

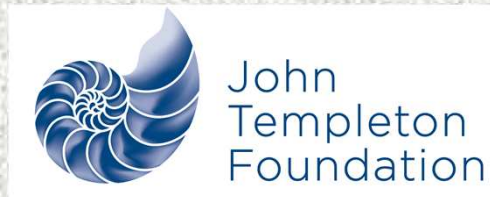
# *La flecha del tiempo en cosmología*

*Olimpia Lombardi*

*CONICET – Universidad de Buenos Aires*

**Encuentro mensual del proyecto**  
*The cosmological origin of the arrow of time*

Buenos Aires, 7 de abril de 2021



## Introducción

En cosmología, suele denominarse "flecha cosmológica del tiempo" al sentido temporal de expansión del universo: dicha flecha será global en un universo Big Bang-Big Chill, pero apuntará en distintos sentidos en un universo Big Bang-Big Crunch. Esta terminología privilegia el "radio" del universo frente a otras propiedades geométricas del espacio-tiempo. Pero, ¿por qué aceptar el carácter privilegiado del radio respecto de otras propiedades geométricas del universo?

Por otra parte, las discusiones tradicionales acerca de la flecha del tiempo suelen involucrar el concepto de entropía: el sentido pasado-a-futuro se relaciona con el gradiente de la función entropía del universo. Sin embargo, la entropía es una magnitud macroscópica, compatible con múltiples configuraciones del sistema. Aquí la pregunta se refiere a la posibilidad de definir una flecha del tiempo para el universo en su conjunto sobre conceptos más básicos que la entropía.

En este trabajo denominaremos "flecha del tiempo cosmológica" a la flecha definida exclusivamente sobre la base de las propiedades geométricas del espacio-tiempo. A su vez, argumentaremos que, si se cumplen ciertas condiciones, es posible definir la flecha cosmológica del tiempo.

### Origen del problema de la flecha del tiempo

Hecho → experimentamos una asimetría temporal entre pasado y futuro



Problema → encontrar un correlato *físico* de tal asimetría



### Origen del problema de la flecha del tiempo

Hecho → experimentamos una asimetría temporal entre pasado y futuro



Problema → encontrar un correlato *físico* de tal asimetría

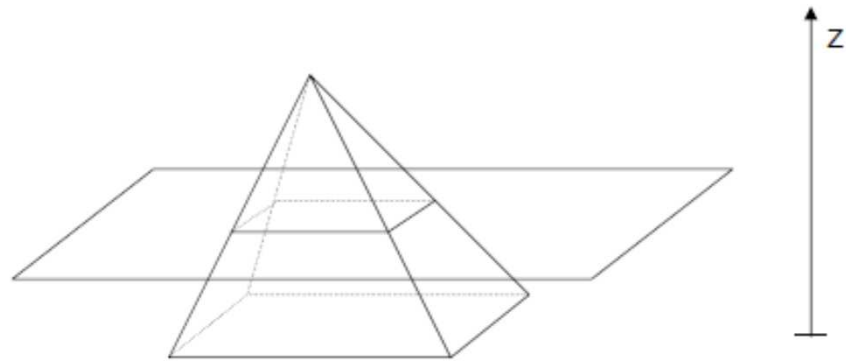
### ¿Cómo entender el problema de la Flecha del Tiempo?

Por analogía con una flecha:

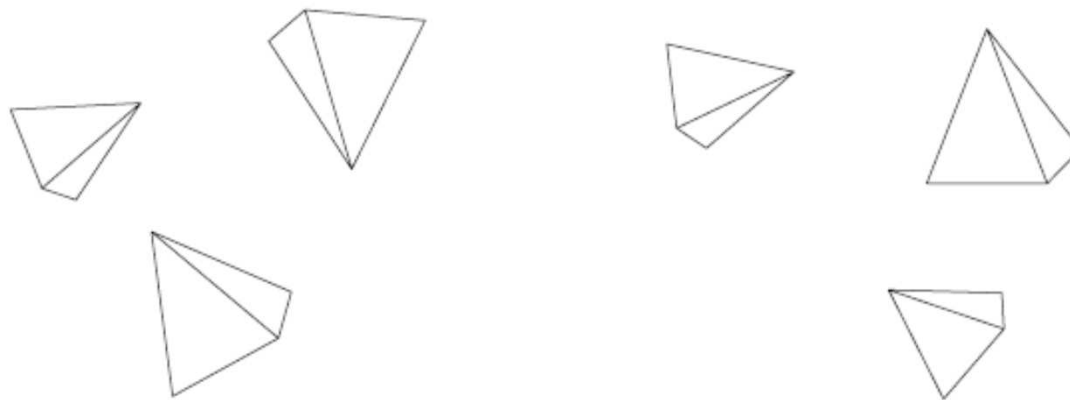
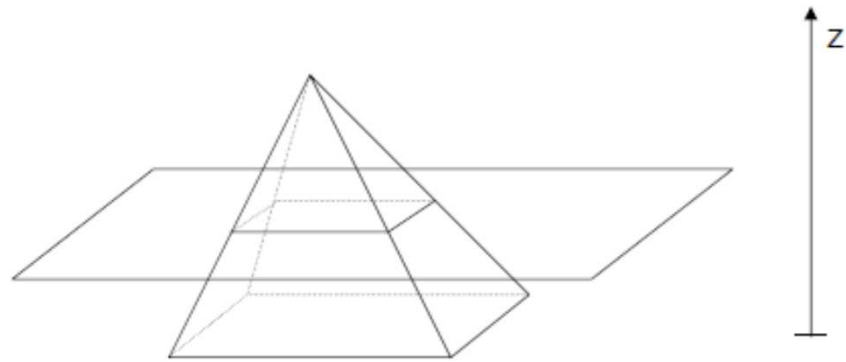


Problema: *cómo distinguir entre los dos sentidos del tiempo sobre la base de las propiedades del espacio-tiempo y en términos exclusivamente físicos.*

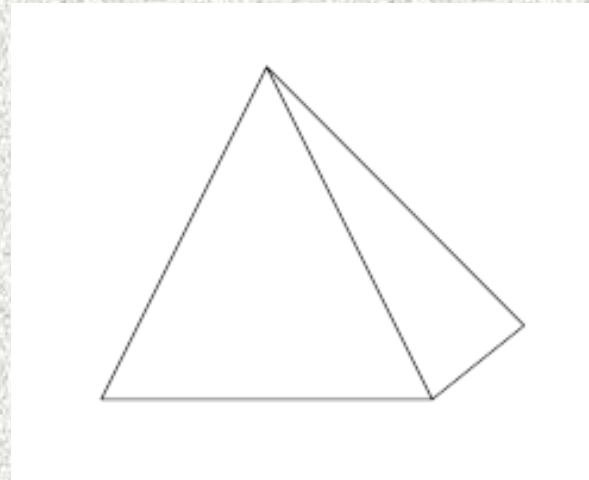
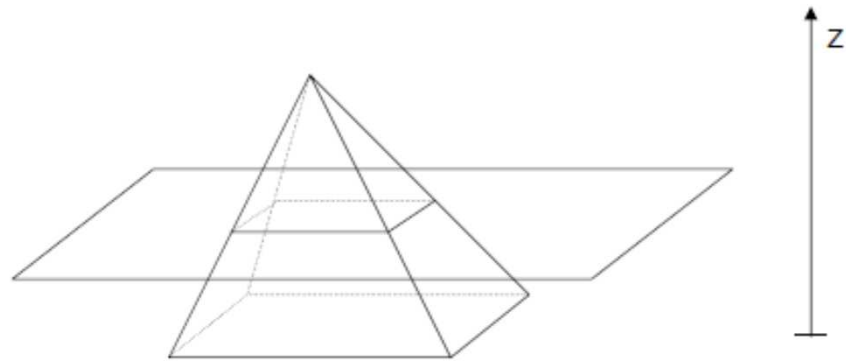
Consideremos, por ejemplo, la pirámide de Keops



Consideremos, por ejemplo, la pirámide de Keops



Consideremos, por ejemplo, la pirámide de Keops



Para el cosmólogo, el universo es un objeto cuatridimensional que puede ser:

simétrico	}	a lo largo de la dimensión temporal
o		
asimétrico		

*Problema:*

*Construir un modelo de universo asimétrico a lo largo de la dimensión temporal, de modo tal que su asimetría permita distinguir entre los dos sentidos temporales.*



