Ciència i tecnologia a bord de la ISS (Estació Espacial Internacional)

X. Ruiz*

Introducció

L'objectiu principal d'aquest treball serà obrir la porta a l'espectre d'activitats cientificotecnològiques que s'han desenvolupat a l'espai durant els últims cinquanta anys amb la intenció d'esbrinar la problemàtica global en relació amb projectes futurs que es duran a terme a bord de la nova ISS en els diferents àmbits de la física de fluids, la ciència dels materials, l'observació espacial i la física fonamental. A causa de l'evident inviabilitat d'un tractament exhaustiu en tots els àmbits esmentats s'ha preferit articular un text lleuger que doni unes quantes pinzellades al voltant dels problemes més punyents en cada cas. No obstant això, també es pot assolir un segon nivell de concreció deixant-se guiar pacientment pels oceans d'informació addicional implícitament continguda en les propostes d'informació complementària. Un tercer nivell, molt més erudit, pot aconseguir-se finalment amb un curós estudi dels textos bàsics referenciats.

Del fet que una nau espacial orbiti al voltant de la Terra deriva una peculiar modificació dels efectes gravitatoris dins del vehicle, l'interior de la nau sembla esdevenir un tranquil entorn ingràvid. No obstant això, aquesta conclusió és només aproximadament correcta ja que, a banda de l'evident no-inercialitat del sistema de referència i del gradient gravitatori existent perquè el vehicle és un cos extens, també s'han de tenir en compte altres tipus de pertorbacions indefugibles. La gènesi d'aquestes pertorbacions està lligada a diverses interaccions tant de caràcter extern –resistència aerodinàmica, pressió solar, etc.–, com intern –maquinària de la nau, activitats de la tripulació, maniobres de correcció de l'òrbita, interacció amb els modes de vibració de l'estructura, etc. En conseqüència, i tenint en compte el problema global, es pot dir més pròpiament que l'interior del vehicle orbitant constitueix un entorn microgravitatori actiu.

Cal esmentar que també poden obtenir-se reduccions importants del nivell gravitatori amb sistemes considerablement més econòmics, com ara torres de caiguda lliure, avions en vol parabòlic, globus estratosfèrics i coets d'exploració. Una torre de caiguda lliure és, en poques paraules, un cilindre llarg sense aire, dins del qual cau lliurement una càpsula que conté els diferents dispositius experimentals. Com a conseqüència d'aquesta caiguda, poden aconseguir-se nivells de gravetat reduïda entre 10 i 0,1 $cm \cdot s^{-2}$ durant períodes de temps curts –normalment entre 2 i 10 segons. Els avions i els coets d'exploració també assoleixen, descrivint arcs parabòlics, nivells gravitatoris reduïts durant períodes més llargs de temps. En el cas dels avions l'acceleració és aproximadament d'1 $cm \cdot s^{-2}$ durant 20 o 25 segons, mentre que en el cas dels coets el nivell gravitatori pot baixar a 0,01 $cm \cdot s^{-2}$ durant un màxim de 15 minuts. En relació amb els vols parabòlics és interessant fer esment de l'èxit de participació del tercer ESA Student Parabolic-Flight Campaign,[1] a Bordeus l'octubre de l'any passat; malgrat que només un dels trenta-un equips d'estudiants dels diferents països europeus pertanyia a l'Estat espanyol –ETSI, Universitat Politècnica de Madrid. Per a la propera campanya l'ESA ha ofert també a aquestes generacions de joves talents set quilograms de càrrega per a experiments en un nou vol del vector rus Foton.

Si l'experiment ha de durar més, esdevé obligatori orbitar la Terra. Les primeres oportunitats d'experimentar sota aquestes condicions es van produir als anys setanta amb els programes Salyut-Soyuz –soviètic– i Skylab –americà. De tota manera, aquells treballs pioners estaven fortament limitats per l'espai disponible a les càpsules, per la baixa potència elèctrica de la qual es disposava i pel baix nombre d'oportunitats de vol proporcionades. Als anys vuitanta el programa del transbordador espacial Space Shuttle va fer miques les restriccions anteriors oferint un amplíssim ventall de possibilitats a causa de la millor preparació de la tripulació, l'increment de càrrega disponible, la durada més llarga dels experiments, les possibilitats de telecontrol i la recuperació dels dispositius experimentals gairebé intactes. El nivell d'acceleració al transbordador és aproximada-

* **Xavier Ruiz** (Tarragona, 1954) és doctor en Ciències Físiques per la UB (1991) i actualment professor del Departament de Química Física i Inorgànica de la Universitat Rovira i Virgili (xruiz@quimica.urv.es).

[1] W. J. Ockels and L. Jagger-Meziere, *The Third ESA Student Parabolic-Flight Campaign*, ESA Bulletin, **105**, 91-100 (2001) (http://www.estec.esa.nl/spacefligt/parabolic; http://www.estec.esa.nl/outreach/pfc).

ment de 0,001 $cm \cdot s^{-2}$ en els moments de calma. Fins avui un gran nombre de missions han volat i encara volen a la seva bodega de càrrega cobrint un vast espectre d'aplicacions.

Fins fa poc tots aquests programes gegantins havien estat exclusivament reservats als països de més empenta econòmica, l'antiga Unió Soviètica i els Estats Units d'Amèrica, però la llarga experiència adquirida ha fet que actualment gairebé totes les nacions puguin dur a terme programes cientificotecnològics, evidentment, de caràcter més reduït –amb minisatèl·lits, nanosatèl·lits i picosatèl·lits de baix preu i logística considerablement més econòmica. La figura 1 justifica aquesta afirmació en el cas de l'Estat espanyol tot il·lustrant un moment de la unió del minisatèl·lit anomenat MINISAT 01 al llançador Pegasus. Aquest enginy de noranta quilograms de càrrega útil i de disseny i fabricació completament espanyoles és el primer d'un programa que preveu tres minisatèl·lits dedicats a la investigació, a l'observació terrestre –MINISAT 02– i a les telecomunicacions –MINISAT 03. En aquest cas, el MINISAT 01 ha inclòs tres experiments científics. L'EURD, destinat a estudiar la radiació difusa del medi interestel·lar galàctic, el CPLM destinat a estudiar el comportament de ponts líquids axisimètrics i el LEGRI, destinat a estudiar la radiació gamma de baixa energia procedent de diferents fonts. Així mateix també va ser implementat l'ETRV per provar el comportament d'un nou regulador de velocitat d'alt interès en el desplegament controlat d'elements satel·litaris mòbils.

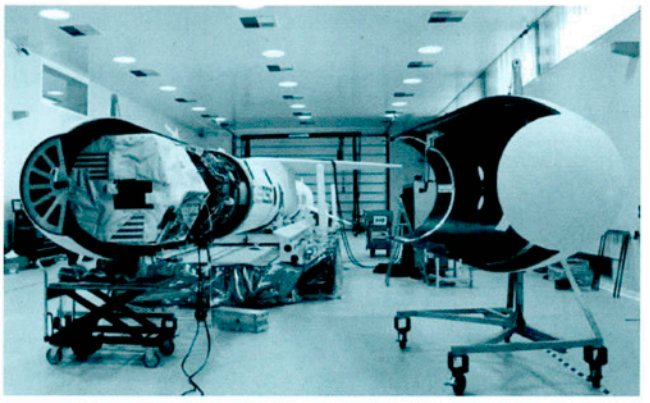

Figura 1: *Instantània de la unió del MINISAT 01 al llançador. L'esmentat minisatèl·lit va ser llançat el 21 d'abril de 1997 des d'un avió Locheed Tristar al cel de Gran Canària. (Cortesia de l'Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial; fotògraf Sr. M. Lamparero)*

No obstant això, per assolir un nivell més profund de coneixement dels anomenats *efectes residuals* o de segon ordre són necessaris, de vegades, períodes encara més llargs d'experimentació. Atès que l'impressionant programa científic dut a terme a la pionera estació MIR està completament exhaurit i que aquest complex espacial ja no existeix, s'ha articulat un nou programa internacional de cooperació entre el Canadà, diversos països europeus –Alemanya, Bèlgica, Dinamarca, Espanya, França, Gran Bretanya, Holanda, Itàlia, Noruega i Suïssa–, els Estats Units, el Japó i Rússia, per construir una estació espacial internacional més moderna, més gran i de més altes prestacions (Karamanolis, 2000). S'espera que la ISS (International Space Station) proporcionarà als investigadors d'arreu un entorn microgravitatori curosament controlat durant períodes de calma de fins a trenta dies, quasi el doble dels que actualment es poden tenir al transbordador. Entre dos períodes de calma està previst procedir a les activitats de manteniment de l'estació com ara les rutines de correció de l'òrbita, els atracaments dels transbordadors i les naus de càrrega amb recanvis i noves tripulacions, etc.

