

Intro:

Sesión tirar hilos de la presentación de Guy Molénat la semana pasada. En concreto hoy tirar de los hilos de la teoría de la relatividad, y la semana que viene de la física cuántica. Y también de la termodinámica, que según el tiempo trataremos hoy o la semana que viene. Y después abandonaremos la física para, en la última parte de este curso, interesarnos al tiempo vivido.

Hoy volvemos a la relatividad, y como nos vamos a adentrar bastante, cabe hacer el mismo trabajo que hicimos con Aristóteles, ie explicar en qué contexto ideológico llega la teoría de Einstein y porqué es una revolución.

Galileo:

En astronomía su enseñanza es absolutamente tradicional, por miedo: Giordano Bruno ha sido quemado en 1600. El sistema de Copérnico está tolerado desde 1543, porque Copérnico ha tenido la prudencia de exponerlo como una hipótesis de trabajo. No dice "es realmente así", sino "si nos imaginásemos que fuera así, los cálculos resultarían + fáciles". Galileo confía a Kepler que no puede ser abiertamente copernicano, no en Italia, y no en la Universidad.

Pero 1609 lo cambia todo:

1609: descubre un juguete que venden los ópticos holandeses: dos lentes de monóculo y un tubo. Amplían muy poco, dan imágenes muy deformadas y borrosas => después de un par de años de moda, el público lo deja. Los astrónomos no ven ningún interés: la astronomía es una ciencia, ie un razonamiento matemático, cuyo valor radica en ser capaz, justamente, de obviar las ilusiones que nos proporcionan los sentidos. Menos aún se fiarán de un instrumento que proporciona imágenes (imágenes!) deformadas y borrosas: no ofrece ningún interés para la ciencia.

Galileo, en cambio, se fabrica un catalejo, con lentes que se hace fabricar especialmente, que le da una ampliación importante (casi x6) y una imagen neta. Lo hace principalmente para ganarse la vida, porque es pobre y tiene que dar clases continuamente para comer: no tiene tiempo de investigar (aún no ha publicado nada). Pretende vender su catalejo a la marina de Venecia.

G. mira Júpiter con su catalejo, y le descubre 4 lunas (refuta argumento vs Copérnico: la tierra no puede girar alrededor del sol, porque la luna no la seguiría).

Mira la Luna, y hace su descubrimiento + subversivo: tiene montañas ¡como la tierra! La sombra de estas montañas varía con el ángulo de la luz solar, ¡como en la tierra! Fin del mundo ptolemaico, donde la luna era una esfera de cristal pulido. Es el fin

de la separación entre mundo sublunar y supra lunar, y el fin de la separación entre física y astronomía. Nacimiento de la astrofísica: las mismas leyes valen tanto para describir la caída de una piedra desde la torre de Pisa que el recorrido de los planetas alrededor del sol.

Consecuencia: Galileo convocado ante tribunal de la inquisición en 1615, defiende que "el espíritu santo nos quiere enseñar cómo se va al cielo, no como va el cielo". Entre 1616 y 18, toda la astronomía copernicana es prohibida. Galileo es acusado de atomismo, pero es salvado por la elección a Papa de su mejor amigo, Maffeo Barberini (Urbano VIII). 1623 el Papa le manda redactar un Diálogo sobre los 2 sistemas del mundo, donde defensa imparcialmente las 2 concepciones, la de Ptolomeo y la de Copernico.

En realidad, Galileo defiende las tesis de Copérnico, y ridiculiza las de Aristóteles. Cuando el libro es publicado en el 1632, Galileo es procesado por la Inquisición y forzado a retractarse en el 33. Las tesis de Copérnico son heréticas, y la mayoría de científicos están furiosos contra Galileo: durante casi 1 siglo han podido hacer su astronomía como les parecía, ya que bastaba decir que era una simple hipótesis, pero la intransigencia de Galileo ha llevado al condeno.

Uno de los principales científicos de la época, Descartes, que acaba de redactar su *Tratado del mundo y de la luz*, destruye su libro, renuncia a la ciencia y se dedica a la filosofía (únicamente publica el prefacio de su libro, bajo el título de *Discurso del Método*).

