
1 ศตวรรษตัวนำยวดยิ่ง: อดีต ปัจจุบันและอนาคต

Century of Superconductors: Past Present and Future

อาภาพงศ์ ชั่งจันทร์*

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

Arpaong Changjan*

Department of Science and Mathematics, Faculty of Science and Technology, Pathumwan Institute of Technology.

บทคัดย่อ

ตัวนำยวดยิ่งถูกค้นพบเป็นครั้งแรกในปีค.ศ.1911 นับเป็นเวลากว่าศตวรรษที่ตัวนำยวดยิ่งได้มีพัฒนาการทั้งทางด้านทฤษฎีและการทดลอง แม้ในปัจจุบันจะมีการประยุกต์ใช้ตัวนำยวดยิ่งในหลายๆ ด้าน อาทิเช่น ด้านการแพทย์ ด้านการคมนาคมหรือการวิจัยที่ต้องใช้สนามแม่เหล็กความเข้มสูง แต่ความเข้าใจในกระบวนการเกิดสภาพนำยวดยิ่งก็ยังไม่เป็นที่กระจ่างชัดนักรวมถึงความพยายามในการสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิวิกฤตใกล้เคียงอุณหภูมิห้องซึ่งยังไม่ประสบผลสำเร็จ จึงทำให้การวิจัยตัวนำยวดยิ่งยังเป็นปัญหาปลายเปิดที่ทำหาคำตอบความสามารถของนักฟิสิกส์จนกระทั่งทุกวันนี้ ในบทความนี้จะกล่าวถึงประวัติการค้นพบและพัฒนาการของตัวนำยวดยิ่ง การประยุกต์ใช้งานรวมถึงแนวทางในการใช้ประโยชน์ต่อไปในอนาคต

คำสำคัญ : ตัวนำยวดยิ่ง สภาพนำยวดยิ่ง อุณหภูมิวิกฤต

Abstract

Superconductor was discovered for the first time in 1911. For more than a century, superconductor has both theoretical and experimental developments. Nowadays superconductor has applications in many areas such as medical, transport or research that requires high-intensity magnetic field. However an understanding of the process of superconductivity is still not clear and endeavors to synthesize superconductor with critical temperature near room temperature has not successful. Therefore, superconductor research problem is open-ended problems that challenge the ability of physicists until today. This article discussed the history of the discovery and development of superconductor, applications and guidelines for exploitation in the future.

Keywords : superconductor, superconductivity, critical temperature

*E-mail: otto_sinkronity@yahoo.com

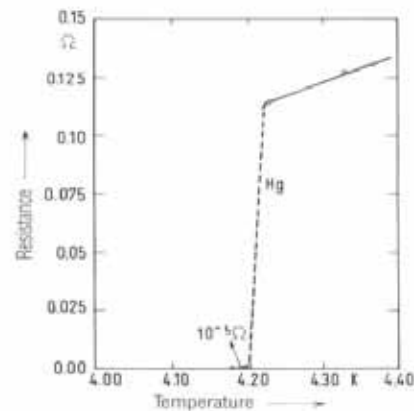
บทนำ

เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปแล้วว่าองค์ประกอบในวงจรไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานคือความต้านทาน (resistance) ซึ่งค่าความต้านทานนี้เป็นสมบัติเฉพาะตัวของวัสดุที่ทำหน้าที่ต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวัสดุนั้นๆ เราสามารถใช้ค่าความต้านทานในการจำแนกประเภทของวัสดุตามความสามารถในการต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าจากน้อยไปหามากได้เป็น ตัวยาน สารกึ่งตัวนำและฉนวนตามลำดับ (Serway & Jewett, 2004) โดยปกติพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากความต้านทานจะแสดงออกมาในรูปของพลังงานความร้อน แสง เสียง หรือพลังงานในรูปแบบอื่นๆ ซึ่งเราสามารถนำการเปลี่ยนรูปของพลังงานเหล่านี้มาใช้ประโยชน์ได้ เช่น หม้อหุงข้าวไฟฟ้า เครื่องปิ้งขนมปังหรือหลอดไฟ เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามในการประยุกต์ใช้งานในหลายกรณี การสูญเสียพลังงานเนื่องจากความต้านทานก็ไม่ใช่ที่ต้องการเพราะจะทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานลดลง เช่น การส่งกระแสไฟฟ้าผ่านสายส่งระยะไกล การทำงานของมอเตอร์หรือการใช้กระแสไฟฟ้าเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กความเข้มสูง ตัวนำยวดยิ่ง (Superconductor) ซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถนำไฟฟ้าได้อย่างสมบูรณ์เมื่ออยู่ในสภาวะที่เหมาะสม กล่าวคือเมื่อลดอุณหภูมิลงจนถึงค่าอุณหภูมิวิกฤตค่าความต้านทานไฟฟ้าจะลดลงอย่างทันทีทันใดและเหลือน้อยมากจนแทบจะเป็นศูนย์ กระแสไฟฟ้าจึงสามารถไหลผ่านได้โดยแทบจะไม่สูญเสียพลังงานเลย ตัวนำยวดยิ่งจึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในกรณีเหล่านี้ได้

การค้นพบสภาพนำยวดยิ่ง

ตัวนำยวดยิ่งถูกค้นพบเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1911 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวเนเธอร์แลนด์ชื่อ คาเมออร์ลิง ออนเนส (Ketterson & Song, 1999) ซึ่งก่อนหน้านั้นอนเนสได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับระบบอุณหภูมิต่ำและประสบความสำเร็จในการลดอุณหภูมิจนกระทั่งฮีเลียมควบแน่นเป็นของเหลวได้ที่อุณหภูมิ 4 เคลวิน ในปี ค.ศ. 1908 จากความสำเร็จในการลดอุณหภูมิของระบบลงได้ถึงระดับนี้ทำให้การศึกษาสมบัติต่างๆ ของวัสดุในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำมากๆ สามารถทำได้ นักวิทยาศาสตร์เชื่อว่าในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำมากๆ วัสดุจะมีสมบัติแตกต่างจากวัสดุชนิดเดียวกันที่อุณหภูมิห้อง ออนเนสได้ทำการศึกษาสมบัติต่างๆ ของวัสดุที่สภาวะอุณหภูมิต่ำโดยใช้ฮีเลียมเหลวเป็นสารหล่อเย็นและหนึ่งในสมบัติของวัสดุที่เขาทำการศึกษาคือสภาพนำไฟฟ้าในโลหะโดยเลือกศึกษาจากปรอทเป็นลำดับแรก สาเหตุที่ออนเนสเลือกที่จะ