En el moment d'escriure aquestes línies els mòduls Zarya, Zvezda, Unity, Destiny, Raffaello i un braç robòtic exterior desenvolupat pel Canadà, l'Space Station Remote Manipulator System –SSRMS– necessari per a posteriors muntatges, ja orbiten la Terra a una alçada aproximada de 400 quilòmetres amb el nom provisional d'Estació alfa. La finalització del muntatge està prevista per a l'any 2004. L'expansió per allotjar 6 persones està planejada per al novembre del 2002, però les activitats van començar l'any 2000, encara que amb una tripulació reduïda (William Shepherd, Yuri Guidzenko i Serguei Krikalev). Aquesta tripulació ja ha estat substituïda i a hores d'ara a bord de l'estació hi ha la segona expedició, (Yuri Usachev, Jim Voss i Susan Helms) que té previst fer-hi una estada llarga de quatre mesos.

Física de fluids

Els motors emprats per propulsar cotxes o avions, les calderes de vapor que generen aproximadament el noranta per cent de l'energia elèctrica mundial, el transport dels contaminants a l'aire i a l'aigua, són, entre d'altres, alguns exemples de com la física de fluids s'enllaça constantment, gairebé sense desitjar-ho, amb la nostra vida quotidiana. A més, cal no perdre de vista que tres dels quatre estats de la matèria –gas, líquid i plasma– són fluids i fins i tot el quart –estat sòlid– es pot comportar com a tal sota certes condicions límit. En conseqüència, l'anàlisi del comportament del fluid esdevé d'importància cabdal a l'hora d'entendre, controlar i millorar tant els processos industrials com els naturals.

Per presentar la gran quantitat d'informació acumulada en relació amb aquesta temàtica en entorns microgravitatoris (Myshkis *et al.*, 1987; Walter, 1986) es consideraran aquí tres apartats. El primer tractarà dels fluids multifàsics sota diferents condicions com ara la combustió, l'ebullició i la condensació. El segon estarà constituït pels fluids complexos com ara els col·loides, els

gels, els fluids magnetoreològics, les escumes i sistemes granulars. El tercer estarà dedicat als sistemes interfacials dels quals interessa conèixer la manera en què una superfície arriba a una determinada forma, la manté i evoluciona sota l'acció de diferents tipus d'influències externes.

Fluids multifàsics

La combustió és una ràpida reacció química autosostinguda que transforma energia química en energia tèrmica. Malgrat que aquest procés és clau en moltes tecnologies modernes, encara planteja reptes relacionats tant amb el seu baix rendiment com amb els productes generats –pol·lució ambiental, productes tòxics. Els estudis de combustió en condicions terrestres i en microgravetat estan motivats, per tant, per dues raons cabdals, l'economia i la salut pública.

Per produir la combustió gairebé sempre es necessiten tres elements: un combustible (sòlid, com ara el carbó; líquid, com ara la cera, la benzina o el querosè, i gasós com ara el propà o l'hidrogen), un oxidant (sòlid, com ara el perclorat d'amoni; líquid, com ara el peròxid d'hidrogen, i gasós, com ara l'omnipresent oxigen) i una font d'ignició (per exemple, una guspira). Les flames difusives que es formen a la Terra barregen el combustible sense cremar, l'oxidant i els productes de la combustió mitjançant el moviment ascendent del gas calent produït durant la combustió. L'eliminació de la convecció induïda per la distribució tèrmica en el si de la flama difusiva fa que la barreja es produeixi només per difusió. Sembla que la flama cremi menys vigorosament generant també canvis tant en la forma geomètrica externa –més esfèrica– com en l'estructura i la distribució cromàtica –pràcticament blava–, i també en la formació de sutge. En microgravetat la producció de partícules de sutge es dobla i les mides de les partícules resultants són força diferents a les produïdes a la Terra –els detectors de fums han hagut de ser redissenyats per poder usar-los a les naus espacials i poder garantir la seguretat de la tripulació i de la càrrega. Contràriament, a les flames difusives, a les flames de prebarreja el combustible i l'oxidant són barrejats forçadament abans de la ignició. L'eliminació de la sedimentació en entorns microgravitatoris ha permès fer un estudi molt més curós de la combustió d'una gota de combustible o d'un conjunt de gotes en suspensió en el si d'un gas oxidant. Aquestes anàlisis han permès millorar l'eficiència del procés de combustió en motors de turbina d'alt rendiment, cremadors de prebarreja, etc. i així reduir la pol·lució i el perill d'explosions principalment en mines i dipòsits de gra. Un altre aspecte general important des del punt de vista de la seguretat s'ha centrat en les característiques del procés de propagació/inhibició del front de flama sota diferents nivells gravitatoris, ja que s'ha comprovat experimentalment que quan bufen lleugers corrents d'aire, alguns materials són sorprenentment més inflamables sota condicions microgravitatòries que sota condicions terrestres. Altres materials poden arribar a consumir-se sense flama, amb la qual cosa esdevenen extremament perillosos, ja que no es detecta la combustió en el moment que es produeix.

Les flames també s'han utilitzat a l'espai per sintetitzar ful·lerens i nanopartícules. Els ful·lerens, una nova forma de partícules de carboni, són molt cars de produir a la Terra i no se n'obtenen en grans quantitats. La importància d'aquests compostos es deu al fet que alguns d'aquests ful·lerens tenen propietats superconductores. Les nanopartícules també són de gran interès tecnològic gràcies a la considerable millora en la consistència dels materials del tipus *composites* que s'obtenen, per exemple, sinteritzant-les.

L'ebullició i la condensació són procediments molt efectius per transferir grans quantitats d'energia calorífica. En entorns espacials, l'ebullició és preferible sobre altres tipus de bescanvis energètics gràcies a la seva eficiència i al fet que els aparells per generar potència poden ser de mida reduïda. A causa de la minimització dels efectes de flotació, a l'espai es plantegen problemes seriosos amb les bombolles de gas calent arrossegades conjuntament amb la fase líquida. Així, per exemple, en el cas d'un flux tubular senzill, l'aire pot fins i tot estar disposat en una zona central envoltada de líquid. Ha estat necessari analitzar, d'una banda, com canvien les propietats físiques dels líquids quan les bombolles i el líquid flueixen plegats, i, de l'altra, desenvolupar estratègies adients per a la separaració o l'eliminació de les esmentades bombolles. Encara que aquesta problemàtica està lligada fonamentalment al funcionament dels motors de combustible líquid, és també rellevant, per exemple, en el processament de materials a partir de la fase líquida a alta temperatura, ja que en aquest cas l'aparició de bombolles per desgasificació a la vora de la interfície de creixement interaccionarà catastròficament amb la fase sòlida en procés de formació.

Fluids complexos

Genèricament s'anomenen col·loides les suspensions de partícules sòlides finíssimes en líquids o de gotetes líquides dins medis fluids (líquids o gasosos). Alguns exemples corrents són els aerosols, els fums –sòlids en gas– i les pintures –sòlids en líquids. Els fluids magnetoreològics o ferrofluids són suspensions de nanopartícules magnètiques que es poden orientar formant cadenes sota la direcció d'un camp magnètic extern. Aquestes cadenes formen grans estructures que fan augmentar dràsticament la viscositat de la preparació. No obstant això, aquest efecte és totalment reversible, i en retirar el camp magnètic extern el sistema tornarà, sense cap tipus d'histèresi, a l'estat inicial. Una escuma –*foam*– és una dispersió no uniforme de bombolles de gas dins d'un volum relativament petit de líquid que conté agents tensioactius. Molts exemples quotidians inclouen detergents,

cosmètics, compostos per a la recuperació d'olis i per a l'extinció d'incendis. També apareixen en aigües pollucionades i en el tractament d'aigües residuals. Finalment, els sistemes granulars estan formats per partícules semblants, que poden ser tan petites com un gra de sorra o tan grosses com un còdol. Malgrat que aquests sistemes heterogenis estan compostos principalment per partícules sòlides, el seu comportament pot esdevenir similar al d'un fluid. En efecte, mentre s'aplica pressió, els grans es comprimeixen els uns amb els altres i queden en equilibri formant una mena de maó tou. En deixar d'aplicar-hi pressió, la interacció intergranular esdevé dèbil i el sistema s'allunya del seu equilibri, és a dir, els grans poden moure's amb certa llibertat i el comportament macroscòpic del sistema s'apropa al d'un fluid. Aquest és el cas dels efectes de vibracions mecàniques i acceleracions més o menys sobtades aplicades a aquests tipus de sistemes.

En el cas dels col·loides, els entorns microgravitatoris han permès bàsicament analitzar més curosament transicions de fase del tipus líquid-sòlid. Així mateix, i gràcies a la baixa velocitat de sedimentació característica d'aquests entorns, els fenòmens de coagulació i coalescència han obert una nova dimensió a la física dels aerosols. En el cas dels ferrofluids, el flux induït pel camp magnètic extern s'ha estudiat al marge de l'acció pertorbadora de la gravetat durant períodes de temps molt més llargs. Aquests estudis han tingut també un impacte tecnològic important, ja que el flux resultant induït per l'esmentat camp magnètic extern es pot emprar en la generació d'una redistribució convenient del material per a l'absorció de cops, el control de l'embragament, etc. D'altra banda, com que en microgravetat les escumes esdevenen més estables, s'ha utilitzat aquest entorn per a l'estudi de les seves propietats sorprenents, ja que en no ser ni sòlides, ni líquides, ni gasoses exhibeixen propietats dels tres estats. A més s'han analitzat els mecanismes de generació per minimitzar els problemes que afecten tant l'eficiència com la velocitat d'un gran nombre de processos industrials que generen escumes. Finalment, pel que fa al cas dels materials granulars, l'experimentació en microgravetat ha permès analitzar problemes relacionats amb la interacció entre la mida del gra i les vibracions externes, o amb el grau de desorganització que genera l'acció d'acceleracions externes. L'aplicació de les conclusions extretes ha esdevingut d'importància cabdal en disciplines com ara l'enginyeria sísmica.

