

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

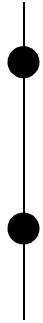
**Diego Mazzitelli**

**Departamento de Física**

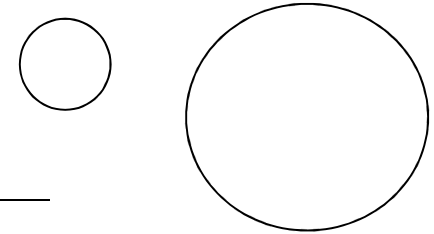
**FCEyN - UBA**

## Postulados de Euclides Siglo IV AC.

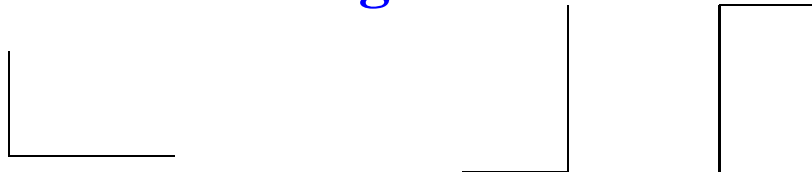
1. Dados dos puntos, existe una recta que los une
2. Cualquier recta se puede hacer todo lo larga que se quiere



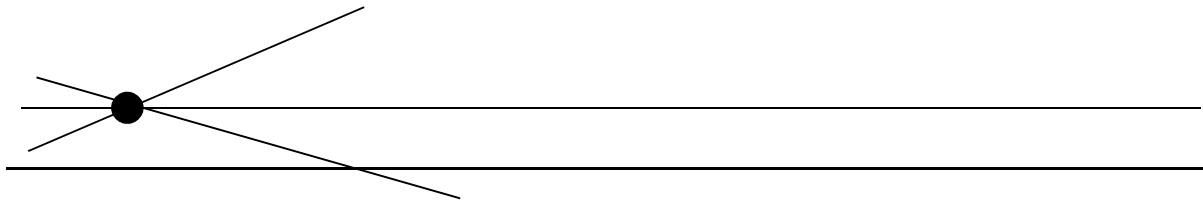
- 
3. Es posible trazar una circunferencia de cualquier tamaño alrededor de cualquier punto



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

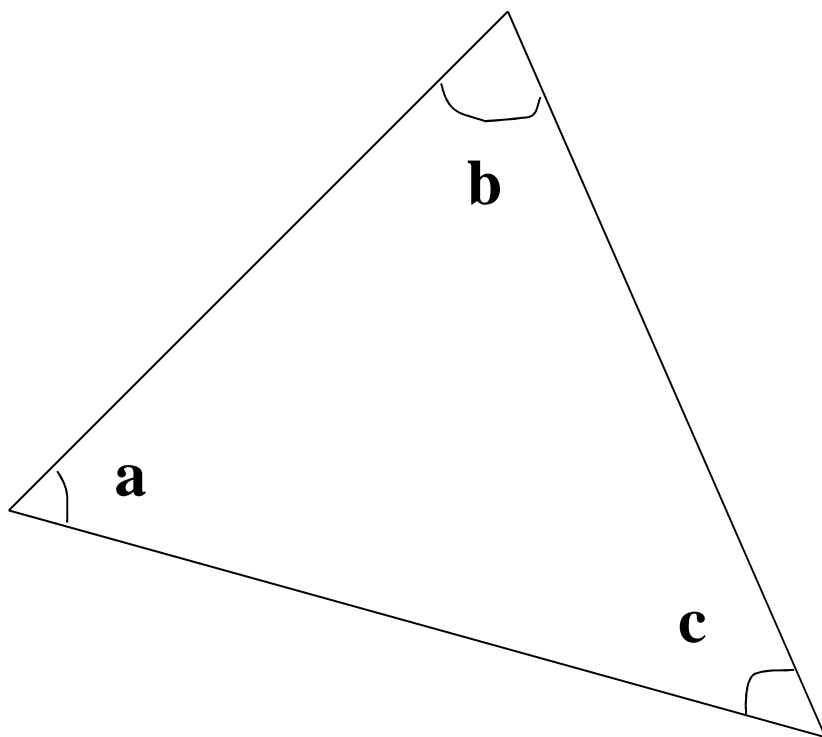


**BASTANTE OBVIOS....???**

## **Algunas consecuencias conocidas:**

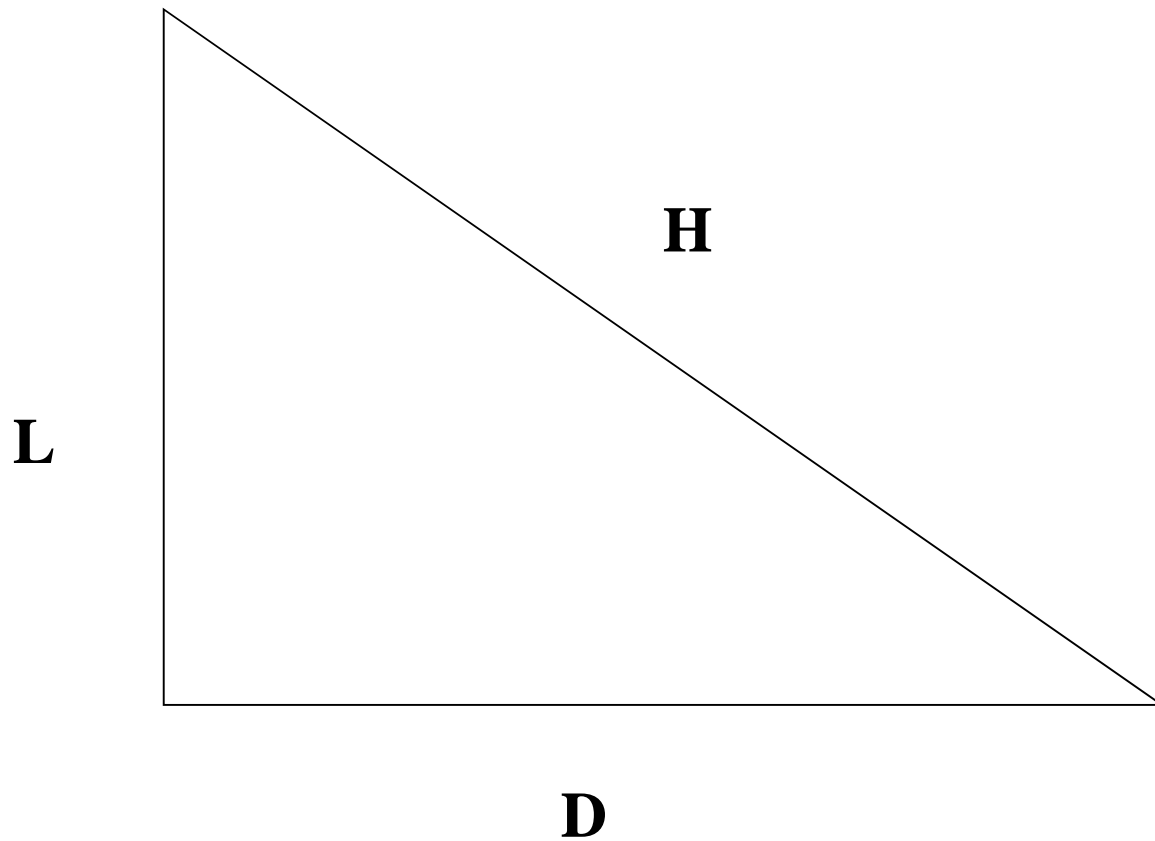


**Dos rectas paralelas nunca se cruzan**



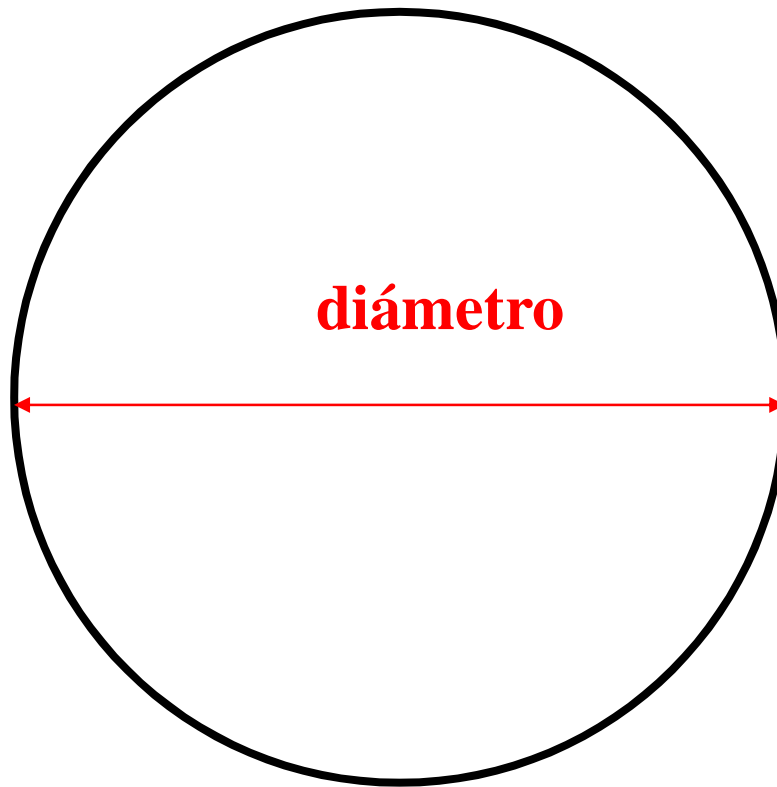
$$\mathbf{a + b + c = 180 \text{ grados}}$$

## Teorema de Pitágoras...



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

**perímetro**



**diámetro**

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



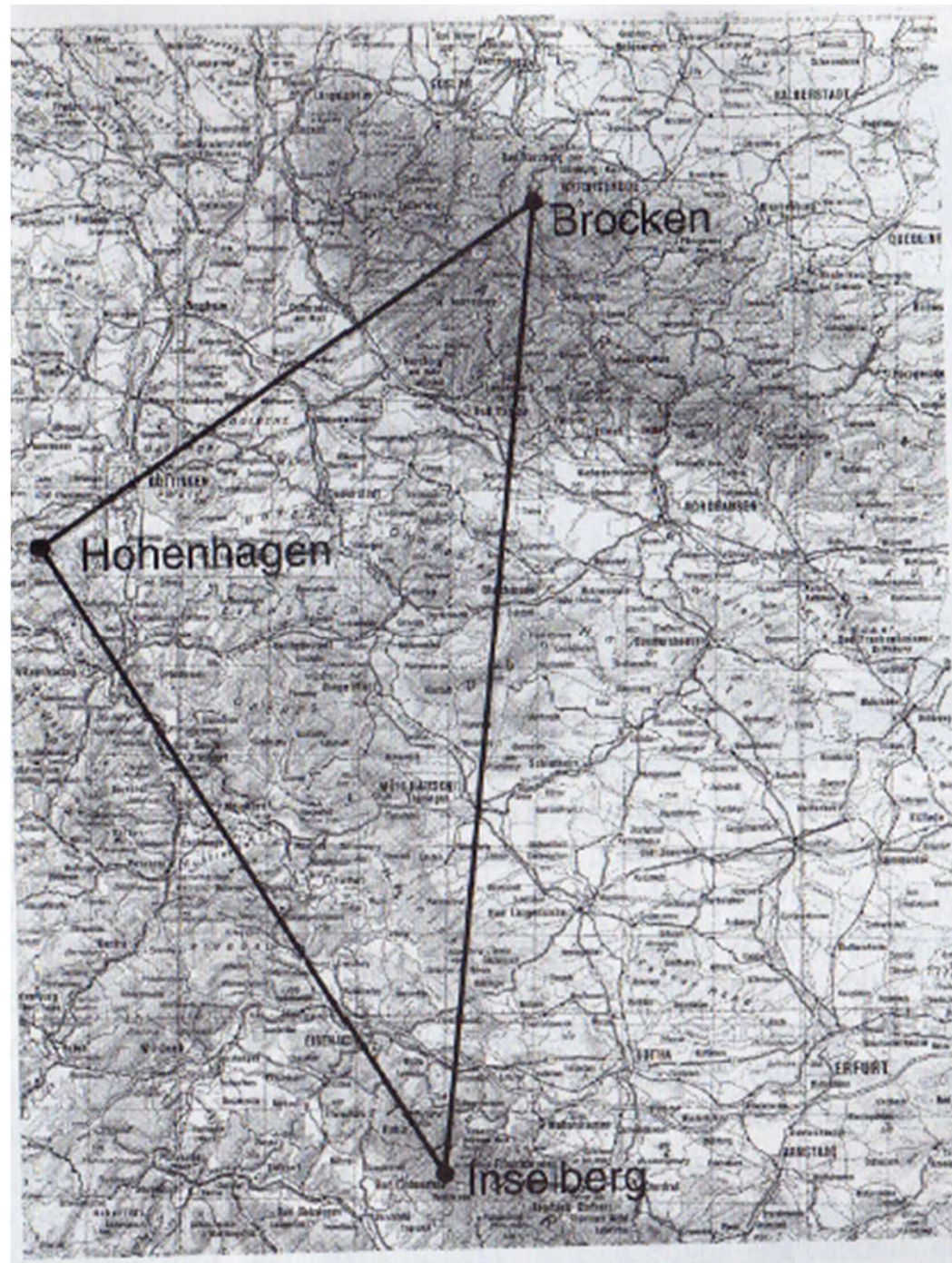
3. 14159265358979323846264338327950288419716939937510582097494459230781640628620899862803482534211706798214808651328230664709384460·  
955058223172535940812848111745028410270193852110555964462294895493038196442881097566593344612847564823378678316527120190914564856·  
692346034861045432664821339360726024914127372458700660631558817488152092096282925409171536436789259036001133053054882046652138414·  
695194151160943305727036575959195309218611738193261179310511854807446237996274956735188575272489122793818301194912983367336244065·  
664308602139494639522473719070217986094370277053921717629317675238467481846766940513200056812714526356082778577134275778960917363·  
717872146844090122495343014654958537105079227968925892354201995611212902196086403441815981362977477130996051870721134999999837297·  
804995105973173281609631859502445945534690830264252230825334468503526193118817101000313783875288658753320838142061717766914730359·  
825349042875546873115956286388235378759375195778185778053217122680661300192787661119590921642019893809525720106548586327886593615·  
338182796823030195203530185296899577362259941389124972177528347913151557485724245415069595082953311686172785588907509838175463746·  
493931925506040092770167113900984882401285836160356370766010471018194295559619894676783744944825537977472684710404753464620804668·  
425906949129331367702898915210475216205696602405803815019351125338243003558764024749647326391419927260426992279678235478163600934·  
172164121992458631503028618297455570674983850549458858692699569092721079750930295532116534498720275596023648066549911988183479775·  
35663698074265425278625518184175746728909777279380008164706001614524919217321721477235014144197356854816136115735255213347574184·  
946843852332390739414333454776241686251898356948556209921922218427255025425688767179049460165346680498862723279178608578438382796·  
797668145410095388378636095068006422512520511739298489608412848862694560424196528502221066118630674427862203919494504712371378696·  
095636437191728746776465757396241389086583264599581339047802759009946576407895126946839835259570982582262052248940772671947826848·  
260147699090264013639443745530506820349625245174939965143142980919065925093722169646151570985838741059788595977297549893016175392·  
846813826868386894277415599185592524595395943104997252468084598727364469584865383673622262609912460805124388439045124413654976278·  
07977156914359977001296160894416948685558484063534220722582848864815845602850601684273945226746767889525213852254995466672782398·  
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 Euclidianas se verifican en la naturaleza....**

