

# MATERIAREN EGOERA BEREZIA: HELIO SUPERFLUIDOA

Jose Antonio Legarreta

*Txikitan ikasi eta egunero ikusten dugunez, materiak hiru agregazio-egoera dituela ziurta daiteke: solido-egoera, likido-egoera eta gas-egoera, bakoitzak berezko ezaugarriak dauzkalarik. Izan ere, eguneroko bizitzan ez omen da materiaren beste egoerarik ezagutzen.*

*Guzti hau luzaro eguneroko esperientziarekin bat etorri bada ere, triologian hutsen bat agertu zen, hala nola, ore-egoera izenaz ezagutzen dena. Beronek ez dauka solidoen zurruntasuna eta ezta likidoen fluidotasuna ere; bion bitarteko ezaugarriak agertzen bait ditu. Agregazio-egoeren triologia zalantzatan jarrita ere, inor ez zen ikergai honetaz arduratu.*

Teknikak hobetuz, ikerlariak tenperatura handitan lan egiteko aukera izan zuten eta ioi-egoera aurkitu zuten, plasma izeneko bigarren gas-egoera ekarri zutelarik. Honen ostean astronomoek, neutroizko izarren aurkudearekin batera bigarren solido-egoera ekarri zuten; materia hiperdentsu deitutakoa.

Oso tenperatura txikietan lan egiteko ahalmenak, bigarren likido-egoera ekarri zuen; egoera superfluido deritzona. Beronek likido-egoeraren legerik tincoenak desafiatzen ditu, bere interpretazioa (atomo-mailan barne) oso zaila eta eztabaidatua delarik.

Lantxo honetan helioaren egoera

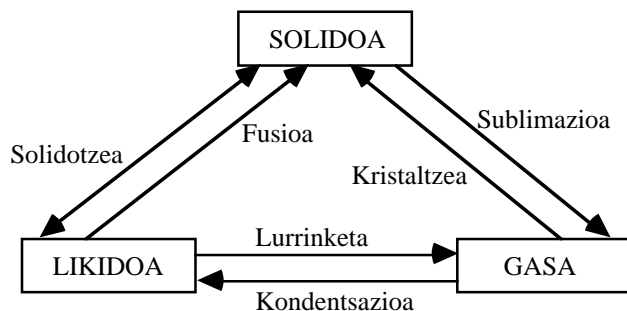
superfluidoaz arituko gara, fisikariak aurkitua duten superfluidorik arraroena delako.

## HELIOAREN EZAUGARRIAK

Astronomoek eguzkian aurkitu zuten eta geroago atmosferako gas urrienen artean identifikatua izan zen. Atmosferan aurki daitekeen helioa  ${}^4_2\text{He}$  da gehienbat,  ${}^3\text{He}$  isotopoa %  $10^{-7}$ -ko portzentaian agertzen delarik.

1.868. urtean espektografoari esker eguzkiaren atmosferan helioa aurkitu zen. Lurrean mineral jakin batzuk berotuz lortu ahal izan zen. Gas naturalaren hobien ustiakuntza heldu arte, helioaren ekoizpena oso urria zen, baina nahikoa laborategi-beharretarako.

Atomo-mailan, hidrogenoaren ostean helioarena oso sinplea bada ere (bi



Materiaren hiru agregazio-egoera arruntren diagrama. Bertan batetik bestera iragateko egin behar diren prozesuen izenak ematen dira. Materia arruntean tenperatura jaitsiz edo igoz egoera batetik bestera pasatzen da. Tenperatura hartuz kristaltzea, solidotzea eta kondentsazio deitutako prozesuak gertatzen dira. Berotuz ordea, sublimazioa, fusioa eta lurrinketa.

protoi, bi neutroi, bi elektro) lehen esan dugunez jokaerarik arraroena hartzen duen superfluidoa da.

## HELIO SUPERFLUIDOA

1900. urte inguruan, ezagutzen ziren gas guztiak likidotzeari ekin zioten ikerlariak.

