
CONSIDERACIONS FONAMENTALS

SOBRE EL POSTULAT DE RELATIVITAT

Albert Einstein

La teoria de la gravitació de Newton ja no seria mai més la mateixa després de l'impacte de la relativitat d'Einstein. L'any 1915, Einstein va trobar les equacions que buscava: la gravitació ja no era tractada com a força, sinó com a curvatura intrínseca de l'espai-temps.

§ 1. OBSERVACIONS SOBRE LA TEORIA ESPECIAL DE LA RELATIVITAT

La teoria especial de la relativitat es basa en el postulat següent, satisfet també per la mecànica de Galileo i Newton:

Si triem un sistema de coordenades K de tal manera que, en referir-s'hi, les lleis físiques adoptin l'expressió més senzilla, les mateixes lleis també són vàlides en relació amb qualsevol altre sistema de coordenades K' que tingui moviment de translació uniforme respecte de K . Aquest postulat, l'anomenem el "principi especial de relativitat". La paraula "especial" significa que el principi es restringeix al cas en què K' té un moviment de translació uniforme en relació amb K ; l'equivalència de K' i K no s'estén al cas de moviment no uniforme de K' respecte de K .

Per tant la teoria especial de la relativitat no s'allunya de la mecànica clàssica per causa del postulat de relativitat, sinó per causa del postulat de la constància de la velocitat de la llum *in vacuo*, a partir del qual, i en combinació amb el principi es-

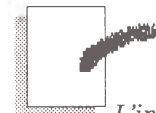
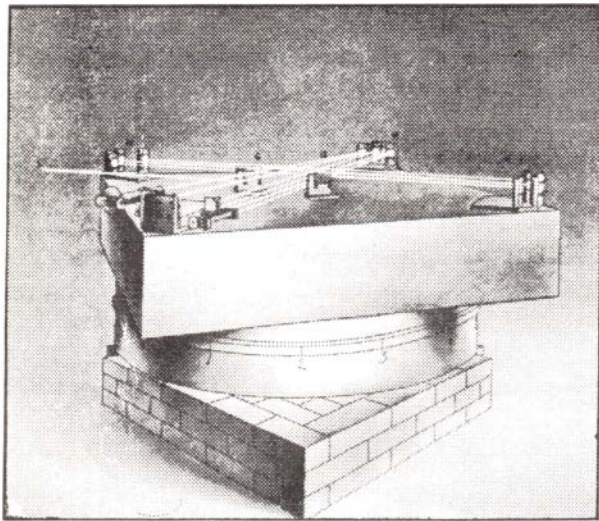
pecial de relativitat, hom obté, de manera prou coneguda, la relativitat de la simultaneïtat, la transformació de Lorentz, i les lleis corresponents per al comportament dels cossos i dels rellotges en moviment.

La modificació a què la teoria de la relativitat ha sotmès la teoria de l'espai i el temps, és, efectivament, molt profunda, però hi ha un punt important que no n'ha estat afectat. Car, fins i tot d'acord amb la teoria especial de la relativitat, les lleis de la geometria han de ser interpretades directament com a lleis referents a les possibles posicions relatives de cossos sòlids en repòs i, d'una manera més general, les lleis de la cinemàtica han de ser interpretades com a lleis que descriuen les relacions que s'estableixen entre les mesures dels cossos i els rellotges. A dos punts materials triats en un cos rígid estacionari, sempre els correspon una distància de longitud perfectament definida, la qual és independent de la posició i de l'orientació del cos, i també del temps. A dues posicions triades de les busques d'un rellotge, en repòs respecte del sistema privilegiat de referència, sempre els correspon un interval de temps de longitud defini-

da, la qual és independent del lloc i de l'instant. Ben aviat veurem com la teoria general de la relativitat no s'ajusta a aquesta senzilla interpretació física de l'espai i del temps.

§ 2. LA NECESSITAT D'AMPLIAR EL POSTULAT DE RELATIVITAT

A la mecànica clàssica, i igualment a la teoria especial de la relativitat, hi ha un defecte epistemològic inherent que fou remarcat clarament, potser per primera vegada, per Ernst Mach. L'il·lustrarem amb l'exemple següent: dues masses fluides de la mateixa dimensió i natura estan suspeses lliurement en l'espai, a una distància tan gran l'una de l'altra, i de la resta de masses, que únicament cal tenir en compte aquelles forces gravitacionals procedents de la interacció de parts diferents del mateix cos. Suposem que la distància entre els dos cossos és invariable, i que en cap d'ells no hi ha moviments relatius d'unes parts respecte de les altres. Suposem, però, que cada massa, segons un observador en repòs respecte de l'altra massa, gira amb velocitat angular constant al voltant de la línia que les uneix.



L'interferòmetre de Michelson i Morley (1880) per mesurar els efectes de l'èter sobre els raigs lluminosos. Segons la concepció clàssica, l'èter era un medi elàstic present a tot l'espai i capaç de transmetre les ones de llum per mitjà de les seves pròpies vibracions. A baix, esquema de l'experiment de Michelson i Morley. No hi va haver les interferències previstes i això volia dir que la velocitat de la llum en el buit era finita i constant per a tota direcció que prenguéss el raig lluminós: la teoria de l'èter ja no tenia base.