ศึกษาสมบัติของปรอทก่อนเนื่องจากปรอทเป็นสารที่สามารถทำให้บริสุทธิ์ได้สะดวกที่สุดในตอนนั้น จากการทดลองทำให้พบพฤติกรรมที่ไม่ปกติของความต้านทานไฟฟ้าในปรอทคือเมื่อลดอุณหภูมิลงค่าความต้านทานจะลดลงเรื่อยๆ แต่เมื่อลดอุณหภูมิจนกระทั่งปรอทมีอุณหภูมิ 4.2 เคลวิน ความต้านทานจะลดลงเป็นศูนย์อย่างทันทีทันใด เรียกสภาวะที่ความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุมีค่าเป็นศูนย์อย่างทันทีทันใดนี้ว่าสภาพนำยวดยิ่ง (Superconductivity) เรียกสารที่มีการเปลี่ยนสถานะทางไฟฟ้าในลักษณะนี้ว่าตัวนำยวดยิ่ง (Superconductor) และเรียกอุณหภูมิที่ทำให้วัสดุเปลี่ยนจากสภาพนำธรรมดาเป็นสภาพนำยวดยิ่งว่าอุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature)

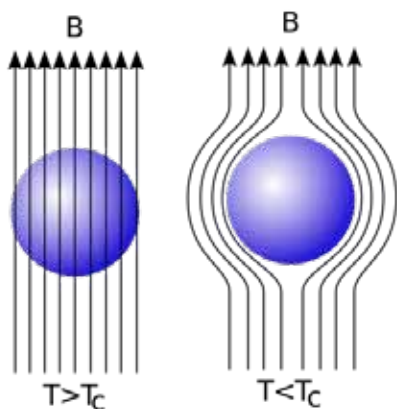


ภาพที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิสำหรับสารตัวนำยวดยิ่งในปรอทที่มีความต้านทานเป็นศูนย์อย่างทันทีทันใดที่อุณหภูมิ 4.2 K (Buckel, 1991)

ในสภาพนำยวดยิ่งสารจะมีสมบัติทางแม่เหล็กและความจุความร้อนจำเพาะเปลี่ยนไปนอกจากอุณหภูมิที่มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตที่สามารถทำลายสภาพนำยวดยิ่งได้ยังพบว่าสภาพนำยวดยิ่ง ถูกทำลายด้วยกระแสไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กที่มีค่าแน่นอนค่าหนึ่งเรียกกระแสไฟฟ้าที่น้อยที่สุดที่ทำให้สภาพนำยวดยิ่งเปลี่ยนไปเป็นสภาพนำปกติว่ากระแสวิกฤต (Critical current) และเรียกสนามแม่เหล็กที่น้อยที่สุดที่ทำให้สภาพนำยวดยิ่งเปลี่ยนไปเป็นสภาพนำปกติว่าสนามแม่เหล็กวิกฤต (Critical magnetic fields)

ต่อมาในปีค.ศ. 1933 ไมสเนอร์และออกเซนเฟลด์ (Buckel, 1991) ได้ค้นพบสมบัติพื้นฐานที่สำคัญของตัวนำยวดยิ่งว่าเมื่อลดอุณหภูมิลงจนต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตสนามแม่เหล็กภายนอก

จะไม่สามารถทะลุผ่านเข้าไปในสารตัวนำยวดยิ่งได้และที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตสนามแม่เหล็กสามารถทะลุทะลวงเข้าไปในเนื้อสารได้แต่เมื่อลดอุณหภูมิจนจนสารเปลี่ยนเป็นตัวนำยวดยิ่งสนามแม่เหล็กจะถูกผลักให้เบนออกมาทำให้สนามแม่เหล็กภายในมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นสารตัวนำยวดยิ่งจึงมีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็กไดอาแบบสมบูรณ์ (Perfect diamagnetic) และอธิบายว่าสาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งเกิดขึ้นที่ผิวของสารตัวนำยวดยิ่งนั้น สร้างสนามแม่เหล็กต่อต้านสนามแม่เหล็กภายนอกที่เข้าไปกระทำ ความหนาของชั้นกระแสนี้เรียกว่าระยะทะลวงลึกของสนาม (Field penetration depth) มีค่าประมาณ 10^{-5} - 10^{-6} เซนติเมตร ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าปรากฏการณ์ไมสเนอร์ (Meissner's effect) ในทางปฏิบัติสามารถใช้ปรากฏการณ์นี้ในการตรวจสอบสภาพนำยวดยิ่งได้โดยตัวนำยวดยิ่งจะสามารถลอยตัวเหนือแม่เหล็กถาวรหรือแม่เหล็กถาวรจะสามารถลอยตัวเหนือตัวนำยวดยิ่งได้



ภาพที่ 2 แสดงปรากฏการณ์ไมสเนอร์ที่เมื่อลดอุณหภูมิจนต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตสนามแม่เหล็กภายนอกจะไม่สามารถทะลุผ่านเข้าไปในสารตัวนำยวดยิ่งได้ (Kittel, 1997)

หลังจากการค้นพบสภาพนำยวดยิ่งในปรอทก็มีการค้นพบสภาพนำยวดยิ่งในสารชนิดอื่นๆ อีกหลายชนิด แต่ตัวนำยวดยิ่งที่มีการค้นพบในยุคแรกๆ จะมีอุณหภูมิวิกฤตต่ำมาก ตัวนำยวดยิ่งที่มีค่าอุณหภูมิวิกฤตสูงสุดที่พบมีค่า 23 เคลวินซึ่งพบในสารประกอบไนโอเบียมเจอร์มาเนียม (Nb_3Ge) (Testardi *et al.*, 1978) จากนั้นมานักวิทยาศาสตร์ได้พยายามวิจัยเพื่อให้ได้ตัวนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงกว่า 23 เคลวินแต่ก็ไม่ประสบความสำเร็จ ทำให้นักวิทยาศาสตร์ทั้งที่ศึกษาวิจัยในเชิงทฤษฎีและเชิงปฏิบัติเชื่อว่า

ตัวนำยวดยิ่งในธรรมชาติน่าจะมีอุณหภูมิวิกฤตจำกัดคือไม่เกิน 30 เคลวิน จนกระทั่งปี 1986 เบทเนอร์ซและมุลเลอร์ (Bednorz & Muller, 1986) พบว่าสารประกอบ La-Cu-O เมื่อถูกเจือด้วยแบเรียม (Ba) จะกลายเป็นตัวนำยวดยิ่งที่อุณหภูมิประมาณ 35 เคลวิน ซึ่งถือว่าเป็นอุณหภูมิวิกฤตที่สูงมากในยุคนั้น

