



หนึ่งศตวรรษของตัวนำวยดิ่ง

จิตติพงษ์ เครือหงส์¹

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอการค้นพบตัวนำวยดิ่งแบบต่างๆ และสมบัติพื้นฐานที่สำคัญของตัวนำวยดิ่งในรอบหนึ่งศตวรรษที่ผ่านมา ได้แก่ สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางแม่เหล็ก นอกจากนี้ได้สรุปทฤษฎีและความแตกต่างของทฤษฎีที่ใช้ในการอธิบายกลไกการเกิดสภาพนำวยดิ่ง ตลอดจนการพัฒนาตัวนำวยดิ่ง

จากจุดเริ่มต้นของการค้นพบจนกระทั่งถึงการค้นพบตัวนำวยดิ่งอุณหภูมิสูงซึ่งยังคงได้รับความสนใจเพื่อที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวันและมีการพัฒนาให้ดีขึ้นต่อไป

คำสำคัญ: ตัวนำวยดิ่ง ทฤษฎีปรากฏการณ์
หนึ่งศตวรรษของตัวนำวยดิ่ง

¹ อาจารย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี โทรศัพท์ 0-7735-5665
อีเมล: kruachong@hotmail.com



A Century of Superconductors

Thitipong Kruaehong¹

Abstract

This article presents the discovery of superconductors and the fundamental properties of superconductors in the past century such as their electrical properties and magnetic properties. In addition, theories with different aspects used for describing the mechanism of superconductivity are

summarized. The development of the superconductor from its origin to the modern high-temperature superconductor is a topic of interest both for their applications in daily life and the future improvement.

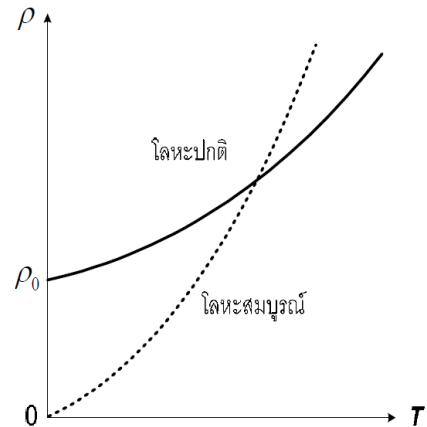
Keywords : Superconductors, Phenomenological Theory, A Century of Superconductors

¹ Lecturer, Department of Physics, Faculty of Science and Technology, Surattthani Rajabhat University, Tel. 0-7735-5665, E-mail : kruaehong@hotmail.com

1. บทนำ

ในตอนต้นศตวรรษที่ 20 นักวิทยาศาสตร์ได้ค้นพบตัวนำยวดยิ่งซึ่งเป็นวัสดุที่มีสมบัติที่โดดเด่นหลายประการจึงอยู่ในความสนใจด้านฟิสิกส์ของแข็งเป็นอย่างมาก โดยส่วนใหญ่จะศึกษาเกี่ยวกับสมบัติพื้นฐานของตัวนำยวดยิ่ง ได้แก่ สมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติทางแม่เหล็ก เป็นต้น จากนั้นจนกระทั่งถึงปัจจุบันรวมระยะเวลากว่าร้อยปีที่ได้มีการค้นพบตัวนำยวดยิ่งในรูปแบบต่างๆ เพิ่มเติมอีกมากมาย อาทิเช่น ตัวนำยวดยิ่งแบบโลหะ โลหะผสม เซรามิก อีกทั้งมีทฤษฎีที่พยายามอธิบายเพื่อที่จะทำให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับการเกิดสภาพนำยวดยิ่งมากยิ่งขึ้น ซึ่งในปัจจุบันสามารถนำตัวนำยวดยิ่งประยุกต์ใช้งานจริงในชีวิตประจำวันของมนุษย์บ้างแล้วโดยอาศัยสมบัติที่ว่าวัสดุนี้ มีความต้านทานไฟฟ้าเป็นศูนย์ และการลอยตัวเหนือแม่เหล็กได้ นอกจากนี้ ตัวนำยวดยิ่งยังมีสมบัติที่แตกต่างจากโลหะทั่วไป คือในโลหะปกติ (Normal Metal) เมื่อให้สนามไฟฟ้า ($\vec{E}$) เข้าไปทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าในโลหะปกตินั้นด้วยค่าความหนาแน่นกระแส ($\vec{J}$) และมีสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการโดยเป็นกฎของโอห์มคือ $\vec{E} = \rho \vec{J}$

สภาพต้านทานไฟฟ้าของโลหะปกติเกิดจากสาเหตุหลักที่สำคัญ 3 ประการ คือ เกิดจากการสั่นของอะตอม (Atomic Vibration) สารเจือ (Impurities) และความบกพร่อง (Defect) จึงก่อให้เกิดการกระเจิงของอิเล็กตรอนภายในโลหะปกติ ดังนั้นเมื่อลดอุณหภูมิลงการสั่นของโครงผลึกก็ลดลง ส่งผลให้ความต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าลดลงตามไปด้วย อย่างไรก็ตามโลหะปกติยังคงมีค่าความต้านทานไฟฟ้าเหลืออยู่หรือความต้านทานไฟฟ้าคงค้าง (Residual Resistance) และถ้าเปลี่ยนจากโลหะปกติเป็นโลหะบริสุทธิ์ (Pure Metal) จะทำให้สภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าลดลงอย่างสม่ำเสมอจนมีค่าเป็นศูนย์ดังรูปที่ 1 เนื่องจากอิเล็กตรอนจะไม่เกิดการกระเจิงมากเช่นเดียวกับโลหะปกติโดยโลหะชนิดนี้มีการจัดเรียงหน่วยเซลล์ที่สมบูรณ์ (Perfect Lattice) และมีความบกพร่องของโครงสร้างน้อยกว่า

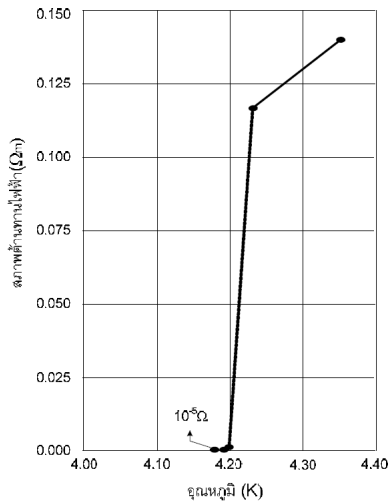


รูปที่ 1 สภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของโลหะปกติและโลหะสมบูรณ์ [1]

2. สมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง

ในปี พ.ศ. 2451 นักฟิสิกส์ชาวเนเธอร์แลนด์ชื่อคาร์เมอร์ลิงก์ ออนเนส (Kamerling Onnes) [2] ได้ประสบความสำเร็จในการทำฮีเลียมเหลวขึ้นอีกสามปีต่อมาคือ ในปี พ.ศ. 2454 ออนเนสได้ทำการทดลองวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของปรอทบริสุทธิ์ขึ้นเป็นครั้งแรก โดยใส่ปรอทลงในภาชนะรูปวงแหวนแล้วแช่ในฮีเลียมเหลวเมื่ออุณหภูมิของสารลดลงพบว่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของปรอทมีค่าเป็นศูนย์ที่อุณหภูมิประมาณ 4.2 เคลวิน ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ปรอทเกิดการเปลี่ยนสถานะจากสถานะปกติเป็นสถานะนำยวดยิ่งอย่างทันทีทันใด ดังรูปที่ 2 เรียกอุณหภูมินี้ว่า อุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature, T_c) ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ทำให้ปรอทไร้สภาพต้านทานไฟฟ้า

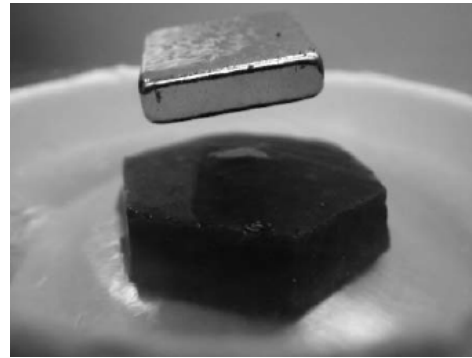
ต่อจากนั้นเขาวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของโลหะชนิดต่างๆ เพิ่มเติม เช่น ตะกั่ว (Pb) ดีบุก (Sn) ไนโอเบียม (Nb) โดยพบว่าสารเหล่านี้มีค่าอุณหภูมิวิกฤต เท่ากับ 3.69, 7.26 และ 9.2 เคลวิน ตามลำดับ ในการค้นพบตัวนำยวดยิ่งในยุคแรกๆ มีค่าอุณหภูมิวิกฤตค่อนข้างต่ำซึ่งจะไม่เกิน 10 เคลวิน และเรียกตัวนำยวดยิ่งกลุ่มนี้ว่าตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Superconductors) หรือตัวนำยวดยิ่งแบบดั้งเดิม (Conventional Superconductors)



รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้าของปรอทกับอุณหภูมิ [3]

เมื่อดำเนินการวิจัยที่วัสดุสภาพต้านทานไฟฟ้าจะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าไปไม่มีการสูญเสียพลังงานเมื่อเวลาผ่านไป เรียกกระแสไฟฟ้านี้ว่า กระแสไฟฟ้ายืนยง (Persistent Current) หรือกระแสไฟฟ้ายวดยิ่ง (Supercurrent) จากกฎของแอมแปร์ (Ampere's Law) ซึ่งเป็นกฎที่อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กและกระแสไฟฟ้า ดังนั้นเมื่อมีกระแสที่ไหลวนรอบวงแหวนของตัวนำยวดยิ่งที่มีค่าความเหนี่ยวนำตนเอง (L) เมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่าลดลงเนื่องจากมีความต้านทานไฟฟ้าจะได้ค่าคงที่เวลา (Time Constant) มีอัตราส่วนเป็น $\tau = \frac{L}{R}$ และพบว่าค่ากระแสนี้มีระยะเวลาประมาณ 100,000 ปี เมื่อนำมาหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจะได้ว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่น้อยมากซึ่งเท่ากับ $10^{-26} \Omega.m$

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้านี้มีค่าน้อยกว่าสถานะปกติมากกว่า 10^{18} เท่า ซึ่งปกติแล้วสภาพต้านทานไฟฟ้าของทองแดงถือว่าเป็นโลหะนำไฟฟ้าที่ดีที่สุดชนิดหนึ่ง ณ อุณหภูมิห้องมีค่าประมาณ $10^{-8} \Omega.m$ ดังนั้นจึงถือเป็นข้อพิสูจน์และลงความเห็นได้อย่างสมเหตุสมผลว่ามีความต้านทานไฟฟ้าเป็นศูนย์จริงในตัวนำยวดยิ่ง นอกจากนี้กระแสนิยงจะมีอยู่ได้เมื่อค่าของกระแสมีค่าที่ต่ำกว่าค่า

