

7 ความไม่แน่นอน

ทฤษฎีของ เนินส์ ได้ทำนายสำคัญพิเศษมาให้แก่วิชาฟิสิกส์ที่อุณหภูมิค่าด้วยลักษณะเด่นชัดในการหายไปของเอนโทรปีและพลังงานที่จุดศูนย์ ขณะที่บุคคลอย่างเช่น พลังค์นั้นชอบในความคิดของแนวคิดเอนโทรปีตั้งแต่แรก แต่นักฟิสิกส์ส่วนใหญ่ในตอนนั้นจนถึงขณะที่ช่วยอธิบายในพจน์ของพลังงาน สำหรับนักฟิสิกส์นั้นการที่ส่ายยังคงพลังงานที่ศูนย์สมบูรณ์ปรากฏอยู่ก็ เปรียบเสมือนกับการปฏิบัติที่ยิ่งใหญ่ที่สุดหลุดพ้นออกไปจากแนวคิดเดิม นักฟิสิกส์ทั้งหลายพยายามจินตนาการพลังงานนั้นว่าจะสามารถสำแดงตัวเองในรูปแบบใดซึ่งไม่สามารถจัดเป็นประเภทการสั่นเชิงความร้อนของอะตอม แต่ปรากฏว่าไม่ประสบความสำเร็จ นับเป็นเวลานาทีความเป็นมายังคงเป็นปริศนายู่

พลังค์ซึ่งกล่าวถึงกฎข้อที่สามของอุณหพลศาสตร์ว่าเป็นผลสืบเนื่องโดยตรงจากการคาดคะเนอย่างดีเลิศของหลักการควอนตัมนั้น ได้อาศัยการเดาอย่างดีซึ่งในที่สุดปรากฏว่าถูกต้องกฎตั้งอยู่บนพื้นฐานของแนวการหาที่มาของสูตรการแผ่รังสีว่าเป็นการกระจายพลังงานตลอดระบบของออสซิลเลเตอร์ เขาไม่ได้กำหนดความหมายทางกายภาพที่แน่นอนให้กับออสซิลเลเตอร์เหล่านั้น แต่ได้กำหนดหน้าที่ของมันว่าต้องเป็นแหล่งกำเนิดของการแผ่รังสีไฟฟ้าแม่เหล็กซึ่งถูกกักไว้ในกับสูตรแนวคิดทางควอนตัมจึงเกิดขึ้นจากความจริงที่ว่าสูตรนี้ใช้ได้ดีเมื่อพลังงานของออสซิลเลเตอร์เหล่านั้นถูกทำให้เปลี่ยนไปเป็นขั้น ๆ ตามพหุคูณของ $h\nu$ สิ่งสำคัญก็คือว่าจะต้องเป็นตัวคูณจำนวนเต็มและต้องไม่เป็นเศษส่วน การคาดคะเนของพลังค์ที่ว่าจุดที่พลังงานเป็นศูนย์ของออสซิลเลเตอร์หนึ่ง ๆ ความมีค่าเป็น $1/2 h\nu$ พลังงานนั้นไม่เป็นผลคูณด้วยจำนวนเต็ม จึงไม่สามารถกำจัดออกไปจากออสซิลเลเตอร์ได้ และจะต้องยังคงรักษาไว้เป็นสถานะพลังงานต่ำสุดที่มีค่าแน่นอน

การคาดคะเนของพลังค์ใช้ได้ดีเมื่อใช้ร่วมกับทฤษฎีความร้อนจำเพาะของ ไอน์สไตน์ที่ยังมีฐานมั่นคงยิ่งขึ้น เมื่อโบร์ ได้ใช้ทฤษฎีควอนตัมกับแบบจำลองอะตอมของเขาที่อิเล็กตรอนไม่เคยหยุดนิ่ง แม้ว่าอิเล็กตรอนอยู่ในสถานะพลังงานต่ำสุดของมัน นั่นคือ "สถานะพื้น" อย่างไรก็ตาม ปรากฏว่ามีความแตกต่างเป็นอันมากระหว่างการที่แสดงว่าการคาดคะเนของพลังค์ถูกต้องกับการที่รู้ว่าทำไมจึงถูกต้อง คำตอบของคำถามประการหลังนี้ไม่สามารถคาดหวังได้จนกว่าจะให้คำอธิบายความหมายทางกายภาพบางประการของค่าคงที่ทางควอนตัมนั้นเอง ได้เสียก่อน ความสำเร็จของ

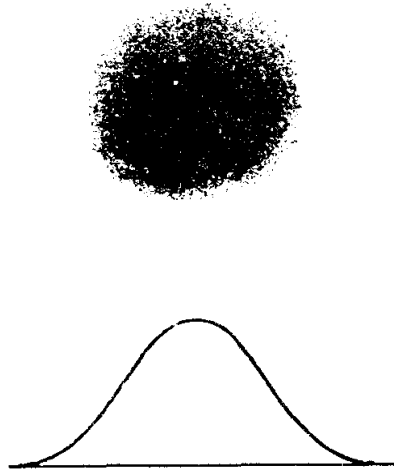
สูตรการแผ่รังสีและการใช้ความร้อนจำเพาะของ โอนส์ไต้นด์ตลอดจนหลักฐานจำนวนมากมายมหาศาลที่สะสมกันในปีต่อ ๆ มา แสดงให้เห็นว่าค่าคงที่ทางควอนตัมจะต้องมีนัยสำคัญอย่างลึกซึ้งในโลกฟิสิกส์ อย่างไรก็ดี สำหรับคนมีค่าคงที่กล่าวไม่ได้มีความหมายอะไรมากไปกว่าตัวเลขประกอบซึ่งพลังจำเป็นต้องใช้เพื่อทำให้สูตรของเขาสอดคล้องกับข้อมูลทางการทดลอง

ความสำเร็จที่ยิ่งใหญ่ของทฤษฎีควอนตัมซึ่งปรากฏจากผลงานของ โอนส์ไต้นด์และของไบริ่นน์มาได้เริ่มขยับความเลือนลอยของแนวคิดทางควอนตัมดังกล่าว แต่มีเพียงพลังเองผู้เดียวยังคงเงิบงำและระมัดระวัง เนื่องจากตระหนักดีตั้งแต่แรกว่าทฤษฎีที่ยิ่งใหญ่ของเขา ไม่สมบูรณ์อย่างน่าสลดใจ ตามที่เขาเล็งเห็นไว้ที่จะหลุดพ้นจากสถานการณ์ที่คับขันนี้ ไอน์สไตน์กล่าวคือ ให้แนวคิดควอนตัมเป็นความพิสดารทางคณิตศาสตร์หรือมีเงื่อนไขต้องใหม่ความหมายทางกายภาพลึกซึ้งนับเป็นเวลานานที่เขาไปรุดปรานในทางเลือกวิธีแรก เนื่องจากความรู้สึกหยาบคายของเขาเกี่ยวกับกฎธรรมชาติจะต้อง "สัมบูรณ์" จึงต้องการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทางฟิสิกส์ซึ่งต้องปราศจากความกำกวมใด ๆ ดังนั้น เขาจึงชอบคำอธิบายเชิงอุณหพลศาสตร์มากกว่าเชิงจลน์ ซึ่งเขาไม่เชื่อถือเพราะว่านำแนวคิดเชิงอะตอมมาใช้ เขาไม่ชอบกลวิธีเชิงสถิติของโบล์ทซ์มันน์อย่างมาก เพราะว่าจะจากแนวความคิดของเขาอันอันลึกลับค่าความยุ่งเหยิงที่เรียบง่ายของปริมาณอุณหพลศาสตร์ลงไปโดยถูกแปลออกไปในพจน์ของความน่าจะเป็น ในการแสวงหาสูตรการแผ่รังสีที่ถูกต้องของเขา กลับเพราะหำร้ายในครั้งแรกที่ตระหนักว่ากลวิธีเชิงสถิติเท่านั้นที่จะนำไปสู่ความถูกต้อง ต่อมาตัวเขาเองก็ต้องนำแนวคิดเชิงอะตอมเข้าไปใช้ในปริมาณอุณหพลศาสตร์ แม้ว่าก่อนที่รายงานฉบับแรกเรื่องสูตรการแผ่รังสีของเขาพิมพ์เผยแพร่ออกไป พลังค์ได้พยายามแต่ไม่ประสบความสำเร็จที่จะแยกแนวความคิดทางควอนตัมออกจากงานของเขา เหตุผลสำคัญของเขาที่ทำให้ยั้งยืนสำหรับทฤษฎีของเขาล้มเหลวในปีต่อ ๆ มาหลังจากที่ไคพพ์เผยแพร่ครั้งแรกกับการไม่ใช้ผลงานของ โอนส์ไต้นด์ในทฤษฎีของเขา คือ ความหวังที่เขาจะหาทางย้อนกลับไปสู่ความต่อเนื่องของฟิสิกส์แผนเดิม

ขณะที่เวลาผ่านไปหลายปีและแนวคิดทางควอนตัมเพิ่มพูนความสำเร็จครั้งแล้วครั้งเล่า ความหวังของเขาเริ่มจางหายไป ดังนั้น จึงไม่มีทางเลือกอีกต่อไปนอกจากยอมรับความจริงทางกายภาพของแนวคิดนี้ สิ่งที่ต้องทำต่อไปคือการค้นหาความหมายของมัน นับเป็นอีกครั้งหนึ่งที่ยัง

ตอนอันคืบแรก เริ่มต้นโดย ไอน์สไตน์ แม้ว่าคนทั่วไปอาจสงสัยว่าระยะ เริ่มแรกนั้นแม้แต่ ไอน์สไตน์ก็ได้
 เห็นช่องทางที่มีอยู่ด้วยหรือ หนึ่งในก่อนหน้านั้นที่เขาได้เขียนรายงานเกี่ยวกับความร้อนจำเพาะ
 เขาได้พิมพ์เผยแพร่การประยุกต์ทฤษฎีควอนตัมกับปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก เขาได้อธิบายเกี่ยว
 กับการปลดปล่อยอิเล็กตรอนให้เป็นอิสระจากผิวของโลหะซึ่งได้รับการฉายแสงอยู่ เนื่องจากการกระ
 ทำของแสงแต่ละควอนตัม แนวคิดที่ว่า "หน่วยของแสง" ตามที่เขาเรียกมันครั้งแรกนั้น สร้าง
 ความยุ่งยากแก่วิชาฟิสิกส์แผนเดิมซึ่งไม่สามารถอธิบายได้ ถ้าการพุ่งชนนั้นมีจริงและทฤษฎีของ
 ไอน์สไตน์ก็สามารถหาคำอธิบายให้กับการสังเกตทั้งหมดได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้น แสงในลักษณะนี้จะ
 ต้องหาคำแห่งอยู่ในปริภูมิได้ ลักษณะของแสงที่เป็นอนุภาคเช่นนี้ว่าต้นเคยเสนอไว้ครั้งหนึ่ง แต่ได้
 ยกเลิกไปนานแล้ว เนื่องจากหันไปนิยมทฤษฎีคลื่นแทน เมื่อพิจารณาถึงการทดลองที่มีชื่อเสียงเรื่องการ
 แทรกสอดของยังก์และเฟรเนล จึงดูเหมือนจะปฏิเสธการอธิบายแสงด้วยการเคลื่อนที่ของคลื่นไม่ได้
 คำถามที่เกิดขึ้นว่าลักษณะคลื่นของแสงสามารถทำให้สอดคล้องกับลักษณะที่เป็นอนุ
 ภาคตามทฤษฎีของ ไอน์สไตน์ได้อย่างไร ไอน์สไตน์ได้อธิบายปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกอย่างฉลาด
 โดยอาศัยทฤษฎีควอนตัม แต่ในเวลาเดียวกันเขาได้ให้ความสนใจกับความเป็นสองภาคของคลื่นและ
 อนุภาคที่ต้องแฝงอยู่ในวิชาฟิสิกส์เป็นเวลามากกว่าสี่สิบปี ควอนตัมของแสงพุ่งซึ่งต่อมาเรียกว่าโฟ
 ตอนจะเป็นอนุภาคหรือคลื่นอย่างไรแน่ ดูเหมือนไม่มีคำตอบสำหรับปริศานี้และเซอร์วิลเลียม แบรกก์
 ได้บ่งบอกสถานการณ์ไว้ดีเมื่อเขาพูดว่าทฤษฎีคลื่นของแสงจัดสอนในทุกวันจันทร์ พุธและศุกร์ แต่
 ทฤษฎีอนุภาคจัดสอนในทุกวันอังคาร พฤหัสบดีและเสาร์ สถานการณ์กลับยิ่งเลวร้ายลงในปี ค.ศ.
 1924 เมื่อชายหนุ่มชาวฝรั่งเศสคือ เจ้าชายหลุยส์ เดอ บรอยล์เสนอวิทยานิพนธ์ปริศนาเอกของเขา
 ว่า ไม่เพียงแต่คลื่นแสงมีลักษณะอนุภาค แต่อนุภาคเองเช่น อิเล็กตรอนอาจจะมีลักษณะคลื่นด้วยเช่น
 กัน นับเป็นความสำคัญที่แนวคิดเชิงปฏิวัตินี้มาจากความนึกคิดใหม่ ๆ ของคนหนุ่มที่ไม่มีความผูกพันกับ
 ความคิดที่ฝังแน่นตามแบบเดิม สิ่งที่เขาทำคือทั้งหมดนี้มาจากความสงสัยว่าธรรมชาติขึ้นชอบความสม
 มาตรา และอาศัยพื้นฐานนี้เขาทำนายถึงขนาดของความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนขณะเคลื่อนที่ด้วย
 อัตราเร็วขนาดหนึ่งได้ แน่แน่นอนว่าคลื่นเดอบรอยล์จะต้องถูกค้นพบในไม่ช้าโดยนักทดลองผู้ซึ่งแสดงว่า
 คลื่นเดอบรอยล์นำไปสู่การเกิดรูปแบบอินเทอร์เฟียเรนซ์เช่นเดียวกับของคลื่นแสง

