

ELS PREMIS NOBEL

DE L'ANY 2001

SOBRE EL

PREMI NOBEL DE FÍSICA

CONCEDIT A

ERIC A. CORNELL,

WOLFGANG KETTERLE

I CARL E. WIEMAN,

A CÀRREC DE

RAMON VILASECA ALAVEDRA,

CATEDRÀTIC DE FÍSICA APLICADA

DE LA UNIVERSITAT POLITÈCNICA

DE CATALUNYA

INTRODUCCIÓ. ELS INVESTIGADORS PREMIATS

El Premi Nobel de Física de l'any 2001 ha estat atorgat als tres investigadors següents (per ordre alfabètic):

— Eric A. Cornell. Laboratoris JILA (Joint Institute for Laboratory Astrophysics) i NIST (National Institute of Standards and Technology) i Universitat de Colorado, a Boulder (Colorado, EUA). Nascut el 1961 a Palo Alto (Califòrnia), i doctor en física pel MIT (Massachusetts Institute of Technology) l'any 1990.

— Wolfgang Ketterle. MIT (Massachusetts Institute of Technology). Nascut el 1957 a Heidelberg (Alemanya), i doctor en física per la Universitat de Munich i el Max-Planck-Institut für Quantenoptik (Garching-Munich) l'any 1986.

— Carl E. Wieman. Laboratori JILA (Joint Institute for Laboratory Astrophysics) i Universitat de Colorado, a Boulder (Colorado, EUA). Nascut el 1951 a Oregon (EUA), i doctor en física per la Universitat de Stanford (EUA) l'any 1977.

84

El Premi Nobel els ha estat concedit, oficialment, «per haver assolit la condensació de Bose-Einstein en gasos diluïts d'àtoms alcalins, i per estudis fonamentals pioners de les propietats dels condensats».

Per tant, per poder descriure el tipus de treball de recerca que han efectuat aquests investigadors, haurem de recordar, en primer lloc, què significa el concepte de «condensació de Bose-Einstein».

LA CONDENSACIÓ DE BOSE-EINSTEIN

Com és actualment ben sabut en física, les partícules (ententent com a tals no sols els constituents més elementals de la

matèria, sinó també altres de més complexos, com ara els àtoms) que constitueixen l'Univers es divideixen en «bosons» i «fermions», segons que la funció d'ona quàntica que descriu un conjunt de tals partícules idèntiques sigui simètrica o antisimètrica respecte de l'intercanvi de dues partícules qualssevol. Les partícules amb espín enter (com ara un àtom amb un nombre total parell de protons, neutrons i electrons) es comporten com a bosons, mentre que les partícules amb espín semienter (com ara l'electró) es comporten com a fermions. Una de les propietats més espectaculars que es dedueix d'aquest fet bàsic és que dos fermions no poden trobar-se mai en el mateix estat quàntic, mentre que dos bosons (o més) sí que poden fer-ho.

Aquesta propietat va ser estudiada amb detall, cap al 1924, per Satyendra N. Bose (en honor del qual prové el nom de *bosons*) i Albert Einstein. Aquests investigadors varen estudiar la distribució estadística de partícules idèntiques ideals (en el sentit que no interaccionen entre si) que formen un gas a una determinada temperatura (un *gas de Bose*). En primer lloc, varen establir la fórmula que ens dóna el nombre de partícules $n(E)$ que, en un estat d'equilibri, es troben en un determinat estat quàntic d'energia E [1]:

$$n(E) = \frac{1}{e^{(E-\mu)/k_B T} - 1}, \quad (1)$$

on μ representa el potencial químic (el qual depèn del nombre total de partícules), k_B la constant de Boltzmann i T , la temperatura absoluta. Aquests estats d'energia poden correspondre, per exemple, als estats quàntics possibles de les partícules com a resultat d'un potencial extern que actua sobre elles. La fórmula (1) ens indica que les partícules tenen tendència a acumular-se en els estats d'energia més baixa. I,

en segon lloc, es varen adonar que, per a temperatures molt baixes (on μ pren valors lleugerament negatius i tendeix cap a zero quan T tendeix cap a zero), quan es decreix progressivament la temperatura, la brutal acumulació de partícules en l'estat més baix d'energia produeix, a partir d'una certa temperatura, una veritable «transició de fase», a partir de la qual les propietats del sistema comencen a canviar a un ritme diferent. És el que es coneix com *condensació de Bose-Einstein* (BEC en anglès, CBE en català) [1].

Podem assenyalar algunes de les propietats de la condensació de Bose-Einstein [1]. Serà útil fer una comparació amb la ben coneguda condensació gas \rightarrow líquid (que també té lloc quan disminueix la temperatura). Així com en la condensació gas \rightarrow líquid el sistema se separa espacialment en dues fases (comença a aparèixer una fase de líquid al fons del recipient, figura 1a), en la CBE també apareixen dues fases: mentre les partícules amb energia superior a la mínima segueixen en la fase de gas normal, les que han baixat a l'estat de mínima energia passen a estar descrites per una única funció d'ona quàntica. És com si les partícules «sincronitzessin» o acolessin el seu estat dinàmic, de manera que evolucionessin en bloc (semblant, posats a cercar comparacions, als soldats quan evolucionen en formació ordenada). Això ens duu a recordar, d'una banda, que les partícules idèntiques són fonamentalment indiscernibles entre si, i que, d'altra banda, qualsevol partícula ve descrita per una funció d'ona quàntica (la qual té un aspecte similar al d'una ona o un petit paquet d'ones), on la «longitud d'ona» (coneguda com *longitud d'ona associada de De Broglie*), λ_{DB} , ve donada per:

$$\lambda_{DB} = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}, \quad (2)$$

on h és la constant de Planck i p , m i v representen la quantitat de moviment, massa i velocitat de la partícula, respectivament. Si, com a velocitat, hi assignem la velocitat més probable que té una partícula en un gas a temperatura T , $v = \sqrt{2k_B T/m}$, llavors resulta que la λ_{DB} pren valors molt petits a temperatura ordinària ($\lambda_{DB} \sim 10^{-2}$ nm), però pren valors relativament grans a temperatures properes a 0 K ($\lambda_{DB} \geq 2 \mu\text{m}$ per a $T \leq 100$ nK). Doncs bé, la CBE té lloc quan, en refredar, la λ_{DB} s'ha fet tan gran que les ones associades a partícules veïnes solapen suficientment per a poder «acoblar-se». Dit d'una altra manera, quan la λ_{DB} s'ha fet tan gran com la separació entre partícules veïnes, o, més exactament, quan el nombre de partícules en un volum $(\lambda_{DB})^3$ es fa igual a 2.612, és quan comença la CBE. Aquest criteri ens defineix una temperatura crítica T_C , per sota de la qual té lloc la CBE (figura 2).