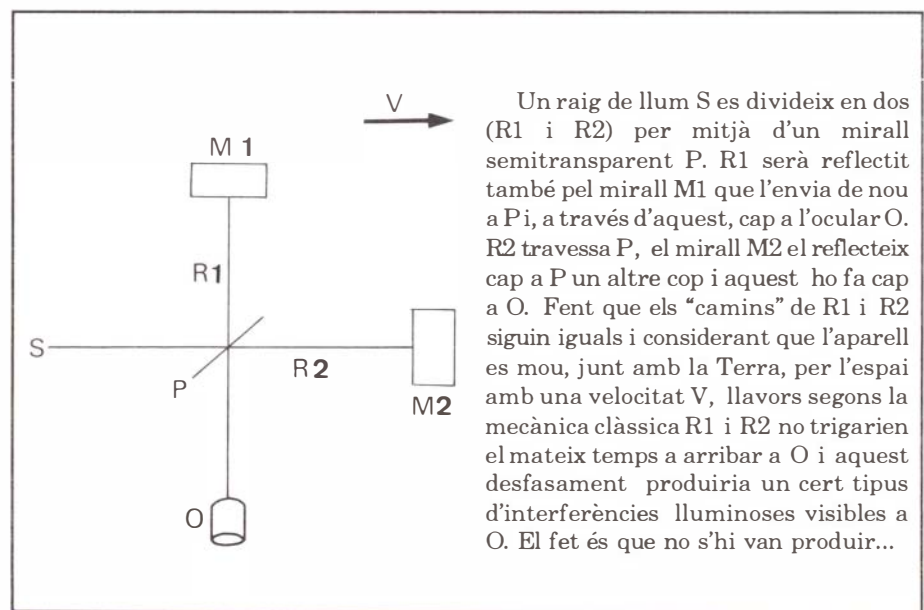
Aquest és un moviment relatiu verificable dels dos cossos. Imaginem ara que cadascun d'ells ha estat mesurat mitjançant instruments en repòs respecte d'ell mateix, i que la superfície de S_1 resulta ésser una esfera, i la de S_2 , un el·lipsoide de revolució. Conseqüentment, ens preguntem: quina és la raó d'aquesta diferència entre ambdós cossos? Cap resposta no pot ésser acceptada com a epistemològicament satisfactòria,¹ si no és el cas que la raó donada representi un fet observable per mitjà de l'experiència. La llei de la causalitat no té la importància d'un axioma en relació amb el món de l'experiència, excepte quan són fets observables els que finalment apareixen com a causes i efectes.

La mecànica newtoniana no dona una resposta satisfactòria a aquesta qüestió. La resol de la manera següent: les lleis de la mecànica són aplicables a l'espai R_1 , respecte del qual el cos S_1 és en repòs, però no a l'espai R_2 , respecte del qual el cos S_2 es troba en repòs. Però l'espai privilegiat R_1 de Galileo, incorporat així, és una causa merament artificial, i no quelcom que pugui ésser observat. És clar, per tant, que la mecànica de Newton no satisfà realment el requisit de causalitat en el cas que estem considerant, sinó tan sols en aparença, ja que assenjala la causa artificial R_1 com a responsable de la di-

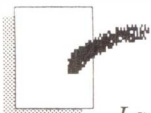
ferència observable en els cossos S_1 i S_2 .

L'única resposta satisfactòria fóra que el sistema físic compost per S_1 i S_2 no manifestés en ell mateix cap causa imaginable a la qual hom pogués referir el comportament diferent de S_1 i S_2 . La causa ha de residir, per tant, fora d'aquest sistema. Hem de tenir en compte que les lleis generals del moviment, les quals determinen, en particular, les formes de S_1 i S_2 , han d'ésser tals que, en aspectes completament essencials, el comportament mecànic de S_1 i S_2 sigui parcialment condicionat per les masses distants que no hem inclòs en el sistema que estem tractant. Aquestes masses distants

i llurs moviments relatius a S_1 i S_2 han de considerar-se, doncs, com la base de les causes (les quals han de ser susceptibles d'observació) del diferent comportament dels nostres dos cossos S_1 i S_2 . Fan el paper de la causa artificial R_1 . De tots els espais imaginables R_1 , R_2 , etc., en qualsevol mena de moviment relatiu de l'un respecte de l'altre, no n'hi ha cap que puguem considerar a priori com a privilegiat sense ressuscitar l'objecció epistemològica esmentada més amunt. Les lleis de la física han d'ésser de tal índole que siguin vàlides per a sistemes de referència en qualsevol mena de moviment. Per aquest camí arribem a una extensió del postulat de relativitat.



