

# La teoria de la relativitat restringida<sup>1</sup>

ROLANDO PÉREZ ÁLVAREZ  
Universitat de L'Havana

## 1. Introducció

Dins de poc de temps, l'any 2005, farà un segle de la publicació del famós article d'Albert Einstein *The Principle of Relativity*, on aquest genial científic va establir les pautes fonamentals del que, amb el temps, s'ha anomenat *teoria de la relativitat restringida*.<sup>2</sup> Ningú no dubta que aquesta és una de les teories científiques més importants del segle xx. A la seua explicació i divulgació s'han dedicat molts llibres, monografies i articles de tota mena, des dels molt elaborats segons el punt de vista conceptual, teòric i matemàtic, fins a intents —seriosos o no— de fer arribar aquest coneixement al públic general.

Tanmateix, la relativitat, com és anomenada comunament, continua sent considerada com un coneixement que està només a l'abast d'especialistes, i un ingredient magnífic per a la fantasia d'escriptors i guionistes de films que moltes vegades, i sense compassió pel públic, traspassen els límits del que és previsible i permisible per les lleis físiques.

El propòsit d'aquestes línies és donar una visió *a vol d'ocell* d'aquesta teoria i les seues principals conseqüències, i comentar alguns punts de vista que pogueren ser útils per a la comprensió, per part del gran públic, de l'impacte d'aquesta part de la física en la nostra vida quotidiana.

## 2. Alguns antecedents

Moltes persones tendeixen a pensar que la teoria de la relativitat és producte d'una *idea divina* d'Einstein sorgida en el marc d'una habitació tancada, o com se sol dir, en una torre de marfil. En el que segueix es tractarà d'argumentar que açò no és així. Més que tenir una idea divina, la genialitat d'Einstein va radicar a centrar l'atenció en una sèrie de contradiccions que havia acumulat la física i en resoldre-les d'una manera creativa.

El comentari anterior no resta cap mèrit a Einstein. Realment, el seu treball és d'admirar, i la seua capacitat intel·lectual està fora de qualsevol dubte. Cal esmentar que va fer incursions molt productives en diferents branques de la física, per la qual cosa diverses lleis i equacions en la física de l'estat sòlid, coloides, làsers, etc, porten el seu nom. La seua tasca en el sorgiment de la mecànica quàntica, una altra de les grans teories físiques del segle xx, és reconeguda universalment. És notable el fet que se li va adjudicar el Premi Nobel per la seua explicació de l'anomenat efecte fotoelèctric, tema aquest que no té res a veure amb la teoria de la relativitat. Molts pensem que haguera merescut

<sup>1</sup> Traducció del castellà de Joan Verdegal.

<sup>2</sup> És anomenada també *teoria de la relativitat especial*.

un altre premi semblant per la teoria de la relativitat, però la veritat és que no el va obtenir.

A finals del segle avantpassat, molts científics d'envergadura abans que Einstein havien assenyalat amb gran agudesia contradiccions i llacunes de la física amb la qual s'havia treballat fins aleshores. En particular, la física prèvia a 1905 usava a dreta i sinistra les relacions o transformacions anomenades de Galileu. Aquestes transformacions serveixen per calcular la posició i l' instant de temps en què ocorre un succés als ulls d'un observador, en funció de la posició i instant de temps en què ocorre el mateix succés als ulls d'un altre observador que es mou respecte al primer a certa velocitat constant. Permetem-nos una lleugera digressió tècnica. Per fixar idees, el lector pot pensar que està observant un fenomen mentre que un amic fa el mateix des d'un tren en marxa. Abans de 1905, per a descriure un succés els físics deien que ambdós observadors ho veuen en el mateix instant de temps, i a més, que ho veuen en posicions o a distàncies distintes, però aquestes posicions difereixen simplement en el que ha caminat el tren des que aquests dos amics es van acomiadar amb una abraçada. Hi ha una petita fórmula matemàtica que descriu això: si anomenem  $t$  i  $x$  al temps i posició del succés analitzat per un observador,  $V$  a la velocitat del tren, i  $t'$  i  $x'$  al temps i posició del succés vist pel segon observador, la relació de transformació de Galileu és