En residencia vigilada (la Iglesia controla todas sus visitas), ciego, dicta a partir del 1635 su *Discurso sobre 2 ciencias nuevas*, en el que anuncia el **Principio de relatividad**: los pasajeros de un barco no tienen manera de decir que se están desplazando porque vean un objeto caer del mástil (propósito: la tierra es como el barco, se mueve pero solo lo podemos constatar respecto a un punto exterior).

La relatividad y sus problemas

Consecuencia de este principio: las velocidades se suman (o se sustraen).

Mientras tanto:

Newton y Young sobre la luz: ¿corpúsculo u onda?

Faraday sobre el electromagnetismo: electricidad y magnetismo son 2 aspectos de un mismo fenómeno. Teoría de los «campos»: una fuerza electromagnética genera un «**campo**»

Maxwell: la luz es un tipo particular de onda electromagnética, y las ondas electromagnéticas son un movimiento perpetuo: nunca se detienen. La luz siempre va a velocidad de la luz.

Maxwell + Galileo-Newton = una paradoja: ¿qué pasaría si pudiéramos viajar a la velocidad de la luz?

Según las leyes de Galileo y Newton, iríamos a la par de las ondas luminosas y la luz se quedaría quieta para nosotros (pasaríamos el «muro de la luz» como un avión supersónico pasa el «muro del sonido»).

Según las leyes de Maxwell, esto es imposible, la luz nunca se queda quieta. Dicho + rigurosamente: la luz siempre viaja a 300.000km/s, independientemente de la velocidad del observador: la velocidad de la luz no es relativa, sino que es absoluta.

Contradicción: las 2 teorías no pueden ser verdad a la vez desde el mismo punto de vista. O una de las 2 es falsa, o tenemos que encontrar otro enfoque, otro punto de vista, otro marco conceptual, para que las 2 puedan ser verdad a la vez.

Esto es lo que hizo Einstein: cambiar nuestro marco conceptual, ie: básicamente, tirar a la basura nuestro concepto de tiempo, y sustituirlo por otro, de tal forma que las 2 teorías, la de Newton y la de Maxwell, puedan ser verdad a la vez.

Experimento: un reloj de luz en un tren que viaja a velocidad constante de 0,8 c. El reloj de luz cuenta 1 segundo cada 1000 millones de «tics». Si se pone en movimiento, el fotón tendrá que recorrer una distancia mayor, el reloj irá + lento.

Pero es un reloj de luz: es un fenómeno natural, no es un péndulo o un muelle. O sea: no es el artefacto humano que se ralentiza, sino el movimiento de los objetos naturales: el movimiento modifica el tiempo, es la primera conclusión del estudio de Einstein: consigue salvar a la vez las leyes de Newton y las de Maxwell, al precio de obligarnos a retomar toda nuestra concepción del tiempo.

Dicho de otra manera: es un reloj de luz, un fotón cautivo entre 2 espejos. Pero la luz siempre va a velocidad de la luz: el fotón no puede ir más lento. Si se produce un tic cada 1,67 segundos, intuitivamente diremos que es porque algo frena el fotón. Pero no: un fotón no se frena. Por eso la experiencia se hace con un reloj de luz: con un reloj de engranajes podríamos pensar que es el reloj que se frena, pero no, son los fenómenos naturales que necesitan un tiempo más largo. Entonces ¿a lo mejor es una ilusión, tenemos la sensación desde el prado que el reloj del tren va + lento?

No es una ilusión: hemos paseado un reloj de cesio (que es nuestro reloj de luz: cuando se excita un átomo de cesio 133, proyecta un fotón) en un avión a 10.000 metros de altitud durante

10 horas, y cuando aterrizó tenía unas billonésimas de segundo de adelanto sobre un reloj idéntico que se había quedado en el suelo: es realmente la naturaleza que ha «acelerado» en altitud. Si el movimiento acelera y si el tiempo es el número del movimiento, es el tiempo mismo que ha acelerado: Aristóteles se equivocaba cuando decía que si los movimientos son más lentos o más rápidos, el tiempo en cambio no es más rápido o más lento. En realidad si, el tiempo puede ser más rápido o más lento.

