

วารสารฟิสิกส์ไทย

Thai Journal of Physics

วารสารสำหรับผู้ที่รักและสนใจในแวดวงฟิสิกส์

ISSN 0857-1449

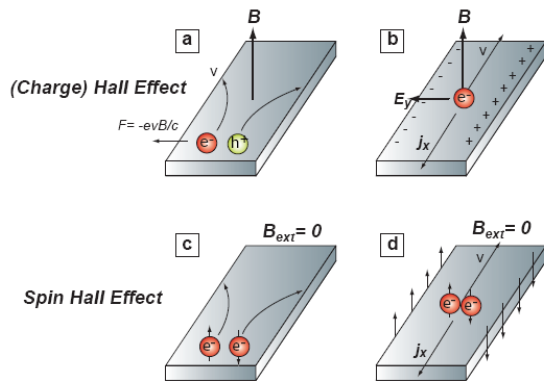
ปีที่ 26 ฉบับที่ 3 : กันยายน – พฤศจิกายน 2552

การเข้ารหัสแบบควอนตัม
(Quantum Cryptography)

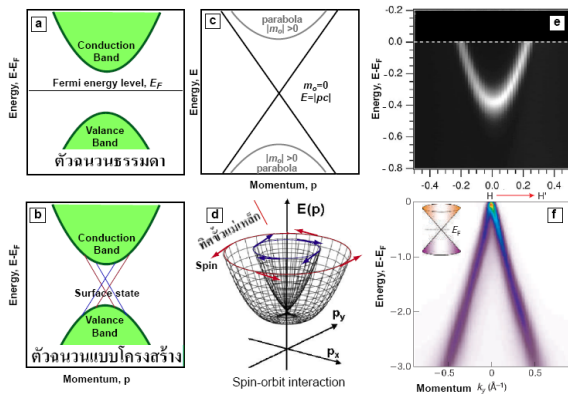
โลกควอนตัมและทฤษฎีสัมพัทธภาพที่รวมอยู่ในสาร
กับคอมพิวเตอร์แห่งอนาคต
ฟิสิกส์และเทคโนโลยีของการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ

Hot Fusion – ฤาเป็นเพียงความฝัน

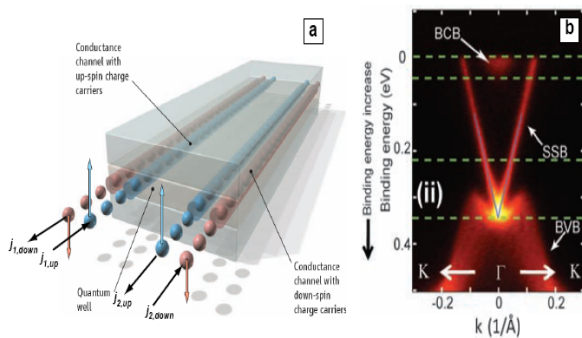
รูปประกอบจากบทความ “โลกควอนตัมและทฤษฎี
สัมพัทธภาพที่รวมอยู่ในสสาร กับคอมพิวเตอร์แห่งอนาคต”
หน้า 9 - 14



รูปที่ 1

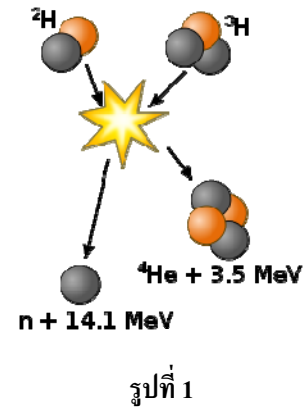


รูปที่ 2



รูปที่ 3

รูปประกอบจากบทความ “Hot Fusion – ฤาเป็นเพียง
ความฝัน” หน้า 30 - 33



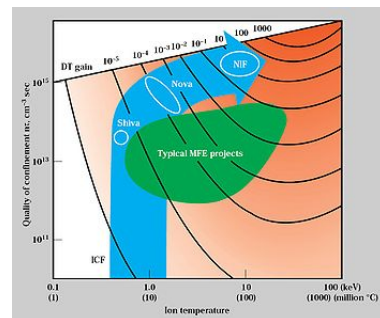
รูปที่ 1



รูปที่ 3



รูปที่ 4



รูปที่ 5

สารบัญ

สวัสดิ์	1
สรุปข่าว	2
การเข้ารหัสแบบควอนตัม (Quantum Cryptography) ฉัตรชัย ศรีนิตวิรวงศ์	4
โลกควอนตัมและทฤษฎีสัมพัทธภาพที่รวมอยู่ในสสาร กับ คอมพิวเตอร์แห่งอนาคต วรวัฒน์ มีวาสนา	9
ระบบการศึกษาวิทยาศาสตร์ไทย ...จะไปถึงดวงดาว หรือจะเข้าขั้นมะเร็งระยะสุดท้าย ตอนที่ 2: แกะและแพะรับบาป เฉลิมพล รุจินรินทร์, สิริพัฒน์ ประโทนเทพ	15
ฟิสิกส์และเทคโนโลยีของการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ หมุดตอเล็บ หนิสอ	20
บนปากกัมมันต์ ตอนที่ 1 พลังแห่งการใช้เหตุผล ศุภกร รักใหม่	25
Hot Fusion – ฤาเป็นเพียงความฝัน ชัย ไทเกอร์	30



สวัสดิ์

กลับมาพบกันอีกครั้งหนึ่งในช่วงส่งท้ายปีเก่าต้อนรับปีใหม่ สำหรับวารสารฟิสิกส์ไทยฉบับนี้นั้นก็จะมีบทความที่น่าสนใจอีกเช่นเคย อย่างเช่นเรื่องของการเข้ารหัสข้อมูลแบบควอนตัม เรื่องของปรากฏการณ์ควอนตัมสปินฮอลล์ (Quantum Spin Hall Effect) ซึ่งมีความน่าสนใจเนื่องจากมีความเป็นไปได้ที่ปรากฏการณ์นี้จะถูกนำไปใช้ในการปฏิวัติโลกของคอมพิวเตอร์ในยุคปัจจุบัน เรื่องของระบบการศึกษาวิทยาศาสตร์ของประเทศไทยอันต่อเนื่องจากเนื้อหาในฉบับที่แล้ว เรื่องของ Hot fusion และเรื่องอื่นๆ

เนื่องจากในวารสารฉบับนี้นั้นมีเรื่องของการเข้ารหัสแบบควอนตัมอยู่ด้วย ทางกองบรรณาธิการจึงจัดให้มีคำถามเกี่ยวกับรหัสเชิงรางวัลเล็กๆ น้อยๆ คือถามว่า เนื้อเพลงที่อยู่บนหน้าปกวารสารฉบับนี้ที่อยู่ในรูปของเลขฐานสองนั้นมาจากภาพยนตร์เรื่องอะไร (ตอบเป็นชื่อภาพยนตร์ ไม่เอาชื่อเพลงเนื่องจากชื่อเพลงปรากฏอยู่ในเนื้อเพลงอยู่แล้ว) โดยรูปเต็มของหน้าปกจะปรากฏอยู่ในหน้าที่ 8 สามท่านแรกที่ตอบถูกจะได้รับของรางวัลจากกองบรรณาธิการครับ (ค่ะ)

กองบรรณาธิการ

กองบรรณาธิการ ชานุกิจ คันถ่อง, ศุภกร รักใหม่, วันทนา คล้ายสุบรรณ, ฉัตรชัย ศรีนิตวิรวงศ์, นฤมล สุวรรณจันทร์ดี, พวงรัตน์ ไพเราะ, พรทิพย์ สุดเมือง, ศิรามาส โกมลจินดา, พรรณ วัฒนกลวิวิช ห้วหน้ากองบรรณาธิการ ประพจน์ คล้ายสุบรรณ ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ สมศรี สิงขรัตน์ ภาพและออกแบบปก ประพจน์ คล้ายสุบรรณ เลขานุการกองบรรณาธิการ เฉลิมศรี เพื่องทอง จำนวนพิมพ์ 2,000 เล่ม

ติดต่อกองบรรณาธิการ วารสารฟิสิกส์ไทย สมาคมฟิสิกส์ไทย อาคารสุรพัฒน์ 3 ถนนมหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 โทรศัพท์: 044-217040 โทรสาร: 044-217047 วารสารฟิสิกส์ไทย เป็นวารสารราย 3 เดือน มีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่สาระ ข่าวสาร และเป็นสื่อสัมพันธ์ในมวลหมู่สมาชิกและผู้สนใจในแวดวงฟิสิกส์ ส่งเสริมให้เกิดการแลกเปลี่ยนข้อมูลและประสบการณ์เกี่ยวกับฟิสิกส์ในวงกว้างที่สร้างสรรค์ โดยความคิดเห็นและทัศนะที่ปรากฏอยู่ในบทความต่างๆ เป็นเฉพาะของผู้เขียนแต่ละท่าน สมาคมฟิสิกส์ไทยไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

Website: www.thps.org ผู้ดูแล: ญัฐวุฒิ สุเดช ติดต่อ: info@thps.org

คณะกรรมการสมาคมฟิสิกส์ไทย ประจำปี 2552 – 2554 นายกสมาคมฯ รศ. ดร. วีระพงษ์ แพสุวรรณ อุปนายก รศ. ดร. วิทยา อมรกิจบำรุง เลขานุการ ผศ. ดร. ประยูร ส่งศิริฤทธิกุล เหรัญญิก ศ. ดร. ชูกิจ ลิ้มปีจันทร์ นายทะเบียน ดร. สาโรช รุจิวรรณ บรรณาธิการ วารสารฟิสิกส์ไทย ดร. ประพจน์ คล้ายสุบรรณ ปฎิคม ผศ. ดร. ศุภกร รักใหม่ ประธานสัมพันธ์ ดร. สัมภาส นิดเกตุ รองเลขานุการ ดร. ขรรค์ชัย โกศลทองกี กรมการ ผศ. ดร. ขจรยศ อยู่ดี, ผศ. รัชนา ชินพิทักษ์, รศ. ดร. ชีววรรณ บุญญวรรณ, ผศ. ดร. ธนากร โอสดาจันทร์, ผศ. ดร. นิรันดร์ วิทอนันต์, ผศ. ดร. ขวัญ อารยะธนิตกุล, ดร. สิริพัฒน์ ประโทนเทพ, ดร. ญัฐพร นิตรณ

สรุปข่าว

รางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ปี 2552



ได้มีการประกาศรางวัลโนเบลประจำปี 2552 กันไปเป็นที่เรียบร้อยแล้ว เมื่อวันที่ 6 ต.ค. 2552 ที่ผ่านมา ซึ่งในปีนี้มีนักวิทยาศาสตร์ 3 ท่าน จากประเทศจีน สหรัฐอเมริกา และแคนาดา เป็นผู้คว้ารางวัลโนเบลในสาขาฟิสิกส์ไปครอง โดยได้รับเงินรางวัล 10 ล้านสวีดิชโครนร่วมกัน

ชาร์ลส เกา (Charles Kao) นักวิทยาศาสตร์เชื้อสายจีน จากมหาวิทยาลัยจีนแห่งฮ่องกง (Chinese University of Hong Kong) เป็นผู้คว้าเงินรางวัลครั้งแรก หรือราว 24 ล้านบาท จากงานวิจัยด้านเส้นใยแก้วนำแสง (Optical fiber) ชาร์ลส เกา ถือเป็นหนึ่งในวีรบุรุษนักประดิษฐ์คนหนึ่งที่ทำให้เกิดการพัฒนาสู่โลกเทคโนโลยีสมัยใหม่ เพราะเป็นบุคคลที่ได้สร้างการเปลี่ยนแปลงขนานใหญ่ให้กับระบบการสื่อสารของสังคมในปัจจุบัน อย่างเช่น การส่งถ่ายข้อมูลทางอินเทอร์เน็ต



ชาร์ลส เกา เกิดเมื่อวันที่ 4 พฤศจิกายน ปี 2476 ที่เมืองเซี่ยงไฮ้ ประเทศจีน และได้เริ่มศึกษาทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าที่โพลีเทคนิค วูลวิช (Woolwich Polytechnic) หรือมหาวิทยาลัยกรีนนิช (University of Greenwich) ในปัจจุบัน หลังจากที่ได้รับปริญญาเอกทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าจากวิทยาลัยอิมพีเรียลลอนดอน (Imperial College

London) ในปี 2508 เขาได้เข้าทำงานที่ห้องปฏิบัติการมาตรฐานการสื่อสาร (Standard Telecommunication Laboratories: STL) ในเมืองฮาร์โลว์ สหราชอาณาจักร ซึ่งเป็นสถานที่เริ่มต้นในงานวิจัยด้านเส้นใยแก้วนำแสง

ในช่วงที่ ชาร์ลส เกา เริ่มทำงานที่ STL ร่วมกับ แอนโทนี คาร์โบวียาค (Antoni Karbowiak) ผู้เริ่มศึกษาคุณสมบัติของท่อนำคลื่น (Waveguides) เพื่อนำไปใช้งานในระบบการสื่อสาร เขาไม่ประสบความสำเร็จในการสร้างท่อนำคลื่นด้วยการใช้เลนส์มาต่อกันหรือใช้ท่อที่เดิมก๊อชเข้าไป แต่หลังจากที่ คาร์โบวียาค ได้ย้ายไปทำงานที่มหาวิทยาลัยนิวเซาท์เวลส์ (University of New South Wales) เมืองซิดนีย์ ประเทศออสเตรเลีย ชาร์ลส เกา จึงได้เริ่มทำงานวิจัยอย่างเต็มตัว และประสบความสำเร็จเป็นที่รู้จักในการสร้างท่อนำคลื่นจากฉนวน อย่างเช่น ท่อพลาสติก ที่สามารถนำคลื่นไมโครเวฟได้ เป็นการสร้างความสนใจให้กับ อีเลียส สนิทเซอร์ (Elias Snitzer) จากบริษัทออปติคอลลออเมริกัน (American Optical Company) ผู้ซึ่งคิดค้นทฤษฎีที่แสดงให้เห็นว่าท่อนำคลื่นที่เป็นฉนวนสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นเส้นใยแก้วนำแสงเพื่อใช้ในระบบการสื่อสารได้ แต่เนื่องจากสัญญาณที่ได้ถูกลดทอนลงมาก เส้นใยแก้วนำแสงแบบนี้จึงไม่ถูกนำไปใช้ในระบบการสื่อสารมากนัก หลังจากนั้น ชาร์ลส เกา และ จอร์จ ฮอคแฮม (George Hockham) ได้ค้นพบว่าความไม่บริสุทธิ์ของเส้นใยเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการดูดกลืนและการกระเจิงของแสง ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้สัญญาณเกิดการลดทอนลง ชาร์ลส เกา ได้เสนอเส้นใยที่ทำจากแก้วบริสุทธิ์สูง รวมทั้งได้คำนวณการลดทอนสัญญาณเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง เดซิเบล (decibels) ต่อกิโลเมตร (dB/km)

ชาร์ลส เกาได้ตีพิมพ์ผลงานใน Proceedings of the Institute of Electrical Engineers หัวข้อ “A fibre of glassy material in a clad structure represents a practical optical waveguide worth important potential as a new form of communication medium” ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติของเส้นใยแก้วนำแสงสามารถเก็บแสงให้อยู่ในแกนกลางของเส้นใยได้เป็นระยะทางไกลระดับกิโลเมตรด้วยเหตุผลที่เกิดจากการสะท้อนกลับหมดภายในท่อ สองสามปีหลังจากนั้น ชาร์ลส เกา ได้นำ

ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ที่มีความบริสุทธิ์และง่ายต่อการผลิตในภาคอุตสาหกรรมมาใช้ทำเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งได้รับความสำเร็จเป็นอย่างมาก เพราะในปี 2513 ทีมนักวิจัยนำโดย จอห์น แมกเชสเนย์ (John MacChesney) ณ ห้องปฏิบัติการเบลล์ได้พัฒนาเส้นใยแก้วนำแสงชนิดนี้จนมีค่าลดทอนสัญญาณเพียง 1 dB/km ได้สำเร็จ

สำหรับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์อีกส่วนหนึ่งนั้น เป็นงานวิจัยร่วมของ วิลลาร์ด บอยล์ (Willard Boyle) และจอร์จ สมิท (George Smith) จากห้องปฏิบัติการเบลล์ (Bell Laboratories) ผู้ประดิษฐ์วงจรถ่ายภาพด้วยสารกึ่งตัวนำ หรือที่เราเรียกกันว่า ซีซีดี (Charge-Coupled Device: CCD) ซึ่งเป็นอุปกรณ์พื้นฐานของกล้องถ่ายภาพดิจิทัลในปัจจุบัน



วิลลาร์ด บอยล์ เกิดเมื่อวันที่ 19 สิงหาคม ปี 2467 ได้รับปริญญาเอกในสาขาฟิสิกส์ จากมหาวิทยาลัยแมกิลล์ (McGill University) ในปี 2493 ส่วนจอร์จ สมิท เกิดเมื่อวันที่ 10 พฤษภาคม ปี 2473 จบการศึกษาด้านฟิสิกส์จากมหาวิทยาลัยชิคาโก (University of Chicago) ในปี 2502 ทั้งสองทำงานร่วมกันที่ห้องปฏิบัติการเบลล์ ณ เมืองนิวเจอร์ซีย์ ตั้งแต่ปี 2512 ผลงานการคิดค้นซีซีดีที่ทำให้ทั้งสองมีชื่อเสียงและได้รับรางวัลโนเบลในครั้งนี้ นอกจากจะเป็นสิ่งสำคัญในการปฏิวัติการถ่ายภาพจากกล้องฟิล์มมาเป็นกล้องดิจิทัลในปัจจุบันแล้วนั้นยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กันอย่างกว้างขวางในด้านต่างๆ เช่น ในด้านดาราศาสตร์ ภูมิศาสตร์ การแพทย์ จนกลายเป็นหัวใจหลักของการพัฒนาเทคโนโลยีหลายอย่างในปัจจุบัน

อุปกรณ์ซีซีดีนั้นประกอบด้วยเซลล์ของสารไวแสงจำนวนมากวางอยู่ในลักษณะเป็นเมตริกซ์ เมื่อแสงตกกระทบลงบน

เซลล์ จะเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระสะสมอยู่ในตัวเก็บประจุ จำนวนประจุของแต่ละเซลล์จะเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อความเข้มของแสงที่ตกกระทบ ปริมาณของอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในแต่ละเซลล์หรือพิกเซล (Pixel) จะถูกอ่านค่าเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าและถูกนำไปประมวลผลเป็นรูปภาพต่อไป

อีกหนึ่งรางวัลที่มีการประกาศผลพร้อมๆ กัน เพื่อล้อเลียนรางวัลโนเบล ฟิงแล้วอาจสร้างรอยยิ้มได้กับรางวัลที่เรียกว่า อิกโนเบล (Ig Nobel Prize) ซึ่งในปีนี้มีกลุ่มบุคคลที่ได้รับรางวัลสาขาฟิสิกส์คือ แคเธอรีน วิทคัม (Katherine Whitcome) จากมหาวิทยาลัยซินซินเนติ (University of Cincinnati) แดเนียล ลิเบอร์แมน (Daniel Lieberman) จากมหาวิทยาลัยฮาร์วาร์ด และลิซา ชาปิโร (Liza Shapiro) จากมหาวิทยาลัยเท็กซัส (University of Texas) จากผลงานวิจัยที่ทำให้เราได้เข้าใจว่า ทำไมผู้หญิงท้องถึงไม่ล้มหัวทิ่ม

ที่มา

- [1] http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2009
- [2] <http://physicsworld.com/cws/article/news/40602>
- [3] <http://improbable.com/ig/winners/#ig2009>

การเข้ารหัสแบบควอนตัม (Quantum Cryptography)

ฉัตรชัย ศรีนิติวรพงศ์¹

หลักการโดยทั่วไปของการเข้ารหัสคือการส่งสารจากผู้ส่งไปยังผู้รับโดยไม่ให้ข้อมูลถูกดักจับ (Interception) หรือหากข้อมูลตกอยู่ในมือของบุคคลที่สามแล้ว บุคคลนั้นจะไม่สามารถลักลอบอ่านข้อมูลในสารนั้นได้ การเข้ารหัสที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันนั้น เป็นเพียงการถ่วงเวลาไม่ให้บุคคลที่สามซึ่งดักสารไปได้มีเวลาพอที่จะถอดรหัสและอ่านสารออกมา โดยตั้งอยู่บนสมมุติฐานว่า หากมีผู้ดักสารไปได้ ผู้ที่ไม่ทราบวิธีการถอดรหัสจะต้องเสียเวลากับการถอดรหัสอย่างมาก ดังนั้นการเข้ารหัสแบบปัจจุบันนี้จึงประกอบด้วยกลไกการถ่วงเวลาในหลายรูปแบบ

การเข้ารหัสสำหรับการส่งข้อมูลผ่านทางอินเทอร์เน็ตก็เป็นแบบหนึ่งของการเข้ารหัส โดยการเข้ารหัสแบบนี้จะใช้กุญแจที่มีขนาดข้อมูลต่างๆ หรือการเข้ารหัสที่ใช้กุญแจที่มีจำนวนบิต (Bit) ต่างๆ กัน โดย 1 บิตประกอบด้วยตัวเลข 0 หรือ 1 ตัวใดตัวหนึ่งเพียงตัวเดียว สมมุติว่าข้อมูลมีการเข้ารหัสแบบสองบิต กุญแจที่จะไขเข้าไปเพื่ออ่านข้อมูลจะเป็นตัวเลข 0 หรือ 1 เรียงกันสองตัว โดยกุญแจทั้งหมดจะมีอยู่เพียง 2^2 หรือ 4 แบบเท่านั้นคือ 00 10 01 และ 11 หากบุคคลที่สามได้สารที่เข้ารหัสโดยกุญแจขนาด 2 บิตนี้ไป จะต้องลองใส่กุญแจทั้งหมดอย่างมากที่สุด 4 แบบเท่านั้นก็จะสามารถเปิดสารออกมาได้ วิธีการถอดรหัสโดยการลองใส่กุญแจทีละตัวจนเจอนี้เรียกว่า Brute-force decryption จะเห็นได้ว่าหากใช้คอมพิวเตอร์ช่วยถอดรหัสโดยลองใส่กุญแจทั้ง 4 นี้ลงไปทีละตัวจนครบ จะใช้เวลาเพียงเสี้ยววินาทีเดียวก็จะทราบ ว่ากุญแจตัวใดใน 4 ตัวนี้เป็นกุญแจที่ถูกต้อง วิธีการนี้เทียบเท่ากับการที่เรามีกุญแจอยู่หนึ่งพวงต้องการจะเปิดประตู วิธีทำคือลองกุญแจทีละดอกจนกว่าจะเจอดอกที่ไขประตูได้ ดังนั้นหากต้องการถ่วงเวลาให้นานที่สุดจะต้องมีกุญแจให้มากดอกที่สุดเท่าที่จะทำได้ ซึ่งวิธีหนึ่งที่นิยมทำคือ เพิ่มจำนวนบิตของกุญแจให้มากขึ้น กุญแจขนาด N บิตจะมีจำนวนกุญแจที่ต่างกันทั้งสิ้น 2^N แบบ สมมุติให้กุญแจมีขนาด 128 บิตจะมีกุญแจที่ต่างกันมากถึง 3.4×10^{38} แบบ โดยประมาณ ซึ่งเป็นจำนวนที่มากพอที่จะทำให้เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้กันทั่วไปในปัจจุบันนี้ไม่สามารถถอดรหัสได้

ภายในระยะเวลาที่ต้องการ หากลองคำนวณระยะเวลาในการถอดรหัสขนาด 128 บิต โดยใช้คอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) ความเร็ว 10 GHz และสมมุติว่าใน 1 รอบของสัญญาณนาฬิกาจะลองกุญแจได้หนึ่งแบบ ดังนั้นใน 1 วินาทีเครื่องคอมพิวเตอร์นี้จะลองกุญแจได้ทั้งหมดถึง 10^{10} แบบหรือ หนึ่งหมื่นล้านแบบ ซึ่งดูเหมือนจะมากแต่หากลองคำนวณเวลาที่ใช้ในการลองกุญแจทั้งหมด 3.4×10^{38} แบบแล้วจะต้องใช้เวลาทั้งสิ้น 3.4×10^{28} วินาที หรือ 10^{21} ปี! โดยประมาณ ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าเป็นการเข้ารหัสที่ไม่สามารถที่จะถอดรหัสได้ถ้าไม่ทราบกุญแจที่ถูกต้อง อย่างไรก็ตามการเข้ารหัสแบบปัจจุบันนี้จะไม่ค่อยมีประสิทธิภาพหากใช้คอมพิวเตอร์แบบควอนตัม (Quantum computer) เป็นตัวถอดรหัส

การเข้ารหัสแบบควอนตัมที่จะกล่าวถึงในบทความนี้มีหลักการที่แตกต่างกับการเข้ารหัสแบบปัจจุบันคือ การเข้ารหัสแบบควอนตัมนี้ การทำสำเนาโดยบุคคลที่สามจะทำได้ไม่ได้หมายความว่าผู้ส่งสารจะสามารถทราบได้หากมีการลักลอบอ่านสารโดยบุคคลที่สาม ซึ่งต่างจากการเข้ารหัสแบบปัจจุบันนี้ที่ผู้ส่งสารจะไม่สามารถทราบได้ว่าสารที่ส่งไปถูกดักจับหรือทำสำเนาโดยบุคคลที่สามหรือไม่ ก่อนที่จะกล่าวถึงการเข้ารหัสแบบควอนตัม จะขอกล่าวถึงหลักการพื้นฐานของกลศาสตร์ควอนตัมที่จะนำไปสู่กลไกการเข้ารหัสเสียก่อน

