8 การลดอุณหภูมิเชิงแม่เหล็ก

ภายหลังจากความสำเร็จในการทำฮีเลียมเหลวในปีค.ศ.1980 แล้ว คาร์เมอร์ลิงห์ ออนเนสได้หวนกลับมาพยายามเพื่อให้บรรลุอุณหภูมิที่ต่ำกว่ายิ่งขึ้นซ้ำอีกหลายครั้ง แต่กรรมวิธีที่เขาใช้มักจะเหมือนกันทุกครั้ง นั่นคือ ลดความดันไอของฮีเลียมเหลวลงไปอีกโดยการใช้เครื่องสูบที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นจำนวนมาก ในความพยายามแต่ละครั้งเขาเข้าไปใกล้ขีดจำกัดสูงสุดซึ่งสามารถบรรลุได้โดยวิธีนี้ แต่ไม่มีวิธีอื่นนอกจากนี้ที่เขาสามารถทำได้ ฮีเลียมเป็นก๊าซที่มีข้อมูลวิกฤติต่ำสุดและเมื่อใดที่ถูกทำให้เป็นของเหลวและไอที่อยู่เหนือของเหลวถูกสูบออกตามขีดความสามารถในการสูบแล้ว เมื่อนั้นเรื่องการทำก๊าซให้เป็นของเหลวก็จบลง จนเวลาล่วงไปอีกครึ่งศตวรรษนับแต่สมัยกาเยเตและขณะที่ ออนเนสถึงแก่กรรมในเดือนกุมภาพันธ์ค.ศ.1926 ดูเหมือนว่าเขาได้ก้าวไปถึงขั้นตอนสุดท้ายที่เป็นไปได้สูงสุดสู่ศูนย์สัมบูรณ์

อย่างไรก็ดี ภายหลังต่อมาอีกสองเดือนเท่านั้นในวันที่ 9 เมษายน ศาสตราจารย์ลาดิเมอร์ แห่งมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนียได้อ่านรายงานที่เสนอต่อสมาคมเคมีอเมริกันซึ่งได้บรรยายกรรมวิธีใหม่ทั้งหมดของการลดอุณหภูมิ กรรมวิธีนี้อาศัยแนวคิดของอาจารย์หนุ่มคนหนึ่งจากแคนาดาชื่อ วิลเลียม ฟรานซิส จิโอก ผู้เสนอการบรรลุอุณหภูมิที่ต่ำกว่าของฮีเลียมเหลวลงไปอีกโดยกรรมวิธีเชิงแม่เหล็ก รายงานฉบับสมบูรณ์ของจิโอกอธิบายความคิดเห็นของเขาอย่างละเอียดได้ถูกเสนอให้พิมพ์เผยแพร่ในวันที่ 17 ธันวาคม นับว่าเกือบเป็นเรื่องราวเหมือนกับเมื่อครั้งกาเยเตและพิคเตซ้ำอีกครั้งหนึ่ง เพราะว่าก่อนหน้านั้นไม่กี่สัปดาห์คือในวันที่ 30 ตุลาคม การเสนอความคิดเห็นแบบเดียวกันนี้ได้ส่งไปยัง แอนนาเลน เดอร์ ฟิสิกส์ โดย ปีเตอร์ เดอบาย โดยต่างคนต่างกระทำไปอย่างแท้จริง

เพื่อที่จะให้เข้าใจถึงกลไกของการลดอุณหภูมิเชิงแม่เหล็กว่าสามารถบังเกิดผลได้อย่างไร ก่อนอื่นจำเป็นจะต้องกล่าวถึงปรากฏการณ์เชิงแม่เหล็กในโครงสร้างของสารบางประการความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดระหว่างไฟฟ้าและแม่เหล็กถูกนำมาจัดไว้ให้อยู่ในรูปแบบที่รัดกุมโดยอาศัยทฤษฎีพลศาสตร์ไฟฟ้าของแมกซ์เวลล์ที่ได้สร้างขึ้นมาในครึ่งหลังคริสตศตวรรษที่สิบเก้า ตามสูตรนี้สนามแม่เหล็กจะสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับการหมุนของประจุไฟฟ้าเสมอ

อิเล็กตรอนซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างอะตอมเป็นประจุเคลื่อนที่ได้ดังกล่าว จึงเกี่ยวข้องกับสนามแม่เหล็กได้สองทางคือ ทางหนึ่งโดยการโคจรรอบนิวเคลียสและอีกทางหนึ่งโดยการหมุนรอบแกนตัวเองเป็นสปิน เฉพาะสปินเท่านั้นที่น่าสนใจในปรากฏการณ์ที่อุณหภูมิต่ำ

ที่อุณหภูมิซึ่งสปินยังไม่เป็นระเบียบจึงมีทิศของสปินพุ่งไปอย่างสะเปะสะปะในทุกทิศทาง ต่อเมื่อขณะที่สารถูกนำเข้าไปไว้ในสนามแม่เหล็ก เช่นให้อยู่ระหว่างขั้วของสนามแม่เหล็กแรงสูง เส้นแรงแม่เหล็กจะโน้มน้าวให้สปินเรียงตัวในทิศของสนาม ระดับที่สารจะถูกทำให้มีอำนาจแม่เหล็กโดยสนามแม่เหล็กขนาดหนึ่งเรียกว่า สภาพรับไว้ได้ของสาร การปรับแนวของสปินด้วยความแรงของสนามขนาดหนึ่งจึงง่ายยิ่งขึ้นเมื่อการสั่นเชิงความร้อนของอะตอมรุนแรงน้อยกว่า นั่นคือ ที่อุณหภูมิต่ำ ความจริงนี้ถูกค้นพบในตอนช่วงเปลี่ยนศตวรรษนั้นเองโดยปิแอร์ กูรี ซึ่งบันทึกไว้ว่า สภาพรับไว้ได้ในเชิงแม่เหล็กแปรผกผันกับอุณหภูมิสัมบูรณ์

ปรากฏว่าไม่ใช่สารทั้งหมดที่ประพฤติในลักษณะเรียบง่ายเช่นนี้ อันที่จริงสปินในสารส่วนมากจะทำอันตรกิริยาอย่างรุนแรงซึ่งกันและกันและยากที่จะพุ่งไปอย่างสะเปะสะปะในทุกทิศทาง เพราะจะจับคู่กันเหมือนกับเป็นแท่งแม่เหล็กสองแท่ง ซึ่งยึดติดกันด้วยขั้วตรงกันข้าม อย่างไรก็ตาม มีผลึกบางชนิดโดยเฉพาะเกลือของโลหะออกไซด์และโลหะกลุ่มธาตุเหล็กที่มีโครงสร้างซึ่งสปินเดี่ยวถูกแยกออกจากันเป็นอย่างมาก ทั้งหมดนี้เป็นไปตามกฎของกูรีและหนึ่งในบรรดาผลึกทั้งหมดนี้คือ แกโดลิเนียมซัลเฟต เป็นผลึกที่ ออนเนสและวอลท์เจอร์ ได้ตรวจสอบในปีค.ศ.1924 วัตถุประสงค์หลักของการทดลองของบุคคลทั้งสองนี้ซึ่งกระทำได้สำเร็จคือ เพื่อที่จะดูว่าที่อุณหภูมิต่ำขนาด 1 ค และใช้สนามแม่เหล็กแรงมาก เขาจะสามารถบรรลุการปรับแนวของสปินได้อย่างสมบูรณ์หรือไม่ บุคคลทั้งสองนี้เลือกใช้แกโดลิเนียมซัลเฟตเพราะว่าเขาได้พบว่ามันยังคงเป็นไปตามกฎของกูรีแม้ที่ 1 ค

แต่เขาทั้งสองไม่ได้เห็นความสำคัญอย่างเต็มที่ของความจริงสุดท้ายนี้เอง จึงได้กลายเป็นจุดเริ่มต้นที่ จิโอกและเดอบาย นำมาพิจารณา ตราบใดก็ตามที่สารเป็นไปตามกฎของกูรีนั้นสปินต้องอยู่ในสถานะไม่เป็นระเบียบซึ่งพุ่งไปอย่างสะเปะสะปะในทุกทิศทาง และจึงหมายความว่าเอนโทรปีของสารต้องมีค่าสูง สำหรับที่ 1 ค การสั่นเชิงความร้อนของอะตอมในแลตทิซผลึก

แกโดลิเนียมซัลเฟตโดยพฤตินัยได้สูญสิ้นไปแล้ว และเอนโทรปีของมันจะมีค่าน้อยจนละทิ้งได้ อย่างไรก็ดี ระบบสปินของเกลือนี้ยังคงไม่เป็นระเบียบ และอาจจะไม่ผ่านเข้าไปในสถานะของเอนโทรปีต่ำจนกว่าจะถึงอุณหภูมิที่ต่ำลงไปอีกมาก เช่นเดียวกันกับไฮโดรเจนสถานะแข็งที่ได้กล่าวถึงแล้วในบทก่อน เกลือนี้เป็นหนึ่งในบรรดาสารซึ่งยังคงผ่านการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญแม้ที่ต่ำกว่า 1 ค ในทางตรงกันข้ามระบบสปินของเกลือนี้ที่ 1 ค สามารถบังคับให้เป็นระเบียบได้ โดยวางเกลือนี้ไว้ในสนามแม่เหล็กแรงสูง การลดเอนโทรปีลงได้สำเร็จโดยลักษณะนี้จึงเป็นวิธีที่จิโอกและเดอบายได้เสนอที่จะนำมาใช้

โดยหลักการแล้วกรรมวิธีการลดอุณหภูมิเชิงแม่เหล็กมีขั้นตอนเช่นเดียวกันกับการทำออกซิเจนเหลวของกาเยเตมาก โดยเริ่มต้นจากการอัดก๊าซก่อนและจึงปล่อยให้ก๊าซขยายตัวออก สิ่งเดียวที่แตกต่างกันคือ แทนที่จะเป็นก๊าซกลับใช้เกลือแทนและใช้สนามแม่เหล็กแทนที่ความดัน วิธีที่ง่ายที่สุดในการอธิบายกรรมวิธีเชิงแม่เหล็กคือโดยการใช้แผนภาพซึ่งลงจุดเอนโทรปีของเกลือนี้ในกราฟประชันกับอุณหภูมิสัมบูรณ์(รูปที่ 8.1)

เราได้เลือกช่วงอุณหภูมิจากระดับใดระดับหนึ่งเหนือ 1 ค จนต่ำลงถึงศูนย์สัมบูรณ์ เส้นทึบหนาแสดงถึงเอนโทรปีของเกลือในกรณีที่สนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ สำหรับที่ 1 ค และต่ำลงไปกว่านั้นอีกเอนโทรปีเปลี่ยนไปเล็กน้อยตามอุณหภูมิ ซึ่งหมายความว่าเกิดจากสปินโดยสิ้นเชิงที่ยังคงมีทิศทางสะเปะสะปะในช่วงนี้ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเอนโทรปีเพิ่มขึ้นเพราะว่าขณะนี้ของแลตทิซเด่นชัดจนสังเกตได้ เอนโทรปีของแลตทิซได้ถูกลงจุดแยกออกต่างหากเป็นเส้นประและขนานกับเอนโทรปีรวม แสดงว่าเอนโทรปีของสปินยังคงไม่เปลี่ยนแปลง ที่อุณหภูมิต่ำมากสักระดับหนึ่งถึงแม้จะไม่มีอิทธิพลของสนามแม่เหล็กใด ๆ สปินก็ต้องมีระเบียบตามกฎข้อที่สามของอุณหพลศาสตร์ กรณีนี้จะเกิดขึ้นเมื่อพลังงานความร้อนมีค่าน้อยมากจนเทียบไม่ได้กับอันตรกิริยาซึ่งกันและกันระหว่างสปิน ผลนี้จึงทำให้สปินรู้สึกตัวเองได้ดังในแผนภาพของเราแสดงออกมาเป็นการหักมุมลงของเอนโทรปี (เส้นทึบ)สู่ค่าน้อยลงจนหายไป

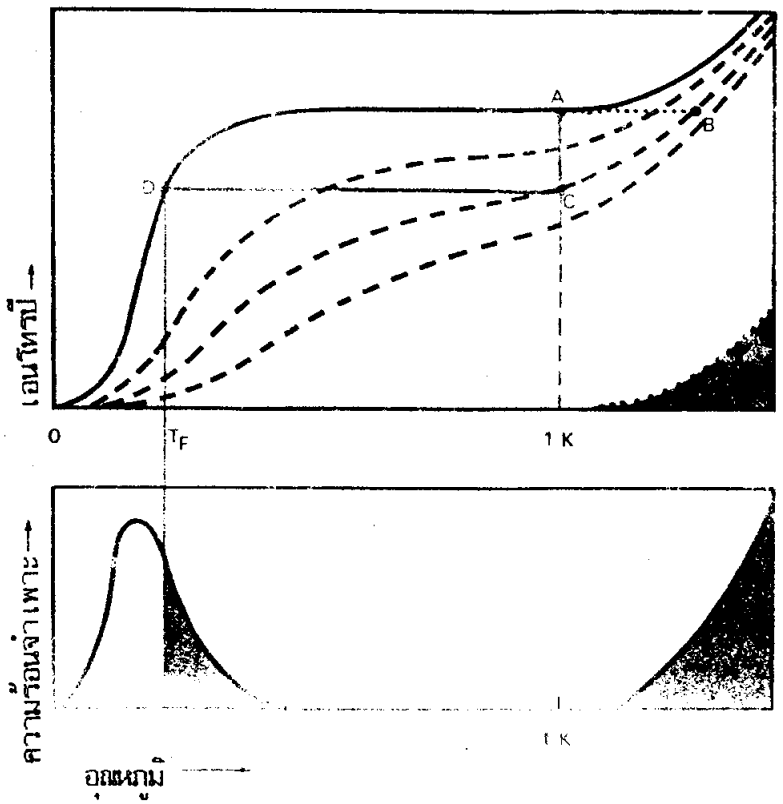
ต่อไปเรานำเส้นโค้งของผลรวมเอนโทรปีมาแสดงไว้ในแผนภาพนี้ซึ่งได้จากเมื่อเกลือนี้ถูกวางอยู่ภายในสนามแม่เหล็กภายนอก เส้นประสามเส้นที่ได้แสดงไว้นั้นแต่ละเส้นสำหรับ