Jakina denez, edozein gas likidotu eta solidotu daiteke, baldintza egokietan temperatura jakin bateraino hoztuz gero. Eta are gehiago, gasa zenbat eta presio handiagoan jarri, likidotze-temperatura gero eta handiagoa da. Esaterako, propanoa eta butanoa botila batean konprimaketa hutsez giro-temperaturan izan daitezke likidotuak. Hortaz, gas bat likidotzerakoan presioaz nahiz tenperaturaz balia gaitzke geure xedea lortzeko.

Praktikan oso presio txikian lan eginda ere, gas gehienek likidotzeak oso temperatura txikiak eskatzen ditu, zero absolutua ( $-273,16^{\circ}\text{C} = \text{OK}$ ) muga izaten delarik. Izan ere, egurats-presioan

oxigenoak  $-218^{\circ}\text{C}$ -ko temperatura behar du, nitrogenoak  $-210^{\circ}\text{C}$ , kloroak  $-101^{\circ}\text{C}$  eta neonak  $-248^{\circ}\text{C}$ . Beste zenbait gasen likidotzeak zailtasun handia agertu zuen arren, denboraren denboraz eta batez ere teknikaren aurrerapenak zirela eta, gas guztien likidotzea lortuz joan zen. Aipaturiko zailtasuna agertzen zuen gasetako bat, hidrogenoa zen; bere likidotze-temperatura ( $-260^{\circ}\text{C}$ ) oso txikia bait da. Beraz, hidrogenoaren likidotze-temperatura zero absolututik oso hurbil dagoela eta, oso zail gertatu zitzaizen ikerlariari bera likidotzea, James Dewar-ek 1892.ean lortu zuen.

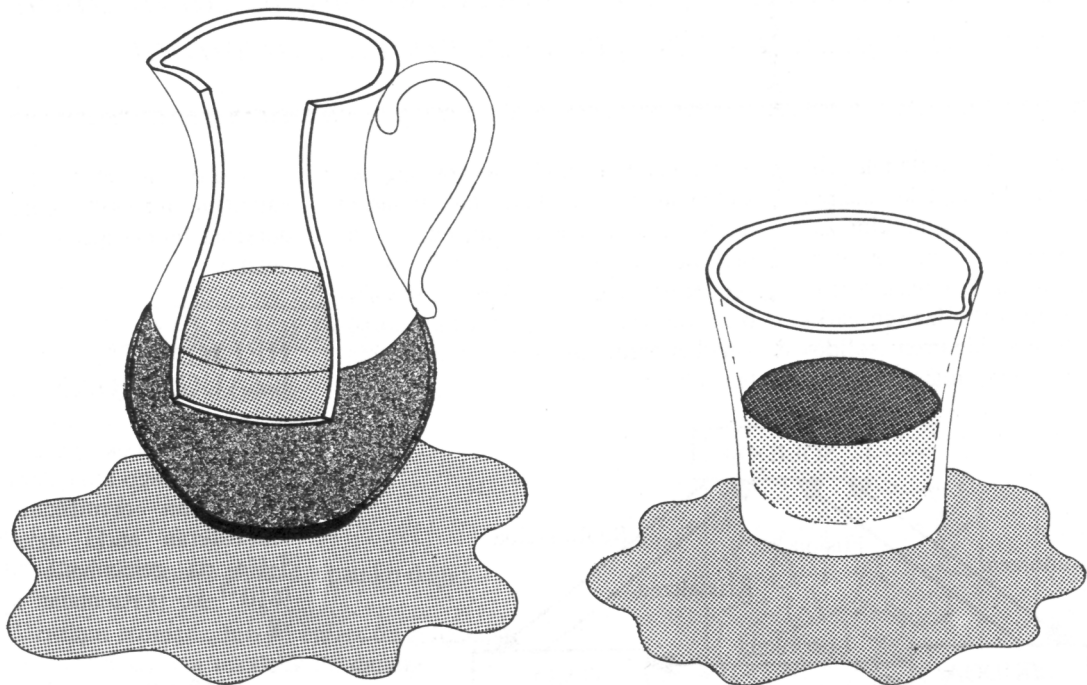
Denok dakigunez, molekulak geldigeldi daudenean (hau da, higidura molekularrik ez dagoenean) energia zinetikoak eta beraz tenperaturak zero balioa hartzen dute. Zero absolutuan ez dago higidura molekularrik. Beraz, inolako molekulak ezin du zero absolutupeko egoerarik lortu.

