

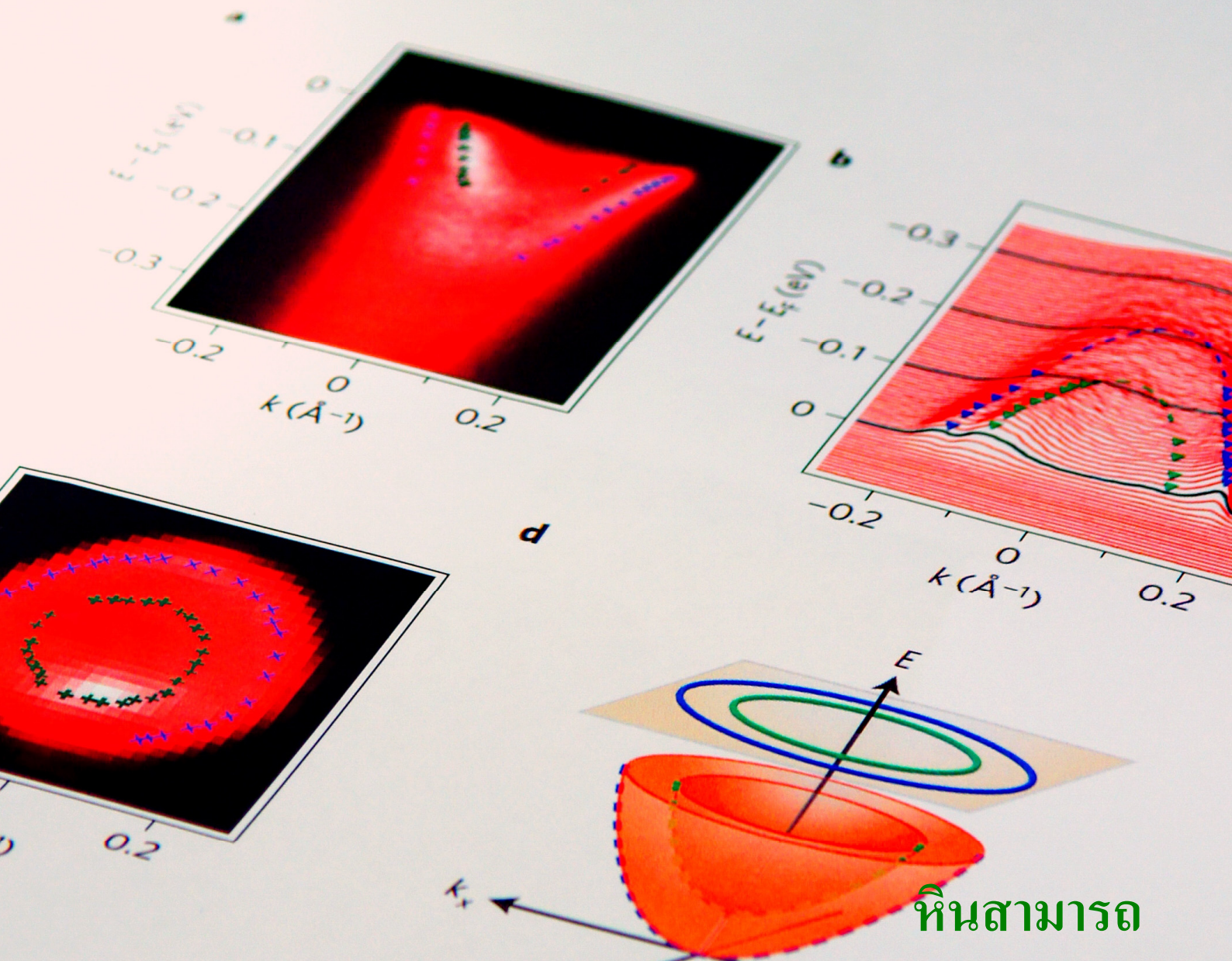
วารสารฟิสิกส์ไทย

Thai Journal of Physics

วารสารสำหรับผู้ที่รักและสนใจในแวดวงฟิสิกส์

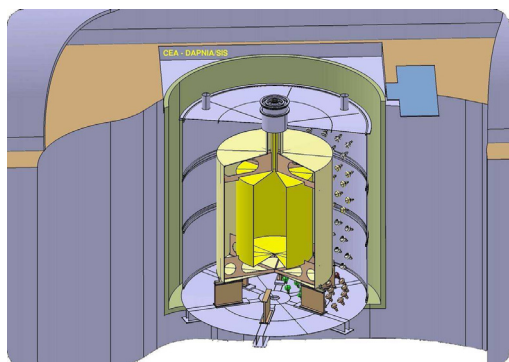
ISSN 0857-1449

ปีที่ 27 ฉบับที่ 4 : ธันวาคม 2553 – กุมภาพันธ์ 2554



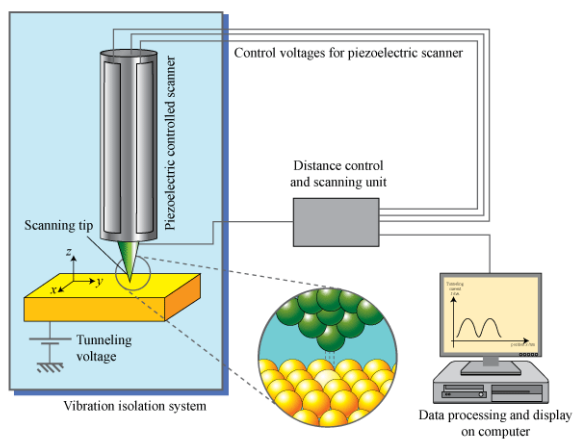
ห็นสามารถ
การจัดการอะตอมและโมเลกุลด้วย Scanning Tunneling Microscope
การสะท้อนของอิเล็กตรอนที่รอยต่อระหว่างโลหะกับตัวนำยิ่งยวด
การค้นพบการแบ่งตัวของนิวเคลียส
เหลียมเพชรเม็ดงามวิชาแม่เหล็กไฟฟ้า ตอนที่ 8

รูปประกอบจากรูปข่าว หน้า 2 – 3



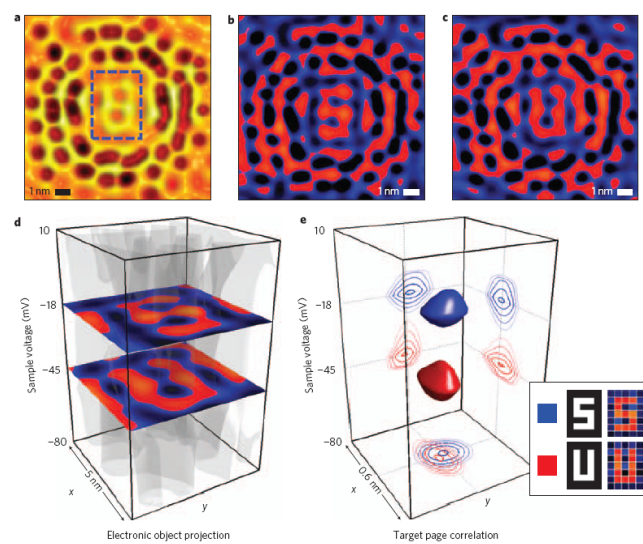
เครื่องตรวจจับ แอนติ-นิวตริโน

รูปประกอบจากบทความ “การจัดการอะตอมและ
โมเลกุลด้วย Scanning Tunneling Microscope” หน้า 7 – 10

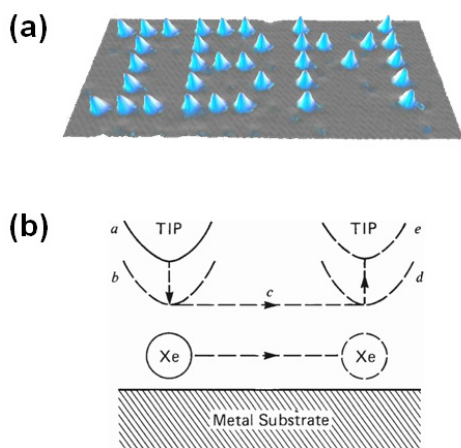


รูปที่ 1

รูปที่ 3



รูปที่ 4



รูปที่ 2

สารบัญ

สวัสดิ์	1
สรุปข่าว	2
การสะท้อนของอิเล็กตรอนที่รอยต่อระหว่างโลหะกับตัวนำยิ่งยวด	4
พวงรัตน์ ไพเราะ	
การจัดการอะตอมและโมเลกุล	7
ด้วย Scanning Tunneling Microscope	
สุเมธ สุกุลเสริมสุข	
หินสามารถ	11
วรวัฒน์ มีวาสนา	
เหล็ยมเพชรเมื่อดามวิชาแม่เหล็กไฟฟ้า:	14
ตอนที่ 8 ชนิดของช่วงเวลาในการคิดกำลังการแผ่รังสี	
แม่เหล็กไฟฟ้าจากอนุภาคประจุเร่ง	
ชาญกิจ คันถ่อง	
การค้นพบการแบ่งตัวของนิวเคลียส	20
อ็อตโต อาร์ ฟริช และ จอห์น เอ วิลเลอร์	
แปลโดย วันชัย โพธิ์พิตร	



สวัสดิ์

ในวารสารฟิสิกส์ไทยฉบับนี้มีสิ่งหนึ่งซึ่งเป็นสิ่งใหม่สำหรับวารสารฯ นั่นคือมีบทความที่ถูกแปลจากบทความต่างประเทศ ซึ่งเป็นบทความที่ทางกองบรรณาธิการเห็นว่าน่าสนใจอย่างมากและน่าจะเป็นประโยชน์กับผู้อ่านวารสารฯ โดยเฉพาะอย่างยิ่งผู้อ่านที่เป็นนักฟิสิกส์หรือนักศึกษาฟิสิกส์รุ่นใหม่ๆ เนื่องจากเป็นบทความเชิงประวัติศาสตร์ของการค้นพบกระบวนการแบ่งตัวของนิวเคลียส หรือปฏิกิริยาฟิชชัน (Fission) ซึ่งบทความนี้นั้นเคยถูกแปลและตีพิมพ์เป็นภาษาไทยมาแล้วครั้งหนึ่งเมื่อปี พ.ศ. 2512 ซึ่งเชื่อว่าในตอนนั้นผู้อ่านวารสารฯ ส่วนใหญ่น่าจะไม่มีโอกาสได้อ่านเนื่องจากยังไม่เกิดหรืออาจยังเป็นเด็กอยู่ในตอนนั้น (รวมถึงกองบรรณาธิการด้วย)

ในวารสารฯ ฉบับนี้ยังมีบทความที่น่าสนใจอื่นๆ อีก เช่น เรื่องของการสะท้อนของอิเล็กตรอนที่รอยต่อระหว่างโลหะกับตัวนำยิ่งยวด (Andreev reflection) เรื่องของ “หินสามารถ” และเรื่องเหล็ยมเพชรเมื่อดามวิชาแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้ดำเนินมาต่อเนื่องจนถึงตอนที่ 8 แล้ว ซึ่งจะยังคงเป็นเรื่องเกี่ยวกับการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าจากอนุภาคประจุเร่ง ซึ่งเป็นการดำเนินการของการกำเนิดแสงซินโครตรอนนั่นเอง

กองบรรณาธิการ

กองบรรณาธิการ ชาญกิจ คันถ่อง, ศุภกร รักใหม่, วันทนา คล้ายสุบรรณ, ฉัตรชัย ศรีนิตวิรวงศ์, นฤมล สุวรรณจันทร์ดี, พวงรัตน์ ไพเราะ, พรทิพย์ สุดเมือง, ศิรามาส โกมลจินดา, พรรัตน์ วัฒนกลวิวิช หัวหน้ากองบรรณาธิการ ประพนธ์ คล้ายสุบรรณ ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ สมสร สิงขรัตน์ ภาพและออกแบบปก ประพนธ์ คล้ายสุบรรณ เลขานุการกองบรรณาธิการ ประพนธ์ คล้ายสุบรรณ จำนวนพิมพ์ 2,000 เล่ม

ติดต่อกองบรรณาธิการ วารสารฟิสิกส์ไทย สมาคมฟิสิกส์ไทย อาคารสุรพัฒน์ 3 ถนนมหาวิทยาลัย ด.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: ณัฐวุฒิ สุระเดช 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 ลิ้มปิจำนงค์ นายทะเบียน ดร. สาโรช รุจิวรรณธน บรรณาธิการ วารสารฟิสิกส์ไทย ดร. ประพนธ์ คล้ายสุบรรณ ปฎิคม ผศ. ดร. ศุภกร รักใหม่ ประธานสัมพันธ์ ดร. สัมภาส นิดเกตุ รองเลขานุการ ดร. ขรรค์ชัย โกศลทองกี กรรมการ ผศ. ดร. ขจรยศ อยู่ดี, ผศ. รัชนา ชินพิทักษ์, รศ. ดร. ชีววรรณ บุญญวรรณ, ผศ. ดร. ธนากร โอสดจันทร์, ผศ. ดร. นิรันดร์ วิทอนันต์, ผศ. ดร. ขวัญ อารยะรัตนกุล, ดร. สิริพัฒน์ ประโทนเทพ, ดร. ณัฐพร นิตระดม

สรุปข่าว

นักฟิสิกส์ใช้นิวทริโนตรวจสอบโรงปฏิกรณ์นิวเคลียร์

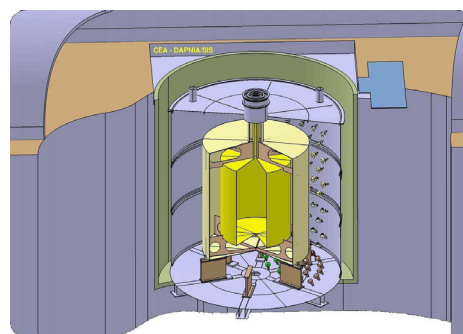


กัมมันตภาพรังสีจากการเดินเครื่องโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ อาจส่งผลกระทบต่อประชาชนและสิ่งแวดล้อมได้ในกรณีที่เกิดอุบัติเหตุหรือเกิดการเดินเครื่องที่ผิดปกติขึ้นตอน ทำให้มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการตรวจสอบและกำกับดูแลอย่างเข้มงวด ปัจจุบันหน่วยงานระดับสากลที่รับผิดชอบ คือ ทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (United Nations' International Atomic Energy Agency: IAEA) ซึ่งมีสำนักงานใหญ่อยู่ที่กรุงเวียนนา ประเทศออสเตรีย ภารกิจอย่างหนึ่งของ IAEA คือ การตรวจจับการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีการเดินเครื่องอย่างผิดกฎหมาย โดยวิธีการตรวจสอบจะใช้ทั้งกล้องวงจรปิด (CCTV) เครื่องถ่ายภาพตามสาย และสัญญาณใยแก้วนำแสง ซึ่งจะทำให้ทราบสถานะของเครื่องได้เมื่อเชื้อเพลิงถูกใช้งาน และในบางกรณีหน่วยงานจะติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับความร้อนเพื่อใช้ตรวจสอบระยะเวลาในการเดินเครื่อง ซึ่งในกรณีที่มีการเดินเครื่องติดต่อกันยาวนาน อาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดสารพลูโตเนียมขึ้นได้

เมื่อเร็วๆ นี้ Thierry Lasserre นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศส ได้นำเสนออีกหนึ่งวิธีการตรวจสอบการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ โดยใช้การตรวจจับอนุภาคนิวทริโนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยานิวเคลียร์-ฟิชชันของโรงปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ด้วยการติดตั้งเครื่องตรวจจับนิวทริโนไว้ในถังซึ่งบรรจุน้ำมันปริมาณหลายแสนตัน โดยให้ลอยอยู่นอกชายฝั่งใกล้กับโรงปฏิกรณ์นิวเคลียร์ การติดตั้งเครื่องตรวจจับ แอนติ-นิวทริโน (คู่ปฏิสสารของนิวทริโน) ในบริเวณใกล้เคียงถือเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง เนื่องจากฟลักซ์ของ

นิวทริโนที่เกิดขึ้นนั้นแปรผันตามระยะห่างและกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ ดังนั้น ปริมาณนิวทริโนที่ตรวจจับได้ในแต่ละจุดจะสามารถบ่งบอกได้ว่าบริเวณใดกำลังเกิดปฏิกิริยาฟิชชันขึ้น

ตามที่นักวิจัยได้ค้นพบเมื่อหลายสิบปีก่อน เกี่ยวกับความซับซ้อนของนิวทริโน ที่แสดงให้เห็นว่านิวทริโนเป็นอนุภาคขนาดเล็ก มีมวลน้อยมาก (ต่างจากก่อนหน้านี้ที่เชื่อกันว่านิวทริโนเป็นอนุภาคไม่มีมวล) และสามารถเปลี่ยนไปเปลี่ยนมา (Oscillate) จากรูปแบบหนึ่งไปเป็นอีกรูปแบบหนึ่งได้ นั่นหมายความว่าเครื่องตรวจจับนิวทริโนรูปแบบใดรูปแบบหนึ่งจะให้ผลการตรวจจับน้อยกว่าที่คาดการณ์ไว้เสมอ เนื่องจากนิวทริโนบางส่วนได้เปลี่ยนรูปแบบไปก่อนที่จะเคลื่อนที่มาถึงระบบวัด



เครื่องตรวจจับ แอนติ-นิวทริโน

Thierry Lasserre ซึ่งเป็นเจ้าหน้าที่จากหน่วยงานพลังงานทางเลือกและพลังงานปรมาณู ประเทศฝรั่งเศส (French Alternative Energies and Atomic Energy Commission) กล่าวว่า การพัฒนาความเข้าใจในพฤติกรรมการเปลี่ยนไปเปลี่ยนมาของนิวทริโนทำให้กลุ่มวิจัยสามารถพัฒนาอุปกรณ์เพื่อตรวจจับแอนติ-นิวทริโนที่เกิดจากเครื่องปฏิกรณ์ได้จากระยะไกล Lasserre และเพื่อนร่วมทีมได้คำนวณการลดลงของฟลักซ์นิวทริโนเทียบกับระยะทางจากเครื่องปฏิกรณ์ โดยพิจารณา รวมถึงการเปลี่ยนไปเปลี่ยนมานี้ นอกจากนั้นทีมวิจัยยังได้วิเคราะห์แอนติ-นิวทริโนทั้งหมดที่เกิดจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ซึ่งมีมากกว่า 200 แห่งทั่วโลก เพื่อจัดทำแผนที่แสดงระดับปริมาณแอนติ-นิวทริโนพื้นหลัง (Background anti-neutrino levels)

จากการคำนวณ Lasserre ได้แสดงให้เห็นว่าเครื่องตรวจจับนิวตริโนจำเป็นต้องติดตั้งให้มีความลึกมากกว่า 500 เมตรจากระดับน้ำทะเล เพื่อป้องกันความผิดพลาดของสัญญาณที่อาจเกิดจากรังสีคอสมิก ทีมนักวิจัยเปิดเผยเพิ่มเติมว่า การตรวจจับปฏิกิริยาฟิชชันในรัศมี 100-500 กิโลเมตร เครื่องตรวจจับจำเป็นต้องมีตัวเปล่งแสงวับ (Scintillator ซึ่งก็คือ วัสดุโปร่งแสง ทั้งของแข็งของเหลว และแก๊ส ที่มีการเปล่งแสงวับเมื่อทำอันตรกิริยากับรังสีชนิดก่อไอออน) ซึ่งมีอนุภาคโปรตอนอย่างน้อยในเรือน 10^{34} อนุภาค หรืออยู่ในระดับแสนตัน

ผู้เชี่ยวชาญด้านฟิสิกส์นิวเคลียร์หลายท่าน ได้ตั้งข้อสังเกตเกี่ยวกับอุปกรณ์ที่ Thierry Lasserre และทีมวิจัยได้พัฒนาขึ้น ว่ามีความเป็นไปได้หรือมีประสิทธิภาพมากนักน้อยเพียงใด อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ก็ถือเป็นสิ่งสำคัญที่ควรจะต้องมีการพัฒนาต่อไป เพื่อสร้างเครือข่ายการตรวจสอบ บันทึก ติดตามการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ทั้งหลาย เพื่อให้มั่นใจได้ว่าการเดินเครื่องอย่างถูกต้อง ไม่ปกปิด และเป็นมิตรต่อทั้งประชาชนและสิ่งแวดล้อม

ที่มา

- [1] <http://www.aps.org/publications/apsnews/201106>
- [2] <http://physicsworld.com/cws/article/news/44411>
- [3] http://arxiv.org/PS_cache/nucl-ex

ลดโลกร้อนด้วยวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่เล็กระดับนาโน



จากปัญหาสภาวะโลกร้อนในปัจจุบัน นักวิจัยหลายภาคส่วนต่างให้ความสำคัญและตระหนักถึงผลกระทบที่จะเกิดขึ้นจากปัญหาสภาวะโลกร้อน ซึ่งจะเห็นได้จากหลายผลงานวิจัยซึ่งเกี่ยวกับการค้นคว้าพลังงานทดแทน การพัฒนาปรับปรุง

ประสิทธิภาพพลังงานสิ้นเปลืองเพื่อให้เกิดผลประโยชน์สูงสุด และหนึ่งในนั้นเป็นงานวิจัยของ Xiao Yan กับทีมนักวิจัยจากสหรัฐอเมริกา ที่ได้เปิดเผยความสำเร็จจากการพัฒนาประสิทธิภาพวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ที่เราทราบกันดีว่าวัสดุนี้นี้สามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ วัสดุที่ Xiao Yan ได้พัฒนานี้เป็นสารประกอบเชิงนาโน (Nanocomposite) จากการทดสอบพบว่าวัสดุนี้นี้สามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานงานไฟฟ้าได้ดีกว่าวัสดุแบบเดิมถึง 60% และมีความเสถียรในภาวะอุณหภูมิที่ร้อนสูงถึง 700°C ถือเป็นวัสดุที่มีศักยภาพตรงกับเป้าหมายงานวิจัยในการนำมาใช้เปลี่ยนพลังงานความร้อนจากการปล่อยไอเสียรถยนต์กลับมาใช้ใหม่ในรูปแบบพลังงานไฟฟ้า เพื่อลดการสิ้นเปลืองของเชื้อเพลิงในรถยนต์

เนื่องจากวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกนั้นสามารถผันพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง จึงเป็นอีกความหวังหนึ่งที่จะนำวัสดุนี้นี้มาทดแทนการใช้พลังงานสิ้นเปลืองอย่างน้ำมัน และมีแนวทางความเป็นไปได้ที่สูงต่อการนำไปใช้กับรถยนต์ อีกทั้งยังสามารถนำไปพัฒนาใช้กับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์เพื่อการนำพลังงานความร้อนจากเตาปฏิกรณ์กลับมาใช้ใหม่ ส่วนในงานพัฒนาอื่น ๆ นั้นเป็นไปอย่างกว้างขวาง เช่น การพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ระบบทำความเย็นของชิ้นส่วนในคอมพิวเตอร์ และงานพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อีกหลายอย่าง

วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่เหมาะสมแก่การนำมาใช้งานนั้นจะต้องมีคุณสมบัติที่นำไฟฟ้าได้ดี นำความร้อนได้ไม่ดี และมีสัมประสิทธิ์การผันพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้สูง คุณสมบัติที่ต้องมีทั้งสามประการนี้จะรวมอยู่ใน Figure of merit ZT นอกจากนั้นวัสดุที่สามารถใช้งานได้จริงนั้นต้องสามารถทำงานได้ในสภาวะอุณหภูมิแวดล้อมที่เหมาะสม เช่นในกรณีของการนำพลังงานความร้อนจากไอเสียรถยนต์มาใช้นั้น วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกต้องทำงานได้ที่อุณหภูมิประมาณ 100°C

(อ่านต่อที่หน้า 30)

การสะท้อนของอิเล็กตรอนที่รอยต่อระหว่างโลหะกับตัวนำยิ่งยวด

พวงรัตน์ ไพเราะ¹

ในรอยต่อระหว่างโลหะ 2 ชนิด เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่มาถึงรอยต่อ หากอิเล็กตรอนไม่มีการสูญเสียพลังงาน และไม่สะท้อนกลับไปในโลหะชั้นเดิม ก็จะเคลื่อนที่ทะลุผ่านรอยต่อไปยังโลหะที่อยู่อีกด้านหนึ่ง เราสามารถคำนวณหาความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ทั้งสองนี้ได้โดยใช้ฟิสิกส์ควอนตัม โดยผลบวกของความน่าจะเป็นของทั้งสองเหตุการณ์นี้ต้องมีค่าเป็น 1 ซึ่งหมายความว่า การถ่ายเทพลังงานที่รอยต่อระหว่างโลหะกับโลหะต่ออิเล็กตรอนที่วิ่งเข้ามา 1 ตัว มีค่าน้อยกว่า 1 เท่าของประจุอิเล็กตรอน (เพราะมีการสะท้อนกลับ) การถ่ายเทพลังงานจะมีค่าเข้าใกล้ 1 เท่า หากกำแพงศักย์ที่รอยต่อมีค่าน้อยมาก ๆ