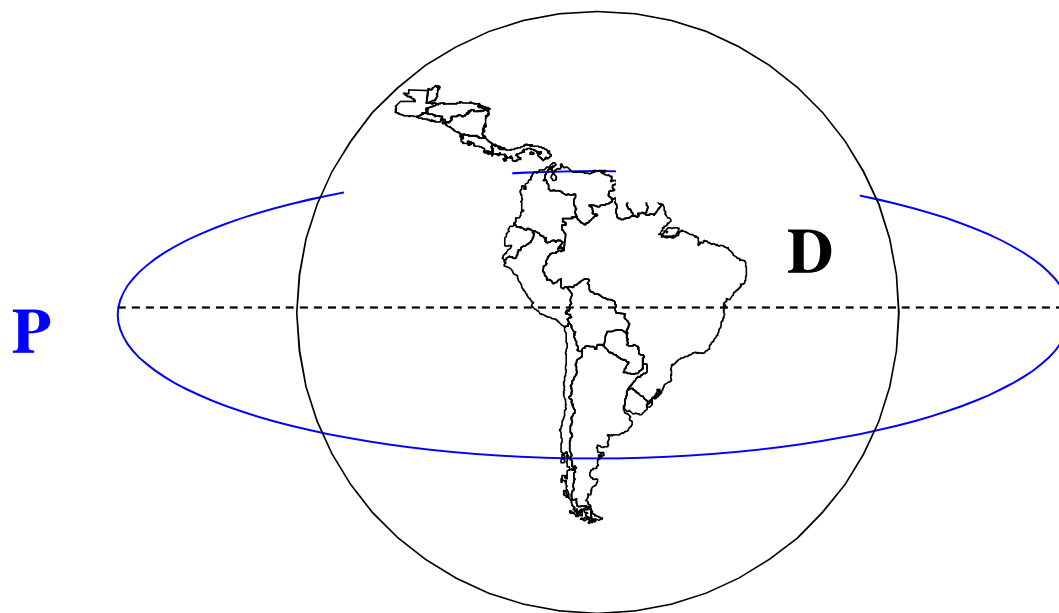
**¿HARÁ FALTA VERIFICARLO  
EXPERIMENTALMENTE?**



**C. F. Gauss, 1820**



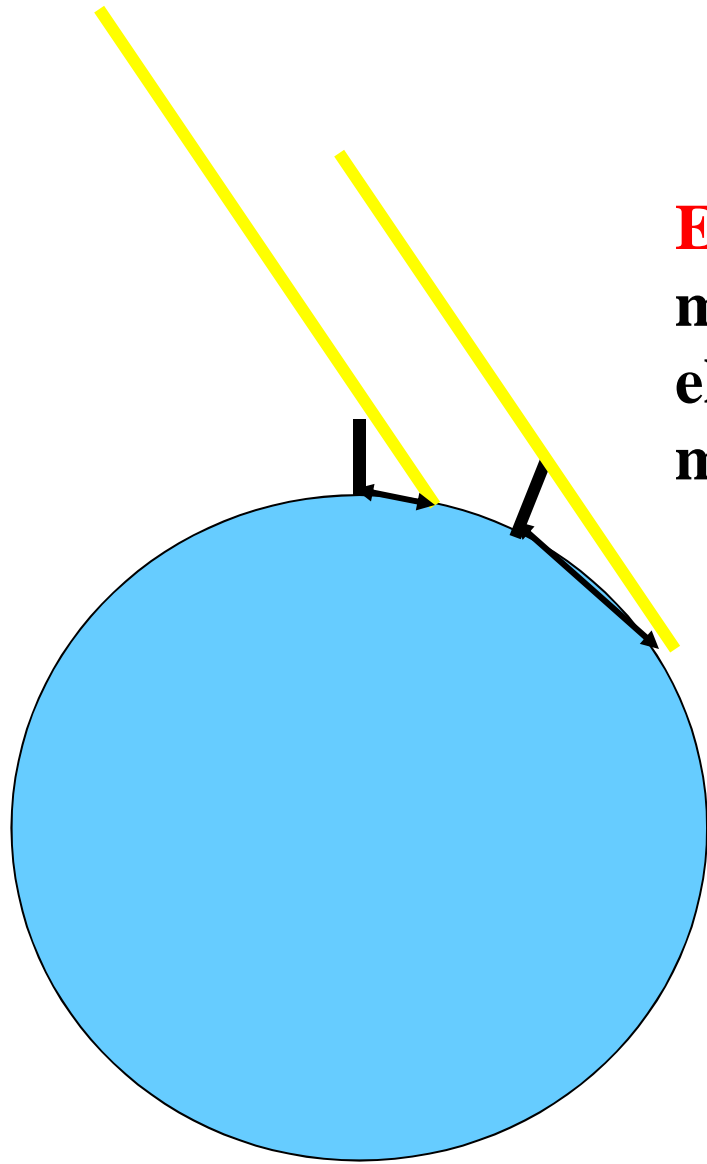
$$P/D = 3.1415926... ???$$



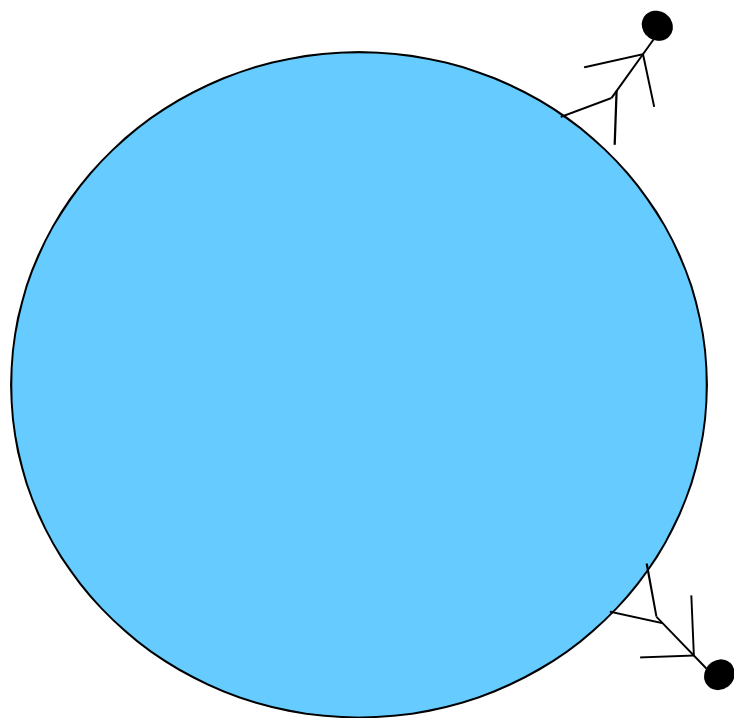
**Empecemos por algo más sencillo:**

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





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



**reciente**

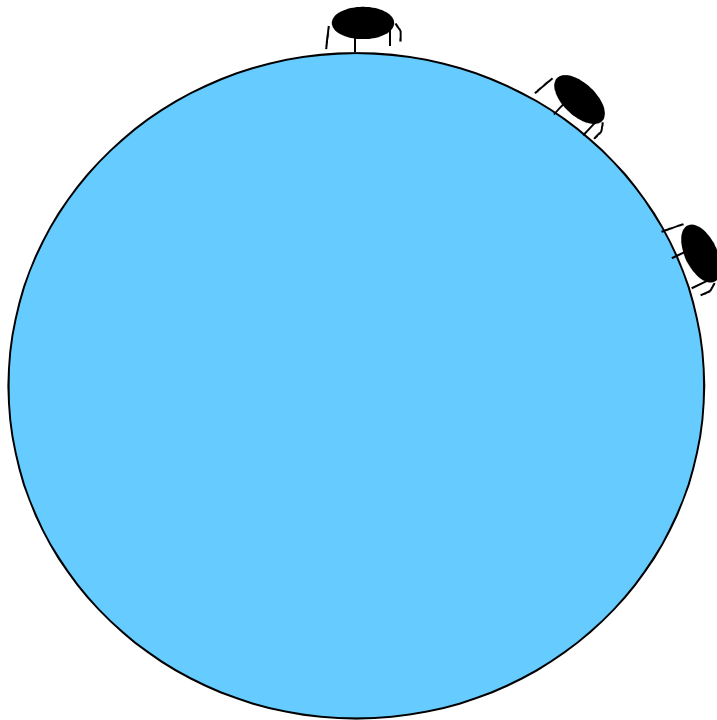


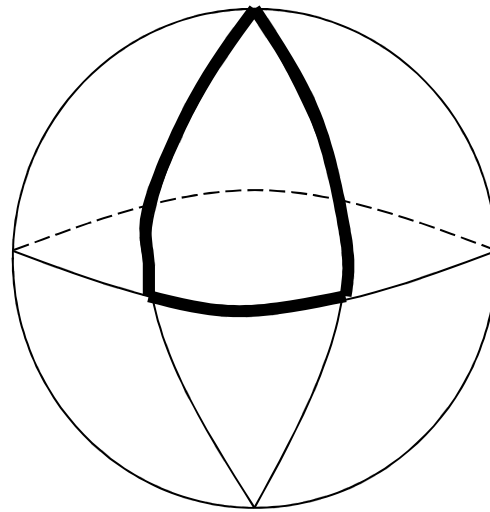
**ecreciente**

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

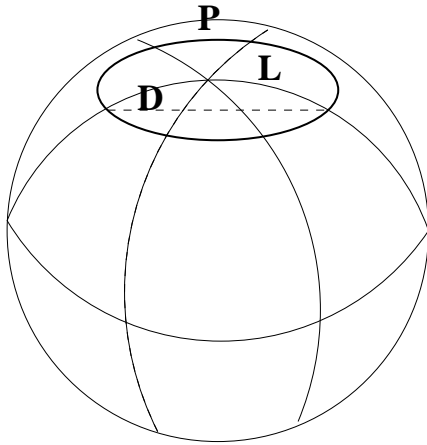
**En los ejemplos anteriores necesitamos una dimensión más...podremos darnos cuenta sin salirnos de la superficie??**

