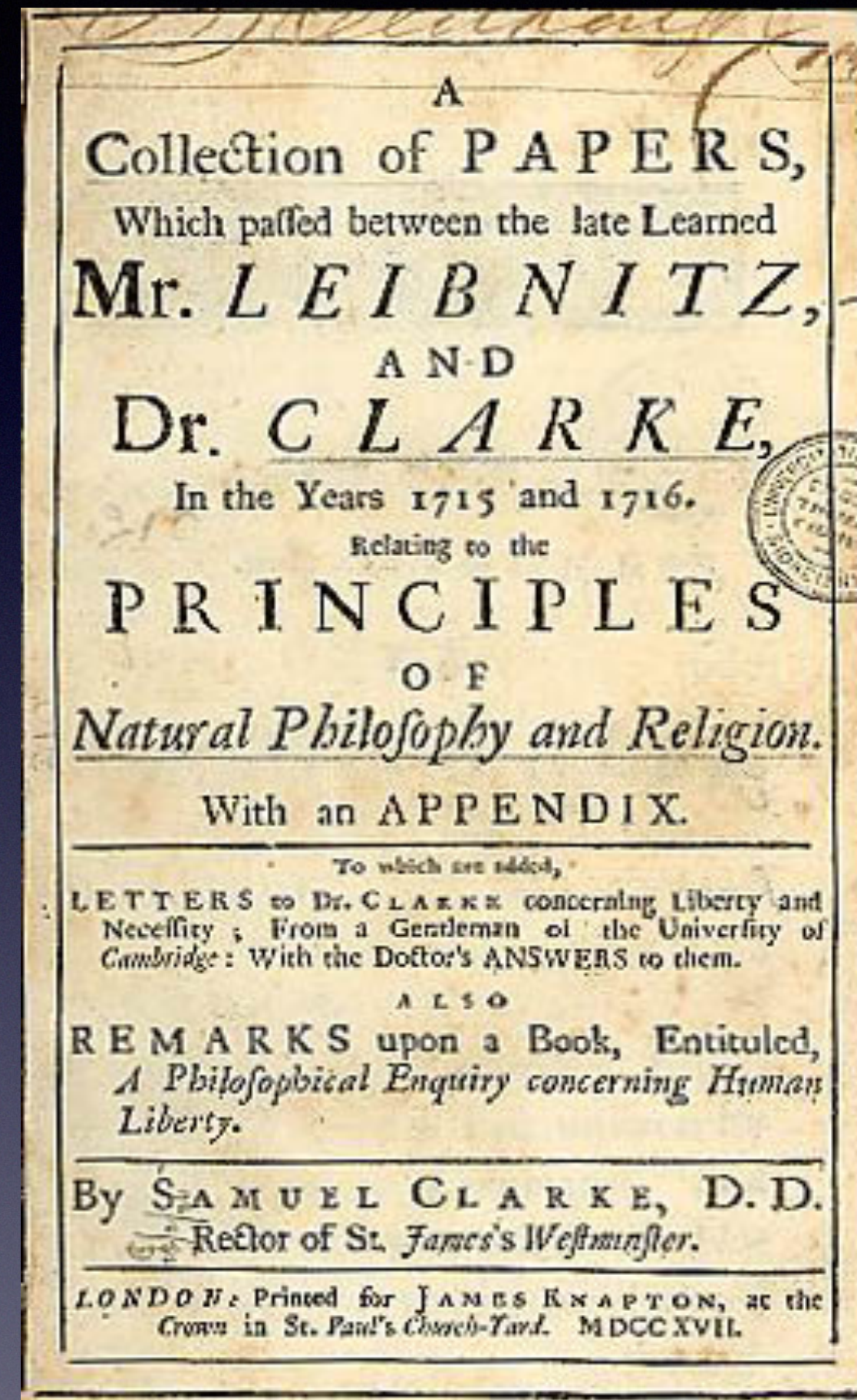




# La correspondencia Clarke – Leibniz



**Samuel Clarke**  
(1675-1729)



**Gottfried Leibniz**  
(1646-1716)





- Space is an order of coexistences
- Order of things among themselves
- Space is nothing at all without bodies, it's the possibility to place them
- It's the location of all bodies with respect to some reference body and any body could be taken as reference





- It is an order of successions
- Time considered without things is nothing at all
- Time is something not distinct from things existing in time



# Argumento de Leibniz

✓ Leibniz fue un racionalista.

✓ *Principio de razón suficiente* (PRS)

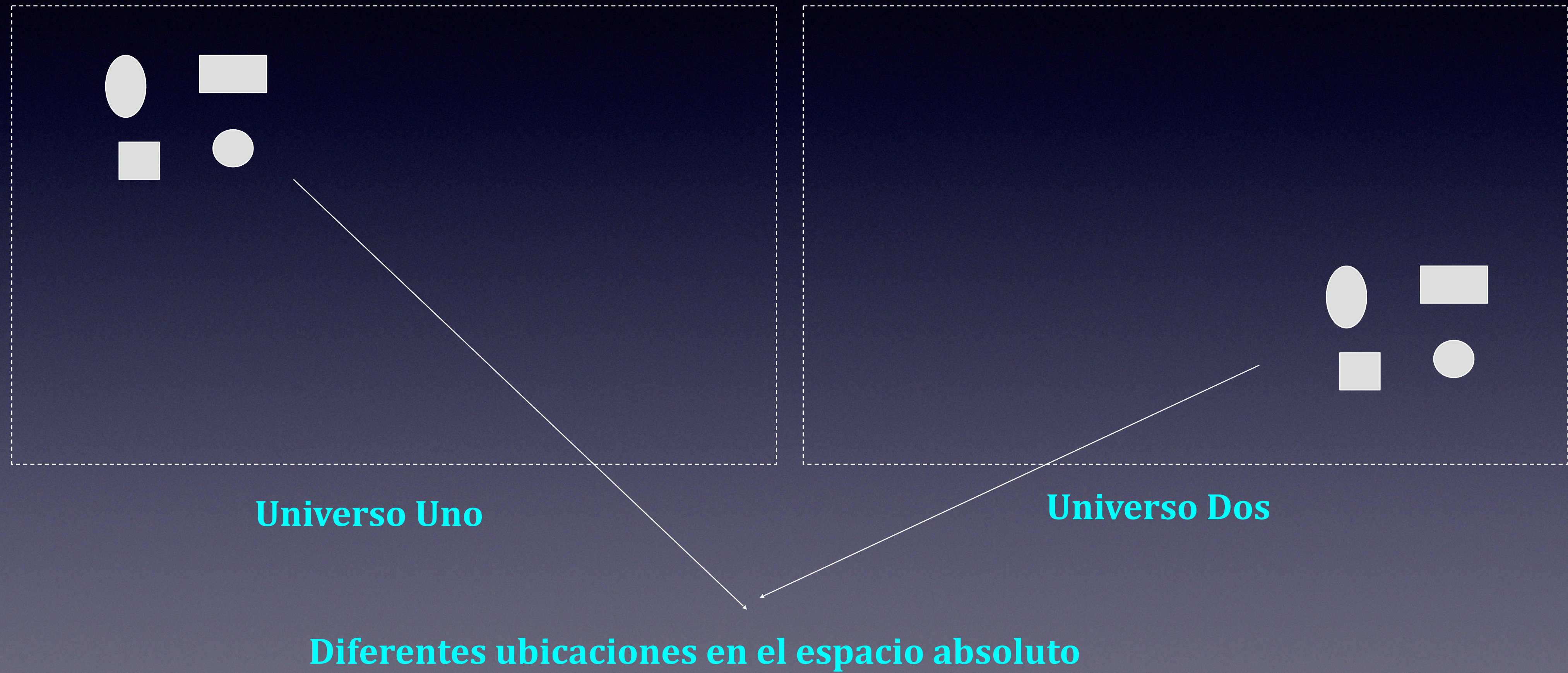
- “Debe haber siempre alguna razón para que las cosas sean como son y no de otra manera.”

✓ *Principio de identidad de los indiscernibles* (PII)

- “Decir que dos cosas son indiscernibles es decir que son la misma cosa bajo diferentes nombres.”



◉ *Argumento de Leibnitz:*

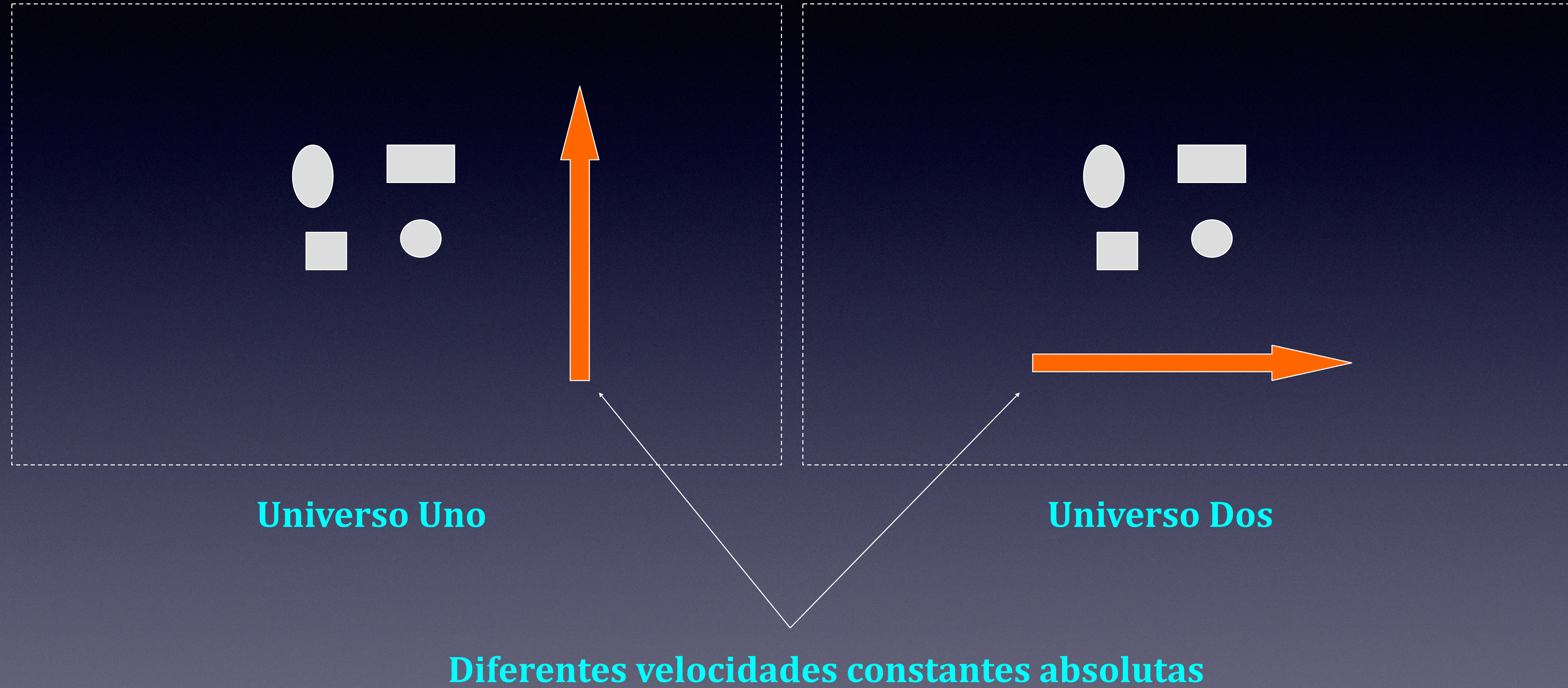




- Conflicto con el PRS:
  - ✓ No hay razón para preferir un universo al otro.
  - ✓ Pero, ¿es verdadero el PRS?
- Conflicto con PII:
  - ✓ PII: Como los “dos universos” son indiscernibles, son idénticos.
  - ✓ Pero, ¿es verdadero PII?



◉ *Argumento cinemático:*





- Según la teoría de Newton del espacio absoluto
  - ✓ Los dos universos no son idénticos aunque las velocidades diferentes absolutas y constantes son indiscernibles.
- Conflicto con PRS:
  - ✓ No hay razón para preferir uno al otro.
- Conflicto con PII:
  - ✓ PII: Dado que los dos universos son indiscernibles, son idénticos.





Things exist at once observed in a certain **order of co-existence**



**Space as set of relations between objects**

**Vacuum ?**

- If you take away all objects in the Universe,  
there would not be any space remaining

⇒ Vacuum doesn't exist, empty space is an imaginary thing



## Newton's Rotating Bucket Experiment 2/2



Water **absolute motion** anti-correlated  
to vessel-water **relative motion**

When vessel-water **relative motion** is max



No recession: **no absolute motion**

When **relative motion** null



Max recession: **max absolute motion**



Absolute motion doesn't depend on motion relative to surroundings  
(Against Descartes 'True' motion)

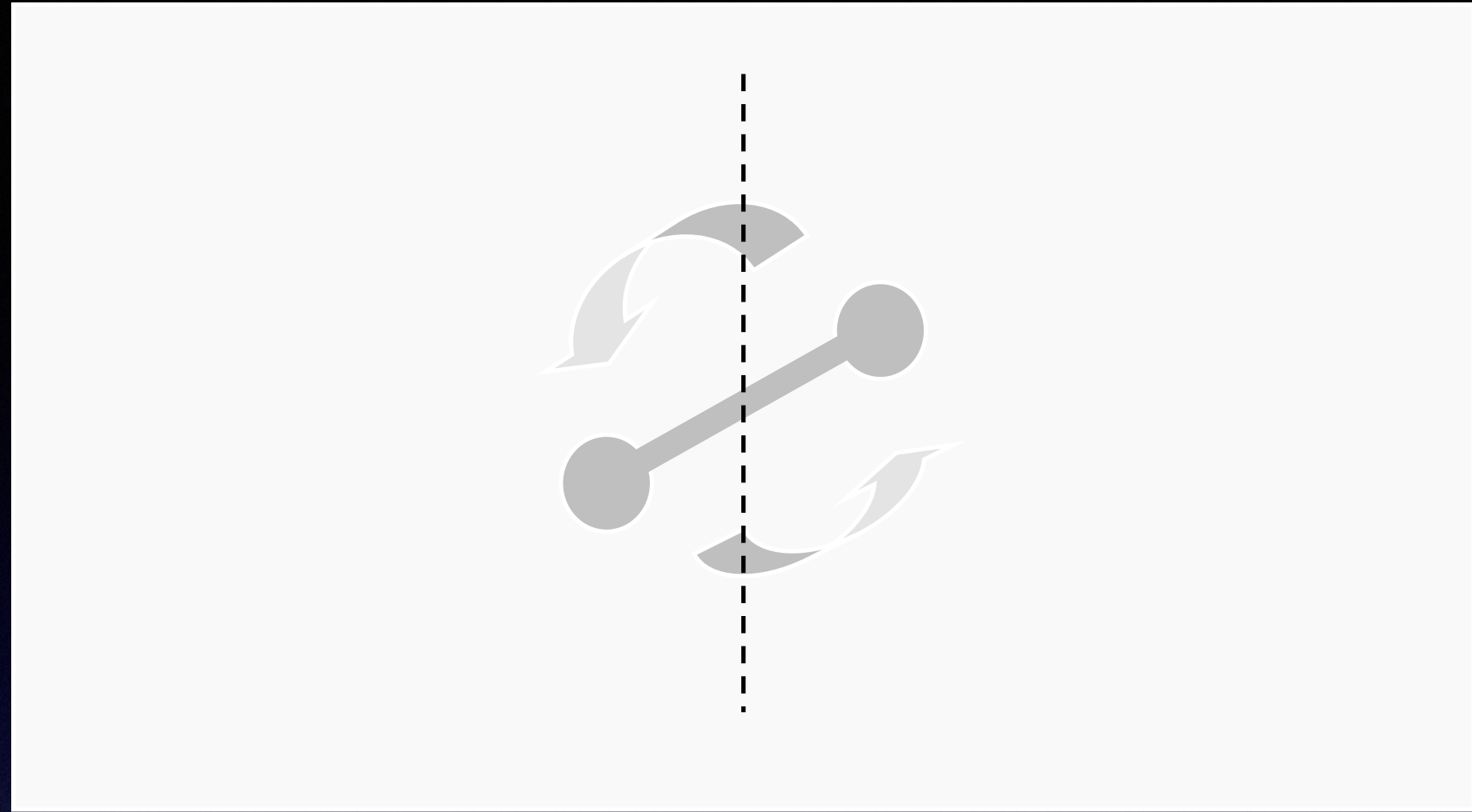
For a given recession there is only one absolute circular motion



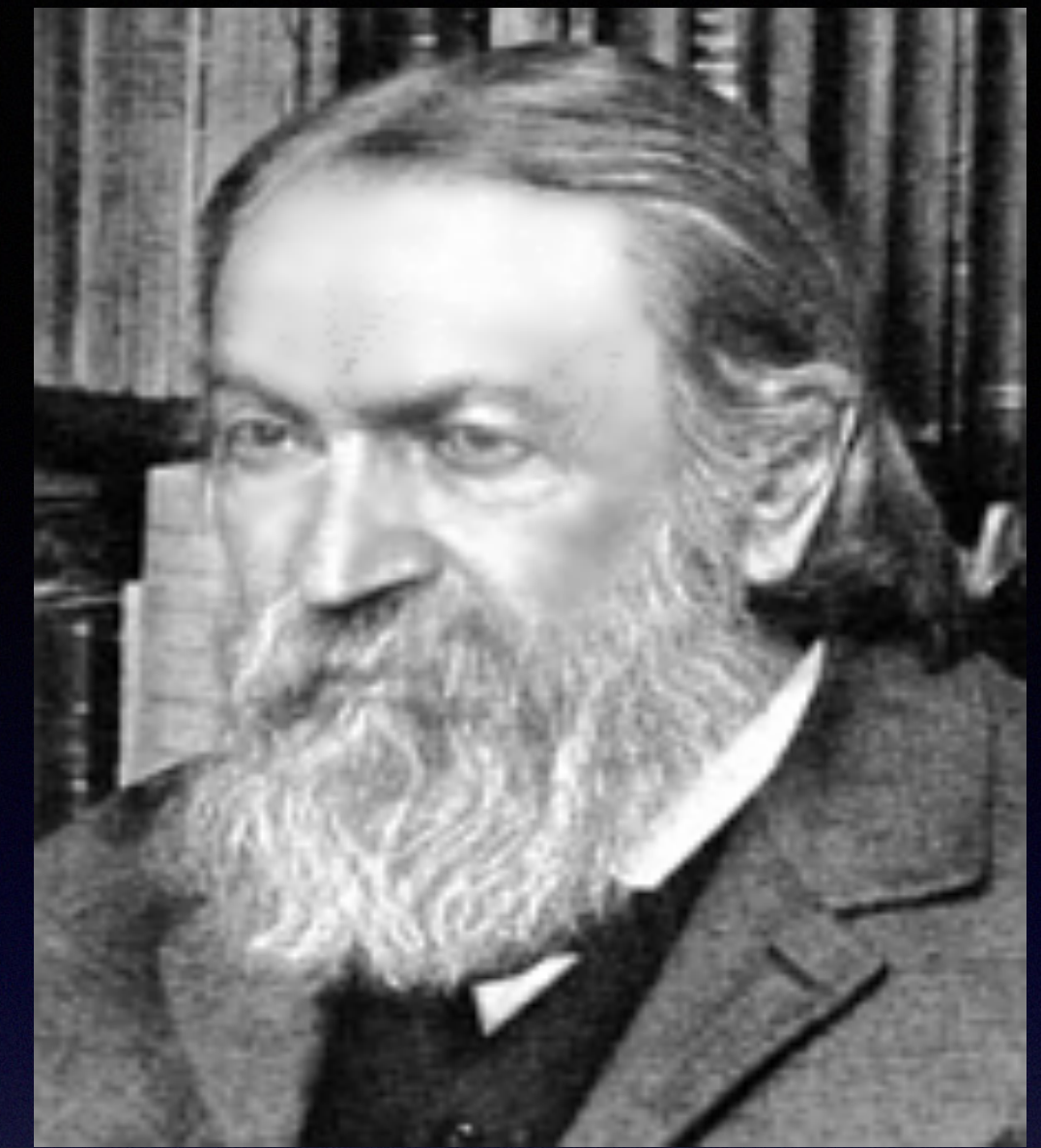
# Leibniz

- ✓ Murió durante la correspondencia.
- ✓ No llegó a dar una respuesta clara al argumento del balde.
- ✓ Admitió la existencia de rotación absoluta.
- ✓ Sin embargo, negó que se relacionase con el espacio absoluto , sino con “the immediate cause of the change is in the body itself”.





Todo movimiento es relativo



Mach, 1836-1916



La influencia del resto del universo produce la curvatura del agua en el balde.



“El experimento de Newton con el balde rotante nos enseña que la rotación del agua respecto a las paredes del balde no juega ningún papel en la generación de las fuerzas centrífugas. Estas se deben, sin embargo, a la rotación del agua respecto a la masa de la Tierra y otros cuerpos celestes. Nadie puede decir que resultaría del experimento si las paredes del balde se hicieran arbitrariamente masivas.” (Mach, *Science of Mechanics* 1883).

Mach: Si el universo gira alrededor del balde el agua se curvaría de la misma forma.



# ¿Qué es el espacio-tiempo?

El concepto de espacio-tiempo fue introducido por Hermann Minkowski en 1907/1908, y luego adoptado y desarrollado por Albert Einstein y Hermann Weyl.







# Spacetime

“The views of space and time which I wish to lay before you have sprung from the soil of experimental physics, and therein lies their strength. They are radical. Henceforth space by itself, and time by itself, are doomed to fade away into mere shadows, and only a kind of union of the two will preserve an independent reality.”

H. Minkowski, Köln, September 21<sup>st</sup>, 1908



# ¿Qué es el espacio-tiempo?

¿Qué es el espacio-tiempo?

El espacio-tiempo es una entidad ontológica fundamental sobre la que existen los demás campos descritos por la física.

¿Cómo representamos al espacio-tiempo en física?

El espacio-tiempo puede representarse por una variedad diferenciable real de 4 dimensiones.



# Espacio-tiempo: métrica

Queremos imponer orden en la variedad. Podemos hacerlo aprendiendo a medir las ‘distancias’ entre los eventos. Matemáticamente, podemos hacer esto introduciendo un ‘tensor métrico’ en la variedad. El espacio-tiempo, entonces, se representa por un par ordenado  $(M, g)$ , donde  $M$  es la variedad y  $g$  el tensor métrico.

