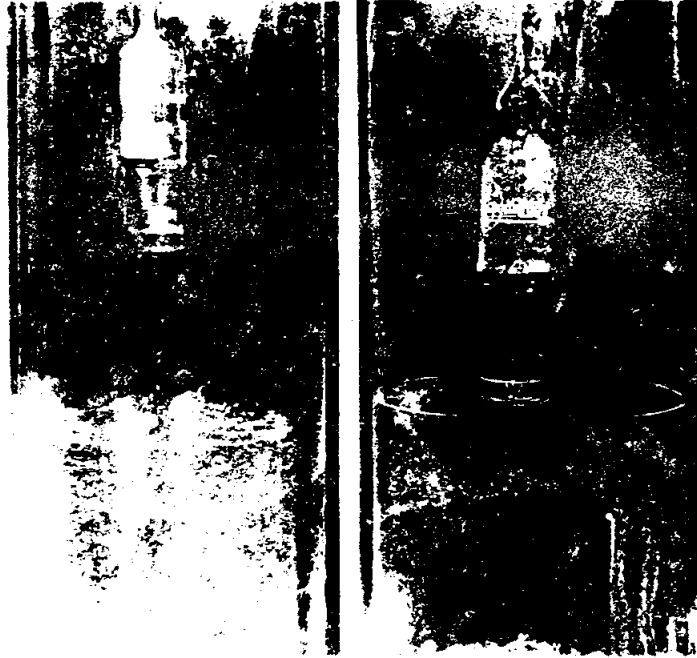


11 สภาพไหลยวดยิ่ง

เมื่อระลอกย่อนหลังไปจะดูเหมือนไม่น่าเป็นไปได้ที่เคียวว่า เวลาจะล่วงเลยไปถึงสามสิบปีระหว่างการทำให้ซีเลียมเหลวได้เป็นครั้งแรกไปสู่การค้นพบคุณสมบัติที่มหัศจรรย์ที่สุด นั่นคือ สภาพไหลยวดยิ่ง ในช่วงสามสิบปีนั้นการทดลองกับซีเลียมเหลวได้กระทำกันไปหลายพันเรื่องในห้องปฏิบัติการต่างๆทั่วโลก และในหลายการทดลองจะต้องได้ดูการเปลี่ยนแปลงลักษณะในของเหลวนั้นอย่างใหญ่หลวง ซึ่งเกิดขึ้นขณะที่ลดอุณหภูมิลงอีก จากเหตุผลทุกประการจึงเชื่อได้ว่าคาเมอร์ลิงห์ ออนเนสได้เห็นแล้วเช่นกันในวันที่น่าจดจำเมื่อ 10 กรกฎาคม ค.ศ. 1908 แต่ต่อมาอีกเกือบสี่ทศวรรษเมื่อในที่สุดมีกเลนัน, สมิตและวิลเฮล์มในโครอนโตได้กล่าวถึงเรื่องนี้ออกมาเป็นลายลักษณ์อักษร บรรดาบุคคลเหล่านี้ยังล้มเหลวในการหาข้อสรุปที่ชัดเจน โดยอธิบายการเคี้ยวของซีเลียมเหลวภายใต้ความดันที่ลดต่ำลง ขณะที่อุณหภูมิลดลงไปถึงในช่วงที่ความหนาแน่นสูงสุด ซึ่งค้นพบโดยออนเนสนั้น เขาเหล่านี้กล่าวว่า "...ลักษณะที่ปรากฏในของเหลวเกิดการเปลี่ยนแปลงตามที่ได้หมายไว้และการเป็นฟองเคี้ยวเหล่านั้นหยุดลงในทันใดจนของเหลวนี้กลับนิ่งสนิท..." (รูปที่ 11.1) เช่นเดียวกันกับในกรณีสภาพนำยวดยิ่งอีกครั้งหนึ่งที่ยิ่งใหญ่ของการค้นพบเป็นอุปสรรคต่อการผลิต การลงความเห็นที่ถูกต้องน่าจะสามารถกระทำได้โดยนักศึกษาศิลิสิกส์ชั้นปีที่หนึ่งแต่ที่นักฟิสิกส์อาวุโสและมีประสบการณ์กล้าออกความเห็นอย่างจริงจังก็คือว่า การนำความร้อนในของเหลวนั้นได้เพิ่มขึ้นล้านเท่าอย่างกระหึ่มหัน แม้กระนั้นนั่นก็คือสิ่งที่เกิดขึ้นอย่างแท้จริง

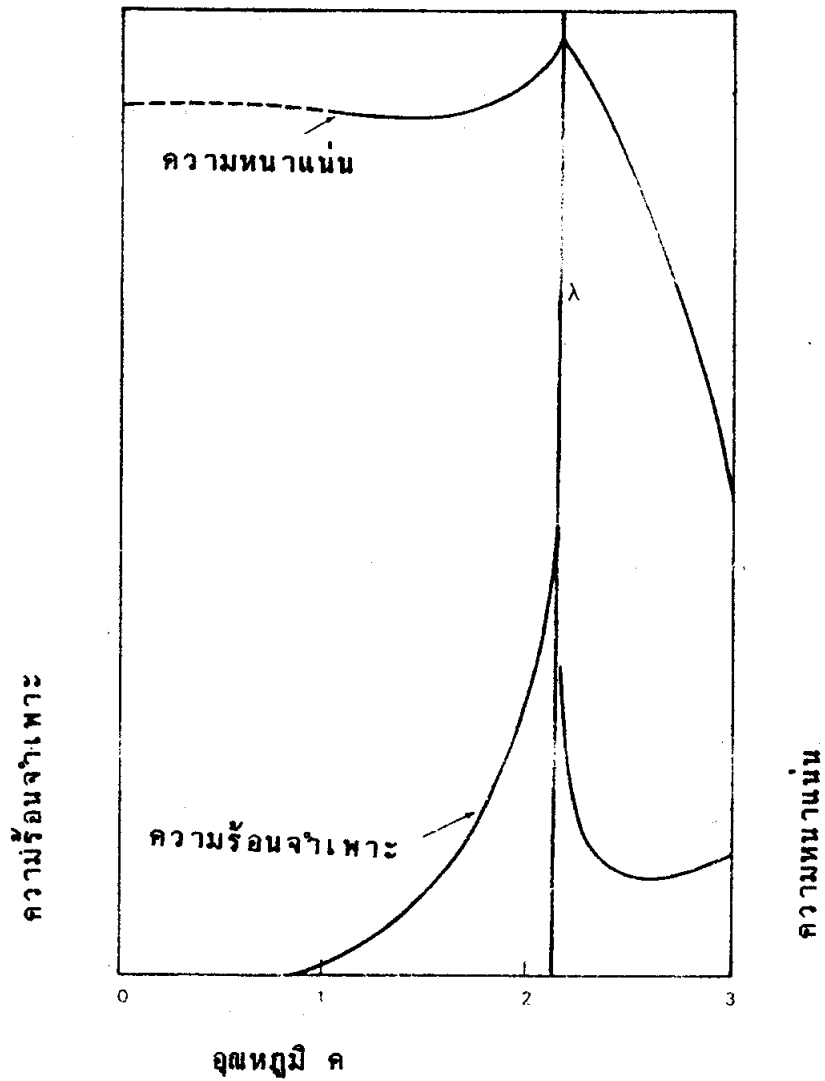
ขอให้เราย้อนกลับไปสักชั่วขณะหนึ่งสู่การทดลองต่างๆของคานาและออนเนสในปี ค.ศ. 1924 ซึ่งเราได้กล่าวถึงในบทที่ 4 ระดับอุณหภูมิที่ต่ำกว่าระดับอุณหภูมิของความหนาแน่นสูงสุดที่ 2.2 ค ลงไปพอที่ บุคคลทั้งสองนี้ได้พบว่าค่าต่างๆของความร้อนจำเพาะสูง

11.1 ซีเลียมเทลลูไรด์(ซีลาย)เหนือและ(ชาว)ใต้จุดแลมดา
การเค็ดคหยุดลงและซีเลียมเทลลูไรด์บึงทะเลสกัดออกมาผ่าน
รอยพรุนเล็กทางเป็องล่างของภาชนะที่แขวนเหนืออ่าง
ซีเลียม



มากจนทั้งสองไม่กล้าที่จะพิมพ์เผยแพร่ค่าเหล่านี้ออกไป เขาทั้งสองรู้สึกเชื่อมั่นว่าเครื่องวัด
ของเขามีข้อบกพร่องบางประการ คานาได้กลับไปอเมริกาและต่อมาอนเนสก็ถึงแก่กรรม
หลังจากนั้นไม่นาน เวลาผ่านไปอีกหกปีก่อนที่ผู้สืบทอดต่อจากเขาคือ วิลเลม เฮนดริก ก็เชื่อม
กับชาวเยอรมันผู้ได้รับเชิญมาร่วมงานชื่อ คลอส เคลาซิอุสจะได้ชำระปัญหาของความร้อนจำ
เพาะสำหรับซีเลียมเทลลูไรด์ ในจดหมายเหตุฉบับที่ 219 อี จากห้องปฏิบัติการไลเดนเขาทั้งสอง
ได้พิมพ์เผยแพร่ผลการทดลองของเขาซึ่งแสดงถึงความผิดพลาดอย่างใหญ่หลวงในความร้อนจำ

11.2 ที่จุดแลมดาความหนาแน่นและความร้อน-
จำเพาะของฮีเลียมเหลวมีค่าสูงสุด

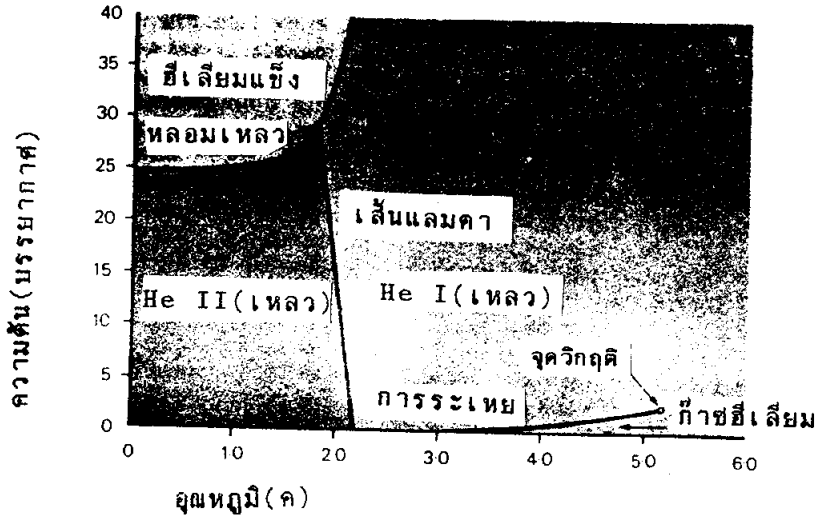


เพาะ เนื่องจากเส้นโค้งนี้คล้ายกับลักษณะของอักษรกรีก จึงเป็นที่รู้จักกันในชื่อว่า จุดแลมดา จุดสูงสุดนี้สำหรับความร้อนจำเพาะเกิดขึ้นที่ระดับอุณหภูมิเดียวกันอย่างแท้จริงกับค่าสูงสุดของความหนาแน่น (รูปที่ 11.2)

คือขอมตระหนักในหัตถ์นั้นเองว่า เรื่องนี้จะต้องแสดงนัยของการเปลี่ยนแปลงเบื้องต้นบางประการสำหรับธรรมชาติของสารนี้ และเข้าใจว่าหลายคนก็คงสงสัยว่าฮีเลียมมีจุดร่วมสามด้วยและสงสัยว่าตามความเป็นจริงแล้วสถานะที่ต่ำกว่า 2.2 ค อาจจะเป็นลักษณะอย่างผลึก แต่ยอมรับว่าสารนี้เคลื่อนไหวได้ อย่างไรก็ตามก็จากตัวอย่างซึ่งทราบกันแล้วก็มีกรณีที่ระนาบของผลึกราบเรียบเสียหายให้เลื่อนไหลไปได้อย่างต่อเนื่อง จึงมีลักษณะของสภาพเคลื่อนที่ ทั้งสองโต้แย้งว่าเนื่องจากฮีเลียมเหลวมีจุดเดือดต่ำจึงต้องมีความบริสุทธิ์อย่างแท้จริงและเรื่องนี้อาจเป็นกรณีสุดขีดของ "ผลึกเหลว" นั่นเอง คำอธิบายนี้นับว่าโอ้อ่าสมภาคภูมิและน่าทึ่ง แต่กลับปรากฏว่าไม่ถูกต้อง เพราะถ้าหากเป็นแบบอย่างปกติของแลตทิซผลึกทั่วไปจะต้องแสดงผลได้ตามแบบอย่างปกติของรังสีเอ็กซ์ที่ถูกทำให้เลี้ยวเบนไป แต่หลังจากนั้นมาอีกไม่กี่ปีเมื่อหาโคโนสในไลเดนค้นหายีเลียมที่ต่ำกว่าจุดแลมดาไปทดลองฉายด้วยรังสีเอ็กซ์ ปรากฏว่าไม่ใช่แบบอย่างเช่นนั้นจึงต้องยอมรับว่าที่ระดับต่ำกว่าและสูงกว่าอุณหภูมินี้สารนี้เป็นของเหลว แต่เป็นของเหลวที่ผ่านการเปลี่ยนแปลงบางประการอย่างลึกลับที่ 2.2 ค การเปลี่ยนแปลงนี้คืออะไรที่ขอมก็ไม่สามารถชี้แจงได้ แต่เท่าที่เขาส่งการกระทำได้คือ การระบุความแตกต่างระหว่างรูปแบบทั้งสองของฮีเลียมเหลว นั่นคือ ที่เหนือกว่าและต่ำกว่าจุดแลมดา โดยเขาเรียกแบบแรกว่าเป็น He I และแบบหลังว่า He II นับเป็นชื่อซึ่งยังคงใช้กันอยู่จนทราบเท่าทุกวันนี้และเราจะใช้ต่อไปในที่นี้ด้วย นอกจากนี้ยังหมายความอีกด้วยว่าแผนภาพสำหรับสถานะของฮีเลียมไม่เหมือนกับของสารอื่นใดโดยที่ไม่มีจุดร่วมสาม เพราะเส้นหลอมเหลวไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่ความดัน 25 บรรยากาศอีกต่อไป (รูปที่ 11.3) ด้วยเหตุนี้ความร้อนแฝงของการ

