



LA TEORIA DE LA RELATIVITAT

Jordi Cosp Vilella

Tots hem sentit a parlar de la teoria de la Relativitat, de la contracció del temps i de les longituds, de la curvatura de l'espai, però pocs han estat els privilegiats als que se'ls hi ha ensenyat les bases de la teoria. El cert és que quan se sent a parlar de Relativitat es posa la pell de gallina. Només de mencionar el nom apareixen les imatges de complicades equacions matemàtiques i conceptes intel·ligibles manipulats per un monjo de la física teòrica tancat al seu despatx escrivint sobre un polsosa pissarra. Res més llunyà de la realitat. La teoria de la Relativitat no és fàcil, calen moltes matemàtiques per resoldre'n les equacions però això no vol dir que els conceptes fonamentals estiguin fora de l'abast de qualsevol persona mínimament interessada en el tema. Aquest fet queda en evidència si tenim en compte que fins fa cinc anys la teoria de la Relativitat especial estava al temari de física de primer curs de telecos.

No és la meua intenció escriure un tractat exhaustiu sobre Relativitat, al mercat es pot trobar llibres fantàstics sobre el tema i l'espai disponible en

JORDI COSP VILELLA és projectista del Departament de Teoria del Senyal i Comunicacions de la UPC i membre de la Branca d'Estudiants de l'IEEE

una revista com aquesta amb prou feines permetria començar-lo. Només he intentat trencar el gel, obrir una escletxa en una porta perquè el lector pugui fer una ullada al que hi ha a l'altra banda. Serà feina seva obrir la

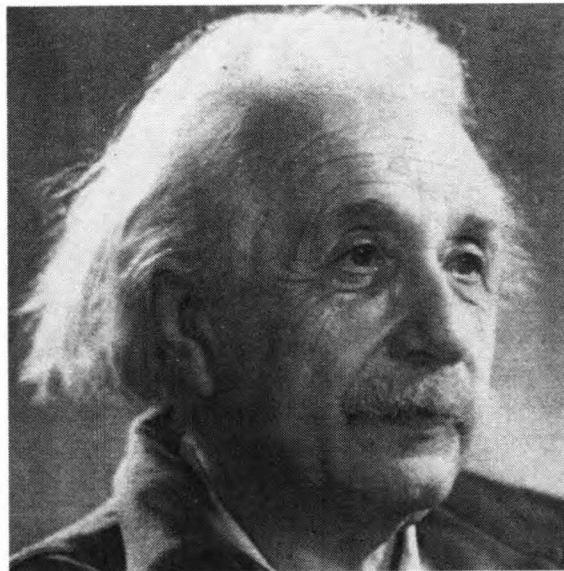


Figura 1.- Retrat d'Albert Einstein.

porta i acabar de descobrir tot el que s'amaga al seu darrera.

PRECURSORS DE LA RELATIVITAT.

Per comprendre millor la Relativitat i l'evolució que va dur a Einstein a formular-la caldria veure quines eren les bases de la física anteriors al segle XX. No donaré les tres lleis fonamentals de la Mecànica Clàssica (de ben segur que tothom ja les coneix) sinó que voldria fer notar

dues hipòtesis en les que es basava aquesta mecànica:

1.- L'interval de temps entre dos successos és independent de l'estat de moviment del cos de referència.

2.- L'interval espacial entre dos punts d'un cos rígid és independent de l'estat de moviment del cos de referència.

Semblen hipòtesis raonables i evidents. Tots els fenòmens que una persona pot experimentar sense l'ajuda de sofisticats aparells de mesura ens donen la raó. El temps i l'espai semblen magnituds universals constants per a qualsevol observador.

