

# รางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ประจำปี ค.ศ. 2016: การเปลี่ยนสถานะทางทอพอโลยี (Topological Phase Transition)

สุกฤต สุจริตกุล<sup>1</sup>

เมื่อเดือนตุลาคมปี ค.ศ. 2016 ที่ผ่านมา J. Michael Kosterlitz, Duncan Haldane และ David J. Thouless ได้รับรางวัลโนเบลในสาขาฟิสิกส์ [1] ซึ่งผลงานที่ท่านเหล่านี้ได้รับรางวัลอันทรงเกียรติ คือเรื่อง การเปลี่ยนสถานะทางทอพอโลยี (Topological Phase Transition) ซึ่งเป็นเรื่องที่ถือได้ว่าเขย่าวงการฟิสิกส์โลกและยังเป็นการวางรากฐานหนึ่งที่สำคัญในวงการควอนตัมคอมพิวเตอร์ การทำความเข้าใจปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ จำเป็นต้องใช้ความรู้ทางฟิสิกส์ที่สำคัญเรื่องของการ เปลี่ยนสถานะ (Phase Transition) และความรู้ทางคณิตศาสตร์เรื่อง ทอพอโลยี (Topology) ให้ชัดเจนก่อน

## อะไรคือการเปลี่ยนสถานะ?

ก่อนที่จะอธิบายเรื่องการเปลี่ยนสถานะนั้น เราจำเป็นต้องระบุสิ่งที่กำหนดสิ่งที่เรียกว่า “สถานะ” ก่อน คำถามในหัวนี้ฟังดูเหมือนจะง่ายแต่จริงๆ แล้วมันเป็นเรื่องที่น่าสนใจที่นักฟิสิกส์หลายๆ ท่านในประวัติศาสตร์ได้ทุ่มเทแทบจะทั้งชีวิตเพื่อศึกษาหัวข้อนี้ เมื่อไรก็ตามที่เราได้ยินคำว่า การเปลี่ยนสถานะ สิ่งแรกที่คนทั่วไปนึกถึงก่อนคือการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว หรือ การกลายเป็นไอของของเหลว ฯลฯ แน่นอนว่าสิ่งเหล่านี้ล้วนเป็นส่วนหนึ่งการเปลี่ยนสถานะ แต่แท้จริงแล้วการเปลี่ยนสถานะตามคำนิยามนั้นครอบคลุมกับอีกหลายๆ กรณีอีกมาก นิยามของคำว่า การเปลี่ยนสถานะ คือ การเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางกายภาพใด ๆ ของระบบหนึ่ง ๆ ไปสู่อีกสมบัติหนึ่งที่แตกต่างกันและแยกแยะออกจากกันได้ ซึ่งโดยนิยามแล้ว คำว่าสมบัติทางกายภาพ (Physical property) รวมไปถึงคำว่าสมบัติความเป็นของเหลว ของแข็งหรือไอ ตามบริบทที่ใช้กันโดยทั่วไป แต่สิ่งที่นิยามนี้รวมเข้าไปถึงด้วยคือสมบัติทางกายภาพอื่น ๆ เช่น สมบัติความเป็นแม่เหล็ก (Magnetism) ซึ่งด้วยอุณหภูมิที่มากพอ แม่เหล็กก็สูญเสียความเป็นแม่เหล็ก

เช่นเดียวกับ เมื่อตัวนำยิ่งยวด (Superconductor) อยู่ภายใต้ อุณหภูมิที่สูงเกินไป หรือภายใต้สนามแม่เหล็กที่เกินค่า ๆ หนึ่ง สมบัติความเป็นตัวนำยิ่งยวดก็จะเกิดการเปลี่ยนสถานะไปเป็นสถานะทางไฟฟ้า อื่น ๆ เช่น ตัวนำปกติ เป็นต้น ทั้งนี้ทั้งนั้น ไม่ว่าจะเปลี่ยนสถานะของก๊าซ-ของเหลว-ของแข็ง สมบัติความเป็นแม่เหล็ก หรือ สมบัติความเป็นตัวนำยิ่งยวด ต่างมีการเปลี่ยนสถานะที่ชัดเจน ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด

