

LES FRONTERES

per D. Allan Bromley

66 (338/especial 1981)

ciència 5/6

Des dels quarks massius que es troben en les profunditats del nucli atòmic fins al col·lapse catastròfic de les estrelles gegants en els llocs més allunyats de l'univers, des de la realització parcial del somni d'Einstein d'una teoria unificada de les forces de la natura fins a les aplicacions més pràctiques en els camps de la tecnologia, la medicina i en l'àmbit de tota la nostra societat contemporània, la física continua tenint un impacte molt profund en la concepció de l'home sobre l'univers i sobre la qualitat de la vida. L'autor sosté que aquests darrers anys han estat els més productius en tota la història d'aquest camp en relació amb les noves descobertes i l'abast dels nous conceptes i ens mostra una selecció dels desenvolupaments més importants en aquesta ciència tan fonamental.

D.A. Bromley és professor Henry Ford II i director de l'A.W. Wright Nuclear Structure Laboratory, Yale University, New Haven 06520. El seu article fou publicat amb el títol *Physics* a "Science", vol. 209, pàgs. 110-121, el 4 de juliol del 1980. Copyright 1981 de l'American Association for the Advancement of Science

9 Els aspectes del coneixement humà sobre el món natural que són universals, permanents constitueixen la física: *universals* en el sentit que el comportament desxifrat en un laboratori terrestre es considera que és igualment vàlid en els punts més llunyans de l'univers, i *permanents* en el sentit que, un cop demostrada ara, una aportació en la comprensió de la natura se suposa que també era vàlida al començament de l'univers i que ho serà en un futur distant. Encara que la física és considerada molt sovint entre les més misterioses de les ciències, les seves aplicacions han afectat profundament les vides de cada ésser humà. La frontera del passat ha provat ser molt sovint l'aplicació del demà.

Aquests últims cinc anys han estat els més interessants, els més desafians i els més productius en la física mundial des del final de la dècada dels anys vint, just després del descobriment de la mecànica quàntica. Sembla que ens trobem en el llindar d'una comprensió completament nova dels fenòmens físics en un nivell més fonamental, al qual mai no havíem arribat. I, com a gratificació, trobem que com a contrast a la fragmentació que sempre havia caracteritzat la física —i també moltes altres ciències— en aquestes últimes dècades, la unitat i la coherència de la nostra ciència, que es troben amagades, estan emergint un altre cop. Conceptes i tècniques desenvolupades en un subcamp són aviat explotades en altres camps,

per a l'enriquiment de tots ells. Obviament, aquest breu resum d'un camp tan dinàmic no pot ser de cap manera complet. El que he intentat, a canvi, és seleccionar en cada un dels subcamps més grans de la física unes quantes àrees que il·lustraran la renaixença i el progrés, els quals jo crec que es faran en els anys a venir. Seguiré la jerarquia natural, des del microscòpic fins al macroscòpic, des de les profunditats del nucli atòmic fins als límits de l'univers que coneixem.

FÍSICA DE PARTÍCULES ELEMENTALS

Referent a l'estructura primària de la matèria, les forces fonamentals i simetries de la natura, la física de les partícules elementals es mou inexorablement cada cop a més altes energies per tal d'escorcollar com més va més curtes distàncies i establir així els principis d'ordre que la natura ha escollit.

L'*annus mirabilis* en aquest camp va ser el 1974. No sols va haver-hi una evidència produïda per un bloc novament contruït de la natura —en la descoberta de les partícules ψ^- , sinó que també es van introduir les grans teories d'unificació que tenien la intenció d'ajuntar l'electromagnetisme amb les interaccions nuclears dèbils (responsables de la radioactivitat) i les interaccions nuclears fortes (responsables dels lligams de les energies del nucli).

L'any 1974, després d'un esforç titànic, els físics experimentals i els físics teòrics havien arribat en general a la conclusió que tres entitats

massives i fraccionadament carregades, els quarks, constitueixen els blocs que es troben sota l'univers natural. La descoberta de les partícules ψ va demostrar conclusivament que encara existia un quart quark, que portava un atribut de quàntum completament nou, arbitràriament batejat amb el nom de *charm* (encís); en aquests dos últims anys la descoberta —fins i tot a una energia més alta— de les partícules Υ va provar l'existència d'un cinquè quark, aquest amb un atribut de quàntum igualment arbitràriament anomenat *bottom* (fons) (vegeu la figura 1). I gairebé tots els físics estan convençuts, en la base dels arguments d'una simetria teòrica, que un sisè quark amb l'atribut de *top* (cim) serà descobert quan puguin estar a l'abast dels experimentadors unes energies més altes. Els mitjans necessaris es troben ara en construcció als Estats Units (Brookhaven i Stanford) i a Europa (Ginebra i Hamburg).

Aquests quarks són els elements constituents dels anomenats hadrons, partícules que interactuen a través d'una força nuclear forta i que es divideixen en dues classes bastant diferents entre si: els barions, dels quals el protó és el membre conegut més lleuger i que se suposa que són composts per tres quarks; i els mesons, dels quals el pió és el membre més lleuger conegut i que hom creu que són composts de combinacions diferents de quark-antiquark.

Encara que s'ha notificat l'observació de quarks lliures, identificats per les seves característiques càrregues elèctriques, que han de ser fraccions de les dels electrons i els protons, gairebé tots els físics estan convençuts que a causa de les forces amb què estan lligats els quarks és impossible isolar-ne un de sol i que qualsevol intent de fer-ho només dóna com a resultat la producció de parells quarks-antiquarks, és a dir, mesons. Això, naturalment, no evitarà que es pugui fer un estudi detallat dels quarks, encara

DE LA FÍSICA

ciència 5/6

especial 1981/339 67

que es quedin atrapats per sempre en els hadrons, i amb l'aplicació d'energies cada cop més altes els estudis augmentaran en importància. La natura ens ha donat també tres electrons: el que ens és més familiar; el muó, que és encara més pesat; i el descobert recentment, encara més pesat: la partícula tau; hom creu que són partícules puntuals sense estructura i que cada una compta amb un neutrino corresponent i fins ara sembla que diferent. Juntes, aquestes partícules constitueixen la família dels leptons interactuants a través de forces nuclears dèbils. Fins fa molt poc tots els mesuraments de neutrinos havien donat una massa de repòs igual a zero, sempre movent-se a la velocitat de la llum i amb un comportament molt particular. Noves dades encara per confirmar apareixen per a prestar suport al suggeriment que els tres neutrinos no són realment diferents i que durant un cert període de temps cadascun d'ells "oscil·la", passant part de la seva vida en cada una de les tres manifestacions. Un corollari necessari és que la massa dels neutrinos muònics i els electrònics no és exactament zero, mentre que el neutrino pot tenir una massa molt gran i, d'aquesta manera, en alguns models molt preliminars i especulatiu pot aportar la massa que falta, una massa que ha estat en l'univers observable durant molt de temps. Però tot això requereix un estudi molt més profund.

Nosaltres, però, ens trobem amb gairebé sis quarks i potser sis leptons i amb una qüestió extremament fonamental, si no és que encara en queden més per trobar. Com se'ns mostra a la figura 1 només hem investigat fins a 11 bilions d'electrovolt (GeV) i hem trobat cinc quarks. És raonable creure que quan la màquina Isabelle a Brookhaven ens porti a 800 GeV en trobarem un altre? En realitat hi ha alguns suggeriments teòrics preliminars que ens porten a creure que això és cert. La teoria dels grups ha portat la unificació de la matemàtica per a la nostra comprensió de les simetries i els patrons de la física de partícules, però filosòficament a molts físics els ha preocupat l'èxit del grup $SU(6)$ en la descripció de la natura. Per què no $SU(6)$ o $SU(12)$? Molt recentment, però, s'ha suggerit que la natura pot estar organitzada d'acord amb el grup E8, el més complex d'una família tancada de cinc membres de les simetries matemàtiques, dels grups excepcionals de Lie, i, si això resultés veritat, només hi hauria sis quarks i sis leptons. Una de les qüestions obertes més importants amb què es troben els físics, llavors, és si la complexitat del microcosmos és limitada o no —com E8 suggeriria— i tan

aviat com es puguin aconseguir més altes energies hi haurà una cursa internacional per trobar les puntes agudes, com les que es troben a la figura 1, que són les úniques pistes que tenim d'una entitat enterament nova. Si apareixen noves entitats, la qüestió més òbvia és si hi ha més elements fonamentals dels que construïen els quarks o no. Ja s'estan desenvolupant teories preliminars, encara que ara per ara no s'ha aconseguit cap base sòlida que provi d'explicar tota la natura com el resultat de les combinacions de dues entitats —que s'anomenen *maons* o *rishons* (el nom depèn de l'autor de la teoria).

Paral·lelament a la investigació dels elements base hi ha hagut la de la gran unificació de les forces naturals. Gràcies a Maxwell es va saber que l'electricitat i el magnetisme eren una sola cosa, i amb l'ajuda de la mecànica quàntica es va arribar a l'electrodinàmica quàntica, que és la teoria més precisa i més conscienciosament provada que coneixem, la qual descriu els fotons que són les partícules de llum que transmeten la força electromagnètica —o, amb unes altres paraules, les partícules del camp electromagnètic. Durant aquest últim any, s'ha portat a terme a Hamburg experiments pioners i s'ha comprovat arreu del món la primera evidència directa dels gluons, que són les partícules corresponents del camp nuclear fort; i de les teories d'unificació ha sortit una molt àmplia teoria, la cromodinàmica quàntica, que té la possibilitat de descriure d'una manera unificada l'electromagnetisme i les forces nuclears fortes i dèbils. Una evidència directa que abona la unitat de les forces dèbils i les electromagnètiques ja ha aparegut en recents experiments pioners a Stanford-Yale en els quals electrons polaritzats a 32-GeV van ser dispersats a partir de protons i deuterons.

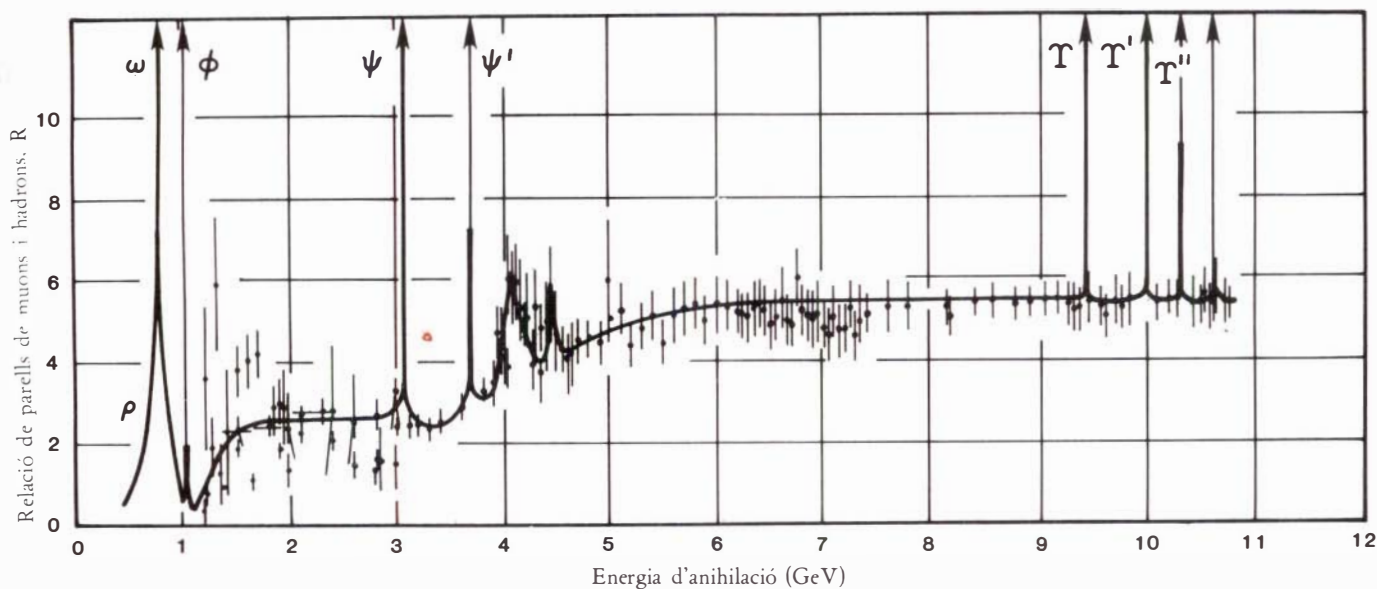
Fins ara, de tota manera, malgrat la recerca intensiva, encara no hem trobat les partícules anomenades bosons intermedis, que corresponen al camp nuclear dèbil. La nostra conclusió és que aquests són tan pesats que es necessitaran energies substancialment més altes per a produir-los, i que han de ser objecte d'una altra més gran investigació en el camp de la física de partícules. Contrastant amb el fotó, que no té càrrega elèctrica, sabem que els bosons intermedis han de formar una família composta per tres elements: dos amb la mateixa massa, i amb càrrega igual i oposada (W^+), i un altre molt més pesat i sense càrrega elèctrica (Z^0). Encara que no podem predir la massa d'aquests bosons amb una precisió real, la proporció de les masses és un paràmetre crític de la cromodinàmica quàntica i el seu mesurament farà avançar molt

la teoria. Les teories actuals suggereixen unes masses equivalents a 80 i 90 GeV respectivament.

