

วารสารฟิสิกส์ไทย

T h a i J o u r n a l o f P h y s i c s

วารสารสำหรับผู้รักและสนใจในแวดวงฟิสิกส์

ISSN 0857-1449

ปีที่ 27 ฉบับที่ 2 : มิถุนายน 2553 – สิงหาคม 2553



แสงชินโครตรอนกับงานวิจัยทางโบราณคดี

การประชุมผู้ได้รับรางวัลโนเบลครั้งที่ 60 ณ เมืองลินเดา

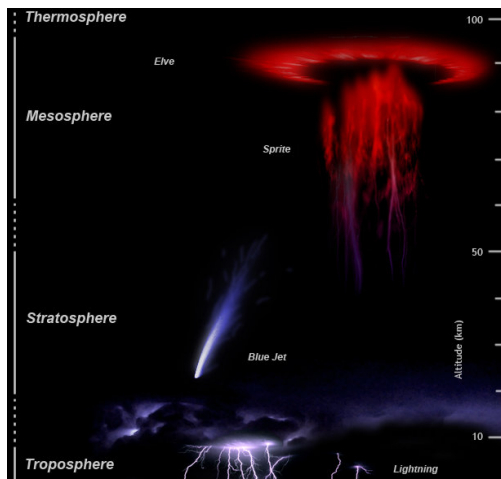
International Young Physicists' Tournament (IYPT)

การศึกษารูปบริเวณรอยกดของวัสดุเปราะ

เหล็ยมเพชรเม็ดงามวิชาแม่เหล็กไฟฟ้า ตอนที่ 7

วิพากกรรมของนักวิจัยรุ่นใหม่

รูปประกอบจากสรูปข่าว หน้า 2 – 3

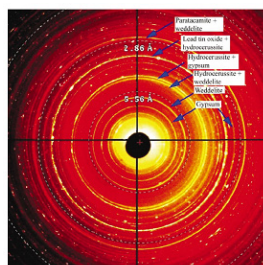


แผนภาพการเกิดปรากฏการณ์ฟ้าผ่าในระดับชั้นบรรยากาศต่างๆ

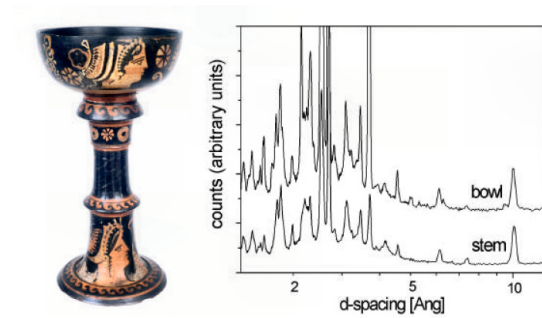


ภาพพายุสุริยะที่ความยาวคลื่น 304 อังสตรอม

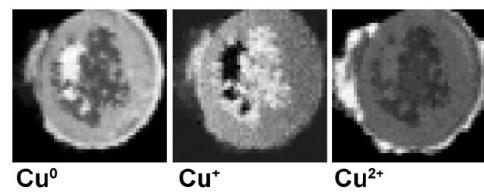
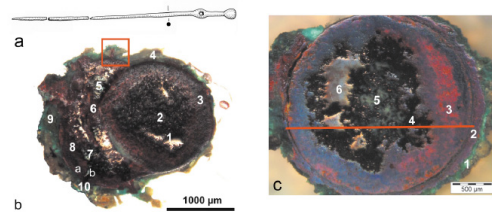
รูปประกอบจากบทความ “แสงซินโครตรอนกับงานวิจัยทางโบราณคดี” หน้า 4 – 11



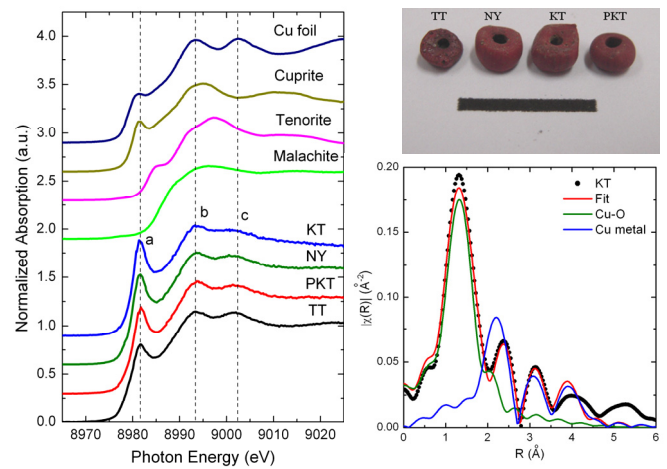
รูปที่ 3



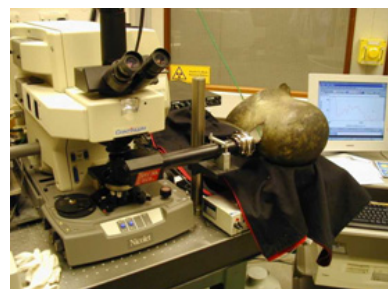
รูปที่ 5



รูปที่ 8



รูปที่ 10



รูปที่ 13

สารบัญ

สวัสดิ์	1
สรุปข่าว	2
แสงซินโครตรอนกับงานวิจัยทางโบราณคดี	4
ประพจน์ คล้ายสุบรรณ	
วิพากกรรมของนักวิจัยฟุ่่น	12
ศิวัช พงษ์เพียจันทร์	
การผิครูปบริเวณรอบรอยกดของวัสดุเปราะ	14
อภิชาติ ลิ้มปิยะพานิช	
การประชุมผู้ได้รับรางวัลโนเบลครั้งที่ 60 ณ เมืองลินเดา	17
ประจำปี 2553	
นิริวัติ ไทยเจริญ	
เหลี่ยมเพชรเม็ดงามวิชาแม่เหล็กไฟฟ้า: ตอนที่ 7	22
สูตรการกระจายในความถี่และมุมของพลังงานการแผ่รังสี	
แม่เหล็กไฟฟ้าโดยอนุภาคประจุเร่ง	
ชาญกิจ คันถ่อง	
International Young Physicists' Tournament (IYPT)	28
or Physics World Cup	
นฤมล สุวรรณจันทร์	



สวัสดิ์

สวัสดิ์ท่านผู้อ่านวารสารฟิสิกส์ไทยทุกท่าน กลับมาพบกันอีกครั้งหนึ่งในช่วงกลางฤดูฝนซึ่งในปีนี้อู้สึกว่าจะมีฝนค่อนข้างเยอะกว่าทุกปี สำหรับในฉบับนี้เรามีบทความหลากหลายบทความที่น่าสนใจอีกเช่นเคย ตัวอย่างเช่น เรื่องของการใช้แสงซินโครตรอนในงานวิจัยด้านโบราณคดี ซึ่งน่าจะเป็นประโยชน์กับประเทศไทยของเราเนื่องจากว่าเรามีสมบัติของชาติด้านโบราณคดีอยู่เป็นจำนวนมาก แต่มีการวิจัยที่เป็นวิทยาศาสตร์ค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับประเทศอื่นที่มีวัตถุโบราณน้อยกว่าเราด้วยซ้ำ บทความเกี่ยวกับงานวิจัยฟุ่่นซึ่งที่จริงแล้วมีความสำคัญกว่าที่เราคิดมากนัก นอกจากนั้นยังมีรายงานเกี่ยวกับการประชุมผู้ได้รับรางวัลโนเบลครั้งที่ 60 ที่เมืองลินเดา ซึ่งมีเยาวชนของเราเข้าร่วมด้วย และบทความแนะนำการแข่งขัน International Young Physicists' Tournament (IYPT) หรือ Physics World Cup ซึ่งหลายคนอาจไม่เคยได้ยินมาก่อน และยังมีบทความทางวิชาการอื่นๆ ที่น่าสนใจอีก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง บทความ เลี่ยมเพชรเม็ดงามวิชาแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งได้ดำเนินมาถึงตอนที่ 7 แล้วในฉบับนี้

กองบรรณาธิการ

กองบรรณาธิการ ชาญกิจ คันถ่อง, ศุภกร รักใหม่, วันทนา คล้ายสุบรรณ, ฉัตรชัย ศรีนิตวิรวงศ์, นฤมล สุวรรณจันทร์, พวงรัตน์ ไพเราะ, พรทิพย์ สุดเมือง, ศิรามาส โกมลจินดา, พรรณ วัฒนกลวิษฐ์ หัวหน้ากองบรรณาธิการ ประพจน์ คล้ายสุบรรณ ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ สมสร สิงขรัตน์ ภาพและออกแบบปก ประพจน์ คล้ายสุบรรณ เลขานุการกองบรรณาธิการ ประพจน์ คล้ายสุบรรณ จำนวนพิมพ์ 2,000 เล่ม

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

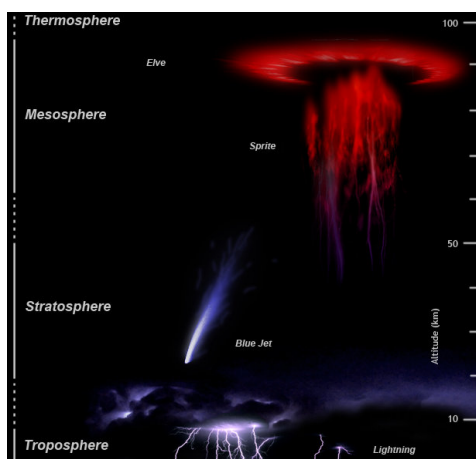
Website: www.thps.org ผู้ดูแล: ณัฐวุฒิ สุรเดช ติดต่อ: info@thps.org

คณะกรรมการสมาคมฟิสิกส์ไทย ประจำปี 2552 – 2554 นายกสมาคมฯ รศ. ดร. วีระพงษ์ แพสุวรรณ อุปนายก รศ. ดร. วิทยา อมรกิจบำรุง เลขานุการ ผศ. ดร. ประยูร ส่งศิริฤทธิกุล เหรัญญิก ศ. ดร. ชูกิจ ลิ้มปิยะจันทร์ นายทะเบียน ดร. สาโรช รุจิวรรณธน บรรณาธิการ วารสารฟิสิกส์ไทย ดร. ประพจน์ คล้ายสุบรรณ ปฎิคม ผศ. ดร. ศุภกร รักใหม่ ประธานสัมพันธ์ ดร. สัมภาส นิดเกตุ รองเลขานุการ ดร. ขรรค์ชัย โกศลทองเก้ กรรมการ ผศ. ดร. ขจรยศ อยู่ดี, ผศ. รัจนา ชินพิทักษ์, รศ. ดร. ชีรวรรณ บุญญวรรณ, ผศ. ดร. ธนากร โอสจันทร, ผศ. ดร. นิรันดร์ วิทอนันต์, ผศ. ดร. ขวัญ อารยะรัตนกุล, ดร. สิริพัฒน์ ประโตนเทพ, ดร. ณัฐพร นัตรแถม

สรุปข่าว

นักฟิสิกส์ค้นพบเครื่องเร่งอนุภาคบนท้องฟ้า

ในงานประชุมของราชสมาคมดาราศาสตร์ (Royal Astronomical Society) ณ เมืองกลาสโกว์ (Glasgow) ประเทศสกอตแลนด์เมื่อต้นเดือนเมษายนที่ผ่านมา ได้มีการนำเสนอหลักฐานในการค้นพบเครื่องเร่งอนุภาคขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ จากปรากฏการณ์ที่เราเห็นเมื่อมีพายุฝนฟ้าคะนอง คือ ปรากฏการณ์สไปรท์ (Sprites) หรือปรากฏการณ์ที่เกิดฟ้าผ่าเหนือพายุเมฆ



