

TEXT HISTÒRIC:

El desembre de 1916, Einstein completava la redacció del llibre del qual en transcriurem un fragment, la "Teoria de la relativitat especial i general (a l'abast de tothom)". L'obra, que ha esdevingut un clàssic de la literatura científica del segle XX, segueix oferint una excel·lent introducció a la teoria de la relativitat i en ella Einstein es proclamà un gran divulgador científic.

*Einstein, Albert (1916). **La igualtat de les masses inercial i gravitatòria com a argument a favor del postulat de la relativitat general.** Secció 20 de la part II del llibre "Teoria de la relativitat especial i general (a l'abast de tothom)". Traducció de Xavier Roqué.*

"Imaginem un ampli fragment de l'espai buit tan allunyat dels estels i d'altres masses de consideració, que ens trobem molt aproximadament en el cas previst per la llei fonamental de Galileu. [...] Imaginem que el cos de referència és una gran caixa en forma d'habitació, on es troba un observador proveït d'aparells. [...] S'ha de lligar al terra si no vol que el menor cop contra el terra l'envii contra el sostre lentament.

Suposem que al mig del sostre de la caixa, per la part exterior, s'hagi fixat un ganxo amb una corda, i que un ésser inespecífic comenci a tibar-ne amb una força constant. La caixa i l'observador s'enlairaran conjuntament amb un moviment uniformement accelerat "cap amunt", i amb el temps assoliran una velocitat fantàstica, cas que ho observem tot des d'un altre cos de referència del qual no es tiba amb cap corda.

Ara bé, com jutja l'esdeveniment l'home de la caixa? El terra li transmet per reacció l'acceleració de la caixa, de forma que ha de resistir aquesta pressió amb les cames si no vol acabar a terra. Així, l'home s'està dret a la caixa igual que un altre s'estaria dret a una habitació d'una casa sobre la Terra. Si deixa anar un cos que té a la mà, l'acceleració de la caixa deixarà de transmetre-s'hi i el cos s'aproparà al terra amb un moviment relatiu accelerat. L'observador es convencerà, a més, *que l'acceleració del cos cap al terra és sempre la mateixa, sigui quin sigui el cos amb el qual faci l'experiment.*

[...], l'home de la caixa arribarà a la conclusió que tant ell com la caixa es troben en un camp gravitatori constant en el temps. Per uns moments se sorprendrà que la caixa no caigui en aquest camp, fins que descobreixi el ganxo del sostre i la corda tibant que hi és fixada i conclouï lògicament que la caixa penja en repòs dins el camp gravitatori.

Tindríem cap dret a riure'ns de l'home i dir que la seva interpretació és errònia? Crec que no, si volem ser conseqüents, havent de reconèixer en canvi que la seva manera de veure les coses no falta a la raó ni a les lleis de la mecànica que coneixem. Encara que la caixa acceleri respecte de l'"espai galileu" que hem considerat primer, bé podríem considerar que està en repòs. Tenim doncs bones raons per estendre el principi de relativitat a cossos de referència accelerats els uns respecte dels altres, i disposem així d'un argument poderós a favor d'un postulat de relativitat generalitzat.

Observi's bé que la possibilitat d'aquesta concepció reposa sobre la propietat fonamental que té el camp gravitatori de conferir a tots els cossos la mateixa acceleració, o el que significa el mateix, sobre la proposició que les masses inercial i gravitatòria són iguals. Si no existís aquesta llei de la natura, l'home dins la caixa accelerada no podria interpretar el comportament dels cossos del seu entorn pressuposant l'existència d'un camp gravitatori, i cap experiència no li permetria suposar que el seu cos de referència està "en repòs".

Suposem que l'home de la caixa fixa una corda al sostre i en penja un cos, que fa que la corda pengi tensa "verticalment". Si ens demanem quina és la causa de la tensió de la corda, l'home de la caixa dirà: "El cos suspès en el camp gravitatori experimenta una força cap avall, que és equilibrada per la tensió de la corda; la

magnitud de la tensió ve donada per la *massa gravitatòria* del cos suspès". D'altra banda, un observador suspès lliurement a l'espai descriurà així la situació: "La corda està obligada a participar del moviment accelerat de la caixa i el transmet al cos que hi està fixat. La tensió de la corda és just la necessària per accelerar aquest cos. La magnitud de la tensió ve donada per la *massa inercial* del cos".

