

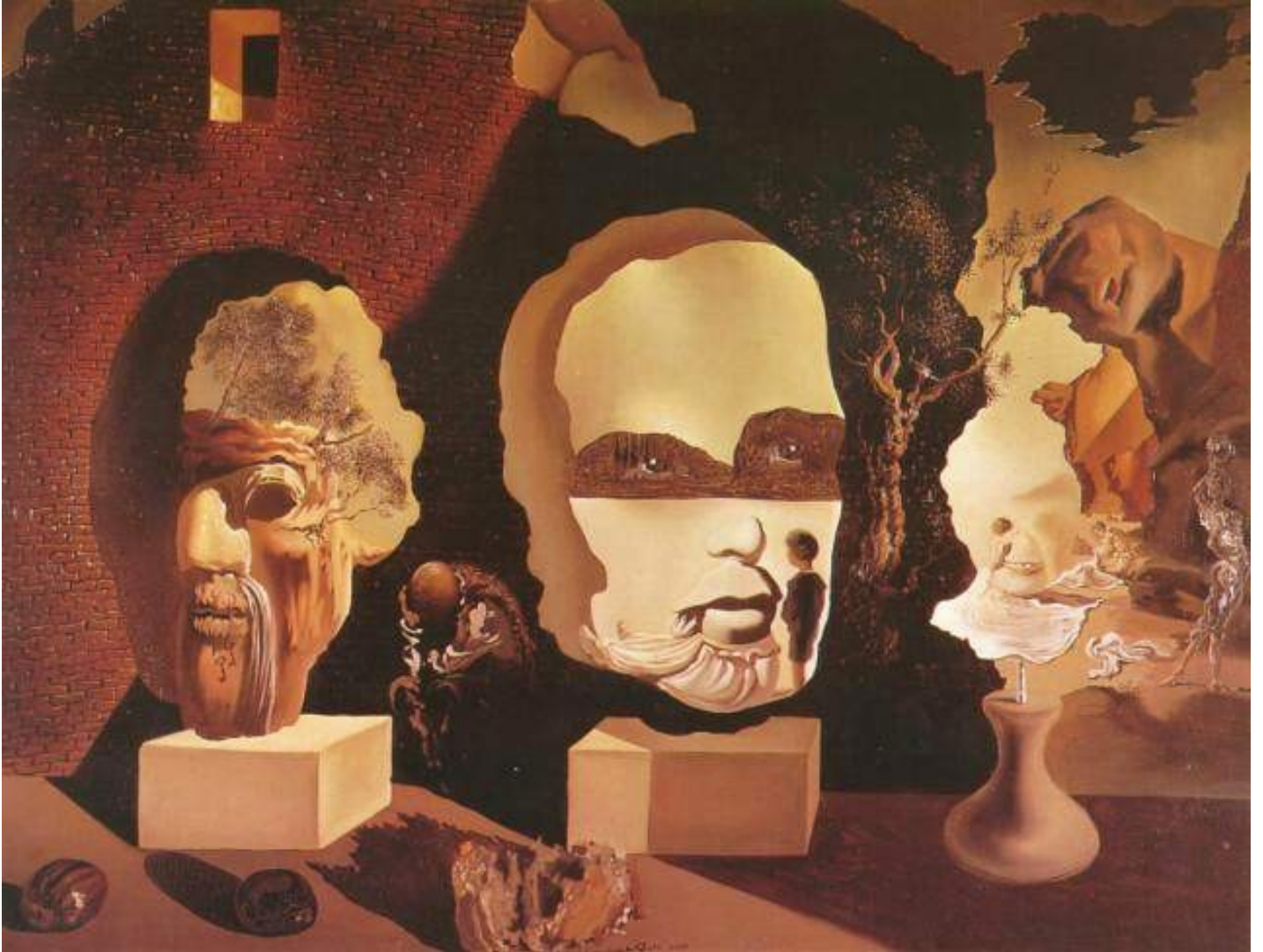
Relativitat : paradoxes de l'espai i el temps

Quin any és ? Quin dia és? Quina hora és ? És fàcil de respondre, només hem de donar un cop d'ull al calendari o al rellotge. La pregunta difícil de respondre és: **què és el temps?**

Ens podríem donar per satisfets amb la definició següent: el temps és un concepte, que ens permet distingir, dins d'una successió d'esdeveniments quin passa en primer lloc, quin en segon, quin en tercer, i així successivament.

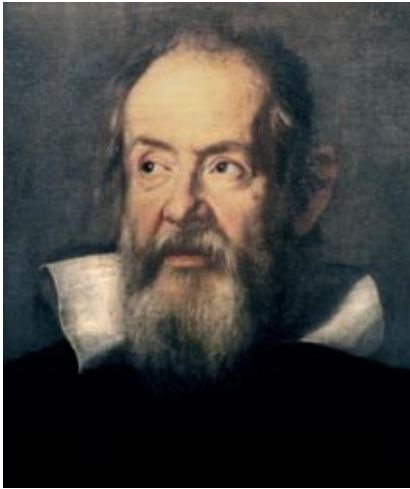
Nosaltres passem a través del temps, el traspassem d'un costat a l'altre: primer són nens, després adults i finalment, vells. Però el temps també "passa" amb nosaltres i es mou en l'espai. Si fem un viatge en tren, mentre ens movem en l'espai, ens movem també en el temps. Al final del viatge som una mica més vells.

Temps i espai són dos conceptes entre els que hi ha una estreta relació.