ในบทความนี้ เราจะพิจารณาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านรอยต่อที่สามารถมีการถ่ายเทพลังงานได้มากกว่า 1 เท่าของประจุอิเล็กตรอน ซึ่งเหตุการณ์นี้จะเกิดขึ้นได้เมื่อการสะท้อนของอิเล็กตรอนเกิดขึ้นที่รอยต่อระหว่างโลหะกับตัวนำยิ่งยวด หรือที่เรียกว่า การสะท้อนอันเดรฟ (Andreev reflection) ตามชื่อนักฟิสิกส์ อเล็กซานเดอร์ เอฟ. อันเดรฟ (Alexander F. Andreev) ที่กล่าวถึงการสะท้อนลักษณะนี้เป็นคนแรก [1] ในกระบวนการนี้ การถ่ายเทพลังงานต่ออิเล็กตรอน 1 ตัวที่วิ่งเข้ามาที่รอยต่อสามารถมีค่าได้มากถึง 2 เท่าของประจุอิเล็กตรอน แต่ก่อนที่จะกล่าวถึงการสะท้อนนี้ในรายละเอียด จะขอกล่าวถึงอิเล็กตรอนในตัวนำยิ่งยวดโดยสังเขปก่อน

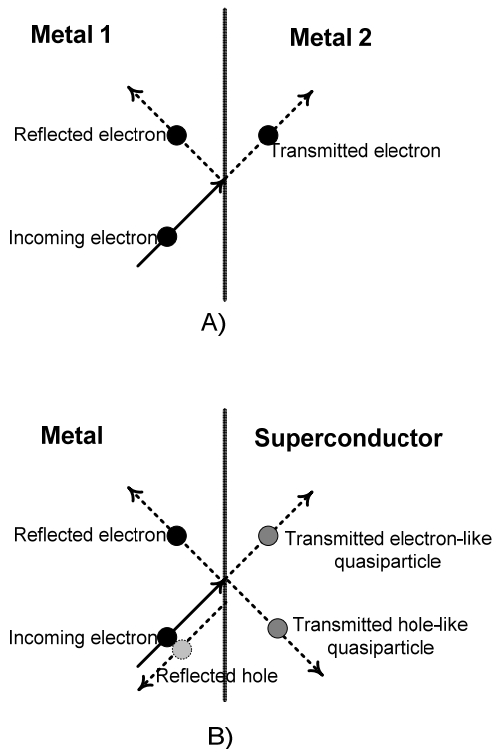
โลหะมีอิเล็กตรอนที่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระทำให้โลหะสามารถนำไฟฟ้าได้ดี โดยมีความต้านทานไฟฟ้าค่าหนึ่งซึ่งเกิดจากการที่อิเล็กตรอนเหล่านี้มีการเคลื่อนที่ไปชนกับสิ่งเจือปน หรือความไม่สมบูรณ์อื่น ๆ ในโลหะ หรือแม้แต่นั่นเอง แต่เมื่อลดอุณหภูมิลงไปถึง 0 เคลวิน ๆ จนต่ำกว่าค่าวิกฤติค่าหนึ่งอิเล็กตรอนที่มีค่าโมเมนตัม [2] และสปิน [3] ตรงข้ามกันจะเริ่ม

จับคู่กัน เรียกว่า คู่อุปเปอร์ (Cooper pair) ซึ่งคู่อุปเปอร์แต่ละคู่ที่เกิดขึ้นจะมีเฟสตรงกัน การที่มีเฟสเดียวกันนี้ทำให้เมื่อเคลื่อนที่ผ่านไปเนื้อสาร คู่อุปเปอร์จะไม่ชนกับสิ่งเจือปนหรือความไม่สมบูรณ์อื่นๆ เลย [4] และสามารถนำไฟฟ้าได้โดยไม่มีความต้านทาน เราเรียกสถานะนี้ว่าตัวนำยิ่งยวด เราสามารถทำลายคู่อุปเปอร์หรือสภาวะนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้โดยใส่พลังงานค่าหนึ่งเข้าไป เรียกว่า ค่าช่องว่างพลังงาน (Δ , Energy gap) ซึ่งหมายความว่าภายในช่วงของค่าช่องว่างพลังงานนี้ จะไม่มีสถานะให้อนุภาคเดี่ยวอยู่ โดยค่าของช่องว่างพลังงานของตัวนำยิ่งยวดแบบดั้งเดิม เช่น ตะกั่ว (Pb) อลูมิเนียม (Al) ไนโอเบียม (Nb) มีค่าอยู่ในช่วงมิลลิอิเล็กตรอนโวลต์ (meV) เมื่อคู่อุปเปอร์ถูกแยกออกจากกัน จะกลายเป็นอนุภาค 2 ตัวซึ่งไม่ใช่อิเล็กตรอน แต่มีสมบัติผสมระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล [5] (Hole) หากอนุภาคนั้นมีความเป็นอิเล็กตรอนมากกว่า เราเรียกว่า อนุภาคคล้ายอิเล็กตรอน (Electron-like quasiparticle) แต่ถ้ามีความเป็นโฮลมากกว่า ก็จะเรียกว่า อนุภาคคล้ายโฮล (Hole-like quasiparticle)

ที่รอยต่อระหว่างโลหะกับตัวนำยิ่งยวด เมื่ออิเล็กตรอนจากฝั่งโลหะวิ่งมาถึงรอยต่อ มีเหตุการณ์ 3 อย่างที่จะเกิดขึ้นได้ เหตุการณ์แรกคือการสะท้อนกลับมาในฐานะอิเล็กตรอน ซึ่งเรียกว่า การสะท้อนปกติ (Normal reflection) อิเล็กตรอนที่สะท้อนออกมาด้วยกระบวนการนี้ จะมีทิศทางของโมเมนตัมในแนวขนานกับรอยต่อเหมือนกับของอิเล็กตรอนที่วิ่งเข้ามา แต่ทิศทางของโมเมนตัมในแนวตั้งฉากกับรอยต่อจะมีทิศตรงกันข้ามกับของเดิม เหตุการณ์ที่สองคือการสะท้อนกลับออกมาในฐานะโฮล เรียกว่า การสะท้อนอันเดรฟ อนุภาคที่สะท้อนออกมาด้วยกระบวนการนี้จะมีคุณสมบัติเป็นโฮลและมีค่าโมเมนตัมที่มีทิศตรงกันข้ามกับอิเล็กตรอนที่วิ่งเข้าไป (ดูรูปที่ 1B) เหตุการณ์ที่สามคือการทะลุเข้าไปยังฝั่งตัวนำยิ่งยวด โดยเมื่อเข้าไปแล้วอาจกลายเป็นอนุภาค

¹อาจารย์ (รศ. ดร.) สาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คล้ายอิเล็กตรอน หรือ อนุภาคคล้ายโฮล เหตุการณ์ที่สามนี้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่ออิเล็กตรอนที่วิ่งมาจากโลหะมีค่าพลังงานที่มากกว่าพลังงานช่องว่างของตัวนำยิ่งยวดเท่านั้น หากอิเล็กตรอนมีพลังงานน้อยกว่า ก็จะเกิดได้เฉพาะ 2 เหตุการณ์แรกเท่านั้น



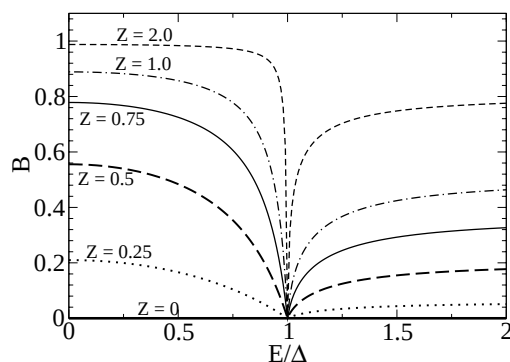
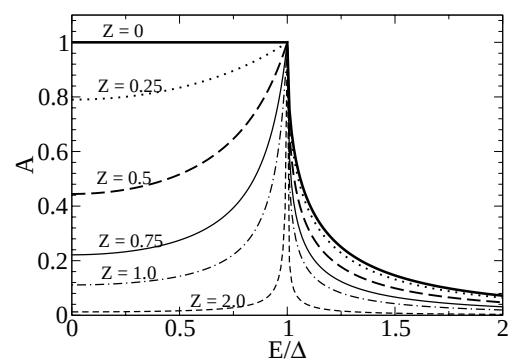
รูปที่ 1 แสดงแผนภาพการสะท้อนของอิเล็กตรอนที่รอยต่อ A) โลหะกับโลหะ B) โลหะกับตัวนำยิ่งยวด

กำหนดให้ B, A, C และ D คือความน่าจะเป็นที่จะเกิดการสะท้อนปกติ การสะท้อนอングเรฟ การทะลุผ่านไปกลายเป็นอนุภาคคล้ายอิเล็กตรอน และการทะลุผ่านไปกลายเป็นอนุภาคคล้ายโฮล เมื่อมีอิเล็กตรอน 1 ตัว จากโลหะวิ่งเข้ามาที่รอยต่อ ตามหลักการอนุรักษ์จำนวนอนุภาค จำนวนอนุภาคที่วิ่งเข้าหารอยต่อ (1 ตัว) จะต้องเท่ากับจำนวนอนุภาคที่วิ่งออกไป ($A+B+C+D$) นั่นคือ $A+B+C+D$ มีค่าเท่ากับ 1

ต่อไปนี้จะพิจารณาความน่าจะเป็นของการสะท้อนปกติ B กับ การสะท้อนอングเรฟ A เท่านั้น ในกรณีรอยต่อระหว่างโลหะกับโลหะ ความน่าจะเป็นของการสะท้อนอングเรฟมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจำนวนประจุสุทธิที่วิ่งเข้าไปยังโลหะอีกด้านหนึ่งจะมีค่า $e(1-B)$ โดยที่ e คือประจุของอิเล็กตรอน เครื่องหมายหน้า B เป็นลบเนื่องจากอิเล็กตรอนที่สะท้อนกลับจะลดปริมาณของ

อิเล็กตรอนที่วิ่งเข้ามารอยต่อไปได้ หรือ อีกนัยหนึ่งค่า $1-B$ คือจำนวนอิเล็กตรอนที่เข้าไปยังโลหะอีกด้านหนึ่งต่ออิเล็กตรอนที่วิ่งเข้ามาหารอยต่อ 1 ตัวนั่นเอง ซึ่งค่า $1-B$ มีค่าไม่เกิน 1

ในกรณีของรอยต่อระหว่างโลหะกับตัวนำยิ่งยวดจำนวนประจุสุทธิที่วิ่งเข้าไปยังโลหะอีกด้านหนึ่งจะมีค่า $e(1-B+A)$ เครื่องหมายหน้า A เป็นบวกเพราะแม้ว่าจะเป็นการสะท้อนกลับ แต่อนุภาคที่สะท้อนเป็นโฮลซึ่งมีประจุตรงข้ามกับอิเล็กตรอน ทำให้การสะท้อนกลับนี้เปรียบเสมือนว่าเป็นอิเล็กตรอนวิ่งไปในทิศทางกันข้าม(เข้าหารอยต่อ) จึงเป็นการเสริมจำนวนประจุที่วิ่งเข้าไปยังด้านตัวนำยิ่งยวด หรืออีกนัยหนึ่งค่า $1-B+A$ คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่เข้าไปยังฝั่งของตัวนำยิ่งยวดต่ออิเล็กตรอนที่วิ่งเข้ามาหารอยต่อจากด้านโลหะ 1 ตัวนั่นเอง ค่า $1-B+A$ สามารถมีค่ามากกว่า 1 ได้

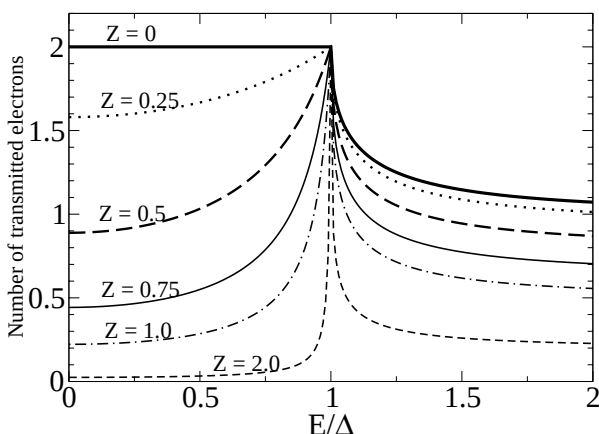


รูปที่ 2 แสดงกราฟความน่าจะเป็นของการสะท้อนอングเรฟ A และความน่าจะเป็นของการสะท้อนปกติ B เป็นฟังก์ชันของค่าพลังงานของอิเล็กตรอนที่วิ่งเข้ามาที่รอยต่อจากด้านโลหะ (ดูความหมายของ Z ในบทความ)

ค่าของ A และ B ขึ้นอยู่กับขนาดของค่าแรงแศกซ์ที่รอยต่อ กล่าวคือ ยิ่งค่าแรงแศกซ์มีค่าน้อย ความน่าจะเป็นของการ

สะท้อนอังกเรฟก็จะมีค่ามาก แต่ความน่าจะเป็นของการสะท้อนปกติจะมีค่าน้อย รูปที่ 2 แสดงกราฟความน่าจะเป็นของการสะท้อนอังกเรฟ และความน่าจะเป็นของการสะท้อนปกติ เป็นฟังก์ชันของค่าพลังงานของอิเล็กตรอนที่วิ่งเข้ามาที่รอยต่อจากด้านโลหะ โดยที่ค่า Z เป็นพารามิเตอร์ที่ไม่มีหน่วยซึ่งระบุว่าการสะท้อนมีค่ามากหรือน้อย เช่น ถ้า Z เป็นศูนย์หมายความว่า การสะท้อนมีค่าเป็นศูนย์ด้วย ถ้า Z มีค่ามากขึ้น การสะท้อนก็มีค่าสูงขึ้นด้วย สังเกตว่า ค่าความน่าจะเป็นในการสะท้อนอังกเรฟ มีค่าเป็น 1 เมื่อ ค่า Z เป็นศูนย์ และพลังงานของอิเล็กตรอนที่วิ่งเข้าหารอยต่อมีค่าน้อยกว่าค่าช่องว่างพลังงาน ($E < \Delta$)

รูปที่ 3 แสดงจำนวนอิเล็กตรอนที่ข้ามไปยังตัวนำยิ่งยวด ต่ออิเล็กตรอนที่วิ่งเข้ามารอยต่อจากด้านโลหะ 1 ตัว เป็นฟังก์ชันของค่าพลังงานของอิเล็กตรอนที่วิ่งเข้ามาที่รอยต่อจากด้านโลหะ จำนวนของอิเล็กตรอนที่ข้ามไปยังฝั่งของตัวนำยิ่งยวด มีค่ามากกว่า 1 เมื่อค่า Z มีค่าน้อยและพลังงานของอิเล็กตรอนที่วิ่งเข้าหารอยต่อมีค่าน้อยกว่าค่าช่องว่างพลังงาน ผู้อ่านอาจมีคำถามว่า ในตัวนำยิ่งยวด ถ้าไม่มีสถานะให้อนุภาคเดี่ยวที่มีพลังงานต่ำกว่าค่าช่องว่างพลังงานอยู่ แล้วอิเล็กตรอนที่วิ่งข้ามไปอีกด้านหนึ่งได้ จะมีสถานะเป็นอะไร คำตอบก็คือ กลายเป็นคูคูเปอร์ (ซึ่งมีพลังงานต่ำกว่าพลังงานของอนุภาคเดี่ยว) แล้ววิ่งต่อไปในในตัวนำยิ่งยวดโดยไม่สูญเสียพลังงาน



รูปที่ 3 แสดงจำนวนอิเล็กตรอนที่ข้ามไปยังตัวนำยิ่งยวด ต่ออิเล็กตรอนที่วิ่งเข้ามารอยต่อจากด้านโลหะ 1 ตัว เป็นฟังก์ชันของค่าพลังงานของอิเล็กตรอนที่วิ่งเข้ามาที่รอยต่อจากด้านโลหะ

โดยสรุป การสะท้อนอังกเรฟเป็นการสะท้อนที่เกิดขึ้นที่รอยต่อระหว่างโลหะกับตัวนำยิ่งยวด เป็นการสะท้อนในลักษณะที่วิ่งย้อนกลับทางของอิเล็กตรอนที่วิ่งเข้ามา โดยอนุภาคที่สะท้อนไปไม่ใช่อิเล็กตรอนแต่กลายเป็นโฮล การสะท้อนอังกเรฟนี้มีโอกาสเกิดขึ้นได้มากเมื่อพลังงานของอิเล็กตรอนที่วิ่งเข้ามามีค่าน้อยกว่าค่าช่องว่างพลังงาน และค่าการสะท้อนที่รอยต่อมีค่าน้อย เป็นการสะท้อนที่ช่วยให้มีการถ่ายเทจำนวนอิเล็กตรอนไปยังด้านตัวนำยิ่งยวดมีค่าได้มากกว่า 1 ตัวต่ออิเล็กตรอน 1 ตัวที่วิ่งเข้าไปที่รอยต่อจากโลหะ

หมายเหตุ

- [1] Andreev, A. F. (1964). "Thermal conductivity of the intermediate state of superconductors". *Sov. Phys. JETP* **19**: 1228.
- [2] มวลและความเร็ว หรือ ค่าคงที่ของแฟรงก์กับเลขคลื่นแล้วหารด้วย 2π
- [3] สมบัติทางควอนตัมของอิเล็กตรอน
- [4] หากมีการเปลี่ยนแปลงต่อคูคูเปอร์คู่ใดคู่หนึ่ง (ไม่ว่าจะจากการชนหรืออย่างอื่น) คูคูเปอร์อื่นๆ จะรู้สึกถึงการเปลี่ยนแปลงนั้นด้วย จึงเป็นการยากที่สิ่งเจือปนจะมีผลกระทบต่อคูคูเปอร์ทั้งหมดได้
- [5] โฮลคือที่ว่างที่อิเล็กตรอนทิ้งไว้เมื่อวิ่งออกไป โฮลจึงมีประจุเป็นบวก และมีความเร็วในทิศตรงกันข้ามกับอิเล็กตรอน

การจัดการอะตอมและโมเลกุล ด้วย Scanning Tunneling Microscope

สุเมธ สกุลเสริมสุข¹

หนึ่งในความฝันของนักวิทยาศาสตร์ในยุคสมัยก่อน โดยเฉพาะนักเคมีคือการที่เราสามารถย้ายโมเลกุล ตัดและสร้างพันธะของโมเลกุลสารได้ดังใจ อาจเทียบเคียงได้กับพวกนักเล่นแร่แปรธาตุในยุคกลาง นักฟิสิกส์รางวัลโนเบล ริชาร์ด ไฟน์แมน เคยเสนอไว้ในปี 1959 ว่า การจัดการกับอะตอมนั้นไม่ขัดกับกฎทางฟิสิกส์ ซึ่งในสมัยที่ไฟน์แมนพูดนั้น เรายังไม่มีเครื่องมือที่สามารถส่องดูวัตถุในระดับอะตอมเลย อีกปัญหาหนึ่งคือ เราต้องมีเทคโนโลยีในการเข้าถึงโมเลกุลสารต่างๆ ก่อน ตัวอย่างเช่น การแยกโมเลกุลเดี่ยว หากแต่สิ่งที่นักวิทยาศาสตร์สามารถแยกได้เดี่ยวๆ เป็นครั้งแรกไม่ใช่โมเลกุลหรืออะตอม แต่เป็นอิเล็กตรอน จากนั้นก็เป็นโฟสตรอน ไอออน โดยใช้เทคนิคที่แตกต่างกันไป ได้แก่ สนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก เลเซอร์ เป็นต้น เทคนิคที่พัฒนาในงานศึกษาอะตอมเดี่ยวนี้นำไปสู่ความก้าวหน้าในการพัฒนาควอนตัมคอมพิวเตอร์ ในขณะที่อีกเทคนิคหนึ่งคือการใช้หัววัตถุในการจับอะตอมหรือโมเลกุลไว้บนพื้นผิว หากจำนวนอะตอมหรือโมเลกุลบนพื้นผิวมีไม่มากเกินไป โดยที่มีอะตอมหรือโมเลกุลเดี่ยวอยู่กระจัดกระจายกันไป ถึงแม้จะมีอะตอมของหัววัตถุอยู่ด้วยแต่เราก็สามารถจำแนกอะตอมหรือโมเลกุลเดี่ยวออกจากอะตอมของหัววัตถุได้ หนึ่งในเครื่องมือที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการ “มองเห็น” ในระดับอะตอมและโมเลกุลเหล่านี้บนพื้นผิววัตถุ คือ **Scanning Tunneling Microscope (STM)** ซึ่งส่งผลให้ผู้ประดิษฐ์คือ Heinrich Binnig และ Gerd Rohrer ได้รับรางวัลโนเบลในปี 1986 ในบทความนี้จะกล่าวถึงหลักการของ STM และตัวอย่างผลงานวิจัยที่น่าสนใจในการใช้ STM ในการจัดการกับโมเลกุล โดยใช้เทคนิคการย้ายที่อะตอมเป็นหลัก

หลักการของ STM

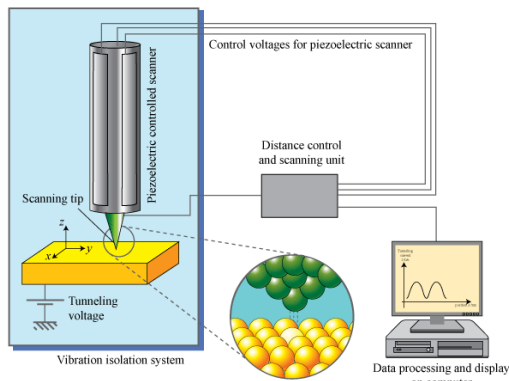
STM เป็นเครื่องมือชิ้นแรกในบรรดาชุดของเครื่องสแกนแบบใช้เข็มแหลมที่ทำให้หัววัตถุอยู่ใกล้กับผิววัตถุมาก (local

scanning probe) ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นในปี 1982 โดยคณะวิจัยของ Binnig และ Rohrer [1] ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยของบริษัท IBM ณ เมืองซูริค ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ หลักการของ STM นี้จะใช้เข็ม (tip) ที่มีปลายแหลมมาก ซึ่งปลายสุดของเข็มมีเพียงหนึ่งอะตอมเท่านั้น เข็มของ STM นี้ต้องถูกวางให้อยู่ใกล้มากๆ กับพื้นผิวที่นำไฟฟ้าได้ของวัสดุ หากระยะห่างของเข็มกับพื้นผิวมีค่าน้อยกว่า 1 นาโนเมตร ฟังก์ชันคลื่นของเข็มกับผิววัสดุจะเกิดการซ้อนเหลื่อมกัน (overlap) เมื่อเราให้ความต่างศักย์คร่อมระหว่างเข็มกับวัสดุ จะเกิดกระแสของอิเล็กตรอนไหลระหว่างขั้วทั้งสอง อิเล็กตรอนที่ไหลนั้นเป็นอิเล็กตรอนที่ทะลุ (tunnel) ผ่านกำแพงศักย์ของ work function ระหว่างเข็มกับวัสดุ จากการคำนวณโดยใช้กลศาสตร์ควอนตัมพบว่าปริมาณของกระแสอิเล็กตรอน (I) นี้ มีค่าแปรผันกับระยะห่างระหว่างเข็มกับผิววัสดุ (z) โดยเป็นฟังก์ชันของการลดลงแบบเอ็กโปเนนเชียล หรือ $I(z) = \exp(-kz)$ โดยที่ k ในวัสดุทั่วๆ ไปที่ใช้ใน STM จะมีค่าประมาณ 23 nm^{-1} จากความสัมพันธ์นี้ พบว่า ขนาดสัญญาณของกระแสอิเล็กตรอนจะเปลี่ยนไปราว 10 เท่าหากระยะห่างเปลี่ยนไป 0.1 nm ซึ่งถือเป็นสัญญาณที่ไวมากต่อการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างเข็มกับผิววัตถุ ส่งผลให้เครื่องมือนี้มีความละเอียดในระดับอะตอม

ส่วนการเคลื่อนที่ของเข็ม STM ถูกควบคุมด้วยแท่งเพียโซอิเล็กทริก ทำให้สามารถสร้างภาพถ่ายพื้นผิวของวัสดุได้โดยทำการกวาดเข็มไปในแนวแกน x และ y ของพื้นผิววัสดุ และระยะห่างระหว่างเข็มกับผิววัตถุ (z) ถูกปรับด้วยวงจรป้อนกลับ (feedback) โดยให้ขนาดของสัญญาณกระแสอิเล็กตรอนมีค่าคงที่ตรงกับค่าที่กำหนดไว้ (constant current mode) สัญญาณป้อนกลับที่ใช้ในการปรับระยะห่างจะถูกนำมาแสดงผลที่ตำแหน่ง x, y เพื่อสร้างเป็นภาพพื้นผิวอีกทีหนึ่ง เป็นการดีที่จะทราบไว้ว่า ภาพที่แสดงผลโดย STM ไม่ได้แสดงถึงความสูงของผิววัตถุโดยตรง

¹อาจารย์ (ดร.) ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

หากแต่หมายถึง ความหนาแน่นสถานะเฉพาะที่ (local density of states, LDOS, $\rho(\mathbf{r}, E)$) ซึ่งเป็นค่าที่เกี่ยวกับทั้งค่าความสูงของพื้นผิวที่ตำแหน่งหนึ่ง ($\mathbf{r}$) กับ โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์หรือระดับพลังงาน (E) ของพื้นผิวดัง โดยทั่วไปแล้วหากผิวของวัสดุมีการนำไฟฟ้าไม่ต่างกันมากนักที่ความต่างศักย์ค่าหนึ่ง ภาพถ่าย STM ก็พอจะอนุมานได้ว่าเป็นผลจากความสูงเพียงอย่างเดียว

