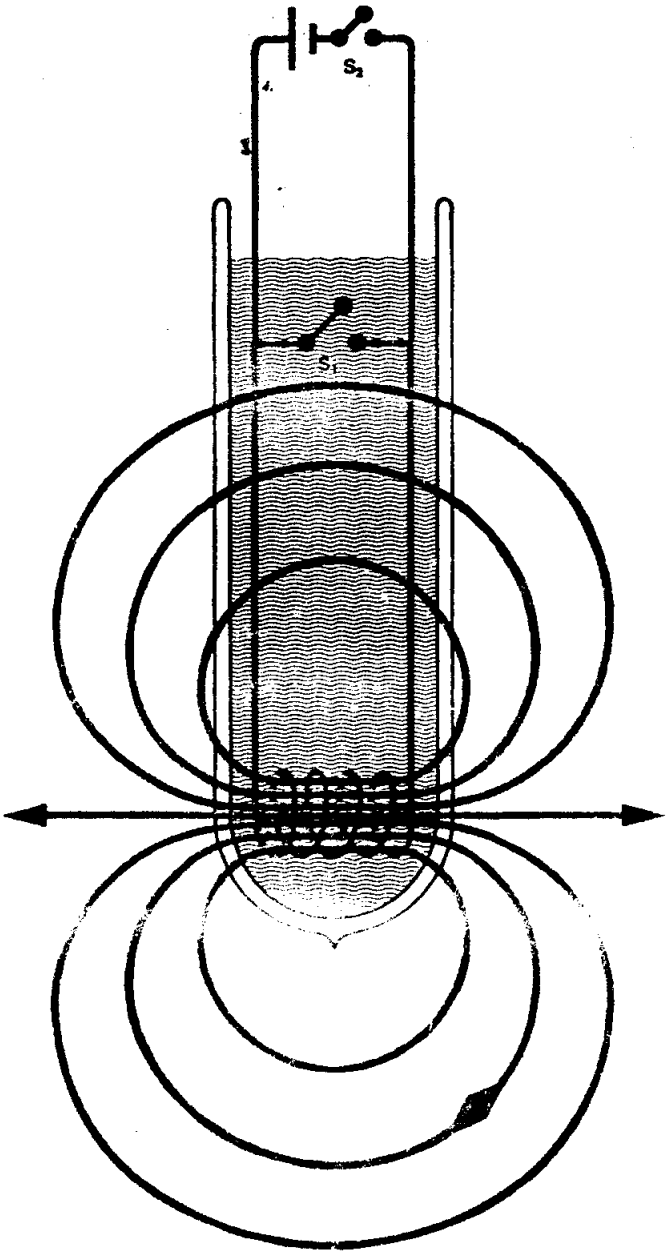
9 สภาพนำยวดยิ่ง

ช่วงใหม่ของการลดอุณหภูมิเชิงแม่เหล็กซึ่งได้ค้นคว้าไปแล้วเพียงบางส่วนอาจจะก่อให้เกิดความประหลาดใจใด ๆ ก็ตามให้กับเรา แต่สิ่งเหล่านี้เกือบจะไม่สามารถเหนือไปกว่าบรรดาสิ่งที่ได้ถูกเผยออกมาเรียบร้อยแล้วจากช่วงอุณหภูมิของฮีเลียมเหลว คาเมอร์ลิงห์ ออนเนสได้เห็นโลกใหม่ที่แปลกในของไหลยวดยิ่งเป็นครั้งแรกเพียงแวบหนึ่งเมื่อค.ศ.1911 ขณะที่เขาได้ค้นพบสภาพนำยวดยิ่ง นับแต่นั้นมาครึ่งศตวรรษที่ผ่านไปความรู้ของเราเกี่ยวกับปรากฏการณ์ลึกลับเหล่านี้ได้เพิ่มขึ้นอย่างมากมาย จนกระทั่งเราได้เข้ามาใกล้สู่การอธิบายทางทฤษฎีมากยิ่งขึ้น แม้กระนั้น เรายังห่างไกลจากความเข้าใจความหมายที่แท้จริงของสิ่งที่เป็นลักษณะใหม่เชิงพื้นฐานอย่างชัดเจนของสารที่รวมกลุ่มก้อนกันอยู่ ดังที่เราเพิ่งได้เห็นแล้วว่าการที่มีปรากฏการณ์ไม่ปกติเช่นพลังงานที่จุดศูนย์หรือสภาพซ้อนสถานะของก๊าซสามารถทำนายได้โดยทฤษฎี แต่เราต้องยอมรับว่าแม้จะอาศัยความรู้ทั้งหมดที่เรามีอยู่ในปัจจุบันแต่เราไม่เคยสามารถทำนายของไหลยวดยิ่งได้เลย เมื่อไม่มีการทำนายหรือทฤษฎีใดที่จะชี้นำเราไป การสำรวจของไหลยวดยิ่งจึงเป็นการค้นคว้าซึ่งปราศจากที่หมาย นับเป็นการคลำทางโดยปิดตาไปเพื่อหาข้อมูลใหม่อย่างไม่มีทิศทาง เนื่องจากความไม่แน่นอนมีระดับกว้างในการค้นหาส่วนต่าง ๆ ของปริศนาเช่นนี้ ดังนั้น ประวัติศาสตร์ของเรื่องนี้จึงได้ให้บทตอนที่น่าตื่นเต้นที่สุดในการแสวงหาศูนย์สัมบูรณ์

คาเมอร์ลิงห์ ออนเนสนับเป็นอัจฉริยะบุรุษผู้หนึ่ง แต่เป็นผู้ที่ถูกครอบงำด้วยความคิดที่สุขุมลึกซึ้ง ดังนั้น จึงต้องใช้เวลาอยู่บ้างก่อนที่เขาจะเริ่มตระหนักถึงความยิ่งใหญ่ของการค้นพบของเขา นับว่าเป็นไปตามธรรมชาติเท่านั้นที่คลใจเขาตั้งแต่แรกให้หาความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำยวดยิ่งกับปรากฏการณ์ทางกายภาพซึ่งทราบกันแล้วนั้น ในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ พักหนึ่งเขาหวังว่าความต้านทานของปรอทที่ลดลงเป็นบางสิ่งบางอย่างที่เขาได้คาดหมายไว้แล้วครึ่งหนึ่ง แต่ในไม่ช้าเขาจำต้องตระหนักว่าเขาได้สะดุดเข้ากับสิ่งที่ไม่รู้จักอย่างไม่ตั้งใจ ทฤษฎีที่เลื่อนลอยทั้งหลายเช่นนั้นของสภาพต้านทานไฟฟ้าที่มีอยู่ในตอนนั้นอาจจะถูกบีบคั้นจนยอมให้มีการลดลงอย่างรวดเร็วพอควรตามอุณหภูมิ และออนเนสได้ทดสอบเรื่องนี้แล้วจริง ๆ แต่เขาต้องยอมแพ้เมื่อปรากฏว่าความต้านทานหายไปในทันทีทันใดอย่างไม่ต่อเนื่อง


S2
S1

9.1 การสาธิตความต้านทานไฟฟ้าเป็นศูนย์ในตัวนำยวดยิ่งของคาเมอร์ลิงห์ ออนเนส

เมื่อได้ประสบกับสิ่งที่เขาประจักษ์แล้วว่าเป็นสถานะใหม่อย่างสิ้นเชิงของสาร ออนเนสจึงได้เริ่มต้นงานค้นคว้าเรื่องนี้ การทดลองแรก ๆ ของเขาได้เตรียมการไว้เพื่อหาว่าความต้านทานของปรอทจะมีค่าน้อยได้สักเพียงใด และคราวนี้เขาต้องถามตัวเองว่าบางทีค่านี้อาจจะหายไปอย่างสิ้นเชิงได้หรือไม่ เรื่องนี้ได้นำไปสู่คำถามที่ทำให้สับสนในหลักการขึ้นมาทันที นับว่าเป็นไปได้เสมอในทางฟิสิกส์ที่จะหาให้ถึงที่สุดว่าปริมาณหนึ่งจะใหญ่มากหรือน้อยมาก แต่จะไม่เคยเป็นไปได้ที่จะกล่าวว่าเป็นค่าอนันต์หรือศูนย์ สิ่งที่ดีที่สุดที่สามารถกระทำได้คือการกล่าวว่าใหญ่กว่าหรือน้อยกว่าค่าจำกัดค่าหนึ่งที่หาได้จากการทดลอง สิ่งที่จำเป็นในกรณีของสภาพนำยวดยิ่งคือการทำให้การตรวจหาความต้านทานที่น้อยมากแม่นยำขึ้นมากกว่าขีดจำกัดของเครื่องมือที่ใช้กันมาแต่เดิม ตรงนี้เองที่ ออนเนสเป็นไปตามธรรมชาติของเขา ภายในสามปีเขาได้สร้างกรรมวิธีที่เปรื่องปราชญ์ซึ่งยังไม่มีอะไรมาแทนที่ได้จนกระทั่งทุกวันนี้

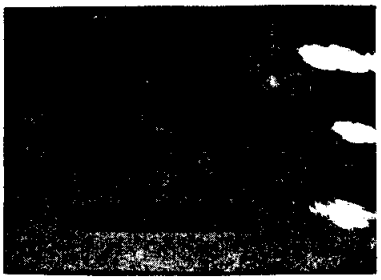
เขาได้ประดิษฐ์ขดลวดจากตะกั่วตัวนำยวดยิ่งดังแสดงไว้ในรูปที่ 9.1 ซึ่งสามารถทำให้ลัดวงจรด้วยสวิทช์ S_1 ที่เป็นตัวนำยวดยิ่งซึ่งได้ออกแบบไว้อย่างฉลาด เมื่อ S_1 เปิด กระแสจะถูกป้อนเข้าสู่ขดลวดจากแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิห้อง โดยผ่านขดลวดทองแดง ตัวนำธรรมดาทั้งหลายกระแสนี้สามารถถูกตัดออกได้โดยการเปิดสวิทช์ S_2 การทดลองนี้เริ่มขึ้นจากการปิด S_2 แต่คงทิ้งให้ S_1 เปิดค้างไว้ ภายใต้ภาวะเหล่านี้กระแสจากแบตเตอรีขณะกำลังผ่านขดลวดตัวนำยวดยิ่งจึงสร้างสนามแม่เหล็กซึ่งสามารถตรวจหาได้ด้วยการเบี่ยงเบนของเข็มทิศภายนอกภาชนะดูวาร์ ต่อจากนั้น S_1 จึงถูกปิดและ S_2 ถูกเปิดซึ่งหมายความว่าขดลวดตัวนำยวดยิ่งตอนนี้ถูกลัดวงจร ขณะเดียวกันนั้นกระแสที่ป้อนเข้าไปจากแบตเตอรีถูกตัดออก อย่างไรก็ตาม เข็มทิศยังคงแสดงการเบี่ยงเบนเหมือนเช่นเดิม แสดงว่ากระแสยังคงไหลผ่านขดลวดอยู่ แม้ว่าได้หยุดรับพลังงานจากแบตเตอรีแล้ว เหตุผลสำหรับปรากฏการณ์ที่ประหลาดนี้อยู่ที่ไม่มีความต้านทานของขดลวด ซึ่งยอมให้กระแส

9.2 ลูกตะกั่วลอยอยู่ในปริภูมิได้ด้วยกระแสที่ไหลเรื่อยไป

ผ่านวงจรตัวนำยวดยิ่งทั้งหมดโดยไม่สูญเสียพลังงาน กระแสที่ "ไหลเรื่อยไป" ดังที่เรียกกันต่อมานี้ได้ให้การพิสูจน์ที่ไวอย่างยิ่งแก่ คาเมอร์ลิงห์ ออนเนส สำหรับการตรวจหาร่องรอยของความต้านทานแม้แต่เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งอาจจะยังคงหลงเหลืออยู่ในขดลวดตะกั่วตัวนำยวดยิ่ง ถ้าพลังงานที่สูญเสียไปในขดลวดจะทำให้กระแสลดลงทีละน้อยเมื่อเวลาล่วงไปและจะถูกบันทึกไว้ด้วยการเปลี่ยนแปลงในการเบี่ยงเบนของเข็มแม่เหล็ก จนกระทั่งหลังจากเวลาผ่านไปหลายชั่วโมงแล้วฮีเลียมเหลวภายในภาชนะดูวาร์จึงได้ระเหยไปในที่สุด และขดลวดนี้จึงหมดสภาพนำยวดยิ่ง ไม่เพียงแต่จะสามารถสังเกตการลดลงที่น้อยที่สุดในการเบี่ยงเบนของเข็มทิศเท่านั้น กระแสที่ไหลเรื่อยไปยังคงไม่เปลี่ยนแปลงด้วย จากการทดลองนี้ ออนเนสสามารถสรุปได้ว่าความต้านทานของขดลวดตะกั่วตัวนำยวดยิ่งจะต้องต่ำกว่าที่อุณหภูมิห้องแสนล้านเท่าเป็นอย่างน้อย