Métrica euclidea

$$\delta_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Intervalo

$$ds^2 = \delta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = (dx^0)^2 + (dx^1)^2 + (dx^2)^2 + (dx^3)^2.$$

$$ds^2 = \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = (dx^0)^2 - (dx^1)^2 - (dx^2)^2 - (dx^3)^2.$$

Métrica de Minkowski

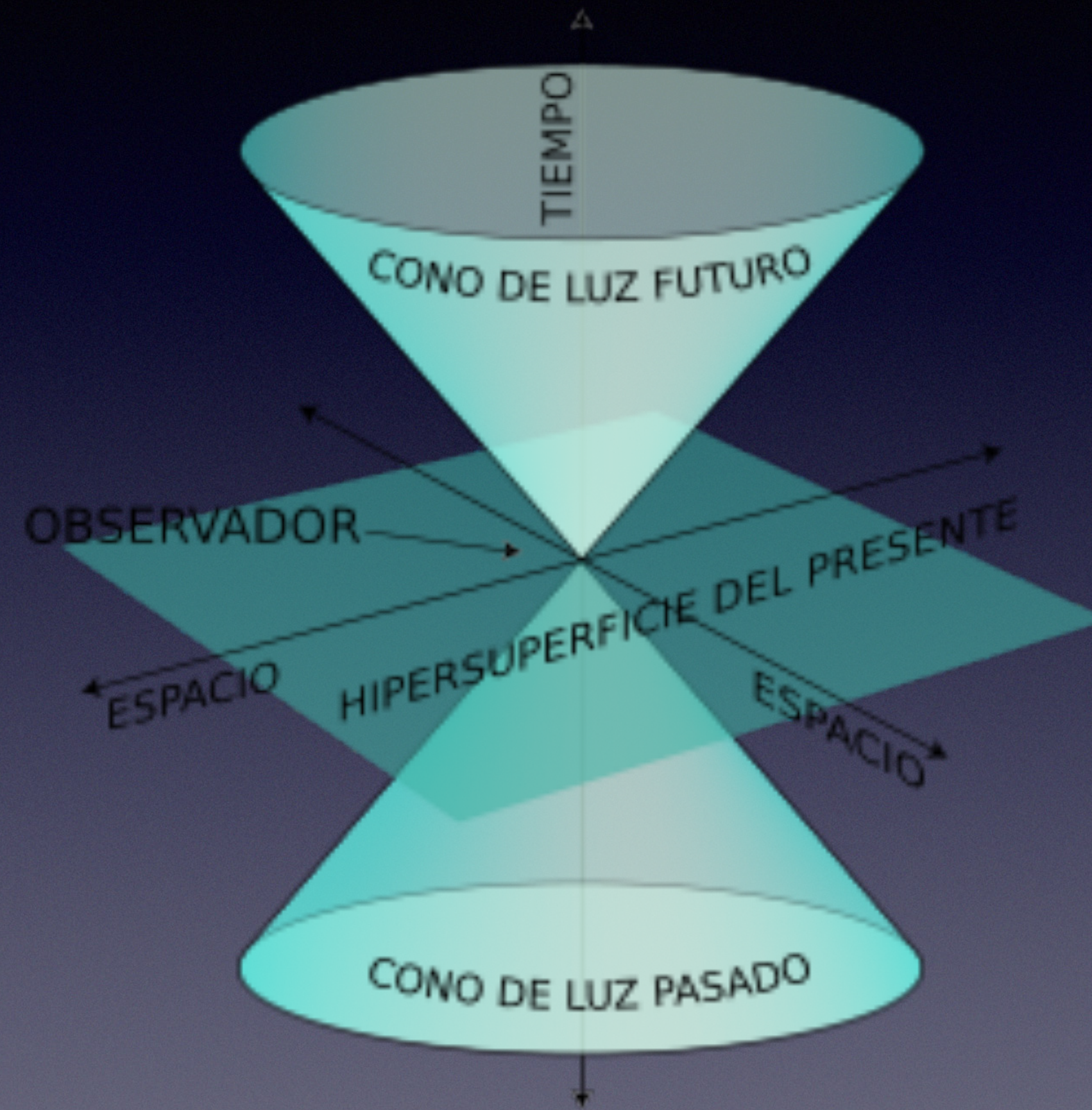


# Conos de luz

$ds^2=0$

$ds^2>0$

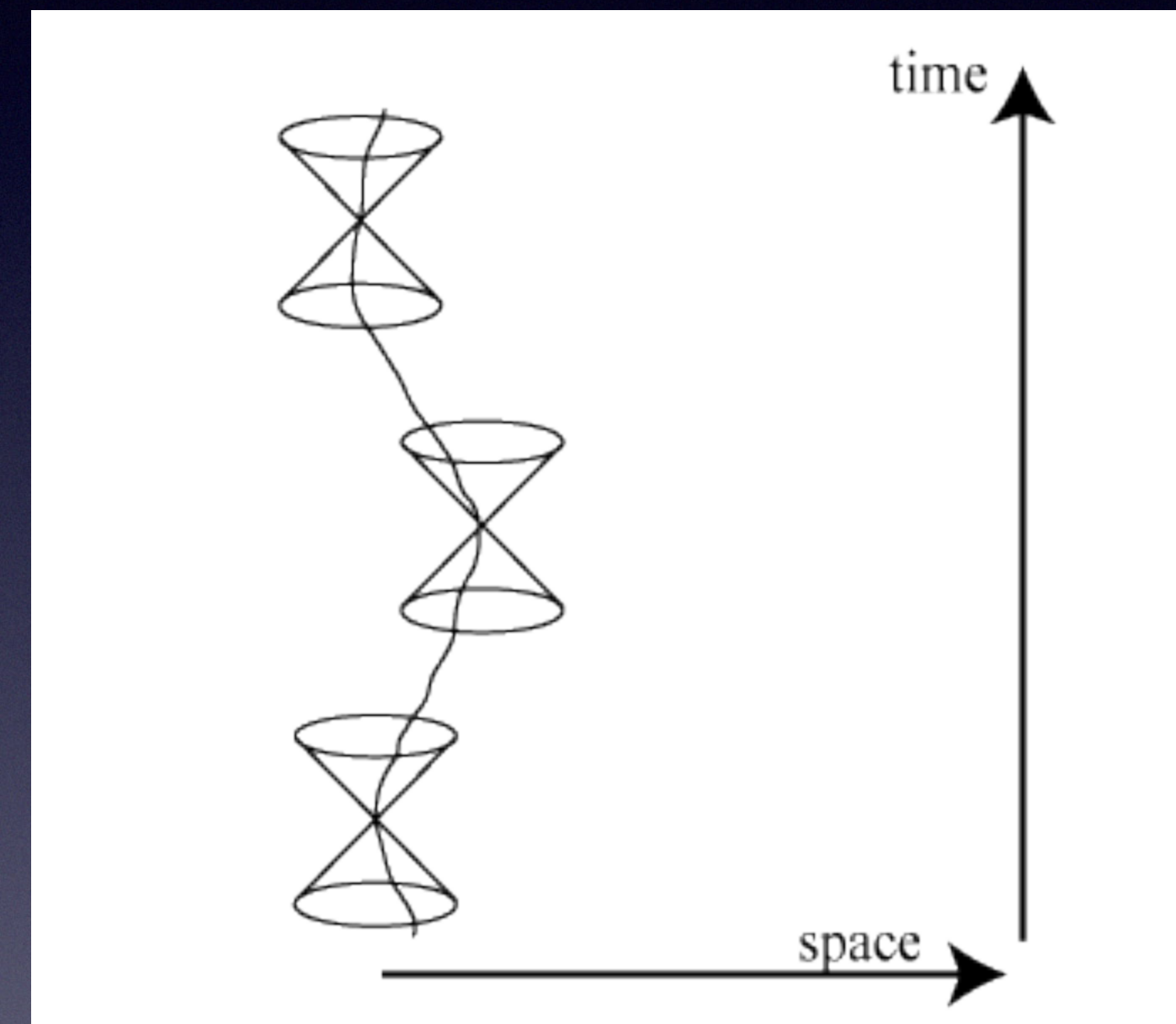
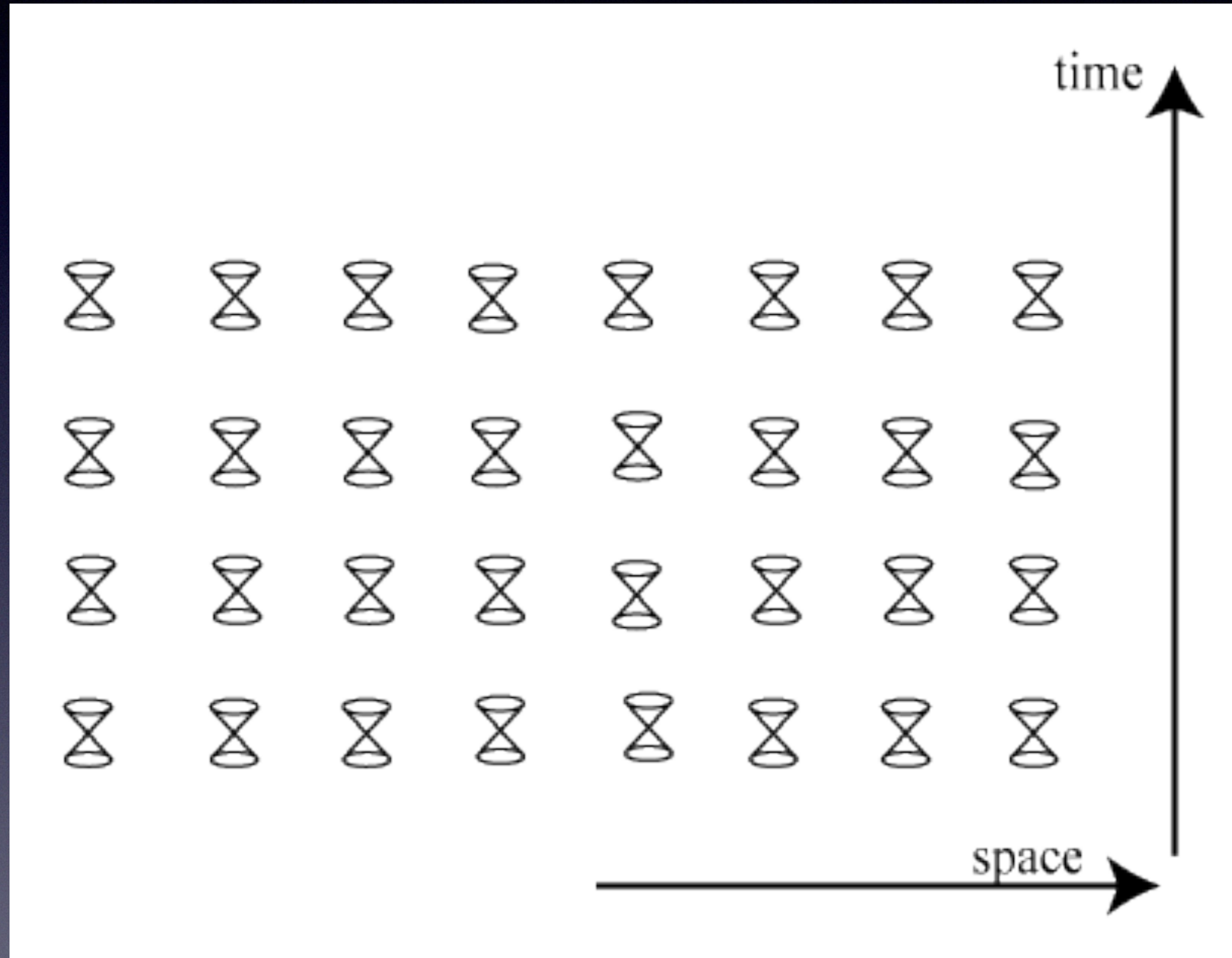
$ds^2<0$



$$\Delta s^2 = x^a x^b \eta_{ab} = c^2 \Delta t^2 - \Delta x^2 - \Delta y^2 - \Delta z^2$$



# Conos de luz





## Newton's Principia: General Scholium

### Cause

*“ I have not been able to discover the **cause** of those properties of gravity from phenomena, and I frame **no hypothesis** ”*

*“To us it is enough that gravity does really exist, and act according to the laws which we have explained”*

### God



*“All systems could only proceed from the counsel and dominion of an intelligent and **powerful Being**“*

*“**Supreme God**, Being eternal, infinite, absolutely perfect, omnipotent, omniscient, living, intelligent ...”*

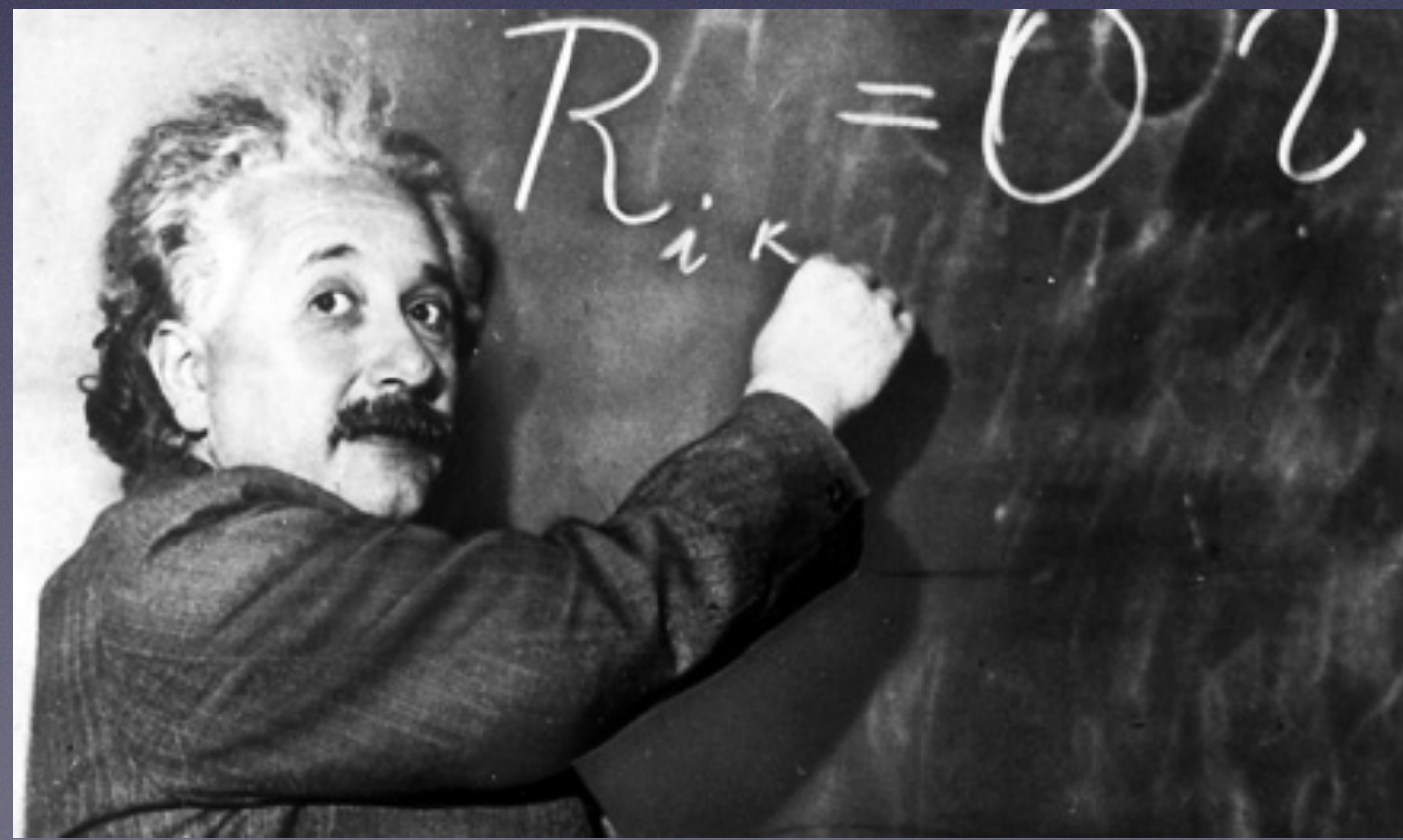


God as ‘God of the gaps’, to account for what science failed to explain



# Espacio-tiempo: gravitación

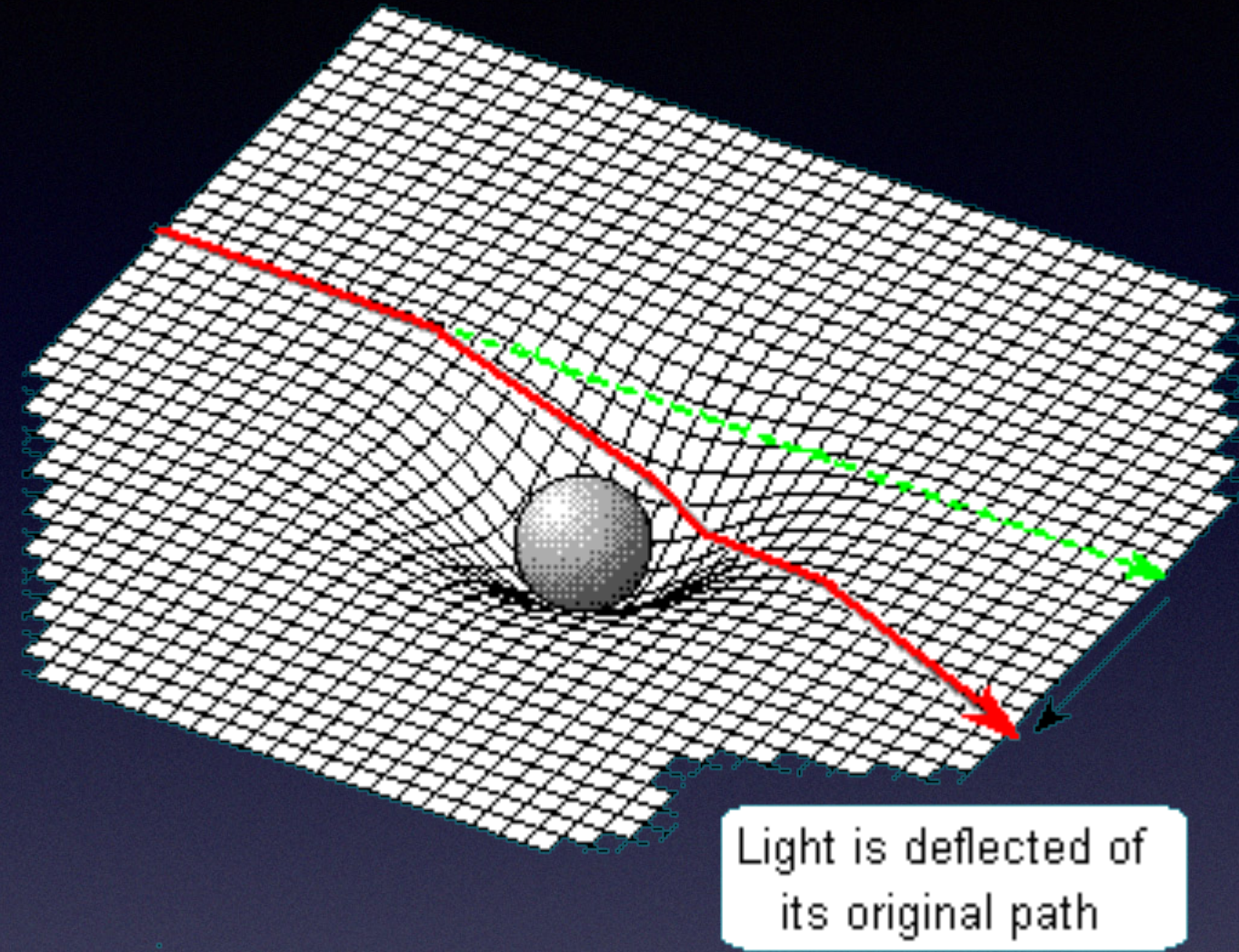
- Los efectos gravitacionales se deben a la curvatura del espacio-tiempo.
- La curvatura es determinada por el contenido de energía e impulso de los campos en el espacio-tiempo.
- Esta relación entre la métrica del espacio-tiempo y las propiedades de las cosas (energía e impulso) viene dada por las ecuaciones de Einstein:



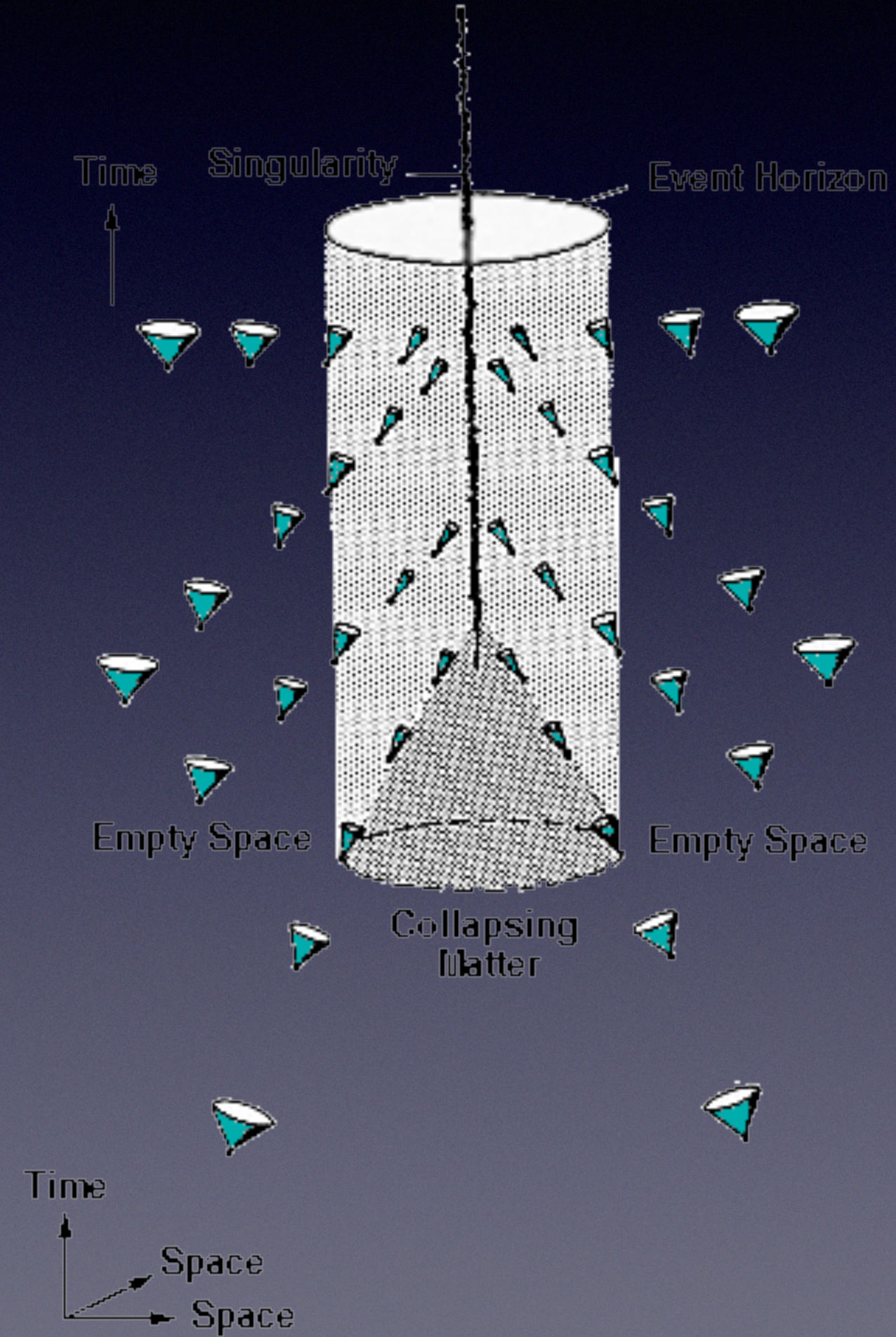
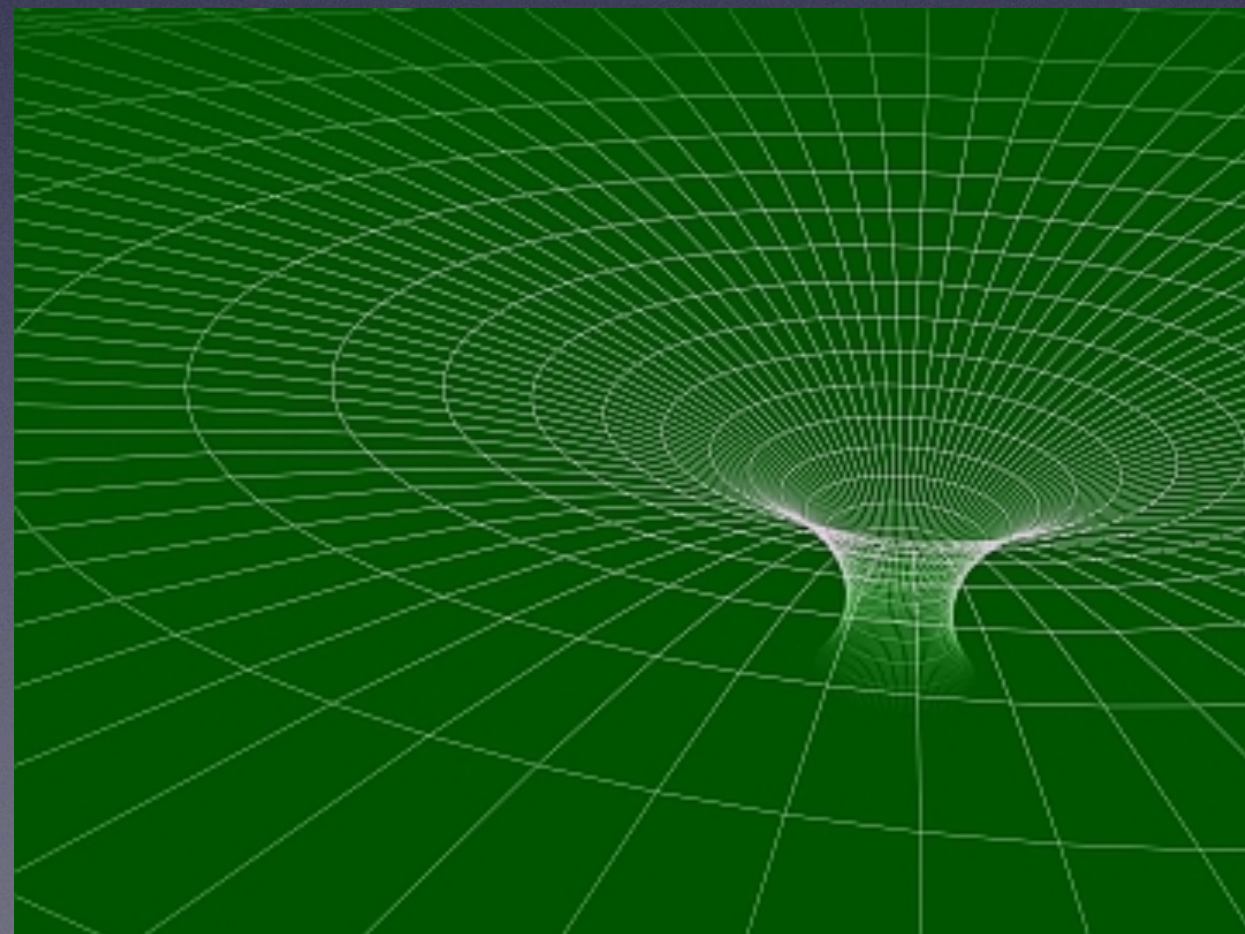
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$



# Espacio-tiempo: gravitación



numiano





*Sustantivalismo*: el espacio-tiempo es una entidad dotada de propiedades físicas. Esta posición está claramente expresada por Einstein (1920). La naturaleza exacta de esta entidad está abierta a discusión.



**Relacionismo**: el espacio-tiempo no es una entidad que pueda existir independientemente de los objetos físicos. El espacio-tiempo, en cambio, es un sistema de relaciones entre diferentes objetos ontológicos. La naturaleza de estos objetos también está abierta a discusión.



*Eternalismo* (también conocido como Universo Bloque — BU): Los momentos presentes, pasados y futuros (y por lo tanto los eventos) existen. Forman un "bloque" de 4 dimensiones de espacio-tiempo. Los eventos están ordenados por relaciones de precedencia, posterioridad o simultaneidad entre sí. Las relaciones entre eventos no cambian. En realidad, no pueden cambiar ya que el tiempo es una de las dimensiones del bloque. He defendido esta posición en Romero (2012) y (2013).



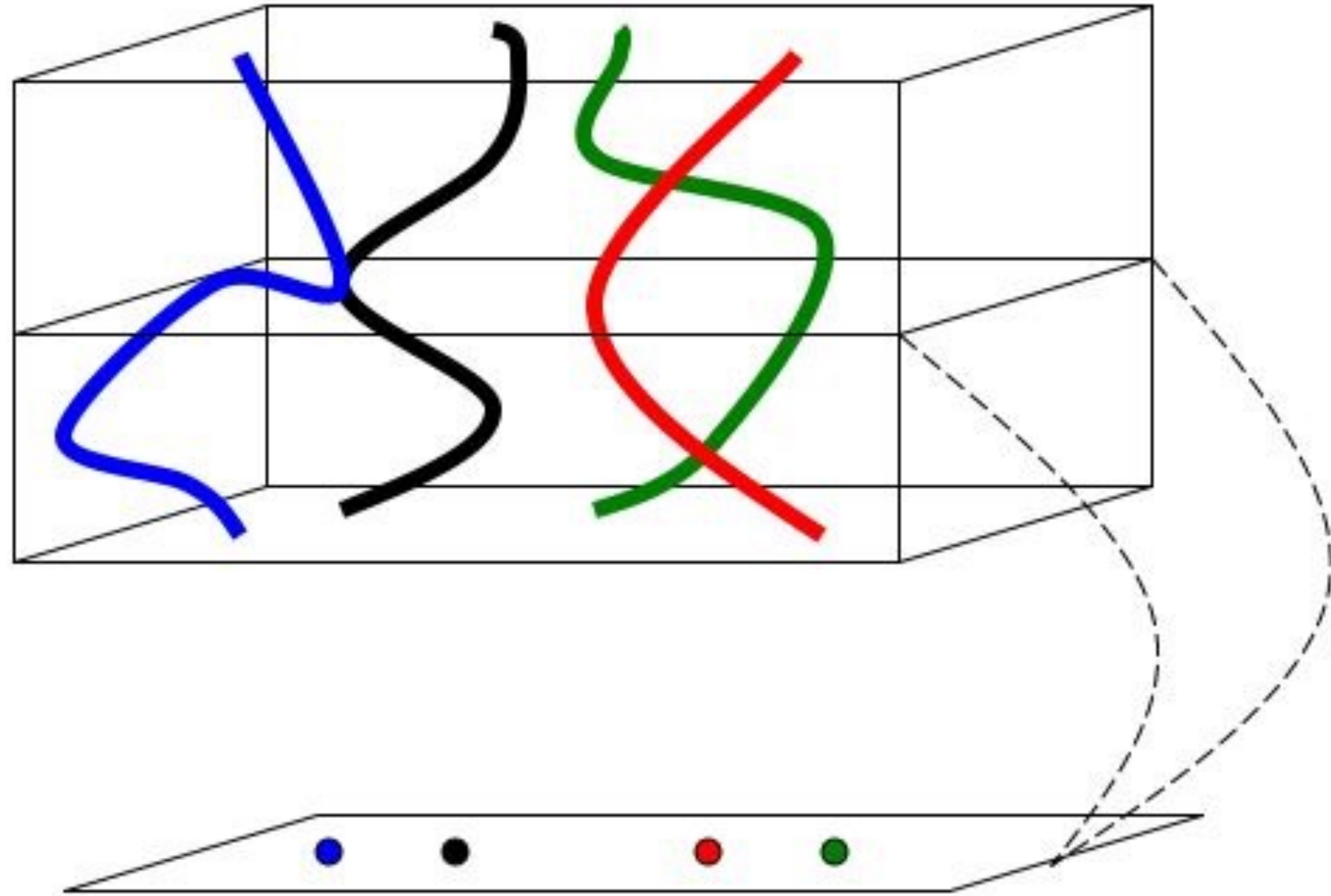
**Presentismo**: Solo son reales aquellos hechos que tienen lugar en el presente. Esta definición requiere explicaciones de los términos "presente" y "real".

**Presente**: La suma mereológica de todos los objetos con distancia temporal nula (Crisp 2003).

Dado que la suma mereológica de objetos es siempre un objeto, podemos inferir que para un presentista el presente es un objeto, es decir, un individuo con algunas propiedades. La fórmula abierta "x es presente" en la definición anterior, entonces significa que "x es parte de la suma mereológica de todos los objetos con distancia temporal nula". También pretende que lo que existe exista solo en un instante, no durante un lapso de tiempo.



Universo Bloque



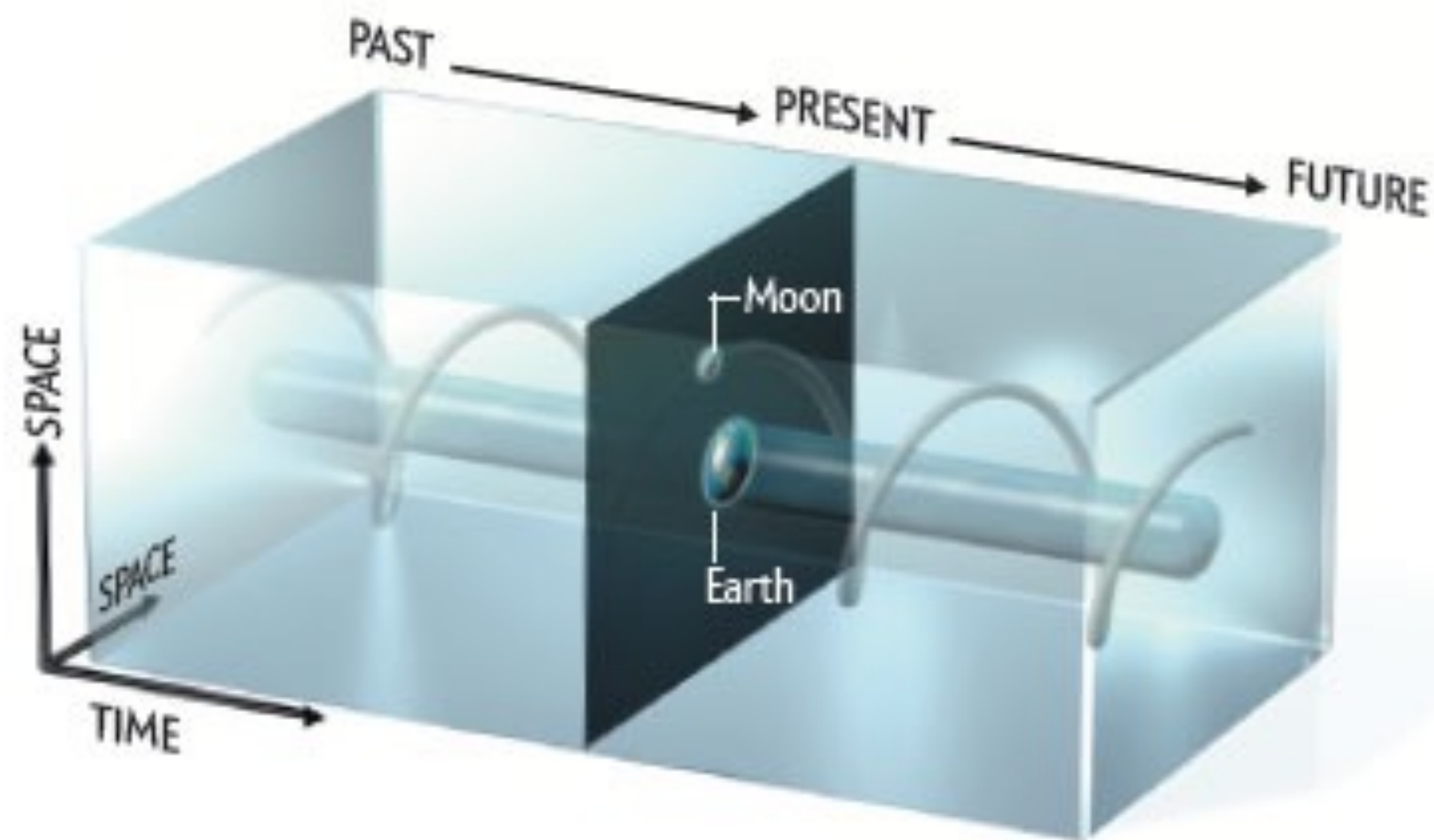
Presentismo



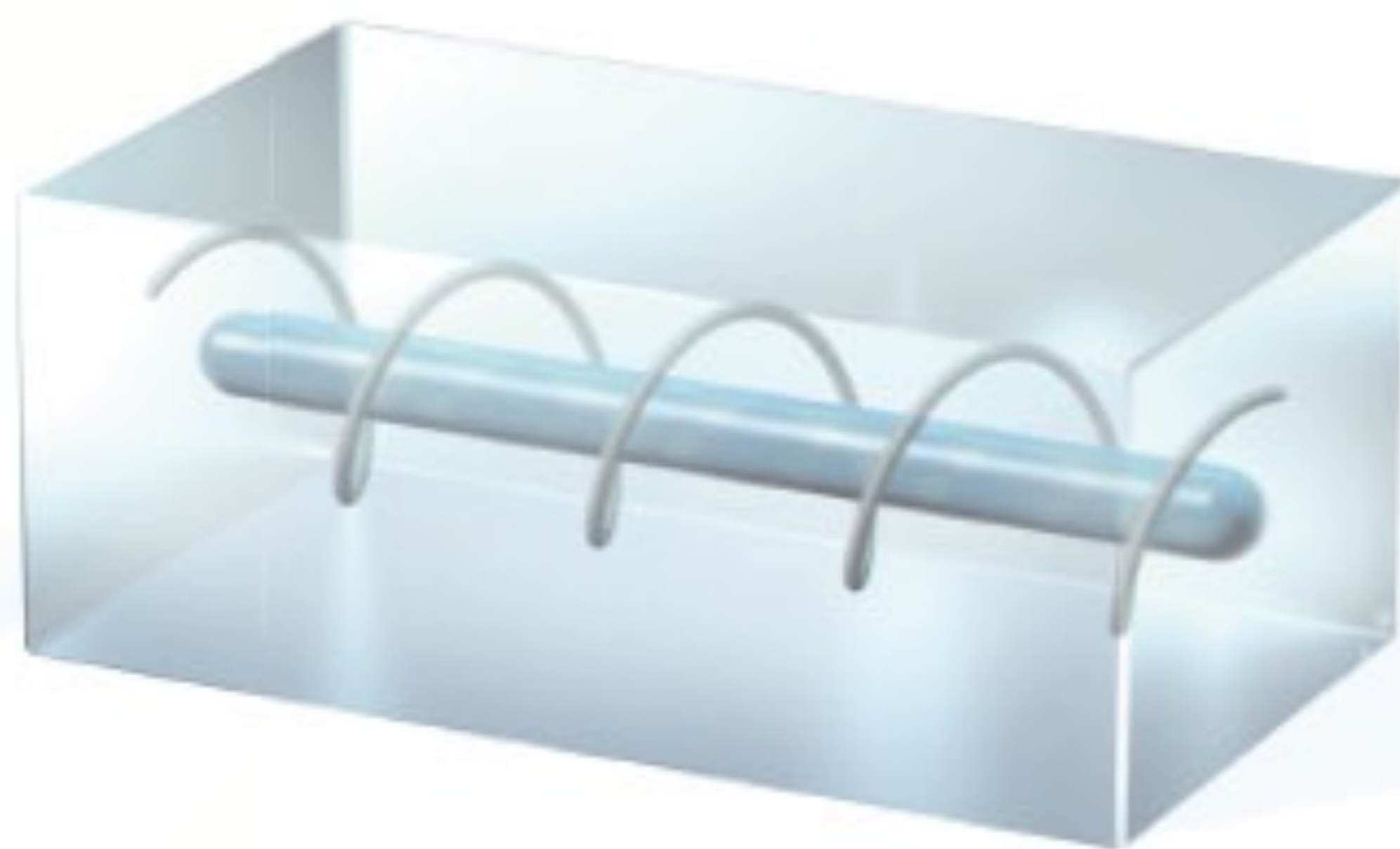
# All Time Like the Present

According to conventional wisdom, the present moment has special significance. It is all that is real. As the clock ticks, the moment passes and another comes into existence—a process that we call the flow of time. The moon, for example, is located at only one position in its orbit around Earth. Over time it ceases to exist at that position and is instead found at a new position.

Researchers who think about such things, however, generally argue that we cannot single out a present moment as special when every moment considers itself to be special. Objectively, past, present and future must be equally real. All of eternity is laid out in a four-dimensional block composed of time and the three spatial dimensions. (This diagram shows only two of these spatial dimensions.)



**Conventional view:** Only the present is real



**Block universe:** All times are equally real



## *Contra el Presentismo*

P<sub>1</sub>. There are gravitational waves.

P<sub>2</sub>. Gravitational waves have non-zero Weyl curvature.

P<sub>3</sub>. Non-zero Weyl curvature is only possible in 4 or more dimensions.

P<sub>4</sub>. Presentism is incompatible with a 4 dimensional world.

Then, presentism is false.

Romero (2017)



## *Contra el Presentismo*

The Englishman John McTaggart Ellis McTaggart presented a disproof of presentism in his famous paper *Unreality of Time* (McTaggart 1908). He reasoned as follows.

1. There is no time without change.
2. If time passes, events should change with respect to the properties of pastness, presentness, and futureness.
3. A given event, then, should be able to be in absolute sense, past, present and future.
4. These properties exclude each other.

Then: Events do not pass, just are.



## *Contra el Presentismo*

The perception of motion gives an additional argument against the idea that the present is an instant of time. According to [Le Poidevin \(2009\)](#):

1. What we perceive, we perceive as present.
2. We perceive motion.
3. Motion occurs over an interval.

Therefore: What we perceive as present occurs over an interval.



## *A favor del Substantivalismo*

- $P_1$ . Only substantival existents can be heated.
- $P_2$ . Spacetime can be heated.

Then, spacetime has substantival existence.



## *A favor de la emergencia del espacio-tiempo*

- $P_1$ . Spacetime has entropy.
- $P_2$ . Only what has a microstructure has entropy.

Then, spacetime has a microstructure.



Curvature of  
space

Distribution of  
mass/energy

$$G_{\alpha\beta} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\alpha\beta}$$

Some constants

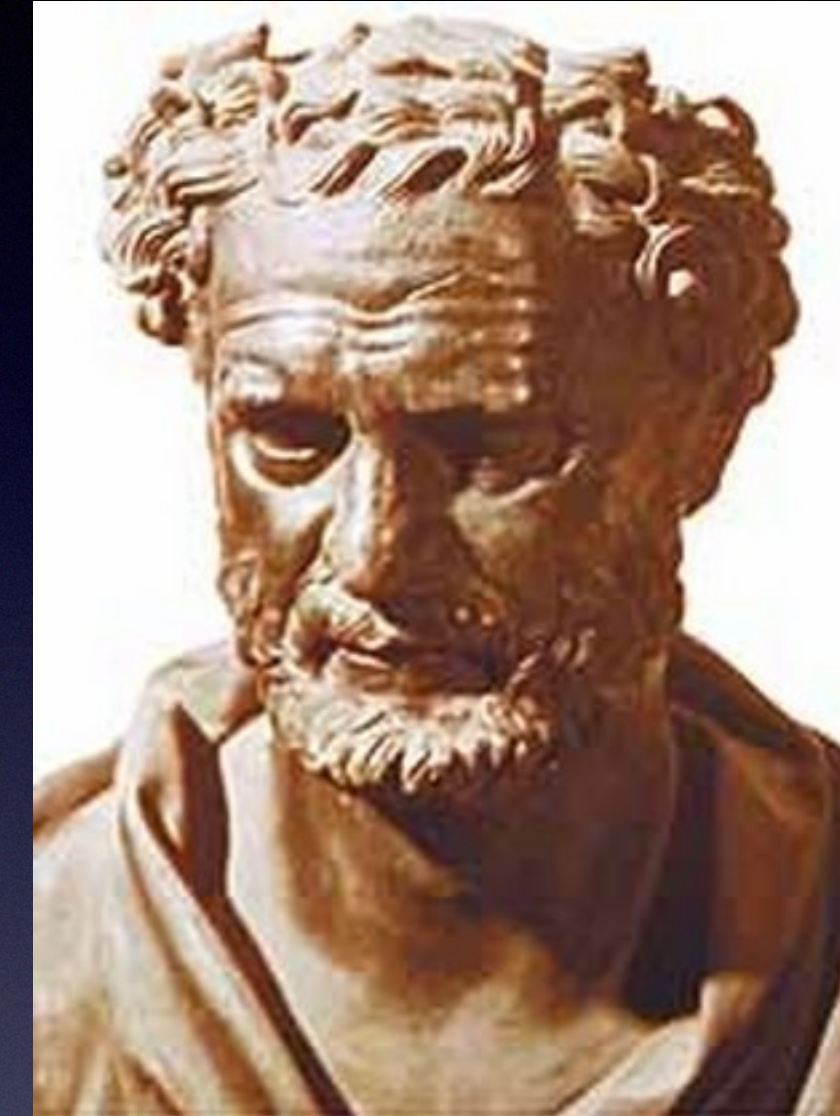
Some constants

- Super substantivalismo: Todo es espacio-tiempo. Kaluza-Klein, Einstein, Wheeler, Sider, Schaffer.
- Espacio-tiempo emergente: El espacio-tiempo y los campos materiales emergen de algún sustrato ontológico más básicos. Causal sets, Loop quantum Gravity, emergent spacetime, etc.