อีกหนึ่งปีถัดมากลุ่มวิจัยของวู (Wu *et. al.*, 1987) ค้นพบสภาพนำยวดยิ่งในสารประกอบ Y-Ba-Cu-O ที่มีอุณหภูมิวิกฤตในช่วง 90 ถึง 100 เคลวิน ซึ่งนับว่าเป็นความก้าวหน้าในการประยุกต์ใช้งานตัวนำยวดยิ่งเป็นอย่างมากเพราะตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิต่ำนั้นต้องประสบปัญหายุ่งยากในการทดลองเนื่องจากต้องมีห้องปฏิบัติการที่มีอุณหภูมิต่ำมากๆ ซึ่งทำให้ต้องลงทุนสูงและต้องใช้ฮีเลียมเหลวมาเป็นตัวหล่อเลี้ยง ซึ่งฮีเลียมเหลวนั้นนอกจากมีราคาแพงแล้วยังหายากอีกด้วย ดังนั้นนักวิทยาศาสตร์จึงให้ความสนใจในตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิต่ำสูงเพราะสามารถใช้ไนโตรเจนเหลวที่มีจุดเดือด 77 เคลวิน ในการหล่อเลี้ยงและไนโตรเจนเหลวก็มีราคาถูกกว่าฮีเลียมเหลวถึง 10 เท่า จากการค้นพบสภาพนำยวดยิ่งในสารประกอบ Y-Ba-Cu-O ทำให้สามารถแบ่งประเภทของตัวนำยวดยิ่งตามช่วงของอุณหภูมิวิกฤตได้เป็นตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิต่ำสูง (High temperature super conductor) ซึ่งมีอุณหภูมิวิกฤตสูงกว่า 77 เคลวินและตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิต่ำ (Low temperature superconductor) ซึ่งมีอุณหภูมิวิกฤตต่ำกว่า 77 เคลวิน

ความสนใจในงานวิจัยด้านตัวนำยวดยิ่งกลับมาอยู่ในกระแสความสนใจในวงการวิทยาศาสตร์อีกครั้งเมื่อมีการค้นพบสภาพนำยวดยิ่งในสารประกอบแมกนีเซียมไดโบไรด์ วัสดุชนิดนี้เป็นที่รู้จักกันมานานตั้งแต่ก่อนปีค.ศ.1950 แล้วแต่เพิ่งจะค้นพบว่าแมกนีเซียมไดโบไรด์สามารถเป็นตัวนำยวดยิ่งได้ที่ 40 เคลวิน ในปีค.ศ.2001 โดย อะคิมิซึ และ นากามัตสึ (Akimisu & Nagamatsu, 2001) การค้นพบสภาพนำยวดยิ่งในแมกนีเซียมไดโบไรด์ ก่อให้เกิดความสนใจในตัวนำยวดยิ่งที่ปราศจากออกไซด์ ทำให้มีการค้นพบตัวนำยวดยิ่งหลากหลายชนิดที่มีโบรอนเป็นส่วนประกอบ (Buzea & Yamachita, 2001) เช่น TaB_2 มีอุณหภูมิวิกฤตที่ 9.5 เคลวิน $BeB_{2.75}$ มีอุณหภูมิวิกฤตที่ 0.7 เคลวินและ $MgCNi_3$ มีอุณหภูมิวิกฤต 8 เคลวิน

สำหรับคำถามที่ว่าแมกนีเซียมไดโบไรด์มีอะไรที่น่าสนใจเป็นพิเศษ ทำให้นักวิทยาศาสตร์ถึงให้ความสนใจในการศึกษาวิจัยกันมากนัก ทั้งๆ ที่อุณหภูมิวิกฤตก็มีค่าเพียง 40 เคลวิน ซึ่งเมื่อเทียบกับตัวนำยวดยิ่งบางชนิดที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงๆ แล้วนับว่าแมกนีเซียมไดโบไรด์นั้นมีอุณหภูมิวิกฤตต่ำมาก แต่จุดเด่นซึ่ง

ทำให้แมกนีเซียมไดโบไรด์เป็นที่น่าสนใจก็คือ แมกนีเซียมไดโบไรด์ประกอบด้วยธาตุที่เป็นโลหะเพียงสองชนิดและมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน ที่สำคัญในด้านการประยุกต์แมกนีเซียมไดโบไรด์มีคุณสมบัติไม่เปราะนั่นก็หมายความว่าเราสามารถยึดแมกนีเซียมไดโบไรด์ออกเป็นลวดไฟฟ้าได้ง่ายและดีกว่าตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงตัวอื่นๆ เพราะตัวนำยวดยิ่งเหล่านี้ส่วนมากเป็นสารประกอบพวกเซรามิกซ์ (Ceramics) ซึ่งเปราะและยึดเป็นเส้นได้ยาก นอกจากนี้สำหรับอุณหภูมิที่หล่อเลี้ยงแมกนีเซียมไดโบไรด์ให้มีสภาพเป็นตัวนำยวดยิ่งนั้นก็ไม่ใช่ว่าเรื่องยากสำหรับเทคโนโลยีในปัจจุบัน

ตัวนำยวดยิ่งอีกประเภทหนึ่งที่มีความน่าสนใจไม่น้อยกว่าตัวนำยวดยิ่งแมกนีเซียมไดโบไรด์คือตัวนำยวดยิ่งชนิดมีเหล็กเป็นองค์ประกอบ (Fe-based Superconductors) โดยในเดือนกุมภาพันธ์ ค.ศ. 2008 ฮิเดโอะ โฮโซโนะ (Hideo Hosono) และทีมวิจัย (Kamihara *et. al*, 2008) จากสถาบันเทคโนโลยีโตเกียว (Tokyo Institute of Technology) ได้รายงานการค้นพบสภาพนำยวดยิ่งในตัวนำยวดยิ่ง LaFeAsO ที่มีการเจือฟลูออรีน โดยสารชนิดนี้จะแสดงสมบัติการเป็นตัวนำยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 26 เคลวิน การค้นพบครั้งนี้อาจจะนับว่าเป็นเรื่องบังเอิญก็ได้เพราะจริงๆ แล้วโฮโซโนะและทีมวิจัยมีจุดประสงค์ที่จะสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำแบบโปร่งแสง (Transparent semiconductor) เพื่อประยุกต์ใช้งานสำหรับหน้าจอคอมพิวเตอร์หรืออุปกรณ์แสดงผลอื่นๆ จากการวิจัยพบว่าวัสดุที่มีสมบัติตามที่ต้องการมีแนวโน้มอยู่ในกลุ่มของ LaOCuCh เมื่อ Ch คือธาตุในกลุ่มแฮลโคเจน (Chalcogen) เช่น ซัลเฟอร์ (Sulfur) เซลิเนียม (Selenium) หรือ เทลลูเรียม (Tellurium) หลังจากนั้นโฮโซโนะและทีมวิจัยได้ศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุชนิดนี้โดยการแทนที่อะตอมของทองแดง (Cu) ด้วยเหล็ก (Fe) หรือโลหะทรานซิชันชนิดอื่นๆ ที่สามารถแสดงสมบัติทางแม่เหล็กได้ แต่การกระทำเช่นนี้ทำให้โครงร่างผลึกอยู่ชิดกันมากขึ้นส่งผลให้โครงสร้างของสารไม่เสถียร เพื่อแก้ปัญหาที่โฮโซโนะและทีมวิจัยจึงต้องแทนที่ธาตุในกลุ่มแฮลโคเจนด้วยธาตุในกลุ่มนิคโทเจน (Pnictogen) เช่น ฟอสฟอรัส (Phosphorus) หรืออาร์เซนิก (Arsenic) และเมื่อทำการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของสารที่เตรียมขึ้นพบว่า LaFePO และ LaFeAsO ที่มีการเจือฟลูออรีนแสดงสมบัติการเป็นตัวนำยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 4 และ 26 เคลวินตามลำดับ