หลังจากนั้นไม่นานออนเนสได้ประกอบการทดลองเหมือนเช่นเดิมตามวิธีที่ง่ายยิ่งขึ้นไปอีก เขาได้ใช้วงแหวนเดี่ยวทำด้วยตะกั่ว ซึ่งเขาทำให้เย็นลงภายในสนามแม่เหล็กที่สร้างจากภายนอกภาชนะดูวาร์โดยเติมภาชนะนั้นด้วยฮีเลียมเหลว ขณะนี้เมื่อแม่เหล็กนั้นถูกนำออกไป เส้นแรงแม่เหล็กจะไม่สามารถออกไปจากวงแหวนนั้นได้ เพราะว่าเป็นตัวนำยวดยิ่ง และการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กใด ๆ จะได้รับการชดเชยจากการเหนี่ยวนำของกระแสที่ไหลเรื่อยไปในวงแหวนนั้น ในตอนท้ายของการทดลองออนเนสจึงได้วงแหวนที่มีกระแสอยู่และได้กักเส้นแรงแม่เหล็กชุดหนึ่งไว้อยู่ในนั้น การที่มีกระแสที่ไหลเรื่อยไปนี้อยู่สามารถสังเกตได้จากการเบี่ยงเบนของเข็มทิศอีกเช่นกัน

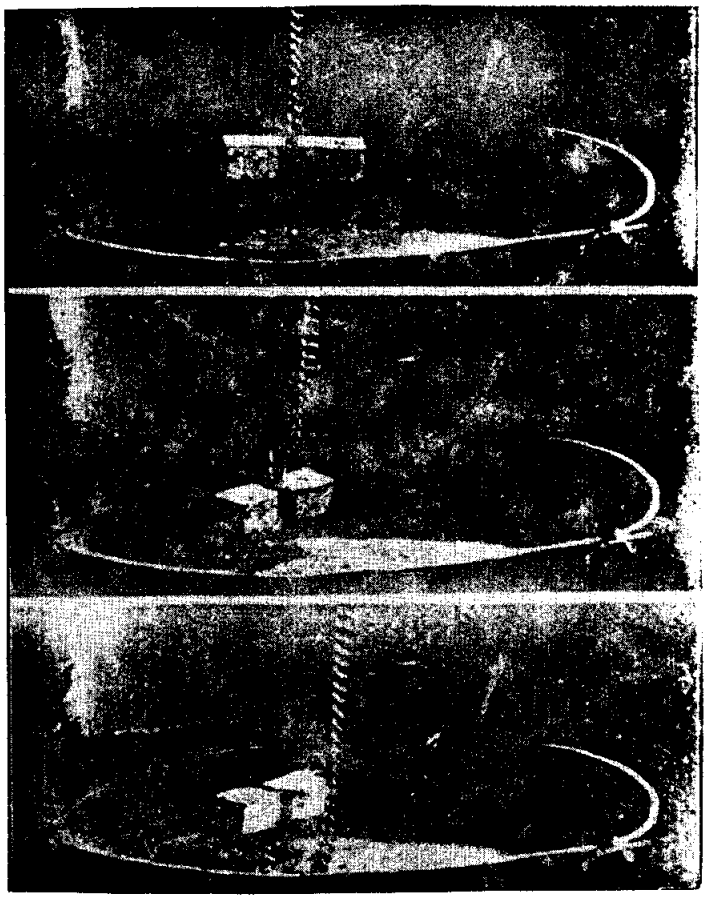
การสาธิตที่ประทับใจยิ่งของกระแสที่ไหลเรื่อยไปได้แสดงไว้ในรูปที่ 9.2 โดยที่กระแสได้ถูกเหนี่ยวนำในวงแหวนดังกล่าวสองวง แล้วจึงนำลูกตะกั่วหย่อนลงไปในวงแหวนทั้งสอง แต่ขณะที่ลูกตะกั่วเข้าไปใกล้วงแหวนทั้งสองกระแสที่ไหลเรื่อยไปตอนนี้ถูกเหนี่ยวนำเช่นกันในผิวของลูกตะกั่วโดยผ่านสนามแม่เหล็กที่ส่งออกมาจากวงแหวนทั้งสอง กระแสเหล่านี้ไหลในทิศทางเดียวกันกับที่อยู่ในวงแหวนทั้งสองและผ่านสนามแม่เหล็กวงแหวนเหล่านี้ ทำให้เกิดการผลักซึ่งกัน



แม่เหล็ก

งาน

งา



9.3 แท่งแม่เหล็กถูกหย่อนลงสู่จานตัวนำยวดยิ่ง ถูกผลัก
โดยเงาเชิงแม่เหล็กของตัวเองทางเบื้องล่างของจานนั้น

และกันเป็นผลให้ในที่สุดลูกตะกั่วจะลอยอยู่ในปริมาณเหนือวงแหวนทั้งสอง ในระยะที่แรงผลักเชิงแม่เหล็กนี้เท่ากับน้ำหนักของลูกตะกั่ว

ปรากฏการณ์ที่น่าตื่นตาตื่นใจเท่า ๆ กันอีกประการหนึ่งสามารถเตรียมได้โดยอาศัยแท่งแม่เหล็กเล็ก ๆ แท่งหนึ่ง ซึ่งหย่อนด้วยไชล่งสู่จานที่ทำด้วยตะกั่วตัวนำยวดยิ่ง(รูปที่ 9.3) ขณะที่แม่เหล็กนี้เข้าไปใกล้จานนั้นเราสังเกตได้ว่าลูกไชจะหย่อนเมื่อและในที่สุดเราเห็นแม่เหล็กลอยอยู่เหนือจานนั้น สิ่งที่เกิดขึ้นในที่นี้ก็คือว่าเส้นแรงแม่เหล็กได้เหนี่ยวนำกระแสที่ไหลเรื่อยไปในผิวตะกั่วซึ่งชดเชยสนามของแม่เหล็กอย่างแท้จริง แท่งแม่เหล็กเล็ก ๆ จึง "แลเห็น" เงาเชิงแม่เหล็กของมันเองซึ่งอยู่ใต้ผิวตะกั่วในระยะเดียวกันกับที่แท่งแม่เหล็กจริง ๆ ลอยอยู่ข้างบนขั้วเหนือและขั้วใต้ของเงาจะผลักขั้วเหล่านี้ของแม่เหล็กจริง จึงทำให้ไม่สามารถเข้าใกล้จานได้มากกว่านั้นอีก

การทดลองของคาเมอร์ลิงห์ ออนเนสกับกระแสที่ไหลเรื่อยไปได้ถูกกระทำซ้ำอีกนับแต่นั้นมาโดยตัวของเขาเองในครั้งแรก และต่อมาโดยผู้อื่นอีกหลายคนด้วยอุปกรณ์สำหรับตรวจหาที่ไวขึ้นและด้วยการยืดระยะของการทดลอง ระยะเวลายาวนานที่สุดซึ่งกระแสที่ไหลเรื่อยไปถูกควบคุมไว้ให้ไหลอยู่ได้คือประมาณสองปี และอาจจะยังคงกำลังไหลอยู่จนถึงปัจจุบันถ้าหากการนัดหยุดงานขนส่งไม่ได้ตัดขาดการส่งมอบฮีเลียมเหลว แม้กระนั้นหลังจากนั้นสองปีก็ไม่มีร่องรอยของกระแสที่อ่อนลงใด ๆ เราจึงไม่ได้ห่างไกลจากความเป็นจริงเมื่อเราถือว่าตัวนำยวดยิ่งมีความต้านทานเป็นศูนย์

ในบรรดาเรื่องแรก ๆ ที่ คาเมอร์ลิงห์ ออนเนสประสบเรื่องหนึ่งคือ การใช้ขดลวดตัวนำยวดยิ่งเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กแรงสูงมาก ๆ เมื่อกล่าวถึงการลดอุณหภูมิเชิงแม่เหล็กก็จะอ้างถึงความยากลำบากอย่างยิ่งเชิงกลวิธีของการสร้างสนามแม่เหล็กแรงสูง กระแสมากมายที่ต้องใช้สำหรับจุดประสงค์นี้จะก่อให้เกิดปริมาณความร้อนมหาศาลในขดลวดแม่เหล็ก ซึ่งจะต้องระบายออกไปด้วยด้วยน้ำหล่อเย็น การหมุนเวียนของน้ำหล่อเย็นนี้จะกำหนดขีดจำกัดที่จะสามารถ

สัมฤทธิ์ได้ แนวทางของการใช้ขดลวดตะกั่วดังแสดงไว้ในรูปที่ 9.1 ซึ่งทำได้โดยปราศจากการสูญเสียดูเหมือนจะให้สิ่งที่อาจเกิดขึ้นได้หลายประการที่เลิศลอย หม้อแปลงไฟฟ้าตัวนำยวดยิ่งที่ไม่มีการสูญเสียตลอดจนเครื่องไฟฟ้าในรูปแบบอื่น ๆ ที่ปราศจากความต้านทานได้ให้ความหวังต่าง ๆ ที่ท้าทาย แต่ต้องยอมรับว่าจำเป็นต้องใช้ฮีเลียมเหลวปริมาณมากมายมหาศาลโดยที่มูลค่านี้จะไม่สูงเกินไปกว่าการสงวนพลังงานที่จะได้รับตอบแทน

น่าเสียดายที่ความฝันนี้มีอยู่ได้ไม่นาน ในไม่ช้างานวิจัยที่ไลเดนได้แสดงว่าสภาพนำยวดยิ่งล้มเหลวเมื่อเกินขนาดวิกฤติของสนามแม่เหล็กไป ทั้งยังพบว่า "ขีดเริ่มเปลี่ยนเชิงแม่-เหล็ก" นี้ค่อนข้างต่ำ โดยไม่เคยเกินกว่าเศษสองหรือสามส่วนร้อยของหนึ่งเทสลา นับว่าเป็นค่าที่ต่ำมากกว่าที่ต้องใช้แม้แต่กับเครื่องจักรไฟฟ้าขนาดย่อม แม้ว่าการเปิดเผยเรื่องนี้ทำให้ท้อถอยแต่เรื่องสภาพนำยวดยิ่งที่สนามแรงสูงก็ไม่ได้เลิกราไปเพราะเหตุนี้ แต่ผลสืบเนื่องของเรื่องนี้ต้องชะลอออกไปอีกสี่สิบปี ในระหว่างนี้ได้ค้นพบว่าขีดเริ่มเปลี่ยนของสนามแม่เหล็กและกระแสเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันอย่างแท้จริง เพราะว่าความแรงของสนามวิกฤติที่สามารถทำลายสภาพนำยวดยิ่งในเส้นลวดเท่ากับที่ถูกสร้างขึ้นโดยกระแสวิกฤติที่ไหลผ่านมันทีเดียว

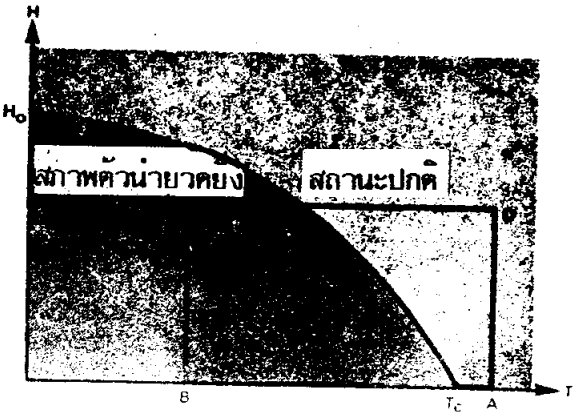
ตลอดระยะเวลานี้การแสวงหาตัวนำยวดยิ่งใหม่ ๆ ได้ดำเนินต่อไป นอกจากปรอทและตะกั่วแล้วในไม่ช้าได้ค้นพบว่าดีบุก อินเดียม แฮลเลียมและแกลเลียมมีสภาพนำยวดยิ่งด้วย ทั้งหมดนี้เป็นโลหะที่มีสมบัติต่าง ๆ ทางฟิสิกส์คล้ายคลึงกัน เช่นจุดหลอมเหลวต่ำและความอ่อน เมื่อในช่วงระหว่างค.ศ.1920-1929 ห้องปฏิบัติการอื่น ๆ ได้เริ่มเข้าร่วมการแสวงหานี้แต่ ไมส์เนอร์ ในเบอร์ลินได้เบนความสนใจไปที่กลุ่มโลหะซึ่งต่างออกไป โดยที่โลหะเหล่านั้นแข็งและมีจุดหลอมเหลวสูง และในบรรดาโลหะเหล่านี้เขาได้พบตัวนำยวดยิ่งชุดใหม่ดังเช่น แทนทาลัม ไนโอเบียม ไทเทเนียมและธอเรียม จากการขยายการสังเกตไปจนใกล้เคียง 1 ค และอุณหภูมิที่บรรลุได้จากการลดอุณหภูมิเชิงแม่เหล็กโดยเฉพาะ จึงได้พบธาตุตัวนำยวดยิ่งรุ่นต่อไปดังเช่นอะลูมิเนียม แคดเมียม สังกะสี ออสเมียม รัธทีเนียมและอื่น ๆ อีกมาก โดยส่วนใหญ่แล้วสารตัวอย่างเหล่านี้ไม่จำเป็นต้องบริสุทธิ์มากนักก็จะแสดงผลนี้ได้ แต่ในกรณีอื่นๆ โดยเฉพาะเมื่อไม่นานมานี้ ปรากฏว่า สภาพนำยวดยิ่งจะพบได้ต่อเมื่อเป็นสารบริสุทธิ์อย่างยิ่งเท่านั้น ดูเหมือนว่าใน

