

Ion Source-1

Ion Source-2

12 มีนาคม 2550 : 08.48 น.

31 พฤษภาคม 2550 : 10.37 น.

FIB
ตัวนำโซเบอร์
เครื่องเติมพลังงานแบบไร้สาย

เทคนิค PIXE กับปัญหาหมอกควันที่เชียงใหม่

การประกาศผลการตัดสินรางวัลชนะเลิศการประกวด
โครงการปริญาตรีฟิสิกส์ ครั้งที่ 1

Thai Journal of Physics

วารสาร

วารสารสำหรับผู้ที่ยรักและสนใจในแวดวงฟิสิกส์

ISSN 0857-1449

ปีที่ 24 ฉบับที่ 3 : กันยายน - พฤศจิกายน 2550

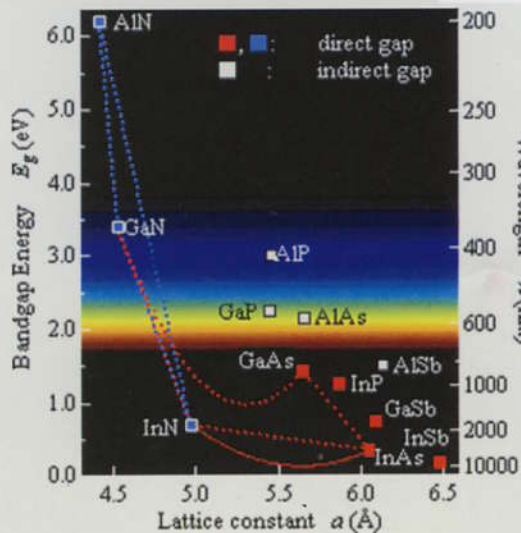
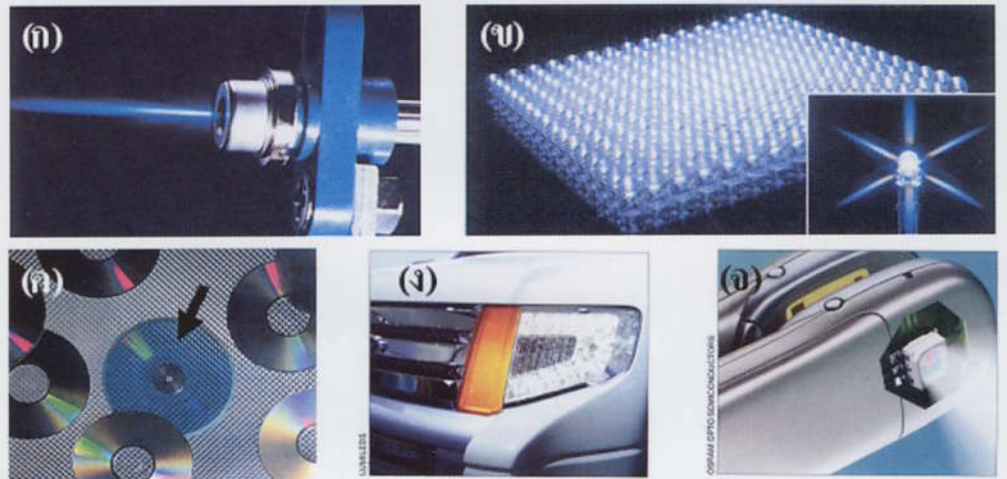
ฟิสิกส์ไทย



บูดาเปสต์ (Budapest)

อ่านรายละเอียดที่ หน้า 29

รูปที่ 1
ดูคำบรรยายที่หน้า 22



รูปที่ 3
กราฟแสดงความสัมพันธ์ของช่องว่าง
ระหว่างแถบพลังงาน (energy gap)
กับค่าคงที่โครงผลึก (lattice constant) (4)

รูปประกอบบทความหน้า 21

สารบัญ

สวัสดิ์

- 3 : สวัสดิ์
- 4 : สรุปข่าว
- 8 : ประกาศผลการตัดสินประกวดโครงงานค้นคว้าอิสระระดับปริญญาตรีฟิสิกส์ ครั้งที่ 1
- 10 : เรื่องเด่นประจำฉบับ : เทคนิค PIXE กับปัญหาหมอกควันที่เชียงใหม่
- 15 : ขอแนะนำ : FIB - ศูนย์เครือข่ายความเป็นเลิศด้านวัสดุนาโนเฉพาะทาง
- 17 : ฟิสิกส์ของวัสดุ : ตัวนำยิ่งยวด (2)
- 21 : ฟิสิกส์ของวัสดุ : สารกึ่งตัวนำ-ตัวนำไอเซเบอร์
- 26 : กางตำราฟิสิกส์ : เหล็กแม่เหล็กเมื่อดึงมาวิชาแม่เหล็กไฟฟ้า (3)
- 29 : ประสบการณ์ฟิสิกส์ : บุญเพสค์



กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ให้การสนับสนุน
ในการจัดพิมพ์วารสารฉบับนี้

รูปที่ปกหลังเป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นแล้วจริงๆ นะครับ ไม่ใช่แค่ทำขึ้นขำๆ สามารถดูภาพเคลื่อนไหวได้ที่ http://www.nepalnews.com/nepalnewsvideo/dec_12_06_student_strike_physics.wmv เป็นการประท้วงของหนุ่มสาวชาวเนปาล เมื่อตอนต้นปีที่หน้ากระทรวงศึกษาธิการ เพื่อกดดันให้รัฐบาลเนปาลเปิดสอนวิชาฟิสิกส์ให้มากขึ้น มีคนอยากเรียนมาก แต่มีห้องเรียนไม่พอ คงเป็นครั้งแรกในโลกที่มีการประท้วงแบบนี้ ถ้าเป็นประเทศไทยคงจะประท้วงในแบบตรงกันข้าม ปัจจุบันนี้ ถ้าไม่มีโครงการพสวท. โครงการคปก. หรือโครงการพิเศษของบางมหาวิทยาลัย สถานการณ์การเรียน-การสอนฟิสิกส์ในบ้านเรากงจะมีคดมนยิ่งไปกว่านี้ ปีหนึ่งๆ มีจำนวนนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาหลักสูตรฟิสิกส์รวมกันทุกมหาวิทยาลัยยังไม่ถึง 100 คนด้วยซ้ำ ถ้าไม่แน่ใจว่าตัวเลขนี้น้อยหรือมาก ก็ลองเปรียบเทียบกับประเทศที่เล็กกว่าไทย 14 เท่า มีประชากรน้อยกว่า 3 เท่า อย่างไต้หวันดูก็ได้รับ ในปี ค.ศ. 2004 ของเขามีนักศึกษาปริญญาโทและเอกฟิสิกส์จำนวน 1,437 คน และ 619 คน ตามลำดับ

(ต่อที่หน้า 4)

พบกันใหม่ฉบับหน้า : ธันวาคม 2550

กองบรรณาธิการ ชาญกิจ กันถ่อง, พรรณัน วัฒนกุลวิชัย, ชงยุทธ เหล่าศิริถาวร, รัตติกร ยี่มนิรัฐ, ศิรามาศ โกมลจินดา, สมชาย เกียรติกรมลชัย, สุภาพ ชูพันธ์ หัวหน้ากองบรรณาธิการ สมสร สิงขรัตน์ ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ กลชาญ อนันตสมบุญ, มานิต รุจิโรดม ฝ่ายภาพและออกแบบปก มิณทร์ เมธิ์สุกุล, ราเชนทร์ เจริญบุญกุล เลขานุการกองบรรณาธิการ กฤติยา โอสาดพันธ์ พิมพ์ที่ หน่วยพิมพ์เอกสาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จำนวน 2,000 เล่ม

ติดต่อกองบรรณาธิการ วารสารฟิสิกส์ไทย สมาคมฟิสิกส์ไทย ตู้ปณ.217 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50202 โทรศัพท์ : 053-942464, 943379 โทรสาร: 053-222776 วารสารฟิสิกส์ไทย เป็นวารสารราย 3 เดือน มีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่สาระ-ข่าวสาร และเป็นสื่อสัมพันธ์ในมวลหมู่สมาชิกและผู้สนใจในแวดวงฟิสิกส์ ส่งเสริมให้เกิดการแลกเปลี่ยนข้อมูลและประสบการณ์เกี่ยวกับฟิสิกส์ในวงกว้าง ที่สร้างสรรค์ โดยความคิดเห็นและทัศนะที่ปรากฏอยู่ในบทความต่างๆ เป็นเฉพาะของผู้เขียนแต่ละท่าน สมาคมฟิสิกส์ไทยไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

Website = <http://thps.org> ผู้ดูแล: จตุพร สายสุด ติดต่อ : info@thps.org

คณะกรรมการสมาคมฟิสิกส์ไทย ประจำปีระปี 2550-2552 ที่ปรึกษา ดร.วิโรจน์ ดันตราภรณ์, รศ.ดร.วิจิตร เส็งหะพันธ์, ศ.ดร.วิรุฬห์ สายคณิต, ศ.ดร.สุทัศน์ ยกส้าน, ผศ.ดร.วาทิพันธ์ ปรัชญพฤตย์, ศ.ดร.ทวี ดันตศิริ นายกสมาคมฯ ศ.เกียรติคุณ ดร. อธิพัฒน์ วิสัยทอง อุปนายก รศ.ดร.พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ เลขานุการ ดร.คุณฤๅ สุวรรณขจร รองเลขานุการ ผศ.ดร.รัฐชาติ มงคลนาวิน เจริญฤๅ ผศ.กานดา สิงขรัตน์ นายทะเบียน ผศ.ดร.ธีรวรรณ บุญญวรรณ ประชาสัมพันธ์ ดร.บัญชา ชนบุญสมบัติ บรรณาธิการวารสารฟิสิกส์ไทย รศ.ดร.สมสร สิงขรัตน์ ปฎิคม ผศ.รังนา ชินพิทักษ์ กรรมการ ประธานสาขาฟิสิกส์ สมาคมวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทยฯ (ผศ.ศิลปชัย บุรณพานิช), รศ.ดร.ชัยวิทย์ ศิลาวัณานาย, รศ.ดร.วิระพงษ์ แพสุวรรณ, รศ.ดร.พิบูล วัฒนวิชาติ, ผศ.ดร.ขจรชัย อยู่ดี, ผศ.ดร.วิทยา อมรกิจบำรุง, ผศ.ดร.ประยูร ส่งศิริฤๅกุล, คุณสุธี เพชรราชู, ศ.ดร.ชูกิจ ลิ้มปิงานัง, รศ.ดร.ณสรณ์ ผลโก, ผศ.ดร.สันติ แม้นศิริ, ผศ.ดร.ชนากร โอสาดพันธ์, ผศ.นิรันดร์ วิทิตอนันต์, ผศ.ศิวพร สหวัฒน์, ดร.พรเทพ นิสามณิพันธ์, คุณอัจฉรา เจริญสุข

สรุปข่าว

อัสดี (ต่อจากหน้า 3)

(มีจำนวนนักศึกษาปริญญาตรีฟิลิกส์ รวม 5,215 คน)

เห็นข่าวปิดโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ โรงงานอุตสาหกรรมผลิตรองเท้า เมื่อเดือนกรกฎาคมแล้วก็เศร้าใจ พี่น้องผู้ใช้แรงงานหลายพันคนต้องตกงาน แต่ก็จำเป็นต้องปลงว่า ผู้ผลิตแบบ OEM (Original Equipment Manufacturer) ก็คงต้องเป็นเช่นนี้เอง คู่ค้าเจ้าของแบรนด์ช้อตเตอร์เคอร์ลงได้เสมอ แต่ผู้ประกอบการก็ไม่สามารถปรับตัว เพราะไม่ได้สร้างภูมิคุ้มกันทางภูมิปัญญาของการคิดค้นทำวิจัยและพัฒนาเพื่อสร้างสรรค้นนวัตกรรมด้านผลิตภัณฑ์ของตัวเอง **ภูมิปัญญาทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของแต่ละอุตสาหกรรม วิ่งตามซื้อหากันอยู่ร่ำไปไม่ได้หรอกครับ ต้องพยายามพัฒนาขึ้นเองด้วย** แต่ประเทศไทยผลิตนักฟิลิกส์ได้น้อยเหลือเกิน แล้วอุตสาหกรรมของเรา (ยังอยู่ในระดับ **factor-driven**) จะขยับขึ้นไปเทียบชั้นได้หวัน (ระดับ **innovation-driven**) ได้อย่างไร (ของมาเลเซียยังสูงกว่าเราก็คือขึ้นไปอยู่ในระดับ **efficiency-driven** แล้ว)



การอบรมครูออนไลน์

ปัญหาการขาดแคลนครูคณิตศาสตร์และวิทยาศาสตร์นั้นไม่ได้มีเฉพาะในบ้านเราเท่านั้น ที่ประเทศอังกฤษก็เป็นเหมือนกัน จึงได้เริ่มมีการอบรมครูผ่านทางอินเทอร์เน็ตเป็นครั้งแรกขึ้นเมื่อเดือนเมษายนที่ผ่านมา เพื่อที่จะแก้ปัญหานี้โดยเฉพาะ โดยโปรแกรมการอบรมครูออนไลน์นี้มีชื่อว่า **iTeach** ใช้เวลาในการอบรม 18 เดือน มีมหาวิทยาลัย Canterbury Christ Church University ในประเทศอังกฤษและวิทยาลัย Hibernia ในประเทศไอร์แลนด์ ร่วมกันรับผิดชอบการสอน ซึ่งโปรแกรมนี้อาจรับสมัครผู้ที่สนใจจากหลากหลายภูมิหลัง(background) เปิดโอกาสให้เรียนเพื่อปรับเปลี่ยนสถานะให้เป็นครูที่พร้อมสอนทางด้านวิทยาศาสตร์

และคณิตศาสตร์ (Qualified Teacher Status, QTS) โดยไม่ต้องผ่านการอบรมครูอย่างเต็มรูปแบบ

ในประเทศอังกฤษนั้น ผู้ที่ต้องการประกอบอาชีพครูวิทยาศาสตร์สามารถเลือกเรียนต่อเพื่อที่จะรับประกาศนียบัตรวิชาชีพครู หลังจากเรียนจบปริญญาตรีสาขาวิทยาศาสตร์ ณ มหาวิทยาลัยหรือสถาบันระดับอุดมศึกษา หรืออาจจะเลือกเรียนปริญญาตรีที่รวม QTS ไว้ในหลักสูตรด้วย แต่วิธีนี้จะเป็นอุปสรรคต่อคนที่ทำงานแล้ว ซึ่งไม่สามารถปลีกเวลาหรือยังลังเลต่อการเปลี่ยนอาชีพ

ทางออกเดียวสำหรับการเรียนเพื่อให้ได้ใบประกอบวิชาชีพครูก็คือการเรียนหลักสูตรทางไกลที่เปิดสอนโดยมหาวิทยาลัยเปิด แต่ข้อเสียก็คือไม่มีหลักสูตรเฉพาะสำหรับครูวิทยาศาสตร์

โปรแกรม iTeach มีวัตถุประสงค์ที่จะส่งเสริม 3 กลุ่มเป้าหมาย ได้แก่ ผู้ที่ทำงานในโรงเรียนแต่ไม่มี QTS อย่างเช่น ผู้ช่วยสอนปฏิบัติการ (lab technicians) บัณฑิตที่จบปริญญาตรีสาขาวิทยาศาสตร์และต้องการที่จะเป็นครู และครูวิทยาศาสตร์ต่างชาติที่ต้องการสอนในประเทศอังกฤษ โปรแกรม iTeach แตกต่างจากหลักสูตรของ PGCE (Postgraduate Certificate in Education) ที่ต้องเรียนกระบวนวิชาต่าง ๆ ในห้องเรียนเป็นเวลา 1 ปี โดยผู้เรียนสามารถดาวน์โหลดวิดีโอการสอนจากเว็บไซต์ของ iTeach แล้วผู้เรียนสามารถทำแบบฝึกหัดในเวลาว่าง แต่ผู้เรียนต้องเข้าร่วมห้องเรียนออนไลน์สัปดาห์ละครั้ง

อย่างไรก็ตาม Brenda Jennison นักฟิลิกส์ด้านการศึกษามาจากมหาวิทยาลัยเคมบริดจ์กังวลว่าผู้เข้าร่วมโปรแกรม iTeach จะขาดประสบการณ์การสอน เพราะผู้เข้าร่วมในโปรแกรม iTeach มีโอกาสฝึกสอนเพียง 14 อาทิตย์เท่านั้น เทียบกับหลักสูตรของ PGCE ที่มีการฝึกสอนถึง 26 อาทิตย์

นอกจากนี้ยังมีข้อท้วงติงเกี่ยวกับกระบวนการคัดเลือกที่เปิดโอกาสให้ผู้สมัครอาจจะไม่ต้องมีปริญญาตรีทางด้านวิทยาศาสตร์โดยตรง แต่มีปริญญาในสาขาที่ใกล้เคียงประกอบกับประสบการณ์ที่น่าจะเป็นครูได้ Simon Hughes ได้ให้ความมั่นใจว่าถึงแม้โปรแกรมนี้อาจได้รับความนิยมมาก โดยมีผู้สมัครเข้าร่วม 5 คนต่อวัน แต่เขายืนยันเลือกรับเฉพาะคนที่เหมาะสำหรับโปรแกรมนี้นั้น โดย Hughes กล่าวทิ้งท้ายว่า **“เชื่อผมเถอะ ผมรู้ดีว่าการเรียนฟิลิกส์ที่น่าเบื่อเป็นอย่างไร”**

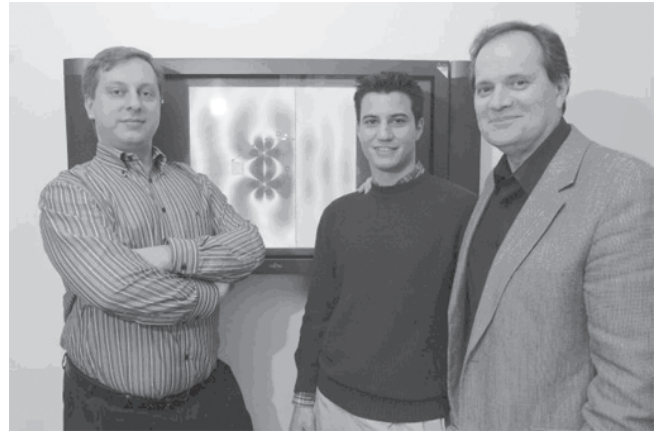
สรุปข่าว

เครื่องเติมพลังงานแบบไร้สาย

ท่านที่เคยดูภาพยนตร์แนวตื่นเต้นระทึกขวัญเรื่อง The Prestige (หรือ “ศึกมายากลหุศโลก” นำแสดงโดย *Huge Jackman* กับ *Christian Bale*) ที่เข้าฉายไปเมื่อประมาณช่วงต้นปีนี้ คงจำกันได้ว่ามีอยู่ฉากหนึ่งที่อยู่ๆ หลอดไฟก็สว่างพรึบขึ้นมาเต็มลานสนามต่อหน้าต่อตา *Huge Jackman* โดยไม่ต้องมีสายไฟใดๆ ครอบก็เป็นภาพยนตร์อีกเรื่องที่เขาเรื่องราวของฟิสิกส์มาเล่น (ล่าสุดที่เพิ่งลาโรงไปเมื่อไม่นานก็คือเรื่อง *Deja Vu*) ช่วงนั้นของเรื่อง The Prestige คัดแปลงมาจากเรื่องจริงของนักฟิสิกส์ประหลาดเชื้อสายเซอร์เบีย (ที่ไปทำมาหากินอยู่ในสหรัฐอเมริกา) ผู้มีนามว่า **Nikolas Tesla** (ค.ศ. 1856 - 1943) ซึ่งก็คือคนต้นคิดส่งไฟฟ้าตามสายแบบกระแสสลับ (ซึ่งเกี่ยวกับความคิดของ *Thomas Alva Edison* แห่งบริษัท GE ที่เสนอว่าควรส่งแบบกระแสตรง แต่ในที่สุดรัฐบาลสหรัฐอเมริกาเวลานั้นตัดสินใจเลือกทำตามแนวทางของเทสลา ดังที่พวกเราใช้กันมาจนถึงปัจจุบันนี้) เทสลาเป็นนักฟิสิกส์หัวล้านน้ำกวางขลุ่ยขลุ่ยมากมาย เพราะเมื่อเกือบร้อยปีมาแล้ว ก็มีความคิดที่จะส่งถ่ายพลังงานแบบไร้สายและเริ่มลงมือทำแล้วจริงๆ ดังที่นำมาขยายความในภาพยนตร์เรื่อง The Prestige ดังกล่าว แต่แล้วโครงการนี้ของเทสลาก็ต้องสะดุดหยุดลง ด้วยเหตุผลบางประการ

จนล่วงมาถึงช่วงต้นของศตวรรษที่ 21 ขณะนี้ก็ได้มีคนเอาความคิดนี้มาปัดฝุ่นใหม่ คนกลุ่มนั้นยอมเป็นใครไปไม่ได้ถ้าไม่ใช่ นักฟิสิกส์ และก็คือกลุ่มนักฟิสิกส์ที่ MIT ดังแสดงในรูปที่ 1

เรื่องนี้คงจะไม่แปลกอะไร ถ้าเป็นการส่งถ่ายพลังงานในระยะประชิด เพราะปัจจุบันก็มีทำใช้กันอยู่แล้วในแปลงสีฟันไฟฟ้าบางยี่ห้อ เมื่อใช้เสร็จก็เพียงปิกกลับลงไปในห้องเสียบแปรง ขดลวดในด้ามจับก็จะเข้าไปอยู่ใกล้ๆ กับขดลวดของฐานเสียบแปลง แล้วก็จะเกิดเหตุการณ์เหมือนกับที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้า (transformer) ทั่วๆ ไป ที่อาศัยประโยชน์จากกฎ Electromagnetic



รูปที่ 1 คณะนักวิจัยของ MIT อันมี (จากซ้ายไปขวา) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ *Marin Soljačić*, นักศึกษาปริญญาเอก *Aristeidis Karalis*, และศาสตราจารย์ *John Joannopoulos* จากผลงานนี้ทำให้ *Soljačić* ซึ่งเป็นคนต้นคิดและก็มีเชื้อสายเซอร์เบียด้วย ได้รับรางวัล *Young Scholar Award* มูลค่า 10,000 เหรียญสหรัฐในปี ค.ศ. 2005 อันที่จริงแล้ว *Soljačić* มีความเชี่ยวชาญทางด้าน *photonic crystals* และ *nonlinear optics* เป็นพิเศษ จนทำให้ได้รับรางวัล *Young Innovator of MIT* ในปี ค.ศ. 2006

Induction ที่ **Michael Faraday** (ค.ศ. 1791 - 1867) ค้นพบเมื่อปี ค.ศ. 1831 กล่าวคือไฟฟ้าทำให้ขดลวดของฐานเสียบสร้างสนามแม่เหล็กสลับไปเหนี่ยวนำให้ขดลวดในด้ามแปรงที่อยู่ใกล้ๆ ผลัดกระแสไฟฟ้าไปชาร์จแบตเตอรี่ที่อยู่ข้างในด้ามแปรงเหมือนกัน

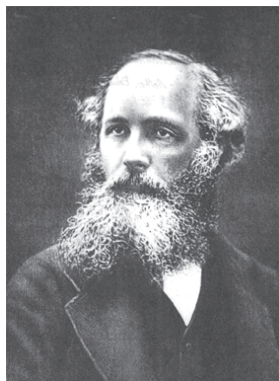
แต่ที่เรื่องนี้น่าสนใจก็เพราะว่าด้วยแนวคิดใหม่ ขดลวดทั้งสอง สามารถอยู่ห่างกันได้หลายเมตร

เป็นที่ทราบกันดีว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีอยู่ 2 แบบคือแบบ “radiative wave” กับ “evanescent wave” แอมพลิจูดของแบบแรกจะแปรผกผันอย่างผกผันกับระยะทางยกกำลังหนึ่ง แต่แบบหลังจะแปรผกผันอย่างผกผันกับระยะทางยกกำลังสอง ดังนั้นแบบหลัง