สมบัติที่สำคัญประการหนึ่งซึ่งทำให้ตัวนำยวดยิ่งชนิดนี้มีความน่าสนใจคือการที่ตัวนำยวดยิ่งชนิดนี้มีค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตบน (Upper critical field) สูงมาก (Ren *et. al*, 2008; Zhu *et. al*, 2008) ส่งผลให้ค่ากระแสวิกฤต (Critical current) มีค่าสูงตามไปด้วย จากจุดนี้จะเห็นว่าตัวนำยวดยิ่งชนิดนี้มีความน่าสนใจ

ในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง เพราะโดยส่วนมากแล้วในการใช้งานตัวนำยวดยิ่ง เราจะใช้ประโยชน์จากการที่ตัวนำชนิดนี้ไม่มีความต้านทาน จึงสามารถนำกระแสได้มากทำให้สามารถผลิตสนามแม่เหล็กความเข้มสูงมาใช้งานได้ แต่ในขณะเดียวกันถ้าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวนำยวดยิ่งมีค่ามากกว่าค่ากระแสวิกฤตตัวนำยวดยิ่งจะสูญเสียสภาพนำยวดยิ่งทันที ทำให้ไม่สามารถผลิตสนามแม่เหล็กความเข้มสูงได้ ดังนั้นนอกจากความน่าสนใจ ในสมบัติพื้นฐานต่างๆ ซึ่งแตกต่างจากตัวนำยวดยิ่งชนิดอื่นๆ แล้วตัวนำยวดยิ่งชนิดนี้ยังมีความน่าสนใจในการประยุกต์ใช้งานอีกด้วย

พัฒนาการของตัวนำยวดยิ่งเชิงทฤษฎี

ทฤษฎีเชิงปรากฏการณ์ (Phenomenological Theory) ทฤษฎีแรกที่อธิบายพฤติกรรมของตัวนำยวดยิ่งถูกนำเสนอเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1935 โดยพี่น้องลอนดอน (F. London & H. London, 1935) โดยทฤษฎีนี้สามารถอธิบายปรากฏการณ์ไมสเนอร์ได้จากทฤษฎีลอนดอนอธิบายว่าค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ซาบซึมเข้าไปในตัวนำยวดยิ่งจะมีค่าลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล และเรียกระยะที่สนามแม่เหล็กซาบซึมเข้าไปในตัวนำยวดยิ่งนี้ว่าระยะความลึกซาบซึมได้ของลอนดอน (London penetration depth)

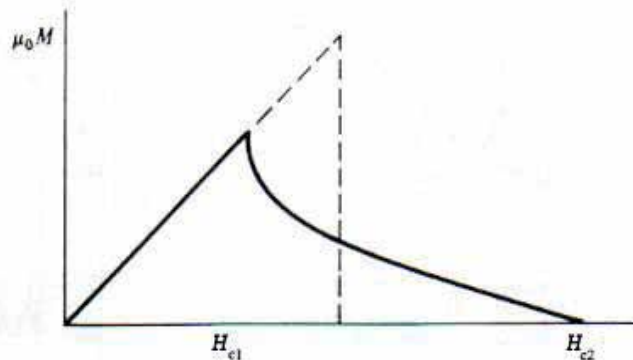
ต่อมาในปี ค.ศ. 1950 กิ้นซ์เบิร์กและแลนดาว (Ginzburg and Landau) ได้พัฒนาทฤษฎีกิ้นซ์เบิร์กและแลนดาวเพื่ออธิบายการเปลี่ยนสถานะจากสภาพนำปกติไปเป็นสภาพนำยวดยิ่งที่บริเวณอุณหภูมิวิกฤต (Poulter, 1991) โดยแนวคิดเริ่มต้นของทฤษฎีนี้ซึ่งเป็นทฤษฎีที่ใช้อธิบายการเปลี่ยนสถานะ (phase transition) เริ่มมาจากการพิจารณาตัวแปรที่บอกความเป็นระเบียบ (order parameter) โดยค่าตัวแปรที่บอกความเป็นระเบียบจะมีค่าต่างกันไปแล้วแต่ปรากฏการณ์ที่ต้องการจะอธิบาย โดยสมบัติที่สำคัญของตัวแปรที่บอกความเป็นระเบียบ คือ ต้องมีค่าเป็นศูนย์เมื่ออยู่เหนือจุดวิกฤตและต้องมีค่าจำกัดเมื่ออยู่ต่ำกว่าจุดวิกฤต เช่น ในกรณีที่สารแม่เหล็กเฟอร์โร (Ferromagnetic) มีการเปลี่ยนสถานะเป็นสารแม่เหล็กพารา (Paramagnetic) ใช้ค่าแมกนีไทเซชัน (Magnetization) เป็นตัวแปรที่บอกความเป็นระเบียบ เพราะเมื่อเราให้ความร้อนกับสารแม่เหล็กเฟอร์โรจนถึงอุณหภูมิคูรี (Curie temperature) สารแม่เหล็กเฟอร์โรซึ่งมีค่าแมกนีไทเซชันไม่เป็นศูนย์ จะเปลี่ยนสถานะกลายเป็นสารแม่เหล็กพารา ซึ่งมีค่าแมกนีไทเซชันเป็นศูนย์ สำหรับในกรณีของสภาพนำยวดยิ่งทฤษฎีกิ้นซ์เบิร์กและแลนดาวใช้ความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนในสภาพนำยวดยิ่งเป็นตัวแปรที่บอกความเป็นระเบียบ

โดยค่าของตัวแปรนี้เป็นไปตามเงื่อนไขคือจะมีค่าเป็นศูนย์เมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตและมีค่าจำกัดเมื่ออุณหภูมิมียุคต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต

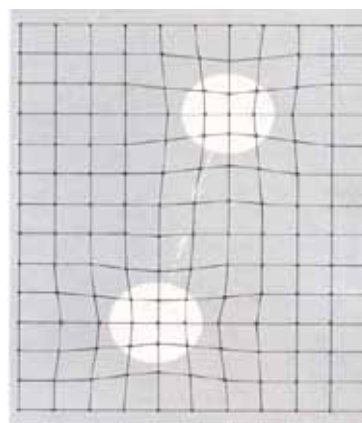
หลังจากนั้นอีก 7 ปี อบริโคซอฟ (A. A. Abrikosov) ใช้ทฤษฎีกินซ์เบิร์กและแลนดาวเพื่อศึกษาพฤติกรรมของค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตและค้นพบว่าสามารถจำแนกประเภทของตัวนำยวดยิ่งออกได้เป็น 2 ประเภทตามพฤติกรรมของค่าสนามแม่เหล็กวิกฤต (Abrikosov, 1957) ได้แก่ ตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 1 (Type I Superconductor) ซึ่งมีค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตเพียงค่าเดียว โดยเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตจะเกิดปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner's effect) คือสนามแม่เหล็กภายนอกจะไม่สามารถผ่านเข้าไปในสารตัวนำยวดยิ่งได้ แต่ถ้าเพิ่มค่าความเข้มสนามแม่เหล็กภายนอกจนเท่ากับสนามแม่เหล็กวิกฤตแล้วสภาพนำยวดยิ่งจะถูกทำลายและสนามแม่เหล็กภายนอกจะสามารถทะลุผ่านเข้าไปในสารตัวนำยวดยิ่งได้ และนำยวดยิ่งประเภทที่ 2 (Type II Superconductor) ซึ่งมีค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตสองค่า ได้แก่ สนามแม่เหล็กวิกฤตล่าง (Lower critical field) และสนามแม่เหล็กวิกฤตบน (Upper critical field) โดยเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตตัวนำยวดยิ่งจะแสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ได้อย่างสมบูรณ์เช่นเดียวกับกรณีตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 1 แต่เมื่อเพิ่มค่าความเข้มสนามแม่เหล็กภายนอกจนเท่ากับสนามแม่เหล็กวิกฤตล่างจะมีเส้นแรงแม่เหล็กบางส่วนที่สามารถทะลุผ่านเข้าไปในสารตัวนำยวดยิ่งได้ ดังนั้นในช่วงนี้ในเนื้อของวัสดุจึงมีส่วนทั้งที่เป็นสภาพนำยวดยิ่งและสภาพนำปกติผสมกันอยู่เรียกสถานะนี้ว่าสถานะกระแสวน (vortex state) เมื่อเพิ่มค่าสนามแม่เหล็กจนกระทั่งมีค่ามากกว่าสนามแม่เหล็กวิกฤตบนเส้นแรงแม่เหล็กจากภายนอกจะทะลุเข้าไปได้อย่างสมบูรณ์ วัสดุจะสูญเสียสภาพนำยวดยิ่งและกลายเป็นสภาพนำปกติโดยสิ้นเชิง

สำหรับทฤษฎีในระดับจุลภาคซึ่งอธิบายกลไกการเกิดสภาพนำยวดยิ่งที่นับว่าประสบความสำเร็จในการอธิบายสมบัติโดยทั่วไปของตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิต่ำคือ ทฤษฎีของบาร์ดีน คูเปอร์ และชริฟเฟอร์ (Bardeen et al., 1959) ทฤษฎีนี้เรียกโดยย่อว่าทฤษฎีบีซีเอส (BCS theory) ซึ่งอธิบายว่ากลไกสำคัญที่ทำให้ตัวนำปกติเปลี่ยนสถานะเป็นตัวนำยวดยิ่งได้คือการจับคู่ของอิเล็กตรอนซึ่งเรียกว่าคูเปอร์ (Cooper Pairs) โดยเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้าไปในโครงผลึก (lattice) จะทำอันตรกิริยากับโครงผลึกทำให้โครงผลึกมีการเสียรูปทรงดังรูปที่ 4

อันตรกิริยานี้เป็นแบบอิเล็กตรอน-โครงผลึก-อิเล็กตรอน (electron-lattice-electron) ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่

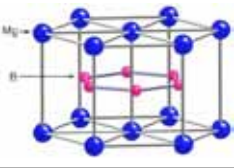
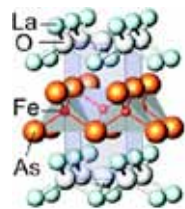
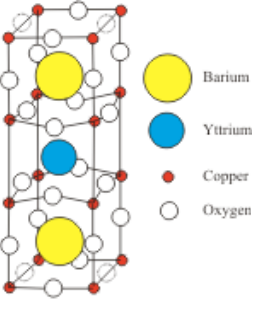






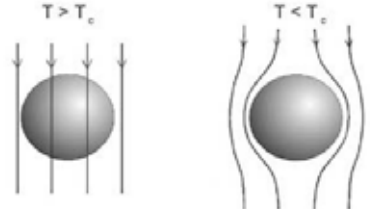


ภาพที่ 3 แสดงตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 1 ซึ่งมีค่าสนามแม่เหล็กวิกฤต 1 ค่า (เส้นประ) และตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 2 ซึ่งมีค่าสนามแม่เหล็กวิกฤต 2 ค่าคือ H_{c1} และ H_{c2} (เส้นทึบ) (Ketterson; & Song, 1999)



ภาพที่ 4 แสดงการเสียรูปทรงของโครงผลึกเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้าไปในโครงผลึกและทำอันตรกิริยากับไอออนบวกที่โครงผลึก (Buckel, 1991)

ผ่านเข้าไประหว่างกลุ่มไอออนที่มีประจุบวกซึ่งอยู่บนโครงผลึกและอิเล็กตรอนจะดึงดูดไอออนบวกในบริเวณรอบๆ ให้เคลื่อนที่เข้ามาใกล้ ทำให้โครงผลึกเกิดการเสียรูปและบริเวณรอบๆ อิเล็กตรอนก็จะมีคานหนาแน่นของไอออนบวกเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้มีผลกระทบต่่ออิเล็กตรอนอีกตัวที่อยู่ในบริเวณนั้น อิเล็กตรอนจะถูกกลุ่มไอออนบวกดูดเข้าไปทำให้ดูเหมือนว่าอิเล็กตรอนตัวแรกดึงดูดกับอิเล็กตรอนตัวหลัง ตามปกติเมื่อไอออนบวกในโครงผลึกสั่นจะทำให้เกิดคลื่นขึ้น ซึ่งคลื่นนี้มีกำเนิดมาจากอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่เข้าไปในโครงผลึกแล้วรบกวนไอออนบวกในโครงผลึกที่สั่นอยู่เรียกสภาวะกระตุ้นของโครงผลึกว่าโฟนอน (phonon) การแลกเปลี่ยนโฟนอนระหว่างกันและกันของอิเล็กตรอนทำให้เกิดแรงดึงดูดที่สามารถเอาชนะอันตรกิริยาผลึกแบบคูลอมบ์ อิเล็กตรอนจึงสามารถรวมกันเป็น