Una de les prediccions més xocants de les grans teories d'unificació és que les famílies de barions i leptons són completament independents l'una de l'altra —com sempre havia estat suposat— i que el protó pot i en realitat deu desintegrar-se eventualment en un leptó més lleuger, probablement en un antielectró (positró) i un pió sense càrrega. Perquè aquesta desintegració succeeixi hi ha d'haver un camp completament nou, que aparelli els barions i els leptons, i com que el límit mínim mesurat de la vida d'un protó és tan llarg, 10^{30} anys, es pot afirmar que la partícula d'aquest nou camp (de vegades anomenat el leptokuark) deu tenir una massa enorme que pot correspondre a 10^{13} GeV —més pesada que la d'un bacteri i molt més lluny de qualsevol energia que es pugui aconseguir a la Terra. Aquesta partícula, però, no es podrà veure mai, encara que en principi podem detectar la desintegració d'un protó tot i que el percentatge de decaïment sigui tan baix que una persona hauria de viure alguns centenars d'anys abans que un dels protons del seu cos es desintegre. Però dos experiments que es troben ja en marxa als Estats Units diuen que es tracta de protons de 10^{33} anys de vida, mentre que les teories d'unificació només predeuen 10^{31} anys màxims de vida. Si s'observa aquesta desintegració, serà una confirmació molt important de les teories d'unificació.

Perquè el somni d'unificació d'Einstein es porti a terme serà necessari incloure la gravitació en les teories unificades; sortosament hi ha hagut un gran progrés, en aquests últims anys, en la teoria de la supergravetat, en la qual el primer pas cap a la unificació, la quantització del camp gravitacional, ha estat un èxit. I, a primera vista, un nou camp ben estrany apareix també ací. En el passat, es prenia com un article de fe en la física que les partícules amb spins múltiples imparells de l'spin del protó (els fermions) i les partícules amb spins múltiples parells (els bosons) formaven famílies molt diferents que obeïen a estadístiques molt diferents; amb un fermió sol podríem ocupar un estat quàntic donat, mentre que el podrien ocupar un nombre infinit de bosons. En la supergravetat, però, s'han predit dos camps de partícules —el gravitó (un bosó) i el gravitino (un fermió)— i la teoria requereix una supersimetria que compregui els dos. Encara que cap d'aquestes partícules de camp no ha estat observada encara, s'està portant a terme una recerca molt intensiva per observar els gravitons que s'espera que siguin

Figura 1. La relació $R_{\mu\mu}$ d'una energia de 2.5 (sota 3 GeV) a 5.5 (energies per sobre de 5 GeV). La interpretació més plausible d'aquest augment és que el llindar per a la creació d'una nova classe de quark ha estat travessat. El que és més remarkable que l'augment de R és que la corba té una sèrie de pics molt alts i extraordinàriament estrets. Els tres pics estan tots junts a prop d'1 GeV i representen una producció dels mesons ρ , ω i ϕ , els quals tenen composicions de quarks, inclosos les combinacions de $u\bar{u}$, $d\bar{d}$ i $s\bar{s}$. El pic a 3.1 GeV és el meso ψ , format per un parell quark-antiquark $c\bar{c}$. Aquest ψ va ser descobert el 1974 durant un mesurament de R ; el ψ' , en que l'estat en excitació del mateix sistema $c\bar{c}$ va ser trobat deu dies més tard. El pic més ample a 4 GeV representa algunes partícules de vida curta i es reconeix actualment com el llindar per a la creació d'un parell de mesons. Els tres pics a 9.4, 10.0, i 10.3 GeV són els mesons Υ , Υ' i Υ'' formats per parells quark-antiquark de $b\bar{b}$ en la seva configuració base i les dues configuracions en estat d'excitació. El pic petit a 10.6 GeV, si és real, podria representar la primera evidència pels mesons del fons deslligats. Aquesta gràfica R és la relació de la collita de parells de muons amb els hadrons totals produïts quan un electró i un positró s'anibilen a l'energia donada per l'abscissa. Els tres quarks originals, up (u), down (d) i strange (s), i els nous charm (c) i bottom (b), que també són quarks, tenen els seus antiquarks corresponents representats ací per \bar{u} , \bar{d} , \bar{s} , \bar{c} , i \bar{b} respectivament.



emesos des dels processos cataclísmics d'una nova explosió en aquesta o en galàxies veïnes. Aquesta també és una de les fronteres de la física de partícules elementals.

Per al gran esquema d'unificació és fonamental la idea física que com més petites són les distàncies, les forces gravitacionals, les electromagnètiques i les dèbils es tornen més fortes, mentre que la interacció forta es torna més dèbil. Els nostres mesuraments actuals semblen la llegenda de l'home cec que es dedicava a estudiar un elefant; la nostra impressió de la força natural fonamental depèn críticament de com ens hi acostem.

Si reeixim a delinear els elements fonamentals i la interacció fonamental de la natura, sobresortirà com un dels triomfs més grans de l'intel·lecte humà. Al mateix temps, li dona èmfasi el fet que després de més de cinquanta anys encara no tenim una interpretació filosòfica generalment acceptable de la mecànica quàntica que hagi reeixit en la difícil tasca de la descripció de l'univers físic; i les anomenades teories de variables ocultes de la mecànica quàntica, dissenyades per recuperar una mica del determinisme, que hom consideraria ofensiu si faltés, continuen essent activament discutides i posades a prova.

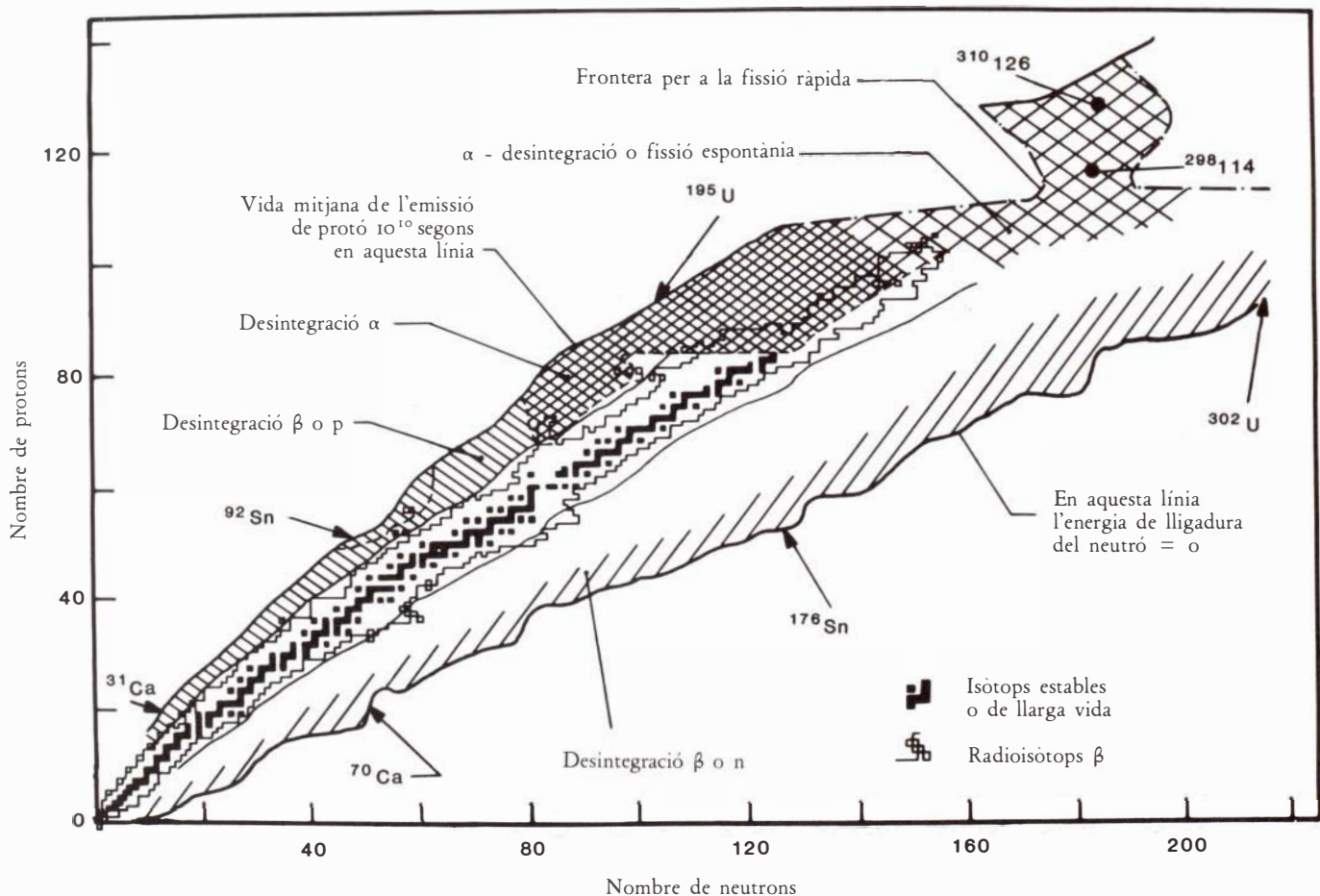
FÍSICA NUCLEAR

Els nuclis formen un pont crucial entre els problemes de "pocs-cossos" característics de la física de partícules i els problemes extrems de "molts-cossos" característics de la física del plasma i dels metalls, on només s'apliquen consideracions estadístiques. En els nuclis, el nombre d'entitats interactuants, els nucleons (neutrons i protons), és prou gran per a comprendre una sèrie molt rica de fenòmens i prou petit per a ser estudiat al microscopi, almenys en el regne de la possibilitat. La figura 2 és un mapa del domini nuclear.