$$\begin{aligned}t' &= t \\x' &= x + Vt\end{aligned}$$

Tornem al fil del nostre argument. Diversos físics notables havien discutit com les lleis de l'electrodinàmica acabades de formular per J. C. Maxwell, i de la validesa de les quals ja no es dubtava, no eren invariants front a les transformacions de Galileu. Dit en altres paraules: en canviar d'un sistema de referència a un altre canviava la seua forma matemàtica, de manera que caldria preguntar-se en quin sistema de referència es complien tal com es coneixien, com s'escriurien, o quin aspecte tindrien en un altre sistema, etc. La confusió era enorme. H. A. Lorentz havia trobat les transformacions que deixaven invariants les esmentades equacions, i per a sorpresa de tots, aquestes transformacions incloïen la idea d'un *temps local* per a cada observador, o sia que els rellotges d'aquests dos observadors anaven a ritmes distintes. Aleshores,  $t'$  ja no era igual a  $t$ . El 1904 (un any abans de l'article d'Einstein) H. Poincaré comentava (Einstein i altres, 1952):

[...] Lorentz dominà feliçment la tasca mitjançant un amuntonament enginyós d'hipòtesis. La més enginyosa fou la de l'hora local. Però açò és insuficient i es requereixen hipòtesis complementàries. És indispensable suposar que tots els cossos en moviment sofreixen una mateixa compressió en direcció del moviment. Per exemple, un dels diàmetres de la Terra disminueix  $1/2000000000$  com a conseqüència del moviment del nostre planeta, mentre l'altre roman constant. [...] Si suposem que el moviment de translació influïra sobre les masses de totes les partícules, llavors les masses mecàniques han de variar [...] per tant no poden ser constants [...].

Basant-nos en tots aquests resultats, si aquests es comproven sorgiria una mecànica totalment nova que es caracteritzaria principalment pel fet que cap velocitat podria superar la velocitat de la llum.

Fins i tot possiblement hem de crear una mecànica nova per complet [...] en la qual la massa augmentara a certa velocitat, amb la particularitat que la velocitat de la llum fóra un límit insuperable. La mecànica corrent quedaria com la primera aproximació, vàlida per a les velocitats no elevades, de manera que la nova mecànica inclouria la vella.

Però, abans de preocupar-se és necessari preguntar-se: és just tot açò?

Al final vull dir que no hem arribat a això, i que encara no hi ha res que demostre que els principis clàssics no isquen de la lluita vencedors i intactes.

Amb excepció d'aquesta última oració, totes les conseqüències que Poincaré analitzava i que ací s'han transcrit, són correctes. Uns mesos més tard, Einstein demostraria que calia canviar els principis clàssics per uns altres.

En els últims decennis del segle XIX també es discutia acaloradament si havia d'existir un medi on es propagara la radiació electromagnètica, de manera semblant a com es propaguen per la substància les ones de so. Els partidaris de la seua existència l'anomenaven *èter*. Diversos experiments, repetits un bon nombre de vegades, en aquell moment i avui en dia, donen resultats nuls i, a més, com a resultat central, es dedueix d'ells que la velocitat de la llum no depèn de l'observador. Dit d'una altra manera: la velocitat de la llum val el mateix es moga la font o no. Açò no és explicable amb les lleis de transformació de Galileu.

També poden assenyalar-se altres fets de caire teòric o experimental que posen de manifest deficiències de la física prèvia a la relativitat, i que aquesta teoria aconsegueix explicar coherentment.

Des del punt de vista gnoseològic és important recalcar que la teoria de la relativitat restringida va nàixer a partir d'aquests fets experimentals i d'aquestes anàlisis teòriques, és a dir, de l'experiència prèvia. Ni més ni menys que de la mateixa manera que uns tres-cents anys abans havia nascut la concepció newtoniana de l'espai, el temps i la mecànica. El naixement de qualsevol teoria és usualment un procés d'inducció incompleta que es consolida en cada confirmació experimental o teòrica que s'aconsegueix, i en la seua aplicació a diverses situacions noves.

### 3. Aspectes fonamentals de la teoria de la relativitat restringida

Einstein "va posar en ordre la casa" a partir de dos postulats que són ben simples però de conseqüències sorprenents, a saber:

Postulat 1: totes les lleis de la física han de ser independents del sistema inercial de referència que utilitze l'observador.