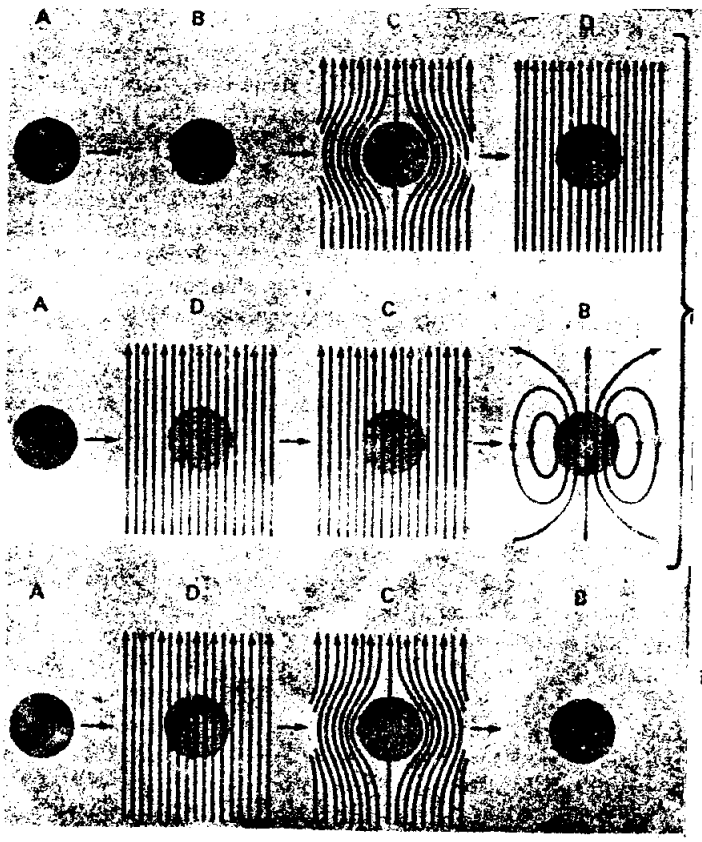
ขณะนั้นตัวนำยวดยิ่งทั้งหลายมีจำนวนมากกว่าโลหะที่ไม่เป็นตัวนำยวดยิ่ง จึงนับเป็นจุดหนึ่งที่ถกเถียงกันได้มากว่าพวกที่ไม่แสดงวี่แววว่าจะกลายเป็นสภาพตัวนำยวดยิ่งตลอดเวลาที่ผ่านมาแล้วนี้ อาจจะเป็นเช่นนั้นได้หรือไม่ที่อุณหภูมิต่ำลงไปอีกยิ่งขึ้นหรือไม่

ความสงสัยเช่นนี้เกี่ยวข้องอย่างแท้จริงกับโลหะปกติบางชนิดที่ยังเหลืออยู่ ตัวอย่างเช่น พวกที่มีเวเลนซ์เดียว เช่น ทองหรือโซเดียม และโลหะไม่กี่ชนิดที่มีเวเลนซ์คู่ เช่น แมกนีเซียมและแคลเซียม กลุ่มอื่นที่ไม่เป็นตัวนำยวดยิ่ง ตัวอย่างเช่น เหล็ก โคบอลท์ นิเกิ้ล และโลหะออกไซด์ที่ทั้งหมดมีสนามแม่เหล็กภายในสูง ซึ่งน่าจะเก็บกดสภาพนำยวดยิ่งไว้ ดังนั้นโลหะเหล่านี้จึงจะยังคงเป็นปกติเสมอ

คาดกันว่าการเกิดสภาพนำยวดยิ่งในโลหะบางชนิดอาจจะช่วยให้เข้าใจสภาพนำยวดยิ่งได้ดีขึ้นด้วยกันทั้งหมดทุกชนิด ครั้งแรกที่เชื่อกันว่าอะตอมบางตัวอาจจะเป็นตัวนำยวดยิ่งและอีกหลาย ๆ ตัวอาจจะไม่เป็น แต่ในไม่ช้าความคิดนี้ได้พิสูจน์แล้วว่าไม่ถูกต้องเมื่อได้ค้นพบสภาพนำยวดยิ่งในสารประกอบ Au_2Bi ทั้งทองหรือพลวงอย่างใดอย่างหนึ่งไม่เป็นตัวนำยวดยิ่ง แต่โลหะนี้ที่แปรรูปเป็นสีเทาเข้มกลับยังคงเป็นปกติ ในที่นี้ความแตกต่างอยู่ที่โครงสร้างของแลตทิซผลึกเท่านั้น ซึ่งในกรณีแรกเป็นจตุรมุขและในอีกกรณีหนึ่งเป็นลูกบาศก์ ความจริงเหล่านี้ได้แสดงว่าเหตุผลสำหรับสภาพนำยวดยิ่งจะต้องไปเสาะแสวงหาในก๊าซของอิเล็กตรอนอิสระมากกว่าในธรรมชาติของอะตอม แม้กระทั่งปัจจุบันเมื่อการทดลองจำนวนมากมายมหาศาลได้ให้แนวทางบางประการสำหรับความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างของผลึกกับจำนวนอิเล็กตรอนอิสระและสภาพนำยวดยิ่ง แต่ความสัมพันธ์นี้ไม่ดีพอถึงขนาดที่จะทำนายการเกิดสภาพนำยวดยิ่ง

ข้อชี้แนะอีกประการหนึ่งที่ว่าสภาพนำยวดยิ่งมีที่มาจากการจัดเรียงตัวที่ค่อนข้างจะพิสดารบางประการของอิเล็กตรอนอิสระนั้น ได้จากความจริงที่ว่าปรากฏการณ์นี้ถูกจำกัดที่อุณหภูมิต่ำ พลังงานที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงใด ๆ และตลอดจนที่เกี่ยวข้องกับสภาพนำยวดยิ่งสามารถประเมินได้โดยทั่วไปอย่างแท้จริงเช่นกันด้วยปริมาณ kT เมื่อ T ในกรณีนี้เป็นอุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลง เมื่อไม่เคยพบตัวนำยวดยิ่งใด ๆ ที่อุณหภูมิสูงกว่า 20 ค ขึ้นไปมาก ๆ และพร้อมกันนั้นพลังงานยิ่งน้อยเกินกว่าที่จะให้มันสัมพันธ์กับกระบวนการบางชนิดที่เกิดขึ้นภายในอะตอม





ความต้านทานเป็นศูนย์

การเหนี่ยวนำเป็นศูนย์

9.4 ผลจากความต้านทานเป็นศูนย์ และการเหนี่ยวนำแม่เหล็กเป็นศูนย์

แท้ที่จริงโลหะผสมเพียงไม่กี่ชนิดที่แสดงอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงใกล้เคียงกับ 20 ค ขณะที่อุณหภูมินี้ของบรรดาโลหะบริสุทธิ์ที่ได้พบทั้งหมดอยู่ต่ำกว่า 10 ค

เมื่องานด้านสภาพนำยวดยิ่งกระจายออกไปสู่ห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิต่ำซึ่งเพิ่งก่อตั้งขึ้นใหม่หลายแห่ง ดังนั้นจึงเติบโตขึ้นอย่างขนานใหญ่ จนกระทั่งในค.ศ.1933 จึงปรากฏชัดเจนยิ่งขึ้นว่าความรู้ของเราบางชิ้นสำคัญอย่างอุกฤษฏ์ดูเหมือนยังคงขาดหายไป แต่ไม่สามารถเล็งเห็นสิ่งที่บกพร่องไปนี้อย่างแท้จริงได้ทันที อย่างไรก็ตามเงื่อนปมจำนวนหนึ่งได้บ่งชี้ไปยังพฤติกรรมเชิงแม่เหล็ก การวัดบางประการเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของลวดต่าง ๆ ในสนามแม่เหล็กได้ดำเนินไปในเวลานั้นที่ไลเดน ซึ่งดูเหมือนว่าขัดแย้งอย่างชัดเจนกับผลการทดลองก่อน ๆ บางส่วนของบุคคลที่นั่น ความไม่สอดคล้องกันอีกประการหนึ่งได้บังเกิดขึ้นจากความหวังของออนเนสที่จะทำสนามแม่เหล็กแรงสูง ในปีค.ศ.1930 เดอ ฮาสและวูกต์ ได้พบว่าลวดต่าง ๆ ที่ทำจากโลหะผสมระหว่างตะกั่วกับพลวงยังคงเป็นตัวนำยวดยิ่งในสนามแม่เหล็กที่สูงขนาดสองเทสลาได้ เมื่ออีกสามปีต่อมา ข้าพเจ้าได้ติดตั้งเครื่องทำฮีเลียมเหลวเป็นครั้งแรกในอังกฤษที่ห้องปฏิบัติการแคลเรนดอนในออกซ์ฟอร์ด โลหะผสมนี้ดูจะเป็นสารที่เหมาะสมสำหรับสร้างให้เป็นแม่เหล็กตัวนำยวดยิ่ง แต่เมื่อได้สร้างขดลวดขึ้นจากโลหะผสมนี้กลับไม่ได้ให้สนามสูงดังที่คาดไว้

ขณะที่เรายังคงเกาศีรษะของเราอยู่แกรกๆด้วยความพยายามที่จะค้นหาว่ามีอะไรผิดปกติเกิดขึ้นกับแม่เหล็กของเรา. ไมส์เนอร์และออชเซนเฟลด์ ในเบอร์ลินได้ประกาศการค้นพบซึ่งได้เปลี่ยนแนวความคิดทั้งหมดเกี่ยวกับสภาพนำยวดยิ่งไปอย่างสิ้นเชิง เพื่อให้เข้าใจความหมายนี้เราจะต้องเพ่งมองให้ใกล้ชิดยิ่งขึ้นที่เส้นขดเริ่มเปลี่ยน ซึ่งแสดงถึงขอบเขตของสถานะตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพของสนามแม่เหล็กที่ลงจุดประชันกับอุณหภูมิ(รูปที่ 9.4) พื้นที่ซึ่งล้อมรอบด้วยเส้นโค้งที่เกือบเป็นพาราโบลานี้คือบริเวณที่โลหะเป็นตัวนำยวดยิ่ง ขณะที่อุณหภูมิสูงขึ้นหรือสนามแม่เหล็กสูงขึ้นเกินกว่าขอบเขตของเส้นโค้งนี้มันจะเป็นตัวนำธรรมดา ที่จุดเปลี่ยนแปลง T_c

สนามที่น้อยจนแทบไม่มีเลยก็เพียงพอแล้วที่จะกำจัดสภาพนำยวดยิ่ง แน่นอนว่าจุดนี้เปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของโลหะ เช่น 4.1 ค ในปรอท 0.56 ค ในแคดเมียม และ 9 ค ในไนโอเบียม เมื่ออุณหภูมิต่ำลงกว่า T_c โลหะจะกลับคืนสู่สภาพนำยวดยิ่งของมันอยู่ได้แม้อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็ก ดังนั้น สนามสูงสุด H_0 ที่สามารถทนทานได้ที่ศูนย์สัมบูรณ์จะแตกต่างกันไปในแต่ละสารอีกเช่นกัน สำหรับชุดของโลหะที่เพิ่งกล่าวถึงค่านี้คือ 0.04, 0.003 และ 0.17 เทสลา ตามลำดับ

