

En el llindar d'una teoria final?¹

ALFREDO TIEMBLO RAMOS

Institut de Matemàtica i Física Fonamental, C.S.I.C.

La teoria de la relativitat constitueix, sens dubte, una d'aqueixes adquisicions del pensament humà a la què pot atribuir-se el valor de medul·lar. No obstant això, convé precisar al respecte els termes de la qüestió per tal d'entendre les raons de la seua immensa i general acceptació.

Presentada habitualment com el punt de partida de la física moderna, el seu valor de ruptura ha arribat a constituir-se en tòpic, tot conferint-li al mateix temps el caràcter indiscutible d'una suposada visió "nova" del món. La veritat és que una perspectiva d'aquesta naturalesa, en el fons, no li fa justícia; més encara: allunya considerablement del seu autèntic significat. Per dir-ho breument, encara que il·lustraré amb certa amplitud el concepte, la relativitat no és la primera gran teoria moderna; és mes aviat tot el contrari: l'última gran teoria clàssica. En ella culmina una visió multiseular de la natura, adquirint el valor de la gran síntesi necessària que tanca tota una concepció de l'univers.

Arribats a aquest punt, és menester anar aigües amunt cercant les pròpies fonts de la nostra cultura que, per descomptat, ens porten directament al món clàssic de l'antiga Grècia. Sorprèn, sens dubte, el fenomen històric del pensament grec, siga perquè les seues fonts originals no han arribat a nosaltres o perquè arranquen d'una tradició perduda en la història dels pobles mediorientals. Aquest pensament es presenta com una eclosió quasi sobtada de la racionalitat en les seues versions més brillants que resulta molt difícil d'entendre. Se sol afirmar que els grecs patrocinen la primera visió científica del món i, encara que pot haver-hi molt de cert, tal vegada siga més cert presentar-los com els descobridors de l'instrument essencial de la cultura, és a dir del pensament abstracte. Com una conseqüència, un postulat essencial impregna tota la filosofia grega: «El món es pot entendre en termes de la raó humana». La gosadia, com a rerefons de l'ànima grega, trobarà en Ulisses una mena de Sant Patró que recorrerà la Mediterrània buscant transgredir tot límit allà on el trobe. El nostre Averrois abundarà en el mateix postulat, en atribuir justament a la raó humana el paper de descobrir el misteri de l'univers.

En aquest punt, i com que es tracta de la física relativista, convé aturar-se en el valor o significat que cal atribuir al verb entendre quan es tracta de l'univers. En altres termes: què entenem per *entendre*? En última instància, sempre hom acaba reflexionant sobre un mateix, apel·lació última a una teoria del coneixement que està en les bases de tota la cultura.

Davant de la varietat de fenòmens que succeeixen en l'univers, hom pot per descomptat apel·lar a la màgia o, tal vegada, a l'exercici d'alguna voluntat que s'expressa a través d'aquests fenòmens. Però, en qualsevol cas, i probablement com a resultat d'observacions

¹ Traducció del castellà de Joan Verdegal.

acumulades al llarg de la història, de les què, d'altra banda, queda prou evidència, hom acaba per concloure que l'univers es manifesta a través de lleis, és a dir de pautes de comportament que, una vegada descobertes, permetran predir els fenòmens. Quasi un somni, l'exercici de la profecia aplicat a l'esdevenir de la Natura. Sorgeix així la idea d'un univers legislat i, des d'aquesta perspectiva, bona part del problema ja s'ha resolt. De moment, entendre l'univers és descobrir aqueixes lleis, i a aquest programa s'aplicarà la intel·ligència humana, encara que la metafísica plantejarà últimes preguntes que possiblement estan encara per respondre, i qui sap fins quan. Les lleis de la Natura seran l'àmbit propi de la racionalitat i, amb ella, de l'ordre, front a un caos inadmissible. La cultura urbana grega resulta d'aquesta manera una metàfora del propi univers, i no solament impregnarà els productes del pensament especulatiu, sinó fins i tot els propis cànons de la creació artística.