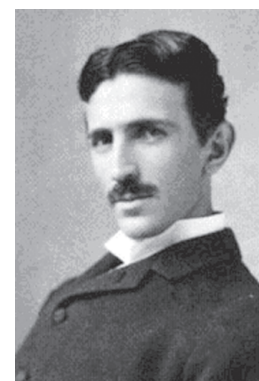
Michael Faraday



James Clerk Maxwell



Nikolas Tesla



สรุปข่าว



รูปที่ 2

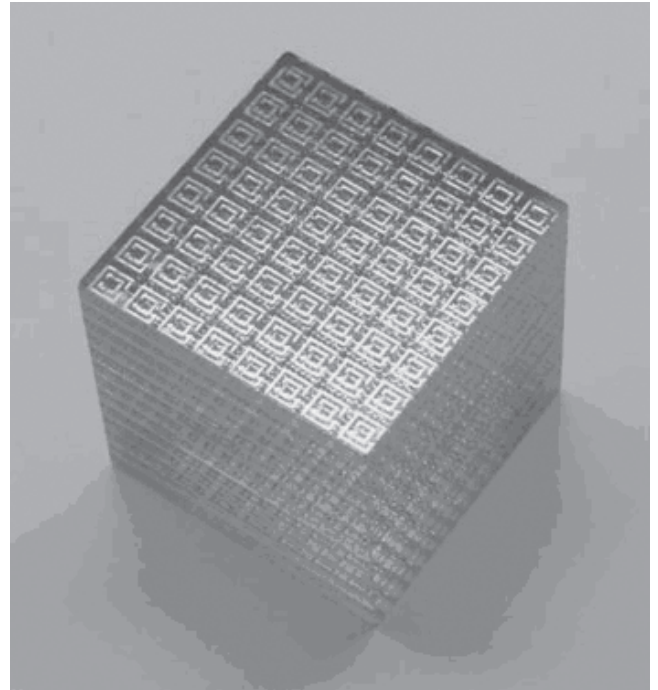
จึงจะหายไปรวดเร็วมากที่ระยะทางห่างจากต้นกำเนิดมากขึ้นๆ (สมกับชื่อ *evanescent* ที่ห้วนๆ ไปแปลว่า “ซึ่งจางหายไป”) เมื่อมาถึงเครื่องรับวิทยุตามบ้านเรือนจึงเหลืออยู่แค่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบแรก แต่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบแรก ก็จะมีประสิทธิภาพต่ำมากในแง่ของการ “ถ่ายทอดพลังงาน” เพราะจะแผ่ออกจากต้นกำเนิดทุกทิศทางโดยรอบ ทีมนักฟิสิกส์ของ MIT พบจากการคำนวณโดยใช้สมการต่างๆ ของ Maxwell (ค.ศ. 1831 - 1879) ว่า ถ้าออกแบบเสาอากาศของเครื่องส่งกับเครื่องรับให้ “เรโซแนนซ์” กันที่ความถี่ 6.4 MHz จะสามารถส่งถ่ายพลังงานระหว่างเครื่องส่งกับเครื่องรับโดยอาศัยเทคนิค “*evanescent coupling*” ได้ภายในรัศมี 3 - 5 เมตร ด้วยประสิทธิภาพระหว่าง 30 - 60% ส่วนวัตถุอื่นๆ ที่อยู่ใกล้ๆ หรือที่ขวางทางอยู่ ซึ่งไม่ได้ “เรโซแนนซ์” ด้วย จะได้รับพลังงานน้อยมากจึงจะไม่เกิดอันตรายใดๆ (ความถี่ของเตาไมโครเวฟที่ใช้กันอยู่ในครัวเรือนคือ 2,450 MHz)

ตามธรรมเนียมมาตรฐานของวงการฟิสิกส์ เมื่อคิดคำนวณได้แล้ว ก็ควรพิสูจน์ให้เห็นจริงได้ด้วยการทดลอง รูปที่ 2 คือผลการทดลองที่คณะผู้วิจัยทำขึ้นที่ MIT คือสามารถจุดหลอดไฟขนาด 60 วัตต์ให้ติดได้ เมื่อขดลวดส่งกับขดลวดรับ (ทำด้วยลวดทองแดง มีเส้นผ่าศูนย์กลางของวงเท่ากับ 60 เซนติเมตร) อยู่ห่างกัน 2 เมตร โดยมีแผ่นกระดาษวางอยู่ตรงกลางด้วย

ดูเหมือนว่าอนาคตแบบที่ว่าพอเดินเข้าบ้านมา เครื่องโทรศัพท์มือถือ คอมพิวเตอร์แล็ปท็อป เครื่องเล่น MP3 ฯลฯ ก็ถูกชาร์จแบตเตอรี่โดยอัตโนมัติโดยไม่ต้องควักออกมาเสียบปลั๊กน่าจะมาถึงเร็วกว่าที่คาด ซึ่งรวมถึงหุ่นยนต์ทำความสะอาดบ้านที่คงไม่ต้องลากสายมาชาร์จแบตเตอรี่อีกต่อไปและคงเป็นไปได้ที่จะเลยไปถึงการเติมพลังงานให้กับหุ่นยนต์นาโน



วัสดุธรรมชาติที่มีค่าดัชนีหักเห “ติดลบ”

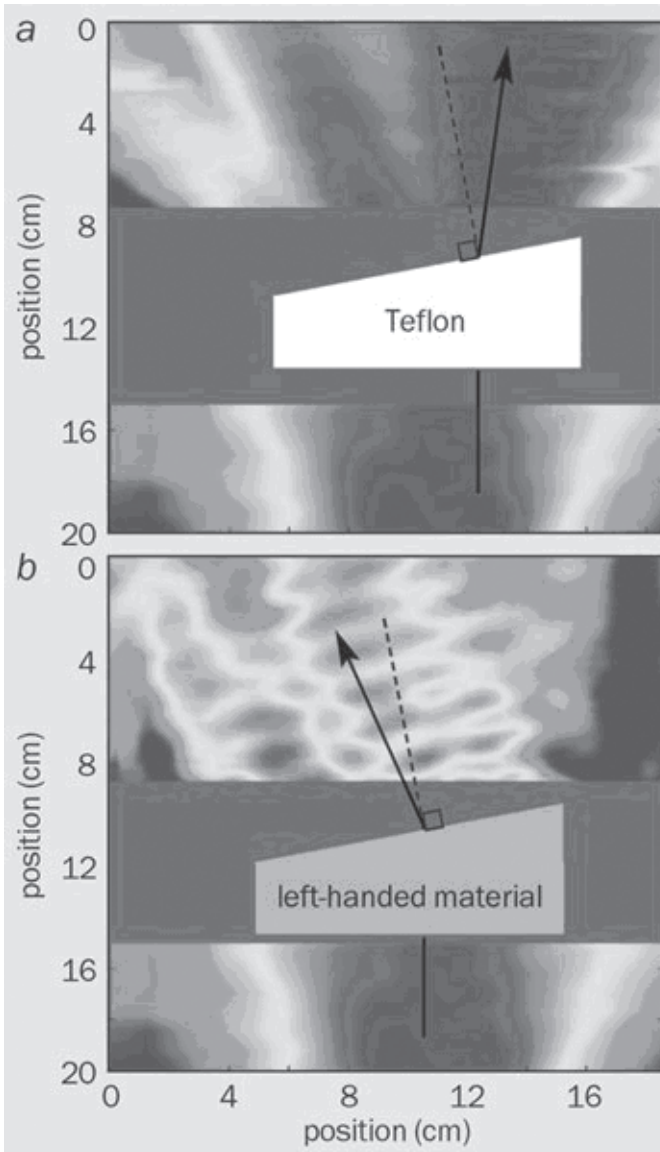


รูปที่ 1 อภิวัตน์ที่ประดิษฐ์ขึ้นมาจากโครงลวดทองแดง เป็นผลงานของนักวิจัยที่บริษัท Boeing

ที่หน้า 5 ของวารสารฟิสิกส์ไทย ฉบับ ธ.ค. 49 - ก.พ. 50 เคยพูดถึงวัสดุที่มีค่าดัชนีหักเห “ติดลบ” ซึ่งเรียกกันว่า “อภิวัตน์ (*metamaterial*)” หรือบางแห่งก็เรียกว่า “*left-handed materials*” ที่ปัจจุบันนักฟิสิกส์สามารถประดิษฐ์ขึ้นมาได้แล้ว ดังแสดงในรูปที่ 1 โครงสร้างลวดทองแดงแบบนี้มีปฏิกิริยาต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีพฤติกรรมตรงกันข้ามกับวัสดุปกติ (*right-handed materials*) ที่มีค่าดัชนีหักเหเป็นค่าบวก

เคยเชื่อกันว่าวัสดุแบบนี้ไม่มีอยู่จริงในธรรมชาติ แต่ตอนนี้อาจต้องเปลี่ยนความเชื่อกันใหม่แล้ว เพราะเมื่อเดือนพฤษภาคมที่ผ่านมาได้มีการเปิดเผยว่า Andrei Pimenov นักฟิสิกส์ของ Universitat Wurzburg และคณะในประเทศเยอรมันนี ได้พบว่าฟิล์มบางของสาร $\text{La}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$ ซึ่งเป็นสารแม่เหล็กประเภทเฟอร์โรกลุ่มโลหะ มีค่าดัชนีหักเห “ติดลบ” สำหรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ $150 \times 10^9 \text{ Hz}$ (150 GHz) หรือต่ำกว่า โดยทำการทดลองวัดที่ค่าแอมพลิจูดและเฟสที่เปลี่ยนไปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทะลุผ่านวัสดุด้วย interferometer ค่าที่วัดได้ถูกนำไปใช้ในการคำนวณหาสภาพ permittivity กับสภาพ permeability ซึ่งสามารถทำให้หาค่าดัชนีหักเหได้ คณะนักวิจัยเยอรมันนีพบว่า

สรุปข่าว



รูปที่ 2 ภาพผลการทดลองของคณะนักวิจัยที่ MIT ในรูปบน แสงถูกส่งจากข้างล่างขึ้นข้างบนผ่านวัสดุปกติ คือ เทฟลอนรูปสี่เหลี่ยมในรูปนี้ จะเห็นได้ว่าแสงที่หลุดออกมาจะหักเหไปทางด้านขวามือของเส้นปกติ (เส้นประ) แต่ในรูปล่างเป็นอภิวัดลุดล้วยรูปที่ 1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าแสงจะหักเหไปทางด้านซ้ายมือของเส้นปกติ

ถ้าความถี่สูงกว่า 150 ทิกะเฮิรตซ์ ค่าดัชนีหักเหจะเปลี่ยนจากที่ติดลบกลับมาเป็นค่าบวก

อันที่จริงเคยมีคนพูดถึงเรื่องนี้มาก่อนแล้วตั้งแต่เมื่อปี ค.ศ. 1967 นั่นคือนักฟิสิกส์ชาวรัสเซียชื่อ **Victor Veselago** เคยกล่าวไว้ว่าวัสดุที่มีค่าดัชนีหักเหติดลบน่าจะมีอยู่ได้ โดยไม่ขัดแย้งกับกฎของฟิสิกส์ใดๆ เพียงแต่จะมีพฤติกรรมทางแสงกลับตรงกันข้ามกับวัสดุปกติที่เราคุ้นเคย Veselago ยังได้เสนอว่าวัสดุแบบนี้จะมีสภาพ **permittivity** กับสภาพ **permeability** เป็นค่าลบพร้อมกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Pimenov และคณะที่พบตามหลังคำทำนาย 40 ปี

Pimenov ให้ความเห็นเพิ่มเติมว่า โดยหลักการแล้วสามารถเพิ่มความถี่ขึ้นไปได้ถึง 1×10^{12} Hz (หรือ 1 terahertz = 1 THz) แต่คงจะไม่สามารถมีค่าดัชนีหักเหติดลบได้ในช่วงแสงที่ตามองเห็น คือ ที่ความถี่สูงกว่า 430 THz (ความยาวคลื่น 780 นาโนเมตร)

ขณะนี้ทีมของ Pimenov กำลังสำรวจวัสดุอื่นๆ ด้วยรวมทั้งเหล็ก ซึ่งถึงแม้จะมีคุณสมบัติดังกล่าวที่ความถี่ประมาณเพียง 150 GHz แต่ก็อาจจะมีประโยชน์ต่อวงการโทรคมนาคม



วาระมหามงคลของวงการฟิสิกส์ไทย

เพื่อเฉลิมพระเกียรติในวโรกาสพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดชมหาราช ทรงเจริญพระชนมายุ 80 พรรษา และสมเด็จพระเจ้าพี่นางเธอ เจ้าฟ้ากัลยาณิวัฒนา กรมหลวงนราธิวาสราชนครินทร์ ทรงเจริญพระชนมายุ 84 พรรษา

ประเทศไทยได้รับเกียรติเป็นเจ้าภาพจัดการแข่งขันดาราศาสตร์และฟิสิกส์ดาราศาสตร์โอลิมปิกระหว่างประเทศขึ้นเป็นครั้งแรก (The 1st International Olympiad on Astronomy and Astrophysics) ที่คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ระหว่างวันที่ 30 พฤศจิกายน ถึง 9 ธันวาคม 2550 โดยได้รับการสนับสนุนจากมูลนิธิส่งเสริมโอลิมปิกวิชาการและพัฒนามาตรฐานวิทยาศาสตร์ศึกษาในพระอุปถัมภ์ฯ (สอวน.)

ในการแข่งขันนี้จะมีทั้งภาคทฤษฎี ภาคปฏิบัติ และภาคสังเกตการณ์ โดยคาดว่าจะมีผู้เข้าร่วมการแข่งขันจาก 25 – 30 ประเทศ แต่ละประเทศจะมีตัวแทนเยาวชนเข้าแข่งขัน จำนวน 5 คน มีอาจารย์ผู้ควบคุมดูแลประเทศละ 2 คน และมีประเทศเข้าร่วมสังเกตการณ์อีกจำนวนหนึ่ง จำนวนผู้เข้าร่วมกิจกรรม 1st IOAA ครั้งนี้จึงคาดว่าจะมีรวม 300 คน

สำหรับการแข่งขัน IOAA ครั้งที่ 2 จะไปจัดที่ประเทศอินโดนีเซีย ส่วนครั้งที่ 3 จะมีเจ้าภาพเป็นประเทศอิหร่าน ผู้ที่สนใจสามารถเข้าไปดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ที่ www.ioaa.info

สรุปข่าว

ผลการตัดสินการประกวดโครงงานค้นคว้าอิสระระดับปริญญาตรีสาขาฟิสิกส์ ครั้งที่ 1 ซึ่งด้วยพระราชทานจาก สมเด็จพระเจ้าพี่นางเธอเจ้าฟ้ากัลยาณิวัฒนา กรมหลวงนราธิวาสราชนครินทร์

เป็นที่ทราบดีโดยทั่วไปโดยไม่ต้องอาศัยการยืนยันจากสถาบันไหนว่าฟิสิกส์เป็นวิทยาศาสตร์พื้นฐานที่สำคัญมากแขนงหนึ่งที่มีความจำเป็นต่อการพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของประเทศ และประเทศไทยยังขาดนักฟิสิกส์เป็นจำนวนมาก คณะกรรมการสมาคมฟิสิกส์ไทยนำโดยนายกสมาคมฯ ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร. ถิรพัฒน์ วิสัยทอง ได้ตระหนักถึงความสำคัญต่อการเรียนการสอนฟิสิกส์ระดับอุดมศึกษาจึงได้ริเริ่มโครงการจัดการประกวดโครงงานค้นคว้าอิสระระดับปริญญาตรีสาขาฟิสิกส์ สำหรับผู้ที่สำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2549 เพื่อส่งเสริมการเรียนการสอน กระตุ้นและให้กำลังใจแก่นักศึกษาที่มีความกระตือรือร้นหมั่นศึกษาหาความรู้อย่างเอาใจจริงเอาใจ โดยได้รับความร่วมมือจากสาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ เป็นเจ้าภาพร่วมในการดำเนินการ

เป็นที่น่ายินดียิ่งว่าในการประกวดโครงงานดังกล่าวในครั้งนี้ ได้มีการส่งโครงงานเข้าประกวดทั้งสิ้น 26 เรื่องจาก 7 สถาบันคือ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ มหาวิทยาลัยนเรศวร และ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ซึ่งทำให้คณะกรรมการประเมินโครงงานลำบากใจพอสมควร เนื่องจากโครงงานที่ส่งมาส่วนใหญ่เป็นโครงงานที่น่าสนใจครอบคลุมตั้งแต่สิ่งเล็กจิ๋วระดับอนุภาคมูลฐาน จนถึงระบบขนาดใหญ่มหึมาระดับจักรวาลมีโครงงานทั้งทางทฤษฎี การคำนวณ/การจำลองโดยอาศัยคอมพิวเตอร์ งานทดลองและงานสิ่งประดิษฐ์ คณะกรรมการฯ ได้ประเมินผลงานจากรายงานโครงงานทั้งหมดและได้คัดเลือกจาก 26 โครงงานจนเหลือ 10 โครงงาน นักศึกษาเจ้าของโครงงานทั้ง 10 ได้มานำเสนอผลงานต่อหน้ากรรมการจำนวน 10 ท่าน คนละประมาณ 15 นาที ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีเมื่อวันที่ 30 มิถุนายน พ.ศ. 2550 โดยพิจารณาถึงความ

เข้าใจของนักศึกษาและความสมบูรณ์ของโครงงาน ในที่สุดคณะกรรมการฯ ได้มีมติให้โครงงานค้นคว้าอิสระระดับปริญญาตรีสาขาฟิสิกส์ของนางสาวอจจรา ปัญญา จากมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ชนะเลิศได้รับรางวัลด้วยพระราชทานจากสมเด็จพระเจ้าพี่นางเธอเจ้าฟ้ากัลยาณิวัฒนากรมหลวงนราธิวาสราชนครินทร์ ซึ่งจะจัดพิธีมอบรางวัลในการประชุมวิชาการ Siam Physics Congress 2008 (SPC2008) ที่เขาใหญ่ จ.นครราชสีมา ในช่วงวันที่ 20-22 มีนาคม พ.ศ. 2551

นางสาวอจจรา ปัญญา ได้ศึกษาและพัฒนาวิธีการวิเคราะห์สมบัติฮิสเทอรีซิสของแม่เหล็กฟิล์มบางแบบไอซิงค์ด้วยวิธีสนามเฉลี่ย โดยอาศัยการจำลองด้วยเทคนิคมอนติคาร์โลในการทำนายคุณสมบัติทางแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารแม่เหล็กและได้ศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสภาวะสิ่งแวดล้อมเช่น อุณหภูมิ หรือลักษณะการใช้งานเช่นความถี่ เป็นต้น เทคนิคการวิเคราะห์สมบัติฮิสเทอรีซิสของแม่เหล็กฟิล์มบางนี้จัดเป็นเครื่องมืออีกอันหนึ่งสำหรับงานพัฒนาแผ่นฟิล์มบางของแม่เหล็กที่ใช้ในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ โครงงานดังกล่าวนี้ดำเนินการภายใต้การให้คำปรึกษาของ ผศ. ดร. ยงยุทธ เหล่าศิริถาวร และ ผศ. ดร.รัตติกร์ ยัมนิริฐ แห่งภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

การดำเนินการจัดการประกวดโครงงานในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากความกระตือรือร้นของนักศึกษาทุกคนที่เป็นเจ้าของโครงงานทั้ง 26 เรื่อง และที่สำคัญไม่ยิ่งหย่อนไปกว่ากันก็คือแรงสนับสนุนของอาจารย์ที่ปรึกษาและคณาจารย์ที่สอนในภาควิชา โดยที่บางท่านยังได้เดินทางมาให้กำลังใจลูกศิษย์ถึงมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีในวันที่มีการเสนอผลงาน ในท้ายที่สุดนี้ขอขอบคุณศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนที่กรุณาให้การสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการดำเนินการจัดการประกวดโครงงานฯ ในครั้งนี้



สรุปข่าว



รูปที่ 1 เจ้าของโครงการทั้ง 10 เรื่องที่ผ่านเข้าถึงรอบชิงชนะเลิศ (เรียงจากซ้ายไปขวา) : น.ส.อัจฉรา ปัญญา นายเอกชัย จันทรตาน น.ส.ละออ เจริญสุข น.ส.ชนิษฐา ปาโท นายจตุภูมิ เมฆโหรา น.ส.อัญชิษฐา วงศ์ประทัต นายสถิต สุกอง น.ส.คาราภรณ์ นันทราช นายปวิศ พรหมเสนา นายอิสรา จันทรเทศนา และ นายบัณฑิต เหมพรหมราช)

ตารางที่ 1 รายชื่อสิบโครงการที่ผ่านเข้ารอบสุดท้าย

1. ระบบวัดค่าความจุพลังงานไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีขนาด AA โดยนายจตุภูมิ เมฆโหรา (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
2. Gravitoelectromagnetism in General Relativity โดยนายอิสรา จันทรเทศนา (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
3. นาฬิกาจับเวลาความเที่ยงตรงสูงสำหรับการทดลองวัดความหนืดของของเหลว โดยนายปวิศ พรหมเสนา (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
4. ลักษณะทางพื้นผิวของกระดูกที่ผ่านการปรับสภาพด้วยความร้อนและสารเคมี โดยนายบัณฑิต เหมพรหมราช (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
5. การพัฒนาระบบหุ่นยนต์โดยใช้ปาล์ม โดยนางสาวคาราภรณ์ นันทราช และ นายสถิต สุกอง (มหาวิทยาลัยมหาสารคาม)
6. การเตรียมสารตัวอย่างมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ข่าวขาวและข่าวกลองในเชิงปริมาณด้วยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนสเปกโทรสโกปี โดยนางสาวละออ เจริญสุข (มหาวิทยาลัยทักษิณ)
7. การวิเคราะห์สมบัติอิทธิพลของแม่เหล็กฟิล์มบางแบบไอซิงค์โดยวิธีสนามเฉลี่ย โดยนางสาวอัจฉรา ปัญญา (มหาวิทยาลัยเชียงใหม่)



รูปที่ 2 ช้างเผือกแท้จากป่าหน่อติดฝั่งโขง.....นางสาวอัจฉรา ปัญญา เป็นลูกคนที่สองและคนสุดท้องของคุณแม่ รัตนา ปัญญา กับ คุณพ่อ นรินทร์ ปัญญา คุณครูสอนวิชาคณิตศาสตร์ แห่งโรงเรียนเชียงแสนวิทยาคม จังหวัดเชียงราย ตอนชั้นประถมเรียนจบจากโรงเรียนสันติวิทยา ส่วนชั้นมัธยมต้นจบจากโรงเรียนจุฬารัตนราชวิทยาลัย ในตัวเมืองจังหวัดเชียงราย เมื่อได้รับการคัดเลือกให้เข้าร่วมในโครงการพสวท. จึงมาศึกษาต่อระดับมัธยมปลายที่โรงเรียนยุพราชวิทยาลัยซึ่งเป็นศูนย์ประจำภาคเหนือของโครงการพสวท. ต่อมาก็ได้เข้าศึกษาต่อ ณ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ด้วยทุนสนับสนุนต่อเนื่องจากโครงการ พสวท. โดยได้เลือกเรียนในสาขาที่เป็นวิชาที่ชอบเสมอมาซึ่งก็คือวิชาฟิสิกส์ นางสาวอัจฉรา มีผลการเรียนดีเยี่ยมอย่างสม่ำเสมอจนสอบปลาย จบปริญญาตรีฟิสิกส์ด้วยคะแนนสะสมเฉลี่ย 3.96 ได้เกียรตินิยมอันดับหนึ่งเหรียญทอง ปัจจุบันนางสาวอัจฉราได้ผ่านการสอบคัดเลือกจากโครงการ พสวท. ให้ได้ไปศึกษาต่อระดับปริญญาโท-เอกสาขาฟิสิกส์ที่ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยสนใจจะไปทำวิจัยต่อทางด้าน Computational Physics

8. การเตรียมฟิล์มแพลตตินัมที่เคลือบบนขั้วไฟฟ้าสำหรับการประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อม โดยนายเอกชัย จันทรตาน (มหาวิทยาลัยเชียงใหม่)
9. สารกึ่งตัวนำแม่เหล็กแบบเจือจาง $Zn_{1-x}Co_xO$: การเตรียมและสมบัติทางแม่เหล็ก โดยนางสาวชนิษฐา ปาโท (มหาวิทยาลัยขอนแก่น)
10. อนุภาคนาโนแม่เหล็ก $YFe_{3-5x}Al_xO_{12}$ ($x=0,1$) สำหรับเป็นสารเพิ่มความเปรียบต่างในภาพถ่าย MRI โดยนางสาวอัญชิษฐา วงศ์ประทัต (มหาวิทยาลัยขอนแก่น)