สนามแม่เหล็กต่างกัน เนื่องจากสนามแม่เหล็กมีผลต่อการปรับแนวของสปินจึงมีระเบียบมากขึ้นกว่ากรณีที่อยู่ในสนามเป็นศูนย์ ดังนั้น เส้นประทั้งหมดของเราจึงอยู่ต่ำกว่าเส้นทึบ แน่นอนว่าเอนโทรปีของแลตทิซผลึกยังคงไม่ถูกกระทบกระเทือนจากสนามแม่เหล็ก ฉะนั้นอิทธิพลของสนามจึงเหมือนกันหมดในเส้นประทั้งสาม ในทางตรงกันข้ามตามที่กำหนดโดยกฎของกูรีทำให้การเป็นแม่เหล็ก นั่นคือ การปรับแนวของสปินจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง ด้วยเหตุนี้การลดลงสัมพัทธ์ของเอนโทรปีที่ต่ำกว่าค่าในขณะที่สนามเป็นศูนย์จึงกลายเป็นสิ่งที่เห็นได้ชัดเจนมากเมื่อเข้าสู่ศูนย์สัมบูรณ์ ขณะนี้แผนภาพดังกล่าวจึงสมบูรณ์แล้วนอกจากยกเว้นแต่การร่างแนวทางไปสู่กระบวนการลดอุณหภูมิเชิงแม่เหล็ก

การใช้ฮีเลียมเหลวเป็นตัวทำให้เย็นจะทำให้อุณหภูมิของเกลือลดลงจนถึง 1 ค แม้จะยังไม่ได้ใช้สนามแม่เหล็กแต่อย่างใด ดังนั้น จึงอยู่ที่ตำแหน่ง A ในแผนภาพเอนโทรปี การทำเกลือให้มีอำนาจแม่เหล็กโดยไม่ปล่อยให้ความร้อนเข้าหรือออกได้ เรียกว่ากระบวนการ "แอเดียแบติก" สาระสำคัญของกระบวนการนี้ก็คือ เอนโทรปียังคงไม่เปลี่ยนแปลง โดยใช้สนามด้วยความแรงขนาด 1 เทสลา เราสามารถสร้างกราฟแสดงผลของการทำให้เป็นแม่เหล็กโดยดูจุดบนเส้นประสำหรับสนามขนาด 1 เทสลา ซึ่งมีค่าเอนโทรปีตรงกับ A ในแผนภาพของเราจุดนี้คือ B เราเห็นได้ว่าโดยการทำให้เป็นแม่เหล็กเราจะทำให้อุณหภูมิของเกลือนี้เพิ่มขึ้น ก่อนหน้านี้เราได้เปรียบเทียบการลดอุณหภูมิเชิงแม่เหล็กกับการขยายตัวของก๊าซ แต่ก๊าซนั้นถูกอัดก่อนการขยายตัวทำให้อุณหภูมิของเกลือนี้สูงขึ้นจาก A ไป B เนื่องจากความร้อนของการทำให้เป็นแม่เหล็กซึ่งคล้ายคลึงกับความร้อนของการอัดอย่างมาก ดังเช่นที่สามารถสังเกตได้จากเครื่องสูบลมจักรยานที่ร้อนขึ้นในวัฏจักรการขยายตัวจะระบายความร้อนของการอัดออกไปด้วยน้ำเย็น แต่ในกระบวนการเชิงแม่-เหล็กต้องอาศัยฮีเลียมเหลว ดังนั้น การเตรียมงานจึงดำเนินไปเพื่อนำความร้อนจากการทำให้เป็นแม่เหล็กออกไปที่ 1 ค เกลือจึงจะคงอยู่ที่อุณหภูมินี้ได้ อย่างไรก็ดี ไม่ใช่อยู่ที่ A แต่อยู่บนเส้นที่ตรงกับ 1 ค และนั่นคือ อยู่ที่ C ขณะนี้คือจุดเริ่มต้นสำหรับขั้นตอนการลดอุณหภูมิที่แท้จริง

สิ่งที่สำคัญมากที่สุดสำหรับขั้นตอนการลดอุณหภูมิคือว่า กระบวนการจะต้องเป็นไปอย่างแอเดียแบติก ซึ่งหมายความว่าความร้อนใด ๆ ที่ไหลเข้าไปในเกลือต้องทำให้น้อยที่สุดเท่าที่จะน้อยได้ ดังนั้น ความเกี่ยวข้องเชิงความร้อนกับฮีเลียมเหลวที่ 1 ค จึงถูกตัดขาดและเกลือนั้นจึง

8.1 แผนภาพเอนโทรปีของเกลือพาราแมกเนติก แสดงถึงกรรมวิธีการลดอุณหภูมิเชิงแม่เหล็กจะช่วยให้สามารถบรรลุอุณหภูมิต่ำมากได้อย่างไร



ถูกกันด้วยฉนวนอย่างสมบูรณ์แบบ ต่อจากนี้สนามแม่เหล็กจะถูกทำให้ลดลงจนเป็นศูนย์ และขณะนี้เราต้องหาจุดดังกล่าวในแผนภาพซึ่งอยู่บนเส้นทึบสำหรับสนามเป็นศูนย์และมีค่าเอนโทรปีเท่ากันกับ C นั่นคือ D ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิสุดท้าย T_f ต้องต่ำยิ่งกว่า 1 ค การลดอุณหภูมิเชิงแม่เหล็กดังที่จิโอกและเดอบายได้ชี้ลู่ทางไว้จึงสามารถทำให้สำเร็จได้ด้วยวิธีนี้

หลังจากข้อเสนอครั้งแรกผ่านไปอีกเจ็ดปีจนกระทั่งได้เครื่องมือที่จำเป็นต่าง ๆ มาประกอบกันเข้าเพื่อทดลองตามกรรมวิธีนี้แล้ว ห้องปฏิบัติการไลเดนที่เพียบพร้อมด้วยอุปกรณ์ไครโอจินิกขนาดมโหฬารยังคงเป็นห้องปฏิบัติการที่อยู่ในชั้นแนวหน้าสุด แต่ไม่ได้อยู่ในฐานะนั้นอย่างโดดเด่นนานนัก ตามความเป็นจริงแล้วในการลดอุณหภูมิเชิงแม่เหล็กไลเดนเฉียดมาเป็นที่สอง

การทดลองครั้งแรกของพวกเขาได้ตีพิมพ์ลงในจดหมายเหตุฉบับวันที่ 15 พฤษภาคม ค.ศ.1933 แต่จิโอกที่เบิร์กเลย์ในแคลิฟอร์เนียได้บันทึกการทดลองที่ประสบผลสำเร็จมาแล้วสามครั้งในวันที่ 19 มีนาคม และวันที่ 8 และ 9 เมษายน อุณหภูมิที่บรรลุได้ในการทดลองทั้งสามครั้งคือ 0.53 ค, 0.34 ค และ 0.25 ค ตามลำดับ กรรมวิธีนี้ได้ถูกพิสูจน์โดยปราศจากข้อสงสัย ดังนั้น ช่วงอุณหภูมิใหม่จึงได้ถูกเปิดเผยออกมา ต่อจากเบิร์กเลย์และไลเดนในไม่ช้าออกซ์ฟอร์ดและต่อมาถึงเคมบริดจ์ได้ไล่ตามมาภายหลัง ขณะนี้การลดอุณหภูมิเชิงแม่เหล็กจึงกลายเป็นกรรมวิธีมาตรฐานในห้องปฏิบัติการอุณหภูมิต่ำทั่วทั้งโลกแล้ว ในไม่ช้าการปรับปรุงในกลวิธี สนามแม่เหล็กแรงสูงยิ่งขึ้นและเกลือที่เหมาะสมมากขึ้นได้ขยายช่วงของกรรมวิธีลดอุณหภูมิเชิงแม่เหล็กแบบใหม่นี้ไปสู่อุณหภูมิต่ำกว่า 0.01 ค

จากแผนภาพเอนโทรปีของเราอาจดูเหมือนว่า สำหรับเกลือใด ๆ ที่กำหนดไว้ไม่มีความหมายมากนักในการใช้สนามแรงสูงมาลบล้างสนามแม่เหล็ก เพราะว่าเอนโทรปีลดลงอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิต่ำสุด สนามที่ยิ่งแรงสูงมากขึ้นจึงไม่น่าจะทำให้บรรลุอุณหภูมิต่ำยิ่งขึ้นมาก ๆ ได้ เรื่องนี้นับว่าเป็นความจริงโดยแท้ แต่การบรรลุอุณหภูมิต่ำสักระดับหนึ่งนั้นเป็นเพียงการชนะเพียงครึ่งเดียว ส่วนอีกครึ่งหนึ่งอยู่ที่การรักษาอุณหภูมิต่ำนั้นไว้ได้นานเพียงพอที่จะให้ทำการทดลองทั้งหลาย นับว่าเหมือนกับกรณีการทำก๊าซเหลว อุณหภูมิต่ำที่ทำได้สำเร็จโดยการขยายออกซิเจนของกาเยเตคงอยู่ได้เพียงสองสามวินาทีจนกระทั่งหมอกของหยดเล็ก ๆ หายไป อุดมการณ์ที่จะมีก๊าซเหลวเดือดอย่างเงียบ ๆ ในหลอดทดลองสามารถทำสำเร็จได้ต่อเมื่อก๊าซปริมาณมากถูกทำให้เป็นของเหลวได้แล้วเท่านั้น เพื่อที่ว่ามันจะไม่ระเหยไปอีกโดยความร้อนเล็กน้อยที่ไหลเข้าไป การที่จะคงอยู่ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1 ค ได้เป็นเวลานานพอสมควร ไม่เพียงแต่จะต้องให้ความร้อนไหลเข้าน้อยที่สุดเท่านั้น แต่ยังต้องให้บรรลุการปรับแนวของสปินอยู่ในระดับหนึ่งที่ดีมากด้วย

ในเรื่องราวเหล่านี้เราได้พบความจริงที่ว่าโดยทั่วไปมีวิธีการอธิบายสิ่งที่เหมือนกันในทางฟิสิกส์ของเราได้สองวิธี วิธีหนึ่งคือการใช้วิธีอุณหพลศาสตร์อย่างแข็งขัน ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่ชัดเจนแต่บอกรายละเอียดให้กับเราเพียงเล็กน้อย อีกวิธีหนึ่งคือทฤษฎีจุลภาคซึ่งพยายามอธิบายเหตุการณ์ที่

เกิดขึ้นในพจน์ของเหตุการณ์ตามมาตราส่วนเชิงอะตอมตามปกติภาพที่ได้โดยวิธีหลังจะบรรยายเหตุการณ์ได้ดีกว่าแต่เชื่อถือได้ไม่เท่ากันเสมอไป การอธิบายการลดอุณหภูมิเชิงแม่เหล็กซึ่งเราอาศัยแผนภาพเอนโทรปีจัดเป็นวิธีอุณหพลศาสตร์อย่างหนึ่งแต่ภาพเชิงจุลภาคอาจทำให้เข้าใจได้ง่ายขึ้นว่าจะต้องทำอะไรเพื่อให้คงอยู่ที่อุณหภูมิต่ำได้เป็นเวลานานโดยการลดอุณหภูมิเชิงแม่เหล็ก

ครั้งแรกขอให้เราพิจารณากรณีสนามแม่เหล็กภายนอกเป็นศูนย์เสียก่อนถึงแม้ว่าที่ 1 ค สปินในเกลือดังตัวอย่างเช่น แกโดลิเนียมซัลเฟตยังคงไม่เป็นระเบียบ แต่ตามทฤษฎีของเนินสต์มันต้องปรับแนวตัวเองให้อยู่ในรูปแบบที่มีระเบียบขณะเข้าสู่ศูนย์สัมบูรณ์ หนึ่งในวิธีต่าง ๆ ซึ่งทำได้สำเร็จและเป็นวิธีเดียวเท่านั้นที่เราจำเป็นจะต้องพิจารณาในที่นี้คือ โดยการกระทำเชิงแม่เหล็กซึ่งกันและกัน เราสามารถคิดว่าเหมือนกับแท่งแม่เหล็กเล็ก ๆ หลายแท่งโดยแต่ละแท่งประกอบด้วยขั้วเหนือและขั้วใต้ ซึ่งเราได้แสดงด้วยลูกศรเล็ก (รูปที่ 8.2) ที่ 1 ค แท่งแม่เหล็กเล็ก ๆ เหล่านี้ต่างพุ่งอย่างสะเปะสะปะไปในทุกทิศทาง เมื่ออุณหภูมิต่ำลงและการเคลื่อนที่เชิงความร้อนซึ่งทำให้มันยุ่งเหยิงได้ลดลง ขั้วเหนือและขั้วใต้ของแต่ละแท่งแม่เหล็กกระทำต่อขั้วของแท่งข้างเคียงจะนำไปสู่การดึงแท่งแม่เหล็กทั้งหมดไปในทิศทางเดียวกัน ขณะที่อุณหภูมิลดต่ำลงไปอีกการปรับแนวซึ่งเกิดขึ้นด้วยตนเองนี้จะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเป็นไปอย่างสมบูรณ์ในที่สุด

หากมองคู่ที่ขั้นตอนเดียวกันแต่เริ่มต้นที่อุณหภูมิต่ำมากเราจะพบว่าตอนแรกสปินทั้งหมดต่างปรับแนวกันแล้ว ขณะที่เพิ่มความร้อนเข้าไปทำให้เกลือนั้นร้อนขึ้น แต่ตอนนี้ต้องใช้พลังงานเพิ่มเติมอีกเพื่อทำให้การปรับแนวของสปินไม่เป็นระเบียบ พลังงานนี้จัดว่าเป็นความร้อนจำเพาะของเกลือซึ่งในช่วงนี้จึงมีค่าสูงด้วยสาเหตุนี้ เมื่อทำให้เกิดความไม่เป็นระเบียบขึ้นแล้วเช่นนี้ก็ไม่ต้องการพลังงานเพิ่มเติมเข้าไปอีกและความร้อนจำเพาะจึงยุติการมีค่าสูงขึ้นอย่างผิดปกติ ย้อนกลับไปที่แผนภาพเอนโทรปีอีกครั้งหนึ่ง เราจึงสรุปได้ว่าในบริเวณที่เอนโทรปีของเกลือนี้แสดงการตกลงอย่างรวดเร็วจึงทำให้ความร้อนจำเพาะของเกลือมียอดแหลม สมควรอย่างแน่นอนที่จะกล่าวอ้างว่าเราสามารถบรรลุถึงผลเดียวกันอย่างแท้จริงด้วยอุณหพลศาสตร์ เว้นแต่ว่าเรื่องนี้น่าจะได้บอกอะไรแก่เราเกี่ยวกับสิ่งที่กำลังเกิดขึ้นกับสปินบ้างเล็กน้อย