7.1 ความไม่แน่นอนทำให้เป็นไปไม่ได้ที่จะระบุตำแหน่งอนุภาคได้อย่างแม่นยำมากกว่าที่กำหนด โดยค่าคงที่ของพลังค์ คลื่นเดอบรอยล์ของอนุภาค เท่านั้นที่กำหนดโอกาสของการพบอนุภาคไว้ในช่วงระยะที่กำหนด ซึ่งหากพ้นจากช่วงนี้จะถูกลบเลือนออกไปด้วยความสัมพันธ์ของความไม่แน่นอน



ครึ่งเนตเหมือนว่าชาวฟิสิกส์ได้กลายเป็นเรื่องพลไปเสียแล้ว และอะไร ๆ ก็อาจจะเป็นไปได้อะไร เรื่องราวในปีเหล่านั้นนับเป็นนิยายอยู่ในตัวมันเอง ซึ่งแม้จะชวนให้เกิดความสนใจแต่เราไม่สามารถติดตามรายละเอียดในหนังสือของผู้ซึ่งในที่สุดสามารถแก้ปัญหาได้กลายเป็นรายชื่อของผู้ได้รับรางวัลโนเบลทั้งสิ้น เราไม่สามารถจะทำอะไรมากไปกว่ากล่าวถึงจุดเด่นในบางเรื่อง ในต้นฤดูร้อนของปีค.ศ. 1925 นักทฤษฎีหนุ่มชาวเยอรมันชื่อว่า เวอร์เนอร์ ไฮเซนเบิร์ก เกิดอาการภูมิแพ้รุนแรง เขาจึงได้เดินทางไปยังเฮลซิงก์เพื่อให้สมองโล่ง เขากลับมาพร้อมกับข้อสรุปที่น่าทึ่ง ซึ่งนำไปสู่บันไดขั้นแรกกล่าวคือ "โดยหลักการแล้วจะต้องมีแต่ปริมาณซึ่งสามารถสังเกตได้เท่านั้นที่จะอนุญาตให้นำไปใช้ในการคำนวณได้" หลักการนี้ส่งผลอย่างหนักแน่นต่อแนวโน้มที่ถือว่า อะตอมหรืออิเล็กทรอนิกส์เคลื่อนที่ด้วยตัวเองแต่มีขนาดเล็กกว่ามาก เราไม่สามารถสังเกตการณ์ระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ในตัวเองเดียวกับเหตุการณ์บนโต๊ะบิลเลียด ดังนั้น จึงไม่อาจเกิดเหตุการณ์ตามคำอธิบายเปรียบเทียบกันนั้นได้จริง

ในปีต่อมาที่ชาวออสเตรียชื่อ แอร์วิน ชเรอดิงเงอร์ ได้เปลี่ยนแปลงรูปแบบอะตอมของโบร์ ซึ่งจัดเป็นวงควอนตัมในขนาดย่อยของระบบสุริยะเสียใหม่ ให้เป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนตามธรรมชาติของคลื่นเดอบรอยล์ของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียส ทำให้พลังพอใจรูปแบบใหม่เป็นอย่างมาก เพราะว่าลักษณะคลื่นค่อนข้างจะสัมพันธ์กับการกลับมาสู่ความต่อเนื่องอีก ในช่วงเวลานั้นที่ผ่านไปอย่างรวดเร็วดูเหมือนว่า ลักษณะเชิงอะตอมของทั้งวัตถุและพลังงานอาจจะเลื่อนไปเป็นคลื่นต่อเนื่องหลายรูปแบบได้ อย่างไรก็ตาม ไม่สามารถทำให้นาฬิกาเดิมกลับได้และว่าฟิสิกส์แบบเดิมไม่อาจหวนกลับมาด้วยชัยชนะพร้อมกับหลักการควอนตัมอยู่ในวงแขนได้ หลังจากรายงานของชเรอดิงเงอร์พิมพ์ออกเผยแพร่ว่าได้สองสามเดือน แมกซ์ บอร์นซึ่งอยู่ในกอดติงเกนได้พบธรรมชาติที่แท้จริงของคลื่นว่า บังถึงความน่าจะเป็นเชิงสถิติของการพบอนุภาคนั้น นับแต่นั้นเป็นต้นมานักฟิสิกส์พอใจที่จะเรียกสิ่งรบกวนขนาดเล็กใด ๆ ในปริภูมิว่าเป็นอนุภาคหนึ่ง โดยไม่คำนึงว่าเป็นอิเล็กตรอนหรือโฟตอน ธรรมชาติของอนุภาคนั้นอธิบายได้ด้วยฟังก์ชันของสิ่งรบกวนซึ่งถูกสร้างขึ้นสิ่งที่บ่งบอกถึงชนิดของสิ่งรบกวนได้แก่ มวล ประจุไฟฟ้า โมเมนตัมเชิงมุมและอื่น ๆ อีก อนุภาคทั้งหมดเกี่ยวข้องกับคลื่นและคลื่นเหล่านี้แสดงถึงโอกาสซึ่งเราสามารถหาอนุภาคในบริเวณที่กำหนดให้อยู่ในปริภูมิ ยอดของคลื่นหมายความว่าความน่าจะเป็นไปได้มากที่สุดของการพบอนุภาคนั้น และหากที่ใดมีความสูงของคลื่นเป็นศูนย์อย่างแท้จริง นั่นคือ เรามีความหวังเพียงเล็กน้อยในการพบอนุภาคในสถานนั้น(รูปที่ 7.1)

ดังนั้น หลังจากไอน์สไตน์ได้เปิดเผยทฤษฎีความเป็นสองภาคของคลื่นและอนุภาคไปแล้วก็แปลกว่าพอที่ บอร์นจึงแก้ปัญหานี้ได้โดยแสดงให้เห็นว่า เมื่อย่อยส่วนลงสมบัติของอะตอมจะทำให้กฎของธรรมชาติ เป็นไปในเชิงสถิติเสมอ นอกจากนั้นยังมีอีกขบวนการหนึ่งที่ต้องนำมาใช้คือ การหาค่าคงที่เชิงควอนตัมต้องอยู่ในขอบข่ายของแนวความคิดใหม่เหล่านี้ เห็นว่าไฮเซนเบิร์ก เป็นผู้จัดหาค่าตอบนี้ไว้แล้วเมื่อครั้งรักษาโรคมณีแพ้อยู่ในเฮลโลแลนตนเอง เขาถามตัวเองว่าคนเราจะกำหนดตำแหน่งของอนุภาคได้ใกล้เคียงสักเพียงใด โดยระลึกอยู่ว่าวิธีการสังเกตโดยตรงเท่านั้นที่สามารถยืนยันถึงความจริงทางกายภาพได้ เช่น เมื่อมีผู้ต้องการค้นหาอิเล็กตรอนสักตัวหนึ่ง ดังนั้น จำเป็นต้องอาศัยเครื่องตรวจจับตำแหน่งของมัน อนุภาคมูลฐานอื่น ๆ เช่น โฟตอนสามารถนำมาใช้เพื่อจุดประสงค์

ได้ แต่ตอนนี้เริ่มมีความยุ่งยากเกิดขึ้นทันที ถ้าใช้โฟตอนหมดคลื่นสั้น กล่าวคือค่าของ $h\nu$ ที่สูงถูกนำมาใช้ ดังนั้น พลังงานของมันจะ ไปเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นหรือ เล็กครอนในลักษณะที่คาดการณไม่ได้ คราวนี้เมื่อเปลี่ยนมาใช้โฟตอนที่มี $h\nu$ ต่ำ เราพบว่าคลื่นของมันจะยาวมากเกินไป กล่าวคือตำแหน่งของแถบเองเป็นตำแหน่งที่ไม่แน่นอนจนกระทั่งจนไม่มีการโยกย้ายที่จะ จะจะลดลง ไปถึงตำแหน่งของอิเล็กตรอนด้วยความเหยิงตรงแต่อย่างใด

ไฮเซนเบิร์กสามารถให้ผลสรุปว่า เหตุผลเช่นนี้ไม่ได้เกิดขึ้นกับชนิดของการทดลองที่เลือกใช้ชนิดใดชนิดหนึ่งโดยเฉพาะ แต่ที่ใช้ได้ถูกต้องทั่ว ๆ ไปทีเดียว เขาพิสูจน์ได้ว่าตามหลักการแล้วการสังเกตุไม่สามารถทำได้เกินกว่าขีดจำกัดของความแน่นอน และปรากฏว่าขีดจำกัดนี้ถูกกำหนดด้วยค่าคงที่เชิงควอนตัม h ในที่สุดความหมายของค่าคงที่สากลหลบลบซึ่งปรากฏครั้งแรกในสูตรการแผ่รังสีของพลังค์ถูกเปิดเผยว่า ค่านี้หมายถึงขีดจำกัดของความแน่นอนในวิชาฟิสิกส์

หลักความ ไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์กมีผลสืบเนื่องหลักซึ่งไม่แต่เพียงในวิชาฟิสิกส์เท่านั้น แต่มีความสำคัญทั่วไปทีเดียวในการพิจารณาเชิงปรัชญา เกี่ยวกับปัญหาของทฤษฎีที่ว่าการกระทำของของมนุษย์ย่อมไม่เป็นอิสระแต่ถูกกำหนดขึ้นโดยเจตนาและความพอใจ คำอธิบายเกี่ยวกับขนาดของ h หรือน้อยกว่านี้เป็นเพียงทฤษฎีการคาดคะเนทางปรัชญาและ ไม่สามารถอ้างได้ว่ามีความหมายแต่อย่างใดเลยในแต่ละเหตุการณ์ที่เกี่ยวข้อง

นับว่าโชคที่ทฤษฎีมหาคณิตหลายทางฟิสิกส์ได้รับความคุ้มครองด้วยวิชาสถิติเนื่องจากสถิติจะแทนค่าเฉลี่ยของแต่ละเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจำนวนมากเสมอ อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันรากฐานของการใช้หลักสถิติ ได้เปลี่ยน ไปอย่างสิ้นเชิง ในการแก้ปัญหาเชิงสถิติของฟิสิกส์แผนเดิมปริมาณมหาคณิตถูกกำหนดขึ้นด้วยค่าเฉลี่ยของแต่ละเหตุการณ์ซึ่งแต่ละค่าหามา ได้อย่างสมบูรณ์ ในตอนนั้นหลักสถิติเป็นเพียงการใช้คณิตศาสตร์อย่างง่ายและจะสมมติว่าถ้าเรามีกรรมวิธีในการสังเกตุอย่างเพียงพอและมีกรรมวิธีที่ดีด้วย เช่นกันในการคำนวณ เราอาจจะสามารถศึกษาแต่ละเหตุการณ์แทน ได้โดยเฉพาะ โดยใช้กลศาสตร์แผนเดิม แต่ในวิชากลศาสตร์ควอนตัมปรากฏว่ากฎของฟิสิกส์ทั้งหลาย เป็นผลลัพธ์จากคามากมายทางสถิติของเหตุการณ์เดียวกันหลายเสมอ อย่างไรก็ตามแต่ละค่านี้เป็นค่า ไม่แน่นอน ยกตัวอย่างเช่น ความสัมพันธ์ของความ ไม่แน่นอนเรา ไม่สามารถทำนาย