Aquest és precisament el rerefons cultural que prevaldrà fins als nostres dies i que impregnarà l'estructura íntima del pensament científic. La teoria de la relativitat en les seues dues versions, restringida i general, és la versió més sofisticada d'aquesta posició intel·lectual que podem anomenar clàssica. Per dir-ho amb la simplicitat que requereix el cas, l'única cosa que Einstein ve a dir és que les lleis de la natura són les mateixes per a tots els observadors, inercials en el cas de la relativitat restringida, i d'altres qualsevol per a la general. Però cal observar que, d'alguna manera, l'assumpte així plantejat resulta una mica banal, ja que perquè alguna cosa existisca amb vigència de llei haurà de ser per força idèntica per a tots els observadors. Així doncs, el pensament d'Einstein podria resumir-se admetent que realment hi ha lleis de la Natura i que, per tant, han de ser universals, terme aquest últim que en física significa que és el mateix per a tot observador o, en altres termes, que no depèn d'ell.

Per això, la denominació "relativitat" és probablement poc afortunada, ja que en llenguatge planer significa el contrari, allò de la veritat i la mentida i el color del cristall, mentre que el que subjau és que, per molt que hom canvie el color del vidre, les lleis de la Natura seran sempre les mateixes.

Arribats a aquest punt, em sembla convenient apuntar algunes observacions sobre idees i llenguatges molt pertinents per al cas que ens ocupa. La teoria de la relativitat, i per extensió una bona part dels desenvolupaments de la física teòrica, estan envoltats del discutible prestigi de l'incomprensible, de manera que, encara que es presumeixen certs, se sol desistir, d'entrada, de tractar d'entendre'ls. Aquesta actitud té bastant menys base del que se sol imaginar, perquè, si bé és cert que el llenguatge natural de la física són les matemàtiques, llenguatge per cert també universal, i que aquestes se saben o no, no ho és menys que les idees que sustenten l'edifici de la física teòrica són prou senzilles. I el cas de la teoria de la relativitat és un excel·lent exemple, perquè, en definitiva, dir que les lleis de la Natura han de ser les mateixes per a tots els observadors no és una proposició que necessite abundoses reflexions.

Tanmateix, una qüestió diferent són les conseqüències que s'hagen de pagar per desenvolupar una idea tan senzilla. Les primeres són, òbviament i com estem dient, de llenguatge. El càlcul tensorial resol el problema, si se sap càlcul tensorial. Hom pot saber càlcul tensorial com hom pot saber alemany o italià, sense que calga meravellar-se perquè

algú tinga aquest coneixement concret.

No obstant això, hi ha d'altres implicacions una mica més subtils que són l'origen del terme relativitat, d'una banda, i de la sorpresa i perplexitat que va causar la seua formulació, d'una altra. Einstein va mostrar, en efecte, que les lleis de la Natura poden establir-se com a idèntiques per a tots els observadors, però va posar de manifest al mateix temps que per a això és precis pagar un preu ben alt, ni tan sols sospitat fins aleshores.

Així doncs, per valorar l'impacte de la visió relativista en la nostra perspectiva de la realitat, és necessari tornar la mirada enrere i resumir, en molt poques paraules, els trets essencials d'una cosmovisió que, només amb la possible excepció de Leibnitz, ha estat vigent des dels orígens de la cultura fins als nostres dies. És la d'un univers submergit en un espai-temps inert immutablement i presumiblement etern en el què estan les coses i ocorren els fenòmens sense que a ell li passe res. Molt especialment, l'enigmàtic concepte del temps sempre va ser considerat com una entitat amb caràcter absolut i, en conseqüència, idèntica per a tots els observadors. De fet, es tracta d'una de les característiques, potser menys satisfactòria, de la dinàmica clàssica.

