

La relatividad general **(o la relación entre la física y la geometría)**

Diego Mazzitelli

Departamento de Física

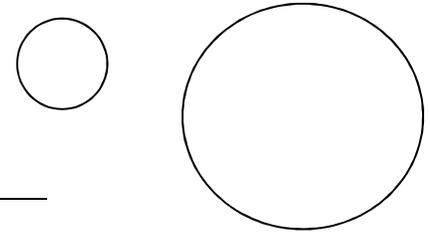
FCEyN - UBA

Postulados de Euclides Siglo IV AC.

1. Dados dos puntos, existe una recta que los une
2. Cualquier recta se puede hacer todo lo larga que se quiere



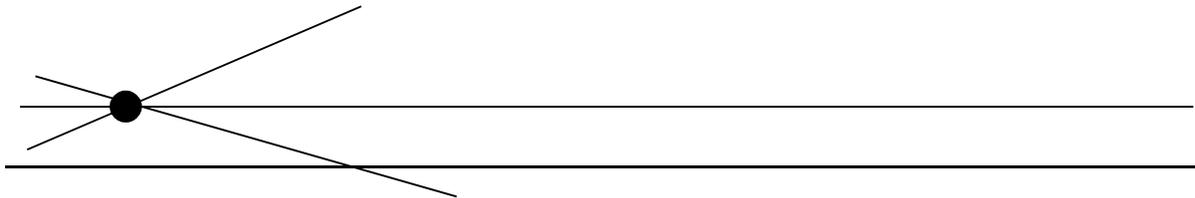
-
3. Es posible trazar una circunferencia de cualquier tamaño alrededor de cualquier punto



4. Todos los ángulos rectos son congruentes



5. Dados una recta y un punto externo a ella, de todas las rectas que pasen por ese punto, sólo una será paralela a la primera

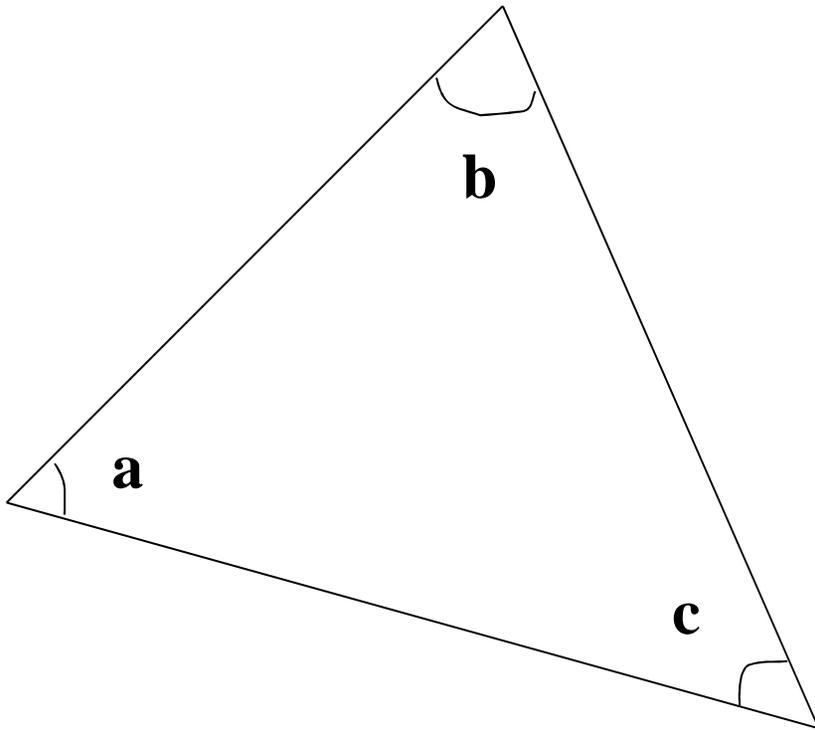


BASTANTE OBVIOS....???

Algunas consecuencias conocidas:

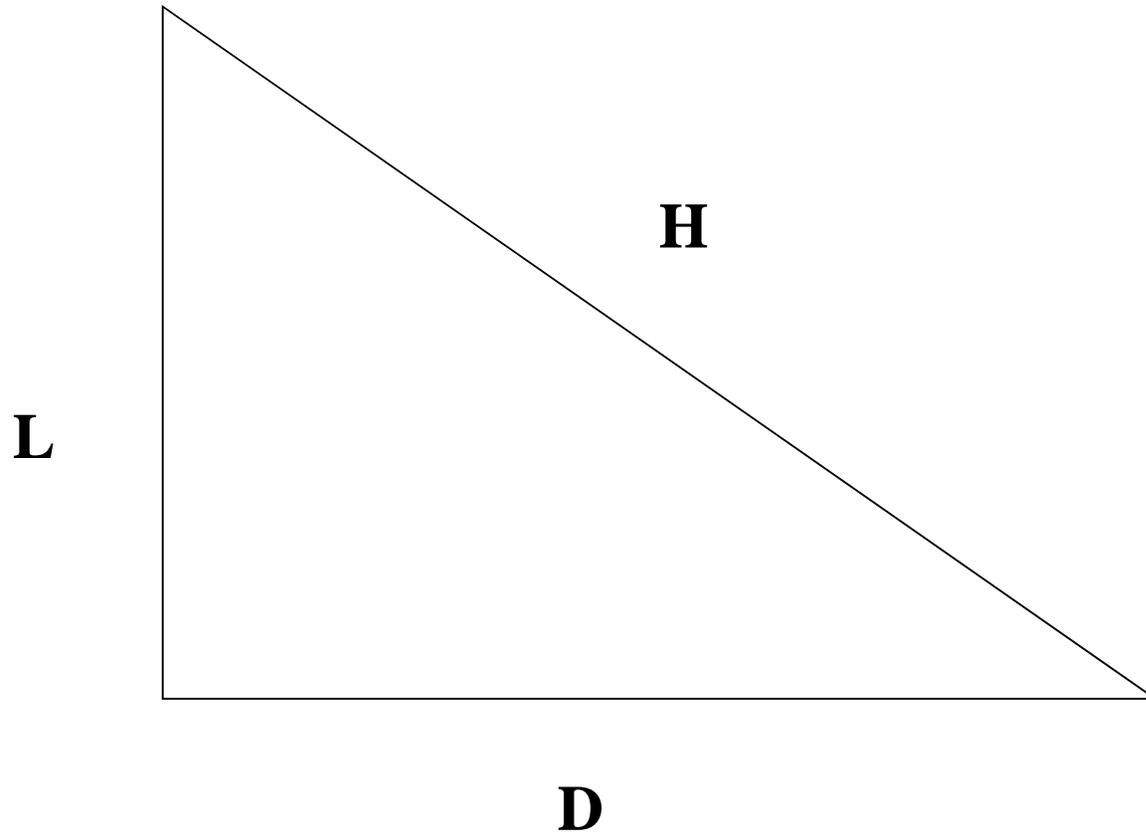


Dos rectas paralelas nunca se cruzan



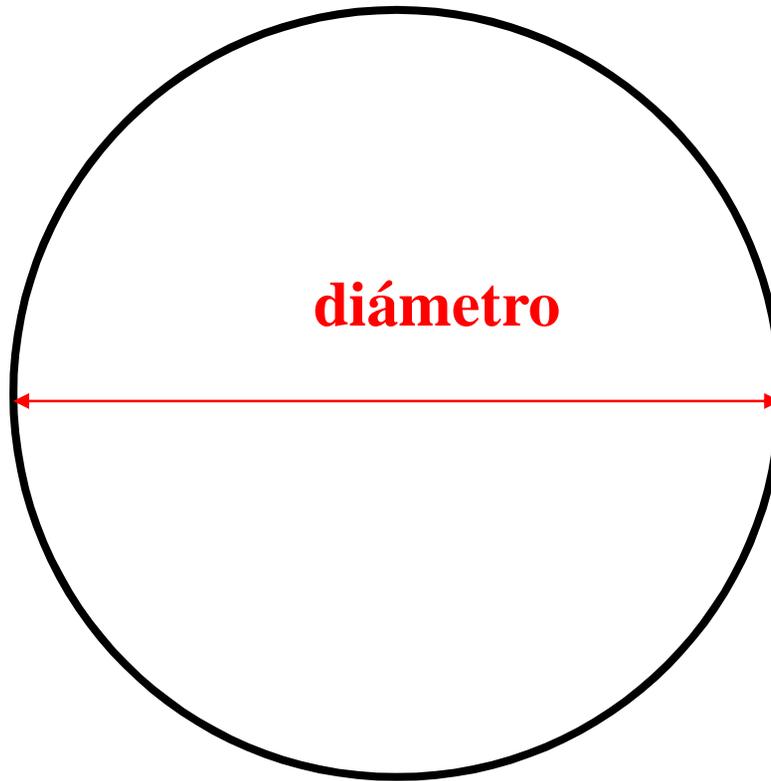
$$a + b + c = 180 \text{ grados}$$

Teorema de Pitágoras...