สถานะของระบบหรืออนุภาคในกลศาสตร์ควอนตัมนั้นจะแทนด้วยเวกเตอร์สถานะ (State vector) ซึ่งจะมีพารามิเตอร์กำกับสถานะของอนุภาคที่เรียกว่าตัวเลขควอนตัม (Quantum number) ในที่นี้เราจะใช้อิเล็กตรอนเป็นตัวส่งสาร โดยเราจะสนใจตัวเลขควอนตัมเพียงสองตัวคือ S และ m_s ซึ่ง S จะระบุถึงสถานะสปินของอิเล็กตรอน โดยอิเล็กตรอนจะมีสปินเป็น $S = 1/2$ ส่วน m_s จะบอกทิศทางของสปิน ซึ่งมีค่าได้สองค่าคือ $m_s = +1/2$ แทนสถานะของสปินขึ้น (Up spin) และ $m_s = -1/2$ แทนสถานะของสปินลง (Down spin) ดังนั้นหากเราสนใจตัวเลขควอนตัม S และ m_s เท่านั้น อิเล็กตรอนจะมีสถานะได้สองแบบคือ สถานะสปินขึ้น

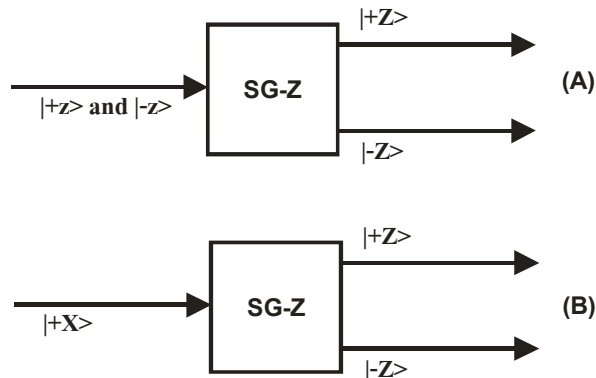
¹ อาจารย์ (ดร.) ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เขียนแทนด้วยเวกเตอร์สถานะ $|+z\rangle$ และสถานะสปินลง เขียนแทนด้วยเวกเตอร์สถานะ $|-z\rangle$ ในที่นี้แกนอ้างอิงทิศทางของสถานะสปินขึ้นหรือลงคือแกน $\hat{z}$ หากใช้ทิศทางแกนอ้างอิงอื่น เช่น $\hat{x}$ หรือ $\hat{y}$ ก็สามารถทำได้เพียงแต่โดยทั่วไปมักจะนิยมใช้ $\hat{z}$ เป็นแกนอ้างอิงทิศทางของสปิน¹ หากเราใช้แกนอ้างอิงอื่นในการกำหนดทิศของสปิน เช่น $\hat{x}$ หรือ $\hat{y}$ จะทำให้เรามีเวกเตอร์สถานะอื่นๆอีกคือ $|+x\rangle$ $|-x\rangle$ $|+y\rangle$ และ $|-y\rangle$ โดยเวกเตอร์สถานะทั้งหมดนี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปผลบวกของเวกเตอร์สถานะ $|+z\rangle$ และ $|-z\rangle$ ได้ เช่น $|\pm x\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|+z\rangle \pm |-z\rangle)$ หรือ $|\pm y\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|+z\rangle \pm i|-z\rangle)$

ในการเข้ารหัสแบบควอนตัมที่จะกล่าวถึงนี้ ข้อมูลจะอยู่ในรูปของเลขฐานสองก็คืออยู่ในรูปของข้อมูลเป็นบิต ยกตัวอย่างเช่น ตัวอักษร “A” เขียนแทนด้วยเลขฐานสอง “100 0001” เพราะฉะนั้นองค์ประกอบพื้นฐานของข้อมูลคือตัวเลข 0 และ 1 เราอาจจะแทนตัวเลข 0 ด้วยเวกเตอร์สถานะ $|-z\rangle$ และ ตัวเลข 1 ด้วยเวกเตอร์สถานะ $|+z\rangle$ ดังนั้นอิเล็กตรอนหนึ่งตัวจะแทนข้อมูลขนาด 1 บิต

การเตรียมข้อความหรือสารก็คือการกำหนดให้อิเล็กตรอนแต่ละตัว (เทียบเท่ากับข้อมูลแต่ละบิต) มีสถานะใดสถานะหนึ่งตามที่ต้องการ โดยจะใช้อุปกรณ์ที่มีแนวคิดมาจากการทดลองของ Stern และ Gerlach เมื่อปี ค.ศ. 1922 ในที่นี้จะเขียนย่อว่า อุปกรณ์ SG (Stern-Gerlach device) อุปกรณ์ SG มีสามแบบคือ SG-Z SG-X และ SG-Y อุปกรณ์ชนิดนี้ทำหน้าที่แยกอิเล็กตรอนออกเป็นสองกลุ่มเช่น SG-Z จะแยกอิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะ $|+z\rangle$ และ $|-z\rangle$ ออกจากกัน ในขณะที่ SG-X จะแยก

อิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะ $|+x\rangle$ และ $|-x\rangle$ ออกจากกันเป็นต้น แผนภาพด้านล่างแสดงถึงการทำงานของ SG-Z



รูปที่ 1 รูปแสดงแผนภาพการทำงานของอุปกรณ์ SG-Z

ในรูปที่ 1(A) ถ้าอิเล็กตรอนตอนแรกจะประกอบไปด้วยอิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะทั้งสองสถานะจำนวนเท่าๆกันคือ $|+z\rangle$ และ $|-z\rangle$ เมื่อถ้าอิเล็กตรอนวิ่งผ่าน SG-Z ถ้าอิเล็กตรอนจะแยกออกเป็นสองลำ แต่ละลำจะประกอบไปด้วยอิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะเดียวกันทั้งหมด ถ้าอิเล็กตรอนที่เบนขึ้นจะประกอบด้วยอิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะ $|+z\rangle$ และถ้าอิเล็กตรอนที่เบนลงจะประกอบด้วยอิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะ $|-z\rangle$ นอกจากนั้นหากถ้าอิเล็กตรอนที่วิ่งเข้ามาตอนแรกอยู่ในสถานะอื่นที่ไม่ใช่ $|+z\rangle$ และ $|-z\rangle$ เช่น $|+x\rangle$ ตามรูปที่ 1(B) อุปกรณ์ SG-Z จะแยกถ้าอิเล็กตรอนออกเป็นสองลำเช่นกันตามรูป ทั้งนี้เนื่องจากสถานะ $|+x\rangle$ สามารถเขียนอยู่ในรูปของผลบวกเชิงเส้นของสถานะ $|+z\rangle$ และ $|-z\rangle$ ตามสมการ

$$|+x\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|+z\rangle + |-z\rangle)$$

โดยคุณสมบัติของอุปกรณ์ SG นี้ทำให้เราสามารถเลือกอิเล็กตรอนที่มีสถานะตามที่ต้องการได้ ส่วนอุปกรณ์การถอดรหัสนั้นเราก็จะใช้อุปกรณ์ SG เป็นตัวถอดรหัสเช่นกัน ตัวอย่างเช่นหากข้อมูลบิตแรกเป็น $|+z\rangle$ และเราถอดรหัสด้วย SG-Z ผู้ถอดรหัสจะพบว่าถ้าอิเล็กตรอนจะเบนขึ้นทำให้อ่านค่าได้เป็น $|+z\rangle$ ส่วนในกรณีที่ข้อมูลบิตแรกเป็น $|+x\rangle$ และเราถอดรหัสด้วย SG-Z จะพบว่าเมื่อผลการถอดรหัสเป็น

¹ สปินของอิเล็กตรอนไม่ใช่เวกเตอร์ที่ชี้ขึ้นลงตามที่เราค้นเคยกัน สปินของอนุภาคนั้นเป็นสมบัติที่ไม่มีกรกล่าวถึงในกลศาสตร์คลาสสิก สปินเป็นสมบัติเฉพาะตัวของอนุภาคนั้นๆ ในกรณีของอิเล็กตรอนจะมีสปินเป็น 1/2 ทำให้มีสถานะที่ต่างกันอยู่สองสถานะและสามารถแยกออกได้โดยสนามแม่เหล็ก คล้ายคลึงกับการที่เราแม่เหล็กที่มีขั้วเหนือชี้ขึ้นและลง

สองแบบคือ $|+z\rangle$ และ $|-z\rangle$ โดยโอกาสที่เกิดแต่ละแบบมีค่าเท่ากัน

จากที่กล่าวมาข้างต้นเหมือนกับว่าหากต้องการจะส่งข้อความก็เพียงแต่แปลงข้อความให้เป็นตัวเลขฐานสองแล้วให้อิเล็กตรอนแต่ละตัวอยู่ในสถานะสปินขึ้นหรือลงตามข้อมูล จากนั้นส่งลำอิเล็กตรอนออกไป ผู้รับก็จะใช้อุปกรณ์ SG-Z อ่านสถานะของอิเล็กตรอนแต่ละตัว แปลงกลับเป็นเลขฐานสองและ

ข้อความตามลำดับ ขั้นตอนการส่งข้อมูลดังกล่าวไม่ใช้การเข้ารหัส แต่เป็นเพียงการใช้สปินของอิเล็กตรอนเป็นตัวส่งข้อมูลเท่านั้น การลักลอบอ่านข้อมูลที่ส่งในลักษณะนี้จะง่ายมากเพียงแค่นักคณิตศาสตร์สามนาอูปรณ์ SG-Z มาดักสารแล้วอ่าน จากนั้นก็ส่งสารต่อไปยังผู้รับ ผู้รับหรือผู้ส่งจะไม่มีทางทราบได้ว่าข้อมูลได้ถูกลักลอบอ่านไปแล้ว

1. อิเล็กตรอนตัวที่(บิตที่)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
2. แกนอ้างอิงของผู้ส่ง (ปกปิด)	$\hat{x}$	$\hat{x}$	$\hat{z}$	$\hat{z}$	$\hat{x}$	$\hat{z}$	$\hat{z}$	$\hat{x}$	$\hat{z}$	$\hat{x}$	$\hat{z}$	$\hat{x}$	$\hat{x}$	$\hat{z}$	$\hat{z}$	$\hat{x}$
3. สารที่ถูกส่ง (ปกปิด)	$ +x\rangle$	$ +x\rangle$	$ -z\rangle$	$ -z\rangle$	$ +x\rangle$	$ -z\rangle$	$ +z\rangle$	$ +x\rangle$	$ -z\rangle$	$ +x\rangle$	$ -z\rangle$	$ -x\rangle$	$ -x\rangle$	$ +z\rangle$	$ -z\rangle$	$ -x\rangle$
4. แกนอ้างอิงของผู้รับ (เปิดเผย)	$\hat{x}$	$\hat{z}$	$\hat{x}$	$\hat{x}$	$\hat{x}$	$\hat{z}$	$\hat{z}$	$\hat{x}$	$\hat{z}$	$\hat{x}$	$\hat{x}$	$\hat{z}$	$\hat{z}$	$\hat{x}$	$\hat{z}$	$\hat{z}$
5. ผลการอ่าน (1 - 8 เปิดเผย 9 - 16 ปกปิด)	$ +x\rangle$	$ -z\rangle$	$ -x\rangle$	$ +x\rangle$	$ +x\rangle$	$ -z\rangle$	$ +z\rangle$	$ +x\rangle$	$ -z\rangle$	$ +x\rangle$	$ +x\rangle$	$ +z\rangle$	$ -z\rangle$	$ +x\rangle$	$ -z\rangle$	$ -z\rangle$
6. ผลการอ่านที่ใช้ได้	ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ได้	ได้	ได้	ได้	ได้	ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ได้	ไม่ได้

ตารางที่ 1 แสดงขั้นตอนและรายละเอียดในการส่งสารโดยใช้อิเล็กตรอน 16 ตัว

วิธีการที่จะทราบว่าคุณได้ถูกลักลอบอ่านหรือไม่นั้นสามารถทำได้ดังนี้ ในการส่งข้อมูลนั้นแทนที่ผู้ส่งสารจะใช้แกนอ้างอิงเพียงแกนเดียวคือแกน $\hat{z}$ และเวกเตอร์สถานะเพียงสองตัวคือ $|+z\rangle$ และ $|-z\rangle$ ผู้ส่งสารจะใช้แกนอ้างอิงสองแกนเช่น $\hat{z}$ และ $\hat{x}$ ดังนั้นอิเล็กตรอนจะมีเวกเตอร์สถานะทั้งสิ้น 4 ตัวคือ $|+z\rangle$ $|-z\rangle$ $|+x\rangle$ และ $|-x\rangle$ ตัวอย่างการส่งสารโดยใช้อิเล็กตรอน 16 ตัวเป็นไปตามตารางที่ 1 ในบรรทัดที่สองผู้ส่งสารจะสุ่มเลือกใช้แกนอ้างอิงอันใดอันหนึ่ง ($\hat{x}$ หรือ $\hat{z}$) สำหรับอิเล็กตรอนตัวหนึ่งๆโดยโอกาสที่จะเลือกแกน $\hat{x}$ หรือ $\hat{z}$ มีค่าเท่ากัน และข้อมูลนี้จะถูกปกปิดและไม่ส่งออกไป ส่วนในบรรทัดที่สามคือสารที่ส่งออกไปโดยถูกปกปิด ในบรรทัดที่สี่ผู้รับสารจะเลือกแกนอ้างอิงแบบสุ่มเช่นเดียวกัน (คือเลือกที่จะใช้อุปกรณ์ SG-X หรือ SG-Z ตัวใดตัวหนึ่ง) ข้อมูลส่วนนี้จะถูกเปิดเผย หลังจากนั้นผู้รับสารจะทำการอ่านสาร ซึ่งแสดงในบรรทัดที่ห้า ผลของการ

อ่านจะถูกเปิดเผยบางส่วน ในที่นี้ผลการอ่านของอิเล็กตรอน 8 ตัวแรกจะถูกเปิดเผยในขณะที่ผลการอ่านสารจากอิเล็กตรอนตัวที่ 9 - 16 จะถูกปกปิด

จากตารางพบว่าข้อมูลที่ถูกลักลอบอ่านจะมีอยู่สามส่วนด้วยกันคือ สารที่ถูกส่งออกไป แกนอ้างอิงของผู้ส่งและผลการอ่านจากอิเล็กตรอนตัวที่ 9 - 16 แต่จะมีเพียงสารที่ถูกส่งออกไปเท่านั้นที่มีโอกาสจะถูกลักลอบอ่าน ส่วนแกนอ้างอิงของผู้ส่งและผลการอ่านจากอิเล็กตรอนตัวที่ 9 - 16 นั้นไม่มีทางที่จะถูกลักลอบอ่านได้ เพราะเป็นข้อมูลที่ผู้ส่งหรือผู้รับ เก็บไว้กับตัวไม่ได้ส่งออกไป มีเพียงผู้ส่งหรือผู้รับเท่านั้นที่ทราบข้อมูลนี้

จะขออธิบายตารางที่ 1 เพิ่มเติมโดยเฉพาะในบรรทัดที่ 5 และ 6 จะเห็นได้ว่าผลการอ่านในบรรทัดที่ 5 นั้นจะถูกต้องก็ต่อเมื่อผู้รับ เลือกใช้แกนอ้างอิงตรงกับผู้ส่ง ซึ่งโอกาสที่เกิดมีค่าเป็น 1/2 ในทำนองเดียวกัน ผลการอ่านที่ใช้ได้จะเป็นผลการอ่านที่ผู้รับ เลือกใช้แกนอ้างอิงตรงกับผู้ส่ง ข้อมูลบรรทัดที่ 6 นี้มีเพียงผู้

ส่งเท่านั้นที่ทราบ เพราะมีเพียงผู้ส่งเท่านั้นที่ทราบแกนอ้างอิงที่ตนเองเลือกใช้ (ข้อมูลในบรรทัดที่ 2)

ขั้นตอนการส่งจะเป็นดังนี้ ผู้ส่งเลือกแกนอ้างอิงตามบรรทัดที่สอง หลังจากนั้นจะแปลงสารที่จะถูกส่งในรูปเลขฐานสองและสปินของอิเล็กตรอนตามแกนอ้างอิงในบรรทัดที่สอง ในที่นี้ “1” จะแทนด้วย $|+x\rangle$ หรือ $|+z\rangle$ และ “0” จะแทนด้วย $|-x\rangle$ หรือ $|-z\rangle$ สารในบรรทัดที่สามจะถูกส่งออกไป ผู้รับเตรียมเครื่องอ่านสาร (SG-X หรือ SG-Z) โดยเปิดเผย ตามบรรทัดที่สี่ หลังจากนั้นผู้รับเปิดเผยผลการอ่านบางส่วน ในที่นี้คือผลการอ่านจากอิเล็กตรอนตัวที่ 1 - 8 ผู้ส่งจะวิเคราะห์ผลการอ่านของผู้รับแล้วจะทราบได้ว่าสารที่ส่งออกไป ได้ถูกลักลอบอ่านหรือไม่ หากผู้ส่งวิเคราะห์แล้วพบว่าไม่มีการลักลอบอ่านสาร ผู้ส่งจะบอกให้ผู้รับ อ่านสารจากอิเล็กตรอนตัวที่ 9 - 16 เฉพาะตัวที่มีผลการอ่านที่ใช้ได้ (ตัวที่ 9 10 และ 15 เท่านั้น) ยกตัวอย่างเช่น หากสารที่จะส่งคือ “10” ผู้ส่งอาจจะบอกให้ผู้รับอ่านสารจากอิเล็กตรอนตัวที่ 10 และ 15 หรือหากสารที่จะส่งคือ “00” ผู้ส่งอาจจะบอกให้ผู้รับอ่านสารจากอิเล็กตรอนตัวที่ 9 และ 15 เป็นต้น

กล่าวโดยสรุปก็คือสารทั้งหมดที่ถูกส่งออกไป ในตัวอย่างนี้คืออิเล็กตรอน 16 ตัว หรือสารขนาด 16 บิต ครึ่งหนึ่งคือ 8 บิตแรกเปิดเผยผลการอ่าน จะถูกใช้ไปในการวิเคราะห์ว่าสารที่ถูกส่งออกไป ได้ถูกลักลอบอ่านหรือไม่ ส่วนอีกครึ่งหนึ่งคือ 8 บิต

หลัง ที่ปกปิดผลการอ่าน จะเป็นเนื้อหาของสาร ที่ผู้ส่งต้องการจะสื่อสารกับผู้รับโดยวิธีนี้ ผลการอ่านที่อยู่ในมือผู้รับ (บรรทัดที่ 5) จะมีความหมายก็ต่อเมื่อผู้ส่ง มั่นใจได้ว่าสารที่ถูกส่งออกไป ไม่ได้ถูกลักลอบอ่าน

จากที่อธิบายมาทั้งหมดข้างต้น วิธีการส่งข้อมูลลักษณะนี้ จะได้ผลก็ต่อเมื่อผู้ส่งสามารถตัดสินใจได้ว่าข้อมูลถูกลักลอบอ่านหรือไม่ วิธีการวิเคราะห์เป็นดังนี้ บุคคลที่สามทราบว่าสารจะถูกส่งในรูปของเวกเตอร์สถานะ $|+z\rangle$ $|-z\rangle$ $|+x\rangle$ และ $|-x\rangle$ บุคคลที่สามจะต้องเลือกใช้ SG-X หรือ SG-Z ในการลักลอบอ่านสารในแต่ละบิต เนื่องจากบุคคลที่สามไม่ทราบว่าผู้ส่งใช้แกนอ้างอิงใดในการส่ง (ข้อมูลในบรรทัดที่สอง) ยกตัวอย่างเช่นในบิตที่ 5 สารที่ส่งออกมาคือ $|+x\rangle$ สมมติให้บุคคลที่สามเลือกใช้ SG-Z ในการลักลอบอ่านสาร ผลการอ่านจะมีโอกาสเป็น $|+z\rangle$ หรือ $|-z\rangle$ ก็ได้เท่ากัน สมมติว่าอ่านได้ $|-z\rangle$ ผลการอ่านนี้จะผ่านไปยังผู้รับ ซึ่งตามตารางผู้รับใช้อุปกรณ์ SG-X ในการอ่านสาร ผลการอ่านจะมีโอกาสที่จะอ่านได้ $|+x\rangle$ หรือเป็น $|-x\rangle$ มีค่าเท่ากัน ซึ่งจะต่างจากกรณีที่ไม่มีการลักลอบอ่าน ผู้รับจะอ่านค่าได้ $|+x\rangle$ เท่านั้น ตารางที่ 2 แสดงเหตุการณ์ที่เป็นไปได้ทั้งหมดเมื่อมีการลักลอบอ่านโดยบุคคลที่สาม

สารที่ส่ง	แกนอ้างอิงของบุคคลที่ 3 (โอกาสที่จะเกิด)	ผลการอ่านของบุคคลที่สาม (โอกาสที่จะเกิด)	แกนอ้างอิงของผู้รับ	ผลการอ่านของผู้รับ (โอกาสที่จะเกิด)	ผลการวิเคราะห์ของผู้ส่ง
$ +x\rangle$	SG-X(1/2)	$ +x\rangle_{(1/2)}$	SG-X	$ +x\rangle_{(1/2)}$	1. ปกติ
	SG-Z(1/2)	$ +z\rangle_{(1/4)}$	SG-X	$ +x\rangle_{(1/8)}$	2. ปกติ
				$ -x\rangle_{(1/8)}$	3. ผิดปกติ
		$ -z\rangle_{(1/4)}$	SG-X	$ +x\rangle_{(1/8)}$	4. ปกติ
				$ -x\rangle_{(1/8)}$	5. ผิดปกติ

ตารางที่ 2 เหตุการณ์ที่เป็นไปได้ทั้งหมดเมื่อมีการลักลอบอ่านสารในบิตที่ 5

ในตารางนี้ผู้ส่งสารจะวิเคราะห์ผลการอ่านจากแกนอ้างอิงของผู้รับและผลที่ผู้รับอ่านได้ จะเห็นได้ว่าโอกาสที่ผู้ส่งจะเห็นถึงความผิดปกติของข้อมูล และตัดสินใจว่าเกิดการลักลอบอ่านข้อมูลจะมีค่าเท่ากับโอกาสที่จะเกิดกรณีที่ 3 รวมกับโอกาสที่จะเกิดกรณีที่ 5 ซึ่งเท่ากับ $1/8 + 1/8 = 1/4$ ส่วนโอกาสที่การลักลอบอ่านโดยผู้ส่งไม่ทราบ จะมีค่าเป็น $3/4$ ซึ่งมากกว่าโอกาสที่การลักลอบอ่านโดยผู้ส่งทราบ

จากตัวเลขข้างต้น ดูเหมือนว่าวิธีการส่งสารแบบนี้ไม่น่าจะได้ผลเพราะหากมีการลักลอบอ่านแล้ว โอกาสที่ผู้ส่งจะไม่ทราบจะมีมากกว่าโอกาสที่ผู้ส่งทราบ แต่การคำนวณข้างต้นเป็นตัวเลขของข้อมูลเพียง 1 บิตเท่านั้น หากข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์มีมากกว่า 1 บิต เช่นตามตัวอย่างในตารางที่ 1 สำหรับสาร 8 บิตแรก จะมีเพียง 5 บิตคือบิตที่ 1 5 6 7 และ 8 เท่านั้นที่นำไปใช้วิเคราะห์ได้ สำหรับข้อมูลขนาด 1 บิตโอกาสที่จะมีการลักลอบอ่านโดยผู้ส่งไม่ทราบจะมีค่าเท่ากับ $3/4$ แต่สำหรับข้อมูลขนาด 5 บิตโอกาสที่จะถูกลักลอบอ่านโดยผู้ส่งไม่ทราบพร้อมกันทั้ง 5 บิตจะมีค่าเท่ากับ $(3/4)^5$ หรือ 0.24 โดยประมาณ หากส่งข้อมูลมากขึ้น เช่น ข้อมูลทั้งหมด 1000 บิต ครั้งหนึ่งเท่านั้นที่จะใช้ได้ (มีโอกาเพียง $1/2$ ที่ผู้รับจะเลือกใช้แกนอ้างอิงตรงกับผู้ส่ง) คือ 500 บิต ผลการอ่านครั้งหนึ่งถูกปกปิด จะเหลือข้อมูลที่ผู้ส่งจะใช้วิเคราะห์ได้เพียง 250 บิต แต่โอกาสที่สารทั้ง 250 บิตจะถูกลักลอบอ่านโดยผู้ส่งไม่พบความผิดปกติเลยจะมีค่าเพียง $(3/4)^{250}$ หรือประมาณ 5.8×10^{-32} ซึ่งเป็นโอกาสที่น้อยมาก จนอาจจะกล่าวได้ว่าเหตุการณ์นี้ จะไม่สามารถเกิดขึ้นได้เลย

จากที่อธิบายมาจะพบว่า การส่งสารในลักษณะนี้ จะทำให้ผู้ส่งทราบว่าสารได้ถูกส่งให้กับผู้รับโดยปลอดภัยหรือไม่ เมื่อผู้ส่งมั่นใจแล้วว่าไม่มีการลักลอบอ่านข้อมูล ผู้ส่งก็จะบอกข้อความของสารให้กับผู้รับได้ อาจมีข้อสงสัยว่าเป็นไปได้หรือไม่ ที่บุคคลที่สามจะทำสำเนาสถานะของอิเล็กตรอน เป็นสองชุดก่อนที่จะทำการอ่านสาร แล้วส่งต่อชุดที่ทำสำเนาไปยังผู้รับ เพื่อให้ผู้ส่งไม่สามารถพบความผิดปกติได้ ในกรณีนี้นั้นโดยธรรมชาติของกลศาสตร์ควอนตัม การทำสำเนาในลักษณะนี้จะเป็นไปไม่ได้ ดังทฤษฎีที่กล่าวถึงเรื่องนี้ไว้คือ Quantum Noncloning Theorem

โดยสรุปก็คือการเข้ารหัสแบบควอนตัมที่นำเสนอในบทความนี้เป็นวิธีการส่งสารที่ทำให้ผู้ส่งสารทราบได้ว่า สารที่ส่งได้ถูกลักลอบอ่านหรือไม่ ก่อนที่จะบอกเนื้อหาของสารต่อผู้รับ ซึ่ง

จากหลักการที่ได้กล่าวมาแล้วพบว่า โอกาสที่จะเกิดการลักลอบอ่านสารโดยผู้ส่งไม่สามารถทราบได้ จะมีน้อยมาก

เอกสารอ้างอิง

- [1] Ballentine L. 1998. Quantum Mechanics - A Modern Development. World Scientific Publishing, Singapore.
- [2] Basdevant J.-L., Dalibard J. 2002. Quantum mechanics. Springer, Berlin.
- [3] Le Bellac M. 2006. Quantum Physics. Cambridge University Press, Cambridge.
- [4] Sakurai J.J. 1994. Modern Quantum Mechanics. Addison-Wesley, New York.

