

SCIENCE & VIE  
**JUNIOR**



**HORS-SÉRIE N°59**

JANVIER  
2005



**EINSTEIN**  
**100 ANS DE RÉVOLUTION**

>  $E=mc^2$  > RELATIVITÉ > PHOTONS > ONDES G > ESPACE-TEMPS

# LES REVOLUCIONS DE LA FÍSICA

---

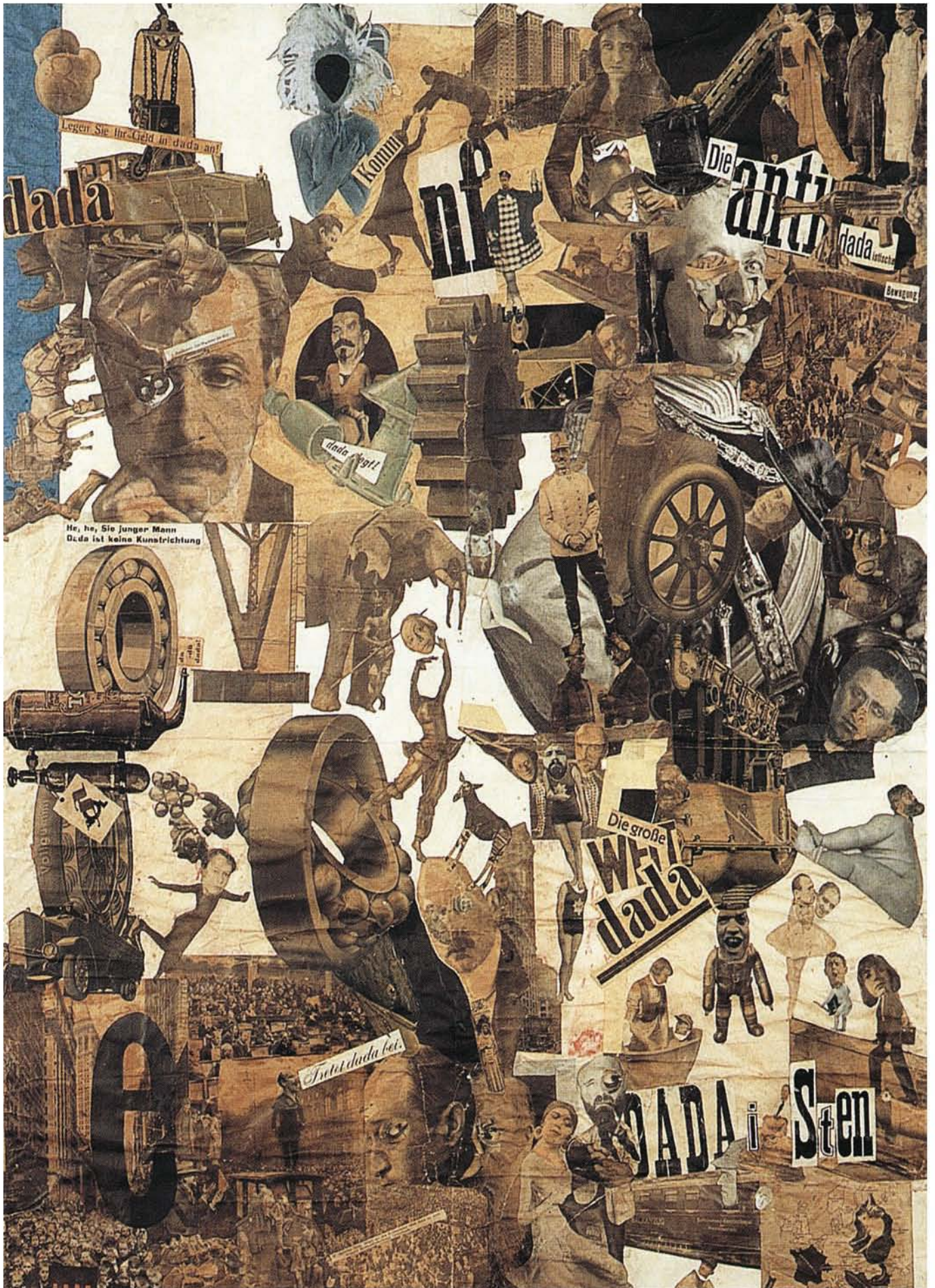
**L**A CELEBRACIÓ DE L'ANY MUNDIAL DE LA FÍSICA ÉS PRESENT A TOT EL MÓN. DES D'ALEMANYA FINS AL JAPÓ, PASSANT PELS ESTATS UNITS, SUÏSSA, ISRAEL, EL REGNE UNIT I ESPANYA, ES RET HOMENATGE A UNA CIÈNCIA BÀSICA I APLICADA QUE HA ESTAT RESPONSABLE D'UN AVANÇ TECNOLÒGIC REALMENT REVOLUCIONARI. TANTS ALS INSTITUTS CIENTÍFICS COM A LES MÉS DIVERSES INSTITUCIONS SOCIALS ES RECORDA EL TREBALL DELS HOMES I LES DONES DE LA FÍSICA, ENTRE ELS QUALS DESTACA ALBERT EINSTEIN, QUE VA VISITAR EL NOSTRE PAÍS L'ANY 1923. AMB TOT, QUAN EL FÍSIC EHRENFEST LI PREGUNTÀ EL MOTIU DE LA VISITA, "PERQUÈ A ESPANYA NO HI HAVIA FÍSICA D'INTERÈS PER A ELL", EINSTEIN LI RESPONGUÉ: "...PERÒ EL REI FA UNES FESTES EXCEL·LENTS".

EN AQUESTA OCASIÓ, LA REVISTA MÈTODE PRESENTA UN VIATGE DE LA MÀ DEL PROFESSOR DE LA UNIVERSITAT DE LEEDS JOSEP SIMÓN CASTEL PER LES DIFERENTS EXPOSICIONS INTERNACIONALS AL VOLTANT DE LA FÍSICA. ENTRE ELLES, APUNTA L'ORGANITZADA PER LA FACULTAT DE FÍSICA I EL DEPARTAMENT D'HISTÒRIA DE LA CIÈNCIA I DOCUMENTACIÓ DE LA UNIVERSITAT DE VALÈNCIA A LA FACULTAT DE FARMÀCIA, LA QUAL OFEREIX UNA VISIÓ COMPLETA DE L'UNIVERS EINSTENIÀ. UN MÓN CALEIDOSCÒPIC, PERÒ UNIFICAT, QUE CARLES PEDRÓS-ALIÓ ASSOCIA AMB EL PROCÉS DE DESENVOLUPAMENT PICTÒRIC DE JOAN MIRÓ.

TAMBÉ REVISEM LA SITUACIÓ ACTUAL DE LA FÍSICA A TRAVÉS DEL TESTIMONI DEL PRESIDENT DE LA REAL SOCIEDAD ESPAÑOLA DE FÍSICA (RSEF), GERARDO DELGADO. UNA SITUACIÓ QUE A ESPANYA ÉS DOLENTA SI CONSIDEREM LA DISMINUCIÓ D'ESTUDIANTS I D'HORES LECTIVES, QUE NECESSITA DEL SUPORT ADMINISTRATIU PER DESENVOLUPAR UNA INVESTIGACIÓ LLIURE QUE CREE LES BASES DE LA INVESTIGACIÓ APLICADA. D'ALTRA BANDA, UN EXEMPLE DE LA PASSIÓ QUE AQUESTA CIÈNCIA PROVOCA EN CIENTÍFICS MAGNÍFICS COM ALAIN ASPECT, EL FÍSIC QUE VA ACONSEGUIR QÜESTIONAR LES DESIGUALTATS DE JOHN BELL I CONFIRMAR QUE ELS FOTONS EMESOS AL MATEIX TEMPS SÓN DOS MOMENTS DE LA MATEIXA ONA, ÉS A DIR, UN ÚNIC ESTAT QUÀNTIC. UN DESCOBRIMENT QUE ENS RELATA DE MANERA ATRACTIVA REBECA ROMERO I L'APLICACIÓ DEL QUAL AVUI S'ESTUDIA EN LA TECNOLOGIA DE LA COMPUTACIÓ, DE L'ENCRIPACIÓ I, TAL VEGADA, DE LA TELEPORTACIÓ.



A l'esquerra, portada de la revista *Science&Vie*, en la seua edició juvenil, on es presenta Einstein com un dels grans revolucionaris de tots els temps.



# EINSTEIN A LES CIUTATS

Josep Simón Castel

El ciutadà Albert Einstein –ingènua sorpresa– administrà durant la seva vida no una sinó tres o quatre nacionalitats. Possiblement sorprenent, ostentà durant la major part de la seva existència dues o tres nacionalitats simultàniament. Probablement previsible, es veié forçat en més d'una ocasió a renunciar a alguna de les seves identitats oficials. Fins als setze anys fou alemany. Abandonà llavors el país on havia nascut per reunir-se amb la seva família, reestablerta al nord d'Itàlia. I renuncià oficialment a la seva nacionalitat, evitant de pas la potencial incorporació al servei militar en l'exèrcit imperial. Dos anys més tard, el 1896, acabava el batxillerat a Suïssa i s'incorporava a l'Escola Politècnica de Zuric seguint els desitjos del seu pare i la tradició del negoci familiar. El 1901 adoptava la ciutadania suïssa i evitava de nou el servei militar, aquesta vegada via examen mèdic. Aquest país allotjà la seva joventut, els estudis universitaris, els primers salaris i la concepció i escriptura dels decisius articles de 1905.

Malgrat que la fama vingué a poc a poc, destacats intel·lectuals, entre els quals el físic Max Planck, intuïren aviat l'interès de fer-se amb els serveis d'Einstein per alimentar el vigor i el prestigi de la ciència alemanya. Així, en comissió oficial, aquest li transmeté l'oferta: la direcció d'un institut de física i l'acceptació com a membre de l'Acadèmia de Ciències Prussiana. Einstein acceptà i el 1914 arribava a Berlín i va esdevenir el membre més jove de la citada acadèmia. Aquesta ciutat l'acollí durant dues dècades i en acabar la Primera Guerra Mundial, amb l'adveniment de la república de Weimar, demanà la nacionalitat alemanya, sense haver de renunciar, però, a la suïssa. Els anys a Berlín el col·locaren braç a braç amb molts dels majors científics del seu temps, tant en el

domini de la física com en el d'altres disciplines, així com amb moltes de les avantguardes de la cultura occidental (figura 1). Amb el premi Nobel guanyat el 1921 esdevingué una figura internacional, ídol de masses i icona de la cultura contemporània.