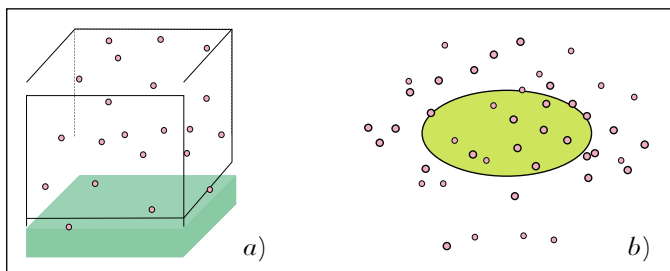


FIGURA 1. a) Condensació gas \rightarrow líquid; b) Condensació de Bose-Einstein, en el cas d'àtoms. La fase condensada és la de color uniforme. La resta d'àtoms resten a la fase de gas normal, i es mouen independentment.

Ara bé, a diferència de la condensació gas \rightarrow líquid, en la qual la separació en dues fases té lloc en l'espai real, en la CBE la separació de fases té lloc, en principi, en l'espai de les velocitats —o moments—, ja que l'energia està relacionada amb la velocitat de les partícules, independentment de la

posició d'aquestes a l'espai real. Les partícules amb velocitat mínima formen el condensat, mentre que la resta de partícules romanen en la fase de gas normal. Ara bé, si les partícules estan sotmeses a un potencial extern que, per exemple, les atragui cap un punt central, llavors la fase condensada també es pot separar, en l'espai real, de la fase no condensada, i concentrar-se al voltant del punt central (aquest és el cas, com veurem, per als condensats formats amb àtoms; figura 1b).

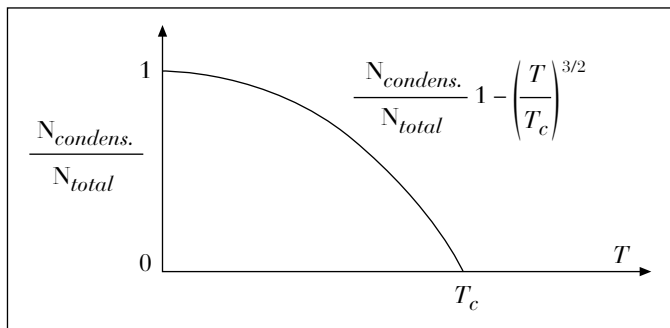


FIGURA 2. Aparició de la fase condensada per sota d'una temperatura crítica T_c .

Una darrera propietat que podem mencionar és que, per sota de T_c , si s'anessin afegint partícules al sistema (sense variar-ne la temperatura), aquestes passarien a engrossir la fase condensada, de la mateixa manera que ho farien en la condensació gas \rightarrow líquid (ja que en aquesta la pressió de vapor roman constant).

La CBE ja es va aconseguir, en el passat, en el ^4He superfluid, en la superconductivitat i en excitons en semiconductors. El problema és que en aquests sistemes la CBE es presenta juntament amb altres fenòmens que emmascaren la condensació, la qual cosa fa que les propietats del sistema

siguin molt diferents de les del gas de Bose ideal. Per exemple, en el cas del ^4He superfluid, la interacció entre les partícules és bastant forta, mentre que en els seus estudis, Bose i Einstein varen considerar un gas ideal on la interacció entre partícules és nul·la. Per aquest motiu la CBE d'àtoms, on la interacció entre àtoms és feble i, per tant, es pot considerar, en principi, com una petita pertorbació, ha tingut tanta transcendència científica.

En els apartats següents estudiem com s'ha aconseguit la CBE d'àtoms.

EL REFREDAMENT I ATRAPAMENT D'ÀTOMS

Des de finals del segle XIX, els científics s'han preocupat de l'estudi i control dels àtoms. Si n'excloem l'estudi del nucli atòmic, l'esforç s'ha dirigit en dues direccions principals:

- a) estudi dels estats electrònics
- b) estudi del moviment de l'àtom (moviment del seu centre de masses).

L'estudi dels estats electrònics (a) és el primer que es va desenvolupar, i encara avui dia s'hi està dedicant una atenció important. Aquest estudi s'ha dut a terme sobretot per mètodes òptics (és a dir, amb llum), complementat en alguns casos mitjançant camps magnètics o elèctrics. L'*espectroscòpia* es dedica a la mesura amb altíssima resolució de les energies dels salts o transicions electròniques entre estats estacionaris dels electrons. Com a exemple, enguany, mitjançant una tècnica làser, s'ha aconseguit mesurar l'energia (o, més exactament, la freqüència ν) de la transició 1s-2s de l'àtom d'hidrogen amb una precisió d'unes desenes d'Hz!, la qual correspon a una resolució $\nu/\Delta\nu$ superior a 10^{14} ! Tot això

permet efectuar tests altament precisos de les teories quàntiques i relativistes actuals, i aviat permetrà fins i tot fer tests de les teories cosmològiques. Al mateix temps, permet establir «rellotges atòmics», dissenyar làsers, «incrementar» o reduir la velocitat de la llum, generar fenòmens òptics no lineals, generar llum en estats quàntics especials, etc.

En canvi, l'estudi del moviment del centre de masses de l'àtom (*b*) no s'ha iniciat sinó des de fa uns quants anys, atès que no s'havia trobat una tècnica que permetés un control prou precís d'aquest moviment. Aquesta tècnica consisteix, bàsicament, en la combinació entre l'acció de la llum làser, la qual permet el refredament dels àtoms, i l'acció de camps magnètics, els quals permeten l'atrapament dels àtoms. De fet, el camí que ha dut, utilitzant aquestes tècniques, cap a la CBE d'àtoms el van iniciar, entre altres, els premis Nobel de 1997: S. Chu, C. Cohen-Tannoudji i W. D. Phillips, els quals varen aconseguir mantenir un petit núvol d'àtoms (entorn de 10^2 - 10^5 àtoms, segons el cas) a temperatures properes al nanokelvin (recordem que $1 \text{ nK} \dots 10^{-9} \text{ K}$)!

L'acció de la llum làser es basa en la pressió de radiació que exerceix una ona electromagnètica sobre una partícula material amb la qual està interaccionant. Si la freqüència de l'ona és ressonant amb una transició atòmica entre dos nivells energètics electrònics determinats, llavors per cada fotó que l'àtom absorbeixi (fig. 3), aquest rebrà un impuls de retrocés Δp que serà igual al moment lineal del fotó $p_{\text{fotó}}$, és a dir: $\Delta p = p_{\text{fotó}} = h/\lambda$, el qual, per exemple per a la llum vermella (o de l'infraroig proper) dels díodes làser que s'utilitzen avui dia per a aquests tipus d'experiments, pren un valor de $10^{-27} \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Aquesta quantitat és deu mil vegades inferior als $10^{-23} \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ que, per mitjana, corresponen a l'impuls d'un àtom de Na que es mogui en un gas a 300 K (figura 3). Per tant, l'absorció d'un fotó per part d'un àtom «calent» canvia relativament poc el moment lineal d'aquest.