La Mecànica Clàssica s'havia mostrat com una eina extremadament potent. Amb l'ajuda del càlcul havia permès explicar els moviments dels cossos més pròxims a l'experiència, la propagació del so, la teoria cinètica dels gasos, les lleis fonamentals de la termodinàmica, etc... Era per això que també es va provar d'explicar la teoria electromagnètica de Maxwell amb les lleis clàssiques. Al cap i a la fi, si la llum no era res més que una ona, perquè havia de ser tant diferent del so?. La teoria mecànica de la llum l'interpretava com un moviment ondulatori en un medi elàstic (èter) que ocupava tot l'univers i fins i tot era capaç d'atravesar la matèria sense provocar fregament. L'èter era in mòbil, era solidari amb un sistema

de referència universal respecte al que eren vàlides totes les lleis de la física. La resta d'observadors es trobarien, doncs, en uns altres sistemes no privilegiats.

A finals del segle XIX, però, la situació ja era insostenible. Nombrosos experiments determinaven que la velocitat de la llum era constant respecte al nostre sistema de referència, la Terra. Semblava evident que l'èter no podia ser solidari amb la Terra. Aquesta substància fantasmal no podia donar voltes al voltant del Sol. Però llavors si els experiments ens mostraven que la llum tenia sempre la mateixa velocitat, algun error devien cometre. Fallava l'experiència o la raó.

Es va donar nombroses explicacions d'aquest fet però cap de totalment satisfactòria. Algunes, com la de Lorentz, donava expressions matemàtiques correctes però continuava basant-se amb la mecànica de Newton. D'altres, com la de Mach i la de Pointcaré, captaven parcialment el concepte però no eren completes.

LA RELATIVITAT ESPECIAL.

Finalment, al 1905, Albert Einstein publicà el seu article 'Sobre l'electrodinàmica dels cossos en moviment'. En ell no buscava efectes estranys que expliquessin les observacions per així mantenir un principis dogmàtics sinó que negava aquests principis i n'afirmava uns altres de diferents.

Al començament del seu article, Einstein, basant-se en les lleis de Maxwell, postula el seu Principi de Relativitat en el que diu que:

1.-Les lleis de l'electrodinàmica i l'òptica són vàlides per a qualsevol sistema de referència pel que són vàlides les equacions de la mecànica.

i també afegeix un segon postulat:

2.-La llum es propaga en el buit a una velocitat c independentment de la velocitat de la font.

Aquests dos postulats topen frontalment amb les dues hipòtesis enunciades més amunt de la constància de les distàncies temporals

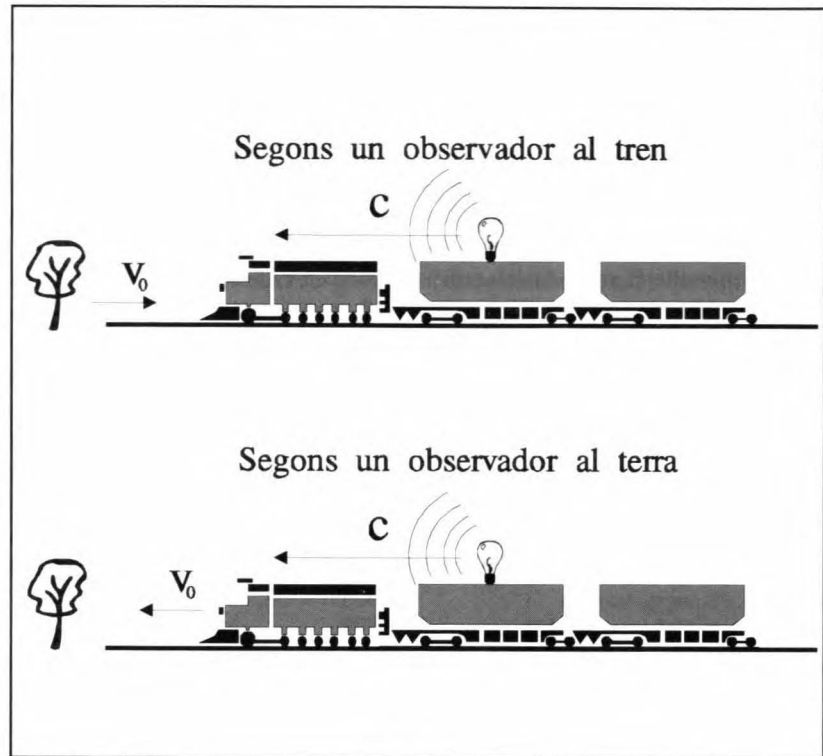


Figura 2.- Un observador situat al tren el veuria quiet, els arbres movent's i la llum generada al tren viatjar a una velocitat c . Un observador situat al terra veuria els arbres quiet's i el tren movent's però la llum provinent del tren també viatjaria a una velocitat c .

