

วารสารฟิสิกส์ไทย

Thai Journal of Physics

วารสารสำหรับผู้ที่รักและสนใจในแวดวงฟิสิกส์

ISSN 0857-1449

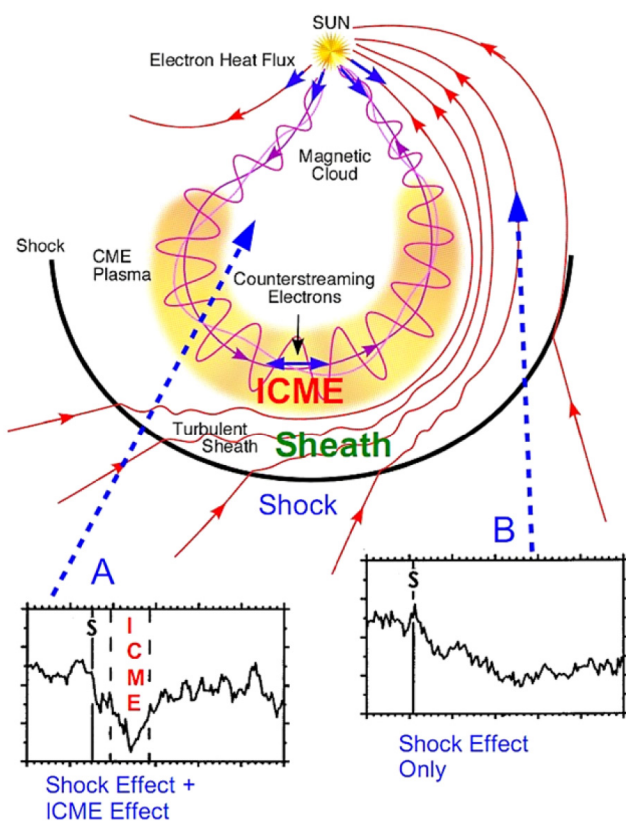
ปีที่ 28 ฉบับที่ 1 : มีนาคม 2554 – พฤษภาคม 2554

การลดลงแบบพหุรูป: ผลกระทบของพายุสุริยะ
ชนิดปลดปล่อยกลุ่มพลาสมาต่อรังสีคอสมิกกาแลกซี

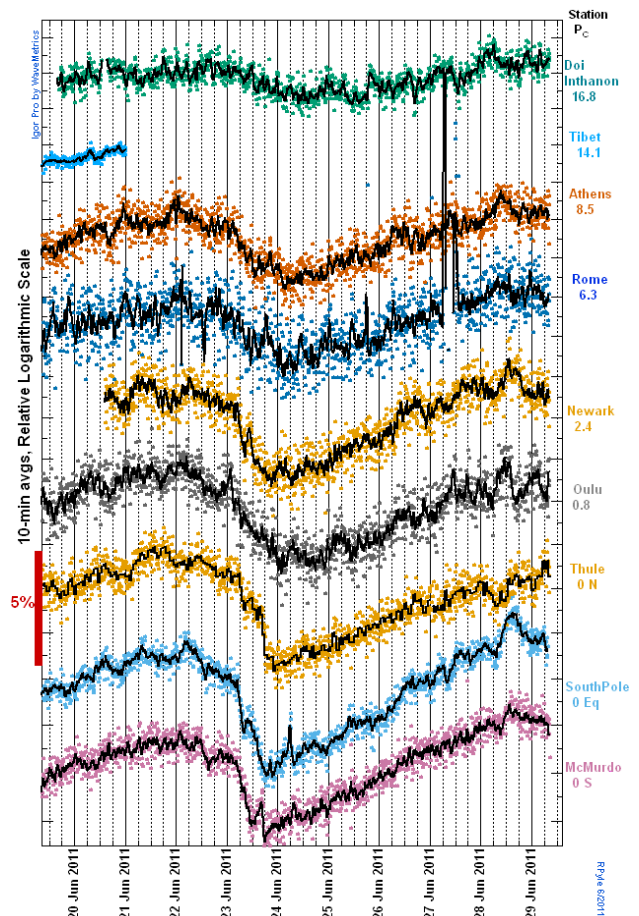
ความท้าทายในวัสดุนาโน

การค้นพบการแบ่งตัวของนิวเคลียส (ตอนจบ)

การเคลือบผิวโลหะด้วยวิธีปฏิกิริยาแก๊ส-โลหะ



รูปที่ 1 โครงสร้างของ ICME และ MC และแนวคลื่นกระแทก (Shock), เส้นและลูกศรสีแดงแสดงสนามแม่เหล็กแบบเกลียว Archimedean spiral field ที่เข้าสู่หรือออกจากดวงอาทิตย์, จากในรูปแสดงเส้นสนามที่ถูกบีบอัดและมีความปั่นป่วนมากขึ้นในบริเวณ Turbulent Sheath สำหรับเส้นสนามแม่เหล็กแบบเกลียวเชือกของเมฆแม่เหล็กแสดงด้วยสีม่วง ซึ่งจะกักขังพลาสมาของ CME ไว้ภายใน



รูปที่ 2 ปริมาณรังสีคอสมิกที่สถานีตรวจวัดนิวตรอน McMurdo, South Pole, Thule, Oulu, Newark, Rome, Athens, Tibet, และ Doi Inthanon (สถานีตรวจวัดนิวตรอนสิรินธร)

สารบัญ

สวัสดิ์	1
สรุปข่าว	2
ความท้าทายในวัสดุนาโน (Challenges in Nanomaterials)	4
ชัยกานต์ เลียวศิริ	
การเคลือบผิวโลหะด้วยวิธีปฏิกิริยาแก๊ส-โลหะ	9
(Surface coating via gas-metal reaction)	
ฉัตรคนัย บุญเรืองสุข	
การค้นพบการแบ่งตัวของนิวเคลียส (ตอนจบ)	14
อ็อตโต อาร์ ฟรีช และ จอห์น เอ วิลเลอร์	
แปลโดย วันชัย โพธิ์พิจร	
การลดลงแบบฟอร์บush: ผลกระทบของพายุสุริยะ	23
ชนิดปลดปล่อยกลุ่มพลาสมาต่อรังสีคอสมิกกาแลกซี	
วัชรารุณี กฤตนิธรรณ	



สวัสดิ์

พบกันอีกครั้งสำหรับวารสารฟิสิกส์ไทยในฉบับปลายฤดูร้อน - ต้นฤดูฝนครับ ในฉบับนี้นอกจากเราจะได้พบกับบทสรุปของบทความเชิงประวัติศาสตร์เกี่ยวกับการค้นพบกระบวนการแบ่งตัวของนิวเคลียส หรือปฏิกิริยาฟิชชัน (Fission) ที่ต่อเนื่องมาจากฉบับที่แล้ว ยังมีบทความเชิงรีวิว (Review) เกี่ยวกับวัสดุนาโน (Nanomaterial) ซึ่งน่าที่จะเป็นที่น่าสนใจสำหรับท่านผู้อ่านหลายท่าน ที่จะนำเสนอโดยสรุปถึงภาพรวม หลักการ (Concept) ชนิดของกระบวนการสังเคราะห์ ชนิดของโครงสร้าง คุณสมบัติพิเศษต่างๆ ที่แตกต่างจากวัสดุทั่วไป และอื่นๆ นอกจากวัสดุนาโนแล้ว ในเรื่องของฟิสิกส์ของวัสดุเรายังมีบทความอีกบทความหนึ่งที่น่าสนใจคือการเพิ่มการเพิ่มความแข็งแรงของพื้นผิววัสดุด้วยกระบวนการเคลือบผิวด้วยปฏิกิริยาแก๊ส-โลหะ ที่น่าสนใจไม่แพ้กัน บทความที่ไม่ใช่บทความเกี่ยวกับวัสดุ (ทั้งที่นาโนและไม่นาโน) ในฉบับนี้จะเป็นบทความด้าน Astrophysics เรื่องการลดลงแบบฟอร์บush (Forbush Decrease) ซึ่งอธิบายถึงการลดลงของรังสีคอสมิกที่เราสามารถสังเกตได้เนื่องจากลมสุริยะ ซึ่งมีผลการทดลองจากสถานีตรวจวัดนิวตรอนสตรินทรที่ยอดคอยอินทนนท์ของเราด้วยครับ

กองบรรณาธิการ

กองบรรณาธิการ ชัญญกั กัณเฑาะ, ศุภกร รักใหม่, วันทนา คล้ายสุบรรณ, ฉัตรชัย ศรีนิติวรพงศ์, นฤมล สุวรรณจันทร์ดี, พวงรัตน์ ไพเราะ, พรทิพย์ สุดเมือง, ศิรามาส โกมลจินดา, พรรณ วัฒนกลวิษฐ์ หัวหน้ากองบรรณาธิการ ประพนธ์ คล้ายสุบรรณ ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ สมศรี สิงขรัตน์ ภาพและออกแบบปก ประพนธ์ คล้ายสุบรรณ เลขานุการกองบรรณาธิการ ประพนธ์ คล้ายสุบรรณ จำนวนพิมพ์ 2,000 เล่ม

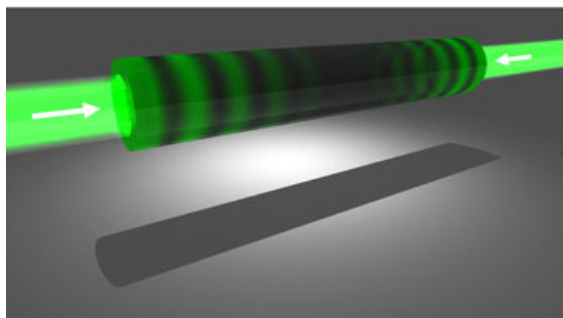
ติดต่อกองบรรณาธิการ วารสารฟิสิกส์ไทย สมาคมฟิสิกส์ไทย อาคารสิรินธรวิโชคชัย 111 ถนนมหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 โทรศัพท์: 044-217040 โทรสาร: 044-217047 วารสารฟิสิกส์ไทย เป็นวารสารราย 3 เดือน มีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่สาระข่าวสาร และเป็นสื่อสัมพันธ์ในมวลหมู่สมาชิกและผู้สนใจในแวดวงฟิสิกส์ ส่งเสริมให้เกิดการแลกเปลี่ยนข้อมูลและประสบการณ์เกี่ยวกับฟิสิกส์ในวงกว้างที่สร้างสรรค์ โดยความคิดเห็นและทัศนะที่ปรากฏอยู่ในบทความต่างๆ เป็นเฉพาะของผู้เขียนแต่ละท่าน สมาคมฟิสิกส์ไทยไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

Website: www.thps.org ผู้ดูแล: วัชรารุณี 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 ลิ้มปิยะจันท์ นายทะเบียน ดร. สาโรช รุจิวรรณ บรรณาธิการ วารสารฟิสิกส์ไทย ดร. ประพนธ์ คล้ายสุบรรณ ปฎิคม ผศ. ดร. ศุภกร รักใหม่ ประธานสัมพันธ์ ดร. สัมภาส นิดเกตุ รองเลขานุการ ดร. ขรรค์ชัย โกศลทองเก้ กรรมการ ผศ. ดร. ขจรยศ อยู่ดี, ผศ. รัชนา ชินพิทักษ์, รศ. ดร. ชีววรรณ บุญญวรรณ, ผศ. ดร. ธนากร โอสดาจันทร์, ผศ. ดร. นิรันดร์ วิทอนันต์, ผศ. ดร. ขวัญ อารยะรัตนกุล, ดร. สิริพัฒน์ ประโทนเทพ, ดร. วัชรพร นิตระดม

สรุปข่าว

เลเซอร์ย้อนกลับ (Anti-laser) อุปกรณ์ใหม่สำหรับเปลี่ยนแสงเป็นพลังงาน



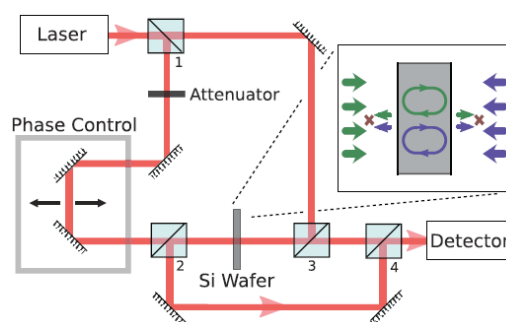
นักฟิสิกส์ประสบความสำเร็จในการสร้างอุปกรณ์ซิลิกอนที่สามารถเปลี่ยนแสงที่มีความยาวคลื่นเฉพาะค่า เช่น แสงเลเซอร์ ให้เป็นพลังงานด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า Anti-laser

ปัจจุบันเทคโนโลยีเลเซอร์นั้นเป็นที่รู้จักกันโดยทั่วไป นับจากการผลิตครั้งแรกซึ่งย้อนกลับไปเมื่อประมาณห้าสิบปีที่แล้ว จนถึงทุกวันนี้ที่ใคร ๆ ก็สามารถเป็นเจ้าของเลเซอร์พอยต์เตอร์ได้ด้วยเงินเพียงไม่ถึงหนึ่งร้อยบาท หรือ เครื่องเล่นแผ่น ซีดี ดีวีดี หรือ แม้แต่เครื่องเล่นบลูเรย์ที่เริ่มได้รับการตอบรับจากผู้ใช้ทั่วโลก

ตามที่เราได้เคยทราบมาก่อนว่า เลเซอร์เป็นแสงที่มีความเข้มสูงที่เกิดขึ้นจากการให้พลังงานเข้าไปในแหล่งกำเนิด แต่ถ้ามีกระบวนการที่ทำงานสวนทางกับการเกิดแสงเลเซอร์นั้นขึ้นจะเป็นอย่างไร เมื่อปีที่ผ่านมากลุ่มของนักฟิสิกส์ที่มหาวิทยาลัยเยล (Yale University) ได้พบหนทางที่จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าว ด้วยสิ่งที่เรียกว่า Time-reversed laser โดยในอุปกรณ์นี้ แสงจะถูกดูดกลืนแล้วถูกเปลี่ยนเป็นความร้อนหรือไฟฟ้า กล่าวคือ เราได้พลังงานออกมาหลังจากเราให้แสงเลเซอร์เข้าไปในอุปกรณ์ และปัจจุบันนี้นักวิทยาศาสตร์กลุ่มนี้ได้สร้างอุปกรณ์ดังกล่าวได้จริง ซึ่งสามารถดูดกลืนแสงได้มากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ของแสงที่ตกกระทบกับอุปกรณ์ดังกล่าว จากนั้นแสงจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน แต่ก็ยังมีข้อจำกัดอยู่ว่า Anti-laser สามารถดูดกลืนแสงได้ในช่วงความถี่แคบ ๆ เท่านั้น ดังนั้นจึงใช้ได้กับแสงที่เป็นแสงอาพันธ์ (Coherent light) ดังเช่นแสงเลเซอร์

อุปกรณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นจากแนวคิดเชิงทฤษฎีที่ว่า เลเซอร์ทำงานอย่างไร และจะเป็นอย่างไรภายใต้กระบวนการที่กลับกัน ซึ่งจาก Time-reversal symmetry ซึ่งเป็นทฤษฎีสมมาตรพื้นฐานของทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าและกลศาสตร์ควอนตัมแบบไม่คิดสัมพัทธภาพ กล่าวว่า ถ้ามีกระบวนการทางกายภาพเกิดขึ้นได้ ก็จะมีกระบวนการย้อนกลับของตัวมันเองด้วย Douglas Stone นักฟิสิกส์ทฤษฎีที่มหาวิทยาลัยเชลกล่าวกับเพื่อนของเขาว่า “ลองจินตนาการดูว่าหากเราฉายแสงเลเซอร์ที่เหมือนกับแสงเลเซอร์ที่ถูกผลิตขึ้น มันจะถูกดูดกลืนที่ความถี่นั้น แต่เราจะสามารถทำได้จริงหรือ”

ด้วยการจับมือกับกลุ่มวิจัยของนักทดลองที่มหาวิทยาลัยเยล ซึ่งนำโดย Hui Cao พวกเขาได้พบคำตอบว่า Anti-laser น่าจะทำงานอย่างไร ด้วยระบบที่มีการแยกแสงเลเซอร์ให้ไปในสองเส้นทางแล้วตกลงบนสองด้านที่ตรงข้ามกันของแผ่นซิลิกอนที่ขจัดเงา พวกเขาออกแบบระบบให้เกิดการสะท้อนและแทรกสอดของแสงทั้งสองส่วนภายในซิลิกอน ซึ่งเหมือนกับเป็นกับดักที่มีแสงเป็นเหยื่อ แสงที่ไม่สามารถออกมาได้จะถูกดูดกลืนและพลังงานจากการดูดกลืนจะเปลี่ยนเป็นความร้อน Stone ยังกล่าวอีกว่า ด้วยการออกแบบที่เหมาะสมเราจะสามารถได้พลังงานไฟฟ้าออกมา โดยจากการทดสอบแสงที่หลุดลอดออกมาได้จากอุปกรณ์มีน้อยกว่าหนึ่งเปอร์เซ็นต์ แต่พวกเขายังคาดหวังที่จะได้การดูดกลืนของแสงที่ดีขึ้นกว่านี้อีกหากเลเซอร์ที่ใช้มีคุณภาพดีขึ้นกว่านี้



การทำให้ลำแสงมาแทรกสอดกันอย่างสมบูรณ์แบบซึ่งจะทำให้แสงถูกดักไว้ในแผ่นซิลิกอนนั้นค่อนข้างมีความซับซ้อน จำเป็นต้องใช้กลวิธีการควบคุมเส้นทางเดินของลำแสงทั้งสองลำ

อย่างแม่นยำ ด้วยการแยกแสงเลเซอร์ที่เข้ามาตกกระทบออกเป็นสองส่วนทำให้ได้แสงที่มีความยาวคลื่นและแอมพลิจูดเท่ากันตกบนทั้งสองด้านของแผ่นซิลิคอนซึ่งหนาประมาณ 110 ไมครอน และถ่วงการเดินทางของลำแสงหนึ่งลำเพื่อควบคุมความต่างเฟสของคลื่นแสงทั้งสอง ด้วยการปรับเฟสที่เหมาะสม วัสดุที่ปกคิจะสะท้อนแสงหรือยอมให้แสงผ่าน จะสามารถดักคลื่นแสงเลเซอร์ที่ยิงเข้าไปได้เกือบจะสมบูรณ์แบบ

จากการควบคุมความต่างเฟส หากมีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขกับลำแสงหนึ่ง จะมีผลต่อการทำอันตรกิริยาต่อกันของแสงทั้งสอง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความสามารถในการดักคลื่นแสงของระบบ “เป็นการใช้แสงควบคุมแสง ซึ่งเปรียบเหมือนกับกับสวิทช์ในการควบคุมแสง ซึ่งจะเป็ประโยชน์อย่างอิ่งในวงจรเชิงแสง (Optical circuit) ซึ่งใช้แสงในการส่งข้อมูลแทนที่จะเป็นระบบไฟฟ้า” Stone กล่าว

คุณสมบัติของวัสดุ เช่น ช่องว่างแถบพลังงาน (Band gap) ของสารจำพวกสารกึ่งตัวนำ จะบอกถึงความสามารถในการดักคลื่นแสงในช่วงความยาวคลื่นใดได้ดีที่สุด สำหรับวัสดุที่ใช้เริ่มแรกเป็นซิลิคอน ซึ่งดักคลื่นแสงช่วงใกล้อินฟราเรด Cao กล่าวว่าแสงในช่วงที่ตามองเห็นก็สามารถทำได้เช่นเดียวกันด้วยการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

เนื่องจากว่า การดักคลื่นแสงของ Anti-laser ก่อนข้างจะขึ้นกับคุณสมบัติของแสง ดังนั้นอุปกรณ์นี้จึงสามารถนำไปใช้ได้กับงานที่ต้องการกำจัดแสงที่มีความยาวคลื่นที่ไม่ต้องการออกไป หรือ เป็นเครื่องตรวจวัดการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่เจาะจงภายในสิ่งแวดล้อมที่เต็มไปด้วยคลื่นความถี่ต่าง ๆ Hakan Tureci นักฟิสิกส์ทฤษฎีแห่งมหาวิทยาลัยพรินซ์ตันกล่าว

Stefano Longhi นักฟิสิกส์ที่ Polytechnic Institute of Milan กล่าวว่า “งานวิจัยนี้จะนำมาซึ่งความตื่นใจด้านทศนศาสตร์และมีความเป็นไปได้ว่าเราจะสามารถสร้างวัสดุที่สามารถให้แสงออกมาและสามารถดักคลื่นแสงอย่างสมบูรณ์ ซึ่งเป็นทั้ง Laser และ Anti-laser ในอุปกรณ์เดียวกัน ซึ่งนี่เป็นก้าวที่สำคัญนำไปสู่ความสัมพันธ์ที่วิเศษระหว่างสสารกับแสง”

ที่มา

[1] <http://www.eng.yale.edu/caolab/papers/Sci11b.pdf>

[2] <http://www.scientificamerican.com/article.cfm>

กลศาสตร์ควอนตัมแสดง “การหล่อเย็นแก้วให้กลายเป็นของเหลว”

ทฤษฎีกลศาสตร์ควอนตัมนั้นได้ถูกพัฒนามาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1920 ซึ่งในขณะนั้นได้สร้างผลกระทบอย่างกว้างขวางเกี่ยวกับการอธิบายพฤติกรรมของสสาร ซึ่งปัจจุบันแบบจำลองฟิสิกส์ควอนตัม นั้นทำให้เราเข้าใจเป็นอย่างดีว่า อนุภาค พื้นฐาน เช่น อิเล็กตรอน โปรตอน และ นิวตรอนนั้นเป็นตัวกำหนดความแตกต่างของโครงสร้างสสาร จากวันนั้นจนถึงวันนี้ รวมระยะเวลากว่า 90 ปี ทฤษฎีใหม่ๆ เกี่ยวกับฟิสิกส์ควอนตัมก็ยังได้รับ



การอธิบายเพิ่มเติมอยู่เสมอ รวมถึงงานวิจัยของ Prof. Eran Rabani ที่ได้ตีพิมพ์ลงในวารสาร Nature Physics เมื่อเร็วๆ นี้ งานวิจัยชิ้นนี้ทำให้หลายๆ คน ต้องตั้งคำถามในการเกิดขึ้นของสิ่งที่หลายคนคิดว่าย่อมไม่น่าจะเป็นไปได้

ศาสตราจารย์ Rabani จาก Tel Aviv University's School of Chemistry และเพื่อนร่วมงานจาก Columbia University ได้ค้นพบปรากฏการณ์ของกลศาสตร์แบบใหม่ที่ทำให้แก้วเปลี่ยนโครงสร้างไปเป็นของเหลวได้ พวกเขาเชื่อว่า แก้วมีโอกาสหลอมละลายได้โดยไม่ต้องใช้ความร้อน แต่ด้วยการใช้การหล่อเย็นด้วยความเย็นที่เข้าใกล้ศูนย์องศาสัมบูรณ์ (-273.15 °C)