**Es decir: podríamos darnos cuenta si fuésemos seres bidimensionales?**

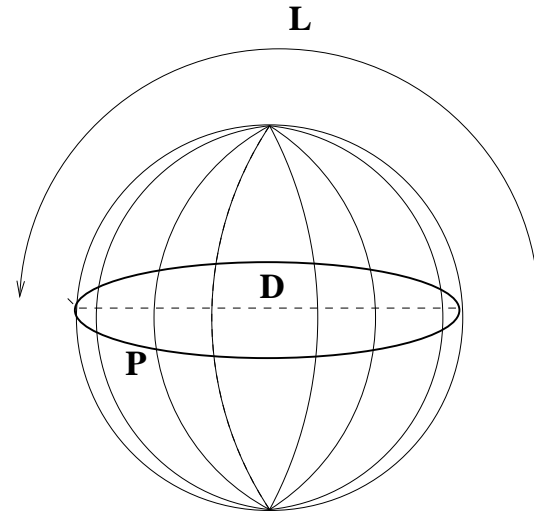




**Sumar los ángulos internos de un triángulo y ver si el resultado es  $180^\circ$  o no**



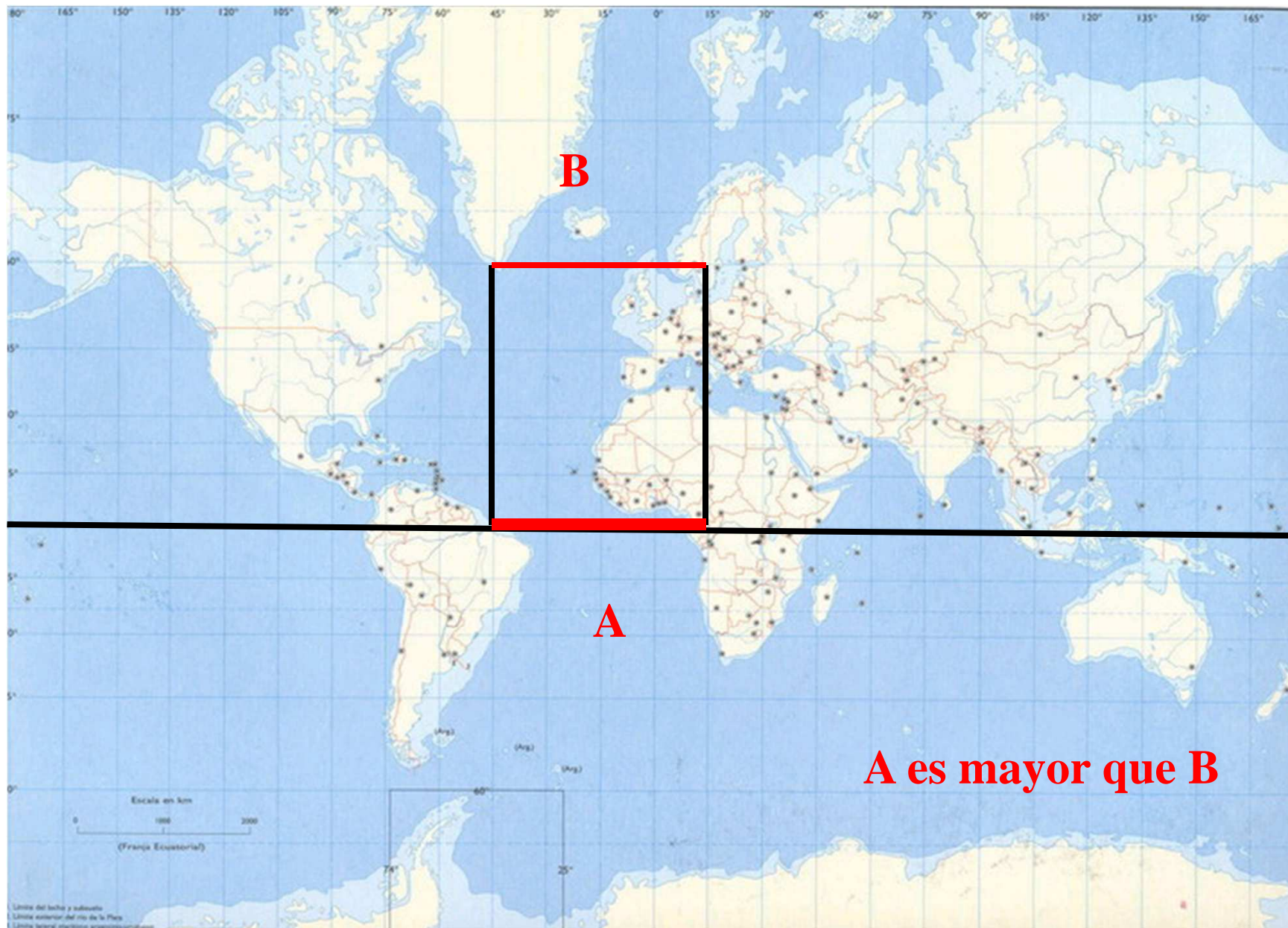
**P/L aproximadamente 3,14**



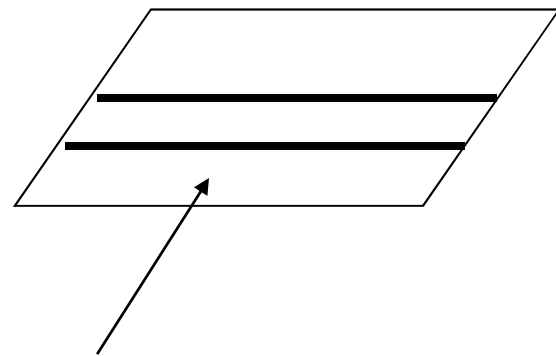
**P/L = 2 !!**

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

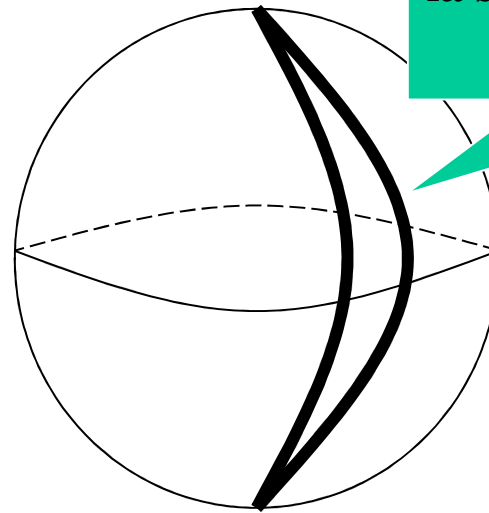




**Chequear si las “paralelas” se cortan...**



**Rectas “paralelas”**



**Lo más parecido a una recta sobre la superficie**

**Geodésicas “paralelas”**

**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**



?

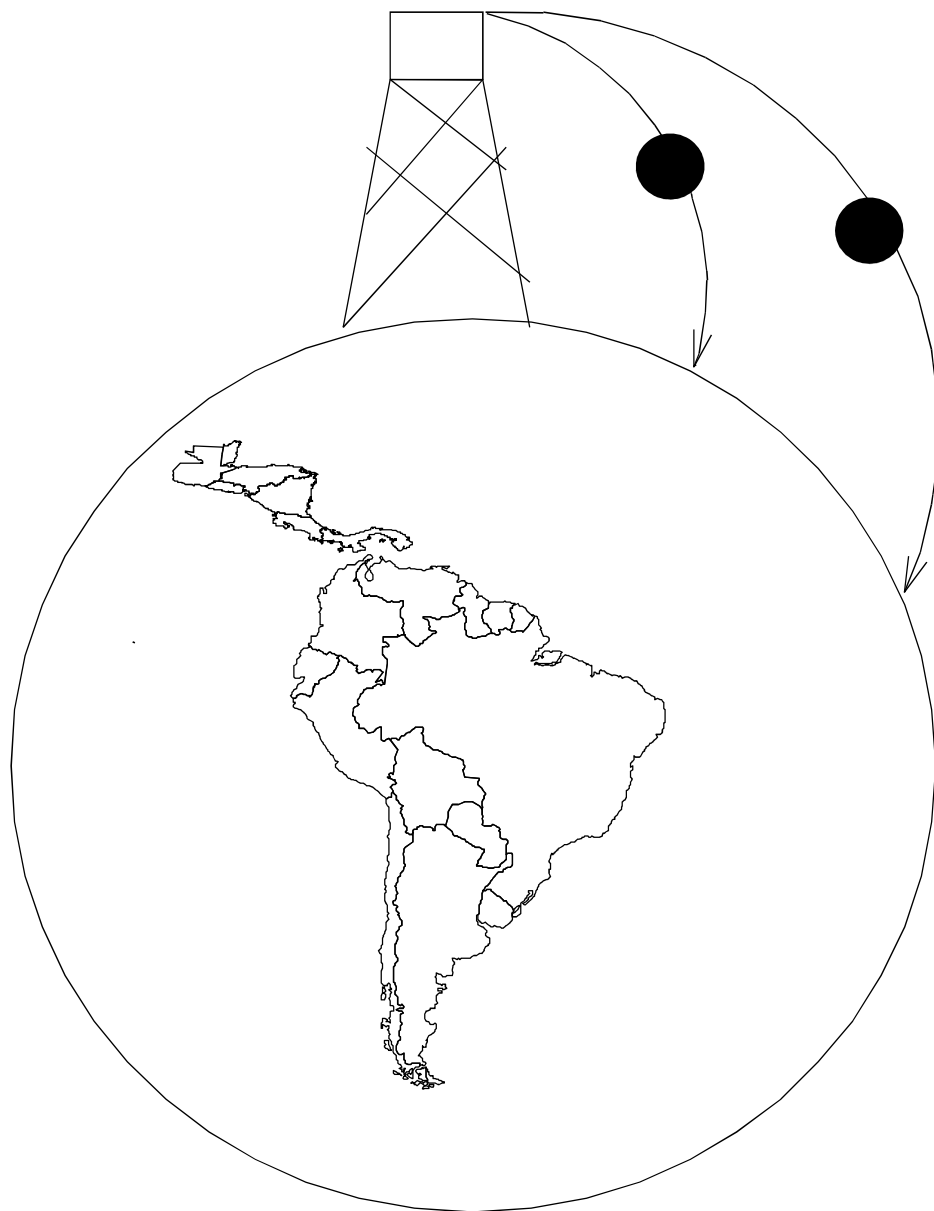
**Conclusión: si fuésemos bidimensionales podríamos hacer “experimentos de geometría” y verificar si vivimos sobre una superficie plana o no.**

**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???**









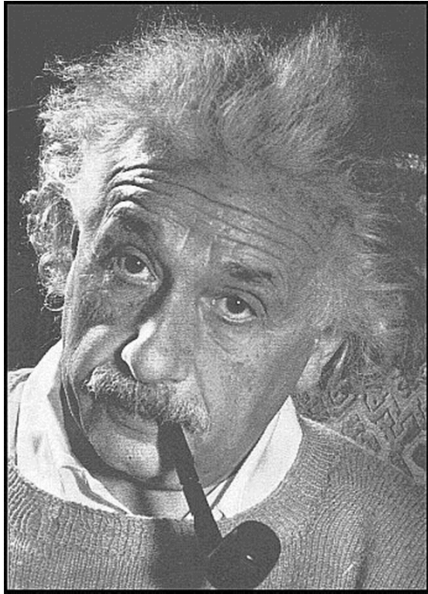




**El movimiento de los objetos en presencia de gravedad es independiente de la masa, de la composición química, etc!!**

**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**



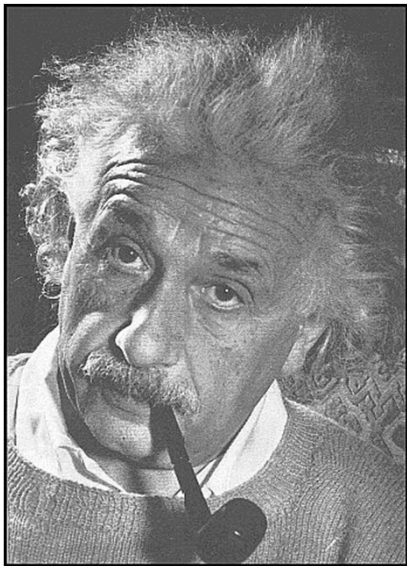
**A. Einstein, 1915**

- **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?

