

LA RELATIVITAT I LA SEVA INFLUÈNCIA EN EL PENSAMENT CIENTÍFIC

Arthur Eddington

Traducció de
Marc Figueras



RECONS
DE CIÈNCIA

LA RELATIVITAT I LA SEVA INFLUÈNCIA EN EL PENSAMENT CIENTÍFIC



RESSONS DE
CIÈNCIA, 2

LA TEORIA DE LA RELATIVITAT I LA SEVA INFLUÈNCIA EN EL PENSAMENT CIENTÍFIC

— CONFERÈNCIA ROMANES 1922 —

Arthur Stanley Eddington

President de la Royal Astronomical Society
Catedràtic pluriè d'astronomia a Cambridge

Sheldonian Theatre, Oxford, 24 de maig de 1922

Traducció de Marc Figueras

Títol original: *The Theory of Relativity and its influence on Scientific thought*

1a edició: maig de 2025

Aquesta traducció © 2025 per Marc Figueras està llicenciada sota Creative Commons Reconeixement-CompartirIgual 4.0 Internacional.



Imatge de portada: H. van Batenburg, CC BY-SA 3.0, via Wikimedia Commons

Imatge de la pàg. 55: Smithsonian Institution d'Estats Units, sense restriccions d'ús, via Wikimedia Commons

No ha ensenyat pas una meditació més profunda els fets certs de cada clima i de cada època, de tal manera que l'on i el quan, tan misteriosament inseparables de tots els nostres pensaments, no són res més que superficials adherències terrestres del pensament?

Thomas Carlyle, Sartor Resartus

La teoria de la relativitat

En els dies anteriors a Copèrnic, la terra era, pel que semblava, una base inamovible sobre la qual s'aixecava tota l'estructura del cel. L'home, situat favorablement al centre de l'univers, podia esperar que, per a ell, l'esquema de la natura es mostrés en el seu aspecte més simple. Però el comportament dels cossos celestes no era senzill en absolut; els planetes descrivien autèntics tirabuixons en corbes fantàstiques que s'anomenaven *epicicles*. El cosmogonista, si volia fer que els planetes es moguessin en les seves òrbites establertes, havia d'omplir els cels amb esferes que giraven al voltant d'altres esferes; així, es van anar afegint rodes i més rodes fins que la música de les esferes semblava quedar gairebé ofegada en una cacofonia de maquinària enrevessada. Llavors, però, va arribar una de les grans revolucions del pensament científic, que escombrà el sistema ptolemaic d'esferes i epicicles i revelà el pla senzill del sistema solar, que ha perdurat fins als nostres dies.

La revolució va consistir a canviar el punt de vista des del qual es contemplaven els fenòmens. Tal com es presenta des de la terra, el recorregut d'un planeta és un elaborat epicicle, però Copèrnic ens va convidar a posar-nos en el lloc del sol i ens va fer que miréssim de nou. En lloc d'un camí amb cercles i nodes, ara podíem veure que l'òrbita és una de les corbes més elementals: una el·lipse. Ens hem d'adonar que el petit planeta on ens trobem no té gaire importància en l'esquema general de la natura; per desxifrar aquest esquema, primer hem d'alliberar la naturalesa de les distorsions que sorgeixen a causa del punt de vista local des del qual l'observem. El sol, i no la terra, és el centre real de l'esquema de les coses — o com a mínim d'aquelles coses en què els astrònoms estaven interessats en aquells moments — i en transferir el nostre punt de vista al sol es fa ben palesa la simplicitat del sistema planetari. La necessitat d'una feixuga maquinària d'esferes i engranatges desapareix tot d'una.

Avui, tothom admet que el sistema ptolemaic, que considerava la terra com el centre de totes les coses, pertany a l'edat fosca. Però, per a la nostra consternació, hem descobert que aquesta mateixa perspectiva geocèntrica encara impregna en bona mesura la física, sense que en fóssim conscients fins fa ben poc. Ha calgut que Einstein duqués més enllà la revolució iniciada per Copèrnic:

alliberar la nostra concepció de la naturalesa del bialx terrestre que li han confegit les limitacions de la nostra experiència, tan vinculada a la terra. Per aconseguir un punt de vista més neutral, ens hem d'imaginar una visita a algun altre cos celeste. És un tema que ha atret els novel·listes populars, i sovint somriem dels seus errors quan, tard o d'hora, s'obliden del lloc on se suposa que es troben els seus personatges i assignen als exploradors un capteniment purament terrestre i que és del tot impossible en l'astre que estan visitant. Ara bé, resulta que els homes de ciència, que no gaudeixen de la dispensa que tenen els novel·listes, han comès el mateix error. Quan, seguint Copèrnic, se situen en el sol, no s'adonen que han de deixar enrere una certa concepció purament terrestre, en concret el marc espacial i temporal en què, en aquest planeta, els éssers humans estan acostumats a situar els esdeveniments que es produeixen. És cert que l'observador situat en el sol encara ubicarà les seves experiències en un determinat marc espacial i temporal, si utilitza les mateixes facultats de percepció i els mateixos mètodes de mesura científica que a la terra, però el marc d'espai i de temps centrat en el sol no és igual que el marc terrestre, com veurem més endavant.

Crec que vostès entendran fàcilment què s'entén per marc espacial i temporal. És el sistema de

localització al qual apel·lem quan afirmem, per exemple, que un determinat fet s'ha produït a cent milles de distància i deu hores més tard que un altre. Els termes *espai* i *temps* no son només una vaga referència descriptiva a un buit il·limitat i a un esdevenir indeturable, sinó que denoten un sistema quantitatiu exacte per determinar distàncies i intervals de temps. El primer gran descobriment d'Einstein va ser que hi ha molts sistemes de determinació d'aquesta mena —molts possibles marcs d'espai i de temps— que són exactament equivalents. Cap d'aquests marcs es pot identificar com a més fonamental que els altres; no hi ha cap marc que es pugui distingir en preferència a d'altres com la bastida utilitzada en la construcció del món. I, tanmateix, un d'aquests se'ns presenta com l'espai i el temps reals de la nostra experiència i defugim els altres marcs equivalents, que ens semblen sistemes artificials en què distància i durada es barregen d'una manera prodigiosa. Quina és la causa d'aquesta selecció tan injusta? No és res que estigui determinat per algun tret distintiu del marc; és un fet que està estipulat per un tret distintiu nostre: que la nostra existència està lligada a un planeta en particular i que el nostre moviment és el moviment d'aquest planeta. La natura ens ofereix una selecció infinita de marcs i triem aquell en què nosaltres i les nostres petites i terrestres inquietuds

prenen la posició més distingida. La nostra entremaliada perspectiva geocèntrica sorgeix de bell nou d'una manera insospitada i ens persuadeix perquè persistim en aquest marc d'espai i de temps terrestre que, en l'esquema general de la natura, no és de cap manera superior a qualsevol altre marc.

Com més detingudament examinem els processos mitjançant els quals s'assignen els esdeveniments a les seves posicions en l'espai i el temps, més clarament veiem que les nostres circumstàncies locals hi tenen un paper considerable. No tenim pas més dret a esperar que el marc espaciotemporal en el sol sigui idèntic al nostre aquí a la terra que a esperar que la força de gravetat sigui la mateixa allà que aquí. Encara que no hi hagués proves experimentals en suport de la teoria d'Einstein, aquesta hauria fet un avenç notable en exposar una fal·làcia subjacent al mode de pensament antic: la fal·làcia d'atribuir sense cap qüestionament un significat més que purament local a la nostra determinació terrestre de l'espai i el temps. En qualsevol cas, hi ha proves experimentals abundants per detectar i determinar la diferència entre els marcs d'observadors en situacions diferents. Gran part de les proves resulten massa tècniques per comentar-les aquí, i només puc referir-me a l'experiment de Michelson i Morley. Sospito que alguns de vostès ja deuen

estar un xic cansats de l'experiment de Michelson i Morley, però també els que van a una representació de *Hamlet* han d'aguantar el príncep de Dinamarca.

