

Savoir sans Frontières

BIG BANG

JEAN-PIERRE PETIT



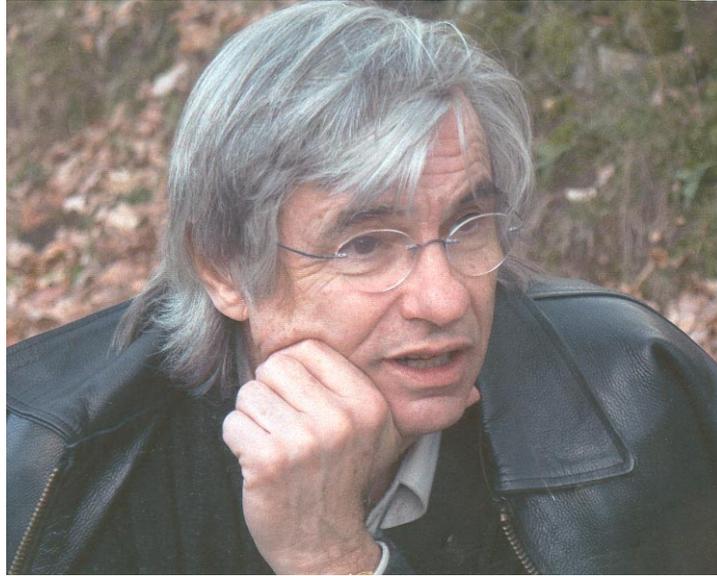
Traducción:
Juan Carlos Anduckia

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

Saber sin Fronteras

Association Loi de 1901

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



Jean-Pierre Petit, presidente de la Asociación

Antiguo director de investigaciones del CNRS, astrofísico y creador de un nuevo género : la Historieta Científica. Creada en el año 2005 junto con su amigo Gilles d'Agostini, la asociación Saber sin Fronteras tiene como finalidad distribuir gratuitamente el saber científico y técnico por todo el mundo. La asociación funciona gracias a donaciones y retribuye a sus traductores con 150 euros por cada historieta traducida (en el 2007), asumiendo además los cargos bancarios de las transferencias. Numerosos traductores en todo el mundo contribuyen a aumentar diariamente el número de álbumes traducidos, los cuales ascienden en el 2007 a 200 y son telecargables de manera gratuita en 28 idiomas, incluyendo el Laostaní y el Ruandés.

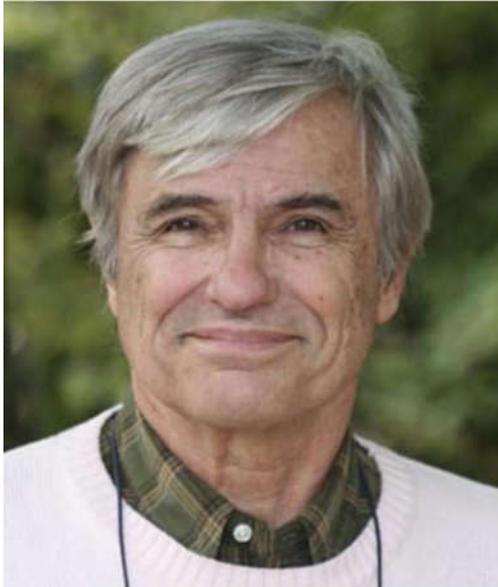
El presente archivo pdf puede ser duplicado y reproducido sin restricciones, parcial o totalmente, y utilizado por los profesores en sus cursos a condición de que lo hagan sin ánimo de lucro. Puede ser depositado en bibliotecas municipales, escolares y universitarias, tanto en forma impresa como en redes de tipo Intranet.

El autor tiene previsto completar la presente colección de historietas con álbumes más elementales, para chicos de 12 años. Igualmente están en proceso de elaboración álbumes « hablantes » para analfabetas, así como álbumes bilingües para el aprendizaje de idiomas a partir de las lenguas de origen.

La asociación está buscando continuamente nuevos traductores que puedan traducir las obras a su propia lengua materna y que posean las competencias técnicas que los habiliten para realizar buenas traducciones de los álbumes que emprenden.

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>



PRÓLOGO

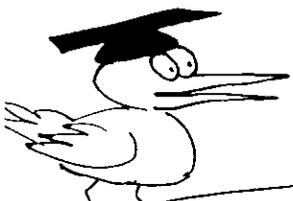


Sabes, Sofía, a menudo me pregunto de dónde vienen las cosas y cómo se originó el Universo...

¿Ha sido TODO siempre tal como es ahora? La Tierra, el cielo...

¿Ha sido el cielo siempre azul?

¿Y han brillado siempre las estrellas en el fondo de un cielo negro?



En el **COMIENZO DE TODO**, nuestro Universo era muy pequeño y muy caliente: un infierno minúsculo

¿Y todo explotó?



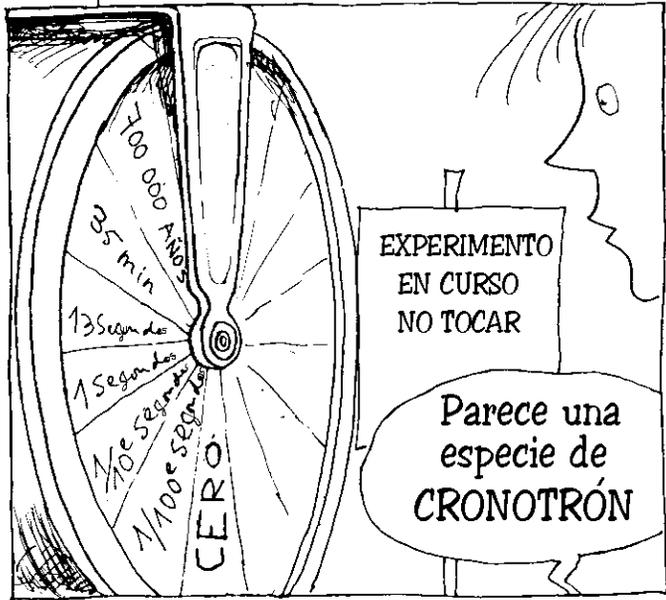
Si, pero esa es una larga historia. Para contarla hay que remontarse mucho pero mucho tiempo atrás



¡Ey, vengan a ver!



¿De qué se trata este truco?



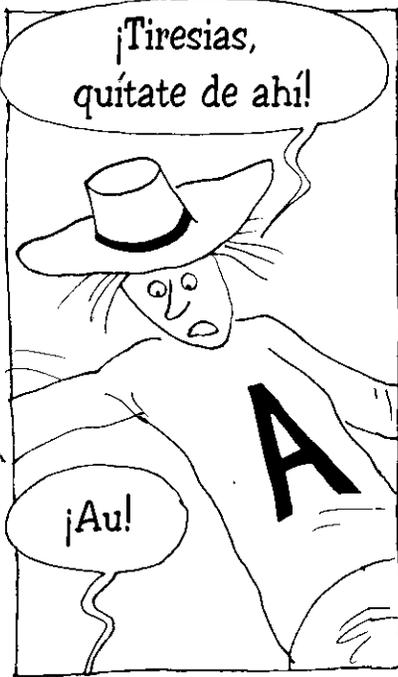
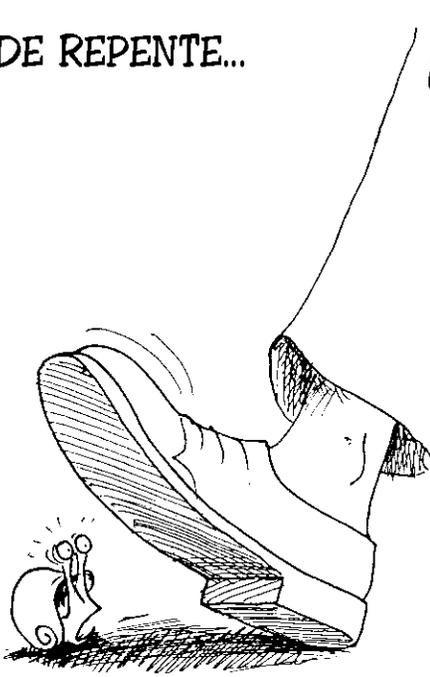
EXPERIMENTO EN CURSO NO TOCAR

Parece una especie de CRONOTRÓN



Y esas graduaciones... ¿no les parecen extrañas?

DE REPENTE...



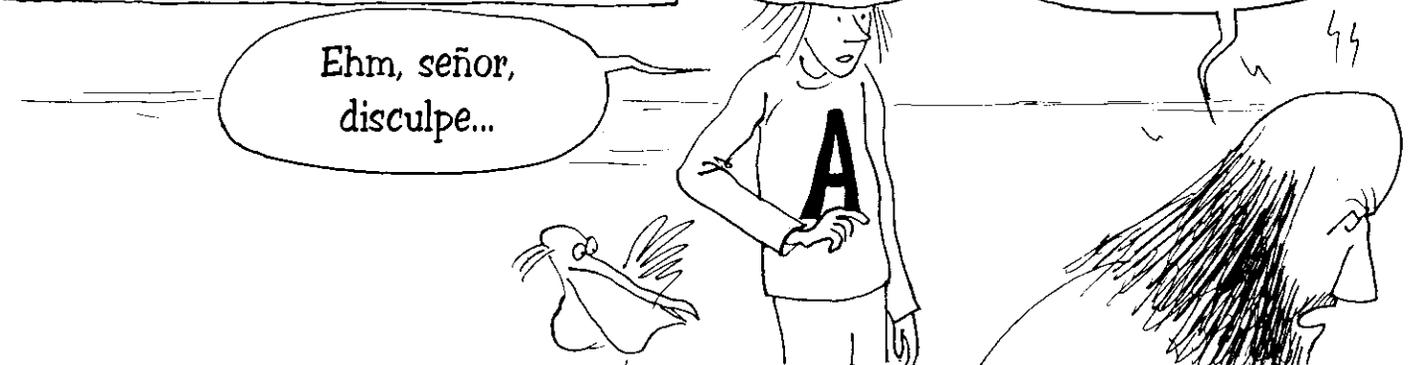
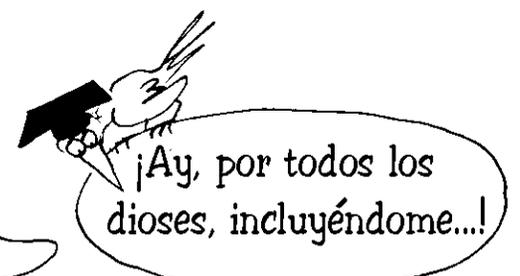
¡Tiresias, quitate de ahí!

¡Au!



KLONG!

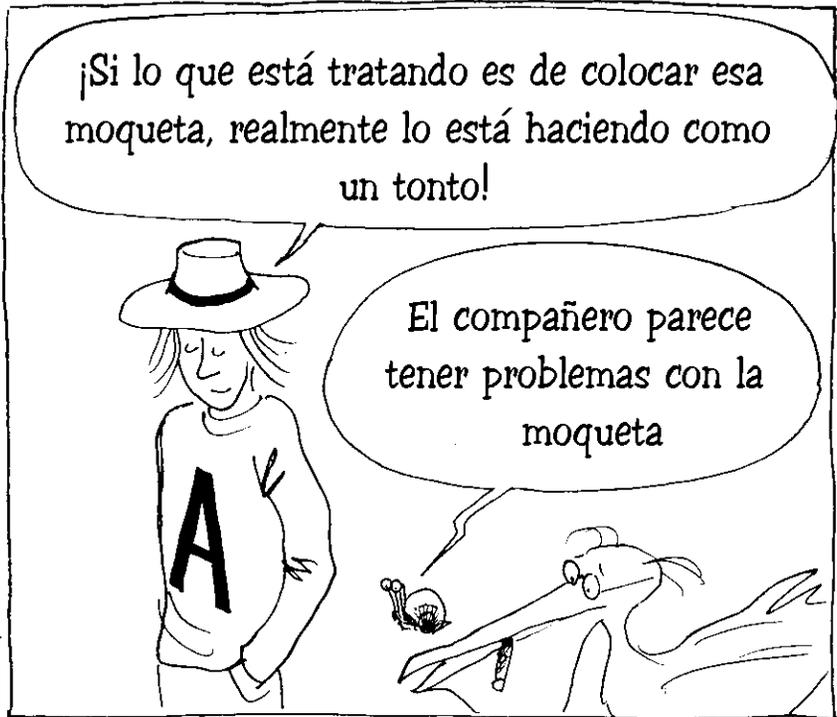
EL COMIENZO DE TODO





¡Rayos, otra vez no funciona!

¡Parece que no es así...!



¡Si lo que está tratando es de colocar esa moqueta, realmente lo está haciendo como un tonto!

El compañero parece tener problemas con la moqueta

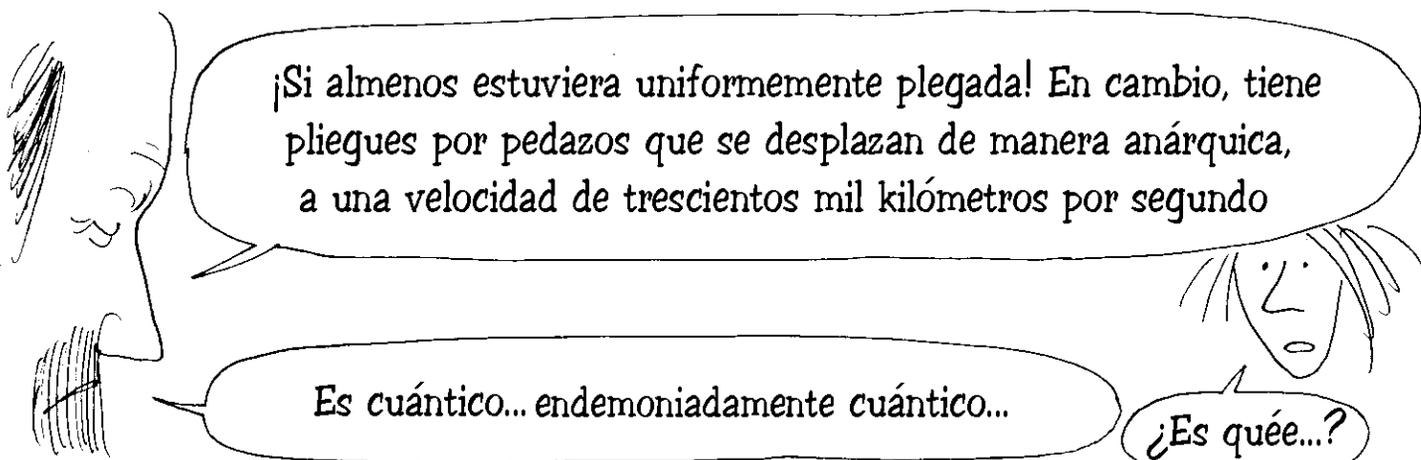


¡Qué desastre... pliegues por todos lados!



Es normal que se le formen arrugas: ha intentado Usted poner demasiada. Así la moqueta se comprime...

Tsss... si no estuviera comprimida, no habría energía: habría sólo espacio...



¡Si al menos estuviera uniformemente plegada! En cambio, tiene pliegues por pedazos que se desplazan de manera anárquica, a una velocidad de trescientos mil kilómetros por segundo

Es cuántico... endemoniadamente cuántico...

¿Es quéé...?



¡No parece haber grandes cosas en este universo!

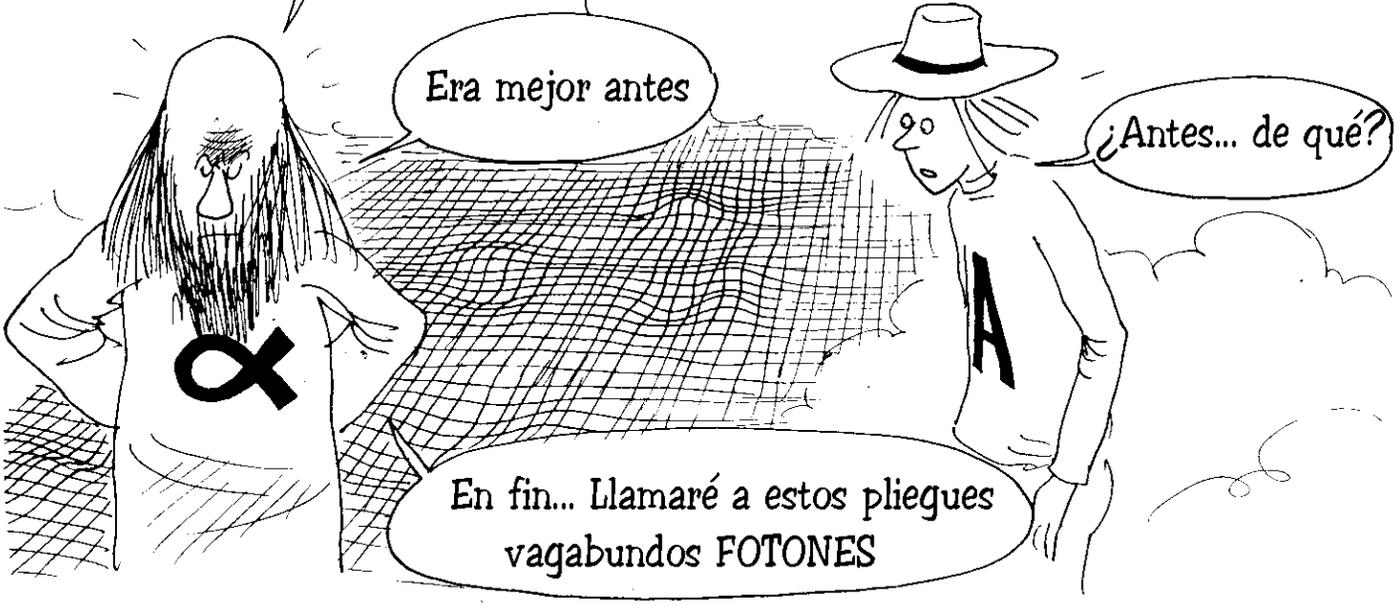
¡Sí que las hay!
Son estas especies de ondulaciones errabundas

Este universo solo tiene dos dimensiones, por lo tanto es una SUPERFICIE en la que los relieves representan partículas, masas y radiaciones. Si pertenecieras a este universo bidimensional, así es como te verías



No es bello, no es para nada bello...

En nuestro mundo tridimensional, las partículas también son variaciones locales de la curvatura

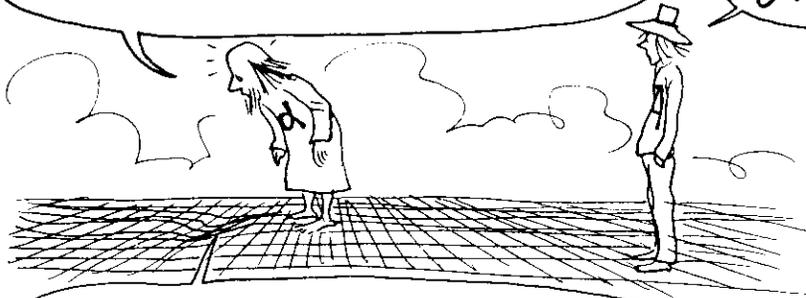


Era mejor antes

¿Antes... de qué?

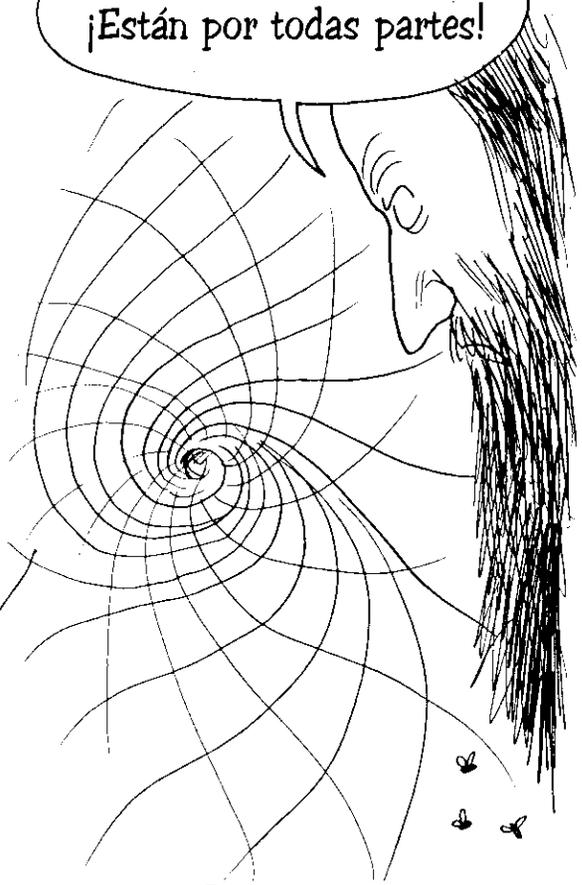
En fin... Llamaré a estos pliegues vagabundos FOTONES

¡En nombre de todos los dioses,
incluyéndome! Mira lo que pasa ahora...



¿Qué?

¡Mira!
¡Están por todas partes!



¡Esta cosa no solo flocula, sino que
además es turbulenta! ¡Qué linda obra...!