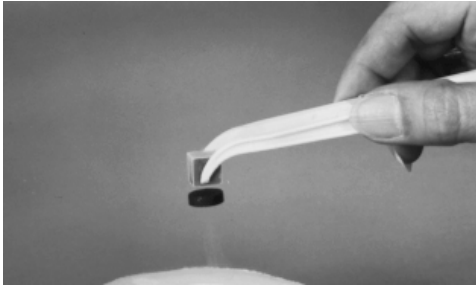


รูปที่ 3 การลอยตัวของแม่เหล็กถาวรชนิด NeFeB บนตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงกลุ่ม Y123 [5]

กระแสค่าหนึ่งเท่านั้นและถ้ากระแสที่ไหลผ่านมีค่าสูงกว่าค่านี้แล้วจะทำให้สภาพนำยวดยิ่งถูกทำลายกลายสภาพเป็นตัวนำปกติได้ทันที เรียกกระแสที่ทำให้ลายสภาพนำยวดยิ่งนี้ว่ากระแสวิกฤต (Critical Current, J_c) ค่ากระแสนี้มีค่าไม่เท่ากันขึ้นกับตัวนำยวดยิ่งแต่ละชนิด

3. สมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำยวดยิ่ง

ในปี พ.ศ. 2476 นักฟิสิกส์ชาวเยอรมันชื่อไมส์เนอร์และโอเชินฟีลด์ (Meissner & Ochsenfeld) [4] ได้ทำการทดลองและพบว่าเมื่อตัวนำยวดยิ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตแล้วให้สนามแม่เหล็กภายนอกกับตัวนำยวดยิ่งนี้ตัวนำยวดยิ่งจะไม่ยอมให้สนามแม่เหล็กพุ่งผ่านเข้าไปในเนื้อได้เลยและยังผลักสนามแม่เหล็กออกอีกด้วย จึงเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์และโอเชินฟีลด์ ต่อมาเรียกสั้นๆ ว่าปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์เป็นปรากฏการณ์ที่นิยมใช้ในการสาธิตว่าสารมีสภาพนำยวดยิ่งซึ่งเกิดขึ้นจากการให้สนามแม่เหล็กภายนอกเข้าไปในขณะที่สารมีสภาพนำยวดยิ่ง สนามแม่เหล็กภายนอกทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ผิวของตัวนำยวดยิ่งและกระแสไฟฟ้างี้จะสร้างสนามแม่เหล็กที่มีขนาดเท่ากันและมีทิศตรงข้ามกับสนามแม่เหล็กที่ให้เข้าไปจึงทำให้สนามแม่เหล็กภายในของสารนั้นมีค่าเป็นศูนย์ดังรูปที่ 3 ซึ่งในการทดลองเพื่อแสดง

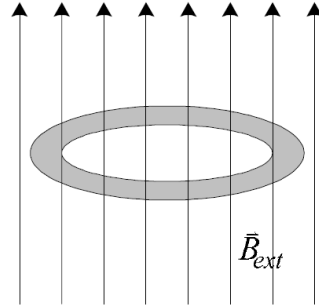


รูปที่ 4 การยกตัวนำวดยิ่งโดยใช้สนามแม่เหล็กถาวร [7]

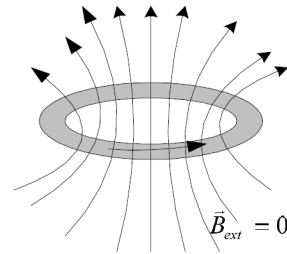
ปรากฏการณ์ไมสเนอร์จะชี้แจงแม่เหล็กถาวรขนาดเล็กชนิด NeFeB และมีน้ำหนักเบาแต่จะให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสามารถทำให้เกิดการลอยตัวของแม่เหล็กได้อย่างชัดเจนและสนามแม่เหล็กก็มีสมบัติเช่นกับกระแสกล่าวนคือ เมื่อสนามแม่เหล็กมีค่ามากกว่าค่าสนามแม่เหล็กค่าหนึ่ง สนามแม่เหล็กจะสามารถทำลายสภาพนำวดยิ่งทำให้ตัวนำวดยิ่งกลายเป็นตัวนำปกติเรียก สนามแม่เหล็กนี้ว่า สนามแม่เหล็กวิกฤต (Critical Magnetic Field: H_c)

ถ้าให้สนามแม่เหล็กมีค่าน้อยกว่าสนามแม่เหล็กวิกฤตจะทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กเกิดการตรึง (Flux Pinning) [6] ในเนื้อของตัวนำวดยิ่งและถ้ามีค่ามากพอก็จะสามารถยกตัวนำวดยิ่งขึ้นได้ดังรูปที่ 4

จากปรากฏการณ์ข้างต้นจึงจัดว่าตัวนำวดยิ่งมีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็กไดอาแมกเนติก (Perfect Diamagnetic) การค้นหาสมบัติยังคงมีอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งในปี พ.ศ. 2498 เดเวอร์และแฟร์แบงค์ (Deaver & Fairbank) [8] ได้ค้นพบความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำวดยิ่งอีกประการหนึ่ง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ฟลักซ์แม่เหล็กแบบควอนไทซ์เซชัน (Flux Quantization) โดยการนำตัวนำวดยิ่งมาทำเป็นรูปวงแหวนและให้สนามแม่เหล็กเข้าไปในตัวนำวดยิ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต สนามแม่เหล็กจะสามารถพุ่งผ่านตัวนำวดยิ่งได้ดัง รูปที่ 5 และถ้าลดอุณหภูมิของวงแหวนให้ต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตแล้วสนามแม่เหล็กที่เข้าไปอีกครั้ง สนามแม่เหล็กดังกล่าวจะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำไหลวนในวงแหวนและจะสร้างสนามแม่เหล็กพุ่งผ่านตรงช่องว่างของวงแหวนดังรูปที่ 6



รูปที่ 5 วงแหวนตัวนำวดยิ่งเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต ($T > T_c$) [9]



รูปที่ 6 วงแหวนตัวนำวดยิ่งเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต ($T < T_c$) [10]

การแบ่งแยกชนิดของตัวนำวดยิ่งสามารถแบ่งโดยพิจารณาตอบสนองต่อการเพิ่มและลดความเข้มสนามแม่เหล็กภายนอกที่ใส่เข้าไป ($\vec{H}$) เป็นเกณฑ์ซึ่ง สามารถแบ่งตัวนำวดยิ่งได้เป็นสองชนิด คือตัวนำวดยิ่งชนิดที่ 1 และตัวนำวดยิ่งชนิดที่ 2

3.1 ตัวนำวดยิ่งชนิดที่ 1

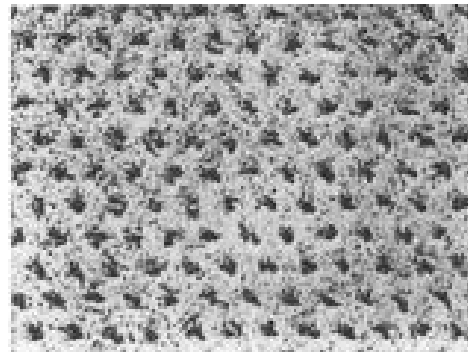
เมื่อมีความเข้มสนามแม่เหล็กอ่อน ($\vec{H} < \vec{H}_c$) และที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต ($T < T_c$) สนามแม่เหล็กภายในตัวนำวดยิ่งมีค่าเป็นศูนย์ ($\vec{B} = 0$) ต่อมาฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นสนามแม่เหล็กจะสามารถเจาะลึกเข้าไปในเนื้อของตัวนำวดยิ่งได้

ทั้งหมดทำให้ความเข้มสนามแม่เหล็กมีค่ามากกว่าความเข้มสนามแม่เหล็กวิกฤต ($\vec{H} > \vec{H}_c$) ตัวนำวดยิ่งเปลี่ยนสภาพเป็นตัวนำปกติทันที นอกจากนั้นการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ของตัวนำวดยิ่งชนิดที่ 1 ด้วยกล่าวคือ การเปลี่ยนแปลงระหว่าง

สภาพนำยวดยิ่งและสภาพปกติของตัวนำยวดยิ่งบริสุทธิ์ชนิดที่ 1 เป็นกระบวนการที่ผันกลับได้ (Reversible Transition) และตัวนำยวดยิ่งไม่บริสุทธิ์ประเภทที่ 1 เป็นการเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับไม่ได้ (Irreversible Transition) ทั้งนี้ จะเกิดการกักเก็บฟลักซ์แม่เหล็ก (Trapped Flux) เอาไว้ภายในบริเวณความบกพร่อง (Defect) ของเนื้อสาร สำหรับตัวนำยวดยิ่งชนิดที่หนึ่งส่วนใหญ่จะเป็นธาตุ (Element) เดียว มีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กวิกฤตต่ำ ดังนั้นที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กมีค่าประมาณ 10-100 มิลลิเทสลาและค่านี้มีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิด้วย

3.2 ตัวนำยวดยิ่งชนิดที่ 2

ตัวนำยวดยิ่งชนิดที่สองโดยทั่วไปแล้วเป็นสารพวกโลหะผสม (Alloy) และสารประกอบ (Compounds) มากกว่าที่จะเป็นธาตุเดี่ยว ตัวนำยวดยิ่งประเภทที่สองเมื่อมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต ($T < T_c$) จะไม่ยอมให้สนามแม่เหล็กผ่านเข้าไปในเนื้อของสารได้ ($\vec{B} = 0$) และผลึกสนามแม่เหล็กออกไปเช่นเดียวกับตัวนำยวดยิ่งชนิดที่ 1 เมื่อความเข้มสนามแม่เหล็กที่มีค่าไม่เกินความเข้มสนามแม่เหล็กวิกฤตล่าง (Lower Critical Field: $\vec{H}_{c1}$) แต่ถ้าความเข้มสนามแม่เหล็กมีค่ามากกว่านี้และไม่เกินความเข้มสนามแม่เหล็กวิกฤตบน (Upper Critical Fields: $\vec{H}_{c2}$) จะเกิดฟลักซ์แม่เหล็กบางส่วนสามารถเจาะลึกเข้าไปในเนื้อสารทำให้สนามแม่เหล็กที่ฝังตัว (Trapped Field) มีค่าเพิ่มมากขึ้นจนมีค่ามากกว่าความเข้มสนามแม่เหล็กวิกฤตบน ($\vec{H}_{c2}$) ตัวนำยวดยิ่งก็จะเปลี่ยนแปลงเป็นสถานะปกติ (Normal State) ฟลักซ์แม่เหล็กจะเจาะลึกเข้าไปในเนื้อสารได้อย่างสมบูรณ์โดยค่าความเข้มสนามแม่เหล็กวิกฤตบนของตัวนำยวดยิ่งชนิดที่ 2 มีค่าประมาณ 100 เทสลา ซึ่งมีค่ามากกว่าตัวนำยวดยิ่งชนิดที่ 1 ประมาณ 1,000 เท่า และสำหรับตัวนำยวดยิ่งบริสุทธิ์ชนิดที่ 2 มีการเปลี่ยนแปลงสภาพระหว่างสภาพปกติกับสภาพนำยวดยิ่งที่เป็นการเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับได้ ส่วนตัวนำยวดยิ่งไม่บริสุทธิ์ชนิดที่สองเป็นการเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับไม่ได้ เนื่องจากเกิดการกักเก็บฟลักซ์แม่เหล็ก