ปัญหาร่วมสนุกประจำฉบับ

```

1000100110000111011011000111010011101101100111010000011000101100101
110000111001011100110110001000001110000110000111010011101101101100
1100101100100010000011011110100111011011001111010101101001000000
1010100110100011010011101110011111001101000001001001000001100001
1011001011011011110111000100000111001100101101101101101101101101
11011011000101001011101101001000001000011101101100101000001100001
0100000110011101111011011011010000011001110111101101101101101101
110111101101100101000001100111101001110110110011110101101101100
0100000100111101101100011100010000011010011010000011011110100110
1110101101101000001000100111111001011001110011110110110100000
1110001100101000001101110110011100101000001101001101000110010
11011110101100111101000010000011000010000011001110101101100
11011011001011100100100000110111101001111101011011010100000
10001101101001110011110101101011010110110110100000100100100001
11011101101101101101110110110110110110110110110110110110110110
11001110110110110110110110110110110110110110110110110110110110
11011110011101101100000101101111001010000011001110000111001101101
01000011001110110110000010110111001010000011001110000111001101101
010000110000110111011001000001101111000011100101101101101100000
100100011011110010110011100111001101000001100001100101100001
1101110110011100101000001101001101000111001011011110101100111
110100001000001100001000001100111011001110010110110110110110110
010000110011110100101111101011011010000010001101101101100111
1110111100101100111001101000001100101000011101101100011101001
1101101101101000001100111101011000011100111100101110010110101
110110010110011100100000100000110001110010110111110011110011
0100001101101110010100000101101110010110110111110110111001
0100001000110110000111001010000011000011101111000011110010110110
010000110100101111101101101101100000110000111011110110100000
10001111010010111110111101001111011011011011000001100101101001
11010101000001100001110011010000011000011101100100001100101101101
11000110100111001001000001010011000011010011010011101101101110011
01000011011011100100000101000110011100001110010110100100000
1101011110011100101110010000011100101101101000001101011110110
110111110111010000010100110100110100111011011011110110110100000
110100111011010000010100110100110100111011011011110110110100000
1110100111011000001100101100101101101101101101101101101101101101
111010100100000100000110111011001000100001010000110011101111
11011010011101000001010111110111101101100101110111101101100101
01000011001111010011101101111011110110110110110111101101100101
11001010100000111011110000111101111011001000010100010100001000100
110010110001110010111011110010110010111101100100000

```

ปัญหาซึ่งรางวัลในฉบับนี้ถามว่า เพลงที่อยู่ในรูปของเลขฐานสองข้างบนนี้เป็นเพลงประกอบภาพยนตร์เรื่องอะไร ผู้อ่าน 3 ท่านแรกที่ตอบถูกจะได้รับของขวัญที่ระลึกเล็กน้อย จากทางกองบรรณาธิการ สำหรับคำตอบพร้อมวิธีการใช้คำสั่งโปรแกรม MatLab หากคำตอบจะมีการเฉลยอยู่ในวารสารฉบับหน้าครับ

โลกควอนตัมและทฤษฎีสัมพัทธภาพที่รวมอยู่ในสสาร กับ คอมพิวเตอร์แห่งอนาคต

รวัดน์ มีวาสนา¹

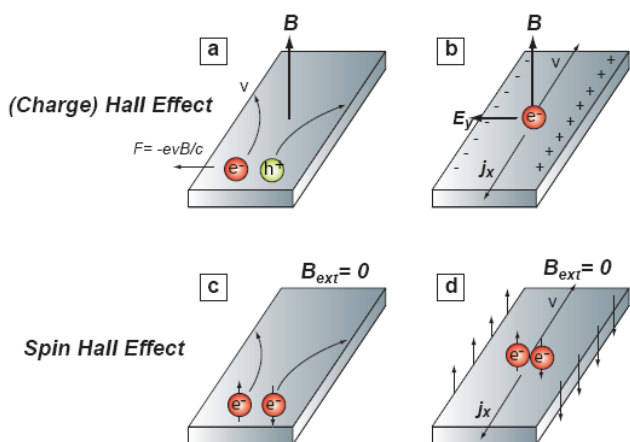
สถานะต่างๆ ของสสารนั้นมี 3 สถานะได้แก่ ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ เป็นสิ่งที่เราทำได้แม่นยำตั้งแต่สมัยชั้นมัธยม เดียวนี้ถ้าถามเด็กมัธยมบางคน อาจจะได้คำตอบว่าสสารมี 4 สถานะ ซึ่งมีสถานะพลาสมาเข้ามาด้วย ความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับธรรมชาติ ณ ปัจจุบัน สถานะของสสารนั้นมีหลากหลายกว่านั้นมาก และมีการค้นพบสถานะใหม่อยู่เรื่อยๆ ตัวอย่างหนึ่งที่อยู่นอกเหนือจาก 4 สถานะนี้ที่เรารู้จักกันดีได้แก่ สถานะแม่เหล็ก ซึ่งเอกลักษณ์ของสถานะนี้คือการที่อิเล็กตรอนแต่ละตัวมีทิศขั้วแม่เหล็กส่วนใหญ่หันไปในทิศทางเดียวกัน และคำว่าแม่เหล็กก็ไม่จำเป็นว่าจะต้องเป็นสสารที่มีสถานะเป็นของแข็งอย่างเดียวเพราะสสารอาจมีสถานะเป็นทั้งของเหลวและเป็นแม่เหล็กพร้อมกันก็มี แล้วทำไมเราถึงอยากรู้เกี่ยวกับสถานะต่างๆ นี้หรือ? การเข้าใจถึงการเกิดและการเปลี่ยนแปลงของสถานะต่างๆ นั้นย่อมหมายถึงประโยชน์ที่เราจะนำมาใช้ได้ ประโยชน์ที่กล่าวถึงนี้เป็นเรื่องใกล้ตัว เช่น เราสามารถเปลี่ยนน้ำที่เป็นของเหลวให้เป็นน้ำแข็งและนำมาใส่ในเครื่องดื่มต่างๆ ให้เย็นทันใจได้ หรือในเมืองหนาวที่อากาศแห้งเราก็เปลี่ยนน้ำให้เป็นไอน้ำเพื่อให้อากาศมีความชื้นพอเหมาะ แม่เหล็กถูกนำมาใช้ได้ตั้งแต่เป็นตัวปิดเปิดของกระเป๋ารถไฟ หรือใช้ในเครื่องไดนาโมเพื่อผลิตไฟฟ้า บางครั้งการใช้ประโยชน์อาจจะดูซับซ้อนขึ้น เช่น สถานะในสารกึ่งตัวนำที่สามารถเปลี่ยนไปมาได้ระหว่างสถานะนำไฟฟ้าและฉนวนไฟฟ้า ปรากฏการณ์นี้ถูกนำมาใช้ในการประดิษฐ์ทรานซิสเตอร์ที่อยู่ในเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์หรือเครื่องคอมพิวเตอร์ที่เราใช้กันทุกวันนี้ บทความนี้จะนำเสนอถึงสถานะใหม่ที่เพิ่งถูกค้นพบและเรียกว่า ปรากฏการณ์ควอนตัมสปินฮอลล์ (Quantum Spin Hall Effect) สถานะนี้มีเอกลักษณ์ตรงที่อิเล็กตรอนแต่ละตัวจะมีทิศขั้วแม่เหล็กหันไปทางใดทางหนึ่ง ขึ้นอยู่กับทิศการเคลื่อนที่ในเชิงควอนตัมของมัน และยังมีความ

น่าสนใจตรงที่อิเล็กตรอนเหล่านี้เปรียบเสมือนอนุภาคที่มีมวล ประสิทธิภาพใกล้เคียงกับอนุภาคโฟตอน (แสง) ตามทฤษฎีสัมพัทธภาพ สถานะที่ว่านี้ได้ถูกทำนายเมื่อ 6 ปีก่อนและ 2 ปีถัดมาก็เริ่มมีผลการทดลองออกมายืนยันเรื่อยๆ นับเป็นการประสานงานกันระหว่างภาคทฤษฎีและภาคทดลองที่น่าชื่นชม นอกจากความสวยงามทางทฤษฎีแล้ว ปรากฏการณ์นี้ยังมีศักยภาพที่จะถูกนำมาใช้ในการประดิษฐ์ทรานซิสเตอร์แบบใหม่ที่มีขนาดเล็ก เร็ว และใช้พลังงานน้อยมากเทียบกับทรานซิสเตอร์สมัยนี้ที่ใกล้จะถึงขีดจำกัดในการพัฒนาแล้ว และยังมีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้กับการคำนวณแบบใหม่เชิงควอนตัม หรือ Quantum Computing ที่อาจจะเป็นการปฏิวัติของโลกคอมพิวเตอร์สมัยนี้โดยสิ้นเชิง

Quantum Spin Hall Effect หรือย่อว่า QSHE นี้เป็นงานวิจัยในสาขาฟิสิกส์ของสารควบแน่น (Condensed matter physics) ซึ่งหนึ่งในหัวข้อหลักของสาขานี้คือการค้นหาและเข้าใจสถานะต่างๆ ของสสารที่เกิดมาจากพฤติกรรมของอิเล็กตรอนและอนุภาคอื่นๆ ในรูปแบบต่างๆ กันในสสาร การจัดสถานะที่มีเอกลักษณ์ต่างๆ นี้ให้เป็นหมวดหมู่ก็จะเป็นแบบแผนให้เข้าใจถึงสมบัติเชิงอิเล็กทรอนิกส์ของสสารต่างๆ ในภาพรวมได้ สถานะต่างๆ นี้ก็อาจจะเปรียบเทียบได้กับธาตุแต่ละชนิดในวิชาเคมีที่ถูกรวบรวมและจัดเข้าเป็นหมวดหมู่ซึ่งตารางธาตุก็ถือเป็นข้อมูลพื้นฐานในการอธิบายสมบัติเชิงเคมีของสารประกอบต่างๆ ในฟิสิกส์ของสารควบแน่นนั้นก็มีการค้นพบและศึกษาสถานะต่างๆ ที่ได้รับความสนใจ เช่น การนำไฟฟ้า การเป็นฉนวนไฟฟ้า แม่เหล็กไฟฟ้า (Ferromagnetism) เพอโรอิเล็กทริกส์ (Ferroelectrics) การนำไฟฟ้ายิ่งยวดหรือนำไฟฟ้าแบบไม่สูญเสียพลังงาน และปรากฏการณ์ควอนตัมฮอลล์แบบประจุ (Charge Quantum Hall Effect) เป็นต้น บ่อยครั้งสมบัติที่น่าสนใจและน่าแปลกใจจะเกิดขึ้นเมื่อกลุ่มอิเล็กตรอนในสสารมีอันตรกิริยา

¹ นักวิจัย (ดร.) สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)

(Interaction) ต่อกันเองหรือต่อสิ่งแวดลอม ตัวอย่างเช่นการนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบอุณหภูมิวิกฤตสูง ความน่าสนใจประการแรกคือตามทฤษฎีแถบพลังงาน สารตั้งต้นของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบอุณหภูมิวิกฤตสูงควรจะเป็นตัวนำไฟฟ้าแท้จริงๆ แล้วกลับเป็นฉนวนไฟฟ้า และนำแปลกยิ่งไปกว่านั้นคือถ้าเราเพิ่มสารเจือเข้าไป (Dope) เพียงเล็กน้อย ฉนวนไฟฟ้างดกล่าวก็น่าจะเป็นได้แค่ตัวนำไฟฟ้าที่แค แต่ถ้าเพิ่มปริมาณสารเจือเข้าไปมากขึ้นอีกเล็กน้อยกลับสามารถทำให้ฉนวนนั้นกลายเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่นำไฟฟ้าได้สมบูรณ์แบบ ในส่วนของสารตั้งต้นที่เป็นฉนวนนั้นต่อมาสามารถอธิบายได้โดยความเป็นฉนวนไฟฟ้าแบบมอทท์ (Mott insulator) ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนที่มีอันตรกิริยาต่อกันทางคูลอมบ์สูงมากหรือไม่ชอบอยู่ด้วยกัน เปรียบเสมือนคนทำงานที่แต่ละคนทะเลาะกันทำให้งานล่าช้า แทนที่จะนำไฟฟ้ากลับไม่นำไฟฟ้าและกลายเป็นฉนวนไฟฟ้าไป แต่ที่นี้พอมีการรับคนเพิ่ม (เพิ่มสารเจือ) กลับมีคนส่วนหนึ่งที่เป็นตัวประสานหรือเป็นพ่อสื่อแม่ชัก ทำให้คนบางส่วนจับคู่กันทำงาน (Cooper pair) และทำได้ดีเกินคาด เปรียบเสมือนการนำไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด แต่อย่างไรก็ตามสารประเภทนี้มีโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ที่ซับซ้อน หลังจากการค้นพบสารนี้จนถึงปัจจุบันก็ยังไม่มีใครมีความเข้าใจในเชิงทฤษฎีอย่างชัดเจนว่าการจับคู่กันของอิเล็กตรอนนั้นเกิดขึ้นได้อย่างไร แต่ในกรณีสถานะ QSHE นั้นเป็นกรณีตรงกันข้าม เนื่องจากเป็นงานวิจัยที่เริ่มจากการทำนายเชิงทฤษฎีก่อน [1-3] ความเข้าใจเชิงทฤษฎีจึงค่อนข้างสมบูรณ์ว่าเป็นสถานะที่เกิดขึ้นได้โดยมีอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นจากสมบัติควอนตัมทางแม่เหล็กของอิเล็กตรอนเป็นส่วนสำคัญในการทำให้เกิดสถานะนี้ขึ้น



รูปที่ 1 ภาพ (a) เมื่ออนุภาคมีประจุต่างกันอยู่ในสนามแม่เหล็กจะวิ่งไปคนละทิศ และเป็นที่มาของปรากฏการณ์ของฮอลล์ในแบบ

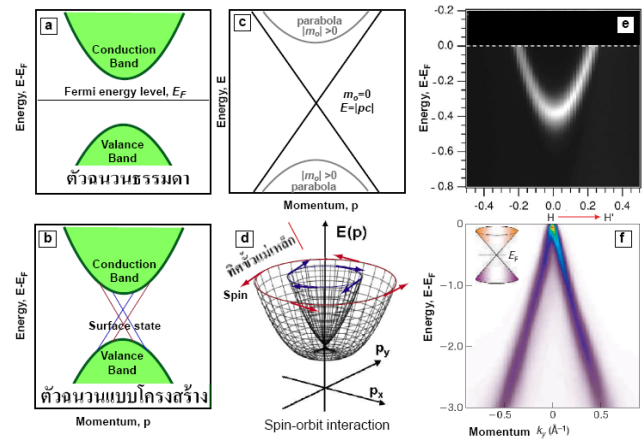
ประจุ หรือ (Charge) Hall Effect ดังภาพ (b) ภาพ (c) อิเล็กตรอนที่มีหัวแม่เหล็กในทิศตรงกันข้ามจะวิ่งไปคนละทิศในสารที่มีอันตรกิริยาที่แรงพอระหว่างหัวแม่เหล็กของอิเล็กตรอนกับสนามแม่เหล็กที่เกิดจากวงโคจรของมันเอง (Spin-orbit interaction) และเป็นที่มาของปรากฏการณ์ของฮอลล์ในแบบหัวแม่เหล็ก หรือ Spin Hall Effect ดังภาพ (d)

ปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall effect) แบบต่างๆ

QSHE นั้นเป็นสถานะที่ถูกคิดขึ้นมาโดยใช้ความรู้บางส่วนจากปรากฏการณ์ทางควอนตัมของฮอลล์ (Quantum Hall Effect) แต่มีลักษณะพิเศษเพิ่มขึ้นมาตรงที่อิเล็กตรอนในสถานะ QSHE นี้จะมีหัวแม่เหล็กที่ขึ้นอยู่กับการเคลื่อนที่ของตัวเอง เช่นถ้าอิเล็กตรอนตัวที่วิ่งไปทางซ้ายมีหัวแม่เหล็กชี้ขึ้น อิเล็กตรอนตัวที่วิ่งไปทางขวาก็จะมีหัวแม่เหล็กชี้ลง เพื่อให้เห็นภาพชัดขึ้นจะขอพูดย้อนไปถึงการทดลองของฮอลล์ในปี ค.ศ. 1879 ซึ่งอธิบายแนวคิดเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของประจุในสนามแม่เหล็ก ดังรูปที่ 1(a) อนุภาคอิเล็กตรอนของสารตัวอย่างที่เคลื่อนในสนามแม่เหล็ก B ก็จะมีแรงจากแม่เหล็ก ($F = -evB/c$ ในหน่วย cgs, โดย e คือ ประจุของอิเล็กตรอน, v คือ ความเร็วของอิเล็กตรอน, c คือ ความเร็วแสง) ผลักประจุเหล่านี้ให้ไปทางผนังด้านซ้าย (กรณีที่เป็นประจุบวกก็จะไปทางผนังด้านขวา) ต่อมาเมื่อมีการสะสมประจุที่ถูกผลักเหล่านี้นั้นบนผนังมากพอก็จะเกิดแรงทางคูลอมบ์จากสนามไฟฟ้าในแนวแกน y มาสมดุลกับแรงจากแม่เหล็ก ทำให้อนุภาคประจุลบที่เคลื่อนที่มาหลังๆ สามารถเคลื่อนที่ต่อไปในแนวเส้นตรงได้ (รูปที่ 1b) เมื่อกรณีเช่นนี้เกิดขึ้นฮอลล์ได้นิยามค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ $R_H = E_y/j_x B = -1/enc$ หรือค่าความนำแบบฮอลล์ $\sigma_H = j_x/E_y = -enc/B$ (โดย E_y คือ สนามไฟฟ้าตามแกน y , j_x คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า, n คือ ความหนาแน่นอิเล็กตรอนในสาร) ซึ่งค่าที่วัดได้นี้จะช่วยบอกถึงความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารต่างๆ และค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ที่เป็นลบก็ช่วยบอกว่าอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ในสารนั้นมีประจุเป็นลบ แต่ในกรณีที่อนุภาคที่มีประจุเป็นบวก (อย่างเช่น อนุภาคโฮลในสารกึ่งตัวนำประเภท p) ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ก็จะเป็นบวกแทน ต่อมาในปี ค.ศ. 1980 มีการค้นพบสิ่งที่น่าสนใจจากการวัดผลในระบบสองมิติของสารซิลิคอนออกไซด์ ค่าความนำแบบฮอลล์ σ_H กลับไม่ได้เพิ่มขึ้น

แบบต่อเนื่องตามค่า $1/B$ แต่กลับมีการเพิ่มเป็นขั้นๆ $\sigma_H = i e^2/h$ โดยที่ i เป็นจำนวนนับ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ทางควอนตัมที่ถูกเรียกว่า (Charge) Quantum Hall Effect (โดยปกติจะละคำว่าประจุไว้ในฐานที่เข้าใจ) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กที่สูงพอจะเกิดการแยกตัวออกทำให้ค่าความหนาแน่น n มีค่าไม่ต่อเนื่อง (quantized) แต่เป็นขั้นๆ $n = i eB/hc$

ที่กล่าวมานั้นเป็นปรากฏการณ์ที่มีอันตรกิริยาทางประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอนเป็นสำคัญ แต่ทั้งนี้นอกจากสมบัติทางประจุอิเล็กตรอนก็มีสมบัติของการมีขั้วแม่เหล็กของตัวเองด้วย และขั้วแม่เหล็กของอิเล็กตรอนนี้ก็สามารถมีอันตรกิริยากับสนามแม่เหล็กที่เกิดจากวงโคจรของมันเอง หรือที่เรียกว่า Spin-orbit interaction ถ้าอันตรกิริยานี้มีความแรงสูงพอที่จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่น่าสนใจใหม่เรียกว่า ปรากฏการณ์ของฮอลล์ทางขั้วแม่เหล็ก (Spin Hall Effect) ดังรูปที่ 1c ในกรณีนี้อิเล็กตรอนที่มีขั้วแม่เหล็กทิศขึ้นจะวิ่งเข้าหาผาผนังทางซ้ายและส่วนที่มีทิศลงก็จะวิ่งเข้าหาผาผนังทางขวา มีลักษณะคล้ายกับปรากฏการณ์ที่อนุภาคมีประจุเป็นบวกหรือลบ (รูปที่ 1a) เพียงแต่ว่าปรากฏการณ์นี้ยังเกิดขึ้นได้โดยไม่ต้องมีสนามแม่เหล็กภายนอก ($B=0$) ซึ่งก็มีผลการทดลองของสาร Gallium arsenide (GaAs) ออกมายืนยัน ตามการทดลองดังรูปที่ 1d [4] ถึงแม้ปรากฏการณ์ของฮอลล์ทางขั้วแม่เหล็กแบบธรรมดาที่มีความน่าสนใจและมีความเป็นไปได้กับการนำไปประยุกต์ใช้อยู่บ้าง แต่อย่างไรก็ตามอาจจะเป็นไปได้ยากเนื่องจากเป็นสมบัติที่ยากต่อการควบคุมเมื่อมีการรบกวนจากสภาพแวดล้อมเช่นในสภาวะที่มีการปนเปื้อนจากสารเจือต่างๆ (อาจจะนึกถึงเสื้อผ้าของเด็กๆ ที่เล่นในสนามเด็กเล่นจะให้สะอาดอยู่ตลอดเวลา นั้นคงเป็นไปได้ยาก) ในขณะเดียวกันจึงมีกลุ่มวิจัยค้นคิดอย่าง Prof. Shoucheng Zhang จาก Stanford University และคณะ, Prof. Eugene Mele และ Prof. Charles Kane จาก University of Pennsylvania ที่เล็งเป้าวิจัยไปอีกทางเพื่อหาทางลดข้อจำกัดนี้ และไม่นานนี้สิ่งที่สร้างความฮือฮามากคือการค้นพบปรากฏการณ์ของฮอลล์ทางขั้วแม่เหล็กในรูปแบบควอนตัม หรือ QSHE ที่มีค่าความนำทางขั้วแม่เหล็กได้เพียงสองค่า คือ $\sigma_{H,Spin} = 0$ หรือ $2e/4\pi$ [5] เป็นปรากฏการณ์ที่เต็มไปด้วยความน่าสนใจในสมบัติเชิงฟิสิกส์ ชั่วยังเป็นสถานะที่ทนต่อการรบกวนจากสภาพแวดล้อม สาร QSHE นี้จึงมีศักยภาพสูงในการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์

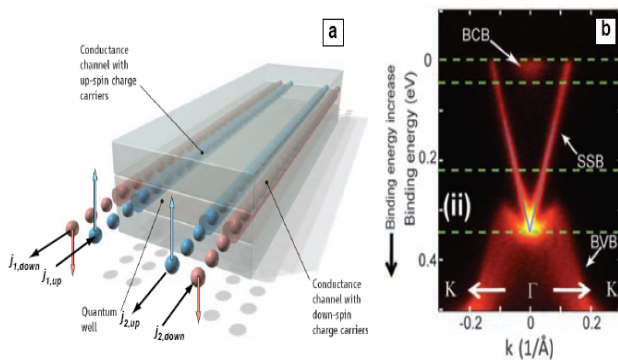


รูปที่ 2 รูปแบบโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของฉนวนใน (a) แบบธรรมดาหรือ Band insulator และ (b) แบบโครงสร้างหรือ Topological insulator (c) รูปแบบโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของอนุภาคที่มีมวลที่เป็นรูปพาราโบลา และของอนุภาคที่มีมวลประสิทธิผลเป็นศูนย์ที่เป็นรูปเส้นตรง (d) โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์เมื่อมีอันตรกิริยาที่แรงพอระหว่างขั้วแม่เหล็กของอิเล็กตรอนกับสนามแม่เหล็กที่เกิดจากวงโคจรของมันเอง หรือเรียกว่า Spin-orbit interaction (e), (f) แสดงตัวอย่างของโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์จากการทดลองของอนุภาคที่มีมวลของทองแดง [6] และของอนุภาคที่มีมวลประสิทธิผลเป็นศูนย์ของ Graphene หรือหนึ่งชั้นอะตอมของไส้ดินสอ [7]