## อะไรคือสิ่งที่กำหนดสถานะ?

การศึกษาเรื่องการเปลี่ยนสถานะทางฟิสิกส์ ก็ได้มีทฤษฎีจำนวนมากที่ถูกนำมาจับเรื่องเหล่านี้ โดยภาพรวม การที่เราจะจับจับหรืออธิบายอะไรก็ตามเกี่ยวกับเรื่องของการเปลี่ยนสถานะ นักฟิสิกส์จะต้องมีนิยามที่ชัดเจนเกี่ยวกับคำว่า “สถานะ” หรือ ในที่นี้คือ Phase เสียก่อน หากเราจำเพาะเจาะจงในสาย Condensed Matter Physics นั้น สิ่งนี้นักฟิสิกส์ส่วนใหญ่สนใจคือสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสามารถอธิบายด้วยฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนในระดับชั้นพลังงานต่าง ๆ ที่ถูกจำกัดอยู่ในระบบที่มีความเป็นระเบียบสูง (Highly ordered system) ของของแข็งที่อะตอมของสสารมีการจัดเรียงตัวเป็นรูปแบบซ้ำ ๆ ที่ชัดเจน ซึ่งการจัดเรียงฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนในแต่ละอะตอมของสสารในของแข็งจะทำให้เกิด ช่องว่างพลังงาน (Energy gap) ที่มีการกระจายตัวไม่เหมือนกัน ซึ่งขนาดของช่องว่างพลังงานนี้เองจะเป็นตัวกำหนดว่าสารใด ๆ จะเป็น ตัวนำไฟฟ้า ฉนวน หรือ สารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะสังเกตได้ว่า ไม่ว่าจะเป็นวัสดุหรือสารตัวไหน ก็เกิดจากการรวมตัวกันในสถานะของแข็งเกิดเป็นโครงสร้างผลึกของอะตอมหรือโมเลกุล ซึ่งอะตอมและโมเลกุลนั้นก็ประกอบมาจาก นิวตรอน โปรตอน และอิเล็กตรอนเป็นหน่วยย่อยที่สุดเหมือน ๆ กัน แต่การจัดเรียงที่ไม่เหมือนกันนี้เองที่ทำให้สมบัติทางกายภาพของวัสดุโดยภาพรวม

<sup>1</sup> นักวิจัยหลังปริญญาเอกที่ RIKEN สังกัด Emergent Phenomena Measurement Research Team, CEMS จังหวัดไซตามะ ญี่ปุ่น

ปรากฏออกมาต่างกัน การที่สมบัติโดยภาพรวมของสสาร ขึ้นอยู่กับ การจัดเรียงในแบบมูลฐานที่สุดนี้ มีชื่อเรียกว่า **หลักแห่งการปรากฏ (Principle of Emergence)** โดยการที่จะศึกษาการเกิดขึ้น ปรากฏการณ์ต่าง ๆ เหล่านี้จากการจัดเรียงสมบัติพื้นฐาน นักฟิสิกส์ จำเป็นต้องนิยาม ตัวแปรลำดับชั้น (Order parameter) เพื่อที่จะ ทำการคำนวณเชิงปริมาณจากรากฐานของระบบ เพื่อคาดเดาสมบัติ ที่จะปรากฏออกมาโดยรวมของสสารหรือกล่าวคือระบุสถานะของ สสารนั่นเอง

### ทำไมจึงต้องศึกษาสิ่งเหล่านี้?

การกำหนดอะไรที่ฟังดูยุ่งยากและยังเป็นเรื่องที่พื้นฐาน มากๆอย่างตัวแปรลำดับชั้นหรือการศึกษาเรื่องหลักการแห่งการ ปรากฏนั้น อาจจะฟังดูน่าเบื่อและขาดเหตุผลในสายตาของใคร หลายคน มันง่ายกว่ามากที่จะหยิบวัสดุใด ๆ ขึ้นหนึ่งชิ้นมาและ ทดสอบเพื่อนำไปใช้ แต่หากเราทราบเบื้องหลังของเหตุการณ์ที่ เปลี่ยนแปลงเทคโนโลยีโลกอย่างเช่น การค้นพบสารกึ่งตัวนำและ นำมาใช้ ว่าได้เปลี่ยนโลกไปมากแค่ไหน?