Se asemejan a pequeños remolinos,
como cuando se agita una sábana
de esta forma



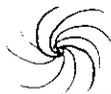
Es curioso. Unos giran en un
sentido, y otros en sentido contrario

Y como sus fotones, se mueven a
300.000 Km /seg

A esos remolinos andariegos los llamaré
NEUTRINOS, cuando giren
así:

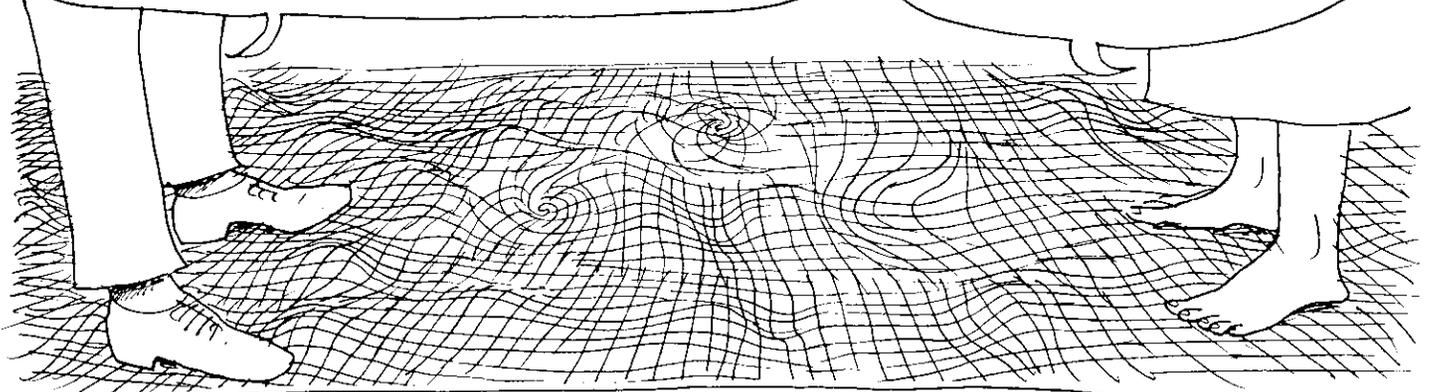


Y **ANTINEUTRINOS**, cuando giren en sentido
contrario:



Se ve tremendamente agitado. No hay ni una sola parte plana en la moqueta. Los pliegues literalmente están los unos junto a los otros (*)

Este universo es muy, muy inestable. ¡Un fiasco total...!

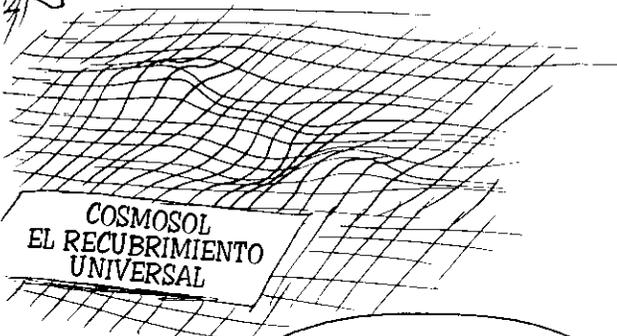


¡Si al menos hubiera algo de orden en todo esto!
Pero no, es un caos. ¡Todo está distribuido al azar!

¡Y aborrezco los juegos de azar!

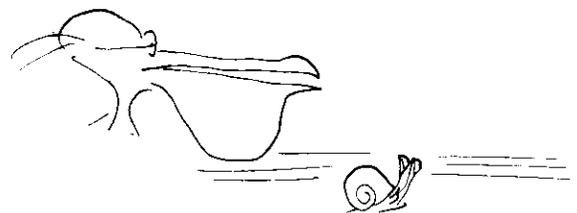
¡El azar, mi querido amigo, es el demonio!

Ah...

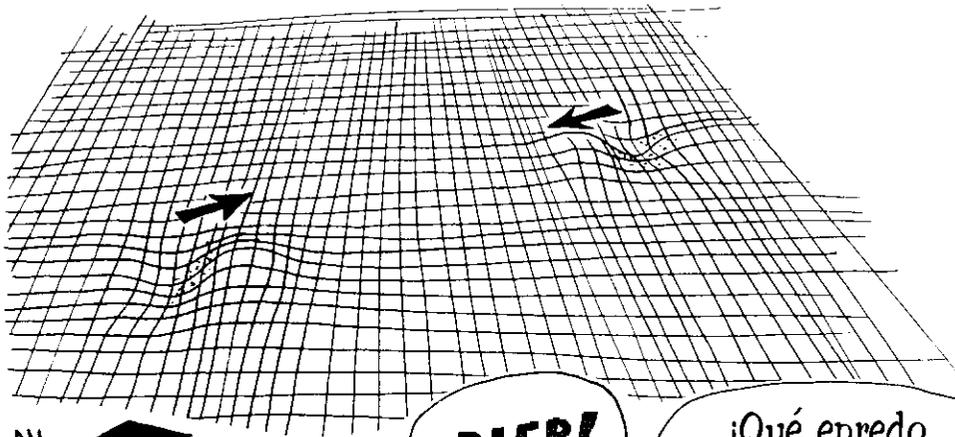


Ni juego a los dados...

¡Oh, miren! Parece que pasa algo allá abajo...

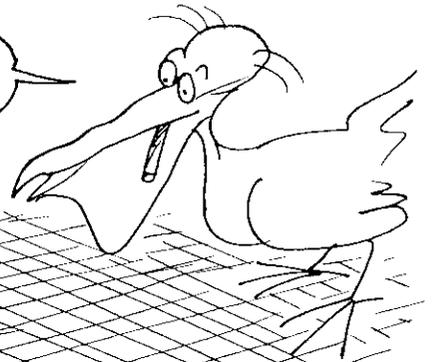
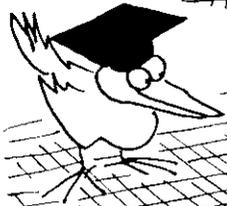


Dos pliegues que se desplazan van al encuentro el uno del otro y a chocar

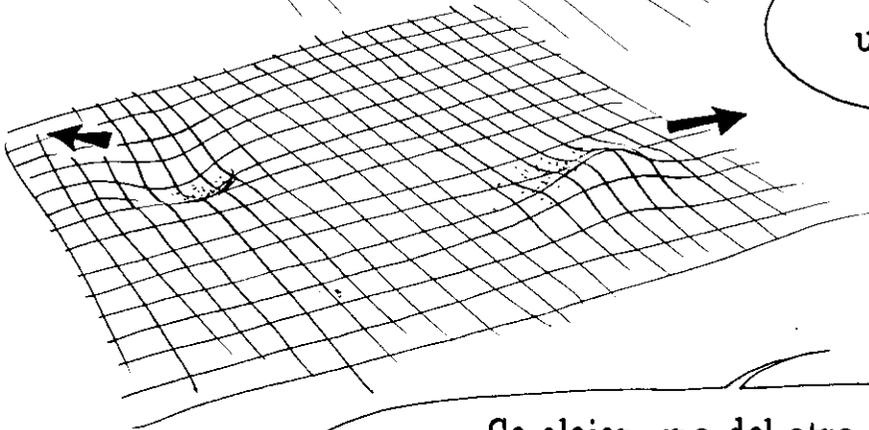


BLEB!

¡Qué enredo, mis amigos!

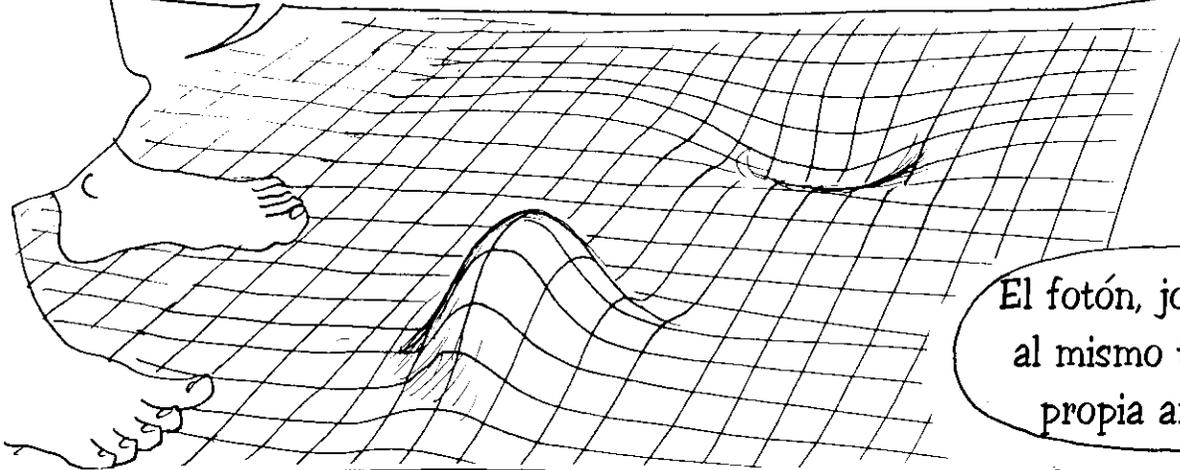


Y ahora se forman chichones: uno hacia abajo y el otro hacia arriba



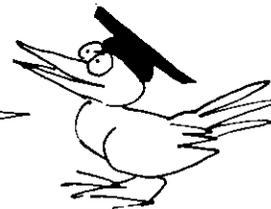
Se alejan uno del otro a una velocidad cercana a los 300.000 km/segundo

Bien. Llamaré a las jorobas MATERIA, y ANTIMATERIA a los huecos. Existe una CURVATURA, y por lo tanto MASA

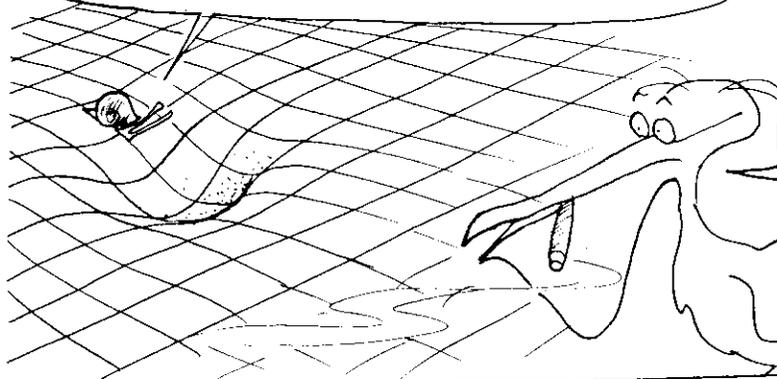


El fotón, joroba y hueco al mismo tiempo, es su propia antipartícula

MATERIA y ANTIMATERIA, nacidas de las colisiones entre fotones, aparecen con velocidades relativistas

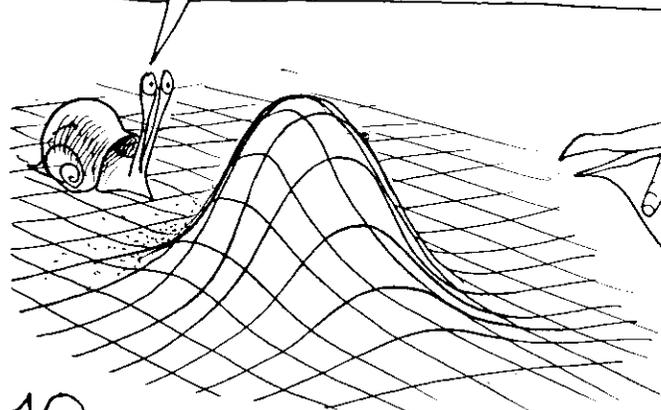


Jorobas, huecos, todo eso es arbitrario



¿Qué quieres decir con esa profunda reflexión, mi querido Tiresias? Hay cosas que aparecen como huecos, y otras como jorobas. Eso es evidente...

Así nos parece porque estamos de este lado de la moqueta. Si estuviéramos del otro, las jorobas se convertirían en fosas, y las fosas en jorobas



Pero... ¡yo no veo más que un solo lado!



¡¡Tiresias!!

Ya no se puede ni siquiera bromear un poco...

? ...

Otro policía epistemológico

¡Miren, allí...! Cuando una joroba y una fosa se encuentran lentamente, se forman dos pliegues viajeros. ¡Es la operación inversa!

Hmm.. simple ANIQUILACIÓN de una partícula de materia y de su antipartícula, que dá como resultado dos fotones

Es el caos primigenio

Hmm...

Las creaciones y aniquilaciones de partículas a partir de pares de fotones ocurren a un ritmo desenfrenado. En ese mundo caótico, en ese mundo de cambio continuo, no hay estructuras. Solamente un hormigueo constante de fotones, de neutrinos, de antineutrinos y de numerosas otras partículas y anti-partículas, fugaces y variadas. Es el CAOS PRIMIGENIO (*)

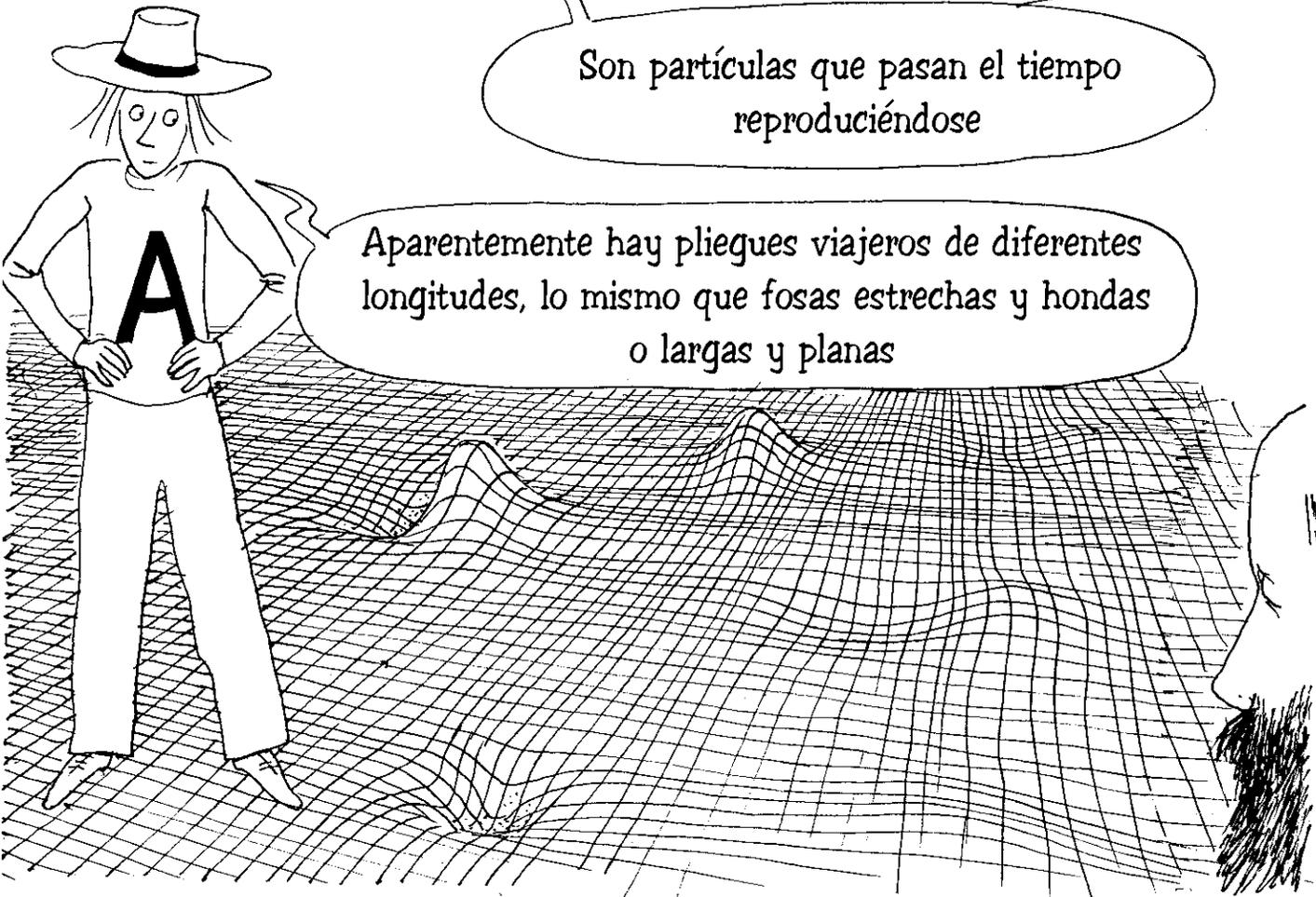


Todo eso me hace pensar en los SEXONES

¿Y qué son los SEXONES?



Son partículas que pasan el tiempo reproduciéndose



Aparentemente hay pliegues viajeros de diferentes longitudes, lo mismo que fosas estrechas y hondas o largas y planas

Llamaré LONGITUD DE ONDA λ ,
a la extensión de los pliegues
viajeros, los FOTONES

Supongamos que creo una oscila-
ción que viaja a lo largo de esta
cuerda. Sacudiéndola lentamente,
le comunico poca energía y la
longitud de onda λ es grande

Si ahora sacudo más fuertemente la cuerda, le
comunico mayor ENERGÍA, y la longitud de
onda λ resultante es decididamente más corta

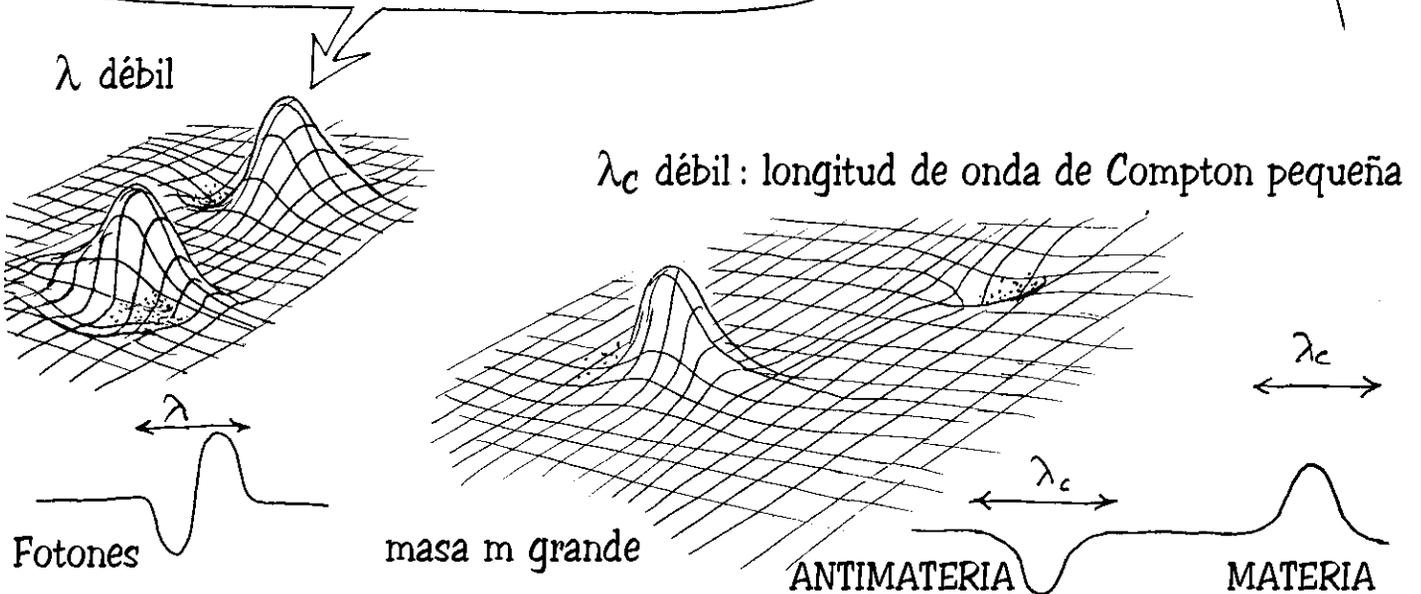
¡Epa!

Así, entre más energía
transporte una onda, menor será
su longitud de onda

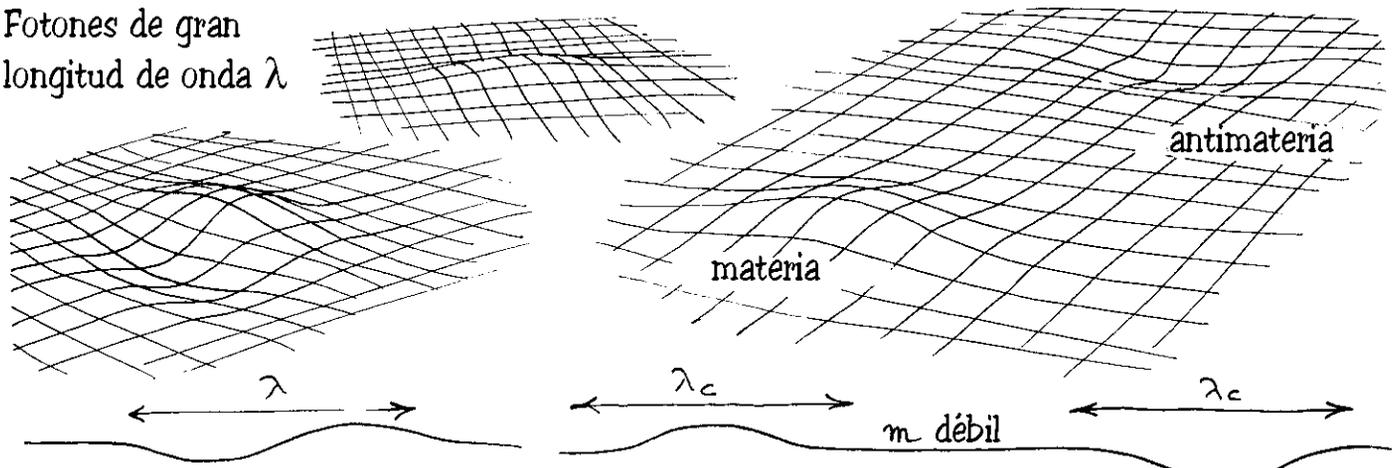
Diré entonces que la ENERGÍA transportada
por un FOTÓN, un corpúsculo de LUZ, será
INVERSAMENTE PROPORCIONAL a su
LONGITUD DE ONDA: E varía como $1/\lambda$

Así sea...