i espacials. Einstein acabava de fer el pas decisiu, la Mecànica Clàssica havia mort com a una realitat universal i passava a ser una bona aproximació per a la majoria dels efectes físics.

En el punt en que es comença a explicar una teoria com la de la Relativitat es corre el perill de perdre rigor científic quan no es vol que l'escrit s'acabi convertint en un munt de fórmules impossibles de digerir per un lector no massa avessat a les matemàtiques. Tot i així, per una millor comprensió i facilitat de lectura, el millor és veure uns quants exemples amb el menor nombre de fórmules possibles i així poder transmetre de forma amena els conceptes relativistes encara que matemàticament el tractat no sigui complet.

Per començar convé entendre bé els postulats i el més complicat és el segon. Per entendre'l ens podem imaginar un tren que es mou a una velocitat v_0 respecte les vies (figura 2). Sobre d'ell s'hi troba una llanterna

que emet llum en la direcció i sentit del moviment del tren. Aquesta llum viatjarà a una velocitat c respecte el tren. Fins aquí no hi trobem res d'anormal. La diferència amb la Mecànica Clàssica apareix quan el segon postulat ens diu que un observador situat a terra veurà viatjar la llum també a una velocitat c enlloc de (v_0+c) com ens diria el sentit comú.

En aquest moment ja podem entendre com la Relativitat nega la hipòtesi de la constància universal del temps que l'experiència quotidiana ens afirma. Realitzem un experiment imaginari consistent en un tren de longitud d movent-se a una velocitat constant v_0 amb un aparell al mig capaç d'emetre polsos de llum cap a totes les direccions de l'espai (figura 3). Suposem que en $t=0$ la font emet un pols de llum. Aquest, segons un observador que es mogui amb el tren, haurà de viatjar una distància $d/2$ cap endavant i una altra d'igual cap enrera a una velocitat constant c . És per això que aquest observador veurà com els dos polsos arriben simultàniament al principi i al final

del tren. En canvi un observador situat fora del tren, en repòs respecte la via, també veurà propagar-se la llum a una velocitat constant c però en aquest cas primer arribarà el pols al final del tren que al principi donat que el final viatja cap a la font i el principi se n'allunya. En aquest cas, dos esdeveniments (l'arribada dels polsos de llum als extrems del tren) en un sistema de referència (el tren) són simultanis mentre que en un altre (el terra) no tenen lloc al mateix temps. Amb un raonament similar també s'arriba a la conclusió que les longituds tampoc són iguals quan es medeixen en diferents sistemes de referència inercials.

No voldria acabar aquesta exposició sobre la Relativitat especial sense mencionar la famosa fórmula d'Einstein $E=mc^2$. En ella ens diu que tant la massa com l'energia d'un cos estan íntimament relacionades per la velocitat de la llum, és a dir,

passen de ser conceptes diferenciats a ser dues cares d'una mateixa moneda. L'experiència ens diu que quan entreguem energia a un cos, aquest normalment el que fa és accelerar-se, és a dir, treballant a velocitats baixes augmenta la seva velocitat. En canvi, quan la velocitat d'aquest cos ja és molt elevada no pot continuar creixent al mateix ritme que quan està en repòs, la velocitat té un límit, però cal mantenir el principi de la conservació de la massa-energia. L'única solució és que aquesta energia entregada no es converteixi tota en cinètica sinó que augmenti la massa i així faci encara més difícil una nova acceleració. Recordeu la segona llei de Newton.

LA RELATIVITAT GENERAL.

