วารสารราชบัณฑิตยสถาน
ปีที่ ๓๗ ฉบับที่ ๑ ม.ค.-มี.ค. ๒๕๕๕

หนึ่งศตวรรษแห่งการพบสภาพนำยวดยิ่ง*

สุทัศน์ ยกส้าน
ภาคีสมาชิก สำนักวิทยาศาสตร์
ราชบัณฑิตยสถาน

บทคัดย่อ

เมื่อ ๑๐๐ ปีก่อนนี้ นักฟิสิกส์ชาวเนเธอร์แลนด์ ชื่อ ไฮเก คาเมอลินก์ ออนเนส (Heike Kamerlingh Onnes) ได้พบว่า โลหะบางชนิดไม่มีความต้านทานไฟฟ้าเมื่ออุณหภูมิลดต่ำใกล้ ๒-๓ เคลวิน ปรากฏการณ์นี้คือ สภาพนำยวดยิ่ง นักฟิสิกส์ต้องใช้เวลานานถึง ๔๖ ปีจึงสามารถอธิบายได้ว่าปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นได้อย่างไร และมีประโยชน์อย่างไร เมื่อถึง ค.ศ. ๑๙๘๖ ซึ่งได้มีผู้ค้นพบตัวนำยวดยิ่งชนิดใหม่ นักฟิสิกส์จึงตระหนักว่า เรายังเข้าใจปรากฏการณ์นี้ไม่ดีพอ

แม้จะยังไม่มีทฤษฎีอธิบายสมบัติของตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูง แต่ตัวนำยวดยิ่งเหล่านี้ก็ถูกนำมาใช้ประโยชน์หลายด้าน เช่น ตรวจดูภายในร่างกาย และค้นหาอนุภาคที่ให้กำเนิดมวล

คำสำคัญ : **สภาพนำยวดยิ่ง, ตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิต่ำ, ตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูง**

เมื่อวันที่ ๘ เมษายน ค.ศ. ๑๙๑๑ นักฟิสิกส์ชาวเนเธอร์แลนด์คนหนึ่ง คือ Heike Kamerlingh Onnes ได้พบปรากฏการณ์สภาพนำยวดยิ่ง ซึ่งเป็นภาวะที่ตัวนำไม่มีความต้านทานไฟฟ้าเลยแม้แต่น้อย ในวันนั้น Onnes ได้จดบันทึกในสมุดรายงานการทดลองที่มหาวิทยาลัย Leiden ว่า ปรอทบริสุทธิ์มีค่าความต้านทานไฟฟ้าเป็นศูนย์ที่อุณหภูมิ -๒๗๐ องศาเซลเซียส และเหตุการณ์ปรอทหมดความต้านทานไฟฟ้านี้เกิดขึ้นอย่างฉับพลันก่อนที่อุณหภูมิของปรอทจะลดถึงศูนย์องศาสัมบูรณ์ ซึ่งเป็นเรื่องที่ไม่มีนักฟิสิกส์คนใดคาดคิดมาก่อน และไม่มีใคร ณ เวลานั้นสามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้

ตามคำอธิบายเดิม ๆ เช่น ทฤษฎีของ Lord Kelvin ได้ให้เหตุผลว่า ตามปรกติกระแสไฟฟ้าเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน และถ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้อย่างสะดวก ความต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าน้อย ในทางตรงกันข้าม ถ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่อย่างยากลำบาก ความต้านทานไฟฟ้าจะมีค่ามาก ทฤษฎีของ Kelvin จึงพยากรณ์ต่ออีกว่า ที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ อิเล็กตรอนทุกตัวจะหยุดนิ่ง ดังนั้น ความต้านทานไฟฟ้าของสารทุกอย่าง ณ อุณหภูมินี้จะมีค่ามากถึงอนันต์

---

* บรรยายในการประชุมสำนักวิทยาศาสตร์ ราชบัณฑิตยสถาน เมื่อวันพุธที่ ๗ ธันวาคม พ.ศ. ๒๕๕๔

แต่ Paul Drude นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน กลับอธิบายว่า สิ่งที่ทำให้ความต้านทานไฟฟ้ามีค่ามากหรือน้อย คือ ไอออน (ion) ที่มีอยู่ในตัวนำ ซึ่งจะสั่นไปมาตลอดเวลา และขัดขวางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ที่อุณหภูมิต่ำไอออนจะสั่นไปมาน้อย อิเล็กตรอนจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปได้คล่อง ความต้านทานไฟฟ้าจึงมีค่าน้อย แต่ที่อุณหภูมิสูง ไอออนจะสั่นมาก ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านไม่สะดวก ความต้านทานไฟฟ้าจึงมีค่ามาก ด้วยเหตุนี้ทฤษฎีของ Drude จึงพยากรณ์ว่า ที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ เมื่อไอออนหยุดนิ่ง อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ได้สะดวกที่สุด ความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำทุกชนิดจะมีค่าเป็นศูนย์