งานวิจัยนี้ถือเป็นงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์พื้นฐาน ที่มีข้อจำกัดและห่างไกลจากการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง อย่างไรก็ตาม ศาสตราจารย์ Rabani เชื่อว่า การที่เราเข้าใจการประพฤติตัวของวัสดุ นั้น จะเป็นการปูพื้นฐานสำหรับการพัฒนาหรือการค้นพบที่ยิ่งใหญ่ในอนาคต และสิ่งสำคัญและน่าสนใจในตอนนี้เป็นคือ ปรากฏการณ์ควอนตัม ทำให้เราสามารถหลอมแก้วได้ด้วย ความเย็น มิใช่ความร้อน

(อ่านต่อที่หน้า 29)

ความท้าทายในวัสดุนาโน

Challenges in Nanomaterials

ชัยกานต์ เลี้ยวหิรัญ¹

บทความนี้ นำเสนอถึงความน่าสนใจและความท้าทายในการศึกษาความพิเศษของวัสดุนาโน การอธิบายโครงสร้างวัสดุนาโน รวมถึงเทคโนโลยีที่นำมาใช้กันทั่วไปในการสังเคราะห์วัสดุนาโน อีกทั้งยังแสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของวัสดุนาโน โดยคุณสมบัติในหลายด้านมีการเปลี่ยนแปลงและเกิดขึ้นเมื่อวัสดุมีขนาดที่เล็กลงอย่างเห็นได้ชัด รวมถึงการนำวัสดุนาโนมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมระดับชาติและระดับโลก สิ่งเหล่านี้ถือได้ว่าเป็นการศึกษาวิทยาศาสตร์เชิงบูรณาการสมัยใหม่ เนื่องจากการนำความรู้พื้นฐานในหลายศาสตร์ เช่น ฟิสิกส์, เคมี, ชีววิทยา รวมถึงด้านวิศวกรรมศาสตร์ มาร่วมวิจัยและประยุกต์ใช้ทั้งหมดนี้เป็นความน่าสนใจและท้าทายอย่างมากที่จะศึกษาวิทยาศาสตร์แขนงนี้ในปัจจุบัน

ในทศวรรษที่ผ่านมา นักวิทยาศาสตร์ทั่วโลกต่างเชื่อว่าวัสดุนาโนจะสร้างความยิ่งใหญ่และก่อให้เกิดการพัฒนาในหลาย ๆ ด้าน โดยถูกนำมาศึกษาและประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายทั้งในด้านวิศวกรรมศาสตร์ แพทยศาสตร์ วัสดุศาสตร์ วิทยาศาสตร์พื้นฐาน และวิทยาศาสตร์ประยุกต์ อันเนื่องมาจากข้อดีของวัสดุนาโนหลายประการ อาทิ ขนาดที่เล็ก มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง ขนาดที่เล็กระดับนาโนเมตร หมายถึง ขนาดระดับ 10^{-9} เมตร ซึ่งเทียบได้กับ 1 เมตรใน 1,000 ล้านเมตร หรือประมาณ 1 ใน 50,000 เท่าของขนาดเส้นผมมนุษย์ 1 เส้น หรือเล็กกว่ามดถึงหนึ่งล้านเท่าเลยทีเดียว ขนาดของวัสดุนาโนที่เราชอบรับว่าสามารถนิยามความเป็นวัสดุขนาดเล็กได้จะอยู่ในช่วง 1-100 นาโนเมตร การมีขนาดเล็กของวัสดุนาโนสามารถเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุได้หลายประการทั้งสมบัติทางฟิสิกส์และทางเคมี เช่น สภาพแม่เหล็ก การเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยา (Catalysis) หรือ พฏิกิริยาทางแสง เป็นต้น ซึ่งก่อให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านต่างๆ เช่น ด้านอิเล็กทรอนิกส์ เซรามิก วัสดุประกอบ รวมถึงคุณสมบัติเชิงกลของ

สสารระดับเล็กในวัสดุพลาสติกยิ่งยวด (Superplastic) ซึ่งเป็นที่นิยมอย่างมากในปัจจุบัน ตลอดจนการพัฒนาวิทยาศาสตร์และวิทยาการด้านอื่นๆ อีกมากมาย เช่น การพัฒนาทางด้านความมั่นคงของประเทศ การสร้างซูเปอร์คอมพิวเตอร์ หรืออาวุธสงครามให้มีขนาดเล็กลง น้ำหนักเบา ควบคุมได้ง่าย หรือแม้กระทั่งการคมนาคม การสื่อสารข้อมูลผ่านระบบนาโน แทนการส่งดาวเทียมที่มีขนาดใหญ่ หรือใช้ในยานอวกาศเพื่อทำการสำรวจอวกาศ การที่วัสดุมีขนาดเล็กลงระดับนาโนจะสามารถเพิ่มศักยภาพในการประยุกต์ใช้ด้านเหล่านี้ให้มีความรวดเร็ว หรือ สามารถใช้เก็บข้อมูลได้ละเอียดมากขึ้น ประหยัดพลังงาน อีกทั้งยังเพิ่มความปลอดภัยอีกด้วย การพัฒนาโครงสร้างนาโนของวัสดุก่อให้เกิดข้อสงสัยแก่นักวิทยาศาสตร์ว่า ทำไมต้องทำการลดขนาดให้เล็กลงระดับนาโน หรือ ทำไมต้องศึกษา คุณสมบัติของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อลดขนาดโครงสร้างลง เช่น จากระดับไมครอน (10^{-6} เมตร) ลงสู่ระดับนาโน (10^{-9} เมตร) เช่น การมีค่าความแข็งแรงเชิงกลสูงขึ้น (Mechanical Strength) การกระจายแสงเพิ่มขึ้น ค่าความร้อนจำเพาะสูงขึ้น และสภาพความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนไป เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเดิมที่มีขนาดใหญ่กว่า เป็นต้น ซึ่งในบทความนี้จะอธิบายแนวคิดที่สำคัญต่อไป

อย่างไรก็ตาม วัสดุนาโนอาจจะทำให้เกิดผลกระทบในหลายด้านถ้าไม่มีการควบคุมการผลิตวัสดุนาโนอย่างปลอดภัย เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีขนาดเล็กมาก ในบางครั้งอาจมีผลกระทบต่อ การดำเนินชีวิตของมนุษย์และสุขภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบทางเดินหายใจ การที่วัสดุมีขนาดเล็กมากสามารถผ่านเข้าไปยังระบบทางเดินหายใจ อีกทั้งยังจะเป็นอันตรายต่อระบบการทำงานของเซลล์ในร่างกายอีกด้วย ดังนั้น การศึกษาคุณสมบัติของวัสดุเพื่อพัฒนาไปสู่การใช้งานจึงต้องมีการทดสอบและควบคุมความปลอดภัยอย่างละเอียด เพื่อเกิดประโยชน์มากที่สุด และส่งผล

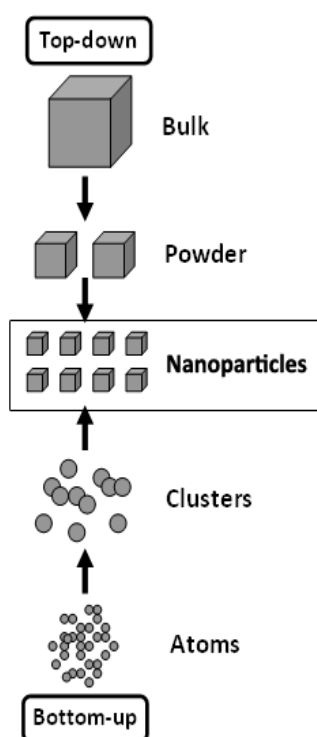
¹อาจารย์ (ดร.) ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

กระทบต่อสิ่งมีชีวิตน้อยที่สุดเช่นกัน

เทคโนโลยีในการสังเคราะห์วัสดุนาโน

เทคโนโลยีที่ก้าวหน้าอย่างรวดเร็วในปัจจุบัน ก่อให้เกิดกระบวนการต่าง ๆ อย่างมากมายที่จะสามารถสังเคราะห์วัสดุนาโนให้มีขนาดเล็กลงได้อย่างรวดเร็ว โดยทั่วไปแล้วเราสามารถจำแนกเทคโนโลยีพื้นฐานในการสังเคราะห์วัสดุนาโนได้ 2 ประเภท ดังรูปที่ 1 คือ

1. เทคโนโลยีบน-ล่าง (Top-down Technology) วิธีการนี้เป็นเทคโนโลยีที่เรามักจะนำมาประยุกต์ใช้เพื่อเตรียมวัสดุนาโน โดยหลักการ คือ การสังเคราะห์วัสดุที่มีขนาดใหญ่ระดับเมตร เซนติเมตร มิลลิเมตร หรือไมโครเมตร ให้มีระดับสุดท้าย คือ ระดับนาโนเมตร โดยกระบวนการเช่น การบด อัด ตัด กระแทก ข่อย เสียดสี หรือใช้เครื่องมือกลช่วย เป็นต้น เทคโนโลยีชนิดนี้ค่อนข้างง่ายในการลดขนาดของวัสดุ แต่ได้ลักษณะความเป็นเนื้อเดียวกันและความเป็นระเบียบในการจัดเรียงตัวของอะตอมที่ค่อนข้างหายาก ในบางครั้งอาจเรียกว่า เทคโนโลยีการทำลาย ตัวอย่างของเทคโนโลยีชนิดนี้ เช่น กระบวนการลิโทกราฟี (Lithography), กระบวนการกัดด้วยกรด (Etching) เป็นต้น



รูปที่ 1 เทคโนโลยีพื้นฐานในการสังเคราะห์วัสดุนาโน

2. เทคโนโลยีล่าง-บน (Bottom-up Technology) วิธีการนี้เป็นเทคโนโลยีที่มักสร้าง หรือ สังเคราะห์โครงสร้างระดับนาโนจากการรวมตัวของอะตอม หรือโมเลกุลที่มีขนาดเล็กกว่าระดับนาโน แล้วทำการรวมตัวกันให้มีขนาดที่ใหญ่ขึ้นในระดับนาโนเมตร เทคโนโลยีประเภทนี้ค่อนข้างกระทำได้ยาก ต้องมีการควบคุมการจัดเรียงตัวของอะตอมหรือโมเลกุล ซึ่งต้องอาศัยปัจจัยหลายอย่างในการควบคุมการสังเคราะห์ แต่จะสามารถกำหนดโครงสร้างของวัสดุได้อย่างแม่นยำ มีความเป็นเนื้อเดียวกันสูง ในบางครั้งอาจเรียกว่า เทคโนโลยีการสร้าง ตัวอย่างของเทคโนโลยีชนิดนี้ เช่น การปลูกผลึก หรือ หนุ่ดควอนตัม (Quantum Dot), การตกสะสมของไอสารเคมี (Chemical Vapor Deposition, CVD) เป็นต้น

โครงสร้างวัสดุนาโน [1,2]

คุณสมบัติเฉพาะที่สำคัญมากอย่างหนึ่งของวัสดุนาโนก็คือ การมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวและปริมาตรสูง สัดส่วนพื้นที่ผิวของอะตอมที่สูงมากดังกล่าวทำให้อนุภาคนาโนมีคุณสมบัติแตกต่างไปจากเนื้อปริมาตรของวัสดุนาโนขนาดใหญ่ การสังเคราะห์โครงสร้างลักษณะดังกล่าว สามารถเริ่มจาก การเตรียมอนุภาคนาโนจากสถานะไอระเหย (Evaporation) และ/หรือ ของเหลว ซึ่งมีกระบวนการที่เกี่ยวข้องหลายขั้นตอน มีขั้นตอนหลัก ๆ คือ การเกิดนิวเคลียสฟลัก (Nucleation) การควบแน่น (Condensation) การจับก้อน (Coagulation) การรวมตัวเป็นก้อนหยาบ (Coalescence) และการเติบโต (Growth) อนุภาคนาโนจะเริ่มเกิดจากการการก่อตัวจากแก่นกลางหรือเกิดนิวเคลียสฟลัก จากนั้นจึงค่อยๆ เกาะกลุ่มและรวมตัวกันเกิดเป็นกลุ่มก้อนใหญ่ขึ้น ด้วยเหตุนี้อนุภาคนาโนหลาย ๆ อนุภาคจะถูกสร้างขึ้นอย่างสม่ำเสมอจากกลุ่มอะตอมเรียงตัวกันคล้ายรูปแบบกล่อ่งลูกบาศก์ และสามารถเติบโตขึ้นได้

วัสดุนาโนสามารถจัดแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มหลัก ๆ ตามทิศทางหรือมิติของผลึก พิจารณารูปที่ 2 ประกอบ ซึ่งก็จะทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสมีค่าเปลี่ยนไปตามมิติด้วย ดังนี้

1. โครงสร้างนาโนศูนย์มิติ (Zero-dimensional Nanostructures) ในกลุ่มนี้ วัสดุจะมีโครงสร้างที่มีมิติทางกายภาพทั้งสามมิติถูกจำกัดอยู่ในช่วงนาโนเมตร มักพบความเป็นเนื้อเดียวกันสูง โดยส่วนใหญ่จะพบเฟสที่มีองค์ประกอบเดียว ลักษณะกลุ่มอะตอมที่พบ จะรวมกลุ่มกัน เรียกว่า คลัสเตอร์

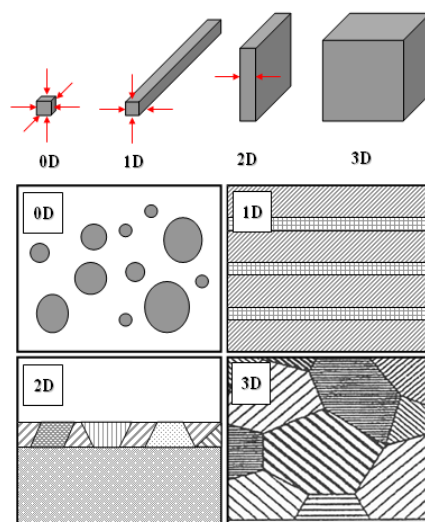
(Clusters) ในบางครั้งเราอาจเรียกกลุ่มอะตอมเหล่านี้ว่า อนุภาคนาโน เช่น อนุภาคนาโนทรงกลม (Nanospheroidal), อนุภาคนาโนสี่เหลี่ยม (Nanorectangle) เป็นต้น วัสดุกลุ่มอะตอมมิติศูนย์สามารถสังเคราะห์ได้หลายวิธี เช่น การพ่นละอองฝอยด้วยเปลวไฟ (Flame Spray Pyrolysis, FSP), เอพิแทกเซียล (Epitaxial), การพ่นละอองฝอย (Spray Pyrolysis, SP), โซล-เจล (Sol-gel) เป็นต้น

2. โครงสร้างนาโนหนึ่งมิติ (One-dimensional Nanostructures) ในกลุ่มนี้ วัสดุหรือโครงสร้างที่มีมิติทางกายภาพสามมิติ มีสองมิติที่ถูกจำกัดอยู่ในช่วงนาโนเมตร ส่วนที่เหลืออีกหนึ่งมิติไม่ถูกจำกัดขนาดในช่วงนาโน วัสดุกลุ่มนี้มีโครงสร้างซับซ้อนขึ้นเล็กน้อยกว่ากลุ่มแรก กล่าวคือ มีความยาวเพิ่มขึ้นหรือมีการเติบโตในทิศทางของระนาบใดระนาบหนึ่งอย่างชัดเจน อาจมีความเป็นเนื้อเดียวกันสูงหรือมีความไม่เป็นเนื้อเดียวกันก็ได้ เช่น แท่งนาโน (Nanorod), เส้นนาโน (Nanowhisker), หลอดนาโน (Nanotube), ลวดนาโน (Nanowire) หรือ เส้นใยนาโน (Nanofibril) เป็นต้น วิธีการสังเคราะห์ที่นิยมใช้เตรียมวัสดุกลุ่มนี้ เช่น การหมุนเหวี่ยงด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrospinning), ลิโธกราฟี (Lithography) เป็นต้น

3. โครงสร้างนาโนสองมิติ (Two-dimensional Nanostructures) ในกลุ่มนี้ วัสดุหรือโครงสร้างที่มีมิติทางกายภาพหนึ่งมิติถูกจำกัดอยู่ในช่วงนาโนเมตร แต่มิติที่เหลืออีกสองมิติไม่ถูกจำกัดขนาด มีโครงสร้างที่ซับซ้อนเพิ่มมากขึ้น มีความชัดเจนในส่วนขนาดความหนาของการก่อตัวของผลึกเป็นชั้น ซึ่งสามารถมองเห็นเป็นมิติได้มากขึ้น การควบคุมโครงสร้างประเภทนี้สามารถกระทำได้โดยต้องมีการควบคุมปัจจัยทางด้านอุณหพลศาสตร์ ซึ่งมีผลโดยตรงต่อสัณฐานวิทยาที่เปลี่ยนแปลงไป รวมถึงความบกพร่องหรือความไม่สมบูรณ์ของผลึก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระดับความบกพร่องแบบสามมิติ เช่น การเกิดรูพรุน (Porosity), การเกิดฟอง (Bubbles), การแตกเป็นรอย (Cracking) และการตกตะกอน (Precipitation) เป็นต้น ตัวอย่างของโครงสร้างชนิดนี้ ได้แก่ ฟิล์มบางนาโน (Nano Thin Films) เป็นต้น วิธีการสังเคราะห์ที่นิยมใช้ในการเตรียมวัสดุกลุ่มนี้ เช่น การตกสะสมของชั้นอะตอม (Atomic Layer Deposition, ALD), การตกสะสมของไอสารเชิงกายภาพ (Physical Vapor Deposition, PVD), การตกสะสมของไอเชิงเคมี (Chemical Vapor Deposition,

CVD), การตกสะสมเชิงไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Deposition) เป็นต้น

4. โครงสร้างนาโนสามมิติ (Three-dimensional Nanostructures) หรือ วัสดุหยาบ ในกลุ่มนี้พบว่าวัสดุหรือโครงสร้างที่มีมิติทางกายภาพทั้งสามมิติไม่ถูกจำกัดขนาดของวัสดุ อาจจะพบองค์ประกอบที่ซับซ้อนมาก มีลักษณะการกระจายตัวของเฟสมากกว่า 2-3 ชนิดขึ้นไป วัสดุอาจประกอบไปด้วย ผลึก (Crystalline) กึ่งผลึก (Quasi-crystalline) และ เฟสอสัณฐาน (Amorphous Phase) หรือแก้วนาโน (Nanoglasses) วัสดุนาโน อาจจะเป็นโลหะ กึ่งโลหะ (Intermetallics) เซรามิกซ์ หรือวัสดุประกอบ (Composites) ก็ได้



รูปที่ 2 โครงสร้างวัสดุนาโนจำแนกตามมิติ [2]

คุณสมบัติของวัสดุนาโน [3]

วัสดุที่มีโครงสร้างในระดับนาโนเมตรมีสมบัติต่างจากวัสดุที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่หลายประการ ลักษณะที่เด่นชัดคือจะมีสมบัติเกี่ยวกับพื้นที่ผิวสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมสูงมาก นอกจากนั้น วัสดุนาโนยังมีสมบัติอีกหลายประการที่พบได้อย่างชัดเจนเมื่อวัสดุมีขนาดเล็กลง โดยพบว่าสมบัติต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปเหล่านี้ขึ้นอยู่กับขนาดโดยตรง ดังที่จะพิจารณาคุณสมบัติทางด้านสสาร ระหว่างวัสดุที่มีโครงสร้างในระดับนาโนเมตร กับ วัสดุที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ระดับไมโครเมตรจนถึงระดับเมตร อาทิ

ค่าการกระจายตัว (Dispersion) ซึ่งหมายถึงอัตราส่วนระหว่างจำนวนอะตอมที่อยู่บนผิวของวัสดุเทียบกับจำนวนอะตอมทั้งหมดของก้อนวัสดุ พบว่า วัสดุที่มีขนาดยิ่งเล็กลง ยิ่งมีค่าการกระจายตัวสูงมากตามไปด้วย นั่นหมายความว่า อะตอมที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมจะยังมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับอะตอมทั้งเนื้อสาร วัสดุที่มีค่าการกระจายตัวสูงพบได้ง่ายในวัสดุที่โครงสร้างผลึกชนิดคิวบิกอย่างง่าย (Simple Cubic, SC), ออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) และ รอมโบฮีดรัล (Rhombohedral) เป็นต้น เนื่องจากในแต่ละหน่วยเซลล์ อะตอมที่ผิวกับในเนื้อเซลล์มีจำนวนเท่ากัน ดังนั้นอะตอมทุกอะตอมจะมีการกระจายตัวที่สูงและสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมได้ทุกอะตอมนั่นเอง แต่ก็มีหน่วยเซลล์บางชนิดจะมีค่าน้อยกว่า ตัวอย่างเช่น ผลึกลูกบาศก์แบบกลางตัว (Body-centered Cubic; BCC) ซึ่งมีค่าการกระจายตัวลดลงเล็กน้อยเนื่องจากอะตอมที่ผิวกับอะตอมทั้งหมดจะต่างกันเพียง 1 อะตอม ซึ่งจะสังเกตเห็นว่ามีหนึ่งอะตอมที่ไม่ใช่อะตอมที่อยู่บนผิวแต่อยู่บริเวณกึ่งกลางของหน่วยเซลล์ คุณสมบัติการกระจายตัวนี้ ถือได้ว่าเป็นมีความสำคัญมากในการแสดงความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาบริเวณพื้นผิวของวัสดุนาโน และเมื่อวัสดุมีขนาดเล็กลงระดับนาโน พบว่าค่าการกระจายตัวจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น นั่นหมายความว่าค่าการกระจายตัวจะแปรผกผันกับขนาดของวัสดุนั่นเอง

ในส่วนของคุณสมบัติทางด้าน **พลังงานพื้นผิวของแข็ง (Solid Surface Energy)** พบว่า ขนาดของอนุภาคที่เล็กลงระดับนาโนนั้นจะมีค่าพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น นั่นหมายความว่าจะมีพื้นที่ผิวอิสระในการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวมากขึ้น ซึ่งสัมพันธ์กับค่าการกระจายตัวของอะตอมที่ผิวดังที่ได้กล่าวมาแล้ว พื้นที่ผิวอิสระที่มากขึ้นจะส่งผลให้มีพลังงานพื้นผิวสูงมากขึ้น จึงทำให้ดึงดูดอนุภาครอบข้างเข้ามาเกาะติดได้มากขึ้น ซึ่งส่งผลให้มี ค่าเสถียรภาพทางอุณหพลศาสตร์ ที่ลดต่ำลง ปัญหาที่มักจะเกิดขึ้นเนื่องจากขนาดที่เล็กของอนุภาคนาโน คือ การเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน (Agglomeration) นั่นคือ การที่วัสดุมีขนาดเล็กลงระดับนาโน ส่งผลให้พลังงานพื้นผิวมีค่าสูงขึ้น และความเสถียรลดต่ำลงอย่างสัมพันธ์กัน จึงพร้อมที่จะดึงดูดอนุภาคที่อยู่รอบข้างให้เกิดการเกาะกันเป็นก้อนใหญ่ขึ้น เพื่อเพิ่มเสถียรภาพทางอุณหพลศาสตร์ของพื้นผิวให้มากขึ้น ซึ่งคล้ายคลึงกับกระบวนการควบแน่น (Condensation) หรือการซินเตอร์ (Sintering) ของวัสดุที่อุณหภูมิสูงนั่นเอง สำหรับการซินเตอร์ ก็คือ กระบวนการที่อนุภาครวมตัว

