

savoir sans frontieres

Las aventuras de Anselmo Chirigota

EL AGUJERO NEGRO

por

Jean-Pierre Petit

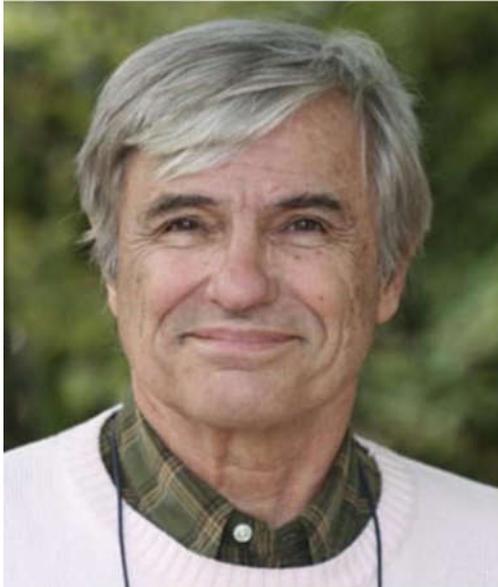


traducción: F. Xavier Safont J.

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

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

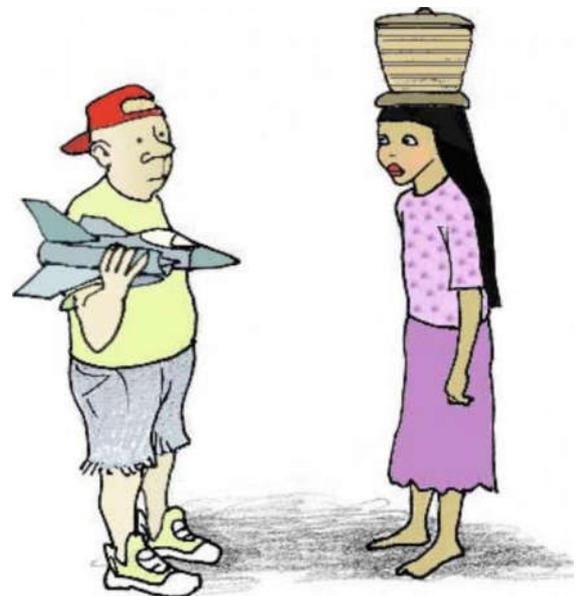


Gilles d'Agostini

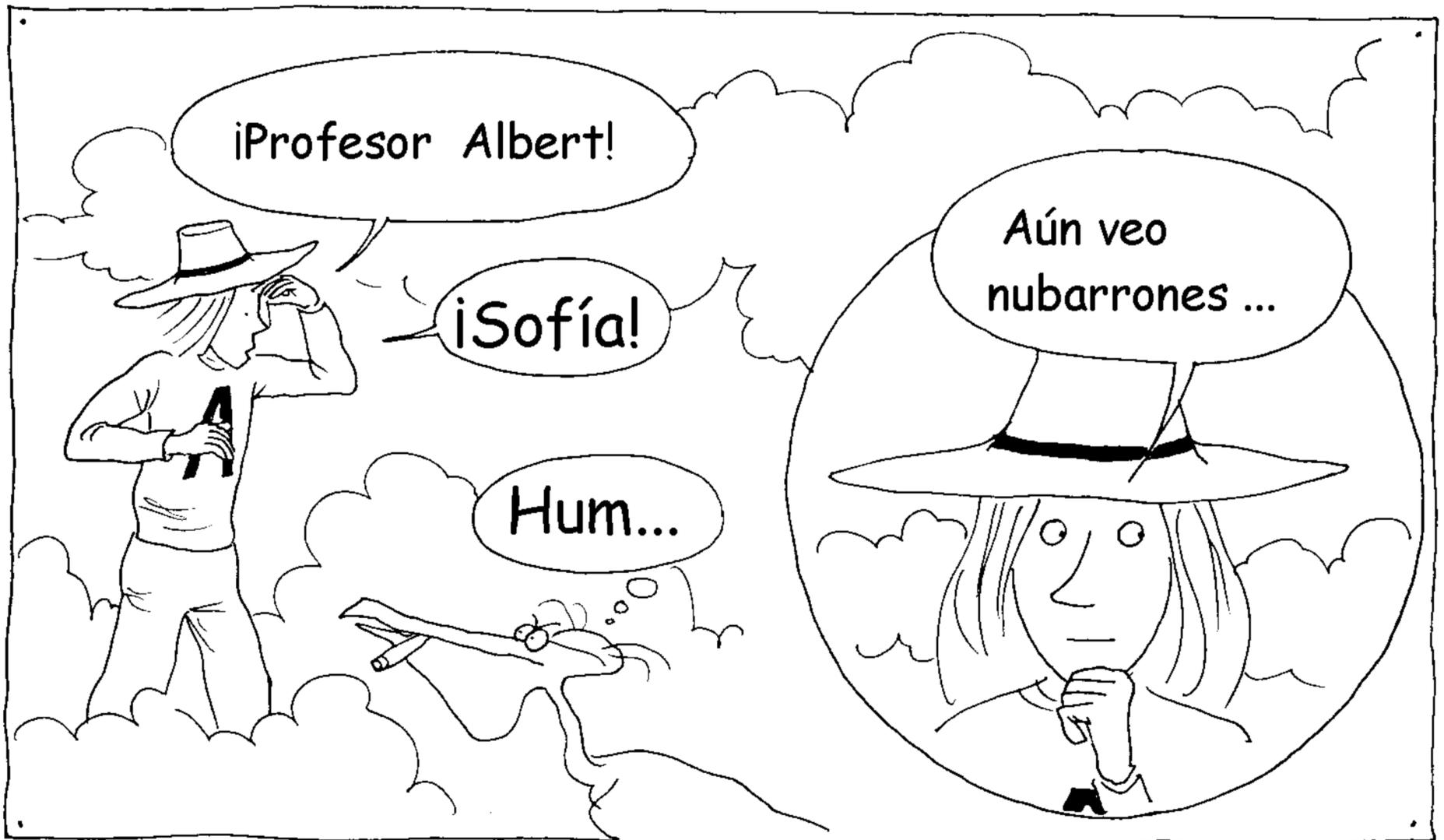
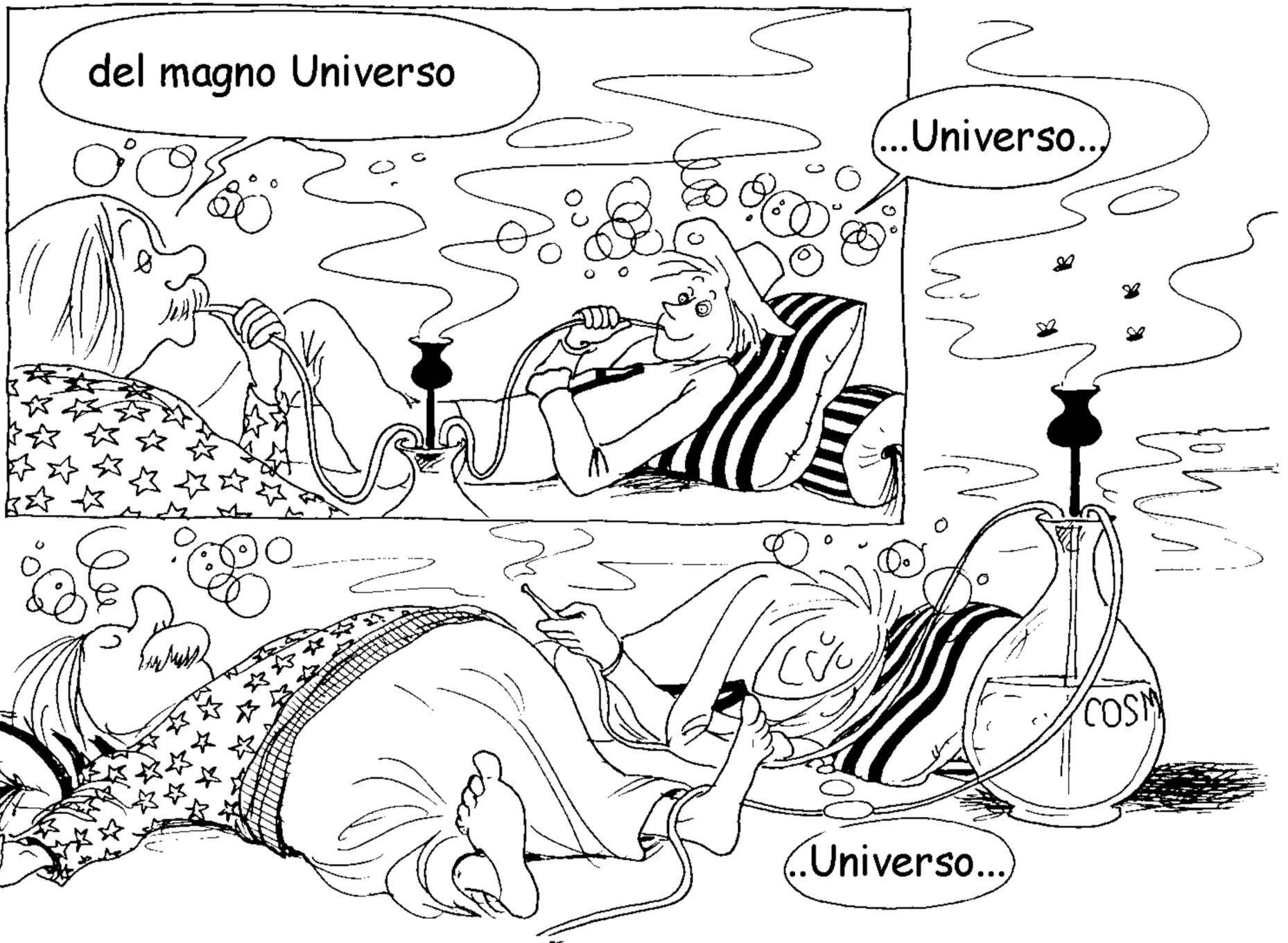
La asociación es completamente voluntaria. El dinero donado es usado en su totalidad para retribuir a los traductores.

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

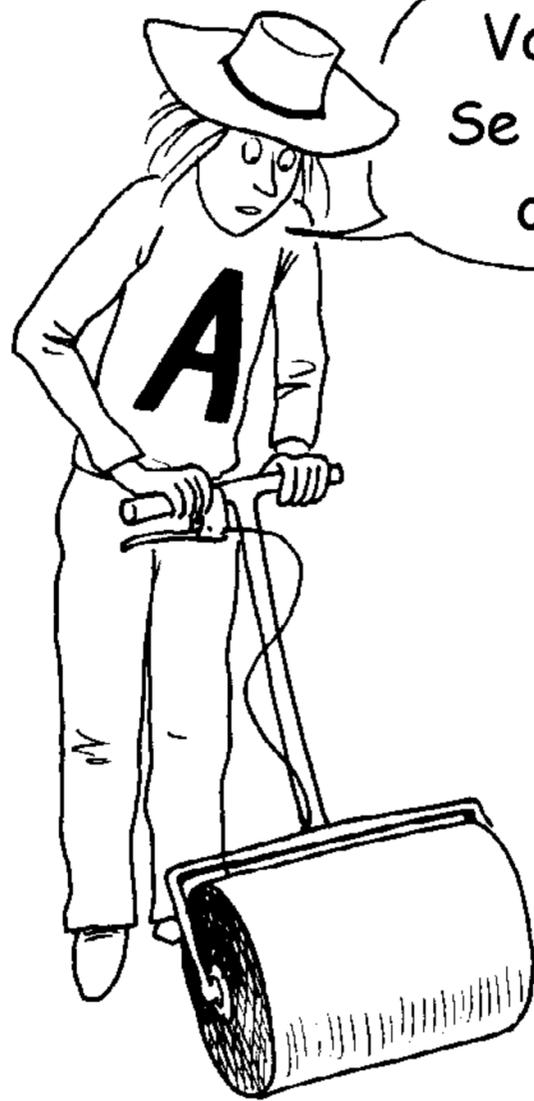
<http://www.savoir-sans-frontieres.com>







Una vez más, Anselmo sale a explorar mundos nebulosos.



Vaya, ¿qué es este trasto?
Se diría que es un rodillo para una pista de tenis,
o para pintar.

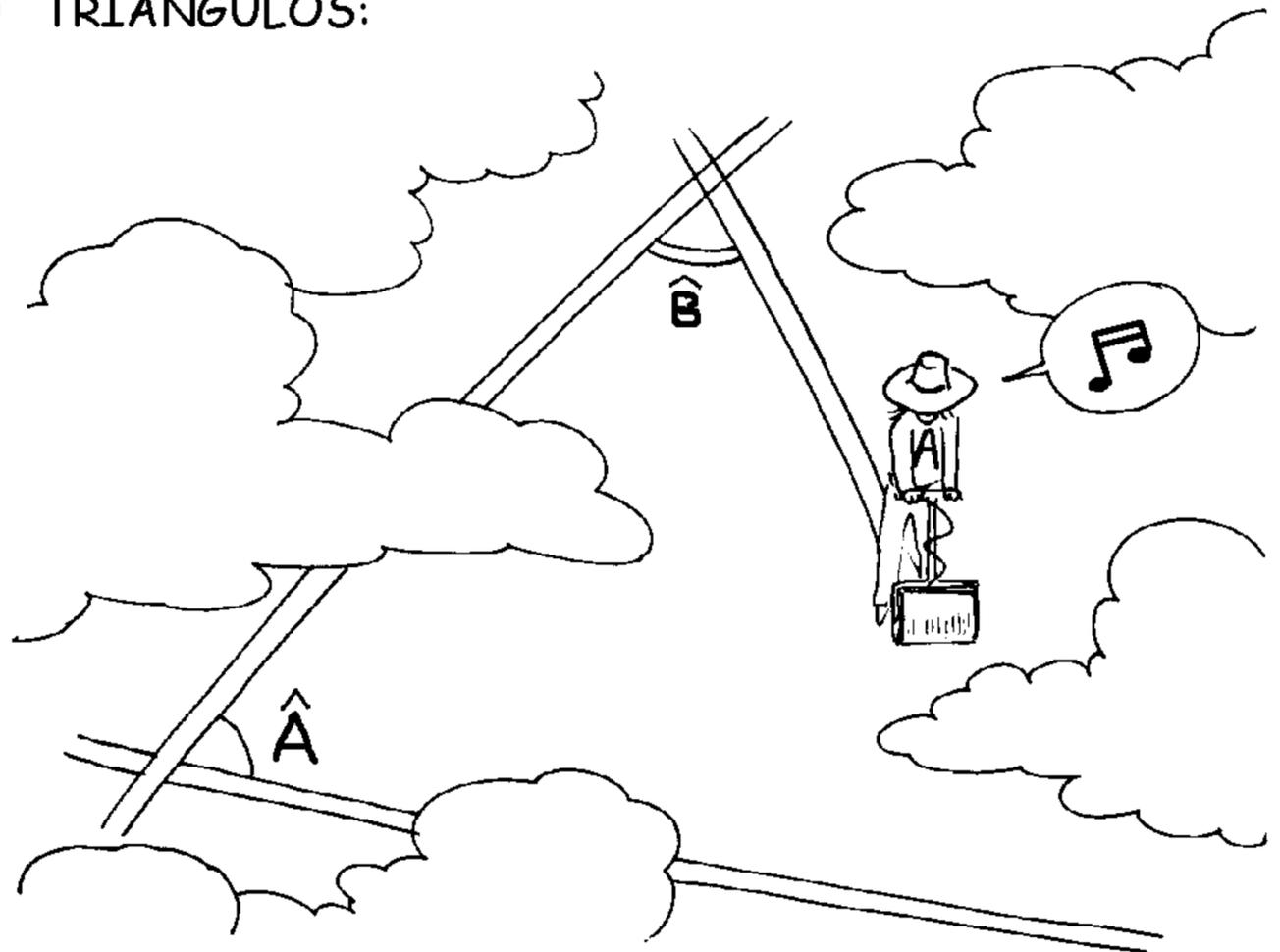


Se puede desplazar en
LÍNEA RECTA, sin esfuerzo.
Por contra, no se puede desviar
ni un ápice a la DERECHA o a
la IZQUIERDA.



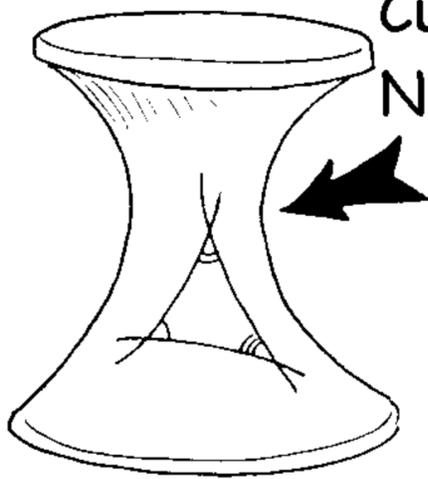
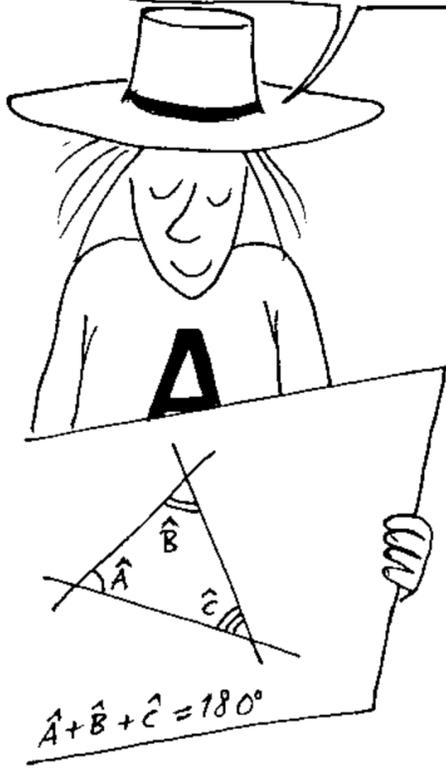
¿Para qué sirve
esta maneta? Vaya,
pues suprime la
adherencia y permite,
de vez en cuando,
cambiar la dirección.

Gracias a este aparato, Anselmo puede trazar las
GEODÉSICAS de una superficie. Con la ayuda
de tres geodésicas, Anselmo puede trazar
TRIÁNGULOS:



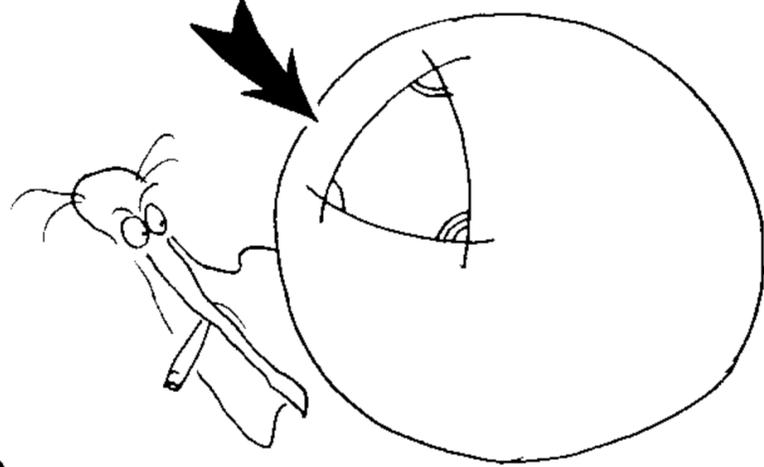
Una superficie es un ESPACIO BIDIMENSIONAL. Es decir, se necesitan DOS
CANTIDADES para especificar la posición de un punto, dos coordenadas.

Veamos, cuando el espacio es EUCLÍDEO, la suma de los ángulos de cualquier triángulo vale 180° .

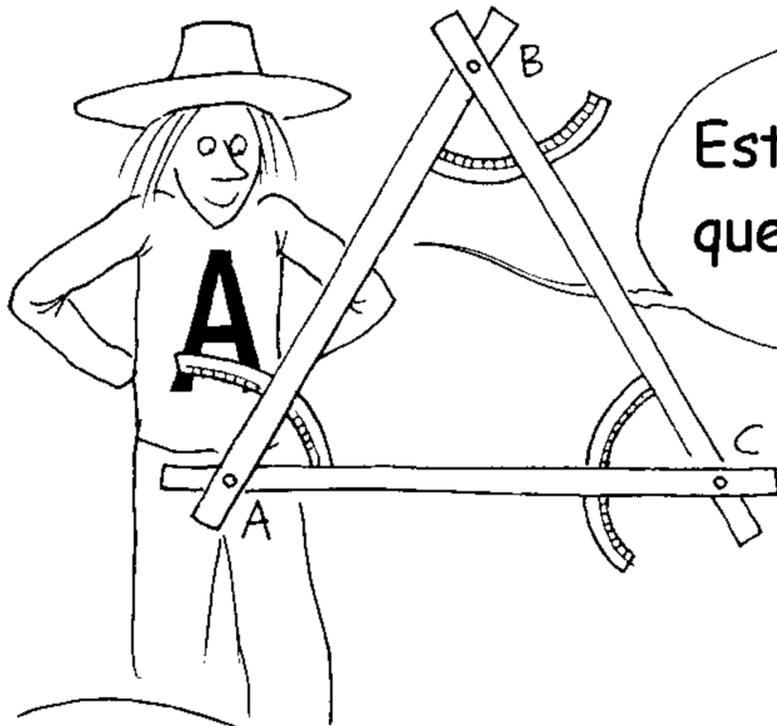


Cuando el espacio tiene curvatura **NEGATIVA**, esta suma es **INFERIOR** a 180°

En un espacio con curvatura **POSITIVA** dicha suma es **SUPERIOR** A 180°



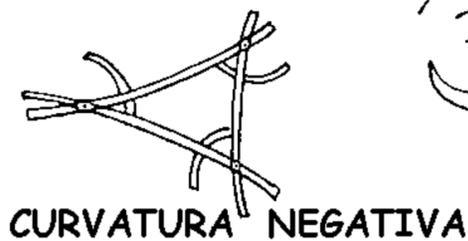
ESPACIOS CON CURVATURA VARIABLE:



He inventado un curvímetro.
Está formado por tres láminas elásticas que pueden girar libremente alrededor de tres pernos A, B y C



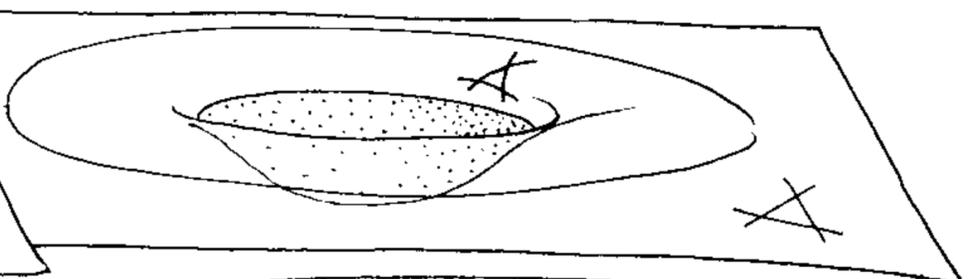
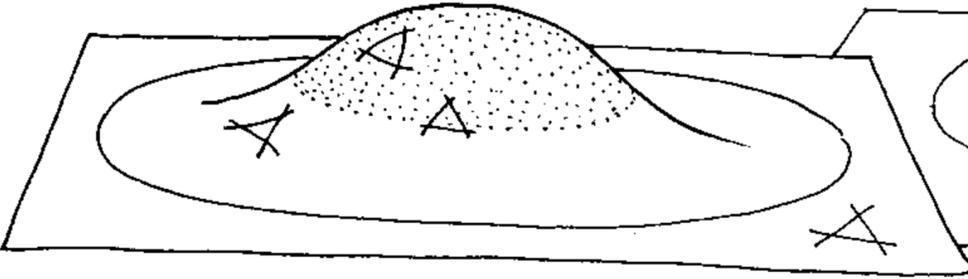
Basta colocarlo sobre una superficie y medir los ángulos con la ayuda de tres semicírculos graduados para saber la **CURVATURA LOCAL**.



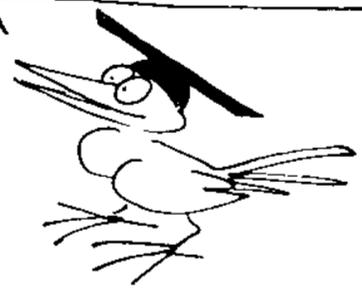
CURVATURA NEGATIVA

CURVATURA POSITIVA

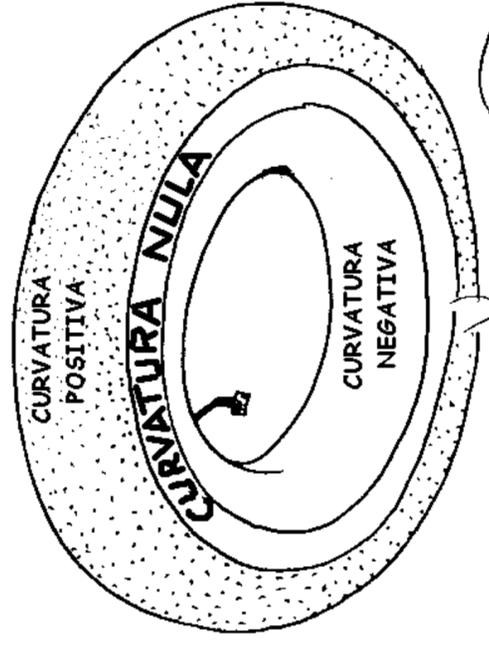
Esta protuberancia modelada en un plano, está constituida por una región central de curvatura positiva, rodeada de una región de curvatura negativa.



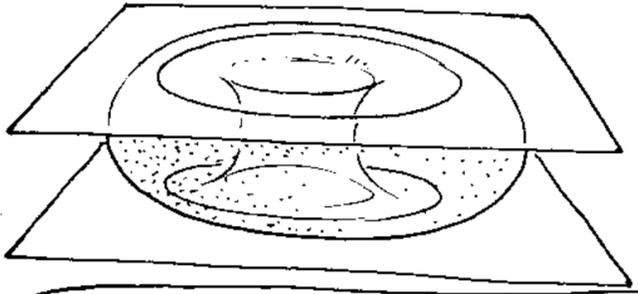
Desde el punto de vista de la CURVATURA, el HUECO es idéntico al BULTO.



Salvo error, esto es un TORO.



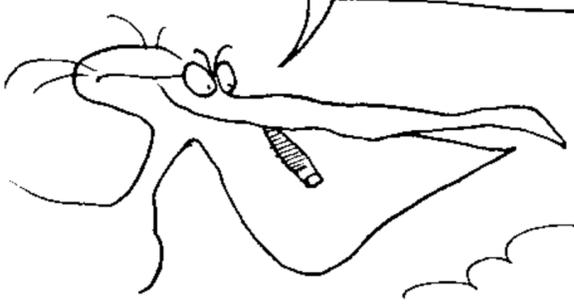
Sí, tiene una banda de curvatura positiva, otra de curvatura negativa, separadas por una frontera con la curvatura nula.



Se puede determinar ésta última colocando el toro entre dos planos como un sandwich.

Querido Tiresio, ¿has comprobado que tu concha es un espacio bidimensional con curvatura variable?

León, ideja a Tiresio tranquilo!



¡Jo!



PUNTOS CÓNICOS



Ahora verás, Anselmo, todavía hay cosas aún más extrañas

Date prisa, Tiresio, tengo ganas de aprender ...

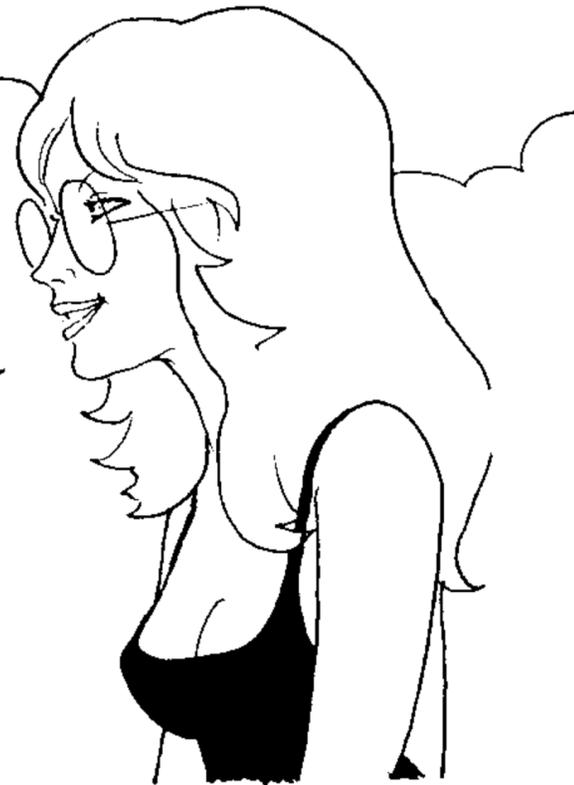
¡Espérame!

Ahora verás, Tiresio, voy a ENMALLAR mi superficie entrecruzando geodésicas, lo que me proporcionará montones de triángulos

Concha de curvatura variable ...¡¡ite burlas de mi!! ...

¡Vaya, ya no comprendo nada!
¿Qué sucede alrededor de este punto P?

tan sólo tienes que utilizar tu curvímetro.



Entonces, Sofía, ¿qué sucede? Si el triángulo del curvómetro no contiene al punto P, marca curvatura nula.

Pero si el punto P cae dentro del triángulo, entonces ¡se curva!

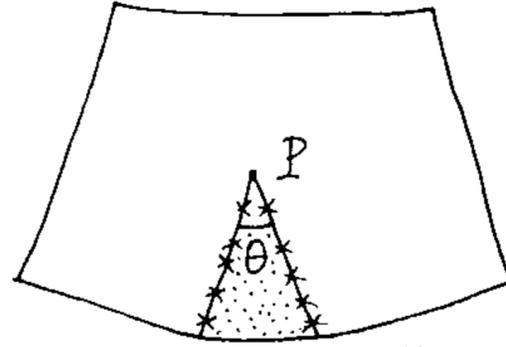
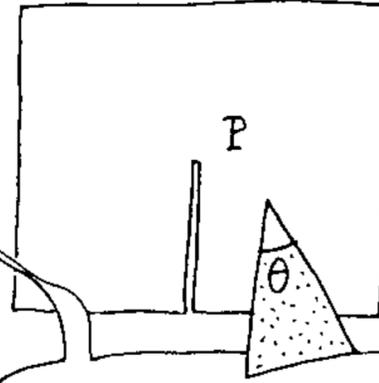
Es un punto cónico. Venga, observa, tomo un plano, le QUITO un sector de ángulo θ y lo vuelvo a coser.

Obtengo un cono, que llamaremos POSICONO

$$\hat{A} + \hat{B} + \hat{C} = 180^\circ + \theta$$

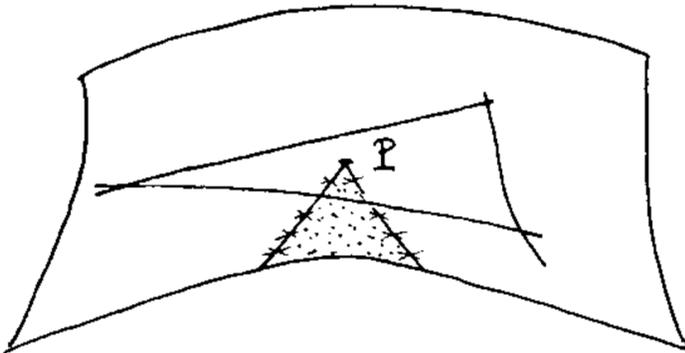
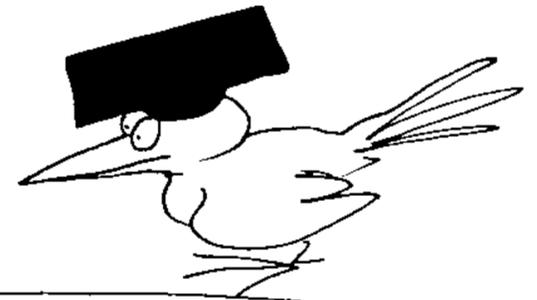
Podeis comprobarlo con cartulina. Un rollo de papel adhesivo os ayudará a materializar fácilmente las geodésicas.

Entonces si mi triángulo contiene al vértice de un cono, la suma de sus ángulos será siempre superior a 180° !