11.3 แผนภาพสำหรับสถานะของฮีเลียม

แสดงเส้นแลมดาซึ่งแบ่งแยก He I กับ He II



หลอมเหลวจึงสูญหายไป และขณะที่เข้าใกล้ศูนย์สัมบูรณ์การหลอมเหลวจึงกลายเป็นกระบวนการเชิงกลเท่านั้น ซึ่งสามารถทำให้เกิดขึ้นได้โดยการเปลี่ยนแปลงความดัน สถานะของเหลวยังคงปรากฏอยู่ต่อไปถึงอุณหภูมิศูนย์และถูกแบ่งเป็นสองภาคคือ He I และ He II

ข้อสังเกตต่างๆของคณะผู้ร่วมดำเนินงานในโตรอนโตตั้งยกมากล่าวข้างต้นจึงกระทำได้ด้วยการอ้างถึงรูปแบบสำหรับของเหลวทั้งสองนี้ และภายใต้ภาวะเหล่านี้ดูเหมือนยิ่งแปลกประหลาดมากขึ้น โดยที่ไม่มีบุคคลเหล่านี้หรือผู้อื่นคนน่าจะได้ตระหนักถึงนัยสำคัญของข้อสังเกตนี้ ชั่วร้ายยิ่งกว่านั้นในอีกสามปีต่อมาคือยอมไม่เพียงแต่ได้ค้นพบเงื่อนงำที่เป็นไปได้ อย่างแน่นอนแห่งที่สุดสำหรับการคลี่คลายความสับสนที่โตรอนโตเท่านั้นแต่เขายังได้พิมพ์เผยแพร่เรื่องนี้ออกไป แต่ในเวลานั้นทั้งเขาและบุคคลอื่นๆอีกทุกคนกลับผ่านข้ามเรื่องนี้ไปเสียได้คือยอมได้วัดความร้อนจำเพาะซ้ำอีกโดยร่วมมือกับลูกสาวของเขาชื่อ แอนนา

เปโตรเนลลาทำให้ความแม่นยำมากขึ้น เมื่อผ่านจุดแลมดาไปบุคคลทั้งสองได้สังเกตเห็นว่า ลักษณะเฉพาะของข้อมูลของเขาเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างกระตั้นหัน ซึ่งเขาทั้งสองอธิบายได้อย่างถูกต้องว่าเป็นการเพิ่มขึ้นของการนำความร้อน อย่างไรก็ตาม ไม่มีใครตระหนักถึงความเกี่ยวข้องกับข้อสังเกตของมิกเลนตินและผู้ร่วมงานของเขา การดำเนินงานขั้นต่อไปของสองพ่อลูกตระกูลชอมคือ การหาค่าอย่างเหมาะสมสำหรับการนำความร้อนของ He II สองได้สร้างอุปกรณ์ตามแบบอย่างที่เคยใช้กันมาแต่เดิมซึ่งเหมาะสมสำหรับตัวนำชนิดเลว เมื่ออุปกรณ์นี้ไม่ได้ผลจึงทราบว่า การนำความร้อนของ He II จะต้องมีความสูงมาก

น่าสังเกตว่าความคิดเห็นในเรื่องการนำความร้อนของฮีเลียมเหลวมีค่าสูงมากนั้น เพิ่งจะเกิดขึ้นเมื่อหลักเสียงไม่ได้แล้วเท่านั้น เรื่องที่ว่าของเหลวไดอิเล็กทริกจะกลับกลายเป็นตัวนำความร้อนที่ต่ำกว่าทองแดงหรือเงินนั้นไม่อาจเข้าใจกันได้เลยหากจะอาศัยแต่เพียงปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ทั้งหลายที่รู้จักกันแล้ว ต่อเมื่อต้องยอมรับความจริงนี้เสียก่อนแล้วเท่านั้น จึงกระจ่างชัดว่าช่องทางไปสู่การค้นพบใหม่มาได้ถูกเปิดออกแล้ว ขั้นตอนหนึ่งที่ได้บรรลุแล้วนี้คล้ายกับการปรากฏรีแวนควิ่งแรกของสภาพนำยวดยิ่ง เว้นเสียแต่ว่าคราวนี้ห้องปฏิบัติการหลายแห่งซึ่งมีประสบการณ์ที่อุดมมิตำได้ก้าวเข้าไปผจญกับส่วนที่โลเคนได้เคยเข้าไปแต่เพียงลำพังในแขนงนี้มาก่อน ดังนั้นในอีกไม่กี่ปีต่อมาจึงมีงานวิจัยท่วมท้นอย่างแท้จริง จนถึงปี ค.ศ. 1936 ขณะที่การค้นพบใหม่ดำเนินไปอยู่นั้น ความก้าวหน้าของงานวิจัยต้องหยุดลงเนื่องจากข่าวสารจากเยอรมันนี้ทำให้วุ่นวาย เงามของสงครามเริ่มขึ้น ราวๆทั่วทั้งยุโรป ดังนั้น งานวิจัยทางวิทยาศาสตร์จึงกลายเป็นการแข่งขันกับเวลา ในระยะไม่ถึงสองปีได้ค้นพบคุณสมบัติส่วนใหญ่ที่น่าประหลาดของ He II และได้สร้างตัวแบบที่เป็นประโยชน์ซึ่งสามารถอธิบายปรากฏการณ์เหล่านี้ได้ทั้งหมด ผลทั้งปวงนี้ทั้งทางการทดลองและทางทฤษฎีได้ถูกบันทึกไว้อย่างจริงจังในวารสาร "ธรรมชาติ" ฉบับที่ 141 ซึ่งมีชื่อเสียง สำหรับใครที่ไม่อยู่ในวงการแข่งขันนี้ในขณะที่หลักฐานต่างๆซ้อนกันอยู่ก็จะมีโอกาส

งวงวยอย่างหือแท้ อย่างไรก็ตาม ไม่มีอะไรสามารถทำให้ไขว้เขวได้มากยิ่งกว่านี้อีกแล้ว การค้นคว้าปัญหานี้ นับว่าเป็นตัวอย่างหนึ่งที่ยอดเยี่ยมของความร่วมมือทางวิทยาศาสตร์อย่างดีที่สุด ทั้งๆที่มีการแข่งขันอย่างดุเดือดระหว่างห้องปฏิบัติการต่างๆ แต่นักวิทยาศาสตร์เหล่านี้ก็ได้แจ้งถึงความก้าวหน้าที่ได้รับแก่กันและกันอย่างหมดสิ้นอยู่ตลอดเวลา ทั้งทางโทรศัพท์และจากการพบปะเป็นการส่วนตัวบ่อยครั้ง ทั้งนี้ได้มีการถกเถียงกันเพื่อค้นหาความสมเหตุสมผลของกรรมวิธีของแต่ละคนอย่างรุนแรง แต่ด้วยการวิจาร์ณเชิงสร้างสรรค์มากกว่า

การค้นคว้าครั้งแรกซึ่งนำไปสู่การค้นพบใหม่นี้ นับว่าเป็นเรื่องไม่รู้ตัวพอสมควร ฮัลเลน เบียร์ลิส และ ฮัคคินในเคมบริดจ์ได้ค้นพบกรรมวิธีซึ่งง่ายอย่างหลักแหลมสำหรับทดลองซ้ำการวัดสภาพนำความร้อนที่ไลเคน ทำให้ได้ความแม่นยำมากยิ่งขึ้น ในขณะที่สองท่อถูกตรึงด้วยข้อมมิได้ใช้หลอดยาวบรรจุฮีเลียมเหลว และบันทึกอุณหภูมิที่ลดลงตลอดตลอดนี้ด้วยเทอร์มอมิเตอร์ไฟฟ้า แต่การจับอุปกรณ์ที่เคมบริดจ์(รูปที่ 11.4ก)มีเพียงกระเปาะแก้วซึ่งต่อกับอ่างฮีเลียมเหลวผ่านทางท่อด้านล่างเท่านั้น กระเปาะนี้มีเครื่องทำความร้อนด้วยไฟฟ้าและเมื่อเปิดสวิตช์จะทำให้ความร้อนผ่านฮีเลียมในท่อไปสู่อ่าง ความแตกต่างของอุณหภูมิที่ปลายทั้งสองของท่อจะบ่งชี้ได้โดยความแตกต่างของความดันไอสำหรับของเหลวในกระเปาะกับในอ่างนั้น ทั้งนี้สามารถสังเกตได้โดยง่ายจากความต่างระดับ โดยที่น้ำหนักของฮีเลียมเหลวในท่อซึ่งสมนัยกันจะเท่ากับความแตกต่างของความดันไอ

เมื่อใช้อุปกรณ์อย่างง่ายแต่มีความไวมากเช่นนี้ คณะผู้ร่วมงานที่เคมบริดจ์ไม่เพียงแต่สามารถยืนยันการถ่ายเทความร้อนอย่างสูงที่ได้พบในไลเคนเท่านั้น แต่ยังได้ค้นพบความจริงที่สำคัญเพิ่มขึ้นประการหนึ่ง โดยที่ไม่เหมือนกับกระบวนการนำความร้อนปกติใดๆ เนื่องจากการไหลของความร้อนผ่าน He II ไม่แปรโดยตรงกับความแตกต่างของอุณหภูมิ ตามความเป็นจริงแล้วการทำให้ความแตกต่างนี้ลดลงยิ่งขึ้นเท่าใด "สภาพนำ" จะยิ่งมากขึ้นจนเกินกว่าค่าของ He I หลายล้านเท่า นับเป็นการค้นพบที่สำคัญซึ่งถ้าหากดำเนินการติด

ตามเรื่องนี้ต่อไปในเวลานั้นอาจจะนำไปสู่การค้นคว้าต่างๆ แทนที่จะเหิงคาเป็นการต่อหลังจากเวลาผ่านไปอีกกว่าสิบปีต่อมา ในที่สุดปรากฏว่าผลการทดลองที่ได้นั้นถูกต้องทีเดียว แต่หลังจากการพิมพ์เผยแพร่ผลนี้ไม่นานนักผู้รายงานเองได้ซึกถึงผลนี้ว่ายังน่าเคลือบแคลงอยู่สิ่งที่ไม่คาดฝันแต่อย่างใดได้เกิดขึ้นเสียแล้ว

น่าสังเกตว่าการขยายการวัดลงไปยังกรณีที่อุณหภูมิแตกต่างกันน้อยลงยิ่งขึ้นๆทุกที่จะทำให้ช่องว่างระหว่างระดับผิวของเหลวไม่เพียงแต่ลดลงเท่านั้น แต่ยังคงกลับเครื่องหมายของมันด้วย หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า ระดับภายในกระเปาะสูงขึ้นเล็กน้อยเหนือระดับอ่างภายนอกกระเปาะ เมื่อถือว่ากรณีนี้ยังเป็นความแตกต่างของความดันไอก็น่าจะหมายความว่า ของเหลวที่ร้อนขึ้นภายในกระเปาะได้เย็นลง จึงนับว่าเรื่องนี้เหลวไหลอย่างชัดเจนขึ้นต่อไปจึงจำต้องศึกษาค้นบนของกระเปาะที่เปิดโล่ง โดยวิธีนี้เท่ากับเป็นการทำซ้ำการทดลองภายใต้ภาวะซึ่งความดันไอเหนือทั้งสองระดับเท่ากัน ผลการทดลองนี้น่าพิศวงโดยเมื่อร้อนขึ้นนั้นระดับภายในได้สูงขึ้นอีก(รูปที่ 11.4ข) จึงได้ค้นพบปรากฏการณ์ใหม่อย่างยิ่ง ซึ่งเกิดขึ้นโดยเฉพาะกับ He II เท่านั้น แต่ไม่เกิดกับของเหลวอื่นใด นั่นคือ เมื่อป้อนความร้อนเข้าไปจะทำให้การไหลของของเหลวเกิดขึ้นในทิศทางไปสู่แหล่งความร้อน

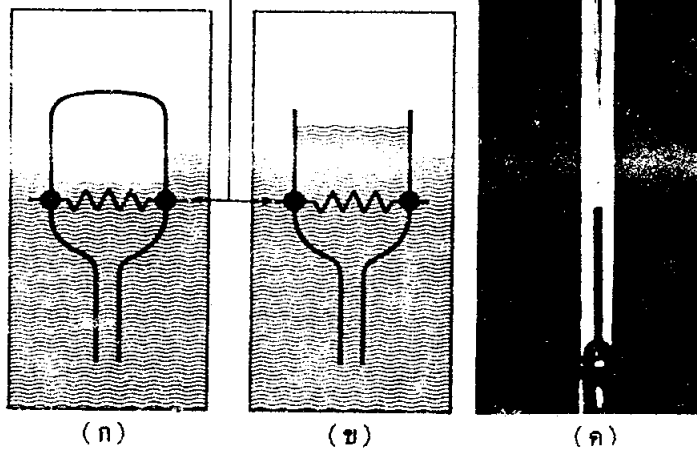
ในไม่ช้าจึงสังเกตกันได้ว่า ความต่างระดับเพิ่มขึ้นเมื่อทำให้ท่อที่เชื่อมต่อกับกระเปาะกับอ่างแคบลง ในที่สุดได้ใช้ช่องแคบที่เล็กลงอย่างมากจำนวนหลายช่อง โดยยึดท่อด้วยผงฝุ่นเพื่อให้ของเหลวต้องไหลแทรกผ่านระหว่างช่องว่างเล็กๆที่มีอยู่มากมาย ไม่เพียงแต่จะสามารถทำให้เกิดความต่างระดับอย่างใหญ่หลวงได้โดยวิธีนี้แล้วเท่านั้น เมื่อด้านบนของกระเปาะถูกดึงออกเหมือนกระบอกเข็มฉีดยายังทำให้เห็นลำพุ่งของฮีเลียมเหลวถูกขับดันออกมาจากกระเปาะอีกด้วย(รูปที่ 11.4ค) สิ่งนี้ปรากฏออกมาให้เห็นอย่างค่อนข้างมหัศจรรย์นี้จึงได้ชื่อว่า "ปรากฏการณ์น้ำหู" แต่เราจะอ้างถึงเรื่องนี้ด้วยคำที่เหมาะสมกว่าคือ "ปรากฏการณ์เชิงกลความร้อน" ซึ่งบ่งชี้ว่าเรากำลังเกี่ยวข้องกับกลศาสตร์ของมวลสาร นั้น