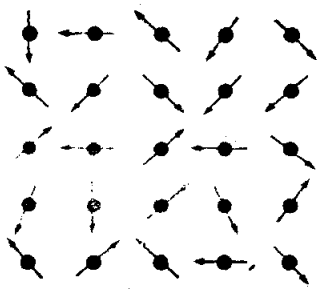
ความร้อนที่ไหลเข้าอย่างไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้สู่ภาชนะคูวาร์ที่บรรจุฮีเลียมเหลว

อยู่เต็ม เป็นผลให้ของเหลวนั้นบางส่วนลายเป็นไอ เพื่อที่จะให้มันอยู่ที่อุณหภูมิต่ำเราจึงต้องมีของเหลวนั้นอยู่ในภาชนะอย่างเพียงพอ ความร้อนไหลเข้าไปในเกลือที่ถูกทำให้เย็นลงเชิงแม่เหล็กมีผลต่อการปรับแนวของสปินที่ไม่เป็นระเบียบและเพื่อที่จะรักษาอุณหภูมิต่ำของมันให้คงอยู่ต่อไป เราต้องมีการปรับแนวของสปินให้พอเหมาะเสียก่อน อีกนัยหนึ่ง เราต้องมีความจุความร้อนสูงเพียงพอที่อุณหภูมิต่ำถ้าเราต้องการรักษาเกลือให้เย็นจัดเป็นเวลานานพอสมควร ดังนั้น สนามแรงสูงที่ลบล้างสภาพแม่เหล็กออกไปอาจจะไม่ทำให้เกลือมีอุณหภูมิต่ำลงมากกว่าสนามที่อ่อนแรงกว่า แต่จะเป็นเหตุให้สปินปรับแนวกันมากขึ้นกว่าเดิมมาก นับว่าเหมือนกับการกล่าวว่าการลบล้างสภาพแม่เหล็กจากสนามแรงสูงกว่าจะนำเกลือนี้เข้าไปสู่ความผิดปกติในค่าความร้อนจำเพาะมากยิ่งขึ้น ความจุความร้อนที่อุณหภูมิต่ำจึงเพิ่มขึ้น

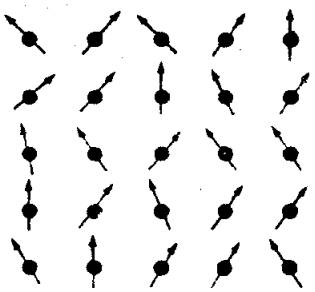
ข้อเสนอการลดอุณหภูมิเชิงแม่เหล็กของจิโอกและเคอบายได้ทำลายการหยุดชะงักซึ่งได้เข้าขวางการเข้าสู่ศูนย์สัมบูรณ์ที่เป็นมาเกือบยี่สิบปีภายหลังจากการทำฮีเลียมเหลวได้ ในทางทฤษฎีหนทางไปสู่อาณาเขตแห่งใหม่ที่ไม่ได้อยู่ในแผนที่ของ"อุณหภูมิแม่เหล็ก" ขณะนี้ได้ถูกเปิดเผยออกมาแล้ว แต่จะเป็นหนทางที่ปฏิบัติได้จริงหรือไม่ยังไม่มีใครรู้ ทั้งคาเมอร์ลิงห์ ออนเนสและโวลท์-เจอร์เองก็ไม่รู้ว่าเขาทั้งสองได้เข้าไปใกล้สู่คำตอบของปัญหานี้แล้วเพียงใด แต่จากงานวิจัยของทั้งสองนี้เองก็ได้เตรียมจัดหาสารทำงานโดยอาศัยแกโลดิเนียมซัลเฟตไว้ให้ ขณะนี้สิ่งที่ต้องการสี่ประการและต้องเป็นไปด้วยดีในเวลาเดียวกันด้วยคือ อุณหภูมิเริ่มต้นต่ำ แม่เหล็กแรงสูง กลไกปิด-เปิดความร้อนและเหนือสิ่งอื่นใดฉนวนความร้อนต้องพิเศษกว่าที่เคยใช้กันมาก่อนทั้งสิ้น

คาเมอร์ลิงห์ ออนเนสได้แสดงว่าอาจจะรักษาระดับอุณหภูมิไว้ที่ 1 ค หรือให้ต่ำกว่าเล็กน้อยได้เป็นเวลาหลายชั่วโมงอย่างสมบูรณ์ เขาทำเช่นนี้ได้โดยสูบไอเหนือฮีเลียมเหลวในภาชนะควาร์ขนาดเล็กออกไป ภาชนะนี้ถูกล้อมรอบด้วยภาชนะอื่น ๆ ที่บรรจุฮีเลียมเหลวที่จุดเดือดของมันสลับกับไฮโดรเจนเหลวและอากาศเหลว เพื่อที่จะให้ได้แม่เหล็กแรงมาก ส่วนที่เป็นขั้วของแม่เหล็กไฟฟ้าแรงสูงจึงได้ถูกนำมาใกล้ชิดกันที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ แต่ช่างห่างระหว่างขั้วต้องกว้างพอที่จะยึดไครโอสตัทขนาดใหญ่ซึ่งประกอบด้วยภาชนะหลายใบซ้อนกันอยู่จะทำให้เกิดสนามสูงเพียงพอสำหรับการทดลองและจำเป็นต้องใช้ไครโอสตัทที่ออกแบบขึ้นเป็นพิเศษ

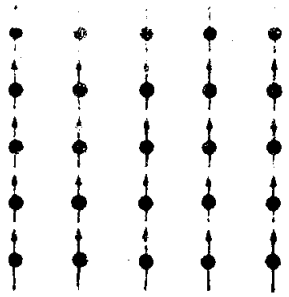
8.2 การเพิ่มความเป็นระเบียบเชิงแม่เหล็กขณะที่อุณหภูมิลดต่ำลงแสดงด้วยทิศทางของสปินของอิเล็กตรอน



1 ค



0.01 ค



0.0001 ค

การทำสนามแม่เหล็กความเข้มสูงต้องสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายแพงมากอยู่ในตัวด้วย แม่เหล็กไฟฟ้าแรงสูงที่สามารถทำให้เกิดสนามในขนาดอย่างเช่น 1 เทสลาตลอดปริมาตรขนาดใหญ่ต้องใช้เหล็กคุณภาพสูงปริมาณมาก ซึ่งทำให้ไม่เพียงแต่มีราคาแพงแต่ยังใหญ่เทอะทะอีกด้วย หนทางเลือกก็คือผ่านกระแสสูงมากไปตามโซเลนอยด์ซึ่งเป็นขดลวดที่ไม่มีเหล็กผสมอยู่ และระบายความร้อนที่เกิดขึ้นจากการไหลของกระแสไฟฟ้าด้วยน้ำมันหรือน้ำเย็นในอัตราสูง การนี้สร้างปัญหาต่าง ๆ ที่ยอกย้อนเชิงวิศวกรรม และยิ่งไปกว่านั้นยังต้องการโรงไฟฟ้าสำหรับจ่ายกระแสตรงที่จำเป็นสำหรับการทดลอง การติดตั้งเครื่องมือทั้งสองชนิดนี้ แห่งแม่เหล็กและโซเลนอยด์ได้ถูกนำมาใช้สำหรับการลดอุณหภูมิเชิงแม่เหล็ก

ในการระบายความร้อนของการทำให้เป็นแม่เหล็กออกจากเกลือนี้เข้าไปในฮีเลียมเหลวที่ 1 ค แล้วจึงกันความร้อนออกไปจากฮีเลียมเหลวเมื่อถอนสนามแม่เหล็กออกไป จำเป็นต้องใช้สวิทช์เปิด-ปิดความร้อน วิธีแก้ปัญหานี้ที่ใช้กันบ่อยครั้งที่สุดคือวิธีที่ คูวารได้เตรียมให้ไว้แล้ว ในการสาธิตภาชนะสุญญากาศของเขาที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 3 เขาแสดงภาชนะสองชั้นที่มีอากาศเหลวกำลังเดือดอย่างเงียบเชียบต่อหน้าผู้ชมของเขา เพราะว่าช่องระหว่างผนังแก้วทั้งสองถูกสูบอากาศออกให้ว่างเปล่า เมื่อเขาทำลายสุญญากาศนี้ ทำให้ของเหลวเริ่มต้นเดือดอย่างรุนแรงและระเหยอย่างรวดเร็ว อากาศในบรรยากาศได้เข้าไปในที่ว่างระหว่างผนังภาชนะทั้งสองและทำให้เกิดเส้นทางการนำความร้อนระหว่างอุณหภูมิห้องกับอากาศเหลว เนินสต์ได้นำหลักการเดียวกันนี้มาใช้ในรูปแบบที่ซับซ้อนเชิงเหนือกว่าสำหรับการวัดความร้อนจำเพาะและได้กลายเป็นกลวิธีมาตรฐานในการวิจัยที่อุณหภูมิต่ำ โดยแทนที่จะทำลายรอยผนึกและให้อากาศในบรรยากาศดันเข้าไปแทรกอยู่ในช่องว่างสุญญากาศอย่างรวดเร็ว แต่ใช้ก๊อกสำหรับให้ก๊าซโดยปกติคือฮีเลียมปริมาณเพียงเล็กน้อยผ่านเข้าไปได้ และสามารถสูบผ่านก๊อกนี้ออกไปได้ด้วยเมื่อต้องการสร้างฉนวนสุญญากาศขึ้นมาอีก ในที่สุดจะได้ฉนวนความร้อนอย่างดีจากสุญญากาศอย่างยอดเยี่ยมมาก และการสร้างไครโอสตัทที่ถูกต้องจำเป็นต้องป้องกันการแผ่กระจายความร้อนทั้งหมดที่เข้าไปในบริเวณทดลองออกไปโดยเครื่องกำบังสะท้อน

เมื่อจิโอกและเดอบายได้พิมพ์เผยแพร่รายงานครั้งแรกของเขาทั้งสองเกี่ยวกับ

ความเป็นไปได้ของการลดอุณหภูมิเชิงแม่เหล็กในปีค.ศ.1926 ฐานะของไลเดนในการเป็นห้องปฏิบัติการเพียงแห่งเดียวในโลกที่ทำฮีเลียมเหลวได้จึงสิ้นสุดลง ห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิต่ำใหม่ๆ เริ่มก่อตั้งขึ้นอีกหลายประเทศ และขณะนี้การแข่งขันสำหรับช่วงใหม่ของอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 1 ค ยังคงมีอยู่ต่อไปซึ่งคล้ายคลึงกับการแข่งขันกันทำฮีเลียมเหลวครั้งแรก แม้กระนั้นเวลาก็ผ่านไปอีกเจ็ดปีจนกระทั่งการลดอุณหภูมิเชิงแม่เหล็กเป็นผลสำเร็จครั้งแรก

สมดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้นอย่างที่สุดว่าการแข่งขันได้ผู้ชนะแล้วคือหนึ่งในบรรดาผู้เริ่มต้นในแนวนี้คือจิโอก ส่วนเดอบายในฐานะนักฤษฎีก็ต้องอยู่นอกการแข่งขันครั้งนี้ไม่ว่ากรณีใดๆ ในวันที่ 12 เมษายน ค.ศ.1933 จิโอกได้รายงานชุดแรกของการทดลองสามเรื่องจากการทำงานร่วมกับมักดักกัล ซึ่งดำเนินการที่มหาวิทยาลัยแห่งแคลิฟอร์เนีย เขาได้ใช้แกโดลิเนียมซัลเฟตและลบล้างสภาพแม่เหล็กของสารตัวอย่างของเขานี้ที่อุณหภูมิเริ่มต้น 3.4 ค ในวันที่ 19 มีนาคม ได้บรรลุถึง 0.53 ค จากผลสำเร็จในการเริ่มต้นครั้งนี้จึงกระตุ้นให้เขาปรับปรุงอัตราการสูบฮีเลียมเหลวออกไปจากไครโอสตัทของเขามากขึ้น และในวันที่ 8 เมษายน โดยอาศัยการลบล้างสภาพแม่เหล็กที่เริ่มจาก 2 ค ทำให้เขาได้บรรลุถึง 0.34 ค การดำเนินการที่ดีกว่ายิ่งขึ้นอีกในวันต่อมาจึงเริ่มต้นที่ 1.5 ค ซึ่งนำไปสู่อุณหภูมิสุดท้าย 0.25 ค การลดอุณหภูมิเชิงแม่เหล็กจึงได้กลายเป็นความจริงและแล้วในการทดลองบุกเบิกครั้งแรก ๆ อุณหภูมิต่ำสุดที่ได้มาโดยอาศัยฮีเลียมเหลวถูกทำให้ลดลงมากกว่าสามเท่าแล้ว

แต่นับว่าเป็นเพียงการเริ่มต้นเท่านั้นเพราะว่าเพียงหนึ่งเดือนหลังจากนั้น ห้องทดลองไลเดนซึ่งในขณะนี้เรียกว่า ห้องทดลองคาเมอร์ลิงห์ ออนเนสเพื่อเป็นเกียรติแก่ผู้ก่อตั้งได้รายงานผลสำเร็จของการลดอุณหภูมิครั้งแรก ซึ่งบรรลุถึงอุณหภูมิ 0.27 ค การทดลองที่ไลเดนได้ดำเนินต่อไปโดยใช้ซีเรียมฟลูโอไลด์ซึ่งเป็นเกลืออีกชนิดหนึ่งที่แพงพอสมควร อย่างไรก็ดีเมื่อเวลาผ่านไปหนึ่งปีห้องทดลองอุณหภูมิต่ำที่ก่อตั้งใหม่ที่ออกซ์ฟอร์ดได้เริ่มงานการลดอุณหภูมิเชิงแม่เหล็กโดยเลือกใช้สารส้มเหล็กแอมโมเนียมซึ่งเป็นสารที่มีอยู่ทั่วไปและใช้กันอย่างกว้างขวางในการห้ามเลือดหลังถูกคนมีดโกนบาด ลักษณะที่สำคัญประการหนึ่งของการทดลองเหล่านี้คือว่า นับเป็นครั้งแรกที่สารที่สองถูกทำให้เย็นลง ในการผสมอนุภาคแคดเมียมให้คลุกเคล้ากับเกลือนั้นปรากฏว่าไลหะ

