

# MÁS RÁPIDO QUE LA LUZ

Jean-Pierre Petit

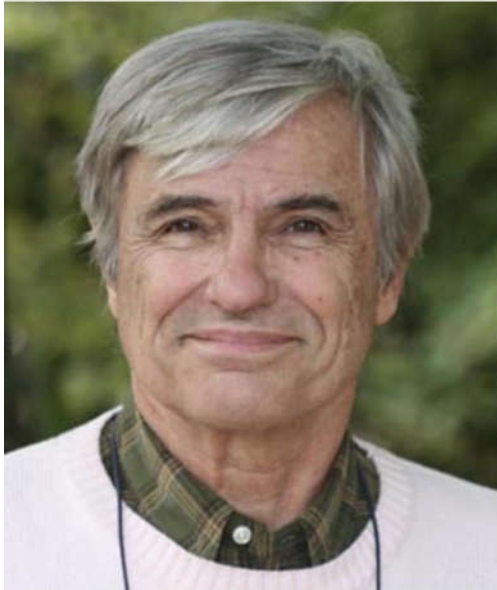
2008



El hombre que  
dibuja más rápido  
que su sombra

# Saber sin Fronteras

**Asociación sin ánimo de lucro creada en 2005 y administrada por dos científicos franceses. Su finalidad: difundir conocimientos científicos por medio de historietas en PDF descargables de manera gratuita. En 2020 hemos completado 565 traducciones en 40 lenguas. Y más de 500.000 descargas.**



**Jean-Pierre Petit**



**Gilles d'Agostini**

**La asociación es completamente voluntaria. El dinero donado es usado en su totalidad para retribuir a los traductores.**

**Para hacer una donación, use el botón de PayPal en la página de inicio:**

<http://www.savoir-sans-frontieres.com>



Querido amigo, te ves algo perturbado. ¿Qué te sucede?

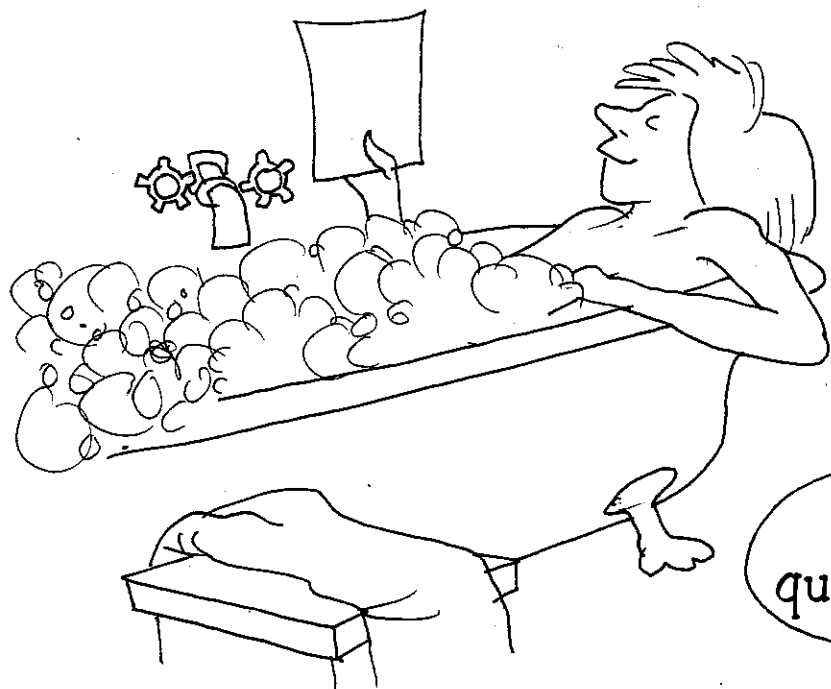


Vengo de un coloquio de astrofísica.  
¡Ni me hables!

El primer debate fue sobre la expansión cósmica.  
Querían saber en dónde se produce ese fenómeno.  
¿Acaso la Tierra se dilata? ¡No, eso se sabría!  
¿Y el sistema solar? Tampoco. ¿Estarán las galaxias en expansión? ¡Menos!

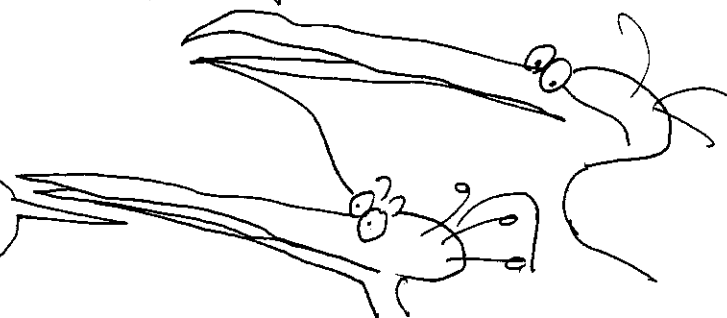


¡O sea que el Universo ha de dilatarse en alguna parte!? ¡Qué locura!



Ya sabes, las observaciones confirman cada año un poco más que la estructura del Universo es **LAGUNAR**

¿Lagunar? ¿Qué quieres decir con eso?



Luego de descubrir que las galaxias podían reunirse en **CÚMULOS** como el cúmulo de Virgo o el cúmulo de Coma, que contienen cerca de mil galaxias, se pensó que el universo podía tener una estructura **JERÁRQUICA**



Así comenzó la búsqueda de **SUPERCÚMULOS**, de "cúmulos de cúmulos", etc...

¿Y qué fue lo que se encontró?



Lo que resulta divertido en el mundo de las ciencias es el hecho de que nuevas palabras aparecen, se inflan y se luego estallan como pompas de jabón. Hubo un tiempo en que los astrofísicos sólo contaban con esta palabra: supercúmulos. Y después, de repente, paff... ¡desapareció!

¡Exacto!

Supongo que será porque nunca los encontraron

Sin embargo, los astrónomos descubrieron un lugar en el que las galaxias estaban agrupadas en una especie de placa a la que denominaron **THE GREAT WALL** (\*)

¿O sea que en esa "placa" había muchas galaxias y en todo el resto sólo vacío?

(\*) LA GRAN MURALLA.

Con el paso de los años las observaciones se hicieron más precisas. Hoy día sabemos que las galaxias, la materia, están dispuestas alrededor de grandes burbujas vacías de cien millones de años-luz de diámetro

Ahí lo tienes, tu problema está resuelto. La expansión tuvo lugar en esas "burbujas"

Hmmm... entonces los cúmulos de galaxias, esas concentraciones de materia, estarían, por decirlo así, en los puntos de intersección de tres de esas... burbujas. ¿Pero se sabe cómo se formó tan singular estructura?

Por desgracia, amigo mío, nadie tiene la más remota idea

Pero supongo que debe haber por lo menos un modelo o algo. Hoy día sabemos hacer muy buenas cosas con los ordenadores, ¿no es así?

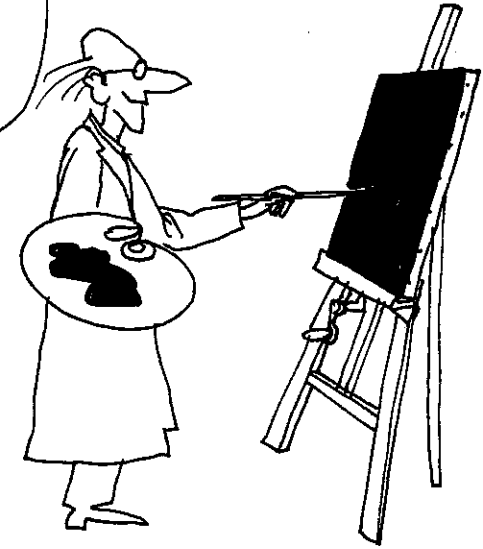
Bueno, hay algunos que hacen simulaciones con **MATERIA OSCURA FRÍA**, pero no son muy convincentes

No veo nada

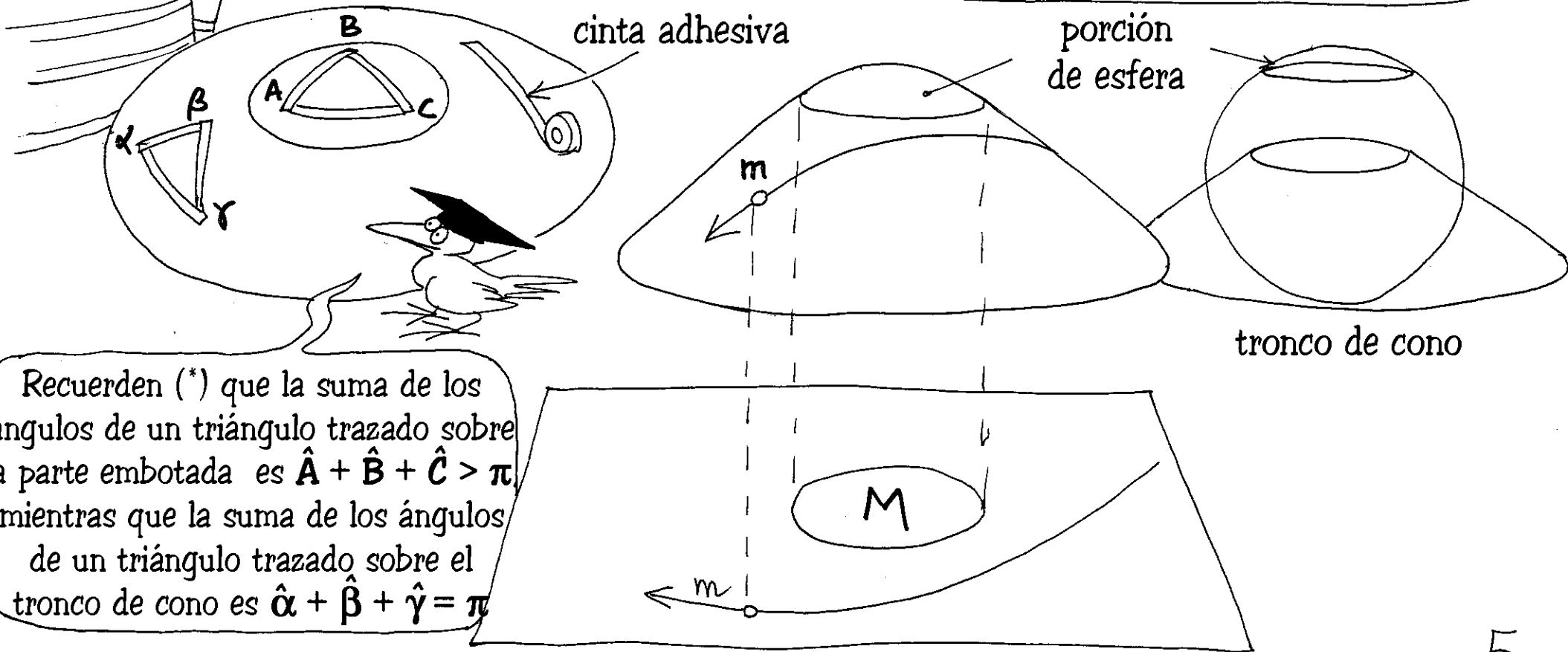
Es normal, es materia oscura

Señor Albert, díganos qué piensa usted de todo esto. Hacía más de veinte años que no teníamos noticias suyas en estas historietas

Vaya, yo aquí he seguido con mi idea inicial: reemplazar las fuerzas por la **GEOMETRÍA**



Tomen un objeto de masa  $M$ , una estrella, un planeta, lo que quieran. Sea una masa  $m$  que circula en las vecindades de aquella. Su trayectoria es influenciada por la fuerza de atracción newtoniana que la masa  $M$  ejerce sobre ella. En dos dimensiones podemos representar eso mediante un cono embotado. Con la ayuda de cinta adhesiva se puede inscribir sobre su superficie una **GEODÉSICA** que, proyectada sobre un plano, tenga la misma trayectoria. La masa se convierte así en una porción de espacio (tapa esférica) con una cierta **CURVATURA**



Recuerden (\*) que la suma de los ángulos de un triángulo trazado sobre la parte embotada es  $\hat{A} + \hat{B} + \hat{C} > \pi$  mientras que la suma de los ángulos de un triángulo trazado sobre el tronco de cono es  $\hat{\alpha} + \hat{\beta} + \hat{\gamma} = \pi$

(\*) Ver "El Geometricón" y "El agujero negro", del mismo autor.

Puesto que hay acuerdo en que **MASA** = **CURVATURA**, si el Universo es **LAGUNAR** quiere decir que está **COMPUESTO** de regiones de un espacio 3d que presentan curvatura, separadas por regiones **NO CURVAS**, planas y euclidianas. ¿Es así?

Si, ¿pero a dónde quieres llegar ?

Este chico no se rinde jamás...

Si... hmm... eso es correcto. Pero sería bien difícil unir porciones de un espacio curvo 3d con porciones de un espacio 3d euclidiano

Claro, pero así como en la representación suya de hace un momento, podríamos hacerlo en 2d

Observen esta bola de ping-pong

La corto en ocho

¿Por qué en ocho?!?



Porque un cubo  
tiene **OCHO** vértices

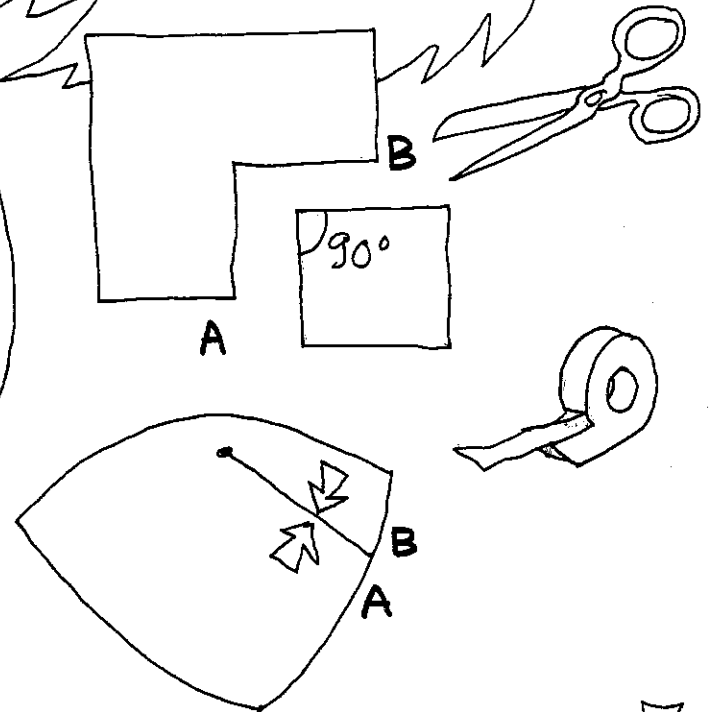


No comprendo...