Entre les seves activitats reivindicatives és rellevant la seva conversió al sionisme, causa que defensà en in comptables ocasions, tot i mantenint una visió personal. L'estat jueu a Palestina era llavors una utopia en construcció i en guerra. El 1952, però, Israel era ja un estat, expeditor de nacionalitat, i el ciutadà Einstein rebé l'oferta de convertir-se en el seu nou president, oferiment que declinà. Aquesta és, doncs, la seva quarta plausible nacionalitat.

Pel que fa a la tercera, més certera, el 1933 Adolf Hitler guanyà la cancelleria alemana i la seva pujada al poder accelerà l'escalada de tensió liderada durant els anys previs pel partit nacionalsocialista. El prestigiós científic, ciutadà alemany i insigne membre de l'acadèmia nacional de més alt prestigi, fou ara qualificat d'individu pertanyent al grup dels elements degenerats. El senyor Einstein, però, s'hi anticipà i renuncià simultàniament a la nacionalitat alemanya i a la seva cadira a

«EINSTEIN OSTENTÀ DURANT LA MAJOR PART DE LA SEVA EXISTÈNCIA DUES O TRES NACIONALITATS SIMULTÀNIAMENT»



© Josep S. Castel

Figura 1 (a l'esquerra): Collage de Hannah Höch, presentat en la Fira de la Primera Internacional Dada, celebrada en 1920 a Berlín. Una excel·lent finestra a la societat berlinesa d'aquest temps. Einstein apareix en la part superior esquerra. (Neue Nationalgalerie, Berlín.)

Figura 2 (a la dreta): Vista de l'exposició Einstein a València, *hall* de la Facultat de Farmàcia.



Figura 3 (esquerra): Columna anunciadora de la celebració del tercer centenari de l'Acadèmia de Ciències Prussiana, plaça Gendarmenmarkt. De dalt a baix, Alexander von Humboldt, Einstein i Leibniz. A l'esquerra d'Einstein es veu parcialment Max Planck.  
Figura 4 (dalt): Anunci de l'exposició sobre Einstein a l'entrada del centre judaic annex a la sinagoga de Berlín.

l'Acadèmia. En el seu nou país d'adopció, els Estats Units d'Amèrica, passà els darrers vint anys de la seva vida i la nacionalitat nord-americana li fou concedida el 1940, als sis anys de la seva arribada, alhora que va retenir la nacionalitat suïssa, llargament conservada.

#### ■ COMMEMORACIONS ARREU DEL MÓN

En aquest any de commemoracions al voltant de la figura d'Einstein, un incommptable nombre d'exposicions i activitats han començat a brollar en abundància al centre de les nostres ciutats. És clar, Alemanya,

**«BERLIN ÉS  
LA CIUTAT EN QUÈ MÉS HE  
CRESCUT A TRAVÉS DE  
LES EXPERIÈNCIES HUMANES  
I CIENTÍFIQUES VISCUDES  
(EINSTEIN)»**

Suïssa, els Estats Units o Israel han preparat amb especial cura aquestes iniciatives i monopolitzen una part molt important dels recursos disponibles. Però el fenomen va molt més enllà d'aquests àmbits nacionals. Einstein visità molts països, divulgant la seva obra i les seves idees i preocupacions polítiques. Les seves gires mundials el convertiren en una icona internacional de la cultura i com a tal és celebrat en els països que visità, com Espanya, el Japó o el Regne Unit. Per altra banda, la significació de la seva obra per al desenvolupament de la física contemporània l'ha col·locat en l'altar de la física per als estudiants i professionals de la disciplina arreu del món. Així, nombroses com-



Figura 5 (tres imatges): Les celebracions de l'any Einstein estan organitzades pel Ministeri Alemany d'Educació i Recerca, però tenen especial força a Berlín, on s'han implicat un gran nombre d'institucions.

moracions han estat organitzades a tot el món al si de les facultats de Física o les càtedres de Física als instituts d'ensenyament secundari.

Aquest és el cas de l'exposició organitzada a València per la Càtedra de Divulgació Científica de la Universitat (figura 2). El treball ha estat realitzat per personal i estudiants associats a la Facultat de Física i el Departament d'Història de la Ciència i Documentació. Situada al *hall* d'entrada de la Facultat de Farmàcia, l'exposició realitza un interessant recorregut cronològic per la vida d'Albert Einstein oferint mirades a les diverses cares de la seua vida: la seua educació i vida familiar, el seu treball científic, el seu activisme en causes polítiques i socials, la cultura del seu temps i l'impacte de la seua obra en aquesta o la seua figura com a icona de la cultura contemporània. L'exposició ha estat dissenyada amb un públic general en ment i

així, sense evitar la complexitat del retrat del personatge, ofereix introduccions acurades però senzilles al seu calidoscòpic univers. Einstein visità Espanya el 1923, i podia haver viscut en aquest país si haguera acceptat l'oferta de la República Espanyola per ocupar una càtedra a la Universidad Central. La situació el 1933 a Alemanya era difícil i Einstein féu costat públicament a la República, però finalment posà rumb als Estats Units.

Possiblement el Berlín actual té moltes connexions amb la gran capital europea que fou des de finals del segle XIX fins a la Segona Guerra Mundial. Els bombardeigs de la guerra deixaren molts edificis emblemàtics en un estat penós, incloent-hi el parlament alemany, el Reichstag. La majoria dels turons de la ciutat pertanyen a la història recent, puix que foren construïts a partir de les runes acumulades en acabar la



Figura 6: Pancarta de l'exposició "Adéu pissarra... per Einstein i altres", a l'entrada del Museu d'Història de la Ciència d'Oxford.

guerra. Amb la restauració de la ciutat i la reunificació del país i desaparició del mur de la divisió, el berlinès i el turista poden avui caminar per molts dels llocs que ocuparen la vida d'Einstein durant la seua estada en aquesta ciutat. Les celebracions de l'any Einstein a Alemanya estan organitzades pel Ministeri Alemany d'Educació i Recerca i s'hi han implicat un gran nombre d'institucions, incloent-hi societats científiques, mitjans de comunicació, universitats, museus, teatres i programes de divulgació científica (figura 5).

Els actes tenen lloc a tot el país, però amb especial força a Berlín. Vorejant la plaça Marx-Engels, la Rote Rathaus, antic ajuntament de Berlín, mostra un gran cartell sobre la porta on es reproduïxen les següents paraules d'Einstein: "Berlín és la ciutat en què més he crescut a través de les experiències humanes i científiques viscudes." A pocs metres, creuant el riu Spree comença la gran avinguda Unter den Linden, des del segle XVII una important artèria de la ciutat. Els primers edificis oficials foren construïts en el període barroc i durant l'època de l'imperi, a finals del segle XIX, adquirí la grandiositat que exhibeix encara avui. La Humboldt Universität, situada enfront de l'Òpera, ha engalanat les seves tanques amb una instantània d'Albert Einstein amb abric, bastó, barret i llibreta, caminant per aquesta vorera mateixa i el senzill lema "Einstein ensenyà ací" que anuncia l'exposició hostatjada al seu edifici.

Einstein recorregué aquesta avinguda per assistir a les sessions de l'Acadèmia de Ciències Prussiana, on presentà nombroses vegades amb prioritat les seves últimes recerces. Amb la censura introduïda pel partit nacionalsocialista en arribar al poder, l'Acadèmia fou dirigida a repudiar públicament Einstein. Avui, l'Acadèmia torna a celebrar el privilegi d'haver gaudit del treball de personalitats com Einstein en una història que inclou figures de la talla de Leibniz, Alexander Von Humboldt o Max Planck (figura 3). En columnes, ubicades en moltes de les places de la ciutat, l'Acadè-



Figura 7: Pissarra produïda pel músic Brian Eno per a l'exposició al Museu d'Història de la Ciència d'Oxford.

mia anuncia els actes del seu tercer centenari amb imatges dels seus membres, incloent-hi Einstein. A l'altra banda del riu, enfrontant amb la porta de Brandenburg i el Reichstag, es representa al Teatre Nacional *Els físics*, de Friedrich Dürrenmatt. Escrita als anys seixanta, l'obra satiritza la suposada independència dels científics, captant les sensacions d'una època negativa per al prestigi de la ciència. Les bombes atòmiques llançades pels Estats Units al Japó crearen un clima de rebuig i Einstein, com és ben sabut, no es va poder substraure a aquest fenomen.