Fenòmens interficials

Els fluids del tipus insecticides agrícoles, lubricants o pintures depenen completament de la seva capacitat per mullar les superfícies. Aquesta característica és igualment un factor important en problemes de recobriments i també en injecció de líquids. Sota condicions de gravetat reduïda, la mullada determina, a més, la forma de les interfícies, i aquesta informació ha permès millorar, per exemple, la seguretat en el disseny dels dipòsits de combustible líquid de qualsevol dels vectors espacials actualment en servei. A més, la resposta dinàmica de la interfície a qualsevol tipus d'interacció externa és també cabdal, ja que aquesta interacció sovint esdevé una font important de desequilibris del sistema. Encara que tota aquesta problemàtica bàsicament s'ha analitzat en microgravetat, les conclusions també s'han aplicat al cas dels transports terrestres de carburant amb l'objectiu de millorar-ne la seguretat.

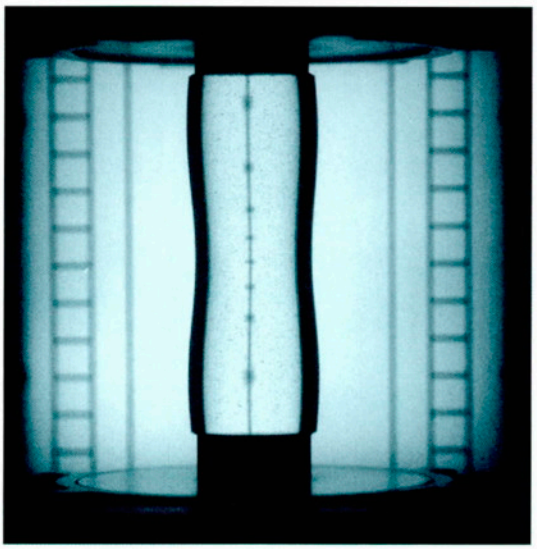

Figura 2: *Instantània d'un assaig de vibració d'un pont líquid de 30 mm de diàmetre dut a terme a bord de la missió Spacelab D-2 l'any 1993. (Cortesia del Prof. Dr. J. M. Perales, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos. Universidad Politécnica de Madrid)*

Un altre fenomen interficial d'importància reconeguda i relacionat amb les interfícies líquid-gas o líquid-líquid és l'anomenat flux capil·lar o de Marangoni. Com que la tensió superficial de la interfície depèn tant de la temperatura com de la concentració –normalment la tensió superficial disminueix amb la temperatura i amb l'addició de contaminats–, qualsevol distribució tèrmica o concentracional genera un desequilibri immediat que es minimitza mitjançant l'aparició d'un flux superficial reparador. En condicions terrestres aquest flux és de segon ordre respecte de la magnitud de la convecció natural, però en entorns microgravitatoris, amb la convecció natural minimitzada, el flux capil·lar dirigeix el transport en el sistema, sobretot si la relació entre superfície lliure i volum és gran. Aquest és el cas de les gotes/bombolles i dels anomenats ponts líquids constituïts per una petita quantitat de líquid mantinguda per forces de tensió superficial entre dos recolzaments sòlids, de la mateixa mida o diferents, en repòs o en rotació uniforme. En relació amb aquest últim sistema fluid

cal afegir que els problemes relacionats amb l'estabilitat de ponts de volum i alçada donats com també amb la resposta de la interfície a vibracions externes han estat també motiu d'atenció continuada des de fa molt de temps (vegeu fig. 2). Això és perquè aquesta disposició fluïda té una gran rellevància en el creixement de nous matèrials monocristal·lins a partir de fase líquida a alta temperatura en entorns microgravitatoris –l'anomenada tècnica de la zona flotant. El coneixement derivat d'aquests estudis fonamentals en relació amb el comportament capil·lar han fet possible, d'una banda, la predicció teòrica de la frontera entre les condicions de creixement estables i inestables en aquesta configuració i, de l'altra, la mesura de propietats termohidrodinàmiques en líquids a altíssimes temperatures o altament corrosius.

Per completar el punt de partida en mecànica de fluids cal afegir només dos aspectes addicionals relacionats amb els sistemes multicomponents no reactius químicament i amb la generació d'entorns en condicions de microgravetat simulada. En relació amb el primer aspecte, cal notar que, gràcies a la minimització dels efectes convectius, la difusió de les diferents espècies a través d'aquests sistemes multicomponents, deguda, principalment, a l'existència de gradients de temperatura i concentració, s'ha analitzat extensament en entorns espacials. L'objectiu d'aquesta atenció s'ha centrat, fins ara, tant en la determinació curosa dels diferents coeficients de difusió com en una anàlisi fonamental a fons dels efectes de segon ordre, conseqüència dels acoblaments entre els camps tèrmic i concentracional, els anomenats efectes Soret i Duffour. Cal aclarir que la difusió és un procés extremament lent. Per donar ordres de magnitud es pot dir que si s'estableix un gradient de concentració al llarg d'un centímetre, l'homogeneïtzació de la barreja pot arribar a trigar tres hores. Aquests temps llargs característics fan que qualsevol mesura difusiva sigui extremament sensitiva al més petit desequilibri.

En relació amb el segon aspecte, és a dir, amb la minimització dels efectes gravitatoris als laboratoris terrestres, la idea genèrica es basa trivialment en la contraposició d'una altra interacció que neutralitzi convenientment la força de la gravetat. Les forces més emprades a aquest efecte són les de tipus magnètic i les d'empenta hidrostàtica. Mentre que per qüestions de manca d'uniformitat del camp l'abast típic dels sistemes que fan servir l'estratègia magnètica correctora està restringit a uns quants centímetres, l'empenta hidrostàtica permet aconseguir entorns extensos sense gaires dificultats experimentals. Només cal parar compte en les mides de les piscines d'entrenament actualment en servei als corresponents centres d'entrenament d'astronautes i cosmonautes (NASA Johnson Space Center –Houston, Texas– i Gagarin Cosmonaut Training Center –Star City, Rússia–) per permetre manipular rèpliques a mida real dels diferents mòduls de la ISS, i és que ja ha passat molt de temps des que l'admirable físic J. Plateau, emprant oli en el si d'una barreja d'aigua i alcohol de la mateixa densitat, estudià les formes d'equilibri d'una massa líquida en condicions de gravetat simulada nul·la.

D'altra banda, en aquests últims temps han aparegut eines computacionals potents i sofisticadíssimes que han ajudat i continuen ajudant a l'estudi d'un gran nombre de processos complexos sota condicions microgravitatòries simulades; són els anomenats entorns microgravitatoris virtuals. L'espectre de possibilitats d'aquestes tècniques és il·limitat, ja que poden resoldre des d'un problema interficial complex fins al comportament d'un sistema líquid sotmès a condicions de gravetat residual constant o a vibracions deterministes de baixa freqüència, i, fins i tot, a sorolls estocàstics del tipus banda estreta. No obstant la importància intrínseca d'aquest món complex de matemàtica sofisticada i abstrusa, cal ser conscient que els resultats obtinguts han de ser analitzats amb precaució, ja que estan fortament influenciats per les limitacions pròpies dels valors numèrics associats als diferents paràmetres termofísics existents en les equacions que s'han d'integrar (i és que, segons afirmà Picasso «el problema amb les computadores és senzillament això, que només són computadores»).

Ciència de materials

El progrés de la tecnologia està íntimament lligat al desenvolupament dels anomenats nous materials. És evident que, sense la matèria primera per a la construcció dels diferents dispositius electrònics i fotònics d'estat sòlid, moltes aplicacions senzilles ara d'ús comú haurien estat abandonades en estadis conceptuals. Però, amb l'increment de la sofisticació tecnològica –de la microtecnologia a la nanotecnologia–, els requeriments perquè els materials s'adaptin a aplicacions més específiques esdevenen cada cop més rigorosos. Cal, doncs, provar noves rutines de creixement i cercar noves condicions de contorn que permetin aconseguir aquest objectiu. Quasi des dels anys setanta, l'espai ha semblat un indret de proves força atractiu per la calma aparent –encara que altres entorns aparentment força més agressius com ara les centrífugues també van ser considerats simultàniament– i, d'aleshores ençà, les proves d'obtenció de materials s'han succeït sense descans una rere l'altra.