Les tres edats 1940

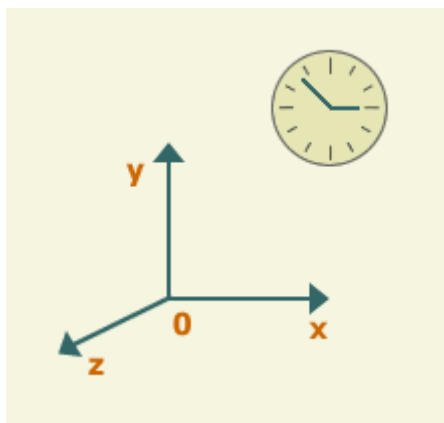
Espai i temps absoluts



Galileu va ser un científic italià del segle XVI que va establir les bases per a la ciència moderna. Entre molts altres resultats importants, va enunciar "el principi de relativitat de Galileu", que afirma que no és possible distingir el repòs absolut del moviment amb velocitat constant.

Newton va ser un físic i matemàtic anglès del segle XVII que va formular les lleis que regulen el moviment dels cossos per fer-ho, es va basar en els treballs de Galileu.

Tant Galileu com Newton pensaven que el temps i l'espai eren absoluts.

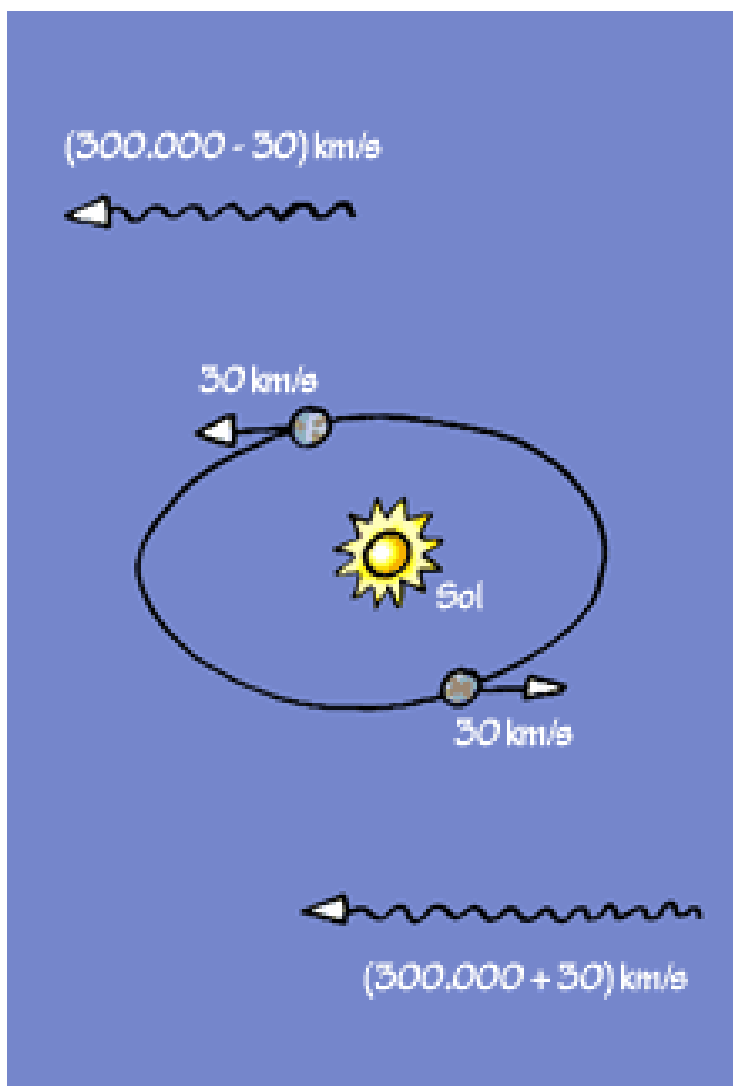


- L'espai absolut és el nostre espai, amb les seves tres dimensions, un espai que és únic per a tota la humanitat i que compartim amb els estels i planetes, en definitiva, amb tot l'univers.

➤ El temps absolut és el temps de la nostra experiència quotidiana, el que sempre va endavant i que mesuren els rellotges. És un temps que passa de la mateixa manera per als homes, els planetes, els estels i tots els objectes que formen l'univers.

Michelson-Morley

A finals del segle XIX es plantejava una pregunta que els físics no aconseguien resoldre de manera satisfactòria: com pot ser que la llum que ens arriba de l'espai exterior es propagui pel buit? La llum és una ona i l'experiència que tothom tenia en aquell temps era que les ones necessitaven un medi per poder propagar-se : aire (com per exemple el so), aigua (com les ones que es formen quan tires una pedra), o altres medis materials.



Per intentar donar una explicació van proposar que tot l'espai que envolta la Terra, els planetes i els estels estava ple d'una substància que van anomenar èter.

Els físics Michelson i Morley van realitzar un experiment per intentar mesurar la velocitat de la Terra respecte de l'èter i per tant la velocitat de la llum respecte aquests dos "objectes". Per fer-ho van utilitzar un aparell anomenat interferòmetre.

La Terra viatja per l'espai a una velocitat molt gran, de l'ordre de 30 km/s i la llum viatja molt més ràpidament, a 300.000 km/s.