เมื่อทฤษฎีของ Kelvin และ Drude ให้คำทำนายที่แตกต่างกันเช่นนี้ บุคคลที่จะตัดสินความถูกต้อง หรือความผิดพลาดของทฤษฎีได้ คือ H. K. Onnes เพราะ Onnes เป็นนักฟิสิกส์คนเดียวในโลกที่สามารถทำให้สสารมีอุณหภูมิใกล้ศูนย์องศาสัมบูรณ์ได้

ดังนั้น ใน ค.ศ. ๑๙๐๖ Onnes จึงทดลองนำทองคำมาทำให้เย็นจัดที่อุณหภูมิ ๑๔ เคลวิน และพบว่า แม้ความต้านทานไฟฟ้าของทองคำจะลดลง ๆ เมื่ออุณหภูมิลดต่ำก็ตาม แต่ความต้านทานไฟฟ้าก็มีแนวโน้มว่าจะมีค่าไม่เป็นศูนย์ เมื่ออุณหภูมิลดถึงศูนย์องศาสัมบูรณ์

ในเวลาต่อมา Onnes ได้ตระหนักว่า การที่ความต้านทานไฟฟ้าของทองคำไม่มีแนวโน้มจะเป็นศูนย์นั้น เป็นเพราะทองคำมีสารเจือ ทำให้ไม่บริสุทธิ์ ดังนั้น เขาจำเป็นต้องใช้โลหะบริสุทธิ์ในการทดลองเรื่องนี้ และได้พบว่า ปรอทเป็นโลหะที่ดีที่สุด เพราะสามารถทำให้บริสุทธิ์ได้ง่ายที่สุด

แต่การทดลองที่ใช้ปรอทบริสุทธิ์กลับให้ผลการทดลองชนิดที่ไม่มีใครคาดถึง กล่าวคือ Onnes ได้พบว่า ความต้านทานไฟฟ้าได้ตกสู่ศูนย์อย่างฉับพลันที่อุณหภูมิ ๔.๒ เคลวิน แทนที่จะลดลงอย่างช้า ๆ ข้อมูลการทดลองของ Onnes จึงให้ผลที่ขัดแย้งกับทฤษฎีทั้งของ Kelvinและ Drude

ในเวลาต่อมา นักฟิสิกส์ได้พยายามอธิบายธรรมชาติของปรากฏการณ์นี้ แม้แต่ Werner Heisenberg (รางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ ค.ศ. ๑๙๓๒) Albert Einstein (รางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ ค.ศ. ๑๙๒๑) และ Richard Feynman (รางวัลโนเบล ค.ศ. ๑๙๖๕) แต่ก็อธิบายไม่ได้ ทั้ง ๆ ที่สามารถใช้กลศาสตร์ควอนตัมอธิบายสมบัติเชิงกายภาพของของแข็งต่าง ๆ ได้ทั้งหมด แต่กลศาสตร์ควอนตัมกลับไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมของตัวนำยวดยิ่งได้เลย

นอกจากจะไม่มีความต้านทานไฟฟ้าแล้ว ตัวนำยวดยิ่งยังมีสมบัติเด่นอีกหนึ่งประการ คือ ไม่ยอมให้สนามแม่เหล็กทะลุทะลวงเข้าไปภายในได้

ใน ค.ศ. ๑๙๓๓ Walther Meissner และ Robert Ochsenfeld แห่งมหาวิทยาลัย Berlin ประเทศเยอรมนี ได้ศึกษาพฤติกรรมของสนามแม่เหล็กในบริเวณใกล้ตัวนำยวดยิ่ง และพบว่า ในกรณีตัวนำธรรมดา

สนามแม่เหล็กจะสามารถไชชอนเข้าไปในตัวนำได้ แต่เมื่อตัวนำธรรมดากลายเป็นตัวนำยวดยิ่ง สนามแม่เหล็กจะถูกผลักออกไป เสมือนไม่ยอมให้สนามแม่เหล็กทะลุเข้าไปได้เลย และสนามแม่เหล็กจะเหนี่ยวนำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลที่ผิวของตัวนำยวดยิ่ง กระแสนี้จะสร้างสนามแม่เหล็กไปต่อต้านสนามแม่เหล็กเดิม และถ้าแรงผลักที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับแรงโน้มถ่วงที่เกิดจากน้ำหนักของตัวนำยวดยิ่ง ตัวนำยวดยิ่งก็จะลอยอยู่เหนือแท่งแม่เหล็กอย่างสมดุล และนี่ก็คือหลักการที่นักเทคโนโลยีนำไปใช้ในการสร้างรถไฟเหาะ