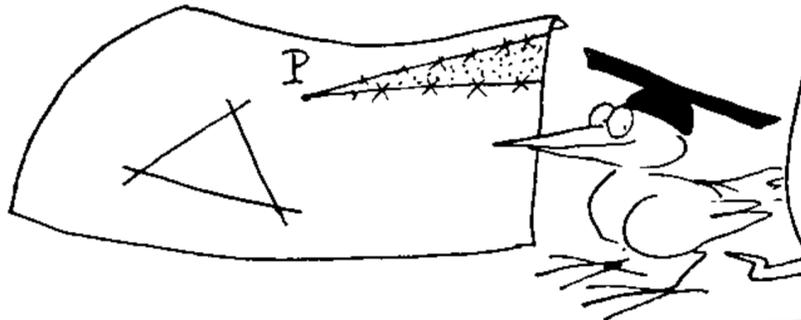


¡ No tan deprisa ! Al cortar el plano, haré justo lo contrario: AÑADIR un sector de ángulo θ .

Entonces ... ¿obtendremos un NEGACONO?

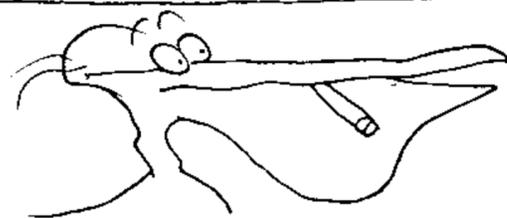
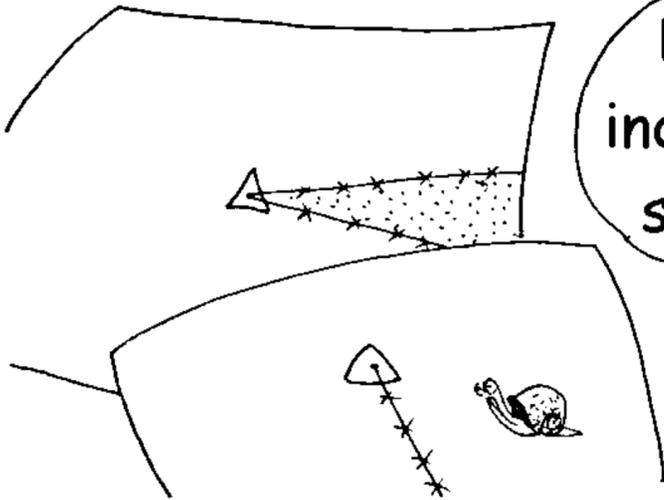


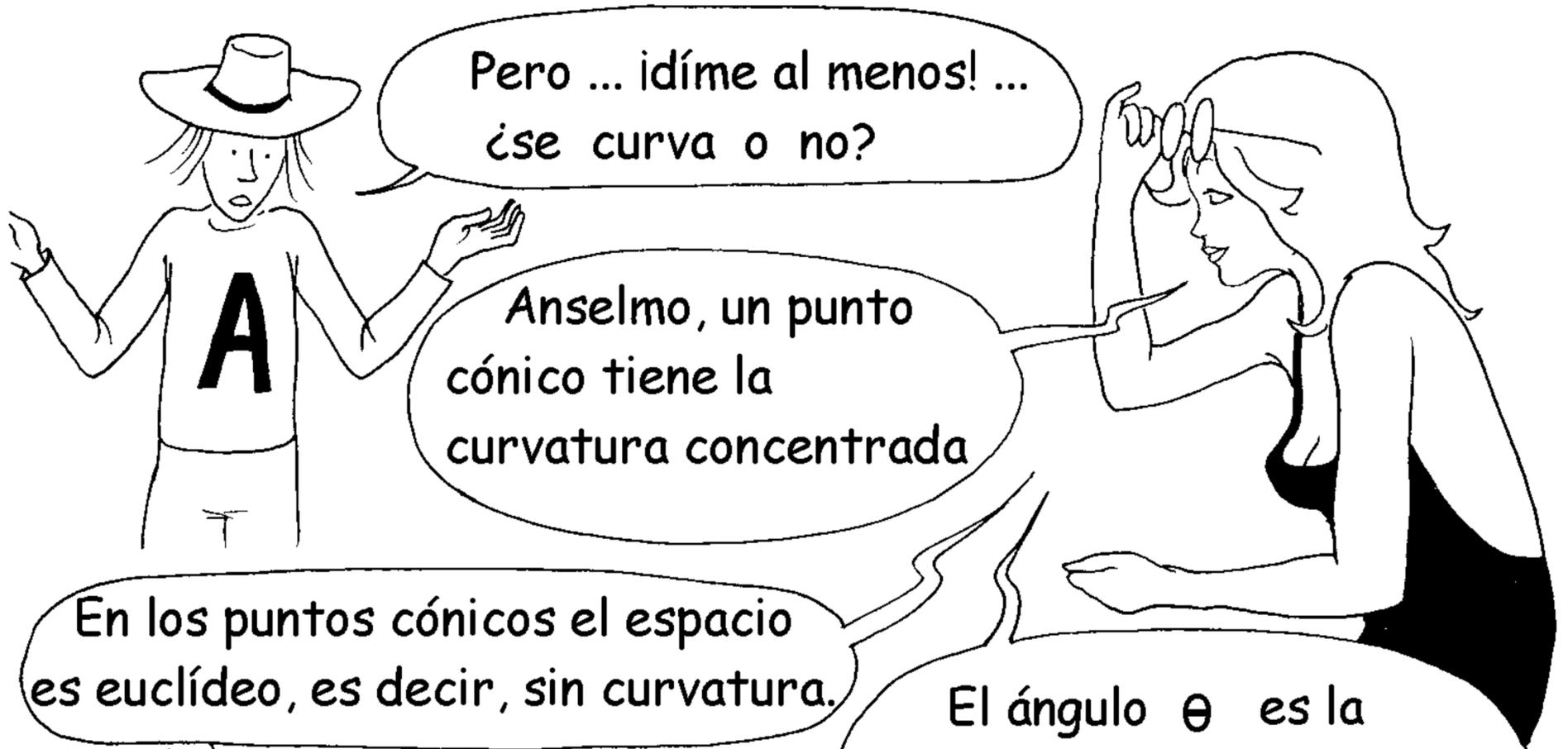
En este caso, en que el triángulo rodea al punto P, la suma de los ángulos es igual a $180^\circ - \theta$!



Cuando el punto está fuera del triángulo, de nuevo la suma es de 180° .

Esta propiedad de los conos es independiente del tamaño del triángulo, sea éste minúsculo o gigante.

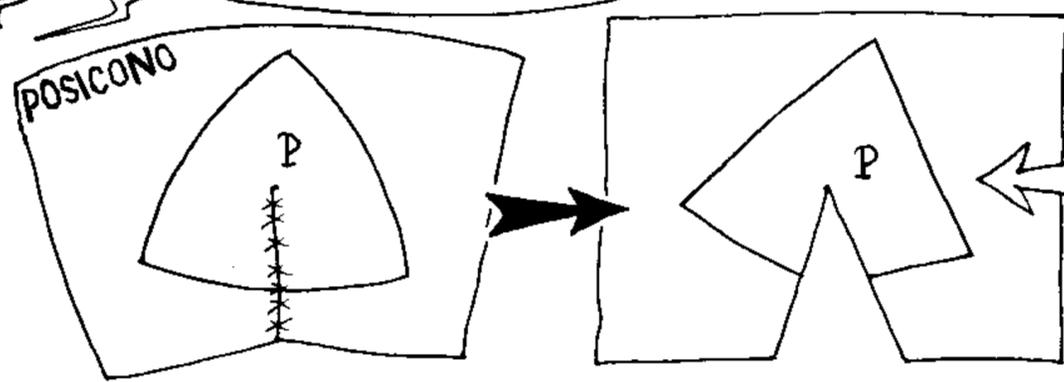




En los puntos cónicos el espacio
es euclídeo, es decir, sin curvatura.

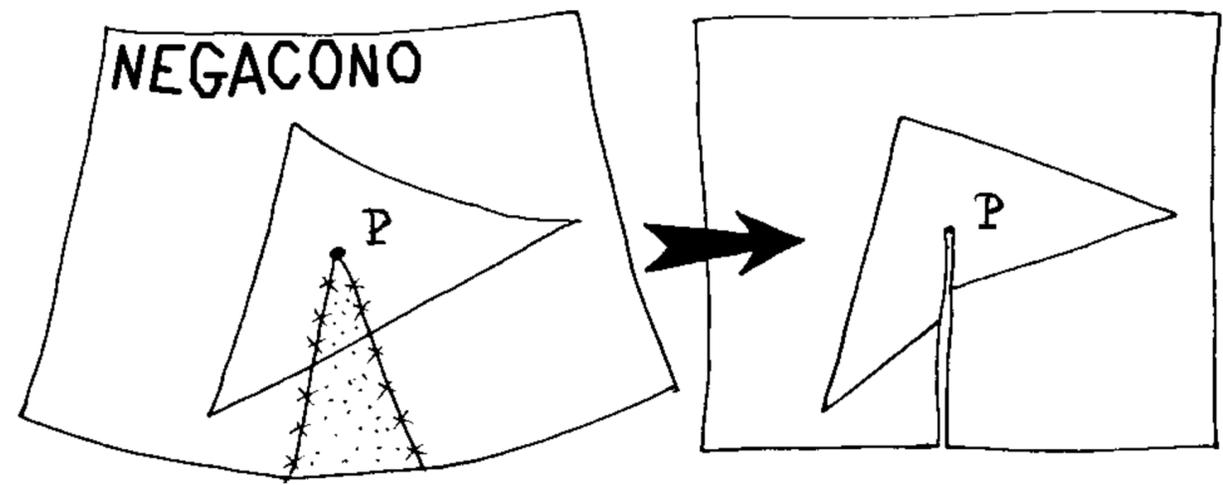
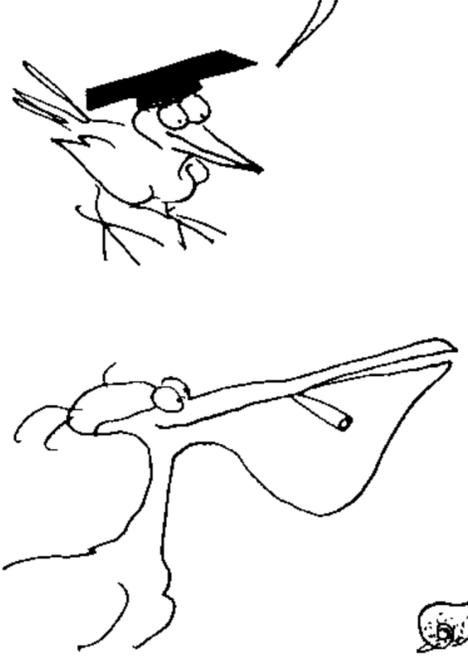
El ángulo θ es la
medida de la cantidad
de curvatura

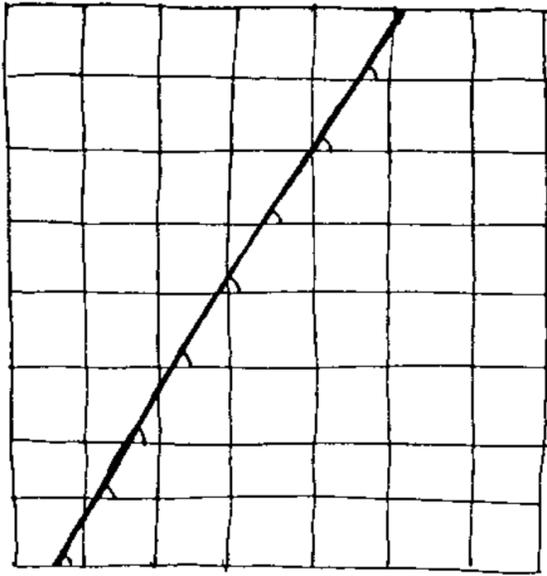
Corta el cono
y aplánalo



Aquí vemos el resultado
de la operación, hecha
por Anselmo, en el caso
de un cono con
curvatura positiva .

En el caso de un cono de curvatura negativa:





Tomemos una superficie PLANA y tracemos una red con sus geodésicas formando una cuadrícula regular. Se dirá que hemos RECUBIERTO esta superficie con cuadrados, idénticos entre si. Si seguimos una TRAYECTORIA, un TRAYECTO, de modo que corte los lados de los sucesivos cuadrados según el mismo ángulo, este trayecto seguirá una geodésica de la superficie.

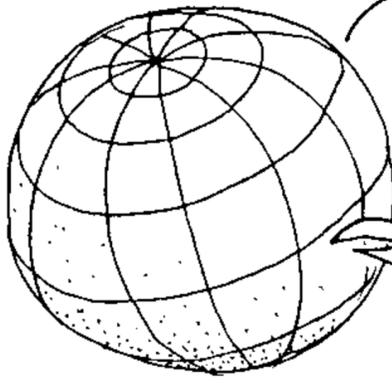
La Dirección

Pero, ¿por qué no hacerlo sobre una esfera?

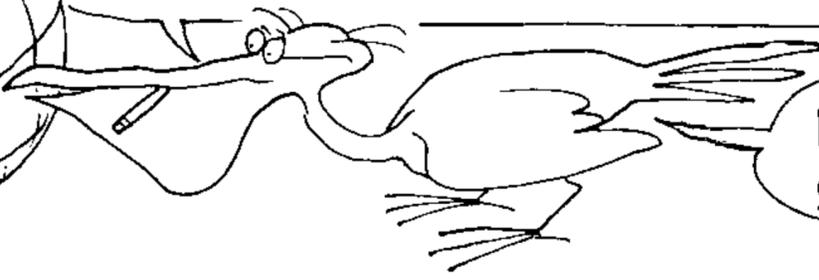
En primer lugar, intenta CUBRIR una esfera con cuadrados muy juntos, ya me dirás cómo te va.

Los meridianos de la esfera son sus geodésicas. Una trayectoria que los corte con un ángulo constante, que no sea de 90° , conducirá invariablemente hacia uno de sus polos!

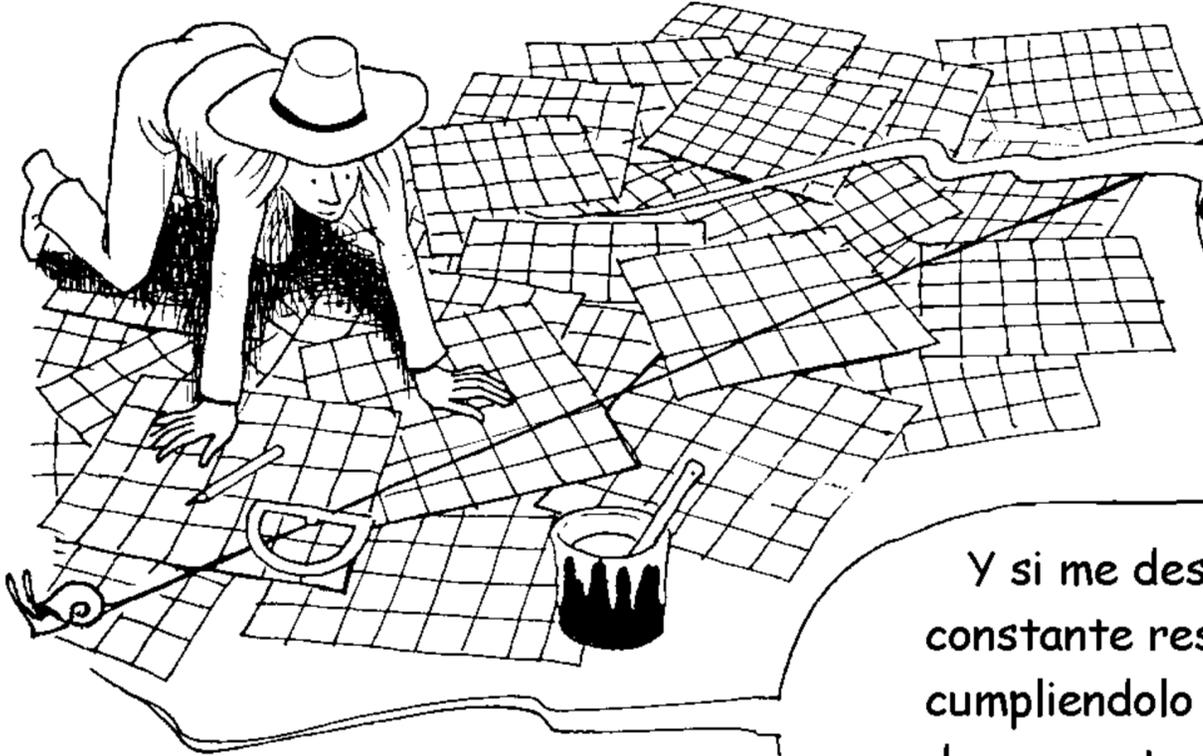
La navegación con rumbo constante conduce ... ¡al polo!



Cortando los meridianos de la esfera según un ángulo de 90° me desplazaría por los paralelos.

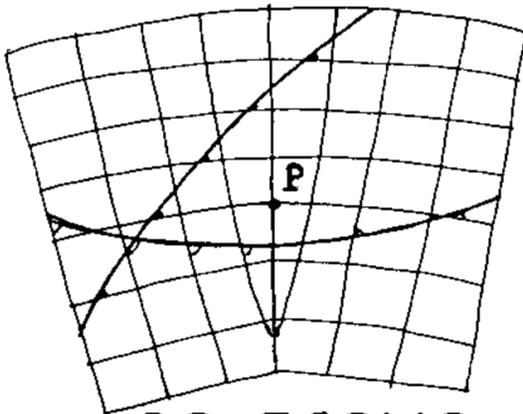


paralelos que no son líneas geodésicas. ¡Está claro! (*)

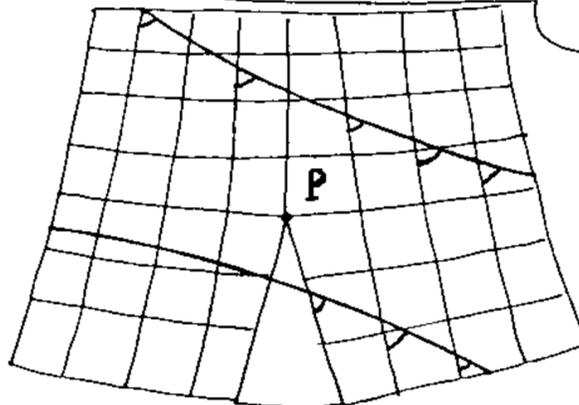


puedo recubrir una superficie plana, euclídea, con la ayuda de cuadrículas planas.

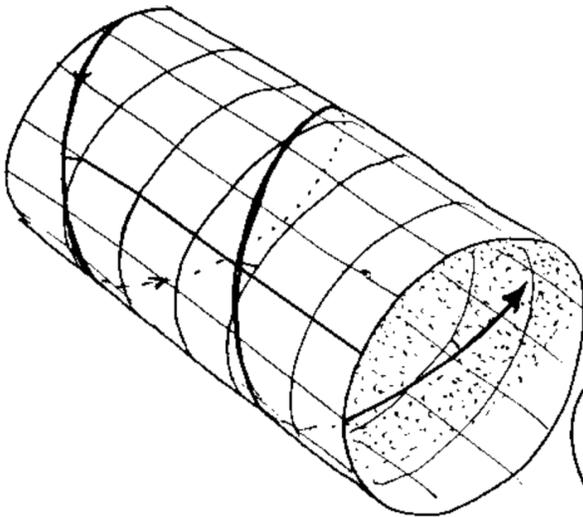
Y si me desplazo con ángulo constante respecto a estos entramados, cumpliéndolo progresivamente, al pasar de una a otra cuadrícula, obtendré una geodésica



POSICONO



NEGACONO

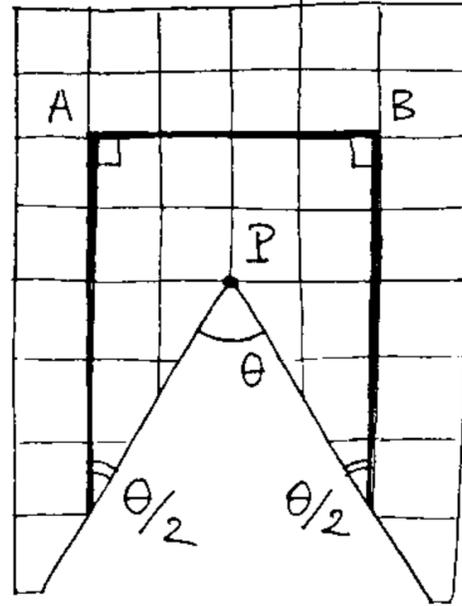
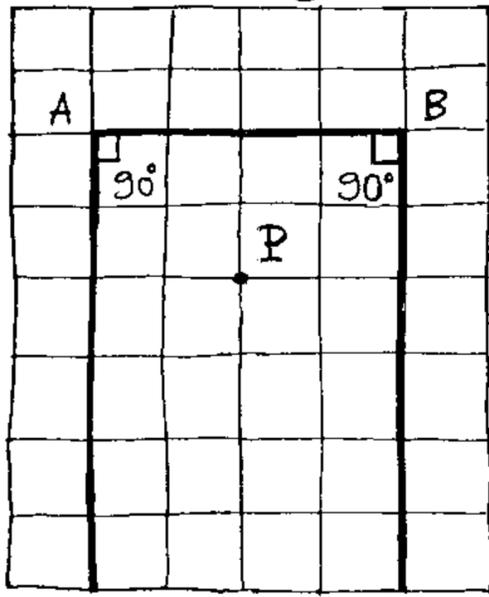


Este sencillo método proporciona también la geodésicas del cilindro, que tienen forma espiral, como un muelle.

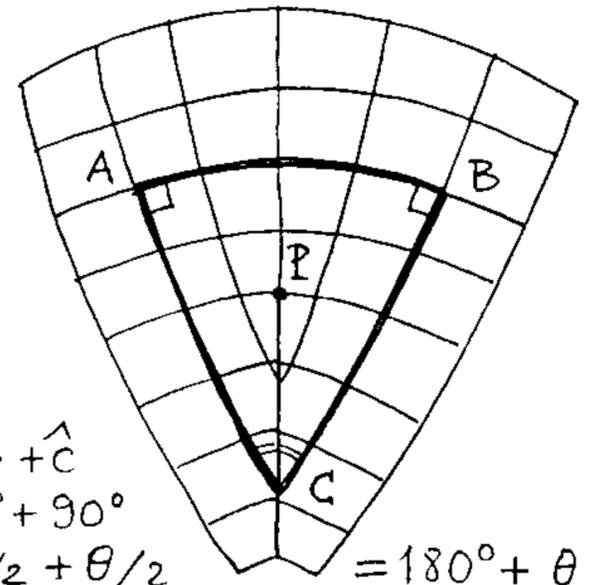


(*) En la esfera se pueden trazar usando cinta adhesiva (excepto el ecuador).

Veamos, por qué la suma de los ángulos de un triángulo, en un cono se incrementa según el ángulo de corte θ :

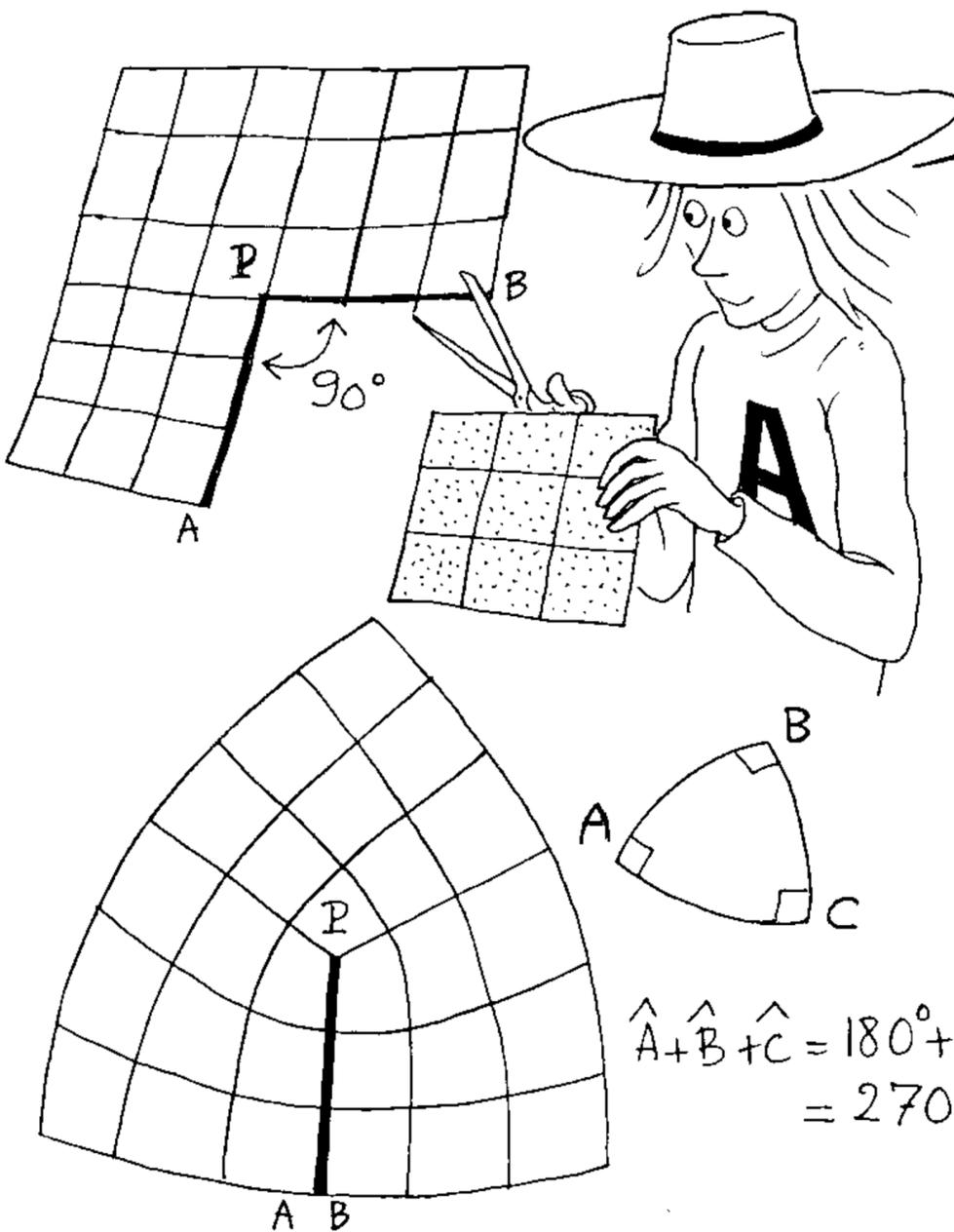


$$\hat{A} + \hat{B} + \hat{C} = 90^\circ + 90^\circ + \theta/2 + \theta/2 = 180^\circ + \theta$$



Ahora Anselmo construirá dos conos particulares en los que se pueda conservar la regularidad del entramado.

La Dirección

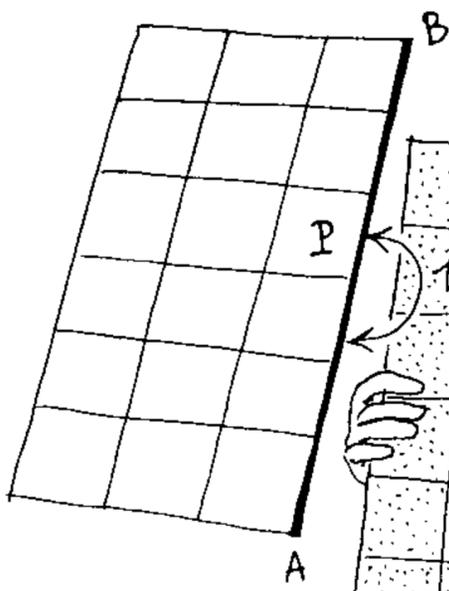


$$\hat{A} + \hat{B} + \hat{C} = 180^\circ + 90^\circ = 270^\circ$$

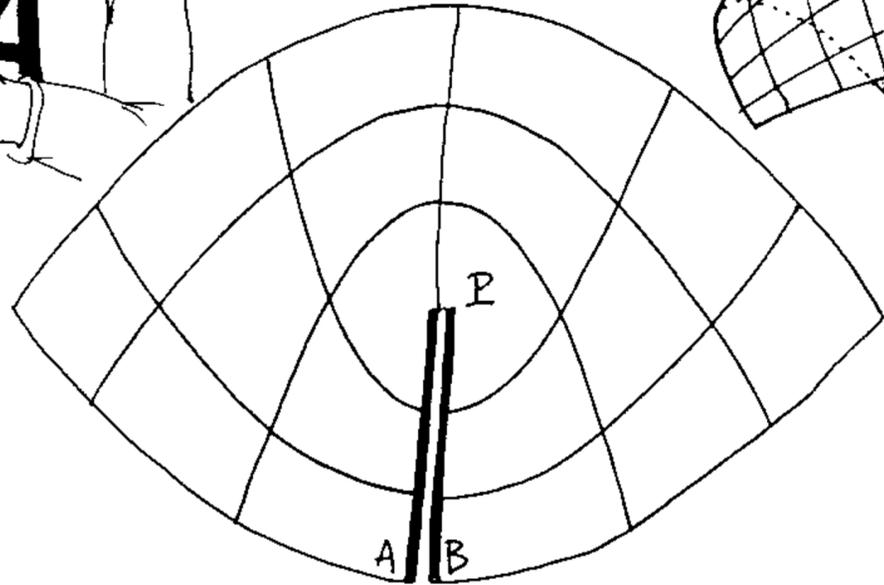
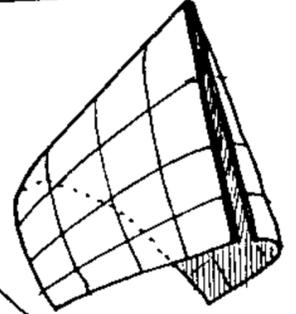
Aquí, le quito 90°



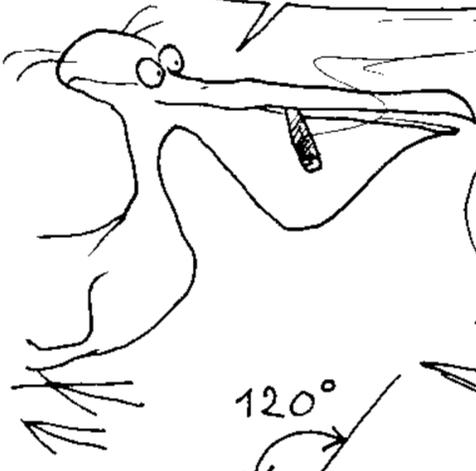
Sobre ese cono se pueden trazar triángulos rectángulos equiláteros.



Ahora, quito un sector de 180°



Sobre ese cono, la suma de los ángulos de un triángulo es de 360°



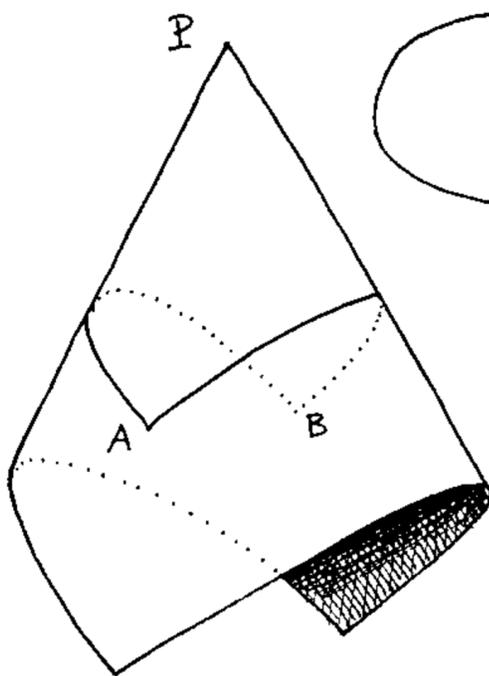
Lo que significa, que se le podría trazar encima, con la ayuda de sus geodésicas, un triángulo que tuviera sus tres ángulos iguales 120° , por consiguiente obtuso.

Pero, ¿por lo menos se cierra?

