

# UN BREU RESUM DEL DESENVOLUPAMENT DE LA TEORIA DE LA RELATIVITAT

per Albert Einstein

6 (142/octubre 1980)

ciència 3

Un número sobre Einstein sense una divulgació de la teoria que l'ha fet més conegut quedaria coix. En aquest cas el problema ha estat senzill: Einstein féu un gran esforç per divulgar les seves teories, un esforç sostingut per uns dots literaris innegables. L'article que encapçalava un número de la revista anglesa «Nature» sobre la relativitat és una mostra del que hem dit.

Albert Einstein (Ulm, 1879 - Princeton, 1955), físic alemany, nacionalitzat suís i, més tard, nord-americà. Amb els seus treballs personifica els desenvolupaments teòrics més importants de la física moderna. Treballà successivament a Zuric, Praga, Berlín i Princeton. La seva anada als Estats Units fou deguda a la persecució que el nazisme féu de les seves teories i de la seva persona. És enormement conegut arreu del món per la seva teoria de la relativitat, teoria que ha proporcionat una nova visió de la mecànica del món físic. La seva militància pacifista i en defensa dels drets dels jueus contribuï a engrandir la seva popularitat. Visità el nostre país l'any 1923, provinent del Japó i Palestina. Donà un curs a Barcelona i després féu el mateix a Madrid i Saragossa. Les seves publicacions són molt nombroses: *L'evolució de la Física*, escrita amb L. Infeld, fou publicada a Barcelona per Edicions 62 l'any 1968; fa poc ha aparegut *Mi visión del mundo*, Barcelona, Ed. Tusquets, 1980. L'article que publiquem traduït per Roser Nogués procedeix de la revista anglesa «Nature».



Em resulta molt atractiu presentar, de la manera més breu possible i, al mateix temps, de manera completa, l'evolució d'una seqüència d'idees, conservant la continuïtat del seu desenvolupament al llarg de l'explicació. Això és el que farem amb la teoria de la relativitat i demostrarem que la construcció total està composta de petites i quasi autoevidents fases del pensament.

El desenvolupament complet comença i està dominat per la idea de Faraday i Maxwell, d'acord amb la qual tots els processos físics comporten una continuïtat d'acció (oposada a l'acció a distància), o bé, en llenguatge matemàtic, estan expressades per equacions en derivades parcials. Maxwell aconseguí fer això per als processos electromagnètics en cossos en repòs, mitjançant la concepció de l'efecte magnètic del corrent de desplaçament en el buit, juntament amb el postulat d'identitat de la natura dels camps electrodinàmics produïts per la inducció i el camp electrostàtic.

L'extensió de l'electrodinàmica al cas dels cossos en moviment fou adoptada pels successors de Maxwell. H. Hertz intentà resoldre el problema assignant a l'espai buit (l'èter) propietats molt semblants a les que posseeix la matèria ponderable, la que es pot pesar; en particular, com a matèria ponderable, l'èter hauria de tenir en cada punt una velocitat definida. El mateix que els cossos en repòs, la inducció electromagnètica hauria d'estar determinada per la taxa o ni-

sobre la propagació de la llum en líquids que flueixen. L'extensió més òbvia de la teoria de Maxwell en el cas dels cossos en moviment era incompatible amb els resultats de l'experiment.

En aquest punt les teories de Lorentz varen ser de gran ajut. A la vista de la seva no qualificada adhesió a la teoria atòmica de la matèria, Lorentz se sentí incapaç de considerar aquesta última com a *font* de camps electromagnètics. En conseqüència, interpretava aquests camps com a condicions de l'èter, el qual era considerat continu. Lorentz considerava l'èter intrínsecament independent de la matèria, tant des del punt de vista mecànic com des del punt de vista físic. L'èter no participava en els moviments de la matèria, i la reciprocitat entre l'èter i la matèria podia assumir-se només quan aquesta última es considerés portadora de les càrregues elèctriques pertinents. El gran valor de la teoria de Lorentz és que l'electrodinàmica, tant dels cossos en repòs com dels cossos en moviment, feia referència a les equacions de Maxwell en l'espai buit. Aquesta teoria no solament sobrepassava la de Hertz quant al mètode, sinó que, amb el seu ajut, H.A. Lorentz tingué un èxit preeminent en explicar els fets experimentals.