Igual com la situació de la física de partícules (vegeu la figura 1), a cada energia més alta en la qual els físics nuclears han fet mesuraments de precisió, s'han trobat una estructura aguda indicativa de noves maneres de moviment nuclear. Han estat identificats spins intrínsecs cent vegades el dels protons, com ho han estat estranys estats moleculars en els quals a determinades energies els nucleons que són presents es disposen en subunitats ben definides, que es mouen entre si. Al llarg d'aquest temps s'ha recollit molta informació sobre tot això, així com sobre estats nuclears quàntics més senzills. Entre les descobertes més importants d'aquests darrers anys es troba el fet que aquests estats

quàntics també poden ser compresos en termes d'elements base d'una força simple, oobeint les regles més simples de la teoria de grups, com en la física de partícules. Originalment postulats amb una base empírica —i subsegüentment entesos i justificats com característiques conegudes de la interacció fonamental nucleó-nucleó—, aquests elements són parells de nucleons. A baixes energies només es troben dues classes de parells: aquells que tenen un moment angular total igual a zero (bosons s) i aquells que tenen un moment angular igual a dues unitats (bosons d). S'esperen bosons amb f i g a més altes energies, però encara no s'han pogut identificar. Els models que inclouen els bosons d i s i les seves interaccions han tingut èxit en reproduir dades nuclears per a tota la taula periòdica amb els models col·lectius rotacionals i vibracionals més vells que surten com a casos especials dels models de bosons en regions de masses nuclears restringides. El més important ha estat l'èxit dels nous models de les regions intermèdies entre aquelles on els models vells semblaven ser vàlids, de manera que per primer cop tenim una comprensió consistent dels fenòmens de l'estructura nuclear de baixa energia per a tota la taula periòdica. A partir d'això, tenim una evidència preliminar per a simetries dinàmiques i simples, equivalents a les dades de les reaccions nuclears; i almenys la promesa de poder treure a la llum la física essencial que roman sota el gran nombre de dades de reacció amb el

Figura 2. El diagrama de l'estabilitat nuclear s'obté marcant l'energia nuclear de lligam com una superfície definida pel nombre de protons (Z) i el de neutrons presents (N). Per N i Z baixes les espècies més estables són les que tenen $N = Z$; però, amb una Z que augmenti, la repulsió electrostàtica entre els protons força l'estabilitat cap als nuclis on N és més gran que Z . Els quadrats negres representen els nuclis que són estables a la natura; això significa simplement que el seu temps de vida en contra de la desintegració espontània es pot comparar llargament amb el temps de vida del sistema solar. N'hi ha uns tres-cents en total. Una línia prima dibuixa la regió que ha estat llargament explorada en física nuclear; conte unes 1.600 espècies nuclears diferents (isòtops). La línia de més enfora defineix la regió on els càlculs indiquen que les espècies nuclears haurien de ser estables en contra de la desintegració instantània a través de forces nuclears fortes. La línia més inferior és la que se'n diu "la línia del rajol de neutrons"; qualsevol espècie formada sota d'ella emet espontàniament i instantàniament neutrons (n) i es mou cap a l'esquerra fins que arriba a la línia de la frontera de l'estabilitat. L'emissió de partícules α estretament lligades (nuclis d'heli contenint dos protons i dos neutrons cadascun) competeix favorablement amb l'emissió directa de protons (p) en la frontera de més amunt, i la fissió espontània limita la regió d'estabilitat pels nuclis pesants. Dues de les illes d'estabilitat, postulades molt més enllà del nivell natural, són indicades a $Z = 114$ i $Z = 126$. És clar que un gran nombre d'espècies nuclears encara ha de ser explotat. Mentre els isòtops més estables de l'urani tenen masses de 235 i 238 respectivament, com mostrem aci, els isòtops d'urani amb masses entre 195 i 302 se suposa que serien estables.



qual comptem. Un dels desenvolupaments més recents i que potencialment arriben més lluny en aquest treball ha estat l'extensió d'aquests models de bosons a nuclis de massa imparella. Ací, a més a més dels bosons en el centre, tenim un nucleó de valència que lògicament és un fermió. En aquesta estructura ens trobem novament amb la necessitat d'una supersimetria que englobi els bosons i els fermions, com en el cas de la supergravetat. Els resultats preliminars en el cas nuclear són extremament encoratjadors; en aquest cas, les teories de la supersimetria prediuen uns certs patrons característics d'estats quàntics excitats dels nuclis de masses parelles comparats als seus veïns de masses imparelles; alguns estats, que els models més vells haguessin inclòs en l'espectre de les masses parelles,

per exemple, són prohibits per la supersimetria. La feina d'aquests últims mesos s'ha mostrat d'acord amb això en els pocs casos en què hi ha dades completes i entre les prediccions de la supersimetria i el que és observat experimentalment. Realment serà gratificador si aquesta nova supersimetria surt primer a la física nuclear. Seria un altre exemple de l'ús del nucli —l'única entitat en la qual totes les forces de la natura operen simultàniament— com a laboratori microscòpic en el qual es posen a prova i s'examinen els conceptes naturals més fonamentals.

Però hem de deixar molt clar que només hem començat a explorar i comprendre el fenomen nuclear; ens hem vist molt limitats per la superfície de Fermi del nucli i els orbitals nuclears molt a prop d'aquesta. En un sentit molt real

som com el físic "d'estat sòlid" que va créixer per seguir creient que el món només contenia els cristalls d'Einstein i al qual algú va parlar de l'existència dels líquids. El principi d'exclusió de Pauli no ens limita l'ús de sondeigs dels nucleons en l'interior del nucli. Aquestes limitacions van desapareixent a mesura que ens movem cap a dominis de noves energies. Com més altes energies, tenim més accés als sondeigs dels mesons; en una de les reaccions més energètiques, un kaó (que té una unitat de nombre quàntic d'estranyesa) converteix un neutró, que es troba al fons del nucli, en una partícula lambda, el barió estrany més lleuger (només un 20 per cent més pesat que el neutró) i emergeix un pió per conservar l'energia i el moment. Com que la partícula lambda s'assembla tant a un neutró, el nucli es queda essencialment igual

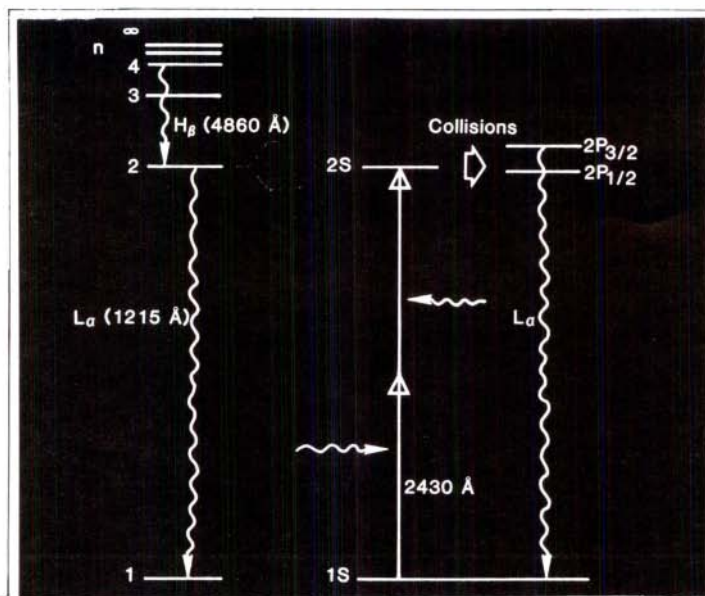


Figura 3. Això és un esquema simplificat de l'excitació dels dos fotons de l'estat metastable 2s a partir de l'estat fonamental 1s promet donar una resolució extremament alta —més alta que una part a 10^6 . L'excitació pot ser verificada observant la col·lisió induïda $2p-1s$ i la fluorescència Lyman-alpha (L_α) en la regió espectral ultraviolada del buit. El nombre quantic principal n al costat de l'esquema de l'esquerra mostra la convergència de l'espectre de l'energia amb el límit de dissociació $n = \infty$. Arreglant els dos fotons de l'esquema central, cadascun adaptat a la meitat exacta del nivell d'energia sota consideració, per atacar l'àtom simultàniament però des de direccions oposades s'ha eliminat l'eixamplament Doppler normal.

i és anomenat hipernúcli; i com sigui que, per altra banda, aquesta partícula és diferent al neutró, pot ocupar estats quàntics prohibits al neutró pel principi de Pauli. Encara que tot just es trobi a la seva infantesa, ja han sortit dades vitals de l'estudi dels hipernúclis.

I amb emissions precises d'electrons i hadrons d'alta energia podem escorcollar, millor que mai, el comportament diferent dels neutrons i dels protons. De moment hem pogut constatar que els nuclis són molt més complexos que les idees que se'n tenien en un principi; amb els nucleons que s'aventuren, durant el poc temps que els és permès segons el principi de la incertesa de Heisenberg, a configuracions en estat d'excitació molt més alt (les anomenades Δ , per exemple) i que es veuen banyats pels núvols dels pions que porta el camp nuclear fort. Els mesuraments d'electrons són particularment sensibles a aquests corrents de pions, però aquí, altre cop, els nostres estudis només comencen.

Amb la disponibilitat d'aquesta emissió de totes les espècies nuclears ha estat possible de sotmetre la matèria nuclear a un cert esforç, d'una manera completament nova i amb valors dels paràmetres abans completament inaccessibles. Densitats més altes, forces centrífugues més altes, camps de Coulomb més alts, que tenen lloc en col·lisions properes de nuclis pesants, tot plegat dona una informació nova i característica sobre el problema nuclear —i, en general, sobre el problema de molts cossos. En una interacció nuclear completament nova i inesperada anomenada dispersió inelàstica profunda, per exemple, uns mecanismes encara desconeguts transfereixen ràpidament l'energia cinètica de moviment relatiu a l'estat intern d'excitació dels nuclis que interactuen, i els dos se separen quasi exactament igual que en la fissió nuclear, portats per la seva repulsió electrostàtica mútua. Quant a la física de partícules d'alta energia, intentem investigar cada cop amb més altes energies i volums més petits per examinar els fenòmens de les distàncies mínimes, i amb col·lisions nuclears pesants amb energia ultralta provem energies cada cop més altes amb volums relativament grans que contenen un bon nombre de nucleons per així acceptar la possibilitat de fenòmens col·lectius completament nous. S'ha suggerit, per exemple, que en aquestes col·lisions seria possible crear un tipus de matèria completament nou, en què els nucleons cedexen gran part de la seva massa per formar un núvol molt dens de pions en el qual es mouen els nucleons disminuïts. Aquests sistemes, si existeixen, hom creu que tenen unes

característiques fascinants. Mentre que els nuclis normals oscil·len en nombre de massa des d'1 fins a 250 aproximadament, aquests nous sistemes oscil·larien entre 350 i 100.000. A més a més tindrien una apetència voraç de neutrons, de manera que exposant-los, diguem, a un reactor nuclear gran, podríem emmagatzemar-hi una gran quantitat d'energia per mitjà d'una absorció directa de neutrons. Desgraciadament, encara no sabem com recuperar aquesta energia emmagatzemada, però tinc confiança que si tenim èxit en la descoberta d'aquests nous sistemes aviat trobarem un sistema per a recuperar-la.

Estem entrant en una nova era en la comprensió dels fenòmens nuclears a un nivell més fonamental del que s'havia aconseguit fins ara. Es troben en construcció nous instruments a Alemanya, França, Japó i la Unió Soviètica, els quals eixamplaran les fronteres del camp fent un gran salt quàntic.

FÍSICA DEL PLASMA

Més d'un 95 per cent de la matèria del nostre univers es troba en un estat plasmàtic, una sopa elèctricament neutra de nuclis i electrons; aquest és veritablement el quart estat de la matèria. Les densitats poden ser tan baixes com d'1 a 100 nuclis per centímetre cúbic a l'espai interestel·lar, i tan altes com de 10^8 a 10^{20} en plasmes de laboratori, i de 10^{22} a 10^{25} en interiors estel·lars.