Per presentar la immensa quantitat d'informació que hi ha en aquest camp (Walter, 1986; Regel, 1985) d'una manera ordenada, s'ha escollit aquí un criteri en funció de l'ús pel qual es vol obtenir el material. Així, el primer apartat s'apropa als materials emprats actualment en electrònica i fotònica, el segon tracta dels metalls i aliatges, el tercer es relaciona amb les ceràmiques i els vidres, el quart amb els materials polimèrics i, atesa la importància cabdal dels catalitzadors en el món de l'energia, el cinquè apartat es dedica específicament a

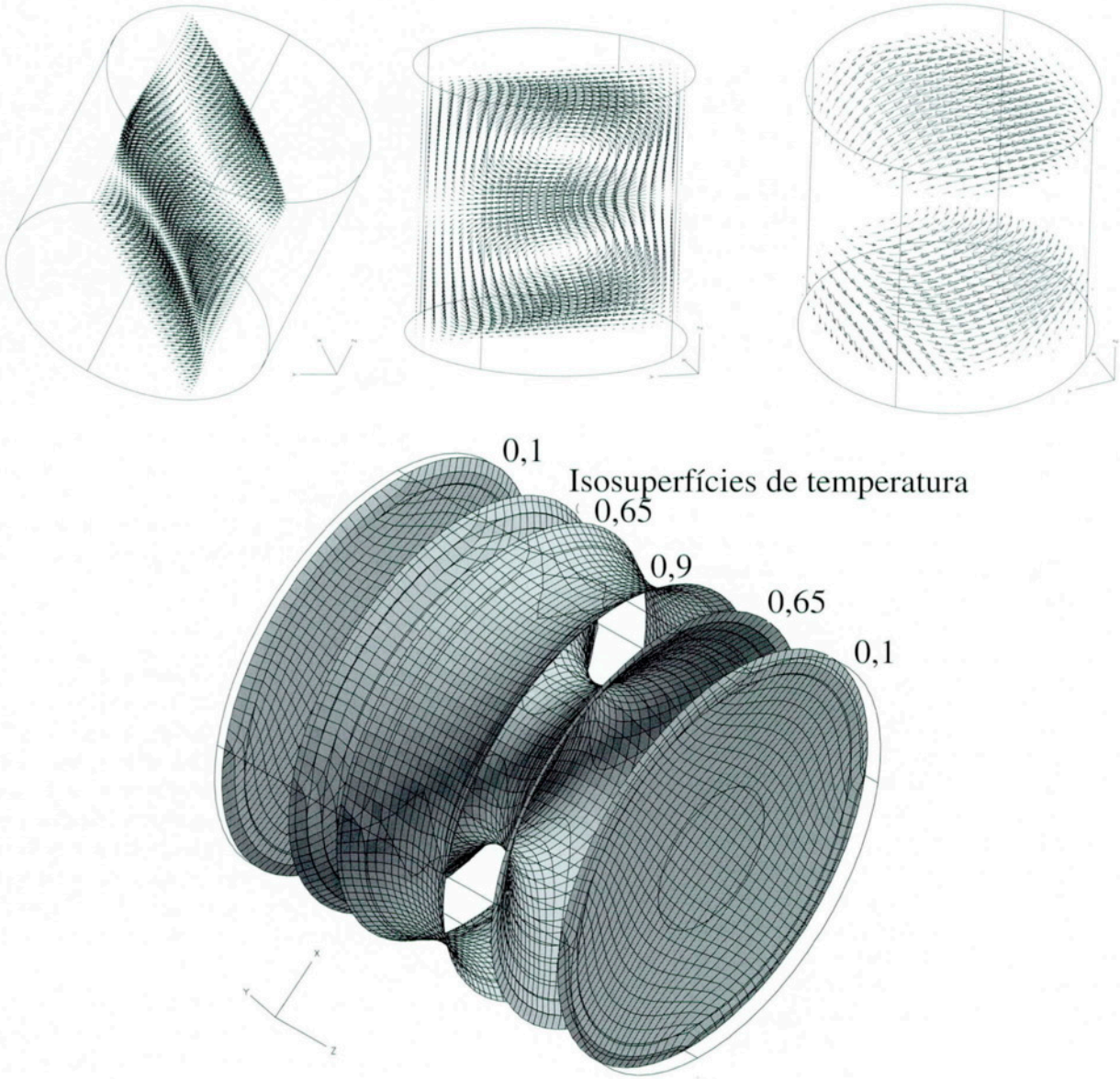

Figura 3: *Distribucions estacionàries de velocitat i isosuperfícies de temperatura en cas d'un creixement tipus FZL. El camp gravitatori aplicat s'ha suposat constant de magnitud igual a $10^{-3} g_E$ i el gradient tèrmic s'ha definit perpendicular a l'esmentat camp gravitatori. El material modelitzat ha estat el germani*

aquest tipus de substàncies. Finalment i fregant el llindar amb la biotecnologia s'ha afegit també un sisè apartat dedicat al creixement de proteïnes.

Materials electrònics i fotònics

El silici (Si), el germani (Ge), els compostos semiconductors dels grups III-V, del tipus arsenur de gal·li (GaAs) o tel·luri de cadmi (TeCd), els òxids magnètics tipus ferrites ($BaFe_{12}O_{19}$, $BaSn_2Fe_4O_{11}$, $BaTi_2Fe_4O_{11}$, etc.), i els òxids múltiples purs o monosubstituïts del tipus $KTiOPO_4$, Nd:β-BBO, $KGd(WO_4)$, $KYb(WO_4)$, β-BBO, $KY(WO_4)$, són exemples ben coneguts i documentats d'aquest tipus de materials electrònics i fotònics. En qualsevol d'aquests sòlids es compleix que les seves propietats físiques són directament proporcionals al grau d'homogeneïtat i a la perfecció del material obtingut. Però, cal no confondre perfecció amb puresa, ja que, per exemple, en el cas dels semiconductors la presència de petites quantitats de dopant homogèniament distribuïdes permet canviar favorablement la conductivitat del material en un factor, fins i tot, aproximadament d'un milió. Així mateix, en el cas dels materials fotònics, la senzilla substitució d'un catió de la matriu cristal·lina pot generar l'aparició de fenòmens làser en un material inicialment no emissor.

La reducció de la convecció natural i la manca de

sedimentació i de pressió hidrostàtica en microgravetat, permeten pensar en la minimització de l'impacte negatiu que té la força gravitatòria en les diverses tècniques de creixement cristal·lí. Sembla, doncs, *a priori*, que un entorn microgravitatori ha de permetre un control curós sobre els defectes cristal·lins i sobre la introducció d'impureses i dopants durant el procés de creixement, procés quasi difusiu que minimitzi la macrosegregació i la microsegregació. L'experiència acumulada respecte a això és un xic decebedora, ja que en alguns casos –òbviament, no en tots– la qualitat de la fase sòlida obtinguda és considerablement pitjor que la que s'obté al laboratori terrestre. L'anàlisi d'aquest fet ha generat tones d'esforç exhaustiu amb un objectiu comú, tractar d'esbrinar quines són les raons per les quals l'espai no respon a les espectatives d'uniformitat corresponents. Molt sintèticament, cal aclarir que encara que el problema és molt complex i resta actualment obert, tot apunta al fet que la forma de la interfície, la convecció capil·lar, la manca d'inercialitat del sistema nau orbitant i la resposta dinàmica a les interaccions externes en forma de vibracions deterministes o estocàstiques són factors força negatius que contribueixen a la creació de condicions termofluidodinàmiques convectives força desfavorables per al control de la segregació.

En entorns microgravitatoris, les tècniques de creixement confinat –anomenades de Bridgman-Stockbarger i de fusió per zona localitzada (FZL) (figura 3)– han estat molt emprades en el creixement de materials monocristal·lins electrònics i fotònics a partir de fase líquida a alta temperatura. La diferència principal és en les condicions tèrmiques que envolten la mostra que s'ha de cristal·litzar, ja que en el primer cas el perfil tèrmic a les seves parets pot assimilar-se a un perfil lineal, mentre que en el segon i a causa de les característiques de l'element escalfador –sovint una única espira– l'esmentat perfil respon molt més acuradament a una gaussiana. D'aquesta manera el fos dopat o la barreja estequiomètrica dopada s'estendrà a tota la mostra o només s'hi concentrarà en una petita part i generarà condicions termohidrodinàmiques completament diferents.

Així mateix, i com que la solidificació és un procés dinàmic en el qual la interfície també té un paper actiu, és interessant analitzar les implicacions que deriven del binomi convecció-forma geomètrica de la interfície. La figura 4 il·lustra una experiència concreta de creixement confinat duta a terme per un equip de la Universidad Autónoma de Madrid en col·laboració amb el Centre National d'Études Spatiales per aportar dades aclaridores en relació amb aquesta problemàtica.