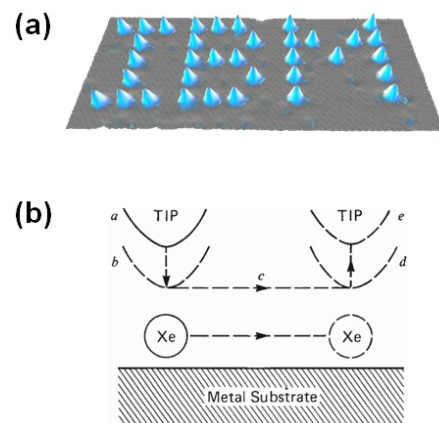


รูปที่ 1 ส่วนประกอบหลักที่ใช้ในการทำงานของ STM [2]

นอกจากจะใช้ในการถ่ายภาพแล้ว STM ยังสามารถใช้ในการสำรวจโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของพื้นผิววัสดุที่ตำแหน่งๆ หนึ่งได้อีกด้วย โดยการที่ให้เข็มหยุดอยู่ที่ตำแหน่งหนึ่งๆ แล้วเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างเข็มกับวัสดุ จากนั้นวัดค่ากระแสออกมา เทคนิคนี้เรียกว่า **Scanning Tunneling Spectroscopy (STS)** สำหรับเทคนิคนี้ ระบบที่ใช้ในการวัดจำเป็นต้องเสถียรพอที่เข็มของ STM อยู่กับที่นานมากพอที่จะทำการวัดได้ (ประมาณ 0.05 นาโนเมตรใน 1 วินาที) ซึ่งในการทดลองจะมีอุปสรรคจากการขยายตัวเชิงความร้อนที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นในบางการทดลองเพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำมากจึงจำเป็นต้องทดลองที่อุณหภูมิต่ำมากๆ เช่น ที่อุณหภูมิจนในไนโตรเจนเหลว (77 K) หรือ ฮีเลียมเหลว (4 K) สำหรับการจัดการอะตอมหรือโมเลกุลบนพื้นผิววัสดุที่จะกล่าวต่อไปนั้น เครื่อง STM ก็จำเป็นต้องมีความเสถียรมากในระดับเดียวกัน ในทางปฏิบัติทั่วไปแล้ว การที่เข็มอยู่ใกล้พื้นผิววัสดุมากๆ ในระดับ 1 นาโนเมตรนั้น มีโอกาสสูงที่เข็มจะชนกับผิววัสดุโดยแรงจากภายนอก เช่น การสั่นของพื้นเนื่องจากคนเดินผ่าน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีระบบด้านการสั่น (vibration isolation) จากแรงหรือปัจจัยภายนอกใดๆ นี่เป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับ STM และ scanning probe อื่นๆ

การจัดการอะตอมและโมเลกุลเชิงกล

การจัดการอะตอมเดี่ยวๆ โดยใช้การย้ายที่โดย STM ถูกสาธิตเป็นครั้งแรก [4] โดย Don Eigler จากห้องปฏิบัติการวิจัยของบริษัท IBM ที่ Almaden ประเทศสหรัฐอเมริกา Eigler พยายามศึกษาอันตรกิริยาระหว่างอะตอมของก๊าซเฉื่อย เช่น อะตอมซีนอน (Xe) กับ พื้นผิวของโลหะ ในการศึกษานี้ Eigler ต้องทำการทดลองที่อุณหภูมิต่ำมากๆ ประมาณ 4 เคลวิน เพื่อที่จะป้องกันอะตอมซีนอนเคลื่อนที่ไปมาอย่างสุ่มบนพื้นผิวโลหะเนื่องจากผลของความร้อน Eigler ค้นพบว่าขณะที่เข็มของ STM เคลื่อนที่ผ่านอะตอมซีนอนบนพื้นผิวของนิกเกิล เข็มของ STM สามารถทำให้อะตอมซีนอนเคลื่อนที่ตามเข็มไปได้ โดยสาเหตุที่ทำให้อะตอมซีนอนเคลื่อนที่ ก็คือ ถ้าระยะห่างระหว่างเข็มกับอะตอมซีนอนใกล้มากพอ (น้อยกว่า 0.2 นาโนเมตร) ที่จะทำให้เกิดแรงที่เชื่อมโยงระหว่างเข็มกับอะตอมซีนอนขึ้น ด้วยความแม่นยำระดับอะตอมของ STM บวกกับแรงที่เกิดขึ้นระหว่างเข็มกับอะตอมนี้ Eigler สามารถสร้างตัวอักษร IBM จากอะตอมซีนอนจำนวน 35 อะตอม (รูปที่ 2) ซึ่งภาพโลโก้ที่กลายเป็นสัญลักษณ์แสดงให้เห็นว่ามนุษย์มีความสามารถในการควบคุมตำแหน่งของอะตอมได้ดังใจ และเป็นการเก็บข้อมูลที่มีความหนาแน่นสูง (ใช้ 35 อะตอมในการบรรจุอักษรสามตัว)



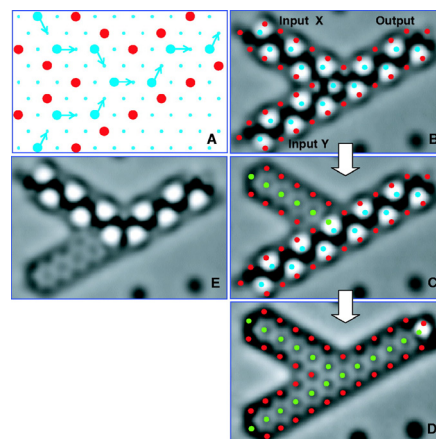
รูปที่ 2 การย้ายอะตอมซีนอนโดยการเคลื่อนที่ด้วยเข็ม STM (a) ภาพ STM แสดง 35 อะตอมซีนอนเรียงเป็นรูปอักษร IBM [3] (b) ขั้นตอนในการย้ายที่อะตอมโดยระยะห่างระหว่างเข็ม STM กับอะตอมซีนอน นั่นคือ (a ไป b) แล้วเลื่อนเข็มพร้อมอะตอมซีนอนไปยังตำแหน่งที่ต้องการ (d) และสุดท้ายเข็ม STM ถอยมาที่ความสูงเดิม (d ไป e) [4]

ต่อมาได้มีการใช้เทคนิคที่ถูกพัฒนาขึ้นนี้สร้างโครงสร้างพื้นฐานทางเรขาคณิตต่างๆ จากอะตอม เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ทางควอนตัม เช่น วงกลม เป็นต้น โดยโมเลกุลของ CO ถูกนำมาเรียงตัวเป็นเส้นรอบวงของวงกลม แล้วจากภาพ STM เราสามารถสังเกตเห็นคลื่นบนพื้นผิวในวงกลมคล้ายกับคลื่นในบ่อน้ำเมื่อเราหย่อนก้อนหินไปตรงกลางบ่อ ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้โดยการแกว่งการสั่นของอะตอมในสองมิติสำหรับปัญหาอนุภาคในกล่องสองมิติ ไม่เพียงแค่นั้นอิเล็กตรอนบนผิวของโลหะที่ถูกขังเท่านั้นที่เราสามารถสังเกตปรากฏการณ์ทางควอนตัมได้ ลักษณะทางควอนตัมก็ยังปรากฏในกลุ่มของอะตอมเองด้วย เมื่อเราทำการจัดเรียงกลุ่มของอะตอมเป็นเส้นตรง แล้วใช้เทคนิค STS ในการดูโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์พบว่าค่าสูงสุดเป็นช่วงๆ ขึ้นกับว่าเราสังเกตที่ระดับพลังงาน (E) เท่าไร (ที่ความต่างศักย์เท่าไร)

ในเวลาต่อมา โดยการใช้เทคนิคการเคลื่อนที่ของอะตอม คณะวิจัยของ Eigler [5] ยังค้นพบว่าเมื่อนำโมเลกุล CO สามโมเลกุลมาจัดวางบนผิวของทองแดง จะมีโครงสร้างการจัดเรียงแบบหนึ่งที่ไม่เสถียร (เรียกว่า chevron configuration) โครงสร้างนี้จะทำการเปลี่ยนการจัดเรียงตัวเพื่อนำไปสู่การจัดเรียงตัวอีกแบบหนึ่งที่เสถียรมากกว่า โดยที่ในการเปลี่ยนแปลงโมเลกุลตัวหนึ่งจากสามตัวนี้จะย้ายที่จากตำแหน่งหนึ่งไปสู่อีกตำแหน่งหนึ่งโดยอัตโนมัติ คณะของ Eigler ได้ใช้ประโยชน์จากคุณสมบัตินี้ในการสาธิตว่าเราสามารถส่งข้อมูลในรูปแบบหนึ่งผ่านการจัดเรียงตัวที่ไม่เสถียร โดยการที่เรามองว่าการเรียงตัวของกลุ่มโมเลกุลในสองรูปแบบแทนบิตของข้อมูล คือ 0 และ 1 ตามลำดับ โดยให้การใช้ STM ย้ายโมเลกุล CO ตัวแรกไปกระตุ้นให้กลุ่มโมเลกุลชุดแรกอยู่ในสถานะที่ไม่เสถียร เมื่อเปลี่ยนการจัดเรียงโมเลกุลในสถานะที่ไม่เสถียรไปสู่การจัดเรียงตัวในสถานะที่เสถียรมากกว่า การย้ายที่ของโมเลกุลไปมีผลต่อกลุ่มโมเลกุลชุดต่อไปคล้ายกับการลัดของโดมิโน ด้วยการใช้เทคนิคนี้ เราสามารถส่งผ่านข้อมูลผ่านกลุ่มของอะตอมจำนวนหนึ่งบนผิววัตถุได้

นอกจากนี้เรายังสามารถควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของกลุ่มอะตอมนี้ได้ โดยผลจากการส่งข้อมูลผ่านเส้นทางการส่งข้อมูลสองสายที่พบกัน ซึ่งทางคณะได้แสดงให้เห็นว่าผลลัพธ์การสาธิตนี้เทียบเท่าได้กับหน่วยคำนวณตรรกะพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณ ได้แก่ AND (แสดงใน รูปที่ 3) และ OR โดยรวมแล้ว การค้นพบนี้เป็นก้าวสำคัญให้เห็นความเป็นไปได้ของการสร้างเครื่องคำนวณ นั้น

คือ คอมพิวเตอร์ โดยใช้กระบวนการสร้างและการทำงานในระดับโมเลกุล อย่างไรก็ตาม มีปัญหาอีกมากที่รอการพัฒนา เช่น การใช้เวลานานในการจัดตัวอะตอม การที่ระบบไม่สามารถกลับไปสู่จุดเริ่มต้นได้ รวมถึงระบบเช่นนี้สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิต่ำมากๆ เท่านั้น



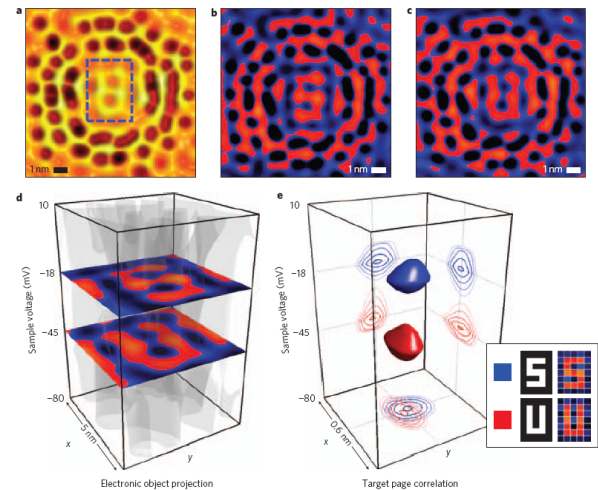
รูปที่ 3 การทำงานของ AND ลอจิกเกต (A) โมเดลของ AND ลอจิกเกต โดยแสดงลำดับการทำงานของ AND ลอจิกเกตตั้ง (B ถึง D) ต่อไปนี้ (B) รูป STM แสดงโครงสร้างการเรียงโมเลกุลตอนเริ่มต้น โดย Input X, Input Y และ output มีค่าเป็น 0 ทั้งหมด (C) ผลลัพธ์หลังจากการกระตุ้นที่ input X โดยการย้ายโมเลกุลส่วนปลายของ input X นั่นคือการเปลี่ยนค่า Input X เป็น 1 (D) โครงสร้างการเรียงของโมเลกุลหลังจากการกระตุ้นที่ปลาย input Y นั่นคือเปลี่ยนจาก 0 เป็น 1 จะเห็นได้ว่า การเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลมีผลต่อเนื่องทำให้ output เปลี่ยนจาก 0 เป็น 1 (E) ผลลัพธ์หลังการกระตุ้นที่ input Y ก่อน โดยที่หากทำการกระตุ้นที่ input X ต่อ ก็จะได้ผลลัพธ์เช่นเดียวกับ (D) ซึ่งไม่ต่างจากการกระตุ้นที่ input X ก่อน หมายเหตุ: รูป STM มีขนาด 5.1 nm x 3.4 nm [5]

การประยุกต์ใช้เทคนิคการจัดการอะตอมยังถูกนำไปใช้ในการจัดเก็บข้อมูลที่มีความหนาแน่นสูงกว่าในระดับอะตอมเดิมดังที่ Eigler ได้เคยสาธิตไว้ (การสร้างอักษร IBM) โดยที่ห้องปฏิบัติการวิจัย ณ Stanford University นำโดย Hari C. Manoharan [6] ได้ใช้เทคนิคใหม่ในการจัดการอะตอมในการเก็บข้อมูลไว้ในอีกมิติหนึ่งนอกเหนือจากมิติทางกายภาพ (x-y-z) โดยใช้ประโยชน์จากความจริงที่ว่า STM ไม่เพียงแต่ใช้ดูพื้นผิวของวัสดุได้เท่านั้น แต่ยังใช้ดูความหนาแน่นสถานะบนพื้นผิวได้ด้วย (LDOS)

วิธีที่ Manoharan และคณะใช้ก็คือ ใช้การเก็บข้อมูลแบบโฮโลแกรมโดยการเก็บข้อมูลแบบ 3 มิติ (x, y, และ ความหนาแน่นสถานะ หรือ ชั้นพลังงาน) ลงบนแบบผิววัสดุซึ่งเป็นแบบ 2 มิติ (x กับ y) วิธีนี้คล้ายคลึงกับเทคนิคโฮโลแกรมแบบใช้แสง ซึ่งตามปกติใช้ในการเก็บรายละเอียดของวัตถุใน 3 มิติลงบนโฮโลแกรม 2 มิติซึ่งสร้างจากการแทรกสอดของสอง coherent waves โดยคลื่นอันหนึ่งเก็บข้อมูล ในขณะที่คลื่นอีกอันหนึ่งใช้อ้างอิงเมื่อใช้คลื่นอ้างอิงฉายไปบนโฮโลแกรม 2 มิติก็จะได้ภาพในรูปแบบ 3 มิติกลับคืนมา

สำหรับการใช้โมเลกุลในการสร้างโฮโลแกรมนั้น เราใช้คลื่นของอิเล็กตรอนบนพื้นผิวของโลหะทองแดงแทนคลื่นแสง โดยที่เราสามารถควบคุมรูปแบบการแทรกสอดของคลื่น ผ่านการจัดเรียงตำแหน่งของโมเลกุล CO ซึ่งคลื่นอิเล็กตรอนบนพื้นผิววัสดุจะกระเจิงเมื่อกระทบกับโมเลกุล CO บนผิวทองแดง ทางคณะวิจัยได้สาธิตว่าโดยรูปแบบการใช้การจัดเรียงตัวที่แตกต่างกันของโมเลกุลที่มีการคำนวณ LDOS ของระบบไว้ล่วงหน้าแล้ว ทางคณะสามารถเขียนตัวอักษร S และ U ไว้ในที่ว่างโดยในการสแกนที่ความต่างศักย์ 10 mV และ -10 mV ตามลำดับ จำนวนค่าความหนาแน่นของข้อมูลได้เท่ากับ 2.8 บิตต่อนาโนเมตร² ซึ่งทางคณะยังสามารถเขียนตัวอักษร S และ U โดยใช้การจัดเรียงตัวของโมเลกุลเหมือนกันแต่อยู่ต่างระดับชั้นพลังงาน (รูปที่ 4) เหมือนการเขียนตัวอักษรในแต่ละหน้าหนังสือ ซึ่งหน้าหนังสือที่แตกต่างกันแทนระดับพลังงานที่แตกต่างกันไปนั่นเอง ค่าความหนาแน่นของข้อมูลในกรณีนี้จะเป็น 5.6 บิตต่อนาโนเมตร² แต่ค่านี้ยังห่างจากค่าความหนาแน่นข้อมูลคือ 8 บิตต่อนาโนเมตร² ที่ได้จากการใช้โมเลกุล (หรืออะตอม) ในการเขียนตัวอักษรโดยตรง ดังนั้นทางคณะวิจัยได้ใช้เทคนิคโมเลกุลโฮโลแกรมในสาธิตการเขียนตัวอักษร S เพียงตัวเดียวจะได้ค่าความหนาแน่นของข้อมูลเป็น 20 บิตต่อนาโนเมตร² ซึ่งจะมากกว่าการใช้โมเลกุลในการเขียนตัวอักษรโดยตรง

การทดลองเหล่านี้เป็นการพิสูจน์ในหลักการว่า เป็นไปได้ในการเก็บข้อมูลโดยใช้การเทคนิคโมเลกุลโฮโลแกรมและโดยการใช้เทคนิคนี้เราสามารถเอาชนะข้อจำกัดของการเก็บข้อมูลในระดับอะตอมได้



รูปที่ 4 การเก็บข้อมูลแบบโมเลกุลโฮโลแกรม (a) รูป STM (13.5 nm x 13.5 nm, $I = 1$ nA, $V = -60$ mV) ที่เข้ารหัสของข้อมูลจำนวนสองหน้า (คือ S กับ U) ที่ตำแหน่งเดียวกันบนพื้นผิว (b) แผนภาพชั้นพลังงาน (dI/dV) ที่ $V = -18$ mV แสดงหน้าที่บรรจุตัวอักษร S. (c) แผนภาพชั้นพลังงานที่ $V = 4$ mV แสดงหน้าที่บรรจุตัวอักษร U โดยที่การเรียงตัวของโมเลกุลไม่ได้แตกต่างไปจากเดิมเลย (d) แผนภาพชั้นพลังงานจากค่าความต่างศักย์หลายๆ ค่าระหว่าง -80 กับ 10 mV (e) แผนภาพแสดง normalized cross-correlation ของ $\rho(r, E)$ [6]

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ อาจารย์ ชาญกิจ คั่นทอง ผู้ให้คำแนะนำทางด้านการใช้ภาษาไทยและศัพท์บัญญัติแก่ผู้เขียน และช่วยปรับปรุงบทความจนกระทั่งมีความสมบูรณ์และชัดเจนยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

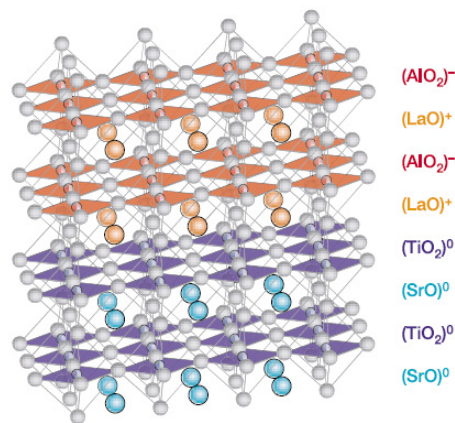
- [1] G. Binning, H. Rohrer, Ch. Gerber and E. Weibel, Phys. Rev. Lett. **49**, 57 (1982).
- [2] http://www.hk-phy.org/atomic_world/stm/stm03_e.html
- [3] <http://www.almaden.ibm.com/vis/stm/atomo.html>
- [4] D. M. Eigler and E. K. Schweizer, Nature **344**, 524 (1990).
- [5] A. J. Heinrich, C. P. Lutz, J. A. Gupta and D. M. Eigler, Science **298**, 1381 (2002).
- [6] C. R. Moon, L. S. Mattos, B. K. Foster, G. Zeltzer and H. C. Manoharan, Nature Nanotechnology **4**, 167 (2009).

หินสามารถ

วรวัฒน์ มีวาสนา¹

สิ่งแรกที่แวบเข้ามาในความคิดเมื่อเราเอ่ยถึงสารประกอบออกไซด์คือ หิน ทราช และ ฟูน – ฟังดูแล้วช่างธรรมดาเสียเหลือเกิน หากเราจะพยายามทำให้สารประกอบออกไซด์กลายเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าทันสมัย หรือ “หินสามารถ” ช่างดูไกลเกินเอื้อม แท้จริงแล้วเรื่องนี้ก็มีความเป็นไปได้

วิวัฒนาการด้านข้อมูลและเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ที่ทันสมัยในยุคนี้เกิดจากการศึกษาและค้นคว้าเกี่ยวกับคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุได้อย่างชัดเจน โดยอาศัยความก้าวหน้าทางด้านวัสดุศาสตร์ที่ทำให้เกิดเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีความบริสุทธิ์และได้ค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนสูง (High electron mobility) ซึ่งทำให้สามารถสร้างตัวทรานซิสเตอร์หรือชิปอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic chip) ความเร็วสูงที่เราใช้กันทุกวันนี้ได้ ในอีกเส้นทางงานวิจัยหนึ่งวิวัฒนาการทางเทคโนโลยีที่ค่อยๆ เข้ามาอย่างเงียบๆ ซึ่งมีแรงขับเคลื่อนจากการศึกษาวิจัยเรื่อง “สารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิวิกฤตสูง” ที่มีมานานกว่า 2 ทศวรรษ สารประกอบออกไซด์ของโลหะทรานซิชันสามารถทำให้มีความบริสุทธิ์มากพอที่จะพัฒนาเป็นเทคโนโลยีทางเครื่องมือสมัยใหม่ได้เช่นกัน คณะผู้วิจัยพบว่ามีเรื่องน่าสนใจ 2 ประเด็นที่เกี่ยวข้องกับสมบัติอันน่าสนใจของสารประกอบออกไซด์นี้ ประเด็นที่หนึ่งคือ เมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างสารกึ่งตัวนำและสารประกอบออกไซด์ สารประกอบออกไซด์แสดงสมบัติทางแม่เหล็กและไฟฟ้าที่หลากหลายกว่าสารกึ่งตัวนำ เช่น เป็นสารที่มีค่าไดอิเล็กทริกสูง เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด มีสภาพต้านทานที่เปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันเมื่อมีสนามแม่เหล็ก หรือเป็นตัวนำโปร่งแสง เป็นต้น

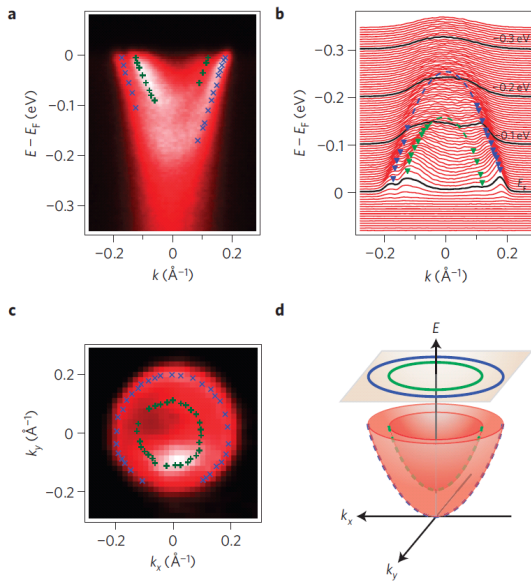


รูปที่ 1 โครงสร้างทางอะตอมของฉนวนรอยต่อระหว่างผลึกที่เป็นฉนวนไฟฟ้า SrTiO_3 และ LaAlO_3 โดยเฉพาะส่วนรอยต่อมีชั้นอิเล็กตรอนนำไฟฟ้าเกิดขึ้น และมีสมบัติทางไฟฟ้าที่หลากหลาย [1]

อีกประเด็นที่เป็นที่น่าสนใจ คือการศึกษาพื้นผิวและบริเวณรอยต่อระหว่างโลหะออกไซด์สองระบบ ถึงแม้เราจะทราบถึงสมบัติที่หลากหลายของโลหะออกไซด์มานานแล้ว แต่การนำโลหะออกไซด์มาสร้างเป็นอุปกรณ์นั้นมียุคไม่มากนัก ซึ่งความไม่แพร่หลายนี้อาจจะเป็นเพราะแต่เดิมเราคิดกันว่าสารประกอบออกไซด์มีความซับซ้อนทางเคมีสูงและไม่น่าทำให้มีความบริสุทธิ์ใกล้เคียงกับสารกึ่งตัวนำทั่วไปได้ แต่ความคิดนี้ก็ได้เปลี่ยนไปเมื่อ Ohtomo และ Hwang [1] ทำการศึกษาชั้นการนำอิเล็กตรอน (Conducting electron layer) ที่ฉนวนรอยต่อระหว่างฉนวนสองชนิด ได้แก่ SrTiO_3 และ LaAlO_3 ดังรูปที่ 1 พวกเขาพบว่าอิเล็กตรอนที่บริเวณรอยต่อระหว่างสารประกอบทั้งสองสามารถเคลื่อนที่ไปรอบๆ ได้อย่างง่ายดาย หรือมีค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนสูง เมื่อเทียบกับค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำ ที่มีทฤษฎีทำนายไว้ก็คือที่ฉนวนรอยต่อนี้ไม่เพียงแต่จะสามารถปรับค่าการนำไฟฟ้าได้ [2] แต่ยังแสดงสมบัติการเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด [3] และมีความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันกับสนามแม่เหล็กที่สูง (Large magnetoresistance) [4] ซึ่งทำให้