Ara bé, si tenim en compte que un mateix àtom, i en una determinada transició atòmica, pot absorbir entorn de 10^6 - 10^8 fotons/s (atès que, una vegada l'electró ha absorbit un fotó i ha pujat a un nivell de més energia, l'electró torna a caure ràpidament al nivell inferior per emissió espontània —emissió d'un altre fotó en qualsevol direcció—, tornant doncs a estar disponible per a reabsorbir un fotó posterior del feix de llum làser), llavors resulta que, en molt menys d'un segon, l'àtom podria quedar parat del tot! De fet, l'àtom no queda parat del tot, ja que cada vegada que l'electró decau per emissió espontània, l'àtom en bloc adquireix una petita energia de retrocés en una direcció arbitrària, per la qual cosa els àtoms mantenen una petita energia cinètica residual. Aquest simple mètode (oposar un feix de llum làser a un *feix atòmic*, per frenar els àtoms i deixar-los solament amb un petit moviment residual) ens proporciona, en la majoria dels casos que s'estudien actualment, el primer pas per a refredar els àtoms.

91

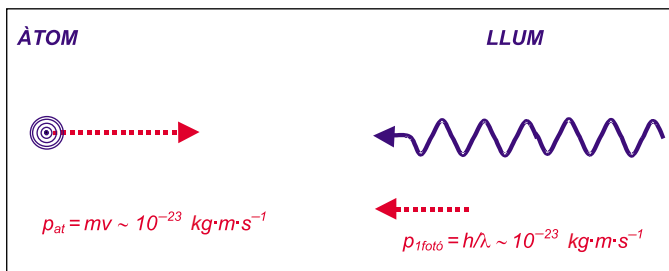


FIGURA 3. Interacció entre un àtom i una ona electromagnètica. Comparació entre els seus moments lineals, considerant un àtom de Na d'un gas a temperatura ordinària, i un fotó d'un feix de llum làser vermella.

El segon pas per al refredament d'àtoms consisteix a utilitzar la mateixa idea, però sofisticant la distribució espacial dels feixos de llum làser: els premis Nobel de 1997 abans mencionats varen utilitzar el que se'n diu *melasses*

òptiques (figura 4): sis feixos de llum, de la mateixa freqüència (en principi generats per un mateix làser de semiconductor, molt estabilitzat en freqüència), irradien un petit volum al centre del recipient (volum en el qual es troben els àtoms que acabem de frenar pel mètode anterior) dirigits en els sis sentits definits per les direccions cartesianes de l'espai. La freqüència de la llum és lleugerament inferior a la d'una determinada transició electrònica dels àtoms en qüestió, de manera que si un àtom es mou en direcció oposada a un dels feixos de llum, podrà absorbir un fotó d'aquest feix (ja que, per efecte Doppler, «veurà» el feix de llum com si tingués una freqüència superior a la que nominalment té) i rebrà el corresponent impuls de retrocés que el frenarà, mentre que no podrà absorbir cap fotó de cap dels altres feixos de llum. Així, és com si els àtoms anessin patint un «fregament» continu amb la llum (efecte melassa òptica), el qual en va reduint la velocitat, de manera que el gas va disminuint la temperatura.

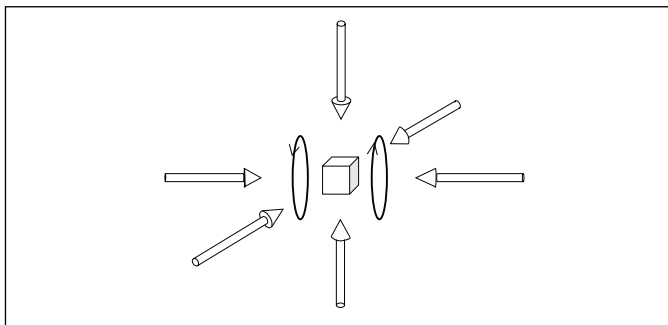


FIGURA 4. *Melasses òptiques formades per sis feixos de llum làser, per al refredament d'àtoms. Bobines magnètiques en posició «anti-Helmholtz» que generen un camp magnètic dirigit cap al centre, per a l'atrapament-confinament dels àtoms. El conjunt defineix una «trampa magneto-òptica».*

Aquest refredament, per ell sol, no impediria que els àtoms s'anessin desplaçant, a poc a poc, i escampant-se per l'espai adjacent, escapant-se de les melasses òptiques. Cal, doncs, complementar aquest refredament amb un «atrapament», o confinament, dels àtoms, que els impedeixi sortir d'una determinada zona de l'espai. I és aquí on intervenen els camps magnètics. Les dues bobines en configuració «anti-Helmholtz» de la figura 4 (el corrent elèctric circula en sentit oposat en cada una d'elles) creen en l'espai un gradient de camp magnètic radial, amb un mínim de camp magnètic en el centre del recipient (s'han de disposar també bobines menys potents, que compensin de manera força precisa el camp magnètic terrestre). Aquest camp magnètic no uniforme desplaça lleugerament, per efecte Zeeman, els subnivells hiperfins dels àtoms, i modifica la freqüència de les transicions atòmiques segons la posició de l'àtom a l'espai. Això fa que els àtoms, en allunyar-se a poc a poc del centre, quan arriben a una certa distància (la qual determinarà la «frontera» del domini d'atrapament), absorbeixin un fotó d'un dels feixos làser i sofreixin un retrocés que els farà retornar cap al centre del domini (cal usar feixos de llum polaritzada circular, per a aquesta finalitat). El conjunt de les melasses òptiques i les bobines magnètiques defineix una *trampa magnetoòptica*, la qual, complementada amb altres tècniques enginyoses per a refredar encara més, va permetre als premis Nobel de 1997 assolir temperatures molt baixes (inferiors fins i tot a la temperatura residual d'agitació deguda al retrocés que sofreixen els àtoms cada vegada que experimenten un procés d'emissió espontània!), entorn del μK o per sota d'aquesta dada, i que en el cas de confinament, únicament en una dimensió van arribar fins a 0,1 nK!

El que han fet els premis Nobel de 2001 ha estat partir d'aquesta experiència anterior, i retocar-la per assolir la CBE. El problema de les investigacions anteriorment descrites, amb vista a assolir la CBE, és que els investigadors no havien tingut, com a fita primordial, aconseguir densitats atòmiques n suficientment elevades. Per tant, no es podia verificar la condició necessària $n \cdot (\lambda_{DB})^3 \geq 2.612$ abans indicada.