Postulat 2: la velocitat de la llum en el buit té un valor constant i universal independentment del moviment relatiu entre l'observador i la font emissora.

En utilitzar de manera coherent i rigorosa aquests postulats, Einstein va demostrar que les relacions de transformació de Lorentz eren correctes i que, per tant, el temps té un caràcter local, és a dir que transcorre de diferent manera per als distints observadors. La demostració està fora dels objectius d'aquestes notes. No obstant això, és convenient dir que les matemàtiques que es necessiten per a aquesta demostració no són complicades; de fet formen part dels continguts dels cursos actuals de batxillerat.

En tota la teoria, la velocitat de la llum apareix per tot arreu i té un paper bàsic. Així, per exemple, apareix com a velocitat màxima i inabastable per a les partícules. Expliquem açò amb algun detall. Segons la física clàssica, si sobre una partícula s'exerceix una força constant aquesta s'accelera indefinidament i la seua velocitat augmenta *sense límits*. En el marc de la teoria de la relativitat, les lleis que regeixen la dinàmica són una mica distintes: si sobre una partícula actua una força constant, aquesta augmentarà la seua velocitat indefinidament però aquest augment es farà més i més lent, de manera que la velocitat de la partícula mai sobrepassarà el valor de la velocitat de la llum. A mesura que la velocitat de la partícula augmenta, una mateixa força té menys efecte sobre l'augment de la velocitat. Durant algunes dècades, molts autors van descriure aquest fet com un augment de la massa. En l'actualitat es prefereix anomenar *massa* a la propietat que és inherent a cada partícula (electró, positró, etc.) i que la caracteritza, qualsevol que siga la velocitat, i carregar llavors la responsabilitat de la disminució de l'acceleració a l'equació dinàmica. Per als lectors acostumats a treballar amb gràfics, la figura 5.1 annexa pot ajudar a entendre com succeeix aquest procés.

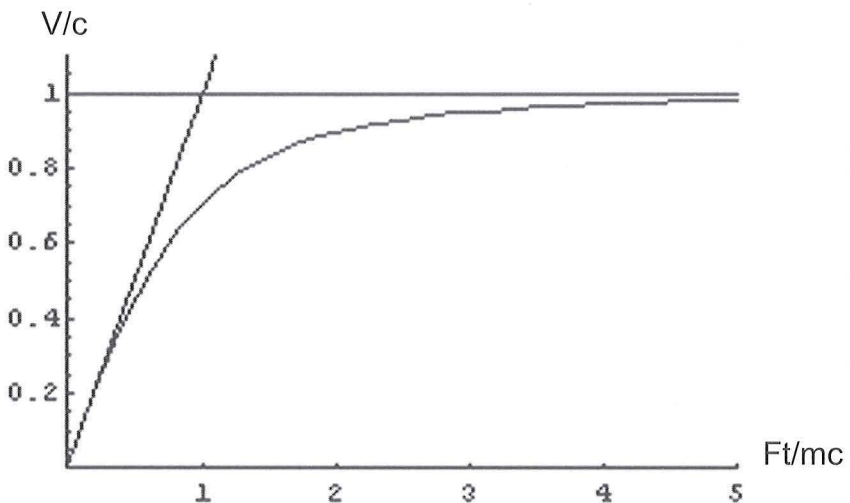


Figura 5.1. En l'eix horitzontal es dona el temps, mesurat en unitats de  $mc/F$ , on  $m$  és la massa de la partícula,  $F$  la força actuant, i  $c$  la velocitat de la llum. En l'eix vertical es dona la velocitat de la partícula en unitats de la velocitat de la llum. La línia horitzontal marca la velocitat de la llum ( $V/c = 1$ ). La recta inclinada dona la velocitat en funció del temps calculada amb la mecànica newtoniana. La corba dona la mateixa magnitud però calculada seguint les lleis relativistes. Cal observar que, per a velocitats petites, aquests dos resultats coincideixen amb una aproximació prou bona. Per a velocitats altes, la mecànica newtoniana prediu que la partícula sobrepassarà la velocitat de la llum. Segons la mecànica relativista, la partícula mai abastarà la velocitat esmentada.