ENTRE MÁS PEQUEÑOS, MÁS PESADOS...



Fotones de gran longitud de onda λ

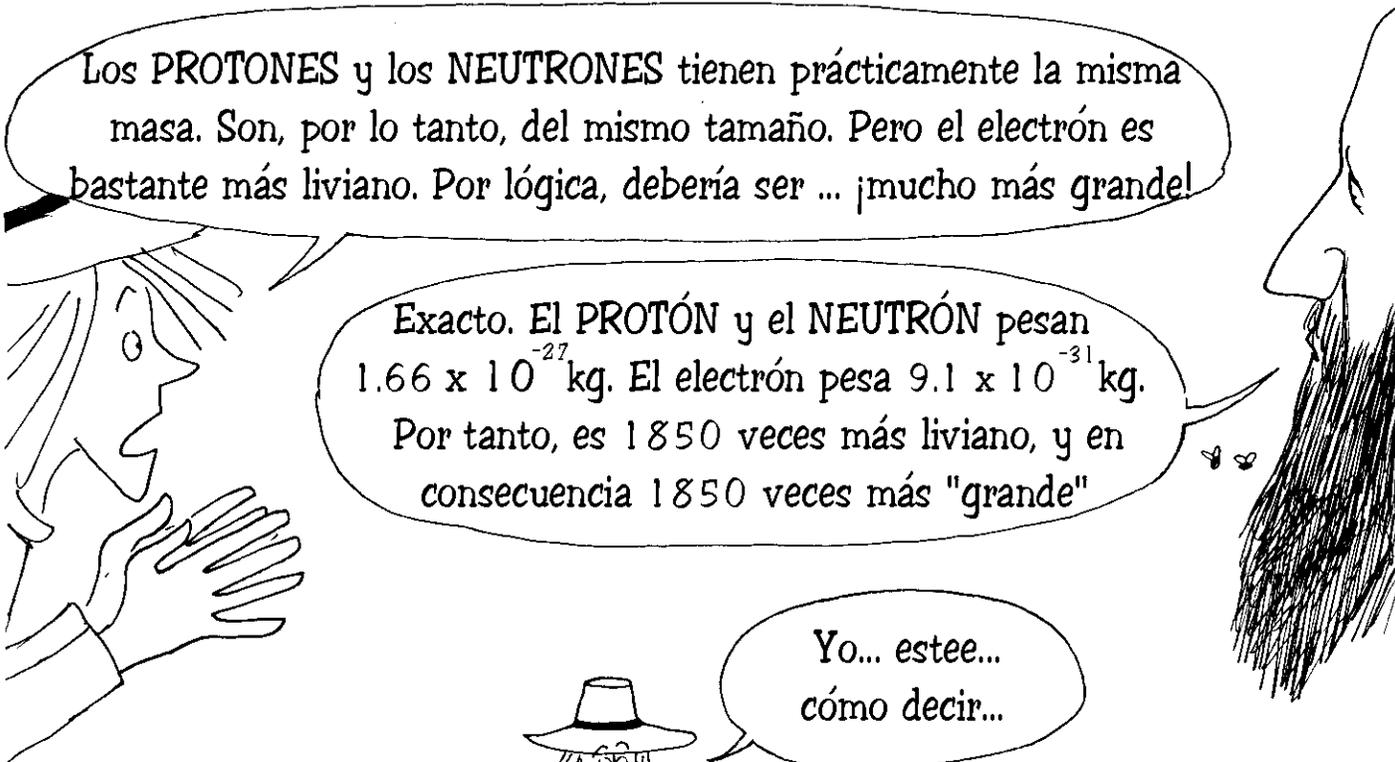


Fotones de gran longitud de onda \rightarrow partículas de gran longitud de onda de Compton. Inversamente, fotones relativamente poco energéticos darán nacimiento a un par partícula-antipartícula de gran longitud de onda, es decir con una masa débil: λ_c grande, m débil.

De hecho, es de lo más simple. Por lo que veo, $\lambda = \lambda_c$ (*), es decir que las partículas (y antipartículas) son del mismo "tamaño" que los fotones que las crearon

Así, cuando se conoce la MASA de una partícula cualquiera, se conoce de inmediato la longitud de onda de la radiación que la creó

(*) Recuérdese que E (energía) = m (masa). Ver "TODO ES RELATIVO", del mismo autor.



¡Ah, si, muy lindo el génesis de hoy día!

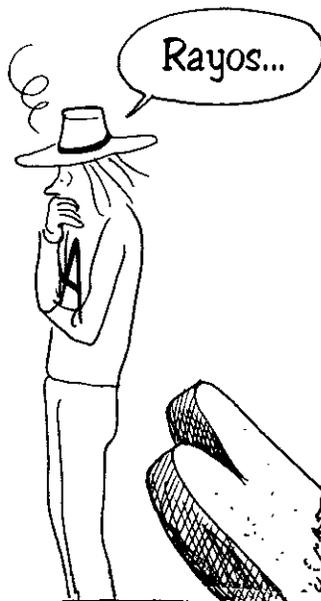
¿Qué estás fabricando?

Fabrico un **ÁTOMO** de **HIDRÓGENO** más acorde a la realidad: con un gran electrón y un **PROTÓN** minúsculo formando su **NÚCLEO**

¡Por todos los dioses, incluyéndome! ¡Qué caos...!
¿Qué tal, hijos míos, si me ayudan a poner un poco de orden en todo este galimatías?

LA TEMPERATURA DE LA RADIACIÓN

T_R



Rayos...

Todos estos fotones tienen longitudes de onda y energías diferentes. Voy a definir para esa población una longitud de onda promedio y una energía fotónica promedio

La TEMPERATURA DE RADIACIÓN T_R será la medida de esta energía promedio de los fotones

Qué desastre...

ESTADO DE EQUILIBRIO

¿Entonces una mezcla puede tener varias temperaturas?!?!?

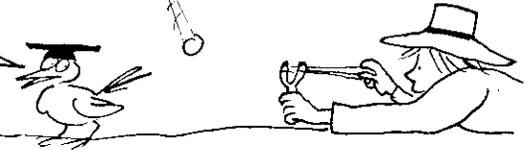
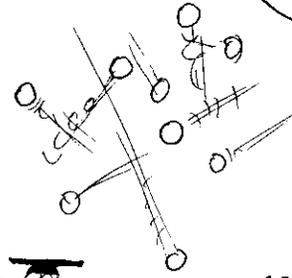
BING!

Sí, pero eso lo veremos en la página 46. Por ahora, las partículas intercambian energía entre ellas, o con los fotones, a través de colisiones. Este mecanismo tiende a uniformar las temperaturas, A VOLVERLAS IGUALES, y a llevar el sistema a un estado de EQUILIBRIO TERMODINÁMICO

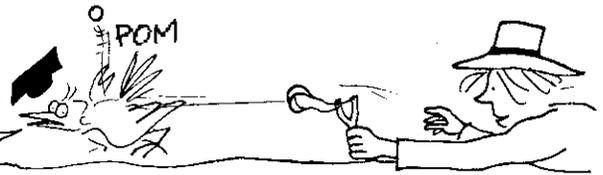
LA TEMPERATURA DE LA MATERIA

T_m

Todas estas partículas MATERIALES tienen masas m y velocidades V diferentes. La ENERGÍA CINÉTICA de una partícula material es $\frac{1}{2}MV^2$. Para esta población también puedo definir una energía de agitación (TÉRMICA) promedio



La TEMPERATURA DE LA MATERIA, T_m , será la medida de esta ENERGÍA PROMEDIO DE AGITACIÓN TÉRMICA



TERMODINÁMICO

Si una partícula tiene mucha energía, si es demasiado rápida, demasiado "caliente", una colisión con otra partícula la frenará. Y lo contrario si es demasiado lenta. Si este fenómeno de acoplamiento energético de especies por colisión es lo suficientemente intenso, no solamente las temperaturas serán iguales, sino que así permanecerán, no importando si expandes o comprimes la mezcla.



Ehjey...

¡Acelera...!

¡No tan rápido!

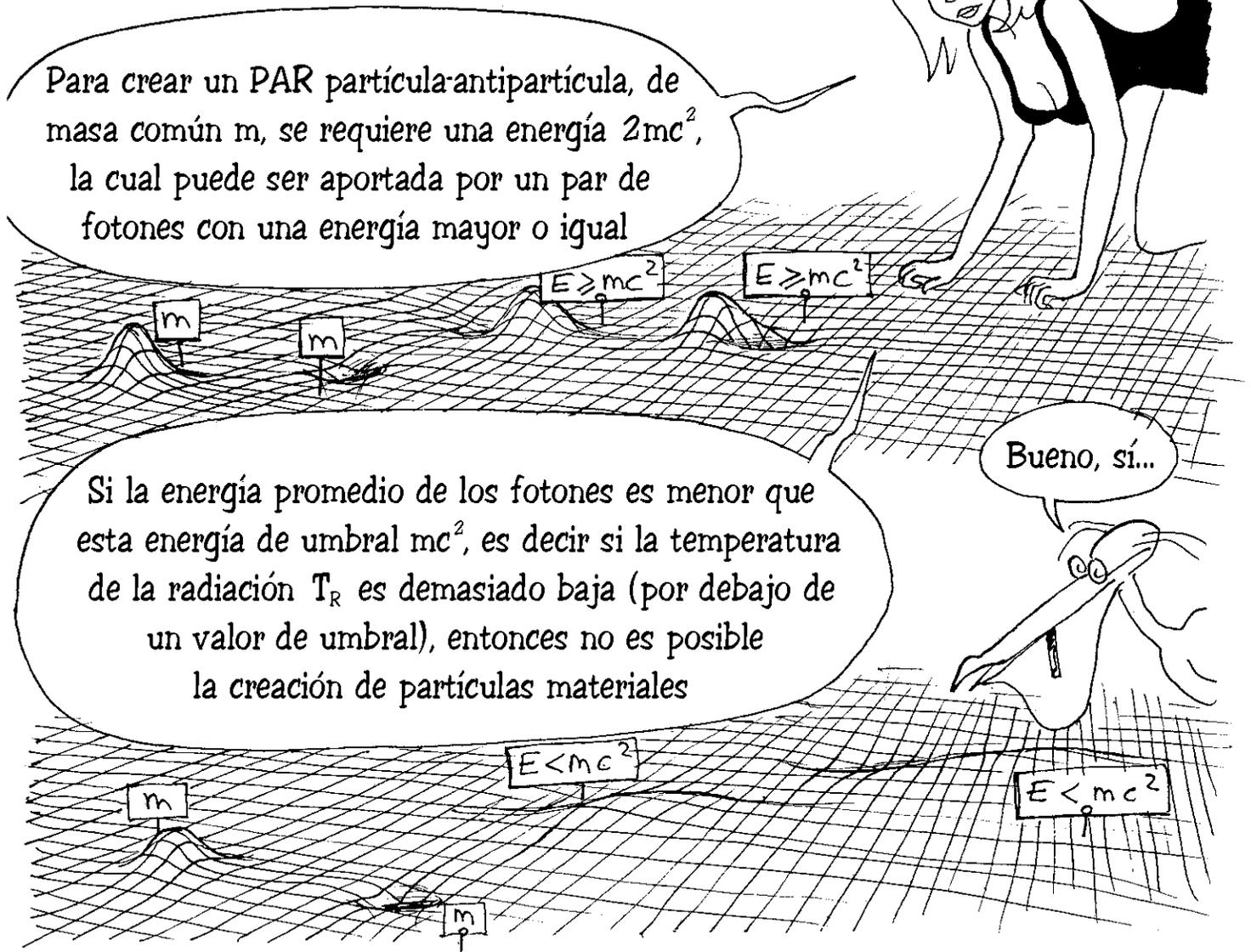


A él...





LA TEMPERATURA DE UMBRAL



DE LA EVOLUCIÓN DE LAS ESPECIES

La SUPERVIVENCIA de una especie también es complicada, pero puede ser asegurada por un ritmo elevado de producción



Lo que implica que la temperatura de la radiación T_R debe ser superior a la temperatura de umbral de la especie

¡Mira, los sexones!



Si la temperatura T_R es más baja, varias causas de desaparición son posibles

La más temible es la aniquilación con la antipartícula

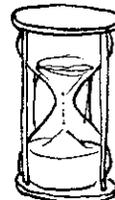


Enseguida vienen malos encuentros de todo tipo

El cosmos es un antro de mala fama



Las partículas tienen además su propia DURACIÓN DE VIDA (*). Transcurrido ese lapso, se descomponen espontáneamente en otras partículas y en radiación.



El problema es durar



(*) Su propia reserva de CRONOL. Ver "TODO ES RELATIVO", del mismo autor.



¿A qué temperatura estamos?

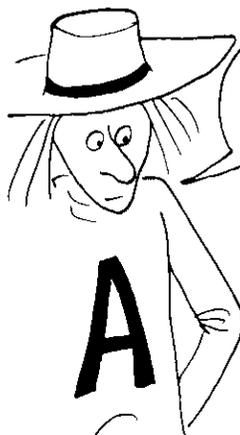
¡Toma un fotón y mídele su longitud de onda λ !

¡Cáspita, veinte billones de grados (2×10^{13} K)!

Parece haber la misma cantidad de fotones, de neutrinos, de protones, de neutrones y de electrones (y de sus respectivas antipartículas)

A una temperatura tan alta, todo el mundo es **RELATIVISTA**. Hasta las partículas materiales van a velocidades cercanas a la velocidad de la luz, c

En "TODO ES RELATIVO" vimos que a medida que la velocidad de una partícula tiende a la velocidad de la luz, su **TIEMPO PROPIO** se coagula como una salsa



En realidad, eso pone un problema serio. Si todo el mundo procede a la velocidad de la luz, ¿entonces el TIEMPO (*) deja de fluir?!? No habría nadie para advertir su paso...

Nada ni nadie iría lo suficientemente lento para que el tiempo fluyera de manera significativa



¡Oh!

Un mundo totalmente ACRÓNICO carecería de sentido

¿El tiempo podría ser entonces un lujo que sólo ciertos universos podrían darse?

¡Es diabólico!

Bah, con todo lo que he visto y aprendido... el ESPACIO, el TIEMPO, el UNIVERSO... ¡todo esto no es más que polvo en el horizonte!

¿El constituyente universal de todas las cosas?

Polvo de perlimpinín

(*) Un tiempo cósmico que podría ser un promedio de los TIEMPOS PROPIOS.

LAS PARTÍCULAS ELEMENTALES

Bueno, en lugar de quedarse de brazos cruzados, ayúdenme a poner un poco de orden en este enredo de las PARTÍCULAS ELEMENTALES



Que tienen longitudes de onda de Compton λ_C bastante pequeñas

Estas partículas de gran masa son los HIPERIONES (*)

Luego vienen los HADRONES, de los que hacen parte el PROTÓN y el NEUTRÓN (lo mismo que el antiprotón y el antineutrón), los cuales pueden unirse para formar NÚCLEOS. Para crear estas partículas es necesaria una temperatura de radiación mayor que 10^{13} K, es decir diez billones de grados

Hmm... su temperatura de umbral

La longitud de onda de Compton de los protones y los neutrones es de 1.35×10^{-12} cm: un picoésimo de cm

PROHIBIDO PISAR LOS NEUTRONES

(*) Apenas una hipótesis, dado el estado actual del conocimiento

HADRÓN viene de HADROS,
que en griego quiere decir pesado

Tiresias,
¿tú sabes griego?

Evidentemente, hay igual cantidad de
ANTIHADRONES que de HADRONES

Finalmente están los LEPTONES (*)

LEPTONES

ANTILEPTONES

Para crearlos, se requiere una temperatura de radiación
de seis mil millones de grados (temperatura de UMBRAL)

El más conocido de los LEPTONES es el electrón, y su gemelo el antielectrón, o
POSITRÓN. Es de notar que la temperatura de umbral de creación de los electrones
es 1850 veces menor que la temperatura de umbral del protón y del neutrón

Así es puesto que se requiere 1850
veces menos energía para crear el
electrón que el protón

(*) Del griego LEPTOS, liviano.

TERRENO MOVEDIZO



Una situación terriblemente cronogénica. El tiempo estaba por aparecer. El cronotrón se puso en marcha y ese fue el primer EVENTO, el primer INSTANTE.



¿Dónde están?
¿Pero qué está pasando?

Es la EXPANSIÓN, la debacle...
El Universo se distiende... Excúsenme...

Me voy a
otra parte

¡Realmente no soporto
el cambio!

¡¡Eh!!

Ya verás que dentro de un
tiempo se va a calmar

¡Ja, ahora nos deja aquí
abandonados!

Adiós,
pásenla bien

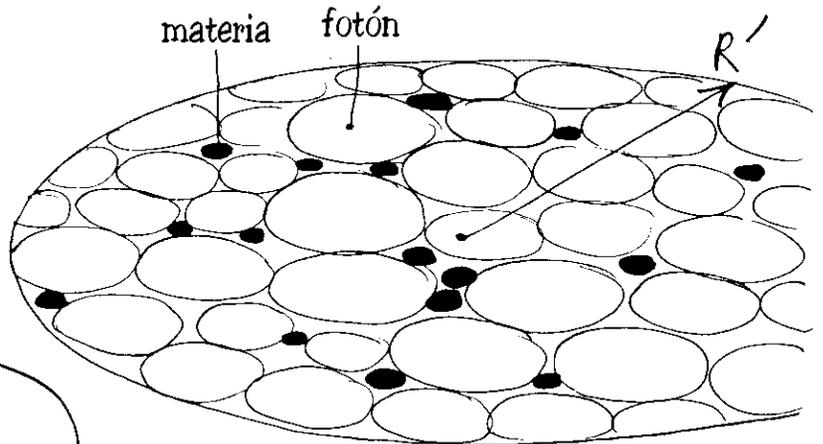
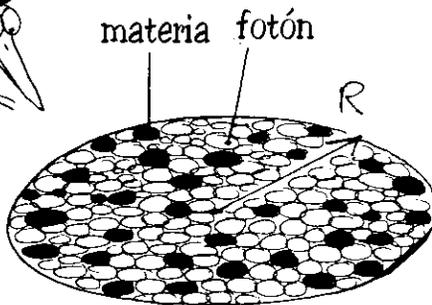
¡Equivocado
de nuevo!

¿A dónde se ha ido...?

Parece una tapa de alcantarilla.
¿Serán las catacumbas del Universo?

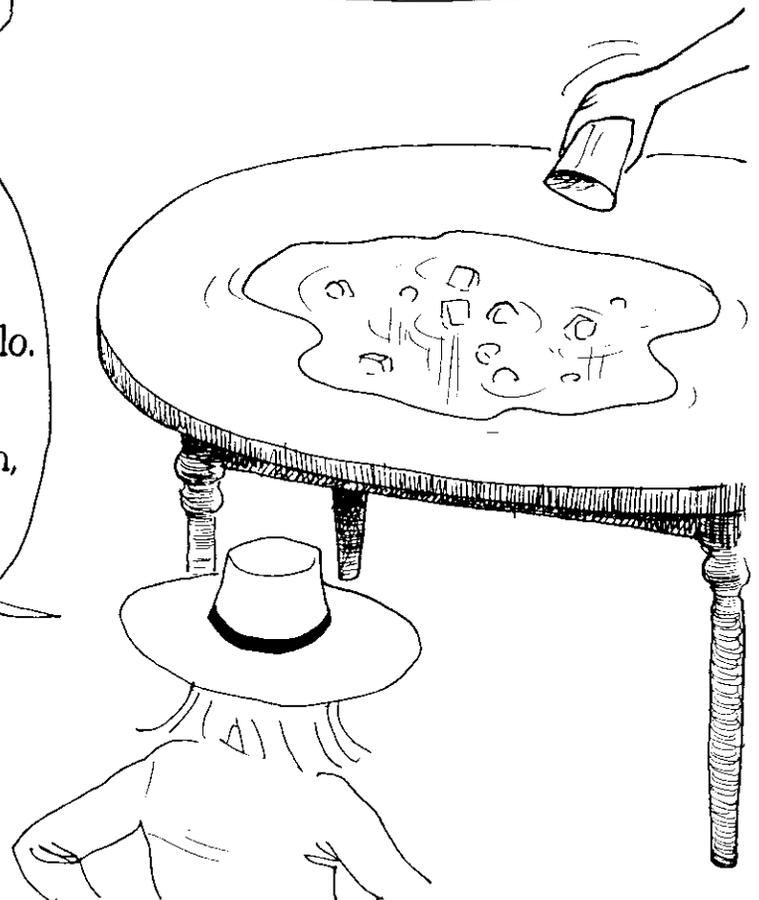
LA CONSERVACIÓN DE LA MASA

Observen lo que pasa: son los fotones los que se dilatan. Las partículas materiales, en cambio, no lo hacen.