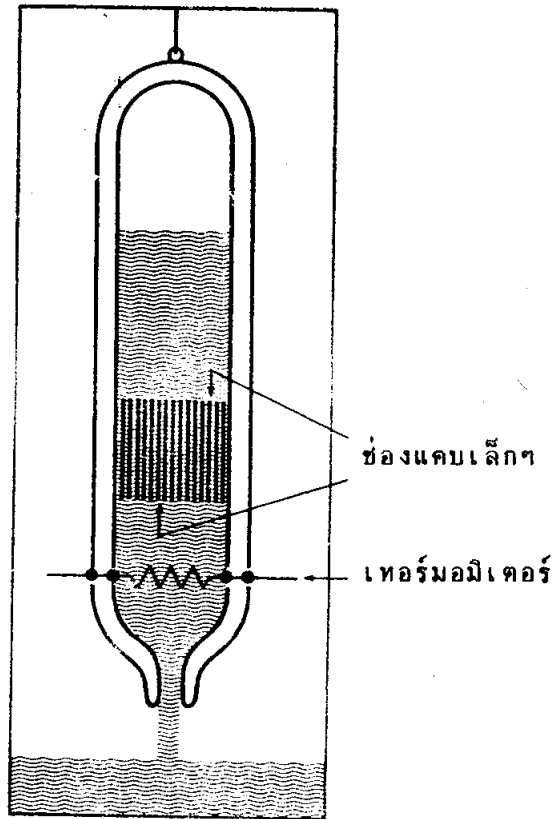
11.4 การค้นพบปรากฏการณ์เชิงกลความร้อน
(ก และ ข) และน้ำฟูซีเสียม(ค) ปรากฏ-
การณ์แคลอริกเชิงกล(ง)

คือ ของเหลวซึ่งเกิดจากความร้อน

เนื่องจากปรากฏอย่างแน่ชัดว่าปรากฏการณ์เชิงกลความร้อนต้องมีอิทธิพลต่อผลต่างๆของการวัดสภาพน้ำความร้อนเค็ม ดังนั้น ผลเหล่านี้จึงไม่สามารถเชื่อถือได้และช่วงเวลาสั้นดูเหมือนว่า การที่ไม่มีความสัมพันธ์เป็นสัดส่วนโดยตรงระหว่างกระแสความร้อนกับความแตกต่างของอุณหภูมิซึ่งได้ค้นพบในเคมบริดจ์ สืบเนื่องมาจากความบกพร่องดังกล่าว อย่างไรก็ตาม ข้อมูลชุดต่อไปของสภาพน้ำความร้อนซึ่งคราวนี้ได้จากไลเคนแสดงว่าผลของเคมบริดจ์ถูกต้องแล้ว

เครื่องทำความร้อน

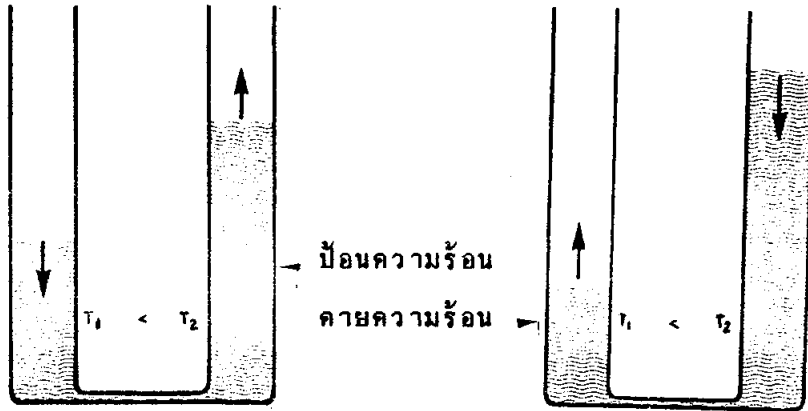




(ง)

สำหรับคำว่า "เชิงกลความร้อน" บ่งชี้ในทันทีถึงเครื่องยนต์ความร้อนและความเป็นไปได้ของการใช้สมการต่างๆทางอุณหพลศาสตร์ในเรื่องนี้ อันที่จริงกรณีนี้เอ็ช. ลอนดอน ได้ดำเนินการไปแล้วในปีต่อมา โดยสร้างความสัมพันธ์ระหว่างงานที่กระทำในการดันให้ฮีเลียมเหลวพุ่งขึ้นมาเป็น "น้ำพุ" กับความร้อนที่ค้องใช้ในการกระทำนี้ ระหว่างนี้รู้สึกว่าจะต้องพิจารณาว่ากรณีนี้จะสามารถผันกลับได้เหมือนกับเครื่องยนต์ความร้อนอื่นหรือไม่ อุปกรณ์นี้จึงถูกสร้างขึ้นที่ออกซ์ฟอร์ดซึ่งทำให้ He II ไหลผ่านช่องแคบชุดหนึ่งจากระดับที่สูงกว่าไปสู่ระดับที่ต่ำกว่า โดยได้สร้างท่อระบายนี้ให้มีผนังสองชั้นเหมือนกับภาชนะของดูวาร์

11.5 การแสดงด้วยแผนภาพสำหรับปรากฏการณ์
เชิงกลความร้อน(ซ้าย) และ ปรากฏการณ์แคลอ-
ริกเชิงกล(ขวา)



เพื่อป้องกันความร้อนที่หลงทะลักเข้ามา (รูปที่ 11.4 ง) และนำเทอร์มอมิเตอร์ที่ไวมากมา
ติดตั้งไว้ที่ทางไหลออกจากช่องแคบเล็กๆ เมื่อทำให้ He II ไหลผ่านท่อนี้ไปปรากฏว่าของ
เหลวที่ไหลออกมามีอุณหภูมิลดลงอีก ดังนั้น "ปรากฏการณ์แคลอริกเชิงกล" นี้จึงเป็นการผัน
กลับอย่างแท้จริงของปรากฏการณ์เชิงกลความร้อน ซึ่งมีผู้สังเกตได้ในเคมบริดจ์ ความสัม
พันธ์ของกรณีเหล่านี้จะสำคัญได้ดียิ่งที่สุดโดยการแสดงด้วยแผนภาพ (รูปที่ 11.5) ของภาชนะ
บรรจุ He II สองใบ ซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยท่อแคบ แผนภาพนี้แสดงให้เห็นในทันทีว่ามีความ
เกี่ยวข้องกันที่เป็นไปได้แบบเดียวกันและผันกลับได้ระหว่างการไหลของมวลสารกับการไหล
ของความร้อน โดยทั้งหมดนี้เกิดขึ้นในทิศทางตรงกันข้าม

สิ่งที่น่าประหลาดใจเท่ากับปรากฏการณ์เชิงกลความร้อนใน He II ก็คือ เรื่องนี้ไม่

ได้รับความสนใจอย่างเต็มที่แต่อย่างใดจากบุคคลต่างๆซึ่งทำงานในด้านนี้ นอกจากนี้ ยังมีอีกเหตุการณ์หนึ่งที่แปลกประหลาดเกิดขึ้นระหว่างการวัดสภาพความร้อนที่เคมบริดจ์กับการสังเกตเห็นปรากฏการณ์เชิงกลความร้อน นั่นคือ การค้นพบสภาพไหลยวดยิ่ง

ห้องปฏิบัติการหลายแห่งสังเกตได้ว่าภาชนะบรรจุฮีเลียมเหลวซึ่งผนึกไว้ไม่แน่นอนหาอย่างแท้จริง ดังนั้นที่ระดับต่ำกว่าจุดแลมดามากจึงรั่วซึมได้มากเสียยิ่งกว่าที่ระดับสูงกว่าจุดแลมดามาก บางครั้งอุปกรณ์ที่ดูเหมือนแน่นอนหาอย่างยิ่งเหนือ 2.2 ค อาจจะมีรั่วออกมาอย่างมากในทันทีที่เย็นลงและทำให้ใช้การไม่ได้ สองห้องถูกตรึงที่ข้อมซึ่งประสบความสำเร็จจากการวัดความร้อนจำเพาะที่ทำให้หุ่นเครื่องนี้แล้ว จึงเสนอความเห็นว่าคุณสมบัติของ He II อาจจะต่ำกว่าของ He I หลังจากนั้นไม่นานการวัดปริมาณนี้โดยตรงได้กระทำสองครั้ง โดยครั้งหนึ่งในโตรอนโตและอีกครั้งหนึ่งในไลเคน ซึ่งแม้จะมีความแตกต่างกันในรายละเอียดของผลการทดลองทั้งสองแห่ง แต่การวัดทั้งสองครั้งได้แสดงว่าคุณสมบัติที่ต่ำกว่าจุดแลมดา การลดลงซึ่งสังเกตได้นี้มากพอควรแต่ไม่มีอะไรที่จะนำไปเปรียบเทียบกับการนำความร้อนซึ่งเพิ่มขึ้นอย่างมหาศาล ในการวัดทั้งสองครั้งนี้ได้วัดความเสียหายภายในจากการหน่วงให้การเคลื่อนที่ของกระบอกหรือจานซึ่งแกว่งกวัดอยู่ในของเหลวช้าลง

ต่อมาในต้นปีค.ศ. 1938 วารสาร *Nature* ได้พิมพ์เผยแพร่บทความสองเรื่องคู่กัน เรื่องหนึ่งโดยคามิทซาวาในมอสโคว์ และอีกเรื่องหนึ่งโดยแอลเลน และ ไมเซนเนอร์ ในเคมบริดจ์ ทั้งสองเรื่องนี้บรรยายถึงการทดลองหาความหนืด ซึ่งได้วัดความเสียหายในของเหลวจากการไหลผ่านรูเล็กหรือผ่านช่องสลิตแคบระหว่างแผ่นบาง ปรากฏว่าผลการทดลองตรงกันนั่นคือ การไหลในของเหลวนี้เกือบจะไม่มีความหนืดทำให้ความต้านทานลดลงเมื่อปากทางที่ต้องผ่านไปยังแคบลงทุกที คามิทซาวาจึงเสนอคำ "สภาพไหลยวดยิ่ง" สำหรับปรากฏการณ์ใหม่นี้ (ดูรูปที่ 11.1)

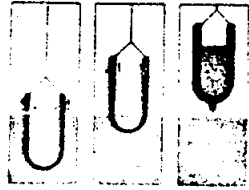
แม้ว่าสภาพไหลยวดยิ่งจะเป็นคุณสมบัติที่แปลกประหลาดและคาดไม่ถึงของ He II แต่แสดงความคล้ายเคียงกันอย่างเด่นชัดกับสภาพนำความร้อนสูง ในแง่ที่ขนาดของสภาพไหลยวดยิ่งนี้ขึ้นอยู่กับภาวะของการทดลอง ขณะที่การทดลองแกว่งกวัดทำให้ความหนืดลดลงที่ต่ำกว่าจุดแลมดาประมาณหนึ่งในสิบของค่าเดิม แต่ปรากฏว่าในช่วงสลิทลดลงถึงขนาดหนึ่งในล้าน ยิ่งกว่านั้นดูราวกับว่าความหลากหลายอย่างน่างงงวยและความซับซ้อนของปรากฏการณ์ใหม่ ๆ ใน He II เท่านั้นยังไม่เพียงพอ ต่อมาอีกไม่ช้าจึงยังคงมีอีกกรณีหนึ่งเพิ่มขึ้นในรายการนี้

ตั้งแต่เมื่อปี ค.ศ. 1922 นั้นเองระหว่างที่คาเมอร์ลิงห์ ออนเนสได้ใช้ความพยายามหลายครั้งที่จะบรรลุถึงอุณหภูมิต่ำมากๆ จึงทำให้เขาได้สังเกตเห็นอยู่ครั้งหนึ่งที่ของเหลวในภาชนะดูวาร์ที่ซ้อนกันอยู่สองใบปรับระดับตัวเองให้สูงเสมอกัน ซึ่งเขาพูดถึงเหตุการณ์นี้ว่าเป็นการกลั่นจากใบหนึ่งไปสู่อีกใบหนึ่ง เขาได้บรรยายถึงการสังเกตของเขาอย่างสั้นๆ แต่ไม่ได้ให้ข้อสังเกตเพิ่มเติม แน่ใจว่าข้าพเจ้าไม่ได้สงสัยในความเกี่ยวของใดๆ ที่มีต่อเรื่องนี้ จนกระทั่งอีกสิบปีต่อมาเมื่อได้รับความเสียหายในการวัดปริมาณความร้อนจากชั้นของฮีเลียม ซึ่งเกิดขึ้นอย่างชัดเจนบนผิวของแข็ง แต่รถลลินในออกซ์ฟอร์ดก็เคยประสบกับความยุ่งยากคล้ายกันนี้มาแล้วใน ค.ศ. 1936 เช่นเดียวกับคาเมอร์ลิงห์ ออนเนสที่ได้พยายามบรรลุอุณหภูมิต่ำโดยการสูบล้อฮีเลียมเหลวออก เขาได้ให้ข้อสรุปว่าเกิดผาบางๆ ตามผนังอุปกรณ์ของเขา และเนื่องจากเพิ่งได้ค้นพบการนำความร้อนสูงของ He II เขาจึงอ้างว่าความยุ่งยากที่เกิดกับโคร โอสดีทของเขา มาจากความร้อนไหลเข้ามาตามแผ่นผาบางนั้น อีกสองปีต่อมามีลาซารอฟในคาร์คอฟได้ค้นพบข้อสรุปอย่างเดียวกันนี้

