



GRAVEDAD

esa pequeña gran fuerza

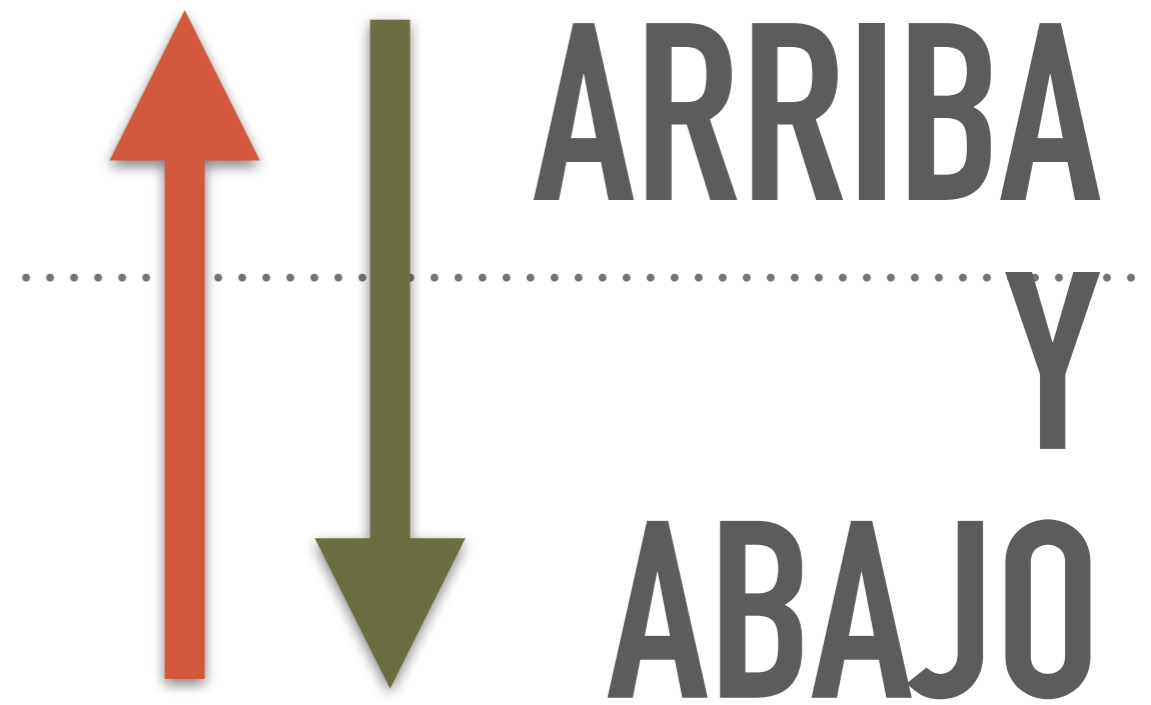
Carlos Román Zúñiga

Instituto de Astronomía, UNAM



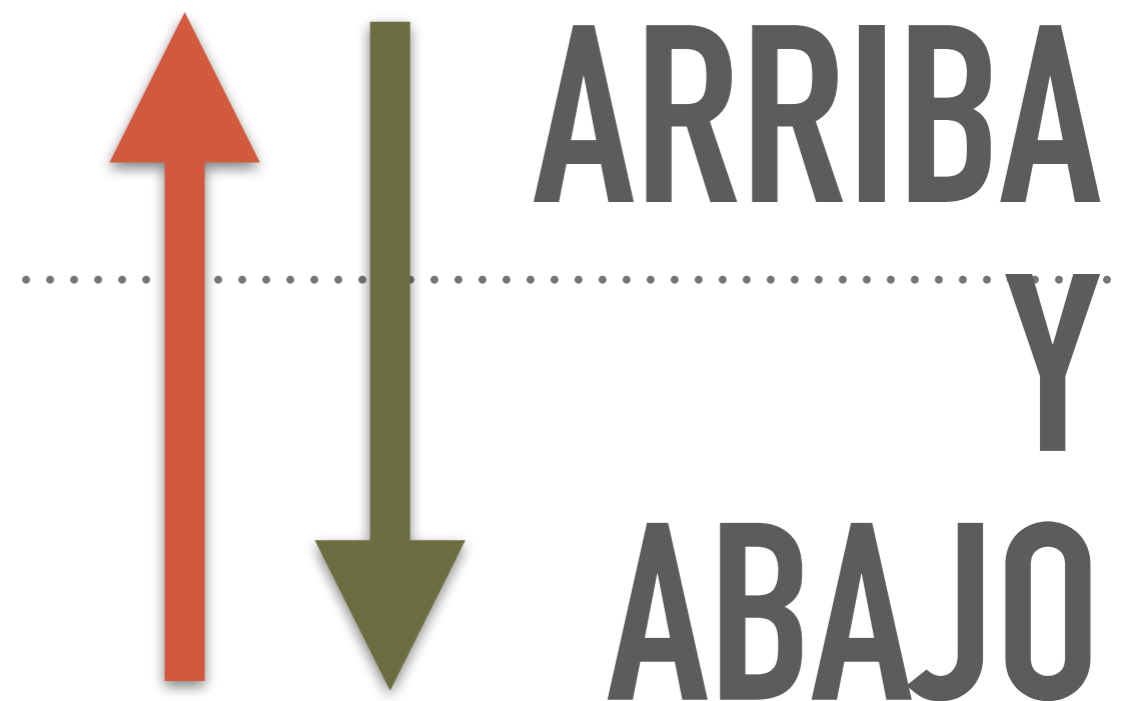


↑
ARRIBA
.....
↓
Y
ABAJO

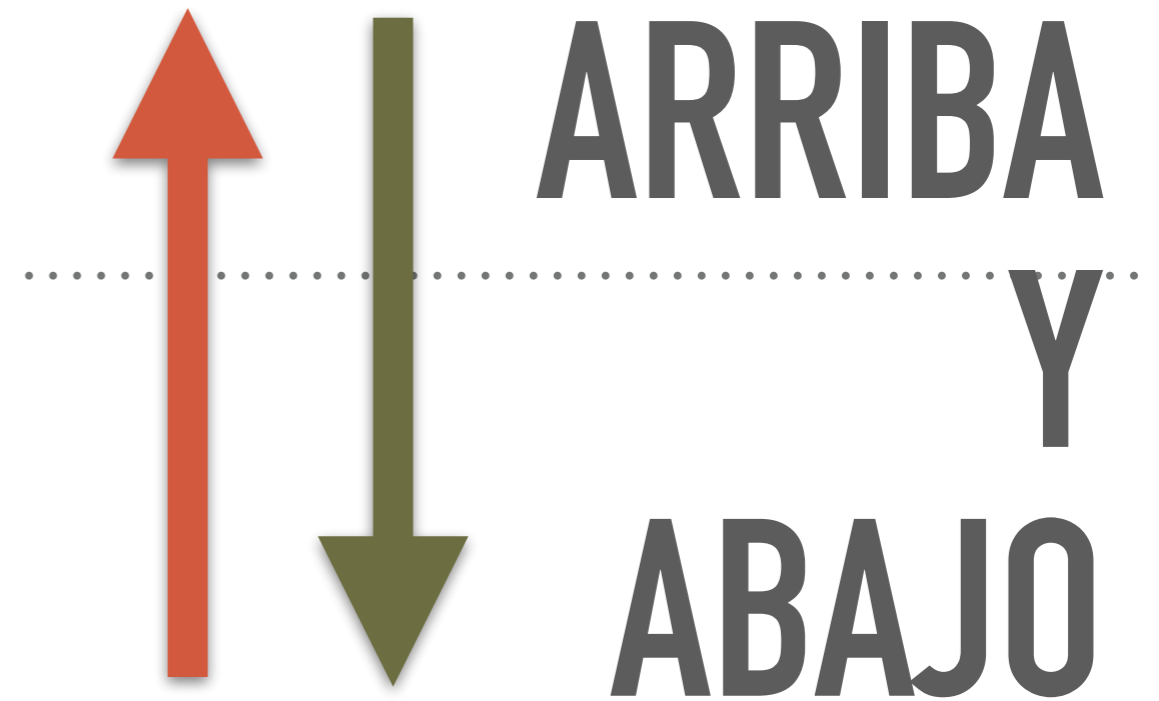


- *Hoy en día la referencia entre arriba y abajo es algo que aprendemos desde que somos muy pequeños. Debería de ser un concepto relativamente fácil de asimilar.*





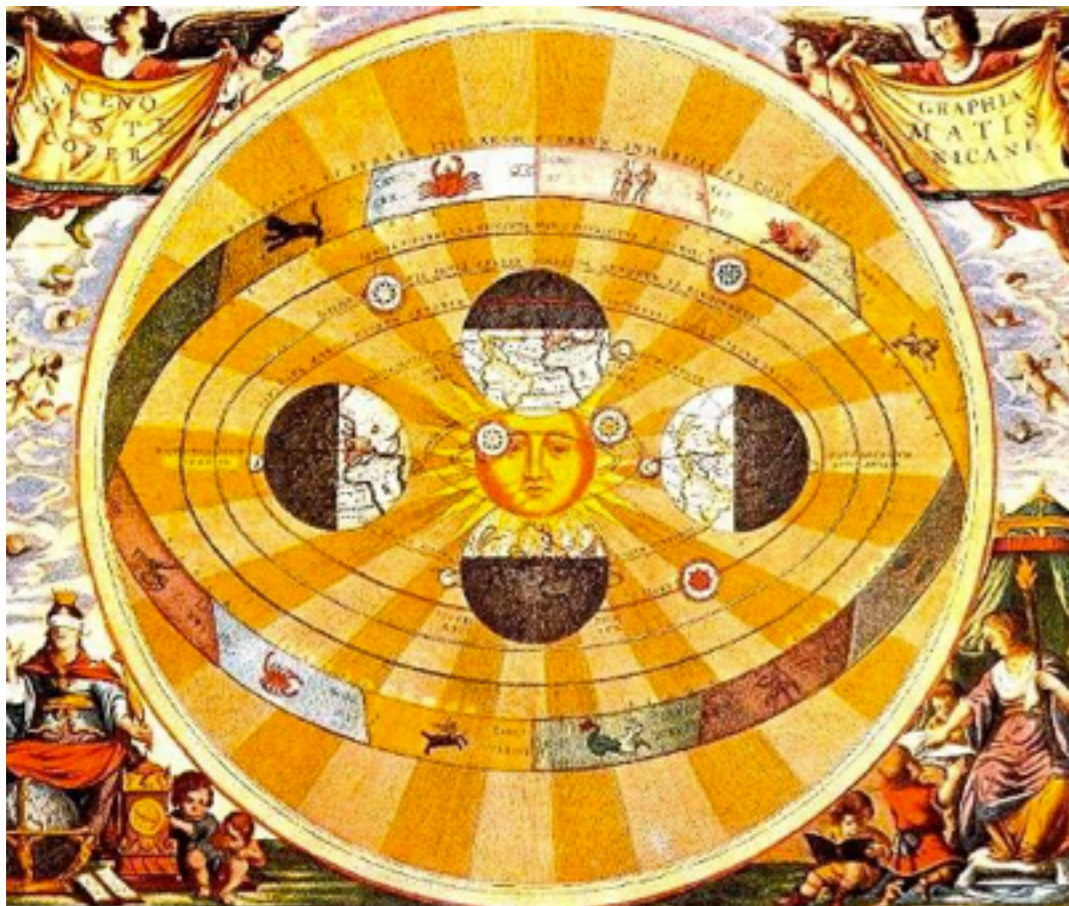
- Hoy en día la referencia entre arriba y abajo es algo que aprendemos desde que somos muy pequeños. Debería de ser un concepto relativamente fácil de asimilar.
- Sin embargo, en una época en que el conocimiento estaba dominado por los preceptos religiosos, la cosa no era tan obvia: la división entre arriba y abajo era antiguamente explicada en términos de la pureza de las cosas. Lo que pertenecía al cielo, podía ascender, y aquello que no merecía ascender, pues permanecía en el suelo o en el peor de los casos, se hundía hacia las profundidades.



- *Hoy en día la referencia entre arriba y abajo es algo que aprendemos desde que somos muy pequeños. Debería de ser un concepto relativamente fácil de asimilar.*
- *Sin embargo, en una época en que el conocimiento estaba dominado por los preceptos religiosos, la cosa no era tan obvia: la división entre arriba y abajo era antiguamente explicada en términos de la pureza de las cosas. Lo que pertenecía al cielo, podía ascender, y aquello que no merecía ascender, pues permanecía en el suelo o en el peor de los casos, se hundía hacia las profundidades.*
- *En un modelo de la Tierra plana, el concepto de gravedad, como hoy lo conocemos, no tiene buena cabida.*

EL UNIVERSO NO ES TAN

SIMPLE DE DESCRIBIR



- Aún con el concepto y demostración de una Tierra esférica y aún con un concepto en el cual las cosas caen hacia el centro de la Tierra, pasó bastante tiempo para que la gravedad se entendiera de manera científica:
- En la filosofía Aristotélica, no existía el método científico, y los conceptos debían de establecerse por argumentos dialécticos. Las cosas caen y punto, no se debe cuestionar porqué.
- En ese marco conceptual, se pensaba que la caída libre era demasiado rápida para que el ojo humano pudiera medirla. Por eso es que nadie se había planteado a la gravedad como la acción de una fuerza. Tampoco tenía lógica plantear que una pluma y una bola de boliche pudieran caer al mismo tiempo al suelo.



LLEGA GALILEO GALILEI.

-
- ¿quién más?
 - La historia del péndulo de Galileo puede tal vez es como la historia de la manzana de Newton: una fábula condimentada. Pero aún así es sumamente didáctica.
 - Galileo notó que cuando el candelabro de la Catedral de Pisa oscilaba, ciertamente la amplitud de la oscilación cambiaba pero no así el periodo de las oscilaciones.
 - Sucesivos experimentos con un péndulo casero mostraron que esto es cierto, pero que además el período de oscilación depende de la longitud de la cuerda, y no de la masa que cuelga.
 - Lo que pasa en un péndulo es que el movimiento vertical, de cada libre de la masa, es afectado por la resistencia de la cuerda y el resultado final es un movimiento en un arco de círculo.
 - No depende de la masa: entonces el problema de la pluma y el plomo, debe tener una solución muy simple. ¿cuál es?