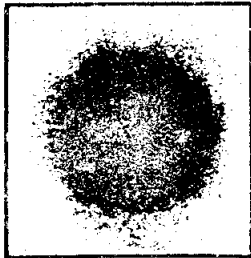
ได้โดยหลักการว่าแต่ละอะตอมของเราเดิมจะสลายตัวภายในวันที่ต่อไปหรือว่ายังคงอยู่ในสภาพเดิมเป็นเวลานานนับแสนปี ในทางตรงกันข้ามหลักสถิติเพียงแต่อนุญาตให้เราทำการทำนายที่เที่ยงตรงว่าในก้อนธาตุเรเดียมใด ๆ ซึ่งประกอบด้วยจำนวนอะตอมมากมายนั้น ครึ่งหนึ่งของจำนวนอะตอมจะสลายตัวไปหมดภายในเวลาหนึ่งพันหกร้อยปี ในฟิสิกส์แผนเดิมเราคิดว่าการใช้หลักสถิติหมายความว่าเราไม่จำเป็นต้องกังวลกับแต่ละเหตุการณ์ แต่ฟิสิกส์ควอนตัมได้สอนเราว่าเราไม่สามารถรู้อะไรเกี่ยวกับแต่ละเหตุการณ์ได้

ในต้นหลักความไม่แน่นอนมีความสำคัญสำหรับจุดประสงค์ของเรา เพราะว่าหลักการนี้นำไปสู่จุดกลับที่พลังงานเป็นศูนย์โดยตรง ในความเป็นจริงคุณสมบัติที่เป็นปริศนาในตอนนี้ได้สูญสิ้นไปแล้วเมื่อปรากฏว่าเป็นผลลัพธ์โดยตรงของความไม่แน่นอน ไฮเซนเบิร์กได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อเราพยายามสังเกตอนุภาคหนึ่งเราอาจจะทำให้ตำแหน่งของมันเป็นค่าไม่แน่นอนขณะที่เราวัดความเร็วของมัน หรือในทางกลับกันเราจะทำให้ความเร็วของมันไม่แน่นอนเมื่อหาตำแหน่งของมัน อย่างไรก็ตาม ความไม่แน่นอนเป็นผลมาจากผลคูณของสองปริมาณ ตามความเป็นจริงนั้นแทนที่จะศึกษาความเร็ว v เราต้องใช้โมเมนตัม mv เพื่อที่จะให้มวล m ของอนุภาคปรากฏได้ ดังนั้นความสัมพันธ์ของความไม่แน่นอนคือ

$$\Delta mv \times \Delta l \gtrsim h$$

ในที่นี่ l มีมิติของความยาว กล่าวคือเป็นบรรทัดฐานของเราสำหรับการวัดตำแหน่ง และสำหรับเครื่องหมาย Δ ใช้เพื่อบ่งชี้ว่าเรากำลังศึกษาการเปลี่ยนแปลงทั้งหลายในโมเมนตัมหรือตำแหน่ง สมการเช่นนี้จึงกล่าวว่าเราเพียงแต่สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ เช่นนั้นคือเมื่อผลคูณมีมากกว่าหรืออยู่ในขนาดเดียวกับค่าคงที่เชิงควอนตัม h ชีคจำกัดของการสังเกตสิ่งนั้นจึงกำหนดด้วย $mv \times l \sim h$ หรือทำให้ผลเหมือนกันคือ $mv \sim h/l$ เมื่อยกกำลังสองและหารสมการนี้ด้วย m เราได้ $mv^2 \sim h^2/ml^2$ ขณะนี้ข้างซ้ายมือของสมการคือมวลคูณด้วยกำลังสองของความเร็วและปริมาณเหมือนกับที่เราได้เห็นในบทต้น ๆ แล้วว่าใช้แทนพลังงานจลน์ของอนุภาคที่มีมวล m แสดงให้เห็นว่าความไม่แน่นอนในการกำหนดตำแหน่งของอนุภาคภายในระยะทาง l ทำให้เกิดพลังงาน h^2/ml^2 แก่อนุภาคด้วยอยู่บ้าง

7.2 ความไม่แน่นอนทำให้เกิดพลังงานแก่อนุภาคที่ถูกจำกัดขอบเขตภายในกล่อง



วิธีหนึ่งในการพิจารณาปัญหาคือ โดยการดูว่าอะไรจะเกิดขึ้นเมื่อเราจำกัดอนุภาคหนึ่งให้อยู่ภายในปริภูมิที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 ขณะนี้เรารู้ว่าอนุภาคอยู่ที่ใดที่หนึ่งภายในกล่อง แต่หลักความไม่แน่นอนไม่อนุญาตให้เราค้นหาตำแหน่งที่แท้จริงของมันได้ภายในเวลาที่กำหนด (รูปที่ 7.2) ตำแหน่งใด ๆ ภายในกล่องมีความน่าจะเป็นที่แน่นอนของการพบอนุภาคและความน่าจะเป็นนี้ถูกกำหนดโดยคลื่นเคออบรอยล์ ซึ่งอาจจะบอกเราว่ามีโอกาสดีที่จะพบมันตรงจุดศูนย์กลางมากกว่าที่จะพบมันตรงบริเวณที่กำหนดไว้ใกล้เคียง นับว่าตรงกับคำพูดในลักษณะซึ่งไม่แน่นอนในรายละเอียดที่ว่า อนุภาคที่ส่งไปมาภายในกล่องจะพบได้ในบางส่วนในบางเวลาเท่านั้น ยิ่งไปกว่านั้นยังสามารถเห็นได้จากสมการของเราว่า ถ้าทำให้ 1 สั่นลง กล่าวคือหากอนุภาคถูกจำกัดให้อยู่ในกล่องที่เล็กลงกว่าเดิม พลังงานของอนุภาคจะเพิ่มขึ้นและจะต้องสั่นรุนแรงยิ่งขึ้น เหตุการณ์เดียวกันจะเกิดขึ้นถ้าทำให้ m น้อยลง กล่าวคือถ้าอนุภาคที่เบากว่าไปวางไว้ในกล่อง

โดยอาศัยจากความจริงที่ว่า การสั่นของอนุภาคทำให้นั้นอาจจะครอบครองส่วนหนึ่ง ส่วนใดของกล่องอยู่ ฉะนั้นจึงเป็นผลสืบเนื่องโดยตรงของความไม่แน่นอน พลังงานซึ่งอนุภาคต้องมีเพราะความเพียงพอที่จากคณนอใหม่เคลื่อนที่ใดเท่านั้น นับว่าเป็นพลังงานที่จุดศูนย์ ถ้าพิจารณาภายในผลึกซึ่งแต่ละอะตอมถูกจำกัดภายใน "กล่อง" ที่เกิดขึ้นจากอะตอมข้างเคียงทั้งหลายทำให้ไม่สามารถหนีไปได้และครอบครองอยู่โดยลำพัง เพราะฉะนั้นแม้แต่ "สถานะพื้น" อะตอมจึงมีพลังงาน h^2/m^2 โดยที่ l คือระยะระหว่างอะตอมข้างเคียง นอกจากนั้น เนื่องจากพลังงานนี้เกิดขึ้นจากการที่ปริมาณเท่านั้นที่อะตอมอยู่ในแลตทิซของผลึก จึงไม่สามารถยกเล็กเสียได้

หลักความไม่แน่นอนไม่เพียงแต่อธิบายการที่มีพลังงานที่จุดศูนย์เท่านั้น แต่ยังให้เหตุ

ผลสำหรับธรรมชาติของมันด้วย เราได้เห็นแล้วว่าความน่าจะเป็นเชิงสถิติอันดีของการค้นหาอะตอม ณ ที่ใดๆ ในปริภูมิซึ่งอะตอมข้างเคียงยินยอมให้อยู่ได้ เท่ากับการสั่นไปมาของมันภายในขอบเขตนี้ เพราะฉะนั้นพลังงานที่จุดศูนย์กลางดูเหมือนไม่แตกต่างไปจากพลังงานความร้อน ซึ่งแสดงด้วยการสั่นของอะตอมเช่นเดียวกัน

หลักฐานโดยตรงสำหรับความคิดที่ว่าพลังงานที่จุดศูนย์กลางของผลึกแสดงด้วยตัวมันเอง โดยการสั่นของอะตอมทั้งหลายถูกเตรียมไว้ในปี ค.ศ. 1927 ซึ่งตรงกันทีเดียวที่ไฮเซนเบิร์กได้เสนอหลักความไม่แน่นอน หลักฐานนี้ได้มาจากการตรวจสอบเกล็ดหินเฮาต์ด้วยรังสีเอกซ์กระทำโดยอาร์ คัมเบลยู เจมส์ และ นางสาวอี เอ็ม เฟิร์ท ที่แมนเชสเตอร์ การค้นพบว่ารังสีเอกซ์เมื่อตกไปยังผลึกถูกเลี้ยวเบนโดยรูปแบบที่สม่ำเสมอของแลตทิซของอะตอมได้ทำไว้แล้วใน ค.ศ. 1912 โดยต่างฝ่ายต่างทำอย่างอิสระ ทั้งโดยแมกซ์ ฟอน ลาเอฝ่ายหนึ่งและสองพ่อลูกตระกูลแบรกล้ออีกฝ่ายหนึ่ง กรรมวิธีใหม่ของการวิจัยค้นคว้านี้ได้เปิดประตูไปสู่การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของสสารในขอบเขตของมิติซึ่งอะตอม ก่อนหน้านั้นเราพบการใช้กรรมวิธีนี้ในการสังเกตการจลศาสตร์ที่เกิดขึ้นในผลึกผลม การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ให้ข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่งของอะตอมในผลึกเทียบกับอะตอมอื่น ๆ ยกตัวอย่างเช่น เผยให้เห็นความแตกต่างในโครงสร้างระหว่างเพชรและแกรไฟท์ซึ่งเป็นโครงสร้างของแลตทิซสองชนิดที่แตกต่างกัน แต่ทั้งสองประกอบด้วยอะตอมคาร์บอนเหมือนกัน อย่างไรก็ตาม อะตอมไม่ได้อยู่นิ่งกับที่ เพราะสั่นไปรอบ ๆ ตำแหน่งสมดุลภายใต้อิทธิพลของพลังงานความร้อนของมัน การเคลื่อนที่ซึ่งความร้อนยอมทำให้เกิดรูปแบบรังสีเอกซ์เสมอซึ่งในระดับหนึ่งจะ ไม่ชัดเจน จากการที่อุณหภูมิทำให้การเคลื่อนที่ซึ่งความร้อนลดลง ดังนั้นความไม่ชัดเจนจะลดน้อยลงด้วย ฉะนั้นการทดลองที่แมนเชสเตอร์จึงมุ่งหมายที่จะตรวจสอบผลึกเกล็ดหินเฮาต์เมื่ออยู่ที่อุณหภูมิอากาศเหลว ในปีต่อมาการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยอาศัยคณิตศาสตร์อย่างรอบคอบได้นำมาพิมพ์เผยแพร่ ด้วยความร่วมมือของวอลเลอร์และฮาร์ทรี แสดงอย่างคลุมเครือว่า การสั่นของอะตอมซึ่งบนทฤษฎีที่อุณหภูมิต่ำมากเกินกว่าที่จะเป็นผลมาจากพลังงานความร้อนของผลึก พลังงานที่จุดศูนย์กลางซึ่งแสดงออกด้วยการสั่นของอะตอมได้ถูกบันทึกในการสังเกตเชิงการทดลองโดยตรง