# Ontología de eventos en Occidente

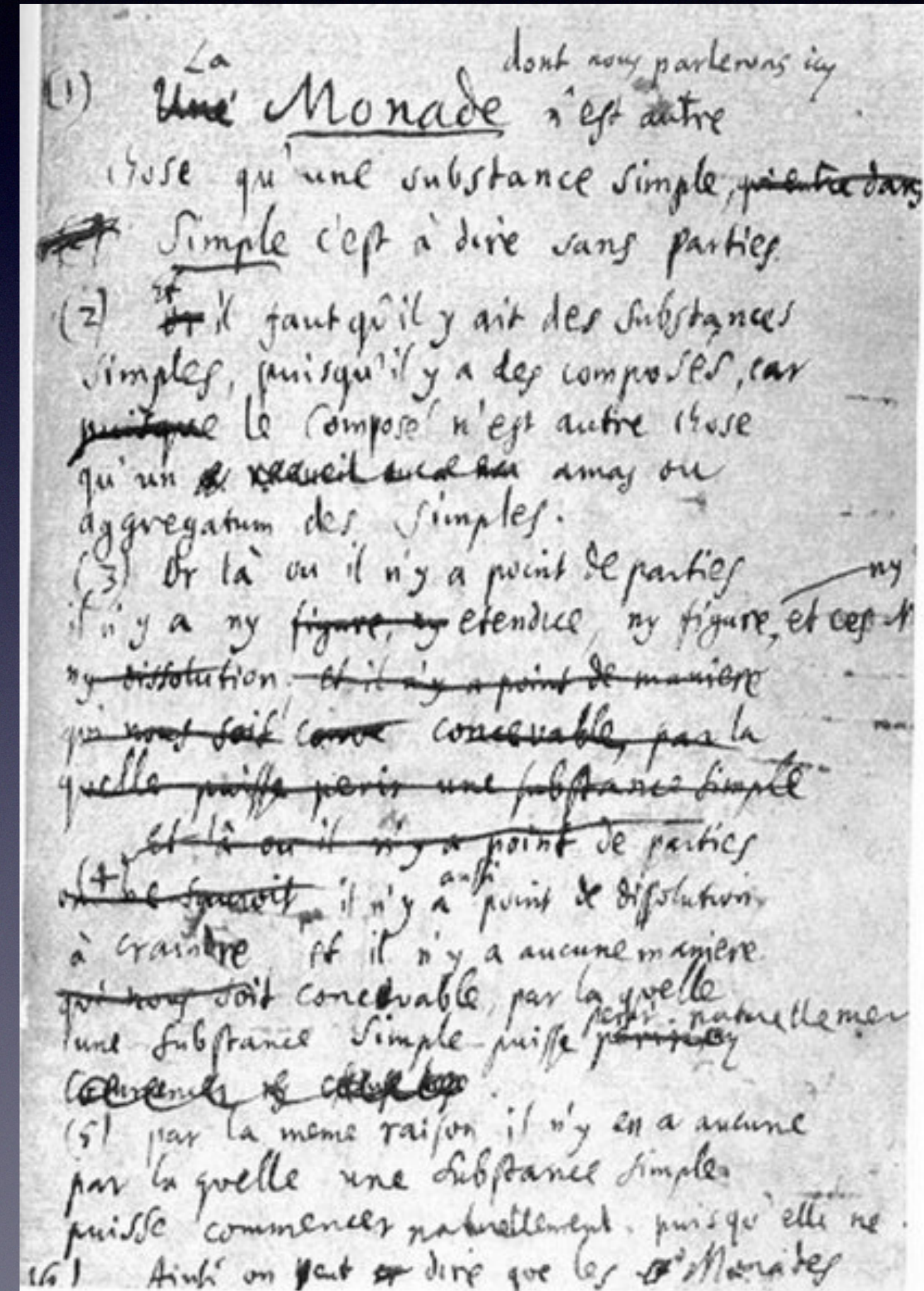
- Los eventos se han interpretado habitualmente en Occidente como cambios en las cosas.
- Pocos pensadores occidentales vieron los eventos como entidades fundamentales: Heráclito, Cratilo y Leibniz.





# Leibniz y la Monadología

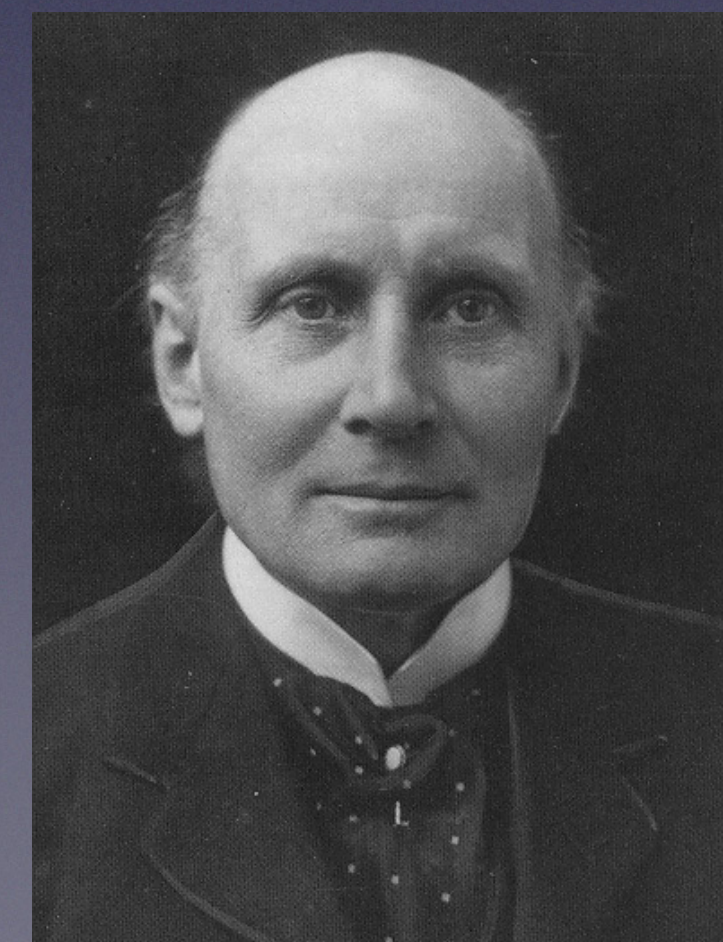
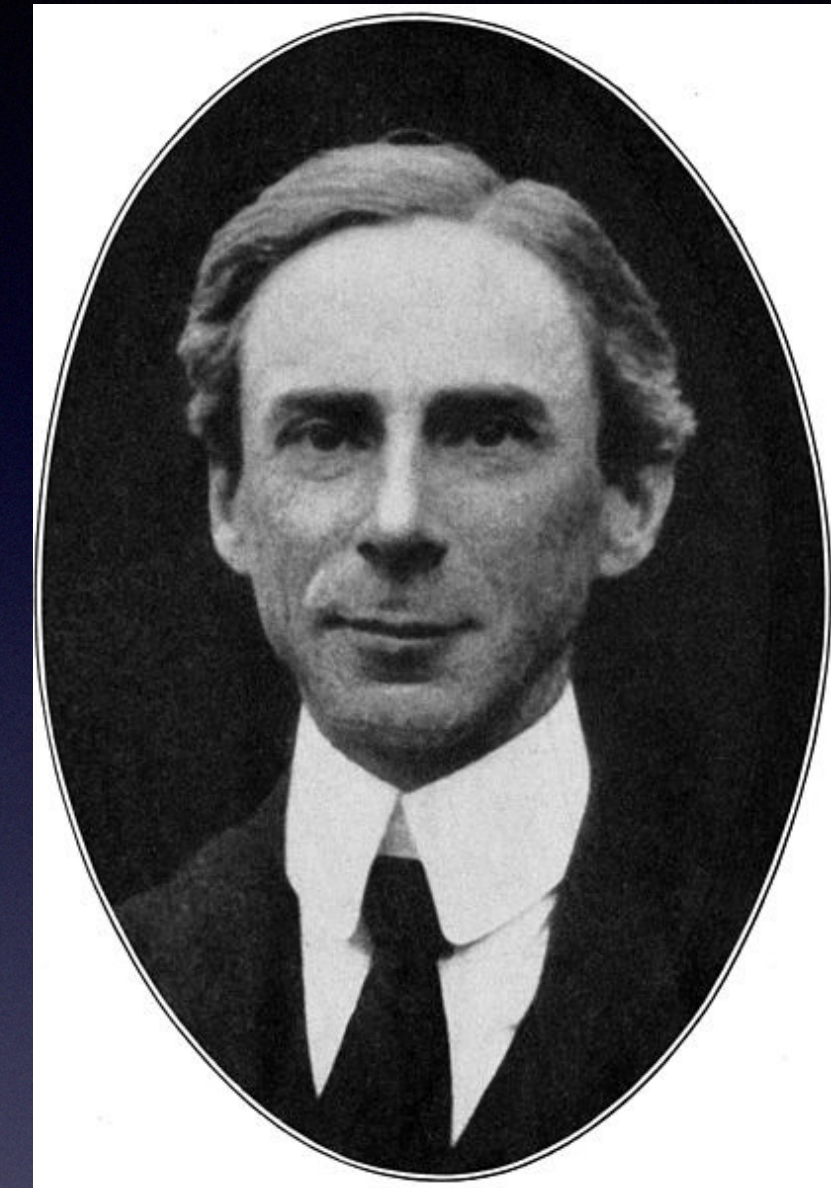
- En su obra póstuma *La Monadología*, Leibniz propuso un sistema ontológico en el que los componentes básicos del mundo eran “centros de acción indivisibles”, las llamadas mónadas.
- Estas mónadas pueden interpretarse como eventos básicos (Rescher 1996) y la ontología de Leibniz forma el primer sistema ontológico hipotético-deductivo basado en eventos como componentes básicos.





# Russell y Whitehead

- Russell fue fuertemente influido por Leibniz y en 1900 publicó *A Critical Exposition of the Philosophy of Leibniz*.
- Luego, en 1914, tras finalizar *Principia Mathematica*, en su *Our Knowledge of the External World*, Russell consideró a los objetos físicos como complejos o arreglos de fenómenos.
- Alfred North Whitehead fue más allá e interpretó al mundo como un arreglo de procesos en su obra *Process and Reality* (1929). Estaba fuertemente influido por las doctrinas de Hegel. Las entidades básicas de su ontología son lo que él llamó “occasions of experience”, o “oportunidades de experiencia”.





# Minkowski y el Mundo

- En 1908 Minkowski propuso una nueva interpretación de la relatividad especial e introdujo el concepto de espacio-tiempo.
- El espacio-tiempo de Minkowski está formado por la totalidad de eventos. A esta totalidad la llama "el Mundo". Los eventos son primitivos y la historia de las cosas son cadenas de eventos (procesos).
- Las leyes físicas pueden entenderse como restricciones en el espacio de eventos. Por tanto, el enfoque de Minkowski fue fundamental para el desarrollo original de la Relatividad General en el período 1912-1915.
- La relatividad general es una teoría sobre la estructura del espacio-tiempo, pero no dice nada sobre su naturaleza ontológica.





# Esquema de una teoría de ontológica de eventos

Supongamos la existencia de eventos. Consideremos a los eventos como individuos básicos. Formularé aquí los esquemas de la teoría sobre los eventos utilizando la lógica estándar de primer orden. Supongo también la teoría de conjuntos y todas las matemáticas que se pueden obtener de la teoría de conjuntos.

La base primitiva es:

$$\mathcal{B} = \langle E, \mathcal{E}, e^0, \star \rangle,$$

where  $E$  is a set,  $\mathcal{E}$  is the collection of all events,  $e^0$  is a fiction called the null event, and  $\star$  is a binary operation on  $E$ . The meaning of all these symbols will become clear through a set of axioms.



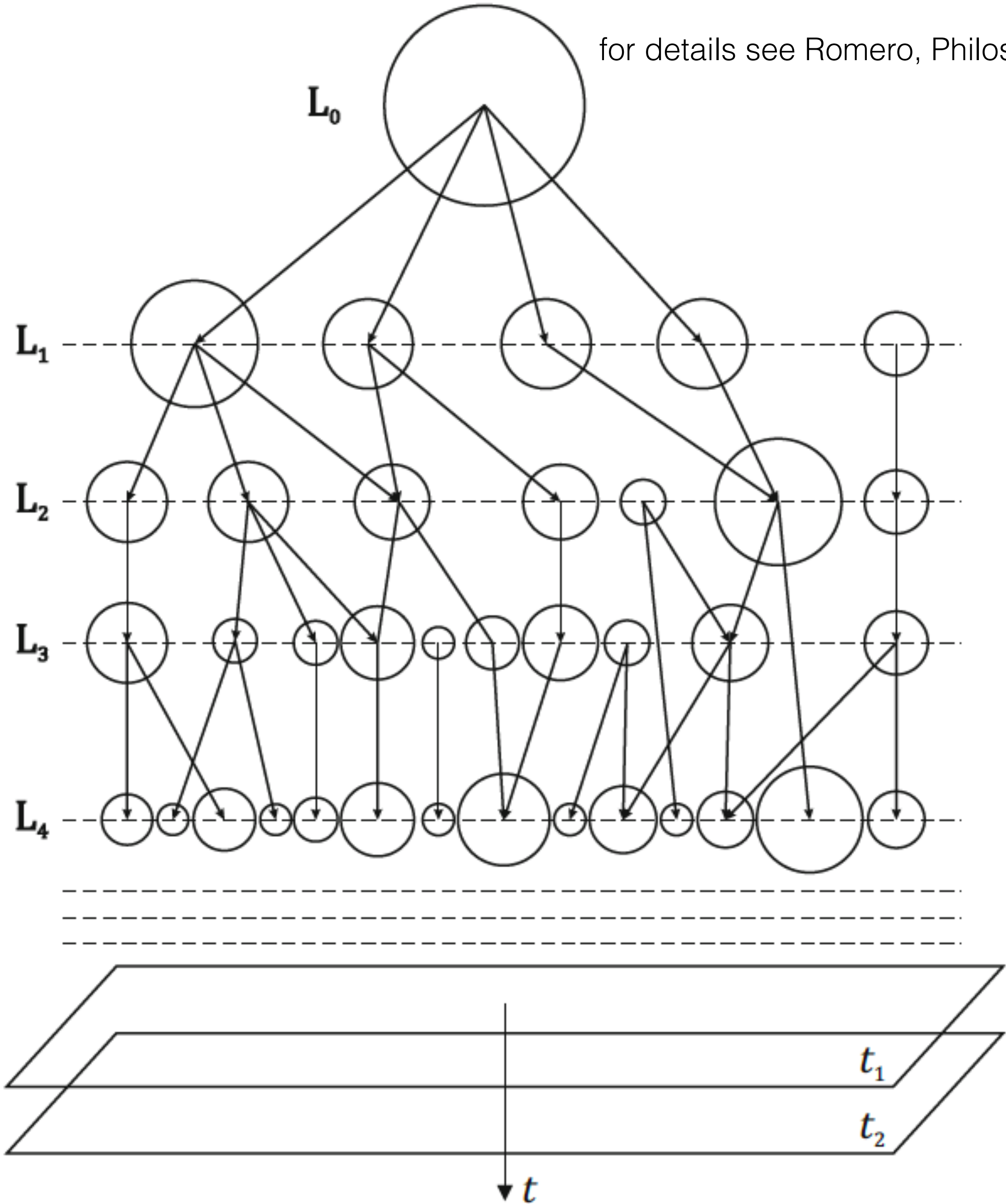
# Algunos axiomas

- $P_1.$   $(\forall e)_E (e \star e = e).$
- $P_2.$   $(\forall e_1)_E (\forall e_2)_E (e_1 \star e_2 \in E).$
- $P_3.$   $(\forall x)_\mathcal{E} (\exists e)_E (e \stackrel{\Delta}{=} x).$
- $P_4.$   $(\forall x)_\mathcal{E} (e_1 \stackrel{\Delta}{=} x \wedge e_2 \stackrel{\Delta}{=} x) \Rightarrow (e_1 = e_2).$
- $P_5.$   $(\exists e^0) (\forall e)_E (e^0 \star e = e \star e^0 \equiv e).$
- $P_6.$   $\neg (\exists x)_\mathcal{E} (e^0 \stackrel{\Delta}{=} x).$
- $P_7.$   $\text{Card} (E) < \aleph_0.$

Ver Romero (2016): A formal ontological theory based on timeless events  
*Philosophia* 44, 607-622.



for details see Romero, Philosophia, 2016.





# Determinismo y predictibilidad

- El determinismo es una doctrina metafísica sobre la naturaleza del mundo. Su suposición ontológica básica es que todos los eventos existen y son legales. Esta doctrina se remonta a Parmenides: “lo que es, es”.
- El determinismo no requiere causalidad estricta.
- El determinismo no implica predictibilidad.
- La predictibilidad es una característica de nuestras teorías acerca del mundo, no una propiedad del mundo mismo.



# Determinismo Newtoniano (Laplaciano)

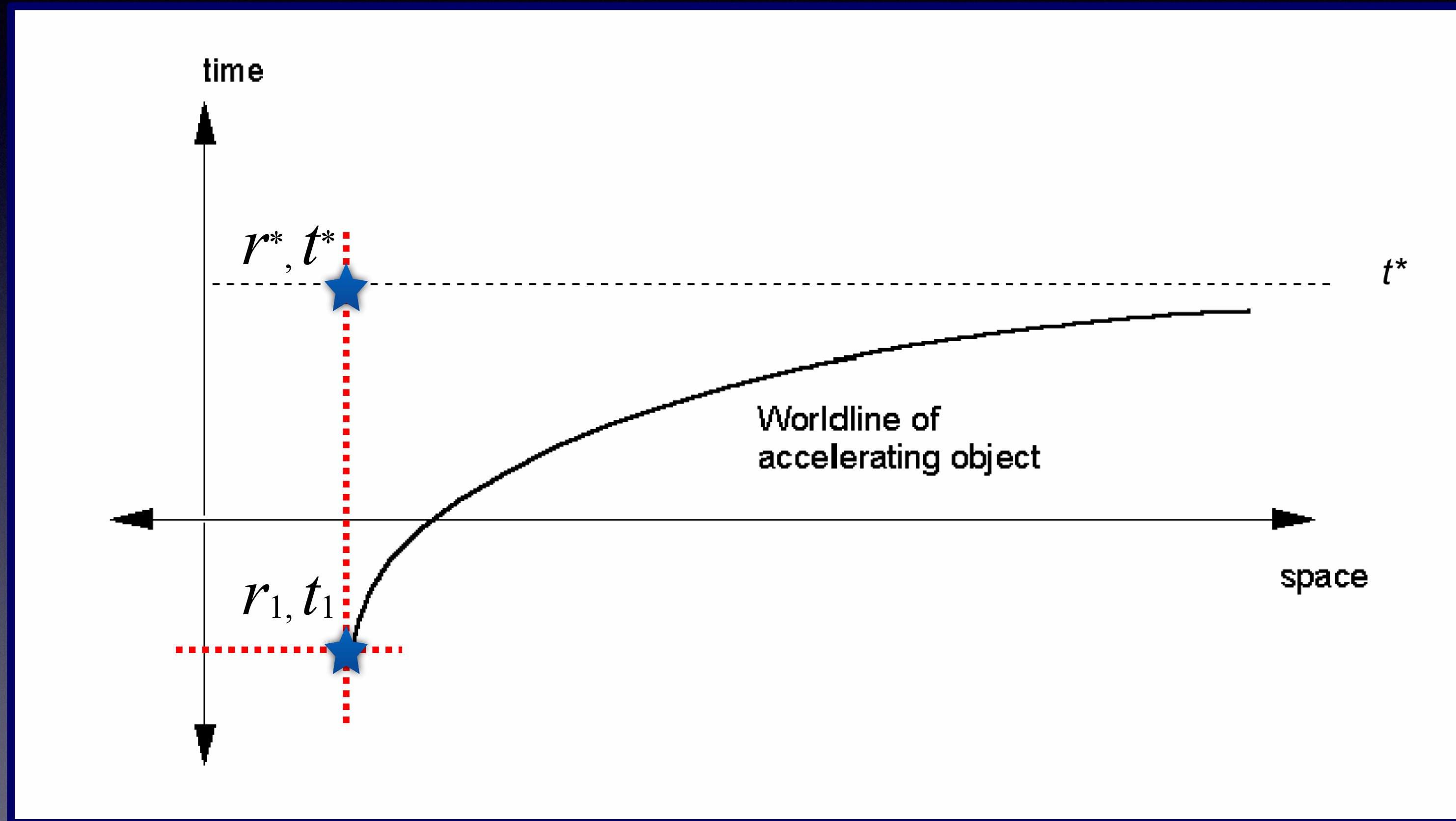


Pierre-Simon, marquis de Laplace (1749 – 1827)

- Cada estado del Universo es determinado por un conjunto de condiciones iniciales y las leyes de la física.
- Las leyes se representan por ecuaciones diferenciales y hay teoremas para la existencia y unicidad de las soluciones. Luego el determinismo Laplaciano implica predictibilidad de principio.
- Esto no implica predictibilidad de hecho: si las ecuaciones son no lineales aparece caos (fuerte dependencia de las condiciones iniciales).
- Horizonte de Cauchy: superficie a partir de la cual no es posible tener una descripción única de la evolución del sistema.
- ¡Aún en el espacio-tiempo Newtoniano hay horizontes de Cauchy!