PLOMO O PLUMA $c \neq ?$



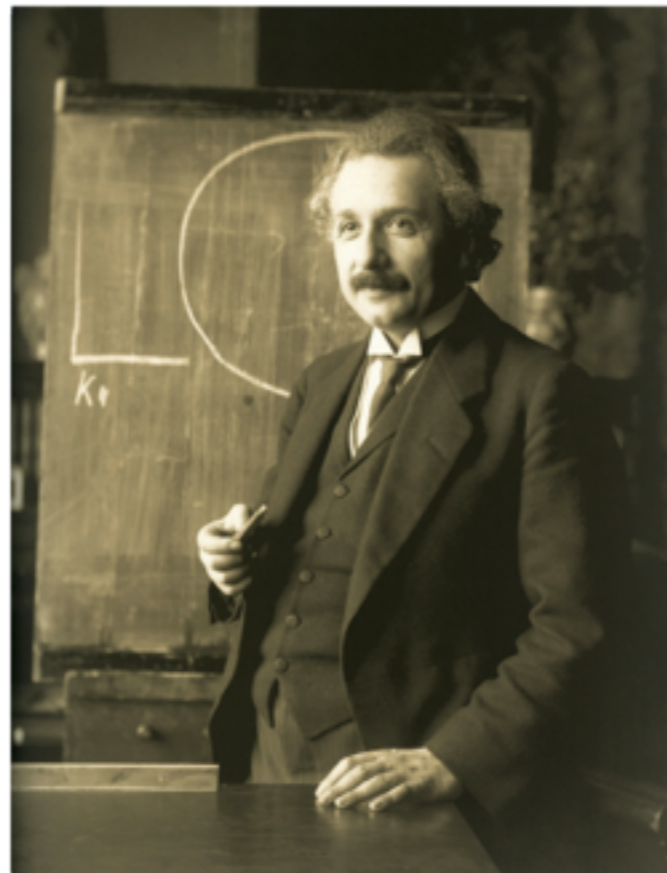
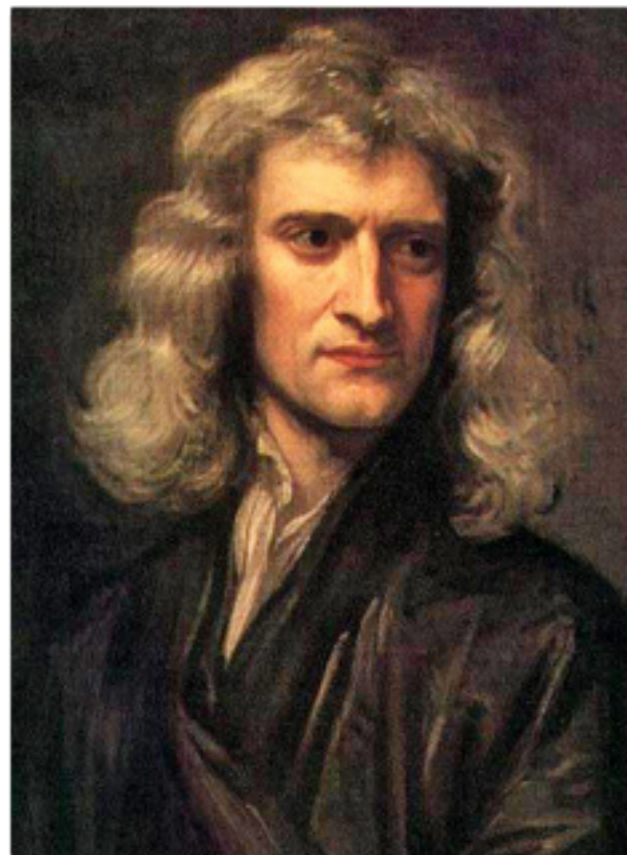
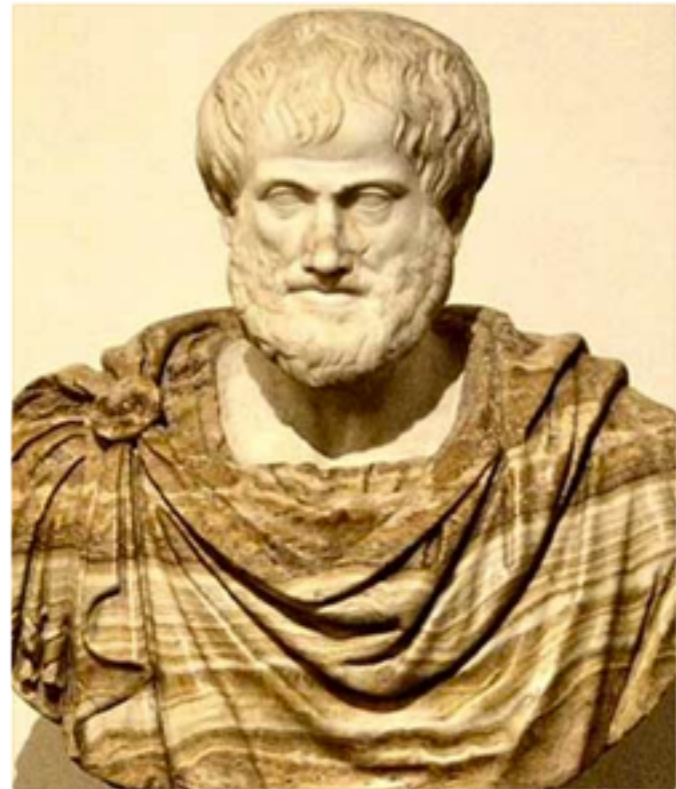
The Human Universe - Brian Cox, BBC 2014

PLOMO O PLUMA



DE ARISTOTELES A EINSTEIN

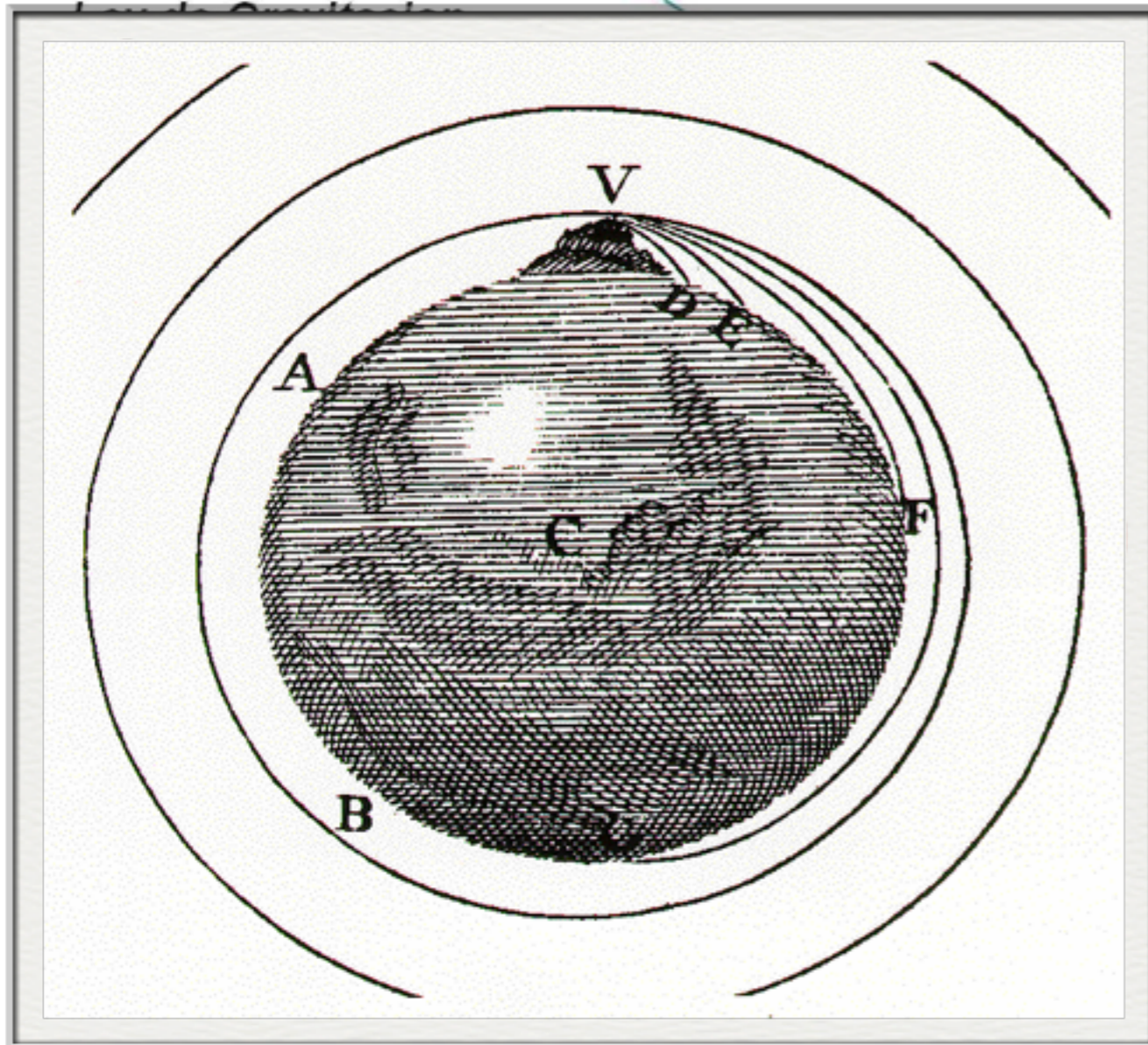
.....



- En el Universo de Aristóteles las cosas se mueven porque un agente las empuja. Por ejemplo el aire (un problema para los arqueros).
- En el Universo de Galileo, el movimiento de caída de un cuerpo no depende de su masa. Movimiento y aceleración.
- En el Universo de Newton, los objetos se aceleran unos hacia los otros porque hay una fuerza universal de atracción.
- En el Universo de Einstein, el espacio tiempo se deforma ante la presencia de la materia y el movimiento de los cuerpos es acorde a esas deformaciones.
- La lección es simple: las cosas nunca terminan de explicarse. Siempre hay más qué entender de cualquier fenómeno.

LEY DE GRAVITACION UNIVERSAL

.....

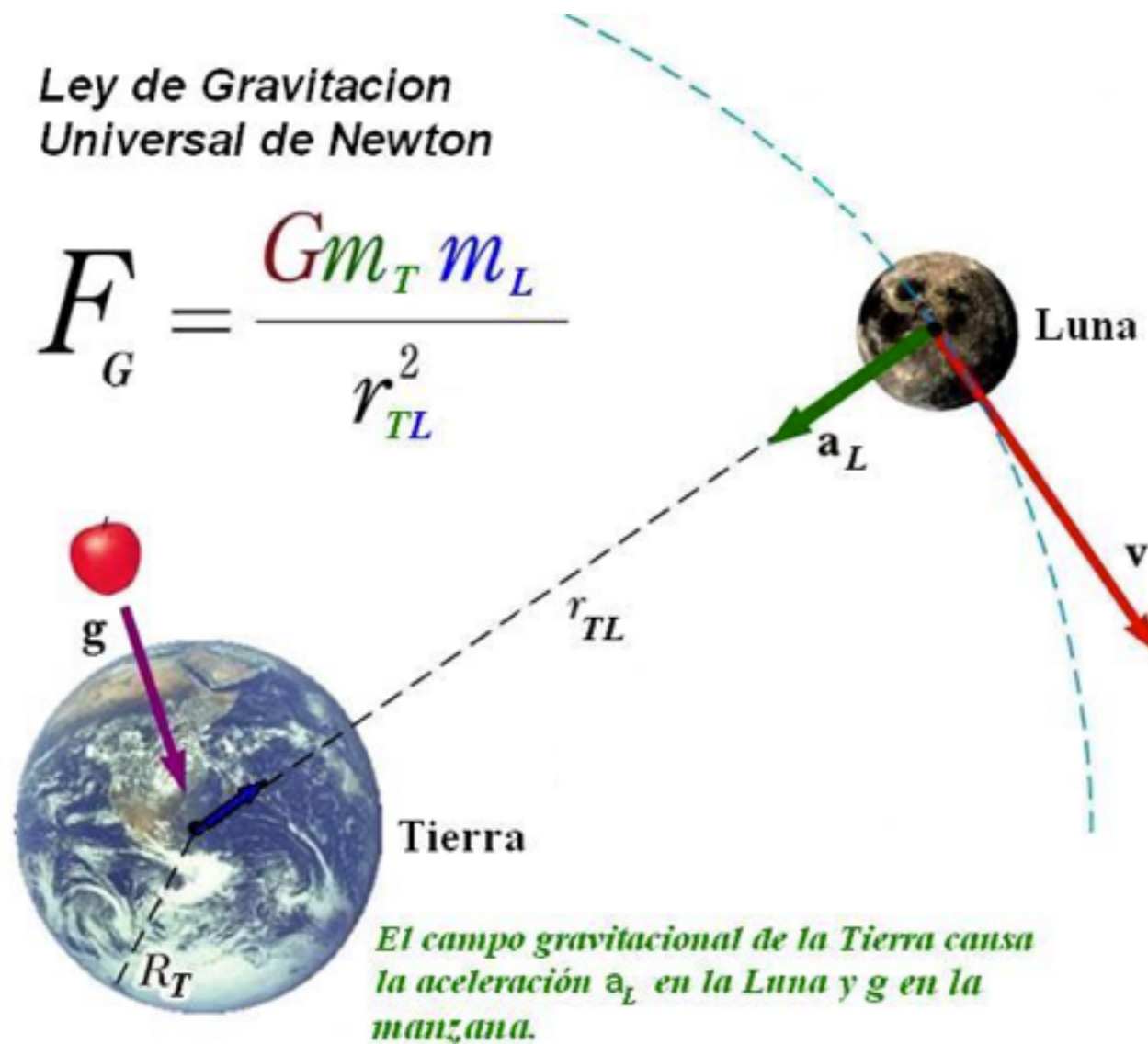


- ▶ La historia de la manzana de Newton nunca ha sido comprobada, pero el razonamiento que siguió posiblemente partió de una idea parecida.
- ▶ Newton comprendió que con suficiente velocidad y en ausencia de aire, un proyectil no tocaría Tierra pero seguiría cayendo hacia ella.
- ▶ Newton usó los argumentos de Galileo para darse cuenta de que la Luna se acelera hacia la Tierra a 0.27 cm/s^2 , que es unas 3640 veces menos que la aceleración de una manzana a corta distancia de la superficie terrestre, que es de 981 cm/s^2 .
- ▶ La manzana se encuentra a unos 6371 km del centro de la Tierra, y la Luna a unos 384 400 km, es decir, 60.1 veces más lejos. Sucede que 3640 es casi exactamente el cuadrado de 60.1
- ▶ Entonces la aceleración entre la Tierra y un objeto cualquiera, es proporcional al cuadrado de la distancia a la que se encuentra. Como además $\text{Fuerza} = \text{Masa} \times \text{aceleración}$, entonces se tiene la Ley de Gravitación Universal.

LEY DE GRAVITACION UNIVERSAL

.....