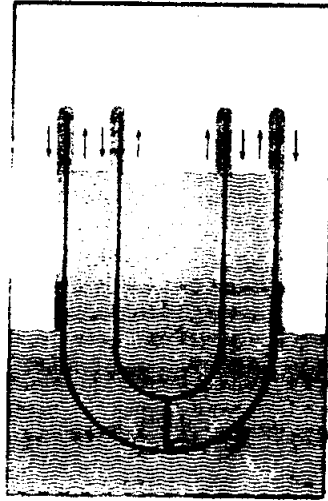
ในเวลาเกือบจะไล่เลี่ยกันขณะที่คราวนี้เป็น ค.ศ. 1938 นักศึกษาและวิจัยผู้หนึ่งชื่อ เจ. ซี. ควนซ์ และข้าพเจ้าต้องการจะดูว่าการทดลองการกลั่นของออนเนสที่ละเลยกันมานานแล้วจะสามารถทำซ้ำได้อีกหรือไม่ เราจึงบรรจุ He II ไว้ในระดับต่างกันลงในกระเปาะแก้วสองใบ ซึ่งมีท่อเชื่อมต่อด้านบนเข้าไว้ด้วย ปรากฏว่าไม่มีเหตุการณ์ใดๆ เกิดขึ้น



11.6 การถ่ายเทแผ่นบางใน He II (ก) และ
การนำมาใช้เพื่ออธิบายความเสียหายเป็นศูนย์(ข)



(ก)



(ข)

แต่ขณะที่เรากำลังจะเลิกทำการทดลองนี้หลังจากกว่าครึ่งชั่วโมงได้ผ่านไปแล้ว เราจึงสังเกตเห็นได้ว่าระดับที่อยู่ต่ำกว่าได้เลื่อนสูงขึ้นมาสักสองสามมิลลิเมตร ต่อจากนั้น เราจึงเพิ่มผิวที่เชื่อมกันอยู่ระหว่างอ่างทั้งสองของ He II โดยนำเส้นลวดเล็ก ๆ จำนวนมากมาบรรจุลงไปในท่อ คราวนี้การถ่ายเทของเหลวระหว่างกระเปาะทั้งสองเพิ่มมากขึ้นจนเห็นได้ชัดเจน

ในทันใดนั้นดูเหมือนทุกสิ่งทุกอย่างจะเข้าสู่ปรอย เพราะปรากฏว่าไม่มีการกลับแต่ก็เสียกลับถูกถ่ายเทโดยอาศัยแผ่นบางที่อยู่บนผิวแทน ยิ่งไปกว่านั้น กรณีนี้ไม่ใช่สภาพนำความร้อนของแผ่นบางที่มีค่าสูง แต่เป็นการไหลอย่างแท้จริงของของเหลวไปตามแผ่นบาง

นั้น การไหลของความร้อนเข้าสู่โครโอสดีทก็ไม่ใช่ปรากฏการณ์สภาพนำความร้อน แต่เป็นการส่งแผ่นฮีเลียมบางขึ้นมาตามผนังของภาชนะ และเกิดการระเหยที่บริเวณด้านบนซึ่งร้อนกว่าอีกด้วย ส่วนหนึ่งของไอนี้จึงควบแน่นซ้ำอีกลงบนของเหลวพร้อมกับนำความร้อนของการกลายเป็นไอคิดตัวไว้อยู่ด้วย

เพื่อให้หมดความคลางแคลงในขั้นต่อไปจึงต้องแสดงการเกิดการถ่ายเทมวลสารดังกล่าวว่าเป็นไปได้จริง และกรณีนี้สามารถทำได้โดยง่ายด้วยการแขวนถ้วยแก้วใบเล็กไว้ในของเหลว (รูปที่ 11.6ก) ในไม่ช้าจะเห็นว่าถ้วยเล็กานี้เต็มไปด้วยของเหลวจนกระทั่งระดับภายในและภายนอกสูงเท่ากัน การไหลในทิศทางข้ามจะเกิดขึ้นเมื่อยกถ้วยนี้ขึ้นมาเล็กน้อยในที่สุดเมื่อถ้วยถูกยกออกไปจากของเหลวไปแล้วจะเห็นหยดเล็กาเกิดขึ้นด้านล่างของถ้วยและไหลกลับสู่อ่างเป็นระยะอย่างสม่ำเสมอ นอกเหนือไปจากภาพที่น่าตื่นตะลึงที่ศรัทธาแล้ว ความสม่ำเสมอนี้ก็ทำให้เรียกร้องความสนใจของเราด้วย เราจึงได้สังเกตอย่างแท้จริงว่าการทำให้ถ้วยว่างเปล่าและการเติมด้วยนั้นให้เติมเกิดขึ้นในอัตราเดียวกันเสมอ โดยไม่ขึ้นกับความต่างระดับหรือระยะทางหรือความสูงของขอบภาชนะเหนือผิวของเหลว

ขณะนี้เราตระหนักว่านับเป็นความโชคคี่ที่แผ่นฮีเลียมบางนั้นได้ให้ตัวอย่างที่สามารถจินตนาการได้อย่างชัดเจนที่สุดสำหรับสภาพไหลยวดยิ่งแก่เรา ในการวัดความหนาของแผ่นฮีเลียมบางเราพบว่าหนาเพียง 50-100 อะตอมเท่านั้น นับว่าบางมากกว่าช่องสลิตซึ่งแคบที่สุดหรือหลอดรูเล็กสุดที่เคยใช้กันมา ลักษณะเฉพาะของการไหลยวดยิ่งจึงเป็นการถ่ายเทได้โดยปราศจากความเสียดทานอย่างสิ้นเชิง ซึ่งเกิดขึ้น ณ "ความเร็ววิกฤติ" ที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเท่านั้นและหายไปที่จุดแลมดา ความคล้ายกันกับสภาพนำยวดยิ่งจึงชวนเชียวอย่างมากจนขึ้นนะให้ทดลองเปรียบเทียบ ซึ่งสามารถกระทำได้โดยง่ายด้วยถ้วยสองใบวางซ้อนกันอยู่โดยมีศูนย์กลางร่วมกัน (รูปที่ 11.6ข) เมื่อยกถ้วยสองชั้นนี้ออกจากของเหลวจะทำให้แผ่นฮีเลียมบางไหลจากใบในไปสู่อ่างฮีเลียมเหลว ปรากฏว่าไม่มีความต่าง

ระดับระหว่างถ้วยทั้งสอง ซึ่งหมายความว่าพลังงานศักย์ไม่แตกต่างกัน เรื่องนี้อุปมากันได้ เช่นเดียวกับการไม่มีศักย์ไฟฟ้าตามเส้นลวดตัวนำวดยิ่งที่เดียว น่าเสียดายที่การทำให้เกิดกระแสที่ไหลเรื่อยไปในฮีเลียมเหลวยุ่งยากกว่ามาก แต่การทดลองเมื่อไม่นานมานี้แสดงถึงความเป็นไปได้ของกรณีนี้อยู่อย่างแน่นอน

จากการค้นพบการถ่ายเทของแผ่นฮีเลียมบาง เราจึงมาถึงตอนท้ายของขบวนการสังเกตที่น่าตื่นตะลึง ซึ่งถูกขัดจังหวะเนื่องจากเกิดสงครามในปี ค.ศ. 1939 ยกเว้นงานค้นคว้าในมอสโคว์ซึ่งดำเนินต่อไปอีกสองปี ขอให้เราหันหลังให้กับความวุ่นวายที่ท่าแห่งงวงของการสังเกตเชิงการทดลอง ไปสู่ความพยายามซึ่งได้กระทำไปเพื่ออธิบายเรื่องเหล่านี้ หลังจากประสบความสำเร็จในเรื่องตัวนำวดยิ่งแล้วฟรีทส์ ลอนคอนได้หันไปขบปัญหาของฮีเลียมเหลว และกรรมวิธีเริ่มต้นครั้งแรกของเขาซึ่งสร้างขึ้นขณะที่ยังอยู่ออกซ์ฟอร์ดคืออาศัยการเปรียบเทียบกับผลึกตามแนวความคิดที่กำลังนิยมกันอย่างมากเวลานั้น ต่อมาเขาได้รับตำแหน่งศาสตราจารย์ที่ซอร์บอนน์ ณ ที่นั่นเอง เขาได้รับข่าวแรกของการปรากฏการณ์การถ่ายเทอย่างประหลาดของ He II ในวารสาร *Nature* เล่มที่ 141 ซึ่งมีชื่อเสียงเล่มเดียวกันนั่นเอง เขาลงพิมพ์เผยแพร่ทฤษฎีใหม่ที่ห้าหายและน่าตื่นตะลึงของเขา โดยที่ยังคงทำให้ขัดแย้งกันอยู่ตราบเท่าทุกวันนี้ จากคำอธิบายเมื่อแรกเริ่มของเขาซึ่งอาศัยผลึกนั้น เขาได้เปลี่ยนไปเป็นก๊าซอุดมคติที่ตรงข้ามกันที่สุด คราวนี้จึงเป็นอีกครั้งหนึ่งที่รายงานฉบับหนึ่งซึ่งลึกลับเลื่อนกันไปเสียนานได้ให้เงื่อนไขไว้แล้ว

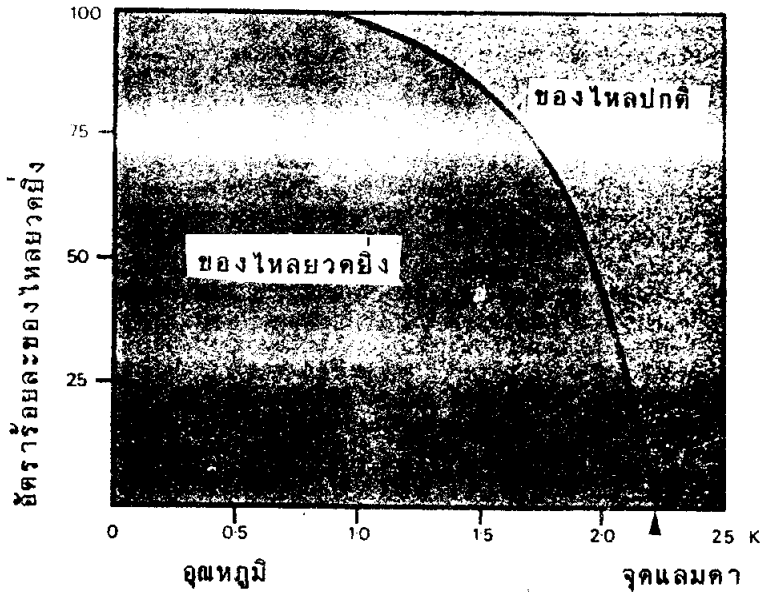
ไอน์สไตน์ซึ่งดำเนินงานของเขาต่อไปในเรื่องสภาพซ้อนสถานะของก๊าซดังที่เราได้วิจารณ์แล้วในบทที่ 7 นั้นได้บรรลุถึงข้อสรุปที่น่าทึ่งที่สุด การคำนวณของเขาแสดงถึงว่าก๊าซอุดมคติที่เป็นไปตามหลักสถิติของโบส จะต้องผ่านการเปลี่ยนแปลงที่น่าพิศวงเมื่อทำให้เย็นลงจนมีอุณหภูมิต่ำมากฯ ต่อจากนั้นจะถึงจุดที่อนุภาคบางตัวจะต้อง "ควบแน่น" อย่างไรก็ตามก็ตีการควบแน่นดังที่ไอน์สไตน์ได้ทำนายไว้กลับไม่บังเกิดผลในผลึก เนื่องจากจะไม่เกิดขึ้นใน

ปฏิกิริยาของตำแหน่งนอกจากในปฏิกิริยาของความเร็ว แต่ยังไม่ประจักษ์ชัดว่าปรากฏการณ์ชนิดใดที่การควบแน่นความเร็วตามสมมติฐานนี้อาจเกิดขึ้นได้บ้าง อีกสองปีต่อมาจึงเกิดความสงสัยต่างนานานในเรื่องความถูกต้องของข้อสรุปของไอน์สไตน์ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากไม่มีก๊าซใดๆที่รู้จักกันแล้วว่าเป็นไปตามหลักสถิติของโบสจะปรากฏลักษณะที่โน้มเอียงไปในทางซ้อนสถานะ เรื่องราวทั้งหมดนี้จึงถูกลืมเลือนไป

ลอนดอนได้หวนกลับไปยังรายงานฉบับจริงของไอน์สไตน์และคำนวณหาค่าของความร้อนจำเพาะที่เกิดจากการควบแน่นดังกล่าว อย่างไรก็ตาม ปรากฏว่ามีจุดยอดที่ไม่คล้ายกับจุดแหลมตา แต่มีเหลี่ยมเหลวถูกแยกให้เป็นกรณีที่แตกต่างกันไปจากลักษณะของก๊าซอุดมคติสมมติที่ลอนดอนได้ให้ข้อสังเกตอย่างถูกต้องไว้แล้วนั้น อีกนัยหนึ่ง ความหนาแน่นต่ำที่สืบเนื่องจากพลังงานที่จุดศูนย์ทำให้ของไหลมีลักษณะบางประการคล้ายก๊าซ แต่กล่าวโดยส่วนรวมแล้ว ลอนดอนมีความระมัดระวังอย่างยิ่ง โดยถือว่าในความคิดของเขานั้นไม่ได้มีเจตนาอื่นใดที่นอกเหนือไปจากเป็นการเสนอเพื่อให้พิจารณาถูกต้อง ทั้งยังไม่พยายามที่จะให้คำอธิบายใดๆสำหรับปรากฏการณ์การถ่ายเทนี้ ในตอนท้ายจึงมีแต่การอ้างอิงสั้นๆเท่านั้นซึ่งระบุว่าตัวแบบของเขาอาจจะเป็นที่น่าสนใจในแง่หนึ่ง อย่างไรก็ตาม นักทฤษฎีรุ่นหลังทั้งหลายดูจะเร่งรีบเข้ามาในขอบเขตที่ศาสตราจารย์ผู้เชี่ยวชาญต่างากรังเกรงที่จะก้าวล่วงเข้าไป ลอนดอนได้หารือเรื่องงานของเขากับลาสโล ทิสซาชาวฮังการีซึ่งสอนอยู่ที่วิทยาลัยฝรั่งเศส และทิสซาได้สังเกตเห็นข้อสรุปที่น่าสังเกตบางประการ ซึ่งเขาได้นำไปตีพิมพ์เผยแพร่หลังจากนั้นไม่นาน โดยยังคงอยู่ในวารสาร *Nature* เล่มเดียวกัน