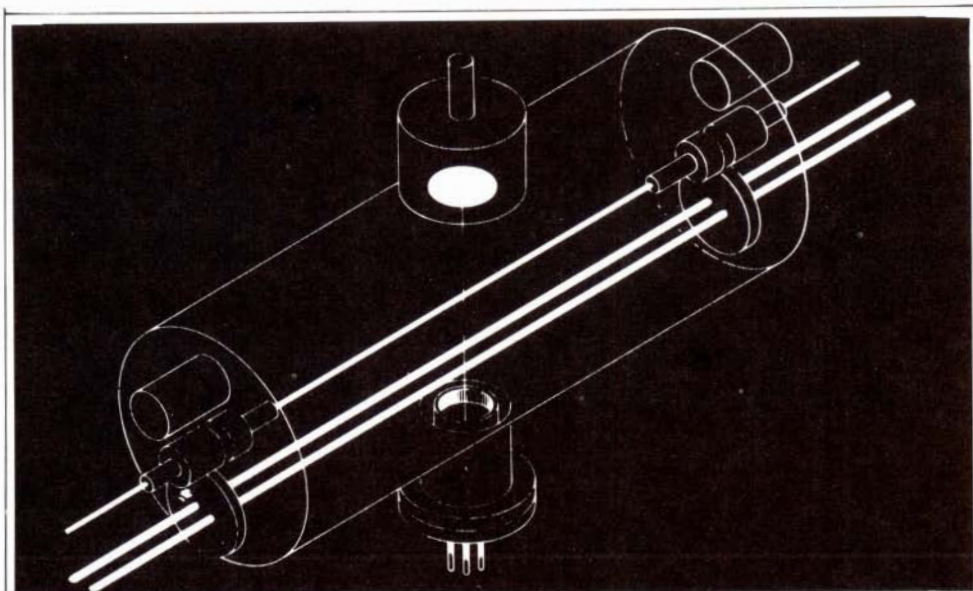
Actualment, la recerca física del plasma es troba molt àmpliament enfocada cap a la realització de reaccions termionuclears en una escala terrestre —per a abreujar, en l'energia de fusió. El nostre Sol és un reactor de fusió; cada segon crema 164 milions de tones d'hidrogen per proporcionar 160 milions de tones de cendra d'heli, amb 4 milions de tones que apareixen gràcies a l'equació $E = mc^2$, com a energia en brut radiada per tot el cosmos. En el Sol, la gravitació proveeix el confinament necessari per a mantenir les condicions de reacció —temperatures que s'apropen als 100.000.000 °C i pressions, simultàniament, que passen els 20 milions de lliures per polzada quadrada. És obvi que l'intent de repetir aquestes condicions a la Terra suposa uns problemes molt grans d'enginyeria.

El Sant Graal d'aquest camp és el criteri de Lawson, $n\tau = 10^{14}$ on n és la densitat del

plasma en els nuclis per centímetre cúbic i τ és el temps de contenció en segons. Uns arguments molts generals suggereixen que en el criteri de Lawson, suposant que les temperatures apropiades per als tipus de combustible en ús han estat ateses, el plasma generarà tanta energia com necessiti per a mantenir-se —això és, que haurem assolit el punt d'equilibri. Estan en estudi dos apropaments complementaris. Primer, el confinament magnètic: un plasma diluït (amb una η baixa) és confinat per un temps relativament llarg (amb una τ alta) en una ampolla magnètica; el segon, el confinament per inèrcia: un plasma molt dens (η alta) és confinat durant molt poc temps (τ baixa) per una implosió induïda enviant simètricament grans energies a un projectil de combustible sòlid en un temps tan curt que la mateixa inèrcia del combustible evita la seva dispersió abans de la fusió. Aquestes energies poden —i seran— enviades per pulsacions de fotons, electrons, protons o ions tan pesats com el xenó, segons el tipus de tecnologia escollit.

Aquestes tecnologies són incompletes en ambdós casos i com sempre totes tenen les seves debilitats i fortesales. Actualment, les tècniques de confinament magnètic amb geometries toroidals del tokamak han obtingut uns resultats molt prometedors. El dispositiu Alcator, al Massachusetts Institute of Technology, ha comunicat que es troba a un factor 3 del criteri de Lawson, mentre que el dispositiu Princeton Large Torus (PLT) ha produït la temperatura plasmàtica més alta fins ara aconseguida, 60.000.000 °C. A l'àrea de fusió d'inèrcia els lasers Lawrence Livermore i els SHIVA i HELIOS de Los Alamos respectivament, que donen 20 teravats cadascun, estan donant dades vitals per a la física del plasma; però encara no s'han acostat al factor de compressió 10.000 del projectil de combustible que es calcula que es necessita per a la fusió d'equilibri. Aquests projectils de combustible consisteixen normalment en un microglobus de vidre molt prim (1 micrometre), de 100 a 200 micrometres de diàmetre, contenint de 10 a 100 atmosferes d'una barreja dels gasos de combustió deuteri i triti, i amb un revestiment de metall per a poder iniciar l'ona de compressió de la implosió. Encara que s'hagin obtingut dades molt importants a partir d'estudis inercials amb electrons i conductors d'ions lleugers, sembla que els conductors d'ions pesants com el xenó tenen grans avantatges sobre les tecnologies d'accelerador ben desenvolupades. De tota manera, aquestes encara es troben en fase de disseny. Els físics del plasma són bastant optimistes a

Figura 4. La detecció d'un sol atom s'aconsegueix polsant un raig de laser a través d'un comptador proporcional de gas. Es fa servir un laser sintonitzable que teneix per a seleccionar atoms d'un tipus donat i per a treure un electró de cadascun dels atoms seleccionats. Com que bom pot fer servir un comptador proporcional per a detectar un electró, pot ser detectat un sol atom en el raig de laser. La detecció d'un atom és simple i tan selectiva que un atom en un volum que contingui més de 10 bilions de bilions d'atoms d'un altre tipus pot ser fàcilment detectat. Això dona també una definició espacial i una resolució del temps de tal manera que els mesuraments selectius poden ser fets per un volum definit d'espai i temps arbitrari —tot el límit de la sensibilitat d'un sol atom. En aquest exemple un segon raig laser és fet servir per a produir un atom resultant de la dissociació d'una molècula. [De l'Oak Ridge National Laboratory].



trobar el punt d'equilibri de la fusió dintre de pocs anys; de tota manera, tenint present els veritables i immensos problemes d'enginyeria (com els que es troben a la fissió nuclear, per exemple), molt pocs creuen que aquest punt es pugui trobar en tan poc temps; podríem aconseguir el poder elèctric i econòmic basat en la fusió als voltants de l'any 2020.

FÍSICA ATÒMICA I MOLECULAR

Com que la força electromagnètica és una de les més compreses de la física, s'han pogut realitzar mesuraments de sistemes atòmics i moleculars amb molta més precisió que amb qualsevol altra obtenidora a la física. Aquest corrent encara continua.

Fins fa molt poc, una limitació en la precisió obtenidora es devia al familiar efecte Doppler que reflectia l'estrany moviment termal dels àtoms o molècules. Amb una demostració de força tecnològica s'ha demostrat que el laser sintonitzable fa possible la superació d'aquesta limitació, tal com se'ns mostra a la figura 3. Actualment, comencen a ser factibles les precisions que s'acostin a una part entre 10^{16} , i si la història ens ha ensenyat alguna cosa, aquesta és, segurament, que un augment en la precisió experimental porta a canvis i evolucions revolucionaris en la comprensió. Una part entre 10^{16} està en camí de fer possible provar directament si les constants fonamentals de la física —a les quals tornaré més tard— són realment constants en el temps, a part de l'obertura de nous estudis de problemes nous i vells a la física atòmica i molecular.

La combinació dels lasers sintonitzables i de l'espectroscopia de microones també ha obert un camp nou als àtoms de Rydberg —un camp que data del 1879. L'any 1890 Rydberg va proposar la seva famosa expressió per al nombre de ratlles d'una sèrie atòmica espectral, $\sigma = C-R(n + \delta)^{-2}$, on n és un nombre enter, que es reconeix actualment com el nombre quàntic principal de l'estat de radiació (vegeu figura 3), δ és una constant aproximada, almenys per a una n gran, i R una constant universal —l'anomenat nombre de Rydberg. Les bases de la mecànica quàntica en aquesta expressió eren primers resultats obtinguts per Schrödinger l'any 1926.

Només recentment s'ha pogut explorar el domini d'una n atòmica alta; clarament, el nivell d'energia de l'àtom és funció de n^{-2} i es fa molt petit amb una n gran. Però ací hi ha d'altres propietats interessants: el radi atòmic varia segons n^2 , i si fos possible realment una agitació en l'òrbita de l'electró d'alguns estats de Rydberg estudiats molt recentment, aquests serien visibles a simple vista; el temps de vida de la radiació abans de la desintegració varia segons n^4 ; així doncs, aquests àtoms de Rydberg tenen una vida molt llarga; estan altament polaritzats per un camp elèctric amb una polaritat que varia segons n^2 ; i són fàcilment destruïbles en col·lisions perquè el seu domini geomètric varia segons n^4 .

Usant lasers sintonitzables per a induir els grans salts d'energia a partir de l'estat fonamental de l'àtom i un camp de microones fins als nivells d'energia atòmica de prop del límit de dissociació, ha estat possible d'estudiar els estats de Rydberg que tenen valors de n d'aproximadament 100. Per moltes raons aquests han proporcionat meravellosos sistemes de prova per a tota mena de fenòmens atòmics i estan essent àmpliament explotats.

Ha estat de particular interès el reconeixement que àtoms preparats i adequats de Rydberg actuen com a detectors molt eficients de radiacions tèrmiques del cos negre que absorbeixen les radiacions a temperatura ambiental; per exemple, les parets de la cambra on es troben els àtoms. A temperatura ambiental, el flux de radiacions de cossos negres és d'uns 25 wats per cm^2 , que correspon a camps elèctrics i magnètics d'uns 10 volts per centímetre i 10^{-2} gauss, respectivament, i a una freqüència de 15×10^{12} hertz. Aquest camp elèctric pot causar una gran translació (~ 2.2 quilohertz) en els nivells de Rydberg relatius a l'estat fonamental de l'àtom i que són fàcilment mesurables. (Hauria d'insistir que aquest camp magnètic pot causar una translació d'una part entre 10^{16} de la freqüència atòmica hiperfina usada en rellotges atòmics; i, com ja he dit abans, aquest és ara el nivell de precisió en la física experimental). Considero que és d'un gran interès la qüestió de si els àtoms de Rydberg poder ser preparats en estats apropiats per a servir com a detectors eficients de radiacions del cos negre de 3 °K d'origen còsmic.