QSHE กับโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของอนุภาควัสดุในทฤษฎีสัมพัทธภาพ

การค้นพบสถานะ QSHE นั้นไม่ได้เป็นการค้นพบโดยบังเอิญแต่มาจากที่นักวิจัยมุ่งค้นคว้าหาสารประกอบที่มีโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ (ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงาน โมเมนตัม และ ขั้วแม่เหล็ก ของอิเล็กตรอน) ในแบบที่เรียกว่า ตัวฉนวนแบบโครงสร้าง หรือ Topological insulator ซึ่งแตกต่างจากสารที่เกิดปรากฏการณ์ของฮอลล์ทางขั้วแม่เหล็กในแบบธรรมดาที่เป็นแบบตัวนำไฟฟ้าธรรมดา ตัวฉนวนแบบโครงสร้างนี้จะมีลักษณะเป็นฉนวนที่ไม่มีการนำไฟฟ้าภายในก้อนสารแต่ส่วนพื้นผิวสามารถนำไฟฟ้าได้ (อาจจะนึกเทียบกับก้อนหินที่ห่อแผ่นอลูมิเนียมไว้) การที่สารเป็นฉนวนทั่วไบนั้นสามารถอธิบายจากการที่ชั้นพลังงานเฟอร์มี (Fermi Energy Level) อยู่ในช่องพลังงานระหว่างแถบพลังงานเวเลนซ์ (Valance band) กับ แถบพลังงานตัวนำ (Conduction band) ดังรูปที่ 2(a) สำหรับ Topological insulator นั้น

จะมีโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นแบบตัวนำเพิ่มเข้ามาในส่วนที่เป็นพื้นผิวของสาร (Surface electronic structure หรือ Edge state) ดังรูปที่ 2(b) โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ในส่วนพื้นผิวนี้อาจมีลักษณะของอนุภาคที่ไร้มวล (มวลประสิทธิผลเข้าใกล้ศูนย์) โดยปกติแล้วในระบบของอนุภาคที่ไร้มวล ความสัมพันธ์ของพลังงานจลน์ของอนุภาคจะแปรผันกับโมเมนตัมยกกำลังสอง ($KE = p^2/2m_0$) หรือถ้าพูดถึงทฤษฎีสัมพัทธภาพ $E^2 = p^2c^2 + m_0^2c^4$ ซึ่งในกรณีที่ค่าโมเมนตัมไม่สูงมากก็จะประมาณ $E \approx m_0c^2 + p^2/2m_0 = m_0c^2 + KE$ ดังนั้นโดยปกติความสัมพันธ์ของพลังงานจลน์กับโมเมนตัมก็จะเป็นรูปพาราโบลา (ตัวอย่างของโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์แบบพาราโบลาจากการทดลองดูได้จากของทองแดงที่ระนาบ(111) ดังรูปที่ 2(c)) แต่กรณีที่อนุภาคเป็นแบบไร้มวล ($m_0 = 0$) $E = |pc|$ จะมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ดังรูปที่ 2(c) ตัวอย่างสารที่มีโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของระบบอนุภาคไร้มวลที่รู้จักกันดีได้แก่ Graphene (หนึ่งชั้นอะตอมของกราฟไฟต์หรือไส้ดินสอ นั่นเอง) ซึ่งมีตัวอย่างผลการทดลองในรูปที่ 2(f) และสารอีกประเภทคือสารประกอบที่มีสถานะ QSHE ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 3 (a) แผนผังการทดลองการทดสอบสถานะ QSHE [5] (b) โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของสารประกอบ Bi_2Te_3 โดยการทดลองที่ใช้เทคนิคโฟโตอิมิชชันแอกแซงเซชัน (ARPES) [8]

สถานะ QSHE นั้นเกิดได้จากโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของระบบอนุภาคไร้มวล บวกกับการที่มีอันตรกิริยาที่แรงพอระหว่างหัวแม่เหล็กของอิเล็กตรอนกับสนามแม่เหล็กที่เกิดจากวงโคจรของมันเอง (Spin-orbit interaction หรือ SOI) ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของ SOI (รูปที่ 2(d)) จะมีทิศของหัวแม่เหล็กที่หันในทิศสวนทางกันเมื่อโมเมนตัมมีทิศตรงกันข้าม

ตามการคำนวณในเชิงทฤษฎี [2,3,8] ซึ่งเป็นการรวมโลกควอนตัมเข้ากับทฤษฎีสัมพัทธภาพ การรวม SOI เข้ากับ Topological insulating state ที่ว่านี้เป็นคุณสมบัติสำคัญที่ทำให้เกิดผลดีต่อสมบัติทางหัวแม่เหล็ก เพราะความทนทานของสภาพโครงสร้าง (Topological invariance) จะช่วยป้องกันอันตรกิริยา SOI ไว้จากสิ่งรบกวนต่างๆ เช่นอันตรกิริยาระหว่างหัวแม่เหล็กที่ขึ้นกับทิศลง (Spin-up spin-down scattering) ทำให้สถานะ QSHE ที่ว่านี้มีความทนทานต่อการกระทบกระเทือนของสภาพแวดล้อม สิ่งที่ตามมาคือลักษณะการนำของกระแสหัวแม่เหล็ก (Spin current) ที่เป็นลักษณะยิ่งยวดหรือไม่มีการเสียพลังงานในการเคลื่อนย้ายข้อมูลทางหัวแม่เหล็ก และนี่เองที่เป็นสมบัติสำคัญที่ทำให้สถานะ QSHE นั้นแตกต่างจากปรากฏการณ์ของฮอลล์ทางหัวแม่เหล็กในแบบธรรมดา

หากแต่ที่กล่าวมาข้างต้นเป็นการคำนวณเชิงทฤษฎีทั้งสิ้น สิ่งที่ต้องวิจัยตามมาก็คือการหาว่าสารชนิดไหนที่จะเกิดสถานะ QSHE ได้บ้าง เหมือนกับที่เราทราบว่าแม้สารบางชนิดเท่านั้นที่เป็นแม่เหล็กได้ คุณสมบัติสำคัญในการค้นคว้าคือการหาสารที่มีทั้งสภาพ Topological insulating state และ SOI ในช่วงแรกมีกลุ่มวิจัยทำนายว่า Graphene ซึ่งทราบว่ามีการสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์แบบอนุภาคไร้มวลอยู่แล้ว (ดังรูปที่ 2(f)) นั้นมีโอกาสที่จะเกิดสถานะ QSHE ได้ [3] แต่ตามความเป็นจริง Graphene กลับมีอันตรกิริยา SOI ที่แรงน้อยเกินไปต่อการเกิดสภาพนี้

ต่อมาไม่นานเกินการรอคอย ในปี ค.ศ. 2007 สถานะ QSHE นั้นก็ถูกค้นพบครั้งแรกในสารประกอบ Mercury telluride ($HgTe$) [5] ซึ่งมีการวัดค่าความนำทางหัวแม่เหล็กของฮอลล์ได้สองค่า $\sigma_{H,Spin} = 0$ หรือ $2e/4\pi$ เป็นการยืนยันผลการทำนายเชิงทฤษฎีโดยมีแผนผังทดลองดังรูปที่ 3(a) ในรูปนี้จะสังเกตเห็นว่าการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะอยู่ที่ขอบเท่านั้น ดังนั้นจากสภาพนำไฟฟ้าที่เฉพาะพื้นผิวของสาร เทคนิคการทดสอบที่ไวต่อสมบัติของก้อนสาร (Bulk-sensitive measurement) จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ทดสอบ เทคนิคที่มีความไวต่อการวัดสมบัติไฟฟ้าบนพื้นผิวอย่างเทคนิคโฟโตอิมิชชันแอกแซงเซชัน (Angle-resolved photoemission spectroscopy หรือ ARPES) จึงเข้ามามีบทบาทสูงแทน (เทคนิค ARPES นี้ส่วนมากใช้ประโยชน์จากแสงซินโครตรอน ซึ่งที่ประเทศไทยก็มีอยู่ที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน จ. นครราชสีมา**) ซึ่งต่อมาก็มีผลการทดลองโดยเทคนิค ARPES ที่

ออกมายืนยันสารที่มีสถานะ QSHE อื่นๆ เช่น $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ [9], Bi_2Te_3 [10] และผลการทดลองโดยเทคนิค ARPES นี้ก็ยิ่งให้ข้อมูลเพิ่มเติมที่ช่วยบอกถึงรายละเอียดของโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์โดยตรงดังรูปที่ 3(b) ซึ่งทำให้ทราบข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างของอนุภาคแบบไร้มวล รวมถึงข้อแม้หลักที่มีทิศเฉพาะที่ค่าโมเมนตัมต่างๆ (จากการวัดโดยเครื่อง Spin-resolved ARPES [9]) ผลการทดลองดังที่กล่าวมานี้แสดงให้เห็นว่าสถานะ QSHE นั้นมีอยู่จริงและช่วยยืนยันความเข้าใจในเชิงทฤษฎีทางฟิสิกส์ แต่นอกจากความสวยงามในเชิงฟิสิกส์นี้แล้ว สถานะ QSHE ก็ยังมีการประยุกต์ใช้ที่น่าสนใจดังที่จะกล่าวต่อไป

กระแสขั้วแม่เหล็กยิ่งยวดและสถานะเชิงโครงสร้าง (Topological state) กับประโยชน์ที่อาจจะตามมา

การส่งข้อมูลโดยไม่สูญเสียพลังงานนั้นเป็นหนึ่งในความใฝ่ฝันในโลกเทคโนโลยี การใช้พลังงานสูงหมายถึงข้อจำกัดหลายๆ อย่างในการพัฒนาทางเทคโนโลยีรวมถึงการสูญเสียทางทรัพยากรที่มีอย่างจำกัดหรือค่าใช้จ่ายที่ตามมา เมื่อพูดถึงโลกคอมพิวเตอร์ ผู้ที่มีเครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพา คงทราบกันดีว่าถ้าเปิดเครื่องไว้นานๆ เครื่องคอมพิวเตอร์ของท่านก็จะร้อนขึ้นกลายเป็นเหมือนเตาไรต์ตัวเล็กๆ ตัวหนึ่งนี่เอง นอกจากความไม่สะดวกนี้ ความร้อนยังหมายถึงข้อจำกัดในการผลิตทรานซิสเตอร์ให้เล็กลงหรือเร็วมากขึ้นเพราะทรานซิสเตอร์ที่เล็กลงจะก่อให้เกิดความร้อนมากขึ้นและทำลายสมบัติทางไฟฟ้า การพัฒนาทรานซิสเตอร์ขณะนี้จึงใกล้ถึงทางตันเต็มที นักวิจัยหลายกลุ่มอย่างกลุ่มนักวิจัยในเครือ IBM และรัฐบาลของสหรัฐอเมริกาจึงให้ความสนใจกับสารที่มีสถานะ QSHE เพราะสมบัติการนำทางกระแสขั้วแม่เหล็กยิ่งยวดของสารนี้สามารถนำมาประยุกต์ในการผลิตทรานซิสเตอร์ที่จะไม่เจอปัญหาเรื่องความร้อน เป็นการท้าทายขอบเขตการพัฒนาทรานซิสเตอร์ในยุคปัจจุบันได้และยังจะเป็นการประหยัดพลังงานมหาศาล แต่อย่างไรก็ตามอาจจะมีการถามขึ้นมามากว่า ถึงแม้จะไม่มี การสูญเสียพลังงานกับกระแสขั้วแม่เหล็ก แต่ก็อาจจะมีการเสียพลังงานกับกระแสไฟฟ้าทางประจุได้มิใช่หรือ? จะเห็นว่าขอบด้านขวาของรูปที่ 3(a) การไหลสวนทางกันของอิเล็กตรอนที่มีทิศขั้วแม่เหล็กตรงกันข้ามทำให้เกิดผลต่างทางขั้วแม่เหล็กที่มีค่ามากกว่าศูนย์และเกิดกระแสขั้วแม่เหล็กขึ้นได้ แต่ถ้าดูที่กระแสไฟฟ้าทางประจุ เนื่องจากอิเล็กตรอนที่มีประจุเท่ากัน

ไหลในทิศสวนทางกันผลต่างทางประจุจึงเป็นศูนย์ กระแสไฟฟ้าทางประจุจึงไม่เกิดขึ้น สาร QSHE จึงสามารถมีกระแสขั้วแม่เหล็กได้โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าทางประจุด้วย ดังนั้นจึงมีสมบัติยิ่งยวดที่สมบูรณ์แบบ

อีกสมบัติของ QSHE ที่น่าสนใจคือ สถานะเชิงโครงสร้างหรือ Topological state ที่อาจถูกนำมาใช้กับการคำนวณแบบใหม่ที่เรียกว่า การคำนวณเชิงควมดัม หรือ Quantum Computing (สำหรับข้อมูลเกี่ยวกับ Quantum Computing สามารถอ่านเพิ่มเติมได้จาก[11]) ปัญหาใหญ่ของการคำนวณแบบนี้ที่พบในปัจจุบันคือการสูญเสียของข้อมูลที่รวดเร็ว (Quantum decoherence) ที่เปรียบได้กับการมีคอมพิวเตอร์ที่เร็วมากแต่ก็ซีลิมสุดๆ ปัจจุบันจึงยังไม่มีควมดัมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ประโยชน์ได้ สถานะเชิงโครงสร้างของสาร QSHE ที่มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมสูงจึงอาจจะนำมาช่วยแก้ปัญหาของการสูญเสียของข้อมูลนี้ ความทนทานในที่นี้หมายถึงความทนทานทาง Topology อาจจะทำให้ลองนึกจินตนาการถึงโดนัท แก้วกาแฟที่มีหูจับ และ หนังสือ ทั้งสามสิ่งนั้นมีรูปทรงเดียวกันในทางทฤษฎีคณิตศาสตร์โครงสร้าง (Topology) เพราะมีลักษณะของรูที่ทะลุอยู่หนึ่งรูเหมือนกันหมด การส่งข้อมูลโดยใช้ Topological state จึงมีประสิทธิภาพดี เนื่องจากแม้จะมีการกระทบกระทั่งในขั้นตอนการส่ง (เช่น โดนนัทกลายเป็นหนังสือไปขณะส่งข้อมูล) ข้อมูลก็ไม่สูญหายเนื่องจากลักษณะเอกลักษณ์ทาง Topology ยังคงอยู่ การวิจัยเรื่องควมดัมคอมพิวเตอร์นี้ถ้าสำเร็จก็จะมีการปฏิวัติเปลี่ยนแปลงโลกคอมพิวเตอร์อย่างไม่ต้องสงสัย การคำนวณที่ใช้เวลาเป็นปีๆ อาจจะลดเหลือเพียงไม่กี่วินาที ความเร็วที่เพิ่มนี้ไม่เหมือนกับการเพิ่มจำนวนคอมพิวเตอร์แบบปัจจุบันขึ้นอีกหลายเครื่องเท่านั้น แต่เป็นการเพิ่มมิติของการใช้งาน อาจจะลองนึกถึงว่าเมื่อก่อนที่มีแต่การส่งข้อมูลทางจดหมาย ถ้าส่งภายในประเทศก็ใช้เวลาเป็นวันหรือถ้าส่งต่างประเทศก็ใช้เวลาเป็นสัปดาห์หรือเดือน ตอนนี้เราสามารถส่งข้อมูลทางอินเทอร์เน็ตได้ ก็ส่งถึงแค่ภายในวินาที ซึ่งไม่ใช่เป็นประโยชน์ในแง่ความเร็วเท่านั้น แต่เรายังสามารถดูแบบเห็นภาพได้ด้วย เป็นต้น ซึ่งถ้าเปรียบกับการส่งจดหมาย ถึงแม้จะมีบุรุษไปรษณีย์เพิ่มอีกพันหรือหมื่นคนก็ไม่ช่วยให้ดูกันแบบเห็นภาพได้ การพัฒนาของควมดัมคอมพิวเตอร์ก็อาจจะสร้างความเปลี่ยนแปลงที่ให้ความรู้สึกคล้ายกัน รวมทั้งการพัฒนาในหลายๆ สาขาที่อาจจะเป็นไปได้ อย่างเช่น การคำนวณในการแพทย์เพื่อ

การรักษาโรคภัยต่างๆ การคำนวณที่ละเอียดเกี่ยวกับแผ่นดินไหว หรือทางภัยพิบัติต่างๆ หรือแม้แต่การพัฒนาด้านความบันเทิงที่แปลกใหม่ และรวมไปถึงเทคโนโลยีใหม่ๆ ที่เรายังอาจจะไม่ได้คาดคิด

ที่กล่าวไปนั้นเป็นสมบัติของสถานะใหม่ที่เราเรียกว่า Quantum Spin Hall Effect ซึ่งความน่าสนใจในเชิงทฤษฎีของมันนั้นมีอยู่เต็มเปี่ยม และถึงแม้ว่าไม่น่าแปลกใจที่ในอีก 10 กว่าปีข้างหน้าจะมีกลุ่มคนที่ทำวิจัยในสาขานี้จะได้รับรางวัลโนเบล ส่วนประโยชน์ที่กล่าวไปนั้น ในขณะนี้ก็อาจจะยังเป็นเพียงแค่ความฝันเพื่อหาทางทำให้ฝันนั้นเป็นจริงสิ่งที่ยังขาดคือการวิจัยเชิงทดลองโดยใช้เครื่องมือต่างๆ ที่ไวต่อสมบัติไฟฟ้าหรือแม่เหล็กบนพื้นผิว เช่น เทคนิคโฟโตมิชชัน** เป็นต้น รวมไปถึงการพยายามสร้างอุปกรณ์แบบขึ้นมา สำหรับผู้อยากให้เห็นหรือมีส่วนร่วมในงานวิจัยวิทยาศาสตร์พื้นฐานตั้งแต่จุดเริ่มต้นจริงๆ ที่จะนำไปสู่การประยุกต์ใช้ประโยชน์และนำไปสู่การปฏิวัติเปลี่ยนแปลงของโลก เทคโนโลยีในอนาคต ผู้เขียนก็เห็นว่าการวิจัยในเรื่อง Quantum Spin Hall Effect เป็นหนึ่งในหัวข้อที่น่าสนใจตามต่อไป

หมายเหตุ

**ในประเทศไทยเราสามารถใช้ประโยชน์จากแสงซินโครตรอนกับเทคนิควิจัยต่างๆ เช่น เทคนิคโฟโตมิชชัน เทคนิคการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ เป็นต้น ได้จากสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน จ. นครราชสีมา, <http://www.slri.or.th>

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Murakami, N. Nagaosa, S.C. Zhang, Dissipationless Quantum Spin Current at Room Temperature. *Science* **301**, 1348 (2003).
- [2] B.A. Bernevig, T.L. Hughes and S.C. Zhang, Quantum Spin Hall Effect and Topological Phase Transition in HgTe Quantum Wells. *Science* **314**, 1757 (2006).
- [3] C.L. Kane and E.J. Mele, Quantum Spin Hall Effect in Graphene. *Physical Review Letters* **95**, 226801 (2005).

- [4] Y. Kato, R. C. Myers, A. C. Gossard, and D. D. Awschalom, Observation of the Spin Hall Effect in Semiconductors. *Science* **306**, 1910 (2004).
- [5] Markus König, Steffen Wiedmann, Christoph Brüne, Andreas Roth, Hartmut Buhmann, Laurens W. Molenkamp, Xiao-Liang Qi, and Shou-Cheng Zhang, Quantum Spin Hall Insulator State in HgTe Quantum Wells. *Science* **318**, 766 (2007).
- [6] Haijun Zhang, Chao-Xing Liu, Xiao-Liang Qi, Xi Dai, Zhong Fang and Shou-Cheng Zhang, Topological insulators in Bi₂Se₃, Bi₂Te₃ and Sb₂Te₃ with a single Dirac cone on the surface. *Nature Physics* **5**, 438 (2009).
- [7] F. Baumberger, T. Greber, and J. Osterwalder, Fermi surfaces of the two-dimensional surface states on vicinal Cu(111). *Physical Review B* **64**, 195411 (2001).
- [8] S. Y. Zhou, G.-H. Gweon, J. Graf, A. V. Fedorov, C. D. Spataru, R. D. Diehl, Y. Kopelevich, D.-H. Lee, Steven G. Louie and A. Lanzara, First direct observation of Dirac fermions in graphite. *Nature Physics* **2**, 595 (2006).
- [9] D. Hsieh, Y. Xia, L. Wray, D. Qian, A. Pal, J. H. Dil, J. Osterwalder, F. Meier, G. Bihlmayer, C. L. Kane, Y. S. Hor, R. J. Cava, and M. Z. Hasan, Observation of Unconventional Quantum Spin Textures in Topological Insulators. *Science* **323**, 919 (2009).
- [10] Y. L. Chen, J. G. Analytis, J.-H. Chu, Z. K. Liu, S.-K. Mo, X. L. Qi, H. J. Zhang, D. H. Lu, X. Dai, Z. Fang, S. C. Zhang, I. R. Fisher, Z. Hussain, Z.-X. Shen, Experimental Realization of a Three-Dimensional Topological Insulator, Bi₂Te₃. *Science* **325**, 178 (2009).
- [11] "Quantum computer", Wikipedia: http://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_computer

ระบบการศึกษาวิทยาศาสตร์ไทย ...จะไปถึงดวงดาว หรือจะเข้าขั้นมะเร็งระยะสุดท้าย ตอนที่ 2: แกะและแพะรับบาป

ดร. เฉลิมพล รุจิณรัตน์¹

ดร. สิริพัฒน์ ประโทนเทพ²

บทความในตอนที่แล้ว ได้ชี้ให้เห็นสถานภาพการศึกษาไทย เปรียบเทียบกับระบบการศึกษาของประเทศอังกฤษ คำว่า O-net และ A-net ที่เรารู้จักกันนั้น คล้ายกับว่าจะลอกเลียนแบบมาจาก ระบบ O-level และ A-level (หรือปัจจุบันเรียกเป็น GCSE และ A-level) แต่โดยสรุปแล้วระบบของไทยเรามีความแตกต่างทางปรัชญา แนวความคิด และการดำเนินการกับของอังกฤษอย่างมหาศาล สิ่งหนึ่งที่ยากมากที่จะระบุได้คือ ปรัชญาของการศึกษาไทยนั้นคืออะไร เรามีแนวคิดและปรัชญาหรือไม่ ความแตกต่างที่เห็นได้อย่างชัดเจนมากในวิธีดำเนินการ ซึ่งอาจเกิดจากความไม่เข้าใจหรือรู้เท่าไม่ถึงการณ์ คือ การดูถูกระบบการศึกษาไทยระบบเก่า โดยเทียบให้ระดับ GCSE เทียบเท่ากับวุฒิ ม.6 ของไทย ทั้งที่จริงแล้วเมื่อนักเรียนอังกฤษเรียนจบระดับ GCSE แล้วจะต้องเรียนระดับ A-level อีกถึง 2 ปีก่อนจะเข้าสู่ระดับมหาวิทยาลัย ซึ่งแปลว่าระดับ GCSE นี้ น่าจะเทียบได้ประมาณ ม.4 ของไทย

บทความตอนที่ 2 นี้มุ่งเสริมความกระจ่างเกี่ยวกับความแตกต่างระหว่างระบบการศึกษาของไทยและของอังกฤษ ซึ่งจะนำผลเสียหายอย่างมหาศาลมาสู่ประเทศชาติในอนาคตอันไม่ไกลนัก ความต่างนั้นคือ การสอบวัดความถนัด หรือที่เรียกกันว่า GAT และ PAT [1] ซึ่งมีชื่อเล่นที่เรียกกันหนาหูว่า การสอบแกะและแพะ ในระบบการศึกษาของประเทศไทยนั้นก็มีการสอบวัดแววความถนัดของนักเรียนเหมือนกัน ซึ่งมีการออกแบบไว้จากการศึกษาวิจัยว่าเป็นช่วงอายุที่เหมาะสมของเด็กในการค้นหาตนเอง และได้เรียนในสิ่งที่ตนเองถนัดและชอบ เพราะหลังจากอายุช่วงนี้ไป การเปลี่ยนลักษณะนิสัย หรือพฤติกรรมของเด็กนั้นแทบจะ

เป็นไปได้ยาก ในขณะที่ที่ไทยเรานำระบบที่คล้ายกันนี้ไปทดสอบกับเด็กนักเรียนชั้น ม. 6 หรือ ม. 5 ก่อนเข้ามหาวิทยาลัย ประโยชน์ของการทดสอบความถนัดในประเทศไทยคือนักเรียนได้เตรียมความพร้อมก่อนเข้ามหาวิทยาลัยถึง 3-4 ปี ได้เลือกเรียนในสิ่งที่ตนเองชอบและเชี่ยวชาญ ท่านผู้อ่านโปรดลองพิจารณาค้นหาประโยชน์ของการสอบประเภทนี้ในระดับมัธยมศึกษาปีที่สุดท้ายก่อนเข้ามหาวิทยาลัยของไทย แกะและแพะรับบาปของการสอบวัดความถนัดของไทยสัปดาห์นี้ก็คือนักเรียนนักศึกษาไทยรุ่นบุญน้อยเหล่านี้เอง บทความนี้จะนำเสนอรายละเอียดของการวัดแววความถนัดของประเทศไทยเพื่อเป็นการตอบคำถามบุญน้อยของเด็กไทยเหล่านี้ ซึ่งการวัดความถนัดหรือน่าจะเรียกให้ถูกว่า การสังเกตความถนัดของเด็กนักเรียนอังกฤษจะใช้เวลาจนถึง 2 ปี ไม่ใช่แค่ซีดๆ เขียนๆ หรือ เคาๆ สุ่มไปเพียงไม่กี่ชั่วโมงของการสอบของไทยเรา