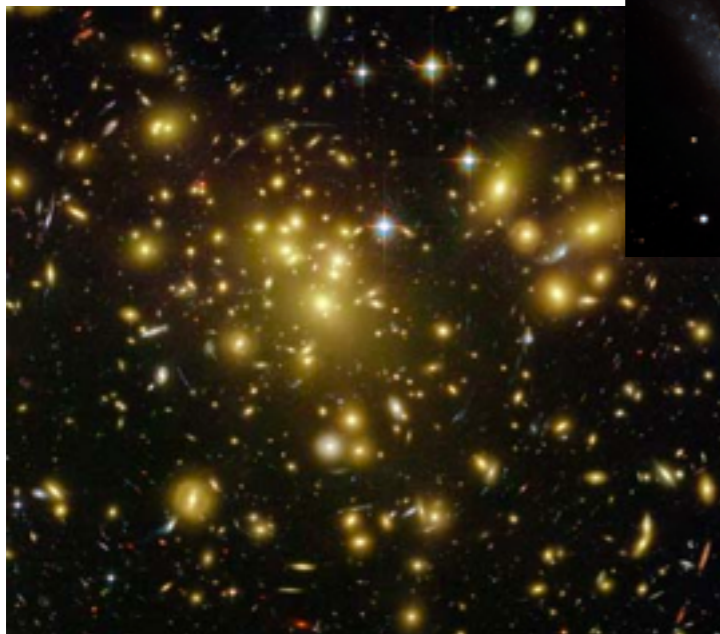
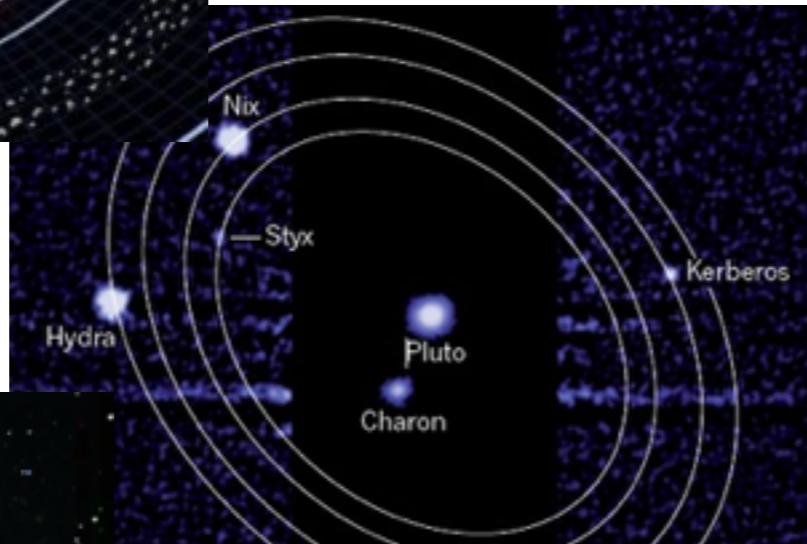
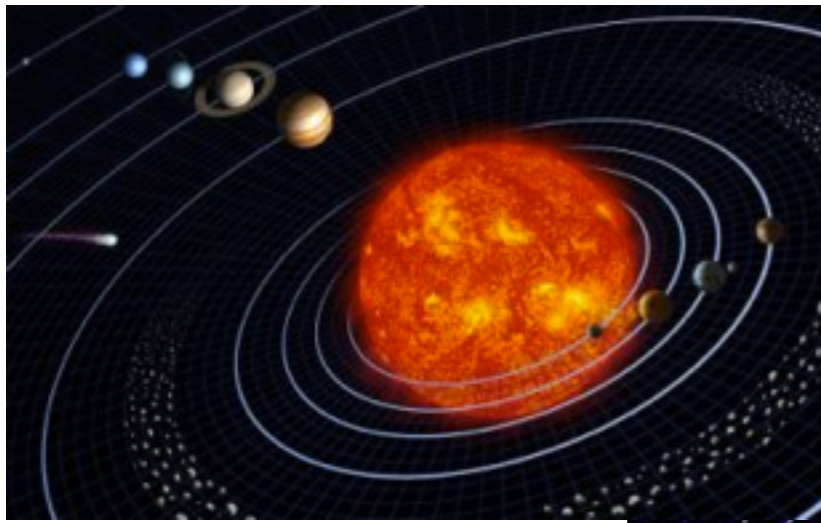
- ▶ La historia de la manzana de Newton nunca ha sido comprobada, pero el razonamiento que siguió posiblemente partió de una idea parecida.
- ▶ Newton comprendió que con suficiente velocidad y en ausencia de aire, un proyectil no tocaría Tierra pero seguiría cayendo hacia ella.
- ▶ Newton usó los argumentos de Galileo para darse cuenta de que la Luna se acelera hacia la Tierra a 0.27 cm/s^2 , que es unas 3640 veces menos que la aceleración de una manzana a corta distancia de la superficie terrestre, que es de 981 cm/s^2 .
- ▶ La manzana se encuentra a unos 6371 km del centro de la Tierra, y la Luna a unos 384 400 km, es decir, 60.1 veces más lejos. Sucede que 3640 es casi exactamente el cuadrado de 60.1
- ▶ Entonces la aceleración entre la Tierra y un objeto cualquiera, es proporcional al cuadrado de la distancia a la que se encuentra. Como además $\text{Fuerza} = \text{Masa} \times \text{aceleración}$, entonces se tiene la Ley de Gravitación Universal.

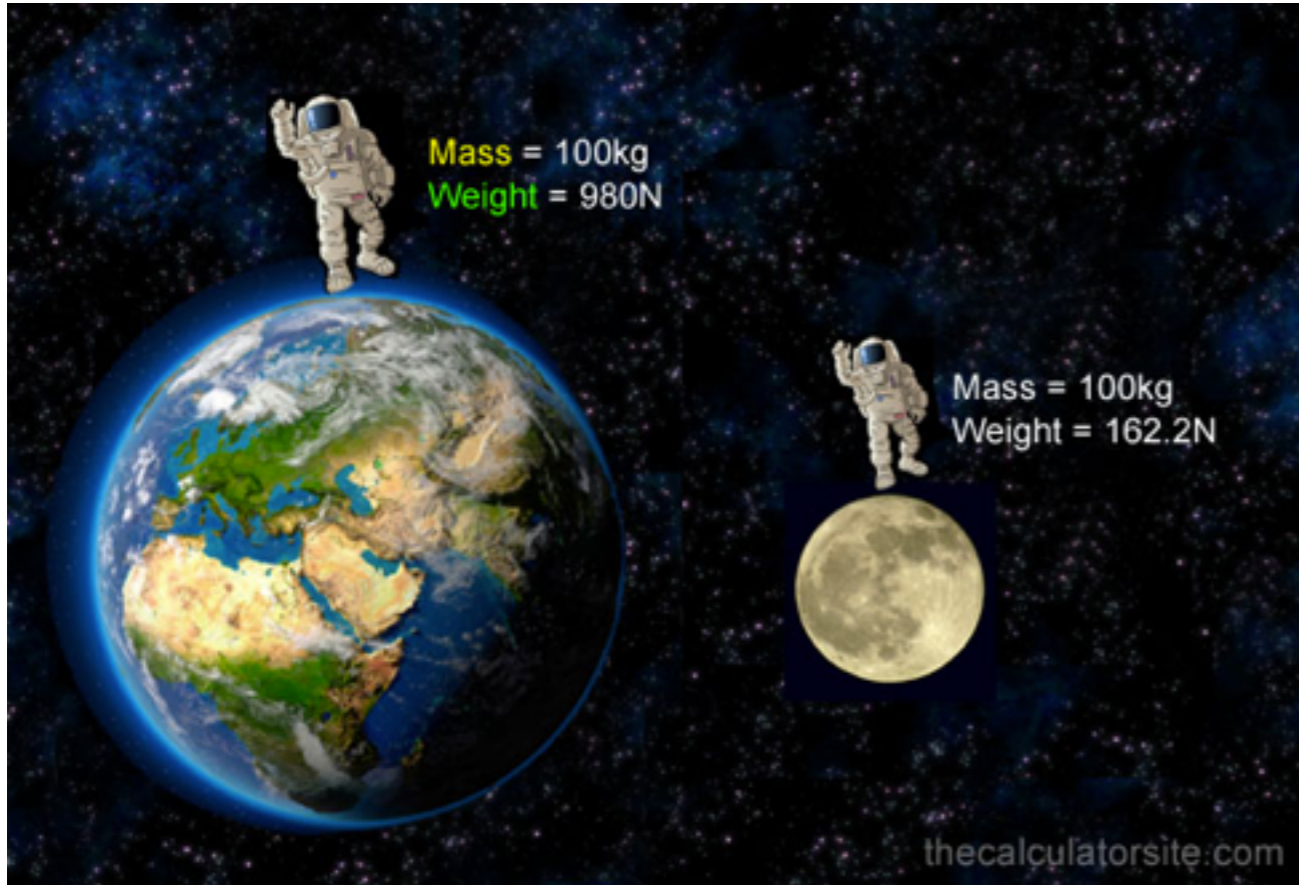


LEY DE GRAVITACIÓN UNIVERSAL

.....

- Hay dos puntos muy importantes acerca de la Ley de Gravitación Universal
- El primero es precisamente ese carácter de Universal. La gravedad no solo actúa entre la Tierra y los objetos cercanos a ella, sino que actúa del mismo modo entre cualesquiera dos objetos con masa: entre dos personas sentadas en el auditorio, entre dos montañas, entre el Sol y los planetas, entre los planetas y sus lunas, entre las estrellas, entre el gas, polvo y estrellas de la galaxia, entre galaxias y grupos de galaxias...
- Con las leyes de Newton (incluida la de gravitación) somos capaces de resolver una variedad enorme de problemas de física, que incluyen hoy en día la exploración del espacio.
- El otro punto importante es que hasta donde podemos observar, no hay una escala límite para la acción de la gravedad. Técnicamente, y por muy pequeña que sea, una masa en un extremo del Universo está siendo atraída por otra masa en el otro extremo.





PESO VS. MASA. VELOCIDAD DE ESCAPE

-
- Aunque a algunos les pueda parecer obvio, es útil aclarar que hay una diferencia entre hablar de masa y peso:
 - cuando hablamos de la masa de un objeto, estamos hablando de la cantidad de materia que compone a dicho objeto. Esa cantidad, en principio no varía de un lugar a otro (a menos que...)
 - cuando hablamos de peso, estamos hablando del producto de masa por la aceleración de la gravedad local. El peso SI varía por lo tanto de un lugar a otro, pues la aceleración de la gravedad puede variar. Por ejemplo, en la Tierra, nuestro peso puede llegar a ser 0.25 menor en los polos que en el Ecuador. Si nos movemos a otro cuerpo celeste, pues la diferencia será aún mayor.
 - La gravedad de un cuerpo también define la llamada velocidad de escape, que es la velocidad a la que necesitamos acelerar un cuerpo desde el reposo, para que pueda salir del campo gravitatorio de el objeto más grande, como un planeta. En la Tierra, esta velocidad es de 11.2 km/s o 40 mil km. por hora! No en balde se requiere un cohete poderoso para lograrlo.
 - En la Luna, la velocidad de escape es mucho menor, 2.4 km/s (8640 km por hora). Si quisiéramos escapar del Sol, necesitaríamos acelerarnos hasta una velocidad de 400 km/s o 2 millones 340 mil kilómetros por hora!!!

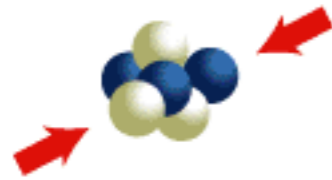
$$v_{escape} = 11.2 \text{ km / s}$$

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{GMm}{r}$$

$$v_{escape} = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

GRAVEDAD VS. OTRAS FUERZAS DE LA NATURALEZA

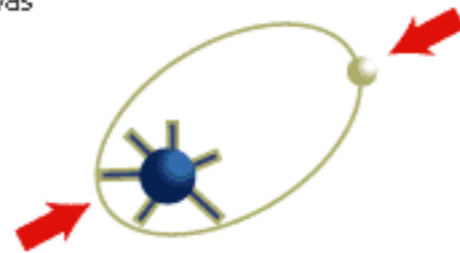
FUERZA NUCLEAR FUERTE
Partícula de intercambio: gluón
Acción: mantiene unido el núcleo atómico



FUERZA ELECTROMAGNÉTICA
Partícula de intercambio: fotón
Acción: mantiene el átomo unido



FUERZA GRAVITATORIA
Partícula de intercambio: gravitón
Acción: rige el movimiento de los planetas

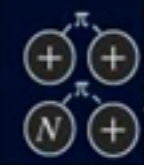

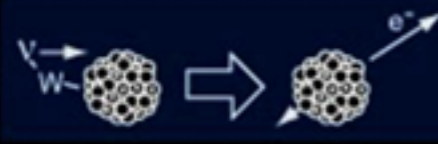



FUERZA NUCLEAR DÉBIL
Partícula de intercambio: partículas W^{\pm} y Z^0
Acción: provoca desintegraciones radiactivas



Fuente: CERN, Ginebra

- Una pregunta que se daría naturalmente de esta discusión es: ¿qué pasa hacia escalas más cortas? ¿sigue dominando la gravedad como la fuerza principal cuando nos vamos al mundo microscópico?
- La respuesta es no: la gravedad en realidad es una de cuatro fuerzas fundamentales. Las otras tres son la fuerza electromagnética, la fuerza nuclear débil y la fuerza nuclear fuerte. De las cuatro, la menos potente es la gravedad.

Fuerzas Fundamentales				
		Intensidad Relativa	Alcance (m)	Partícula
Fuerte		10^{38}	10^{-15} Diametro de un núcleo de tamaño mediano	Gluones
Electromagnética		10^{36}	∞ Infinito	Fotones
Débil		10^{25}	10^{-18} 0.1% del diametro de un proton	Bosones W y Z
Gravitatoria		1	∞ Infinito	Gravitones (Hipotético)

GRAVEDAD VS. OTRAS FUERZAS DE LA NATURALEZA



- Por ejemplo, la fuerza electromagnética es esencial para mantener unidos a los protones y electrones de los átomos y moléculas.
- La fuerza de atracción eléctrica entre las cargas opuestas de un electrón y un protón es 10^{36} veces más intensa que la fuerza de gravedad entre ambas partículas.
- La fuerza electromagnética, sin embargo, no parece tampoco tener una escala límite. Eso es esencial para otro fenómeno clave en el Universo: la generación de radiación electromagnética (luz). Los fotones son la partícula mediadora de la fuerza electromagnética.
- Otro aspecto importante: la fuerza electromagnética también decae con el cuadrado de la distancia.

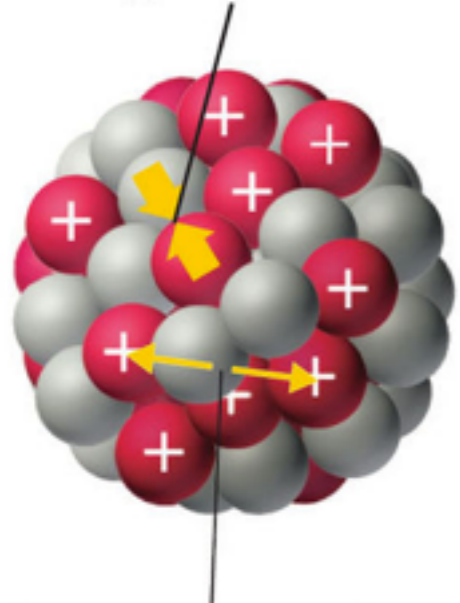
Fuerzas Fundamentales

		Intensidad Relativa	Alcance (m)	Partícula
Fuerte		10^{38}	10^{-15} Diametro de un nucleo de tamaño mediano	Gluones
Electromagnética		10^{36}	∞ Infinito	Fotones
Débil		10^{25}	10^{-18} 0.1% del diametro de un proton	Bosones W y Z
Gravitatoria		1	∞ Infinito	Gravitones (Hipotético)

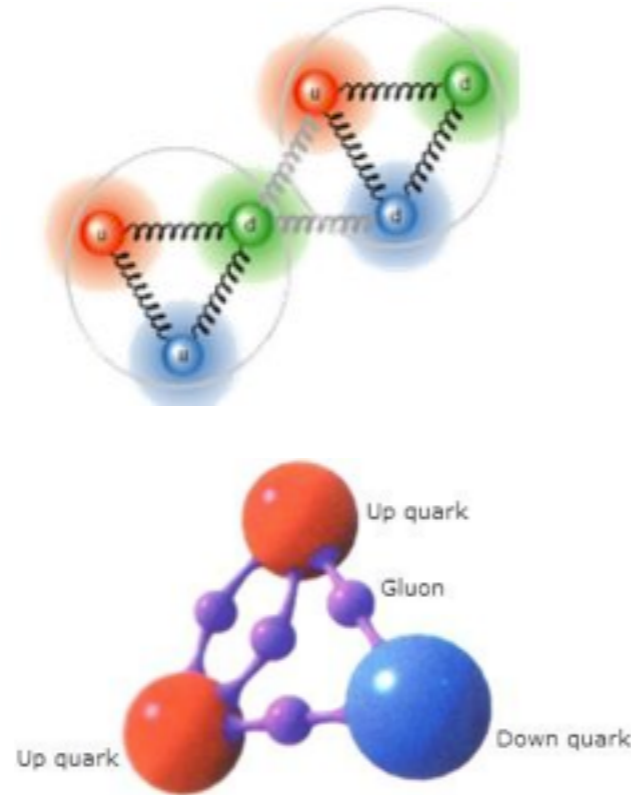
La interacción de los neutrinos induce el decaimiento beta