Empiezo a comprender  
qué es lo que nuestro  
aventurero del saber  
tiene en su cabeza



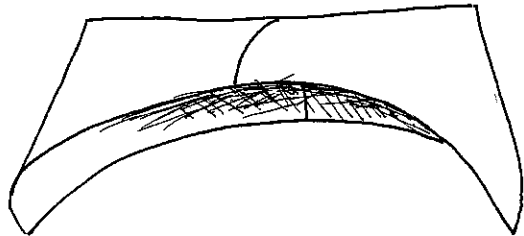
Estas son cuestiones de **CURVATURA TOTAL** que ya fueron descritas en **EL TOPOLOGICÓN**. La de la esfera es  $4\pi$ . Por lo tanto en un octavo de esfera hay una curvatura repartida cuyo valor es  $4\pi/8 = \pi/2$ . Para un **POSICONO** construido con un corte de  $\pi/2=90^\circ$  se obtiene un **PUNTO DE CURVATURA CONCENTRADA**



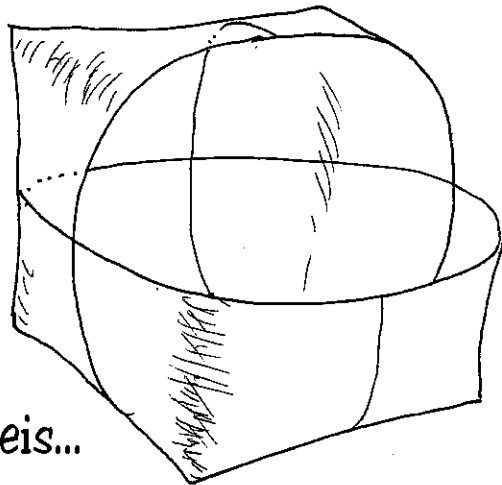
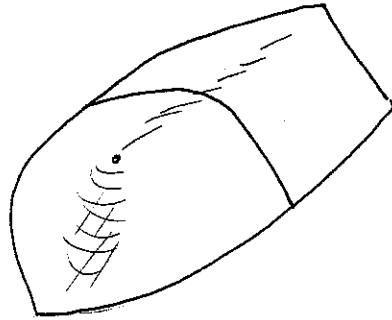
Ver también  
**EL GEOMETRICÓN.**



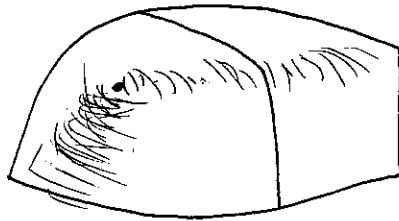
# UN CUBO SIN ARISTAS



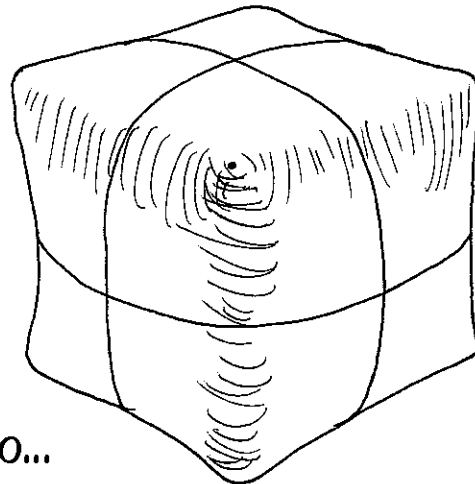
dos POSICONOS unidos



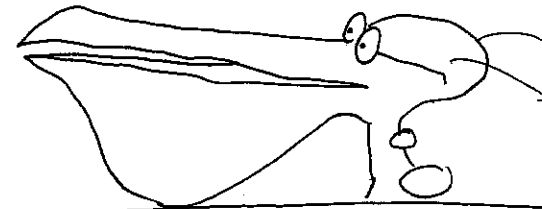
seis...



ocho...

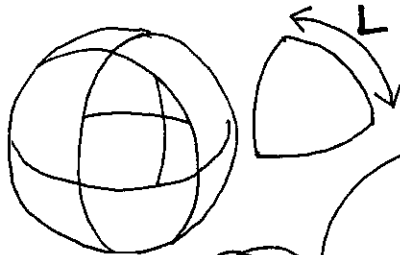
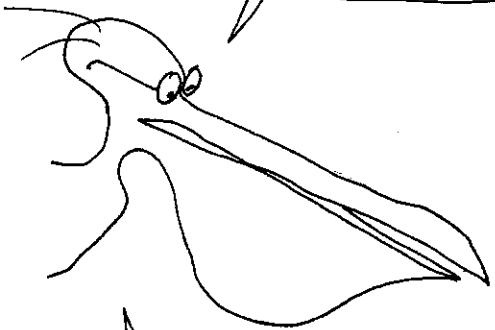


Anselmo puede así unir 8 puntos cónicos, puntos que contienen una curvatura concentrada cuyo valor es  $\pi/2$



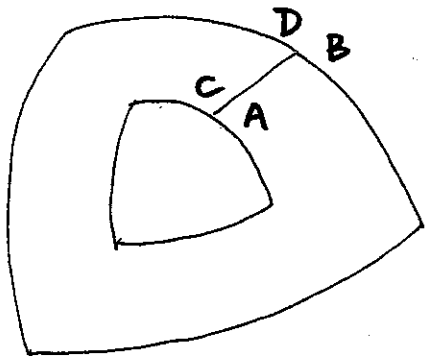
¡¿Y dónde están las aristas?!

Muy bonito.  
¿Pero qué hacer con los octavos  
de bola de ping-pong?

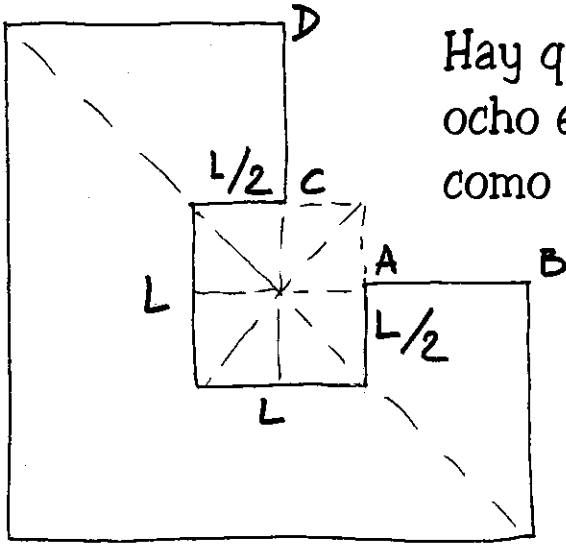
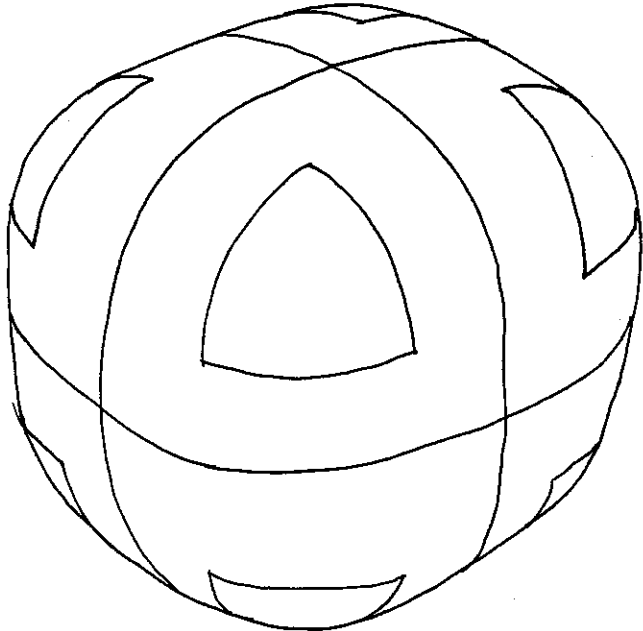


No, no,  
ya entendi.  
Vas a ver

Me debí perder una parte



Ahora sólo hay que adaptar las esquinas esferoidales



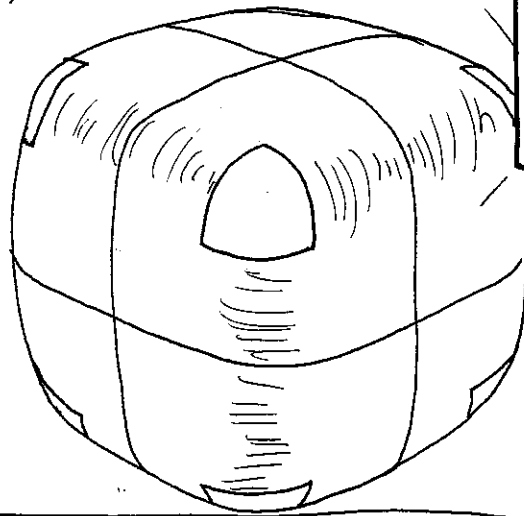
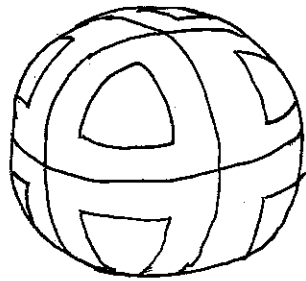
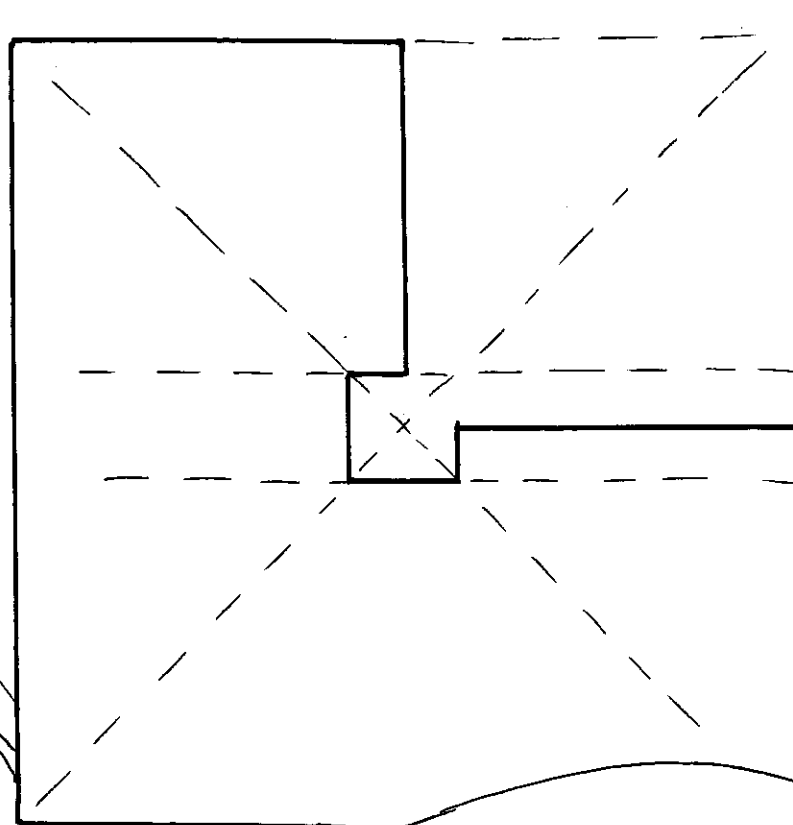
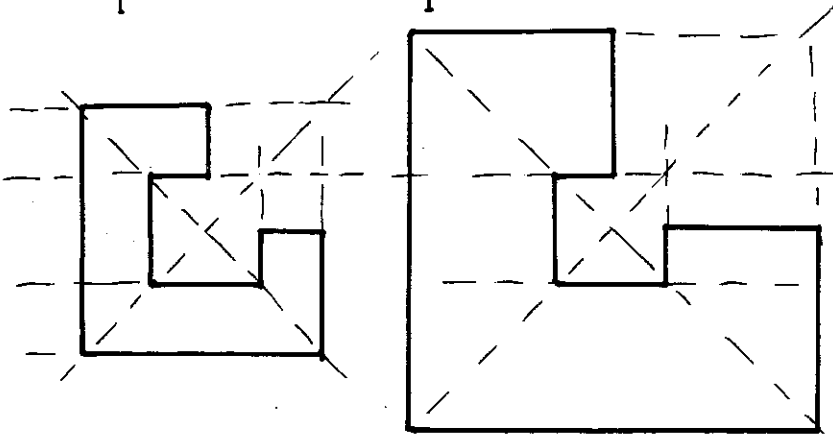
Hay que preparar  
ocho elementos  
como éste:



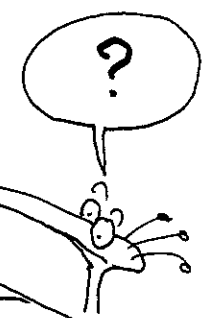
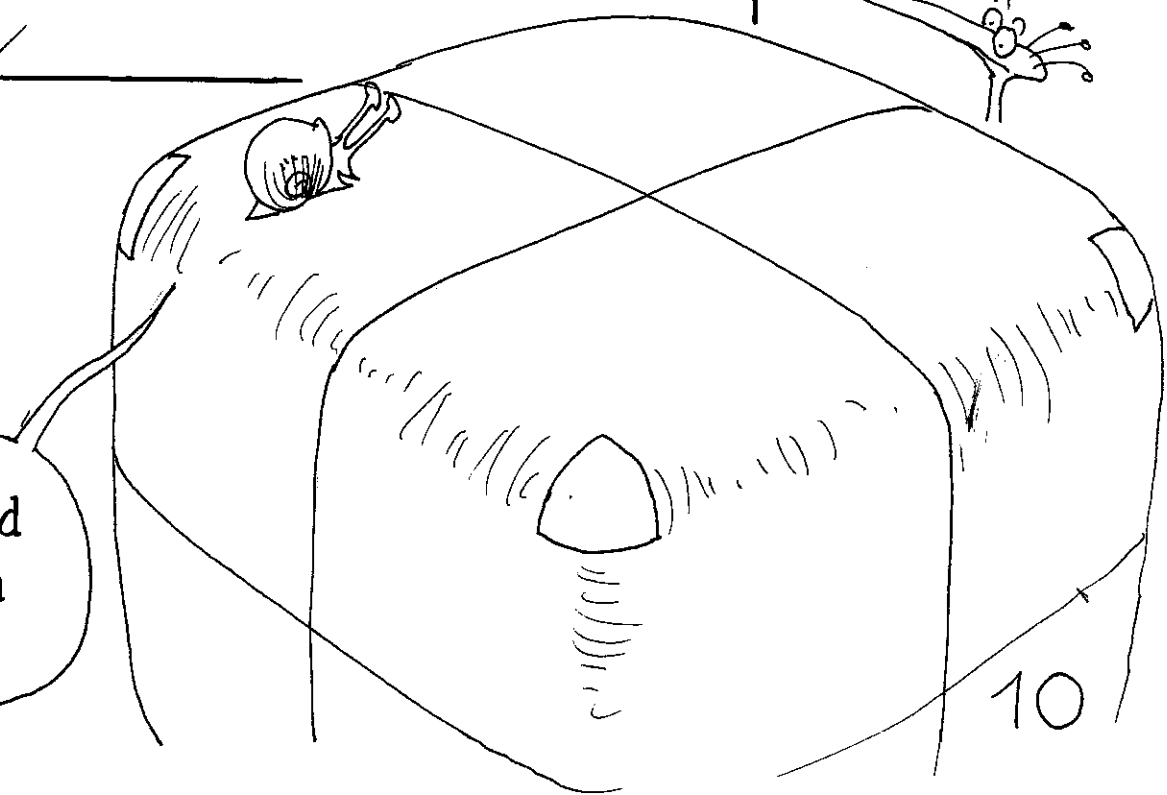
¡Los planos  
tangentes se unen!!!

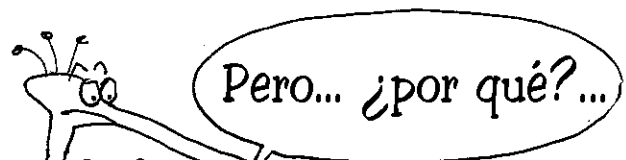
Hmm... qué suerte

El hecho de que el cuadrado central  
parezca hacerse más pequeño no es  
más que una ilusión óptica.



Vamos a ver, plumíferos del servicio,  
dejémonos de tonterías. ¡Habría continuidad  
del plano tangente cualquiera que fuese la  
importancia relativa del área de  
las esquinas redondeadas!