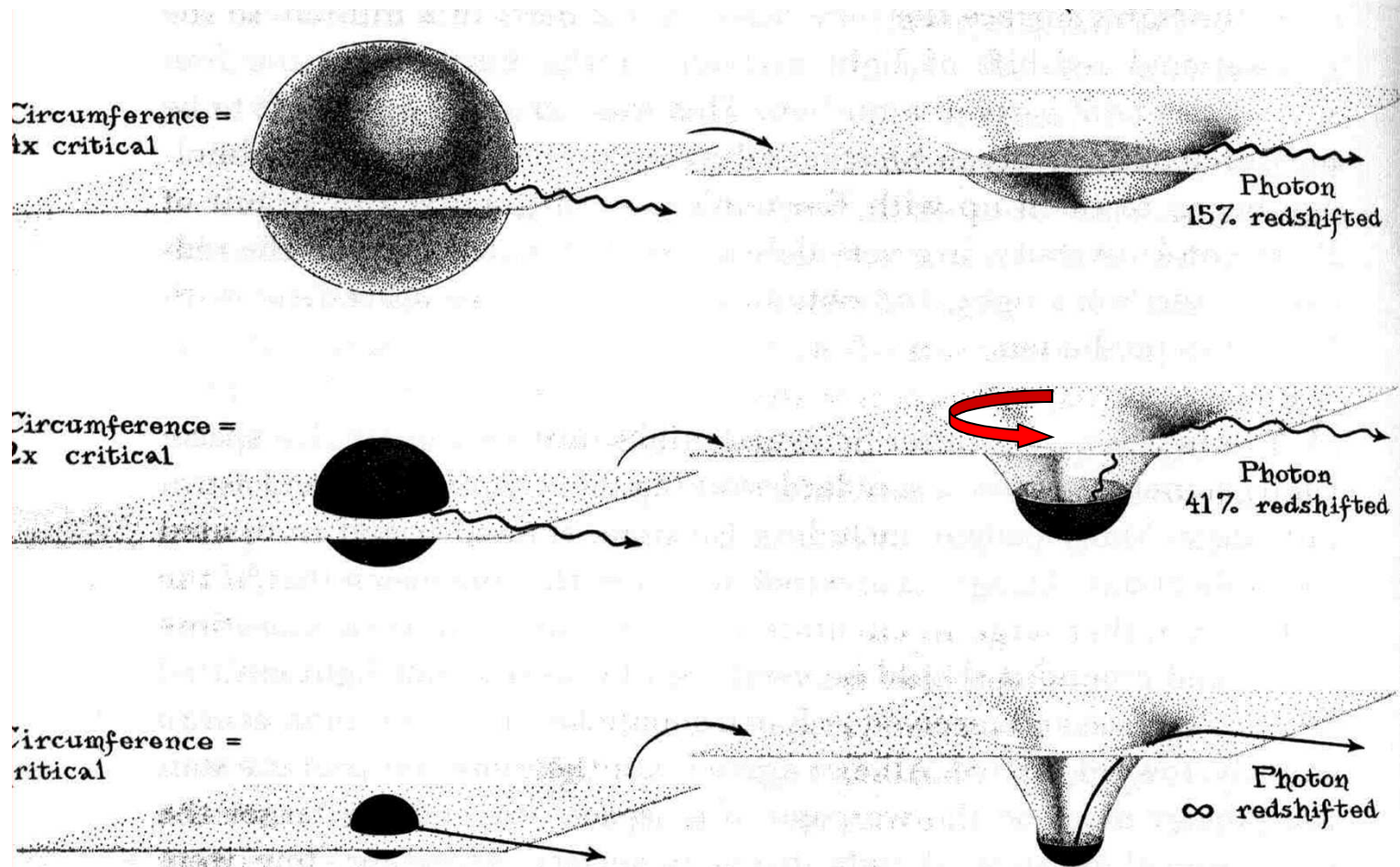


**“La Tierra ejerce una fuerza sobre la Luna, por eso su trayectoria no es recta”**



**“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

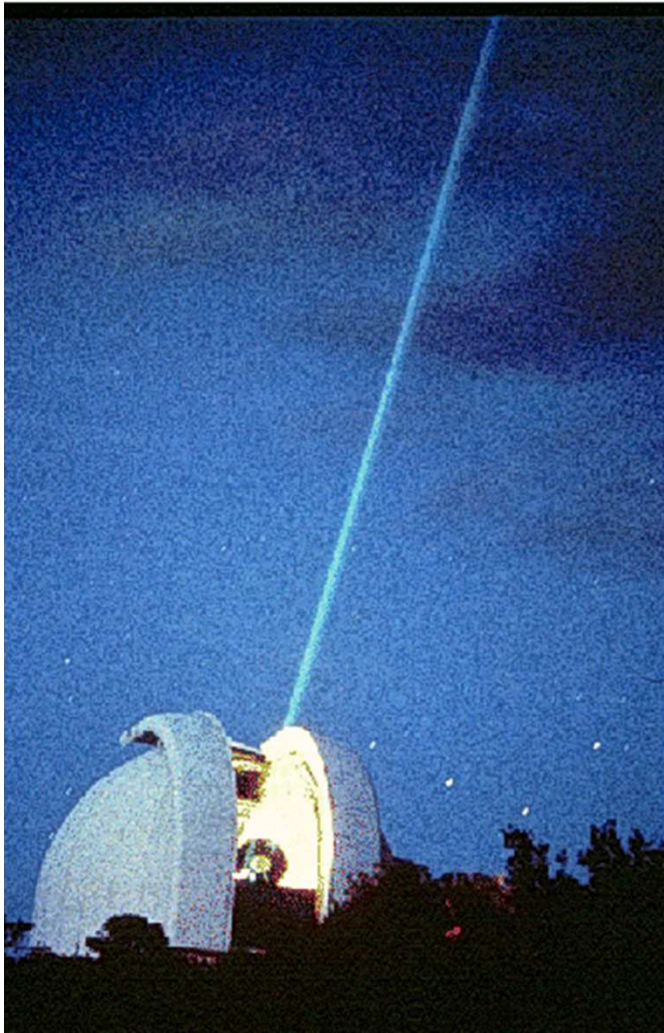


**LA GEOMETRÍA NO ES INMUTABLE!**

## **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



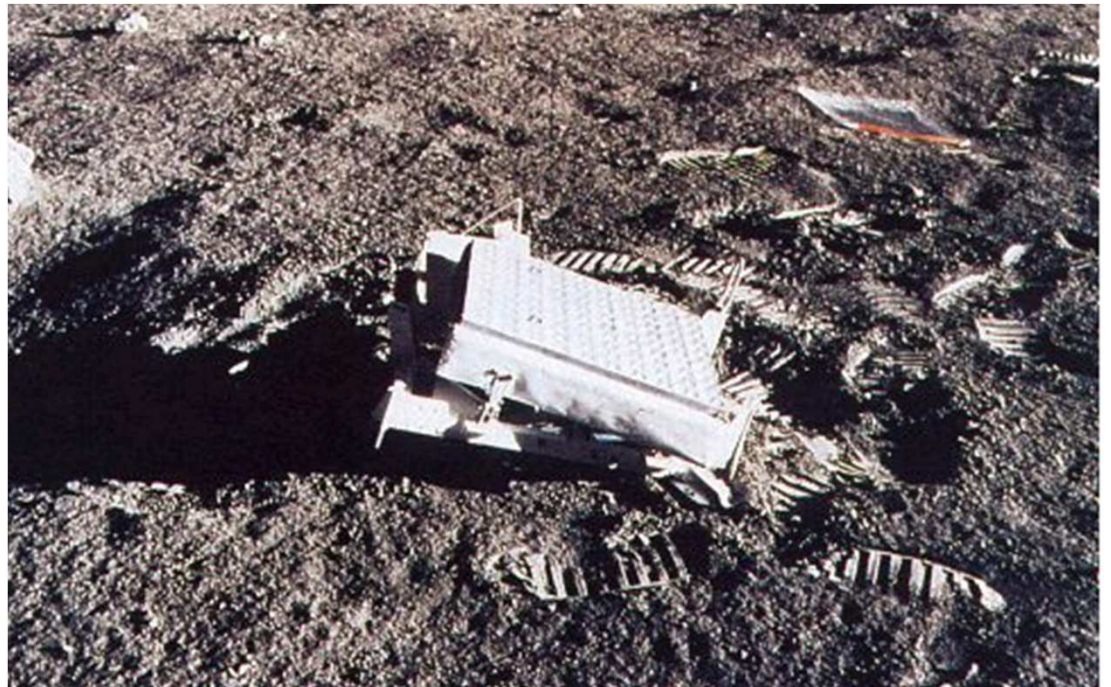


**La Luna y la Tierra “caen” hacia el Sol con la misma aceleración**

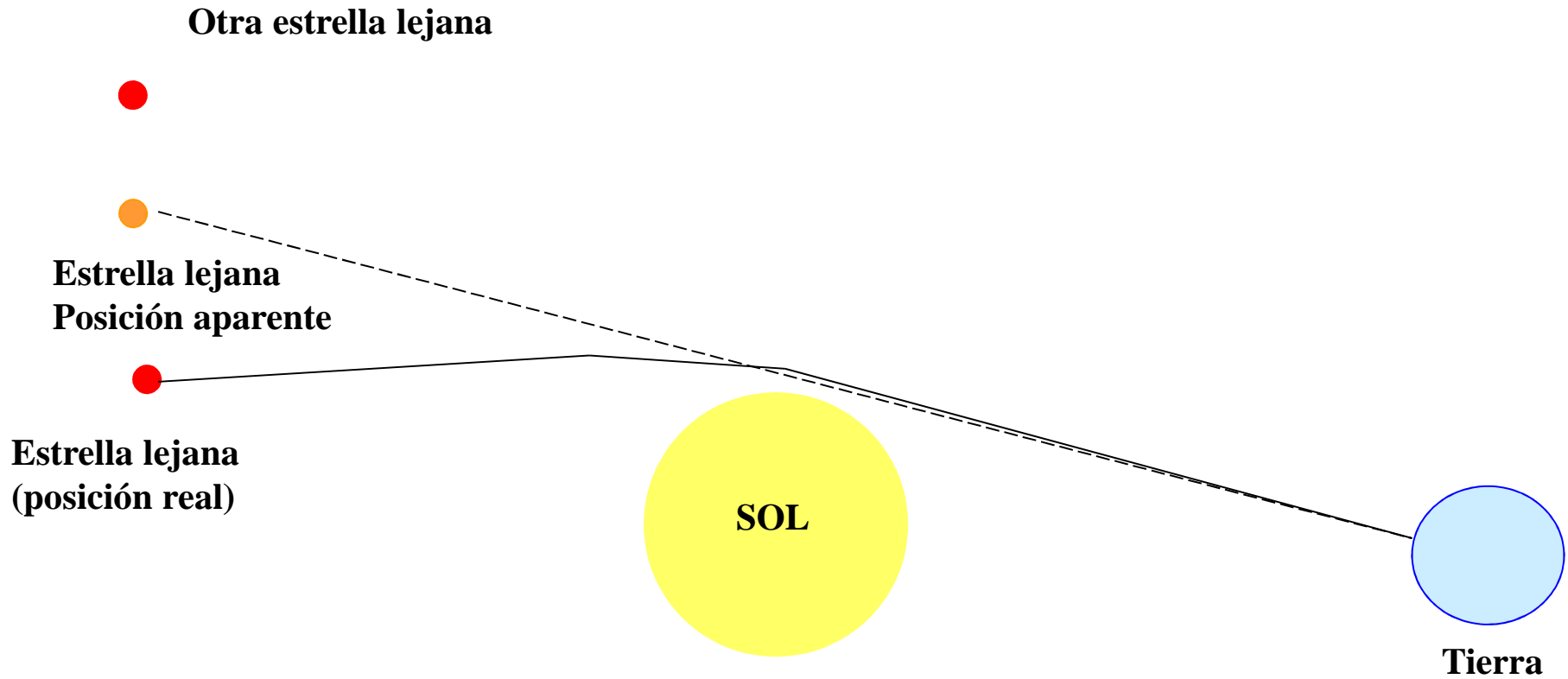
**Precisión: 0,000000000001% !!!!!**

**Experimento: “Lunar Laser Ranging”**

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

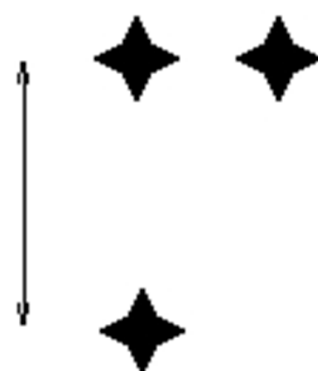
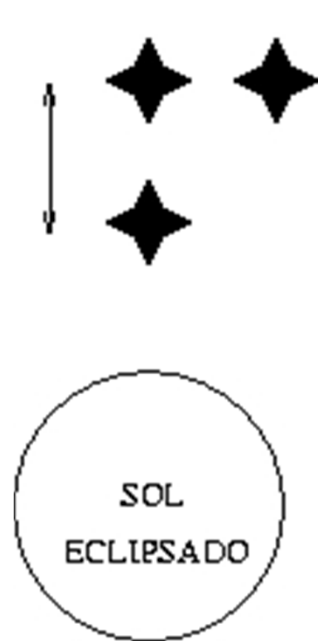