ย้อนกลับไปเมื่อปี ค.ศ. 1931 Wolfgang Pauli นัก ฟิสิกส์ชื่อดังได้กล่าวไว้เป็นภาษาเยอรมันว่า “Über Halbleiter soll man nicht arbeiten, das ist eine Schweinerei; wer weiss, ob es überhaupt Halbleiter gibt.” [2] แปลว่า “เรา ไม่ควรที่จะศึกษาเรื่องสารกึ่งตัวนำ มันช่างเป็นหัวข้อที่สกปรกน่า ขยี้แหยง และไม่มีใครรู้ด้วยซ้ำว่ามันมีจริงรึเปล่า” ในสมัยนั้น เทคโนโลยีทางไฟฟ้าของมนุษย์ชาติอยู่กับสารสองชนิดคือ ฉนวน และตัวนำ ทำให้ทุกอย่างที่เป็นสวิตช์ต้องใช้คนทำทั้งหมด ไม่มี สวิตช์อัตโนมัติ แม้กระทั่งจะต่อสายโทรศัพท์ทางไกลครั้งหนึ่ง ก็ ต้องใช้แรงงานคนสลับปลั๊กจำนวนมากเมื่อต่อสายโทรศัพท์ และ เป็นที่รู้กันว่า สวิตช์อัตโนมัติสลับระหว่าง ปิด (0) และ เปิด (1) อยู่ ตลอดเวลา เป็นรากฐานของคอมพิวเตอร์ ถ้าไม่มีเทคโนโลยีจาก สารกึ่งตัวนำในวันนั้น และทุกคนคล้อยตาม Wolfgang Pauli ไป หมด แล้วยุค อินเทอร์เน็ต ไอแพด หรือ ไอโฟน ก็จะไม่เกิดขึ้น ทั้งนี้ทั้งนั้น ความเข้าใจเรื่องสารกึ่งตัวนำก็เป็นผลจากการศึกษา สมบัติของสารในระดับมูลฐานนั่นเอง

### ย้อนสู่ยุคทองของสารกึ่งตัวนำ

ในช่วงเกือบ ๆ ร้อยปีที่ผ่านมา จัดได้ว่าเราอยู่ในยุคทองของ เทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำที่การพัฒนาเทคโนโลยีใด ๆ ก็ตามคือ การทำให้สารกึ่งตัวนำทำงานได้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น ในขนาดที่เล็ก ลงด้วย นาโนเทคโนโลยี โดยมี หุบเขาซิลิคอน หรือ Silicon Valley ในรัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นศูนย์รวมแห่งนักลงทุน ที่สุดมันสมองสืบทอดโดยตรงมาจาก Bell's lab สาเหตุที่ไอโฟนรุ่น ใหม่ออกมาทุกปี เร็วขึ้นทุกปีนั้น ก็เกิดจากการพัฒนาเทคโนโลยีสาร กึ่งตัวนำเหล่านี้ ให้เล็กลงและมีประสิทธิภาพมากขึ้นเรื่อย ๆ แต่ทว่า สมบัติของการเป็นสารกึ่งตัวนำนั้น ก็ยังมีข้อจำกัด เนื่องจากความ เป็นสารกึ่งตัวนำนั้น ถูกกำหนดด้วยขนาดของช่องว่างพลังงาน โดยสารกึ่งตัวนำที่ดีจะต้องมีช่องว่างพลังงานประมาณ 1-1.5 eV หรือเทียบเท่ากับพลังงานของอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งด้วยความต่าง ศักย์ไฟฟ้าของถ่าน AA เกือบ ๆ หนึ่งก้อน ช่องว่างพลังงานขนาด เล็กนี้เอง ทำให้เราสามารถที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนที่ถูกยึดอยู่กับ แกนกลางของไอออนไม่สามารถนำไฟฟ้าได้ กลายเป็นอิเล็กตรอนที่ สามารถนำไฟฟ้าได้ด้วยกระบวนการต่าง ๆ การควบคุมสมบัตินี้เอง ทำให้เรามีสวิตช์อัตโนมัตินี้ใช้ และทำให้คอมพิวเตอร์สามารถ คำนวณ 0 และ 1 ได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว แต่ทว่าแม้แต่สมบัติ ช่องว่างพลังงานที่ละเอียดอ่อนนี้เอง ก็เกิดจาก หลักแห่งการปรากฏ คือต้องมีการจัดเรียงพื้นฐานที่ชัดเจนของหน่วยเล็ก ๆ ฉะนั้น ถ้าเรา ทำให้ระบบของสารกึ่งตัวนำเล็กลงไปเรื่อย สมบัติของมันก็จะ เปลี่ยนไปเมื่อขนาดของระบบเล็กเกินไป สิ่งนี้เรียกว่า ชีตจำกัดทาง ควอนตัม (Quantum limit) ฉะนั้นแม้แต่เทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำเอง ก็ยังมีชีตจำกัดของมันอยู่ การจะข้ามผ่านชีตจำกัดนี้ไป เรา จำเป็นต้องมีความรู้เพิ่มเติมเกี่ยวกับสถานะของอิเล็กตรอนอื่น ๆ