แม้ว่าก่อนหน้านี้คนทั่วไปเริ่มสงสัยอยู่แล้วว่าพลังงานที่จุดศูนย์อาจจะสำแดงตัว
เองออกมาในพฤติกรรมของวัตถุที่อุณหภูมิค่า ในปี ค.ศ. 1916 เนินส์ก็ได้นำความสนใจไป
ที่การบิดเบือนอย่างเด่นชัดไปจากกฎของเทราตัน ซึ่งพบในไฮโดรเจนเหลวและยังพบในฮีเลียมเหลว
อีกด้วย กฎนี้ซึ่งนำมาใช้โดยนักบุกเบิกงานวิจัยที่อุณหภูมิค่าสำหรับทำนายพฤติกรรมของก๊าซ โดย
บุคคลเหล่านี้วางโครงการที่จะทำให้ก๊าซนั้นเหลว เกี่ยวข้องกับความร้อนของการกลายเป็นไอ นั่นคือ
พลังงานที่ต้องใช้เพื่อทำให้ของเหลวกลายเป็นไอ พลังงานส่วนนี้จำเป็นต้องให้กับโมเลกุลในของ
เหลวทำให้มีความเร็วสูงพอที่จะทำให้มันแตกตัวออกจากแรงดึงดูดของโมเลกุลข้างเคียง เทราตัน
ได้แสดงให้เห็นว่าพลังงานนี้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ กล่าวคือ ยิ่งจุดเดือดของสารค่า
ลงเพียงใดความร้อนของการระเหยกลายเป็นไอจะยิ่งน้อยลง นั่นว่าเรื่องนั้นสมเหตุสมผลอย่างแน่นอน
เพราะเราทราบว่าสำหรับจุดเดือดค่านั้นเป็นเพราะแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีค่าน้อย

ดูว่าเราได้สังเกตเห็นความยุ่งยากนั้นจะเห็นได้จากกรณีที่เขาระมัดระวังเป็นพิเศษใน
การป้องกันความร้อนหลังไหลเข้าไปในโคริโอสแตทซึ่งเขากำลังจะทำไฮโดรเจนเหลวอยู่ โดยอาศัย
กฎของเทราตันช่วยให้ดูว่าเราสามารถคาดการณ์ได้ว่าไฮโดรเจนจะใช้ความร้อนของการกลายเป็นไอ
น้อยกว่าออกซิเจนถึงสี่เท่า ซึ่งหมายความว่าไฮโดรเจนจะกลายเป็นไอได้ง่ายมาก สิ่งที่เขาไม่สำ
มารณการคาดการณ์ได้และไม่สามารถอธิบายได้ก็คือ ความร้อนของการกลายเป็นไอมีค่าน้อยกว่าที่ทำนาย
ไว้ถึงสองเท่า สิ่งนี้ผิดแผกไปอย่างร้ายแรงจากกฎของเทราตันได้ถูกค้นพบ ยิ่งกว่านั้น คาเมอรัลิ่ง
อนเนสยังพบความบิดเบือนไปจากกฎของเทราตันที่เลวร้ายกว่านั้นในฮีเลียมเหลวด้วย

หลังจากนั้นต่อมาอีกเจ็ดปีปรากฏว่าข้อมูลทางการทดลองเกี่ยวกับก๊าซความแน่นมีมาก
ขึ้น ข้อเสนองานของเนินส์ที่ให้พิจารณาการบิดเบือนเหล่านี้ว่าเป็นผลมาจากเนื่องจากพลังงานที่จุดศูนย์
นั้นจึงเป็นที่ยอมรับในบรรดาศาสนิกของเขาคือ เบนเนวิทซ์ และ ไชมอน ทั้งสองได้ใช้ผลเหล่านี้
ในการคำนวณซึ่งทำให้แสดงให้เห็นได้ว่า ค่าความร้อนของการกลายเป็นไอมีค่าต่ำอย่างคาดไม่ถึงนี้ แท้
จริงแล้วสามารถอธิบายได้โดยอาศัยอิทธิพลของพลังงานที่จุดศูนย์นั่นเอง

กฎของเทราตันใช้ได้ทั้งอุณหภูมิปกติและอุณหภูมิสูง และอาศัยความจริงที่ว่าพลังงาน
ทั้งหมดของสสารมีค่าโดยประมาณเท่ากับพลังงานความร้อนของมัน พลังงานนี้คือพลังงานที่ใช้สำหรับ

ทำให้ของเหลวระเหยกลายเป็นไอ และจะมีค่าแปรตามอุณหภูมิสัมบูรณ์โดยประมาณ อย่างไรก็ตาม เหตุการณ์จะแตกต่างไปจากนี้ขณะที่เข้าใกล้ศูนย์สัมบูรณ์ เพราะว่าขณะนั้นส่วนใหญ่ของพลังงานทั้งหมดเกิดขึ้นจากพลังงานที่จุดศูนย์ซึ่งยังคงอยู่ในสสาร และไม่ได้ลดน้อยลงตามอุณหภูมิที่ต่ำลงประการใด (รูปที่ 6.4 ข) ด้วยเหตุนี้จึงมีพลังงานของการสั่นค่อนข้างมากกว่าที่ได้จากฟิสิกส์แบบเดิมอย่างเห็นได้ชัด และพลังงานส่วนนี้เองที่ทำให้เกิดการระเหยขึ้น นั่นคือ ความร้อนที่ใช้ไปทำให้ของเหลวระเหยกลายเป็นไอน้อยกว่าที่คาดไว้จากพื้นฐานการคำนวณเดิม

ในทำนองเดียวกันกับที่เป็นจริงสำหรับความร้อนของการระเหยกลายเป็นไอน้ำว่าเป็นความจริงสำหรับพลังงานที่ต้องใช้ในการทำให้วัตถุหลอมเหลวด้วย การศึกษาที่ปรากฏว่าเกิดขึ้นในฮีเลียม คาเมอรลิ่งห์ ออนเนสไม่สามารถทำความเข้าใจว่าเหตุใดแม้กระทั่งที่อุณหภูมิต่ำสุดซึ่งเขาทำได้ถึง 0.8 องศาเหนือศูนย์สัมบูรณ์เท่านั้น แต่ฮีเลียมยังคงเป็นของเหลวอยู่โดยไม่ยอมกลายเป็นของแข็ง ขณะนี้เรารู้แล้วว่าแม้แต่ที่ศูนย์สัมบูรณ์ฮีเลียมจะยังคงเป็นของเหลวและรู้ว่าต้องใช้ความดันภายนอกถึง 25 บรรยากาศเพื่อเปลี่ยนให้มันไปอยู่ในสถานะของแข็ง (รูปที่ 10.3) ในสภาพของเหตุการณ์เช่นนี้ไม่สามารถอธิบายได้โดยฟิสิกส์แบบเดิมซึ่งใคร ๆ จะต้องคาดคิดว่าการลดอุณหภูมิสารใด ๆ จะต้องกลายเป็นของเหลวก่อนในตอนแรกและในที่สุดถึงจุดเยือกแข็งจึงกลายเป็นของแข็งได้ ไชมอน ได้แสดงว่าพฤติกรรมประหลาดของฮีเลียม เป็นผลสืบเนื่องโดยตรงของพลังงานที่จุดศูนย์มีค่าสูง พลังงานนี้มากพอที่จะเอาชนะแรงดึงดูดเพียงเล็กน้อยของสสาร จนกระทั่งการสั่นที่จุดศูนย์ของอะตอมฮีเลียมแม้แต่ที่ศูนย์สัมบูรณ์ก็ทำให้อะตอมอยู่ห่างไกลเกินกว่าที่จะรวมตัวกันเป็นผลึกได้ การใช้ความดันเพิ่มเติมจากภายนอกเข้าไปเท่านั้นจึงจะทำให้อะตอมฮีเลียมเข้าใกล้กันเพียงพอที่จะทำให้มันมีโอกาสเชื่อมโยงกันขึ้นเป็นแลตทิซของแข็ง แม้แต่เหนือศูนย์สัมบูรณ์ขึ้นไปมาก ๆ ผลของพลังงานที่จุดศูนย์ซึ่งมีต่อธรรมชาติของฮีเลียม เหล่านี้ยังคงส่งผลออกมาเป็นความหนาแน่นค่าอย่างผิดปกติ ซึ่งเป็นลักษณะอีกประการหนึ่งของคาเมอรลิ่งห์ ออนเนสได้บันทึกไว้ในวันแรกของการทำฮีเลียมเหลว

นอกจากนี้ ยังมีอีกกรณีหนึ่งซึ่งพลังงานที่จุดศูนย์สูงกว่าในฮีเลียมยิ่งขึ้นไปอีก แต่เพื่อให้ทราบซึ่งถึงความสำคัญพิเศษโดยเฉพาะของกรณีนี้ เราจะต้องย้อนกลับไปในเรื่องเริ่มต้นของการสร้างกฎข้อที่สาม วิธีโดยเฉพาะซึ่ง เนินส์ ได้พิสูจน์ทฤษฎีของเขาโดยพิจารณาความสัมพันธ์ทางเคมี

ต่างๆ ได้ทำให้กฎเมฆขอบพร่องอย่างน่าเสียดาย เขาเพียงแค่สามารถตั้งข้อสมมติฐานความถูกต้องของกฎนี้สำหรับสารในสถานะควบแน่น ซึ่งหมายถึงสำหรับของเหลวหรือของแข็งทั้งหลายแต่ใช้ไม่ได้สำหรับก๊าซ ความยุ่งยากนี้โดยตรงที่ว่าความร้อนจำเพาะของก๊าซอุดมคติต้องมีค่าแน่นอนอยู่เสมอแต่ที่ศูนย์สัมบูรณ์ตามฟิสิกส์แผนเดิม นับว่าสามารถโต้แย้งได้และปรากฏว่าได้ถูกโต้แย้งจริง ๆ ด้วย เมื่อเข้าไปใกล้ศูนย์สัมบูรณ์สารทั้งปวงจะเปลี่ยนไปอยู่ในสถานะควบแน่นและด้วยเหตุผลนี้แนวคิดของก๊าซอุดมคติจึงมีความหมายเพียงเล็กน้อย แต่เน็นสต์ไม่ได้คำนึงถึงสิ่งเหล่านี้ เพราะเขาได้พิจารณาว่าการอ้างเหตุผลเช่นนี้เป็นการหลบเลี่ยงที่ไม่มีคุณค่าสำหรับทฤษฎีของเขาเลย เขายืนยันว่าประการหลังนี้เป็นกฎพื้นฐานของอุณหพลศาสตร์ และเมื่อเป็นเช่นนั้นจึงไม่สามารถข้อยกเว้นกับช็อคจัททิด ๗ แนวโต้แย้งซึ่งเขาใช้มาตลอดนับว่าเป็นไปตามแบบฉบับของคนอย่างเขาและตามความเชื่อมั่นอย่างมากในข้อสมมติฐานของเขา เขาให้เหตุผลว่าเนื่องจากทฤษฎีของเขาต้องใช้ได้อย่างกว้างขวาง กฎเดิมของความร้อนจำเพาะสำหรับก๊าซอุดมคติจึงต้องมีช็อคจัททิด ดังนั้นเขาทำนายว่าความร้อนจำเพาะจะลดลงขณะเข้าไปใกล้ศูนย์สัมบูรณ์และจะทำให้สำเร็จได้ด้วยกระบวนการที่ยังไม่เป็นที่รู้จักซึ่งเขาเรียกว่า "สภาพซ้อนสถานะของก๊าซ"

ผู้ร่วมงานของเน็นสต์จำนวนมากแม้แต่ผู้ซึ่งชื่นชอบเขาต่างสงสัยเกี่ยวกับปรากฏการณ์ที่เข้าใจยากนี้ ซึ่งฟังดูเหมือนการพยากรณ์มากกว่าเป็นการทำนายแบบวิทยาศาสตร์ เน็นสต์ยังคงไม่สะดุ้งสะเทือนแต่อย่างใด เพราะเขามีพลังค์เข้าข้างเขาอยู่ พลังค์เป็นผู้ที่ขึ้นชื่อว่ามีความระมัดระวังเวลาที่เขาถูกลูกศิษย์นักวิจัยถามปัญหา เขาจะตอบว่า "ฉันจะให้คำตอบแก่คุณในวันพรุ่งนี้" เช่นนี้ทุกครึ่ง อย่างไรก็ตาม เขาไม่คิดที่จะต้องระวังอะไรเกี่ยวกับกฎต่าง ๆ ทางอุณหพลศาสตร์ เนื่องจากเขาคิดว่าเป็นความแน่นอน พลังค์เชื่อมั่นว่าสภาพซ้อนสถานะของก๊าซจะต้องมีอยู่จริงและไม่ได้ยากนักได้กับหลักควอนตัม แต่เขาไม่เห็นหนทางใดที่จะนำเข้าไปไว้ในทฤษฎีของเขา ผลสุดท้ายพลังงานของก๊าซอุดมคติทั้งหมดจึงขึ้นอยู่กับ การเคลื่อนที่เชิงเส้นของอะตอมทั้งหลายของก๊าซ และปรากฏว่าเป็นไปไม่ได้ที่จะให้ความถี่ของการออสซิลเลตซึ่งสามารถคูณด้วย h เพื่อให้เป็นควอนตัม "รายงานการประชุม" ของบัณฑิตยสถานปารีสเขียนทางวิทยาศาสตร์ จึงจับลงด้วยความพยายามอย่างเต็มที่ของพลังค์และคนอื่น ๆ ในการหาคำตอบอย่างใดอย่างหนึ่ง