Si es mira atentament la teoria especial de la Relativitat, en el primer postulat s'afirma que les lleis de la electrodinàmica són vàlides en els

sistemes que són vàlides les lleis de la mecànica. Això realment no ens està dient que tots els sistemes siguin vàlids, només ho són els que descriuen un moviment uniforme, els que no estan accelerats. Podem endevinar que la teoria no era completa. Per què hi havia d'haver encara uns sistemes privilegiats respecte als altres? Seria com afirmar que les direccions horitzontals són diferents de la vertical perquè la llei de la inèrcia es manifesta molt més clarament en les primeres.

Quan Einstein va intentar explicar els camps gravitatoris es va trobar que amb només la Relativitat especial no podia, calia una altra teoria molt més general. No fou fins al cap de 10 anys i d'acceptar que la seva primera teoria era un joc de nens comparada amb la segona que no va publicar la teoria general de la Relativitat. En ella es pot aproximar el primer postulat per:

1.-Tots els cossos de referència són equivalents de cara a la descripció de la Natura, sigui quin sigui el seu moviment.

Aquesta definició no és del tot certa però una definició més precisa s'escapa de la intenció d'aquest article.

La teoria general de la Relativitat es basa en el principi d'equivalència de la gravitació i la inèrcia. És a dir, no es pot distingir entre un moviment produït per una força inercial (acceleració, força centrífuga, etc...) o una força gravitatòria. Aquest principi es pot explicar amb els següents exemples. Imagineu un observador tancat en un ascensor sense cap finestra que li pugui mostrar l'exterior i totalment allunyat de qualsevol força o camp gravitatori. Quan aquest observador deixés anar un objecte a l'aire, aquest, segons la llei de la inèrcia, continuaria el seu moviment flotant per l'aire fins a xocar amb alguna de les parets. Suposem ara que l'observador juntament amb l'ascensor està caient sobre la Terra. Si deixés anar qualsevol objecte o fins i tot quan ell fes el mínim moviment també perdria el control i sortiria flotant ja que tots els