Hau horrela delarik, lantxo honen hasieran esana dugunez helioaren kasuan kokatuko gara. 1900.ean gas guz-

tiak, helioa izan ezik, likidotuak izan ziren. Helioa likidotzeko bide guztiak jorratu zirelarik ere, alde batetik ezin zela likidotu eta are gutxiago solidotu, eta bestetik soil-soilik gas-egoeran egon zitekeela pentsatu zuten horretan aritu ziren ikerlariak, presioak eta tenperaturak edozein balio hartuta ere.

Berez, lehenengo baieztapena zuzena da, zeren hozketa hutsez helioa ezin bait da solidotu. Eta bigarren baieztapenari dagokionez, ez dela gas iraunkorra esan behar da, baina bai likidotzen zailena. Helioaren likidotzea Kammerling Onnes holandar fisikariak 1908an lortu zuen. Beraz, gas guztiak likidotu zitezkeen, temperatura baxutan lan egiteak eskatzen zuena ordainduz gero. Aurkikunde honek helio likidoaren ezaugarriak ikastera bultzatu zituen ikerlariak. Ezaugarriok ikertzen hasi zirenetik laster oso harrigarriak zirela ikusi zuten, beraren jokaera esplikatuz ezin zutelarik.

Hasteko,  $^4\text{He}$ -aren likidotze-temperatura presio normalean (1 atm) ezagutzen denik txikiena da:  $-268,82^{\circ}\text{C}$



Helio superfluidodun bainura ontzi porotsua sartzen denean:

- 1) Superfluidoa ontzi porotsuaren hormatik sartu egiten da, harik eta barruko superfluidoa eta kanpoko altuera berean egon arte.
- 2) Erresistentzia elektriko baten bidez aldiuneko korrante elektrikoa sortuko bagenu, beroketak barruko superfluidoari eragingo lioke, kanpoko superfluidoa tenperatur aldaketa anulatzen ontziaren barrura sartuko litzatekeelarik.
- 3) Ontziaren kanpotik barruranzko superfluido-fluxua dela eta, superfluido-zirristada sortzen da.

(4,18K), hots, zero absolutuaren gainetik lauren bat gradu zentigradutan.  $^3\text{He}$ -ari dagokionez, likidotze-tenperatura txikiagoa da:  $-270^\circ\text{C}$  (3,2K). Tenperatura guztiz txikiagotu arren, 0,001K-eraino esaterako, giro-presiopean ezin dira helioaren isotopo biok solidotu.

Esandako tenperaturetan lortutako likidoek likido guztien ezaugarriak daukate, baina tenperatura txikiagotuz gero, biak superfluido-egoerara iristen dira.  $^3\text{He}$ -ak 0,001K tenperaturan lortzen du superfluido-egoera.  $^4\text{He}$ -ari dagokionez 2,17 K tenperaturan lortzen du bere superfluido-egoera. Gaur egun hain tenperatura txikiak lortu eta luzaro mantentzeko tresna egokiak, finlandiarrek daukate. Ondoko lerroetan helioaren 4 pisu atomikoko isotopoaren ezaugarriez arituko gara bereziki; berak agertzen bait ditu ezaugarriak bereziki.

Helioaren isotopo honek 4,18K tenperaturan sortzen duen likidoari, He I deritzen. Lehenago esana denez, tenperatura txikiagotuz gero 2,17K tenperaturan inguruan He-ak transformazio bitxia jasaten du, ezaugarri fisikoen aldaketa gertatzen zaiolarik. Transformazio honek solidoketa dirudien arren, likido izaten jarraitzen du. 2,17K tenperatura lortuz gero,  $^4\text{He}$ -ak superfluido-egoera hartzen du eta era berri honi He II deritzen.

Zeintzuk dira Helio IIaren berezitasunak?

## HORMATIK GORA

Biskositatea fluido guztien propietatea da; bai gasena eta bai likidoena. Biskositateak fluidoaren barne-marruskadura adierazten du, zeinak higadura baten efektuak, fluidoan zehar, higaduraren norabide elkartuztean transmititzen bait ditu. Unitatea poisea (P) da.