Acelerado, y no ralentizado como podríamos creer según la teoría de la relatividad especial: es que con el avión entra en juego la gravedad, y la teoría de la relatividad de 1905 no toma en cuenta la gravedad. De eso trata la teoría de la relatividad general: cómo integrar la gravedad dentro de los cálculos de la relatividad especial.

Con la teoría de la relatividad especial, Einstein ha resuelto el viejo conflicto entre el principio de relatividad del movimiento, y la velocidad constante de la luz: los dos son ciertos a la vez si abandonamos nuestra concepción del tiempo absoluto y universal, y entendemos que el tiempo es una dimensión local que padece modificaciones.

La gravedad fue descubierta por Newton. Fue él quien entendió que la caída de los cuerpos en la tierra y los movimientos de los astros en el cielo son debidos a la misma fuerza. El problema es que nadie, ni siquiera Newton, *entiende* que *es* exactamente esta fuerza: parece mágica, porque no tiene ningún canal de transmisión, y es inmediata. Según la teoría de Newton, si el sol desapareciera de repente, nos daríamos cuenta 8 minutos después, porque es el tiempo que tarda la luz solar en llegar a la tierra. Pero la gravedad, ella, dejaría de hacer efecto inmediatamente y la tierra saldría de su órbita como una piedra que sale de una fronda, al instante. La física de Newton permite calcular, ie predecir, a partir del momento que mete la gravedad en ecuaciones, pero no la puede explicar, ie decir qué es esta fuerza que hace que el sol atrae la tierra a más de 150 millones de quilómetros, ni cómo funciona.

Que no se explique es un problema, pero mientras podamos calcular, el problema es menor. Pero con la teoría de la relatividad el problema cambia de dimensión, porque la contradice: no pueden ser ciertas a la vez la afirmación que nada vaya + rápido que la luz, y a la vez que la gravedad vaya + rápido que la luz. La gravedad es una violación de las leyes de la relatividad.

Esto es como Einstein lo resolvió:

La relatividad específica sólo funciona con desplazamientos rectilíneos y uniformes (=sin curvas ni aceleraciones, como en el ejemplo del tren). Es decir, con los movimientos que son estrictamente equivalentes al reposo: si estamos en un tren a velocidad constante y sin sobresaltos ni curvas en la vía, no podemos decir si nos estamos moviendo nosotros o si el paisaje está desfilando ante nuestros ojos. "relatividad"= las leyes conservan una "relación" entre un referente y otro, mediante las transformaciones de Lorentz.

En cambio, si el tren acelera, experimentamos una fuerza que nos empuja hacia atrás. Lo mismo pasa cuando el tren llega a una curva, la misma fuerza nos empuja hacia el exterior de la curva. Lo mismo pasa cuando un avión despega: en los 3 casos tenemos la sensación que nuestro cuerpo «pesa» en dirección a la flecha de la fuerza.

Esta es la segunda idea genial de Einstein, que le permite elaborar la teoría de la relatividad general: no se puede distinguir entre la gravedad y una aceleración. A esta intuición le da el nombre de "Principio de equivalencia".

¿Cómo resuelve esta intuición la incompatibilidad entre la relatividad general y la gravedad de Newton? Imaginamos una aceleración como la que experimentamos en el tornado de una feria (ejemplo sacado de Brian Greene, *El Universo Elegante*). Cuando gira, notamos que nuestra espalda presiona sobre la pared exterior igual que si estuviéramos estirados en una cama: no se puede diferenciar la aceleración de la gravedad. De hecho, en la estación espacial internacional, un giro a la velocidad adecuada permite simular perfectamente la gravedad.

Si medimos la circunferencia del tornado, obtendremos 2 resultados distintos según si la medimos desde el eje central, o desde el interior de la pared : de hecho, obtenemos exactamente el mismo ratio inferior a Pi que si el espacio, en lugar de ser plano, fuera alabeado. Y lo mismo ocurre con el tiempo.