# DEFLEXIÓN DE LA LUZ



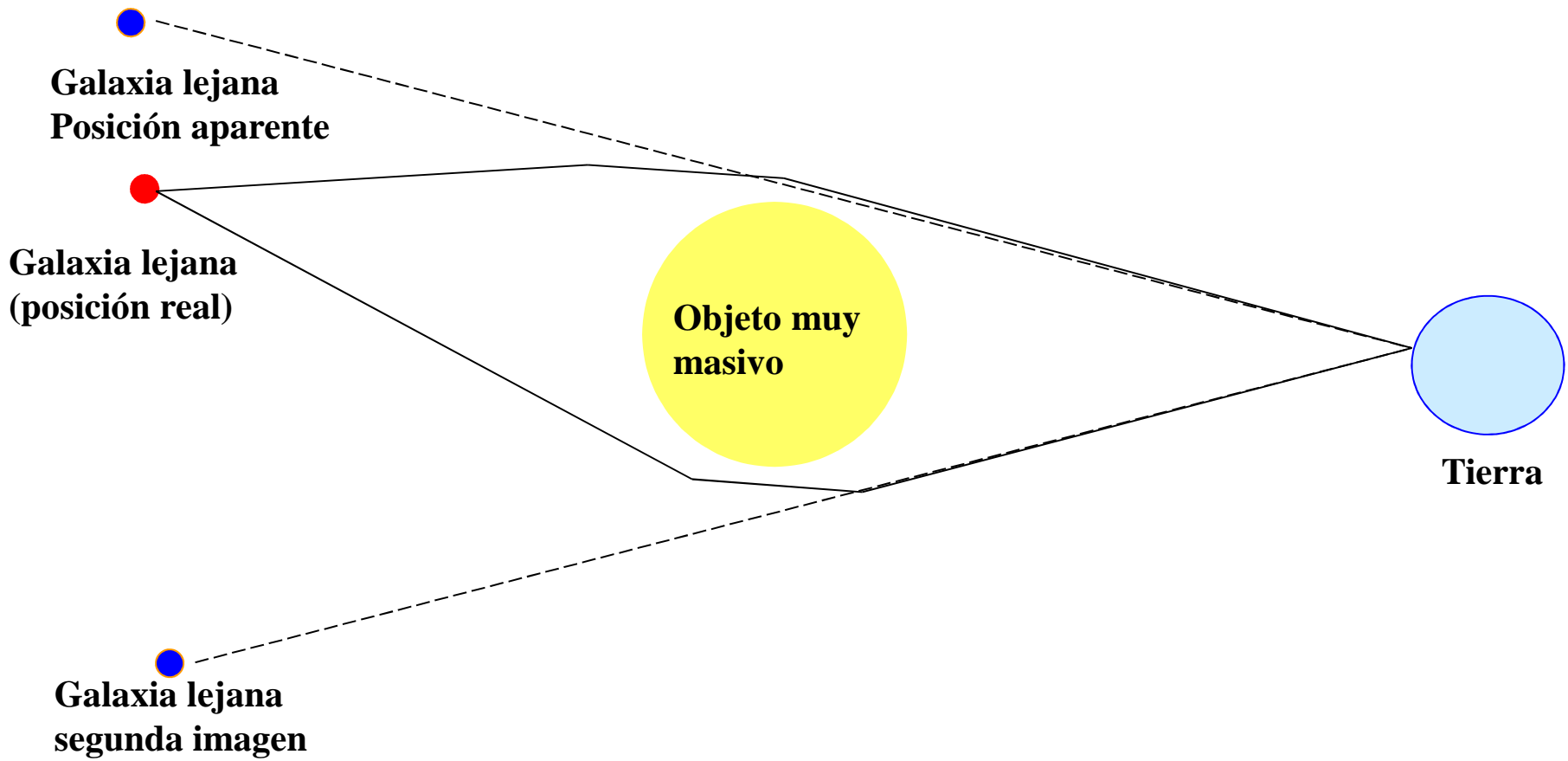
**Observado por Eddington (1919)**

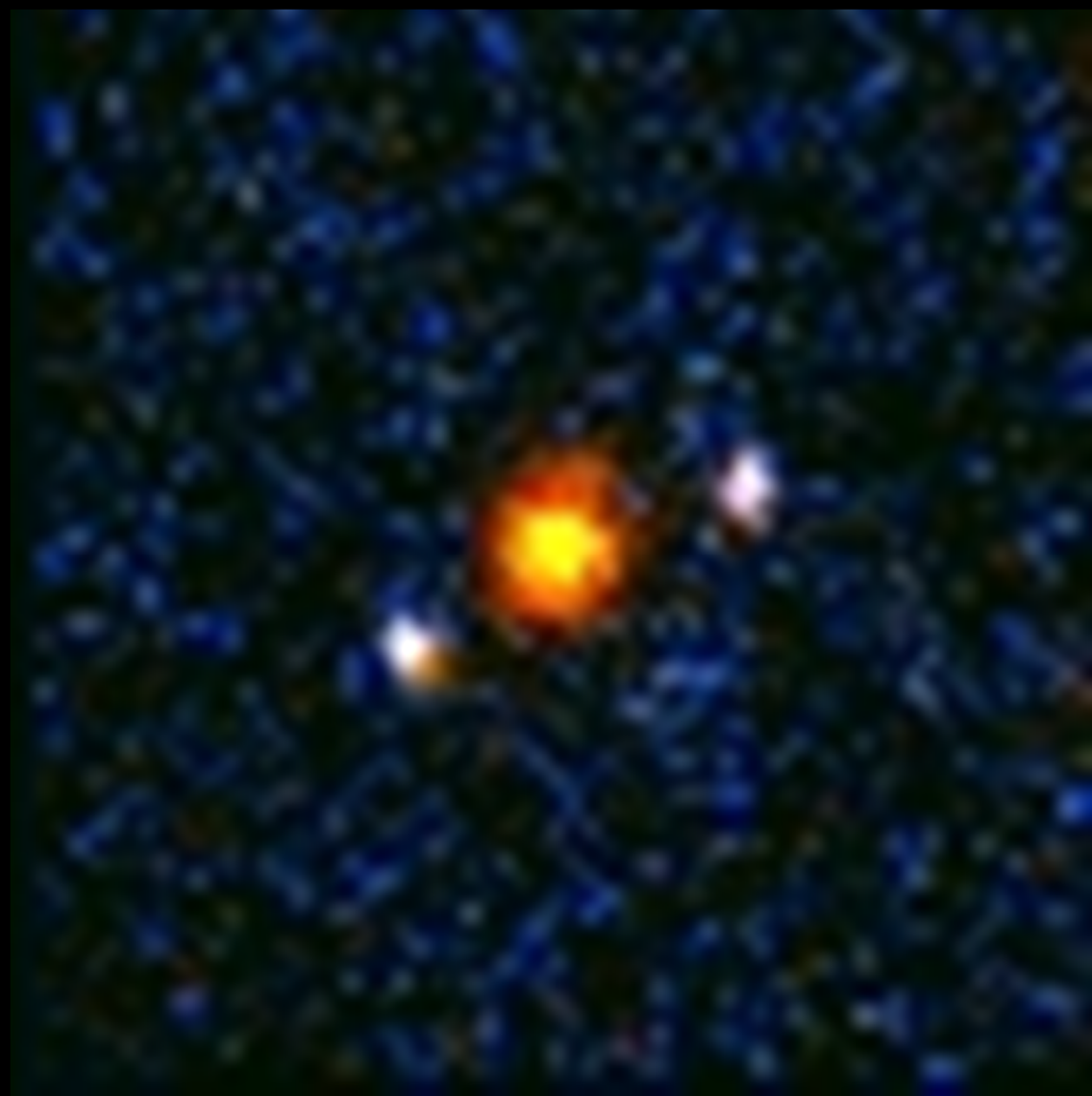




DE NOCHE, SELS MESES DESPUES

# LENTES GRAVITACIONALES











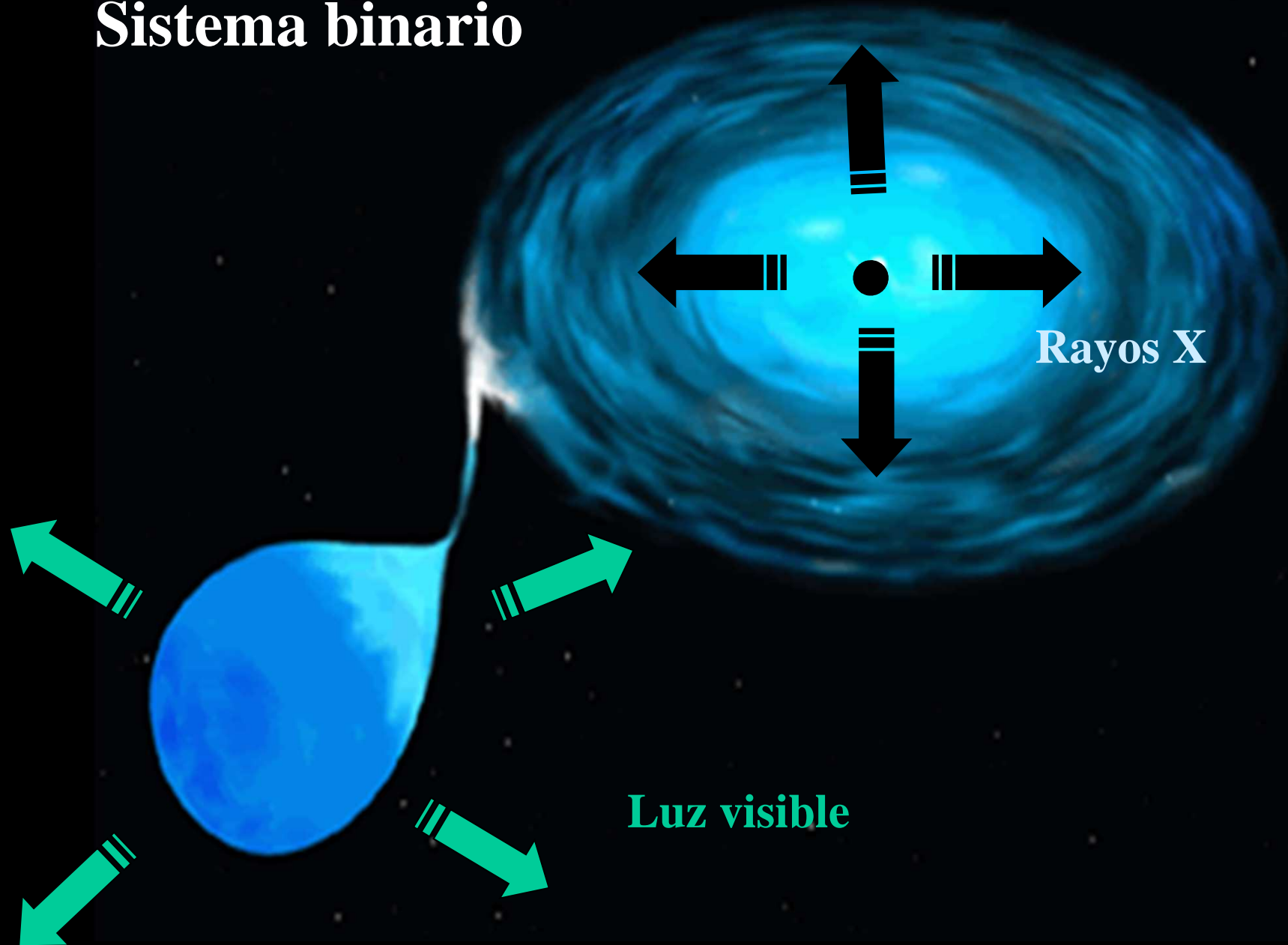


# Agujeros negros

- **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





## El primero: Cygnus X1

**M = entre 10 y 20  
Msol**



**El más grande de la galaxia: Sgr A**

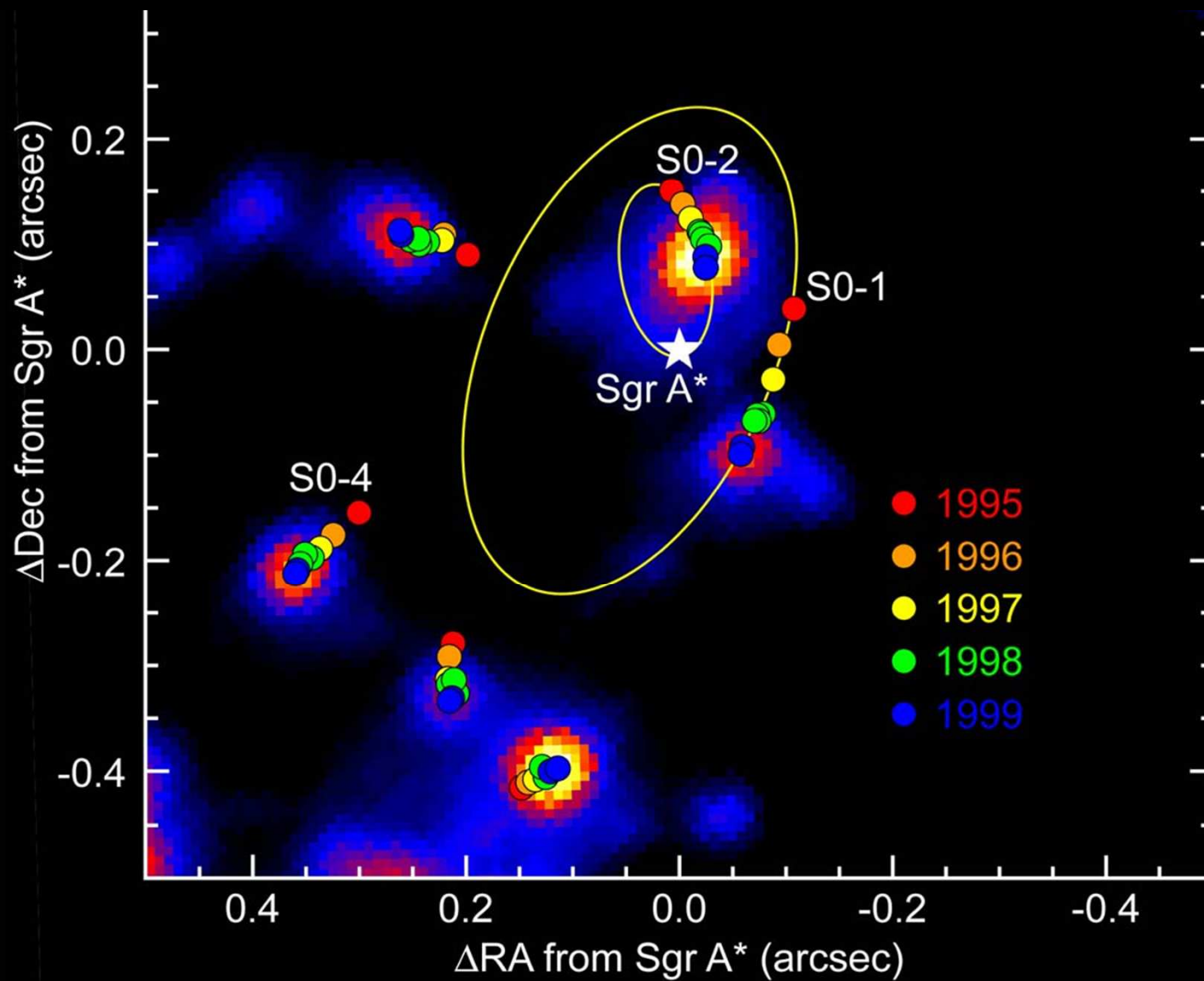
**$M = 3\,000\,000\ M_{\text{sol}}$**



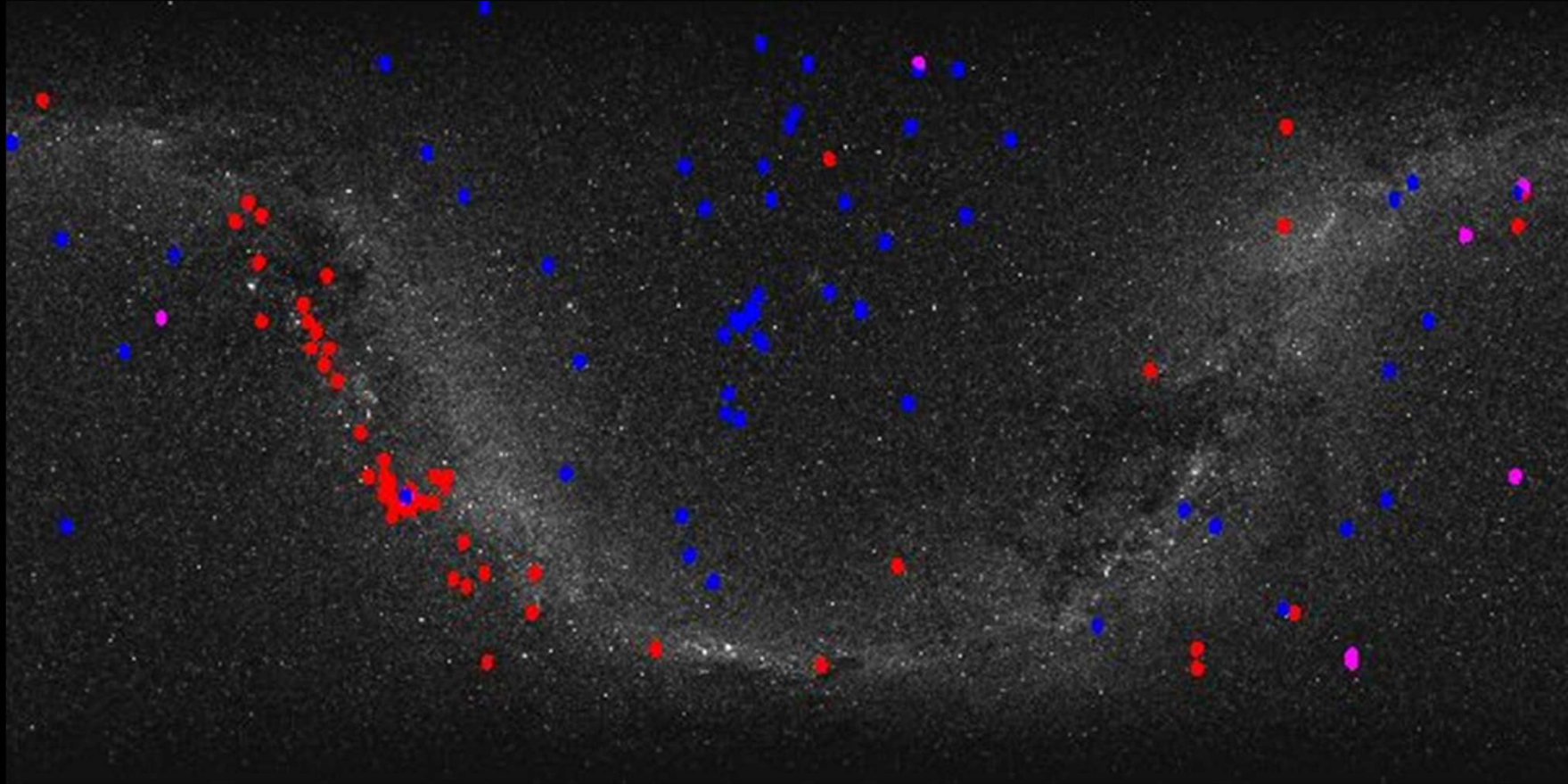
1 light-year