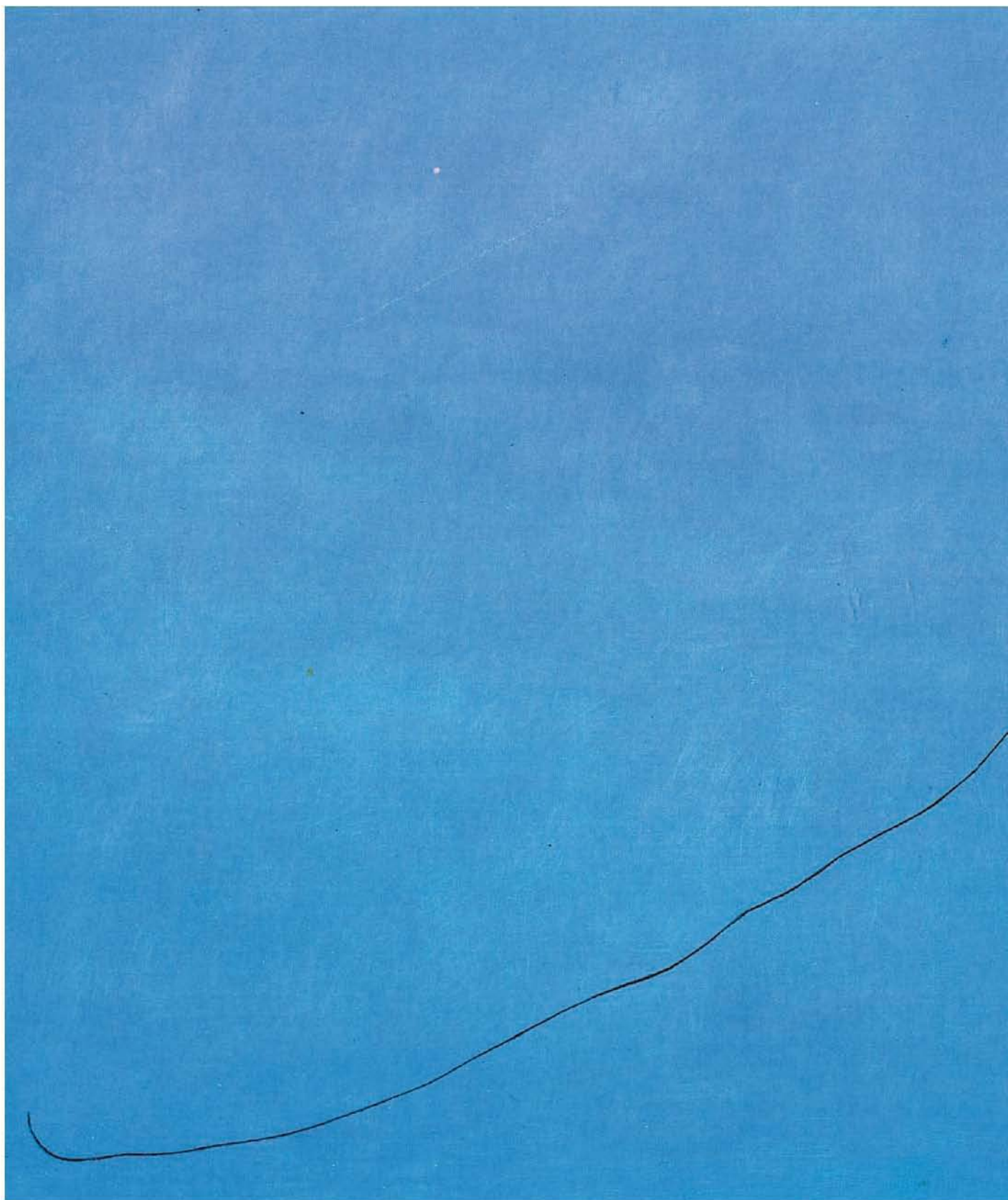
A pocs metres del teatre, la normalitat, després de l'intens drama de la Segona Guerra Mundial, ha tornat també a Oranienburger Strasse. En aquest carrer es troba la sinagoga, amb la seva cúpula daurada, visible des de molts punts del barri central de Berlín. Einstein tocà el seu violí el 1930 en aquesta sinagoga i lluità activament per la causa sionista. Al centre judaïc annex s'ha inaugurat una exposició sota el títol "Relativament jueu. Albert Einstein, jueu, sionista, inconformista" (figura 4). L'exposició ofereix una visió equilibrada del judaisme d'Einstein, que tingué un vessant fonamentalment polític i aconfessional, així i tot essencial per entendre la seva vida.

Als voltants de l'urbs berlinesa, Postdam centralitza una gran part de les activitats de l'any Einstein. En la capital de l'estat de Brandenburg es troba l'observatori astronòmic construït per Eric Mendelssohn en honor a la teoria de la relativitat. La Torre Einstein, experiment de l'expressionisme, alberga durant tot l'any una exposició sobre la història de la seva construcció i els diversos usos que ha tingut fins a l'actua-









## “AIXÒ HO POT FER UN NEN”

LA NECESSITAT DE L'ESFORÇ  
PER APRECIAR L'ART I LA CIÈNCIA

Carles Pedrós-Alió

La Fundació Miró de Barcelona és un edifici obert a la llum i caragolat sobre si mateix al voltant d'un pati. Per això, quan es va fer la primera retrospectiva de l'obra d'en Joan Miró el 1993, la història de la seua pintura es desenvolupava circularment al voltant del pati. Jo estava embadalit davant dels “Blaus:” *Blau I* a la meua esquerra, *Blau III* (figura 1) a la meua dreta i *Blau II* just al davant. Estava submergit en el món irreal d'aquests tres quadres enormes i subtils. I llavors vaig sentir el que deia un home a la seua dona: “Però si això ho pot fer un nen!” Immediatament vaig comprendre que aquella parella havia començat l'exposició pel final. No tenia la perspectiva que jo havia après caminant des dels inicis, a Montroig, fins a aquests magnífics “Blaus”. I és que, mirats en fred, aïlladament, és veritat que tant els “Blaus” com molts olis més d'en Miró són d'una senzillesa i unes coloraines que poden semblar infantils. Potser “decoratius”, una mica més polidets que els dibuixos del nostre fill de sis anys, però certament no mereixedors dels preus que la gent paga per ells. O potser sí?

La pintura d'en Miró il·lustra perfectament una de les similituds entre l'art i la ciència. I és que tant les obres d'art com les de ciència requereixen de qui les mira un esforç per comprendre-les i gaudir-ne. Requereixen un esforç i un coneixement del context en el qual van ser creades. En alguns casos aquest esforç l'hem fet tants cops que ni ens adonem que l'hem fet. M'explicaré. Pensem en un quadre clàssic, per exemple *El tocador del llaud* pintat el 1661 per H. M. Sorgh (figura 2). Aquest quadre és un de tants representants del gènere dels “interiors holandesos”. Immediatament copsem l'escena: un home toca un instrument dins d'una habitació mentre una dona se l'escolta. Al terra, més a prop nostre, un gat i un gos semblen confirmar allò de la música que calma les feres. Per la finestra hom pot veure un carrer, uns edi-

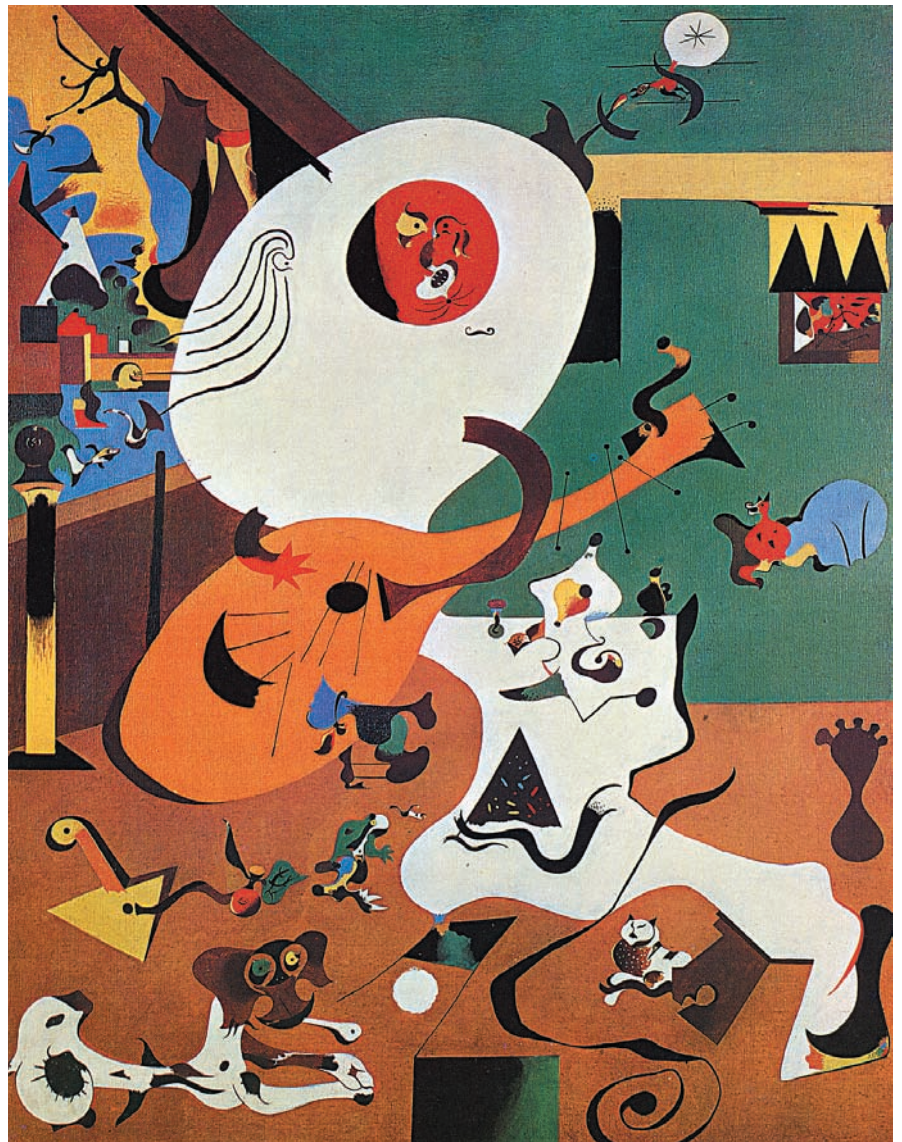


Figura 1. Joan Miró, *Blau III* (1961). Oli sobre tela. Pierre Matisse Gallery New York.



Figura 2 (a dalt). H. M. Sorgh: *El tocador del llaud* (1661). Oli sobre fusta. Rijksmuseum, Amsterdam

Figura 3 (a la dreta). Joan Miró: *Interior holandés I* (1928). Oli sobre tela. The Museum of Modern Art, New York. Simon Guggenheim Foundation.



fics que s'allunyen en la distància, uns arbres... Estem tan acostumats als codis darrere d'aquest quadre que ni ens adonem que està ple de paranys. Està ple de trucs perquè els nostres ulls vegin un món tridimensional allà on solament hi ha taques de pintura sobre les dues dimensions de la superfície de la tela.

En canvi, la reacció més normal davant de la ciència és que no s'entén perquè utilitza un llenguatge tècnic i uns conceptes molt complexos.

En ciència hi ha un exemple equivalent al quadre d'en Sorgh: els mapes del temps. Cada vegada que veiem un telenotícies, hi ha un professional que ens explica durant cinc minuts conceptes realment complicats: isòbares, fronts, gotes fredes, núvols de desenvolupament vertical, tot això en un mapa parametritzat en hectopascals. A pesar del llenguatge tècnic, de la complexitat dels models de circulació atmosfèrica, de l'abstracció d'un mapa d'isòbares, tots estem tan acostumats a llegir-ne que no tenim cap

dificultat a identificar els fronts i els anticiclons o si els vents seran humits o secs.

Desafortunadament, els codis necessaris per entendre –i gaudir-ne– els missatges més profunds i reveladors de la major part de les obres d'art i de ciència ens resulten aliens perquè mai fem l'esforç de buscar la història i el context. I per això pensem que la ciència és massa complicada i que l'art el pot fer un nen.