### Condiciones para definir la Flecha del Tiempo Cosmológica

- 1º) El espacio-tiempo debe ser temporalmente orientable
- 2º) El espacio-tiempo debe admitir la definición de un tiempo cósmico
- 3º) Debe ser posible formular un modelo asimétrico mediante leyes no t-invariantes
- 4º) Debe rechazarse la prioridad ontológica del espacio-tiempo respecto del universo

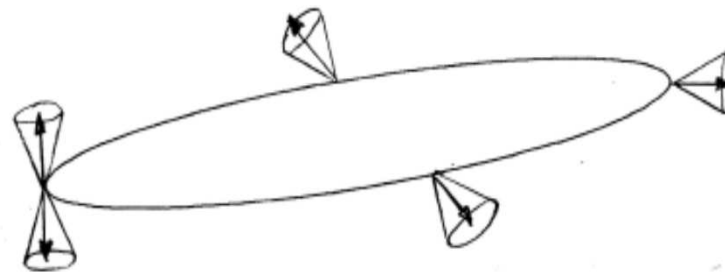
### Orientabilidad temporal

*Espacio-tiempo temporalmente orientable:* puede definirse un campo vectorial continuo, cuyos vectores son tipo tiempo respecto de su métrica.

### Orientabilidad temporal

*Espacio-tiempo temporalmente orientable*: puede definirse un campo vectorial continuo, cuyos vectores son tipo tiempo respecto de su métrica.

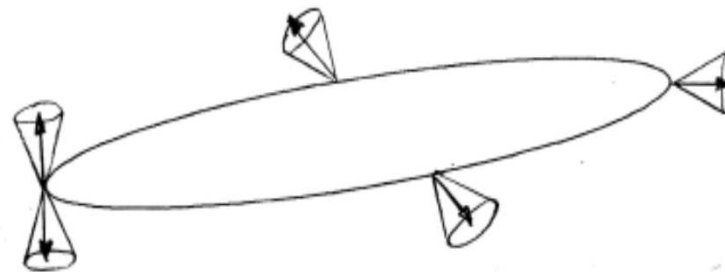
Si el espacio-tiempo es *temporalmente no-orientable*, puede convertirse un vector "temporal" que apunta hacia el futuro en un vector "temporal" que apunta hacia el pasado por medio de una transformación continua.



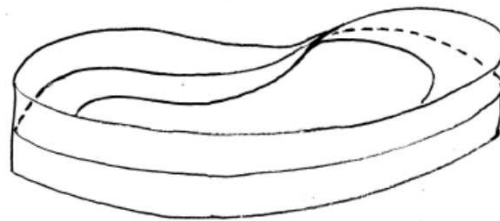
## Orientabilidad temporal

*Espacio-tiempo temporalmente orientable*: puede definirse un campo vectorial continuo, cuyos vectores son tipo tiempo respecto de su métrica.

Si el espacio-tiempo es *temporalmente no-orientable*, puede convertirse un vector "temporal" que apunta hacia el futuro en un vector "temporal" que apunta hacia el pasado por medio de una transformación continua.



Cinta de Moebius:

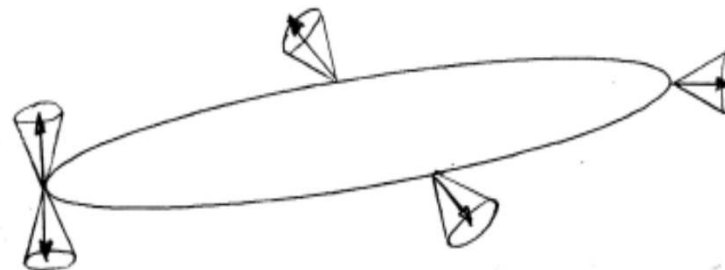




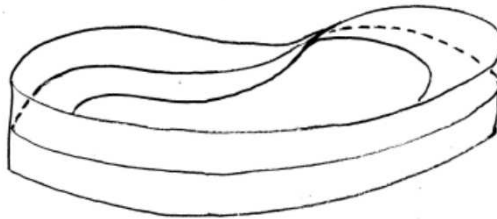
## Orientabilidad temporal

*Espacio-tiempo temporalmente orientable*: puede definirse un campo vectorial continuo, cuyos vectores son tipo tiempo respecto de su métrica.