També s'han fet créixer diversos materials electrònics i fotònics a l'espai emprant tècniques de creixement lliure. A diferència del cas anterior, en el qual la mostra romania continguda a l'interior d'un recipient cilíndric no reactiu –usualment quars–, en aquest cas és el mateix

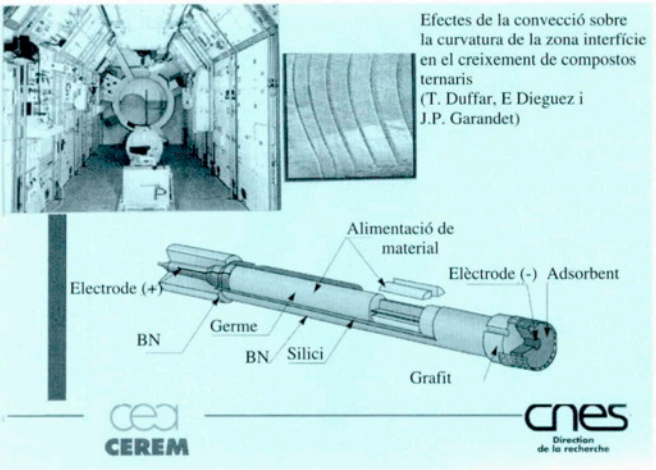

Figura 4: *Creixement de materials a l'espai. En aquest experiment es fon i resolidifica un lingot policristal·lí de* $Ga_{0,2}In_{0,8}Sb$ *movent la mostra en un gradient tèrmic de 60 K/cm a raó de 4 mm/h. (Cortesia del Prof. E. Dieguez, Departamento de Física de Materiales, Universidad Autónoma de Madrid)*

líquid el que es conté a si mateix per l'acció de forces de tensió superficial. Aquesta possibilitat evita la contaminació del material del gresol, elimina la possibilitat de nucleació incontrolada a les parets del gresol i permet condicions extremes de creixement a temperatures de fusió molt altes o amb fases líquides altament corrosives. A més, la manca de gresol elimina radicalment la possibititat de danys a la fase sòlida una vegada formada –escletxes, fissures, etc.– per causa dels esforços tèrmics derivats dels diferents coeficients de dilatació d'ambdós materials: gresol i monocristall.

No obstant això, cal afegir que una gran majoria de materials tenen problemes amb les pressions de vapor en els corresponents punts de fusió. Això fa que sigui necessari algun tipus de contenidor per reajustar la pressió de vapor dels components volàtils de la fosa emprant recipients externs termostatitzats o que permetin el confinament de gasos inerts que actuin com a barrera difusional. Encara que això és tècnicament trivial, en aquests casos sembla millor emprar tècniques de creixement pseudoconfinat. Aquestes tècniques permeten assolir també les mateixes fites emprant un petit gruix de líquid no reactiu –usualment una sal fosa– entre el monocristall i la paret del contenidor (Liquid Encapsulated Melt Zone). Això aporta, a més, l'avantatge sobre el creixement lliure de permetre la minimització de la convecció Marangoni escollint curosament el líquid encapsulant. Altres tècniques de creixement pseudoconfinat en entorns microgravitatoris són variants de la tècnica de Bridgman amb, per exemple, els exòtics gresols triangulars que recullen l'esfera de fase líquida a alta temperatura mitjançant els tres contactes gresol-fosa.

Metalls i aliatges

Les propietats dels metalls i aliatges estan fortament lligades a la seva estructura cristal·lina i química com també als defectes generats en la fase sòlida durant el procés de solidificació. Per exemple, la resistència mecànica i la resistència a la corrosió d'un aliatge estan determinades per la seva microestructura, és a dir, per la distribució dels àtoms en el seu si. Un altre factor important que influeix en l'estructura és la forma de la interfície sòlid-líquid durant el procés de solidificació. Així, sota condicions tèrmiques idèntiques, a mesura que el ritme de solidificació creix, la forma de la interfície evoluciona a través d'una sèrie de transicions controlades per criteris d'estabilitat morfològica. Per a ritmes de creixement baixos, la interfície és estable –plana o lleugerament corbada–, però a mesura que el ritme de creixement s'incrementa, comença a desenvoluparse una textura cel·lular fins que aquestes cel·les adopten una forma de rusc d'abelles –inestabilitat morfològica. Si el ritme de creixement és més gran, la formació de dendrites fa que el material hagi de ser rebutjat per a qualsevol aplicació. Com que l'estabilitat morfològica depèn dels nivells de gravetat actuants, a l'espai ha estat possible aconseguir condicions estables de creixement a velocitats més altes que les corresponents als laboratoris terrestres. Aquest fet és importantíssim, ja que ha permès compensar els curts períodes de creixement característics d'aquests entorns.

Una altra àrea d'interès en la recerca de metalls i aliatges en microgravetat és la solidificació multifàsica. Certs materials passen, en solidificar-se, de la fase líquida a més d'una fase sòlida –solidificació en l'eutèctic del diagrama de fases. Així, per exemple, els aliatges líquids de manganès i bismut se solidifiquen en dos sòlids diferents, cadascun del quals presenta una composició diferent de la del líquid original. Un dels sòlids està distribuït en barretes, partícules o capes dins l'altre sòlid, que fa el paper de fase majoritària. Altres materials se solidifiquen de manera diferent en els monotèctics dels diagrames de fases. Per exemple, l'aliatge líquid d'alumini i indi comença com una dissolució d'indi en alumini, però quan s'ha solidificat, sota condicions apropiades, s'obté una matriu d'alumini sòlid amb barretes d'indi líquid a dins. A mesura que el sistema es va refredant, les barretes d'indi líquid es converteixen en barretes sòlides, que són dispersades dins el material solidificat. Quan aquests tipus de materials complexos són processats a la Terra l'estructura obtinguda està influenciada pels efectes de convecció i sedimentació. En microgravetat, però, l'estructura multifàsica és totalment diferent, i genera propietats d'allò més innovadores.

Vidres i ceràmiques

Els materials que, de manera natural, formen vidres tenen unes propietats d'enllaç químic que limiten la mobilitat dels àtoms dins el líquid precursor a alta temperatura, i eviten la formació d'estructures cristal·lines a mesura que el líquid es refreda. Molts materials que usualment presenten estructura cristal·lina, com ara els metalls, poden ser forçats a formar vidres mitjançant un procés de refredament ràpid –l'anomenat tremp (*quenching*)– fins a una temperatura molt per sota de la seva temperatura de solidificació. En efecte, quan el material se solidifica, es refreda tan ràpidament que els àtoms no tenen temps de col·locar-se sistemàticament en el seu lloc natural i ho fan desordenadament. Les ceràmiques són materials inorgànics i no metàl·lics que poden tenir una forta resistència mecànica a temperatures molt altes i que tenen un comportament més bo que els metalls sota certes circumstàncies. El problema d'aquests materials és que es trenquen sense mostrar símptomes precursors de la imminència de la ruptura; és a dir, no presenten ni deformació elàstica ni plàstica. Com els vidres, les ceràmiques no són capaces d'absorbir impactes de la manera que ho fan els metalls i es trenquen sota grans tensions, mentre que els metalls es dobleguen abans de trencar-se.

La recerca en microgravetat ha estès el rang de vitrificació a nous compostos, especialment en l'àmbit dels vidres fortament dopats; ha permès millorar la qualitat de la fibra òptica usada en les telecomunicacions, així com també optimitzar les ceràmiques resistents a l'abrasió utilitzades, per exemple, en turbines d'alt rendiment. S'han aconseguit també avenços importants en el camp de l'obtenció sintètica de materials bioceràmics com ara ossos, dents, etc. En lluita amb els vidres transparents, els entorns microgravitatòris han permès aconseguir aerogels molt més transparents que els que poden aconseguir-se a la Terra. Afegint-hi la lleugeresa –la densitat d'un aerogel és només d'unes tres vegades la densitat de l'aire– i també el caràcter de magnífic aïllant tèrmic, els aerogels crescuts a l'espai esdevindran en un futur proper una elecció òbvia com a materials per a la construcció de, per exemple, finestres superaïllants.

Per aprofitar al màxim la potència dels motors, fixat un determinat consum, les indústries automovilística i aeroespacial demanen constantment nous materials més resistents, més lleugers, més elàstics i d'una vida útil més llarga. Les estratègies emprades per aconseguir aquest tipus de materials han estat el desenvolupament de compòsits fibrats i l'obtenció d'escumes metàl·liques. Cal notar que, en aquest últim cas, la distribució de bombolles aconseguida als laboratoris terrestres és molt heterogènia, com també, anàlogament, les propietats físiques de l'escuma resultant. Els entorns microgravitatoris han permès millorar la qualitat del material amb l'ajut de camps elèctrics i magnètics que aconsegueixen reorganitzar convenientment la distribució de bombolles en el metall fos.