Aquest famós experiment és una prova senzilla que permet determinar si la llum viatja a la mateixa velocitat en dues direccions diferents. Amb aquesta finalitat es construeix un aparell amb dos braços iguals en angle recte, que proporcionen dos camins iguals per a la llum. Es divideix un feix de llum en dues parts de manera que una part viatja d'anada i tornada per un braç i l'altra fa el mateix per l'altre braç. En tornar, els dos feixos s'uneixen de nou, i mitjançant delicades proves d'interferència és possible determinar si un d'ells s'ha retardat respecte a l'altre; es podria detectar un retard inferior a una bilionèsima de segon. En el fons, l'experiment és una cursa entre dos raigs de llum amb recorreguts d'una distància igual però en direccions diferents; el resultat és un empat. A primera vista això és just el que hom esperaria; i podem arribar a preguntar-nos per què algú hauria pensat que era un experiment que valia la pena dur a terme. Però Michelson, com a bon copernicà, s'havia situat al sol per presenciar aquesta cursa; en conseqüència, es va adonar que el moviment orbital de la terra arrossegava l'aparell a una velocitat de vint milles per segon [32 km/s]. Així doncs, la llum, en anar i tornar per un

braç, no recorre exactament la longitud multiplicada per dos; començant per un extrem ha d'arribar fins a l'altre, però mentrestant aquest s'ha avançat una mica; després torna al lloc fins al qual s'ha desplaçat el punt de sortida mentre la anava i tornava. Això no suma exactament la longitud del braç multiplicada per dos. Fent els càlculs, trobem fàcilment que, tot i que els dos braços són iguals, les dues distàncies recorregudes per la llum són diferents; el competidor la pista del qual es troba alineada amb el moviment de la terra es troba un recorregut més llarg i, per tant, en desavantatge. Però tanmateix, d'acord amb l'experiment, no pateix el retard esperat. Des del nostre punt de vista centrat en el sol, sembla que l'experiment hagi anat malament; Copèrnic ha estat refutat i Ptolemeu és el triomfador.

Però això és perquè no hem assumit totes les conseqüències de transferir el nostre punt de vista al sol; durant tota l'estona no hem acabat d'aixecar els peus de la terra. Per descomptat, tot l'experiment es basa en què els dos braços s'hagin ajustat de manera que siguin perfectament iguals. Això només es pot determinar mitjançant l'experimentació; i la prova aplicada consisteix a fer girar l'aparell noranta graus, de manera que si, per exemple, el recorregut en la línia del moviment terrestre hagués tingut l'avantatge de tenir el braç més curt, el recorregut transversal hauria

tingut aquest mateix avantatge en repetir-lo després de girar l'aparell noranta graus. Es tracta d'una prova perfectament satisfactòria per a un observador terrestre; al capdavant, girar una vareta d'una direcció a una altra és la manera senzilla i directa de marcar longituds iguals. Però la prova no és satisfactòria per a un observador situat al sol; aquest no pensaria en intentar dividir longituds iguals mitjançant varetes que viatgen a vint milles per segon. El seu marc espacial —l'espai no només per a mesures refinades, sinó també de les mesures més crues fetes amb els òrgans sensorials del cos que en determinen la percepció de l'espai— queda compartimentat per artefactes en repòs respecte a ell, com els seus propis ulls o les extremitats. Jutjarà la longitud dels objectes que pot transportar, a la terra, segons les dimensions que ocupen en el seu propi marc. En l'espai de l'observador terrestre, els dos braços de l'aparell estan ajustats de manera que tenen la mateixa longitud, però en l'espai re-compartimentat de l'observador solar poden ocupar perfectament longituds desiguals, i quan assumim el punt de vista d'un observador situat en el sol no hem de passar per alt aquesta diferència. I la diferència no és tant una hipòtesi proposada per explicar el resultat de Michelson com una deducció directa d'aquest. Es va trobar que els dos recorreguts de la llum duraven temps iguals, i això demostra

clarament que el braç en la direcció menys afavorida és més curt que l'altre per contrarestar el desavantatge al qual m'he referit.*

Quan l'aparell es gira en angle recte, l'experiment dona el mateix resultat. No importa quin dels dos braços col·loquem en la línia del moviment de la terra: aquest braç ha de ser més curt que l'altre. En altres paraules, cada braç s'ha de contraure automàticament quan es gira de la posició transversal a la longitudinal respecte a la seva línia de moviment. Aquesta és la famosa contracció de FitzGerald d'una vareta en moviment. És de la mateixa quantitat sigui quin sigui el material de què està feta i només depèn de la velocitat del moviment. Per al desplaçament orbital de la terra, la contracció és d'una part en dos-cents milions; de fet, el diàmetre terrestre en la direcció del seu moviment sempre s'escurça en dues polzades i mitja [6,3 cm], mentre que el diàmetre transversal no resulta afectat.

Aquesta contracció d'un objecte material en moviment va ser revelada per primera vegada gràcies a l'experiment de Michelson i Morley;

* L'única alternativa és que (en relació amb un observador solar) la velocitat de la llum difereixi en diferents direccions, almenys a la regió on es realitza l'experiment. Presumiblement, això seria degut a alguna influència de la terra en moviment en la propagació de la llum (arrossegament de l'èter). Aquesta explicació va tenir una certa acollida en alguns moments, però no es va poder conciliar amb els fenòmens observats de l'aberració de la llum.

però no resulta pas antipàtica a les anticipacions teòriques. Hem de recordar que una vareta està formada per un gran nombre de molècules mantingudes en posició per les seves forces mútues. La força principal és la força de cohesió, i no hi ha dubte que aquesta és de naturalesa elèctrica. Però quan la vareta es posa en moviment, les forces elèctriques al seu interior han de canviar. Per exemple, cada càrrega elèctrica que es posa en moviment es converteix en un corrent elèctric; i els corrents s'exerciran atraccions magnètiques entre ells, atraccions que no es produïen en el sistema en repòs. Sota el nou sistema de forces, les molècules hauran de trobar noves posicions d'equilibri; l'espaiat entre elles serà diferent i, per tant, no és estrany que la forma de la vareta canviï. Sense anar més enllà de les lleis clàssiques de Maxwell podem anticipar teòricament quin serà el nou estat d'equilibri de la vareta, i resulta que es contreu en la quantitat exacta requerida pel resultat de Michelson i Morley.

La contracció de la vareta mòbil no ens ha de sorprendre; seria molt més sorprenent que mantingués la mateixa forma malgrat l'alteració de les forces elèctriques que determinen l'espaiat de les molècules. Però el que resulta més destacable és que la contracció només és aparent segons la perspectiva de l'observador solar, mentre que nosaltres, que ens desplacem juntament amb la

vareta aquí a la terra, no la podem apreciar. El fet que la contracció sigui molt petita és irrellevant. Suposem, per comoditat, que la velocitat de la terra fos 8.000 vegades més alta, de manera que la contracció equivalgués més o menys a la meitat de la longitud original; continuariem sense notar-la en la nostra vida quotidiana.