แผนภาพการเกิดปรากฏการณ์ฟ้าผ่าในระดับชั้นบรรยากาศต่างๆ สไปรท์จะเกิดขึ้นในบริเวณชั้นบรรยากาศที่เรียกว่าเมโสสเฟียร์ (Mesosphere)

Martin Fullekrug นักวิจัยจากมหาวิทยาลัยบาธ (Bath University) ได้อธิบายถึงการที่ทีมงานสามารถตรวจจับคลื่นวิทยุที่เกิดขึ้นพร้อมกับการเกิดสไปรท์ว่า คลื่นวิทยุที่วัดได้สามารถบอกได้ว่าปรากฏการณ์สไปรท์สามารถทำให้เกิดการเร่งพลังงานของอิเล็กตรอนที่อยู่บริเวณใกล้เคียงจนเกิดเป็นลำอนุภาคที่มีพลังงานสูงเหมือนกับการทำงานของเครื่องเร่งอนุภาค โดยพลังงานนี้สูงเทียบเท่ากับพลังงานของโรงงานไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดเล็กเลยทีเดียว

แนวคิดเริ่มแรกของเครื่องเร่งอนุภาคตามธรรมชาติที่เกิดขึ้นห่างจากตัวเราไม่กี่กิโลเมตรนี้ เกิดขึ้นเมื่อปี 1925 จากนัก

ฟิสิกส์รางวัลโนเบล Charles Wilson ที่ได้ศึกษาผลของสนามไฟฟ้าเมื่อเกิดพายุฝนฟ้าคะนอง Wilson ทำานว่า สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในกลุ่มเมฆฝนจะทำให้เกิดการแตกตัวของประจุในชั้นบรรยากาศ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์สไปรท์ในชั้นบรรยากาศเหนือเมฆ สนามไฟฟ้าของสไปรท์นี้จะทำให้อิเล็กตรอนอิสระที่อยู่บริเวณใกล้เคียง (อิเล็กตรอนนี้อาจเกิดขึ้นจากการแตกตัวของชั้นบรรยากาศโดยรังสีคอสมิก (Cosmic ray)) เคลื่อนที่จากชั้นบรรยากาศที่อยู่ใกล้ผิวโลกคือชั้นโทรโพสเฟียร์ (Troposphere) ขึ้นไปจนถึงชั้นบรรยากาศชั้นบนสุดที่อยู่ติดกับอวกาศ ซึ่งตามกฎของแมกซ์เวลล์การเปลี่ยนแปลงของกระแสอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงคลื่นความถี่วิทยุขึ้น

ในปี 1998 Robert Roussel-Dupre จาก Los Alamos National Laboratory ได้ทำการจำลองเพื่อหารูปแบบของคลื่นวิทยุที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์นี้ และพบว่าคลื่นวิทยุนี้จะเกิดเป็นพัลส์ที่มีสเปกตรัมของความถี่ค่อนข้างเรียบ ต่อมาในปี 2008 กลุ่มนักวิทยาศาสตร์ชาวยุโรป ได้ทำการติดตั้งเครื่องตรวจจับคลื่นวิทยุไวบนเทือกเขา Pyrenees ในประเทศฝรั่งเศส เพื่อตรวจจับคลื่นวิทยุเมื่อเกิดปรากฏการณ์สไปรท์ สัญญาณที่ตรวจพบนั้นปรากฏว่ามีคุณลักษณะดังเช่นที่ Roussel-Dupre ได้ทำนายไว้



ถึงแม้ขณะนี้จะยังไม่มีแนวคิดที่จะนำเครื่องเร่งอนุภาคที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติมาใช้งาน แต่การค้นพบนี้ก็จะทำให้เราเข้าใจปรากฏการณ์ในชั้นบรรยากาศมากขึ้น และอีกไม่นานเราคงได้เห็นข้อมูลที่น่าสนใจเกี่ยวกับปรากฏการณ์การเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุในชั้นบรรยากาศนี้ได้จากงานวิจัยของหลายๆ ประเทศ ที่ต่างส่งดาวเทียมขึ้นไปสำรวจแล้ว ตัวอย่างเช่นดาวเทียม

IBUKI ของญี่ปุ่น (ซึ่งจริงๆ แล้วเป็นดาวเทียมที่ภารกิจหลักคือ การศึกษาก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse gas) ในชั้นบรรยากาศ) ดาวเทียม TARANIS (Tool for the Analysis of RAdiations from lightNings and Sprites) ของฝรั่งเศส เป็นต้น



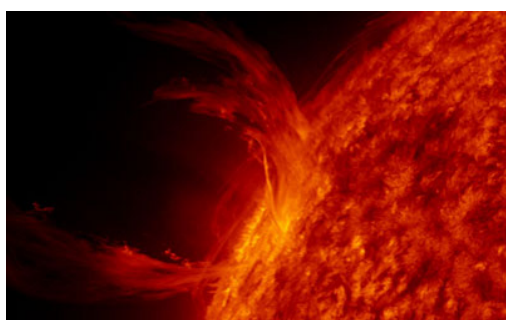
ดาวเทียม IBUKI (ซ้าย) และดาวเทียม TARANIS (ขวา)

ที่มา

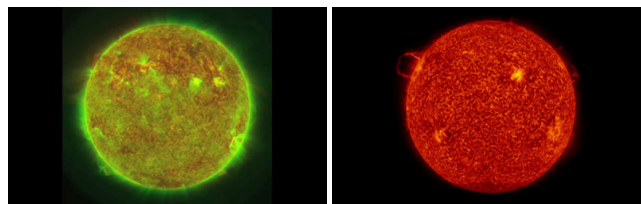
- [1] <http://physicsworld.com/cws/article/news/42368>
- [2] http://en.wikipedia.org/wiki/Upper-atmospheric_lightning
- [3] http://www.jaxa.jp/projects/sat/gosat/index_e.html
- [4] <http://events.eoportal.org/presentations/501/13174.html>

จับตายุสุริยะ

องค์การอวกาศและการบินแห่งชาติของสหรัฐ หรือ องค์การนาซา ได้เปิดเผยภาพถ่ายของดวงอาทิตย์ภาพแรกที่ได้จาก ดาวเทียม Solar Dynamics Observatory (SDO) ซึ่งเป็นการกิจแรก ในโครงการการศึกษาดวงอาทิตย์ “Living With a Star” ซึ่งใช้งบประมาณถึง 850 ล้านดอลลาร์สหรัฐ เพื่อศึกษาสาเหตุที่ทำให้ ดวงอาทิตย์เกิดการเปลี่ยนแปลงและทำความเข้าใจต่อผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อสิ่งมีชีวิตหรือการดำรงชีวิตอยู่บนโลก



ภาพพายุสุริยะที่ความยาวคลื่น 304 อังสตรอม



ภาพดวงอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นต่างๆ

ภาพถ่ายของดวงอาทิตย์จากการสำรวจด้วยดาวเทียม SDO ถูกส่งกลับมาครั้งแรก ภายหลังจากที่ส่ง SDO ขึ้นไปเมื่อ เดือนกุมภาพันธ์ที่ผ่านมา ซึ่งเป็นภาพของดวงอาทิตย์ที่มีความละเอียดสูงที่สุดเท่าที่เคยมีมา โดยภาพแสดงให้เห็นถึงกลุ่มก้อนของอนุภาคที่มีประจุที่ถูกปล่อยออกจากพื้นผิวของดวงอาทิตย์ หรือที่เรียกว่า การปลดปล่อยก้อนมวลจากโคโรนา (Corona Mass Ejection) พร้อมกับแสดงการปะทุของดวงอาทิตย์ หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า เปลวสุริยะหรือโซลาร์แฟลร์ (Solar flare)

การปะทุใหญ่นับดวงอาทิตย์ จะสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กบนพื้นผิวของดวงอาทิตย์ เมื่อการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมากจะทำให้เกิดจุดมืด (Sunspot) บนดวงอาทิตย์ ซึ่งจำนวนของจุดมืดจะเพิ่มขึ้นมากที่สุดและลดลงต่ำสุดเป็นวัฏจักรเฉลี่ยทุกๆ 11 ปี โดยจำนวนจุดมืดจะมีจำนวนมากที่สุด (Solar maxima) ครั้งถัดไปนั้นจะอยู่ในช่วงปี 2011 - 2012

การสำรวจของ SDO นี้จะใช้ปฏิบัติการในระยะเริ่มต้นเพียง 5 ปี ซึ่งจะทำให้เราสามารถสังเกตดวงอาทิตย์ได้อย่างละเอียดที่สุดและรวดเร็วที่สุดเท่าที่เคยมีการศึกษาดวงอาทิตย์มา

นักวิทยาศาสตร์คาดการณ์ว่าการปะทุครั้งใหญ่ของดวงอาทิตย์ในรอบต่อไปนี้จะสร้างความเสียหายมากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับเทคโนโลยีใหม่ๆ ในปัจจุบันที่ได้พัฒนาไปจากเมื่อ 11 ปีที่แล้วเป็นอย่างมาก ความปั่นป่วนของดวงอาทิตย์จะส่งผลกระทบต่อระบบดาวเทียมสื่อสาร ซึ่งลอยตัวเหนือชั้นบรรยากาศ ทำให้โทรศัพท์มือถือ ระบบนำร่องจีพีเอส ที่ต่างพึ่งพา ระบบเหล่านี้ใช้งานไม่ได้

ที่มา

- [1] <http://physicsworld.com/cws/article/news/42436>

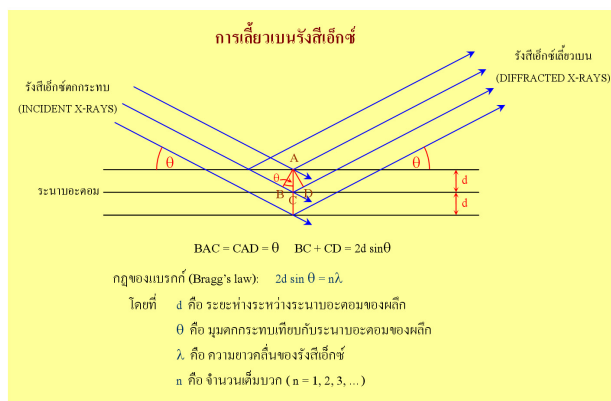
แสงซินโครตรอนกับงานวิจัยทางโบราณคดี

ประพจน์ คล้ายสุบรรณ¹

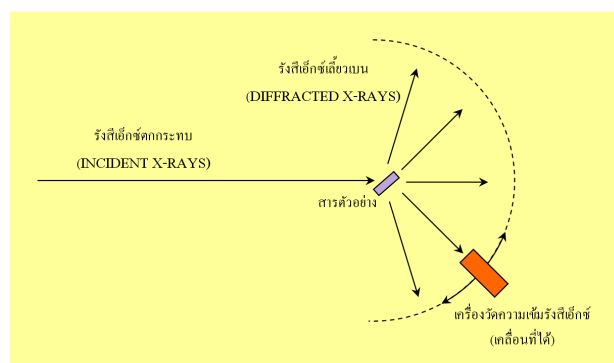
ในปัจจุบันแสงซินโครตรอนได้ถูกนำไปใช้ในงานวิจัยในหลากหลายสาขาวิชา ทั้งงานวิจัยที่เกี่ยวกับวิทยาศาสตร์บริสุทธิ์ในสาขาวิชาฟิสิกส์ เคมี และชีววิทยา และงานวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์ประยุกต์ เช่น วัสดุศาสตร์ วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ธรณีวิทยา และอื่น ๆ นอกจากนี้ แสงซินโครตรอนยังได้ถูกนำไปใช้ในงานวิจัยทางเภสัชศาสตร์ และการออกแบบผลิตภัณฑ์ในเชิงอุตสาหกรรมอีกด้วย แสงซินโครตรอนนั้นมีความสมบัติที่เหนือกว่าแสงที่ได้จากแหล่งกำเนิดแสงชนิดอื่นหลายประการ กล่าวคือ แสงซินโครตรอนเป็นแสงที่มีความเข้มสูง มีขนาดลำแสงเล็ก และเราสามารถเลือกใช้ความยาวคลื่นของแสงที่เราต้องการได้ คุณสมบัติเหล่านี้ทำให้แสงซินโครตรอนเป็นแสงที่เหมาะสมสำหรับการทดลองในงานวิจัยในเกือบทุกสาขา