Ara tornem a *El tocador del llaud*. El quadre d'en Sorgh, com tota la llarga serie d'interiors holandesos, és un compendi de les tècniques pictòriques desenvolupades als Països Baixos. Els objectes sobre la taula permeten lluir-se amb una natura morta. Els personatges mostren les habilitats del pintor en el retrat, mentre que la finestra a la dreta permet il·luminar tota l'escena amb una llum molt particular i jugar amb clars i ombres per donar relleu i contrastos a l'escena. Finalment, el que es veu a través de la finestra permet a l'artista entretenir-se amb les miniatures d'un pai-



Figura 4. J. Miró: *La Masia* (1921-1922). Oli sobre tela. Sra. Hemingway, New York.

satge llunyà. Natura morta, retrat i paisatge en un sol quadre: Admirable! Però no només això, sinó també una profunditat de camp extraordinària: des del gos que sembla estar a un metre de l'observador fins als edificis més llunyans del carrer que veiem per la finestra, potser 300 o 400 metres enllà.

Com interpreta Miró aquest quadre? El 1928 va pintar *Interior holandès I* (figura 3), inspirat en una postal del quadre d'en Sorgh que va portar d'un viatge als Països Baixos. Bàsicament trobem els mateixos objectes en les mateixes posicions. Però hi ha almenys dues diferències molt significatives. Primera, en el quadre d'en Miró la perspectiva ha quedat totalment deformada i quasi anul·lada i, en segon lloc, els objectes i personatges són formes aïllades de l'escena. Aquesta interpretació ens fa conscients que allò que hi mirem és un conjunt de taques de pintura sobre una superfície plana i no un veritable fragment de la realitat. D'alguna manera ens fa conscients dels paranys del quadre holandès.

Els interiors holandesos representen una fase intermèdia entre els paisatges de Montroig i els "Blaus" en la carrera de Miró. *La masia* (1921-1922) és, en aparença, un paisatge rural relativament convencional (figura 4). Però alguns objectes, com el parterre negre del qual surt l'arbre o la regadora no respecten la perspectiva. Sembla que vulguessin independitzar-se del conjunt. Aquest procés s'accentua en quadres com *Paisatge català (el caçador)* (1923-24) (figura 5). El paisatge ha quedat reduït a dues àrees de colors groc i beix. Els objectes s'han independitzat completament del fons i a més han iniciat la seva conversió en símbols mitjançant una simplificació general i la deformació d'alguns trets. Per exemple els cossos del caçador i del conill s'han reduït a una línia,

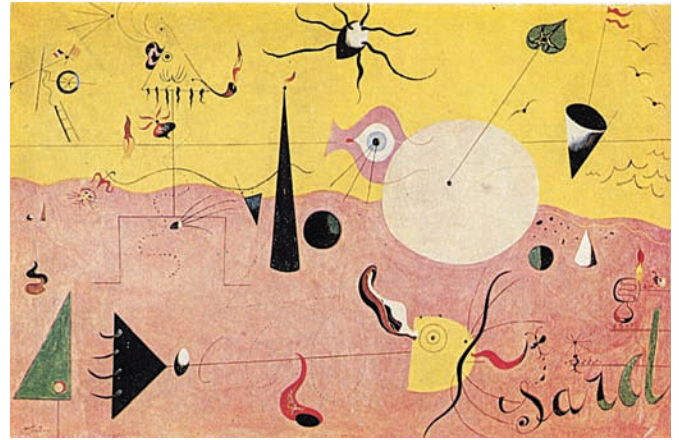


Figura 5. J. Miró: *Paisatge català (El caçador)* (1923-24). Oli sobre tela. The Museum of Modern Art, New York.

com si no tinguessin cap interès. Però els ulls, les orelles, el cor, el sexe, són presents de forma clara.

Aquest procés de simplificació, de depuració, de decantació, continua als interiors holandesos i en les constel·lacions dels anys quaranta. Llavors els quadres comencen a adquirir noms llargs i complicats. *Dona a la vora d'un llac, la superfície del qual s'ha fet iridiscent pel pas d'un cigne, Gent a la nit guiada pels deixants fosforescents de les serps o L'ocell de la nit revelant el misteri a una parella d'amants*. Com més llargs són els títols més simples són els quadres. L'exemple més extrem és el quadre de 1967 *L'ala de l'aloïsa, aureolada del blau d'or arriba al cor de la roseïlla, abaltida damunt la prada ornada de diamants* (figura 6). Sembla com si Miró, que sempre havia estat quasi més proper a la poesia que a la pintura, ens volgués recordar que la forma correcta d'enfrontar-se als seus quadres tan aparentment simples és partir des de l'estat d'ànim líric que suggerien els seus títols.

Però aquest mecanisme era massa obvi. La subtilitat de la seva poesia no necessitava d'aquesta mena de cossa i els quadres de gran format de l'última època, com els "Blaus", ja no requereixen més que la seua presència per imposar-nos una visió inversemblantment profunda i ambigua alhora, per submergir-nos en aquest estat poèticament oníric, en què intuïm revelacions sobre el món i sobre la nostra percepció d'aquest món. Com va dir Roland Penrose: "Hi ha una regió, a mig camí entre la desintegració del caos i l'esterilitat d'un ordre infal·lible, on existeix la vida. Miró tracta d'obrir els nostres ulls precisament en aquest nivell precari. No es proposa incitar-nos a arribar al cel o a l'infern, sinó a guanyar una comprensió més precisa de la coexistència d'ambdós extrems i de la nostra inevitable relació amb ells." Després d'a-



quest itinerari al voltant del pati de la Fundació Miró, el comentari de l'home a la seua dona deixa de tenir sentit. És evident que això no ho pot fer un nen. Que l'aparent simplicitat és el fruit d'un procés llarg i exigent de simplificació, d'eliminació de tot allò que no era essencial, per arribar a manifestar d'una forma contundent, simple i d'una gran bellesa alguna veritat sobre la realitat que ens envolta.

### ■ EINSTEIN I LA BELLESA D' $E=mc^2$

I això és precisament el que fan les millors aportacions científiques. Agafem per exemple l'equació:

$$E=mc^2$$

Si no sabem el context i la història d'aquesta equació, si la mirem fredament, això ho pot fer un nen! No més cal que sàpiga escriure per posar junts un número, tres lletres i un signe igual. Cal saber una mica de física per apreciar aquesta fórmula aparentment tan simple. I, és més, no la podem apreciar en tota la seua bellesa si no sabem el procés intel·lectual que va portar Albert Einstein a desenvolupar-la.

El context mínim consisteix a saber que aquestes lletres i números representen una altra cosa. El sol fet de saber que  $E$  és l'energia,  $m$ , la massa i  $c$  la velocitat de la llum ens revela una visió del món completament revolucionària i meravellosa. Pensar que la velocitat de la llum és una constant a tot l'univers, que l'energia i la matèria són intercanviables i que amb aquesta senzilla equació podem calcular-ne l'equivalència és extraordinari, és una intuïció poètica sobre l'estructura de l'univers concentrada en aquests cinc símbols.

Einstein va arribar a aquesta equació després d'un llarg procés de síntesi. Per exemple, abans de desenvolupar-la, hi havia dues lleis de conservació. D'una banda teníem la llei de la conservació de la massa. Així, quan cremem unes branques de pi, la matèria del pi es converteix en gasos (fum,  $\text{CO}_2$ ) i cendres. La massa combinada d'aquestes cendres i dels fums és igual a la massa de les branques. La matèria s'ha transformat, però la seua massa s'ha conservat. D'altra banda, el mateix es pot dir de l'energia. Si pensem en una central hidroelèctrica, l'aigua a l'embassament té una determinada energia potencial, fruit del desnivell entre la superfície de l'aigua a l'embassament i la superfície del mar. Quan s'obren les comportes l'aigua fa girar una turbina i aquesta turbina genera electricitat. Finalment l'aigua arriba al riu i continua el seu curs cap al mar. En aquest cas l'energia potencial inicial és igual a la suma de l'energia elèctrica produïda, l'energia potencial de l'aigua al riu i la calor per-

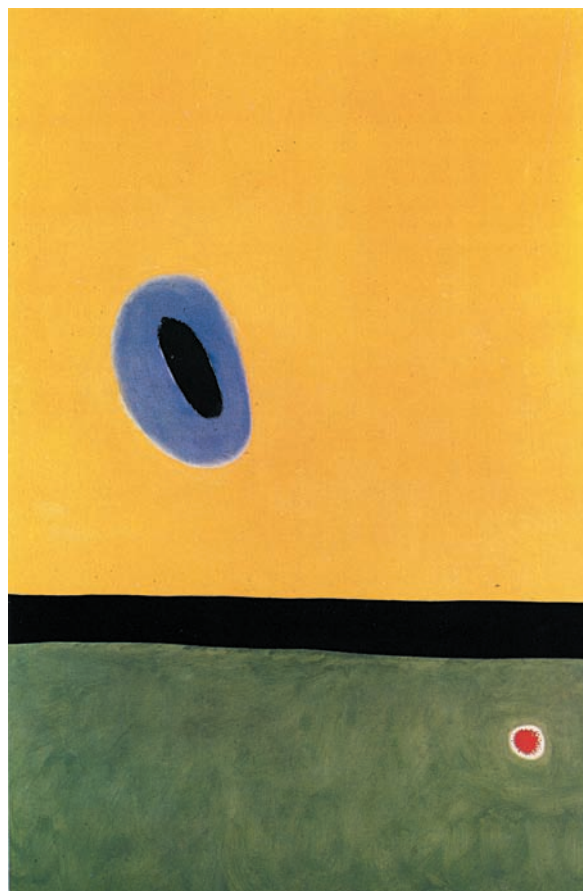


Figura 6. Joan Miró: *L'ala de l'aloza, aureolada del blau d'or arriba al cor de la rosella abaltida damunt la prada ornada de diamants* (1967). Oli sobre tela. Pilar Juncosa de Miró, Palma de Mallorca.

duda en el funcionament de la turbina. L'energia s'ha transformat, però el total s'ha conservat. Gràcies a l'equivalència entre massa i energia, però, aquestes dues lleis queden simplificades en una sola.

Aquest procés d'unificació, de simplificació, de síntesi, només va ser possible per una profunda comprensió del context i de la història que havia creat les equacions i les teories físiques vigents en la seva època. De la mateixa manera que l'interior holandès aquestes equacions i teories també estaven plenes de paranys. El treball intel·lectual pacient i molt llarg d'Einstein té paral·lelismes amb el procés de desenvolupament pictòric de Miró. Tots dos van arribar a formulacions senzilles carregades d'un sentit profund i alhora poètic. No podem esperar gaudir del plaer subtil d'aquestes obres mestres sense fer un esforç previ per entendre'n el context i la història. L'aprenentatge no té per què ser avorrit, però l'esforç és imprescindible. ☺

Carles Pedrós-Alió. Institut de Ciències del Mar, CMIMA, CSIC (Barcelona).