นี้ได้กลายเป็นสภาพน่ายวดยิ่งที่ 0.56 ค ไม่กี่ปีหลังจากนั้นการทดลองลบล้างสภาพแม่เหล็กได้เริ่มขึ้นในเคมบริดจ์และหลังสงครามโลกห้องทดลองจำนวนมากมายทั่วทั้งโลกได้พากันก้าวเข้ามาในสาขานี้ ขณะที่ในครั้งแรกการเน้นส่วนใหญ่อยู่ที่การตรวจสอบเกลือต่าง ๆ ที่ใช้ในกระบวนการลดอุณหภูมินั้น งานวิจัยคุณสมบัติของสารอื่น ๆ ซึ่งได้ทำให้อุณหภูมิลดลงถึงอุณหภูมิเชิงแม่เหล็กก็ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนกระทั่งในระหว่างปี ค.ศ. 1950–1959 การลดอุณหภูมิเชิงแม่เหล็กจึงกลายเป็นกลวิธีมาตรฐาน ซึ่งไม่ก่อให้เกิดความยุ่งยากอย่างใหญ่หลวงใด ๆ เบิกทางไปสู่ช่วงของอุณหภูมิต่ำลงถึงหนึ่งส่วนสองพันถึงสามพันองศาเหนือศูนย์สัมบูรณ์

กระบวนการที่นำมาปรับปรุงใช้สำหรับการทดลองเหล่านี้เหมือนกันมากกับที่ใช้ในงานบุกเบิกครั้งแรกที่เบิร์กเลย์ ไลเดนและออกซ์ฟอร์ด แผนภาพแสดงเค้าโครงได้แสดงไว้ในรูปที่ 8.3 โดยปกติเกลือ S ในรูปทรงกลมหรือทรงรูปไข่ถูกยึดแน่นด้วยฐานของตัวนำความร้อนต่ำในภาชนะ P ซึ่งสามารถนำออกไปได้โดยผ่านก๊อกเปิด-ปิดท่อ T ภาชนะนี้ถูกล้อมรอบด้วยอ่างของฮีเลียมเหลวที่กำลังเดือดภายใต้ความดันลดลงที่ประมาณ 1 ค ในภาชนะของดูวาร์ D ตอนแรกให้ก๊าซฮีเลียมจำนวนน้อยเข้าไปในภาชนะและท่อถูกปิดสนิทอยู่ ดังนั้น เกลือจึงอยู่ที่อุณหภูมิ 1 ค ด้วย เพราะว่าก๊าซฮีเลียมเป็นตัวนำความร้อนที่ดีแต่สปินในเกลือดังแสดงในภาพด้วยลูกศรเล็ก ๆ ยังคงไม่เป็นระเบียบที่อุณหภูมินี้ กล่าวคือ เอนโทรปีของมันยังสูงอยู่ หากย้อนกลับไปที่แผนภาพเอนโทรปีของเราในรูปที่ 8.1 เราสามารถเจาะจงตำแหน่งของเกลือที่ขั้นตอนนี้ของกระบวนการได้ที่จุด A ต่อไปผ่านสนามแม่เหล็กให้แก่เกลือซึ่งปกติกระทำโดยนำแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างแรงมาวางไว้จนกระทั่งขณะนี้ไครโอสตัทอยู่ระหว่างขั้วเกือกม้า (รูปที่ 8.3 ข) สนามแม่เหล็กภายนอกนี้จะควบคุมสปิน ซึ่งกระทำตัวเหมือนกับแท่งแม่เหล็กเล็ก ๆ นั่นเอง ให้ไปสู่ทิศทางเส้นแรงของสนามนั้นจนกระทั่งสปินจะปรับแนวอยู่ในทิศเดียวกันกับทิศของสนาม ดังนั้น จึงทำให้เกิดรูปแบบเป็นระเบียบ นั่นคือ เอนโทรปีของเกลือจะลดลงและเราจะบรรลุถึงจุด C ในแผนภาพเอนโทรปี อย่างไรก็ดีดังที่ได้อธิบายไว้แล้วในตอนต้นว่าการป้อนสนามเข้าไปให้กับเกลือนี้จะต้องส่งผลให้เกิดการคายความร้อนของการทำให้เป็นแม่เหล็กและทำให้เอนเอียงที่จะเลื่อนไปยังจุด B ในแผนภาพเอนโทรปี แต่สามารถป้องกันการค่อย ๆ ร้อนขึ้นของเกลือนี้ได้โดยอาศัยก๊าซที่อยู่ในภาชนะ P ซึ่งจะ

8.3 ขั้นตอนต่อเนื่องสั้นในการทดลองลดอุณหภูมิเชิงแม่เหล็ก

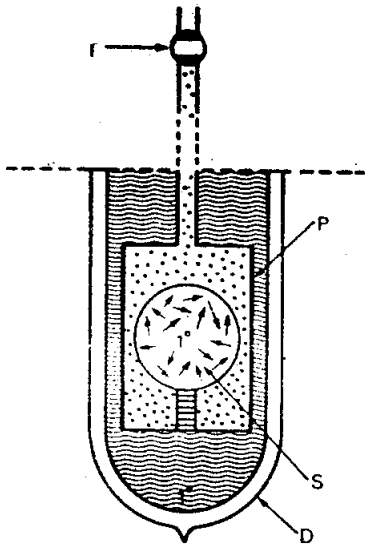
นำความร้อนของการทำให้เป็นแม่เหล็กเข้าไปในฮีเลียมเหลว อีกนัยหนึ่ง ความร้อนที่เกิดจากการปรับแนวของสปินเพียงแต่ส่งผลให้ส่วนเกินบางส่วนของฮีเลียมระเหยกลายเป็นไอไป แต่อุณหภูมิของส่วนต่าง ๆ ทั้งหมดยังคงอยู่ที่ 1 ค

ขณะนี้เครื่องมือเกือบจะพร้อมแล้วสำหรับการลดอุณหภูมิเชิงแม่เหล็กที่จะเกิดขึ้น แต่ก่อนที่จะเริ่มลงมือจำเป็นต้องเตรียมการเพื่อไม่ให้มีความร้อนไหลเข้าไปในเกลือที่ทำให้เย็นแล้ว ความร้อนที่ไหลถ่ายเทกันกับส่วนอื่น ๆ ของเครื่องมือจะต้องถูกทำให้แยกจากกันและเรื่องนี้ทำให้เรียบร้อยได้โดยเปิดก๊อก T ไปสู่เครื่องสูบและไล่ไอออกจากช่องว่างภายใน P (รูปที่ 8.3 ค) ในตอนสุดท้ายแม่เหล็กไฟฟ้าถูกนำออกไปและเกลือนั้นๆได้เลื่อนตำแหน่งไปสู่จุด D ในแผนภาพเอนโทรปี ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิต่ำสุดท้ายที่บรรลุได้โดยกระบวนการนี้ (รูปที่ 8.3 ง)

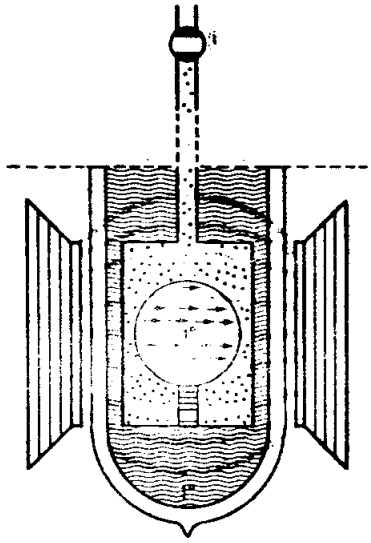
หลังจากการลบล้างสภาพแม่เหล็กนี้แล้ว การทดลองต่างๆ กับเกลือหรือสารใดๆ ซึ่งเย็นลงแล้วโดยวิธีนี้สามารถเริ่มดำเนินการได้ทันที ระยะเวลาสำหรับการสังเกตจะเป็นไปได้นานเพียงใด แน่นอนว่าขึ้นอยู่กับความร้อนที่ไหลเข้าไปในเกลือ ในการทดลองครั้งแรกสุดจิโอกสามารถควบคุมให้อยู่ที่อุณหภูมิต่ำมากเป็นเวลาหลายชั่วโมง ความสำเร็จนี้น่าทึ่งเพียงใดนั้นได้ปรากฏอย่างชัดเจนหลังจากนั้นอีกหนึ่งเดือนต่อมา ในการทดลองที่ไลเดนเป็นครั้งแรกพบว่าไม่สามารถที่จะรักษาอุณหภูมิต่ำไว้ได้นานเกินกว่า 2-3 นาที ในปีต่อ ๆ มางานจำนวนมากที่ทำในห้องปฏิบัติการต่าง ๆ เพื่อพัฒนาฉนวนความร้อนของเกลือให้ดียิ่งขึ้นและสามารถลดกระแสความร้อนไหลเข้าถึง 10^{-8} วัตต์ นับเป็นปริมาณการไหลที่น้อยที่สุดของพลังงานอย่างแท้จริง

การพิจารณาว่าปริมาณความร้อนแม้แต่เพียงเล็กน้อยได้ก่อปัญหาขึ้นในการทดลองเหล่านี้เพียงใด จะดูได้จากการก่อกวนแปลก ๆ ที่ทารุณต่อการทดลองในระยะแรกเริ่มมาเป็น

(ก)

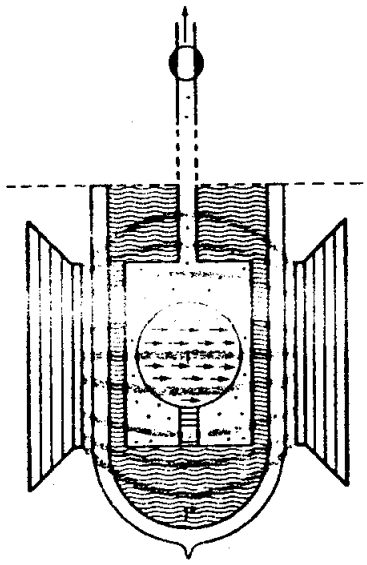


(ข)

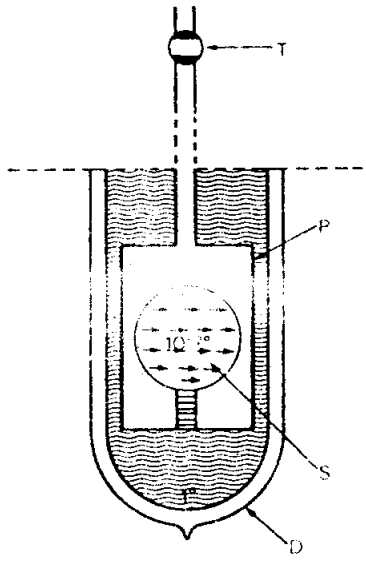


เครื่องสูบ

(ค)



(ง)



เวลาช้านาน สิ่งที่พบว่าเกิดขึ้นบ่อยครั้งดูเหมือนความร้อนเข้าไปในเกลือตัวอย่างจากแหล่งกำเนิดบางแห่งที่ยังไม่ทราบได้ ความร้อนที่เพิ่มขึ้นมีมากพอที่จะทำให้การทดลองอย่างแม่นยำเป็นไปไม่ได้ จึงจำเป็นต้องหาร่องรอยที่มาของความร้อนนี้ ลักษณะของการรบกวนที่น่าฉงนอยู่ที่ว่ามันเกิดขึ้นอย่างกระจายทั่วไป และโดยปกติดูเหมือนว่าเวลากลางวันเลวร้ายกว่าเวลากลางคืน เงื่อนปมสุดท้ายได้มาจากความจริงที่ว่าการร้อนขึ้นนี้คล้ายกับจะเลวร้ายยิ่งขึ้นเมื่อกำลังเดินเครื่องสูบเชิงกลอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับไครโอสตัท ในที่สุดก็ได้สืบหาร่องรอยไปจนถึงเส้นไนลอนบาง ๆ ซึ่งแขวนเกลืออยู่เพื่อจะลดการนำความร้อน แรงกระเทือนเชิงกลและเครื่องยนต์ที่กำลังเดินเครื่องซึ่งเกิดขึ้นบ่อยครั้งมากในเวลากลางวันเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการสั่นของเส้นไนลอน ความร้อนที่เกิดขึ้นโดยการยืดออกไปของเส้นป่านไนลอนเหล่านี้ขณะที่มันสั่นจะเพียงพอที่จะทำให้การทดลองเสียหายได้ ปรากฏว่าการรบกวนได้หายไปเมื่อใช้เครื่องยึดแขวนที่มั่นคง

ข้อจำกัดสุดท้ายของการลดอุณหภูมิซึ่งได้มาจากการสบล้างสภาพแม่เหล็กของเกลือพาราแมกเนติก ไม่เพียงแต่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเริ่มต้นและสนามแม่เหล็กที่ใช้เท่านั้น แต่เหนือสิ่งอื่นใดยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางแม่เหล็กของตัวทำให้เย็นด้วย ขออ้างถึงแผนภาพเอนโทรปีของเราอีกครั้ง (รูปที่ 8.1) เราเห็นได้ว่าข้อจำกัดนี้ถูกกำหนดจากการตกต่ำลงอย่างชันมากของเส้นเอนโทรปีในสนามเป็นศูนย์ เรายังได้เห็นอีกว่าการตกต่ำลงนี้เกิดขึ้นเนื่องจากผลของสปินที่มีต่อกันและกันที่อุณหภูมิหนึ่งซึ่งต่ำมากจนการสั่นเชิงความร้อนอ่อนมากเกินกว่าที่จะกีดกั้นสปินไม่ให้รวมตัวกันอยู่ในรูปแบบที่เป็นระเบียบ อีกครั้งหนึ่งที่ปัญหานี้คล้ายกันมากกับการลดอุณหภูมิของก๊าซในเครื่องยนต์ขยาย ในกรณีนั้นก็เช่นเดียวกันเพราะขณะที่อุณหภูมิลดลงนั้นการทำอันตรกิริยาต่อกันของแรงยึดเหนี่ยวเด่นชัดขึ้นจนกระทั่งก๊าซจึงเริ่มกลายเป็นของเหลว เรื่องนี้จะต้องหมายความว่าการลดอุณหภูมิต่อไปอีกโดยการขยายตัวของก๊าซกลายเป็นเรื่องที่เป็นไปไม่ได้

ความคล้ายคลึงกันระหว่างการลดอุณหภูมิด้วยการขยายตัวและการลดอุณหภูมิเชิงแม่เหล็กยังมีอีกต่อไป ในกรณีของเครื่องยนต์ขยายที่ใช้ไฮโดรเจนจะยอมให้เย็นลงได้ต่ำกว่าอุณหภูมิของเครื่องที่ใช้อากาศ เพราะว่าจุดเดือดของไฮโดรเจนต่ำมากกว่าของอากาศ อุณหภูมิต่ำลงไปยิ่งกว่านี้อีกสามารถทำได้ด้วยเครื่องยนต์ฮีเลียม นับว่าเป็นเรื่องเดียวกันกับกรณีของเกลือพารา-