$$H = \sqrt{L^2 + D^2}$$

perímetro



diámetro

$$\text{perímetro} = 3.1415926\dots \times \text{diámetro}$$

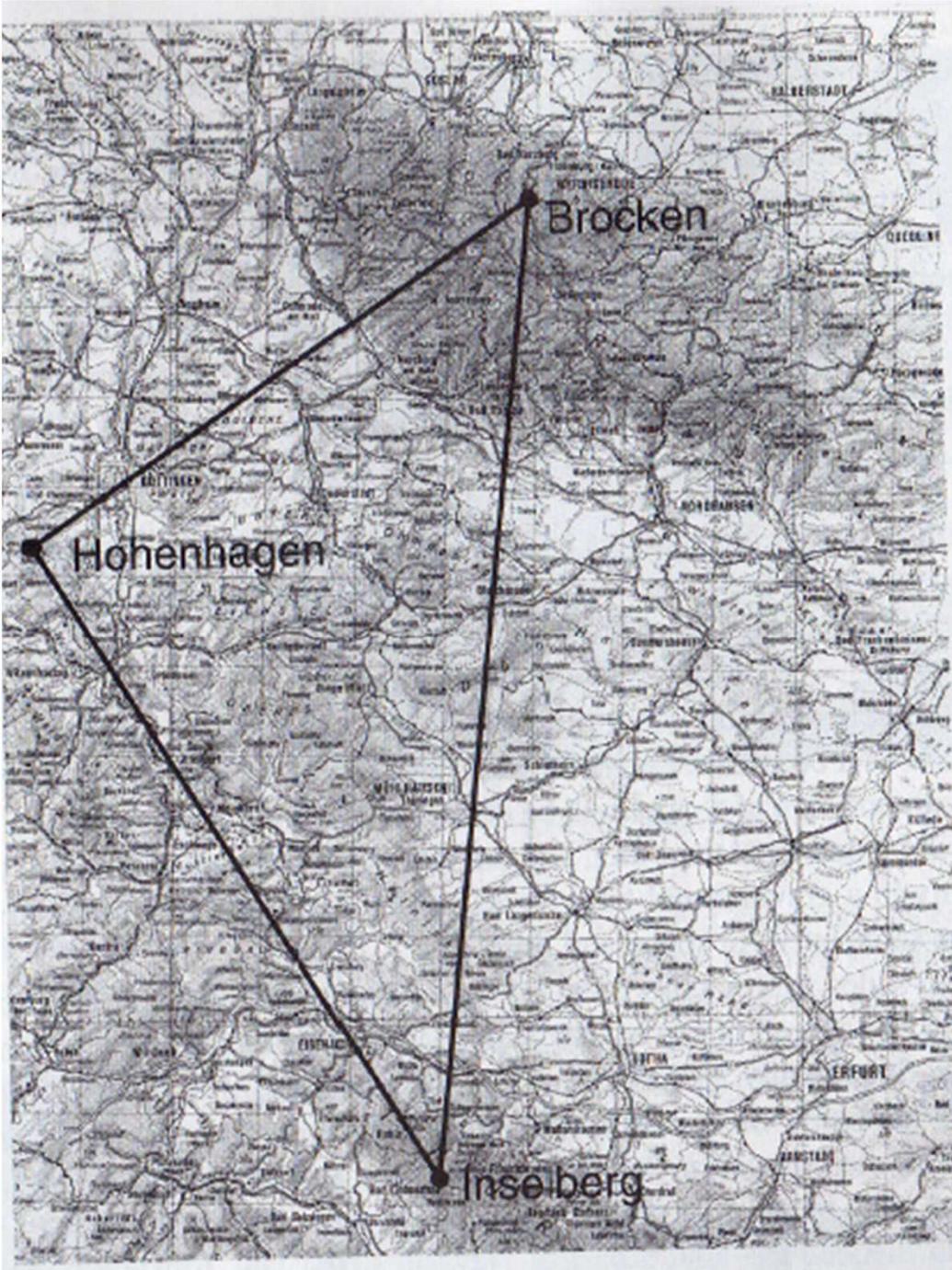


3. 14159265358979323846264338327950288419716939937510582097494459230781640628620899862803482534211706798214808651328230664709384460·
955058223172535940812848111745028410270193852110555964462294895493038196442881097566593344612847564823378678316527120190914564856·
692346034861045432664821339360726024914127372458700660631558817488152092096282925409171536436789259036001133053054882046652138414·
695194151160943305727036575959195309218611738193261179310511854807446237996274956735188575272489122793818301194912983367336244065·
664308602139494639522473719070217986094370277053921717629317675238467481846766940513200056812714526356082778577134275778960917363·
717872146844090122495343014654958537105079227968925892354201995611212902196086403441815981362977477130996051870721134999999837297·
804995105973173281609631859502445945534690830264252230825334468503526193118817101000313783875288658753320838142061717766914730359·
825349042875546873115956286388235378759375195778185778053217122680661300192787661119590921642019893809525720106548586327886593615·
338182796823030195203530185296899577362259941389124972177528347913151557485724245415069595082953311686172785588907509838175463746·
493931925506040092770167113900984882401285836160356370766010471018194295559619894676783744944825537977472684710404753464620804668·
425906949129331367702898915210475216205696602405803815019351125338243003558764024749647326391419927260426992279678235478163600934·
172164121992458631503028618297455570674983850549458858692699569092721079750930295532116534498720275596023648066549911988183479775·
35663698074265425278625518184175746728909777279380008164706001614524919217321721477235014144197356854816136115735255213347574184·
946843852332390739414333454776241686251898356948556209921922218427255025425688767179049460165346680498862723279178608578438382796·
797668145410095388378636095068006422512520511739298489608412848862694560424196528502221066118630674427862203919494504712371378696·
095636437191728746776465757396241389086583264599581339047802759009946576407895126946839835259570982582262052248940772671947826848·
260147699090264013639443745530506820349625245174939965143142980919065925093722169646151570985838741059788595977297549893016175392·
846813826868386894277415599185592524595395943104997252468084598727364469584865383673622262609912460805124388439045124413654976278·
079771569143599770012961608944169486855584840635342207222582848864815845602850601684273945226746767889525213852254995466672782398·
645659611635488623057745649803559363456817432411251507606947945109659609402522887971089314566913686722874894056010150330861792868·
092087476091782493858900971490967598526136554978189312978482168299894872265880485756401427047755513237964145152374623436454285844·
479526586782105114135473573952311342716610213596953623144295248493718711014576540359027993440374200731057853906219838744780847848·
968332144571386875194350643021845319104848100537061468067491927819119793995206141966342875444064374512371819217999839101591956181·
467514269123974894090718649423196156794520809514655022523160388193014209376213785595663893778708303906979207734672218256259966150·
142150306803844773454920260541466592520149744285073251866600213243408819071048633173464965145390579626856100550810665879699816357·
473638405257145910289706414011097120628043903975951567715770042033786993600723055876317635942187312514712053292819182618612586732·
157919841484882916447060957527069572209175671167229109816909152801735067127485832228718352093539657251210835791513698820914442100·
675103346711031412671113699086585163983150197016515116851714376576183515565088490998985998238734552833163550764791853589322618548·
96321329330898570642046752590709154814165498594616371802709819943099244889575712828905923232609729971208443357326548938239119325·
974636673058360414281388303203824903758985243744170291327656180937734440307074692112019130203303801976211011004492932151608424448·
596376698389522868478312355265821314495768572624334418930396864262434107732269780280731891544110104468232527162010526522721116603·
966655730925471105578537634668206531098965269186205647693125705863566201855810072936065987648611791045334885034611365768675324944·
166803962657978771855608455296541266540853061434443185867697514566140680070023787765913440171274947042056223053899456131407112700·

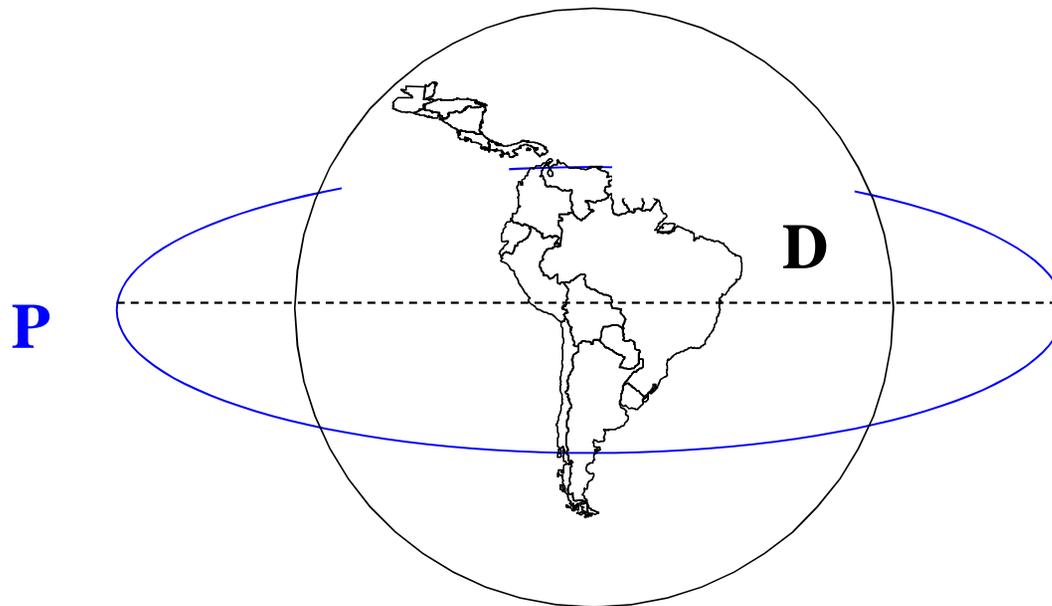
Nuestro sentido común y nuestra intuición nos dicen que las relaciones de la geometría Euclidiana se verifican en la naturaleza....

**¿HARÁ FALTA VERIFICARLO
EXPERIMENTALMENTE?**

C. F. Gauss, 1820



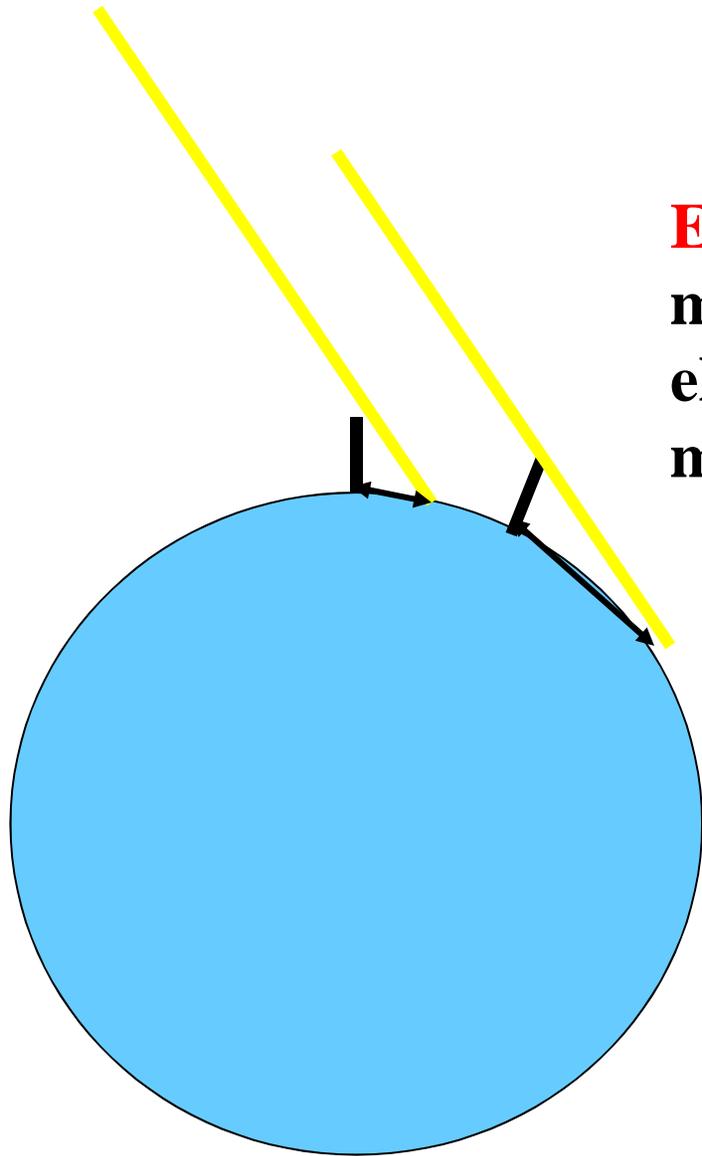
$$P/D = 3.1415926... ???$$



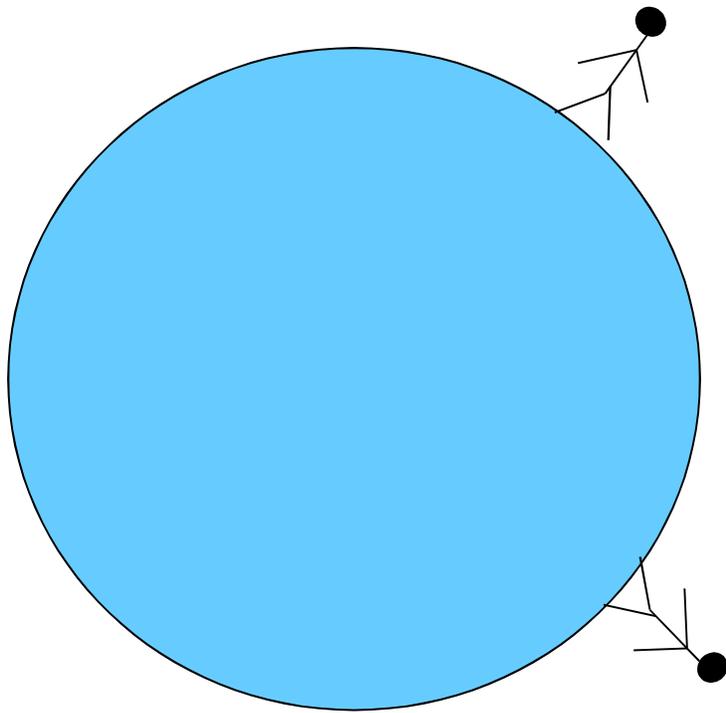
Empecemos por algo más sencillo:

¿Cómo podemos darnos cuenta si la **superficie de la Tierra es plana o esférica?**





Eratosthenes, Siglo III AC
midió con mucha precisión
el radio de la Tierra usando este
método!!!



reciente

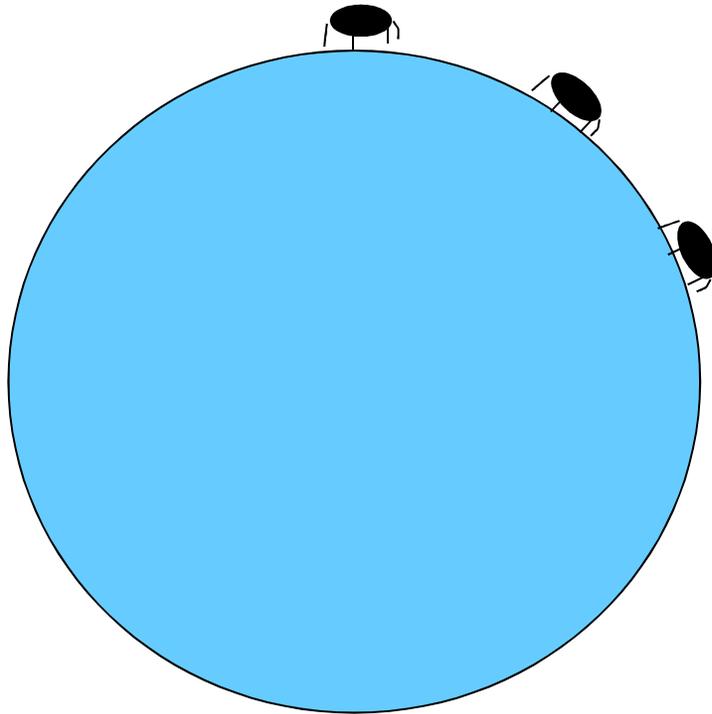


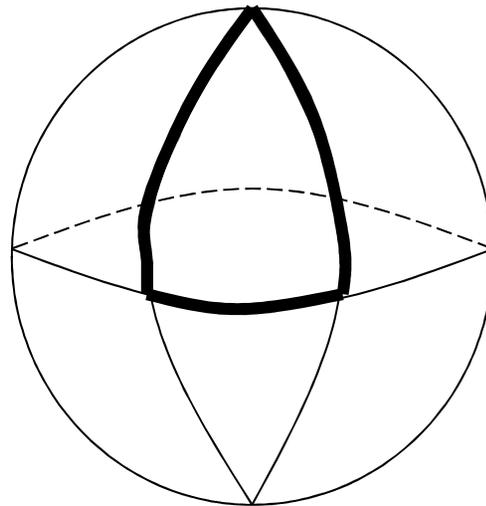
ecreciente

**Hemisferio sur (en el hemisferio norte
es al revés !!!)**

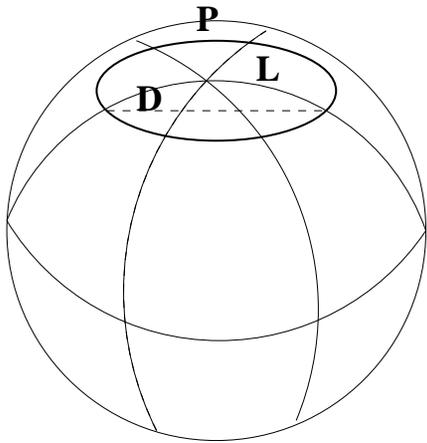
En los ejemplos anteriores necesitamos una dimensión más...podremos darnos cuenta sin salirnos de la superficie??

Es decir: podríamos darnos cuenta si fuésemos seres bidimensionales?