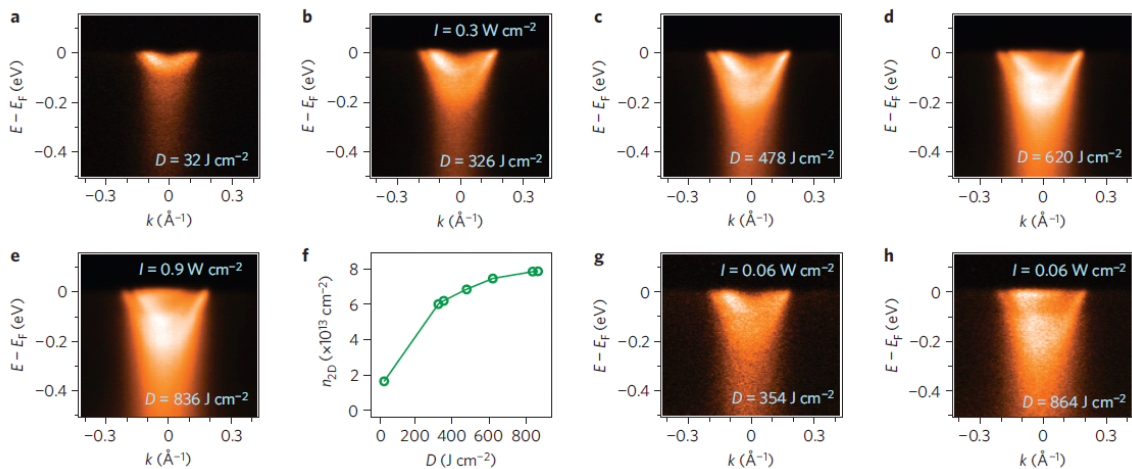
¹อาจารย์ (ดร.) สาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารประกอบดังกล่าวน่าจะพัฒนามาเป็นเครื่องมือเครื่องใช้อันเปี่ยมด้วยสรรพประโยชน์และล้ำเทคโนโลยีได้



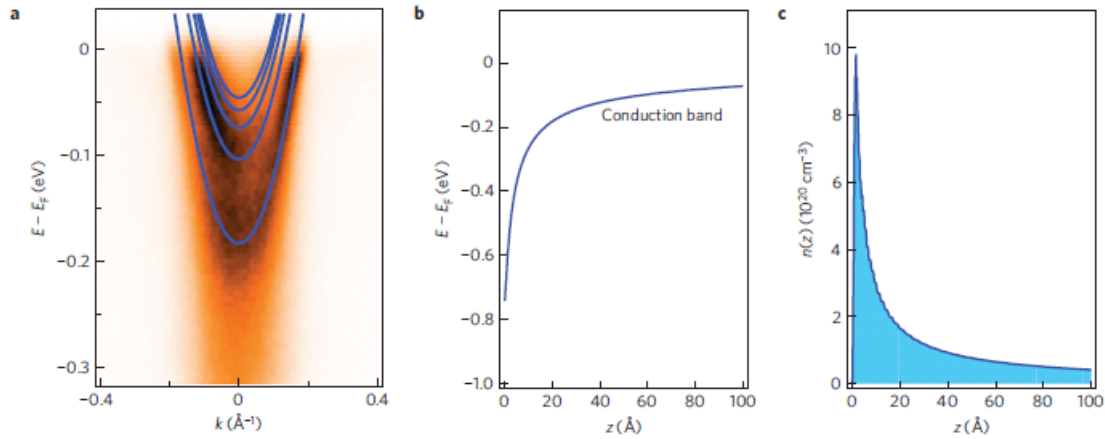
รูปที่ 2 a), b) โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานและโมเมนตัม (Band dispersion) ของชั้นอิเล็กตรอนบนผิวของ SrTiO_3 หลังการฉายแสงยูวี c) แสดง Fermi surface ของชั้นอิเล็กตรอนซึ่งเป็นรูปร่างกลมสองวง โดยพื้นที่ภายในวงกลมทั้งสอง (Luttinger area) จะบอกถึงความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสองมิติที่มีค่าประมาณ $7 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ d) แผนภาพแสดงโครงสร้างในสามมิติของ band dispersion และ Fermi surface [5]

ถึงแม้เราจะได้เห็นแล้วว่าที่ผิวรอยต่อนี้จะมีสมบัติเฉพาะตัว

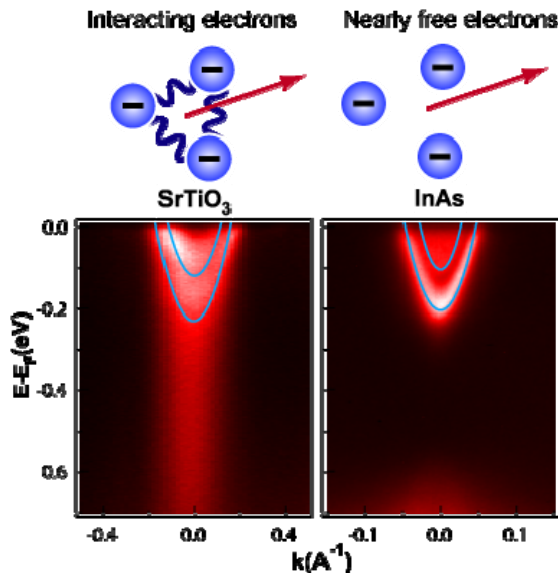


รูปที่ 3 a)-e) โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของ SrTiO_3 เมื่อฉายแสงยูวีด้วยปริมาณโดสต่างๆ (Irradiation dose, D) f) ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสองมิติที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณโดส g)-h) แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงบนผิวไม่เปลี่ยนแปลงกลับเมื่อฉายแสงด้วยความเข้มแสงต่ำ [5]

แต่ความเข้าใจเกี่ยวกับที่มาของการเกิดชั้นการนำอิเล็กตรอน และสมบัติของมันยังคงมีอย่างจำกัด คำถามที่เกิดขึ้นก็คือในการเกิดชั้นการนำอิเล็กตรอนต้องมีรอยต่อระหว่างฉนวนสองชนิดหรือไม่ ปัจจุบันผลการศึกษาของคณะผู้วิจัย [5]** แสดงให้เห็นว่าการเกิดชั้นการนำอิเล็กตรอนสามารถเกิดขึ้นได้บนผิวของสารโลหะออกไซด์เพียงชนิดเดียว และไม่จำเป็นต้องเกิดบนผิวรอยต่อระหว่างออกไซด์สองชนิด ข้อมูลที่ได้มาจากการทดลองโดยใช้เทคนิคโฟโตอิมิชชันแบบแยกแยะเชิงมุม (Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy, ARPES) ดังรูปที่ 2 เราสามารถเห็นชั้นการนำอิเล็กตรอนใน 2 มิติที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของ SrTiO_3 หลังจากฉายแสงยูวีที่มีความเข้มสูงจากเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนลงบนพื้นผิว ซึ่งพบว่าที่พื้นผิวสามารถมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสองมิติได้ถึง $7 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ ซึ่งมีค่าสูงเมื่อเทียบกับของสารกึ่งตัวนำทั่วไป นอกจากนั้นในรูปที่ 3 เรายังพบว่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนยังสามารถถูกควบคุมได้ด้วยการเปลี่ยนปริมาณโดสของการฉายแสง (Irradiation dose) ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่พื้นผิวนี้นี้มีค่าประมาณ $0.5\text{-}8 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ ซึ่งเป็นช่วงที่ใกล้เคียงกับที่พบในผิวรอยต่อระหว่าง $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ การค้นพบนี้จึงแสดงให้เห็นถึงวิธีการใหม่ในการสร้างและควบคุมการเกิดชั้นการนำอิเล็กตรอน 2 มิติโดยไม่ต้องอาศัยผิวรอยต่อ และเนื่องจากการที่ไม่มีผิวสัมผัสด้านบน จึงทำให้สามารถถ่ายภาพให้เห็นถึงรายละเอียดของโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยเครื่องมือ ARPES ซึ่งยังไม่เคยมีการศึกษาที่ใดมาก่อน



รูปที่ 4 การคำนวณหาโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้แบบจำลอง Quantum well states ที่คล้ายกับของรอยต่อของสารกึ่งตัวนำสองชนิด ซึ่งสนับสนุนว่า ชั้นอิเล็กตรอนสองมิติมีความหนาประมาณ 2 นาโนเมตร (20 อังสตรอม)



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ถึงความเหมือนและแตกต่างกันของ SrTiO_3 และสารกึ่งตัวนำทั่วไป (InAs)

จากข้อมูลการทดลองที่ได้คำนวณหาโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้แบบจำลอง Quantum well states ที่คล้ายกับของรอยต่อของสารกึ่งตัวนำสองชนิด ดังรูปที่ 4(b) การที่ศักย์ไฟฟ้ามีค่าต่ำเมื่อใกล้กับผิวของสาร (ผิวสารอยู่ที่ตำแหน่ง $z = 0$) และเริ่มสูงขึ้นเมื่อเข้าไปในชั้นสาร ทำให้เกิดลักษณะเหมือนเป็นหลุมของศักย์ไฟฟ้าดังกล่าว เรียกว่า Quantum well ปรากฏว่าถ้าจะให้การคำนวณได้โครงสร้างที่ใกล้เคียงกับผลการทดลอง (รูปที่ 4(a)) หลุมของศักย์ไฟฟ้าควรจะมีความกว้างประมาณ 2 นาโนเมตร หมายความว่าความหนาของชั้นอิเล็กตรอนสองมิติควรจะมีความหนาประมาณ 2 นาโนเมตรเช่นกัน แต่อย่างไรโครงสร้าง

อิเล็กทรอนิกส์ของ SrTiO_3 ที่วัดได้ก็ยังคงมีความแตกต่างจากของสารกึ่งตัวนำแบบดั้งเดิม ดังรูปที่ 5 ข้อมูลของคณะผู้วิจัยได้แสดงให้เห็นหลักฐานที่สำคัญว่าอิเล็กตรอนเองนั้นมีอันตรกิริยาต่อกันค่อนข้างมากใน SrTiO_3 ซึ่งทำให้คาดหวังถึงคุณสมบัติที่เหนือกว่าสารกึ่งตัวนำโดยทั่วไป เรื่องน่าประหลาดใจอีกอย่างหนึ่งเกิดขึ้นเมื่อคณะผู้วิจัยได้เห็นข้อมูลการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนซึ่งยังคงมีความสามารถที่จะเคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว ลองนึกภาพว่าคุณกำลังเดินอยู่ท่ามกลางงานปาร์ตี้ที่มีผู้คนขวุ่นวาย ไม่ต้องสงสัยเลยว่าจะยากสักแค่ไหนหากคุณจะเดินอย่างรวดเร็วไปรอบๆ งาน เพราะคุณจะต้องชนเข้ากับคนอื่นๆ ที่ยืนอยู่ในงานอย่างแน่นอ เมื่อลองนึกภาพตามนี้อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนมักจะทำให้การเคลื่อนที่ช้าลง แต่สิ่งที่ค้นพบกลับเป็นตรงกันข้าม ถึงแม้ว่าในขณะนี้จะไม่มีการอธิบายที่ชัดเจน แต่ก็อาจจะเป็นได้ว่าช่องพลังงานของโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์เปลี่ยนไปเมื่อระบบเปลี่ยนจาก 3 มิติมาเป็น 2 มิติ ซึ่งช่องพลังงานนี้อาจเปรียบได้กับพื้นที่ลาดเอียงคล้ายเนินเขาซึ่งเป็นที่จัดงานปาร์ตี้ ซึ่งแทนที่คุณรุ่มร่ามชนคนอื่นในงานปาร์ตี้ แต่กลับวิ่งได้เร็วขึ้นเนื่องจากการวิ่งลงจากเขา ถึงแม้ยังต้องมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมในส่วนนี้ แต่โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ที่มีรูปแบบเฉพาะที่คณะผู้วิจัยได้ค้นพบก็เป็นคำตอบโดยนัยว่าทำให้อุปกรณ์ที่ผลิตจากสารประกอบออกไซด์สามารถแสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่หลากหลายและยังคงมีค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนที่สูง

(อ่านต่อที่หน้า 30)

เหลี่ยมเพชรเม็ดงามวิชาแม่เหล็กไฟฟ้า: ตอนที่ 8 ชนิดของช่วงเวลาในการคิดกำลังการแผ่รังสี แม่เหล็กไฟฟ้าจากอนุภาคประจุเร่ง

 ชาญกิจ กันล่อง¹

1. บทนำ

ในตำราต่างๆ เกี่ยวกับทฤษฎีไฟฟ้าพลศาสตร์แบบฉบับ (classical electrodynamics) ในหัวข้อการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าจากอนุภาคประจุเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง ซึ่งเป็นทฤษฎีพื้นฐานหนึ่งของฟิสิกส์เครื่องเร่งอนุภาค (particle accelerator physics) มักมีการแสดงสูตรการคิดกำลังการแผ่พลังงานรังสี ทั้งในรูป กำลังรวมทั้งหมด และการกระจายของกำลังในทิศทางต่างๆ รอบๆ อนุภาคประจุเคลื่อนที่ เช่น [1-2] เนื่องจากในกรอบห้องปฏิบัติการมีระยะเวลา 2 ชนิด (โดยไม่นับในกรอบของอนุภาค) คือ ระยะเวลา t ที่รังสีเดินทางไปถึง ณ จุดสังเกตรังสี กับ ระยะเวลา t' ในอดีตที่อนุภาคกำลังปลดปล่อยรังสีดังกล่าว ซึ่งเรียกว่า retarded time ทำให้ผู้ที่เริ่มศึกษาหัวข้อนี้อาจสับสนได้ง่ายว่า ปริมาณเกี่ยวกับกำลังแบบต่างๆ คิดโดยใช้ระยะเวลาชนิดใด ผมได้มีโอกาสทำความเข้าใจหัวข้อนี้ จึงนำมาขยายความและแสดงให้เห็นชัดเจนในที่นี้ ซึ่งน่าจะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่เริ่มศึกษา เมื่อเขียนบทความนี้ใกล้เสร็จ ผมเพิ่งพบงานปริทัศน์ (review) [3] ที่แยกแยะกำลังที่คิดจากเวลาในแต่ละชนิดอย่างละเอียด แต่ผมยังมีประเด็นที่จะขยายความเพิ่มเติมอยู่ดี

2. ปรากฏการณ์ตอบแปลอ์กับระยะเวลาสองชนิด

เพื่อให้เข้าใจความแตกต่างระหว่างระยะเวลาสองชนิดข้างต้น เราจะสาริตโดยใช้ระบบ 1 อนุภาคแผ่รังสีอย่างง่าย กล่าวคือ พิจารณาอนุภาคประจุเคลื่อนที่ดังรูปที่ 1 เมื่ออยู่ที่จุด A ซึ่งมีพิกัด $\vec{r}(t')$ ณ เวลา t' ก็ให้กำเนิดคลื่นวงกลม A ออกมารอบๆ โดยหน้าคลื่นวงกลมนี้อาจเดินทางด้วยอัตราเร็วคงที่ c ไปยังจุดสังเกตคลื่น P ที่พิกัด $\vec{x}$ ณ เวลา t เมื่อให้การกระจัดจากจุด A ไปยัง P เป็น $\vec{R} = R\hat{n} \equiv \vec{x} - \vec{r}(t')$ จะได้

ความสัมพันธ์ระหว่าง t กับ t' ดังนี้

$$c(t - t') = R(t') = |\vec{x} - \vec{r}(t')| \quad (2.1)$$

$$\frac{dt}{dt'} = 1 - \hat{n}(t') \cdot \vec{\beta}(t') \quad (2.2)$$

สำหรับสมการ (2.2) มาจากการหาอนุพันธ์เทียบกับ t' และให้ $\vec{\beta} \equiv \frac{\vec{v}}{c}$ เมื่อ $\vec{v}$ เป็นความเร็วของอนุภาค เราจะเข้าใจสมการนี้ได้อย่างไร?

พิจารณารูปที่ 1 หลังจากที้อนุภาคให้กำเนิดหน้าคลื่น A ก็ใช้เวลา dt' เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง B และให้กำเนิดหน้าคลื่น B กล่าวอีกนัยหนึ่ง dt' เป็นคาบของการปล่อยคลื่นของอนุภาคตั้งแต่หน้าคลื่น A จนถึง B ที่สังเกตจากกรอบห้องปฏิบัติการ ในที่นี้เราจะวิเคราะห์แบบน้อยยิ่ง (infinitesimal) โดยให้จุด B มีระยะห่างน้อยยิ่งจากจุด A เมื่อหน้าคลื่นทั้งสองกำเนิดขึ้นแล้วก็ทยอยเดินทางออกไปด้วยอัตราเร็วคงที่ c ไปยังจุดสังเกต P ตามลำดับ วิเคราะห์เวลาที่หน้าคลื่นทั้งสองใช้เดินทางไปยังจุด P ดังนี้

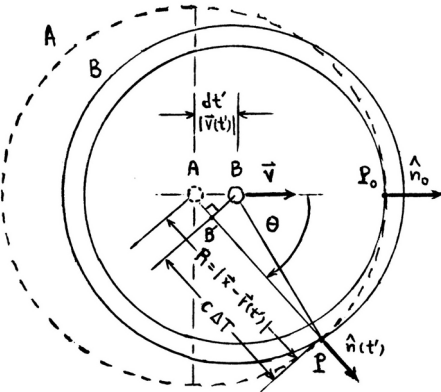
ก) การเดินทางของหน้าคลื่น A

- เมื่ออนุภาคกำเนิดหน้าคลื่น A วิเคราะห์จากรูปที่ 1 ได้ว่า หน้าคลื่นนี้จะใช้เวลาเท่ากับ $\frac{dt' \hat{n}(t') \cdot \vec{v}(t')}{c}$ ในการเดินทางถึงตำแหน่ง B' (หมายเหตุ: แม้ตำแหน่ง B' มีความสัมพันธ์กับ B ดังแสดงในรูป แต่ขณะนี้เรากำลังพูดถึงหน้าคลื่น A ที่เดินทางถึงตำแหน่ง B' ในอวกาศก่อนที่อนุภาคจะเดินทางไปถึง B)

¹อาจารย์ (ดร.) ภาควิชาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

- เมื่อหน้าคลื่น A ผ่านตำแหน่ง B' ก็กำหนดให้ใช้เวลา ΔT ในการเดินทางต่อไปยัง P

- รวมระยะเวลาที่หน้าคลื่น A กำเนิดจากอนุภาคที่ตำแหน่ง A แล้วเดินทางไปยัง P ได้เป็น $\Delta t_A = dt' \hat{n}(t') \cdot \vec{v}(t')/c + \Delta T$



รูปที่ 1 แสดงปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ โดยอนุภาคที่ retarded time t' ที่ตำแหน่ง A เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว $\vec{v}(t')$ และกำเนิดหน้าคลื่นวงกลม A ต่อมาเวลาผ่านไป dt' อนุภาคก็เคลื่อนไปยังตำแหน่ง B ซึ่งห่างออกไปน้อยยิ่งแล้วกำเนิดหน้าคลื่นวงกลม B หลังจากนั้น หน้าคลื่น A (วงเส้นประ) และหน้าคลื่น B (วงเส้นทึบ) ก็ทยอยมาถึงจุดสังเกต P ตามลำดับ สำหรับหน้าคลื่น B จะมาถึงจุด P_0 ก่อนที่จะมาถึงจุด P

ข) การเดินทางของหน้าคลื่น B

- เมื่ออนุภาคกำเนิดหน้าคลื่น A ก็ใช้เวลา dt' เดินทางด้วยความเร็ว $\vec{v}(t')$ ไปยังจุด B และกำเนิดหน้าคลื่น B

- วิเคราะห์จากรูปที่ 1 ได้ว่า หน้าคลื่น B จะเดินทางจากจุด B มาถึง P โดยใช้เวลา ΔT

- รวมระยะเวลาที่อนุภาคเดินทางจากตำแหน่ง A จนกระทั่งกำเนิดหน้าคลื่น B แล้วหน้าคลื่น B ก็เดินทางต่อไปยัง P ได้เป็น $\Delta t_B = dt' + \Delta T$

จากข้อ ก) และ ข) ได้ระยะเวลา dt ที่เป็นคาบของคลื่นที่สังเกตได้ ณ จุด P นั่นคือ นับตั้งแต่ที่หน้าคลื่น A เดินทางมาถึง จนกระทั่ง หน้าคลื่น B เดินทางมาถึง เป็น

$$dt = \Delta t_B + \Delta t_A \quad (2.3)$$

$$= dt' - \hat{n}(t') \cdot \vec{\beta}(t') dt'$$

$$f' = f \left[\frac{c}{c - \hat{n} \cdot \vec{v}} \right]_{\text{ret}} \quad (2.4)$$

ซึ่งก็คือสมการ (2.2) นั่นเอง และเมื่อเขียนในรูปความถี่ที่เป็นส่วนกลับของคาบก็ได้สมการ (2.4) ซึ่งก็คือสูตรที่แสดงปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ในกรณีที่เกิดจากแหล่งกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่เข้าหาผู้สังเกตหนึ่งนั่นเอง โดยที่ $[\]_{\text{ret}}$ หมายถึง ตัวประกอบที่อยู่ภายในวงเล็บเหลี่ยมนี้หาที่ retarded time t' พิจารณาความแตกต่างระหว่างเวลาทั้งสองชนิดที่สัมพันธ์กันตาม (2.1)-(2.3) ดังนี้

1) คาบ dt' เป็นคุณสมบัติในการกำเนิดคลื่นจากอนุภาคที่เคลื่อนที่ แต่คาบ dt ที่วัดได้ที่ P นั้นได้รับผลจากการเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาคด้วย เช่น กรณีในรูปที่ 1 อนุภาคเคลื่อนที่เข้าไปใกล้ P มากขึ้นแล้วค่อยปล่อยหน้าคลื่น B ออกมา ทำให้หน้าคลื่น B มาถึง P เร็วกว่ากรณีที่อนุภาคไม่เคลื่อนที่

2) ความสัมพันธ์ระหว่างคาบ dt กับ dt' ยังขึ้นกับมุม θ ระหว่าง $\hat{n}(t')$ กับ $\vec{v}(t')$ เพราะในกรณีดังรูปที่ 1 ที่จุด P มี $\hat{n}(t')$ ทำมุม θ กับ $\vec{v}(t')$ หน้าคลื่น B ต้องใช้เวลา $dt(\hat{n})$ ในการเดินทางมากขึ้นกว่าเวลา $dt(\hat{n}_0)$ ที่หน้าคลื่นมาถึงจุด P_0 ที่มี $\hat{n}_0(t')$ ขนานกับ $\vec{v}(t')$ ในขณะที่ dt' นั้นเหมือนกันทุกกรณี

3) เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ในระดับสัมพัทธภาพซึ่งมี $|\vec{v}| \rightarrow c$ เมื่อให้ $d\tau'$ เป็น proper time (เวลาในกรอบอนุภาคนิ่ง) ระหว่างที่กำเนิดหน้าคลื่น A กับ B , คาบ dt' ในกรอบห้องปฏิบัติการที่สมนัย (correspond) กันก็จะมีค่าของเวลา (time dilation) ตามสมการ

$$dt' = d\tau' \gamma(v) ; \quad \gamma \equiv 1/\sqrt{1 - \beta^2} \quad (2.5)$$

3. นิยามกำลังของการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าจากอนุภาคประจุเคลื่อนที่

ในกลศาสตร์ เมื่อให้ K และ U เป็นพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของอนุภาคภายใต้แรง $\vec{F}$ ตามลำดับ จาก ทฤษฎีบทงาน-พลังงานจลน์ ซึ่งมาจากหลักอนุรักษ์พลังงานกล สามารถเขียนได้ว่า

$$\frac{dK}{dt} = \vec{v} \cdot \vec{F} = -\frac{dU}{dt} \quad (3.1)$$

ในทำนองเดียวกัน จากหลักอนุรักษพลังงานในทฤษฎีไฟฟ้าพลศาสตร์ซึ่งเป็นทฤษฎีอันตรกิริยาระหว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากับอนุภาคประจุ ทำให้มีว่า [1] (ใช้ระบบหน่วยเกาส์เซียน)

$$\begin{aligned} \frac{dK}{dt} &= \int_V d^3x \vec{J} \cdot \vec{E} \\ &= -\int_V d^3x \left[\frac{\partial u_F}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{S} \right] \end{aligned} \quad (3.2)$$

โดยที่ t เป็นเวลาขณะสังเกตรังสีในกรอบห้องปฏิบัติการ, V เป็นปริมาตรของอาณาบริเวณที่พิจารณา ซึ่งมีระบบอนุภาคและสนามอยู่ภายใน โดยในช่วงที่พิจารณาไม่มีอนุภาคที่เป็นแหล่งกำเนิดรังสีหลุดออกไปภายนอกเลย, K เป็นพลังงานจลน์ทั้งหมดของอนุภาค, $u_F \equiv \frac{1}{8\pi}(\vec{E}^2 + \vec{B}^2)$ เป็นความหนาแน่นพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้า, และ $\vec{S} \equiv \frac{c}{4\pi}(\vec{E} \times \vec{B})$ เป็นพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกไปกับรังสีต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ เรียกว่า เวกเตอร์พอยติง (Poynting vector) เราสามารถจัดรูป (3.2) ได้ว่า

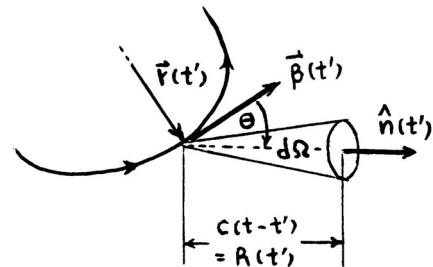
$$\frac{dE}{dt} = \frac{d}{dt}(K + U_F) = -\int_A d\vec{a} \cdot \vec{S} \quad (3.3)$$