		ปี ค.ศ.		
	ค้นพบสภาพนำยวดยิ่งใน MgB_2 ที่อุณหภูมิวิกฤต 39 เคลวิน	2008	ค้นพบสภาพนำยวดยิ่งใน $LaFeAsO$ ที่มีการเจือฟลูออรีน ที่อุณหภูมิวิกฤต 26 เคลวิน	
		2001		
	ค้นพบสภาพนำยวดยิ่งในสารประกอบ Y-Ba-Cu-O มีอุณหภูมิวิกฤต 90 เคลวิน	1987	ค้นพบสภาพนำยวดยิ่งในสารประกอบ La-Cu-O เมื่อถูกเจือด้วย Ba ที่อุณหภูมิวิกฤต 35 เคลวิน	
		1986		
	ตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 2	1957	ทฤษฎีบีซีเอส	
	ทฤษฎีกินซ์เบิร์กแลนดาว	1950	ทฤษฎีลอนดอน	
		1935		
	ค้นพบตัวนำยวดยิ่งเป็นครั้งแรกในปรอทที่อุณหภูมิวิกฤต 4 เคลวิน	1911	ปรากฏการณ์ไมน์สเนอร์	
		1908		
	ค้นพบฮีเลียมเหลว			

ภาพที่ 5 แสดงลำดับเหตุการณ์สำคัญในการค้นพบตัวนำยวดยิ่ง(ปรับปรุงจาก อาภาพงศ์ ชั่งจันทร์, 2555 ; Grant, 2011)

คู่คูเปอร์ได้ คู่คูเปอร์นี้ประกอบด้วยคู่อิเล็กตรอนที่มีขนาดโมเมนตัมและสปินเท่ากันแต่มีทิศทางการเคลื่อนที่ตรงกันข้ามและระยะห่างระหว่างอิเล็กตรอนคู่หนึ่งๆ เรียกว่าความยาวอาพันธ์ (Coherent length, ξ) แต่ที่อุณหภูมิสูงๆ อีออนบวกในโครงผลึกมีการสั่นเนื่องจากอิทธิพลของความร้อนมากทำให้อันตรกิริยาแลกเปลี่ยนแบบคูมอมบีมีค่ามากกว่าอันตรกิริยาดึงดูดอิเล็กตรอนจึงไม่สามารถจับคู่กันได้

สำหรับงานวิจัยเชิงทฤษฎีที่มุ่งเน้นอธิบายพฤติกรรมของตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงซึ่งมีความซับซ้อนและมีพฤติกรรมแตกต่าง

จากตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิต่ำจำเป็นต้องใช้ทฤษฎีที่มีเงื่อนไขเฉพาะตัวจึงจะสามารถอธิบายพฤติกรรมที่สนใจได้แต่อย่างไรก็ตามก็ยังมีบางพฤติกรรมที่อธิบายได้ไม่ดัดนัก ในกรณีของทฤษฎีบีซีเอสซึ่งสามารถอธิบายพฤติกรรมของตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิต่ำได้ดี แต่สำหรับในกรณีตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงต้องมีการปรับเงื่อนไขให้เหมาะสมจึงสามารถอธิบายผลจากการทดลองได้แต่ก็ยังมีสมบัติบางประการของตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงที่ทฤษฎีบีซีเอสอธิบายได้ไม่ดัดนัก เช่น ค่าสนามแม่เหล็กวิกฤต ในตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงส่วนมากจะมี

ค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตสองค่าแต่จากผลการคำนวณโดยทฤษฎีปีซีเอสจะให้ค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตได้เพียงค่าเดียวซึ่งคือค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตเฉลี่ยของตัวนำยวดยิ่งนั่นเอง

ในกรณีของทฤษฎีกินซ์เบิร์กและแลนดาวซึ่งเป็นทฤษฎีที่ใช้อธิบายการเปลี่ยนสถานะจึงสามารถอธิบายได้ทั้งตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงและตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิต่ำ แต่จะสามารถอธิบายผลการทดลองได้ดีเฉพาะกับพฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนสถานะ เช่น ค่าอุณหภูมิวิกฤตและค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตนอกจากนี้ผลการคำนวณโดยทฤษฎีกินซ์เบิร์กและแลนดาวจะให้ผลสอดคล้องกับการทดลองในบริเวณรอบๆ อุณหภูมิก่อนหน้านั้น

ในปัจจุบันจึงยังไม่มีทฤษฎีใดที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของตัวนำยวดยิ่งครอบคลุมได้ในทุกกรณี ทฤษฎีปีซีเอสสามารถอธิบายสภาพนำยวดยิ่งของสารที่มีอุณหภูมิวิกฤตต่างๆ ได้แต่ในสารที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงๆทฤษฎีปีซีเอสจะให้ผลไม่สอดคล้องกับการทดลองสำหรับทฤษฎีกินซ์เบิร์กและแลนดาวสามารถที่จะอธิบายตัวนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงๆ ได้แต่จะให้ผลสอดคล้องกับการทดลองในบริเวณรอบๆ อุณหภูมิก่อนหน้านั้น ในช่วงอุณหภูมิที่ไกลออกไปจากอุณหภูมิวิกฤตทฤษฎีกินซ์เบิร์กและแลนดาว ก็จะทำให้ผลที่ไม่สอดคล้องกับการทดลอง ทำให้งานวิจัยตัวนำยวดยิ่งเชิงทฤษฎียังเป็นปัญหาที่ท้าทายความสามารถของนักฟิสิกส์ไม่น้อยไปกว่าการสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิต่ำ

จากความพยายามศึกษาเชิงทฤษฎีเพื่อทำความเข้าใจสมบัติพื้นฐานของตัวนำยวดยิ่ง เช่น ค่าอุณหภูมิวิกฤต ค่ากระแสวิกฤตหรือค่าสนามแม่เหล็กวิกฤต แม้ว่าจะมีบางประเด็นที่ยังไม่เป็นที่กระจ่างชัดนักแต่ก็นำมาซึ่งองค์ความรู้ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้ ดังนั้นการศึกษาสมบัติพื้นฐานของตัวนำยวดยิ่งเชิงทฤษฎีจึงเป็นสิ่งที่ขาดไม่ได้ในการพัฒนาตัวนำยวดยิ่งให้สามารถประยุกต์ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพและต่อยอดเป็นนวัตกรรมที่สามารถใช้งานได้จริงในอนาคต

การประยุกต์ใช้งานและแนวทางการใช้ประโยชน์ในอนาคต

จากสมบัติพื้นฐานของตัวนำยวดยิ่งไม่ว่าจะเป็นการมีความต้านทานที่น้อยมากจนแทบไม่มีเลยหรือการแสดงปรากฏการณ์ไมน์สเนอร์ทำให้มีการนำตัวนำยวดยิ่งมาประยุกต์ใช้ได้ในงานหลายประเภท เช่น ด้านการแพทย์ ด้านการคมนาคมหรือการวิจัยที่ต้องใช้สนามแม่เหล็กความเข้มสูง เป็นต้น ทั้งนี้องค์ประกอบสำคัญของการประยุกต์ใช้งานตัวนำยวดยิ่งก็คือตัวนำยวดยิ่งนั้นจะต้องมีค่าอุณหภูมิวิกฤตที่สูงพอประมาณ รวมถึงต้อง