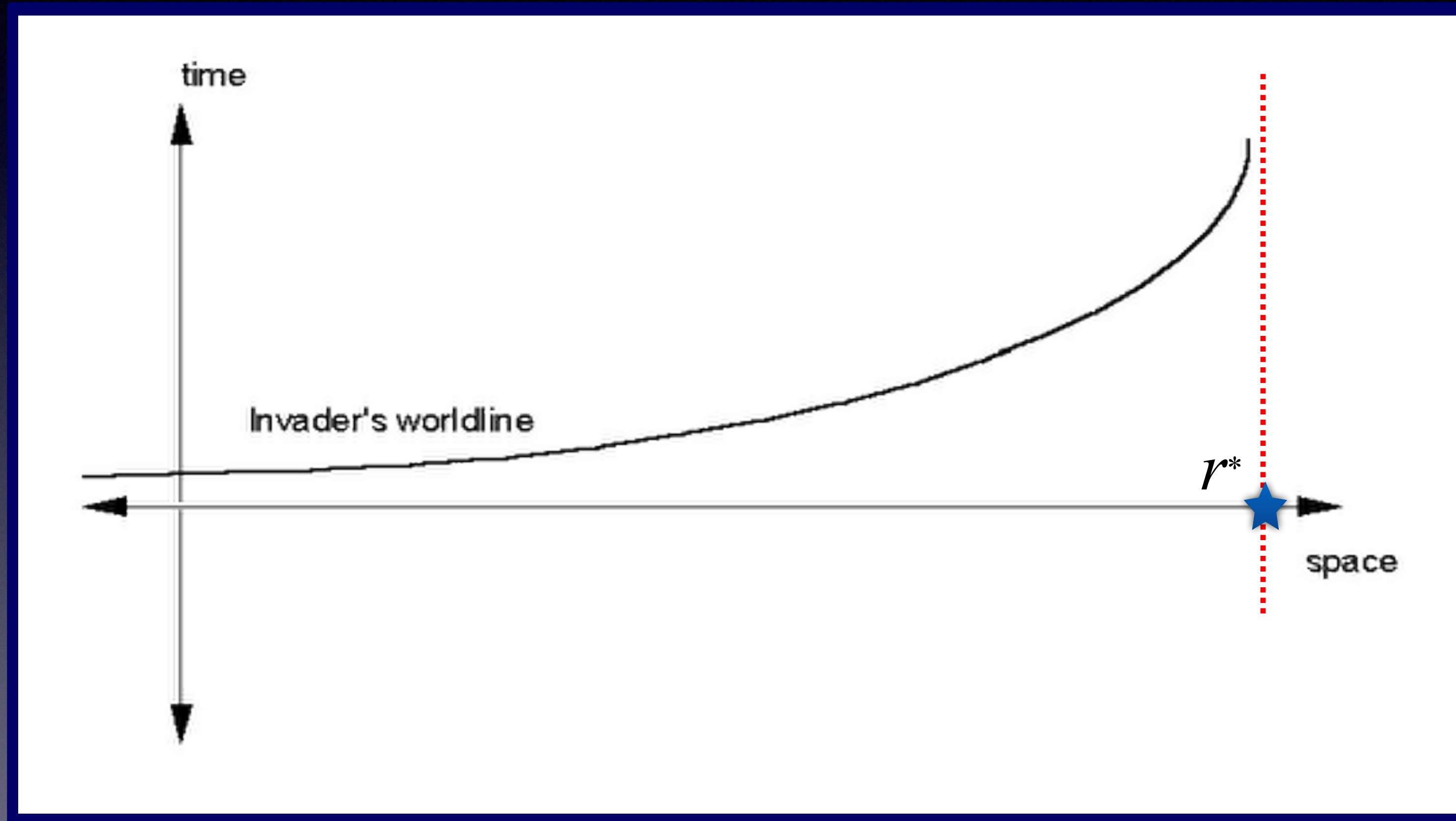
# Horizontes en espacio-tiempo Newtonianos



El que no haya un límite superior a la velocidad de los sistemas lleva a paradojas



# Horizontes en espacio-tiempo Newtonianos



El que no haya un límite superior a la velocidad de los sistemas lleva a paradojas

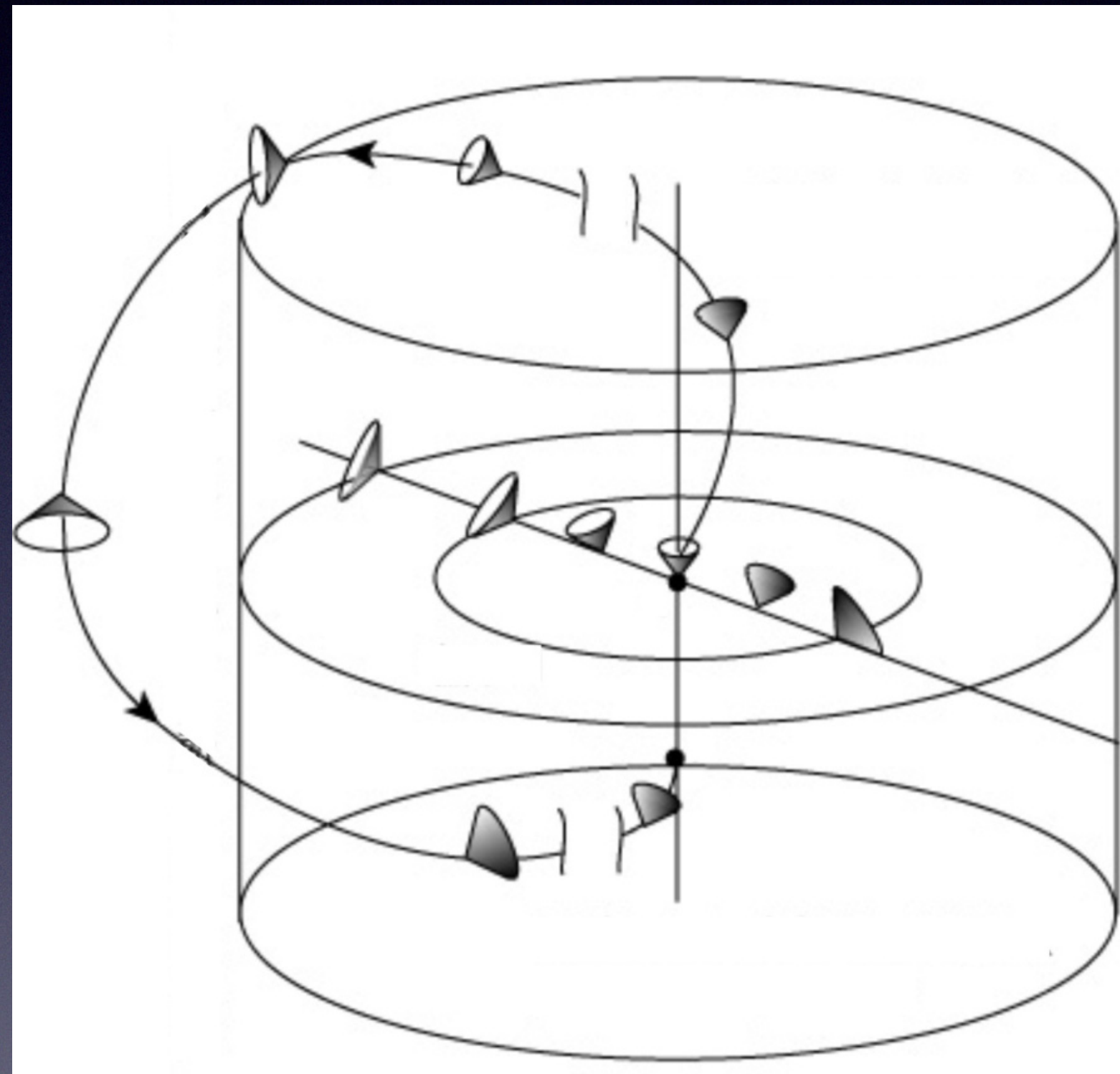


# Relatividad general y determinismo

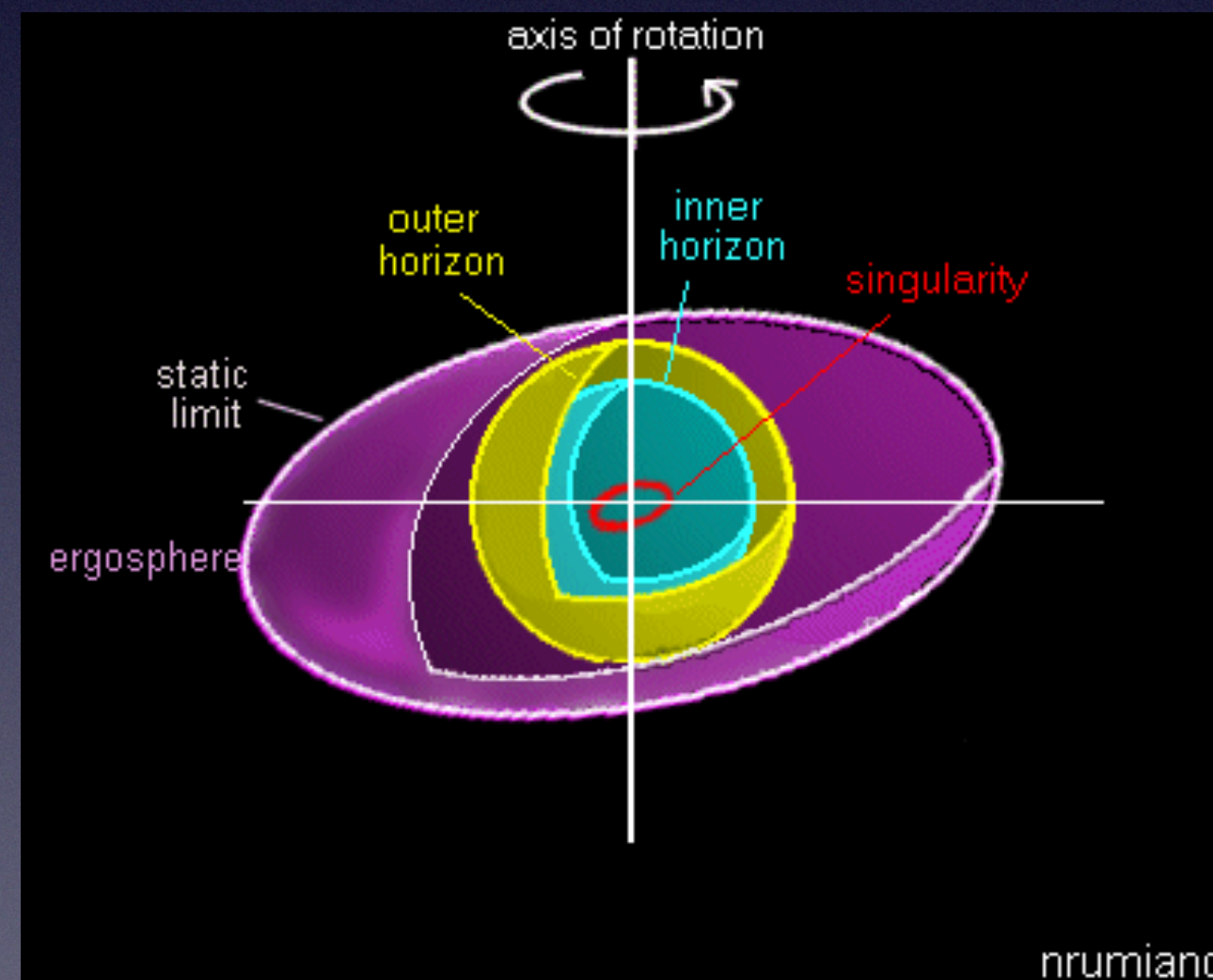
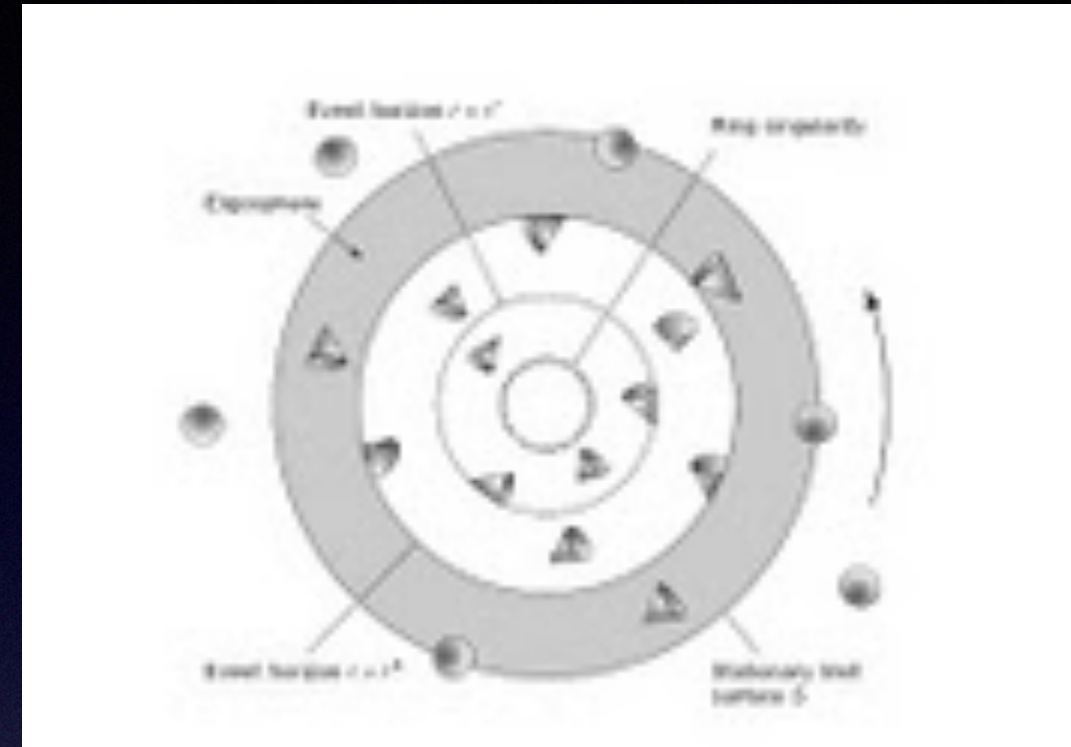
- En relatividad general se supone la existencia de todos los eventos (representados por una variedad). De aquí que la teoría es determinista.
- Sin embargo, el problema de Cauchy no puede ser siempre resuelto en relatividad general. Horizontes de Cauchy aparecen naturalmente en muchas soluciones de las ecuaciones de campo de Einstein.
- Aunque la variedad sea fija, no siempre podemos describirla a partir de conocimiento limitado a una región de ella.



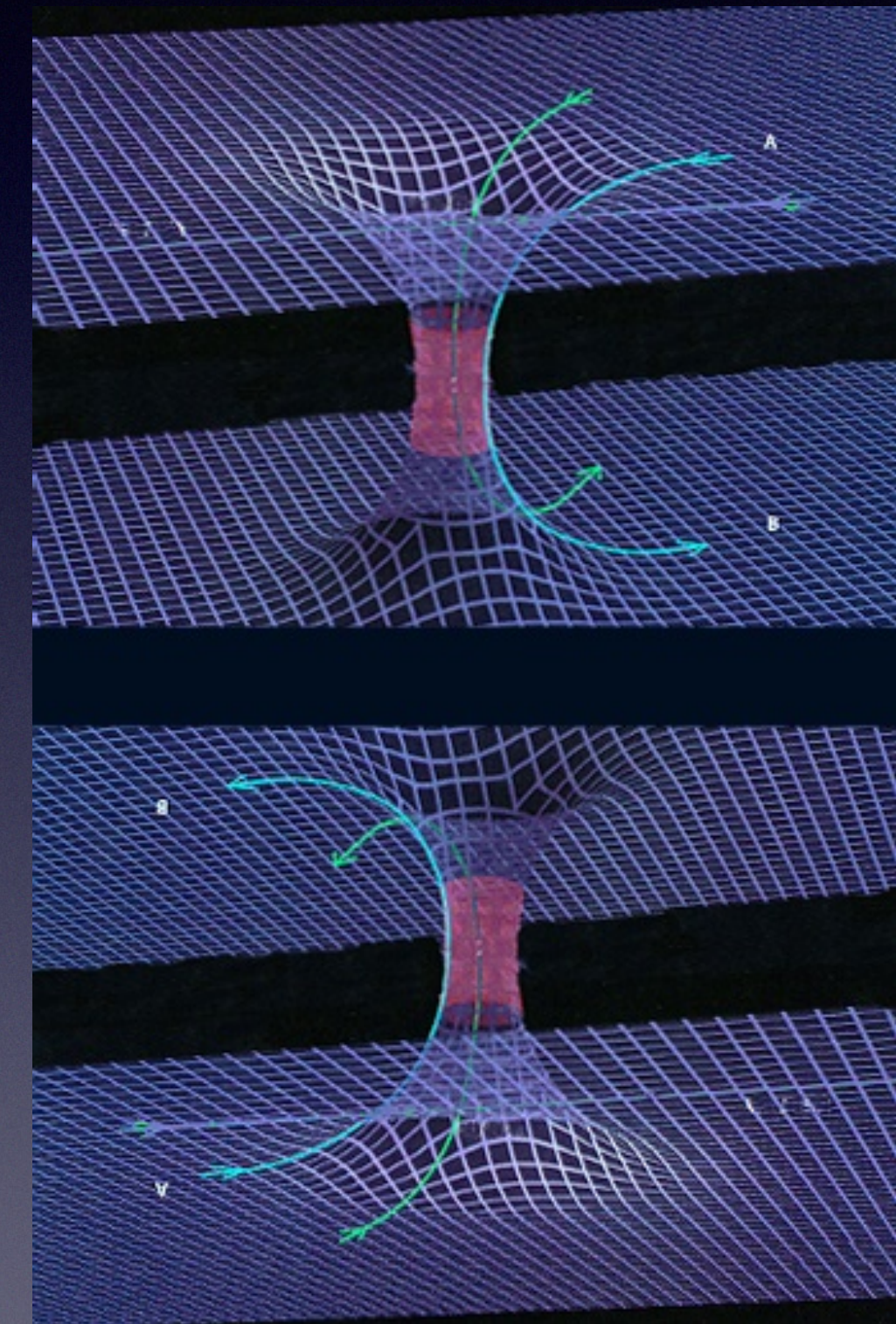
# Espacio-tiempos con CTCs: la variedad es sin embargo fija