เทคนิคการทดลองซึ่งใช้ประโยชน์จากแสงซินโครตรอนในย่านพลังงานรังสีเอ็กซ์ ทั้งรังสีเอ็กซ์พลังงานต่ำ (Soft x-rays) และรังสีเอ็กซ์พลังงานสูง (Hard x-rays) นั้นมีอยู่หลายเทคนิค เทคนิคแรกที่จะขอกล่าวถึงคือการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction หรือ XRD) ซึ่งรวมไปถึงเทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากวัตถุผง (X-ray powder diffraction หรือ XPD) เทคนิคการทดลองนี้อาศัยหลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากโครงผลึกตามกฎของแบรกก์ (Bragg's law) ซึ่งแสดงในรูปที่ 1 จุดประสงค์ของการทำการทดลอง XRD นั้นก็เพื่อตรวจสอบว่าสารตัวอย่างที่นำมาศึกษานั้นมีโครงสร้างผลึกเป็นอย่างไร สำหรับในกรณีของการทดลอง XPD นั้นจะเป็นการทดลองเพื่อหาว่าสารตัวอย่างนั้นๆ เป็นสารประกอบชนิดใด เนื่องจากผลึกของสารประกอบแต่ละชนิดจะมีรูปแบบที่วัดได้จากการทดลอง XPD ที่มีลักษณะเฉพาะตัว ซึ่งเมื่อเรานำรูปแบบ XPD ที่วัดได้ไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลของรูปแบบ XPD ที่เรามีอยู่แล้วก็จะสามารถทราบได้ว่าสารตัวอย่างที่เรานำมาวัดมีสารใดบ้างเป็นองค์ประกอบและมีสารเหล่านั้นอยู่ในอัตราส่วนเท่าใด อย่างไรก็ตาม เทคนิค XRD และ XPD นั้นจะมองเห็นเฉพาะองค์ประกอบ

ในวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นผลึกเท่านั้น



รูปที่ 1 หลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

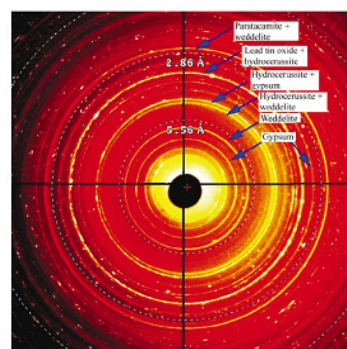


รูปที่ 2 แผนภาพการทดลองการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

ตัวอย่างงานวิจัยทางโบราณคดีที่ใช้เทคนิคการทดลอง XRD ร่วมกับแสงซินโครตรอนได้แก่ การศึกษาวิจัยชนิดของสีเขียนในภาพวาดสมัยศตวรรษที่ 15 (ผลงานของศิลปินชื่อ Jaume Huguet แห่งเมืองบาร์เซโลนา ประเทศสเปน) ณ ศูนย์ซินโครตรอน Synchrotron Radiation Source (SRS) เมือง Daresbury ประเทศอังกฤษ [1] Huguet เป็นศิลปินที่มีชื่อเสียงมากในสมัยนั้น ซึ่งทำให้เขาได้งานวาดสำคัญ ๆ หลายงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งงานวาดรูปที่เกี่ยวกับศาสนาสำหรับที่วางแท่นบูชา (Altarpiece) ใน

¹นักฟิสิกส์เครื่องเร่งอนุภาค (ดร.) ฝ่ายเทคโนโลยีเครื่องเร่งอนุภาค สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)

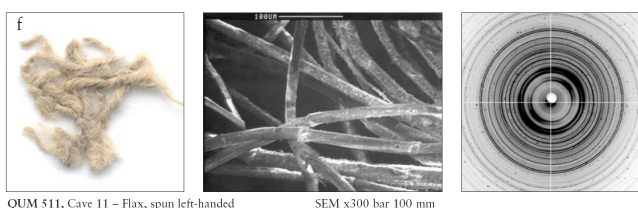
โบสถ์ งานศึกษาวิจัยโดยการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองนี้ นอกจากจะทำให้ทราบถึงเทคนิคการวาดภาพ (โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เทคนิคการเตรียมสี) ในสมัยโบราณแล้ว ยังบ่งบอกถึงการใช้องค์ประกอบสีที่แตกต่างกันในแต่ละยุคสมัยสำหรับแต่ละท้องที่อีกด้วย สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้ เนื่องจากภาพที่นำมาศึกษามีคุณค่าทางโบราณคดีสูง การกะเทาะสีออกมาจากภาพเพื่อทำการศึกษาก็ต้องทำด้วยความระมัดระวังและกะเทาะสีออกมาในปริมาณที่น้อยมาก พื้นที่ของภาพที่ถูกกะเทาะออกมานั้นน้อยกว่า 1 ตารางมิลลิเมตรเสียอีก ด้วยเหตุนี้จึงเราไม่สามารถวิเคราะห์สีปริมาณน้อยนี้ได้ด้วยเทคนิคการทดลองที่นิยมใช้กัน เช่น การทดลองสเปกโตรสโคปีในย่านรังสีอินฟราเรดร่วมกับการแปลงแบบฟูเรียร์ (Fourier transform infrared spectroscopy หรือ FTIR) หรือ การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ซึ่งการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีตัวตรวจจับและแยกแยะพลังงานรังสีเอกซ์ (Energy-dispersive x-ray detector หรือ EDX) นั้นสามารถบอกได้เพียงว่าสีเขียวจากภาพวาดนี้เป็นสารประกอบที่มีส่วนผสมของทองแดงและคลอรีนอยู่เท่านั้น ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของสีจึงต้องเปลี่ยนมาทำการทดลอง XRD โดยใช้แสงซินโครตรอนแทนแสงซินโครตรอนที่ใช้มีความยาวคลื่นเท่ากับ 0.087 นาโนเมตร และมีขนาดลำแสงเล็กเพียง 100 ไมครอน (0.1 มิลลิเมตร) เท่านั้น ซึ่งจากการทดลองพบว่าสีเขียวในภาพนั้นเป็นสารประกอบของทองแดงสามชนิด ได้แก่ สารประกอบคาร์บอนเนต สารประกอบอะซิเตต และสารประกอบคลอไรด์ของทองแดง ซึ่งข้อมูลที่ได้ นอกจากจะบอกถึงวัตถุดิบที่นำมาใช้ทำสีแล้ว ยังบอกถึงกระบวนการที่ใช้ในการทำสีอีกด้วย เนื่องจากกระบวนการทำสีแต่ละกระบวนการจะให้สีที่มีอัตราส่วนของสารประกอบทั้งสามชนิดแตกต่างกันออกไป



รูปที่ 3 (บน) หนึ่งในภาพวาดของ *Jaume Huguet* ที่ถูกนำมาวิจัยชื่อ *Retaule del Conestable* ซึ่งเป็นศิลปะแบบกอธิค (Gothic) เครื่องหมายดอกจันสามแห่งในรูปแสดงบริเวณที่น่าสีมาทำการทดลอง (ล่าง) รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงสี วัสดุต่างๆ ในรูปบอกถึงองค์ประกอบแต่ละชนิดของสารตัวอย่าง ตัวอย่างเช่น วงในสุดในรูปที่มีลูกศรชี้แสดงถึงยิปซัม ซึ่งเป็นส่วนประกอบของปูนปลาสเตอร์ที่ติดออกมาด้วยกับสีที่นำมาทำการทดลอง [1]

ตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้เทคนิคการทดลองการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ร่วมกับแสงซินโครตรอนอีกชิ้นหนึ่งได้แก่ การศึกษาวิจัยเส้นใยผ้าที่ขุดพบจากถ้ำในบริเวณใกล้เคียงกับหมู่บ้านโบราณของปาเลสไตน์ที่ชื่อ *Khirbet Qumran* [2] ซึ่งตั้งอยู่บริเวณชายฝั่งตะวันตกเฉียงเหนือของทะเล Dead Sea ในเขตเวสต์แบงก์ทางตะวันออกของกรุงเยรูซาเล็ม งานวิจัยนี้ใช้แสงซินโครตรอนในประเทศฝรั่งเศส ณ ศูนย์ซินโครตรอน European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) เมือง Grenoble และ ศูนย์ซินโครตรอน Synchrotron Radiation Source (SRS) จุดประสงค์หลักของงานวิจัยนี้มีสองประการ ประการแรกคือเพื่อวิเคราะห์ว่าเส้นใยผ้า

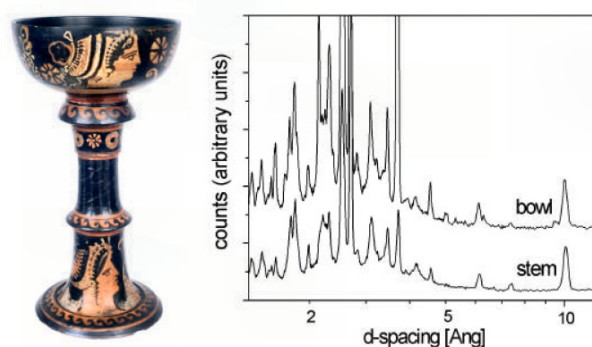
ที่พบนั้นทำมาจากวัสดุชนิดใด และประการที่สองคือเพื่อทราบถึงชนิดของสีที่ใช้ย้อมผ้า นั้นเป็นสีที่ถูกสกัดมาจากแร่ หรือถูกสกัดจากพืช หรือถูกสกัดจากสารอินทรีย์ชนิดอื่น ผลการวิเคราะห์เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับเส้นใยผ้าที่พบจากแหล่งขุดค้นอื่นจะทำให้เราทราบว่าเส้นใยผ้านี้เป็นของคนที่เคยอาศัยอยู่ในบริเวณนี้หรือเป็นของชนเร่ร่อนเผ่าเบดูอินที่เคยเดินทางผ่านบริเวณถ้ำเหล่านี้ แสงซินโครตรอนที่ใช้สำหรับการทดลองในรูปที่ 4 นั้นมีความยาวคลื่นเท่ากับ 0.087 นาโนเมตร และมีขนาดลำแสงเท่ากับ 200 ไมครอน (0.2 มิลลิเมตร) จากการทดลองพบว่า เส้นใยผ้าที่ขุดพบทั้งหมดสามารถแบ่งได้เป็นสามชนิด คือ เส้นใยเปลือกไม้ (Bast fiber) เส้นใยฝ้าย และเส้นใยขนสัตว์ โดยสรุปได้จากความแตกต่างขององค์ประกอบของเส้นใย คือ เส้นใยเปลือกไม้และเส้นใยฝ้ายจะมีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ ในขณะที่เส้นใยขนสัตว์จะมีโปรตีนชื่อเคราติน (Keratin) เป็นองค์ประกอบ