Sembla lògic pensar que la velocitat de la llum s'hauria de sumar o restar de la de la Terra segons si la mesurem en el sentit del moviment d'aquesta o en sentit oposat. És a dir, si mesurem la velocitat de la llum respecte del èter sortiria c i respecte de la Terra c' . La velocitat de la Terra respecte de l'èter sortiria v . Segons la relació clàssica de suma de velocitats s'hauria de complir :

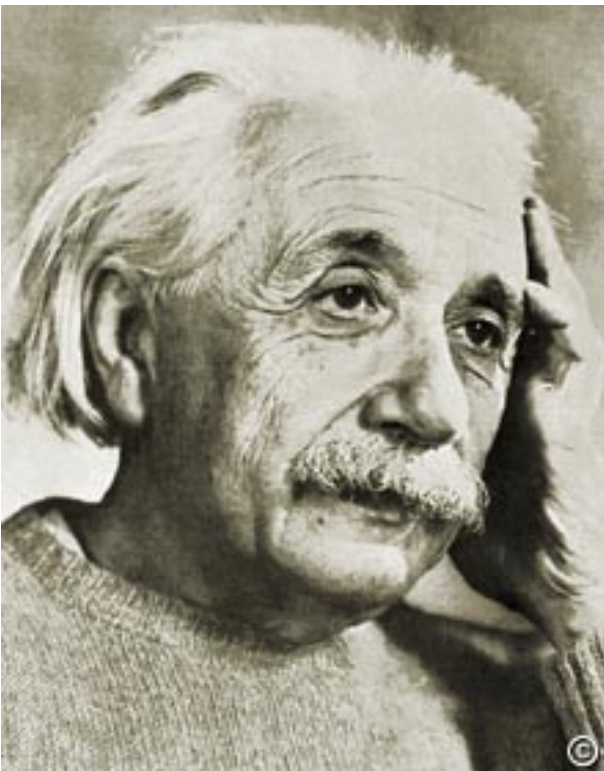
$$c' = c + v.$$

Contra tot el que s'esperava va sortir igual en tots els casos $c' = c$. Hi havia una discrepància entre les dades experimentals i les deduccions teòriques. Com es podia explicar?

Els postulats d'Einstein

El 1905, un jove físic alemany, Albert Einstein, que treballava en una oficina de patents perquè ningú li volia donar feina com a investigador, va publicar un article amb el qual va revolucionar tots els conceptes de la física clàssica. La seva teoria, coneguda com a relativitat especial, es basa en dos postulats:

1. Principi de relativitat: Totes les lleis de la física són les mateixes en tots els sistemes de referència inercials. No hi ha sistemes privilegiats.
2. Principi de constància de la velocitat de la llum: la velocitat de la llum en el buit és constant i és sempre la mateixa independentment del moviment de la font.



En establir la no-existència de sistemes privilegiats, s'acaba amb la idea d'espai absolut i la constància de la velocitat de la llum destrueix la llei de suma de velocitats i concorda amb els resultats experimentals de Michelson i Morley.

Algunes conseqüències sorprenents d'aquests postulats són:

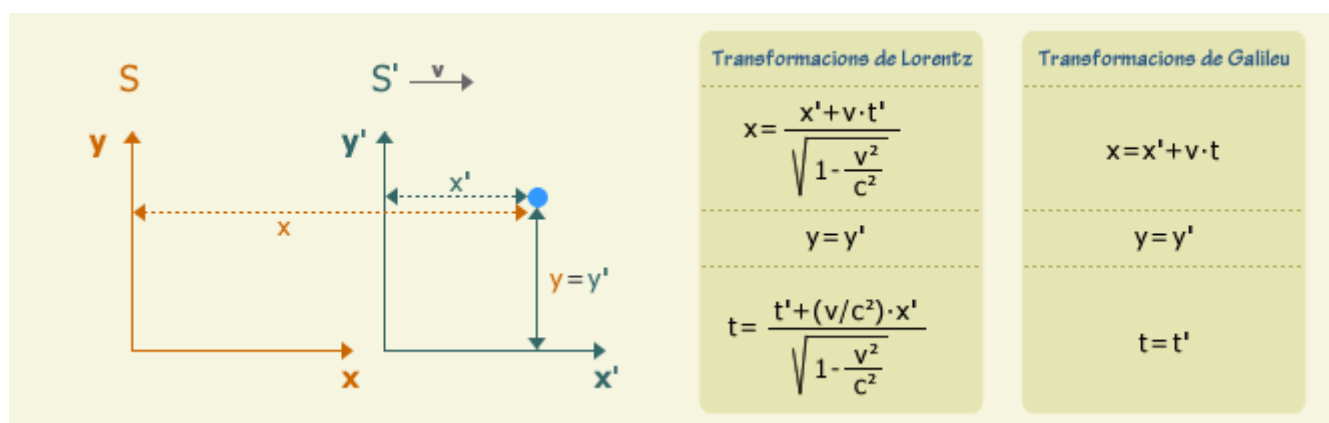
- L'espai i el temps ja no són absoluts, sinó que depenen de l'observador.
- Les transformacions de Galileu deixen de ser vàlides.
- El misteriós èter no existeix.
- La longitud dels cossos depèn del seu estat de moviment.

Aquestes idees no van ser gaire ben vistes per la ciència de l'època i van trigar molt de temps a ser acceptades per tota la comunitat científica.

La relativitat del temps

El segon postulat d'Einstein ens obliga a replantejar-nos la idea d'espai i temps absoluts. Dos esdeveniments que són simultanis per a un observador, no ho són per a un altre. El temps és relatiu, depèn del sistema de referència que utilitzem. De fet a partir d'Einstein, l'espai i el temps ja no estan separats sinó que s'han de considerar junts formant una entitat superior de quatre dimensions anomenada espai-temps.