Espacio-tiempo de Gödel



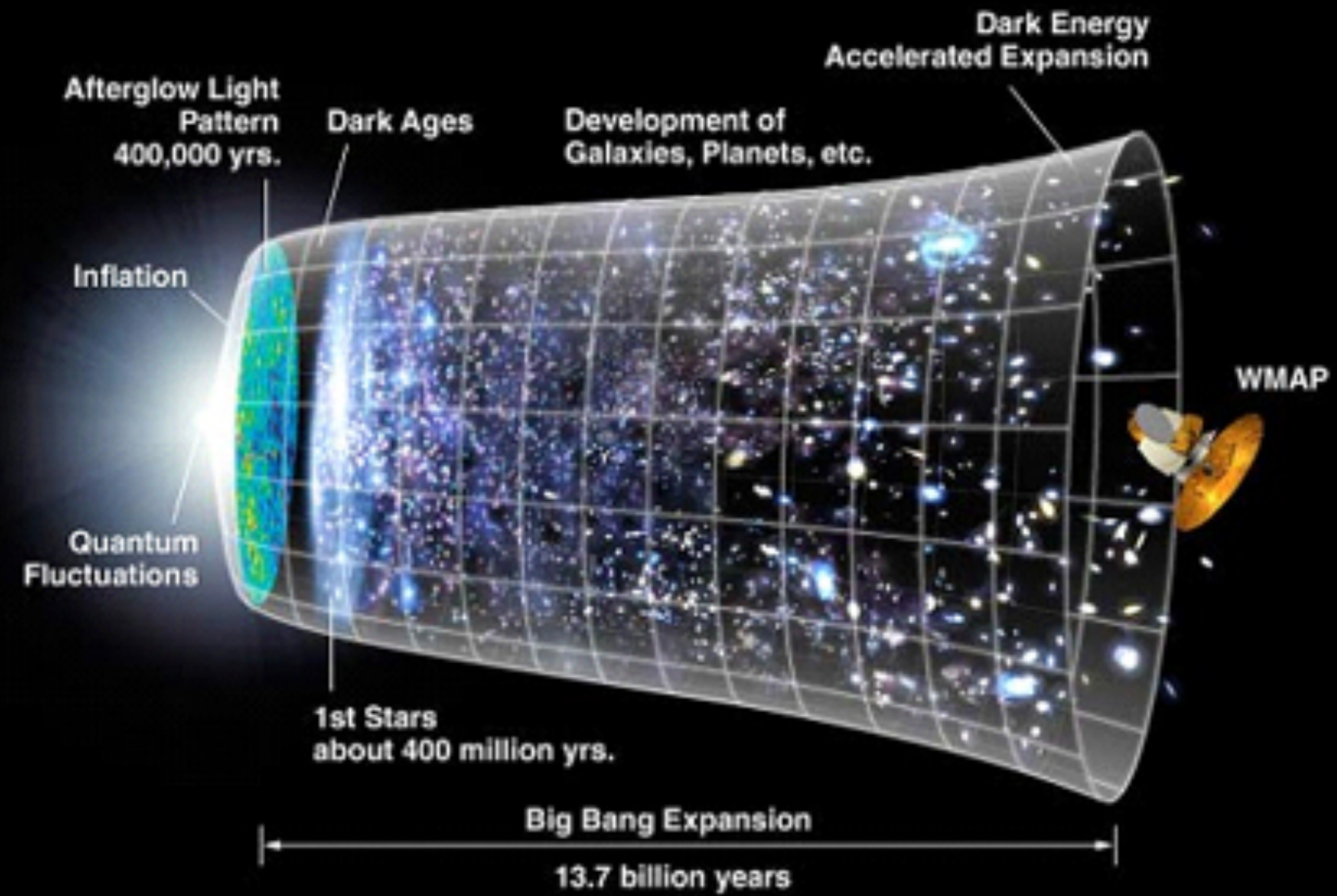
Agujero negro rotante



Agujeros de gusano



# Modelos de universo



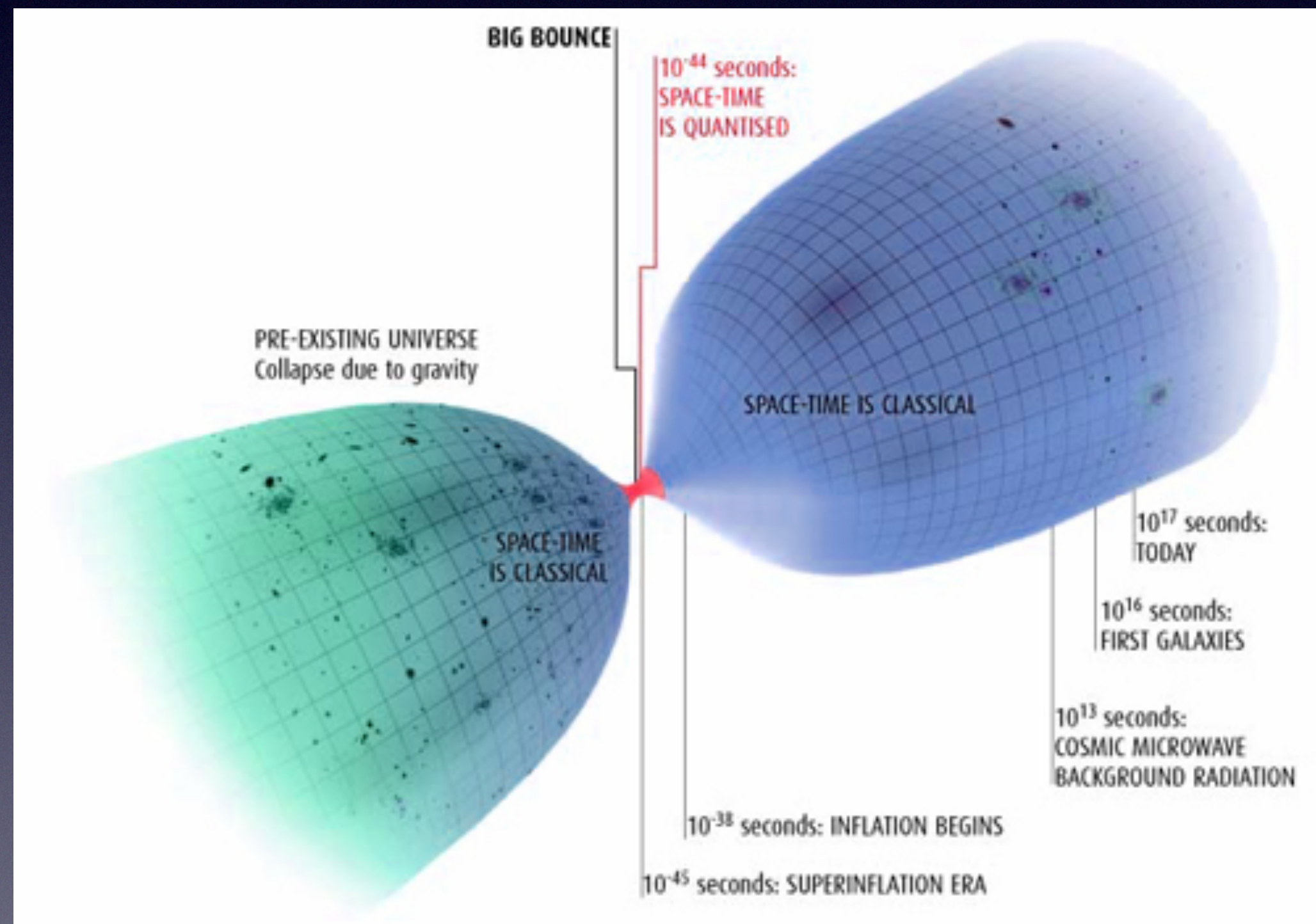
Big Bang

13.7 billion years  
Big Bang Expansion

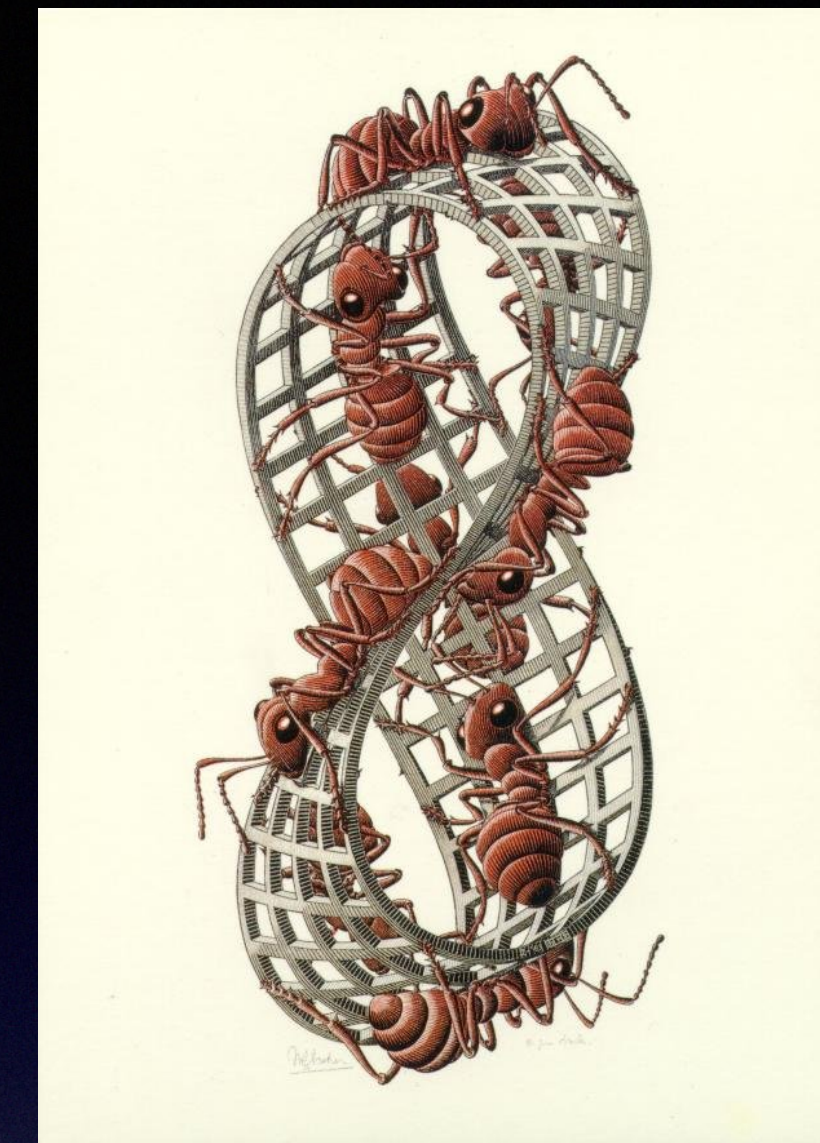
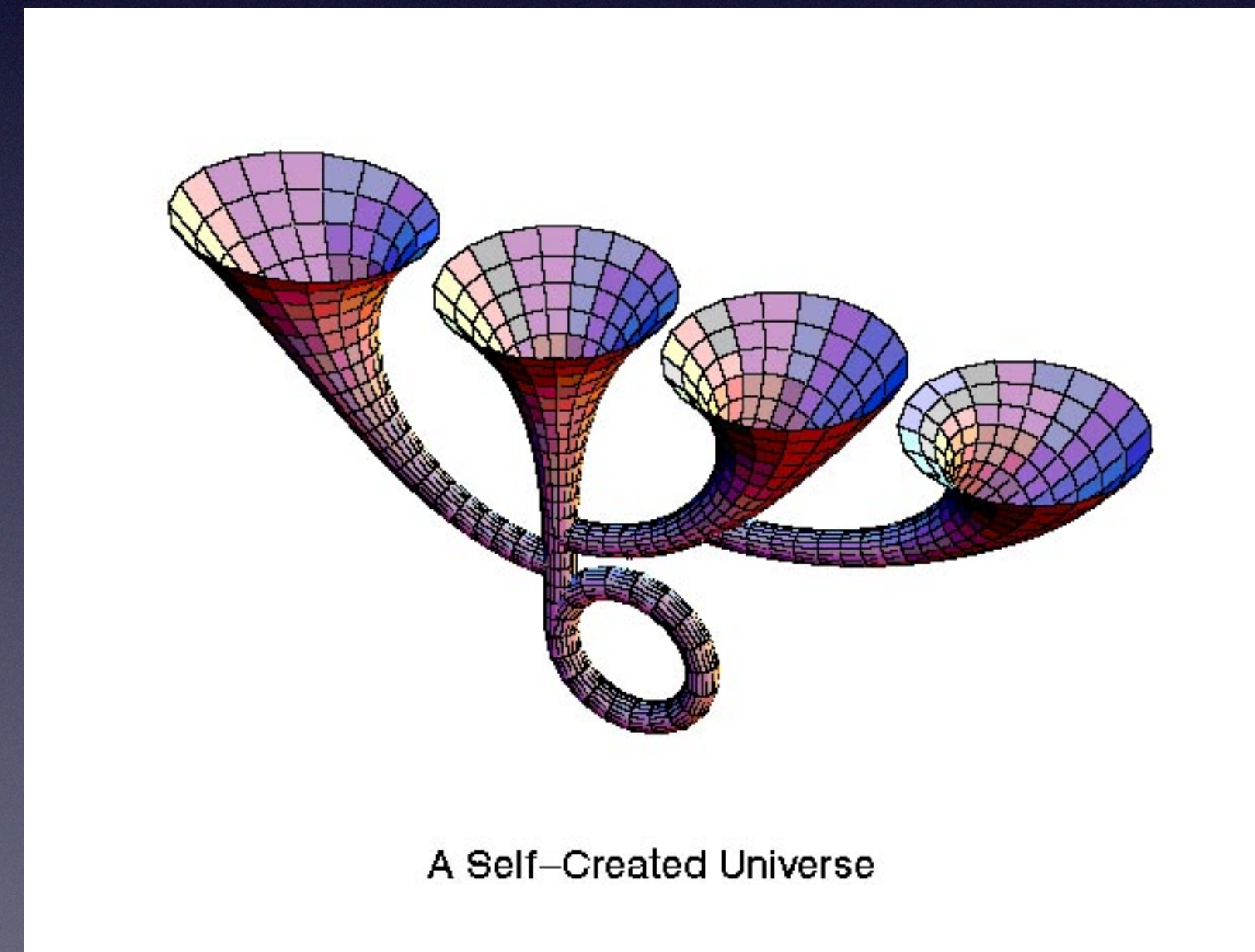


# Modelos de universo

## Big Bounce



## Universo auto-existente





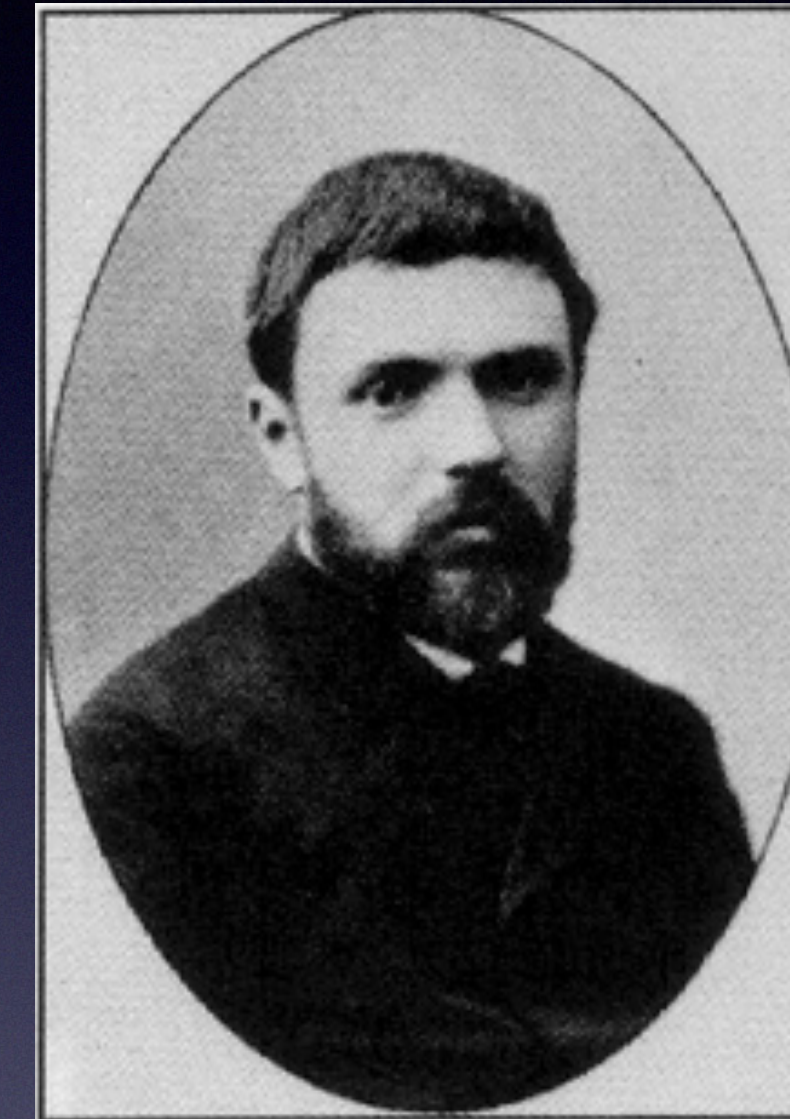
El espacio-tiempo es determinado, pero no necesariamente nuestras representaciones permiten describirlo en forma completa sobre la base de un conocimiento limitado.



# ¿Cuál es la geometría que describe al mundo?

Henri Poincaré (1854 – 1912)

“La geometría que escogemos es fruto de una convención; es como elegir un sistema de coordenadas”.





# El agumento de Poincaré

No importa que tipo de medidas realicemos utilizando instrumentos, rayos de luz o partículas, cualquier apartamiento de la geometría euclídea que observemos en la naturaleza puede deberse a la presencia de campos que modifiquen nuestros instrumentos y desvíen la luz y las partículas de trayectorias geodésicas. No hay forma de establecer objetivamente la verdadera geometría física del mundo. Esta geometría, para Poincaré y seguidores (Reichenbach, Grünbaum), sería materia de pura convención (considerar, e.g. la teoría de Lorentz y la relatividad espacial).



# Objeciones

- Las teorías no pueden ser arbitrariamente complejas a fin de salvar la geometría euclídea.
- Las perturbaciones en la métrica representan ondas gravitacionales, que portan energía, y por tanto son entidades naturales y no convencionales.
- La red de nuestras teorías del mundo debe ser coherente.
- Toda entidad postulada por una teoría es conjetural y sus características pueden ajustarse o modificarse cuando las consecuencias de la teoría son confrontadas con la realidad. Nuestro conocimiento del mundo no es convencional, sino conjetural.



# La anisotropía del tiempo y la dinámica del Universo





Hay algunos aspectos del universo que son sorprendentes:  
**Las cosas cambian.**



El problema es que parecen  
cambiar siempre para peor...

**Segunda ley de la Termodinámica:**  
la entropía de todo sistema cerrado  
aumenta hasta su máximo valor  
posible.

Hans Baldung Grien (1484- 1545)

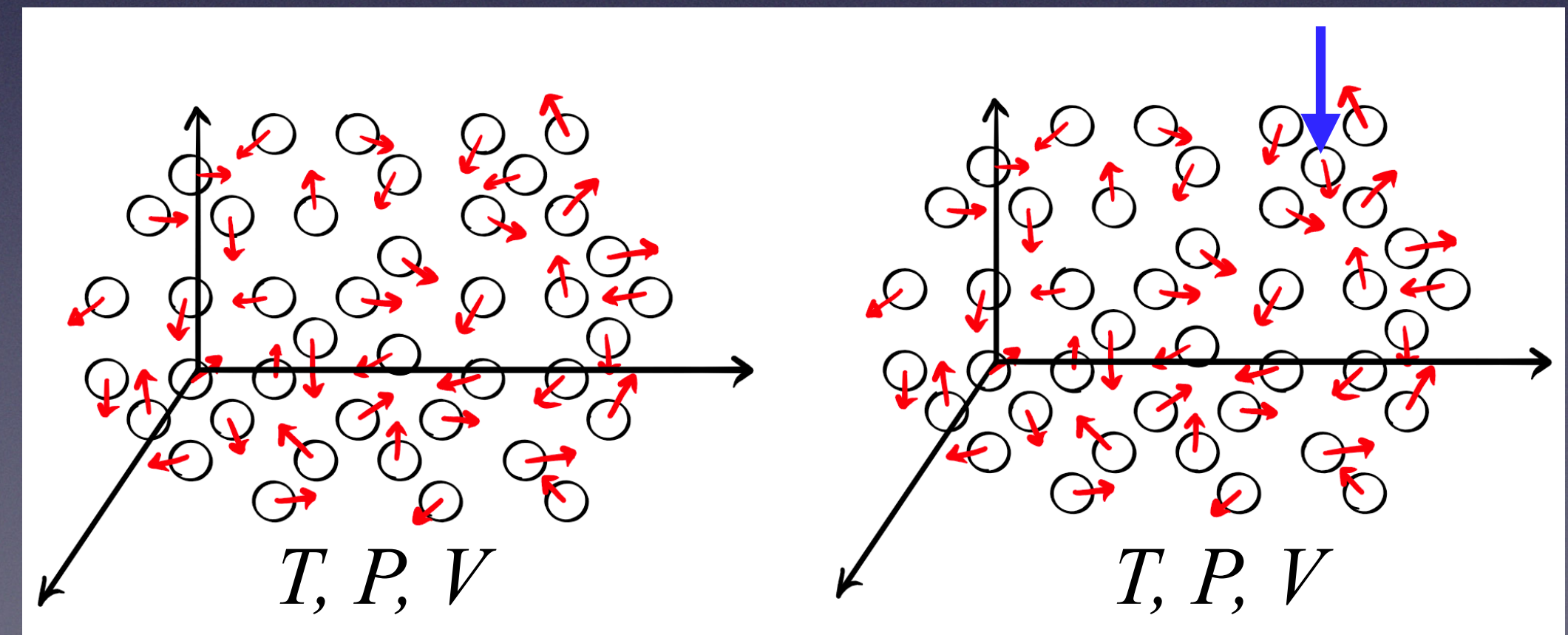
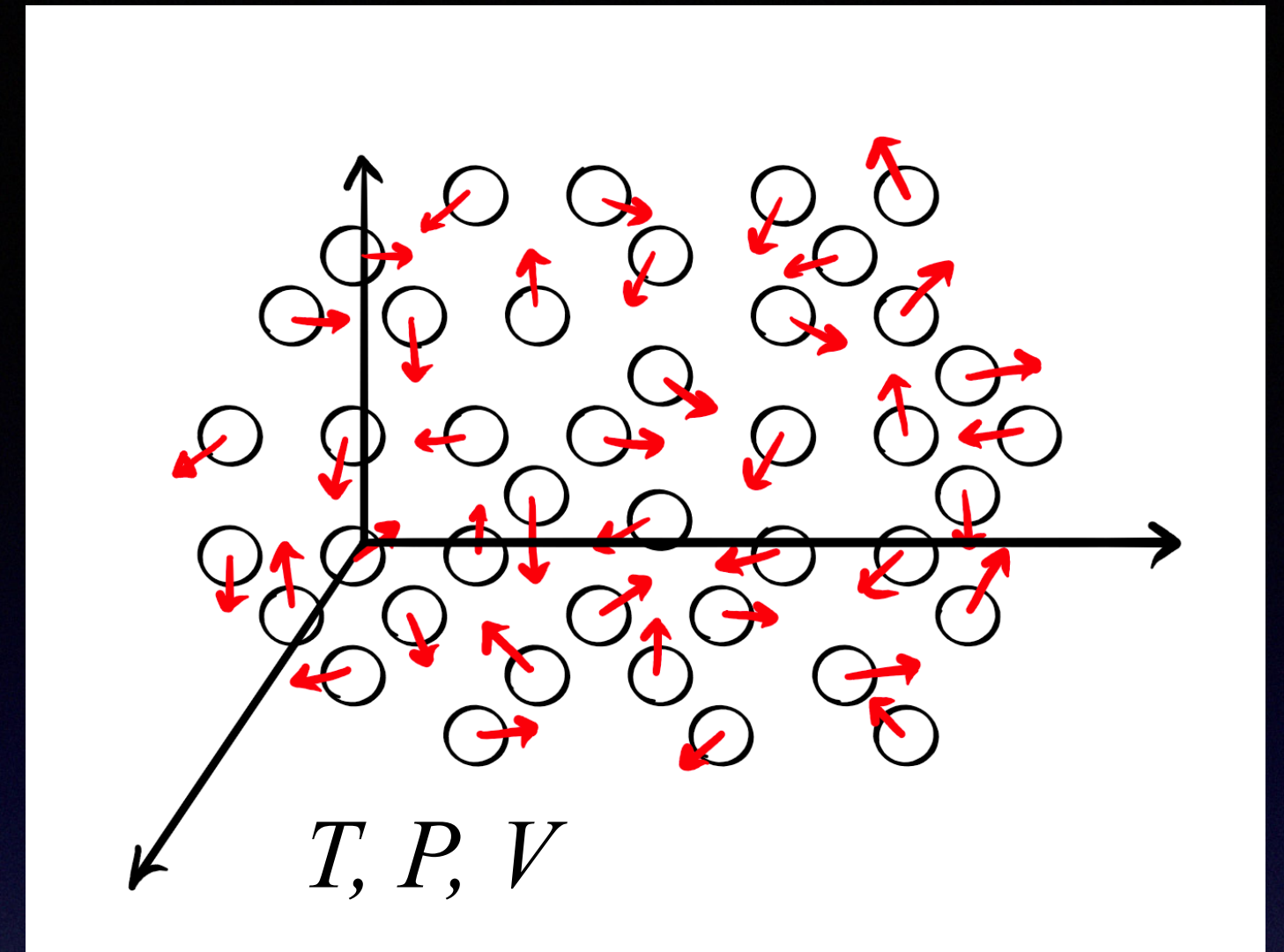


**Entropía:** Es una medida del número de micro estados compatibles con el macroestado de equilibrio en un sistema termodinámico.

$$S = k \cdot \ln \Omega$$

A nivel macroscópico:

$$dS = \frac{\delta Q}{T}$$







Pieter Bruegel the Elder, *The Triumph of Death*



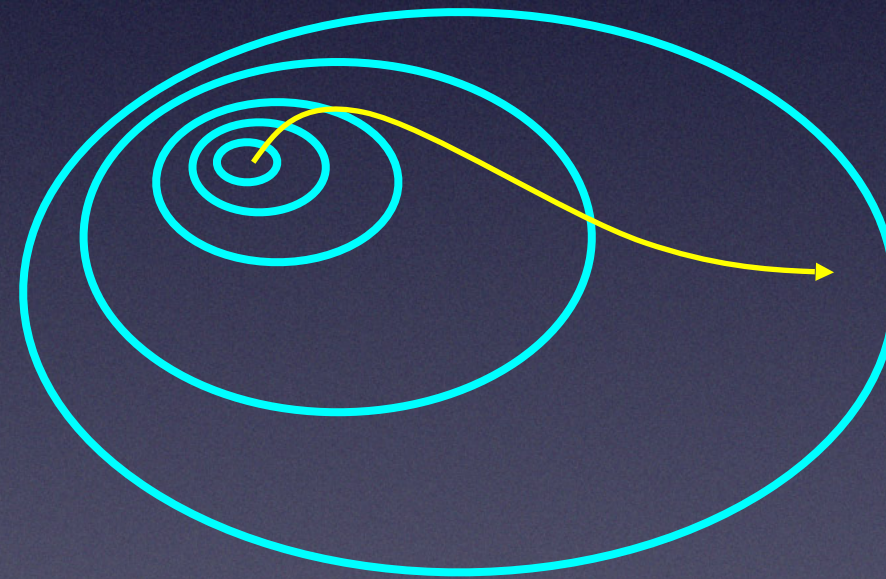
$$\frac{dS}{dt} \geq 0$$





La entropía se incrementa porque hay más estados posibles de alta entropía que de baja entropía.