เขาได้นำข้อเสนอแนะของลอนดอนไปใช้ในการสังเกต He II อย่างอาภัพ แต่จริงตามตัวอักษร ในความเห็นของทิสซานั้นเมื่อลดอุณหภูมิของเหลวนี้นิ่งต่ำกว่าจุดแหลมตาจะทำให้ของเหลวนี้นแยกออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนปกติและของไหลยวดยิ่ง ส่วนประกอบปกติจะเหมือนกับ He I แต่ส่วนของไหลยวดยิ่งประกอบด้วยอะตอมที่ "ควบแน่น" การเริ่มปรา

11.7 ตัวแบบของไหลสองชนิด



กฎของไหลวดยิ่งครั้งแรกอยู่ที่ 2.2 ค และเมื่อลดอุณหภูมิลงต่อไปก็จะมีปริมาณมากขึ้นจากการชดเชยของส่วนปกติซึ่งกลายเป็นของไหลวดยิ่งเพิ่มขึ้น จนกระทั่งที่ศูนย์สัมบูรณ์จะทำให้ของเหลวทั้งหมดประกอบด้วยของไหลวดยิ่ง ดังนั้นในสิ่งที่เรียกว่า "ตัวแบบของไหลสองชนิด" He II จึงถือว่า He II เป็นของผสมของส่วนประกอบปกติและส่วนประกอบของไหลวดยิ่ง โดยที่ความเข้มข้นสัมพัทธ์เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ(รูปที่ 11.7) นับว่าเป็นเพราะสมบัติเชิงกายภาพต่างๆในของผสมนี้ตามที่ได้ตั้งสมมติฐานไว้จากตัวแบบของเขา จึงทำให้ทิสซาได้รับคะแนนในชัยชนะอย่างท่วมท้น

ส่วนของไหลวดยิ่งจะปราศจากความต้านทานเนื่องจากไม่ได้ใช้พลังงานไป ดังนั้น

จึงนำไปสู่สมบัติทางอุณหพลวัตใหม่อย่างยิ่ง แต่ในทางตรงกันข้ามพบว่า ส่วนประกอบปกติจะประพฤติเช่นเดียวกับ He I อย่างแท้จริง หากพิจารณาจากการวัดความหนืดก็จะได้ชัดเจนว่าของไหลปกติจะหน่วงให้การแกว่งกวัดของจานซึ่งแขวนอยู่ข้างลง และค่าความหนืดที่สังเกตได้ลดลงเมื่อต่ำกว่าจุดแลมดา จึงแสดงแค่เพียงว่าความเข้มข้นของส่วนประกอบปกติลดลงเท่านั้น อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้ช่องสลิตแคบหรือหลอดแคบจะทำให้ส่วนประกอบปกติผ่านสิ่งเหล่านี้ไปไม่ได้เลย แต่ของไหลวดยิ่งจะไหลผ่านไปโดยปราศจากความต้านทาน

สำหรับปรากฏการณ์เชิงกลความร้อนเราสามารถอธิบายได้อย่างเดียวกัน ดังนี้(รูปที่ 11.5) เมื่อให้ความร้อนแก่ภาชนะทางขวาจะทำให้ของไหลวดยิ่งถูกเปลี่ยนไปเป็นส่วนประกอบปกติ และของไหลวดยิ่งจะผ่านหลอดรูเล็กมากขึ้น จากซ้ายไปขวาเพื่อชดเชยกับความเข้มข้นที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม วิธีอื่นในการทำให้ความแตกต่างนี้เท่าเทียมกันโดยที่ของไหลปกติไหลผ่านจากขวาไปซ้ายจะเป็นไปไม่ได้เลย เพราะจะถูกชักขวางจากความต้านทานในหลอดรูเล็ก ผลลัพธ์ทั้งหมดจึงเป็นการไหลสุทธิสำหรับของเหลวในทิศทางไปสู่ความร้อน การทำให้กระบวนการผันกลับได้และบังคับให้ He II ผ่านหลอดรูเล็กไปจะทำให้อุณหภูมิลดลง เพราะว่าเฉพาะของไหลวดยิ่งเท่านั้นที่สามารถผ่านไปได้ ด้วยเหตุนี้ความเข้มข้นในของไหลปกติทางซ้ายจะต่ำกว่า และกรณีนี้ก็สมนัยกับอุณหภูมิต่ำลง

ตัวแบบของไหลสองชนิดนี้ให้คำอธิบายสำหรับสภาพนำความร้อนสูง ซึ่งคาพิทซาได้สงสัยไว้แล้วว่าเป็นกระบวนการพาความร้อน พิธซาให้ข้อสังเกตว่า เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิย่อมจะหมายความว่ามีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น พลังงานที่ใช้ไปจึงต้องเป็นพลังงานที่จำเป็นสำหรับกระตุ้นให้อะตอมฮีเลียมจากพลังงานเป็นศูนย์ไปสู่สถานะ He I ดังนั้น ในการพาความร้อนใดก็ตามที่พาไปจะไม่เป็นแต่เพียงความร้อนจำเพาะของของเหลวแต่เป็นพลังงานกระตุ้นที่สูงนี้

เมื่อรายงานของพิธซาพิมพ์เผยแพร่ออกมาลอนดอน ไกโรธ เคื่องหินที่ในคอนแรก เนื่อง

จากเขาเสียค่ายที่ข้อเสนอแนะอย่างระมัดระวังของเขาถูกนำไปใช้อย่างรีบร้อน ทั้งยังเห็นว่าเป็นไปไม่ได้ในทางฟิสิกส์อย่างชัดเจนยิ่งกว่าใครๆที่จะยอมรับของไหลสองชนิด ซึ่งประกอบด้วยอะตอมชนิดเดียวกัน โดยที่ตามคำจำกัดความจะต้องไม่สามารถแบ่งแยกความแตกต่างได้ ยิ่งกว่านี้ทิสซาได้ตั้งข้อสมมติฐานสำหรับคุณสมบัติของไหล ซึ่งไม่ได้เป็นไปตามแบบอย่างจากการควบแน่นของโบส-ไอน์สไตน์แต่อย่างใด ตรงกันข้ามทิสซาประสบความสำเร็จอย่างไม่น่าเชื่อในการคลายปมยุ่งเหยิงของผลการทดลอง ด้วยการให้ความหมายซึ่งอย่างน้อยสมเหตุสมผล จนแม้กระทั่งลอนดอนต้องยอมรับว่ามีนัยสำคัญ นอกจากนี้ทิสซาได้ใช้ตัวแบบของเขาในการทำนายค่าและปรากฏว่าถูกต้องทั้งหมด ประการแรกคือปรากฏการณ์แคลอริกเชิงกล ซึ่งเขาคาดการณ์ล่วงหน้าได้ก่อนที่การทดลองทั้งหลายจะตีพิมพ์เผยแพร่กันเสียอีก ดังที่ได้กล่าวแล้วข้างต้นปรากฏการณ์นี้สามารถคาดได้ว่า เป็นเพียงการผันกลับทางอุณหพลศาสตร์ของปรากฏการณ์เชิงกลความร้อนและการทำนายนี้ถือว่าปลอดภัยพอสมควร แต่ปรากฏว่าการทำนายประการที่สองก้าวหน้าไปไกลกว่านั้นมาก โดยเขาได้ชี้แนะว่าความร้อนที่กระตุ้นเข้าไปใน He II ซึ่งเป็นการเพิ่มความเข้มข้นในของไหลปกติขึ้นชั่วขณะหนึ่ง ควรจะเคลื่อนที่ผ่านของเหลวไปในรูปของคลื่นความร้อน

เมื่อรายงานฉบับที่สองของทิสซาซึ่งเขาได้ทำให้คำทำนายนี้แพร่หลายออกไปก็เกิดสงครามขึ้น ดังนั้น งานทางด้านฮีเลียมเหลวจึงหยุดลงนอกจากในรัสเซีย เนื่องจากความขัดข้องของการติดต่อสื่อสารจึงยังผลให้การส่งรายงานจากรัสเซียมาถึงอย่างล่าช้า แม้กระนั้นในที่สุดเราก็สามารถปะติดปะต่อสิ่งที่นักวิทยาศาสตร์ของที่นี่ได้บรรลุความสำเร็จจนครบก่อนที่บุคคลเหล่านั้นจะได้รับผลกระทบจากสงครามโล่อันหลังมาจนหันเช่นกัน อันดับแรกก็มีรายงานฉบับยาวโดยคาพิทซาที่เขียนขึ้นในปี ค.ศ. 1940 ซึ่งรวมการทดลองไว้หลายเรื่อง โดยเฉพาะบางเรื่องนับว่าเยี่ยมยอดมาก หนึ่งในบรรดาการทดลองที่น่าประทับใจที่สุดได้ถูกวางแผนขึ้นโดยเฉพาะเพื่อแสดงให้เห็นกระบวนการนำความร้อน โดยป้อนความร้อนด้วยไฟฟ้า

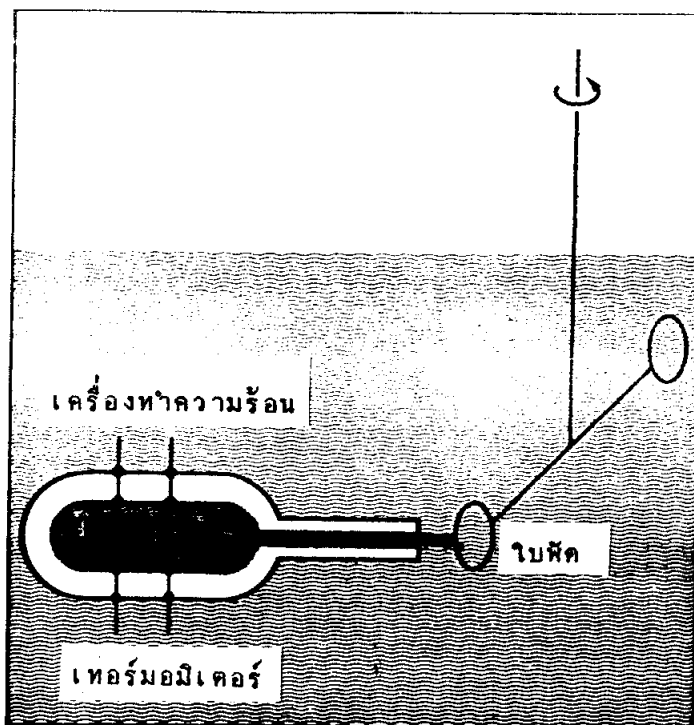
ในกระเปาะแก้วสองชั้น ซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยท่อไปยังอ่างฮีเลียม (รูปที่ 11.8) ตรงข้ามกับปากท่อได้แขวนใบพัดไว้ให้ทำหน้าที่เป็นเครื่องแสดงการไหล เมื่อเปิดสวิตช์เครื่องทำความร้อน จะทำให้ใบพัดถูกผลักดันจากกระแสที่ไหลพุ่งออกมาจากท่อ เรื่องนี้สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแบบของไหลสองชนิด โดยเมื่อเกิดของไหลปกติที่เครื่องทำความร้อนและถูกขับดันออกมาทางท่อ ขณะเดียวกันนั้นกระแสของไหลยวดยิ่งที่ชัดเจนจะไหลเข้ามาในหลอดโดยไม่มีความต้านทาน อย่างไรก็ตามก็ไม่มีมีการกล่าวถึงถึงการอธิบายนี้และรายงานของทิสซา แสดงว่าเรื่องราวทั้งหมดนี้ไม่มีใครรู้อย่างแน่นอน แต่คาพิทซา กลับพยายามที่จะทำให้เห็นการไหลวนของกระแสไปตามผนังและในตอนกลางของท่อ

ต่อมาอีกเจ็ดเดือน คาพิทซาได้แก้ไขคำอธิบายข้างต้นนี้ของเขาในรายงานฉบับที่สอง และได้ตีความหมายการสังเกตของเขาออกมาในรูปของตัวแบบของไหลสองชนิด ถึงแม้จะมีการกล่าวถึงทิสซาเพราะในระหว่างนั้นปรากฏแน่ชัดว่าได้รับรายงานฉบับแรกของเขา แต่คาพิทซาได้กำหนดให้คำอธิบายที่แท้จริงเป็นไปตามทฤษฎีของลอฟ เควีโควิช แลนดาว ซึ่งตีพิมพ์เผยแพร่ในเวลาเดียวกัน โดยทฤษฎีของแลนดาวซึ่งทำให้เขาได้รับรางวัลโนเบลในอีกยี่สิบปีต่อมานั้น นับว่าได้ให้เหตุผลทางฟิสิกส์ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งในการช่วยอธิบายถึงความสำเร็จที่ไม่น่าสมเหตุสมผลของตัวแบบของไหลทั้งสองของทิสซา ทั้งนี้ เนื่องจากตามทฤษฎีของแลนดาวจะมีแต่เพียงการไหลชนิดเดียวเท่านั้นคือฮีเลียมเหลว เมื่อทำให้อุณหภูมิของเหลวนี้นิ่งขึ้นจากที่ศูนย์สัมบูรณ์ ดังนั้นจะทำให้พลังงานความร้อนอยู่ในรูปของควอนตัมเชิงการสั่นที่เรียกว่า โฟนอน การสั่นที่เป็นควอนตัมของอะตอมฮีเลียมจะเคลื่อนที่ผ่านของเหลวไปในลักษณะซึ่งคล้ายกันบ้างเล็กน้อยกับการผ่านไปในอวกาศของควอนตัมแสง คือ โฟตอน ตามความเป็นจริงนั้น จะเรียกโฟนอนว่าเป็น "กึ่งอนุภาค" อยู่บ่อยครั้ง เนื่องจากสามารถนำคณิตศาสตร์มาใช้กับโฟนอนได้อย่างเดียวกับอนุภาค ลักษณะอนุภาคของโฟนอนนับว่าปรากฏชัดเจนโดยเฉพาะในกรณีของฮีเลียมเหลว ในการทดลองของคาพิทซาจะสร้างโฟนอนขึ้นที่

11.8 การสาธิตของคาบิทซา

เรื่องการไหลทวนใน He II

เครื่องทำความร้อนและสิ่งเคลื่อนที่ไปตลอดท่อ นั้น ในที่สุดเมื่อไปปะทะกับใบพัดจะถ่ายทอดพลังงานของการเคลื่อนที่ออกไปที่นั่น จึงกล่าวสั้นๆ ได้ว่าส่วนประกอบปกติของฮีลิวียมกับสมบัติที่อุณหภูมิยิ่งยวด ซึ่งเคลื่อนที่ผ่านเนื้อของไหลในขณะนั้นเองเป็นของไหลวาคยิ่ง