GRAVEDAD VS. OTRAS FUERZAS DE LA NATURALEZA

Strong nuclear force

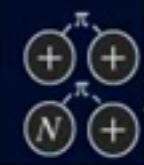

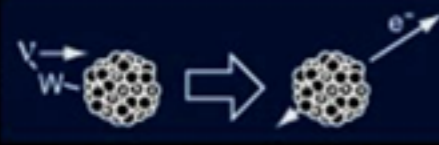
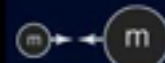


Electrostatic repulsion

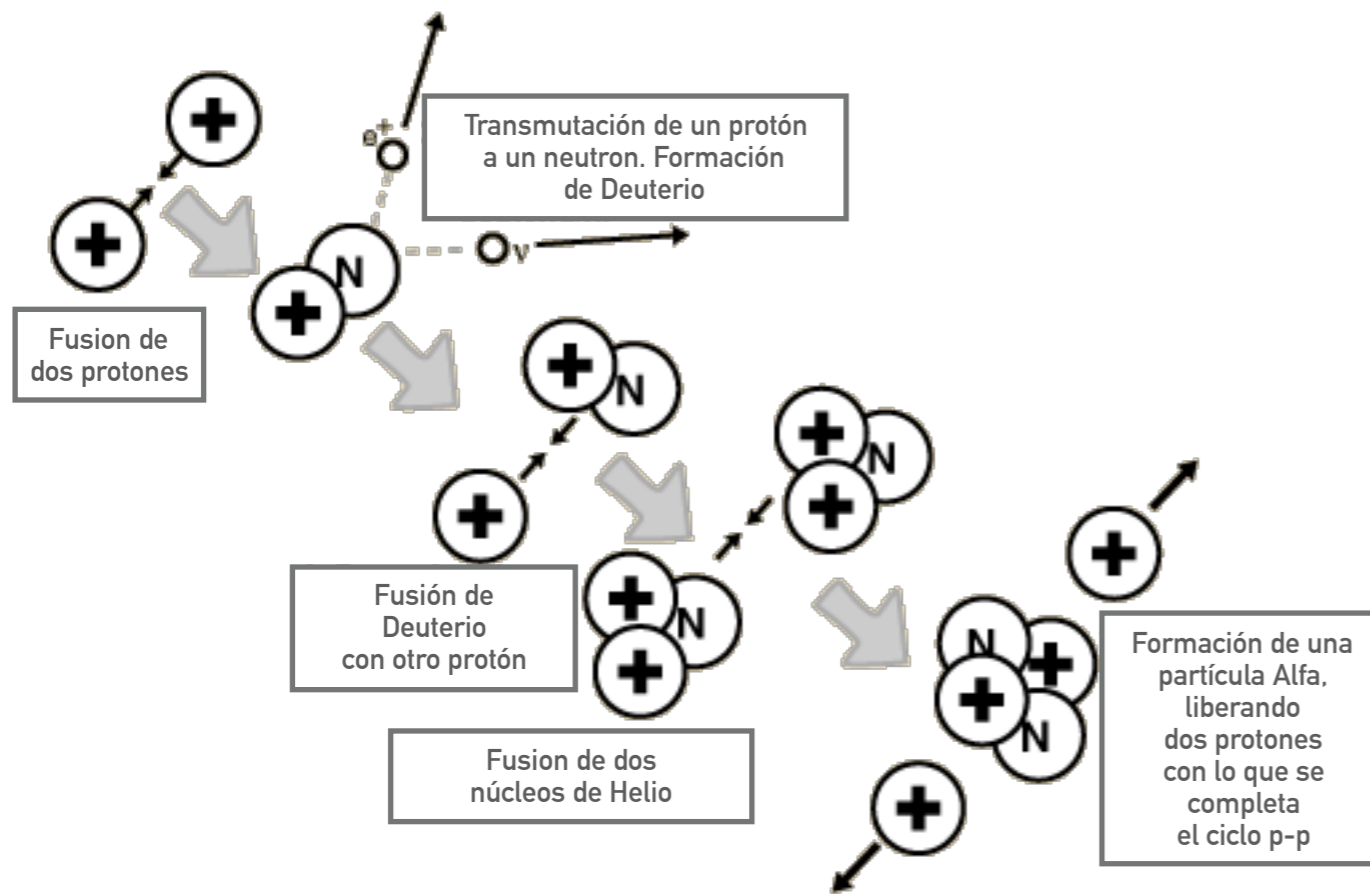


- La fuerza nuclear fuerte es otra fuerza que si la pensamos, tiene más lógica que las otras: ¿cómo hace la naturaleza para mantener unidas a partículas con la misma carga eléctrica en los núcleos de los átomos, si en principio se repelen con la misma intensidad que dos partículas de carga opuesta se atraen?
- Esta es la fuerza más intensa que posee la naturaleza, y es 100 veces más intensa que la fuerza electromagnética.
- Sin embargo, su gran diferencia con la gravedad y el electromagnetismo es su alcance, que no pasa de 10^{-15} metros, es decir el diámetro típico de un núcleo atómico.
- La partícula mediadora de esta fuerza, es el gluón, que actúa entre partículas aún más pequeñas que componen a los protones y los neutrones, llamados quarks. Estos quarks tienen una propiedad llamada "color" que es la fuente de la fuerza fuerte.

Fuerzas Fundamentales

	Intensidad Relativa	Alcance (m)	Particula
Fuerte  Fuerza que mantiene al núcleo unido	10^{38}	10^{-15} Diámetro de un núcleo de tamaño mediano	Gluones
Electromagnética 	10^{36}	∞ Infinito	Fotones
Débil  La interacción de los neutrinos induce el decaimiento beta	10^{25}	10^{-18} 0.1% del diámetro de un proton	Bosones W y Z
Gravitatoria 	1	∞ Infinito	Gravitones (Hipotético)

GRAVEDAD VS. OTRAS FUERZAS DE LA NATURALEZA



- La fuerza nuclear débil, por otra parte es necesaria para cambiar el “sabor” de algunos quarks, de modo que un protón pueda convertirse en un neutrón.
- Esta transmutación es necesaria para que pueda existir el ciclo protón-protón, responsable de la fusión nuclear que transforma hidrógeno en helio en los núcleos de las estrellas.
- Otros procesos de fusión nuclear (como el ciclo del helio o el ciclo del carbón) son esenciales para formar elementos más pesados en las estrellas.
- La interacción nuclear débil es también responsable del decaimiento Beta, en el cual se liberan electrones desde los núcleos de los átomos durante transmutaciones de proton a neutrón, y este proceso es también esencial para formar ciertos elementos.
- La fuerza nuclear débil solo puede actuar a distancias de aprox. 1/10 del radio del protón. Las partículas mensajeras de esta fuerza son los llamados Bosones W y Z.
- En la llamada época electrodébil del Universo, 10^{-36} segundos después del Big Bang, las fuerzas electromagnética y nuclear débil eran una sola: la fuerza electrodébil, pues mediaban a energías similares. Cuando el Universo se enfrió, estas fuerzas se separaron.

Fuerzas Fundamentales

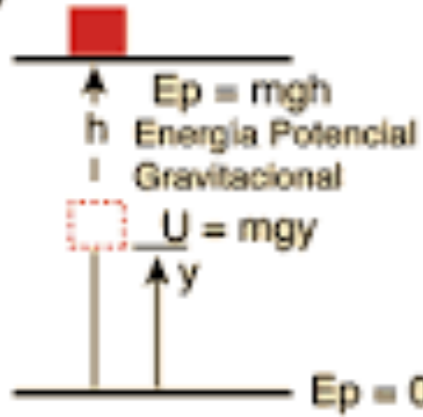
		Intensidad Relativa	Alcance (m)	Partícula
Fuerte		10^{38}	10^{-15} Diametro de un nucleo de tamaño mediano	Gluones
Electromagnética		10^{36}	∞ Infinito	Fotones
Débil		10^{25}	10^{-18} 0.1% del diametro de un proton	Bosones W y Z
Gravitatoria		1	∞ Infinito	Gravitones (Hipotético)

La interacción de los neutrinos induce el decaimiento beta

INTERMEZZO. POTENCIALIALES Y CAMPOS

$$F_y = - \frac{dU}{dy} = - \frac{d}{dy} (mgy)$$

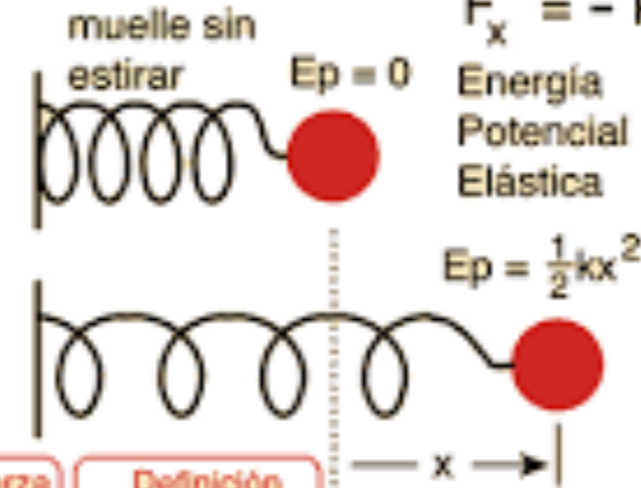
$$F_y = - mg$$



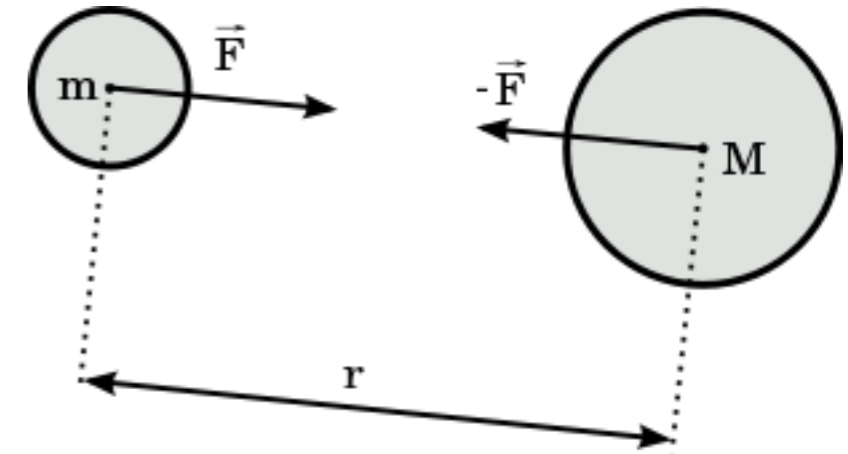
Integral de fuerza y potencial

$$F_x = - \frac{dU}{dx} = - \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{2} kx^2 \right)$$

$$F_x = - kx$$

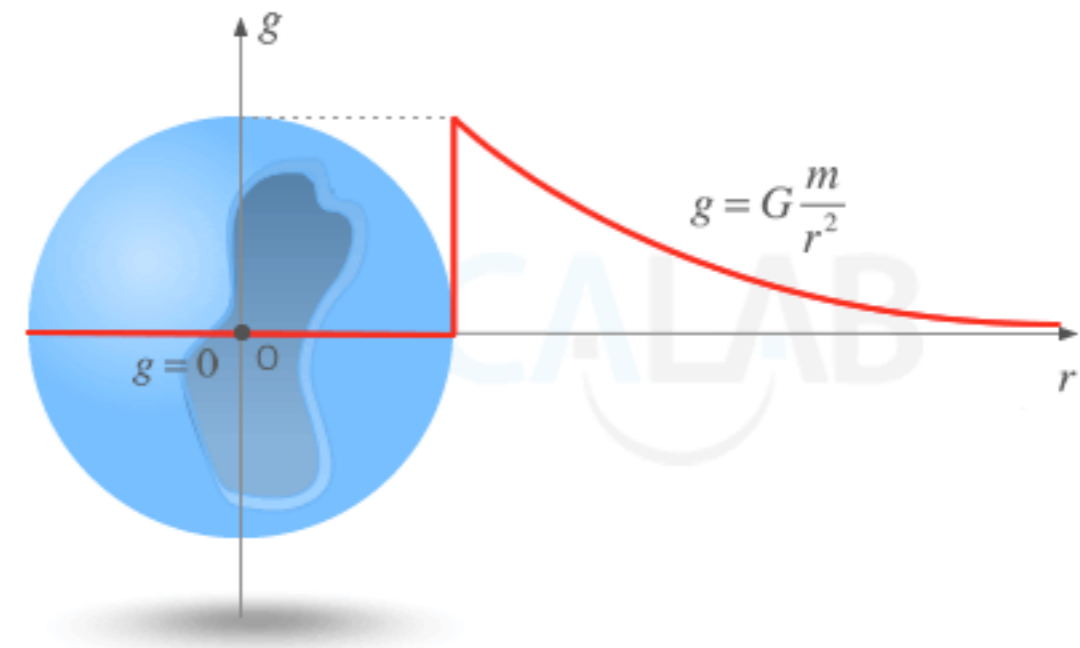
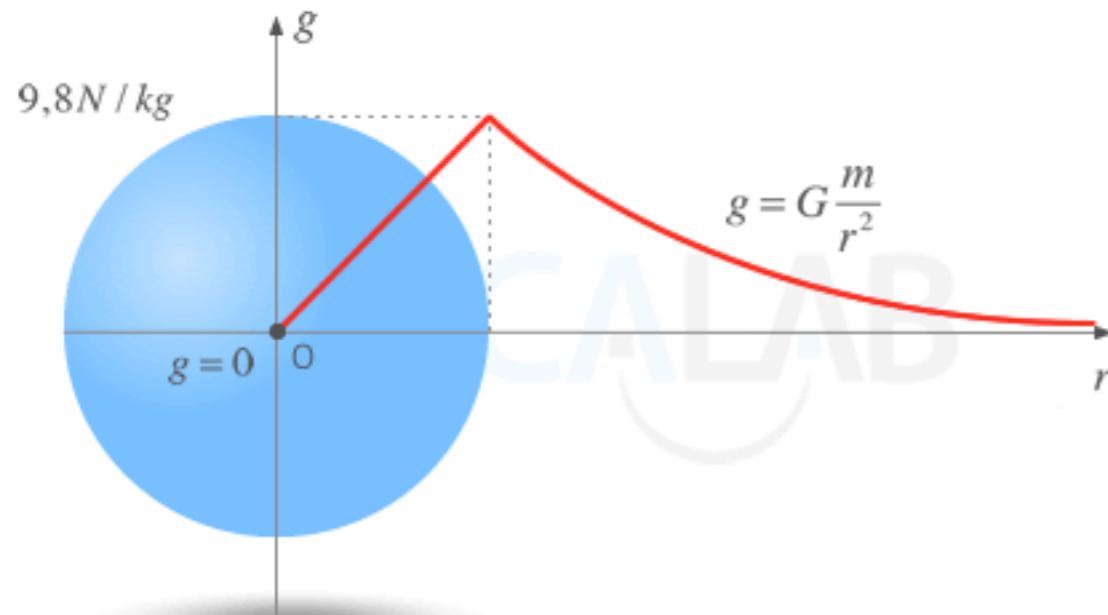