Si se comienza en un estado de baja entropía, evolucionar hacia un estado de mayor entropía es lo más natural.



¿Porqué la entropía no llegó ya a su máximo?

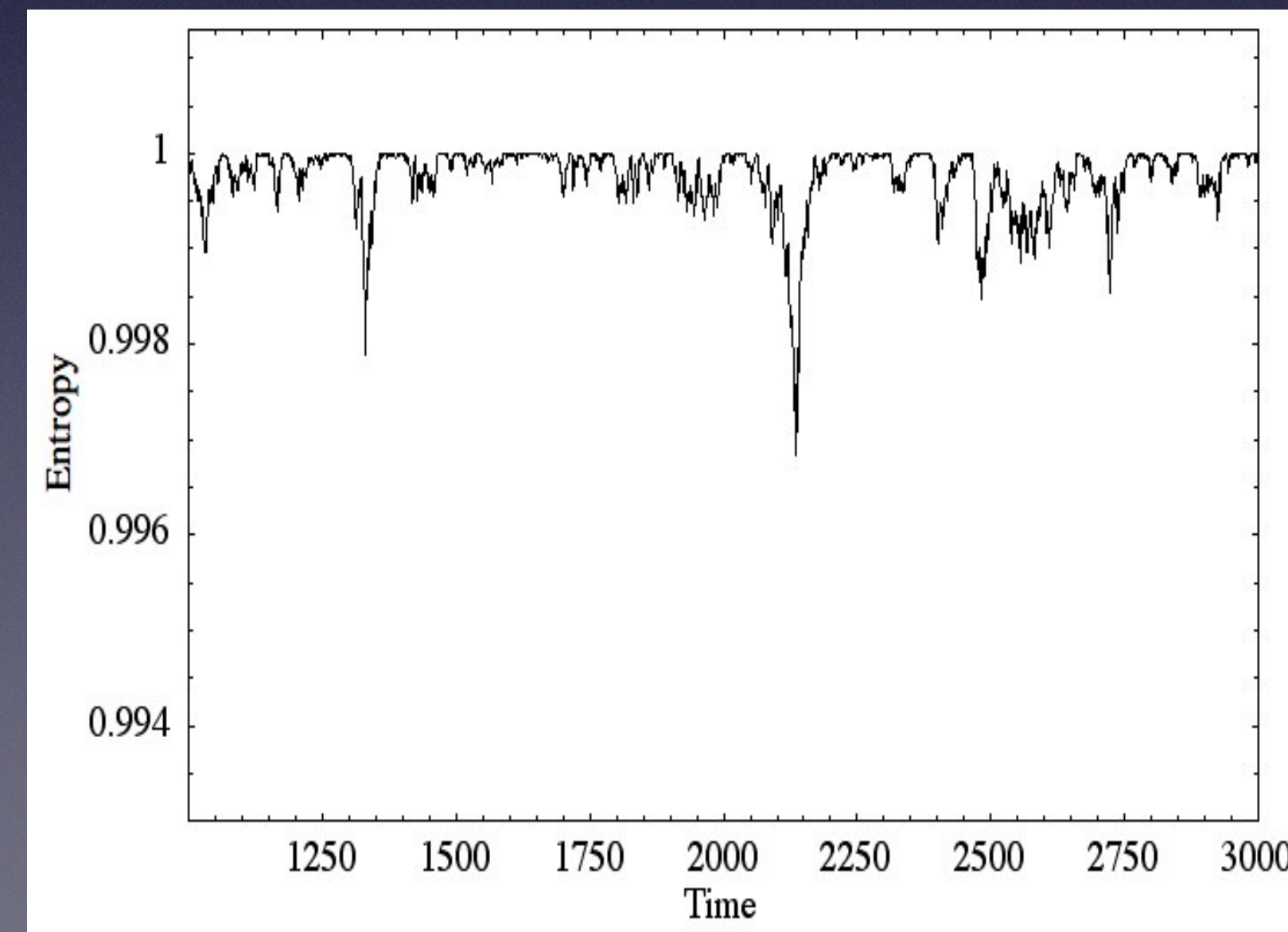
Se trata de una cuestión sobre las condiciones iniciales del universo



Boltzmann: tal vez existe un **multi-universo** y está en equilibrio termodinámico:

“There must then be in the universe, which is in thermal equilibrium as a whole and therefore dead, here and there, relatively small regions of the size of our world, which during the relatively short time of eons deviate significantly from thermal equilibrium. Among these worlds the state probability increases as often as it decreases.” (1895)

Quizás el universo observable es sólo una fluctuación térmica.





Boltzmann no fue el primero en sugerir este escenario.

“For surely the atoms...  
in the course of endless time they are  
buffeted, driven along, chancing upon  
all motions, combinations.

At last they fall into such an arrangement  
as would create this universe...”

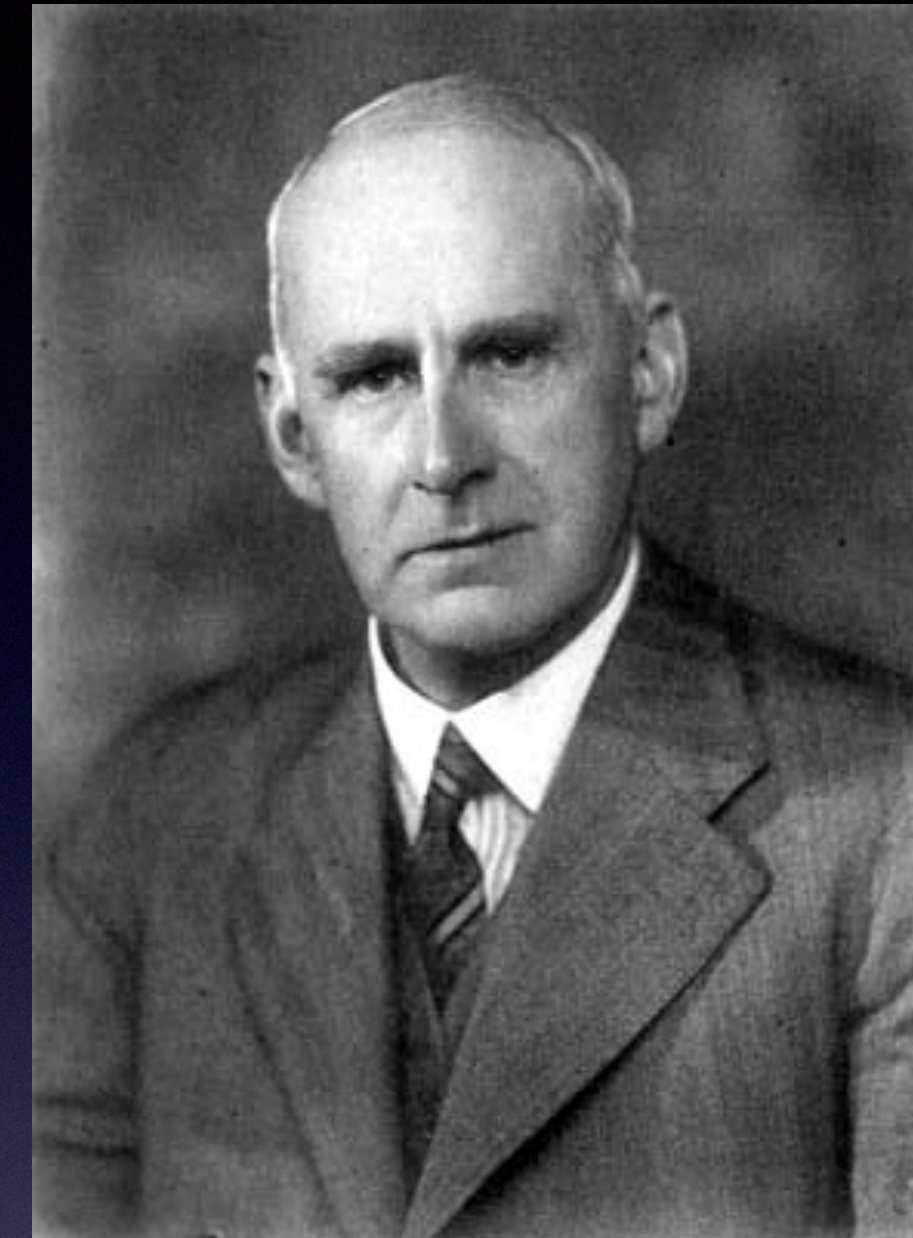
-- Lucretius, *De Rerum Natura*, c. 50 BC.





**Sir Arthur Eddington** demostró que el universo que vemos no puede ser una fluctuación térmica.

“A universe containing mathematical physicists at any assigned date will be in the state of maximum disorganization which is not inconsistent with the existence of such creatures.” (1931)



Las fluctuaciones son raras, y las fluctuaciones grandes **muy** raras:

$$P \sim e^{-\Delta S}.$$

Este escenario predice que es infinitamente más probable que el cerebro de Boltzmann surja de una fluctuación de su entorno en equilibrio térmico que todo un universo que lo contenga -- “Boltzmann Brains.”



# ¿Que sucede con el electromagnetismo?

El campo en un punto  
 $p=(r, t)$  viene dado por

$$\partial^\nu \partial_\nu A^\mu(\vec{r}, t) = 4\pi j^\mu(\vec{r}, t),$$

Soluciones

$$A_{\text{ret}}^\mu(\vec{r}, t) = \int \frac{j^\mu(\vec{r}', t - |\vec{r} - \vec{r}'|)}{|\vec{r} - \vec{r}'|} d^3 r',$$

$$A_{\text{adv}}^\mu(\vec{r}, t) = \int \frac{j^\mu(\vec{r}', t + |\vec{r} - \vec{r}'|)}{|\vec{r} - \vec{r}'|} d^3 r'.$$

Principio de superposición

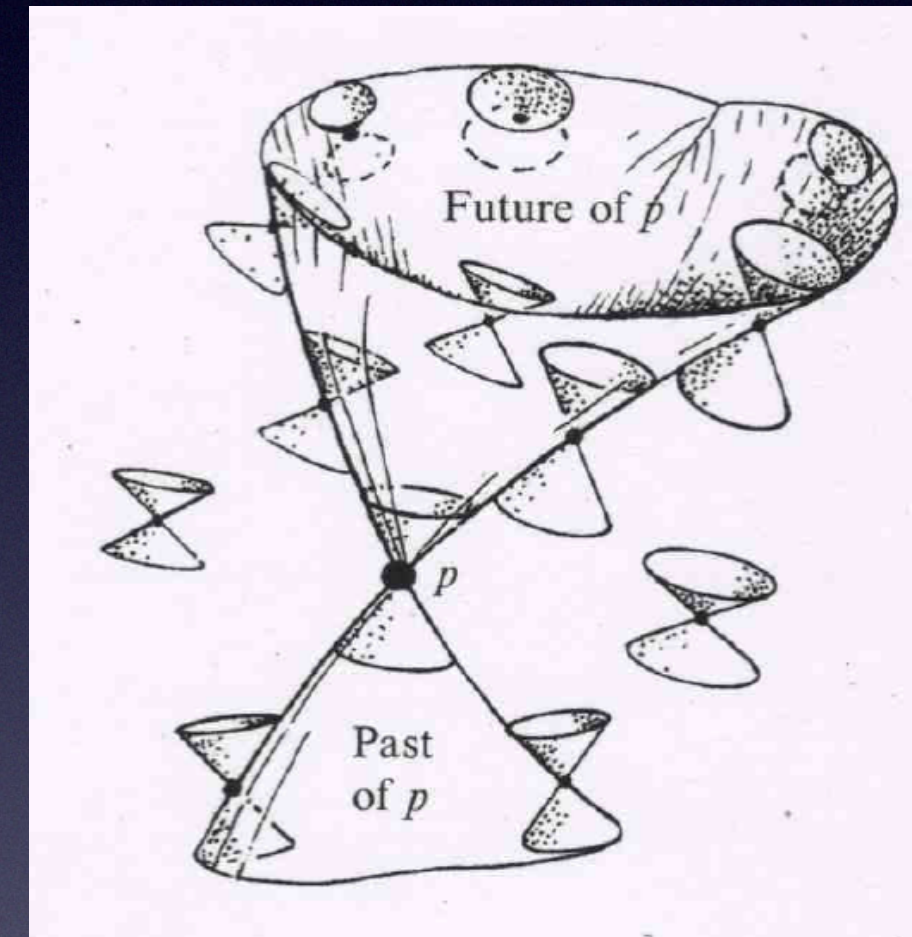
$$A(\vec{r}, t) = \frac{1}{2} \int_V (\text{adv} + \text{ret}) dV.$$



# ¿Que sucede con el electromagnetismo?

En un espacio-tiempo Rimanniano ( $R \neq 0$ ) los conos que determinan la estructura causal no son simétricos alrededor de  $p$ .

$$L = \lim_{V \rightarrow \infty} \left[ \int_V \text{adv} - \int_V \text{ret} \right] dV \neq 0.$$



Si  $L \neq 0$  hay una dirección preferencial para el flujo de Poynting, esto es, para la dirección en que ocurren los eventos. El tiempo, pues, es **anisotrópico** en un espacio-tiempo general  $(M, g_{ab})$ .



Hay en el Universo una relación entre la dinámica del espacio-tiempo y la dirección local del tiempo, debida a electrodinámica.

La dinámica del Universo, a través de los fenómenos electromagnéticos, determina la dirección del tiempo de acuerdo con la dirección según la cual la materia pierde calor radiando en el espacio

Ley de Stefan-Boltzmann

$$L = A\sigma_{\text{SB}}T^4$$

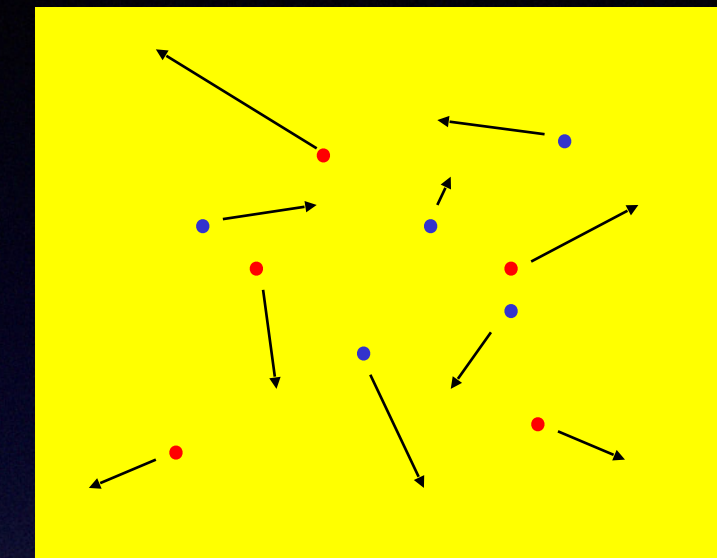


No se conoce una fórmula general para el cálculo de la entropía, pero entendemos algunos casos particulares.

Gas térmico

(universo temprano):

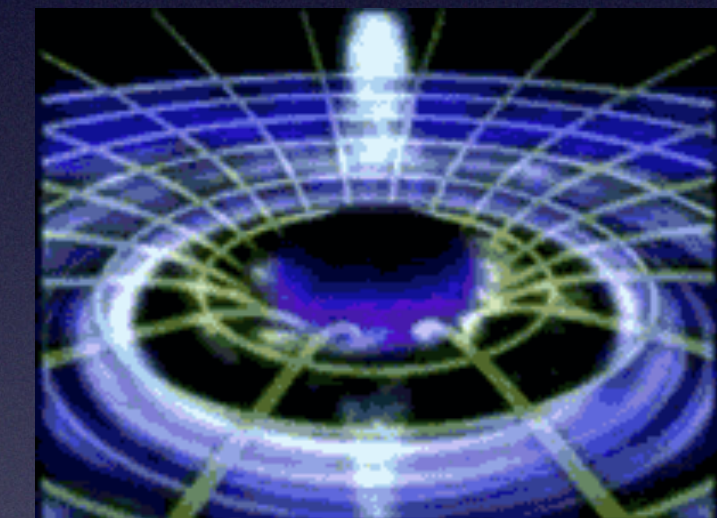
$$S_{\text{therm}} = \left( \frac{\rho + p}{T} \right) V \sim N \sim 10^{88}$$



Agujeros negros

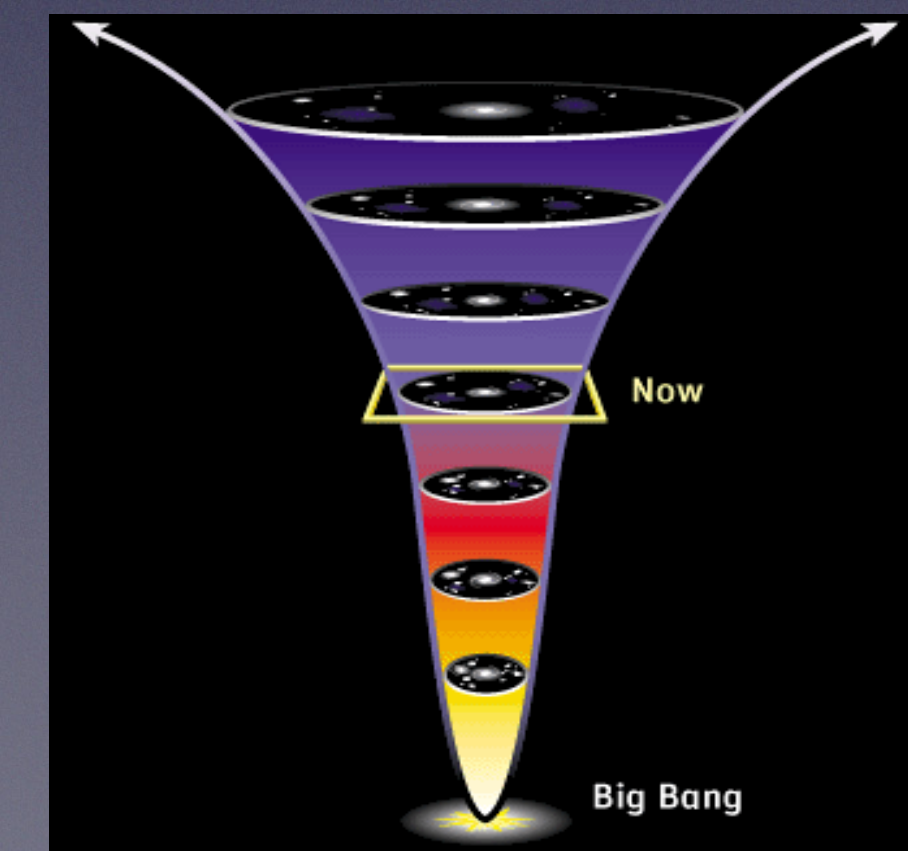
(hoy):

$$S_{\text{BH}} = \frac{A}{4G} \sim 10^{90} \left( \frac{M_{\text{BH}}}{10^6 M_{\odot}} \right)^2 \sim 10^{100}$$



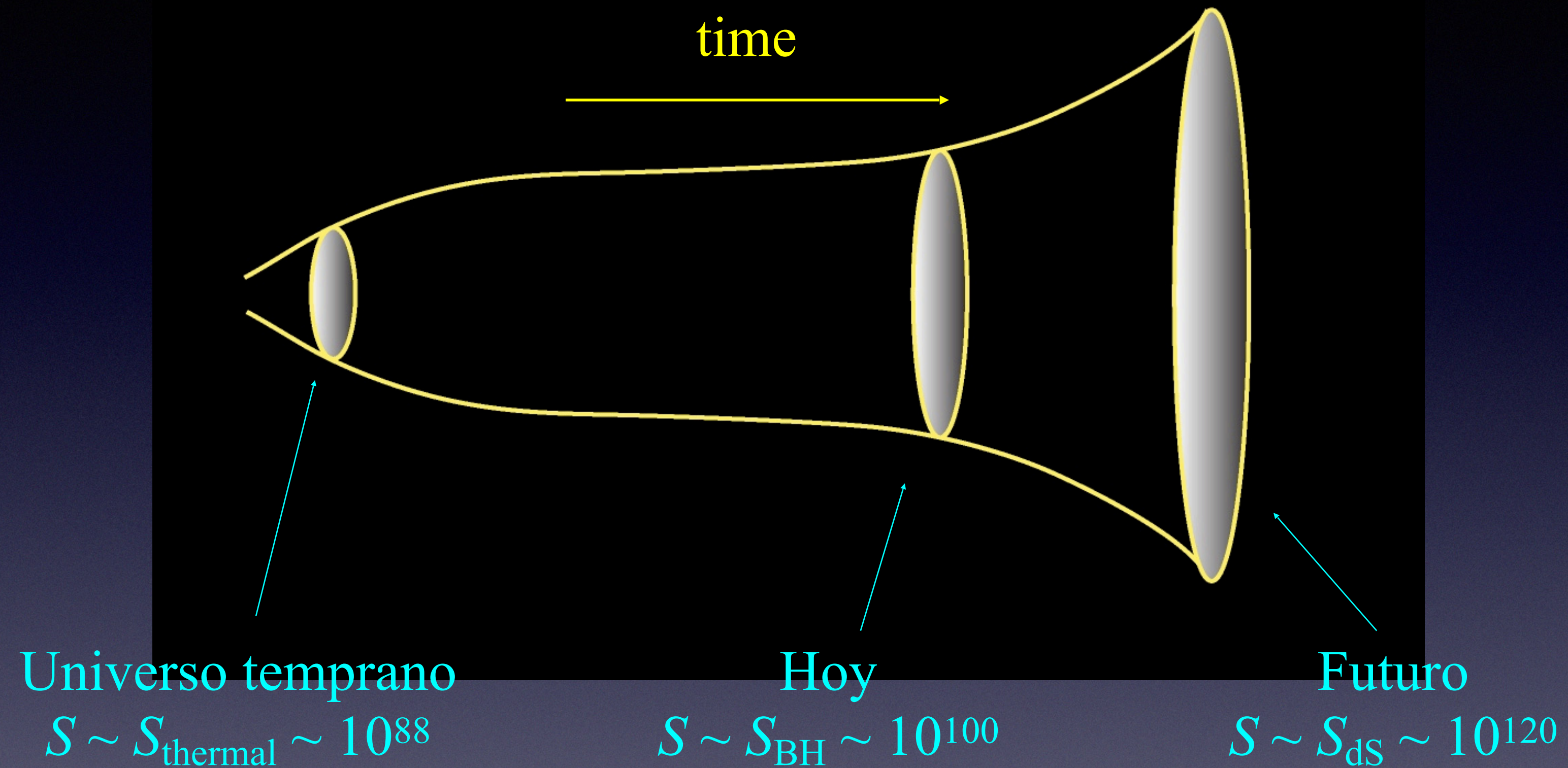
Espacio-tiempo de  
de Sitter (futuro):

$$S_{\text{dS}} = \frac{A}{4G} \sim \left( \frac{L_{\text{dS}}}{M_{\text{P}}} \right)^2 \sim 10^{120}$$





La entropía se incrementa con el Universo en expansión y la formación de estructura



La entropía es mucho menor hoy de lo que podría ser.  
En el comienzo del Universo fue mucho menor que hoy .