เราได้ในตอนต้นแล้วว่า กฎของบอยล์สำหรับก๊าซอุดมคติสามารถหาได้โดย
กรรมวิธีทางสถิติในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลก๊าซ แน่แน่นอนว่าวิธีการที่ใช้ในคริสต์ศตวรรษที่สิบเก้า
โดยแมกซ์เวลล์และโบลท์ซมันน์ตั้งอยู่บนพื้นฐานของฟิสิกส์แบบเดิม ดังนั้น จึงไม่เป็นที่ประหลาดใจนัก
ว่าวิธีนี้ไม่สามารถให้แนวทางใด ๆ เกี่ยวกับการอยู่ในสภาพซ้อนสถานะของก๊าซ ซึ่งมีรากฐานมา
จากการทำให้พลังงานเป็นควอนตัม วิธีการแก้ปัญหาวงสถิติของก๊าซโดยคณิตศาสตร์ประกอบด้วย
การแบ่งปริมาตรที่ก๊าซอยู่ออกเป็นส่วนย่อย ๆ หรือ "เซลล์" ดังนั้น โอกาสของการพบอนุภาค
ในเซลล์ใดเซลล์หนึ่งโดยเฉพาะจึงคำนวณได้ วิธีการเดียวกันนำมาใช้ในปริภูมิที่สร้างขึ้นจากมิติ
ทั้งสามของความเร็วและเพื่อความสะดวกทางคณิตศาสตร์ การคำนวณต่าง ๆ กระทำรวดเร็วจนใน
"ปริภูมิเฟส" ซึ่งหมายถึงการรวมกันของทุกทิศทางของตำแหน่งและอีกสามพิกัดของโมเมนตัม อันนี้
ไม่มีความสลับซับซ้อนใด ๆ เกี่ยวกับ "ปริภูมิ" ซึ่งมีมากกว่าสามมิติขึ้นไปเพียงแต่นำมาใช้เพื่อให้การ
คำนวณทางคณิตศาสตร์ของปริมาณหลายจำนวนพร้อม ๆ กันซึ่งเกี่ยวข้องกับอนุภาคหนึ่ง ๆ เป็นไปได้
ง่ายมากขึ้น ในปลายศตวรรษที่ห้าแมกซ์เวลล์ ลาร์ต กิบส์ เคยนำปริภูมิเฟส 6 มิติมาใช้อย่างไม่มีเปิด
เผยแล้ว โดยไม่มีปรัชญาเมธีหรือผู้มีเวทย์มนต์คาถาใดให้ความสนใจ ขนาดของเซลล์เหล่านี้ในปริ-
ภูมิเฟสตามแบบเดิมมีขนาดไม่แน่นอน แต่จะเห็นได้อย่างชัดเจนจากหลักความไม่แน่นอนของไฮเซน-
เบิร์กว่า การแบ่งส่วนย่อยตามอำเภอใจนั้นเป็นไปไม่ได้ในวิชาฟิสิกส์ควอนตัม เมื่อขีดจำกัดสำหรับ
พิจารณาแต่ละเหตุการณ์ถูกกำหนดด้วยค่าคงที่ทางควอนตัม h ไว้แล้ว ดังนั้น สิ่งที่เป็นจริงทางกาย
ภาพจึงไม่สามารถแอบอ้างถึงสิ่งที่เกิดขึ้นใด ๆ น้อยกว่า h ได้และนั่นคือขนาดของเซลล์ในสถิติควอน-
ตัมจึงต้องกลายเป็น h^3

ดังนั้น ในสถิติควอนตัมของก๊าซอุดมคติอันนี้ เราจึงแบ่งสถานะพลังงานแยกออกจาก
กัน จะเห็นว่า โอนส์ไตน์ก็เช่นกัน ได้กำหนดสถานะพลังงานเป็นควอนตัมสำหรับการสั่นของอะตอมใน
ทฤษฎีความร้อนจำเพาะของผลึกของเขา นั่นหมายความว่าความร้อนจำเพาะของก๊าซอุดมคติต้อง
เป็นควอนตัมในลักษณะคล้ายคลึงกัน และกลายเป็นศูนย์ที่ศูนย์สัมบูรณ์ ตามขั้นตอนนี้การทำนายของ
เนินส์เกี่ยวกับสภาพซ้อนสถานะของก๊าซได้ให้ความสมเหตุสมผลทางทฤษฎีอย่างแน่นแฟ้นโดยอาศัยหลัก
ควอนตัม

เราได้อธิบายการทำให้เป็นควอนตัมของการเคลื่อนที่เชิงโมเลกุลว่าเป็นผลสืบ

เนื่องที่ขาดเสียไม่ได้ของความสัมพันธ์เรื่องความไม่แน่นอน เพราะว่ามันคือ ลักษณะการหาเหตุผล
อย่างตรงไปตรงมาและง่ายที่สุด อย่างไรก็ตาม คิวจะต้องตั้งข้อสังเกตไว้ว่าถ้ากล่าวตามประวัติแล้ว
สถิติควอนตัมมีความเป็นมาก่อนหน้าเรื่องความไม่แน่นอนถึงสามปี ในฤดูร้อนของปี ค.ศ. 1924
ไอน์สไตน์ได้รับบทความขนาดสั้นซึ่งเขียนโดยนักฟิสิกส์หนุ่มชาวอินเดียนในเมืองคัลกาชื่อ เอส. เอ็น.
โบส เพื่อให้ไอน์สไตน์แปลความ เพราะโบสรู้สึกว่าการหาสูตรการแผ่รังสีตามแบบเดิมของพลังค์ควรวัด
ต้องนำหลักสถิติและหลักควอนตัมรวมกันมาใช้แทนเท่านั้น เขาสามารถทำดังกล่าวเช่นนั้นได้โดยเลือก
เซลล์ปริมาตร h^3 ในตอนท้ายของบทความ ไอน์สไตน์ได้ลงปัจจัยลึกลับเรียกเรื่องความสนใจ
ในความสำคัญอย่างยิ่งใหญ่หลวงของบทความของโบส เนื่องจากบทความนี้ได้เบี่ยงทางไปสู่สถิติเชิง
ควอนตัมสำหรับอนุภาคตัวต่อมา เขาจึงได้พัฒนาความคิดนี้ด้วยตัวของเขาเอง เสนอไปพร้อมกันใน
"รายงานการประชุม" ของบัณฑิตยสถานปารีสเขียนทางวิทยาศาสตร์ ซึ่งได้กลายมาเป็นหลักฐานที่
สถิติโบส-ไอน์สไตน์ที่แตกต่างจากสถิติแมกซ์เวลล์-โบลท์ซมันน์เดิม

พลังค์ได้ให้พื้นฐานแน่นอนสำหรับการใช้สถิติแผนใหม่ไว้แล้วในการใช้กับออสซิลเล-
เตอร์ของเขา ซึ่งมีส่วนสำคัญที่ต่างจากสถิติแผนเดิมเมื่อภายหลังนำมาประยุกต์กับโมเลกุล ในวิธี
การนับของโบลท์ซมันน์ เขาระบุความแตกต่างระหว่างแต่ละโมเลกุล แม้ว่าตามความเป็นจริงไม่
ได้แตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น ถ้าเรามีสองเซลล์คือ A และ B เราต้องการวางอนุภาคสองตัว
คือ a และ b เข้าไปไว้ในเซลล์ทั้งสอง สถิติแผนเดิมจะยอมให้การจัดที่เป็นไปได้แบบดังนี้

	A	B
1.	a	b
2.	b	a
3.	ab	-
4.	-	ab

คราวนี้ถ้า a และ b เป็นโมเลกุลของไฮโดรเจน ทั้งสองโมเลกุลนั้นไม่แตกต่างกัน
และไม่จำเป็นต้องแบ่งแยกความแตกต่างระหว่างโมเลกุลทั้งสอง ดังนั้น ถ้าเรียกโมเลกุลทั้งคู่เป็น

x สถิติโบส-ไอน์สไตน์จะยอมให้มีการจัดคู่กันได้เพียงสามแบบเท่านั้น คือ

	A	B
1.	x	x
2.	xx	-
3.	-	xx

โดยทั่วไปในฟิสิกส์แผนเดิมเราไม่ได้สังเกตความแตกต่างในการนับระหว่างสถิติทั้งสองแบบ เพราะว่ามีสถานะพลังงานที่ว่างอยู่มากกว่าจำนวนอนุภาคที่จะนำไปไว้ในมัน โดยเหตุนี้จึงไม่เคยมีใครสังเกตจำนวนรูปแบบของการสับคู่ที่มากเกินไปซึ่งได้จากสถิติแผนเดิม เพราะว่ายังมีเซลล์อีกมากที่ยังคงว่างเปล่าอยู่นั่นเอง อย่างไรก็ตาม เหตุการณ์ต่างๆ จะเปลี่ยนแปลงไปที่อุณหภูมิค่าที่ซึ่งพลังงานความร้อนต่ำลงและเซลล์ส่วนมากย่อมจะถูกครอบครองเต็มไปหมดแล้ว

ครั้นถึงปี ค.ศ. 1924 สภาพข้อสันนิษฐานของก๊าซได้ถูกเลื่อนฐานะจากการเป็นสมมติฐานที่ยังคลุมเครือ ไปเป็นรากฐานทางทฤษฎีที่หนักแน่น แต่การตรวจสอบความถูกต้องในทางปฏิบัติยังห่างไกลจากความจริงอยู่ตลอดมา อันที่จริงแล้วมันกลายเป็นสิ่งที่ยิ่งเป็นไปได้ยากในเวลาเดียวกันสถิติเชิงควอนตัมได้ตั้งสภาพข้อสันนิษฐานของก๊าซเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้จริงอย่างหนึ่งและได้แสดงว่าไม่สามารถสังเกตได้อย่างค่อนข้างแน่นอนในก๊าซจริงใด ๆ ตามการคาดคะเนทางทฤษฎีนั้นการบิดเบือนไปจากกฎก๊าซอุดมคติต้องขึ้นกับ "พารามิเตอร์ของสภาพข้อสันนิษฐาน" ซึ่งมีรูปตามความสัมพันธ์ดังนี้ $Nh^3/V(2\pi mkT)^{3/2}$ โดยในที่นี้ N คือ ตัวเลขอะโวกาโดร V คือ ปริมาตรที่หนึ่งกรัม-อะตอมบรรจุอยู่ และ T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ เพื่อให้พารามิเตอร์นั้นค่ามากพอควร ดังนั้น V , m และ T ต้องมีค่าน้อย ๆ นั่นคือ เราจะสังเกตสภาพข้อสันนิษฐานได้ชัดที่สุดในก๊าซเบาที่ถูกอัดขยายภายใต้อุณหภูมิต่ำ ดังนั้น ก๊าซที่เหมาะสมกับการศึกษาที่สุด คือ ฮีเลียม และสามารถคาดการณ์ได้ผลสูงที่สุดที่จุดวิกฤติ เพราะว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่านั้นก๊าซไม่สามารถถูกอัดให้หนาแน่นมากขึ้นได้โดยไม่กลายเป็นของเหลวไปเสียก่อน แม้ภายใต้สถานะการอัดที่เหมาะสมที่สุดก็ตามการบิดเบือนไปจากกฎก๊าซอุดมคติเนื่องจากสภาพข้อสันนิษฐานมีเพียงประมาณร้อยละหนึ่งเท่านั้น นับว่าน้อยกว่าอิทธิพลของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมฮีเลียมซึ่งยากที่จะประเมินได้อย่างถูกต้อง โดยเหตุนี้สภาพข้อ

สถานะจะถูกกลืนหายไปอย่างหมดสิ้น

ช่วงหนึ่งดูเหมือนว่าการคาดการณ์ของเนินส์เกี่ยวกับสภาพซ้อนสถานะของก๊าซ แม้จะเป็นจริงแต่ไม่เคยพิสูจน์ได้เลย ต่อมาจึงเริ่มตระหนักในทันทีว่าสภาพซ้อนสถานะของก๊าซมีส่วนสำคัญในบรรดาปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ที่รู้จักกันดีที่สุดปรากฏการณ์หนึ่งคือ พฤติกรรมเชิงอิเล็กทรอนิกส์ในโลหะ