แมกเนติกที่อันตรกิริยาระหว่างสปินเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่างกันสำหรับสารต่างชนิด ยกตัวอย่างให้เห็นได้สักสองสามตัวอย่างคือ เอนโทรปีลดลงอย่างรวดเร็วเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 0.2 ค ในแกโดลิเนียมซัลเฟต ที่ประมาณ 0.05 ค ในสารส้มเหล็กแอมโมเนีย และที่ 0.003 ค โดยประมาณในซีรัสแมกนีเซียมไนเตรต ค่าหลังสุดนี้สามารถถือว่าเป็นขีดจำกัดต่ำของการลดอุณหภูมิเชิงพาราแมกเนติก

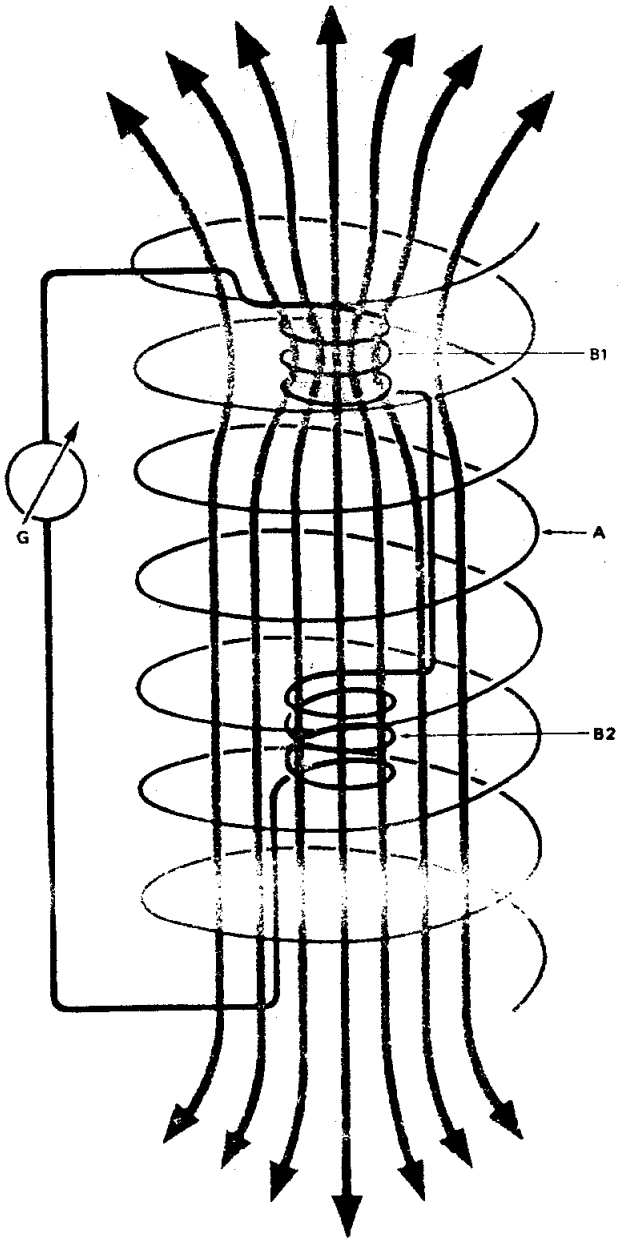
เมื่อเปรียบเทียบการลดอุณหภูมิเชิงแม่เหล็กกับการลดอุณหภูมิโดยการขยายควรจะระลึกว่ากระบวนการที่พิจารณาข้างต้นคล้ายกันมากกับจังหวะขยายเดี่ยวที่ใช้โดยกาเยเต อุปกรณ์การลดอุณหภูมิเชิงแม่เหล็กที่ค่อนข้างจะซับซ้อนอยู่บ้างซึ่งสอดคล้องกับเครื่องขยายแบบสูบชักทำให้บังเกิดผลได้อย่างแท้จริง แต่กลับปรากฏว่าใช้ประโยชน์ได้ค่อนข้างจำกัด คุณค่าของเครื่องยนต์เชิงแม่เหล็กเช่นนี้อยู่ที่ความสามารถในการลดอุณหภูมิมวลขนาดใหญ่ของสารที่สองเท่านั้น อย่างไรก็ตาม เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำมากเหล่านี้ความจุความร้อนของสารอื่นโดยปกติมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่าของเกลือนั้น การลบล้างสภาพแม่เหล็กรวดเดียวเพียงหนึ่งครั้งนับว่าพอเพียงในเกือบทุกกรณี แม้กระนั้นการลบล้างสภาพแม่เหล็กมากกว่าหนึ่งครั้งจะเป็นประโยชน์เมื่อต้องการบรรลุอุณหภูมิต่ำมาก ๆ และเพื่อจุดประสงค์เหล่านี้อุปกรณ์การลดอุณหภูมิทั้งหลายที่มีสองหรือแม้แต่สามขั้นตอนของการลบล้างสภาพแม่เหล็กได้เคยนำมาใช้แล้ว ในกรณีเช่นนี้เกลือที่แตกต่างกันซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่ากันลดหลั่นลงไปตามลำดับจึงนำมาใช้ในแต่ละขั้นตอนเพื่อให้เอนโทรปีลดลงจนต่ำสุด ตรงนี้อีกเช่นกันที่เราพบความคล้ายคลึงกันอย่างมากกับการทำให้เป็นของเหลว "แบบลดหลั่น" ดังที่ได้อธิบายแล้วในบทที่ 2

เมื่อจิโอกและเคอบายได้เสนอกรรมวิธีการลดอุณหภูมิแบบใหม่ของเขาทั้งสองนั้น คำถามที่ผุดขึ้นมาในครั้งนั้นก็คือ อุณหภูมิต่ำมากขนาดนี้สามารถวัดได้หรือไม่และถ้าวัดได้จะวัดอย่างไร นับว่าโชคดีที่คำถามนี้กลับกลายเป็นคำถามที่เหลวไหล เพราะมีคำตอบอยู่ในตัวแล้ว การลดอุณหภูมิจะมีผลต่อสารเมื่อเอนโทรปีของสารนั้นยังคงเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิอยู่เท่านั้น และการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีซึ่งเป็นไปตามกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์สามารถใช้หาอุณหภูมิได้เสมอ อีกนัยหนึ่งกลไกการลดอุณหภูมิใด ๆ นับว่าเป็นเครื่องวัดอุณหภูมิอยู่ในตัวมันเองโดยอัตโนมัติ

8.4 เทอร์มอมิเตอร์แม่เหล็ก

เช่นเดียวกับการลดอุณหภูมิเชิงแม่เหล็กเองวิธีวัดอุณหภูมิของมันด้วยก็เช่นกันมีความคล้ายคลึงอย่างใกล้ชิดกับที่ใช้ในการทำก๊าซเหลว อุณหภูมิของก๊าซที่เปลี่ยนไปจะก่อให้เกิดการผันแปรของความดันและปริมาตรของก๊าซ ซึ่งสัมพันธ์ซึ่งกันและกันด้วยกฎของบอยล์และเกย์-ลูสแซกในรูปของสมการอย่างง่ายคือ P x V = ค่าคงที่ x T ความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกันสำหรับเกลือพาราแมกเนติกคือกฎของกูรี ซึ่งสามารถเขียนได้ว่า สภาพรับการเป็นแม่เหล็กไว้ได้ = ค่าคงที่/T นับว่าเป็นสูตรอย่างง่ายมากสูตรหนึ่งอีกเช่นกันที่บ่งบอกถึงการวัดอุณหภูมิเชิงแม่-เหล็กว่าง่ายพอ ๆ กันด้วย ในกรณีของเครื่องวัดอุณหภูมิแบบก๊าซจะวัดการเปลี่ยนแปลงความดันของก๊าซในปริมาตรที่กำหนดโดยที่ค่านี้จะแปรโดยตรงกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ นับว่าเป็นกรรมวิธีที่เก่าแก่มากของการวัดอุณหภูมิซึ่งใช้เป็นครั้งแรกโดยกาลิเลโอและโดยอามองตองส์ ส่วนกรณีของเกลือสิ่งที่ต้องกระทำทั้งหมดคือการวัดสภาพรับการเป็นแม่เหล็กไว้ได้ของเกลือ ซึ่งตามกฎกูรีจะแปรผกผันกับอุณหภูมิสัมบูรณ์

การวัดนั้นง่ายพอสมควร สภาพรับไว้ได้คือการทำให้เกลือเป็นแม่เหล็กซึ่งเกิดขึ้นโดยสนามแม่เหล็กที่กำหนดไว้ขนาดหนึ่ง เรื่องนี้ในทางปฏิบัติจะเป็นผลสำเร็จได้โดยการใช้สนามแม่เหล็กอย่างอ่อนและวัดความเข้มของสนามภายในสารตัวอย่าง นับว่าโชคดีที่สามารถทำได้โดยไม่ต้องวางเครื่องบันทึกในทางแม่เหล็กใดๆเข้าไปในตัวเกลือ เมื่อเปิดกระแสให้ไหลในขดลวดทรงกระบอกยาว A (รูปที่ 8.4) สนามแม่เหล็กเอกพันธุ์ได้ถูกสร้างขึ้นภายในทรงกระบอกยาวนั้นและความแรงของสนามนี้วัดได้จากกระแสเหนี่ยวนำภายในขดลวดทุติยภูมิ B และบันทึกผ่านแกลแวนอมิเตอร์ G ขดลวดทุติยภูมินี้ถูกแบ่งออกสองส่วนเท่ากันเป็น B_1 และ B_2 ที่พันในทิศตรงกันข้าม ดังนั้น ถ้าสนามแม่เหล็กมีความแรงเท่ากันตลอดแนวความยาวของขดลวดปฐมภูมิ A จะไม่มีกระแสสุทธิไหลผ่านเข้าไปในขดลวดทุติยภูมิและแกลแวนอมิเตอร์จะไม่แสดงค่าที่อ่านได้ ในการทำหน้าที่เป็นเทอร์โมมิเตอร์เชิงแม่เหล็ก ระบบของขดลวดถูกวางไว้โดยรอบไครโอสัตในตำแหน่งที่เกลือ S เข้าไปอยู่ในศูนย์กลางของ B_1 เลยทีเดียว เมื่อเกลือมีสภาพรับการเป็นพาราแมกเนติกไว้ได้


B1
A
B2
G

นั้นเส้นแรงแม่เหล็กถูกลากเข้าหามันและผลลัพธ์จากการนี้ทำให้จำนวนทั้งหมดของเส้นแรงแม่เหล็กผ่านเข้าไปใน B_1 จะต้องมากกว่าที่ผ่านเข้าไปใน B_2 ฉะนั้น แกลแวนอมิเตอร์จึงบันทึกไว้ได้ ค่าที่อ่านได้นี้เป็นการวัดสภาพรับไว้ได้ของเกลือโดยตรง และตามกฎของกูรีจึงเป็นส่วนกลับของอุณหภูมิสัมบูรณ์

การหาอุณหภูมิเชิงแม่เหล็กโดยวิธีง่ายนี้กลับกลายเป็นเรื่องง่ายน้อยลงเมื่อเข้าใกล้สู่ศูนย์สัมบูรณ์ และอีกครั้งหนึ่งที่ความยุ่งยากคล้ายกับที่ได้ประสบมาแล้วกับเทอร์โมมิเตอร์แบบก๊าซ เราได้เห็นมาแล้วในบทต้น ๆ ว่าเมื่อก๊าซถูกลดอุณหภูมิลงจะเริ่มปรากฏว่าที่อุณหภูมิแน่นอนระดับหนึ่งมีการบิดเบือนไปจากสมการอย่างง่าย $PV = RT$ ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลก๊าซและเป็นเหตุให้เกิดการชะลอการกลายเป็นของเหลวในก๊าซ อันตรกิริยาระหว่างสปินในเกลือพาราแมกเนติกมีบทบาทในทำนองเดียวกันที่ทำให้เกิดการบิดเบือนไปจากกฎของกูรี เรื่องนี้ไม่ได้หมายความว่าเทอร์โมมิเตอร์เชิงแม่เหล็กขณะนี้กลายเป็นสิ่งที่ไร้ประโยชน์ เพราะยังคงแสดงค่าที่อ่านได้แต่ต้องใช้สูตรที่ซับซ้อนกว่ากฎของกูรี โดยเป็นสูตรที่มีค่าแก้ต่างๆสำหรับอันตรกิริยาระหว่างสปินดังในกรณีการแทนกฎของก๊าซอย่างง่ายด้วยสมการแวนเดอร์วาลส์

อย่างไรก็ตาม การใช้ค่าแก้เหล่านี้เป็นสิ่งที่ยอกย้อนมากเพราะว่าเกี่ยวข้องกับความรู้อย่างละเอียดในเรื่องการทำอันตรกิริยาเชิงแม่เหล็กที่ซับซ้อนภายในเกลือนั้น และยิ่งกลายเป็นเรื่องที่พลิกแพลงมากขึ้นทุกทีเมื่อต้องวัดอุณหภูมิที่ต่ำลง ๆ ด้วยเหตุนี้จึงดูเหมือนว่าค่าที่แท้จริงของอุณหภูมิต่ำสุดที่สามารถบรรลุได้โดยอาศัยเกลือพาราแมกเนติกอาจจะถูกตราว่าเป็นค่าไม่แน่นอนได้เสมอ แต่นับว่าโชคดีอีกครั้งที่เราได้รับความคุ้มครองจากกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ เพราะกฎนี้บรรจุนิยามของอุณหภูมิสัมบูรณ์อยู่ในตัวเอง ดังที่ได้แสดงไว้โดยลอร์ดเคลวินเมื่อกว่าหนึ่งศตวรรษมาแล้ว อุณหภูมินี้จะต้องได้จากวัฏจักรที่กระทำกับเครื่องยนต์ความร้อนในอุดมคติที่ได้พิจารณาเป็นครั้งแรกโดยซาดิ คาร์โนต์ เครื่องยนต์ดังกล่าวจะทำงานโดยการรับปริมาณความร้อน Q_1 เพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิสัมบูรณ์ T_1 และคายความร้อนออก $-Q_2$ ที่อุณหภูมิต่ำ T_2 ปริมาณความร้อนและอุณหภูมิสัมบูรณ์เหล่านี้ปรากฏอยู่ตามความสัมพันธ์ ดังนี้ $Q_1/T_1 = -Q_2/T_2$ จึงหมายความอย่างแน่นอนว่าถ้า Q_1, Q_2 และ T_1 เป็นค่าที่ทราบแล้ว อุณหภูมิ T_2 ก็จะสามารถหาได้จากความ