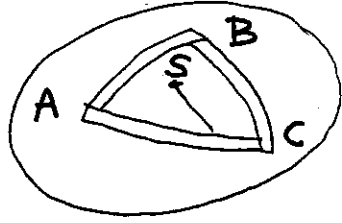
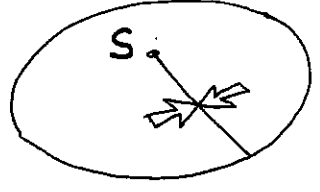
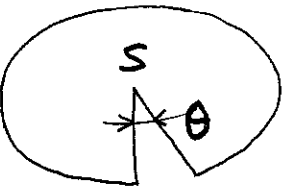


Pero... ¿por qué?...

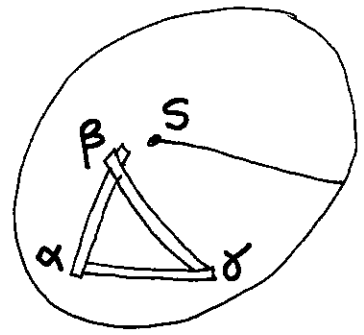


(\*) ¡Vuelvan a leer las historietas en las que aparecen desde hace más de treinta años! (**EL AGUJERO NEGRO**, pág. 8 y siguientes). Pueden fabricar un **POSICONO** haciendo un corte en un ángulo  $\theta$ . Si trazan un triángulo formado por 3 geodésicas, habrá dos posibilidades: que el triángulo contenga el vértice **S** del cono, en cuyo caso la suma de sus ángulos valdrá  $\pi + \theta$ ; o que no lo contenga, en cuyo caso la suma de sus ángulos en los vértices será la **SUMA EUCLIDIANA**, igual a  $\pi$ . Si unen dos posiconos correspondientes a sendos cortes  $\theta_1$  y  $\theta_2$ , la suma de los ángulos de un triángulo que contenga a los dos vértices **S**<sub>1</sub> y **S**<sub>2</sub> será la suma euclidiana  $\pi$  más  $\theta_1 + \theta_2$

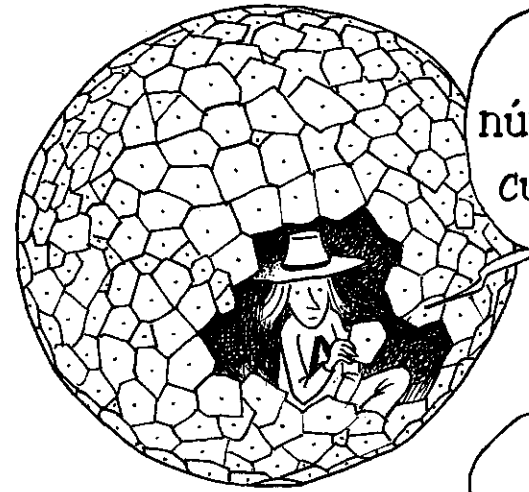
disco



$$\hat{A} + \hat{B} + \hat{C} = \pi + \theta$$



$$\hat{\alpha} + \hat{\beta} + \hat{\gamma} = \pi$$



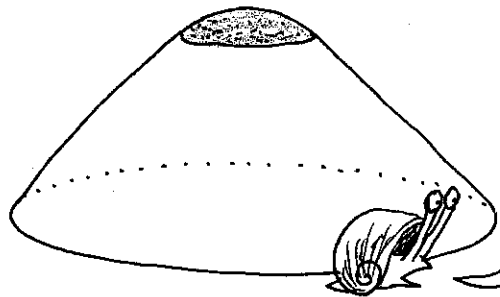
Uniendo lo más regularmente posible un número  $N$  de microconos de ángulo  $\theta$ , noto que cuando  $N \times \theta = 720^\circ$  obtengo... ¡una esfera!

Es normal puesto que la **CURVATURA TOTAL** de la esfera vale  $720^\circ$

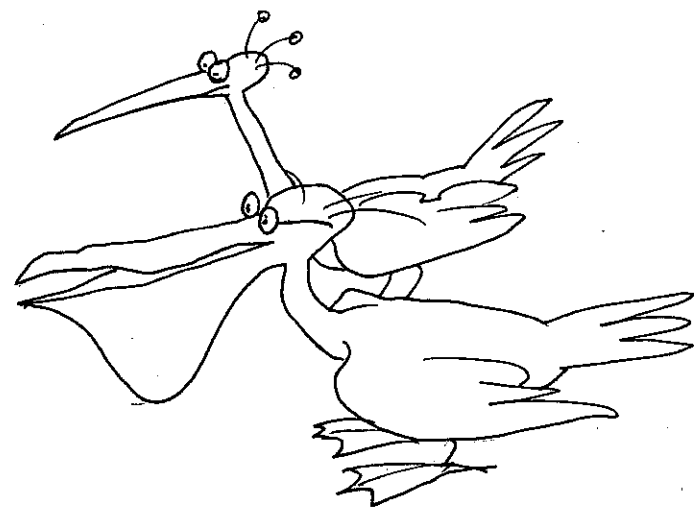
Por ahora sal de ahí, cariño

(\*) **EL AGUJERO NEGRO**, pág. 9.

(\*) dibujo tomado de la pág. 37.



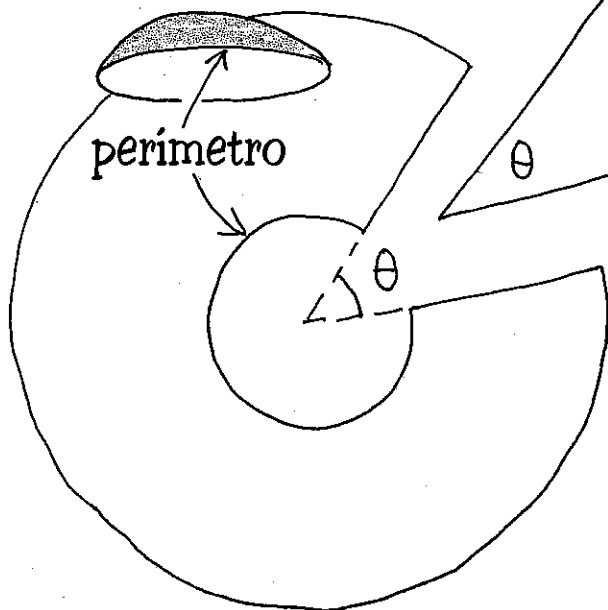
Cuando quieran poner algo curvo en lo euclidiano es suficiente que verifiquen que las curvaturas son compatibles. Supongan, por ejemplo, que quieren fabricar un cono embotado



$$S = 4\pi R^2$$
$$720^\circ$$

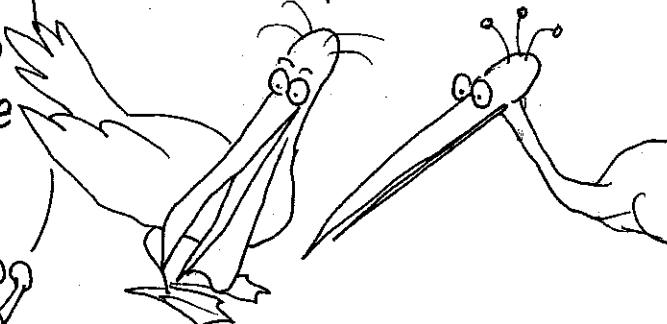
La cantidad de curvatura contenida en la tapa esférica es igual a

$$\theta = 720^\circ \times \frac{A}{4\pi R^2}$$



El flanco de un cono embotado es una parte de un cono correspondiente a un corte con este ángulo  $\theta$ . Basta con recortar el vértice de este cono de manera que los perímetros cuadren, ¡y listo!

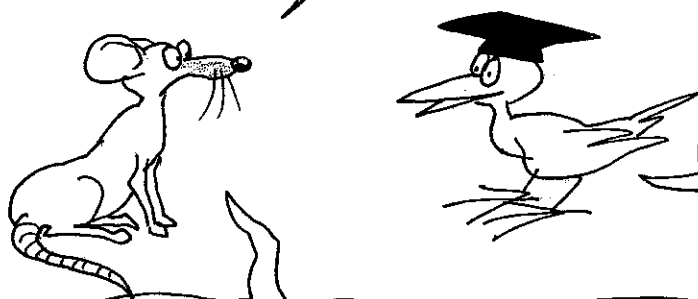
!?



¡Fácil!

# MATERIA, VACÍO...

Bueno, si comprendí bien, la materia en el Universo ocupa especies de pequeños islotes en el espacio, con muchísimo vacío alrededor o en medio. ¿Pero el **VACÍO** qué es?



Para un físico, el vacío perfecto, lleno de **NADA**, no puede existir. Sería necesario que el Universo estuviera a la temperatura del cero absoluto. Ese vacío perfecto sería imposible de aislar, incluso con un recinto perfectamente hermético, pues éste irradiaría y el "vacío" se llenaría con los fotones emitidos por la pared (\*)

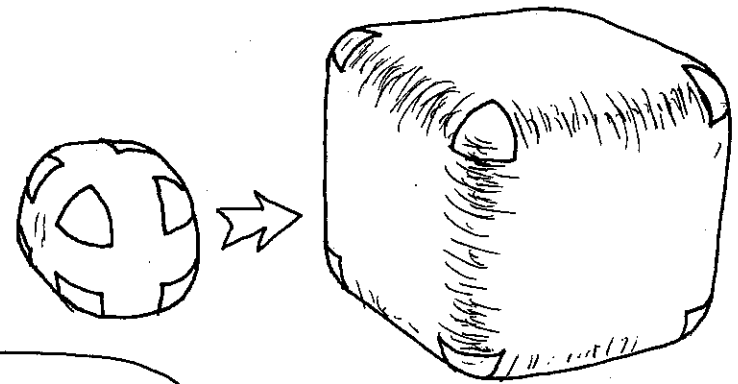
En otras palabras, ¿los grandes vacíos entre las galaxias han sido llenado por los fotones emitidos por... las estrellas?



¡Hay que releer **BIG BANG!** En 1967, las observaciones revelaron la presencia en todo el Universo de fotones extremadamente numerosos (mil millones de veces más numerosos que las partículas de materia). Ellos forman el **FONDO DE RADIACIÓN CÓSMICA DE 3K**. Al colisionar, originan lo que se conoce como el "Vacío Cósmico" y son ellos los que pueblan las burbujas de 100 millones de años-luz de diámetro

(\*) Correspondiente a  $h\nu = hc / \lambda = kT$ , donde **T** es la temperatura absoluta de la pared, **c** la velocidad de la luz, **h** la constante de Planck y **k** la constante de Boltzmann.

En últimas, la representación de Anselmo de un cubo con esquinas redondeadas formadas por octavas de esfera de área constante y unidas por una superficie extensible, un "vacío" constituido por "fotones cohesivos", no es tan mala



¡Pero los fotones se mueven!  
No entiendo esta imagen de un "tejido de fotones cohesivos"

Tienes razón. Las ondas también se mueven. Es mejor imaginar una especie de "MAR PICADO" agitado sin cesar por ondas cuya longitud de onda sería de unos cuantos milímetros (\*)

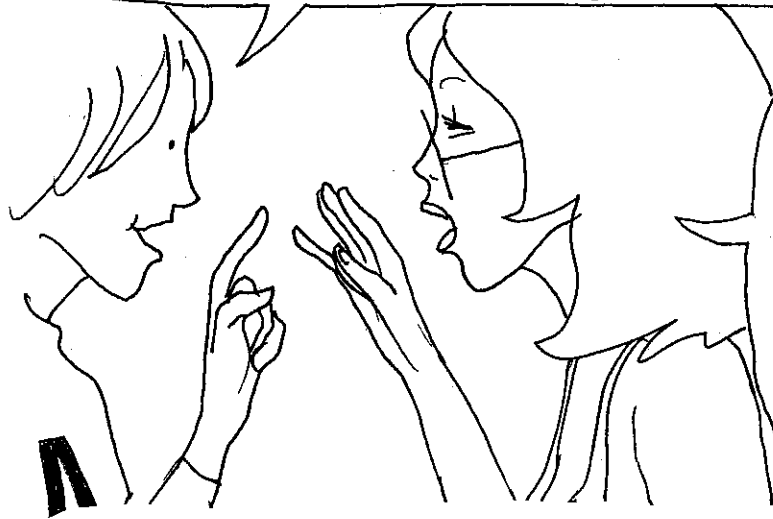
Si ese "MAR PICADO" se dilata, entonces quiere decir que aparecen nuevas "ondas"

$$\begin{aligned} (*) \quad \lambda &= hc/kT; \quad h=6,63 \times 10^{-34} \\ c &= 3 \times 10^8 \text{ m/s;} \\ k &= 1,38 \times 10^{-23} \\ T &= 3 \text{ K} \quad \lambda = 5 \times 10^{-3} \text{ m} \end{aligned}$$

No, las que se dilatan son las "ondas".  
La longitud de onda  $\lambda$  de los fotones "cosmológicos" crece como la dimensión  $R$  del Universo

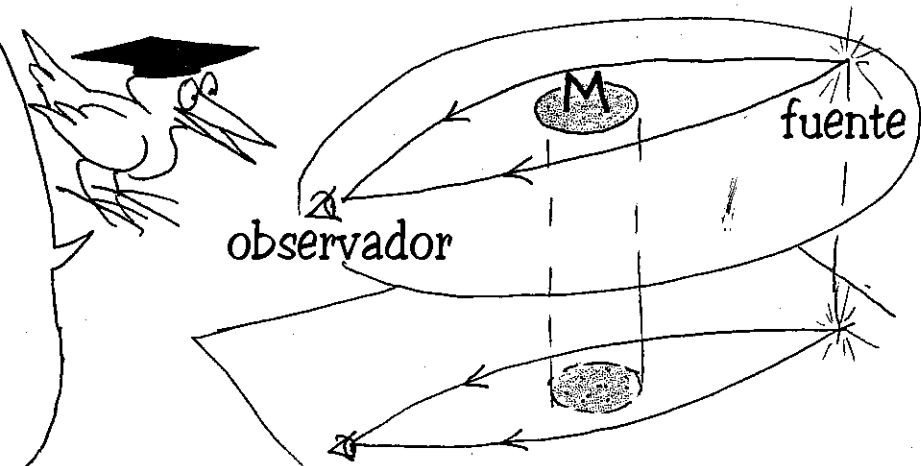


La energía contenida en el Universo, Sofía, es la suma de dos cosas: la energía  $mc^2$  de las partículas dotadas de masa que, si  $m$  y  $c$  son constantes, se conserva; y la energía  $h\nu = hc/\lambda$  de los fotones cosmológicos. Si el número de éstos se conserva y su longitud de onda  $\lambda$  crece como la **DIMENSIÓN CARACTERÍSTICA R** del Universo, eso significa que su energía disminuye. Por lo tanto **ESE COSMOS PIERDE ENERGÍA**



No pienses que todo es tan simple y fácil de comprender. El **MODELO COSMOLÓGICO** es un simple **OBJETO GEOMÉTRICO**, solución de la ecuación de Einstein, incapaz de dar cuenta de la existencia de las partículas, la cual es objeto de la **MECÁNICA CUÁNTICA**. Y como sabes, el matrimonio aún no se ha consumado

En otras palabras, tomamos una **HIPERSUPERFICIE 4d** y alojamos allí las partículas asumiendo que ellas siguen geodésicas. Esta **HIPÓTESIS** permite hacer **PREDICCIONES** para los fotones, como su desviación por una masa como resultado del efecto de **LENTE GRAVITACIONAL**, efecto puesto en evidencia en 1915 durante un eclipse total de Sol

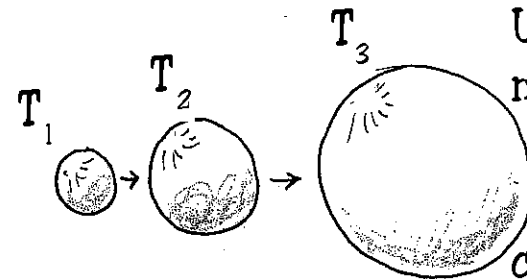


efecto de **ESPEJISMO GRAVITACIONAL**

# MODELO COSMOLÓGICO

Un **MODELO COSMOLÓGICO** es una solución de una ecuación de campo como la ecuación de **EINSTEIN**  $S \Leftarrow \chi T$ , la cual debe leerse "en el sentido de la flecha".  $T$  representa el **CONTENIDO DE ENERGÍA-MATERIA** del universo, que **DETERMINA LA GEOMETRÍA** de una **HIPERSUPERFICIE** de cuatro dimensiones, el **ESPACIO-TIEMPO**. Veamos cómo la distribución de la energía en un objeto puede determinar su geometría. Consideremos un recinto con la forma de una esfera, a temperatura ambiente. Calentémosla de manera no uniforme, por ejemplo colocándola en un ambiente gaseoso cada vez más caliente, pero enfriando una parte con un chorro de agua fría. El objeto se dilatará y su forma, su geometría, dependerá del valor de la temperatura en todo punto del recinto metálico.