จากผลงานของฟาราเดย์ แมกซ์เวลล์และคนอื่น ๆ อีกมากมายในคริสต์ศตวรรษที่สิบเก้า ทำให้ไฟฟ้าและแม่เหล็กกลายเป็นวิชาที่มีรากฐานอย่างดีในโครงสร้างทั่วไปของฟิสิกส์แผนเดิม ในขั้นต้นความคล้ายคลึงกันในพฤติกรรมระหว่างกระแสกับกระแสไฟฟ้าทำให้เชื่อว่าประจุน่าจะเป็นของไหลที่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด อย่างไรก็ตาม ในปี ค.ศ. 1897 เจ. เจ. ทอมสันค้นพบอิเล็กตรอนจึงเป็นที่รู้จักกันว่ากระแสไฟฟ้ามีลักษณะเชิงอะตอมและยอมรับกันว่าอิเล็กตรอนเป็นตัวนำประจุไฟฟ้า นับแต่นั้นมาจึงยังเหลืออีกก้าวหนึ่งที่จะต้องแสดงความแตกต่างระหว่างฉนวนกับโลหะ โดยอาศัยความจริงที่ว่าในโลหะมีอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปได้อย่างอิสระและสามารถทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น

ก้าวดังกล่าวนี้เริ่มขึ้นในระยะช่วงต่อระหว่างคริสต์ศตวรรษนั้นโดยครูค ผู้ซึ่งสร้างแนวคิดที่ให้ "ก๊าซ" ของอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในโลหะ ต่อมานักทฤษฎีชาวต่างชาติผู้ยิ่งใหญ่ชื่อ เฮนดริก อันโตเน โลเรนซ์ได้พัฒนาขึ้นเป็นทฤษฎี โดยได้รับการสนับสนุนอย่างแข็งขันจากแบบจำลองของอะตอมของรัทเทอร์ฟอร์ด-โบร์ ซึ่งอธิบายว่าอะตอมประกอบด้วยนิวเคลียสที่มีประจุบวกซึ่งล้อมรอบด้วยอิเล็กตรอนที่มีประจุลบ ทฤษฎีนี้สมมติว่าในของแข็งบางชนิดอิเล็กตรอนหนึ่งตัวหรือมากกว่าของอะตอมหนึ่ง ๆ จะหลุดออกไปจากวงรอบ ๆ โครงสร้างอะตอมและเคลื่อนที่ไปมาได้ อย่างอิสระในปริมาตรของสาร ทำนองเดียวกับโมเลกุลของก๊าซที่บรรจุอยู่ในภาชนะ ถ้าสารเช่นนี้ถูกวางอยู่ระหว่างขั้วบวกและลบของแบตเตอรี่ไฟฟ้า จะทำให้อิเล็กตรอนถูกดึงดูดโดยขั้วบวกและถูกผลักโดยขั้วลบกลายเป็นกระแสไฟฟ้า ในทำนองเดียวกันคลื่นไฟฟ้าแม่เหล็กของแสงที่ตกไปยังสารจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระในผิวของสารซึ่งไม่ให้คลื่นผ่านเข้าไปแต่กลับสะท้อนออกมา อีกนัยหนึ่ง สารที่เราพิจารณาว่ามีก๊าซซึ่งประกอบด้วยอิเล็กตรอนอิสระปรากฏว่าแสดง

พฤติกรรมตรงกันกับที่เราเรียกว่าเป็นโลหะ

จากทั้งหมดนี้จะเห็นว่า ทฤษฎีอิเล็กทรอนิกส์ของโลหะสอดคล้องเป็นอย่างดีจนทำให้ค่าความนำจะถูกต้อง ดังนั้น เมื่อค้นพบความแตกต่างที่ค่อนข้างเป็นขั้นพื้นฐานสองประการ จึงเกิดความยุ่งเหยิงขึ้น ประการแรกดูเหมือนว่าจากขนาดของการนำความร้อนของโลหะนั้น อิเล็กตรอนทั้งหมดต้องมีความเร็วเฉลี่ยสูงมากซึ่งไม่ได้ขึ้นกับอุณหภูมิ ซึ่งให้เห็นว่า จุดนี้กฎของก๊าซใช้ไม่ได้ผล ความแตกต่างประการที่สองเกี่ยวข้องกับความร้อนจำเพาะ เราได้เห็นก่อนหน้านี้ว่าระดับชั้นความเสรีเชิงจลน์ในสามมิติและเชิงศักย์สามมิติสำหรับการสั่นของอะตอมทำให้เกิดความร้อนจำเพาะเท่ากับ

$$6/2 R$$

คือกัม-อะตอม ซึ่งเท่ากับประมาณ 25 จูล ถ้าคราวนี้ในการสั่นของโลหะมีอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มขึ้น เช่น หนึ่งตัวต่ออะตอม เคลื่อนที่ไปรอบ ๆ เหมือนกับโมเลกุลของก๊าซ อิเล็กตรอนอิสระเหล่านี้จะต้องมีส่วนเพิ่มระดับชั้นความเสรีเชิงจลน์อีกสามมิติ ทำให้ความร้อนจำเพาะทั้งหมดเป็น

$$6/2 R + 3/2 R = 9/2 R$$

นั่นคือ ประมาณ 37 จูล อย่างไรก็ตามแน่นอนว่าตัวเลขนี้ไม่ถูกต้องและพบว่าค่าความร้อนจำเพาะสำหรับโลหะและฉนวนต่าง ๆ เท่ากับ 25 จูล เหมือนกันหมด

คำตอบสำหรับปริศนานี้ในที่สุดก็หาได้จากสภาพซ้อนสถานะของก๊าซของเนิร์นสต์ นับเป็นตัวอย่างหนึ่งที่นำสนใจว่าคำอธิบายในขั้นสุดท้ายมักจะได้จากความพยายามของนักวิทยาศาสตร์จำนวนหนึ่งซึ่งแต่ละคนต่างมีส่วนสนับสนุนอย่างสำคัญ ในปี ค.ศ. 1925 ไวล์ฟกัง เพาลี ได้ตั้งสมมติฐานซึ่งมีชื่อเรียกตามชื่อของเขา นับเป็นหลักกลศาสตร์ควอนตัมที่สำคัญซึ่งเขาแปลข้อมูลทางสเปกโตรสโกปีในพจน์ของกฎใหม่ของธรรมชาติ ซึ่งกล่าวว่าในอะตอมใด ๆ จะไม่มีอิเล็กตรอนเกินกว่าสองตัว สามารถวิ่งโคจรที่พลังงานควอนตัมเดียวกัน ยิ่งกว่านั้น ทั้งสองตัวนี้จะต้องมีสปินชี้ไปในทางตรงกันข้ามกล่าวคือ ทั้งสองนี้ต้องมีโมเมนต์เชิงมุมตรงกันข้าม สำหรับตรงนี้เราไม่สามารถกล่าวตัวเข้าไปวิจารณ์ความหมายที่ลึกซึ้งซึ่ง "หลักการกีดกัน" นี้มีอยู่ในขอบเขตของฟิสิกส์แนวใหม่ ปราภาคว่า "สปิน" ในโลกของอนุภาคมูลฐานมีความสำคัญมากกว่าโมเมนต์เชิงมุมของฟิสิกส์แนว

เค็มมากเหลือเกิน นับเป็นคุณสมบัติขั้นพื้นฐานของอนุภาคเช่นเดียวกับมวลหรือประจุไฟฟ้าของมัน
 ยังมีความจริงที่น่าสงสัยอีกว่า เหตุใดสปินทั้งหลายจึงรู้เรื่องของตัวอื่นๆ เสียจนทำให้มันหลีกเลี่ยง
 สถานะควอนตัมเดียวกัน โดยอาศัยการพิจารณาเชิงสัมพัทธภาพ คิแรกได้นำความรู้เรื่องซิงกัมและ
 กันน์เข้า ไปรวมไว้ในรูปแบบที่สอดคล้องกันของกลศาสตร์ควอนตัม แต่กระนั้นเรื่องนึ่งคงเป็นปริศ-
 นาอยู่บ้างบางประการ

ในปีต่อมาเอ็นริโก เฟอร์มี ในอิตาลีได้ก้าวไปอีกขั้นหนึ่งและขยายหลักการเพาลีจาก
 ขอบเขตของอะตอมเดี่ยว ไปสู่ระบบทางฟิสิกส์ที่กว้างขวางมากขึ้น อย่างเช่น ก๊าซ ในย่อหน้าแรก
 ของบทความของเขา ได้อ้างอิงถึงสภาพย้อนสถานะในก๊าซของเนิสต์ ทำให้หลักการกีดกันนี้เป็นพื้น
 ฐานของการใช้สถิติแบบใหม่ คิแรกได้นำขั้นตอนเดียวกันนี้มาใช้หลังจากนั้นสองสามเดือนโดยไม่ได้
 ลอกเลียนกัน เนื้อหาของหลักสถิติเฟอร์มี-คิแรก เป็นความรู้ซึ่งกันและกันที่ไม เลกูลของก๊าซมีต่อแต่ละ
 ไม เลกูล ซึ่งตามหลักการเพาลีจะกีดกันไม เลกูลสองตัวในก๊าซปริมาณหนึ่งไม่ให้มีสถานะพลังงาน
 เดียวกัน จึงหมายความว่าลักษณะใหม่ของการนับความน่าจะเป็นทางสถิติ ไม่ได้เพียงแค่แตกต่าง ไป
 จากกรณีวีเอแมกซ์เวลล์-โบลท์ซมันน์เท่านั้น แต่ยังแตกต่างจากวิธีของโบสและ ไอนส์ไตน์ด้วย
 เพราะว่าขณะนั้นเพียงอนุภาคเดี่ยวเท่านั้นที่สามารถอยู่ได้ในเซลล์แต่ละ เซลล์ในปริภูมิเฟสที่ทำให้
 เป็นควอนตัม เมื่อใช้ตัวอย่างเดียวกันกับในหน้า 153 ตามหลักสถิติเฟอร์มี-คิแรก จึงมีเพียงโอกาส
 เดียวที่เป็นไปได้ซึ่งอนุภาคสองตัวสามารถกระจายไประหว่างสองเซลล์คือ A และ B ซึ่งแน่นอน
 ต้องเป็นดังนี้

A	B
x	x

กรณีนี้จึงนำไปสู่สถานการณ์ที่แตกต่างไปอย่างมากจากสมมติฐานต่างๆ ทั้งทางแผน
 เค็มหรือหลักสถิติโบส-ไอนส์ไตน์ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาแล้ว เพียงเนื้อที่สำหรับอนุภาคหนึ่งในแต่ละ เซลล์
 จำนวนของ เซลล์ที่มากมายมหาศาลจะถูกบรรจุอยู่เต็มเมื่อก่อนยลสัมบูรณ์ ความจริงนี้เท่านั้นนำไปสู่
 พลังงานที่จุดศูนย์มีค่าสูง เฟอร์มียังใช้แบบจำลองของเขาคำนวณหาความร้อนจำเพาะของก๊าซที่สภาพ
 ย้อนสถานะอย่างมากได้และพบว่าค่ามันจะต้องแปรตามอุณหภูมิสัมบูรณ์ที่อุณหภูมิค่า ในที่สุดจะมีค่าอยู่

ในระบับเดียวกันกับค่าคงที่เดิมคือ $3/2 R$

ถ้าเพิ่มได้อ้าวไปไกลยิ่งขึ้นหนึ่งละก็ เขาก้าวไปมากเกินไปด้วยซ้ำในการบ่งชี้ว่า
หลักสถิติโบส-ไอน์สไตน์ใช้ได้กับโฟตอนเท่านั้นและว่าอนุภาคของสารทั้งหมดจะเป็นไปตามหลักสถิติ
ใหม่ แสดงว่าเขายังไม่เข้าใจความจริงในขั้นนี้ที่ว่าตามหลักกติกกันของเพาลีนั้น สปินเป็นลักษณะเด่น
ที่สำคัญซึ่งควบคุมการกระจายของอิเล็กตรอนไปตามวงโคจรรอบนิวเคลียสของอะตอม ก้าวที่เขาได้
ใช้ในการคำนวณคือฮีเลียม นับแต่นั้นมาปรากฏชัดเจนว่าเฉพาะอนุภาคที่มีจำนวนเลขคี่ของสปินเท่า
นั้นจะเป็นไปตามหลักสถิติเฟอร์มี-ดิแรก ขณะที่พวกที่มีจำนวนเป็นเลขคู่สามารถมีสปินสองแบบที่ตรง
กันข้ามจึงหักล้างโมเมนต์เชิงมุมของกันและกันเสมอ ฮีเลียมมีอิเล็กตรอนสองตัวอยู่ในวงโคจรและ
มีอนุภาคสี่ตัวอยู่ในนิวเคลียสคือ โปรตอนสองตัวและนิวตรอนสองตัว ซึ่งทั้งหมดต่างมีสปิน คั้งนั้น
จำนวนของสปินในฮีเลียมจึงเป็นจำนวนคู่และอะตอมของมันเป็นไปตามหลักสถิติโบส-ไอน์สไตน์
ความจริงนี้ต้องนำมากล่าวถึงไว้ในที่นี้เพราะว่าจะกลายเป็นเรื่องสำคัญอย่างใหญ่หลวงในการอภิ-
ปรายถึงคุณสมบัติประหลาดของควานำไฟฟ้าวยคยั้งและฮีเลียมเหลว