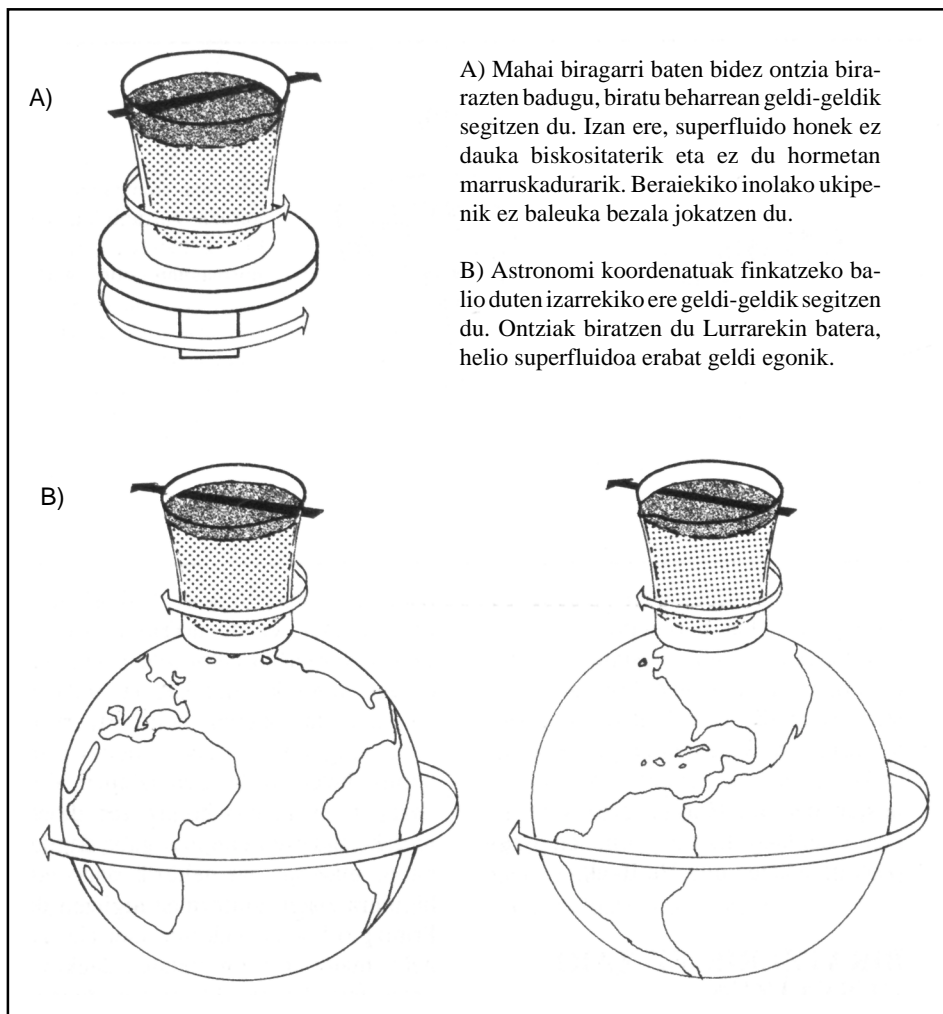
Uraren biskositatea  $25^\circ\text{C}$ -tan 0,01 P-koa da. Likido oretsuek oso biskositate handia daukate eta beirek infinitua. Gasek, oster, oso biskositate txikia daukate. Helio superfluidoak ez dauka biskositaterik, hau da, guztiz fluido da (fluido perfektua).

Adibidez, olio-tanta bat ur-tanta bat baino astiroago irristatzen da kristal batean behera. Hortaz, olioak urak baino biskositate handiagoa dauka. Baina helio superfluidoak ezagutzen den edozein likido normal baino askoz azkarrago jaisten da. Airean altuera jakin batek eroritako berunezko bola bat bezain azkar irristatuko litzateke helio superfluidoazko tanta bat kristalean behera.