El nou caràcter del temps va fer convenient crear una matemàtica en què els successos es caracteritzen per quartets de números  $(x, y, z, t)$ ; tres d'aquests números  $(x, y, z)$  fixen el lloc de l'espai on ocorre l'esdeveniment, i el quart  $(t)$  denota l'instant de temps en què succeeix. El conjunt de tots aquests quartets de números forma l'anomenat espai de successos, o espai de Minkowski. Aquest darrer nom se li dóna en honor de H. Minkowski.<sup>3</sup> Aquest espai té propietats matemàtiques molt singulars que el fan apropiat per expressar d'una manera compacta les equacions, per fer desenvolupaments matemàtics amb transparència, i interpretacions i lectures geomètriques senzilles. Posseeix quatre dimensions, la qual cosa ha estat font de confusions per al públic general, ja que els mitjans de comunicació de masses han volgut donar interpretacions fantasioses a aquest fet.

#### 4. Conseqüències fonamentals

És pràcticament impossible enumerar exhaustivament les conseqüències de la teoria de la relativitat restringida. En el paràgraf de Poincaré citat prèviament se n'enumeren algunes de les més importants. Tractarem d'esmentar i comentar succintament tres d'aquestes conseqüències.

*Transformacions de Lorentz.* Es tracta de les equacions que donen la posició i instant en què ocorre un succés vist per un observador  $(x', t')$  en funció de la posició i instant amb què un altre observador descriu el mateix succés  $(x, t)$ . Aquestes equacions tenen la forma

$$x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - (V/c)^2}}$$

$$t' = \frac{t - Vx/c^2}{\sqrt{1 - (V/c)^2}}$$

Aparentment, aquestes relacions són ben diferents de les de Galileu. No és molt difícil demostrar que si la velocitat del moviment relatiu  $V$  és molt menor que la velocitat de la llum  $c$ , les dues transformacions donen resultats molt pròxims. Això és el que ocorre amb la immensa majoria dels fenòmens quotidians.

*Relativitat del temps.* Per a la física anterior a la teoria de la relativitat, el temps era absolut. Açò vol dir que transcorre d'igual manera per a tots els observadors. Per a la relativitat, dos successos poden ser simultanis per a un observador i no ser-ho per a un altre. Encara més: per a un observador dos successos poden ocórrer en un determinat ordre temporal, mentre que per a un altre observador estar en l'ordre invers. No obstant

<sup>3</sup> Hermann Minkowski (Aleksotas, Lituània, 1864-Göttingen, Alemanya, 1909), matemàtic d'origen rus, establert a Suïssa i després a Alemanya. Va ser professor del jove Einstein a l'Escola Politècnica de Zúric. L'any 1909 va elaborar un formalisme matemàtic per a descriure la teoria de la relativitat creada pel seu antic alumne.

això, la mateixa teoria argumenta que açò no ocorre per a dos successos qualsevol: un fill no pot nàixer abans que la mare. Els intervals de temps entre dos successos depenen del sistema de referència des del qual s'observen. En expressar-les així, aquestes asseveracions semblen extravagants i contradictòries amb la nostra experiència quotidiana. La veritat és que són correctes i que l'experiència dels laboratoris —i, de manera indirecta, la quotidiana— les confirmen. Tornarem sobre aquest tema més endavant.

*Relació massa-energia.* Una partícula material *emmagatzema* una energia donada per la seua massa i la seua velocitat. Fins i tot en repòs, aquesta energia pot arribar a ser molt gran comparada amb valors d'energia de fenòmens quotidians. Si  $m$  és la massa de la partícula i  $c$  la velocitat de la llum, aquesta energia és  $E = m c^2$ .

Fins ací els comentaris que volíem fer sobre les conseqüències de la teoria de la relativitat.

Des dels seus inicis, la teoria de la relativitat —com tota bona teoria científica— ha tingut molts *advocats del diable* que han volgut trobar contradiccions en la seua fonamentació o en les seues conseqüències. Així, han sorgit les anomenades *paradoxes*. Probablement, la més famosa d'aquestes paradoxes siga la dels bessons.<sup>4</sup> No ens entretindrem a plantejar i resoldre cap paradoxa. Val a dir que les paradoxes sorgeixen quan no s'aplica rigorosament la nova manera de pensar. L'experiència quotidiana no ens té acostumats a grans velocitats i ens traïx amb la seua concepció absoluta del temps.