อีกปีหนึ่งต่อมามีรายงานใหม่ของเพาลีซึ่งอ้างถึงงานของเฟอร์มีและครั้งนี้ได้ประยุกต์
หลักสถิติใหม่ ไม่เพียงแต่ใช้ได้กับอิเล็กตรอนทั้งหลายที่โคจรรอบอะตอมเท่านั้นแต่ยังใช้ได้กับก๊าซ
อิเล็กตรอนในโลหะด้วย นำประหลาดพอควรที่เขาไม่ได้ใช้ขั้นตอนของการประยุกต์สูตรของเฟอร์มี
สำหรับความร้อนจำเพาะอย่างชัดเจน แต่เขากลับใช้หลักสถิติใหม่แทนในการอธิบายสภาพโคอะ-
แมกเนติกอย่างอ่อนของโลหะซึ่งเป็นปริศนามาช้านานและขณะนี้เขาสามารถอธิบายได้แล้ว บางที
ความล้มเหลวของเขาในการคำนวณความร้อนจำเพาะของอิเล็กตรอนสืบเนื่องมาจากความระมัดระ-
วังอย่างยิ่งซึ่งเขาใช้แก้ปัญหาก๊าซอิเล็กตรอน ในหน้าสำหรับรายงานนี้เขาปวดศีรษะอย่างมาก
ที่จะชี้ให้เห็นถึงลักษณะใหม่เอียงของข้อเสนอของเขา

อีกหนึ่งปีผ่านไปถึงตอนปี ค.ศ. 1928 จนกระทั่งขั้นตอนสุดท้ายซึ่งแก้ปัญหากทั้งหมด
ของก๊าซอิเล็กตรอนได้โดยอาร์โนลด์ ซอมเมอร์เฟลด์ได้รวมเอาหลักการกติกกัน หลักสถิติเฟอร์มี-ดิแรก
และข้อเสนอของเพาลีประยุกต์กับอิเล็กตรอนของโลหะ ผลที่ได้ก็ออกมากลายเป็นบทความที่มีชื่อเสียง

ซึ่งได้รับการอ้างถึงในตำราทฤษฎีเกี่ยวกับเนื้อหาซึ่งได้แก่ปัญหาที่โด่งดังเป็นจำนวนมากได้ในราว
 เดียว

ก่อนอื่นเราต้องย้อนกลับไปหาคำพารามิเตอร์ของสภาพข้อสถานะที่ได้กล่าวถึงใน
 หน้า 153 ในการประยุกต์กับก๊าซอิเล็กตรอน เราพบว่าพารามิเตอร์นั้นมีค่ามากเหลือเกิน เพราะ
 ว่ามวล m ของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยมาก กล่าวคือมีค่าน้อยกว่าอะตอมฮีเลียมเจ็ดพันเท่า อีกทั้ง
 ก๊าซอิเล็กตรอนยังหนาแน่นมาก เนื่องจากอิเล็กตรอนถูกยึดเหนี่ยวให้อยู่ร่วมกันด้วยนิวเคลียสที่มี
 ประจุบวกของอะตอมในขอบเขตที่แคบของแลตทิซของผลึก ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ปริมาตร V ที่หนึ่ง
 กรัม-อะตอมของอิเล็กตรอนครอบครองมีค่าน้อยมาก เราจะเห็นได้ว่าทั้ง m และ V ต่างเป็น
 ตัวหารในพารามิเตอร์ของสภาพข้อสถานะ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้กลายเป็นค่ามหึมา ปรากฏที่
 สอง อิเล็กตรอนเป็นไปตามหลักสถิติเฟอร์มี-ดิแรคซึ่งดังที่เราได้เห็นมาแล้วจะต้องทำให้ก๊าซอิเล็ก
 ตรอนมีพลังงานที่จุดศูนย์สูง

ในการคำนวณตัวรวมเหล่านี้ทั้งหมดคนชื่อเมอร์เฟลด์สามารถแสดงได้ว่าก๊าซอิเล็ก-
 ตรอนไม่เพียงแต่อยู่ในสภาพข้อสถานะเท่านั้น ความร้อนจำเพาะของมันยังมีค่าไม่ถึงค่าเดิมคือ
 $3/2 R$ จนกว่าจะมีอุณหภูมิถึงประมาณ 30,000 องศา เนื่องจากโลหะทั้งหลายกลายเป็นไอไปก่อน
 ที่จะถึงอุณหภูมิเช่นนั้นเสียก่อนแล้ว ดังนั้น ก๊าซอิเล็กตรอนจึงไม่เคยแม้แต่จะมีค่าถึงค่าตามแผนเดิม
 ที่อุณหภูมิปกติก็อยู่ในสภาพข้อสถานะแล้วอย่างสิ้นเชิง ความร้อนจำเพาะของมันจึงมีค่าน้อยเกินไป
 ที่จะวัดได้ โดยวิธีรายงานของเมอร์เฟลด์ไม่เพียงอธิบายค่าที่หายไปของ $3/2 R$ ในความร้อน
 จำเพาะของโลหะเท่านั้น เขายังแสดงให้เห็นด้วยว่าสภาพข้อสถานะในก๊าซที่เนิสต์ตั้งสมมติฐาน
 ไว้แม้จริง ยิ่งกว่านั้นยังอยู่ในรูปแบบสุดขีดเสียอีก คราวนี้สิ่งที่ค้างอยู่ทั้งหมดคือการพิสูจน์เชิง
 ทดลองโดยตรงสำหรับทฤษฎีนั้น เรื่องนี้กระทำได้โดยอาศัยการวิจัยที่อุณหภูมิต่ำ

ความยุ่งยากในการสังเกตค่าจำเพาะเชิงอิเล็กตรอนอยู่ที่ว่าแม้จะอยู่ที่อุณหภูมิปกติ
 แล้วยังมีค่าน้อยเกินไป เนื่องจากตามหลักของเฟอร์มีและเมอร์เฟลด์ด้วยมันควรจะตรง
 ตามอุณหภูมิสัมบูรณ์โดยเฉพาะที่ 3 ค จะยิ่งน้อยลงไปอีกถึงร้อยเท่า อย่างไรก็ตามไม่เพียงแต่ความ
 ร้อนจำเพาะของอิเล็กตรอนที่ลดลงตามอุณหภูมิที่ลดลงเท่านั้น ค่าของแลตทิซผลึกด้วยก็เช่นกัน

เห็นว่าใช้คircuit ที่ปรากฏว่าที่อุณหภูมิค่าสุดความร้อนจำเพาะของแลตทิซของผลึกหาย ไปอย่างรวดเร็ว มากกว่าของก๊าซอิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาพย้อนสถานะ จึงหมายความว่าหากการวัด ได้ขยายออกไป กระทำที่อุณหภูมิเพียงพอแล้ว ความร้อนจำเพาะของอิเล็กตรอนต้องสังเกตได้และกระทั่งในที่สุด เคนซ์ดิงยังขึ้น สภาวะการณ์นี้จะบรรลุได้ที่อุณหภูมิของฮีเลียมเหลวและส่งผลตามที่ได้คาดการณ์ไว้ให้ พบได้ในโลหะทุกชนิด(รูปที่ 7.3) ในบริเวณนี้ความร้อนจำเพาะของแลตทิซแปรตามกำลังสามของ อุณหภูมิ ขณะที่ของอิเล็กตรอนยังคงแปรโดยตรงกับอุณหภูมิเช่นเดิม สำหรับบรรดาผู้ที่ชอบสมการ คณิตศาสตร์เราสามารถแสดงความร้อนจำเพาะในโลหะ ดังนี้ $AT^3 + BT$ เมื่อ A และ B เป็น ค่าคงที่และพจน์แรกเป็นของแลตทิซ ขณะที่พจน์ที่สองเป็นค่าสำหรับอิเล็กตรอน ไม่ว่าค่าคงที่ จะมีขนาดเท่าใดก็ตาม เมื่อค่าของอุณหภูมิ T ค่าพอควรจะทำให้พจน์ที่สองต้องมีค่ามากกว่าพจน์แรกเสมอ

วิธีสะดวกที่สุดในการสร้างภาพคุณสมบัติของก๊าซอิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาพย้อนสถานะ ให้เห็นได้คือ โดยการพิจารณาอิเล็กตรอนที่ไม่ได้อยู่ในมิติของตำแหน่งตามแบบที่ใช้กันมาแต่เดิม แต่อยู่ในมิติความเร็ว วิธีการสร้างภาพแทนนี้ได้กล่าวถึงแล้วก่อนหน้านี้ในบทที่ 5 เมื่อเราได้กล่าว ถึงระดับของความ เป็นระเบียบในระบบหนึ่ง การลงตำแหน่งของอิเล็กตรอนในโลหะจะให้ข้อมูลที่มี ประโยชน์แต่เพียงเล็กน้อย เพราะอิเล็กตรอนกระจายอย่างไม่เป็นระเบียบภายในปริภูมิที่มีอยู่ แต่ ในมิติความเร็วเราลงความเร็วของมัน นั่นคือ ระยะทางที่แต่ละอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปได้ในหนึ่ง หน่วยเวลา อิเล็กตรอนทั้งหมดต่างเริ่มต้นที่จุดหนึ่งดังแสดงไว้ในรูปที่ 7.4 ในกรณีที่ประกอบด้วย อิเล็กตรอนอิสระอย่างแท้จริง บรรดาอิเล็กตรอนที่อยู่ในช่วงความเร็วขนาดหนึ่งจะ เคลื่อนด้วยความน่าจะเป็นเท่ากันในทุกทิศทาง การพบความเร็วเท่ากันจึงเคลื่อนที่ไปได้ เป็นระยะทางที่เท่า กันในหนึ่งหน่วยเวลาจากจุดกำเนิดเดียวกัน ตำแหน่งของอิเล็กตรอนเหล่านี้ในมิติความเร็วจึง ต้องเรียงรายอยู่บนผิวของทรงกลมที่มีจุดกำเนิดอยู่ที่ศูนย์กลางของทรงกลม

ทุกหน่วยสมมูลอิเล็กตรอนซึ่ง เป็นไปตามหลักสถิติเฟร์มี-ดิแรกต้องอยู่ที่สถานะพลังงาน ค่าสุดที่หมอบุ้ทั้งหมดจนเต็ม โดยที่แต่ละสถานะจะถูกครอบครองโดยอิเล็กตรอนสองตัวที่สปิน ตรงกันข้าม ฉะนั้น จะมีแนวคิดว่าผลจากความเร็วจักกาคตามกำหนดค่าหนึ่ง เราจะพบอิเล็กตรอนใน

สถานะควอนตัมทั้งหมดที่เป็นไปได้สำหรับความเร็วค่าก่าเนน และ โมเมนตัมอิเล็กตรอนในสถานะของความเร็วสูงกว่านั้นขึ้นไป ในการแสดงแทนด้วยภาพของเราจึงให้ความเร็วจำกัดขณะคือทรงกลมที่มีผิวกำหนดได้อย่างชัดเจน เรียกว่า ผิวเฟอร์มี และขนาดของทรงกลมแสดงถึงการวัดพลังงานที่จุดศูนย์ของก๊าซอิเล็กตรอน