Definición matemática



$$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

$$G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$$



GRAVEDAD VS. OTRAS FUERZAS DE LA NATURALEZA

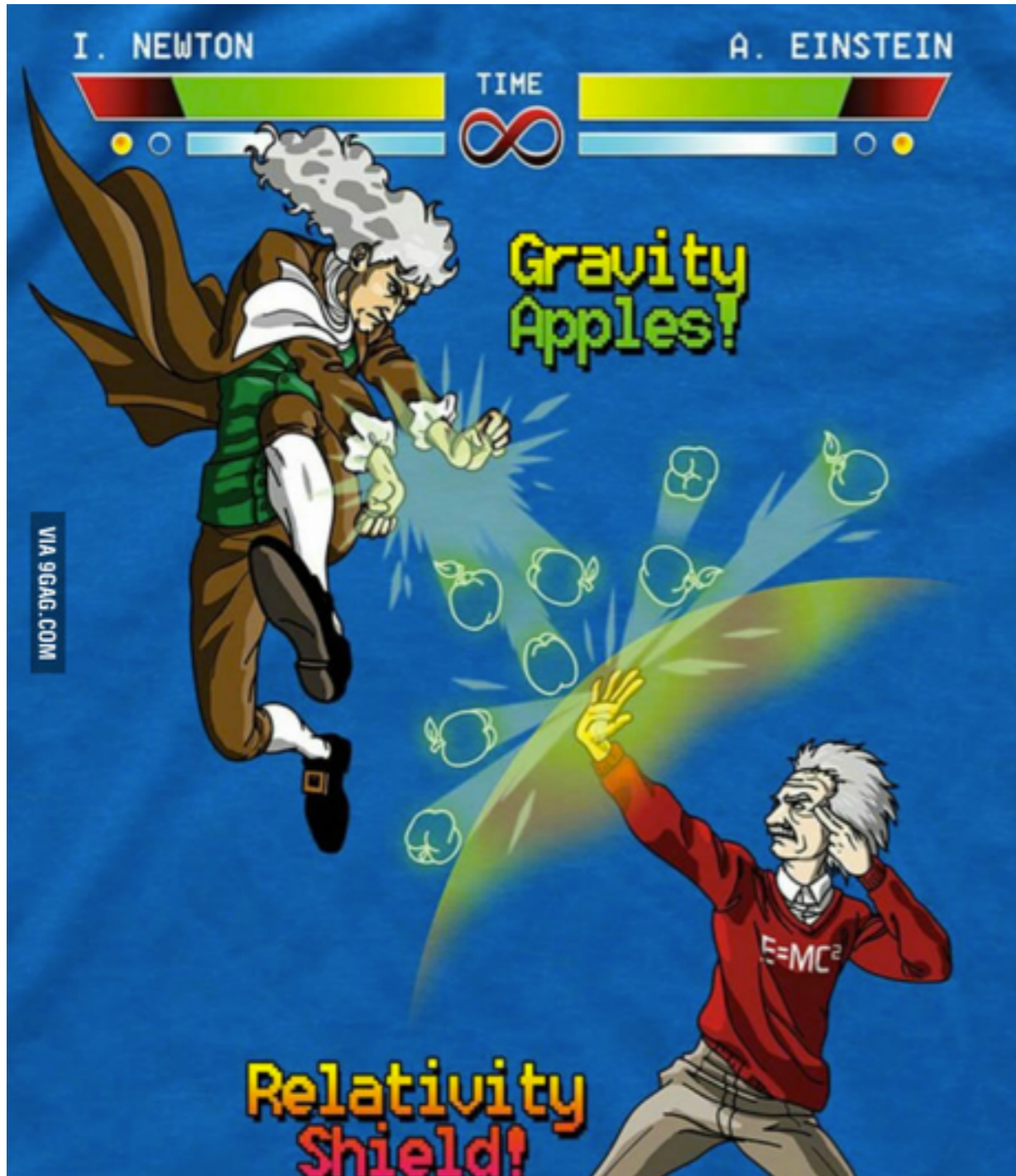
.....



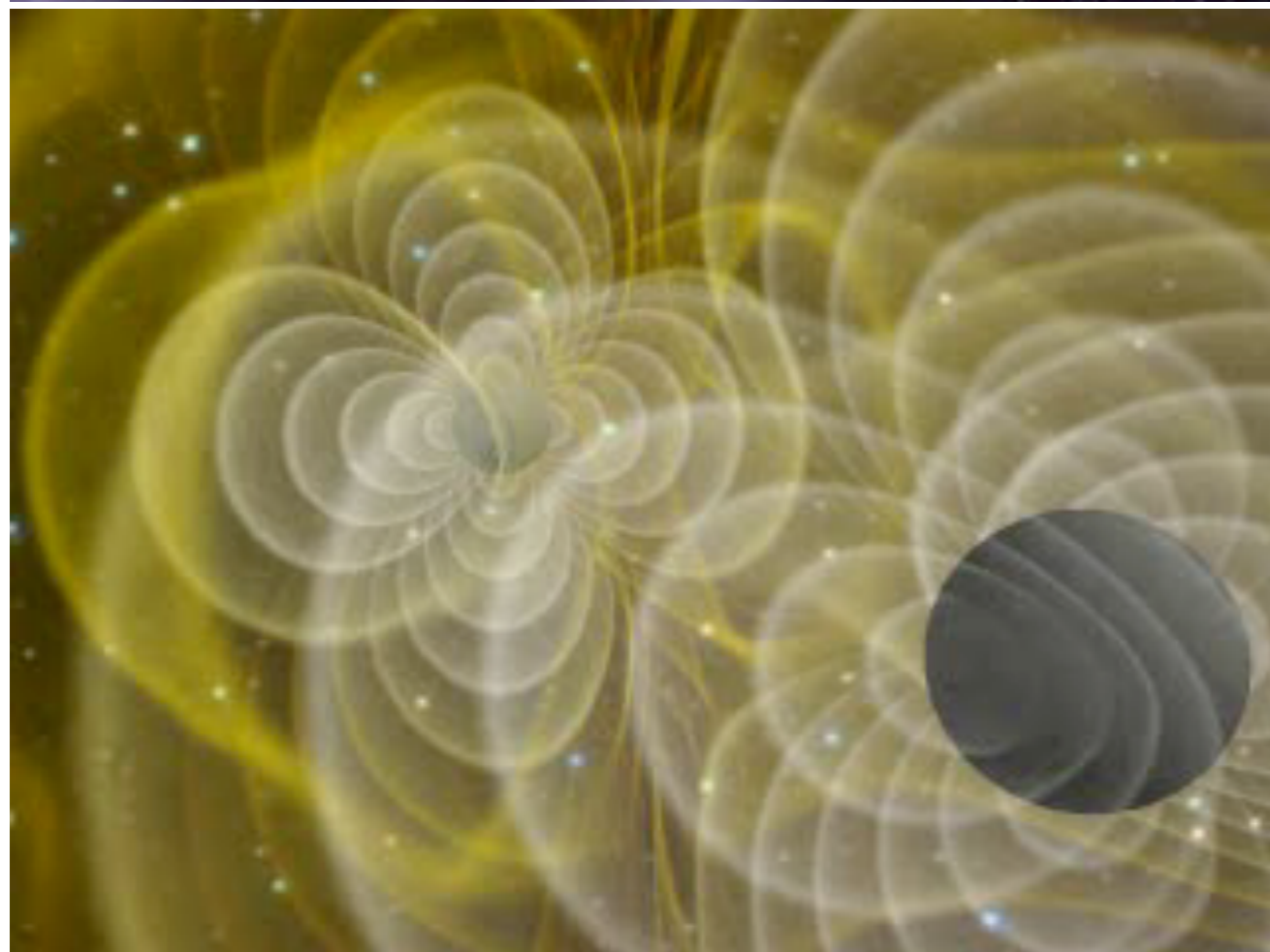
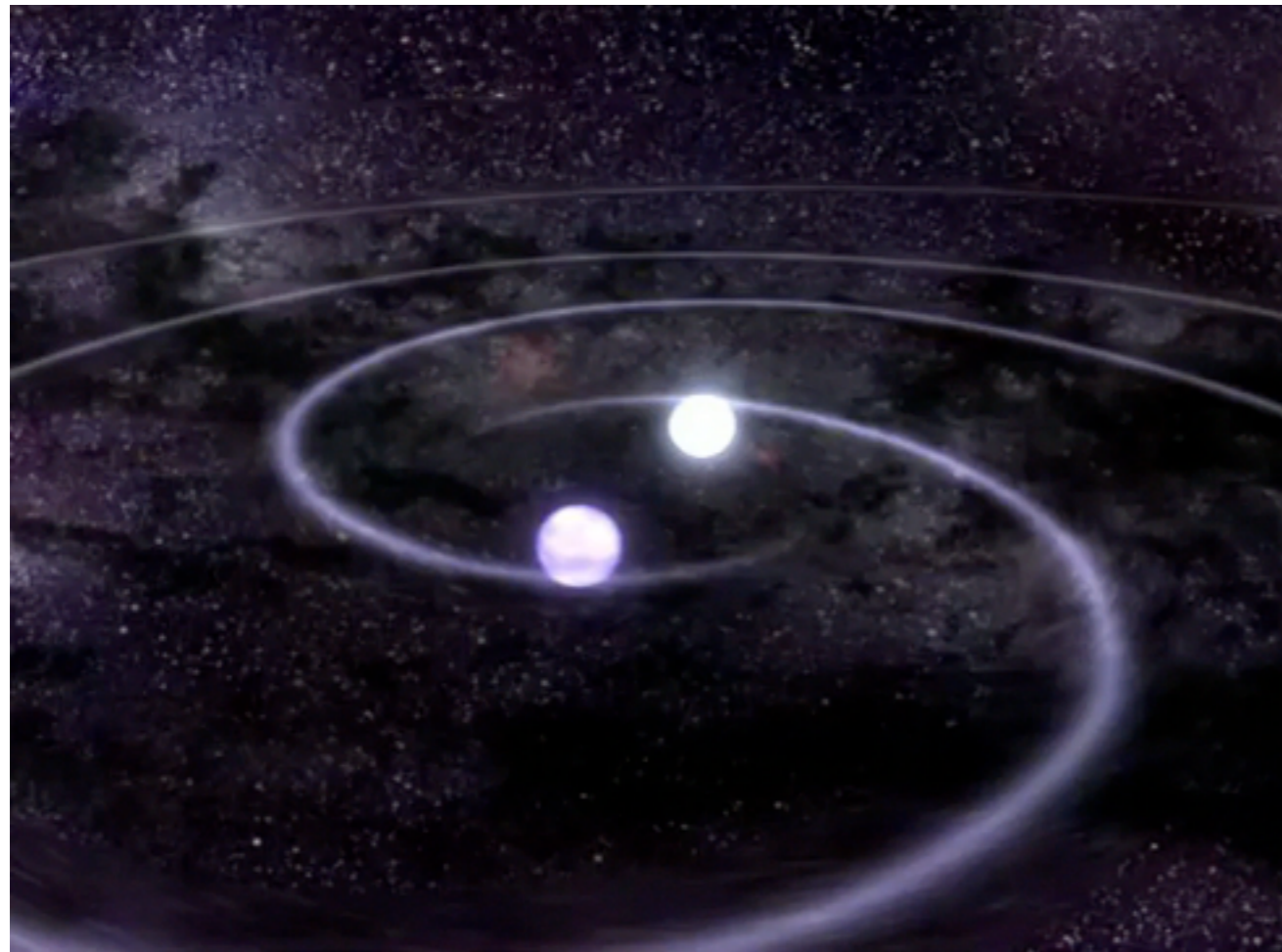
- Resumiendo lo anterior: no es que la Fuerza gravitatoria sea una fuerza débil del Universo. A final de cuentas es la fuerza que domina a las escalas a las que el Universo se mueve y expande.
- Pero a las escalas a las que se define la composición básica de la materia, la Gravedad es mucho más débil como fuerza, que las otras tres.
- Otra diferencia fundamental es que las fuerzas electromagnética, nuclear débil y nuclear fuerte se definen mediante lo que llamamos **campos cuánticos**, es decir que actúan en acciones individuales o discretas. En cambio, la gravedad se define como un **campo clásico** que no es discreto sino continuo.
- Por último, los campos cuánticos requieren para actuar, de la mediación de una partícula mensajera (fotón, bosón, gluón), pero para la gravedad dicha partícula aún no se ha encontrado, pero si le ha teorizado y puesto nombre: se llama **gravitón**.

DE NEWTON A EINSTEIN: EL ESPACIO CURVO

.....



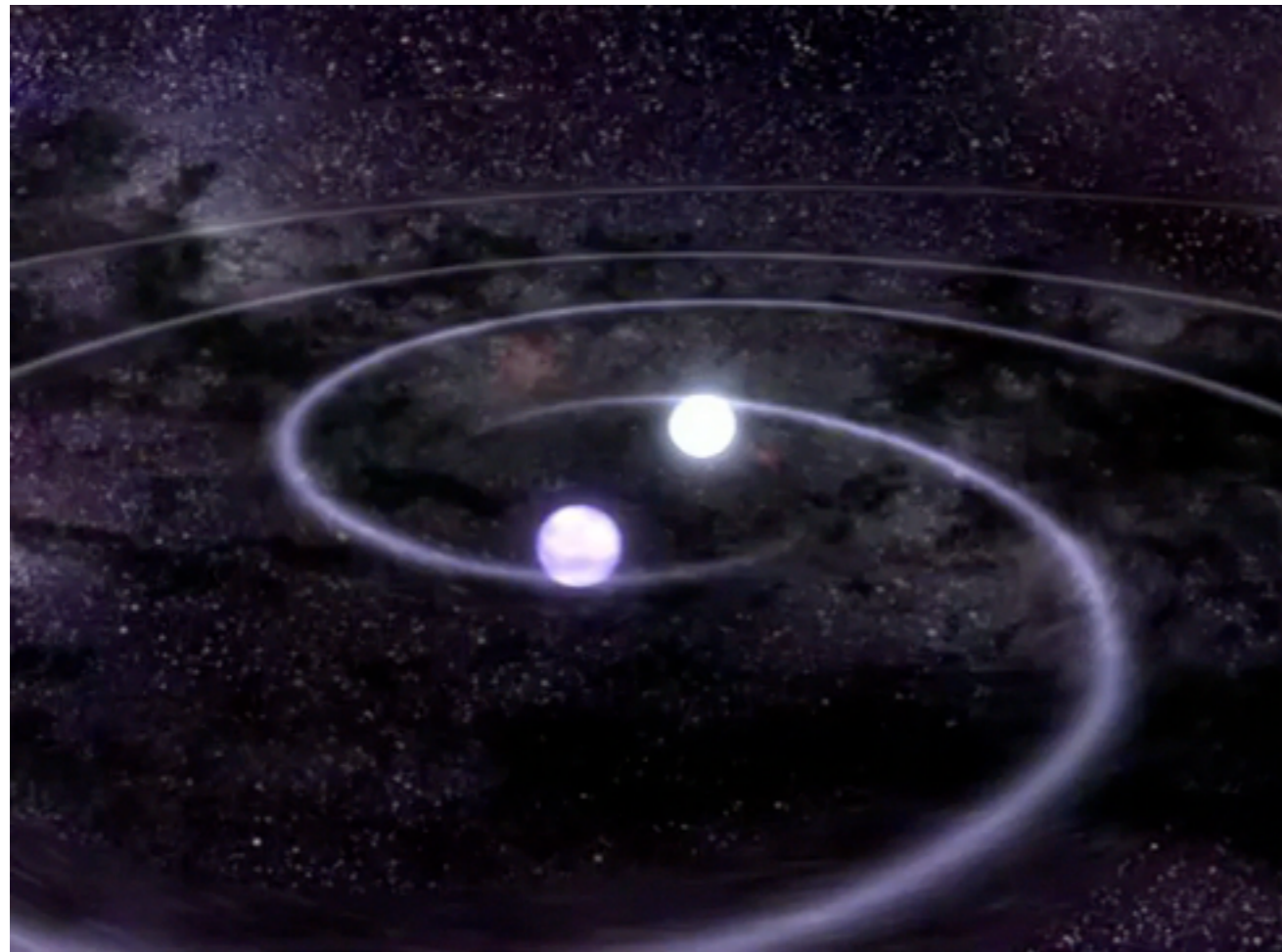
- Hacia principios del siglo pasado, el edificio de la física Newtoniana empezó a mostrar algunas fisuras, unos pocos problemas sin resolver.
- Uno de ellos era el problema de la precesión del perihelio de Mercurio, que no podía ser completamente explicado por la física Newtoniana.
- Otro problema fundamental era la necesidad, en la teoría de Newton de que la gravedad actuara de manera instantánea entre dos cuerpos. Pero si esto es así, entonces el tiempo, la distancia y la masa de los objetos no puede cambiar. Son absolutos.
- La teoría de la Relatividad, formulada por Albert Einstein, revisa este concepto, definiendo a la velocidad de la luz como un límite que no puede ser superado. Esto implica que la gravedad no puede actuar de modo instantáneo, sino que, del mismo modo en que una onda electromagnética entre dos cargas se propaga a la velocidad de la luz, así deberá suceder con una onda gravitacional propagada en un campo gravitacional entre dos cuerpos.
- Para poder reconciliar estas ideas, Einstein propuso que la presencia de materia cambia de hecho la geometría del espacio y el tiempo. La idea en la que la acción de la gravedad siempre debe seguir la menor distancia entre dos cuerpos, requiere de una solución ingeniosa: si el espacio y el tiempo se modifican con la presencia de la materia para permitir que las líneas rectas se curven lo necesario para que la gravedad actúe con una velocidad máxima igual a la velocidad de la luz, entonces podemos explicar el movimiento de los cuerpos a cualquier escala.
- La Teoría General de la Relatividad, de Einstein, hasta el momento es capaz de explicar todos los fenómenos de la Física Newtoniana, pero también es capaz de explicar las pequeñas fisuras que dejaba la concepción de espacio y tiempo absolutos con acción inmediata.