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

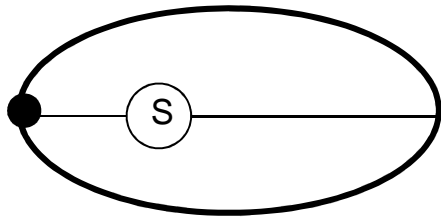


## OTROS CANDIDATOS

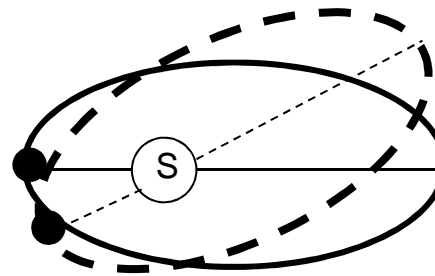


- Hasta 20 masas solares
- Entre 100 y 100 000 masas solares
- Más de 1 000 000 de masas solares

# 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!!**

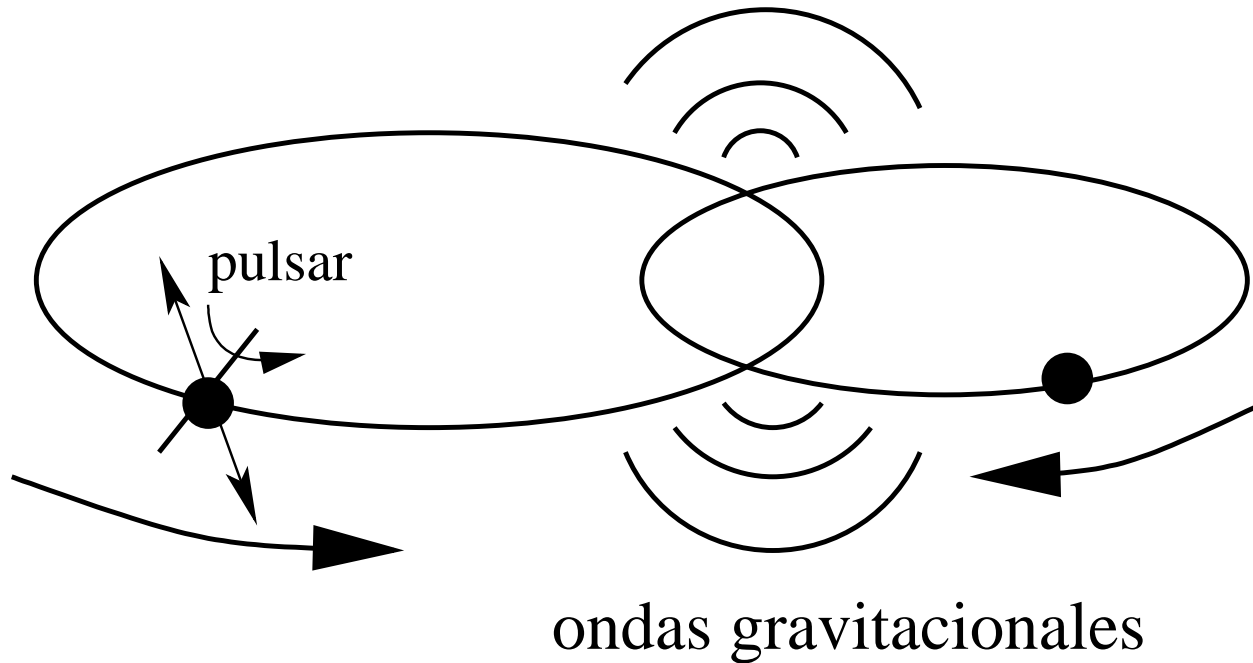
**Para PSR J0737-3039, la elipse rota 17 grados por año**

## **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.**



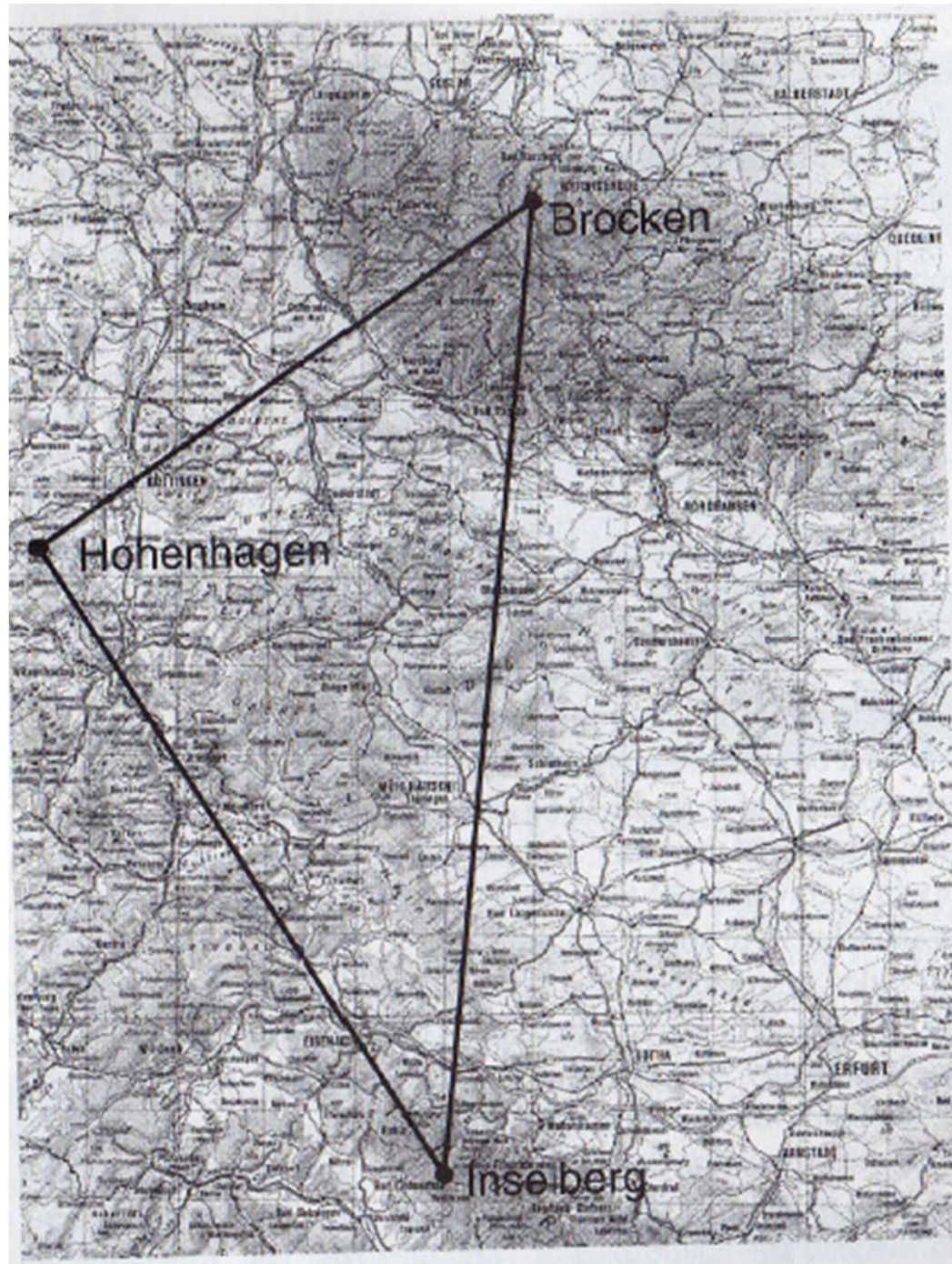
## Instrumento para detectar de ondas gravitacionales (LIGO)