สัมพันธ์นี้ โดยปกติความคงตัวของสมการต่าง ๆ ทางอุณหพลศาสตร์อยู่ที่ว่าต่างก็ใช้ได้ในกรณีทั่วไปและไม่ยึดอยู่กับระบบทางฟิสิกส์ใด ๆ โดยเฉพาะเท่านั้น สิ่งที่จำเป็นทั้งหมดในกรณีของเราก็คือว่าจะต้องไม่มีความร้อนอื่นใดนอกเหนือจากที่เกี่ยวข้องในความสัมพันธ์ข้างต้นผ่านเข้าหรือออกจากเครื่องมือขณะทำการวัด

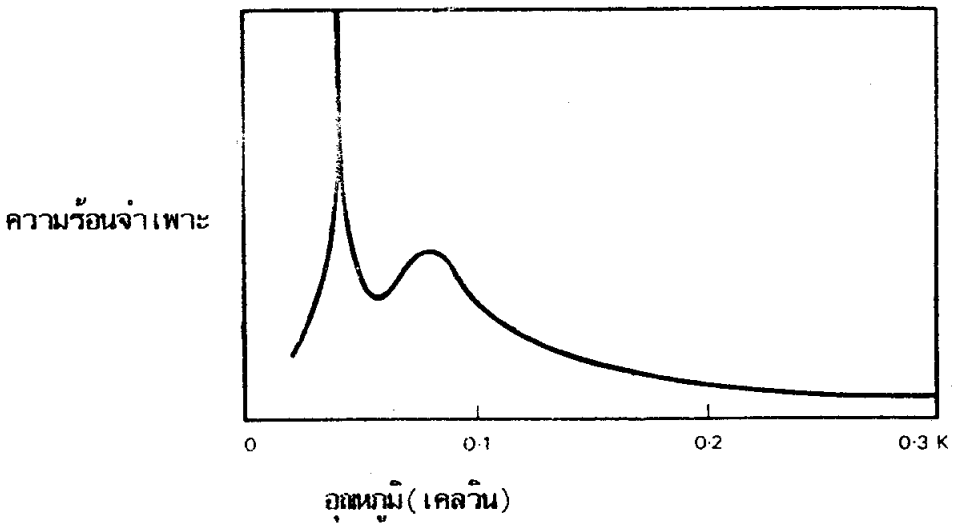
ในกรณีของอุณหภูมิเชิงแม่เหล็ก เงื่อนไขสุดท้ายนี้สามารถบรรลุได้ง่ายเนื่องจากมีการดูแลอย่างรัดกุมที่สุดในการลดความร้อนไหลเข้าไปในเกลือนี้อยู่แล้วไม่ว่าในกรณีใดๆ วัฏจักรทางอุณหพลศาสตร์สำหรับการวัดอุณหภูมิที่ได้กระทำไปจึงใกล้เคียงกับวัฏจักรใน "อุดมคติ" มาก วิธีการทดลองนี้สามารถดำเนินการให้สำเร็จผลออกมาได้หลายวิธี ซึ่งต่างกันแต่เพียงในด้านกลวิธีซึ่งเราไม่จำเป็นต้องบรรยายกันในรายละเอียด ทั้งหมดนี้ตั้งอยู่บนรากฐานของหลักการเดียวกันที่ประกอบด้วยการวัดปริมาณความร้อนและการหาความสัมพันธ์กับอุณหภูมิสัมบูรณ์ค่าหนึ่งที่ทราบค่าในช่วงที่กำหนดไว้แน่นอนว่าอุณหภูมินี้คือ T_1 ที่เป็นอุณหภูมิระดับสูงกว่า ซึ่งในกรณีของเราเป็นจุดเริ่มต้นสำหรับการลบล้างสภาพแม่เหล็กอยู่ในช่วงของฮีเลียมเหลว ปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าไปในเกลืออาจจะได้มาจากเครื่องทำความร้อนไฟฟ้าหรือจากการฉายรังสีด้วยรังสีแกมมาและสามารถวัดปริมาณได้ด้วยความแม่นยำสูงมาก

การหาค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ทางอุณหพลศาสตร์เปิดทางให้เราแน่ใจอย่างแท้จริงในการกรุยทางไปสู่ช่วงใหม่ที่ต่ำกว่า 1 ค ซึ่งกำลังสำรวจอยู่ แต่ค่อนข้างจะเป็นวิธีดำเนินการที่ไม่เหมาะสมอยู่บ้าง ซึ่งไม่มีใครปรารถนาที่จะทำซ้ำอีกในแต่ละการทดลอง ดังนั้น สิ่งที่กระทำได้คือการดำเนินการให้ได้ผลออกมาสักครั้งหนึ่งสำหรับเกลือแต่ละชนิดที่ใช้ ด้วยการวัดทางอุณหพล-ศาสตร์อย่างระมัดระวังมาก ผลลัพธ์ที่ได้นำมาใช้หาพจน์ที่เป็นค่าแก้ดังได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น วิธีนี้ช่วยให้เรานำมาใช้ได้กับการวิจัยอื่น ๆ ทั้งหมดกับเกลือชนิดเดียวกันด้วยกลวิธีอย่างง่ายของการวัดสภาพรับการเป็นแม่เหล็กไว้ได้เท่านั้น และสิ่งที่ต้องทำทั้งหมดนอกเหนือจากการอ่านแกลแวนอ-มิเตอร์คือการค้นหาค่าแก้ในตารางที่เตรียมได้จากการหาค่าทางอุณหพลศาสตร์ เพื่อให้สามารถทำการเปรียบเทียบเรื่องนี้ในระหว่างการทดลองต่าง ๆ เป็นไปได้ จึงจำเป็นต้องทำให้รูปทรงเชิงเรขาคณิตของเกลือตัวอย่างเป็นรูปทรงอย่างง่าย และนี่คือเหตุผลที่ว่าทำไมโดยปกติจึงทำให้อยู่ใน

รูปทรงกลมหรือทรงรี

ดังได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้แล้วว่าการวิจัยที่กระทำในระดับต่ำกว่า 1 ค ส่วนมากเน้นเรื่องการตรวจสอบคุณสมบัติของเกลือนั่นเอง โดยใช้สเกลอุณหภูมิทางอุณหพลศาสตร์นับว่าไม่เพียงแต่สามารถวัดสภาพรับการเป็นแม่เหล็กที่แท้จริงไว้ได้เท่านั้น แต่ยังวัดความร้อนจำเพาะได้ด้วย ลักษณะที่น่าศึกษามากที่สุดคือ กลไกที่ทำให้อันตรกิริยาระหว่างสปินเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำสุดขณะเข้าใกล้ศูนย์สัมบูรณ์ปรากฏว่ากฎของกูรีเริ่มไม่ได้ผลขึ้นมาทีละน้อยและสภาพรับการเป็นแม่เหล็กไว้ได้ไม่แปรตามอุณหภูมิสัมบูรณ์อีกต่อไป ในที่สุดสภาพรับการเป็นแม่เหล็กไว้ได้เกิดการเปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็วและตามปกติมีลักษณะซับซ้อนมาก จึงบ่งชี้ว่าระบบของสปินเปลี่ยนแปลงไปอย่างลึกซึ้ง การเปลี่ยนแปลงนี้ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีของเนินส์แสดงถึงการสร้างรูปแบบอย่างเป็นระเบียบในระบบของสปินเสมอ แม้ว่าไม่คล้ายกันนักกับความเป็นระเบียบของอะตอมในแลตทิซผลึกแต่ก็สอดคล้องกัน สำหรับสปินไม่ได้เป็นระเบียบตามตำแหน่งแต่เป็นระเบียบเฉพาะทิศทางเท่านั้น วัตถุประสงค์หลักของการวิจัยอยู่ที่รายละเอียดของรูปแบบนี้รวมทั้งลักษณะซึ่งรูปแบบนี้สร้างขึ้นมา ของยกเพียงสองตัวอย่างของลักษณะดังกล่าว สปินอาจจะปรับแนวตัวเองโดยแรงแม่เหล็กซึ่งกระทำซึ่งกันและกันโดยตรงเหมือนกับกลุ่มของเข็มทิศที่ถูกนำมาไว้ใกล้กันหรืออาจจะจัดแนวกันด้วยสนามไฟฟ้าของแลตทิซอะตอม ในกรณีแรกเป็นผลของลักษณะสหสัมพันธ์ที่ขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาระหว่างสปินจำนวนมากกระทำต่อกันและกัน ขณะอยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามผลึกนั้นแต่ละสปินถูกจัดแนวแยกกันต่างหากแต่ทั้งหมดพุ่งไปในทิศทางเดียวกัน การเปลี่ยนแปลงในระดับของความเป็นระเบียบเหล่านี้คือ การเปลี่ยนค่าเอนโทรปี สปินทั้งหลายจึงต้องสำเหนียกตัวเองต่อความร้อนจำเพาะของเกลือนั้น ความจริงการวัดความร้อนจำเพาะสามารถนำมาใช้เพื่อจะบอกเราให้รู้ว่าการจัดแนวแบบใดจะเกิดขึ้นในเกลือชนิดใดชนิดหนึ่งโดยเฉพาะ ผลของสหสัมพันธ์มีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วขณะที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลง การทำอันตรกิริยาซึ่งกันและกันทำให้มีอะไรบางอย่างเกิดขึ้นมาเหมือนกับการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันระหว่างความเป็นระเบียบกับความไม่เป็นระเบียบ จนทำให้เราต้องคาดว่าน่าจะมียอดสูงพุ่งขึ้นในค่าความร้อนจำเพาะ อีกนัยหนึ่ง การกระทำของสนามแม่เหล็กในแลตทิซต่อสปินแต่ละตัวจะ

8.5 ความร้อนจำเพาะของสารสัมเหล็ก-แอมโมเนียบ่งชี้ให้เห็นสองกลไกที่ต่างกันของความเป็นระเบียบของสปิน



เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นทีละน้อยของความร้อนจำเพาะ ในเกลือบางชนิดกระบวนการจัดแนวทั้งสองแบบนี้จะเกิดขึ้นแม้ที่อุณหภูมิต่างกัน ดังตัวอย่างเช่นค่าความร้อนจำเพาะของสารสัมเหล็กแอมโมเนียแสดงไว้ในรูปที่ 8.5 ขณะที่เกลือนั้นถูกทำให้เย็นลงความเป็นระเบียบของสปินจะเริ่มสังเกตได้ทีละน้อยภายใต้อิทธิพลของสนามผลึกที่ประมาณ 0.2 ค ซึ่งนำไปสู่ความเป็นค่าสูงสุดเป็นช่วงกว้างที่ 0.09 ค ตามมาด้วยยอดแหลมซึ่งแสดงถึงความเป็นระเบียบเชิงสหสัมพันธ์ที่ 0.04 ค การวัดสภาพรับไว้ได้แสดงว่าที่ต่ำกว่า 0.04 ค เกลือในขณะนั้นแสดงลักษณะฮีสเทอร์รีซิสทางแม่เหล็กซึ่งค่อนข้างจะคล้ายกับการแสดงออกของแม่เหล็กที่อุณหภูมิห้อง

การวิจัยส่วนมากที่กระทำกับสารที่สองให้เย็นลงต่ำกว่า 1 ค โดยอาศัยการลบล้างสภาพแม่เหล็กของเกลือเน้นการสังเกตอย่างต่อเนื่องที่กระทำเหนือ 1 ค ดังตัวอย่างที่ได้กล่าวแล้วในตอนท้ายบทก่อนว่าไฮโดรเจนแข็งแสดงค่าความร้อนจำเพาะที่ผิดปกติอย่างมาก ซึ่งพบว่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำสุดเท่าที่สามารถบรรลุได้ในตอนนั้น การลดอุณหภูมิเชิงแม่เหล็กในขณะนี้ทำให้เกิดความเป็นไปได้ที่จะติดตามปรากฏการณ์นี้ไปจนถึงที่อุณหภูมิต่ำมากกว่ายิ่งขึ้น และเป็นไป

ได้ที่จะแกะรอยออกมาเป็นเส้นโค้งที่ไม่คาดคิดมาก่อนทีเดียว ซึ่งแสดงถึงยอดแหลมขนาดใหญ่ ท่านองเดียวกันการลดอุณหภูมิเชิงแม่เหล็กได้เปิดเผยสภาพน่ายวดยิ่งในโลหะอีกมากมาย รวมทั้งลักษณะใหม่ของพฤติกรรมประหลาดของฮีเลียมเหลวซึ่งจะกล่าวในบทที่ 10

ในแง่หนึ่งของการลดอุณหภูมิเชิงแม่เหล็กได้นำไปสู่ปรากฏการณ์ใหม่อย่างสิ้นเชิง นั่นคือ การปรับทิศทางของนิวเคลียสทั้งหลายของอะตอม สาขาวิชาซึ่งเปิดขึ้นมาจากการค้นคว้าทดลองเหล่านี้อยู่ในขอบเขตของฟิสิกส์นิวเคลียร์ และในที่นี้วิทยาการอุณหภูมิต่ำจึงค่อนข้างมีบทบาทอยู่บ้างในการเป็นเพียงเครื่องมือส่วนหนึ่งของการวิจัยทางนิวเคลียร์ อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์ที่ได้มามีความสำคัญเพียงพอที่เราควรจะให้รายละเอียดสั้น ๆ ของผลงานนี้ โดยเฉพาะเมื่อมันเกี่ยวข้องอย่างใกล้ชิดกับการบรรลุถึงอุณหภูมิต่ำยิ่งขึ้นไปอีก