Polímers

Els polímers són macromolècules fetes de petites estructures moleculars, anomenades monòmers, que es repeteixen formant llargues cadenes. Com que en estat líquid els enllaços entre les molècules dels polímers afecten propietats físiques com ara la viscositat, la miscibilitat i la solubilitat, la seva manipulació en microgravetat ha portat a la producció de polímers en estat líquid amb unes propietats específiques més uniformes i controlades. A més, a l'espai, el procés de solidificació a partir de les seves mares líquides viscoelàstiques s'ha estudiat d'una manera més sistemàtica i s'ha posat un èmfasi especial tant en els aspectes fonamentals de modelització –determinant els valors i les possibles dependències de les diferents constants que apareixen en les equacions tensorials constitutives models de tres i quatre paràmetres d'Oldroyd– , com en els efectes que provoquen en la solidificació paràmetres com ara la temperatura, la composició i la mida de les cadenes polimèriques. Respecte a això cal afegir que s'han fet també els primers intents d'emprar els entorns microgravitatoris per millorar-ne el grau de cristal·linitat. Aquesta propietat és conseqüència del fet que els polímers refredats lentament no són mai completament cristal·lins –si el refredament és molt ràpid cristal·litza un polímer amorf– ja que els seus patrons de difracció per raigs X tenen generalment la forma d'anells superposats a un fons difús. Aquest fons mostra la presència d'una fase amorfa, mentre que els anells indiquen l'existència simultània d'una fase cristal·lina formada per petits cristalls, sols visibles amb el microscopi òptic i orientats a l'atzar. A diferència de les cel·les elementals en els sòlids cristal·lins habitualment formades per unes quantes desenes d'àtoms, les cel·les d'aquests cristalls microscòpics poden tenir centenars d'àtoms i presenten propietats físiques força anisotròpiques. A més, com que tant la mida com la disposició dels cristalls tenen un profund efecte sobre les propietats físiques del polímer un cop cristal·litzat, es tracta també de, mitjançant la termohidrodinàmica del medi no newtonià, fer servir les condicions peculiars microgravitatòries per generar distribucions microcristal·lines tan adients com sigui possible a la propietat que es vol potenciar.

Catalitzadors

Els compostos inorgànics més interessants i útils com a catalitzadors són, de lluny, les zeolites. Aquests cristalls estan formats per xarxes alternades de silici i alumini que poden prendre diferents formes, com ara cubs o tetràedres. Internament, les zeolites presenten una estructura esponjosa amb cavitats uniformes i molt petites –de 0,1 a 1,2 nanòmetres. Per aquesta raó són utilitzades com a catalitzadors en nombrosos processos químics, el més conegut dels quals és l'anomenat craqueig del petroli per a l'obtenció de gasolina. A més, la peculiar estructura d'aquests compostos permet l'entrada als seus porus només de molècules de certa mida i deixa fora les de mida més gran. Com a conseqüència, les zeolites són també molt emprades en sistemes de filtració per eliminar concentracions baixes d'ions metàl·lics, principalment Hg, Cd i Pb, o materials radioactius de les aigües residuals. La minimització de la sedimentació i la flotació ha permés produir cristalls de millor qualitat i mida més gran que la dels crescuts a la Terra.

Proteïnes

El cos humà conté al voltant de cent mil proteïnes diferents i són aquestes substàncies les que tenen un paper important en el transport d'oxigen i productes químics a la sang, en la formació dels músculs, de la pell, i en la lluita contra les malalties –fins i tot els virus són estructures proteíniques. El requisit obligat per entendre els processos bioquímics que es produeixen en el cos humà passa per conèixer l'estructura molecular d'aquestes substàncies cristal·lines i l'esmentada informació s'obté per anàlisi de raigs X o per difracció de neutrons dels corresponents monocristalls. Amb aquest coneixements és possible generar medicaments perquè s'inserteixin en els centres actius de la proteïna i en bloquin les funcions. Encara que és molt difícil obtenir la mida i qualitat exigides als laboratoris terrestres, en entorns microgravitatoris ha estat possible fer créixer fàcilment monocritalls d'algunes proteïnes que compleixen els requisits per a futures anàlisis. De fet, el programa d'obtencions és molt extens i ambiciós; d'aquesta manera el món farmacèutic espera complir l'objectiu d'ajudar en la defensa del cos humà enfront de les malalties – la penicil·lina és un exemple força conegut de com una droga bloca la funció d'una proteïna. És clar que, des d'un punt de vista molt més fonamental, la natural extensió d'aquest programa d'obtencions podria apuntar, de la mateixa manera que en el cascas recent del genoma, a la descripció completa del proteïnoma humà.

Observació espacial

Observació terrestre i atmosfèrica

A banda de les aplicacions militars òbvies de l'observació per satèl·lit, l'observació espacial de la Terra va demostrar des del principi una importància extrema. Així, de vegades, ha estat i continua sent l'única manera de poder fer un seguiment rigorós de llocs que per les seves característiques peculiars són difícils d'observar directament (deserts, oceans, regions polars, etc.). Però l'observació espacial no només aporta informacions en el rang visible. Si s'empren altres longituds d'ona poden obtenir-se dades d'aspectes tan importants com ara la localització de recursos minerals, l'estat dels recursos forestals, la localització de reserves marines de fitoplàncton o l'evolució de la desertització d'un continent determinat (Burnay, 1988). I és que, fins i tot, ja es comencen a emprar satèl·lits per monitorar el trànsit

(ESA-Road Traffic Management System) o per proporcionar informació als automobilistes.

No obstant això, l'aplicació més popular de l'observació per satèl·lit és el seguiment diari del temps. És trivial esmentar que els satèl·lits meteorològics han ajudat a les poblacions a tenir cura dels seus recursos en situacions de perill extrem, com ara tornados, huracans, inundacions, etc. A més, les observacions dels satèl·lits meteorològics també s'han utilitzat per contrastar prediccions meteorològiques a curt i llarg termini, i per analitzar la influència de diferents paràmetres com ara la dinàmica oceànica, l'activitat volcànica o la dinàmica de la capa d'ozó en l'evolució climàtica global (Kidder, 1995). En relació amb aquest últim aspecte cal remarcar els esforços continuats vers l'estudi de determinats processos fisicoquímics a l'atmosfera que impliquen substàncies de tanta importància per a la nostra supervivència com ara l'ozó (O_3), la família NO_y i els aerosols i CFC del tipus CCl_4, F_{11}, F_{12}, F_{22}, CF_4.

Observació de l'espai

L'observació espacial des de l'espai és molt avantatjosa, ja que, en desaparèixer el soroll característic produït per la presència de l'atmosfera terrestre, permet tenir en compte la informació de tot l'espectre electromagnètic. Així, els raigs gamma, els raigs X, els infrarojos propers, el visible, l'ultraviolat, etc. han estat emprats en astrometria, en la detecció i l'anàlisi de cometes, en els seguiments heliogràfics –taques i erupcions solars–, en l'anàlisi de la composició iònica del vent solar, en la detecció de grups de galàxies llunyanes, en l'anàlisi dels raigs còsmics, en la detecció de forats negres i fonts de ràdio del tipus quàsars i púlsars, en la detecció de radiació de fons, etc.

Entre tots el dispositius orbitants que possibiliten les anàlisis anteriorment esmentades, cal distinguir l'HST (Hubble Space Telescope). Aquesta meravella tecnològica permet una altíssima resolució en la totalitat del seu camp de visió, i també la possibilitat d'observació en rangs de longitud d'ona fortament alterats per l'atmosfera, o bé inaccesibles a l'observació terrestre convencional. Això ha fet de l'HST el dispositiu idoni per desenvolupar projectes de gran envergadura relacionats, per exemple, amb l'observació de l'espai profund, amb la determinació de la mida i l'edat de l'Univers partint del mètode de les cefeides, amb la formació i evolució estel·lar o fins i tot amb l'observació del nostre sistema planetari. Encara que l'HST ara funciona a la perfecció i està previst que romangui en servei aproximadament uns vint anys, ja s'està parlant del seu successor natural, l'NGST (Next Generation Space Telescope), un telescopi infraroig que treballaria en una banda d'observació més ampla. Cal fer notar que aquest telescopi no és el primer d'aquesta gamma; de fet, el novembre de 1995 es va llançar el primer observatori infraroig anomenat ISO (Infrared Space Observatory) per possibilitar l'observació en la banda infrarroja de 2 a 240 micres. A més, l'ISO ha permès l'obtenció d'informació espectroscòpica i polarimètrica de diferents objectes astronòmics rellevants des del punt de vista astrofísic i cosmològic.

Física fonamental

L'objectiu de la física fonamental és l'estudi de les lleis bàsiques que governen el món físic, des de l'escala microscòpica fins a la còsmica. En l'àmbit espacial, els treballs relacionats amb la física fonamental s'han centrat principalment en la física de la matèria condensada amb un èmfasi en l'estudi de propietats al voltant de punts crítics, així com també en l'anàlisi de sistemes a escala atòmica en la recerca de justificacions experimentals per a diversos principis d'[astro]física gravitacional relativista (Fundamental Physics, NASA 1998).

Física de la matèria condensada

L'estudi de les propietats dels estats en petits entorns molt propers als punts crítics és un tema fonamental que desperta gran interès en l'àmbit de la física de la matèria condensada. Quan un sistema s'apropa a un punt crític de transició entre dues fases, les propietats d'ambdues fases esdevenen anòmales i les fluctuacions tendeixen a dominar el comportament termodinàmic del sistema. En arribar al punt crític, la distinció entre les dues fases desapareix. Per exemple, en el cas de la transició líquid-vapor, els valors de la compressibilitat isoterma i la conductivitat tèrmica divergeixen, és a dir, augmenten de manera monòtona fins que esdevenen de valor infinit a la transició. Com a conseqüència d'aquest comportament, un líquid supercrític s'estratifica sota l'acció gravitatòria i qualsevol mesura termodinàmica terrestre és una mitjana del valor de la propietat a diferents densitats. La possibilitat d'experimentació a l'espai és molt important, ja que aquest entorn no només permet minimitzar l'esmentada estratificació, sinó que les possibles pertorbacions generades per efectes convectius pràcticament desapareixen i les inhomogeneïtats tèrmiques s'equilibren ràpidament per conducció.