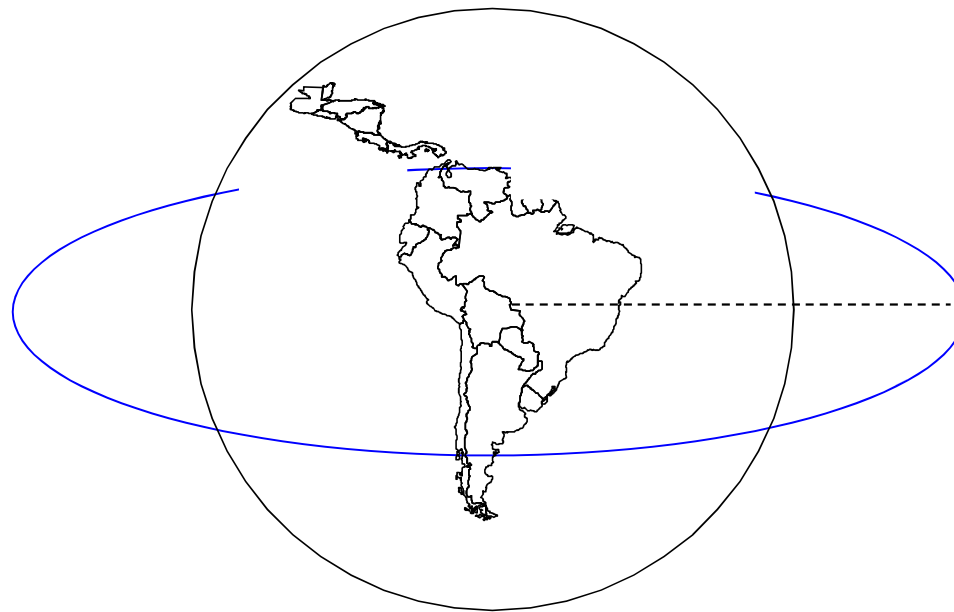




**Volvamos a la geometría.....**

Si se midieran con  
suficiente precisión  
los ángulos, se  
encontraría una  
diferencia de  
 $0,000000000000006$  grados





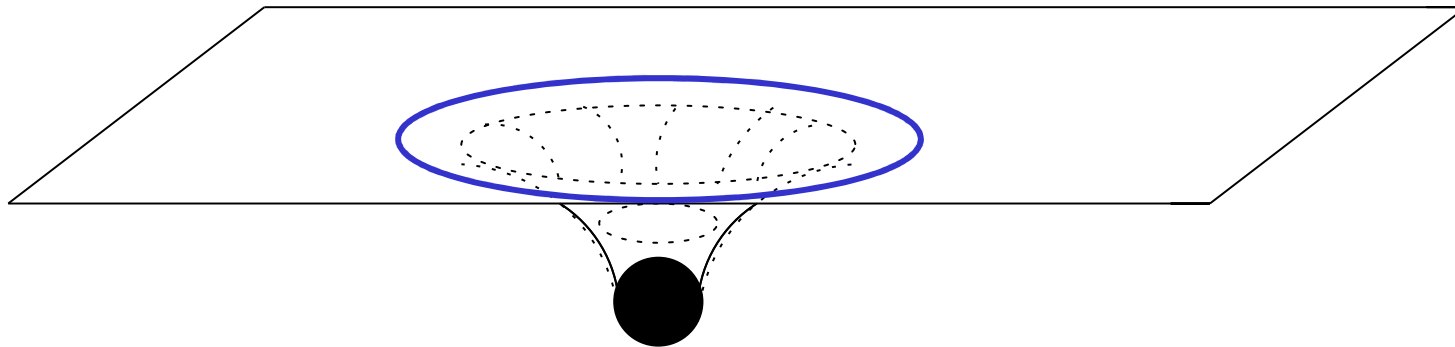
**El perímetro no es igual a  $2 \times 3.14159 \times \text{radio}$ .  
Para la Tierra, es menor en un 0,00000002%**



**perimetro**



**“radio”**

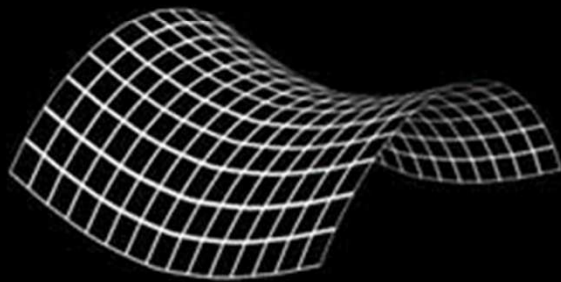


**El perímetro no es igual a  $2 \times 3.14159 \times \text{radio}$**

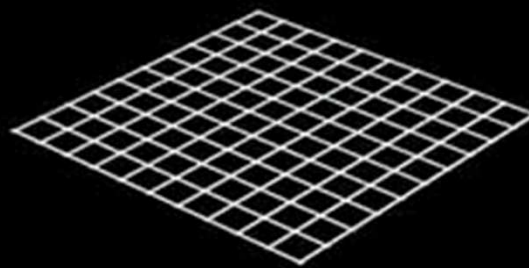
# La geometría del universo A GRAN ESCALA

**El Universo está en expansión (Hubble 1929).**

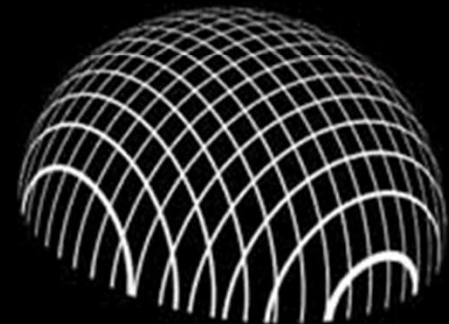
**De acuerdo a la Relatividad General, hay tres posibilidades para la geometría espacial:**