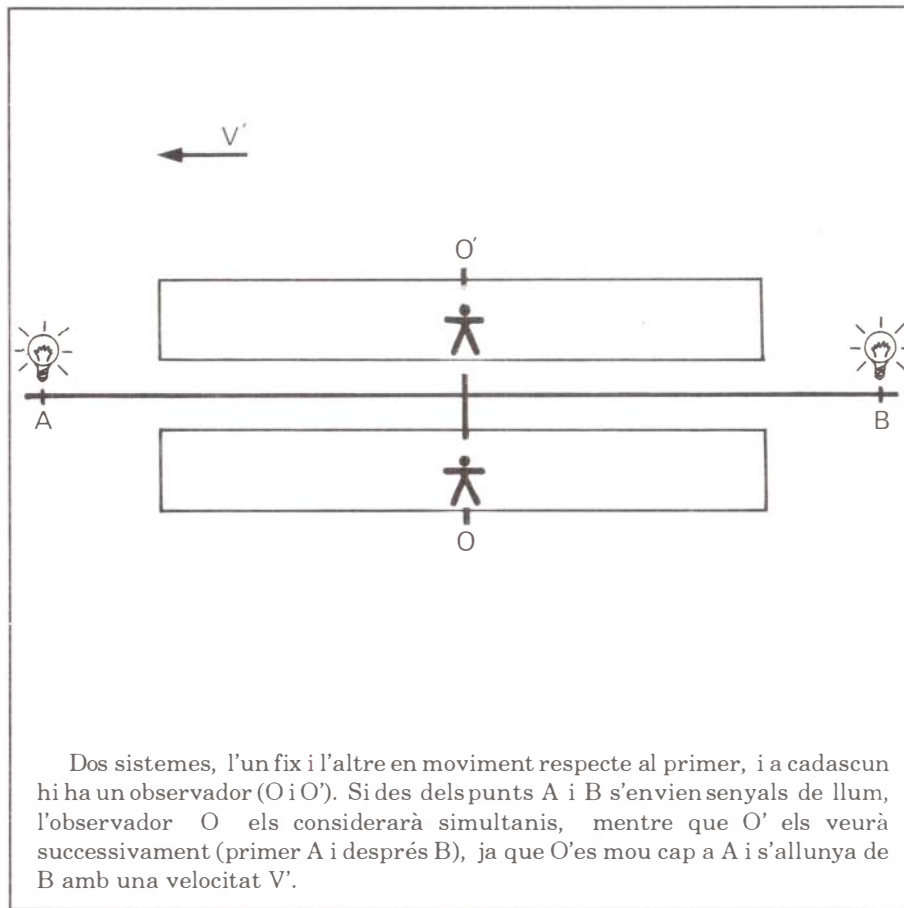
Un raig de llum S es divideix en dos (R_1 i R_2) per mitjà d'un mirall semitransparent P. R_1 serà reflectit també pel mirall M1 que l'envia de nou a P i, a través d'aquest, cap a l'ocular O. R_2 travessa P, el mirall M2 el reflecteix cap a P un altre cop i aquest ho fa cap a O. Fent que els "camins" de R_1 i R_2 siguin iguals i considerant que l'aparell es mou, junt amb la Terra, per l'espai amb una velocitat V, llavors segons la mecànica clàssica R_1 i R_2 no trigarien el mateix temps a arribar a O i aquest desfasament produiria un cert tipus d'interferències lluminoses visibles a O. El fet és que no s'hi van produir...



La velocitat finita i constant de la llum va fer replantejar a Einstein la relació entre les mesures de l'espai i del temps: la simultaneïtat de dos fets depèn del moviment relatiu entre els sistemes de referència des d'on se'ls observa.

A baix, pàgina de notes d'Einstein, corresponents a una conferència sobre la relativitat (1918-1919)

A més d'aquest poderós argument de la teoria del coneixement, hi ha una dada física ben coneguda que abona una extensió de la teoria de la relativitat. Sigui K un sistema galileà de referència, és a dir, un sistema en relació amb el qual (si més no en la regió quadridimensional que estem considerat) una massa, suficientment allunyada de les altres masses, es mou amb moviment uniforme i rectilini. Sigui K' un segon sistema de referència que té un moviment de translació uniformement accelerat en relació amb K. Llavors, respecte de K', una massa suficientment allunyada de les



Dos sistemes, l'un fix i l'altre en moviment respecte al primer, i a cadascun hi ha un observador (O i O'). Si des dels punts A i B s'envien senyals de llum, l'observador O els considerarà simultanis, mentre que O' els veurà successivament (primer A i després B), ja que O'es mou cap a A i s'allunya de B amb una velocitat V'.

altres masses tindria un moviment accelerat tal que la seva acceleració i direcció d'acceleració foren independents de la composició material i de l'estat físic de la massa.

¿Això permet deduir a un observador en repòs respecte de K' que es troba en un sistema de referència "realment" accelerat? La resposta és negativa, ja que la relació amb K', esmentada més amunt, de les masses en moviment lliure es pot interpretar també de la manera següent: el sistema de referència K' és no accelerat, però la regió de l'espai-temps en qüestió es troba sota la influència d'un camp gravitatori, el qual genera el moviment accelerat dels cossos en relació amb K'.

Aquesta perspectiva és possible gràcies a allò que ens ensenya l'experiència quant a l'existència d'un camp de força, el camp gravitatori, que té la notable propietat d'imprimir la mateixa acceleració a tots els cossos.² El comportament mecànic dels cossos en relació amb K' és el

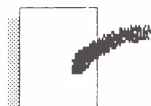
mateix que en el cas de sistemes que tendim a mirar com a "estacionaris" o com a "privilegiats". Per aquesta raó, des del punt de vista de la física, la suposició suggereix immediatament, per ella mateixa, que els sistemes K i K' es poden considerar tots dos com a "estacionaris", és a dir, l'un i l'altre poden servir com a sistemes de referència per a la descripció física dels fenòmens.

Hom observarà a partir d'aquestes reflexions que, tot cercant el camí de la teoria general de la relativitat, anirem a parar a una teoria de la gravitació, car podem "produir" un camp gravitatori mitjançant un simple canvi del sistema de coordenades. Resultarà obvi, també, que el principi de la constància de la velocitat de la llum *in vacuo* ha de ser modificat, ja que reconeixem fàcilment que el camí d'un raig de llum respecte de K' ha de ser curvilini en general, si respecte de K la llum es propaga en línia recta i amb una determinada velocitat constant.