### อนาคตต่อจากเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำคืออะไร?

ในช่วงไม่กี่ทศวรรษที่ผ่านมา ได้มีนักฟิสิกส์จำนวนมากที่ คิดค้นและศึกษาสถานะใหม่ ๆ ของสสาร ไม่ว่าจะเป็นตัวนำยิ่งยวด อุณหภูมิต่ำ สารสองมิติอย่างกราฟีน หรือแม้แต่ความเป็นไปได้ใน การนำสปินหรือการหมุนของอิเล็กตรอนมาใช้เรียกว่าสปินทรอนิกส์ หนึ่งในความพยายามนั้นเองก็คือ สสารที่มีสถานะทางทอพอโลยี ซึ่ง เป็นหนึ่งในสถานะใหม่ของสสารที่นักวิทยาศาสตร์เพิ่งค้นพบในช่วง ครึ่งศตวรรษหลังที่ผ่านมา

### ทอพอโลยีคืออะไร?

ทอพอโลยี หรือ Topology มีรากศัพท์มาจากภาษากรีก จากคำว่า Topos ที่แปลว่า พื้นที่ และ Logos ที่แปลว่าการศึกษา โดยรวม ทอพอโลยีนั่นก็คือศาสตร์แขนงหนึ่งทางคณิตศาสตร์ที่ศึกษาและทำความเข้าใจเรื่องพื้นที่ ซึ่งการที่จะศึกษาและจัดกลุ่มพื้นที่ต่าง ๆ นั้น ก็จะต้องมีกฎพื้นฐานบางอย่างที่จะจัดกลุ่มและแยกแยะรูปทรงต่าง ๆ ออกจากกันและตัวแปรบางอย่างที่จะใช้จัดกลุ่มเชิงปริมาณ (ตามแนวทางของนักคณิตศาสตร์) ซึ่งตัวแปรนี้เองเรียกว่า ค่าความไม่แปรผันทางทอพอโลยี (Topological Invariant)



รูปที่1 ตัวอย่างการเปรียบเทียบความไม่แปรผันทางทอพอโลยีของรูปทรงต่างๆ

ตัวอย่างง่าย ๆ ได้แก่ หากเรากำหนดกฎให้รูปทรงต่าง ๆ มีสมบัติเหมือนกันก็น้ำมัน ที่ไม่สามารถถูกตัด เจาะ หรือปะการให้ส่วนใด ๆ ติดกันใหม่ได้ แต่เราสามารถปั้นก้อนดินน้ำมันนั้นภายใต้กฎเหล่านี้ได้ สิ่งที่เป็นค่าความไม่แปรผันทางทอพอโลยี ในกรณีนี้ก็คือ “จำนวนรู” ในรูปทรงต่าง ๆ จินตนาการว่า การทำให้เกิด “รู” ที่ทะลุจากฝั่งหนึ่งไปยังอีกฝั่งหนึ่งในก้อนดินน้ำมันนั้น จะทำได้ก็ต่อเมื่อเรา เจาะ หรือ ปะส่วนใดส่วนหนึ่งให้ติดกัน การจะทำให้หายไปก็เช่นกัน เราต้องบีบขอบรูเดิมให้มาปะติดกับอีกขอบรูหนึ่ง หรือ ตัดขอบรูข้างหนึ่งทิ้งไป ดังนั้น ภายใต้กฎนี้ จำนวน “รู” คือ สิ่งที่ไม่สามารถเปลี่ยนได้ กล่าวคือ ภายใต้กฎนี้ แก้วน้ำและโดนัท คือรูปทรงที่สมมูลกันทางทอพอโลยี (Topological

equivalent) เพราะมีค่า ความไม่เปลี่ยนแปลงทางทอพอโลยี หรือในกรณีนี้คือ จำนวน “รู” เท่ากันคือ 1 รู รูปทรงที่มีสถานะทางทอพอโลยีต่างกันกรณีนี้ก็คือ รูปทรงที่มีจำนวนรูไม่เท่ากัน เช่น รูปทรงของเบเกอรี่สามชนิดคือ ชินนามอนบัน โดนัท และ เพรทเซล ที่มีจำนวนรูเป็น 0, 1 และ 3 ตามลำดับ ซึ่งกระบวนการใด ๆ ก็ตามภายใต้กฎที่กล่าวมานี้ ไม่สามารถเปลี่ยน ชินนามอนบันให้เป็นโดนัทหรือ โดนัทให้เป็นชินนามอนบันได้

