

Física

Report elaborat sota la coordinació de David Jou,
amb la col·laboració de Ramon Vilaseca i Francesc Salvat

SUMARI

Abreviacions	71
Resum	73
1. Introducció	74
2. Recursos humans: investigadors i grups	74
3. Temes de recerca	80
4. Resultats: publicacions i patents	87
5. Els recursos econòmics	97
6. Balanç i conclusions	100
Referències bibliogràfiques	101
Annex	101

ABREVIACIONS

€	euro	ICMAB	Institut de Ciència de Materials de Barcelona
CD6	Centre de Desenvolupament de Sensors, Instrumentació i Sistemes	ICREA	Institució Catalana de Recerques i Estudis Avançats
CEHIC	Centre d'Estudis d'Història de les Ciències	IEC	Institut d'Estudis Catalans
CERMAE	Centre de Referència en Materials Avançats per a l'Energia	IEEC	Institut d'Estudis Espacials de Catalunya
CERN	Centre Europeu per a la Recerca Nuclear	IFAE	Institut de Física d'Altes Energies
CESCA	Centre de Supercomputació de Catalunya	INTE	Institut de Tècniques Energètiques
CIEMAT	Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas	ISI	Institute for Scientific Information
CIRIT	Comissió Interdepartamental de Recerca i Innovació Tecnològica	LEP	Large Electron Positron Collider
CREB	Centre de Referència en Enginyeria Biomèdica	LHC	Large Hadron Collider
CREBEC	Centre de Referència en Bioenginyeria de Catalunya	PACS	<i>Physics and Astronomy Classification System</i>
CSIC	Consell Superior d'Investigacions Científiques	qbit	<i>quantum bit</i>
DNA	àcid desoxiribonucleic	UAB	Universitat Autònoma de Barcelona
DURSI	Departament d'Universitats, Recerca i Societat de la Informació	UAM	Universitat Autònoma de Madrid
DVD	disc versàtil digital	UB	Universitat de Barcelona
ENHER	Empresa Nacional Hidroelèctrica de la Ribagorçana	UdG	Universitat de Girona
ESA	European Space Agency	UdL	Universitat de Lleida
ETSE	Escola Tècnica d'Enginyeria Superior	UE	Unió Europea
GPS	sistema de posicionament global	UIC	Universitat Internacional de Catalunya
ICFO	Institut de Ciències Fotòniques	UNESCO	Organització de les Nacions Unides per a l'Educació, la Ciència i la Cultura
		UPC	Universitat Politècnica de Catalunya
		UPF	Universitat Pompeu Fabra
		URL	Universitat Ramon Llull
		URV	Universitat Rovira i Virgili
		UV	Universitat de València

RESUM

En aquest report presentem una panoràmica de la recerca en física a Catalunya en el període 1996-2002, des de les perspectives dels recursos humans, econòmics, les línies de treballs i els resultats de la recerca (publicacions, impacte, patents). Les dades i conclusions del present report són comparades amb les del report corresponent al període 1990-1995.

L'anàlisi dels grups de recerca mostra una cinquantena de grups de grandàries diverses, amb un total d'uns 890 investigadors (515 doctors i 375 doctorands), cosa que representa un augment considerable respecte dels 600 investigadors censats en el període anterior. Aquest increment és degut a la consolidació i ampliació de grups anteriors, a la constitució de nous instituts i centres de recerca relacionats amb la física als programes Institució Catalana de Recerques i Estudis Avançats (ICREA) i Ramón y Cajal i al nombre creixent de doctorands i de postdoctors estrangers. Pel que fa a àrees de recerca, predomina l'estat sòlid i ciències de materials (amb uns 200 investigadors) i, amb uns 100 investigadors, l'electrònica, física estadística, física d'altres energies i òptica.

Hem detectat un increment important en el nombre de publicacions (de 2.600 a 3.800, aproximadament), especialment en les revistes més conegudes i esmentades, i un increment considerable en la participació relativa en comparació amb el total mundial d'articles publicats. Aquest augment és degut en gran part a l'increment d'investigadors, ja que la productivitat ha restat en el nivell del període anterior, d'unes 1,2 publicacions per doctor i per any. L'increment en publicacions ha estat acompanyat per un ascens en el nombre mitjà de citacions aconseguides per les publicacions; en particular, també ha augmentat el nombre d'articles molt citats, amb quatre publicacions d'aquest període citades més de 450 vegades, i amb una quinzena citades

més de 125 vegades. Ha augmentat la relació amb les empreses, tant públiques com privades, i el nombre de patents, des d'unes 10 en el període anterior fins a unes 40 en el període actual.

El finançament per investigador i any ha passat de 6.845 euros en el període 1990-1995 a uns 7.400 euros en el període 1996-2002; si tenim en compte la inflació acumulada durant els set anys del segon període, la quantitat rebuda per investigador i any val 6.450 euros en valor constant referit a 1996, quantitat una mica inferior a la del període anterior. El finançament total dedicat a la recerca en física ha augmentat proporcionalment, posant de manifest un esforç apreciable per part de les administracions, esforç encara més considerable si tenim en compte els sous dels investigadors, no inclosos en l'avaluació dels projectes considerats. No obstant això, fóra bo poder incrementar, en el futur immediat, el finançament per a projectes de recerca experimentals.

Les relacions internacionals han seguit essent intenses; diversos físics de les universitats catalanes han liderat projectes europeus de col·laboració internacional àmplia, alguns dels quals incorporen empreses, en àrees com ara el magnetisme, la superconductivitat, l'electrònica i la nanotecnologia, així com l'astrofísica des de l'espai.

En definitiva, la valoració dels diversos aspectes relacionats amb la recerca en física en aquest període és força positiva, cosa que ha d'ésser un estímul per a seguir en una línia de consolidació de la bona feina feta, sense perdre de vista, però, que encara queda molt a fer. Efectivament, malgrat el creixement i l'augment de la qualitat de la recerca, es continua observant una excessiva dependència dels resultats respecte del voluntarisme dels investigadors; caldria no cedir en l'esforç de consolidar la infraestructura i el marc científic per tal de no malmetre el capital humà i científic aconseguit fins ara.

1. INTRODUCCIÓ

En aquest report sobre la recerca en física, continuació del publicat per l'Institut d'Estudis Catalans (IEC) el 1997, estudiem l'evolució d'aquesta ciència a Catalunya en els anys 1996-2002, amb dós inclosos. Considerem els recursos humans (investigadors i grups de recerca), les activitats de recerca i els seus resultats (línies de treball, publicacions, impacte, patents) i els recursos econòmics dedicats a aquestes tasques. Seguim la mateixa estructura que en el report de 1997, que comprenia el període 1990-1995, per tal de facilitar la comparació de les dades corresponents, a fi d'avaluar el progrés assolit en aquest interval. Els resultats manifesten un progrés molt considerable en la majoria dels aspectes considerats.

2. RECURSOS HUMANS: INVESTIGADORS I GRUPS

2.1. Definició del camp

En aquest apartat expliquem els criteris metodològics seguits en aquest treball, anàlegs als que vàrem emprar en el report anterior, però amb petites modificacions que comentarem quan per-toqui. El problema essencial rau a delimitar amb prou claredat els temes i investigadors que incloem en el report, cosa que resulta difícil pel caràcter marcadament interdisciplinari d'algunes branques de la física, que se superposen a la química, l'enginyeria, la biologia o la geologia, per exemple, i pel fet que diversos investigadors de física formen part de departaments universitaris relacionats amb altres àrees del saber, com les ja esmentades de geologia i enginyeria o com la biologia molecular i la fisiologia. Hem preferit, però, acceptar un cop més el repte d'aquesta complexitat —que ha dificultat considerablement el nostre estudi— més que no pas cenyir-nos a una especificació estrictament administrativa del camp, més operativa i còmoda a l'hora de fer estimacions econòmiques o de personal, però que, al nostre entendre, amaga la riquesa i diversitat d'interessos que dóna tant d'atractiu a la física.

Pel que fa a la docència, la llicenciatura en física es desenvolupa a Catalunya a les universitats de Barcelona (UB) i Autònoma de Barcelona (UAB), però altres universitats, com la Poli-

tècnica de Catalunya (UPC) i la de Girona (UdG), tenen també departaments de física i participen en l'ensenyament d'altres titulacions i en l'oferta de tercers cicles en física. D'altres universitats, com la Rovira i Virgili (URV) o la Ramon Llull (URL), no tenen departaments de física, però inclouen físics en altres departaments —química i enginyeria— o en centres com l'Observatori de l'Ebre. Diversos centres del Consell Superior d'Investigacions Científiques (CSIC) a Catalunya apleguen també un nombre considerable d'investigadors en física, tot i que dintre d'un context fortament interdisciplinari. A continuació, detallarem els grups que hem inclòs en aquest estudi, selecció en què hem tingut en compte que un altre report de la recerca està dedicat a tecnologies de la informació i les comunicacions, motiu pel qual no hem incorporat molts dels físics que treballen en els aspectes més aplicats d'aquestes àrees o en altres tan diverses com la intel·ligència artificial, la visió per computador o el tractament d'imatges en medicina. En definitiva, la demarcació ha obeït en bona part a criteris de publicació d'articles en revistes relacionades amb física.

Per tal d'especificar més inequívocament els grups inclosos —a fi que el report pugui ésser contrastat independentment per altres investigadors que s'ho proposin— donem a continuació una llista de centres (en l'annex detallam la llista de grups i de nombre d'investigadors). De la UB hem inclòs tots els grups dels cinc departaments que formen la Facultat de Física (Física Fonamental, Astronomia i Meteorologia, Estructura i Constituents de la Matèria, Física Aplicada i Òptica, i Electrònica) a més dels grups de Biofísica i Bioenginyeria de la Facultat de Medicina (que formen part dels departaments de Ciències Fisiològiques I i II) i del Grup de Geofísica de la Facultat de Geologia (emmarcat en el Departament de Geodinàmica i Geofísica). A la UAB, considerem el Departament de Física, l'Institut de Física d'Altes Energies (IFAE), el Laboratori de Llum de Síncrotró, el Grup de Biofísica del Departament de Bioquímica i Biologia Molecular, de la Facultat de Medicina, i alguns membres del Departament d'Enginyeria Electrònica, a l'Escola Tècnica d'Enginyeria Superior (ETSE). A la UPC, considerem els departaments de Física i Enginyeria Nuclear, Física Aplicada, i Òptica i Optometria (en el darrer, només hem considerat els físics, però no els biòlegs, el treball dels quals correspon a as-

pectes més pròpiament optomètrics) i alguns investigadors en fotònica del Departament de Teoria del Senyal i, en física de radiacions, investigadors de l'Institut de Tècniques Energètiques (INTE). A la UdG, hem inclòs els membres del Departament de Física, que formen part de la Facultat de Ciències i de l'Escola Politècnica. A la URL, la física es troba concentrada en l'Observatori de l'Ebre. A la URV, hem inclòs alguns membres dels grups de Física i Cristal·lografia de Materials, i d'Experimentació, Computació i Modelització en Mecànica de Fluids, de la Facultat de Química (els que treballen en temes més propers a la física). Pel que fa al CSIC, hem considerat l'Institut de Ciències del Mar (Grup d'Oceanografia Física), l'Institut de Ciències de la Terra Jaume Almera (grups de Propietats Òptiques dels Sòlids, i de Dinàmica de la Litosfera del Departament de Geofísica i Tectònica), l'Institut de Ciències de l'Espai i l'Institut de Ciència de Materials de Barcelona (ICMAB) (grups de Materials Magnètics, de Materials Superconductors, de Propietats Òptiques, d'Estructura Electrònica, de Creixement Cristal·lí i el Laboratori de Cristal·lografia i Difracció de Raigs X). No hem inclòs, en canvi, el Centre Nacional de Microelectrònica, ja que la seva contribució és analitzada en el Report de Tecnologies de la informació i les comunicacions ja esmentat.

2.2. Formació: llicenciatura i doctorat

Primerament, estudiem l'evolució del nombre d'estudiants de física, que experimenta fluctuacions molt considerables, les quals de vegades resulten difícils d'interpretar. De fet, la preocupació per la manca de vocacions envers els estudis de física no és exclusiva del nostre país: es presenta a tota la Unió Europea (UE) i als Estats Units, tal com ho constaten revistes especialitzades com *Physics Today* o *Physics World* i l'opinió de la majoria d'investigadors. En efecte, durant els darrers anys els estudis en física han experimentat la competència de les titulacions d'enginyeria de telecomunicacions, enginyeria electrònica, enginyeria informàtica i enginyeria de materials, que, d'antuvi, presenten unes possibilitats laborals més immediates i unes expectatives

econòmiques més reditícies que la física, tot i que en la pràctica calgui matisar molt aquesta afirmació. Tot i això, una anàlisi detallada de l'evolució dels estudis manifesta fluctuacions considerables però no pas una tendència nítida a la baixa. En la taula 1 indiquem el nombre d'estudiants que han acabat la llicenciatura en física en el període considerat.

S'observa un descens molt acusat el curs 1997-1998 i un de no tan radical el 2000-2001, i una represa posterior. De fet, durant els darrers anys de la dècada dels noranta els diaris de Barcelona dedicaren molta atenció a la manca d'especialistes en informàtica i en telecomunicacions a Catalunya, i a la necessitat de contractar especialistes forasters per tal de poder cobrir les necessitats de les empreses. És molt probable que aquesta insistència, que de vegades ocupà titulars en la premsa, tingués efectes considerables sobre els estudiants vacil·lants en la seva elecció de física. Paral·lelament als comentaris de la premsa, s'amplià l'oferta docent en les matèries esmentades, cosa que féu minvar molt el nombre d'estudiants de física. Cal dir que, anteriorment, un nombre d'estudiants de física ho eren en segona o tercera opció, ja que la nota de tall els impedia entrar en enginyeries, possibilitat que ara tenen després que la nota de tall en aquests estudis hagi baixat com a conseqüència de l'ampliació de l'oferta de places. Es constata, però, una recuperació a partir del curs 2000-2001. Un estudi ampliat al període 1990-2003 indica, però, que fluctuacions d'aquesta mena ja es podien observar anteriorment, ja que els estudiants que acaben la llicenciatura entre els anys 1990 i 1996 són, segons el report anterior, 244, 151, 174, 178, 188, 172 i 239. Dintre d'aquest context, el que sembla una anomalia és el pic acusat d'estudiants el curs 1996-1997, més que no pas el descens posterior. Veiem que el nombre recent de llicenciats, 182 l'any 2002, encara està molt per sota dels 239 llicenciats de 1995, però que supera el nombre de llicenciats d'altres cursos del període 1990-1995. Hi ha hagut interès, per part de l'Administració, a fomentar la millora de la docència a la universitat per tal de reduir el nivell de fracàs, molt elevat actualment, mitjançant un programa de grups d'innovació docent, de la Direcció General d'Universitats, i altres iniciatives dels diversos departaments de física.

TAULA 1
Nombre d'estudiants que han acabat la llicenciatura en física

Universitat	1996-1997	1997-1998	1998-1999	1999-2000	2000-2001	2001-2002
UB	312	151	150	138	109	134
UAB	62	51	42	73	48	49
<i>Total</i>	374	202	192	211	157	183

TAULA 2
Tesis doctorals en física llegides

Universitat	1996-1997	1997-1998	1998-1999	1999-2000	2000-2001	2001-2002
UB	29	16	20	22	22	37
UAB	12	14	18	9	13	8
UPC	9	12	17	17	15	20
URV	3	0	0	1	2	2
UdG	0	0	2	2	1	1
<i>Total</i>	53	42	57	51	53	68

Pel que fa al tercer cicle, recordem que hi ha programes de doctorat tant a la UB i la UAB, amb llicenciatures en física, com a la UPC i a la UdG. A la UPC, els departaments de Física Aplicada i de Física i Enginyeria Nuclear imparteixen conjuntament un programa de doctorat en Física Aplicada i Simulació en Ciències, i hi ha un programa de doctorat en enginyeria òptica, amb convenis de col·laboració amb empreses del sector per a la formació avançada del seu personal. A la UAB, un programa conjunt aplega les assignatures dels diversos grups i existeix, també, un programa de ciència de materials i un d'història de les ciències, vinculats parcialment al Departament de Física. En la taula 2 indiquem el nombre de tesis doctorals llegides durant aquest període.

Observem, al començament, una minva en el nombre de tesis llegides, relacionada amb dues causes: la saturació que s'observa en les universitats, i que descoratja molts estudiants a seguir aquesta via, i una agilitació del mercat laboral, que ha fet que trobar feina resultés relativament fàcil per als llicenciats en física, tot i que sembla apuntar-se una represa important al darrer any. Un cert nombre d'estudiants fan un màster de tercer cicle, però no una tesi doctoral, de manera que el nombre d'estudiants de tercer cicle és superior al que podrien suggerir les xifres de lectures de tesis.