ขณะที่อุณหภูมิของโลหะเพิ่มขึ้นเหนือศูนย์สัมบูรณ์ อิเล็กตรอนบางตัวจะมีความเร็วสูงกว่าค่าจำกัด ดังนั้น บางส่วนของสถานะพลังงานที่ต่ำกว่าลงไปภายในทรงกลมจะว่างเปล่า ทั้งนี้หมายความว่าผิวเฟอร์มีนั้นแทนที่จะมีขอบเขตอย่างชัดเจนกลับกลายเป็นเลือนลางไปบ้าง อย่างไรก็ตาม เนื่องจากก๊าซอยู่ในสภาพซ้อนสถานะ ได้มากขึ้น ความเร็วที่เพิ่มขึ้นจึงมีสาเหตุมาจากการให้ความร้อนเข้าไป จึงมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความเร็วสูงที่จุดศูนย์ ความเลือนลางของผิวเฟอร์มีจะเป็นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เรื่องนี้จึงแสดงความล้มเหลวของทฤษฎีอิเล็กตรอนเดิมของครูดโดยทันทีในเรื่องการนำความร้อนของโลหะ นั่นคือ อิทธิพลของอุณหภูมิต่อความเร็วของอิเล็กตรอนมีน้อยมากจนละทิ้งได้ ลักษณะที่สำคัญที่สุดของก๊าซอิเล็กตรอนอยู่ที่ว่า คุณสมบัติของมันถูกกำหนดเกือบสิ้นเชิงโดยพลังงานมหาคาลที่จุดศูนย์ ซึ่งไม่ขึ้นกับอุณหภูมิอย่างแน่นอน

สำหรับโลหะที่แท้จริงใด ๆ มีภาพในเรื่องก๊าซอิเล็กตรอนอิสระอย่างแท้จริงแน่นอนว่าย่อมจะเป็นภาพที่ง่ายมาก ในความเป็นจริงแม้ว่าอิเล็กตรอนเกือบจะไม่กระทบซึ่งกันและกันแต่จะกระทำอันตรกิริยาอย่างรุนแรงกับแลตทิซของผลึก อิเล็กตรอนเหล่านี้ไม่สามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระได้ทุกทิศทางอย่างเสมอภาคจึงไม่เป็นทรงกลมแต่อย่างใด ดังนั้น ผิวเฟอร์มีย่อมถูกทำให้บิดเบี้ยวอย่างมากเสมอ การสำรวจผิวเฟอร์มีของโลหะต่าง ๆ นั้นว่าได้ครอบงำความพยายามส่วนใหญ่ของไซออนเบิร์กในเคมบริดจ์และของห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิต่ำอีกหลายแห่งตลอดระยะเวลา 10 ปีที่ผ่านมาบ่อยครั้งที่ผิวเฟอร์มีที่แท้จริงซึ่งพบโดยบุคคลเหล่านี้ดูเหมือนกับเป็นขั้นส่วนของการแกะสลักสมัยใหม่ หรือดังที่กล่าวกันอย่างขบขันว่าเหมือนกับสัตว์ประหลาดต่าง ๆ จากมิตติความเร็ว นั้นว่าน่าสนใจหากจะตั้งข้อสังเกตว่าสำหรับโลหะที่มีวาเลนซ์เดียว เช่น โซเดียมและทองจะเป็นไปตามทฤษฎีง่าย ๆ น้อย่างดี และผิวเฟอร์มีของมันปรากฏว่าใกล้เคียงกับลักษณะทรงกลม เฉพาะอุณหภูมิที่ต่ำเท่านั้นที่ให้การศึกษานี้เป็นไปได้ เพราะว่าที่ใกล้ศูนย์สัมบูรณ์เข้าไปเพียงใดผิวเกือบจะไม่เลือน

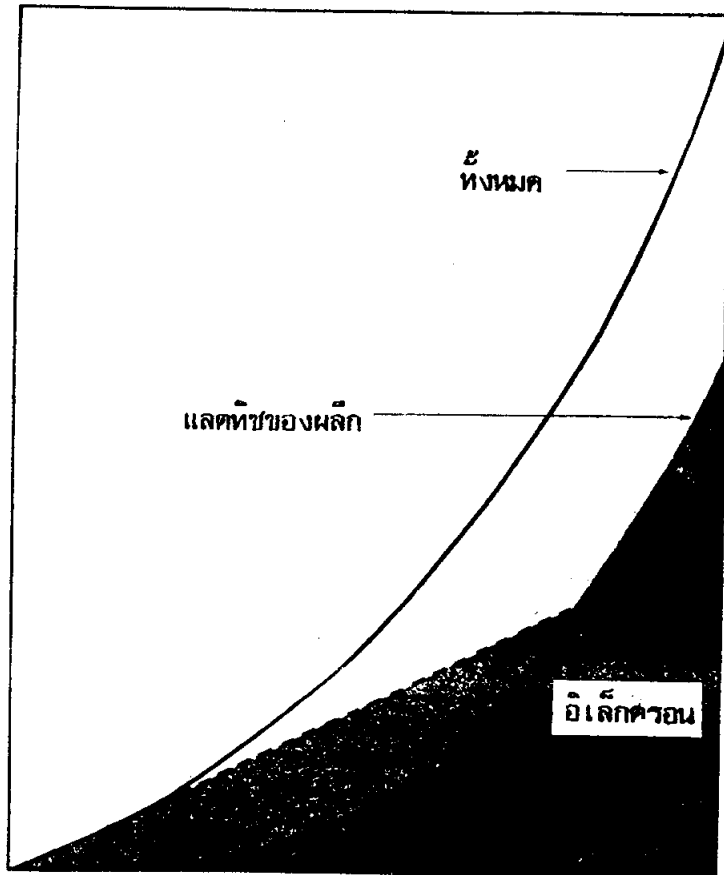
กลางแต่อย่างใด และสามารถตรวจสอบในรายละเอียดได้ อย่างไรก็ตาม ในขั้นนี้เราไม่สามารถพิจารณาผลลัพธ์ที่ได้ การขึ้นขมกับเรื่องนี้จะต้องอาศัยการกวาดเขี่ยเข้าไปอีกมากในทฤษฎีของโลหะ อย่างไรก็ตาม การขึ้นนี้ไม่ได้มีความสำคัญโดยเฉพาะสำหรับวิชาฟิสิกส์ที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากถ้าอิเล็กตรอนยังอยู่ในสภาพซ้อนสถานะอย่างมากแม้แต่ที่อุณหภูมิห้องก็ตามด้วย

ย้อนกลับมาที่คำถามเกี่ยวกับความร้อนจำเพาะ ค่าความร้อนจำเพาะของอิเล็กตรอนในโลหะแสดงถึงการมีค่าเอนโทรปีเข้าใกล้ศูนย์ที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งนับว่าเป็นค่า "ต่ำ" แล้วสำหรับอิเล็กตรอน เพราะว่าพลังงานที่จุดศูนย์ของอิเล็กตรอนสูงมาก เนื่องจากเราได้ให้ค่าจำกัดความของอุณหภูมิ "ต่ำ" ว่าเป็นอุณหภูมิซึ่งพลังงานที่จุดศูนย์ปรากฏเด่นชัด ทั้งนี้ อุณหภูมิในระดับหนึ่งซึ่งจัดเป็นค่าต่ำสำหรับระบบฟิสิกส์หนึ่งอาจเป็นค่าสูงสำหรับระบบอื่น สำหรับ "สูง" หมายถึงอุณหภูมิใด ๆ สำหรับระบบหนึ่งถ้าหากสิ่งสำคัญบางประการยังคงสามารถเกิดขึ้นกับระบบที่อุณหภูมิต่ำกว่านั้นได้ ตามความเป็นจริงแม้เราว่าเอนโทรปีของระบบจะต้องกลายเป็นศูนย์สมบูรณ์ แต่เรายังไม่สามารถแน่ใจได้เสียทีเดียวว่าที่อุณหภูมิหนึ่งซึ่งเราได้พิจารณาว่าเป็นค่าต่ำนั้น เอนโทรปีของระบบเป็นค่าต่ำเพียงพอที่จะยอมมีการประเมินค่าแนวโน้มต่อไปจนถึงศูนย์สมบูรณ์แล้วหรือไม่ ในบางครั้งก็มีแนวส่อออกมาอย่างแท้จริงว่าการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญบางประการในสารหนึ่งแฝงเร้นอยู่ที่อุณหภูมิต่ำกว่าลงไปอีก

ในตอนต้นทศวรรษระหว่าง ค.ศ. 1920 - 1929 ห้องปฏิบัติการของเนินส์ตัน เบอร์ลินวัดค่าความร้อนจำเพาะของไฮโดรเจนในสถานะของแข็งได้ต่ำถึง 10 ค และได้ประมาณค่านอกช่วงออกไปอย่างเรียบร้อยจนถึงศูนย์สมบูรณ์ อย่างไรก็ตาม ข้อมูลทางอุณหพลศาสตร์สำหรับไฮโดรเจนที่ได้จากผลงานนี้ ไม่สอดคล้องกับที่ได้จากอุณหพลศาสตร์ทางเคมี จึงยังเกิดความสงสัยขึ้นว่า สิ่งสำคัญบางประการต้องยังคงเกิดขึ้นอยู่ในไฮโดรเจนระหว่าง 10 ค และศูนย์สมบูรณ์ นับเป็นวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ปริญาเอกของข้าพเจ้าที่จะไขปริศนานี้ ดังนั้น การวัดความร้อนจำเพาะจึงต้องถูกขยายออกไปจนถึงอุณหภูมิต่ำลงไปอีก ผลที่ได้รับจากการวัดนี้ควรถูกค่ากับความสงสัยอย่างเต็มที่ นั่นคือ ที่ 6 ค ปรากฏชัดเจนว่าความร้อนจำเพาะไม่ได้ลดลงรวดเร็วตามที่คาดการณไว้ และที่ 3 ค กลับยังเริ่มมีค่าสูงในขณะที่อุณหภูมิลดลง ในเวลานั้นยังเป็นไปไม่ได้ที่จะติดตามผลต่อไป

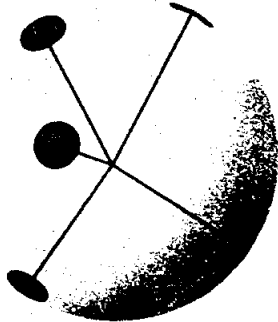
7.3 ที่ใกล้ศูนย์สัมบูรณ์พอควร ความร้อนจำเพาะของ
อิเล็กตรอนในโลหะจะปรากฏเด่นชัดเหนือค่าของแลตทิซ
ผลึกเสมอ

ความร้อนจำเพาะ



อุณหภูมิ

7.4 ในมิติของความเร็วปรากฏว่าอิเล็กตรอนในโลหะอยู่ภายในเนื้อที่ของทรงกลมที่ขอบเขตชัดเจนที่ศูนย์กลาง (รูปซ้าย) แต่ในขณะที่ที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะเห็นว่าผิวของทรงกลมจะเลื่อนกลาง (รูปขวา)



จนถึงที่อุณหภูมิต่ำกว่า 2 ค. แคนต่อๆ มากลวิธีที่ใช้ได้พัฒนาจนแสดงให้เห็นค่าความร้อนจำเพาะของไฮโดรเจนสถานะแข็งที่ใกล้เคียงกับ 1 ค. ฟุงซ์ เป็นยอดแหลม สาเหตุของความผิดปกตินี้เกี่ยวข้องกับอย่างใกล้ชิดกับพลังงานสูงที่จุดศูนย์กลางของไฮโดรเจนสถานะแข็ง ซึ่งแสดงผลออกมาในลักษณะการสั่นที่เพิ่มขึ้นซึ่งทำให้โมเลกุลแยกห่างออกจากกันอย่างสิ้นเชิง ในความเป็นจริงโมเลกุลเหล่านี้มีปริมาตรที่มากเสียจนเมื่อสภาวะที่จะหมุนไปรอบ ๆ ภายในแลตทิซผลึก การลดลงของเอนโทรปีสัมพันธ์กับความร้อนจำเพาะที่ผิดปกติสืบเนื่องมาจากความเป็นระเบียบของการเคลื่อนที่เชิงหมุนตัวของโมเลกุลไฮโดรเจน

ตั้งแต่นั้นมาได้พบความผิดปกติของความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิต่ำในสารต่างๆ หลายชนิด บางครั้งเรารู้จักกระบวนการที่เป็นสาเหตุแต่ส่วนมากผู้คนยังคงอยู่ในความมืดมนคล้ายกับกลไกที่เกี่ยวข้อง อย่างไรก็ตาม ในแต่ละกรณีพบว่าชัดเจนทีเดียวว่าเอนโทรปีของสารมีค่ามากกว่าที่คาดหมายไว้ ด้วยความจริงนี้จึงเบี่ยงทางไปสู่ช่วงอุณหภูมิต่ำยิ่งขึ้นกว่าที่ทำการทดลองได้จากฮีเลียมเหลว