

Discos que giren i ascensors que cauen

L'esforç d'**EINSTEIN** per explicar la Teoria general de la relativitat

Joaquín Lambies

Professor de Filosofia · IES Pedreguer

Einstein va desenvolupar la teoria general de la relativitat en el període de temps comprés entre 1907 i 1915. El seu propòsit principal era estendre el principi de relativitat, aplicable fins ara només a sistemes inercials, de tal manera que fora vàlid per als no inercials, és a dir, per a sistemes accelerats. Així doncs, el resultat final hauria de ser que les mateixes lleis físiques foren vàlides en qualsevol sistema, amb independència del seu estat de moviment. El mode de dur a terme aquesta extensió es va basar en allò que Einstein va descriure com “el pensament més feliç de la meua vida” i que el portava a constatar que una persona caient lliurement en un camp gravitatori no sentiria el seu propi pes. En la seua obra divulgativa *L'evolució de la física*, Einstein presenta una forma didàctica d'entendre la seua proposta. Imaginem un ascensor que cau lliurement en un camp gravitatori (Fig. 1). Una persona, que viatja en ell, trau un mocador i el solta. Què passaria? Com, d'acord amb l'ensenyament de Galileu, tots els cossos cauen amb una mateixa acceleració, amb independència de la seua massa, el nostre viatger de l'ascensor veuria el mocador en repòs en el lloc on el va soltar (ja que les seues distàncies relatives es mantenen inalterades) i, així continuaria, llevat que rebera alguna influència externa. Què passaria ara si el mocador fora espentat? El veuríem accelerar fins aconseguir una velocitat final amb la qual es desplaçaria uniformement i en línia recta fins arribar al sòl de l'ascensor. Quines conclusions trau de tot això Einstein? Que el sistema uniformement accelerat que representa l'ascensor és equivalent a un sistema inercial ja que no hi ha cap manera de distingir tots dos sistemes a partir de la manera de comportar-se els objectes en ells. «En resum», afirma Einstein, «les lleis de la mecànica es compleixen per a l'observador interior, perquè tots els cossos es comporten segons una esperància del principi d'inèrcia”. (Einstein i Infeld, 1993, p. 174) En efecte, el moviment del mocador hauria seguit les mateixes lleis mecàniques tant si els fets hagueren succeït en un sistema uniformement accelerat, com ocorre en un camp gravitatori, o en un sistema inercial (que podem considerar en repòs o en desplaçament uniforme rectilini).

Aquesta extensió del principi d'equivalència per a incloure sistemes accelerats tindrà conseqüències profundes. Per a començar, va portar Einstein a pensar que la geometria euclidiana no era la més indicada per a la descripció de l'espai físic. El mateix Einstein narra que va arribar a aquesta conclusió reflexionant sobre dos discos

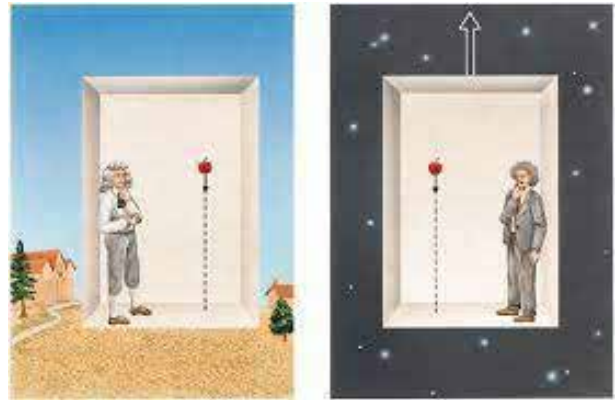


Fig. 1

iguals superposats (disc A i disc B) els centres dels quals coincidiren i pels quals passara un eix comú. Es tracta ara de suposar que el disc A es troba en rotació mentre que el disc B roman en repòs. Què passaria ara si -i en això insisteix molt Einstein- utilitzant exactament la mateixa vara de mesurar intentàrem determinar la mesura del diàmetre i de la circumferència dels dos discos. Doncs bé, trobaríem que la mesura de B no ens donaria especials sorpreses, si finalment el quocient entre la seua circumferència i el seu diàmetre són iguals a Pi. No obstant això, i és ací on els resultats prenen un caire sorprenent, aquest mateix càlcul oferiria un valor superior a Pi en el cas del disc A. Per què? No estan els dos discos en perfecta superposició amb centre comú? No són iguals? La raó que explica la discrepància de valor no hem de buscar-la a l'hora de mesurar el diàmetre de A, sinó en l'intent de mesurar la seua circumferència. En aquest últim cas, hem de col·locar la nostra vara de mesurar (la mateixa amb la qual mesurem en B) en perpendicular al radi del disc i, aleshores, la vara s'alinea amb la direcció del moviment, circumstància que, d'acord amb el que s'estableix en la relativitat restringida, produiria un escurçament de la vara. Així doncs, el resultat final és que, sent el quocient entre circumferència i diàmetre superior a Pi en el disc A, hem de concloure que l'espai no és euclidià en aquest disc. Però resulta, a més, que el disc A és equiparable a un sistema de referència sotmés a un camp gravitatori (per la presència d'una força centrífuga). I, atès que segons el principi de relativitat estès, els sistemes inercials han de considerar-se equivalents als sistemes accelerats, el resultat d'aquest experiment mental ens indica que la geometria euclidiana havia de ser substituïda per una altra de més apropiada a l'hora d'estudiar qualsevol sistema físic en general.