Llavors, els premis Nobel de 2001 varen introduir les modificacions següents en l'esquema de refredament-atrapament de la trampa magnetoòptica anterior:

a) Després de ser refredats i atrapats a la manera «tradicional» indicada (o per alguna de les seves variants), els àtoms es preparen per a ser concentrats en un volum més petit, mitjançant una força magnètica apropiada. Per a aquesta fi, d'una banda es «bombegen» els àtoms a un determinat subnivell magnètic que implica que tots tenen el seu moment magnètic alineat en una determinada direcció. Aquest «bombeig òptic» es pot fer mitjançant llum làser polaritzada, tal com va idear A. Kastler (Premi Nobel de 1966). I, d'altra banda, es modifica la distribució de camp magnètic, fent-lo més potent i amb un gradient més gran, de manera que adquireixi una distribució espacial quadrupolar (amb canvis de $\sim 10^2$ G/cm i «curvatures» de $\sim 10^2$ G/cm² dins la zona de confinament dels àtoms) amb un mínim de camp al centre. D'aquesta manera, cada àtom, en trobar-se sotmès a un gradient de camp magnètic, es comporta com un petit imant, i sofreix una força que el fa moure cap a la zona d'intensitat magnètica menor (el moment magnètic atòmic ha de ser antiparal·lel amb el camp magnètic). És a dir, es desplaça cap al centre de la zona de

confinament. Com a resultat, la concentració atòmica augmenta. Es pot considerar que els àtoms es troben sotmesos a un potencial central atractiu de tipus aproximadament harmònic (si bé s'hi afegeix un petit camp magnètic transversal uniforme i rotatiu —d'1 Gauss—), de manera que el punt amb camp magnètic zero vagi movent-se contínuament, impedint així que cap àtom estigui massa estona en l'esmentat punt, on podria perdre la seva orientació magnètica). Quan els àtoms ja estan sotmesos a aquests camps magnètics, es poden interrompre els sis feixos de llum làser (de fet, actualment els àtoms, una vegada refredats, es canvien de lloc abans de ser sotmesos a aquest camp magnètic de confinament i compressió).

b) Aquesta acumulació dels àtoms no és encara suficient. Cal, a més, disminuir la temperatura fins a valors neta-ment més baixos. Per a tal fi es posa en marxa un procediment de «refredament evaporatiu». Aquest refredament és el mateix que fa que el cafè o la sopa es refredin: les molècules més energètiques del cafè o la sopa són les que «s'evaporen», és a dir, les que s'escapen del líquid, enduent-se una quantitat d'energia important, superior a la mitjana d'energia per partícula. El resultat és que l'energia mitjana de les molècules que resten en el cafè o la sopa disminueix, la qual cosa significa que la temperatura disminueix. Traduït al cas dels àtoms, el que es fa és deixar escapar també els àtoms més energètics, durant intervals de temps molt breus (d'uns quants mil·lisegons), de la trampa magnètica. Aquests intervals es repeteixen moltes vegades. El temps entre cada interval d'evaporació ha de ser prou llarg per a donar temps als àtoms que resten a la trampa perquè, a través de col·lisions elàstiques, es vagin redistribuint l'energia cinètica entre ells (el fet d'haver augmentat la concentració del gas és crucial per a permetre que els àtoms sofreixin el nombre suficient de col·lisions elàstiques per a aquesta fi).

La manera com es procedeix per deixar escapar els àtoms més «calents» consisteix a canviar bruscament l'orientació del moment magnètic d'aquests àtoms, mitjançant un pols de radiofreqüència que traspasa la població atòmica des del subnivell magnètic ocupat fins a un altre subnivell. Llavors, la trampa magnètica ja no actua sobre aquests àtoms, i es poden escapar. La manera com aquest mètode permet actuar selectivament sobre els àtoms més energètics, sense pertorbar els altres, es basa en el fet que aquests àtoms més energètics seran els únics que visitaran, en el seu moviment, les parts més exteriors de la zona de confinament, i, quan es trobin en aquestes parts més exteriors, els seus subnivells estaran més separats entre si (per l'efecte Zeeman) que en el cas dels altres àtoms que es troben en altres situacions espacials, amb menys camp magnètic. Per tant, el camp de radiofreqüència es podrà ajustar a la separació Zeeman que correspongui als subnivells dels àtoms més energètics, i consegüentment seran els únics afectats per la radiofreqüència i els únics que es podran escapar de la trampa.

Finalment, després de la «compressió» per camp magnètic i d'una successió de refredaments evaporatius, els premis Nobel actuals varen aconseguir, al 1995, incrementar prou la concentració atòmica i, al mateix temps, disminuir suficientment la temperatura del gas perquè es verificués la condició $n \cdot (\lambda_{DB})^3 \geq 2.612$, que dóna lloc a la CBE. El procés de refredament-atrapament inicial dura uns quants minuts, i el procés de confinament-compressió i refredament evaporatiu dura un temps característic, que sol ser d'un minut. El condensat format dura poc temps, només unes poques desenes de segons, atès que el condensat és en si mateix un estat metastable: d'una banda, està una mica afectat pel bombardeig per part dels àtoms que no estan en la fase condensada, i, d'altra banda, l'existència, encara que en una proporció molt petita, de col·lisions inelàstiques pot dur els àtoms a

altres estats que no quedin atrapats (fins i tot hi pot haver col·lisions a tres cossos, que farien que el condensat pogués degenerar de mica en mica cap a una fase líquida ordinària).

La figura 5 mostra la primera CBE aconseguida en el món, pels premis Nobel Cornell i Wieman (i col·laboradors), l'any 1995, amb àtoms de ^{87}Rb [2]. Tal com s'indica en el peu de figura, la distribució de velocitats mostra, en els gràfics 2 i 3, una forta acumulació d'àtoms al voltant de la velocitat zero. Aquests àtoms són els que formen el condensat (són els de mínima energia), mentre que la resta d'àtoms, amb una distribució de velocitats més àmplia, formen la fase de gas normal. En el tercer gràfic (el de la dreta) es pot observar que la fase normal (que era dominant abans que es formés el condensat) ha quedat fortament reduïda. La fase condensada es forma al centre de la zona de confinament del gas. Les seves dimensions són tan petites (es mesuren en micres), que era impossible fer-ne una «fotografia» directa. Va caldre deixar expandir el sistema gasós lliurement (cancel·lant el camp magnètic de confinament) durant mil·lisegons perquè el condensat prengués unes dimensions de dècims de mil·límetre i pogués ser fotografiat amb una càmera CCD (prèvia il·luminació amb un pols de llum làser de freqüència apropiada, la qual pot ser absorbida pels àtoms i, per tant, provocar un contrast òptic en cada punt proporcional a la concentració d'àtoms en el mateix). En la figura 5, els requadres mostren aquestes fotografies, en les quals també es distingeixen clarament la fase condensada i la fase normal. Cal advertir que, a causa de la seva expansió adiabàtica, el condensat abaixa la seva densitat, però també abaixa la seva temperatura (en aquests primers experiments la temperatura inicial del condensat era de 170 nK, mentre que la final —en el moment d'enregistrar la figura 5— era d'uns 20 nK), i una cosa compensa l'altra. És clar que, per causa de l'expansió i la il·luminació per al registre, el condensat acaba finalment destruint-

se. Atès que l'expansió lliure del condensat amplia fortament les dimensions del sistema gasós, les fotografies de la figura 5 representen no sols un mapa de posicions, sinó també de velocitats dels àtoms, ja que el desplaçament de cada àtom des de la posició que ocupava abans de l'expansió lliure del sistema gasós és aproximadament proporcional a la seva velocitat. El nombre total d'àtoms en la fase condensada, en aquest primer experiment, va ser d'uns dos mil, i la concentració d'àtoms, entorn de 10^{14} cm^3 .