El recent desenvolupament de tècniques on els àtoms sols i les molècules poden ser isolats per a un estudi detallat (vegeu figura 4) és solament una part del desenvolupament general de mètodes per a la preparació de sistemes atòmics en estats quàntics completament definits, fent-los

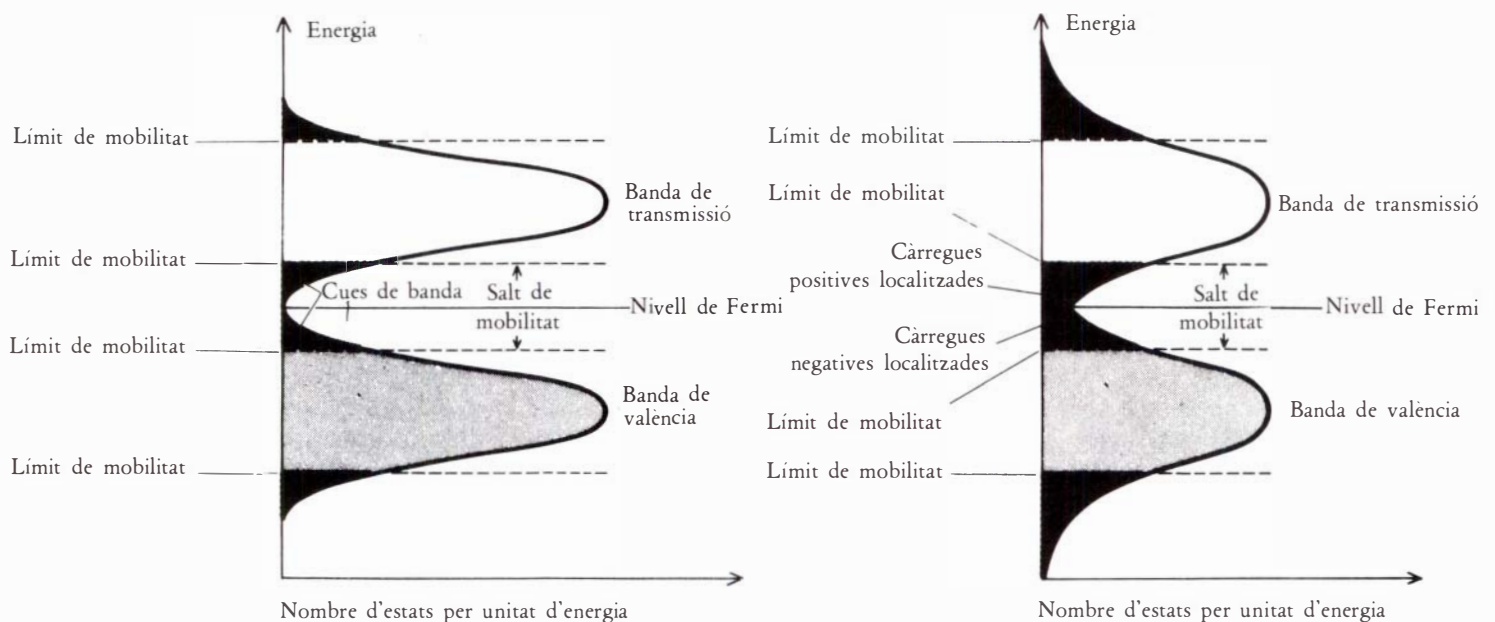
uns sistemes de prova excel·lents per a qüestions físiques molt fonamentals: Fins a quin punt l'electró i el protó són idèntics en magnitud (1 entre 10^{20})? Fins a quin punt són idèntiques les masses de l'electró i del positró (1 entre 10^7)? Fins a quin punt la massa de l'univers es troba uniformement distribuïda (1 entre 10^{51})? Si realment les interaccions electromagnètiques i les dèbils estan unificades, llavors les forces dèbils són presents als àtoms (encara que molt dèbilment), i el senyal característic de la seva presència és que violen la conservació de la paritat, mentre que les forces electromagnètiques no ho fan. S'han fet recerques intensives en àtoms pesants de cara a manifestar aquestes violacions; s'ha predit que, en aquests àtoms, els efectes de les violacions són els més grans, però els resultats encara són ambigus per les incertituds en el càlcul de funcions d'ona de molts cossos en l'àtom. Es va progressant en experiments extraordinàriament difícils amb l'hidrogen, on aquestes incertituds haurien de ser mínimes.

Una de les àrees més interessants de la física nuclear en aquests últims anys ha estat aquella en la qual s'ha disposat un autèntic arsenal de sondeigs físics, incloses l'espectroscopia de raigs X, l'espectroscopia de Mössbauer i la difracció de neutrons, per investigar l'estructura i la dinàmica de les grans molècules de la vida. Els mecanismes pels quals el grup hemo (amb una base de ferro) de la molècula d'hemoglobina realitza la seva missió vital transportant oxigen a les cèl·lules del cos dels mamífers han estat ara, i per primer cop, compresos en termes dels túnels quàntics mecànics de la molècula més petita a través de les sèries de barreres de potencial —algunes petites, d'altres grans— establertes per l'estructura de la molècula d'hemoglobina més gran. Això es pot considerar un gran triomf en la comprensió que obre completament noves mires, de manera que la recerca dels processos de la vida és cada cop més accessible als estudis detallats del nivell quàntic.

FÍSICA DE LA MATÈRIA CONDENSADA

A mesura que les temperatures ambient s'acosten a aquelles que són característiques al nostre planeta, els àtoms i les molècules es combinen per formar els ben coneguts sòlids i líquids de matèria condensada.

Figura 5. Els semiconductors amorfs que no estan fortament desordenats (esquerra) tenen les franges de valència i de transmissió similars a les del semiconductor cristal·lí. El tret que distingeix les franges en els sòlids amorfs és el reemplaçament dels marges de les franges agudes presents en els cristalls per les quals són anomenades cues de la franja, o estats localitzats, que s'estenen fins al llindar de l'energia. Els estats localitzats es troben separats dels estats estesos en la major part de les franges pels marges de variabilitat. De la regió que hi ha entre els marges de variabilitat de les franges de transmissió i valència se'n diu llindar de variabilitat. Juga el mateix paper en els semiconductors amorfs que el llindar d'energia juga als semiconductors cristal·lins. Les impureses o defectes químics en la configuració de lligams locals pot portar a aguts canvis estructurals (que no es mostren a la figura) en el llindar de variabilitat. Si el desordre és molt gran, com s'espera en cristalls de molts components (dreta), les cues de la franja de les franges de transmissió i de valència poden sobreposar-se al llindar de variabilitat. Això porta a una redistribució de la càrrega elèctrica, ja que els electrons es mouen des d'un estat localitzat fins a un altre per a disminuir la seva energia. El resultat és una densitat alta d'enllaços carregats positivament i negativament, els quals disminueixen la variabilitat dels portadors i fan el material menys sensible als esforços per a modular la seva conductivitat amb mitjans químics —això és, amb drogues. [De D. Adler, "Scientific American" (maig 1977), p. 36].



Sòlids. Al llarg d'aquestes últimes dècades s'ha portat a terme un espectacular progrés en l'exploració i la comprensió de l'estructura dels sòlids. El centre de tot això han estat els conceptes d'invariància en les translacions —d'estructures cristal·lines periòdiques repetides infinitament en totes les direccions— i de les funcions d'ona electròniques i d'estructures de banda apropiades per a aquests sistemes. Recentment, però, l'atenció s'ha enfocat més vers les ruptures d'aquesta invariància en les translacions, o ordre d'alt-grau. Potser la ruptura més abrupta possible és la que té lloc a la superfície. I és ací, en la física de superfícies, que han tingut lloc alguns dels més importants descobriments d'aquests últims anys. Una segona ruptura està en l'àrea dels sòlids amorfs, on més aviat regna un ordre de curt i no de llarg grau; ací, també, tenim l'esperança d'una nova comprensió i de noves aplicacions (vegeu figura 5). Una de les investigacions més poderoses i noves i que comprèn més territori, perquè serveix tant per als sòlids com per als líquids, és la de la radiació del sincrotró. Abans del fracàs dels dissenyadors d'acceleradors d'electrons d'alta energia no s'ha reconegut fins fa molt poc com una font de radiacions electromagnètiques d'amplitud d'ona constantment variable, que oscil·len entre els ultraviolats i les regions de

fortes radiacions X, amb intensitats i ordres de magnitud molt més grans que les que s'havien pogut aconseguir fins ara.

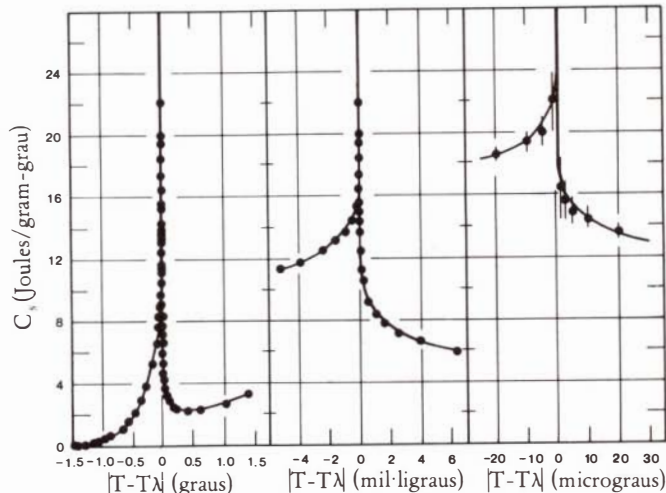
Dels estudis de fotoelectrons i dels electrons d'Auger expel·lits des de superfícies per aquests fotosincrotrons ha estat possible aprendre moltes coses sobre superfícies i sobre interaccions de gasos a les superfícies. Ara sabem, per exemple, que a temperatures ambient, quan una superfície d'alumini neta és exposada a oxigen pur només una part de l'oxigen reacciona per a formar l'òxid, Al_2O_3 , mentre que gran part és absorbida químicament a la superfície, de la qual pot ser portat, augmentant la temperatura, a la forma d'òxid. Similarment, ja és sabut que les molècules de monòxid de carbó, si es posen en una superfície de níquel clara, sempre s'alineen perpendicularment a la superfície. Tot això depèn de conèixer exactament l'energia del fotó, de mesurar amb precisió l'energia dels electrons expel·lits i de la deducció del medi estructural i químic exacte des del qual es van moure els electrons —i en aquesta deducció s'han desenvolupat tècniques extremament elegants.

En el camp dels sòlids amorfs s'ha reconegut ara que la franja d'estructura —que sempre s'havia cregut que era característica de les estructures cristal·lines periòdiques— persisteix com un

signe de l'ordre de curt-grau (vegeu figura 5). D'ací se segueix, i ha estat demostrat, que molts dels dispositius electrònics familiars en l'electrònica d'estats sòlids poden ser obtinguts de materials amorfs amb un cost molt petit, amb una mínima sensibilitat als contaminants i en àrees molt més grans. Hem enfocat la nostra atenció en el desenvolupament de tècniques per a immobilitzar els lligams atòmics suspesos, que són inevitables en material amorf a través d'addicions de petits àtoms com el de l'hidrogen, el liti i el fluor, i, al contrari, per a modificar la densitat dels estats en el salt de la franja per aconseguir les propietats electròniques desitjades.

Amb materials cristal·lins i amorfs, s'ha trobat una aplicació àmplia gràcies a una nova tècnica en la qual s'utilitzen radiacions de laser d'energia molt alta, de pulsacions de nanosegones per a temperar les superfícies. Mantenint la pulsació de la radiació suficientment baixa i el nivell d'energia suficientment alt, es fonen només uns centenars d'amstrongs de la superfície per tornar-se a congelar quasi instantàniament. En algunes aplicacions s'aprofita el fet que la recongelació no solament treu tot mal causat per altres processos de tractaments fets amb anterioritat (implantació d'ions, difusió, etc...), sinó que les petites traces de contaminants que no

Figura 6. Calor específica del líquid ^4He en la proximitat del punt λ —això és, la transició de la fase normal (alta temperatura) a la fase superfluida (baixa temperatura). Noteu que les absisses estan en graus, mil·ligraus i micrograus en els tres plafons, il·lustrant l'estructura de la temperatura dependent detallada en la proximitat d'aquesta fase de transició de segon ordre. Les línies sòlides són empíricament encaixades als punts de les dades experimentals. (De M.J. Buckingham i W.M. Fairbank.)



són desitjables són generalment més solubles en la fase líquida que en la sòlida i són així escombrades cap a la superfície a les regions crucials ja temperades. En altres aplicacions la temperació del laser s'utilitza per a crear una capa cristal·lina ultrapura en un substrat, en qualsevol àrea desitjada. Aquesta última aplicació és de particular importància en la producció de cèl·lules solars i per a dissenyar les memòries de les bombolles magnètiques.