L'espai i el temps són relatius i que, l'únic que podem considerar com a absolut és la velocitat de la llum. Les transformacions que inclouen els postulats de la relativitat s'anomenen transformacions de Lorentz.

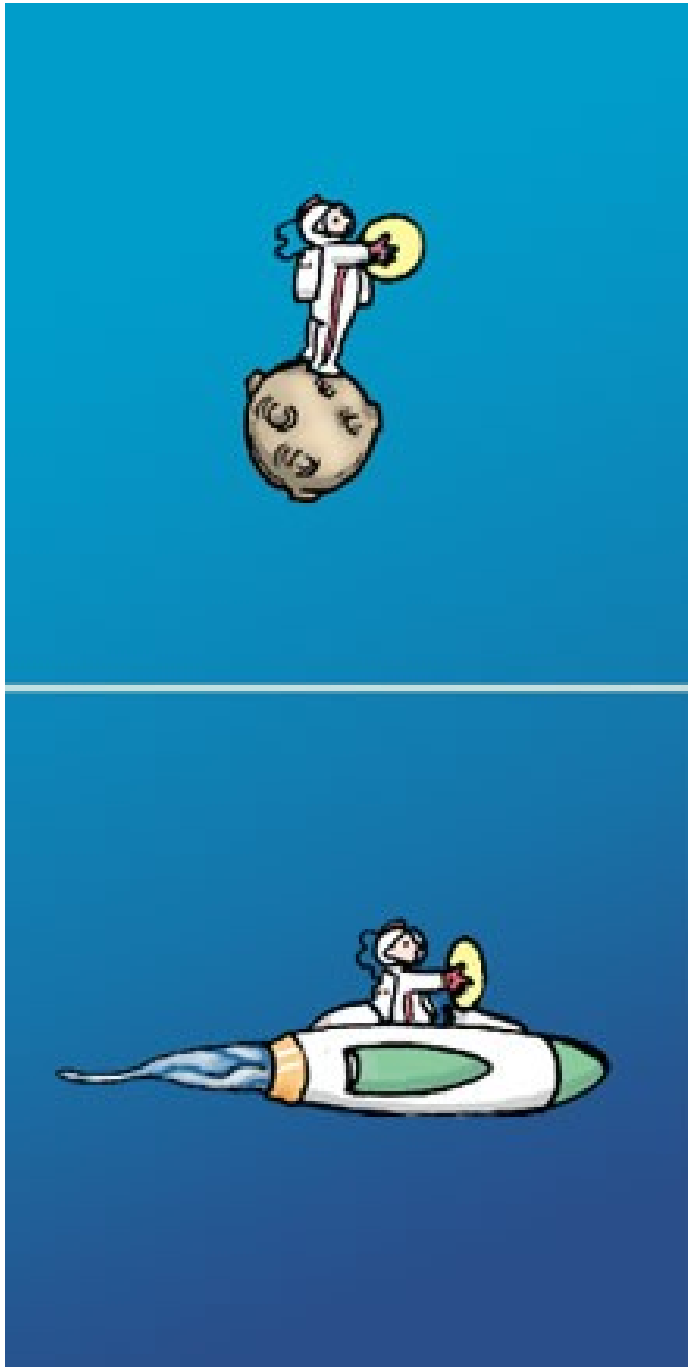


Considerem un sistema de referència **S'** movent-se amb velocitat v horitzontal constant respecte d'un altre sistema **S**. La relació entre les magnituds x' , y' , t' que mesurem des de **S'** i les magnitud x, y, t que mesurem des de **S** parteix de les transformacions de Lorentz. Com es pot observar, la posició i el temps depenen de la velocitat v amb que es mou el sistema **S'** i també de la

velocitat de la llum c , que se suposa absoluta i, a més, totes les velocitats han de ser inferiors a c .

Dilatació del temps i contracció de longituds

Les conseqüències més sorprenents de les transformacions de Lorentz fan referència a l'espai i el temps.



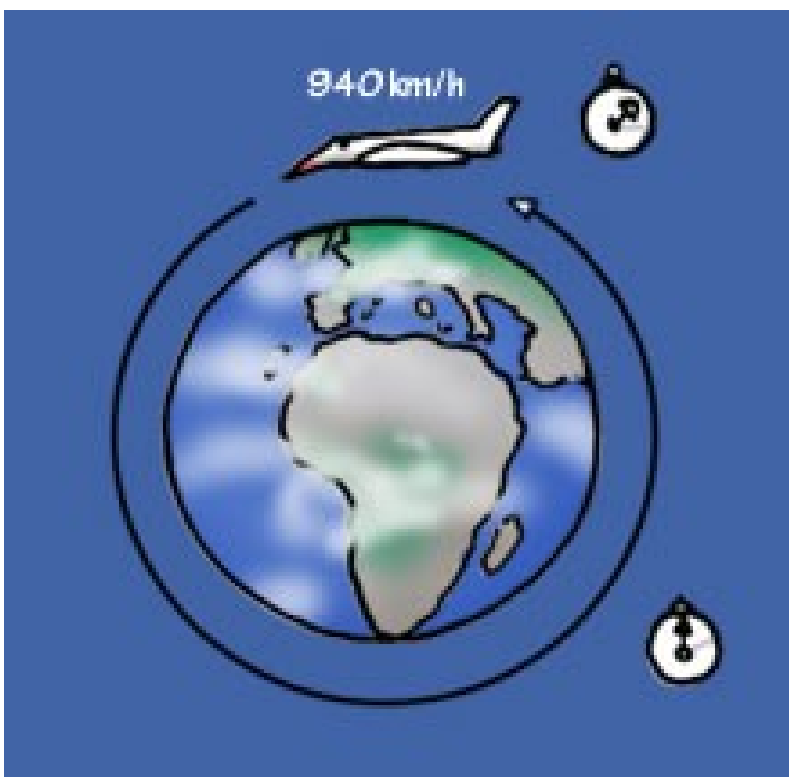
- La longitud d'un objecte és més gran quan està en repòs respecte de l'observador. Quan l'objecte es mou a una velocitat v amb relació a l'observador, la seva longitud es contrau en la direcció del moviment.
- El temps passa més lentament quan ens movem que quan estem en repòs.