La teoria es mostrava insatisfactòria solament en un punt de fonamental importància. Semblava donar preferència a un sistema de coordenades d'un estat particular de moviment (en repòs en relació amb l'èter), al contrari de tots els altres sistemes de coordenades, en moviment respecte a aquest. En arribar a aquest punt, la teoria semblava estar en oposició directa amb la mecànica clàssica, en la qual tots els sistemes d'inèrcia que estan en moviment uniforme els uns respecte als altres són igualment justificables com a sistemes de coordenades (principi especial de la relativitat). D'aquesta manera tota l'experiència també en el terreny electrodinàmic (en particular l'experiment de Michelson) donava suport a la idea de l'equivalència de tots els sistemes d'inèrcia, és a dir, estava a favor del principi especial de la relativitat.

La teoria especial de la relativitat deu el seu origen a aquesta dificultat, la qual, a causa de la seva natura fonamental, resultà ser intolerable. Aquesta teoria originà la resposta a la pregunta: ¿és realment el principi especial de la relativitat contradictori amb les equacions de camp de Maxwell per a l'espai buit? La resposta a aquesta pregunta va ser afirmativa. Perquè si aquestes equacions són vàlides en referència a un sistema de coordenades K, i nosaltres introduïm un nou sistema de coordenades K' d'acord amb les (a tots els efectes ja establertes) equacions de transformació:

$$\begin{aligned}x' &= x - vt \\y' &= y \\z' &= z \\t' &= t\end{aligned}$$

(transformació de Galileu)

vell de canvi del flux elèctric o magnètic respectivament, tenint en compte que aquestes velocitats d'alteració es refereixen a elements de superfície que es mouen juntament amb el cos. Però la teoria de Hertz s'oposava a l'experiment fonamental de Fizeau

Un moviment accelerat pot produir els efectes d'un camp gravitatori. Aquest és un dels principis de la relativitat general.

(Dibuix de Bernarda Bryson a G. Gamow: La gravetat. «Scientific American», març 1961.)

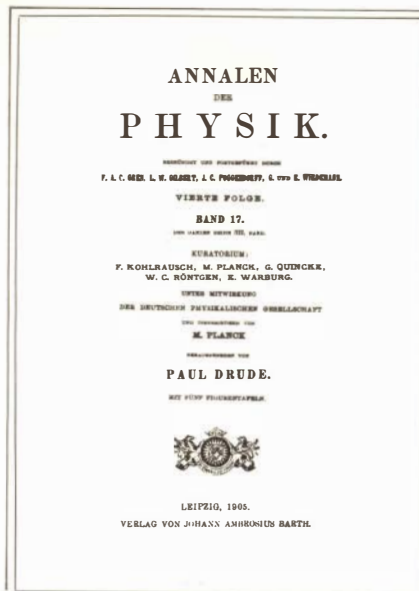


la massa inerta d'aquest cos augmenta en una quantitat  $E/c^2$ , on  $c$  és la velocitat de la llum al buit. D'altra banda, un cos de massa  $m$  es pot considerar com un magatzem d'energia de magnitud  $mc^2$ .

A més, es va comprovar aviat que era impossible fer una construcció de la ciència de la gravitació d'una manera natural. En arribar a aquest punt em va sobtar el fet que la força de la gravi-

tació comptés amb una propietat fonamental, que la distingia d'altres forces electromagnètiques. Tots els cossos cauen amb la mateixa acceleració en un camp gravitatori, o bé —el que no és sinó una altra formulació del mateix fet— la massa gravitòria i d'inèrcia d'un cos és numèricament igual. Aquesta igualtat numèrica suggereix identitat de caràcter. Poden ser idèntiques la gravitació i la inèrcia? Aquesta qüestió ens porta directament vers la teoria general de la relativitat. ¿És que no m'és possible