Transicions de fase. En la matèria condensada, un dels fenòmens més difícils és la transició de fases entre sòlid i líquid, entre líquid i gas, entre estats normals i estats superconductors o superfluids, entre estats magnètics i no magnètics, etc... Una de les àrees de la física teòrica moderna més actives ha estat l'estudi d'aquestes transicions de fase a un nivell molt fonamental. Primer, s'hauria de distingir entre transicions de fase de primer ordre i de segon ordre: en una transició de fase de primer ordre la quantitat en qüestió (el volum d'una substància durant una transició d'una fosa) canvia discontinuadament, mentre que en una transició de fase de segon ordre la quantitat (la calor específica en la transició d'estats normals a estats superconductors en l'heli líquid) canvia contínuament i hi ha una discontinuïtat en la seva primera derivada (vegeu figura 6). Dit d'una altra manera, no hi ha una evidència preliminar de la fosa a temperatures que estan per sota del punt de fusió (primer ordre), mentre que, com es mostra a la figura 6, aquesta evidència preliminar existeix en la proximitat de la temperatura en una transició de segon ordre a la superconductivitat (o ferromagnetisme). Aquests últims anys s'ha desenvolupat una extensa teoria que inclou l'anomenat grup de renormalització per permetre la descripció d'aquest comportament de la temperatura a la proximitat d'una transició de fase de segon ordre. Aquest treball ha portat al sorprenent suggeriment que, a més a més de l'ordre, el comportament dels sistemes en la proximitat de transicions de fase dependria críticament de la dimensió del problema; això és, la fusió en un sistema de dues dimensions seria sorprenentment diferent de la molt familiar fusió en sistemes tridimensionals. I encara més, un sòlid perfecte de dues dimensions se suposa que no mostraria cap de les agudes dispersions de Bragg característiques dels neutrons i dels raigs X que es dispersen en un sòlid tridimensional. Més enllà d'això, s'ha reconegut que la dimensió efectiva d'una situació física no necessita ser integral i que, com en els tractaments de Regge dels moments angulars en la física nu-

clear i de partícules, la dimensionalitat pot ser considerada, de vegades molt útilment, un paràmetre continu.

Aquestes consideracions han provocat una revaluació profunda del comportament dels sòlids i han donat una empenta a altres sistemes sotmesos a estudi que no siguin els tridimensionals. Han estat trobats sistemes unidimensionals en preparats orgànics als quals ha estat injectat metall i molts complexos com el poliparafenilè, en què àtoms de metall s'alineen per formar essencialment una cadena unidimensional de conductors. Un dels sistemes bidimensionals més fascinants és aquell que té una capa d'electrons flotant a la superfície de l'heli líquid, refredat fins a sota d'1 °K, on la concentració d'electrons es pot variar experimentalment sobre límits molt amplis (de 10^4 a 10^9 per centímetre quadrat). S'han observat algunes resonàncies en l'absorció de la freqüència del radi per aquest sistema de dues dimensions a mesura que es va refredant per sota d'una temperatura de transició T_c , i la interpretació acceptada és que a T_c ha tingut lloc una transició a una estructura triangular d'electrons.

L'objectiu de les teories en aquest camp és el de reproduir observacions experimentals en les regions dels punts crítics de les transicions de fase de segon ordre com a funcions de la temperatura T però en la forma $(T - T_c)^\beta$ (vegeu figura 6), on β és l'anomenat exponent crític. S'ha trobat que encara que β és essencialment independent del sistema específic, depèn críticament de la simetria del sistema i del nombre de dimensions espacials que té.

Un dels aspectes més sorprenents i gratificadors de tot aquest treball de renormalització, de tota manera, ha estat el reconeixement d'un formalisme complet, apropiadament reinterpretat, que té aplicació directa en el camp general de la teoria. Aquí, l'èmfasi està en les fluctuacions del camp i els seus grans trets característics; el focus està específicament en tot el concepte de graduació; on intentem de desplegar una teoria que sigui vàlida per a una àmplia i dispar gamma d'escala de distàncies. La transferència del formalisme de la transició de fases, per via del grup de renormalització, ha arribat a tenir una identitat pròpia en el concepte de la llibertat asimptòtica en la cromodinàmica quàntica, en què, com es va predir, la força quark-quark disminueix —els quarks es fan lliures— a mesura que treballem amb distàncies cada cop més curtes. Aquesta és una altra il·lustració de la unitat essencial de la física.

Recerca d'orientació tecnològica en els sò-

lids. La recerca fonamental sobre les propietats dels sòlids és bàsicament tecnològica en dues àrees particulars. Actualment, importem (als EUA) més d'un 90 per cent de materials com crom, tàntal, cobalt, manganès i estronci —tots ells molt essencials en diversos aspectes per a una societat altament tecnològica—; però el pitjor és que els subministraments econòmicament viables dels minerals base d'aquests materials estan disminuint ràpidament en el món. Ens trobem, així, en la necessitat de reemplaçar aquests recursos i proveir-nos de nous materials que siguin equivalents estructuralment i en erosió, corrosió i d'altres comportaments als que tenim actualment. Això ha situat un altre cop la física de superfícies en auge i l'ha portat, per exemple, al desenvolupament d'aliatges químics, en els quals s'implanten substàncies químicament incompatibles, per mitjà de tècniques de raigs d'ions, per aconseguir les característiques requerides. Aquest és un camp obert i vitalment important.

Una pressió que va en augment per integració a gran escala en l'electrònica d'estat sòlid dona també ímpetu a la recerca de la matèria condensada. L'any 1960 vàrem situar un circuit en una sola hostia; el 1970, el nombre d'aquests dispositius era de 10^3 ; i el 1980, de 10^6 . Tampoc no ens hem trobat amb ordres de magnitud de cap limitació física intrínseca. L'hostia de 10^9 és una possibilitat del futur. Al mateix temps, en els últims vint anys hem assistit a una reducció de costos per un factor de 10^5 en dispositius electrònics, i podem anticipar que el corrent continuarà mentre la viabilitat i la baixa energia en la demanda d'aquests siguin mantingudes. Podria valer la pena de posar això en una perspectiva diferent. Tot el contingut de la biblioteca del Congrés correspon a setanta trilions de bits d'informació; actualment, es necessitarien vint de les màquines més grans del món per a emmagatzemar tota aquesta informació. Segons els projectes que es tenen, en la dècada dels vuitanta es dissenyarà la màquina capaç d'allotjar en una única memòria totes les dades d'aquesta biblioteca. Com a nota més personal, podem dir que el cervell humà té una capacitat d'uns 10^{13} bits. Fa cosa de vint anys una memòria de computador equivalent hagués ocupat una desena part d'una milla cúbica; una extrapolació (amb una mica d'audàcia) dels corrents actuals suggereix que per a l'any 2050 podrem allotjar aquests 10^{13} bits en una memòria d'estat sòlid lleugerament més petita que el cervell humà.

Les conseqüències elementals d'aquests desenvolupaments són més enllà del que podem

imaginar actualment, però ja han canviat entera-ment el caràcter general de gran part de la física. Ara podem fer preguntes molt complexes i sofisticades que hauria estat impossible de plantejar fa cosa de cinc anys.

Ja he mencionat més amunt l'aparellament de nucleons que porta als bosons a i d , els quals estan revolucionant la nostra manera d'entendre la física nuclear. L'aparellament d'electrons d'un moment angular total igual a zero (parelles de Cooper) es troba al cor del més vell i reeixit model de Bardeen-Cooper-Schrieffer de la superconductivitat dels metalls. En aquest camp, es troba en estudi experimental la recerca de temperatures de transició més altes; un superconductor digne de confiança, amb una temperatura que treballi per sobre del punt d'ebullició de l'hidrogen, a 21°K (evitant necessitar heli), seria un gran benefici tecnològic.

Fluids. La superfluidesa de l'isòtop lleuger de l'heli, ^3He , ha ajudat llargament a l'eixamplament del nostre coneixement dels fenòmens quàntics, ja que les seves característiques són totalment diferents de les del superfluid ^4He ; això reflecteix el fet que els nuclis de ^3He són fermions, mentre que els de ^4He són bosons. Com a contrast dels parells d'electrons de Cooper que tenen un moment angular relatiu igual a zero, els nuclis de ^3He en els parells superfluids tenen una unitat de moment angular; com a conseqüència, aquest superfluid exposa una "textura" i una anisotropia marcada respecte, per exemple, a un camp magnètic aplicat que serveix per a orientar macroscòpicament els parells. Això ofereix un camp ampli i obert de recerca a la física quàntica.

En el camp dels fluids clàssics, la turbulència sobresurt com un dels problemes més grans sense resoldre de tota la física moderna. A la frontera entre la noció ordenada i la desordenada, la turbulència s'ha resistit a la lògica matemàtica —es troba entre el reialme de la simple aproximació i el de la simplicitat estadística. I encara, és present a la nostra societat tecnològica: en el soroll del motor d'un jet, en la vàlvula d'un cor que falla, en gran part de les situacions atmosfèriques, en l'estimació de bona part de l'energia perduda en el transport d'alta velocitat. Les teories de la turbulència han estat proposades per matemàtics de la matemàtica aplicada, començant essencialment amb un grup de Moscou l'any 1941, però no va ser fins a l'any 1950 que aquestes teories van ser introduïdes a l'Europa Occidental i Nord-americana.