รูปที่ 4 (ซ้าย) รูปถ่ายของตัวอย่างเส้นใยผ้าที่ขุดพบจากหมู่บ้าน Khirbet Qumran (กลาง) ภาพขยายของเส้นใยผ้าจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (ขวา) รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ซึ่งได้จากการทดลอง X-ray fibre diffraction [2]

ตัวอย่างสุดท้ายของงานวิจัยที่ใช้เทคนิคการทดลอง XRD ร่วมกับแสงซินโครตรอนได้แก่ การศึกษาวิจัยคุณสมบัติบริเวณผิวของเครื่องเผากำยาน (Incense burner) ของพิพิรภัณฑ์แมนเชสเตอร์ ซึ่งนักโบราณคดีสันนิษฐานว่าถูกทำขึ้นโดยชาวกรีกทางตะวันตกเฉียงใต้ของอิตาลีเมื่อประมาณศตวรรษที่ 4 ก่อนคริสตกาล งานวิจัยนี้ใช้แสงซินโครตรอนที่มีความยาวคลื่นเท่ากับ 0.052 นาโนเมตร ณ ศูนย์ซินโครตรอน Synchrotron Radiation Source [3] โดยนักวิจัยได้ทำการทดลองกับเครื่องเผากำยานนี้ ณ สองบริเวณ คือ บริเวณถ้วยเผาส่วนบน และ บริเวณก้านสำหรับถือ เพื่อศึกษาว่าทั้งสองส่วนนี้ถูกปั้นขึ้นจากดินเหนียวชนิดเดียวกันหรือไม่ เนื่องจากมีข้อสงสัยว่าทั้งสองส่วนนี้อาจจะไม่ได้เป็นชิ้นเดียวกันตั้งแต่แรก แต่เป็นการนำถ้วยเผาล้อมมาติด

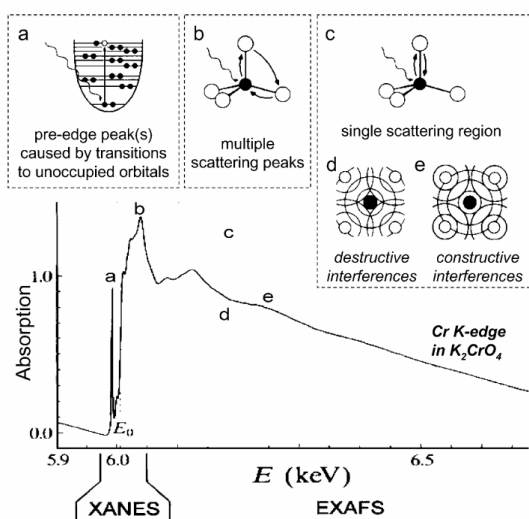
บนก้านถือซึ่งเป็นของเก่าจริง ข้อสงสัยนี้เกิดขึ้นเนื่องจากลักษณะของรอยแตกที่วาดอยู่บนทั้งสองส่วนนั้นมีความแตกต่างกันพอสมควร และเมื่อเคาะเบาๆ ทั้งสองส่วนก็ให้เสียงที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังไม่เคยมีการพบเครื่องปั้นดินเผาในยุคนี้ที่มีรูปร่างเช่นเดียวกันนี้เลย อย่างไรก็ตาม จากผลการทดลอง XPD พบว่ามีความเป็นไปได้สูงที่ทั้งสองส่วนนั้นถูกทำขึ้นจากดินเหนียวชนิดเดียวกัน นั่นคือ ทั้งสองส่วนเป็นวัตถุโบราณชิ้นเดียวกันแต่ดั้งเดิม เนื่องจากสเปกตรัม XPD ที่ได้จากทั้งสองส่วนนั้นมีความคล้ายคลึงกันอย่างมากดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 (ซ้าย) รูปถ่ายของเครื่องเผากำยาน Thymiaterion (ขวา) สเปกตรัมของระยะห่างระหว่างระนาบอะตอมของดินเผาที่ได้จากบริเวณถ้วย (Bowl) และบริเวณก้าน (Stem) ของเครื่องเผา ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกันอย่างมาก [3]

นอกเหนือจากเทคนิคการทดลองการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction หรือ XRD) แล้ว เทคนิคการทดลองที่เป็นที่นิยมใช้ในงานวิจัยทางโบราณคดีอีกเทคนิคหนึ่งคือการศึกษาสเปกตรัมของการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ (X-ray absorption spectroscopy หรือ XAS) หลักการของการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ของอะตอมนั้นกล่าวได้โดยย่อดังนี้ เมื่ออะตอมของสารได้รับรังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงานมากกว่าค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในอะตอมนั้น อะตอมจะดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ทำให้อิเล็กตรอนของอะตอมในชั้นพลังงานระดับลึกเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานไปอยู่ในชั้นบนสุดที่ยังว่างอยู่หากรังสีเอ็กซ์มีค่ามากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวเพียงเล็กน้อย หรือจนกระทั่งอิเล็กตรอนหลุดออกมาจากอะตอม หากพลังงานรังสีเอ็กซ์มีค่ามากขึ้น การดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ของอะตอมที่เปลี่ยนแปลงไปกับพลังงานของรังสีเอ็กซ์นี้เองที่ปรากฏเป็นโครงสร้างที่เรียกว่า X-ray absorption near edge structure

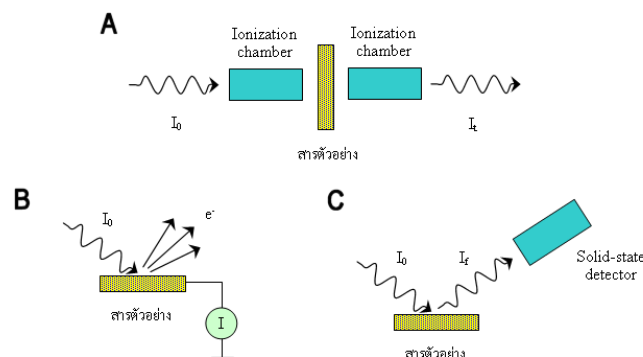
(XANES) และ Extended X-ray absorption fine structure (EXAFS) ที่นักทดลองสามารถวัดได้ รูปที่ 6 แสดงถึงที่มาของโครงสร้างการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ที่เกิดจากการเปลี่ยนสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนและพฤติกรรมการแทรกสอดของอิเล็กตรอนกับอะตอมรอบข้าง การวิเคราะห์โครงสร้าง XANES จะบอกถึงสถานะทางเคมีของอะตอม โดยเฉพาะอย่างยิ่งสถานะออกซิเดชัน นอกจากนี้ยังมีรูปแบบของการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ที่เป็นเอกลักษณ์ตามองค์ประกอบทางเคมี จึงสามารถใช้จำแนกชนิดของโมเลกุลหรือสารประกอบได้ สำหรับโครงสร้าง EXAFS นั้นเกิดจากอิเล็กตรอนที่มีพลังงานจลน์สูงขึ้นซึ่งมีพฤติกรรมเป็นแบบคลื่นซึ่งจะถูกสะท้อนกลับโดยอะตอมตัวอื่นๆ ที่อยู่โดยรอบ ดังนั้นการวิเคราะห์โครงสร้าง EXAFS จึงบอกเราเกี่ยวกับการจัดเรียงตัวของอะตอมตัวอื่นๆ ที่อยู่ล้อมรอบอะตอมที่ดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ เช่น ระยะห่างระหว่างอะตอม ชนิดของอะตอม และจำนวนของอะตอมที่อยู่ล้อมรอบ การทดลอง EXAFS จึงมีประโยชน์อย่างยิ่งกับการวิเคราะห์โครงสร้างที่เป็นผลึกในระยะสั้น รวมทั้งโครงสร้างที่ไม่เป็นผลึกได้อีกด้วย



รูปที่ 6 แสดง โครงสร้าง XANES และ EXAFS ที่เกิดจากการเปลี่ยนสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนจากการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์และพฤติกรรมการแทรกสอดของอิเล็กตรอนกับอะตอมรอบข้าง [4]

เนื่องจากการทดลอง XAS นี้ต้องอาศัยการเปลี่ยนความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์จึงสามารถกระทำได้โดยใช้แสงซินโครตรอนเท่านั้น การใช้เทคนิค XAS เพื่อหาโครงสร้างอะตอม

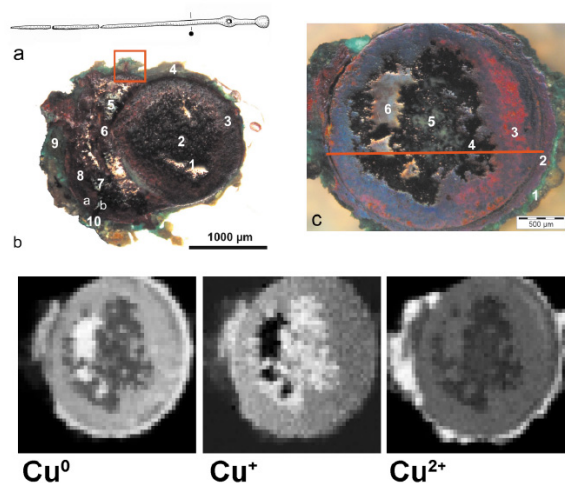
นี้เหมาะกับการนำไปใช้ในการวิเคราะห์วัสดุโบราณเนื่องจากเราสามารถทำการทดลองได้กับสารที่ไม่มีโครงสร้างผลึก ซึ่งเป็นข้อดีที่เหนือกว่าการทดลอง XRD



รูปที่ 7 รูปแบบการทดลองสามชนิดของเทคนิคการทดลองการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ (A) การวัดค่าการส่งผ่านรังสีเอ็กซ์ (B) การวัดค่ากระแสอิเล็กตรอน และ (C) การวัดความเข้มของรังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนส์

ตัวอย่างการนำเทคนิคการทดลอง XAS ไปใช้กับงานวิจัยทางโบราณคดี ได้แก่ การศึกษาเข็มนาฬิกาสำหรับกระดูก (Fibula) ที่ทำจากโลหะบรอนซ์ (ทองแดงผสมดีบุก) ในสมัยโบราณซึ่งขุดได้จากแหล่งโบราณคดี Tell Beydar ทางตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศซีเรีย [5] แหล่งโบราณคดีแห่งนี้จัดเป็นแหล่งอารยธรรมเมโสโปเตเมียตอนเหนือที่มีผู้อยู่อาศัยอยู่ในสมัยสามพันปีก่อนคริสตกาล งานศึกษาวิจัยชิ้นนี้ใช้เทคนิคการทดลอง XANES ร่วมกับเทคนิคการทดลองอื่นหลายชนิด เช่น การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน-EDX การศึกษาสเปกตรัม FTIR การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และอื่น ๆ โดยเฉพาะเทคนิคการทดลอง FTIR spectroscopy และ XRD นั้นเป็นการทำโดยใช้แสงซินโครตรอนอีกด้วย เนื่องจากการทดลอง XANES นั้นสามารถบอกถึงสถานะออกซิเดชันของสารตัวอย่างได้จึงเหมาะสมสำหรับการศึกษาการผุกร่อนของโลหะดังเช่นในตัวอย่างงานวิจัยชิ้นนี้ ผลจากการทดลอง XANES ในรูปที่ 8 ทำให้เราทราบว่าอะตอมทองแดงที่ไม่เกิดการออกซิเดชันและอะตอมทองแดงที่มีสถานะออกซิเดชันเป็นบวกหนึ่งจะอยู่ในบริเวณใจกลางของเข็มนาฬิกาและบริเวณรอบนอกสุด ในขณะที่อะตอมทองแดงที่มีสถานะออกซิเดชันเป็นบวกสองจะอยู่ในบริเวณรอบนอกสุดเท่านั้น การศึกษาสถานะออกซิเดชันนี้ยัง