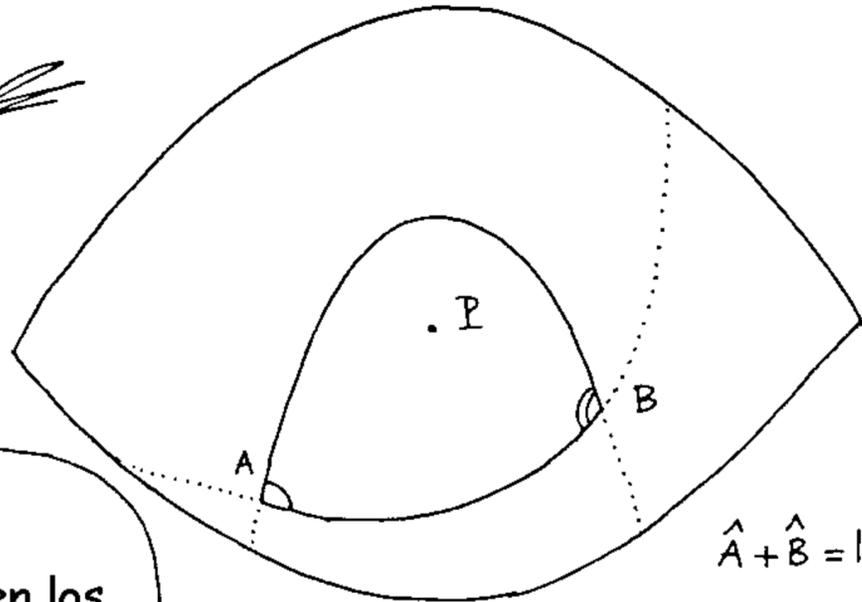
Humm...

Claro que sí amigo Tiresio, itú eres el obtuso!

¡Jo!



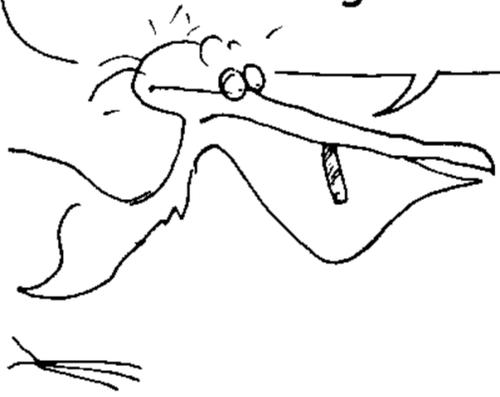
Sobre este cono se pueden trazar BIÁNGULOS, cuya suma de ángulos vale 180° .



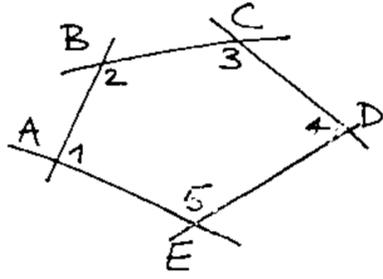
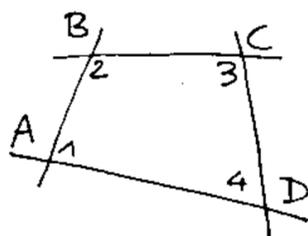
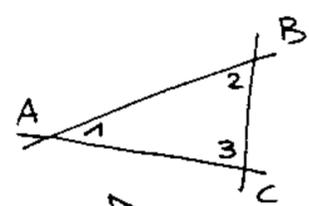
$$\hat{A} + \hat{B} = 180^\circ$$

EL CONO VISTO DESDE ARRIBA

¡Esperad! éso ya no lo entiendo...
Hablábamos de triángulos. Ahora aparecen los BIÁNGULOS. Lo siguiente serán, por qué no, ... ¡los monoángulos?!



Todos estos objetos son POLÍGONOS



Etc...

En el PLANO:

- La suma de los ángulos de un:
- triángulo vale 180°
 - cuadrilátero vale $180^\circ + 180^\circ = 360^\circ$
 - pentágono vale $180^\circ + 180^\circ + 180^\circ = 540^\circ$

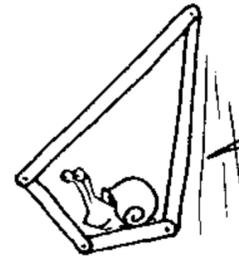
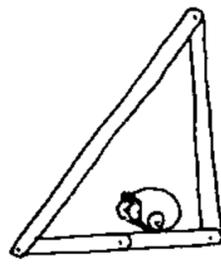
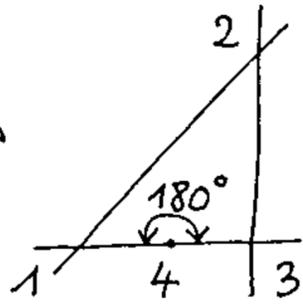
Y en le caso del BIÁNGULO, si lo encogemos a un segmento, esta suma es nula



tiemblo ...



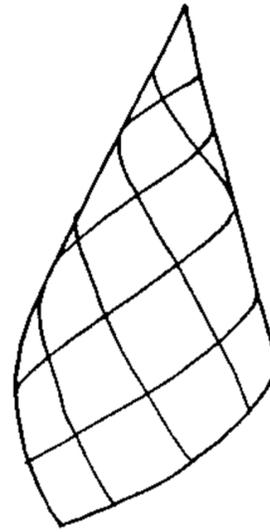
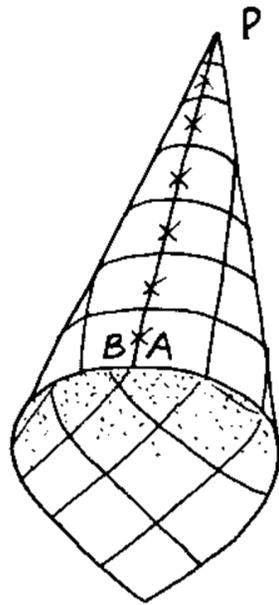
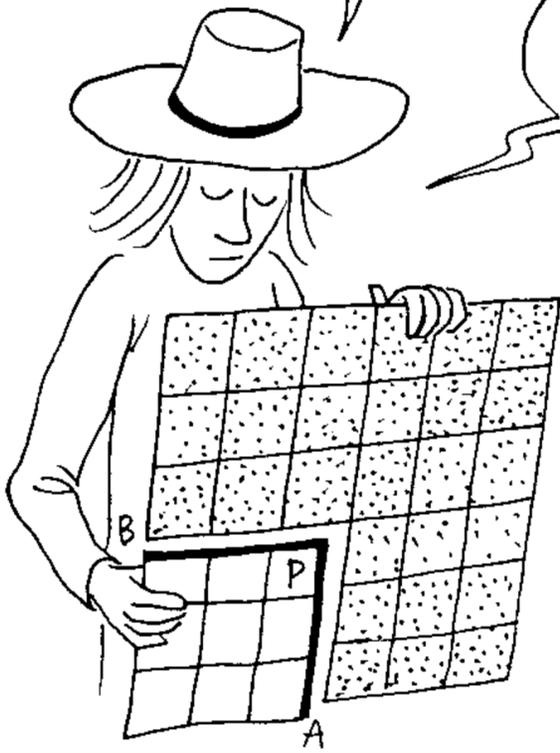
¿Por qué 180° más por cada vértice que se le añade?



ésto debería aclarártelo.

Bien, continuemos...

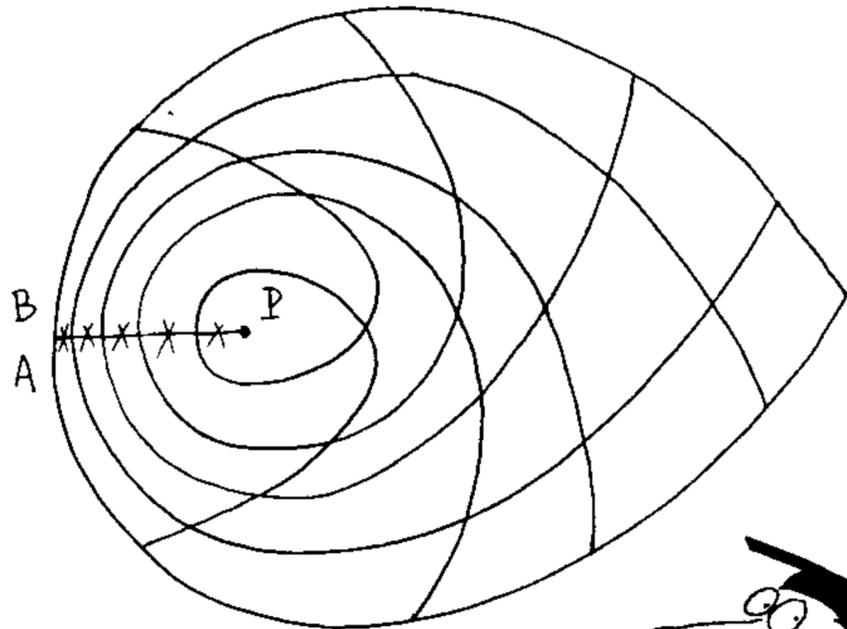
Ahora voy a quitar las tres cuartas partes del plano.



Parece una servilleta



Y cuando la observo desde el extremo



Anselmo obtiene ésto

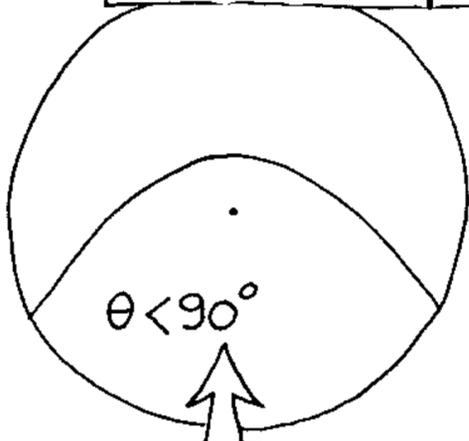


Sobre este cono todas las geodésicas se cortan
ellas mismas (aquí se cortan en ángulo recto).
Así pues podemos dibujarle monoángulos

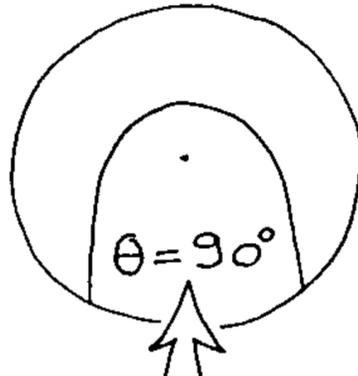
así pues, ¡era cierto!



• Todo depende del ángulo θ del cono •



Las geodésicas no
se cierran.



caso límite



Las geodésicas
se cierran.

LOS POLOS

¿Y si lo quitara ... todo?

¿¿Cómo que todo!?



Sí, si quitara prácticamente TODO el plano

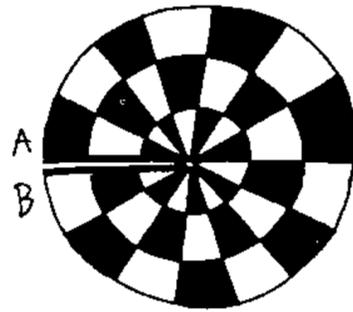
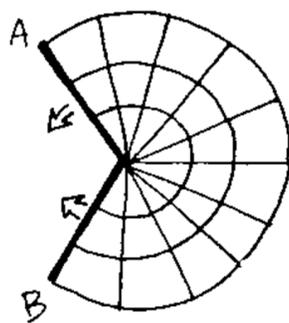
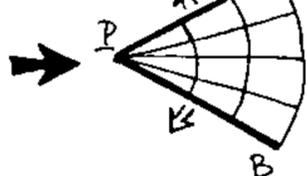
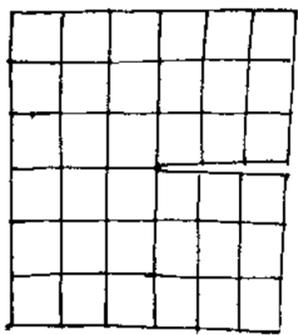
Bien, aquí está mi cono

¿A éso le llamas un cono?

¡Cuánta miseria!



De hecho los ENMALLADOS obtenidos por Anselmo se podrían haber obtenido estirando los objetos



Y entonces se obtiene un POLO

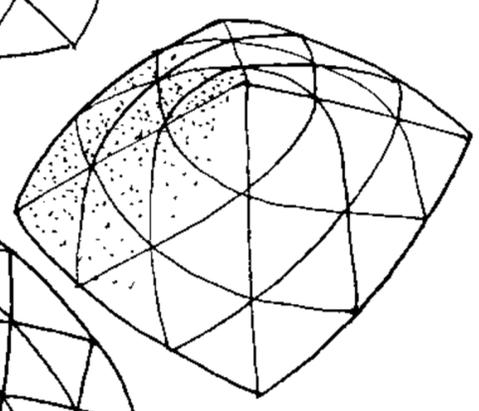
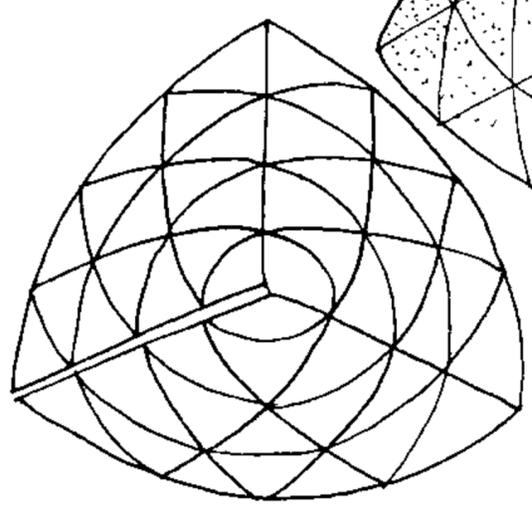
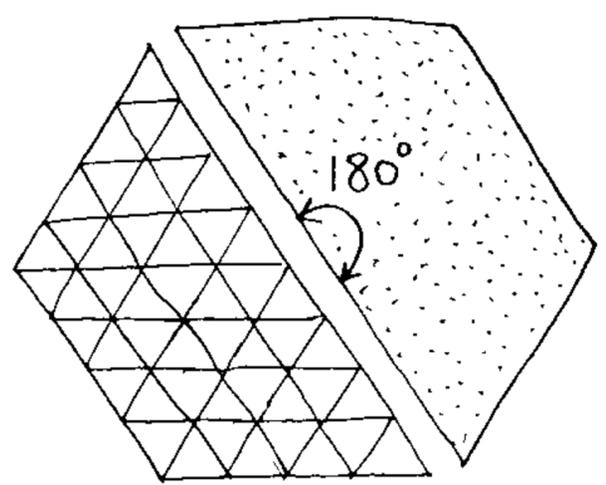
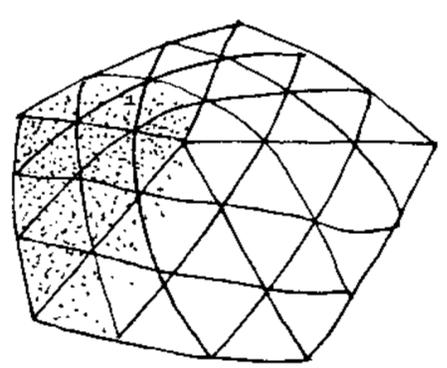
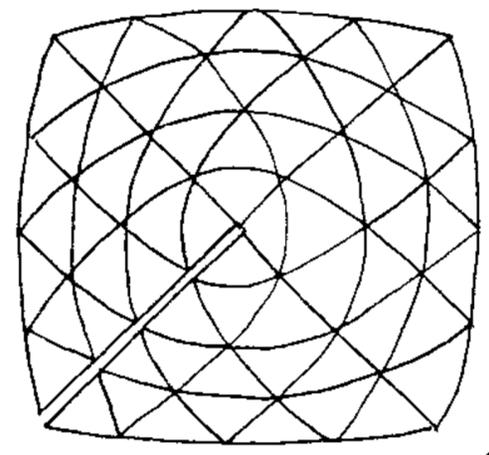
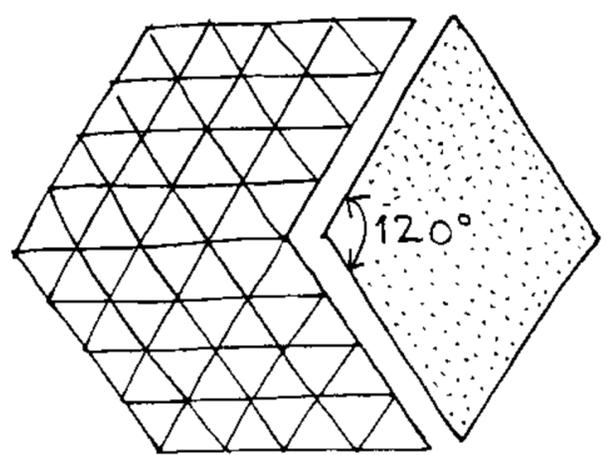
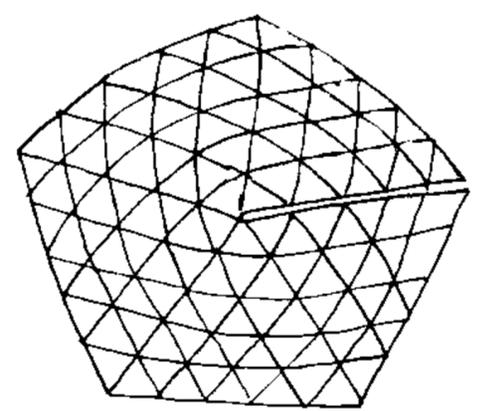
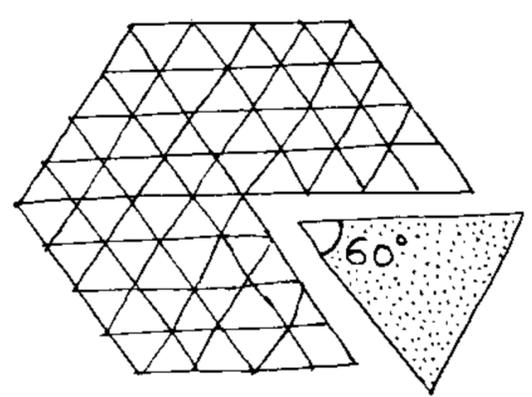
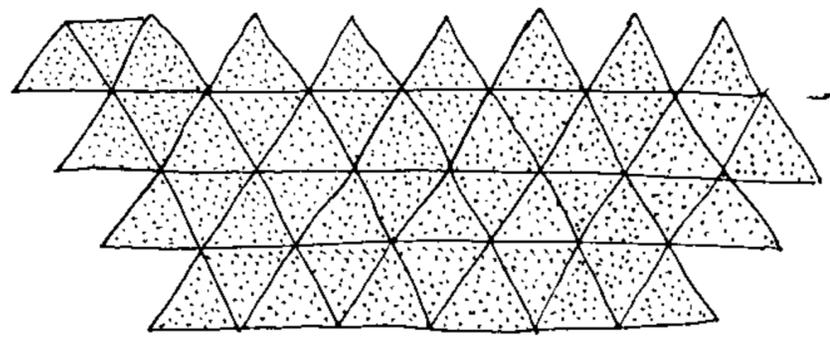


El polo es lo que queda cuando se ha quitado todo. Este punto representa una curvatura concentrada igual a 360°

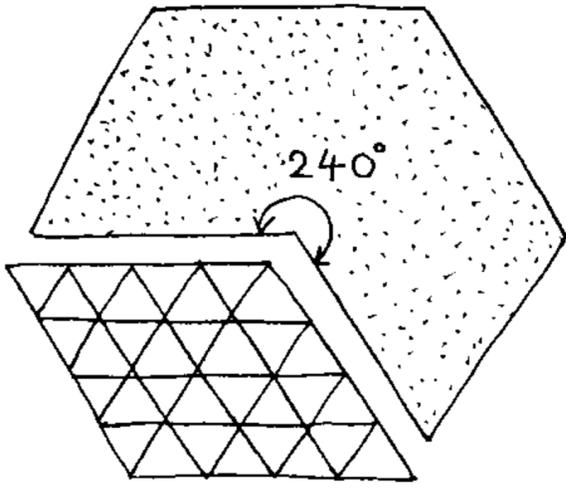
Hace un instante, he recubierto espacios bidimensionales (superficies) con cuadrados, pero también lo podría haber hecho con triángulos



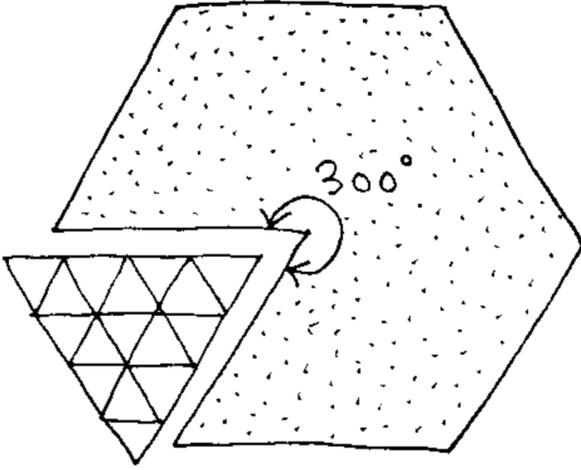
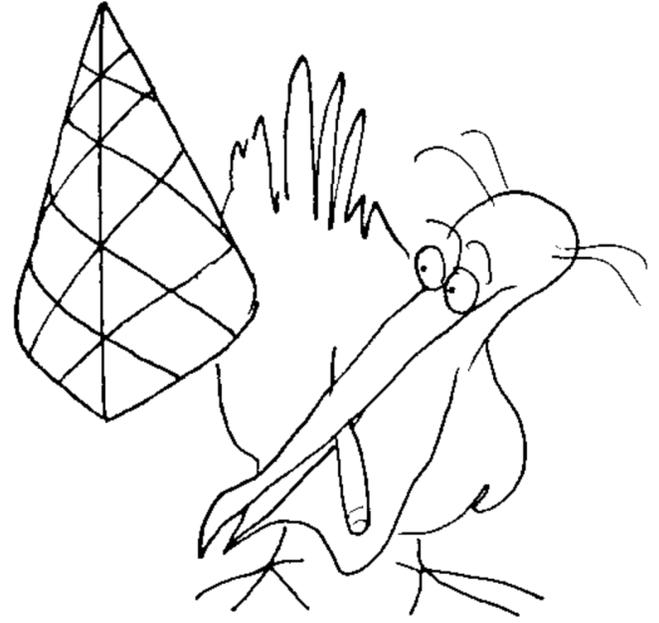
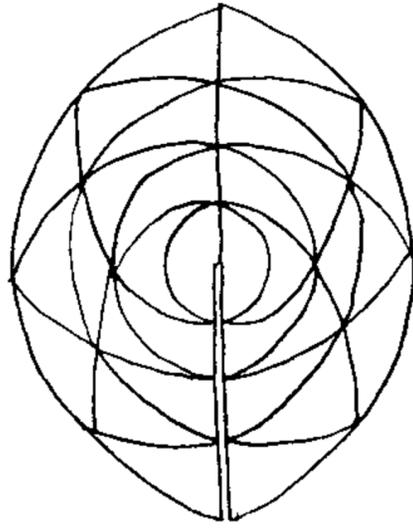
O con hexágonos



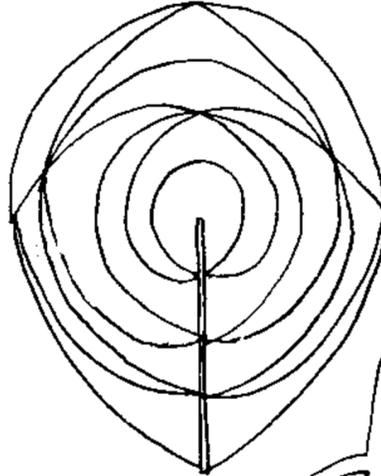
Estas mallas con triángulos equiláteros permiten engendrar los conos de ángulo 60° , 120° , 180° , 240° y 300°



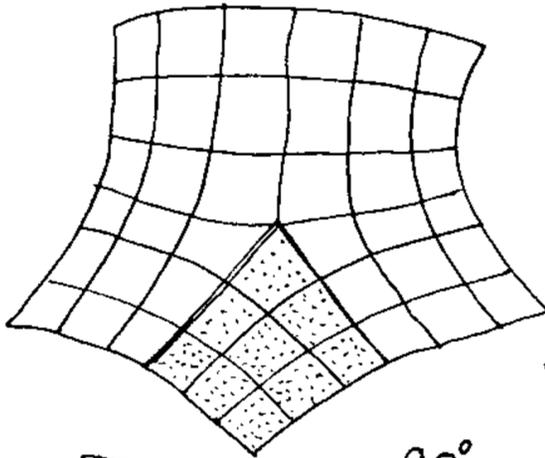
240°



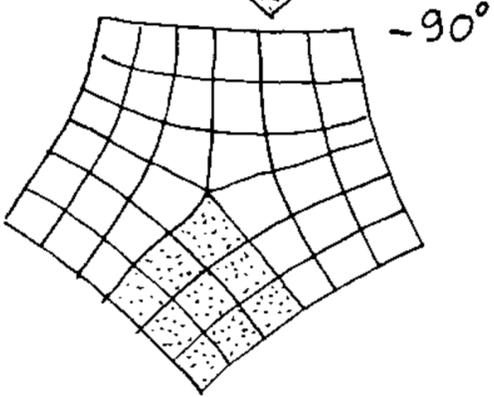
300°



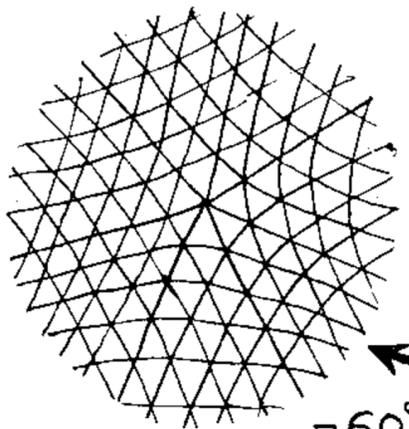
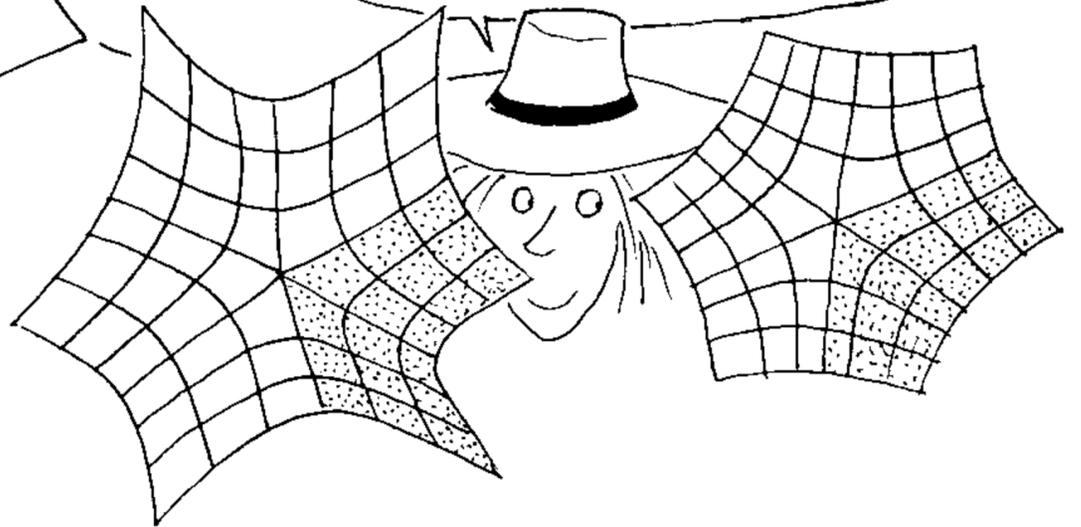
Añadiéndole un sector de ángulo θ he creado una curvatura negativa $-\theta$, concentrada en el vértice de este negacono



Cantidad de curvatura concentrada = -180° , etc...



-90°



-60°

Se pueden conseguir bellos negaconos con entramados triangulares

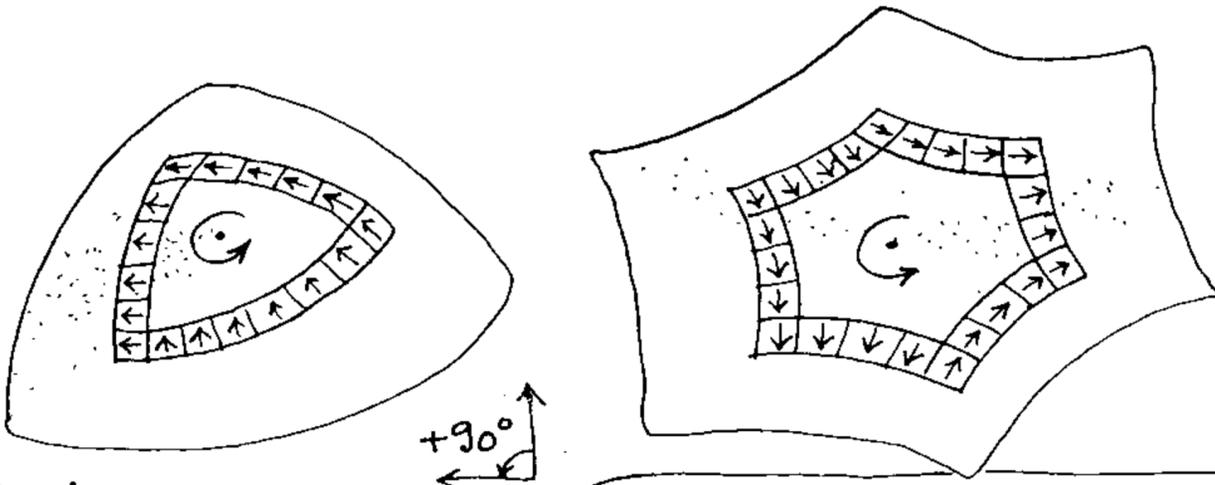
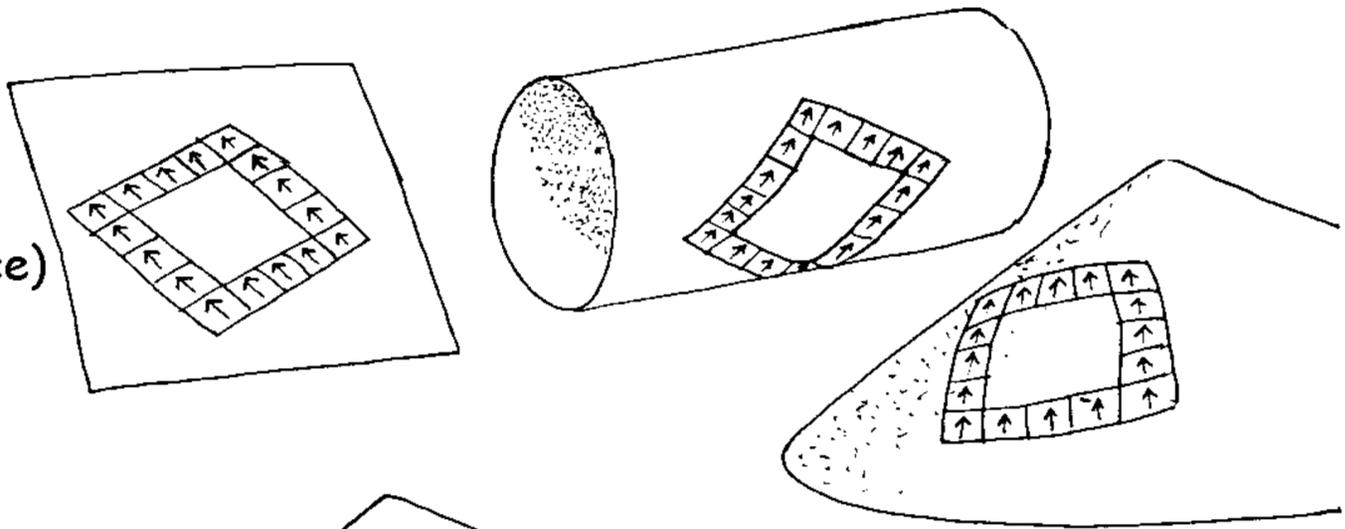


MEDIDA DE LA CURVATURA



El juego consiste en rodear un punto de concentración de curvatura con cuadrados, respetando la continuidad de las flechas. Al dar una vuelta alrededor del punto P, el ángulo que haya girado la flecha da una medida directa de la curvatura θ .

Algunos ejemplos:
Plano, cilindro,
cono (sin rodear el vértice)
La cantidad de
curvatura es CERO



Giramos alrededor del punto en cualquier sentido.
Si la flecha gira en el mismo sentido, se trata de un posicono. Si ella gira en sentido contrario se trata de un negacono.

Voy a fabricar posiconos con un ángulo θ muy pequeño cada uno

De algún modo, como si se tratara de átomos de curvatura...

Después los pegaré juntos

Obtengo una superficie sobre la que trazaré triángulos hechos de geodésicas, obtenidos usando cinta adhesiva.

La suma de los ángulos del triángulo sobrepasa 180° en un valor igual a la suma de los ángulos de los conos elementales cuyos vértices están contenidos en este triángulo.