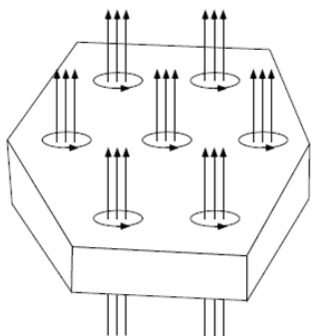


รูปที่ 7 ฟลักซ์แม่เหล็กเกิดการฝังตัวในเนื้อของตัวนำยวดยิ่งที่เป็นสารประกอบระหว่างตะกั่ว (Pb) และอินเดียม (In) ที่อุณหภูมิ 1.1 เคลวิน [14]

เอาไว้ภายในบริเวณความบกพร่องของเนื้อสารเช่นเดียวกับตัวนำยวดยิ่งชนิดที่ 1 และค่านี้มีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิด้วยเช่นกัน

เมื่อพิจารณาขณะที่ตัวนำยวดยิ่งชนิดที่ 2 อยู่ในสถานะระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กวิกฤตระดับล่างและระดับบน ฟลักซ์แม่เหล็กสามารถเจาะลึกเข้าไปได้บางส่วน จึงเรียกตัวนำยวดยิ่งในสถานะนี้ว่า “สถานะผสม (Mixed State)” นักฟิสิกส์ที่ทำนายการเกิดสถานะนี้เป็นคนแรกคืออะบริโครซอฟ (Abrikosov) [11] ต่อมาในปี พ.ศ. 2510 เอสแมนและทราเบิล (Essmann & Trauble) [12] ได้ทดลองเพื่อเป็นการสนับสนุนคำทำนายของอะบริโครซอฟ โดยทำการทดลองให้เกิดสนามแม่เหล็กฝังตัวในตัวนำยวดยิ่งซึ่งเป็นสารประกอบระหว่างตะกั่ว (Pb) และอินเดียม (In) ที่อุณหภูมิ 1.1 เคลวิน และใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนในการตรวจสอบ ฟลักซ์แม่เหล็กพบว่าฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะเป็นรูปสามเหลี่ยมเรียงต่อกันดังรูปที่ 7 การค้นพบครั้งนี้ทำให้ คำทำนายของอะบริโครซอฟเป็นจริงและเขาได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี พ.ศ. 2546 [13]

บริเวณที่ฟลักซ์แม่เหล็กฝังตัวในเนื้อของตัวนำยวดยิ่งจะมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก เรียกว่าวอร์เท็กซ์ (Vortex) ซึ่งแต่ละวอร์เท็กซ์มีลักษณะเหมือนขดลวดโซลินอยด์ที่มีควอนตัมฟลักซ์แม่เหล็กเดี่ยว (Single Quantum of Magnetic Flux) หรือฟลักซอน (Fluxon) มีค่า



รูปที่ 8 แสดงวอร์เท็กซ์และมีการแสไฟฟ้าไหลวนรอบๆ ของขอบวอร์เท็กซ์ [15]

ของฟลักซ์แม่เหล็กเท่ากับ $\phi_0 = \frac{h}{2e} = 2.0676 \times 10^{-15}$ เวเบอร์ และมีการแสไฟฟ้าไหลวน (Eddy Current) รอบๆ ของขอบวอร์เท็กซ์บริเวณเนื้อสารส่วนที่มีสถานะนำยวดยิ่ง และมีสนามแม่เหล็ก $B = 0$ หรือมีสภาพต้านทานไฟฟ้า $\rho = 0$ แทรกระหว่างวอร์เท็กซ์ดังรูปที่ 8 การเกิดวอร์เท็กซ์ จะเกิดจากการพัฒนาตัวนำยวดยิ่งที่ยังไม่สมบูรณ์จึงทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กแทรกเข้าไปได้และอยู่ในบริเวณที่เป็นจุดบกพร่อง (Defect) ของโครงสร้าง

นอกจากการแบ่งประเภทของตัวนำยวดยิ่งด้วยสมบัติทางแม่เหล็กแล้ว นักวิทยาศาสตร์ได้ค้นพบตัวนำยวดยิ่งอีกมากมายในระยะเวลาที่ผ่านมาหนึ่งศตวรรษ สามารถแบ่งได้จากชนิดของสารประกอบได้อีกทางหนึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4. การแบ่งประเภทตัวนำยวดยิ่งตามสารประกอบ

การแบ่งประเภทของตัวนำยวดยิ่งโดยปกติแล้วจะต้องคำนึงถึงสารประกอบที่ทำให้เกิดตัวนำยวดยิ่งเป็นหลัก ดังนั้นการแบ่งประเภทแบบนี้ส่วนใหญ่จึงเป็นการแบ่งประเภทโดยพิจารณาข้อมูลที่ได้จากการทดลองจึงสามารถแบ่งประเภทของตัวนำยวดยิ่งตามชนิดของสารประกอบได้ดังนี้

4.1 ตัวนำยวดยิ่งแบบดั้งเดิม (Conventional Super Conductors)

เป็นตัวนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิวิกฤตที่ค่อนข้างต่ำ โดยส่วนใหญ่เป็นธาตุและสารประกอบไม่เกิน 2 ชนิด

ถูกค้นพบในยุคแรกๆ อาทิเช่น อลูมิเนียม (Al) มีอุณหภูมิวิกฤต 1.19 เคลวิน [16] ไนโอเบียม (Nb) 9.2-9.23 เคลวิน [17] และสารประกอบ CuS_2 มีอุณหภูมิวิกฤตเท่ากับ 1.6 เคลวิน [18] และสารประกอบที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงสุดของตัวนำยวดยิ่งกลุ่มนี้มีค่าเท่ากับ 23.2 เคลวิน คือ Nb_3Ge [19]

4.2 ตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูง (High Temperature Superconductors)

นักวิทยาศาสตร์ได้ใช้ความพยายามในการสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่งให้มีอุณหภูมิวิกฤตที่สูงมากขึ้น โดยใช้เวลาถึง 75 ปี คือตั้งแต่ปี พ.ศ. 2454 จนถึงปี พ.ศ. 2529 จึงจะค้นพบตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูง (High Temperature Superconductors) เป็นครั้งแรกในปี พ.ศ. 2529 โดย เบทโนร (Bednorz) และมุลเลอร์ (Muller) [20] ในสารประกอบแลนทานัม (La) ซึ่งต่อมาและคณะ [21] ได้ค้นพบตัวนำยวดยิ่งในสารประกอบของอิตเทรียม (Y) ซึ่งมีอุณหภูมิวิกฤตสูงกว่าจุดเดือดของไนโตรเจนเหลวเป็นครั้งแรกและมีสารประกอบอีกหลายกลุ่มโดยมีเรนาบของ CuO_2 ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญในโครงสร้างและมีลักษณะเด่นอีกอย่างหนึ่งคือ ตัวนำยวดยิ่งชนิดนี้จะมีอุณหภูมิวิกฤตที่สูงกว่ามากกว่า 35 เคลวิน ซึ่งเกินขอบเขตของตัวนำยวดยิ่งแบบดั้งเดิมของทฤษฎีบีซีเอส ตัวนำยวดยิ่งชนิดนี้จึงถูกเรียกว่าตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงและมีทองแดง (Cu) และออกซิเจน (O) เป็นองค์ประกอบดังนั้นในบางครั้งจึงถูกเรียกว่าตัวนำยวดยิ่งกลุ่มคิวเพรต (Cuprate Superconductors) [22] ปัจจุบันตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงกำลังเป็นที่สนใจศึกษาของนักวิจัยทั่วโลกเนื่องจากมีสมบัติที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้ง่ายกว่าตัวนำยวดยิ่งชนิดอื่นอย่างไรก็ตามตัวนำยวดยิ่งชนิดนี้ยังมีสมบัติหลายประการที่ยังไม่มีทฤษฎีอธิบายได้

4.3 ตัวนำยวดยิ่งแบบแม่เหล็ก (Magnetic Super Conductors)

ตัวนำยวดยิ่งแบบแม่เหล็กนี้เป็นตัวนำยวดยิ่งที่มีสมบัติเป็นทั้งตัวนำยวดยิ่งและสมบัติทางแม่เหล็ก ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อตัวนำยวดยิ่งได้รับการเจือด้วย

สารแม่เหล็กมีผลทำให้เกิดสภาพทางแม่เหล็กเกิดขึ้นในโครงสร้าง แต่เนื่องจากสนามแม่เหล็กมีผลทำลายสภาพนำยวดยิ่ง ดังนั้นจึงทำให้อุณหภูมิวิกฤตมีค่าน้อยกว่าตัวนำยวดยิ่งแบบอื่น ๆ นอกจากนี้ยังทำให้เกิดตัวนำยวดยิ่งที่เรียกว่า Gapless Superconductors ได้ซึ่งถูกค้นพบโดยอะบริโครซอฟ (Abrikosov) และกอร์คอฟ (Gorkov) [23] โดยเกิดจากการเจือสารแม่เหล็กไม่เข้มข้นทำให้ตัวนำยวดยิ่งมีอุณหภูมิวิกฤตลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารเจือแม่เหล็กเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงค่าหนึ่งจะทำให้สภาพนำยวดยิ่งถูกทำลายอย่างสิ้นเชิง ตัวนำยวดยิ่งกลุ่มนี้เป็นตัวนำยวดยิ่งในกลุ่มธาตุหายาก (Rare Earth) หรือสารประกอบ Chevrel-Phase [24] และเป็นสารประกอบในรูป $REMo_6X_8$ ($X=S$ หรือ Se) และใน XRh_4B_4 ($X=Y, Th$ หรือ RE) ในปี พ.ศ. 2518 ถึงปี พ.ศ. 2520 ทำให้มีการศึกษาผลของการรวมกันของสภาพนำยวดยิ่งกับสภาพความเป็นแม่เหล็กมากขึ้น ในสารประกอบ $HoMo_6S_8$ ซึ่งจะเป็นตัวนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิวิกฤตเท่ากับ 1.82 เคลวิน [25] ตัวอย่างของสารประกอบกลุ่มนี้อีกชนิดหนึ่งคือ $ErRh_4B_4$ ($T_c=7$ เคลวิน) [26] จากการทดลองเป็นการผสมกันระหว่าง $ErRh_4B_4$ และ $HoMo_6S_8$ พบว่าที่อุณหภูมิวิกฤตสารประกอบอยู่ในสถานะที่มีสภาพนำยวดยิ่งที่อยู่รวมกันกับสภาพแม่เหล็กเฟอร์โร (Ferromagnetic) และในสารประกอบ $ErMo_6S_8$ [27] และ $SmRh_4B_4$ [28] พบว่ามีสภาพนำยวดยิ่งอยู่รวมกันของสภาพแม่เหล็กแอนไทเฟอร์โร (Antiferromagnetic)