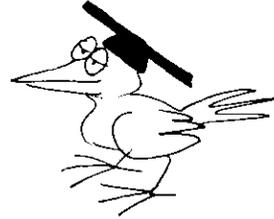
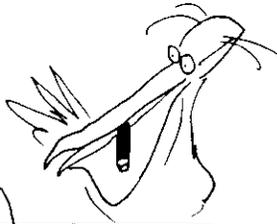
La materia es espacio congelado

Eso me hace pensar en lo que pasa cuando se riega sobre una mesa un vaso lleno de agua y de cubos de hielo. La masa de agua se extiende y se dilata. Los cubos siguen la expansión, pero conservan sus dimensiones

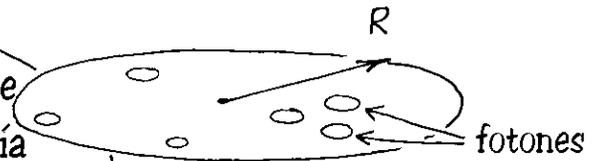


Puesto que la dimensión de las partículas materiales está ligada a su masa, deduzco entonces que LA MASA SE CONSERVA

A la inversa, el ensamble de fotones (que se dilatan) pierde ENERGÍA



Si R es el radio del Universo, como la longitud de onda λ de los fotones sigue la expansión (λ varía como R), deduzco también que la temperatura de la radiación, que varía como $1/\lambda$, decrece como $1/R$



Todo ocurre como si el universo creara su propio espacio, su COSMOTOPO (*), secretando... vacío...

Materia y luz no son más que dos formas diferentes de una misma entidad: la ENERGÍA-MATERIA. Los fotones mantienen su velocidad de 300.000 km/s pero pierden energía

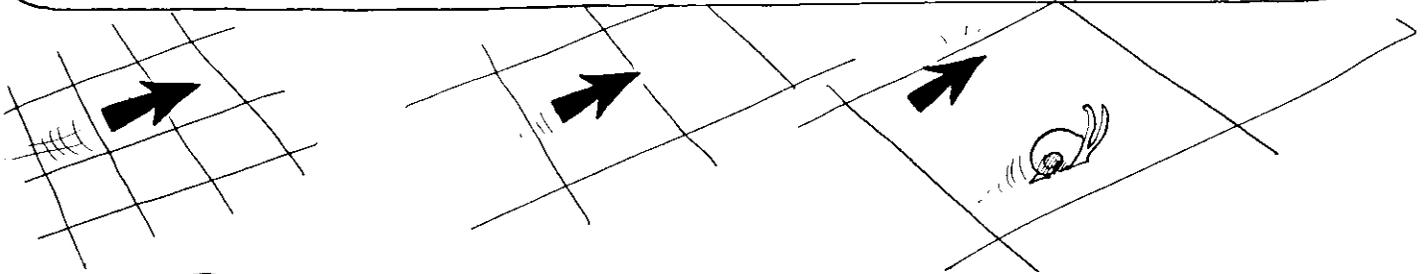
(*) De cosmos: COSMOS, y topos: LUGAR (lugar donde se encuentra el Universo).

Aquí tienes una representación que muestra bien el estiramiento del fotón y la pérdida de energía que resulta



¿Y cómo se comporta la materia durante la expansión?

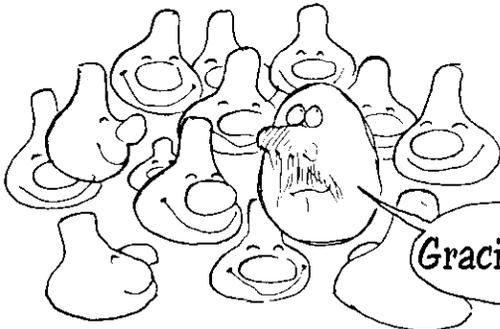
El universo secreta espacio como una concha. Entre más pasa el tiempo, más camino tienen por recorrer las partículas. Cuando el tamaño del Universo se dobla, la velocidad de agitación de las partículas materiales disminuye a la mitad, y su energía cinética resulta entonces dividida por 4: la velocidad de agitación varía como el inverso del radio R del Universo, mientras que la temperatura de la materia T_m varía como $1/R^2$



Uff...
No puedo más...

Pero vimos antes que la temperatura de radiación T_R varía como $1/R$. ¿Quiere eso decir que la materia tiene una tendencia a enfriarse más rápidamente?

Así es. Pero las colisiones entre los fotones y la materia la recalientan. Bastante frecuentes, éstas mantienen el estado de equilibrio termodinámico ($T_R = T_m$) durante un cierto tiempo



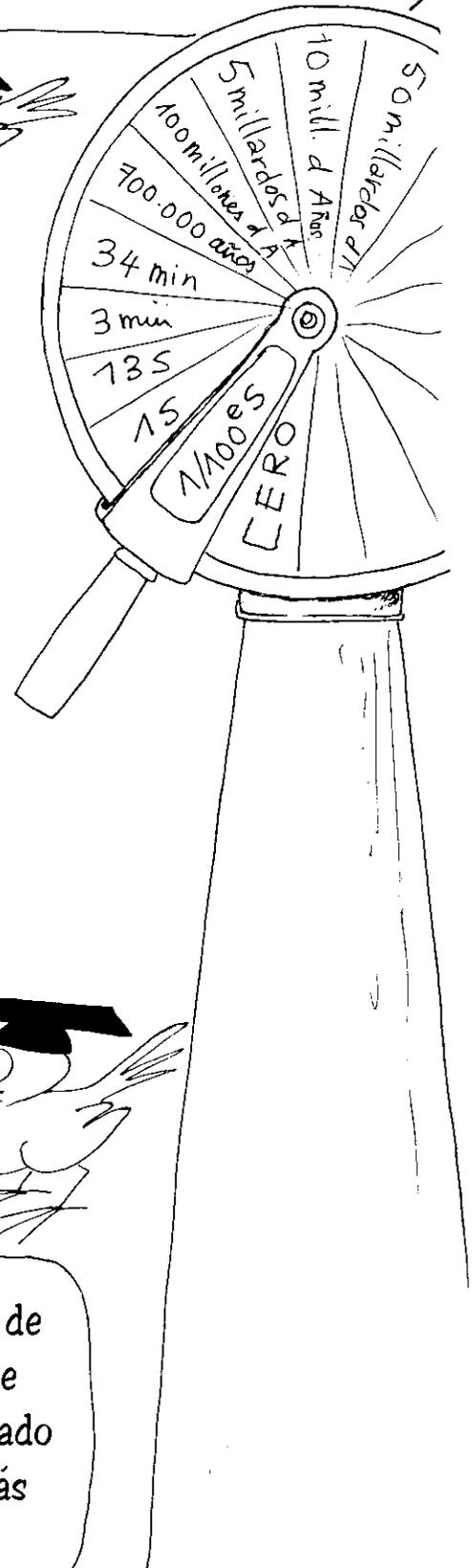
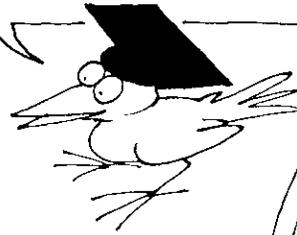
Gracias, amiguitos...

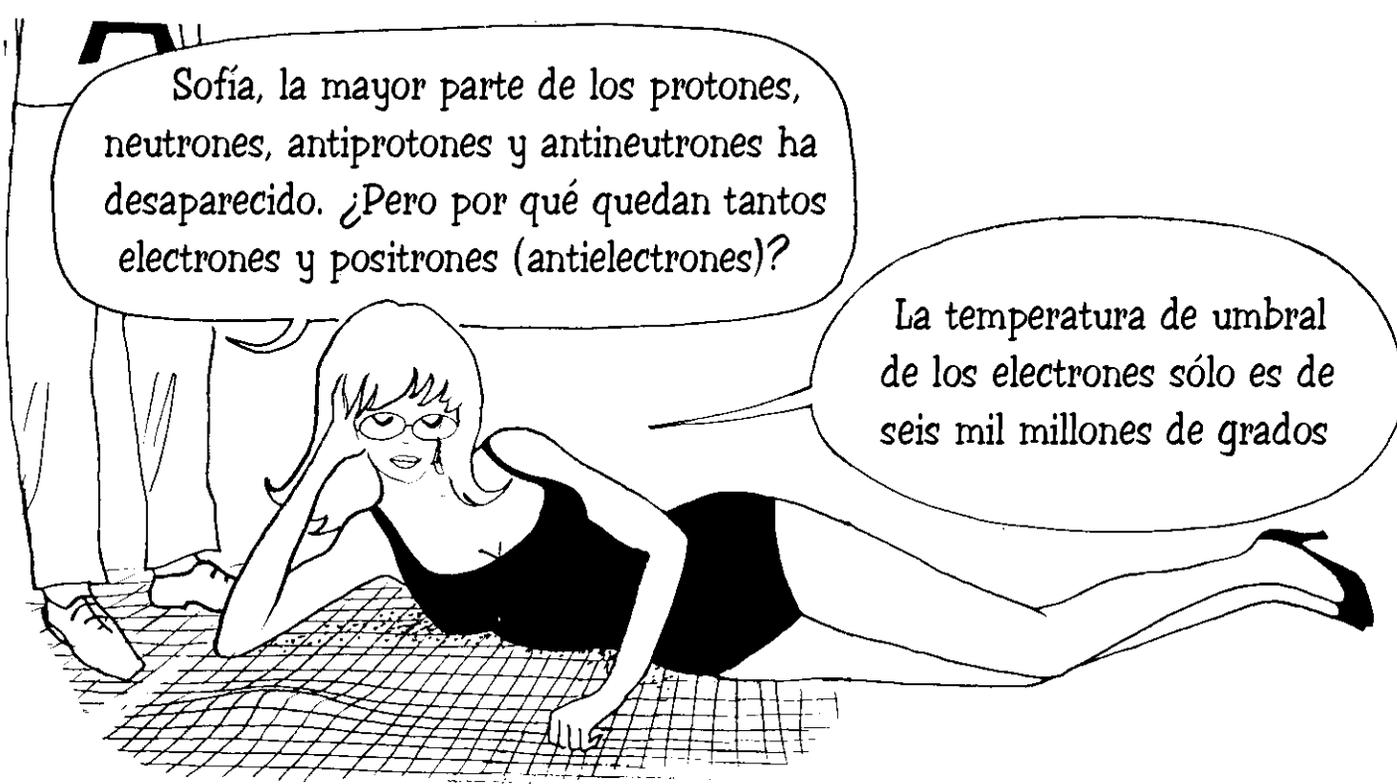
Un centésimo de segundo

Los protones, los neutrones, los anti-protones y los antineutrones no van ahora más que a un décimo de la velocidad de la luz, c



La temperatura ($T_R = T_m$) ha caído a cien mil millones de grados, es decir muy por debajo de su temperatura de umbral, que es de 10 billones de grados. Se han aniquilado por pares a un ritmo frenético y no queda, entonces, más que uno en un MIL MILLONES





Sofía, la mayor parte de los protones, neutrones, antiprotones y antineutrones ha desaparecido. ¿Pero por qué quedan tantos electrones y positrones (antielectrones)?

La temperatura de umbral de los electrones sólo es de seis mil millones de grados

Solamente seis mil millones de grados... ¿comprendes?

Bueno, eso ya parece un poco más fresco

Pero hay algo raro. La temperatura es de cien mil millones de grados, y mientras los protones, neutrones, antiprotones y antineutrones va a un décimo de la velocidad de la luz, los electrones siguen siendo relativistas

Sí, es cierto. ¿Por qué?

El medio también está en un estado de EQUILIBRIO TERMODINÁMICO: el acoplamiento de todas las especies, y de la radiación, también es intenso. Las energías cinéticas de las partículas materiales son, en promedio, iguales:

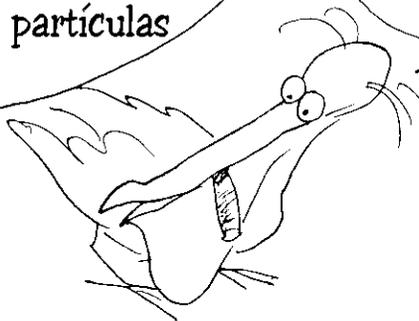
$$\frac{1}{2} M_{\text{protón}} (V_{\text{protón}})^2 = \frac{1}{2} M_{\text{electrón}} (V_{\text{electrón}})^2.$$



Espera... como la masa del electrón es 1850 veces menor que la del protón, entonces, necesariamente, para compensar, a una temperatura dada la velocidad de agitación del electrón debe ser mucho mayor

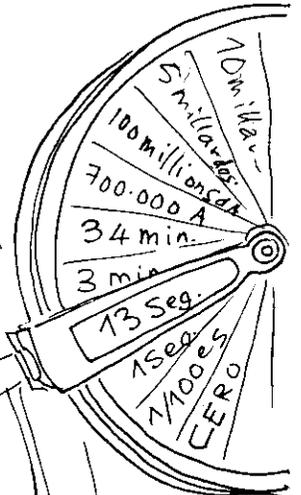
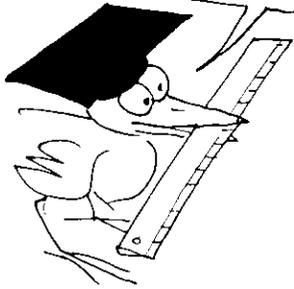
De hecho, como la energía-umbral de creación de una partícula de masa m es simplemente mc^2 , cuando el medio se enfría al punto que la velocidad de agitación V se vuelve mucho menor que c , la creación de estas partículas cesa y se tiene la despoblación

Dicho de otro modo: cuando una población de partículas de materia deja de ser relativista, se ve diezmada



Trece segundos

La temperatura ha caído a tres mil millones de grados



Oh, mira los electrones y los antielectrones. ¡Qué hecatombe!

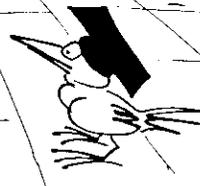
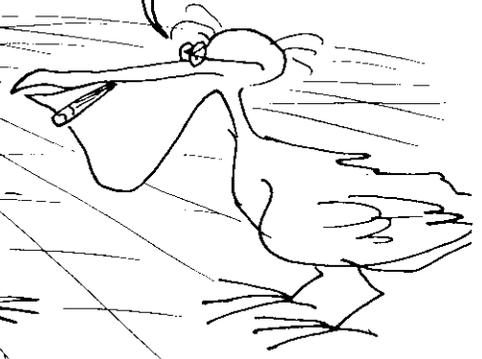


Claro, estamos por debajo de su temperatura de umbral

¡Toda una tragedia de San Bartolomé cosmológica!

¡También de éstos quedará sólo uno en MIL MILLONES!

Qué desastre...



Por poco y no hubieran quedado más que fotones. Vaya fortuna...

En alguna otra parte habrá universos a los que les va mal

Uno de los más grandes misterios de la cosmología es no poder explicar por qué materia y antimateria no se aniquilaron mutuamente

En este punto de la historia siempre ocurre lo mismo... llega un momento en que el problema de la **ANTIMATERIA** se esconde bajo la manga.... y ¡zas!, la antimateria desaparece

¡Tiresias, te recuerdo las reglas! Solamente los **HECHOS**. ¡Nada de especulaciones descabelladas! (*)

¡Estoy harto de los policías epistémicos!

¡Psst...!

(*) Dedicaremos especialmente un álbum a las especulaciones descabelladas: "EL CARNAVAL DE LA CIENCIA": una antología de las ideas por venir.

LA ERA RADIATIVA

De las partículas ya no quedan MASAS

Ahora no ha quedado gran cosa en este universo, aparte la luz

La ENERGÍA-MATERIA, que existía en partes iguales bajo la forma de materia, antimateria, fotones y neutrinos, se encuentra ahora casi exclusivamente bajo la forma de fotones y de neutrinos, es decir de radiación. Adicionalmente, cada vez que el tamaño R del Universo se duplica, la densidad de materia disminuye por simple dilución

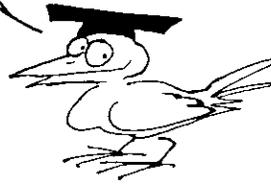
Sobre la moqueta, cuando R se duplica, la densidad resulta dividida por $2 \times 2 = 4$. En nuestro universo tridimensional, de hecho, la densidad resulta dividida por $2 \times 2 \times 2 = 8$

La densidad de materia varía como el inverso del cubo del "tamaño", es decir del "radio" R del Universo

Para nosotros, los fotones, la cosa es más dramática. La expansión nos "vacía" poco a poco de nuestra energía. La cantidad de energía-materia que transportamos disminuye como el inverso del radio R del Universo

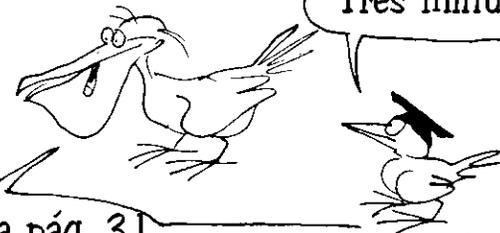
Eso hace que la densidad de energía-materia que está bajo la forma de fotones varíe como el inverso de la cuarta potencia de R

Mientras la materia permanece acoplada con los fotones, éstos la calientan constantemente. Esto sucede hasta que su temperatura común ($T_R = T_m$) cae a 3000 K, al cabo de unos 700.000 años



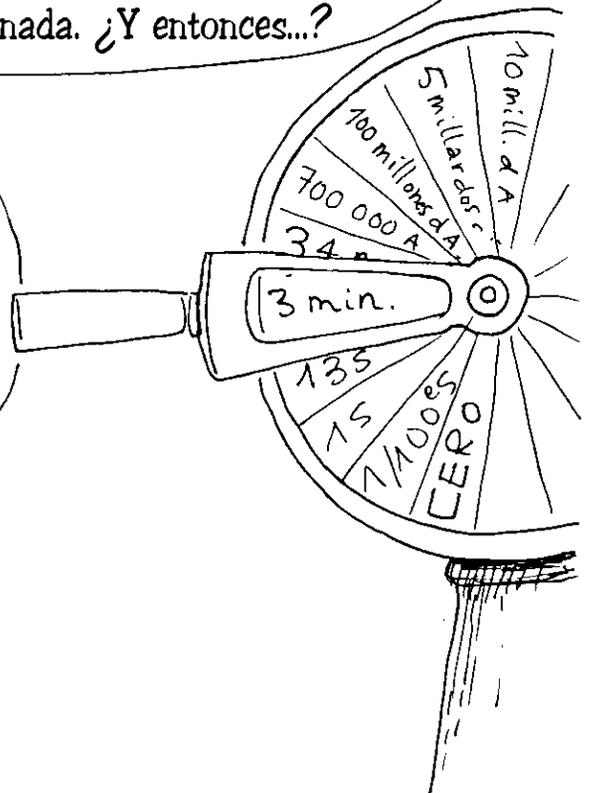
LA NUCLEOSÍNTESIS

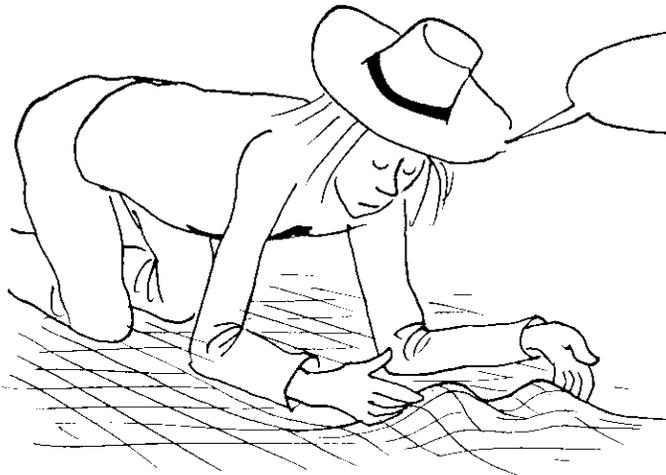
Tres minutos



Bien... en relación con el estado descrito en la pág. 31, en el primer centésimo de segundo el tamaño del Universo, R , se ha multiplicado por cien y la temperatura ($T_R = T_m$) ha caído a mil millones de grados. Después de eso no queda prácticamente nada. ¿Y entonces...?

Aquí hay dos jorobas.
¿Que pasaría si trato de empujarlas y hacerlas deslizar la una sobre la otra?