COROLARIO: ONDAS GRAVITACIONALES

.....

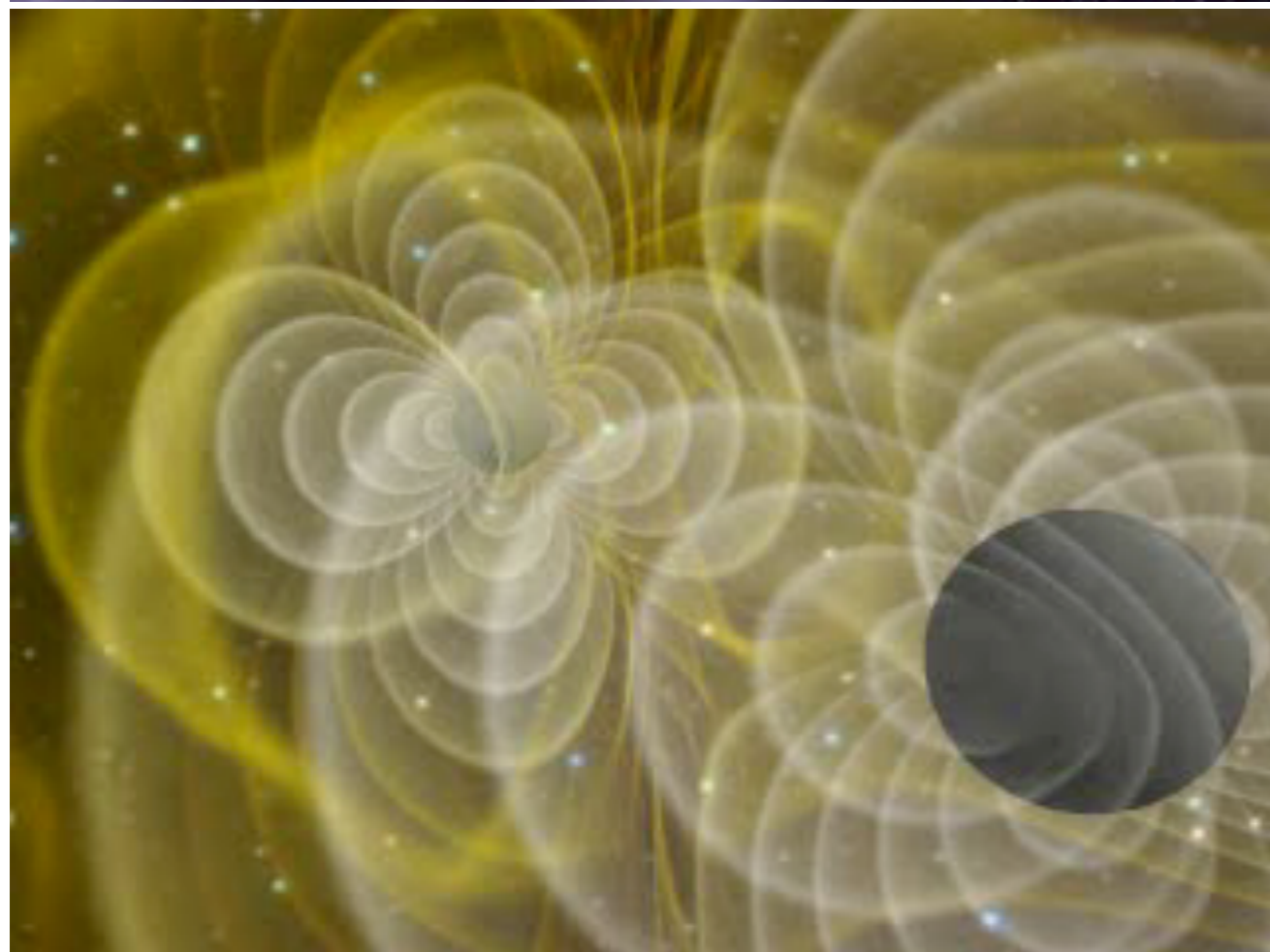
- Una de las predicciones más interesantes de la Teoría de la Relatividad General de Einstein es la generación de ondas que se propagan en el tejido del espacio tiempo.
- En el caso de un evento en el cual se involucren dos objetos muy masivos, el intercambio de energía del evento puede generar una radiación de un modo similar a como la hace la interacción de dos cargas eléctricas. Estas ondas se propagan como ondas en una charca.
- A diferencia de las ondas electromagnéticas (luz), son muy difíciles de detectar por dos razones principales:
 - la primera es que mientras las ondas electromagnéticas resultan de la interacción a nivel microscópico causada por pequeños desbalances de carga, el efecto equivalente en gravedad requiere de actuar a una gran escala y con una gran acumulación de masa.
 - La segunda es que la frecuencia y potencia de la luz es muchísimo mas alta que la de las ondas gravitacionales. La luz interacciona fuertemente con la materia, pero las ondas gravitacionales solo lo hacen de manera muy débil.

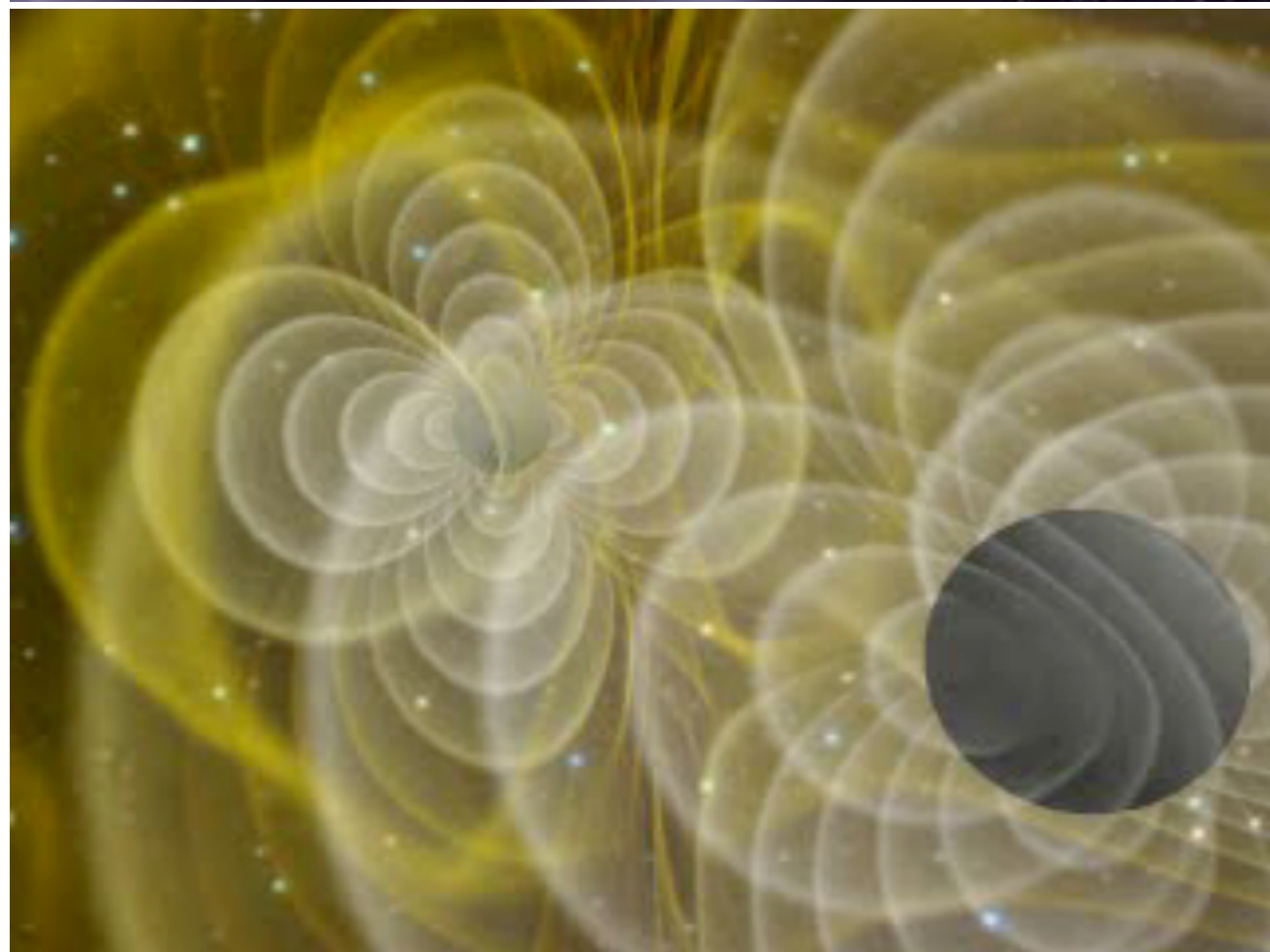
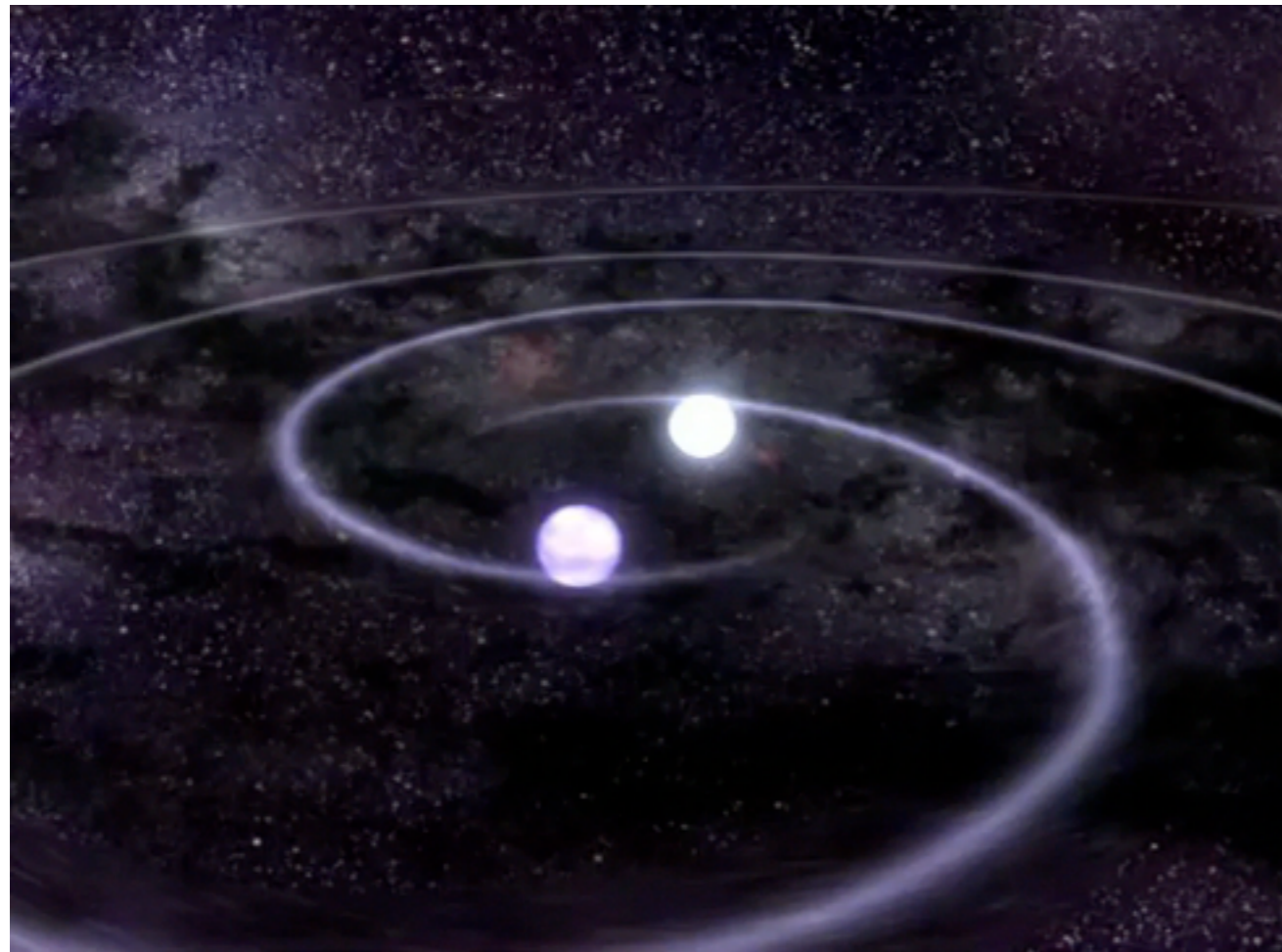


COROLARIO: ONDAS GRAVITACIONALES

.....