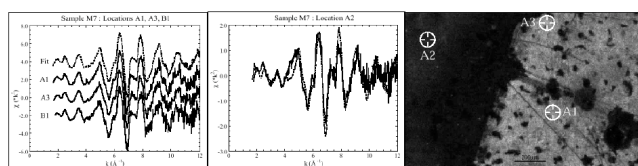
บอกไปถึงชนิดของแร่ทองแดงที่นำมาใช้ทำเข็มกลัดโลหะชิ้นนี้อีกด้วย



รูปที่ 8 (บน) ภาพวาดและชิ้นส่วนสองชิ้นของเข็มสำหรับกลัดผ้าคลุมที่นำมาวิเคราะห์ (ล่าง) แผนภาพที่ได้จากการทดลอง XANES แสดงบริเวณของอะตอมทองแดงที่มีค่าสถานะออกซิเดชันต่างกัน [5]

ตัวอย่างของงานวิจัยทางโบราณคดีที่อาศัยเทคนิคการทดลองการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์อีกตัวอย่างหนึ่งได้แก่การศึกษาสารเคลือบเงาบนภาชนะเซรามิกในสมัยยุคกลางประมาณศตวรรษที่ 10 ถึง 12 และศตวรรษที่ 13 ถึง 15 [6, 7] ในกระบวนการการผลิตภาชนะเซรามิกประเภทนี้มีการเผาภาชนะถึงสามครั้ง โดยการเผาครั้งแรกเป็นการเผาให้เซรามิกแข็งตัว การเผาลองต่อมาเป็นการเผาเพื่อเคลือบชั้นดินบนภาชนะ ส่วนการเผาลองสุดท้ายเป็นการเผาสำหรับชั้นเคลือบเงา ซึ่งจุดประสงค์ของการเผาลองนี้คือการทำให้สารประกอบเกลือของทองแดงและเงินในสารเคลือบเงาเกิดกระบวนการรีดักชัน (Reduction) เปลี่ยนเป็นโลหะทำให้เกิดความเป็นมันเงา นักโบราณคดีพบว่าภาชนะเซรามิกที่พบนั้นบางชิ้นไม่มีลักษณะเป็นเงาซึ่งนักวิจัยคาดว่าอาจเป็นผลที่เกิดขึ้นจากสาเหตุที่เป็นไปได้สองประการ สาเหตุแรกคือกระบวนการรีดักชันที่เกิดขึ้นนั้นไม่เพียงพอที่จะเปลี่ยนสารประกอบเกลือของทองแดงและเงินเป็นโลหะ กับอีกสาเหตุหนึ่งคือโลหะทองแดงและเงินที่เกิดขึ้นนั้นเกิดขึ้นในลักษณะที่เป็นผลึกขนาดเล็กหรือไม่เป็นผลึกเลย จึงทำให้ไม่เกิดการสะท้อนแสงเป็นเงาวาว

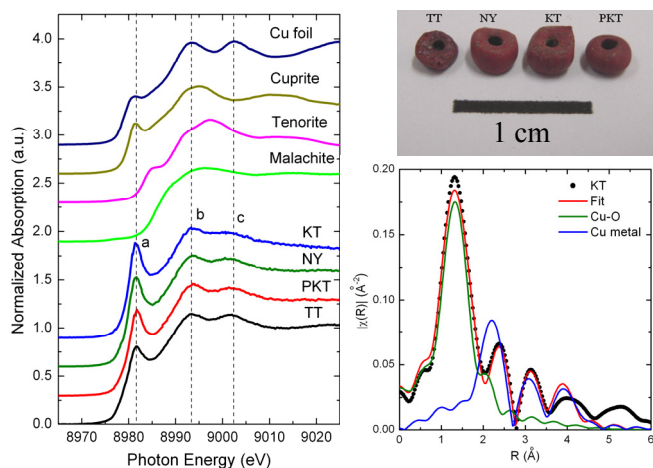
นักวิจัยได้ทำการศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ โดยการวัดความเข้มของรังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนส์ (Fluorescence microXAS) เพื่อหาการกระจายตัวของอะตอมทองแดงที่มีสถานะออกซิเดชันต่าง ๆ กัน จากการทดลองพบว่าสเปกตรัมของการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ที่ได้จากบริเวณที่เป็นเงาสอดคล้องกับสเปกตรัมของโลหะทองแดงที่ใช้เป็นตัวเปรียบเทียบ นั่นก็คืออะตอมของโลหะทองแดงเป็นต้นเหตุของความเป็นมันเงา ดังที่กล่าวไว้ในตอนต้น นอกจากนั้นในบางบริเวณพบว่ามีทั้งทองแดงที่เป็นโลหะและสารประกอบออกไซด์ปนกันอยู่ ซึ่งบ่งบอกถึงกระบวนการรีดักชันที่ไม่สมบูรณ์



รูปที่ 9 สเปกตรัมการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ของสารเคลือบเงาบนภาชนะลงเงา (lusterware) ในสมัยยุคกลาง ส่วนภาพทางขวามือแสดงการกระจายตัวของอะตอมทองแดง (บริเวณที่มีสีอ่อนในภาพ) [7]

สำหรับงานวิจัยโบราณคดีในประเทศไทยนั้น ที่ผ่านมานักโบราณคดีส่วนใหญ่ยังไม่ได้นำแสงซินโครตรอนมาใช้วิเคราะห์ตัวอย่างวัตถุโบราณกันอย่างแพร่หลายนัก จนกระทั่งในปีปัจจุบัน มีการตีพิมพ์ผลงานวิจัยเรื่องการศึกษารูททองแดงในลูกปัดแก้วโบราณอายุประมาณ 1300-2000 ปีโดยใช้แสงซินโครตรอนในการทดลอง XAS ณ ห้องปฏิบัติการแสงสยาม สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน [8] ตัวอย่างในงานวิจัยเรื่องนี้เป็นลูกปัดแก้วสีแดงขนาดประมาณ 2-3 มิลลิเมตร ซึ่งถูกค้นพบที่แหล่งโบราณคดีภูเขาทอง แหล่งโบราณคดีนางข้อน แหล่งโบราณคดีทุ่งตึก และแหล่งโบราณคลองท่อม จากการวิเคราะห์เบื้องต้นด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน-EDX พบว่ามีธาตุโลหะหนักหลายชนิดในปริมาณต่ำ หนึ่งในนั้นคือธาตุทองแดงซึ่งนักวิจัยคาดว่ามีความสำคัญในการให้สีแดงแต่ยังไม่ทราบว่าสถานะทางเคมีและโครงสร้างอะตอมของทองแดงนั้นเป็นแบบใด นักวิจัยจึงวัดสเปกตรัม XANES และ EXAFS และทำการวิเคราะห์ข้อมูล (รูปที่ 10) จึงพบว่าอะตอมของธาตุทองแดงส่วนหนึ่งจับตัวกันเป็นโลหะและมีโครงสร้างผลึกแบบ FCC ขนาดเล็ก อีกส่วน

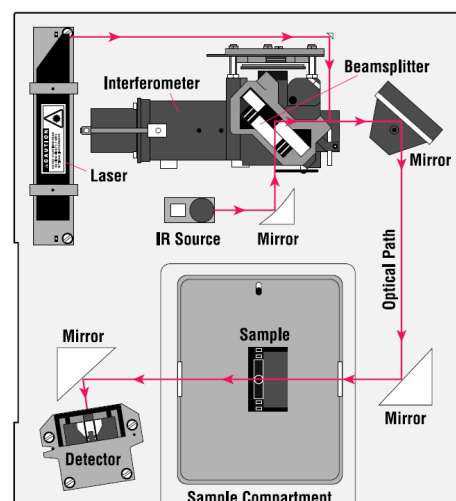
หนึ่งจับตัวกับอะตอมของออกซิเจนในเนื้อแก้วของลูกปัด ซึ่งมีโครงสร้างอะตอมที่แตกต่างจากผลึกของแร่ Cuprite หรือ Cu_2O ซึ่งมีสีแดงตามธรรมชาติ และเป็นวัตถุพิเศษสามัญในการผลิตแก้วสีแดงในยุคโบราณ นอกจากนี้ยังพบว่าโครงสร้าง XANES ของลูกปัดไทยมีความคล้ายคลึงกันมากกับแก้วโบราณสีแดงจาก Messina ในประเทศอิตาลีอีกด้วย



รูปที่ 10 (ซ้าย) สเปกตรัม XANES ของลูกปัดเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน (ขวบน) ลูกปัดจากทั้งสี่แหล่งโบราณคดี และ (ขวาล่าง) การเปรียบเทียบข้อมูล EXAFS จากการทดลองและการคำนวณ

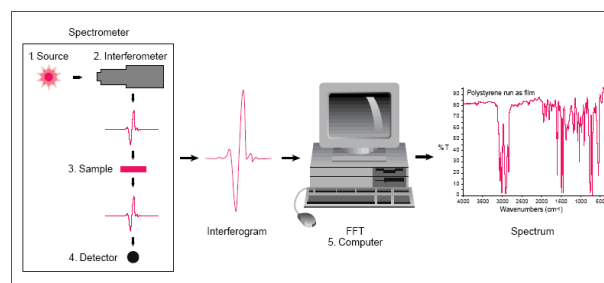
เทคนิคการทดลองถัดไปที่จะกล่าวถึงได้แก่การศึกษาสเปกตรัม FTIR ซึ่งเป็นการศึกษาการสั่นของอะตอมซึ่งอยู่ในย่านความถี่ของรังสีอินฟราเรด ข้อมูลความถี่ของการสั่นของกลุ่มอะตอมที่มีพันธะระหว่างกันนี้จะบอกให้เราทราบถึงองค์ประกอบทางเคมีของสารตัวอย่างได้จากการเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของกลุ่มเคมี (Chemical group) ในฐานข้อมูลที่มีอยู่แล้ว และยังคงถึงโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของสารตัวอย่างอีกด้วย รูปที่ 11 แสดงแผนภาพโครงสร้างและองค์ประกอบของอุปกรณ์การทดลอง (FTIR spectrometer) ในรูปแหล่งกำเนิดแสงอินฟราเรด (IR Source) ที่เรานิยมใช้สองชนิดคือ หลอดผลิตรังสีอินฟราเรดที่เรียกว่าหลอดซิลิกอนคาร์ไบด์หรือโกลบาร์ (Globar tube) และหลอดฮาโลเจน (Quartz-halogen lamp) ทำหน้าที่ผลิตรังสีอินฟราเรดเข้าสู่ Interferometer เพื่อสร้างรูปแบบของการแทรกสอด (Interferogram) รูปแบบการแทรกสอดนี้จะถูกฉายลงบนสารตัวอย่าง (Sample) ในขณะที่เครื่องวัดความเข้มรังสีอินฟราเรด (Detector) จะบันทึกสัญญาณความเข้มของการแทรกสอดของรังสี