คราวนี้ขอให้เราพิจารณาสิ่งที่เกิดขึ้นกับสนามแม่เหล็กในบริเวณใกล้เคียงกับลูกกลมโลหะที่ความต้านทานไฟฟ้าของมันเป็นศูนย์ขณะที่เราทำให้เย็นลงผ่าน T_c เนื่องจากการลดอุณหภูมิ(จาก A ไป B) กระทำในสนามภายนอกเป็นศูนย์ จึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่จะคาดหวังได้ ที่ B เราเพิ่มสนามรอบ ๆ ลูกกลมจากศูนย์ไปเป็นค่าหนึ่งซึ่งต่ำกว่าจุดวิกฤติมากที่ C เนื่องจากขณะนี้ลูกกลมเป็นตัวนำอย่างสมบูรณ์ การเพิ่มขึ้นของสนามภายนอกจึงชดเชยโดยกระแสยวดยิ่งในผิวของมันและไม่มีฟลักซ์แม่เหล็กใด ๆ สามารถทะลุทะลวงผ่านเข้าไป ดังนั้น เส้นแรงแม่เหล็กจึงโป่งออกรอบ ๆ เส้นศูนย์สูตรของลูกกลมและการเพิ่มขึ้นของฟลักซ์แม่เหล็กในบริเวณนี้สามารถตรวจหาได้โดยง่ายด้วยเครื่องมือที่เหมาะสม เมื่อลูกกลมถูกทำให้ร้อนขึ้นในสนามภายนอกซึ่งคงที่จาก C ไป D กระแสยวดยิ่งในผิวของมันจะหมดไปขณะที่ผ่านเส้นขีดเริ่มเปลี่ยนนี้ไป ดังนั้นฟลักซ์แม่เหล็กจึงทะลุทะลวงผ่านเข้าไปในลูกกลมจนกระทั่งที่ D สนามภายในและภายนอกลูกกลมเท่ากัน

อย่างไรก็ตามจะต้องคาดการณ์ถึงรูปแบบที่แตกต่างกันอย่างสิ้นเชิงแบบหนึ่ง เมื่อลูกกลมนี้ถูกดำเนินการให้ผ่านคลอดวัฏจักรเดียวกันนี้แต่ในทิศทางตรงกันข้าม การเพิ่มสนามจาก A ไป D ทำให้เส้นแรงทะลุทะลวงลูกกลมได้เพราะเป็นการนำโดยปกติ ในการลดอุณหภูมิภายใต้สนามคงที่จาก D ไป C ลูกกลมจะกลายเป็นตัวนำอย่างสมบูรณ์ แต่เนื่องจากเราไม่ได้เปลี่ยนแปลงสนามภายนอก ดังนั้น จึงไม่มีผลทางแม่เหล็กที่คาดหวังได้ อีกนัยหนึ่ง สภาพนำอย่างสมบูรณ์จะทำให้มันเองรู้สึกในพฤติกรรมทางแม่เหล็กของลูกกลม ขณะนี้เมื่อสนามถูกลดลงจาก C ไปเป็นศูนย์ที่ B ขณะที่เส้นแรงพยายามที่จะออกจากโลหะ การเปลี่ยนแปลงของสนามนี้ถูกชดเชยโดยกระแสที่ไหลเรื่อยไปซึ่งเกิดขึ้นในผิวของลูกกลม ทำให้ขวางกั้นฟลักซ์ไม่ให้หนีออกมา ดังนั้นเราจะยังคงปล่อยให้อยู่ที่ B กับขั้วคู่ของแม่เหล็กในลูกกลมโดยการกระทำของมันเสมือนกับแท่งแม่-

เหล็กแห่งหนึ่ง

จนกระทั่งค.ศ.1933 เชื่อกันโดยทั่วไปว่าในตัวนำยวดยิ่งหนึ่ง ๆ รูปแบบของพฤติกรรมนี้บรรลุได้อย่างแท้จริง และความเชื่อถือนี้ดูเหมือนจะได้รับการสนับสนุนจากการทดลองในครั้งแรก ๆ ซึ่งดำเนินการที่ไลเดน อย่างไรก็ดี น่าเสียดายที่ลูกกลมนี้กลวงนับเป็นพฤติกรรมที่สำคัญซึ่งดูเหมือนจะหลุดลอดไปจากการสังเกตของทุกคน ต่อเมื่อการทดลองดังที่ได้ร่างโครงไว้ในรูปที่ 9.4 ถูกดำเนินการไปอย่างถูกต้องกับโลหะตัวอย่างในสถานะของแข็งโดยไมส์เนอร์และออชเซนเฟลด์ จึงทำให้รูปแบบเชิงแม่เหล็กอย่างแท้จริงของสถานะตัวนำยวดยิ่งปรากฏออกมา อันที่จริงวัฏจักร ABCD ได้ให้พฤติกรรมทางแม่เหล็กตามที่คาดหวังไว้ แต่เมื่อมันถูกกระทำในแนวตรงกันข้ามคือ ADCB ผลซึ่งออกมาอย่างน่าประหลาดที่สุดจึงได้ถูกค้นพบ ในส่วนของ DC ฟลักซ์แม่เหล็กไม่ได้คงอยู่ในโลหะอีก แต่ถูกผลักอย่างสิ้นเชิงเมื่อผ่านเส้นขีดเริ่มเปลี่ยนไป ด้วยเหตุนี้การลดสนามภายนอกจาก C ไป B ลูกกลมนี้จึงยังคงไม่มีฟลักซ์ที่อาจถูกกักกันไว้และไม่มีขั้วคู่แม่เหล็กหลงเหลืออยู่ที่ B

ปรากฏการณ์ใหม่ที่ค้นพบโดยไมส์เนอร์ คือการผลักที่เกิดขึ้นเองของฟลักซ์แม่เหล็กจากโลหะนั้น เมื่อมันกลายเป็นตัวนำยวดยิ่งและการเกิดปรากฏการณ์นี้ยังผลให้เกิดความสมมาตรใหม่ของพฤติกรรมทางแม่เหล็ก เพราะปรากฏอย่างชัดเจนว่าไม่แตกต่างกันอย่างใดไม่ว่าวัฏจักรจะกระทำไปในแนวใด เราได้ศึกษารายละเอียดจากการทดลองจริง ๆ เพราะว่าโดยวิธีนี้เท่านั้นที่จะสามารถช่วยให้เห็นได้ว่าความต้านทานไฟฟ้าเป็นศูนย์โดยตัวมันเองไม่เพียงพอที่จะอธิบายปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ ดังนั้น นอกจากการสูญหายไปของสภาพต้านทานแล้ว สถานะตัวนำยวดยิ่งยังแสดงถึงผลทางแม่เหล็กประการหนึ่ง นั่นคือ การหายไปของการเหนี่ยวนำเชิงแม่เหล็ก

หลังจากการค้นพบใหม่นี้แล้วในปีแรกได้พยายามกันหลายครั้งที่จะเชื่อมโยงปรากฏการณ์ทั้งสอง นั่นคือ ปรากฏการณ์สภาพต้านทานเป็นศูนย์และการเหนี่ยวนำเป็นศูนย์เข้าด้วยกันโดยอาศัยสมการพลวัตไฟฟ้าของแมกซ์เวลล์ อย่างไรก็ตาม ในไม่ช้าได้ปรากฏชัดเจนว่าความพยายามทั้งหลายเหล่านี้ประสบชะตากรรมจนล้มเหลวไป เพราะสมการที่เกี่ยวข้องเหล่านี้ไม่สามารถใช้หาได้สำหรับกรณีนี้ เรื่องนี้แสดงว่าสภาพนำยวดยิ่งไม่สามารถเข้าใจได้ในกรอบ

ของพลวัตไฟฟ้าธรรมดา และจำเป็นต้องใช้กลวิธีใหม่อย่างสิ้นเชิง ซึ่งในไม่ช้าก็ได้จากฟริทส์ และไฮนส์ ลอนดอนผู้ซึ่งได้มาอยู่ที่ออกซ์ฟอร์ดในฐานะผู้ลี้ภัยจากนาซีในเยอรมัน จุดเริ่มต้นของงานของบุคคลทั้งสองเริ่มขึ้นจากวิทยานิพนธ์ปริญญาเอกของไฮนส์ โดยที่เขาพิจารณาความลึกซึ้งกระแสที่ไหลเรื่อยไปจะสามารถทะลุทะลวงเข้าไปในผิวตัวนำยวดยิ่ง และเขาได้ผลที่น่าสนใจประการหนึ่งซึ่งซึ่งเราจะย้อนกลับมาอีกในไม่ช้า เมื่อเขากับพี่ชายของเขามาถึงอังกฤษนั้น ตรงกับการค้นพบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์พอดีจึงเอื้อต่อการเน้นอย่างถูกจังหวะแก่งานของเขา ซึ่งขณะนี้ได้อาศัยการสนับสนุนจากทักษะทางทฤษฎีอย่างเยี่ยมยอดของฟริทส์ ในเวลาเดียวกันนั้นเองนับว่าเป็นช่วงที่วุ่นวายสับสนของห้องปฏิบัติการแคลเรนดอนจากข้อมูลเกี่ยวกับปรากฏการณ์ไมส์เนอร์และนัยสำคัญของมันที่ได้รับมาเพิ่มขึ้นโดยนักทดลองทั้งหลาย ได้นำไปสู่การถกเถียงที่ไม่รู้จบระหว่างนักทดลองเหล่านี้กับนักทฤษฎีทั้งหลาย ผลของการร่วมมืออย่างใกล้ชิดกันนี้ทำให้พี่น้องตระกูลลอนดอนประสบความสำเร็จในการสร้างขอบข่ายพลวัตไฟฟ้าใหม่สำหรับตัวนำยวดยิ่งภายในเวลาที่น้อยกว่า 2 ปีหลังจากการค้นพบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์

ลักษณะที่เป็นแก่นกลางของพลศาสตร์ไฟฟ้าของลอนดอนอยู่ที่สมการใหม่สมการหนึ่งที่เชื่อมโยงกระแสกับสนามแม่เหล็ก ซึ่งนำมาใช้แทนความสัมพันธ์ที่รู้จักกันดีของแมกซ์เวลล์ระหว่างกระแสและสนามไฟฟ้า นอกเหนือจากการให้คำอธิบายที่ทำให้เข้าใจได้ดีสำหรับปรากฏการณ์แม่เหล็กไฟฟ้าต่าง ๆ ของสภาพนำยวดยิ่งแล้ว สมการของลอนดอนยังเผยถึงความสมมาตรอย่างน่าพอใจของรูปแบบการนำยวดยิ่ง ในพลศาสตร์ไฟฟ้าธรรมดา ปรากฏว่ากระแสไฟฟ้าคงที่สัมพันธ์กับสนามแม่เหล็กคงตัว แต่สนามแม่เหล็กที่คงตัวไม่ทำให้เกิดกระแส เพื่อที่จะให้ได้กระแสในตัวนำธรรมดาสนามแม่เหล็กจะต้องเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ดังนั้น เรื่องนี้จึงนำไปสู่ความอสมมาตรของสมการพลวัตไฟฟ้า ในทางตรงกันข้าม ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคงตัวกับสนามแม่เหล็กคงตัวในตัวนำยวดยิ่งตามที่พี่น้องตระกูลลอนดอนได้แสดงไว้นั้น จะเป็นความสมดุลอย่างสมมาตรจากความจริงที่ว่าสนามคงตัวจะทำให้เกิดกระแสคงตัวด้วย ทั้งหมดนี้เป็นกระแสที่ไหลเรื่อยไปซึ่งได้สาธิตเป็นครั้งแรกโดยคาเมอร์ลิงห์ ออนเนสกับกระแสจากปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อโลหะนั้นถูกทำให้เย็นลงจนถึงสภาพนำยวดยิ่งในสนามแม่เหล็กคงตัว

ปรากฏการณ์ประหลาดของสภาพนำยวดยิ่งจึงให้รูปแบบที่ง่ายมากยิ่งขึ้นอย่างแท้จริงมากกว่าการนำไฟฟ้าธรรมดา โดยแสดงความสมมาตรอย่างงดงามซึ่งจะถูกทำลายเมื่อเราผละออกไปจากบริเวณใกล้เคียงกับศูนย์สัมบูรณ์ ตามความเป็นจริงแล้วถ้าฟาราเดย์ ได้ดำเนินการทดลองงานบุกเบิกของเขาที่ราชวิทยาลัยกับลวดตะกั่วตัวนำยวดยิ่งในฮีเลียมเหลว แทนที่จะใช้ลวดทองแดงที่อุณหภูมิห้อง เขาอาจจะได้พบกฎต่าง ๆ ของการเหนี่ยวนำไฟฟ้าแม่เหล็กซึ่งชัดเจนและง่ายเสียจนกระทั่งเขาอาจจะได้ทราบถึงการปรากฏออกมาในขั้นมูลฐาน สิ่งที่เราเรียกว่าการนำไฟฟ้าธรรมดาอาจจะได้ปรากฏแก่เขาเป็นกรณีที่แยกออกไปอย่างซับซ้อนจากสภาพนำยวดยิ่ง