Suposem ara que la direcció del moviment de la Terra és cap amunt verticalment. Si tombo el braç, passant de la posició horitzontal a la vertical, es contraurà a la meitat de la seva longitud. No, no em podran convèncer que m'equivoco ni em preocupa que em mesurin amb un regle. Portin-ne vostès un i mesurin-me el braç; primer horitzontalment: el resultat és de 30 polzades; ara verticalment: el resultat és de 30 mitges polzades. Perquè han de recordar que han passat a l'escala en la direcció del moviment de la terra, de manera que cada divisió d'una polzada es contrau a mitja polzada. «Però podem veure que el seu braç no es contrau. Que no hem de confiar, doncs, en els nostres ulls?» Ben cert que no, tret que primer corregeixin les seves impressions visuals d'acord amb la contracció de la retina en direcció vertical i per l'efecte del nostre moviment ràpid en la direcció aparent de propagació de les ones de llum. Si calculen aquestes correccions, trobaran que només emmascaren la contracció. «Però si es produeix la contracció, no s'hauria de notar en el

braç?» No necessàriament; soc un observador situat a la terra i les meves impressions, com altres estímuls sensorials, pertanyen a la visió geocèntrica de la natura, la visió que Copèrnic ens ha persuadit d'abandonar.

Agafin uns compassos i girin-los sobre un full de paper. La corba resultant, és una circumferència o una el·lipse? Copèrnic, des del seu punt de vista situat en el sol, declara que a causa de la contracció de FitzGerald els dos punts s'han acostat quan s'orienten en la direcció del moviment orbital de la terra; per tant, la corba s'aplana i forma una el·lipse. Però aquí crec que Ptolemeu té dret que l'escoltem: assenyala que des dels inicis de la geometria els cercles sempre s'han dibuixat amb compàs d'aquesta manera, i que quan s'esmenta la paraula *cercle* qualsevol persona intel·ligent entén que aquesta és la corba a què es fa referència. De fet, la mateixa corba és un cercle en l'espai de l'observador terrestre i una el·lipse en l'espai d'un observador solar. És, alhora, una el·lipse en moviment i un cercle estacionari. Crec que això és la millor il·lustració possible del que entenem per *relativitat de l'espai*.

De vegades, s'expressa la queixa que la conclusió d'Einstein que el marc d'espai i de temps és diferent per a observadors amb moviments diferents tendeix a convertir en un misteri un fenomen que, al cap i a la fi, no és intrínsecament

estrany. Hem vist que depèn d'una contracció dels objectes en moviment que resulta estar força d'acord amb la teoria clàssica de Maxwell. Però fins i tot si aconseguim explicar-nos-ho de manera intel·ligible, això no fa que l'afirmació sigui menys certa! Sovint, un resultat nou es pot expressar de diverses maneres; una forma d'enunciar-lo pot semblar menys misteriosa, però una altra pot mostrar amb més claredat quines conseqüències tindrà esmenar i ampliar els nostres coneixements. És per aquesta última raó que subratllem la relativitat de l'espai, és a dir, que les longituds i les distàncies difereixen segons l'observador implicat.

La distància i la durada són els termes més fonamentals de la física; la velocitat, l'acceleració, la força, l'energia... totes en depenen; i amb prou feines podem fer cap afirmació en física sense fer-hi referència directa o indirecta. Segurament podem assenyalar millor les conseqüències revolucionàries del que hem après amb l'afirmació que la distància i la durada, i totes les magnituds físiques que se'n deriven, no es refereixen a cap element absolut del món exterior, com fins ara se suposava, sinó que són magnituds relatives que es modifiquen quan passem d'un observador a un altre que té un moviment diferent. La conseqüència per a la física del descobriment que una iarda [0,9 m] no és un bocí absolut d'espai, i que el que

és una iarda per a un observador pot ser divuit polzades [0,46 m] per a un altre observador, es pot comparar amb les conseqüències per a l'economia del descobriment que una lliura esterlina no és una quantitat absoluta de riquesa i que, en determinades circumstàncies, en «realitat» pot ser set xílings i mig. El teòric pot queixar-se que aquesta última afirmació tendeix a convertir en un misteri fenòmens monetaris que tenen una explicació del tot intel·ligible, però és una afirmació que apel·la a qualsevol home que estigui interessat en les aplicacions pràctiques del diner.

Ptolemeu a la terra i Copèrnic al sol contemplen el mateix univers extern. Però les seves experiències són diferents, i és en el procés d'experimentar els esdeveniments que s'ajusten a un determinat marc espacial i temporal, un marc que és diferent segons les circumstàncies locals de l'observador que els està experimentant. Aquesta, entenc, és la doctrina de Kant: «L'espai i el temps són formes d'experiència». El marc, doncs, no es troba en el món, sinó que és subministrat per l'observador i depèn d'aquest. Aquestes relacions de simplicitat, que busquem quan tractem d'obtenir una comprensió del funcionament de l'univers, han de residir en els propis esdeveniments abans que s'hagin fet encaixar arbitràriament en un marc determinat. El màxim que podem esperar de qualsevol marc és que no

distorsioni la simplicitat que hi havia originàriament, atès que un marc mal triat pot fer estralls amb la senzillesa natural de les coses. Hem vist que la simplicitat dels moviments planetaris va quedar enfosquida en el marc de Ptolemeu i, en canvi, es va fer evident en el marc de Copèrnic. Ara bé, per als fenòmens terrestres ordinaris, la posició s'inverteix i el marc de Ptolemeu permet que se'n faci evident la simplicitat natural; en el marc de Copèrnic, els fenòmens més simples es produeixen mitjançant processos molt complicats que s'anul·len mútuament. Els objectes ordinaris es contrauen i s'expandeixen a mesura que es mouen, i els canvis queden ocults per una elaborada conspiració en la qual s'uneixen totes les magnituds de la naturalesa, elèctriques, òptiques, mecàniques i gravitatòries. En el marc de Copèrnic ens enfrontem a una gran complicació en la descripció, una complicació que no té contrapartida en res que succeeixi al món exterior; i això és així perquè els termes de la nostra descripció re-meten al procés, irrellevant, d'encaixar en el marc d'espai i de temps que s'hagi seleccionat. Aquest elaborat sistema copernicà recorda força una de les idees del Cavaller Blanc:

Però vaig tenir una idea:
tenyir bigotis de verd
i un ample ventall desplego

perquè no es vegin (és cert).*

No neguem la subtileza i la notable eficiència del pla, però se'ns pot permetre qüestionar si és la interpretació més senzilla de l'àrida monotonia que la natura ens presenta del seu rostre. El fet més senzill és que un marc terrestre o ptolemaic s'adapta de manera natural als fenòmens terrestres, i un marc solar o copernicà s'adapta als fenòmens del sistema solar; però no podem fer que un mateix marc ens serveixi per a ambdós tipus de fenòmens sense introduir complicacions innecessàries.

Avui anem més enllà de Copèrnic, i no ens acontentem amb una visita al sol. Per què hauríem de triar el sol i no una altra estrella per obtenir una visió sense distorsió de les coses? L'astrònom ara es situa de manera que es desplaça amb el centre de gravetat de l'univers estel·lar, i ni tan sols així està satisfet del tot. El físic somnia amb una terra de Quisapon, que estaria autènticament en repòs respecte a l'èter. Ens adonem de la distorsió que apliquem al món natural a causa del punt de vista provincià des del qual l'observem, i intentem situar-nos de manera que puguem eliminar aquesta distorsió i així observar

* Versió catalana de Salvador Oliva: Carrol, Lewis, *A través del mirall i allò que l'Alicia hi va trobar* (Edicions 62, Barcelona, 2012). (N. del t.)

allò que realment és. Però és una recerca vana. Allà on posem la nostra càmera, la fotografia és per força una imatge bidimensional, distorsionada segons les lleis de la perspectiva; mai és una autèntica semblança de l'estructura com a tal.