L'aproximació als fluids mecànics amb funcions

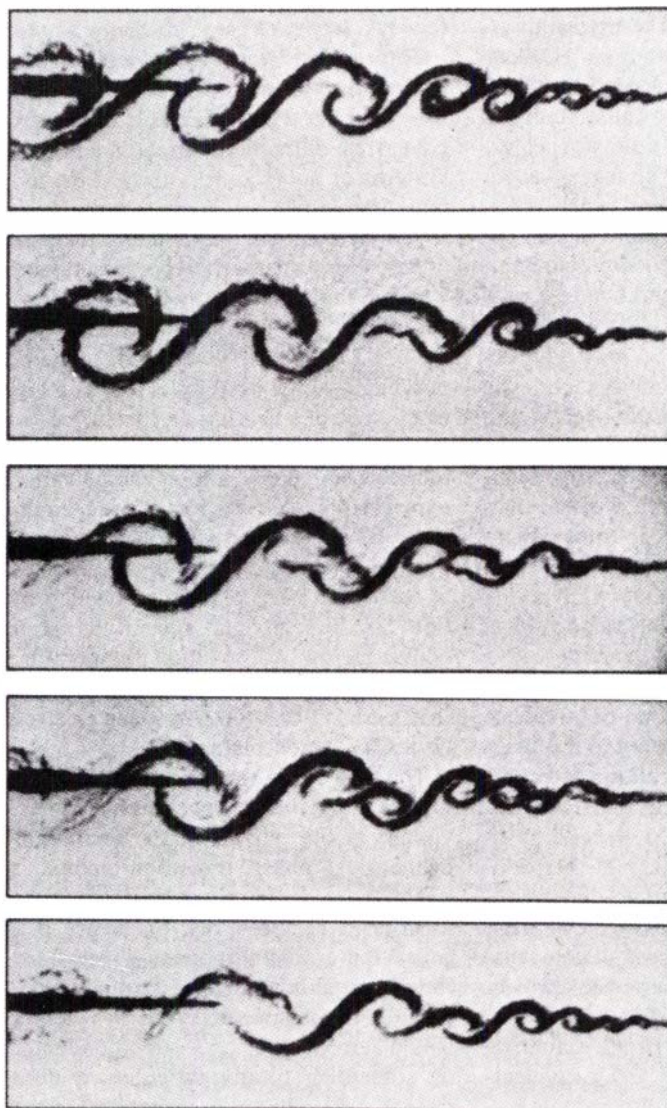


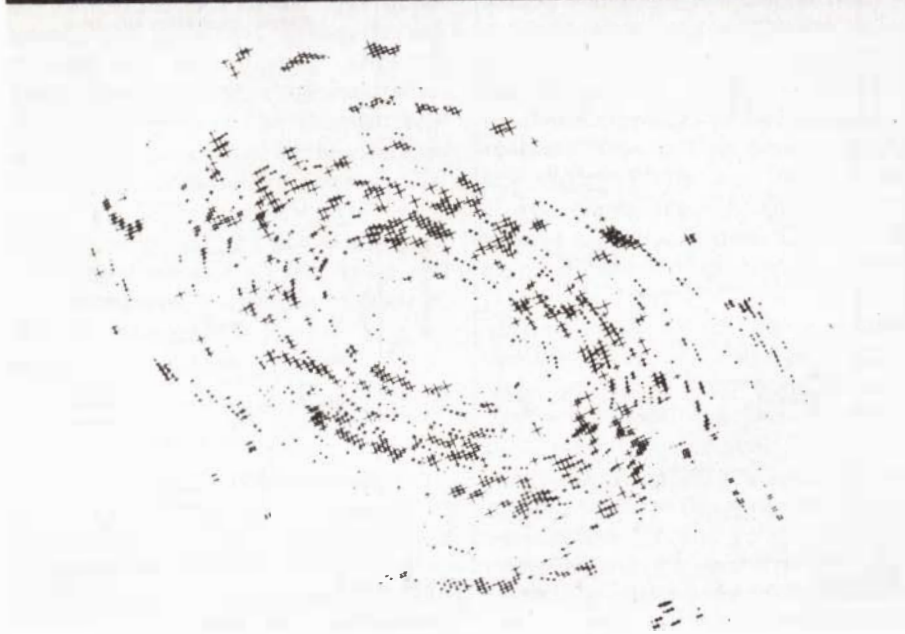
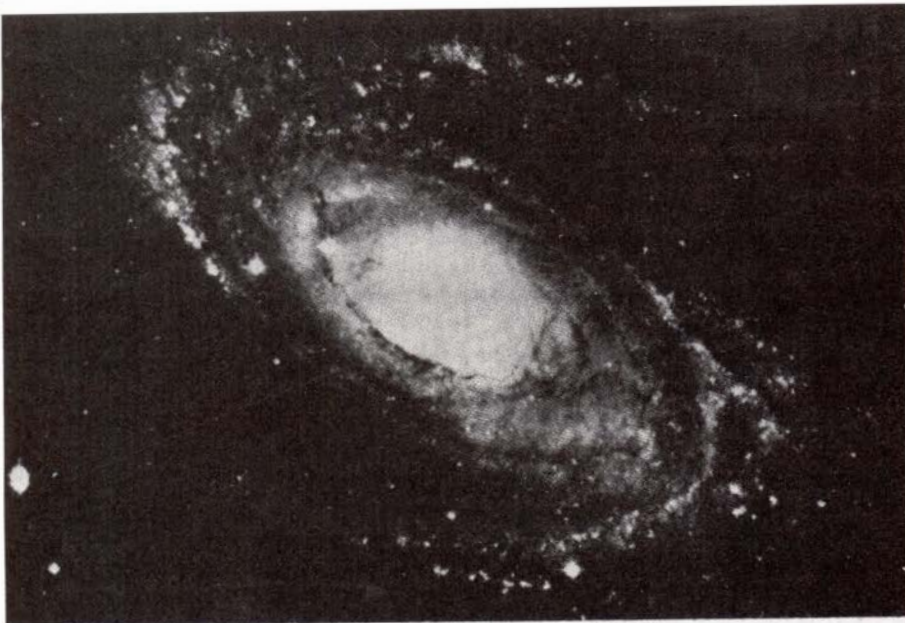
Figura 7. L'ombragrafia ens mostra la barrera turbulent de capes entre dos corrents de la mateixa densitat, els dos fluint d'esquerra a dreta a cada plafo. El corrent de més amunt flueix a 10 metres per segon i el de més avall a 3,5 metres per segon. La pressió és de 8 atmosferes i cada plafo té 5 cm. d'altura. La seqüència va ser obtinguda per un grup del California Institute of Technology, usant una barrera de nitrogen i d'heli-argó com a materials, en els dos corrents. Usant materials apropiats que tinguin diferents característiques però amb la mateixa densitat, és possible, igual com aci, classificar situacions de dimensions quasi arbitràries per poder fer un estudi més detallat.

temporals de correlació va ser introduïda l'any 1955 i continua essent explotada, sobretot a l'URSS, mentre que a Europa i els Estats Units ha dominat l'ús de simulacions amb computadores.

Molt recentment, als Estats Units s'ha recomenat a estudiar aquest problema, i s'ha aconseguit un progrés substancial. Això es pot il·lustrar amb un dels casos més simples, una

capa gruixuda de fluid uniformement escalfada per sota. Amb un flux de calor a baix, el flux de fluid és laminar i uniforme. En augmentar la calor, primer apareix una inestabilitat, tal com Rayleigh va mesurar-la fa molt de temps, en forma d'ondulacions de convecció (vegeu figura 7), que són periòdiques en una dimensió i d'amplitud infinita en la dimensió perpendicular. A mesura que augmenta la calor, doncs,

Figura 8. Una galàxia en espiral M81 (a dalt) pot haver estat creada per supernovae. Una teoria d'estructures de galàxies en espiral proposada per H. Gerola i P.E. Seiden de l'IBM Thomas J. Watson Research Center manté que si una formació desencadenada d'estrelles supernova ocasiona una altra supernova, es podria produir una cadena de regions de formació d'estrelles. Si totes aquestes cadenes fossin creades en una galàxia diferencial en rotació, la distribució de les estrelles formaria una estructura d'espiral. Una simulació d'aquesta teoria feta per un computador per la galàxia M81 (a sota) ens dona una distribució d'estrelles brillants joves (creus) que s'assembla a l'actual distribució (a dalt).



aquestes ondulacions de convecció comencen a oscil·lar sinusoidalment al llarg de la seva amplitud, i si augmenta més apareixen seqüencialment formes addicionals. És característic d'aquestes formes que el període de cada nova forma és el doble que el de la forma que la precedeix. A mesura que van apareixent més i més noves formes, el sistema va tenint una separació cada cop més llarga entre repetició i

repetició d'una configuració donada; i, en el límit, quan aquesta separació arriba a ser infinita (tot i que el sistema ja no es repeteix mai), obtenim una turbulència.

Ha estat demostrat que la inclusió d'un aparellament no lineal que connecti les tres formes més baixes portarà també, només eventualment, a la turbulència. Aquesta feina ha portat a la introducció de les anomenades "superfícies

estranyes atractives" en la fase espacial del problema. Les trajectòries de sistemes que no es trobaven originàriament en aquestes superfícies es mouen vers elles; un cop les abasten, resten allà i es mouen caòticament com a indicació de turbulència. Hem començat tot just a explotar aquesta nova penetració en l'estudi del comportament dels fluids.

Entre les qüestions més fascinants obertes en la física dels fluids hi ha les que estan relacionades amb el moviment de plaques tectòniques—dels continents en la superfície del nostre planeta. Hem avançat molt ràpidament des d'una idea antiga cap a una veritat acceptada bastant generalment; però els mecanismes que hi ha sota la tectònica de plaques encara romanen essencialment desconeguts. També ho són els detalls dels mecanismes responsables del geomagnetisme.

ASTROFÍSICA RELATIVISTA

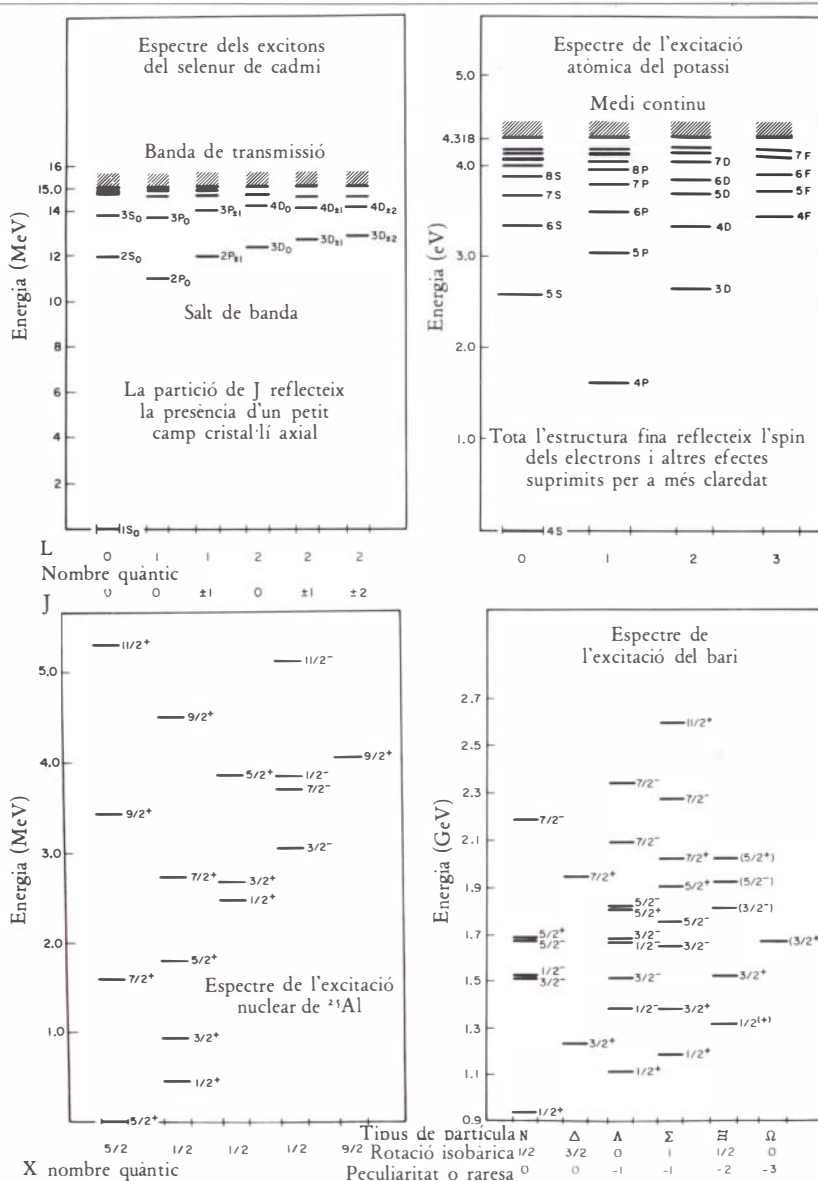
Una de les descobertes més importants de l'astrofísica moderna va ser la de la radiació còsmica de 3°K (es tracta d'una radiació del cos negre); el ressò, segons l'efecte Doppler, de la gran explosió (el Big Bang). Mesuraments recents confirmen que aquesta radiació té veritablement un caràcter de cos negre, però s'ha demostrat que té una petita anisotropia direccional que pot ser interpretada—en termes de l'efecte Doppler—com una prova que el sistema solar es mou en la direcció de la constel·lació Leo amb una velocitat d'alguns centenars de quilòmetres per segon. Penetrant com penetra a tot l'espai, aquesta radiació K ens dona en efecte una informació bàsica uniforme, un nou éter, en contra del qual es pot posar a prova el moviment dels elements materials de l'univers. Les nebuloses d'espiral es troben entre els més dramàtics habitants nocturns del firmament, ja que la seva aparença suggereix que haurien de ser subjectes a una física relativament simple. Aquest, però, no ha estat el cas i cap dels models hidrodinàmics o mecànics no ha reeixit a reproduir l'òbvia estabilitat de les espirals al llarg del temps. Va ser, per això, de molt interès—i d'un alt poder instructiu en la física en general—quan un grup d'investigadors amb coneixements primaris de biologia va recordar que, en sistemes biològics bàsics, la classificació pot comportar efectes de gran riquesa (els físics haurien d'haver après això dels sòlids amorfs).