## 5. Velocitat de la llum

Des de fa molt de temps, la velocitat de la llum va moure la curiositat de la gent de ciència. Galileu va portar a terme un experiment que pretenia mesurar el temps que tardava un raig de llum que emetia una llanterna en anar i tornar d'una muntanya a una altra. El resultat del seu experiment fou que la velocitat de la llum era infinita, o tan gran que en el seu experiment no es podia detectar el seu valor real. En la taula adjunta es pot apreciar com ha evolucionat històricament la mesura de la velocitat de la llum realitzada per diversos investigadors (<http://physicsweb.org/resources/>).

Data	Autor	Mètode	Resultat (km/s)	Error (km/s)
1676	Olaus Roemer	Satèl·lits de Júpiter	214.000	
1726	James Bradley	Aberració de la llum	301.000	
1849	Armand Fizeau	Roda dentada	315.000	
1862	Léon Foucault	Espill giratori	298.000	± 500
1879	Albert Michelson	Espill giratori	299.910	± 50
1907	Rosa Dorsay	Constants electromagnètiques	299.788	± 30

<sup>4</sup> Es tracta de dos bessons. Un roman a la Terra i l'altre mamprén un viatge espacial. En tornar a la Terra, comprova que el seu germà té una edat diferent. Segons es raone, un és major que l'altre, o a l'inrevés. Evidentment, un dels dos raonaments és correcte i l'altre no.

Data	Autor	Mètode	Resultat (km/s)	Error (km/s)
1926	Albert Michelson	Espill giratori	299.796	± 4
1947	Essen, Gorden-Smith	Cavitat ressonant	299.792	± 3
1958	K. D. Froome	Interferòmetre	299.792,5	± 1
1973	Evanson i altres	Làser	299.792,4574	± 0,001
1983	Valor adoptat		299.792,458	

Ja en la segona meitat del segle xx era tal l'exactitud amb què es podia mesurar aquesta magnitud que es va prendre la mateixa per definir la unitat de mesura de les longituds, el metre. Així va ser com en la Conferència General de Pesos i Mesures de 1983 es va adoptar la següent definició de metre:

El metre és la longitud que recorre la llum en el buit durant un interval de temps igual a  $1/299.792.458$  segons.

Amb aquesta definició de metre, la velocitat de la llum resulta ser *exactament* igual al valor 299.792.458 metres per segon. A partir d'aqueix moment, els experiments no poden perseguir per objectiu mesurar la velocitat de la llum, perquè aquesta s'ha fixat per la definició del metre. D'ara endavant, els experiments i aparells que abans s'usaven per mesurar  $c$  s'usaran per mesurar distàncies o temps amb gran exactitud.

La llum viatja a una velocitat que resulta enorme quan és comparada amb les velocitats de la vida quotidiana: aproximadament tres-cents mil quilòmetres per segon. Aquest és un fet bàsic que hem de tenir present si volem entendre per què la teoria de la relativitat pot *desafiar* l'experiència quotidiana en afirmar que el temps és relatiu, quan podem comprovar sense majors dificultats que els rellotges de tots els nostres amics i parents funcionen al mateix ritme, tan si estan en repòs com en moviment. La clau per a explicar aquesta aparent contradicció és el valor tan gran de la velocitat de la llum, perquè açò fa que les diferències entre els temps de diversos rellotges siguin molt petites, excepte quan estan en joc velocitats comparables amb la velocitat de la llum. Però velocitats tan grans no es troben en la vida quotidiana.

Podríem preguntar-nos per què la velocitat de la llum és tan gran quan se la compara amb la velocitat dels nostres desplaçaments. Una resposta, certament una mica conformista, és que la naturalesa és com és, i punt. Hi ha altres magnituds que també prenen valors en un ampli interval. Si prenem la conductivitat elèctrica d'un bon conductor (plata, per exemple) i la comparem amb la d'un mal conductor (ambre, per exemple), resulta que una és una cosa així com 1.000.000.000.000.000.000.000.000 vegades l'altra. Si fem els comptes amb un material en estat superconductor, cal agregar uns deu zeros més a aquest nombre ja de per si impressionant.