3. Zur Elektrodynamik bewegter Körper;  
von A. Einstein.

Daß die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe gegenwärtig aufgeföhrt zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzulassen scheinen, ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet, während nach der üblichen Auffassung die beiden Fälle, daß der eine oder der andere dieser Körper der bewegte sei, streng voneinander zu trennen sind. Bewegt sich nämlich der Magnet und ruht der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten ein elektrisches Feld von gewissem Energiawerte, welches an allen Orten, wo sich Teile des Leiters befinden, einen Strom erzeugt. Ruht aber der Magnet und bewegt sich der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten kein elektrisches Feld, dagegen im Leiter eine elektromotorische Kraft, welcher an sich keine Energie entspricht, die aber — Gleichheit der Relativbewegung bei den beiden ins Auge gefaßten Fällen vorausgesetzt — zu elektrischen Strömen von derselben Größe und demselben Verlaufe Veranlassung gibt, wie im ersten Falle die elektrischen Kräfte.

Beispiele ähnlicher Art, sowie die mißlungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum „Lichtmedium“ zu konstatieren, führen zu der Vermutung, daß dem Begriffe der absoluten Ruhe nicht nur in der Mechanik, sondern auch in der Elektrodynamik keine Eigenschaften der Erscheinungen entsprechen, sondern daß vielmehr für alle Koordinatensysteme, für welche die mechanischen Gleichungen gelten, auch die gleichen elektrodynamischen und optischen Gesetze gelten, wie dies für die Größen erster Ordnung bereits erwiesen ist. Wir wollen diese Vermutung (deren Inhalt im folgenden „Prinzip der Relativität“ genannt werden wird) zur Voraussetzung erhalten und außerdem die mit ihm nur scheinbar unvertägliche

Sobre l'electrodinàmica dels cossos en moviment, l'article que Einstein publicà el 1905 als «Annalen der Physik», on introduí per primer cop les idees de la relativitat.

llavors les equacions de camp de Maxwell ja no són vàlides en les noves coordenades ( $x', y', z', t'$ ). Però les aparences ens deceben. Una anàlisi més entretinguda del significat físic de l'espai i del temps posa en evidència que la transformació de Galileu es fonamenta sobre suposicions arbitràries, i, en particular, en la que el supòsit de la simultaneïtat té un significat que és independent de l'estat de moviment del sistema de coordenades emprat. Es demostrava que les equacions de camp per al buit satisfien el principi especial de la relativitat, fent ús de les equacions de transformació següents:

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

(transformació de Lorentz)

En aquestes equacions,  $x, y$  i  $z$  representen les coordenades mesurades en unitats de longitud, que són en repòs en referència al sistema de coordenades, i  $t$  representa el temps mesurat amb rellotges adaptats d'identica construcció, que es troben en un estat de repòs.

En virtut del que ens mostra el principi especial de la relativitat, és necessari que totes les equacions en física no alterin la seva forma en fer la transició d'un sistema d'inèrcia a un altre, quan utilitzem la transformació de Lorentz per calcular aquest canvi. En el llenguatge matemàtic, tots els sistemes d'equacions que expressin lleis físiques han de ser covariants respecte a la transformació de Lorentz. Des del punt de vista del mètode, el principi especial de la relativitat és comparable al principi de Carnot de la impossibilitat d'un moviment continu de segona espècie, ja que, igual que aquest últim, ens proporciona una condició general que totes les lleis naturals han de satisfer. Posteriorment, H. Minkowski trobà una expressió particularment elegant i suggestiva per a aquesta condició de covariància, la qual revela una relació formal entre la geometria euclidiana de tres dimensions i el continu espai-temps de la física.

Geometria euclidiana de tres dimensions	Teoria especial de la relativitat
Existeix una mesura numèrica (distància $ds$ ), corresponent a	Existeix una mesura numèrica (distància $ds$ ), corresponent a

dos punts veïns en l'espai, que concorda amb l'equació:  
 $ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2$

És independent del sistema de coordenades escollit i es pot mesurar amb unitats

Les transformacions permissibles són de tal caràcter, que l'expressió  $ds^2$  és invariable, és a dir, que les transformacions lineals ortogonals són permissibles.