ผลสืบเนื่องที่สำคัญอีกประการหนึ่งของปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ได้จากการผลักของฟลักซ์แม่เหล็กจากโลหะเมื่อถูกลดอุณหภูมิผ่านเส้นขีดเริ่มเปลี่ยน เพราะมันยินยอมให้ใช้อุณหพลศาสตร์ได้ การผลักดันให้ฟลักซ์แม่เหล็กเข้าและออกตรงที่มีการเปลี่ยนแปลงระหว่าง C และ D ในรูปที่ 9.4 หมายถึงการทำงานเช่นเดียวกับงานที่กระทำโดยการขยายตัวหรือการอัดก๊าซที่บรรจุอยู่ในกระบอก ความสัมพันธ์ทางอุณหพลวัตต่าง ๆ ดังที่เราได้เห็นแล้วก่อนหน้านี้นับเป็นเรื่องธรรมดามากเสียจนไม่มีความแตกต่างกัน ไม่ว่าจะเป็นงานที่กระทำกับลูกสูบหรือกับแรงแม่เหล็ก สิ่งที่น่าสนใจที่ควรจะกล่าวถึงแม้แต่ก่อนหน้าที่ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์จะได้ให้พื้นฐานที่หนักแน่น แต่ก็เป็นที่น่าสงสัยกันทั่วไปว่าสภาพนำยวดยิ่งจะต้องสามารถปรับปรุงการใช้อุณหพลวัตได้ และตามความเป็นจริงแล้วกอเตอร์ในฮอลแลนด์ได้สร้างรูปนัยนิยมสมบูรณ์ของสภาพนำยวดยิ่งสำเร็จลงแล้วก่อนหน้าการค้นพบของไมส์เนอร์ไม่นานนัก การตรวจสอบการคาดคะเนที่จะได้จากสูตรทั้งหลายนี้จึงเป็นงานขั้นต่อไปสำหรับนักทดลองทั้งหลายในไลเดน ออกซ์ฟอร์ดและคาร์คอฟ

จึงนับว่างานนี้เองทำให้พบเงื่อนปมแรกที่ได้คลี่คลายสาเหตุในความล้มเหลวของขดลวดแม่เหล็กสนามแรงสูงของเราที่ทำจากโลหะผสมระหว่างตะกั่วกับพลวง ขณะที่ผลทางความร้อน เช่น ความร้อนจำเพาะและความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะในโลหะบริสุทธิ์สอดคล้องเป็นอย่างดีกับค่าต่าง ๆ ที่คาดคะเนไว้โดยอุณหพลศาสตร์จากเส้นขีดเริ่มเปลี่ยนนั้น แต่กลับปรากฏว่าเรื่องนี้ไม่ใช่กรณีของโลหะผสม เนื่องจากขีดเริ่มเปลี่ยนมีค่าสูงอย่างยิ่งนี้เอง จึงทำให้สามารถคาดได้ว่า

ผลทางความร้อนจะมีมากในโลหะผสม แต่ผลงานในออกซ์ฟอร์ดก็เป็นเช่นเดียวกันกับในคาร์คอฟซึ่งได้แสดงโดยสรุปว่า ไม่มีร่องรอยของผลต่าง ๆ เหล่านี้ อีกครั้งหนึ่งที่ปรากฏชัดเจนว่าส่วนที่สำคัญบางส่วนในความรู้ของเราเกี่ยวกับสถานะตัวนำยวดยิ่งยังบกพร่องอยู่ โดยเฉพาะโลหะผสมนั้นดูเหมือนว่าประพฤติแตกต่างไปอย่างแท้จริงจากโลหะบริสุทธิ์ทั้งหลาย

เมื่อเพียบพร้อมด้วยข้อมูลมากเช่นนี้สำหรับการดำเนินงานต่อไป จึงได้วางแนวกลวิธีการทดลองออกมาอย่างชัดเจนไปสู่การศึกษาเชิงแม่เหล็กอย่างใกล้ชิดยิ่งขึ้นกับโลหะผสมตัวนำยวดยิ่ง ในปีค.ศ.1934 เป็นปีที่มีงานค้นคว้ามากมายปีหนึ่งสำหรับนักทดลองทั้งหลายในออกซ์-ฟอร์ด คาร์คอฟและไลเดน กลุ่มผู้ร่วมงานทุกกลุ่มดำเนินงานในปัญหาต่าง ๆ ในแนวเดียวกันมากที่เดียวและใช้กรรมวิธีคล้ายกัน ซึ่งอย่างไรก็ดีนับว่าแตกต่างกันไปพอสมควรที่จะช่วยให้ตรวจสอบผลการทดลองต่าง ๆ ของแต่ละกลุ่มกันได้อย่างมีประโยชน์ ผลที่ปรากฏออกมาของงานนี้ทั้งหมดก็คือ เมื่อได้จัดการประชุมสัมมนาขึ้นที่ราชบัณฑิตยสภาในกรุงลอนดอนเมื่อฤดูใบไม้ผลิของปีค.ศ. 1935 รูปแบบทั้งหมดจึงได้ปรากฏขึ้นมาอย่างชัดเจนและสมเหตุผล ตามความเป็นจริงแล้วโลหะผสมนั้นประพฤติต่างไปจากโลหะบริสุทธิ์มากทีเดียว เพราะแทนที่จะดอยกันสนามแม่เหล็กออกไปอย่างสิ้นเชิงจนกระทั่งถึงสนามที่เป็นขีดเริ่มเปลี่ยน กลับพบว่าฟลักซ์แม่เหล็กทะลุทะลวงตัวอย่างโลหะผสมที่สนามค่อนข้างต่ำ อย่างไรก็ตาม เมื่อเส้นแรงผ่านเข้าไปในโลหะผสมจะไม่เป็นการทำลายสถานะตัวนำยวดยิ่งในทันทีทันใด ดังเช่นในโลหะบริสุทธิ์ การทะลุทะลวงเข้าไปในโลหะของฟลักซ์แม่เหล็กนี้ได้พบว่าเป็นกระบวนการที่ดำเนินไปอย่างช้า ๆ ซึ่งครอบคลุมขยายออกไปในช่วงกว้างของสนาม ปรากฏว่าสารตัวอย่างยังคงเป็นตัวนำไฟฟ้าตลอดกระบวนการ ผลนี้สามารถนำมาแสดงได้ดังแผนภาพ(รูปที่ 9.5) ซึ่งคล้ายกับที่ได้ใช้แสดงในกรณีของโลหะบริสุทธิ์ ความแตกต่างอยู่ที่ว่าตรงนี้สำหรับโลหะผสม เส้นขีดเริ่มเปลี่ยนถูกแทนที่โดยการทะลุทะลวงของฟลักซ์อย่างช้า ๆ เป็นช่วงกว้าง

นัยสำคัญของปรากฏการณ์นี้น่าสงสัยนี้เป็นที่ตระหนักกันทีละน้อยเท่านั้น จึงไม่ได้รวบรวมผลต่าง ๆ ของงานวิจัยนี้ไว้จนกระทั่งเวลาล่วงเลยไปอีก 30 ปี ขอให้เราย้อนกลับไปในเรื่องของวิทยานิพนธ์ของไฮนส์ ลอนดอนซึ่งได้รับการพิมพ์เผยแพร่ด้วยเช่นกันในค.ศ.1934

คำกล่าวของเราก่อนหน้านี้ว่าสนามแม่เหล็กจะเหนี่ยวนำกระแสที่ไหลเรื่อยไปในผิวของตัวนำยวดยิ่ง ซึ่งเพียงพอที่เดียวที่จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ตามที่เราได้อธิบายไว้แล้ว แต่กระนั้นก็ค่อนข้างจะไม่สมบูรณ์ กระแสหมายถึงการไหลของอิเล็กตรอนและอิเล็กตรอนจะผลักซึ่งกันและกัน เราจึงไม่สามารถถือได้ว่ากระแสที่ไหลเรื่อยไปเคลื่อนที่อยู่ภายในผิวเชิงเรขาคณิตของโลหะ แต่จะต้องขยายออกไปสักระยะหนึ่งเข้าสู่เนื้อโลหะนั้น จากการคำนวณของไฮนส์ ลอนดอนพบว่าระยะนี้จะอยู่ประมาณ 10^{-5} เซนติเมตรและแน่ละย่อมหมายความว่าสนามแม่เหล็กก็จะทะลุทะลวงเข้าสู่โลหะในระยะเดียวกันด้วย

ปริมาตรตัวนำยวดยิ่งที่ถูกต้องของตัวอย่างโลหะจึงจะเล็กกว่าปริมาตรเชิงเรขาคณิตของมันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เพราะว่าจะต้องนำผิวที่หนาขนาด 10^{-5} เซนติเมตรมาหักออก จึงเห็นได้อย่างชัดเจนว่าความเคลื่อนคลาดเช่นนี้น้อยเกินกว่าที่จะตรวจหาได้จากตัวอย่างที่มีขนาดธรรมดา แต่แน่นอนว่าถ้าพิจารณาลวดบางหรือแผ่นโลหะบางก็จะกลายเป็นเรื่องสำคัญ(รูปที่ 9.6) ต่อมาความยุ่งยากที่แปลกประหลาดก็บังเกิดขึ้น เราได้เห็นแล้วว่างานซึ่งก็คือพลังงานที่เกี่ยวข้องในการเปลี่ยนแปลงระหว่างสถานะตัวนำยวดยิ่งกับสถานะปกติของโลหะมาจากการผลักกันของสนามแม่เหล็กภายในปริมาตรของตัวอย่าง เนื่องจากเป็นปริมาณมูลฐานทางอุณหพลวัต จึงไม่ขึ้นอยู่กับรูปทรงของสิ่งตัวอย่าง ดังนั้น ถ้าโลหะนั้นอยู่ในรูปทรงของเส้นลวดที่บางมากโดยที่ขนาดของมันไม่ใหญ่โตเมื่อเทียบกับระยะของการทะลุทะลวง ปริมาตรที่ฟลักซ์แม่เหล็กจะถูกผลักออกมาจึงน้อยกว่ามากในสิ่งตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่นั้น วิธีเดียวที่จะรักษาค่าพลังงานของการเปลี่ยนแปลงให้เหมือนเดิมก็คือจะต้องให้สนามขีดเริ่มเปลี่ยนมีค่ามากขึ้นอย่างสอดคล้องกัน

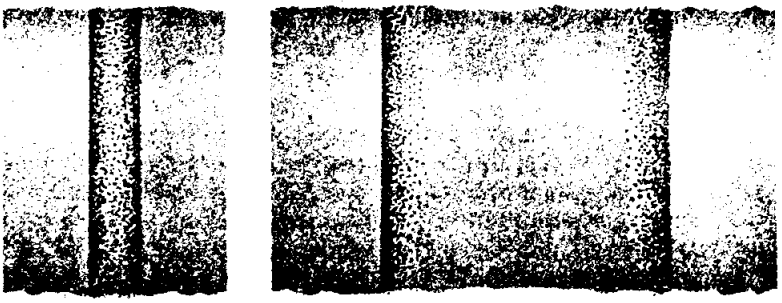
ข้อสรุปนี้ซึ่งอาศัยพื้นฐานจากพลศาสตร์ไฟฟ้าของลอนดอน นับว่าน่าสนใจเป็นพิเศษเพราะได้ช่วยให้การตรวจสอบทฤษฎีด้วยการทดลองเป็นไปได้โดยตรง แต่มีความยุ่งยากแน่นอนบางประการ กลวิธีต่าง ๆ สำหรับการสร้างลวดที่บางมาก ๆ ไม่ได้ก้าวหน้าไปอย่างดีนักในเวลานั้น นอกจากนี้ โลหะนั้นจะต้องปลอดจากความเครียดหรือสารเจือปนเพื่อที่จะได้ไม่มีคุณสมบัติของโลหะผสม แม้กระนั้นการทะลุล่วงไปในค.ศ.1937 โดยนักศึกษาค้นวิจัยชาวอเมริกันในออกซ์-ฟอร์ดชื่อ เรกซ์ ปอนดิอุส ผู้ซึ่งได้ประสบความสำเร็จในการทำลวดตะกั่วที่บางมากเสียจนเส้นผ่าน

9.5 ในโลหะผสมตัวนำยวดยิ่ง เส้นขีดเริ่มเปลี่ยนถูกแทนที่โดยช่วงการทะลุทะลวงของฟลักซ์อย่างช้า ๆ

ศูนย์กลางของลวดเหล่านี้สามารถเทียบได้กับความลึกของการทะลุทะลวงที่ได้คำนวณไว้ ผลที่ได้นับว่าน่าพึงพอใจยิ่งตรงที่ว่าไม่เพียงแต่สนามขีดเริ่มเปลี่ยนเพิ่มขึ้นจนสังเกตได้เท่านั้น แต่ขนาดของมันยังตรงกับที่ได้คาดการณ์ไว้ตามทฤษฎีอย่างแท้จริง

แม้ว่าการพิสูจน์สำหรับทฤษฎีจะเป็นการสนับสนุนเพียงใดก็ตาม แต่ยังนำไปสู่คำถามที่ทำให้ยุ่งยากอีกคำถามหนึ่ง การทดลองนี้ได้แสดงอย่างไม่คลุมเครือว่า เส้นลวดบางมาก ๆ สามารถรักษาสภาพนำยวดยิ่งแม้ในสนามแรงสูงไว้ได้มากกว่าโลหะชนิดเดียวกันในรูปทรงที่ใหญ่โต เราอาจจะถามว่าแล้วเหตุใดปรากฏการณ์ไมส์เนอร์จึงเกิดขึ้นได้เล่า? ทำไมเมื่อนำโลหะนี้ไปไว้ในสนามแม่เหล็กจึงไม่แตกแยกออกเป็นแนวของบริเวณปกติอย่างชัดเจนกับบริเวณตัวนำยวดยิ่ง

9.6 การทะลุทะลวงของฟลักซ์แม่เหล็กเข้าสู่ลวดตัวนำยวดยิ่งชนิดหนาและบาง ในลวดที่บางมาก ๆ การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไม่เป็นศูนย์อย่างสมบูรณ์ในที่ใด ๆ



โดยแต่ละแนวสามารถรักษาการนำอย่างสมบูรณ์จนถึงที่สนามแม่เหล็กสูงมากได้?