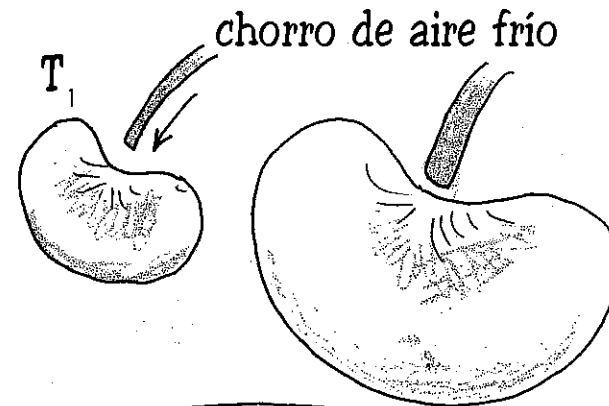
*La Dirección*



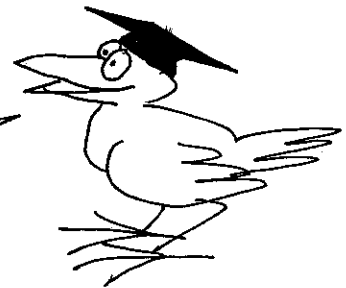
Una esfera hueca, de metal, colocada en un ambiente gaseoso de temperatura creciente, se dilatará

conservando su **GEOMETRÍA ESFÉRICA**.

Pero si, por ejemplo, se contrarresta localmente su dilatación con un chorro de aire frío entonces tomará la forma de un cacahuete.



Se puede hablar de un **CAMPO DE TEMPERATURA**



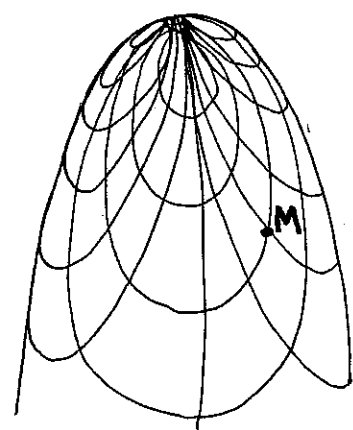
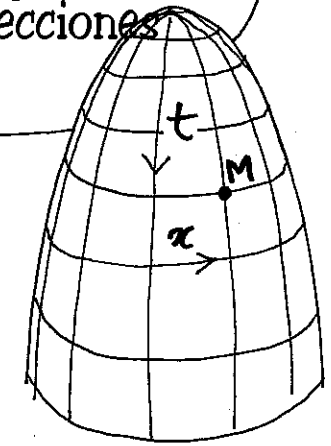
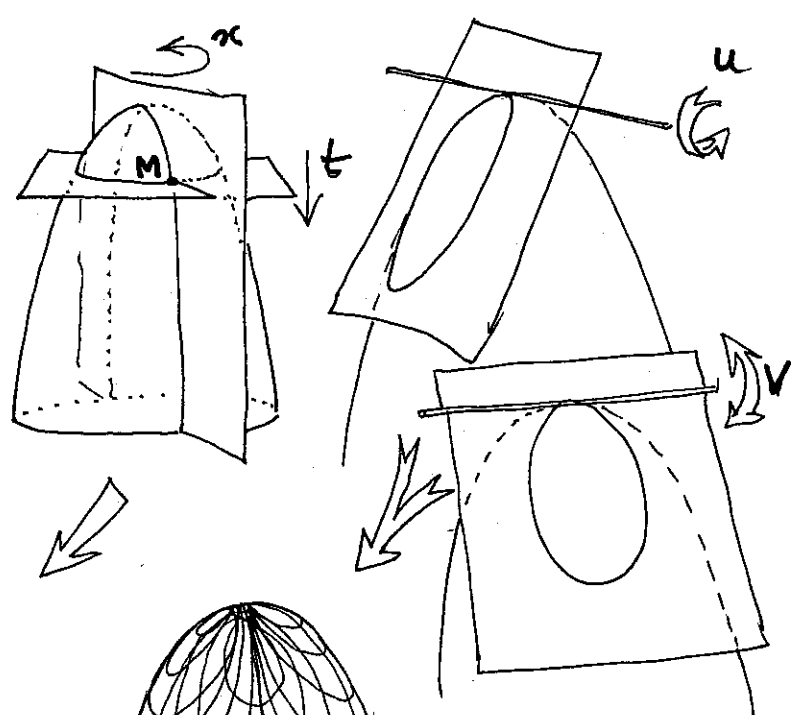
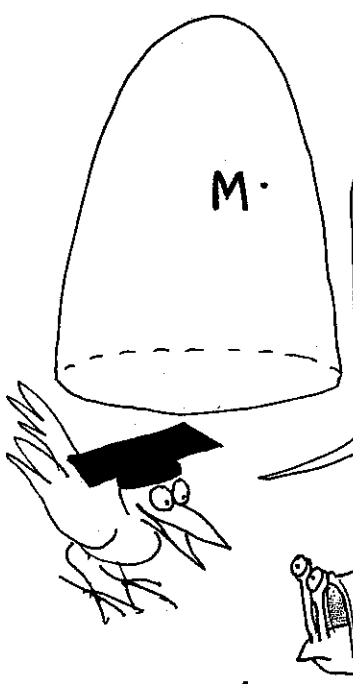
Anselmo ha construido un modelo geométrico **2d** de un universo inhomogéneo, con regiones que no se dilatan, rodeadas de vacíos inmensos en expansión. Este es uno de los aspectos claves del Cosmos tal como lo conocemos hoy día. Antes, los cosmólogos se representaban el universo como una especie de gas uniforme, cuyas moléculas eran las "galaxias" (\*). Ese modelo perduró. En la actualidad, sin embargo, nadie es capaz de construir una solución a la ecuación de Einstein que no tenga la simetría de la esfera  $S^3$ . Así pues, se intenta describir un mundo decididamente inhomogéneo y lagunar invocando soluciones perfectamente "lisas" y homogéneas. Estando así las cosas, al extraer de una ecuación de campo como la de Einstein una hipersuperficie de cuatro dimensiones ¿qué sigue? Hay que **CARTOGRAFIARLA**, aplicarle un sistema de coordenadas  $(x,y,z,t)$ , referidas las tres primeras a la posición de un punto en dicha hipersuperficie, y la cuarta al **TIEMPO**. Y es ahí cuando el **GEÓMETRA** le pasa el mando al **FÍSICO**.



(\*) Un universo lleno de "polvo", puesto que las velocidades de agitación de las galaxias serían pequeñas comparadas con  $c$ .

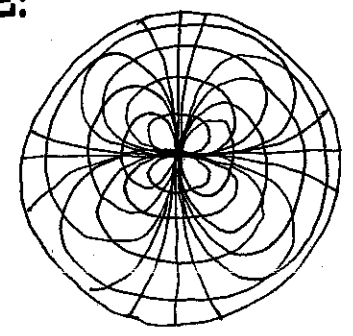
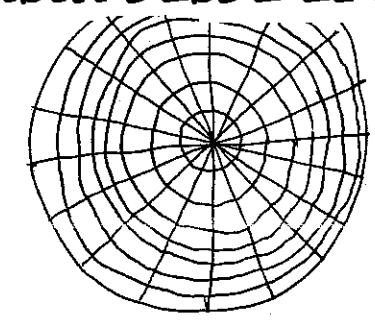
# CARTOGRAFÍA

Consideremos una superficie en forma de paraboloides, de "trozo de mantequilla". Se puede ubicar la posición de un punto **M** con la ayuda de dos números, llamados **COORDENADAS**. Para la misma superficie existe una infinidad de posibilidades para el **SISTEMA DE COORDENADAS**. Se puede, por ejemplo, cortar la superficie con dos familias de planos, cuyas secciones forman dos familias de curvas



Si el trozo de mantequilla representa un espaciotiempo 2d, ¿debe entonces existir al menos una elección particular de coordenadas que defina sin ambigüedad el **ESPACIO** y el **TIEMPO**?

**VISTA DESDE EL EJE:**



# DIBÚJAME UNA OVEJA (\*)

Uno de los grandes cambios paradigmáticos de comienzos del siglo pasado fue considerar que vivimos no en un **ESPACIO 3d** sino en una **HIPER-SUPERFICIE 4d**. Por esa misma época nuevas ecuaciones completaron aquellas ya conocidas, como las ecuaciones de Maxwell del electromagnetismo. **FENÓMENOS NUEVOS** aportaron nuevos **OBSERVABLES**, como la carga eléctrica, y el **FÍSICO** quedó provisto de una "caja de herramientas" conformada por un juego de ecuaciones interdependientes en las que figuran algunas "constantes".

$G$  : constante de gravitación

$c$  : velocidad de la luz

$m$  : masas elementales (nucleones, electrones)

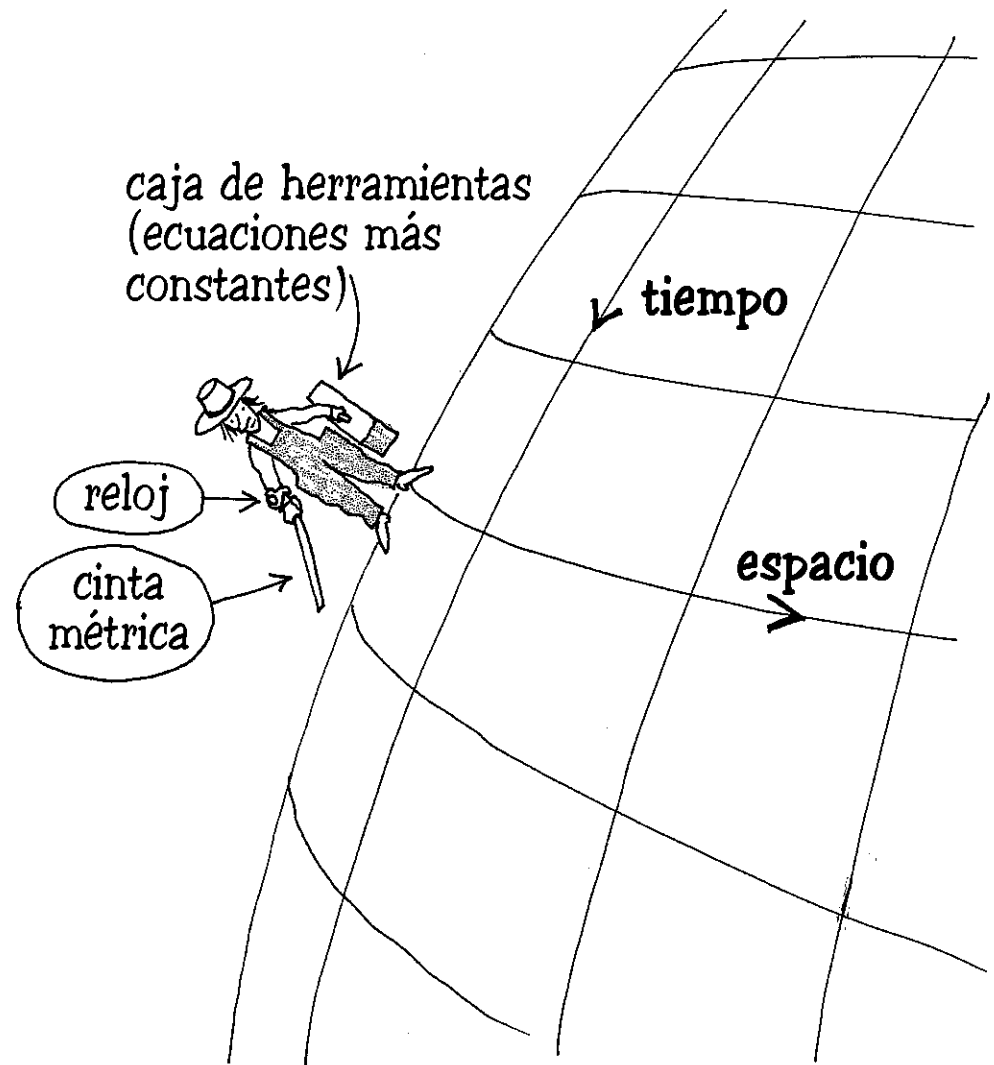
$h$  : constante de Planck

$e$  : carga eléctrica elemental

$\mu_0$  : "permeabilidad magnética del vacío"

$\alpha$  : constante de estructura fina (geometría de los átomos)

Se descubrió que había los mismos átomos en todo el universo, que éste evolucionaba, que tenía un pasado y un futuro y que habitamos una porción minúscula de espacio-tiempo




(\*) Frase que los lectores de **EL PRINCIPITO**, traducido a numerosas lenguas, reconocerán bien.

Se descubrió que la **RADIACIÓN** y la **MATERIA** no eran más que dos manifestaciones de una misma entidad, la **ENERGÍA-MATERIA**, de acuerdo con la célebre ecuación de equivalencia  $E = mc^2$ , la cual muy pronto se verificó experimentalmente con bellos experimentos realizados al aire libre.

Sólo quedaba por estudiar **LOCALMENTE** las propiedades de nuestra hipersuperficie-hábitat.

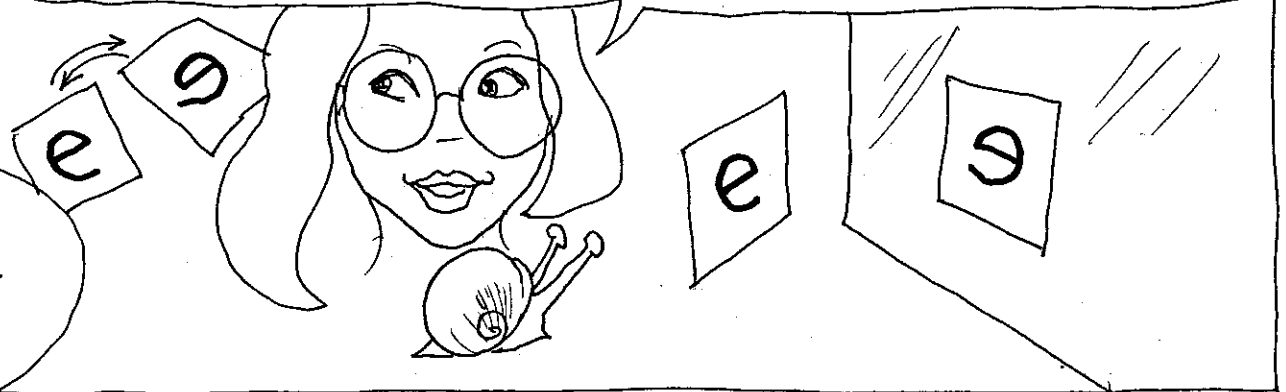


Imaginemos que vivimos sobre una superficie cuya curvatura varía poco de un punto a otro., y que deslizamos sobre ella una calcomanía como ésta: 

Si la **VOLTEAMOS**, su tamaño tampoco se modifica. y al voltearla de nuevo se recupera la original, de manera que el tamaño se conserva por esta inversión "especular"

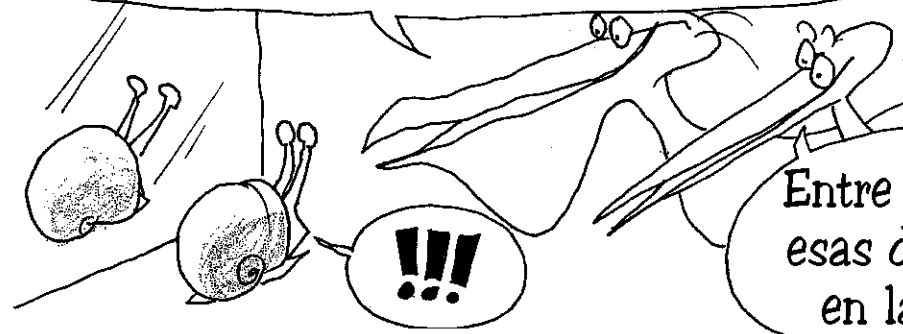


Advertiremos que la calcomanía es **INVARIANTE** sea que uno la gire o la desplace (un poco, no mucho) (\*)



(\*) Se dice que este espacio es localmente invariante ante **GRUPOS** de **ROTACIONES** y **TRANSLACIONES**. 20

Mi estimado Tiresias, ¿sabías que tu concha no es idéntica a su imagen especular?  
 ¿Eres un caracol "derecho" o "izquierdo"?