โดยที่ A เป็นพื้นผิวห่อล้อมปริมาตร V , $U_F \equiv \int_V d^3x u_F$ เป็นพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งหมดใน V , และ $E \equiv K + U_F$ เป็นพลังงานของระบบอนุภาคกับสนามทั้งหมดใน V

สังเกตว่าใน (3.2) และ (3.3) ของวิชาไฟฟ้าพลศาสตร์ที่เป็นทฤษฎีสถานนั้น มีพจน์เกี่ยวกับ $\vec{S}$ ที่แสดงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถพาพลังงานแผ่ออกไปนอก V ได้ โดยไม่ใช้การที่อนุภาคพาพลังงานไป พจน์เช่นนี้ไม่มีในกลศาสตร์ธรรมดา (3.1) เราจึงนิยาม กำลังทั้งหมดของการแผ่รังสีออกไปนอกอาณาบริเวณ V ณ ขณะเวลาสังเกตรังสี t ว่า

$$\begin{aligned} \frac{dW}{dt} &\equiv P(t) \equiv \int_A d\vec{a} \cdot \vec{S} \\ &= \int_A d\Omega R^2 |\hat{n} \cdot \vec{S}| = \int_A d\Omega \frac{dP}{d\Omega}(t, \hat{n}) \end{aligned} \quad (3.4)$$

โดยที่ $\frac{dW}{dt}$ แสดงอัตราที่พลังงานของรังสี (W) แผ่ออกไปนอก V ซึ่งถึงแม้ว่าจะเท่ากับ $-\frac{dE}{dt}$ แต่มีความหมายไม่เหมือนกัน กล่าวคือ E จะรวมพลังงานจลน์ K ของอนุภาคด้วย ซึ่งถ้าสมมุติว่าภายใน V มี $dE = d(K + U_F) < 0$ ลดลง ก็จะมีการแผ่ในรูปพลังงานรังสี $dW > 0$ ในขนาดเดียวกันออกไปนอก V ส่วนปริมาณ $\frac{dP}{d\Omega}(t, \hat{n})$ เกี่ยวกับการสังเกตกำลังของรังสี ณ เวลาสังเกตรังสี t ภายในมุมตันน้อยยิ่ง $d\Omega$ ในทิศ $\hat{n}(t')$ ที่เทียบกับตำแหน่งอนุภาคประจุเร่งที่ $\vec{r}(t')$ ในอดีตที่อนุภาคมีความเร็ว $\vec{v}(t')$ และกำลังปลดปล่อยรังสีดังกล่าว สำหรับจุดสังเกตรังสี $\vec{x}$ อยู่ห่างจาก $\vec{r}(t')$ เป็นระยะ $R \equiv |\vec{x} - \vec{r}(t')|$ แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงความหมายของปริมาณ $\frac{dP}{d\Omega}(t, \hat{n})$ ของการสังเกตรังสีที่เวลา t ณ จุดสังเกตรังสี $\vec{x}$ ในทิศ $\hat{n}(t')$ ต่างๆ รอบๆ อนุภาคประจุเร่งในอดีตที่ตำแหน่ง $\vec{r}(t')$ ที่ retarded time t'

4. ปริมาณเกี่ยวกับกำลังชนิดต่างๆ ของการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าจากอนุภาคประจุเร่ง

4.1 กำลังของการแผ่รังสีที่คิดที่เวลาสังเกตรังสี t ใดๆ

สำหรับอนุภาคประจุเร่งมีการแผ่รังสีในรูปสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ลดลงช้าตามส่วนกลับของระยะทาง R ดังนี้

$$\vec{E}_{\text{rad}}(t, \vec{x}) = \frac{e}{c} \left[\frac{\hat{n} \times [(\hat{n} - \vec{\beta}) \times \dot{\vec{\beta}}]}{R(1 - \vec{\beta} \cdot \hat{n})^2} \right]_{\text{ret}} \quad (4.1)$$

$$\vec{B}_{\text{rad}}(t, \vec{x}) = [\hat{n} \times \vec{E}_{\text{rad}}]_{\text{ret}}$$

ทำให้ได้ว่า

$$\vec{S}(t, \vec{x}) = \frac{c}{4\pi} [(\vec{E}_{\text{rad}} \cdot \vec{E}_{\text{rad}}) \hat{n}]_{\text{ret}} \quad (4.2)$$

$$\frac{dP}{d\Omega}(t, \hat{n}) = \frac{c}{4\pi} [R \vec{E}_{\text{rad}}]^2_{\text{ret}} \quad (4.3)$$

ปริมาณ $\frac{dP}{d\Omega}(t, \hat{n})$ เกี่ยวกับกำลังที่คิดที่เวลาสังเกตรังสี t มีการนำไปใช้คิดปริมาณ

$$\frac{dW}{d\Omega} = \int_{-\infty}^{\infty} dt \frac{dP}{d\Omega}$$

ซึ่งนำไปใช้คิดปริมาณ $\frac{d^2 W}{d\omega d\Omega}(\omega, \hat{N})$ [1] ที่แสดงการกระจายในความถี่ ($\omega = 2\pi f$) และตามทิศทาง ($\hat{N}$) เทียบกับจุดกำเนิด O ที่พิจารณา ของพลังงานการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าของอนุภาคประจุเร่ง ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์สเปกตรัมของการแผ่รังสีจากเครื่องเร่งอนุภาค ณ จุดสังเกตรังสีรอบๆ จุดกำเนิดที่กำหนด เช่น การแผ่รังสีซินโครตรอนจากเครื่องเร่งอนุภาคซินโครตรอน [1-4] เป็นต้น

4.2 กำลังของการแผ่รังสีที่คิดที่เวลา retarded time t'

ในอดีตขณะที่รังสีก่อกำเนิด

เรานิยาม กำลังทั้งหมดของการแผ่รังสีออกจากอนุภาคประจุที่คิดที่เวลา retarded time t' ว่า

$$P(t') \equiv \frac{dW}{dt'} \quad (4.4)$$

ซึ่งแสดงสมบัติการแผ่พลังงานรังสีของตัวอนุภาคประจุเคลื่อนที่ในกรอบห้องปฏิบัติการ โดยไม่เกี่ยวกับการเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาค ปัญหาในการหาลำดับชนิดนี้ คือ เราสะดวกที่จะใช้รูป $\vec{S}(t, \vec{x})$ (4.2) ที่คิดที่เวลาสังเกตรังสี t จึงต้องทำการเปลี่ยนตัวแปรจาก $t' \rightarrow t$ เท่าที่ทราบ ในตำราที่เขียนเกี่ยวกับเรื่องนี้ เช่น [1-3] ซึ่งแสดงคณิตศาสตร์อย่างละเอียด ยังอธิบายเทคนิคการเปลี่ยนตัวแปรนี้อย่างกระชับและไม่ชัดเจน ในที่นี้ผมจะพยายาม

อธิบายให้ชัดเจน จากนิยาม (4.4) เราสามารถใช้เทคนิค คือ หลักอนุรักษพลังงาน เขียน $\frac{dP}{d\Omega}(t', \hat{n})$ ในรูป $\frac{dP}{d\Omega}(t, \hat{n})$ ดังนี้

$$\begin{aligned} dW &= dt' P(t') = dt' \int d\Omega \frac{dP}{d\Omega}(t') \\ &= \int d\Omega \left[dt' \frac{dP}{d\Omega}(t') \right] \\ &= \int d\Omega dt(\hat{n}) \left[\frac{dt'}{dt} \frac{dP}{d\Omega}(t') \right] \\ &= \int d\Omega dt(\hat{n}) \left[\frac{dP}{d\Omega}(t) \right] \end{aligned} \quad (4.5)$$

พิจารณา (4.5) ตามขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

(ก) บรรทัดที่ 1 $\rightarrow$ 2 จากรูปที่ 2 เรานิยามทิศ $\hat{n}(t')$ และ $d\Omega$ ที่สังเกตรังสีรอบๆ ตำแหน่ง $\vec{r}(t')$ ของอนุภาคในอดีต และเมื่อรวบรวมกำลังการแผ่รังสีของอนุภาคที่เวลา t' จากทุกๆ $d\Omega$ รอบๆ $\vec{r}(t')$ ก็ได้กำลังทั้งหมด $P(t')$ เนื่องจาก t' เป็นวิวัฒนาการของอนุภาค ไม่ขึ้นกับทิศ $\hat{n}(t')$ รอบๆ $\vec{r}(t')$ ทำให้สามารถนำ dt' เข้าไปในเครื่องหมายอินทิเกรตมุมต้นได้ ในบรรทัดที่ 2 เราพิจารณาแต่พลังงานรังสี dW เฉพาะที่ปลดปล่อยในช่วง dt' น้อยยิ่งเท่านั้น เพราะไม่สามารถอินทิเกรตตัวแปร t' ในช่วงจำกัดได้ ไม่เช่นนั้นการเปลี่ยนค่า t' จะทำให้ทิศ $\hat{n}(t')$ และ $d\Omega$ ที่นิยามเฉพาะกับ $\vec{r}(t')$ ที่ t' หนึ่งๆ เปลี่ยนความหมาย

(ข) บรรทัดที่ 2 $\rightarrow$ 3 เปลี่ยนตัวแปรจาก t' เป็น t แต่สังเกตจากรูปที่ 1 ว่า เมื่อ t' เปลี่ยนแปลงน้อยยิ่งไป dt' , ค่า dt ของรังสีชุดเดียวกันที่จะมาถึง ขึ้นอยู่กับตำแหน่งจุดสังเกต P ตามทิศ $\hat{n}(t')$ ต่างๆ ซึ่งทำมุมกับ θ กับ $\vec{v}(t')$ หรืออีกนัยหนึ่ง ตัวประกอบ $\frac{dt'}{dt}$ ขึ้นอยู่กับมุม θ ดังสมการ (2.2) ทำให้ตัวประกอบนี้ต้องอยู่ภายในเครื่องหมายอินทิเกรตมุมต้น นำออกมาไม่ได้

(ค) บรรทัดที่ 3 $\rightarrow$ 4 เนื่องจากช่วง dt ที่สมนัยกับ dt' ขึ้นอยู่กับทิศทาง $\hat{n}(t')$ ต่างๆ ของจุดสังเกต P ดังนั้นการรวบรวมพลังงานรังสีในช่วง dt ที่สมนัยกับพลังงานรังสีที่ปลดปล่อยในช่วง dt' ต้องรวบรวมจากทุกทิศทาง $\hat{n}$ ที่มี $dt(\hat{n})$ ไม่เท่ากันดังในบรรทัดที่ 4 ของ (4.5) เนื่องจากพลังงานรังสี dW ระหว่างที่แผ่ออกในช่วง dt' กับ พลังงานรังสีชุด

เดียวกันที่สังเกตได้ในช่วง $dt(\hat{n})$ ที่รวบรวมจากทุกทิศทาง ต้องอนุรักษ์ ทำให้บรรทัดที่ 3 เท่ากับบรรทัดที่ 4

จากบรรทัดที่ 3 และ 4 ของ (4.5) เมื่อจัดรูปใหม่ และแทนค่า (2.2) กับ (4.1)-(4.3) ได้ว่า

$$\begin{aligned} \frac{dP}{d\Omega}(t', \hat{n}) &= \frac{dt}{dt'} \frac{dP}{d\Omega}(t, \hat{n}) = \frac{dt}{dt'} R^2 (\hat{n} \cdot \bar{S}) \\ &= \frac{c}{4\pi} \left[(1 - \bar{\beta} \cdot \hat{n}) |R \bar{E}_{\text{rad}}|^2 \right]_{\text{ret}} \\ &= \frac{e^2}{4\pi c} \left[\frac{|\hat{n} \times [(\hat{n} - \bar{\beta}) \times \dot{\bar{\beta}}]|^2}{(1 - \bar{\beta} \cdot \hat{n})^5} \right]_{\text{ret}} \end{aligned} \quad (4.6)$$

ปริมาณ $\frac{dP}{d\Omega}(t', \hat{n})$ แสดง ลักษณะการกระจายของกำลังการแผ่รังสีที่จะแผ่ออกไปรอบๆ อนุภาคประจุในขณะที่กำลังแผ่รังสี ซึ่งเป็นสมบัติของตัวอนุภาคประจุเคลื่อนที่เองในกรอบห้องปฏิบัติการ โดยไม่เกี่ยวกับการเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาค ใน [1] มีการแสดงสูตรของปริมาณนี้สำหรับกรณี $\dot{\mathbf{v}}(t') // \bar{\mathbf{v}}(t')$ และกรณี $\dot{\mathbf{v}}(t') \perp \bar{\mathbf{v}}(t')$ ไว้

ในลิมิตไม่สัมพัทธภาพ (non-relativistic limit) กล่าวคือ $\beta = \frac{v}{c} \rightarrow 0$ จะเห็นว่า $\bar{E}_{\text{rad}}(t, \bar{x})$ ใน (4.1) ประกอบด้วยตัวประกอบ $\frac{e}{c} \frac{1}{R}$ คูณด้วย ตัวประกอบตรีโกณมิติ (trigonometric factor) เมื่อกระจายพจน์ในตัวประกอบตรีโกณมิติในรูปกำลังของ $\bar{\beta} = \frac{\bar{v}}{c}$ จะเห็นว่าพจน์ที่ขึ้นกับ $\bar{\beta}$ ตั้งแต่กำลังหนึ่งขึ้นไป มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับพจน์กำลังศูนย์ จึงตัดทิ้งไปได้ว่า

$$\bar{E}_{\text{rad}}(t, \bar{x}) \approx \frac{e}{c} \left[\frac{\hat{n} \times (\hat{n} \times \dot{\bar{\beta}})}{R} \right]_{\text{ret}} \quad (4.7)$$

เมื่อใช้ (4.7) ในการประมาณ (4.6) และ (4.4) แบบไม่สัมพัทธภาพ จะได้ว่า

$$\frac{dP}{d\Omega}(t', \hat{n}) \approx \frac{e^2}{4\pi c^3} \left| \frac{d\bar{v}}{dt'} \right|^2 \sin^2 \theta \quad (4.8)$$

$$\begin{aligned} P(t') &= \int d\Omega \frac{dP}{d\Omega}(t') \approx \frac{2}{3} \frac{e^2}{c^3} \left| \frac{d\bar{v}}{dt'} \right|^2 \\ &= \frac{2}{3} \frac{e^2}{c} \frac{1}{(mc)^2} \frac{d\bar{p}}{dt'} \cdot \frac{d\bar{p}}{dt'} \end{aligned} \quad (4.9)$$

เรียกว่า สูตรลาร์มอร์ (Larmor formula) [1-2] ซึ่งเป็นกำลังทั้งหมดที่คิดที่เวลา t' ขณะที่อนุภาคประจุปลดปล่อยรังสี

เรามีวิธีง่าย ๆ ในการหา $P(t')$ แบบสัมพัทธภาพ โดยใช้วิธีขยายทั่วไป (generalization) จาก $P(t')$ (4.9) ให้เป็นรูปที่สอดคล้องกับกาล-อวกาศ (space-time) 4 มิติในทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ [1-2] (ส่วนวิธีหา $P(t')$ แบบสัมพัทธภาพโดยตรงดูได้ใน [5]) กล่าวคือ ปริมาณพลังงาน-โมเมนตัมของอนุภาคในทฤษฎีสัมพัทธภาพ จะก่อรูป (form) เป็น 4-โมเมนตัม (4-momentum) ซึ่งเป็นปริมาณ 4-เวกเตอร์ (4-vector) ที่มี 4 องค์ประกอบ (component) ซึ่งมี 2 ตัวแทน (representation) หรือเขียนได้ 2 แบบ กล่าวคือ p^μ กับ p_μ ดังนี้

$$\begin{aligned} p^\mu &= (p^0, \bar{p}) = \left(\frac{E}{c}, \bar{p} \right) = (m\gamma c, m\gamma \bar{v}) \\ p_\mu &= (p^0, -\bar{p}) \end{aligned} \quad (4.10)$$

โดยที่ดัชนี $\mu = 0, 1, 2, 3$ สำหรับผลคูณดอท (dot product) ระหว่างสอง 4-เวกเตอร์ A^μ กับ B^μ ใดใด เป็นปริมาณ 4-สเกลาร์ (4-scalar) อยู่ในรูป

$$\begin{aligned} A_\mu B^\mu &\equiv A_0 B^0 + A_1 B^1 + A_2 B^2 + A_3 B^3 \\ &= A^0 B^0 - \bar{A} \cdot \bar{B} \end{aligned} \quad (4.11)$$

และปริมาณพลังงาน-โมเมนตัมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าก็ต้อง

เขียนได้ในรูป $p_F^\mu = (p_F^0, \bar{p}_F) = \left(\frac{W}{c}, \bar{p}_F \right)$ นั่นคือพลังงานรังสี W ที่คิดจาก (4.9) ต้องเป็นองค์ประกอบที่ 0 ของ p_F^μ เมื่อจัดรูป (4.9) ให้สอดคล้องกับ (4.10) โดยแทนสมการ (2.5) ลงไปจะได้

$$\begin{aligned}
 dp_F^0 &= \frac{dW}{c} = dt' \frac{P(t')}{c} \\
 &= c dt' \frac{2}{3c} \left(\frac{e}{c}\right)^2 \frac{1}{(mc)^2} \frac{d\vec{p}}{dt'} \cdot \frac{d\vec{p}}{dt'} \quad (4.12) \\
 &= d\tau' p^0 \frac{2}{3} \left(\frac{e}{c}\right)^2 \left[\frac{1}{(mc)^3} \frac{d\vec{p}}{d\tau'} \cdot \frac{d\vec{p}}{d\tau'} \right]
 \end{aligned}$$

จะเห็นว่าด้านซ้ายกับด้านขวาในบรรทัดสุดท้ายของสมการ (4.12) ต่างก็มีองค์ประกอบที่ 0 ทำให้ตัวประกอบในวงเล็บเหลี่ยมต้องไม่มีองค์ประกอบใดๆ ของ 4-เวกเตอร์ นั่นคือ เป็นปริมาณ 4-สเกลาร์ ซึ่งมีรูปแบบง่ายที่สุดอยู่ในรูปผลคูณคอต (4.11) ซึ่งหาได้โดยการเปลี่ยนอนุพันธ์เทียบกับเวลา t' ให้เป็นเทียบกับ proper time τ' ของอนุภาคขณะที่กำเนิดรังสีแทน ซึ่ง τ' เป็นปริมาณ 4-สเกลาร์เช่นกัน เราจึงได้ว่า

$$\begin{aligned}
 dp_F^0 &= \frac{dW}{c} = dt' \frac{P(t')}{c} \\
 &= d\tau' p^0 \frac{2}{3} \left(\frac{e}{c}\right)^2 \left[-\frac{1}{(mc)^3} \frac{dp_\mu}{d\tau'} \frac{dp^\mu}{d\tau'} \right] \quad (4.13)
 \end{aligned}$$

สำหรับเครื่องหมายลบ มีเพื่อให้พจน์ที่มีดัชนี $\mu = 1, 2, 3$ ของ (4.13) มีเครื่องหมายตรงกับ (4.12) ดังนั้นได้รูปทั่วไปแบบสัมพัทธภาพของ $P(t')$ คือ

$$\begin{aligned}
 P(t') &= \frac{d}{dt'} (cp_F^0) \\
 &= -\frac{2}{3} \frac{e^2}{c} \frac{1}{(mc)^2} \frac{dp_\mu}{d\tau'} \frac{dp^\mu}{d\tau'} \quad (4.14)
 \end{aligned}$$

ในตำราต่างๆ เช่น [1-2] มีการเขียน $P(t')$ ในรูปของเวลา t' หลายรูป เช่น

$$\begin{aligned}
 P(t') &= \frac{2}{3} \frac{e^2}{c} \frac{1}{(mc)^2} \left[\left(\frac{d\vec{p}}{d\tau'} \right)^2 - \beta^2 \left(\frac{d\vec{p}}{d\tau'} \right)^2 \right] \quad (4.15) \\
 &= \frac{2}{3} \frac{e^2}{c} \gamma^6 \left[\left(\frac{d\vec{\beta}}{dt'} \right)^2 - \left(\frac{d\vec{\beta}}{dt'} \times \frac{d\vec{\beta}}{dt'} \right)^2 \right]
 \end{aligned}$$

เรียกกรุปในบรรทัดสุดท้ายของ (4.15) ว่า สูตรลินาร์ด (Liénard formula) เมื่อเป็นที่ทราบวาสสูตรข้างต้นเป็นการคิดกำลังทั้งหมด

ในขณะทีอนุภาคปลดปล่อยรังสี เพื่อให้ง่าย ก็ตัดเครื่องหมาย “prime” เขียนเป็น $P(t)$ ได้

4. สรุป

เราได้อธิบายความหมายและความแตกต่างของ เวลาขณะสังเกตรังสี (t) กับ retarded time (t') และอธิบายความหมายของกำลังที่คิดที่เวลาแต่ละชนิดข้างต้น ต่อมาได้แสดงให้เห็นชัดเจนว่าปริมาณเกี่ยวกับกำลังการแผ่รังสีชนิดต่างๆ ที่ปรากฏในตำรามาตรฐานทางไฟฟ้าพลศาสตร์ในหัวข้อการแผ่รังสีจาก

อนุภาคประจุเร่งว่ามาจาก กำลังที่คิดที่เวลาชนิดใด ได้แก่ ปริมาณ

$\frac{d^2 W}{d\omega d\Omega}(\omega, \hat{N})$ ที่ใช้วิเคราะห์สเปกตรัม มาจากกำลังที่คิดที่

เวลาสังเกตรังสี t , ปริมาณ $\frac{dP}{d\Omega}(t', \hat{n})$ ที่แสดงลักษณะการ

กระจายของกำลังการแผ่รังสีรอบๆ อนุภาคประจุเร่งขณะที่กำลังแผ่รังสี เป็นกำลังที่คิดที่ retarded time t' , รวมถึง สูตรลาร์มอร์ และ สูตรลินาร์ด เป็นกำลังแผ่รังสีรวมทั้งหมดที่คิดที่ retarded time t'

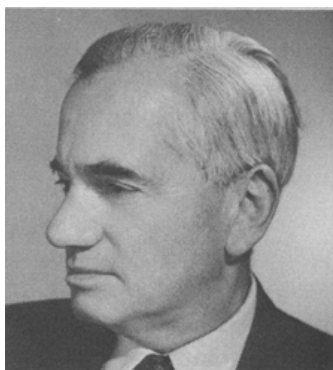
เอกสารอ้างอิง

- [1] J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics* (John Wiley & Sons, New York, 1975), 2nd ed.
- [2] C. A. Brau, *Modern Problems in Classical Electrodynamics* (Oxford, New York, 2004).
- [3] A. Hofmann, *The Physics of Synchrotron Radiation* (Cambridge, 2007).
- [4] ชาญกิจ กันจน์, “เหล็ยมเพชรเมื่อดงามวิชาแม่เหล็กไฟฟ้า: ตอนที่ 7 สูตรการกระจายในความถี่และมุมของพลังงานการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าโดยอนุภาคประจุเร่ง,” *วารสารฟิสิกส์ไทย*, ปีที่ 27 ฉบับที่ 2, 2553.
- [5] A. O. Barut, *Electrodynamics and Classical Theory of Fields and Particles* (Dover, 1980).