El món de la ciència ficció està ple de viatges interestelars. L'astronauta es dirigeix rumb a una estella llunyana i ho fa amb una velocitat propera a la de la llum (300.000 km/s). Però en el espai estelar el temps passa més lentament. Quan torna al seu planeta, per al viatger de l'espai només han passat uns mesos però a la Terra han passat segles. Els seus amics i familiars fa molt de temps que han mort. L'astronauta ha fet un salt en el temps i la nau espacial ha funcionat com una màquina del temps. Però no és només ciència ficció, és un efecte de la relativitat.

El nostre entorn és ple d'objectes que es mouen. Normalment coneixem prou bé la velocitat aproximada a què acostumem a anar. Totes aquestes velocitats són molt baixes comparades amb la llum i els efectes que prediu la relativitat només són observables a velocitats altíssimes, de l'ordre de la velocitat de la llum. Així doncs, com podem comprovar-los?

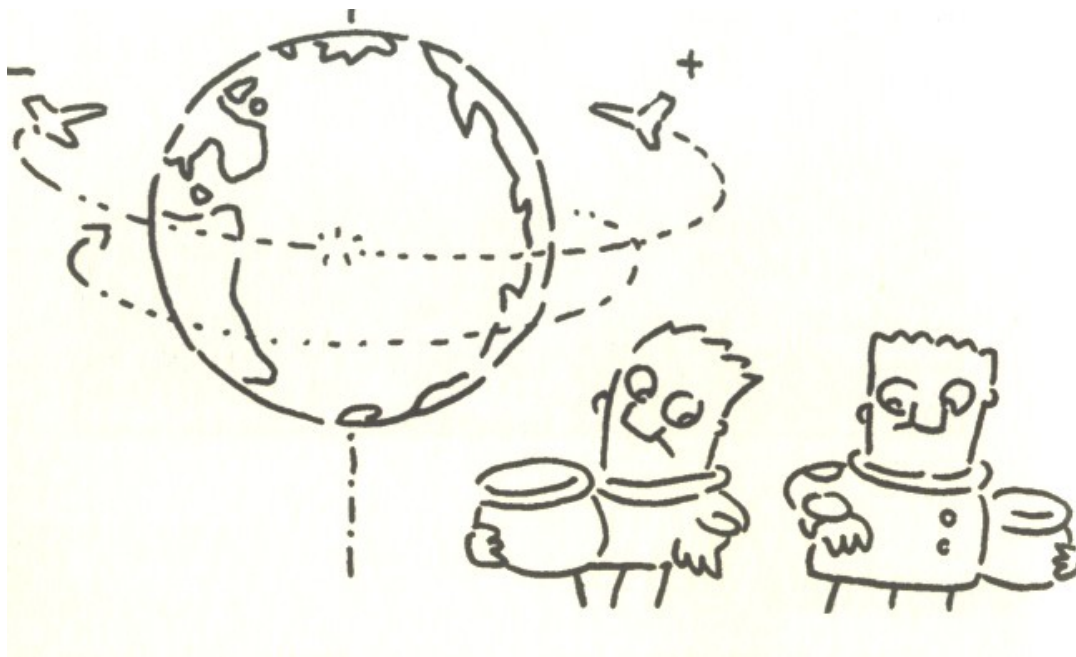
Comprovacions experimentals

A l'època que Einstein va formular la teoria, la tecnologia no estava prou desenvolupada per comprovar-la. Van haver de passar algunes dècades fins que es van poder confirmar experimentalment algunes de les seves prediccions.



Una primera confirmació la va donar l'experiment de Hafele i Keating. El 1971 ja existien els rellotges atòmics de precisió, i dos físics, Hafele i Keating, es van plantejar utilitzar-los per comprovar l'efecte de la dilatació del temps.

Per això, van sincronitzar dos rellotges atòmics i van deixar-ne un en repòs a la terra i l'altre el van ficar dins un avió Jumbo que va donar la volta a la Terra a una velocitat de 940 km/h. Els resultats van confirmar de ple la relativitat.



Una segona confirmació la dona el temps de vida dels muons. Els muons són unes partícules elementals que es formen quan els raigs còsmics impacten amb la part alta de l'atmosfera de la Terra. aquestes partícules tenen una vida molt curta, ja que en repòs es desintegren només en 2,2 microsegons.

Segons això no podríem detectar-los a la superfície de la Terra perquè es desintegrarien abans de poder arribar-hi, però els muons es detecten a molts laboratoris de la superfície terrestre. Per què? La resposta és la dilatació del temps predita per Einstein. Els muons viatgen gairebé a la velocitat de la llum i això fa que la seva vida "s'allargui" fins a 200 vegades la que tindrien en repòs.