Per tal d'il·lustrar el que s'ha dit en aquest paràgraf, adjuntem taules amb valors típics i aproximats de masses, distàncies i velocitats que es troben a la natura.

Magnitud	Valor
Massa de l'electró	$9,1 \cdot 10^{-31}$ kg
Massa del protó	$1,7 \cdot 10^{-27}$ kg
Mesó Y	$1,7 \cdot 10^{-26}$ kg
Persona	$7,0 \cdot 10^1$ kg
Bou de toreig	$5,0 \cdot 10^2$ kg
Cotxe	$1,0 \cdot 10^3$ kg
Massa de la Luna	$7,4 \cdot 10^{22}$ kg
Massa de la Terra	$6,0 \cdot 10^{24}$ kg
Massa del Sol	$2,0 \cdot 10^{30}$ kg
Massa de la Galàxia	$1,0 \cdot 10^{42}$ kg
Massa de l'Univers	$1,0 \cdot 10^{52}$ kg

Valors de les masses d'alguns objectes presents en la natura, expressades en quilograms. La massa de l'electró, per exemple, és 9,1 movent la coma decimal trenta-un llocs a l'esquerra. La massa del Sol és 2,0 però movent la coma decimal trenta llocs a la dreta. La massa de la Galàxia i de l'univers només es presenten de manera estimada, per la qual cosa donem únicament els seus respectius ordres de magnitud. Cal observar que la relació (quocient) entre la major de les magnituds de la taula amb la menor és aproximadament un 1 seguit de *vuitanta-dos* zeros.

Magnitud	Valor
Radi clàssic de l'electró	$2,8 \cdot 10^{-15}$ m
Radi típic de l'àtom de H	$5,3 \cdot 10^{-11}$ m
Alçària d'una persona	$1,7 \cdot 10^1$ m
Major altura (profunditat)	$1,0 \cdot 10^4$ m
Altura de l'Estació Orbital	$3,0 \cdot 10$ m
Radi mitjà de la Lluna	$1,7 \cdot 10^6$ m
Radi de la Terra	$6,4 \cdot 10^6$ m
Altura de satèl·lit geoestacionari	$3,6 \cdot 10^7$ m
Semieix orbital de la Lluna	$3,8 \cdot 10^8$ m
Radi del Sol	$7,0 \cdot 10^8$ m
Semieix orbital de la Terra	$1,5 \cdot 10^{11}$ m
Radi de la Galàxia	$4,6 \cdot 10^{20}$ m
Radi de l'Univers	$1,7 \cdot 10^{26}$ m

Algunes distàncies típiques en la natura, expressades en metres. Cal observar que la relació (quocient) entre la major i la menor és aproximadament un 1 seguit de quaranta-un zeros.



Magnitud	Valor
Persona veloç en distàncies curtes	10 m/s
Velocitat d'un avió en envolar-se	70 m/s
Primera velocitat còsmica	7.900 m/s
Segona velocitat còsmica	11.200 m/s
Velocitat mitjana orbital de la Terra	29.800 m/s
Velocitat mitjana galàctica del Sol	250.000 m/s
Velocitat de la llum en el buit	299.792.458 m/s

Algunes velocitats típiques en la natura, expressades en metres per segon. La primera velocitat còsmica és la que necessita tenir un objecte per posar-se en òrbita al voltant de la Terra. Amb la segona velocitat còsmica, l'objecte pot eixir-se'n del camp gravitatori del nostre planeta.

Una segona resposta trasllada la qüestió a altres aspectes de la natura. En efecte, l'energia dels nostres moviments s'obté bàsicament de processos químics que ocorren a nivell muscular; processos que generen quantitats d'energia petites i que, d'altra banda, són ineficients. Això limita seriosament la velocitat que pot aconseguir l'ésser humà, fins i tot amb l'ajuda d'altres formes d'energia que no són d'origen muscular. Si les fonts bàsiques de la nostra energia corporal foren reaccions nuclears, les velocitats quotidianes serien molt majors, les diferències de temps que dos observadors pogueren mesurar serien cosa freqüent, i les concepcions del temps que tindriem serien relativistes. La idea de temps local hauria estat anterior a l'aparició de la roda, o fins i tot del foc.