ระบบการสังเกตวัดความถนัดทางการศึกษาของนักเรียนในประเทศไทย

ความสำเร็จของระบบการศึกษาแบบอังกฤษนั้นไม่ได้อยู่ที่การศึกษาในตำราแต่เพียงอย่างเดียว หากอยู่ที่การเรียนรู้บุคลิกภาพ ความถนัด และอัจฉริยภาพที่มีอยู่ในตัวเอง เพื่อที่จะดึงความสามารถของตนเองออกมาใช้ได้อย่างเต็มที่ ประสบความสำเร็จในการศึกษา อาชีพการงาน โดยไม่ลืมที่จะนำความสุขมาเป็นที่ตั้ง ไม่ใช่แค่การศึกษานอกตำรา แต่เป็นการเรียนรู้ตัวตนของตนเอง ในสังคมไทยนั้นท่านผู้อ่านจะสังเกตเห็นได้ว่า หากมี

¹ นักวิชาการอิสระ

² อาจารย์ (ดร.) วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

เด็กสักคนหนึ่งเก่งวิทยาศาสตร์มากๆ มักจะถูกแนะแนวให้ไปเรียนหมอ ถ้าเก่งคณิตศาสตร์มากๆ ก็ให้ไปเรียนวิศวะ ถ้าไม่เก่งวิทย์ฯ หรือคณิตฯ ก็ให้ไปเรียนบริหารหรือศิลปะ โดยไม่ได้ศึกษาถึงความเข้ากันได้กับบุคลิกของเด็กและความถนัดที่แท้จริงของเขา หลายต่อหลายครั้งที่ผลสอบของเด็กออกมาไม่ดีไม่ได้เกิดจากความไม่ถนัดของเขา แต่เกิดจากวิธีการสอนของครูอาจจะไม่เข้ากับวิธีการเรียนรู้ของเด็ก การแนะแนวที่ผิดพลาดนั้นส่งผลเสียอย่างใหญ่หลวง นอกจากจะทำลายศักยภาพที่มีอยู่ในตัวเด็ก ยังเป็นการสร้างบุคลากรที่ไม่มีคุณภาพเข้าสู่สังคมในอนาคตอีกด้วย การเข้าใจถึงตัวตนที่แท้จริงของเด็กจึงมีผลมากต่อการเลือกอาชีพ และต้องทำในเวลาที่เหมาะสม จึงจะเลือกวิชาและอาชีพที่เหมาะสมให้กับพวกเขา อาชีพที่จะอยู่ติดตัวเขาไปอีกหลายสิบปี อาชีพที่เขาสามารถจะประสบความสำเร็จและรักในสิ่งที่ทำคือสิ่งที่ดีที่สุดที่พ่อแม่จะสามารถให้กับลูกหลานผู้เป็นที่รักยิ่งของเราได้

หลักสูตรไทย		อายุเด็ก	หลักสูตรอังกฤษ	
ม.ปลาย	ม.๖	18-19	Year 13	A-Level, IB
ช่วงการสอบ GAT และ PAT ของไทย				
	ม.๕	17-18	Year 12	
	ม.๔	16-17	Year 11	O-Level, GCE, GCSE, iGCSE
ม.ต้น	ม.๓	15-16	Year 10	
ช่วงการสังเกตวัดความถนัดของระบบอังกฤษ				
	ม.๒	14-15	Year 9	
	ม.๑	13-14	Year 8	Primary Level

รูปที่ 1 การเปรียบเทียบช่วงการวัดความถนัดของระบบอังกฤษและระบบไทย

โรงเรียนชั้นนำในประเทศอังกฤษนั้น เมื่อนักเรียนขึ้นชั้น Year 8 (ม.1 โดยประมาณ) จะมีการสอบ Career Testing เพื่อดูความถนัด วิธีการคิดและตัดสินใจของเด็ก ซึ่งจะทำให้รู้สายอาชีพที่เด็กถนัด และช่วยในการเลือกวิชาของ IGCSE ในช่วง Year 10 โดยการทดสอบนั้นจะมีขึ้นทุกวันติดต่อกันเป็นเวลา 30 วัน เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เพียงพอ โดยนักจิตวิทยาเด็กจะเข้าทำการทดสอบเก็บข้อมูลเด็กในโรงเรียนด้วยตัวเอง การทดสอบนั้นจะมีทั้งแบบที่เป็น Questionnaire และการทดสอบอื่นเช่น การเขียน การวาดภาพ ซึ่งจะนำไปสู่การทำ Graphology หรือ Handwriting analysis อันจะกล่าวถึงในภายหลัง ที่ต้องมีการทดสอบหลากหลายประเภท

เพราะหากมี Questionnaire แต่เพียงอย่างเดียว เด็กอาจเกิดอาการเบื่อ ไม่อยากทำการทดสอบ อย่างที่กล่าวมาแล้วว่าเราต้องคำนึงถึงความสุขของเด็กด้วย หลายครั้งการทดสอบอาจจะมาในรูปของกิจกรรมสนุกๆ ที่มาให้เด็กทำหลังเลิกเรียน การทดสอบนี้จะแทรกอยู่ใน ตารางเรียนของเด็กๆ จนครบ 30 วัน เมื่อนักจิตวิทยาได้รับข้อมูลจากเด็กเพียงพอแล้ว จะนำมาวิเคราะห์ร่วมกับผู้เชี่ยวชาญด้านพัฒนาการเด็ก ที่มงานดังกล่าวจะค่อยๆ ตรวจวิเคราะห์ผลจากเด็กเป็นรายบุคคล เพื่อสร้าง Model ทางความคิดของเด็กขึ้นมา การตรวจวิเคราะห์นั้นจะกินเวลานานถึง 2-3 เดือน จากนั้นผลวิเคราะห์จะถูกส่งกลับมายังโรงเรียน โรงเรียนจะนำผลที่ได้จากการทดสอบเด็กนั้นมาประชุมร่วมกับคณาจารย์เพื่อวางแผนการสอนเด็กแต่ละคน (ซึ่งโรงเรียนเหล่านั้นต้องมีจำนวนครูเพียงพอที่จะดูแลเด็กอย่างทั่วถึง) คณะครูจะทราบถึงวิธีการเรียนรู้ของเด็กที่อยู่ในการดูแลและปรับการสอนให้เข้ากับวิธีการเรียนรู้ของเด็กให้มีประสิทธิภาพสูงสุด จากนั้นจะทำการจัดการประชุมผู้ปกครองของเด็กๆ เพื่อส่งผลทดสอบต่อให้กับผู้ปกครอง พร้อมทั้งแนะนำรูปแบบการสอนที่มีประสิทธิภาพให้กับพ่อแม่ของเด็ก เรียกว่า Learn how to learn ที่ต้องมีการแนะนำรูปแบบการสอนแก่พ่อแม่ของเด็กนั้น เป็นเพราะว่าระบบการศึกษาของอังกฤษนั้นจะเป็นการเรียนที่โรงเรียน 60 เปอร์เซ็นต์ และเรียนกับครอบครัว 40 เปอร์เซ็นต์ เป็นระบบการศึกษาแบบครอบครัว พ่อแม่คนไทยหลายคนก็เข้าใจกันเองว่าการส่งลูกเรียนโรงเรียนอินเตอร์แล้วทางโรงเรียนจะดูแลเด็กทั้งหมด จะทำให้ 40 เปอร์เซ็นต์กับครอบครัวนี้หายไปอย่างน่าเสียดาย แต่ด้วยสภาพสังคมปัจจุบัน พ่อแม่อาจจะไม่มีเวลาดูแลลูกมากนัก ก็ได้มีโรงเรียนกวดวิชาที่เป็นรูปแบบของครอบครัวเข้ามาดูแลตรงส่วนนี้แทน หลังจากพ่อแม่ได้รับผลวิเคราะห์ของลูกจากโรงเรียนแล้วไม่เพียงจะทราบถึงวิธีการเรียนรู้ของลูก ยังจะทราบถึงวิธีการคิดและตัดสินใจของลูก ทำให้ยอมรับเขาในสิ่งที่เขาเป็นมากขึ้น เป็นการพัฒนาความสัมพันธ์ภายในครอบครัวอีกด้วย

เมื่อนักเรียนขึ้นชั้น Year 9 (อายุประมาณ 14 ปี) การทดสอบจะมีขึ้นอีกครั้ง แต่จะเป็น Career and Personal Testing ช่วงนี้เป็นช่วงที่เด็กกำลังย่างเข้าสู่วัยรุ่น ช่วงนี้บุคลิกของเขาจะเริ่มคงที่และชัดเจนขึ้น ความเข้าใจในตัวบุคคลเหล่านั้นจึงเป็นสิ่งที่สำคัญมากอันจะช่วยให้อุเลเขาอย่างเข้าใจ และเมื่อเด็กรู้ถึงบุคลิกของเขาจะทำให้เขาเรียนรู้ที่จะควบคุมตนเอง ซึ่งเป็นบันไดขั้นแรก

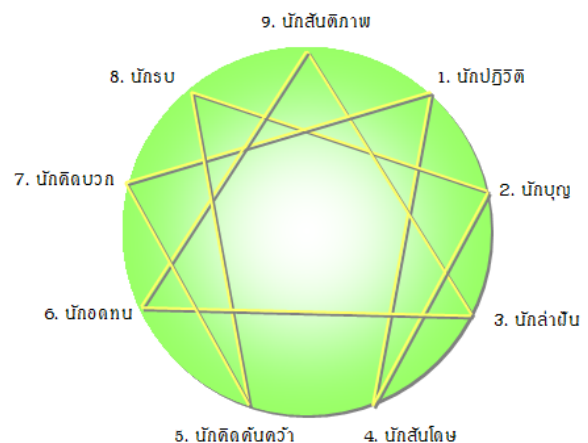
ไปสู่สิ่งสำคัญที่สุดคือ การเป็นคนดีในสังคมนั่นเอง การทดสอบในช่วง Year 9 นั้นบางส่วนจะคล้ายคลึงกับของเดิมเพื่อเป็นการย้ำถึงสิ่งที่เขาเป็น และจะเน้นไปทางบุคลิกภาพมากขึ้น และจะ Scope ถึงอาชีพที่เหมาะสมกับเขาให้ชัดเจนขึ้น โดยระยะเวลาของการสอบและการวิเคราะห์นั้นโดยรวมแล้วจะยังคงอยู่ที่ประมาณ 3 - 4 เดือน (หรือ 1 semester) เช่นเดิม และเมื่อผลออกมาจะมีการนำเข้าสู่ที่ประชุมครูเพื่อประเมินผลใน 1 ปีที่ผ่านมา หลังจากนั้นจะนำผลในปีนั้นไปพูดคุยกับพ่อแม่ของเด็ก หรือถึงความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นใน 1 ปีที่ผ่านมา (ดังที่กล่าวมาแล้วว่า การเรียนการสอนนั้นจะควบคู่ไปทั้งครูและพ่อแม่) และนำผลในปีนั้นไปใช้ในการเลือกวิชา IGCSE ของลูกในชั้น Year 10 ซึ่งจะทำให้เห็นว่า Career path ที่เหมาะสมกับลูกนั้นจะไปทางไหน และเลือกวิชาใน IGCSE ได้อย่างชัดเจนและเหมาะสม ไม่ใช่หลงไปให้มากนัก เรียนอะไรเข้าว่า โดยคิดว่าคุ้ม แต่สุดท้ายวิชากรรมต้องมาตกลงกับเด็ก อาจจะจบลงด้วยการที่เด็กไม่อยากเรียน หรือถ้าเป็นระบบการเรียนหลักสูตรอังกฤษในเมืองไทย ถ้าเหตุการณ์เมื่อเรียนนี้เกิดในช่วง A-Level หรือ IB เด็กอาจไม่อยากเรียนต่อ ปรึกร้อนเอาผล IGCSE ซึ่งพี่ไทยเราดูτριเทียบไว้ให้เท่ากับ ม.6 ไปยื่นเข้ามหาวิทยาลัยไทยได้ การเรียนเอามากเอาเยอะเหมือนชื่อของตลาดนัด อาจจะดูเหมือนหวังดี แต่จะกลายเป็นกรณี พ่อแม่รังแกกันไป



รูปที่ 2 กระดาษเขียนเล่นของ Bill Gates และลายมือของ Tony Blair ในกรอบเด็กมุ่มล่างขวา (ที่มา BBC News 1 ก.พ. 2005)

สำหรับระบบที่ใช้ Test เด็กนั้นมีให้เลือกใช้หลายชนิด โดยถ้าเป็นรูปแบบของ Questionnaire แล้ว ที่นิยมเป็นอย่างมากก็คือ MBTI (The Myers-Briggs Type Indicator) ซึ่งพัฒนาโดย

Isabel Myers และ Katharine Briggs [2] โดยอาศัยพื้นฐานจากรูปแบบทางจิตวิทยาของ Carl Jung นักจิตวิทยาผู้มีชื่อเสียงชาวสวิดเซอร์แลนด์ ซึ่งจะเป็นคำถามทางจิตวิทยาเพื่อวิเคราะห์วิธีการรับรู้และตัดสินใจของเด็ก โดยแบ่งบุคลิกของคอนออกเป็น 4 มิติ คือ ทักษะติดต่อผู้อื่น การรับข้อมูล การตัดสินใจ และการดำเนินชีวิต แต่ละมิติก็จะมีระดับแบ่งย่อยลงไป การตรวจวิเคราะห์นั้นถ้ามีจำนวนมากจะนิยมตรวจด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งได้ผลเร็ว หากตรวจด้วยผู้เชี่ยวชาญจะให้ผลที่ละเอียดกว่ามากแต่ใช้เวลามากขึ้นไปด้วย ผลที่ออกมาจะทำให้ทราบถึงขอบเขตของอาชีพที่เด็กถนัดและเหมาะสมกับบุคลิกของเขาอีกรูปแบบของ Questionnaire ที่เป็นที่นิยมคือ Enneagram [3] เป็นการตอบแบบสอบถามซึ่งใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง และวิเคราะห์ผลได้รวดเร็วโดยจะแบ่งลักษณะบุคลิกภาพเป็นประเภทใหญ่ๆ 9 ประเภท เช่น นักปฏิวัติ นักบุญ (ชอบช่วยเหลือ) เป็นต้น ผลการทดสอบวิธีนี้จะนำมารวมกับ MBTI เพื่อเพิ่มความละเอียดในการทดสอบขึ้นไปอีก



รูปที่ 3 ลักษณะบุคลิกภาพ 9 ประเภทของแบบทดสอบ Enneagram

ดังที่เคยกล่าวไปแล้วว่าการทดสอบเด็กในช่วง Year 8 - 9 นั้นหากมีรูปแบบเป็น Questionnaire เพียงอย่างเดียวอาจทำให้เด็กเบื่อ ไม่เต็มใจทำแบบทดสอบ ในการทดสอบหลายครั้งจะมากับกิจกรรมสนุกๆ เช่น มีกระดาษที่มีกรอบอยู่ตรงกลางแผ่นหนึ่ง และให้เด็กเขียนอะไรลงไปก็ได้ตามใจ เด็กจะสนุกกับจินตนาการของตน โดยสิ่งที่เด็กเขียนลงไปนั้นจะถูกนำไปวิเคราะห์โดยนักจิตวิทยา การทดสอบแบบนี้เรียกว่า Graphology การวิเคราะห์จะเริ่มตั้งแต่เด็กเขียนอะไรลงไปไหนช่องนั้น ตัวอักษร

รูปภาพ เขียนอยู่ตรงกลางช่อง หรือขีดขอบ เขียนเต็มช่อง หรือเกินออกมานอกช่อง ทั้งหมดนี้ล้วนมีความหมายทางจิตวิทยาซ่อนอยู่ทั้งสิ้น และ ต้องทำโดยผู้เชี่ยวชาญเท่านั้นจึงจะได้ผลที่แม่นยำ แม้กระทั่งสมุดจดงานของเด็กก็ยังถูกนำมาทำ Handwriting analysis เพราะลายมือนั้นเป็นสิ่งที่สะท้อนถึงบุคลิกของผู้เขียนโดยตรง ไม่ว่าจะเป็นเขียนเอียงซ้าย-ขวา ชิดเส้นบรรทัด หรือลอยจากเส้น ความคงที่ของลายมือ ทั้งหมดที่กล่าวมานั้นจะถูกรวบรวมตลอดการเก็บข้อมูล เพื่อให้ได้รับข้อมูลจากตัวเด็กอย่างเพียงพอ ข้อมูลทั้งหมดนี้จะถูกนำมาวิเคราะห์ร่วมกันระหว่างนักจิตวิทยาและผู้เชี่ยวชาญด้านวิวัฒนาการของเด็กดังที่กล่าวมาแล้ว เพราะผลที่ได้นั้นส่งผลโดยตรงต่ออนาคตของเด็ก จึงต้องอย่างละเอียดรอบคอบ เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดกับตัวเด็กเอง แนวคิดนี้เป็นที่น่าทึ่งอย่างมาก เพราะการแนะแนวทางซึ่งสร้างอนาคตที่ดีให้แก่เด็กคนหนึ่งหมายถึงการสร้างบุคลากรที่มีคุณภาพให้กับสังคม นับเป็นกุศลใหญ่ที่เราได้ทำกับสังคมเลยทีเดียว

ตัวอย่างหนึ่งจากประสบการณ์การสอนนักเรียนไทยในหลักสูตรนานาชาติของผู้เขียน (ดร. เฉลิมพล) คือ การทดสอบดูบุคลิกภาพและความถนัดของเด็กนักเรียนคนหนึ่งด้วยระบบที่เหมือนกับประเทศอังกฤษ ผลที่ได้ออกมาคือ เด็กคนนั้นมีระเบียบวินัยสูง มีแบบแผน เป็นนักคิด ชอบทำงานหนัก มีความพยายาม และเหมาะกับงานที่ต้องคิดเพียงคนเดียว (นี่คือผลแบบคร่าวๆ ผลจริงนั้นจะยาวและละเอียดกว่านี้มาก) ผลการเรียนของเด็กในโรงเรียนก็จัดว่าดีมาก และสนใจอยากจะเป็นหมอเพราะมีใจอยากที่จะช่วยคน ซึ่งถ้าดูผิวเผินแล้วน้องก็เหมือนจะเหมาะกับอาชีพนี้ แต่ผลการทดสอบนี้ที่ออกมากลับน่าสนใจมากกว่านั้นคือ เด็กคนนั้นเป็นนักคิดมากกว่านักปฏิบัติ เขาจึงเหมาะกับงานอาจารย์หมอมากกว่าที่จะเป็นหมอด้วยตัวเอง การเป็นหมอได้ช่วยผู้คนนับว่าเป็นบุญแล้ว อาจารย์หมอผู้ทำหน้าที่สร้างผู้ที่ช่วยชีวิตคนนับเป็นผลบุญที่ยิ่งใหญ่กว่าขึ้นไปอีก เมื่อเด็กคนนั้นทราบผลการทดสอบของตนเองเขาตื่นเต้นมาก สีหน้าแสดงออกเหมือนถูกลือตเตอร์ เขาอยากที่จะเรียนทางด้านนี้มาก ผู้เขียนจึงแนะแนวทางการเลือกเรียน Single science ที่ให้เรียน ฟิสิกส์ เคมี และชีววิทยา ใน IGCSE โดยมหาวิทยาลัยที่รับเข้าแพทย์อันดับต้นๆ นั้น เขาต้องการ เคมี เกรดเอ-สตาร์ (A*) อังกฤษ เกรดเอ (A) เป็นอย่างน้อย และวิชาอื่นให้ได้เอ-สตาร์ สัก 5 - 6 วิชา จาก 8 วิชา และ A-Level ควรเลือกเคมีกับชีววิทยาเป็นตัวหลัก ส่วนอีก 1 - 2 วิชาเลือกอะไร

ก็ได้ แต่ภาพรวมแล้ว ต้องได้เอ-สตาร์ทั้ง 4 วิชา นอกจากนี้มหาวิทยาลัยยังต้องการในเรื่องของการฝึกงานและการทำวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอาชีพหมอด้วย อีกทั้งเด็กจะต้องทราบก่อนด้วยว่าตนเองจะไปเข้ามหาวิทยาลัยอะไร เพราะมหาวิทยาลัยอันดับต้นๆ ทางด้านหมอยังมีเงื่อนไขการรับอย่างอื่นอีกที่ไม่เหมือนกัน แต่การที่เราได้มีโอกาสช่วยน้องวางแผนกันตั้งแต่ Year 9 สุดท้ายทุกคนก็ได้ตามที่ตนเองหวัง นอกเสียจากมีเหตุสุดวิสัยจริงๆ นอกจากนั้นการจัดการการเรียนการสอนจะต้องดูแลแม้กระทั่งลักษณะการสอนของครูที่จะเหมาะกับเด็กคนนี้ที่สุดด้วย เพื่อให้ครูได้ช่วยวางแผนการสอนให้แก่เด็กคนนั้นได้ถูกต้อง และเด็กยังได้มีโอกาสเข้าใจถึงบุคลิกภาพของตนเอง และสามารถวางแผนตัวเองในสังคมได้ดีขึ้น

ตัวอย่างที่กล่าวไปเป็นข้อดีอีกประการหนึ่งของ การศึกษาระบบของอังกฤษ นั่นคือ การเรียนรู้ที่จะเข้าใจถึงตนเอง นำเสียดายที่โรงเรียนนานาชาติในไทยที่นำระบบการศึกษอังกฤษเข้ามากลับมองข้ามความสำคัญตรงจุดนี้ไป เสียดายที่คนที่ทำหน้าที่อนุมัติโรงเรียนนานาชาติไม่รู้ถึงปรัชญาการเรียนการสอนของต่างประเทศ เสียดายที่พ่อแม่ผู้ปกครองไม่รู้และเสียดายอย่างแรงที่ระบบการศึกษาไทยได้ดำเนินการทดสอบวัดความถนัดมาใช้อย่างผิดๆ เสียดายที่สังคมไม่สนใจ สิ่งดีๆ จึงเกิดขึ้นไม่ได้ในเมืองไทย ซึ่งแท้ที่จริงแล้ว การได้ส่งเสริมให้เด็กค้นหาตัวเองให้เจออย่างมีเหตุมีผลตั้งแต่ช่วงแรกของวัยเรียน เพื่อจะนำมาใช้วางแผนการศึกษานั้น ควรจะมีกันได้แล้วในทุกระบบของการศึกษาของประเทศไทย

คำถามที่อาจจะค้างคาใจผู้อ่านคือ แล้วปรัชญาของระบบการศึกษาไทยคืออะไร ...