La Dirección

Lo que habitualmente conocemos con el nombre de superficie curva se puede considerar como la unión de un gran número de microconos pegados juntos

También se pueden juntar NEGACONOS o POSICONOS con NEGACONOS. En este caso la suma de los ángulos del triángulo será de 180° más la cantidad de curvatura que contienen, calculada algebraicamente.

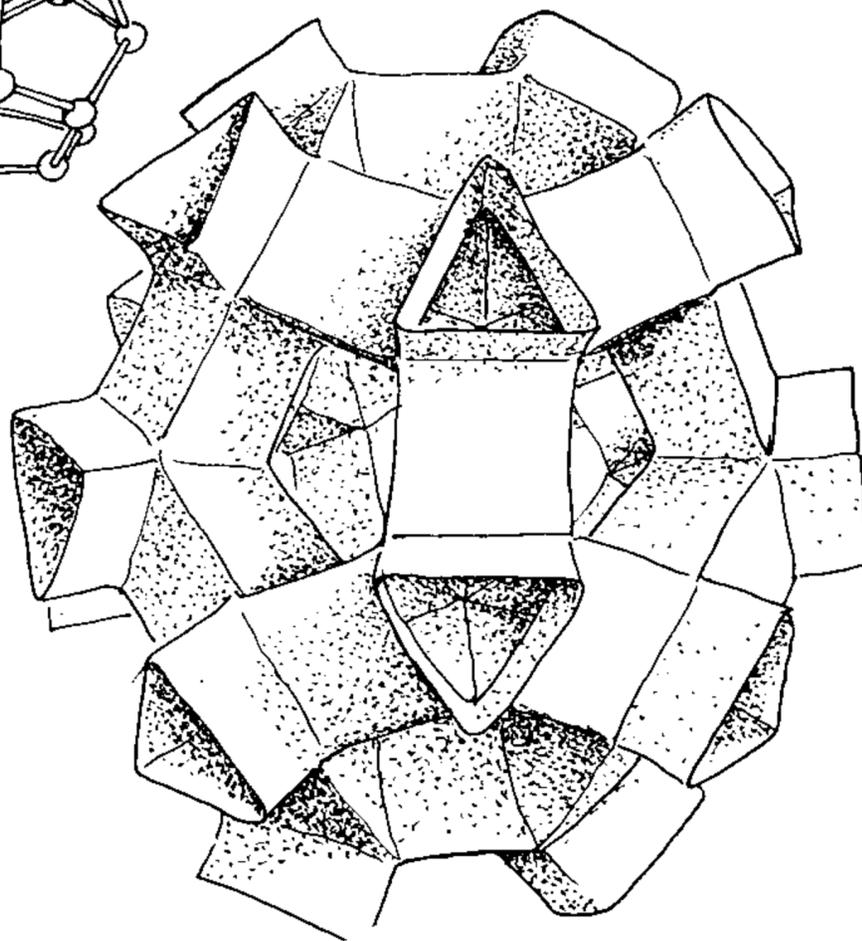
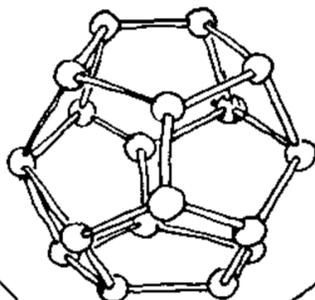
PATCHWORK

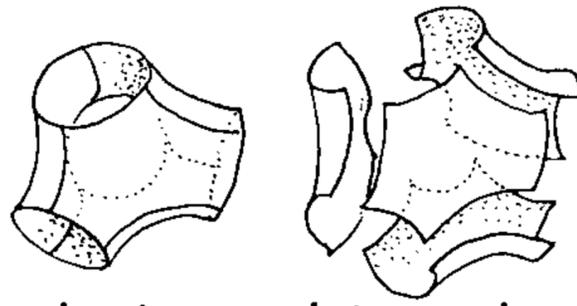
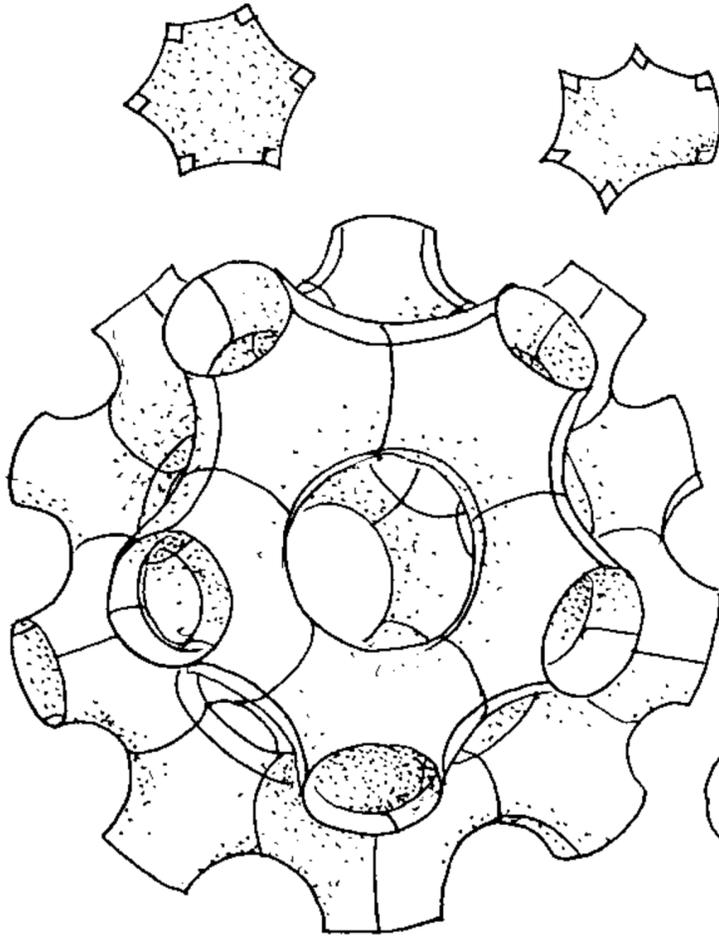
Sofía, ¿qué sucede si junto NEGACONOS?

Por ejemplo negaconos con $\theta = -180^\circ$. Su contorno corresponde a un hexágono que tiene seis ángulos rectos

En primer lugar, los podemos unir de cuatro en cuatro

Si se unen veinte, se obtiene ése elemento de superficie con curvatura negativa, cada uno en uno de los veinte vértices de un DODECAEDRO (*)





el mismo objeto donde se ha repartido más uniformemente la curvatura negativa. Está constituido por sesenta hexaortógonos.

una especie de sesentaedro...

parece una vértebra de DODECAEDRODÓN



Si fueras alicatador y utilizaras azulejos hexaortogonales, así te quedaría el suelo.

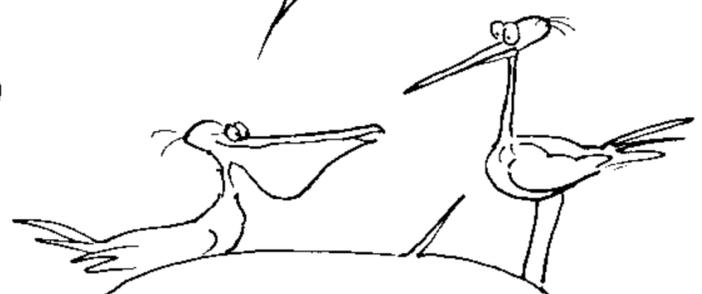


Querido amigo, permite que te diga que, modificando los genes de un caracol, se podría hacer de modo que su concha...



Este ejemplo muestra como la distribución de curvatura puede condicionar la forma de los objetos

!!!



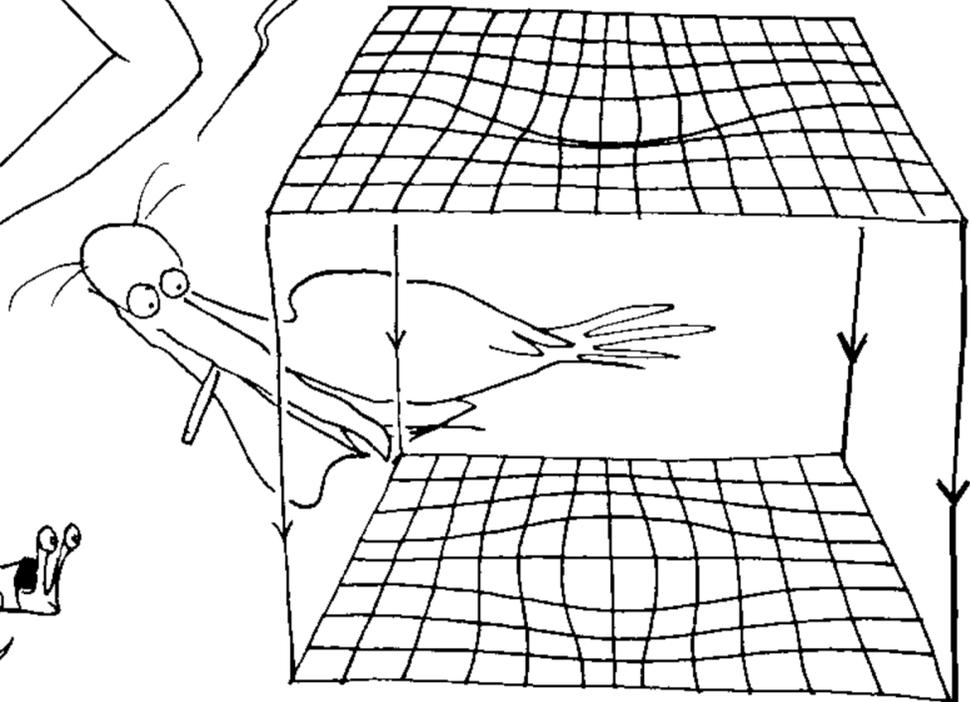
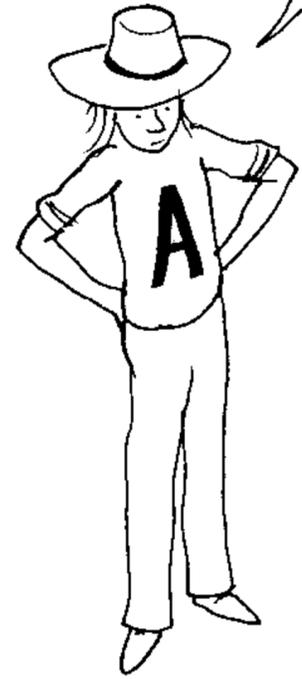
¡¡¡qué horror!!!

TRES DIMENSIONES

Sofía, ¿se puede VER la curvatura de nuestro espacio de TRES dimensiones?

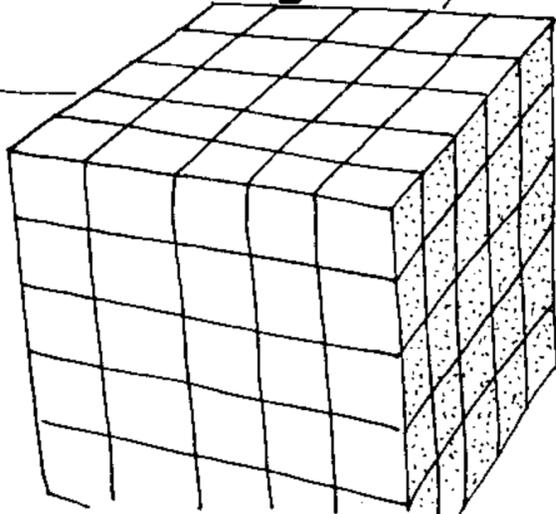
Es difícil, porque nosotros estamos dentro de ese espacio tridimensional

Veamos, he visto que se pueden proyectar las geodésicas de una superficie (bidimensional) sobre un plano (de 2 dimensiones)

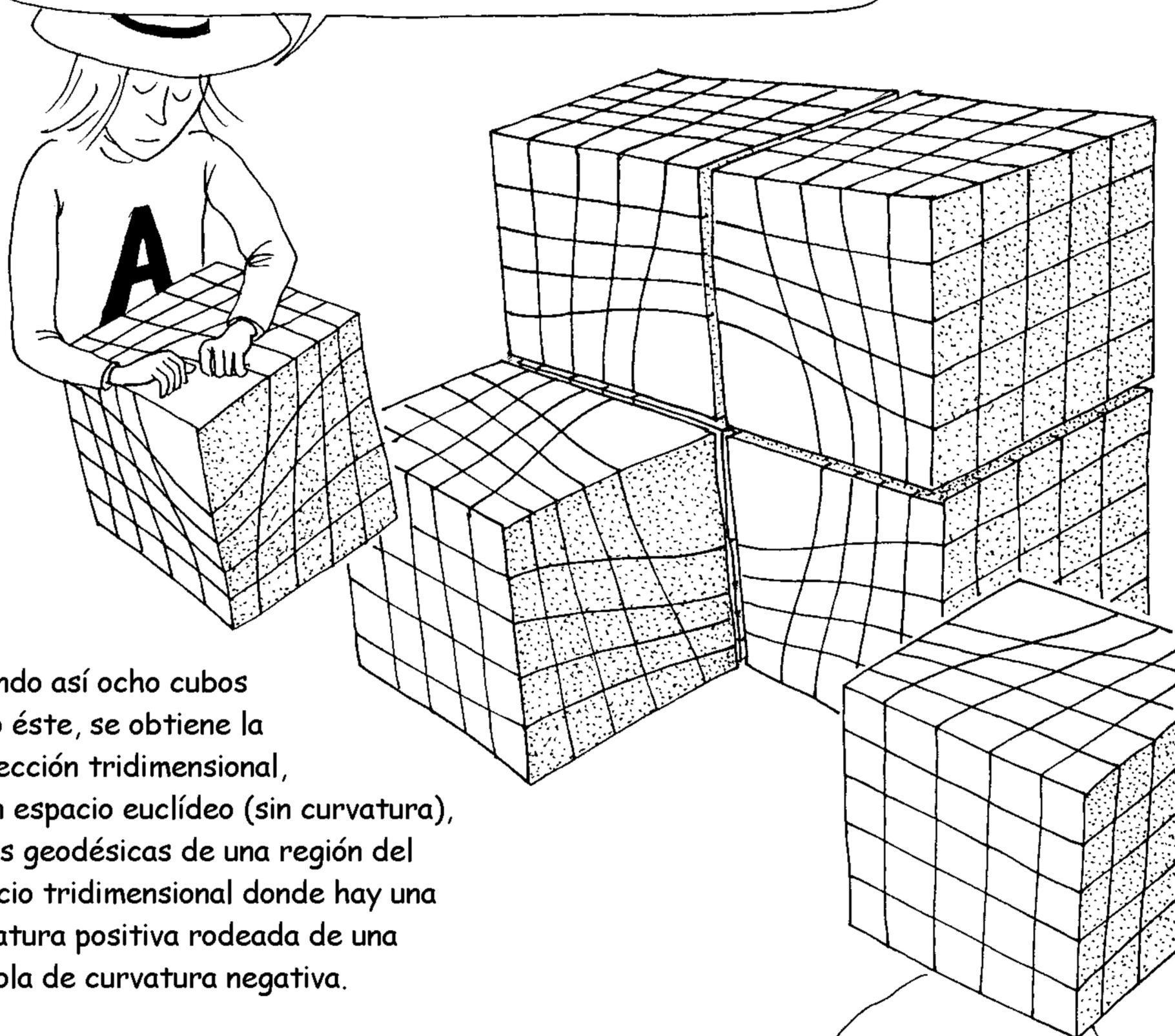


Esta "protuberancia" corresponde a una concentración de curvatura positiva, rodeada de una zona de curvatura negativa.

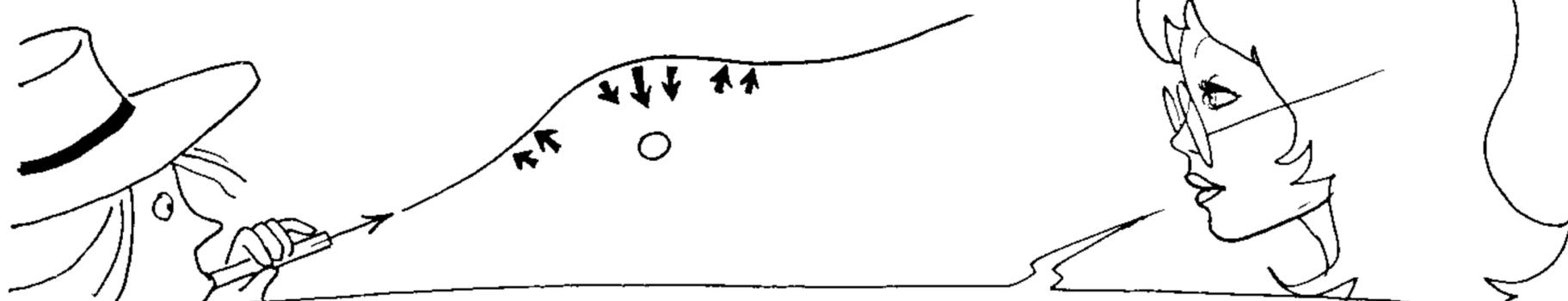
Ahora mira este cubo sobre el que hemos puesto ese hilo formando un entramado.



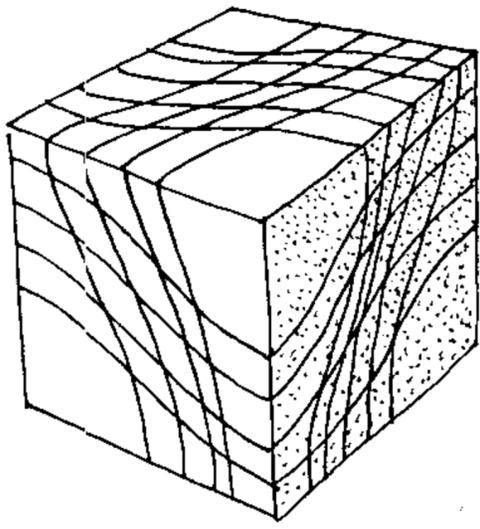
Ahora desplazaré los hilos de este modo:



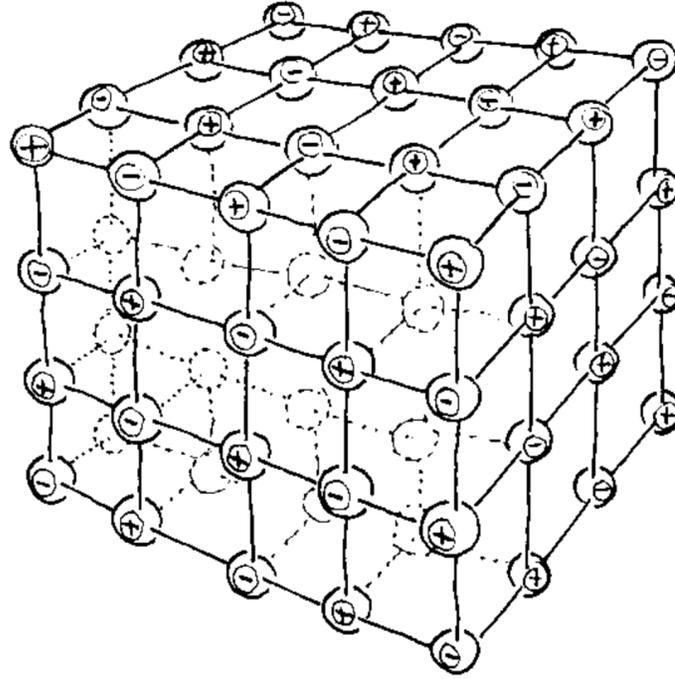
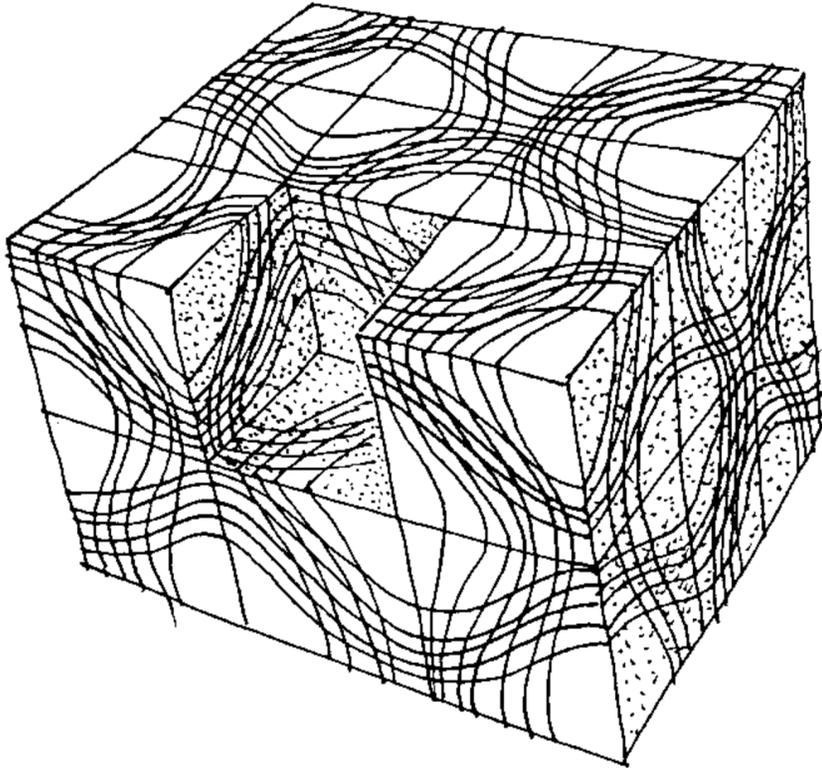
Uniendo así ocho cubos como éste, se obtiene la proyección tridimensional, en un espacio euclídeo (sin curvatura), de las geodésicas de una región del espacio tridimensional donde hay una curvatura positiva rodeada de una aureola de curvatura negativa.



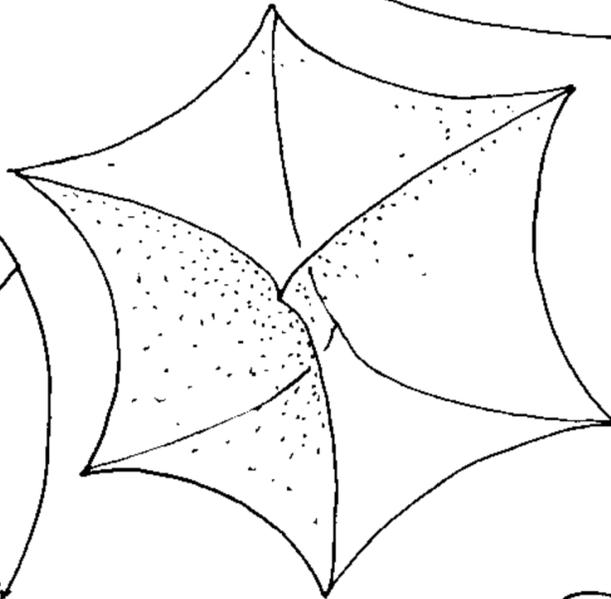
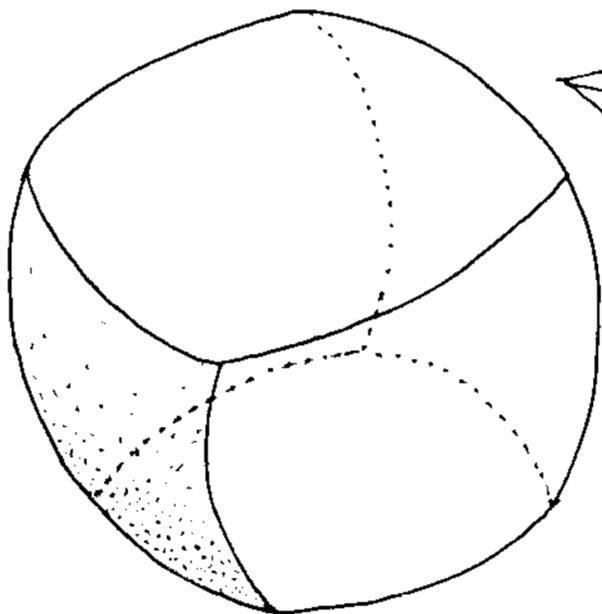
Si consideramos las geodésicas como TRAYECTORIAS, se observa primero una repulsión, después una atracción y luego, de nuevo, una repulsión.



Desplazando los hilos de este modo y uniendo los cubos convenientemente, obtendríamos la imagen de un mundo poblado de curvaturas positivas y negativas:

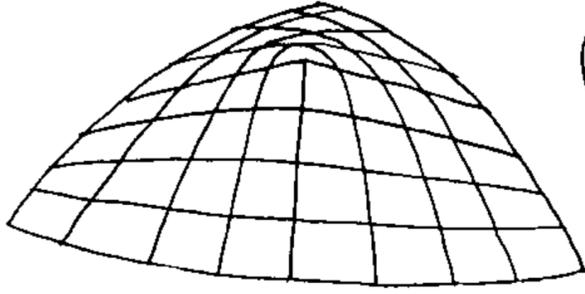


Cuando se observan de más cerca, se ve que se trata de deformaciones que afectan a los CUBOS que llenan el espacio tridimensional

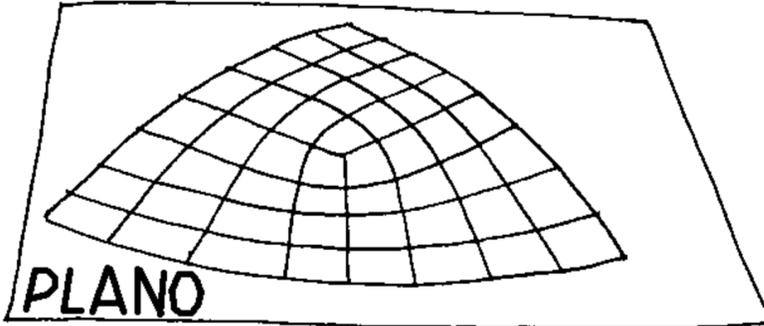


¡Vaya!, es curioso, se podría ampliar estos extraños cubos y rellenar el espacio.

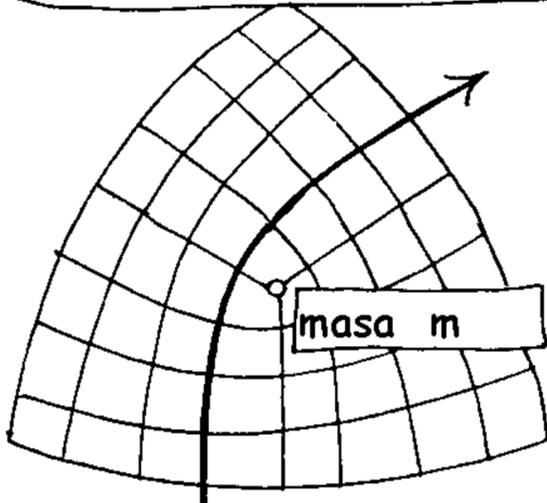
PROYECCIONES



Puedo proyectar las geodésicas de un cono sobre un plano.



todas esas líneas se curvan, lo que evoca las TRAYECTORIAS

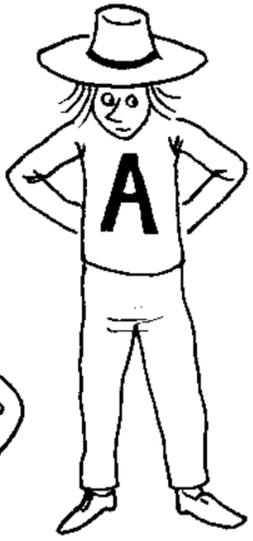


La idea fundamental de la RELATIVIDAD GENERAL consiste en asociar las MASAS a alteraciones locales de la curvatura del espacio.

Queréis decir
¿¿ la masa es un ángulo?!?

¡Ji, Ji!...
¡ponme $\pi/8$!...

Sí, en la medida que las masas son concentraciones de curvatura



Resumiendo, lo que usted quiere decir, señor Albert, es que las inflexiones de las trayectorias, debidas a las FUERZAS, no son más que un efecto de PROYECCIÓN, en nuestro mundo sensible, de una trayectoria trazada sobre otra superficie, y de la que es una GEODÉSICA .

¡Aún con la metafísica!

¡Pues no!,
¡ es la geometría!

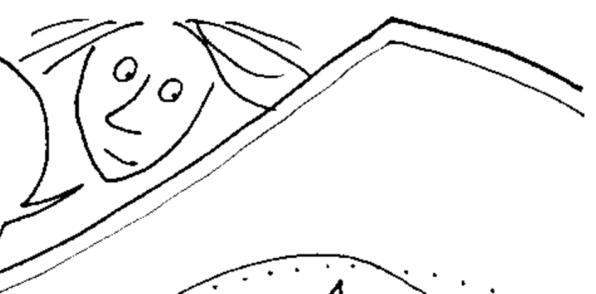
Voy a proporcionarte otro ejemplo. Imagina que estamos en una cápsula espacial, en órbita alrededor de la Tierra

Entonces no pesamos nada

¡Ah no!

¡Jo!

Jugaremos a una especie de billar

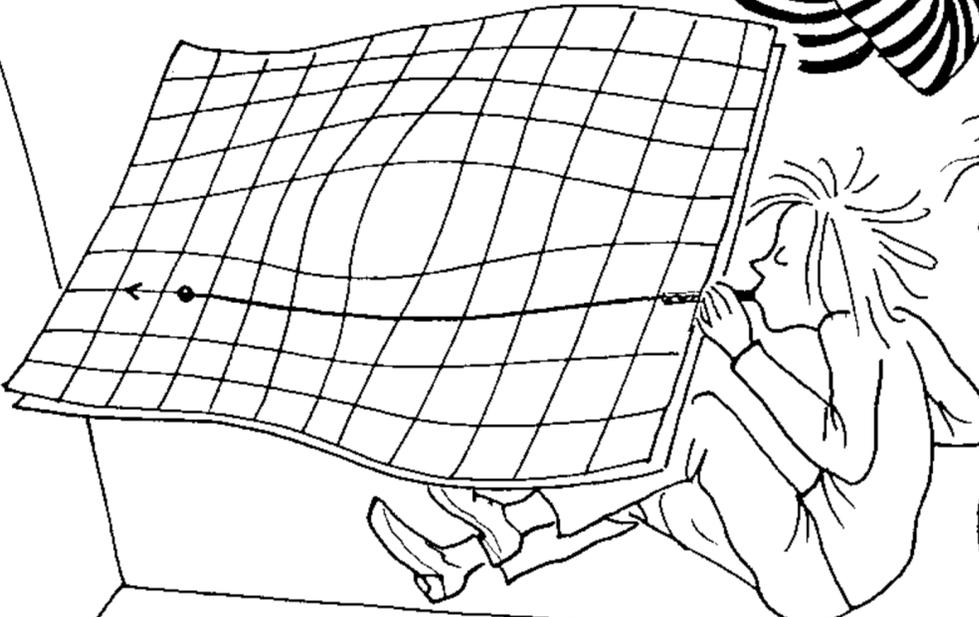


Este objeto está constituido, aparentemente, de dos superficies transparentes, llenas de pliegues, de bultos, pero idénticas y próximas la una a la otra

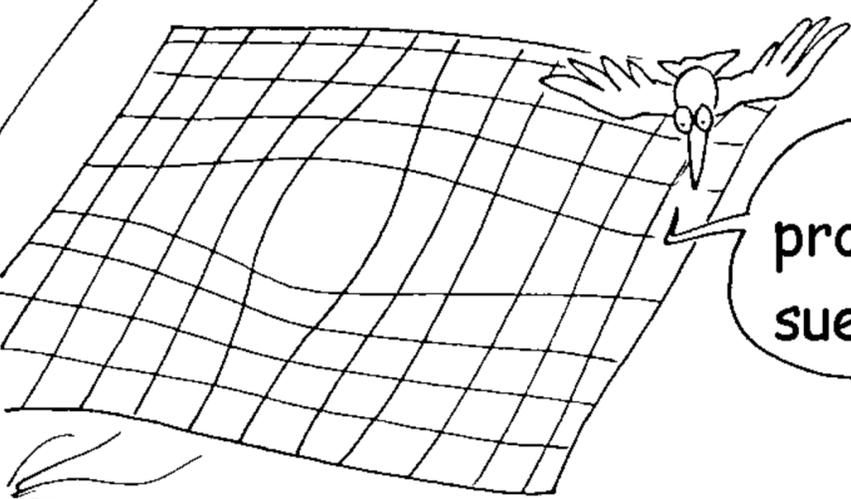
Lo cual permite lanzar bolitas entre ambas y observar sus trayectorias



Estas trayectorias no dependen de la velocidad inicial V que se conserva a lo largo de todo el movimiento. *La Dirección*



Precisamente, en ese caso se encuentra que todas las trayectorias posibles son **GEODÉSICAS** (si hubiera gravedad no se daría ese caso).