## GERARDO DELGADO

### «ÉS LA NOSTRA OBLIGACIÓ A ESPANYA EDUCAR A TRAVÉS DE L'EXPERIMENTACIÓ»

Manuel Boix i Chornet

El president de la Real Sociedad Española de Física (RSEF) denuncia el retard de l'ensenyança de la física a Espanya

Gerardo Delgado és president de la Real Sociedad Española de Física (RSEF) des de l'any 1997 i professor d'investigació a l'Institut de Matemàtiques y Física Fundamental del CSIC (Madrid). Ha publicat més de 180 articles, així com llibres sobre química quàntica, física d'agregats moleculars i fotodissociació, on se centra en l'estudi teòric de les interaccions entre àtoms i molècules. Va formar part el 2001 de la ponència al Senat sobre la situació de les ensenyances científiques en l'educació secundària, situació que considera extremadament preocupant a Espanya. El 2005, com a president de la RSEF, està duent a terme una activitat frenètica en l'organització i promoció de la celebració de l'Any Mundial de la Física, un any ple d'esdeveniments en què es commemora el centenari del considerat com a *Annus Mirabilis*, l'any en què Albert Einstein va publicar tres treballs que es convertiren en la base de la física moderna.

Tan malament es troba la física que necessita que la Unesco li dedique un any?

Jo crec que la física té una gran salut. Ha representat un paper primordial en el desenvolupament del segle XX, que ha estat el segle de la física, i segons pareix ho continuarà sent en el segle XXI. Però això no vol dir que no tinga problemes. En aquests moments, sobretot a Europa occidental, hi ha una gran disminució del nombre d'estudiants. Això és particularment dramàtic a Espanya, on, en pocs anys, s'ha passat dels 18.000 als 13.000 estudiants de física. Aquest enorme descens comprometrà no sols el desenvolupament científic, sinó també el tecnològic de la nostra societat. Per això la Unesco ha declarat el 2005 Any Internacional de la Física, amb l'objectiu de promoure vocacions que assegurin aquest desenvolupament.

La RSEF s'ha implicat molt en la celebració de l'Any de la Física i sembla bolcada amb la divulgació de la ciència. És aquest el paper reservat a les societats científiques del segle XXI? Ha evolucionat en aquest sentit el paper de la RSEF?



© Fotos: entrevista: Jesús Navarro



**«A ESPANYA S'HA PASSAT EN POCOS ANYS DELS 18.000 ALS 13.000 ESTUDIANTS DE FÍSICA, UN ENORME DESCENS QUE COMPROMETRÀ NO SOLS EL DESENVOLUPAMENT CIENTÍFIC, SINÓ TAMBÉ EL TECNOLÒGIC DE LA NOSTRA SOCIETAT»**

Quan es llegeixen les actes fundacionals de la RSEF de 1903, un no deixa de sorprendre's i de sentir una admiració especial i afecte pels nostres pares fundadors, com José Echegaray, un premi Nobel de literatura i el primer que va firmar les actes de la Societat. L'objectiu inicial de la Real Sociedad de Física y Química era "connectar-nos amb Europa". I amb aquest objectiu s'editava una revista científica que no sols recollia i promocionava la investigació dels seus membres, sinó que traduïa i publicava els articles científics de les millors revistes del món, com els articles d'Einstein, que van ser publicats pocs mesos després de ser escrits. Així s'intentava fer arribar l'esperit científic de començament del segle XX a Espanya, una Espanya que venia del desastre de 1898, una Espanya trista, pobra, que havia perdut el nord, una Espanya amb una situació d'inestabilitat política permanent. Aquests homes, en compte de dedicar-se a plorar, es van dedicar a treballar per aquest país, i van pensar que la millor manera de fer-ho era dedicant-se a crear un ambient científic, a fer ciència i a propagar la cultura científica. Jo crec que aquest missatge era cert a principi del segle XX i ho continua sent en el segle XXI. La promoció científica és consubstancial a la RSEF. Junt amb altres societats europees hem creat l'*European Physical Journal* (EPJ), del qual he estat el primer president durant quatre anys. A més, publiquem des de fa dotze anys la *Revista Española de Física*, que ha estat la base de la *Revista Iberoamericana de Física*, el primer número de la qual va eixir al mes de febrer. Amb aquesta revista pretenem elevar el nivell cultural dels físics i de la investigació, però també tenim una obligació amb la societat mateixa, la societat que ens manté i ens exigeix i per a la qual organitzem cada any esdeveniments amb l'objectiu d'acostar la ciència a la societat. És la nostra obligació educar Espanya en una ciència per a tots i esperem que l'any 2005 siga un any en què Espanya vibre amb la física. Això és el que nosaltres intentem.

Ha comentat que hi ha una autèntica crisi vocacional en la física. A què creu que és degut que la física siga poc atractiva per als joves?

En tot Europa es dóna aquesta situació. A Espanya tenim una crisi sense haver arribat a tenir un desenvolupament de la física important, i això és especialment dramàtic. Quasi totes les anàlisis assenyalen que el problema té el seu origen en el sistema educatiu, on el nombre d'hores lectives de física s'ha anat reduint sis-

temàticament. Ja en els anys 30 un president de la Sociedad de Física y Química es queixava amargament a un ministre d'Instrucció Pública, responsable de l'educació en l'època, per haver disminuït l'ensenyament en física a sis hores la setmana. En l'actualitat tenim dues hores i a més són optatives. Tenim una ensenyança que és absolutament penosa. Amb el nombre d'hores que es dediquen a la física, és impossible tenir una bona formació. En aquesta situació, i encara que sembla una *boutade*, jo quasi preferiria que se suprimita la física de l'ensenyament secundari. Suprimint-la encara alguns estudiants podrien pensar que hi ha alguna cosa que no coneixen, però que pot tenir cert interès. Però ara per ara, amb el tipus d'ensenyament que se'ls dóna, els estem destruint l'interès per la física. L'ensenyança actual està allunyant de forma permanent la ciutadania de la ciència, i en particular de la física.

Quins canvis proposaria vostè?

La física és una ciència experimental. Jo em vaig enamorar de la física fent experiments, una cosa comuna en tots els científics. Crec que no sols hem d'augmentar el nombre d'hores, sinó fer un gir copernicà al tipus d'ensenyança de la ciència que tenim a Espanya.

No obstant això, la física sempre s'ha ensenyat així i aquesta crisi vocacional és un problema d'ara.

No, no és veritat. Jo la física no l'he estudiada així. Jo recorde que amb

tretze anys vaig fer un experiment molt senzill que consistia a connectar un cable a una bateria i acostar-hi una brúixola, i el que observàvem és que en fer passar corrent elèctric l'agulla imantada es movia, de manera que alguna relació devia existir entre l'electricitat i el magnetisme. Un experiment com aquest que porta molt poc de temps i costa menys de dos euros va provocar que a cap de nosaltres se'ns oblidara que l'electricitat i el magnetisme estan relacionats. Quan un xic amb tretze anys veu un experiment senzill i després se li explica la teoria de l'experiment, se n'enamora i intenta entendre per què la naturalesa es comporta així. Però si a un estudiant, en compte d'ensenyar-li el fenomen li poses fórmules abstractes en la pissarra, es pensa que la física és molt complicada, que no té res a veure amb mirar la natura amb ulls de sorpresa, i s'allunya irremediablement de la física. Jo he tingut aquest tipus de professors, però aquests professors tenien un laboratori per a experimentar i entre 5 i 6 hores cada setmana per a explicar. En aquests moments, amb el nombre d'ho-





**«SEMPRE DIC ALS RESPONSABLES  
POLÍTIQS QUE USEN LES SOCIETATS  
CIENTÍFIQUES, JA QUE NOSALTRES  
NO TENIM MÉS MISSIÓ QUE AUGMENTAR  
LA CULTURA CIENTÍFIQA I AJUDAR  
A ANALITZAR QUIN TIPUS  
D'ENSENYAMENT NECESSITA  
AQUEST PAÍS»**

res lectives i els programes que se'ls obliga a explicar no dona temps per a res, i això converteix la física en una cosa molt avorrida. Sens dubte, jo també abandonaria la física si me l'hagueren explicada com es fa ara. Açò està compromentent tot el nostre desenvolupament tecnològic i la nostra competitivitat. No podem imaginar-nos un país modern, que vulga representar un paper important en la humanitat, sense tenir una ciència i una tecnologia realment competitives.

Recentment, i amb l'objectiu d'obrir un debat sobre l'estat de l'ensenyança de les ciències en l'educació secundària, representants de les societats de matemàtiques, física i química han participat en la redacció d'una ponència que s'ha presentat en el Senat. S'ha pres algun tipus de mesura a partir d'aquestes conclusions?

El document que es va elaborar va ser aprovat pel ple del Senat i es va enviar al govern. El treball va ser molt important, però els resultats han estat molt escassos perquè no sols depenen del Govern central, sinó també de les administracions autonòmiques, i jo l'he vist molt poc plasmat, o gens, en actuacions concretes. Sempre dic als responsables polítics que usen les societats científiques, que estem ací per servir Espanya i per ajudar, que nosaltres no tenim més missió que augmentar la cultura científica i ajudar a analitzar quin tipus d'ensenyament necessita aquest país. Però per més anàlisis i documents que fem, si les autoritats no ens tenen en compte és com escriure en el buit. En qualsevol cas jo no estic desanimat. Mentre continue sent president de la RSEF, i després com a membre de peu de la comunitat de físics, continuaré treballant i continuaré dient el que crec que és bo per a l'ensenyança de la física a Espanya, encara que no tinc gens clar que em facen cas.

Té solució el problema?

Països que han afrontat el problema com Alemanya ja l'han superat i han aconseguit que augmente el nombre d'estudiants. En altres països, com Corea del Sud, la física és el motor d'un enorme desenvolupament econòmic, i Hongria té una producció en física tres vegades major que Espanya. A França es donen el doble d'hores de física, a més de disposar de laboratoris obligatoris a l'ensenyament secundari. Per a fer-nos una idea de la situació, en les Olimpíades Internacionals de Física el nostre país obté resultats que ens situen entre els tres pitjors del món, i això no és perquè els nostres estudiants siguin menys intel·ligents.