Entre otros, ¿existen esas dos poblaciones en la naturaleza?

¡Dijimos que en estas historietas no habría nada de política!

Esta simetría evoca el descubrimiento de la **DUALIDAD MATERIA-ANTIMATERIA** (\*) que invierte en particular la carga eléctrica:

$$\Theta = -e$$

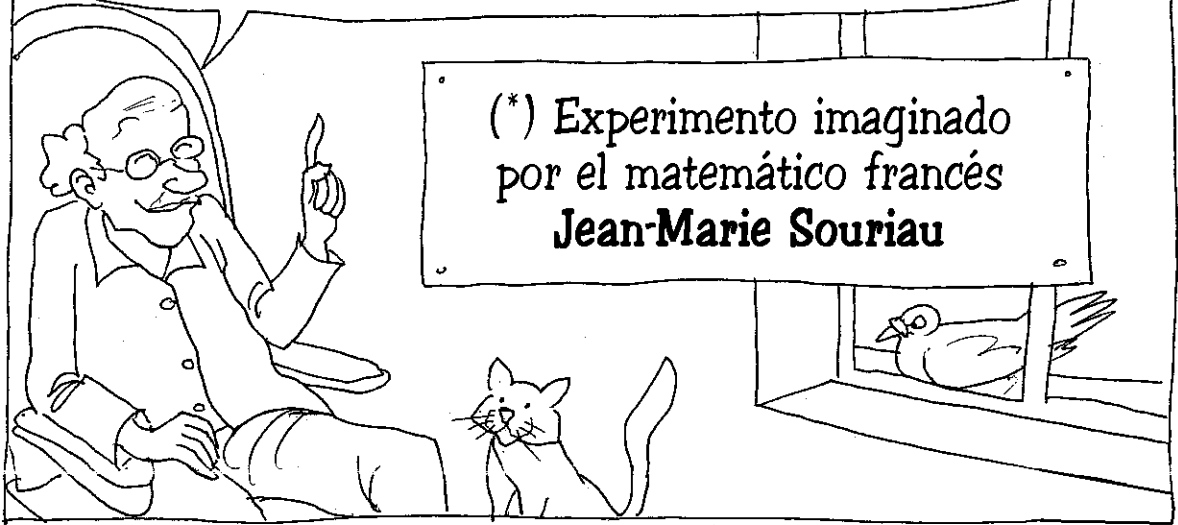
Que el tamaño de la letra no cambie ilustra el hecho de que la masa de una partícula de antimateria es la misma que aquella de la que está hecha su simétrica:

$$m = m$$



Todas las partículas: neutrón, mesones, quarks, etc... tienen sus antipartículas, sólo el **FOTÓN** es su propia antipartícula.

Volvamos a nuestro espaciotiempo. Les propongo un experimento muy fácil. Cambien de habitación en su casa, cierren las cortinas y esperen (\*)



(\*) Experimento imaginado por el matemático francés **Jean-Marie Souriau**

¡No pasa **NADA!**

Es el mismo caso de la calcomanía, pero ahora en 4d

Somos invariantes ante una translación espacio-temporal

¿Y qué pasa con las **ROTACIONES** en este espacio 4d?

Pasa lo mismo, pero es imposible de representar porque las "calcomanías 4d" son invariantes por rotaciones en un ángulo **IMAGINARIO PURO**, que constituyen el **GRUPO DE LORENTZ (\*)**

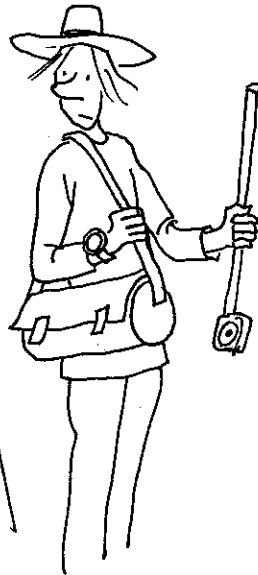
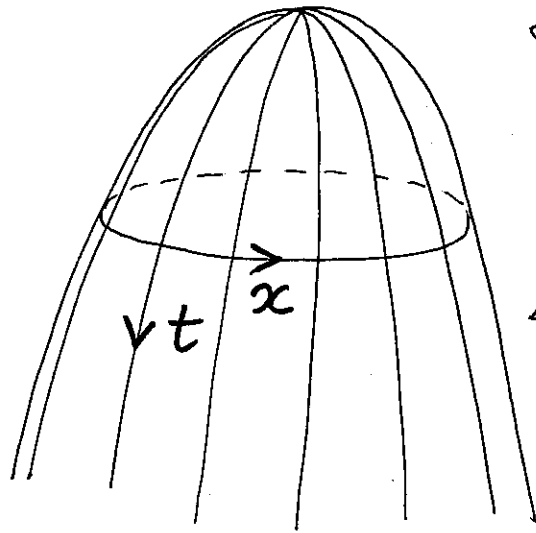
Puesto que la caja de herramientas del **FÍSICO** parece funcionar bastante bien en nuestro pequeño rincón espacio-temporal (si exceptuamos algunos aspectos de la astrofísica abordados en el álbum **EL UNIVERSO GEMELAR**), la tentación de considerar que los elementos de esta caja podían ser universales fue grande, y en particular que las constantes que figuraban en las ecuaciones podían ser **CONSTANTES ABSOLUTAS**

G c R m  
e a M<sub>0</sub>

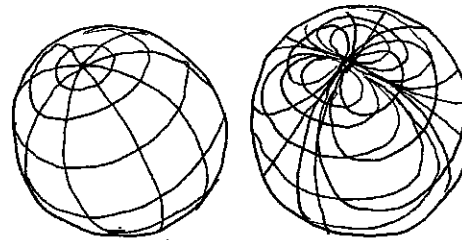
(\*) Esta propiedad de invariancia por rotaciones lorentzianas resume por sí misma todos los aspectos desconcertantes de la teoría de la **RELATIVIDAD ESPECIAL**.



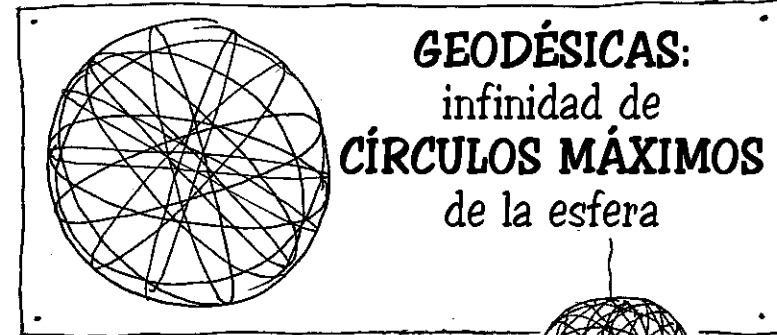
# BIG BANG



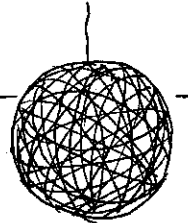
En la hipersuperficie que constituye la solución de la ecuación de EINSTEIN existen curvas particulares que siguen siendo las mismas independientemente del sistema de coordenadas escogido: son las **GEODÉSICAS**. Así mismo, la infinidad de geodésicas que se pueden inscribir sobre una esfera es independiente del sistema de coordenadas que sirve para ubicarlas en la superficie.



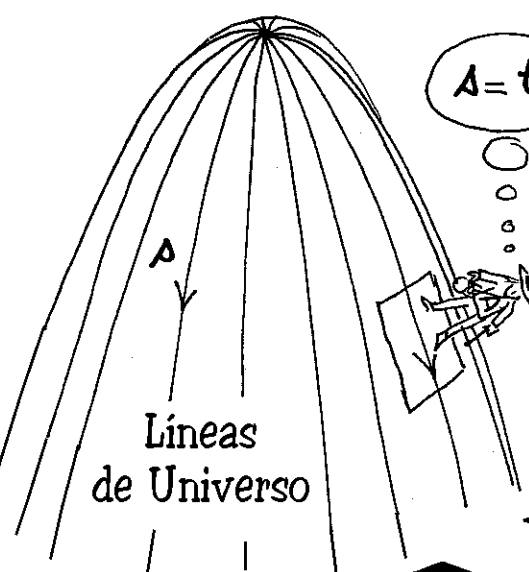
Conjuntos de coordenadas



**GEODÉSICAS:**  
infinidad de **CÍRCULOS MÁXIMOS** de la esfera

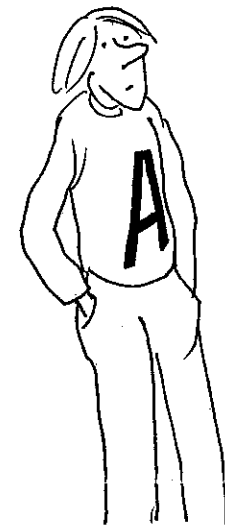


Lámpara formada por geodésicas

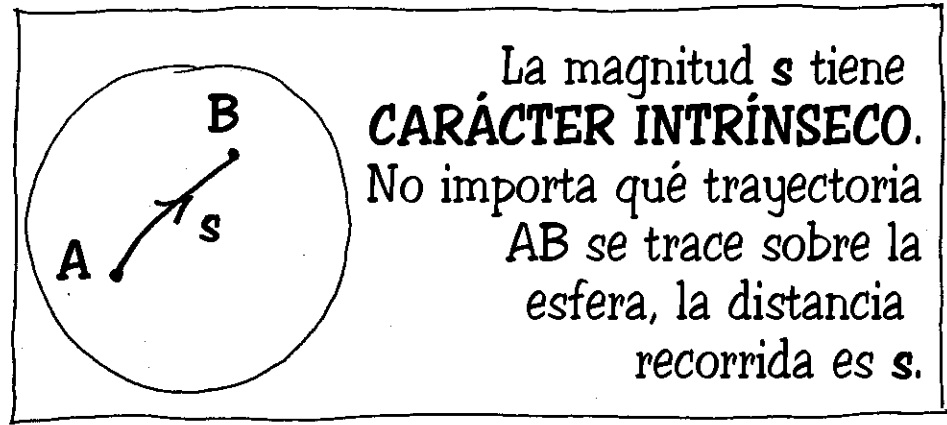
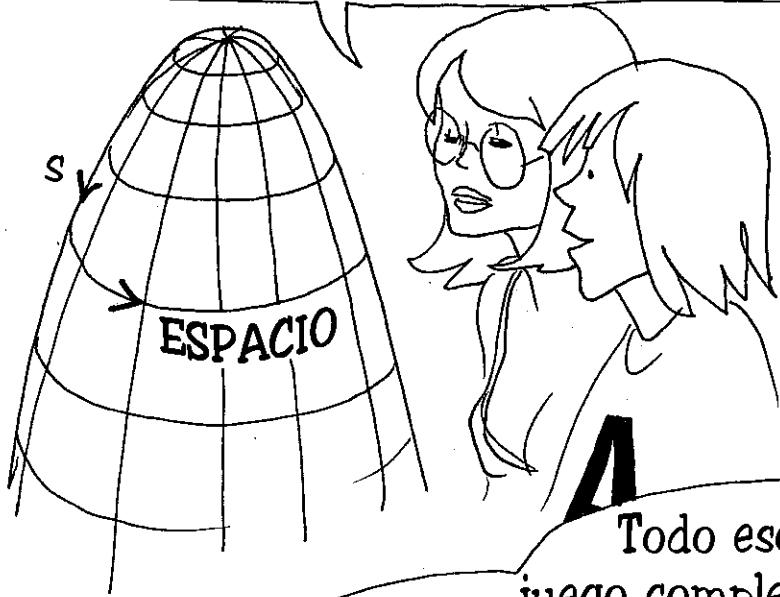


$A = t$

Se escoge una familia de geodésicas en la hipersuperficie, convergiendo hacia un punto. Se identifica la abscisa curvilínea  $s$ , medida a lo largo de dichas curvas, rebautizadas como **LÍNEAS DE UNIVERSO**, y se le identifica con un **TIEMPO CÓSMICO  $t$**

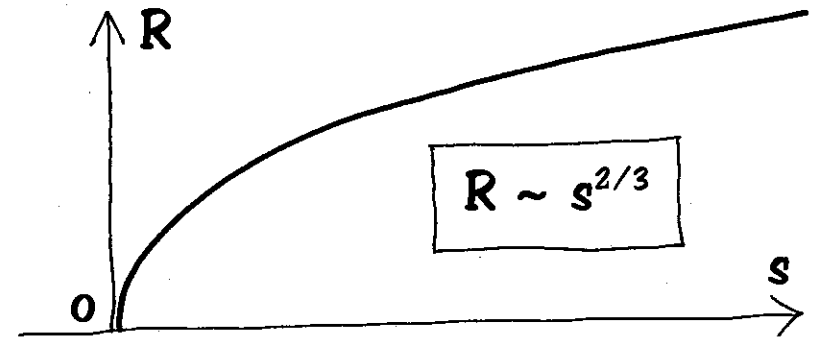


Perpendicularmente a esas líneas se halla, formada por puntos situados a la misma **ÉPOCA**  $s$ , una hipersuperficie de tres dimensiones que se identifica con el espacio de la **FÍSICA**, como se aprecia aquí



La magnitud  $s$  tiene **CARÁCTER INTRÍNSECO**. No importa qué trayectoria  $AB$  se trace sobre la esfera, la distancia recorrida es  $s$ .

El modelo cosmológico conocido como **MODELO ESTÁNDAR** es una solución.



Todo eso junto con el juego completo de ecuaciones con las cantidades  $G, c, m, e, \alpha, \mu_0$ , consideradas como **CONSTANTES ABSOLUTAS**. La identificación de  $s$  con el tiempo funcionó bien y dio nacimiento al modelo del **BIG BANG**



¿Y entonces?

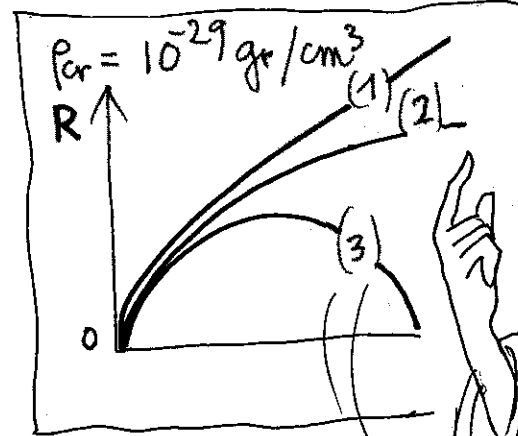


(\*) También se designa a esa elección como **COORDENADAS GAUSSIANAS**.