การค้นพบการแบ่งตัวของนิวเคลียส¹

แรกเริ่มการคิดวิธีการแบ่งตัวของนิวเคลียสมีสี่สันด้วยความสำเร็จ ความล้มเหลว
หรือแค่เพียงโชคช่วยของนักวิทยาศาสตร์หลายท่านจากประเทศต่างๆ
ชัยชนะจากการรวมกันของโชคชะตา กับความคิดอย่างรอบคอบ
ทำให้มนต์คำอันน่าตื่นตะลึงนี้เป็นความจริงขึ้นมา

อ็อตโต อาร์ ฟริช และ จอห์น เอ วิลเลอร์
แปลโดย วันชัย โพธิ์พิจิตร²



อ็อตโต อาร์ ฟริช *Otto Robert Frisch, O.B.E., F.R.S.*

ศาสตราจารย์แจคโซเนียน (Jacksonian Professor) ในวิชาปรัชญาธรรมชาติ (ฟิสิกส์)
แห่งมหาวิทยาลัยเคมบริดจ์ อังกฤษ ทำวิจัยที่เบอร์ลิน (1927-30) สัมบูร์ก (1930-33)
ลอนดอน (1933-34) โคเปนเฮเกน (1934-39) และ เบอริงแฮม (1939-40) ระหว่าง
สงครามเขาทำงานเรื่องระเบิดปรมาณูที่ลอสอะลามอส เขาเป็นคนแรกซึ่งสังเกตพบ
พลังงานที่ถูกปลดปล่อยในการแบ่งตัวของนิวเคลียส



จอห์น เอ วิลเลอร์ *John Archibald Wheeler*

ศาสตราจารย์วิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยพรินซ์ตัน สหรัฐอเมริกา หนึ่งใน
นักวิทยาศาสตร์อเมริกันคนแรกๆ ซึ่งใส่ใจในเรื่องการแบ่งตัวของนิวเคลียส ปี 1934
ไปทำงานกับนีลส์ โบห์ร์ ที่โคเปนเฮเกนในฐานะบัณฑิตวิจัยแห่งชาติ (national
research fellow) เขาสำเร็จ Ph.D. ทางฟิสิกส์จากมหาวิทยาลัยจอห์น ฮอปกินส์ตั้งแต่
ปี 1933 เข้าทำงานในแผนกวิชาฟิสิกส์ของพรินซ์ตันในปี 1938

¹ เรื่องนี้แปลเมื่อพฤศจิกายน พ.ศ.2553 จากบทความ “The Discovery of Fission”. *Physics Today* 20 (1967) 11, pp. 43-52 แปลครั้งแรกจาก *Physics Education* นิตยสาร “วิทยาศาสตร์” มกราคม – มีนาคม พ.ศ.2512

² ผู้แปล รศ. ดร.วันชัย โพธิ์พิจิตร Wanchai Phothiphichitr, Ph.D., D.I.C., B.Sc.(Special Physics), A.R.C.S. รับราชการที่ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (พ.ศ.2523-46) เป็นคณบดีคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (พ.ศ.2542-46) เริ่มรับราชการที่มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ในปี พ.ศ.2509 คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและวิทยาศาสตร์ สจธ.(2518-20) คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจธ.(2520-23)

ความเป็นมาของเรื่องทั้งหมด

โดย อ็อตโต อาร์ ฟริช

อนุภาคนิวตรอนถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1932 แล้วทำไมจึงต้องใช้เวลาอีก 7 ปี ก่อนที่จะพบการแบ่งตัวของนิวเคลียส? การแบ่งตัวของนิวเคลียสเป็นปรากฏการณ์ที่น่าทึ่งมาก มันก่อให้เกิดกัมมันตภาพรังสีทุกชนิดเป็นจำนวนมาก และผลิตชิ้นส่วนซึ่งมีไอออนไนเซชันมากกว่าไอออนไนเซชันของสิ่งใดๆ ที่รู้จักกันมาก่อนแล้วทำไมถึงใช้เวลานานเช่นนี้? เป็นคำถามซึ่งอาจตอบได้ดีที่สุดโดยการวิจารณ์สถานการณ์ในยุโรปจากมุมมองของนักฟิสิกส์ทดลองผู้หนึ่ง

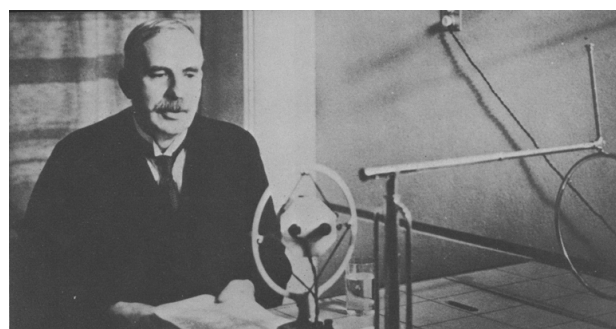
การวิจัยค้นคว้าในยุโรป

ในยุโรปมีห้องปฏิบัติการสองสามแห่งเท่านั้นที่ดำเนินการวิจัยทางนิวเคลียร์ฟิสิกส์ และ ข้าพเจ้าคิดว่า คำว่า ‘ทีม’ ยังไม่ได้ถูกใส่เข้าไปในภาษาเฉพาะวงการของวิทยาศาสตร์ วิทยาศาสตร์ยังคงถูกคิดตามศึกษากันอยู่โดยนักวิทยาศาสตร์ปัจเจกชน ซึ่งทำงานร่วมกับลูกศิษย์และผู้ช่วยอีกคนสองคนเท่านั้น

ปารีส เป็นที่รวมสถานปฏิบัติการวิจัยที่แข่งขันที่สุดแห่งหนึ่งในยุโรป เป็นนครที่กัมมันตภาพรังสีถูกค้นพบ และเป็นที่ซึ่งมาดามคูรีทำงานจนกระทั่งถึงแก่กรรมในปี ค.ศ. 1934 เธอยังคงมีอิทธิพลต่อสถานการณ์ คือว่า เทคนิคการทดลองก็คล้ายคลึงกันกับเทคนิคซึ่งใช้ในตอนต้นศตวรรษที่ 20 นั่นคือ ไอออนไนเซชันแอมเบอร์ และ อิเล็กโตรมิเตอร์ สถานการณ์เช่นนี้ดีพอสำหรับกระทำการวัดอย่างแม่นยำเกี่ยวกับธาตุกัมมันตรังสีธรรมชาติ แต่มันยังไม่ดีพอสำหรับงานส่วนใหญ่ที่เกี่ยวกับการแตกสลายของนิวเคลียส มาดามคูรีให้ความเชื่อถ้อยเล็กน้อยต่อทฤษฎี ครั้งหนึ่งเมื่อลูกศิษย์ของเธอคนหนึ่งเสนอแนะการทดลองอันหนึ่ง และเสริมว่านักฟิสิกส์ทฤษฎีห้องถัดไปคิดว่ามีหวังสำเร็จ มาดามคูรีตอบว่า “เอาละ เราอาจลองทำดูเหมือนกันนั่นแหละ” การไม่ใส่ใจของเขาทั้งหลายในทฤษฎี อาจเป็นเหตุทำให้พวกเขาไม่ได้เป็นผู้ค้นพบนิวตรอน

เคมบริดจ์ เป็นเมืองที่สองซึ่งควรแก่การอภิปราย เออร์เนสต์ รัทเธอร์ฟอร์ด ผู้ซึ่งบุคลิกภาพอันน่าเกรงขามของเขามีอิทธิพลต่อการวิจัยที่เคมบริดจ์ ได้ผ่านนิวเคลียสของอะตอมสำเร็จเมื่อปีค.ศ.1919 อันที่จริงตั้งแต่ปี 1919 เป็นต้นมา เขาได้วุ่นอย่างใจ

จดใจจ่ออยู่กับสังเกตการณ์และการนับอนุภาคของนิวเคลียสแต่ละอนุภาค เขาเป็นคนแรกผู้นำวิธีซินทิลเลชันมาใช้ และก็ยังคิดอย่างเหนียวแน่นกับวิธีนี้ เขาชอบมากที่สุดสำหรับวิธีการง่ายๆ ไม่ซับซ้อน เขามีความไม่ไว้วางใจอย่างมากในการใช้เครื่องมือที่ยากกลับซับซ้อน แม้ในปี 1932 เมื่อ จอห์น ค็อกครอฟต์ และ เออร์เนสต์ วอลตัน ได้ยิงนิวเคลียสให้แตกสลายด้วยโปรตอนซึ่งถูกเร่งด้วยเครื่องเร่งอนุภาคสำเร็จเป็นครั้งแรก เขาทั้งสองก็ใช้ซินทิลเลชันตรวจจับกระบวนการนี้



รูปที่ 1 รัทเธอร์ฟอร์ด เป็นคนแรกซึ่งใช้วิธีซินทิลเลชันเพื่อตรวจจับอนุภาค



รูปที่ 2 ตัวเชื่อมในสายโซ่: ค็อกครอฟต์ (ซ้าย) และ วอลตัน มีส่วนช่วยในความคิดใหม่ๆ เมื่อเขาทั้งสองทำให้นิวเคลียสแตกสลายโดยโปรตอนที่ถูกเร่งด้วยเครื่องเร่งอนุภาค

ถึงเวลานั้นรัทเธอร์ฟอร์ดก็ตระหนักว่าต้องพัฒนาวิธีอิเล็กตรอนิกส์มาใช้ในการนับจำนวนอนุภาค เหตุผลก็คือว่า วิธีซินทิลเลชันมีข้อบกพร่องอย่างแจ้งชัด มันทำงานไม่ได้ผลสำหรับอัตราการนับต่ำหรือสูงมาก และไม่น่าเชื่อถืออย่างแท้จริง ความไม่สมบูรณ์นี้ถูกเน้นโดยผลการทดลองที่มาจากห้องปฏิบัติการแห่งที่สามซึ่งข้าพเจ้าต้องการเอ่ยถึง – เวียนนา

เวียนนา เป็นที่ซึ่งข้าพเจ้าเริ่มต้นชีวิตการทำงาน และเวียนนาในช่วงเวลานั้นเป็นคล้ายๆ กับ ‘เด็กปากโป้ง’ ของนิวเคลียร์ฟิสิกส์ นักฟิสิกส์ที่นั่นอ้างว่า ไม่เพียงในโตรเจนและนิวเคลียสมวลเบาหนึ่งหรือสองชนิดอื่นซึ่งถูกทำให้แตกสลายได้โดยอนุภาคแอลฟาเท่านั้น แต่จากการทดลองมันทั้งหมดถูกทำเช่นนั้นได้และอีกทั้งยังให้โปรตอนออกมามากกว่าที่ใครคนอื่นสามารถสังเกตพบได้ ปัจจุบันข้าพเจ้าก็ยังไม่ทราบว่าทำไมพวกเขาได้พบผลการทดลองที่ผิดๆ เหล่านั้น ปรากฏชัดว่าเราได้จ้างนักศึกษาทำการนับโดยไม่ได้อธิบายว่าจะคาดหวังอะไร อย่างผิวเผินปฏิบัติการครั้งนั้นดูเหมือนจะเป็นแบบวิธีปรนัยมากๆ เพราะว่ามันจะไม่มีอคติใดๆ กระนั้นเหล่านักศึกษาก็เริ่มมีอคติอย่างรวดเร็วต่ออัตราการนับสูงๆ เพราะเขารู้สึกว่าเขาจะได้รับการเห็นชอบถ้าเขาได้พบอนุภาคจำนวนมาก จึงเป็นไปได้ทีเดียวว่าสถานการณ์นี้เป็นเหตุให้ได้ผลการทดลองผิดๆ ร่วมด้วยทัศนคติอย่างไม่พินิจพิจารณาและความกระตือรือร้นค่อนข้างมากที่จะเอาชนะคนอังกฤษในเกมของคนอังกฤษเอง

ข้าพเจ้ายังจำได้เมื่อลาจากเวียนนาประมาณเวลานั้น (ภายหลังที่ได้หลีกเลี่ยงหน้าที่การนับซินทิลเลชันแล้ว) อาจารย์ของข้าพเจ้า คาร์ล พร็อมม์ พูดกับข้าพเจ้าด้วยเสียงเศร้าๆ ว่า “เธอต้องเล่าให้ผู้คนในเบอร์ลินฟังได้ไหม ว่าเราไม่เลวอย่างที่เขาคิดหรอก?” ข้าพเจ้าได้ล้มเหลวในการเกลี้ยกล่อมพวกเขา

เยอรมนี มีการวิจัยทางนิวเคลียร์ฟิสิกส์อยู่หลายแห่ง ทีมของ อ็อตโต ฮาห์น กับ ลิเซ ไมท์เนอร์ ซึ่งเป็นหนึ่งในหลายกลุ่มแรกผู้ศึกษาธาตุกัมมันตรังสีต่างๆ โดยในเวลานั้นได้แยกทีมกันทำวิจัยอย่างอิสระ ฮาห์นกำลังทำเรื่องการประยุกต์กัมมันตภาพรังสีสำหรับปฏิกิริยาเคมี โครงสร้างของสารตะกอน และหัวข้อคล้ายกันนี้ โดยที่ ลิเซ ไมท์เนอร์กำลังใช้สารกัมมันตรังสีอธิบายกระบวนการแผ่รังสีบีตาและแกมมา และอันตรกิริยาของรังสีแกมมากับสสาร

นอกจากนั้น ฮานส์ ไกเกอร์ ก็อยู่ในเยอรมนี เขาได้อุบัติกับรัทเธอร์ฟอร์ดตั้งแต่ปี 1909 เรื่อยมาในห้วงเวลา ก่อนที่นิวเคลียสถูกค้นพบ รัทเธอร์ฟอร์ดรู้สึกไม่แน่ใจเกี่ยวกับวิธีซินทิลเลชันจึงขอให้ไกเกอร์สร้างเครื่องนับแบบไฟฟ้าเพื่อตรวจสอบวิธีซินทิลเลชัน แต่ทันทีที่รัทเธอร์ฟอร์ดเห็นว่าทั้งสองวิธีให้ผลอย่างเดียวกัน เขาก็กลับไปใช้วิธีซินทิลเลชันซึ่งดูเรียบง่ายกว่า และ

เชื่อถือได้มากกว่า ถ้าใช้มันด้วยความระมัดระวังอย่างถูกต้อง ไกเกอร์กลับไปเยอรมนีและปรับปรุงเครื่องนับแบบไฟฟ้าของเขาให้สมบูรณ์ และในปี 1928 เขากับ วาลเทอร์ มิลเลอร์ซึ่งเป็นนักศึกษาคณะหนึ่งได้ร่วมกันพัฒนาเครื่องนับซึ่งดีขึ้น ที่สามารถนับรังสีบีตา เครื่องนับแต่ก่อนไม่ดีพอสำหรับจุดประสงค์นี้ และวิธีซินทิลเลชันก็ไม่สามารถตรวจจับรังสีบีตาเช่นกัน

อย่างไรก็ตามเครื่องนับแบบใหม่นี้ยังช้าอยู่มากเพราะว่าการปล่อยประจุระหว่างเส้นลวดแกนกลางกับตัวนำทรงกระบอกสวมหุ้มแกน ถูกกระจับโดยตัวต้านทานค่าหลายเมกะโอห์มที่ใส่ในวงจร ด้วยเหตุฉะนั้นอัตราการนับจึงถูกจำกัดจำนวนที่ไม่สูงไปกว่าที่ได้ด้วยวิธีซินทิลเลชัน แม้แต่อัตราที่ลดลงถึงสามร้อยอนุภาคต่อนาทีก็ต้องมีการใช้ค่าปรับแก้มากทีเดียว

วาลเทอร์ โบทเช เป็นคนแรกที่ใช้วิธีโคอินซิเดนซ์สำหรับสองเรื่อง ได้แก่ การทดลองทำบางอย่างเกี่ยวกับรังสีคอสมิก และการวัดพลังงานของรังสีแกมมาด้วยพิษของอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่รังสีแกมมามันทำให้เกิด โดยที่จริงนี้เป็นวิธีที่เชื่อถือได้วิธีแรกสำหรับการวัดพลังงานของรังสีแกมมาพลัฟ่อนๆ

ก่อนปี 1932 บ่อเกิดเพียงเท่านั้นของอนุภาคสำหรับการทำแตกสลายนิวเคลียสของอะตอมคืออนุภาคแอลฟาธรรมชาติ ได้แก่ โปโลเนียม ซึ่งหาซื้อได้ยาก (จริงๆ แล้วในทางปฏิบัติเราต้องไปที่ปารีส) หรือบ่อเกิดของหนึ่งตัวของผลิตภัณฑ์อันจากการสลายตัวของเรเดียม ซึ่งอนุภาคแอลฟาที่ได้นี้สะอาดมาก แต่อายุสั้น และโดยปรกติมีรังสีแกมมาออกมาด้วยเป็นจำนวนมาก

ปีแห่งการค้นพบ

แต่ในปี 1932 ปีแห่งความมหัศจรรย์ ปีนั้น ไม่เพียงนิวตรอนถูกค้นพบเท่านั้น แต่พัฒนาการสองสิ่งอื่นได้เกิดขึ้น ในสหรัฐอเมริกา เออร์เนสต์ โอ ลอเรนซ์ ได้สร้างไซโคลตรอนเครื่องแรก ซึ่งมีแนวโน้มในทางเป็นประโยชน์ และในอังกฤษคืออครอฟด์ กับ วอลตัน ก็ได้สร้างเครื่องเร่งเครื่องแรก สำหรับโปรตอนซึ่งใช้ทำให้เกิดการแตกสลายนิวเคลียสได้ ข้าพเจ้าไม่จำเป็นต้องแถลงหรือกล่าว นี่เป็นการเริ่มการพัฒนาอย่างยิ่งใหญ่ นิวเคลียร์ฟิสิกส์ส่วนใหญ่ที่เราจะรู้จักกันทุกวันนี้จะไม่เคยได้เกิดขึ้น ถ้าปราศจากเครื่องมือเครื่องหนึ่งเครื่องใดในสองเครื่องนี้ แต่สิ่งที่น่าสนใจคือว่า เครื่องมือทั้งสองในทางปฏิบัติมิได้มีส่วนในเส้นทางแคบๆ ที่นำไปสู่การค้นพบการแบ่งตัวของนิวเคลียส

ข้าพเจ้าไม่ต้องการพูดถึงการค้นพบนิวตรอนให้มากนัก เพราะว่ามันถูกอภิปรายในปาฐกถาที่น่าสนใจหลายเรื่อง เมื่อปี 1962 ในการประชุมคองเกรสทางประวัติของวิทยาศาสตร์ ณ เมืองอิลคา มลรัฐนิวยอร์ก เอกสารตีพิมพ์ของคองเกรส มีผลงานที่น่าสนใจหลายเรื่อง โดยนอร์แมน เฟทเธอร์ และเซอร์เจมส์ แชดวิก แสดงให้เห็นว่านิวตรอนถูกค้นพบไม่ใช่โดยบังเอิญอย่างง่าย ๆ ด้วยทุกคนอื่นได้วางรากฐานไว้แล้ว แต่เป็นเพราะการค้นหานิวตรอนได้ดำเนินตลอดมาในเคมบริดจ์ (แม้เป็นที่ยอมรับกัน ด้วยความคิดผิดๆ) คนที่เคมบริดจ์มีวิตกจริตต่อการค้นพบนี้ เขาได้ทำสังเกตการณ์ที่สำคัญและที่โน้มน้าวใจถูกมองข้าม เอช ซี เว็สเทอร์ ได้แสดงว่ารังสีทะลุผ่านแปลกประหลาดเหล่านั้นที่เบอร์ลีย์มเปลี่ยนแปลงออกเมื่ออนุภาคแอลฟาตกบนมัน มีความเข้มข้นในทิศทางหน้ามากกว่าในทิศทางหลัง ผลนี้ค่อนข้างจะไม่สามารถเข้าใจได้ถ้ารังสีนั้นคือรังสีแกมมาดังเช่นที่ทุกคนเชื่อ

แม้แต่นักฟิสิกส์ชาติฝรั่งเศส คูรี และ โกลิโอะ ต่างมีส่วนร่วมกับความเชื่อนี้ในท่ามกลางการทำนายทั้งหมดทางทฤษฎี แล้วการทดลองของแชดวิกก็แสดงได้อย่างแข็งขันว่ารังสีลึกลับนี้ประกอบด้วยอนุภาคซึ่งมีโดยประมาณมวลของโปรตอน มีความสับสนเล็กน้อยเวลานั้นเพราะว่า เอ็นริโก เฟอร์มี และ โวล์ฟกัง เปาลี ได้ใช้คำว่า “นิวตรอน” ชื่อบอกอนุภาคไปแล้ว ซึ่งต่อมาภายหลังถูกเรียกว่า “นิวตริโน”

หลังจากนิวตรอนถูกค้นพบ ย่อมมีการรีบเร่งทำการทดลองอยู่บ้างแน่ๆ แต่ไม่มีใครรู้ว่าควรทำอะไรดี ด้วยจำนวนนิวตรอนมีค่อนข้างน้อย แต่อย่างไรก็ตามพวกมันเป็นผลผลิตทุติยภูมิของการแตกสลายของนิวเคลียส โดยที่แรกเริ่มมาได้แต่บ่อเกิดอนุภาคแอลฟาธรรมชาติเท่านั้น การผลิตนิวตรอนจึงต่ำ ยิ่งกว่านั้นเครื่องมือหลักสำหรับการตรวจจับคือ ห้องหมอก เป็นสำคัญ ด้วยห้องหมอกรอยทางเดินของนิวตรอนสามารถถูกพบได้เป็นจำนวนจำกัด และมันเป็นงานช้าที่จะค้นหาความหมายใดๆ จากรอยทางเดินของนิวเคลียสสะท้อนหลังชนที่ถูกตรวจจับได้สองสามรอย ครั้งหนึ่ง ลีโอ ซิลาร์ด ได้พูดตลกๆ ว่าถ้าผู้ชายคนหนึ่งทำการบางสิ่งในทันทีโดยมิได้คาดหมาย มันจะมีผู้หญิงอยู่เบื้องหลังเสมอ แต่ถ้านิวเคลียสของอะตอมทำการบางสิ่งในทันทีโดยมิได้คาดหมาย บางทีมันคงมีนิวตรอนอยู่เบื้องหลัง



รูปที่ 3 มหาปียมิตร: ลอร์ดและเลดี้รัทเธอร์ฟอร์ด (ซ้าย) และมาร์เกรท โบห์ร์ ในสวนของรัทเธอร์ฟอร์ด ภาพนี้ถ่ายเมื่อประมาณปี 1930

วิธีการนับทางอิเล็กทรอนิกส์เพิ่งได้เริ่มถูกพัฒนา ส่วนใหญ่เนื่องจากผลของปฏิกิริยาผิดๆ ที่มาจากเวียนนาที่ไม่มีใครอื่นสามารถยืนยันได้ มีการตัดสินใจว่าจริงๆ แล้วจำเป็นต้องสร้างเครื่องขยายและเครื่องนับอิเล็กทรอนิกส์ ที่แท้พวกเวียนนาเองก็ได้ริเริ่มงานทำนองนี้แต่ไม่ประสบความสำเร็จ งานนี้เริ่มในสวีเดนและแลนด์เหมือนกัน โดย เฮร์มันน์ ไกรนาเคอร์ซึ่งได้รับความสำเร็จบ้าง ถึงกระนั้น ข้าพเจ้าก็คิดว่าโยงโยหลักที่นำไปสู่การพัฒนาเครื่องนับที่เหมาะสมเกิดขึ้นในอังกฤษ ที่ซึ่ง ชาร์ลส์ วินน์ วิลเลียมส์ได้ใช้แผ่นดาวยืดที่ถูกต้อง และหลอดสูญญากาศที่มีระดับการรบกวนสัญญาณต่ำ เพื่อสร้างเครื่องนับอิเล็กทรอนิกส์ อย่างไรก็ตามเครื่องนับเหล่านั้นแม้ว่า แชดวิก จะใช้มันด้วยผลลัพธ์ดีสำหรับการค้นพบนิวตรอน ก็ยังมีการรบกวนสูงเกินไปที่จะเป็นประโยชน์อื่นได้มาก

กัมมันตภาพรังสีประดิษฐ์

สถานการณ์เริ่มไปต่ออย่างจริงจังเมื่อกัมมันตภาพรังสีประดิษฐ์ถูกพบโดย คูรี กับ โกลิโอะ ในปี 1934 ข้าพเจ้าคิดว่าเขาทั้งสองต้องมีความสุขมากที่ได้แก้ตัวสำหรับความล้มเหลวของเขาที่ควรพบนิวตรอนสองปีก่อนหน้านั้น เกือบเป็นวันตรงกันเมื่อสองปีก่อนที่การค้นพบทั้งสองเกิดขึ้นในกลางเดือนมกราคม เขาทั้งสองได้ทราบล่วงหน้ามาหลายเดือนแล้วว่า อะตอมเนียมที่ถูกกระดมยิงด้วยอนุภาคแอลฟาปล่อยไปซิตรอนออกมา แต่เขาไม่เคยสนใจเลย

ว่านี่อาจเป็นกระบวนการเกิดลำช้า เขาได้แต่เพียงสังเกตไปซิตรอนระหว่างการระดมยิง



รูปที่ 4 คูรี กับ โจสียโอ ค้นพบกัมมันตภาพรังสีประคิษฐ์

ลอเรนซ์กับผู้ทำงานไซโคลตรอนของเขาในแคลิฟอร์เนียก็ทำผิดทำนองเดียวกัน จริงอยู่เขาทั้งหลายได้สังเกตว่าเครื่องนับแสดงอาการไม่ปกติหลังจากปิดเครื่อง ข้าพเจ้าได้รับการบอกเล่าว่า เขาทั้งหลายได้สร้างกลไกพิเศษเพื่อทำให้เครื่องนับถูกปิดโดยอัตโนมัติพร้อมกับไซโคลตรอน! มิฉะนั้นพวกเขาคงจะได้พบกัมมันตภาพรังสีประคิษฐ์ก่อนหน้าคนฝรั่งเศส

น่าประหลาดใจที่ไม่มีผู้ใดดูเหมือนจะได้คิดมาก่อนว่า ผลลัพธ์ของการแตกสลายของนิวเคลียสอาจเป็นนิวเคลียสไม่เสถียร ถึงแม้ว่าการมีอยู่ของนิวเคลียสไม่เสถียรย่อมรู้กันมาตั้งแต่สามสิบปีหรือมากกว่านั้นแล้ว ข้าพเจ้าได้รับการบอกเล่าตลอดมาว่ารัทเธอร์ฟอร์ดได้เขียนถึงโจสียโอแสดงความยินดีเรื่องการค้นพบของเขา และพูดว่าตัวเขาเองได้คิดตลอดมาว่านิวเคลียสตัวบางตัวอาจไม่เสถียร แต่ได้มองหาเพียงแค่อนุภาคแอลฟาเพราะว่าจริงแล้วเขาไม่สนใจอนุภาคบีตา

ทันใดที่งานนี้เป็นที่ทราบกันในเดือนมกราคม 1934 นักวิทยาศาสตร์จำนวนมากรีบทำซ้ำและขยายการทดลอง แต่ส่วนใหญ่รับทำในแนวที่คูรีกับโจสียโอชี้ทางไว้คือระดมยิงธาตุอื่นๆ ด้วยอนุภาคแอลฟา (ข้าพเจ้าก็รีบทำด้วยเช่นกันในห้องปฏิบัติการแบล็กเก็ตต์ในลอนดอน)

แต่ในโรมเวลานั้น เฟอร์มีได้ตัดสินใจแล้วว่านิวเคลียร์ฟิสิกส์เป็นวิชาสำคัญและน่าสนใจแขนงหนึ่ง และเขาได้เริ่ม