นับว่าโชคดีที่คำตอบของคำถามนี้เป็นที่ทราบกันดีจากอีกสาขาหนึ่งของฟิสิกส์ นั่นคือพฤติกรรมของหยดน้ำ ในเรื่องนั้นหยดน้ำเล็ก ๆ ตั้งแต่สองหยดขึ้นไปเมื่อเข้ามาสัมผัสกันจะรวมกันเสมอกลายเป็นหยดใหญ่ขึ้น กระบวนการที่กลับกันกล่าวคือ การแตกแยกด้วยตนเองของหยดหนึ่งเป็นหยดเล็ก ๆ จำนวนหนึ่งจะไม่เกิดขึ้น แน่นอนว่าเหตุผลสำหรับปรากฏการณ์นี้อยู่ที่แรงตึงผิว ซึ่งนำไปสู่การได้รับพลังงานมาด้วยการลดพื้นที่ผิวทั้งหมด หยดกลมหนึ่งหยดจะแทนผิวซึ่งน้อยที่สุดของปริมาณน้ำขนาดหนึ่ง และการแตกกระจายออกโดยตัวมันเองเป็นหยดเล็ก ๆ ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ เพราะกระบวนการเช่นนั้นจะนำไปสู่ผิวที่มากขึ้น ดังนั้นจึงต้องอาศัยพลังงาน

การนำความคิดเช่นเดียวกันนี้มาใช้กับสภาพนำยวดยิ่ง เราจึงต้องสรุปว่ากามีปรากฏการณ์ไมส์เนอร์แสดงถึงแรงตึงผิวเป็นบวกที่ขอบเขตระหว่างสถานะตัวนำยวดยิ่งกับสถานะปกติในโลหะ ฟลักซ์แม่เหล็กจะถูกผลักออกมาทั้งหมดจากสิ่งตัวอย่าง เพราะว่าต้องอาศัยพลังงานมากเกินไปสำหรับการก่อตัวของพื้นที่ผิวมากมายระหว่างบริเวณสถานะตัวนำยวดยิ่งกับบริเวณปกติ

ใด ๆ ในเวลาเดียวกันความคิดเหล่านี้ได้ให้คำอธิบายประการหนึ่งสำหรับพฤติกรรมประหลาดของโลหะผสมตัวนำยวดยิ่งแก่เรา กล่าวคือ โลหะเหล่านี้เป็นโลหะที่มีพลังงานผิวเป็นลบ เมื่อตระหนักในความจริงนี้แล้วความล้มเหลวที่น่าฉงนของแม่เหล็กสนามแรงสูงที่ออกซ์ฟอร์ดจึงกลายเป็นเรื่องที่ไม่น่าสงสัยอีกต่อไป ทั้งนี้ เป็นเพราะแม่เหล็กนั้นได้ถูกออกแบบขึ้นมาภายใต้สมมติฐานที่ว่า โลหะผสมที่นำมาใช้สร้างนั้นประพฤติเช่นเดียวกันกับโลหะบริสุทธิ์ แต่สมมติฐานนี้ได้ถูกพิสูจน์แล้วว่าไม่ถูกต้อง

งานวิจัยด้านโลหะผสมตัวนำยวดยิ่งได้ดำเนินต่อไปในห้องปฏิบัติการไม่กี่แห่ง จนกระทั่งถูกขัดจังหวะจากกิจประหยุดของสงครามในค.ศ. 1939 จนถึงช่วงต้นทศวรรษระหว่างคริสต-ศตวรรษ 1950-1959 คำถามนี้ที่เกี่ยวกับแรงดึงผิวเป็นลบจึงนำมาขบคิดกันอีกครั้ง ในตอนนั้น พิปปาร์ดในเคมบริดจ์ได้ค้นคว้าธรรมชาติของผิวร่วมระหว่างสถานะตัวนำยวดยิ่งกับสถานะปกติของโลหะเดียวกัน และสรุปว่านอกเหนือจากความลึกของการทะลุทะลวงขนาด 10^{-5} ซม. ท ไฮนส์ลอนดอนได้ศึกษาไว้แล้ว จะต้องพิจารณาปริมาณอีกชนิดหนึ่งซึ่งเขาเรียกว่า "ระยะอาพันธ์" แนวคิดของอาพันธ์สำหรับโมเมนต์ของอิเล็กตรอนในตัวนำยวดยิ่งไม่ได้เป็นเรื่องใหม่ เพราะจากการสังเกตกระแสที่ไหลเรื่อยไปและปรากฏการณ์ของความต้านทานเป็นศูนย์ที่แสดงเป็นนัยแล้วว่า ในตัวนำยวดยิ่งนั้น โมเมนต้มจะยังคงไม่เปลี่ยนแปลงตลอดระยะทางอันยาว ขณะที่ในสถานะปกติระยะที่เคลื่อนที่ได้อย่างอิสระของอิเล็กตรอนหนึ่ง ๆ จะถูกขัดขวางโดยสารเจือปนที่อยู่ถัดไป ซึ่งเผชิญหน้าอยู่และถูกทำให้กระเจิงไป จึงกล่าวได้อย่างคร่าวๆ ว่าระยะอาพันธ์คือระยะซึ่งถ้าต่ำกว่านี้จะเป็นไปไม่ได้ที่จะบ่งชี้ความแตกต่างระหว่างการนำปกติกับสภาพนำยวดยิ่ง แม้แต่สำหรับสารเดียวกันเอง ขนาดของมันจะต้องขึ้นอยู่กับระดับความบริสุทธิ์ ยกตัวอย่างเช่นในตีบุกที่บริสุทธิ์มากๆ อิเล็กตรอนหนึ่งอาจเคลื่อนที่ไปได้ประมาณ 10^{-4} ซม. ก่อนที่จะถูกทำให้กระเจิงไป และในช่วงปริภูมินี้จะไม่มีความแตกต่างสำหรับตัวนำยวดยิ่ง ในทางตรงข้ามถ้าโลหะนี้ไม่บริสุทธิ์หรือแม้แต่เป็นโลหะผสมปรากฏว่าระยะเคลื่อนที่ได้อิสระโดยเฉลี่ยตามปกติพร้อมทั้งระยะอาพันธ์จะสั้นกว่ามาก ดังเช่นในขนาดของ 10^{-6} ซม.หรือน้อยกว่า

คราวนี้แรงตึงผิวที่แนวแบ่งเขตระหว่างสถานะตัวนำยวดยิ่งกับสถานะปกติขึ้นอยู่กับขนาดสัมพัทธ์ของการทะลุทะลวงกับระยะอาพันธ์ ถ้าหากระยะหลังมากกว่าระยะแรกดังในกรณีโลหะบริสุทธิ์ แรงตึงผิวจะเป็นบวกและโลหะนั้นจะกันฟลักซ์แม่เหล็กออกไปจนกระทั่งที่สนามวิกฤติแรงตึงผิวจะเปลี่ยนแปลงอย่างไม่ต่อเนื่องไปสู่สถานะปกติ สำหรับโลหะผสมระยะอาพันธ์จะสั้นกว่าระยะทะลุทะลวง ดังนั้น แรงตึงผิวจะเป็นลบและฟลักซ์สามารถเข้าไปในโลหะที่สนามค่อนข้างต่ำอย่างไรก็ตาม ขณะเปลี่ยนแปลงนี้ความต้านทานปกติไม่ถูกเก็บรักษาไว้แต่สภาพนำยวดยิ่งจะยังคงอยู่ต่อไปจนถึงสนามแรงสูงมากยิ่งขึ้นไปอีก กล่าวอย่างสั้น ๆ ได้ว่า ทฤษฎีในขณะนี้สามารถอธิบายพฤติกรรมประหลาดของโลหะผสม ซึ่งเราสังเกตได้ตั้งแต่เมื่อยี่สิบปีก่อนหน้านี้แล้ว(รูปที่ 9.5)

ในค.ศ.1957 เอบริโคซอฟในมอสโคว์ได้พิมพ์เผยแพร่ทฤษฎีที่สมบูรณ์ของลักษณะสภาพนำยวดยิ่งนี้ ซึ่งปัจจุบันเรียกว่า แบบ 2 โดยแสดงการคาดหมายในรายละเอียดบางประการเกี่ยวกับพฤติกรรมของโลหะผสมตัวนำยวดยิ่งใน "อุดมคติ" เขายื่นเสนอผลงานของเขาต่อที่ประชุมสัมมนาในมอสโคว์ นับเป็นการประชุมครั้งแรกที่นักฟิสิกส์สาขาอุณหภูมิต่ำจำนวนน้อยจากออกซ์ฟอร์ดและเคมบริดจ์เข้าร่วมประชุมอยู่ด้วย เมื่อโอกาสที่น่าตื่นเต้นมาถึงในที่สุดเราได้พบปะกันเป็นการส่วนตัวกับกลุ่มผู้ร่วมดำเนินงานที่มีผลงานซึ่งเรารู้จักเป็นอย่างดีจากการพิมพ์เผยแพร่ของเขาเหล่านี้ โดยเฉพาะที่จะเว้นเสียมิได้ที่จะกล่าวถึงคือ คาปิทซาผู้ซึ่งข้าพเจ้าได้พบครั้งสุดท้ายเกือบจะเสี้ยวหนึ่งของศตวรรษก่อนหน้านี้เมื่อเขาออกจากเคมบริดจ์เพื่อไปเยือนมอสโคว์ เอบริโคซอฟตั้งสมมติฐานว่าการเพิ่มสนามแม่เหล็กรอบโลหะผสมนี้ในครั้งแรกควรจะมีช่วงของการเหนี่ยวนำเป็นศูนย์ ซึ่งที่สนามวิกฤติต่ำพอควร(H_{c1}) จะเปิดทางให้แก่สถานะ "ผสม" ใหม่ที่เส้นแรงควอนตัมเข้าสู่โลหะ การเพิ่มสนามต่อไปอีกควรจะทำให้สภาพนำยวดยิ่งหายไปในที่สุดที่สนามวิกฤติที่สองซึ่งสูงกว่ามาก(H_{c2}) โดยหากเกินสนามนี้ไปโลหะนั้นจะเป็นปกติอย่างสิ้นเชิง (รูปที่ 9.5 และ 9.7)

ช่วงปีที่ผ่านมาไม่นานนี้สามารถพิสูจน์คำทำนายของเอบริโคซอฟเกี่ยวกับ การมีฟลักซ์แม่เหล็กเป็นเส้นวนเชิงควอนตัมอยู่ในแลตทิซอย่างมีระเบียบได้ จากการสังเกตโดยตรง(รูปที่ 9.8) อย่างไรก็ดี เมื่อครั้งที่เราได้ฟังเอบริโคซอฟในปีค.ศ.1957 นั้นยังไม่ซาบซึ้งในความคิด