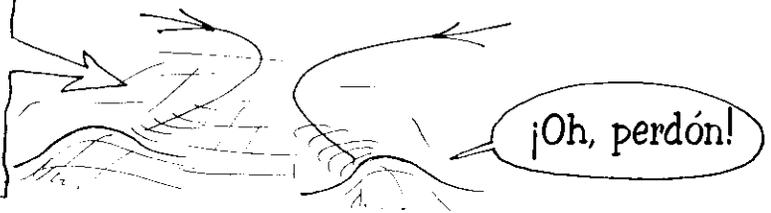


Comienzan por repelerse

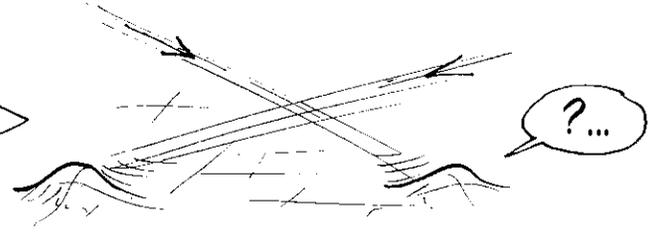


Luego se atraen para formar un solo objeto

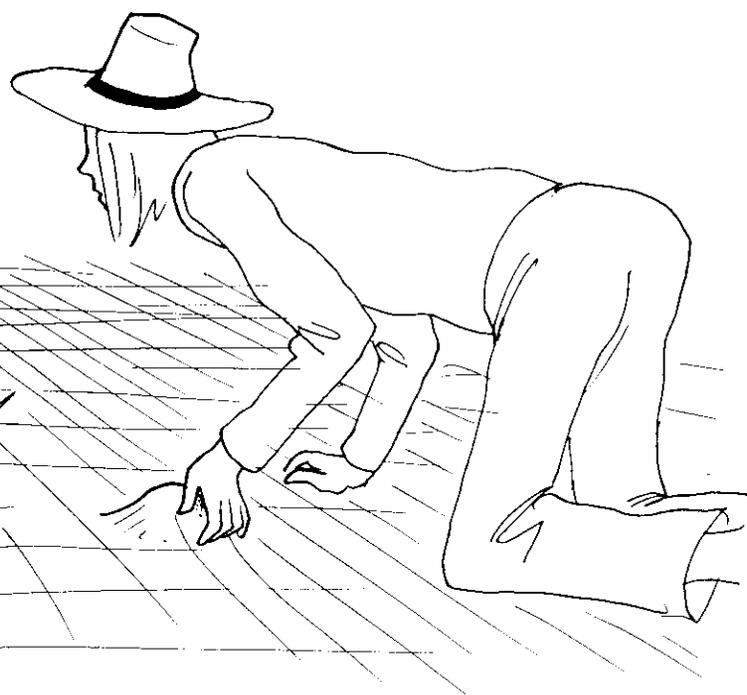
Cuando dos jorobas colisionan, se dan tres casos: si se mueven lentamente, rebotan la una contra la otra.



Cuando son rápidas, se cruzan tan velozmente que no tienen tiempo de interactuar.



Sólo pueden unirse para unas condiciones bien definidas de velocidad de agitación y de temperatura.



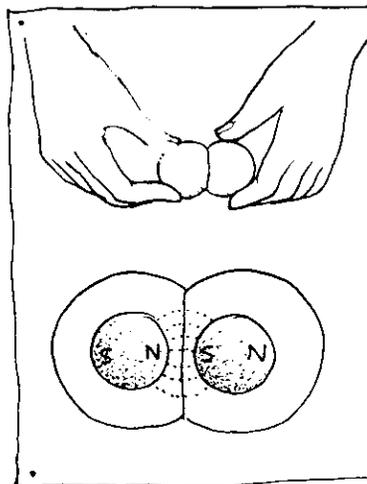
Y una colisión violenta con un tercer elemento rompe las estructuras previamente formadas



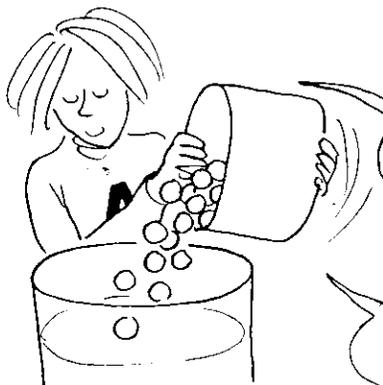
Esas reacciones de FUSIÓN producen los primeros NÚCLEOS ATÓMICOS. Esta MORFOGÉNESIS hará aparecer las primeras FORMAS y las primeras ESTRUCTURAS del Universo

Todo eso es muy divertido. Hay en juego una fuerza atractiva y una fuerza repulsiva. A grandes distancias, domina la fuerza repulsiva; a cortas distancias sucede lo contrario

Voy a introducir unos imanes en cada una de estas esferas de espuma



La espuma se comprime fácilmente, de manera que si presiono dos esferas una contra otra, van a quedar pegadas entre sí.



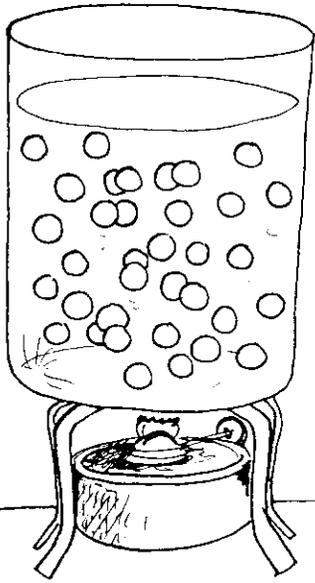
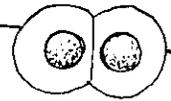
Ahora coloco las esferas en un gran recipiente lleno de agua...

...para permitir que se muevan

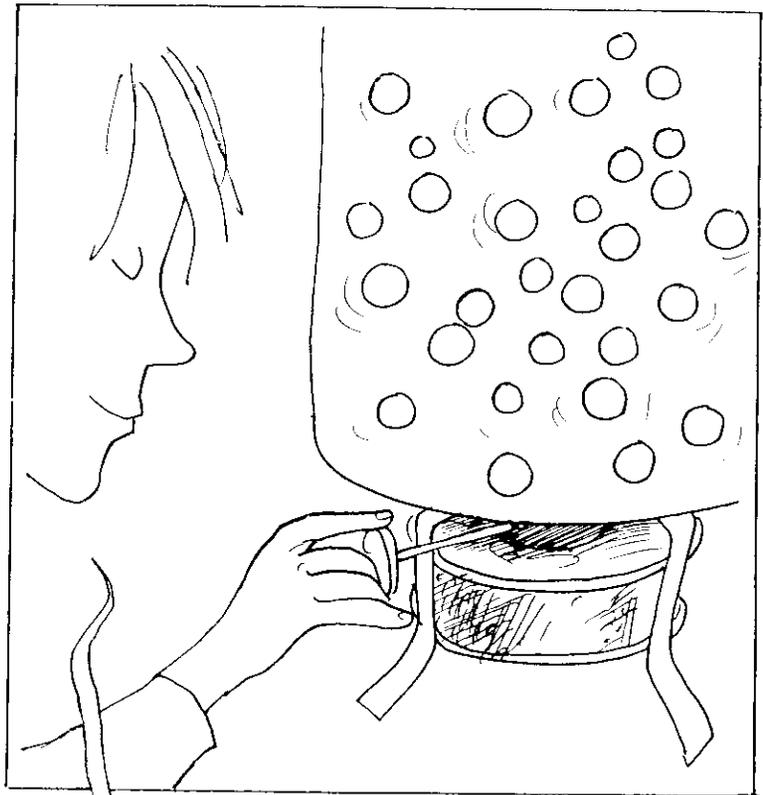
Dos fuerzas intervienen. Una es atractiva: los imanes. La otra es repulsiva: la espuma, cuando está comprimida. En el momento en que las esferas se tocan, las fuerzas se manifiestan. El alcance de la fuerza magnética es tal que sólo entra en juego cuando la espuma está suficientemente comprimida. Y existe una situación en la que las fuerzas se equilibran



La espuma hace que las esferas tengan una densidad prácticamente igual a la del agua. Ahora creo un movimiento de agitación por calentamiento

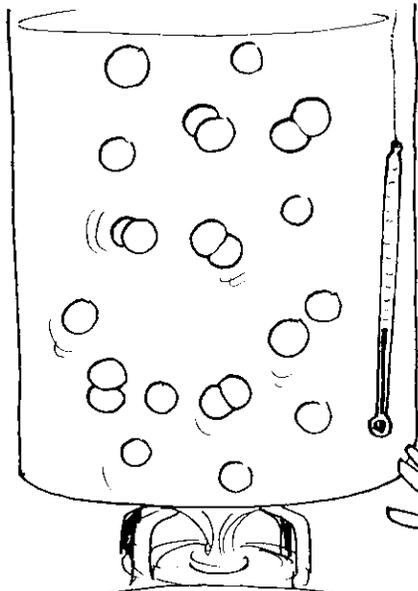


Cuando el calentamiento es débil, las esferas rebotan suavemente unas contras otras sin que suceda nada. Cuando chocan de frente, no hay suficiente energía para comprimir la espuma y permitir que la fuerza magnética se manifieste a corta distancia y actúe



Ahora voy a aumentar el calentamiento





¡Eso es, funciona! Es la temperatura adecuada (superior a la temperatura de UMBRAL), el grado de agitación es suficiente

En efecto, las esferas se ensamblan de dos en dos

Cuando el calor es demasiado, la agitación térmica destruye estas ESTRUCTURAS

¿Y si enfriaras un poco?



Anselmo deja que el agua se enfríe: la TURBULENCIA disminuye. En un momento dado, algunas esferas se acoplan. Pero si la temperatura continúa bajando, esta NUCLEOSÍNTESIS se detiene.



Nada que hacer ahora. Todo está demasiado frío. La poca agitación de las bolas impide que se unan entre ellas

Estamos por debajo del UMBRAL

Lo mismo sucede cuando la temperatura del Universo desciende por debajo de **mil millones de grados**, lo que ocurre al cabo de **unos cuantos MINUTOS**. Es entonces que se forman estructuras de dos, tres o cuatro "esferas".

⊕ PROTÓN

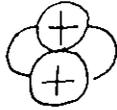
○ NEUTRÓN



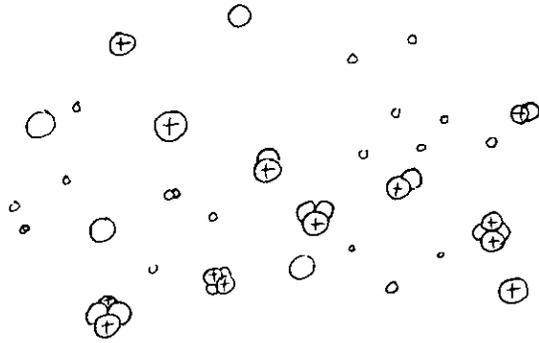
1 PROTÓN
Deuterio



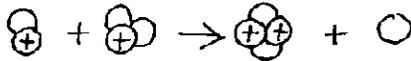
1 PROTÓN
Tritio



2 PROTONES
Helio



El DEUTERIO y el TRITIO así formados se combinan en la siguiente REACCIÓN NUCLEAR:

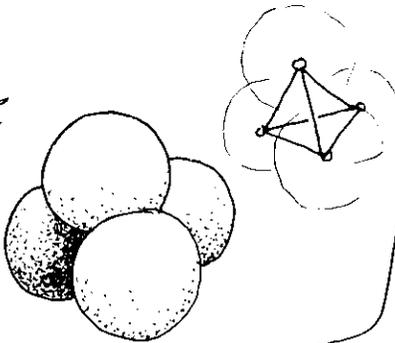


deuterio + tritio → helio + 1 neutrón.

En este estado, el Universo es una BOMBA DE HIDRÓGENO (*)

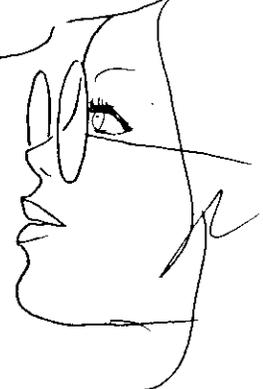


¿Entonces todo se transforma en Helio?



El núcleo de Helio es bastante simétrico, compacto y sólido. Si la temperatura no cambiara, toda la materia se convertiría en Helio. Pero al cabo de 34 minutos la temperatura desciende a 300 millones de grados y la nucleosíntesis se detiene.

Los núcleos ya no tienen suficiente velocidad para vencer la repulsión electrostática (+ repele +). Es el final del juego

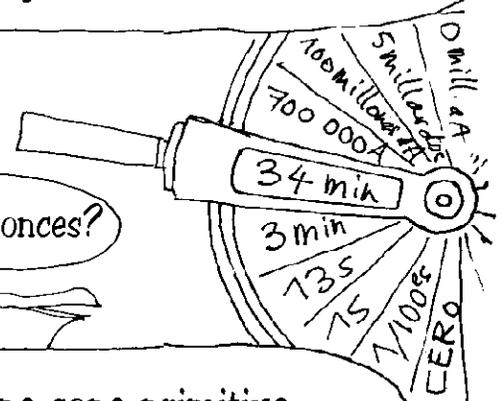


Los últimos neutrones libres se han desintegrado. Son por naturaleza inestables y se transforman, al cabo de 109 segundos, en un par PROTÓN-ELECTRÓN



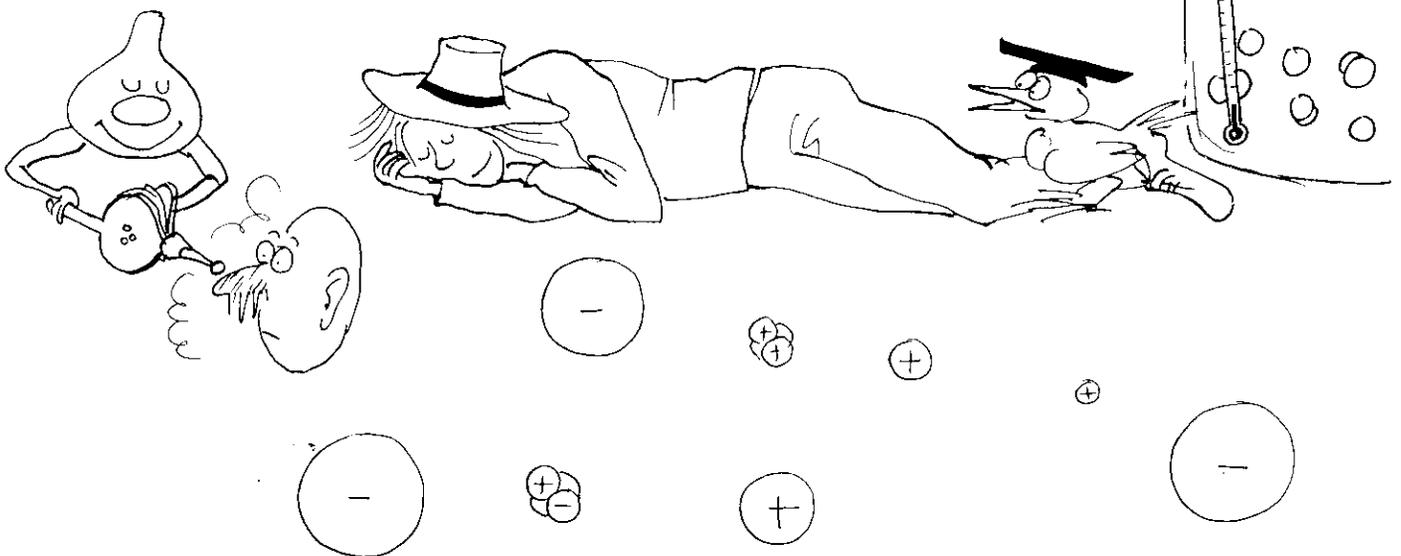
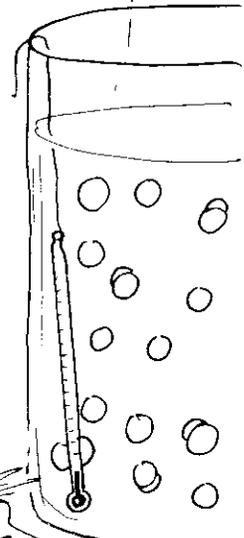
Han transcurrido 34 minutos desde el comienzo

¿Y entonces?



Al final de esta fase, se tiene una sopa primitiva conformada por FOTONES, NEUTRINOS, PROTONES, ELECTRONES y NÚCLEOS DE HELIO. La materia se reparte, en porcentaje, de la siguiente manera: 25% de Helio y 75% de Hidrógeno (protones libres)

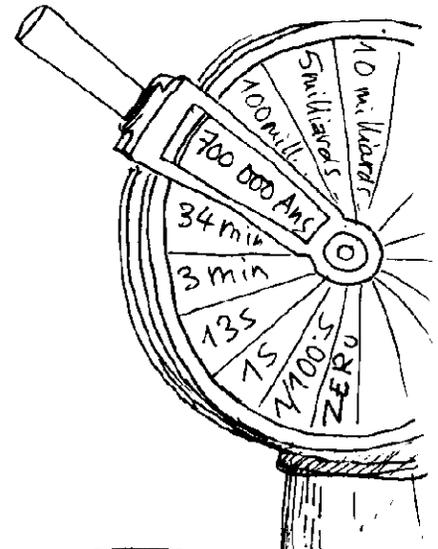
Durante **700.000 años** no pasa absolutamente NADA. El Universo continúa expandiéndose, y los fotones junto con él. El gas de fotones continúa suministrando calor a la materia a fin de que las dos temperaturas T_R y T_m permanezcan iguales (equilibrio termodinámico).



Hasta que la temperatura desciende a **3000 Kelvin.**

EL UNIVERSO TRANSPARENTE

Otro mecanismo MORFOGENÉTICO entra en juego. Las fuerzas eléctricas tienden a ligar los electrones a los núcleos para formar los átomos. La agitación térmica ha disminuido de tal forma que las estructuras no se rompen, una vez formadas, por efecto de las colisiones con otro átomo u otro componente de la mezcla



Poco a poco, todos los electrones LIBRES son capturados por los núcleos

Esos extraños átomos... con sus grandes electrones. Uff... no me acostumbro

Y el universo se vuelve TRANSPARENTE

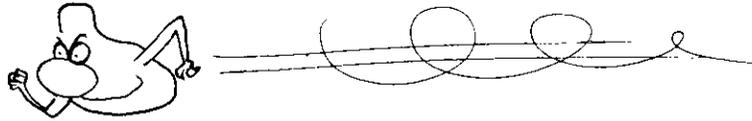
¿Qué quieres decir con transparente?
¡¿Es que antes era opaco?!

Antes, los fotones interactuaban constantemente con la materia y ningún fotón lograba abrirse camino en ese medio.

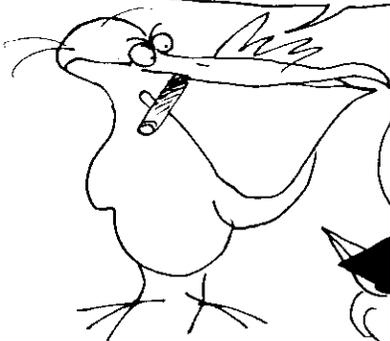
¡Pffff!

EL DESACOPLE

Ahora todo eso se acabó. Los fotones pueden atravesar todo el Universo sin apercibirse de que la materia existe; hay un DESACOPLE. Por dos razones. Primero, porque hay más espacio. Segundo, porque los fotones interactúan menos con la materia neutra (los átomos).



Bueno, veamos... los telescopios nos proporcionan imágenes que, de alguna manera, provienen "directamente del pasado..."



Si, pero incluso con un telescopio fantásticamente potente, jamás podremos observar un fenómeno de la época en que el Universo tenía menos de 700.000 años



El pasado, el pasado remoto del Universo, permanecerá por siempre fuera de foco, nebuloso

¡Sí, es imposible psicoanalizar el Universo!



La materia y los fotones han dejado de interactuar y de intercambiar energía: el EQUILIBRIO TERMODINÁMICO SE ROMPE, y la temperatura de la materia T_m comienza a disminuir más rápidamente (como el inverso del cuadrado del radio del Universo) que la temperatura T_R de los fotones, la temperatura de la radiación, que decrece solamente como el inverso del radio R

¡Hola chicos!

¡Ahora cada uno por sí mismo!

¡Eh! ¿Pero qué sucede?
La noche comienza a caer
de repente y empieza a
hacer mucho frío...

El Universo experimenta ahora una especie de crepúsculo, y continúa enfriándose. El cielo pasa de violeta a rojo oscuro: es la noche que cae como una fría capa. Hay también mil millones de fotones originales por cada átomo de helio o hidrógeno. Pero estos fotones, distendidos a causa de la expansión, han quedado como exangües

EL BIG BANG ha llegado a su fin.

¡Por poco y no hubiera quedado nada (una partícula en mil millones)!

Todo está oscuro, como en un túnel



¡Brrr... que frío más
condenado!

La longitud de onda de los
fotones es de 0,15 mm, lo
que corresponde a una temperatura
de radiación $T_R = -173^\circ\text{C}$

Los átomos, por su parte,
se mueven a 150 m/s,
lo que equivale a una
temperatura de la materia
 $T_m = -267^\circ\text{C}$

Bueno, creo que estoy a punto de comprender
cómo es que funciona el Universo

Pero me queda una
pregunta importante:
¿para qué sirve todo esto?