เข้าด้วยกันหรือเกิดการเชื่อมต่อกันของแต่ละอนุภาคบริเวณขอบเกรนหรือรอยต่อ (Grain) ระหว่างที่มีการให้ความร้อนแก่ระบบ ซึ่งมีผลทำให้เกิดการหดและแน่นตัวมากขึ้น ดังนั้นจึงเป็นกระบวนการที่สามารถเพิ่มความเสถียรภาพทางอุณหพลศาสตร์ให้กับพื้นผิวได้เป็นอย่างดี

ในส่วนของ **ผลของขนาด (Size Effect)** ยังพบว่า สมบัติของวัสดุที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ระดับนาโน เช่น สารกึ่งตัวนำชนิดแกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลน (Zinc Blende) มีค่าคงที่ของแลตทิซ 0.3565 นาโนเมตร และมีปริมาตรของหนึ่งหน่วยเซลล์เท่ากับ 0.180 ลูกบาศก์นาโนเมตร ในหน่วยเซลล์จะมี Ga และ As อย่างละ 4 อะตอม โดยที่อะตอมของอาร์เซนิก (As) จะเรียงตัวกันแบบคิวบิกหน้ากลาง (Faced-center Cubic, FCC) เมื่ออนุภาควัสดุมีขนาดเล็กมาก อัตราส่วนระหว่างจำนวนอะตอมที่อยู่บนผิวต่อจำนวนอะตอมทั้งหมด จะมีค่ามากขึ้น หมายถึง เฟอร์เซ็นต์ของอะตอมบนผิวมีมากขึ้น จะทำให้คุณสมบัติของสารที่มีขนาดเล็กมาก ๆ เปลี่ยนไปจากอนุภาคนาโนที่มีขนาดใหญ่ สำหรับอนุภาคในระดับนาโน เราสามารถประมาณจำนวนอะตอมที่อยู่บนพื้นผิวได้

ในการพิจารณา **การนำไฟฟ้า (Conductivity)** ในตัวนำหรือสารกึ่งตัวนำนั้น อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้โดยอิสระ ซึ่งระยะทางเฉลี่ยที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้โดยอิสระโดยไม่มีการเบี่ยงเบน (Deflection) เรียกว่า วิถีอิสระเฉลี่ย (Mean Free Path) ซึ่งในโลหะโดยทั่วไปมีค่าประมาณ 2-50 nm สำหรับในสารที่มีความบริสุทธิ์มาก ๆ จะมีความยาวมากกว่านี้ ซึ่งถ้ามีระยะวิถีอิสระเฉลี่ยนี้มาก ก็จะมีการนำไฟฟ้าได้ดี ดังนั้น วัสดุที่มีความแตกต่างทางด้านความสม่ำเสมอหรือความเป็นเนื้อเดียวกันของโครงสร้างวัสดุ อีกทั้งยังมีปัจจัยของการสั่นเนื่องจากความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้อง สาเหตุเหล่านี้ล้วนสามารถทำให้ระยะวิถีอิสระเฉลี่ยเปลี่ยนแปลงไป ค่าสภาพต้านทานของตัวนำและสารกึ่งตัวนำที่ประกอบขึ้นจากโครงผลึกซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าระยะวิถีอิสระเฉลี่ย จะคล้ายกับการต่ออนุกรมกันของตัวต้านทาน ซึ่งจะทำให้สภาพต้านทานมีค่ามาก เนื่องจากตำหนิแลตทิซที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวขัดขวางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในการนำไฟฟ้า แต่ถ้าหากขนาดของผลึกมีค่าน้อยกว่าระยะวิถีอิสระเฉลี่ย จะทำให้สภาพนำไฟฟ้ามีค่าสูงกว่า ซึ่งเป็นข้อดีของวัสดุนาโนระดับนาโนนั่นเอง

ในส่วนของ สมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) ของก้อนวัสดุที่มีโครงสร้างระดับนาโนนั้น จะสามารถพิจารณา ค่าสภาพการยืดหยุ่นมอดูลัสของยัง หรืออัตราส่วนระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) พบว่าเมื่อมีการลดขนาดของเกรนให้สั้นกว่า 20 นาโนเมตร ค่ามอดูลัสของยังจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับการลดลงของเกรนขนาดปกติ (เกรนปกติจะมีขนาดตั้งแต่ระดับไมโครเมตรจนถึงมิลลิเมตร) เมื่อพิจารณาในส่วนของความแข็งแรง (Strength) พบว่าเมื่อทดสอบค่าความแข็งแรงของวัสดุที่มีเกรนในระดับนาโน เช่น วัสดุที่มีเกรนขนาด 50 นาโนเมตร พบว่ามีความแข็งแรงถึง 4.14 จิกะปาสกาล เหตุผลที่ค่าความแข็งแรงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของเกรนลดลง คือ การเกิด การเพิ่มขึ้นของบริเวณรอยต่อระหว่างเกรน ซึ่งจะช่วยลดการยืดหดภายในเกรน ทำให้วัสดุมีความแข็งแรงและเหนียวแน่นกว่าวัสดุที่มีเกรนขนาดใหญ่

มากไปกว่านั้น สีของวัสดุ (Colour) ซึ่งสามารถหาได้โดยการหาค่าของความยาวคลื่นแสงที่ถูกวัสดุนั้นดูดกลืนไว้ การดูดกลืนจะเกิดขึ้นเนื่องจาก อิเล็กตรอนเมื่อได้รับกลุ่มพลังงานโฟตอนจากแสงธรรมชาติจะเกิดการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานปกติไปสู่ระดับพลังงานอื่น เมื่ออนุภาคหรือกลุ่มอะตอมของวัสดุมีขนาดต่างกัน ก็จะมีการแยกของระดับพลังงานต่างกันด้วย การเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากการแผ่พลังงานบางส่วนออกมาระหว่างระดับพลังงานที่แตกต่างกันนั้นสามารถกำหนดสีของวัสดุได้ จึงทำให้อนุภาควัสดุที่มีขนาดต่างกัน มีสีต่างกัน

ความก้าวหน้าของวัสดุนาโนในอุตสาหกรรมระดับชาติ

ในปัจจุบันพบว่า วัสดุนาโนมีบทบาทอย่างมากในการนำไปประยุกต์ใช้ หรือเป็นส่วนหนึ่งของวัสดุชนิดอื่น ๆ เพื่อเพิ่มความสามารถในการใช้งานได้ดียิ่งขึ้น ในอุตสาหกรรมระดับชาติจนถึงระดับโลกพบว่า มีการใช้วัสดุนาโนที่มีขนาดเล็กมากในด้านต่าง ๆ อย่างแพร่หลายดังที่ได้กล่าวมาในตอนต้นของบทความก่อให้เกิดการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรมก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว มีการประดิษฐ์คิดค้นผลิตภัณฑ์โดยการสังเคราะห์วัสดุนาโนชนิดใหม่และมีขนาดที่เล็กลง อย่างไม่หยุดยั้ง เช่น ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยการนำวัสดุนาโนมาเคลือบบนเสื้อผ้า เพื่อลดการเปื้อนหรือการเกาะติดของโมเลกุลของเหลว เช่น เลือดในโรงพยาบาล, น้ำ (เหงื่อ) ในอุตสาหกรรมกีฬา มากไปกว่านั้นยังพบเทคโนโลยีวัสดุ

นาโนที่นำมาใช้เป็นส่วนหนึ่งในการต้านหรือยับยั้งการเติบโตของแบคทีเรีย เช่น การเพิ่มวัสดุนาโนขนาดเล็กบนเสื้อผ้า ถุงเท้า เพื่อเพิ่มความสามารถในการยับยั้งการเติบโตของแบคทีเรีย ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดกลิ่นอับ หรือกลิ่นอันไม่พึงประสงค์ เช่น มีการทำเป็นสเปรย์ด้านแบคทีเรีย, บ้านสุนัขที่ด้านแบคทีเรีย, ตู้เย็นด้านแบคทีเรีย, สุขภัณฑ์ด้านแบคทีเรีย, เครื่องซักผ้าด้านแบคทีเรีย เป็นต้น อีกทั้งยังใช้ในการปรับปรุงมลภาวะในอากาศได้ เช่น ตรวจจับฟอกอากาศที่มีส่วนผสมของวัสดุนาโนไททาเนียมไดออกไซด์, โคมไฟฟอกอากาศ, เครื่องกรองอากาศที่มีแผ่นกรองอนุภาคที่ทำจากวัสดุนาโนขนาดเล็กกว่า 10 นาโนเมตร โดยสามารถกรองเชื้อโรค เช่น ไวรัสและแบคทีเรีย ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดโรคต่าง ๆ มากไปกว่านั้น ยังมีการผลิตกระจกที่สามารถทำความสะอาดตัวเองได้ตลอดเวลา โดยบูรณาการความคิดนาโนเทคโนโลยีจากธรรมชาติ นั่นคือ น้ำกลิ้งบนใบบัว อีกทั้งยังผลิตกระจกเบื้องตกแต่งบ้านที่สามารถเปลี่ยนสีได้ตามอุณหภูมิอีกด้วย

ทางด้านเครื่องสำอาง วัสดุนาโนถือว่ามามีบทบาทในการเป็นส่วนผสมสำคัญ เช่น มีการผสมวัสดุนาโนชนิดสังกะสีออกไซด์ (ZnO) หรือ ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ลงในผลิตภัณฑ์ดูแลผิวพรรณ เพื่อช่วยสะท้อนรังสีอัลตราไวโอเลตซึ่งเป็นรังสีที่สามารถทำลายผิวหนังได้ มากไปกว่านั้น ยังมีการเพิ่มวัสดุเหล่านี้ลงในผลิตภัณฑ์เพื่อช่วยเพิ่มความกระจ่างใสให้กับผิวพรรณอีกด้วย เช่น มีการประยุกต์ใช้อนุภาคนาโนทอง (Au Nanoparticles) เป็นส่วนผสมในเทคโนโลยีการบำรุงผิวหน้าเพื่อให้เกิดความกระจ่างใส และแปลงประกายได้ทันทีหลังการใช้

จะเห็นได้ว่า วัสดุนาโนในปัจจุบันมีความน่าสนใจเป็นอย่างมาก ไม่เพียงแต่คุณสมบัติทางด้านวัสดุที่มีการปรับปรุงให้ดีขึ้นเนื่องจากการมีขนาดเล็กลงระดับนาโนแล้วนั้น ยังสามารถพัฒนาศักยภาพทางด้านอุตสาหกรรมได้เป็นอย่างดี ดังนั้นความท้าทายของวัสดุนาโน ยังคงมีการพัฒนาต่อไปอีกในอนาคตเพื่อที่จะสร้างสรรค์วัสดุนาโนชนิดใหม่ โดยใช้เทคโนโลยีนาโนที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น เพื่อสร้างอุตสาหกรรมที่ทันสมัย และสามารถก่อให้เกิดประโยชน์ให้มากยิ่งขึ้นเป็นวิถีมุ่งต่อมนุษยชาติต่อไป

(อ่านต่อที่หน้า 13)

การเคลือบผิวโลหะด้วยวิธีปฏิกิริยาแก๊ส-โลหะ

Surface coating via gas-metal reaction

นัตรคนัย บุญเรือง¹

หากมองย้อนกลับไปเราจะพบว่าโลหะและโลหะผสม (Metals and alloys) เป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็น เครื่องประดับ ตัวนำไฟฟ้า ตัวนำความร้อน อุปกรณ์เครื่องใช้ในสำนักงานหรือในครัวเรือน เครื่องมือ เครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรม ส่วนประกอบโครงสร้างอาคาร ส่วนประกอบของยานยนต์และอากาศยาน ทั้งในส่วนโครงสร้างและเครื่องยนต์ เป็นต้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าโลหะและโลหะผสมมักจะถูกนำไปใช้ในงานทางด้านเชิงกลเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากมีสมบัติที่โดดเด่นทางด้านความแข็งแรง (Strength) และความแกร่ง (Toughness) ซึ่งสมบัติดังกล่าวสามารถปรับเปลี่ยนหรือตัดแปลงได้ตามกระบวนการขึ้นรูป (Processing) และกระบวนการทางความร้อน (Heat treatment) ต่าง ๆ เพื่อให้ได้สมบัติเชิงกลตามต้องการและสามารถนำไปใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมได้อย่างถูกต้อง ซึ่งการนำไปใช้งานในหลายกรณี โลหะและโลหะผสมหลายชนิดมักจะได้รับผลกระทบที่บริเวณผิวชิ้นงาน เช่น การเสียดสี ซึ่งทำให้เกิดการสึกหรอ (Wear) หรือการเกิดปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อมที่ทำให้เกิดการกัดกร่อน (Corrosion) การสึกหรอและการกัดกร่อนดังกล่าวสามารถทำให้เกิดความเสียหายที่บริเวณผิวของชิ้นงานในรูปของรอยสึกหรือรอยแตกในระดับจุลภาค ซึ่งสามารถขยายเป็นรอยแตกในระดับมหภาคได้และนำไปสู่การแตกหักของชิ้นงานได้ในที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเกิดขึ้นในกรณีที่ชิ้นงานมีการเสียดสีและใช้งานที่อุณหภูมิสูง เช่น เครื่องมือตัด แม่พิมพ์ ส่วนประกอบของเครื่องจักร ส่วนประกอบของเครื่องยนต์ เป็นต้น ดังนั้นการเคลือบผิวจึงเป็นสิ่งจำเป็นต่อชิ้นงานที่ใช้งานในลักษณะดังกล่าว ชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวจะมีคุณสมบัติพื้นผิว (Surface properties) ที่ดีขึ้น คือ มีความแข็ง ความต้านทานต่อการสึกหรอ และความต้านทานต่อการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น ซึ่งสมบัติพื้นผิวจะดีขึ้นมากน้อย

เพียงใดนั้นขึ้นกับลักษณะเฉพาะของวัสดุที่นำมาเคลือบ ความสม่ำเสมอของผิวเคลือบ และการยึดเกาะ (Adhesion) ระหว่างผิวเคลือบกับชิ้นงาน

เมื่อพิจารณาผิวเคลือบที่เป็นวัสดุประเภทเดียวกัน วิธีการเคลือบผิวเป็นปัจจัยสำคัญที่จะมีผลต่อสมบัติพื้นผิวของชิ้นงาน ชิ้นงานที่ใช้วิธีเคลือบผิวที่ต่างกันจะมีลักษณะเฉพาะของผิวเคลือบที่ต่างกัน โดยการเคลือบผิวแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก คือ

1. การตกสะสมไอเชิงเคมี (Chemical Vapor Deposition, CVD) ใช้การทำปฏิกิริยาของแก๊สเกิดเป็นผิวเคลือบบนชิ้นงาน (Substrate) ซึ่งถ้าชิ้นงานเป็นโลหะจะเรียกอีกอย่างว่าวิธีปฏิกิริยาแก๊ส-โลหะ (Gas-metal reaction) ซึ่งต้องทำที่อุณหภูมิสูงในช่วงประมาณ $850 - 1050^{\circ}\text{C}$ [1-2] ดังนั้นวิธีนี้จะใช้ได้กับชิ้นงานที่ทนอุณหภูมิสูงได้เท่านั้น อย่างไรก็ตาม ฟิล์มที่ได้จะมีสมบัติเชิงกลที่ดี [3] ต่อมาได้มีการประยุกต์ใช้สนามไฟฟ้าทำให้แก๊สแตกตัวเป็นพลาสมาแล้วถูกเหนี่ยวนำโดยสนามไฟฟ้าเข้าสู่ชิ้นงานและเกิดปฏิกิริยาเกิดเป็นสารประกอบที่ต้องการเคลือบบนผิวชิ้นงาน เรียกวิธีนี้ว่า การตกสะสมไอเชิงเคมีเสริมพลาสมา (Plasma Enhance Chemical Vapor Deposition, PECVD) ซึ่งวิธีนี้จะใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ที่ต่ำกว่าวิธีการตกสะสมไอเชิงเคมีธรรมดา คือจะอยู่ในช่วงประมาณ $500 - 900^{\circ}\text{C}$ [1-2] แต่ก็ถือว่าเป็นช่วงอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูง

2. การตกสะสมไอเชิงฟิสิกส์ (Physical Vapor Deposition, PVD) เป็นการตกสะสมสารที่ต้องการบนชิ้นงานโดยตรงเป็นหลัก ซึ่งอาจมีการทำปฏิกิริยากับแก๊สร่วมด้วย วิธีการนี้สามารถทำได้ทั้งอุณหภูมิต่ำ แต่ผิวเคลือบที่ได้จะมีการยึดเกาะที่ไม่ดีเท่ากับวิธีการตกสะสมไอเชิงเคมี [4] วิธีการเคลือบผิวที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ได้แก่

¹อาจารย์ (ดร.) ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

- การสปัตเตอริง (Sputtering) ซึ่งเป็นการให้อิออนของแก๊สเข้าชนกับอะตอมของเป้าที่เป็นวัสดุที่ต้องการเคลือบ ทำให้อะตอมของเป้าหลุดออกไปสะสมบนชิ้นงานด้วยการเหนี่ยวนำโดยสนามไฟฟ้า โดยผิวเคลือบที่ได้อาจเป็นวัสดุชนิดเดียวกับเป้าหรือเป็นวัสดุที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างเป้าและแก๊สในระบบก็ได้

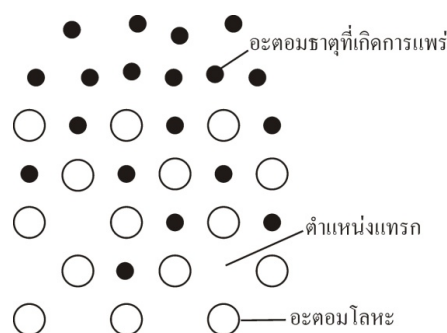
- การฝังไอออนฐานพลาสมา (Plasma Based Ion Implantation, PBII) เป็นการยิงไอออนของธาตุชนิดหนึ่งเข้าไปฝังบนผิวชิ้นงานที่เตรียมไว้ แล้วเกิดปฏิกิริยากับธาตุนบนผิวชิ้นงานกลายเป็นผิวเคลือบ [5] หรือเป็นการยิงไอออนของธาตุหลายชนิดเข้าไปฝังบนผิวชิ้นงานแล้วเกิดปฏิกิริยากันกลายเป็นผิวเคลือบ [6]

- การตกสะสมที่สนับสนุนโดยลำไอออน (Ion Beam-Assisted Deposition, IBAD) เริ่มจากการใช้ไอเล็กตรอนยิงไปบนผงวัสดุที่ต้องการทำเป็นผิวเคลือบให้กลายเป็นไอ แล้วใช้ไอออนชนและถ่ายเทพลังงานให้กับไอของวัสดุดังกล่าว ให้ไปสะสมอยู่บนผิวของชิ้นงาน [7-8]

- การตกสะสมโดยเลเซอร์แบบพัลส์ (Pulsed Laser Deposition, PLD) เป็นการใช้เลเซอร์ยิงไปบนเป้าที่เป็นวัสดุที่ต้องการเคลือบเพื่อให้เกิดการระเหิดของวัสดุดังกล่าว แล้วไปสะสมบนชิ้นงาน [9-11] หรือใช้เลเซอร์ยิงไปบนเป้าที่เป็นธาตุชนิดหนึ่งในบรรยากาศของแก๊สชนิดหนึ่ง แล้วทำให้ธาตุดังกล่าวระเหิดออกมาและเกิดปฏิกิริยากับแก๊สแล้วตกสะสมเป็นผิวเคลือบบนชิ้นงาน [12-13] เป็นต้น

ในบทความนี้จะกล่าวถึง **วิธีปฏิกิริยาแก๊ส-โลหะ (Gas-metal reaction)** ซึ่งเป็นวิธีในกลุ่มประเภทที่ 1 การตกสะสมไอเชิงเคมี โดยเป็นการเคลือบผิวโลหะด้วยวิธีการแพร่ (Diffusion coating) ชนิดหนึ่ง ซึ่งอาศัยหลักการแพร่ของธาตุชนิดใด ๆ ผ่านผิวของชิ้นงานเข้าไปโดยผลของอุณหภูมิและเกรเดียนต์ความเข้มข้น (Concentration gradient) ของธาตุชนิดดังกล่าวที่แพร่ไปในระหว่างบริเวณผิวชิ้นงานกับบริเวณภายในชิ้นงาน เมื่อธาตุที่แพร่เข้าไปในชิ้นงานมีมากขึ้นจนเกินขีดจำกัดการละลาย (Solubility limit) ของธาตุนั้นในโลหะชิ้นงาน ก็จะทำให้เกิดปฏิกิริยากับโลหะชิ้นงานกลายเป็นเฟสใหม่เคลือบบนผิวของชิ้นงานดังกล่าว โดยทั่วไปแล้วแก๊สที่ใช้ในวิธีปฏิกิริยาแก๊ส-โลหะจะเป็นแก๊สที่ให้ธาตุขนาดเล็กจำพวก โบรอน คาร์บอน ไนโตรเจน หรือออกซิเจน

เช่น แก๊สแอมโมเนีย (NH_3) ซึ่งให้ไนโตรเจน หรือ แก๊สอะเซทิลีน (C_2H_2) ซึ่งให้คาร์บอน เป็นต้น โดยธาตุขนาดเล็กเหล่านี้จะสามารถแพร่เข้าไปในโลหะได้ด้วย กลไกการแพร่แบบแทรก (Interstitial mechanism) ผ่านช่องว่างขนาดเล็กระหว่างอะตอมโลหะที่เรียกว่า ตำแหน่งแทรก (Interstitial site) โดยมีเกรเดียนต์ความเข้มข้นของธาตุขนาดเล็กเป็นแรงขับ (Driving force) ดังแสดงใน รูปที่ 1



รูปที่ 1 กลไกการแพร่แบบแทรกของธาตุขนาดเล็กที่แพร่เข้าสู่โลหะ

การเคลือบผิวด้วยวิธีนี้ สิ่งที่เราต้องแน่ใจก็คือ ผลิตภัณฑ์ (Product) จากปฏิกิริยาระหว่างธาตุขนาดเล็กเหล่านี้กับโลหะจะต้องเป็นสารประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นผิวเคลือบที่ดี เช่น ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) ไทเทเนียมคาร์ไบด์ (TiC) หรือทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) โดยผลิตภัณฑ์ที่เป็นผิวเคลือบดังกล่าวจะถูกควบคุมโดยชนิดของแก๊สและชนิดของธาตุในโลหะที่จะทำปฏิกิริยากัน ดังนั้นเราจึงไม่สามารถสร้างผิวเคลือบที่มีองค์ประกอบของธาตุที่ไม่ปรากฏในโลหะหรือโลหะผสมนั้นได้ ตัวอย่างเช่น เราไม่สามารถสร้างผิวเคลือบเซอร์โคเนียมไนไตรด์ (ZrN) บนผิวของเหล็กกล้าที่ไม่มีองค์ประกอบของธาตุเซอร์โคเนียมได้ และถึงแม้ว่าในโลหะผสมจะมีธาตุที่ต้องการแล้ว แต่ถ้าองค์ประกอบของธาตุดังกล่าวมีปริมาณไม่มากพอ ก็จะไม่สามารถเกิดปฏิกิริยากับแก๊สกลายเป็นผิวเคลือบที่มีคุณสมบัติที่ดีได้