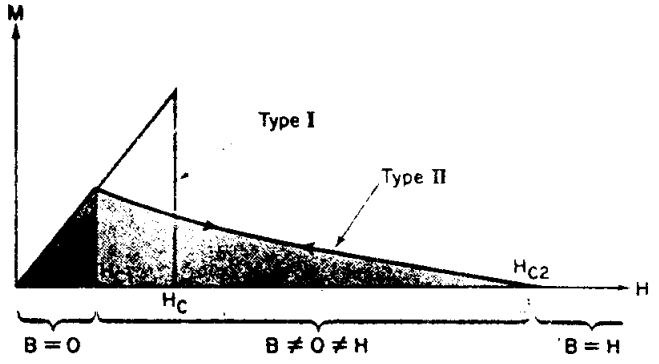
ของเขา ความยุ่งยากอยู่ที่ว่าเท่าที่ผ่านมาไม่มีเส้นการทำให้เป็นแม่เหล็กใดที่สังเกตได้จากโลหะผสมแสดงถึงพฤติกรรมตามที่ทำนายไว้ แทนที่จะเป็นยอดแหลมที่ H_{c1} กลับกลายเป็นมีค่าสูงสุดที่ไม่อาจชี้เฉพาะลงไปได้และไม่มีเส้นใดที่แสดงวี่แววของสภาพผันกลับได้ทางแม่เหล็กแต่อย่างใด จึงต้องใช้เวลาสักระยะหนึ่งกว่าที่จะรู้ว่าการทำนายของเอบริโคซอฟหมายถึงเพียงแต่ผลึกเดี่ยวที่ไม่ถูกรบกวนของโลหะผสมเนื้อเดียวกันอย่างแท้จริง ไม่มีสารตัวอย่างดังกล่าวที่สร้างขึ้นได้ แต่การใช้กลวิธีที่พัฒนาแล้วเมื่อไม่นานมานี้ทำให้ห้องปฏิบัติการวิจัยอิเล็กทรอนิกส์บริการในอังกฤษประสบความสำเร็จในอีกห้าปีต่อมา ในการสร้างผลึกเดี่ยวของแทนทาลัม - ไนโอเบียมซึ่งเมื่อวัดที่ออกซ์ฟอร์ดแล้วปรากฏว่าแสดงรายละเอียดทุกประการตรงตามพฤติกรรมที่คาดไว้สำหรับตัวนำยวดยิ่งแบบ 2 เราจะย้อนกลับมายังเรื่องราวที่เกี่ยวข้องของโลหะผสมตัวนำยวดยิ่งและความสำคัญของมันในด้านเทคโนโลยีตัวนำยวดยิ่งในบทต่อไป

อย่างไรก็ตาม ก่อนที่จะเข้าไปคลุกคลีกับการพิจารณาเชิงเทคโนโลยี เราต้องย้อนกลับไปสู่ปัญหามูลฐานต่าง ๆ ของสภาพนำยวดยิ่ง ปัญหาที่สำคัญที่สุดและที่เราได้หลีกเลี่ยงมาจนถึงตอนนี้คือ ปัญหาของการอธิบาย

นับแต่สภาพนำยวดยิ่งถูกค้นพบครั้งแรกได้มีการเสนอทฤษฎีที่แตกต่างกันหลายทฤษฎีในการอธิบายเรื่องนี้ ดูเหมือนประมาณสองถึงสามทฤษฎีต่อปีอย่างหลีกเลี่ยงไม่พ้นตลอดช่วงที่ยิ่งของครึ่งศตวรรษ ความจริงที่ไม่ต้องพิสูจน์ใหม่ ๆ ถูกสร้างขึ้นเพื่ออธิบายปรากฏการณ์ตั้งแต่ที่หยาบที่สุดไปจนถึงที่หรูหราอย่างยิ่ง ซึ่งทั้งหมดต่างก็มีสิ่งร่วมกันอยู่ประการหนึ่ง นั่นคือ ทั้งหมดนี้ไม่สอดคล้องกับความจริงทั้งหลาย ในที่สุดฟิสิกซ์ บล็อชผู้ซึ่งได้พยายามอย่างมากเพื่อให้เราเข้าใจในเรื่องอิเล็กตรอนในโลหะได้แถลงออกมาเป็นสัจพจน์ของเขาเองซึ่งกล่าวว่า "ทุกทฤษฎีของสภาพนำยวดยิ่งสามารถพิสูจน์ได้ว่าผิด" นับเป็นเวลานานที่สัจพจน์นี้ได้กลายเป็นว่าถูกต้องเพียงทฤษฎีเดียว

อย่างไรก็ตาม กลวิธีหาคำตอบนี้สามารถทำให้ค่อย ๆ แคบเข้ายิ่งขึ้นทีละน้อย โดยการยกเลิกบรรดาความพยายามที่เป็นไปไม่ได้และโดยการศึกษาเพิ่มเติมจากการทดลองต่าง ๆ

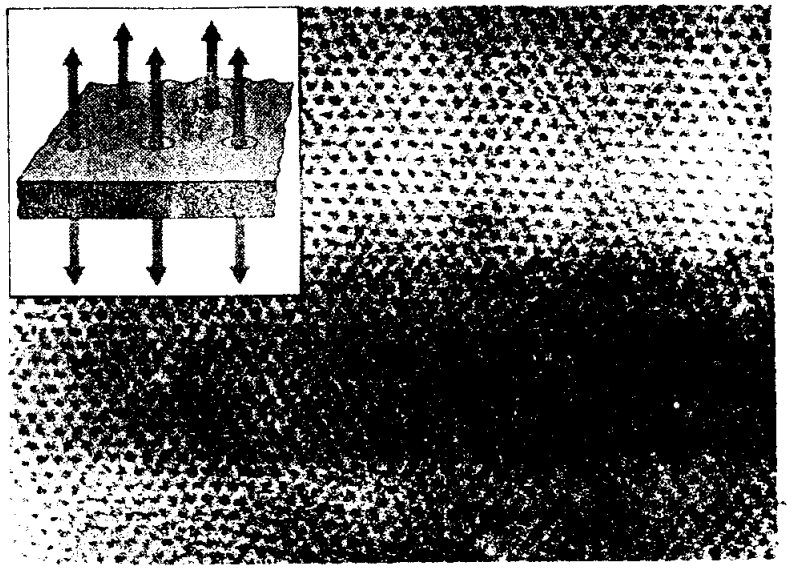
9.7 เส้นการทำให้เป็นแม่เหล็กของตัวนำยวดยิ่งแบบ 2 ที่บริสุทธิ์ แสดงถึงสถานะ "ผสม" ระหว่างบริเวณตัวนำยวดยิ่งอย่างเต็มที่กับบริเวณปกติอย่างเต็มที่



พลศาสตร์ไฟฟ้าของลอนดอนและการประยุกต์ของอุณหพลศาสตร์ได้ช่วยให้เรื่องราวทั้งหลายกระจ่างขึ้นมาก ตัวอย่างเช่น จากการทดลองซึ่งกระทำที่ออกซ์ฟอร์ดในค.ศ. 1938 สามารถสรุปได้ว่าเอนโทรปีของกระแสที่ไหลเรื่อยไปเป็นศูนย์ การค้นพบนี้บ่งชี้ได้ทันทีว่ามีช่องว่างขนาดเล็กในสถานะพลังงานที่มีอยู่บนผิวเฟร์มีตามที่กล่าวแล้วในบทที่ 7 หมายความว่า ขณะที่อุณหภูมิสูงขึ้นจากศูนย์สัมบูรณ์ ผิวนี้ไม่เพียงแต่เลื่อนลางไปเช่นเดียวกับในโลหะปกติเท่านั้น แต่ยังคงราบเรียบแม้แต่ที่อุณหภูมิระดับต่าง ๆ และอิเล็กตรอนต้องได้รับพลังงานปริมาณที่แน่นอนขนาดหนึ่ง(ประมาณ 10^{-4} อิเล็กตรอนโวลท์) จึงจะกระโดดข้ามช่องว่างนี้ให้ได้เสียก่อนที่จะสามารถเข้าไปสู่สถานะผิดปกติที่เลื่อนลางซึ่งอยู่เหนือขึ้นไป(รูปที่ 9.9)

แนวคิดเรื่องช่องว่างของพลังงานนี้นับว่าเป็นลักษณะสำคัญที่สุดของโลหะตัวนำยวดยิ่งในการอธิบายว่า เหตุใดสถานะพลังงานที่ต่ำกว่าช่องว่างนี้จึงไม่สามารถดายพลังงานและต้องจัดตัวเองอยู่ในกระแสที่ปราศจากความต้านทาน นอกจากนั้น ความแคบของช่องว่างนี้ยังแสดงได้ด้วยว่าทำไมสภาพนำยวดยิ่งจึงถูกจำกัดเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำสุด นับแต่นั้นมาการถือว่ามีช่องว่างนี้อยู่และการวัดได้อย่างแม่นยำได้จัดวางรากฐานไว้ในการวัดต่าง ๆ มากมาย โดยวิธีนี้เส้นทางของนักทฤษฎีทั้งหลายถูกกำหนดวางลงไปทีละขั้นตอนและสิ่งที่เหลือให้ต้องกระทำคือ การหากระบวนการ

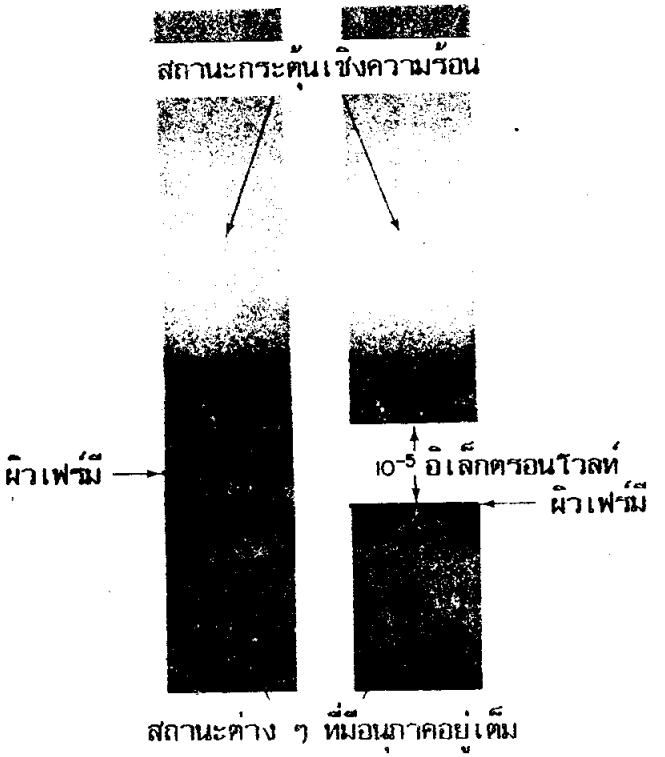
9.8 แถวลำดับอย่างสม่ำเสมอของเส้นหมุนวนเชิงแม่เหล็กที่เป็นควอนตัมในสถานะผสมสามารถทำให้เห็นได้โดยการใช้ผงเหล็กโรยบนผิวโลหะ



เชิงอิเล็กตรอนภายในโลหะนั้น ซึ่งอาจจะสอดคล้องกับทุก ๆ ระยะของสภาวะต่าง ๆ เหล่านี้ตลอดจนปรากฏการณ์อื่นที่ทราบแล้วของสภาพนำยวดยิ่ง นับเป็นภาระที่หนักหนาสาหัสซึ่งต้องอาศัยความรู้อย่างเลิศลอยเกี่ยวกับปรากฏการณ์เชิงอิเล็กตรอนในโลหะต่าง ๆ ความเชี่ยวชาญอย่างยิ่งในด้านกลวิธีทางคณิตศาสตร์และเหนือสิ่งอื่นใดจะต้องมีจินตนาการที่ปราดเปรื่องแต่อยู่ภายในขอบเขต

ขณะนี้สิ่งที่ดูเหมือนว่าจะเป็นขั้นตอนวิกฤติได้มีผู้ดำเนินการไปอย่างอิสระในเวลาเดียวกันเมื่อปี ค.ศ. 1950 โดยฟรอห์ลิคในลิเวอร์พูลและบาร์ดีนในอิลลินอยส์ ความคิดเบื้องต้นทางด้านทฤษฎีต่าง ๆ ของเขาทั้งสองคือว่า กลไกที่นำไปสู่สภาพนำยวดยิ่งเป็นผลที่เกิดจากการกระทำซึ่งกันและกันของอิเล็กตรอน แต่ผ่านการทำหน้าที่เป็นสื่อกลางของการสั่นในแลตทิซ จึงกล่าวอย่าง

9.9 ช่องว่างของพลังงานที่ผิวเฟร์มี ของตัวนำยวดยิ่ง



กว้าง ๆ ได้ว่าในที่นี้เราไม่สามารถพยายามที่จะให้ความคิดได้มากกว่าความคิดอย่างคร่าว ๆ นั่นคือ สภาพนำยวดยิ่งมาจากอาการซึ่งการสั่นเชิงอะตอมได้รับอิทธิพลมาจากการที่มีอิเล็กตรอนที่เป็นตัวนำอยู่ด้วย เพื่อให้ง่ายขึ้นขอให้เราสมมติว่าเราพิจารณาโลหะที่แต่ละอะตอมจะให้อิเล็กตรอนอิสระหนึ่งตัว หมายความว่าผลึกนี้ประกอบด้วยแลตทิซของไอออนต่าง ๆ ที่มีประจุบวก โดยที่แต่ละอะตอมได้สูญเสียอิเล็กตรอนไปหนึ่งตัว และประกอบด้วย "ก๊าซ" ซึ่งมีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระเท่ากันกับจำนวนไอออน ซึ่งเคลื่อนที่อย่างสะเปะสะปะผ่านแลตทิซของผลึกนี้ เมื่อพิจารณาอิเล็กตรอนที่มีประจุลบหนึ่งตัวในแลตทิซนั้น ถูกล้อมรอบด้วยไอออนประจุบวกทั้งหลาย กลุ่มหลังคือ