แม้จะมีการพบปรากฏการณ์สภาพนำยวดยิ่งตั้งแต่ ค.ศ. ๑๙๑๑ แต่ก็ไม่มีทฤษฎีฟิสิกส์ที่สามารถอธิบายเหตุผลและที่มาของปรากฏการณ์นี้ได้ ทั้งนี้เพราะไม่มีการทดลองใด ๆ ที่ชี้นำ จนกระทั่ง ค.ศ. ๑๙๕๐ เมื่อ B. Serin วัดอุณหภูมิวิกฤติของธาตุที่มีไอโซโทปต่าง ๆ กัน (อุณหภูมิวิกฤต คือ อุณหภูมิที่ตัวนำธรรมดากลายเป็นตัวนำยวดยิ่ง และตัวนำยวดยิ่งกลายเป็นตัวนำธรรมดา) และได้พบว่าอุณหภูมิวิกฤตขึ้นกับไอโซโทป นั่นคือ ธาตุที่มีไอโซโทปต่างกันจะมีอุณหภูมิวิกฤตแตกต่างกัน การทดลองนี้จึงแสดงให้เห็นว่ามวลของไอออนเกี่ยวข้องโดยตรงกับอุณหภูมิวิกฤต เพราะความถี่ในการสั่นของไอออนแปรผกผันกับรากที่สองของมวล นั่นแสดงว่า ความถี่ในการสั่นของไอออนคือสาเหตุสำคัญในการกำหนดค่าอุณหภูมิวิกฤตของธาตุ

ในมุมมองของกลศาสตร์ควอนตัมนั้น ไอออนที่อยู่เรียงรายเป็นแลตทิซ (lattice) ในตัวนำจะสั่นไปมาได้ ทำให้เกิดคลื่นควอนตัมที่มีโมเมนตัมและพลังงานที่มีสมบัติเสมือนเป็นอนุภาคที่เรียกว่า โฟนอน (phonon) อันตรกิริยา (interaction) ระหว่างอิเล็กตรอนกับโฟนอนสามารถใช้อธิบายสมบัติการนำไฟฟ้า การนำความร้อน การดูดกลืนแสงและเสียง ฯลฯ ของของแข็งทุกชนิดที่มิได้เป็นตัวนำยวดยิ่งได้เป็นอย่างดี

ใน ค.ศ. ๑๙๕๕ Leon Cooper แห่งมหาวิทยาลัย Brown ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้ศึกษาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนทั้งในตัวนำธรรมดาและตัวนำยวดยิ่ง เขาพบว่า ในตัวนำธรรมดาและในสุญญากาศ อิเล็กตรอน ๒ ตัว ซึ่งมีประจุลบเหมือนกันจะผลักกัน แต่ในตัวนำยวดยิ่งที่มีไอออนประจุบวกอยู่ด้วยเป็นจำนวนมาก อิเล็กตรอน ๒ ตัวสามารถดึงดูดกันได้ โดยใช้ไอออนบวกเป็นสื่อ ดังนี้ คือ เมื่ออิเล็กตรอนตัวหนึ่งเคลื่อนที่เข้าไปอยู่ท่ามกลางกลุ่มไอออนที่มีประจุบวก แรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างประจุบวกกับประจุลบจะทำให้เหล่าไอออนเคลื่อนที่เข้าหาอิเล็กตรอนตัวนั้น แต่อิเล็กตรอนดังกล่าวจะอยู่ในบริเวณนั้นไม่นานจะเคลื่อนที่ต่อไปอย่างรวดเร็ว ทำให้เหล่าไอออนซึ่งมีมวลมากกว่ายังไม่ทันเคลื่อนที่กลับที่เดิม บริเวณนั้นจึงมีความหนาแน่นของประจุบวกค่อนข้างสูง จนอิเล็กตรอนอีกตัวหนึ่งที่อยู่ในบริเวณใกล้ ๆ ถูกแรงทางไฟฟ้าดึงดูดเข้าหากลุ่มไอออนบวก เหตุการณ์นี้จึงทำให้ดูเสมือนว่า อิเล็กตรอนทั้ง ๒ ตัวดึงดูดกัน โดยอาศัยการเคลื่อนที่ของไอออน (โฟนอน) เป็นตัวเชื่อม หรือกล่าวในบริบทควอนตัมได้ว่า อิเล็กตรอนตัวแรกทำให้