นอกจากนี้ หากโลหะผสมที่ต้องการเคลือบผิวดังกล่าวมีธาตุผสมอยู่หลายชนิด ก็ต้องพิจารณาด้วยว่าเมื่อแก๊สทำปฏิกิริยากับธาตุผสมเหล่านั้นแล้ว ผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นจะเป็นเฟสชนิดที่เราต้องการด้วยหรือไม่ ซึ่งปัจจัยดังกล่าวขึ้นอยู่กับความเสถียรทางอุณหพลศาสตร์ของแต่ละเฟสที่เกิดขึ้นหรือระดับพลังงานอิสระของแต่ละเฟสนั้น ตัวอย่างเช่น โลหะผสมชนิดหนึ่งมีธาตุ X เป็น

องค์ประกอบหลัก และมีธาตุ Y และ Z เป็นธาตุผสมในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน สมมุติว่าเราให้แก๊สที่มีองค์ประกอบของออกซิเจนแก่โลหะผสมดังกล่าวเพื่อให้เกิดปฏิกิริยากับธาตุ Z เกิดเป็นเฟส ZO ที่มีคุณสมบัติเป็นผิวเคลือบที่ดีเคลือบบนผิวของโลหะผสมดังกล่าว แต่ปรากฏว่าออกซิเจนเมื่อรวมตัวกับธาตุ Y แล้วจะเกิดเป็นเฟส YO ซึ่งมีความเสถียรทางอุณหพลศาสตร์มากกว่า ZO และ XO ดังนั้นผิวเคลือบที่ได้จึงมีเฟสเป็น YO ซึ่งไม่ใช่ผิวเคลือบที่มีคุณสมบัติที่ดีตามที่เรากำลังต้องการ หรือในกรณีที่เกิดขึ้นที่กระทำปฏิกิริยากับโลหะผสมดังกล่าวมีองค์ประกอบของธาตุหลายชนิดที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับธาตุผสมในโลหะผสมนั้นได้ ผิวเคลือบที่เกิดขึ้นก็จะเป็นผลิตภัณฑ์ของธาตุชนิดที่มีความไวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่า ตัวอย่างเช่น สมมุติว่าเราให้แก๊สอะเซทิลีนเพื่อต้องการให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนในแก๊สอะเซทิลีนกับธาตุ Y ในโลหะผสมชนิดเดิมเพื่อให้เกิดผิวเคลือบที่มีเฟสเป็น YC ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นผิวเคลือบที่ดี แต่ปรากฏว่าไฮโดรเจนในแก๊สอะเซทิลีนสามารถเกิดปฏิกิริยากับธาตุ Y ได้ดีกว่าคาร์บอน โดยเกิดเป็นเฟส YH ที่มีความเสถียรทางอุณหพลศาสตร์มากกว่าเฟส YC ดังนั้นผิวเคลือบที่ได้จึงมีเฟสเป็น YH ซึ่งไม่ใช่ผิวเคลือบที่มีคุณสมบัติที่ดีตามที่เรากำลังต้องการเช่นกัน ดังนั้นในการเคลือบผิวด้วยวิธีปฏิกิริยาแก๊ส-โลหะนี้อาจจะไม่สามารถทำให้เกิดผิวเคลือบเป็นไปตามที่เราต้องการได้

แต่ถ้าหากเราเลือกแก๊สที่มีองค์ประกอบของธาตุชนิดอื่นที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับธาตุผสมในโลหะผสมดังกล่าว แล้วเกิดเป็นเฟสที่มีคุณสมบัติเป็นผิวเคลือบที่ดีในระดับที่รองลงไปก็ย่อมจะเป็นทางออกที่ดีที่สุดในกรณีนี้ ตัวอย่างเช่น เราทราบว่าแก๊สไนโตรเจน (N_2) สามารถเกิดปฏิกิริยาระหว่างไนโตรเจนกับธาตุ Z ในโลหะผสมชนิดเดิมเพื่อให้เกิดผิวเคลือบที่มีเฟสเป็น ZN ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นผิวเคลือบที่ดีใกล้เคียงกับผิวเคลือบที่มีเฟสเป็น ZO และ YC และนอกจากนี้ ZN ยังมีความเสถียรทางอุณหพลศาสตร์มากกว่า XN และ YN ดังนั้นเราจึงควรตัดสินใจที่จะเลือกใช้แก๊สไนโตรเจนในการเคลือบผิวโลหะผสมชนิดดังกล่าวนี้

อย่างไรก็ดี ตัวอย่างที่กล่าวมาทั้งหมดเป็นเพียงแนวคิดที่จะทำให้เกิดความเข้าใจในหลักการของการเคลือบผิวด้วยวิธีปฏิกิริยาแก๊ส-โลหะเท่านั้น ซึ่งในทางปฏิบัติมีหลายกรณีที่ธาตุหลายชนิดในโลหะผสมจะรวมตัวกับธาตุที่มาจากแก๊สแล้วเกิดเป็นสารประกอบขึ้น ตัวอย่างเช่น การเกิดเฟส Ti_2AlN และ Ti_2AlC ใน

การไนไตรด์ (การเติมไนโตรเจนแก่ชิ้นงาน) และการคาร์บูไรซ์ (การเติมคาร์บอนแก่ชิ้นงาน) โลหะผสม Ti-47Al-2Nb-2Cr [14]

อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญอีกประการหนึ่งในการเคลือบผิวด้วยวิธีปฏิกิริยาแก๊ส-โลหะ เนื่องจากอุณหภูมิมีผลต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมของธาตุในเนื้อโลหะชิ้นงาน การศึกษาในเรื่องดังกล่าวสามารถทำได้โดยพิจารณาการแพร่ในระดับอะตอม ซึ่งสำหรับ กลไกการแพร่แบบแทรก สัมประสิทธิ์การแพร่ดังกล่าวเป็นไปตามสมการ

$$D = \beta \omega a^2 \quad (1)$$

เมื่อ

β คือ ตัวประกอบเรขาคณิต (Geometric factor) ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับชนิดของโครงสร้างผลึก โดยจะมีค่าเท่ากับ 1 สำหรับผลึกที่มีโครงสร้างแบบ FCC (Face-Centered Cubic) และ BCC (Body-Centered Cubic) และมีค่าเท่ากับ $1/8$ สำหรับผลึกที่มีโครงสร้างแบบ DC (Diamond Cubic)

a คือ Lattice parameter

ω คือ ความถี่ในการกระโดดของอะตอมตัวหนึ่งจากตำแหน่งแทรกหนึ่งไปยังตำแหน่งแทรกที่อยู่ข้างเคียง (Nearest neighbor interstitial sites) ซึ่งมีค่าเป็นไปตามสมการ (2)

$$\omega = \tilde{\nu} \exp\left(-\frac{\Delta G^m}{kT}\right) \quad (2)$$

เมื่อ

$\tilde{\nu}$ คือ ความถี่ในการสั่นของอะตอม (Atomic vibration frequency)

ΔG^m คือ พลังงานเสรีของกิบส์ในการย้ายที่ของอะตอมตัวหนึ่งในช่องแทรก (Gibbs free energy of interstitial atom migration)

k คือ ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ (Boltzmann's constant) มีค่า $1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (Absolute temperature)

เมื่อแทนสมการ (2) ลงในสมการ (1) จะได้

$$D = \beta a^2 \tilde{v} \exp\left(-\frac{\Delta G^m}{kT}\right) \quad (3)$$

และได้

$$D = \beta a^2 \tilde{v} \left(\exp\left(\frac{\Delta S^m}{k}\right) \right) \left(\exp\left(-\frac{\Delta H^m}{kT}\right) \right) \quad (4)$$

เมื่อ

ΔS^m คือ เอนโทรปีสำหรับการย้ายที่ของอะตอมตัวหนึ่งในช่องแทรก (Entropy for an interstitial atom migration)

ΔH^m คือ พลังงานที่ทำให้อะตอมตัวหนึ่งในช่องแทรกเกิดการย้ายที่ (Energy required for an interstitial atom migration)

เมื่อกำหนดให้พจน์พรีเอ็กซ์โพเนนเชียลเป็น

$$D_0 = \tilde{v} \beta a^2 \exp\left(\frac{\Delta S^m}{k}\right) \quad (5)$$

จะได้ว่า

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{\Delta H^m}{kT}\right) \quad (6)$$

เรียกสมการ (6) ว่า สมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) สำหรับกลไกการแพร่แบบแทรก ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ กับ อุณหภูมิและพลังงานต่ออะตอม แต่ในการศึกษาการแพร่โดยทั่วไปแล้วมักจะทำการศึกษานี้ในระดับโมล อะตอมมากกว่าระดับอะตอม โดยทั่วไปจึงเขียนสมการอาร์เรเนียสในรูปแบบสมการ (7)

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (7)$$

เมื่อ

Q คือ พลังงานกระตุ้นสำหรับการแพร่ (Activation energy for diffusion) ซึ่งเป็นพลังงานที่อะตอม 1 โมลจะต้องเอาชนะเพื่อที่จะสามารถเกิดการแพร่ได้ มีหน่วยเป็น จูลต่อโมล ($\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$)

R คือ ค่าคงที่แก๊ส (Gas constant) มีค่า $8.314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

สมการอาร์เรเนียสแสดงให้เห็นว่า การควบคุมการแพร่ในการเคลื่อนที่ด้วยวิธีปฏิกิริยาแก๊ส-โลหะสามารถทำได้โดยการควบคุมอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา หรือกล่าวได้ว่าที่อุณหภูมิใด ๆ การแพร่ของธาตุในโลหะโดยกลไกการแพร่แบบแทรกจะมี

สัมประสิทธิ์การแพร่เป็น D ซึ่งหากเราทราบสัมประสิทธิ์การแพร่ที่อุณหภูมิใด ๆ เราสามารถควบคุมระดับความลึกในการแพร่หรือความหนาของชั้นเคลือบซึ่งเป็นบริเวณที่มีลักษณะเป็นสารละลายของแข็งแบบแทรก (Interstitial solid solution) ได้ แนวคิดดังกล่าวนี้ได้ถูกนำมาใช้โดยการพิจารณาร่วมกับรูปแบบการเติบโตของชั้นเคลือบในช่วงอุณหภูมิที่ทำการเคลือบผิว โดยในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวรูปแบบการเติบโตของชั้นเคลือบส่วนใหญ่ มักเป็นแบบพาราโบลา ดังนั้นความหนาของชั้นเคลือบดังกล่าวจะเป็นไปตาม กฎพาราโบลา (Parabolic law) คือ

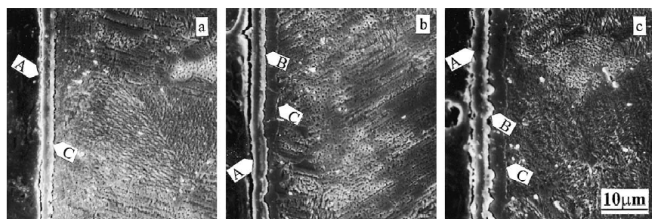
$$d^2 = 4Dt \quad (8)$$

เมื่อ

d คือ ความหนาของชั้นสารละลายของแข็งแบบแทรก ซึ่งในทางปฏิบัติคือ ระยะความลึกจากผิววัสดุหลักลงไปใต้ผิวจนถึงบริเวณที่มีความเข้มข้นของอนุภาคที่เกิดการแพร่อยู่ต่ำ ซึ่งในที่นี้เลือกให้เป็นค่าประมาณร้อยละ 15 ของค่าความเข้มข้นที่บริเวณผิว

t คือ เวลาที่ธาตุขนาดเล็กละเอียดการแพร่เข้าไปในโลหะ ซึ่งก็คือช่วงเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวด้วยวิธีปฏิกิริยาแก๊ส-โลหะ

สมการ (7) และ (8) แสดงให้เห็นว่า เราสามารถควบคุมความหนาของชั้นเคลือบได้โดย (ก) การควบคุมเวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่างแก๊สกับโลหะที่อุณหภูมิคงที่ใด ๆ หรือโดย (ข) การควบคุมอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาในช่วงเวลาคงที่ใด ๆ ดังตัวอย่างภาคตัดขวางของโลหะผสม TiAl ที่ทำการไนไตรด์ในบรรยากาศของแอมโมเนียที่อุณหภูมิ 900°C ที่แสดงในรูปที่ 2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิในการไนไตรด์คงที่ ความหนาของชั้นเคลือบจะเพิ่มขึ้นตามเวลาในการไนไตรด์ โดยจะเห็นตามรูปว่าชั้นเคลือบแบ่งออกเป็น 3 ชั้นย่อยคือ ชั้นนอก (A) เป็นชั้นที่มีความเข้มข้นของไนโตรเจนมากที่สุด มีเฟสเป็น TiN ชั้นกลาง (B) เป็นชั้นที่มีความเข้มข้นของไนโตรเจนรองจากชั้นนอก มีเฟสเป็น Ti_2AlN และชั้นใน (C) เป็นชั้นที่มีความเข้มข้นของไนโตรเจนน้อยที่สุด มีเฟสเป็นสารประกอบที่มีองค์ประกอบของอะลูมิเนียมสูง เช่น Al_2Ti , Al_5Ti_2 และ Al_3Ti เป็นต้น



รูปที่ 2 ภาพตัดขวางบริเวณผิวของโลหะผสม TiAl ที่ทำการไนไตรต์ในบรรยากาศของแอมโมเนียที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 10, 30 และ 50 ชั่วโมงตามลำดับ (เรียงจากซ้ายไปขวา) [15]

เอกสารอ้างอิง

1. X.Z. Ding, B.K. Tay, H.S. Tan, S.P. Lau, W.Y. Cheung, S.P. Wong, Surf. Coat. Technol. 138 (2001) 301-306.
2. E. Kusano, A. Satoh, M. Kitagawa, H. Nanto, A. Kinbara, Thin Solid Films 343-344 (1999) 254-256.
3. M. Panciejko, W. Precht, A. Czyzniewski, Vacuum 53 (1999) 57-60.
4. D.E. Wolfe, J. Singh, Surf. Coat. Technol. 124 (2000) 142-153.
5. X. Ma, Y. Sun, P. Wu, L. Xia, K. Yukimura, Surf. Coat. Technol. 169-170 (2003) 375-378.
6. R. Teghil, L. D'Alessio, A. De Bonis, A. Galasso, P. Villani, A. Santagata, Thin Solid Films 515 (2006) 1411-1418.
7. J.M. López, F.J. Gordillo-Vázquez, M. Fernández, J.M. Albella, D. Cáceres, I. Vergara, Appl. Surf. Sci. 172 (2001) 110-116.
8. D.E. Wolfe, J. Singh, Surf. Coat. Technol. 124 (2000) 142-153.
9. F. Santerre, M.A. El Khakani, M. Chaker, J.P. Dodelet, Appl. Surf. Sci. 148 (1999) 24-33.
10. R. Teghil, L. D'Alessio, A. De Bonis, A. Galasso, P. Villani, A. Santagata, Thin Solid Films 515 (2006) 1411-1418.

11. G. Radhakrishnan, P.M. Adams, D.M. Speckman, Thin Solid Films 358 (2000) 131-138.
12. G. Soto, Appl. Surf. Sci. 230 (2004) 254-259.
13. Y. Suda, H. Kawasaki, K. Doi, J. Nanba, T. Ohshima, Mater. Charact. 48 (2002) 221-228.
14. C. Boonruang, T. Thongtem, M. McNallan, S. Thongtem, Mater. Lett. 58 (2004) 3175-3181.
15. B. Zhao, J. Sun, J. S. Wu & Z. X. Yuan, Scripta Mater. 46 (2002) 581-586.

ความท้าทายในวัสดุนาโน (ต่อจากหน้า 8)

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ อาจารย์ชาญกิจ กันจ้อง ผู้ให้คำแนะนำทางด้านการใช้ภาษาและศัพท์บัญญัติวิทยาศาสตร์ที่ถูกต้องตามหลักวิชาการแก่ผู้เขียน และช่วยปรับปรุงบทความให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

แหล่งข้อมูลอ้างอิง

1. Gao, Nanostructures & Nanomaterials; Synthesis, Properties & Applications, Imperial College Press, USA, 2004
2. <http://www.rmutphysics.com/charud/oldnews/67/index67.htm>
3. พิสิษฐ์ สิงห์ใจ, นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology), ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัย เชียงใหม่, หน้า 2-1.

การค้นพบการแบ่งตัวของนิวเคลียส¹ (ตอนจบ)

แรกเริ่มการคิดวิธีการแบ่งตัวของนิวเคลียสมีสี่สันด้วยความสำเร็จ ความล้มเหลว

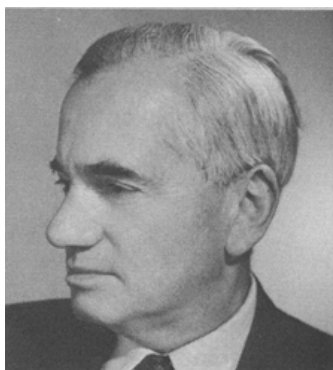
หรือแค่เพียงโชคช่วยของนักวิทยาศาสตร์หลายท่านจากประเทศต่างๆ

ช่วยกันจากการรวมกันของโชคชะตา กับความคิดอย่างรอบคอบ

ทำให้มนต์อันน่าตื่นตะลึงนี้เป็นความจริงขึ้นมา

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) ระหว่างสงครามเขาทำงานเรื่องระเบิดปรมาณูที่ลอสอลามอส เขาเป็นคนแรกซึ่งสังเกตพบพลังงานที่ถูกปลดปล่อยในการแบ่งตัวของนิวเคลียส



จอห์น เอ วิลเลอร์ John Archibald Wheeler

ศาสตราจารย์วิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยพรินซ์ตัน สหรัฐอเมริกา หนึ่งในนักวิทยาศาสตร์อเมริกันคนแรกๆ ซึ่งใส่ใจในเรื่องการแบ่งตัวของนิวเคลียส ปี 1934 ไปทำงานกับนีลส์ โบห์ร์ ที่โคเปนเฮเกนในฐานะบัณฑิตวิจัยแห่งชาติ (National research fellow) เขาสำเร็จ Ph.D. ทางฟิสิกส์จากมหาวิทยาลัยจอห์น ฮอปกินส์ตั้งแต่ปี 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)

(ต่อจากฉบับที่แล้ว)

โบห์รนำข่าวมา

ข้อความที่ฟริชบอกโบห์รขณะที่โบห์รออกจากโคเปนเฮเกนได้เปิดขอบเขตใหม่ของการประยุกต์ต่อมโนทัศน์นี้ของนิวเคลียสเชิงประกอบ กวาที่โบห์รมาถึงนิวยอร์ก เขาก็ได้ยอมรับแล้วว่า การแบ่งตัวของนิวเคลียสเป็นกระบวนการมากกว่าหนึ่งกระบวนการซึ่งแข่งขันกับการปล่อยนิวตรอนช้า และการปล่อยรังสีแกมมาออกมา สัปดาห์หลังจากการมาถึงของเขา เขากับโรเซนเฟลด์ก็เขียนบทความเสร็จ สรุปภาพทั่วไปของการแบ่งตัวในเทอมของการสร้างและการแตกแยกของนิวเคลียสเชิงประกอบ โรเซนเฟลด์ได้ติดตามโบห์รไปอยู่พรินซ์ตันหลายเดือนเพื่อทำวิจัยเรื่องการวัดในควอนตัมอิเล็กโทรไดนามิกส์ ในระหว่างการพักแรมที่พรินซ์ตันของโรเซนเฟลด์ โบห์รได้แสดงปาฐกถาในเรื่องนั้นน้อยกว่าครึ่งโหล แต่ทว่า คำถามเรื่องนั้นและอื่น ๆ มากมายรวมกันใช้เวลาส่วนใหญ่ของโบห์รไป ไม่มีใครสามารถเข้าในห้องพักงานของเขาได้โดยไม่เห็นรายการข่าวเหยียดของภาระหน้าที่ และผู้คนซึ่งเขาต้องให้เวลาพบ รายการนี้ทำให้ง่ายที่จะชื่นชมยินดีด้วยเมื่อเขาเข้ามาในห้องพักงานของข้าพเจ้าเพื่อปรึกษาหารืองานที่เราดำเนินการอยู่ เรากำลังพยายามเข้าใจในรายละเอียดของกลวิธานของการแบ่งตัว และที่สำคัญไม่น้อยกว่า คือ วิเคราะห์ค่าแกง(ศักย์) ที่ขวางกั้นการแบ่งตัว และการพิจารณาเพื่อคำนวณความสูงของค่าแกง



รูปที่ 8 โรเซนเฟลด์ กับ โบห์ร สรุปความคิดของการแบ่งตัว

แรกสุดแน่นอนว่าเราต้องคิดสูตรโดยเฉพาะของจุดเริ่มหรือค่าแกงของปฏิกิริยา ตามภาพแบบจำลองหยดของเหลวสามารถจะมีแม้แต่ค่าแกงใด ๆ ได้อย่างไร? ของไหลอุดมคติถูก

แบ่งแยกโดยไม่มีข้อจำกัดได้หรือไม่? และเพราะฉะนั้นพลังงานการกระตุ้นที่จำเป็นต้องใช้เปลี่ยนจากโครงรูปดั้งเดิมไปเป็นชิ้นส่วนคูนั้นสามารถมีค่าน้อยตามใจชอบได้หรือไม่? เราได้การชี้แนะสำหรับคำถามนี้จากทฤษฎีแคลคูลัสของการแปรผันโดยส่วนใหญ่ เรื่อง จุดสูงสุด จุดต่ำสุด และจุดวิกฤติ เรื่องนี้เราดูซึมแบบออสโมซิสจากสิ่งแวดล้อมของเราซึ่งถูกประจวบอย่างเต็มเปี่ยมโดยความคิดและผลงานของมาร์สตัน มอร์ส เป็นที่ชัดเจนว่าเราสามารถหาปริภูมิโครงรูปเพื่อบรรยายการผิวนิพจน์ของนิวเคลียส ในปริภูมิการผิวนิพจน์นี้เราสามารถหาวิถีหลากหลายที่จะนำโครงรูปเกือบทรงกลมยามปรกติข้ามกำแพงไปเป็นโครงรูปที่ถูกแบ่งแยก บนแต่ละวิถีพลังงานการผิวนิพจน์ขึ้นถึงค่าสูงสุด ค่าจุดยอดนี้แตกต่างกันจากวิถีหนึ่งไปอีกวิถีหนึ่ง ท่ามกลางค่าสูงสุดเหล่านี้ ค่าต่ำสุดวัดความสูงของจุดอานม้า หรือจุดเริ่มการแบ่งตัว หรือพลังงานการกระตุ้นสำหรับการแบ่งตัว