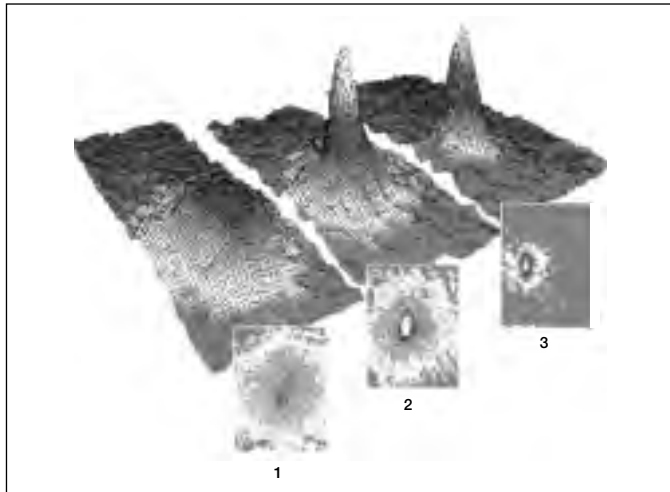


FIGURA 5. Primera condensació de Bose-Einstein aconseguida en el món, per Cornell i Wieman (i col·laboradors). Els tres gràfics tridimensionals, d'esquerra a dreta, mostren la distribució de velocitats en el condensat (els eixos horitzontals són v_x i v_y), just abans que es formés el condensat, a l'inici del mateix, i una vegada ja ben format. Els requadres mostren una «foto» del condensat (després de deixar-lo expandir lliurement durant uns quants mil·lisegons). Tant als gràfics com a les fotografies, es poden distingir les fases condensada (la qual correspon a un total d'uns milers d'àtoms a una temperatura de 20 nK), i de gas normal al seu voltant [2].

Després dels experiments de Cornell i Wieman, Ketterle també va publicar, el mateix any, resultats experimentals de CBE en ^{23}Na [8] (la figura 6 mostra resultats obtinguts per Ketterle en un dels seus treballs), i en els pocs anys que han transcorregut des de llavors fins ara s'ha aconseguit la CBE ja en unes desenes de laboratoris del món, malgrat el cost i la complicació experimental d'aquestes investigacions. Aquests experiments s'han centrat en les espècies d'àtoms que s'assenyalen en la taula 1 (en alguns dels casos s'indica també la referència dels primers investigadors que ho han aconseguit, així com el nombre total d'àtoms del condensat assolit i la seva temperatura).

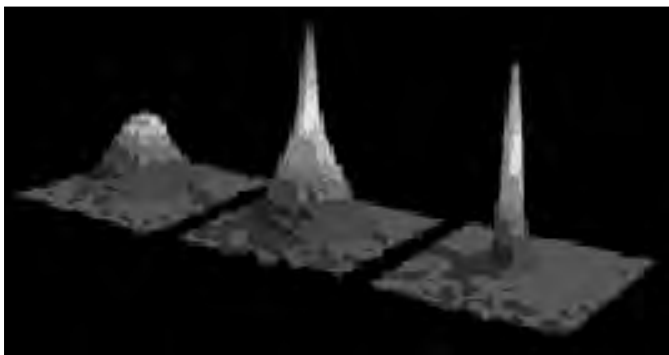


FIGURA 6. *Figura similar a l'anterior, però referida a la CBE aconseguida per Ketterle i col·laboradors, en ^{23}Na . S'aprecia l'elevat grau de condensació de la velocitat atòmica aconseguit [8-13].*

Cal assenyalar el mèrit de D. Kleppner (del MIT), el qual, de fet, va intentar en primer lloc la CBE, en un gas de ^1H . Però en l'hidrogen és més difícil, ja que la redistribució de l'energia entre els àtoms que resten en el condensat després de cada procés de refredament evaporatiu, a través de les col·lisions, és més lent que en els àtoms alcalins (i a més hi ha més col·lisions inelàstiques; en particular, recombinació d'àtoms per formar molècules).

| | |
|-------------------------------|---|
| ⁸⁷ Rb: | M. H. Anderson, J. R. Ensher, M. R. Matthews, <i>C. E. Wieman, E. A. Cornell: Science</i> , núm. 269 (1995), p. 198 [2.000 àtoms, $T = 20$ nK] |
| ⁷ Li: | C. C. Bradley, C. A. Sackett, J. J. Tollett, R. G. Hulet: <i>Phys. Rev. Lett.</i> , núm. 75 (1995), p. 1687 |
| ²³ Na: | K. B. Davis, M. O. Mewes, M. R. Andrews, N. J. van Druten, D. S. Durfee, D. M. Kurn, i <i>W. Ketterle: Phys. Rev. Lett.</i> , núm. 75 (1995), p. 3969 [500.000 àtoms] |
| ¹ H: | D. G. Fried, T. C. Killian, L. Willmann, D. Landhuis, S. C. Moss, D. Kleppner, T. J. Greytak: <i>Phys. Rev. Lett.</i> , núm. 81 (1998), p. 3811 |
| ⁸⁵ Rb: | S. L. Cornish, N. R. Claussen, J. L. Roberts, <i>E. A. Cornell, C. E. Wieman: Phys. Rev. Lett.</i> , núm. 85 (2000), p. 1795 |
| ⁴ He (metastable): | (S'ha aconseguit enguany) |
| ⁴¹ K: | (S'ha aconseguit enguany) |

TAULA 1. *Espècies d'àtoms en les quals s'ha aconseguit la condensació de Bose-Einstein, fins ara.*

No obstant això, les investigacions de Kleppner van ser molt útils als altres investigadors, en particular als premis Nobel. D'altra banda, cal remarcar que la CBE sols es pot presentar en àtoms bosònics, la qual cosa significa que el nombre total de constituents (protons, neutrons i electrons, tots d'espín 1/2) ha de ser parell. Per exemple, no es presentaria en un gas de ³He, ja que aquest està format per àtoms fermiònics. No obstant aquest fet, avui dia s'està començant a estudiar el comportament d'un gas fermiònic a temperatures molt baixes, per al qual es preveuen diferències, però també similituds, respecte al cas dels gasos bosònics.