Des d'un punt de vista més aplicat cal afegir aquí, molt sintèticament, que els fluids supercrítics són molt efectius per dissoldre altres subtàncies sòlides, líquides o gasoses i per oxidar i neutralitzar compostos tòxics resultants de molts processos industrials. Alguns exemples rellevants són l'extracció de la cafeïna del cafè verd mitjançant CO_2 supercrític –72 bar i 31 °C– i l'oxidació de brosses orgàniques perilloses –dioxines– mitjançant reactors d'aigua supercrítica. Aquests reactors de baix impacte natural poden treballar a pressions i temperatures baixes –500 bar i 400 °C– i el rendiment de l'oxidació –combustió freda– és molt alt. Per aquestes raons, els fluids supercrítics estan guanyant terreny ràpidament en els sectors químic, alimentari i energètic.

Les solucions d'electròlits també mostren un comportament singular prop dels seus punts crítics líquid-vapor

microgravity.msfc.nasa.gov/	microgravity.grc.nasa.gov/
www.isunet.edu	www.issi.unibe.ch
earthlab.meteor.wisc.edu	www.msfc.nasa.gov/NEWMSFC/gravity.html
www.estec.esa.nl/spaceflight/index.htm	www.cnes.fr/activites/
www.flatoday.com/space/	microgravity.hq.nasa.gov
mgnwww.larc.nasa.gov/site/	www.spacedaily.com/microgravity.html
www.space.com/	www.spaceday.com/
zeta.lerc.nasa.gov/school/resource.htm	www.amazings.com/notesp/index.html
www.reston.com/nasa/russia.html	www.microgravity.com/
www.ssl.msfc.nasa.gov/msl1/ground_lab/ground_lab.htm	www.ping.be/eurospace/
quest.arc.nasa.gov/space/teachers/mg/index.html	spacelink.nasa.gov
www.nasm.edu	www.vasc.org
www.spacecamp.com/museum/	www.astrored.net/museo-espacial/
helios.etsit.upv.es/asig/quinto/tel_espa	www.en.com/users/cygnus/mir.htm
liftoff.msfc.nasa.gov/shuttle/spacelab	liftoff.msfc.nasa.gov/rsa/mir.html
spaceflight.nasa.gov/index-m.html	liftoff.msfc.nasa.gov/rsa/pads.html
howe.iki.rssi.ru/GCTC	www.mcs.net/~rusaerog/
www.inta.es/areas/inta.es/numero0/articulos/media.htm	aeroweb.lucia.it/~agretch/Museums.html
www.arianespace.com/index1.htm	www.isas.ac.jp/
science.ksc.nasa.gov/shuttle/technology/sts-newsref	
nix.nasa.gov	mix.msfc.nasa.gov
spaceflight.nasa.gov/gallery/index.html	zeta.lerc.nasa.gov/school/gallery.htm
www.esa.int/gallery	
tycho.dm.unipi.it/~nobili/pgb/index.html	www.lerc.nasa.gov/Other_Groups/MMAP/PIMS/
microgravity.grc.nasa.gov/MSD/MSD_htmls/acceleration.htm	
zarm9.zarm.uni-bremen.de	www.jamic.co.jp
home.hiwaay.net/~mmyszka/ZeroG/zerog.html	esapub.esrin.esa.it/bulletin/bullet82/plet82.htm
www.estec.esa.nl/outreach/pfc/default.htm	www.estec.esa.nl/spaceflight/parabolic
www.ssc.se/ssd/sond/mgrav1.html	www.ssc.se/ssd/sond/maser.html
www.dtm.it/dtmsounding.htm	
microgravity.grc.nasa.gov/MSD/MSD_htmls/fluids.html	www.cmmr.uah.edu/
microgravity.grc.nasa.gov/MSD/MSD_htmls/combustion.html	www.ipmnet.ru/
www.clarkson.edu/~regel/center.htm	aemes.aero.ufl.edu/cfd
www.engr.usask.ca/dept/mee/research/mrg/research.html	www.ccr.jussieu.fr/gdr-pr2m/
investigadores.uncoma.edu.ar/AplicacionesEspaciales/index.htm	www.ncmr.org
www-personal.engin.umich.edu/~aloe/micro-g.html	www.mae.cornell.edu/microgravity/
zeta.lerc.nasa.gov/expr3/combust.htm	www.onu.edu/org/aiaa/nasa/1998/index.html
sun00.rowan.edu/~marchese/microgravity.html	zeta.lerc.nasa.gov/school/gallery.htm
gazpacho.ugr.esi	
ivscc.gsfc.nasa.gov	www.eso.org
www.atnf.csiro.au	www.earth.nasa.gov/
spacescience.nasa.gov/	solarsystem.estec.esa.nl/
astro.estec.esa.nl/	hubble.esa.int/
hubble.stsci.edu/news_.and._views/	www.spacetelescope.org/about/hubblebrief.html
sci2.esa.int/specialevents/infrared/index.html	sci.esa.int/xmm
www.ieec.fcr.es/recerca/index.html	www.srl.utu.fi/main_english.html
arc.iki.rssi.ru/welcome.html	origins.jpl.nasa.govi
www.esrin.esa.it/htdocs/esis/esis.html	
chex.stanford.edu	ltmpf.jpl.nasa.gov/
coffee.phys.unm.edu/dynamx/	bigben.stanford.edu/sumo/
mgravity.itsc.uah.edu/microgravity/micrex/micrex.stm	www.esrin.esa.it/htdocs/mgdb/mgdbhome.html
www.nas.edu/ssb/archmenu.html	
nctn.hq.nasa.gov	www.esa.int/export/esaCP/Improving.html
www.esa.int/export/esaCP/Protecting.html	www.esa.int/export/esaCP/Benefits.html
www.space.gc.ca/business/default.asp	www.spacehab.com/

Taula 1: *Informació complementària. Totes les citacions comencen amb http:// i ho hem suprimit per no fer la taula tan llarga. Hem classificat els diversos temes i els hem separat per una línia horitzontal i, per ordre, són aquests: de caràcter didàctic en general; museus aerospacials; coets, satèl·lits i estacions espacials; imatges; caracterització de les acceleracions residuals; torres de caiguda lliure; vols de gravetat reduïda; globus i coets estratosfèrics; física de fluids i ciència de materials; observació espacial; física fonamental; bases de dades, informes, etc.; interacció amb la tecnològia i la indústria*

com a conseqüència dels efectes d'electrostricció, és a dir, dels efectes de les compressions locals de solvent generades pel camp elèctric prop d'un ió. Si la compressibilitat del solvent és alta, la densitat prop de l'ió pot incrementar-se apreciablement i genera propietats d'allò més poc usuals. La principal motivació d'aquest tipus d'estudis en entorns microgravitatoris és fonamental a fi i efecte de provar noves teories, ja que les actuals, per exemple, la teoria de l'associació iònica de Bjerrum –o la dels coeficients d'activitat de Debye-Huckel– són vàlides sempre que el solvent sigui incompressible.

A més, a l'espai s'han dut a terme experiments per estudiar fenòmens crítics que requereixen temperatures extremament baixes. D'acord amb els principis de la mecànica clàssica, els àtoms a temperatures suficientment baixes, o estan en repòs, o, com a màxim, efectuen petites oscil·lacions al voltant de les seves posicions d'equilibri. En altres paraules, a temperatures properes al zero absolut la matèria ha de ser sòlida. No obstant això, l'heli es liqua a 4,2 K –pressió atmosfèrica– i arriba a la transició superfluida, l'anomenat punt λ, a 2,17 K –pressió atmosfèrica. A temperatures per sota d'aquest valor l'heli superfluid o heli líquid II es manté líquid a temperatures properes al zero absolut, ja que la interacció entre els seus àtoms és particularment dèbil i els efectes quàntics esdevenen protagonistes. A més de tenir una viscositat anormalment baixa, l'heli superfluid té una conductivitat tèrmica anormalment elevada i la seva modelització empra el model de dos líquids de Landau-Tisza (Landau, 1982). Aquest model proposa que a temperatures diferents del zero absolut una part de la massa del líquid es comporta com un líquid viscós normal, mentre que l'altra part es comporta com un líquid superfluid sense viscositat. Ambdós comportaments es produeixen independentment sense cessió mútua d'impuls. Cal aclarir que aquest és un model de treball i com a tal s'ha de tractar, és a dir, no hi ha cap divisió real de les partícules fluides en superfluides i normals; en realitat en aquest líquid quàntic hi ha simultàniament un moviment normal i un superfluid lligat cadascun a la seva massa efectiva, de manera que la suma d'ambdues masses és igual a la massa total del líquid.