ขณะที่เรากำลังประเมินความสูงของกำแพง และการปลดปล่อยพลังงานในแบบวิธีหลากหลายของการแบ่งตัว ก็ถึงเวลาที่มีการประชุมวิชาการฟิสิกส์ทฤษฎีประจำปีครั้งที่ห้า จัดที่กรุงวอชิงตัน ในวันที่ 26 มกราคม โบห์รรู้สึกความรับผิดชอบต่อฟริชกับไมท์เนอร์ และคิดว่าไม่ควรให้ข่าวงานที่กำลังดำเนินอยู่ของเขาทั้งสอง และมโนทัศน์ของเขาทั้งสอง จนกว่าเขาทั้งสองได้มีโอกาสถูกต้องที่จะตีพิมพ์ ดังเช่นเป็นธรรมเนียมทั่ววงการวิทยาศาสตร์ถึงแม้ว่าสถานการณ์เป็นอย่างนี้แต่ในตอนต้นโรเซนเฟลด์ไม่ตระหนักในการเรียกร้องจากโบห์รและความยุ่งยากใจของเขา ในวันที่โบห์รมาถึงสหรัฐ โรเซนเฟลด์ลงไปพรินซ์ตันโดยรถไฟ (โบห์รมีนัดหมายตอนสายวันนั้นที่นิวยอร์ก) โรเซนเฟลด์ได้รายงานการค้นพบเรื่องใหม่นี้ต่อสโมสรวารสาร – สโมสรวารสารที่มีตามปรกติสิ้นวันจันทร์ – และแน่นอนว่าทุกคนตื่นเต้นมาก อีสเตอร์ ไอ ราบี ซึ่งอยู่ที่สโมสรวารสาร นำข่าวนี้อีกกลับไปโคลัมเบียที่ซึ่ง จอห์น ดันนิง เริ่มต้นวางแผนการทดลอง

อย่างไรก็ตาม ในวันที่ 26 มกราคม โบห์ร ยังลังเลที่จะพูดเกี่ยวกับการค้นพบของฟริชกับไมท์เนอร์ จนกระทั่งเขาได้รับคำบอกว่าการค้นพบนั้นถูกตีพิมพ์แล้วจริง ในตอนบ่ายนั้นวารสาร ดี นาทูร์วิสเซนชาฟเทิน ฉบับที่ลงพิมพ์ผลงานโดย ฮาห์นกับ ฟริตซ์ สตราสมันน์ ถูกส่งถึงมือเขา ดังนั้นเขาจึงสามารถเล่าเกี่ยวกับมันได้แน่นอนว่า ทุกคนเริ่มต้นทำการทดลองของเขา การ

พิสูจน์ทางฟิสิกส์โดยตรงครั้งแรกว่าปฏิกิริยาการแบ่งตัวบังเกิดขึ้นปรากฏในหนังสือพิมพ์ฉบับวันที่ 29 มกราคม

ทำทฤษฎีให้เข้ารูปเข้าร่าง

การวิเคราะห์การแบ่งตัวนำไปสู่ทฤษฎีหยดของเหลว และตามลำดับนี้เป็นการกลับสู่เรื่องเป็นที่รักและโปรดปรานของ โบห์ร์ผู้ซึ่งสำหรับงานวิจัยเรื่องแรกของเขาตอนเป็นนักศึกษาคือการทดลองเรื่องความไม่เสถียรของสายน้ำที่พุ่งออกมาต่อสู่กับการแตกตัวออกเป็นหยดเล็ก ๆ

เขาคำนวณที่เกี่ยวกับงานของ จอห์น ดับบลิว สตรัทท์ ลอร์ดเรลลี่ที่สาม งานนี้เปิดโอกาสให้กับจุดตั้งต้นสำหรับการวิเคราะห์ของเรา อย่างไรก็ดี เราต้องไปสู่เทอมอันดับสูงกว่าการคำนวณเทอมอันดับสองซึ่งเรลลี่โปรดปรานคือผ่านข้ามส่วนรูปพาราบอกลึกลับ ๆ ของศักย์ของนิวเคลียส นั่นคือ ส่วนของศักย์ที่เพิ่มขึ้นอย่างแบบกำลังสองกับความผิดปกติ เรากำหนดเทอมอันดับสามเพื่อดูการหล่นลงของศักย์ เทอมเหล่านี้ทำให้เราสามารถหาค่าความสูงของกำแพง หรืออย่างน้อยที่สุดความสูงของกำแพงสำหรับนิวเคลียสที่มีประจุไฟฟ้าใกล้เคียงกับค่าจำกัดวิกฤติสำหรับการแตกตัวในทันที

ตรงนี้เราพบว่าเราสามารถลดทอนโจทย์ทั้งหมดเป็นการหาฟังก์ชัน f ของตัวแปรเดียวไร้มิติ x “พารามิเตอร์ความแบ่งตัว” นี้วัดอัตราส่วนของกำลังสองของประจุไฟฟ้าต่อมวลของนิวเคลียส พารามิเตอร์นี้มีค่าเป็น 1 สำหรับนิวเคลียสที่ไม่เสถียรอยู่แล้วต่อการแบ่งตัวในรูปทรงกลมของมัน สำหรับค่าทั้งหลายของ x ใกล้เคียงกับ 1 โดยการพัฒนานุกรมยกกำลังดังกล่าวมาแล้วนี้ เราสามารถประเมินความสูงของกำแพง และโดยแท้จริงให้การคำนวณอย่างละเอียดที่เดียวของสองเทอมแรกในอนุกรมยกกำลังสำหรับความสูงของกำแพง หรือ f ในเทอมยกกำลังของ $(1 - x)$ กรณีค่าจำกัดในทางตรงข้ามถูกนำมาใช้วิเคราะห์ได้ด้วย ในค่าจำกัดนี้ นิวเคลียสมีประจุน้อยยิ่ง กระทั่งว่ากำแพงถูกควบคุมเกือบจะทั้งสิ้นโดยความดึงดูด แรงดึงดูดทำให้การช่วยเหลือเกือบเล็กน้อยต่อการผลักดันวัสดุแยกกัน

ระหว่างกรณีนี้ (อนุกรมยกกำลัง รอบ $x = 0$) กับ อีกกรณีหนึ่ง (อนุกรมยกกำลัง รอบ $x = 1$) มีช่องว่างที่ใหญ่โตมโหฬาร เราเห็นว่าจะต้องใช้งานปริมาณมากเพื่อคำนวณสมบัติของกำแพงการแบ่งตัวที่จุดต่าง ๆ ในระหว่างนั้น เพราะเหตุนี้เราจึงจำกัดตัวเอง

โดยการประมาณค่าในช่วงระหว่างจุดเหล่านี้ โดยตลอดเวลา 28 ปี ตั้งแต่นั้นมา นักวิจัยหลายคนได้ทำการคำนวณอย่างมากมายมาหิมามบนภูมิลักษณะของพลังงานการผิดปกติ ดังที่บรรยายเห็นเป็นภาพบนปริภูมิโครงรูปให้เป็น “ฐาน” ของแผนที่ภูมิลักษณะ เรายังห่างไกลจากการทำให้การวิเคราะห์เสร็จสมบูรณ์ ผลงานที่สวยงามของ วลาดิสลอฟ เจ สวีอาเทกกี และ ผู้ร่วมงานของเขาที่เบิร์กลีย์ ได้สอนเราอย่างมากมากกว่าที่เราเคยรู้มาก่อนเกี่ยวกับโครงสร้างกำแพงการแบ่งตัวนี้ และได้เผยให้เห็นลักษณะหน้าตาที่ไม่ถูกสงสัยมากนักหลายตาสำหรับค่าทั้งหลายของ x ซึ่งไกลจากค่าจำกัดดั้งเดิมที่ง่ายสองค่านี้

จากกำแพงการแบ่งตัว เราหันไปหาอัตราการแบ่งตัว เราทั้งหมดได้ยอมรับกันเสมอมาว่านิวเคลียสฟิสิกส์ประกอบด้วยสองส่วน ได้แก่ (ก) พลังงานของกระบวนการ และ (ข) อัตราซึ่งกระบวนการจะเดินต่อไป ทฤษฎีนิวเคลียสเชิงประจักษ์บอกเราว่าอัตรานี้ควรถูกวัดได้โดย ความกว้างโดยส่วน ของสถานะของนิวเคลียสในคำถาม สำหรับการแตกตัวโดยกระบวนการที่ระบุไว้

สู่ทฤษฎีที่ง่ายกว่า

เราสามารถประมาณความกว้างนี้ได้อย่างไร? บุคคลหลายคนในชุมชนฟิสิกส์ – บรรดาเขาเหล่านี้ เฮนรี อายริง และ ยูจีน วิกเนอร์ -- หมกมุ่นอยู่กับทฤษฎีว่าด้วยอัตราของปฏิกิริยาเคมี นอกจากนี้เราได้อนุมานข้อมูลบางอย่างที่เป็นประโยชน์จากฟิสิกส์ของรังสีคอสมิก ใครไม่ระลึกถึงการคำนวณมากมายอย่างละเอียดที่สเตอร์เมอร์และเพื่อนร่วมงานของเขาทำไว้เรื่องทางโคจรของอนุภาครังสีคอสมิกในสนามแม่เหล็กโลก? มานูเอล ซานโดวาล วาลลาร์ตา และผู้ทำงานทั้งหลายต่อมาสามารถหาเวลาทำการคำนวณในรายละเอียดเหล่านี้ได้เกือบทั้งหมด เขาเพียงต้องใช้ทฤษฎีบทลิววีลเท่านั้น ซึ่งกล่าวว่า ความหนาแน่นของระบบทั้งหลายในปริภูมิเฟส มีค่าคงตัวไม่ขึ้นกับเวลา

การพิจารณาเช่นเดียวกันของปริภูมิเฟสมีประโยชน์เท่ากันสำหรับการหาอัตราการแบ่งตัว กลับกลายเป็นว่าเราสามารถแสดงที่น่าจะเป็นของการเคลื่อนข้ามกำแพงว่าเท่ากันกับอัตราส่วนของสองจำนวน หนึ่งในสองจำนวนนี้เกี่ยวข้องกับปริมาณของปริภูมิเฟสที่มีอยู่ในโครงรูปของสถานะที่กำลังเปลี่ยนขณะที่นิวเคลียสกำลังข้ามจุดบนสุดของกำแพง เราถูกบังคับให้พิจารณาองศาแห่งความเสรีทั้งหมดของนิวเคลียส นอกเหนือจาก

องศาหนึ่งใดโดยเฉพาะที่นำไปสู่การแบ่งตัว องศาแห่งความเสรีอื่นเหล่านี้ทั้งหมดถูกสรุปโดยผลในการกระตุ้นภายในของนิวเคลียสขณะมันกำลังข้ามกำแพงการแบ่งตัว มโนทัศน์นี้แจ่มชัดในทอแมสกลาสสิก มันคือปริมาตรของปริภูมิเฟสซึ่งถูกกำหนดอย่างสมบูรณ์โดยปริมาณพลังงาน

ปริมาณอื่นซึ่งปรากฏในตัวหารของนิพจน์อัตราการแบ่งตัวเชื่อมโยงกับปริมาตรของปริภูมิเฟสที่เข้าถึงได้โดยง่ายกับระบบเชิงประกอบ ในการเคลื่อนที่เชิงซ้อนทั้งหมดยกเว้นการเคลื่อนที่จริงข้ามกำแพง ทุมนุมระบบภายใต้การพิจารณาจะถูกจำกัดอยู่ในแถบแคบ ๆ ของพลังงาน ΔE ซึ่งถูกกำหนดโดยพลังงานของนิวตรอนที่ตกกระทบ ปริมาณที่ต้องนำมาพิจารณาได้แก่ ผลคูณระหว่างช่วงของพลังงานนี้ กับ อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตรในปริภูมิเฟสต่อพลังงานสำหรับนิวเคลียสที่ไม่แตกสลาย ความมั่งคั่งของการได้มาซึ่งปริมาณนี้คือความจริงที่ว่าความคิดแบบคลาสสิกเหล่านี้ถูกใช้มาสำหรับการถอดความโดยตรงเข้าสู่ทอแมสของกลศาสตร์ควอนตัม ดังนั้นวิธีประมาณการของ เวนต์เซล-ครามอร์ส-บริวส ได้สอนเราว่า ปริมาตรของปริภูมิเฟสกำหนดจำนวนของระดับพลังงาน เพราะฉะนั้นเราสรุปว่า ความกว้าง -- ความกว้างที่ต้องการใช้วัดความน่าจะเป็นสำหรับการแบ่งตัว -- หาได้จากอัตราส่วนของจำนวนสถานะทั้งหลายที่สามารถเข้าถึงนิวเคลียสที่อยู่ในสถานะการเปลี่ยนย้าย ขณะที่มันกำลังข้ามกำแพง นั่นคือ จำนวนสถานะของการกระตุ้นนอกเหนือจากการเคลื่อนตัวในทิศทางของการแบ่งตัว และตัวหารนั้นได้แก่ระยะห่างระหว่างระดับพลังงานของนิวเคลียสหารด้วย 2π

ดังนั้นเราก็ได้มาถึงการเกี่ยวข้องโดยตรงกับปริมาณที่น่าสนใจโดยการทดลอง สูตรที่ได้มาด้วยวิธีนี้สำหรับอัตราปฏิกิริยา หรือความกว้างของระดับ และประยุกต์ต่อปฏิกิริยามากมายหลายประเภท รวมทั้งการแบ่งตัว และใช้ได้ทั่วไปมากกว่าสูตรใด ๆ ที่มีอยู่แล้วแต่ก่อนมาในทฤษฎีอัตราปฏิกิริยา สูตรใหม่นี้ให้ความเข้าใจอย่างลึกซึ้งพอควรในอัตราของการผ่านข้ามกำแพงการแบ่งตัว

ณ จุดนี้โดยเฉพาะ น่าสนใจที่จะสังเกตความระมัดระวังในการที่โบห์รนำเอาสูตรมาใช้ เขาจะเข้ามาประมาณวันเว้นวัน และเราก็จะคิดไตร่ตรองเรื่องนี้สักครั้งก่อนวัน ลองใช้วิธีนี้บ้าง วิธี

โน้นบ้าง แต่ความระมัดระวังสูงสุดของเขาปรากฏชัดที่สุดเมื่อเราต้องการแปลความหมายของจำนวนของระดับที่เข้าถึงได้ในสถานะการเปลี่ยนย้าย ปัจจุบันจำนวนนี้ถูกเรียกว่า “จำนวนช่อง” และเราใช้มันเป็นสูตรบรรยายทฤษฎีการวิเคราะห์ช่องของการแบ่งตัว นอกจากนี้เรายังประยุกต์การพิจารณาการวิเคราะห์ช่องที่คล้ายคลึงกันนี้สำหรับปฏิกิริยานิวเคลียร์อื่นด้วย แต่ในเวลานั้นความคิดว่าแต่ละช่องของช่องเอกเทศเหล่านี้ในหลักการมีความสำคัญแน่นอนซึ่งสังเกตได้โดยการทดลอง สำหรับเราแล้วเป็นความคิดที่น่าเคลือบแคลงสงสัย ทั้งเรายังเห็นคุณค่าน้อยกว่าจนกระทั่งผลงานต่อมาของอาเก โบทซ์ ความเป็นไปได้ว่าแต่ละช่องเอกเทศจะมีการแจกแจงเชิงมุมซึ่งจากนี้เราสามารถหาค่า K ของช่องนั้นได้ วลีอันระมัดระวังที่ถูกใช้อ้างอิงกับจำนวนช่องนั้นปรากฏในคำพูดต่อไปนี้ “การตั้งข้อสังเกตว่า ผลทางกลศาสตร์ควอนตัมที่เกิด ณ พลังงานการแบ่งตัววิกฤติ หรือ ที่ต่ำกว่า อาจยังแสดงอิทธิพลของมันบ้างเหนือพลังงานนี้ และก่อให้เกิดการแกว่งกวัดเล็กน้อยที่บริเวณเริ่มต้นกราฟผลผลิต ซึ่งเป็นไปได้ที่ยอมให้มีวิธีการโดยตรงเพื่อหาจำนวนช่อง” อย่างแน่นอนต่อมาในปี 1950 เราว่าการแปรผันเหล่านี้ถูกสังเกตโดยแลมเพียร์และกรีนและผู้อื่นได้อย่างไร และมันนำไปสู่การวัดโดยตรงของจำนวนช่องอย่างไร

การปรากฏอย่างชัดเจนของโบห์ร

ตอนสำคัญที่สุดในช่วงเวลาที่พริ้นซ์ตัน เกิดขึ้นเมื่อข้าพเจ้าไม่ได้ติดต่อกับโบห์รโดยตรง ยามเช้าหนึ่งที่มีหิมะ โบห์รกำลังเดินจากสโมสรนันทนาการไปห้องทำงานของเขาในฟิสิกส์ฮอลล์ จากผลสืบเนื่องของการรับประทานอาหารเข้ากับยอร์ก พลาเช็ค ผู้ซึ่งกังขาอย่างยิ่งในความคิดเรื่องการแบ่งตัวนี้ โบห์รเริ่มต่อสู้กับปัญหาในการอธิบายถึงการที่ภาคตัดขวางของการแบ่งตัวเกิดขึ้นอย่างไม่ธรรมดากับพลังงานของนิวตรอน ในระหว่างทางเดิน เขาได้สรุปว่าการแบ่งตัวแบบนิวตรอนช้าเกิดโดย P^{235} และการแบ่งตัวแบบนิวตรอนเร็วเกิดโดย P^{238} เมื่อเขาเดินมาถึงฟิสิกส์ฮอลล์ โบห์รและข้าพเจ้าได้มารวมกันกับ พลาเช็ค และ โรเซนเฟลด์ โบห์รพร้อมอยู่แล้วที่จะร่างความคิดทั้งหมดบนกระดานดำ ที่นั่นเขาแสดงมโนทัศน์ว่า P^{238} ไม่หั่นไหวง่ายต่อการแบ่งตัวโดยนิวตรอนขนาดพลังงานความร้อน หรือโดยนิวตรอนขนาดพลังงานระหว่างกลาง แต่แบ่งตัวได้โดยเพียงนิวตรอนที่มีพลังงานขนาดล้านอิเล็กตรอนโวลต์ หรือมากกว่าเท่านั้น

นอกจากนี้การแบ่งตัวซึ่งพบที่พลังงานต่ำกว่า เกิดเพราะมี U^{235} และมีภาคตัดขวาง $1/v$ สำหรับการจับนิวตรอน เราารู้แล้วโดยการทดลองว่า นิวตรอนขนาดพลังงานระหว่างกลางเผชิญกับการจับเรโซแนนซ์ และด้วยการพิจารณาอย่างง่าย ๆ เราสามารถแสดงว่า ปฏิกิริยาเรโซแนนซ์ของนิวตรอนด้วยยูเรเนียมไม่สามารถเกิดจาก U^{235} ได้ เราสรุปเช่นนี้เพราะเรารู้ว่าภาคตัดขวางเรโซแนนซ์จะมีค่าเกินขีดจำกัดทางทฤษฎีที่ได้รับจากกำลังสองของความยาวคลื่น ถ้า U^{235} รับผิดชอบต่อผลแห่งเรโซแนนซ์ ดังนั้นเรโซแนนซ์ต้องเนื่องด้วย U^{238} และความจริงที่สุดว่านิวตรอนเรโซแนนซ์ไม่ก่อให้เกิดการแบ่งตัวได้พิสูจน์ว่า U^{238} ไม่หวนไหวต่อการแบ่งตัวโดยนิวตรอนที่มีพลังงานต่ำเช่นนั้น ดังนั้นถ้ามันไม่หวนไหวที่พลังงานนั้น แน่ใจว่ามันจะไม่หวนไหวที่พลังงานต่ำยิ่งกว่า โดยเหตุนี้การแบ่งตัวพลังงานต่ำต้องเนื่องด้วย U^{235}

สองสามวันต่อมา ในวันที่ 26 เมษายน ฟลาเช็ท วิคเนอร์ โรเซนเฟลด์ โบห์ร์ ตัวข้าพเจ้าเอง และคนอื่น ๆ ได้มาถกกันว่าเรายังสามารถหวังสร้างระเบิดนิวเคลียร์ได้หรือไม่ เป็นเรื่องไร้สาระที่สุดขณะนั้นที่จะคิดแยก U^{235} จนถึงกับข้าพเจ้าไม่สามารถลืมคำซึ่งโบห์ร์ใช้ในการพูดเกี่ยวกับเรื่องนี้ “จะต้องใช้ความพยายามของประเทศหนึ่งหมดทั้งประเทศที่จะสร้างระเบิด” เขามืออาจยังทราบ ว่าตามความเป็นจริงแล้ว ความพยายามของคนทำงานหลายพันคนที่ดึงมาจากสามประเทศถูกใช้เพื่อให้ได้บรรลุวัตถุประสงค์

ทฤษฎีการแบ่งตัวทำให้เป็นไปได้ที่จะทำนายในเทอมทั่วไปภาคตัดขวางสำหรับการแบ่งตัวขึ้นกับพลังงานอย่างไร ในห้องปฏิบัติการทางฟิสิกส์ฟาลเมอร์ รูคอล์ฟ ลาเด็นเบิร์ก เจมส์ แคนเนอร์ ไฮน์ส เอช บาร์ชาลล์ และ ฟาน ฟุริส ณ เวลาพอดีที่เรากำลังคิดเรื่องทฤษฎีอยู่ ได้ลงมือวัดภาคตัดขวางของยูเรเนียมในช่วงสองถึงสามล้านโวลต์ และภาคตัดขวางของธอเรียมด้วย ซึ่งทั้งหมดสอดคล้องกับการทำนายทุกประการ



รูปที่ 9 ฟลาเช็ท มีส่วนช่วยสร้างทฤษฎีของการแบ่งตัว

การพิจารณาอย่างเดียวกันแน่นอนว่าทำให้เป็นไปได้ที่จะทำนายว่า พลูโตเนียม 239 จะแบ่งตัวได้ สำหรับการประยุกต์ของทฤษฎีนี้ เราเป็นหนี้บุญคุณโดยเฉพาะต่อ หลุยส์ เอ เทอร์เนอร์ เราได้เริ่มต้นบนทางซึ่งในที่สุดนำไปสู่โครงการพลูโตเนียมขนาดยักษ์ ซึ่งมีเพียงประมาณการทางทฤษฎีเท่านั้นช่วยส่องแสงและส่งเสริมก้าวแรก ๆ ของโครงการ

การแบ่งตัวที่เกิดเองเสนอการประยุกต์น่าดึงดูดใจที่สุดของความคิดเหล่านี้ร่วมด้วยกับกับมโนทัศน์ของการทะลุผ่านกำแพง การประยุกต์อีกเรื่องหนึ่งว่าด้วยความแตกต่างระหว่างนิวตรอนที่เกิดกลับปล้น และนิวตรอนที่เกิดล่าช้า โดยสรุปการแบ่งตัวของนิวเคลียสเป็นกระบวนการต่างไปจากกระบวนการอื่นๆทั้งหมดซึ่งเราได้เคยเกี่ยวข้องมาก่อนในนิวเคลียร์ฟิสิกส์ ในที่เราพบเป็นครั้งแรกในการแบ่งตัวได้แก่การแปลงรูปของนิวเคลียส มีคุณลักษณะรวมกลุ่มอย่างหนีไม่พ้น โดยนัยเช่นนี้ การแบ่งตัวของนิวเคลียสได้เปิดประตูสู่การพัฒนาแบบจำลองรวมกลุ่มของนิวเคลียสในช่วงเวลาหลังสงคราม