La idea genial de Einstein, que sustenta la teoría de la relatividad general, es la siguiente: el universo es un continuo espacio-tiempo de 4 dimensiones, que se puede representar como un tejido elástico, una membrana. Una aceleración de movimiento, que equivale a una gravedad, produce un alabeo en este tejido.

Precauciones: es una imagen. Algo fabricado para que nos podamos representar una abstracción. Pero no describe exactamente lo que nos enseña la teoría. En particular:

Está hecha por analogía con la gravedad terrestre: como si una fuerza "tirase" hacia abajo las bolas. Pero no hay ningún "abajo", ni hay ninguna "fuerza" en el sentido clásico de la palabra: hay un

alabeo de la estructura del universo, estructura que por otro lado nos "baña".

La membrana que usamos como imagen tiene 2 dimensiones, mientras que el espacio-tiempo alabeado por la gravedad tiene 4 dimensiones (difícil de imaginar, imposible de representar). En particular, la misma fuerza se ejerce sobre cualquier parte del globo.

El continuo espacio-tiempo de 4 dimensiones es el medio por el cual se transmite la fuerza gravitacional. Volveremos sobre esto para comentarlo, y veremos sus consecuencias filosóficas. De momento nos quedamos en la física, porque hay consecuencias importantes desde este punto de vista.

La gravedad queda explicada. La fuerza gravitatoria se propaga como una onda, y progresa a la velocidad de la luz (si el sol se esfumase, nos enteraríamos 8 minutos + tarde y por medio de una "ola" de fuerza gravitatoria, como cuando se arroja una piedra a un estanque). La gravedad no se transmite instantáneamente.

La teoría se ha verificado experimentalmente numerosas veces. Una de las consecuencias es que la luz también tendría que quedar afectada por este alabeo del universo cuando pasa a proximidad de cuerpos masivos. Y, consecuentemente, que la posición aparente de las estrellas debería resultar otra que su posición real cuando un cuerpo masivo se interpone en el camino de su luz. El 29 de mayo de 1919 se produjo la primera confirmación experimental de la teoría de la relatividad, al comprobar durante un eclipse de sol que las estrellas situadas justo al borde del disco solar tenían una posición aparente distinta de su posición habitual: los rayos de luz quedan desviados por el sol, y esto solo se explica mediante el alabeo del espacio-tiempo. Ahora bien: el sol es una estrella menor, pesa muy poco, y el desplazamiento es del orden de un 0,0002%. Imperceptible, pero medible. En cambio, la luz que pasa cerca de una estrella de neutrones padece un desvío mucho + importante (25%).

Lo mismo pasa con el tiempo. El alabeo del universo no solo curva los trayectos en el espacio, sino que también contrae el tiempo. Esto es + difícil de entender, pero también se ha verificado experimentalmente: resulta que Mercurio gira alrededor del sol + rápidamente de lo que debería. Dicho de otra manera: gira alrededor del sol exactamente como si su órbita no siguiese un plano, sino un cono. La teoría de la relatividad general predecía que la geometría necesaria para describir los fenómenos astrales es una geometría no-euclidiana.

Igual que el alabeo del espacio, el del tiempo es imperceptible alrededor del Sol, que es una estrella pequeña y ligera. Pero la teoría prevé que alrededor de la estrellas + masivas, el ralenti del tiempo debe de ser mucho mayor. La teoría prevé también que si

la masa de una estrella está suficientemente concentrada, el espacio-tiempo puede ser tan pronunciado que nada, ni la luz, puede salir del pozo una vez que ha pasado el punto de no-retorno. Y justo por encima de este punto, el tiempo pasaría unas 10.000 veces + lento que en la tierra. Teóricamente se puede usar un agujero negro como "máquina del tiempo", para viajar en el futuro (no en el pasado, es un detalle importante sobre el cual volveremos).

En la época de Einstein, nadie creía en la posibilidad de estos "agujeros negros", ya que suponían la posibilidad de concentrar la materia hasta puntos inimaginables: para transformar la tierra en un agujero negro, tendríamos que condensar toda la materia que contiene en una bola de 1,5cm de diámetro. Imposible.