## 6. Confirmacions

La teoria de la relativitat restringida ha tingut i té cada dia moltes confirmacions que fan d'ella una teoria sòlidament establerta.

Tal vegada la confirmació més realitzada siga la *relació massa-energia*. La generació d'electricitat en les plantes atomoelèctriques consisteix a provocar determinades reaccions nuclears. En aquestes reaccions, certs nuclis atòmics es converteixen en altres, i apareixen també altres partícules. Però succeeix que la massa dels nuclis de partida és una mica major que la dels nuclis i partícules que apareixen després de la reacció. Aquest *defecte* de massa apareix en forma d'energia electromagnètica —quants de radiació—, que són els que al final d'un procés tecnològic una mica complex possibiliten la generació d'energia elèctrica. D'aquesta manera, l'electricitat que moltes vegades il·lumina les nostres llars s'obté d'un ús premeditat i intel·ligent de la teoria de la relativitat. La bomba atòmica es basa en el mateix principi de defecte de massa. És un ús de la teoria de la relativitat, també premeditat, però gens intel·ligent. En el Sol, i en molts altres cossos celests, ocorren reaccions nuclears els balanços energètics de les quals només poden explicar-se amb la relació massa-energia einsteniana.

El micromón està compost per partícules elementals com ara l'electró, el protó, el neutró, etc. Diverses d'elles s'uneixen per a formar nuclis atòmics, àtoms i molècules. Les molècules poden ser molt simples, com la de l'aigua, o prou complicades, amb milers d'àtoms, com les que regeixen l'herència i altres aspectes de la vida. Àtoms independents o molècules es poden unir en formes d'agregació molt diverses (gasos, líquids, sòlids, etc.). En aquests sistemes, hi ha usualment velocitats altes. En moltes circumstàncies, la teoria de la relativitat ha de ser presa en compte per calcular i predir les propietats d'aqueixos sistemes.

Un exemple concret i simpàtic: per què l'or té aqueix color característic que el fa tan buscat i desitjat? El color d'una substància està determinat bàsicament per les longituds d'ona (colors) que reflecteix. Per calcular i explicar açò és necessari posseir una manera prou precisa de calcular els nivells o valors d'energia que tenen les partícules components de la substància. Avui en dia, els físics i químics posseeixen els mètodes i mitjans de càlcul per portar a terme aquesta tasca. En el cas de l'or, un càlcul no relativista conclou que el color de l'or hauria de ser gris platejat, com molts altres metalls. La inclusió dels efectes relativistes ens porta a un acord raonablement bo amb la realitat: l'or és més aviat groc amb components rogencs.

A escala de laboratori s'han portat a terme infinitat d'experiments per tal de confirmar un o altre aspecte de la teoria de la relativitat. Vegeu per exemple <http://physicsweb.org/resources/>, on es fa un compendi de desenes de comprovacions.

## 7. Comentaris finals

La física anterior a 1905 també era en algun sentit relativista, perquè considerava que la posició dels successos depenia del sistema de referència respecte al qual s'observava. Però el temps transcorria de la mateixa forma en tots els sistemes encara que aquests es mogueren uns respecte als altres. Per aquest motiu, l'usual era caracteritzar els successos per les seues tres coordenades espacials; el temps era un simple paràmetre sense connexió amb les coordenades. En introduir el temps local, la relativitat dels successos va passar a ser un fenomen més complex i essencial. D'aquí el nom d'aquesta teoria. El de *restringida* (o especial) fa referència a que es limita a sistemes de referència que es mouen un respecte a l'altre a velocitat constant.<sup>5</sup> Els noms sempre són una cosa d'importància secundària. Probablement, la teoria de la relativitat restringida en mereixeria un altre (teoria del temps local?), però la veritat és que des dels seus inicis es va encunyar el nom que té i no ens va malament amb ell.

La filosofia va trobar en aquesta nova branca de la física una extensa font per a les seues anàlisis. El temps és una categoria del discurs filosòfic que ha donat molt de què parlar, però certament les ciències naturals no han estat la font d'argumentació per a aquesta categoria. Una de les poques parts de la ciència que ha fet contribucions a les concepcions del temps és precisament la teoria de la relativitat.