ไอออนประจุบวกเหล่านี้จะถูกดึงดูดเข้าไปหาอิเล็กตรอน จึงก่อให้เกิดการยุบตัวขึ้นของโครงสร้าง และการยุบตัวภายในไปเล็กน้อยนี้ของแลตทิซผลึกจะมีผลสองประการ คือ ประการแรกจะทำให้เกิดการดึงดูดต่ออิเล็กตรอนอื่น ๆ จนสามารถนำไปสู่สภาพนำยวดยิ่ง และประการที่สอง อิเล็กตรอนจะรู้สึกถึงการสั่นของไอออนบวกทั้งหลาย จากการพิจารณาผลทั้งสองนี้เข้าด้วยกันฟรอห์ลิคได้ทำนายว่า การเริ่มมีสภาพนำยวดยิ่งน่าจะเกิดจากมวลของไอออนทั้งหลายที่สั่นอยู่

นับว่าโชคดีที่กระบวนการด้านเทคโนโลยีนิวเคลียร์ช่วยให้การแยกไอโซโทปต่างๆ เป็นไปได้ นั่นคือไอโซโทปของอะตอมต่าง ๆ ที่เป็นธาตุชนิดเดียวกันแต่มีมวลต่างกันสำหรับโลหะตัวนำยวดยิ่งหลายชนิด อันที่จริงฟรอห์ลิคไม่ทราบถึงความคืบหน้าในการทดลองที่ห้องปฏิบัติการในอเมริกาสองแห่ง เมื่อได้รับผลเหล่านี้มาปรากฏว่ามีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในอุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงไปตามมวลไอออนดังที่ได้ทำนายไว้แล้วโดยตัวเขาเอง นับว่าผลการทดลองนี้ให้การสนับสนุนอย่างยิ่ง เนื่องจากเป็นครั้งแรกที่การทำนายเชิงทฤษฎีด้านปรากฏการณ์ตัวนำยวดยิ่งประสบผลสำเร็จ

อย่างไรก็ดี สำหรับการอธิบายทางทฤษฎีเกี่ยวกับตัวนำยวดยิ่งนับเป็นตอนจบของการเริ่มต้นมากกว่าเป็นการเริ่มต้นของจุดจบ การทดลองนี้ได้พิสูจน์ว่ารูปแบบของอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนต่าง ๆ กับการสั่นสะเทือนในแลตทิซมีผลตามที่ชี้แนะไว้โดยฟรอห์ลิค แต่จากตรงนั้นมานับว่าหนทางยังอีกยาวกว่าจะถึงจุดที่สามารถแสดงกลไกโดยเฉพาะของรูปแบบนี้ที่น่าจะทำให้เกิดสภาพนำยวดยิ่ง น่าประหลาดที่ว่าหนึ่งในบรรดาความยุ่งยากที่เกิดจากทางทฤษฎีนี้คือ มันค่อนข้างจะประสบความสำเร็จเกินไปและไม่ชัดเจนว่าทำไมโลหะทุกชนิดจึงควรพร้อมที่จะกลายเป็นตัวนำยวดยิ่งได้ กฎเกณฑ์ที่สำคัญบางประการยังคงขาดหายไปและในค.ศ. 1956 ลีออน คูเปอร์เป็นผู้ที่ได้ค้นพบ แต่ก่อนหน้านั้นเกือบยี่สิบปี ฟริทซ์ ลอนดอนได้นำหลักสถิติไบส-ไอน์สไตน์ขึ้นมาอธิบายสภาพนำยวดยิ่งในฮีเลียมเหลวซึ่งจะอธิบายในบทต่อไป ดังที่เราได้เห็นแล้วในบทที่ 7 ว่าอิเล็กตรอนในโลหะจะเป็นไปตามหลักสถิติเฟร์มี-ดิแรก ซึ่งสืบเนื่องจากสปินของมันจึงทำให้แต่ละอิเล็กตรอนสามารถครอบครองเพียงหนึ่งเซลล์เฟสเท่านั้น ในทางตรงกันข้าม ในหลักสถิติ

โบส-ไอน์สไตน์ที่สปินเป็นคู่ ดังตัวอย่างเช่นในอะตอมฮีเลียมนั้นอะตอมเป็นจำนวนมากสามารถครอบครองอยู่ในหนึ่งเซลล์ได้ บางครั้งมีผู้แนะว่าการจับคู่กันเช่นนี้อาจจะเกิดขึ้นในกรณีของอิเล็กตรอนด้วยและด้วยสาเหตุบางประการจะทำให้เกิดสภาพนำยวดยิ่งคราวนี้ คูเปอร์ ได้แสดงอย่างแข็งขันว่ากลไกการดึงดูดกันของฟรอห์ลิค-บาร์ดีนจะชอบรูปแบบของการควบแน่นโดยการจับคู่ของอิเล็กตรอนที่ผิวเฟร์มี ซึ่งต่างมีโมเมนตัมและสปินที่เท่ากันแต่ตรงกันข้าม และด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดช่องว่างของพลังงาน นอกจากนี้การดึงดูดจะเกิดขึ้นต่อเมื่ออิเล็กตรอนสองตัวไม่ได้อยู่ใกล้กันจนเกินไป ระยะที่ทำให้เกิดผลนี้มากที่สุดคือระยะอาพันธ์ ในปีต่อมาบาร์ดีน คูเปอร์ และชรีฟเฟอร์ ขยายแนวความคิดนี้ไปสู่ทฤษฎีของสภาพนำยวดยิ่งอย่างสมบูรณ์ จนทำให้ทั้งสามได้รับรางวัลโนเบล

การพิสูจน์ว่าคู่คูเปอร์เป็นพาหะของกระแสยวดยิ่งปรากฏว่าได้มาอย่างที่ไม่คาดหวัง การไหลเรื่อยไปของกระแสเช่นนั้นบ่งชี้ในทันทีว่า กระแสนี้จะต้องเป็นควอนตัม เนื่องจากมิฉะนั้นกระแสจะมีความแรงลดลงและพลังงานของมันจะคายออกมาในรูปของการแผ่รังสี ความจริงที่ว่าเรื่องนี้ไม่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้จากการสมมติเท่านั้นว่า สเปกตรัมของสถานะพลังงานที่อนุญาตให้มีได้ของกระแสที่ไหลเรื่อยไปนั้นไม่ต่อเนื่อง แต่ประกอบด้วยขั้นต่าง ๆ โดยที่แต่ละขั้นมีขนาดเท่ากับ "ฟลักซอยด์" มูลฐาน ตามที่ตั้งสมมติฐานไว้โดยเอฟ. ลอนดอนค่าของขั้นหนึ่ง ๆ น้อยอย่างยิ่งขนาด h/e (โดยที่ e เป็นประจุอิเล็กตรอน) ซึ่งหมายความว่ามีเพียงประมาณ 10^{-15} ของหน่วยฟลักซ์แม่เหล็กเท่านั้น ความยุ่งยากทางการทดลองของการตรวจหาขั้นต่าง ๆ ที่เล็กมากเช่นนี้ในสนามแม่เหล็กเป็นเรื่องที่น่าสพึงกลัว แต่ก็แก้ได้ในค.ศ.1961 โดยกลุ่มผู้ร่วมงานสองฝ่ายที่ต่างฝ่ายต่างดำเนินการกันไปอย่างอิสระในแคลิฟอร์เนียและเยอรมัน ซึ่งผลการทดลองของกลุ่มเหล่านี้พิมพ์เผยแพร่ใน *Physics Letters* ฉบับเดียวกัน สิ่งที่ดูเหมือนจะระบุอยู่ในทั้งสองการค้นคว้านี้คือความจริงที่ว่า ขั้นตอนทั้งหลายเป็นเพียงครึ่งหนึ่งของขนาดที่คาดหมายไว้นั้นตอนแรกถูกระบุว่าเป็นความไม่แม่นยำบางประการของการสังเกต จนกระทั่งเป็นที่ตระหนักว่าค่านี้ไม่ใช่ h/e แต่เป็น h/2e พาหะของกระแสที่ไหลเรื่อยไปจึงไม่ใช่อิเล็กตรอนเดี่ยว แต่เป็นอิเล็กตรอนคู่

ปรากฏการณ์ที่เป็นแก่นกลางของสภาพนำยวดยิ่งคือ การสูญเสียความต้านทานอย่างสิ้นเชิงซึ่งขณะนี้จะหาคำอธิบายได้จากพฤติกรรมในคู่ของคูเปอร์ สภาพต้านทานปกติมีสาเหตุมาจากการกระเจิงของอิเล็กตรอนเดี่ยวโดยที่โมเมนตัมจะเปลี่ยนไปในการชนกัน คู่ของคูเปอร์ก็เช่นเดียวกันจะประสบผลกระทบจากการกระเจิง แต่เป็นการกระเจิงที่เกิดขึ้นกับแต่ละตัวของคู่ต่าง ๆ ได้รับการชดเชยจากการกระเจิงที่เท่ากันแต่ตรงกันข้ามของอิเล็กตรอนอีกตัวหนึ่ง หมายความว่าโมเมนตัมทั้งหมดของคู่นั้นคงตัว จึงไม่ได้รับผลกระทบจากการสูญเสียโมเมนตัมและกระแสของอิเล็กตรอนคู่ไหลผ่านโลหะ จึงสามารถเป็นไปได้โดยปราศจากการสูญเสียพลังงาน อีกนัยหนึ่งก็คือ ปลอดจากความต้านทานอย่างสิ้นเชิง ความต้านทานจะเกิดขึ้นอีกครั้งหนึ่งเมื่อขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นผ่านจุดเปลี่ยนแปลงนั้น การไหลของความร้อนจึงทำให้คู่ทั้งหลายแยกออกจากกัน

เมื่อปรากฏอย่างชัดเจนขึ้นทีละน้อยว่ากลไกของฟรอห์ลิค-บาร์ดีนกำลังจะให้กุญแจไปสู่สภาพนำยวดยิ่ง บรรดานักฟิสิกส์ทั้งหลายต่างผิดหวังกันทั่วไปที่ปรากฏการณ์ซึ่งเด่นชัดเช่นนี้ควรจะเผยอะไรออกมาที่น่าตื่นเต้นกว่าอันตรกิริยาเล็ก ๆ น้อย ๆ ระหว่างอิเล็กตรอนต่าง ๆ กับการสั่นของแลตทิซ ในที่นี้จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเรากำลังเป็นสักขีพยานให้กับการใช้กฎควอนตัมเป็นครั้งแรกในสเกลขนาดมหภาค และคนทั่วไปหวังที่จะได้เห็นการเปิดเผยหลักการเบื้องต้นของธรรมชาติชนิดใหม่บางประการ อย่างไรก็ตาม หลักการใหม่เช่นนี้เกี่ยวข้องกันอยู่อย่างแท้จริงแต่ก็ประหลาดมากเสียจนต้องใช้เวลานานกว่าจะเป็นที่ยอมรับกัน แต่การทำความเข้าใจยิ่งกระทำได้ยากกว่า ด้วยเหตุที่จะต้องนำเสนอทฤษฎีในรูปแบบของคณิตศาสตร์

หลักการเบื้องต้นใหม่นี้คือการรวมกันเป็นคู่และเรายังไม่เข้าใจนัยสำคัญในหลักการนี้อย่างสมบูรณ์ รวมทั้งฐานะในกลไกตามปรากฏการณ์ธรรมชาติแต่อย่างใด ดูเหมือนว่าในลักษณะเบื้องต้นจะเป็นการคงไว้ซึ่งโมเมนตัมของคู่ทั้งหลาย ที่ยอมให้พาโมเมนตัมนี้ไปได้ตลอดระยะทางอันยาว โดยปราศจากการเสื่อมสลายไปให้แก่สิ่งแวดล้อม ซึ่งตามแบบแผนเดิมเกิดจากการกระเจิง แนวความคิดของการเชื่อมโยงการเคลื่อนที่โดยปราศจากความต้านทานด้วยคู่ของสปินที่ตรงกันข้ามเกิดขึ้นเป็นครั้งแรกในค.ศ. 1938 เมื่อฟริทส์ ลอนดอนมุ่งความสนใจไปยังการควบแน่นที่ไม่จำเป็นต้องเป็นไปตามตำแหน่งแต่อยู่ในมิติโมเมนตัม ลอนดอนได้พยายามใช้รูป

แบบนี้กับฮีเลียมเหลวและเราจะละการกล่าวถึงสปินคู่เหล่านี้ไว้ในบทสุดท้ายซึ่งจะพิจารณาถึงฮีเลียมเหลวต่อไป