Quines expectatives es tenen i què se li ha d'exigir al nou govern en matèria de política científica?





Jo he de recordar el que personalment he sentit dir al president del Govern, el senyor José Luis Rodríguez Zapatero. Ens va prometre duplicar el percentatge de diners dedicats a investigació fins al 2% del PIB en quatre anys; això suposa un creixement consolidat aproximat del 0,25% anual. Probablement alguns anys hi haurà problemes, pareix que enguany serà difícil arribar a l'1,25%, però espere que al llarg de la legislatura es complequen les previsions. Avui dia hi ha una gran quantitat de científics joves molt bons a Espanya, molts dels quals han estat incorporats de forma precària en el programa Ramón y Cajal, i seria fonamental que aquests científics es consolidaren de manera definitiva en les universitats i centres d'investigació on es troben. Això hauria de ser una prioritat.

Les polítiques científiques dels governs posen cada vegada més èmfasi en la investigació aplicada i el desenvolupament tecnològic. Està perdent interès per a la societat actual la investigació bàsica?

Això és una cosa que ens preocupa molt als físics de tot el món. Ha d'haver-hi investigació orientada, ha d'haver-hi investigació aplicada. Lògicament la societat vol que els diners que inverteix revertessen en una sèrie de beneficis, però és fonamental que tinguem una investigació no programada, una investigació absolutament lliure que cree les bases de la investigació aplicada. No es pot fer investigació aplicada si no hi ha ciència per aplicar i la ciència es crea amb la investigació bàsica.

Durant l'any de la física es commemora el centenari de la publicació per part d'Einstein de quatre articles que han resultat revolucionaris en el segle xx. Es pot imaginar un científic així avui dia?

Molts de nosaltres sentim un autèntic vertigen en pensar que una persona de 26 anys que treballava en una oficina de patents i feia ciència a estones lliures haja estat capaç de crear les bases de la relativitat, reinterpretar la hipòtesi de Planck i assentar les bases de la mecànica quàntica amb l'estudi de l'efecte fotoelèctric, i fer una anàlisi del moviment Brownià, base de tots els estudis de sistemes complexos. Aquest és el millor exemple d'una investigació que no és aplicada en els seus orígens i que, no obstant això, ha tingut un gran impacte en el desenvolupament tecnològic. La mecànica quàntica està en la base de tota la generació

**«EN COREA DEL SUD LA FÍSICA  
ÉS EL MOTOR D'UN ENORME  
DESENVOLUPAMENT  
ECONÒMIC I HONGRIA TÉ UNA  
PRODUCCIÓ EN FÍSICA TRES  
VEGADES MAJOR QUE  
ESPANYA»**

d'energia, en tots els problemes de transmissió de comunicacions i en multitud d'aplicacions en el camp de la medicina. La investigació bàsica és fonamental per a poder fer avanços qualitatiu en la vida i en la tecnologia.

Veient-ho en perspectiva, van tenir un impacte tan gran en la

física i en la societat del moment com el tenen cent anys després?

Encara que Einstein treballava allunyat dels cercles oficials de la ciència, prompte va haver-hi persones que van notar fins a quin punt eren revolucionaris els seus treballs, entre altres el mateix Planck. Però els seus començaments no crec que foren molt fàcils. Poc després va ser nomenat membre de l'Acadèmia Prusiana i ja més tard se li va donar el premi Nobel, encara que pel treball de l'efecte fotoelèctric i no pel de la relativitat. Aviat va passar a ser un científic conegut, però el gran salt a la fama el va fer amb l'experiment de l'eclipsi, on, per primera vegada, una observació demostrava que eren correctes les seues prediccions. Després, com tots sabem, Einstein s'ha convertit en icona de moltes coses i sens dubte ha estat el físic més conegut de la història.

I ja per acabar, quins són els reptes que es planteja la física per al futur?

Doncs no ho sé, perquè de reptes en tenim molts. Els reptes tecnològics tal vegada siguin més fàcils de preveure; tot el món parla de la fusió nuclear controlada, de temes ambientals, on la física representarà un paper important, i de la computació quàntica. I des del punt de vista científic jo crec que el repte més important és el de la teoria de la gran unificació i la recerca de la partícula de Higgs. Jo crec que en aquests moments hi ha moltes línies obertes i tenim ciència per a estona, així que jo els diria a tots els estudiants que pràcticament tota la gran física està encara per fer. Aquesta visió finalista que es tenia a finals del segle XIX i XX que pràcticament estava tot fet és equivocada. Un exemple: jo treballo en sistemes complexos, en el món dels agregats moleculars i conèixer les lleis que regeixen dos o tres partícules no resol els problemes deguts als efectes emergents que es donen quan es tenen milers i milions de partícules. ☺

**Manuel Boix i Chornet.** Investigador postdoctoral al Centro Nacional de Investigaciones Oncológicas (CNIO), Madrid.



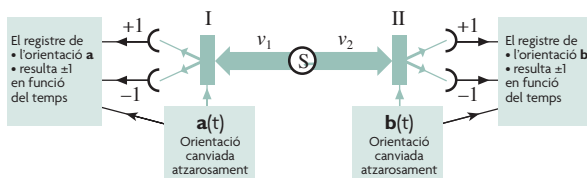
# ALAIN ASPECT

## «UNA PERSONA TELETRANSPORTADA, SERIA LA MATEIXA?»

Rebeca Romero Escrivà

Alain Aspect és director d'investigació en el CNRS, de l'Institut d'Optique (Orsay)

El 6 de gener de 1983, la revista londinenca *New Scientist* va informar de dos experiments duts a terme pel doctor Alain Aspect, de l'Institut d'Òptica Teòrica d'Orsay, que violaven les desigualtats de John Bell (una sèrie de càlculs que pretenien demostrar que les anomenades *teories locals de variables ocultes* eren incompatibles amb la mecànica quàntica i proposava que el que ocorre aquí i ara només hauria de dependre de coses pròximes en l'espai i en el temps). Aspect, contra tot pronòstic, va decantar la balança a favor de la mecànica quàntica; va confirmar la no localitat de l'univers, és a dir, que a nivell quàntic (de partícules subatòmiques), la realitat és no local i les partícules intercanvien informació a velocitats superiors a la de la llum a través de connexions misterioses. L'experiment d'Aspect consistia a mesurar la polarització, una propietat que posseeixen els fotons (dels quals es compon la llum), la imatge mental més clara de la qual és la de la fletxa que ix del fotó i apunta a una direcció determinada, tal com es mostra en la següent figura.



Cada polaritzador és atzarosament reorientat durant la propagació dels fotons entre la font i els polaritzadors. Cada un registra l'orientació del polaritzador, així com els resultats de la mesura de la polarització en funció del temps. Quan es completa una volta, els marcadors d'ambdós costats són atrets conjuntament i es pot determinar el valor de la correlació en funció de l'orientació relativa en el moment de la mesura; en altres paraules, la mecànica quàntica prediu fortes reciprocitats entre aquestes mesures.

Aspect va demostrar que aquesta polarització és paral·lela, és a dir, que quan es mesuren les polaritzacions d'un dels dos fotons emesos al mateix temps, s'obtenen les de l'altre, i aquestes resulten de signe contrari, independentment de la distància que hi haja



© Fotografies d'Alain Aspect: Rebeca Romero Escrivà

entre elles. Aspect compara la misteriosa solidaritat o simpatia dels fotons amb la replicació de les cadenes de DNA, i això és important, no sols per les aplicacions que tenen avui en la tecnologia de la computació i de l'encriptació, sinó també perquè tanca la vella paradoxa d'Einstein, Podolsky i Rosen (EPR). Per a Aspect, dos fotons emesos al mateix temps han de considerar-se dos moments de la mateixa ona, o el que és el mateix, un únic estat quàntic.

Alain Aspect és director d'investigació en el CNRS, de l'Institut d'Optique (Orsay) i professor en l'École Polytechnique (Palaiseau). Nascut el 1947, Aspect va estudiar en l'École Normale Supérieure i en la Universitat d'Orsay, a París, i va realitzar el seu servei militar *en coopération* com a mestre durant tres anys a Camerun (Àfrica). El 1974 va començar els seus "Experimental Tests of Bell's Inequalities with Correlated Photons" a l'Institut d'Optique d'Orsay, que va ser la matèria que va desenvolupar en la seua tesi doctoral, un text considerat clàssic en la mecànica quàntica. Entre les seues investigacions més recents destaquen les dirigides a les condensacions de Bose-Einstein. Com a professor, ha creat escola; com a científic, ha rebut nombrosos guardons per les seues diferents investigacions, entre altres, el premi Max Born de l'Optical Society of America, l'Holweck, premi conjunt de l'Institute of Physics i de la Société Française de Physique, i el premi Von Humboldt a la investigació. Més enllà d'aquests guardons, Aspect ha estat considerat pels seus col·legues, juntament amb John Bell, com un possible candidat a premi Nobel. Alguns científics encara confien que pugui rebre aquest reconeixement algun dia.

La següent entrevista és fruit de diverses fonts. La primera és la conferència que Aspect, sota el títol "De les intuïcions d'Einstein als bits quàntics: una nova revolució quàntica?", va pronunciar el 14 d'abril davant alumnes i professors del campus de Ciències, organitzada per la Facultat de Física. La segona, una conversa de sobretaula sobre conviccions científiques, en la qual van participar dos físics teòrics, Carlos Ferreira (degà i catedràtic d'Òptica de la Facultat de Física de València), i Vicente Vento (catedràtic de Física Teòrica a la Universitat de València) i un físic experimental, Jorge Velasco, (professor d'Investigació del CSIC); el seu convidat d'honor (i personalitat híbrida, en ambdós camps de la física) va ser el mateix Aspect. Assistir d'oient a una conferència excepcional i al que podríem considerar una taula redona entre col·legues és una experiència si més no gratificant i instructiva per a una periodista inexperta. Si el lector pretén reconstruir mentalment els esforços d'interpretació, intel·ligents i genials, duts a terme per aquests físics, tal vegada, la seua *força d'imaginació* es veja recompensada amb les següents

Aspect durant la seua conferència "De les intuïcions d'Einstein als bits quàntics: una nova revolució quàntica?" impartida el 14 d'abril de 2005.



paraules d'Einstein: "L'estudi i, en general, la recerca de la veritat i la bellesa és un camp en què se'ns permet ser xiquets tota la vida." Finalment, només va fer falta una breu entrevista amb el professor de l'Institut d'Optique Théorique et Appliquée, l'objectiu últim de la qual –més que incorporar nous continguts– va ser aclarir els ja introduïts. Com a resultat final, al lector se li presenta una entrevista ordenada per temes i amb comentaris intercalats, a fi de "traduir" una xarrada entre físics al llenguatge assequible de la divulgació científica.