เกิดอนุภาคโฟนอน แล้วอิเล็กตรอนตัวที่ ๒ รับโฟนอนตัวนั้นไป การส่ง-รับโฟนอนในลักษณะนี้จึงทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างอิเล็กตรอนทั้งสองที่อยู่เป็นคู่ซึ่งมีชื่อเรียกว่า คู่คูเปอร์ (Cooper pair)

แนวคิดนี้ได้รับการพัฒนาต่อโดย John Bardeen, Leon Cooper และ Robert Schrieffer แห่งมหาวิทยาลัย Illinois ที่ Urbana Campaign ใน ค.ศ. ๑๙๕๗ ทฤษฎีนี้จึงได้รับการขนานนามสั้น ๆ ว่า ทฤษฎี BCS (จากพยัญชนะตัวแรกของนามสกุลของนักฟิสิกส์ทั้งสาม) ทำให้ทั้งสามได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ประจำ ค.ศ. ๑๙๗๒ และทำให้ Bardeen ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์เป็นครั้งที่ ๒ (ครั้งแรกได้ใน ค.ศ. ๑๙๕๖ จากการประดิษฐ์ทรานซิสเตอร์)

ดังนั้น ทฤษฎี BCS จึงแถลงว่า อุณหภูมิที่เกิดคู่คูเปอร์ เป็นอุณหภูมิที่ตัวนำธรรมดากลายเป็นตัวนำยวดยิ่ง และปรากฏการณ์สภาพนำยวดยิ่งจะสลายเมื่อคู่คูเปอร์ทุกคู่แตกแยกเป็นอิเล็กตรอนธรรมดา

ในขณะที่คู่คูเปอร์เคลื่อนที่ไปในตัวนำยวดยิ่ง และถูกอิทธิพลการสั่นไปมาของไอออนรบกวน คู่คูเปอร์ก็ยังครองสภาพเป็นคู่ได้เหมือนเดิม คือ มีโมเมนตัมลัพธ์เท่าเดิม แม้โมเมนตัมของอิเล็กตรอนตัวหนึ่งในคู่นั้นจะเพิ่ม แต่โมเมนตัมของอิเล็กตรอนอีกตัวหนึ่งในคู่จะลด ดังนั้น โมเมนตัมลัพธ์จึงไม่เปลี่ยนแปลง คู่คูเปอร์จึงเคลื่อนที่ต่อไปในทิศทางเดิมและกระแสก็จะไหลเท่าเดิม เสมือนไม่มีไอออนใด ๆ มาขวางทางเดินของคู่คูเปอร์เลย

ทฤษฎี BCS สามารถอธิบายสมบัติต่าง ๆ ของตัวนำยวดยิ่งชนิดต่าง ๆ ได้ดีมาก และนักเทคโนโลยีก็ประสบความสำเร็จในการนำตัวนำยวดยิ่งไปสร้างแม่เหล็กที่สามารถผลิตสนามแม่เหล็กความเข้มสูงได้ เพื่อใช้ในทางการแพทย์ การคมนาคม ฯลฯ จนนักฟิสิกส์ทุกคนคิดว่า ธรรมชาติของสภาพนำยวดยิ่งเป็นที่เข้าใจดีแล้ว

จนกระทั่งเดือนมกราคม ค.ศ. 1986 เมื่อ Alex Müller และ George Bednorz แห่งห้องปฏิบัติการ IBM ที่เมือง Zurich ในสวิตเซอร์แลนด์ ได้พบตัวนำยวดยิ่งชนิดใหม่ซึ่งประกอบด้วยแลนทานัม (lanthanum) ทองแดง และออกซิเจน (copper และ oxygen) ที่ถูกเจือด้วยแบเรียม (barium) และมีอุณหภูมิวิกฤตเท่ากับ ๓๐ เคลวิน ซึ่งนับว่าค่อนข้างสูง และทฤษฎี BCS ไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมของตัวนำยวดยิ่งชนิดใหม่นี้ได้

การค้นพบของ Müller และ Bednorz จึงเปิดศักราชของการวิจัยตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูง (high temperature superconductor) และทำให้ Müller และ Bednorz ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ประจำ ค.ศ. ๑๙๘๗