4.4 ตัวนำยวดยิ่งออกไซด์แบบเดิม (Earlier Oxide Superconductors)

ในปี พ.ศ. 2508 ได้ค้นพบตัวนำยวดยิ่งที่เป็นสารประกอบออกไซด์เป็นชนิดแรก คือ $SrTiO_3$ [29] ซึ่งมีอุณหภูมิวิกฤตที่ค่อนข้างต่ำและในปี พ.ศ. 2529 คือ $Ba(Pb_{1-x}Bi_x)O_3$ [30] ที่มีอุณหภูมิวิกฤตเท่ากับ 13 เคลวิน ที่ $x = 0.25$ จากการทดลองพบว่าสารประกอบออกไซด์กลุ่มนี้ที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงที่สุดคือ $(K_{0.4}Ba_{0.6})BiO_3$ [31] ประมาณ 32 เคลวิน ในปี พ.ศ. 2531 ได้มีการค้นพบว่าสารกลุ่มนี้มีโครงสร้างแบบเพอร์อฟสไกต์ (Perovskite) [32]

เช่นเดียวกับตัวนำยวดยิ่งกลุ่มคิวเพรทแต่มีอุณหภูมิวิกฤตต่ำกว่ามากซึ่งยังไม่พบความสัมพันธ์ที่ชัดเจนกับตัวนำยวดยิ่งกลุ่มคิวเพรทมากนักทำให้ยังไม่สามารถสรุปได้ว่าทำไมตัวนำยวดยิ่งกลุ่มคิวเพรทเท่านั้นจึงให้อุณหภูมิวิกฤตที่สูงที่สุดโดยสารประกอบออกไซด์ตัวอื่นไม่สามารถทำได้

4.5 ตัวนำยวดยิ่งแบบ Heavy-Electron

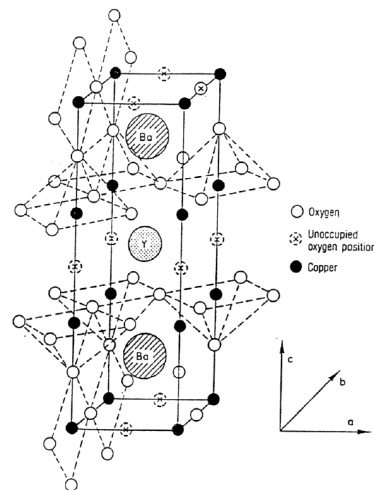
เนื่องจากค่าความจุความร้อนของอิเล็กตรอนในโลหะในสภาพปกติจะขึ้นกับสถานะที่ผิวเฟอร์มิและมีมวลอิเล็กตรอนเท่ากับ $m_0=9.1 \times 10^{-31}$ กิโลกรัม เมื่อโลหะปกติได้รับความร้อนทำให้อิเล็กตรอนมีการสั่นทำให้เกิดค่าของมวลยังผลซึ่งเป็นมวลที่เกิดจากการเปรียบเทียบกับค่าของมวลอิเล็กตรอนในโลหะสถานะปกติ [33] และสามารถเขียนสมการของค่าความจุความร้อนจำเพาะของมวลยังผลได้เป็น $c = \gamma T + \beta T^3$ เทอมที่ 2 ของสมการเป็นเทอมที่อธิบายการสั่นของอิเล็กตรอนในโลหะปกติโดยสมมติให้เคลื่อนที่อยู่ในพื้นผิวเฟอร์มิที่มีลักษณะเป็นทรงกลมและมีรัศมี k_F และมีค่า γ เท่ากับ $\gamma = \frac{\pi^2 k_B^2 \rho^*(\mu)}{m^3 k_F / \pi^2 h^2}$ เมื่อ k_B คือค่าคงตัวของโบสต์มันซ์และ $\rho^*(\mu) = m^3 k_F / \pi^2 h^2$ ซึ่งเป็นค่าความหนาแน่นสถานะของการเคลื่อนที่อิเล็กตรอนที่ผิวบนสุดบนผิวเฟอร์มิ

นอกจากมวลยังผลของอิเล็กตรอนสามารถเกิดขึ้นที่อุณหภูมิปกติแล้ว มวลยังผลสามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิต่ำ โดยเฉพาะตัวนำยวดยิ่งกลุ่มนี้มีมวลยังผลเกิดขึ้นค่ามากกว่าโลหะปกติ 2 ถึง 3 เท่า และจากการทดลองพบว่ามวลยังผลเหล่านี้เกิดจากอิเล็กตรอนในชั้น f ซึ่งปกติแล้วโลหะปกติมักเกิดจากอิเล็กตรอนในชั้น d โดยตัวนำยวดยิ่งกลุ่มนี้มีอิเล็กตรอนที่มีมวลยังผลที่มีค่ามากทำให้ถูกเรียกว่า “Heavy-Electron Superconductors” และในบางครั้งก็เรียกว่า “Heavy-Fermion Superconductor” ด้วย ตัวนำยวดยิ่งที่พบจะอยู่ในรูปของสารประกอบ อาทิเช่น Ube_{13} ($T_c=0.85$ เคลวิน) [34] $CeCu_2Si_2$ [35] ($T_c=0.65$ เคลวิน) และ Pt_3 ($T_c=0.54$ เคลวิน) [36] และการวัดค่ามวลยังผลสามารถวัดได้จากวิธี Cyclotron Resonance นอกจากที่มีอิเล็กตรอนมวลหนักแล้วตัวนำยวดยิ่งกลุ่มนี้

ยังมีสมบัติแม่เหล็กร่วมด้วย เช่น ในสาร UCd_{11} [37] และยังมีการค้นพบว่าตัวนำยวดยิ่งแบบ Heavy-Electron บางชนิดเป็น Singlet Spin-State ด้วย แต่กลไกการเกิดสภาพนำยวดยิ่งไม่ได้เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับโฟนอน ซึ่งมีการนำเสนอว่ากลไกการเกิดสภาพนำยวดยิ่งในสารกลุ่มนี้อาจเกิดจากแมกนอน (Magnon) [38] ก็เป็นไปได้

4.6 ตัวนำยวดยิ่งแบบออร์แกนิก (Organic Super Conductors)

สารประกอบออร์แกนิกที่แสดงสมบัติเป็นตัวนำยวดยิ่งได้ถูกค้นพบครั้งแรกใน พ.ศ. 2523 ซึ่งมีอุณหภูมิวิกฤตต่ำกว่า 1 เคลวิน กลไกการเกิดสภาพนำยวดยิ่งในสารออร์แกนิกนี้เกิดจากการถ่ายโอนประจุ (Charge Transfer) ระหว่างโมเลกุล Organic Cation กับ Inorganic Anion Complex โดยมี π -orbital ใน Cation ทำให้เกิดการนำไฟฟ้าแบบโลหะขึ้นโครงสร้างหลักที่สำคัญในตัวนำยวดยิ่งออร์แกนิกถูกเรียกว่า Organic Building Block คือ Bis (Ethylenedioxy) Tetrathiafulvalene ซึ่งเขียนย่อๆ ว่า ET [39] โดยในปี พ.ศ. 2526 มีการค้นพบ $(\text{ET})_2\text{ReO}_4$ [40] มีอุณหภูมิวิกฤตเท่ากับ 2.5 เคลวิน ซึ่งสูงมากแล้วสำหรับตัวนำยวดยิ่งประเภทนี้ ในปัจจุบันมีการค้นพบในสารประกอบ $(\text{ET})_2\text{Cu}[\text{N}(\text{CN})_2]\text{Br}$ [41] มีอุณหภูมิวิกฤตเท่ากับ 11.6 เคลวิน ทำให้แนวคิดเกี่ยวกับตัวนำยวดยิ่งออร์แกนิกที่ว่าอุณหภูมิวิกฤตต่ำมากๆ ตัวนำยวดยิ่งออร์แกนิกเป็นตัวนำยวดยิ่งที่มีสมบัติที่หลากหลาย โดยจะมีสมบัติอย่างหนึ่งที่คล้ายคลึงกับตัวนำยวดยิ่งแบบคิวเพรทคือ มีความสมมาตรไม่สูงมาก การนำไฟฟ้าเกิดขึ้นได้เฉพาะบางทิศเท่านั้นแต่มีสมบัติอีกหลายประการที่แตกต่าง เช่น ในโลหะปกติค่าของ Optical Spectrum ที่แสดงว่าอัตราการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นของอิเล็กตรอนจะขึ้นกับรากที่ 2 ของความถี่หรืออุณหภูมิ แต่สำหรับตัวนำยวดยิ่งแบบออร์แกนิกจากผลการทดลองของ Optical Spectrum สามารถสรุปได้ว่าอัตราการกระเจิงเป็นแบบไม่ยืดหยุ่นของอิเล็กตรอนมีค่าขึ้นกับความถี่และอุณหภูมิแบบเชิงเส้นด้วย

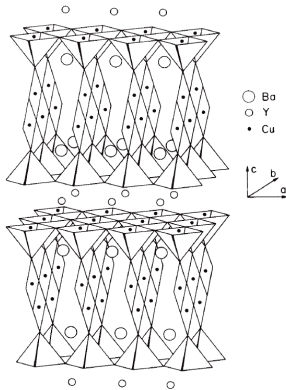


รูปที่ 9 โครงสร้าง 3 มิติ ของตัวนำยวดยิ่ง Y123 [46]

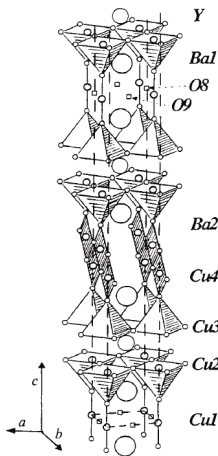
5. ความแตกต่างระหว่างตัวนำยวดยิ่งแบบดั้งเดิมกับตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูง

จากที่กล่าวมาข้างต้นตัวนำยวดยิ่งแบบดั้งเดิมคือตัวนำยวดยิ่งที่มีค่าอุณหภูมิวิกฤตไม่เกิน 35 เคลวินและตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงมีค่าอุณหภูมิวิกฤตมากกว่าค่านี้เป็นต้นไป ในปัจจุบันตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงที่ถูกค้นพบมีหลายชนิด แต่ในที่นี้จะสนใจเฉพาะตัวนำยวดยิ่งที่มีทองแดงและออกซิเจนหรือตัวนำยวดยิ่งกลุ่มคิวเพรทซึ่งนอกจากจะมีอุณหภูมิวิกฤตที่สูงมาแล้วตัวนำยวดยิ่งชนิดนี้ยังมีสมบัติหลายประการที่แตกต่างจากตัวนำยวดยิ่งแบบดั้งเดิมคือ