## ■ JOVENTUT I CARRERA

Explique'ns com va començar el seu interès per la ciència. Vaig començar a entusiasmar-me per la ciència llegint novel·les de Jules Verne. Recorde amb especial plaer *L'illa misteriosa*, una novel·la que podríem considerar química. Després, amb els anys, per voluntat pròpia, vaig decidir decantar-me per la ciència; sentia una atracció especial per la física.

Quins professors van marcar la seua vida professional a la Universitat?

En realitat, els professors que van deixar una empremta profunda en la meua educació científica els vaig trobar a l'institut. Allí vaig tenir excel·lents mestres de física. Gaudia aprenent i llegint els llibres que em recomanaven. També vaig tenir bons professors a la Universitat. No obstant això, allí vaig aprendre pel meu propi interès, perquè m'agradava ser autodidacta. Era una espècie d'aventura intel·lectual. Llavors treballava molt, però per a mi treballar no era treballar; era més aviat un *divertimento*.

Per què va migrar de l'òptica a la mecànica quàntica?

En els meus estudis inicials no existia la possibilitat d'estudiar mecànica quàntica, però oferien una bona preparació en física clàssica. En la física clàssica vaig trobar fascinant l'estudi de la llum i per això vaig triar l'especialitat d'òptica, però era conscient que si volia investigar la interacció entre la matèria i la llum –l'aspecte que més m'atreia–, hauria de dedicar-me a la mecànica quàntica. Quan vaig estar a Àfrica vaig tenir l'oportunitat de treballar per mi mateix en mecànica quàntica.

Ha esmentat Àfrica. Què va trobar a Camerun?

Camerun va ser molt important en la meua vida, perquè vaig percebre que el món real no és tal com el mostren els mitjans de comunicació. Allí em vaig adonar de la importància del bagatge cultural de la població, el seu rerefons de creences, així com del paper que exerceixen els orígens ètnics en l'orientació científica dels estudiants.

## ■ L'EXPERIMENT DE 1982

En la seua introducció al llibre *Quantum Unspeakables: From Bell to Quantum Information* (editat per Bertlmann i Zeilinger, Springer, 2002) narra que va conèixer per primera vegada John Bell el 1975, uns mesos després de la lectura del seu famós article, i com va ser aquesta trobada. Quin motiu li va portar a presentar-se davant John Bell i quina impressió li va causar la reunió que va mantenir amb ell?

L'article de John Bell, que parlava de les seues conegudes desigualtats, va deixar una empremta profunda en mi. Vaig decidir canalitzar les meues impressions en la meua tesi i la vaig dedicar a aquest problema, que em semblava –i encara em sembla– fascinant. Vaig convèncer Christian Imbert, un professor jove de l'Institut d'Optique, perquè avalara el meu projecte i dirigira la meua tesi. Volia fer un nou experiment. Imbert em va aconsellar que abans anara a Ginebra i parlara de la meua proposta amb John Bell. Vaig

aconseguir una cita i vaig acudir, enormement emocionat, a l'oficina de Bell al CERN. Ell es va quedar en silenci, escoltant, mentre jo explicava la meua planificació de l'experiment. El detall més curiós va ser que quan vaig deixar de parlar em va fer una pregunta que mai oblidaré i que sempre porte a col·lació quan em pregunten per aquesta anècdota: "La seua és una decisió irrevocable?" ("Have you a permanent position?"), em va interpel·lar. És clar que la seva pregunta feia referència a si jo tenia les espatles cobertes perquè l'experiment que jo proposava no estava de moda i podia no ser beneficiós per a la meua carrera científica. Li vaig contestar que sí, i quan es va assegurar que la cosa anava seriosament, em va animar i va canviar de tema. Tots dos vam començar a parlar de física.

El silenci de Bell és molt significatiu. Potser va intuir que l'experiment que vostè es proposava fer podia vio-



lar les seves conegudes desigualtats. Com va ser la següent trobada amb John Bell, esdevinguda anys després, quan vosté li comunicà personalment que aquestes sospites s'havien comprovat? Va guardar silenci de nou?

Realment va ser molt incòmode; l'ambient era tens, però no va tenir més remei que acceptar els resultats i felicitar-me. En tot cas, m'incline a pensar que, com a físic, els apreciava, independentment que violaren les seves desigualtats.

Un científic hauria d'estar sempre preparat per a un moment com aquest, no troba? El mateix Einstein pensava que les teories, en la ciència, existeixen només per a ser superades per altres teories. Recordem les seues pròpies paraules: "L'investigador teòric té poc d'envejable. Perquè la naturalesa, o millor dit l'experimentació, és jutgessa inexorable i poc amigable de la seua obra. No diu mai que 'sí' a una teoria. En el millor dels casos diu 'potser', i l'enorme majoria de les vegades diu simplement 'no'. Si un experiment s'adiu amb una teoria, significa un 'potser', i si no s'hi adiu, és 'no'. És probable que a tota teoria li arribe un dia el seu 'no', i per a la major part, molt prompte una vegada han estat concebudes".

Sí, així és, encara que els meus experiments, al demostrar que no complien les desigualtats de Bell, refutaren les teories de variables ocultes, que es presentaven com alternativa a la mecànica quàntica. Hi ha que tenir en compte que les desigualtats de Bell són la conseqüència d'una sèrie de postulats molt generals; parlar de "Teories de Bell" és totalment incorrecte. Dit açò, durant molt de temps les desigualtats de John Bell van absorbir el meu pensament. Vaig dedicar vuit anys de la meua vida a l'estudi del seu treball i al meu propi projecte. Sent admiració per la seua teoria. Crec que no és una exageració dir que l'aclariment de la descripció quàntica d'objectes senzills ha estat l'arrel de la segona revolució quàntica, i que John Bell, tal com he assenyalat en diversos articles, va ser-ne el profeta. Encara que el meu experiment inclinava definitivament la balança cap a la mecànica quàntica, les desigualtats de John Bell són un capítol de la història d'aquesta disciplina que no podem ignorar. En el fons, devem a John Bell el rescat de l'antic debat Bohr-Einstein.

#### ■ EL DEBAT BOHR-EINSTEIN I EL COROL·LARI DE L'EXPERIMENT D'ASPECT

La mecànica quàntica ha revisat alguns dels conceptes clàssics de la física. Un dels més importants és el de la

### «ELS MEUS EXPERIMENTS, AL DEMOSTRAR QUE NO COMPLIEN LES DESIGUALTATS DE BELL, REFUTAREN LES TEORIES DE VARIABLES OCULTES»

dualitat ona-partícula, és a dir, respondre a la pregunta de si la llum és formada per ones o per fotons. La mecànica quàntica va haver de renunciar a la noció clàssica de trajectòria d'una partícula amb una posició i una velocitat bé definides a cada instant. Werner Heisenberg va demostrar l'any 1927 amb la

seua famosa llei física, coneguda amb el nom de *principi d'incertesa*, que és impossible determinar simultàniament la velocitat i la posició d'un electró, o el que és el mateix, asseverar que l'electró "està en aquest precís lloc" i es mou amb "tal i tal velocitat"; perquè el mer fet d'observar la seua posició ja fa que canvie de velocitat; i al revés, quan se'n sap la velocitat, tant més indefinida és la posició. Einstein no acceptava aquesta situació. Per a ell, la interpretació correcta d'aquest principi era que ni els experiments ni la teoria eren capaços de dir-nos per ara res més precís sobre el tema. Potser la física no fóra exacta, però la naturalesa sí que ho era. La polèmica va començar a l'octubre de 1927, arran del Cinquè Congrés Solvay a Brussel·les, al qual van assistir tots els fundadors de la teoria quàntica: Planck, Einstein, Bohr, Heisenberg, Born, De Broglie, Schrödinger, Dirac, Pauli, així com moltes de les grans figures de la física de l'època, com Madame Curie, Lorentz, Ehrenfest, W. L. Bragg, Debye, Compton, etc. Aquí Einstein assenyala públicament alguna objecció a la teoria acabada de proposar i fora de les ponències manté contínues discussions –particularment amb Bohr– que mostren la seua insatisfacció amb la teoria. Heisenberg ho recorda de la manera següent: "Einstein va intentar incansablement refutar durant el congrés les relacions d'incertesa basant-se en contraexemples, formulats en forma d'experiments mentals. Tots residíem en el mateix hotel, i no era rar que ja en el desdijuni Einstein ens portara una d'aquestes propostes, que calia passar a analitzar [...]. Al llarg del dia discutíem Bohr, Pauli i jo l'exemple d'Einstein, amb la qual cosa a l'hora del sopar ja estàvem en condicions de demostrar que l'experiment teòric d'Einstein concordava amb les relacions d'incertesa i no podia ser utilitzat per a refutar-les."

Einstein acceptava expressament la *consistència lògica* de la mecànica quàntica, però no la seua *necessitat lògica*. La polèmica va continuar amb la publicació de la paradoxa EPR, un treball publicat en col·laboració amb Boris Podolsky i el seu jove assistent Nathan Rosen que demostrava que si s'adopta un punt de vista objectiu clarament definit sobre la realitat física, llavors la mecànica quàntica és una teoria física incompleta, perquè no pot contenir *tots* els elements de la realitat d'interès per a la descripció del sistema. Bohr va respondre a aquest



embat. La disputa es va prolongar de forma epistolar entre ambdós científics fins a la mort d'Einstein en 1955. Per altra banda, en una de les cartes que, al setembre de 1944, Einstein va escriure a Max Born (íntim amic d'Einstein i autor de la interpretació de la funció d'ona com una probabilitat de presència de la partícula), diu: "Ens hem convertit en antípodes pel que fa a les nostres expectatives científiques. Tu creus en el Déu que juga als daus, jo en un ordre i una legalitat completes en un món que existeix objectivament, i que jo he tractat de capturar mitjançant recursos molt especulatiu. Jo *crec* fermament, però espere que algú descobreixca un camí més realista, o tal vegada una base més tangible que la que la sort m'ha permès trobar. Fins i tot el gran èxit inicial de la teoria quàntica no em fa creure en aquest joc de daus fonamental, encara que sóc perfectament conscient que els nostres joves col·legues ho interpreten com una conseqüència de la senilitat. Sens dubte, arribarà el dia en què sabrem quina d'aquestes actituds instintives va ser la correcta."