¡Oh!, ¡mirad como la lámpara proyecta las trayectorias sobre el suelo de nuestra cápsula espacial!



Alguien que no viera más que estas sombras, pensaría que los objetos que se desplacen sobre este **PLANO** estarían sometidos a la acción de un **CAMPO DE FUERZAS**. Mientras que no es más que un problema de curvatura de una superficie.

Entonces, cuando observo la trayectoria de un cometa alrededor del Sol, suponiendo que sucede en un espacio tridimensional euclídeo, sin curvatura, de hecho este cometa sigue una **GEODÉSICA** en un tipo de espacio en el cual ... él va **¡¡¡EN LÍNEA RECTA!!!!**

No percibimos más que la sombra de las cosas

Es muy platónico eso que tú dices, amigo Tiresio

No se puede ir más que **¡en LÍNEA RECTA!**

la **LUZ** sigue también una geodésica

Vaya, es divertido, las geodésicas cuando son proyectadas siguiendo otro ángulo, ¡no tienen el mismo aspecto!

?!?

¡Tiresio!



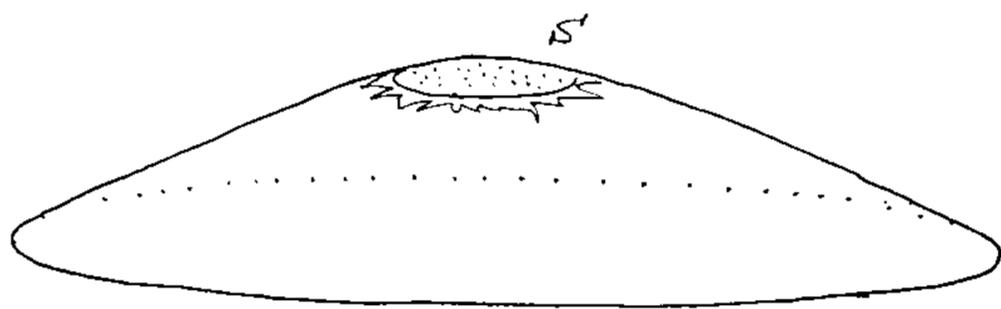
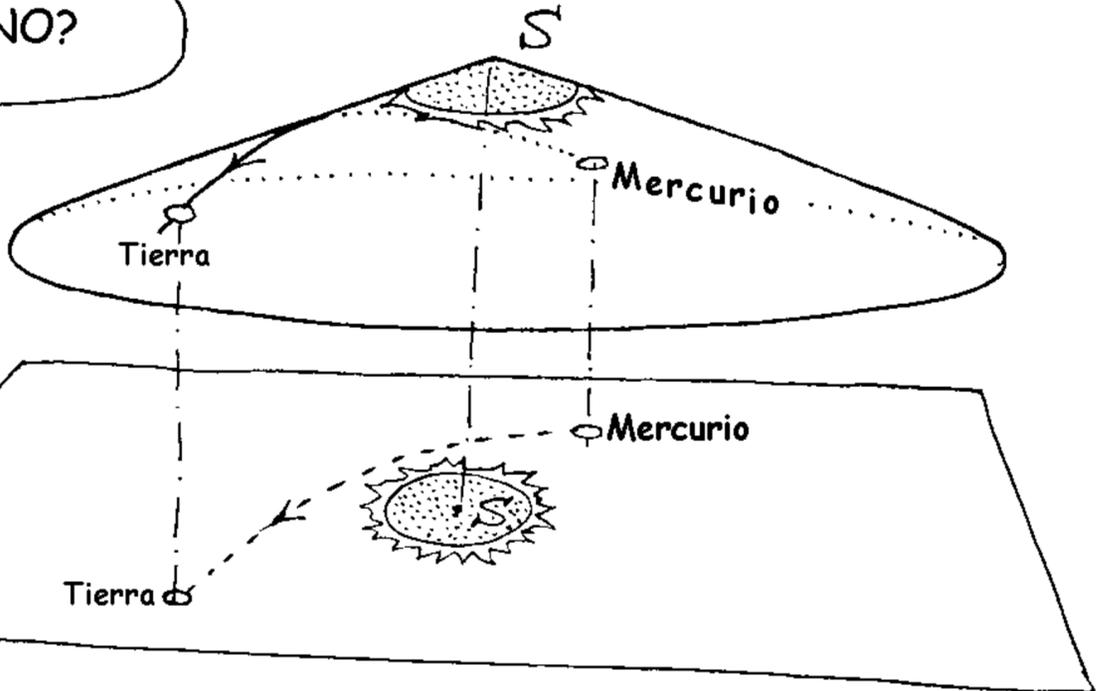
Bien, bien...

MASA-MATERIA

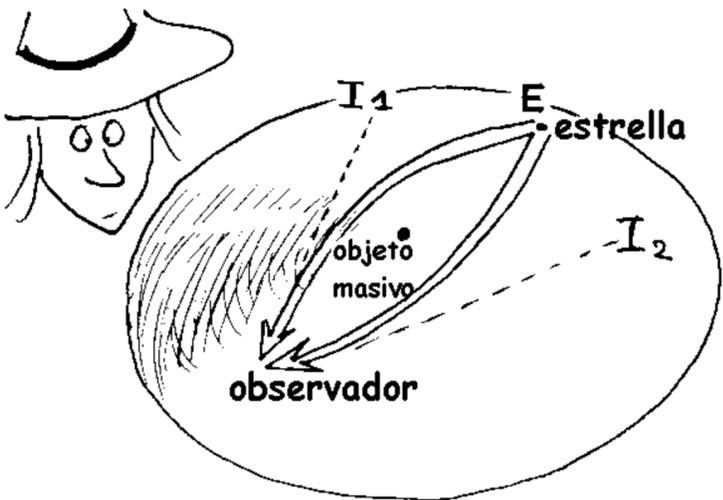
Pero entonces, ¿el Sol es un...CONO?



Sabemos que el Sol desvía los rayos luminosos procedentes de Mercurio



Creemos que el espacio, en la vecindad del Sol, es PLANO. De hecho, este astro, por su importante masa, representa una cierta cantidad de curvatura. Pero, como el Sol no es una masa puntual, debemos representar esta región del espacio por medio de un cono con el vértice limado:



Los objetos extemadamamente masivos pueden curvar el espacio hasta el punto de que un observador podrá percibir DOS imágenes I_1 y I_2 de una misma estrella E: se trata del efecto de LENTE GRAVITACIONAL, efecto ya observado recientemente.

las masas de los átomos, de las partículas
generan la curvatura general del universo.

a la MASA se
le da un significado
GEOMÉTRICO

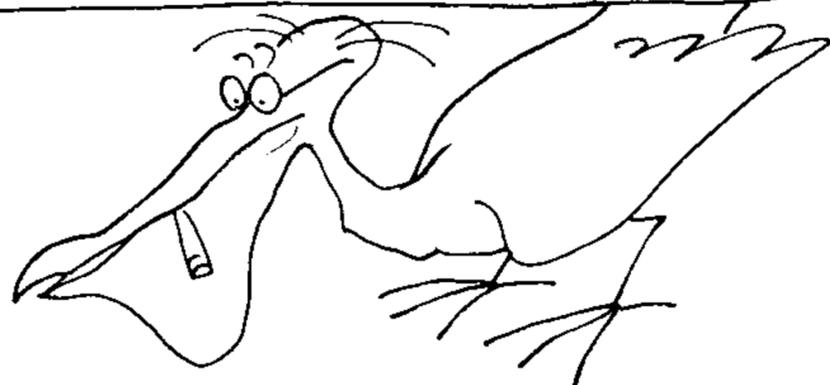
Pero, ¿en los átomos
hay mucho... VACÍO?

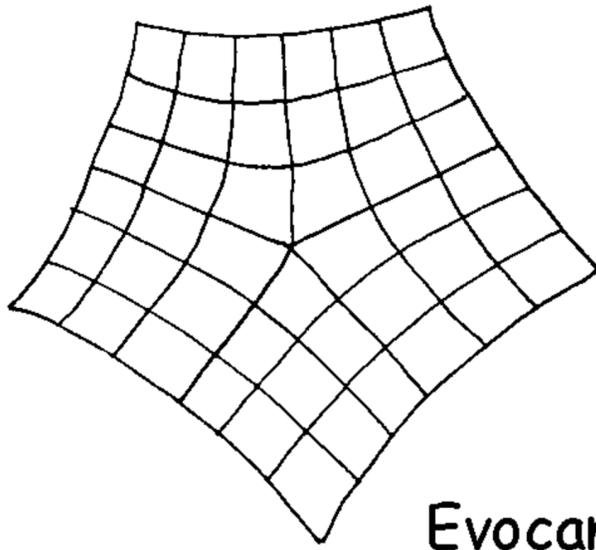


o de lo contrario
no comprendo nada...

Pues no, querido amigo, esta vieja
dualidad entre materia y vacío está
completamente superada; ya no hay
más que... GEOMETRÍA

¡iii! No más que...
geometría!!?!





Evocan "masas negativas",
generadoras de fuerzas repulsivas.

Un universo lleno de masas negativas sería
muy extraño. En vez de engendrar estrellas y
galaxias, se poblaría de burbujas, de grandes

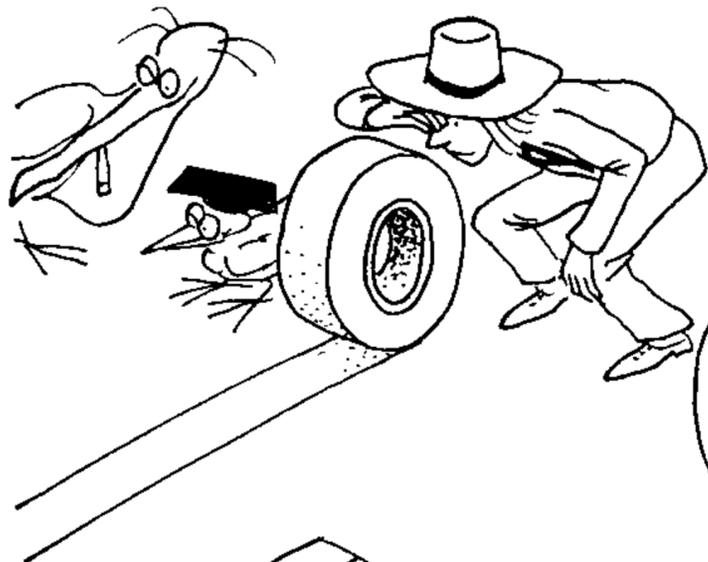
espacios vacíos:

Así parecen distribuirse
los cúmulos de galaxias,
que forman un extraño tejido
celular, cada célula tiene
unos 20 millones de años-luz
de lado.

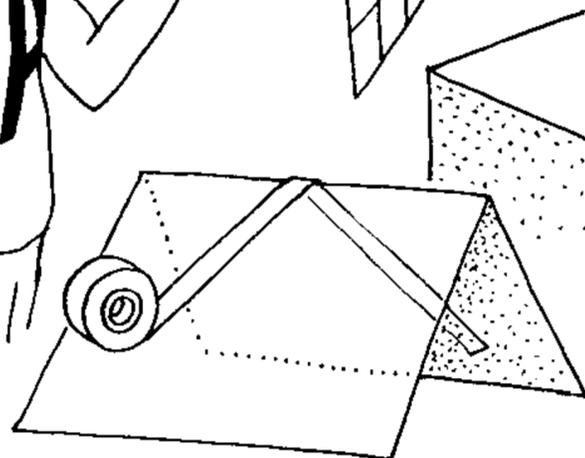
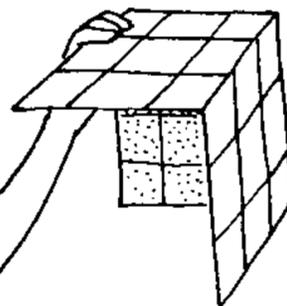
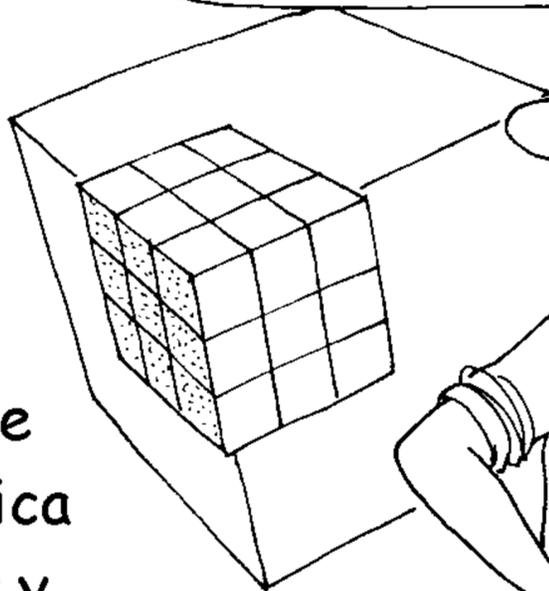
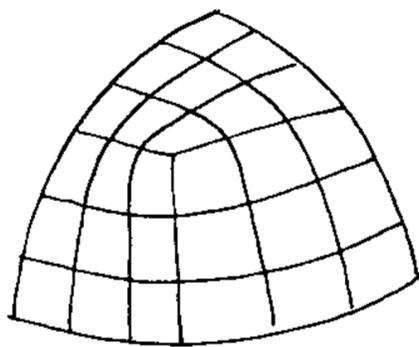


Las fuerzas gravitacionales se podrían manifestar repulsivas a muy
grandes distancias.

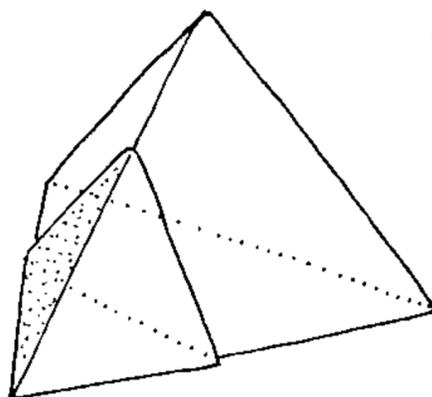
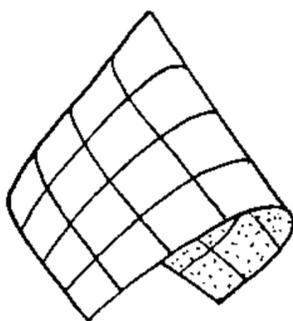
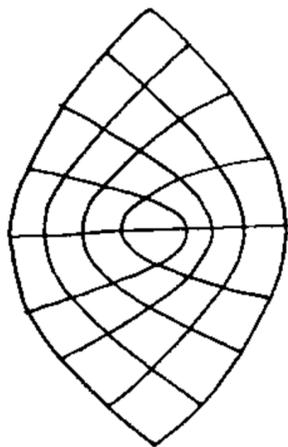
POLIEDROS



Anselmo, vas a materializar las geodésicas con la ayuda de, por ejemplo, cinta adhesiva.

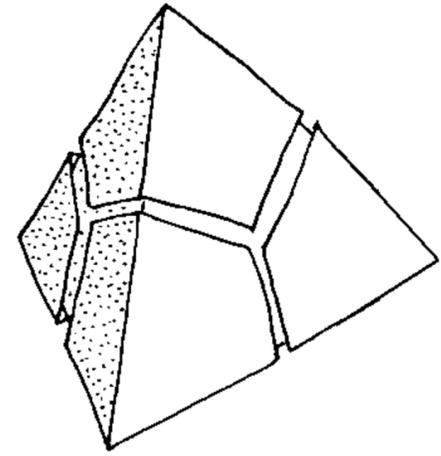
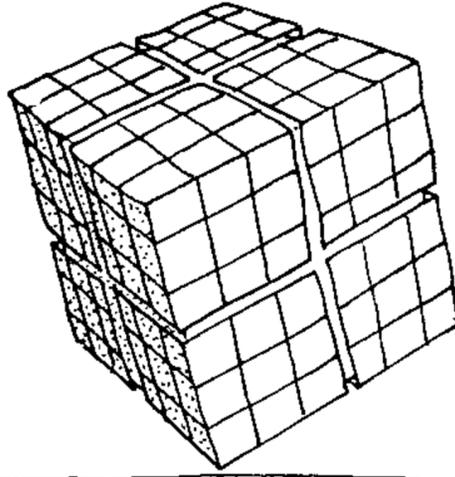
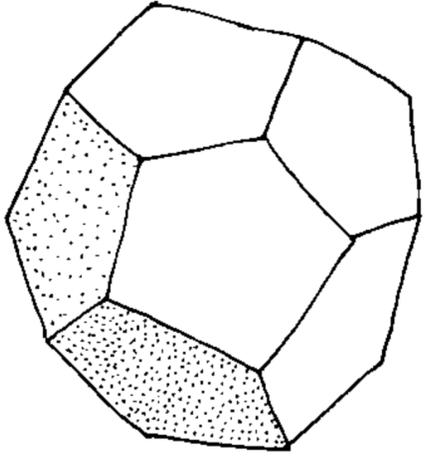


El hecho de plegar este cono ($\theta=90^\circ$) no modifica en nada las geodésicas y encaja perfectamente en el vértice de un cubo.



Incluso se le pueden hacer tres pliegues a este cono ($\theta=180^\circ$) para que encaje en el vértice de un tetraedro regular

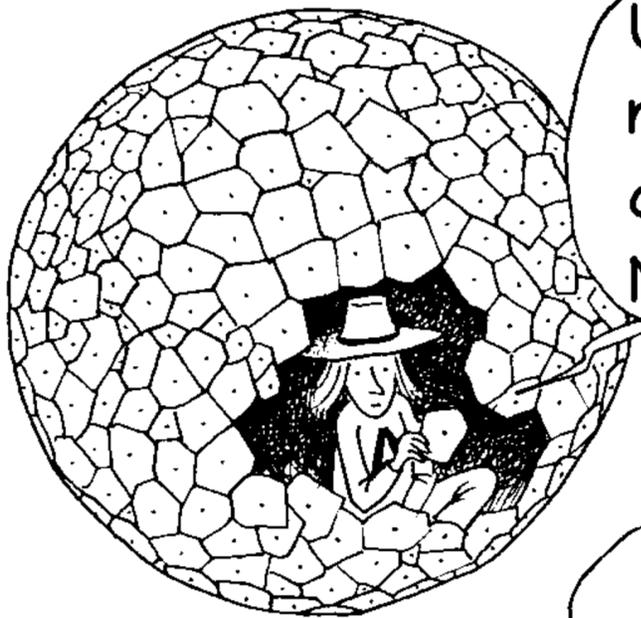
UN ESPACIO DEBE SER ABIERTO O CERRADO



Veinte conos ($\theta = 36^\circ$)
 permiten hacer
 un DODECAEDRO
 $20 \times 36^\circ = 720^\circ$

Ocho conos ($\theta = 90^\circ$)
 permiten hacer
 un CUBO
 $90^\circ \times 8 = 720^\circ$

Cuatro conos ($\theta = 180^\circ$)
 permiten hacer
 un TETRAEDRO
 $180^\circ \times 4 = 720^\circ$



Uniendo, del modo más regular posible, un número N de microconos de ángulo θ , compruebo que en el momento que $N \times \theta = 720^\circ$ obtengo... ¡una esfera!

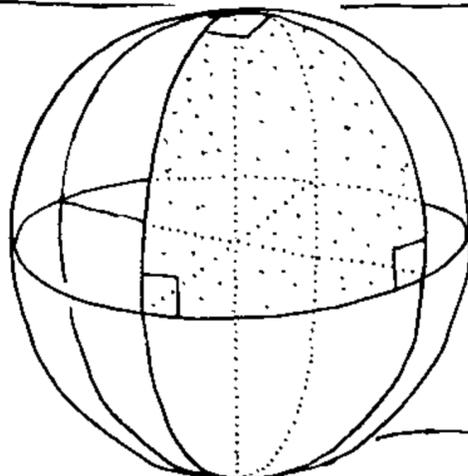
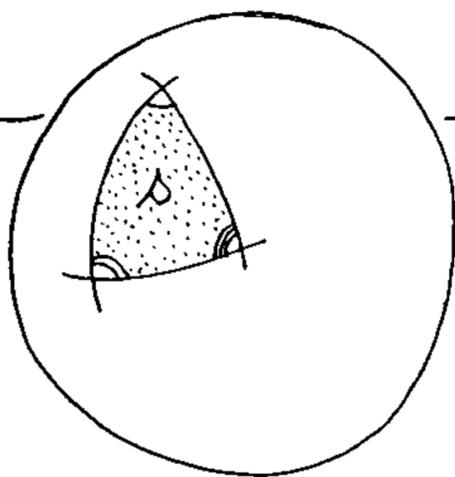
está claro pues la
CURVATURA TOTAL
 de la esfera es de 720°

ahora, sal de ahí
 querido mío



En la esfera, la curvatura se encuentra uniformemente repartida. Por ello la suma de los ángulos de un triángulo trazado sobre la esfera es igual a $180^\circ + 720^\circ \times \frac{s}{S}$, donde s es la superficie del triángulo y S la de la esfera. El término: $720^\circ \times \frac{s}{S}$ representa la CANTIDAD de CURVATURA contenida en el triángulo. (*)

La Dirección



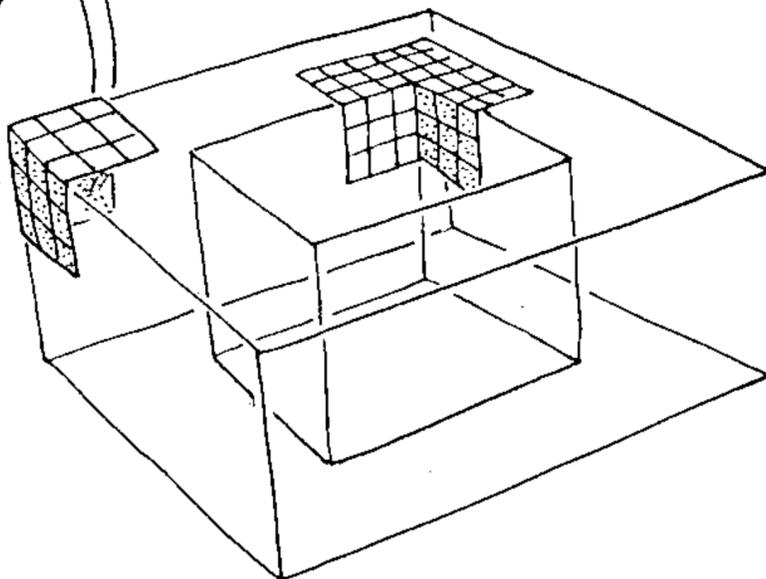
Ejemplo: este triángulo ocupa un octavo de la superficie de la esfera $\hat{A} + \hat{B} + \hat{C} = 180^\circ + \frac{720^\circ}{8} = 270^\circ$

¡Fantástico!...

Por análogo motivo, si la densidad media en nuestro espacio tridimensional (es decir la cantidad de curvatura por unidad de volumen) sobrepasa los $10^{-29} \frac{g}{cm^3}$ este espacio se CERRARÁ sobre si mismo.

Profesor Albert, dígame, ¿cuánto vale la curvatura total de un TORO?

Muy sencillo, Anselmo, no tienes más que representarlo así: con ocho posiconos ($\theta = +90^\circ$) y ocho negaconos ($\theta = -90^\circ$)



(*) Este teorema se lo debemos C. F. GAUSS (1777-1855)

La suma de los dieciseis ángulos,
de las dieciseis curvaturas es nula.
¡La CURVATURA TOTAL del TORO
por lo tanto es... CERO!

Pues, sí ...

Todo objeto del
género esfera tiene
una CURVATURA
TOTAL igual a 720° ,
es decir 4π

Un toro de N agujeros, una hogaza (*), tendrá
una curva igual a $-4\pi(N-1)$ (se resta 4π por cada agujero)

Y si haces un objeto cerrado sobre si
mismo, de forma poliédrica, obtendrás su
curvatura total al sumar todas las curvaturas
concentradas en sus vértices.

Tiresio,
¿qué haces
viejo amigo?

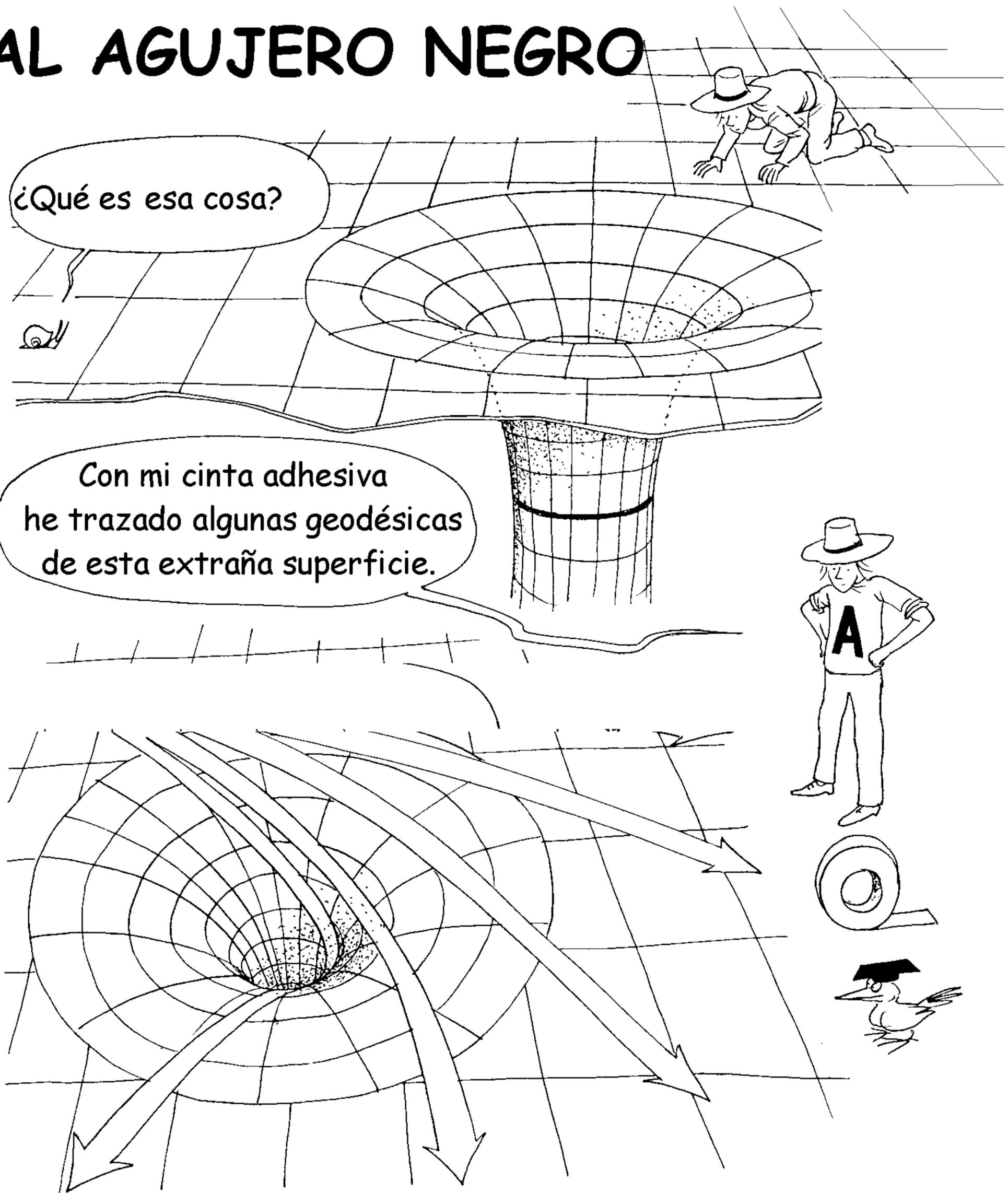
Busco mi
curvatura total

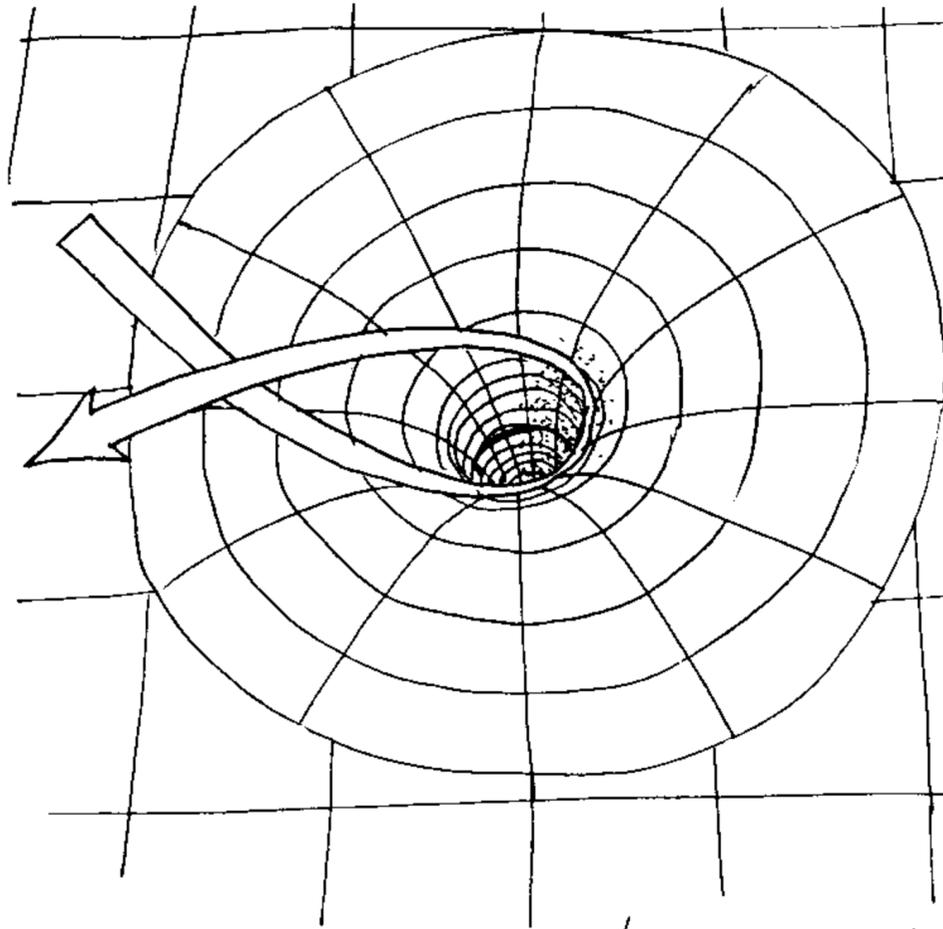
(*) Una HOGAZA es una clase de pan que se hace
en el Sur de Francia (donde vive el autor) y en España.