Essencialment, les equacions de la física no són altra cosa que un intent de descriure el succeir de la natura o, el que és igual, l'evolució dinàmica dels sistemes. L'esmentada evolució es caracteritza a través d'un paràmetre t , el temps, objecte essencial de la dinàmica que, paradoxalment, manca en ella de caràcter dinàmic. Quan en física existeix una cosa que no se sap exactament el que és, se li atribueix un paràmetre i es continua avançant; això és justament el que va ocórrer amb el temps. Cal observar que no passa el mateix amb la nostra percepció de l'extensió, és a dir de l'*espacialitat*, si se'm permet el terme.

Una llarga tradició matemàtica havia construït des dels grecs una rigorosa concepció de l'espai a través del que denominem geometria. Més endavant, mitjançant el concepte de sistema de referència, el geni cartesià permetrà caracteritzar cada punt de l'espai per tres valors numèrics que reben el nom de coordenades.

Galileu és el primer que es planteja el problema d'establir les transformacions o regles que permeten passar d'un sistema de referència a un altre. Un mateix punt de l'espai té, en dos sistemes de referència, distints valors de les coordenades, propietat evident que està implícita en la seua pròpia definició. Però, naturalment, el temps era idèntic per a tots els sistemes de referència; és això, i no altra cosa, el que tracta de descriure un caràcter paramètric.

Per descomptat, hi havia bones raons per fer-ho així, i no mai s'havia observat res que posara en qüestió un aspecte tan evident. El propi Newton va acceptar aquest punt de vista, tot adoptant respecte al temps una actitud quasi reverencial associada al seu caràcter absolut.

En línies molt generals, aquest és l'univers comunament acceptat fins als nostres dies i que encara perviu en el fons de la nostra manera de veure de les coses.

És justament aquest aspecte de la nostra cultura el que qüestiona el pensament relativista, tot posant de manifest que, com de fet podem comprovar que ocorre, si volem que les lleis de la Natura no canvien d'un observador a un altre és inevitable acceptar que el temps sí que ha de fer-ho. D'aquesta manera, cada sistema de referència tindrà un temps propi diferent del dels altres, és a dir, el mateix que els ocorre a les coordenades. Aleshores, resulta inevitable atribuir-li també el caràcter d'una coordenada més. Jo no

crec que, almenys entre els membres de la meua generació, no haja calgut superar una actitud inicial d'estupor i incredulitat davant d'una idea d'aquesta naturalesa. Es tracta, a més, d'aquest tipus d'idees que no es queden en el terreny de l'especulació, sinó que tenen conseqüències de tota mena impossibles d'eludir.

Per començar, si cada observador té el seu propi temps i, en conseqüència, adquireix l'estatut d'una coordenada, i si, a més, és en aquest marc on les lleis de la Natura adquireixen el requerit caràcter d'universalitat, caldrà concloure per força que és aquest marc de quatre coordenades, és a dir un espai de quatre dimensions, l'escenari "natural" on escriure les equacions de la física.

Hom podria suposar que un programa d'aquesta naturalesa, encara que matemàticament possible (Minkowski), hauria de venir acompanyat d'un grau creixent de complexitat pel que fa a les expressions. Doncs bé, el que resulta sorprenent és que ocorre justament el contrari: les coses són molt més senzilles en quatre dimensions, i en moltes ocasions fins i tot més intuïtives.