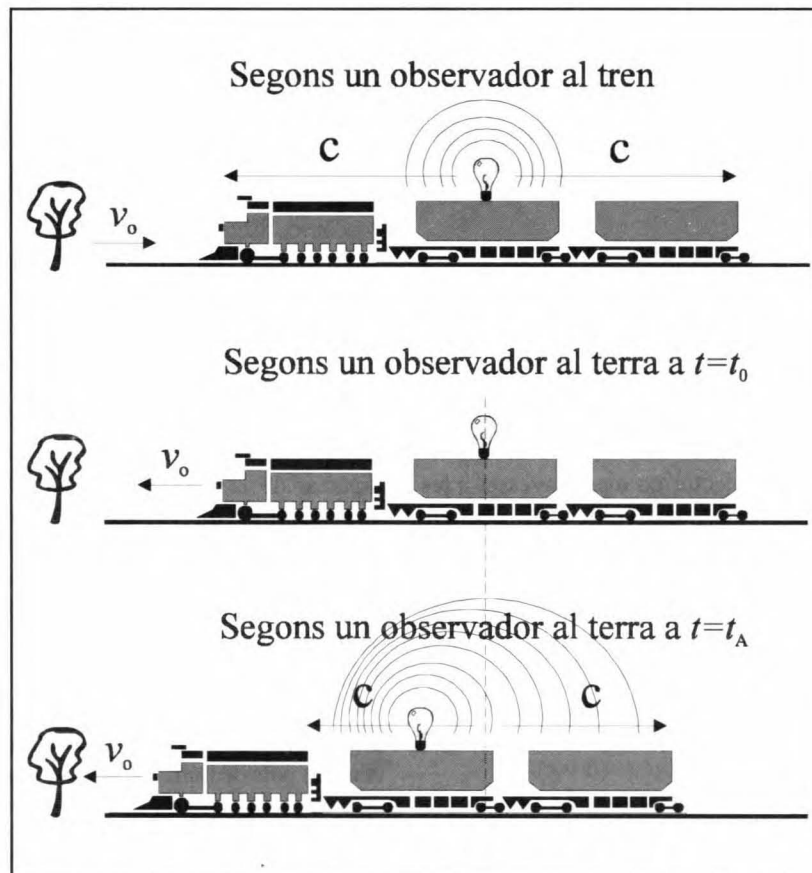


Figura 3.- Per a un observador al tren l'arribada dels rajos de llum als extrems del tren és simultània. Per a un altre al terra a $t=t_0$ s'emet el pols de llum. Però degut a que el tren s'està desplaçant i c és constant, la cua persegueix la llum i l'atrapa abans que el cap que se n'allunya. Al dibuix no s'ha tingut en compte la disminució de les longituds.

elements del sistema estan accelerats igualment, entre ells no hi ha cap diferència. Aquest observador no podria distingir si està flotant per l'espai o caient en el buit.

Un cas anàleg seria si algun ésser empenyés l'ascensor amb una acceleració constant. L'observador experimentaria una força en sentit contrari a l'acceleració que l'enganxaria al terra, fet que no es podria distingir del que passaria si situéssim l'ascensor en repòs a la superfície d'un planeta, on l'observador continuaria experimentant una força, el pes, que seria per ell igual que l'anterior en tots els aspectes. Per Einstein una força gravitatòria no és més que una il·lusió dels nostres sentits. No existeix cap força màgica que actuï a distància pel sol fet d'existir un cos amb massa sinó que aquest cos provoca una distorsió geomètrica a l'espai que l'envolta. Simplement els cossos segueixen la llei de la inèrcia en un espai diferent del que capta l'experiència quotidiana.

Un dels efectes d'aquest principi és la curvatura de la trajectòria de la llum sota un camp gravitatori. Si ens tornem a imaginar l'ascensor d'abans però aquest cop amb un forat per on hi pugui entrar un raig de llum i li apliquem una forta acceleració cap 'amunt', si la llum entra horitzontalment a una alçada de, diguem, 1 metre sobre el terra, quan hagi atravesat l'ascensor i degut a la velocitat finita de la llum, aquesta arribarà a l'altra paret a una alçada més baixa de la que havia entrat. La llum s'ha corbat. Però com que el principi d'equivalència de la gravitació i de la inèrcia diu que no podem distingir els efectes d'una força inercial i una de gravitatòria, la llum quan travessa un camp gravitatori també s'ha de corbar. Aquesta va ser una de les proves fonamentals de la

teoria. Quan en el 1919 un eclipsi solar va permetre observar les estrelles que s'havien de veure pròximes al Sol, la seva posició aparent havia canviat respecte un altre moment del dia en que el sol no es trobava al mig de la trajectòria de la llum (figura 4).

En la Relativitat especial havíem vist que la velocitat de la llum era constant, però ara, en canvi, veiem que la llum es pot corbar. Si un raig de llum, que no és més que un front d'ona, es corba, la part exterior del front ha de viatjar més depressa que la interior. No, no es tracta de cap

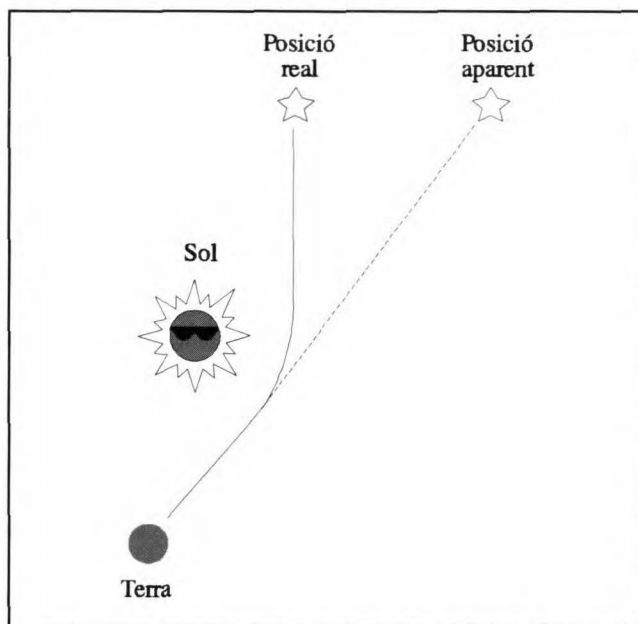


Figura 4.- El raig de llum provinent d'una estrella, en passar a prop del Sol, es corba i a la Terra se la veu en una altra posició.