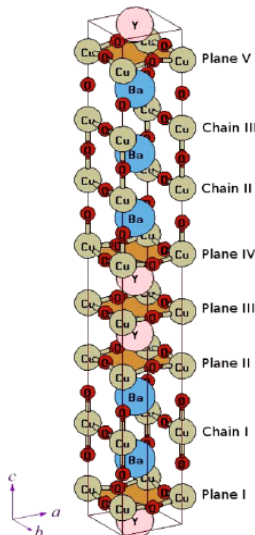
1. ตัวนำยวดยิ่งกลุ่มคิวเพรทเป็นตัวนำยวดยิ่งที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นชั้นๆ จึงทำให้มีลักษณะที่ขึ้นกับทิศทาง (Anisotropy) เป็นอย่างมากและการนำไฟฟ้าเกิดขึ้นในแนวตั้งฉากกับแกนหลัก (c) ของผลึกเกือบไม่มี จึงทำให้ตัวนำยวดยิ่งชนิดนี้มีโครงสร้างการนำไฟฟ้าเป็นแบบระนาบ 2 มิติ (a, b) จึงขอยกตัวอย่างลักษณะโครงสร้าง 3 มิติของตัวนำยวดยิ่งที่มีมิติเตรียมเป็นองค์ประกอบซึ่งเป็นตัวนำยวดยิ่งที่มีการวิจัยและพัฒนาการอย่างสม่ำเสมอในหนึ่งศตวรรษที่ผ่านมาประกอบด้วยตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y123 [42], Y124 [43], Y247 [44] และ Y358 [45] ดังแสดงในรูปที่ 9-12 ตามลำดับ



รูปที่ 10 โครงสร้าง 3 มิติ ของตัวนำยวดยิ่ง Y124 [47]



รูปที่ 11 โครงสร้าง 3 มิติ ของตัวนำยวดยิ่ง Y247 [48]



รูปที่ 12 โครงสร้าง 3 มิติ ของตัวนำยวดยิ่ง Y358 [49]

2. ตัวนำยวดยิ่งแบบดั้งเดิมเป็นตัวนำยวดยิ่งที่ไม่ขึ้นกับทิศทาง (Isotropic) จะมีความยาวอาพันธ์ (Coherence Length) เพียงค่าเดียว แต่ตัวนำยวดยิ่งกลุ่มคิวเพรทจะมีความยาวอาพันธ์ 2 ค่าคือ ความยาวอาพันธ์ในระนาบ ab และความยาวอาพันธ์ตามแกน c โดยความยาวอาพันธ์ทั้ง 2 ค่านี้มีค่าความยาวที่แตกต่างกันมาก เช่นตัวนำยวดยิ่งกลุ่มบิสมัสจะมีความยาวอาพันธ์ตามแกน c ประมาณ 2 Å แต่ในระนาบ ab มีความยาวอาพันธ์ประมาณ 40 Å ซึ่งความยาวอาพันธ์ก็คือระยะห่างระหว่างอิเล็กตรอนสองตัวในทฤษฎีบีซีเอสซึ่งจะได้กล่าวในลำดับถัดไป

3. ตัวนำยวดยิ่งกลุ่มคิวเพรทมีความยาวอาพันธ์ประมาณ 10-40 Å แต่ตัวนำยวดยิ่งแบบดั้งเดิมจะมีค่าประมาณ 10^4 Å ซึ่งมากกว่าตัวนำยวดยิ่งกลุ่มคิวเพรทประมาณ 1,000 เท่า

4. ในตัวนำยวดยิ่งแบบดั้งเดิมเมื่ออุณหภูมิวิกฤตมีค่าเพิ่มขึ้นความหนาแน่นประจุก็จะเพิ่มขึ้นด้วย แต่ในตัวนำยวดยิ่งกลุ่มคิวเพรทความหนาแน่นประจุมีรูปแบบไม่ชัดเจนเพราะได้มีการพบว่าในตัวนำยวดยิ่งกลุ่มคิวเพรทที่มีอุณหภูมิสูงสุดจะมีความหนาแน่นประจุค่อนข้างน้อย

5. ค่าช่องว่างระหว่างพลังงาน (Energy Gap) ของตัวนำยวดยิ่งกลุ่มคิวเพรทในแต่ละวิธีการวัดจะให้ค่าที่ไม่เท่ากันและมีค่าสูงกว่าตัวนำยวดยิ่งแบบดั้งเดิมมากโดยใช้วิธี Tunneling Infrared Radiation และ Reflection

6. ตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงบางชนิด เช่น $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ มีสัมประสิทธิ์ไอโซโทป (α) เท่ากับ 0.06-0.08[50] ซึ่งมีค่าน้อยกว่าสัมประสิทธิ์ไอโซโทปของทฤษฎีบีซีเอสซึ่งเท่ากับ 0.5 [51] และตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงบางชนิดจะให้ค่าสัมประสิทธิ์ไอโซโทปมากกว่าทฤษฎีบีซีเอส เช่น $(\text{Ba})\text{BiO}_3$ มีสัมประสิทธิ์ไอโซโทป เท่ากับ 0.6 [52] การเปลี่ยนของมวลไอโซโทปเพิ่มขึ้นจะทำให้อุณหภูมิวิกฤตเพิ่มขึ้นด้วย เช่น ปรอท เมื่อมวลอะตอมของปรอทเปลี่ยนจาก 199.5 u เป็น 203.4 u ทำให้อุณหภูมิวิกฤตเปลี่ยนจาก 4.126 เคลวิน เป็น 4.146 เคลวิน [53] ตามลำดับ

การค้นพบสัมประสิทธิ์ไอโซโทปของตัวนำยวดยิ่งถูกค้นพบโดยแมกซ์เวลและเรโนลด์ (Maxwell & Reynold)

[54] ในปี พ.ศ. 2493 ซึ่งทำให้ทราบว่า การเกิดสภาพนำยวดยิ่งเกิดจากอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับโครงผลึกซึ่งจะส่งผลต่ออุณหภูมิวิกฤตของสารและสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการ $M^{\alpha} T_c = \text{ค่าคงตัว}$

7. ในตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงค่าของอุณหภูมิวิกฤตจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารเจือปนแม่เหล็ก ในขณะที่ตัวนำยวดยิ่งแบบดั้งเดิมค่าของอุณหภูมิวิกฤตขึ้นกับความเข้มข้นของสารเจือปนแม่เหล็กมาก แต่ไม่ขึ้นกับสารเจือปนแม่เหล็ก

เนื่องจากมีความแตกต่างของตัวนำยวดยิ่งแบบดั้งเดิมและตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงหลายประการ เช่น การมีความไม่สมมาตรสูงของตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูง การมีค่าสัมประสิทธิ์ของไอโซโทปน้อยกว่าและมากกว่า ทฤษฎีบีซีเอส แสดงว่าการอธิบายสมบัติของตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงตามทฤษฎีบีซีเอสโดยใช้กลไกของอันตรกิริยาที่ใช้โฟนอนแบบอ่อนและใช้การประมาณในขั้นตอนการคำนวณคงไม่สามารถอธิบายตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงได้ แนวทางหนึ่งในการปรับปรุงทฤษฎีเพื่อที่จะอธิบายสมบัติของตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงได้ คือ ต้องปรับปรุงทฤษฎีบีซีเอสให้ครอบคลุมรูปแบบที่ไม่สมมาตรหรือถึง 2 มิติ ในตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงให้ได้ซึ่งมีรายละเอียดของทฤษฎีที่ใช้ในการอธิบายสภาพนำยวดยิ่งดังนี้

6. ทฤษฎีปรากฏการณ์ของตัวนำยวดยิ่ง

จากการค้นพบตัวนำยวดยิ่งจึงทำให้นักฟิสิกส์ทฤษฎีได้สร้างแบบจำลองเพื่ออธิบายเพื่อทำให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกการเกิดสภาพนำยวดยิ่งซึ่งมีทฤษฎีที่สำคัญ 3 ทฤษฎี ได้แก่ ทฤษฎีลอนดอน (The London Theory) ทฤษฎีกินซ์เบิร์กและแลนดาว (The Ginzburg-Landau Theory) และทฤษฎีบีซีเอส (The BCS Theory) ซึ่งมีรายละเอียดของแต่ละทฤษฎีดังนี้

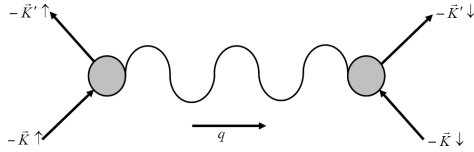
6.1 ทฤษฎีลอนดอน

ในปี พ.ศ. 2478 ฟิโนตตระกูลลอนดอน [55] เป็นผู้นำเสนอทฤษฎีที่สามารถอธิบายตัวนำยวดยิ่งโดยสามารถ

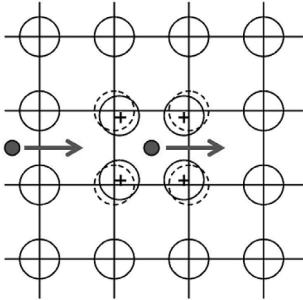
อธิบายปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ได้อย่างชัดเจนและได้นำสมการแมกเวลล์ (Maxwell Equation) [56] มาประยุกต์ในระบบตัวนำยวดยิ่งโดยกำหนดให้การนำไฟฟ้าในตัวนำยวดยิ่งเกิดจากอิเล็กตรอนยวดยิ่ง (Super Electron) ที่มีสมบัติเป็นแบบของไหลอุดมคติ (Ideal Fluid) กล่าวคือของไหลที่ไม่มีความหนืดและไม่ถูกอัดโดยลอนดอนได้กำหนดค่าคงตัว λ_L ต่อมาถูกเรียกว่า ความลึกซึมซาบได้ของลอนดอน (London Penetration Depth) ซึ่งค่านี้ก็คือ ระยะที่สนามแม่เหล็กทะลุเข้าไปในเนื้อของตัวนำยวดยิ่งและเป็นพารามิเตอร์แบบปรากฏการณ์ (Phenomenological Parameter) ในปัจจุบันได้นำค่า λ_L มาใช้ในทฤษฎีกินซ์เบิร์กและแลนดาวและประยุกต์ใช้ในการกำหนดสมบัติและการจำแนกประเภทของตัวนำยวดยิ่งให้มีความชัดเจนมากยิ่งขึ้น