**abierta**



**plana**

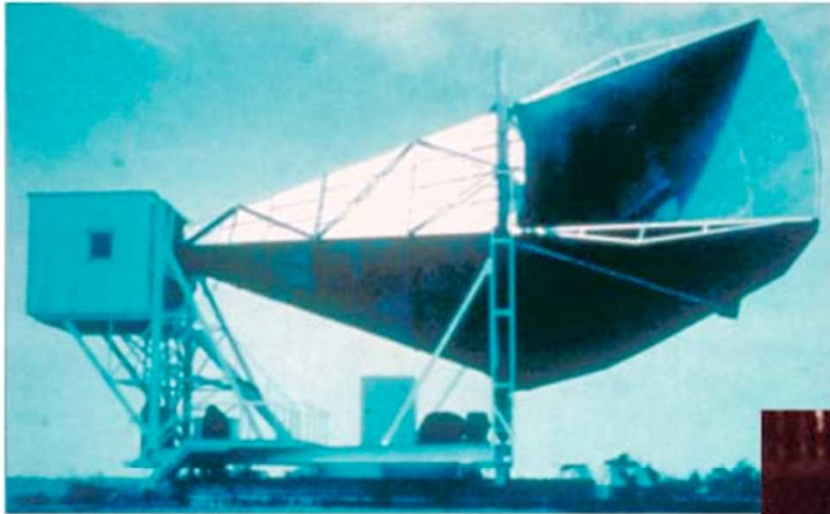


**cerrada**



# Fondo cósmico de microondas: descubrimiento

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

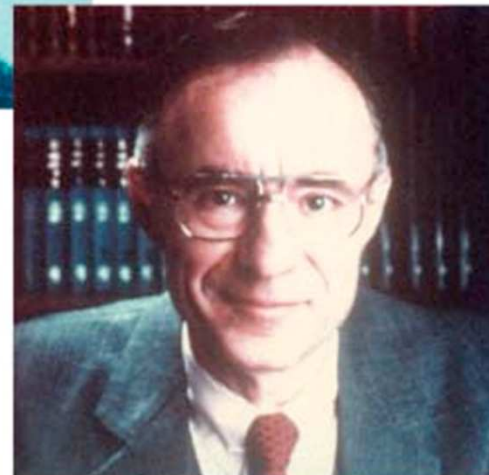


Microwave Receiver



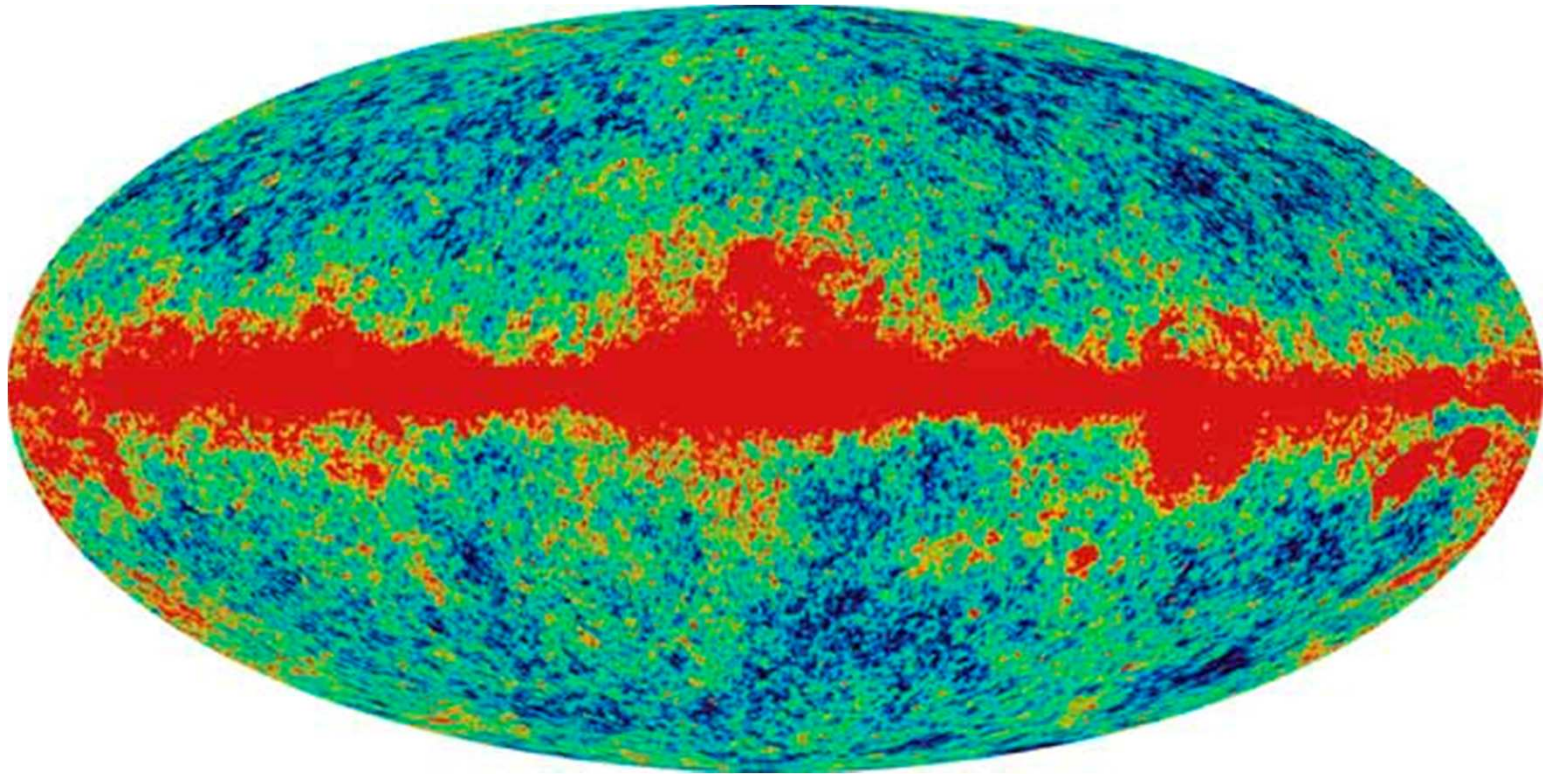
MAP990045

Robert Wilson



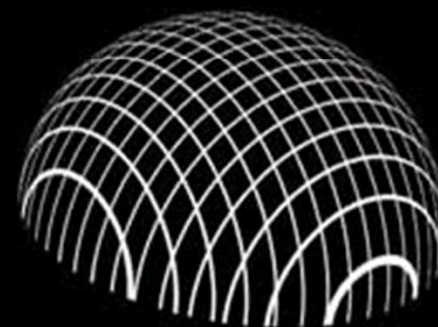
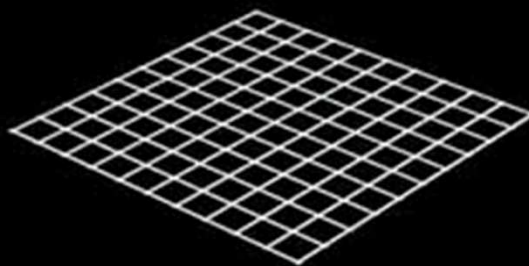
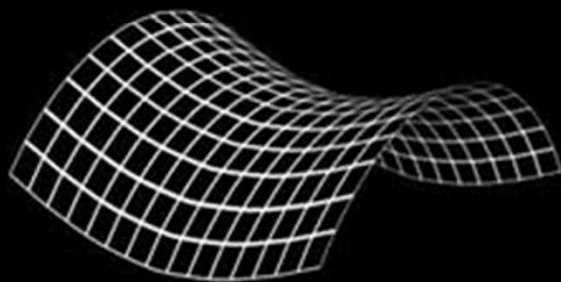
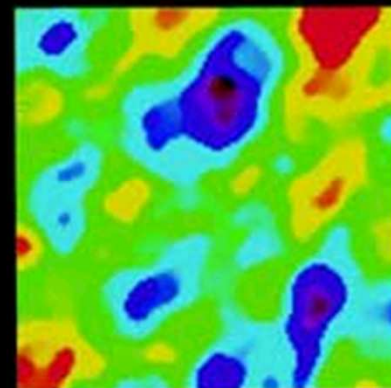
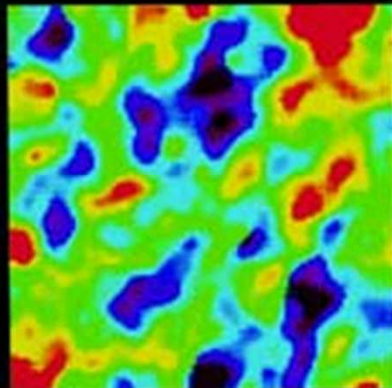
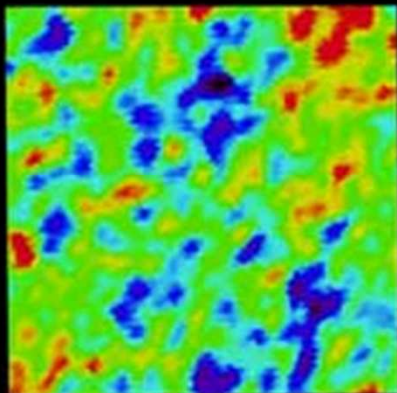
Arno Penzias

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



**Satélite WMAP 2003**

# Podemos medir la geometria del universo!!

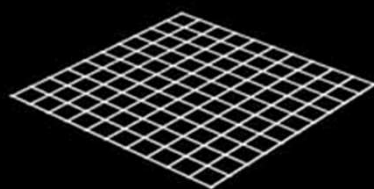


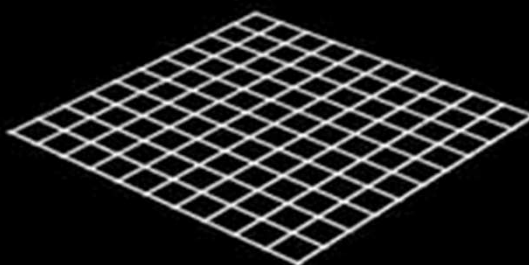
**abierta**

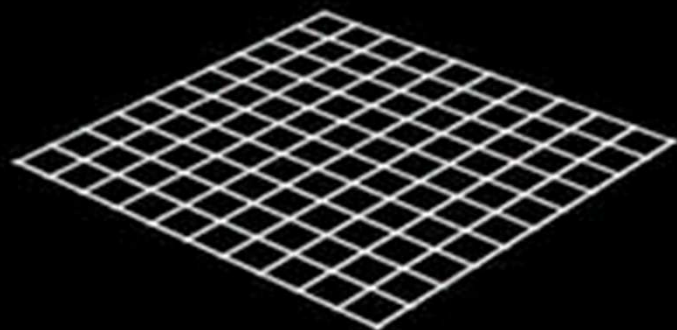
**plana**

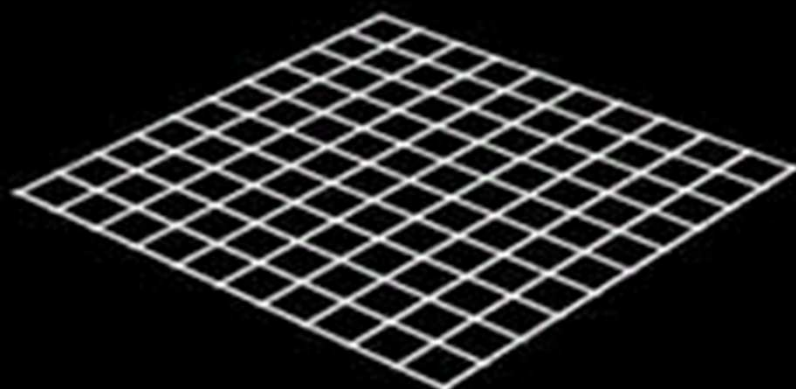
**cerrada**

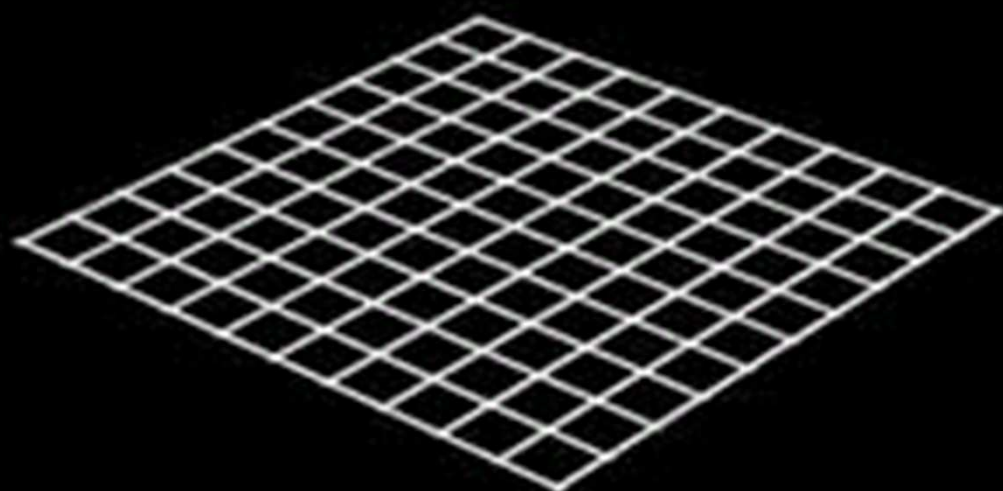


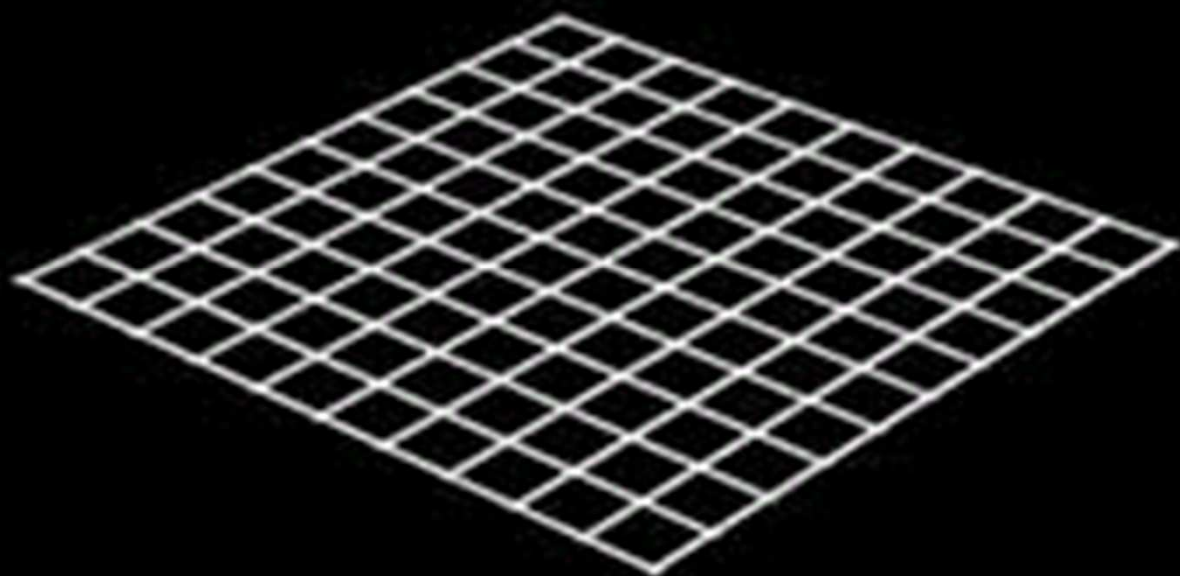


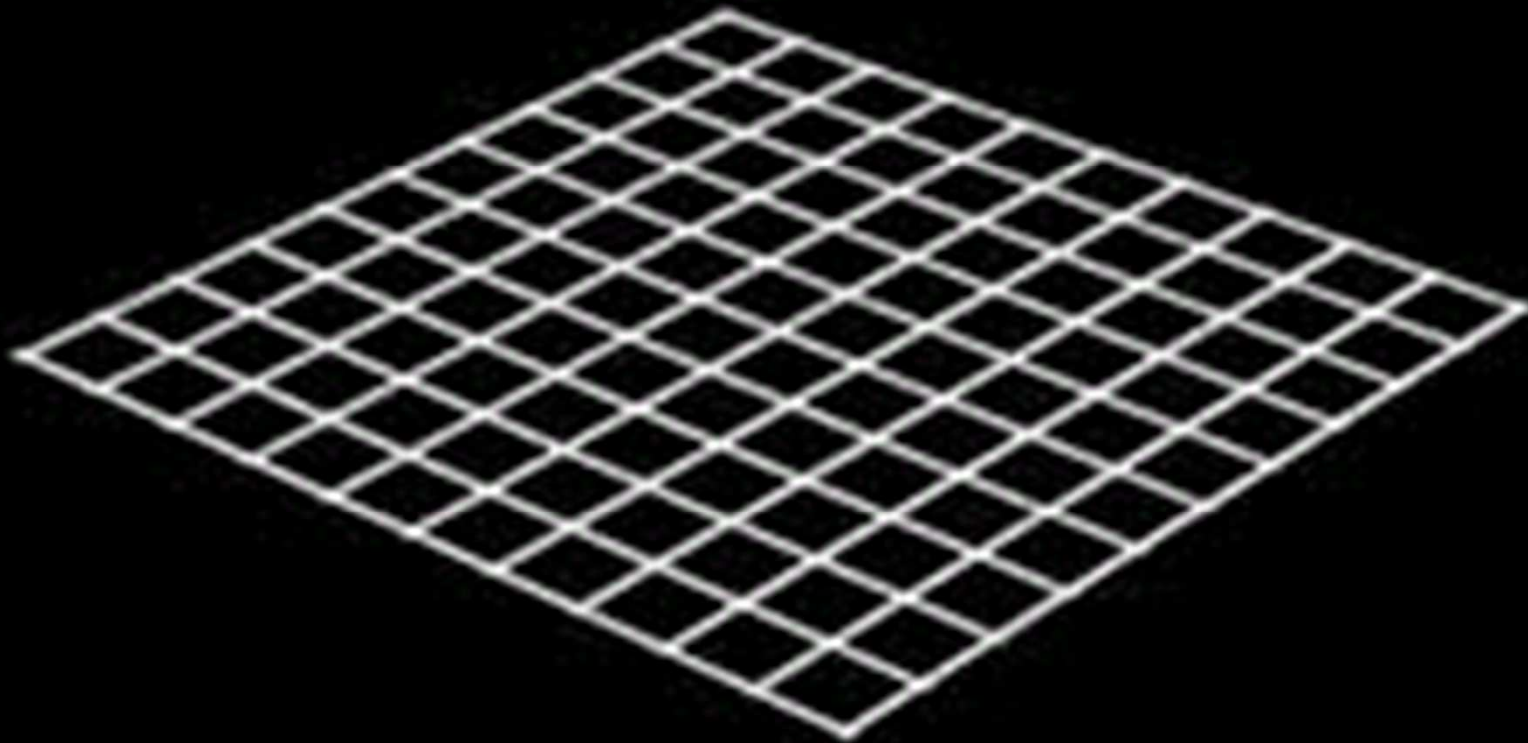












**Debe haber 25% de materia oscura y 70% de energía oscura!!!**

## 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

.....

.....

.....