Conseqüències dels postulats d'Einstein

Aplicant els postulats d'Einstein a la dinàmica s'obtenen també resultats sorprenents.

Una primera conseqüència és que la massa d'un cos depèn de la velocitat amb que es mogui segons la relació :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

on m_0 és la massa de cos en repòs, v és la velocitat amb que es mou el cos i c és la velocitat de la llum.

Aquesta relació és molt important perquè en podem deduir que com més ràpid va un cos més gran és la seva massa. Això suposa una limitació a la pràctica per a la velocitat dels cossos materials. Cap cos material no pot arribar a anar a la velocitat de la llum perquè la seva massa aniria augmentant fins a fer-se infinitament gran i, necessitaríem una energia infinita per poder impulsar-lo.



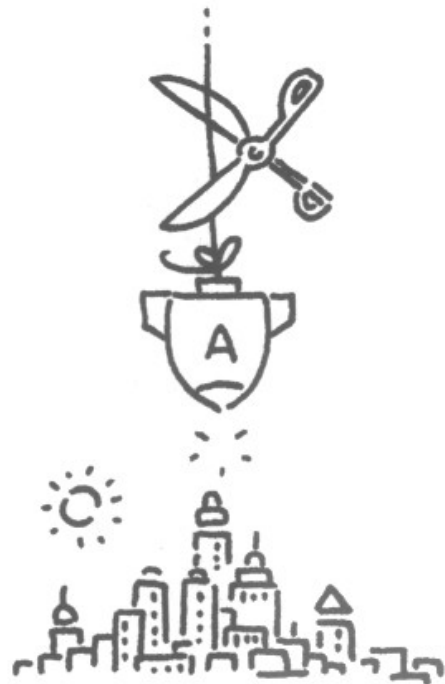
Una segona conseqüència dels postulats d'Einstein és que la massa es pot transformar en energia, segons la equació:

$$E = m \cdot c^2$$

La massa m , encara que sigui molt petita, multiplicada per la velocitat de la llum al quadrat, que és un valor molt gran ($c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$), allibera una enorme quantitat d'energia.

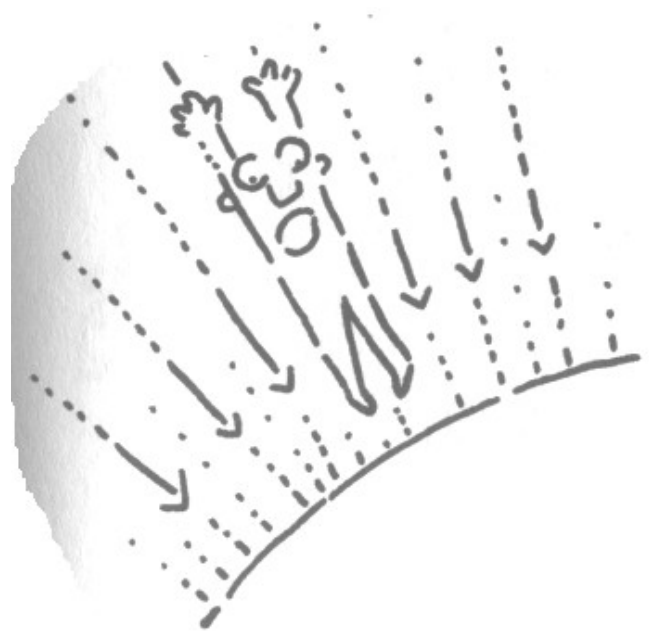
La bomba atòmica es basa en aquests conceptes.

Petites quantitats de matèria es poden transformar en enormes quantitats d'energia. En les centrals nuclears, la massa de combustible radiactiu (urani o plutoni), es transforma en energia tèrmica.