§3. EL CONTINU ESPAI-TEMPS. EXIGÈNCIA DE COVARIÀNCIA GENERAL PER A LES EQUACIONS QUE EXPRESSEN LES LLEIS GENERALS DE LA NATURA

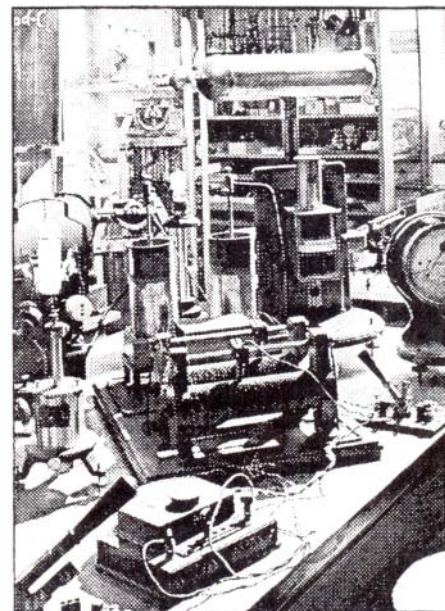
A la mecànica clàssica, així com a la teoria especial de la relativitat, les coordenades d'espai i temps tenen un significat físic directe. Dir que un esdeveniment té x_1 per coordenada X_1 , significa que la projecció de l'esdeveniment sobre l'eix X_1 , determinada pels regles rígids i d'acord amb les normes de la geometria euclidiana, s'obté col.locant un regle donat (la unitat de longitud) x_1 vegades sobre l'eix X_1 , a partir de l'origen de coordenades. Dir que un esdeveniment té $x_4 = t$ per coordenada X_4 , significa que un rellotge patró, ideat per a mesurar el temps en un determinant període unitat, i que és estacionari en relació amb el sistema de coordenades i coincident pràcticament en l'espai amb l'esdeveniment,³ haurà mesurat $x_4 = t$ períodes en acomplir-se aquest.

Aquesta imatge de l'espai i del temps ha estat sempre en l'esperit dels físics, fins i tot encara que, per regla general, no n'hagin estat conscients. Això és ben clar pel que fa al paper que tenen aquests conceptes en els mesuraments físics; aquesta interpretació també haurà servit de base per a les reflexions del lector al llarg del paràgraf precedent (§2), per tal de poder assignar algun significat a allò que hi llegia. No obs-



Aspecte del laboratori de física de l'Institut Politècnic de Zuric, on Einstein va dur a terme recerques sobre l'efecte fotoelèctric.

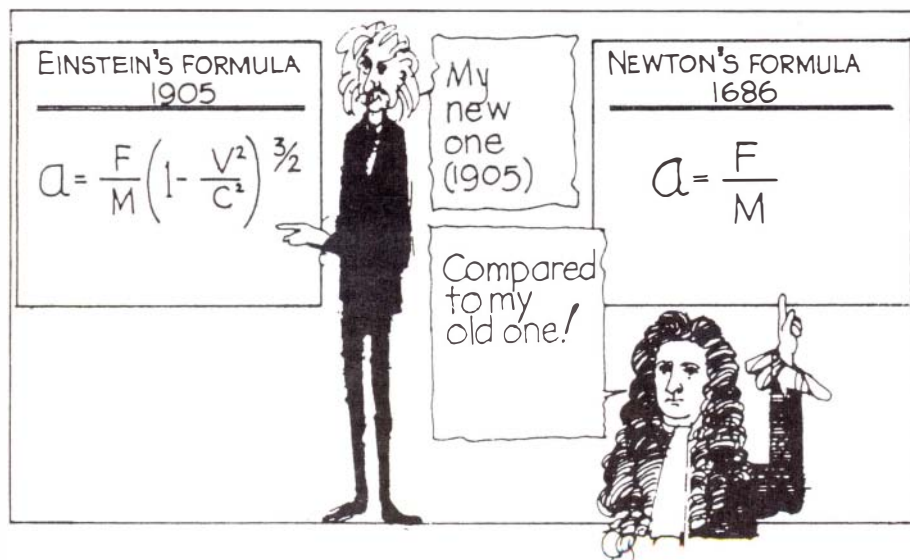
A baix, il·lustració del llibre Einstein for Beginners, Writers and Readers Publishing, Londres, 1979.



tant això, ara demostrarem que hem de deixar de banda aquesta imatge i substituir-la per una altra de més general, que ens permeti de realitzar el postulat de relativitat general, si la teoria especial de la relativitat és vàlida per al cas singular en què no hi ha camp gravitatori.

En un espai lliure de camps gravitatoris introduïm un sistema galileu de referència $K(x,y,z,t)$, i també un sistema de coordenades $K'(x',y',z',t')$ en moviment uniforme de rotació en relació amb K . Suposem que els orígens d'ambdós sistemes, així com llurs eixos Z , coincideixen permanentment. Demostrarem com, per a un mesurament de l'espai-temps en el sistema K' , la definició anterior del significat físic de longituds i de temps no es pot sostenir. Per raons de simetria, és clar

que un cercle al voltant de l'origen en el pla X,Y de K pot considerar-se, al mateix temps, com un cercle en el pla X',Y' de K' . Suposem que la circumferència i el diàmetre d'aquest cercle han estat mesurats amb una unitat infinitament petita comparada amb el radi, i que tenim el quocient dels dos resultats. Si aquest experiment es realitzés amb un regle de mesura en repòs en relació amb el sistema galileu K , el quocient fóra π ; amb un regle de mesura en repòs en relació amb K' , el quocient fóra més gran que π . Això s'explica de seguida si imaginem el procés sencer de mesuratge des del sistema "estacionari" K , i tenim en compte que el regle de mesura aplicat a la perifèria experimenta una contracció lorentziana, mentre que l'aplicat al llarg del radi, no. Per tant, la geometria euclidiana no és vàlida per a K' . El concepte de coordenades, definit més amunt, que pressuposa la validesa de la geometria euclidiana, deixa de tenir sentit, per tant, en relació amb el sistema K' . Així, no podem introduir, tampoc, un temps que satisfaci els requisits físics a K' , indicat per rellotges en repòs respecte a K' . Per a convèncer-nos d'aquesta impossibilitat, imaginem dos rellotges de constitució idèntica col.locats l'un a l'origen de coordenades i l'altre a la circumferència del cercle, i tots dos observats des del sistema "estacio-