Els programes de doctorat en física d'algunes universitats catalanes (considerats programes de qualitat pel Ministeri i la Generalitat de Catalunya, i receptors, com pertoca, de diversos ajuts per a la seva potenciació) atreuen estudiants de fora de Catalunya, tant d'Espanya com d'altres llocs —el Marroc, Amèrica del Sud, Romania, i d'alguns països de la UE. Convindria augmentar l'ambició dels programes i professionalitzar-los, formalitzant per exemple la participació d'experts externs de la universitat (investigadors del CSIC, professionals destacats, etc.) i convertir-ne alguns en referència internacional en alguna especialitat. Per exemple, la posada en funcionament del sincro-

tró i les possibilitats que obrirà per a la recerca, o els instituts de recerca existents (apartat 2.4), haurien d'ésser aprofitats al màxim en aquesta direcció. En aquest sentit, cal esmentar la posada en marxa de la International Graduate School of Catalonia el 2002, amb l'objectiu d'afavorir la internacionalització dels estudis de doctorat.

Pel que fa a les beques per a la realització del doctorat, recordem que per al Govern central, segons l'estructuració ministerial dels anys 1996-2004, les beques per a doctorands depenen de dos ministeris —el d'Educació i Cultura i el de Ciència i Tecnologia—; pel que fa a la Generalitat de Catalunya, depenen de les direccions generals de Recerca i d'Universitats; i també les universitats i el CSIC tenen programes propis de beques. Adicionalment, un nombre considerable d'estudiants de tesi doctoral obtenen beques associades a projectes de recerca de la UE o a contractes amb empreses. La gestió de beques continua essent encara un tema de discussió política entre l'Estat i la Generalitat de Catalunya. Les beques del Ministeri d'Educació i Cultura corresponen al Programa Nacional de Formació de Professorat i Perfeccionament de Personal Investigador a Espanya i l'Estranger, i les del Ministeri de Ciència i Tecnologia, al Programa Nacional de Formació de Personal Investigador i beques associades als projectes de recerca del Pla Nacional de Recerca Científica i Desenvolupament Tecnològic.

2.3. Recerca: distribució de grups i investigadors per centres

Hem comptat el nombre d'investigadors que formen part dels diversos grups, a partir de les pàgines web dels diversos departaments. Els hem dividit en doctors i doctorands, desglossament merament indicatiu, ja que potser algun dels doctorands ha llegit la tesi darrerament, o alguns investigadors doctors han mar-

TAULA 3
Nombre d'investigadors (doctors i doctorands) per centres

Investigadors	UB	UAB	UPC	UdG	URL	URV	CSIC	Total
Doctors	232	106	90	14	7	10	56	515 [385]
Doctorands	174	60	73	13	5	6	44	375 [213]
Total	406	166	163	27	12	16	92	890 [594]

xat a d'altres països per a alguna estada postdoctoral. Els resultats, per centres, són presentats a la taula 3.

A la UAB hem inclòs els membres d'IFAE i del Laboratori de Llum de Sincrotró. Entre claudàtors, hem indicat el nombre de doctors i de doctorands que vam censar en el report anterior (1990-1995). Podem constatar l'importantíssim increment del nombre d'investigadors, malgrat que en el report anterior temíem trobar-nos ja davant d'una perspectiva de saturació. La magnitud de l'increment, doncs, resulta sorprenent. Alguns factors que ho expliquen són el dinamisme en la creació de nous instituts de recerca relacionats amb la física (que comentarem en l'apartat 2.4), els diversos programes de reincorporació de doctors, com ara el Programa REIN del Ministeri de Ciència i Tecnologia, o el Programa de Recuperació de Doctors i Tecnòlegs de la Direcció General de Recerca, les noves iniciatives de contractació de personal investigador no vinculat a docència (el Programa Ramón y Cajal del Ministeri de Ciència i Tecnologia i el programa de contractes de la ICREA, impulsat pel Departament d'Universitats, Recerca i Societat de la Informació [DURSI]), i les beques i projectes europeus, que permeten tenir un nombre més elevat de joves postdoctorals i de professors visitants (una cinquantena, aproximadament).

En l'apartat de doctors hem inclòs professors ordinaris (catedràtics i titulars), professors contractats (ajudants, associats), becaris postdoctorals dels programes de reinserció del Ministeri i Ramón y Cajal, visitants postdoctorals, i contractats en el programes ICREA i Ramón y Cajal. Per tal de tenir una idea de l'estabilitat d'aquest conjunt d'investigadors, hem esbrinat el nombre de professors numeraris, que resulta ésser de 75 catedràtics (45 de la UB, 19 de la UAB + IFAE, 9 de la UPC, 1 de la UdG, 1 de la URV), 172 titulars (101 de la UB, 20 de la UAB + IFAE, 43 de la UPC, 8 de la UdG), 6 catedràtics d'escola universitària (6 de la UPC), 61 titulars d'escola universitària (57 de la UPC, 4 de la UdG) i 26 investigadors del CSIC (4 professors d'investigació, 8 investigadors científics, 14 científics titulars), amb un total, doncs, d'uns 350 funcionaris. Hi ha hagut a les universitats una tendència a transformar titularitats en càtedres, per tal de reconèixer la tasca de nombrosos professors que tenien

una llarga carrera docent i de recerca, que fa que la proporció càtedres/titularitats sigui relativament elevada.

Respecte dels programes ICREA i Ramón y Cajal, dues iniciatives que han resultat ésser força fructíferes, tot i que el segon es troba amb problemes d'indefinició del futur dels contractats, cal remarcar que ICREA ha signat quinze contractes d'investigadors en el camp de la física (4 amb la UB, 3 amb la UAB, 2 amb la UPC, 2 amb l'Institut d'Estudis Espacials de Catalunya [IEEC], 2 amb l'ICMAB i 2 amb la Universitat Pompeu Fabra [UPF]) i el Programa Ramón y Cajal ha signat 31 contractes relacionats amb física (15 UB, 4 UAB + IFAE, 4 UPC, 7 ICMAB, 1 URV).

També resulta il·lustrativa la llista de grups de recerca consolidats de la Direcció General de Recerca, que aplega vint-i-nou grups relacionats amb la física, amb un total d'uns sis-cents trenta investigadors (uns tres-cents vint doctors i uns tres-cents deu doctorands). La gran majoria d'aquests grups tenen un investigador estranger doctor, que contribueix a l'increment en el nombre d'investigadors que hem comentat anteriorment. Per centres, els grups consolidats són dotze a la UB, set a la UAB, sis a la UPC i quatre a l'ICMAB-CSIC; per àrees de coneixement, n'hi ha un d'astronomia i astrofísica, onze de física aplicada, dos de física atòmica, molecular i nuclear, onze de la matèria condensada, un de física de la Terra, quatre de física teòrica i tres d'òptica. En l'anex indiquem les seves denominacions i altres grups de recerca que no formen part encara de la llista de grups consolidats. Naturalment, dintre d'aquests grups hi ha diversos grups de treball, que poden ésser detectats segons l'agrupació d'autors en els articles. A més, hi ha altres grups de recerca que no formen part de la llista de grups consolidats, perquè no arriben a la grandària mínima i estan aplegats amb altres grups d'altres àrees de coneixement o que no figuren en la llista de grups relacionats amb la física (com ara els grups de biofísica, geofísica o oceanografia).

2.4. Instituts de recerca

En el report anterior vam indicar la fundació, el 1991, de l'IFAE, iniciativa que agrupa investigadors en partícules elementals i al-

tes energies de la UB, la UAB i la UPC i que en potencia, en principi, les interrelacions i la presència internacional. Durant el període considerat hem de deixar constància, positivament, de la creació d'altres instituts i centres de recerca, iniciatives que no sols impulsen la col·laboració entre grups, sinó que també tenen un impacte econòmic molt considerable pel que fa a equipaments, infraestructures i contractació de personal.

El 1996 fou fundat l'IEEC, per iniciativa conjunta de la Fundació Catalana per a la Recerca, la UB, el CSIC, la UAB i la UPC, amb la incorporació posterior, el 2001, de la Comissió Interdepartamental de Recerca i Innovació Tecnològica (CIRIT). L'IEEC aplega investigadors de la UB (Departament d'Astronomia i Meteorologia, Departament de Matemàtica Aplicada), la UAB (Departament de Matemàtica), la UPC (departaments de Física i Enginyeria Nuclear i de Física Aplicada) i CSIC (Institut de Ciències de l'Espai) i alguns investigadors contractats directament per l'IEEC (dos dels quals, d'ICREA). Les seves línies d'estudi són la terra (atmosfera, oceà, litosfera) i el cosmos (física solar, planetologia i medis interplanetaris, física estel·lar i galàctica i cosmologia), i participa en missions espacials de l'European Space Agency (ESA). En aquesta mateixa especialitat, la UB ha creat el Centre Especial de Recerca en Astrofísica, Física de Partícules i Cosmologia, que engloba diferents professors i investigadors dels departaments d'Astronomia i Meteorologia, d'Estructura i Constituents de la Matèria i de Física Fonamental. Aquest centre és una unitat associada del CSIC a través de l'Institut de Ciències de l'Espai del CSIC.

Un altre centre constituït durant aquest període (cap a l'any 2002) és el Centre Especial de Recerca en Bioelectrònica i Nanobiociència, que aplega diversos grups de recerca de la UB (Electrònica, Biofísica i Bioenginyeria) i de l'Institut d'Investigacions Biomèdiques August Pi i Sunyer. El seu objectiu és promoure la recerca interdisciplinària entre física/enginyeria i biologia/medicina, tot integrant aspectes bàsics i aplicacions clíniques i industrials. Juntament amb el Centre de Referència en Enginyeria Biomèdica (CREB) de la UPC, han impulsat la creació del Centre de Referència en Bioenginyeria de Catalunya (CREBEC) aprovat l'any 2003, que aplega bioelectrònica, biofísica, microbiologia i nanotecnologia.

Podríem afegir encara el Centre Universitari de la Visió, constituït pel Departament d'Òptica i Optometria de la UPC, més abocat a aspectes mèdics que no pas pròpiament físics, i, més especialment, la recent fundació de l'Institut de Ciències Fotòniques (ICFO), el 2003, a la UPC, del qual no donarem més detalls perquè cau fora del període estudiat en aquest report, però que contribuirà al desenvolupament d'aquesta àrea tan important. També el 2003 es va crear el Centre de Referència en Materials Avançats per a l'Energia (CERMAE), de la Generalitat de Cata-

lunya, integrat per grups de la UB, la UPC, la UAB i l'ICMAB, i dedicat a superconductivitat, cèl·lules fotovoltaïques, piles de combustible, tecnologia d'hidrogen i nanotecnologia.

Una rellevància excepcional, pel que fa a les expectatives que genera, és l'aprovació, a començaments de 2002, del projecte d'una gran instal·lació de llum de sincrotró a Catalunya, per part del Govern espanyol i el Govern de la Generalitat de Catalunya, que hi havien de contribuir a parts iguals. Després de més de dotze anys de gestions de la comissió promotora, s'aprovà aquest projecte, que constituirà la infraestructura científica més gran instal·lada mai a Catalunya (un anell accelerador d'uns dos-cents cinquanta metres de longitud, amb un consum de vuit megawatts). El sincrotró, que havia de suposar una inversió multimilionària (uns cent vint milions d'euros per a la construcció, més el manteniment anual), serà instal·lat al Vallès, a prop del campus de la UAB, amb vocació internacional, ja que està pensat per servir els grups científics de l'Europa del sud. És previsible que aquesta instal·lació sigui un revulsiu per a la recerca en microelectrònica i nanoelectrònica, en estructura de macromolècules —sobretot proteïnes— i en ciència de materials, i que impulsi una activitat industrial capdavantera en àrees com l'electrònica i la farmacèutica.

En canvi, queda per a la història, però en volem deixar constància, l'intent meritori però finalment no reeixit, d'aconseguir per a Vandellòs la instal·lació del futur reactor nuclear de fusió ITER, un projecte mundial de gran abast, la consecució del qual hauria suposat un impuls enorme per a la física a Catalunya i a Espanya. La preparació de la proposta es dugué a terme discretament, al llarg de 2002, i sortí a la llum pública l'any 2003, en què ocupà una gran atenció mediàtica. Finalment, l'octubre de 2003 els ministres de la UE es decantaren per la candidatura francesa de Cadarache, que encara ha de competir amb candidatures del Canadà i del Japó fins a la decisió definitiva sobre la ubicació d'aquesta gran instal·lació.

2.5. Recerca: distribució d'investigadors i grups per àrees de recerca

Per tal de tenir una visió més detallada de la recerca cal examinar la distribució d'investigadors per especialitats. Ho farem en dues taules, una seguint les àrees de la UNESCO i una segona tenint en consideració les àrees més utilitzades per les societats de física. Les diferències entre ambdues taules són petites, i les comentarem tot seguit.

A la taula 4 observem un predomini notable d'investigadors en estats sòlids (molt d'ells en ciències de materials), seguits per òptica i física teòrica. Per ara, el sincrotró està en etapa de

TAULA 4
 Nombre d'investigadors per àrees de recerca segons la classificació UNESCO

Àrees	Investigadors	Institucions
Astronomia		
21 Astronomia i astrofísica	68	CSIC (10), UB (37), UPC (11), IEEC (7), URL (3)
22 Física		
2203 Electrònica	106	UB (86), UAB (20)
2204 Fluids	23	URV (8), UB (3), UPC (12)
2205 Mecànica	76	UB (53), UPC (23)
2207 Física nuclear	38	UB (13), UAB (13), UPC (12)
2209 Òptica	94	UB (21), UAB (26), UPC (47)
2211 Estat sòlid	208	CSIC (67), UB (68), UAB (36), UPC (15), URV (8), UdG (10)
2212 Física teòrica	76	UB (22), UAB-IFAE (54)
2213 Termodinàmica	53	UB (20), UAB (14), UPC (19)
2406 Biofísica	37	UAB (15), UB (22)
25 Ciències terra i espai		
2501 Atmosfera	36	URL (2), UB (28), UdG (6)
2507 Geofísica	36	UB (16), URL (7), CSIC (7), UPC (6)
2510 Oceanografia	25	CSIC (17), UAB (2), UdG (6)
Laboratori de Síncrotró	14	UAB (14)
<i>Total investigadors</i>	890	

construcció, motiu pel qual hem agrupat els seus investigadors en un sol grup. En realitat, podríem atribuir-los a electromagnetisme, a cristal·lografia, a enginyeria, i a d'altres especialitats, però en aquest moment creiem més adient reunir-los en un sol epígraf. Quan indiquem el nombre d'investigadors de l'IEEC només ens referim a aquells que pertanyen directament a aquesta institució, però no als que pertanyen al CSIC o a les universitats.

La distribució UNESCO presenta alguns problemes, especialment pel que fa a l'assignació de la mecànica estadística, de la física no lineal, i de la relativitat, que hem inclòs en la secció de «mecànica», mentre que l'àrea de la nucleònica es troba desfasada. En l'àrea d'estat sòlid incorporem els investigadors en ciència de materials. Una altra dificultat d'assignació és la dels investigadors de termodinàmica, alguns dels quals podrien ésser considerats com a investigadors en materials. Com que en materials el nombre d'investigadors és ja molt elevat, hem tendit a donar prioritat, en cas de dubte, a l'àrea de termodinàmica, tal com vam fer en el report anterior. Resulta més actual fer servir una distribució diferent que la proposada per la UNESCO, del sistema de classificació de dades físiques i astronòmiques PACS (*Physics and Astronomy Classification*

System), que no resol totes les ambigüitats esmentades però que és més utilitzada en la física d'avui, i que és presentada en la taula 5.

Les diferències entre les dues taules són mínimes. Consisteixen, essencialment, a desglossar els investigadors de la secció de mecànica de la primera en la secció de gravitació i cosmologia, i en la de física estadística (i no lineal), i a sumar aquests darrers en la secció física estadística i termodinàmica, i a anomenar *partícules* i *camps* allò que abans havia rebut el nom de *física teòrica*. Segueix essent evident la majoria d'investigadors en ciències de materials. Altes energies, una especialitat amb gran tradició a Barcelona, ha estat lleugerament depassada per física estadística i termodinàmica i per òptica, àrees que ja en el report anterior manifestaven una elevada taxa de creixement. Una atribució diferent dels especialistes en cosmologia i gravitació hauria pogut ésser incloure'ls en l'apartat d'astronomia i astrofísica; per això, hem preferit indicar explícitament el nombre d'investigadors en lloc de donar-lo directament agregat dins de l'apartat d'altres energies. Les altres especialitats estan per sota, tot i que si haguéssim incorporat plenament l'enginyeria electrònica, la presència de l'àrea d'electrònica hauria estat molt superior.

TAULA 5
Nombre d'investigadors per àrees temàtiques segons la classificació PACS

Àrees	Investigadors	Institucions
Matèria condensada (materials)	208	CSIC (67), UB (68), UAB (36), UPC (15), URV (8), UdG (10)
Altes energies	91	
Partícules i camps	(76)	UB (22), UAB-IFAE (54)
Gravitació i cosmologia	(15)	UB (15)
Física estadística i termodinàmica	114	UB (58), UAB (14), UPC (42)
Òptica	94	UB (21), UAB (26), UPC (47)
Física nuclear	38	UB (13), UAB (13), UPC (12)
Astronomia i astrofísica	68	CSIC (10), UB (37), UPC (11), IEEC (7), URL (3)
Fluids	23	URV (8), UB (3), UPC (12)
Electrònica	10	UB (86), UAB (20)
Biofísica	37	UAB (15), UB (22)
Oceanografia	25	CSIC (17), UAB (2), UdG (6)
Atmosfera	36	URL (2), UB (28), UdG (6)
Terra	36	UB (16), URL (7), CSIC (7), UPC (6)
Laboratori de Sincrotró	14	UAB (14)
<i>Total investigadors</i>	890	

3. TEMES DE RECERCA

Abans de comentar les línies de recerca en física a Catalunya, presentem una panoràmica dels progressos més remarcables durant el període 1996-2002, que ajuden a emmarcar les recerques en el nostre país i que permeten constatar el grau de dinamisme i d'adaptació dels nostres grups d'investigadors a les noves tendències i temes de recerca.