นับตั้งแต่ที่มีการพบตัวนำยวดยิ่งในปรอท จนอีก ๗๕ ปีต่อมา นักฟิสิกส์ได้พบปรากฏการณ์สภาพนำยวดยิ่งในโลหะอื่น ๆ และในสารประกอบอีกมากมาย แต่ไม่มีใครเคยคิด ฉนวนจะเป็นตัวนำยวดยิ่งได้ที่อุณหภูมิสูง ๓๐ เคลวิน ครั้นเมื่อนักวิจัยชาวฝรั่งเศสได้พบว่าสารประกอบออกไซด์ของแบเรียม แลนทานัม และทองแดงนำไฟฟ้าได้เหมือนโลหะ จึงเป็นเรื่องแปลกที่ทำให้ Bednorz กับ Müller สนใจใคร่ศึกษาพฤติกรรมของสารประกอบออกไซด์นี้ที่อุณหภูมิต่ำบ้าง และได้ตกตะลึงเมื่อพบว่า คือ ตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงชนิดแรกของโลก ที่มีโครงสร้างซึ่งประกอบด้วยระนาบของทองแดงและออกซิเจน โดยมีอะตอมของแบเรียมและแลนทานัมแทรกอยู่ระหว่างระนาบ

หลังจากนั้นไม่นาน P. Chu ก็ได้พบตัวนำยวดยิ่งอีกชนิดหนึ่ง คือ ทิเทรียม แบเรียมคอปเพอร์ออกไซด์ (yttrium barium copper oxide) หรือที่เรียกสั้น ๆ ว่า YBCO (อ่านว่า ibb-ko) ที่อุณหภูมิ 93 เคลวิน การวิจัยสภาพนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงจึงเกิดขึ้นตั้งแต่นั้นมา

ปัจจุบันสถิติอุณหภูมิวิกฤตสูงสุดเป็นของสารประกอบปรอท (mercury) แบเรียม แคลเซียม (calcium) ทองแดง และออกซิเจน ที่อุณหภูมิ ๑๓๕ เคลวิน ซึ่งอาจทำให้สูงถึง ๑๕๐ เคลวิน ได้เมื่อเพิ่มความดัน

ตลอดเวลา ๒๕ ปีที่ผ่านมานี้ นักฟิสิกส์ได้พบตัวนำยวดยิ่งอีกหลายประเภทที่แตกต่างจากตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิต่ำ ซึ่งเป็นตัวนำยวดยิ่งยุคเก่าอย่างสิ้นเชิง เช่น ประเภท heavy-fermion superconductor, organic superconductor, iron-based superconductor ซึ่งมีโครงสร้างและองค์ประกอบที่แตกต่างจากโลหะและออกไซด์ที่รู้จักกันดี ดังนั้น การสร้างทฤษฎีที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของตัวนำยวดยิ่งเหล่านี้จึงยังทำไม่ได้ แม้กระทั่งถึงวันนี้ แต่นักฟิสิกส์ก็ได้พบชัดแล้วว่า ในตัวนำยวดยิ่งทุกชนิดจะมีคู่คูเปอร์เสมอ แม้จะไม่ทราบชัดว่าอิเล็กตรอนในคู่คูเปอร์จับคู่กันด้วยกลไกใด

ดังนั้น ปัญหาในอนาคตก็คือ นักฟิสิกส์ทฤษฎีจะต้องสร้างทฤษฎีขึ้นมาเพื่ออธิบายสมบัติและที่มาของปรากฏการณ์สภาพนำยวดยิ่งในตัวนำยวดยิ่งที่ไม่ธรรมดาเหล่านี้ให้ได้หมดทุกประเด็น

ปัจจุบันตัวนำยวดยิ่งไม่เพียงแต่จะน่าสนใจในเชิงวิชาการบริสุทธิ์เท่านั้น แต่ยังมีประโยชน์มหาศาลด้วย เช่น สามารถนำไปใช้ในทางการแพทย์และวิทยาศาสตร์ประยุกต์ได้ด้วย จึงเป็นไปได้ว่า เทคโนโลยีตัวนำยวดยิ่งในอนาคตจะเพิ่มบทบาทและความสำคัญมากยิ่งขึ้นไปอีก

ทางด้านการประยุกต์ตัวนำยวดยิ่งในการวิเคราะห์โรคนั้น Onnes เป็นบุคคลแรกที่ตระหนักว่าคุณประโยชน์หนึ่งของตัวนำยวดยิ่ง คือ ใช้ทำแม่เหล็กที่สามารถให้สนามแม่เหล็กความเข้มสูงได้ เพราะลวดตัวนำธรรมดาที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะร้อน แต่ในการสร้างสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูงนั้น เรา