Hem de provar un altre pla. No crec que puguem eliminar mai del tot l'element humà en la nostra concepció de la natura; però sí que podem eliminar un element humà concret: aquest marc espacial i temporal. Si el nostre pensament ha de ser antropocèntric, no cal que sigui també geocèntric; tampoc estem sempre en una situació millor si ens limitem a canviar-lo pel marc d'espai i temps d'alguna altra estrella o estàndard de moviment. Hem de deixar el marc totalment indeterminat. Quan fem això, veiem que el món comú a tots els observadors —en el qual cada observador traça un marc d'espai-temps diferent segons la seva pròpia perspectiva— és un món de quatre dimensions. Quan observem qualsevol objecte, per exemple una cadira, la impressió que es forma en els nostres ulls és una imatge bidimensional en funció de la posició des de la qual mirem; però no tenim cap dificultat a concebre la cadira com un objecte sòlid, que no s'identifica amb cap de les imatges bidimensionals que en tenim, sinó que les genera totes a mesura que canvia la posició de l'observador. Ara cal que ens adonem que aquesta cadira sòlida en tres

dimensions és en si mateixa només un aspecte que canvia segons el moviment de l'observador, i que hi ha un «supraobjecte» en quatre dimensions que no podem identificar amb la cadira tridimensional en el sistema de Ptolemeu ni amb la mateixa cadira en el sistema de Copèrnic, però que dona lloc a aquests dos aspectes. A nosaltres ens resulta fàcil fer la síntesi d'una cadira tridimensional a partir d'una sèrie d'imatges planes, perquè estem acostumats a assumir diferents posicions en ràpida successió; de fet, els nostres dos ulls ens donen punts de vista lleugerament diferents de manera simultània. Per pura necessitat, el nostre cervell s'ha vist obligat a formar la concepció de la cadira sòlida amb la combinació d'aquests aspectes canviants. Però el cert és que no alterem el nostre moviment en cap mesura apreciable i fins ara el nostre cervell no s'ha vist en la necessitat de combinar aspectes per a diferents estats de moviment; en conseqüència, doncs, l'esforç que ara demanem al cervell és nou. I això explica per què el resultat sembla transcendir el nostre mode de pensament habitual.

El descobriment, o, més ben dit, el redescobriments, del món de les quatre dimensions es deu a Minkowski. Einstein havia determinat plenament les relacions entre els marcs espacials i temporals per a observadors amb diferents estats de moviment. Al geni de Minkowski li devem la

constatació que aquests marcs són només sistemes de compartimentació traçats arbitràriament en un món de quatre dimensions, comú a tots els observadors.

Hi ha l'estranya elucubració que la quarta dimensió ha de ser quelcom que es troba més enllà de tota capacitat de concepció de l'home corrent, i que només el matemàtic pot iniciar-se en els seus misteris. És cert que el matemàtic té l'avantatge de comprendre i dominar la maquinària tècnica per resoldre els problemes que es poden plantejar en l'estudi del món de quatre dimensions, però pel que fa a la concepció d'aquestes quatre dimensions del món el seu punt de vista és el mateix que el de qualsevol altre. Que potser se suposa que gràcies a una intensa reflexió arriba a alguna mena d'èxtasi en el qual percep una direcció, fins ara insospitada, que s'estén en angle recte respecte a la longitud, l'amplada i el gruix? En qualsevol cas, això no serviria de gaire. El món de les quatre dimensions, del qual ara parlem, resulta ben familiar per a tothom. És obvi per a qualsevol persona —fins i tot per a un matemàtic— que el món dels objectes sòlids i permanents té tres dimensions i no pas més i que els objectes estan disposats en un determinat arranjament per partida triple: qualsevol objecte particular es pot analitzar en funció d'una disposició a dreta i esquerra, cap enrere i cap endavant i amunt i

avall. Però no és menys evident per a tothom que el món dels esdeveniments és de quatre dimensions i que, ben mirat, els fets s'organitzen en un arranjament quàdruple: qualsevol situació particular s'analitzarà d'acord amb els criteris de dreta i esquerra, cap enrere i cap endavant, amunt i avall i més tard i més d'hora. El tema del nostre estudi és la naturalesa externa, que és un món d'esdeveniments, comú a tots els observadors però que aquests representen de manera diferent d'acord amb els seus marcs locals d'espai i de temps; resulta evident per a l'experiència comuna que aquest món absolut conté una ordenació quàdruple.*

La notícia que els esdeveniments que ens envolten formen un món de quatre dimensions és tan obsoleta com la notícia de la mort de la reina Anna. La raó per la qual el relativista ressuscita aquest antic truisme és perquè només en aquesta combinació no desmembrada de quatre dimensions es troben les experiències de tots els observadors. Segons la nostra pròpia experiència, una dimensió està fortament desconnectada de les altres tres i la identifiquem com el temps; però aquesta experiència nostra és únicament

* La teoria de la relativitat no suggereix que hi hagi res a la natura com un espai de quatre dimensions. L'objectiu del reconeixement del món quadridimensional és eliminar el molest marc de l'espai.

terrestre, i si insistim a construir un sistema de la natura fonamentant-nos en una experiència purament terrestre ens estarem constrenyent al sistema medieval geocèntric del món.

Estem acostumats a considerar el món perdurable format d'una successió contínua d'estats instantanis, com si el món dels esdeveniments estigués estratificat. Se suposa que cada esdeveniment es troba en un instant o estrat definit, i la successió ordenada d'aquests estrats constitueix tota la realitat. L'instant «ara» representa un d'aquests estrats que permea tot l'univers; de fet, estem acostumats a estendre'l més enllà de l'univers, i fins i tot fem servir la paraula *ara* en referència a l'existència d'aquells que han marxat del món material. Les investigacions de la teoria de la relativitat mostren de manera incontrovertible que aquesta suposada estratificació és una il·lusió; no hi ha la més mínima evidència que sostingui aquesta visió de l'estructura del món. L'estat instantani, que fins ara hem assumit com un estrat natural en el món quadridimensional dels esdeveniments, no és res més que una compartimentació arbitrària creada per nosaltres mateixos perquè es correspongui amb la nostra visió geocèntrica. Podem prendre una altra compartimentació amb una orientació diferent,* és a dir,

* L'orientació no ha de superar un cert límit. Aquest angle limitant es pot considerar una constant fonamental de

un tall que, a una banda de nosaltres, inclogui esdeveniments que van passar fa un temps i, a l'altra, esdeveniments que encara no han passat; un arranjament tan absurd és en tots els aspectes equivalent al nostre estat anomenat *instantani*, i, de fet, és un estat instantani segons la perspectiva d'algun observador no terrestre amb un moviment adequadament escollit.