El **Modelo Estándar** tuvo su cuarto de hora, sus admiradores y sus sacerdotes. Se calculó incluso que el devenir lejano del Universo dependía de su actual densidad, según que ésta fuera menor, igual o mayor que un valor crítico igual a  $10^{-29} \text{ g/cm}^3$  (\*). El descubrimiento de que, al contrario, el universo aceleraba fue el fin de este modelo (ver **EL UNIVERSO GEMELAR**)



¿Entonces los hombres volvieron al pasado?



La **MECÁNICA CUÁNTICA** se declaró incapaz de describir fenómenos ocurridos en tiempos anteriores al

$$\text{tiempo de Planck } t_p = \sqrt{\frac{hG}{c^3}} = 10^{-43} \text{ seg.}$$

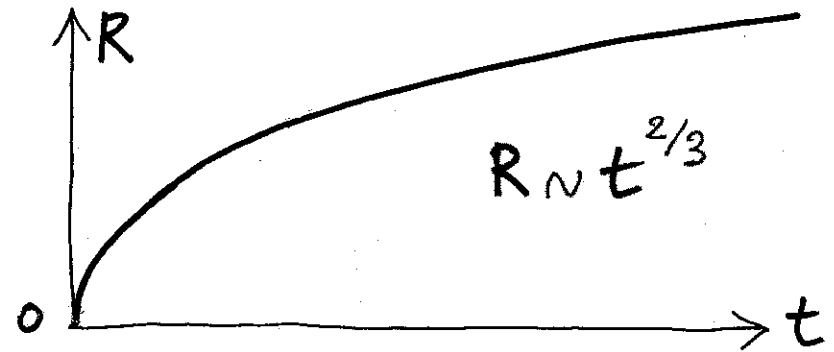
o en distancias inferiores a

$$\text{la longitud de Planck } L_p = \sqrt{\frac{hG}{c^5}} = 10^{-33} \text{ cm.}$$

(\*) Ver las últimas páginas de **EL GEOMETRICÓN** (1980).

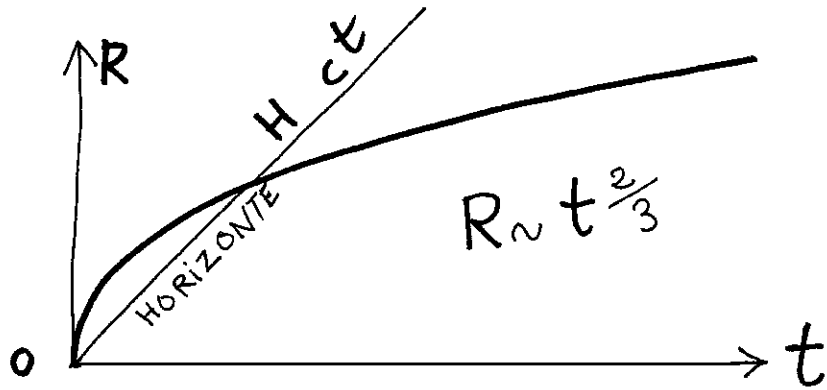
# LA BARRERA DE PLANCK

Puesto que nadie dudaba de que lo que funcionaba en el presente pudiera también ser válido en el pasado más lejano, se especuló fuertemente sobre la posible edad del Universo cuando  $t$  era inferior al tiempo de Planck, y eso sin tener en cuenta ni un sólo segundo que ello se basaba en la hipótesis de que  $G$ ,  $h$  y  $c$  eran **CONSTANTES ABSOLUTAS** no afectadas por la evolución cósmica



¡Presten atención a esto!  
¡Les puedo citar montones de artículos publicados por gente muy seria en los que muestran que si se toca alguna de esas constantes y se supone la menor variación de ellas a lo largo de la evolución, eso llevaría a contradicciones flagrantes frente a las observaciones!

# ¡CIRCULEN, NO HAY NADA QUE VER!

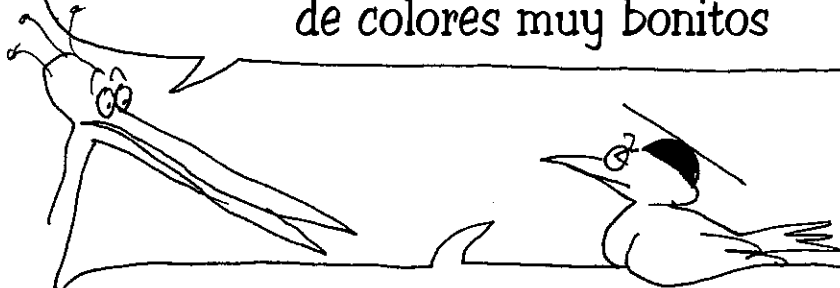


En 1992 el satélite **COBE**, al efectuar las primeras mediciones de la radiación primordial, la CMB (\*), la cual proporcionó una imagen del universo en sus primeros instantes, mostró que éste era homogéneo con un margen de error de cienmilésimas

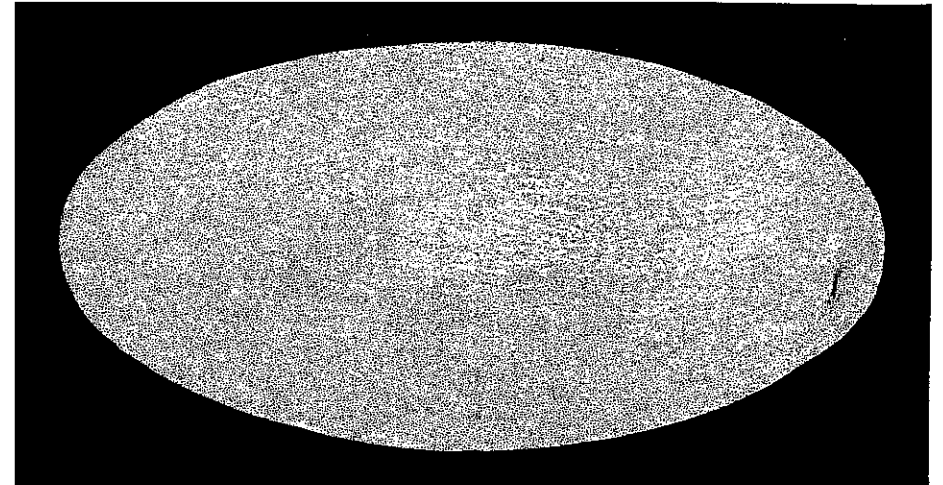


El Universo primitivo en exclusiva

No comprendo. En las revistas y en internet se muestran montones de inhomogeneidades de colores muy bonitos



Eso se debe al realce de las fotografías en ordenador. La verdadera foto es la que aparece aquí a la derecha



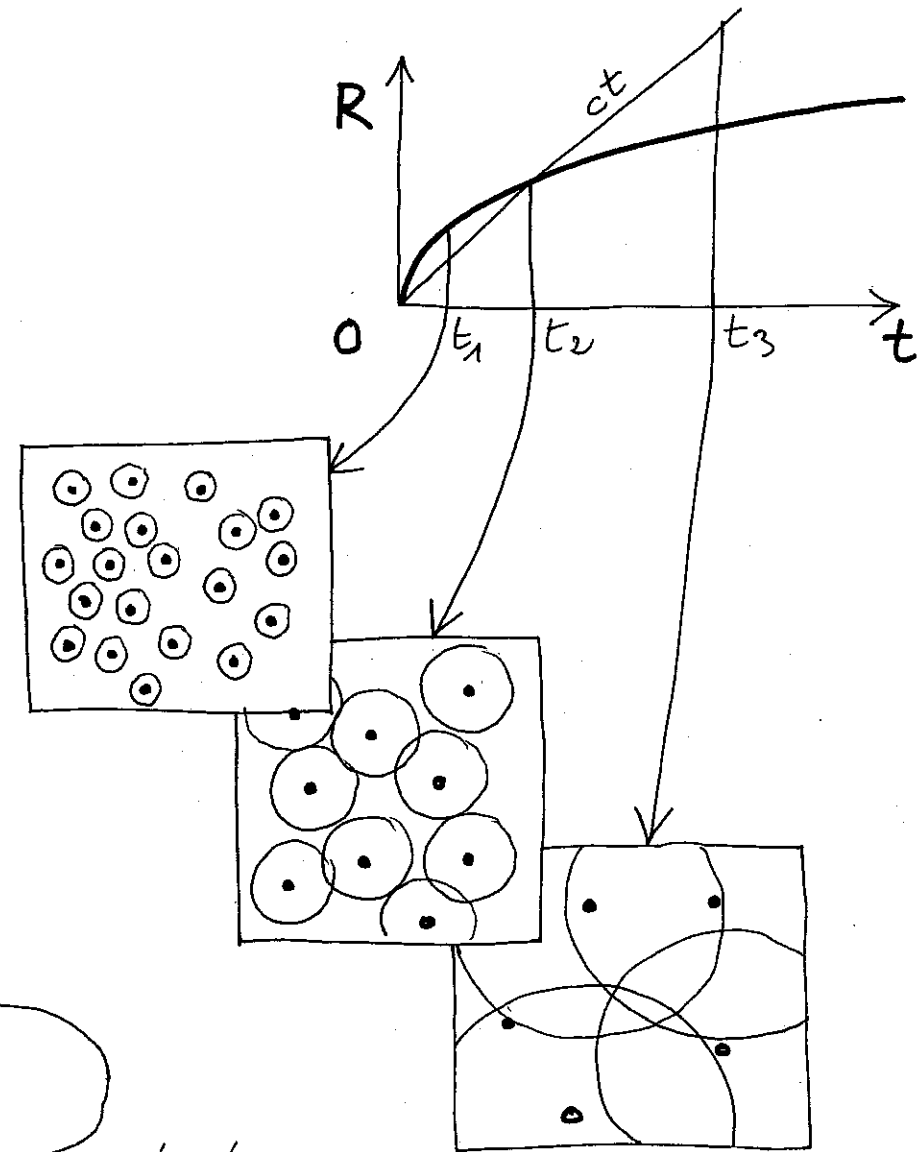
¡tal como realmente es!

(\*) Cosmic Microwave Background.

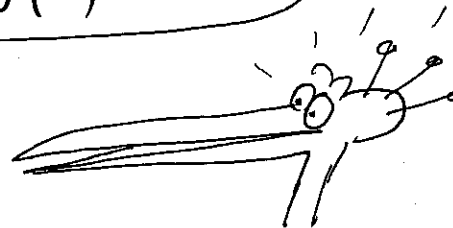
Esta fantástica homogeneidad constituye una paradoja inevitable. Si la velocidad de la luz es constante entonces una onda electromagnética (\*) emitida después del instante cero se propagará en una burbuja de radio  $ct$ , a la que llamamos **HORIZONTE COSMOLÓGICO**. Ahora bien, como muestra la curva de la página precedente, la distancia entre las partículas crece como  $R$ . Por lo tanto, en aquella época las partículas se alejaban a una velocidad mayor que  $c$ , ignorándose totalmente... Un universo autista. ¿Cómo explicar en esas condiciones que un universo en el cual las partículas no han interactuado jamás las unas con las otras presente tal grado de homogeneidad?

*La Dirección*

(\*) moviéndose a velocidad  $c$




Hay una forma: que la velocidad de la luz hubiese sido mayor en el pasado (\*\*)



(\*) Idea desarrollada por primera vez por el autor en 1988: "An interpretation of cosmological model with variable light velocity", *Mod. Phys. Lett. A*, vol. 3 no. 16, nov. 1988, p. 1527.

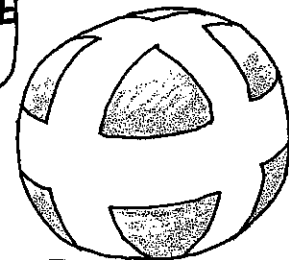
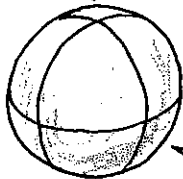
# RUPTURA DE SIMETRÍA



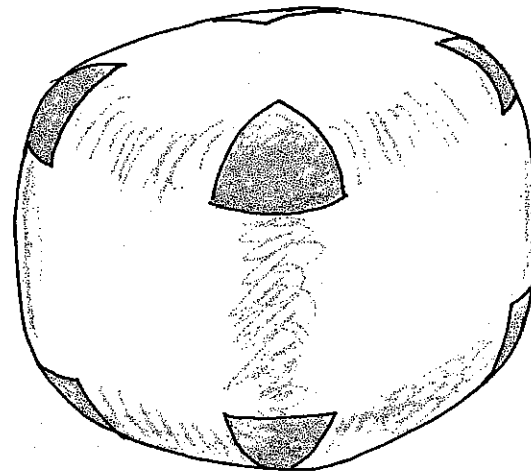
Si queremos hallar indicios de algo pienso que es necesario volver a la representación de Anselmo y retroceder en el tiempo. Habrá necesariamente un momento en el que las ocho esquinas redondas del cubo se junten para formar una esfera

RUPTURA DE  
SIMETRÍA

esfera



crac!



cubo en el que los ocho  
vértices son porciones  
de esfera no extensibles

Un objeto con la simetría del cubo posee un cierto número de planos de simetría y de ejes de simetría, de rotaciones discretas de  $\pi/2$ ,  $\pi$ ,  $3\pi/2$ . Una esfera posee un grado de simetría inconmensurablemente más elevado (\*) puesto que todo plano que pasa por su centro es un plano de simetría y puesto que la esfera es invariante ante una rotación en un ángulo cualquiera alrededor de cualquier eje que pase por su centro.

(\*) La simetría  $O(2)$ .

La idea del cubo de esquinas embotadas era ayudar a fijar las ideas, dando la imagen de un universo con ocho "cúmulos de materia" y conformado como un poliedro regular. También en dos dimensiones se puede imaginar una esfera que se rompa en un gran número de fragmentos rígidos, unidos por elementos extensibles de superficie euclidiana. De esta forma perdería por completo su simetría inicial y se produciría lo que se conoce como una **RUPTURA DE SIMETRÍA**. En física teórica un tal evento es sinónimo de cambios mayores, por ejemplo en la forma en que se produciría la expansión del Universo

Y a la inversa, cuando hay simetría es porque hay invariancia de algo. ¿Pero de qué?

En su célebre libro "Los tres primeros minutos" (\*) el premio Nobel Steven Weinberg dijo que, cuando se remonta uno muy lejos en el pasado y la radiación crea sin cesar pares de partículas y de antipartículas que se aniquilan, y las velocidades de agitación térmica de todas ellas alcanzan la velocidad de la luz, se puede considerar, retomando su frase, que **"EL UNIVERSO ESTÁ LLENO DE TODO TIPO DE RADIACIONES"**

¿Y?!?



(\*) Que inspiró al autor a escribir **BIG BANG** en 1982.



Siguiendo esta idea, cuando las partículas materiales (\*) llegaran a rozar la velocidad de la luz, se comportarían entonces como...  
**RADIACIÓN**, y por lo tanto...

... se volverían como el "gas de fotones": **COMPRESIBLES**

¡Esperen, no tan rápido! La longitud de onda  $\lambda_\phi$  de los fotones varía como  $R$ . Si lo que dicen es cierto, ¡entonces la **LONGITUD DE ONDA DE COMPTON**

$$\lambda_c = \frac{h}{mc}$$

que da a las partículas su "tamaño" variaría de la misma forma! ¡Y para eso haría falta que una de las constantes, digamos  $c$ , variara a su vez!!!

¿Pero por qué sólo **UNA** constante y no **TODAS** a la vez, ya que en eso estamos?