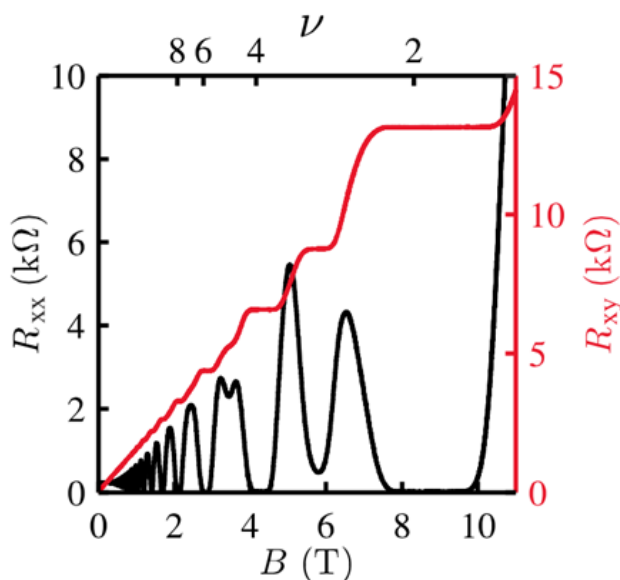
### ทอพอโลยีเกี่ยวกับฟิสิกส์อย่างไร?

ย้อนกลับไปเมื่อปี ค ศ 1975 ในช่วงที่รากฐานของทฤษฎีของระบบสองมิติที่อุณหภูมิต่ำ ๆ กำลังก่อร่างสร้างตัวขึ้นมาจากการถกเถียงของนักฟิสิกส์ ด้วยทฤษฎีกลศาสตร์ควอนตัมที่ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนกำลังสูงงอมได้ที ประกอบกับความแพร่หลายและเข้าถึงได้ของระบบเย็นตัวด้วยฮีเลียมเหลวที่ทำให้นักฟิสิกส์สามารถลดอุณหภูมิของระบบลงไปได้ถึง (และอาจจะต่ำกว่า) 4 องศาเคลวิน หรือ 4 องศาจอนถึง 0 องศาสมบูรณ์ซึ่งเป็นขีดจำกัดทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamical limit) ทำให้ความแปรผันทางอุณหภูมิ (Thermal fluctuation) ลดลงจนเกือบหายไป ส่งผลให้นักฟิสิกส์สามารถศึกษาและพิจารณาระบบทางควอนตัมได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น เป็นที่แน่นอนว่า นักฟิสิกส์ในสมัยนั้น ต่างหันเหความสนใจไปถกเถียงทฤษฎีกันต่าง ๆ นานา เพื่อทำความเข้าใจผลการทดลองต่าง ๆ ที่ยังไม่มีคำอธิบายอย่างชัดเจน และทำนายคาตหมายสมบัติ ปรากฏการณ์ใหม่ ๆ ที่ยังไม่มีใครพบเห็น หนึ่งในเรื่องที่โด่งดังในปีนั้น คือเรื่องควอนตัมฮอลล์แบบจำนวนเต็ม โดย Ando, Matsumoto และ Uemura [3]

### ปรากฏการณ์ควอนตัมฮอลล์จำนวนเต็มคืออะไร?

พิจารณาอิเล็กตรอนอิสระในระบบสองมิติที่อุณหภูมิต่ำ ๆ แน่นอนว่าเมื่อสนามแม่เหล็กถูกจ่ายเข้าไปในระบบในแนวตั้งฉาก อิเล็กตรอนเหล่านั้นก็จะเริ่มหมุนวนเป็นวงกลมตามกฎมือขวาของแรงลอเรนซ์ (Lorenz Force) หากพิจารณาระบบนี้ด้วยกลศาสตร์ควอนตัมพื้นฐาน การหมุนวนของอิเล็กตรอนภายใต้สนามแม่เหล็กนี้จะทำให้เกิดชั้นพลังงานที่เรียกว่าระดับชั้นพลังงานแลนดา (Landau Level) ขึ้น ซึ่งขนาดพลังงานของระดับชั้นพลังงานแลนดาแต่ละชั้นนี้มีค่าแปรผันตรงกับขนาดของสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉาก ดังนั้นเมื่อสนามแม่เหล็กสูงมากพอ ขนาดของระดับชั้นพลังงานแลนดาจะเพิ่ม จนเราสามารถบีบให้อิเล็กตรอนใน