อินฟราเรดที่เดินทางผ่านหรือสะท้อนออกจากสารตัวอย่าง อุปกรณ์บันทึกข้อมูลจะทำการบันทึกผลในขณะที่กระจกตัวหนึ่งใน Interferometer เปลี่ยนระยะทางไปเรื่อย ๆ ซึ่งก็คือการสร้างรูปแบบของการแทรกสอดที่จะตกลงบนสารตัวอย่างนั่นเอง



รูปที่ 11 แผนภาพแสดงโครงสร้างและองค์ประกอบของ FTIR spectrometer [9] ซึ่งอาศัยหลักการสร้าง Interferogram จากการแทรกสอดของคลื่น (รังสีอินฟราเรด) โดยใช้แสงเลเซอร์เป็นแสงอ้างอิงในการคำนวณระยะทางการเคลื่อนที่ของกระจก

สัญญาณความเข้มของการแทรกสอดที่วัดได้จะถูกประมวลผลโดยการแปลงแบบฟูเรียร์ (Fourier transformation) ซึ่งจะได้เป็นสเปกตรัมของการส่งผ่านรังสีอินฟราเรด (Transmission spectrum) ในสารตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 12

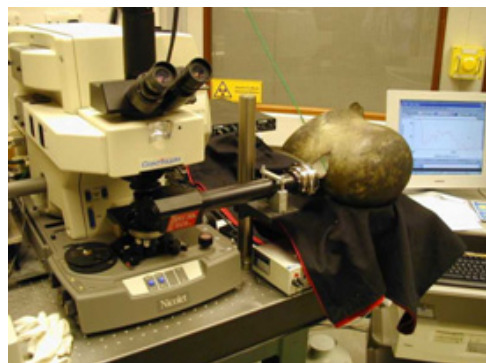


รูปที่ 12 หลักการของ Fourier transform infrared spectroscopy [9] ในรูป FFT Computer คือคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับการแปลงแบบฟูเรียร์โดยอาศัยอัลกอริทึมทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า Fast Fourier Transform (FFT)

การทำการทดลอง FTIR โดยการใช้แสงซินโครตรอนในย่านรังสีอินฟราเรด (Synchrotron radiation FTIR หรือ SR-FTIR) นั้นเป็นที่นิยมเนื่องจากลำแสงซินโครตรอนมีขนาดเล็กจึงสามารถใช้เลือกศึกษาเฉพาะตำแหน่งที่เราต้องการบนสารตัวอย่างได้ และเนื่องจากเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนเป็นแหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรดที่มีความเสถียรสูงกว่าหลอดรังสีอินฟราเรดจึงทำให้ได้อัตราส่วนระหว่างสัญญาณที่ต้องการวัดกับสัญญาณรบกวน (Signal-to-noise ratio) สูงกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งรังสีอินฟราเรดในย่านความถี่ต่ำ (Far-infrared) ซึ่งเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนจะให้ปริมาณฟลักซ์หรือความเข้มแสงสูงกว่า นอกจากนั้นแสงซินโครตรอนซึ่งมีลักษณะเป็นพัลส์สั้น ๆ ทำให้เราสามารถศึกษาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วได้อีกด้วย

ตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้เทคนิคการทดลอง FTIR กับแสงซินโครตรอนอีกชิ้นหนึ่งได้แก่การศึกษาการสุกของหมวกนักรบชนิดโครินเธียน (Corinthian helmet) จากพิพิธภัณฑสถานแห่งชาติเมืองแมนเชสเตอร์ ประเทศอังกฤษ ซึ่งทำจากโลหะบรอนซ์ในสมัยกรีกเมื่อประมาณ 600 ปีก่อนคริสตกาล ณ สถานีทดลองทางด้าน Infrared microspectroscopy (สถานีทดลองที่ 11.1) ของศูนย์ซินโครตรอน Synchrotron Radiation Source (SRS) เมือง Daresbury ประเทศอังกฤษ [11] สถานีทดลองดังกล่าวสามารถให้แสงซินโครตรอนในย่านรังสีอินฟราเรดในช่วงเลขคลื่น (Wave number) ตั้งแต่ 400 ถึง $4,000 \text{ cm}^{-1}$ รูปที่ 13 แสดงงานศึกษาวิจัยชิ้นนี้ซึ่งเป็นรูปในขณะที่นักวิจัยทำการทดลองและเก็บข้อมูล ในรูปนี้เราจะไม่เห็นส่วนของ FTIR spectrometer ซึ่งอยู่นอกกรอบทางซ้ายมือ แต่จะเห็นส่วนของกล้องจุลทรรศน์อินฟราเรดซึ่งทำหน้าที่โฟกัส Interferogram จาก Spectrometer ลงบนหมวกซึ่งอยู่ทางขวามือในรูป เนื่องจากขนาดของลำแสงที่ถูกโฟกัสมีขนาดเล็กมากเพียงแค่ $8 \text{ ไมครอน} \times 8 \text{ ไมครอน}$ เท่านั้นจึงทำให้ได้แผนภาพขององค์ประกอบทางเคมีของชิ้นตัวอย่างที่มีความละเอียดสูง (โดยทั่วไปแล้ว แสงอินฟราเรดจากหลอดหลอด Global จะสามารถถูกโฟกัสได้เพียงประมาณ $70 \text{ ไมครอน} \times 70 \text{ ไมครอน}$ เท่านั้น) งานวิจัยนี้ใช้เทคนิคการทดลอง FTIR ร่วมกับเทคนิคการทดลอง XRD และการวัดรังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนส์ (X-ray fluorescence หรือ XRF) ซึ่งใช้แสงซินโครตรอนเช่นกัน ผลจากการทดลอง FTIR ทำให้นักวิจัยสามารถบ่งบอกและแยกแยะชนิด

ของสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบในบริเวณพื้นผิวของหมวกนักรบนี้ได้



รูปที่ 13 ภาพขณะทำการทดลอง FTIR กับหมวกนักรบสมัยโบราณ โดยใช้แสงซินโครตรอน ณ สถานีทดลองที่ 11.1 ศูนย์ซินโครตรอน SRS ประเทศอังกฤษ [11]

เทคนิคการทดลองที่ใช้แสงซินโครตรอนซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยทางโบราณคดีนั้นยังมีอีกหลายชนิด [11] เช่น การวัดการกระเจิงของรังสีเอกซ์ในมุมแคบและมุมกว้าง (Small/wide-angle x-ray scattering หรือ SAXS/WAXS) การสร้างภาพสามมิติขององค์ประกอบภายในของวัตถุโดยเทคนิคการทดลองโทโมกราฟี (Tomography) โดยการวัดค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีเอกซ์และนำไปคำนวณทางคณิตศาสตร์โดยอาศัยทฤษฎีชื่อว่า Slice-projection theorem ซึ่งทำให้เราสามารถศึกษาองค์ประกอบและโครงสร้างภายในได้โดยไม่ต้องผ่าวัตถุโบราณนั้นๆ จะเห็นว่าเทคนิคการทดลองชนิดต่างๆ ซึ่งใช้แสงซินโครตรอนส่วนใหญ่เป็นการศึกษาโดยไม่ทำลายสารตัวอย่าง (Non-destructive study) ซึ่งทำให้เทคนิคการทดลองเหล่านี้เป็นเทคนิคที่เหมาะสมในการใช้ศึกษาวัตถุโบราณซึ่งมีคุณค่าสูง

เอกสารอ้างอิง

1. N. Salvadó et al., "Identification of copper based green pigments in Jaume Huguet's Gothic altarpieces by Fourier transform infrared micro-spectroscopy and synchrotron radiation X-ray diffraction", J. Synchrotron Rad. **9**, 215 (2002).

2. M. Muller *et al.*, “*Identification of the Textiles from Khirbet Qumran Using Microscopy and Synchrotron Radiation X-ray Fibre Diffraction*”, in “*Khirbet Qumran et Ain Feshkha, II. Etudes d'anthropologie, de physique et de chimie. Studies of Anthropology, Physics and Chemistry*”, J.-B. Humbert and J. Gunneweg (Eds.), Academic Press, Editions Saint-Paul, Fribourg Suisse, Gottingen, 2003.
3. W. Kockelmann, E. Pantos, and A. Kirfel, “*Neutron and Synchrotron Radiation Studies of Archaeological Objects*”, in “*Radiation in Art and Archaeometry*”, D.C. Creagh and D.A. Bradley (Eds.), Elsevier Science B.V., 2000.
4. M. Cotte, J. Susini, J. Dik and K. Janssens, “*Synchrotron based X-ray absorption spectroscopy for art conservation: Looking back and looking forward*”, *Accounts of Chemical Research* **43**, 705-714 (2010).
5. I. De Ryck, A. Adriaens, E. Pantos and F. Adams, “*A comparison of microbeam techniques for the analysis of corroded ancient bronze objects*”, *Analyst* **128**, 1104 (2003).
6. A.D. Smith, T. Pradell, J. Molera, M. Vendrell, M. Marcus, and E. Pantos, “*MicroXAFS studies into the oxidation states of different coloured Islamic and Hispano-moresque luster decorations*”, *J. Phys. IV* **104**, 519 (2003).
7. E. Pantos *et al.*, “*SR-based molecular speciation of archaeomaterials*”, *Proceedings of the Workshop on Structural Molecular Archaeology*, Ettore Majorana Centre, Erice, Sicily, 2002.
8. W. Klysubun, Y. Thongkam, S. Pongkrapan, K. Won-in, J. T-thienprasert and P. Dararutana, “*XAS study on copper red in ancient glass beads from Thailand*”, *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, In press (doi 10.1007/s00216-010-4219-1).
9. “*Introduction to Fourier Transform Infrared Spectrometry*”, Thermo Nicolet Corporation information booklet, Thermo Nicolet Corporation website : <http://www.thermonicolet.com>.
10. Synchrotron Radiation Source, Daresbury Laboratory website: <http://www.srs.ac.uk/srs/stations/station11.1.htm>.
11. See, for example, J.G. Grossman *et al.*, “*Porosity characterization of ancient ceramics by small-angle x-ray scattering*”, *Proceedings of EMAC99, 5th European Meeting on Ancient Ceramics*, Athens, Greece, October 1999. K. Yamahana, “*Synchrotron radiation analysis on ancient Egyptian vitreous materials*”, *Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan*, Himeji, Japan, July 12-14, 2000.