3.1. Repàs dels progressos de física en el món

El Physics Survey Overview Committee de l'American Physical Society, en un estudi sobre les perspectives de la física en el canvi de segle, apuntà l'any 2000 sis temes prioritaris en les perspectives d'aquesta ciència fins al 2010: desenvolupament de tecnologies quàntiques, creació de nous materials, comprensió de sistemes complexos, exploració de l'Univers, unificació de les forces, i aplicació de la física a la biologia. Efectivament, aquestes grans línies han marcat poderosament el desenvolupament de la física en el període estudiat en aquest report. Adop-

tarem la perspectiva d'aquestes sis grans àrees com a base de la panoràmica sobre la física del període 1996-2002 que donem tot seguit.

Pel que fa a la física quàntica, destaquen d'una banda l'interès per temes molt fonamentals referents a la comprensió bàsica de l'entrellaçament de funcions d'ona de sistemes en interacció o del col·lapse de la funció d'ona i la seva aplicació a qüestions de tractament de la informació, encriptació i teleportació, i el desenvolupament de teories quàntiques topològiques, en més dimensions, amb l'objectiu d'unificar les interaccions, tema de què parlarem en un paràgraf posterior. Pel que fa a l'exploració d'idees quàntiques en situacions límit de la matèria, destaca l'estudi de la condensació de Bose-Einstein, aconseguida aquesta darrera per primera vegada a mitjan 1995, i que des de llavors ha estat un camp d'activitat intensíssima. Finalment, cal al·ludir a sistemes de baixa dimensionalitat, com punts quàntics, nanotúbuls o sistemes bidimensionals amb aplicacions creixents a la nanoelectrònica.

L'exploració de l'Univers ha estat marcada per una àmplia collita de resultats del telescopi espacial Hubble, entre els quals destaca l'observació d'alguns sistemes planetaris en formació en estrelles relativament properes i l'observació de galàxies ex-

tremadament distants en procés de formació, i l'exploració detallada de les fluctuacions del fons de microones amb el satèl·lit WMAP, el 2002, que enriqueixen considerablement les primeres observacions efectuades pel satèl·lit COBE l'any 1992. L'observació de l'Univers s'ha eixamplat a nous dominis de longituds d'ona, com per exemple els raigs X i els raigs gamma, per a l'estudi dels darrers dels quals ha estat inaugurat, el 2003, l'observatori MAGIC a les Illes Canàries. Per la sorpresa i la importància de la novetat que suposa, destaca el descobriment, el 1998, de l'expansió accelerada de l'univers, a partir de l'observació de supernoves llunyanes, i que ha introduït en la cosmologia actual l'energia fosca com a nou ingredient que cal tenir en compte, al costat de la radiació, la matèria normal i la matèria fosca.

Les teories cosmològiques han tingut, a més, altres novetats. La que ha rebut més atenció ha estat la dels universos membra, basada en la idea que algunes de les dimensions addicionals de l'espai proposades per les teories de supercordes podrien tenir una extensió finita, no negligible, de manera que l'Univers seria com una membrana tridimensional en un espai de més dimensions finites. Aquesta idea ha constituït un lligam entre les teories de supercordes i la cosmologia. En un marc més clàssic, la de la relativitat general einsteiniana, segueix l'interès per la detecció de les ones gravitatòries, camp en què hi ha diversos projectes en curs, molt ambiciosos i de gran escala.

En l'àrea de les partícules elementals i les altes energies, destaca l'observació de les oscil·lacions de neutrins atmosfèrics, és a dir, del pas de neutrins electrònics a neutrins muònics i tauònics. Aquest fenomen, predit des de fa temps si els neutrins tinguessin massa diferent de zero, permet fer estimacions de les masses dels neutrins i explicar per què el flux de neutrins electrònics procedents del sol és la tercera part d'allò predit per les teories que en suposen massa nul·la i absència d'oscil·lacions. Pel que fa a les grans instal·lacions, destaca el final del Large Electron Positron Collider (LEP) del Centre Europeu per a la Recerca Nuclear (CERN), tancat el 2000, per a iniciar la construcció de les instal·lacions del Large Hadron Collider (LHC), que hauria d'entrar en funcionament el 2008. Mentrestant, hi ha hagut un elevat interès per la física dels neutrins, ja esmentada, una bona part de la qual s'ha desenvolupat en les grans instal·lacions de Kamiokande, al Japó. Entre altres estudis, destaquen els experiments sobre violació de la simetria CP en partícules amb quarks pesants, on és més visible que en els kaons. En la recerca de la unificació de les interaccions, hi ha hagut progressos teòrics amb el desenvolupament de la teoria M, que ha permès relacionar les diferents teories de supercordes, i posar-ne de manifest les coincidències profundes.

L'optoelectrònica i la fotònica han estat protagonistes en el camp de l'òptica. Entre d'altres progressos, podem esmentar els

fort avenç dels làsers de semiconductor, en particular dels que emeten «verticalment» (VCSEL) en lloc d'emetre lateralment, i permeten fer matrius on cada píxel és un làser, i dels que emeten llum blava, els quals poden tenir grans repercussions tecnològiques, ja que permeten més miniaturització i més densitat d'emmagatzematge d'informació que no pas els làsers de llum vermella disponibles fins fa pocs anys. S'han seguit desenvolupant fibres òptiques dopades convenientment per a amplificar el senyal que transporten. D'altra banda, ja s'estan començant a implementar experimentalment els cristalls fotònics, camp en el qual hi ha hagut ja un important progrés teòric. També convé destacar el ràpid progrés de la biofotònica en els darrers anys.

En l'estudi de la matèria, destaquen els progressos en magnetisme i superconductors i l'interès per la nanotecnologia. Pel que fa als superconductors es va progressant en la fabricació de cintes de superconductors de temperatura crítica elevada, que permet el pas de corrents elevats amb resistència nul·la, i encara resten problemes bàsics en la comprensió de la superconductivitat d'alta temperatura crítica. En la nanotecnologia, impulsada per la conveniència de miniaturitzar al màxim els ordinadors i altres aparells, començà la cursa la nanoelectrònica, però actualment reben un gran interès tota mena de sistemes d'escala nanomètriques, com ara els cristalls fotònics abans esmentats (a cavall entre les microtecnologies i les nanotecnologies), els nanotúbuls o petits agregats de partícules, o qualsevol tipus de nanodispositiu, nanosensors que facin ús de fenòmens de nanoescala, i la utilització de materials nanoestructurats per resoldre els reptes energètics. La comprensió dels canvis d'estat, de les propietats de transport i d'altres característiques d'aquests darrers sistemes, suposen reptes molt considerables, tant des del punt de vista experimental com del teòric, atès que les descripcions termodinàmiques usuals ja no són vàlides puix que els recorreguts lliures són comparables a la grandària dels sistemes. A aquestes escales de grandària, inferiors a les de les cèl·lules biològiques, s'obre una nova interfície d'interacció entre sistemes artificials i sistemes biològics, com per exemple entre dispositius nanoelectrònics i cèl·lules nervioses.

L'anomenada *física de sistemes complexos* ha donat un impuls a temes com l'anàlisi de motors moleculars, la potència dels quals és comparable o inferior a la del soroll tèrmic de l'entorn, a l'estudi de les lleis d'escala topològiques i dinàmiques de xarxes físiques, ecològiques i socials, a l'aplicació de lleis físiques estadístiques a l'anàlisi de sistemes econòmics o de trànsit de cotxes en carreteres i ciutats, a l'anàlisi de sistemes granulars en física estadística. Els sistemes biològics, sistemes complexos per excel·lència, estan motivant un nombre creixent d'estudis: una frontera en desenvolupament molt ràpid és l'estudi de les propietats elàstiques i electrostàtiques de macromolècules bio-

lògiques —DNA, proteïnes— i el plegament i l'estructura de proteïnes, l'estudi de sistemes com ara xarxes neuronals i el sistema immunitari.

Les ciències del planeta han tingut com a tema principal l'estudi del forat d'ozó, l'efecte hivernacle i el seu paper en el canvi climàtic. Han tingut una gran incidència en política, especialment des dels acords de Kyoto de 1997, que demanaven que les emissions de gasos d'efecte hivernacle, el 2010, fossin reduïdes en un 10 % respecte de les de 1990. L'Administració dels Estats Units (EUA), a partir de 2001, decidí no seguir les restriccions de Kyoto, sinó impulsar unilateralment les seves indústries, que es veurien perjudicades per algunes limitacions si s'intentaven seguir les restriccions fixades pel tractat. Aquest tema ha suscitat molt d'interès per part del públic, per les seves implicacions polítiques, econòmiques, socials i ambientals, i està impulsant nous programes d'investigació en el camp de materials, nanotecnologia i altres per desenvolupar nous procediments de producció i emmagatzematge de l'energia.

Pel que fa a la presència de la física en l'economia, destaca la successió de *booms* i fracassos en la borsa de les companyies basades en les noves tecnologies, moltes de les quals estan directament relacionades amb la física o amb la biologia cel·lular. Pel que fa a la distribució dels coneixements, destaca la implantació del format electrònic de les revistes al llarg d'aquest període, de manera que un nombre considerable de revistes ja no són rebudes en format paper a les biblioteques actuals, i l'ús creixent de mitjans electrònics en l'aprenentatge i la docència.

Tindrem ocasió de veure, en la descripció que segueix, que moltes d'aquestes novetats han estat incorporades en poc temps a la recerca que fan els grups de les nostres universitats.

3.2. Línies de recerca en física a Catalunya

A continuació descrivim les línies de recerca en física a Catalunya, per grans àrees temàtiques, en aquest període. La recerca ha anat desenvolupant-se en funció de les descobertes internacionals, de les noves possibilitats instrumentals, de les relacions internacionals amb altres grups, i d'altres factors, que en conjunt posen de manifest el gran dinamisme dels diversos grups.

3.2.1. Física de la matèria condensada.

Física de materials

(UNESCO 2211, PACS 60, 70 i 81)

Seguint el codi PACS, usem la denominació «física de la matèria condensada» per a designar l'estudi de materials, que també pot ésser considerat des d'altres classificacions, com ara física aplicada, física de l'estat sòlid, química de materials, química orgà-

nica, o enginyeria de materials. És un camp amb un elevat nombre d'investigadors i de grups (taules 4 i 5), que es van consolidant i ampliant considerablement. Magnetisme i les seves aplicacions és el tema que capta l'atenció de més investigadors, seguit de superconductivitat i de l'estudi termodinàmic i estadístic de transicions de fase.

A la UB, els grups que treballen en ciència de materials són al Departament de Física Aplicada i Òptica (Grup de Capes Fines i Enginyeria de Superfícies, que treballa en biosensors, energia solar i espintrònica, i Grup de Física i Enginyeria de Materials Amorfs i Nanoestructures), d'Estructura i Constituents de la Matèria i de Física Fonamental (Grup de Materials: transicions de fase i propietats magnètiques i de transport, i Grup de Magnetisme, que treballa en efecte túnel ressonant, partícules i clústers nanoscòpics, i nanotecnologia per a qbits magnètics per a computació quàntica) i d'Electrònica (el Grup d'Enginyeria i Materials Electrònics, que treballa en síntesi de materials nanoestructurats, semiconductors i ceràmics, caracterització de dispositius per tècniques microscòpiques, fabricació de nanosensors i dispositius nanoelectrònics).

A la UPC, al Departament de Física Aplicada s'estudien aliatges amb memòria de forma, dispositius piezoelèctrics, i conducció elèctrica en polímers i circuits caòtics. Al Departament de Física i Enginyeria Nuclear, s'estudien aliatges moleculars, transicions de fase, propietats elèctriques de materials dielèctrics (a Terrassa), i materials i tecnologies d'anàlisi per a la construcció i de medi ambient. Hi ha també un Laboratori de Caracterització de Materials que treballa en cristalls líquids, fases semidesordenades, aliatges moleculars, fuilerè i desenvolupament de programari per a l'estudi de processos en materials. Al mateix Departament, el Grup de Simulació per Ordinador en Matèria Condensada estudia el moviment molecular en fases condensades, així com els líquids quàntics —i el tractarem més extensament en l'apartat de Física Estadística i no Lineal. També a la UPC hi ha un Departament de Ciència de Materials i Enginyeria Metallúrgica, que treballa, entre altres temes, en el desenvolupament de biomaterials, però que no hem inclòs en aquest treball, perquè el considerem més propi del Report d'Enginyeria.

Al Departament de Física de la UAB dos grups es dediquen a la física dels materials: Magnetisme i Materials Magnètics, i Física i Enginyeria de Materials (constituïts per membres dels grups de Física de Materials I i II i d'Electromagnetisme). El primer estudia propietats magnètiques en materials compostos per làmines fines i el segon estudia vidres i materials amorfs en general. El CSIC disposa, al campus de la UAB, de l'ICMAB, que té diversos grups, alguns dels quals es poden relacionar amb la física: el Grup de Superconductivitat treballa en el creixement de cintes superconductores nanoestructurades, el Grup de Mag-

netisme, en nous òxids magnètics i espintrònica; el Laboratori de Cristal·lografia i Difracció de Raigs X treballa en noves metodologies de resolució i refinament d'estructures cristal·lines, cristal·lografia de superfícies, nanotubs de carboni, tecnologia i aplicacions d'espectroscòpia Mossbauer, compostos polimorfes per a indústria farmacèutica; el Grup d'Estructura Electrònica investiga en simulació per ordinador de nanoestructures i propietats electròniques i magnètiques; el Grup de Creixement Cristal·lí prepara capes primes de materials magnètics i conductors iònics, i el Grup de Propietats Òptiques investiga les propietats òptiques de semiconductors, materials orgànics i altres, mitjançant espectroscòpia Raman i eHipsometria, així com en el creixement de punts quàntics.

A la UdG estudien compòsits avançats, nanopartícules ceràmiques i superconductores, caracterització tèrmica de materials, i modelització d'injecció de plàstics, mentre que a la URV alguns investigadors estudien dissolucions polimèriques i el Grup de Física i Cristal·lografia de Materials treballa en l'obtenció i caracterització de materials amb aplicacions en làsers d'estat sòlid, a guies d'ona i a òptica no lineal.

3.2.2. *Altes energies*

Considerem dins d'aquesta secció les recerques en partícules elementals i en gravitació i cosmologia. La proporció d'investigadors en aquestes dues àrees és de 85 % de partícules i 15 % de gravitació, cosa que posa de manifest un augment relatiu del nombre d'investigadors en el primer tema, ja que en el report passat la proporció era de 75 % i 25 % aproximadament. Aquest increment és degut en bona part a l'IFAE i als programes de física de partícules elementals i grans acceleradors. De fet, cal tenir en compte que durant aquest període ha augmentat força l'interès per problemes de computació quàntica, més propers a la fonamentació de la teoria quàntica que no pas a les partícules pròpiament dites. Tot i això, com que els investigadors en aquest tema formen part encara dels grups a què pertanyien inicialment, dedicats a partícules, de moment els incloem en aquest epígraf.

3.2.3. *Partícules i camps*

(UNESCO 2212 i 2208, PACS 10)

Al Departament de Física de la UAB hi ha el Grup de Fenomenologia de Partícules Elementals i el de Partícules i Astropartícules, que formen part del Grup de Física Teòrica, i que investiguen en problemes diversos de partícules elementals, en informació quàntica i en generalitzacions de les desigualtats de Bell, i el de Física Experimental d'Altes Energies, a més d'alguns investigadors contractats directament per l'IFAE. A la UB, al Departament d'Estructura i Constituents de la Matèria hi ha el Grup d'Altes

Energies, que treballa en teories de cordes, models supersimètrics de partícules, teories efectives de QCD i del model estàndard, tests de QCD, entrellaçament de funció d'ona quàntica, i de computació quàntica.

L'IFAE té un grup experimental, que participà en el LEP (experiment ALEPH) que cessà l'any 2002, i en el futur col·lididor del LHC en el CERN, per a descobrir les partícules de Higgs, en particular en el projecte ATLAS, amb la construcció de calorímetres i imants, en col·laboració amb empreses d'enginyeria. També col·labora amb el Japó i amb els EUA, en programes sobre física de neutrins (projectes K2K i CDF). El 2003 s'iniciaren experiments amb el MAGIC, telescopi de disset metres de diàmetre instal·lat a Roque de los Muchachos (La Palma) per a detectar raigs còsmics i astropartícules de gran energia. A la UB, un grup experimental participa en els experiments LHCb (CERN) i BaBAR (SLAC), i a la UPC un grup participa en l'experiment TOF (CERN).

També podrien ésser considerats en aquesta línia alguns projectes de física de col·lisions nuclears d'ions pesants, que incloem, però, en l'apartat de física nuclear.