มีค่ากระแสวิกฤตและค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตที่สูงด้วย เนื่องจากการประยุกต์ใช้งานส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานบางประการของตัวนำยวดยิ่ง

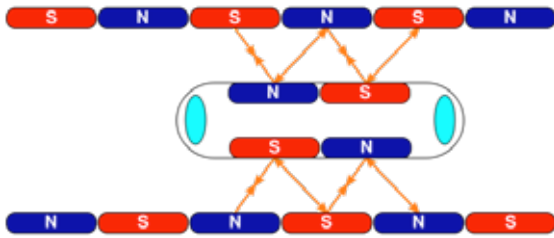
1. MagLev (Magnetic Levitation)

MagLev หรือรถไฟพลังแม่เหล็กไฟฟ้าทำงานโดยใช้สนามแม่เหล็ก (Magnetic field) มากให้รถไฟลอย (Levitation) อยู่บนรางทำให้หมดปัญหาการเสียดสีระหว่างรางและตัวรถรวมทั้งใช้ไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กเพื่อเป็นตัวขับเคลื่อนและหยุดรถโดยอาศัยหลักการของการดึงดูดกันของแม่เหล็กต่างขั้วและการผลักกันของแม่เหล็กขั้วเดียวกัน โดยจะมีชุดแผงขดลวดเล็กๆ อยู่สองข้างราง กระแสไฟฟ้าจะเป็นกระแสสลับที่เปลี่ยนทิศทางไปมาไปมาเพื่อจะเปลี่ยนขั้วสนามแม่เหล็กให้ผลักและดึงดูดไฟฟ้าไปข้างหน้าอยู่ตลอดเวลา โดยแผงรางที่อยู่ข้างหน้าจะมีขั้วแม่เหล็กตรงข้ามกับแผงที่ติดตั้งบนรถเพื่อที่จะดึงดูดรถและแผงรางที่อยู่ข้างหลังจะมีขั้วแม่เหล็กเดียวกับแผงที่ติดตั้งบนรถเพื่อทำให้เกิดแรงผลักเสริมอีกแรงหนึ่ง จากการที่ตัวนำยวดยิ่งแทบจะไม่มี ความต้านทานเลยทำให้สามารถสร้างสนามแม่เหล็กความเข้มสูงได้มากกว่าตัวนำปกติ ลดการสูญเสียพลังงานในรูปพลังงานความร้อนและลดขนาดของขดลวดที่ใช้งานให้มีขนาดเล็กลง แม้ว่าในปัจจุบัน MagLev ที่ใช้ตัวนำยวดยิ่งสำหรับสร้างสนามแม่เหล็กความเข้มสูงจะยังอยู่ในช่วงทดสอบการใช้งานแต่ก็มีแนวโน้มจะสามารถใช้ขนส่งในเชิงพาณิชย์ได้ในอนาคต

2. MRI (Magnetic Resonance Imaging)

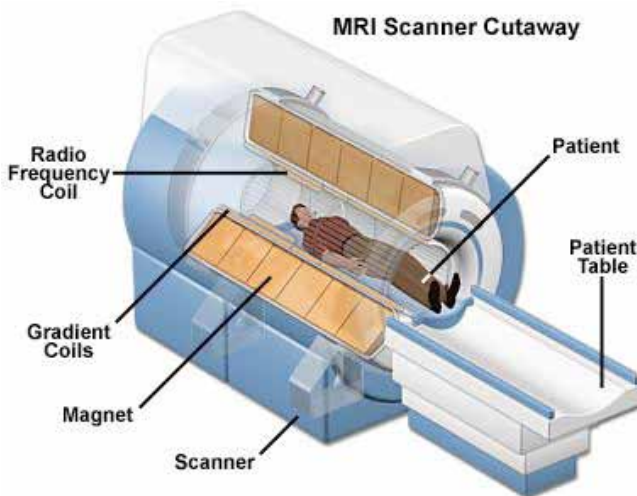
MRI คือ เครื่องมือที่ใช้สำหรับสร้างภาพอวัยวะภายในร่างกายโดยใช้สนามแม่เหล็กความเข้มสูงและความถี่ในย่านความถี่วิทยุ (Radio frequency) ด้วยการส่งคลื่นความถี่เข้าสู่ร่างกายและรับคลื่นสะท้อนกลับ แล้วนำสัญญาณที่ได้มาประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ ทำให้ได้ภาพอวัยวะภายในของร่างกาย เช่น สมอง กระดูกสันหลัง ตับ ไต ที่มีความคมชัด สามารถแยกเนื้อเยื่อต่างๆ ของร่างกายได้อย่างชัดเจน ทำให้มีความถูกต้องแม่นยำในการวินิจฉัยโรคมกยิ่งขึ้น สามารถตรวจเส้นเลือดได้โดยไม่ต้องฉีดสารทึบรังสีก็ยังสามารถทำการตรวจได้ในทุกๆ ระยะเวลาไม่เฉพาะแนวขวางอย่างเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ (CT-scan) (MRI ต่างจาก X-RAYS อย่างไร, 2012)

จากการที่ MRI ต้องใช้สนามแม่เหล็กความเข้มสูงจึงมีความจำเป็นที่ต้องใช้ขดลวดตัวนำยวดยิ่งในการสร้างสนามแม่เหล็กเนื่องจากต้องใช้ฮีเลียมเหลวในระบบหล่อเย็นจึงทำให้การทำ MRI ในแต่ละครั้งมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงแต่จากแนวโน้มของงานวิจัย



ภาพที่ 6 (1) หลักการทำงานของ MagLev (Superconductors: MagLev Train, 2012)
 (2) รถไฟ MagLev สายทดสอบ Yamanashi Maglev Test Line ในประเทศญี่ปุ่น (MagLev Trains By 2025 In Japan, Could Reach 361 MPH!, 2012)

ทางการขนส่งกระแสดำนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงขึ้นเรื่อยๆ ทำให้ในอนาคตการทำ MRI น่าจะมีต้นทุนที่ต่ำลง



ภาพที่ 7 ส่วนประกอบของเครื่องMRI (MRI: A Guided Tour, 2012)

นอกจากนี้ตัวนำยวดยิ่งยังถูกนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ อีกหลายด้านทั้งสามารถนำมาใช้งานจริงได้แล้วหรือยังอยู่ในช่วงค้นคว้าวิจัย เช่น SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) ซึ่งเป็นเซ็นเซอร์ความไวสูงที่สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย (SQUID Magnetometer, 2012) มอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวนำยวดยิ่ง (Uses for Superconductors, 2012) หรือเครื่องเร่งอนุภาคเพื่อศึกษาสมบัติของอนุภาคมูลฐาน เป็นต้น