เทคนิค PIXE กับปัญหาหมอกควัน ที่เชียงใหม่

ธีรศักดิ์ คำวรรณะ*, โฉม ทองเหลือง** และ สมศรี สิงขรัตน์*

รูปที่ปกหน้า ภาพถ่ายถนนเลียบริมคลองชลประทานที่บริเวณ ต. แม่เหียะ เปรียบเทียบระหว่างวันที่**ไม่ปกติ** (12 มีนาคม 2550) กับ วันที่**ปกติ** (31 พฤษภาคม 2550) ขอให้สังเกตความชัดของกลุ่มต้นสนด้านขวาของถนน กับเสาโทรศัพท์ที่ปลายถนน ซึ่งอยู่ห่างจากจุดถ่ายภาพประมาณ 800 เมตร จุดนี้อยู่ในเขตชานเมือง มีผู้คนและการจราจรเบาบาง

คำนำ

ใครที่อยู่จังหวัดเชียงใหม่ เมื่อช่วงต้นเดือนมีนาคมที่ผ่านมา คงได้พบกับเรื่องที่ทำให้ไม่สบายใจอย่างมากๆ ต้องขอสารภาพตามตรงว่าในหัวเวลานั้น เมื่อตอนขับรถแล้วมองไปเบื้องหน้าเห็นอากาศขมุกขมัวมากอย่างไม่เคยพบเคยเห็นมาก่อน (ดูรูปที่ปกหน้า) เกิดอาการปอดกระเส้าขึ้นมาอย่างช่วยไม่ได้ แล้วคิดฟุ้งซ่านไปต่าง ๆ นานาว่าจะเป็นอย่างนี้ไปอีกนานแค่ไหน? ปอดจะพังไหมนี่ ? นัยน์ตาอีกล่ะ? ผู้สูงอายุกับลูกเล็กเด็กแดงจะไหวหรือ? ฯลฯ และก็เป็นจริงอย่างที่กลัว ลูกสาวตัวน้อยคนเดียวของคนรู้จัก ซึ่งมีปัญหาภูมิแพ้เรื้อรัง ถึงกับช็อกต้องอัมส่งโรงพยาบาลกันจ้าละหวั่น นักธุรกิจที่เชียงรายก็เล่าว่า มีฝรั่งสูงอายุกลุ่มหนึ่งเช่าเหมาลำเครื่องบินมาลงลงวันเกิดให้เพื่อน แต่เมื่อมาถึงสนามบินเชียงราย กลับไม่ยอมลงจากเครื่อง โรงแรมและงานปาร์ตี้ที่จองไว้ ต้องยกเลิกทั้งหมด รวมๆ แล้วคงมีผลเสียมากกว่านี้ อีกหลายเรื่อง

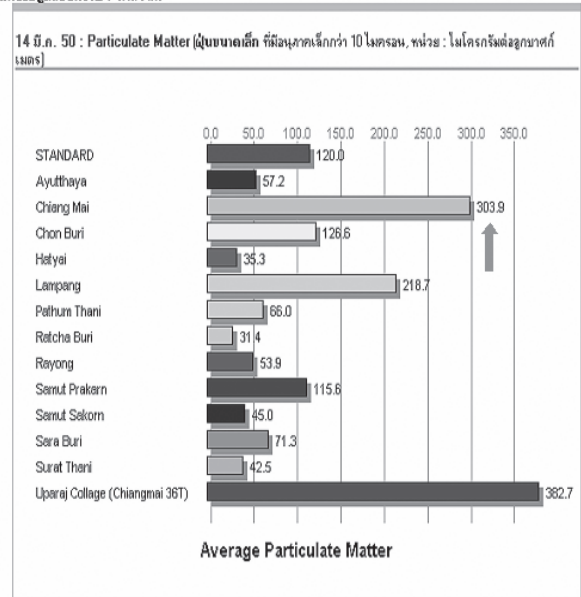
ในฐานะชาวฟิสิกส์ที่อาศัยอยู่ที่นี้ ก็ขอมีส่วนร่วมช่วยเพิ่มเติมฐานข้อมูลของปัญหานี้ให้สมบูรณ์ขึ้น และ/หรือ หลากหลายมุมมองมากขึ้น โดยการใช้เทคนิคพิเศษที่ไม่เคยมีมาก่อนในประเทศไทย วิเคราะห์ว่าฝุ่นละอองในช่วงรุนแรงสูงสุดประกอบไปด้วยธาตุอะไรบ้าง มีโลหะหนักที่เป็นพิษหรือไม่

มลพิษในอากาศ

โดนเข้าเต็มๆ คราวนี้ มือใหม่อย่างพวกเราที่เชียงใหม่

ตารางที่ 1 ข้อมูลจากกรมควบคุมมลพิษ เปรียบเทียบปริมาณฝุ่นละอองในอากาศ ของหลายจังหวัด ในวันที่ 14 มีนาคม 2550 จะเห็นได้ว่าจุดที่โรงเรียนยุพราชวิทยาลัยซึ่งเป็นจุดกลางใจเมือง มีปริมาณฝุ่นละอองสูงเกินมาตรฐานที่กำหนด (120 ไมโครกรัม ต่ออากาศ 1 ลูกบาศก์เมตร) ถึงประมาณ 3 เท่า

ส่งข้อมูลแบบกราฟ > ตามวันที่



เข่าอกเข้าใจคนปักยได้ตอนล่างขึ้นอีกโ ขตอนช่วงที่ถูกมโดยควันไฟที่ข้ามน้ำข้ามทะเลมาจากอินโดนีเซีย แต่อย่าเพิ่งด่วนสรุปว่า เป็นปัญหาที่เกิดกับแต่ประเทศจนๆ คนไทยที่เคยไปใช้ชีวิตอยู่ในเมืองเล็กๆ ชื่อ San Bernardino ของประเทศสหรัฐอย่างสหรัฐอเมริกาหลายปี เล่าให้ฟังว่าคนที่นี่เขาเจอกันออกบอไป วันดีคืนดีก็จะมีประกาศ (smog alert) ทางโทรทัศน์ว่า วันนี้คุณภาพอากาศไม่ดี อยู่ในระดับ 4 ถ้าเป็นไปได้ขอให้อยู่แต่ในที่พักอาศัย หรือ วันนี้อยู่ในระดับ 3 ออกจากบ้านได้ แต่ไม่ควรออกกำลังกายกลางแจ้ง ฯลฯ ที่น่าเจ็บใจก็คือ อากาศเสียนี้ถูกพัดพามาจากนครลอสแอนเจลิสที่อยู่ทางทิศตะวันตกของ San Bernardino ตัวช่วยเสริมโดยไม่ตั้งใจ ก็คือเทือกเขาสูงทะมึน

* อาคารวิจัยนิวตรอนพลังงานสูง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

** สถาบันวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

เรื่องเด่นประจำฉบับ

ทางด้านตะวันออกของเมืองที่กลายเป็นปราคารักษ์กักอากาศเสียเอาไว้ ไม่ให้ลอยเลยผ่านไปทางทะเลทรายโมฮาวี ซึ่งอยู่อีกด้านของเทือกเขาได้โดยสะดวก ก็เหมือนกันหมด ไม่ว่าอากาศดีมีจนมีมนุษย์มากขึ้น ก็มักมีมลภาวะเพิ่มขึ้นเป็นเงาตามตัว

มลพิษในอากาศที่มีผลต่อสุขภาพก็คืออนุเล็กลงๆ ที่แขวนลอยอยู่ในอากาศ ซึ่งมีทั้งที่เป็นของแข็งและของเหลว ศัพท์เทคนิคภาษาอังกฤษที่ใช้เรียกอนุเหล่านี้ก็คือ atmospheric aerosols หรือ airborne particulate matter (ซึ่งชื่อย่อสั้นๆว่า **PM**) แต่ถ้าเป็นไทยๆ ก็ขอเรียกง่าย ๆ ว่า “ฝุ่นละออง” การที่จะล่องลอยอยู่ในอากาศได้นานพอจนเป็นปัญหา อนุพวกนี้จะต้องมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่โตกว่า 50 ไมโครเมตร (หรือเล็กกว่า 0.05 มม.) ที่อาจเคยเห็นเขียนกันว่า “**PM2.5**” ก็หมายถึงฝุ่นละอองที่มีขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่มีอันตราย เพราะเล็กพอที่จะเข้าไปได้จนถึงถุงลม (air sac) ในปอดโดยผ่านทางปากและจมูกได้ ฝุ่นละอองเล็กขนาดนี้สามารถล่องลอยอยู่ในอากาศได้นานเป็นหลายอาทิตย์ อีกทั้งยังสามารถปลิวไปได้ไกลหลายร้อยกิโลเมตร ธาตุหลักๆ ที่มีมักมีปนอยู่ในฝุ่นละอองก็คือ Al, Si, S, K, Ca และ Fe แต่ทั้งนี้ก็จะขึ้นอยู่กับสถานที่และฤดูกาลด้วย เช่นบริเวณใกล้ชายทะเลก็จะมี Na มากกว่าที่อื่น บริเวณที่อยู่ใกล้ๆ โรงงานอุตสาหกรรมผลิตเหล็กก็มักจะมี Cr สูง เป็นต้น

สำนักจัดการคุณภาพอากาศและเสียงของกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม คือ หน่วยงานของรัฐที่มีหน้าที่รับผิดชอบเรื่องนี้ มีสถานีเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองในอากาศตั้งอยู่ในหลายจังหวัด ในช่วงเดือนมีนาคมที่เกิดปัญหานี้ ทางกรมควบคุมมลพิษได้รายงานข้อมูลให้ประชาชนทราบอย่างมีประสิทธิภาพ ดังปรากฏตัวอย่างในตารางที่ 1 แต่จะเห็นได้ว่าไม่ได้รวมข้อมูลที่ว่าฝุ่นละอองเหล่านี้ ประกอบไปด้วยธาตุอะไรบ้าง ซึ่งก็เข้าใจซิดจกักนี้ได้ไม่ยาก เพราะการวิเคราะห์ธาตุด้วยวิธีการทางเคมีก็ต้องใช้เวลาค่อนข้างมาก ยิ่งถ้ามีสารตัวอย่างจำนวนมากก็จะกลายเป็นภารกิจใหญ่โตเอาเรื่อง

เทคนิค PIXE

แต่บางประเทศก็หาทางออกโดยเลือกวิธีวิเคราะห์แบบอื่นที่ใช้เวลาน้อยๆ เช่น ประเทศออสเตรเลีย ที่มีโครงการคอยเฟ้นรางวัลที่เอาจริงเอาจัง มีเครือข่ายครอบคลุมหลายจุดทั้งในและนอกประเทศ เช่น อินโดนีเซีย เวียดนาม ฟิลิปปินส์ เกาหลีใต้ และญี่ปุ่น เมื่อถึง

เวลาตามกำหนด แต่ละจุดจะส่งแผ่นกรองอากาศกลับคืนไปที่ศูนย์กลาง คือ ที่ศูนย์วิจัยของ Australian Nuclear Science and Technology Organization หรือ ANSTO ใกล้กับนครซิดนีย์ เพื่อการวิเคราะห์อย่างละเอียดด้วยเทคนิค Particle Induced X-ray Emission (ย่อว่า **PIXE** แล้วอ่านออกเสียงว่า “พิกซ์”) เทคนิคนี้คิดค้นและพัฒนาขึ้นเมื่อปีพ.ศ.2513 โดยทีมนักฟิสิกส์นิวเคลียร์นำโดยศาสตราจารย์ **Sven Johansson** แห่งมหาวิทยาลัยลุนด์ ที่อยู่ทางตอนใต้ของประเทศสวีเดน ปัจจุบันได้รับความนิยมใช้กันแพร่หลายในหลากหลายวงการมาก

อันที่จริงเทคนิค PIXE ก็คล้ายๆ กับเทคนิค Energy Dispersive X-ray Analysis (EDX) ที่ปัจจุบันนี้มีพกพามากับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน กล่าวคือใช้วิธียิงอนุภาคเข้าใส่สารตัวอย่าง อนุภาคกระตุ้นจะกระตุ้นให้อะตอมต่างๆ ในสารตัวอย่างปลดปล่อยรังสีเอกซ์เฉพาะตัว (characteristic X-rays) ออกมาจากการเอารังสีเอกซ์เหล่านี้ที่วัดได้ไปวิเคราะห์จะทำให้สามารถรู้ได้ถึงทั้งชนิดและปริมาณของอะตอมนั้นๆ ในสารตัวอย่าง สิ่งนี้



รูปที่ 1 ภาพถ่ายเครื่องดูดฝุ่นละอองแบบ GENT Sampler หนึ่งในสองเครื่องที่ใช้ในภารกิจนี้ ได้รับมอบจากทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ หรือ IAEA ภายในกล่องพลาสติกใสที่วางอยู่บนพื้น นอกจากจะมีปั๊มดูดอากาศแล้ว ยังมีนาฬิกาตั้งเวลา ระบบปรับตั้งแรงดูด และเครื่องวัดปริมาตรอากาศที่ถูกดูดผ่านหัวกรองที่อยู่ในภาชนะเหมือนถังพลาสติกด้านขวามือของภาพ

เรื่องเด่นประจำฉบับ

แตกต่างกันก็คือ อนุภาคกระสุนของเทคนิค EDX เป็นอนุภาคอิเล็กตรอน ส่วนของเทคนิคPIXE มักเป็นอนุภาคโปรตอนที่มีมวลมากกว่าเกือบ 2 พันเท่า เทคนิค PIXE จึงมีความไวมากกว่า เพราะอนุภาคประจุไฟฟ้าเล็กๆอย่างอิเล็กตรอนเมื่อวิ่งไปชนเป้าจะผลิตรังสีรบกวน bremsstrahlung X-rays ด้วย ในปริมาณที่มากกว่าอนุภาคโปรตอนหลายเท่า พูดยรวมๆ ได้ว่าเทคนิค PIXE มีความไวในระดับ 10 ppm (parts per million) สำหรับธาตุต่างๆ ตั้งแต่ลูมิเนียมถึงยูเรเนียม (หรือก็คือสามารถวัดธาตุเหล่านี้ที่มีปริมาณเพียง 10 ไมโครกรัมในสารตัวอย่าง มวล 1 กรัมได้)

การวิเคราะห์ฝุ่นละอองเชียงใหม่ด้วยเทคนิค PIXE

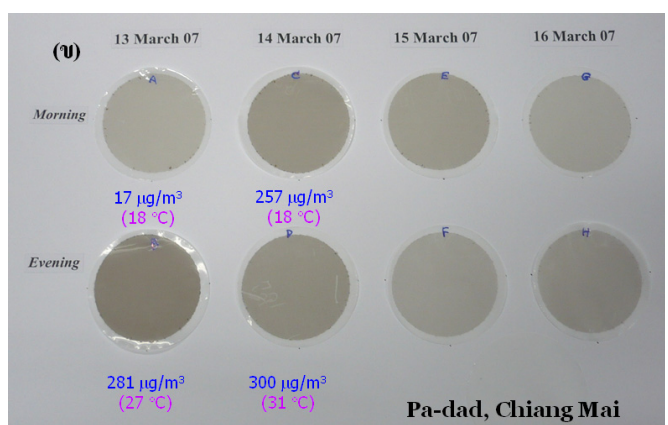
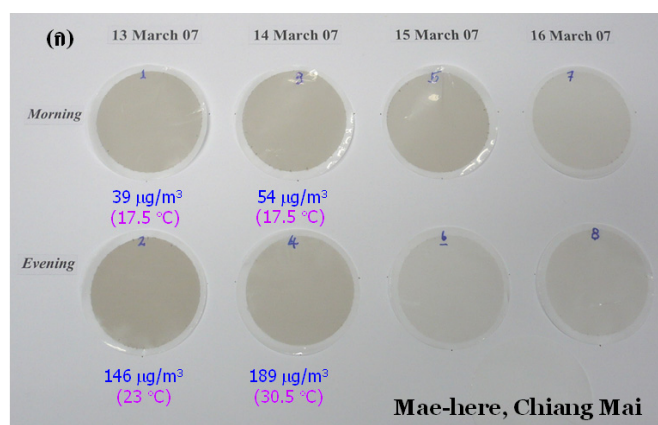
ในระหว่างวันที่ 13 - 16 มีนาคม 2550 คณะผู้เขียนได้ทำการวัดฝุ่นละอองในอากาศพร้อมกัน 2 จุดที่มีสภาพแวดล้อมแตกต่างกัน โดยวัดวันละ 2 ครั้ง คือ เช้ากับเย็น ครั้งละ 1 ชั่วโมง จุดแรกอยู่ที่ ต.แม่เหียะ รอยต่อระหว่าง อ. เมือง กับ อ.หางดง ภายในหมู่บ้านจัดสรรที่อยู่ด้านหน้าของบริเวณที่เคยจัดงานมหกรรมพืชสวนโลก ซึ่งถือได้ว่าเป็นตัวแทนของเขตชานเมืองประชากรเบาบาง และเป็นพื้นที่ที่มีระดับค่อนข้างสูง (เพราะอยู่บนลาดเชิงคอกยสุเทพ) ส่วนจุดที่สองอยู่ทางอีกฝั่งหนึ่งของแม่น้ำปิง ในเขต ต.ป่าแดด อ.สารภี จุดนี้อยู่ใกล้กับนครใต้พิภพ “เวียงกุมกาม” ถือได้ว่าเป็นบริเวณชุมชนหนาแน่น ที่อยู่ในที่ลุ่ม (เพราะน้ำเคยท่วมบ่อยๆ ในฤดูฝน) จุดทั้งสองอยู่ห่างกันประมาณ 8 กิโลเมตร

ทั้งสองจุดใช้เครื่องวัดฝุ่นละอองที่เหมือนกันทุกประการ ดังแสดงในรูปที่ 1 มีหลักการทำงานคล้ายกับที่ใช้อยู่ในประเทศ

ออสเตรเลีย กระดาษกรอง(membrane filter)ที่ใช้เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท Whatman ทำด้วยพอลิเมอร์ชนิด polycarbonate ที่เหนียวและบางมาก เพราะมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มม. แต่มีมวลเพียง 15.331 มิลลิกรัม เป็นแบบที่มีรู (pore) ขนาด 0.4 ไมโครเมตร มีข้อดีที่เหมาะสมกับเทคนิค PIXE ตรงที่ไม่มีสารอื่นปนเปื้อน นอกจาก H, C และ O ซึ่งเทคนิค PIXE วัดไม่ได้

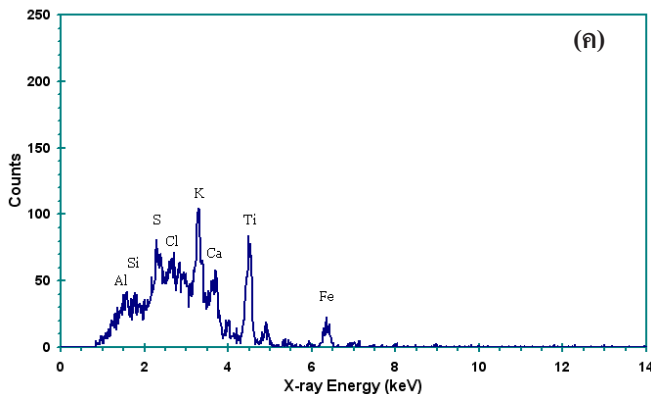
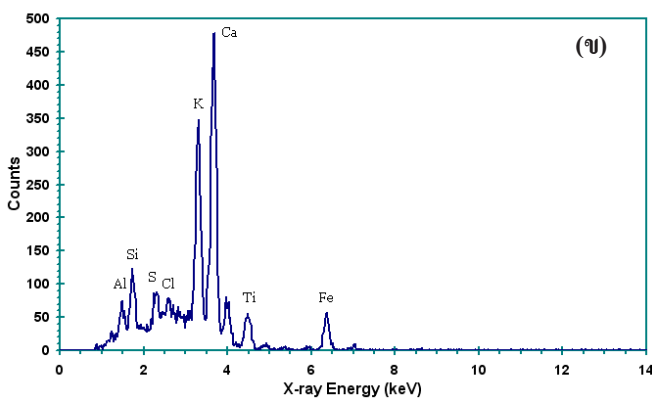
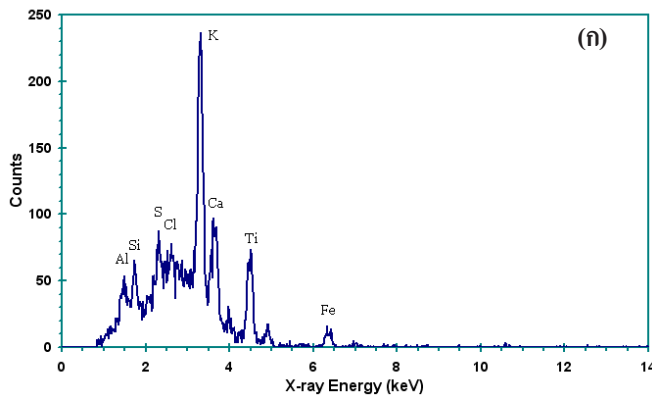
กระดาษกรองที่ใช้แล้วจะไม่ถูกนำไปทิ้งในทันที แต่จะถูกพักไว้ระยะหนึ่งเพื่อให้สภาพความชื้นของทั้งสองจุดปรับเข้าสู่สมดุลเดียวกัน กระดาษกรองของวันที่ 13 กับ 14 ถูกนำไปชั่งหามวลของฝุ่นละอองด้วยตาชั่งอิเล็กตรอนิกส์ไวพิเศษรุ่น Mettler Toledo ความละเอียด 1 ไมโครกรัม ผลการทดลองส่วนนี้ ได้แสดงไว้แล้วในรูปที่ 2 ซึ่งมีข้อสังเกตดังนี้

- ปริมาณมวลฝุ่นละอองในตอนเช้ามืดน้อยกว่าในตอนเย็น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PIXE (เป็นการยืนยันว่าขึ้นอยู่กับกิจกรรมของมนุษย์ด้วย)
- ปริมาณมวลฝุ่นละอองที่ ต.ป่าแดดมีมากกว่าที่ ต.แม่เหียะ ประมาณ 1.5 เท่าขึ้น (เมื่อพูดถึงอากาศก็รู้สึกกันว่าเป็นสิ่งที่เบาบาง แต่ถึงอย่างไรก็มีมวล อากาศ 1 ลูกบาศก์เมตร มีมวลประมาณ 1 กก. จึงก็เหมือนกับน้ำเช่นกันที่จะไหลไปสู่บริเวณที่ต่ำกว่าเสมอ)
- ปริมาณมวลฝุ่นละอองที่วัดได้โดยคณะผู้เขียน (ที่ ต.ป่าแดด) อยู่ในระดับที่สอดคล้องเป็นอย่างดี กับค่าที่วัดไว้โดยกรมควบคุมมลพิษ(ดูตารางที่ 1) ถึงแม้จะใช้เครื่องมือและกระดาษกรองคนละชนิดกันก็ตาม



รูปที่ 2 (ก) ผลการทดลองของจุดที่ ต.แม่เหียะ ขอให้สังเกตว่าในช่วงเวลานั้นอากาศยังคงค่อนข้างเย็น โดยเฉพาะในตอนเช้า (ข) ผลการทดลองของจุดที่ ต.ป่าแดด ที่เลือกซึ่งเฉพาะวันที่ 13 กับ 14 เพราะยังอยู่ในช่วงสถานการณ์รุนแรง ทิศนวิสัยเริ่มดีขึ้นตั้งแต่วันที่ 15 ทั้งนี้เพราะได้มีคำสั่งห้ามกิจกรรมการเผาอย่างเข้มงวด