---

<sup>5</sup> Vegeu en aquest mateix número l'article del professor A. Tiemblo sobre la relativitat general.

El segle xx va ser un període històric de grans avanços científics i tecnològics. Seria difícil i gosat dir que haja estat caracteritzat per una o una altra ciència. Cal recordar que, a més de la relativitat, el segle xx va veure nàixer i desenvolupar-se d'una manera impressionant la mecànica quàntica, l'electrònica, la informàtica, la bioquímica, l'enginyeria genètica, i un llarg etcètera. Probablement siga més savi fer al·lusió a un conjunt de ciències, o activitats humanes que van marcar fites importants. Però no hi ha dubte que la teoria de la relativitat estaria en aqueix selecte grup d'èxits de la ciència que es van erigir en monuments a l'obra humana i en aspectes capdavanters del progrés durant el segle passat. Caldria agregar que encara avui en dia aquesta teoria segueix donant de què parlar i que les seues aplicacions estan encara en plena fase d'expansió.

### Observacions sobre la bibliografia i agraïments

De la teoria de la relativitat s'ha escrit molt. Sense ànim de cobrir l'extensa bibliografia, em permet d'assenyalar a l'apartat de bibliografia els llibres que va escriure el propi Einstein per explicar la seua teoria sense profunditats matemàtiques (Einstein, 1952, 1961). L'editorial Mir ha publicat excel·lents obres de divulgació, algunes en castellà (Chernin, 1990; Zavelski, 1990). Per a persones més familiaritzades amb la física hi ha també molts textos; en la meua preferència personal estan els de French (1988), Jackson (1975), Landau i Lifschitz (1962) i Schutz (1985). Finalment, val la pena comentar que en Internet hi ha llocs molt útils per aprendre relativitat. En <http://physicsweb.org/resources/>, per exemple, hi ha llistes bibliogràfiques, llibres i notes descarregables, enllaços cap a col·leccions d'acudits, anàlisis de les paradoxes de la relativitat, preguntes freqüentment plantejades (*frequently asked questions*), etc. En <http://www.bipm.fr> i <http://physics.nist.gov/cuu/Constants/> es poden veure qüestions interessants sobre els patrons de mesura, sistemes d'unitats i valors de les constants físiques fonamentals, entre elles la velocitat de la llum.

El professor Federico García Moliner, coeditor d'aquest número, em va animar a escriure aquestes notes, i tantes altres tasques i bons propòsits, de manera que el meu agraïment a la seua persona desborda qualsevol frase que al respecte es poguera dir.

Gran part d'aquestes reflexions han madurat mentre impartia assignatures que contenen aquest tema a la Universitat de L'Havana i en els cursos d'estiu de la Universitat Nacional d'Educació a Distància d'Espanya. Els meus col·legues i alumnes mereixen menció per les seues contribucions a la meua visió actual d'aquesta matèria, especialment el professor Antonio Bernalte Miralles, organitzador d'aquestes activitats a la UNED.

Volguera manifestar també els meus agraïments a l'Agrupació Borriana de Cultura per la seua magnífica perseverància en divulgar la ciència com a component bàsic de la cultura.

**BIBLIOGRAFIA**

- EINSTEIN, A, H. A. LORENTZ, H. MINKOWSKI i H. WEYL Editors (1952): *The Principle of Relativity*, Nova York, Dover. Col·lecció d'articles, amb notes d'A. Sommerfeld.
- EINSTEIN, A. (1961): *Relativity, the Special and the General Theory*, Nova York, Crown (traducció de R.W. Lawson).
- CHERNIN, A. (1990): *Física del temps*, Moscou, Mir.
- ZAVELSKI, F. (1990): *Temps i el seu Mesurament*, Moscou, Mir.
- FRENCH, A. P. (1988): *Relativitat Especial*, Barcelona, Reverté.
- JACKSON, J. D. (1975): *Classical Electrodynamics*, Nova York, Wiley.
- LANDAU, L. D. i E. M. LIFCHITZ (1962): *The Classical Theory of Fields*, Oxford, Pergamon.
- SCHUTZ, B. F. (1985): *A first course 'in' general relativity*, Cambridge, Cambridge University Press.