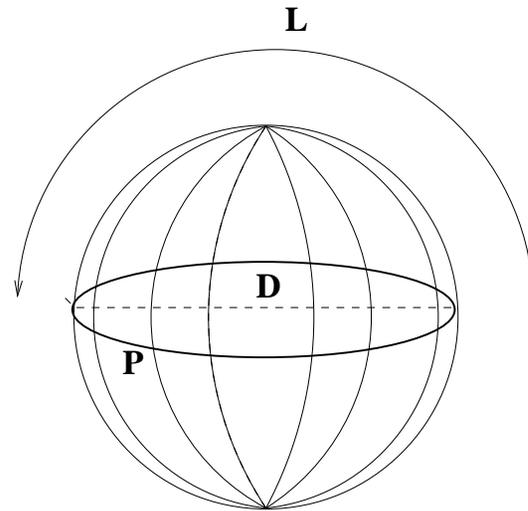




Sumar los ángulos internos de un triángulo y ver si el resultado es 180° o no

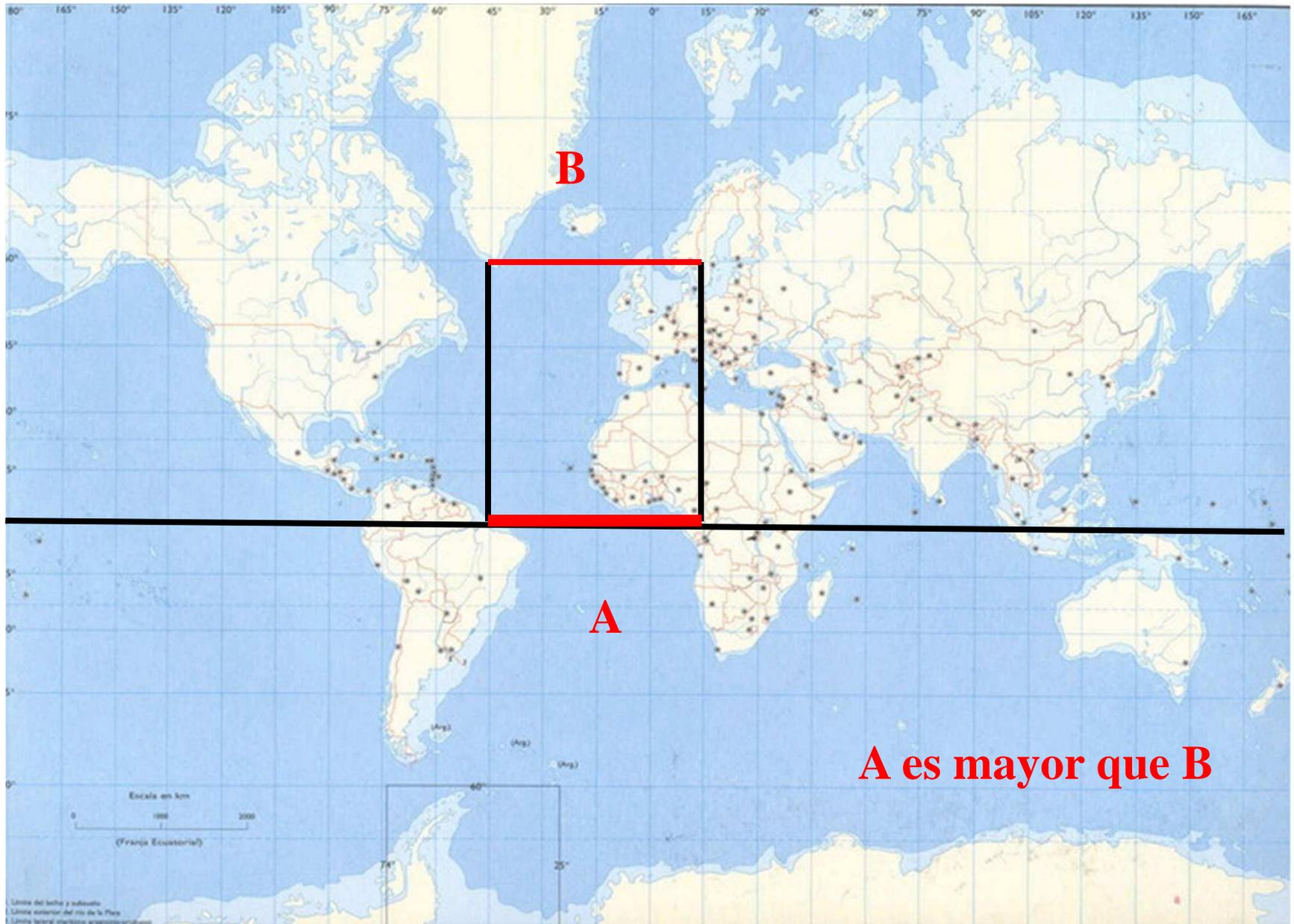


P/L aproximadamente 3,14



P/L = 2 !!

Comparar perímetros y “diámetros” de circunferencias dibujadas sobre la superficie

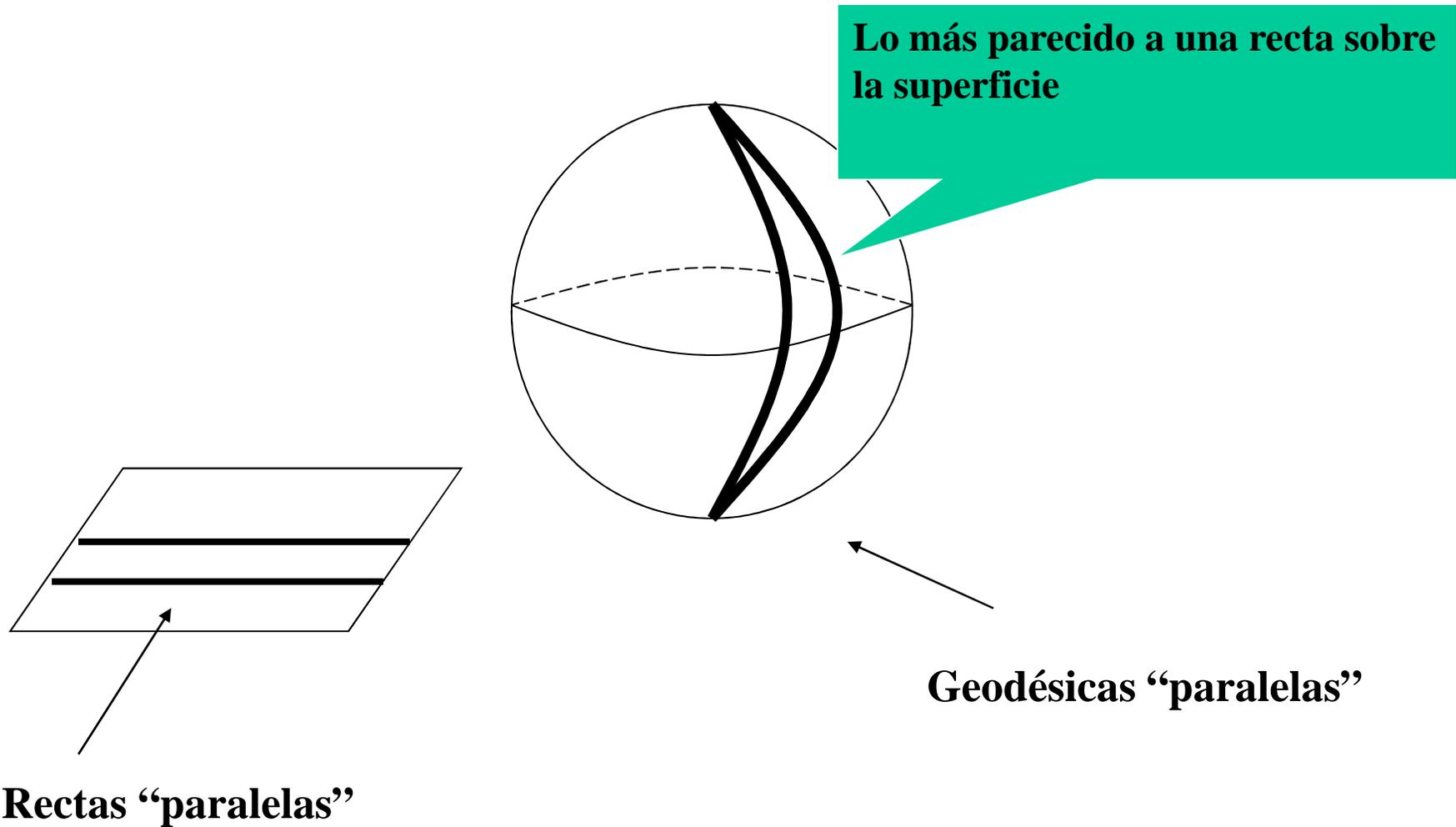


B

A

A es mayor que B

Chequear si las “paralelas” se cortan...



El “experimento” de Colon: llegar a las “indias” viajando hacia el este o hacia el oeste...

...o viajar siempre en “linea recta” y volver al punto de partida



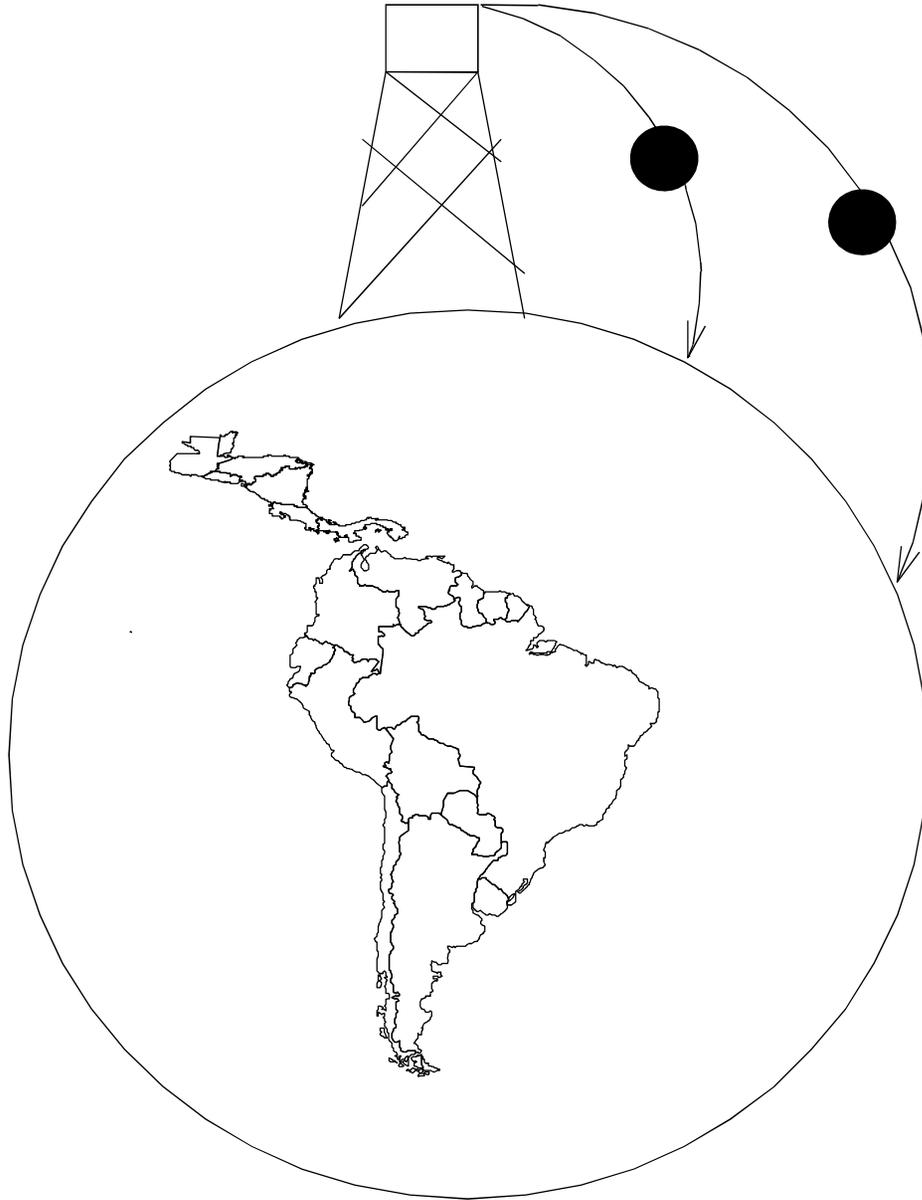
Conclusión: si fuésemos bidimensionales podríamos hacer “experimentos de geometría” y verificar si vivimos sobre una superficie plana o no.

Somos seres tridimensionales:

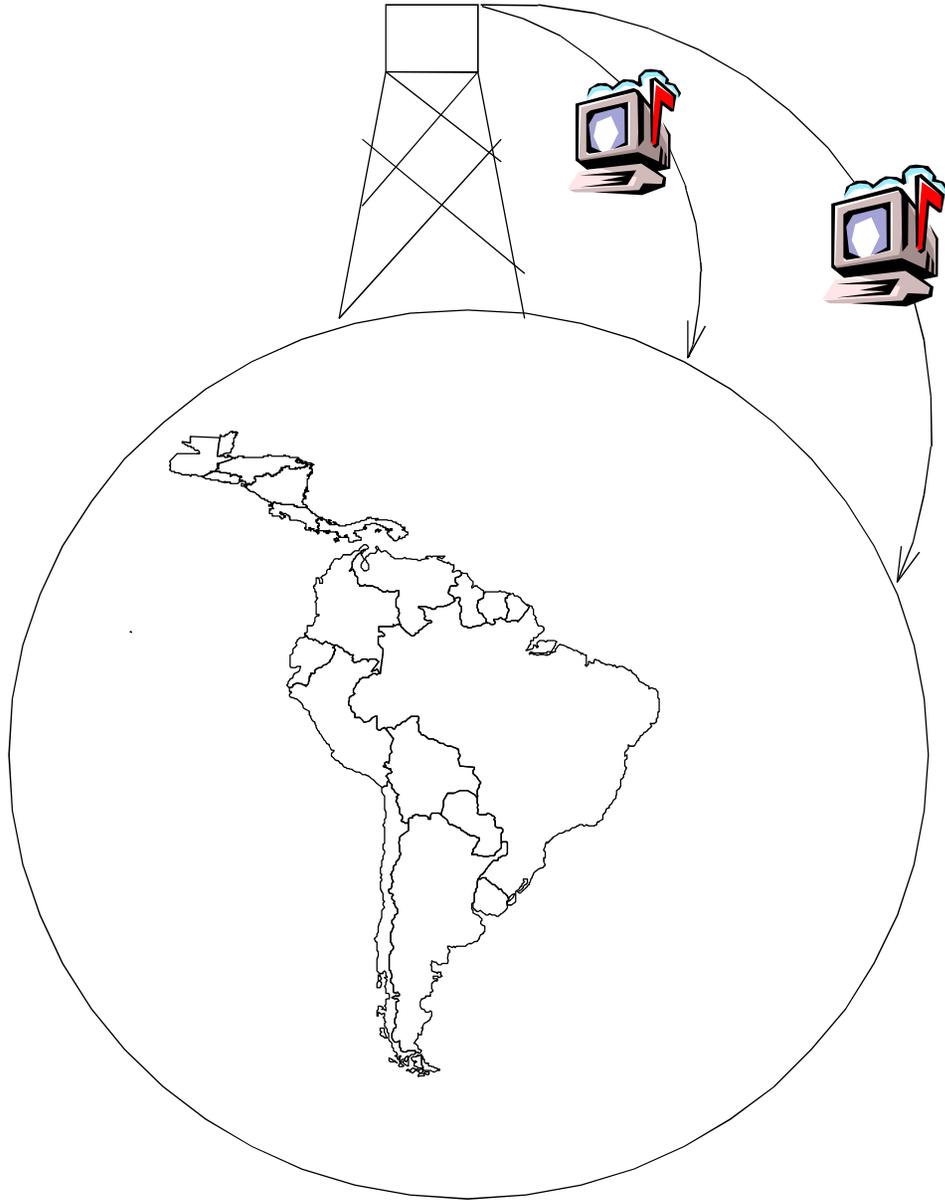
¿Es “euclídeo” el espacio en que vivimos?