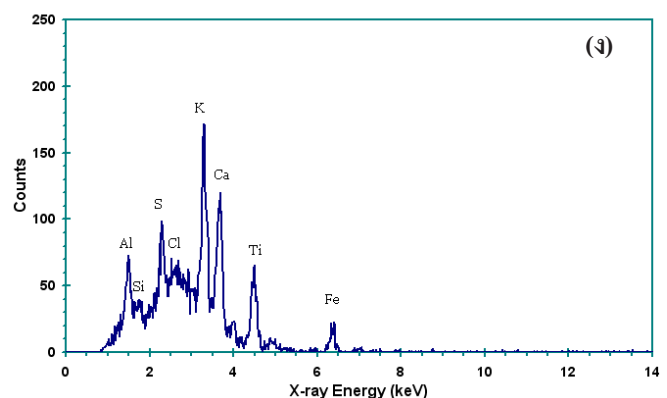
เรื่องเด่นประจำฉบับ



รูปที่ 3(ค) สเปกตรัมพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ถูกกระตุ้นให้เกิดออกจากกระดาศกรงที่มีฝุ่นละอองของ ต.แม่เหียะ ในวันที่ 16 (เย็น) ปริมาณ $K/Ca = 0.38/0.19$ ไมโครกรัม / ลบ. เมตร

รูปที่ 3(ก) สเปกตรัมพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ถูกกระตุ้นให้เกิดออกจากกระดาศกรงที่มีฝุ่นละอองของ ต. แม่เหียะ ในวันที่ 13(เย็น) ได้ตรวจสอบแล้วว่า peak Ti ไม่ได้เกิดออกจากฝุ่นหรือกระดาศกรง แต่เกิดออกมาจากวัสดุที่ใช้ทำตัวจับกระดาศกรง (sample holder) สเปกตรัมนี้ใช้เวลาวัด 15 นาที สำหรับกระแสอนุภาคโปรตอน 7 ไมโครแอมแปร์ (ถ้าต้องการลดเวลาลงก็สามารถทำได้โดยการเพิ่มกระแสอนุภาคโปรตอนขึ้น แต่ถ้าสูงเกินไปก็จะทำให้กระดาศกรงที่บางมากทะลุเป็นรูได้) การวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของธาตุต่างๆ ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ชื่อ GUPIX ช่วย ซึ่งเป็นโปรแกรมมาตรฐานที่ใช้กันอยู่ในวงการ PIXE ทั่วโลก ในที่สุดทำให้ทราบว่าปริมาณ $K/Ca = 1.03/0.33$ ไมโครกรัม / ลบ. เมตร

รูปที่ 3(ข) สเปกตรัมพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ถูกกระตุ้นให้เกิดออกจากกระดาศกรงที่มีฝุ่นละอองของ ต. ป่าแดด ในวันที่ 13 (เย็น) ขอให้สังเกตว่าแกนคิ่งมีสเกลไม่เหมือนกับสเปกตรัมอื่น ปริมาณ $K/Ca = 1.51/2.25$ ไมโครกรัม / ลบ. เมตร



รูปที่ 3(ง) สเปกตรัมพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ถูกกระตุ้นให้เกิดออกจากกระดาศกรงที่มีฝุ่นละอองของ ต. ป่าแดด ในวันที่ 16 (เย็น) ปริมาณ $K/Ca = 0.66/0.51$ ไมโครกรัม / ลบ. เมตร

กระดาศกรงเหล่านี้ถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PIXE โดยการนำไปประคมยิงใส่โดยตรงด้วยลำอนุภาคโปรตอนพลังงาน 2 MeV ที่ผลิตจากเครื่องเร่งอนุภาคแทนเดิม “แทนเดอรอน” เครื่องแรกและเครื่องเดียวของประเทศไทย (ดูรูปที่ปกหลัง) มูลค่าประมาณ 45 ล้านบาท ซึ่งได้รับบริจาคมาจาก Chalmers University of Technology ประเทศสวีเดน และได้รับ

การสนับสนุนเสริมจากสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และ IAEA ให้มีระบบผลิตไอออน และหัววัดรังสีเอกซ์ ที่สมบูรณ์ ผลการวิเคราะห์ปรากฏดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งมีข้อสรุปดังต่อไปนี้

- ทั้งสองจุดพบ peak ของธาตุต่างๆ คล้ายกัน สอดคล้องกับที่กล่าวไว้ตอนต้น คือ Si, S, K, Ca และ Fe โดยไม่พบเห็น peak ของโลหะหนักชนิดอื่นๆ เช่น สังกะสี

เรื่องเด่นประจำฉบับ

- ทองแดง หรือ ตะกั่ว (ส่วนใหญ่มักมีต้นตอมาจากรถยนต์)
- การที่สเปกตรัม PIXE แสดงให้เห็นทั้ง peak ของ Si, S, K, Ca และ Fe ชี้ให้เห็นว่าฝุ่นละอองของช่วงเวลานั้นมีองค์ประกอบ 2 ส่วน คือเกิดมาจากการเผาชีวมวล (biomass burning) [ดูจาก peak ของโปตัสเซียม(K) เป็นสำคัญ][1] และเป็นฝุ่นละอองจากดิน/หิน/ปูน (soil dust)[ดูจาก peak ของซิลิกอน (Si) กับ แคลเซียม(Ca)เป็นสำคัญ] [2] ซึ่งสอดคล้องกับข้อเท็จจริงที่ว่าตลอดช่วงเวลาดังแต่เดือนพฤศจิกายน 2549 จนถึง เดือนมีนาคม 2550 ไม่มีฝนจากฟ้าช่วยชะล้างอากาศของเชียงใหม่เลย ปัญหาของจังหวัดเชียงใหม่ครั้งนี้จึงเป็นเรื่องของฝุ่นที่สะสมลอยฝุ่นละอองดิน/หิน/ปูนจากถนนและการก่อสร้างที่เกิดจากกิจกรรมของชาวเมืองในแอ่งกระทะใหญ่แห่งนี้ ที่เพิ่มความถี่เป็นพิษเพราะมีงานมหกรรมพืชสวนโลกด้วย (วันที่ 1 พฤศจิกายน 2549 – 31 มกราคม 2550) สมทบอีกด้วย อากาศที่เย็นนานผิดปกติ ในคราวนี้จึงเป็นเหมือนกระทะยักษ์ที่ถูกครอบฝาเอาไว้ฝุ่นละอองขนาดเล็กมากจึงมีแต่ลอยลอยสะสมเพิ่มขึ้นตลอดเวลาหลายเดือนที่แล้งฝนแล้วมาถูกซ้ำเติมเข้าไปอีกด้วยกิจกรรมเผาขยะใบไม้, เผาซังข้าวแห้ง, เผาป่า ฯลฯ ซึ่งเป็นกิจวัตรของผู้คนบางส่วนทั้งในและนอกเขตประเทศไทยเมื่อเข้าหน้าร้อนของทุกปี
 - ที่ ต.แม่เหียะ มี peak ของ K สูงกว่า peak ของ Ca เสมอประมาณ 2-3.5 เท่า แต่ที่ ต.ป่าแดด จะกลับเป็นตรงกันข้ามเฉพาะในตอนเย็นของวันที่ 13 และ 14 กล่าวคือมีปริมาณ Ca สูงกว่า K ประมาณ 1.5 เท่า (ฝุ่นในอากาศบริเวณชายขอบทะเลทรายด้านทิศตะวันตกเฉียงเหนือของประเทศจีน จะมีปริมาณ Ca สูงกว่า K ประมาณ 3 เท่า [3]) ดังนั้นจึงเห็นได้อย่างชัดเจนว่าอัตราส่วนระหว่างฝุ่นละอองที่เกิดจากการเผาชีวมวลกับฝุ่นละอองที่เกิดมาจากดิน/หิน/ปูนจะไม่เท่ากันระหว่างเขตชุมชนกับเขตชานเมือง และระหว่างเวลาเช้ากับเวลาเย็น

สรุป

มันชัดเจนแล้วว่าปัญหานี้เกินครั้ง เกิดจากน้ำมือมนุษย์ ดังนั้นมนุษย์จึงจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนพฤติกรรม และ ออกแบบการดำรงชีวิตร่วมกันในสังคมอย่างมีประสิทธิภาพเช่น ระบบ

ขนส่งมวลชนที่สมบูรณ์ ระบบเก็บและกำจัดขยะโดยส่วนกลางที่เอจจริงเอจจังและมีประสิทธิภาพ การเฝ้าระวังเป็นพิเศษเมื่อเข้าหน้าแล้ง ฯลฯ มิฉะนั้นเหตุการณ์นี้จะเวียนกลับมาเกิดขึ้นอีก หนังสือพิมพ์บางฉบับประเมินไว้หายๆ ว่าจังหวัดเชียงใหม่แห่งเดียวสูญเสียรายได้จากการท่องเที่ยวถึง 30 ล้านกว่าบาทในแต่ละวัน รศ.ดร.นพ.พงษ์เทพ วิวรรณเดช ผู้อำนวยการศูนย์ประสานงานข้อมูลด้านหมอกควันภาคเหนือ รายงานไว้ใน “ข่าวมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ฉบับที่ 15 วันที่ 9-15 เมษายน 2550 ” ว่าในช่วงวันที่ 15-23 มีนาคม 2550 มีจำนวนผู้ป่วยด้วยโรคที่เกี่ยวข้องกับหมอกควัน เช่น โรคทางเดินหายใจ โรคทางตา โรคหัวใจและหลอดเลือด และโรคผิวหนัง ใน 8 จังหวัดภาคเหนือตอนบน รวมกันถึง 61,000 ราย ทำให้รัฐบาลต้องสูญเสียค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาประมาณ 25 ล้านบาท.....

เห็นตัวอย่างเพียงแค่นี้ก็หนาวแล้วละครับ



กิตติกรรมประกาศ

ผลการทดลองนี้เป็นผลพลอยได้ของโครงการวิจัยที่ได้รับการสนับสนุนเป็นอย่างดีจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และ International Atomic Energy Agency (IAEA, Vienna) คณะผู้เขียนขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง มา ณ โอกาสนี้ นอกจากนี้ขอขอบคุณ ดร.สมพร จันทระ และคุณพรชัย จันตา แห่งภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่กรุณาเอื้อเฟื้อและอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องอเล็กทรอนิกส์

เอกสารอ้างอิง

1. Y. Ma, et al., “Chemical Characterisation of Biomass Burning Aerosols over the Western Pacific as part of TRACE P”, American Geophysical Union, Fall Meeting 2002.
2. Silvia Nava, “Aerosol Characterisation by Ion Beam Analysis Techniques”, Ph.D. Thesis, Department of Physics, University of Genoa, 30 April 2003.
3. L. Makra, et al., “PIXE Analysis of Atmospheric Aerosol Particles in North – Western China”, <http://www.sci.u-szeged.hu/eghailattan/akta99/MakraL-China/MakraL-China.html>.

FIB – เครื่องกลึงสำหรับงานระดับนาโนเมตร

นิกร มังกรทอง*

เครื่องกลึงเกิดขึ้นมาพร้อมกับการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านวัสดุเป็นเวลายาวนานแล้วเมื่อต้องการอุปกรณ์สักอย่างหนึ่ง เช่น ตัว C-Clamp ก็จะทำมาจากแท่งเหล็กโดยการนำมาตัด ไส เจาะรู แล้วกลึงทำเกลียวจึงจะได้ตามที่ต้องการ หรือเมื่อต้องการที่จะต่อเหล็ก 2 ชิ้นให้กลายเป็นชิ้นเดียวกันจะต้องใช้เครื่องเชื่อมเพื่อเชื่อมโลหะ ซึ่งกระบวนการทั้งหมดอยู่ในระดับ 1 มิลลิเมตร-1 เมตร ตามองมนุษย์สามารถมองเห็นและหยิบจับด้วยมือเปล่าได้สะดวก

แต่เมื่อวัสดุมีขนาดเล็กลงในระดับนาโนเมตรจะต้องมีเครื่องกลึงพิเศษที่มีความสามารถเป็นเครื่องกลึงในระดับนาโน นั่นก็คือเครื่อง FIB (Focused ion beam) สามารถมองเห็นภาพในระดับนาโนด้วย SEM (Scanning electron microscope) และสามารถตัด เจาะ ไส ชิ้นงานด้วยเครื่อง FIB เปรียบเสมือนเลื่อย เครื่องเจาะ เครื่องไส ในโรงงานกลึง สามารถเชื่อมด้วย GIS (Gas injection system) และวัดขนาดด้วยซอฟต์แวร์ของเครื่อง เปรียบเสมือนมีตลับเมตรอยู่ในตัว แล้วยังสามารถวิเคราะห์ธาตุ หรือชนิดของสารประกอบด้วย EDS (X-ray analysis) และที่มีมากกว่าเครื่องกลึงทั่วไปก็คือ มีแท่นสำหรับวางชิ้นงานที่สามารถควบคุมอุณหภูมิความชื้น และสามารถตรวจสอบคุณสมบัติของวัสดุสามารถปรับหมุนชิ้นงานได้เป็น 3 มิติในมุมต่างๆ ที่ต้องการได้ ซึ่งจะทำงานร่วมกับระบบสุญญากาศ ในระดับความดันต่างๆ สามารถบันทึกภาพการเปลี่ยนแปลงของวัสดุแบบภาพจริง ได้ เครื่อง FIB จึงเปรียบได้กับโรงงานกลึงในระดับไมโครเมตร-นาโนเมตรที่มีศักยภาพที่สูงอีกเครื่องหนึ่งในวงการวิทยาศาสตร์ ในปัจจุบันซึ่งเป็นที่สนใจของบริษัทต่างๆ ในอุตสาหกรรม อิเล็กทรอนิกส์และอื่นๆ

ในประเทศไทยมีเครื่อง FIB อยู่ประมาณ 4 เครื่อง โดยอยู่ในภาคอุตสาหกรรมของเอกชน 3 เครื่อง ส่วนใหญ่ใช้ในการตัด ถ่ายภาพชิ้นงาน แล้ววิเคราะห์เท่านั้น สำหรับอีก 1 เครื่องอยู่ที่ คณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่เป็นรุ่น Quanta 200 3D Dual Beam ราคาประมาณ 21 ล้านบาท มีการใช้งานกว้างขวางมากกว่า เมื่อเทียบกับอีก 3 เครื่องที่มีใช้อยู่ในขณะนี้

เครื่อง FIB ได้พัฒนาออกมาหลายรุ่นด้วยกันซึ่งบางรุ่น มีสามารถดูภาพที่มีขนาดรายละเอียดถึง 2 นาโนเมตร แต่ขึ้นอยู่กับความต้องการใช้งานของผู้ใช้ และปัจจุบันนี้มีอยู่เพียง 2 บริษัท ที่ผลิตเครื่องมือ FIB ในเชิงการค้าคือ FEI Company และ SII Nanotechnology Inc.

ซึ่งในที่นี้จะขอนำเสนอรายละเอียดเครื่อง FIB ของ FEI Company ที่มีอยู่ของคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดย เครื่อง FIB ดังกล่าว จะมีส่วนประกอบสำคัญ คือ

1. **SEM (E-Beam)** ใช้ electron beam จากขดลวด ทั้งสแตน ในการตรวจดูภาพและถ่ายภาพต่างๆ ที่มีความละเอียดกำลังขยายสูงสุดประมาณ 100,000 เท่า

2. **FIB (I-Beam)** ใช้ Gallium Ion Source (Ga^+ ion) มี โมเมนต์ที่พลังงาน 30 kV เท่ากับ 3.4×10^{-20} kg.m/s เป็นแหล่ง แสงสว่างสูงใช้ในการตรวจดูและเตรียมชิ้นงาน ได้แก่ ตัด เจาะ เชื่อม ทำลวดลายต่างๆทั้งพื้นผิว และภาพตัดขวางที่มีขนาดเล็ก ประมาณช่วง 30 นาโนเมตร – 100 ไมโครเมตร ได้แก่ชิ้นงานที่แห้ง ทั้งนำไฟฟ้าและไม่นำไฟฟ้า



รูปที่ 1 ขั้นตอนการตัด เจาะ เตรียมชิ้นงานภายในเครื่อง FIB [1]

* รองศาสตราจารย์ (ดร.) หัวหน้าศูนย์เครือข่ายความเป็นเลิศด้านวัสดุนาโนเฉพาะทาง มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ขอแนะนำ



รูปที่ 2 เครื่อง FIB ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

3. Gas injection system (GIS) ใช้แก๊สได้แก่ Platinum และ Tungsten อยู่ในรูปของสารประกอบ $((CH_3)_3Pt(C_2H_5)_3)$ และ $(W(CO)_6)$ ตามลำดับ สำหรับการ Deposition โดยอาศัย Gallium Ion Beam ให้พลังงาน เช่น ใช้ในการกระบวนการเชื่อม พอก และ ประดิษฐ์ขึ้นรูปต่างๆได้ ดังแสดงในรูปที่ 3

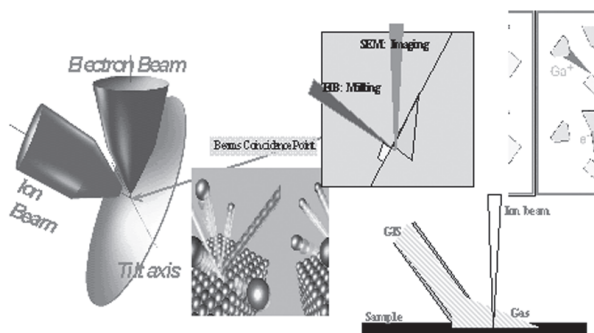
4. X-ray analysis (EDS) ใช้ในการตรวจวิเคราะห์ ธาตุ และสารประกอบ ร่วมกับ SEM ของเครื่อง

5. Omiprobe เป็นเข็มใช้สำหรับจับชิ้นงานจากที่หนึ่งไป เชื่อมติดกับอีกที่หนึ่ง โดยการบังคับทิศทางและระยะด้วยปุ่มควบคุม และโปรแกรม และสังเกตด้วย E-Beam และ I-Beam เชื่อมติด และตัด ที่ปลายเข็มของ Omiprobe ขนาด 1 ไมโครเมตร

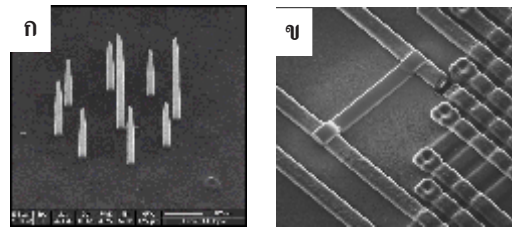
6. Sub-stage เป็นแท่นสำหรับวางชิ้นงานสามารถหมุน และทำมุมเอียงต่างๆ เพื่อให้เห็นภาพชิ้นงานได้ 3 มิติ รอบด้าน

7. สูญญากาศปรับได้มีทั้งหมด 2 ระดับคือ

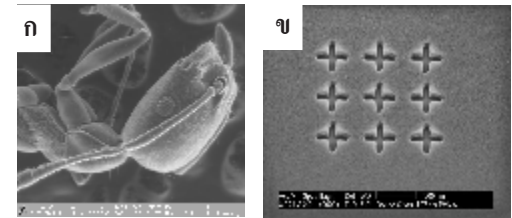
- High vacuum สำหรับเตรียมชิ้นงานและต้องการ ตรวจวิเคราะห์ทั้งพื้นผิวและภาคตัดขวางละเอียด ของวัสดุสูงที่ระดับความดันประมาณ 9×10^{-5} Pa ($1 \text{ Pa} \sim 10^{-5} \text{ atm}$)
- Low vacuum สำหรับตรวจวิเคราะห์พื้นผิวชิ้นงานได้ ทุกชนิด เช่น ชิ้นงานที่ไม่นำไฟฟ้า ชิ้นงานทางชีววิทยา ที่ระดับความดัน 10-400Pa



รูปที่ 3 แสดง Electron Beam, Ion Beam และ Gas Injection System (GIS) กับ Gallium Ion Beam [1]



รูปที่ 4 รูปที่ประดิษฐ์ขึ้นจากการทำ Deposit (ก) และเชื่อม (ข) [1]



รูปที่ 5 (ก) ชิ้นงานทางชีววิทยา

(ข) ลวดลายที่เกิดจาก Ion Beam [1]

ลักษณะการประยุกต์ใช้งานได้แก่ ด้านการตรวจวิเคราะห์ ชิ้นงาน ทั้งพื้นผิว และลักษณะภาพตัดขวางในระดับไมโครเมตรถึง นาโนเมตร ใช้งานด้านงานวิจัยสำหรับการประดิษฐ์ชิ้นงานลักษณะ ต่างๆ เพื่อการประยุกต์ใช้งาน เช่น ขั้วอิเล็กโทรด ลักษณะเข็มหรือ เส้น และทำเป็นลวดลายต่าง ๆ ในระดับไมโครเมตรถึงนาโนเมตร ได้ เป็นต้น ดังรูปที่ 4 และ 5

ในปัจจุบันเครื่อง FIB ของคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย เชียงใหม่ อยู่ในช่วงเริ่มต้นการติดตั้งและเตรียมสถานที่ และเริ่ม การดำเนินงานทดลองเดินเครื่อง ฝึกอบรมบุคลากรสำหรับควบคุม ดูแลเครื่อง เพื่อใช้ในการศึกษาและวิจัยด้าน Biosensor, Device Fabrication และการให้บริการแก่ชุมชนด้านต่างๆ เช่นการฝึกอบรม การบริการตรวจวิเคราะห์ การเตรียมชิ้นงาน สำหรับการตรวจ วิเคราะห์ SEM และTEM และรวมถึงการร่วมทำวิจัยกับหน่วยงาน ต่างๆ เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

เอกสารนี้ช่วยจัดเตรียมโดยนายมิชัย เทพนุรัตน์ นักวิจัย ของศูนย์นาโนฯ คณะวิทยาศาสตร์ และ เครือข่ายความเป็นเลิศ ด้านวัสดุนาโนเฉพาะทางมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

เอกสารอ้างอิง

- [1] FEI Company., Tools for NANOTECH FEI Solutions Quanta 3D,. (2004).
- [2] SII Nanotechnology Inc., Focused Ion Beam System SMI2000 series and options.
- [3] <http://www.s3.infm.it/fib.html>, 27/07/2550

ตัวนำยิ่งยวด

พวงรัตน์ ไพเราะ*

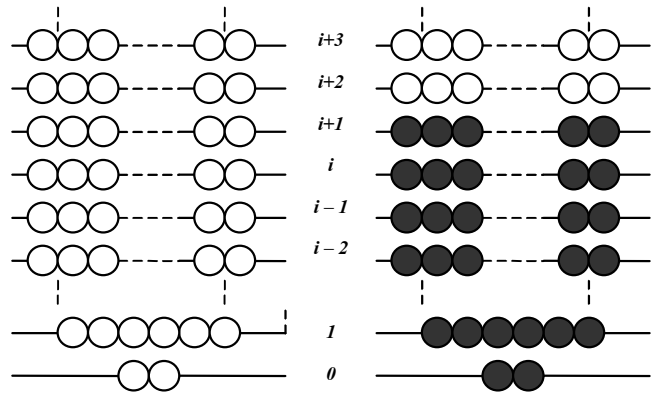
ตอนที่ 2 กลไกการเกิดสภาพนำยิ่งยวด

ในระดับจุลภาค

ในตอนที่แล้ว (วารสารฟิสิกส์ไทย มิ.ย.-ส.ค. 2550) เราได้รู้จักสมบัติสำคัญ ๆ ของตัวนำยิ่งยวด ได้แก่ การเป็นตัวผลึกสนามแม่เหล็ก การเป็นตัวนำไฟฟ้าอย่างสมบูรณ์ และปรากฏการณ์โจเซฟสัน สำหรับในตอนนี้เราจะมาพูดถึงกลไกการเกิดสภาพนำยิ่งยวดในระดับจุลภาคที่ทำให้สารกลายเป็นตัวนำยิ่งยวดได้

โดยทั่วไปแล้ว สารที่สามารถกลายเป็นตัวนำยิ่งยวดได้ มักมีสมบัติเป็นโลหะ เช่น อลูมิเนียม โปรท ตะกั่ว ไนโอเบียม เป็นต้น ดังนั้นก่อนที่จะกล่าวถึงกลไกการเกิดสภาพนำยิ่งยวด เราจะพูดถึงเกี่ยวกับสมบัติของโลหะอย่างสั้น ๆ ก่อน