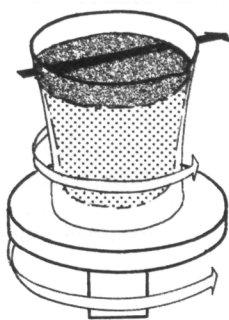
Alderantziz, likido normaletan ez bezala helio superfluidoaren barruan

superfluidoaz beteko bagenu, horman zehar oso azkar alde egingo luke. Ura, berriz, pitxerraren barruan geldituko litzateke. Beraz, He II-a hain da fluido perfektua, ezen erretako lurraren poro mikroskopikoetatik iragaten bait da.

Baina, ontzi porogabeen gordeko bagenu, zer gertatuko litzateke? Pentsa liteke He II-a bertan geldituko litzatekeela, hots, ez lukeela alde egingo, pororik ez dagoelako. Baina, ez da hori

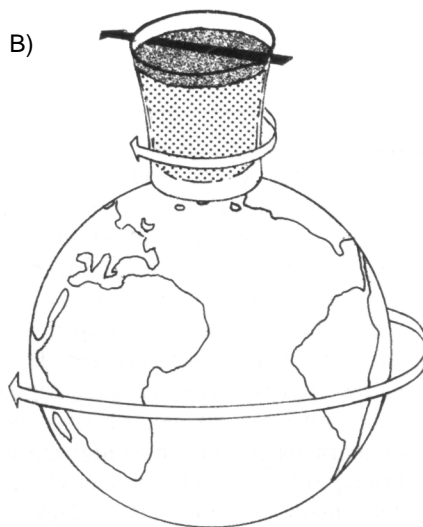


A)



A) Mahai biragarri baten bidez ontzia birarazten badugu, biratu beharrean geldi-geldik segitzen du. Izan ere, superfluido honek ez dauka biskositaterik eta ez du hormetan marruskadurarik. Beraiekiko inolako ukipekin ez baleuka bezala jokatzen du.

B)



B) Astronomi koordenatuak finkatzeko balio duten izarrekiko ere geldi-geldik segitzen du. Ontziak biratzen du Lurrarekin batera, helio superfluidoak erabat geldi egonik.

higitzen den edozein objektuk ez du inongo marruskadurarik topatzen.

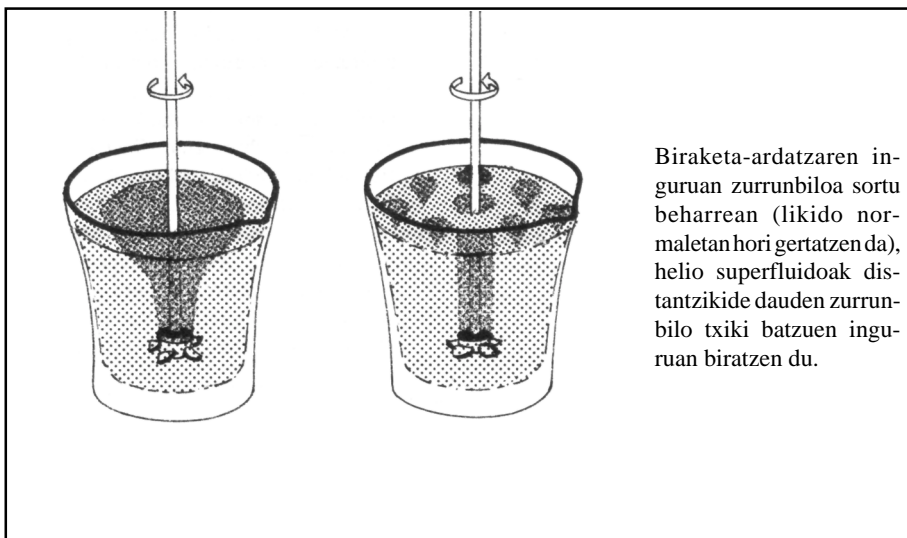
Fluidoaren mekanikaren lege baten arabera, fluido bat higitzen ari deneko diametroa zenbat eta handiagoa izan, gero eta azkarrago jariatzen da. He II-ak, aldiz, guztiz kontrako jokaera hartzen du; diametro txikidun hodiedan azkarrago higitzen da handidunetan baino. Jokaera honek ondorengo esperimendu bitxi honetan garrantzitsuak dira: esmaltatu gabeko zeramikazko pitxer bat helio