ระดับชั้นพลังงานแลนดาวบนสุดนั้นแยกออกมาไฟฟ้าได้เพียงตัวเดียว แล้วเมื่อสนามแม่เหล็กถูกลดลงมา ระดับชั้นพลังงานแลนดาวที่มีค่าลดลงนั้น จะทำให้อิเล็กตรอนที่มีพลังงานพอนำกระแสไฟฟ้ามีจำนวนมากขึ้นทีละหนึ่งอิเล็กตรอน ทำให้เราสามารถตรวจวัดค่าความนำไฟฟ้าของอิเล็กตรอนแต่ละตัวได้ ดังจากที่จากรูปที่ 2 ในปรากฏการณ์ฮอลล์แบบคลาสสิก (Classical Hall Effect) ค่าความต้านทานตามแนวสนามไฟฟ้า ( $R_{xx}$ ) นั้นควรจะคงที่ ในขณะที่ค่าความต้านทานแนวตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า ( $R_{xy}$ ) ควรจะเป็นฟังก์ชันเส้นตรงกับสนามแม่เหล็ก กลับกลายเป็นค่าที่แสดงการเปลี่ยนสถานะเนื่องจากจำนวนอิเล็กตรอนอิสระที่แตกต่างกันในแต่ละเฟสอย่างชัดเจนตามรูป สาเหตุที่ชื่อของปรากฏการณ์นี้เป็นควอนตัมฮอลล์แบบจำนวนเต็ม มาจากการที่สามารถสังเกตความนำไฟฟ้าของอิเล็กตรอนทีละตัว ๆ ได้จากปรากฏการณ์นี้



รูปที่ 2 ค่าความต้านทานฮอลล์ของระบบควอนตัมฮอลล์แบบจำนวนเต็มที่สนามแม่เหล็กต่างๆ (แหล่งที่มา

<https://ocw.tudelft.nl/course-readings/quantum-hall-effect-experimental-data/>)

### สิ่งนี้เกี่ยวกับการเปลี่ยนสถานะทางทอพอโลยีอย่างไร?

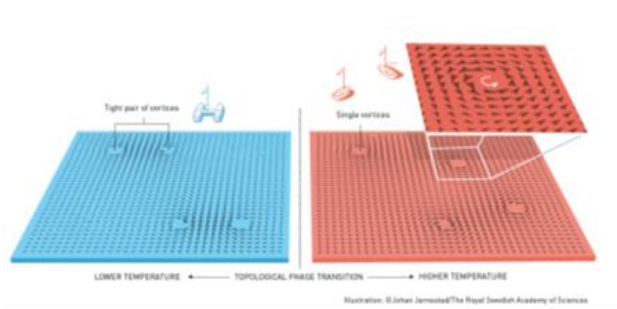
ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่า การที่เราสามารถจัดเรียงสมบัติใดๆ ผ่านกฎเกณฑ์ชุดหนึ่ง ๆ โดยสามารถแยกสมบัติบางอย่างที่วัดได้ซึ่งก็คือความไม่แปรผันทางทอพอโลยี ออกจากกันอย่างชัดเจน นั่นคือการเปลี่ยนสถานะทางทอพอโลยี ในที่นี้ การที่ระดับชั้นพลังงานแลนดาวสามารถเปลี่ยนจนข้ามระดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi

level) ในระดับที่พอดีในการรับอิเล็กตรอนมาไฟฟ้าเพิ่มขึ้นหรือลดลงทีละตัว เป็นรูปแบบหนึ่งของการเปลี่ยนสถานะทางทอพอโลยี โดยในที่นี้ จำนวนอิเล็กตรอนที่สามารถนำไฟฟ้าได้คือจำนวน “รู” ที่มีในระบบนั่นเอง

### ผลงานนี้เป็นเหตุแห่งรางวัลโนเบลหรือไม่?

คำตอบคือใช่ แต่ไม่ใช่รางวัลปี ค.ศ. 2016 หากแต่เป็นปี ค.ศ. 1985 โดยนักฟิสิกส์จากสถาบัน Max-Planck-Institute for Solid State Research ชื่อ Klaus von Klitzing ได้ทำการทดลองและค้นพบปรากฏการณ์นี้จริงในปี 1980 [4] ก่อนที่เขาจะได้รับรางวัลโนเบลในปี 1985 จริงๆ แล้วการยกตัวอย่างเรื่องควอนตัมฮอลล์แบบจำนวนเต็มเพราะเป็นแค่ตัวอย่างที่ง่ายที่สุดที่จะหยิบยกมาอธิบายเรื่องการเปลี่ยนเฟสทางทอพอโลยี และจะทำให้เข้าใจเรื่องที่ได้รับรางวัลโนเบลในปี ค.ศ. 2016 ได้ง่ายขึ้น จริงๆ แล้วสิ่งที่นำไปสู่การได้รับรางวัลโนเบลในปี ค.ศ. 2016 นั้นเริ่มต้นขึ้นมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1972 สามปีก่อนทฤษฎีของควอนตัมฮอลล์แบบจำนวนเต็มจะถูกคิดค้นขึ้นด้วยซ้ำไป