สารที่เราจัดว่าเป็นโลหะนั้น เป็นสารที่สามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี ธาตุในตารางธาตุส่วนใหญ่มีสมบัติเป็นโลหะ และที่อุณหภูมิห้อง (20-23 °C) โลหะเป็นของแข็ง ยกเว้น โปรท และมีโครงสร้างเป็นผลึกซึ่งเป็นการเรียงตัวอยู่ด้วยกันอย่างเป็นระเบียบของอะตอมของธาตุโลหะนั้น ๆ เมื่ออะตอมของธาตุที่เป็นโลหะมารวมตัวอยู่กันเป็นก้อน อะตอมแต่ละตัวจะให้อิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นนอกสุดของอะตอมออกมา (อิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นนอกสุดนี้ เราเรียกว่า วาเลนซ์อิเล็กตรอน จำนวนวาเลนซ์อิเล็กตรอนของอะตอมของธาตุที่เป็นโลหะจะมี 1 ตัวหรือมากกว่าก็ได้) วาเลนซ์อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากอะตอมพ่อแม่นี้ ไม่ได้ถูกจำกัดบริเวณให้เคลื่อนที่อยู่เฉพาะใกล้ ๆ กับอะตอมพ่อแม่เท่านั้น แต่พวกมันสามารถเคลื่อนที่ไปได้ทั่วทั้งก้อนโลหะ ทำให้ในบางครั้งเราเรียกอิเล็กตรอนเหล่านี้ว่าเป็น “อิเล็กตรอนอิสระ” ซึ่งเป็นตัวหลักที่รับผิดชอบต่อการมีสมบัติต่าง ๆ ของโลหะ ในทางฟิสิกส์เราจะบรรยายสมบัติของโลหะผ่านทางค่า ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ เหล่านี้ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของโลหะ (n) และ ระดับพลังงานแฟร์มี (E_F : Fermi energy) ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระในโลหะมีค่าอยู่ราว ๆ 1×10^{22} ถึง 10×10^{22} ตัวต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ส่วนค่าพลังงานแฟร์มีจะมีค่าอยู่ราว ๆ 1 ถึง 10 อิเล็กตรอนโวลต์



รูปที่ 1 (ก) แสดงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนอิสระในโลหะ จากต่ำขึ้นไปหาสูง ก่อนที่จะมีการเติมอิเล็กตรอน สังเกตว่าในแต่ละระดับพลังงาน (i) จะมีจำนวนสถานะไม่เท่ากัน (วงกลมสีขาว แสดงสถานะควอนตัมที่อิเล็กตรอนเข้าไปอยู่ได้ในแต่ละระดับพลังงาน) (ข) ที่ศูนย์เคลวิน เมื่อระบบมีอิเล็กตรอน N ตัว แต่ละตัวจะมีพลังงานซึ่งจัดเรียงกันอยู่ตามลำดับของระดับพลังงานต่าง ๆ โดยเริ่มจากระดับพลังงานต่ำสุดก่อน จนถึงอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายจะอยู่ที่ระดับพลังงานที่เราเรียกว่าระดับพลังงานแฟร์มี (วงกลมสีดำแสดงสถานะควอนตัมที่มีอิเล็กตรอนอยู่)

ระดับพลังงานแฟร์มี คือ ระดับพลังงานสูงสุดของอิเล็กตรอนอิสระที่อุณหภูมิศูนย์เคลวิน

อิเล็กตรอนเป็นอนุภาคแบบเฟอร์มิออน กล่าวคือ ในระบบหลายอนุภาคที่เป็นเฟอร์มิออนชนิดเดียวกัน จะมีอนุภาคเฟอร์มิออนอยู่ในสถานะควอนตัมหนึ่งๆ ได้เพียง 1 ตัวเท่านั้น (ต่างจากอนุภาคแบบโบซอน ซึ่งในระบบหลายอนุภาคที่เป็นโบซอนชนิดเดียวกัน จะมีอนุภาคโบซอนอยู่ในสถานะควอนตัมหนึ่งๆ ก็ได้) ในแบบจำลองที่ง่ายที่สุดของโลหะที่เรียกว่า แบบจำลองอิเล็กตรอนอิสระ พลังงานของอิเล็กตรอนอิสระมีเฉพาะพลังงานจลน์เท่านั้น นั่นคือ $E = \frac{1}{2}mv^2$ โดยที่ m คือ มวลยังผลของอิเล็กตรอนในโลหะ และ v คืออัตราเร็วของอิเล็กตรอน

ในโลหะที่อุณหภูมิศูนย์เคลวิน อิเล็กตรอนอิสระทุกตัวจะมีพลังงานจัดเรียงตัวกันในลักษณะที่ว่า ที่ระดับพลังงานต่ำๆ จะมี

* ผู้ช่วยศาสตราจารย์ (ดร.) แห่งสาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ฟิสิกส์ของวัสดุ

อิเล็กตรอนอยู่ก่อนและที่พลังงานในระดับที่สูงขึ้นไปจะมีอิเล็กตรอนเข้ามาเติมจนเต็ม จนกระทั่งถึงอิเล็กตรอนอิสระตัวสุดท้าย ซึ่งจะอยู่ที่ระดับพลังงานสูงสุดที่เรียกว่า พลังงานแฟร์มี (รูปที่ 1) ดังนั้นจะเห็นได้ชัดว่า ค่าพลังงานสูงสุดของอิเล็กตรอนนี้ขึ้นกับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระในระบบ 3 มิติ มี $E_F \propto n^{2/3}$ สมบัติการนำไฟฟ้าและความร้อนของโลหะที่อุณหภูมิห้องหรือที่อุณหภูมิต่ำกว่า จะขึ้นอยู่กับสมบัติของอิเล็กตรอนอิสระที่มีพลังงานอยู่แถวพลังงานแฟร์มีนี้เอง เนื่องจากเป็นพวกที่มีค่าอัตราเร็วสูงสุด $v_F = \sqrt{\frac{2E_F}{m}}$

การเกิดสภาพนำยิ่งยวดในโลหะนั้น เกิดจากการที่อิเล็กตรอนอิสระในโลหะ ซึ่งมีสมบัติคล้ายกับก๊าซอิเล็กตรอน เริ่มเกิดการควบแน่นที่อุณหภูมิต่ำลง สถานะก๊าซอิเล็กตรอนเป็นสถานะที่อิเล็กตรอนแต่ละตัวไม่มีความสัมพันธ์กัน หรือในภาษาฟิสิกส์ควอนตัม เรียกว่า มีเฟสต่างกัน แต่เมื่อระบบอยู่ในสถานะที่อิเล็กตรอนบางส่วนเริ่มควบแน่น อิเล็กตรอนที่ควบแน่นกันนี้จะมีความสัมพันธ์กันเป็นอย่างมาก หรือคือ เริ่มมีเฟสเดียวกัน นั่นเอง โดยที่พวกที่เริ่มควบแน่นก่อน จะเป็นพวกที่มีพลังงานอยู่แถวๆ พลังงานแฟร์มี และเมื่ออุณหภูมิต่ำลง อิเล็กตรอนที่มีพลังงานต่ำกว่า พลังงานแฟร์มีก็จะควบแน่นเป็นจำนวนเพิ่มขึ้น จนในที่สุดที่ศูนย์เคลวิน อิเล็กตรอนทุกตัวจะอยู่ในสถานะควบแน่นนี้ทั้งหมด เราเรียกอิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะควบแน่นนี้ว่า **คอนเดนเสท (Condensate)** เนื่องจากอิเล็กตรอนพวกนี้มีเฟสเดียวกัน และในทางฟิสิกส์ควอนตัม คอนเดนเสทนี้จะถูกบรรยายด้วยฟังก์ชันคลื่นเพียงตัวเดียวเท่านั้น (ซึ่งต่างจากสถานะก๊าซอิเล็กตรอน ที่อิเล็กตรอนแต่ละตัวจะแทนด้วยฟังก์ชันคลื่นของตัวเอง ซึ่งจะต่างกันไป เนื่องจากมีเฟสไม่ตรงกัน) พวกมันจึงเคลื่อนที่ในลักษณะที่ไปไหนไปด้วยกัน ทำให้ไม่ชนสิ่งกีดขวางใด ๆ ที่มีอยู่ในก้อนโลหะเลย เนื่องจากฟังก์ชันคลื่นรวมของอิเล็กตรอนในสถานะคอนเดนเสทนี้เคลื่อนที่ไปพร้อมกันทั้งก้อน เป็นผลให้สามารถนำไฟฟ้าได้โดยไม่มีความต้านทาน

ในแง่ของทฤษฎีนั้น หลังจากการค้นพบตัวนำยิ่งยวดตัวแรกในปี ค.ศ.1911 นักฟิสิกส์ก็ได้มีการระดมความคิดอย่างหนัก เพื่อที่จะอธิบายฟิสิกส์ของตัวนำยิ่งยวด **แลนเดา (Landau)** และ **กินซ์เบิร์ก (Ginzberg)** เป็นกำลังสำคัญในการอธิบายสมบัติของตัวนำยิ่งยวดโดยใช้ทฤษฎีในระดับมหภาค คือ พวกเขาเล็งเห็นว่า



รูปที่ 2 บาร์ดีน คูเปอร์ และชรีฟเฟอร์ (นำมาจากเว็บไซต์ของ American Institute of Physics)

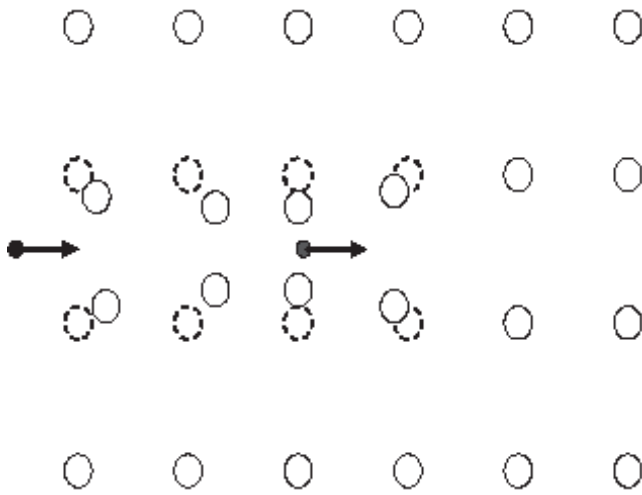
ฟังก์ชันคลื่นของตัวนำยิ่งยวดนั้น มีความเป็นมหาคอยู่ และมีค่าเป็นศูนย์ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิต่ำกว่า แต่ไม่เป็นศูนย์ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิต่ำกว่า ทำให้เขาอนุมานว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิต่ำกว่าฟังก์ชันคลื่นดังกล่าวยกกำลังสอง และยกกำลังสี่ และจากพลังงานอิสระนี้พวกเขาสามารถนำไปใช้อธิบายสมบัติของตัวนำยิ่งยวดได้ทั้งหมด แต่ไม่สามารถบอกได้ว่าฟังก์ชันคลื่นนี้เกิดมาจากไหน

จนกระทั่งในปี ค.ศ.1957 นักฟิสิกส์ชาวอเมริกัน 3 ท่าน คือ **บาร์ดีน (Bardeen)**, **คูเปอร์ (Cooper)**, และ **ชรีฟเฟอร์ (Shrieffer)** (รูปที่ 2) สามารถอธิบายที่มาของสภาพนำยิ่งยวดได้ในระดับจุลภาค เรียกว่า **ทฤษฎีบีซีเอส (BCS theory)**

ตามปกติแล้วเนื่องจากอิเล็กตรอนเป็นอนุภาคที่มีประจุ ดังนั้นพวกมันจะผลักกันด้วยแรงคูลอมบ์ แต่เมื่ออุณหภูมิต่ำลงต่ำกว่าอุณหภูมิต่ำกว่า อิเล็กตรอนในโลหะที่มีพลังงานแถวๆ พลังงานแฟร์มีจะเริ่มจับคู่กันและดึงดูดกันด้วยแรงที่เกิดขึ้นทางอ้อมตามทฤษฎีบีซีเอส แรงดึงดูดนี้เกิดเนื่องจากการชนกับโฟนอน ซึ่งเป็นการสั่นไหวเชิงควอนตัมของไอออนบวก พอจะอธิบายอย่างหยาบๆ ให้เห็นภาพง่ายๆ เทียบกับฟิสิกส์แบบฉบับ (Classical Physics) ดังนี้

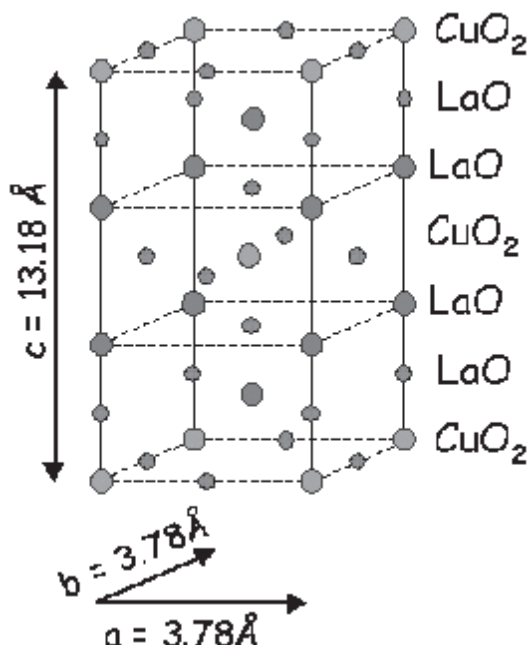
ที่อุณหภูมิต่ำพอ เมื่ออิเล็กตรอนวิ่งผ่านบริเวณหนึ่ง ๆ ที่มีไอออนบวกอยู่ ไอออนบวกในบริเวณนั้นก็จะสั่นไหวถูกดึงดูด

ฟิสิกส์ของวัสดุ



ให้ออกจากตำแหน่งสมดุลของมันให้เข้าหาอิเล็กตรอนตัวที่วิ่งผ่านนี้ แต่เนื่องจากไอออนบวกมีมวลมากกว่าอิเล็กตรอนมาก การเคลื่อนที่ของมันจะช้ากว่าอิเล็กตรอนตัวที่วิ่งผ่าน กล่าวคืออิเล็กตรอนได้วิ่งผ่านไปแล้ว แต่ไอออนบวกบริเวณนั้นยังจะเพิ่งเคลื่อนที่เข้าหาบริเวณที่อิเล็กตรอนได้วิ่งผ่านไป จึงทำให้ความหนาแน่นของประจุบวกในบริเวณนั้นมีค่ามากกว่าปกติ ซึ่งมีผลให้ดึงดูดอิเล็กตรอนอีกตัวหนึ่งวิ่งเข้ามาสู่บริเวณดังกล่าว และทำให้ดูเหมือนกับว่า มันถูกอิเล็กตรอนตัวแรกดึงดูดให้เข้ามาอยู่ในบริเวณนี้ (รูปที่ 3)

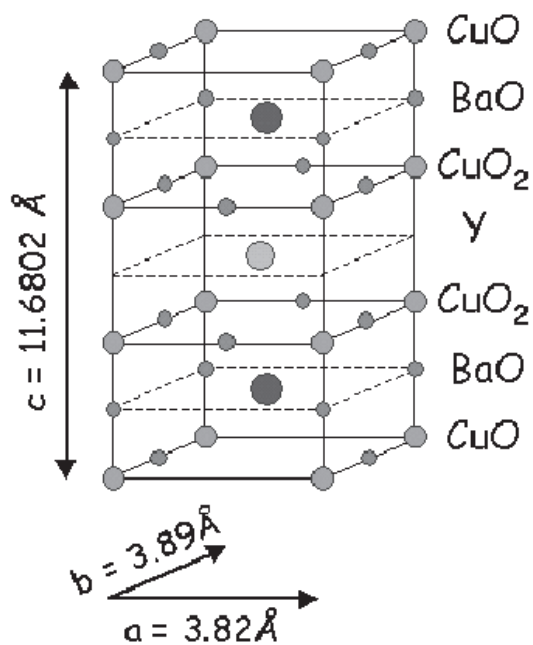
คู่อิเล็กตรอนที่ดึงดูดกันนี้ เรียกว่า คู่อุปเปอร์ (Cooper pairs)



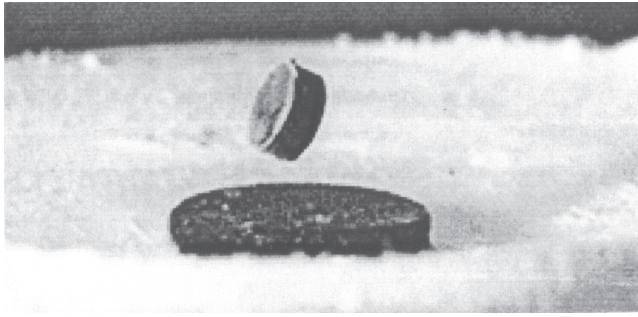
รูปที่ 3 แสดงภาพของการดึงดูดกันระหว่างอิเล็กตรอน (วงกลมสีดำที่) 2 ตัวโดยการสั่นไหวของไอออนบวก การดึงดูดกันเกิดเนื่องจากการที่อิเล็กตรอนตัวที่อยู่ขวามือ วิ่งผ่านบริเวณหนึ่งแล้วทำให้ไอออนบวก (วงกลมสีขาว) ในบริเวณนั้นต้องเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่งสมดุลของมัน (วงกลมประ))

ซึ่งแต่ละคู่จะประกอบด้วยอิเล็กตรอนสองตัวที่มีโมเมนตัมตรงข้ามกัน และมีสปินตรงข้ามกัน (สปิน เป็นสมบัติทางควอนตัมเฉพาะอย่างหนึ่งของอนุภาคที่ทำให้อนุภาคมีโมเมนต์แม่เหล็ก มีหน่วยเดียวกับ โมเมนตัมเชิงมุม ในกรณีของอิเล็กตรอนนั้นค่าสปินมีได้ 2 ค่าคือ เท่ากับ $+\frac{\hbar}{2}$ หรือ $-\frac{\hbar}{2}$) การดึงดูดกันและมีเฟสเดียวกันของคู่อิเล็กตรอนนี้จะทำให้ระบบมีพลังงานต่ำกว่าระบบของก๊าซอิเล็กตรอนอิสระที่อุณหภูมิเดียวกันแต่ไม่มีแรงดึงดูดระหว่างกัน

เมื่อต้องการกระตุ้นให้ระบบกลับสถานะ หรือการทำให้คู่อุปเปอร์แยกออกจากกัน เราต้องเอาชนะค่าพลังงานค่าหนึ่ง เรียกว่า ค่าช่องว่างพลังงาน ซึ่งตามทฤษฎีบีซีเอสนี่จะมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับทิศทางของการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในคู่อุปเปอร์ เราเรียกตัวนำยิ่งยวดที่มีค่าช่องว่างพลังงานแบบนี้ว่า ตัวนำยิ่งยวดแบบ



รูปที่ 4 รูปซ้ายเป็นรูปโครงสร้างผลึกของ La_2CuO_4 ซึ่งเป็นแบบเตตระโกนอล คือ มีแกน a , b และ c ที่ตั้งฉากกัน และขนาดของ $a = b < c$ รูปขวาเป็นรูปโครงสร้างผลึกของ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ซึ่งเป็นแบบออร์โธโกนอล มีแกน a , b และ c ที่ตั้งฉากกัน และขนาดของ $a \neq b < c$ ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ เมตร}$) (นำมาจากเว็บไซต์ <http://hoffman.physics.harvard.edu/research/SCmaterials.php>)



เอสเวฟ (s-wave superconductors) ซึ่งตัวนำยิ่งยวดที่ค้นพบในช่วงแรกๆ จะเป็นแบบนี้ทั้งหมด

ทฤษฎีบีซีเอสเป็นทฤษฎีที่ประสบความสำเร็จอย่างมาก เนื่องจากสามารถอธิบายและทำนายสมบัติของตัวนำยิ่งยวดได้เป็นอย่างดี ซึ่งก็เป็นผลให้นักฟิสิกส์ทั้งสามท่านได้รับรางวัลโนเบลในปี ค.ศ.1972

งานวิจัยทางตัวนำยิ่งยวดในช่วงถัดมา มุ่งเน้นในงานค้นหาและสังเคราะห์วัสดุใหม่ๆ ที่สามารถกลายเป็นตัวนำยิ่งยวดที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น ในปี ค.ศ.1986 เบดเนอร์ซ (Bednorz) และมุลเลอร์ (Muller) ได้ค้นพบสารประกอบเซรามิกซ์ La_2CuO_4 ซึ่งโครงสร้างผลึกเป็นแบบเตตระโกนอล (รูปที่ 4) สารประกอบนี้มีอุณหภูมิวิกฤตของสถานะตัวนำยิ่งยวดประมาณ 30 เคลวิน การค้นพบสารประกอบนี้

เป็นจุดเริ่มต้นของการค้นพบสารประกอบเซรามิกซ์อื่นๆ ที่มีลักษณะโครงสร้างผลึกคล้ายๆ กันคือมีระนาบคอปเปอร์ออกไซด์เป็นส่วนประกอบหลัก (รูปที่ 4) เช่น $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ซึ่งมีอุณหภูมิวิกฤต 92 เคลวิน (ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิจุดเดือดของไนโตรเจนเหลวที่มีค่าประมาณ 77.4 เคลวิน หรือ -195.8 องศาเซลเซียส) เป็นต้น เบดเนอร์ซ และมุลเลอร์ ได้รับรางวัลโนเบลจากการค้นพบนี้ในปี ค.ศ.1987

สารประกอบที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงเหล่านี้มีสมบัติทางฟิสิกส์บางอย่างที่อธิบายไม่ได้ด้วยทฤษฎีบีซีเอส เช่น การดึงดูดกันของอิเล็กตรอนในตัวนำยิ่งยวดพวกนี้ไม่ได้เกิดจากโฟนอน ซึ่งเป็นผลให้ค่าช่องว่างพลังงานมีค่าไม่คงที่ โดยมีค่าขึ้นอยู่กับทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ซึ่งทฤษฎีการเกิดสภาพยิ่งยวดในสารพวกนี้ก็ยังเป็นหัวข้อที่นักวิจัยในสาขานี้ให้ความสนใจกันอยู่

ในตอนหน้าซึ่งเป็นตอนสุดท้าย เราจะพูดถึงการนำตัวนำยิ่งยวดมาประยุกต์ใช้ในเชิงเทคโนโลยี

[เรื่องนี้เริ่มต้นค้นได้ง่ายที่ <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solids/scdis.html#c1>]

SPC 2008

ยังจำความหลังของเราได้ไหม ครั้งแรกที่โรงแรมน้ำรักริมชายหาดชวนฝัน ครั้งที่สองที่โรงแรมเจียบสงบ ริมฝั่งแม่น้ำร่มรื่น ยังระลึกถึงผลงานของคุณอยู่เสมอ ครั้งที่สามเราไปพบกันอีกบนภูเขานะ ประมาณวันที่ 20 - 22 มีนาคม 2551 จอมได้โรงแรมอะไรแล้วจะบอกทำตัวให้ว่างนะ แล้วจะให้รางวัล

สารกึ่งตัวนำ-ตัวนำไชนเบอร์

สกุลธรรม เสนาะพิมพ์*

ในชีวิตประจำวันที่เราล้อมด้วยเทคโนโลยีล้ำสมัย ซึ่งได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและรวดเร็วขึ้น นับว่าเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับวัสดุ โดยเฉพาะวัสดุที่ใช้เป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์การสื่อสารประเภทต่าง ๆ เช่น อินเทอร์เน็ต โทรศัพท์มือถือ และโทรศัพท์มือถือ เนื่องจากสามารถเข้าถึงกิจกรรมต่าง ๆ ในการดำเนินชีวิตของเรามากที่สุด การตอบสนองต่อความต้องการดังกล่าว ซึ่งดูเหมือนว่าจะไม่มีที่สิ้นสุด ทำให้เกิดการพัฒนาด้านฟิสิกส์วัสดุอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะกับวัสดุกึ่งตัวนำ (semiconducting materials) ซึ่งถือได้ว่าเป็นวัสดุพื้นฐานที่เป็นหัวใจของเทคโนโลยีดังกล่าว บทความนี้ ผู้เขียนคาดหวังว่าจะสามารถนำให้ทุกท่านเข้าใจถึงความสำคัญและทิศทางการพัฒนาของวัสดุกึ่งตัวนำในปัจจุบัน