Respecte a aquestes transformacions, les lleis de la geometria euclidiana són invariables.

D'això es desprèn que, respecte al seu paper en les equacions físiques, encara que no amb la seva significació física, el temps és equivalent a les coordenades de l'espai (deixant de banda les relacions de realitat). Des d'aquest punt de vista, la física és, tal com ja era, una geometria euclidiana de quatre dimensions, o més correctament, una estàtica en un continu euclidià quadridimensional.

El desenvolupament de la teoria especial de la relativitat consisteix en dues fases principals, les quals podríem definir com l'adaptació de la «mètrica» espai-temps a l'electrodinàmica de Maxwell i l'adaptació de la resta de la física a aquesta «mètrica» alterada de l'espai-temps. El primer d'aquests processos concorda amb la relativitat de la simultaneïtat, la influència del moviment en les mesures de longitud i els rellotges, la modificació de la cinemàtica i en particular un nou teorema de l'addició de velocitats. El segon procés aporta modificacions a la llei del moviment de Newton per a gran velocitats, juntament amb informació de fonamental importància sobre la natura de la massa inerta. Es descobrí que la inèrcia no és una propietat fonamental de la matèria, ni tampoc una magnitud irreductible, sinó una propietat de l'energia. Si donem una quantitat d'energia  $E$  a un cos,

dos punts veïns en l'espai-temps (successos puntuals), que concorda amb l'equació  $ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + dx_4^2$ .

És independent del sistema d'inèrcia escollit i es pot mesurar amb unitats de longitud i un rellotge estàndard.  $X_1, X_2$  i  $X_3$  són aquí coordenades rectangulars, mentre que  $X_4 = \sqrt{-1}ict$  és el temps multiplicat per la unitat imaginària i la velocitat de la llum.

Les transformacions permissibles són d'un tal caràcter que l'expressió  $ds^2$  és invariable, és a dir, són permissibles les substitucions lineals ortogonals que mantinguin semblança amb  $x_1, x_2, x_3$  i  $x_4$ . Aquestes substitucions són les de la transformació de Lorentz.

Respecte a aquestes transformacions, les lleis de la física són invariables.

de considerar la terra lliure de la rotació, si concebo la força centrífuga que actua sobre tots els cossos en repòs en relació amb la Terra com un camp «real» de gravitació o bé com una part d'aquest camp? Si aquesta idea es pot dur a terme, llavors hauríem provat realment la identitat de la gravitació i la inèrcia. Puix que la mateixa propietat que es considera *inèrcia* des del punt de vista d'un sistema en el qual no pren part la rotació, es pot interpretar com a *gravitació* quan el considerem respecte a un sistema que participa de la rotació. D'acord amb Newton, aquesta interpretació és impossible, atès que, segons la llei de Newton, el camp centrífug no es pot considerar com una producció de la matèria, i perquè, en la teoria de Newton, no hi ha lloc per a un camp «real» del tipus «camp de Coriolis». Però potser la llei de Newton, pel que fa referència als camps, podria ser reemplaçada per una altra que encaixés dins d'un sistema de coordenades en «rotació». La meua convicció respecte a la identitat de la massa d'inèrcia i gravitatòria em va fer sentir completament segur de la correcció d'aquesta interpretació. Vaig encontrejar-me amb la següent idea: estem molt familiaritzats amb els camps «aparents» que són vàlids en relació amb sistemes de coordenades que posseeixen un moviment arbitrari respecte al sistema d'inèrcia. Amb l'ajut d'aquests camps especials hauríem de ser capaços d'estudiar la llei que, en general, satisfà aquests camps gravitatoris. Amb relació a aquest punt, ens adonem del fet que les masses ponderables seran un factor determinant a l'hora de produir el camp, o bé, d'acord amb el resultat fonamental de la teoria especial de la relativitat, la densitat de l'energia, com a magnitud que té el caràcter transformacional d'un tensor.