gertatzen; ontziaren barruko hormatik igotzen hasten da eta kanpoko hormatik jaisten da, molekula bakoitzak murrubatu bat eskalatuz alde egingo balu bezala. Prozesuak ontzia hustu arte dirau. Prozesu hau ez luke inongo likido normalek burutuko; alde batetik, biskositateak likidoaren xafren desplazamendu kapilarra galeratzen bait du eta gainazaltentsioa dela bide likidoak ahalik eta bolumen txikiena betetzeko joera dauka, eta bestetik, grabitate-indarra gainditu beharko luke kanpotik energiari jaso

gabe. Hemen termodinamikaren bigarren printzipioa sartzen da: bere kabuz utziriko sistemak energia galdu egiten du beti, desordenarik handieneko egoerara abiatuz.

Hau horrela delarik, aipaturiko eragozpen guztiak (biskositatea, gainazal-tentsioa, grabitate-indarra eta termodinamikaren bigarren printzipioa) gainditzen ditu He II-ak. Prozesua, gutxi gorabehera, honelaxe suertatuko litzateke: superfluidoaren lodiera txikiko

rategiak berak Lurrarekin batera Espazioan biratu bitartean. Superfluidoak, beraz, astronomian erreferentziatzat hartzen diren norabide finkoekiko erabat geldirik dago. Ontziaren higidura edozein norabideren ingurukoa (noski, biraketa eta translazio motelak hartzen dira kontutan eta ez astindu edo ontzia irauli) izanda ere, ezaugarri hau betetzen du He-ak. Esperimentu honetan He II-a erreferentzia egonkorra da ontziaren higidura guztiekiko eta ziba girokopikoa bezala portatzen da.



Biraketa-ardatzaren inguruan zurrumbiloa sortu beharrean (likido normalaetan hori gertatzen da), helio superfluidoak distantzikide dauden zurrumbilo txiki batzuen inguruan biratzen du.

geruza bat barne-hormatik igotzen hasten da, zeharo estaliz. Ontziko ertzerara helduta, kanpo-hormatik jaisten hasten da. Une honetan kanpoko geruzak, grabitatearen eraginpean, barruko geruzatik tiratzen du, ontzia husten delarik. Hortaz, prozesuan lehen esandako likido normalen oztopoak gainditzen ditu He II-ak.

## BIRATZERIK EZ ZAIO GUSTATZEN

Ontzi batean ura edo beste edozein likido normal ipintzen badugu eta ontzia bertikala zein horizontalaren inguruan birarazten badugu, ura ere biraketa-ardatzaren inguruan hasiko da biratzen eta indar zentrifugoaren kariaz zurrumbilo bat sortuko da ardatzaren inguruan. Hau ez da helio II-arekin gertatzen: He II-z betetako ontzia norabide bertikala edo beste edozein norabideren inguruan biraraziko bagenu, superfluidoak geldi-geldi segituko luke. Are gehiago, laborategiarekiko ezezik, izar geldiekiko ere ez da higitzen, labo-

Helio superfluidoak biskositaterik ez daukanez, ez du atxekidurarik eta ezta ontziaren hormekiko desplazamenduaren kontrako erresistentzi indarririk ere, hau da, ontziak helio superfluidoari eragiten ez dionez, inerti printzipioa betetzen du. Lehendabizi, ikus dezagun printzipio honek zer dioen: inolako indarren eraginik gabe dagoen puntu material bat geldirik dago edo higidura zuzen uniforme higitzen da. Printzipio honen ondorioz inertzia izeneko materiaren propietatea daukagu. Propietate honek adierazten duenez, gorputz batek ezin du bere higidurazko edo pausagunezko egoera berez aldatu. Helio superfluidoari marruskaduraz inongo kanpo-indarririk transmititzen ez zaionez, inerti printzipioaren arabera geldirik segitzen du He II-ak, ontzia higitzen hasitakoan.