วัสดุกึ่งตัวนำ หรือ สารกึ่งตัวนำ โดยทั่วไปสามารถจำแนกประเภทได้ตามองค์ประกอบ (composition) ซึ่งสามารถจำแนกได้เป็น สารประกอบกึ่งตัวนำ (compound semiconductors) เช่น ซิลิกอน (Si) และแกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) และ อลลอยกึ่งตัวนำ (alloy semiconductors) เช่น อลลอยของซิลิกอนเจอร์มาเนียม ($\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$) และอลลอยของอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ ($\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$) เป็นต้น นอกจากนี้เรายังนับรวมถึง สารกึ่ง

ตัวนำที่ไม่มีโครงสร้างที่ชัดเจน (non-crystalline semiconductors) บางชนิดอีกด้วย ในปัจจุบันวัสดุกึ่งตัวนำที่มีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำและอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์นั้น ส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างผลึกแบบเพชร (diamond structure) ที่มีพันธะโคเวเลนต์ของอิเล็กตรอนในวงโคจรไฮบริดของ sp^3 (*) เช่น Si และโครงสร้างผลึกที่คล้ายกัน คือ โครงสร้างผลึกแบบ zinc-blende เช่น GaAs เป็นต้น แม้ว่าจะมีวัสดุกึ่งตัวนำหลากหลายชนิดที่สามารถสังเคราะห์ด้วยเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่มีนัยสำคัญขึ้น แต่ก็มีเพียงสารกึ่งตัวนำบางชนิดเท่านั้นที่ได้รับการพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพจนกระทั่งมีความบริสุทธิ์และความสมบูรณ์ในระดับสูงได้ เช่น Si, GaAs, แกลเลียมฟอสไฟด์ (GaP), และอินเดียมฟอสไฟด์ (InP) เป็นต้น

“สารกึ่งตัวนำ” มีความหมายในตัวเองที่ชัดเจนว่าเป็นวัสดุที่มีค่าสภาพนำไฟฟ้าอยู่ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของโลหะและฉนวน แต่ถ้าจะกล่าวโดยเคร่งครัดเราจะรวมไปถึงตัวนำที่สามารถนำไฟฟ้าด้วยไอออน (ions) อีกด้วย นอกจากนี้ ชนิดประจุของพาหะนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำยังสามารถถูกปรับเปลี่ยน โดยส่งผลให้ค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเปลี่ยนแปลงค่าได้ในช่วงกว้าง ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยทั่วไปสารกึ่งตัวนำที่มีความบริสุทธิ์สูง หรือ

ตารางที่ 1 ตัวอย่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำอสุติ (คอลัมน์กลาง) และสารกึ่งตัวนำแท้ (คอลัมน์ขวา) ที่อุณหภูมิห้อง

Materials	สภาพนำไฟฟ้า ($\Omega\text{-cm}$) ⁻¹	
	Heavily doped n^+ and p^+	Intrinsic or compensated
Si	$\sim 10^{23} n$ and p	$\sim 10^{+4}$
Ge	$\sim 2 \times 10^{23} n$ and p	$\sim 2 \times 10^{+2}$
GaAs	$\sim 10^{23} p$ and $10^{+4} n$ type	$\sim 10^{-8}$ (semi-insulating)

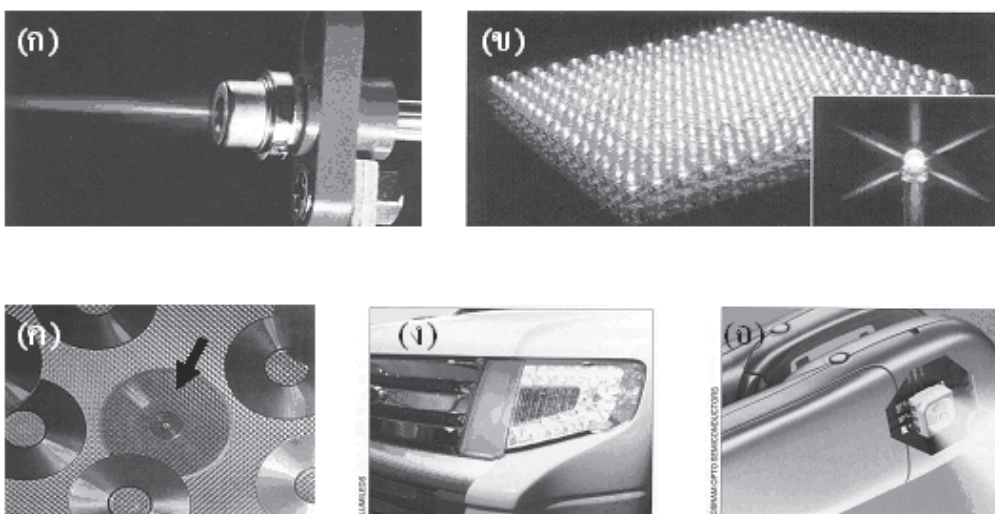
(*) สำหรับธาตุในหมู่สี่ ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนวงนอกสุด มีระดับพลังงานย่อยเรียกว่า s (1 ระดับ) และ p (3 ระดับ) และเรียกฟังก์ชันความหนาแน่นของฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนในแต่ละระดับพลังงานย่อยนี้ว่า ออร์บิทัล s และ p ตามลำดับ โดยออร์บิทัลแต่ละชนิดจะมีอิเล็กตรอนอยู่ได้ออร์บิทัลละ 2 ตัว เนื่องจากธาตุหมู่สี่มีอิเล็กตรอนวงนอกสุดทั้งหมด 4 ตัว ถ้าอะตอมนี้ทำพันธะกับอะตอมอื่นๆ โดยเกิดออร์บิทัลชุดใหม่กับอิเล็กตรอนวงนอกสุดที่มาจากอะตอมอื่นอีก 4 ตัว ก็จะได้ออร์บิทัลของโมเลกุลที่เสถียรเป็น 4 ออร์บิทัลที่เหมือนกันทุกประการ เรียกชื่อว่า sp^3 ซึ่งเป็นรูปผสม (hybridized form) ของออร์บิทัล s (1 ออร์บิทัล) กับ p (3 ออร์บิทัล) และแยกไม่ได้ว่าเป็นออร์บิทัล s หรือ p

* อาจารย์ (คร.) ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

“สารกึ่งตัวนำแท้” จะมีสภาพต้านทานสูง ณ อุณหภูมิห้อง แต่เราก็สามารถควบคุมให้สารกึ่งตัวนำแท้มีสภาพนำไฟฟ้าสูงขึ้นด้วยการเติมสิ่งเจือปน โดยกระบวนการเติมสิ่งเจือปนนี้เรียกว่า “การโด๊ป (doping)” และสารกึ่งตัวนำที่มีสิ่งเจือปนอยู่จะถูกระบุว่า “สารกึ่งตัวนำอสุทธิต” ซึ่งสารกึ่งตัวนำอสุทธิตจะมีด้วยกันสองชนิด คือ การเจือสิ่งเจือปนที่ก่อให้มีการเพิ่มจำนวนอิเล็กตรอนในแถบชั้นการนำ และการเจือสิ่งเจือปนที่ทำให้สารตัวนำอสุทธิตเพิ่มโฮลในแถบเวเลนซ์ จากสมบัติพิเศษของสารกึ่งตัวนำที่สามารถควบคุมชนิดของพาหะและเปลี่ยนแปลงขนาดของค่าสภาพนำไฟฟ้าได้ ทำให้ความพิเศษเฉพาะของสารกึ่งตัวนำมีได้ขึ้นอยู่กับการควบคุมและการเปลี่ยนแปลงทั้งชนิดประจุ (เครื่องหมาย) ของพาหะนำไฟฟ้า และขนาดของค่าสภาพนำไฟฟ้ามากกว่า ดังนั้น อาจเรียกลักษณะของสารกึ่งตัวนำว่าเป็น “ตัวนำไซเบอร์” (cyber conductors) ซึ่งจะสื่อถึงตัวนำที่สามารถถูกควบคุมและปรับเปลี่ยนค่าสภาพนำไฟฟ้าได้นั่นเอง โดยศัพท์คำว่า “cyber” เป็นคำศัพท์ที่มีรากศัพท์จากภาษากรีกและใช้ในความหมายเดียวกันกับ “cybernetics” (cybernetics คือ ศาสตร์ที่ว่าด้วยระบบการสั่งงานและการสื่อสาร ทั้งที่ใช้กับเครื่องจักรกลและสัตว์)

การค้นพบและการพัฒนาของสารกึ่งตัวนำได้นำไปสู่ความสำเร็จในการประดิษฐ์สิ่งประดิษฐ์กึ่งตัวนำต่าง ๆ เช่น งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเจอร์มาเนียม (Ge) ได้นำไปสู่การพัฒนาและการ

ประดิษฐ์ทรานซิสเตอร์ (transistors) และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สถานะแข็ง (solid state electronics) สำหรับเทคโนโลยีที่ใช้ Si เป็นสารพื้นฐานนั้นได้รับการพัฒนาแบบคู่ขนานกับ Ge และประสบความสำเร็จสำหรับการประดิษฐ์วงจรรวม (integrated circuit) นอกจากนี้ สารกึ่งตัวนำในกลุ่มสาม-ห่า (สารประกอบกึ่งตัวนำที่มีธาตุหมู่สามและธาตุหมู่ห้าในตารางธาตุเป็นองค์ประกอบ) เช่น GaP และ GaAs และอัลลอยกึ่งตัวนำของสารในกลุ่มนี้ เช่น $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ อลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) และอินเดียมแกลเลียมฟอสไฟด์อาร์เซไนด์ ($\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}_y\text{As}_{1-y}$) ได้แสดงความโดดเด่นในฐานะที่เป็นวัสดุพื้นฐานสำหรับเทคโนโลยีด้านการประดิษฐ์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เปล่งแสงซึ่งรวมไปถึงเลเซอร์ไดโอดที่ประยุกต์ใช้งานด้านการส่งสัญญาณภายในเส้นใยนำแสง (optical fiber) นอกจากนี้ในปัจจุบันการได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วในการพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพของสารในกลุ่มสาม-ไนไตรด์ (III-Nitrides) (สารประกอบกึ่งตัวนำที่มีธาตุหมู่สามและธาตุไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ) เช่น แกลเลียมไนไตรด์ (GaN) และอัลลอยที่เกี่ยวข้อง เช่น อินเดียมแกลเลียมไนไตรด์ ($\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$) ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่ให้แสงในช่วงน้ำเงิน-เขียว ในรูปที่ 1 แสดงตัวอย่างสิ่งประดิษฐ์ที่เกิดจากการพัฒนาเทคโนโลยีด้านอิเล็กทรอนิกส์เปล่งแสงที่เกิดจากสารในกลุ่มสาม-ห่าและกลุ่มสาม-ไนไตรด์ จากตัวอย่างข้างต้น จะเห็นได้ว่าสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดจะมีความเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานที่แตกต่างกัน โดยที่ทิศทางการพัฒนาเทคโนโลยีของสารกึ่งตัวนำจะสัมพันธ์



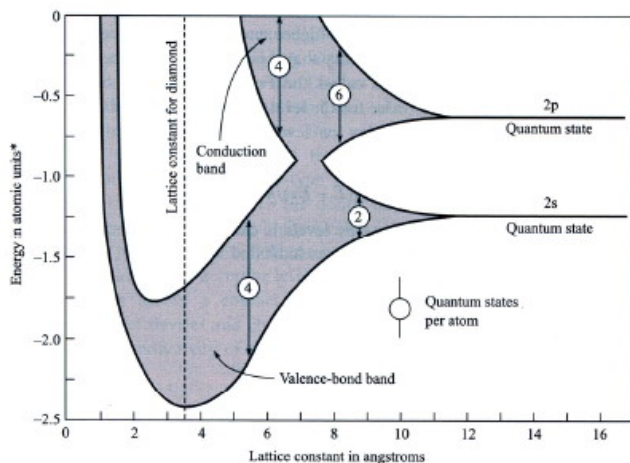
รูปที่ 1 (ก) เลเซอร์แสงสีน้ำเงิน ที่ให้ความยาวคลื่น 491 นาโนเมตร ประดิษฐ์จากสารกึ่งตัวนำแกลเลียมไนไตรด์ (GaN) และอัลลอยกึ่งตัวนำอินเดียมแกลเลียมไนไตรด์ (InGaN) (ข) แผงไฟไดโอดสีน้ำเงินที่เหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงในห้องผ่าตัดที่ให้ความสว่างสูงและแผ่ความร้อนต่ำ (ค) แผ่น Blu-ray Disc (BD) ที่มีความจุ 25 GB/12 cm-disk ด้าน ซึ่งต้องใช้หัวอ่านเลเซอร์แสงสีน้ำเงิน ความยาวคลื่น 405 นาโนเมตร [1] การประยุกต์ใช้ไดโอดเปล่งแสงกับ (ง) ไฟหน้ารถยนต์ และ (จ) โทรศัพท์มือถือ (โปรดดูภาพสีที่หน้า 2)

ฟิสิกส์ของวัสดุ

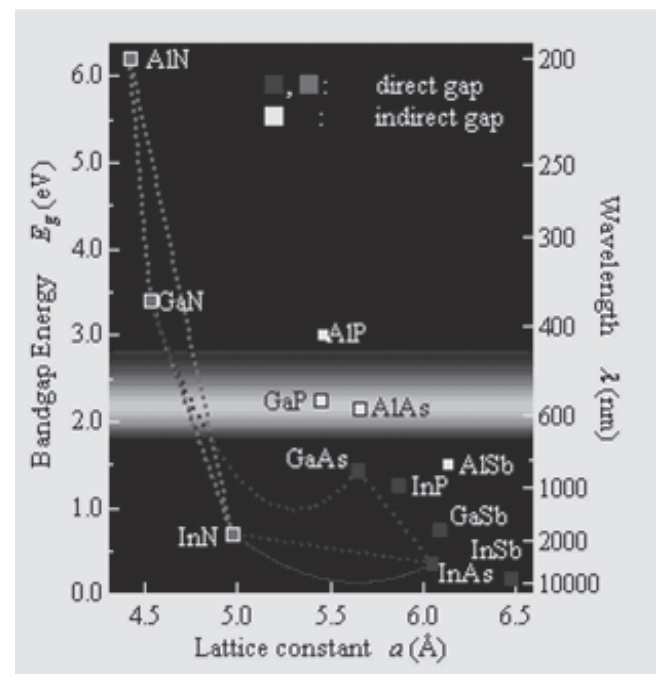
กับการควบคุมและดัดแปลงสมบัติทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำต่อไปนี้เป็นหลัก คือ (1) โครงสร้างผลึก (crystal structure) และ (2) โครงสร้างแถบพลังงาน (energy band structure) (นอกเหนือจากการควบคุมดัดแปลงสภาพนำไฟฟ้าด้วยการโด๊ป) ดังนั้นความสามารถในการควบคุมและดัดแปลงสมบัติทางฟิสิกส์ทั้งสองชนิดนี้จึงเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการพัฒนาสิ่งประดิษฐ์ที่อาศัยสารกึ่งตัวนำเป็นส่วนประกอบหลัก

เมื่อเราศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างผลึกและโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ พบว่าระยะระหว่างอะตอมในสารแต่ละชนิดที่มีระยะห่างไม่เท่ากันจะมีผลต่อค่าช่องว่างแถบพลังงาน และจะส่งผลต่อค่าสภาพนำไฟฟ้าด้วย เช่น ในรูปที่ 2 แสดงตัวอย่างโครงสร้างแถบพลังงานของอิเล็กตรอนวงนอกสุดของคาร์บอน (ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนวงนอกสุดของอะตอมคาร์บอนอยู่ในระดับที่ $n = 2$ ซึ่งมีระดับพลังงานย่อย 2s และ 2p) ตามรูป (จะบรรยายจากขวาไปซ้าย) เมื่ออะตอมอยู่ห่างกันมากระดับพลังงาน (2s และ 2p) ของอิเล็กตรอนของแต่ละอะตอมจะเหมือนกันไม่มีอิทธิพลซึ่งกันและกัน เมื่อทำให้อะตอมจำนวนมาก N อะตอม มาอยู่ใกล้กัน เพื่อให้เกิดเป็นของแข็ง จะทำให้ฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนเกิดการเหลื่อมกันและรวมเป็น

ระบบเดียวกัน พบว่าเมื่อมีอะตอมจำนวนมากยิ่งขึ้นระดับพลังงานก็จะยิ่งใกล้ชิดกันมากขึ้นจนไม่สามารถแยกออกจากกันได้ การเข้าใกล้กันมากขึ้นของอะตอมนั้นจะทำให้เกิดการเหลื่อมกันของฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนในแถบพลังงานย่อย 2s และ 2p เกิดเป็นแถบพลังงานเดี่ยวที่มีระดับพลังงานทั้งหมด 8N ระดับ จากนั้นเมื่ออะตอมอยู่ใกล้กันมากขึ้นแถบพลังงานเดี่ยวจะแยกออกเป็น 2 แถบพลังงาน โดยที่แต่ละแถบพลังงานจะมีจำนวนระดับพลังงานอยู่ 4N ระดับ สำหรับอะตอมคาร์บอนนั้น เนื่องจากมีอิเล็กตรอนวงนอกสุดอยู่ 4 ตัว (2 ตัวอยู่ในระดับ 2s และอีก 2 ตัวอยู่ในระดับ 2p) จึงทำให้แถบพลังงานระดับล่าง (ซึ่งเป็นแถบวาเลนซ์) ของคาร์บอนมีอิเล็กตรอนอยู่เต็ม 4N ตัว สำหรับแถบพลังงานระดับบน 4N ระดับ เป็นแถบการนำที่ไม่มีอิเล็กตรอนอยู่ โดยแถบพลังงานทั้งสองอยู่ห่างกันถึง 7 อิเล็กตรอนโวลต์ ด้วยค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (energy gap) E ที่มีค่ามากนี้ทำให้คาร์บอนแสดงสมบัติเป็นฉนวน นอกจากนี้เรายังสามารถใช้โครงสร้างแถบพลังงานของคาร์บอนนี้อธิบายโครงสร้างแถบพลังงานของ Si และ Ge ได้ในทำนองเดียวกันเนื่องจากเป็นธาตุหมู่สี่เหมือนกัน ทำให้สามารถมองภาพการรวมกันของอิเล็กตรอนในแถบ ns และ np (เมื่อ n คือระดับพลังงานของอิเล็กตรอน



รูปที่ 2 โครงสร้างแถบพลังงานของคาร์บอน แสดงการรวมกันของอิเล็กตรอนในแถบพลังงานย่อย 2s และ 2p แล้วแยกออกเป็น 2 แถบพลังงาน คือ แถบวาเลนซ์และแถบการนำ ค่าพลังงานของแถบวาเลนซ์เป็นลบแสดงถึงสถานะที่เกิดเป็นพันธะ (bonding states) ส่วนค่าพลังงานของแถบการนำที่มีค่าบวก (เช่น สำหรับผลึกเพชรที่เลยด้านบนของกราฟ) แสดงถึงสถานะที่ไม่เกิดเป็นพันธะ (antibonding states) [3]



รูปที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (energy gap) และค่าคงที่โครงผลึก (lattice constant) [4]

(โปรดดูภาพสีที่หน้า 2)

ฟิสิกส์ของวัสดุ

วงนอกสุดสำหรับธาตุแต่ละชนิด) แล้วแยกออกจากกันเป็น 2 แถบ เมื่ออะตอมเข้าใกล้กันมากขึ้นตามชนิดโครงสร้างผลึก จากรายงานการวิจัย พบว่าค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของ Si และ Ge มีค่าเท่ากับ 1.11 [2] และ 0.67 [2] อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ

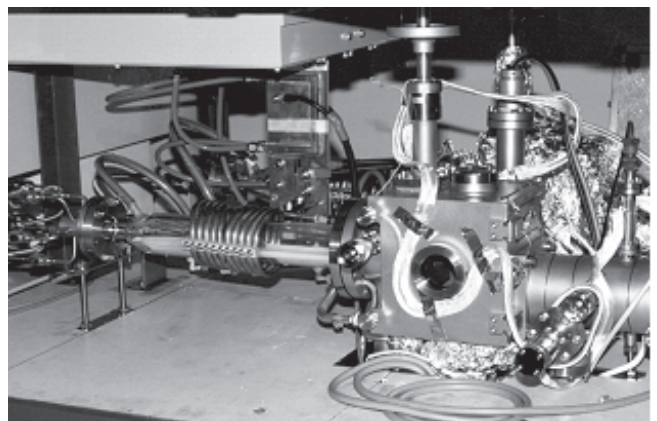
ในรูปที่ 3 (โปรดดูภาพสีที่หน้า 2) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงผลึก (lattice constant) และค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน พบว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารประกอบกึ่งตัวนำนั้น จะมีลักษณะไม่ต่อเนื่อง ส่งผลให้ไม่สามารถประดิษฐ์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสงที่ใช้งานในบางช่วงความยาวคลื่น เช่น ช่วงอินฟราเรด (1300-1550 นาโนเมตร) และช่วงแสงสีน้ำเงิน-เขียว (400 - 560 นาโนเมตร) ได้ด้วยสารประกอบกึ่งตัวนำเพียงเท่านั้น การสังเคราะห์อัลลอยกึ่งตัวนำโดยการผสมด้วยอะตอมของธาตุในหมู่เดียวกัน เช่น การเติมอะตอมของอินเดียม (In) (ธาตุหมู่สาม) ในโครงสร้างผลึกของ GaN เพื่อแทนที่อะตอม Ga (ซึ่งเป็นธาตุหมู่สามเช่นกัน) จะทำให้ได้อัลลอยกึ่งตัวนำ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ซึ่งมีสมบัติทางฟิสิกส์ต่าง ๆ เช่น ค่าช่องว่างแถบพลังงานอยู่ระหว่างอินเดียมไนไตรด์ (InN) และ GaN โดยมีค่าขึ้นอยู่กับสัดส่วนธาตุองค์ประกอบ x (โดยที่ค่าของ x ที่น้อยที่สุดคือศูนย์และมากที่สุดคือหนึ่ง) การสร้างอัลลอยกึ่งตัวนำจึงเป็นการเติมเต็มในส่วนที่สารประกอบกึ่งตัวนำไม่สามารถตอบสนองได้และเป็นทางเลือกที่มีความยืดหยุ่นสูงสามารถตอบสนองต่อการใช้งานได้ สำหรับการสร้างอัลลอยสำหรับสารกึ่งตัวนำในกลุ่มสาม-ห้า นั้น จะยกตัวอย่างในกรณีของ GaAs การสร้างอัลลอยโดยการเติมไนโตรเจน (N) ที่เป็นธาตุหมู่ห้าในตารางธาตุลงใน GaAs จะได้อัลลอยกึ่งตัวนำแกเลียมอาร์เซไนต์ไนไตรด์ ($\text{GaAs}_{1-y}\text{N}_y$) ที่มีค่าคงที่โครงผลึกเล็ก

ลงตามสัดส่วนของธาตุ N (y) ที่เติมเข้าไปในเนื้อสารเนื่องจากขนาดรัศมีอะตอม N มีขนาดเล็กกว่าขนาดรัศมีอะตอม As ในทางกลับกัน การเติม In ที่เป็นธาตุหมู่สามในตารางธาตุลงในโครงผลึกของ GaAs จะได้อัลลอยกึ่งตัวนำ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ที่ให้ค่าคงที่โครงผลึกเพิ่มขึ้นเนื่องจากขนาดรัศมีอะตอม In มีขนาดใหญ่กว่ารัศมีอะตอม Ga ซึ่งเป็นไปตามแนวโน้มทางตารางธาตุ แต่สิ่งที่น่าสนใจในรูปที่ 3 นี้คืออัลลอยกึ่งตัวนำอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนต์ไนไตรด์ ($\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{N}_y$) ซึ่งเราสามารถสังเคราะห์ได้โดยการเติมทั้ง N และ In เพื่อปรับค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน ในขณะที่สามารถควบคุมให้ค่าคงที่โครงผลึกมีขนาดคงที่เท่ากับค่าคงที่โครงผลึกของ GaAs ได้ ปกติการก่อตัวอย่างเดียวกันนี้สามารถตรวจพบในอัลลอยกึ่งตัวนำ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}_{1-y}\text{As}_y$ เช่นเดียวกัน จากตัวอย่างอัลลอยกึ่งตัวนำที่กล่าวมาข้างต้น อัลลอยกึ่งตัวนำที่มีองค์ประกอบเป็นธาตุจำนวน 3 และ 4 ชนิด เรียกว่า ternary alloy และ quaternary alloy ตามลำดับ