Ens resulta tan contrari als nostres prejudicis naturals reconèixer que ara l'instant global és creat per nosaltres mateixos i no té existència a banda de la nostra perspectiva geocèntrica, que dedicaré uns moments a intentar mostrar-ne l'artificialitat. Quan dic que soc conscient d'un instant *ara*, només en soc conscient en la mesura que estigui *aquí*, dins meu. Què em duu, doncs, a imaginar que existeix una prolongació d'això fora de mi? M'hi duu el fet de fer una ullada al món i

l'estructura del món, i pel seu caràcter fonamental apareix en molts tipus de fenòmens; per exemple, determina la velocitat de propagació de la llum. L'instant en el sol que és simultani amb un instant concret a la terra és indeterminat (varia segons el marc espacial i temporal emprat), però només dins d'un rang de 16 minuts. Qualsevol esdeveniment en el sol que succeeixi abans d'aquests 16 minuts és en el passat de manera absoluta, i tots els observadors estaran d'acord en aquest punt; de fet podríem haver rebut ja un missatge de ràdio anunciant el fet. Els esdeveniments posteriors als 16 minuts són en el futur de manera absoluta. La zona neutral que no és ni passat ni futur (en termes absoluts) s'amplia proporcionalment a mesura que augmenta la distància; en el cas de l'estrella fixa més propera s'estén fins als 8 anys, i en el de les estrelles més llunyanes conegudes fins ara arriba als 400.000 anys.

veure que «ara» es produeixen diversos esdeveniments; així, arribo a la conclusió que aquest instant del qual soc conscient s'ha d'ampliar per incloure'ls. Però aquesta idea és una altra herència de l'edat fosca, enderrocada per Römer el 1675. Allò que succeeix en l'instant «ara» no són pas els esdeveniments en si mateixos, sinó les impressions sensorials a què donen lloc. Així doncs, ha desaparegut del tot la meua justificació per situar els esdeveniments a l'exterior meu en els instants dels quals soc conscient. Malauradament, però, no es va eliminar el punt de vista més cru i grosser, sinó que es va apedaçar; es va veure que les dificultats immediates es podien resoldre situant els esdeveniments externs no en l'instant en què els percebem visualment, sinó en un instant que havíem experimentat un xic abans, per tal de permetre, podríem dir-ho així, el temps de propagació de la llum. D'aquesta manera, els nostres instants encara es prolongaven per l'espai, però com una compartimentació entre esdeveniments obtinguda mitjançant un procés artificial de càlcul i ja no per la intuïció immediata. La teoria de la relativitat identifica aquests instants globals pel que són: compartimentacions artificials construïdes amb finalitats de càlcul. Aquí puc afegir que això no altera de cap manera els instants locals que formen el corrent de la nostra consciència; reconeix plenament que la cadena

d'esdeveniments en aquesta successió temporal és una sèrie d'un caràcter totalment diferent de la successió de punts al llarg d'una línia en l'espai. Aquells que sospiten que la teoria d'Einstein es dedica a fer trucs injustificables amb el temps haurien d'adonar-se que deixa del tot intacta la successió temporal de la qual tenim coneixement intuïtiu, i es limita a esmenar l'esquema temporal artificial del temps que Römer va introduir a la física per primera vegada.

L'estudi del món quadridimensional dels esdeveniments ens ofereix una nova visió dels processos de la natura perquè elimina l'estratificació irrellevant en un sentit determinat —els estats instantanis— que hem introduït d'un mode tan innecessari en la nostra perspectiva habitual. Quan s'ignora aquesta estratificació, podem veure els processos en el seu aspecte més simple, malgrat que no sigui, és clar, el seu aspecte més familiar. Cal que distingim entre senzillesa i familiaritat; un porc ens pot resultar d'allò més familiar en forma de llonzes a la xarcuteria, però el porc «no estratificat» és un objecte d'estudi més senzill per al biòleg que vol entendre com funciona l'animal.

Conclouré aquesta part de l'argument amb una aplicació experimental que il·lustra el poder del mètode d'Einstein. Darrerament s'han estudiat molt els electrons que es mouen a velocitats molt altes; per exemple, les partícules β emeses per les

substàncies radioactives són electrons negatius que de vegades assoleixen velocitats de 100.000 milles per segon [160.000 km/s]. D'acord amb els experiments, es troba que el ràpid moviment produeix un augment de massa d'aquestes partícules. Vull mostrar que la teoria de la relativitat dona una explicació molt senzilla de com es produeix aquest augment de massa, però abans he d'assenyalar que anteriorment ja s'havia plantejat una explicació, acceptada en general com a satisfactòria. En realitat, el fenomen va ser predit per J. J. Thomson abans que ningú concebés la relativitat, perquè, si suposem que la massa d'una partícula és d'origen elèctric, una aplicació de les equacions de Maxwell mostra que hauria d'augmentar amb la velocitat. Ara bé, la llei exacta de l'augment no es pot predir a partir d'aquesta base, ja que diverses hipòtesis plausibles condueixen a resultats lleugerament diferents. A més a més, al cap i a la fi les equacions de Maxwell només són lleis empíriques que ja tenen el seu propi misteri; va ser un avenç notable vincular el canvi de massa a altes velocitats amb altres fenòmens l'estranyesa dels quals s'ha desdibuixat per mor d'una ja perllongada familiaritat, però encara hi ha marge per a una explicació d'un abast més general. Einstein ens duu directament a l'arrel del misteri i aclareix un punt que era enganyós, si no del tot equivocat, en l'explicació anterior. El canvi

de massa no depèn de cap manera de si la massa és d'origen elèctric o no; sorgeix simplement del fet que la massa és una magnitud relativa, que per a la seva definició depèn de les magnituds relatives de longitud i de temps. Fixem-nos en la partícula β des del seu propi punt de vista: només és un electró normal, en cap cas diferent de cap altre. «Oh, però oi que està viatjant inusualment ràpid?». «Això», diu l'electró, «és una qüestió d'opinió. Pel que a mi respecta, estic en repòs, si és que la paraula *repòs* té algun significat. De fet, ara mateix contemplava amb estupefacció la vostra extraordinària velocitat de 100.000 milles per segon amb què passeu com una centella pel meu davant». Per descomptat, a l'electró el nostre moviment no li interessa en absolut i no modificarà la seva constitució a causa nostra, de manera que manté la seva massa, radi, camp elèctric, etc., iguals a les constants habituals que s'apliquen als electrons en general. Aquests termes són relatius i, per tant, es refereixen a un marc concret espacial i temporal: clarament el marc apropiat perquè un electró s'observi a si mateix, és a dir, un marc respecte al qual es troba en repòs. Però aquest marc no és el marc geocèntric habitual al qual referim les magnituds com la longitud, el temps i la massa; hi ha una diferència de 100.000 milles per segon entre el nostre punt d'observació i el de la partícula β que es contempla a si

mateixa. És una simple qüestió de geometria descobrir en què es converteixen les longituds i els temps de la partícula β quan les referim a les compartimentacions que hem traçat en el món. I ara, quan calculem el canvi de massa conseqüent que resulta dels canvis de longitud i temps, trobem que s'hauria d'augmentar justament en la proporció que indiquen els experiments més refinats.

La qüestió és que cada electró, en repòs o en moviment, és una estructura perfectament constant; però la distorsionem fent-la encaixar en el marc espaciotemporal adequat al nostre propi moviment, un moviment que a l'electró no l'incumbeix en absolut. Com més gran sigui el nostre moviment respecte a l'electró, més gran serà la distorsió. I aquesta no la produeix pas cap agent físic que influeixi en l'electró; és una distorsió purament subjectiva en funció de la nostra transformació del marc de referència espacial i temporal. La distorsió implica un canvi en la nostra descripció física de l'electró en termes de massa, forma i mida; en particular, el canvi de massa coincideix amb exactitud amb el que es troba experimentalment.

Ja veuen vostès que no és del tot inútil discutir els marcs espaciotemporals naturals dels observadors que es mouen a velocitats enormes. No coneixem cap observador animat amb aquestes

velocitats, però sí que coneixem objectes materials inanimats. La seva semblança comuna queda enfosquida quan els referim indistintament al nostre irrellevant marc geocèntric; ens sembla creure que han alterat les seves propietats, que han canviat de massa, etc. però la semblança es restaura quan referim cada individu al marc que li és adequat i, així, els descrivim tots en termes comparables.