ศัพท์ไทย-อังกฤษ

ชื่อนักวิทยาศาสตร์

อ็อตโต อาร์ ฟริช Otto Robert Frisch

อ็อตโต อาร์ ฟริช เป็นชาวยิว เกิดที่กรุงเวียนนา ประเทศออสเตรียเมื่อปี 1904 เขากับ รูคอล์ฟ ไฟเออร์ล ร่วมกันออกแบบกลวิธีทางทฤษฎีครั้งแรกสำหรับการจุดระเบิดปรมาณูในปี 1940 เขาเดินทางไปอเมริกาในปี 1943 หลังจากได้รับสัญชาติบริติชอย่างรีบร้อนเพื่อทำงานให้โครงการแมนฮัตตันในฐานะคณะผู้แทนบริติชคนหนึ่ง

ในปี 1944 ที่ลอสอัลามอส งานชิ้นหนึ่งในตำแหน่งหัวหน้ากลุ่มการประกอบแบบวิกฤติ (Critical assemblies group) ก็จะต้องคำนวณหาอย่างถูกต้องปริมาณที่ตรงพอดีของยูเรเนียมชนิดเพิ่มคุณค่า (Enriched uranium) ซึ่งจะต้องใช้สร้างมวลวิกฤติคือมวลของยูเรเนียมซึ่งจะดำรงปฏิกิริยานิวเคลียร์ไว้ เขาทำให้ได้เช่นนี้โดยวางชิ้นๆ กันแท่ง 3 ซม. ของยูเรเนียมไฮโดรเจนชนิดเพิ่มคุณค่าจำนวนหลายโหลแต่ละคราว และวัดกัมมันตภาพนิวตรอนที่กำลังเพิ่มขึ้น ขณะที่มวลวิกฤติถูกเข้าใกล้ไฮโดรเจนในแท่งโลหะเพิ่มเวลาที่ปฏิกิริยาต้องการใช้ในการเร่ง นี้เรียกขานเล่น ๆ โดยริชาร์ด ฟายน์แมนว่า การแห่หางมังกรกลับ เพราะจำนวนแท่งที่มากเกินไปจะก่อให้เกิดปฏิกิริยาที่ควบคุมไม่อยู่ ซึ่งจะหลอมละลายแท่งโลหะ และฆ่าคนทุกคนบริเวณนั้นด้วยรังสีนิวตรอนวันหนึ่ง ฟริชเกือบทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ควบคุมไม่อยู่โดยชะงักตัวข้ามกองแท่งโลหะ ไฮโดรเจนในร่างกายของเขาสะท้อนนิวตรอนกลับเข้าในกอง เขาชำเล็งมองทางหางตาของเขาและเห็นไฟแดงกระพริบของเครื่องนับเปิดสว่างตลอดเวลา เขาตระหนักดีว่าอะไรกำลังเกิดขึ้น ฟริชเอามือปิดกองแท่งให้กระจายอย่างรวดเร็ว ในสองวินาทีนั้น ฟริชได้รับรังสีนิวตรอนเท่ากับมาตรฐานที่ยอมรับได้ในหนึ่งวันเต็ม ด้วยแนวทางนี้การทดลองของเขาสามารถหามวลถูกต้องแม่นยำของยูเรเนียมที่ต้องใช้ทำลูกระเบิดปรมาณู นามรหัส Little Boy ที่ถล่มฮิโรชิมา

ในปี 1946 เขากลับอังกฤษ รับตำแหน่งหัวหน้ากองนิวเคลียร์ฟิสิกส์ของการวิจัยพลังงานปรมาณู (Atomic Energy Research Establishment) ที่ฮาร์เวลล์ และสอนที่เคมบริดจ์ตลอดสามสิบปีต่อมาอีกด้วย

ฟริชถึงแก่กรรมในปี 1979

จอห์น เอ วิลเลอร์ John Archibald Wheeler

จอห์น เอ วิลเลอร์ เป็นศาสตราจารย์วิชาฟิสิกส์ที่มหาวิทยาลัยพรินซ์ตันจากปี 1938 ถึง 1976 แล้วเป็นผู้อำนวยการศูนย์ฟิสิกส์ทฤษฎีที่มหาวิทยาลัยเท็กซัสจาก 1976 ถึง 1986 เมื่อเขาเกษียณจากงานทางวิชาการ วิลเลอร์ได้กลับมหาวิทยาลัยพรินซ์ตันในฐานะศาสตราจารย์เกียรติคุณจวบกระทั่งถึงแก่กรรมเมื่อปี 2008 สิริรวมอายุได้ 96 ปี เขาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาเอกของริชาร์ด ฟายน์แมน วิลเลอร์ให้ความสำคัญต่อการสอนนักศึกษาแม้หลังจากเป็นนักฟิสิกส์ที่มีชื่อเสียงแล้วเขาก็ยังสอนฟิสิกส์ปีหนึ่ง

และปีสองอย่างต่อเนื่อง เขากล่าวว่าสติปัญญาวัยเขาวัยนั้นสำคัญที่สุด

วิลเลอร์เริ่มนำ S-matrix เอส-เมตริกส์ มาใช้ ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ขาดเสียไม่ได้ในวิชาฟิสิกส์ของอนุภาค เขาเป็นผู้บุกเบิกในทฤษฎีการแบ่งตัวของนิวเคลียสร่วมกับนิลส์ โบห์ร์ และเอ็นริโก เฟอร์มี โดยร่วมกันกับนักฟิสิกส์ชั้นนำคนอื่นมากมายระหว่างสงครามโลกครั้งที่สอง วิลเลอร์หยุดชะงักอาชีพวิชาการของเขาเพื่อเข้าร่วมในการพัฒนาระเบิดปรมาณูในโครงการแมนฮัตตัน โดยทำงานที่ไซดงันแซนฟอร์ดในวอชิงตัน ที่ซึ่งปฏิกิริยาปรมาณูขนาดใหญ่หลายแห่งถูกสร้างเพื่อผลิตธาตุฟิวโตเนียมสำหรับระเบิดปรมาณู

สองสามปีต่อมา วิลเลอร์เดินทางไปทำการพัฒนา ‘ระเบิดไฮโดรเจน’ ที่มีอนุภาพมากกว่าภายใต้โครงการโปรแกรมอาวุธนิวเคลียร์แมตเตอร์ฮอร์น

หลังจากสรุปงานโครงการแมนฮัตตันแล้ว วิลเลอร์กลับมหาวิทยาลัยพรินซ์ตันดำเนินอาชีพวิชาการอย่างเดิม เขาเป็นคนหนึ่งในผู้ร่วมงานในภายหลังของไอน์สไตน์ เขาพยายามบรรจุจินตนาการของไอน์สไตน์เรื่อง Unified field theory (ทฤษฎีสันนาม ซึ่งรวมให้เป็นหนึ่งเดียว) รู้จักกันว่าเขาเป็นผู้สร้างคำ ‘Black hole’, ‘Quantum foam’ และ ‘Wormhole’ และวลี “It from bit”

มาดามคูรี Madame Marie Curie

เออร์เนสต์ รัทเทอร์ฟอร์ด Ernest Rutherford, 1st Baron

Rutherford of Nelson OM, FRS

จอห์น ค็อกครอฟต์ John Cockcroft

เออร์เนสต์ วอลตัน Ernest Walton

คาร์ล พรืซิบรัม Karl Przibram

อ็อตโต ฮาห์น Otto Hahn

ลิเซ ไมท์เนอร์ Lise Meitner

ฮานส์ เกเกอร์ Hans Geiger

วาลเทอร์ มิลเลอร์ Walther Mueller

วาลเทอร์ โบทเท Walther Bothe

เออร์เนสต์ โอ ลอเรนซ์ Ernest Orlando Lawrence

นอร์แมน เฟทเธอร์ Norman Feather

เซอร์เจมส์ แชดวิก Sir James Chadwick

เฮซ ซี เว็บสเตอร์ H. C. Webster

คูรี และ โจลิโอ Irene Joliot-Curie and Frederic Joliot-Curie
 เอ็นริโก เฟอร์มี Enrico Fermi
 โวล์ฟกัง เปาลี Wolfgang Pauli
 ลีโอ ซิลาร์ด Leo Szilard
 เฮอermann ไกรนาเคอร์ Hermann Greinacher
 ชาลส์ วินน์ วิลเลียมส์ Charles Wynn-Williams
 แพตริกเก็ตต์ Patrick Maynard Stuart Blackett, Baron Blackett OM,

CH, PRS

อริสติด ฟอน โกรสเส Aristid von Grosse
 มานน์ สิกบาห์น Karl Manne Georg Siegbahn
 ฟรีดริช สตราสมันน์ Fritz Strassmann
 ฮานส์ ฟอน ฮาลบาน Hans von Halban
 ปีเตอร์ไพริชเวิร์ค Peter Preiswerk
 ปาเวล ซาวิตช์ Pavel Savitch
 ก็อดฟรีด ฟอน โดรสเต Gottfried von Droste
 นีลส์ โบห์ร์ Niels Henrik David Bohr
 จอร์จ พลาเช็ค George Placzek
 วิลเลียม เอ อาร์โนลด์ William A. Arnold
 อิดา โนดดาค Ida Noddack
 เวอร์เนอร์ ไฮเซนเบิร์ก Werner Heisenberg
 เกรกอรี ไบรท์ Gregory Breit
 เมิลเลอร์ Møller
 อาเก โบห์ร์ Aage Bohr
 เบ็น ม็อตเทลสัน Ben Roy Mottelson
 ฟรีดริช คาลคาร์ Fritz Kalckar
 มาร์สตัน มอร์ส Marston Morse
 โรเซนเฟลด์ Leon Rosenfeld
 อีสิดอร์ ไอ ราบี Isidore Isaac Rabi
 จอห์น ดันนิง John Ray Dunning
 จอห์น ดับบลิว สตรัทท์ ลอร์ดเรย์ที่สาม John W. Strutt, the third

Lord Rayleigh

วลาดิสลอส เจ สวีอาเทคกี Wladyslaw J. Swiatecki
 เฮนรี อายริง Henry Eyring
 ยูจีน วิกเนอร์ Eugene Wigner
 สเตอร์เมอร์ Störmer
 มานูเอล ซานโดวาล วาลลาร์ตา Manuel Sandoval Vallarta

แลมเพียร์ และ กรีน Lamphere and Green
 รูดอล์ฟ ลาเดินเบิร์ก Rudolf Ladenberg
 เจมส์ แคนเนอร์ James Kanner
 ไฮน์ซ์ เอช บาร์ชาลล์ Henry Herman (“Heinz”) Barschall
 ฟาน วูร์ฮิส Van Voorhies
 หลุยส์ เอ เทอร์เนอร์ Louis A. Turner

ศัพท์เทคนิค

การค้นพบการแบ่งตัวของนิวเคลียส The Discovery of Fission

นิวเคลียร์ฟิสิกส์ (ฟิสิกส์ของนิวเคลียส) nuclear physics

นิวตรอน Neutron

นิวเคลียส Nucleus

กัมมันตภาพรังสี Radioactivity

ชิ้นส่วน Fragment

ไอออไนเซชัน Ionization

ไอออไนเซชันเชมเบอร์ Ionization chamber

อิเล็กโตรมิเตอร์ Electrometer

การแตกสลายของนิวเคลียส Nuclear disintegration

วิธีซินทิลเลชัน Scintillation method

โปรตอน Proton

เครื่องเร่งอนุภาค Particle accelerator

‘เด็กปากโป้ง’ ‘Enfant terrible’

อนุภาคแอลฟา Alpha particle

เครื่องนับแบบไฟฟ้า Electric counter

รังสีบีตา Beta ray

รังสีแกมมา Gamma ray

วิธีโคอินซิเดนซ์ Coincidence method

รังสีคอสมิก Cosmic ray

โปโลเนียม Polonium

ไซโคลตรอน Cyclotron

การประชุมกองเกรสทางประวัติของวิทยาศาสตร์ ณ เมืองอิฐาคา

มลรัฐนิวยอร์ก History of Science Congress, Ithaca, New York

นิวตริโน Neutrino

ห้องหมอก Cloud chamber

เครื่องนับอิเล็กทรอนิกส์ Electronic counter

กัมมันตภาพรังสีประดิษฐ์ Artificial radioactivity

โพสิตรอน Positron

กำแพงคูลอมบ์ Coulomb barrier
 โพรแทกทีเนียม Protactinium
 ธาตุทรานซยูเรนิค Transuranic element
 เอกา Eka
 สอมอลอกขั้นสูง Higher homologue
 ไอโซเมอร์ Isomeric
 โครงสร้างเกร็ง Rigid structure
 การสลายบีตา Beta decay
 ครึ่งชีวิต Half life
 กุงแกลฟ์ ใกล้ เกอเทบอร์ก Kungälv near Goeteborg
 มวลพร่อง Mass defect
 เนเจอร์ Nature
 ปาฐกถาเบเกอร์เรียน Bakerian lecture
 ปรากฏการณ์คอมป์ตัน Compton Effect
 แบบจำลองหยดของเหลว Liquid-drop model
 นิวเคลียสเชิงประกอบ Compound nucleus
กลวิธานของการแบ่งตัว Mechanism of Fission
 เรือยนต์โรตทิงโฮล์ม MS (Motor Ship) Drottningholm
 ฟิสิกส์รีวิว Physical Review
 เศษส่วนการอัด Packing fraction
 ภาคตัดขวางสำหรับปฏิกิริยานิวเคลียร์ The cross section for a nuclear reaction
 กระบวนการกระเจิง Scattering process
 การเปลี่ยนเฟส Phase shift
 นิวตรอนช้า Slow neutron
 เรโซแนนซ์ Resonance
 ที่ประชุมสัมมนา Colloquium
 วิธีเสรีเฉลี่ยของนิวคลีออน Mean free path of a nucleon
 พลังงานการกระตุ้น Activation energy
 ควอนตัมอิเล็กโตรไดนามิกส์ Quantum electrodynamics
 ของไหลอุดมคติ Ideal fluid
 แคลคูลัสของการแปรผัน Calculus of variations
 ปริภูมิโครงรูป Configuration space
 การผิดรูป Deformation
 จุดอานม้า Saddle point

การประชุมวิชาการฟิสิกส์ทฤษฎี ประจำปีครั้งที่ห้า จัดที่กรุง
 วอชิงตัน The fifth annual theoretical physics conference,
 Washington
 สโมสรวารสาร Journal club
 ดี นาตูร์วิสเซนชาฟเทน Die Naturwissenschaften (Sciences)
 พารามิเตอร์ความแบ่งตัว Fissility parameter
 อนุกรมยกกำลัง Power series
 ความตึงผิว Surface tension
 ภูมิลักษณะ Topography
 ทฤษฎีบทลิอูวิลล์ Liouville's theorem
 ปริภูมิเฟส Phase space
 องศาแห่งเสรี Degree of freedom
 ชุมนุสระบบ The ensemble of systems
 กลศาสตร์ควอนตัม Quantum mechanics
 วิธีประมาณการของ เวนต์เซล-คราเมอร์ส-บริยวง Wentzel-
 Kramers-Brillouin approximation
 จำนวนช่อง The number of channels
 การแกว่งกวัด Oscillation
 กราฟผลผลิต Yield curve
 สโมสรนัสซอ Nassau Club
 ไฟน์ฮอลล์ Fine Hall
 ห้องปฏิบัติการทางฟิสิกส์พาลเมอร์ Palmer Physical Laboratory
 นิวตรอนที่เกิดฉับพลัน Prompt neutron
 นิวตรอนที่เกิดล่าช้า Delayed neutron
 แบบจำลองรวมกลุ่มของนิวเคลียส Collective model of the nucleus

ฟิสิกส์ของปรมาณู* (ฟิสิกส์ของอะตอม) Atomic physics
 แตกต่างจากนิวเคลียร์ฟิสิกส์ (ฟิสิกส์ของนิวเคลียส) Nuclear physics หรือไม่อย่างไร?

* ปรมาณู หรือ อะตอม ประกอบด้วย ใจกลาง หรือ นิวเคลียส และมี อิเล็กตรอน (ประจุไฟฟ้าลบ) ห่อหุ้มหรือวิ่งวน โคจรรอบๆ นิวเคลียสประกอบด้วยโปรตอน(ประจุไฟฟ้าบวก) และนิวตรอน (ไม่มีประจุ) มวลของปรมาณูส่วนใหญ่เป็นมวลของ นิวเคลียสซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางพิสัยจาก 1.75 fm (เฟมโตเมตร) (1.75×10^{-15} m) ของไฮโดรเจน ถึงประมาณ 15 fm สำหรับธาตุหนักที่สุดเช่นยูเรเนียม ขนาดเหล่านี้เล็กมาก มากกว่าเส้นผ่าน

ศูนย์กลางของอะตอมของมัน (นิวเคลียส + หมอกอิเล็กตรอน) ด้วยแฟลเตอร์ประมาณ 23,000 (ยูเรเนียม) ถึงประมาณ 145,000 (ไฮโดรเจน)

ดังนั้น ฟิสิกส์ของปรมาณู (ฟิสิกส์ของอะตอม) atomic physics จะกล่าวถึงโครงสร้างของอิเล็กตรอน (Electron configuration) ที่วงโคจร ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนเหล่านี้ ฯลฯ ในขณะที่นิวเคลียร์ฟิสิกส์ (ฟิสิกส์ของนิวเคลียส) Nuclear physics ว่าด้วย กัมมันตภาพรังสีของการสลายตัวของนิวเคลียสทั้งธรรมชาติและประดิษฐ์ (Natural radioactivity and artificial disintegration) พลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy) ของนิวคลีออน (โปรตอน และนิวตรอน) การแบ่งตัวของนิวเคลียส (Nuclear fission) การหลอมตัวของนิวเคลียส (Nuclear fusion) ฯลฯ

พลังงานนิวเคลียร์ หรือ พลังงานปรมาณู ได้แก่พลังงานที่มาจากนิวเคลียสของปรมาณู (อะตอม) เมื่อใดก็ตามที่มีการเปลี่ยนแปลงในนิวเคลียสของอะตอมก็จะมี การปลดปล่อยพลังงานออกมา

การเปลี่ยนแปลงนิวเคลียสมีสองชนิด คือ การแบ่งตัวของนิวเคลียส (Nuclear fission) และการหลอมตัวของนิวเคลียส (Nuclear fusion)

ในการแบ่งตัวของนิวเคลียส (Nuclear fission) อะตอมที่มีมวลมาก เช่น ยูเรเนียมถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน และส่งผลให้มีการสูญเสียมวลด้วย นิวเคลียสสองตัวใหม่ที่เกิดขึ้นนี้มีมวลของมันบวกกันแล้วก็ยังเบากว่านิวเคลียสดั้งเดิม สสารที่หายไปถูกแปลงเป็นพลังงาน

ยูเรเนียม 235 เป็นไอโซโทปที่ใช้ตั้งต้นปฏิกิริยาลูกโซ่ การแบ่งตัวของนิวเคลียส ยูเรเนียม 235 ถูกแบ่งเป็นสองส่วนโดยนิวตรอนหนึ่งตัว และปลดปล่อยพลังงาน กับนิวตรอนอีกสองสามตัว นิวตรอนเหล่านี้ซึ่งถูกปล่อยออกมาจะไปแบ่งแยกอะตอมสองสามตัวอื่น ด้วยปริมาณยูเรเนียมที่เพียงพอ ปฏิกิริยาลูกโซ่จะเริ่มขึ้น ถ้าปฏิกิริยาลูกโซ่นี้ถูกควบคุมเหมือนในเครื่องปฏิกรณ์ก็จะสามารถผลิตพลังงานนิวเคลียร์ได้ ปฏิกิริยาลูกโซ่แบบนี้แหละที่เกิดขึ้นในระเบิดปรมาณูด้วยเช่นกัน

อะตอมที่มีมวลน้อย ๆ เช่น ไฮโดรเจน เกี่ยวข้องกับการหลอมตัวของนิวเคลียส (Nuclear fusion) การหลอมตัวของนิวเคลียสมีความสามารถปล่อยพลังงานปริมาณมากกว่าการแบ่งตัวของนิวเคลียส ปฏิกิริยาการหลอมตัวเหล่านี้ก็ถูกเรียกว่าปฏิกิริยาเทอร์โมนิวเคลียร์ด้วย ตัวอย่างหนึ่งของปฏิกิริยาเทอร์โมนิวเคลียร์พบได้บนดวงอาทิตย์ที่ซึ่งอะตอมไฮโดรเจนรวมตัวกันเป็นธาตุใหม่คือฮีเลียม ในกระบวนการนี้ ‘พลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy)’ ถูกปล่อยออกมาส่วนใหญ่ในรูปของความร้อน ตัวอย่างอีกอันหนึ่งของปฏิกิริยาเทอร์โมนิวเคลียร์คือระเบิดไฮโดรเจน

การหลอมตัวของนิวเคลียส (Nuclear fusion) ดูเหมือนจะเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานที่ดีกว่าสำหรับใช้ผลิตไฟฟ้า ปัญหาใหญ่คือการควบคุมปฏิกิริยาการหลอมตัว หลังจากเมื่อควบคุมได้ยังต้องใช้เวลาก่อสร้างโรงไฟฟ้าแบบนี้เพื่อจำหน่ายแก่ประชาชน ในการกระทำอย่างนี้ให้สำเร็จได้คงจะกินเวลาหลายปี “อาจจะถึงปี 2020 กว่าที่เราจะเป็นสังคมของปฏิกิริยาการหลอมตัว (Fusion society)”

การลดลงแบบพอร์บู่: ผลกระทบของพายุสุริยะ ชนิดปลดปล่อยกลุ่มพลาสมาต่อรังสีคอสมิกกาแลกซี

วัชรานุกูล กฤตดิษฐ์^{1,2}

โลกมิได้ถูกกระหน่ำด้วย ลมสุริยะ (Solar Winds) [a] และ พายุสุริยะ (Solar Storm) [b] เท่านั้น หากแต่ยังมีอันตรายจากภายนอกของระบบสุริยะอย่าง รังสีคอสมิกกาแลกซี (Galactic Cosmic Rays: GCRs) เข้ามาเชื่อมโยงกันอีกด้วย GCRs ประกอบด้วยอนุภาคระดับองค์ประกอบของอะตอม โดย 89% คือ นิวเคลียสของไฮโดรเจน (โปรตอน), นิวเคลียสฮีเลียม 10%, และ อีก 1% เป็นนิวเคลียสของธาตุหนักอื่นๆ เช่น ลิเทียม เบริลเลียม เป็นต้น เมื่อ GCRs ถูกเร่งภายในสนามแม่เหล็กของซากซูเปอร์โนวาในกาแลกซีทางช้างเผือก จะมีพลังงานจลน์ราว 10^{10} - 10^{15} eV [c] ขณะที่รังสีคอสมิกจากดวงอาทิตย์ (Solar Cosmic Rays) ซึ่งถูกเร่งจากพายุสุริยะ มีพลังงานสูงสุดไม่เกิน 10^{10} eV ส่วนรังสีคอสมิกจากภายนอกกาแลกซีทางช้างเผือก (Extragalactic Cosmic Rays) มีพลังงานขั้นต่ำ 10^{15} eV รังสีคอสมิกทั้งสามประเภทเรียกรวมกันว่า รังสีคอสมิกปฐมภูมิ (Primary Cosmic Rays)