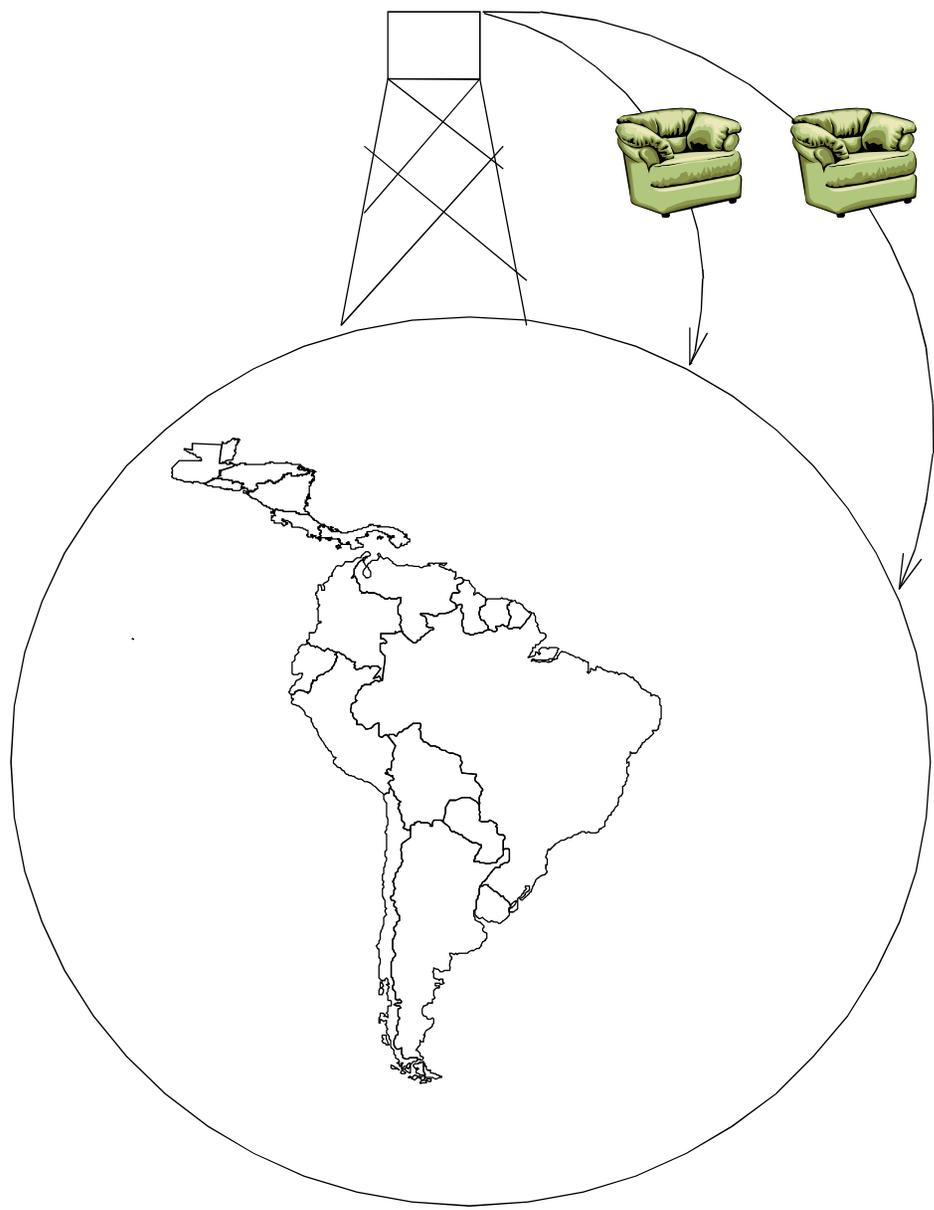
¿Las propiedades geométricas son inmutables? ¿o dependen de características físicas (temperatura, densidad de masa, campos eléctricos y magnéticos)?

¿Porqué sospechar que nuestra intuición es incorrecta???







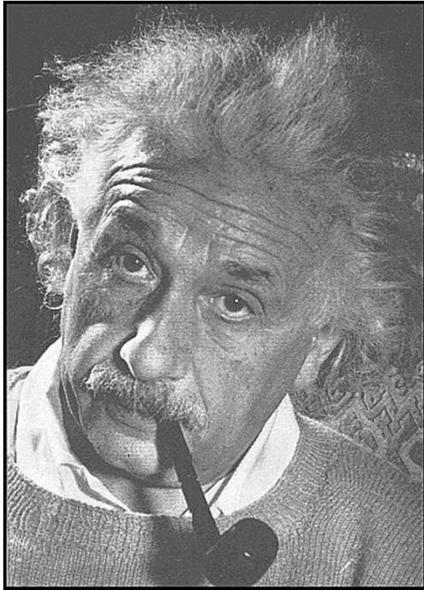




El movimiento de los objetos en presencia de gravedad es independiente de la masa, de la composición química, etc!!

Esta peculiaridad llevó a Einstein a sospechar que hay una relación entre la gravitación y la geometría del espacio

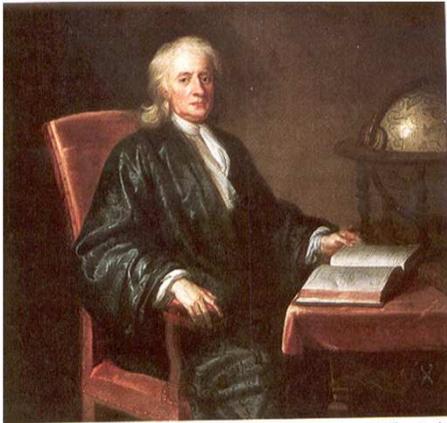
IDEAS BÁSICAS DE LA RELATIVIDAD GENERAL



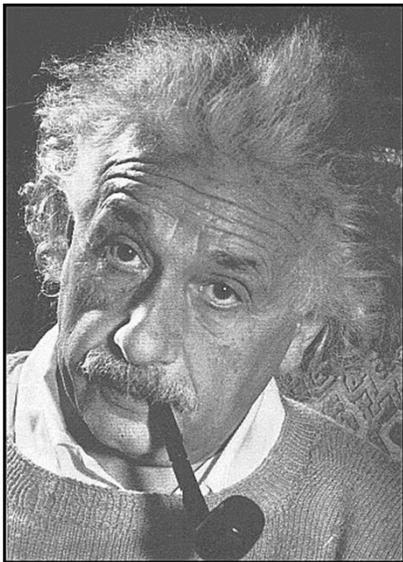
A. Einstein, 1915

- **la materia y la energía modifican el espacio-tiempo**
- **los objetos que están sometidos sólo a la gravedad, se mueven a lo largo de geodésicas. La trayectoria es independiente de la masa.**

¿Porqué la Luna gira alrededor de la Tierra?

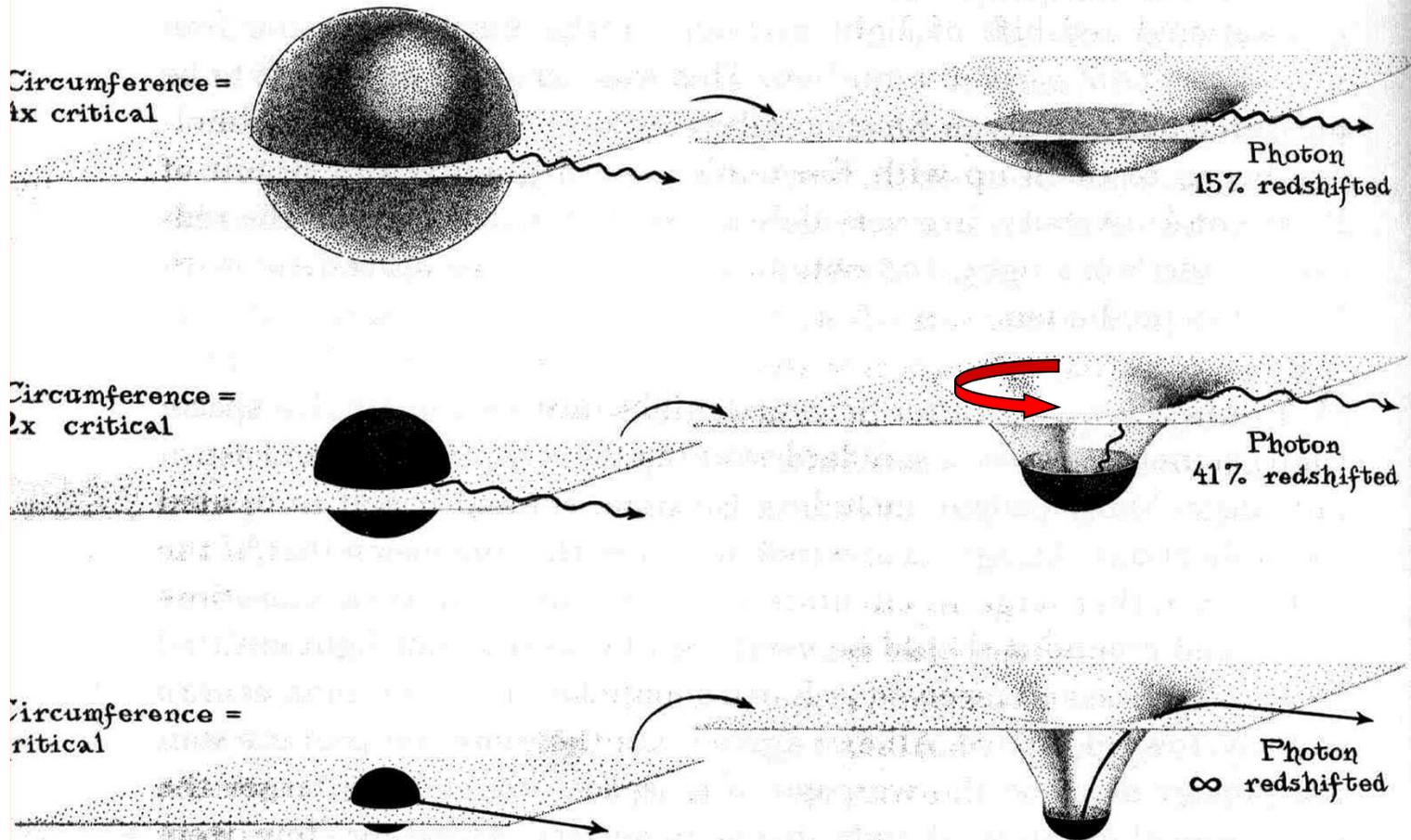


“La Tierra ejerce una fuerza sobre la Luna, por eso su trayectoria no es recta”



“La Tierra deforma el espacio tiempo a su alrededor, la Luna se mueve sobre una geodésica en el espacio tiempo curvo”

Curvatura del espacio cerca de una estrella o planeta



LA GEOMETRÍA NO ES INMUTABLE!

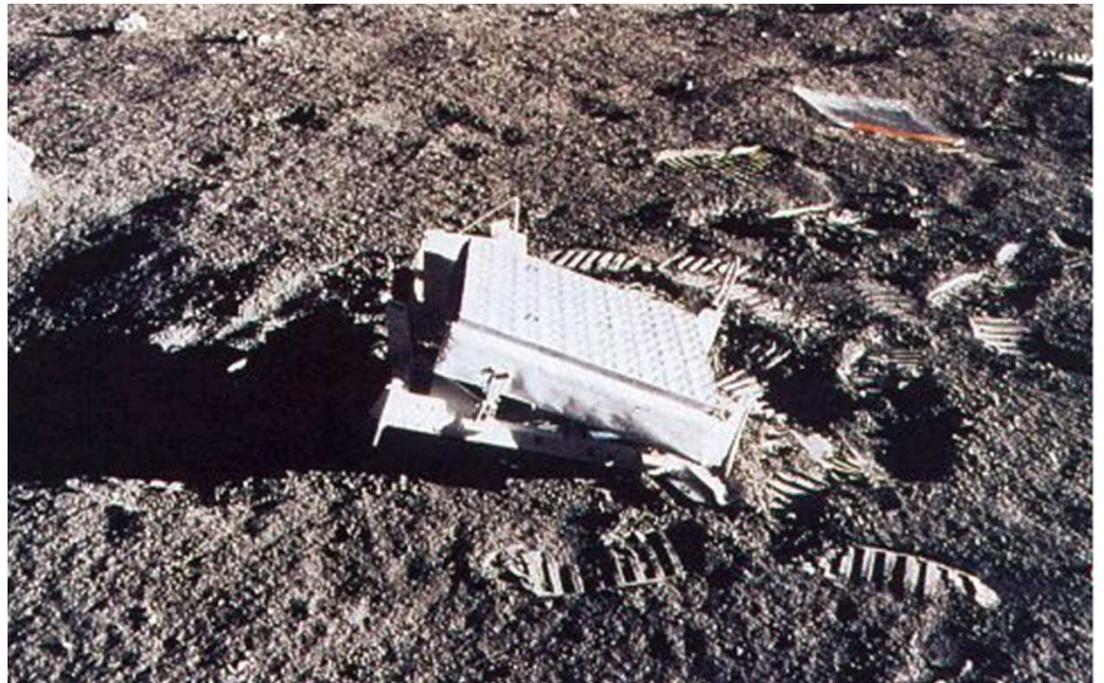
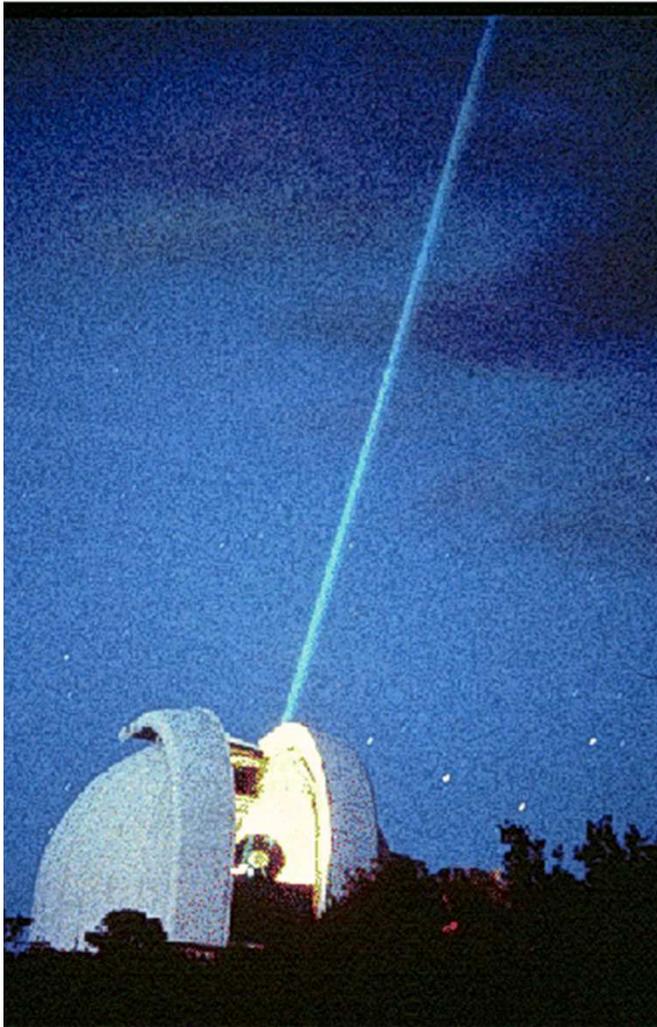
ALGUNAS VERIFICACIONES EXPERIMENTALES DE LA RELATIVIDAD GENERAL:

- todos los cuerpos caen con igual aceleración
- deflexión de la luz
- existencia de agujeros negros
- correcciones a las trayectorias de los planetas
- ondas gravitacionales
- expansión del Universo

La Luna y la Tierra “caen” hacia el Sol con la misma aceleración

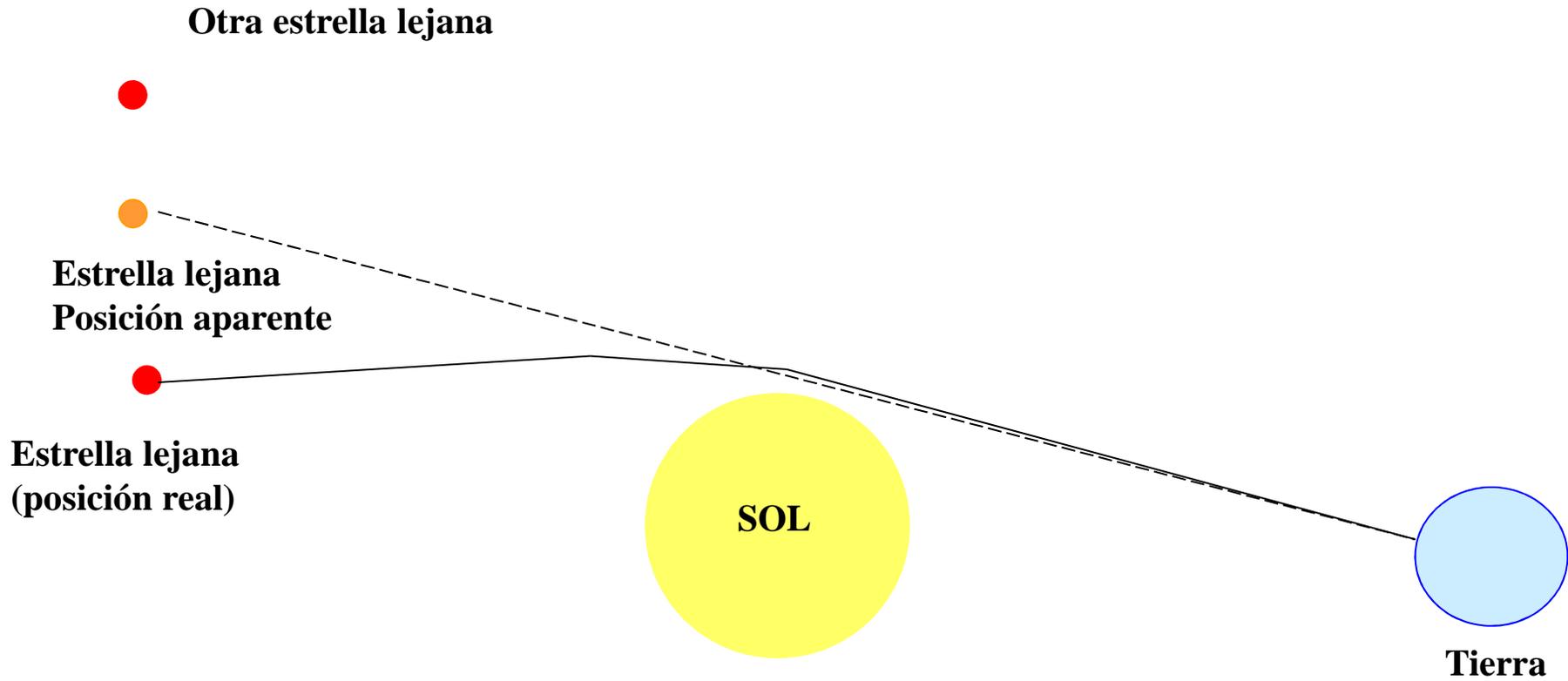
Precisión: 0,00000000001% !!!!!

Experimento: “Lunar Laser Ranging”

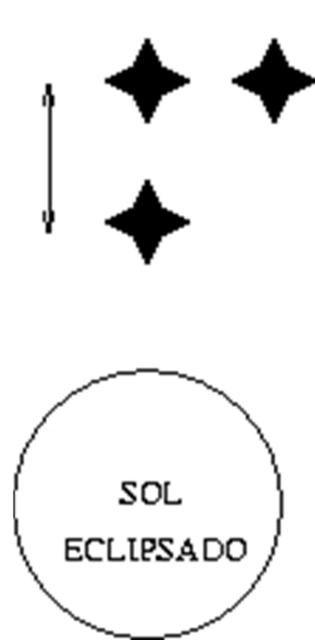


Se mide la distancia Tierra Luna con precisión de pocos centímetros!!!

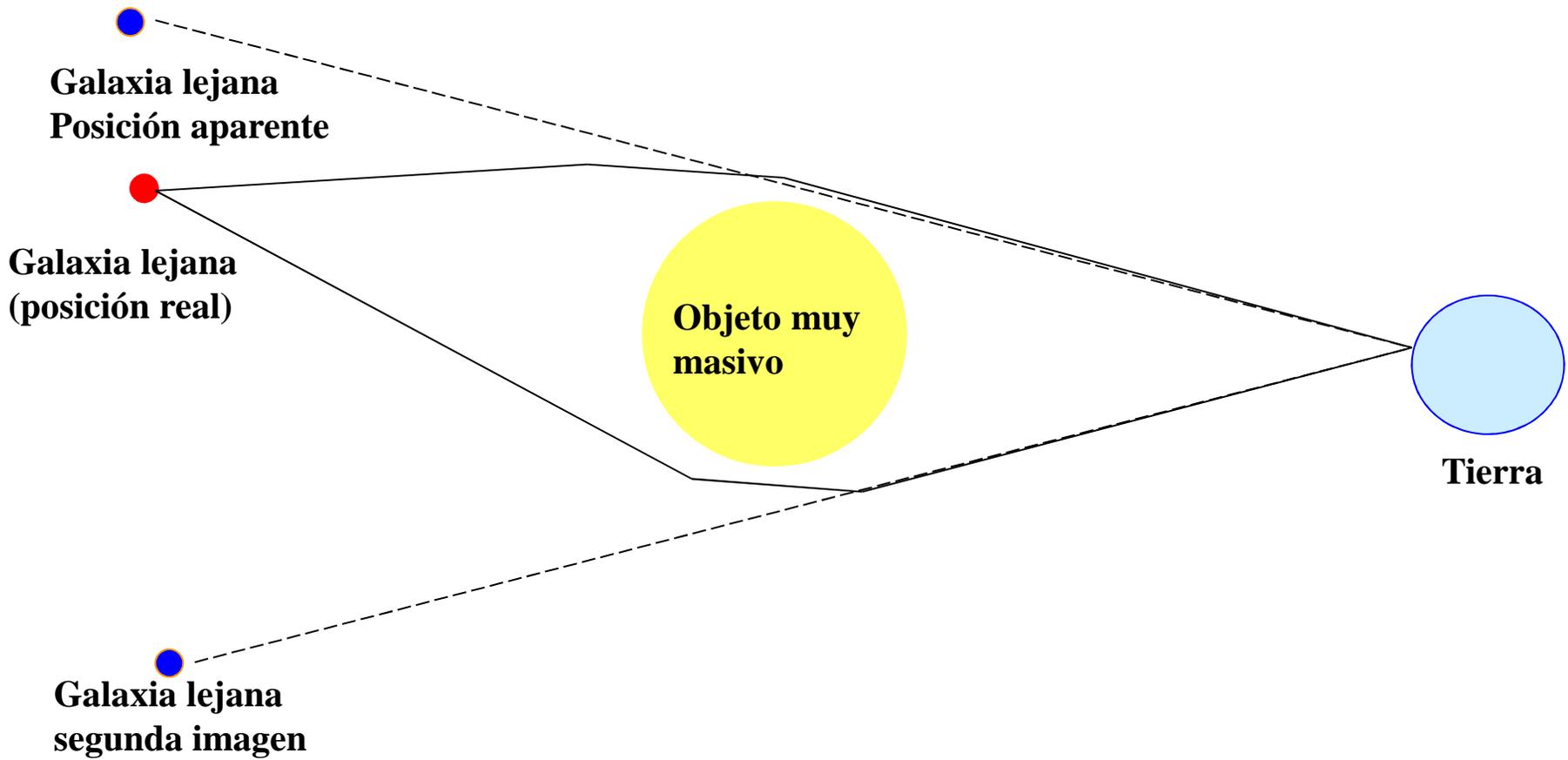
DEFLEXIÓN DE LA LUZ

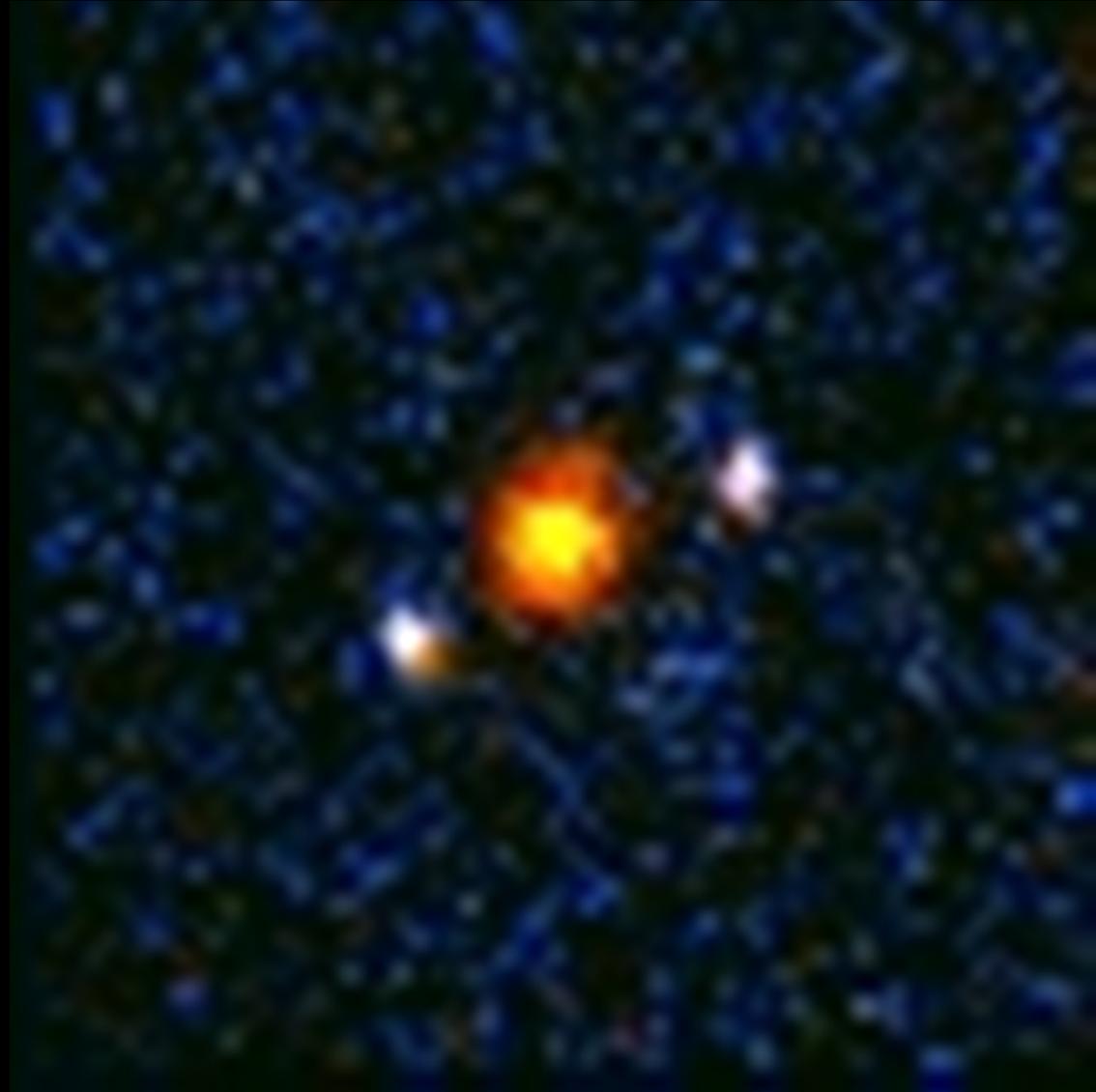


Observado por Eddington (1919)