โปรดลองพิจารณาโดยดูจากตัวอย่างต่อไปนี้ 1) การเข้าโรงเรียนดีๆ มีคุณภาพ เช่น โรงเรียนนานาชาติ หรือโปรแกรมภาษาอังกฤษมีค่าใช้จ่ายสูงมาก สูงกว่าแม้แต่ค่าเล่าเรียนปกติของมหาวิทยาลัยส่วนมาก 2) ความเสมอภาคทางการศึกษา ถูกนำไปใช้ให้หมายถึงเด็กต้องเรียนเนื้อหาหลักสูตรเหมือนกันทุกคนทั่วราชอาณาจักร ในขณะที่เด็กที่ผู้ปกครองมีฐานะไม่ดีนัก ไม่สามารถจ่ายค่าธรรมเนียมพิเศษต่างๆ ไม่มีโอกาสได้ใช้เครื่องมือดีๆ หรือไม่ได้เรียนในห้องปรับอากาศเหมือนกับเด็กที่พ่อแม่ทุ่มทุนสร้าง ซึ่งแตกต่างอย่างมากจากการศึกษาระบบเก่าของไทยที่เมื่อเข้ามาโรงเรียนของรัฐแล้วจะยากดีมีจนก็มีโอกาสเรียนใหม่ๆ เก่าๆ

เหมือนกัน แบ่งปันกัน ช่วยกันดูแลรักษาโรงเรียน 3) ธุรกิจสอนพิเศษเป็นธุรกิจที่ทำรายได้มากกว่าโรงเรียนภาคปกติอย่างมหาศาล แม้ว่าบางแห่งจะเป็นเหมือนการนั่งดูรายการทีวี ที่ปกติควรจะดูได้ฟรีๆ ครูในโรงเรียนปกติจำเป็นต้องมีอาชีพสอนพิเศษเพื่อเลี้ยงตัว และทุ่มเทเนื้อหาสาระวิชาดีๆ ไปไว้ในชั่วโมงสอนพิเศษ นั่นแปลว่า ถ้าเด็กต้องการเข้าเรียนที่มหาวิทยาลัยดีๆ ก็กลัวเพื่อนจะแซงหน้า ต้องจ่ายเงินค่าเรียนพิเศษเพิ่มมากกว่าการเรียนปกติ 4) การสอบวัดความถนัดของไทยเริ่มเกิดเป็นธุรกิจการสอนพิเศษ สามารถติวเข้ม สอบเข้าได้หลายครั้ง มีการเก็บค่าธรรมเนียมการสอบ มีเงินมากกว่าที่สอบได้หลายครั้งกว่า นับเป็นการสร้างโอกาสธุรกิจทางการศึกษาใหม่ได้ในเวลาอันรวดเร็วมาก 5) การพัฒนาโรงเรียนให้ดี ถ้าไม่มีเงินทำไม่ได้แทนที่จะมีการประยุกต์นำวัสดุท้องถิ่นหรือวัสดุเหลือใช้มาใช้เป็นประโยชน์ โรงเรียนที่ได้รับการเชิดชูว่าเป็นโรงเรียนชั้นเยี่ยม คือโรงเรียนที่มีความเจริญทางวัตถุสูง มีห้องเรียนดี มีอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ มีอินเทอร์เน็ตให้ใช้กันทั่วหน้า 6) การเลือกเส้นทางเรียนของเด็กในปัจจุบันเลือกเพราะความที่น่าจะทำเงินรายได้สูง เช่นอาชีพหมอและวิศวกร ซึ่งเป็นค่านิยมที่มั่นคงไม่เปลี่ยนแปลงมาเกินครึ่งศตวรรษแล้ว จนเรามีหมอหน้าเลือดและวิศวกรหน้าเงินที่ไม่เคยมีความสุขที่แท้จริงเพราะไม่รู้จักคำว่าพออยู่เต็มสังคมไทยไปหมด ค่านิยมของการเลือกอาชีพที่ดีคือได้นั่งโต๊ะทำงาน งานน้อยๆ เงินเดือนสูงๆ โดยไม่สนใจว่าคุณค่าความเป็นมนุษย์อยู่ตรงไหน

ผู้เขียนขอเสนอคำว่า “เงิน” เป็นปรัชญาหลักของระบบการศึกษาไทย ก็ได้แต่หวังว่าคงไม่ใช่สำหรับระบบการศึกษาไทยทั้งหมด

เด็กทุกคนเกิดมาต่างกัน ล้วนมีความถนัด ความชอบที่ต่างกัน แม้แต่พี่น้องท้องเดียวกัน ยังมีอาชีพแตกต่างกันได้ตั้งมากมาย ทั้งความชอบ ความคิด และจิตใจ ดังนั้นหน้าที่ในการค้นหาตัวตนของเด็กนั้นเป็นอีกหน้าที่หนึ่งของคนเป็นพ่อ-แม่ จะดีแค่ไหนหากพวกเราได้ทำในสิ่งที่เขารักและสนใจ และเมื่อได้ทำอย่างมีความสุขแล้ว ความสำเร็จย่อมจะตามมาอย่างแน่นอน

เอกสารอ้างอิง

[1] สถาบันทดสอบทางการศึกษาแห่งชาติ <http://www.niets.or.th/>

[2] The Myers and Briggs Foundation. <http://www.myersbriggs.org/>

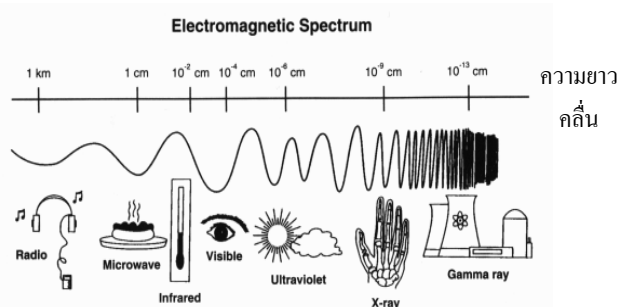
[3] The Enneagram Institute. <http://www.enneagraminstitute.com/>

ฟิสิกส์และเทคโนโลยีของการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ

หมุดตอเล็บ นิสสัย¹

คลื่นไมโครเวฟและการให้ความร้อนกับวัสดุ

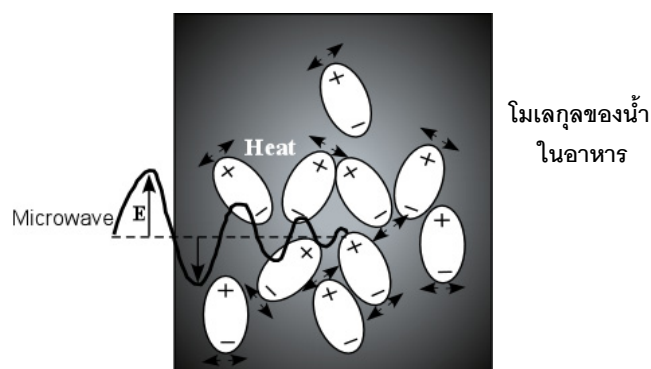
คลื่นไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งซึ่งมีความยาวคลื่นระหว่าง 1 มิลลิเมตรถึง 1 เมตรดังแสดงในรูปที่ 1 โดยเมื่อนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทุกชนิดมาเรียงกันตามความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน จะได้แผนภาพที่เรียกว่าสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic spectrum) โดยคลื่นไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ระหว่างคลื่นวิทยุและคลื่นอินฟราเรด คลื่นไมโครเวฟเป็นคลื่นที่มีความยาวคลื่นและความถี่ที่เหมาะสมสำหรับใช้ในกระบวนการเกี่ยวกับอาหาร เช่นการต้ม การนึ่ง การอุ่น และการทำแห้ง



รูปที่ 1 แสดงสเปกตรัมของคลื่นไมโครเวฟ

คลื่นไมโครเวฟถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้สำหรับเรดาร์ในสมัยสงครามโลกครั้งที่สอง [1] เนื่องจากมันจะสะท้อนได้ดีที่ผิวของโลหะ ประกอบกับคลื่นไมโครเวฟเคลื่อนที่ในอากาศด้วยความเร็วเท่ากับแสง ดังนั้นเรดาร์จึงเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูงมากในการตรวจจับเครื่องบินของฝ่ายศัตรู สำหรับการนำคลื่นไมโครเวฟไปใช้ในการให้ความร้อนกับอาหารเพื่อการทำให้อสุกหรือการทำแห้งนั้นสามารถทำได้เนื่องจากเมื่อคลื่นไมโครเวฟเคลื่อนที่เข้าไปในวัสดุต่างๆที่ประกอบด้วยโมเลกุลที่มีความเป็นขั้ว หรือโมเลกุลที่ประจุบวกและประจุลบมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ โมเลกุลเหล่านั้นจะมีการเคลื่อนที่เนื่องจากแรงกระทำ

จากสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟ การที่คลื่นไมโครเวฟเป็นคลื่นที่มีความถี่สูง ซึ่งความถี่ของคลื่นไมโครเวฟสำหรับใช้ในกระบวนการให้ความร้อนอาหารจะเท่ากับ 2.45 GHz ดังนั้นสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟจะมีการสลับขั้ว 2,450 ล้านครั้งต่อวินาที เมื่อโมเลกุลของน้ำซึ่งเป็นโมเลกุลมีขั้วที่มีจำนวนมากที่สุดในอาหารอยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟ มันจะพยายามหมุนตามการสลับขั้วของสนามไฟฟ้า ก็จะทำให้เกิดการชนกันระหว่างโมเลกุลหรือเกิดแรงเสียดทานภายในโมเลกุลของน้ำนั่นเอง การชนกันดังกล่าวจะทำให้เกิดเป็นความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว ปรากฏการณ์การเกิดความร้อนดังกล่าวเหมือนกันกับการเกิดความร้อนเมื่อนำเอากิ่งไม้แห้งสองอันมาถูกัน รูปที่ 2 แสดงการตอบสนองของโมเลกุลน้ำเมื่อได้รับคลื่นไมโครเวฟ



รูปที่ 2 แสดงแบบจำลองการดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟแล้วเกิดเป็นความร้อนขึ้นของวัสดุไดอิเล็กตริกโดยโมเลกุลไดโพลจะถูกบังคับให้หมุนภายใต้สนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของคลื่นไมโครเวฟ การชนกันระหว่างโมเลกุลขณะหมุนทำให้เกิดแรงเสียดทาน และเกิดเป็นความร้อนขึ้น

กระบวนการที่ทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในวัสดุเมื่อได้รับคลื่นไมโครเวฟเรียกว่า Dielectric heating [2] ซึ่งทำให้พลังงานของคลื่นไมโครเวฟซึ่งอยู่ในรูปของสนามไฟฟ้า เปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนภายในวัสดุได้อย่างรวดเร็วและมี

¹ อาจารย์ (ดร.) ห้องปฏิบัติการพลาสมาประยุกต์เพื่อการกสิกรรม สังกัดวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

ประสิทธิภาพสูง ดังนั้นในปัจจุบันจึงได้มีการนำเทคโนโลยีไมโครเวฟมาใช้มากมายเช่น การอบแห้ง การฆ่าเชื้อโรค การ vulcanization การเร่งปฏิกิริยาเคมี การกำจัดสารพิษ และการกำเนิดพลาสมา [2-4] เป็นต้น

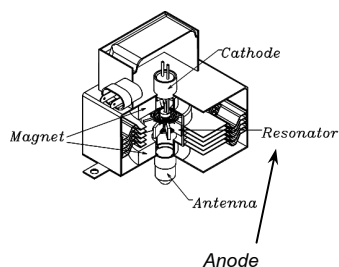
ในขบวนการอบแห้งอาหารนั้น จะใช้คุณสมบัติของคลื่นไมโครเวฟที่จะตอบสนองต่อโมเลกุลชนิดต่างๆไม่เท่ากัน โดยจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเชิงไดอิเล็กตริกของมัน [2] คลื่นไมโครเวฟจะถูกดูดกลืนโดยโมเลกุลของน้ำได้ดีที่สุดเนื่องจากความถี่ของการหมุนของโมเลกุลของน้ำซึ่งมีความเป็นเชิงขั้ว (Dipole) สูงกับความถี่ของคลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ 2.45 GHz เกิดการก่อกวน (Resonance) กัน ทำให้น้ำสามารถดูดพลังงานของคลื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดโดยพลังงานของคลื่นไมโครเวฟมีผลกระทบต่อวัสดุอื่นๆ น้อยมาก น้ำจะถูกทำให้ร้อนขึ้นอย่างรวดเร็วจนระเหยออกไปหมด ดังนั้นพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจึงใช้ในการระเหยของความชื้นในอาหารโดยที่ความร้อนดังกล่าวจะไม่ทำให้โครงสร้างและรสชาติของอาหารเกิดการเสียหายถ้าหากมีการควบคุมที่เหมาะสม ซึ่งจะเห็นว่าการอบแห้งโดยคลื่นไมโครเวฟมีความเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำไปใช้เพื่อพัฒนาขบวนการอบแห้งอาหารที่มีประสิทธิภาพสูง [4]

ในการอบปลาแห้งโดยใช้คลื่นไมโครเวฟเพื่อให้ได้ปลาแห้งที่มีคุณภาพเป็นที่ต้องการของตลาดนั้นจะต้องทราบเงื่อนไขที่เหมาะสมของการอบเช่น กำลังของคลื่นไมโครเวฟ การถ่ายเทความร้อนและความชื้นในเตาอบ และในตู้ปลาเป็นต้น

คลื่นไมโครเวฟที่ใช้ในการให้ความร้อนกับอาหารสามารถผลิตได้ด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่าแมกนีตรอน (Magnetron) ซึ่งจะเป็นส่วนประกอบสำคัญของเตาไมโครเวฟ



(ก)



(ข)

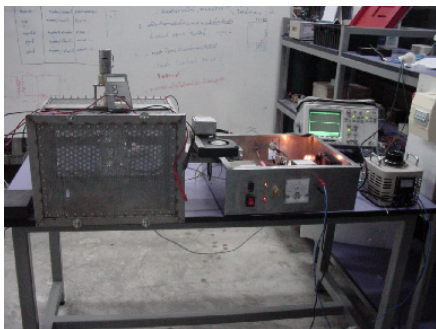
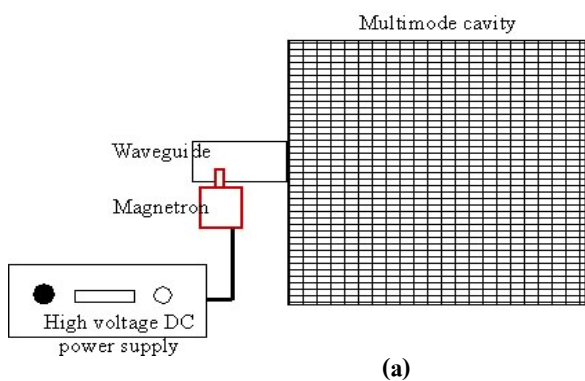
รูปที่ 3 (ก) แมกนีตรอน (ข) โครงสร้างของแมกนีตรอน

แมกนีตรอน

แมกนีตรอนเป็นอุปกรณ์ที่ทำให้กำเนิดคลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่ 2.45 GHz มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งประกอบด้วยไส้หลอด (Filament) คาโทด (Cathode) ซึ่งเป็นขั้วใดขั้วหนึ่งของไส้หลอด และถูกบรรจุอยู่ในช่องสุญญากาศซึ่งส่วนของผนังรอบๆจะทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด (Anode) คลื่นไมโครเวฟที่ถูกกำเนิดขึ้นจะถูกส่งออกมาภายนอกโดย Antenna ในการทำงานของแมกนีตรอนนั้นแมกนีตรอนจะถูกจ่ายด้วยไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำประมาณ 3-4 โวลต์ กระแส 10 แอมแปร์ที่ไส้หลอด ซึ่งจะทำให้ไส้หลอดร้อนและปล่อยอิเล็กตรอนออกมา และเมื่อจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงมากกว่า 4,000 โวลต์ไปที่ขั้วใดขั้วหนึ่งของไส้หลอดซึ่งทำหน้าที่เป็นคาโทดเทียบกับขั้วแอโนด ก็จะทำให้อิเล็กตรอนถูกบังคับให้เคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กถาวร ซึ่งจะทำให้แมกนีตรอนสามารถปล่อยคลื่นไมโครเวฟออกมาได้ โดยที่ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟจะถูกกำหนดด้วยโครงสร้างภายในช่องสุญญากาศระหว่างขั้วคาโทดกับขั้วแอโนดให้เท่ากับ 2.45 GHz

การออกแบบและสร้างระบบการอบปลาแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ในการอบปลาแห้งโดยใช้คลื่นไมโครเวฟเพื่อให้ได้ปลาแห้งที่มีคุณภาพเป็นที่ต้องการของตลาดนั้นจะต้องทราบเงื่อนไขที่เหมาะสมของการอบเช่น กำลังของคลื่นไมโครเวฟ การถ่ายเทความร้อนและความชื้นในเตาอบ และในตู้ปลาเป็นต้น ดังนั้นเพื่อเป็นการศึกษาเงื่อนไขดังกล่าวจึงได้ออกแบบและสร้างระบบอบปลาแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟซึ่งประกอบด้วยส่วนหลักๆ คือส่วนกำเนิดคลื่นด้วยแมกนีตรอน ส่วนการจ่ายและควบคุมกำลังความต่างศักย์สูง ส่วนท่อนำคลื่น (Waveguide) และส่วนเตาอบ (Cavity) ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงระบบการอบปลาแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งประกอบด้วยแมกนีตรอน ระบบจ่ายกำลังและควบคุมความต่างศักย์สูงและห้องคลื่น (Cavity) (a) ไลอะแกรม (b) รูปถ่าย

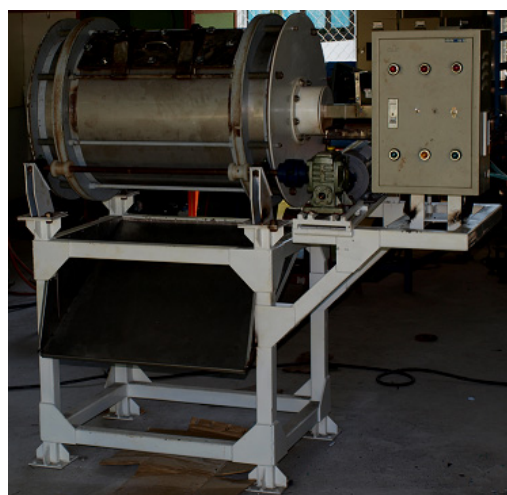
การพัฒนาเครื่องอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟของมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

ในการวิจัยและพัฒนาฟิสิกส์และเทคโนโลยีไมโครเวฟของหน่วยวิจัยพลาสมาประยุกต์เพื่อการกลีกรรรม มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ที่ผ่านมา ทำให้กลุ่มวิจัยมีความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับคลื่นไมโครเวฟ สามารถออกแบบและสร้างระบบกำเนิดและควบคุมคลื่นไมโครเวฟที่มีราคาถูก ปลอดภัย และมีประสิทธิภาพ มีศักยภาพในการนำเทคโนโลยีไมโครเวฟไปใช้ในการทำปลาแห้งที่คุณภาพสูงและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยเตาอบแห้งที่ได้พัฒนาขึ้นจะสามารถถ่ายทอดเทคโนโลยีให้กับชุมชนเพื่อเป็นทางเลือกของการประกอบอาชีพต่อไปดังแสดงในรูปที่ 5 และรูปที่ 6 และนอกจากนั้น จะทำการพัฒนาระบบการอบแห้งในระดับอุตสาหกรรมของอาหารสัตว์อัดเม็ดดังแสดงในรูปที่ 7 การพัฒนาเทคโนโลยีการอบไม้ยางดังแสดงในรูปที่ 8 เครื่องอบแห้งปลาในระดับอุตสาหกรรมดังแสดงในรูปที่ 9 และการอบรังนกแอ่นสำหรับการส่งออกดังแสดงในรูปที่ 10 และจะทำการต่อยอดเพื่อ

การพัฒนาเทคโนโลยีไมโครเวฟและคลื่นความถี่สูงในระดับสากลต่อไปในอนาคต



รูปที่ 5 เครื่องอบปลาแห้งสำหรับชุมชน



รูปที่ 6 เครื่องอบพริกสำหรับชุมชน



รูปที่ 7 เครื่องดันแบบสำหรับการอบแห้งอาหารสัตว์อัดเม็ดสำหรับ
อุตสาหกรรม



รูปที่ 8 เครื่องดันแบบสำหรับการศึกษาการอบแห้งไม้ยางพารา



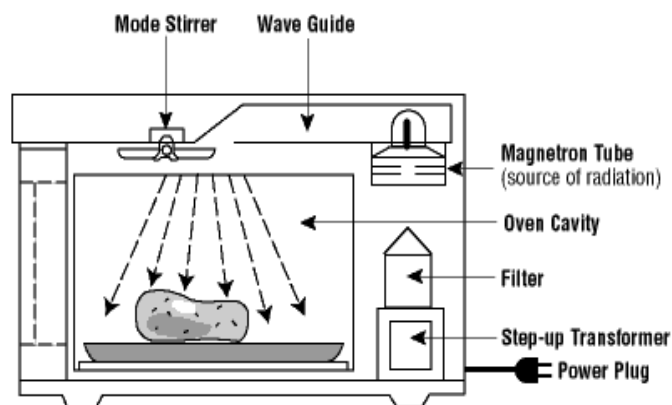
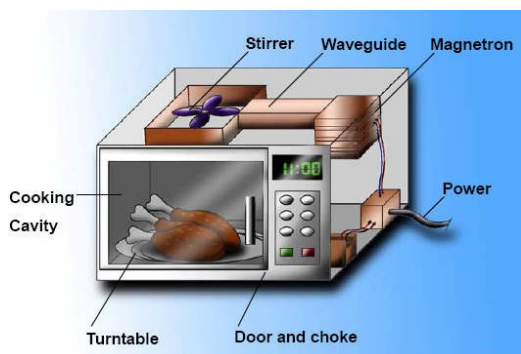
รูปที่ 9 เครื่องอบแห้งปลาสำหรับอุตสาหกรรม



รูปที่ 10 เครื่องดันแบบสำหรับการอบร้งนกงางแอนสำหรับการ
ส่งออก

เอกสารอ้างอิง

- [1] L. Reynolds, *The history of the microwave oven*, Microwave World, Vol. 10, 1989
- [2] R.V. Decareau, *Microwave in the food processing industry*, Academic Press Inc. 1985
- [3] G. Roussy and J.A. Pearce, *Foundations and Industrial Applications of Microwaves and Radio Frequency Fields*, John Wiley & Sons, 1995
- [4] John M. Osepchuk, *A History of Microwave Heating Application*, IEEE transactions on microwave theory and technique, vol MTT-32, No.9, September 1984.



แหล่งภาพ:

- <http://www.wackyarchives.com/bizarre/the-microwaved-cd.html>
- <http://greenprophet.com/2008/08/12/1621/microwave-ovens-health>
- http://www.ccohs.ca/oshanswers/phys_agents/microwave_ovens.html
- <http://www.freefoto.com/preview/04-23-90?ffid=04-23-90>

บนบ่ากุ่มกัณฑ์

ตอนที่ 1 พลั้งแห่งการใช้เหตุผล

ศุภกร รักใหม่¹

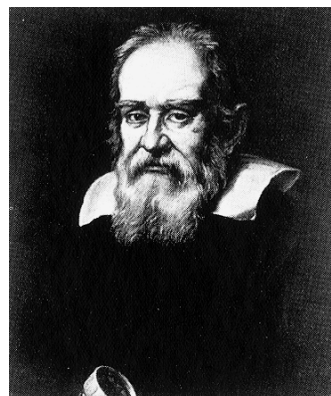
“ซึ่งข้าพเจ้าอาจมองเห็นได้ไกลล่านั้น ก็เพียงขึ้นที่สนจากบน บ่าเหล่ากุ่มกัณฑ์” ไอแซค นิวตัน กล่าวไว้ในจดหมายถึงโรเบิร์ต ฮุก เมื่อ 333 ปีก่อน

ไม่ใช่เพียงนิวตันเท่านั้น ใครจะเถียงได้ว่าเราทั้งหมดล้วนยืน อยู่บนบ่ายักษ์ทั้งสิ้น ต่างกันแต่เพียงใครจะมองไปทางไหน และ มองหาอะไร

สิบปากว่า ฤจะเท่าตาเห็น

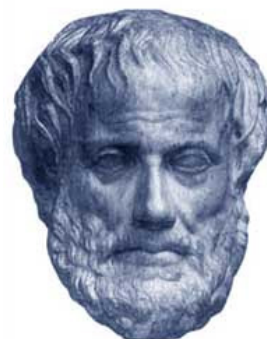
“ความจริงเป็นสิ่งเข้าใจง่ายเมื่อมันถูกค้นพบแล้ว จุดสำคัญคือการหามันให้พบ”

นั่นเป็นคำกล่าวของยักษ์ท่านหนึ่ง เป็นหนึ่งในผู้ที่มอบ บ่าให้เราได้นั่งอยู่สูง และมองไปได้ไกลถึงขอบจักรวาลใน ปัจจุบัน ที่น่าทึ่งคือยักษ์ท่านนี้เป็นนักฟิสิกส์ทดลองในยุคที่มีเพียง ไม้บรรทัดหยาบๆ ยุคที่ใช้จิ้งหะของชีพจรเป็นนาฬิกาจับเวลา ยุค ที่คณิตศาสตร์มีเพียงการบวก ลบ คูณ หาร แต่ที่ดังที่นักการเมือง กล่าวกันว่าสถานการณ์สร้างวีรบุรุษ หรือที่นักฟิสิกส์ทดลอง (ไทย) กล่าวว่าความยากจนสร้างบุคลิกภาพ (Lack of funding builds character.) ยักษ์ของเราท่านนี้ก็ค้นพบความลับของจักรวาล ด้วยอุปกรณ์ที่แสนจะง่ายไม่ก็จิ้ง และที่น่าทึ่งที่สุดก็คือ ท่านผู้นี้ ค้นพบหนึ่งในความลับที่สำคัญที่สุดของจักรวาลโดยใช้เพียง ห้อยทดลองเล็กๆ ที่เรียกว่าสมอ เครื่องมือก็เป็นเพียงสิ่งง่ายๆ ที่ เราเรียกว่าตุรกระ ยักษ์ท่านนี้ชื่อว่ากาลิเลโอ กาลิเลอี



รูปที่ 1 กาลิเลโอ

กาลิเลโอ เกิดเมื่อ 15 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2107 ปีเดียวกันกับ วิลเลียม เชกสเปียร์ กวีชาวอังกฤษ และเป็นปีเดียวกับที่ไมเคิลแอง เจโล ศิลปินลือนามชาวอิตาลีเสียชีวิต เป็นปีที่ตรงกับรัชสมัย สมเด็จพระมหาจักรพรรดิของกรุงศรีอยุธยา ห้าปีก่อนการเสียกรุง ครั้งที่หนึ่ง ในยุโรปขณะนั้นพื้นฐานความรู้ทางวิทยาศาสตร์เกือบ ทั้งหมดมาจากอริสโตเติล และหนึ่งในคำสอนของอริสโตเติลก็คือ “วัตถุที่หนักกว่าตกเร็วกว่าวัตถุที่เบากว่า”