GCRs ที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากซากซูเปอร์โนวาสู่อวกาศระหว่างดาวฤกษ์ บางส่วนเดินทางผ่านเข้าสู่ระบบสุริยะ แม้ว่าแหล่งกำเนิด GCRs อย่างซากซูเปอร์โนวาจะกระจุกกระจายในกาแลกซีทางช้างเผือก ทว่าด้วยโครงสร้างสนามแม่เหล็กของกาแลกซีและดวงอาทิตย์เบี่ยงเบนทิศทางการเดินทางของ GCRs จนทิศทางของอนุภาคลังงานสูงเหล่านั้นพุ่งเข้าหาโลกในปริมาณเท่ากันทุกทิศทางหรือมีความสมมาตร (Isotropic) โดยประมาณ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาทิศทางและปริมาณ GCRs โดยละเอียดจะพบว่ามีความไม่สมมาตร (Anisotropy) จากปัจจัยอื่นๆ ทั้งภายในและภายนอกของระบบสุริยะ

GCRs ที่ผ่านกับดักสนามแม่เหล็กโลกเข้ามายังชั้นบรรยากาศ มีโอกาสชนกับอะตอมหรือโมเลกุลแก๊สภายในชั้น

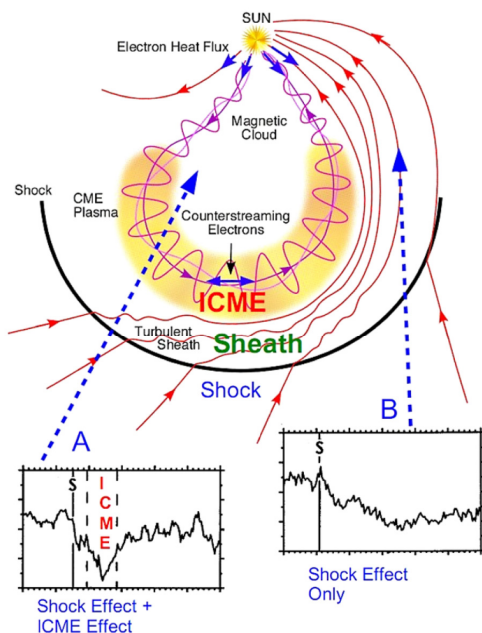
บรรยากาศโลกแล้วผลิต รังสีคอสมิกทุติยภูมิ (Secondary Cosmic Rays) ซึ่งประกอบด้วยอนุภาค เช่น นิวตรอน โพซิตรอน โพออน มิวออน เป็นต้น รวมทั้งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างรังสีแกมมา รังสีคอสมิกทุติยภูมิจะแผ่กระจายราวสายฝนลงมายังผิวโลกเรียกว่า ฝนรังสีคอสมิก (Cosmic Ray Shower) แม้ระหว่างทางรังสีคอสมิกทุติยภูมิจะลดความเข้มลงแบบฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียลตามความดันบรรยากาศ อันเนื่องมาจากถูกดูดกลืนหรือชนกับโมเลกุลแก๊สของชั้นบรรยากาศโลก แต่นิวตรอนหรือมิวออนบางส่วน สามารถตรวจวัดได้โดยสถานีตรวจวัดรังสีคอสมิกภาคพื้นดิน และเนื่องจาก GCRs เดินทางเข้าสู่โลกตลอดเวลาในสภาพอวกาศ (Space Weather) ปรกติ ปริมาณรังสีที่วัดได้จึงถือเป็นสัญญาณพื้นฐาน (Background Signal) ของสถานีตรวจวัดนิวตรอนหรือมิวออนแต่ละแห่ง

การปลดปล่อยกลุ่มมวลโคโรนา (Coronal Mass Ejection: CME): เมื่อดวงอาทิตย์เกิดการปะทุและปลดปล่อยกลุ่มพลาสมาจำนวนมากที่เรียกว่า การปลดปล่อยกลุ่มมวลโคโรนา เป็น พายุสุริยะ ชนิดที่ส่งผลกระทบเป็นระยะเวลานาน (Long-Duration Event) เมื่อ CMEs เดินทางออกสู่อวกาศระหว่างดาวเคราะห์จะเรียกว่า Interplanetary Coronal Mass Ejections (ICMEs) การตรวจวัดโดยสถานีตรวจวัดภาคพื้นโลก หรือ ดาวเทียม ที่ระยะทางประมาณ 1 AU จากดวงอาทิตย์ พบว่า ICMEs มีรัศมีประมาณ 0.1 – 0.5 AU (1 AU: Astronomical Unit หรือ หน่วยดาราศาสตร์ คือระยะทางเฉลี่ยระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ประมาณ 1.49×10^8 กิโลเมตร) เคลื่อนที่ผ่านอวกาศระหว่างดาวเคราะห์ด้วยอัตราเร็วประมาณ 300 – 900 กิโลเมตรต่อวินาที พร้อมกันนั้นก็ขยายตัวเชิงรัศมีด้วยอัตราเฉลี่ย 43 กิโลเมตร

¹กลุ่มวิจัยและพัฒนา สถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

²โครงการพัฒนาศักยภาพเชิงวิชาการฟิสิกส์ดาราศาสตร์และฟิสิกส์อวกาศ ห้องปฏิบัติการวิจัยฟิสิกส์ดาราศาสตร์และอวกาศ หน่วยวิจัยทางฟิสิกส์บูรณาการ ศูนย์ความเป็นเลิศทางฟิสิกส์

ต่อวินาที โดยภายในมีสนามแม่เหล็กเฉลี่ย 10.1 ± 0.3 นาโนเทสลา (nT) และมีพลาสมาความหนาแน่นเชิงจำนวนประมาณ $6.9 \pm 0.2 \text{ cm}^{-3}$ [1] ขณะที่ภายใน ลมสุริยะ มีสนามแม่เหล็กประมาณ 5 nT และมีความหนาแน่นเชิงจำนวนของอนุภาคน้อยกว่า 3.0 cm^{-3} ความไม่ต่อเนื่องของปริมาณทางกายภาพในอวกาศระหว่างดาวเคราะห์ดังกล่าวก่อให้เกิดแนวขอบเขตที่เรียกว่า **คลื่นกระแทก (Shocks)** ดัง รูปที่ 1 ด้านหลังคลื่นกระแทกคือ **Turbulent Sheath** ซึ่งเป็นบริเวณที่สนามแม่เหล็กดวงอาทิตย์ถูกบีบ และมีความปั่นป่วนสูงขึ้นบริเวณใกล้คลื่นกระแทกและลดลงจนถึงบริเวณขอบหน้า (Leading Trail) ของ ICME ตามเข้ามาด้วยพลาสมาของ CME ซึ่งถ้าภายในมี โครงสร้างสนามแม่เหล็กแบบเกลียวเชือก (Interplanetary Magnetic Flux Rope: IMFR) จะเรียก ICME นั้นว่า **เมฆแม่เหล็ก (Magnetic Cloud: MC)** ซึ่งประมาณ 50% ของ ICMEs จะตรวจพบโครงสร้างเส้นสนามแม่เหล็กแบบนี้ [3]

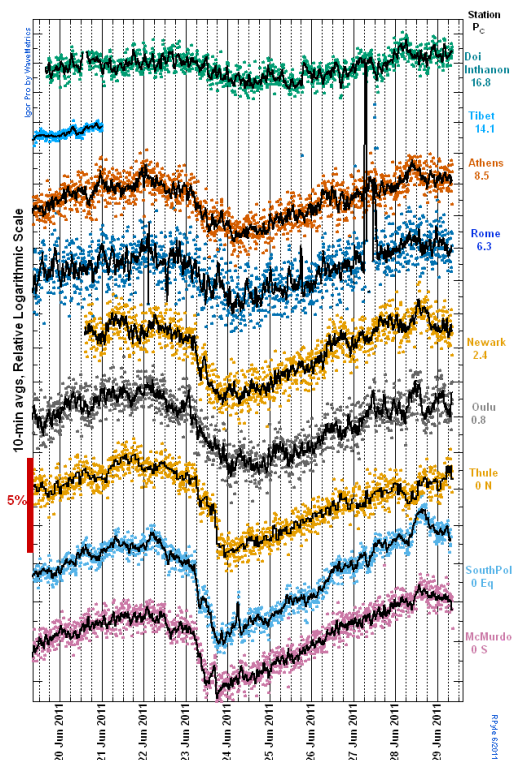


รูปที่ 1 โครงสร้างของ ICME และ MC และแนวคลื่นกระแทก (Shock). เส้นและลูกศรสีแดงแสดงสนามแม่เหล็กแบบเกลียว Archimedean spiral field ที่เข้าสู่หรือออกจากดวงอาทิตย์, จากในรูปแสดงเส้นสนามที่ถูกบีบอัดและมีความปั่นป่วนมากขึ้นในบริเวณ Turbulent Sheath สำหรับเส้นสนามแม่เหล็กแบบเกลียวเชือกของเมฆแม่เหล็กแสดงด้วยสีม่วง ซึ่งจะกักขังพลาสมาของ CME ไว้ภายใน ภาพประกอบจาก Zurbuchen และ Richardson [2] และดัดแปลงเพิ่มเติมโดย Richardson และ Cane [22]

เมื่อดวงอาทิตย์เกิดการปะทุที่ผลักดันให้เกิด ICMEs หรือ MCs สภาพอวกาศหรือสภาพสนามแม่เหล็กและพลาสมาในอวกาศระหว่างดาวเคราะห์จะถูกรบกวน ปริมาณรังสีคอสมิกที่วัดได้จากสถานีตรวจวัดนิวตรอนจะลดลงอย่างรวดเร็ว [4,5] โดยมีส่วนการลดลงมากที่สุด 25% [5] ก่อนจะค่อยๆ ฟื้นระดับสัญญาณสู่สภาวะปกติแบบเอกซ์โปเนนเชียลภายในระยะเวลา 3 ถึง 10 วัน [6] โดยผู้ที่พบปรากฏการณ์นี้คือ Scott E. Forbush [7] จึงเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า **การลดลงแบบฟอรัช (Forbush Decreases : FDs)** อย่างไรก็ตามปริมาณการลดลงแบบฟอรัชที่แต่ละสถานีตรวจวัดนิวตรอนตรวจพบไม่เท่ากัน หากแต่ขึ้นอยู่กับ **Geomagnetic Cutoff Rigidity ($P_c = p/q$)** ซึ่งจะบ่งบอกว่าอนุภาคที่มีโมเมนตัมต่อประจุอย่างน้อยเท่าใดจึงจะต้านทานการเบี่ยงเบนโดยสนามแม่เหล็กโลก และผ่านเข้าสู่ชั้นบรรยากาศ ณ แต่ละตำแหน่งบนผิวโลก เช่น การลดลงแบบฟอรัชอันเนื่องมาจาก ICME เมื่อวันที่ 23 มิถุนายน 2554 (รูปที่ 2) สถานีที่ตรวจวัด ณ ตำแหน่งที่มีค่า P_c ต่ำ เช่น ที่สถานี South Pole ($P_c = 0$ GV) พบการลดลงแบบฟอรัชลึกกว่า สถานีตรวจวัดนิวตรอนสิรินธร (Princess Sirindhorn Neutron Monitor) ณ ดอยอินทนนท์ (Doi Inthanon) จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งสามารถวัดปริมาณ GCRs ที่มี Geomagnetic Cutoff Rigidity สูงที่สุดในโลก ($P_c = 16.8$ GV)

กลไกทางฟิสิกส์ของการลดลงแบบฟอรัช : การลดลงแบบฟอรัชแบ่งออกเป็นสองระยะ ดังรูปที่ 3 โดย **การลดลงระยะที่ 1** สัญญาณ GCRs ลดลงเนื่องจากผลของการเพิ่มอัตราเร็วของลมสุริยะหน้าคลื่นกระแทกและการพุ่งใน Turbulent Sheath ด้านหลัง Shock Front และ **การลดลงระยะที่ 2** เกิดขึ้นเมื่อโลกหรือดาวเทียมตรวจวัดเข้าสู่กลุ่มพลาสมาที่ตามมาด้านหลัง Turbulent Sheath [5,8,9] อย่างไรก็ตามการลดลงแบบฟอรัชแต่ละครั้งไม่จำเป็นต้องตรวจพบการลดลงทั้งสองระยะ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับทิศทางเคลื่อนที่ของ ICME/MC ที่สัมพันธ์กับโลก หรือดาวเทียมตรวจวัดในอวกาศ [5] หากอุปกรณ์ตรวจวัดผ่านคลื่นกระแทกและกลุ่มพลาสมา จะพบทั้งสองระยะที่ 1 และ 2 (เส้นทาง A รูปที่ 1), หาก ICME/MC ถูกปลดปล่อยออกสู่อวกาศในทิศทางที่ไม่เคลื่อนที่เข้าหาโลกโดยตรง จะตรวจพบแต่ผลการลดลงโดยคลื่นกระแทก นั้นคือระยะที่ 1 (เส้นทาง B รูปที่ 1) และหาก ICME/MC เคลื่อนที่เข้าจนแทบไม่ส่งผลกระทบต่อความต่อเนื่องของสสารในบริเวณ

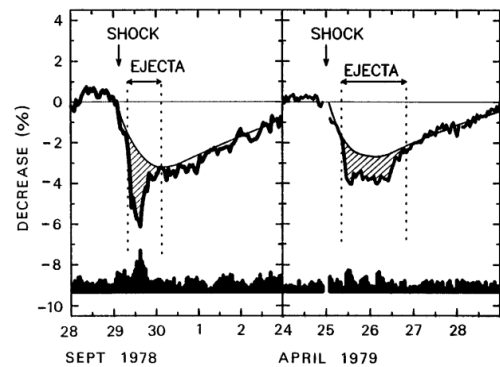
ด้านหน้า จะตรวจพบผลของการลดลงภายใน ICME/MC เท่านั้น ซึ่งเป็นระยะที่ 2



รูปที่ 2 แสดงปริมาณรังสีคอสมิกที่สถานีตรวจวัดนิวตรอน McMurdo, South Pole, Thule, Oulu, Newark, Rome, Athens, Tibet, และ Doi Inthanon (สถานีตรวจวัดนิวตรอนลิรินทร) Credit: <http://neutronm.bartol.udel.edu> & www.thaispaceweather.com

การลดลงแบบพอร์นุชอันเนื่องมาจากคลื่นกระแทกหรือการลดลงแบบพอร์นุชระยะที่ 1: คลื่นกระแทกนอกจากจะเปลี่ยนทิศทางของ GCRs ยังเร่งอนุภาคของ GCRs และลมสุริยะที่บริเวณหน้าคลื่นกระแทกหรือ **Upstream** ยังผลให้เกิดอัตราพาอนุภาคสูงขึ้นในบริเวณดังกล่าว ขณะที่ด้านหลังคลื่นกระแทกที่ลมสุริยะช้ากว่า เรียกว่า **Downstream** ซึ่งอยู่ภายใน **Turbulent Sheath** ความปั่นป่วนภายในบริเวณหลังนี้ ยังผลให้การฟุ้งแบบขนาน (Parallel Diffusion) กับเส้นสนามแม่เหล็ก ลดลง อนุภาคเกิดการกระเจิง (Scattering) มากขึ้น โดยทั่วไปแบบจำลองการฟุ้งและการพา (Diffusion-convection Model) ถูกใช้ในการอธิบายการลดลงแบบพอร์นุชระยะที่ 1 เช่น แบบจำลองการฟุ้ง-การพาในหนึ่งมิติของ Nishida [11] ที่ขึ้นกับเวลาในพิกัดทรงกลม พบว่าการกระเจิงมีส่วนรับผิดชอบต่อการลดลงแบบพอร์นุชมากกว่าการพา

ยังมีแบบจำลองที่เสนอโดย Perko [12] ที่ให้สัมประสิทธิ์การฟุ้งขึ้นกับระยะห่างจากดวงอาทิตย์ นอกเหนือจากนี้ การลอยเลื่อน (Drift) ยังถูกพิจารณาโดย Kadokura และ Nishida [13] กับ Le Roux และ Potgieter [14] อย่างไรก็ตามการคำนวณผลจากการลอยเลื่อนดังกล่าวก็ไม่พบว่ามีการลอยเลื่อนมีส่วนรับผิดชอบต่อการลดลงแบบพอร์นุชระยะที่ 1 มากเท่ากับการฟุ้งและการพา



รูปที่ 3 การลดลงแบบพอร์นุชจากสถานีตรวจวัดนิวตรอน Deep River, Mt. Wellington และ Kerguelen เมื่อกันยายน 1978 และเมษายน 1979 [10] เส้นที่เรียบแสดงผลจากการแยก การลดลงอันเนื่องมาจากพลาสมาใน ICME/MC ออกไป เหลือเพียงการลดลงและพื้นระดับสัญญาณอันเนื่องมาจากคลื่นกระแทก Credit: Wibberenz และคณะ [10]

ในบทความนี้จะแสดงตัวอย่างแบบจำลองสำหรับการพิจารณาการลดลงของความหนาแน่นรังสีคอสมิกของ Wibberenz และคณะ [10] ซึ่งพิจารณาการลดลงของ ความหนาแน่นรังสีคอสมิกพลังงานสูง U และมี Compton-Getting Factor, $C=1$ ในหนึ่งมิติ ดังแสดงใน รูปที่ 4a โดยเสนอว่าบริเวณ Upstream หรือหน้าคลื่นกระแทกตำแหน่ง r_0 ลมสุริยะมีอัตราเร็ว V_s และมีสัมประสิทธิ์การฟุ้งตามแนวรัศมีจากดวงอาทิตย์เป็น $K = K_{\parallel} \cos^2 \phi + K_{\perp} \sin^2 \phi$ โดยที่ $K_{\parallel}$ และ $K_{\perp}$ คือ สัมประสิทธิ์การฟุ้งตามแนวขนานกับสนามแม่เหล็ก และสัมประสิทธิ์การฟุ้งในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก ตามลำดับ, ϕ คือมุมระหว่างสนามแม่เหล็กกับแนวรัศมีจากดวงอาทิตย์, และกำหนดให้ L คือความกว้างของอวกาศส่วนที่มีสนามแม่เหล็กปั่นป่วนหรือ Turbulent Sheath ซึ่งภายในที่เป็นบริเวณ Downstream มีสัมประสิทธิ์การฟุ้ง K' เมื่อพิจารณาการประมาณแบบ Standard Force Free สำหรับอนุภาคพลังงานสูงด้วยการหา

ปริพันธ์ของ $dU/dt = UCV/K$ จากตำแหน่งคลื่นกระแทก (r_0) ย้อนตามทิศทาง r เข้าหาดวงอาทิตย์ไม่เกินระยะ $r_0 - L$ (ดูรูปที่ 4b) ซึ่งจะได้ความหนาแน่นของรังสีคอสมิกตามรัศมีว่า

$$U(r) = U_0 \left[1 - \left(\frac{CV'}{K'} \right) (r_0 - r) \right] \quad (1)$$

โดยที่ V' คืออัตราเร็วลมสุริยะภายใน Downstream และสำหรับการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของรังสีคอสมิกอันเนื่องมาจากการพุ่งและการพา คือ

$$\begin{aligned} \Delta U(r) &= U(r) - U_0 \\ &= -\frac{U_0 CV'}{K'} (r_0 - r) \end{aligned} \quad (2)$$

เมื่อรวมกับอัตราการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของรังสีคอสมิกภายในอวกาศรอบนอกอันเนื่องมาจากการผันแปรตามรัศมีระหว่างสภาพที่ไม่ถูกรบกวนและสภาพที่ถูกรบกวน $\Delta U = U_0 G_r (r_0 - r)$ เมื่อ $G_r = CV/K$ หรือ Radial Gradient ตามรูปที่ 4b จะได้

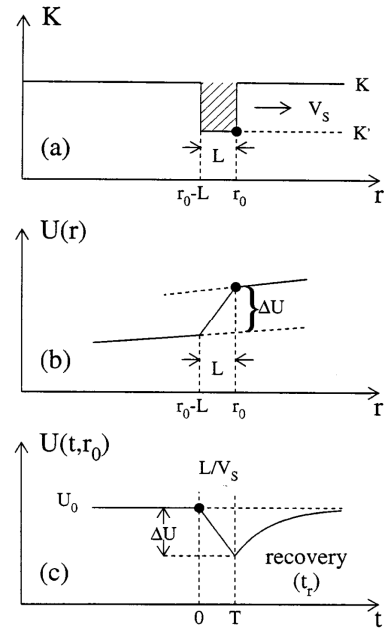
$$\frac{\Delta U}{U_0} = -G_r (r_0 - r) \left[\frac{V'}{V} \frac{K}{K'} - 1 \right] \quad (3)$$

ในกรณีที่สัมประสิทธิ์การพุ่งเชิงตั้งฉากกับเส้นสนามแม่เหล็กลดความสำคัญ ซึ่งอาจเขียนได้ว่า

$$\frac{\Delta U}{U_0} = -G_r (r_0 - r) \left[\frac{V'}{V} \frac{B'^2}{B^2} \frac{K_{\parallel}}{K'_{\parallel}} - 1 \right] \quad (4)$$

ซึ่งสมการนี้แสดงว่าระดับการลดลงของสัญญาณรังสีคอสมิกเกิดขึ้นจากความแตกต่างของความเข้มสนามแม่เหล็ก อัตราเร็วลมสุริยะ (การพา) และการพุ่งเชิงขนานกับเส้นรัศมี ตลอดจนปัจจัยภายนอกอย่าง Radial Gradient โดยระดับการลดลงสูงสุดถูกควบคุมตามความกว้างของพื้นที่ Downstream ดังรูปที่ 4c

อย่างไรก็ดีแบบจำลองนี้ให้สัมประสิทธิ์การพุ่งลงที่ภายในบริเวณ Downstream ซึ่งเป็นเพียงเงื่อนไขเพื่อการคำนวณอย่างง่ายเท่านั้น ในสถานการณ์จริงโดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณที่ใกล้หน้าคลื่นกระแทกซึ่งทิศทางของสนามแม่เหล็กขนานกับหน้าคลื่นกระแทกมากยิ่งขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การพุ่งไม่ได้เป็นค่าคงที่ภายใน Turbulence Sheath แต่อาจแปรผันตามระยะห่างจากดวงอาทิตย์ภายในบริเวณดังกล่าว [15]



รูปที่ 4 จาก Wibberenz และคณะ [10] (a) แสดงแบบจำลองสำหรับ Shock ที่เกี่ยวข้องกับการลดลงแบบพอร์นุชระยะที่ 1 ณ ตำแหน่ง 1 AU จากดวงอาทิตย์ (b) แสดงความหนาแน่นของรังสีคอสมิกที่ระยะ r และ (c) แสดงการผันแปรความหนาแน่นของรังสีคอสมิกในช่วงเวลาที่เกิด Shock และหลังจากสัญญาณลดลงสู่จุดต่ำสุดและเข้าสู่ระยะฟื้น (Recovery Stage)

แบบจำลองของ Wibberenz และคณะ [10] ที่แสดงเป็นตัวอย่าง ใช้อธิบายได้เพียงการลดลงจนถึงจุดต่ำสุดของสัญญาณอันเนื่องมาจาก Shock Effect เท่านั้น แต่ไม่ได้อธิบายการฟื้นคืนของสัญญาณหลังจากจุดต่ำสุด ยังมีแบบจำลองของ Le Roux และ Potgieter [14] ที่นอกจากจะอธิบายการลดลงของสัญญาณแล้ว ยังอธิบายการฟื้นของสัญญาณด้วยการผันแปรตามระยะทางจากดวงอาทิตย์ของสัมประสิทธิ์การพุ่งหลัง Downstream ได้อีกด้วย