Aquest exemple ens mostra que la nostra extensió del principi de la relativitat revela com a *necessària* la proposició que les masses inercial i gravitatòria són iguals. Obtenim així una interpretació física d'aquesta igualtat.

La consideració de la caixa accelerada mostra que una teoria de la relativitat general ha de lliurar resultats importants sobre les lleis de la gravitació. De fet, el desenvolupament conseqüent de la idea de la relativitat general ha lliurat les lleis que satisfà el camp gravitatori". [...]

FONT:

Roqué, Xavier.(2000). *Albert Einstein. La teoria de la relativitat i altres textos Col·lecció Clàssics de la Ciència.* Barcelona. Vic. Institut d'Estudis Catalans/Editorial Pòrtic/Eumo Editorial. (pp.36-37).



QÜESTIONS:

1.- Què vol dir Einstein quan descriu l'escenari imaginari d'aquesta cèlebre experiència i afirma que "*ens trobem molt aproximadament en el cas previst per la llei fonamental de Galileu*"?

2.- Quina sensació deu de tenir l'observador (que podria ser també una observadora)?

3.- Per què creus que puntualitza Einstein que l'observador va proveït d'aparells? Per què la massa de la caixa hauria de ser menyspreable?

4.- Per què l'ésser inespecífic ha de tirar amb una força constant? Quin tipus de moviment s'establirà?

Pregunta menys rellevant i en relació a l'"ésser inespecífic": et recorda algun altre ésser que, en aquell cas era diminut, molt i molt cèlebre de la història de la física?

5.- Dibuixa l'esquema de forces que actuen sobre la caixa i sobre l'observador i respon:

Per què l'observador/a experimenta l'acceleració "cap amunt" de la caixa? En virtut de quina llei de la dinàmica? On es localitza la parella i quina sensació deu de tenir ara l'observador/a?

6.- Amb quina acceleració -en relació a la de la caixa- "cauen" els objectes que deixa anar l'observador? Tots amb la mateixa?

7.- Quina és la interpretació que fa l'observador del que està passant? Contradiu aquesta interpretació alguna llei de la mecànica?

8.- Dibuixa l'esquema de forces que actuen sobre el cos penjat del sostre de la caixa en els dos casos descrits en el text: des del punt de vista de l'observador situat dins de la caixa i des del punt de vista de l'observador exterior que es mou lliurement per l'espai.

9.- Defineix massa gravitatòria i massa inercial. Per què han de ser necessàriament iguals?

10.- Analitzant les experiències descrites en el text, creus que és correcte concloure que és **equivalent** estar en repòs en un camp gravitatori o bé, estar uniformement accelerats en l'espai buit en sentit contrari?

11.- Un altre cas relacionat: quin pes aparent tenim en caiguda lliure?

12.- Quina motivació va empènyer Einstein a imaginar aquesta experiència?

PER SABER-NE MÉS:

La igualtat de la massa inercial i la massa gravitatòria és el que s'anomena *Principi d'equivalència feble*, que tal com Einstein exposa en el text és una condició *necessària* per aconseguir que l'acció del camp gravitatori i de "l'ésser inespecífic" o coet – que generen un MRUA en sentit contrari- donin els mateixos resultats i siguin indistingibles.

El *Principi d'equivalència fort* afirma que tots els fenòmens dins el laboratori succeiran exactament igual en qualsevol de les dues situacions i resulta ser una condició suficient per tal que es verifiqui que la massa inercial és igual a la massa gravitatòria.

Einstein començà a gestar el Principi d'equivalència (*"la idea més feliç de la meua vida"*) quan reflexionava sobre el fet que una persona en caiguda lliure no experimenta cap força gravitatòria. La seva caiguda "elimina" la gravitació. En altres paraules, localment, una persona en caiguda lliure actua com si fos un observador inercial.

El Principi d'equivalència és el primer pas cap a l'elaboració de la teoria de la relativitat general (Einstein hi invertí més d'onze anys).

Aquesta teoria estendrà el principi de relativitat ("les lleis de la natura són vàlides per a tots els sistemes de referència sigui quin sigui el seu tipus de moviment") i afirmarà que la gravitació genera una curvatura de l'espai-temps. L'espai-temps és deformat per la distribució de massa i energia que conté.

Enllaç interessant: ciencia@nasa i el Principi d'Equivalència (no et perdis el vídeo!)
http://ciencia.nasa.gov/headlines/y2007/18may_equivalenceprinciple.htm?list929310