จากที่กล่าวมาทั้งหมดจะเห็นว่าในช่วงเวลาที่ผ่านมา 1 ศตวรรษหลังจากค้นพบตัวนำยวดยิ่งได้มีเหตุการณ์ต่างๆ เกิดขึ้นมากมาย ทั้งการค้นพบตัวนำยวดยิ่งชนิดใหม่ๆ ที่มีสมบัติแตกต่างไปจากเดิม การสร้างทฤษฎีหรือแบบจำลองเพื่ออธิบายพฤติกรรมของตัวนำยวดยิ่งรวมทั้งการประยุกต์ใช้ตัวนำยวดยิ่งในด้านต่างๆ แต่จนกระทั่งทุกวันนี้ความเข้าใจในกระบวนการเกิดสภาพนำยวดยิ่งก็ยังไม่เป็นที่กระจ่างชัดนักรวมถึงความพยายามในการสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิวิกฤตใกล้เคียงอุณหภูมิห้องซึ่งยังไม่ประสบความสำเร็จการศึกษาที่ผ่านมา ทั้งทางด้านทฤษฎีและการทดลอง ทำให้ประเด็นปัญหาบางประเด็นกระจ่างขึ้น แต่ก็ยังมีอีกหลายประเด็นปัญหาที่ยังไม่สามารถตอบได้อย่างชัดเจน ดังนั้นงานวิจัยทางด้านตัวนำยวดยิ่งจึงยังคงเปิดกว้างแก่นักวิจัยในปัจจุบัน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์แก้ว อุดมสมุทรศิริ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ สำหรับคำแนะนำในการเขียนบทความชิ้นนี้

เอกสารอ้างอิง

อาภาพงศ์ ชั่งจันทร์. (2555). ตัวนำยวดยิ่งชนิดมีเหล็กเป็นองค์ประกอบ. วารสารวิทยาศาสตร์ มศว, 28(1), 219-231.
 MRI ต่างจาก X-RAYS อย่างไร. วันที่ค้นข้อมูล 27 กันยายน 2555, เข้าถึงได้จาก <http://www.mrithailand.com/mrixray.html>

- Abrikosov, A.A. (1957). On the Magnetic Properties of Superconductors of the Second Group. *SOVIET PHYSICS JETP* 5(6):1174-1182.
- Akimisu, & Nagamatsu, J. (2001). Superconductivity at 39 K in magnesium diboride, *Nature*. 410, 63.
- Bardeen, J.; Cooper, N.; & Schrieffer, J.R. (1959). Theory of Superconductivity, *Physical Review*. 108(5), 175-1204.
- Bednorz, J. G., & Müller, K. A. (1986). Possible High T_c Superconductivity in the Ba-La-Cu-O System. *Zeitschrift für Physik B Condensed Matter* 64(1), 189-193.
- Buckel, W. (1991). Superconductivity: Fundamentals and Applications. Weinheim. VCH. p.3.
- Buckel, W. (1991). Superconductivity: Fundamentals and Applications. Weinheim. VCH. p.31.
- Buckel, W. (1991). Superconductivity: Fundamentals and Applications. Weinheim. VCH. p.112.
- Buzea, C., & Yamachita, T. (2001). Review of the superconducting properties of MgB₂. *Superconductor Science and Technology* 14(11), R115-R146.
- Kamihara, Y., Watanabe, T., Hirano, M., & Hosono, H. (2008). Iron-Based Layered Superconductor La[O_{1-x}F_x]FeAs (x = 0.05–0.12) with T_c = 26 K. *Journal of American Chemical Society*. 130(11), 3296-3297.
- Ketterson, J. B., & Song, S. N. (1999). Superconductivity. 1st Edition. UK. Cambridge University Press. p. 25.
- Ketterson, J. B., & Song, S. N. (1999). Superconductivity. 1st Edition. UK. Cambridge University Press. p. 1-4.
- Kittel, C. (1997). Introduction to solid state Physics. 7th edition; John Wiley & Sons. p. 344.
- London, F., & London, H. (1935). The Electromagnetic Equations of the Superconductor, *Proceeding of the Royal Society A* 149, 71-88.
- MagLev Trains By 2025 In Japan, Could Reach 361 MPH!. retrieved September 27, 2012, from <http://www.treehugger.com/corporate-responsibility/maglev-trains-by-2025-in-japan-could-reach-361-mph.html>.
- Meuris, C. & Rifflet, J.M. (Winter 2007-2008). Superconducting magnets for the LHC: CLEFS CEA No. 56. p. 4-9.
- MRI:A Guide Tour. retrieved September 27, 2012, from <http://www.magnet.fsu.edu/education/tutorials/magnetacademy/mri/>
- Poulter, J. (1991). Lectures on Ginzburg – Landau (GL) Theory in The Theory of Superconductivity. Faculty of Science Chulalongkorn University. p. 1-47.
- Ren, Z. A., Lu, W., YANG, J., Yi, W., Shen, X. L., Li, Z. C., Che, G. C., Dong, X. L., Sun, L. L., Zhou, F., & Zhao, Z. X. (2008). Superconductivity at 55 K in Iron-Based F-Doped Layered Quaternary Compound Sm[O_{1-x}F_x]FeAs. *Chinese Physics Letter* 25(6): 2215-2216.
- Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2004). Physics for Scientists and Engineers. 6th Edition. THOMPSON/BROOKS/COLE. p. 644.
- Superconductors: Maglev Train. retrieved September 27, 2012, from <http://www.physicscentral.org/explore/action/super-train.cfm>.
- SQUID Magnetometer. retrieved September 27, 2012, from <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solids/squid.html>
- Testardi, L.R., Wernick, J.H. & Royer, W.A. (1978). Superconductivity with onset above 23° K in Nb₃Ge sputtered films. *Solid State Communications*. 15:1.
- Uses for Superconductors Available from: <http://www.superconductors.org/Uses.htm>. [27 Sep 2012]
- Wu, M.K., Ashburn, J. R., Torng, C. J., Hor, P. H., Meng, R. L., Gao, L., Huang, Z. J., Wang, Y. Q., & Chu, C. W. (1987). Superconductivity at 93 K in a New Mixed-Phase Y-Ba-Cu-O Compound System at Ambient Pressure. *Physical Review Letters* 58(9): 908-910.
- Zhu, X., Yang, H., Fang, L., Mu, G., & Wen, H. H. (2008). Upper Critical Field, Hall Effect and Magnetoresistance in the Iron-Based layered Superconductor LaFeAsO_{0.9}F_{0.1-δ}. *Superconductor Science and Technology* 21:105001(5pp).