Sí, Anselmo tiene razón.
¿Qué sentido tiene todo esto?

¿Acaso es útil?

Veamos: al comienzo había un
montón de cosas en un
gran desorden

El CAOS

Después el universo se puso a
fabricar ESTRUCTURA, cada vez más
compleja: núcleos, átomos, ...

He encontrado el principio
cosmológico de base

Ah sí...
¿y cuál es?

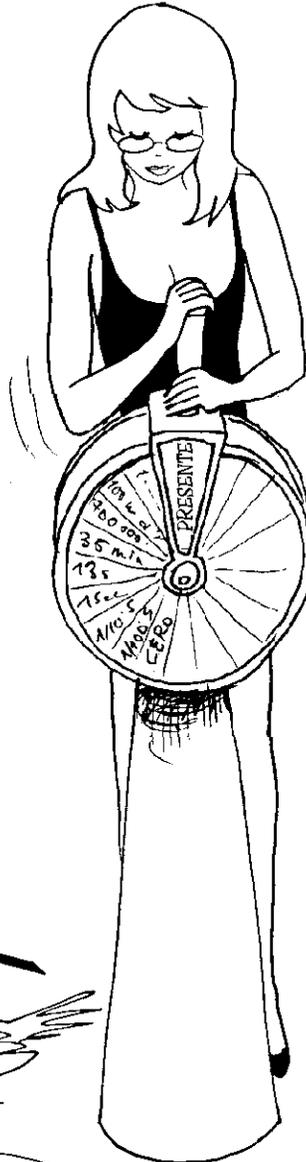
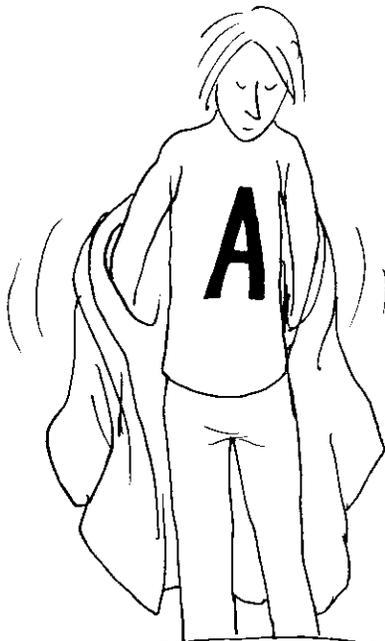
¿PARA QUÉ SER SENCILLO
CUANDO SE PUEDE SER
COMPLICADO?

Bueno... no está mal tu
pequeña historia. Pero es
pura especulación, fantasías
de teórico.

¿Quién dice que las cosas
ocurrieron como dices?



Para responder a la pregunta de León, olvidemos el Universo de la moqueta y volvamos al presente

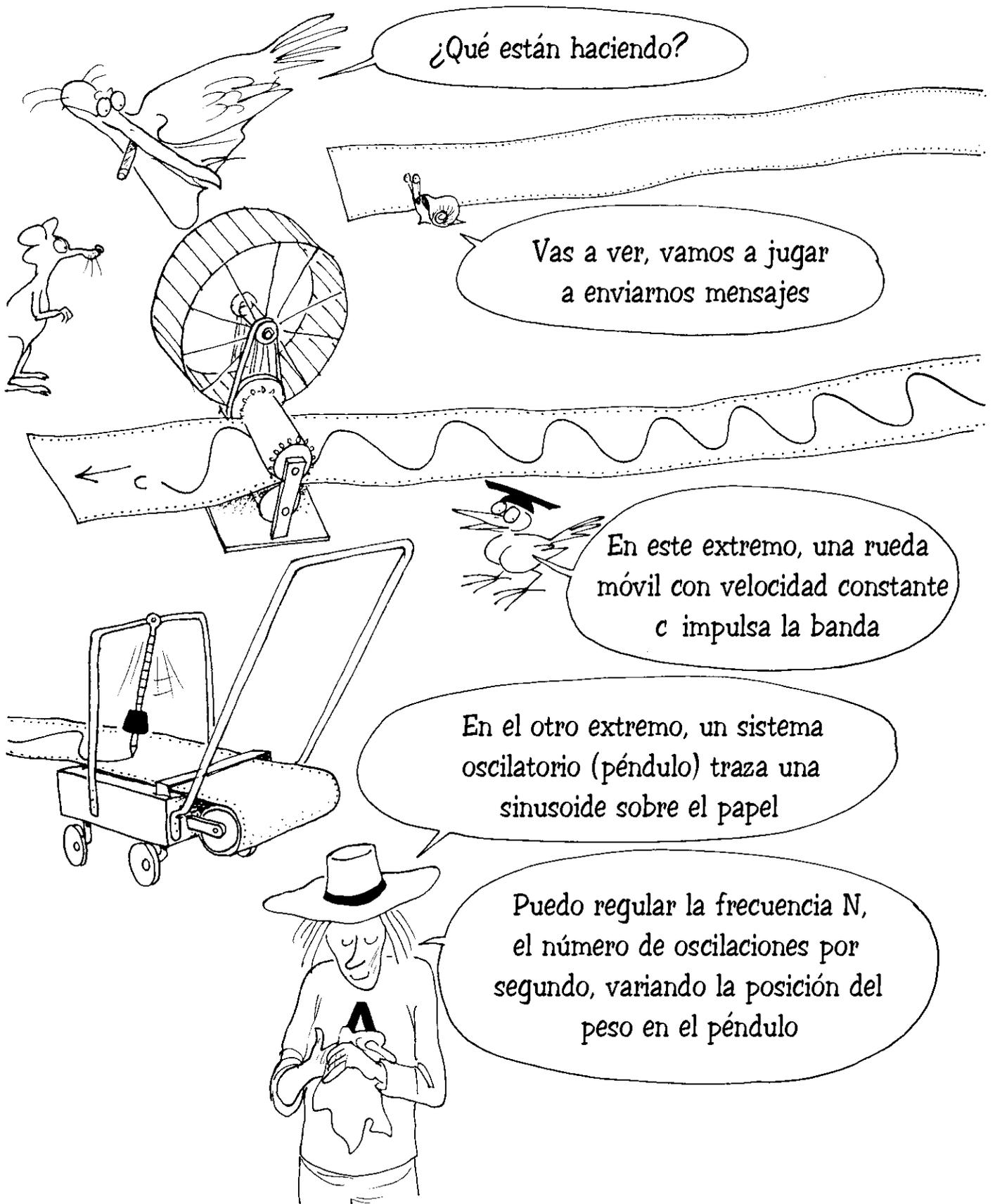


¿Y todo el resto qué?
La formación de las galaxias,
de las estrellas...
¿nos olvidamos de eso?

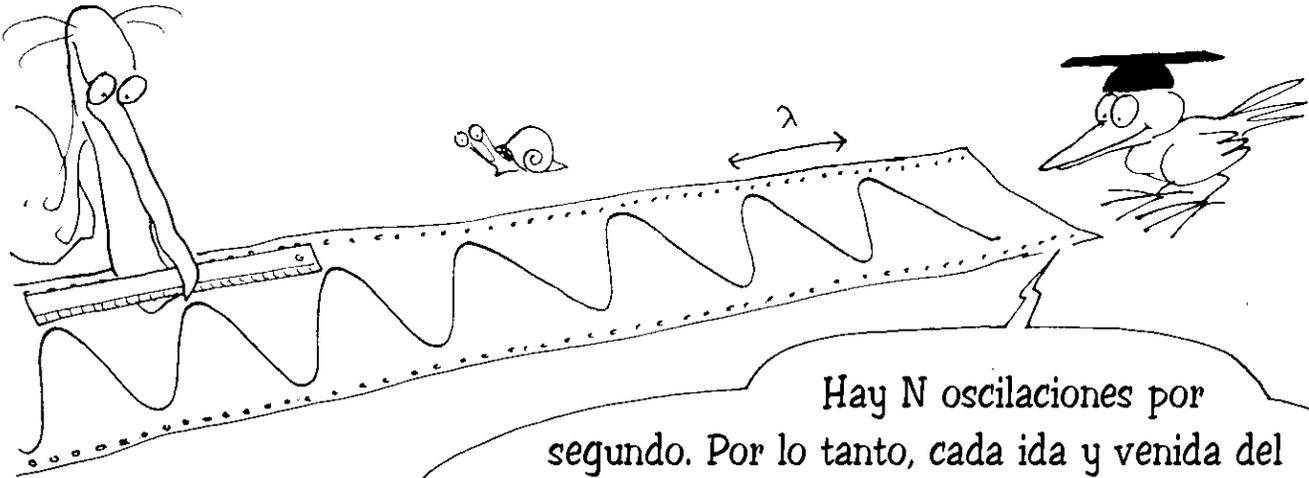
No, no. Todo eso lo contaremos
en otra parte (*)

(*) Ver "MILLE MILLIARDS DE SOLEILS", del mismo autor (NdT).

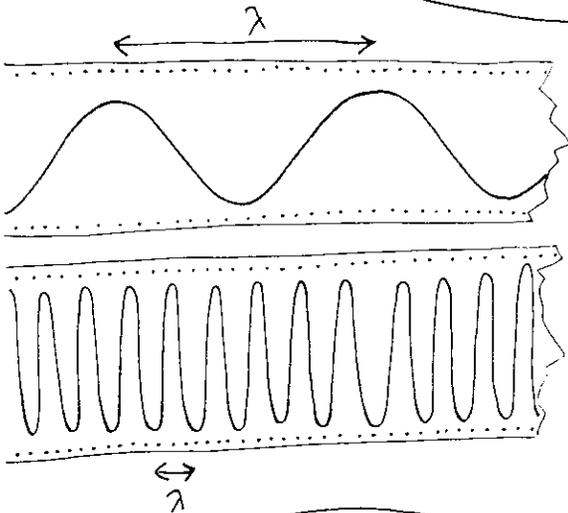
EL EFECTO DOPPLER



Bueno, está bien. Yo puedo medir la longitud de onda de recepción



Hay N oscilaciones por segundo. Por lo tanto, cada ida y venida del péndulo se realiza en un N-ésimo de segundo, y este es el PERIODO de la onda. Durante este tiempo, la banda avanza $\lambda = c/N$ (longitud de onda)



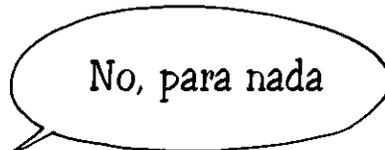
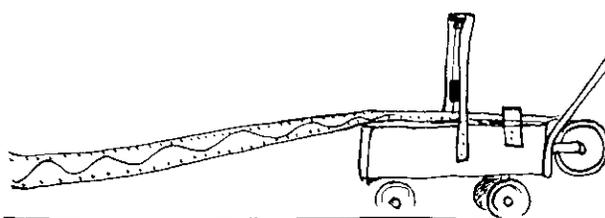
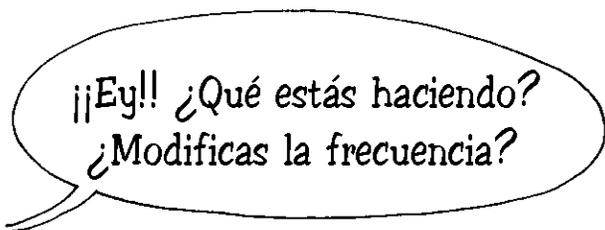
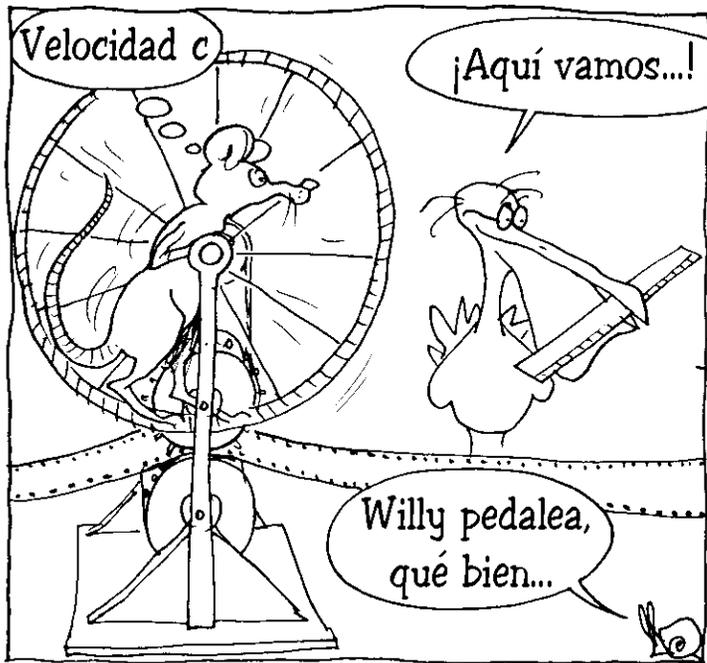
Baja frecuencia, periodo largo, gran longitud de onda.
Alta frecuencia, periodo corto, pequeña longitud de onda

Eso permite comunicar

Algo muy importante, la comunicación

Bien. Voy a hacer un ensayo de transmisión a una distancia mayor

¿Listos?

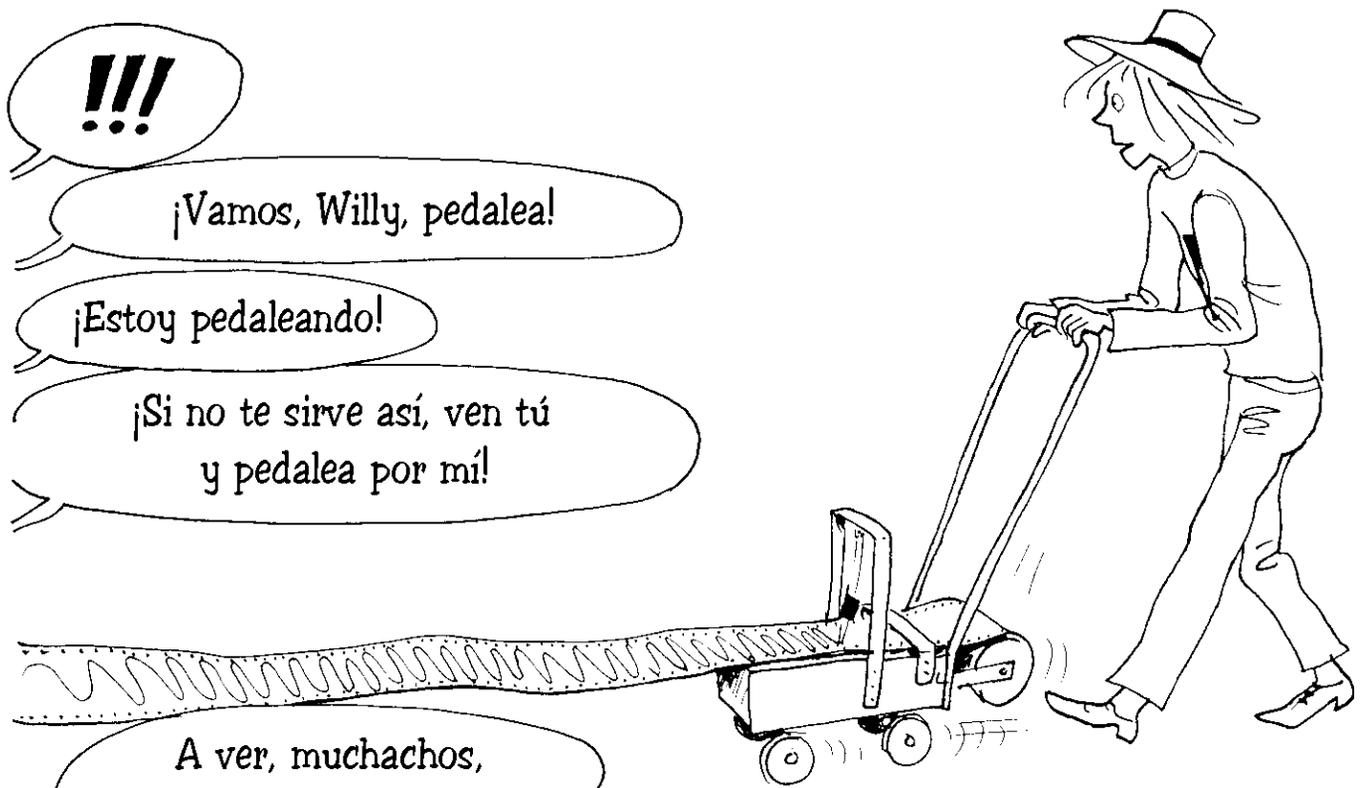


!!!

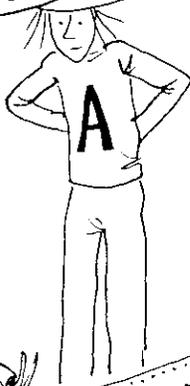
¡Vamos, Willy, pedalea!

¡Estoy pedaleando!

¡Si no te sirve así, ven tú
y pedalea por mí!



A ver, muchachos,
explíqueme este caso

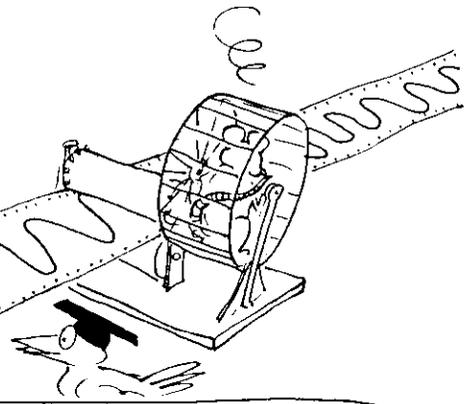


?



(A)

(B)



Se ha normalizado, pero poco antes se produjo un aumento de la longitud de onda (A), es decir una caída aparente de la frecuencia de recepción. Después, luego de un intervalo normal (B), se produjo un aumento de la frecuencia de recepción (C), es decir una disminución de la longitud de onda λ

Oigan,
¿puedo parar?

Claro, Willy, para

Willy dice que todo el tiempo
pedaleó con regularidad

¿Podría ser que el papel
se dilató o se contrajo?

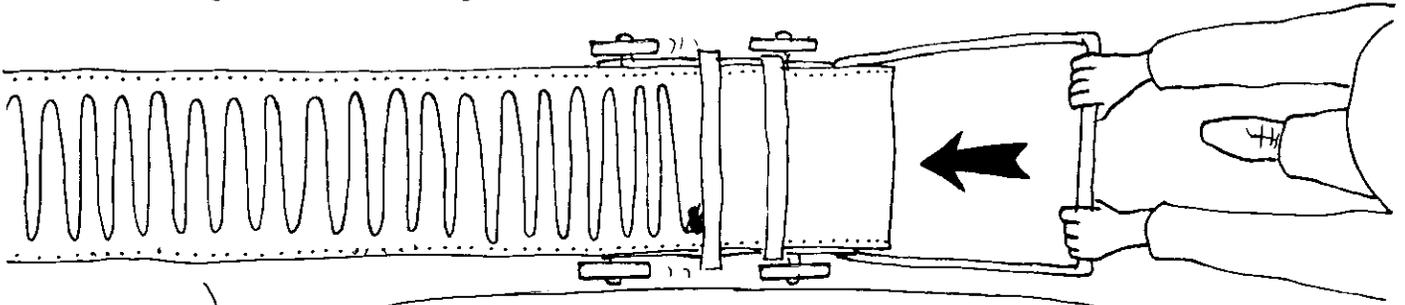
No, Anselmo. Es el
efecto Doppler-Fizeau

¿El... quéé?

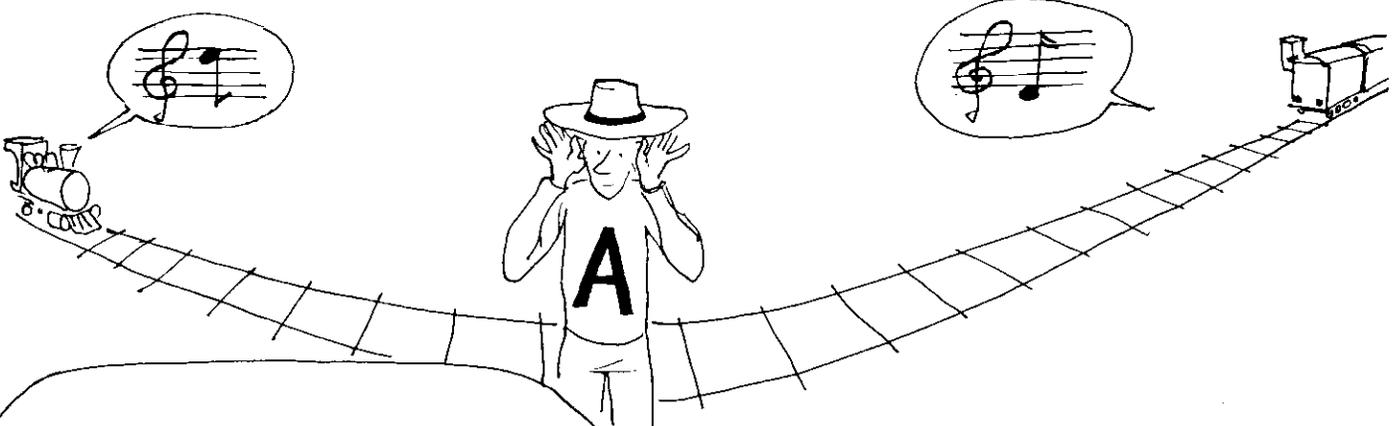
Cuando desplazas el carrito,
la frecuencia aparente varía

Cuando se aleja, la sinusoide se
estira y la frecuencia se percibe
más baja

Cuando el carrito se acerca y avanza sobre la banda, la sinusoide se comprime, se contrae, y la frecuencia parece más alta.