Y sin embargo cierto: el descubrimiento de los agujeros negros ha sido una de las mayores confirmaciones experimentales de la teoría de la relatividad. Hay un agujero bonito en el centro de nuestra galaxia (2,5 millones de soles). Nada comparado con los agujeros negros en el centro de los quásares, 1000es de millones de soles.

A partir de aquí se resuelven todas la paradojas, se explica lo que es la gravedad y como actúa.

A partir de aquí sobretodo, tenemos que retomar a cero nuestra concepción del tiempo: el tiempo de la relatividad tiene 3 características:

Es inseparable del espacio, con el cual forma un continuo. Inseparable, pero no idéntico: la sucesión en el tiempo tiene una especificidad, es irreversible. El tiempo es lo que hay de irreversible en la estructura del universo.

El tiempo es relativo a la posición que uno ocupa en el universo. En la teoría de Newton el tiempo era absoluto: una flecha rígida sobre la cual los acontecimientos ocurren. Para la teoría de la relatividad, no es así. El tiempo es la estructura del universo, y esta estructura ni es uniforme, ni es constante.

Para empezar, la simultaneidad es relativa: Ejemplo: «¿qué está pasando en Marte ahora?». La respuesta es diferente para el habitante de la tierra, el piloto de una nave que se acerca, y el de una nave que se aleja. Plantea cantidad de problemas, entre los cuales que si A y B están en movimiento relativo, un acontecimiento futuro para A (y entonces meramente posible) ya es pasado para otro (y entonces irremediabilmente fijado).

Solución propuesta: lo que llamamos presente, pasado y futuro son en realidad una configuración geométrica del universo, un "paisaje espacio-temporal". No hay ningún momento que merezca ser llamado "presente" + que los demás, ni hay proceso que

transforme el futuro en presente y el presente en pasado: dentro de la teoría de la relatividad general, **el tiempo no pasa**.

Volvemos a Platón y a Parménides : el ser es, el no ser no es, esto es todo lo que podemos decir. Lo que es, es, y si nosotros lo vemos como una sucesión de momentos, es una ilusión debida a nuestro lugar en el universo y a nuestra constitución.

Cf Zenón de Elea, de la escuela de Parménides, que ideó una paradoja en el s. -V que tuvo en vilo a todos los filósofos de la antigüedad hasta Aristóteles.

Resultado: el tiempo no añade ninguna información a la yuxtaposición de un seguido de acontecimientos. Otro ejemplo (Paul Davies, *That mysterious flow*): 24 de diciembre, Alicia espera la nieve para Navidad con mucha ilusión. 25 de diciembre llueve, Alicia está decepcionada. 26 de diciembre nieva, Alicia está contenta: ordenarlo en pasado, presente y futuro, expresar este orden por medios gramaticales, no aporta ninguna información.

Dicho de otra manera: volvemos a Platón, el Tiempo es una dimensión real del universo, igual que el espacio, pero el sentimiento que tenemos que el tiempo "pasa" es una ilusión. Expliquémoslo en clave relativista:

El espacio-tiempo es el canal por el cual se propaga la gravedad, de tal manera que, por una parte, los cuerpos pesados están obligados a comportarse de determinada manera por el alabeo del espacio-tiempo, y por otra parte es su masa y su volumen quienes determinan la forma de este alabeo: hay una estrecha relación, aún indeterminada, entre el espacio, el tiempo y la masa de los cuerpos.

En la física de Newton y Galileo, el tiempo es un cronómetro absoluto que mide todas las transformaciones y los desplazamientos: es el «nombre del movimiento» de Aristóteles.

En la física de Einstein, el tiempo es una dimensión del mundo, que se distorsiona cuando se está sometido a una aceleración, a la vez que determina qué aceleración produce para estas masas. Salvando muchas distancias, estamos + cerca de la visión de Platón: el tiempo es el movimiento mismo del universo, la única manera de dar cuenta de ello es la geometría, y en el fondo el sentimiento de duración, de simultaneidad, de sucesión, de que existen un pasado, un presente y un futuro, es una ilusión producida por nuestras condiciones locales.