ทฤษฎีของแลนดาวไม่ได้อาศัยการควบแน่นของโบส-ไอน์สไตน์ แม้ว่าสถิติของโบสดู เหมือนจะมีความสำคัญ โดยเนื้อหาสาระแล้วทฤษฎีนี้มุ่งหมายที่จะอธิบายภาวะใกล้เคียงกับ ศูนย์สัมบูรณ์ แต่ไม่ได้ให้คำอธิบายสำหรับจุดแลมดา นอกจากโฟนอนที่รู้จักกันดีจากทฤษฎีของ แชนซ์แล้วแลนดาวยังได้ตั้งสมมติฐานการมี "โรตอน" ซึ่งเป็นอีกรูปแบบหนึ่งของการกระตุ้นเชิงความร้อน โดยที่เขาเสนอแนะว่าเป็นควอนตัมมูลฐานของการไหลวน การทดลองต่างๆ ซึ่งกระทำกันในหลายทศวรรษหลังแสดงว่าการกระตุ้นเช่นนี้มีอยู่ในฮีเลียมอย่างไม่ต้องสงสัย แต่ลักษณะที่แท้จริงของโรตอนยังคงเป็นสิ่งลึกลับอยู่

นอกจากการขัดเกลาการตีความหมายของ He II ได้อย่างน่าเชื่อถือและสวยงามแล้ว ทฤษฎีของแลนดาวยังได้ให้ตัวอย่างของแนวทางที่ฟิสิกส์ใช้ได้ผลสำหรับเรา ขณะที่รายงานฉบับแรกของทิสซามาถึงมอสโคว์ในปีค.ศ. 1941 อย่างแน่นอนแต่ฉบับที่สองไม่มีมา แลนดาวก็เช่นเดียวกันได้ตั้งสมมติฐานของรูปแบบใหม่สำหรับการเคลื่อนที่ของคลื่นในฮีเลียมเหลวโดยอาศัยทฤษฎีของเขาเอง แต่ในรูปนัยนิยมของเขาจะคล้ายกับปรากฏการณ์เสียง ดังนั้นเขาจึงเรียกว่า "เสียงที่สอง" ตามความเป็นจริงแล้วความพยายามครั้งแรกที่ล้มเหลวในการตรวจหาปรากฏการณ์นี้ได้กระทำโดยใช้อุปกรณ์เกี่ยวกับเสียงด้วยซ้ำไป เพิ่งจะมาหลังจากที่ อี. เอ็ม. ลิฟชิตส์ได้อธิบายสูตรของแลนดาวเสียใหม่แล้วเท่านั้น จึงได้ยอมรับลักษณะเชิงความร้อนของคลื่นนี้ ทั้งนี้เปชคอฟได้สาธิตให้เห็นแล้วในปีค.ศ. 1944 ว่า คลื่นนี้มีอยู่จริง และการขยายการสังเกตต่อมาถึงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 1 ค ได้แสดงว่ากลวิธีที่ถูกต้องคือกลวิธีของแลนดาวแต่ไม่ใช่วิธีของทิสซาตั้งกล่าวแล้ว

ในแง่หนึ่งอาจกล่าวได้ว่า ทฤษฎีแลนดาวได้ให้การคาดคะเนที่ไม่ถูกต้องสำหรับความเร็ววิกฤติในของไหลยวดยิ่ง ความจริงที่ว่า การไหลโดยไม่มี ความเสียหายจะหยุดลงเมื่อเกินค่าความเร็วที่แน่นอนขนาดหนึ่งในของไหลยวดยิ่งนั้น สามารถอธิบายได้โดยการเบี่ยงเบนพลังงานกลให้เป็นพลังงานความร้อน นั่นคือ โดยอาศัยการสร้างโฟนอนหรือโรตอน นำเสีย

คายที่การทดลองต่างๆแสดงว่าสภาพของไหลยวดยิ่งหมดสิ้นลงที่ความเร็วน้อยกว่าความเร็วที่ต้องใช้ในการสร้างกิ่งอนุภาคเหล่านี้มาก จึงจำเป็นต้องค้นหาวิธีอื่นที่ของเหลวสามารถจะสลายพลังงานกลได้ต่อไป

ตามความเป็นจริงนั้นความบกพร่องดังกล่าวข้างต้นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติต่างๆ ซึ่งทฤษฎีแลนดาวได้กำหนดให้สัมพันธ์กับเนื้อของไหลยวดยิ่ง และสมบัติเหล่านี้ไม่รวมถึงความปั่นป่วนเข้าไว้ด้วย อันที่จริงความปั่นป่วนในของไหลยวดยิ่งนี้สังเกตได้บ่อยครั้งมาก แต่นัยสำคัญของเรื่องนี้ถูกมองข้ามไปได้อย่างไรไม่ทราบ ตอนนี้จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการนำความร้อนขึ้นอยู่กับกระแสความร้อนซึ่งแต่เดิมสังเกตได้ในเคมบริดจ์เมื่อปีค.ศ. 1937 แต่ในตอนนั้นไม่เชื่อกันด้วยความหลงผิดก็คือ สิ่งที่แสดงถึงการปั่นป่วน ดังหนึ่งในบรรดาการทดลองทั้งหลายของคาพิทซาในค.ศ. 1940 ปรากฏว่าอุณหภูมินี้ไปสู่ความเข้าใจในปรากฏการณ์เหล่านี้ได้เตรียมไว้ให้แล้วในค.ศ. 1949 โดยอนซาเจอร์ แต่คำกล่าวที่สำคัญของเขาได้กระทำไปแต่เพียงให้ข้อสังเกตในการอภิปรายระหว่างประชุมสัมมนาในฟลอเรนซ์ ดังนั้นจึงไม่ได้รับความสนใจเท่าที่ควร

จนกระทั่งปีค.ศ. 1955 เมื่อไฟน์แมนในแคลิฟอร์เนียได้เสนอรายงานอย่างยืดยาวฉบับหนึ่งเกี่ยวกับแนวคิดของอนซาเจอร์ล้วนๆเท่านั้น จึงเริ่มจะตระหนักกันถึงความสำคัญอย่างเต็มเปี่ยมของแนวคิดนี้ในการอธิบายปรากฏการณ์ของไหลยวดยิ่ง อนซาเจอร์ และไฟน์แมนได้ตั้งสมมติฐานว่าของไหลยวดยิ่งจะต้องสามารถไหลวนและศูนย์กลางในการไหลวนขนาดใหญ่เหล่านี้ซึ่งแต่ละแห่งประกอบด้วยอะตอมจำนวนมากจะต้องเป็นปริมาณควอนตัม การส่งพลังงานออกไปจึงจะสามารถเกิดขึ้นเมื่อศูนย์กลางการไหลวนต่างๆกระทำอันตรกิริยากับโฟนอนและโรตอนทั้งหลาย เนื่องจากอะตอมมากมายยังมีส่วนร่วมในการสร้างการไหลวนทางควอนตัมขนาดใหญ่เหล่านี้ ดังนั้น พลังงานต่ออะตอมจึงน้อยกว่าพลังงานที่ต้องใช้สำหรับการสร้างโฟนอนหรือโรตอนสักตัวหนึ่งมาก โดยวิธีนี้ศูนย์กลางการไหลวนทั้งหลายจึง

ยินยอมให้พลังงานถูกดึงออกไป จากการไหลของของไหลวดยิ่งด้วยความเร็วที่น้อยกว่าที่ได้ทำนายไว้โดยทฤษฎีของแลนดาу

การไหลวนในของไหลวดยิ่งได้กล่าวถึงแล้วในตอนต้นบทนี้ พร้อมกับการทดลองด้วยถ้วยสองชั้นเมื่อเราพิจารณาความเป็นไปได้ของการไหลเรื่อยไปใน He II การทดลองมากมายซึ่งได้ดำเนินการในทศวรรษก่อน ดูเหมือนจะทำให้การไหลวนทางควอนตัมขนาดใหญ่เช่นนี้น่าจะเป็นไปได้ แม้ว่าไม่มีการทดลองใดที่จะนำลงความเห็นได้สมดังที่เราต้องการจะให้ เป็นเช่นนั้นเท่าใดนัก แม้กระนั้น การไหลโดยไม่มี ความต้านทานและกระแสที่ไหลเรื่อยไปไม่ได้เป็นเพียงลักษณะซึ่ง He II คล้ายคลึงกันกับตัวนำวดยิ่ง ขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงในโลหะหนึ่งไปสู่สภาพนำวดยิ่งปรากฏว่า เอนโทรปีลดลงอย่างรวดเร็ว นั้น สำหรับฮีเลียมก็จะเกิดขึ้นเช่นเดียวกันนี้ด้วย นอกจากนี้ การไหลสำหรับของไหลวดยิ่งเหมือนกับกระแสวดยิ่งที่ไหลเรื่อยไปที่เดียวกันนี้ยังมีความเด่นชัดโดยที่เอนโทรปีเป็นศูนย์ ดังนั้น เราจะย้อนกลับมาที่จุดนี้อีกในภายหลัง

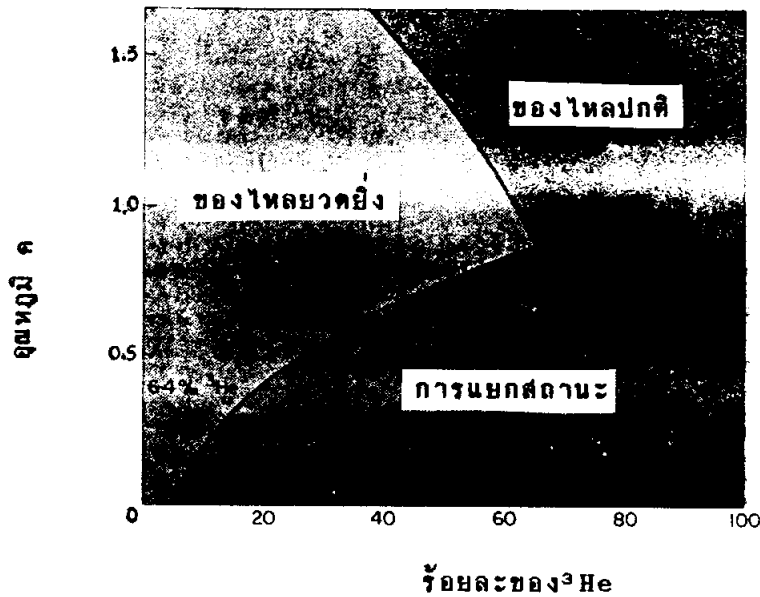
นอกจากแบบปกติของอะตอมฮีเลียม ซึ่งมีนิวเคลียสประกอบด้วยสองโปรตอนและสองนิวตรอนแล้ว ยังมีแบบอื่น ๆ ซึ่งมีเพียงนิวตรอนเดียว โดยหมายความว่าแบบเหล่านี้มีสปินเป็นจำนวนคี่ ดังนั้น จึงจะต้องเป็นไปตามหลักสถิติของเฟอร์มี-ดิแรคแต่ไม่ใช่ของโบส-ไอน์สไตน์ เรื่องนี้ทำให้การเปรียบเทียบไอโซโทปทั้งสองนี้น่าทึ่งอย่างยิ่ง แต่โซครายที่มีเพียงทุกาหนึ่ง ในหมื่นอะตอมฮีเลียมเท่านั้นเป็นไอโซโทปประเภทเบา อย่างไรก็ตาม นับเป็นลมร้ายที่โหมมาโดยไม่ทำให้เป็นผลดีกับใครเลยและอุตสาหกรรมทางนิวเคลียร์ซึ่งสร้างลูกระเบิดอะตอมยังผลิตไอโซโทปฮีเลียมเบาด้วย เมื่อปรากฏเรื่องนี้ชัดเจนขึ้นจึงมีผู้ทางที่น่าตื่นตัวในการค้นคว้าฮีเลียมเบาเหลวและศึกษาว่า จะเป็นของไหลวดยิ่งหรือไม่ ครั้นถึงปีค.ศ. 1949 มีฮีเลียมเบาให้ใช้ได้อย่างพอเพียงสำหรับทำให้เป็นหยดเหลวเล็กๆได้ และเพียงแต่เพื่อเยี่ยค่าทำนายต่างๆซึ่งมีที่ศรัทธาที่สุดของนักทฤษฎีทั้งหลาย การทดลองนี้จึงนับเป็นชัยชนะสำหรับ

แวนเดอร์วาลส์ ด้วยการใช้กฎเก่าของสถานะสมนัยโดยการแก้ไขสำหรับพลังงานที่จุดศูนย์ ให้ถูกต้องเพิ่มเติมเข้าไป จึงทำให้เคอโบเออร์แห่งแอมสเตอร์ดัมได้ทำนายเส้นความดันไอสำหรับของเหลวใหม่นี้ได้อย่างถูกต้องด้วยความแม่นยำที่น่าอัศจรรย์ จุดเดือดสำหรับของเหลวนี้ต่ำกว่าของฮีเลียมธรรมดาเพียงหนึ่งองศา