LENTES GRAVITACIONALES







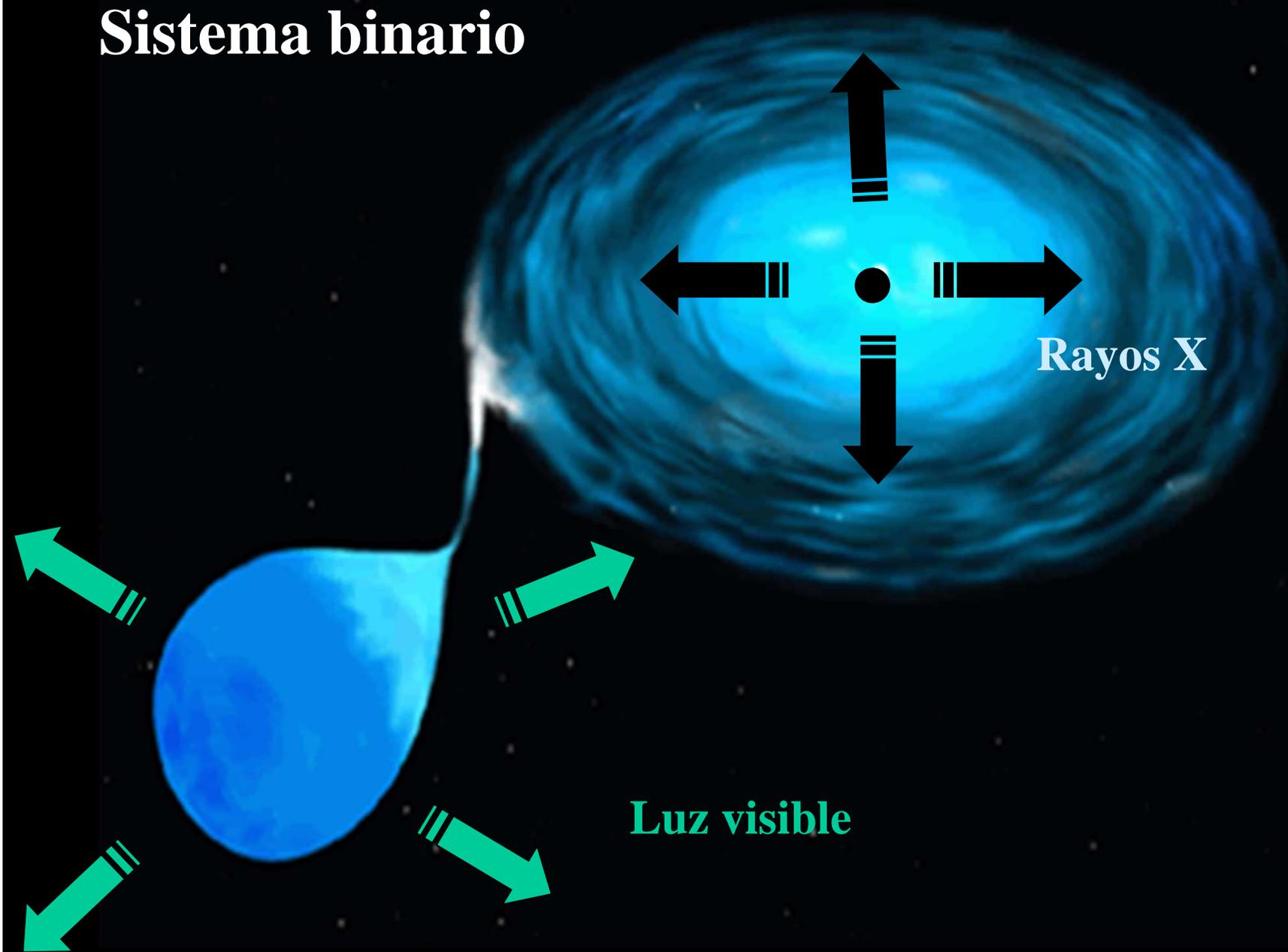




Agujeros negros

- **Objetos tan compactos que no dejan escapar nada...ni siquiera la luz!**
- **Pueden formarse cuando se acaba el “combustible” de una estrella suficientemente masiva**
- **Se los detecta indirectamente a través de sus efectos gravitacionales**

Sistema binario



Rayos X

Luz visible

El primero: Cygnus X1

**M = entre 10 y 20
Msol**



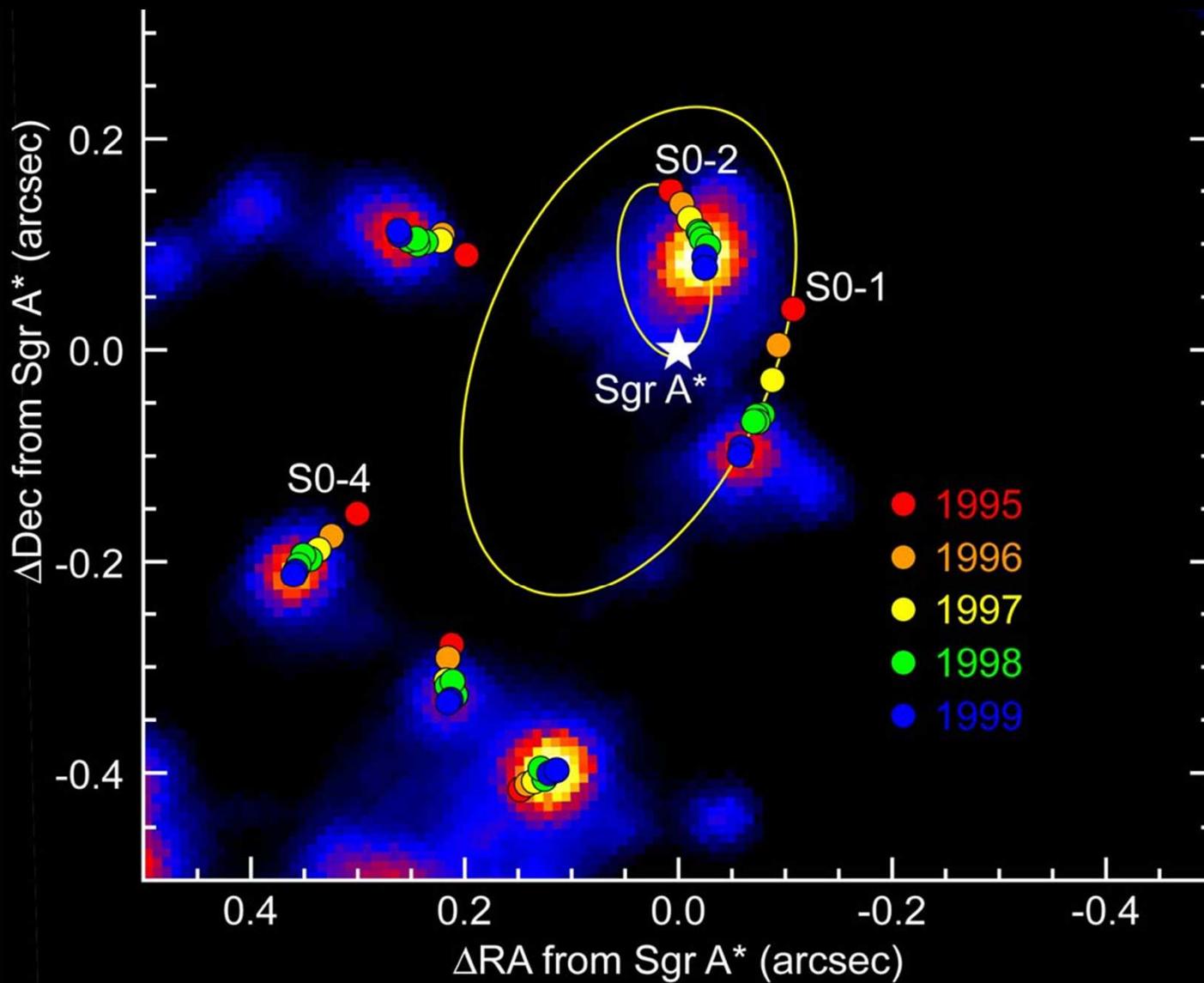
El más grande de la galaxia: Sgr A

M = 3 000 000 Msol

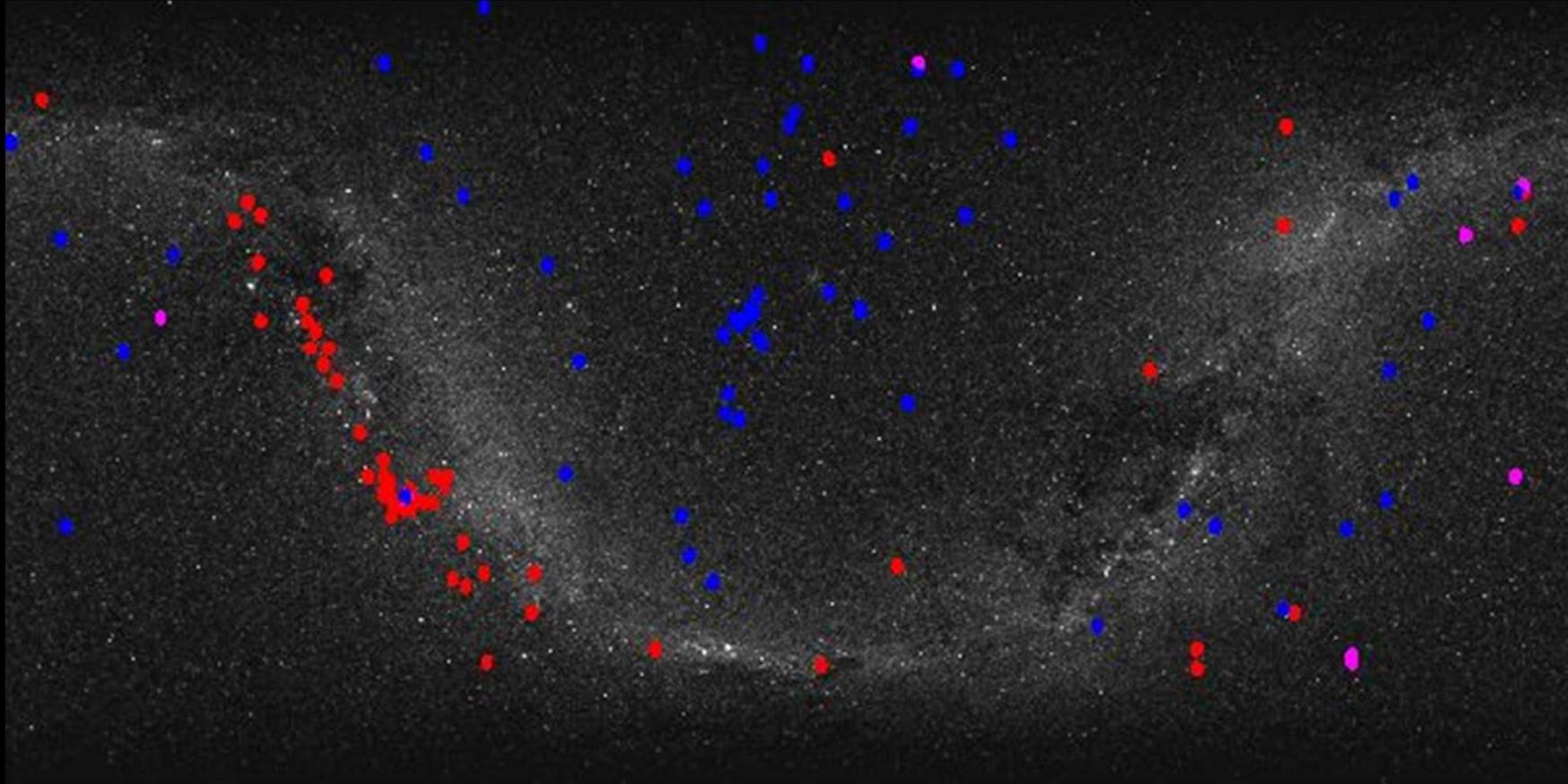


1 light-year

Descubrimiento de estrellas orbitando alrededor de SgrA*, en el centro de la vía láctea

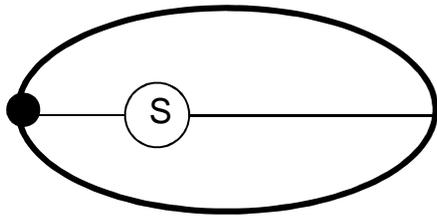


OTROS CANDIDATOS

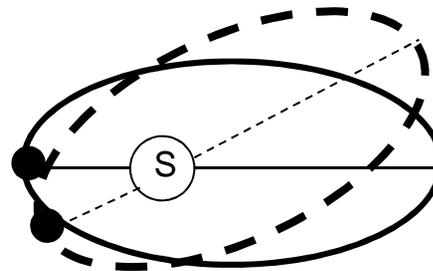


- Hasta 20 masas solares
- Entre 100 y 100 000 masas solares
- Más de 1 000 000 de masas solares

Correcciones a las trayectorias de planetas y estrellas



Predicción de Newton



Predicción de Einstein

Para Mercurio, el efecto de la curvatura del espacio es chico, pero medible: la elipse rota 1 grado cada 83,5 siglos!!

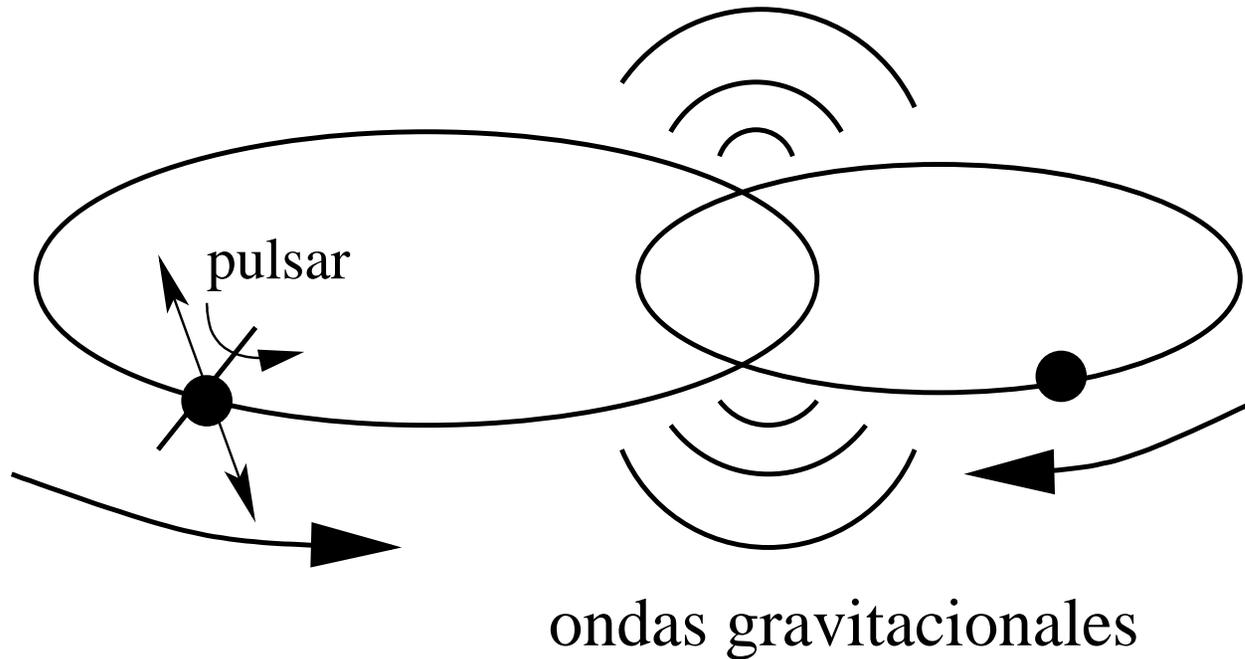
Para PSR J0737-3039, la elipse rota 17 grados por año

Ondas gravitacionales

Los objetos en movimiento producen deformaciones en el espacio y el tiempo que viajan a la velocidad de la luz.