falàcia o contradicció aparent. El segon postulat de la Relativitat especial no és cert sota la influència de camps gravitatoris. Cal remarcar que això no nega la validesa de la Relativitat especial. Així com l'electrostàtica és el cas límit de l'electrodinàmica en el que no hi ha moviment, la Relativitat especial és el cas límit de la general en el que no hi ha ni acceleracions ni camps gravitatoris.

Finalment quedaria explicar tot l'aparell matemàtic que comporta la teoria de la Relativitat general. Com ja he dit al principi no és senzill. Aquest tipus de matemàtica no s'ensenya a les carreres tècniques, el

que no vol dir que un enginyer o informàtic sigui incapaç de comprendre-la. Per aprendre, que no vol dir aprovar exàmens, només calen les ganes. El temps i la capacitat també són importants però secundaris. En aquest article em limitaré a mostrar alguna idea sobre els conceptes matemàtics que cal utilitzar i la millor manera és amb uns exemples quotidians.

Si un cartògraf vol fer un plànol de la ciutat de Barcelona no tindrà cap problema amb la curvatura de la Terra, podrà obviar-la. Aquest és el

nostre espai més proper sense un camp gravitatori massa gran. En canvi, si vol fer un mapa d'Euràsia haurà de tenir en compte que només podrà representar la projecció d'un casquet esfèric sobre un pla. Aquesta seria una porció gran del nostre Univers en la que hauríem de tenir en compte la teoria de la Relativitat. Un altre cas semblant seria si volguéssim dibuixar un triangle sobre la superfície de la Terra (figura 5). Suposem que una part del triangle és un segment de l'Equador i que els costats són dos quarts de meridians que van des de l'Equador al Pol Nord. Els meridians són per-

pendiculars a l'Equador, formen amb ell un angle de 90° . Per tant, la suma de dos angles del triangle serà de 180° mesurats sobre la Terra. Però encara falta un tercer angle, el que formen els dos meridians al Pol Nord i aquest serà sempre més gran que zero. Aquest és un cas en que, en contra del que ens han ensenyat sempre, la suma dels angles d'un triangle és més gran que 180° . Quan considerem la geometria de la superfície de la Terra com bidimensional no podem aplicar la geometria euclidiana, la geometria que podem experimentar sobre un pla 'de veritat'. El mateix passa amb l'Univers. En el nostre àmbit més proper el veiem 'pla', podem acceptar

com a cert el principi d'Euclides que diu que la línia recta és la trajectòria més curta entre dos punts. En canvi, quan ens situem a escales molt més grans, les masses provoquen curvatures en l'espai-temps que deformen la nostra visió de la Natura. És convenient remarcar que tot i que els nostres sentits ens enganyin en un principi, dels efectes d'aquestes projeccions podem deduir l'estructura real. Els grecs tot i no disposar de vehicles espacials per observar la Terra des de l'exterior ja sabien que era esfèrica.



Figura 5.- La suma dels angles d'un triangle dibuixat sobre la Terra és més gran que 180° .

CONCLUSIONS.