Les nostres mesures de distància a l'espai estan subjectes a determinades lleis: les lleis de la geometria. Però ara s'ha fet impossible considerar el tema de la geometria espacial com a complet en si mateix. Considerem un triangle format per tres punts (o esdeveniments) en el món quadridimensional; si hem disposat els nostres estrats instantanis de manera que els tres punts es trobin en un únic estrat, aleshores el triangle és un triangle espacial i les seves propietats entren dins de l'àmbit de la nostra geometria clàssica. Però un altre observador disposarà els seus estrats en una direcció diferent, i per a ell el triangle estaria en part en l'espai i en part en el temps, de manera que no encaixaria adequadament en la geometria espacial. El tema de la geometria es troba en una condició peremptòria, perquè Copèrnic i Ptolemeu no només no es posen d'acord pel que fa a la geometria d'una configuració, tampoc estan d'acord en si a una configuració

determinada és aplicable la geometria espacial. És evident que per salvar-la hem d'ampliar la nostra geometria de manera que, a més de l'espai, inclogui el temps. Permetin-me plantejar una il·lustració d'aquesta ampliació. L'observador terrestre pot tenir un triangle espacial (format per tres punts o esdeveniments en el mateix instant) els costats del qual pot mesurar amb regles; també pot tenir un «triangle temporal» format per tres esdeveniments en moments diferents, els costats dels quals ha de mesurar amb *rellotges*.^{*} Tots coneixen la llei del triangle espacial: que, si mesurem amb un regle d'A a B i de B a C, la suma de les lectures és sempre *més gran* que la mesura d'A a C. No és tan conegut que hi ha una llei exactament anàloga per al triangle temporal: que si mesurem amb un rellotge d'A a B i de B a C, la suma de les lectures sempre és *més petita* que la lectura d'un rellotge que mesuri d'A a C. En un triangle espacial dos costats qualssevol són, junts, *més grans* que el tercer costat; en un

* Els tres esdeveniments no poden ser al mateix lloc, ja que això donaria una línia de temps, no un triangle. El rellotge s'ha de moure de manera que els dos esdeveniments dels quals cal determinar la distància temporal succeeixin allà on es troba, de la mateixa manera que el regle s'ha d'orientar de manera que es superposi sobre els punts a mesurar. No es pot «doblegar» el rellotge, és a dir, aplicar-hi força per fer-lo moure amb una velocitat diferent de la uniforme, de la mateixa manera que no és permès doblegar el regle amb una força.

triangle temporal dos costats qualssevol son, junts, *més petits* que el tercer costat.* Aquestes dues lleis s'han de combinar en la nostra geometria general de quatre dimensions, i això fa que no sigui una geometria tan simple com aquella a què estem acostumats.**

En qualsevol cas, el punt al qual vull dirigir l'atenció és aquest. Evidentment, la proposició que els he presentat sobre els triangles temporals no es pot dissociar de la proposició corresponent sobre els triangles espacials. Quan abandonem el punt de vista geocèntric medieval, hem d'admetre que pertanyen a una geometria de la qual la nostra geometria espacial ordinària és només una part o projecció. Ara bé, si examinen la proposició sobre els triangles temporals, veuran que és una afirmació sobre el comportament dels rellotges quan es desplacen, un tema que es troba dins de l'àmbit de la mecànica. Quan tractem el món en quatre dimensions ja no podem distingir entre geometria i mecànica; es converteixen en un mateix tema. Quan haguem dominat completament

* Per descomptat, no és cert que dos costats qualssevol siguin menors que el tercer costat. Un rellotge, a diferència d'un regle, només pot mesurar en una direcció: del passat al futur, de manera que els costats $AB + BC$ i AC només es poden triar d'una manera.

** Això només implica una generalització més aviat insignificant de la geometria euclidiana, que no s'ha de confondre amb la geometria «no euclidiana» introduïda més endavant en la conferència.

la geometria del món dels esdeveniments, n'haurérem après la mecànica de manera inevitable. És per això que Einstein, estudiant la geometria del món i descobrint que era estrictament no euclidiàna, va trobar que, alhora, estudiava la força mecànica de la gravitació. I quan va decidir quina de les possibles varietats de geometria no euclidiana s'obeïa —i d'aquesta manera va establir les lleis de la nova geometria—, la mateixa decisió va establir la llei de la gravitació, una llei semblant a la que havia donat Newton, però no idèntica.

Arribats a aquest punt, se'ns obre tot un món davant nostre. Veiem que dues grans branques de la física matemàtica, la geometria i la mecànica, es troben en el món quadridimensional. No és només que els problemes mecànics es puguin tractar mitjançant fórmules originàriament pertanyents a la geometria pura (això és un recurs que fa temps que s'utilitza), sinó que la geometria experimental i la mecànica en realitat fan referència al mateix assumpte. El jove estudiant que descobreix lleis experimentals amb regles i compassos i figures de cartró, i després passa als pèndols i els dinamòmetres, en el fons està treballant un mateix tema, que no es pot separar més que el tema del magnetisme es pot separar del de l'electricitat.

És per mitjà d'aquesta unificació de la geometria i la mecànica que m'agradaria abordar el

problema de la gravitació, mostrant que un camp de força és una manifestació de la geometria de l'espai i del temps. Però em temo que això resultaria massa tècnic, de manera que l'abordarem des d'un angle diferent.

Hem vist que la contemplació del món des del punt de vista d'un únic observador és susceptible de distorsionar-ne la senzillesa i hem intentat obtenir una idea més justa considerant altres punts de vista i combinant-los. Com més punts de vista millor. Considerem ara, doncs, un altre punt de vista, en el qual no havíem pensat abans: el punt de vista d'un observador que ha caigut d'un aeroplà i es troba en caiguda lliure. En certs aspectes, és una situació ideal... com a mínim temporalment. Per desgràcia, al terra estem sempre sotmesos a una influència molt inquietant: patim un ingent bombardeig per part de les molècules del sòl, que colpegen les soles de les nostres sabates amb una força total d'uns deu *stones* de pes [63 kg] cap amunt. Ara bé, els nostres cossos són els aparells científics que fem servir per dur a terme les nostres observacions quotidianes del món. Estic segur que cap físic permetria que algú entrés al seu laboratori i comencés a colpejar els seus rellotges i galvanòmetres mentre fa observacions amb ells; però si fos el cas, consideraria necessari aplicar determinades correccions per tenir en compte l'efecte de tals pertorbacions. Així

doncs, deixem-nos caure lliurement al buit; d'aquesta manera ens alliberarem del bombardeig inquietant que he esmentat i podrem tenir una visió molt més natural del que passa al nostre voltant.

Mentre caiem, fem l'experiment de deixar anar una poma que teníem agafada amb la mà. Ara la poma és lliure, però no pot caure més del que ja estava caient i, en conseqüència, roman en contacte amb la nostra mà. Des de la nostra nova perspectiva —en el nostre nou marc espacial i temporal—, la poma no cau; no hi ha cap força misteriosa que l'acceleri. I recordin que aquest nou marc d'espai i de temps és el marc natural d'un observador lliure, mentre que l'antic marc, en el qual es produïa la misteriosa força acceleradora, era el marc d'un observador sotmès a una gran pertorbació. És cert que quan mirem cap a baix, cap a terra, veiem arbres i cases que es dirigeixen a tota velocitat cap a nosaltres, però no hi ha cap misteri en això; hi ha una causa evident: és ben clar que, des de sota, estan sent impulsats cap amunt per aquell bombardeig molecular que he esmentat. Poden veure vostès que la visió de les coses que té la poma és més senzilla que la de Newton. Newton va haver d'inventar una força misteriosa que arrossegava la poma cap avall; la poma només observa un agent físic familiar que impulsa en Newton cap amunt.