6.2 ทฤษฎีกินซ์เบิร์กและแลนดาว

เนื่องจากทฤษฎีของลอนดอนยังคงเป็นทฤษฎีอย่างกว้างๆ ไม่ครอบคลุมเท่าใดนัก ต่อมากินซ์เบิร์กและแลนดาว [57] ได้นำแนวคิดของลอนดอนมาประยุกต์โดยกำหนดให้ระบบของตัวนำยวดยิ่งมีตัวแปรของความเป็นระเบียบ เพื่อใช้ในการอธิบายสมบัติของตัวนำยวดยิ่งเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กและเป็นทฤษฎีแบบมหภาค (Macroscopic Theory) จึงได้ละเว้นการพิจารณาอันตรกิริยาของอิเล็กตรอน แต่จะดูผลของปรากฏการณ์ที่เกิดแบบกว้างๆ ซึ่งจากทฤษฎีนี้สามารถแบ่งตัวนำยวดยิ่งออกเป็นสองประเภทและใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวอาพันธ์ (Coherence length : ξ) และความลึกซึมได้ของลอนดอน λ_L โดยพวกเขาได้กำหนดพารามิเตอร์ κ ขึ้นมา ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความยาวอาพันธ์และความลึกซึมได้ของลอนดอนสามารถเขียนเป็นอัตราส่วนได้เป็น $\kappa = \frac{\lambda_L}{\xi}$ จากสมการนี้สามารถแบ่งชนิดของตัวนำยวดยิ่งโดยค่า $\kappa < \frac{1}{\sqrt{2}}$ เป็นตัวนำยวดยิ่งชนิดที่ 1 และ $\kappa > \frac{1}{\sqrt{2}}$ เป็นตัวนำยวดยิ่งชนิดที่ 2 อีกทฤษฎีหนึ่งที่มีความสำคัญในการอธิบายกลไกการเกิดสภาพนำยวดยิ่งคือ ทฤษฎีบีซีเอส ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 13 แสดงอันตรกิริยาดึงดูดระหว่างอิเล็กตรอนโดยอาศัยคลื่นแลตทิซที่เรียกว่าโฟนอน [59]



รูปที่ 14 อันตรกิริยาของคู่อิเล็กตรอนของการเกิดสภาพนำยวดยิ่ง [60]

6.3 ทฤษฎีบีซีเอส

ในปี พ.ศ. 2500 บาร์ดีน คูเปอร์และشريฟเฟอร์ (Bardeen, Cooper & Schrieffer) [58] มีแนวความคิดว่า กลไกการเกิดสภาพนำยวดยิ่งเกิดจากการที่อิเล็กตรอนสองตัวดึงดูดกัน ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมโดยมีอันตรกิริยาแบบดึงดูดระหว่างอิเล็กตรอนสองตัวภายในตัวนำยวดยิ่งและอาศัยโฟนอน (Phonon) เป็นสื่อกลางในการจับคู่อิเล็กตรอน ทฤษฎีนี้เป็นทฤษฎีแบบจุลภาค (Microscopic Theory) ที่แสดงให้เห็นอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนโดยมีเงื่อนไขว่าอิเล็กตรอนที่จับคู่กันจะต้องมีโมเมนตัม ($\vec{k} \uparrow, -\vec{k} \downarrow$) และสปินตรงข้ามกันและเรียกอิเล็กตรอนคู่นี้ว่า คูคูเปอร์ (Cooper Pair) สามารถเขียนแทนอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับโฟนอนดังรูปที่ 13

อันตรกิริยาทางไฟฟ้าจะเกิดขึ้นจากอิเล็กตรอนตัวหนึ่งเคลื่อนที่ผ่านเข้าไประหว่างกลุ่มไอออนที่มีประจุบวก และอิเล็กตรอนตัวนี้ดึงดูดไอออนบวกของโครงผลึกบริเวณรอบๆ ให้เคลื่อนที่เข้ามาใกล้ทำให้บริเวณรอบๆ อิเล็กตรอนตัวนี้มีความหนาแน่นของไอออนบวกเพิ่มขึ้นและโครงผลึกจะเกิดการยุบตัวดังรูปที่ 14

การยุบตัวของโครงผลึกทำให้มีผลกระทบต่ออิเล็กตรอนอีกตัวหนึ่งที่อยู่ใกล้บริเวณนั้น โดยอิเล็กตรอนตัวนี้จะถูกกลุ่มไอออนบวกดึงดูดให้เข้าใกล้กับอิเล็กตรอนตัวแรก ทำให้ดูเหมือนว่าอิเล็กตรอนตัวแรกดึงดูดอิเล็กตรอนตัวใกล้โดยทฤษฎีนี้จะแตกต่างกับความเป็นจริงซึ่งโดยปกติแล้วอิเล็กตรอนเป็นอนุภาคที่มีประจุเหมือนกัน จะเกิดการผลักกัน

ในปัจจุบันทฤษฎีซึ่งเป็นที่ยอมรับกัน คือ ทฤษฎีกินซ์เบิร์กและแลนดาวและทฤษฎีบีซีเอสทั้งสองทฤษฎีนี้มีความมุ่งหมายที่จะอธิบายเกี่ยวกับสภาพนำยวดยิ่งแต่มีความแตกต่างกันในการอธิบายกลไกการเกิดสภาพนำยวดยิ่งซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

7. ความแตกต่างของทฤษฎีปรากฏการณ์

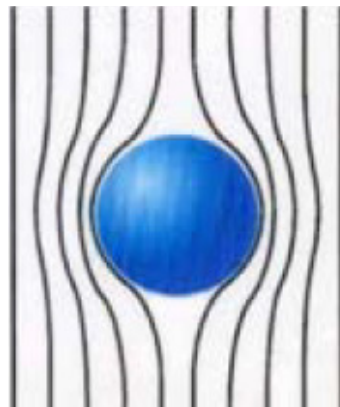
เนื่องจากสถานการณ์การศึกษาตัวนำยวดยิ่งในปัจจุบันยังคงไม่มีทฤษฎีใดที่ได้รับการยอมรับว่าอธิบายสมบัติต่างๆ ของตัวนำยวดยิ่งได้อย่างสมบูรณ์โดยแต่ละทฤษฎีนั้นเริ่มจากแนวคิดที่ต่างกันแต่สามารถอธิบายสภาพนำยวดยิ่งได้เหมือนกัน มีข้อเด่นและข้อด้อยต่างกันออกไป กล่าวคือ ทฤษฎีบีซีเอสสามารถอธิบายสภาพนำยวดยิ่งของสารที่มีอุณหภูมิวิกฤตต่ำๆ ได้ดี แต่สำหรับตัวนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงๆ ทฤษฎีบีซีเอสจะให้ผลไม่สอดคล้องกับการทดลอง สำหรับทฤษฎีกินซ์เบิร์กและแลนดาวสามารถที่จะอธิบายตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงได้แต่จะให้ผลในบริเวณใกล้ๆ อุณหภูมิวิกฤตเท่านั้น ในช่วงอุณหภูมิที่ต่างออกไปจากอุณหภูมิวิกฤตทฤษฎีกินซ์เบิร์กและแลนดาวก็จะให้ผลที่ไม่สอดคล้องกับการทดลอง นอกจากนี้แนวคิดเริ่มต้นของทั้งสองทฤษฎีนี้ยังเริ่มต้นจากคนละแนวคิดกล่าวคือ แนวคิดของทฤษฎีบีซีเอสนั้นเริ่มมาจากการพิจารณาในระดับจุลภาคโดยแสดงให้เห็นถึงอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอน แต่ในทฤษฎีกินซ์เบิร์กและแลนดาวจะอธิบายในระดับมหภาคจะละเว้นการพิจารณาอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอน ดังนั้นจึงถือได้ว่าการพัฒนาทางด้านทฤษฎียังไม่มีข้อสรุปที่ชัดเจน และเนื่องจากข้อมูลด้านการทดลองที่มีอยู่ยังมีไม่มากพอที่จะชี้ขาดความถูกต้องของทฤษฎีหรือสมมติฐานได้

ชัดเจนทำให้นักวิจัยต้องการข้อมูลเพิ่มเติมเพื่อมาตัดสินความถูกต้องของทฤษฎี

อย่างไรก็ตามการประยุกต์ใช้ตัวนำยวดยิ่งได้ทำคู่ขนานกันไปซึ่งปัจจุบันได้มีการนำตัวนำยวดยิ่งมาประยุกต์ใช้งานจริงโดยส่วนใหญ่จะเป็นการใช้งานเกี่ยวกับสนามแม่เหล็กความเข้มสูงที่ตัวนำยวดยิ่งผลิตได้ ได้แก่ รถไฟฟ้าพลังงานแม่เหล็ก (Maglev) [61] โดยคำว่า Maglev นี้มีชื่อย่อมาจากคำว่า Magnetic Levitation ซึ่งเป็นรถไฟไฟฟ้าที่อาศัยแรงยกตัวลอยเหนือรางหรือบนเส้นทางวิ่งเนื่องจากการผลักกันของสนามแม่เหล็กสองขั้วที่เหมือนกัน อย่างไรก็ตามการใช้หลักการนี้ต้องอาศัยพลังงานไฟฟ้าค่อนข้างสูงรวมถึงการลอยตัวเหนือรางเนื่องจากการผลักกันของแม่เหล็กจะทำให้การลอยตัวไม่มีเสถียรภาพจึงบรรทุกน้ำหนักได้น้อย การพัฒนาจึงไม่ก้าวหน้าในช่วงแรกต่อมาเมื่อมีการพัฒนาตัวนำยวดยิ่งขึ้นจึงได้อาศัยปรากฏการณ์ไมสเนอร์เนื่องจากสนามแม่เหล็กจะเกิดการห่อตัวนำยวดยิ่งดังรูปที่ 15 จึงทำให้การลอยตัวเหนือเส้นทางวิ่งมีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้นและสามารถป้องกันการตกของตัวรถได้

ในปัจจุบันได้ค้นพบตัวนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดของไนโตรเจนเหลวทำให้การพัฒนารถไฟ Maglev มีการพัฒนาอย่างก้าวกระโดด ในปัจจุบันรถไฟ Maglev ได้นำไปใช้งานจริงแล้วในบางประเทศ คือ ปี พ.ศ. 2546 สามารถทำความเร็วได้สูงสุด ประมาณ 581 กิโลเมตรต่อชั่วโมง นอกจากนี้รถไฟ Maglev เป็นเทคโนโลยีที่ประหยัดพลังงานเป็นอย่างมากโดยจากการคำนวณพบว่า สามารถประหยัดพลังงานได้ถึง 5 เท่าเมื่อเทียบกับรถยนต์และเครื่องบิน