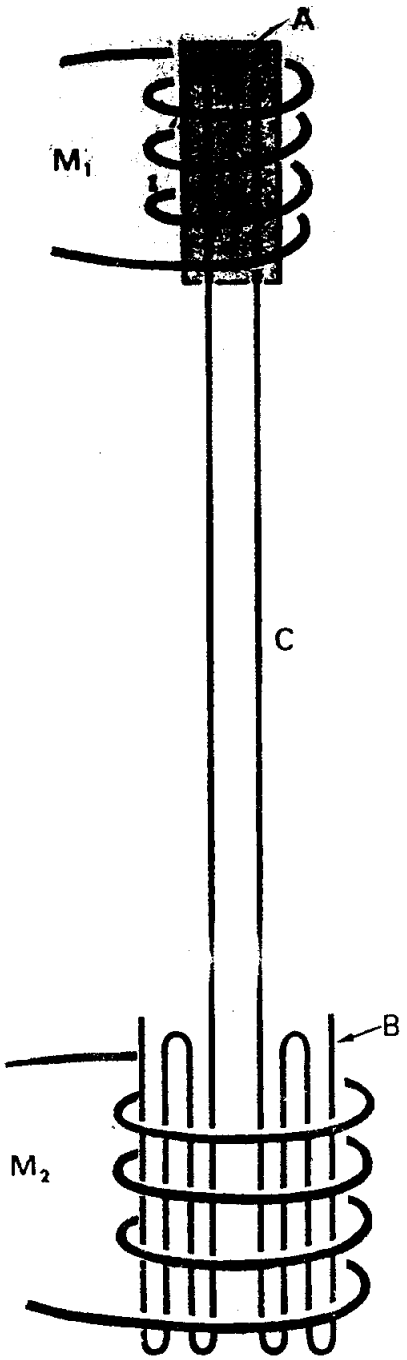
ปรากฏว่าอิเล็กตรอนเป็นอย่างไร อนุภาคนิวเคลียร์ก็เป็นอย่างนั้นด้วยเช่นกันทีเดียว เพราะโปรตอนและนิวตรอนทั้งหลายมีสปินที่ให้นัยของการหมุนรอบแกนตัวเองแก่นิวเคลียสของอะตอม แต่จะต้องอาศัยการคาดหมายจากการสังเกตกรณีอื่น ๆ และจากการพิจารณาทางทฤษฎีจึงจะได้ว่า การแผ่รังสีออกมาจากนิวเคลียสกัมมันตรังสีจะเกิดขึ้นในทิศทางที่แน่นอนเมื่อเทียบกับแกนของสปิน เนื่องจากภายใต้เงื่อนไขปกติแกนของสปินของแต่ละนิวเคลียสพุ่งไปอย่างสะเปะสะปะทุกทิศทาง จึงไม่มีผลลัพธ์สุทธิของทิศทางที่จะสังเกตได้จากการแผ่รังสี ในทางตรงข้ามถ้าแกนต่าง ๆ ของนิวเคลียสทั้งหลายสามารถทำให้ชี้ไปในทิศทางเดียวกันหมด ดังนั้น การแผ่รังสีก็เช่นกันจะเปล่งออกไปในทิศทางที่บอกได้แน่นอนจากสารตัวอย่างกัมมันตรังสี การปรับแนวของนิวเคลียสทั้งหลายเช่นนั้นสามารถบรรลุได้โดยใช้ผลเชิงแม่เหล็กของสปิน นั่นคือโมเมนต์แม่เหล็กของสปิน โดยที่อนุภาคนิวเคลียร์มีขนาดเล็ก โมเมนต์แม่เหล็กของมันจึงมีค่าน้อยกว่าโมเมนต์แม่เหล็กของอิเล็กตรอนประมาณหนึ่งพันเท่า การปรับแนวของอนุภาคเหล่านี้ยิ่งลำบากมากกว่าแม้แต่ที่อุณหภูมิต่ำสุดเท่าที่บรรลุได้ ตามความเป็นจริงต้องใช้สนามแม่เหล็กภายนอกขนาดห้าเทสลาสำหรับสร้างการปรับแนวเชิงนิวเคลียร์ที่ 0.01 ค

แม้ว่าจะมีความยากลำบากทางการทดลองอย่างน่ากลัวที่เกิดจากกรรมวิธีนี้ แต่ก็ได้นำมาใช้จนประสบความสำเร็จอย่างน้อยบางประการ เราต้องระลึกว่าเกลือนี้ถูกใช้เป็นตัว

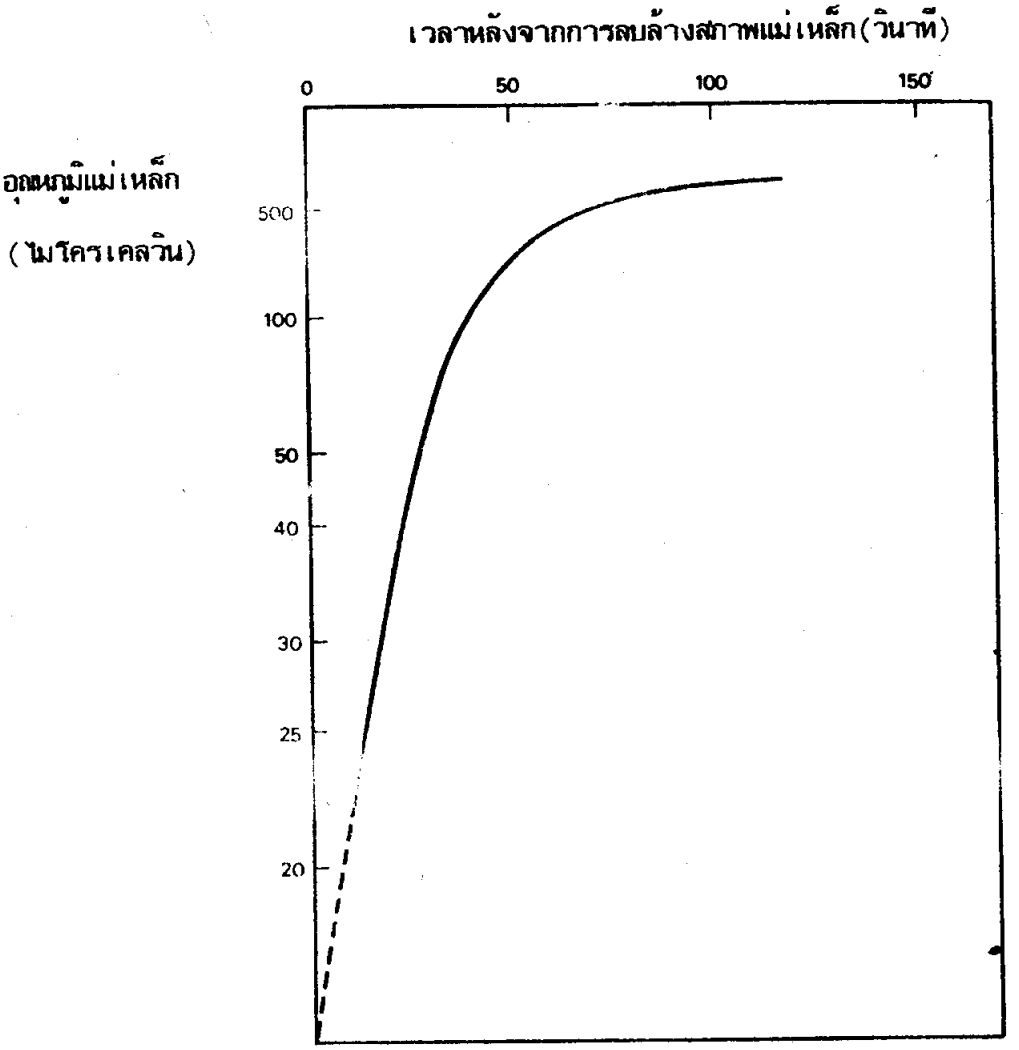
ทำความเย็น ดังนั้น เพื่อที่จะบรรลุถึง 0.01 ค จึงต้องป้องกันสนามแม่เหล็กสูงมากที่ใช้สำหรับการปรับแนวเชิงนิวเคลียร์อย่างระมัดระวังเพื่อไม่ให้มันร้อนขึ้นอีก นับว่าโชคดีที่มีกุสโลบายแยบยลมากบางประการอยู่บ้างซึ่งการปรับแนวเชิงนิวเคลียร์สามารถกระทำให้สำเร็จลงได้ง่ายกว่าที่ใช้ "การบังคับโดยพละการ" ดังที่กรรมวิธีข้างต้นได้ถูกขนานนามอย่างไม่เป็นทางการ หนึ่งในบรรดากุสโลบายต่าง ๆ ที่อธิบายได้ง่ายที่สุดอาศัยสนามแม่เหล็กของสปินของอิเล็กตรอน จากรูปที่ 8.4 ของเราซึ่งแสดงด้วยภาพของการดำเนินงานของเทอร์โมมิเตอร์แม่เหล็กจะสามารถเห็นได้ว่า เกลือพาราแมกเนติกดึงดูดเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหลาย หมายความว่าภายในผลึกมีสนามแม่เหล็กสูงมากกว่าสนามภายนอกที่ปิ้นอยู่ สนามภายในเหล่านี้สามารถมีกำลังแรงมากทีเดียวยกตัวอย่างเช่นที่ 0.5 ค สนามภายนอกขนาดเพียง 1/10 เทสลา จะสร้างสนามภายในเกลือได้ไม่น้อยกว่า 50 เทสลา

การทดลองนี้กระทำกับเกลือที่ไอออนของมันมีนิวเคลียสทังสเตนตรังสี การสลบล้างสภาพแม่เหล็กจากสนามแรงสูงเริ่มขึ้นเหมือนเดิมที่ประมาณ 1 ค แต่ต่อจากนั้นสนามภายนอกไม่ได้ลดลงไปเป็นศูนย์ แต่การสลบล้างสภาพแม่เหล็กกลับยุติลงที่ 1/10 เทสลา และขณะนี้แกนของสปินของนิวเคลียสทังสเตนตรังสีเรียงตัวในทิศทางเดียวกันทั้งหมด นั่นคือทิศของสนามภายนอก คราวนี้เครื่องนับสำหรับการตรวจหาการแผ่รังสีนิวเคลียร์ถูกย้ายไปตามตำแหน่งต่าง ๆ ที่ทิศของการแผ่รังสีส่งออกมาจากสารตัวอย่างเพื่อบันทึกไว้ ในบรรดาผลการทดลองสำคัญ ๆ ที่ได้มาในลักษณะนี้เป็นการพิสูจน์การไม่คงตัวของภาวะเสมอมูลในอันตรกิริยาอย่างอ่อน ซึ่งเป็นหฤษฎีที่หยางและลีได้รับรางวัลโนเบลในปี ค.ศ. 1957

การมีปรากฏการณ์ทางพาราแมกเนติกเกิดขึ้นเนื่องจากสปินนิวเคลียร์ได้ค้นพบในปี ค.ศ. 1936 โดยนักฟิสิกส์ชาวรัสเซียสองคนชื่อ ซับนิคอฟ และ ลาซาเรฟ ซึ่งดำเนินงานในคาร์คอฟ เห็นได้ชัดเจนว่าด้วยความสำเร็จในการลดอุณหภูมิโดยอาศัยสปินของอิเล็กตรอน การลดอุณหภูมิลงต่อไปอีกให้ถึงอุณหภูมิที่ต่ำกว่ายิ่งขึ้นโดยการสลบล้างสภาพแม่เหล็กของสปินนิวเคลียร์ควรจะนำมาพิจารณาได้แล้ว ตามความเป็นจริงนั้นความเป็นไปได้ของการลดอุณหภูมิเชิงนิวเคลียร์ได้นำมาปรึกษาหารือกันครั้งแรกในราวกึ่งกลางช่วงปีระหว่างค.ศ. 1930-1939 โดยกอเตอร์ ใน


A
M_1
C
B
M_2

8.6 การลดอุณหภูมิเชิงนิวเคลียร์(รูปซ้าย)แผนภาพของเครื่องมือ และ(รูปขวา)ผลการทดลอง เส้นโค้งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงที่สังเกตได้จากเทอร์มอมิเตอร์แม่เหล็กซึ่งได้เทียบมาตรฐานการวัดในมาตราอุณหภูมิสัมบูรณ์



ไลเดนและโดยเคอร์ตและไซมอนในออกซ์ฟอร์ด โดยหลักการแล้วกรรมวิธีนี้ง่ายพอควรเพราะไม่มีอะไรมากไปกว่าการทำซ้ำของเดิมที่ได้กระทำจนประสบความสำเร็จเรียบร้อยแล้วกับสปินของอิเล็กตรอนในเกลือพาราแมกเนติกที่อุณหภูมิต่ำลงยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม การประยุกต์ในทางปฏิบัติของกรรมวิธีนี้ทำให้ยุ่งยากอย่างมากมายซึ่งเกิดจากขนาดเล็กมากของสปินนิวเคลียร์ ความยุ่งยากใหญ่หลวงต่าง ๆ ที่เพิ่งกล่าวถึงนี้สัมพันธ์กับกรรมวิธีการบังคับโดยพละการของการปรับแนวเชิงนิวเคลียร์จะยิ่งเพิ่มขึ้นอีกหลายเท่าเมื่อจะต้องทำให้การลดอุณหภูมิเชิงนิวเคลียร์ที่ต้องทำให้เย็นลงถึงประมาณ 0.01 ค โดยการลบล้างสภาพแม่เหล็กของเกลือพาราแมกเนติกเท่านั้น ยังต้องคอยกันความร้อนออกไปจากสารนี้ และกันการลบล้างสภาพแม่เหล็กในตัวเองจากสนามอย่างต่ำสุด 5 เทสลา

ด้วยกรรมวิธีจำกัดที่สามารถนำมาใช้สำหรับการวิจัยในช่วงปลายทศวรรษระหว่างปีค.ศ.1930-1939 จึงอาจมีความหวังเพียงเล็กน้อยสำหรับการดำเนินงานตามโครงการที่คาดหวังสูงส่งเช่นนั้นให้ลุล่วงไป แต่ในระยะช่วงปลายทศวรรษระหว่างปีค.ศ.1940-1949 เริ่มมีความหวังมากขึ้น เซอร์ฟรานซิส ไซมอนแห่งออกซ์ฟอร์ดได้ใช้ความพยายามอย่างใหญ่หลวงเพื่อประกอบเครื่องมือที่จำเป็น ทั้งตัวเขาเองพร้อมด้วยเคอร์ตและเพื่อนร่วมงานของเขาทั้งสองเริ่มต้นจัดเตรียมการไปสู่ถนนสายยาวของการทดลองนี้ ต่อมาในปีค.ศ.1956 ก่อนการถึงแก่กรรมของเขาเล็กน้อย ไซมอนมีความพึงพอใจที่ได้เห็นการทดลองเป็นผลสำเร็จครั้งแรก อุณหภูมิที่ได้บันทึกไว้เป็นตัวเลขต่ำกว่า 0.000016 ค ซึ่งน้อยกว่าสองส่วนแสนเท่าของหนึ่งองศาเหนือศูนย์สัมบูรณ์

อุณหภูมิต่ำอย่างเหลือเชื่อนี้สามารถบรรลุได้เพียงชั่วครู่และหลังจากนั้นประมาณหนึ่งนาทีตัวทำให้เย็นเชิงนิวเคลียร์อุ่นขึ้นมาอีกจนถึงอุณหภูมิที่การลบล้างสภาพแม่เหล็กได้เริ่มขึ้น แม้กระนั้น ในการพิจารณาย้อนกลับไปดูเหมือนว่าความสำเร็จของการทดลองนี้เกือบจะเป็นสิ่งมหัศจรรย์ แต่ปรากฏชัดเจนขึ้นทีละน้อยเท่านั้นว่านอกจากอุปสรรคที่คาดได้ต่าง ๆ แล้ว ต้นตอของอุปสรรคต่อไปยังคงขวางอยู่ในหนทางของการลดอุณหภูมิเชิงนิวเคลียร์อีกด้วย