การควบคุมและดัดแปลงสารกึ่งตัวนำให้มีสมบัติทางฟิสิกส์ตามต้องการนั้น จำเป็นต้องอาศัยเทคโนโลยีการปลูกผลึกชั้นสูง ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด แต่ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในระดับอุตสาหกรรมและระดับห้องปฏิบัติการนั้น เป็นเทคนิคที่สามารถเตรียมผลึกได้ทีละชั้นผลึก และได้โครงสร้างเป็นผลึกเดี่ยว (single crystal) โดยอาศัยอิทธิพลของวัสดุฐานรอง หรือ “ซับสเตรท” (substrate) ที่มีโครงสร้างผลึกเดี่ยวเช่นกัน เทคนิคนี้ถูกเรียกว่าเป็น **การปลูกผลึกแบบ “เอพิแทกซ์” (epitaxy)** วิธีการปลูกผลึกแบบเอพิแทกซ์ที่ได้รับความนิยมมีอยู่ 2 วิธี คือ วิธีโมเลกุลลำบีมเอพิแทกซ์ (Molecular Beam Epitaxy; MBE) และ วิธีการปลูกผลึกแบบเมทัลลอร์แกนิกเฟสเอพิแทกซ์ (Metalorganic Vapor Phase

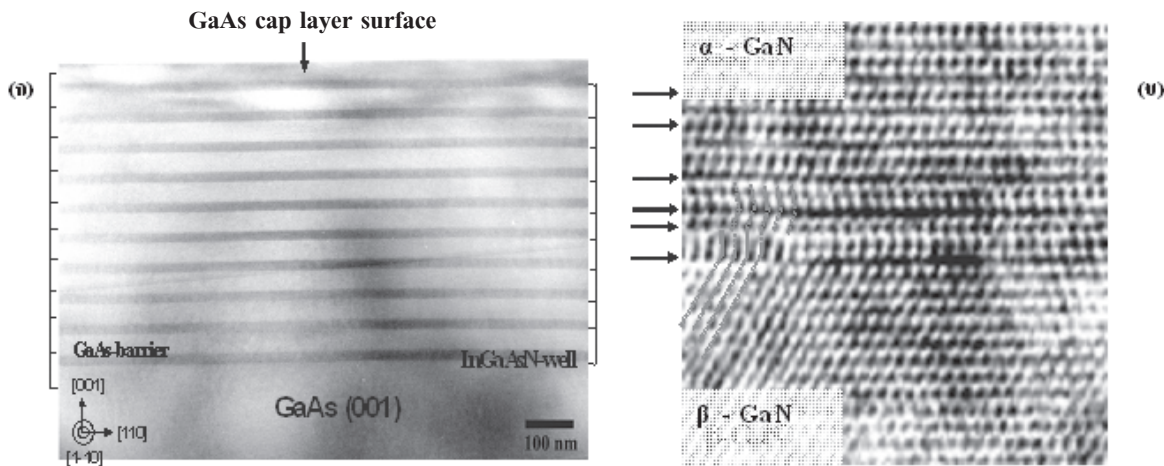


(ก) MBE System



(ข) MOVPE reactor

รูปที่ 4 แสดงระบบการปลูกผลึกแบบเอพิแทกซ์ 2 วิธี (ก) วิธีโมเลกุลลำบีมเอพิแทกซ์ (Molecular Beam Epitaxy; MBE) และ (ข) วิธีการปลูกผลึกแบบเมทัลลอร์แกนิกเฟสเอพิแทกซ์ (Metalorganic Vapor Phase Epitaxy; MOVPE) [4]



รูปที่ 5 (ก) แสดงภาพตัดขวางที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy; TEM) ของชั้นงาน ควอนตัมเวลล์ InGaAsN/GaAs ที่ปลูกผลึกบนวัสดุฐานรอง GaAs (001) มุมมองในทิศทาง $\langle 110 \rangle$ (ข) ภาพโครงผลึก (lattice image) ของผิวรอยต่อระหว่าง GaN ที่มีโครงสร้างแบบ zinc-blende (β -GaN) (ส่วนล่างของภาพ) กับ โครงสร้างผลึกแบบ wurtzite (α -GaN) (ส่วนบนของภาพ) [ชั้นงานทั้งสองถูกปลูกผลึกด้วยวิธี MOVPE]

Epitaxy; MOVPE) รูปที่ 4 (ก) และ 4 (ข) แสดงระบบเครื่องมือทั้งสองตามลำดับ เนื่องจากการการปลูกผลึกแบบเอพิแทกซ์นั้นมีความสะอาดสูง ทำให้สามารถเติมสิ่งเจือปนเข้าไปในโครงสร้างผลึกเพื่อกำหนดชนิดของพาหะนำไฟฟ้าและค่าสภาพนำไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังพบว่าสิ่งที่เราสามารถควบคุมอัตราการปลูกผลึกได้ทีละชั้นผลึกและสามารถควบคุมสัดส่วนของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชั้นผลึกได้อย่างแม่นยำ ทำให้เราสามารถสร้างโครงสร้างระดับนาโน เช่น ควอนตัมเวลล์ (quantum wells) หรือควอนตัมดอท (quantum dots) ของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะเป็ประโยชน์ในการเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสง และการศึกษาวิจัยทางฟิสิกส์และวิศวกรรมอีกด้วย รูปที่ 5(ก) แสดงภาพตัดขวางที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy; TEM) ของชั้นงานควอนตัมเวลล์ InGaAsN/GaAs ที่ปลูกผลึกบน GaAs ซับสเตรท และสำหรับรูปที่ 5(ข) แสดงถึงภาพโครงผลึก (lattice image) ของผิวรอยต่อระหว่าง GaN ที่มีโครงสร้างแบบ zinc blende (β -GaN) (ส่วนล่างของภาพ) กับ โครงสร้างผลึกแบบ wurtzite (α -GaN) (ส่วนบนของภาพ) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการก่อตัวของโครงผลึกแบบต่อเนื่องจากผลึกสารกึ่งตัวนำที่มีโครงผลึกแบบ zinc blende ไปสู่ผลึกสารกึ่งตัวนำที่มีโครงผลึกแบบ wurtzite แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการควบคุมโครงผลึกของสารกึ่งตัวนำระหว่างการปลูกผลึก

จากตัวอย่างข้างต้น จะเห็นได้ว่าสารกึ่งตัวนำนั้นเป็นตัวนำไอออนหรือ วัสดุไอออน อย่างแท้จริง เนื่องจากสามารถควบคุมและปรับเปลี่ยนสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ เช่น ชนิดของพาหะนำไฟฟ้า ค่าสภาพนำไฟฟ้า ค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน ค่าคงที่โครงผลึกและชนิดโครงผลึก ตลอดจนความสำเร็จในการสร้างโครงสร้างระดับนาโน ให้มีความเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งานประเภทต่างๆ ได้ ทำให้การค้นคว้าวิจัยสารกึ่งตัวนำใหม่ๆ ทั้งสารกึ่งตัวนำชนิดสารประกอบและอัลลอยจึงมีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการขยายขอบเขตการประยุกต์ใช้งานของสารกึ่งตัวนำ

เอกสารอ้างอิง

1. http://ja.wikipedia.org/wiki/Blu-ray_Disc
2. Ben G. Streetman and Sanjay Banerjee. *Solid State electronic Devices*, 5th edition, New Jersey: Prentice Hall, 2000. 524.
3. D. B. Holt and B. G. Yacobi. *Extended defects in semiconductors*, Cambridge, 2007.
4. จากโสมเพจวิจัยของห้องปฏิบัติการ ศาสตราจารย์ ดร. เคนทาโร โอนาเบะ ภาควิชาวัสดุขั้นสูง มหาวิทยาลัยโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น

เหลื่อมเพชรเม็ดงามวิชาแม่เหล็กไฟฟ้า

ชาญกิจ กันล่อง

ตอนที่ 3 พลังงานไฟฟ้า (1)

พลังงานอยู่ที่ไหน?

อาจกล่าวได้ว่าจักรวาลตามฟิสิกส์แบบฉบับประกอบด้วย วัสดุ 3 ชนิด คือ อวกาศ-เวลา, อนุภาค, และ แรง พลังงานอาศัยอยู่ในวัสดุใดใน 3 ชนิดนี้ คำตอบ คือ ทั้งหมดเลย! และแลกเปลี่ยนไปมาได้! ในบทความนี้จะสำรวจ concept พลังงานในวิชาไฟฟ้าสถิต

พิจารณาจุดประจุ q_i เคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้าสถิตของจุดประจุต้นกำเนิด (source) q_j ที่ตรึงกับกรอบเฉื่อย มี กฎการเคลื่อนที่ ดังสมการ (1) ดังนี้

$$q_i \vec{E}_j = \vec{F}_i = m_i \vec{a}_i \quad (1)$$

โดยที่สนามไฟฟ้ามีรูปตามกฎของคูลอมบ์ กล่าวคือ

$$\vec{E}_j = \hat{r}_{ji} \frac{q_j}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|^2}, \vec{E}_i = -\hat{r}_{ji} \frac{q_i}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|^2},$$

และ

$$\hat{r}_{ji} = \frac{\vec{r}_i - \vec{r}_j}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|}$$

พิจารณาอินทิกรัลตามเส้นของสมการ (1) โดยใช้เส้นทางการเคลื่อนที่ $\vec{r}_i(t)$ ของจุดประจุ q_i จากตำแหน่งตอนต้น $\vec{r}_i(I)$ ถึงตำแหน่งตอนท้าย $\vec{r}_i(F)$ จะได้ปริมาณต่างๆ ดังนี้

(ก) จากขาสุดของ (1) จะได้ปริมาณ พลังงานจลน์

$$\begin{aligned} \int_I^F d\vec{r}_i \cdot m_i \vec{a}_i &= \Delta \left(\frac{1}{2} m_i v_i^2 \right) \\ &\equiv \frac{1}{2} m_i v_i^2 (F) - \frac{1}{2} m_i v_i^2 (I) \end{aligned} \quad (2)$$

(ข) จากตรงกลางของ (1) จะได้ปริมาณ งาน (work)

$$\text{work} \equiv \int_I^F d\vec{r}_i \cdot \vec{F}_i \quad (3)$$

(ค) จากซ้ายสุดของ (1) จะได้ปริมาณ พลังงานศักย์

$$\begin{aligned} \int_I^F d\vec{r}_i \cdot q_i \vec{E}_i &= -\Delta \left(\frac{q_i q_j}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|} \right) = -\left(\frac{q_i q_j}{|\vec{r}_i(F) - \vec{r}_j|} - \frac{q_i q_j}{|\vec{r}_i(I) - \vec{r}_j|} \right) \\ &= -\Delta \left(\frac{1}{8\pi} \int d^3 x \vec{E} \cdot \vec{E} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

โดยที่ในบรรทัดที่สองของ (4) แสดงรูปของพลังงานศักย์ และ บรรทัดที่สามแสดงรูปของพลังงานสนามไฟฟ้า โดยมี $\vec{E} = \vec{E}_i + \vec{E}_j$ เป็นสนามไฟฟ้ารวมของระบบจุดประจุทั้งสอง ซึ่งเราจะกล่าวถึงต่อไปที่สมการ (11)-(14)

เมื่อเขียนรวมสมการ (2)-(4) จะได้ สมการพลังงาน ดังนี้

$$\begin{aligned} -\Delta \left(\frac{1}{8\pi} \int d^3 x \vec{E} \cdot \vec{E} \right) &= -\Delta (q_i q_j / |\vec{r}_i - \vec{r}_j|) \\ &= \int_I^F d\vec{r}_i \cdot \vec{F}_i(\vec{r}_i) = \Delta \left(\frac{1}{2} m_i v_i^2 \right) \end{aligned} \quad (5)$$

จะเห็นว่าสมการกฎการเคลื่อนที่ (1) กับสมการพลังงาน (5) มี โครงสร้างสมนัยกัน กล่าวคือ อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม สมนัยกับ พลังงานจลน์, แรง สมนัยกับ งาน, และ สนาม สมนัยกับ พลังงานศักย์หรือพลังงานสนาม แสดงดังแผนผัง (6) กับ (7) ต่อไปนี้

$$\text{สนาม} \rightarrow \text{แรง} \rightarrow \text{อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม} \quad (6)$$

$$\text{พลังงานสนาม} \leftrightarrow \text{พลังงานศักย์} \rightarrow \text{งาน} \rightarrow \text{พลังงานจลน์} \quad \text{ของอนุภาค} \quad (7)$$

เรามี 2 กระบวนทัศน์ (กรอบความคิด) ในการมองสมการพลังงาน (5) และแผนผัง (7) ดังนี้

I. กระบวนทัศน์แบบวิชากลศาสตร์ จากบรรทัดที่หนึ่ง และสองของสมการ (5) ทำให้ได้ว่าพลังงานศักย์เท่ากับงานในการนำอนุภาควัตถุ (มีมวล) จากตำแหน่งอนันต์มาจัดวางที่ตำแหน่งต่างๆ ทำให้มีมุมมองว่าพลังงานศักย์เก็บสะสม (stored) อยู่ในการติดตั้งจัดวางวัตถุที่ประกอบกันเป็นระบบ เช่น เชื้อเพลิง น้ำ ก็เป็น การจัดสร้างหรือจัดวางวัตถุในระบบให้พลังงานศักย์สามารถ ->

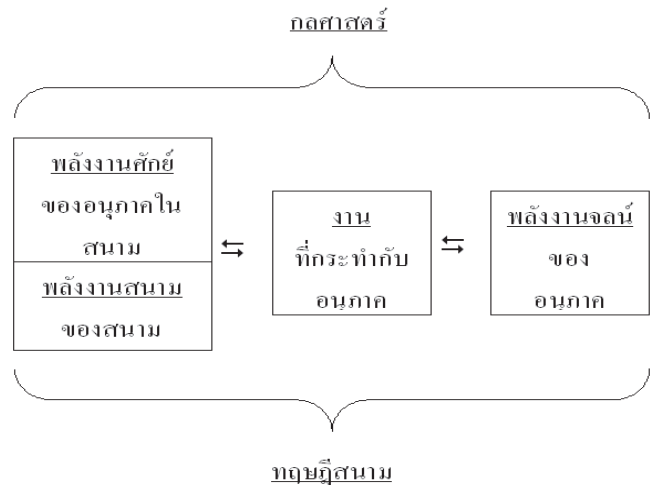
“ทำงานผลิตภัณฑ์” -> ความเคลื่อนไหวหรือพลังงานจลน์ที่เอาไปใช้งานขับเคลื่อนสิ่งต่างๆ เราจึงเรียกปริมาณที่เชื่อมโยงระหว่างพลังงานศักย์กับพลังงานจลน์ว่า งาน อนึ่ง เครื่องกำเนิดพลังงานก็เปรียบเสมือนกับเป็น “ก๊อกรของพลังงาน” ซึ่งเป็นการสร้างระบบที่สามารถควบคุมพลังงานศักย์ให้ปลดปล่อยพลังงานจลน์ออกมาได้เรื่อยๆ อย่างเป็นอัตโนมัติ แล้วนำความเคลื่อนไหวนี้ไปทำการผลิตสร้างงานอุตสาหกรรม

II. กระบวนทัศน์แบบทฤษฎีสถาน ในทฤษฎีสถาน มองว่าอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคไม่ใช้การกระทำโดยตรงที่ขึ้นกับแค่ระยะห่าง (action-at-a-distance) แต่เป็นสนามที่แผ่ไปในอวกาศและมีพลศาสตร์ในตัวมันเอง ในทฤษฎีสถานจึงจะทิ้ง concept พลังงานศักย์ที่สะสมที่ตัวอนุภาคตามกระบวนทัศน์ I. แต่มองว่าเป็น พลังงานสนาม (field energy) ที่สะสมอยู่ในตัวสนามทั่วทั้งอวกาศและถ่ายทอดให้กับอนุภาคกลายเป็นพลังงานจลน์ของอนุภาค เช่น การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ผ่านอวกาศสามารถให้ความร้อนและการเคลื่อนไหวต่างๆ ในโลก สำหรับวิชาไฟฟ้าพลศาสตร์ที่ประจักษ์กันกำเนิดสนามเคลื่อนที่ได้นอกจากมีพลังงานสนามไฟฟ้าในรูปบรรทัดที่สามของ (4) แล้วยังมีพลังงานสนามแม่เหล็กด้วย [1 (หน้า 236-237)] แต่วิชาไฟฟ้าสถิตมีเฉพาะพลังงานสนามไฟฟ้าเท่านั้น โดยเป็นสิ่งเดียวกับพลังงานศักย์ตามสมการ (4) (ซึ่งแสดงโดยสัญลักษณ์ $\leftrightarrow$ ในแผนผัง (7)) แม้ว่าพลังงานสนามไฟฟ้ากับพลังงานศักย์ในวิชาไฟฟ้าสถิตเป็นสิ่งเดียวกันแต่เป็น concept ที่มาจากกระบวนทัศน์ที่ต่างกันโดยสิ้นเชิง ดูการเปรียบเทียบดังรูปที่ 1

ตามกระบวนทัศน์แบบทฤษฎีสถานนี้ ในวิชาไฟฟ้าสถิตมีการถ่ายเทพลังงานตามแผนผัง (7) ดังที่บรรยายตรงย่อหน้าต้นบทความว่า พลังงานของระบบอยู่ทั้งในสนามของแรง นั่นคือพลังงานสนาม และอยู่ทั้งในอนุภาค นั่นคือ พลังงานจลน์ และมีการถ่ายเทไปมาระหว่างพลังงานทั้งสองรูปนี้ในระบบ อนึ่ง ในขอบเขตของทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป สนามความโน้มถ่วงเป็นความโค้งของอวกาศและเวลา ดังนั้นจึงมีพลังงานอีกชนิดหนึ่งอยู่ในโครงสร้างเรขาคณิตของอวกาศเวลา นั่นคือ พลังงานสนามความโน้มถ่วง

ปฏิกิริยาคง (paradox) ระหว่างพลังงานศักย์กับพลังงานสนามในวิชาไฟฟ้าสถิต

พิจารณาระบบจุดประจุ n อนุภาค ลำดับด้วย $i = 1, 2, \dots, n$ ที่เริ่มต้นจากหยุดนิ่งในกรอบเฉื่อย ในขณะเริ่มต้น



รูปที่ 1 แสดงกระบวนทัศน์ในการมองพลังงานกล 2 แบบ คือแบบกลศาสตร์ (ด้านบน) กับ แบบทฤษฎีสถาน (ด้านล่าง)

ระบบยังไม่มีพลังงานจลน์ มีแต่พลังงานศักย์รวมสะสมไว้ พร้อมที่จะก่อเกิดการเคลื่อนไหว ซึ่งมีค่าเท่ากับงานในการนำจุดประจุเหล่านี้จากตำแหน่งอนันต์มาไว้ด้วยกันที่ตำแหน่ง $\vec{r}_i$ ต่างๆ และพบว่ามีรูปเป็นผลบวกของพลังงานศักย์จากแต่ละคู่ของอนุภาคอันตรกิริยาดังนี้ (ใช้หน่วย Gaussian) [1 (หน้า 45-46), 2 (หน้า 92-94)]

$$U_M = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n \frac{q_i q_j}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|} \quad (8)$$

โดยที่ดัชนี M หมายถึง รูปในวิชากลศาสตร์ ถ้าประมาณเป็นระบบประจวบเนื่อง พลังงานศักย์รวมที่เก็บสะสมไว้จะอยู่ในรูป

$$U = \frac{1}{2} \iint_V d^3x d^3x' \frac{\rho(\vec{x}) \rho(\vec{x}')}{|\vec{x} - \vec{x}'|} = \frac{1}{2} \int_V d^3x \rho(\vec{x}) V(\vec{x}) \quad (9)$$

เราจะพยายามเขียน (9) ในรูปสนามไฟฟ้า โดยขยาย การอินทิเกรตปริมาตรของก้อนประจวบเนื่องกำเนิด ให้เป็นการอินทิเกรตทั่วทั้งอวกาศ และใช้สมการปัวซองของศักย์กับการอินทิเกรตแยกส่วนจัดรูปดังนี้

$$U_F = \frac{1}{8\pi} \int d^3x (-\nabla^2 V) V = \frac{1}{8\pi} \left[\int d^3x \vec{\nabla} V \cdot \vec{\nabla} V - \int d\vec{a} \cdot V \vec{\nabla} V \right] = \frac{1}{8\pi} \int d^3x \vec{E} \cdot \vec{E} \quad (10)$$

เนื่องจากความเข้มสนามจะอ่อนลงจนเป็นศูนย์ในบริเวณที่ห่างจากประจวบเนื่องกำเนิดเป็นระยะอนันต์ เราจึงสามารถละพจน์ผิว (surface

term) ที่เป็นพจน์ที่สองในบรรทัดที่สองของ (10) ได้ ส่วนดัชนี F หมายถึง รูปในทฤษฎีสถานม สังเกตว่า U_F (10) มีค่าเป็นบวกอย่าง เดียวเพราะอยู่ในรูปผลคูณภายในของสนามไฟฟ้าขัดแย้งกับ U_M (8) ที่เป็นได้ทั้งค่าบวกหรือลบอันเนื่องจากระบบมีได้ทั้งประจุบวก และลบ!! [1 (หน้า 46-47), 2 (หน้า 96)] ปฏิทรรศน์ นี้มาจากไหน? และจะแก้ไขอย่างไร? ลองตรวจสอบจากระบบที่ง่ายกว่านี้

พิจารณาระบบ 2 ประจุ ลำดับด้วย i, j ที่เริ่มต้นจากหยุด นิ่งในกรอบเฉื่อย ในขณะที่เริ่มต้นระบบมีแต่พลังงานศักย์ซึ่งสามารถ จัดให้อยู่ในรูปสนามไฟฟ้าโดยใช้สมการปัวซองของศักย์และ การอินทิเกรตแยกส่วนดังนี้

$$\begin{aligned} U_M &= \frac{q_i q_j}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|} = \int d^3 x (q_i \delta(\vec{x} - \vec{r}_i)) \frac{q_j}{|\vec{x} - \vec{r}_j|} \\ &= \frac{1}{4\pi} \int d^3 x \left(-\nabla^2 \left(\frac{q_i}{|\vec{x} - \vec{r}_i|} \right) \right) \frac{q_j}{|\vec{x} - \vec{r}_j|} \\ &= \frac{1}{4\pi} \int d^3 x \vec{E}_i(\vec{x}) \cdot \vec{E}_j(\vec{x}) \end{aligned} \quad (11)$$

ซึ่งเราได้ละพจน์ผิวไป และพอจะมีทฤษฎีบท

$$\int d^3 x \vec{\nabla} \left(\frac{1}{|\vec{x} - \vec{r}_i|} \right) \cdot \vec{\nabla} \left(\frac{1}{|\vec{x} - \vec{r}_j|} \right) = 4\pi \frac{1}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|} \quad (12)$$

$$\int d^3 x \vec{\nabla} \left(\frac{1}{|\vec{x} - \vec{r}_i|} \right) \cdot \vec{\nabla} \left(\frac{1}{|\vec{x} - \vec{r}_i|} \right) = 4\pi \frac{1}{|\vec{r}_i - \vec{r}_i|} \rightarrow \infty \quad (13)$$