D'altra banda, les consideracions basades en els resultats mètrics de la teoria especial de la relativitat ens porten al resultat que la mètrica euclidiana ja no pot continuar essent vàlida respecte als sistemes accelerats de coordenades. Malgrat que va ajornar uns quants anys el procés de la teoria, aquesta dificultat es va mitigar quan vàrem comprovar que la mètrica euclidiana es conservava en petits dominis. Com a conseqüència d'això, la magnitud  $ds$ , que es definia físicament en la teoria especial de la relativitat, conservava el seu significat també en la teoria general de la relativitat. Però les coordenades *per se* perdien el seu significat directe, i simplement degeneraven en nombres sense significació física, essent el seu únic objecte la numeració dels punts en les coordenades espai-temps. Per tant, en la teoria general de la relativitat, les coordenades tenen la mateixa funció que les coordenades gaussianes en la teoria de les superfícies. Una conseqüència necessària del que hem exposat és que en aquestes coordenades generals la magnitud mesurable  $ds$  ha de ser capaç de representar-se en la forma

$$ds^2 = \sum_{uv} g_{uv} dx_u dx_v$$

on els símbols  $g_{uv}$  són funcions de les coordenades espai-temps. Del que hem exposat també concloem que la natura de la variació espai-temps dels factors  $g_{uv}$  determina, per un costat, la mètrica espai-temps i, per l'altre costat, el camp gravitatori que regeix el comportament mecànic dels punts materials.

La llei del camp gravitatori està determinada principalment per les condicions següents: Primer, haurà de ser vàlida per a una elecció arbitrària del sistema de coordenades; segon, haurà de ser determinada pel tensor d'energia de la matèria; i tercer, contindrà coeficients diferencials no més alts que el factor  $g_{uv}$  del segon i lineals. D'aquesta manera s'obté una llei que, encara que és fonamentalment diferent de la de Newton, correspon tan exactament a aquesta última que es troben molt pocs criteris en els quals la teoria pugui ser decisivament posada a prova mitjançant l'experiment.

Les qüestions que queden són algunes de les que encara estan per solucionar actualment. ¿Són els camps elèctrics i els gravitatoris realment tan diferents de caràcter que no hi ha unitats formals a les quals es puguin reduir? ¿Prene part, els camps gravitatoris, en la constitució de la matèria, i es pot considerar que el continu en el nucli atòmic és apreciablement no euclidià?

Hi ha una qüestió final que fa referència a un problema cosmològic. S'haurà d'investigar la inèrcia com a força d'acció entre masses distants? I en connexió amb aquesta última: l'abast de l'espai és el d'un univers finit? Aquí la meua opinió difereix de la d'Eddington. Juntament amb Mach, crec que una resposta afirmativa es fa imperativa, però de moment no es pot provar res. Almenys no es podrà mentre no es faci una investigació dinàmica dels grans sistemes d'estrelles fixes tenint en compte els límits de la validesa de la llei de la gravitació de Newton per a immenses regions de l'espai. Llavors potser serà eventualment possible obtenir una base més exacta per a la solució d'aquesta qüestió tan fascinant.

(Albert Einstein)

#### Materials de lectura

- Albert Einstein i Leopold Infeld: *L'evolució de la física*, Barcelona, Edicions 62, 1968.  
 Albert Einstein: *La relatividad* (Über die Spezielle und Allgemeine Relativitätstheorie), Mèxic, Editorial Grijalbo, 1970.  
 Albert Einstein i altres: *La teoría de la relatividad*, selecció de textos de L. Pearce Williams, Madrid, Alianza Universidad, 1973.  
 Albert Einstein: *El significado de la relatividad*, Madrid, Espasa-Calpe, 1971.  
 Bertrand Russell: *ABC de la relatividad*, Barcelona, Ariel Quincenal, 1978.  
 Albert Einstein: *Autoportrait*, París, Inter Éditions, 1979.