Des del 1995 fins ara, els investigadors, a més d'obtenir els condensats d'àtoms, han començat també a estudiar, teòricament i experimentalment, les seves propietats. En els dos apartats següents comentem breument quines han estat les contribucions dels tres premis Nobel a les investigacions sobre condensats de Bose-Einstein, en aquests anys.

De manera resumida, i no exhaustiva, els premis Nobel Cornell i Wieman han efectuat, des del 1995, les contribucions següents:

- Primera observació de CBE en el món, en ^{87}Rb . Condensats de $\sim 10^4$ àtoms (figura 5).
- Primera observació de CBE en ^{85}Rb .
- Estudi d'excitacions col·lectives en condensats, i influència de la temperatura.
- Estudi de condensats formats per dues espècies d'àtoms, o per àtoms en dos estats diferents.
- Formació de vòrtexs en condensats de dues espècies d'àtoms.

Estudi de la seva «coherència»

- Contribució a l'estudi d'efectes no lineals en condensats, deguts a la interacció entre els àtoms (en particular, *four-wave mixing*).
- Estudi dels col·lapses i reexpansions dels condensats amb *longituds de scattering* negatives. *Bose-novas*.
- Decaïment de «solitons foscos» en vòrtexs tipus anell.

Referències relacionades amb aquests treballs són les [2-7]. Per entendre alguns dels conceptes indicats en la llista anterior hem d'assenyalar que, des d'un punt de vista teòric, els condensats de Bose-Einstein d'àtoms se solen descriure, en la teoria del camp mitjà, amb una funció complexa o «paràmetre d'ordre» (relacionada amb la funció d'ona)

$\phi(\vec{r}, t) = \sqrt{n(\vec{r}, t)} e^{iS(\vec{r}, t)}$ (on n és la densitat de matèria i s la fase), la qual obeeix a una «equació de Schrödinger no lineal» (o de Gross-Pitaevskii):

$$i\hbar \frac{\partial \phi}{\partial t} = \left(\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V_{ext}(r) + g|\phi|^2 \right) \phi, \quad (3)$$

on el primer terme representa l'energia cinètica, $V_{ext}(r)$ és el potencial extern de confinament i el darrer terme representa una pertorbació no lineal que prové de la interacció entre les partícules (g és proporcional a la denominada *longitud de scattering*). Aquesta equació presenta certes propietats:

— d'una banda, admet l'existència de vòrtexs. Un vòrtex és una singularitat en la distribució material. La funció ϕ que descriu el condensat pot prendre, en algun punt, un valor nul de la seva amplitud (i la fase, òbviament, queda indefinida), la qual cosa significa absència de matèria en aquell punt. Al llarg de qualsevol línia tancada que envolti el punt, la fase varia en $+2\pi$ o -2π (o en un múltiple seu), la qual cosa implica que la circulació de la velocitat està quantitzada. Doncs bé, tant Cornell i Wieman com, com veurem, sobretot Ketterle, s'han dedicat a provocar l'aparició de vòrtexs en un condensat i a estudiar-ne la dinàmica (vegeu la figura 9 més endavant).

— d'altra banda, l'equació (3) és formalment equivalent a l'equació que descriu el comportament d'una ona de llum en un medi material que presenti una no-linealitat òptica de tipus Kerr (per exemple, un medi on l'índex de refracció sofreixi, en cada punt, variacions proporcionals a la intensitat de la llum en el punt; és el que succeeix, per exemple, en el vidre de les fibres òptiques). Per tant, en el condensat es poden presentar fenòmens similars als que es pre-

senten en aquests tipus de medis materials, amb la diferència que, en comptes d'afectar ones lluminoses que es propaguin pel material, afectaran les *ones de matèria* que es generin en el si del condensat, com a pertorbació o excitació del mateix. Cornell i Wieman han estudiat algun d'aquests efectes, com ara la *barreja de quatre ones* (*four-wave mixing*).

Finalment, Cornell i Wieman han estudiat un altre efecte no previst per a un condensat ideal, el qual és degut a la petita interacció que existeix entre els àtoms. En algunes espècies atòmiques, com ara el Li o el Rb, per a les quals la longitud de *scattering* és negativa, aquesta interacció entre els àtoms produeix col·lapses i re-expansions del condensat. És un fenomen semblant al que té lloc en els estels: a causa de l'atracció gravitatòria entre les seves partícules materials, un estel pot sofrir un col·lapse (contracció brusca), el qual va seguit d'una expansió produïda per l'aproximació tan forta entre les partícules, que augmenta la seva interacció. En el cas dels condensats d'àtoms, aquests processos de col·lapse i reexpansió són cíclics, n'hi pot haver molts de seguits, i en cada expansió es pot perdre una mica de matèria (la que surt a més velocitat). Les expansions, Cornell i Wieman les han anomenat *Bosenovas* [7b], per la seva similitud amb les supernoves. D'altra banda, mitjançant camps magnètics es pot modificar el valor de la longitud de *scattering* en el Rb i, per tant, es pot influir sobre la seva dinàmica de col·lapses i expansions.

103

INVESTIGACIONS DE KETTERLE

També de manera resumida i no exhaustiva, indiquem les contribucions a l'estudi dels condensats de Bose-Einstein efectuades pel Premi Nobel Ketterle. Des del nostre punt de vista, Ketterle, si bé no va ser el primer investigador d'assolir la CBE (el seu treball es va publicar uns quants mesos des-

prés del primer de Cornell i Wieman), és l'investigador que, fins ara, ha efectuat més contribucions i més interessants:

- Tercera observació de CBE en el món, primera en ^{23}Na (vegeu la taula 1).
- Assoliment de condensats molt grans, amb 1-10 milions d'àtoms.
- El fet anterior ha permès la primera observació no destructiva (és a dir, sense necessitat de fer-lo expandir) del condensat, per mètode òptic dispersiu (permet ~ 100 observacions/s) [10].
- El fet anterior ha permès ratificar que hi ha una separació de fases no sols en l'espai de moments, sinó en l'espai real (a causa de la presència del potencial extern), i mesurar directament el *moviment del punt zero* associat al principi d'incertesa de Heisenberg.
- Primera demostració de la «coherència» del condensat.
- Primera demostració d'un *làser d'àtoms*.
- Estudi detallat de la formació de vòrtexs, i de distribucions de vòrtexs (*Abrikosov arrays*), dins els condensats. Superfluïdesa.
- Estudi d'efectes no lineals en condensats, deguts a la interacció entre els àtoms. En particular, *four-wave mixing* amb dues ones de llum i dues d'àtoms (difracció de Bragg...), i amplificació d'ones de matèria.
- Creació de fonons (*Bogoliubov transformation*—quasipartícules amb $\pm q$).
- Estudis de superfluïdesa, de condensats multicomponents...
- Inici de l'estudi de les propietats d'un gas d'àtoms fermiònics fred.