ตระเตรียมการใช้เครื่องมือบางเครื่อง ดังนั้นเมื่อข้าพเจ้าการค้นพบมาถึงเขาจึงได้ลงมือทำงานอย่างรวดเร็วทีเดียวเพื่อดูว่า นิวตรอนจะก่อรูปนิวเคลียสกัมมันตรังสีหรือไม่

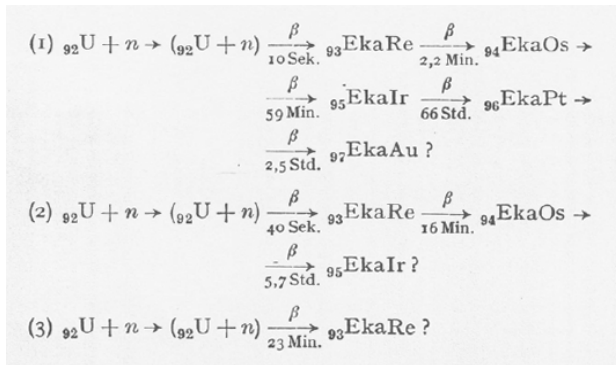
ข้าพเจ้าจำได้ว่าปฏิกิริยาของข้าพเจ้า และบางทีของผู้อื่นหลายคนเป็นว่าการทดลองของเฟอร์มีไร้สาระเพราะว่านิวตรอนมีจำนวนน้อยกว่าอนุภาคแอลฟาเยอะ แต่ข้อโต้แย้งง่ายๆ ที่ถูกมองข้ามไปก็คือนิวตรอนมีประสิทธิผลดีกว่ามาก นั่นคือมันไม่ถูกทำให้ช้าลงโดยอิเล็กตรอน และมันไม่ถูกผลักโดยสนามไฟฟ้า कुลอมบ์ของนิวเคลียส จริงๆแล้วภายในสี่สัปดาห์ของการค้นพบของคูรีกับโจสียโอ เฟอร์มีก็ได้ตีพิมพ์ผลงานชิ้นแรกของเขาซึ่งพิสูจน์ว่า ธาตุหลายชนิดได้กลายเป็นธาตุกัมมันตรังสีเมื่อถูกระดมยิงด้วยนิวตรอน ต่อมาอีกหนึ่งเดือนเท่านั้นเขาก็ประกาศว่าการยิงยูเรเนียมด้วยนิวตรอนผลิตกัมมันตภาพรังสีใหม่บางชนิดซึ่งเขารู้สึกว่าต้องเป็นผลมาจากธาตุทรานซยูเรนิค เพราะว่าทั้งสองเหตุบนพื้นฐานทางทฤษฎี (กำแพงคุลอมบ์ และอื่นๆ ทั้งหมด) และตรวจพบว่าการทดลองได้ยืนยันว่า ธาตุหนักๆ ทั้งหมดเป็นที่ยอมรับกัน คุณกลืนนิวตรอนเอาไว้โดยไม่มีสิ่งใดแตกแยกออกมา และทำให้เฟอร์มีคิดว่าต้องเป็นกรณีสำหรับยูเรเนียมด้วยเหมือนกัน

แน่นอนว่างานชิ้นนี้เป็นที่น่าสนใจพอสมควรต่อนักเคมีรังสี หลายคนเริ่มจับงานนี้ แต่อีกครั้งที่แปลกประหลาดเมื่อผลที่คิดอันหนึ่งจริงๆ ได้เริ่มขับเคลื่อนสถานการณ์ คือบันทึกลงโดย อริสติด ฟอน โกรสเส นักเคมี เกิดในเยอรมนี กำลังทำงานในสหรัฐอเมริกา ผู้คิดว่า หนึ่งในธาตุเหล่านี้ประพฤติเหมือนกับโปรแทกทิเนียม เขาเคยทำงานช่วงต้นกับฮาห์นเรื่องโปรแทกทิเนียมทันทีหลังจากมันถูกค้นพบในปี 1917 ดังนั้นข้อเสนอแนะของเขาได้ทำให้ ฮาห์น กับ ไมท์เนอร์ ต้องทำงานไวลาย เขาทั้งสองรู้สึกว่าการโปรแทกทิเนียมเป็นเด็กทารกของเขาเอง และเขากำลังจะตรวจสอบมัน ลิเซ ไมท์เนอร์ได้ชวนฮาห์นมาร่วมงานอีก

ในไม่ช้าพวกเขาก็แสดงให้เห็นว่าโกรสเสเข้าใจผิด คือมันไม่ใช่โปรแทกทิเนียม อีก ประการหนึ่งมีสิ่งแปลกประหลาดมากมายที่นั่นซึ่งได้ทำให้เขาสนใจในปรากฏการณ์นี้ และต้องดำเนินต่อ ผลที่ได้แปลกประหลาดที่สุด

รูปที่ 5 แสดงการจัดระเบียบแบบหนึ่งบ่งบอกโซ่ของธาตุกัมมันตรังสีที่ฮาห์นกับไมท์เนอร์ได้คิดมาระบุธาตุเหล่านั้น เขาทั้งสองไม่ได้ตั้งชื่อใหม่ให้แก่ธาตุเหล่านั้น ซึ่งเขาคิดว่าเขาได้ระบุแล้ว

แต่เขาใช้คำอุปสรรค “เอกา” บ่งบอกว่ามันคือ สอมอลอกซ์สูงของ รีเนียม ออสเมียม ฯลฯ จนถึง เอกาโกลด์ เห็นได้ชัดว่าฮาห์น ค้นพบที่ได้ธาตุเคมีชุดใหม่ทั้งหมดชุดหนึ่งมาเล่น และศึกษาคุณสมบัติ ปัจจุบันแน่นอนอยู่แล้วว่าบรรดาธาตุตามหลังยูเรเนียมมีชื่อเนปจูเนียม พลูโตเนียม อเมรีเซียม ฯลฯ และรู้ว่าธาตุเหล่านี้มีคุณสมบัติทางเคมีแตกต่างจากพวกที่ฮาห์นได้กำลังศึกษา



รูปที่ 5 การคำนวณที่แสดงโซ่การเกิดปฏิกิริยาของธาตุกัมมันตรังสี ซึ่งถูกตีพิมพ์ในบทความในวารสาร คี นาตูร์วิสเซนชาฟเทิน ในปี 1938 โดย ฮาห์น ไมท์เนอร์ และ สตราสมันน์ (Sek. คือวินาที Min. คือนาที Std. คือชั่วโมง Eka คือสอมอลอกซ์สูง (Higher homologue))

โซ่ขนาน

ผลการทดลองนำฟิสิกส์เพราะเหตุผลสองประการ ประการแรกปรากฏว่ามีอนุกรมขนานสามเส้น และจากผลผลิตที่ได้อนุกรมทั้งหลายต้องตั้งต้นจากยูเรเนียม 238 หรืออาจเป็นไปได้สำหรับหนึ่งของอนุกรมเหล่านี้เริ่มจากยูเรเนียม 235 (ซึ่งหายากกว่ามาก) ดังนั้นดูเหมือนว่าอย่างน้อยที่สุดก็มีอนุกรมขนานสองเส้นของธาตุไอโซเมอร์ริค คุณสมบัติไอโซเมอร์ริคนี้ต้องถูกถ่ายทอดทั้งหมดไปตามสายโซ่ของการแตกแยกของนิวเคลียสที่เปลี่ยนรังสีบีตา

คุณสมบัติไอโซเมอร์ริคของนิวเคลียสยังเป็นเรื่องค่อนข้างใหม่ในปี 1938 และการอธิบายเรื่องนี้ไม่ชัดเจนด้วยประการทั้งปวง ได้มีข้อเสนอ (ซึ่งตอนนีได้รับการยอมรับ) ว่ามันเกิดจากโมเมนต์เชิงมุมที่มีค่ามาก แต่ก็มีข้อเสนออื่นด้วยว่าอาจเนื่องจากการมีอยู่ของโครงสร้างเกร็งของนิวเคลียส เราสามารถจินตนาการว่าโครงสร้างเกร็งเช่นนี้อาจอยู่รอดจากการสลายบีตา และอาจมีอิทธิพลต่อครึ่งชีวิตของผลผลิตที่เกิดขึ้นตามมา

แต่ก็ยังมีความลึกลับของความยาวโคโคเด่นของโซ่เหล่านี้ อย่างไรก็ตาม ด้วยยูเรเนียมเองไม่ใช่จะไม่เสถียรต่อรังสีบีตา ธาตุอื่นทั้งหลายในบริเวณนั้นไม่เคยมีการสลายบีตามากกว่าสองครั้งต่อเนื่อง กระนั้นสี่หรือห้าครั้งได้ถูกพบที่นี่ ดังนั้น นักเคมีฮาห์นจึงคิดที่ได้ธาตุใหม่มากมาย แต่ฮาห์นในฐานะนักฟิสิกส์รังสี หรือนักเคมีรังสี ค่อนข้างวิตกกังวลกับกลวิธีซึ่งสามารถอธิบาย เรื่องเหล่านี้

งานทั้งหมดนี้ถูกทำให้ยากโดยสถานการณ์การเมืองในเยอรมนี ฮิตเลอร์อยู่ในอำนาจ และสถาบันวิจัยต้องเล่นเกมการเมืองที่จะยืดคออ่อนเพื่อป้องกันการไล่ทำร้ายและสังหารชาวยิวจากการปลดบุคลากรของสถาบันบางคนออก ในปี 1938 เมื่อออสเตรียถูกยึดครองโดยพวกนาซี ลิเซ ไมท์เนอร์รู้สึกไม่ปลอดภัย ขาวลือได้แพร่สะพัดไปว่า เธออาจจะหลุดจากตำแหน่งงานของเธอ แล้วหลังจากนั้นจะถูกกักไม่ให้ออกนอกเยอรมนีเพราะเธอรู้ต้นตอที่อันตรายดี การตื่นตกใจเกิดขึ้นบ้าง เพื่อนร่วมงานชาวต่างชาติอาสาถล่มพาเธอเข้าซอลแลนด์โดยไม่ต้องมีวีซ่า ดังนั้นเธอได้ออกจากเยอรมนีในต้นฤดูร้อนของปี 1938 แล้วจากซอลแลนด์ไปแวะพักสั้นๆที่เคนมาร์ค และได้รับการต้อนรับด้วยไมตรีจิตจากมันน์ สึกบาห์น ที่สถาบันโนเบลในสต็อกโฮล์ม

พลาดไปนิดเดียว

หลังจากนั้นทีมที่มี สตราสมันน์ เข้ามาร่วมด้วยกับฮาห์น ในฐานะนักเคมีคนที่สอง ก็ต้องดำเนินงานต่อไปโดยไม่มีไมท์เนอร์ ในระหว่างนั้นงานบางอย่างได้ถูกเริ่มต้นที่ปารีส น่าสนใจที่พวกเขามีมุมมองที่แตกต่าง คือครั้งแรกพวกเขาไม่สนใจในธาตุทรานซยูเรนิค แต่ก็คิดว่าถ้าธอเรียมถูกระดมยิงด้วยนิวตรอน เขาควรพบโซ่กัมมันตรังสีเส้นใหม่ซึ่งหายไปที่ตั้งต้นจาก $4n + 1$ ผู้คนตระหนักว่าโซ่เส้นอื่น ได้แก่ $4n$, $4n + 2$, $4n + 3$, ถูกแทนทั้งหมดโดยอนุกรมกัมมันตรังสีธรรมชาติ แต่โซ่เส้น $4n + 1$ ได้หายไป ดังนั้น อิเรน คิวรี ลูกสาวของมาดามคิวรี ร่วมกับ ฮานส์ ฟอน ฮาลบาน ชาวออสเตรีย และ ปีเตอร์ โพทซ์เวิร์ค ชาวสวิส ก็เริ่มค้นหาอนุกรมนี้ และได้ตีพิมพ์งานบางส่วนในเรื่องนี้

ต่อมาทีมนี้ได้แยกกันเพราะฮาลบานไปโคเปนเฮเกน และทำงานกับข้าพเจ้าอยู่ช่วงเวลาหนึ่งในการศึกษาเรื่องนิวตรอนช้า อิเรน คิวรีได้พบผู้ร่วมงานใหม่เป็นชาวยูโกสลาฟชื่อ ปาเวล

ชาวितซ์ เขาทั้งสองพยายามคลี่คลายเรื่องราวทรานซิวเรนิค อีเรน คูริตระหนักดีว่ามีวัสดุแตกต่างกันมากมายหลายชนิด

แต่เธอก็มีความคิดที่ดีในการเลือกสรรวัสดุหนึ่งจากวัสดุอื่นอย่างง่าย ๆ โดยอำนาจทะลุทะลวงสูงของรังสีบีตาของมัน เขาทั้งสองหุ้มสารตัวอย่างของเขาด้วยแผ่นทองเหลืองค่อนข้างหนา และศึกษาเฉพาะแต่สารซึ่งรังสีของมันทะลุออกมา เขาไม่ได้ตระหนักว่าแม้แต่วิธีนั้นก็ไม่อาจคัดเลือกได้เพียงสารเดียวถึงแม้ว่าสารนั้นดูเหมือนมีอายุเป็นเอกลักษณ์พอสมควร คือ 3.5 ชั่วโมงจากคุณสมบัติทางเคมีของมัน เขาทั้งสองคิดในครั้งแรกว่ามันดูเหมือนกับธอเรียม

งานนี้ได้ถูกตรวจสอบโดยฮาห์น ผู้สรุปว่ามันไม่ใช่ธอเรียม และเขียนบอกข้อสรุปนั้นไปที่ปารีส คูริและชาวิตซ์ทำงานนี้ต่อไป และในบทความชิ้นต่อมาในฤดูร้อนของปี 1938 แสดงการยอมรับว่าสารอายุ 3.5 ชั่วโมงตัวนั้นไม่ใช่ธอเรียม แต่ประพฤติกรรมเหมือนเล็กน้อยกับแอกติเนียม และเหมือนแลนธาเนียมยิ่งกว่า เธอได้มาใกล้แล้วจริงๆ ต่อมาโน้ตสั้นของการแบ่งตัวของนิวเคลียส แต่น่าเสียดายที่ไม่ได้แถลงอย่างชัดเจน เธอพูดว่า มันไม่ใช่แอกติเนียมแน่ๆ และว่า มันค่อนข้างจะคล้ายแลนธาเนียม “จากนั้นมันสามารถถูกแยกได้โดยการทำลำดับส่วนเท่านั้น แต่เธอก็คิดจริงๆ ว่ามันสามารถถูกแยกออกมาได้ เหตุผลบางทีก็คือว่า เธอยังมีของผสมของสารสองชนิด แน่แน่นอนว่าในกรณีนั้นเราทำให้เกิดผลการแยกบางส่วน แล้วการทดลองนี้ก็ถูกตรวจสอบตามลำดับโดยฮาห์นกับสตราสมันน์ ผู้ซึ่งค้นพบผลิตภัณฑ์มันตรังสีซึ่งประพฤติกรรมเป็นบางส่วนเหมือนแอกติเนียม และบางส่วนเหมือนเรเดียมเล็กน้อย

มีอีกงานหนึ่งซึ่งพลาดความสำเร็จไปนิดเดียวประมาณเวลาเดียวกัน ก็อดฟริด ฟอน โครสเช นักฟิสิกส์ผู้ทำงานกับลิเซ ไมท์เนอร์ ได้มองหารังสีแอลฟาพิสัยไกล ซึ่งมาจากยูเรเนียมระหว่างการระดมยิงด้วยนิวตรอน ถ้าเขายับยั้งรังสีแอลฟาชนิดธรรมดาไว้โดยการใช้ศักย์ไบแอสในเครื่องขยาย เขาก็ยังไม่ล้มเหลวที่จะพบการแบ่งตัวของนิวเคลียส น่าเสียดายที่แทนการใช้ศักย์ไบแอส เขาไปใช้แผ่นโลหะบาง และแผ่นนั้นหนาพอที่หยุดยังไม่เพียงแตรังสีแอลฟาของยูเรเนียมเท่านั้น แต่ยังขึ้นส่วนของการแบ่งตัวด้วย นอกจากนั้นเขาก็ไม่ได้พบรังสีแอลฟาพิสัยไกลใดๆ

ซึ่งต้องอยู่ที่นั่น ถ้าไอโซโทปของเรเดียม หรือ ของแอกติเนียม ถูกสร้างขึ้น

ครั้งเมื่อ ฮาห์น กับ สตราสมันน์ ได้ตรวจสอบอย่างรอบคอบคุณสมบัติทางเคมีของ “เรเดียม” ตัวนี้ ก็พบว่ามันเหมือนกันกับของแบเรียมทุกประการ

การเยี่ยมเยียนอุดมฤกษ์

ที่นี้ถึงคราวข้าพเจ้าเข้ามา เพราะว่าลิเซ ไมท์เนอร์ว่าเหวในสวีเดน และในฐานะหลานผู้ซื่อสัตย์ของเธอ ข้าพเจ้าไปเยี่ยมเธอตอนคริสต์มาส ที่นั่น ในโรงแรมเล็กๆ ในเมืองคุงเกิลท์ ใกล้เกอเทบอร์ก ข้าพเจ้าพบเธอตอนอาหารเช้ากำลังครุ่นคิดเรื่องจดหมายจากฮาห์น ข้าพเจ้ากังวลเกี่ยวกับเนื้อความ – ว่า แบเรียมถูกสร้างจากยูเรเนียมโดยนิวตรอน – แต่เธอยังหมกมุ่นกับมันต่อ เราเดินขึ้นเดินลงบนหิมะ โดยข้าพเจ้าใช้สกี ส่วนเธอเดิน (เธอพูดและพิสูจน์ด้วยว่าเธอสามารถเคลื่อนไปได้เร็วเท่ากันจริงด้วยวิธีนั้น)



รูปที่ 6 บุคคลสำคัญที่เป็นศูนย์กลางของการค้นพบ ได้แก่ อ็อตโตฮาห์น และ ลิเซ ไมท์เนอร์ ภาพนี้ถูกถ่ายที่หน้าสถาบันที่ตั้งชื่อตามชื่อของเขทั้งสอง

และความคิดได้ก่อตัวขึ้นทีละน้อยว่า นี่ไม่ใช่การถากหรือ การกระแทกออกของนิวเคลียส แต่ดูเหมือนจะเป็นกระบวนการที่ต้องอธิบายโดยทฤษฎีของโบห์รวา นิวเคลียสเป็นเหมือนหยดของเหลว หยดเช่นนี้อาจยืดตัวออก และแบ่งตัวมันเองแล้วข้าพเจ้าได้คำนวณวิธีที่ประจุไฟฟ้าของนิวเคลียสจะลดความตึงผิว และพบว่ามันจะลงเป็นศูนย์เมื่อ Z มีค่าราวๆ 100 และบางทีจะน้อยทีเดียวสำหรับยูเรเนียม ลิเซ ไมท์เนอร์ ได้คำนวณพลังงานที่จะหาได้จากมวลพร่องในการแบ่งตัวเช่นนี้ เธอจำกราฟของมวลพร่องในหัวของเธอได้ดี ผลออกมาว่าแรงผลักไฟฟ้าของชิ้นส่วนที่

แบ่งออกมาจะให้พลังงานแก่ชิ้นส่วนประมาณ 200 MeV และมวลพวกร่องนี้เองที่ปลดปล่อยพลังงานนั้นออก ดังนั้นกระบวนการนี้สามารถเกิดขึ้นได้บนรากฐานคลาสสิกอย่างบริสุทธิ์ โดยไม่ต้องร้องขอการข้ามกำแพงศักย์ ซึ่งแน่นอนว่าย่อมไม่เคยได้ผล

เราใช้เวลาด้วยกันเพียงสองสามวันตอนคริสต์มาสนั้น แล้วข้าพเจ้าก็กลับไปโคเปนเฮเกนและจัดการเล่าความคิดเรื่องนี้ให้โบห์ร์ฟังได้อย่างจวบจนแจ่ม ขณะเขากำลังขึ้นเรือไปสหรัฐอเมริกา ข้าพเจ้าจำทำที่เขาเขหัวของเขาเองหลังจากเพียงแค่ข้าพเจ้าเริ่มต้นเล่า และเขาพูด “โอ เราช่างโง่เสียนี้กระไร ! เราควรได้เห็นอย่างนั้นมาก่อนแล้ว” แต่เขาก็ไม่ได้เห็น – ไม่มีใครได้เห็น

ลิเซ ไมท์เนอร์ กับ ข้าพเจ้า ได้เรียบเรียงเขียนบทความโดยใช้โทรศัพท์ทางไกลระหว่างโคเปนเฮเกนกับสต็อกโฮล์ม ข้าพเจ้าเล่าเรื่องทั้งหมดแก่ ยอร์จ พลาเช็ค ซึ่งอยู่ในโคเปนเฮเกน ก่อนที่ข้าพเจ้าแม้แต่จะคิดทำการทดลอง ตอนแรกพลาเช็คไม่เชื่อเรื่องที่นิวเคลียสหนักเหล่านี้ซึ่งรู้จักกันแล้วว่าเผชิญกับความไม่เสถียรต่ออนุภาคแอลฟา ควรต้องมาเผชิญกับความไม่เสถียรพิเศษนี้อีกด้วย เขาพูด “มันฟังดูเล็กน้อยคล้ายคนซึ่งถูกรถยนต์แล่นทับและจากการชันสูตรศพพบว่าเขามีเนื้ออกร้ายแรง และจะตายภายในวันสองวันไม่ว่าอย่างไร” แล้วเขาก็พูด “ทำไมคุณไม่ใช้ห้องหมอกทดสอบมันดูล่ะ ?” ข้าพเจ้าไม่มีห้องหมอกใกล้มือ และคิดว่าถึงอย่างไรมันก็จะยุ่งยาก ดังนั้นข้าพเจ้าจึงใช้ไอออนในเซชันแอมเบอร์แทน และมันเป็นการทดลองที่ง่ายมากเพื่อสังเกตสัญญาณพัลส์ขนาดใหญ่ซึ่งมาจากชิ้นส่วนไอออน

ข้าพเจ้าไม่คิดว่าลำดับเหตุการณ์ตามวันเดือนปีจะมี ความหมายมากนัก และอย่างแน่นอนไม่สามารถวัดอ้างความฉลาดปราดเปรื่องหรือความคิดริเริ่มพิเศษอันใด ข้าพเจ้าแค่โชคดีที่อยู่กับ ลิเซ ไมท์เนอร์ เมื่อเธอได้รับแจ้งล่วงหน้าถึงการค้นพบของสาหพันธ์สตาสมันน์ แล้วข้าพเจ้าก็ต้องถูกระงับลงเสียก่อนถึงจะได้ลงมือทำการทดลองครั้งสำคัญในวันที่ 13 มกราคม ในเวลานั้นบทความร่วมของเราเกือบเขียนเสร็จแล้ว ข้าพเจ้าจึงเรื่องรอไว้อีกสามวันเพื่อเขียนบทความอีกเรื่อง และแล้วทั้งสองบทความถูกส่งไปยังวารสาร เนเจอร์ ในวันที่ 16 มกราคม และ ตีพิมพ์ห่างกันหนึ่งสัปดาห์ ในบทความที่หนึ่งข้าพเจ้าใช้ศัพท์ “การแบ่งตัว” ที่ถูกเสนอแนะโดยนักชีววิทยาอเมริกันชื่อ วิลเลียม เอ. อาร์โนลด์ ผู้ซึ่งข้าพเจ้าถามว่า คนเขาเรียกปรากฏการณ์ของการแบ่งเซลล์ว่าอะไร

บทความที่สองบรรจุข้อเสนอแนะจากลิเซ ไมท์เนอร์ ด้วยเหมือนกัน ที่ว่า ชิ้นส่วนการแบ่งตัวที่โผล่ออกมาจากชิ้นยูเรเนียมที่ถูกกระดมยิงสามารถถูกเก็บรวบรวมไว้บนผิว และกัมมันตภาพของชิ้นส่วนเหล่านี้ถูกวัดได้ ความคิดเหมือนกันนี้เกิดขึ้นอย่างเอกเทศแก่โจลิโอ และเขาได้ทำการทดลองเป็นผลสำเร็จเมื่อวันที่ 26 มกราคม ประมาณเวลาเดียวกัน ข่าวนี้อีกก็ไปถึงสหรัฐอเมริกา อะไรเกิดขึ้นตอนนั้นจะถูกอภิปรายโดย วิลเลอร์

การค้นพบอย่างโชคดียังบังเอิญ

กลับมาถึงคำถามเริ่มเรื่องของข้าพเจ้าที่ว่า ทำไมใช้เวลานานนักก่อนการแบ่งตัวถูกค้นพบ จริงๆ แล้วทำไมนิวตรอนจึงไม่ถูกพบเร็วกว่านั้น ริทเธอร์ฟอร์ดได้คิดเกี่ยวกับนิวตรอนแล้ว และได้ทำนายคุณสมบัติบางอย่างของมันไว้ตั้งแต่ครั้งแสดงปาฐกถาเบเกอเรียนในปี 1920 แต่โจลิโอไม่ได้อ่าน คาดว่าปาฐกถาสาธารณะคงไม่มีสิ่งใหม่ ! เมื่อคุริกับโจลิโอพบว่า “การแผ่รังสีเบอริลเลียม” ทำให้โปรตอนกระเด็นออกมาจากพาราฟิน เขาทั้งสองลงความเห็นว่ามันเป็นทำนองปรากฏการณ์คอมพ์ตันของการแผ่รังสีแกมมาพลังงานสูงมาก (ประมาณ 50 MeV)

เขาทั้งสองเพิกเฉยต่อคำคัดค้านของนักฟิสิกส์ทฤษฎีทั้งหลาย ในที่สุดนิวตรอนก็ถูกค้นพบที่เคมบริดจ์ สถานที่ซึ่งอนุภาคเช่นนี้ได้ถูกคาดหวั่ง และได้ถูกมองหาดลอดมา