รูปที่ 2 อริสโตเติล

¹ อาจารย์ (ผศ. ดร.) สาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ทฤษฎีนี้มาจากปรัชญาของอริสโตเติลที่ว่าไม่มีผลใดปราศจากเหตุ (There is no effect without cause.) ดังนั้นจึงไม่มีการเคลื่อนที่โดยปราศจากแรงกระทำ ความเร็วของการเคลื่อนที่จึงแปรผันตามแรงกระทำ เมื่อวัตถุตกจากที่สูง แรงที่กระทำคือน้ำหนักที่ดึงดูดลงข้างล่าง ดังนั้นความเร็วจึงแปรผันตามน้ำหนักวัตถุที่หนักกว่าจึงตกเร็วกว่า ซึ่งเมื่อฟังดูก็เข้าใจได้ว่าเหตุผลเสียทีเดียว แต่ปราชญ์ก็ยังรู้พลัง ทฤษฎีนี้มีจุดผิดพลาดสำคัญตรงที่ไม่มีแนวคิดในเรื่องของความเร่งอยู่ แต่ทว่าจุดที่ผิดพลาดที่สุดก็คือ มันเป็นทฤษฎีที่ไม่ถูกยืนยันด้วยผลการทดลอง เป็นที่น่าฉงนว่าเหตุใดนักคิดที่ยิ่งใหญ่อย่างอริสโตเติลจึงผิดพลาดเช่นนั้น ทั้งๆ ที่การทดลองง่ายๆ เพียงแค่ปล่อยก้อนหินที่น้ำหนักต่างกันสักสองเท่าลงมาจากหอคองก็จะทำให้เห็นความไม่ถูกต้องของทฤษฎีนั้นได้ทันที ดังที่กาลิเลโอได้กล่าวไว้ในแบบประชิดประชันนิจา ในรูปของบทสนทนาระหว่างชาวอิตาลีกับซิมพลิซิโอในหนังสือ “บทสนทนาเกี่ยวกับวิทยาศาสตร์ใหม่สองแขนง (Discourses on Two New Sciences)” ซึ่งตีพิมพ์ครั้งแรกในประเทศเนเธอร์แลนด์

ซัลวาทดี : เราสงสัยเป็นอย่างยิ่งว่าอริสโตเติลได้เคยทดลองดูว่ามันจริงหรือไม่ว่าก้อนหินสองก้อน ก้อนหนึ่งหนักกว่าอีกก้อนหนึ่งสิบเท่า หากปล่อยให้ตกลงมาพร้อมกัน จากความสูงสัก 100 คิวบิต* จะตกด้วยความเร็วที่ต่างกันขนาดที่ว่าเมื่อก้อนที่หนักกว่าตกถึงพื้น อีกก้อนหนึ่งจะยังตกมาไม่เกิน 10 คิวบิต

ซิมพลิซิโอ : ถ้าพูดที่เขาใช้น่าจะถือว่าเขาได้ทำการทดลองแล้ว เพราะเขากล่าวว่า “เราเห็นว่าก้อนที่หนักกว่า...” ซึ่งคำว่า “เห็น” นั้นแสดงว่าเขาได้ทำการทดลองแล้ว

ซัลวาทดี : แต่เราได้ทดสอบแล้ว และเรายืนยันกับท่านได้ว่าลูกปืนใหญ่ที่หนักสักร้อยหรือสองร้อยปอนด์ หรือมากกว่านั้น จะไม่ตกถึงพื้นนำหน้าลูกปืนเล็กที่หนักครึ่งปอนด์แม้เพียงสักลิบหนึ่ง หากทั้งสองถูกปล่อยลงมาจากความสูงสัก 200 คิวบิต

* คิวบิต เป็นหน่วยวัดโบราณ เทียบเท่าระยะประมาณ 17-22 นิ้ว

ในความเป็นจริงนั้น ได้มีผู้ทำการทดสอบทฤษฎีนี้ของอริสโตเติลมาแล้วหลายครั้งก่อนหน้ากาลิเลโอ และผลที่ได้ทุกครั้งก็แสดงว่าอริสโตเติลคิดผิด แต่จะว่าไปแล้ว เราก็ไม่อาจตำหนิอริสโตเติลได้ เพราะอริสโตเติลเป็นนักทฤษฎี หาใช่ นักทดลอง ผู้ที่คิดโดยไม่ทดลองยังไม่น่าถูกตำหนิเท่าผู้ที่เชื่อโดยไม่คิด ปัจจุบันเรา

(ยกเว้นนักศึกษาในห้องเรียนวิชาฟิสิกส์ 1) รู้ว่าวัตถุที่หนักกว่าไม่ได้ตกเร็วกว่า และผู้ที่ทำให้เราได้คิดก็คือกาลิเลโอ

กาลิเลโอเป็นแบบอย่างของนักวิทยาศาสตร์ที่น่าเลื่อมใส เขาไม่เพียงเชื่อในความจริงที่พิสูจน์ได้ และเชื่อในการใช้เหตุผลเพื่อทำความเข้าใจความจริงเท่านั้น เขายังมีคุณสมบัติที่สำคัญอีกอย่างที่คุณเหมือนจะขัดแย้งกับสันดานของสิ่งมีชีวิตที่เรียกว่ามนุษย์อย่างเรา นั่นคือความสามารถในการตรวจสอบความคิดของตนเอง และสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงความคิดของตนเองเมื่อรู้ว่ามันไม่ถูกต้อง ในช่วงต้น เมื่อกาลิเลโอเริ่มศึกษาเรื่องการตกของวัตถุนั้นเขาเสนอทฤษฎีทำนองเดียวกับของอริสโตเติลนั่นคือวัตถุตกด้วยความเร็วคงที่ เขาทำการทดลองเพื่อพิสูจน์ทฤษฎีนั้น ซึ่งผลปรากฏว่าผลการทดลองไม่เป็นไปตามทฤษฎี กาลิเลโอเขียนไว้ในบันทึกชื่อ “เกี่ยวกับการเคลื่อนที่ (De Motu หรือ On Motion)” ถึงผลการทดลองนี้ว่า “ในช่วงเริ่มต้นนั้น ก่อนที่เบาจะเคลื่อนที่นำหน้าก้อนที่หนักกว่า จากนั้นก้อนที่หนักกว่าแซงก้อนที่เบาและตกถึงพื้นก่อนเล็กน้อย” นั่นยังทำให้กาลิเลโอคิดว่าวัตถุที่เบากว่าอาจจะตกเร็วกว่า หากไม่มีแรงต้านอากาศ ปัจจุบันเรารู้ว่าน่าจะมีผลผิดพลาดเกิดขึ้นในการทดลองนั้น กฎของนิวตันบอกเราว่าวัตถุเคลื่อนที่ด้วยความเร่งที่แปรผันตามแรงสุทธิ ซึ่งในกรณีนี้ก็คือผลต่างระหว่างน้ำหนักของวัตถุกับแรงต้านอากาศ หากเราลองพิจารณาวัตถุทรงกลมสองก้อนที่ทำจากวัสดุเดียวกันแต่ขนาดต่างกัน เราพบว่าแรงต้านอากาศนั้นเพิ่มขึ้นตามพื้นที่ผิวซึ่งแปรตามรัศมียกกำลังสอง ในขณะที่น้ำหนักวัตถุนั้นแปรตามปริมาตรซึ่งเพิ่มขึ้นตามรัศมียกกำลังสาม ดังนั้นในช่วงต้นของการตก วัตถุก้อนที่โตกว่าจะตกด้วยความเร่งที่มากกว่าเสมอ และเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น แรงต้านอากาศก็เพิ่มขึ้น จนถึงจุดที่แรงต้านอากาศเท่ากับน้ำหนัก วัตถุก็จะตกด้วยความเร็วคงที่ ดังนั้นจะไม่มีช่วงไหนที่วัตถุก้อนที่เบากว่าตกนำหน้าก้อนที่หนักกว่า ข้อสันนิษฐานเกี่ยวกับความผิดพลาดของผลการทดลองในบันทึกของกาลิเลโอก็คือ ขณะที่ปล่อยวัตถุให้ตกลงมานั้น วัตถุก้อนโตถูกกำไว้แน่นกว่า และถูกปล่อยลงมาถึงก่อนที่เล็กกว่าเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม กาลิเลโอใช้เวลาสี่สิบปีหลังจากนั้น ศึกษาปรับปรุงการทดลอง และใช้เหตุผลกับมันจนในที่สุดก็สามารถบรรลุความเข้าใจในการตกของวัตถุที่ใครก็ไม่สามารถแย้งได้ ยิ่งไปกว่านั้นกาลิเลโอยังเป็นผู้วางแนวคิดเรื่องการตกในสุญญากาศ และการแยกผลของแรงต้านอากาศออกไปจากการเคลื่อนที่

น่าเสียดายที่กาลิเลโอเกิดหลังอริสโตเติลกว่าสองพันปี เพราะอริสโตเติลนั้น ถึงแม้จะมีคำสอนที่ผิดบ้าง แต่อริสโตเติลก็เป็นนักคิดที่เชื่อในเหตุผล ดังคำกล่าวที่เขากล่าวถึงเพลโตผู้เป็นอาจารย์ว่า

“เพลโตนั่นเป็นที่รักยิ่งของข้าพเจ้า แต่ที่ข้าพเจ้ารักยิ่งกว่าคือความจริง”

หากอริสโตเติลได้รู้ถึงการทดลอง และการใช้เหตุผลของกาลิเลโอเข้าก็จะต้องคล้อยตามเช่นกัน กาลิเลโอไม่เพียงทำการทดลองมากมายเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ต่างๆ เขายังปรับปรุงอุปกรณ์ และเทคนิคการทดลองของตนเองอยู่เสมอเพื่อให้ได้สิ่งที่นักศึกษาศรีอยุธยาเอกฟิสิกส์หลายคนในปัจจุบันไม่ค่อยรู้จัก นั่นคือ “ผลการทดลองที่เชื่อถือได้” จากการเรียนรู้ความผิดพลาดที่ผ่านมา กาลิเลโอได้ประดิษฐ์การทดลองเรื่องการตกของวัตถุโดยใช้ลูกทองเหลืองกลมกลิ้งลงรางที่ปูพื้นด้วยหนังเรียบขนาดกว้างหนึ่งนิ้วที่เขาวางไว้บนแผ่นไม้ยาว 12 หลาที่ทำเป็นพื้นเอียง เพื่อให้การตกนั้น “ช้าลง” และเขาจับเวลาการตกโดยใช้ถังใส่น้ำที่มีช่องน้ำไหลเล็กๆ ที่ก้นถัง และวัดช่วงเวลาโดยการชั่งน้ำหนักน้ำที่ไหลออกจากถัง หลังจากทำการทดลองกว่าร้อยครั้ง กาลิเลโอพบว่าระยะทางของการเคลื่อนที่นั้นแปรตามระยะเวลายกกำลังสอง และนั่นถูกยืนยันด้วยแคลคูลัสของนิวตันในอีกกว่าร้อยปีต่อมา !!

การใช้พื้นเอียงในการทดลองของกาลิเลโอนั้น นอกจากจะแสดงอัจฉริยภาพในเรื่องเทคนิคการทดลองแล้ว ยังบรรจุการค้นพบหลักการสำคัญทางฟิสิกส์ คือเรื่องของเวกเตอร์และการแยกการเคลื่อนที่ออกตามแนวแกน กาลิเลโอเป็นคนแรกที่แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนที่ในสองแกนนั้นแยกอิสระจากกัน และยังเป็นคนแรกที่แสดงให้เห็นว่าเส้นทางการเคลื่อนที่ของโปรเจกไทล์นั้นเป็นพาราโบลา ตัวละครที่ชื่อซาเกรโด ในบทสนทนาของกาลิเลโอกล่าวเกี่ยวกับเรื่องนี้ว่า

ซาเกรโด : มันแน่นอนว่าแนวคิดนี้เป็นแนวคิดที่ใหม่และฉลาดหลักแหลมมาก มันตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่า การเคลื่อนที่ในแนวราบนั้นเป็นสิ่งที่คงที่ และในเวลาเดียวกันนั้น การเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง ยังเป็นไปตามธรรมชาติด้วยตัวของมันเองโดยแปรผันตามกำลังสองของเวลา และการเคลื่อนที่ทั้งสองนั้นผสมกัน แต่ไม่รบกวน ไม่เปลี่ยนแปลง ไม่ขัดขวางกันและกัน...มันช่างเป็นพฤติกรรมที่ยากจะเข้าใจสำหรับเราและในความเป็นจริงแล้ว อย่าว่าแต่ผู้คนในสมัยของกาลิเลโอเลย แนวคิดเรื่องเวกเตอร์และการ

แยกการเคลื่อนที่ออกเป็นแนวแกนนั้น ยังเป็นสิ่งที่ยากจะทำความเข้าใจแม้สำหรับคนในสมัยปัจจุบันของเรา

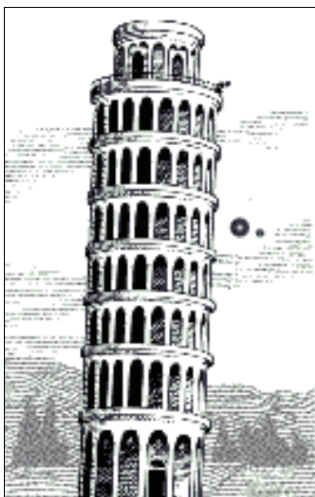
การทดลองอันน่าทึ่ง

การทดลองของกาลิเลโอที่ผู้คนปัจจุบันรู้จักกันดีที่สุด คือการทดลองเรื่องการตกของวัตถุที่หอเอนเมืองปิซา ว่ากันว่ากาลิเลโอขึ้นไปบนหอเอนแล้วทิ้งก้อนหินสองก้อนที่ขนาดต่างกันลงมาต่อหน้าคณาจารย์และนักศึกษาของมหาวิทยาลัยปิซา และทุกคนก็ได้เห็นว่าหินสองก้อนตกลงพื้นพร้อมกัน สำหรับนักฟิสิกส์ตัวเล็กๆ ในปัจจุบันแล้ว มโนภาพของเหตุการณ์วันนั้นมันช่างดูยิ่งใหญ่และน่าทึ่งเสียเหลือเกิน น่าทึ่งเสียจนทำให้นักศึกษาฟิสิกส์บ้านนอกคันธนูถ่อไปถึงเมืองปิซาเพียงเพื่อได้ขึ้นมองหอเอนหลังดาพร่มจินตนาการภาพบรรยากาศของเหตุการณ์เมื่อห้าศตวรรษที่แล้ว ไม่มีใครรู้ว่าการทดลองวันนั้นเกิดขึ้นจริงหรือไม่ เหตุการณ์การทดลองที่หอเอนเมืองปิซานั้นถูกเล่าไว้โดยนักศึกษาคณะหนึ่งของกาลิเลโอที่ชื่อวีวีอานี แต่ไม่มีอยู่ในหนังสือหรือบันทึกใดๆ ของกาลิเลโอเองเลย นักประวัติศาสตร์ส่วนใหญ่เชื่อว่าเหตุการณ์วันนั้นไม่ได้เกิดขึ้นจริง



รูปที่ 3 หอเอนเมืองปิซา ที่โด่งดังเพราะกาลิเลโอ

แต่มีการทดลองอีกชิ้นหนึ่งในเรื่องการตกของวัตถุที่กาลิเลโอเองได้บันทึกไว้ มันเป็นการทดลองที่น่าทึ่งเสียยิ่งกว่าการทดลองที่หอเอนเมืองปิซา มันเป็นการทดลองที่นอกจากจะหักล้างทฤษฎีของอริสโตเติลโดยไร้ข้อโต้แย้งใดๆ แล้ว ยังเป็นการทดลองที่แสดงให้เห็นพลังของการใช้เหตุผลของมนุษย์ เป็นการทดลองที่ไขหนึ่งในความลับที่สำคัญที่สุดของจักรวาลโดยใช้เพียงห้องทดลองเล็กๆ ที่เรียกว่าสมอง เครื่องมือก็เป็นเพียงสิ่งง่ายๆ ที่เราเรียกว่าตรรกะ มันเป็นการทดลองที่เรียกว่า “การทดลองด้วยความคิด” หรือ “thought experiment” ชิ้นแรกของโลก



รูปที่ 4 การทดลองที่หอเอนเมืองปิซา

การทดลองด้วยความคิดของกาลิเลโอ ในรูปแบบบทสนทนา ของคุณครูสุภา บักจ้อย และบักเจ็ด เป็นดังนี้

ครูสุภา : เราลองตั้งสมมติฐานว่า ในสุญญากาศ วัตถุที่หนักกว่าตกเร็วกว่าวัตถุที่เบากว่าตามทฤษฎีของอริสโตเติล ทีนี้เรามาลองพิจารณาการตกของวัตถุสองก้อนที่เป็นวัสดุเดียวกัน รูปร่างเหมือนกัน สมมติว่าก้อนใหญ่หนักสองเท่าของก้อนเล็ก และปล่อยให้ทั้งสองก้อนตกลงมาพร้อมกันจากความสูงเดียวกัน สมมติว่าก้อนใหญ่ใช้เวลาสิบหน่วยในการตกถึงพื้น ดังนั้น ตามสมมติฐานของเราก้อนเล็กต้องใช้เวลามากกว่าสิบหน่วย เช่น ใช้เวลาสี่สิบหน่วยในการตกถึงพื้น

บักจ้อย : ช่วย งง แท้เนื้อ เว่าให้จ้อยเห็นภาพหน่อยเน

บักเจ็ด : เอ็งนี่โง่งแท้เนื้อ เขาบอกว่า ปั่นก้อนดินเหนียวมาสองก้อน ก้อนหนึ่งเท่ากำปั้น อีกก้อนเท่าหัวแม่มือ แล้วปั่นขึ้นไปปล่อยลงมาจากบนกิ่งต้นบักขาม สมมติว่าก้อนเท่ากำปั้นใช้เวลาสิบอึดใจตกถึงพื้น ก้อนเท่าหัวแม่มือใช้เวลาสี่สิบอึดใจตกถึงพื้น

ครูสุภา : ทีนี้เราลองมาพิจารณาว่ามีวัตถุชิ้นที่สาม ซึ่งทำจากการนำวัตถุก้อนใหญ่กับก้อนเล็กข้างต้นนั้นมาผูกติดกัน แล้วปล่อยลงมาจากความสูงเดียวกัน พร้อมกันกับสองก้อนแรก จะเกิดอะไรขึ้น

บักเจ็ด : เขาบอกว่าไปขุดดินเหนียวมาอีก ปั่นก้อนหนึ่งเท่ากำปั้น อีกก้อนเท่าหัวแม่มือ แล้วเอามาแปะติดกัน คราวนี้ปั่นขึ้นต้นบักขามอีกที เอาก้อนหินสามก้อน คือก้อนเท่าหัวแม่มือ ก้อนเท่ากำปั้น และก้อนที่เท่าหัวแม่มือกับเท่ากำปั้นแปะติดกัน ปล่อยลงมาพร้อมกัน เขาถามว่าเกิดอีหยัง

บักจ้อย : ง่ายแท้ ถ้าก้อนใหญ่ตกเร็ว ก้อนเล็กตกช้า เอาก้อนใหญ่แปะติดกับก้อนเล็ก ก้อนเล็กก็ต้องถ่วงก้อนใหญ่ ก้อนใหญ่ก็ต้องดึงก้อนเล็ก ก้อนที่แปะติดกันก็ต้องตกเร็วกว่าก้อนเล็กก้อนเดียวแต่ช้ากว่าก้อนใหญ่ก้อนเดียว คือก้อนที่สามใช้เวลาตกถึงพื้นมากกว่าสิบอึดใจ แต่น้อยกว่าสี่สิบอึดใจ

บักเจ็ด : แต่ก้อนที่แปะติดกันมันหนักกว่าก้อนใหญ่ก้อนเดียว ตามสมมติฐานแล้วมันก็ต้องตกเร็วที่สุดสิ ต้องใช้เวลาตกน้อยกว่าสิบอึดใจ

ครูสุภา : ถูกทั้งคู่แหละจ๊ะ

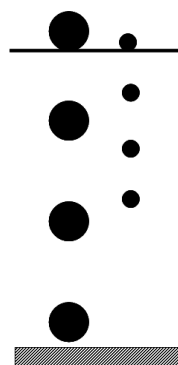
บักจ้อย : แล้วมันจะเป็นไปได้หยัง ก้อนที่สามมันจะใช้เวลาตกมากกว่าสิบอึดใจและน้อยกว่าสิบอึดใจได้หยัง

บักเจ็ด : มันเป็นไปได้ไม่ได้ หรือว่าสมมติฐานผิด

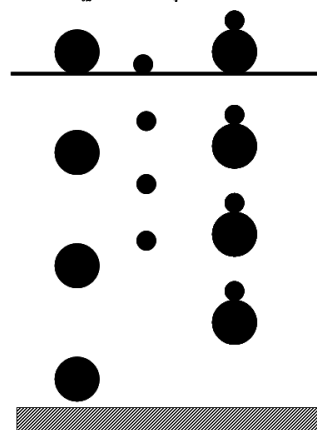
ครูสุภา : แล้วสมมติฐานที่ถูกคืออะไร

บักจ้อย : ถ้าตั้งสมมติฐานให้ก้อนเบาตกเร็วกว่า มันก็ออกมาเหมือนเดิมอยู่ดี

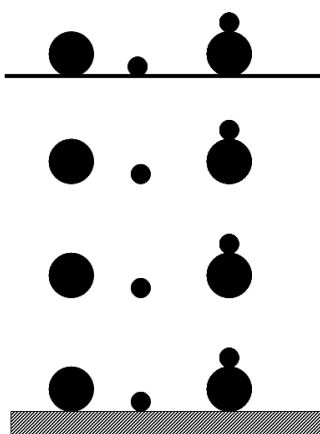
บักเจ็ด : งั้นก็มีทางออกเดียว คือทั้งก้อนหนักก้อนเบาตกเร็วเท่ากัน



รูปที่ 5 สมมติฐาน: วัตถุที่หนักกว่าตกเร็วกว่า



รูปที่ 6 หากสมมติฐานถูก เกิดความเป็นไปได้สองอย่างที่ขัดแย้งกัน



รูปที่ 7 ทางออกเดียวคือความเร็วของการตก ไม่ขึ้นกับน้ำหนัก

นั่นเป็นการทดลองด้วยความคิดของกาลิเลโอ ซึ่งบันทึกไว้ใน “บทสนทนาเกี่ยวกับวิทยาศาสตร์ใหม่สองแขนง (Discourses on Two New Sciences)” เป็นการทดลองที่ทำให้กาลิเลโอมั่นใจว่าทฤษฎีของอริสโตเติลนั้นผิดอย่างแน่นอน และได้ข้อสรุปว่าความเร็วในการตกของวัตถุในสุญญากาศนั้นไม่ขึ้นกับน้ำหนัก ความจริงนี้ได้รับการยืนยันด้วยคณิตศาสตร์ในอีกศตวรรษถัดมา

ในช่วงปลายของชีวิตนั้นกาลิเลโอถูกกักบริเวณเนื่องจากการทดลองของเขาที่ยืนยันทฤษฎีของโคเปอร์นิคัสที่ว่าโลกหมุนรอบดวงอาทิตย์ และแย้งความเชื่อของคริสตจักรในสมัยนั้น ที่สอนว่าโลกเป็นศูนย์กลางของทุกสิ่ง เขาป่วยหนักและตาบอดก่อนจะเสียชีวิตในวันที่ 8 มกราคม พ.ศ.2185 ตรงกับรัชสมัยสมเด็จพระเจ้าปราสาททองของกรุงศรีอยุธยา และในปีที่กาลิเลโอเสียชีวิตนั่นเอง ยังมีอีกท่านหนึ่งก็ถือกำเนิดขึ้น เขาเป็นผู้ที่จะยืนยันผลการทดลองของกาลิเลโอด้วยเครื่องมือทางคณิตศาสตร์ อันมหัศจรรย์ที่เราเรียกว่าแคลคูลัส และเป็นผู้ที่บอกให้เราได้ว่าความเร่งของการตกของวัตถุที่กาลิเลโอค้นพบนั้นคืออะไร ยังมีท่านนี้ชื่อว่าไอแซ็ค นิวตัน

กาลิเลโอถูกยกย่องว่าเป็นผู้วางรากฐานฟิสิกส์ทดลองให้กับโลกนี้ เขาตั้งสมมติฐาน ทำการทดลอง ปรับเปลี่ยนสมมติฐาน ปรับปรุงการทดลอง จนกว่าจะได้ความจริงที่ไร้ข้อโต้แย้ง เขาไม่ปิดกั้นความคิดของตนเองด้วยความเชื่อใดๆ เขาเป็นผู้ที่เชื่อมั่นในความจริงที่พิสูจน์ได้ และเชื่อว่าจักรวาลนี้เป็นสิ่งที่มีระเบียบ มีเหตุผล และความจริงทุกอย่างในจักรวาลนี้เป็นสิ่งที่ทำ

ความเข้าใจได้ ความเป็นนักฟิสิกส์ของเขาสะท้อนอยู่ในคำพูดที่เขากล่าวไว้ในบันทึกชื่อ “นักวิเคราะห์ (The Assayer)” ว่า

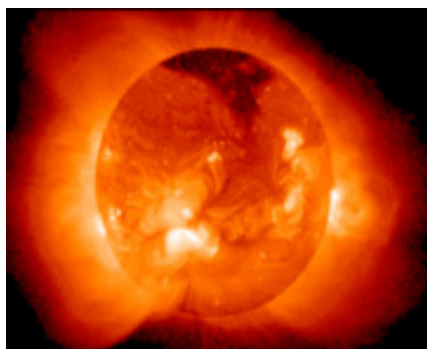
“ปรัชญาถูกเขียนไว้ในหนังสือเล่มมหัพวารที่เรียกว่าจักรวาล มันถูกเขียนด้วยภาษาคณิตศาสตร์ ตัวอักษรที่ใช้คือสามเหลี่ยม วงกลม และรูปทรงเรขาคณิตต่างๆ ...”