3.2.4. *Física matemàtica*

Tradicionalment, la física matemàtica ha estat lligada a la física teòrica, que en bona part ha estat dedicada a les altes energies. De mica en mica, l'especialitat de física matemàtica s'ha anat diversificant i obrint a altres tipus de problemes. Actualment, es desenvolupa especialment a l'Institut de Ciències de l'Espai del CSIC, als departaments d'Estructura i Constituents de la Matèria de la UB i de Física i Enginyeria Nuclear i de Física Aplicada de la UPC. Destaquen els estudis sobre la funció zeta de Riemann i altres funcions especials (amb un llibre molt citat sobre el tema) a l'IEEC, transformacions de *gauge*, superfícies aleatòries, teories quàntiques topològiques i simetries d'equacions diferencials (a la UB), i vidres de spin, difusió anòmala, caos, teoria de la informació, simulació de sistemes físics (a la UPC).

3.2.5. *Gravitació i cosmologia*

(UNESCO 2212, PACS 01, 02, 04 i 10)

La recerca en gravitació i relativitat general és minoritària, però està força ben representada en diverses línies capdavanteres com ones gravitatòries i teories de gravitació en universos membrana, i en altres temes més clàssics. Al Departament de Física Fonamental de la UB, el Grup de Gravitació i Cosmologia Relativistes i Sistemes Estocàstics treballa en gravitació en models de branes i en la detecció d'ones gravitatòries, amb participació en el projecte internacional LISA Pathfinder, que es basarà en la distància relativa entre dues naus espacials. Pel que fa a la cosmologia, va atraient un nombre creixent d'investigadors, i cal tenir en

compte la participació de membres del Grup d'Astronomia i Astrofísica, que treballen en l'estudi de supernoves distants, que el 1998 va posar de manifest l'expansió accelerada de l'univers, i en temes de formació, evolució i distribució de galàxies. De fet, actualment es fa difícil separar nítidament aquests estudis dels d'astrofísica i astronomia, que esmentem a continuació.

3.2.6. Astronomia i astrofísica

(UNESCO 21, PACS 95, 96, 97 i 98)

Els investigadors en aquesta àrea pertanyen a la UB (Departament d'Astronomia i Meteorologia), la UPC i el CSIC, i n'hi ha que són membres de l'IEEC. A la UB es treballa en cosmologia (creixement i estructura interna d'halos de matèria fosca, energia fosca, i expansió accelerada de l'Univers mitjançant observació de supernoves distants), nucleosíntesi primordial, formació i evolució de galàxies i els seus agrupaments, supernoves termonuclears (nucleosíntesi explosiva), medi interestel·lar (núvols moleculars, formació estel·lar), astronomia galàctica (models cinemàtics de la galàxia, observació i modelització de microquàsars) estudis de fotosfera solar i relació Sol-Terra, feixos de radiació prop de sistemes massius... A la UPC, al Departament de Física Aplicada, un grup estudia nanes blanques, noves, supernoves, evolució i cinemàtica estelars, nebuloses planetàries.

Al CSIC es treballa en formació d'estructures còsmiques de gran escala, física estel·lar (formació d'estrelles, observació i identificació d'estrelles de diversos tipus, nucleosíntesi en estrelles de carboni, models de sistemes planetaris, formació, refredament i estructura de nanes blanques), noves clàssiques (emissió de raigs X i raigs gamma en noves, màsers d'aigua a Cefeu...

Els estudis esmentats en els dos paràgrafs anteriors són complementats amb investigacions sobre física fonamental (constants fonamentals, universos membrana), de microgravetat (efectes en fluids i en ciència de materials), de geodèsia espacial i de cosmoquímica orgànica. Hi ha relacions assídues amb grans instal·lacions internacionals (observatoris astronòmics de La Palma, Calar Alto, European Southern Observatory de Xile i d'altres) i amb missions espacials internacionals (amb contribucions importants de la UB a projectes de l'ESA, en especial l'observatori de raigs gamma INTEGRAL, l'interferòmetre global astromètric GAIA, i el satèl·lit PLANCK SURVEYOR per a la determinació d'anisotropies de la radiació de fons).

A Catalunya hi ha diversos observatoris i una tradició observacional considerable, però dintre de possibilitats limitades. Els més antics i potents són el Fabra i el de l'Ebre, i el 2002 es començà a construir el del Montsec. La dedicació a l'observació es complementa, en graus diversos, amb l'aprenentatge i ensenyament universitari d'astronomia. Els temes tractats a l'Observatori de l'Ebre (de la URL i relacionat amb projectes del CSIC) són

geomagnetisme (variacions del camp geomagnètic, variacions magnètiques d'origen extern, caracterització magnètica de l'Antàrtida), ionosfera (forçament extern i intern, modelatge de paràmetres), sismologia (atenuació sísmica a partir d'ones de coda tomografia sísmica d'estructures terrestres), activitat solar i clima. L'Observatori Fabra depèn de la Reial Acadèmia de Ciències i Arts de Barcelona i es dedica a l'astrometria, tot i que amb mitjans i objectius limitats. L'observatori del Montsec pretén cobrir aquest dèficit, amb el telescopi més gran de Catalunya (vuitanta centímetres de diàmetre), no pas amb el projecte impossible i innecessari de competir amb els grans observatoris però sí de desenvolupar projectes de recerca en el camp de l'observació sistemàtica, integrat en xarxes internacionals. A una escala diferent, podem esmentar diversos observatoris d'aficionats que palesen la difusió de l'interès per les observacions astronòmiques.

3.2.7. Termodinàmica i física estadística i no lineal

(UNESCO 2213, 2205 i 2307, PACS 05, 44, 51, 65 i 82)

Aquesta àrea és molt diversa i ha tingut un creixement ràpid en els darrers quinze anys. Aquest creixement és explicable, en bona mesura, pel fet que hem incorporat en aquest grup les recerques en física no lineal, seguint la tendència marcada per la Societat Europea de Física, que agrupa la física estadística amb la no lineal. Aquí, a més, hi hem sumat la termodinàmica, molt propera en els seus interessos a la física estadística. Com ja hem comentat en l'apartat 2.3, alguns dels investigadors en termodinàmica haurien pogut ésser inclosos en ciència de materials, una frontera sempre activa i ambigua pel que fa a l'atribució dels investigadors. Els temes predominants han estat fenòmens de no equilibri, transicions de fase, i física no lineal. A la UB, en el Departament de Física Fonamental, el Grup de Física Estadística treballa en moviment brownià anòmal, soroll no lineal i ressonància estocàstica, termodinàmica mesoscòpica, i sistemes amb criticalitat autoorganitzada (com xarxes neuronals, xarxes tròfiques i de comunicacions, piles d'arròs i volcans); també cal referir-se a l'aplicació de la física no lineal a l'anàlisi econòmica, o a les noves branques de l'anomenada *econofísica*; al Departament d'Estructura i Constituents de la Matèria, el Grup de Transicions Estructurals de Fase estudia des del punt de vista teòric i experimental la dinàmica de transicions de fase, cinètica de processos d'ordenació, relaxació estructural en sistemes amorfs i formació de patrons estructurals i interacció entre càrregues i matèria. En el mateix Departament, el Grup de Processos Estocàstics investiga fluctuacions en sistemes extensos fora de l'equilibri.

A la UAB, el Grup de Física Estadística estudia termodinàmica estesa fora de l'equilibri, aspectes termodinàmics de mo-

dels cosmològics, adsorció de partícules en superfícies i models termodinàmics simples de canvi climàtic, criticalitat autoorganitzada i models de xarxes tròfiques. A la UPC, al Departament de Física Aplicada, el Grup de Transicions de Fase, Polimorfisme i Metaestabilitat treballa en nanocalorimetria i transicions de fase i el Grup de Fluctuacions i Turbulència estudia formació de patrons, fluctuacions en sistemes extensos, dinàmica de reaccions químiques i propagació de fronts. En el Departament de Física i Enginyeria Nuclear, el Grup de Simulació per Ordinador en Matèria Condensada i Sistemes Complexos analitza el comportament atòmic de la matèria condensada (dissolucions iòniques, líquids iònics, moleculars i quàntics, en un ampli ventall de situacions) i un altre grup treballa en estadística de sistemes complexos i xarxes (criticalitat autoorganitzada, transport i correlacions en xarxes complexes, sincronització en models extensos, i simulació de sistemes microbians d'interès biològic), i a Terrassa treballen en dinàmica no lineal en sistemes fotònics i biològics. Alguns investigadors al Departament de Química Física de la UB estudien dinàmica no lineal, propagació d'ones en medis excitables, fronts de propagació amb fluctuacions, i alguns investigadors a la UdG i a la Universitat Internacional de Catalunya (UIC) treballen en sistemes de reacció-difusió hiperbòlics i aplicacions biològiques a propagació d'espècies i d'epidèmies.

Per a arrodonir la perspectiva dels estudis en termodinàmica caldria esmentar recerques més tecnològiques referides a màquines tèrmiques, bombes de calor, cicles de refrigeració, tant a la UPC com a la URV, que no incloem en aquest report perquè considerem que estan bàsicament interessades en problemes d'enginyeria, tot i que no menystenen qüestions d'interès fonamental.

3.2.8. Òptica

(UNESCO 2209, PACS 42 i 78)

Igual que la termodinàmica i la física estadística, l'òptica ha estat una àrea de recerca amb una capacitat elevada de creixement. Làsers, òptica no lineal, fotònica, reconeixement d'imatges, fibres òptiques... són els temes predominants en la recerca del conjunt de grups; la recerca en òptica s'ha anat consolidant, té relacions amb empreses, i serà potenciada, indubtablement, pel nou ICFO fundat el 2002 i relacionat amb la UPC. A aquesta mateixa Universitat, a Terrassa, al Departament de Física i Enginyeria Nuclear, el Grup d'Òptica no Lineal i Làsers investiga la generació de fenòmens no lineals en cristalls fotònics i microcavitats, així com la dinàmica temporal i espaciotemporal dels làsers (làsers de semiconductor i de medi amplificador atòmic, solitons espacials, sincronització d'oscil·ladors caòtics). També a Terrassa, al Departament d'Òptica i Optometria, el

Grup d'Òptica Aplicada treballa en enginyeria òptica (senyors, instruments i sistemes), tecnologia de sistemes làser, òptica fisiològica i processament d'imatges. D'altra banda, al Campus Nord, al Departament del Senyal i Comunicacions hi ha un grup de fotònica amb interès per solitons en fibres òptiques, i altres grups que estudien sistemes òptics de seguretat, inversió lidar i atmosfera.

Al Departament de Física de la UAB, el Grup d'Òptica estudia biestabilitat òptica, moduladors òptics de fase, apoditzadors d'amplitud, reconeixement de formes en moduladors òptics espacials, làsers sense inversió, i recentment ha iniciat recerca en el camp de l'òptica atòmica i quàntica. Al Departament de Física Aplicada i Òptica de la UB, estudien reconeixement d'objectes tridimensionals, escàners tridimensionals, propagació de feixos i teoria de difracció, i aplicació de mètodes multimèdia a la docència, i al Departament d'Electrònica es treballa en l'aplicació de nanopartícules per a la producció de guies òptiques i fibres òptiques.

3.2.9. Electrònica

(UNESCO 2203, PACS 41 i 72)

L'activitat en el camp de l'electrònica és molt més àmplia que la ressenyada aquí, però com que hi ha un report dedicat a la tecnologia electrònica, no hem tractat aquest tema exhaustivament, i no hem inclòs ni el Centre Nacional de Microelectrònica del CSIC ni diversos grups d'enginyeria electrònica de la UPC, UB ni UAB. Ens hem limitat al Departament d'Electrònica de la Facultat de Física de la UB, i a investigadors del Departament d'Enginyeria Electrònica de l'ETSE de la UAB que publiquen en revistes de física.

A la UB, al Departament de Física Aplicada i Òptica, un grup treballa en capes fines de silici, amb aplicacions a plaques fotovoltaïques i al Departament d'Electrònica hi ha dos grups, l'un d'Enginyeria i Materials Electrònics i l'altre de Sistemes per a la Instrumentació i Control. El primer, a part de les seves activitats en materials electrònics i ceràmics descrites en l'apartat de materials, treballa en microtecnologies i nanotecnologies, i sensors i microsistemes, i forma part del CERMAE, de la Generalitat de Catalunya. L'altre grup treballa en la preparació d'interfícies per a biosensors i en robots miniaturitzats per a micromanipulació, amb interès especial per les fronteres amb la biologia. Forma part del CREBEC, de la Generalitat de Catalunya. A la UPC un grup del Departament de Física Aplicada explora el comportament de transductors piezoelèctrics. A l'ETSE de la UAB, els grups més afins a la física pròpiament dita treballen en transport en sistemes nanomètrics, dispositius quàntics i aplicacions a microones, en la fiabilitat de dispositius electrònics i, una mica més aplicat, a circuits i sistemes.

3.2.10. *Mecànica de fluids*

(UNESCO 2204, PACS 47)

La mecànica de fluids, que durant unes quantes dècades va ésser conreada gairebé exclusivament a les escoles d'enginyeria, tornà a formar part dels currículums de física com a conseqüència de problemes d'importància conceptual general com ara inestabilitats hidrodinàmiques, aparició d'estructures en sistemes allunyats de l'equilibri, camins cap al caos, i fluxos turbulents. En el Departament d'Estructura i Constituents de la Matèria de la UB, alguns investigadors fan treballs experimentals sobre inestabilitats hidrodinàmiques i estructures espacials en interfícies líquid-gas. Al Departament de Física Aplicada de la UPC, part del Grup de Turbulència, Fluctuacions i Difusió estudia la formació d'estructures convectives i centrífugues en fluids confinats, la interacció entre ones llargues i corrents longitudinals i forma part d'una xarxa temàtica de dinàmica de fluids i turbulència geofísica. Al Departament de Física i Enginyeria Nuclear de la UPC s'estudia miscibilitat de mesofases desordenades; al Departament de Química Física i Inorgànica de la URV alguns investigadors treballen en turbulència, i al Grup de Física Estadística de la UB es treballa en alguns problemes relacionats amb els fluids, com viscoelasticitat i ferrofluids. A la UPC hi ha un Departament de Mecànica de Fluids, dedicat a la fluïdotècnia (turbomàquines, sistemes de control de potència en circuits oleohidràulics i pneumàtics), que no hem inclòs en aquest treball ja que és més tècnic.

3.2.11. *Física atòmica, molecular i nuclear*

(UNESCO 2207 i 2208, PACS 21 i 24)

Els estudis de física atòmica i molecular estan més desenvolupats a les facultats de Química que no pas a les de Física; per això, aquí ens cenyim sobretot a temes relacionats amb la física nuclear. Aquesta té tres components: física nuclear bàsica, enginyeria de reaccions nuclears, i radioactivitat ambiental. Al Departament d'Estructura i Constituents de la Matèria de la UB, el Grup de Física Nuclear Teòrica i de Moltes Partícules en Interacció estudia estructura nuclear, líquids quàntics, propietats dels hadrons en medi nuclear, física d'hipernuclis, reaccions d'ions pesants, col·lisions electròniques de baixa energia, transport de radiació i detectors de radiació, sistemes mesoscòpics, i nanoagregats metàl·lics. A la UPC, el Departament de Física i Enginyeria Nuclear estudia, com s'ha indicat abans, el moviment molecular en fases condensades i els líquids quàntics, i d'altra banda treballa en temes de fusió nuclear i control de reactors nuclears, i analitza experiments del CERN. L'INTE estudia la radiació ionitzant d'origen natural o artificials, les seves aplicacions, riscos i impacte ambiental. A la UAB, el Grup de Física de les Radiacions estudia aspectes de dosimetria de radiacions i de radioactivitat ambiental.

3.2.12. *Biofísica*

(UNESCO 2406, PACS 87)

La biofísica és un camp en creixement ràpid en molts llocs del món, arrossegat en part pel gran impuls de la biologia molecular i de la biomedicina. Un nombre creixent d'investigadors d'altres àrees es va incorporant, si més no a temps parcial, a temes relacionats amb problemes biològics o mèdics. A la UB, la Unitat de Biofísica del Departament de Ciències Fisiològiques II treballa en bioenergètica cel·lular (metabolisme en models d'apoptosi, metabolisme de l'hepatòcit de rata) i en l'anàlisi de senyals i d'imatges biomèdiques (modelització de sistemes fisiològics, processament de seqüències dinàmiques d'imatges gammagràfiques, estudi de la funció renal). La Unitat de Biofísica i Bioenginyeria del Departament de Ciències Fisiològiques I, treballa en mecànica respiratòria, i més recentment ha impulsat la línia de la nanomecànica cel·lular i molecular i producció d'imatges mèdiques amb tomografia d'emissió de fotons. Forma part del Centre Especial de Recerca en Bioelectricitat i Nanobiociència, juntament amb el Departament d'Electrònica de la UB (apartat 2.4). A la UAB, la Unitat de Biofísica de la Facultat de Medicina treballa en membranes: fluïdesa de la matriu lipídica, estructura i funció de proteïnes transportadores, control del cicle cel·lular, regulació d'unions adherents i activació transcripcional.