Les referències relacionades amb aquests treballs són les [8-17] (vegeu també la figura 6 anterior). Com a comentari d'algunes d'aquestes investigacions assenyalades, podem indicar que el *moviment del punt zero* es refereix al fet que, segons el principi d'incertesa de Heisenberg, no es pot tenir una partícula en un estat on la posició estigui perfectament definida i al mateix temps la velocitat estigui també perfectament definida. Això implica que, fins i tot en l'estat més baix d'energia, les partícules mostren un cert moviment residual, que introdueix una petita incertesa en la seva posició i velocitat. Doncs bé, Ketterle i els seus col·laboradors han demostrat que el moviment residual dels àtoms del condensat és el que correspon a aquest mínim quàntic.

La demostració de la «coherència» del condensat es refereix al fet que Ketterle va confirmar experimentalment que el condensat està definit per una única funció d'ona, la qual té una amplitud i una fase ben definides. El seu mètode va consistir a crear dos condensats (separats solament per un feix laminar de llum làser), i a continuació fer-los superposar. Per a aquesta fi va anul·lar el camp magnètic de confinament, amb la qual cosa els dos condensats es van expandir (i caure per gravetat) i, per tant, van anar superposant-se, de manera que es va anar creant una interferència entre les dues funcions d'ona que descriuen cada condensat. Aquesta interferència, que dona com a resultat una ona estacionària de matèria, amb nodes i ventres, està representada a la figura 7. Aquest resultat, que (igual que havia passat amb una part de la figura 5) va aparèixer publicat a la portada de la revista *Science* [11], va ser molt important amb vista a corroborar la propietat bàsica d'un condensat: l'obediència té una única funció d'ona.

També va ser molt interessant la demostració d'un làser d'àtoms [11-13], el qual consisteix en la generació d'uns pols de matèria, on tots els seus àtoms es mouen de

manera coherent entre si (igual que en uns pols de llum làser, on la llum és coherent). Ketterle i els seus col·laboradors el varen aconseguir ideant una manera de deixar escapar, controladament, una part dels àtoms que formen el condensat; tots aquests àtoms surten en un mateix estat i es propaguen de manera coherent. La manera de deixar-los escapar controladament va consistir a fer girar bruscament, mitjançant l'aplicació d'uns pols de camp magnètic orientat convenientment, el moment magnètic d'una part dels àtoms del condensat. Aquests àtoms amb el moment magnètic girat ja no estan sotmesos a la força de confinament produïda pel camp magnètic quadrupolar principal, i, per tant, surten del condensat, i s'acceleren per la gravetat. Els pols de matèria generats es poden observar en la figura 8.

106

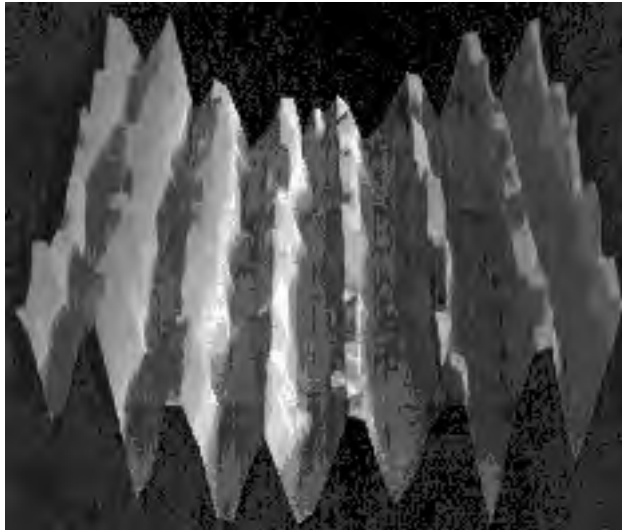


FIGURA 7. *Ona de matèria estacionària, amb nodes i ventres, formada per la superposició de dos condensats que es propaguen en direccions oposades (un va d'esquerra a dreta i l'altre de dreta a esquerra), amb una energia cinètica corresponent a 1 nK! [11].*



FIGURA 8. *Làser d'àtoms: polsos de matèria que emanen d'un condensat, i que, per tant, estan constituïts per àtoms que evolucionen de manera coherent entre si. Els polsos cauen per la gravetat [11-13].*

Un estudi molt recent és el de la formació espontània de vòrtexs en un condensat, quan el condensat se sotmet a una rotació al voltant d'un eix. Ketterle i els seus col·laboradors han sotmès un condensat a una rotació ràpida (mitjançant un feix de llum làser focalitzat sobre la perifèria del condensat i que es va fent girar, arrossegant tot el condensat a causa de la força dipolar que exerceix sobre el condensat), i, com a conseqüència d'aquest fet, dins el condensat es formen el conjunt de vòrtexs que s'observen en la figura 9. Aquests vòrtexs són com «forats» longitudinals, paral·lels entre si i paral·lels a l'eix de rotació, que travessen el condensat. Això ha confirmat plenament les previsions teòriques. En efecte, un condensat és un sistema irrotacional —ho és la funció descrita per (3)— i, per tant, no hi pot haver trajectòries tancades, llevat que encerclin

alguna singularitat; a més, tal com hem comentat, la circulació de la velocitat al voltant d'una singularitat està quantitzada. Com a resultat de tot això, un condensat no pot rotar sobre si mateix, amb qualsevol velocitat angular, llevat que es formin singularitats (vòrtexs) en el seu interior. I, en efecte, s'ha demostrat que els vòrtexs apareixen. El «fluid atòmic» es posa a circular al voltant de cada singularitat, amb una velocitat angular permesa per la quantització. Apareix el nombre de vòrtexs necessari per a satisfer la conservació de l'energia i el moment angular respecte a la força de rotació aplicada (aquestes xarxes de vòrtexs s'anomenen *d'Abrikosov*).