Amb aquests instruments en la mà, resulta possible abordar, a més, un dels problemes més antics i a la vegada més fonamentals amb els què s'ha enfrontat el pensament. Em referisc al fenomen de la inèrcia i, al mateix temps, a l'atracció gravitatòria entre els objectes. Ambdós tenen sorprenents propietats en comú; algunes implicarien el recurs al llenguatge matemàtic, però no cal recórrer a ell per tal d'assenyalar el que essencialment els uneix, és a dir el seu caràcter universal. Inèrcia i gravitació no distingeixen un tipus de matèria d'altres: davant d'elles, totes es comporten de la mateixa manera. Val a dir per exemple que, respecte dels fenòmens electromagnètics, per no citar altres forces de la natura, no tota la matèria es comporta igual. Així, amb un sistema elèctric de mesura hom pot veure que hi ha càrregues negatives, positives i fins i tot, com és el corrent, objectes sense càrrega. Podrien citar-se al respecte moltes altres propietats que no són del cas. La qüestió és que, davant de la inèrcia i la gravitació, tota la matèria es comporta de la mateixa manera; quasi podria dir-se que inèrcia i gravitació transcendeixen a la pròpia matèria. Com a conseqüència, són impossibles d'apantallar, és a dir que no hi ha cap dispositiu, almenys conegut fins ara, susceptible d'eludir la seua presència, cosa que com és notori no ocorre, per fer servir el mateix exemple, amb els fenòmens electromagnètics.

En aquestes condicions, sembla natural, en un primer pas, establir una relació entre ambdues i, en un altre posterior, associar-les a algun tipus de propietat de caràcter extremadament bàsic i fonamental.

No em detindré en la primera qüestió, que es tradueix en l'anomenat principi d'equivalència, que estableix que, localment —és a dir un punt de l'espai i el seu immediat al voltant—, una acceleració és indistingible d'un camp gravitatori. I dic que no em detindré perquè es tracta d'un tema que admet encara un cert debat no exempt de subtilesa que probablement aniria més enllà del propòsit d'aquestes línies.

En canvi, sí que ho faré amb la idea de l'establiment d'un vincle entre els fenòmens gravitatoris i alguna propietat que, pels propis termes del problema, hauria de ser extremadament general. La solució la va buscar Einstein en la pròpia geometria, tot identificant els efectes de la gravitació amb les pròpies propietats geomètriques de l'espai.

La veritat és que una postura d'aquesta mena explica admirablement el caràcter universal dels fenòmens gravitatoris, perquè, com ja havia esbossat, en adjudicar-los un

caràcter geomètric es transcendeix al propi concepte de matèria.

La qüestió en aquest punt planteja una altra ruptura amb un pensament ancestral; ja des dels grecs es coneixien els fonaments de la geometria amb notable precisió, però la qüestió és: de quina geometria? Si algú haguera plantejat aquesta pregunta en el segle XVI, probablement ni tan sols l'haurien entès, perquè geometria com a mare no hi havia més que una, l'euclidiana, o, en altres termes, la que fem servir tots els dies. Ja en el segle XIX, i per motius en els quals no em sembla oportú entrar, es coneixia l'existència de diferents possibles geometries (Riemann entre altres) dins d'un marc coherent en el terreny matemàtic. Però atribuir-los carta de naturalesa en la visió objectiva de l'univers era una possibilitat d'aqueixes que es descarten d'entrada.

També en aquest terreny Einstein va trencar amb idees ancorades en el fons de la nostra història. Contra el testimoni habitual dels nostres sentits, la descripció més coherent de la natura s'aconsegueix en un espai de quatre dimensions que inclouen el temps i la geometria del qual no és necessàriament euclidiana. Podem viure en un univers obert o tancat, corb o pla, i és veritat que falten elements per respondre a aquestes preguntes però no és menys cert que totes aquestes possibilitats estan obertes en l'estat present dels nostres coneixements.