Bestalde helio superfluidoak higitzeko erazko bagenu, inerti printzipioaren arabera higidura zuzen uniforme higitu beharko luke, lehentxeago esana den desplazamenduaren aurkako erresistentzi indarririk ez dagoelako. Baiez-tapen hau hurrengo esperimentuaz frogatu daiteke: hodi luze eta itxiaren barruan

He II-a higitzen denetik aurrerantz etengabe higituko da hodian barne-korronte iraunkorra burutuz, korronte elektriko iraunkorak supereroaletan higitzen diren bezalaxe.

## BEROAREKIKO JOKAERA

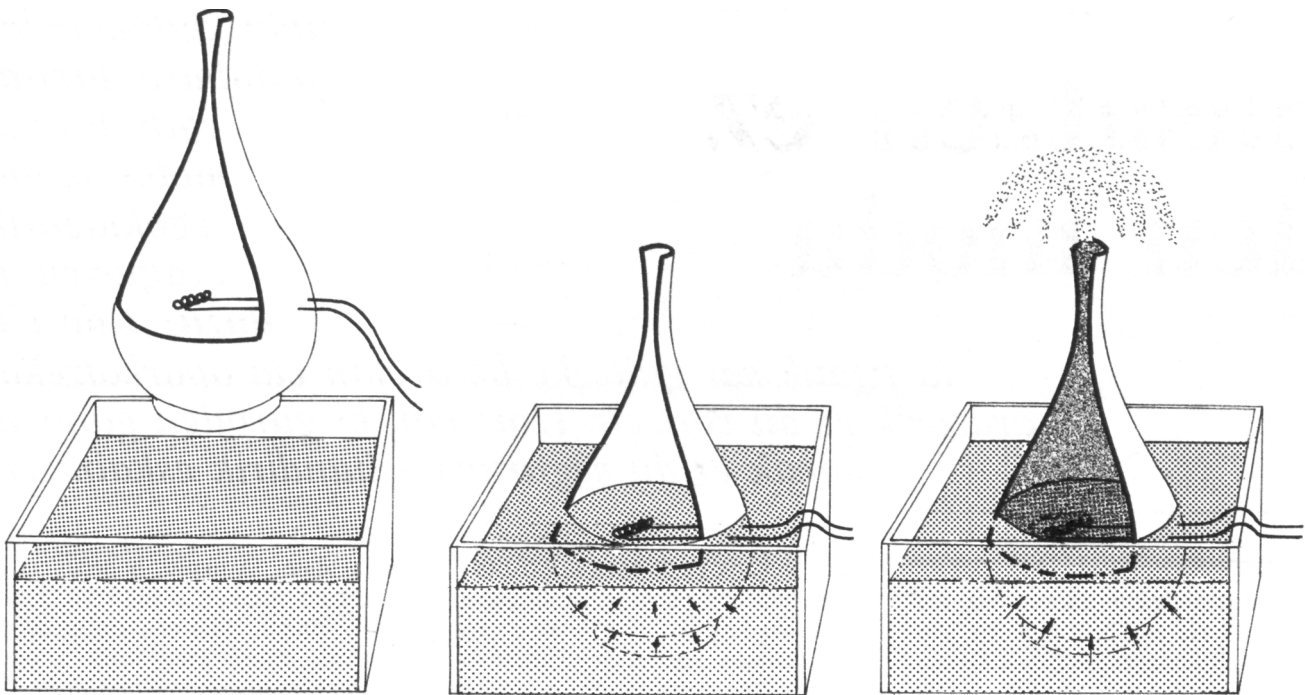
Gorputz baten barrena beroa erraz hedatzen denean, bero-eroale ona dela esaten da. Aitzitik, nekez hedatzen denean bero-eroale txarra da. Beraz, gorputz batek beroa erraz eroaten duenean bero-eroankortasun handia dauka. Bero-eroankortasuna gorputz batek beroa nola eramaten duen adierazten digun propietatea da.

Fluidoetan molekula bakoitza puntu batetik bestera joan daiteke, hau da, higitu egiten da. Higidura horren bidez hedatzen da beroa fluidoan zehar.

Likido normal bat bero-iturri baten eraginpean jartzen denean, likidoaren edozein puntu bero-iturritik zenbat eta hurbilago egon hainbat eta beroago dago, hau da, likidoa lokalki berotzen da. Beraz, likidoaren barruan tenperatur diferentziak sortzen dira. Punturik be-roenetatik punturik hotzenetara hedatzen da beroa, eta puntu arteko tenperatur diferentzia zenbat eta handiagoa izan, are eta lasterrago gainera.