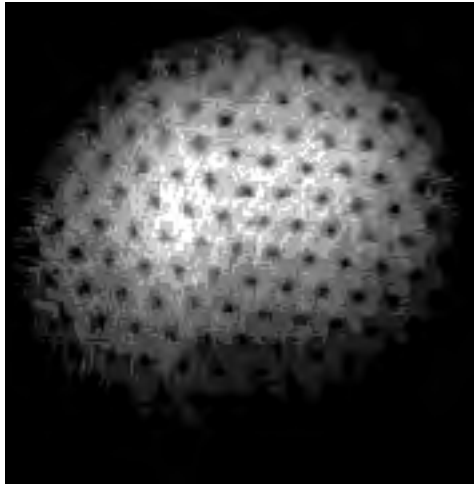


FIGURA 9. *Distribució de vòrtexs formats a l'interior d'un condensat, produïts per la rotació global del condensat (xarxes de vòrtexs d'Abrikosov). Els vòrtexs travessen el condensat i són paral·lels a l'eix de rotació [12-17].*

Finalment, comentarem que Ketterle també ha estudiat alguns fenòmens no lineals, des del punt de vista mencionat en l'apartat anterior. En particular, ha demostrat fenòmens

de «barreja de quatre ones» en els quals, en comptes de produir-se la barreja entre quatre ones de llum (com és habitual en òptica no lineal), es produeixen entre dos feixos de llum làser i dues ones de matèria, generades aquestes últimes com a excitació elemental del condensat. També, igual que en òptica no lineal, es produeixen interaccions i, en particular, intercanvis d'energia entre aquestes quatre ones. S'ha aconseguit, per exemple, amplificar ones de matèria [15].

CONCLUSIONS

En conclusió, els premis Nobel de Física de 2001, juntament amb els seus col·laboradors, i junt també amb altres científics, han demostrat que les tècniques de refredament i atrapament d'àtoms, degudament modificades, es poden utilitzar per a aconseguir condensats de tipus Bose-Einstein d'àtoms. Aquests sistemes són molt més semblants al cas ideal considerat per Bose i Einstein de condensats formats per partícules sense interacció mútua que els altres tipus de condensats que s'havien aconseguit fins ara en altres classes de sistemes materials. Al mateix temps, aquests científics han estudiat, i continuen estudiant amb gran dedicació i eficiència, les propietats d'aquests condensats d'àtoms, els quals es formen a les temperatures més baixes conegudes en l'Univers.

A causa de la novetat dels condensats d'àtoms, als científics encara se'ls fa difícil imaginar quines aplicacions tindran. Es parla de les possibles aplicacions dels làsers d'àtoms en la litografia atòmica de precisió (igual que en el cas de la llum, els feixos coherents es poden focalitzar més bé sobre una superfície que els feixos incoherents), aplicacions en nanotecnologies (aprofitant també el làser d'àtoms, o bé el fet que en un condensat els àtoms estiguin distribuïts en l'espai de la manera més uniforme possible i, per tant, es podrien

dipositar més regularment sobre un substrat o sobre una distribució de pous de potencial), aplicacions en metrologia de precisió, en òptica atòmica, en computació quàntica... Som, doncs, en un camp d'estudi molt efervescent, en el qual ens esperen encara moltes sorpreses!

REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

Detalls, des del punt de vista teòric, sobre la condensació de Bose-Einstein, en general, se'n poden trobar, per exemple, a:

[1] HUANG, K. *Statistical Mechanics* (Wiley, Nova York, 1987).

A continuació hi ha una llista no exhaustiva de les referències més importants dels treballs científics publicats pels premis Nobel de 2001:

Cornell i Wieman

- [2] ANDERSON, M. H.; ENSHER, J. R.; MATTHEWS, M. R.; WIEMAN, C. E.; CORNELL, E. A. *Science*, núm. 269 (1995), p. 198 (*cf.* també *Sci. Am.*, març 1998, p. 26-31).
- [3] JIN, D. S.; ENSHER, J. R.; MATTHEWS, M. R.; WIEMAN, C. E.; CORNELL, E. A. *Phys. Rev. Lett.*, núm. 77 (1996), p. 420, i núm. 78 (1997), p. 764.
- [4] MYATT, C. J.; BURT, E. A.; CHRIST, R. W.; CORNELL, E. A.; WIEMAN, C. E. *Phys. Rev. Lett.*, núm. 78 (1997), p. 586.
- [5] BURT, E. A.; CHRIST, R. W.; MYATT, C. J.; HOLLAND, M. J.; CORNELL, E. A.; WIEMAN, C. E. *Phys. Rev. Lett.*, núm. 79 (1997), p. 337.
- [6] HALL, D. S.; MATTHEWS, M. R.; ENSHER, J. R.; WIEMAN, C. E.; CORNELL, E. A. *Phys. Rev. Lett.*, núm. 81 (1998), p. 1539.

- [7] HALL, D. S.; MATTHEWS, M. R.; WIEMAN, C. E.; CORNELL, E. A. *Phys. Rev. Lett.*, núm. 81 (1998), p. 1543.
- [7b] DONLEY, E. A. *et al. Nature*, núm. 412 (2001), p. 295.

Ketterle

- [8] DAVIS, K. B.; MEWES, M. O.; ANDREWS, M. R.; VAN DRUTEN, N. J.; DURFEE, D. S.; KURN, D. M.; KETTERLE, W. *Phys. Rev. Lett.*, núm. 75 (1995), p. 3969.
- [9] MEWES, M. O.; ANDREWS, M. R.; VAN DRUTEN, N. J.; KURN, D. M.; DURFEE, D. S.; TOWNSEND, C. G.; KETTERLE, W. *Phys. Rev. Lett.*, núm. 77 (1996), p. 988.
- [10] ANDREWS, M. R.; MEWES, M.-O.; VAN DRUTEN, N. J.; DURFEE, D. S.; KURN, D. M.; KETTERLE, W. *Science*, núm. 273 (1996), p. 84.
- [11] ANDREWS, M. R.; TOWNSEND, C. G.; MIESNER, H. J.; DURFEE, D. S.; KURN, D. M.; KETTERLE, W. *Science*, núm. 275 (1997), p. 637.
- [12] MEWES, M. O.; ANDREWS, M. R.; KURN, D. M.; DURFEE, D. S.; TOWNSEND, C. G.; KETTERLE, W. *Phys. Rev. Lett.*, núm. 78 (1997), p. 582.
- [13] KETTERLE, W.: *Physics Today* (març 1997). TOWNSEND, C. G.; KETTERLE, W.; STRINGARI, S. *Phys. World* (març 1997), p. 29-34.
- [14] STAMPER-KURN, D. M.; ANDREWS, M. R.; CHIKKATUR, A. P.; INOUE, S.; MIESNER, H. J.; STENGER, J.; KETTERLE, W. *Phys. Rev. Lett.*, núm. 80 (1998), p. 2027.
- [15] INOUE, S.; PFAU, T.; GUPTA, S.; CHIKKATUR, A. P.; GÖRLITZ, A.; PRITCHARD, D. E.; KETTERLE, W. *Nature*, núm. 402 (1999), p. 641.
- [16] ABO-SHAEER, J. R.; RAMAN, C.; VOGELS, J. M.; KETTERLE, W. *Science*, núm. 292 (2000), p. 476.
- [17] RAMAN, C.; ABO-SHAEER, J. R.; VOGELS, J. M.; XU, K.; KETTERLE, W., *cond-mat/0106235* (2001).