จำต้องใช้กระแสไฟฟ้าค่าสูง ดังนั้น ลวดธรรมดาจะร้อนมากและจะหลอมเหลว แต่ถ้าเราใช้ลวดที่ทำด้วยตัวนำยวดยิ่ง กระแสไฟฟ้าที่ไหลในลวดไม่ว่าจะมากเพียงใดลวดก็ไม่ร้อน ดังนั้น สนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูงจึงสามารถเกิดขึ้นได้ถ้าใช้ลวดตัวนำยวดยิ่งในการทำแม่เหล็ก ผลที่ตามมา คือ เทคโนโลยี magnetic resonance imaging (MRI) จะสามารถทำให้แพทย์เห็นอวัยวะที่เป็นเนื้อเยื่อในร่างกายได้โดยไม่ต้องผ่าตัด ผู้ป่วย MRI จึงมีประโยชน์ในการตรวจหามะเร็ง ดูความผิดปรกติของกล้ามเนื้อ ข้อต่อ หัวใจ หลอดเลือด ฯลฯ เพราะภาพของ MRI จะแสดงปริมาณน้ำที่มีในเนื้อเยื่อ ถ้าเนื้อเยื่อนั้นเป็นโรค ปริมาณน้ำของเนื้อเยื่อนั้นก็จะแตกต่างจากเนื้อเยื่อปรกติ

ทุกคนทราบดีว่า โมเลกุลของน้ำประกอบด้วยอะตอมออกซิเจนและไฮโดรเจน แต่ในเครื่อง MRI ที่ใช้ตรวจภายในร่างกาย แพทย์จะตรวจสอบเฉพาะอะตอมของไฮโดรเจน เมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก นิวเคลียสของไฮโดรเจนจะหมุนส่ายคล้ายลูกข่างด้วยความถี่ค่าหนึ่ง แต่ถ้ามีสนามแม่เหล็กอีกสนามหนึ่งมากระทำในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กเดิม และสนามนี้มีความถี่เท่ากับความถี่ในการหมุนส่ายของนิวเคลียส นิวเคลียสก็จะรับพลังงานจากสนามแม่เหล็กสนามที่ ๒ เข้าไป แล้วกลับทิศหมุนทันที จำนวนนิวเคลียสที่กลับทิศการหมุนจะบอกให้แพทย์รู้ว่า มะเร็งในร่างกายอยู่ที่ใด และมีปริมาณมากหรือน้อยเพียงใด

ตามปรกติการทำงานของเครื่อง MRI ต้องใช้สนามแม่เหล็กที่มีความเข้มตั้งแต่ ๑-๓ เทสลา (tesla) ซึ่งนับว่าสูงกว่าสนามแม่เหล็กโลกนับหมื่นเท่า นอกจากนี้ แท่งแม่เหล็กที่ใช้ในเครื่อง MRI ก็ต้องมีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะให้ร่างกายคนเข้าไปอยู่ภายในได้ เพื่อพัฒนา MRI ให้สามารถถ่ายภาพสามมิติของเนื้อเยื่อได้ Peter Mansfield และ Paul Lauterbur จึงนำสนามแม่เหล็กที่ไม่สม่ำเสมอมาใช้ และใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็นห้วง ๆ มาประกอบ เทคนิคนี้ทำให้นักวิทยาศาสตร์ทั้งสองได้รับรางวัลโนเบลสาขาการแพทย์และสรีรวิทยาประจำ ค.ศ. ๒๐๐๓ จากการประดิษฐ์อุปกรณ์ fMRI (Function MRI) ที่ใช้ตรวจสภาพการทำงานของอวัยวะในร่างกาย เช่น การไหลของเลือดในสมองเวลาถูกกระตุ้น

ดังนั้น ตัวนำยวดยิ่งจึงสามารถช่วยแพทย์ให้สามารถตรวจสอบภายในร่างกายได้ดีขึ้น และช่วยให้ผู้คนนับแสนได้รับการวิเคราะห์โรคจนสามารถรักษาล่วงหน้าได้ทัน

รถไฟเหาะก็เป็นอีกตัวอย่างหนึ่งของการประยุกต์ตัวนำยวดยิ่งที่น่าสนใจ ที่สถานีทดลองในเมือง Yamanashi ประเทศญี่ปุ่น มีการติดตั้งขดลวดที่ทำด้วยตัวนำยวดยิ่งใต้ท้องรถไฟ และเมื่อตัวนำยวดยิ่งผลักสนามแม่เหล็กไม่ให้เข้ามาใกล้ แรงผลักดังกล่าวนี้สามารถรองรับน้ำหนักของรถไฟได้ และรถไฟจะลอยได้เป็นรถไฟเหาะ สถิติความเร็วของรถไฟเหาะในปัจจุบันนี้สูงถึง ๕๘๑ กิโลเมตรต่อชั่วโมง แต่การประยุกต์ยังมิได้นำไปใช้อย่างแพร่หลาย เพราะค่าโสหุ้ยแพง ดังนั้น อุปกรณ์ที่สร้างจึงเป็นเพียงตัวอย่างที่ยังไม่เป็นประโยชน์ในเชิงพาณิชย์