PRIMERA APROXIMACIÓN AL AGUJERO NEGRO

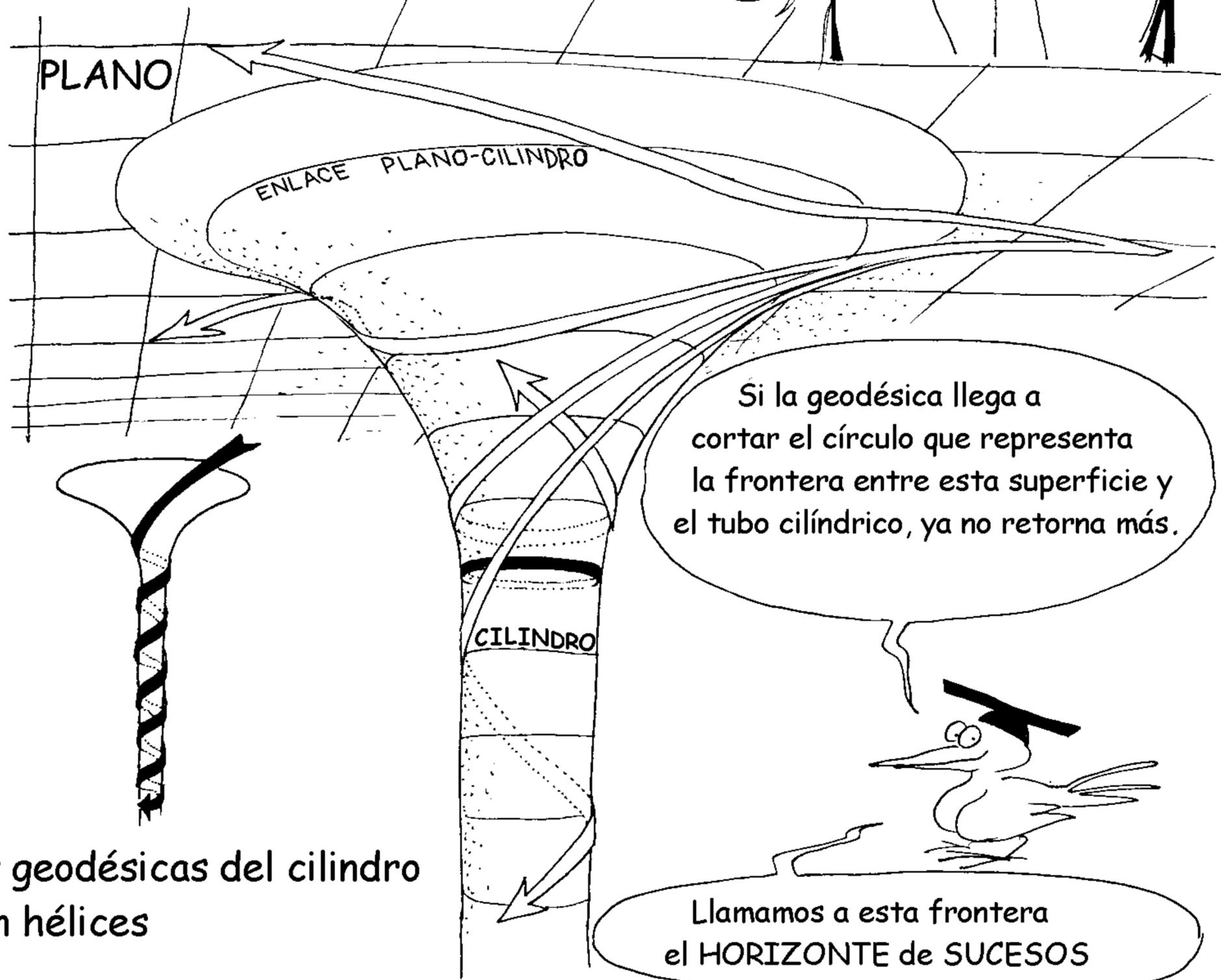
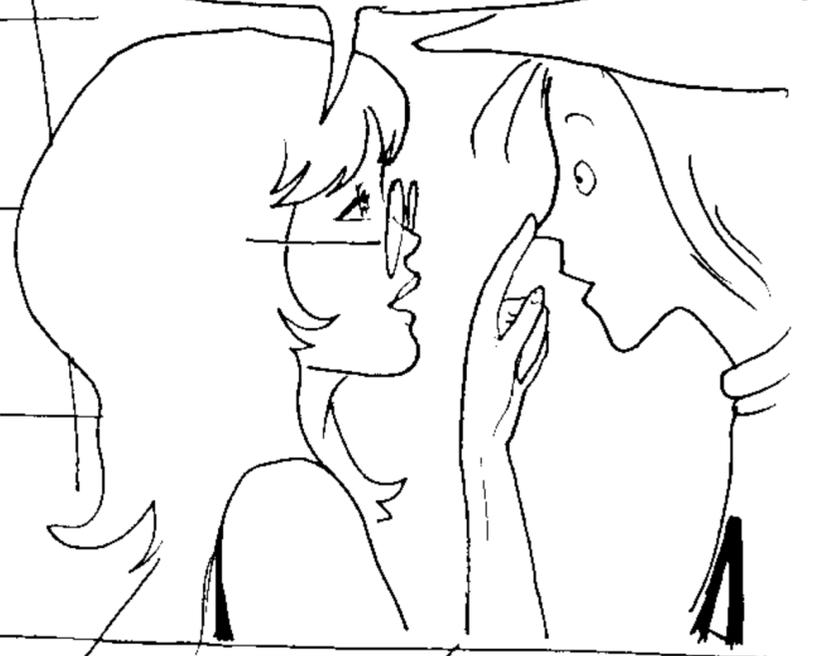
¿Qué es esa cosa?

Con mi cinta adhesiva
he trazado algunas geodésicas
de esta extraña superficie.





Si la geodésica se sumerge suficientemente en esta depresión, llegará a cortarse a si misma



PLANO

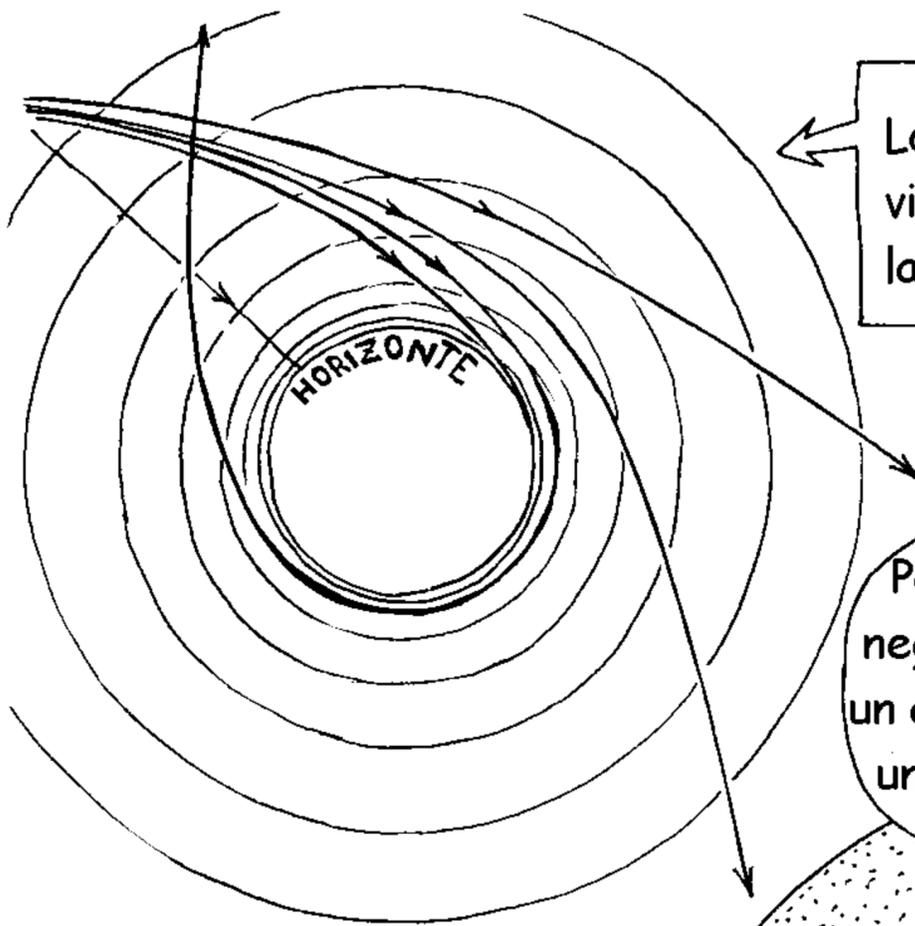
ENLACE PLANO-CILINDRO

CILINDRO

Si la geodésica llega a cortar el círculo que representa la frontera entre esta superficie y el tubo cilíndrico, ya no retorna más.

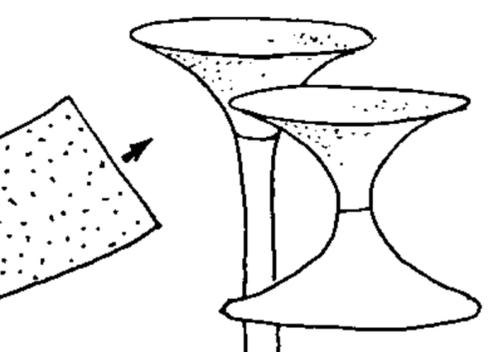
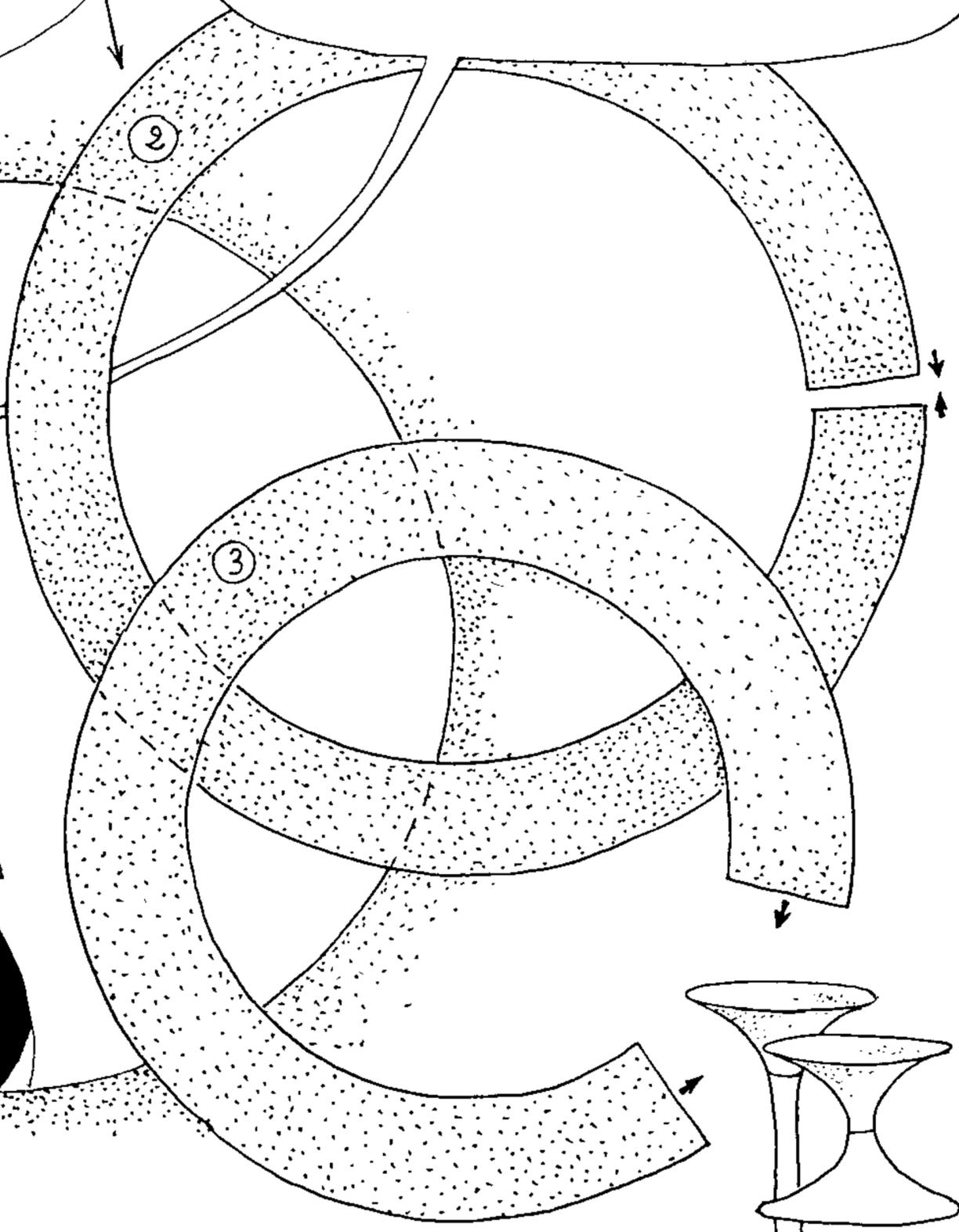
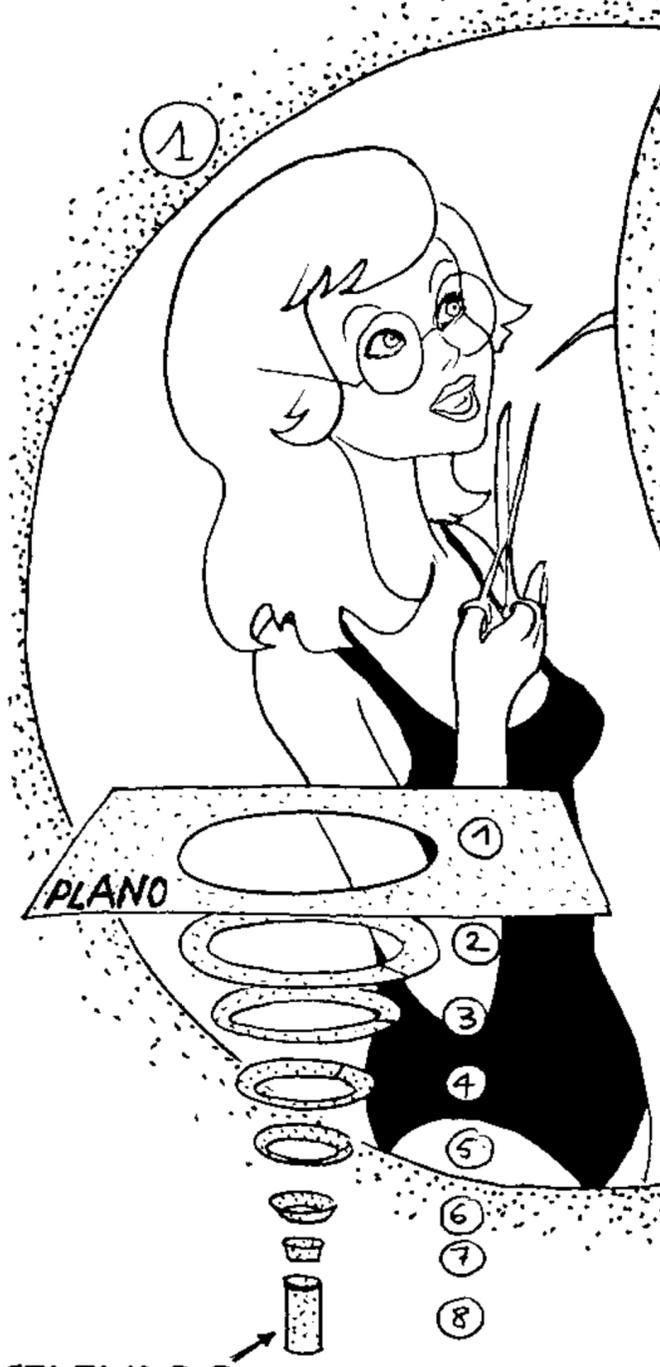
Llamamos a esta frontera el HORIZONTE de SUCESOS

las geodésicas del cilindro son hélices



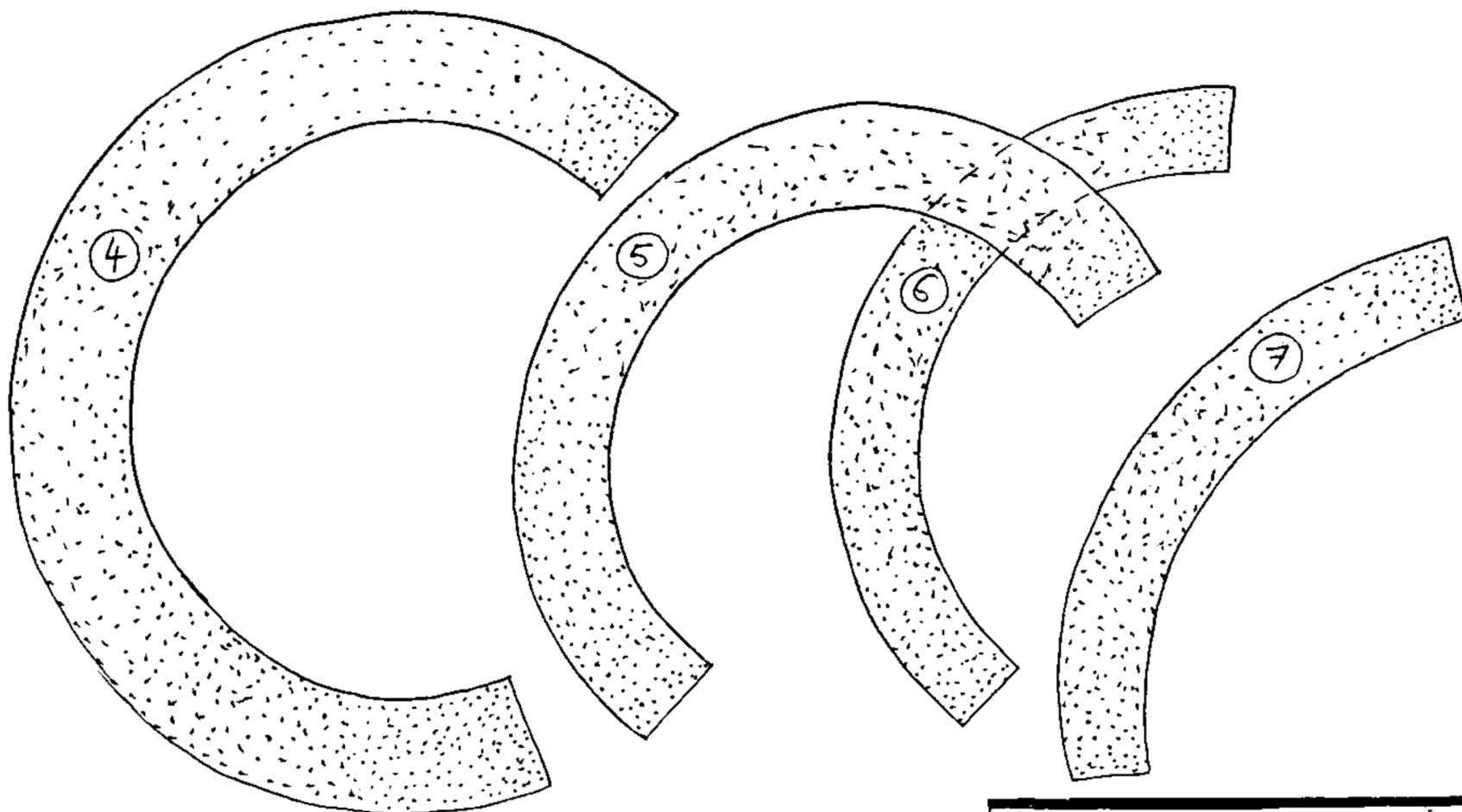
Los que tuvieran la ilusión de vivir en un mundo PLANO concebirían las trayectorias de este modo.

Podeis fabricar vuestro propio agujero negro con la ayuda de un plano dotado de un agujero (1) de seis troncos de cono (para unir borde con borde) y de un cilindro (8)

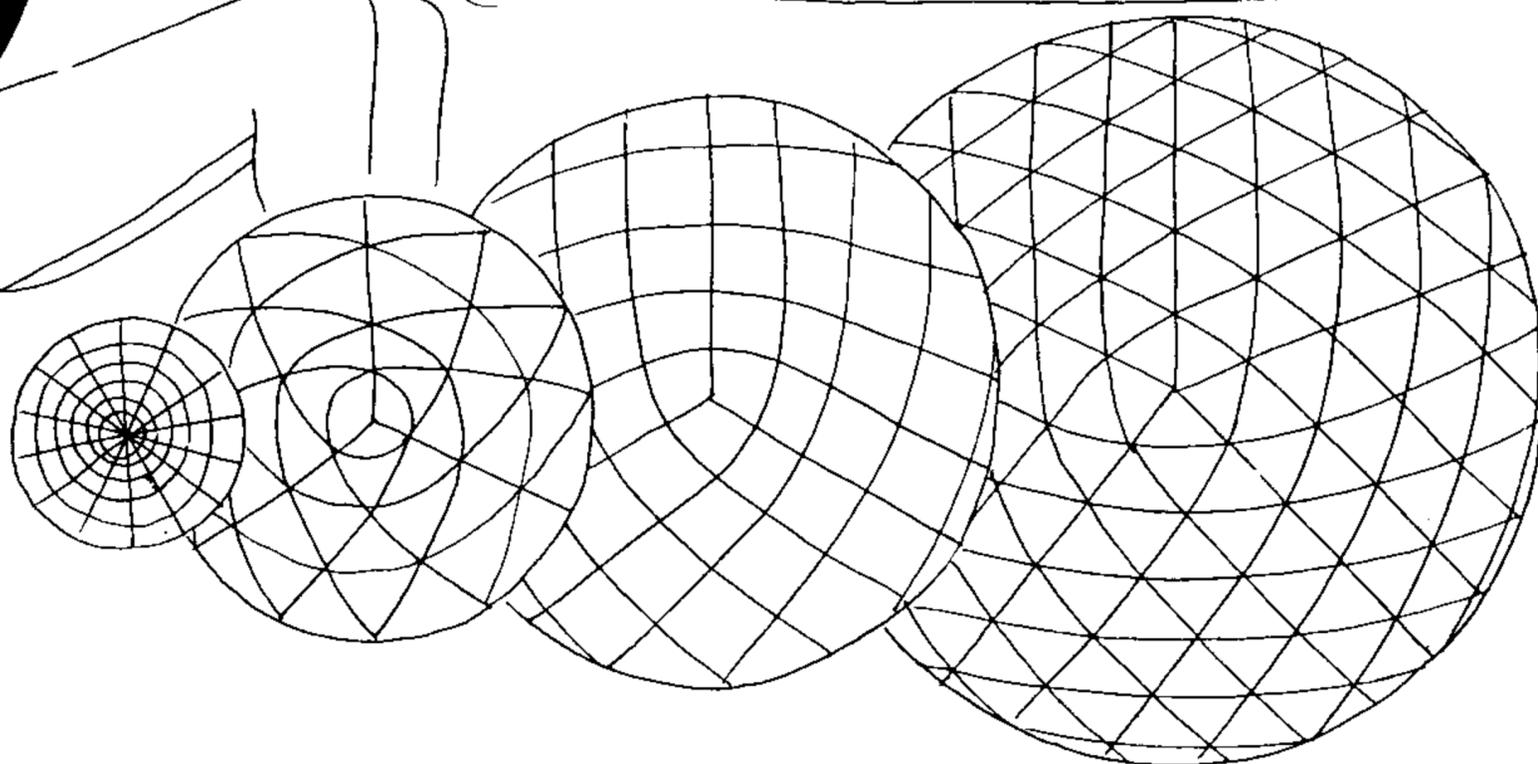


VARIANTES

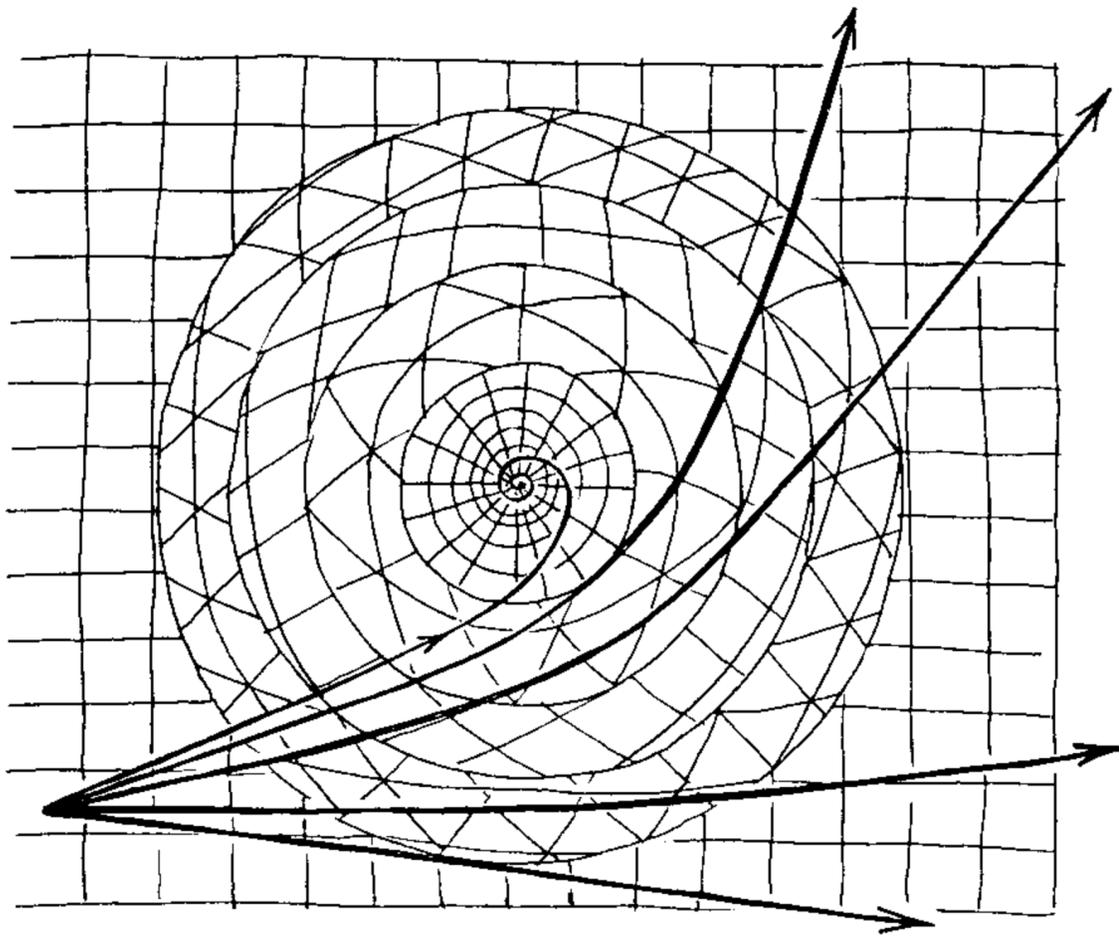
CILINDRO



Aquí vemos otro modo de imaginarse un AGUJERO NEGRO con la ayuda de los entramados.



Hemos elegido entramados regulares por razones estéticas.



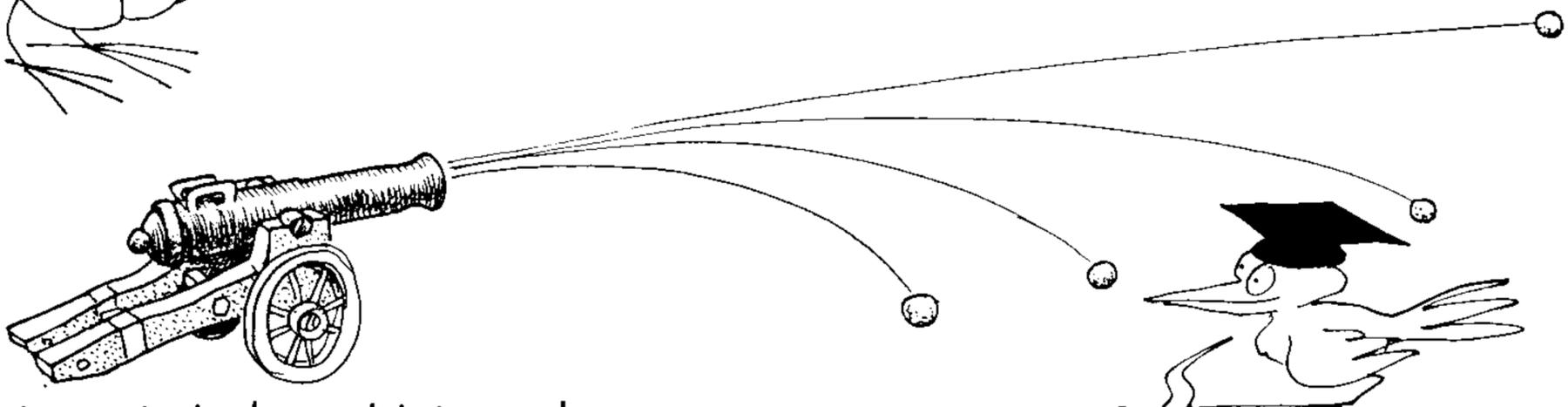
La regla del juego consiste en cortar los enmallados sucesivos según un ángulo constante, asegurándose una continuidad en cada frontera circular. Cuando más nos acercamos al agujero negro más notamos su atracción. En el interior de **CÍRCULO HORIZONTE DE SUCEOS** la trayectoria se enrolla en espiral. Se puede observar que la malla central de coordenadas polares se puede considerar al entramado de un cilindro mediante sus geodésicas, visto en perspectiva.



¡Alto ahí!

¡Hay algo que chirría desde el principio hasta el final de vuestro razonamiento!

Habéis reemplazado las masas por curvaturas y las trayectorias por geodésicas. Pero ¿qué habéis hecho con la VELOCIDAD INICIAL?



Por ejemplo: la bala de un cañón y la atracción terrestre

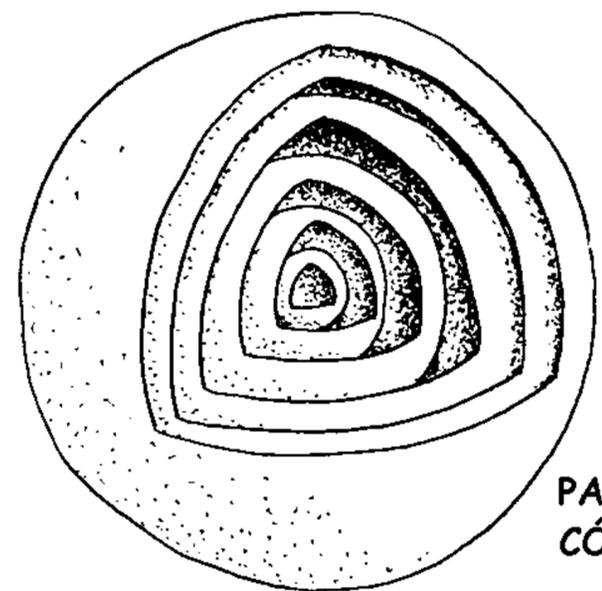
La trayectoria de un objeto en el campo de fuerza creado por una o varias masas depende de su velocidad inicial V_0 .

Entonces, los dibujos que acabamos de ver, ¿correspondían a un valor particular de la velocidad inicial V_0 ?



SUMERGIÉNDOSE

Imaginemos un mundo construido como una cebolla, es decir, en capas concéntricas. (*)



PARQUE
CÓSMICO

A cada capa le corresponde un valor V de la velocidad. Y, cuando más velocidad se lleve, a más profundidad se está.

A la velocidad de la luz, nos encontraremos en el centro de la cebolla.

(*) Este modelo se presentó en "TOUT EST RELATIF" con el nombre de PARQUE CÓSMICO (del mismo autor, ediciones BELIN).

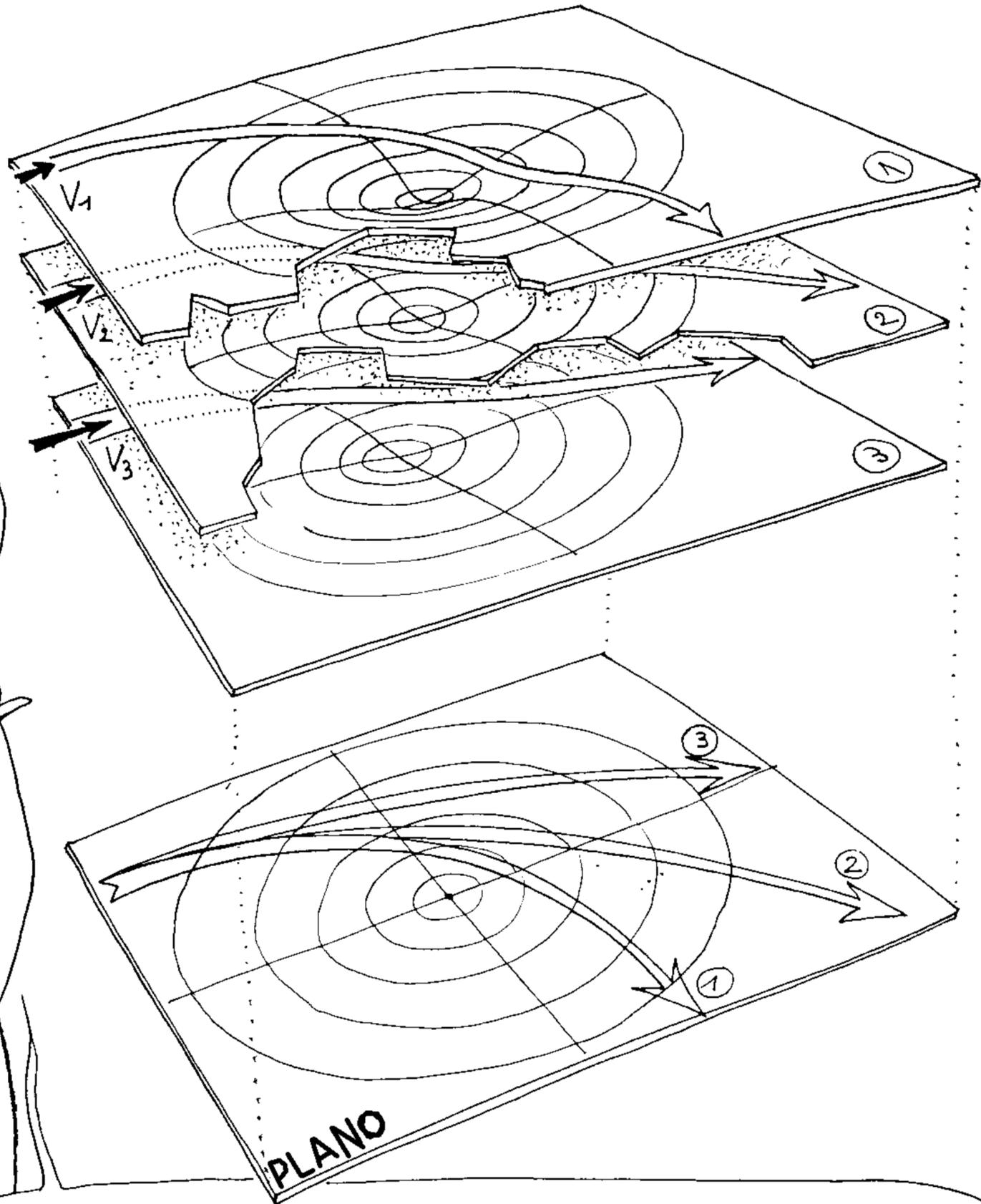
En ausencia de FUERZAS, un objeto conserva su velocidad V (por lo tanto se mantiene a la misma distancia del centro de la cebolla). Describe una GEODÉSICA de la ESFERA correspondiente, es decir, una CIRCUNFERENCIA MÁXIMA.