Si el espacio-tiempo es *temporalmente no-orientable*, puede convertirse un vector "temporal" que apunta hacia el futuro en un vector "temporal" que apunta hacia el pasado por medio de una transformación continua.



Cinta de Moebius:



Si el espacio-tiempo es no-orientable, la distinción entre los dos sentidos temporales no puede establecerse a nivel global.

### Tiempo cósmico

*Tiempo propio de una partícula:* tiempo que mide un reloj solidario con la partícula

No siempre es posible sincronizar los tiempos propios de todas las partículas del universo

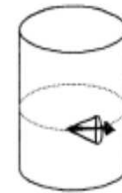
### Tiempo cósmico

*Tiempo propio de una partícula:* tiempo que mide un reloj solidario con la partícula

No siempre es posible sincronizar los tiempos propios de todas las partículas del universo

Condiciones:

- a) El espacio-tiempo debe ser foliable en hipersuperficies tipo-espacio ordenables según una función monótona creciente (impide curvas temporales cerradas)



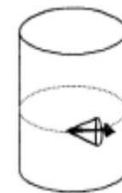
## Tiempo cósmico

*Tiempo propio de una partícula:* tiempo que mide un reloj solidario con la partícula

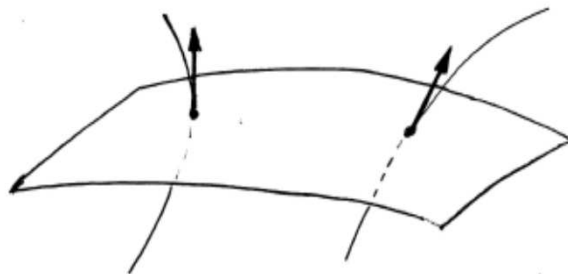
No siempre es posible sincronizar los tiempos propios de todas las partículas del universo

Condiciones:

- a) El espacio-tiempo debe ser foliable en hipersuperficies tipo-espacio ordenables según una función monótona creciente (impide curvas temporales cerradas)



- b) La noción de simultaneidad debe ser unívoca y recobrar la noción de la Teoría Especial (las líneas de mundo deben ser ortogonales a las hipersuperficies tipo espacio)





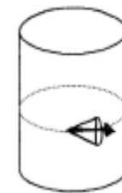
## Tiempo cósmico

*Tiempo propio de una partícula:* tiempo que mide un reloj solidario con la partícula

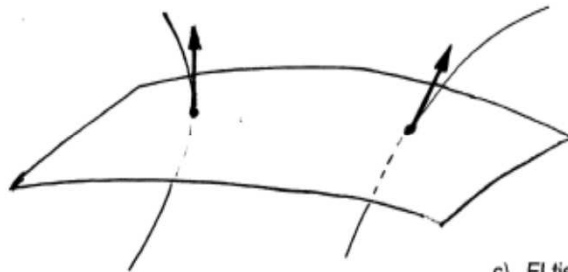
No siempre es posible sincronizar los tiempos propios de todas las partículas del universo

Condiciones:

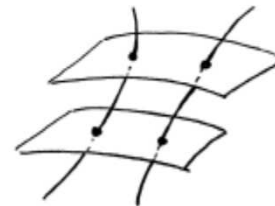
- a) El espacio-tiempo debe ser foliable en hipersuperficies tipo-espacio ordenables según una función monótona creciente (impide curvas temporales cerradas)



- b) La noción de simultaneidad debe ser unívoca y recobrar la noción de la Teoría Especial (las líneas de mundo deben ser ortogonales a las hipersuperficies tipo espacio)



- c) El tiempo propio entre dos hipersuperficies de simultaneidad debe ser el mismo para todas las líneas de mundo.



### Universos Asimétricos

#### a) *La pregunta acerca de la posibilidad*

¿Cómo es posible describir un universo temporalmente asimétrico mediante leyes t-invariantes?