Hi ha un interès creixent per l'estudi de problemes biofísics per part de grups de matèria condensada i de física estadística, tant de la UB (Departament de Física Fonamental: propietats elàstiques i elèctriques de DNA, plegament de proteïnes, motors moleculars, microreologia de cèl·lules vives, propietats elèctriques del DNA), com de la UAB (Grup de Física Estadística: xarxes tròfiques, propagació d'epidèmies i d'espècies), com de la UPC (al Departament de Física Aplicada un grup estudia models físics dels éssers vius, i al Departament de Física i Enginyeria Nuclear es fan estudis de dinàmica no lineal en sistemes biològics).

3.2.13. *Física de l'atmosfera*

(UNESCO 2501 i 2509, PACS 86 i 92)

El grup més gran està format per investigadors de la UB (Departament d'Astronomia i Meteorologia). Els estudis realitzats per aquest grup combinen dades de satèl·lits amb models de predicció de dinàmica atmosfèrica en mesoscala, que incorporen les característiques orogràfiques i micrometeorològiques del paisatge, amb una atenció especial a la nostra zona mediterrània (en particular a tempestes convectives de gran intensitat que produeixen grans riuades, i que en són típiques), la propagació de contaminants atmosfèrics pel vent, l'anàlisi de sèries meteorològiques de xarxes, amb interès pels estudis de radar meteorològic. A l'Institut de Ciències de l'Espai del CSIC es tre-

balla en l'ús òptim del GPS (sistema de posicionament global) per a mesures de la humitat. A la UAB s'estudien models termodinàmics de canvi climàtic de baixa dimensionalitat. A l'Observatori de l'Ebre, la secció de meteorologia estudia les relacions entre clima i activitat solar, a més d'activitats observacionals. A la UPC, en física aplicada, i també en física i enginyeria nuclear, alguns investigadors estudien canvi climàtic i medi ambient, i sistemes espacials i percepció remota i, a la UdG, meteorologia i radiació solar, avaluació d'aerosols atmosfèrics, dispersió de contaminants, avaluació de la coberta de núvols.

3.2.14. Geofísica

(UNESCO 2507, PACS 91)

Aquesta branca té una tradició llarga en el nostre país, sobretot pel que fa a estudis observacionals de sismologia (Observatori Fabra) i dels acoblaments entre activitat solar i ionosfera terrestre (Observatori de l'Ebre). A la UB, al Departament de Geodinàmica i Geofísica de la Facultat de Geologia, les línies de recerca són: estudis de propietats físiques de la litosfera (a partir de mètodes electromagnètics, gravimètrics, sísmics i magnètics), tant en zones continentals com oceàniques, l'aplicació de mètodes GPS per a la quantificació de deformacions corticals, i sismologia aplicada a l'estudi de les propietats de la dinàmica d'allaus de neu i la seva detecció. Al Departament d'Astronomia i Meteorologia s'estudia l'origen i l'ocurrència de terratrèmols, ressonàncies d'estructures i activitat microsísmica. El Grup de Dinàmica de la Litosfera del l'Institut Jaume Almera (CSIC) estudia sismologia, dinàmica de la litosfera, propietats físiques de la litosfera, dorsals oceàniques, marges continentals i formació de conques oceàniques, processos superficials. A l'IEEC es fan diversos estudis sobre teledetecció i sistemes d'informació geogràfica.

A l'Observatori de l'Ebre hi ha una secció d'ionosfera (forçament solar sobre la ionosfera, modelatge de paràmetres ionosfèrics) i una de sismologia (estudis d'atenuació sísmica, anàlisi de soroll sísmic ambiental, tomografia sísmica d'estructures terrestres). En el Departament de Física Aplicada de la UPC, un grup estudia ciències de la Terra, dinàmica de fluids i turbulència geofísica.

3.2.15. Oceanografia

(UNESCO 2510, PACS 86 i 92)

La tradició d'estudis de biologia marina a Barcelona ha tardat força temps a incorporar significativament grups d'oceanografia física. Ara, però, l'Institut de Ciències del Mar (CSIC) ja disposa d'un grup d'oceanografia física que estudia dinàmica de les capes marines superficials, circulació a la Mediterrània occidental, tècniques experimentals de mesura de corrents, aplicació de

senyors remots a l'oceà. Al Departament de Física de la UdG el Grup d'Anàlisi de Sistemes Ambientals treballa en limnologia física, turbulència, agregació de partícules i qualitat de l'aigua. A la UPC, el Departament de Física Aplicada estudia dinàmica de costes i fluids estratificats. No incloem en canvi altres grups de la UPC, com el Laboratori d'Enginyeria Marítima, que disposa d'un canal d'investigació i experimentació, perquè els seus estudis se centren en un camp més pròpiament d'enginyeria.

3.2.16. Història de la física

Lentament, la tasca d'uns pocs investigadors en aquest camp es va obrint pas, encara que de manera molt minoritària però ja institucionalitzada. A diferència del report anterior, hem volgut dedicar a aquests estudis una menció explícita, per la seva importància creixent. A la UAB hi ha el Centre d'Estudis d'Història de les Ciències (CEHIC), amb dos investigadors especialitzats en història de la física, en especial en els orígens de l'electrodinàmica quàntica i en els de la teoria electromagnètica, i tenen relació amb la Societat Catalana d'Història de la Ciència i de la Tècnica. A la UB, dos investigadors del Departament de Física Fonamental estudien alguns problemes de les relacions entre la física estadística i els orígens de la física quàntica.

Un camp que està començant a tenir una activitat apreciable és la didàctica de la física (UPC, UAB, UB), amb interès per nous mitjans docents informàtics i en xarxa, mètodes multimèdia per a l'ensenyament de l'òptica. A començaments de l'any 2004 s'ha constituït a la UAB un centre per impulsar aquests estudis.

4. RESULTATS: PUBLICACIONS I PATENTS

Els resultats de la recerca en física s'acostumen a publicar en revistes, llibres o informes tècnics; els de caràcter més aplicat poden donar lloc a informes tècnics i patents. L'avaluació de la recerca és un tema molt complex, que ha de tenir en compte diversos indicadors, com la quantitat d'articles i el seu impacte, les comunicacions en congressos, els llibres, la transferència de tecnologia, el nombre de tesis doctorals i de postdoctorats, la captació de recursos econòmics i la participació en projectes internacionals... Aquí estudiem alguns d'aquests aspectes.

4.1. Publicacions

Examinem en primer lloc les publicacions en les revistes internacionals de més impacte i visibilitat internacional. En la taula 6 recollim el nombre d'articles publicats entre 1996 i 2002 en les revistes de física de més impacte, amb algun autor pertanyent a

TAULA 6
 Nombre d'articles publicats en algunes de les revistes de física de més impacte

Revistes	1993	2001	1985-1989		1990-1995		1996-2002	
	Impacte	Impacte	Espanya	Catalunya	Espanya	Catalunya	Espanya	Catalunya
<i>Phys. Rev. Lett.</i>	7,11	6,67	56	10	148	22	708	128
<i>Nucl. Phys. B</i>	4,54	6,23	49	9	225	45	386	56
<i>Astrophys. J.</i>	3,39	5,92	84	11	296	58	679	82
<i>Phys. Lett. B</i>	3,08	4,37	263	40	670	194	830	187
<i>Phys. Rev. D</i>	3,01	4,36	128	33	165	54	542	142
<i>J. Chem. Phys.</i>	3,62	3,15	47	6	80	12	737	168
<i>Appl. Phys. Lett.</i>	3,50	3,85	22	4	130	16	396	95
<i>Phys. Rev. B</i>	3,16	3,07	234	22	701	148	1346	253
<i>Europhys. Lett.</i>	2,78	2,26	34	4	93	25	170	40
<i>Phys. Rev. A</i>	2,27	2,81	145	37	312	54	328	49
<i>Phys. Rev. E</i>	—	2,23	0	0	125	31	705	195
<i>Z. Phys. C</i>	2,22	—	96	14	128	34	—	—
<i>Superc. Sci. Tech.</i>	—	2,14	—	—	—	—	27	43
<i>Astron. Astrophys.</i>	2,12	2,28	241	16	518	7	336	29
<i>J. Phys. A</i>	2,06	1,45	60	8	154	31	299	43
<i>Phys. Rev. C</i>	1,97	2,70	28	0	83	13	214	40
<i>J. Appl. Phys.</i>	1,78	2,13	80	13	306	65	608	119
<i>Nucl. Phys. A</i>	1,75	2,07	77	10	168	22	262	44
<i>Class. Quant. Grav.</i>	1,49	1,98	14	4	66	25	119	43
<i>J. Phys. Cond. Matt.</i>	—	1,78	—	—	—	—	36	319
<i>Mod. Phys. Lett. A.</i>	1,40	1,12	0	0	31	19	43	7
<i>Physica A</i>	1,18	1,30	39	12	67	26	155	54
<i>Nucl. Instr. Meth. B</i>	1,16	1,04	25	3	132	19	191	22
<i>Phys. Lett. A.</i>	1,15	1,22	87	15	170	39	219	27
<i>Opt. Commun.</i>	1,11	1,35	42	13	125	33	215	56
<i>Appl. Opt.</i>	0,91	1,46	50	1	152	20	213	41
<i>J. Math. Phys.</i>	0,90	1,15	76	16	98	15	138	23
<i>J. Magn. Magn. Mat.</i>	—	1,33	—	—	275	44	503	60
<i>Physica C</i>	2,30	0,81	36	13	137	58	122	56

algun centre de recerca català. Ens hem limitat a revistes on hi ha més de deu articles d'autors catalans en aquest període i d'índex d'impacte superiors a la unitat. Podríem ampliar la llista amb moltes altres revistes, algunes de les quals són dels àmbits de la geofísica i la biofísica, la física de l'aire i l'oceanografia. Per tal de facilitar la comparació amb el report anterior, hi incloem el nombre corresponent de publicacions en el període 1990-1995.

Recordem una vegada més que ens hem limitat a revistes d'índex d'impacte superior a la unitat, i amb més de deu articles publicats per investigadors de les universitats catalanes. Aquesta darrera restricció explica que no figurin en la llista revistes de geofísica, meteorologia ni biofísica. En efecte, en aquests camps hi ha un nombre considerable de revistes especialitzades, i els articles dels diversos grups es dispersen entre aquestes i no arriben als deu articles en cada revista, encara que el nombre total d'articles, sumat sobre les diverses revistes, sigui considerable.

També és escàs el nombre d'articles publicats en les revistes *Nature* i *Science*, que mereixen, però, un esment especial, donat l'elevat índex d'impacte. Durant el període considerat, ha aparegut un article a *Nature* (el 1998, sobre observació de su-

pernoves distants i expansió accelerada de l'univers, amb una investigadora del Departament d'Astronomia i Meteorologia de la UB, i el 2001, sobre viscoplasticitat, amb una investigadora del Departament de Física Fonamental de la UB), i dos articles a *Science* (el 1997 i el 2000, un sobre supernoves i un sobre microquàsars, tots dos amb investigadors del Departament d'Astronomia i Meteorologia de la UB).

De la taula anterior destaca immediatament un increment considerable en el nombre d'articles publicats en la majoria de les revistes esmentades, especialment en *Physical Review Letters* i *Applied Physics Letters*, increment que analitzem, en termes relatius, en la taula següent. Una altra característica remarcable és que bona part dels articles han estat fets en el marc de col·laboracions internacionals, factor que indica una normalització gairebé total de la nostra recerca en aquest aspecte. Com que, en general, hi ha hagut un increment mundial en el nombre de publicacions, cal examinar si aquest increment absolut també representa un increment en la proporció relativa de participació en les diverses revistes. Aquest és l'objectiu de la taula 7.

TAULA 7

Proporció d'articles publicats a Catalunya i a Espanya respecte al total d'articles publicats en les revistes respectives

	Catalunya / Món (‰)			Espanya / Món (‰)		
	1985-1989	1990-1995	1996-2002	1985-1989	1990-1995	1996-2002
<i>Phys. Rev. Lett.</i>	1,14	1,65	6,39	0,64	1,11	3,53
<i>Europhys. Lett.</i>	2,76	9,35	12,00	2,34	3,48	5,09
<i>Nucl. Phys. B</i>	3,06	8,44	8,43	1,67	4,22	4,39
<i>Phys. Lett. B</i>	4,97	19,10	18,40	3,27	6,59	8,15
<i>Phys. Rev. D</i>	6,49	7,18	11,30	2,52	2,19	4,32
<i>Z. Phys. C</i>	9,00	18,00	47,90	6,17	6,78	14,70
<i>Nucl. Phys. A</i>	3,27	5,16	8,85	2,52	3,94	5,27
<i>Phys. Rev. C</i>	0,00	2,86	6,86	0,82	1,82	3,87
<i>Nuclear Inst. Meth.</i>	0,69	2,90	3,02	0,58	2,01	2,62
<i>Astrophys. J</i>	1,61	5,26	5,30	1,23	2,69	4,39
<i>Astr. & Astr.</i>	3,41	6,86	9,39	5,14	7,56	10,90
<i>Appl. Phys. Lett.</i>	0,16	1,23	5,18	0,32	1,00	2,16
<i>J. Appl. Phys.</i>	1,22	4,01	8,85	0,75	1,89	5,27
<i>J. Chem. Phys.</i>	1,56	2,67	10,00	1,23	1,78	4,42
<i>Phys. Rev. A</i>	5,03	5,31	5,13	1,97	3,07	3,44

TAULA 7 (Continuació)
 Proporció d'articles publicats a Catalunya i a Espanya respecte al total d'articles publicats en les revistes respectives

	Catalunya / Món (%)			Espanya / Món (%)		
	1985-1989	1990-1995	1996-2002	1985-1989	1990-1995	1996-2002
<i>Phys. Rev. B</i>	1,41	5,64	7,76	1,50	2,67	4,13
<i>J. M. M. M.</i>	—	6,76	8,06	—	4,23	6,76
<i>Class. Quant. Gr.</i>	5,04	16,50	19,40	1,77	4,36	5,36
<i>Appl. Optics</i>	0,22	3,42	6,23	1,12	2,60	3,24
<i>Optics Commun.</i>	6,40	8,79	10,90	2,07	3,33	4,20
<i>J. Phys. A</i>	2,44	6,91	8,68	1,83	3,43	6,03
<i>Phys. Rev. E</i>	—	12,20	13,70	—	4,91	4,97
<i>Physica A</i>	9,16	9,70	14,20	2,98	2,50	4,09
<i>Phys. Lett. A</i>	3,53	6,50	4,42	2,05	2,83	3,59
<i>J. Math. Phys.</i>	7,59	5,43	7,97	3,60	3,55	4,78
<i>Mod. Phys. Lett. A</i>	0,00	2,86	3,48	0,00	4,66	2,13
<i>Physica C</i>	—	—	7,79	—	—	1,70

La taula 7 indica les contribucions relatives de Catalunya (en tant per mil) i del conjunt d'Espanya (en tant per cent) al total d'articles publicats en les respectives revistes. En gairebé tots els casos es veu un increment notable en aquest paràmetre, en algunes ocasions en un factor 4 (en revistes d'impacte especialment elevat com *Phys. Rev. Lett.*, *J. Chem. Phys.*, *Appl. Phys. Lett.*), un factor 2,8 (*Z. Phys. C*, *Phys. Rev. C*) o un factor 2 (*J. Appl. Phys.*, *Appl. Optics*), mentre que en altres revistes s'arriba a la saturació i ja no hi ha increment (*Nuclear. Phys. B*, *Phys. Lett. B*, *Astrophys. J.*, *Phys. Rev. E*).

Les revistes en què la participació catalana és més elevada són *Z. Phys. C*, *Phys. Lett. B* i *Phys. Rev. D*, de l'àrea de partícules elementals, *Class. Quantum Grav.*, de gravitació i cosmologia, i *Physica A* i *Phys. Rev. E*, de física estadística i termodinàmica, i *Europhys. Lett.*, de caràcter general. Aquesta tendència és la mateixa que en el report anterior, i és conseqüència de la tradició de partícules elementals i de l'impuls de la física estadística i termodinàmica en els darrers anys. Per al conjunt d'Espanya, també les partícules i la física estadística tenen una presència especialment elevada, a més de l'astrofísica (*Astr. & Astr.*), a causa de la participació en projectes internacionals relacionats amb els observatoris europeus instal·lats a les Illes Canàries.

Com que cada departament dona els articles en què han participat els seus autors, i com que hi ha col·laboracions entre

diverses universitats, un nombre significatiu d'aquests articles estan repetits en dues o més universitats o departaments. Dintre d'una mateixa universitat, la col·laboració entre membres de diversos departaments també fa que el recompte sigui més elevat, cosa que passa més especialment amb la UB. Així, si consultem la base de dades dels indicadors essencials de ciència «isiknowledge» (*essential science indicators [ISI]*) interpolem, per a un període de set anys, uns 1.430 articles, en lloc dels 2.060. En el període 1990-1995, el nombre total d'articles era 2.155, segons les bases de dades de l'ISI. Ara, podríem fer una estimació d'uns 3.700, un increment, doncs, lleugerament superior a l'increment proporcional en el nombre d'investigadors, que apunta cap a un manteniment de la productivitat, en articles per doctor i per any (1,2 articles per doctor i per any, si dividim aquests 3.800 articles entre els 445 doctors que surten com a mitjana dels 515 doctors de 2002 i els 385 de 1995 i pels set anys que comprèn l'interval analitzat; aquest valor és el mateix que l'obtingut en el report del període 1990-1995) (taula 8).