Analogía: las cargas en movimiento en una antena generan ondas electromagnéticas (radio y TV por ejemplo)

Pérdida de energía por emisión de ondas gravitatorias



Pulsar 1913+16, la órbita se achica 3mm por vuelta!!

Premio Nobel 1993



Russell A. Hulse



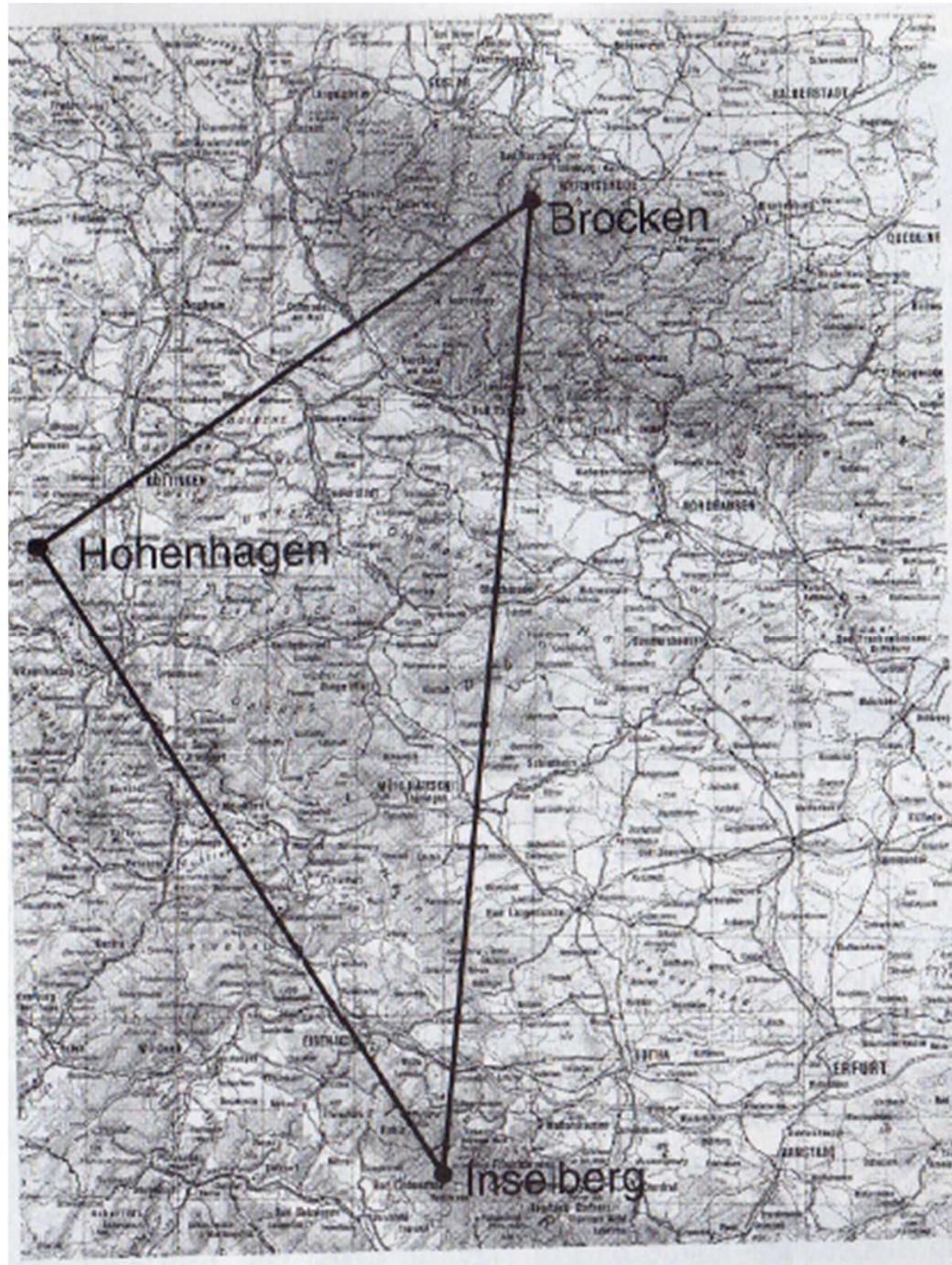
Joseph H. Taylor Jr.

Instrumento para detectar de ondas gravitacionales (LIGO)



Volvamos a la geometría.....

Si se midieran con suficiente precisión los ángulos, se encontraría una diferencia de $0,0000000000000006$ grados





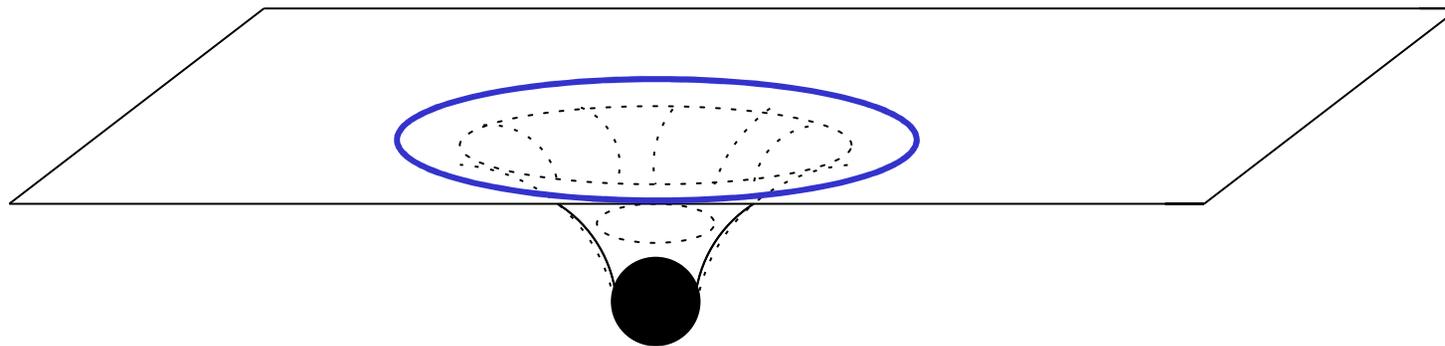
**El perímetro no es igual a $2 \times 3.14159 \times \text{radio}$.
Para la Tierra, es menor en un $0,00000002\%$**



perimetro



“radio”

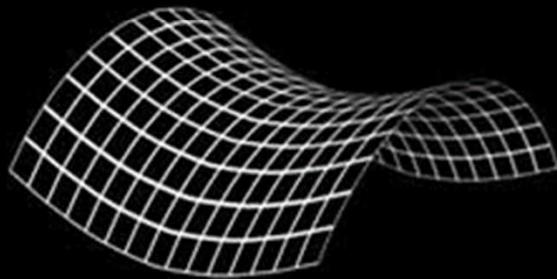


El perímetro no es igual a $2 \times 3.14159 \times \text{radio}$

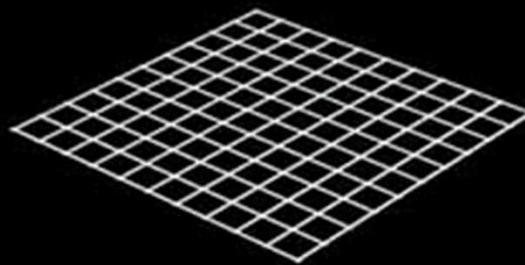
La geometría del universo A GRAN ESCALA

El Universo está en expansión (Hubble 1929).

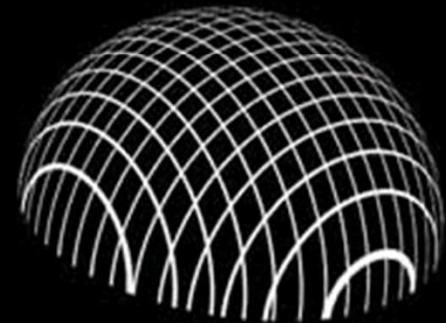
De acuerdo a la Relatividad General, hay tres posibilidades para la geometría espacial:



abierta



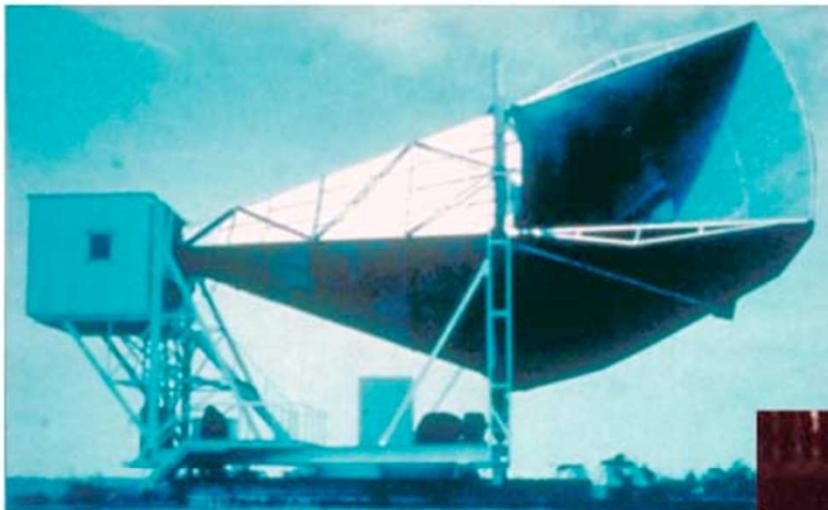
plana



cerrada

Fondo cósmico de microondas: descubrimiento

Llegan fotones de todos lados, correspondientes a $T=2,7\text{ K}$

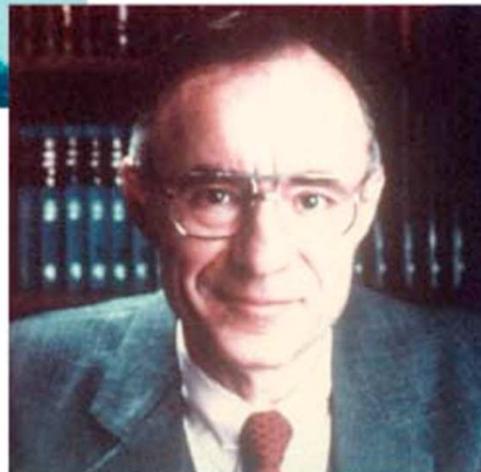


Microwave Receiver



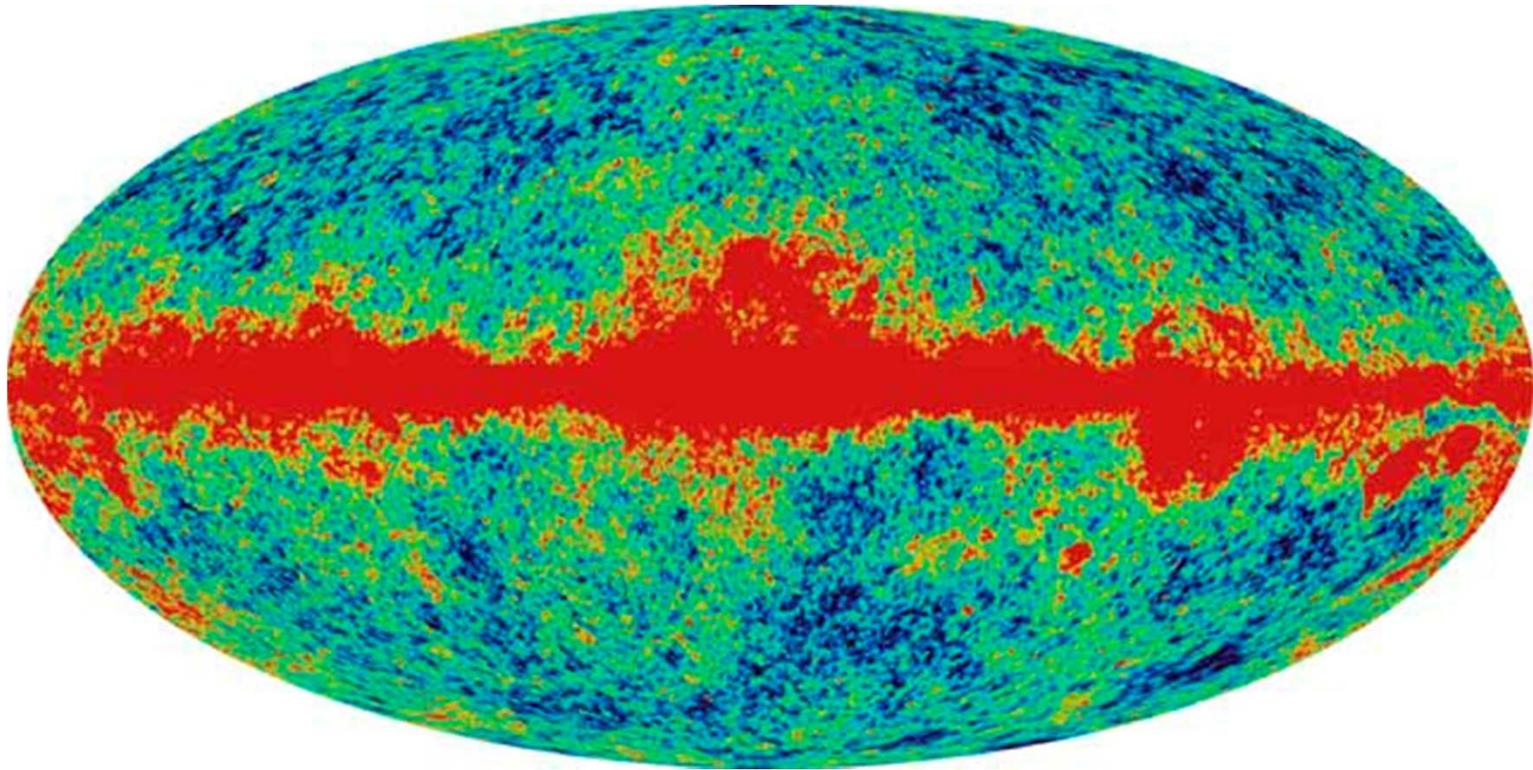
MAP990045

Robert Wilson



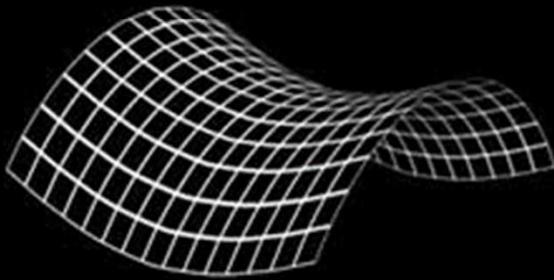
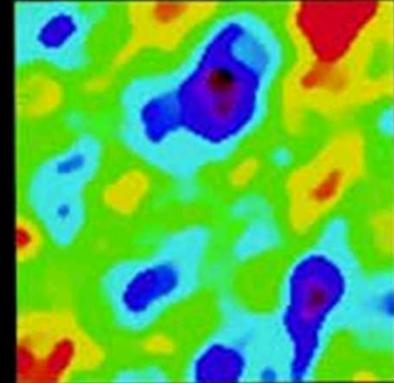
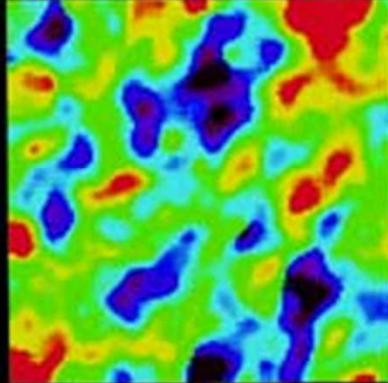
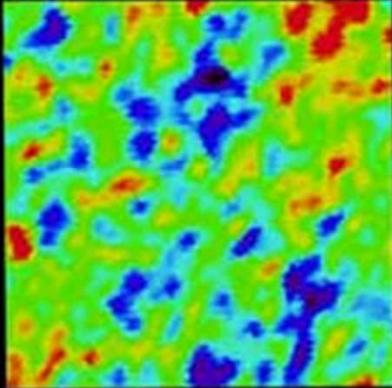
Arno Penzias

**Fondo cósmico de microondas:
Las variaciones en la temperatura del Universo**

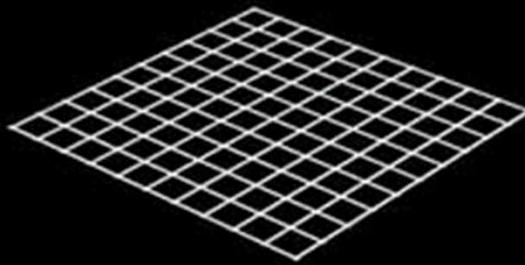


Satélite WMAP 2003

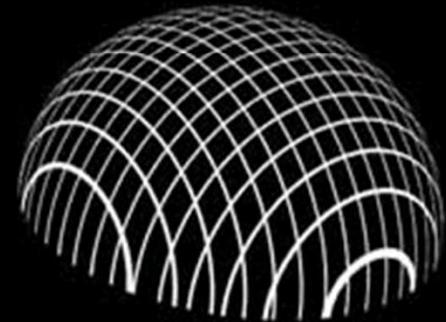
Podemos medir la geometria del universo!!



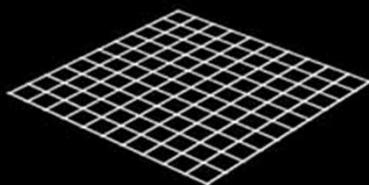
abierta

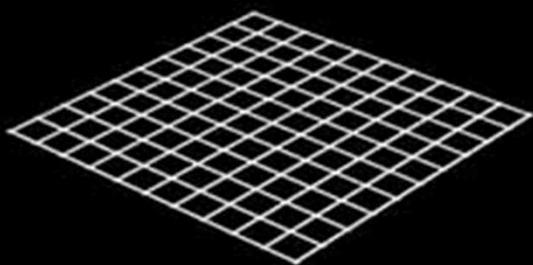


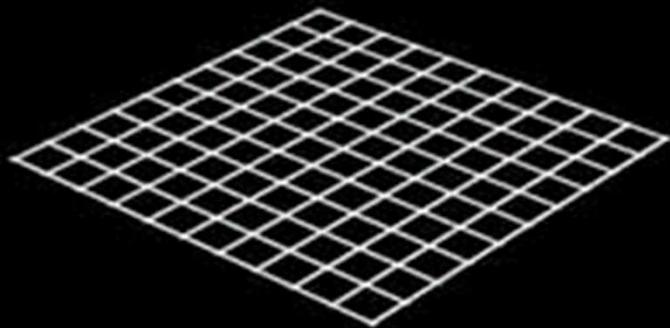
plana

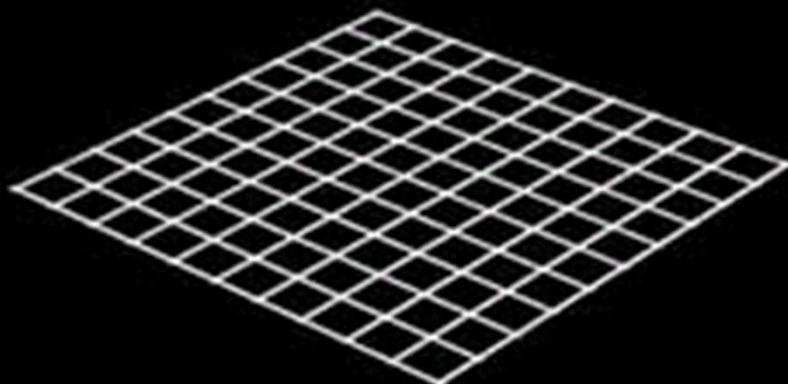


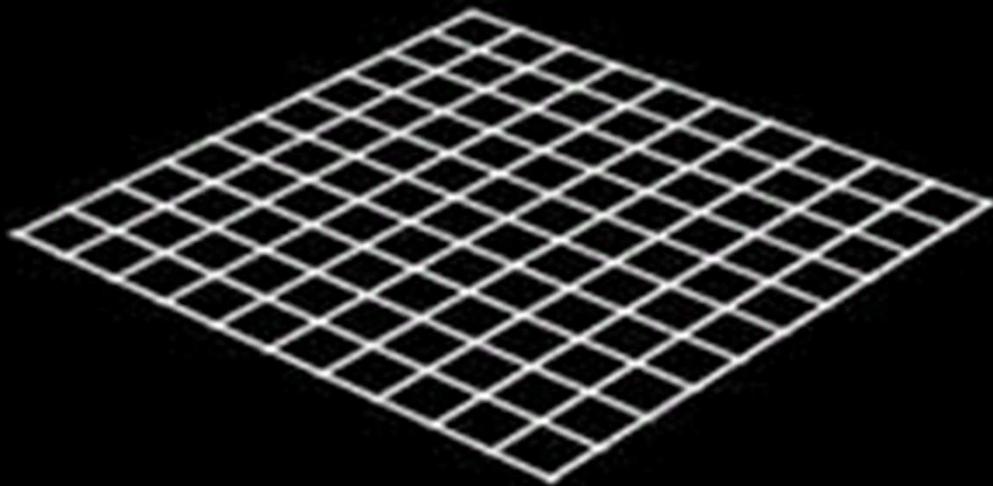
cerrada

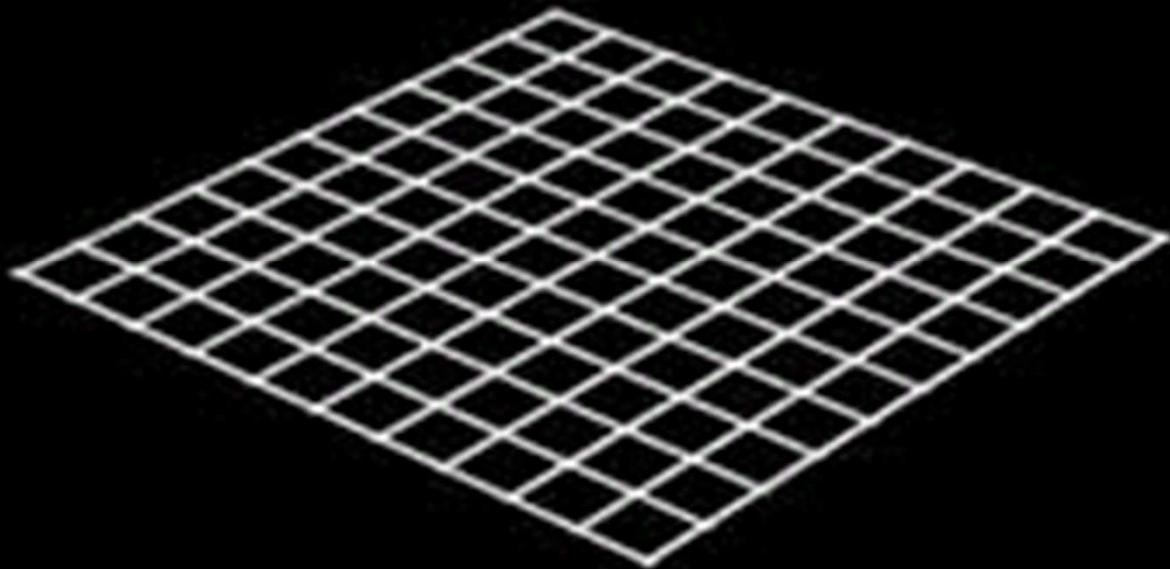


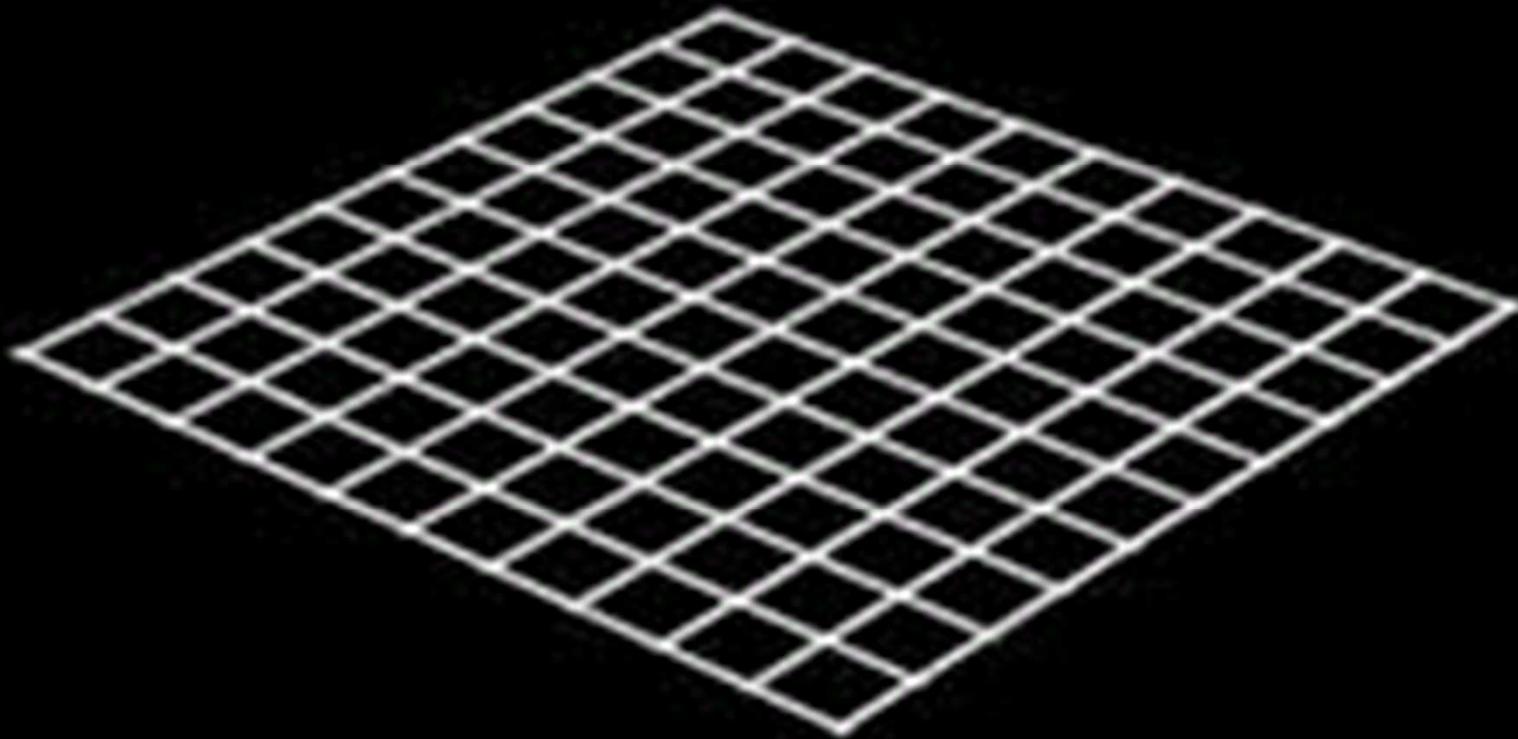












Debe haber 25% de materia oscura y 70% de energía oscura!!!

Algunos temas de investigación actuales:

- Las ondas gravitatorias todavía no fueron detectadas directamente
- La expansión del Universo es acelerada. NO se sabe que es lo que produce la aceleración ni que tipo de materia llena el Universo!!
- La relatividad general NO es compatible con la mecánica cuántica

.....

.....

.....