La Relativitat ens ha permès adonar-nos que el que nosaltres, segons la nostra experiència, percebem com a realitats, la invariança de l'espai i del temps, no són altra cosa que conceptes de la nostra perspectiva i és natural que canviïn segons el punt de vista. Com que no existeix una perspectiva privilegiada, tots els sistemes de referència són igual de vàlids per descriure els fenòmens de la Natura. La física anterior a Einstein no ho havia assumit encara i considerava que el seu punt de vista era el privilegiat. Primer Aristòtil i Ptolomeu van concebre un Cosmos geocèntric on el lloc habitat per l'Home, i per tant el mateix Home, tenia una importància fonamental a l'Univers. Aquesta visió cosmològica va perdurar durant tota l'Edat Mitjana fins que Galileo i Newton van donar el model matemàtic per concebre un altre Cosmos on la Terra ja no n'era el centre sinó el Sol i les estrelles fixes. Aquest model tot i semblar radicalment diferent de l'anterior és més igual del que aparenta. S'havia canviat el centre de l'Univers però s'havia mantingut l'essència de la teoria anterior, l'Univers continuava tenint un centre, continuava tenint un observador privilegiat amb un nom diferent, ara s'anomenava èter. No voldria treure mèrit a Newton i la

resta de científics de l'època, ells ens van donar la forma de calcular els efectes físics més propers a nosaltres i sense ells segurament no coneixeriem la Relativitat. El més greu va ser que tot i saber que la seva visió del Cosmos era parcial, els seus seguidors la van prendre com a dogmàtica.

Amb la teoria de la Relativitat es va trencar aquest esquema. La nostra visió local de l'Univers no era extrapolable a la resta del Cosmos. Calia trencar amb uns conceptes fortament arrelats a les nostres consciències per adquirir-ne uns altres de més universals.

Crec que la part més important d'aquesta teoria no és la part matemàtica, ni els seus postulats amb les seves conseqüències sobre la física moderna, ni tant sols la nova concepció de la Natura i de l'Univers del que tots en formem part, sinó que és una mostra d'humilitat dels nostres limitats coneixements físics. Quan creïem que la Mecànica Clàssica podia explicar tots els fenòmens observables va sorgir la Relativitat, capaç d'explicar les llacunes de l'anterior. També cal tenir en compte que la Relativitat continua tenint llacunes, que no és coherent amb la

Mecànica Quàntica i que els científics s'hi han estat barallant durant quasi tot aquest segle. Quan temps ens haurem de passar donant voltes postulant cada vegada noves teories que tapen llacunes per obrir-ne d'altres? Potser la ciència està seguint un camí equivocat com a finals del segle passat quan volia explicar l'electrodinàmica amb les hipòtesis de la Mecànica Clàssica de la invariança del temps i de l'espai. Podria ser que mentre ens limitem a creure en la física de forma dogmàtica siguem incapaços de veure d'altres possibilitats que fa molt temps que ja tenim al nostre abast. Potser l'Home té més importància del que ens creiem, no per

tot l'Univers però si per nosaltres mateixos.

BIBLIOGRAFIA.

- [1] ALBERT EINSTEIN: *Sobre la teoria de la Relativitat especial i general*. Alianza Editorial, LB1048.
 - [2] ALBERT EINSTEIN: *Notas autobiogràfiques*. Alianza Editorial, LB1005. 1949*.
 - [3] ALBERT EINSTEIN: *El significado de la Relatividad*. Obras maestras del pensamiento contemporáneo.
 - [4] ALBERT EINSTEIN ET AL.: *La teoría de la Relatividad*, Grandes Obras del Pensamiento, 4. Ed. Altaya, 1995.
 - [5] ALBERT EINSTEIN: *Mis ideas y opiniones*. Antoni Bosch Editor, 1990.
 - [6] LINCOLN BARNETT: *El Universo y el Doctor Einstein*. Fondo de Cultura Económica, 132. 1948*.
 - [7] DESIDERO PAPP: *Einstein. Historia de un espíritu*. Colección Austral 1606. Espasa Calpe, 1981.
 - [8] BANESH HOFFMAN: *Einstein*. Biblioteca Salvat de grandes biografías, 1987.
 - [9] BANESH HOFFMAN: *La Relatividad y sus orígenes*. Ed. Labor.
 - [10] NAYLA FAROUKI: *La Relatividad*. Dominós. Círculo de Lectores. 1993*
 - [11] PAUL A. TIPLER. *Física Moderna*. Ed Reverté, 1985
- Les dates marcades amb un asterisc** indiquen l'any de publicació de l'original.