- Una de las predicciones más interesantes de la Teoría de la Relatividad General de Einstein es la generación de ondas que se propagan en el tejido del espacio tiempo.
- En el caso de un evento en el cual se involucren dos objetos muy masivos, el intercambio de energía del evento puede generar una radiación de un modo similar a como la hace la interacción de dos cargas eléctricas. Estas ondas se propagan como ondas en una charca.
- A diferencia de las ondas electromagnéticas (luz), son muy difíciles de detectar por dos razones principales:
 - la primera es que mientras las ondas electromagnéticas resultan de la interacción a nivel microscópico causada por pequeños desbalances de carga, el efecto equivalente en gravedad requiere de actuar a una gran escala y con una gran acumulación de masa.
 - La segunda es que la frecuencia y potencia de la luz es muchísimo mas alta que la de las ondas gravitacionales. La luz interacciona fuertemente con la materia, pero las ondas gravitacionales solo lo hacen de manera muy débil.





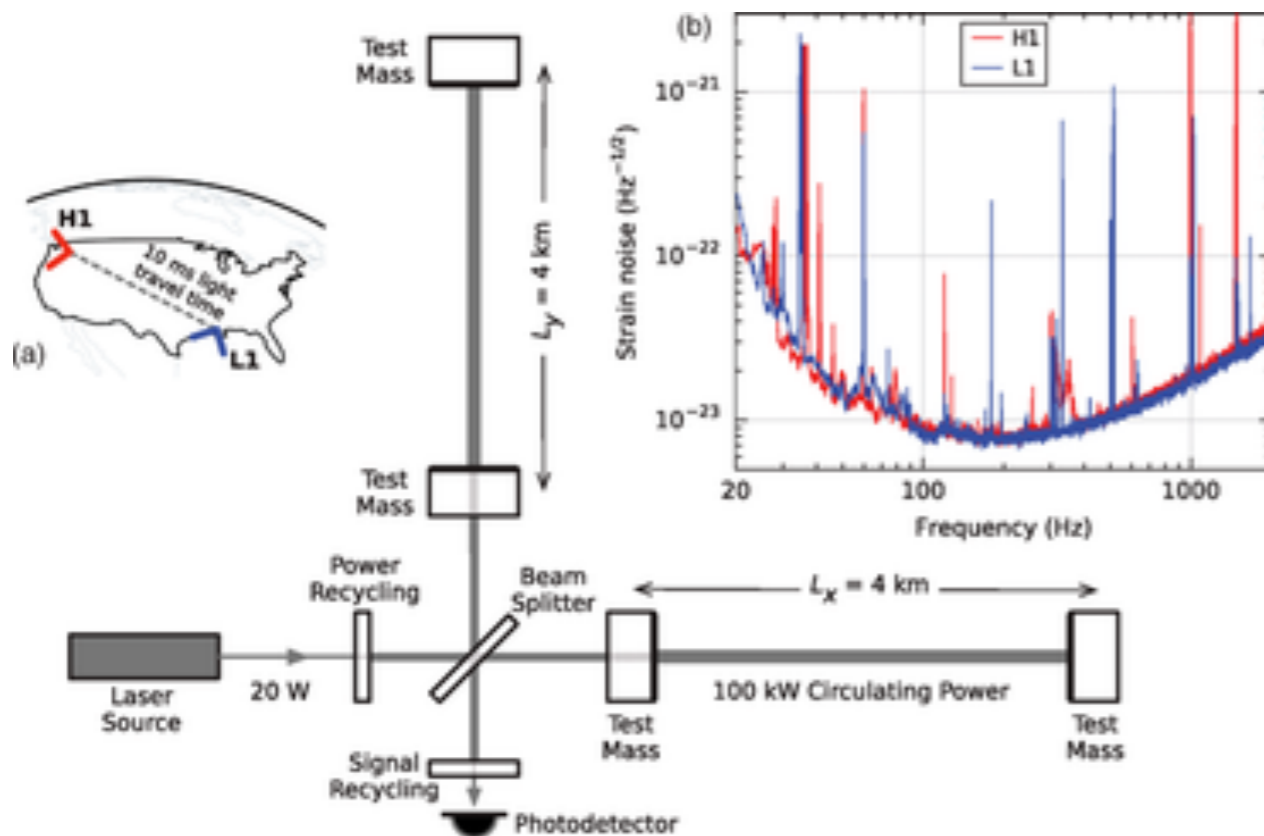
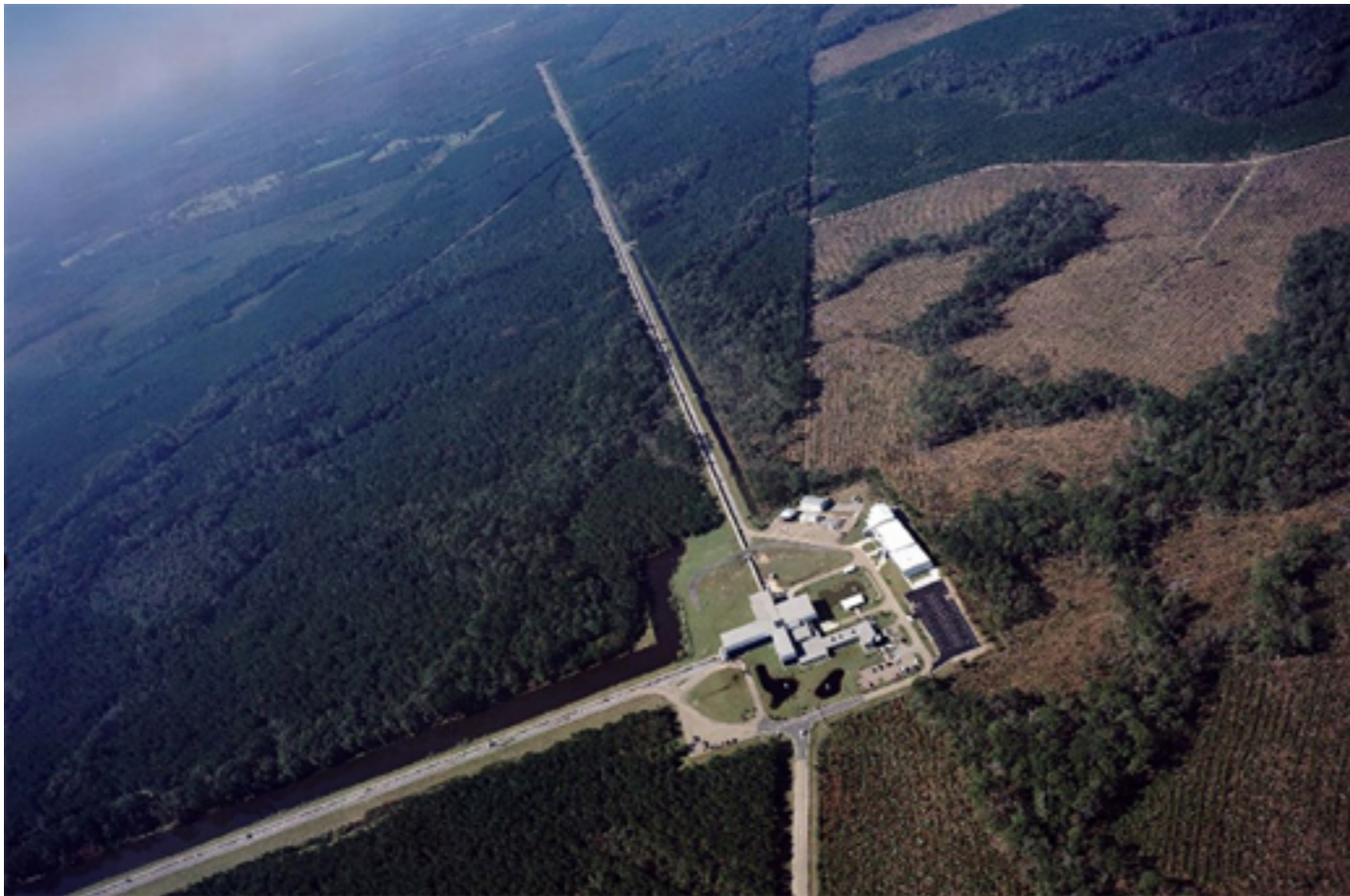
COROLARIO: ONDAS GRAVITACIONALES

.....

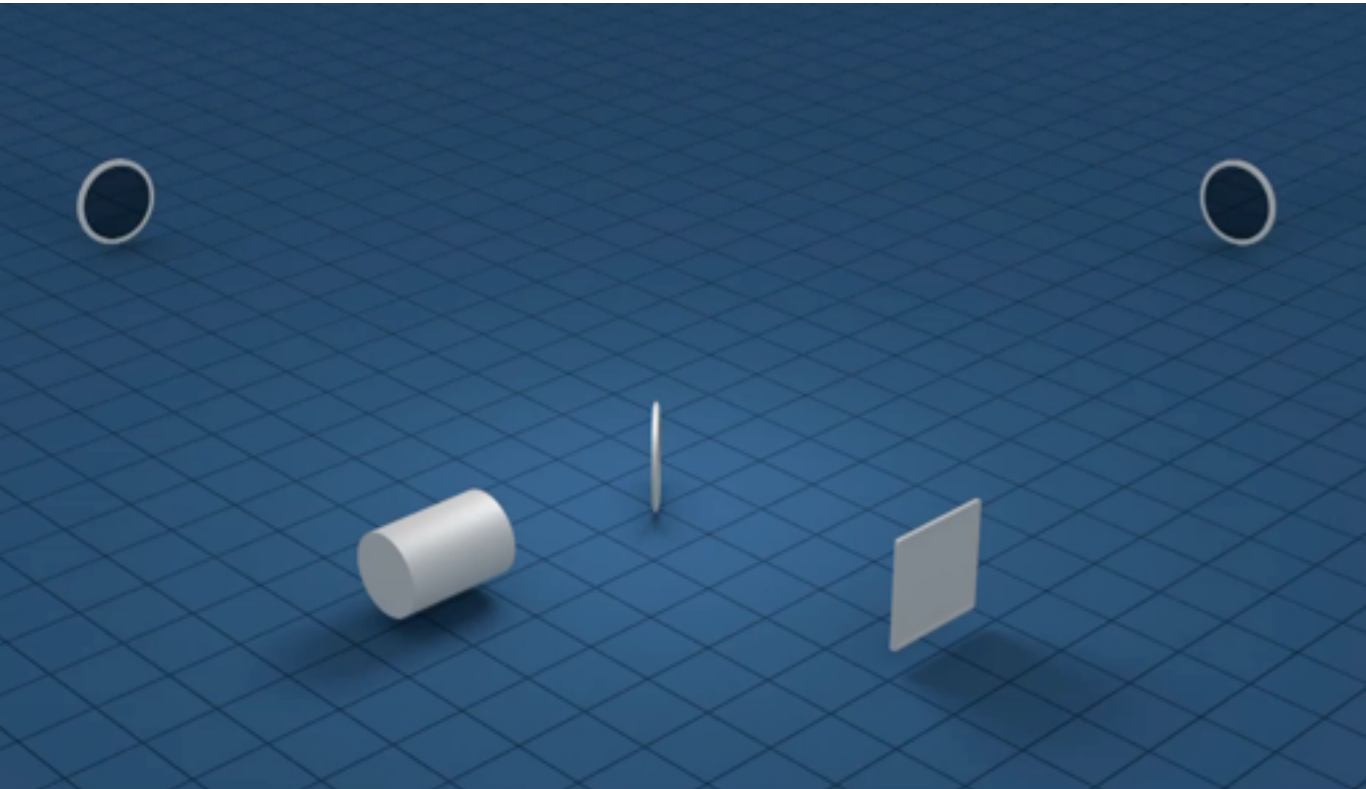
- Una de las predicciones más interesantes de la Teoría de la Relatividad General de Einstein es la generación de ondas que se propagan en el tejido del espacio tiempo.
- En el caso de un evento en el cual se involucren dos objetos muy masivos, el intercambio de energía del evento puede generar una radiación de un modo similar a como la hace la interacción de dos cargas eléctricas. Estas ondas se propagan como ondas en una charca.
- A diferencia de las ondas electromagnéticas (luz), son muy difíciles de detectar por dos razones principales:
 - la primera es que mientras las ondas electromagnéticas resultan de la interacción a nivel microscópico causada por pequeños desbalances de carga, el efecto equivalente en gravedad requiere de actuar a una gran escala y con una gran acumulación de masa.
 - La segunda es que la frecuencia y potencia de la luz es muchísimo mas alta que la de las ondas gravitacionales. La luz interacciona fuertemente con la materia, pero las ondas gravitacionales solo lo hacen de manera muy débil.

COROLARIO: ONDAS GRAVITACIONALES

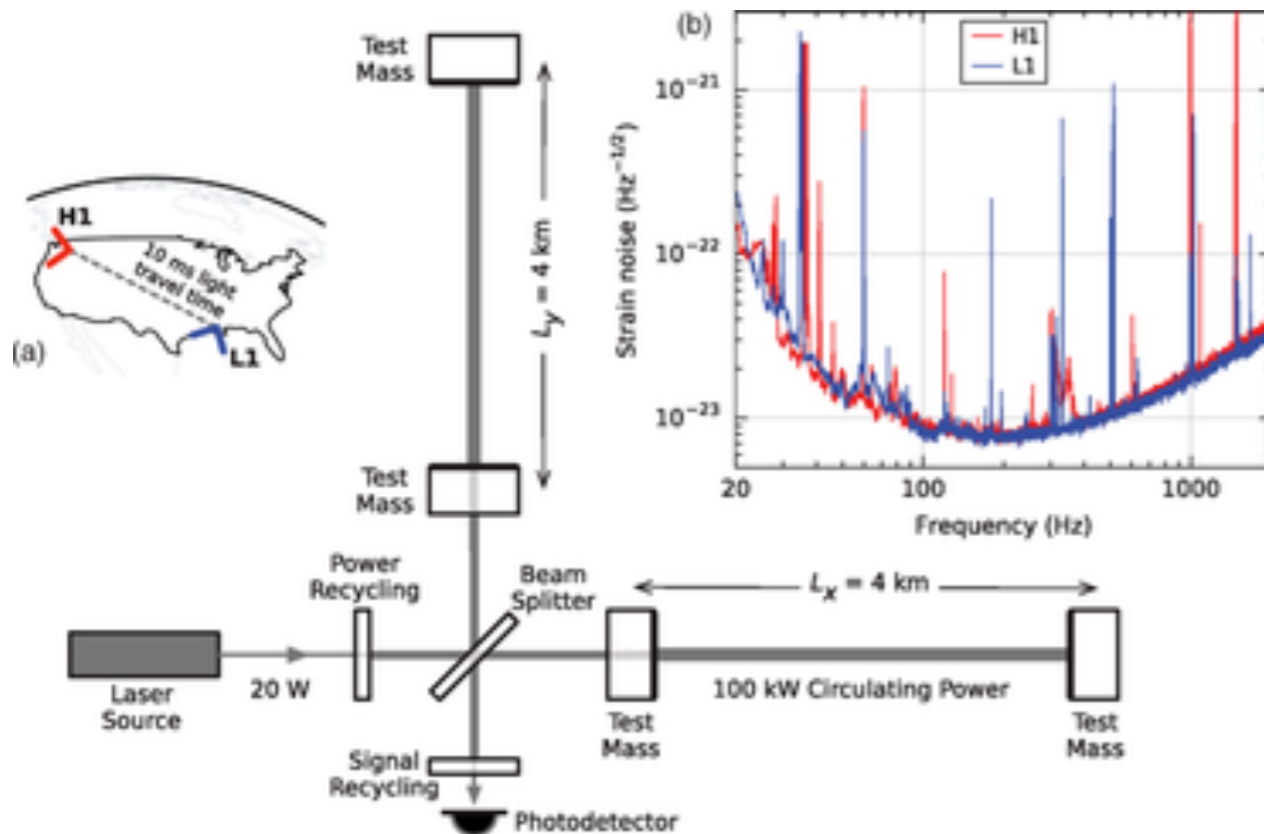
-
- ▶ La primera detección confirmada de una onda gravitacional fue hecha por el observatorio LIGO en febrero de este año, abriendo un nuevo nicho en la física. Somos ya una civilización capaz de detectar ondas gravitacionales, aunque hace 7 mil años apenas habíamos inventado el alfabeto y el arado.
 - ▶ Las ondas gravitacionales tienen tan baja potencia que su detección en la Tierra requiere de medir vibraciones que causan desplazamientos de $\sim 10^{-20}$ cm (1/1000 el radio de un proton) en una masa de prueba que consiste en este caso en un espejo suspendido por cables.
 - ▶ LIGO es en realidad un interferometro tipo Michelson Morley. Hay cuatro masas o espejos de prueba a los cuales se envía un pulso de luz láser separado por un dicroico. El laser es IR y los espejos tienen cero absorción en este rango. El sistema esta al vacío y el sistema de suspensión de los espejos mas una calibración y correlación compleja asegura que la mayoría de las vibraciones espurias son eliminadas.
 - ▶ Si una onda gravitacional llega al detector, hará que los espejos se desplacen y que el pulso de laser se retrase (por un desfase de onda) al llegar al fotodetector, causando una serie de interferencias constructivas o destructivas. Hay dos detectores (Livingston, LO y Richland, WA) separados por una distancia de 3000 km. La señal debe confirmarse en ambos y puede ser triangulada para determinar el origen aproximado de la fuente en el cielo.