¡Esto se torna apasionante!

(\*) La antimateria posee una masa  $m$  y una energía  $mc^2$  positivas.



¡Bueno, hay momentos en los que hay que arriesgarse y echarse al agua!  
Voy entonces a permitir que **TODAS LAS CONSTANTES** de la física varíen conjuntamente, optando por las cuatro hipótesis siguientes:

- Todas las ecuaciones de la física deberán ser satisfechas
- Todas las longitudes características variarán como **R**
- Todos los tiempos característicos variarán como **t**
- Todas las energías, en todas las formas posibles, se conservarán



En **RELATIVIDAD GENERAL** se encuentra una longitud característica, el **RADIO DE SCHWARZSCHILD**  $R_s$

$$L_s = \frac{2Gm}{c^2} \quad \text{en donde} \quad \frac{Gm}{c} \sim R \quad (*)$$

**G** es la "constante de la Gravitación"

(\*) El signo  $\sim$  significa "varía como".

Siempre en el ámbito de la **RELATIVIDAD GENERAL**, la famosa ecuación de Einstein se escribe:

$$S = - \frac{8\pi G}{c^2} T$$

donde el fraccionario representa la **CONSTANTE DE EINSTEIN** (\*). Por razones matemáticas, ésta debe ser invariante, lo que da:

$$G \sim c^2$$

Combinando obtengo mi primera ley:

$$m \sim R$$

La masa **m** crece como la dimensión característica **R** del universo. ¿Por qué no...? Combinemos eso con mi hipótesis de conservación de la energía  $mc^2 = \text{CONSTANTE}$

$$c \sim \frac{1}{\sqrt{R}}$$

¡Ahí lo tienes, un modelo con la velocidad de la luz variable! Continuemos

Eso me da de paso una constante de la gravitación que varía como

$$G \sim \frac{1}{R}$$

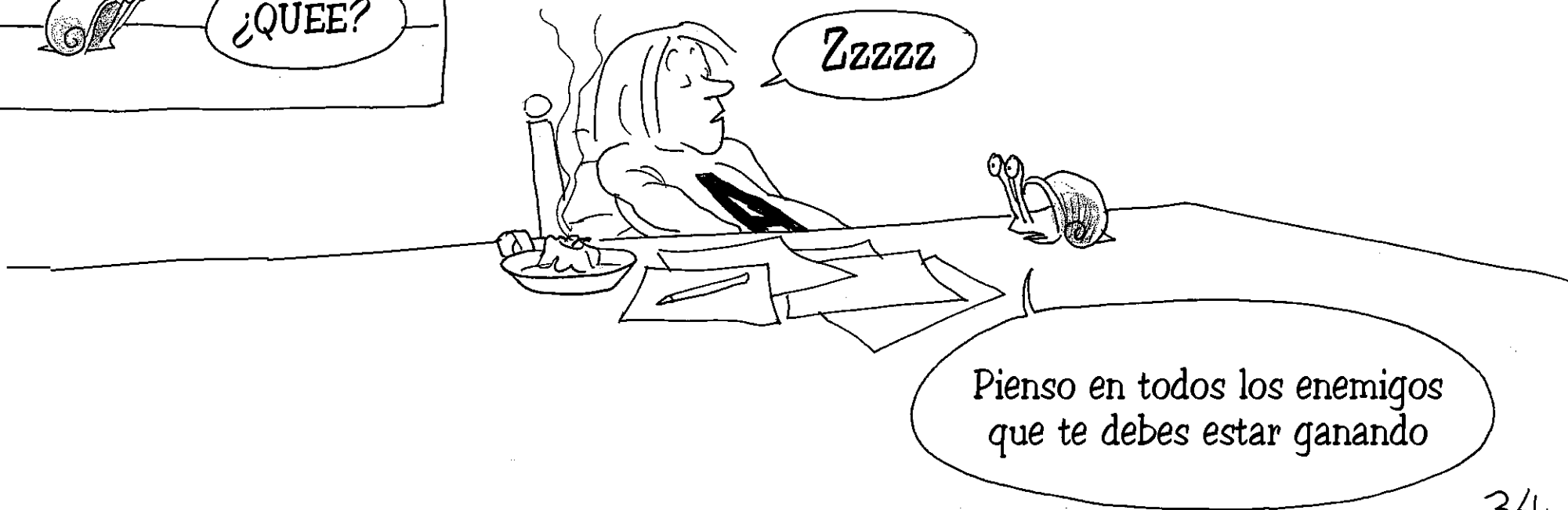
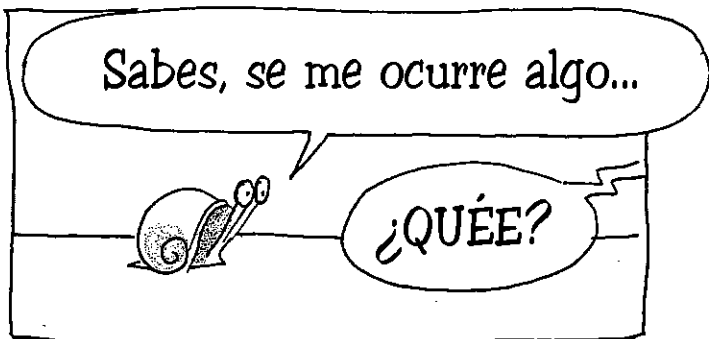
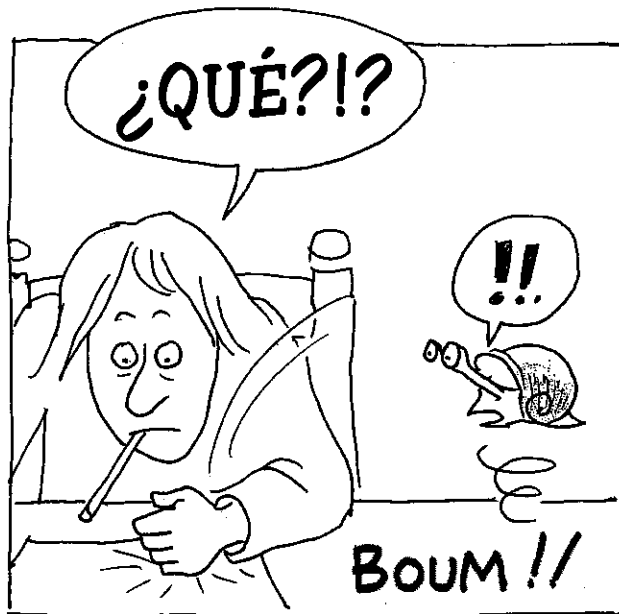
Ahora le añado a mi receta el hecho de que las partículas sean compresibles, es decir

$$\lambda_c = \frac{h}{mc} \sim R$$

Y obtengo una constante de Planck que evoluciona según

$$h \sim R^{3/2}$$

(\*) Que en obras recientes se escribe  $\chi = - \frac{8\pi G}{c^4}$ , debiéndose la diferencia a la manera en que se escriban los términos del tensor **T**.



# A LA MAÑANA SIGUIENTE

Bueno, todo eso suena muy bonito, pero yo preguntaría: ¿para qué sirve? Anselmo simplemente ha descubierto que las ecuaciones de la física, sin excepción (\*), son invariantes ante lo que se conoce como una **TRANSFORMACIÓN GAUGE** o de calibración

Ahora, recuerden una cosa: los instrumentos de medida y de observación están contruidos a partir de esas mismas ecuaciones

En conclusión = con ese sistema es esencialmente imposible concebir un experimento o un instrumento de observación que permita poner en evidencia la menor **VARIACIÓN**, dado que los instrumentos de medición o de observación "derivan paralelamente" a las cantidades que pretenden medir

¿Entonces todo lo que hice es inútil?

(\*) Para la invariancia de las ecuaciones de Maxwell, Schrödinger, etc. ... ver el Anexo.

Es un bonito ejercicio de matemática.  
¿Pero qué interés puede tener si no puedes medir nada? Es como tratar de poner en evidencia la elevación de temperatura de un recinto midiendo la dilatación de una tabla de hierro con una regla hecha de ese mismo metal



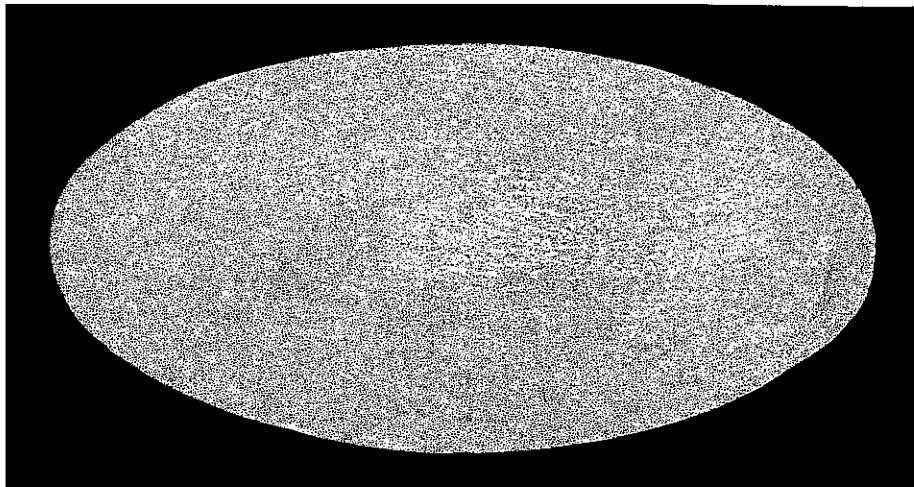
Je je

Espera un momento, hay algo que podemos OBSERVAR y que el modelo podría llegar a explicar

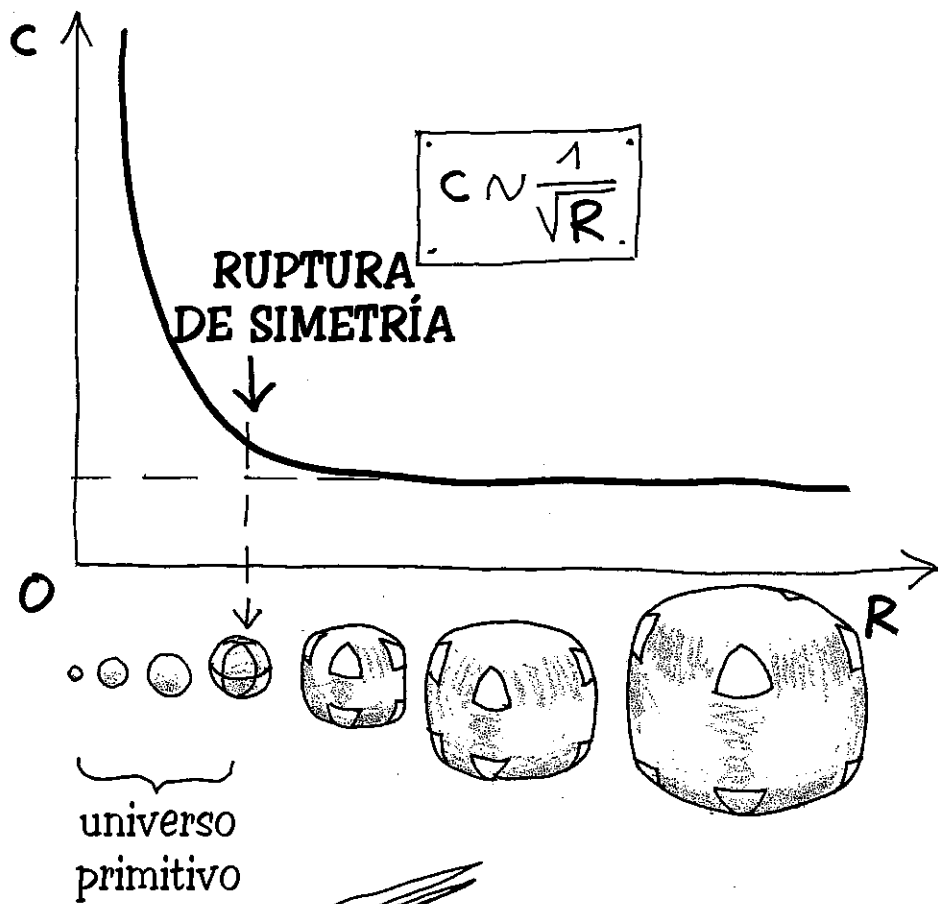


Ah sí,  
¿y qué es?

¡Esto!



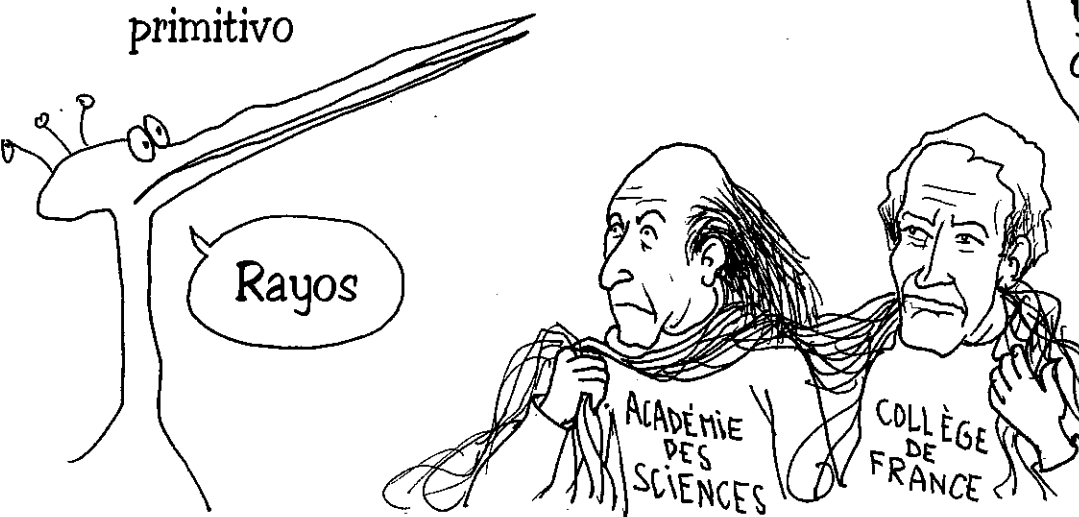
El Universo primitivo



$$\begin{array}{l}
 c \sim \frac{1}{\sqrt{R}} \quad G \sim \frac{1}{R} \quad h \sim R^{3/2} \\
 m \sim R \quad e \sim \sqrt{R} \quad \epsilon_0 = \text{const} \\
 \alpha = \text{const} \quad \mu_0 \sim R \quad (*) \\
 (\text{ver Anexo})
 \end{array}$$



En el modelo de Anselmo (\*) la velocidad de la luz es variable cuando el universo se encuentra en su estado primitivo, antes de la **RUPTURA DE SIMETRÍA**. En ese caso el **HORIZONTE COSMOLÓGICO** ya no es más  $ct$ , con  $c$  constante, sino que se calcula con la ayuda de una **INTEGRAL** (ver el Anexo), y se encuentra que dicho horizonte... varía como  $R$ , lo que justifica la **HOMOGENEIDAD** del universo en todas esas épocas pasadas



No dejen que sus **SUPERCUERDAS** se arrastren y enreden así, se van a tropezar con ellas

(\*) Publicado por el autor en revistas de alto nivel con "comité de evaluación" en 1988-89, 1995 y 2001, en la más completa indiferencia.



(\*) "¡Les aseguro que funciona!"

**FiN**



# ANEXO

Primero calculemos el **HORIZONTE COSMOLÓGICO**.