อีกครั้งหนึ่งที่ใช้กฎของสถานะสมนัยทำให้ต้องคาดหวังจุดแลมดาศาสำหรับไอโซโทป เบา(เราจะเรียกว่า ^3He ให้แตกต่างไปจาก ^4He ตามธรรมดา) ได้ประมาณ 1.5 ค แต่ความร้อนจำเพาะกลับไม่มีความผิดปกติ ทั้งยังไม่พบของไหลยวดยิ่งที่จุดนี้หรือที่อุณหภูมิที่ต่ำลงไปมากกว่านี้ ชั่วขณะหนึ่งดูเหมือนคำอธิบายของฟริตส์ ลอนดอนในรูปแบบตามการควบแน่นของโบส-ไอน์สไตน์ถูกต้องแล้ว อย่างไรก็ตาม งานค้นคว้าต่อมาก่อให้เกิดความประหลาดใจขึ้นอย่างมากภายในพฤติกรรมของ ^3He และคราวนี้ดูเหมือนว่าเรื่องนี้อาจจะช่วยให้การเปิดเผยธรรมชาติสำหรับของไหลทางควอนตัมกระทำได้อย่างลึกซึ้งยิ่งขึ้นกว่าที่เราได้สงสัยมาแล้วโดยตลอดจนกระทั่งบัดนี้ แม้กระนั้นก่อนที่จะเข้าสู่การพิจารณาเรื่องเหล่านี้ เราต้องย้อนกลับไปชั่วคราวหนึ่งถึงการแยกสถานะที่นำสงสัย(รูปที่ 5.5) ซึ่งตอนนั้นเราเรียกว่าเป็นตัวอย่างเด่นชัดที่สุดของกฎข้อสามของอุณหพลศาสตร์ ดังได้กล่าวในตอนนั้นว่าของเหลวผสมระหว่างไอโซโทปทั้งสองจะไม่ใช่ของไหลที่มีเนื้อเดียวกันอย่างสม่ำเสมออีกต่อไป เมื่อทำให้อุณหภูมิลดลงต่ำกว่า 0.8 ค และแยกออกเป็นสองสถานะต่างหากโดยสถานะหนึ่งมี ^4He ซึ่งเป็นของไหลยวดยิ่งอยู่ในปริมาณมากกว่าอีกสถานะหนึ่งซึ่งยังคงเป็นส่วนปกติของ ^3He อยู่ในปริมาณมาก(รูปที่ 11.9)

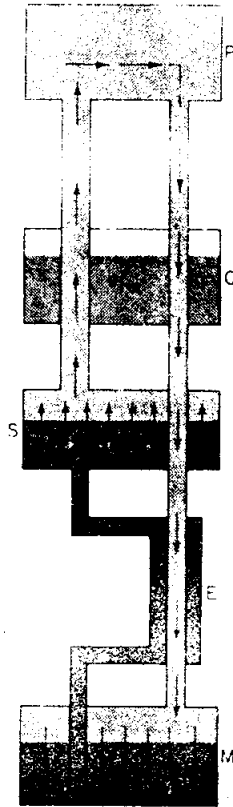
แม้แต่ก่อนหน้าการค้นพบการแยกสถานะไฮน์ส ลอนดอนได้เสนอแนะในปีค.ศ. 1951 ว่าการเพิ่มขึ้นของเอนโทรปีในของเหลวผสม $^3\text{He} - ^4\text{He}$ เขิงแอกเซียแนติกควรจะเป็นผลให้เกิดการลดอุณหภูมิลงอย่างมาก ความเป็นไปได้ของกรรมวิธีนี้ก็กลับมีมากขึ้นภายหลังจากการแยกสถานะด้วยตนเอง และผู้เขียนแบบจำลองซึ่งสร้างขึ้นจนประสบความสำเร็จในครั้ง

11.9 แผนภาพแสดงถึงการแยกสถานะ
ในของไหลผสม $^3\text{He} - ^4\text{He}$
ใกล้ศูนย์สัมบูรณ์



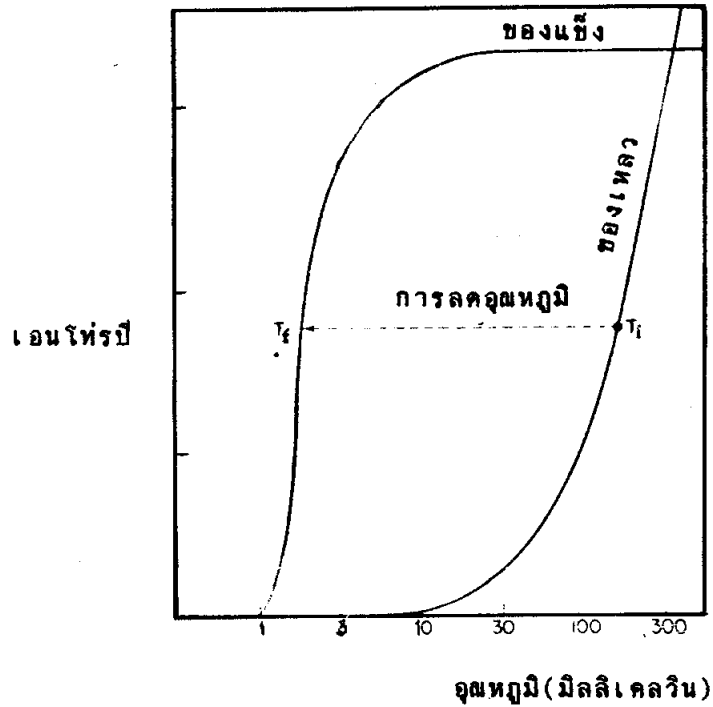
แรกได้นำไปใช้งานในปี ค.ศ. 1965 โดยทาโคนิสและผู้ร่วมงานของเขาหลายคนในไลเคน
ตั้งแต่นั้นมาจึงนำสู่เขียนดังกล่าวมาใช้อย่างกว้างขวางและมีจำหน่ายอยู่ในปัจจุบันด้วย อุปกรณ์
นี้ประกอบด้วยส่วนสำคัญคือ วงจรปิด (รูปที่ 11.10) ซึ่งสารทำงานคือของผสมระหว่าง
 ^3He กับ ^4He จะไหลวนเวียนอยู่โดยอาศัยเครื่องสูบ(P) ต่อมาจะถูกควบแน่น
ด้วยการผ่านไปในอ่าง ^4He ที่ 1.3 ค (C) และทำให้เย็นลงต่อไปในเครื่องแลกเปลี่ยน
ความร้อน(E) โดยที่จะนำไปสู่ห้องผสม(M) ในการใช้งานจะทำให้ M กลายเป็น
ส่วนซึ่งเย็นที่สุดของวัฏจักรที่ประมาณ 0.1 ค และมีสถานะของเหลวสองชนิดแยกกันอยู่ โดย

11.10 แผนภาพการไหลในตู้เย็นแบบเจือจางฮีเลียม
 สำหรับคำอธิบายขอให้ดูในเนื้อเรื่อง ส่อนคือสถานะ
 ที่มี ^3He เป็นปริมาณมาก สเข้มคือสถานะที่มี
 ^4He เป็นปริมาณมาก



ชนิดที่เบากว่ามี ^3He เป็นปริมาณมากจะอยู่ด้านบน คราวนี้อะตอม ^3He จากส่วนนี้จะละลาย
 อยู่ในสถานะที่มี ^4He เป็นปริมาณมากด้านล่าง ดังนั้น กระบวนการนี้ซึ่งคล้ายกับการระเหย

11.11 แผนภาพเอนโทรปีของ³He เหลว และแข็ง การทำให้เป็นของแข็งจากสถานะของเหลว โดยการชักเชิงแอกเซียแบบติงนำไปสู่การลดอุณหภูมิ ($T_i \rightarrow T_f$)



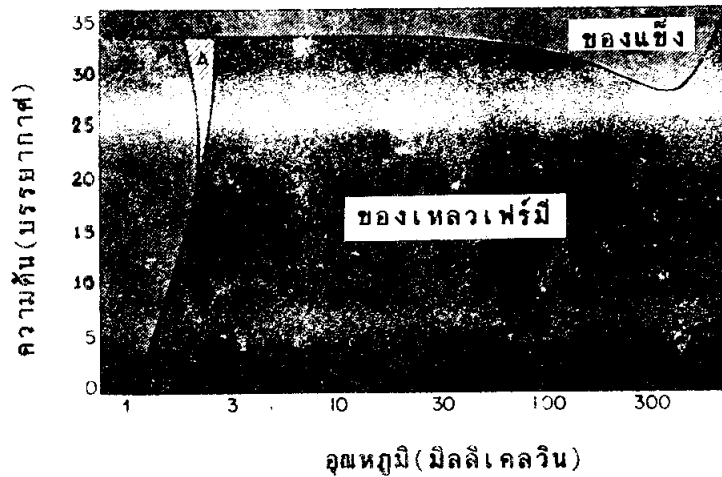
ของก๊าสจึงทำให้อุณหภูมิลดลง ขณะนี้สามารถดำเนินการทดลองต่อไปโดยการนำสารที่ต้องการค้นคว้ามาไว้กับ μ ให้สัมผัสกันในเชิงความร้อน ของไหลที่ย้อนกลับไปตอนนี้จะผ่านเข้าสู่เครื่องกลั่น(S) ซึ่งควบคุมโดยเครื่องทำความร้อนให้อยู่ที่อุณหภูมิ 0.6 ค จากจุดนี้ ³He

จะถูกทำให้ระเหยผ่านกลับไปสู่เครื่องสูบและคงเหลือของไหลที่มีแต่ ^3He เป็นปริมาณมากไว้เบื้องล่าง ตู้เย็นแบบเจือจางใช้กันมากขึ้นในขั้นเตรียมการลดอุณหภูมิสำหรับการทำความเย็นเชิงนิวเคลียร์ ดังที่ได้กล่าวแล้วในบทที่ 8

คราวนี้จะย้อนกลับไปยังคุณสมบัติของ ^3He บรีสุทธีอีกครั้ง เราได้เห็นแล้วว่าข้อมูลวิกฤติของไอโซโทปนี้คล้ายคลึงกันอย่างมากกับไอโซโทปหนัก นั่นคือ จุดวิกฤติเป็น 3.33 ค ที่ความดัน 1.15 บรรยากาศ ไอโซโทปเบานี้มีพลังงานที่จุดศูนย์เช่นเดียวกับ ^4He และภายใต้ความดันปกติยังคงอยู่ในสถานะของเหลวจนถึงศูนย์สัมบูรณ์ ซึ่งกลายเป็นของแข็งเฉพาะภายใต้ความดัน 34 บรรยากาศเท่านั้น อย่างไรก็ตาม ที่จุดนี้ความคล้ายกันจะหมดไปและตอนนี้เราจะต้องพิจารณาความจริงที่ว่า ^3He ไม่เหมือนกันกับไอโซโทปหนักซึ่งเป็นไปตามหลักสถิติของโบส เพราะ ^3He เป็นอนุภาคเฟอร์มิออนที่มีสปินลึกลับได้ไม่เต็มที นับว่าการจัดระเบียบของสปินเหล่านี้เองซึ่งกำหนดหน้าที่ของเอนโทรปีใน ^3He เหลวและแข็ง โดยแสดง (รูปที่ 11.11) ว่าสปินทั้งหลายในสถานะของแข็งยังคงไม่เป็นระเบียบอยู่จนอุณหภูมิลดต่ำลงไปถึงประมาณ 0.003 ค ขณะที่ในของเหลวนั้นเอนโทรปีจะลดลงอย่างรวดเร็วกว่า เมื่อแลนดาวได้ศึกษาค้นคว้าพฤติกรรมในของเหลวเฟอร์มิ เขาแสดงให้เห็นว่ามีความคล้ายกับอิเล็กตรอนปกติในโลหะเป็นอย่างมาก

แม้แต่ก่อนหน้าก็คือในปีค.ศ. 1950 โทเมอร์รันซันในมอสโคว์ได้ส่งสัญญาณที่เหล่านี้ของเอนโทรปีและเสนอว่า การยึด ^3He เหลวเชิงแอนติสติกให้กลายเป็นสถานะของแข็งจะก่อให้เกิดการลดอุณหภูมิลง อย่างไรก็ตาม แม้จะตระหนักกันว่ากรรมวิธีนี้เป็นไปได้แต่จะพบกับความยุ่งยากในทางปฏิบัติมากมาย ดังนั้น ต้องใช้เวลาอีกสิบห้าปีต่อมา จึงลดอุณหภูมิของฮีเลียมลงเป็นครั้งแรกได้ด้วยกรรมวิธีของโทเมอร์รันซัน และเมื่อไม่นานมานี้ลาฟริเยฟได้บรรลุถึงอุณหภูมิประมาณ 0.001 ค จากการทำให้ ^3He ให้เป็นของแข็งด้วยกระบวนการแอนติสติก ตามความเป็นจริงแล้วนับว่ากรรมวิธีนี้ได้ทำให้วีแวคครั้งแรกของสภาพของไหล

11.12 แผนภาพสถานะของ ^3He ซึ่งควมแน่น
 เส้นหลอมเหลวมีจุดต่ำสุดที่ประมาณ 0.3 ค
 และนอกจากของเหลวเฟร์มีซึ่งเสถียรอยู่เหนือ
 0.001 ค ยังมีการจัดแปรอีกสองแบบ สำหรับ
 ของเหลว A และ B โดยที่ชนิดหลังกลายเป็น
 ของไหลยวดยิ่ง



ยวดยิ่งใน ^3He บรรลุได้ในอ.ศ. 1972

ในระหว่างที่โทเมอร์ริชคได้ดำเนินการค้นคว้าอยู่นั้น เขาได้ทำนายว่าอุณหภูมิ (0.3 ค) ที่เอนโทรปีของเหลวลดต่ำกว่าของแข็ง เส้นหลอมเหลวควรจะผ่านจุดที่ต่ำสุด ตามความเป็นจริงแล้วต่อมาก็ได้พบว่าเรื่องนี้ถูกต้อง (รูปที่ 11.12) และในที่นี้เราจะเห็นได้ว่าสมบัติทางแม่เหล็กของ ^3He เปลี่ยนแปลงหน้าที่ทางอุณหพลวัตเมื่อเทียบกับ ^4He ความแตกต่างที่