Y ahora ¡observad!

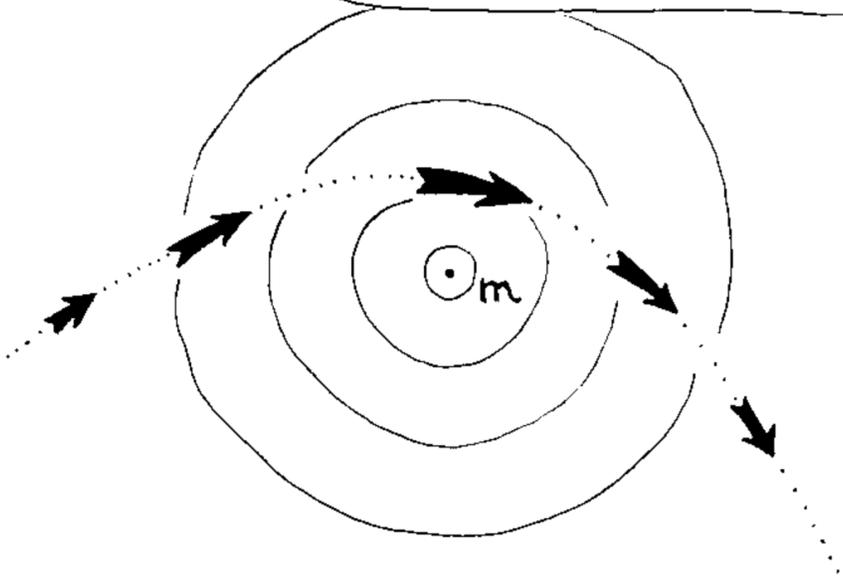
Aquí vemos el efecto del martillazo del profesor Albert. Se puede observar como el efecto se atenúa hacia el centro.

Aquí tenemos un hueco (o una joroba, pues el razonamiento es parecido...). Hemos dibujado las curvas de nivel (¡NO son geodésicas!) y una geodésica particular.

$$V_1 < V_2 < V_3$$



Cuanto menor sea la velocidad inicial, más se notará la deformación y más se curvará la trayectoria.



Bajo el efecto de la atracción gravitacional, la velocidad de un objeto primero aumenta y después disminuye. La velocidad máxima se alcanzará cuando la distancia entre el objeto y la masa atractiva sea mínima (PERIHELIO)

¿Qué es este aparato?

Es el
CRONOSCAFO

Con él se pueden seguir las
geodésicas del parque cósmico

Pero, ¿para qué
encerrarse en
el cronoscafo?

Todo el conjunto
del Parque Cósmico
está bañado por un
fluido: el CRONOL

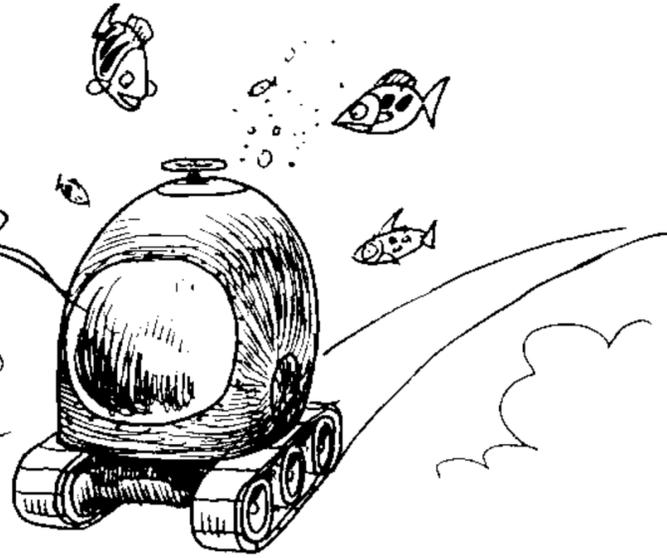
¡Por nada del
mundo subiría
ahí!

El trayecto seguido
por el CRONOSCAFO
se llama el DESTINO



(*) Nota de SERVICIO: El SEGUNDO PRINCIPIO afirma que es imposible seguir las geodésicas del espacio-tiempo (PARQUE CÓSMICO) en sentido contrario. *La Dirección*

Como la presión P_R es superior a P_E , el cronol fluye y el reloj contador mide el tiempo que pasa



Cuando más se hunde en el cronol aumenta más la presión P_E . Como el flujo es proporcional al incremento $(P_R - P_E)$: el tiempo se corre menos deprisa.

Y la profundidad ES la velocidad. Entonces cuando más rápido vayamos menos tiempo se cuela (*)

Y cuando se alcanza la velocidad de la luz, P_E se vuelve precisamente IGUAL a P_R y el tiempo se detiene.

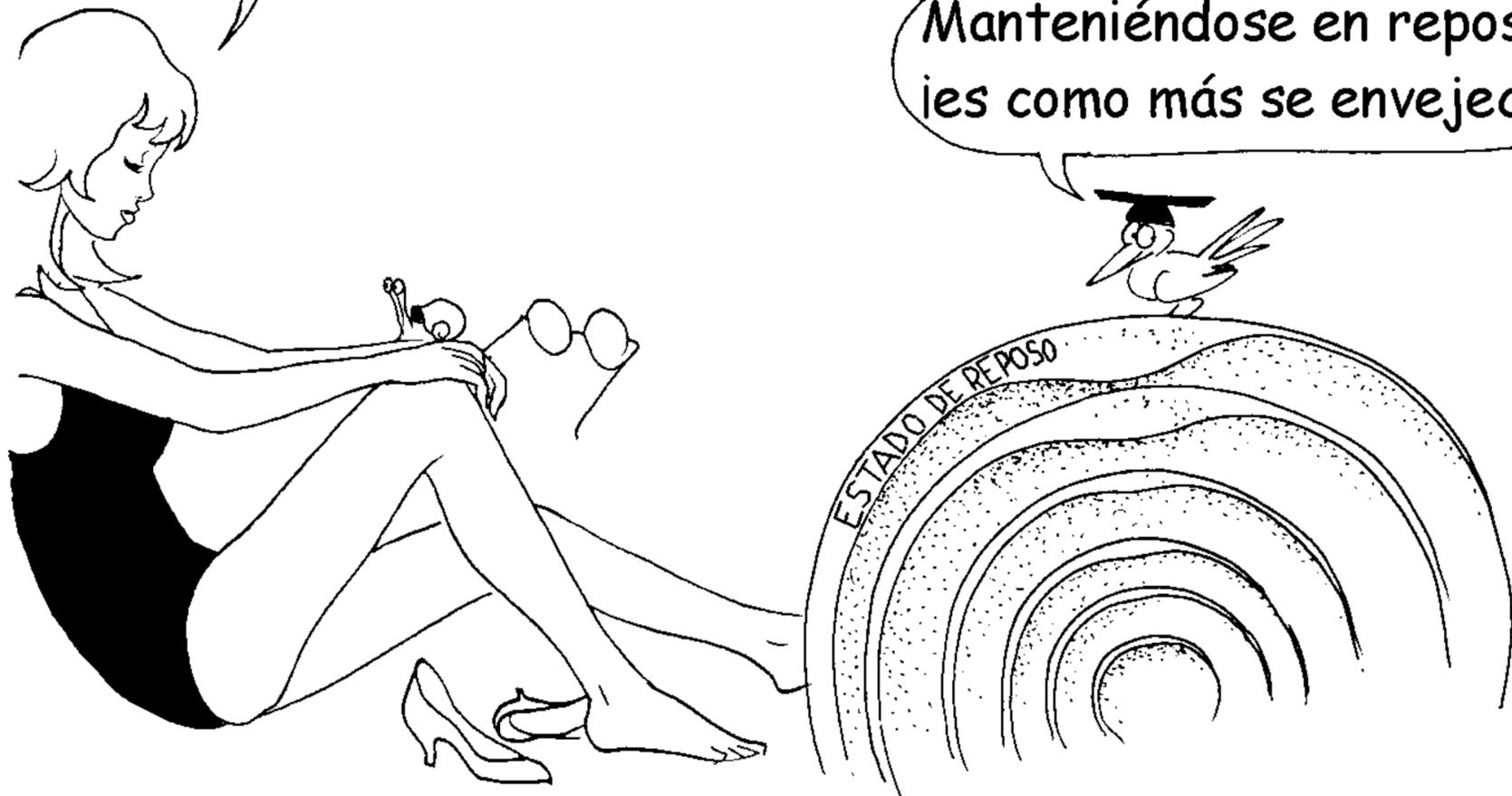


Y ya no se puede ir más deprisa que la velocidad de la luz, así como no se puede ir a mayor profundidad que el centro del Parque Cósmico.

(*) Ved "TOUT EST RELATIF" del mismo autor.

La superficie del Parque Cósmico representa la inmovilidad, el reposo.

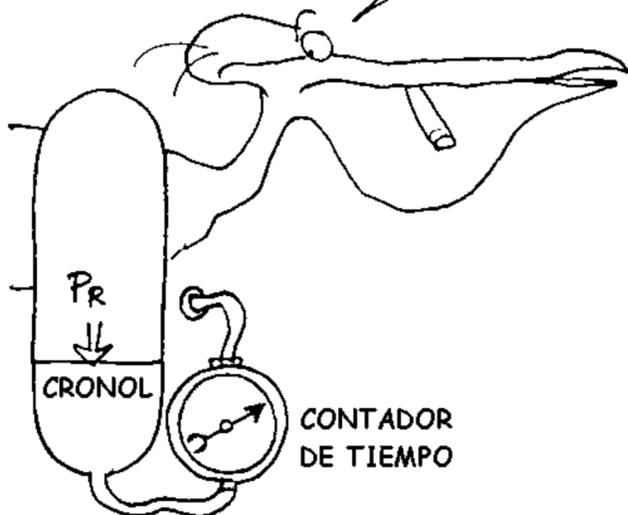
Manteniéndose en reposo
ies como más se envejece!



Cuando un objeto es muy masivo, curva intensamente el espacio-tiempo. Lo que significa que en esa región, incluso en reposo, un objeto se sumergirá en el CRONOL a presión mayor. Y su tiempo se colará menos deprisa que el de un objeto, también en reposo, con una masa mucho menor. Éste será el caso de la vecindad de un objeto superdenso como puede ser una estrella de neutrones.

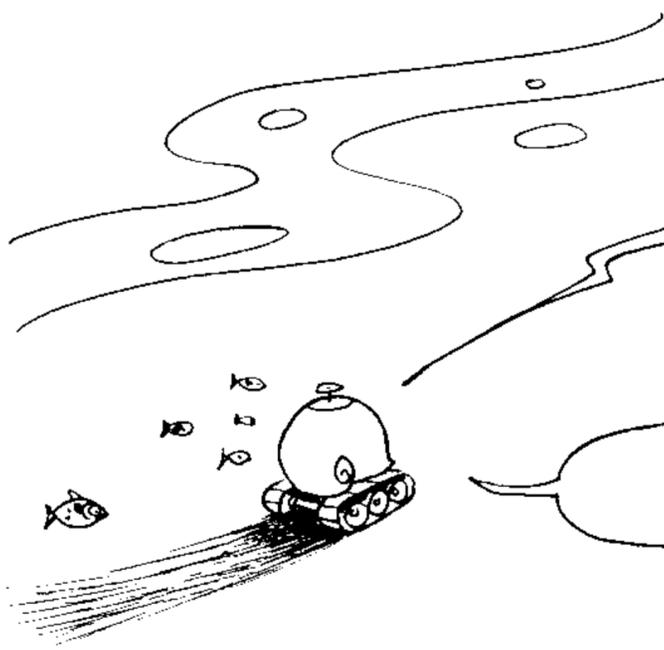
¿Qué sucedería si
saliéramos bruscamente
del cronoscafo?

Tal vez sufriésemos
una prematura vejez



Y cuando el cronol del depósito
se agote completamente, es ...¿la muerte?

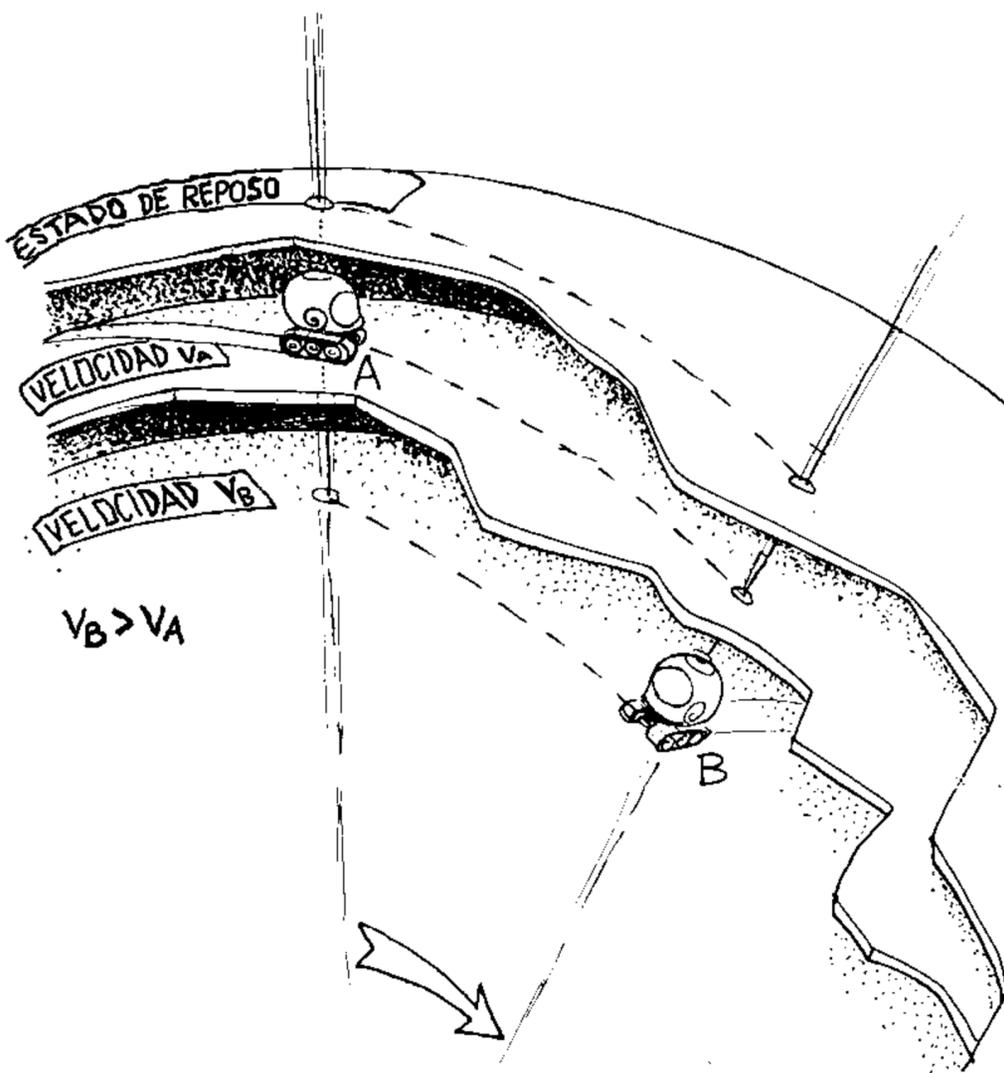
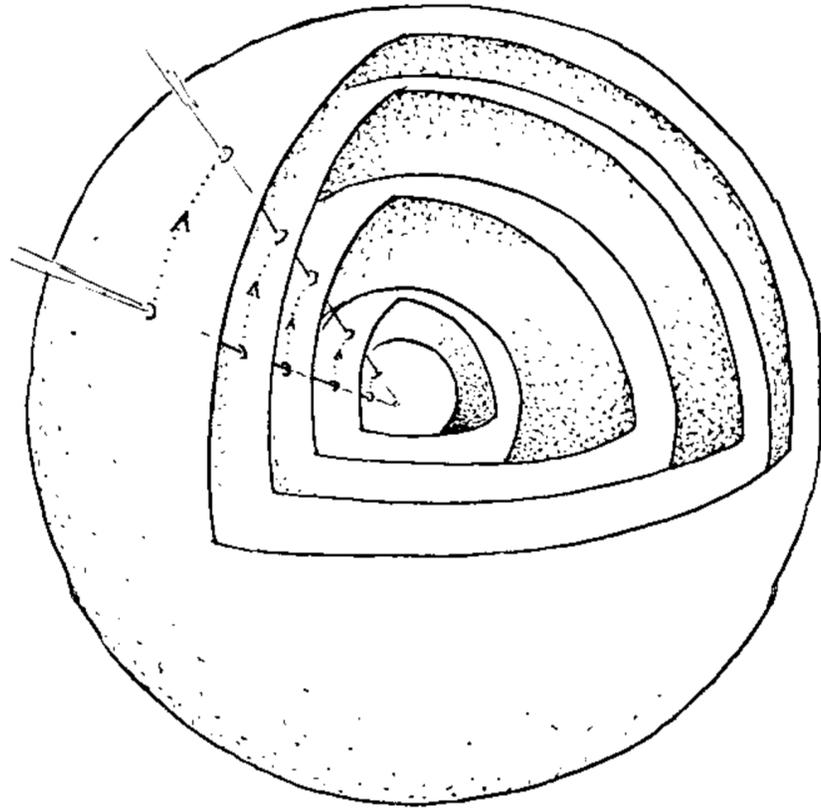
COMUNICARSE



Allá vamos pues encerrados en estas dos cronoscafos. Pero, ¿cómo nos comunicaremos?

Utilizando FOTONES.

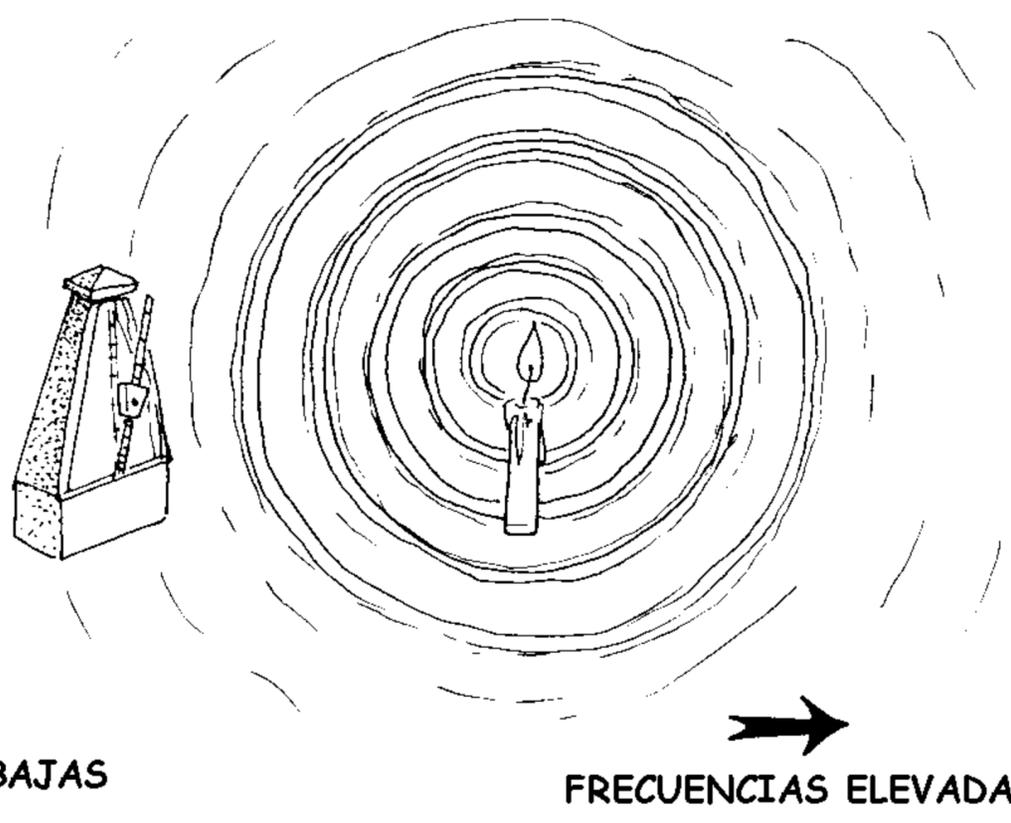
Los fotones son como unos haces de luz que barrieran todas las capas del Parque Cósmico a velocidad angular constante.



Un objeto A, desplazándose a velocidad V_A , puede lanzar uno de estos haces de luz en dirección de un objeto B que se desplaza a velocidad V_B

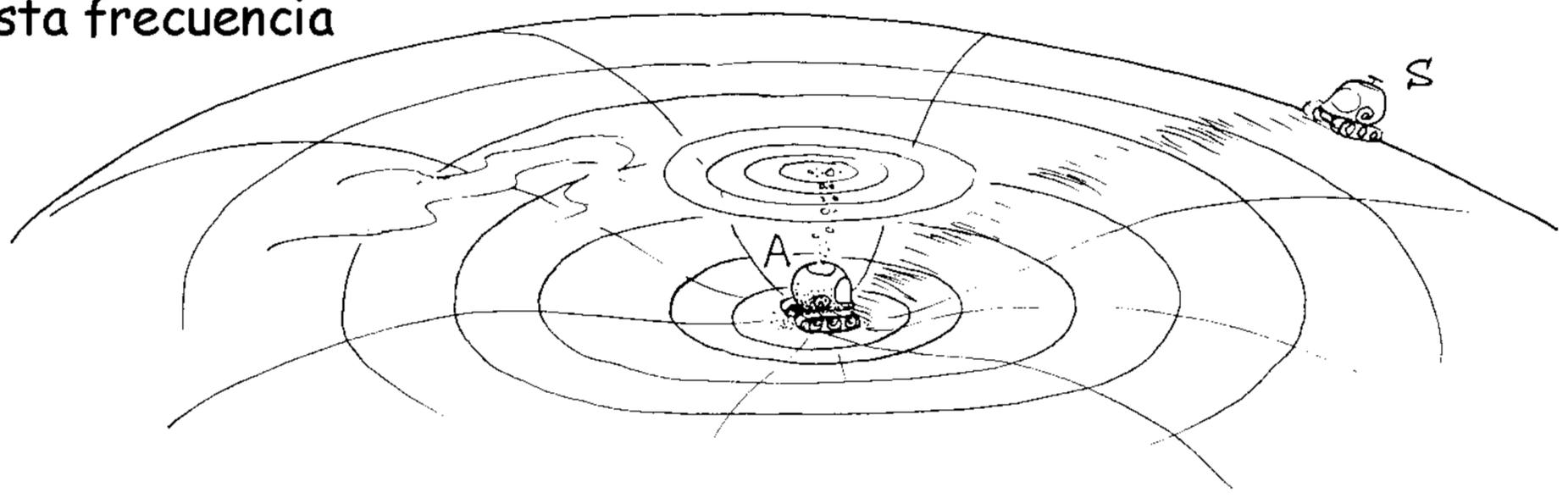


La luz es un fenómeno periódico, que tiene una frecuencia asociada N



INFRARROJO ROJO NARANJA AMARILLO VERDE AZUL VIOLETA ULTRAVIOLETA

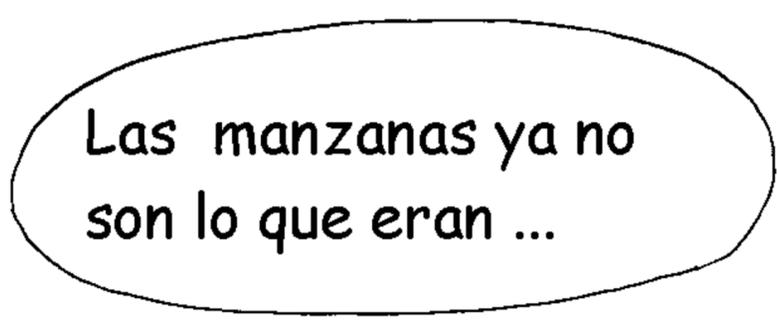
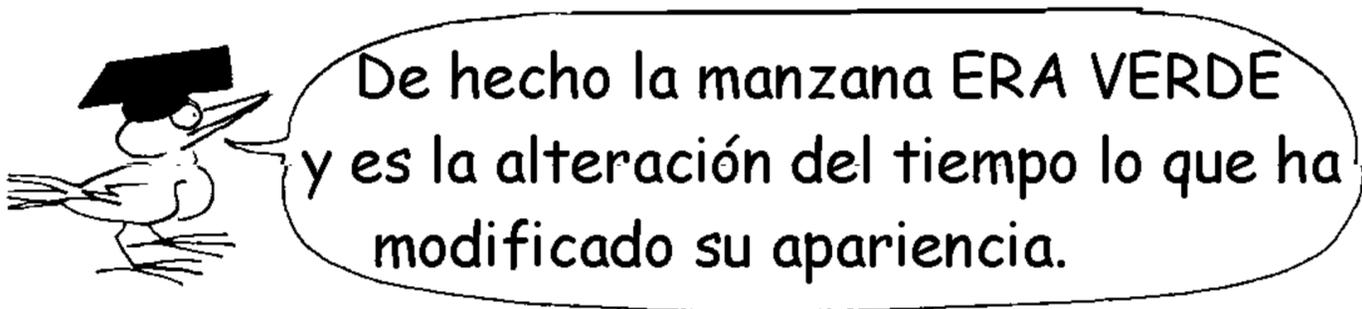
Y el color viene determinado por esta frecuencia



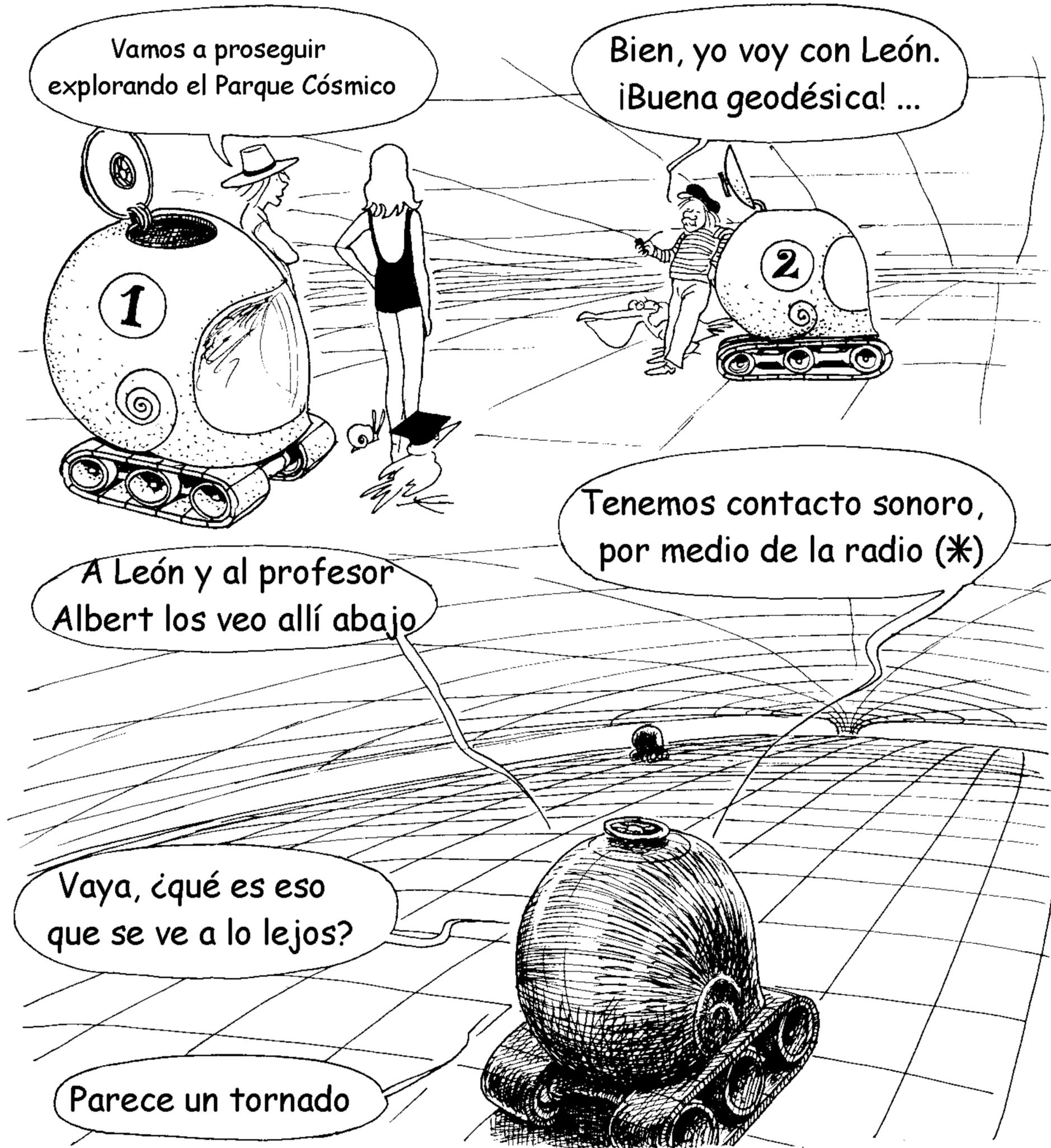
Las frecuencias (emitidas o recibidas) se miden respecto al tiempo que se fluye en el cronoscafo del emisor o del receptor. Desde el cronoscafo A, Anselmo emite luz azul. Está en una región del espacio donde hay una fuerte curvatura. Puede estar, por ejemplo, cerca de una estrella de neutrones (con mucha masa).

Sofía, en el cronoscafo S, recibe esta luz. Está lejos del objeto supermasivo. Por lo tanto su tiempo discurre más rápido y ella medirá una frecuencia más baja, hasta el punto que esta luz se percibirá, desde su punto de vista, desplazada hacia el rojo. Es lo que se llama RED SHIFT (corrimiento al rojo) de origen gravitacional.