การสร้างภาพด้วยการสั่นพ้องแม่เหล็ก (MRI: Magnetic Resonance Imaging) [63] เป็นอุปกรณ์ทางการแพทย์ที่ได้นำตัวนำยวดยิ่งมาประยุกต์ใช้ โดยในยุคเริ่มแรกของการสร้างเครื่องมือได้ใช้ขดลวดทองแดงที่มีน้ำหนักของขดลวดประมาณ 100 กิโลกรัม แต่จะให้สนามแม่เหล็กที่มีความเข้มน้อยประมาณ 0.3-0.7 เทสลา ดังนั้นจึงเกิดการพัฒนาในระยะหลังโดยใช้แม่



รูปที่ 15 แสดงสนามแม่เหล็กขณะที่ห่อตัวนำยวดยิ่ง [62]

เหล็กยวดยิ่ง (Super Magnet) ซึ่งนำตัวนำยวดยิ่งมาทำเป็นขดลวด (Wire) สามารถให้ความเข้มสนามแม่เหล็กได้ถึง 2 เทสลา

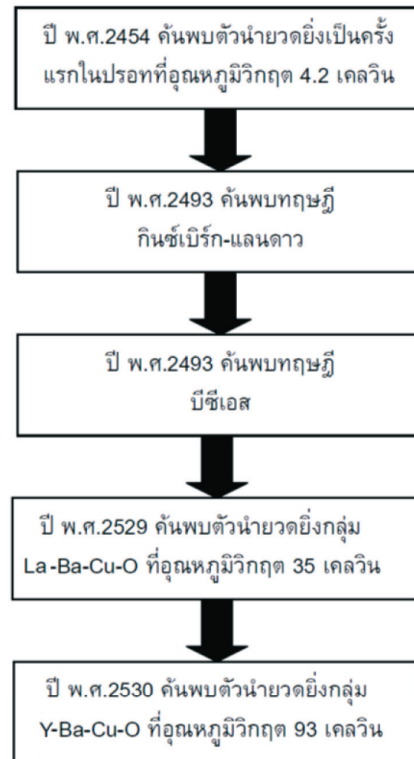
เครื่องเร่งอนุภาค (Accelerator) [64] เป็นอุปกรณ์ที่ต้องการสนามแม่เหล็กที่มีค่าสูงประมาณ 10-15 เทสลา เกิดจากการให้กระแสไฟฟ้าวิ่งผ่านขดลวดยวดยิ่งซึ่งออกแบบให้นำกระแสได้เกือบหมื่นแอมแปร์โดยไม่สูญเสียพลังงาน สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนี้จะให้ค่าสูงกว่าตัวนำธรรมดาหลายเท่าตัว เนื่องจากตัวนำธรรมดามีการสูญเสียพลังงานในรูปความร้อนทำให้ไม่สามารถทนกระแสสูงๆ ได้ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าตัวนำยวดยิ่งเป็นวัสดุใหม่ที่นักวิทยาศาสตร์ยังคงให้ความสนใจกว่าร้อยปีที่ผ่านมาและยังต้องสั่งสมความรู้ด้านเทคโนโลยีเป็นอันมากเพื่อที่จะนำวัสดุชนิดนี้มาใช้ในอนาคตที่กำลังใกล้ตัวเราเข้ามาทุกที

8. สรุป

บทความวิชาการฉบับนี้ได้สรุปสมบัติพื้นฐานที่สำคัญของตัวนำยวดยิ่งได้แก่ สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางแม่เหล็ก และการค้นพบตัวนำยวดยิ่งแบบต่างๆ ในระยะเวลาหนึ่งศตวรรษที่ผ่านมา นอกจากนี้ได้สรุปทฤษฎีและความแตกต่างของทฤษฎีที่ใช้ในการอธิบายกลไกการเกิด

สภาพนำยวดยิ่งซึ่งมีเหตุการณ์ที่สำคัญนับตั้งแต่ที่มีการค้นพบสภาพนำยวดยิ่งในปรอทเมื่อปี พ.ศ. 2454 โดยคาร์เมอร์ลิงห์นอนเนส จากนั้นกว่า 75 ปี จนกระทั่งในปี พ.ศ. 2529 เบททอสและมูลเลอร์ได้ค้นพบตัวนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงกว่า 30 เคลวิน ในสารประกอบแลนทานัม (La) ในปีต่อมาและคณะได้ค้นพบตัวนำยวดยิ่งกลุ่มอิตเทรียม (Y) ที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงถึง 93 เคลวิน ซึ่งเป็นอุณหภูมิวิกฤตที่สูงกว่าจุดเดือดของไนโตรเจนเหลวที่ 77 เคลวินเป็นครั้งแรก จึงทำให้การประยุกต์ใช้งานสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวางซึ่งแตกต่างจากตัวนำยวดยิ่งแบบดั้งเดิมที่ต้องใช้อิเลียมเหลวและไฮโดรเจนเหลวที่จุดเดือด 4 เคลวินและ 20 เคลวิน เพื่อที่จะรักษาสภาพนำยวดยิ่งและต้องมีระบบกันความร้อนเป็นอย่างดี การค้นพบของเบททอสและมูลเลอร์เป็นการค้นพบครั้งสำคัญ ของตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงจึงทำให้พวกเขาได้รับรางวัลโนเบลในปี พ.ศ. 2530 [65]

หลังจากการค้นพบตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงแล้วได้มีการพัฒนาในด้านต่างๆ อย่างชัดเจนโดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านการทดลองซึ่งพัฒนาจนก้าวหน้าสู่การศึกษาค้นคว้าในด้านทฤษฎีอย่างเทียบกันไม่ได้ กล่าวคือ ตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงที่เตรียมได้มีสมบัติหลายประการที่ไม่สามารถอธิบายได้โดยใช้ทฤษฎีบีซีเอสและทฤษฎีกินซ์เบิร์กแลนดาวและจนถึงปัจจุบันก็ไม่มีทฤษฎีใดที่สามารถอธิบายตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงได้อย่างครอบคลุมซึ่งตรงกันข้ามกับการทดลองที่มีการวัดสมบัติต่างๆ การเตรียมตัวนำยวดยิ่งในรูปแบบต่างๆ รวมถึงการประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางซึ่งจะสรุปเหตุการณ์สำคัญของการค้นพบตัวนำยวดยิ่งและทฤษฎีที่สำคัญๆ ได้ดังรูปที่ 16 และในปี พ.ศ. 2554 เป็นปีของการครบรอบหนึ่งศตวรรษของการค้นพบตัวนำยวดยิ่งซึ่งนักฟิสิกส์ทั้งทฤษฎีและการทดลองคงให้ความสนใจที่จะพัฒนาสมบัติพื้นฐานของตัวนำยวดยิ่งเพื่อที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวันของมนุษย์ให้ได้มากที่สุดและมีพัฒนาการที่ดีขึ้นต่อไป



รูปที่ 16 ลำดับเหตุการณ์ของการค้นพบตัวนำยวดยิ่งและทฤษฎีที่สำคัญ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Bennesman and Ketterson, *The Physics of Superconductor*, 1st, New York: Springer, 2003, pp.385.
- [2] T.A.Vanderah, *Chemistry of Superconductor Materials*, 1st, New Jersey: NoYes Publications, 1990, pp.5.
- [3] C.Kittel, *Introduction to Solid State Physics*, 6th, New York: John Wiley& Sons, 1996, pp.334.
- [4] W.Meissner and R.Ochsenfeld, "Ein neuer Effekt bei Eintritt der supraleitfähigkeit," *Naturwissenschaften*, vol.21, pp.787-788, 1933.
- [5] R.W.Hill, "Superconducting Levitation," *Physics in Canada*, vol.67, pp.136-138, 2011.



- [6] D.B.Jan, J.Y.Coulter, M.E.Hawley, L.N. Bilaevskii, M.P.Maley, Q.X.Jia, B.B.Maranville, F.Hellman, and X.Q Pan "Flux Pinning Enhancement in Ferromagnetic and Superconducting Thin-Film Multilayers," *Applied Physics Letters*, vol. 82, pp.778-780, 2003.
- [7] Mcdonough. (2004, August 27). [Online]. Available: http://www.user.qwest.net/csconductorExperiment_Kits/Demonstration%20Kits.html.
- [8] B.S.Deaver and W.M. Fairbank, "Experimental Evidence for Quantized flux in Superconducting Cylinders," *Physical Review Letter*, vol.7, pp.43-46, 1961.
- [9] A.L.Fetter and J.D.Walecka, *Quantum Theory of Many-Particle System*, 1st, Singapore, Mc Grow Hill, 1995, pp.416.
- [10] C.Kittel, *Introduction to Solid State Physics*, 6th, New York: John Wiley & Sons, 1996, pp.358.
- [11] A.A.Abrikosov, "On the Magnetic Properties of Superconductors of the Second Group," *Soviet Physics JETP*, vol.5, pp.1442-1452, 1957.
- [12] U. Essmann and H.Trauble, "The Direct Observation of Individual Flux Line in Type II Superconductors," *Physics Letter*, vol. 24A, pp.526-527, 1967.
- [13] A.A.Abrikosov, "Type II Superconductors and The Vortex Lattice," *Nobel Lecture*, pp.59-67, 2003.
- [14] U. Essmann and H.Trauble, "The Direct Observation of Individual Flux Line in Type II Superconductors," *Physics Letter*, vol. 24A, pp.526-527, 1967.
- [15] J.Deang, Q.Du, M.Gunzburger, and J. Peterson, "Vortice in Superconductors: Modelling and Computer Simulations," *Philosophical Transactions of The Royal Society*, vol.335, pp. 1957-1968, 1997.
- [16] B.W.Robert, "Survey of Superconductive Materials and Critical Evaluation of Selected Properties," *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, vol.5, pp.591, 1976.
- [17] B.W.Robert, "Survey of Superconductive Materials and Critical Evaluation of Selected Properties," *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, vol.5, pp.687, 1976.
- [18] Y.Takano, N.Uchiyama, S.Ogawa, N.Mori, Y.Kimishima, S.Arisawa, A.Ishii, T.Hatano, and K.Togano, "Superconducting Properties of CuS₂-Under High Pressure," *Physica C*, vol.341-348, pp.739-740, 2000.
- [19] L.R.Testardi, J.H.Wernick, and C.K. Royer, "Superconductivity with Onset Above 23 K in Nb-Ge Sputtered Films," *Solid State Communications*, vol.15, pp.1-4, 1974.
- [20] J.G. Bednorz and K.A.Muller, "Possible High T_c Superconductivity in the Ba-La-Cu-O System," *Zeitschrift fur Physik B Condensed Matter*, vol.64, pp.189-193, 1986.
- [21] M.K.Wu, J.R.Ashburn, C.J.Torng, P.H.Hor, R.L.Meng, L.Gao, Z.J.Huang, Y.Q.Wang, and C.W.Chu, "Superconductivity at 93 K in a New Mixed-Phase Y-Ba-Cu-O Compound System at Ambient Pressure," *Physical Review Letter*, vol.58, pp.908-910, 1987.
- [22] G.M.Zhao, H.Keller, and K.Conder, "Unconventional Isotope Effect in the High-Temperature Cuprate Superconductors," *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol.13, pp.569-587, 2001.
- [23] A.A.Abrikosov and L.P.Gorkov, "Contribution to the Theory of Superconducting Alloy with Paramagnetic Impurities," *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, vol.12, pp.1243-1253, 1961.
- [24] A.N.Podmarkov and I.S. Sandalov, "Possibility of Magnetic Field-Induced Superconductivity