Figura 9. L'espectre de l'excitació quàntica per a quatre sistemes físics diferents. A cada cas, l'espectre ha estat dibuixat per mostrar la classificació típica dels estats quàntics a les famílies que tenen nombres quàntics comuns. És particularment sorprenent la similitud en l'aparença general d'aquests espectres, malgrat les energies d'excitació de grau 10^{12} . L'excitació és una entitat formada per l'electró pujat des de la banda de valència d'un aparellament sòlid fins al forat del qual se l'havia tret anteriorment; l'espectre del potassi és el dels electrons extranuclears; l'espectre nuclear és el de les configuracions de nucleons a ^{25}Al amb una energia d'excitació en augment; i l'espectre del bari és el de les configuracions quark que estan per sota (ací només u, d i s) i que formen aquests barions.

Partint d'ací, el grup va treure un model físic molt simple dividint l'espai general ocupat per una nebulosa en cèl·lules amb una probabilitat a l'atzar que hi hagués una *supernova* a cada una d'elles; hom va suposar que l'ona de xoc de la *supernova* servia per a estimular la formació d'estrelles en les cèl·lules adjacents, i es va donar una velocitat angular a tot el volum. S'ha obtingut un suport bastant convincent en les primeres mesures de les radiacions X des del New Einstein Satellite Observatory. Com se'n mostra a la figura 8, aquest model no sols genera patrons d'estrelles característics molt evocatius de les galàxies d'espiral, sinó que també mostra la desitjada estabilitat a llarg terme.

Segurament un dels processos més sorprenents de tota la física és el del col·lapse gravitacional; però aquest és un procés que encara no comprenem malgrat que es vagi fent un progrés constant. Es sabut que seguint el seu camí d'evolució, identificat ja fa molt per Hertzsprung i Russell, les estrelles que tenen una massa inicial de menys d'1.4 vegades la del nostre Sol estan destinades a l'estat d'estrella blanca nana; el sistema és estabilitzat per una pressió de degeneració d'electrons a una densitat d'unes 1.000 tones per polzada cúbica i irradia energia fins a esdevenir una escòria en l'espai —una fi bastant innoble. Per a estrelles amb unes masses inicials entre 1.4 i 2 vegades la del nostre Sol, la pressió de la degeneració d'electrons resisteix la gravitació i estabilitza el sistema a una densitat comuna d'unes 10^9 tones per polzada cúbica —esdevenen estrelles de neutrons, sistemes mecànic-quàntics d'alguns decennis de quilòmetres de diàmetre.

L'estrella de neutrons és una entitat tan meravellosa que si no existís ens veuríem forçats a inventar-la. Per a la seva descripció necessitem tota la física clàssica i quàntica. Hom creu que la seva sòlida crosta consisteix en el ferro més pur que hom pot trobar enlloc de l'univers; justament a sota d'això hi ha una esfera molt prima de protons superconductors que mantenen un camp magnètic a la superfície de 10^{13}G , i això, aparellat a una velocitat angular molt alta, porta la superfície a un camp electrostàtic de 10^{12}V/cm . La crosta superconductora engloba un superfluid de neutrons de viscositat igual a zero. Com a superfluid, aquesta esfera interior de neutrons no pot rodar coherentment; en canvi, deuen sortir una sèrie de minúsculs rotacionals (remolins), tots amb els eixos paral·lels al de revolució de l'estrella —les teories actuals suggereixen que hi pot haver 10^4 rotacionals d'aquests per centímetre quadrat en



una sèrie d'estructures triangulars. La composició i l'estructura a prop del centre d'aquestes estrelles, on les densitats es podrien aproximar als 10^{15} grams per centímetre cúbic, no es coneixen. No sabem ni l'equació d'estat per a la matèria que es troba a sota d'unes condicions tan extremes.

Fins en les estrelles que tenen una massa inicial de més de dues vegades la massa del nostre Sol, la pressió de degeneració dels neutrons no resisteix la gravitació i el col·lapse continua. Podria ser que eventualment les estrelles de quarks estables es desenvolupessin, i és clar que el que

passa en el col·lapse deu dependre de l'estructura de la matèria última, com ja està determinat a la física de partícules elementals. Però molt abans que es pugui manifestar el més exòtic dels fenòmens del col·lapse, els camps gravitacionals de superfície tenen tal magnitud que fins i tot els fotons projectats cap enfora des de la superfície cauen enrera. Es forma un forat negre, separat per sempre més de la resta de l'univers, caracteritzat només per la seva massa, el seu moment angular i la seva càrrega elèctrica. Gran part de la massa del nostre univers que falta aparentment pot ser que esti-

gui realment amagada en aquests forats negres, i si no en els neutrinos que hem mencionat més amunt.

Encara hi ha una especulació a l'entorn d'aquests petits i primordials forats negres, formats com una conseqüència de fluctuacions en densitat en el Big Bang original. El nostre punt de vista sobre la transmissió d'aquests forats negres ha canviat radicalment en comprendre, fa pocs anys, que la idea que teníem del col·lapse gravitacional era un model clàssic i no quàntic. La introducció de conceptes de la teoria quàntica, en particular la possibilitat de creació de parells en la matèria en els camps molt forts que hi ha a prop de la superfície d'una estrella que s'està col·lapsant, ha obert la possibilitat que els forats negres no se separin completament de l'univers; mentre que un parell partícula-antipartícula creat pot ser capturat per un forat negre, l'altre membre pot escapar-se, i emergeix energia des del forat.

Hom creu que els últims estats de l'evaporació d'un forat negre podrien ser violentament explosius. Els càlculs que s'han fet fins ara suggereixen que si els forats negres existeixen, i que si n'hi ha algun en la nostra part de l'univers, ara es deuen trobar —tenint una massa com la del mont Everest empaquetada en un diàmetre d'un àtom d'hidrogen— a punt d'atènyer la seva fase explosiva. La seva temperatura —de 10^{12} °K aproximadament— no tindria rival en res des de la primitiva bola de foc del Big Bang. Entre les observacions més recents i més importants en astrofísica es troba la de l'explosió dels raigs gamma. Des del 1973, els satèl·lits del voltant de la Terra amb detectors de raigs gamma han mostrat unes cent radiacions d'explosions de gamma diferents que duraven un temps de l'ordre d'un segon, però hom no té cap informació de la font d'aquestes explosions. El 5 de març de l'any 1979, una explosió cent vegades més intensa que cap altra va ser finalment atribuïda, per un grup nacional de satèl·lits en el sistema solar, a fragments de la *supernova* N49 en el Gran Núvol Magelànic. Pot ser calculat que l'explosió, de 0,15 segons de duració, va descarregar energia de raigs gamma de l'ordre de 10^{41} ergs per segon, excedint en molt la lluminositat de la nostra galàxia, la Via Làctia. Podem aconseguir una descripció bastant consistent si postulem que el dia 5 de març del 1979 el fragment de l'estrella de neutrons de la *supernova* N49 va ser sotmès a un ajustament intern —un terratrèmol— i el canvi corresponent a la superfície, amb els seus immensos camps electromagnètics, els seus electrons suficientment accelerats per a produir

parells electrons-positrons, els quals es van desintegrar posteriorment amb emissions dels fotons característics de 511-GeV. Però a causa de l'intens camp gravitacional de l'estrella de neutrons, aquests fotons van ser transformats gravitacionalment a gairebé 400-GeV, tal com s'ha pogut mesurar per un dels satèl·lits soviètics.

Un fet tan cataclísmic en la galàxia germana es creu que pot haver produït radiacions gravitacionals i electromagnètiques, i els centres que disposen d'antenes que operen amb ones gravitacionals busquen des del 5 de març del 1979 qualsevol evidència d'aquest esdeveniment, encara que les sensibilitats d'aquestes antenes són encara molt primitives. La generació d'antenes d'ones gravitacionals de què disposarem, amb grans barres de safir, temperatures ultrabaixes i aparells ultrasensitius per a mesurar totes les característiques, promet obrir enterament nous dominis en la física gravitacional per a estudis experimentals.

Ja hem fet un progrés impressionant en la comprensió del nostre univers, donat que ho hem vist tot solament a través de finestres en la nostra atmosfera d'amplitud d'ona electromagnètica bastant estreta. La tecnologia de l'espai ens ha donat uns pocs i primitius satèl·lits-observatori a fora de l'atmosfera, i aquests han revolucionat completament el nostre punt de vista. Amb una més gran expansió de l'observació extraatmosfèrica, que la tecnologia Shuttle ens permetrà —a totes les longituds d'ona, des de les ones de ràdio fins a les radiacions gamma—, estic segur que ens sorprendrem contínuament i que el nostre coneixement actual, per molt notable que sigui, resultarà ser merament un albirament de les meravelles que la natura té guardades.

CONCLUSIÓ

S'ha suggerit molt freqüentment que la física, com moltes altres ciències, està fragmentada en subcamps i especialitats cada cop més petites i que van deixant de comunicar-se i de comprendre's entre elles. Encara que això sembli superficialment cert, jo he provat de fer veure que aquest ja no és el cas; els conceptes, les tècniques i les tecnologies de la física es transfereixen ràpidament d'un subcamp a l'altre i és ací on resideix la nostra força. I parlem una llengua comuna. Encara que les escales canviïn, la física que es troba a sota de tot no és tan diferent. En la figura 9 mostro espectres d'excitació típics per a sistemes quàntics excitats en la

matèria condensada, atòmica, nuclear i en la física de partícules elementals. Mentre que les ordenades canvien en un factor de 10^{12} —de mil·lielectrovolt a milions d'electrovolt— el comportament característic és remarcablement similar. I molt sovint els desenvolupaments més interessants i els més importants tenen lloc a les interfases entre les nostres fronteres artificials entre subcamp i subcamp; això és alguna cosa més que un accident.

Perquè ningú no cregui que entenem la natura més del que realment la comprenem, deixeu-me concloure considerant algunes de les constants bàsiques del nostre univers. Expressat en una unitat fonamental (el temps que un fotó triga a creuar una partícula elemental) l'edat de l'univers és de $\sim 10^{10}$; el seu diàmetre, expressat també en termes de la partícula elemental, de $\sim 10^{10}$; la proporció de les interaccions nuclears fortes a les interaccions gravitacionals entre partícules elementals és de $\sim 10^{40}$; i la massa de l'univers, expressada en masses de protó, és de $\sim (10^{40})^2$. Això ens dona la clara impressió que la naturalesa intenta comunicar-nos alguna cosa però no tenim ni la més mínima idea del que pot ser. No sabem per què aquest número, 10^{40} , apareix tan sovint; no sabem per què és tan comú; tampoc no sabem com, o si canvia amb el temps. Se sospita des de fa temps que reflectint l'expansió de l'univers, la constant gravitacional G podria disminuir sistemàticament a través del temps —i que les altres constants considerades fonamentals, com la de la càrrega elemental de l'electró i el protó, també podrien canviar. Els estudis de les abundàncies relatives dels isòtops nuclears, com ^{187}Os i ^{187}Re , han demostrat que aquest canvi en la càrrega electrònica (si existeix) ha estat, en els 4,5 bilions d'anys de vida del nostre sistema solar, de menys 1/300 de les vagues prediccions del model de la variació de G. Simplement no comprenem el que sembla que és un simple aspecte molt comú al nostre univers —però, després de tot, només hem estat observant-ho científicament durant una infima fracció dels seus 12 bilions d'anys de vida o més. Obviament, en un treball de tan ampli abast com aquest no puc esperar poder expressar el meu reconeixement i fer referència del meu agraïment al gran nombre de persones que he mencionat o citat a través dels seus treballs. Però estic en deute, particularment, amb els meus col·legues i alumnes a Yale amb els quals he tingut el plaer de parlar d'aquestes coses en moltes ocasions, amb Phil Albelson pel repte a emprendre aquesta ressenya i amb Frances DeGrenier per la seva ajuda a preparar-la.