ช่วงต้นศตวรรษที่ผ่านมา ปัจจัยอย่าง Rigidity ของอนุภาค GCRs ได้รับการพิจารณาว่าอาจเกี่ยวข้องกับการลดลงแบบพอร์นุช [เช่น 5,16-18] Alania และ Wawrznczak [18] เสนอแบบจำลองการลดลงแบบพอร์นุชระยะที่ 1 โดยรวมปัจจัยจากสัมประสิทธิ์การพุ่งที่นอกจากแปรผันตามระยะทางจากดวงอาทิตย์แล้วยังขึ้นอยู่กับ Rigidity ซึ่งขึ้นเวลา เข้ากับ การขนส่งแบบการพา โดยลมสุริยะ โดยใช้สมการขนส่งของ Parker [19] จะให้ผลการลดลงของอนุภาครังสีคอสมิกแบบรวดเร็วและการเพิ่มกลับขึ้นมาอย่างช้าๆ

การลดลงแบบพอร์นุชอันเนื่องมาจากกลุ่มพลาสมาหรือ

การลดลงแบบพอร์นุชระยะที่ 2 : นอกเหนือจากการลดลงอันเนื่องมาจากคลื่นกระแทก พลาสมาของ ICME/MC ยังมีส่วนทำให้ความหนาแน่นของ GCRs ลดลงได้อีกระดับ โดยทั่วไป 80 – 90 % ของเหตุการณ์ ICME/MC ในช่วงที่วัดสัญญาณได้น้อยที่สุด คือช่วงที่โลกหรือดาวเทียมตรวจวัดถูกคลื่นเข้าไปภายใน ICME/MC [20] (ดูรูปที่ 2) ในที่นี้จะพิจารณา ICMEs ที่มีโครงสร้างสนามแม่เหล็กคล้ายเกลียวเชือกหรือเมฆแม่เหล็ก (MC) มีงานของ Cane และคณะ [21] พิจารณาการขนส่งอนุภาค ณ บริเวณส่วนใดส่วนหนึ่งของเมฆแม่เหล็ก โดยมองเป็นหน้าตัดในทิศทางทรงกระบอก เมื่อให้ U เป็นความหนาแน่นเชิงจำนวนของ GCR ที่จะพุ่งเข้าไปในเมฆแม่เหล็กตามแนวรัศมี ρ ด้วยสัมประสิทธิ์การพุ่งตั้งฉากกับแนวแกนเมฆแม่เหล็ก $\kappa_{\perp}$ ซึ่งเป็นค่าคงที่ จะได้สมการขนส่งในทิศทางทรงกระบอก

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left[\rho \kappa_{\perp} \frac{\partial U}{\partial \rho} \right] \quad (5)$$

โดยเมื่อกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น $U(r < R, t = 0) = 0$ สำหรับภายในเมฆแม่เหล็ก และเงื่อนไขขอบเขต $U(r \geq R, t) = U_0$ สำหรับนอกเมฆแม่เหล็ก ซึ่งสามารถหาผลเฉลยเป็นอนุกรมของฟังก์ชันและค่าคงที่จากฟังก์ชันเบสเซล และพบว่าการกระจายตัวของอนุภาคจะอยู่บริเวณใกล้ขอบและค่อยๆ เบาบางลงเมื่อเข้าไปใกล้แกนกลางของเมฆแม่เหล็กทรงกระบอก แต่เมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่งอนุภาคจะเติมเข้าไปในแกนกลางจนความหนาแน่นของอนุภาคสม่ำเสมอใกล้เคียงกันตลอดรัศมีของหน้าตัดทรงกระบอก โดยมี Relaxation time หรือเวลาโดยประมาณที่ใช้ในการเติมอนุภาคเข้าไปในเมฆแม่เหล็ก เป็น $t_c = R^2 / (x_1^2 \kappa_{\perp})$ เมื่อ $x_1 = 2.405$ [22]

ตามแบบจำลองนี้ หากให้เมฆแม่เหล็กมีรัศมี $R = 0.1$ AU และสัมประสิทธิ์การพุ่งตั้งฉาก $\kappa_{\perp} = 0.5 \times 10^{21} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ ของลมสุริยะที่ตำแหน่ง 1 AU จากดวงอาทิตย์ในสภาพที่ไม่ถูกรบกวน ก็จะสามารถคำนวณเวลาที่ GCRs ใช้พุ่งเข้าไปในเมฆแม่เหล็กทรงกระบอกได้ประมาณ 0.21 ชั่วโมง และหากเมฆแม่เหล็กเดินทางออกสู่อวกาศรอบนอกด้วยอัตราเร็วประมาณ 900 กิโลเมตรต่อวินาที จะใช้เวลาเดินทางมาถึงโลกด้วยเวลาประมาณ 46 ชั่วโมง เมื่อเมฆแม่เหล็กมีขนาดเล็กกว่านี้ที่ตำแหน่งใกล้ดวง

อาทิตย์และขยายตัวจนมีรัศมี 0.1 AU แล้ว GCRs จะถูกเติมเข้าไปจนเต็มก่อนที่เมฆแม่เหล็กจะเดินทางมาถึงโลกและไม่สามารถตรวจพบการลดลงแบบพอร์นุชระยะที่สองได้ อย่างไรก็ตามจากการสำรวจโดยยานอวกาศที่โคจรตัดผ่านและวัดสนามแม่เหล็กภายในเมฆแม่เหล็ก พบว่าภายในโครงสร้างสนามแม่เหล็กแบบเกลียวเชือกนี้มีความปั่นป่วนของสนามแม่เหล็กน้อยกว่าในสนามแม่เหล็กภายนอก และน้อยกว่าบริเวณ Turbulent Sheath ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การพุ่งภายในเมฆแม่เหล็ก ย่อมมีค่าน้อยกว่าภายในลมสุริยะ และเวลาในการเติมอนุภาคเข้าสู่เมฆแม่เหล็กด้วยการพุ่งย่อมนานขึ้น เมื่อ Vanhoefer [23] วิเคราะห์ข้อมูลเมฆแม่เหล็กจำนวน 8 ครั้ง แล้วคำนวณหาสัมประสิทธิ์การพุ่งเชิงตั้งฉาก พบว่าได้ค่าเฉลี่ย $6 \times 10^{18} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ ซึ่งน้อยกว่าปริมาณเดียวกันในลมสุริยะถึง 1000 เท่า และใช้เวลาในการเติม GCRs เข้าไปประมาณ 17 ชั่วโมง

อย่างไรก็ตาม กลไกการพุ่งแบบตั้งฉากมิใช่ปัจจัยเดียวที่ทำให้เกิดการลดลงของ GCRs เมื่อ Bothmer และคณะ [24] รายงานจากข้อมูลของยานอวกาศยูลิสซิส (Ulysses) พบการลดลงแบบพอร์นุช 8 – 12% ที่ระยะทางจากดวงอาทิตย์ 3.5 ถึง 4.6 AU อันเนื่องมาจากการขยายตัวของเมฆแม่เหล็กซึ่งมากกว่าการลดลงด้วยการพุ่งแบบตั้งฉาก [10] ดังนั้นจึงควรมีกลไกทางกายภาพอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการลดลงแบบพอร์นุชระยะที่ 2 เช่น การเติมอนุภาคเข้าสู่ภายในเมฆแม่เหล็กโดยกลไก Finite Larmor Radius Gyration ของ Kubo และ Shimazu [25], ในงาน Krittinahatam และ Ruffolo [26] เสนอการลอยเลื่อนอันเนื่องมาจากความโค้งและความไม่สม่ำเสมอของสนามแม่เหล็ก (Curvature-Gradient Drift) ภายในแบบจำลองสนามแม่เหล็กแบบเกลียวเชือกในระบบพิกัด Quasi-Toroidal เมื่อคำนวณความเร็วลอยเลื่อน (Drift Velocity) อันเนื่องมาจากความโค้งและความไม่สม่ำเสมอของสนามแม่เหล็กที่บริเวณผิวของสนามแม่เหล็กแบบเกลียวเชือกของเมฆแม่เหล็ก พบว่าการลอยเลื่อนแบบไหลเข้า (Inflow) ของอนุภาคโปรตอนพลังงานจลน์ 1 GeV (ใช้เป็นตัวแทนของ GCR) มีอัตราการเติมเฉลี่ย $900 \text{ AU}^2 \text{ km s}^{-1}$ สู่เมฆแม่เหล็กที่มีปริมาตรประมาณ 0.05 AU^3 โดยใช้เวลา 2.3 ชั่วโมงในการเติมอนุภาค GCR เข้าไป ซึ่งแม้ว่าการลอยเลื่อนแบบไหลเข้าและไหลออกจากเมฆแม่เหล็ก จะอธิบายความไม่สมมาตรของทิศทางเคลื่อนที่ของ GCR ในช่วงที่เกิดการลดลงแบบพอร์นุชได้ก็ตาม แต่เวลาเพียง 2.3 ชั่วโมง

ยังคงไม่เพียงพอที่จะใช้อธิบายการตรวจพบการลดลงแบบพอร์บัสระยะที่ 2 ได้ อีกทั้งผลการจำลองยังบ่งชี้ว่าอนุภาคไม่สามารถเดินทางเข้าสู่ภายในใจกลางเมฆแม่เหล็กได้ เพียงแต่ถูกกำหนดเส้นทางเคลื่อนที่อยู่แต่ภายในบริเวณขอบนอกของเมฆแม่เหล็กเท่านั้น

ต่อมา Krittinatham และคณะ [27] รวมผลของการการพุ่งเชิงตั้งฉากกับเส้นสนามของอนุภาคอันเนื่องมาจากความปั่นป่วนของเส้นสนามแม่เหล็กภายในซึ่งขึ้นกับตำแหน่งภายในเมฆแม่เหล็ก เข้ากับผลจำลองการลอยเลื่อนของอนุภาค พบว่าแม้ว่าการพุ่งจะช่วยให้ GCR เดินทางเข้าสู่บริเวณใจกลางของเมฆแม่เหล็ก แต่ก็ยังไม่สามารถกักอนุภาค GCR ไว้ได้เป็นระยะเวลานานพอที่จะตรวจพบการลดลงแบบพอร์บัสระยะที่ 2 เนื่องจากอนุภาค GCR สามารถหนีออกไปได้ด้วยการพุ่งสู่เขตที่มีการลอยเลื่อนแบบไหลออก เพื่ออธิบายผลให้สอดคล้องกับความจริงยิ่งขึ้น กลไกทางกายภาพอื่นๆ อาทิ การขยายตัวของเมฆแม่เหล็ก ซึ่งทำให้เกิดการผ่อนคลายความเข้มของสนามแม่เหล็ก ตลอดจนการลดความเร็วของอนุภาคระหว่างการขยายตัวดังกล่าว ควรจะได้รับการพัฒนาแนวคิดและทดสอบด้วยการวิธีการเชิงวิเคราะห์หรือเชิงคำนวณต่อไป

การพัฒนาแบบจำลองกลไกทางกายภาพที่ควบคุมการลดลงแบบพอร์บัสระยะที่หนึ่งและระยะที่สอง ยังคงได้รับการพัฒนาและปรับปรุงแบบจำลองให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น เพื่อนำไปสู่ความเข้าใจโครงสร้างของพายุสุริยะชนิดที่ปลดปล่อยกลุ่มอนุภาคลำพลังงานสูงและสนามแม่เหล็กความเข้มสูงออกสู่อวกาศระหว่างดาวเคราะห์ (ICMEs) หรือ การปลดปล่อยกลุ่มมวลโคโรนาสู่อวกาศระหว่างดาวฤกษ์ ซึ่งรบกวนสภาพอวกาศภายในระบบสุริยะเป็นวงกว้างโดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณอวกาศใกล้โลก ชั้นบรรยากาศโลกและแม่เหล็กทั้งบนผิวโลก ขณะที่ผลประโยชน์ในอวกาศ อาทิ ดาวเทียมสื่อสาร ดาวเทียมสำรวจภูมิอากาศ-ภูมิประเทศ เครื่องมือหรืออวกาศยานเพื่อการค้นคว้าทางวิทยาศาสตร์ ฯลฯ ตลอดจนผลประโยชน์บนโลก อาทิ ระบบสายส่งกระแสไฟฟ้า ระบบขนส่งทางท่อ อวกาศยาน การสื่อสาร ฯลฯ ล้วนเกี่ยวข้องกับผลประโยชน์ทางเศรษฐกิจ ชีวิตความเป็นอยู่ของมนุษย์ทั้งในอดีต ปัจจุบันและในอนาคตอันใกล้ ฉะนั้นการทำความเข้าใจพายุสุริยะและปรากฏการณ์อันส่งผลกระทบต่อสภาพพลาสมาและสนามแม่เหล็กในอวกาศ สนามแม่เหล็กโลก ชั้นบรรยากาศโลก ตลอดจนปรากฏการณ์เชิงธรณีฟิสิกส์ นอกจากจะ

ถมช่องว่างแห่งความไม่เข้าใจของมนุษย์ต่อธรรมชาติแล้ว ยังเป็นประโยชน์ต่อการปกป้องผลประโยชน์ของมนุษยชาติอีกด้วย

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ อาจารย์ ชาญกิจ คันฉ่อง ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ สำหรับคำแนะนำเพื่อปรับปรุงแก้ไขบทความนี้เพื่อให้ถ่ายทอดสาระสู่ผู้อ่านได้ดียิ่งขึ้น

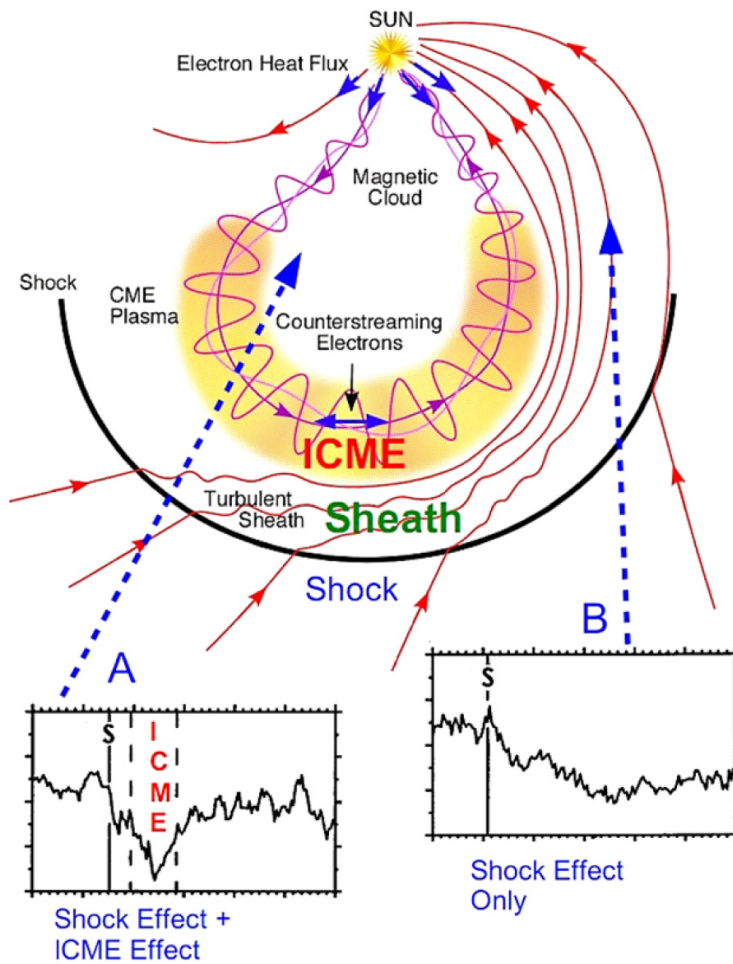
หมายเหตุ

- ลมสุริยะ (Solar Wind) คือ กระแสอนุภาคโปรตอน อิเล็กตรอน และนิวเคลียสธาตุหนักอื่นๆ หรือพลาสมาที่เดินทางออกมาจากชั้นบรรยากาศโคโรนา (corona) ของดวงอาทิตย์ ทุกทิศทุกทางตลอดเวลา มีอัตราเร็วเฉลี่ย 400 km s^{-1} สำหรับ slow solar wind และ 800 km s^{-1} สำหรับ fast solar wind
- พายุสุริยะ (Solar Storm) คือ การปะทุหรือระเบิดที่ผิวดวงอาทิตย์อันเนื่องมาจากกิจกรรมเชิงแม่เหล็กในบริเวณและมณฑลโดยรอบจุดมืด (Sunspot) พายุสุริยะจะเร่งอนุภาคในบริเวณดังกล่าวให้มีพลังงานสูงกว่าพลังงานของอนุภาคในลมสุริยะ รวมทั้งปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพลังงานสูง อนึ่งพายุสุริยะเป็นปรากฏการณ์แบบชั่วคราว มิได้เกิดขึ้นตลอดเวลาเช่นเดียวกับลมสุริยะ โดยความถี่ของการเกิดพายุสุริยะเป็นไปตามคาบเฉลี่ย 11 ปี ที่เรียกว่าวัฏจักรสุริยะ (Solar Cycle)
- รายละเอียดเพิ่มเติมสามารถติดตามที่ ชาญเรืองฤทธิ์ จันทร์นอก วารสารฟิสิกส์ไทย ปีที่ 25 ฉบับที่ 4 (ธ.ค. 2551 – ก.พ. 2552)

เอกสารอ้างอิง

- Richardson, I.G., & Cane, H.V., Solar Phys. **264**, 189, 2010.
- Zurbuchen, T.H., and Richardson, I.G., Space Sci. Rev. **123**, 31, 2006.
- Klein, L.W., and Burlaga, L.F., J. Geophys. Res. **87**, 613, 1982.
- Burlaga, L.F., Interplanetary Magnetohydrodynamics. Oxford University Press, New York, 1995.

5. Cane H.V., Space Sci. Rev. **93**, 55, 2000.
 6. Lockwood, J.A., Webber, W.R., and Jokipii, J.R., J. Geophys. Res. **91**, 2851, 1986.
 7. Forbush, S.E., Phys. Rev. **51**, 1108, 1937.
 8. Barnden L.R., Proc. 13th Internat. Cosmic Ray Conf., 2, 1277, Denver, Colorado, 1973.
 9. Cane H.V., J. Geophys. Res. **98**, 3509, 1993.
 10. Wibberenz, G., le Roux, J.A., Potgieter, M.S., and Bieber, J.W., Space Science Rev. **83**, 309, 1998.
 11. Nishida, A., J. Geophys. Res. **87(A8)**, 6003, 1982.
 12. Perko, J.S., J. Geophys. Res. **92**, 8502, 1987.
 13. Kadokura, A., and Nishida, A., J. Geophys. Res. **91(A1)**, 13–29, 1986.
 14. Le Roux J.A., and Potgieter, M.S., Astron. Astrophys. **243**, 531, 1991.
 15. Cane, H.V., Richardson, I.G., and von Rosenvinge, T.T., J. Geophys. Res. **101**, 21, 561, 1996.
 16. Ahluwalia, H.S., and Fikani, M.M., J. Geophys. Res. **112**, A08105, 2007.
 17. Wawrzynczak, A and Alania, M.V., Adv. In Space Res. **41**, 325, 2008.
 18. Alania, M.V, and Wawrznczak, A., Astrophys. Space Sci. Trans. **4**, 59, 2008.
 19. Parker, E.N., Planetary and Space Science **13(1)**, 9, 1965.
 20. Richardson, I.G., and Cane, H.V., Solar Phys. **270(2)**, 609, 2011.
 21. Cane, H.V., Richardson, I.G., Wibberenz, G., Proc. 24th Int. Cosmic Ray Conf. 4, 377, 1995.
 22. Pinsky, M.A., Partial Differential Equations and Boundary-Value Problems with Applications 2nd ed., McGraw-Hill Inc., 1991.
 23. Vanhoefer, O., Auswirkungen interplanetarer Plasmawolken auf die kosmische Strahlung, Master's thesis, University of Kiel, 1996.
 24. Bothmer, V. et al., Proc. 25th Int. Cosmic Ray Conf. 1,333, 1997.
 25. Kubo, Y., and Shimazu, H., Astrophys. J. **720**, 853.
 26. Krittinatham, W., and Ruffolo, D., Astrophys. J. **704**, 831, 2009
 27. Krittinatham, W., Ruffolo, D., and Bieber, J.W., Spatially dependent turbulence and particle diffusion in an interplanetary magnetic flux rope, American Geophysical Union, Fall Meeting 2010, 2010.
-
- สรุปข่าว** (ต่อจากหน้า 3)
- จากฟิสิกส์ดั้งเดิมนั้น นักวิจัยสามารถอธิบายถึงพฤติกรรมของอนุภาคทางฟิสิกส์ที่มีปริมาณแน่นอนได้ แต่สำหรับอนุภาคที่เล็กระดับอะตอมหรือโมเลกุล ซึ่งมักถูกพิจารณาในรูปแบบของคลื่นนั้น ไม่มีทางเป็นไปได้ที่จะระบุตำแหน่งและความเร็วที่แน่นอนพร้อมๆ กันได้ (ทฤษฎีหลักความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์ก) จากพื้นฐานของทฤษฎีนี้ ศาสตราจารย์ Rabani และเพื่อนร่วมทีมสามารถนำมาใช้อธิบายถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับแก้ว
- ศาสตราจารย์ กล่าวเพิ่มเติมว่า ความแตกต่างของวัสดุหลายๆ แบบบนโลกนี้ อย่างซิลิกาที่ใช้ผลิตหน้าต่าง มันสามารถกลายเป็นแก้วได้เมื่อถูกทำให้เย็นลงเร็วพอ และแก้วอาจหลอมเย็นกลายเป็นของเหลวได้ เมื่ออยู่ภายใต้เงื่อนไขที่พิเศษ สิ่งที่เกิดขึ้นทั้งหมดนี้ขึ้นอยู่กับลำดับการจัดเรียงตัวของโมเลกุลในวัสดุ ในช่วงขณะของการเย็นตัว วัสดุอาจกลายเป็นแก้ว และหลังจากนั้นอาจกลายเป็นของเหลว หากมีเงื่อนไขที่ถูกต้องเหมาะสม
- ทีมนักวิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า ในอนาคตจะมีห้องปฏิบัติการที่สามารถพิสูจน์สิ่งที่พวกเขาทำนายไว้ได้ ซึ่งจะเป็นการแก้โจทย์ปัญหาที่ยิ่งใหญ่ ตามที่ Philip W. Anderson นักวิทยาศาสตร์รางวัลโนเบลได้เขียนได้ว่า “Understanding of classical glasses was one of the biggest unsolved problems in condensed matter physics”
- ที่มา**
- [1] <http://www.sciencedaily.com/releases/2011/02/110202102748.htm>



การลดลงแบบพอร์บู่:
ผลกระทบของพายุสุริยะ
ชนิดปลดปล่อยกลุ่มพลาสมา
ต่อรังสีคอสมิกกาแลกซี
(ดูรายละเอียดภายในเล่ม)



สมาคมฟิสิกส์ไทย

อาคารสิรินธรวิทย์โชทัย

111 ถนนมหาวิทยาลัย

ต. สุรนารี อ. เมือง

จ. นครราชสีมา 30000

ตู้ ปณ. 93 ปณจ. นครราชสีมา 30000

THAI PHYSICS SOCIETY

Sirindhornwitchothai Bldg.

111 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