วิบากกรรมของนักวิจัยฝุ่น

ศิวัช พงษ์เพียจันทร์¹

หากกรรมคือการกระทำซึ่งอาจเป็นได้ทั้งในรูปแบบของ “กุศลกรรม” และ “อกุศลกรรม” วิบากกรรมคือสิ่งที่ย้อนกลับเข้ามาสู่ตัวของผู้กระทำโดยอาจแสดงออกมาในลักษณะที่แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับเหตุและปัจจัยของกรรมที่ผู้กระทำได้ก่อขึ้น เจกเช่นเดียวกันกับวิบากกรรมของ “นักวิจัยฝุ่น” ซึ่งมักถูกสังคมนำไปเปรียบเทียบกับบุคคลที่ขอบประพฤติดนไม่เป็นที่พอใจเป็นพาหุ สาธารณะแก่คนในสังคมได้ หนาเข้าอาจถึงขั้นถูกสังคมตราหน้าว่าเป็นพวกตงงานไร้ฝีมือจัดอยู่ในกลุ่มคนที่เป็นภาระของส่วนรวมและต้องการได้รับความช่วยเหลือเยียวยาโดยเร่งด่วน แต่คำถามที่ตามมาคือยุดิธรรมแล้วหรือที่จะรับคว่นสรูป่างานของ “นักวิจัยฝุ่น” ก็คงไม่ต่างจากความหมายเดิมของฝุ่นมากนัก สะท้อนให้เห็นถึงภาพลักษณ์ของงานวิจัยที่ เบาหวิว ฟุ้งกระจาย และ ไร้ซึ่งความเป็นรูปธรรม? สมเหตุสมผลหรือไม่ที่จะจึงตัดสินใจว่า “นักวิจัยฝุ่น” ก็บุคคลที่ว่างจัดไม่รู้จักทำวิจัยเรื่องอะไรที่สุดท้ายเลยจำเป็นต้องมาลงที่เรื่อง “ฝุ่น” ทั้งที่มูลเหตุของการวิจัยฝุ่นนั้นอาจจะลึกซึ้งมากกว่าที่สังคมโดยรวมกำลังรับรู้อยู่ ณ ขณะนี้ก็เป็นได้ และคงไม่ใช่คำกล่าวอ้างที่เกินเลหหากจะเปรียบเปรย “นักวิจัยฝุ่น” ในสังคมที่ขาดภูมิคุ้มกันด้านวิทยาศาสตร์ สิ่งแวดล้อมที่แข็งแกร่งว่าคงไม่ต่างอะไรกับ “ไอ้ฟัก” ในเรื่อง “คำพิพากษา” ของ ชาติ กอบจิตติที่ได้รับรางวัลซีไรต์ประจำปี พ.ศ. 2525

เพราะ “ฝุ่น” มีส่วนสำคัญในการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิในชั้นบรรยากาศส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศทั้งในระดับท้องถิ่นและระดับภูมิภาค

เพราะ “ฝุ่น” คือตัวการสำคัญในการช่วยขยายพื้นที่การกระจายตัวของสารพิษให้กว้างไกลมากยิ่งขึ้น จากแหล่งกำเนิดที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งผ่านกระบวนการ “Long range transportation” หรือการขนถ่ายสารพิษในระยะไกล

และเป็นเพราะ “ฝุ่น” อีกเช่นเดียวกันที่มีส่วนสำคัญต่อปัญหาระบบทางเดินหายใจ อัตราการเกิดโรคมะเร็งในปอดรวมทั้ง

ความสุมเสี่ยงในการเกิดโรคหัวใจของผู้ที่อยู่อาศัยรอบบริเวณแหล่งกำเนิด จึงไม่ใช่เรื่องที่น่าประหลาดใจกับจำนวนผลงานตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยด้านอากาศซึ่งเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงสองสามทศวรรษที่ผ่านมาโดยส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของ “ฝุ่น” หรือที่เรียกกันติดปากในวงการวิชาการว่า “แอโรซอล” โดยเฉพาะอนุภาคของแอโรซอลที่มีขนาดเล็กมากถึงระดับนาโนจะได้รับความสนใจมากเป็นพิเศษ

ในวงการวิทยาศาสตร์อากาศแบ่งชนิดของแอโรซอลออกเป็น 2 ประเภทคือแอโรซอลที่มีขนาดใหญ่ (Coarse aerosol) หรืออนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่กว่า 10 ไมครอน โดยประมาณและแอโรซอลที่มีขนาดเล็ก (Fine aerosol) หรืออนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่า 10 ไมครอนซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าแอโรซอลที่สามารถกระจายตัวออกไปในระยะทางที่ไกลได้นั้นพนักิโเลเมตรส่วนใหญ่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางระหว่าง 0.1 – 1 ไมครอนและจัดอยู่ในกลุ่มของ Accumulation mode ซึ่งส่วนใหญ่จะทำหน้าที่เป็นแกนกลั่นตัวเมฆ (Cloud Condensation Nuclei: CCN) ส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ ในขณะที่แอโรซอลที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 10 ไมครอน (Coarse mode) ส่วนใหญ่จะถูกแรงโน้มถ่วงของโลกตรึงให้ตกลงอยู่รอบบริเวณแหล่งกำเนิดจึงทำให้ไม่สามารถขนถ่ายไปในระยะไกลได้ ในทางกลับกันอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางระหว่าง 0.001 – 0.1 ไมครอน (Aitken nuclei mode) แม้ว่าจะรอดพ้นจากการถูกตรึงลงสู่พื้นผิวผ่านแรงโน้มถ่วงของโลกแต่กระแสดมกลับไม่สามารถนำพาอนุภาคที่มีขนาดเล็กจิ๋วเหล่านี้เคลื่อนตัวไปได้ไกลเนื่องจากน้ำหนักที่เบาหวิวจนเกินไปส่งผลให้กลุ่มแอโรซอลที่อยู่ในรูปแบบของ Aitken nuclei mode ถูกบังคับให้เคลื่อนตัวแบบบราวเนียน (Brownian motion) ฟุ้งกระจายอย่างสะเปะสะปะไร้ทิศทางและท้ายที่สุดคือจบชีวิตลงด้วยการตกลงสู่พื้นผิวโลกด้วยระยะเวลาอันสั้น

¹อาจารย์ (ผศ. ดร.) คณะพัฒนาสังคมและสิ่งแวดล้อม สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์

จากความพิเศษที่มันเป็นแกนกลั่นตัวเมฆและสามารถเคลื่อนตัวได้ในระยะไกลนับพันกิโลเมตรจึงทำให้นักวิทยาศาสตร์ที่ศึกษาเรื่องพฤติกรรมของมลสารในชั้นบรรยากาศใส่ใจเป็นพิเศษเกี่ยวกับสมบัติทางกายภาพของแอโรซอลในกลุ่ม Accumulation mode อย่างไรก็ตามเส้นโค้งของแอโรซอลกลุ่มนี้ไม่ได้จำกัดอยู่ที่พฤติกรรมเคลื่อนที่ของมันแต่เพียงอย่างเดียว องค์ประกอบทางเคมีอันสลับซับซ้อนของมันคือสิ่งที่มักสร้างความอึดอัดใจให้กับนักวิจัยได้อยู่เสมอ โดยเฉพาะธาตุที่มีเลขออกซิเดชัน (Oxidation number) ที่แตกต่างกันถึง 9 ชนิด (-2 - +6) เช่นซัลเฟอร์ซัลเฟตเป็นธาตุที่มีศักยภาพสูงในการก่อภาวะเรือนกระจกได้หลากหลายรูปแบบ อาทิ ซัลเฟอร์ในฟอร์มของ H_2SO_4 , SO_3^{2-} , SO_2 ที่มีเลขออกซิเดชันเท่ากับ +4 ย่อมมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรดในดินและแหล่งน้ำต่างๆตามธรรมชาติ ส่วนซัลเฟอร์ในฟอร์มของ SF_6 ที่มีเลขออกซิเดชันเท่ากับ +6 กลับส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเนื่องจากมีศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global warming potential) สูงกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 23,900 เท่า นอกจากนี้ยังมีสารประกอบซัลเฟอร์อีกหลายชนิดที่มีเลขออกซิเดชันและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกันออกไป อุปสรรคอีกประการที่ทำให้นักวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมส่วนใหญ่พยายามหลีกเลี่ยงงานวิจัยที่ต้องมาข้องเกี่ยวกับการวัด Speciation ของธาตุที่มีเลขออกซิเดชันจำนวนมากคือข้อจำกัดในการเลือกใช้เครื่องมือวิเคราะห์เช่น หากจำเป็นต้องใช้เครื่อง Ion chromatography ในการตรวจสอบระดับความเข้มข้นของสารประกอบซัลเฟอร์ในตัวอย่างอากาศ สิ่งที่เราวิเคราะห์จะทราบได้คือข้อมูลของซัลเฟอร์ในรูปแบบของซัลเฟต (SO_4^{2-}) ซึ่งอาจจะไม่ใช่คำตอบสุดท้ายสำหรับการศึกษาภาพรวมของสารประกอบซัลเฟอร์ในแอโรซอลในขณะที่การนำตัวอย่างอากาศมาวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Atomic absorption spectrometry กลับให้องค์ความรู้เพียงแค่ระดับความเข้มข้นของซัลเฟอร์ในรูปแบบของธาตุเดียว (S) เพียงเท่านั้น

เทคนิค X-ray Absorption Near Edge Structure (XANES) น่าจะเป็นทางเลือกใหม่สำหรับการนำมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยแอโรซอลด้วยคุณสมบัติที่สามารถสแกนระดับพลังงานที่แตกต่างกันของ Exciting beam ในช่วง 2440 - 2530 eV ส่งผลให้นักวิจัยสามารถจำแนกธาตุซัลเฟอร์ที่มีเลขออกซิเดชันที่แตกต่างกันได้โดยสังเกตจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะของสเปกตรัม

(Spectrum) ของตัวอย่างโดยนำไปเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของสารมาตรฐานที่ทราบตัวเลขออกซิเดชันที่แน่ชัดก่อนที่จะนำข้อมูลเหล่านี้ไปประมวลโดยใช้แบบจำลองทางสถิติที่เรียกว่า Partial least square เพื่อคำนวณหาสัดส่วนร้อยละของสารมาตรฐานแต่ละชนิดซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของตัวอย่างแอโรซอล ปัจจุบันผู้เขียนได้ร่วมงานวิชาการกับ ดร. วันทนา คล้ายสุบรรณ นักวิชาการระดับชำนาญการและผู้จัดการระบบลำเลียงแสงที่ 8 และ ดร. กาญจนา ธรรมนุ จากสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอนภายใต้หัวข้อวิจัยเรื่อง “Using X-ray Absorption Near Edge Structure (XANES) and Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy Techniques to Quantify Speciation of Particulate Sulfur Compounds and Organic Species in Bangkok Atmosphere, Thailand” ซึ่งเป็นหัวข้อวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาคุณวุฒิปดของนางสาว วรางคณา ณ พัทลุง นักศึกษาปริญญาเอกสังกัดสาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

แม้มูลเหตุแห่งคำถามประเภทที่ “นักวิจัยฝุ่น” ต้องเผชิญอาจยังไม่เป็นที่แน่ชัดแต่สิ่งที่สำคัญกว่าคือคำถามที่ว่า “เราจะสามารถทราบสัดส่วนที่แตกต่างของสารประกอบซัลเฟอร์ในแอโรซอลพร้อมกันในเวลาเดียวได้อย่างไร?” ซึ่ง XANES อาจเป็นเครื่องมือชนิดใหม่ที่ช่วยตอบโจทย์ข้อนี้และท้ายที่สุดคือการปลดล็อกวิบากกรรมให้กับ “นักวิจัยฝุ่น” ในอนาคตอันใกล้