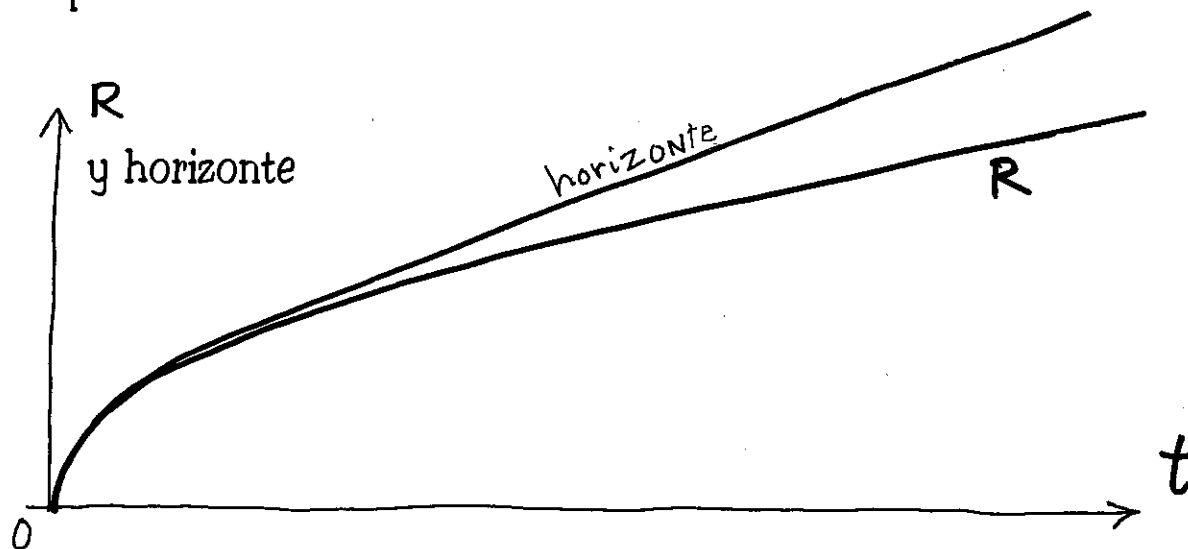
Cuando la velocidad de la luz no varía, este horizonte es simplemente  $H = ct$

En el universo joven esta velocidad varía como:  $c \sim \frac{1}{\sqrt{R}}$

El horizonte se expresa entonces como una integral:  $H = \int_0^{t(\text{presente})} c(t) dt \sim \int_0^{t(\text{presente})} \frac{dt}{\sqrt{R}}$

Pero  $t \sim R^{3/2} \Rightarrow dt \sim \sqrt{R} dR \Rightarrow \text{horizonte} \sim \int_0^{R(\text{presente})} dR = R$  horizonte  $\sim R$

Para resumir, esquemáticamente:



# RELACIÓN FUNDAMENTAL DE INVARIANCIA DE CALIBRACIÓN

Todas las ecuaciones de la física son invariantes ante transformaciones de calibración en las cuales no sólo son variables las magnitudes de espacio y de tiempo, sino también las "constantes" que en ellas figuran. Al volver las ecuaciones adimensionales aparecen relaciones de calibración. Tomemos como ejemplo las ecuaciones de Maxwell:

$$\boxed{\nabla \times B = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial E}{\partial t}} \quad \boxed{\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}} \quad \boxed{\nabla \cdot B = 0} \quad \boxed{\nabla \cdot E = \frac{\rho_e}{\epsilon_0}}$$

Apliquemos este método de "adimensionalización" generalizada :

$$B = \mathbf{B} \beta ; \quad E = \mathbf{E} \epsilon ; \quad c = \mathbf{c} \xi ; \quad t = \mathbf{t} \tau ; \quad \frac{\partial}{\partial t} = \frac{1}{\mathbf{t}} \frac{\partial}{\partial \tau}$$

$$\nabla = \begin{cases} \frac{\partial}{\partial x_1} = \frac{1}{\mathbf{R}} \frac{\partial}{\partial \xi_1} \\ \frac{\partial}{\partial x_2} = \frac{1}{\mathbf{R}} \frac{\partial}{\partial \xi_2} \\ \frac{\partial}{\partial x_3} = \frac{1}{\mathbf{R}} \frac{\partial}{\partial \xi_3} \end{cases} \quad \text{donde } \delta = \begin{cases} \frac{\partial}{\partial \xi_1} \\ \frac{\partial}{\partial \xi_2} \\ \frac{\partial}{\partial \xi_3} \end{cases} \quad \left| \begin{aligned} \frac{\mathbf{B}}{\mathbf{R}} \delta \times \beta &= -\frac{\mathbf{E}}{\mathbf{c}^2 \mathbf{t}} \frac{\partial \epsilon}{\xi^2 \partial \tau} \\ \frac{\mathbf{E}}{\mathbf{R}} \delta \times \epsilon &= -\frac{\mathbf{B}}{\mathbf{t}} \frac{\partial \beta}{\partial \tau} \end{aligned} \right.$$

Combinando esas dos relaciones se obtiene:  $\Rightarrow$

$$\boxed{R = c t}$$

lo que está de acuerdo con las relaciones obtenidas anteriormente.

Introduzcamos el **radio de Bohr**, que varía como el factor de escala **R** :

$$R_b = \frac{\hbar^2}{m_e e^2} \sim R ; m_e \sim m \sim R ; e \sim \frac{\hbar}{R} ; \hbar \sim R^{3/2} \rightarrow \boxed{e \sim \sqrt{R}}$$

La constante de estructura fina  $\alpha$  determina la geometría de los átomos. Considerémosla como constante absoluta:

$$\alpha = \frac{e}{\epsilon_0 \hbar c} = \text{cst} \Rightarrow \boxed{\epsilon_0 = \text{constante}}$$

$$\epsilon_0 \text{ y } \mu_0 \text{ están ligadas por : } c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \text{ de donde : } \boxed{\mu_0 \sim R}$$

Hemos hecho la hipótesis de que todas las formas de energía se conservan. Una presión es una densidad de energía por unidad de volumen, de donde :

$$E_{\text{magnet}} = R^3 \frac{B^2}{2\mu_0} = \text{cst} \Rightarrow \boxed{B \sim \frac{1}{R}}$$

$$E_{\text{electr}} = R^3 \epsilon_0 E^2 = \text{cst} \Rightarrow \boxed{E \sim \frac{1}{R^{3/2}}}$$

$$\Rightarrow \frac{E}{B} = \frac{1}{\sqrt{R}}$$

Lo que está de acuerdo con lo que obtuvimos para las ecuaciones de Maxwell :  $\frac{E}{B} \sim \frac{R}{t} \sim \frac{1}{\sqrt{R}}$

¿Cómo varían las **velocidades**?

La energía cinética es:  $\frac{1}{2} m V^2$ . Si se conserva, entonces

$$V \sim \frac{1}{\sqrt{R}} \sim C$$

Pasemos a la **masa volúmica**  $\rho = n m$

Si se supone que hay conservación de especies, se tiene:  $n R^3 = \text{cst}$

$$\rho \sim \frac{1}{R^3}$$

Examinemos cómo se comporta la **longitud de Jeans**, longitud característica asociada con el fenómeno de inestabilidad gravitacional:

$$L_J = \frac{V}{\sqrt{4\pi G \rho m}} \quad \text{resulta: } L_J \sim R$$

De la misma forma se encuentra que el tiempo de Jeans obedece a:  $t_J = \frac{1}{\sqrt{4\pi G \rho}} \sim t$

Cualquiera que sea el dominio de la física al que se aplica este método, volvemos siempre a nuestras hipótesis fundamentales. Por ejemplo, se encuentra que las secciones eficaces de colisión varían como  $R^2$ , la distancia de Debye varía como  $R$ , y así sucesivamente...

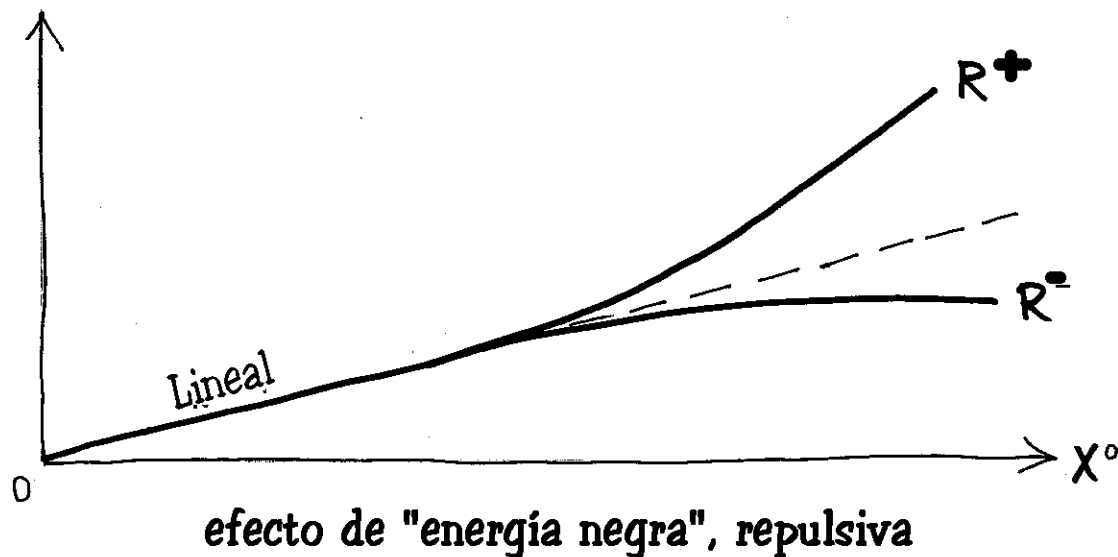
Para terminar este trabajo debemos ver de qué manera se puede establecer un puente con nuestro modelo cosmológico bimétrico, descrito en el álbum:

**EL UNIVERSO GEMELAR**

Este modelo hace aparecer dos factores de escala  $R^+$  y  $R^-$ . Poniendo a funcionar (no se procede de otra forma, en cosmología) las hipótesis de isotropía y homogeneidad en las dos poblaciones de masas, hemos buscado "soluciones conjuntas" en la métrica de Robertson-Walker, las cuales nos han llevado al siguiente sistema de dos ecuaciones diferenciales acopladas :

$$\begin{cases} R^{+''} = \frac{1}{R^{+2}} \left[ \frac{R^{+3}}{R^{-3}} - 1 \right] \\ R^{-''} = \frac{1}{R^{-2}} \left[ \frac{R^{-3}}{R^{+3}} - 1 \right] \end{cases}$$

El comienzo de esta expansión, con  $R^+ = R^-$ , es lineal. Siendo esta solución inestable, una de las dos poblaciones va a ver acelerada su expansión. Es nuestro caso, y hemos visto que el modelo daba cuenta del



# INVARIANCIA DE LORENTZ

En el universo primitivo, la ley de evolución es lineal :  $R^+ = R^- \sim X^0$

Las métricas de Robertson-Walker, bajo la hipótesis de que el índice de curvatura es nulo ( $k = 0$ ), tienen la forma común :

$$d\Delta^2 = dX^{02} - R^2 [du^2 + u^2 d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2]$$

En coordenadas cartesianas :

$$d\Delta^2 = dX^{02} - dx^2 - dy^2 - dz^2$$

Este espacio es localmente invariante bajo la acción del grupo de Lorentz.

Para hacer aparecer el vínculo con el modelo de velocidad de la luz variable, escribimos :

$$X^0 \sim R ; dX^0 \sim dR \sim t^{-\frac{1}{3}} dt \sim \frac{dt}{\sqrt{R}} \sim c(t) dt$$

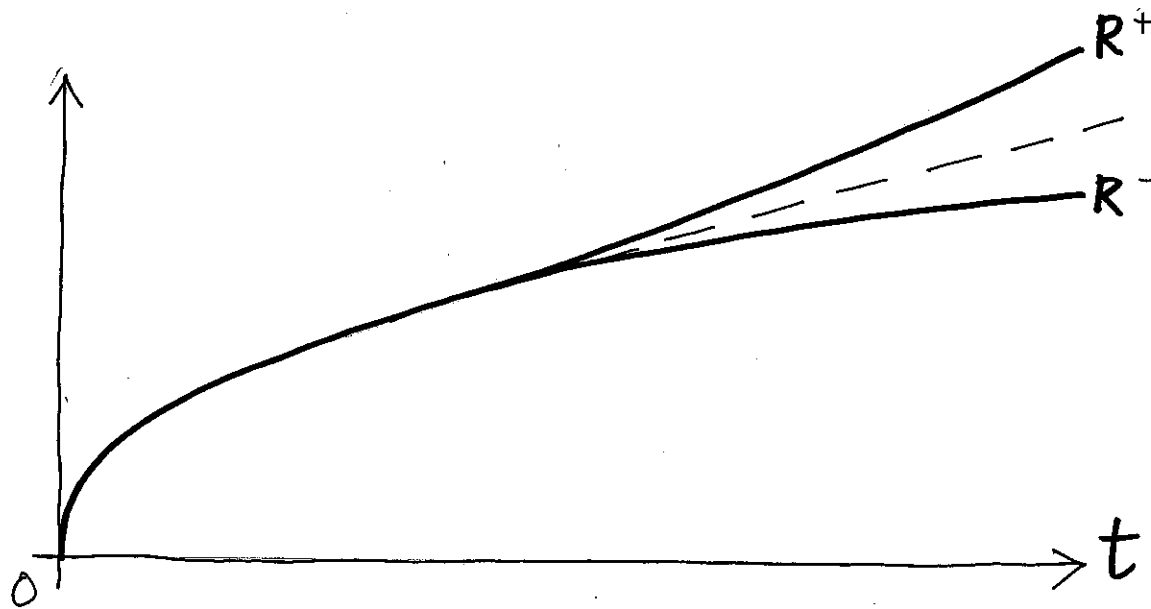
Sea la relación general que nos permite pasar de la variable cronológica  $X^0$  al tiempo :  $dX^0 = c(t) dt$

Antes de la ruptura de simetría tenemos :  $dX^0 \sim t^{-\frac{1}{3}} dt \Rightarrow X^0 \sim t^{\frac{2}{3}}$

Después de la ruptura de simetría, cuando  $c$  se comporta como una constante absoluta, se tiene  $X^0 = ct$

# EVOLUCIÓN

Esto nos permite representar la evolución conjunta de las dos entidades cósmicas en función del tiempo, tal como lo acabamos de definir.

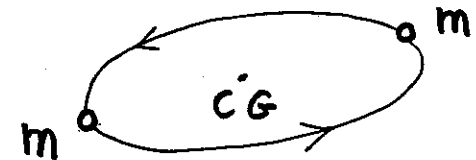


# LA PARADOJA DE ZENÓN

¿Habremos dominado la definición de este objeto inaferrable al que denominamos "tiempo"?

Eso sería presuntuoso de nuestra parte. A lo sumo, hemos negociado la paradoja de la homogeneidad del universo primitivo con algo que parece menos costoso en términos de hipótesis que la teoría de la **INFLACIÓN**.

Pero el experimento mental que sigue nos demostrará que aún tendremos que hacer frente a muchas dificultades. Consideremos una especie de reloj elemental constituido por dos masas que orbitan alrededor de su centro de gravedad común. Vamos a calcular, suponiendo que este reloj es tan "compresible" como el resto del universo primitivo, y que logra atravesar las turbulencias cósmicas sin dificultad, cuantas vueltas ha dado desde el "instante cero":



Su periodo de rotación es :  $\tau = \frac{2\pi r^{3/2}}{Gm}$        $Gm = Cst$        $r \sim R$        $\tau \sim t \sim R^{3/2}$

Y el resultado es :  $N = \int_0^{R_0} \frac{dR}{R^{3/2}} = \left[ \frac{1}{\sqrt{R}} \right]_0^{R_0} = \text{infinito!}$

Francamente, admiro a las personas que reflexionan seriamente sobre el "instante cero" y llegan hasta preguntarse "cómo era antes"