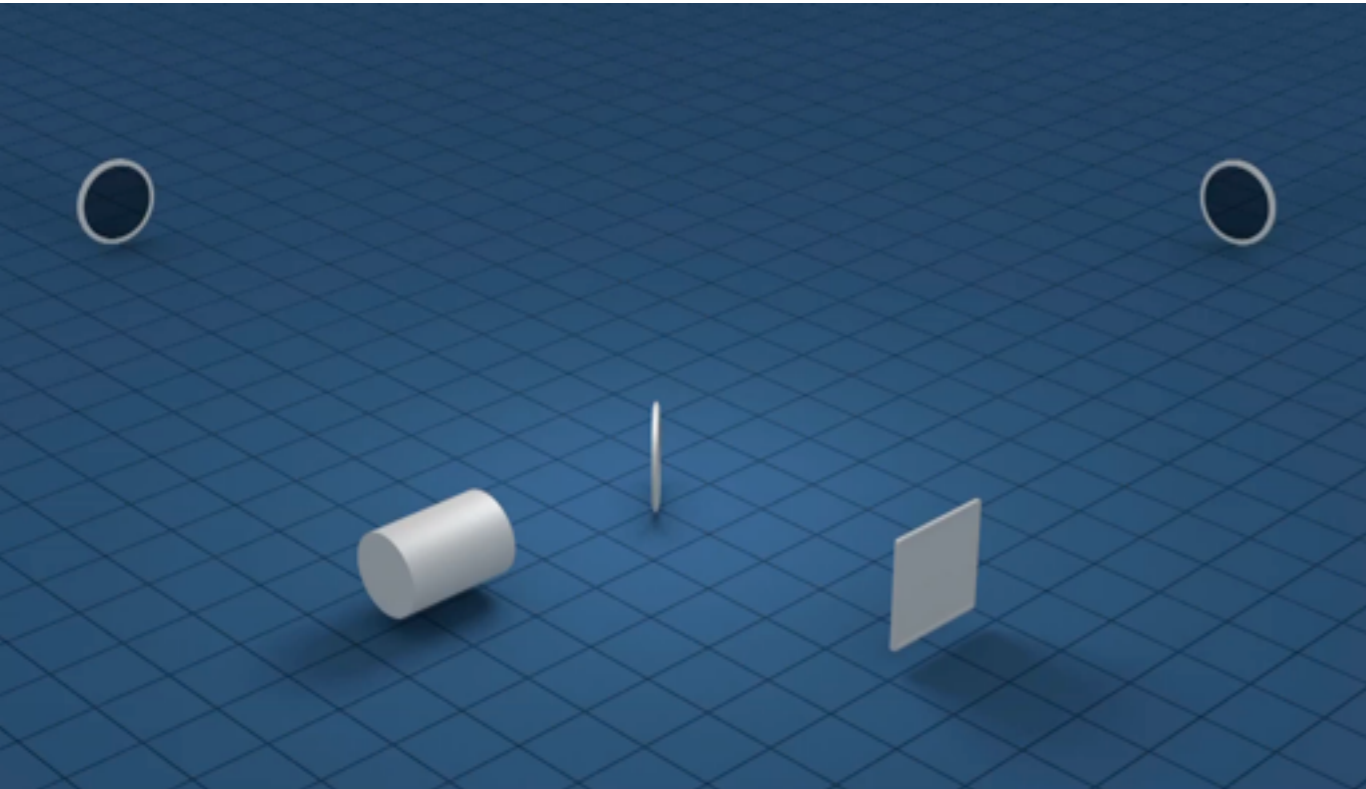
COROLARIO: ONDAS GRAVITACIONALES



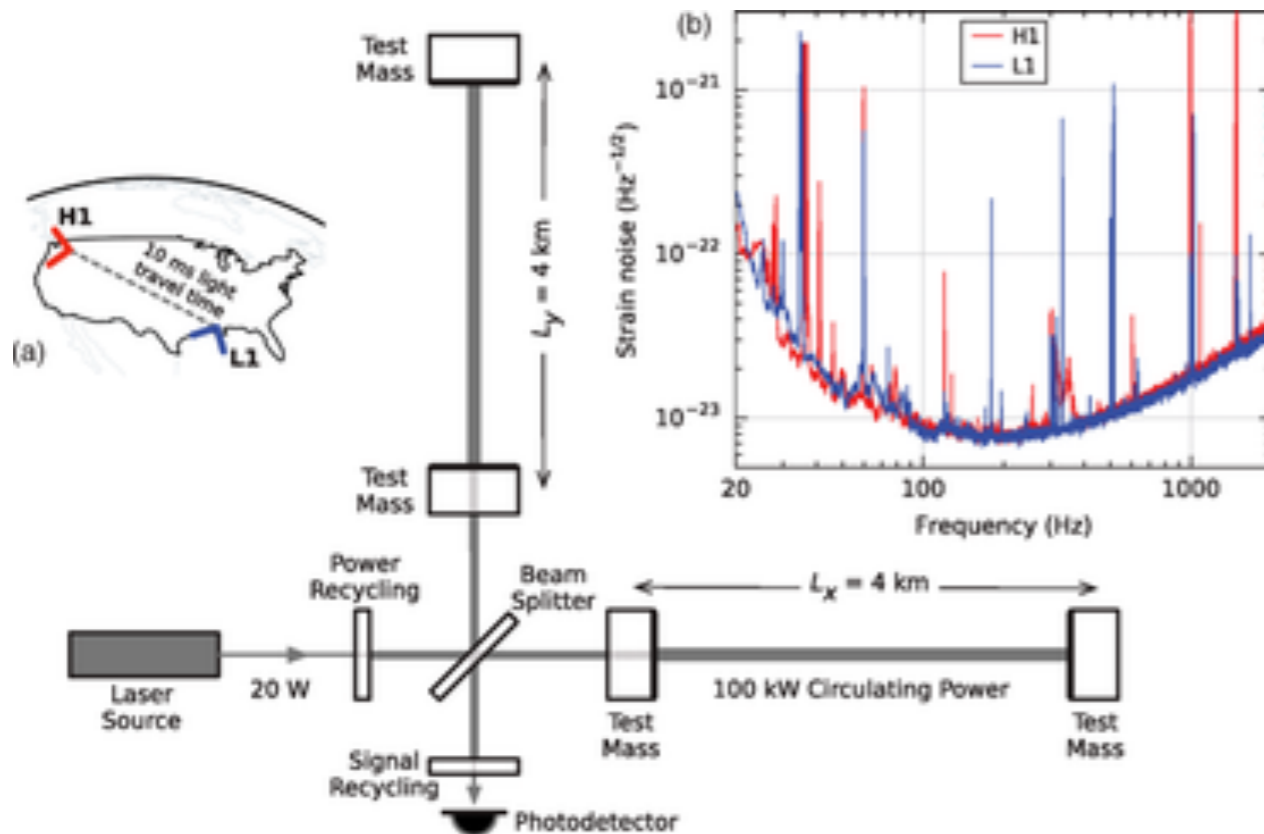
-
- La primera detección confirmada de una onda gravitacional fue hecha por el observatorio LIGO en febrero de este año, abriendo un nuevo nicho en la física. Somos ya una civilización capaz de detectar ondas gravitacionales, aunque hace 7 mil años apenas habíamos inventado el alfabeto y el arado.
 - Las ondas gravitacionales tienen tan baja potencia que su detección en la Tierra requiere de medir vibraciones que causan desplazamientos de $\sim 10^{-20}$ cm (1/1000 el radio de un proton) en una masa de prueba que consiste en este caso en un espejo suspendido por cables.
 - LIGO es en realidad un interferometro tipo Michelson Morley. Hay cuatro masas o espejos de prueba a los cuales se envía un pulso de luz láser separado por un dicroico. El laser es IR y los espejos tienen cero absorción en este rango. El sistema esta al vacío y el sistema de suspension de los espejos mas una calibración y correlación compleja asegura que la mayoría de las vibraciones espurias son eliminadas.
 - Si una onda gravitacional llega al detector, hará que los espejos se desplacen y que el pulso de laser se retrase (por un desfase de onda) al llegar al fotodetector, causando una serie de interferencias constructivas o destructivas. Hay dos detectores (Livingston, LO y Richland, WA) separados por una distancia de 3000 km. La señal debe confirmarse en ambos y puede ser triangulada para determinar el origen aproximado de la fuente en el cielo.



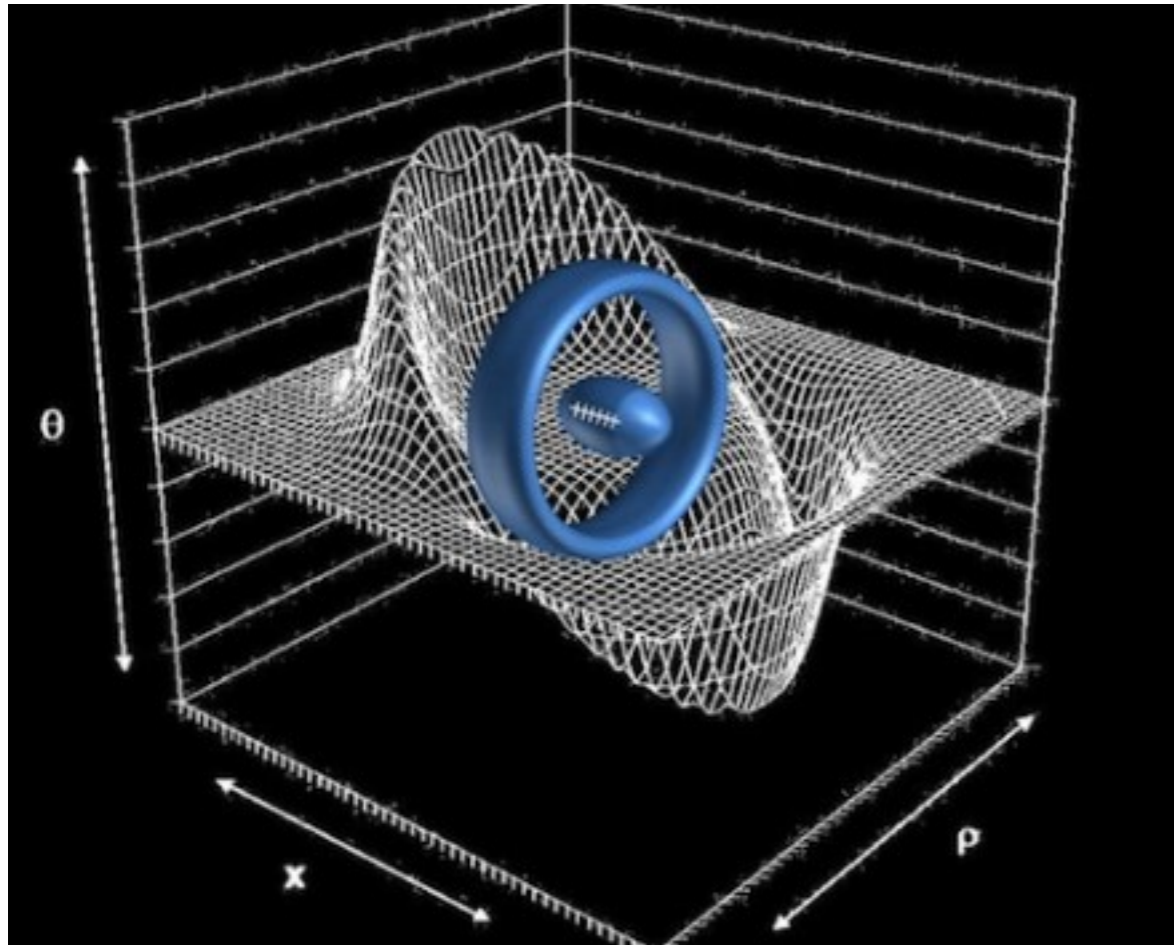
COROLARIO: ONDAS GRAVITACIONALES



-
- La primera detección confirmada de una onda gravitacional fue hecha por el observatorio LIGO en febrero de este año, abriendo un nuevo nicho en la física. Somos ya una civilización capaz de detectar ondas gravitacionales, aunque hace 7 mil años apenas habíamos inventado el alfabeto y el arado.
 - Las ondas gravitacionales tienen tan baja potencia que su detección en la Tierra requiere de medir vibraciones que causan desplazamientos de $\sim 10^{-20}$ cm (1/1000 el radio de un proton) en una masa de prueba que consiste en este caso en un espejo suspendido por cables.
 - LIGO es en realidad un interferometro tipo Michelson Morley. Hay cuatro masas o espejos de prueba a los cuales se envía un pulso de luz láser separado por un dicroico. El laser es IR y los espejos tienen cero absorción en este rango. El sistema esta al vacío y el sistema de suspension de los espejos mas una calibración y correlación compleja asegura que la mayoría de las vibraciones espurias son eliminadas.
 - Si una onda gravitacional llega al detector, hará que los espejos se desplacen y que el pulso de laser se retrase (por un desfase de onda) al llegar al fotodetector, causando una serie de interferencias constructivas o destructivas. Hay dos detectores (Livingston, LO y Richland, WA) separados por una distancia de 3000 km. La señal debe confirmarse en ambos y puede ser triangulada para determinar el origen aproximado de la fuente en el cielo.



GRAVEDAD: ESA PEQUEÑA FUERZA



- La fuerza gravitacional podrá ser la más débil de las cuatro fuerzas fundamentales, pero no es una fuerza pequeña: su acción da forma y movimiento al Universo.
- Hoy en día la física parece converger a un punto en el cual entendemos la gravedad como un fenómeno.
- Ahora falta que podamos entender como dominar la gravedad. Algunos predicen que el avance del conocimiento nos permitirá algún día entender como dominar los campos gravitacionales o modificarlos a nuestro antojo (p.ej. el mecanismo de Alcubierre, los agujeros de gusano, etc.). Por ahora es ciencia ficción, pero también lo fue la detección de las ondas gravitacionales.
- Hemos superado a Aristóteles, a Galileo, y a Newton. ¿Habrá necesidad de superar las teorías de Einstein para entender mejor el funcionamiento del Universo?