No hem d'oblidar tampoc els llibres, que tenen, molt sovint, una capacitat d'influència superior a la dels articles, tant per l'amplitud i l'estructuració del contingut, com per la durada de la seva vigència, o la seva possible influència en investigadors joves que accedeixen per primera vegada a un camp de recerca. En el període esmentat, hem localitzat set llibres de recerca en anglès (un

TAULA 8
Articles de física publicats en el període 1996-2002,
per institucions

Institucions	Nombre d'articles
UB	2.060
UAB	869
UPC	730
CSIC	435
UdG	110
URV	80
URL	60
<i>Total</i>	4.346

de magnetisme, un de processos estocàstics, un de relativitat general i ones gravitatòries, dos de sistemes complexos, dos de termodinàmica), a més d'uns deu volums d'actes de congressos i diversos números especials de revistes internacionals amb científics catalans com a editors invitats; cal comptar també diversos llibres de text, en català o en castellà, i sis llibres de divulgació en català.

4.2. Impacte

L'impacte de les publicacions, relacionat amb el nombre de citacions que reben en les publicacions especialitzades, és un indicador de la influència de la recerca. Una possibilitat d'avaluar-lo es basa en l'índex d'impacte de la revista en què han estat publicats els articles (aquest índex és el nombre de citacions en els

dos anys consecutius a la data de publicació). A partir de la taula 9, podem comparar l'evolució de l'índex mitjà de les publicacions considerades; per a fer-ho, cal tenir en compte tant l'evolució del nombre d'articles com el de l'índex d'impacte de les revistes, tal com ho indiquen les dues primeres columnes de la taula. Els resultats són un índex de 2,60 en el període 1990-1995 i un índex de 3,14 en el període 1996-2002, de manera que l'índex mitjà ha augmentat considerablement, per sobre de l'índex mitjà del conjunt de les revistes, no ponderat per articles, que passa de 2,25 a 2,66.

Ara bé, els càlculs anteriors no ens permeten descobrir l'impacte real dels articles que estem considerant, ni els articles molt citats, que tenen un interès especial, ja que indiquen —dintre de les precaucions que cal tenir sempre en interpretar adequadament el nombre de citacions— les línies especialment fructíferes en un determinat moment. Si el nombre de citacions per any es manté durant un temps llarg, podem afirmar que ens trobem davant d'un clàssic en la seva especialitat. En el report anterior ja dedicàrem una atenció considerable als articles més citats, que després ampliàrem en els articles amb Lluís Rovira i Pau Senra a la *Revista de Física* i a *Contributions to Science* i que analitzàrem amb profunditat en el llibre *Estudis bibliomètrics sobre la recerca en física a Catalunya*, publicat per l'IEC el 2001 i que aplega, a més d'una llista considerable d'articles molt citats fins al 2000, els testimonis directes dels autors dels articles. Seguint aquella anàlisi, indicarem aquí els trenta articles més citats, fins a abril de 2004, de la física a Catalunya, a partir de les dades de l'*ISI web of knowledge* (<<http://isiknowledge.com>>). Tal com vam fer en el report anterior, i per tal d'evitar personalismes, no ens referirem als autors, que poden ésser identificats indirectament per qui ho desitgi, sinó tan sols als temes i als centres de recerca.

TAULA 9
Articles de física procedents d'alguna institució de recerca de Catalunya, citats més de dues-centes vegades

Referència	Citacions	Àrea	Institució
<i>Phase transitions, Academic</i> (1983)	1.984	Física estadística	UB
<i>Phys. Rev. Lett.</i> , núm. 76 (1996), p. 3830	537	Magnetisme	UB
<i>Phys. Rev. Lett.</i> , núm. 76 (1996), p. 1122	519	Magnetisme	ICMAB-CSIC
<i>J. Magn. Magn. Mat.</i> , núm. 192 (1999), p. 203	490	Magnetisme	UAB
<i>Nature</i> , núm. 391 (1998), p. 51	476	Cosmologia	UB
<i>Extended irrevers, Springer</i> , 1993	460	Termodinàmica	UAB
<i>Nuovo Cimento B</i> , núm. 36 (1976), p. 5	431	Òptica	UAB

TAULA 9 (Continuació)
 Articles de física procedents d'alguna institució de recerca de Catalunya, citats més de dues-centes vegades

Referència	Citacions	Àrea	Institució
<i>Phys. Rev. A</i> , núm. 26 (1982), p. 1589	325	Física estadística	UB
<i>Phys. Rev. Lett.</i> , núm. 74 (1995), p. 5036	308	Òptica	UPC
<i>J. Phys. Chem. B</i> , núm. 101 (1997), p. 9463	287	Materials	UAB
<i>Phys. Rep.</i> , núm. 51 (1979), p. 267	279	Física nuclear	UB
<i>Rep. Prog. Phys.</i> , núm. 51 (1988), p. 1105	276	Termodinàmica	UAB
<i>Z. Phys. C</i> , núm. 52 (1991), p. 13	260	Partícules elementals	UAB
<i>Phys. Rep.</i> , núm. 216 (1992), p. 253	247	Partícules elementals	UAB
<i>Phys. Lett. B</i> , núm. 223 (1989), p. 425	245	Partícules elementals	UB
<i>Zeta regularization</i> , Springer, 1994	244	Física matemàtica	ICE-CSIC
<i>Phys. Lett. B</i> , núm. 231 (1989), p. 519	239	Partícules elementals	UAB
<i>Phys. Rev. Lett.</i> , núm. 84 (2000), p. 2778	235	Gravitació	UB
<i>Acta Metall.</i> , núm. 30 (1982), p. 297	219	Física estadística	UB
<i>J. Appl. Phys.</i> , núm. 63 (1988), p. 3538	206	Magnetisme	UB
<i>Lett. Nuov. Cim.</i> , núm. 17 (1976), p. 333	204	Òptica	UAB
<i>Nuovo Cimento B</i> , núm. 53 (1979), p. 1	200	Òptica	UAB
<i>Phys. Lett. B</i> , núm. 429 (1998), p. 169	200	Partícules elementals	UAB-UB

El màxim absolut de citacions, a gran distància de tots els altres, és un capítol d'un llibre sobre transicions de fase, dedicat a la dinàmica de les transicions de fase de primer ordre. És remarcable, també, que els tres següents articles en nombre de citacions corresponguin a estudis en magnetisme de materials, fets per tres grups de tres institucions diferents, la qual cosa mostra la maduresa d'aquesta disciplina a Catalunya. Pel que fa a les àrees de recerca d'aquests articles són materials (sis), física estadística i termodinàmica (cinc), partícules (cinc), òptica (quatre), cosmologia i gravitació (dos), un de física matemàtica, i un de física nuclear. Tal com acostuma a passar en les llistes d'articles molt citats, observem correlacions entre diversos articles —en temes i en autors— que posen de manifest línies de treball especialment fructíferes o afortunades, que convindria potenciar durant un cert temps per treure'n tant de rendiment com sigui possible.

En el report anterior havíem aplegat una dotzena d'articles citats més de cent vegades, llista que en el llibre esmentat (*Estudis bibliomètrics sobre la recerca en física a Catalunya*) vam ampliar fins a una cinquantena d'articles en què (tret de la primera referència de la llista) el més citat arribava tot just a les

tres-centes citacions, mentre que ara comptem amb sis referències citades més de quatre-centes vegades. Observem que de les vint-i-tres referències de la llista anterior n'hi ha set que pertanyen al període estudiat (publicades entre 1996 i 2002). Més encara, de les cinc referències més citades, quatre han estat publicades en el període estudiat. Això té un mèrit especial, ja que, com és obvi, aquestes publicacions han tingut menys temps per a ésser citades que no pas publicacions anteriors. Això indica que aquestes publicacions s'han produït en àmbits de gran impacte: tres (efecte túnel quàntic magnètic, magneto-resistència colossal en òxids, i magnetisme en materials compostos per superposició de capes fines de materials magnètics diferents) poden tenir aplicacions en nous sistemes de memòria per a ordinadors, mentre que l'article dedicat a cosmologia és el primer que, a partir de l'estudi de supernoves llunyanes, indicà l'expansió accelerada de l'univers.

Els grans resultats de la física del període estudiat no s'acaben aquí. Altres articles d'aquest període han assolit més de cent vint-i-cinc citacions; en particular, recordem, entre d'altres que probablement no hem pogut localitzar, els articles següents (taula 10).

TAULA 10
*Altres articles de física procedents d'alguna institució de recerca de Catalunya
publicats entre 1996 i 2002, citats més de cent vint-i-cinc vegades*

Article	Citacions	Àrea	Institució
<i>Europhys. Lett.</i> , núm. 35 (1996), p. 301	145	Magnetisme	UAB
<i>Nucl. Phys. B</i> , núm. 466 (2000), p. 3	142	Partícules elementals	UAB
<i>Nucl. Phys. B</i> , núm. 586 (2000), p. 141	141	Partícules elementals	UAB
<i>Phys. Rev. Lett.</i> , núm. 77 (1996), p. 3728	126	Partícules elementals	UAB
<i>Phys. Lett. B</i> , núm. 438 (1998), p. 255	125	Partícules elementals	UAB
<i>Phys. Rev. Lett.</i> , núm. 86 (2001), p. 3200	115	Física estadística	UPC

Cal, també, que el públic arribi a conèixer l'esforç investigador dels nostres centres de recerca. Cal fer notar, en aquest sentit, l'esforç remarcable que estan fent els gabinets de premsa de les universitats per dur a terme aquesta funció, i l'acolliment que dona la premsa a notícies sobre articles publicats en algunes revistes especialment conegudes, com *Nature*, *Science* o *Physical Review Letters*.

4.3. L'aportació catalana en el context espanyol

A fi de fer una comparació amb altres àmbits geogràfics, hem reproduït, actualitzada, la llista de les vint-i-cinc publicacions de física més citades de l'àmbit hispànic (taula 11). Veiem que els vuit primers articles de la taula 9 es troben en aquesta llista.

Per tal de tenir algun element mitjà de comparació, esmen-

TAULA 11
Llista d'articles de física citats més de tres-centes vegades procedents d'alguna institució espanyola de recerca

Article	Citacions	Àrea	Institució
<i>Eur. Phys. J. C</i> , núm. 3 (1998), p. 1	2.113	Partícules	CIEMAT, UV
<i>Phase transitions, Academic</i> , 1983	1.984	Fís. estadíst.	UB
<i>Eur. Phys. J. C</i> , núm. 15 (2001), p. 1	1.951	Partícules	CIEMAT, UV
<i>Phys. Rev. D</i> , núm. 54 (1996), p. 1	1.771	Partícules	CIEMAT, UV
<i>Phys. Rev. D</i> , núm. 50 (1994), p. 1173	1.070	Partícules	CIEMAT, UV
<i>Phys. Rev. L</i> , núm. 74 (1995), p. 4091	832	Quàntica	Univ. Castella-la Manxa
<i>Phys. Lett. B</i> , núm. 239 (1990), p. 1	661	Partícules	CIEMAT, UV
<i>Phys. Rev. D</i> , núm. 45 (1992), p. S1	608	Partícules	CIEMAT
<i>Phys. Rev. D</i> , núm. 66 (2002), p. 1	571	Partícules	CIEMAT, UV
<i>Phys. Rev. Lett.</i> , núm. 76 (1996), p. 3830	537	Magnetisme	UB
<i>Phys. Rev. Lett.</i> , núm. 76 (1996), p. 1122	519	Magnetisme	ICMAB-CSIC
<i>Phys. Rev. A</i> , núm. 31 (1985), p. 2672	517	Fís. estadíst.	UAM
<i>J. Magn. Magn. Mat.</i> , núm. 192 (1999), p. 203	490	Magnetisme	UAB
<i>Phys. Lett. B</i> , núm. 204 (1988), p. 1	488	Partícules	CIEMAT
<i>Nature</i> , núm. 391 (1998), p. 51	476	Cosmologia	UB

TAULA 11 (Continuació)
 Llista d'articles de física citats més de tres-centes vegades procedents d'alguna institució espanyola de recerca

Article	Citacions	Àrea	Institució
<i>Extended irrevers, Springer</i> , 1983	460	Termodinàm.	UAB
<i>Phys. Lett. B</i> , núm. 170 (1986), p. 1	440	Partícules	CIEMAT
<i>Nucl. Instr. Meth. A</i> , núm. 289 (1990), p. 35	407	Partícules	CIEMAT
<i>Nature</i> , núm. 386 (1997), p. 256	385	Magnetisme	Univ. de Saragossa
<i>Phys. Rep.</i> , núm. 83 (1982), p. 281	360		
<i>Phys. Lett. B</i> , núm. 329 (1994), p. 399	333	Partícules	Univ. de Santiago
<i>Phys. Lett. B</i> , núm. 302 (1993), p. 533	325	Partícules	Univ. de Santiago
<i>Phys. Rev. A</i> , núm. 26 (1982), p. 1589	325	Fís. estadíst.	UB
<i>Phys. Rev. Lett.</i> , núm. 74 (1995), p. 5036	308	Òptica	UPC
<i>Phys. Rev. Lett.</i> , núm. 71 (1993), p. 1852	292	Quàntica	UAM

tarem que a Espanya es publicaren 22.070 articles de física en el període 1993-2003, que aconseguiren una mitjana de 7,33 citacions/article, segons les dades de «isiknowledge», cosa que fa que puguem considerar articles molt citats els que han estat citats més de setanta-cinc vegades. Pel que fa al nombre mitjà de citacions per article especificat per universitats, segons les dades de l'*ISI web of knowledge*, queda indicat en la taula següent (taula 12).

TAULA 12
 Nombre de publicacions en física i impacte mitjà
 en diverses universitats d'Espanya, segons «isiknowledge»

Institució	Articles	Citacions/article
UV	1.796	10,93
UAB	1.198	9,11
UB	2.036	8,28
CSIC (Cat.)	450	7,40
UAM	2.173	11,09
Univ. del País Basc	825	6,84
UPC	750	6,81
Univ. de Saragossa	1.219	6,41
Univ. de Santiago	626	6,25
Univ. Compl. Madrid	1.952	6,18

Com ja havíem indicat en el nostre estudi sobre les publicacions més citades en física en les universitats espanyoles, la universitat que assoleix, en física, un índex d'impacte més elevat a Espanya és la Universitat Autònoma de Madrid (UAM), seguida per la Universitat de València (UV), l'alt índex de la qual és degut en part al fet que cinc dels sis articles més citats de la física espanyola corresponen a taules de propietats de partícules elementals en les quals han participat alguns representants d'aquesta universitat, cosa que aporta alguns milers de citacions als articles de la seva universitat (de fet, els articles més citats acostumen a tenir una influència considerable en elevar el nivell mitjà de citacions de les publicacions d'un determinat centre). Segueixen la UAB i la UB, la Universitat del País Basc i la UPC. A l'*ISI web of knowledge* no hi ha dades (en física) de les universitats de Girona ni Rovira i Virgili (cosa que no és estranya, ja que no tenen un nombre de físics gaire elevat) ni de la Universitat Politècnica de Madrid ni de la Universitat de Sevilla, una altra institució que cal tenir en compte en física. Tampoc no hi ha dades per als instituts del CSIC a Catalunya; per això, el valor indicat en aquest cas és una estimació relacionada amb el nombre real d'articles, i el nombre mitjà de citacions per article és el que correspon als articles de física del CSIC al conjunt d'Espanya. Convé recordar, finalment, a efectes de comparació, que el nombre de publicacions i les citacions per article de les universitats Califòrnia-Santa Bàrbara i Califòrnia-Berkeley són, respectivament, 4.264 articles i 19,53 citacions/articles i 6.761 articles i 14,28 citacions/article.

4.4. L'aportació catalana en el context internacional

Per tal de tenir alguna comparació internacional, recollim, de la mateixa base de dades, els índexs d'impacte mitjans per diversos països. S'observa un predomini, en posicions capdavanteres, de països petits, però amb una forta tradició científica. La mitjana d'impacte corresponent a Catalunya pot ésser calculada a partir de les dades de la UAB-UB-UPC-CSIC, que representen un percentatge molt elevat del nombre d'articles de física a Catalunya, i ens duu a un valor de 8,25 citacions/article, que se situa en una posició perfectament homologable al nivell internacional (taula 13).

TAULA 13
Impacte mitjà en física (en citacions/article) de diversos països

País	Citacions/article
Suïssa	12,08
EUA	10,56
Dinamarca	10,17
Holanda	9,41
Escòcia	9,33
Israel	9,08
Finlàndia	8,69
Àustria	8,60
Alemanya	8,53
Xipre	8,40
Nova Zelanda	8,34
Canadà	8,33
Anglaterra	8,31
Suècia	7,90
Gal·les	7,47
França	7,58
Itàlia	7,58
Espanya	7,33

Un altre element de comparació de tipus general el podem obtenir a partir de les dades de l'*Essential Science Indicators* de l'*ISI web of knowledge*, que recull una llista d'uns vuit mil articles de física de tot el món, articles molt citats publicats entre gener de 1993 i octubre de 2003. Entre els primers cinc-cents articles més citats n'hi ha catorze d'universitats espanyoles, cinc amb participació del Centro de Investigaciones Energéticas, Me-

dioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) i València, un de la Universitat de Castella-la Manxa, dos de la UB, un de la UAB, un de Saragossa, dos de Santiago, un de la UPC i un de la UAM.