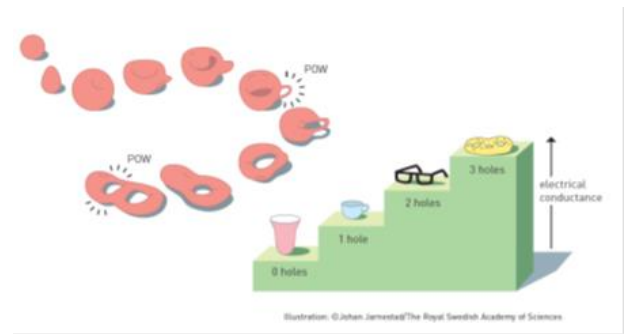
ควอนตัมฮอลล์แบบจำนวนเต็ม นั้นสามารถอธิบายได้ด้วยระบบกลศาสตร์ควอนตัมของอนุภาคที่ไม่มีอันตรกิริยาระหว่างกันในระบบสองมิติ เป็นโมเดลที่ใช้ได้จริง ในระบบนี้ การที่นักทฤษฎีสถิณั้นนิยมการคาดหมายสมบัติของสสารตามหลักแห่งการปรากฏด้วยระบบของอนุภาคที่ไม่มีอันตรกิริยาระหว่างกันนั้นเป็นเพราะความเชื่อในสมัยนั้นที่ว่า “แรงอันตรกิริยาระยะยาวระหว่างอนุภาคใด ๆ ไม่มีอยู่จริงในระบบแบบสองมิติ” ซึ่งในปี ค.ศ. 1972 J. Michael Kosterlitz และ David J. Thouless 2 ใน 3 ของคนที่ได้รับรางวัลโนเบลในปี ค.ศ. 2016 ได้เผยแพร่งานวิจัยที่ทำนายในทางสวนทางกันว่า ระบบดังกล่าวน่าจะมีอยู่จริง จะเห็นได้ว่าเป็นเวลานานกว่างานบางงานจะได้รับรางวัลโนเบล แต่ในที่สุดงานวิจัยและทำนายเรื่องนี้ก็ได้รับการพิสูจน์ว่าเป็นจริงในการทดลองที่เพิ่งผ่านมาไม่นานนี้เอง โดยงานวิจัยในปี ค.ศ. 1972 นี้เป็นถือได้ว่าเป็นงานแรกที่มีการนำทอพอโลยีมาใช้กับสถานะของสสาร โดยมีการนิยามคำว่า ลำดับชั้นทอพอโลยี (Topological order) เป็นครั้งแรกอีกด้วย [5]



รูปที่ 3 การเปรียบเทียบระบบคลื่นสปินก่อน (ขวา) และหลัง (ซ้าย) การเปลี่ยนสถานะทางทอพอโลยีเมื่ออุณหภูมิในระบบถูกลดลง (ขวา ไปซ้าย) (แหล่งที่มา

[http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2016/press.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2016/press.html))

งานวิจัยดังกล่าวทำนายว่า อันตรกิริยาระยะยาวในระบบสองมิติ นั้น เกิดได้ระหว่างสมบัติทางแม่เหล็กของอิเล็กตรอนนั้นก็คือสปิน และคลื่นสปินนี้ก็มีผลกระทบที่หักล้างกันในสภาวะปกติ เหมือนกับวงน้ำวนที่อยู่รวมกันอย่างสะเปะสะปะ สาเหตุที่เราไม่สามารถสังเกตรวงน้ำวนจากคลื่นสปินนี้ได้ก็เพราะว่าในสภาวะปกตินั้นวงน้ำวนมีการแทรกสอดแบบหักล้างกันทำให้ไม่เกิดเป็นกระแสที่วัดค่าได้ (รูปที่ 3 ขวามือ) แต่เมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำพอ ความแปรปรวนที่เกิดจากการรบกวนของพลังงานความร้อนจะลดลงพอจนทำให้วงน้ำวนของคลื่นสปินเหล่านี้เกิดอันตรกิริยากัน(รูปที่ 3 ซ้ายมือ) ส่งเสริมให้เกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันจนเป็นปริมาณที่วัดได้ โดยค่ากระแสสปินที่วัดได้นั้นก็จะเพิ่มเป็นค่าที่แตกต่างกันตามจำนวนของการเข้าคู่กันของวงน้ำวนคลื่นสปินที่แทรกสอดกันแบบเสริม ซึ่งก็คือความไม่ผันแปรทางทอพอโลยีในกรณีนี้เอง กล่าวคือการเปลี่ยนสถานะนี้ก็เหมือนกับการที่รูของระบบที่กล่าวถึงในกรณีของซินนามอนบันถูกเจาะเพิ่มขึ้นนั่นเอง (รูปที่ 4) งานวิจัยอย่างต่อเนื่องภายใต้หัวข้อนี้เป็นสิ่งที่ทำให้นักวิทยาศาสตร์ทั้งสามท่านได้รับรางวัลโนเบลในสาขาฟิสิกส์ในที่สุด หลังจากมีงานวิจัยที่ยืนยันทฤษฎีนี้ซ้ำหลายครั้ง [6-8]