nari" K. Per un raonament conegut de la teoria especial de la relativitat, el rellotge de la circumferència funciona -considerant-ho des de K - més lentament que l'altre, ja que el primer és en moviment i el segon, en repòs. Un observador a l'origen comú de coordenades, capaç d'observar el rellotge de la circumferència per mitjà de la llum, el veuria endarrerir-se en relació amb el rellotge que té al seu costat. Com que no es decidirà a acceptar que la velocitat de la llum allarg del camí en qüestió depengui explícitament del temps, interpretarà que les seves observacions proven que el rellotge situat a la circumferència "realment" marxa més lentament que el rellotge col·locat a l'origen. D'aquesta manera, es veurà obligat a definir el temps de tal manera que el ritme de marxa d'un rellotge depengui d'on estigui situat aquest.

Arribem, per tant, a aquest resultat: a la teoria general de la relativitat, l'espai i el temps no poden ser definits de manera que les diferències de coordenades espacials puguin mesurar-se directament mitjançant el regle de mesura unitat, o les diferències de coordenades temporals, amb un rellotge patró.

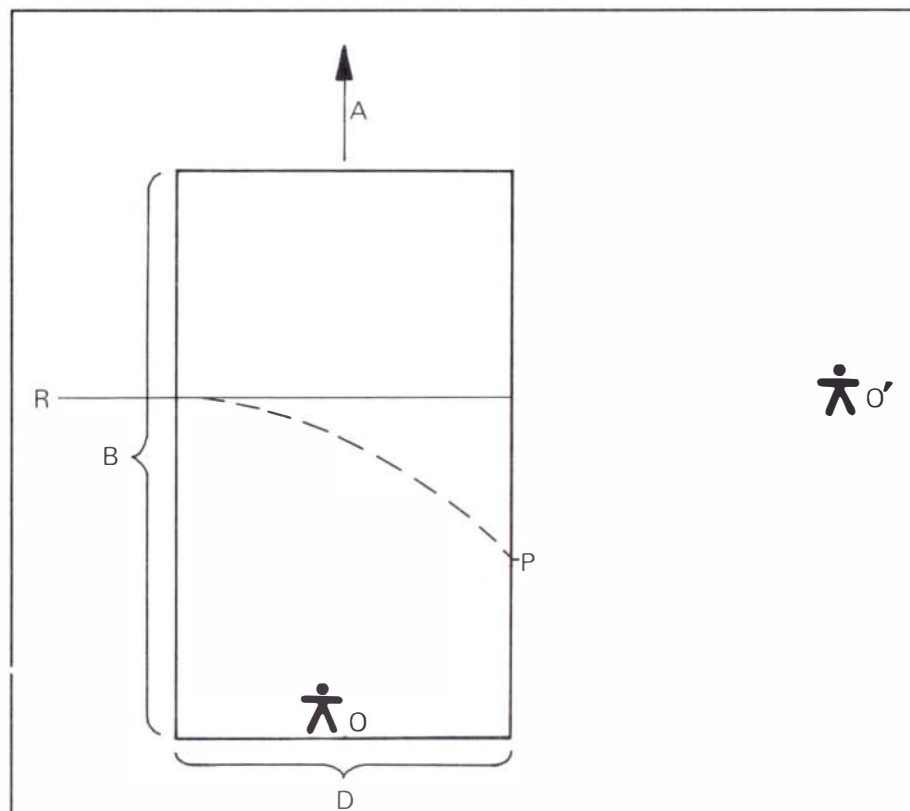
El mètode seguit fins ara per a establir coordenades en el continu espai-temps d'una manera definida, esdevé, ara, ineficaç i sembla que no hi hagi cap altre procediment que ens permeti d'adaptar sistemes de coordenades a l'univers quadridimensional de manera que en po-

guéssim esperar una formulació particularment senzilla de les lleis de la natura. Pertant, no ens queda altre remei que considerar tots els sistemes de coordenades imaginables igualment adients, en principi, per a la descripció de la natura. És el mateix que suposar que:

Les lleis generals de la natura han d'expressar-se per mitjà d'equacions, les quals són vàlides per a tots els sistemes de coordenades, és a dir, són covariants respecte de qualsevol canvi de coordenades (covariants en general).

És clar que una teoria física que satisfaci aquest postulat serà tam-

bé adient per al postulat general de relativitat, ja que el conjunt de tots els canvis de coordenades inclou, en qualsevol cas, aquells que corresponen a tots els moviments relatius de sistemes de coordenades tridimensionals. Hom comprovarà, a partir de la reflexió següent, com aquesta condició de covariància general, la qual lleva el darrer residu d'objectivitat física a l'espai i al temps, és una condició natural. Totes les nostres verificacions de l'espai-temps signifiquen, invariablement, una determinació de coincidències espàcio-temporals. Si, per exemple, els esdeveniments consistissin simplement en el moviment de



Suposem una gàbia transparent situada en el buit. Un coet la projecta cap "amunt" amb una acceleració igual a la de la gravetat, de manera que un observador O que hi viatgi tingui la sensació que encara es troba a la Terra. Si un raig de llum R entra a la gàbia per la paret B, durant el temps que R tarda a recórrer la distància D, la gàbia es mou en la direcció A. De primer, l'observador O no entén per què R es desvia cap al punt P; per fi, recorda l'equivalència entre la massa i l'energia establerta per Einstein i atribueix a la gravetat la "caiguda" de R cap a P, igual que ho faria si R fos un cos material. En canvi, per un observador extern O', R ha seguit la línia recta i ha sortit pel punt P simplement perquè, mentrestant, tota la gàbia s'ha desplaçat cap "amunt". Per O', doncs, no hi hauria cap acció d'un camp gravitatori sobre R.