Aquesta és, en síntesi, la situació de la física que hem denominat clàssica. El segle que ha acabat ens va posar en contacte amb una dimensió encara més enigmàtica de la realitat. Em referisc per descomptat a la física quàntica, els principis de la qual xoquen també amb la visió ancestral dels fenòmens. No em sembla que siga aquest el moment d'abordar els principis fonamentals de la mecànica quàntica, probablement encara escassament compresos; només caldrà dir que totes les forces de la natura admeten, dins d'escala específiques de validesa, les dues descripcions clàssica i quàntica, i *grosso modo* ambdues són conegudes per a totes elles, amb la flagrant excepció de la gravitació. Ningú no ha aconseguit fins ara construir una descripció quàntica de la gravitació matemàticament coherent i físicament acceptable. Les raons, de caràcter molt tècnic, ens portarien massa lluny pel camí de les matemàtiques. No obstant això, sí que pot esmentar-se l'aparent contradicció filosòfica que existeix entre la relativitat general i la mecànica quàntica.

Com hem vist, el principi de relativitat estableix que les lleis de la Natura són independents de l'observador. Doncs bé, en mecànica quàntica tot sembla indicar que l'observació juga un paper essencial, que al meu parer encara no ha estat entès del tot. Entre ambdues posicions sembla haver-hi, en conseqüència, un fons de contradicció la solució del qual és un dels grans temes del nostre temps.

Es troba implícit en aquest plantejament el naixement d'un nou programa, i amb ell d'una nova ciència, la cosmologia, que disposa d'aquesta manera d'uns fonaments teòrics basats precisament en la relativitat general, així com d'un respectable repertori observacional obtingut a partir dels cada vegada més valuosos recursos de la moderna astrofísica.

La cosmologia, tot i que encara és incipient, s'allunya d'aquesta manera del terreny de l'especulatiu, tot adquirint l'estatut de coneixement pròpiament dit. Es tracta quasibé de la materialització d'un vell somni de la humanitat, que per molt de temps quedava en les lleixes a les quals els mortals no podien accedir. Implícita en la relativitat general,

està la seua vocació de globalitat, és a dir de teoria que ha d'estendre's a l'univers en el seu conjunt. I no es tracta d'una extrapolació més o menys convincent: ens trobem davant d'una visió de la realitat que només adquireix un sentit complet quan es refereix a la totalitat de la realitat física, és a dir a l'univers.

D'aquesta manera, el conjunt del cosmos ha de ser una solució de les pròpies equacions relativistes. Naturalment, falten dades per poder afirmar que disposem de solució general, però no és menys cert que comencem a parlar de *models d'univers* construïts dins d'hipòtesis més o menys raonables.

El segle que recentment s'ha acomiadat va començar disposant d'informació rellevant sobre propietats globals que afecten a la pròpia estructura de l'univers; la més coneguda és potser el fenomen de l'expansió (Hubble, Humason), encara que avui en dia disposem d'altres que no venen al cas. La qüestió és que avui en dia podem portar aquestes dades que afecten a magnituds, l'àmbit de les quals és rigorosament enlluernador, a la modesta realitat d'una pissarra i conjecturar un test de validesa l'escenari del qual està a milers de milions d'anys llum.

És una situació que, com li passava a Kant, afecta de la mateixa manera els límits de l'univers i els de la pròpia consciència humana. Al meu parer, aquesta és la dimensió en què el llegat d'Einstein adquireix tota la seua transcendència. Sempre he pensat que el coneixement és més una qüestió de preguntar assossegadament que de respondre amb urgència. Estem començant a formular-nos preguntes l'existència de les quals mai abans podíem ni tan sols sospitar: l'univers té un origen?; si és així, com va començar?, o bé, quina és la seua edat?, i la seua extensió? També hi ha d'altres més discutibles, com ara les frases: i abans què?, o bé, què hi ha més enllà? I finalment la més inquietant de totes: pot copsar-se alguna cosa sobre el seu sentit?, el naixement de l'univers és tal vegada un fenomen inevitable?

Naturalment, no intentaré respostes definitives en aquest sentit, però alguna cosa ja es pot dir al respecte. En primer lloc sabem que l'univers és una realitat evolutiva, o històrica si es prefereix; en termes planers: canvia amb el temps, no és immutable, abans era d'una manera i ara és d'una altra.