เอกสารอ้างอิง

- [1] The Galileo Project, Rice University.
- [2] “Thus Spoke Galileo”, A. Frova and M. Marenzana, Oxford University press.
- [3] “A History of Physics”, F. Cajori, Dover Publication Inc.
- [4] “Dialogues Concerning Two New Sciences”, Galileo Galilei, Translated By H. Crew and A. de Salvio, William Andrew Publishing.

Hot Fusion – ฤา เป็นเพียงความฝัน

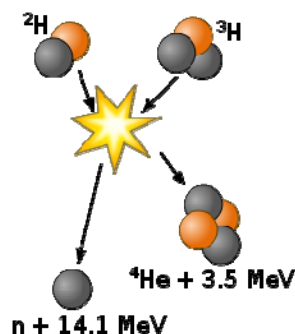
ชัย ไทเกอร์¹



EPISODE I

ครั้งหนึ่งนานมาแล้ว.....

ในอดีตกาลอันไกลโพ้น ฟิวชันและฟิชชันที่เกิดขึ้นในกระบวนการบิกแบงเป็นจุดเริ่มต้นแห่งการเกิดธาตุต่างๆ ในจักรวาล และกระบวนการเหล่านี้ก็ยังดำเนินอย่างต่อเนื่อง อย่างน้อยก็บนดวงอาทิตย์ของเรา ปฏิกิริยาของฟิวชันอันเป็นการหลอมตัวของธาตุไฮโดรเจนเป็นธาตุหนัก แล้วให้พลังงานมหาศาลออกมา เป็นต้นกำเนิดของพลังงานบนโลกทั้งสิ้น ในช่วงสมัยสงครามโลกครั้งที่สอง การค้นพบปฏิกิริยาฟิชชันได้นำไปสู่การพัฒนาระเบิดปรมาณูและการประยุกต์ใช้พลังงานนิวเคลียร์แบบฟิชชันในทางสันติ แล้วต่อมาปฏิกิริยาฟิวชันก็นำไปสู่การพัฒนาระเบิดไฮโดรเจนที่มีอำนาจรุนแรงอย่างยิ่ง นักวิทยาศาสตร์ดีดลูกคิด แล้วคำนวณว่า แจ๋ว! เราสมการนิวเคลียร์ฟิวชันเข้าร่วมกับสมการของไอสไตน์ พบว่าสามารถเปลี่ยนมวลของไฮโดรเจน (ดิวเทอเรียมหรือทริเทียม) ให้เป็นพลังงานมหาศาล มากกว่าปฏิกิริยาฟิชชันหลายเท่า ก็ในเมื่อทำระเบิดไฮโดรเจนได้ ทำไมจะหาวิธีควบคุมให้มันปลดปล่อยพลังงานอย่างกระฉูดกระฉ่อนไม่ได้ น่าจะดีไม่น้อย จะได้แก้ปัญหาน้ำมัน ก๊าซ ถ่านหิน ที่กำลังจะหมดไป ไม่มีกากกัมมันตรังสีมาก หรือจะได้ลดปัญหาหมอกควัน (สมัยนั้นเขายังไม่ห่อคำว่า “โลกร้อน”) สารพัดประโยชน์ เกิดประโยชน์ที่ว่า “แล้วเราจะได้มีพลังงานใช้ชั่ววันรัตนกาล”

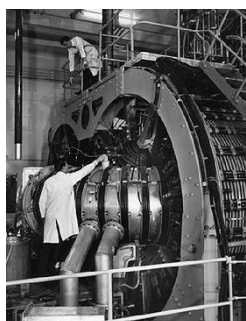


รูปที่ 1 แผนภาพแสดงปฏิกิริยาที่เป็นไปได้มากที่สุดระหว่างดิวเทอเรียมกับทริเทียม

ว่าแล้วมหาอำนาจคือ สหรัฐอเมริกา อังกฤษ รัสเซีย ก็ลุยกันขงใหญ่ เริ่มการวิจัยแบบลับ ลวง พราง เวลาประชุมวิชาการระดับ IAEA แต่ละครั้งก็มูมมิบไม่ค่อยยอมแบไต๋ง่าย ๆ ที่อังกฤษงานวิจัยในช่วง ค.ศ. 1940 - 1950 เกิดขึ้นที่ Harwell และ Aldermaston โดยเริ่มวิจัยในเครื่องมือที่เรียกว่า ZETA (ย่อมาจาก Zero Energy Toroidal Assembly) อันเป็นเครื่องมือที่กำเนิดพลาสมาในรูปทรงทอรรอยด์ แล้วควบคุมด้วยสนามแม่เหล็กภายนอก ส่วนที่อเมริกาก็เริ่มแบบกำปั้นทุบดิน เรียกชื่อเสียว่า Columbus จัดเป็นเครื่องมือประเภท Z-pinch คือปลดปล่อยพลังงานจากตัวเก็บประจุหรือคาปาซิเตอร์ขนาดใหญ่อย่างรวดเร็วผ่านเข้าไปในพลาสมา คราวนี้ทางตำราอีกทีก็จะร้องอ้อว่าพลังงานไฟฟ้า $\frac{1}{2} C V^2 = \frac{1}{2} L I^2$ หาวิธีอัดประจุด้วยไฟฟ้าแรงสูงระดับเมกะโวลต์ แล้วให้ค่าเหนี่ยวนำ ($L = \text{Inductance}$) น้อยๆ ก็จะได้กระแสไฟฟ้าระดับเมกะแอมป์! จะเกิดกระแสไฟฟ้ามหาศาลภายในเสี้ยวไมโครวินาที ซึ่งจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบกระแส (ตามกฎของแอมแปร์) กระแสไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็กจะทำอันตรกิริยาเกิดแรงแม่เหล็กอีกต่อหนึ่ง (เรียกว่าแรงลอเรนทซ์ - Lorentz force) บีบอัดพลาสมาให้เกิดความร้อนสูง หวังว่าที่ 100 ล้านองศาเคลวิน เชื้อเพลิงพลาสมาที่

¹ chaivitya@gmail.com

เป็นคิวที่เตรียมและเตรียมจะหลอมรวมกัน เกิดปฏิกิริยาฟิวชันให้พลังงานและนิวตรอนออกมา อย่างดีนะครับ ต้องมีนิวตรอนออกมาจึงจะเป็นของแท้ สมัยโน้นดีใจกันใหญ่ว่าได้ความร้อนสูง วัตนิวตรอนก็เจอ แกรมมีโอออน มีรังสี (รวมทั้งรังสีซินโครตรอนซะด้วย) สารพัด อนิจจา พลังงานที่ได้้น้อยกว่าที่ป้อนให้ ก็แปลว่าขาดทุน แกรมเกิดแวนเดีว กระพริบตายังไม่ทัน พลาสมาก็ไม่เสถียร เกิดการรั่วไหล เอาละ ต่อมาก็เลยคิดดัดแปลงท่อพลาสมา รูปทรงกระบอกให้ขดเป็นวงกลม ที่เรียกว่าทอรอยด์อีกนั่นแหละ แกรมเอาสนามแม่เหล็กสารพัดรูปแบบ ทั้งวงซ่าย วงขวา รอบแกนเล็ก แกนใหญ่ เกิดรูปลักษณะของเครื่องมือฉบับสืบบแบบ (พวกตระกูล Toroidal pinch)



รูปที่ 2 ZETA อันเก่าแก่



รูปที่ 3 ระเบิดไฮโดรเจน—ฟิวชันของแท้

จนถึงปี 1950 สงครามเย็นก็เริ่มเย็นลง นักฟิสิกส์รัสเซียที่ชื่อ Kurchatov ไปปาฐกถาที่อังกฤษเรื่อง The Possibility of Producing Thermonuclear Reactions in a Gas Discharge ถึงตอนนั้น อังกฤษ รัสเซีย อเมริกา จึงยอมชูกร่วมมือกันวิจัย แต่ก็ยังมูบมิบกันอยู่ดี แกรมยังสร้างลอกแบบของรัสเซียที่เรียกว่าโทคามัก (ไม่ใช่โทมาฮอว์ค) ที่ออกแบบโดย Artsimovich (น่าเสียดายที่ไม่ได้รางวัลโนเบล) อังกฤษเริ่มสร้างเครื่องมือขนาดใหญ่ที่

Culham ให้ชื่อว่า JET ย่อมาจากคำว่า Joint European Torus เพราะไปขอตั้งคั่นจากประชาคมยุโรปมาลงขันวิจัยกัน ทำไมละครับ มันแพงและมันยาก จำได้ว่าเครื่องมือใหญ่ขนาดตึกสูง 5-6 ชั้นนี้เปิดโดยสมเด็จพระราชินีอลิซาเบธที่ 2 ขณะนี้ก็ยังวิจัยกันอยู่ ท่อพลาสมาที่ใหญ่ขนาดคนเข้าไปเดินข้างในได้ ส่วนที่อเมริกามีการสร้างเครื่องมือวิจัยฟิวชันสารพัดแบบ สารพัดชื่อ ที่ต่างๆ ได้แก่ Scyllac, Doublet, TFTR (Toroidal Fusion Test Reactor) อันหลังนี้จัดว่าเป็นพระเอกเพราะมีขนาดใหญ่ สร้างที่ Princeton University ชื่อเท่ แต่ในที่สุดก็เลิกราไป

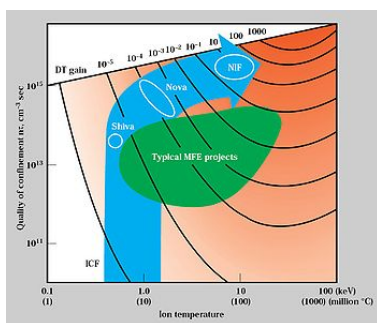


รูปที่ 4 แสตมป์รัสเซียฉลองโทคามัก ปี 1987

ในช่วง 1980 ฟิวชันฮอตมาก หลายประเทศเริ่มลงแรงวิจัยกันใหญ่ ที่ญี่ปุ่นมีงานวิจัยทั้งฟิวชันและพลาสมาที่ Nagoya University, JT-60 ที่สถาบันแห่งชาติ แกรมใช้วิธีลัดข้ามทะเลไปวิจัยที่ Gulf Atomic อเมริกาโน่น ที่จีนก็วิจัย Belt pinch โดยใช้เทคโนโลยีรัสเซีย ที่ Academic Sinica ปักกิ่ง และโทคามักที่ Heifei ในเยอรมันก็วิจัยฟิวชันควบคุมด้วยสนามแม่เหล็กแบบต่างไปจากโทคามัก (เรียกว่า Stellarator, TEXTOR) ที่ Max Planck Institute of Plasma Physics ในเมืองมิวนิก ในเนเธอร์แลนด์ก็วิจัยพวก Screw pinch ที่ฝรั่งเศสสร้าง Tora Supra (แปลว่าเครื่องมือฟิวชันแบบทอรอยด์ ที่ใช้สนามแม่เหล็กจากขดลวดตัวนำยิ่งยวด Ti-Nb) ที่ Cadarache จำชื่อนี้ให้ดีเพราะนี่คือที่ตั้งของเครื่องมือวิจัยสุดยอดรุ่นที่สามที่เรียกว่า ITER (International Toroidal Experimental Reactor) ที่แคนาดาที่มีการวิจัยในเครื่องมือชื่อว่า STOR ที่มหาวิทยาลัย Saskatchewan ส่วนเกาหลีก็มีโทคามัก และมีดังค์ไปลงขัน ITER กับเขาด้วย บราซิล อาร์เจนตินาก็วิจัยกับเขาด้วย ในอาเซียน มาเลเซียตั้งตัวรวมนักวิจัยประเภทด้อยดั่งค์ ทั้งอาเซียนและแอฟริกันวิจัยฟิสิกส์พื้นฐานของเครื่องมือขนาดเล็กที่เรียกว่าพลาสมาไฟกัส (Plasma

focus) ช่วงหลังนี้ นักวิจัยที่หนีจากหลักการใช้สนามแม่เหล็กควบคุมหันมาใช้ความเฉื่อยควบคุมพลาสมาเพราะได้มีการพัฒนาเลเซอร์กำลังสูงหลายแห่ง เรียกว่าวิจัยแบบ Inertial fusion ตัวอย่างเช่นที่ห้องปฏิบัติการขนาดใหญ่ในอเมริกา, มหาวิทยาลัย Rochester ในอเมริกา, มหาวิทยาลัย Osaka ในญี่ปุ่น ทำไปทำมาก็มีอุปสรรค มันคือว่า อันการคำนวณพลศาสตร์ ออกแบบเป่าเชื้อเพลิง (Pellet) และการบีบอัด เสาควบคุมด้วยลำแสงเลเซอร์นี้ช่างคล้ายกับการจำลองแบบอาวุธนิวเคลียร์เสียจริง พอช่วงหลัง ๆ งานวิจัยแบบนี้ก็เลยไม่ค่อยออกข่าว

ในช่วง 1980 - 1990 มีการวางแผนเป็นระบบมากขึ้น ไอ้ที่สร้างเครื่องมือวิจัยแปลกๆ ขอให้ได้ตีพิมพ์ก็ว่าไป (เรียกว่า Physics of devices) แต่ควรรวมหัวกันสร้างเครื่องมือขนาดใหญ่รวบรวมฟิสิกส์ ปัญหา ข้อมูลต่างๆ แล้วออกแบบสร้าง ITER ถ้าเวิร์ก ก็ออกแบบ DEMO (DEMONstration Power Plant) ต่อ ส่วนความฝันเดิมที่ว่าฟิวชันต้องสำเร็จในปี 2000 ก็เลื่อนเป็น 2010 เห็นว่าล่าสุดเลื่อนไป 2050



รูปที่ 5 พารามิเตอร์สำคัญของการเกิดปฏิกิริยาฟิวชันคือค่าควบคุม (Confinement) กับอุณหภูมิของไอออน จากภาพจะเห็นสถานการณ์การวิจัยเลเซอร์ฟิวชันที่เรียกชื่อว่า Shiva, Nova, NIF ส่วนฟิวชันที่ควบคุมด้วยสนามแม่เหล็กเรียกรวมว่า MFE เพื่อจะบรรลุเป้าหมายของปฏิกิริยา D-T ที่ระดับต่างๆ ค่าควบคุมต้องสูง และอุณหภูมิต้องถึง 100 - 1000 ล้านองศาเซลเซียส (ไปทางทิศลูกศร)

ในช่วงนี้ มีคนพยายามคิดฟิวชันในรูปแบบอื่น ถ้าไม่เอาร้อนก็เอาเย็นก็แล้วกัน เรียกว่า **Cold fusion** ทำเอาพวกฮอตฟิวชันตกใจกันใหญ่ เพราะกลัวตกงาน ทำไมละครับ ก็ Cold fusion ทำกันแค่ในหลอดแก้วทดลอง ใช้ขั้วโลหะในปฏิกิริยาลึกลับๆ พวกชุบไฟฟ้าทำนองนั้น แล้วยังวัดความร้อนได้สูง วัดนิวตรอนได้ด้วยตีพิมพ์ (วารสาร Nature นะครับ) ออกทีวี ทดลองซ้ำกันยกใหญ่

พวกปัญจวัคคี่ก็ออกมาเชียร์ จนห้องปฏิบัติการขนาดใหญ่ทำการพิสูจน์ให้เห็นจริง ในที่สุดก็เลิกร้างไป แต่ก็ยังมีการวิจัยอยู่บ้างภายใต้ชื่ออื่น (Condensed matter.....)

แล้วที่แล้มา สังคมโลกได้ประโยชน์อะไรบ้าง

ข้อ 1. บทเรียนราคาแพงครับ ว่างานวิจัยเป็นงานสากล ต้องสมานฉันท์วิจัย อย่ามูบมิบ อย่าเก่งคนเดียว จะไปผิตทางอเมริกา อังกฤษ หมาดั่งก็ไปหลายแต่เครื่องมือวิจัยก็ไม่สามารถสร้างอุณหภูมิที่สูงและเสถียรพอ จนกระทั่งทีมอังกฤษบนเครื่องมือ (ที่เรียกว่า Thomson scattering) ไปวัดค่าอุณหภูมิของไอออน (= Ion temperature อย่าง คำว่าอุณหภูมินี้ เทียบเท่าพลังงานจลน์ ถ้ายังสงสัยไปให้อ่านทฤษฎีจลน์ของก๊าซ) ในเครื่องโทคามัก T-3 (ตั้งชื่อแบบรดถึง) ของรัสเซียว่ามีอุณหภูมิสูงกว่าเครื่องมือแบบอื่นจริง ทุกประเทศจึงหันมาสร้างเครื่องมือแบบโทคามัก รัสเซียใจดีมาก ไม่เคยหวงหรือคิดค่าสิทธิบัตรสักกริบ ช่วงหลัง IAEA เข้ามาเป็นเจ้าภาพจัดประชุมฟิวชันระดับโลกให้มีการแลกเปลี่ยนงานวิจัย ทุกครั้งที่ประชุมจะมีการแจวไฮไลต์ แม้กระทั่งนักวิจัยจากประเทศด้อยสตาจค์ เช่น ไทย ก็เคยได้รับทุนให้ไปติดตามผลงานคนอื่นด้วย เขากลัวว่าเดี่ยวเราจะตกขบวนรถไฟ (ส่วนตารางเป็นเรื่องของเรา)

ข้อ 2. ได้ผลงานตีพิมพ์นานาชาติและสิทธิบัตรมหาศาล ยุคโน้น วารสารที่ดัง ๆ คือ Physics of Fluid ของอเมริกา, Plasma Physics ของเคมบริดจ์, Plasma Physics and Controlled Fusion ของ IAEA นักวิจัยมีงานทำ นักศึกษาก็ได้ Ph.D. มีตำราที่เกี่ยวข้องกับฟิวชันออกมามากกว่าสามสิบเรื่องเห็นจะได้ สำนักพิมพ์ก็ออกไดเติ้ลวารสารใหม่กันอีกสิบกว่าฉบับ ประชุมสัมมนา กันนับพันครั้งในทุกทวีป ยกเว้นอาร์คติก

ข้อ 3. สปีนออฟทางเทคโนโลยีครับ มีการพัฒนาขดลวดแม่เหล็ก ระบบทำความเย็นยิ่งยวด ระบบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ความถี่วิทยุ ไฟฟ้าแรงสูง เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ ไอออนบีมโซโลกราฟี โทโมกราฟี เครื่องวัดสเปกตรัม ตัวพาพาซิเตอร์ ตัวโซลิตสเตรเรคิไฟร์ เลเซอร์ ระบบออปติกส์ ระบบปั๊มสุญญากาศ ระบบคอมพิวเตอร์ควบคุม ระบบจัดจกการังสี ตัวโคลสตรอน (Klystron) แมกนีตรอน (Magnetron) ไจราตรอน (Gyratron) เทคนิคการวัดสารพันรูปแบบ ฯลฯ รวมทั้งการใช้คอมพิวเตอร์จำลองแบบ ที่ส่งต่อไปยังภาคอุตสาหกรรม และวิทยาศาสตร์แขนงอื่น

ข้อ 4. สปินออฟทางทหาร อย่างที่เล่ามาแล้วว่างานเลเซอร์ฟิวชันถูกมูบมิบ ถูกคลาสซิไฟด์ เทคนิคเล็กๆ หลายอย่างทางทหารก็ชอบเหมือนกัน ตัวอย่างเช่น ระบบจู่ระเบิดปฏิกิริยาหรือทริกเกอร์ช่างเหมือนกับการจุดชนวนระเบิดนิวเคลียร์ มีการห้ามขายอุปกรณ์บางอย่างจากอเมริกา เช่น คาปาซิเตอร์เก็บพลังงาน (Energy storage capacitor) จนกว่าได้รับอนุญาตจากเบื้องสูง และห้ามส่งต่อไปยัง จีน คิวบา ลิเบีย ซีเรีย....ทำนองนั้น

ข้อ 5. อา...สัจธรรมครับ

.....**CHANGE!**.....นักวิจัยฟิวชันเปลี่ยนหัวเรื่องวิจัยเร็วมากเพื่อความอยู่รอด เพื่ออีโก้ (Ego) บางคนก็รีบตีพิมพ์งานหรือวิเคราะห์งานผิดพลาดจนต้องมีวารสารประเภท Comments on Fusion คอยดักคอ แต่เท่าที่ทราบไม่มีใครถูกถอดถอนตำแหน่ง แบบนักวิจัยเกาหลีเรื่องโคลนนิง เคียวนั้นนักวิจัยฟิวชันเปลี่ยนไปเล่นวิจัยพลาสมาในอุตสาหกรรมกันเยอะ เพราะขอตั้งค้วิจัยได้ง่าย ถ้าขอวิจัยฟิวชันจะยากส์มาก ๆ ๆ

.....พระเจ้าไม่ให้อะไรฟรี ๆ (หรือ There is no free lunch) แปลว่า ทฤษฎีง่ายนิดเดียว แต่การทดลองนั้นยากยิ่งนัก จนนักฟิสิกส์ดังที่เคยทำงานในโครงการแมนฮัตตัน นามว่า William Parkins ให้ความเห็นในวารสาร Science แล้วขยายต่อโดย New

Scientist ฉบับ 9 มีนาคม 2006 ว่าวิจัยกันแล้ว 40 ปีหมดไปแล้ว 2 หมื่นล้านเหรียญ สรุปว่า “No future for fusion power” เขาตายไปก่อนที่คนอื่นจะรู้มเกลียง

.....งานวิจัยพื้นฐานทางพลาสมาฟิสิกส์นำไปสู่การประยุกต์ได้จริง ช่วงแรกที่มีการวิจัยเรื่องกาวพลาสมา (Plasma sheath) ในห้องปฏิบัติการมหาวิทยาลัย ไม่รู้วิจัยไปทำไม แต่ฟิวชันถูกเอาไปใช้และประมาณสิบปีให้หลัง อีตา Conrad นำมาประยุกต์ในเทคนิคการเคลือบผิวโดยฝังไอออน (Plasma immersion ion implantation) ปรากฏการณ์ดิสชาร์จในพลาสมาหลายแบบกลายเป็นเครื่องมือใช้เคลือบผิวที่เรียกว่า Sputter สกัดผิวเรียกว่า Etcher เคลือบผิวด้วยอาร์ก เรียกว่า Cathodic arc plasma deposition ทำความสะอาดผิวเรียกว่า Plasma cleaner ที่ใช้ในห้องทดลองวัสดุ และอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำ และยังมีตัวอย่างอื่นอีกมากมายได้หัวข้อเทคโนโลยีพลาสมาหรือ Industrial plasma processing

ขออ้อลาเพียงแค่นี้ก่อนครับ โปรดติดตาม **EPISODE II** ตอนต่อไป

หมายเหตุ: ขอบคุณ Wikipedia สำหรับภาพทั้งหมด

Pre-registration

To receive further announcement and more information, please visit SPC2010 website at www.thps.org/spc2010

Conference Venue

The SPC2010 will take place at River Kwai Village Hotel (<http://riverkwaivillagehotel.com>) located in Sai Yok, only 70 kilometers from the city of Kanchanaburi. River Kwai Village Hotel is the only luxurious jungle resort in Kanchanaburi surrounded by delightful nature with comfortable accommodations.



First Announcement and Call for Papers **Siam Physics Congress**

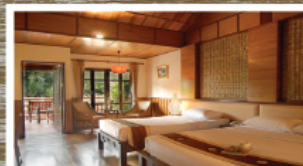
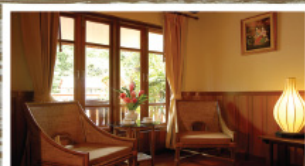
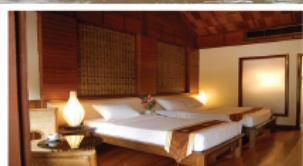
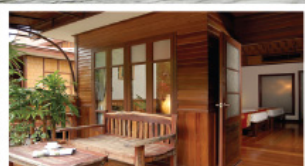
Physics for Creative Society

March 25 - 27 2010

(อ่านรายละเอียดเพิ่มเติมในปกหลังด้านใน)

Organized by

Thai Physics Society
Kasetsart University
Srinakharinwirot University
Ramkhamhaeng University
Thailand Center of Excellence in Physics
National Astronomical Research Institute of Thailand (Public Organization)



สมาคมฟิสิกส์ไทย

อาคารสุรพัฒน์ 3 ถนนมหาวิทยาลัย

ต. สุรนารี อ. เมือง

จ. นครราชสีมา 30000

ตู้ ปณ. 93 ปณจ. นครราชสีมา 30000

THAI PHYSICS SOCIETY

Surapat 3 Building, University Avenue

Tambon Suranaree, Muang District

Nakhon Ratchasima 30000

P.O. Box 93 Nakhon Ratchasima 30000

ชำระค่าฝากส่งเป็นรายเดือน

ใบอนุญาตเลขที่ 187/2552

ปท.จ. นครราชสีมา

สิ่งตีพิมพ์

หากไม่ถึงผู้รับ โปรดส่งคืนสมาคมฟิสิกส์ไทย