Relativitat general

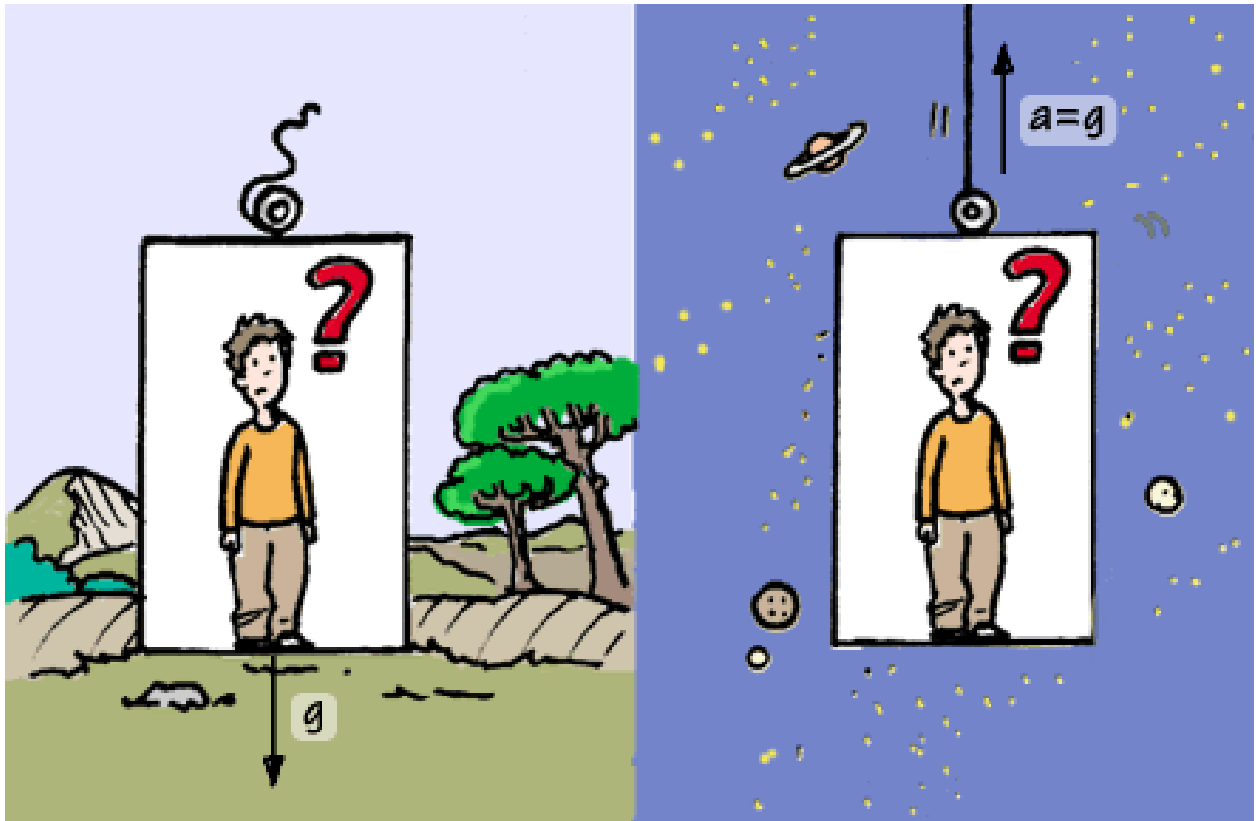
Després de formular la relativitat especial, Einstein va començar a treballar per intentar aplicar la relativitat a la gravitació. Després de pensar-hi molt, va tenir "la idea més feliç de la seva vida": si una persona cau en caiguda lliure, no sentirà el seu propi pes.



Aquesta idea formulada amb més precisió és l'anomenat principi d'equivalència: Un sistema de referència accelerat en l'espai lliure és localment equivalent a un sistema de referència en repòs dins d'un camp gravitatori.

Per justificar això, Einstein va posar l'exemple següent. Els dos observadors estan situats dins d'ascensors tancats. El primer està en repòs a la Terra i el segon es mou per l'espai lliure amb una acceleració igual a la de la gravetat.

Els dos observadors notaran els mateixos efectes, se sentiran enganxats al terra de l'ascensor, no podran notar cap diferència entre els dos casos.



En l'espai, el temps també canvia en relació a la gravetat. Com més gran sigui la atracció gravitatoria d'un cos, més lent passa el temps. Com més gran sigui la massa del cos atractor, més gran serà la gravetat i més lent passa el temps. Així a Júpiter el temps passa més a poc a poc que a la Terra. Y encara passa més lentament a la superfície del Sol o d'una estrella més gran. En els forats negres el temps es pararia.

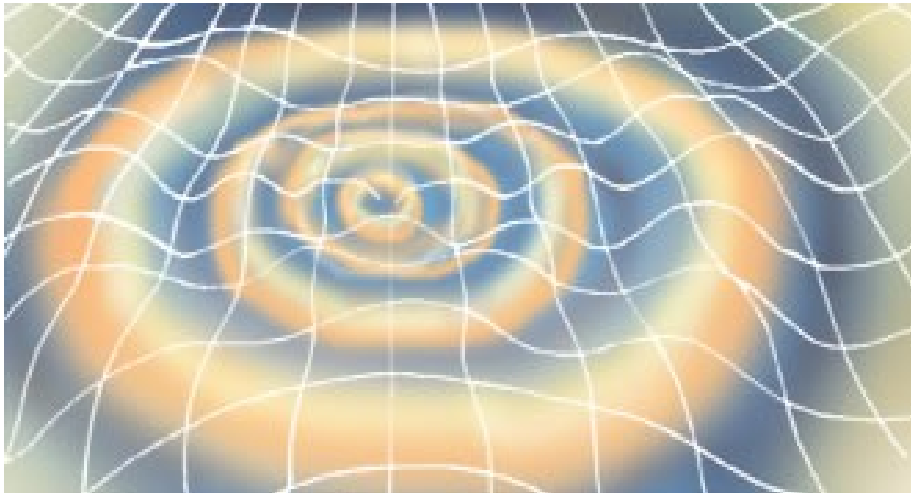
Les equacions de camp de la relativitat general

L'equivalència funcionaria perfectament si la Terra fos plana, però no va bé per una Terra esfèrica. Einstein va tenir llavors una segona idea genial: l'equivalència funciona si la geometria de l'espai-temps és corbada en lloc de plana. En essència, Einstein va suposar que la massa (i també l'energia) deformen l'espai-temps.

Aquí és on Einstein va aprofitar la geometria que Rieman havia desenvolupat molts anys abans. Amb conceptes matemàtics introduïts per Rieman, Einstein va ser capaç d'explicar els moviments del Sol, dels planetes i dels estels: simplement segueixen geodèsiques en un espai-temps corbat.