No és el meu propòsit destacar indègudament la superioritat de la visió de la poma sobre la de Newton, sinó més aviat considerar ambdues en igualtat de condicions. Tal vegada he estat una mica injust amb en Newton. La seva posició a la superfície de la terra era infortunada, però hagués estat d'allò més satisfet de situar-se al centre de la terra, on hauria pogut romandre sense cap mena de suport, és a dir, sense les pertorbacions del bombardeig molecular. Des d'allà hauria observat amb claredat la ben coneguda acceleració de la poma; i la poma hauria observat una acceleració corresponent de Newton sense cap bombardeig molecular que la provoqués. Des de tots dos punts de vista hi ha un agent misteriós que està actuant. Com hauríem de representar aquest agent? Ens l'hem d'imaginar com una força, com una estrebada d'algun tipus? Però si és així, a qui s'aplica, l'estrebada? Si prenem el punt de vista de Newton, l'estrebada s'aplica a la poma; si considerem el punt de vista de la poma, s'aplica a Newton. Així doncs, en la nostra síntesi de tots els punts de vista no podem decidir qui dels dos rep l'estrebada i la imatge de la gravitació com a agent arrossegador esdevé impossible. Einstein la substitueix per una imatge diferent, que potser entendrem millor si la comparem amb una revolució molt semblant del pensament científic que es va produir fa molt de temps.

Els antics creien que la terra era plana. La petita part de la seva superfície amb la qual s'havien de preocupar de manera habitual es podia representar sense cap mena de distorsió important en un mapa pla. Tots vostès han vist aquests mapes del món, com per exemple la projecció de Mercator, i poden recordar com Groenlàndia es veu d'una mida enormement exagerada. Ara, els que donaven suport a la teoria de la terra plana haurien de sostenir que el mapa pla ens proporciona la veritable mida de Groenlàndia; però aleshores, com explicarien que els viatgers que recorren aquell país informessin que les distàncies són molt més curtes? Suposo que inventarien una teoria segons la qual en aquell país resideix una mena de dimoni que ajuda els viatgers en els seus recorreguts, fent que els desplaçaments semblin molt més curts del que són «en realitat». Sens dubte, els científics intentarien mantenir la seva respectabilitat creant algun mot polisíl·lab grecol·latí per no haver d'emprar la paraula *dimoni*, però això no hauria d'ocultar el fet que en qualsevol cas estarien apel·lant a un *deus ex machina*. Malgrat tot, el terme *dimoni* és força adequat, perquè aporta la característica maliciosa que no podem fixar-lo en cap ubicació concreta. Podríem començar igualment el nostre mapa pla amb el seu centre situat a Groenlàndia; aleshores podríem comprovar que els desplaçaments serien

allà prou normals i que les activitats del dimoni inquietarien els viatgers que recorren Europa. Ara sabem que la veritable explicació és que la superfície terrestre és corba i que les complicacions «demoníiques» apareixien perquè estàvem forçant la superfície terrestre a ajustar-se a un marc pla inadequat que distorsionava la senzillesa de les coses.

El que ha passat en el cas de la terra ha passat també en el cas del món, i cal una revolució similar del pensament. Un observador situat, posem per cas, al centre de la terra, determina que hi ha un marc d'espai i de temps —un marc pla o euclidià— en el qual pot situar les coses que succeeixen en el seu entorn sense distorsionar-ne la simplicitat natural. Sempre que l'observador limiti les seves observacions al seu entorn immediat no hi ha gravitació ni tendència dels cossos a caure. Llavors estén aquest marc d'espai i de temps a distàncies més grans, fins arribar a la superfície terrestre, on es troba amb el fenomen de les pomes que cauen. Cal explicar aquest nou fenomen, de manera que inventa un *deus ex machina* que anomena *gravitació* a l'acció del qual atribueix la pertorbació. Però hem vist que, posats a fer, podríem partir igualment de la poma que cau. Aquesta té un marc pla d'espai i de temps en el qual els fenòmens del seu entorn s'ajusten sense cap distorsió; des del seu punt de vista, els cossos

propers no pateixen cap acceleració. Però quan estén aquest marc més lluny, es perd la senzillesa i, en conseqüència, també ha de postular una força «demoníaca» de la gravitació existent en parts allunyades, que provoca, per exemple, que els objectes no pertorbats al centre de la terra caiguin cap a ella.

Quan canviem d'un observador a un altre — d'un marc espaciotemporal pla a un altre—, hem de canviar la zona en què actua aquest dimoni. No resulta ara evident la solució? El dimoni no és res més que la complicació que sorgeix quan obliquem el món a encaixar en un marc espaciotemporal euclidià pla, al qual no es pot ajustar sense distorsió. No encaixa amb el marc perquè el món no és un món euclidià o pla. Si admetem una curvatura del món, la misteriosa pertorbació desapareix. Einstein ha exorcitzat el dimoni.

Einstein, en reconèixer que en els fenòmens de la gravitació no estava tractant amb «estrebades» sinó amb una curvatura del món, va haver de reconsiderar la llei de la gravitació. No va poder fer que cap llei de curvatura possible correspongués exactament a la llei d'atracció assumida anteriorment, de manera que es va veure obligat a plantejar una nova llei de la gravitació, una llei que en la majoria dels casos pràctics difereix molt poc de la de Newton, tot i que la seva fonamentació és essencialment diferent. No cal que m'allargui

aquí sobre la manera molt notable en què s'ha confirmat l'esmena d'Einstein de la llei de la gravitació, tant per mitjà del canvi secular anòmal en l'òrbita del planeta Mercuri com pel desplaçament observat de les estrelles a la vora del sol durant l'eclipsi total de 1919. No obstant això, sí que val la pena que recordi que en aquesta darrera observació el punt de confrontació entre la teoria de Newton i la d'Einstein no era l'existència d'una deflexió dels raigs de llum que passaven prop del sol, sinó la magnitud d'aquesta deflexió, atès que Einstein va predir que la deflexió possible era el doble que la que permetia la teoria newtoniana; les observacions de l'eclipsi van confirmar quantitativament la deflexió més gran. El principal èxit d'Einstein és una nova llei, no una nova explicació, de la gravitació. Atribueix la gravitació dels cossos massius a una curvatura del món en la regió que els envolta i, d'aquesta manera, aporta un raig de llum a tot el problema; en qualsevol cas, no es preocupa específicament d'explicar com els cossos materials produeixen aquesta curvatura del món que els envolta (o com hi estan associats), ni de quina manera aquesta curvatura s'ajusta a una llei. Tot i que considerar la teoria de la relativitat general com la recerca d'una explicació de la gravitació seria malinterpretar de pla en pla la postura d'Einstein quan la va proposar, crec tanmateix que l'estudi posterior de les

seves idees ha dut a una explicació genuïna tan completa com es podria desitjar. En aquesta conferència, però, no els presentaré l'explicació; de vegades una explicació requereix exposar moltes coses.*

Crec que sense les matemàtiques ens podem fer una idea general de per què Einstein va considerar necessari modificar la llei de la gravitació