Einstein i els seus col·legues Podolsky i Rosen es negaven a acceptar la correlació misteriosa entre partícules. Pensaven que havien d'existir variables ocultes (encara no observades) que distingiren aquests sistemes aparentment idèntics. Els físics havien d'intentar trobar una resposta a aquest misteri per a completar-



La disputa sobre la mecànica quàntica entre Niels Bohr i Albert Einstein es va prolongar de forma epistolar entre ambdós científics fins a la mort d'Einstein en 1955.



© Institut Internacional de Física de Solvay, cortesia d'AlP, Emill Segre

Congrés de Solvay, Brussel·les. D'esquerra a dreta, filera del davant: I. Langmuir, M. Planck, Mme. Curie, H. A. Lorentz, A. Einstein, P. Langevin, Ch. E. Guye, C. T. R. Wilson, O. W. Richardson. Filera del mig: P. Debye, M. Knudsen, W. L. Bragg, H. A. Kramers, P. A. M. Dirac, A.H. Compton, L. de Broglie, M. Born, N. Bohr. Filera de dalt: A. Piccard, E. Henriot, P. Ehrenfest, E. Herzen, Th. De Donder, E. Schrödinger, E. Verschaffelt, W. Pauli, W. Heisenberg, R. H. Fowler, L. Brillouin.

la. Açò és el que venia a dir el conegut article que van publicar el 1935, titulat "Can quantum mechanical description of physical reality be considered complete?". Per la seua banda, Schrödinger es va alinear amb la posició adoptada per EPR i va encunyar el terme "emparellament" (*entanglement*) per a caracteritzar la falta de factorabilitat d'un estat EPR. Anys més tard, el 1964, John Bell demostraria científicament la paradoxa EPR. Sols faltava saber si les desigualtats de Bell es satisfieien. Si era així, guanyava el debat Einstein, sinò, ho guanyava Bohr, però en ambdós casos Bell tenia raó, perquè va mostrar el camí per a entendre si la descripció no determinista de la mecànica quàntica era, o no, correcta, és a dir, que les prediccions eren distintes. Va ser Alain Aspect qui en la dècada dels vuitanta transformà les idees de Bell en un experiment realitzable, què mostrà que les prediccions correctes eren les de la mecànica quàntica. Per això, alguns científics encara pensen que si Bell no haguera mort tan jove, pot ser haguera sigut un Premi Nobel, y tal volta Aspect ho podria haber compartit amb ell.

Parle'ns del debat Bohr-Einstein. En quina mesura era conegut dins de la comunitat científica?

Excepte Bohr i Schrödinger, molts físics ignoraven aquest debat, perquè els semblava molt acadèmic. Acceptar una o altra teoria era més aviat una qüestió de gust personal. Einstein mateix aparentment no va contestar a aquesta actitud i vam haver d'esperar trenta anys, fins que John Bell es va interessar novament per aquestes qüestions, perquè s'acceptara la paradoxa d'EPR com una realitat universal.

El 1980 vostè va ser el primer a dur a terme uns experiments que van obtenir resultats categòrics a favor de la teoria quàntica que rebatien les desigualtats de Bell usant dos polaritzadors connectats. Una altra generació d'experiments al començament dels anys noranta va confirmar els seus resultats. Què van demostrar definitivament aquestes seqüeles?

Que ja no hi hauria cap dubte: dos fotons emparellats no són dos sistemes distints que transporten dues còpies idèntiques dels mateixos paràmetres. Un parell de fotons emparellat ha de ser considerat com un únic sistema inseparable, descrit en termes de funció d'ona global que no pot ser descompost en estats de simple fotó. La inseparabilitat de l'estat del fotó emparellat es manté fins i tot quan els fotons es troben distants, inclosa la separació espacial en sentit relativista, és a dir, en una separació tal que cap senyal que viatge a una velocitat inferior o igual a la velocitat de la llum pot connectar les dues mesures. Aquest és el cas dels



experiments de 1982, en què hi havia una separació de dotze metres entre els fotons, en el moment del mesurament. A més, era possible canviar la posició dels polaritzadors durant el vol dels fotons entre la font i el detector. En experiments posteriors, on noves fonts han permès la injecció de fotons emparellats en dues fibres òptiques, es va observar una violació de les desigualtats de Bell a centenars de metres, i fins i tot més lluny, i resultava possible canviar a l'atzar la col·locació dels polaritzadors mentre es propagaven els fotons en les fibres. Els experiments assenyalen que tot ocorre com si les partícules emparellades encara estigueren en contacte i com si la mesura d'un fotó afectara immediatament l'altre.

Els resultats dels seus experiments no sols suposen un avanç acadèmic o teòric; al mateix temps ens introdueixen en una nova revolució tecnològica. L'emparellament de les partícules ofereix noves possibilitats en el tractament de la informació i de la transmissió. Un exemple el trobem en la criptografia, és a dir, en la ciència que s'encarrega de "codificar i/o transmetre un missatge secret sense que siga llegit o entès per una tercera persona". Quines aplicacions poden desenvolupar-se en encriptació gràcies als coneixements quàntics que ha aportat el seu experiment?

Un camp tan recent com el de la informació quàntica promet sorprenents aplicacions, encara que hem de tenir en compte que el cas de la criptografia és un camp naixent. Tant els mètodes de codificació com els de descodificació han progressat gràcies als avanços en les matemàtiques i en la capacitat dels ordinadors. Contemplant aquest progrés continuat, sembla clar que la seguretat de la transmissió es





garanteix per la hipòtesi que l'adversari no faça servir unes matemàtiques més avançades o ordinadors més potents que l'emissor i el receptor. En la criptografia clàssica, l'única transmissió completament segura és la que usa un mètode d'un sol ús en què emissor i receptor comparteixen dues claus idèntiques una sola vegada i llavors la distribució de les còpies de la clau és el moment crític, perquè implica canals secrets que podrien ser interceptats per un espia amb tecnologia més avançada. En canvi, en la criptografia quàntica la seguretat de la transmissió depèn de les lleis fonamentals de la física de la mecànica quàntica. En aquest cas, és possible descobrir l'espia seguint la pista que deixa necessàriament en efectuar aquests esforços, ja que en la física quàntica tots els mesuraments pertorben el sistema en certa manera. Si no hi ha una pista com aquesta, es pot estar segur que el missatge ha estat enviat amb plena garantia!

Què pot explicar-nos sobre la computació quàntica? Arribarem algun dia a fabricar ordinadors quàntics?

La computació quàntica no treballa basant-se en el clàssic codi binari que només pot prendre dos valors, 0 o 1. En compte del bit utilitza el seu equivalent quàntic, el qubit, que pot estar en qualsevol superposició dels dos estats. En això consisteix la capacitat potencial d'un ordinador quàntic i les poderoses possibilitats que brinda en comparació amb els algorismes clàssics. El futur del càlcul quàntic aplicat a la informàtica alberga molts dubtes, però la idea de la computació quàntica encara és un punt de referència de la investigació científica per a algunes comunitats de físics experts. Per exemple, els protocols d'encryptació usats actualment es basen en la dificultat de factoritzar grans nombres. Amb un ordinador quàntic el temps de factorització es reduiria notablement. Ara la factorització s'aconsegueix en un temps que creix exponencialment segons el nombre de dígit. Un ordinador quàntic ho faria en un temps que augmentaria també segons els dígit, però polinòmicament, és a dir, que podria factoritzar llargs nombres en intervals temporals molt més breus que els mètodes convencionals.

Posats a parlar del futur, fem un poc de ciència-ficció. Vostè és un gran admirador i lector de Jules Verne. L'escriptor francès deia que "Tot allò que una persona puga imaginar, altres podran fer-ho realitat." Verne ens va

**«HAURÍEM DE PREGUNTAR-NOS SI EL RESULTAT DE LA TELEPORTACIÓ DONARÀ LLOC A LA MATEIXA PERSONA»**

ensenyar millor que ningú que el passat en la ciència-ficció és sovint el futur anticipat. En aquest sentit, què pensa de la teletransportació? Sabem que dos fotons emparellats, enviats en direccions oposades, romanen comunicats entre si, que formen subsistemes que no poden representar-se separatament. Si el fenomen de l'emparellament (*entanglement*) fa que dues partícules subatòmiques romanguen mútuament relacionades –perquè han estat generades en un mateix procés– i quan una de les dues partícules pateix un canvi d'estat, repercuteix en l'altra, sense importar com de separades es troben, llavors, no seria possible la teletransportació? Pensa que algun dia podrem viatjar a Mart –teleportar-nos instantàniament– a través d'una espècie de codificador/descodificador quàntic?

La matèria i l'energia no poden ser teletransportades, però l'entitat quàntica d'una partícula sí. Per això, en la teletransportació quàntica no es transfereixen les partícules mateixes; allò que es transmet són els seus estats quàntics, és a dir, informació que permet reconstruir-los quasi instantàniament en un altre lloc. En altres paraules, es tracta de prendre un objecte i aconseguir que en una altra part de l'univers aparega un objecte idèntic, en el mateix estat. Ja s'ha aconseguit teletransportar fotons a través d'un tub de fibra òptica de 600 metres de longitud, és a dir, que un raig de llum es produïra idènticament i instantàniament en dos llocs distints, separats per 600 metres. No obstant això, de moment, la teletransportació només és factible per a sistemes de comunicació digitals i de computació avançada. Teletransportar un ésser humà implicaria desarmar-lo àtom a àtom, per a després tornar-lo a muntar en una altra part. Tal vegada algun dia aconseguirem fer-ho, però abans hauríem de preguntar-nos si el resultat de la teletransportació donarà lloc a la mateixa persona.

Tornem al present, per a acabar. Vostè ha creat una escola de seguidors. Breument, quines qualitats desitjaria que tingueren?

La qüestió més important, tal vegada l'única cosa important, és que siguin feliços dedicant-se a la investigació. L'entusiasme ha de donar fruit en la investigació. Si ets entusiasta i has fet un treball vàlid, llavors descobriràs, sens dubte, coses interessants. ☺

**Rebeca Romero Escrivà.** Llicenciada en Periodisme i Comunicació Audiovisual, Universitat de València.