Einstein va desenvolupar la teoria general de la relativitat en el període de temps comprés entre 1907 i 1915. El seu propòsit principal era estendre el principi de relativitat, aplicable fins ara només a sistemes inercials, de tal manera que fóra també vàlid per als no inercials, és a dir, per a sistemes accelerats.



Albert Einstein (1879-1955).

A partir d'aquests resultats, la teoria general de la relativitat va introduir una nova teoria de la gravitació segons la qual la matèria, i també l'energia, tenien la capacitat de corbar l'espai-temps. I en aquest punt, Einstein va poder aprofitar el treball sobre geometries no euclidianes ja realitzat per diversos matemàtics al segle XIX. Van ser per a ell especialment profitoses les aportacions de **Bernhard Riemann** ja que aquest autor havia desenvolupat una geometria no euclidiana que feia possible la determinació intrínseca de la curvatura.

Així doncs, en 1917 Einstein va publicar "Consideracions cosmològiques en la teoria general de la relativitat", un article on utilitzava la teoria general de la relativitat per construir un model d'univers. Aquesta aportació revolucionària suposa una renovació radical dels plantejaments teòrics acceptats fins ara en cosmologia. La novetat és tan important que alguns historiadors l'han qualificada fins i tot com a punt d'origen de la cosmologia científica.

Les equacions proposades per Einstein per al camp gravitatori partien d'una matèria uniformement repartida en l'univers i una densitat constant. La constància de la densitat assegurava una curvatura espacial constant. Al seu torn, aquesta curvatura de l'espai-temps ens situava davant un univers espacialment tancat i finit. D'aquesta manera, es donava solució al problema de les condicions en els límits que, inevitablement, es plantejava en l'univers newtonià (atesa la seua naturalesa euclidiana i infinita, la quantitat de matèria que ha de contindre resulta igualment infinita i, amb això, el potencial gravitatori romania indefinit).

Tanmateix, en el model d'Einstein, tal com ha sigut presentat, es generava una tendència al col·lapse gravitatori. Per a poder mantindre un univers estàtic, Einstein va haver d'introduir una constant cosmològica que compensara aquesta tendència al col·lapse gravitatori.

Poc temps després que Einstein donara a conèixer el seu model cosmològic, l'astrònom i amic d'Einstein, **William De Sitter** va trobar altres solucions a les equacions de camp d'Einstein. En una d'elles, l'univers que s'obtenia era també estàtic i, així mateix, s'hi feia ús d'una constant cosmològica positiva. No obstant això, la gran diferència consistia en el fet que es tractava en aquest cas d'un univers buit de matèria. Einstein es va negar a reconèixer-li cap mena de significat físic a aquest model ja que, segons ell, les propietats de l'espai-temps eren causades sempre per la distribució de matèria i energia.

I això no és tot. També l'astrònom i professor de matemàtiques rus **Alexander Friedmann** va trobar altres solucions a les equacions d'Einstein. La novetat més destacable de l'aportació de Friedmann és que fa possible que la curvatura varie amb el temps. Ens trobaríem, així, amb un univers de radi variable en funció de quin siga el valor assignat a la constant cosmològica. Si la constant cosmològica era major que la utilitzada en el model d'Einstein, aleshores l'univers tindria un radi creixent, és a dir, ens trobaríem davant un univers en expansió. Aquesta expansió contínua tindria lloc a partir d'un punt singular de radi nul. L'existència d'aquest punt d'origen, situat en algun moment del passat, permetria parlar, en principi, d'una "edat de l'univers".

En canvi, si la constant cosmològica fora menor que la feta servir en el model d'Einstein, aleshores ens trobaríem davant un univers on es produiria una alternança entre períodes d'expansió i períodes de contracció.

Malgrat la gran rellevància teòrica que, vist retrospectivament, presenten els models de Friedmann, la veritat és que van tindre escassa repercussió en el seu temps. Això va ser motivat, d'una banda, per la insistència del mateix Friedmann en el caràcter purament matemàtic de les seues aportacions i, per una altra, pel fet que ningú, en aquells moments, no estava disposat a acceptar la idea d'un univers en expansió.

A. Einstein i L. Infeld, *L'evolució de la física*, Ed. orig: Cambridge Univ. Press, 1938.