อนึ่ง ในวงจรไฟฟ้าที่ใช้ลวดชนิดตัวนำยวดยิ่ง เมื่อมีสนามแม่เหล็กอื่นใดเข้าไปรบกวน สนามแม่เหล็กนี้จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ารบกวนการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร ซึ่งจะแสดงให้เห็นได้ชัด ไม่ว่าสนามแม่เหล็กที่มารบกวนนั้นจะมีความเข้มมากหรือน้อยเพียงใด และนี่ก็คือหลักการทำงานของ SQUID (superconducting quantum interference device) ที่ใช้ตรวจจับสนามแม่เหล็กความเข้มน้อย ซึ่งเกิดจากการไหลของกระแสไฟฟ้าในหัวใจและสมอง

ปัจจุบันนี้ SQUID ยังใช้ในการตรวจหาสสารมืด (dark matter) และอนุภาคมูลฐานที่ยังไม่มีใครพบด้วย

ในด้านคมนาคม ลวดที่ทำด้วยตัวนำยวดยิ่งก็นับว่ามีประโยชน์ เพราะสามารถให้กระแสไฟฟ้าที่สูงถึง ๒,๐๐๐ แอมแปร์ผ่านไปตามเส้นลวดได้ (โดยลวดไม่หลอมเหลว) อย่างมีประสิทธิภาพร้อยละ ๑๐๐ เต็มโดยที่กำลังไม่ตกเลย นอกจากนี้ ลวดตัวนำยวดยิ่งยังมีประโยชน์ในการใช้งานในยานอวกาศที่ถูกส่งออกไปไกลโลกมาก เพราะในบริเวณนั้นอุณหภูมิต่ำมากถึง ๓ เคลวิน และยานอวกาศต้องประหยัดพลังงานให้มากที่สุด ดังนั้น ลวดที่ใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ จึงต้องใช้ลวดที่ทำด้วยตัวนำยวดยิ่ง

ในการค้นหาอนุภาคพระเจ้า (Higgs boson) ที่ CERN ซึ่งเป็นศูนย์วิจัยนิวเคลียร์ของยุโรป นักฟิสิกส์จำเป็นต้องใช้เครื่องเร่งอนุภาคพลังงานสูง เพราะอนุภาคโปรตอนที่ใช้มีความเร็วเกือบเท่าความเร็วแสง ดังนั้น ในการจะทำให้โปรตอนพุ่งเป็นเส้นโค้ง นักฟิสิกส์จำต้องใช้สนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูงมาก และนั่นก็หมายความว่า ต้องใช้ลวดตัวนำยวดยิ่งในอุปกรณ์ large hadron collider (LHC) เพื่อค้นหาอนุภาค Higgs boson ซึ่งเป็นอนุภาคที่ทำให้อนุภาคต่าง ๆ ในเอกภพมีมวล

ในการค้นหานี้ นักฟิสิกส์ได้เร่งอนุภาคโปรตอนให้พุ่งชนกันในท่อวงกลมที่ยาว ๒๗ กิโลเมตร ซึ่งมีแท่งแม่เหล็กจำนวน ๑,๒๓๒ แท่งวางเรียงรายตามตัวท่อ แท่งแม่เหล็กแต่ละแท่งยาว ๑๕ เมตร และหนัก ๓๕ ตัน ลวดที่ใช้ทำด้วยไนโอเบียม (niobium) กับไทเทเนียม (titanium) ซึ่งหล่อเลี้ยงด้วยฮีเลียมเหลวที่อุณหภูมิ ๑ เคลวิน

แม้กระทั่งถึงวันนี้ นักฟิสิกส์ก็ยังไม่พบอนุภาคพระเจ้า (Higgs boson) แต่ก็คาดหวังจะพบในอีกไม่นาน

ในขณะที่โลกกำลังประจักษ์ในความก้าวหน้าด้านการประยุกต์ตัวนำยวดยิ่ง ความก้าวหน้าด้านทฤษฎีของสภาพนำยวดยิ่งก็ได้รุดหน้าเช่นกัน เช่น ใน ค.ศ. ๑๙๕๗ Aage Bohr (บุตรชายของ Niels Bohr) และ Ben Mottelson ได้ให้คำอธิบายว่า เหตุใดนิวเคลียสของธาตุบางธาตุจึงเสถียรมาก โดยเฉพาะนิวเคลียสที่มีจำนวนโปรตอนและนิวตรอนเป็นจำนวนคู่ พวกเขาอธิบายว่าเกิดจากการจับคู่ระหว่างโปรตอนกับ