สำคัญที่สุดระหว่างไอโซโทปทั้งสองนี้ ดูเหมือนจะเป็นความล้มเหลวของ ^3He ในการกลาย เป็นของไหลควอนตัมที่ประมาณ 1.5 ค โดยในครั้งแรกเชื่อกันว่า ^3He ยังคงไม่ใช่ของไหล ควอนตัมจนถึงศูนย์สัมบูรณ์ งานทางทฤษฎีต่อมาได้ชี้แนะว่าสถานะใหม่อาจจะปรากฏที่ประมาณ 0.1 ค ในที่สุดเมื่อบรรลุถึงอุณหภูมินี้แต่กระนั้นก็ไม่ได้พบอะไร และจากนั้นเป็นต้นมามีการ แข่งขันที่ค่อนข้างซับซ้อนขึ้นระหว่างนักทฤษฎีซึ่งค้นพบเหตุผลต่อมาว่า เหตุใดการเปลี่ยนแปลง จึงควรที่จะเกิดที่อุณหภูมิต่ำกว่ายิ่งขึ้น กับนักทดลองที่ไม่พบอะไรเมื่อบุคคลเหล่านี้มาไกลจนถึง เพียงนั้นแล้ว ต่อมาในปีค.ศ. 1964 เปชคอฟในมอสโกได้ประกาศการค้นพบความร้อนจำเพาะผิดปกติที่ 0.005 ค แต่การค้นพบในเรื่องนี้ถูกโต้แย้งอย่างรุนแรงจากผู้ดำเนินงานใน เออร์แบนา อีกแปดปีต่อมาการเปลี่ยนแปลงเช่นนี้ได้พบขึ้นจริง แต่ที่ต่ำกว่าครึ่งหนึ่งของอุณห ภูมินี้ และมีผลย้อนให้ผู้คนสงสัยว่าการค้นพบของเปชคอฟอาจจะถูกต้องเสียเป็นแน่แท้ แต่สง สัยว่าการวัดอุณหภูมิของเขาไม่ถูกต้อง ไม่มีใครจะเคยทราบหรือใส่ใจต่ออย่างใดเพราะว่า การค้นพบที่ตื่นตาตื่นใจหลายประการในปีต่อมา ได้บังคับงานค้นคว้าในระยะแรกอย่างสิ้น เเชิง

หนึ่งในบรรดาคณะต่างๆที่บุกเบิกการลดอุณหภูมิตามแบบโพเมอร์ริช ซึ่งดำเนินงาน อยู่ที่มหาวิทยาลัยคอร์เนลได้ทำให้กรรมวิธีนี้สัมบูรณ์ถึงขนาดที่เขาเหล่านี้ สามารถหาไปตาม เส้นหลอมเหลวของ ^3He จนต่ำกว่า 0.002 ค ในปีค.ศ. 1972 โอเชอร์อฟกับริชาร์ดสัน และ สิดี้สังเกตุว่าในการลดอุณหภูมิลง จึงทำให้เขาทั้งสามได้ผ่านจุดเปลี่ยนแปลงสองจุดที่ 0.0026 ค และ 0.002 ค ซึ่งแสดงถึงสถานะของเหลวใหม่สองสถานะ การสังเกตุนี้จุด ชนวนให้เกิดการค้นคว้ามโหฬารอย่างแท้จริงในแขนงที่ยากมากนี้ คณะผู้ร่วมงานที่คอร์เนล ซึ่งใช้การลดอุณหภูมิตามแบบโพเมอร์ริช ถูกผลักดันให้ดำเนินงานต่อไปตามเส้นหลอมเหลว และคราวนี้ปัญหาถึงแผนภาพของสถานะที่ความดันต่ำลงจะต้องแก้ไขได้ เพื่อให้เป็นไปตาม จุดประสงค์นี้จึงต้องนำการหาความเย็นเชิงนิวเคลียร์มาใช้ แต่ตอนนี้ปัญหาที่ติดตามมาอย่าง

เหนียวแน่นได้ให้ภาพพฤติกรรมซึ่งละเอียดและเชื่อถือได้พอสมควรสำหรับ ^3He เหลวที่อุณหภูมิค่าลงไปมาก ของเหลวเฟร์มีธรรมดาซึ่งอยู่ในสถานะเสถียรที่อุณหภูมิสูงขึ้นไปทั้งหมด (รูปที่ 11.12) จะหายไปภายใต้ความดันศูนย์ที่เหนือจุด 0.001 ค เล็กน้อย ที่ต่ำกว่าอุณหภูมินี้ปรากฏว่าสถานะที่เรียกว่า $^3\text{He B}$ จะเสถียรที่ความดันต่ำ อย่างไรก็ตาม ดังที่เราเพิ่งได้เห็นแล้วว่าเส้นหลอมเหลวนั้นมีจุดเปลี่ยนแปลงสองจุด คือ T_A และ T_B ซึ่งนำไปสู่สองเส้นที่ไปบรรจบกันที่จุดตรีวิฤติ T_C ที่ประมาณ 0.0024 ค และ 18 บรรยากาศ เส้นโค้งเหล่านี้รวมทั้งเส้นหลอมเหลวล้อมรอบสถานะเหลวอีกสถานะหนึ่งคือ $^3\text{He A}$

ดังนั้น แผนภาพสำหรับสถานะ ^3He จึงกลายเป็นเรื่องที่ซับซ้อนยิ่งกว่าของไอโซโทปหนัก และจึงอีกครั้งหนึ่งที่เราต้องแสวงหาสมบัติทางแม่เหล็กซึ่งเป็นลักษณะที่เกี่ยวข้องกัน เราไม่สามารถกล่าวถึงรายละเอียดของสมบัติทางแม่เหล็กสำหรับสถานะทั้งสามของ ^3He ให้ลึกซึ้งได้ในหนังสือเล่มนี้ แต่ลักษณะที่สำคัญคือ การเปลี่ยนจากของเหลวเฟร์มีธรรมดาไปเป็นของเหลว A ทำให้ความหนืดลดลงอย่างมาก ขณะที่การเปลี่ยนแปลงไปสู่ของเหลว B จะเกิดของไหลวดยิ่งอย่างแท้จริง ค่าของความหนืดที่สังเกตได้ใน ^3He ขึ้นอยู่กับกรรมวิธีของการวัดเช่นเดียวกับ ^4He แต่ดูเหมือนว่าของเหลว A ค่อนข้างจะอยู่ระหว่างของเหลวเฟร์มีธรรมดากับของเหลว B ซึ่งเป็นของไหลวดยิ่งอย่างเต็มที่ ครั้งนี้ก็เช่นกันที่สมบัติทางทางอุณหพลวัตจะเปลี่ยนไป ตามความแรงของสนามแม่เหล็กในทุกๆค่าของอุณหภูมิและความดัน ซึ่งก่อให้เกิดภาพที่ซับซ้อนอย่างเหลือล้น การพิจารณาในเรื่องนี้จึงอยู่นอกเหนือขอบเขตของเราทีเดียว

ในการอธิบายเชิงทฤษฎีด้วยความพยายามดังกล่าวข้างต้นนี้เพื่อตีความหมายของสถานะต่างๆซึ่งเพิ่งค้นพบใหม่ของ ^3He เหลว ได้ดำเนินการโดยไปตามทฤษฎีสภาพนำยวดยิ่งของบาร์ดีน กับ คูเปอร์ และ ชรีฟเฟอร์อย่างใกล้ชิด อีกครั้งหนึ่งที่อ้างถึงช่องว่างระหว่างพลังงานและคู่ของอะตอม ^3He แทนที่จะเป็นอิเล็กตรอน แต่แตกต่างกันตรงที่ว่าแต่ละคู่ของ

^3He สามารถมีสปินตรงข้ามกัน ($\uparrow\downarrow$) หรือขนานกันไป ($\uparrow\uparrow$) โดยอาศัยความเป็นไปได้ที่คู่ซึ่งมีสปินขนานกันสามารถชี้ไปในทิศต่างกัน จึงนำไปสู่ความหลากหลายต่อไปอีก ดังนั้น ของเหลว A จึงถูกมองออกมาว่าเป็นของผสมระหว่างคู่ที่มีสปินขนานกัน แต่มีทิศทางตรงข้ามกัน ($\uparrow\uparrow, \downarrow\downarrow$) ในทางตรงกันข้าม ของเหลว B ถูกพิจารณาว่าเป็นของไหลยวดยิ่งแท้จริงที่มีคู่ซึ่งมีสปินขนาดเท่ากันและโมเมนตัมเท่ากัน แต่ทิศทางตรงข้ามกัน ($\uparrow\downarrow$) โดยที่คล้ายคลึงกันกับของไหลอิเล็กทรอนิกส์ในตัวนำยวดยิ่งเป็นอย่างมาก

เมื่อสามสิบปีก่อนข้าพเจ้าได้เริ่มเรียกร้องความสนใจในความคล้ายคลึงกันขั้นมูลฐานระหว่างสภาพของไหลยวดยิ่งในฮีเลียมเหลวกับสภาพนำยวดยิ่งของอิเล็กทรอนิกส์ แต่นักฟิสิกส์ก็ยังไม่มั่นใจในเรื่องนี้แต่อย่างใด ดูเหมือนค่อนข้างจะประหลาดที่อะตอมฮีเลียมเป็นไปตามหลักสถิติของโบส และอิเล็กตรอนในโลหะซึ่งเป็นเฟอร์มิออนก็ควรจะแสดงพฤติกรรมคล้ายกันตั้งแต่บัดนั้นมา เรื่องราวต่างๆ ได้เปลี่ยนแปลงไปเป็นอันมาก การค้นพบคู่คูเปอร์ช่วยให้เล็งเห็นถึงความคล้ายคลึงกันมากยิ่งขึ้นของธรรมชาติระหว่างพาหะสองชนิดในสภาพของไหลยวดยิ่งในที่สุดสภาพของไหลยวดยิ่งที่เพิ่งค้นพบใน ^3He ซึ่งเป็นเฟอร์มิออนอีกนั่นเองจึงนับว่าให้การสนับสนุนอย่างแข็งขันเพิ่มขึ้นอีกสำหรับสถานะ "ปราศจากความต้านทาน" นี้ของการรวมกลุ่มก้อนของสสาร รูปแบบของการอธิบายนี้ซึ่งเป็นทางเลือกเมื่อสามสิบปีก่อน บัดนี้ดูเหมือนจะขยายความสำคัญออกไปอย่างกว้างขวางและลึกซึ้งมากยิ่งขึ้น เนื่องจากปรากฏว่า สภาพของไหลยวดยิ่งเป็นลักษณะทั่วไปของสสารที่อุณหภูมิต่ำนั่นเอง

ธรรมชาติที่ต่างกันระหว่างพาหะของไหลยวดยิ่งหรือหากจะเป็นอะไรก็ตาม แต่นำไปสู่ลักษณะเท่าที่เดียวกัน นับว่าจะสนับสนุนมากกว่าจะทำให้เขวไปจากธรรมชาติทั่วไปของปรากฏการณ์นี้ ปรากฏว่ามีความคล้ายคลึงกันที่น่าสนใจสำหรับการรวมกลุ่มก้อนในของแข็งซึ่งรู้จักกันดีอยู่แล้ว ถ้าหากเราไม่คุ้นเคยกับการมีสถานะของแข็งอยู่มากนัก เราอาจจะประหลาดใจได้มากเท่าๆกันว่า อะตอมกับโมเลกุลซึ่งออกแรงกระทำซึ่งกันและกันหลายรูปแบบ

จะรวมกันเป็นผลึกเสมอ ตรงนี้ก็อีกเช่นกันที่จะเห็นว่าลักษณะของผลึกและสมบัติมูลฐานของผลึกนั้นจะเหมือนกันมาก ไม่ว่าจะประกอบกันขึ้นจากอะตอมของทองแดงหรือโมเลกุลไฮโดรเจนหรือหน่วยที่ซับซ้อนดังเช่นโปรตีน

ผลึกทั้งหลายซึ่งมีสภาพแข็งเกร็งและมีจุดหลอมเหลวที่เฉียบขาดอยู่ด้วยนั้น สมบัติซึ่งตรงกันนี้ เกิดจากการจัดตัวอย่างสม่ำเสมอของอนุภาค ซึ่งเป็นส่วนประกอบของผลึก กฏข้อที่สามของอุณหพลศาสตร์กำหนดว่า เมื่อเข้าใกล้ศูนย์สัมบูรณ์จะทำให้เอนโทรปีเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งหมายความว่าสารนั้นจะต้องบังเกิดรูปแบบที่เป็นระเบียบ วิธีเดียวที่เป็นระเบียบซึ่งกลุ่มอนุภาคจะสามารถจัดให้อยู่เคียงข้างกันได้ก็คือให้อยู่ในแนวลำดับอย่างสม่ำเสมอ นั่นคืออนุภาคทั้งหมดจึงต้องก่อตัวเป็นผลึก ข้าพเจ้าได้ระบุคำกล่าวอย่างกว้างมากยี่งนี้ด้วยคำว่า "เคียงข้างกัน" อย่างจงใจ เพื่อให้กระจ่างชัดว่า เราได้พิจารณารูปแบบที่สม่ำเสมอในปฏิกิริยาของตำแหน่งต่างๆ นับว่า เป็นเพียงแบบเดียวของปฏิกิริยาซึ่งเราสามารถเข้าใจได้โดยอาศัยประสบการณ์ประจำวัน แต่ไม่ได้หมายความว่าไม่มีปฏิกิริยาอื่นใดอีกแล้วที่อนุภาคสามารถก่อรูปแบบที่เป็นระเบียบ

ดังที่เราได้เห็นแล้วในบทที่ 5 ว่า "ก่อนและหลัง" นั้น มีความสำคัญในทฤษฎีฟิสิกส์เช่นเดียวกับ "เคียงข้างกัน" ตามความเป็นจริงแล้วคำแถลงที่เป็นพื้นฐานของฟิสิกส์ควอนตัมคือหลักความไม่แน่นอนได้กล่าวถึงค่าคงตัวของพลังค์ โดยการประสมกันของตำแหน่งกับความเร็ว แต่ไม่ปรากฏว่าค่าใดค่าหนึ่งในสองค่านี้มีนัยสำคัญโดยตัวเอง เท่านั้นเกี่ยวกับแม่กุญแจและลูกกุญแจซึ่งทั้งสองนี้จะมีความหมายต่อเมื่อนำมาใช้พร้อมกันเท่านั้น

จึงเห็นได้อย่างชัดเจนว่าไม่มีความหมายที่จะพยายามตัดสินว่า ในการพรรณาโลกฟิสิกส์นั้นตำแหน่งหรือความเร็วจะมีความสำคัญมากกว่ากัน เนื่องจากทั้งสองค่านี้ต่างก็ล้วนแต่จำเป็นและเสมอภาคกันอย่างเต็มที่ การพิจารณาของเราในเรื่องสภาพซ้อนสถานะของก๊าซในบทที่ 7 ได้แสดงว่าปฏิกิริยาของความเร็วมียสำคัญเท่าเทียมกับปฏิกิริยาของตำแหน่ง ดัง