Minimitzar els efectes gravitatoris ha permès una localització molt més acurada del valor de la transició –valors p, V, T– així com també una anàlisi molt curosa de la variació de diferents propietats termodinàmiques rellevants –viscositat, compressibilitat isoterma, conductivitat tèrmica, etc.– al voltant del punt λ. A més, ha permès fer un estudi paramètric dels efectes que les pertorbacions externes poden induir a aquest tipus de sistemes superfluids en microgravetat.

Cal fer notar finalment que una altra transició de fase de segon ordre, tant o més important que la transició superfluida, és la transició superconductora. Si es disminueix la temperatura, la resistència elèctrica disminueix fins que, més enllà d'aquesta transició, es fa nul·la. Sota aquestes condicions, el material és també capaç d'expulsar el camp magnètic del seu interior –efecte Meissner. Quasi la meitat dels metalls superconductors del tipus I i altres òxids més complexos –usualment, superconductors del tipus II– presenten aquesta propietat, és a dir, el corrent elèctric pot fluir indefinidament a través d'un anell superconductor sense pèrdues energètiques.

Física atòmica

Els fenòmens físics a escala atòmica solen succeir a escales de longitud molt curtes i escales de temps molt ràpides; això fa que sigui extremament difícil organitzar estratègies vàlides per a l'estudi experimental de qualsevol tipus de fenomen. És necessari, abans de res, optimitzar el temps d'observació, i per a això s'empren majoritàriament dues tècniques. La més habitual consisteix en la utilització d'àtoms freds en el si de camps electromagnètics que actuen com a veritables trampes atòmiques. Malauradament, la intensitat dels camps necessaris en entorns terrestres interfereix amb cert tipus de mesures i incrementa intolerablement el grau d'incertesa dels resultats. La segona tècnica, anomenada *refredament per làser*, es basa senzillament a aprofitar el bescanvi de moment entre els àtoms que són objecte d'estudi i els fotons provinents de làsers de certes freqüències. Malauradament, els àtoms lents generats són accelerats ràpidament per la gravetat als laboratoris terrestres. En microgravetat, la petita magnitud del camp gravitatori permet que les intensitats dels camps electromagnètics emprats a les trampes sigui molt més petita, fet que minimitza les interferències en aquelles mesures que no es poden fer als laboratoris terrestres. A més, els àtoms lents permeten una observació de durada molt més llarga abans de col·lidir amb les parets de les càmeres d'alt buit que els aïllen de les influències externes. Des d'un punt de vista tecnològic el refredament per làser s'ha utilitzat en estudis metrològics d'estabilitat i precisió ultraaltes. En efecte, la sistemàtica d'aquests estudis consisteix a estimular àtoms, prèviament refredats per làser, mitjançant un altre làser, de manera que efectuïn una transició entre dos estats determinats. S'espera que l'anàlisi de les característiques temporals de les esmentades transicions serà decisiva en la recerca de rellotges més estables i acurats per millorar en un futur –tal vegada properels sistemes globals de posicionament i navegació.

Finalment, cal afegir que el refredament per làser s'ha utilitzat també per condensar agrupacions d'àtoms en un estat d'agregació anomenat condensació de Bose-Einstein –un estat similar al de l'heli superfluid. L'estudi en microgravetat ha permès el manteniment de condensats més grans durant períodes de temps més llargs, fet que ha incrementat la comprensió d'aquest estat peculiar de la matèria.

[Astro]física gravitacional

Les quatre interaccions fonamentals de l'Univers són explicables actualment sota el marc de dues teories, de moment no unificables, la teoria quàntica i la teoria general de la relativitat. En particular i atès que els nostres coneixements fonamentals de l'Univers a gran escala es basen en l'anomenada teoria general de la relativitat, una tasca d'allò més bàsica és tractar de comprovar les prediccions de la relativitat general –seguint l'exemple del geni Carl Friedrich Gauss a Alemanya, que mitjançant la mesura dels àngles del triangle definit pels pics Brocken, Hohehagen i Inselberg, volia ratificar, a escala terrestre, l'aplicabilitat de la geometria euclidiana. Com que la relativitat general descriu la gravetat com una distorsió local en la curvatura de l'espai-temps, les geodèsiques al voltant d'un objecte massiu, per exemple la Terra, resulten distorsionades i, per tant, les distàncies mesurades amb objecte i sense són lleugerament diferents. A més, en el cas d'objectes en rotació, s'ha de considerar una nova pertorbació en les mesures de l'espaitemps. Ambdós efectes són molt difícils de mesurar experimentalment i, fins i tot amb les observacions satel·litàries efectuades, les diferències estan gairebé en el límit de sensibilitat dels aparells de mesura més sensibles.

Un altre principi que s'ha intentat comprovar experimentalment ha estat el principi d'equivalència. L'experiment terrestre més famós en relació amb l'equivalència entre les masses inertes i pesants és degut a Galileo Galilei, el qual, com és ben sabut, justificà aquesta equivalència d'acord amb els resultats obtinguts llançant diferents objectes des de la part més alta de la torre de Pisa. Una versió relativament moderna d'aquesta prova es va efectuar a la Lluna, en el marc del projecte Apollo, i més recentment s'ha dut a terme en satèl·lits especialment dissenyats per minimitzar el fregament atmosfèric en el marc del programa STEP (Satellite Test Equivalence Principle). Mitjançant aquesta nova eina, una caiguda lliure pot mantenir-se en una distància immensament més gran –l'equivalent vertical de la distància de caiguda en el satèl·lit en òrbita és de l'ordre de 2.000 km– i pot ser analitzada molt més curosament amb aparells de mesura ultraprecisos, a banda que l'experiència pot repetir-se moltíssimes vegades. Tant a la Lluna com a l'espai els resultats obtinguts confirmen de moment la validesa del principi d'equivalència.

Amb la nova generació de rellotges d'alta estabilitat i precisió s'espera també contribuir a una mesura més acurada més acurada del desplaçament cap al vermell com també la detecció del corriment de la constant d'estructura fina. A més, es planeja la possibilitat d'establir connexions entre aquesta nova generació de rellotges per permetre la realització d'altres comprovacions amb un nivell d'exactitud sense precedents. La millora en l'exactitud de les mesures, per exemple, en els experiments tipus Michelson-Morley o Kennedy-Thorndyke es preveu que sigui un factor entre 100 i 10.000.

Finis coronat opus

Tal com es desprèn del contingut global d'aquestes pàgines, la quantitat de treball que s'ha fet durant aquests últims cinquanta anys és esfereïdora, i la quantitat de coneixement implícit és brutal; però tot i així la mateixa evolució natural d'aquest coneixement generarà noves preguntes i nous reptes als quals la intel·ligència humana haurà d'enfrontar-se amb l'ajut d'un conjunt d'estacions espacials d'altes prestacions que ja s'ha començat amb l'actual ISS.

Una consideració final gairebé obligatòria en qualsevol treball seriós sobre ciència i tecnologia en entorns espacials és la clàssicament anomenada *gran pregunta amarga*: podem realment justificar el fet de construir una caríssima estació espacial per analitzar fenòmens en microgravetat, mentre un gran percentatge dels sis mil milions dels habitants de la Terra viuen en la més absoluta misèria, patint vergonyoses condicions infrahumanes? Malgrat que la resposta no és tan clara com podria semblar, es pot argumentar que els centenars d'astronautes, científics i enginyers que pensen i duen a terme els experiments a l'espai no estudien només els entorns microgravitatòris en si mateixos. De fet, intenten utilitzar aquests entorns fonamentalment com a eina per millorar la comprensió dels processos físics, químics i biològics que es produeixen a la Terra. Es tracta així que les respostes obtingudes permetin optimitzar la qualitat de vida de *tots* els habitants d'aquest petit gran planeta blau... de moment, casa nostra.

Bibliografia bàsica

KARAMANOLIS, S., *La Estación Espacial Internacional*, McGraw-Hill/Interamericana de España, SAU (2000).

MYSHKIS, A. D., BABSKII, V. G., KOPACHEVSKII, N. D., SLOBOZHANIN, L. A. and TYUPTSOV, A. D., *Low-gravity Fluid Mechanics*, Springer-Verlag, (Berlin, 1987).

WALTER, H. U. ed., *Fluid Sciences and Material Science in Space*, Springer-Verlag, (Berlin, 1986).

REGEL, L., *Science des materiaux dans l'espace*, Technique et Documentation (Lavoisier), (Paris, 1985).

BURNAY, S. G., WILLIAMS, T. L. and JONES, C. H. ed., *Applications of Thermal Imaging. 1. Thermal Imaging*, Adam Hilger, (Bristol, 1988).

KIDDER, S. Q. and VONDER HAAR, T. H., *Satellite Meteorology. An Introduction*, Academic Press, (San Diego, 1995).

Fundamental Physics, Microgravity Research Division, NASA (1998).

LANDAU, L. D. and LIFSHITZ, E. M., *Fluid Mechanics*, Pergamon Press (1982).