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบปริมาณที่วัดได้ที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนระหว่างการเปลี่ยนสถานะทอพอโลยีกับตัวอย่างรูปทรงที่มีค่าความไม่แปรผันทางทอพอโลยีที่ไม่เท่ากัน (แหล่งที่มา [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2016/press.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2016/press.html))

จากกรณีที่ผ่านมา หลักแห่งการปรากฏ เป็นสิ่งที่กำหนดหลาย ๆ อย่าง และการคิดและวางรากฐานทฤษฎีเพื่อให้ นักฟิสิกส์สามารถค้นพบปรากฏการณ์ใหม่ ๆ ได้นั้นเป็นเรื่องสำคัญ ตลอดในช่วงเกือบ ๆ หนึ่งศตวรรษหลังการค้นพบสารกึ่งตัวนำที่ดูไม่มีทิศทางที่ชัดเจน เป็นภาพลอย ๆ ในช่วงแรก ก็อาจจะเหมือนกับสถานการณ์ การค้นพบสถานะทางอิเล็กทรอนิกส์ใหม่ของสสาร อย่างเช่น สถานะทางทอพอโลยี ในครั้งนี้ แต่ต่อไปในอนาคต สสารที่มีสถานะทางทอพอโลยีบางตัว อาจจะนำสู่ควอนตัมคอมพิวเตอร์แห่งอนาคต แม้ยังไม่ชัดเจนในวันนี้ เหมือนกับที่หลายท่านรวมถึง Wolfgang Pauli ไม่อาจคาดหมายผลสำคัญของการศึกษาสารกึ่งตัวนำ และไม่อาจทราบเลยว่า ประชากรโลกส่วนใหญ่ จะเดินไปเดินมาโดยพกสารกึ่งตัวนำติดตัวกันไม่มากนักน้อยในรูปของโทรศัพท์ นาฬิกา ฯลฯ ไม่แน่ว่า ในอีกไม่กี่สิบปีข้างหน้า เราอาจจะมีเทคโนโลยีแรกเริ่มของสารทอพอโลยีก็เป็นได้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] "The 2016 Nobel Prize in Physics: Press Release". Nobelprize.org. Nobel Media AB 2014. Available at [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2016/press.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2016/press.html)
- [2] W. Pauli, Wissenschaftlicher Briefwechsel mit Bohr, Einstein, Heisenberg u.a. / Sci. Correspondence with Bohr, Einstein, Heisenberg, a.o.: Band III/Volume III: 1940–1949, Springer-Verlag, 2008.
- [3] T. Ando, Y. Matsumoto and Y. Uemura, "Theory of Hall effect in a two-dimensional electron system", J. Phys. Soc. Jpn. 39, 279 (1975).
- [4] K. V. Klitzing, G. Dorda and M. Pepper, "New method for high-accuracy determination of the fine-structure constant based on quantized Hall resistance", Phys. Rev. Lett. 45, 494 (1980).
- [5] J. M. Kosterlitz and D. J. Thouless, "Long range order and metastability in two dimensional solids and superfluids: Application of dislocation theory", J. Phys. C: Solid State Phys. 5, L124 (1972).
- [6] M. Aidelsburger, M. Lohse, C. Schweizer, M. Atala, J. T. Barreiro, S. Nascimbène, N. R. Cooper, I. Bloch and N. Goldman, "Measuring the Chern number of Hofstadter bands with ultracold bosonic atoms", Nat. Phys. 11, 162 (2015).
- [7] C.-Z. Chang, J. Zhang, X. Feng, J. Shen, Z. Zhang, M. Guo, K. Li, Y. Ou, P. Wei, L.-L. Wang, Z.-Q. Ji, Y. Feng, S. Ji, X. Chen, J. Jia, X. Dai, Z. Fang, S.-C. Zhang, K. He, Y. Wang, L. Lu, X.-C. Ma and Q.-K. Xue, "Experimental observation of the quantum anomalous Hall effect in a magnetic topological insulator", Sci. 340, 167 (2013).
- [8] Z. Hadzibabic, P. Krüger, M. Cheneau, B. Battelier and J. Dalibard, "Berezinskii-Kosterlitz-Thouless crossover in a trapped atomic gas", Nat. 441, 1118 (2006).