* El següent resum donarà una pista de la naturalesa de l'explicació. La llei de la gravitació d'Einstein s'expressa normalment com un conjunt de deu equacions diferencials molt elaborades; aquestes equacions són exactament equivalents a l'enunciat geomètric que «el radi de curvatura esfèrica de qualsevol secció tridimensional del món de quatre dimensions és una longitud constant universal, la mateixa per a tots els punts del món i per a totes les direccions de la secció». Per tant, la llei implica que el món té una certa homogeneïtat i isotropia (però no l'homogeneïtat i isotropia completes d'una esfera). Per explicar la llei de la gravitació i els fenòmens que regeix, hem d'explicar com es garanteix aquesta isotropia i homogeneïtat. La nostra explicació és que l'homogeneïtat i la isotropia no es troben inicialment en el món extern, sinó en les mesures que en fem; s'introdueix en totes les nostres operacions de mesura perquè els aparells que fem part del món. A l'inici d'aquesta conferència hem vist que la contracció del braç girat d'horitzontal a vertical no es detecta mitjançant mesures fetes amb un regle que comparteix la contracció; de la mateixa manera no apareix cap anisotropia del món en les mesures que fem amb aparells que, essent part del món, comparteixen la mateixa anisotropia. La llei de la gravitació sorgeix, doncs, del fet que una certa inhomogeneïtat i anisotropia del món no pot arribar a l'experiència observacional, perquè queda eliminada en totes les observacions i mesures fetes amb aparells materials. Els fenòmens ordenats de la gravitació es deuen a l'absència de certs efectes concebibles. Hem intentat trobar una clau al misteri, però el secret del pany no rau en la clau sinó en els vigilants.

de Newton. Tornem a la il·lustració del porc, i imaginem que volem descobrir la llei que regula la distribució del greix i la carn magra en l'animal. Des del punt de vista del taulell del xarcuter, una llei plausible seria que la meitat de cada llonza és greix i l'altra meitat, carn magra; si això es confirmés, de manera molt aproximada, per l'observació, podríem imaginar haver descobert la llei exacta de l'estructura porcina. Però la situació es modifica si renunciem al punt de vista del taulell i contemplem l'animal d'una manera més general, recordant que no s'ha concebut amb cap referència particular a les llonzes en què el nostre xarcuter ha decidit tallar-lo. Ara hem de buscar un tipus de llei completament diferent i apareixen dues possibilitats. Podem trobar que la nostra proposta de llei, encara que s'expressi en el llenguatge del taulell del xarcuter, sigui tanmateix equivalent a una possible llei biològica; en aquest cas, es podrà traduir immediatament en una afirmació més general que no faci referència a cap estratificació particular. Però, d'altra banda, ens podem trobar que la llei proposada no es pugui alliberar d'aquesta referència a un sistema concret de tall en llonzes; en aquest segon cas, només podem considerar-la com una aproximació, que potser funcionarà força bé per a les llonzes amb les quals tenim més experiència, però es revelarà cada cop menys precisa quan

observem les parts més tortuoses de l'animal. Tots dos casos es poden il·lustrar en les modificacions d'Einstein de la teoria clàssica. La llei de la gravitació de Newton es refereix explícitament a un marc d'espai i de temps i, per tant, a un món estratificat en estats instantanis; i resulta impossible alliberar-la d'aquesta referència a una estratificació concreta sense modificar-la. De fet, si les crucials observacions astronòmiques haguessin demostrat que la llei de Newton i no la d'Einstein era la llei exacta de la gravitació, això hauria estat la prova d'una estratificació real de l'estructura del món, una estratificació no revelada per cap altre fenomen. La llei d'Einstein és la llei més simple perquè és coherent amb el que ara coneixem del canemàs general de l'estructura del món; la llei de Newton només podria tenir sentit introduint una característica nova i especialitzada —una disposició estratificada de l'estructura— que no s'observa en cap altre fenomen.

Les lleis de l'electromagnetisme de Maxwell ofereixen un exemple de l'altre tipus. Aquestes, és ben cert, s'expressen en relació a les llonxes particulars del món dels esdeveniments, que se'ns serveixen com a rodanxes instant a instant. Però es poden reexpressar, sense que se'n modifiqui l'efecte, en una forma que no faci referència a les llonxes. Es tracta d'una propietat molt notable de les equacions de Maxwell que era força

desconeguda en el moment en què es van presentar per primera vegada; va sortir a la llum molt més tard gràcies a les investigacions de Larmor i Lorentz. Com a conseqüència de tot això, Einstein pot assumir tota la teoria clàssica de l'electromagnetisme sense cap mena d'alteració; la re-expressa de manera que mostra com s'aplica en general i sense estar lligada al punt de vista purament terrestre, però sense modificar les lleis. Dona un tractament diferent a les lleis gravitatòries i a les electromagnètiques, perquè descobreix que aquestes últimes ja estan adaptades al seu esquema.

Si he aconseguit el meu objectiu, s'hauran vostès adonat que la revolució actual del pensament científic es una continuació, en una seqüència natural, de les grans revolucions en èpoques anteriors de la història de la ciència. La teoria especial de la relativitat d'Einstein, que explica la indeterminació del marc de l'espai i del temps, corona l'obra de Copèrnic que fou la primera que ens va portar a renunciar a la nostra insistència en una visió geocèntrica de la natura; la teoria general de la relativitat d'Einstein, que revela la curvatura o la geometria no euclidiana de l'espai i el temps, encamina el pensament rudimentari d'aquells astrònoms previs que van contemplar per primer cop la possibilitat que la seva existència restés en una cosa que no era plana. Aquestes revolucions

anteriors encara són una font de perplexitat en la infantesa, que aviat superarem; i arribarà un moment en què les sorprenents revelacions d'Einstein també s'hauran assentat en les idees comunes del pensament culte.

Alliberar el nostre pensament dels lligams de l'espai i del temps és una aspiració del poeta i del místic, una idea que és vista amb certa fredor pel científic, que té prou bons motius per témer la confusió d'idees poc apedaçades a què podria donar lloc. Si bé altres ja havien tingut certes sospites de l'objectiu final que calia assolir, ha estat Einstein qui ens ha mostrat el camí que havíem d'agafar per desempallegar-nos d'aquestes «adherències terrestres del pensament». I en desfer-nos de les manilles ens deixa, no (com es podia témer) unes generalitats vagues per a la contemplació extàtica a gust del místic, sinó un canemàs precís de l'estructura del món que esperona el físic matemàtic.

LES CONFERÈNCIES ROMANES

Les conferències Romanes són una prestigiosa conferència acadèmica de caràcter anual que serveixen com a conferència pública de cada curs acadèmic a la Universitat d'Oxford. Se celebren sempre al Sheldonian Theatre de la ciutat.

El cicle de conferències va ser fundat el 1891 pel biòleg George Romanes (1848-1894), de qui reben el nom. La primera conferència es va celebrar el 1892, amb el polític William Gladstone com a convidat.

Al llarg dels anys, s'ha invitat a nombroses personalitats destacades de les arts i les ciències. La conferència pot ser de qualsevol tema de ciència, art o literatura, i és aprovada pel vicerector de la universitat.

L'any 1922 el conferenciant convidat va ser Arthur Eddington, amb la conferència que hem reproduït aquí.

THE ROMANES LECTURE

1922

The
Theory of Relativity
and its
Influence on Scientific Thought

BY

ARTHUR STANLEY EDDINGTON

M.A., F.R.S.

Plumian Professor of Astronomy, Cambridge
President of the Royal Astronomical Society

DELIVERED

IN THE SHELDONIAN THEATRE

24 MAY, 1922

OXFORD

AT THE CLARENDON PRESS

1922