Un altre indicador, més anecdòtic però que també presenta un cert interès, és el d'articles de recerca que han aconseguit repercussió mediàtica internacional. El 1996, un article sobre el descobriment de l'efecte túnel magnètic en nanopartícules (*Phys. Rev. Lett.*, núm. 76 [1996], p. 3830) fou comentat en diverses revistes, entre les quals *Physics Today*, i a la premsa; el 1999, una aplicació de models difusius amb retard a la propagació de la cultura neolítica a Europa (*Phys. Rev. Lett.*, núm. 82 [1999], p. 867) fou objecte de diversos articles de premsa i de programes de televisió; el 2001, un article sobre la supressió de soroll per l'addició de més soroll en sistemes no lineals (*Phys. Rev. Lett.*, núm. 86 [2001], p. 950) fou esmentat dins la secció de ciència del *New York Times* i, com a conseqüència, en diversos altres diaris i mitjans de comunicació. Diversos altres articles de física han rebut també una atenció considerable en la premsa catalana, gràcies a l'impuls dels gabinets de premsa de les universitats i a l'interès dels periodistes per aquestes matèries.

També cal esmentar alguns premis a investigadors: la Medalla Lars Onsager, atorgada anualment per la Universitat de Trondheim a investigadors en física estadística, fou concedida el 2002 a un investigador en aquesta matèria del Departament de Física Fonamental de la UB. Un investigador del Departament d'Astronomia i Meteorologia obtingué el Fred Scarf Award 1999 de l'American Geophysical Union a la millor tesi doctoral de ciències de l'espai i aeronòmia. El Premi Duran Farell (2002), de Gas Natural, fou per a investigadors de l'ICMAB-CSIC, i el Premi Nacional d'Investigació Blas Cabrera, del Ministeri de Ciència i Tecnologia, fou concedit a un investigador de l'ICMAB-CSIC.

Altres formes de presència internacional són la participació en projectes europeus, en comitès internacionals, en consells editorials, en conferències invitades, o en l'organització de congressos i de cursos, de programes de doctorat internacionals, o en premis internacionals. Podem destacar el lideratge i participació en projectes europeus (com ara en nanotecnologia i qbits magnètics en computació quàntica, sensors nanoscòpics, micro-sistemes, fotònica) en el V Programa Marc (1998-2002) de la UE. També cal fomentar programes de doctorat d'alt prestigi que captin estrangers i facin de Catalunya un centre de referència en alguns camps de la física.

4.5. Patents

El disseny d'aparells o de tècniques susceptibles d'aplicació directa porta al camp de les patents, un camp on la física ha estat

massa poc present fins no fa gaire. La situació ha millorat des del report anterior, en dos aspectes: ha augmentat el nombre de patents sol·licitades, i s'ha eixamplat el camp de col·laboració amb les empreses. Detallarem ara els progressos en aquests dos camps.

Alguns grups han aconseguit darrerament diverses patents internacionals: el Grup de Magnetisme del Departament de Física Fonamental de la UB ha aconseguit set patents internacionals, relacionades amb aplicacions de magnetisme i nanotecnologia al tractament de la informació, i l'ICMAB ha aconseguit onze patents en el marc d'Espanya, referents a refrigeració magnètica, conducció elèctrica variable, limitadors de corrent, detectors magnètics, aerogels de silici, obtenció de pols, fils, làmines i cintes superconductores, precipitació de partícules sòlides finament dividides. Algunes d'aquestes patents sorgeixen de col·laboracions amb empreses espanyoles (ENHER, Carburos Metàlics, per exemple) i d'altres amb empreses internacionals, dintre de projectes europeus. El Grup de Física i Cristal·lografia de Materials de la URV ha aconseguit dues patents sobre obtenció de tungstanat doble d'iterbi i potassi (amb aplicació a la generació de llum làser) i sobre la producció de capes primes de tungstanats dopats amb iterbi per a noves generacions de làsers miniaturitzats de potència elevada. També, grups d'electrònica han aconseguit algunes patents en materials per a sensors.

A aquestes diverses patents cal sumar-hi les sol·licitades des de Barcelona. La Classificació Internacional de Patents, seguida per l'Oficina Espanyola de Patentes y Marcas, dedica una part a les patents relacionades amb la física. Els resultats de la cerca per a l'Oficina de Patents de Barcelona són presentats a la taula 14.

Cal dir que la relació de la majoria de les patents amb el que entenem com a física en aquest estudi és bastant migrada; així,

per exemple, hi ha patents sobre màquines servidores d'entrepans, o sobre màquines que mantenen calents entrepans, màquines electròniques de joc, o sobre fundes per a DVD, que són de caràcter pràctic però poc relacionades amb el resultat d'una recerca de tipus fonamental. D'altres, en canvi, estan relacionades amb temes com ara l'optimització de dispositius luminotècnics, detectors iònics de fum, alarmes acústiques, més properes a situacions estudiades per la física. Aquestes patents estan fetes, en nombres comparables, per indústries o per particulars, sovint corresponents a dèries força anecdòtiques.

Pel que fa als centres públics, en aquest cas les universitats, la UPC ha presentat en aquest període 25 patents, i la UAB, la Universitat de Lleida (UdL) i la UdG una patent cadascuna, amb un total de 28 patents sobre les 291 patents sol·licitades a Catalunya. Un estudi atent de les patents indica que la majoria no corresponen a departaments de física, sinó més aviat a telecomunicacions, enginyeria informàtica o electrònica, no cobertes en aquest treball. Dintre de les grans línies de la física, les patents estan relacionades amb òptica (dispositius per a mesura automàtica de paràmetres opticogeomètrics i detecció de defectes en lents oftàlmiques, un espectropluviòmetre òptic, o una tècnica per a mesurar velocitats lineals i rotacionals d'objectes o densitats de fluids amb correccions de temperatura), amb electrònica (dispositius de protecció de línies elèctriques, per a mesurar altes tensions, linealitzadors adaptatius per a amplificadors de potència), informàtica (determinació de vies ràpides de memòria, sincronització d'accés a memòria en multiprocessadors vectorials), ciències de materials (mesura d'impedància elèctrica, d'aeropermeabilitat en medis porosos, caracterització i control de mesclures bituminoses), o de biofísica (transluminadors per a bandes fluorescents de proteïnes i DNA en gels electroforètics). No hem

TAULA 14
Patents relacionades amb física registrades a l'oficina de patents de Barcelona

Any	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Catalunya	29	42	68	59	41	55	25
Sector privat	27	39	63	54	34	52	22
Sector públic	2	3	5	5	7	3	3
Espanya	149	237	415	340	232	308	120
Percentatge català	19,5	17,7	16,4	17,3	17,6	17,9	20,8
Conjunt de bases de dades (inclosa l'anterior): patents de física registrades per organismes de recerca catalans							
Patents	4	7	5	5	12	3	3

identificat, però, investigadors dels departaments de física entre els autors d'aquestes patents.

4.6. Col·laboracions amb empreses

Tot i que la col·laboració amb empreses és més directa en les enginyeries que no pas en la física, cal constatar que la interfície d'interacció amb les empreses i de transferència de coneixement i de tecnologia s'ha eixamplat considerablement des del report anterior, cosa que queda reflectida també en l'apartat 5 sobre recursos econòmics, en què el volum econòmic dels contractes de col·laboració amb empreses ha augmentat considerablement.

Convé examinar amb un cert detall aquesta frontera activa i prometedora, impulsada des de les diverses administracions amb iniciatives diverses, com els instituts que contribueixen a incrementar la relació entre les universitats i les empreses, els programes de col·laboració entre universitat i empresa, programes de desenvolupament i consolidació de xarxes temàtiques dinamitzadores de recerca i desenvolupament de transferència de tecnologia, amb participació d'universitats i empreses, les xarxes europees mixtes universitat-empresa. També podem esmentar l'impuls rebut per algunes àrees industrials d'alta tecnologia poc desenvolupades a Catalunya fins no fa gaire, com per exemple la indústria aeronàutica, en la qual comença a haver-hi alguns fruits interessants.

Les relacions entre física i indústria es desenvolupen sobretot en els camps de materials, magnetisme, superconductivitat, electrònica, òptica, energia, i en algunes àrees més especialitzades, com instrumentació per al CERN o per a indústries aeronàutiques, o col·laboració matemàtica o informàtica amb empreses. N'esmentarem alguns exemples. L'Institut de Ciència de Materials de Barcelona signà un conveni amb Carbuross Metàlics, el 1999, per crear MATGAS-2000, un laboratori tecnològic conjunt per a projectes tecnològics i de desenvolupament. Hi ha col·laboracions entre laboratoris de cristal·lografia de l'ICMAB i indústria farmacèutica, entre l'IEEC i indústries espacials de nova creació (sobre temes relacionats amb el control distribuït de satèl·lits), i sobre la gestió de dades de satèl·lits mitjançant un contracte de l'ESA amb un consorci format per la UB, el Centre de Supercomputació de Catalunya (CESCA) i l'empresa de programari GMV de Madrid; entre l'IFAE i empreses que fabriquen imants, calorímetres i detectors per al CERN, entre grups d'enginyeria de làsers i empreses interessades en el disseny i la realització de telequips de telepresència, entre l'INTE, que estudia la radiació ionitzant i la fiabilitat de dosímetres electrònics de radiació i calibratge de sondes de mesurament de radiació ambiental,

i instal·lacions com ara serveis de radioteràpia dels hospitals. Hi ha col·laboracions entre grups de meteorologia i física de fluids i empreses d'enginyeria elèctrica d'origen eòlic, entre grups de física de materials i indústries ceràmiques, entre grups de termodinàmica i indústries frigorífiques, o grups de biofísica i desenvolupament de tècniques no invasives de respiració assistida.

Altres temes de recerca són, sense pretendre ésser exhaustius, només a tall indicatiu: superfícies òptiques polides mitjançant tractament tèrmic, reconeixement de forma, color i textura mitjançant processament òptic i digital d'imatges, desenvolupament de sensors òptics (Centre de Desenvolupament de Sensors, Instrumentació i Sistemes —CD6—, de Terrassa), microsensors de magnituds físiques i químiques desenvolupats per grups d'electrònica, tècniques de dosimetria en radioteràpia, vigilància radiològica de centrals nuclears catalanes, desmantellament del reactor Argos, simulació del transport de radiació en problemes d'interès clínic, o cursos de formació de supervisors i operadors d'instal·lacions radioactives. A una escala més teòrica, hi ha interaccions entre el grup de física estadística interessat en processos estocàstics i la seva aplicació a l'economia (econofísica) i companyies financeres de Catalunya, amb repercussions notables en la gestió de fons d'inversió; o en el desenvolupament de programaris informàtics per al CERN, o desenvolupament de codis d'interacció radiació-matèria en dosimetria clínic i radioprotecció, o de predictors per al sector agropedagari basats en xarxes neuronals.

5. ELS RECURSOS ECONÒMICS

Un paràmetre essencial en la recerca és el dels recursos disponibles. En aquesta secció analitzem el conjunt de subvencions atorgades durant el període 1996-2002, tot detallant-ne els receptors, per temes de recerca i per universitats, i les fonts de finançament. Aquesta és la part més difícil d'obtenir de tot el report, i per tant la que està sotmesa a un marge d'error més gran, ja que podria ésser que ignoréssim diversos dels projectes concedits.

Aquest tema se situa en un marc d'interès per incrementar les despeses en recerca que, en el percentatge de despesa en recerca en relació amb el producte interior brut (PIB) ha pujat des d'un 0,64 % fins a un 1,27 % de 1987 a 2002 a Catalunya (d'un 0,64 % a un 1,03 % al conjunt de l'Estat). Aquest percentatge és inferior al de Madrid (un 1,90 % el 2002). L'increment esmentat està per sobre de l'evolució de la mitjana europea, cosa necessària si volem arribar a convergir amb Europa (*Avui*, 16 desembre 2003).

Les quantitats que indiquem corresponen als costos de projectes i d'infraestructures per a projectes i a convenis amb em-

preses, però no inclouen el personal (tret dels professors visitants), ni els edificis, ni les beques, ni les despeses de mobilitat especials, ni tampoc els doctorats de qualitat. Pel que fa als projectes, hem indicat els concedits durant aquest interval. Cal tenir en compte, però, que els primers anys de l'interval es disposava de recursos generals per a projectes anteriors, i que les quantitats concedides per a projectes durant els darrers anys seran en part destinades a anys posteriors a l'acabament de l'interval. Fer un càlcul més acurat resultava extremadament difícil. En el report anterior vam emprar un criteri anàleg a aquest, de manera que la comparació amb el report anterior és significativa.

5.1. Distribució per àrees i per centres

En el càlcul del finançament per centres hem topat amb la dificultat d'accedir als detalls sobre les quantitats corresponents a cada projecte concret. Tot i que les memòries d'alguns centres les especifiquen, molts altres centres hi posen tan sols els noms i la referència dels projectes, però donen només el balanç econòmic global del conjunt dels projectes. En el cas de centres dedicats a activitats interdisciplinàries, el desconeixement de les quantitats concretes de cada projecte fa que l'assignació econòmica que atribuïm a la física tingui un marge considerable d'ambigüïtat. Per exemple, en l'ICMAB hem inclòs en el Report de Física els grups de Materials Magnètics i Superconductivitat, i el de Cristal·lografia i Difracció de Raigs X, però no els grups més centrats en els aspectes químics dels materials —encara que, de fet, la distinció entre perspectives físiques i químiques en el camp de la ciència de materials és en bona part fútil, ja que es pretén, precisament, integrar amb profunditat els aspectes físics, químics i tecnològics. Així, hem assignat als grups esmentats una quantitat proporcional al nombre d'investigadors, en aquest cas un 33 % del total de l'ICMAB, aproximadament. Anàlogament, en l'Institut de Ciències del Mar i en l'Institut Jaume Almera hem assignat un 11 % del pressupost total al Grup d'Oceanografia Física i un 8 % del total al conjunt dels dos grups de Propietats Òptiques dels Sòlids i de Dinàmica de la Litosfera. Dificultats semblants les trobem en l'assignació a física d'una part del Departament de Geodinàmica i Geofísica de la UB, dels grups de Biofísica de les facultats de medicina de la UB i la UAB, i investigadors de fluids de la URV. A falta de dades més detallades, hem distribuït els fons proporcionalment al nombre d'investigadors, amb una ponderació d'un 1,5 en el cas de recerca experimental. Fetes aquestes observacions, creiem que la taula 15 ofereix una descripció plausible i versemblant de les quantitats destinades als diferents centres.

TAULA 15
*Distribució, en euros, del finançament per centres
en els períodes 1996-2002 i 1990-1995*

Centre	1996-2002	1990-1995
UB	18.280.000	[8.474.000]
UAB	9.670.000	[6.009.000]
UPC	5.100.000	[3.666.000]
URV	300.000	[240.000]
CSIC	6.020.000	[5.169.000]
URL	240.000	[60.100]
UdG	830.000	[120.200]
IEEC	660.000	—
<i>Total</i>	41.200.000	[24.641.000]

En la taula 15, les dotacions de la UAB inclouen l'IFAE i el Laboratori de Llum de Sincrotró. Els valors elevats de la URL es deuen a l'Observatori de l'Ebre, una part de les subvencions al qual estan comptabilitzades en el CSIC, ja que alguns membres de l'Observatori en formen part i reben els ajuts mitjançant projectes atorgats al CSIC.

Per tal d'interpretar l'evolució del finançament, convé tenir en compte l'increment del nombre d'investigadors, el fet que el període del present estudi aplega set anys en lloc dels sis anys de l'estudi anterior, i la inflació acumulada durant els set anys transcorreguts, que ha estat, en conjunt, de l'ordre del 15 %. El finançament per investigador i per any fou de 6.845 euros en el període 1990-1995, i ha estat de 7.394 euros en el període 1996-2002. Si tenim en compte la inflació, i comptem en termes de moneda constant, la quantitat queda reduïda a 6.430 euros, referits a l'any 1996, lleugerament inferior a la quantitat del període 1990-1995 (taula 16).

En definitiva, cal reconèixer que les diverses administracions implicades han fet un esforç considerable, que es mesura, més que no pas en un augment de la despesa mitjana per investigador (tret de l'actualització segons la inflació), en un increment d'investigadors i en una millora d'infraestructures. El mèrit és, doncs, considerable, ja que la quantitat total exigiria sumar, als finançaments donats aquí, els sous del personal fix i contractat i les beques dels projectes espanyols, i les ampliacions d'edificis, que suposen despeses i inversions molt considerables, el conjunt de les quals multiplica segurament en un factor entre 3 i 4 les dades donades en la taula. No obstant això, el finançament de projectes de recerca experimentals, que en general suposen més despesa, podem considerar que encara és baix, i fóra bo

TAULA 16
Distribució del finançament, en euros, per àrees de recerca

Àrea	1996-2002	1990-1995
Matèria condensada	12.200.000	[8.534.170]
Partícules i camps	4.220.000	[2.884.790]
Gravitació	290.000	(inclosa a Partíc. i camps)
Física estadística i termo	3.100.000	[1.202.000]
Òptica	3.600.000	[2.584.290]
Astronomia i astrofísica	2.820.000	[1.021.700]
Física nuclear	1.590.000	[1.382.300]
Electrònica	5.360.000	[2.884.790]
Fluids	900.000	[360.600]
Biofísica	790.000	[421.000]
Oceanografia	2.130.000	[961.600]
Atmosfera	2.290.000	[1.262.100]
Geofísica	1.900.000	[240.400]
Total	41.200.000	

que es pogués incrementar en el futur immediat, tant per a projectes com per a infraestructura.