หลักการที่ใช้ในการทดลองของปีค.ศ.1956 คล้ายกับการลดอุณหภูมิแบบลดหลั่นสองขั้นตอนเป็นอย่างมาก ซึ่งทำได้สำเร็จกับเกลือพาราแมกเนติกชนิดต่าง ๆ ในแต่ละขั้นตอน

อย่างไรก็ดี ทั้งสองวิธีมีความแตกต่างกันมากในระดับขั้น ครั้งนี้ในขั้นตอนแรกเองจะต้องมีประสิทธิภาพดีเท่ากับการลดหลั่นสองขั้นควบในครั้งก่อน และต่อจากนั้นในขั้นนิวเคลียร์จะต้องถูกลบล้างสภาพแม่เหล็กจากสนามแม่เหล็กที่แรงมากที่สุด แม้จะใช้อุปกรณ์แม่เหล็กขนาดใหญ่เท่าที่จะหาได้ซึ่งถูกบีบเค้นจนถึงที่สุดแล้วก็เป็นที่ตกลงกันว่า ในการทดลองขั้นบุกเบิกเริ่มแรกจะกระทำโดยปราศจากสวิทช์ความร้อนระหว่างสองขั้นตอน ภาพวาดเค้าโครงโดยย่อของการทดลองนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 8.6 โดย A คือ เกลือพาราแมกเนติกเป็นตัวแทนการลดอุณหภูมิเชิงแม่เหล็กขั้นแรก เกลือนี้เชื่อมโยงกับตัวทำให้เย็นเชิงนิวเคลียร์ B โดยผ่านตัวเชื่อม C ส่วน M_1 และ M_2 เป็นขดลวดที่ระบายความร้อนด้วยน้ำเย็นสองชุด สำหรับสร้างสนามแม่เหล็กแรงสูงๆ แต่ทั้งไครโอสตัทหรือเครื่องมือประกอบอื่นๆไม่ได้แสดงไว้ โลหะทองแดงใช้เป็นทั้งตัวทำให้เย็นเชิงนิวเคลียร์ B และตัวเชื่อมต่อ C ที่จริงแล้วใช้เส้นลวดทองแดงบางๆจำนวนมากอัดปลายบนใน A และปลายล่างม้วนหลายตลบเป็น B การจัดแบบนี้มีส่วนดีที่ช่วยให้การถ่ายเทความร้อนระหว่างทองแดงกับเกลือเป็นไปได้ดี ทั้งยังหลีกเลี่ยงกระแสความร้อนไหลวนในการลบล้างสภาพแม่เหล็ก เพราะทองแดงถูกแบ่งแยกอย่างถี่ถ้วน

ในครั้งแรกสปินของอิเล็กตรอนขั้น A ถูกลบล้างสภาพแม่เหล็กและโดยการนำความร้อนผ่าน C ขั้นทางนิวเคลียร์ B จึงถูกทำให้เย็นลงถึงอุณหภูมิประมาณ 0.02 ค ต่อจากนั้นขั้นทางนิวเคลียร์ถูกลบล้างสภาพแม่เหล็กจากสนามแรงที่สุดที่สามารถสร้างได้ ซึ่งมีค่าต่ำกว่า 3 เทสลาพอดี หลังจากนั้นไม่กี่นาทีสนามนี้ถูกลดลงจนเป็นศูนย์ การวัดสภาพรับการเป็นแม่เหล็กไว้ได้เชิงนิวเคลียร์ได้เริ่มต้นขึ้นและแสดงค่าที่อ่านได้ไว้ในรูปที่ 8.6 โดยได้แสดงอุณหภูมิที่คำนวณจากกฎของกูรีไว้ด้วย ดังได้กล่าวแล้วว่าอุณหภูมิของขั้นตอนเชิงนิวเคลียร์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจากการลบล้างสภาพแม่เหล็ก จนกระทั่งหลังจากนั้นประมาณ 1 นาที การลดอุณหภูมิเชิงนิวเคลียร์ส่วนใหญ่หมดสิ้นไป อีกครั้ง เราจะเห็นได้จากแผนภาพว่าเมื่อเริ่มการบันทึกสภาพรับการเป็นแม่เหล็กไว้ได้เชิงนิวเคลียร์ หลังจากสนามนั้นได้ถูกปิดไปแล้วไม่กี่วินาทีอุณหภูมิที่บันทึกได้คือ 0.000022 ค และโดยการทำย้อนหลังกลับไปยังจุดเริ่มต้นของการทดลองปรากฏว่าสามารถลงบันทึกการลดอุณหภูมิลงมากที่สุดถึง 0.000016 ค

ในครั้งแรกพากันคิดว่าการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของอุณหภูมิเป็นแต่เพียงสืบเนื่องมาจากละเลยสวิทช์ความร้อนในตัวเชื่อม C และสืบเนื่องมาจากความร้อนไหลจากเกลือไปตามลวดทองแดงเข้าไปในขั้นตอนนิวเคลียร์ ทำให้ลวดร้อนขึ้นอย่างรวดเร็วมาก ดังนั้น จึงดูเหมือนว่าการนำสวิทช์ความร้อนที่มีประสิทธิภาพมาใช้ดังเช่นที่ได้ใช้จนประสบผลสำเร็จมาแล้วในการลบล้างสภาพแม่เหล็กสองขั้นตอนของเกลือพาราแมกเนติกจะแก้ไขสถานการณ์นี้ได้ จนกระทั่งการทดลองในแนวทางนี้ได้กระทำกันแล้วเท่านั้น ความยุ่งยากอย่างแท้จริงของการลดอุณหภูมิเชิงนิวเคลียร์จึงได้บังเกิดขึ้น อุปสรรคเหล่านี้เป็นลักษณะลึกซึ้งมากกว่าที่จะเป็นความไม่สมบูรณ์ทางวิทยาการใด ๆ จึงทำให้ค่อนข้างจะน่าท้อใจอยู่บ้าง

เพื่อให้เข้าใจเรื่องทั้งหมดนี้เราจะต้องพิจารณาแนวคิดในเรื่องอุณหภูมิอย่างใกล้ชิดยิ่งขึ้น เมื่อกล่าวถึงก๊าซในบทต้น ๆ เราได้อธิบายอุณหภูมิของก๊าซในพจน์ของพลังงานจลน์ของโมเลกุลและในของแข็งในพจน์ของการสั่นของอะตอม นอกจากนั้นเราได้เห็นแล้วว่าสภาพรับการเป็นแม่เหล็กไว้ได้ของสปินเป็นการวัดอุณหภูมิด้วย ในทองแดงที่ใช้สำหรับขั้นตอนการลดอุณหภูมิเชิงนิวเคลียร์เกิดปรากฏการณ์ทั้งสามทั้งหมด นั่นคือ มีทั้งการสั่นของอะตอม สปินนิวเคลียร์และพลังงานจลน์ของก๊าซอิเล็กตรอนในสภาพข้อนสถานะด้วย ดังนั้น เราจึงได้สมมติโดยปริยายว่าไม่ว่าจะเป็นเวลาใด ๆ ทั้งสามปรากฏการณ์นี้ควรจะให้ค่าที่อ่านได้สำหรับอุณหภูมิตรงกัน ที่อุณหภูมิปกติและแม้แต่อุณหภูมิของฮีเลียมเหลวเรื่องนี้ก็เป็นจริงแต่เป็นเพราะการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างสปินกับอิเล็กตรอนและการสั่นของแลตทิซผลึกเกิดขึ้นชั่วขณะเท่านั้น การทดลองต่าง ๆ กับเกลือพาราแมกเนติกที่ต่ำกว่า 1 ค ได้แสดงว่าขณะที่การแลกเปลี่ยนพลังงานไม่รวดเร็วเท่าที่ควร แต่โดยทั่วไปยังคงเร็วพอที่จะไม่ทำให้การหาค่าของอุณหภูมิผิดพลาดไปจากความเป็นจริง อย่างไรก็ตามสิ่งต่าง ๆ เปลี่ยนแปลงไปอย่างมากเมื่อพิจารณาอุณหภูมิที่ยิ่งต่ำลงไปอีก

ที่ 0.00002 ค การแลกเปลี่ยนพลังงานของสปินนิวเคลียร์กับอิเล็กตรอนและการสั่นในแลตทิซเป็นกระบวนการที่ช้ามากเมื่อเทียบกับเวลาของการสังเกต เรื่องนี้จึงนำไปสู่การตีความของการทดลองในค.ศ.1956 ที่แตกต่างกันเกินกว่าที่ได้เชื่อครั้งแรกทีเดียว ในการลบล้างสภาพแม่เหล็กนั้นสปินนิวเคลียร์เป็นไปตามการเปลี่ยนแปลงของสนามภายนอกในทันทีทันใด

และขึ้นไปสู่สถานะซึ่งสอดคล้องกับ 0.000016 ค แต่อิเล็กตรอนและแลตทิซยังคงอยู่ที่อุณหภูมิเริ่มต้นตามเดิม ดังนั้น เราจึงต้องเผชิญกับสถานการณ์ประหลาดของสารตัวอย่างทองแดงที่มีอุณหภูมิต่างกันสองระดับในขณะเดียวกันคือ 0.000016 ค สำหรับสปินและ 0.02 ค สำหรับอิเล็กตรอนและแลตทิซ ต่อจากนั้นการแลกเปลี่ยนพลังงานอย่างค่อยเป็นค่อยไประหว่างสปินกับส่วนอื่นๆ ของสารทำให้สปินร้อนขึ้นจนกลับไปสู่อุณหภูมิเมื่อเริ่มต้นอีกครั้ง

แม้จะได้พยายามแล้วหลายครั้งและทำการทดลองที่หลักแหลมเป็นจำนวนมากแต่ไม่เป็นผลสำเร็จจนกระทั่งเวลาผ่านไปกว่าสิบปีหลังจากการลบล้างสภาพแม่เหล็กเชิงนิวเคลียร์ครั้งแรก จึงสามารถทำให้อิเล็กตรอนและแลตทิซเย็นลงอย่างแท้จริงถึงอุณหภูมิขนาด 0.05 ค และอยู่ที่อุณหภูมินั้นได้เป็นเวลาหลายชั่วโมง นอกจากนี้พบข้อมูลเป็นอันมากเกี่ยวกับพฤติกรรมของระบบลบล้างสภาพแม่เหล็กของสปินจนกลายเป็นธรรมเนียมนิยมที่ต้องทำความแตกต่างระหว่างการลดอุณหภูมิเชิงนิวเคลียร์ซึ่งหมายถึงการลดต่ำลงของอุณหภูมิของสปินเท่านั้น และการทำความเย็นเชิงนิวเคลียร์ซึ่งหมายถึงการลดอุณหภูมิของระบบที่สอง ดังเช่นอิเล็กตรอนและแลตทิซหรือแม้แต่สารอื่น ๆ เช่นฮีเลียมเหลวด้วย นับว่ากระบวนการหลังมีความสำคัญโดยทั่วไปและได้มีบทบาทสำคัญในการค้นหาคุณสมบัติของสสารในช่วงมิลลิเคลวิน

สองขั้นตอนที่มีความสำคัญสำหรับการพัฒนาการทำความเย็นเชิงนิวเคลียร์ให้ประสบผลสำเร็จคือ ขั้นตอนแรกเป็นสวิทช์ความร้อนที่มีประสิทธิภาพและขั้นตอนที่สองเป็นการลดอุณหภูมิขั้นปฐมภูมิอย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ทั้งสองลักษณะนี้จำเป็นสำหรับกำจัดความร้อนที่เล็ดลอดเข้าไปในขั้นตอนเชิงนิวเคลียร์ลงได้ ดังนั้น ทำให้มีเวลาสำหรับขั้นตอนเชิงนิวเคลียร์ที่จะดูดกลืนความร้อนที่ระบายออกไปโดยอิเล็กตรอนและแลตทิซ ดังปรากฏชัดเจนจากที่ได้กล่าวข้างต้นแล้วนั้น ตามความเป็นจริงการให้เวลาเพียงพอสำหรับการแลกเปลี่ยนพลังงานนี้เป็นปัจจัยอย่างสำคัญยิ่งในการดำเนินงานตามแผนการหรือการวิจัยใด ๆ ไม่แต่เพียงสปินนิวเคลียร์เท่านั้นที่อุณหภูมิ 0.001 ค หรือต่ำกว่าลงไปอีก

สวิทช์ความร้อนสามารถเตรียมได้จากเส้นลวดตัวนำยาวยิ่งขนาดสั้นซึ่งสอดอยู่ระหว่างขั้นตอนลดอุณหภูมิปฐมภูมิกับนิวเคลียสทั้งหลายที่ถูกลบล้างสภาพแม่เหล็ก โดยการป้อน

สนามแม่เหล็กเล็กน้อยเข้าไป เส้นลวดนี้ทำให้เกิดความร้อนไหลเป็นอย่างดีผ่านระหว่างสองขั้นตอนนั้น ซึ่งลดลงเป็นล้านเท่าเมื่อถูกทำให้มีสภาพนำยวดยิ่งโดยการนำสนามออกไป ตู้เย็นชนิดฮีเลียมเจือจางนำมาใช้แทนเกลือพาราแมกเนติกซึ่งทำหน้าที่เป็นต้วทำความเย็นปฐมภูมิ กรรมวิธีไครโอจินิกแบบใหม่นี้ซึ่งเราจะอภิปรายในบทสุดท้ายนั้นสามารถทำให้บรรลุถึงอุณหภูมิ 0.01 ค ในการดำเนินงานต่อเนื่องกัน ดังนั้น จึงเหนือกว่าวิธีใช้การลดอุณหภูมิเชิงพาราแมกเนติกเสียก่อนการประสมประสานกันของสวิทช์ความร้อนและตู้เย็นชนิดเจือจางสำหรับการทำความเย็นเชิงนิวเคลียร์นี้ได้ถูกนำมาใช้ในระยะไม่กี่ปีมานี้โดยห้องทดลองหลายแห่ง และคณะผู้วิจัยของลูนาสมาที่โอตานีมิ ประเทศฟินแลนด์เป็นผู้ครอบครองสถิติปัจจุบัน คณะนี้สามารถลดอุณหภูมิอิเล็กตรอนและแลตทิซในสารตัวอย่างทองแดงลงไปถึง 0.0003 ค และสามารถควบคุมไว้ได้ และคณะเดียวกันนี้ได้ทำให้ฮีเลียมเหลวเย็นลงถึง 0.0007 นับเป็นความสำเร็จอย่างน่าประทับใจที่เปิดโอกาสไปสู่การสังเกตไอโซโทปฮีเลียมเบาในช่วงอุณหภูมิที่น่าสนใจมากที่สุด