โปรตอน และนิวตรอนกับนิวตรอน แบบจำลองนิวเคลียสของ Bohr และ Mottelson นี้ทำให้ทั้งสองได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ ใน ค.ศ. ๑๙๗๕

ในอีก ๒ ปีต่อมา Arkady Migdal ได้ใช้แนวคิดเรื่องคู่คูเปอร์อธิบายโครงสร้างภายในของดาวนิวตรอนว่า ดาวชนิดนี้มีเปลือกนอกเป็นของแข็ง ชั้นในมีคู่นิวตรอน คู่โปรตอน และคู่ควาร์ก ดังนั้น เนื้อดาวจึงเป็นของเหลวยวดยิ่ง (superfluid คือ ของเหลวที่ไหลโดยปราศจากแรงหนืดรบกวน) และองค์ประกอบเหล่านี้ทำให้ดาวนิวตรอนปล่อยแสงออกมาได้เป็นดาวพัลซาร์ (pulsar) แม้คำอธิบายนี้จะไม่มีหลักฐานและการทดลองสนับสนุน เพราะนักวิทยาศาสตร์ยังไม่สามารถสร้างสสารที่มีความหนาแน่นเป็นพันล้านล้านเท่าของน้ำได้ แต่ Frank Wilczek (รางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ ค.ศ. ๒๐๐๔) ก็เชื่อมั่นในทฤษฎีของ Migdal ว่าถูกต้อง

ด้าน Douglas Osheroff แห่งมหาวิทยาลัย Stanford ได้พบปรากฏการณ์ของเหลวยวดยิ่งใน helium-3 (เลขไอโซโทปเท่ากับ ๓ เพราะนิวเคลียสของธาตุนี้มีโปรตอน ๒ โปรตอน และนิวตรอน ๑ นิวตรอน) เมื่อ ค.ศ. ๑๙๗๒ ทำให้การจับคู่ของอะตอมฮีเลียมเกิดได้ ๓ รูปแบบ การค้นพบนี้ทำให้ Osheroff ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ ใน ค.ศ. ๑๙๙๖ ร่วมกับอาจารย์ที่ปรึกษาคือ Robert Richardson และ David Lee

ส่วนกลไกที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ตัวนำยวดยิ่ง ซึ่งนักฟิสิกส์ทฤษฎีเรียกว่า spontaneous symmetry breaking นั้น สามารถอธิบายสาเหตุที่ทำให้โปรตอนและนิวตรอนมีมวลได้ และมีส่วนทำให้ Yoichiro Nambu ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ ใน ค.ศ. ๒๐๐๘

ใน ค.ศ. ๑๙๒๖ ซึ่งเป็นปีที่ Onnes เสียชีวิต เขามีอายุ ๗๒ ปี และจากไปในขณะที่กลศาสตร์ควอนตัมกำลังถือกำเนิด Onnes ไม่เคยยอมรับทฤษฎีควอนตัม และไม่เชื่อเลยว่าตัวนำยวดยิ่งมีความต้านทานไฟฟ้าเป็นศูนย์จริง เพราะเขาเป็นนักฟิสิกส์อนุรักษ์ที่เชื่อในความถูกต้องของ Newton แต่การค้นพบของ Onnes ก็ได้ปูทางให้นักฟิสิกส์รุ่นหลัง ๆ ได้เจริญรอยตามด้วยความตื่นเต้นตลอดเวลา ๑ ศตวรรษที่ผ่านมา และจะตลอดไปอีกนานแสนนาน.

เอกสารอ้างอิง

Blundell, S. J. Superconductivity: A very short introduction, Oxford University Press, 2008.

Annett, J. F. Superconductivity, Superfluids and Condensates, Oxford University Press, 2004.

Abstract **Superconductivity**

Suthat Yoksan
Associate Fellow of the Academy of Science, The Royal Institute, Thailand

One hundred years ago, a Dutch physicist named Heike Kamerlingh Onnes discovered that certain metals completely lose their electrical resistance when cooled to within a few degrees of absolute zero. The effect was named superconductivity. It took 46 years to figure out how superconductivity occurred and how to make it useful. Since 1986 many new superconductors were discovered; physicists then came to realize that we understand the phenomenon far less well.

Even though we are yet to find a theory to account for the high temperature superconductivity, superconductors are already used in applications as diverse as seeing inside the human body and discovering particles which will explain the origin of mass.

Key words: Superconductivity, Low temperature superconductor, High temperature superconductor