La visió que ens ofereixen els actuals telescopis comença a ser una espècie de viatge en el temps. Quan observem el nostre entorn planetari tenim evidència d'una situació que estava ocorrent fa alguns minuts, que poden arribar a ser algunes hores, és a dir un passat pròxim. Quan es tracta de galàxies, la qüestió es trasllada als milions d'anys llum, és a dir que, segons creix l'abast dels mitjans d'observació, contemplem una realitat cada vegada més jove. No és ara el moment d'entrar en detalls, però sí d'assenyalar que el cel profund ens ofereix el testimoni d'objectes molt particulars que corresponen, sens dubte, a estructures de l'univers molt joves.

Sabem així que, amb tota probabilitat, l'univers té un origen que cal situar entre els quinze mil i vint mil milions d'anys. Sabem també que inicialment era molt més reduït, tal vegada absurdament petit. La seua història transcorre en períodes ben diferenciats, en els quals una fracció infinitesimal d'un segon té el rang d'una era, per la transcendència dels esdeveniments que hi van ocórrer. Sabem que, quasi amb seguretat, el fonamental estava ja fet abans que transcorregueren alguns segons.

No és la meua intenció recórrer als nombres, però hom pot afirmar que es tracta

d'una història que estem començant a conèixer, encara que siga a grans trets. Podem retrocedir en el temps fins a un punt enormement pròxim al propi origen, però més enllà ens trobem novament amb una barrera que correspon al moment en què els aspectes quàntics de la gravitació predominen sobre qualsevol altre tipus de fenòmens, i en aquest règim no disposem de recursos teòrics, ni per descomptat experimentals, que ens permeten imaginar com va ser aqueix origen de la realitat que, sense incórrer en cap tipus d'exageració, podríem anomenar el principi de totes les coses. La teoria vàlida en aquest domini és el que es denomina gravitació quàntica, teoria encara per construir i, per emprar un verb que he usat fa poc, possiblement més aviat per imaginar.

La física, a pesar de les seues abstraccions teòriques, és una ciència de base empírica. Les equacions de Maxwell, sorprenent i bellíssim exercici de síntesi matemàtica, no són en el fons altra cosa que una elegantíssima descripció de manipulacions realitzades en el laboratori amb el concurs de piles i bombetes de llum. Mai no s'ha assajat la construcció d'una teoria sobre fenòmens dels quals no es disposa de cap informació experimental. La gravitació quàntica es troba justament en aquesta situació, i per això suposa, al meu entendre, un desafiament a la intel·ligència humana que manca de precedents en la història.

Des d'aquesta perspectiva evolutiva, hom pot a més atribuir-li el valor d'una teoria final, perquè hauria de donar compte pel seu propi àmbit de validesa d'aquells fenòmens responsables de l'origen de la realitat. Entre altres coses, la pròpia gènesi de l'espai-temps la naturalesa dinàmica del qual s'imposa cada vegada amb major evidència.

Arribats a aquest punt, cal preguntar-se si realment és possible arribar tan lluny. Al meu parer, la possible solució apunta a una raonable conjectura: potser ni relativitat general ni mecànica quàntica siguen dues teories realment fonamentals, sinó aproximacions ambdues d'una altra molt més profunda, la gravitació quàntica, de la qual, com ja he esmentat, no tenim de moment cap indicatiu ben fundat.

És un terreny en què probablement ciència i filosofia, o si es prefereix física i metafísica, hauran de trobar-se després d'alguns segles d'anar cada una pel seu costat. L'èxit encara és dubtós en aquest terreny, però tot apunta que a l'univers encara li queden alguns milers de milions d'anys; així doncs, encara queda temps.

D'aquesta manera, com sol ocórrer, portar més enllà la frontera del coneixement, més que aportar per fi una resposta definitiva, no fa sinó augmentar l'àmbit del misteri. I és que el coneixement és més una qüestió de preguntar bé que de respondre malament.