Per entendre com es comporten la gravetat i la massa en l'espai, imaginem que l'espai és com una làmina prima d'un material elàstic. Si hi situem un cos molt pesant, el cos

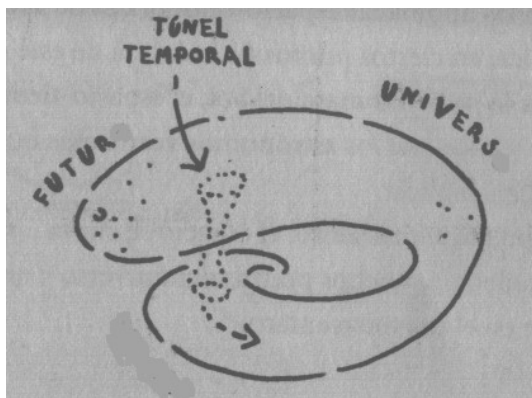


s'enfonçarà en la làmina elàstica i provocarà un enfonsament que serà més fondo com més pesant sigui el cos.

Però entre les seves dimensions, l'espai estel·lar també compren el temps. En conseqüència la massa corba l'espai-temps.

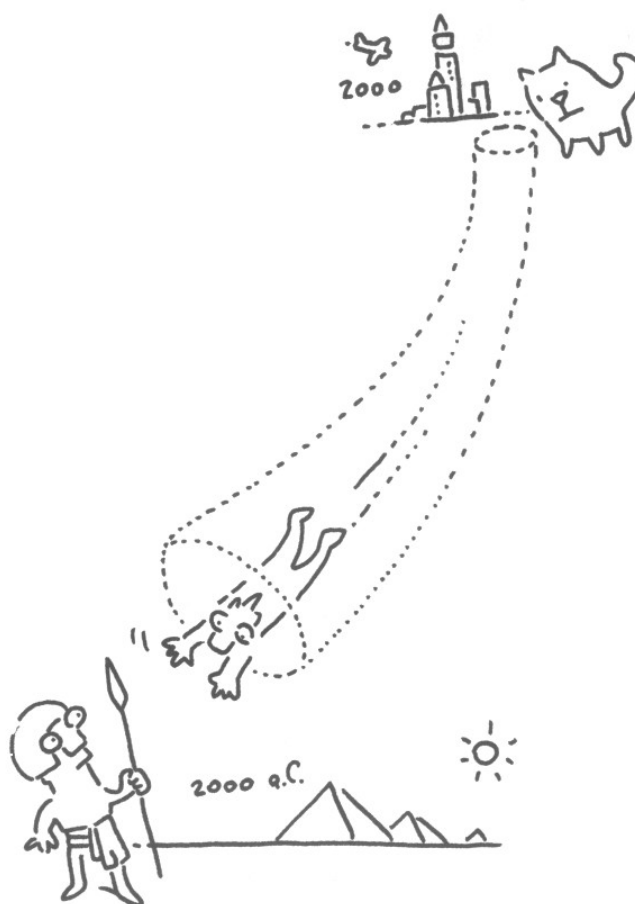
Quan la velocitat d'un objecte s'acosta a la velocitat de la llum, en relació a un observador en repòs, el temps s'alenteix i els objectes es fan petits mentre la massa augmenta. Per això i segons la Teoria de la Relativitat, si es pogués viatjar a la velocitat de la llum, els viatgers experimentarien tots aquests efectes i acabarien transformats en energia.

Després de molt treballar i de l'ajut d'un matemàtic amic seu, Marcel Grossman, Einstein va trobar les equacions que relacionen la curvatura de l'espai-temps amb el seu contingut en massa i energia. Era novembre de 1915 i la nova teoria va anomenar-se Relativitat General.

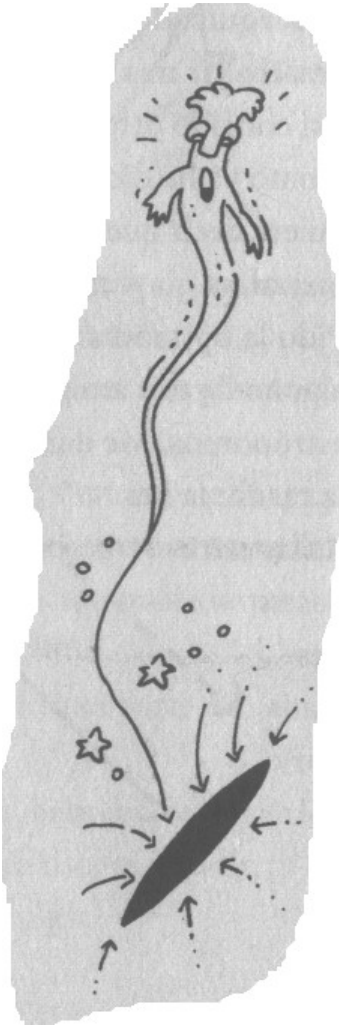


Segons la Teoria de la relativitat General, l'univers es corba sobre sí mateix.

Si fos així, dos parts de l'univers, una del passat i una del futur, podrien establir contacte, fent possible l'existència d'una drecera (una mena de túnel) espai-temporal. La nau Enterprise de "Star Trek" (de moment només del món de la ciència ficció), potser es desplaçari per túnels d'aquesta mena, teòricament possibles.



Els forats negres



Els forats negres eren estrelles com el Sol. En un moment determinat van explotar i després es van concentrar al voltant d'un nucli de massa de enormes dimensions. Una cullerada d'àtoms d'un forat negre equivaldria a la massa d'un portaavions.

La força d'atracció gravitatòria que fan és tan gran, que ni tan sols la llum hi pot escapar i és per això que s'anomenen "forats negres". No reflecteixen ni emeten llum, només l'absorbeixen. Però també

absorbeixen tot lo altre, incloent-hi el temps, que en quedar atrapat es mouria de forma alentida i fins i tot arribaria a aturar-se.





A la recerca de la quarta dimensió 1970