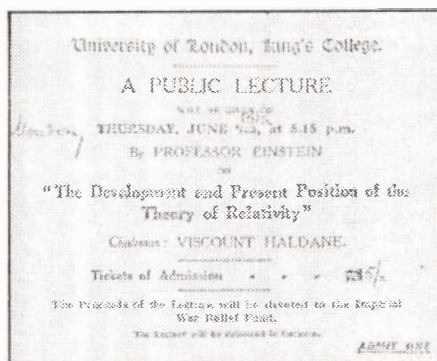
Segons la relativitat general, els efectes produïts per un sistema gravitacional són idèntics als d'un sistema sense gravitació que té un moviment accelerat respecte al primer. Experiment ideal proposat per Einstein.

punts materials, llavors, en definitiva, només serien observables les confluències de dos o més d'aquests punts. D'altra banda, els resultats dels nostres mesuraments no són altra cosa que verificacions de confluències d'aquestes entre els punts materials dels nostres instruments de mesura i d'altres punts materials, coincidències entre les busques d'un rellotge i uns punts de l'esfera del rellotge, i esdeveniments observats que ocorren al mateix lloc i al mateix temps.

La introducció d'un sistema de referència no té altra finalitat que la de simplificar la descripció de totes aquestes coincidències. Assig-nem a l'univers quatre variables d'espai-temps x_1, x_2, x_3, x_4 de tal manera que, per a cada esdeveniment, hom trobi el sistema corresponent de valors de les variables $x_1 \dots x_4$. A dos esdeveniments coincidents els correspon un únic sistema de valors de les variables $x_1 \dots x_4$; és a dir, la identitat de les coordenades caracteritza la coincidència. Si, en lloc de les variables $x_1 \dots x_4$, n'introduïm unes funcions x'_1, x'_2, x'_3, x'_4 com a nou sistema de coordenades, de manera que els sistemes de valors es corresponguin els uns amb els altres, sense ambigüitat, la igualtat de totes quatre coordenades en el nou sistema expressarà també la coincidència espàcio-temporal dels dos esdeveniments. Com que tota la nostra experiència física es pot reduir, finalment, a coincidències semblants, no hi ha cap raó immediata per a preferir uns sistemes de coordenades a uns altres; és a dir, arribem al requisit de covariància general.

§ 4. LA RELACIÓ DE LES QUATRE COORDENADES AMB EL MESURAMENT EN L'ESPAI-TEMPS

En aquesta discussió no he pres-tès pas de presentar la teoria general de la relativitat com el sistema més senzill i lògic possible, i amb el mínim d'axiomes; el meu objectiu



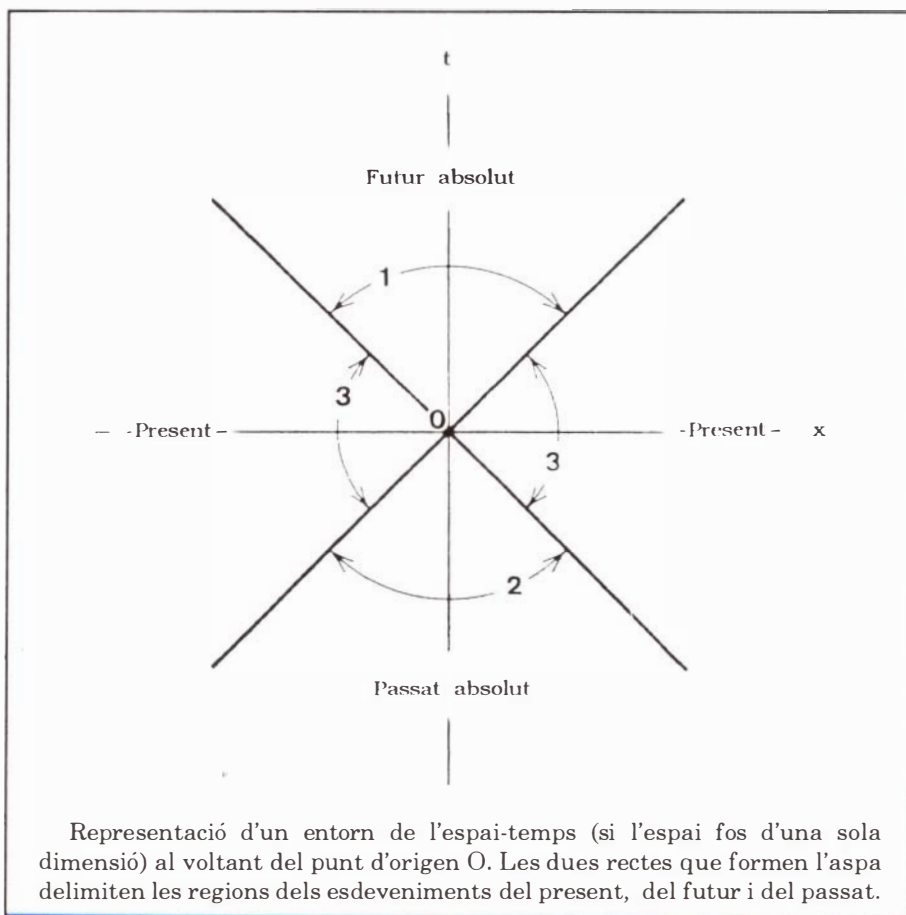
Entrada per a una conferència d'Einstein al King's College (Londres, 1921). A baix, sistema de referència format pels eixos de coordenades x i t (temps). Uns éssers estranys en forma de punt o de segment serien els únics que podrien habitar un univers bidimensional amb sistemes de referència com aquest.