Helio superfluidoak beroaren aurrean ez du lehen esan eran jokatzen. Alde batetik, bere bero-eroankortasuna infinitu bide da, eta berau gero eta handiagoa da, puntu arteko tenperatur diferentzia zenbat eta txikiagoa izan. Bestetik, helio superfluidoaren honoan puntu berorik sortzen ez denez, ez du irakiten. Hala ere, berotu orduko lurrindu egiten da, baina lurrinketa gainazalean gertatzen da, gainerantzeko fluidoaren tenperatura berean gelditzen delarik. Praktikan, beraz, bero-supereroale bezala agertzen da, hots, tenperatur desberdintasun txikirik gertatuz gero ere, beroa berehala hedatzen da likidoan zehar. Horregatik lokalki berotzea edo hoztea ia ezinezkoa da. Beraz, likidoaren barnean ezin da tenperatur desberdintasunik sortu.

Helio superfluidoan zehar beroa nola hedatzen den jakiteko, ondorengo espe-



Helio superfluido bultzatzen duen ontzi baten barrura sartu eta laster, mahai gainean zehar sakabanatuta ikusten da, ontzia pitzatua balego bezala.

Kristalezko ontzia edo metalikoa erabiltzekotan, helio superfluido hormaren barruko azalean gora igotzen da, eta ontziaren ertzerantz heldutakoan, hormaren kanpoko azaletik jaisten da, pixkanaka-pixkanaka ontzia hustu eta superfluido mahai gainean sakabanatzen delarik.

rimentua asmatu zen: helio superfluido banoan baten ontzi porodun eta lepo estuduna sartzen bada, helio superfluido poroetatik sartzen da ontzira, kanpoko eta barruko altuera berean daudenean sartzeko-prozesua amaitutzat ematen delarik. Ondoren erresistentzia elektriko batez ontziaren barruko bero-tuko bagenu, ontzia inguratzen duen superfluido horman zehar sartuko litzateke, barruko hotsu eta tenperatura oreka mantentzeko. Ontzira sartzen den helio-kantitatearen ondorioz, ontziaren lepotik helio-zirristada handia irteten da masa-desberdintasuna ezabatuz.

Ikerlariek esperimentu hau berregin dute, erresistentzia elektriko baten bidezko bapateko beroaldi laburrak sortuz. Beroaldi hauen ondorioz beroa uhinen antzera hedatzen da masa liki-

doan zehar. Uhin hauei oihartzun sekundario deritze. Beroa hedatzeko era hau, ez da beste inongo materi egoeratan betetzen.

## ONDORIO GISA \_\_\_\_\_

Besteak beste,  $^4\text{He}$ -arekin burututako esperimentu guztiak  $^3\text{He}$ -arekin ere egin litezke, baina tenperatura hotzagotan lan egin beharko litzateke; 0,001K tenperaturaren inguruan hain zuzen.  $^3\text{He}$ -ak oso propietate harrigarriak agertzen ditu: presio jakin batzuen eraginpean solidotua izan daiteke, baina ez hoztuz; berotuz baizik. Gainera  $^3\text{He}$  superfluido magnetikoa da, burdina edo nikela bezala, eta burututako esperimentuek bi mota daudela frogatzen dute: 3A eta 3B. 3A Helioak (imantazio handiagoa dauka)

duen dentsitatea kalkulatzeko oso zaila da, aldakorra delako. Superfluido zeharkatzen duen eremu magnetikoaren arabera aldatzen da dentsitatea.

Amaitzeko, egoera superfluido zeharo interesatzen zaie astronomoei; neutroizko izarren jokabidea esplikatzen bait die. Berauetan neutroi-geruza bat dago eta ez da ez solidoa, ez likidoa eta ezta gaseoso ere; superfluido baizik. Hortaz, laborategi krioskopikoetan burutzen ari diren ikerlanek, materiak inolako eraginik jasaten ez duen zeru aldera garamatzate. ■