### Universos Asimétricos

#### a) La pregunta acerca de la posibilidad

¿Cómo es posible describir un universo temporalmente asimétrico mediante leyes  $t$ -invariantes?

Una evolución  $S_i \rightarrow S_j$  es *dinámicamente posible* respecto de una ley  $L$  si es consistente con  $L$ , es decir, si es una solución de  $L$ .

Sea  $T(S)$  el estado temporalmente invertido respecto de  $S$ .

La ley  $L$  es  *$t$ -invariante* cuando se cumple: la evolución  $S_i \rightarrow S_j$  es dinámicamente posible respecto de  $L$  sii su evolución invertida  $T(S_j) \rightarrow T(S_i)$  es también dinámicamente posible respecto de  $L$ .

### Universos Asimétricos

#### a) La pregunta acerca de la posibilidad

¿Cómo es posible describir un universo temporalmente asimétrico mediante leyes t-invariantes?

Una evolución  $S_i \rightarrow S_j$  es *dinámicamente posible* respecto de una ley  $L$  si es consistente con  $L$ , es decir, si es una solución de  $L$ .

Sea  $T(S)$  el estado temporalmente invertido respecto de  $S$ .

La ley  $L$  es *t-invariante* cuando se cumple: la evolución  $S_i \rightarrow S_j$  es dinámicamente posible respecto de  $L$  sii su evolución invertida  $T(S_j) \rightarrow T(S_i)$  es también dinámicamente posible respecto de  $L$ .

t-invariancia  $\rightarrow$  propiedad de leyes (ecuaciones)

t-simetría  $\rightarrow$  propiedad de modelos (soluciones)

Por lo tanto, nada impide obtener modelos asimétricos mediante leyes t-invariantes.



## Universos Asimétricos

### a) La pregunta acerca de la posibilidad

¿Cómo es posible describir un universo temporalmente asimétrico mediante leyes  $t$ -invariantes?

Una evolución  $S_i \rightarrow S_f$  es *dinámicamente posible* respecto de una ley  $L$  si es consistente con  $L$ , es decir, si es una solución de  $L$ .

Sea  $T(S)$  el estado temporalmente invertido respecto de  $S$ .

La ley  $L$  es  *$t$ -invariante* cuando se cumple: la evolución  $S_i \rightarrow S_f$  es dinámicamente posible respecto de  $L$  sii su evolución invertida  $T(S_f) \rightarrow T(S_i)$  es también dinámicamente posible respecto de  $L$ .

$t$ -invariancia  $\rightarrow$  propiedad de leyes (ecuaciones)

$t$ -simetría  $\rightarrow$  propiedad de modelos (soluciones)

Por lo tanto, nada impide obtener modelos asimétricos mediante leyes  $t$ -invariantes.

Un espacio-tiempo orientable  $M$  es  *$t$ -isótropo* si existe un difeomorfismo  $d$  de  $M$  sobre sí mismo que invierte las orientaciones temporales pero preserva la métrica.

Un espacio-tiempo orientable  $M$  es  *$t$ -simétrico* respecto de una hipersuperficie tipo espacio  $t=\alpha$ , donde  $\alpha$  es una constante, si es  $t$ -isótropo y el difeomorfismo  $d$  deja fija la hipersuperficie  $t=\alpha$  (la hipersuperficie  $t=\alpha$  divide al espacio-tiempo en dos "mitades" especularmente simétricas)

***b) La pregunta acerca de la probabilidad***

Puede demostrarse que, en el conjunto de los modelos standard de la cosmología contemporánea (modelos FLRW), los modelos t-simétricos tienen medida nula.

### *El status ontológico del tiempo*

- La t-invariancia de las leyes no es un obstáculo para describir un modelo t-asimétrico de universo.
- Pero si  $m$  es modelo,  $T(m)$  (el modelo especularmente simétrico respecto de  $m$ ) también lo es.

¿Cómo elegir entre dos universos nomológicamente posibles, uno la imagen especular del otro?

- Si se tratara de un sistema inmerso en un entorno, la pregunta tiene sentido.
- ¿Pero qué sentido tiene para el universo como un todo?

La idea misma de dos universos "temporalmente opuestos" presupone un tiempo común a ambos universos → Incompatible con la interpretación standard de la Relatividad General.