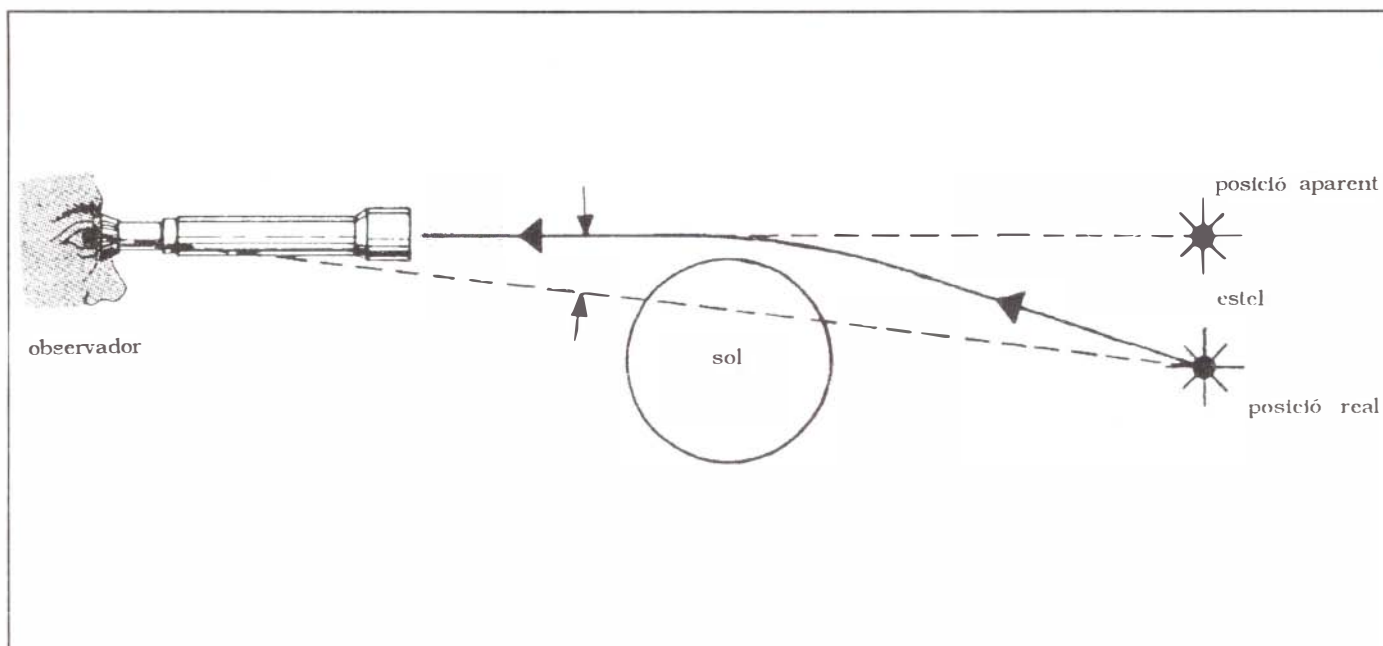
principal ha estat un altre: desenvolupar aquesta teoria de manera tal que el lector trobi el camí començat aquí com l'únic psicològicament natural, i, també, que les suposicions subjacents semblin tenir el màxim grau de versemblança possible. Tenint present aquest propòsit, suposem que:

Per a regions quadridimensionals infinitament petites la teoria

de la relativitat en el sentit restringit és apropiada, si hom tria convenientment les coordenades.

Triarem, doncs, l'acceleració del sistema de coordenades infinitament petit ("local"), de manera que desaparegui el camp gravitatori; això és possible per a una regió infinitament petita. Siguin X_1, X_2, X_3 les coordenades d'espai, i X_4 la coordenada que pertoca al temps,





Dues expedicions científiques britàniques a l'Àfrica occidental i al Brasil van observar durant un eclipsi total de Sol que la llum que passava a prop de la superfície solar provinent d'un estel experimentava una deflexió cap al Sol de manera que l'estel tenia una posició aparent lleugerament desviada de la posició real. Segons Einstein, la presència d'una gran massa fa que l'espai-temps presenti una curvatura local.

mesurada en la unitat escaient.⁴ Si hom imagina que un regle rígid ha estat pres com a unitat de mesura, les coordenades, amb una orientació donada del sistema de coordenades, tenen un significat físic directe en el sentit de la teoria especial de la relativitat. Aleshores, per a la teoria especial de la relativitat, l'expressió

$$ds^2 = -dX_1^2 - dX_2^2 - dX_3^2 + dX_4^2 \quad (1)$$

té un valor que no depèn de l'orientació del sistema local de coordenades, i que es pot verificar amb mesures d'espai i de temps. La magnitud de l'element lineal corresponent a punts infinitament pròxims del continu quadridimensional, l'anomenem ds . Si el ds de l'element $dX_1 \dots dX_4$ és positiu, aleshores seguint Minkowski l'anomenem temporal; si és negatiu, l'anomenem espacial.