โดยอินทิกรัล (10) เป็นเอกฐาน (singular) มีค่าลู่ออก สังเกตว่าการ เขียน U ในรูปสนามไฟฟ้าตาม (8) ยังคงอยู่ในรูปสนามของแต่ละ ประจุ $\vec{E}_i$ กับ $\vec{E}_j$ ไม่ได้อยู่ในรูปสนามรวมของระบบ $\vec{E}(\vec{x}) = \vec{E}_i + \vec{E}_j$ และยังไม่รู้รูปทั่วไปสำหรับทุกระบบประจุ เนื่องจากเราสามารถ บวกค่าคงที่ลงไปในพลังงานศักย์ได้อย่างไม่จำกัด โดยไม่เปลี่ยนค่า ของแรงเพราะแรงอยู่ในรูปอนุพันธ์ของพลังงานศักย์ ($\vec{F} = -\vec{\nabla} U(\vec{x})$) และไม่มีผลกระทบกับปรากฏการณ์ในอวกาศและเวลา [1 (หน้า 47)] เราจึงสามารถจัดรูป (11)ให้อยู่ในรูปสนามไฟฟ้ารวมของระบบได้ โดยบวกพจน์เอกฐานในรูป (13) ซึ่งเป็นค่าคงที่อนันต์ (IC : infinite constant) ลงไปดังนี้

$$\begin{aligned} U_F &= \frac{q_i q_j}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|} + IC = \frac{1}{2} \left(\frac{q_i q_i}{|\vec{r}_i - \vec{r}_i|} + 2 \frac{q_i q_j}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|} + \frac{q_j q_j}{|\vec{r}_j - \vec{r}_j|} \right) \\ &= \frac{1}{4\pi} \frac{1}{2} \int d^3 x \left[(\vec{E}_i)^2 + 2\vec{E}_i \cdot \vec{E}_j + (\vec{E}_j)^2 \right] \\ &= \frac{1}{4\pi} \frac{1}{2} \int d^3 x (\vec{E}_i + \vec{E}_j)^2 = \frac{1}{8\pi} \int d^3 x \vec{E} \cdot \vec{E} \end{aligned} \quad (14)$$

เห็นได้ชัดว่าสาเหตุที่ (14) ไม่ตรงกับ (11) ก็เพราะมีการเพิ่มพจน์ เอกฐานนี้เข้ามา เมื่อย้อนกลับไปที่ (8) ถึง (10) ถามว่าในขั้นตอนใด เป็นจุดที่มีการเพิ่มพจน์เอกฐานนี้? คำตอบคือ ขั้นตอนแรกที่เปลี่ยน ผลบวก (8) ให้เป็นอินทิกรัล (9) นั่นเอง [2 (หน้า 97)] โดยพจน์ เอกฐานนี้ไม่มีปัญหาในเครื่องหมายอินทิเกรตเพราะภายใต้ $\rho(\vec{x}')$ ที่มีค่าจำกัด $d^3 x'$ ที่มีค่าน้อยยิ่งจะหักล้างกับองค์ประกอบเอกฐาน $1/|\vec{x} - \vec{x}'|$ ที่จุด $\vec{x}' \rightarrow \vec{x}$ ทำให้สามารถนิยามตัวถูกอินทิเกรตที่จุดนี้ ได้ [2 (หน้า 97)] เช่น พิจารณาจุดประจุขนาด $dq = d^3 x' \rho(\vec{x}')$ ที่อยู่จุด $\vec{x}'$ เมื่อเราให้ $d^3 x'$ เป็นปริมาตรทรงกลมน้อยยิ่งล้อมรอบ จุดกล่าวคือ

$$d^3 x' = d \left(\frac{4}{3} \pi R^3 \right) \Big|_{\vec{x} \rightarrow \vec{x}'} = 4\pi R^2 dR \Big|_{\vec{x} \rightarrow \vec{x}'}$$

โดยที่

$$R = |\vec{x} - \vec{x}'| \rightarrow 0$$

ก็จะได้ว่า

$$d^3 x' \frac{\rho(\vec{x}')}{|\vec{x} - \vec{x}'|} \text{ ที่จุด } \vec{x}' \rightarrow \vec{x} \text{ มีค่า } 4\pi dR \rho(\vec{x}') R \rightarrow 0$$

ซึ่งไม่มีปัญหาในเครื่องหมายอินทิเกรต $\int d^3 x'$ ของ (9)

ดังนั้นในอินทิกรัล (9) ได้ค้นพบพจน์เอกฐานนี้ไว้แล้ว ในขณะที่ผลบวก (8) ไม่ได้ค้นพบ นำสนใจว่าพจน์เอกฐานที่ไม่มี ในรูปของพลังงานศักย์ U_M (8) แต่มีในรูปของพลังงานสนาม U_F (10) หรือ (14) นี้ มีความหมายว่าอย่างไร? คราวหน้าเราจะมา อภิปรายความหมายของพจน์เอกฐานนี้กัน



เอกสารอ้างอิง

- [1] J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics* (John Wiley & Sons, 2nd ed., 1975).
- [2] D. J. Griffiths, *Introduction to Electrodynamics* (Prentice-Hall, 2nd ed., 1989).

บูดาเปสต์

อิรพัฒน์ วิลัยทอง

เดือนพฤษภาคม ค.ศ. 1981 ทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ [หรือที่เรียกกันสั้นๆติดปากว่า ไอเออีเอ(IAEA)] จัดทัศนศึกษาเรื่องการประยุกต์ใช้เครื่องเร่งอนุภาคพลังงานต่ำ (พลังงานของอนุภาคอยู่ในเรือน keV) โดยพานักวิทยาศาสตร์นิวเคลียร์ซึ่งส่วนใหญ่เป็นนักฟิสิกส์จากประเทศที่กำลังพัฒนาไปดูงานการใช้เครื่องเร่งอนุภาคที่ประเทศฮังการี เซกโกสโลวาเกีย เยอรมันตะวันออกและสหภาพโซเวียต หัวเรือใหญ่ของการจัดทัวร์ครั้งนั้นเป็นเจ้าหน้าที่เทคนิคประจำกองฟิสิกส์ของไอเออีเอชื่อ ดร. โจ ดอลนิชาร์ (Joe Dolnicar) ซึ่งต่อมาภายหลังได้กลายเป็นสหายนิตินิตลอคชีวิตของเรา

โจรู้ว่าทางเชียงใหม่กำลังมีโครงการขอเครื่องเร่งอนุภาคผลิตนิวตรอน (เครื่องกำเนิดนิวตรอน = Neutron Generator) จึงให้ไอเออีเอส่งประกาศรับสมัครคัดเลือกผู้เข้าร่วมทัวร์มายังสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติหรือ พปส. (ปัจจุบันเปลี่ยนชื่อเป็นสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ) ในฐานะหน่วยงานหลักระดับชาติที่ดูแลงานด้านนี้ เพื่อส่งเรื่องต่อไปยังหน่วยงานอื่นที่เกี่ยวข้องเมื่อทบวงมหาวิทยาลัยได้รับเรื่องจาก พปส. จึงแจ้งต่อไปยังมหาวิทยาลัยต่างๆ รวมทั้งมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ด้วย ในขณะที่เดียวกัน โจ ก็ส่งข่าวเป็นการภายในถึงบรรดาผู้คนที่เขาหมายตาเอาไว้ว่าจะเชิญมาเป็น “ลูกทัวร์” เพื่อให้รู้ตัวล่วงหน้า จะได้เตรียมเอกสารไว้ให้พร้อมก่อนที่จะไปสมัครเป็นทางการจะมาถึง ซึ่งหนึ่งในนั้นก็มีผมอยู่ด้วยคนหนึ่ง

ผมรอแล้วรอเล่าเฝ้าแต่รอหาย จนเวลาแสนตายของการส่งใบสมัครใกล้เข้ามาถึงยังไม่ได้รับเรื่องจากมหาวิทยาลัย ผมรวบรวมความกล้าไปตามเรื่องที่ “ตึกหน้า” (สำนักงานอธิการบดี) ถึงได้รู้ว่าการที่ดูแลงานนี้ส่งเรื่องไปที่คณะแพทยศาสตร์ ผมขอเข้าพบรองอธิการบดีฝ่ายบริหาร อธิบายให้ท่านฟังถึงความจำเป็นเร่งด่วนที่ต้องกรอกใบสมัครส่ง ท่านรองฯก็ “เก้ท เดอะ แมสเสจ” รับสั่งการ



แม่น้ำดานูบช่วงที่ไหลผ่านกรุงบูดาเปสต์

ต่อให้ทันที อีกสองวันต่อมาผมเกาะปีกการบินไทยลงกรุงเทพฯ อธิบายให้เจ้าหน้าที่ทบวงมหาวิทยาลัยฟังเรื่องเครื่องเร่งอนุภาคกับมหาวิทยาลัยเชียงใหม่จนเข้าใจ จึงได้ส่งใบสมัครของผมไปที่ พปส. เพื่อส่งต่อไปยังไอเออีเอ มารู้อีกจากโฆษกหลังจากใบสมัครของผมไปถึงแบบ “เส้นยาแดงผ่าแปด” จริงๆ

หลังจากนั้นไม่นาน ผมก็เผด็จกระเป๋าดูทางไปบูดาเปสต์ จำได้ว่าเครื่องบินลงที่สนามบินดอนเมือง มีเจ้าหน้าที่ผู้หญิงชาวฮังการีมารอรับ พาไปเช็คอินที่โรงแรม ไตรราชชื่อแล้วพบว่าเพื่อนร่วมห้องของผมเป็นนักเคมีนิวเคลียร์ชาวเปรูชื่อ ริคาร์โด โลเปซ เก็บสัมภาระเข้าห้องเรียบร้อยแล้ว เจ้าหน้าที่ที่ผลัดผมขึ้นรถเร่งรีบพาไปร้านอาหารที่โจใช้เป็นสถานที่เลี้ยง “ลูกทัวร์” นอกรอบเพื่อเป็นการต้อนรับคำค้นแรกของพวกเราที่นี้อย่างไม่เป็นทางการ และเพื่อสร้างความคุ้นเคยระหว่างลูกเรือพ่อพันธุ์แม่ที่จะต้องกินนอน และเรียนรู้ร่วมกันอีกหลายอาทิตย์ กิจกรรมนี้ โจเรียกติดปากว่า “งานละลายน้ำแข็ง” เพื่อนคนแรกที่ผมได้คุยด้วยในงานคือ มาเรีย เฟอร์นันเดซ จากประเทศโปรตุเกส อังดิก น้ำแข็งก็ยิ่งละลาย และก่อนงานจะเลิกผมก็ได้คุยกับนักวิทยาศาสตร์จากประเทศอื่นๆ อีกหลายคน



Dr. Joe Dolnicar คือคนขวามีอสูด

วันรุ่งขึ้น ตอนเช้าไปฟังบรรยายสรุปเรื่องทัวร์ที่สำนักงานพลังงานปรมาณูของฮังการี ตกบ่ายก็นั่งรถบัสเที่ยวดูสถานที่สำคัญๆ ในเมืองบูดาเปสต์ ผมถูกคาดหวังจากงานแขวนใบหนึ่งในร้านขายของที่ระลึกที่คูตีมีระดับ ควักกระเป๋าจ่ายเงินซื้อทันทีโดยไม่ทันคิดว่างานขนาดไม่เล็กใบนี้จะต้องตะลอนๆ ไปกับผมในประเทศสังคมนิยมอีกหลายสัปดาห์ งานแขวนใบแรกที่ผมถูกใจจนต้องซื้อโดยไม่คิดหน้าคิดหลังเสียก่อนใบนี้ เป็นงานเซรามิกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 14 นิ้ว ตรงกลางเป็นรูปวาดตำนานเซนต์จอร์จ (St. George)ปราบมังกร ยี่สิบสี่ปีให้หลัง ผมจึงได้อ่านเรื่องตำนานนี้จากคอลัมน์ “ถามตอบรอบโลก” ของหนังสือพิมพ์ผู้จัดการฉบับวันที่ 7 เมษายน 2548

เรื่องราวเกี่ยวกับเซนต์จอร์จและมังกรเป็นนิยายพื้นบ้านของประเทศต่างๆ ทั่วยุโรปและเอเชียไมเนอร์ เนื้อหาใกล้เคียงกันแต่รายละเอียดแตกต่างกันไปบ้างตามวัฒนธรรมประเพณีของท้องถิ่น เรื่องเริ่มต้นขึ้นเมื่อมังกรเจ้าพ่อตัวหนึ่งมาจับจองที่อยู่ใกล้กับบ่อน้ำ ซึ่งเป็นแหล่งน้ำแห่งเดียวของชาวบ้าน ในหมู่บ้านที่ผู้คนเคยอาศัยอยู่อย่างสงบ ถ้าจับจองเฉยๆ คงไม่กระไรนักแต่มังกรตัวนี้กลับประกาศเอกสิทธิ์เหนือบ่อน้ำ ทุกๆ วันจะต้องมีผู้โชคร้ายคนหนึ่งจากการจับฉลากส่งเวทชีวิตให้กับมัน แลกกับที่มันยอมคายให้ชาวบ้านดื่มน้ำไปใช้

จนมาวันหนึ่ง ถึงคราวชะตาขาดของมังกรอันธพาล ผู้จับฉลากได้คือธิดาของกษัตริย์ พระราชบิดาทรงวิงวอนขอความช่วยเหลือจากเทพเจ้าที่นับถือเพียงใดก็ไม่เป็นผล ขณะที่เจ้าหญิงจะถูกนำตัวไปส่งเวทมังกรนั้น อัศวินขี่ม้าขาวก็มาถึง ชายพเนจรนามว่าจอร์จขี่ม้าขาวผ่านมายังหมู่บ้านพอดิ เขามามังกรและ



เชิญชมภาพสีที่หน้า 2

ช่วยชีวิตเจ้าหญิงไว้ได้ ชาวบ้านซึ่งได้ตระหนักด้วยตัวเองแล้วว่าเทพเจ้าที่กราบไหว้บูชามาเนิ่นนานตามบรรพบุรุษนั้น เอาเข้าจริงก็ไม่มีอำนาจอะไรเลย จึงเปลี่ยนมาเป็นผู้เชื่อในพระคริสต์ตามอัศวินม้าขาวผู้ช่วยชีวิตเจ้าหญิง

สมัยโบราณ มีผู้เชื่อว่าเรื่องราวดังกล่าวเกิดขึ้นจริง ปัจจุบันนักประวัติศาสตร์จำนวนมากระบุว่าเซนต์จอร์จ ผู้ขี่ม้าขาวและปราบมังกรสำเร็จนั้นเป็นรูปแบบเรื่องเล่าของคริสต์ศาสนาที่เข้ามาแทนที่เทพปกรณัมดั้งเดิมของกรีกและโรมัน และยังมีร่องรอยคล้ายคลึงกันอยู่ อย่างไรก็ตามการนับถือเซนต์จอร์จก็ดำเนินเรื่อยมาถึงคริสต์ศตวรรษที่ 3 แห่งอังกฤษซึ่งครองราชย์ระหว่างปี 1327-1377 และเป็นที่รู้จักกันดีในฐานะผู้สนับสนุนการพระราชทานบรรดาศักดิ์เป็นผู้สถาปนาเซนต์จอร์จให้เป็นนักบุญประจำประเทศของอังกฤษในรัชสมัยของพระองค์ ตลอดมาจนถึงปัจจุบัน และนอกจากนี้ยังเป็นนักบุญประจำประเทศและเมืองต่างๆ อีกหลายแห่ง

การประชุมที่บูดาเปสต์สอนผมว่าโอกาสเป็นสิ่งสำคัญต่อความสำเร็จก็จริง แต่ที่สำคัญกว่าคือคนที่รู้คุณค่าของโอกาสนั้น และมีความพยายาม มีความมุ่งมั่น ที่จะใช้โอกาสนั้นให้เกิดประโยชน์ สูงสุด เพราะมีเวลานั้นแล้ว โอกาสก็จะลอยผ่านไป..... และอาจจะไม่หวนกลับมาอีกเลยก็เป็นได้.....

National Astronomical Research Institute of Thailand

สถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (สอวท.)
กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

NARIT



ความเป็นมา BACKGROUND

ตามที่คณะรัฐมนตรี มีมติเมื่อวันที่ 20 กรกฎาคม 2547 เห็นชอบในหลักการแก่กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ในการจัดตั้งสถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติขึ้นในประเทศไทยเพื่อเฉลิมพระเกียรติพระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัวในโอกาสฉลอง 200 ปี แห่ง การพระราชสมภพ ในปี พ.ศ. 2547 และพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดชในวโรกาสเจริญพระชนมายุครบปีพระราชสมภพ 80 พรรษาในปี พ.ศ. 2550

วิสัยทัศน์ VISION

มุ่งเน้นการวิจัย การสร้างเครือข่ายความร่วมมือและการพัฒนาองค์ความรู้ทางดาราศาสตร์ของประเทศสู่ระดับสากล เพื่อสร้างวัฒนธรรมแห่งการเรียนรู้ทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ในสังคมไทย



พันธกิจ MISSION

1. สร้างผลงานวิจัยทางด้านดาราศาสตร์ที่เป็นองค์ความรู้ใหม่และมีคุณภาพระดับสากลเผยแพร่ในระดับประเทศและนานาชาติ เพื่อเสริมสร้างขีดความสามารถในการแข่งขัน และการพัฒนาองค์ความรู้ทางดาราศาสตร์และเทคโนโลยีของประเทศ
2. สร้างเครือข่ายความร่วมมือทางด้านดาราศาสตร์กับมหาวิทยาลัย สถาบันการศึกษาและองค์กรที่เกี่ยวข้องทั้งในระดับประเทศและนานาชาติ ในการวิจัย การผลิตบัณฑิต การบริการวิชาการแก่สังคม และการสร้างมาตรฐานทางวิชาการด้านดาราศาสตร์และวิทยาศาสตร์ของประเทศ
3. ส่งเสริมบรรยากาศและความตื่นตัวทางด้านวิทยาศาสตร์ของประเทศรวมทั้งการสร้างความตระหนักและความเข้าใจที่ถูกต้องทางวิทยาศาสตร์สู่สาธารณะ
4. พัฒนาองค์ความรู้ทางดาราศาสตร์ร่วมกับศาสตร์ด้านอื่นเพื่อให้เกิดการบูรณาการทางวิชาการอันจะเป็นประโยชน์แก่สังคม
5. เป็นศูนย์สารสนเทศและถ่ายทอดองค์ความรู้ทางดาราศาสตร์ของประเทศ
6. สนองนโยบายของรัฐด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ด้านเศรษฐกิจและสังคม การจัดการศึกษาตามแนวปฏิรูปการศึกษาและพระราชบัญญัติการศึกษาแห่งชาติ

หอดูดาวแห่งชาติ NATIONAL OBSERVATORY

ที่ตั้ง บริเวณยอดดอยอินทนนท์ จังหวัดเชียงใหม่
ละติจูด $18^{\circ} 35' 17''$ เหนือ (N)
ลองจิจูด $98^{\circ} 29' 11''$ ตะวันออก (E)
ความสูงเหนือระดับน้ำทะเล 2,550 เมตร

หอดูดาวแห่งชาติ เป็นที่ตั้งของกล้องโทรทรรศน์ชนิดสะท้อนแสงแบบเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 เมตร พร้อมระบบฐานแบบวัสดุ-อาซิมุท และระบบขับเคลื่อนกลองอัตโนมัติ และมีระบบโดมที่เคลื่อนไหวได้อย่างสอดคล้องกับการเคลื่อนที่ของกล้องโทรทรรศน์ ซึ่งจะทำการสังเกตการณ์เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

เชียงใหม่ (สำนักงานชั่วคราว)

อาคารฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ 50200
โทรศัพท์ 0 - 5322 - 5569 โทรสาร 0 - 5322 - 5524

กรุงเทพฯ (สำนักงานประสานงาน)

ชั้น 2 สำนักงานปัสัฒ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ถนนพหลโยธิน แขวงจตุจักร กทม. 10400
โทรศัพท์ 0 - 2354 - 3756 โทรสาร 0 - 2354 - 3794

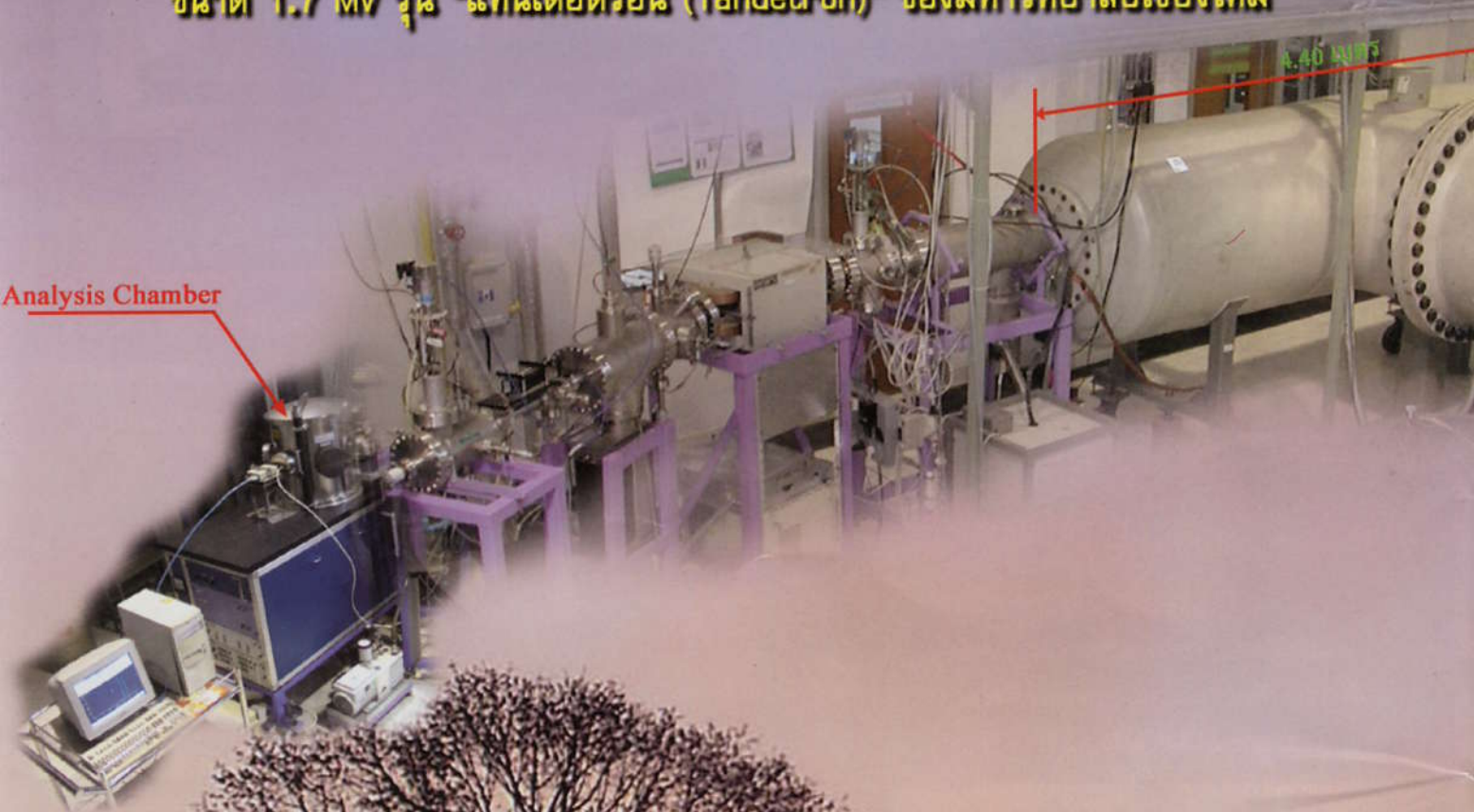
Website : www.narit.or.th

Email : info@narit.or.th

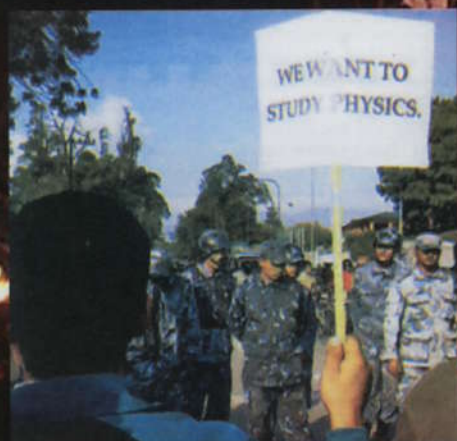
พื้นที่โฆษณา

เครื่องเร่งอนุภาคแบบแทนเด็ม (Tandem accelerator)
ขนาด 1.7 MV รุ่น "แทนเดตรอน (Tandetron)" ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Analysis Chamber



สมาคมฟิสิกส์ไทย • THAI PHYSICS SOCIETY
ถ.ปณ. 217 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50202
P.O.Box 217, Chiang Mai University, Chiang Mai 50202, THAILAND



ภาพประกอบของคอลัมน์ "สวัสดี"
โปรดดูที่หน้า 3



สิ่งตีพิมพ์

หากไม่ถึงผู้รับ โปรดส่งคืน
สมาคมฟิสิกส์ไทย