- in Metal with Kondo Impurities,” *Zh.Eksp. Teor. Fiz*, vol.95, pp.2235-2247, 1989.
- [25] J.W.Lynn, G. Shirane, W.Thomlinson, and R.N. Shelton, “Competition between Ferromagnetism and Superconductivity in HoMo_6S_8 ,” *Physical Review Letter*, vol.46, pp.368-371, 1981.
- [26] J.L.Genicon, A.Sulpice, and R. Tournier, “Ferromagnetism and Superconducting down to 0 K in b.c.t. ErRh_4B_4 ,” *Journal Physique Letter*, vol.44, pp.725-732, 1983.
- [27] O.Fischer, M.Ishikawa, M.Pelizzone, and A.Treyvaud, “Exchange and Crystalline Field in Metallic Compounds,” *Journal De Physique*, vol.5, pp.89-94, 1979.
- [28] H.C.Hamaker, L.D.Woolf, H.B.Mackay, Z. Fisk, and M.B.Maple, “Coexistence of Superconductivity and Antiferromagnetic order in SmRh_4B_4 ,” *Solid State Communication*, vol.32, pp.289-294, 1979.
- [29] J.F.Schooley, W.R.Hosler, E.Ambler, and J.H.Becker, “Dependence of Superconducting Transition Temperature on Carrier Concentration in Semiconducting SrTiO_3 ,” *Physical Review Letter*, vol.14, pp.305-307, 1965.
- [30] A.W.Sleight, J.L.Gillson, and P.E. Bierstedt, “High Temperature Superconductivity in the $\text{BaPb}_{1-x}\text{Bi}_x\text{O}_3$ System,” *Solid State Communication*, vol.17, pp.27-28, 1975.
- [31] S.Jin, T.H.Tiefel, R.C.Sherwood, A.P.Ramirez, E.M.Gyorgy, G.W.Kammlott, and R.A. Fastnact, “Transport Measurement of 32K Superconductivity in Ba-K-Bi-O System,” *Applied Physics Letter*, vol.53, pp.1116-1119, 1988.
- [32] M.A.Pena and J.L.G.Fierro, “Chemical Structure and Performance of Perovskite Oxide,” *Chemical Reviews*, vol.1, pp.1981-2017, 2001.
- [33] P.Michalel, “Effective Mass Model-Superconductors with Anisotropic Electron-Phonon Interaction,” *Physica C*, vol.157, pp.4-12, 1989.
- [34] T. Maehira, A.Higashiya, M.Higuchi, H.Yasuhara, and A.Hasegawa, “Electronic Structure and the Fermi Surface of UBe_{13} ,” *Physica B*, vol.312-313, pp.103-105, 2002.
- [35] M.Ishikawa, N.Takeda, P.Ahmet, Y.Karaki, H. Ishimoto, D.Hud, and J.Sakurai, “Ferromagnetic Interaction and Superconductivity of CeCu_2Si_2 ,” *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, vol.63, pp.1165-1169, 2002.
- [36] M.S.Kim, M.C.Bennett, D.A.Sokolov, M.C. Aronson, J.N.Millican, J.Y.Chan Huang, Y. Chen, and J.W.Lynn, “Synthesis and Study of the Heavy-Fermion Compound Yb_5Pt_9 ,” *Physical Review B*, vol.74, pp.1-6, 2006.
- [37] Z.Fisk, G.R.Stewart, J.O.Willis, H.R.Ott, and F.Hulliger, “Low-Temperature Properties of the Heavy-Fermion System Ucd_{11} ,” *Physical Review B*, vol.30, pp.6360-6362, 1984.
- [38] G.Chen and W.Goddard, “The Magnon Pairing Mechanism of Superconductivity in cuprate ceramics,” *science*, vol.239, pp.899-902, 1988.
- [39] A.Graja, A.Brau, and J.P.Farges, “Study of New Conducting Organic Composite Base on BEDO-TTF Molecule,” *Synthetic Metal*, vol.122, pp.233-235, 2001.
- [40] S.S.P.Pakin, E.M.Engler, R.R.Shumaker, R.Lagier, V.Y.Lee, J.C.Scott, and R.L.Greene, “Superconductivity in a New Family of Organic Conductors,” *Physical Review Letter*, vol.50, pp.270-273, 1983.
- [41] L.I.Buranov, N.D.Kushch, V.A.Merzhanov, M.V.Oshev, A.G.Khomenko, and E.B. Yagubshi, “Anisotropic Resistivity and



- Thermopower of Organic Superconductor $(\text{ET})_2\text{Cu}[\text{N}(\text{CN})_2]\text{Br}$,” *Journal Physics France*, vol.2, pp.1257-1262, 1992.
- [42] K.Corder, “Oxygen Diffusion in the Superconductors of the YBaCuO family,” *Material Science and Engineering*, vol.32, pp.41-43, 2001.
- [43] C.A.Hijar, C.L.Stern, K.R. Poeppelmeier, K. Rogachi, Z.Chen, and B.Dabrowski, “Single-Crystal Growth and Characterization of $\text{REBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$ and $\text{Y}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$,” *Physica C*, vol.252, pp.13-21, 1995.
- [44] T.Fukushima, S.Horii, H.Ogino, T.Uchikoshi, T.S.Suzuki, Y. Sakka, A.Ishihara, J.I.Shimoyama, and K.Kishio, “Tri-axial Grain Orientation of $\text{Y}_2\text{Ba}_4\text{Cu}_7\text{O}_y$ Achieved by Magneto-Science Method,” *Applied Physics Express*, vol.1, pp. 111701-111703, 2008.
- [45] A.Aliabadi, A. Farshchi, and M. Akhavan, “A New Y-based HTSC with T_c above 100 K,” *Physica C*, vol. 469, pp. 2012–2014, 2009.
- [46] W. Buckel, “*Superconductivity Fundamental and Application*,” 1st, New York: VCH Publisher Inc, 1991, pp.295.
- [47] P.Marsh, R.M.Fleming, M.L. Mandich, A.M. Desantolo, J. Kwo, M.Hong, and L.J.Martinez-Miranda, “Crystal Structure of the 80 K Superconductor $\text{YBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$,” *Nature*, vol.334, pp.141-143, 1988.
- [48] P.Bordet, C.Chailout, J. Chenavas Hodeau, M Marezio, J.L. Karpinski, and .E Kaldis, “Structure Determination of New High-Temperature Superconductor $\text{YBa}_2\text{Cu}_7\text{O}_{14+x}$,” *Nature*, vol.334, pp. 596-598, 1988.
- [49] A.Tavana and M.Akhavan, “How T_c can go above 100 K in the family,” *Euro Physics Journal B*, vol. 73, pp.79-83, 2010.
- [50] M.A.Malik and B.A.Malik, “Isotope Effect as a Probe of the Role of Phonons in Conventional and High Temperature Superconductors,” *American Journal of Condensed Matter Physics*, vol.2, pp.67-72, 2002.
- [51] T.W.Barbee, M.L.Cohen, L.C.Bourne, and A.Zettl, “The Isotope Effect and Superconducting Oxides,” *Journal of Physics C: Solid State Physics*, vol.21, pp.5977-5985, 1988.
- [52] H.K.Yoshida, T.Hirooka, A.Oyamada, Y.Okabe, T.Takahashi, T.Sasaki, A.Ochiai, T.Suzuki, A.J.Mascarenhas, J.I.Pankove, T.F.Ciszek, S.K.Deb, R.B.Goldfarb, and Y.Li, “Oxygen Isotope Effect in the Superconducting Bi-Sr-Ca-Cu-O System,” *Physica C*, vol.156, pp.481-484, 1988.
- [53] C.A.Reynold, B.Serin, W.H.Wright, and L.B. Nesbitt, “Superconductivity of Isotope of Mercury,” *Physical Review*, vol.78, pp.478-478, 1950.
- [54] J.Bardeen, “Electron-Phonon Interactions and Superconductivity,” *Nobel Lecture*, pp.54-69, 1972.
- [55] C.Timm, *Theory of Superconductivity*, 1st, New York: Tu Dresden, 2012, p.23.
- [56] H.Zhang, Y.Duan, and B. Hu, “Bifurcation of the London Equation in Anisotropic Superconductors,” *Euro Physics Letters*, vol.52, pp.101-107, 2000.
- [57] Z.Tesanovic, “Extreme Type-II Superconductors in a Magnetic Field: A Theory of Critical Fluctuations,” *Physical Review B*, vol.59, pp.6449-6474, 1999.
- [58] J.Bardeen, N.Cooper, and J.R.Schrieffer, “Theory of Superconductivity,” *Physical Review*, vol.108, pp.1175-1204, 1957.
- [59] W. Buckel, *Superconductivity Fundamental and Application*, 1st, New York: VCH Publisher Inc, 1991, pp.321.



- [60] K.Matsumoto, *General Theory of High- T_c Superconductors*, 1st, Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2010, pp.8.
- [61] J.S.Wang, S.Y.Wang, Z.Y. Ren, H.Jiang, M.Zhu, X.R.Wang, X.M.Shen, and H.H.Song, "Experiment Result of High Temperature Superconducting Maglev Vehicle," *Physica C*, vol.386, pp.431-437, 2003.
- [62] C.Kittel, *Introduction to Solid State Physics*, 6th, New York: John Wiley & Sons, 1996, pp.321.
- [63] Y.Iwasa, J.Bascunan, S.Hahn, M.Tomita, and W.Yao, "High-Temperature Superconducting Magnets for NMR and MRI: R&D Activities at the MIT Francis Bitter Magnet Laboratory," *IEEE Transaction on Applied Super conductivity*, vol.20, pp.718-721, 2010.
- [64] R.M.Scanlan, W.A.Barletta, D.D. Orco, A.D. Mcinturff, A.Asner, E.W.Collings, P.F.Dahl, H.Desportes, A.Devred, R.Garre, E.Gregory, W.Hassenzahl, M.Lamm, D.Larbalestier, D.Leroy, P.Mcintyre, J.Miller, T.Shintomi, H.T.Kate, and S.Wipf, "Review of Status of Superconducting Accelerator and Detector Magnet at Extremely High Fields," *Nuclear Instrument and Methods in Physics Research A*, vol.380, pp.544-554, 1996.
- [65] J.G.Bednorz, and K.A.Muller, "Perovskite-Type Oxides-The New Approach to High- T_c Superconductivity," *Nobel Lecture*, pp.425-457, 1987.