A l'element lineal en qüestió, o a dos esdeveniments infinitament pròxims, també els correspondran uns diferencials definits $dx_1 \dots dx_4$

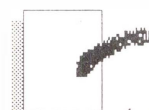
de les coordenades quadridimensionals de qualsevol sistema de referència triat. Si aquest sistema, així com el sistema "local", és donat per a la regió que estem considerant, els mateixos dX_v podran representar-se per mitjà d'expressions lineals homogènies dels dx_σ :

$$dX_v = \sum \alpha_{v\sigma} dx_\sigma \quad (2)$$

Introduint aquestes expressions a (1) obtenim:

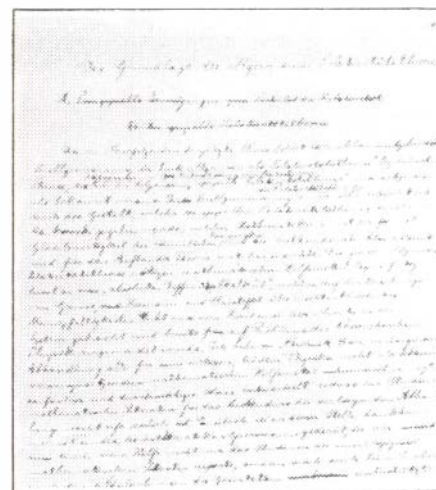
$$ds^2 = \sum_{\sigma\tau} g_{\sigma\tau} dx_\sigma dx_\tau \quad (3)$$

on les $g_{\sigma\tau}$ seran funcions de x_σ . Aquestes ja no poden dependre de l'orientació i de l'estat de moviment del sistema "local" de coordenades, ja que ds^2 és una quantitat verificable mesurant amb regle i rellotge esdeveniments infinitament pròxims en l'espai-temps, i definida independentment de cap elecció de coordenades particular. Les $g_{\sigma\tau}$ han d'ésser triades aquí de manera que $g_{\sigma\tau} = g_{\tau\sigma}$; el sumatori s'estén a tots els valors de σ i τ , d'aquesta manera la



A dalt, esquema de la primera observació, en 1919, de la deflexió de la llum a causa de la presència d'un cos de gran massa com el Sol. La teoria de la relativitat general havia previst el fenomen i aquesta observació va verificar per primer cop la teoria.

A baix, paràgraf introductori del manuscrit de l'article d'Einstein Els fonaments de la teoria general de la relativitat (Universitat Hebrea de Jerusalem).





Albert Michelson, el segon per l'esquerra, i Einstein, a la dreta. Contradiant la mecànica clàssica, l'experiment de Michelson i Morley va obrir la porta a la relativitat.

suma consisteix en 4×4 termes, dels quals dotze són iguals dos a dos.

El cas de la teoria ordinària de la relativitat sorgeix del cas considerat aquí, si, a causa de les relacions particulars de les $g_{\sigma\tau}$ en una regió finita, és possible de triar un sistema de referència en la regió finita de tal manera que les $g_{\sigma\tau}$ prenguin els valors constants:

$$\left. \begin{array}{cccc} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & +1 \end{array} \right\} (4)$$

A partir d'aquí trobarem que l'elecció d'unes coordenades semblants no és possible, en general, en una regió finita.

De les consideracions de §2 i §3 hom dedueix que, des del punt de vista físic, les quantitats $g_{\sigma\tau}$ han de ser considerades com les quantitats que descriuen el camp gravitatori, en relació amb el sistema de referència escollit. Si suposem ara que la teoria especial de la relativitat és vàlida per a una certa regió quadridimensional amb les coordenades triades convenientment, llavors les $g_{\sigma\tau}$ tenen els valors propo-

sats a (4). Un punt material lliure es mou aleshores, en relació amb aquest sistema, amb moviment uniforme i rectilini. Llavors, si introduïm unes noves coordenades espàcio-temporals x_1, x_2, x_3, x_4 mitjançant qualsevol transformació, les $g_{\sigma\tau}$ en aquest nou sistema ja no seran constants, sinó funcions de l'espai i del temps. Alhora el moviment del punt material lliure se'ns presentarà en les noves coordenades com un moviment no uniforme i curvilini, i la llei d'aquest moviment serà independent de la naturalesa de la partícula mòbil. Considerarem doncs, que aquest moviment es troba sota la influència d'un camp gravitatori. Tenim, d'aquesta manera, l'aparició d'un camp gravitatori relacionat amb la variabilitat espàcio-temporal de les $g_{\sigma\tau}$. Així, també, en el cas general, quan ja no sigui possible aplicar la teoria especial de la relativitat a una regió finita mitjançant una elecció de coordenades adient, continuarem sostenint que les $g_{\sigma\tau}$ descriuen el camp gravitatori.

D'acord amb la teoria general de la relativitat, la gravitació ocupa un lloc excepcional comparat amb d'altres forces, en particular les electromagnètiques, ja que les deu funcions que representen el camp

gravitatori defineixen, al mateix temps, les propietats mètriques de l'espai mesurat. ■

NOTES

1. És clar que una resposta pot ser satisfactòria des del punt de vista de l'epistemologia, però en canvi ser falsa físicament, en el cas que entri en conflicte amb d'altres experiències.
2. Eötvös ha provat experimentalment que el camp gravitacional compleix aquesta propietat amb gran precisió.
3. Admetem la possibilitat de verificar la "simultaneïtat" en el cas d'esdeveniments immediatament pròxims en l'espai (o parlant amb més precisió - en el cas d' immediata proximitat o coincidència en l'espai-temps), sense donar una definició d'aquest concepte fonamental.
4. La unitat de temps s'ha d'escollir de manera que la velocitat de la llum *in vacuo* mesurada en el sistema local de coordenades sigui igual a la unitat.