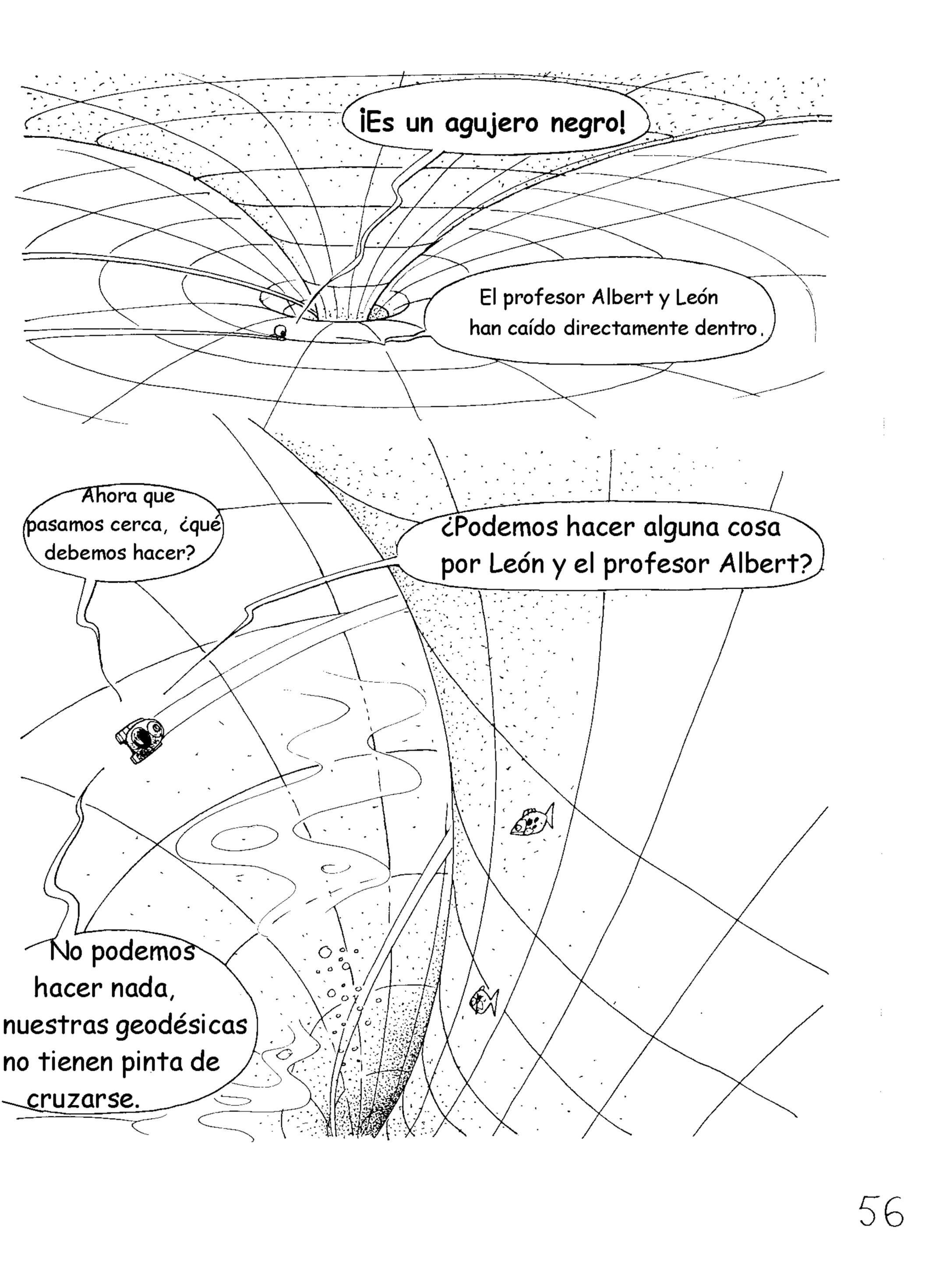
Anselmo está sobre una estrella de neutrones. (Le hemos liberado de las molestias de la gravedad para que no sea instantáneamente aplastado por su propio peso sobre la superficie de la estrella).



SEGUNDA APROXIMACIÓN AL AGUJERO NEGRO



(*) Las ondas de radio son de la misma naturaleza que las ondas luminosas. Tienen la misma velocidad de propagación c , pero frecuencias inferiores.



¡Es un agujero negro!

El profesor Albert y León
han caído directamente dentro.

Ahora que
pasamos cerca, ¿qué
debemos hacer?

¿Podemos hacer alguna cosa
por León y el profesor Albert?

No podemos
hacer nada,
nuestras geodésicas
no tienen pinta de
cruzarse.

¿Les ves?

El fondo del agujero negro se ve totalmente opaco

Aún les veo, pero su cronoscafo se ha vuelto rojo oscuro

Atención, profesor Albert, León, ¿me escucháis?

No entiendo nada. Su voz se ha vuelto sobreaguda y habla demasiado deprisa

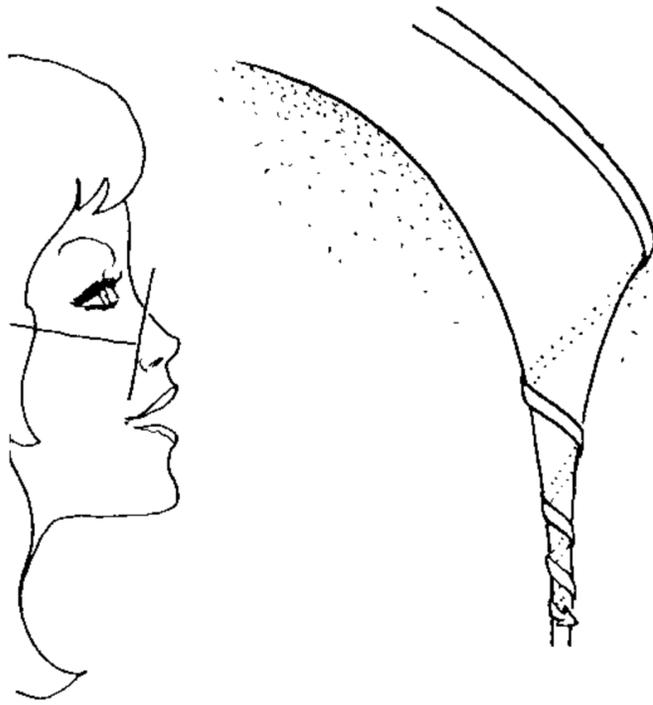
Su voz cada vez es más grave. ¡Parece un disco cuando se para!

ΑΗΑΔΤΕΩΩΗΗΗ...

Son los problemas de comunicación que se presentan cuando se vive en "burbujas de tiempo" muy distintas.

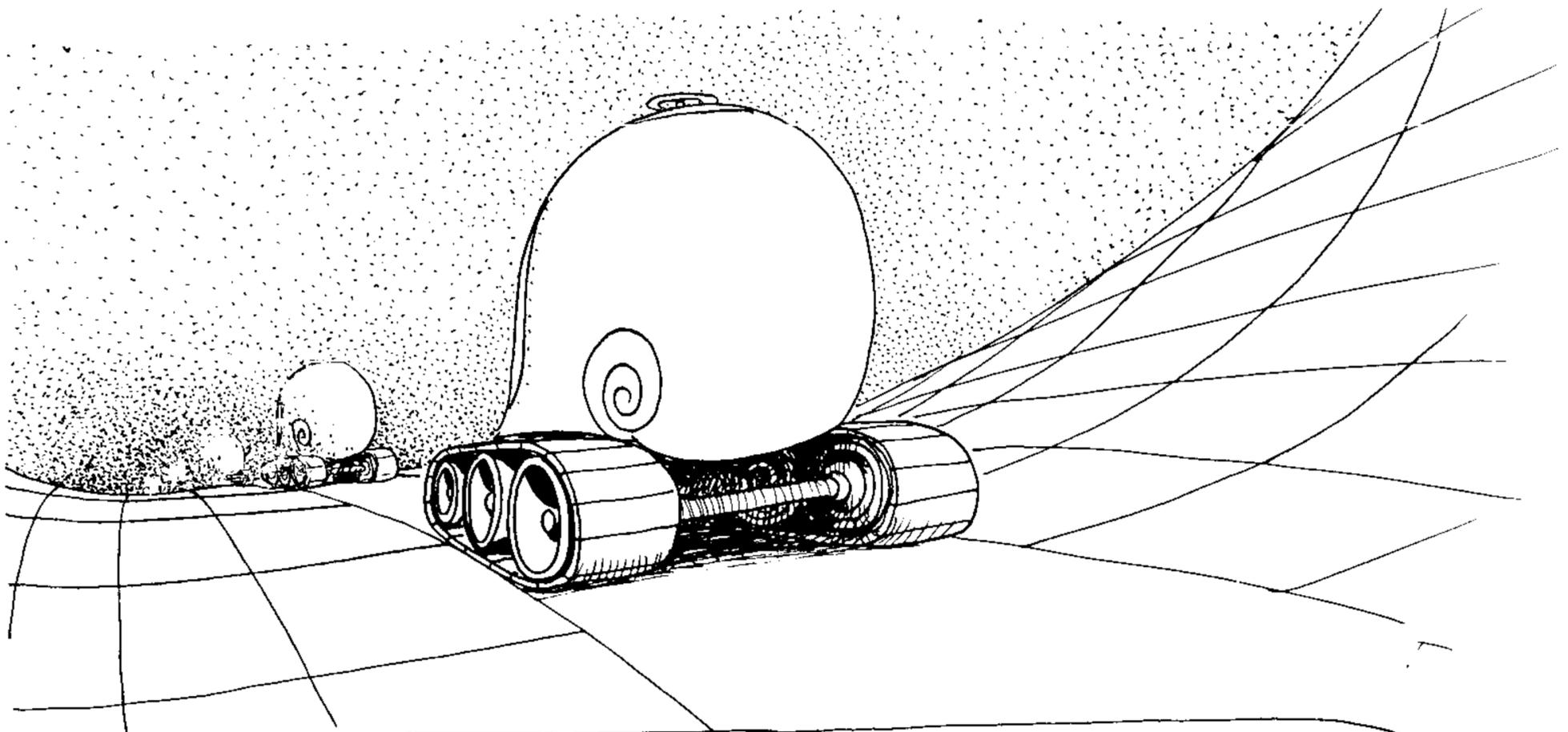
CUESTIÓN DE TIEMPO

Cuanto Albert y León más se sumergen profundamente en el CRONOL más crece la presión exterior P_e , menos mana la clepsidra y menos fluye el tiempo en su cronoscafo.



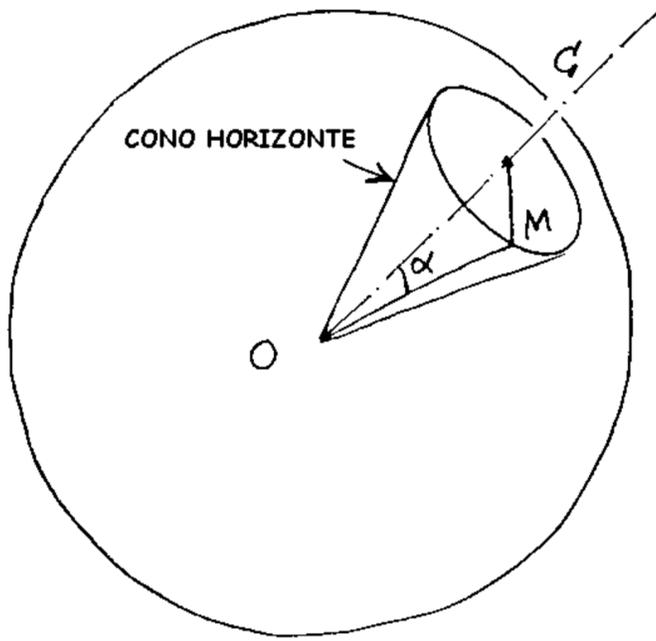
Cuando alcancen el fondo y la velocidad de la luz, de su reloj hidráulico de a bordo habrá manado una cantidad limitada de cronol, lo que significa que este trayecto habrá sido recorrido en una cantidad FINITA de tiempo.

Pero si Sofía, Anselmo, Max y Tiresio pudieran continuar observando esta caída, les parecería interminable. La luz emitida por su cronoscafo rápidamente se desplaza hacia el infrarrojo lejos de la luz visible, mientras que su mensaje de radio se desliza hacia los infrasonidos.



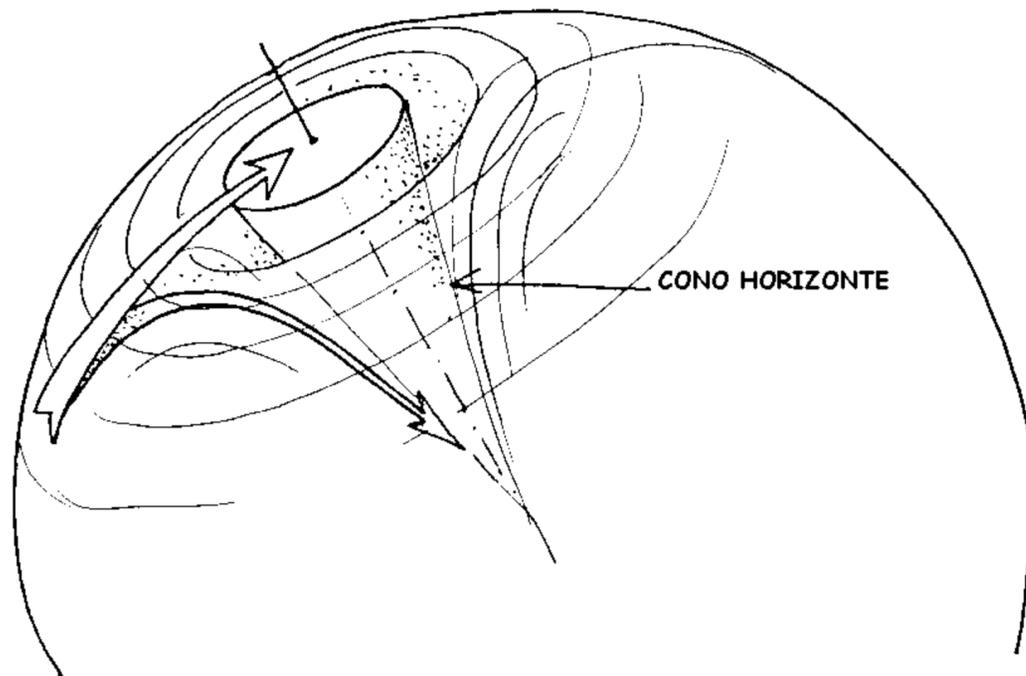
Esto me recuerda la paradoja de Aquiles, quien intenta alcanzar a la tortuga disminuyendo CADA VEZ a la mitad la distancia que le separa de ella. Lo consigue en un tiempo finito.

Aquí tenemos una imagen del agujero negro en este modelo del PARQUE CÓSMICO. El punzón ha deformado completamente el espacio-tiempo hasta el centro, donde reina la velocidad de la luz. Todas las superficies, en este punto, se vuelven tangentes a un cono de semiángulo α .



En este modelo la distancia es, de hecho, un **ÁNGULO** entre dos radiovectores, por ejemplo \vec{OM} y \vec{OC} . Mirando el dibujo inferior se percibe que nunca se entra al interior del cono de semiángulo α . Para un observador que permanezca en la superficie del CRONOL,

es decir, en estado de reposo y que no imaginara esta curvatura del espacio-tiempo, esta frontera del agujero negro, llamada **HORIZONTE** de SUCESOS se vería como una **CIRCUNFERENCIA** que se franquearía a la velocidad de la luz.





¡Oh!, mira hemos vuelto cerca de nuestro punto de partida, cerca del cronoscafo nº 3, que ha quedado inmóvil.

Nuestra excursión alrededor del agujero negro ha frenado nuestro envejecimiento. Si uno de nosotros se hubiera quedado en ese cronoscafo en reposo, puede que hubiera esperado nuestro regreso durante cientos o millones de años!

¿Adónde conducen los agujeros negros?



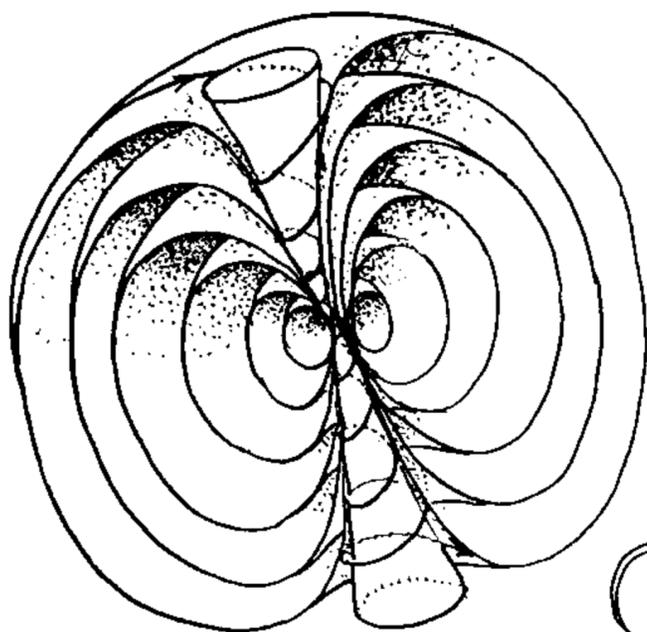
Es decir, un objeto en el que nunca se podría entrar. Sólo se podría salir.

Nadie lo sabe. La teoría afirma que podría existir un anti agujero negro.



Una FUENTE BLANCA

Aquí vemos, según el modelo del PARQUE CÓSMICO, cómo sería un corte de un agujero negro-fuente blanca.

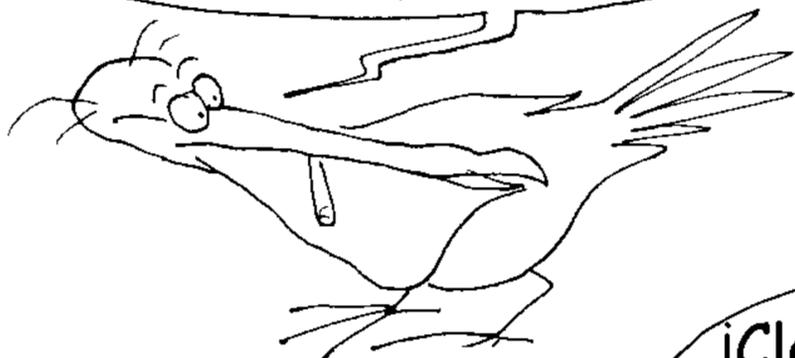


es el MISMO objeto, pero con una orientación inversa de las geodésicas



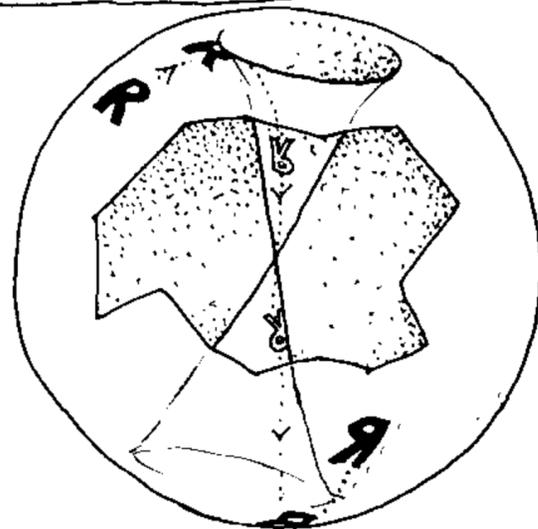
Pero, ¿qué hay DENTRO del agujero negro, más allá del HORIZONTE de SUCESOS? ...
¿¿Es que ...
no hay NADA?!?

El interior del agujero negro ¿sería la NADA en estado puro?...

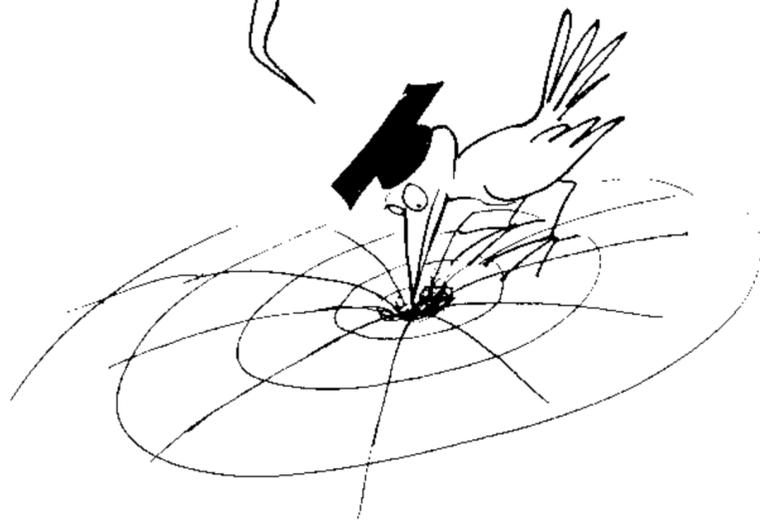


¡Claro que no! "el interior" del agujero negro sería sencillamente el exterior de la fuente blanca asociada

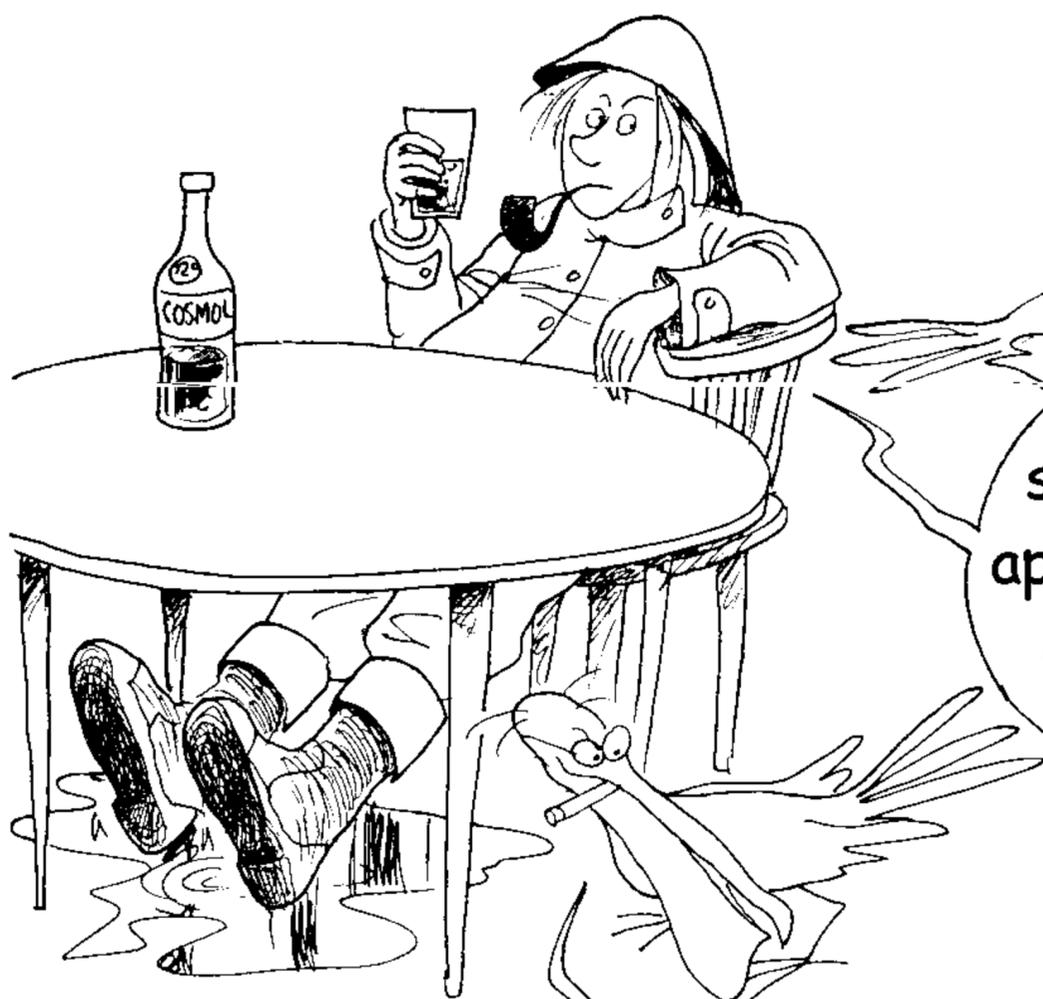
Hay que destacar que, en este modelo, la estructura AGUJERO NEGRO- FUENTE BLANCA le da a todas las hojas del Parque Cósmico el carácter de superficies inorientables, de una sola cara, "el paso" invierte los objetos. Por ejemplo: una **R** se transforma en **Я**.



Pero existen otras teorías. Algunos creen que los agujeros negros ponen en comunicación nuestro universo con un UNIVERSO GEMELO.



O incluso con un mundo donde todo sería la imagen especular de éste, también el tiempo



En resumidas cuentas, si hay audaces que se aproximen a un agujero negro, alguno volverá para contarlo.

En realidad, la concha de Tiresio puede que no sea más que un agujero negro!



¡Mamaaa!

León, ¡deja tranquilo a Tiresio!

Vamos, Tiresio, lo fundamental al fin y al cabo es el estar bien cada uno en su concha

¡Ya!

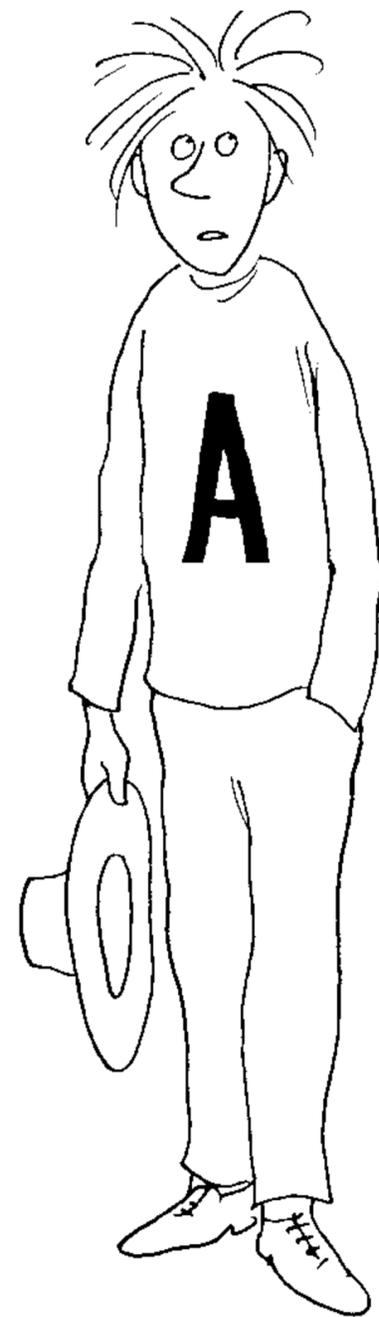


¡Ostras, el cosmol! tengo una resaca...



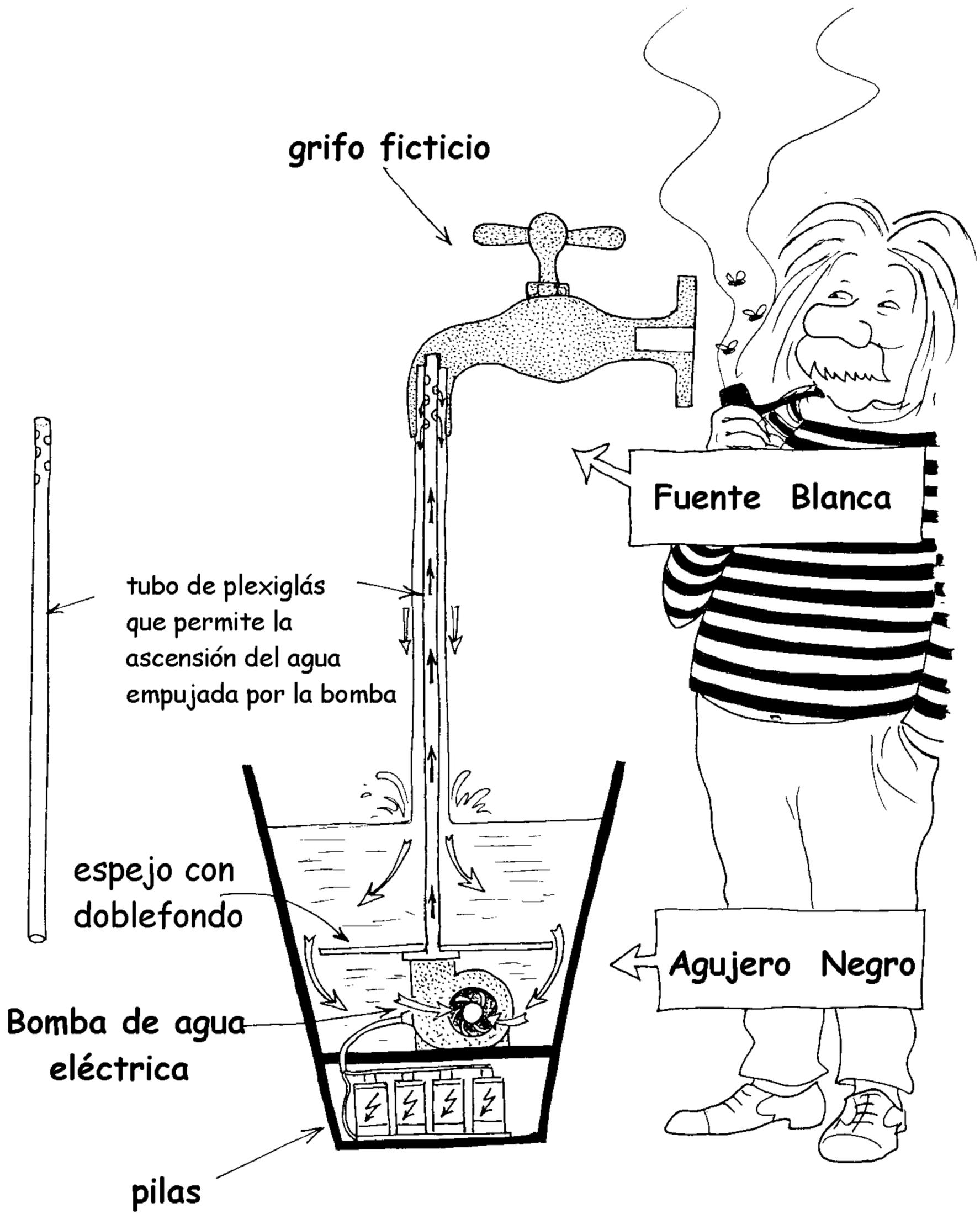
Veamos. ¡El vacío y la materia son semejantes! El espacio se puede cerrar sobre si mismo y entonces no se puede viajar más que en línea recta!

Si este universo es el
mejor de los universos posibles,
¿cómo son los demás?



FIN





el lector puede que encuentre extraño que el autor recupere este cómic dedicado, entre otras cosas, al modelo de AGUJERO NEGRO, ja que él muchas veces ha manifestado su escepticismo respecto a la existencia de dichos objetos.



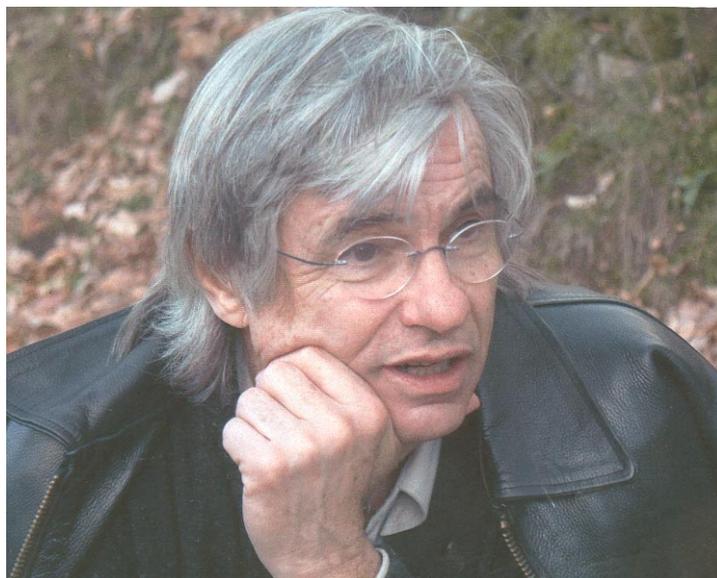
este modelo de agujero negro es solución de la ecuación de Einstein cuando ésta se refiere a una porción del universo donde no hay enegía, ni materia, ...
El modelo citado ino es más que una ficción matemática!

este álbum fue concebido a principios delo ochenta. En un futuro , el autor desarrollará otra idea, refiriéndose al destino final de los objetos desestabilizados (las estrellas de neutrones) su TRANSMISIÓN HIPERESPACIAL a un UNIVERSO GEMELO. A la espera de ese cómic, el presente álbum se puede considerar como una buena presentación de algunos detalles de la RELATIVIDAD GENERAL.

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.

Para contactar la asociación basta con ir a su página web

Para realizar una donación:

Para otros países → Número de Cuenta Bancaria Internacional (IBAN) :

IBAN
FR 16 20041 01008 1822226V029 88

y → Código Identificador del Banco (BIC):

BIC
PSSTFRPPMAR

Los estatutos de la asociación (en francés) están disponibles en su sitio web. Así mismo, la contabilidad puede ser accesada en línea, en tiempo real. La asociación no retiene dinero alguno de las donaciones, ni siquiera los costos de las transferencias bancarias, de modo que las sumas entregadas a los traductores son netas.

La asociación no paga a ninguno de sus miembros, que operan benévolamente y asumen ellos mismos los costos de funcionamiento y de administración del sitio web, costos que no son por lo tanto sufragados por la asociación.

Pueden estar seguros de que en esta especie de « obra humanitaria cultural », cualquiera sea la suma que ustedes donen, ésta será consagrada íntegramente a retribuir a los traductores.

En promedio, estamos poniendo en línea una decena de nuevas traducciones cada mes.