### El status ontológico del tiempo

- La t-invariancia de las leyes no es un obstáculo para describir un modelo t-asimétrico de universo.
- Pero si  $m$  es modelo,  $T(m)$  (el modelo especularmente simétrico respecto de  $m$ ) también lo es.

¿Cómo elegir entre dos universos nomológicamente posibles, uno la imagen especular del otro?

- Si se tratara de un sistema inmerso en un entorno, la pregunta tiene sentido.
- ¿Pero qué sentido tiene para el universo como un todo?

La idea misma de dos universos "temporalmente opuestos" presupone un tiempo común a ambos universos → Incompatible con la interpretación standard de la Relatividad General.

Dos modelos de universo  $(M, g)$  y  $(M', g')$  se consideran equivalentes si son *isométricos*, es decir, si existe un difeomorfismo  $\theta: M \rightarrow M'$  que convierte la métrica  $g$  en la métrica  $g'$ .

Las transformaciones de simetría (en particular, la inversión temporal) son isometrías.

*Por lo tanto,  $m$  y  $T(m)$  son descripciones distintas pero equivalentes de un mismo universo posible*



Esta tesis de equivalencia:

- Sólo requiere negar la prioridad ontológica del espacio-tiempo respecto del “contenido” del universo.
- Es independiente de la t-invariancia de las leyes:

$L : \alpha = k t \Rightarrow L^* = T(L) : \alpha = -k t \rightarrow$  El problema de decidir entre  $m$  y  $T(m)$  se convierte en el problema de decidir entre  $L$  y  $L^*$  cuál es “verdadera”



Requiere apelar a nuestra percepción del tiempo



$L$  y  $L^*$  son leyes equivalentes que describen la misma situación física global

### La relevancia de la t-invariancia de las leyes

Diferencia entre:

- *"Problema de la simetría"*: cómo formular un modelo t-asimétrico mediante leyes t-invariantes.
- *"Problema de la elección"*: cómo elegir entre dos modelos especularmente simétricos entre sí.

### La relevancia de la t-invariancia de las leyes

Diferencia entre:

- *"Problema de la simetría"*: cómo formular un modelo t-asimétrico mediante leyes t-invariantes.
- *"Problema de la elección"*: cómo elegir entre dos modelos especularmente simétricos entre sí.

Para ninguno de ambos problemas es relevante la t-invariancia de las leyes:

- *"Problema de la simetría"*: la t-invariancia no es obstáculo para formular modelos t-asimétricos.
- *"Problema de la elección"*: surge tanto con leyes t-invariantes como con leyes no t-invariantes y se resuelve apelando a la tesis de equivalencia en ambos casos.

### La relevancia de la t-invariancia de las leyes

Diferencia entre:

- "Problema de la simetría": cómo formular un modelo t-asimétrico mediante leyes t-invariantes.
- "Problema de la elección": cómo elegir entre dos modelos especularmente simétricos entre sí.

Para ninguno de ambos problemas es relevante la t-invariancia de las leyes:

- "Problema de la simetría": la t-invariancia no es obstáculo para formular modelos t-asimétricos.
- "Problema de la elección": surge tanto con leyes t-invariantes como con leyes no t-invariantes y se resuelve apelando a la tesis de equivalencia en ambos casos.

#### *Conclusión:*

A diferencia de lo que tradicionalmente se supone, la t-invariancia de las leyes no es relevante para el problema de la flecha cosmológica del tiempo.

El problema requiere concentrar la atención en las propiedades de los *modelos* y no de las leyes



### Consideraciones finales

- La flecha del tiempo cosmológica no es una consecuencia inevitable de las leyes físicas: es una propiedad contingente del espacio-tiempo.
- Los modelos cosmológicos standard de la cosmología contemporánea cumplen las condiciones necesarias para poseer una flecha cosmológica del tiempo con alta probabilidad.
- El carácter contingente de la flecha cosmológica del tiempo no minimiza su carácter objetivo.

# *La flecha del tiempo en cosmología*

*¡Muchas gracias!*

**Encuentro mensual del proyecto**  
*The cosmological origin of the arrow of time*

Buenos Aires, 7 de abril de 2021