ขณะที่นิวตรอนถูกพบในปี 1932 เครื่องขยายสัญญาณพัลส์และไอออนไนเซชันแอมเบอร์มีพร้อมสำหรับการตรวจจับที่ผิวของสัญญาณพัลส์การแบ่งตัว แต่นั่นคงเป็นก้าวกระโดดที่ไกลเกินกว่าที่คาดหวั่ง แบบจำลองหยดของเหลวของนิวเคลียสเกิดเมื่อสายคือความคิดเรื่องนิวเคลียสเชิงประกอบคิดค้นโดยโบห์ร์ก่อนข้างห้า ในปี 1936 เท่านั้น อาจต้องมีสัมผัสอัจฉริยะจึงจะคิดเรื่องการแบ่งตัวได้ตอนนั้น และก็ไม่มีการทำได้

การค้นพบกัมมันตภาพรังสีประดิษฐ์ในปี 1934 เป็นอีกเรื่องหนึ่งของการค้นพบโดยบังเอิญ ไม่มีผู้ใดมองหามันยกเว้นริทเธอร์ฟอร์ด ผู้ซึ่งมองหาลักษณะสำหรับการสลายแอลฟา และแม้แต่ทีมเบิร์กเลย์ก็แสวงหาเป็นไม่เห็นเมื่อเครื่องนับของเขา “ประพัตติพิศฯ” หลังการค้นพบถึงได้มีการรีบรุดกันไปดลัดและเพื่อทำการทดลองซ้ำด้วยความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดที่สุดเท่านั้น (ข้าพเจ้าก็เป็นหนึ่งในผู้แกะ) เฟอร์มีคนเดียวเท่านั้นที่มีเขาวนปัญญาจุ่มไปในทิศทางที่แตกต่างและให้ผลดีมาก

แต่แล้วเฟอร์มีก็ก้าวสู่หนทางผิด เขารู้สึกเชื่อมั่นว่า ยูเรเนียมเหมือนกับธาตุหนักอื่นที่จะกลืนอย่างเชื่องช้า นิวตรอนช้าๆ ที่ตกบนมัน เขาได้ตรวจสอบให้แน่ใจว่าสารกัมมันตรังสีที่ถูกสร้างจากยูเรเนียมนั้นแตกต่างจากธาตุที่รู้จักใดๆ โกลิเยเรเนียม อิดาโนดาค นักเคมีชาวเยอรมัน ซึ่งบ่งอย่างถูกต้องที่เดียวว่า สารกัมมันตรังสีนั้นอาจเป็นธาตุที่เบากว่า แต่คำวิจารณ์ของเธอ (ตีพิมพ์ในวารสารที่นักเคมีไม่ได้อ่านมาก และนักฟิสิกส์เกือบไม่อ่านเลย) ถูกพิจารณาว่าเป็นแค่เพียงการโอ้อวดภูมิรู้ เธอไม่ได้แสดงว่าธาตุเบาเช่นนั้นเกิดขึ้นอย่างไร ก่อนข้างแน่นอนว่าบทความของเธอไม่มีผลอะไรต่องานในภายหลัง

ในที่สุดก็เป็นวิชาเคมีแท้ๆที่ทำให้สิ่งทั้งหลาย เขาร่องเขารอยที่ถูกต้อง อีเรน คูรี กับ ปาเวล ซาวิทซ์ ได้มาใกล้มันมาก เพียงแค่การปรากฏซึ่งๆ หน้าของสารสองชนิดที่มีคุณสมบัติคล้ายกันราวกับจะแฝง ได้ละเว้นเขาทั้งสองจากการค้นพบการแบ่งตัวยูเรเนียมก่อน ฮาห์น กับ สตราสมันน์ ได้ทำสำเร็จในที่สุด

กลวิธานของการแบ่งตัว

โดย จอห์น เอ วิลเลอร์

ในตอนต้นเดือนมกราคม ค.ศ. 1939 เรือยนต์เคินสมุทร สวีดิช-อเมริกัน ชื่อ โคโรทท์นิง โฮล์ม ได้นำเอาข่าวสารสั้นๆ ข้ามทะเลพายุจัดจากโคเปนฮาเกนไปนิวยอร์ก ข่าวสารนี้เป็นสัญลักษณ์ของการถ่ายโอนอย่างสม่ำเสมอการค้นพบทั้งหลายเกี่ยวกับนิวเคลียสจากยุโรปไปสหรัฐอเมริกา ซึ่งได้ดำเนินต่อเนื่องมาระหว่างปีครองอำนาจของฮิตเลอร์

ถึงแม้ว่าการถ่ายโอนเหล่านี้เป็นชะตากรรมสำหรับสหรัฐอเมริกาและประเทศอื่นทั้งหมดทั่วโลก การถ่ายทอดข่าวสารพิเศษชิ้นนี้กระทำง่าย ๆ คือ คำพูดสองสามคำโดยอ็อตโต ฟริช แก์นีลส์ โบห์ร์ บนสะพานท่าเรือในโคเปนฮาเกน และคำพูดสองสามคำโดยโบห์ร์ แก์ เอ็นริโก เฟอร์มี กับ ข้าพเจ้า บนสะพานท่าเรือในนิวยอร์ก ในฐานะผู้ร่วมงานรุ่นเยาว์ในเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นครั้งนั้น และในเดือนหลายเดือนต่อมา ข้าพเจ้าจะเล่ากิจกรรมที่นำไปสู่การตีพิมพ์บทความของโบห์ร์ กับข้าพเจ้าในวารสาร ฟิสิกส์รีวิว ในบทความนี้เราได้สรุปความที่ถูกแสดงด้วยคำพูดในข่าวสารนั้นได้แก่ แบบจำลองหยดของเหลวที่ฟริชประยุกต์สำหรับกลวิธาน

ของการแบ่งตัว และการกำหนดเศษส่วนการอัด ที่ลิเซ ไมท์เนอร์ ได้พิจารณาเพื่อนำไปสู่ประมาณการเบื้องต้นของการปลดปล่อยพลังงานในปฏิกิริยาการแบ่งตัว

ไม่มีใครซึ่งกำลังมองกระบวนการใหม่เอี่ยมเช่นนี้ในขณะนั้นอดจะทบทวนทุกสิ่งที่เขาเกี่ยวข้องกับนิวเคลียร์ฟิสิกส์เพื่อแสวงหาการแปลความหมาย โชคดีว่าความคิดที่เป็นกุญแจสำหรับการไขปริศนานี้ได้ถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง จึงอาจเหมาะสมที่จะระลึกว่าเราได้เรียนรู้อะไรมาเกี่ยวกับนิวเคลียร์ฟิสิกส์ในปีจำนวนครึ่งโหลที่ผ่านมา

เบาะแสของคำตอบ

ค.ศ. 1933 เป็นปีที่มีผลดีสำหรับคนบางคนเช่นข้าพเจ้าผู้เพิ่งกำลังสำเร็จปริญญาเอก มันเป็นปีแห่งการค้นพบนิวตรอน และบทความยิ่งใหญ่ของเวอร์เนอร์ ไฮเซนเบิร์ก เรื่องโครงสร้างของนิวเคลียสที่ประกอบขึ้นจากนิวตรอนและโปรตอน การค้นพบเหล่านี้ทำให้ผู้คนรู้สึกว่าในไม่ช้าเขาอาจรู้เกี่ยวกับนิวเคลียสได้มากเท่ากับที่เขาได้รู้แล้วเกี่ยวกับอะตอม

ด้วยธรรมชาติที่คลั่งคลั่งของคนหนุ่มจำนวนมากมายรวมถึงข้าพเจ้าด้วยในเวลานั้น ข้าพเจ้าได้ใช้ปี 1933-34 ทำงานกับเกรกอรี ไบรท์ ผู้ซึ่งการมองเห็นการณ์ไกลของเขา ข้าพเจ้าเป็นหนี้อย่างมาก เขาและกลุ่มนักวิจัยซึ่งในไม่ช้าข้าพเจ้าได้พบว่าตัวข้าพเจ้าเองก็เป็นสมาชิกคนหนึ่ง ยอมรับเกือบโดยไม่รู้ตัวแบบจำลองของนิวเคลียสขณะนั้น คือว่า นิวตรอนและโปรตอนเคลื่อนที่ในศักย์สอดคล้องกันที่ร่วมกัน คล้ายคลึงมากกับศักย์ไฟฟ้าของอะตอม เรายอมรับแบบจำลองแบบนี้ “โดยไม่รู้ตัว” ก็ใช่ แต่ ไม่ชัดเจน ด้วยเหมือนกัน พวกเราไม่มีใครถือแบบนั้นตามตัวอักษร โดยเฉพาะอย่างยิ่งไม่ใช่ไบรท์ ด้วยความรอบคอบและการเห็นแจ้งทะลุของเขา ดังนั้นเขาเต็มใจเสมอที่จะพิจารณาอนุภาคแอลฟาในนิวเคลียสด้วยกับกับนิวตรอนและโปรตอน เมื่อธรรมชาตินั้นทำให้เข้าใจในการพิจารณาปฏิกิริยาที่ไม่ธรรมดาในไบรท์ยังมุ่งความสนใจเป็นพิเศษไปที่บริเวณการสืบค้นเกือบโดยเสรีเท่าที่เป็นไปได้จากประเด็นที่ขึ้นกับแบบจำลอง ดังนั้นงานส่วนใหญ่เป็นเรื่องการทะลุทะลวงของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเข้าไปในนิวเคลียส และภาคตัดขวางสำหรับปฏิกิริยานิวเคลียร์ขึ้นกับพลังงานอย่างไร การวิเคราะห์กระบวนการกระเจิงในเทอมของการเปลี่ยนเฟสก็ได้รับความสนใจอย่างมากด้วย



รูปที่ 7 นักคิดกำลังเดินทอดน่อง: เฟอร์มี (ซ้าย) และ โบห์ร์ (ขวา) เป็นที่ทราบกันดีสำหรับการกระจายและการประยุกต์ที่สำคัญของความคิดแรกเริ่มของการแบ่งตัวของนิวเคลียสของเขทั้งสอง

ด้วยการสนับสนุนอย่างกระตือรือร้นของโบรท์ ข้าพเจ้าใช้เวลาปีต่อมาที่สถาบันของนิลส์ โบห์ร์ในโคเปนเฮเกน ที่นั่นข้าพเจ้าถูกแนะนำให้เข้าร่วมศึกษาความคิดใหม่หลายเรื่อง แต่ไม่มีเรื่องไหนในนิวเคลียร์ฟิสิกส์ที่น่าทึ่งมากกว่าข่าวสารที่เมิลเลอร์นำกลับมาในระหว่างฤดูใบไม้ผลิปี 1935 จากการเยือนโรมในประเทศอิตาลีระยะสั้นๆ มันบอกถึงการทดลองเรื่องนิวตรอนช้าของเฟอร์มี และเรโซแนนซ์นำประหลาดที่เขาได้ค้นพบ ประมาณการต่างๆ ครั้งที่ได้เคยทำไว้ก่อนหน้านี้ซึ่งว่าอนุภาคที่ผ่านทะลุนิวเคลียสจะมีความน่าจะเป็นน้อยยิ่งในการสูญเสียพลังงานของมันโดยการแผ่รังสีและการถูกจับกุม ถ้าแบบจำลองนิวเคลียสล่าสุดน่าเชื่อถือ กระนั้นตรงกันข้ามต่อหน้ากับการทำนายของแบบจำลองนี้ การทดลองของเฟอร์มีแสดงให้เห็นภาคตัดขวางและเรโซแนนซ์ขนาดมหึมาซึ่งค่อนข้างจะเหนือคำอธิบาย

หลายสัปดาห์ก่อนผ่านไปก่อนที่ผลสำคัญที่สุดของการค้นพบนี้จะถูกคลี่คลายได้ ทุกๆ คนได้เอาเป็นธุระอย่างกระตือรือร้น แต่ไม่มีใครเกินกว่าโบห์ร์ซึ่งเดินกลับไปกลับมาในที่ประชุมสัมนาและมีส่วนร่วมเป็นศูนย์กลางในการอภิปราย

หยดของเหลว

เรื่องราวการพัฒนาแบบจำลองหยดของเหลว และจินตภาพนิวเคลียสเชิงประกอบเป็นเรื่องที่คุ้นเคย แต่ที่ไม่ชัดเจนนักและแน่นอนว่าไม่มีพยานหลักฐาน ณ เวลานั้น คือ การแยกแยะระหว่างความคิดเหล่านี้: (1) โดยเนื้อแท้ แบบจำลองนิวเคลียสเชิงประกอบแสดงว่า ชะตากรรมของนิวเคลียสเป็นอิสระต่อกลวิธาน

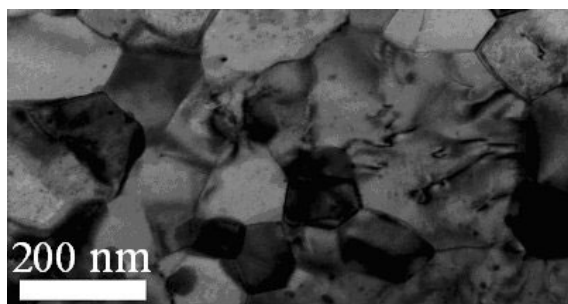
ของการสร้างนิวเคลียสนั้น และ (2) อาจกล่าวได้ว่าแบบจำลองหยดของเหลวเป็นกรณีพิเศษของแบบจำลองนิวเคลียสเชิงประกอบ คือ วิธีโดยเฉพาะที่ทำให้แบบจำลองโครงสร้างนิวเคลียสสมเหตุผล โบห์ร์ได้เสนอว่า วิธีเสรีเฉลี่ยของนิวคลีออนสั้นเทียบ กับขนาดของนิวเคลียส แทนที่จะยาวเช่นที่ถูกทักท้อในการประเมินที่ผ่านมาทั้งหมด ความคิดใหม่นี้ทำให้ทฤษฎีเช่นแบบจำลองหยดของเหลวมีเสน่ห์ดึงดูดอย่างมหาศาล

ไม่มีใครมองสถานการณ์ย้อนหลังจากจุดได้เปรียบ ณ ปัจจุบันอดพิสวงใน “อุบัติเหตุครั้งยิ่งใหญ่ของนิวเคลียร์ฟิสิกส์”—กรณีแวดล้อมที่วิธีเสรีเฉลี่ยของอนุภาคในนิวเคลียสไม่สั้นอย่างสุดขีดเทียบกับขนาดของนิวเคลียส (ดังเช่นรับเอาในจินตภาพหยดของเหลว) และก็ไม่ยาวอย่างสุดขีด (ดังที่รับเอาในแบบจำลองก่อนๆ) แต่มีค่ากลางๆ ยิ่งกว่านั้นรายละเอียดน่าอัศจรรย์ทั้งหมดของนิวเคลียร์ฟิสิกส์กลับกลายเป็นขึ้นอยู่กับหนทางวิกฤติเช่นนี้กับค่าของพารามิเตอร์ตัวนี้ ตามที่ อาเก โบห์ร์ และ เป็น ม็อตเทสสัน ได้สอนเราเมื่อเร็วๆ นี้ว่า ไม่มีใครสามารถทำนายค่าพารามิเตอร์อันเที่ยงตรงท่ามกลางระบอบทางเลือกหลายระบอบซึ่งในนี้ปรากฏการณ์วิทยาโดยแท้จริงจะแอบอยู่ จากการประเมินค่าล่วงหน้าใดๆ ของวิธีเสรีเฉลี่ย สังเกตการณ์เท่านั้นจึงจะเพียงพอ ! ด้วยความรู้อันน้อยนิดเมื่อปี 1935 เกี่ยวกับค่าของพารามิเตอร์นี้ และยิ่งรู้น้อยกว่านั้นอีกเกี่ยวกับสภาพวิกฤติของมัน นักฟิสิกส์จึงไม่มีทางเลือกนอกจากจะค้นหาด้วยพลังทั้งหมดตามความคิดที่ว่าวิธีเสรีเฉลี่ยสั้นมาก

การพัฒนาแบบจำลองหยดของเหลวซึ่งถูกประยุกต์ต่อหลากหลายกระบวนการเกิดจากน้ำมือของ ฟรีดริช คาลคาร์ และนิลส์ โบห์ร์ ระหว่างปี 1935-37 เขาทั้งสองประยุกต์มันต่อหลากหลายกระบวนการ ที่ศูนย์กลางของการประยุกต์เช่นนี้ทุกครั้ง ได้กระทำตามอุดมการณ์ของนิวเคลียสเชิงประกอบ นั่นคือ มโนทัศน์ว่า ปฏิกริยานิวเคลียร์เกิดเป็นสองขั้นที่แยกขาดจากกันขั้นแรก อนุภาคเข้าถึงในนิวเคลียส และส่งมอบพลังงานการกระตุ้น ขั้นต่อมา ด้วยวิธีการบางอย่าง นิวเคลียสใช้พลังงานนั้นสำหรับการแผ่รังสี การปล่อยนิวตรอนหรืออนุภาคแอลฟาออกมาหรือกระบวนการที่มาประชันกันอื่นใด

(อ่านตอนจบในฉบับหน้า)

สรุปข่าว (ต่อจากหน้า 3)



ภาพถ่ายแสดงโครงสร้างของ Half-Heuslers

วัสดุที่มีความเป็นไปได้และเป็นความหวังของกลุ่มวิจัยนี้เรียกว่า “Half-Heuslers” ซึ่งเป็นโลหะผสมที่มีความแข็งแรงสูง ทนทาน และมีคุณสมบัติการนำความร้อนที่ดี แต่คุณสมบัติอย่างหลังนี้เป็นตัวลดประสิทธิภาพการผันพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า ทำให้กลุ่มวิจัยได้พัฒนาเพื่อลดค่าการนำความร้อนโดยการบดเนื้อวัสดุเข้าด้วยกันเป็นผงเล็กๆ เปรียบเสมือนการเปลี่ยนรูปเป็นวัสดุนาโนคอมพอสิตที่ประกอบด้วยเม็ดวัสดุเล็กๆ จำนวนมากมาย เมื่อให้ความร้อนแก่ผงนาโนคอมพอสิต ความร้อนจะถูกถ่ายเทผ่านรอยต่อระหว่างผิว ซึ่งวิธีนี้จะทำให้การนำความร้อนโดยรวมลดลง

ปัจจุบัน Xiao Yan ได้ร่วมงานกับนักวิจัยอีกหลายคน จากวิทยาลัยบอสตัน มหาวิทยาลัย M.I.T. มหาวิทยาลัยเวอร์จิเนีย และมหาวิทยาลัยเคลมสัน เพื่อร่วมกันพัฒนาเทคนิคในการสร้างวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก จาก Half-Heusler $Zr_{0.5}Hf_{0.5}CoSb_{0.8}Sn_{0.2}$ ซึ่งขณะนี้ขนาดวัสดุที่ทำได้อยู่ในระดับ 100-200 นาโนเมตร และให้ค่า ZT เท่ากับ 0.8

วัสดุที่ทีมของ Xiao Yan สังเคราะห์ขึ้นมีข้อดีหลายประการ เช่น มีความเสถียรเชิงอุณหภูมิสูง มีความแข็งแรงทนทาน ไม่มีพิษ และราคาถูก ทำให้แนวทางการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงมีความเป็นไปได้และคุ้มค่ามากขึ้น ซึ่งคงเป็นข่าวดีสำหรับผู้ขับจี้รถยนต์ทั้งหลาย เพราะวัสดุนี้นี้สามารถนำไปพัฒนาเพื่อลดอัตราการใช้น้ำมันต่อระยะทางได้มากถึง 10%

ที่มา

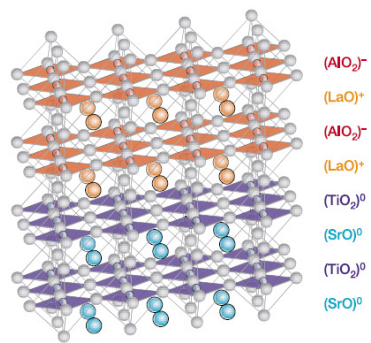
[1] <http://physicsworld.com/cws/article/news/44902>

หินสามารถ (ต่อจากหน้า 13)

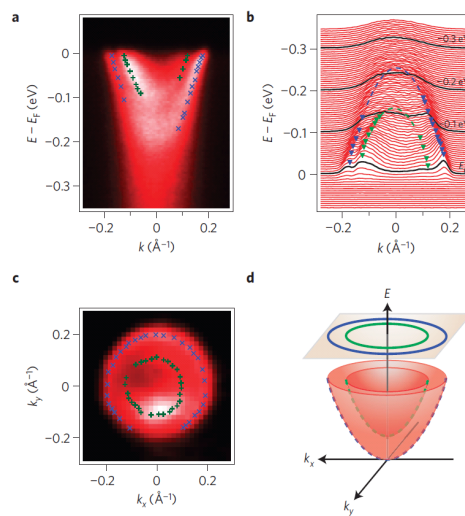
**หมายเหตุ การวัดด้วยเทคนิค ARPES ทำขึ้นที่ Advanced Light Source (USA) ทำการคำนวณโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ University of St Andrews (UK) และทำการทดลองวัดคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน จังหวัดนครราชสีมา ประเทศไทย

เอกสารอ้างอิง

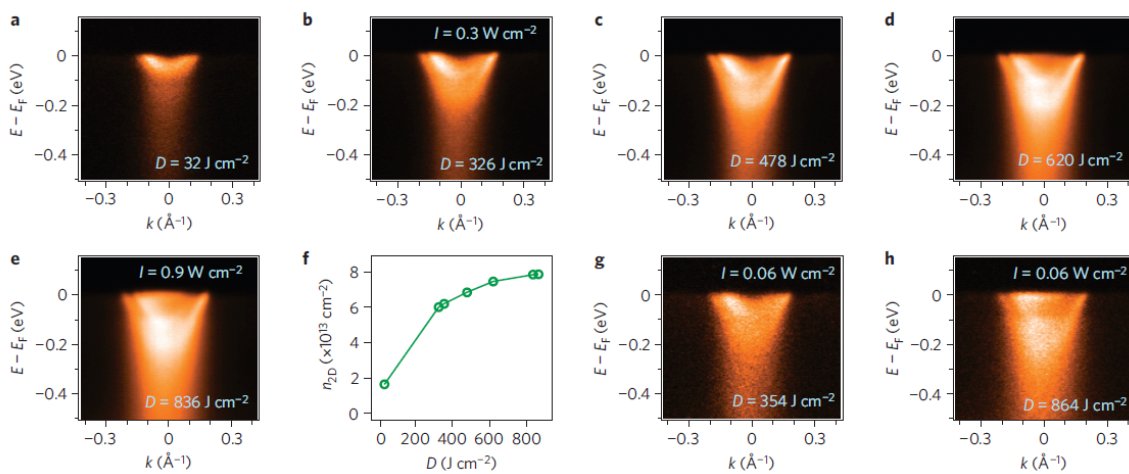
- [1] A. Ohtomo and H. Hwang, A high-mobility electron gas at the $LaAlO_3/SrTiO_3$ heterointerface. *Nature* **427**, 423-426 (2004).
- [2] Thiel, S. et al. Tunable quasi-two-dimensional electron gases in oxide heterostructures. *Science* **313**, 1942-1945 (2006).
- [3] Reyren, N. et al. Superconducting interfaces between insulating oxides. *Science* **317**, 1196-1199 (2007).
- [4] Brinkman, A. et al. Magnetic effects at the interface between non-magnetic oxides. *Nature Mater.* **6**, 493-496 (2007).
- [5] W. Meevasana, P. D. C. King, R. H. He, S-K. Mo, M. Hashimoto, A. Tamai, P. Songsirithigul, F. Baumberger and Z-X. Shen, Creation and control of a two-dimensional electron liquid at the bare $SrTiO_3$ surface, *Nature Mater.* **10**, 114-118 (2011)



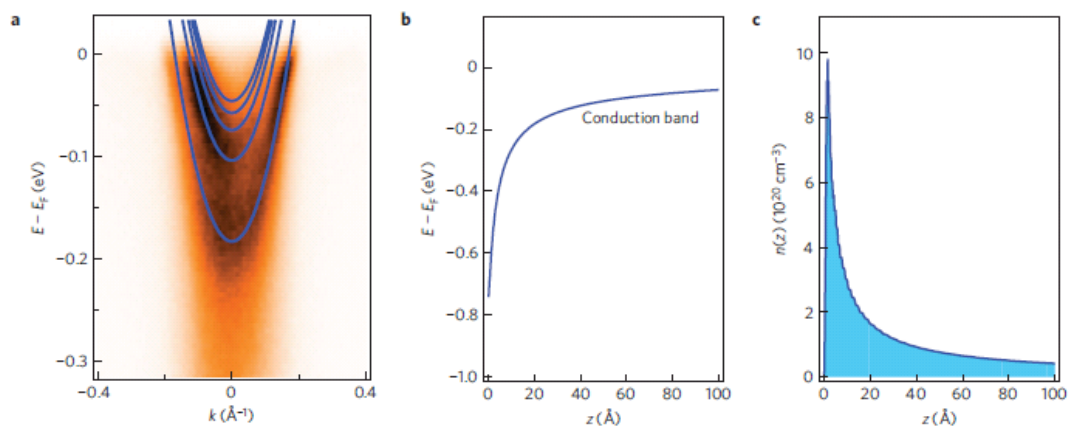
รูปที่ 1



รูปที่ 2



รูปที่ 3



รูปที่ 4



การค้นพบการแบ่งตัวของนิวเคลียส
(ดูรายละเอียดภายในเล่ม)



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