Es exactamente lo mismo que sucede cuando oyes el sonido de un tren que pasa a tu lado. Cuando se acerca el sonido es más agudo, y más grave cuando se aleja



Con un sistema de este tipo, cuando conozco a priori la longitud de onda de la señal que será emitida por una fuente inmóvil, puedo calcular la velocidad de acercamiento o alejamiento (recesión) de dicha fuente

Y lo que es válido para el sonido lo es igualmente para la luz. Los objetos que se alejan aparecen más rojos, y los que se acercan más azules

Bien, retomemos nuestros experimentos de transmisión a distancia

Willy, a tu lugar

¡Ha cambiado la frecuencia!

O se está moviendo...

Otra vez lo mismo
que antes

¡Sí, eso es!
Se está alejando de nuevo

¡No, cabezas de chorlito,
no me estoy alejando!
¡Estoy AQUÍ...!

¡Y el oscilador está
allá abajo!

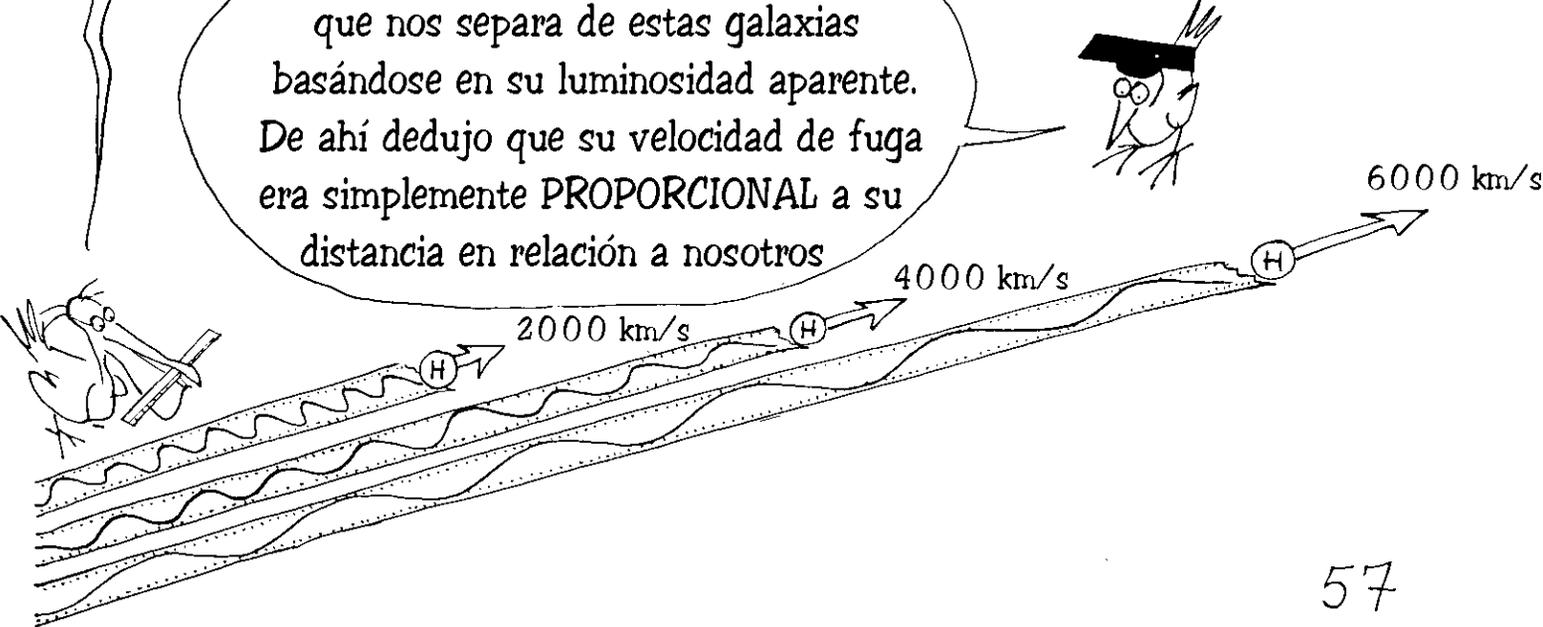
LA FUGA DE LAS GALAXIAS



Pues sí, fue de esta manera que, en 1930, Edwin Hubble descubrió la **EXPANSIÓN DEL UNIVERSO**, al constatar que las galaxias distantes huyen de nosotros, tornándose más rojas, en virtud del efecto **DOPPLER-FIZEAU**, a medida que se alejan

Estos átomos de hidrógeno emiten, en principio, en una longitud de onda de 21 cm. El efecto Doppler me indica velocidades de fuga de 2000, 4000 y 6000 km/s

Hubble pudo evaluar la distancia que nos separa de estas galaxias basándose en su luminosidad aparente. De ahí dedujo que su velocidad de fuga era simplemente **PROPORCIONAL** a su distancia en relación a nosotros



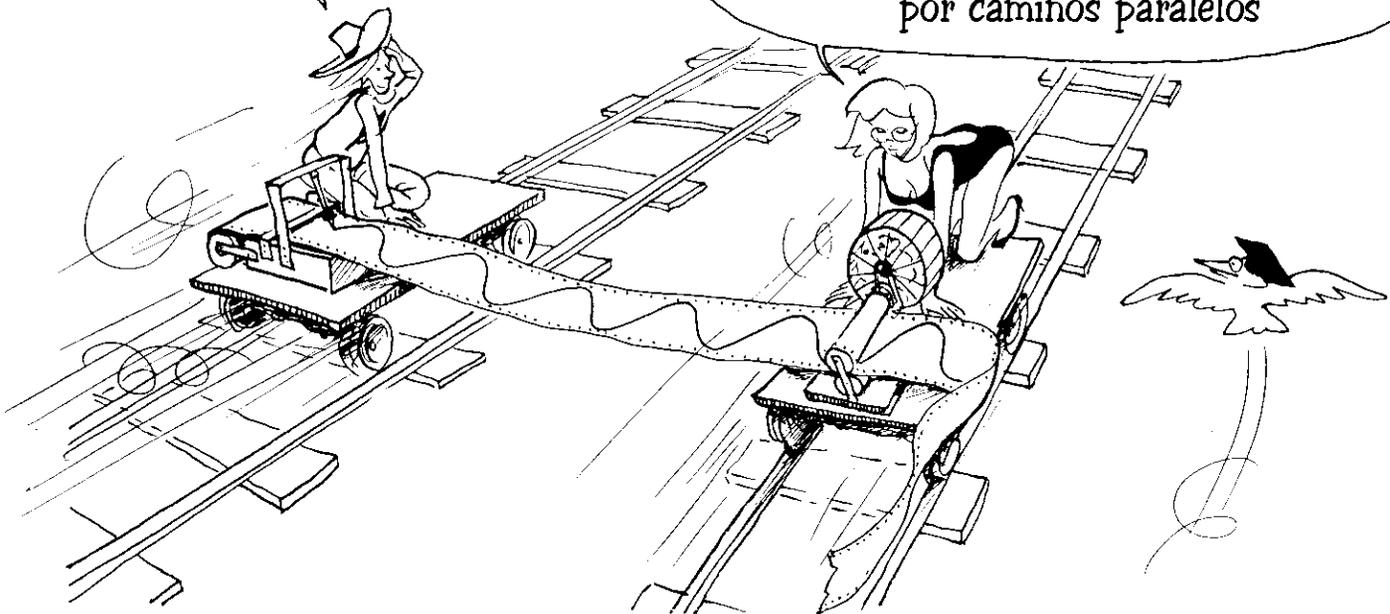
¿Espera, y eso qué quiere decir?
¿Que los objetos aceleran cuando se
alejan de nosotros?

No exactamente. La moqueta se dilata
en todas partes. Imagina un punto A
que, en el instante $t = 0$, está a un
metro tuyo. Al cabo de un segundo,
estará a $1m20$. Su velocidad de fuga
es entonces de 20 cm/s

En el mismo lapso de tiempo,
un punto B, situado inicialmente a 2 m
de tí, se encontrará a $2m40$ (en B'), y
su velocidad EN RELACIÓN A TÍ
será de 40 cm/s

El efecto DOPPLER indica
VELOCIDADES RELATIVAS

No hay variación alguna de la
longitud de onda cuando el emisor y el
receptor van a la misma velocidad
por caminos paralelos



¿Entonces todo nuestro universo está en expansión?

Esperen, tengo otra idea. Supongamos que el tiempo... se acelere

¡Pero eso no quiere decir nada!?

Las oscilaciones de los átomos, como por ejemplo los átomos de hidrógeno, son como el "pulso" del Universo. Imagina un universo en el que su pulso se acelera. Entre más envejece, mas rápido late el "pulso". Las imágenes del pasado nos llegan como una película en cámara lenta. Y el efecto Doppler no es más que una ilusión

Así es, Tiresias, podemos imaginar todo eso. Lo que dices equivale a decir que las leyes de la física evolucionan en el tiempo, tal como sostiene Fred Hoyle

EL FONDO DEL CIELO ES FRÍO

Mas existe otro argumento a favor de la expansión y de su corolario, el BIG BANG

¡Hic!

Vimos antes que solamente un fotón en mil millones pudo haberse transformado en materia

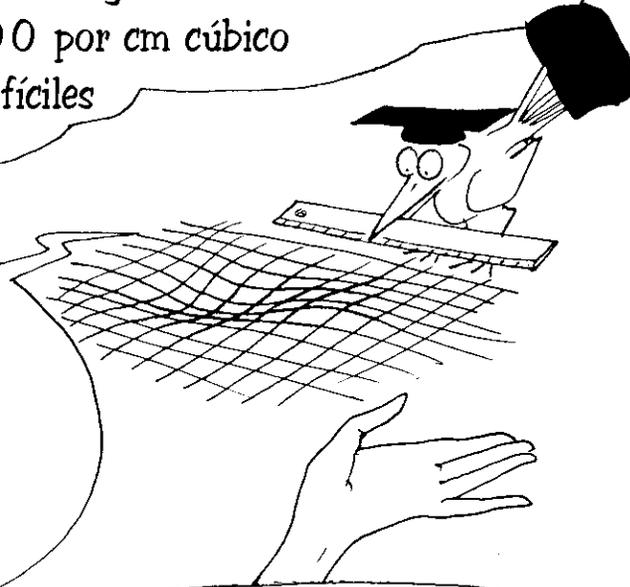


¡Y en antimateria!



Debería, por lo tanto, existir una gran cantidad de esos fotones primitivos, alrededor de 500 por cm cúbico (más otros tantos neutrinos, más difíciles de detectar)

Su longitud de onda debería ser de unos cinco milímetros, lo que corresponde a una temperatura de la radiación T_R de 3 grados Kelvin ($-270\text{ }^\circ\text{C}$)

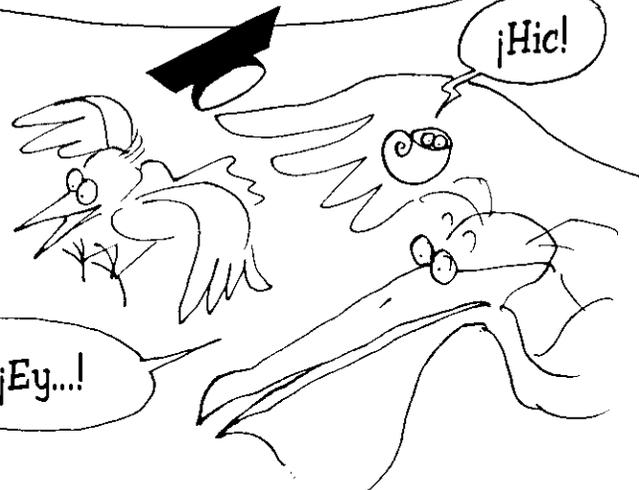


Esos fotones, de energía muy pequeña, fueron detectados por Penzias y Wilson en 1964, y son las cenizas verdaderas del BIG BANG, la prueba tangible de la gran danza cósmica



¡Hic!

¡Ey...!



EL HORIZONTE COSMOLÓGICO

Sofía, según la LEY DE HUBBLE la velocidad de alejamiento de los objetos crece con la distancia...

... ¡Entonces por lógica deben existir objetos que se alejan de nosotros a velocidades iguales e incluso mayores que la velocidad de la luz!?

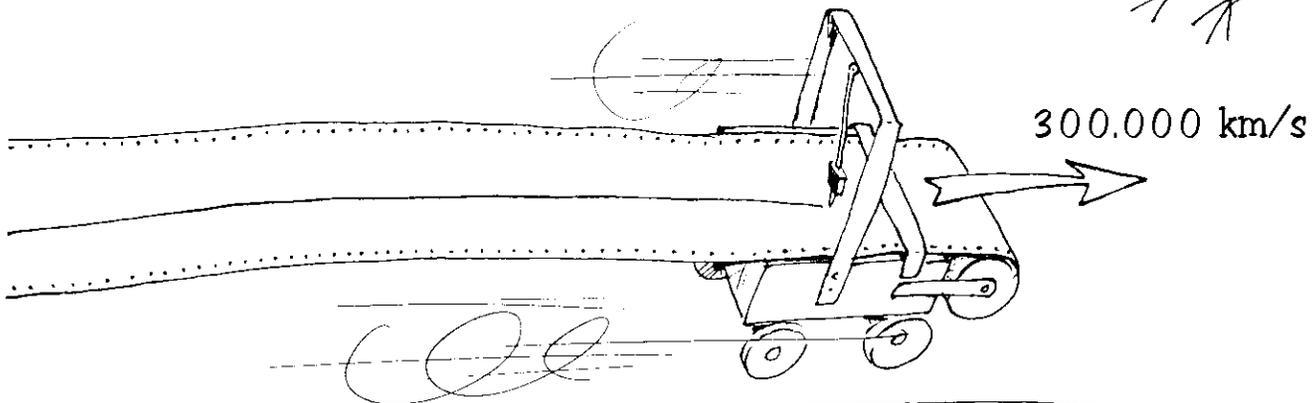
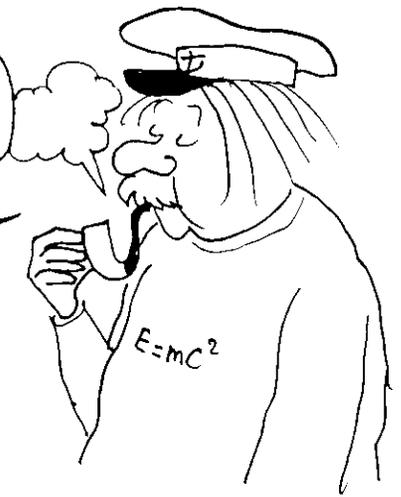
¿O sea que nunca recibiremos esa luz?

¿Por qué?
Si un avión se aleja de mí a una velocidad supersónica, ¿puedo oír el sonido que produce, o no?

Mis amores, no es de esa forma como hay que ver las cosas...

El hecho de desplazarse tiene una incidencia sobre el TIEMPO (*). Un objeto que se desplaza a una velocidad cercana a los 300.000 km/s, la velocidad de la luz, se encuentra, con respecto a nosotros, observadores, en una "esfera de tiempo" diferente. Percibimos su mensaje como una especie de película en cámara lenta

Si el objeto se mueve con respecto a nosotros a la velocidad de la luz, el desfase temporal se vuelve total, y su tiempo parece coagularse como una salsa



A causa de ese desliz, de ese desfase de los tiempos de uno con respecto a los del otro, la frecuencia de recepción de las ondas disminuye. Este fenómeno, de esencia relativista, se sobrepone y contribuye al efecto DOPPLER. Cuando la velocidad de alejamiento del emisor, en relación a nosotros, alcanza el valor c , la frecuencia de las ondas recibidas cae a cero. ¡Nada de energía, nada de ondas, cero mensajes!



Ondas de frecuencia nula...
¡ya no son ondas!

(*) Ver "TODO ES RELATIVO", del mismo autor.

Para los objetos que nos interesan, una velocidad relativa igual a 300.000 km/s se alcanza en una esfera llamada HORIZONTE. Éste no es la frontera DE LAS COSAS EXISTENTES sino la frontera de las COSAS QUE PODEMOS CONOCER. El universo accesible para nosotros no es más que una porción de un universo más vasto. Este horizonte está a unos diez mil millones de años-luz. El alcance del más potente telescopio terrestre actual, el de monte PALOMAR (*), es de mil millones de años-luz.

La Dirección

¿Pero entonces cuál es el significado del radio R del universo de antes?



La historia comenzó cuando el Universo tenía un centésimo de segundo. Imagina que en ese instante se traza un círculo, o mejor una esfera, de radio R, y que se sigue la expansión de esa esfera de referencia a lo largo del tiempo.
Eso es todo...

De esa forma no se hacen suposiciones sobre el hecho de que el espacio pueda ser finito o infinito (**)

Tiene ojos fascinantes...

¡Ey, ustedes dos!

¡Esta historia aún no ha terminado!

JiJiJi

Y los necesitamos

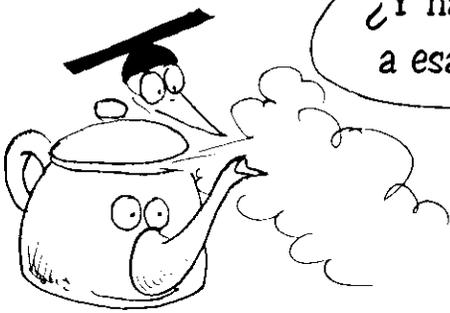
(*) Actualmente hay al menos dos telescopios terrestres más potentes que el de monte PALOMAR, pero este último sigue siendo un hito en la historia de la cosmología (NdT).

(**) Ver "EL GEOMETRICÓN", del mismo autor.

LOS MODELOS DE FRIEDMANN



Sofía, ¿qué es lo que provoca la expansión del Universo?



Son las fuerzas debidas a la PRESIÓN. Todo ocurre como si el Universo hubiera EXPLOTADO como una bomba



¿Y nada se opone a esa expansión?



Las fuerzas de gravedad tienden a hacer condensar el Universo sobre sí mismo, a hacerlo IMPLOSIONAR

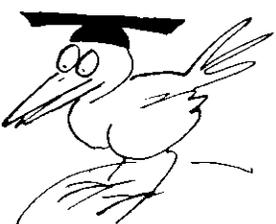


¿Acaso no se puede concebir un universo en el que esas fuerzas, de presión y gravitacionales, se equilibren?



Se puede mostrar que el equilibrio es imposible. A la menor perturbación de ese equilibrio, este universo "estático" explota o implosiona

EXPLOSIÓN

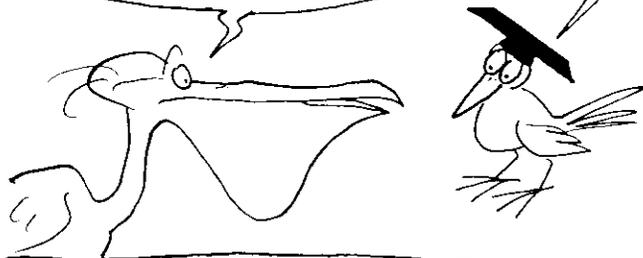


IMPLOSIÓN

Pero entonces díganme,
¿nuestro Universo pudo
haber implosionado en
lugar de hacer explosión?

En un cierto
sentido eso es
posible

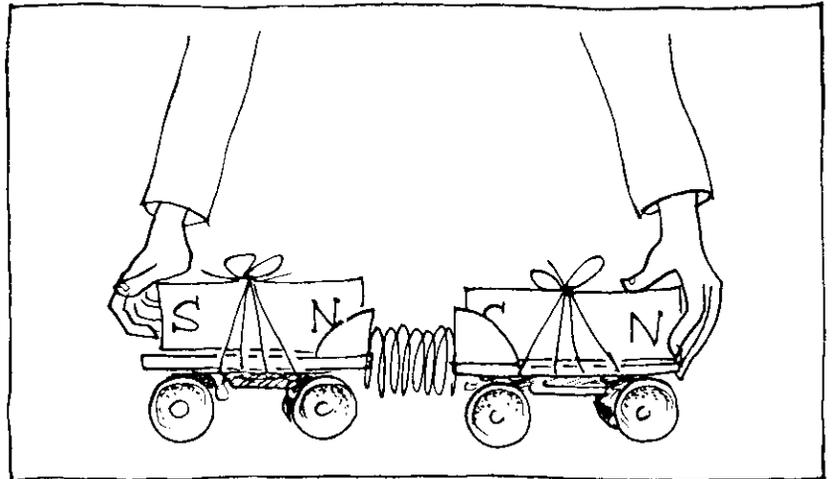
¿Quién dice, entonces,
que el tiempo no pudo haber
comenzado... marcha atrás...?