En el Universo temprano la materia estaba en equilibrio térmico (!). ¿Porqué  $S$  era baja?

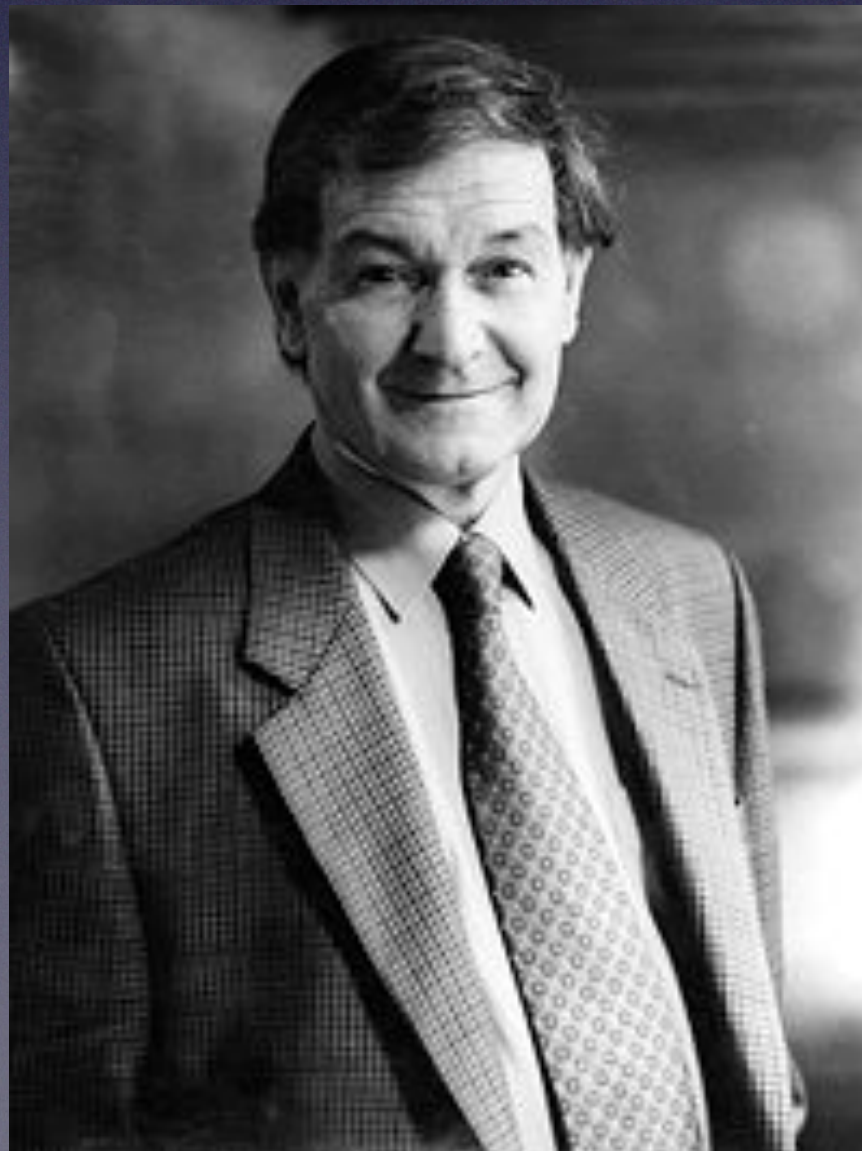
En el Universo temprano la entropía global era dominada por la entropía de la gravitación. El Universo temprano **no** estaba en equilibrio térmico **global**.



¿Cual es la entropía del campo gravitacional?

Conjetura de Penrose: **La curvatura de Weyl es una medida de la entropía del campo gravitacional.**

El tensor de Weyl es la componente de traza nula del tensor de Riemann.



Roger Penrose

$$C^{\alpha\beta}_{\alpha\beta} = 0$$

The Weyl tensor in 4 dimensions

$$C_{abcd} = R_{abcd} + \frac{1}{2}(g_{ad}R_{cb} + g_{bc}R_{da} - g_{ac}R_{db} - g_{bd}R_{ca}) + \frac{1}{6}(g_{ac}g_{db} - g_{ad}g_{cb})R.$$

Curvatura de Weyl

$$C^2 = C^{abcd}C_{abcd}$$



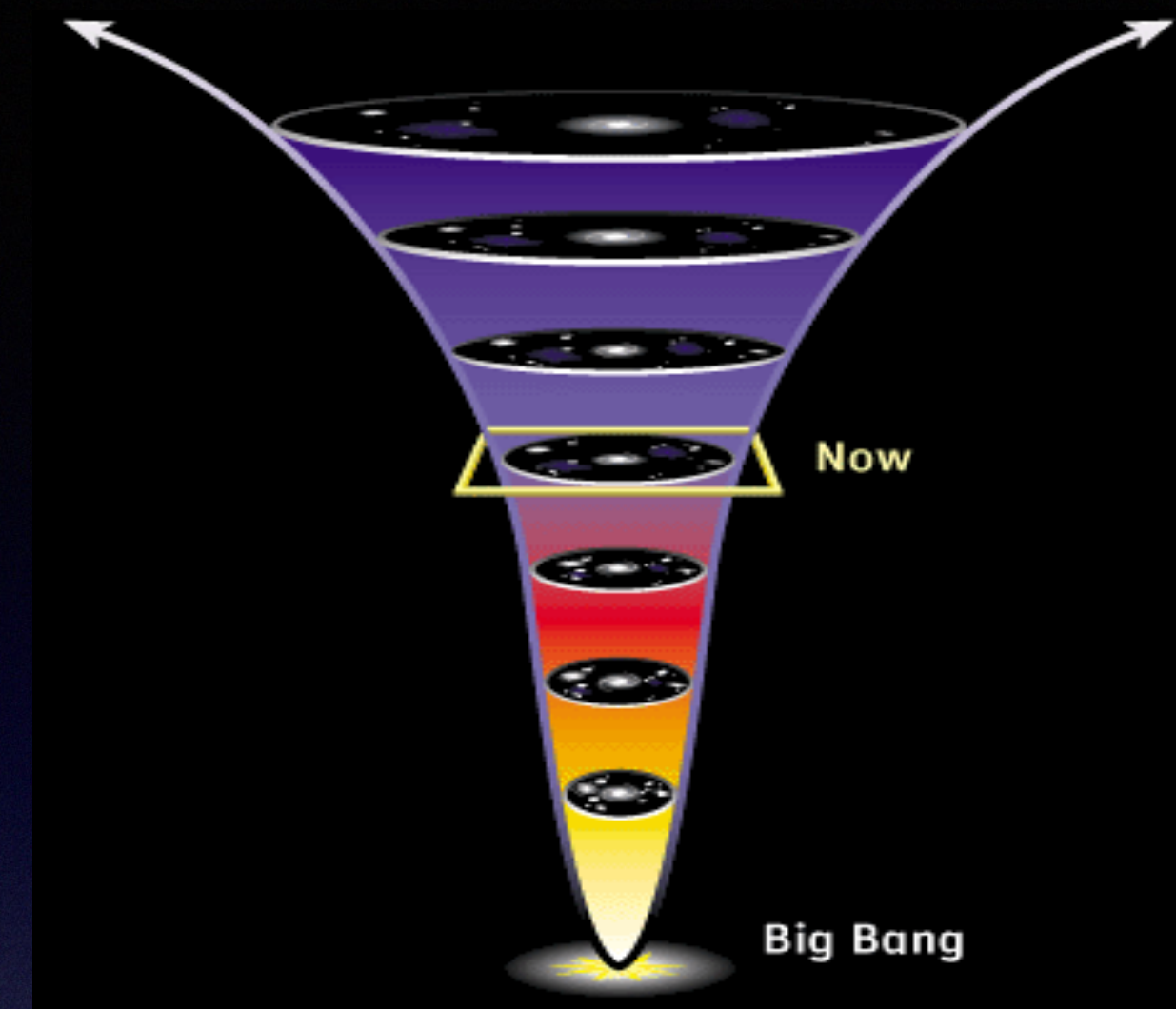
La ausencia de estructura en el espacio-tiempo corresponde a la ausencia de curvatura conforme de Weyl. La curvatura de Weyl tiende a infinito cuando el colapso gravitacional es completo.



## Conclusiones

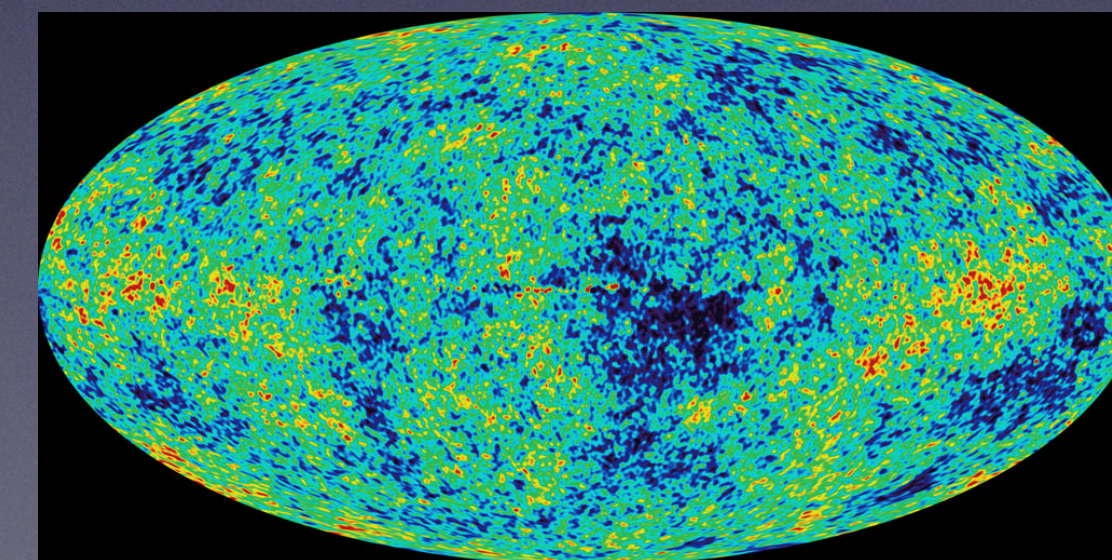
El tiempo es **anisotrópico**.

La irreversibilidad que observamos en los procesos macroscópicos **es introducida localmente por la electrodinámica** a través de la estructura causal impuesta por la **dinámica del espacio-tiempo** circundante.



El espacio-tiempo **no es necesariamente orientable en forma global** ni tal orientabilidad es necesaria para asegurar la irreversibilidad macroscópica.

La cantidad de procesos fuera del equilibrio que observamos en el Universo actual implica que **la curvatura de Weyl fue muy baja en el pasado**.





“Home is where one starts from. As we grow older  
The world becomes stranger, the pattern more complicated  
Of dead and living.”

T.S. Elliot



Gracias



Extras



# Some definitions and theorems

- D<sub>1</sub>. An event  $e_1 \in E$  is composed  $\Leftrightarrow (\exists e_2, e_3)_E (e_1 = e_2 \star e_3)$
- D<sub>2</sub>. An event  $e_1 \in E$  is basic  $\Leftrightarrow \neg (\exists e_2, e_3)_E (e_1 = e_2 \star e_3)$
- D<sub>3</sub>.  $e_1 \subset e_2 \Leftrightarrow e_1 \star e_2 = e_2$  ( $e_1$  is part of  $e_2 \Leftrightarrow e_1 \star e_2 = e_2$ )
- D<sub>4</sub>.  $\text{Comp}(e) \equiv \{e_i \in E \mid e_i \subset e\}$  is the composition of  $e$ .
- D<sub>5</sub>.  $E^0 = E \cup \{e^0\}$ .

The following theorems are immediate:

$\vdash (\forall e)_E (e^0 \subset e)$ .

$\vdash \langle E, \star, e^0 \rangle$  is a commutative monoid of idempotents.

A composed event is called a *process*.



# Identity of events

Events, when considered as individuals, admit descriptions (duration, complexity, etc).

- $D_6. F = G \Leftrightarrow (\forall e)_E (Fe \wedge Re \Rightarrow Fe = Re).$
- $D_7. R = S \Leftrightarrow (\forall e_1)_E (\forall e_2)_E \dots (\forall e_n)_E (Re_1, \dots, e_n \wedge Se_1, \dots, e_n \Rightarrow Re_1, \dots, e_n = Se_1, \dots, e_n).$

The identity criterion for events is given by

- $P_8. (\forall e_1)_E (\forall e_2)_E (e_1 = e_2 \Leftrightarrow \forall F : Fe_1 = Fe_2).$

Leibniz's identity of indiscernibles

$\vdash (\forall e)_E (e = e).$



# More relations between events

It is convenient now to define two important relations between processes: ***overlapping*** and ***separateness***. Two processes overlap if and only if they have common events. Two processes are separate if and only if they do not overlap. Formally,

- $D_9. p_1 O p_2 \Leftrightarrow (\exists p_i) E(p_i \subset p_1 \wedge p_i \subset p_2).$
- $D_{10}. p_1 \setminus p_2 \equiv \neg(p_1 O p_2).$



# The World

The composition of all actual events is the World ( $W$ ):

$$\neg(\exists e)_E \neg(e \subset W).$$

The World,  $W$ , should not be confused with the Universe,  $\mathcal{U}$ , the composition of all things in a thing-based ontology as the one given by Bunge (1977) and Romero (2013). The Universe can change, i.e. events and processes take place in the Universe. The World, the composition of all changes, can not change itself because it is not a thing. In an ontology of events, the totality of events is changeless, otherwise there would be a change not included in the totality, which is absurd. Events do not change, they *are* changes. In the sense used here for the words, the Universe can evolve, but not the World, which is fixed.



# Order

Composition is not an ordering relation. We cannot adopt a simple relation of “before than”, as Grunbaum (1973) did, because not all events can be ordered by such a relation without further specification. We need to introduce a stronger structure on the set of all events  $E$ , if we want to represent with this a set the World.

We stipulate that  $E$  is a metric space.

–  $D_{10}$ .  $E$  is a metric space if for any two elements  $e_1$  and  $e_2$  of  $E$ , there is a real number  $d(e_1, e_2)$ , called the *distance* between  $e_1$  and  $e_2$  in accordance with the postulates:

M1.  $d(e_1, e_2) = 0$  iff  $e_1 = e_2$ .

M2.  $d(e_1, e_2) + d(e_2, e_3) \geq d(e_1, e_3)$  with  $e_3 \in E$ .



$$\vdash d(e_1, e_2) = d(e_2, e_1).$$

$$\vdash d(e_1, e_2) \geq 0.$$

Only in case that  $d(e_1, e_3) > 0$ , there is a precedence relation between  $e_1$  and  $e_3$ . I postulate:

– P<sub>9</sub>.  $E$  is a metric space.

Then,

– D<sub>11</sub>. The event  $e_1$  *precedes* (or is *earlier than*) the event  $e_3$  iff  $(\exists e_2)_E [d(e_1, e_3) \geq d(e_1, e_2) + d(e_2, e_3)]$ .

In short,  $e_1 \prec e_3$ . Events such that  $d > 0$ ,  $d = 0$ , and  $d < 0$  are called *time-like*, *null*, and *space-like* events, respectively.



$\vdash \langle E, \prec \rangle$  is a partially ordered set.  
 $\vdash (\forall e_1, e_2) \in E [e_1 \prec e_2 \Rightarrow \neg(e_2 \prec e_1)]$ .  
 $\vdash \neg(\exists e) \in E (e \prec e^0 \vee e^0 \prec e)$ .

- Reflexive: For all  $x \in E$ ,  $x \preceq x$ .
- Antisymmetric: For all  $x, y \in E$ ,  $x \preceq y \preceq x$  implies  $x = y$ .
- Transitive: For all  $x, y, z \in E$ ,  $x \preceq y \preceq z$  implies  $x \preceq z$ .
- Locally finite: For all  $x, z \in E$ ,  $\text{Card}(\{y \in C \mid x \preceq y \preceq z\}) < \infty$ .



Once the set of events has been equipped with a metric structure, I can make the fundamental semantic assumption of the event ontology: The World is represented by a metric space. In symbols:

$$- P_{10}. E \triangleq W.$$

Here,  $E$  is a mathematical construct and  $W$  is the composition of all events, i.e. the maximal existent in an event ontology. It follows that

$$\vdash \neg(\exists e)_E(e \prec W \vee W \prec e).$$



# Things

To construct things out of events we introduce the operation of abstraction from a collection of individuals. Let us consider a formula with a single variable  $x$  that runs over events:  $\langle \_ \_ x \_ \_ \rangle$ . The formula predicates of each individual  $x$  such and such a description. We can abstract a virtual (i.e. fictitious) class from such a formula forming the collection and we call the class a “property”.

$$P = \{y : \_ \_ y \_ \_ \}.$$

Now, things can be constructed as classes of events sharing some properties,  $P, Q$ , etc:

$$X = \langle P, Q, \dots \rangle e.$$

In this way things are bundles of events defined by shared properties, which are abstracted from conditions imposed on the events. The thing ‘Socrates’, for instance, is a cluster of events sharing their occurrence in Greece, previous to such and such other events, including events like ‘talking with Plato’, and so on.



# Causality

Causality is a mode of event generation. Two events  $e_1$  and  $e_2$  are causally related iff there is at least a process  $p$  such that  $e_2$  is component of  $p$  if  $e_1$  is as well, and that is not the case if  $e_1$  is not a component of  $p$ . We say then that  $e_1$  is a cause of  $e_2$ .

$$e_1 \triangleright e_2$$

- $P_{11}$ . There are events that belong to the same process but are not causally related.



# Space-time

To go from ontology to physics we add more structure to the metric set that represents the totality of events.

$$P_7^*. \text{Card } (E) = \aleph_1.$$

$P_{12}$ . The set  $E$  is a  $C^\infty$  differentiable, 4-dimensional, real pseudo-Riemannian manifold.

$P_{13}$ . The metric structure of  $E$  is given by a tensor field of rank 2,  $g_{ab}$ , in such a way that the differential distance  $ds$  between two events is:  $ds^2 = g_{ab}dx^a dx^b$ .



P<sub>14</sub>. The tangent space of  $E$  at any point is Minkowskian, i.e. its metric is given by a symmetric tensor  $\eta_{ab}$  of rank 2 and trace  $-2$ .

P<sub>15</sub>. The metric of  $E$  is determined by a rank 2 tensor field  $T_{ab}$  through the Einstein field equations:

$$G_{ab} - g_{ab}\Lambda = \kappa T_{ab}. \quad (2)$$

$$\mathcal{ST} \hat{=} \langle E, g_{ab} \rangle.$$

Space-time is represented by an ordered pair whose elements are the manifold and the metric field.



# A model of the World

$$M_{\text{W}} = \langle E, g_{ab}, T_{ab} \rangle .$$

Since the ontic basis of the model is the *totality* of events, the World is ontologically determined. This does not imply that the World is necessarily *predictable* from the model. In fact, Cauchy horizons can appear in the manifold  $E$  for many prescriptions of  $T_{ab}$  (e.g. Joshi 1993). One thing is the World, and another our representations of the World.



# Perspectives

- A quantum theory of space-time should start with  $P_7$

$$- P_7. \text{Card}(E) < \aleph_0.$$

- Then, infinite magnitudes should not appear in the theory.
- Not all events are causally originated, but a poset of events might be adequate to represent the most fundamental structure of space-time.
- Quantum gravity can be considered a theory about relations among basic events and the ontological emergence of space-time and gravity.
- It can be proved that the dimension, topology, differential structure, and metric of the manifold where a poset is embedded is determined by the poset structure (Malament 1977).