A aquestes inversions caldrà sumar-hi, a partir de 2003, les aportacions per a la construcció del Laboratori de Llum de Síncrotró, que ascendiran a més de 120 milions d'euros des de 2003 fins a 2008, i que preveu un personal d'uns 125 científics i tècnics.

La URL figura en física gràcies a l'Observatori de l'Ebre. Ara bé, moltes de les subvencions a l'observatori de l'Ebre arriben a través del CSIC. En oceanografia hem inclòs projectes de radioactivitat ambiental, que podrien ésser comptats en l'apartat de física nuclear, però ens ha semblat més adient fer-ho aquí perquè la majoria dels fons vénen de programes ambientals.

5.2. Distribució del finançament segons les fonts

El finançament de la recerca a Catalunya prové de la UE, de l'Administració central, de la Generalitat de Catalunya, de les universitats mateixes, i de convenis amb empreses o amb insti-

tucions públiques. En el període 1996-2004 hi ha hagut un Ministeri de Ciència i Tecnologia. El Ministeri d'Educació i Ciència passà a ésser Ministeri d'Educació, Cultura i Esports, que ha conservat una Direcció General d'Ensenyament Superior i Investigació Científica. Pel que fa a Catalunya i a Europa, els ajuts se situen en el II Pla de Recerca de Catalunya (1997-2003) i en el V Programa Marc Europeu.

TAULA 17
Distribució del finançament, en euros, segons les fonts

Fonts de finançament	1996-2002	1990-1995
Administració central	14.550.000	[12.860.000]
Generalitat de Catalunya	4.600.000	[2.825.000]
Unió Europea	12.670.000	[5.410.000]
Convenis	8.380.000	[3.185.000]
Universitats i altres	1.000.000	[360.000]
Total	41.200.000	

A la taula 17 s'observa un increment notable del finançament, sobretot pel que fa a la Generalitat de Catalunya, la UE i els convenis amb empreses i institucions públiques i privades. Per a fer una avaluació més ajustada de l'esforç de l'Administració central cal recordar que a càrrec seu van els sous de la gran majoria dels investigadors (professors universitaris, membres del CSIC i un nombre important de becaris predoctorals). En termes relatius, resulta especialment interessant l'increment del finançament procedent de la UE i dels convenis, que revela un augment en la capacitat d'iniciativa dels grups, tant en participació en projectes europeus com en aproximació a la indústria, dos aspectes molt necessaris per a una consolidació de la física.

Pel que fa a la Generalitat de Catalunya, uns 2.100.000 euros corresponen a ajuts de la Direcció General de Recerca a grups consolidats, 1.700.000 a infraestructures i manteniment i uns 800.000 a programes de professors visitants i d'organització i assistència a congressos. Hem deixat per a la secció de convenis els signats amb els departaments d'Indústria i Energia, de Medi Ambient i de Política Territorial i Obres Públiques, que sumen uns 900.000 euros.

Els convenis amb empreses i institucions comprenen una gran diversitat de situacions. Alguns es refereixen a programes de professors visitants pagats per empreses (Iberdrola, Fundación Ramon Areces), d'altres a equipaments informàtics (Sun Microsystems), d'altres a contractes amb grans empreses com

ENHER, Carburos Metálicos, o petites empreses (apartat 4.7). També hem inclòs col·laboracions amb institucions com el Servei Meteorològic de Catalunya o l'Institut Nacional de Meteorologia, o amb diversos ajuntaments o amb diversos departaments de la Generalitat de Catalunya, esmentats en el paràgraf anterior. L'apartat «Universitats» inclou petita infraestructura, adquisició de bibliografia, ajuts a congressos, ajuts a la publicació d'articles i de tesis doctorals; en l'epígraf «altres» incloem la Fundació Catalana per a la Recerca, que subvenciona, per exemple, la utilització del supercomputador CESCA.

6. BALANÇ I CONCLUSIONS

En aquesta darrera part assagem una síntesi i fem un balanç de les observacions fetes en aquest estudi. Creiem que el conjunt és molt positiu i que posa de manifest una empena i una vitalitat molt considerables de la comunitat científica dedicada a la física a Catalunya. Efectivament, les dades més destacables són, a parer nostre, les següents:

1) El nombre d'estudiants en física experimenta fluctuacions considerables. Després d'una caiguda considerable el curs 2000-2001, probablement per l'increment d'ofertes laboralment atractives com telecomunicacions o enginyeria informàtica, hi ha hagut una lleugera recuperació en el nombre d'estudiants.

2) El nombre total d'investigadors, doctors més doctorands, ha augmentat considerablement respecte del període 1990-1995, tot passant d'uns sis-cents a uns vuit-cents, tot i que llavors es temia haver arribat a una saturació. Cal tenir en compte la incorporació d'investigadors consolidats en contractes com els d'ICREA o del programa Ramón y Cajal; destaca, a més, l'increment en el nombre de doctors joves que vénen a fer una estada postdoctoral a les nostres universitats i el paper dinamitzador d'alguns nous instituts, que han generat un nombre apreciable de contractes d'investigadors i de visitants que passen un temps llarg a les nostres universitats.

3) Pel que fa a institucions i infraestructures relacionades amb la recerca en física, cal esmentar, seguint el precedent de l'IFAE (fundat el 1993), la fundació de l'IEEC, que aplega investigadors de les diverses universitats i del CSIC, el Centre Especial de Recerca en Bioelectrònica i Nanociència (del Parc Científic de la UB) i, més recentment (a començaments de 2003, ja fora del període estudiat), la fundació de l'ICFO i la constitució del Centre Especial de Recerca en Astrofísica, Física de Partícules i Cosmologia de la UB i el CERMAE. Iniciatives de coordinació com aquestes han contribuït a potenciar econòmicament i operativament els seus camps respectius, però convindria potenciar encara amb més profunditat el grau d'interacció intern,

en lloc de limitar-se a una simple juxtaposició d'iniciatives dels diversos grups preexistents, que en alguns casos contribueix a la inestabilitat d'aquestes iniciatives.

4) Per les seves repercussions futures, cal destacar especialment l'aprovació del projecte d'un gran laboratori de llum de sincrotró, una gran infraestructura d'envergadura europea, que dinamitzarà àrees de la física com són ara ciència de materials, electrònica, nanotecnologia i biofísica, a més d'ésser un al·licient per al teixit industrial avançat.

5) Hi ha hagut un increment molt notable en el nombre total d'articles en revistes especialment rellevants, i també un increment relatiu en la proporció d'articles publicats en les revistes respectives en relació amb el total d'articles provinents de tot el món. La productivitat, però, s'ha mantingut al mateix nivell que en el període 1990-1995, d'unes 1,2 publicacions per doctor i any.

6) Alguns articles apareguts durant el període estudiat han aconseguit, des de la seva publicació, un nombre molt important de citacions; en particular, n'hi ha quatre que superen les quatre-cents citacions, cosa que encara no havia passat en les publicacions anteriors de física a Catalunya. D'altres articles han superat en poc temps les cent cinquanta citacions, cosa que indica que estan en contextos especialment actius.

7) L'impacte mitjà dels articles ha augmentat. El nombre mitjà de citacions per article (en el període 1993-2003) se situa en 8,25, un valor homologable a escala internacional, ja que és un valor superior a les mitjanes de França, Itàlia i Espanya, tot i que encara està per sota de països com Dinamarca, Holanda, Escòcia o Gal·les, de dimensions comparables, però amb una tradició superior en recerca.

8) Ha augmentat la relació amb les empreses, tant públiques com privades, tant locals com multinacionals, especialment en ciència de materials, magnetisme, medi ambient, fluids, energia, òptica i electrònica. Ha augmentat el nombre de patents: des de deu fins a unes quaranta.

9) El finançament per investigador i any ha passat de 6.845 euros en el període 1990-1995 a uns 7.400 euros en el període 1996-2002; ara bé, si tenim en compte la inflació acumulada durant els set anys del segon període, la quantitat rebuda per investigador i any val 6.450 euros en valor constant referit a 1996, quantitat, doncs, una mica inferior a la del període anterior.

10) Com que el nombre total d'investigadors ha augmentat considerablement, el finançament total dedicat a la recerca en física ha augmentat proporcionalment, posant de manifest un esforç apreciable per part de les administracions. Aquest esforç és encara més considerable si tenim en compte els sous dels investigadors, no inclosos en l'avaluació dels projectes considerats. No obstant això, fóra bo poder incrementar, en el futur immediat, el finançament per a projectes de recerca experimentals.

11) Diversos físics de les universitats catalanes han liderat projectes europeus de col·laboració internacional, àmplia, alguns dels quals incorporen empreses, en àrees com magnetisme, superconductivitat, electrònica i nanotecnologia, i astrofísica des de l'espai.

12) Les universitats són més sensibles a la necessitat de donar a conèixer la investigació que s'hi fa; els serveis de premsa són especialment actius i la presència de resultats de la recerca en els diaris ha crescut bastant.

La valoració força positiva expressada en els punts anteriors ha de servir per a encoratjar a seguir en una línia de consolidació de la bona feina feta, sense perdre de vista, però, que encara queda molt a fer. Efectivament, malgrat el creixement i l'augment de la qualitat de la recerca, es continua observant una excessiva dependència dels resultats respecte del voluntarisme dels investigadors; caldria no cedir en l'esforç de consolidar la infraestructura i el marc científic per tal de no malmetre el capital humà i científic aconseguit fins ara.

Queda encara força camí per a arribar a una situació d'excel·lència, en què les aportacions de les nostres universitats a la física siguin àmpliament reconegudes mundialment. Falta, encara, perquè els nostres programes de doctorat atreguin un gran nombre d'estudiants, perquè les nostres universitats figurin en els deu primers llocs en algunes de les especialitats a Europa, perquè el pas dels investigadors postdoctorals per les nostres universitats sigui una referència rellevant en el seu currículum, perquè la transferència de tecnologia sigui capaç de crear noves empreses o de dinamitzar i enfortir empreses ja existents, perquè les patents aconseguides siguin capaces de generar ingressos que contribueixin significativament al sosteniment d'instituts de recerca en una proporció comparable o superior a les subvencions rebudes dels poders públics. Falta encara força camí perquè la física sigui vista pels inversors internacionals com un al·licient rellevant per a instal·lar-se a Catalunya, o perquè sigui vista per la societat un valor a tenir en compte en fer balanç de la creativitat del país. Hi ha altres factors més imponderables —com ara la bona fortuna d'algun descobriment especialment remarcable— que esdevenen, però, més probables com més gran és l'esforç global realitzat en recerca.

AGRAÏMENTS

Agraïm l'ajut del senyor Llorenç Arguimbau per la recerca de fonts d'informació, que han estat decisives per a l'elaboració d'aquest treball, i els comentaris de les diverses persones —president i Junta Directiva de la Societat Catalana de Física, directors de departaments de física i de grups de recerca— que han llegit el report i ens han fet arribar les seves crítiques i suggeriments, entre els quals figuren Eduard Salvador, Ferran Sala, Jordi Torra,

Xavier Obradors, Juan Ramon Morante, Jaume Masoliver, Francesc Díaz, Santiago Royo, Joan Bagaria, Carmen Miguel...

REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

APPLEQUIST, T.; SHAPIRO, D. «Physics in a new era». *Physics Today* (2001), p. 34-39.

INSTITUT D'ESTUDIS CATALANS. *La recerca científica i tecnològica a Catalunya, 1990*. Barcelona: IEC: CIRIT, 1990.

JOU, D. *Reports de la recerca a Catalunya: Física 1990-1995*. Barcelona: IEC, 1997.

SENRA, P.; ROVIRA, L. «Estudis sobre la recerca en física a Catalunya. Els articles més citats». *Revista de Física*, núm. 2 (1999), p. 42.

— «Studies on physics research in Catalonia. The most cited papers». *Contributions to Science*, núm. 2 (2000), p. 237.

ROVIRA, L.; SENRA, P.; JOU, D. «Bibliometric analysis of physics in Catalonia: towards quality consolidation?». *Scientometrics*, núm. 49 (2000), p. 233-256.

— *Estudis bibliomètrics sobre la recerca en física a Catalunya*. Barcelona: IEC, 2001.

ROVIRA, L.; CADEFÀU, J.; DURAN, M.; ESPLUGA, X.; JOU, D.; LLOBET, A.; SENRA, P. *Mapa de excel·lència en física y química de las universidades españolas*. Universitat de Girona, 2003.

Annex

Llista de grups considerats, obtinguda a partir de les pàgines web dels diversos centres; entre parèntesis indiquem una estimació del nombre de doctors i doctorands que hem pogut documentar. De fet, alguns dels grups estan formats per membres de diversos departaments, de manera que la superposició d'informació sobre grups i departaments no sempre encaixa de manera senzilla. Ara bé, introduir tots els detalls i matisos hauria fet el report excessivament feixuc. Un cop fet el treball, i amb una visió de perspectiva d'aquestes dificultats, creiem que hauria estat menys discutible referir-nos només al nombre de membres dels departaments i no entrar en el detall dels grups; tot i això, creiem que val la pena conservar aquesta darrera informació, ja que, tot i alguna dislocació puntual, pot resultar útil com a descripció indicativa. Els asteriscs indiquen els grups que apareixen en la llista de grups consolidats de la Direcció General de Recerca del Departament d'Universitats, Recerca i Societat de la Informació de la Generalitat de Catalunya.

Universitat de Barcelona: Departament d'Estructura i Constituents de la Matèria (Física Nuclear Teòrica i de Moltes Partícules en Interacció* 9 + 4, Materials: Transicions de Fase i Propietats Magnètiques i de Transport* 9 + 10, Física d'Altes

Energies* 12 + 1); Departament de Física Aplicada i Òptica (Física i Enginyeria de Materials Amorfs i Nanoestructures* 10 + 7, Capes Fines i Enginyeria de Superfícies* 16 + 10, Òptica Física* 11 + 10), Departament de Física Fonamental (Gravitació i Cosmologia Relativistes i Processos Estocàstics* 19 + 13; Interaccions Magnètiques i Magnetisme Molecular* 9 + 3, Física Estadística* 9 + 12), Departament d'Astronomia i Meteorologia (Astronomia i Astrofísica* 21 + 16, Meteorologia* 9 + 19); Electrònica (Grup d'Enginyeria i Materials Electrònics, i Grup de Sistemes per a la Instrumentació i el Control) (40 + 46); Facultat de Geologia (11 + 5), Facultat de Medicina (Biofísica i bioenergètica cel·lular 2 + 3, Biofísica i Bioenginyeria 7 + 10)

Universitat Autònoma de Barcelona: Departament de Física (Física teòrica 18 + 5; Física d'Altes Energies 9 + 4; Electromagnetisme 7 + 2; Física Estadística 9 + 4; Física de les Radiacions 10 + 4; Física de materials I 6 + 4; Física de Materials II 7 + 2; Electromagnetisme 7 + 2, Òptica 6 + 5; IFAE (8); Facultat de Medicina (Grup de Biofísica 7 + 8), Escola d'Enginyeria (Grup d'Electrònica 12 + 8); Laboratori de Llum de Sincrotró (10 + 4).

Universitat Politècnica de Catalunya: Departament d'Òptica i Optometria (Enginyeria òptica 15 + 11); Departament de Física i Enginyeria Nuclear (Simulació per Ordinador en Matèria Condensada* 18 + 6, Làsers i Propietats Elèctriques i Òptiques

de Materials* 12 + 8, Transicions de Fase, Polimorfisme i Metaestabilitat* 7 + 6), Departament de Física Aplicada (Turbulència, Fluctuacions i Difusió* 10 + 6, Física de Materials: Propietats Elèctriques* 8 + 7), Física no Lineal (8 + 13), Fotònica (Departament de Teoria del Senyal i Comunicacions) (5 + 2); Laboratori de Tècniques Energètiques (6 + 3)

Universitat Rovira i Virgili (Grup de Física i Cristal·lografia de Materials 5 + 3), Grup d'Experimentació, Computació i Modelització en Mecànica de Fluids (5 + 3)

Consell Superior d'Investigacions Científiques

Institut de Ciència de Materials de Barcelona (Laboratori de Cristal·lografia i Difracció de Raigs X (6 + 8), Grup de Materials Magnètics (5 + 6), Grup de Materials Superconductors (5 + 12), Grup d'Estructura Electrònica (3 + 5), Grup de Creixement Cristal·lí (3 + 4), Grup de Propietats Òptiques (3 + 2), Institut de Ciències del Mar (Grup d'Oceanografia Física 11 + 7), Institut Jaume Almera (Grup de Propietats Òptiques dels Sòlids 5); Grup de Dinàmica de la Litosfera (7); Institut de Ciències de l'Espai (4 + 6)

Universitat de Girona: Departament de Física (Matèria Condensada 7 + 2; Física Aplicada 6 + 9; Ciència de Materials 3 + 2)

Institut d'Estudis Espacials de Catalunya (3 + 4)

Laboratori de Llum de Sincrotró (13 + 4)

Observatori de l'Ebre (7 + 5)