¡Tsss!...



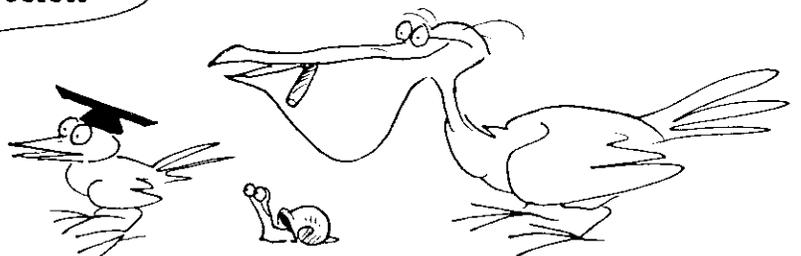
¿Que estás
fabricando?

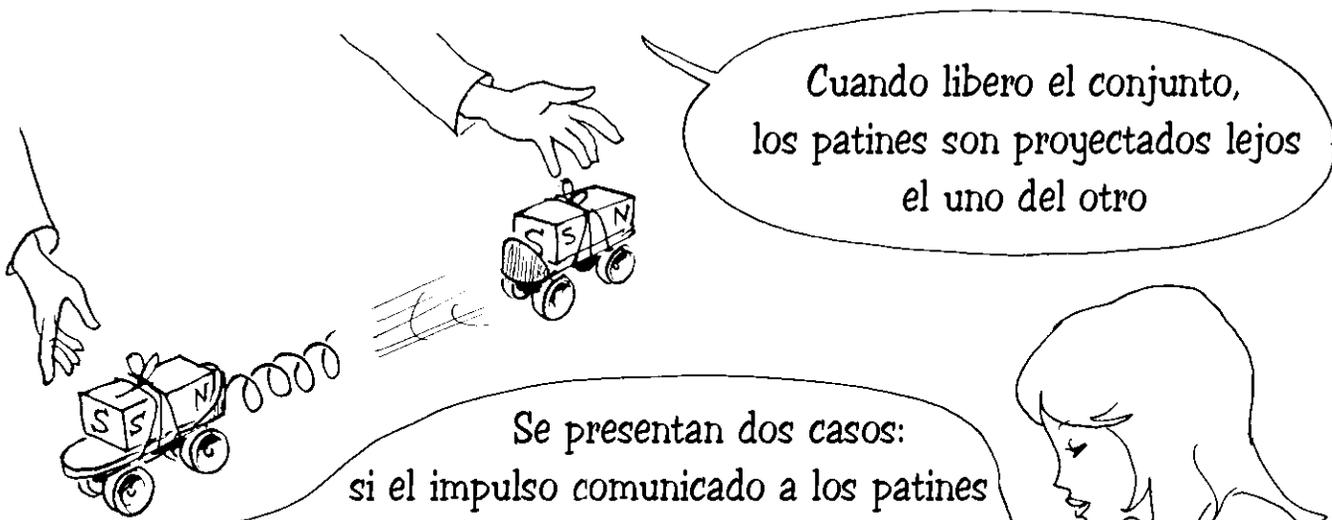


Anselmo ha unido dos imanes que se atraen sobre
dos patines de ruedas. Y un resorte comprimido
tiende a apartar los patines uno del otro.



Mira, los imanes
representan las fuerzas de
gravitación, atractivas y
cohesivas. El resorte simula
las fuerzas de presión





Quando libero el conjunto, los patines son proyectados lejos el uno del otro

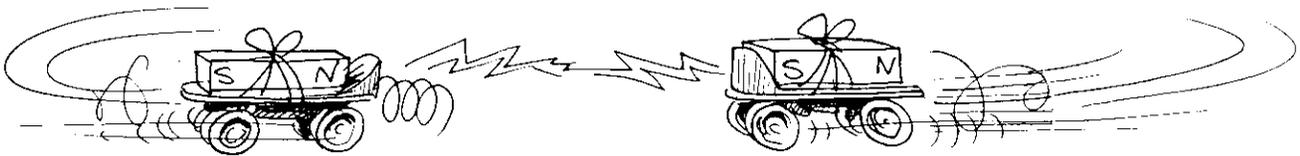
Se presentan dos casos:
si el impulso comunicado a los patines es suficientemente fuerte, estos se alejarán el uno del otro indefinidamente. Entre más se alejen, menor resultará la fuerza de atracción, que varía como el inverso del cuadrado de la distancia



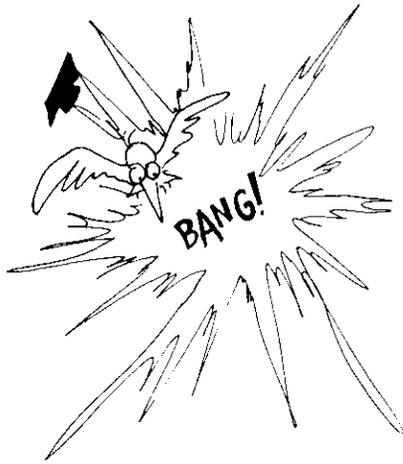
Si el rozamiento no existiera, los patines terminarían por alcanzar una VELOCIDAD CONSTANTE



Pero si el impulso dado por el resorte es muy pequeño, o los imanes muy potentes, los patines regresarán y "caerán" uno sobre otro a velocidad creciente



Todo esto evoca dos tipos posibles de universo:
Primer Escenario: La expansión se prolonga indefinidamente. Cuando las últimas estrellas se hayan extinguido, llegará la noche, el frío absoluto, la MUERTE TÉRMICA.



Segundo Escenario:

Las fuerzas de gravedad terminan por dominar. Luego de llegar a una máxima extensión, el Universo "colapsa sobre sí mismo". Todas las estructuras: galaxias, estrellas, etc. resultan pulverizadas. Los mismos átomos son despedazados y el BIG BANG ocurre al contrario, hasta una nueva recuperación del Universo y una nueva fase de expansión.



Herr Albert Einstein, quien en 1917, a costa de increíbles y casi imposibles acrobacias matemáticas, había concebido su modelo estacionario, quedó muy consternado. Friedmann le había arrebatado la victoria. Comenzó entonces a elaborar la teoría de la relatividad, trabajo que le tomó varios años.



De acuerdo con los modelos de Friedmann, el Universo está en expansión indefinida si la densidad (actual) de materia es menor que 5×10^{-30} gramos por centímetro cúbico. Este universo tendría además un volumen y una extensión espacial infinitos.

(*) Palabras originales de Einstein.

Las ~~LA~~ GEOMETRÍA DEL UNIVERSO

Para nosotros, el Universo es una hipersuperficie de cuatro dimensiones en la que se mezclan el espacio y el tiempo.

Las ideas evocadas en las páginas precedentes corresponden cada una a una presentación diferente de esa ENTIDAD-UNIVERSO que es el ESPACIO-TIEMPO.

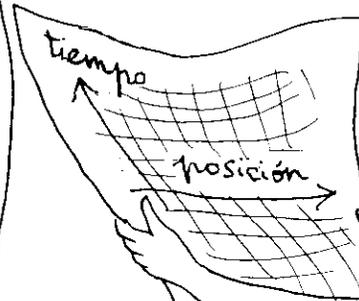
¿El Universo...
qué FORMA
tiene?

¡Ay no...!

Recuérdese que el número de dimensiones de un espacio es el número de cantidades que hacen falta para definir la posición de un punto

Cita: ¹ martes a las once en la esquina de la ² Sexta Avenida con la ³ Calle Quinta en el ⁴ tercer piso : cuatro cantidades

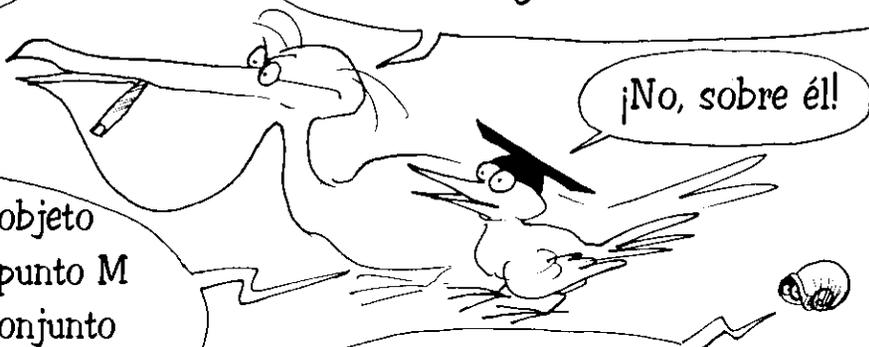
En un dibujo sólo se pueden representar espacios en DOS dimensiones, es decir SUPERFICIES. Por eso vamos a estudiar un espacio-tiempo de 2 dimensiones, siendo una la posición y la otra el tiempo





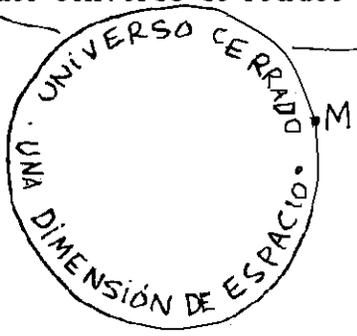
El primer modelo de Universo cerrado, el modelo estático de Einstein, puede representarse mediante un cilindro

Oigan, esperen... si entendí bien, estamos... ¿dentro del cilindro?



¡No, sobre él!

En un instante dado un objeto está representado por el punto M sobre la superficie, y el conjunto del Universo se reduce a un círculo

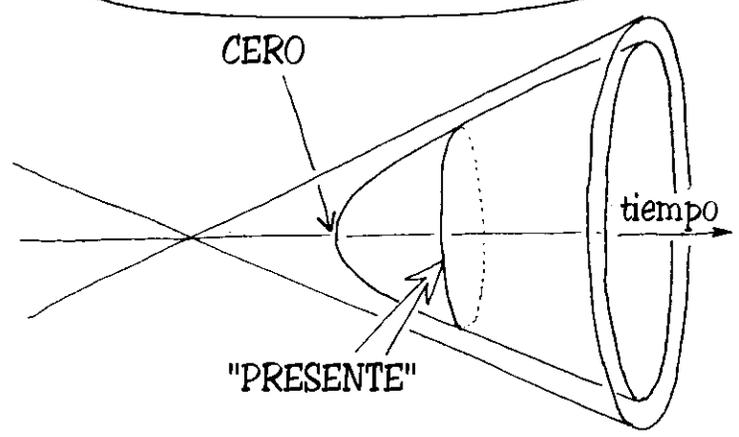


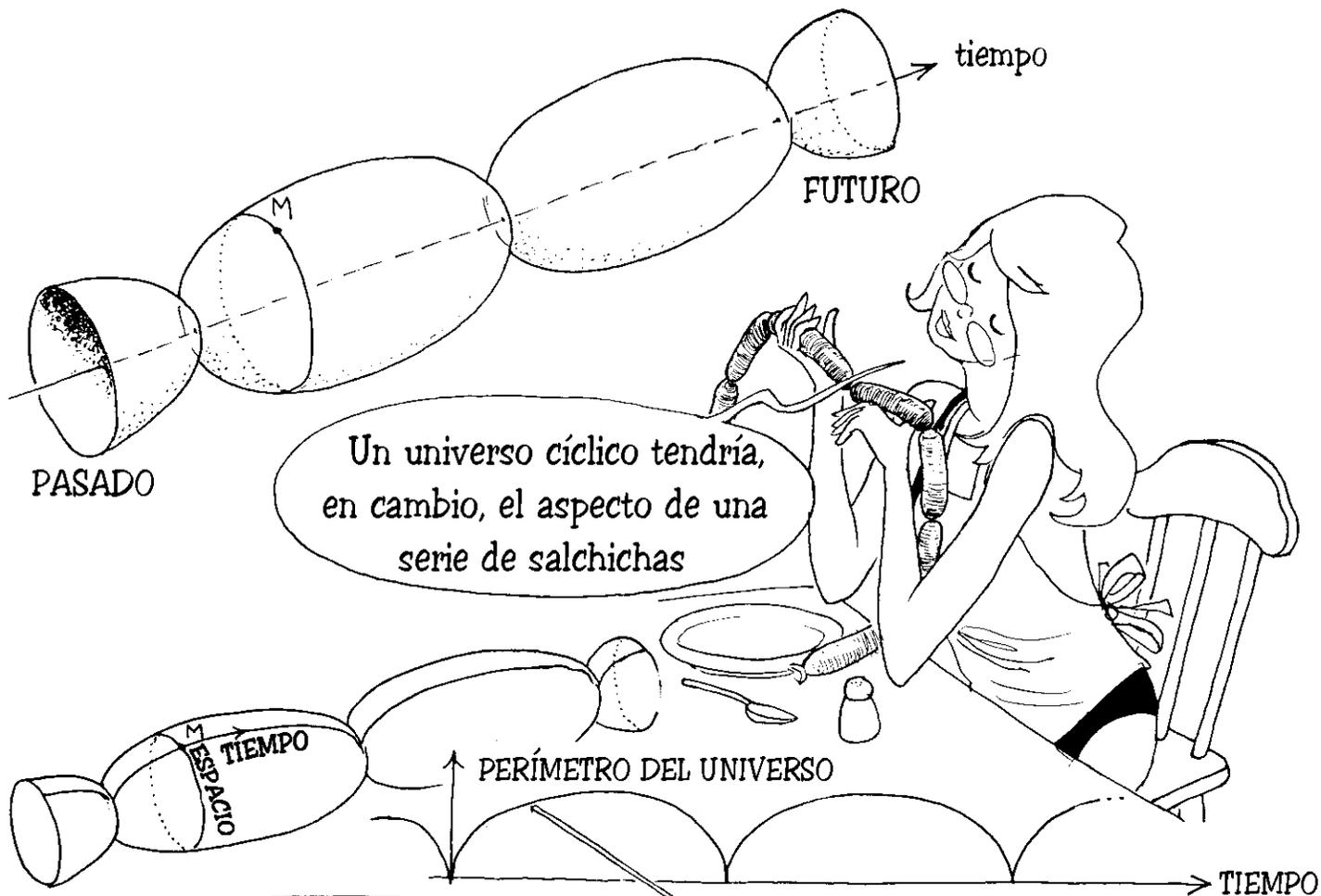
Cuando un objeto está inmóvil describe una generatriz del cilindro a lo largo del tiempo



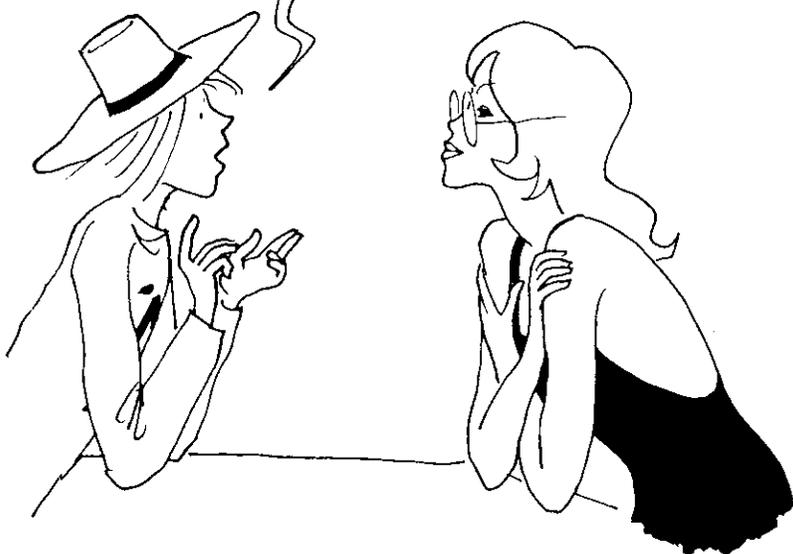
Es fácil representar la dilatación de ese universo cerrado en función del tiempo, con lo que se tiene un modelo de universo no estacionario

Aquí tienen, por ejemplo, una imagen en 2 dimensiones de un espaciotiempo en expansión indefinida





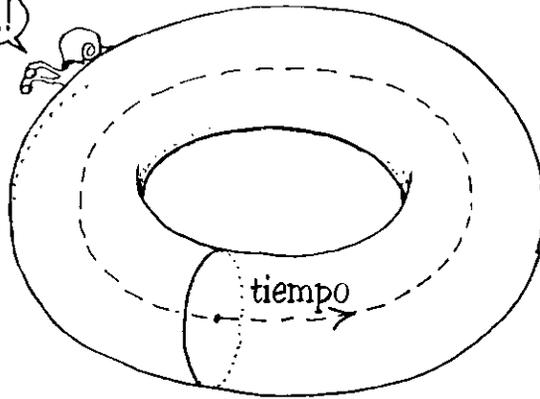
¿Pero por qué el tiempo tiene que ser necesariamente "ABIERTO", es decir infinito a la vez hacia el futuro y hacia el pasado?



¿Quieres decir que el tiempo... podría cerrarse sobre sí mismo?!!

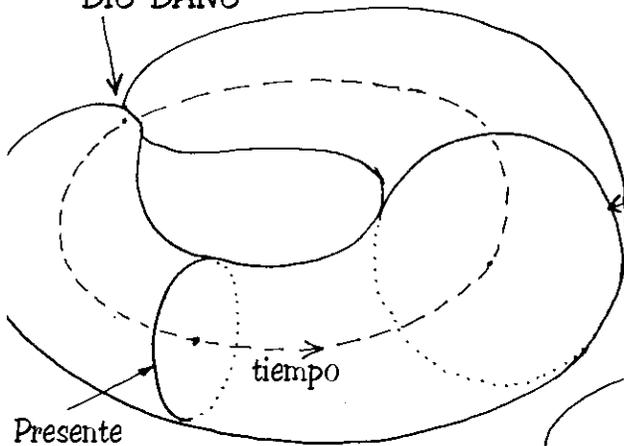
No hay problema. Si se cierra sobre sí mismo el modelo de Einstein, se obtendrá... un TORO

¡Otra vez...!



En este ESPACIO-TIEMPO totalmente cerrado, los mismos eventos se reproducen idénticamente al cabo de un tiempo τ , el cual sería el PERIODO de tan extraño universo

SINGULARIDAD
BIG BANG



También se puede cerrar sobre sí mismo un universo cíclico

ESTADO DE MÁXIMA
EXPANSIÓN

Eso se convierte en una serie de salchichas cerrada sobre sí misma... ¡con una sola salchicha!

¡Oh, miren a León!!!

¡Se ha desmayado!
Era previsible...



EPÍLOGO

Esto es lo que se sabe
sobre el origen del Universo



En fin... lo que se **CREE**
SABER, pues esta visión ha
cambiado muchas veces en
5000 años

"... Pero este esfuerzo por comprender el
Universo es una de aquellas raras cosas
que elevan la vida humana por encima de
la farsa, dándole un poco de dignidad en
medio a la tragedia"

Steven Weinberg

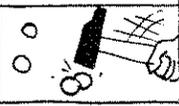


La continuación de "BIG BANG" (la formación de galaxias, estrellas, etc...) la podrán encontrar en "MILLE MILLIARDS DE SOLEILS".



EL COSMODRAMA



TIEMPO	TEMPERATURA	DENSIDAD	FENÓMENOS
ANTES...	$T \geq 10^{12}$ grados		?
1/1000 seg	300 mil millones de grados		Sopa indiferenciada de fotones, neutrinos, antineutrinos (el fotón es su propia antipartícula), protones, antiprotones, neutrones, antineutrones, electrones y positrones.
1/100 seg	100 mil millones de grados	4 mil millones de g/cm^3	Hecatombe de hadrones (protones, antiprotones, neutrones, antineutrones). Quedará uno en mil millones; el resto se aniquiló con los antihadrones presentes para dar nuevos fotones.
1/10 seg	30 mil millones de grados		Nada en particular. Demasiado caliente para que se puedan formar los núcleos de los átomos.
1 segundo	10 mil millones de grados	380.000 g/cm^3	Los neutrinos "viven su vida". Cesan de interactuar con la materia.
13 segundos	3 mil millones de grados		Hecatombe electrones-antielectrones. Quedará también uno por cada mil millones.
3 minutos	1 mil millones de grados		Nucleosíntesis: formación de núcleos de Helio. Desaparición de los neutrones libres (vida media: 109 seg).
35 minutos	300 millones de grados	1 g/cm^3	Se completa la nucleosíntesis: 25% de Helio, 75% de Hidrógeno.
700.000 años	3.000 grados		Después de la aniquilación de toda la materia y la antimateria, el Universo vive una "era radiativa" en la que la energía-materia se encuentra principalmente como radiación. Cuando la temperatura desciende a 3000°, se forman los átomos neutros; y los fotones dejan de interactuar con la materia: el universo es "transparente".
100 millones de años	$T_R = -173^\circ C$ $T_m = -267^\circ C$		No estando más recalentados por los fotones, los átomos neutros de Hidrógeno y de Helio ven caer en picada su temperatura. Formación de las galaxias y las primeras estrellas.
5 mil millones de años			Formación de la Tierra.
10 mil millones de años	$T_R = -270^\circ C$ (3 grados Kelvin)	10 g/cm^3	Desarrollo de la vida.
HOY DÍA			Invención de la bomba atómica...