การผิดรูปบริเวณรอบรอยกดของวัสดุเปราะ

Deformation around Indentation of Brittle Materials

อภิชาติ ลิ้มปิชัยพานิช¹

บทความนี้นำเสนอเกี่ยวกับการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุเปราะซึ่งมีความแข็ง (Hardness) สูง และแตกหักง่าย (Brittle) โดย **วิธีการกด (Indentation)** ประโยชน์ของการทดสอบดังกล่าวทำให้เราทราบถึงธรรมชาติของวัสดุขณะที่มี **การผิดรูป (Deformation)** และกระบวนการที่ทำให้วัสดุผิดรูป เพื่อที่จะได้นำองค์ความรู้ดังกล่าวไปใช้พัฒนาเทคโนโลยีการผลิตวัสดุ และสามารถกำหนดเงื่อนไขและสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการใช้งานของวัสดุนั้น เพื่อยืดอายุการใช้งาน โดยเฉพาะวัสดุด้านการสึกหรอ (Wear resistant materials) เช่น ผิวเคลือบเซรามิก (Ceramic coating) เป็นต้น

การผิดรูปของวัสดุโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ **การผิดรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic deformation)** และ **การผิดรูปแบบไม่ยืดหยุ่นหรือแบบพลาสติก (Plastic deformation)** ความแตกต่างระหว่างการผิดรูปของวัสดุทั้งสองประเภทหลังจากมีแรงกระทำ คือ วัสดุจะกลับคืนสู่สภาพเดิมสำหรับการผิดรูปแบบยืดหยุ่น ส่วนการผิดรูปแบบพลาสติกวัสดุจะเสื่อมสภาพอย่างถาวร แม้แรงกระทำที่ทำให้เกิดการผิดรูปถูกขจัดออกไปแล้วก็ตาม

วิธีการทดสอบการผิดรูปของวัสดุที่นิยม คือ การกด เนื่องจากการทดสอบที่ง่ายและสะดวก อีกทั้งยังให้ผลเป็นที่น่าเชื่อถือ การทดสอบโดยการกดจะใช้หัวกดที่มีความแข็งสูง ซึ่งมี 3 ชนิดหลัก คือ แบบวิกเกอร์ส (Vickers) แบบนูป (Knoop) และแบบเฮอร์ตซ์ (Herzian) ในบทความนี้จะกล่าวถึงหัวกดแบบวิกเกอร์สเท่านั้น

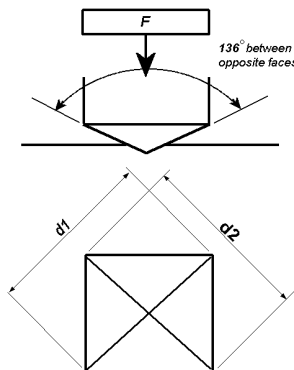
การกดโดยใช้หัวกดเป็นการทดสอบความแข็งวิธีหนึ่ง (Hardness test) โดยนำน้ำหนักกดที่ใส่อยู่ในช่วงกรัมและกิโลกรัม (นิยมใช้ตั้งแต่ 50 g – 10 kg) หัวกดวิกเกอร์สเป็นหัวกดเพชร

รูปทรงพีระมิด โดยมีมุมระหว่างด้านตรงข้าม 136° ดังรูปที่ 1 รอยกดที่ปรากฏ (Indent) มีลักษณะคล้ายรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่พื้นผิว ซึ่งเกิดจากการอัดและการยุบตัวในบริเวณที่มีแรงกด และรอยแตก (Crack) ที่บริเวณมุมของสี่เหลี่ยมเนื่องจากความเค้นขณะกดที่สูง ในบริเวณดังกล่าวก่อให้เกิดการแตกหักในวัสดุเปราะ (Fracture) ซึ่งการแตกหักดังกล่าวก่อให้เกิดรอยแตกในเบื้องต้น ตามด้วยการขยายตัวของรอยแตก (Crack propagation) ลักษณะของรอยกดของวัสดุเปราะแสดงให้เห็นในรูปที่ 2 อย่างไรก็ตาม ลักษณะทางกายภาพที่สังเกตได้ดังกล่าวเป็นบริเวณรอยกดที่พื้นผิวเท่านั้น ซึ่งเราไม่สามารถทราบได้ว่าเกิดอะไรขึ้นที่บริเวณใต้รอยกด หรือบริเวณรอบรอยกดที่เราไม่สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงนั้น มีการผิดรูปแบบยืดหยุ่นหรือไม่

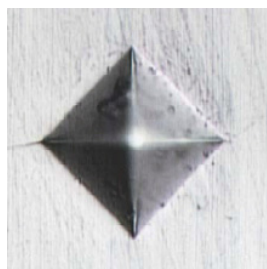
ตามทฤษฎี การกดโดยใช้หัวกดวิกเกอร์สเป็นการกดของวัตถุแหลมคม ซึ่งบริเวณที่แหลมคมที่สุดจะมีความเข้มข้นของความเค้น (Stress concentration) สูงมาก ลักษณะของความเค้นดังกล่าวทำให้เกิดการผิดรูปแบบพลาสติก ที่บริเวณยอดหัวกดสัมผัสกับวัตถุ รวมถึงบริเวณฐานของยอดหัวกดซึ่งเป็นมุมของรอยกด บริเวณโดยรอบทั้งหมดเรียกว่า **เขตพลาสติก (Plastic zone)** ส่วนบริเวณรอบเขตพลาสติกเป็นบริเวณที่มีการผิดรูปของวัสดุแบบยืดหยุ่น เรียกว่า **เขตยืดหยุ่น (Elastic zone)** นอกจากนี้การกดโดยใช้หัวกดวิกเกอร์สยังก่อให้เกิดรอยแตกบริเวณต่างๆ รอบรอยกด เนื่องจากความเค้นมีค่ามากกว่าความเค้นต่ำสุดที่ทำให้เกิดรอยแตก ความเค้นที่สูงยังเปิดรอยแตกทำให้อรอยแตกเกิดการขยายตัว และจะหยุดเมื่อความเค้นผ่อนคลายลงจนกระทั่งมีค่าต่ำกว่าความเค้นสูงสุดที่ทำให้เกิดรอยแตก รอยแตกทั้งหมดแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ รอยแตกในแนวตั้งฉากกับแรงกดบริเวณรอบรอยกด (Radial crack) รอยแตกในแนวตั้งฉากกับแรงกดบริเวณฐานของรอยกด

¹อาจารย์ (ดร.) ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

(Lateral crack) และรอยแตกในแนวขนานกับแรงกดบริเวณฐานของรอยกด (Median crack) ดังรูปที่ 3



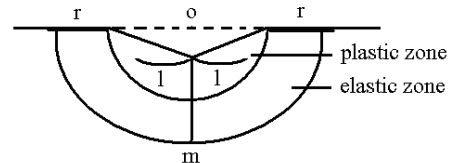
รูปที่ 1 ลักษณะของหัวกดวิกเกอร์ส และการวัดขนาดของรอยกด ใช้ระยะระหว่างมุมตรงข้าม ทั้งสองด้าน (d_1 และ d_2) ขนาดของรอยกดสามารถนำมาคำนวณหาค่าความแข็งของวัตถุได้ [1]



รูปที่ 2 ลักษณะของรอยกดวิกเกอร์สและรอยแตก โดยสามารถสังเกตเห็นรอยแตกบริเวณมุมด้านซ้าย (Radial crack) ได้อย่างชัดเจน [2]

ลำดับของการเกิดรอยแตกและการผิดรูปรอบรอยกด เนื่องจากแรงกดโดยหัวกดวิกเกอร์สสรุปอยู่ในรูปที่ 4 เริ่มจาก (i) เขตพลาสติกเกิดขึ้นบริเวณที่มีแรงกด (ii) บริเวณพลาสติกมีขนาดกว้างขึ้น และเกิดรอยแตกบริเวณใต้ฐานของเขตพลาสติก (Median crack) เนื่องจากความเค้นที่สูง (iii) เมื่อแรงกดมีค่าสูงสุด บริเวณพลาสติกมีขนาดกว้างที่สุดและรอยแตกบริเวณใต้ฐานของเขตพลาสติกขยายตัวลงไปใต้พื้นผิวเป็นระยะไกลที่สุด (iv) เมื่อเริ่มคลายแรงกด รอยแตกบริเวณใต้ฐานของเขตพลาสติกเริ่มประสานส่วนบริเวณพลาสติกไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาด (v) ก่อนที่แรงกดจะออกจากพื้นผิว (หรือก่อนหัวกดจะไม่สัมผัสพื้นผิว) จะเกิดความเค้นเนื่องจากวัสดุพยายามคืนรูปที่บริเวณใต้ฐานของรอยกด

ส่งผลให้เกิดรอยแตกบริเวณใต้ฐานของรอยกด (Lateral crack) ขึ้น และ (vi) รอยแตก Lateral crack ขยายขึ้นในทิศทางเข้าหาพื้นผิว โดยรอยแตกอาจสัมผัสกับพื้นผิวหรือไม่ก็ได้ ในขณะที่ไม่มีแรงกดกระทำต่อพื้นผิวแล้ว

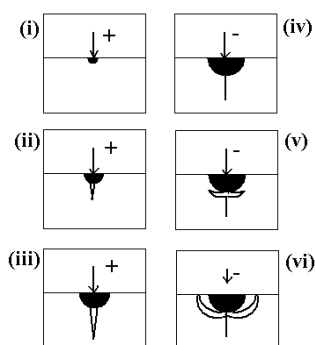


รูปที่ 3 ลักษณะของรอยแตกและบริเวณที่เกิดการผิดรูปของวัสดุรอบรอยกดแบบวิกเกอร์ส ตัวอักษร “ r ” แทนรอยแตกในแนวตั้งฉากกับแรงกดบริเวณรอบรอยกด (Radial crack) “ l ” แทนรอยแตกในแนวตั้งฉากกับแรงกด บริเวณฐานของรอยกด (Lateral crack) และ “ m ” แทนรอยแตกในแนวขนานกับแรงกด บริเวณฐานของรอยกด (Median crack) บริเวณพลาสติกและบริเวณยืดหยุ่นมีลักษณะครึ่งทรงกลมที่จุดศูนย์กลาง “ o ” (บริเวณที่หัวกดสัมผัสกับผิวครั้งแรก)

ในช่วงทศวรรษ 1960-1980 เป็นยุคที่นักวิทยาศาสตร์ส่วนหนึ่งตื่นตัวและให้ความสนใจกับการศึกษาการผิดรูปบริเวณรอบรอยกดของวัสดุเปราะ ซึ่งอยู่ในส่วนของกลศาสตร์การแตกหัก (Fracture mechanics) การศึกษาการผิดรูปรอบรอยกดในสมัยนั้นเป็นเรื่องที่ต้องใช้ความพยายามสูงมาก เนื่องจากความยากลำบากในการเตรียมชิ้นงานเพื่อศึกษา และข้อจำกัดในองค์ความรู้เฉพาะด้าน วิธีการเตรียมชิ้นงานที่ง่ายและสามารถเห็นผลการทดลองได้ชัดเจน คือ การกดและขัดลอกเอาผิวหน้าของชิ้นงานออกทีละน้อยเพื่อศึกษาบริเวณใต้พื้นผิวรอบรอยกด หรือ การขัดเป็นชั้น (Sequential polishing) ผู้เขียนซึ่งเคยได้ทำวิจัยศึกษาเกี่ยวกับการกดจึงขอถือโอกาสบอกเล่าเกี่ยวกับวิธีดังกล่าวให้กับผู้อ่านทุกท่าน

การศึกษการผิดรูปบริเวณรอบรอยกดของวัสดุเปราะ โดยการขัดเป็นชั้น สามารถสังเกตรอยแตกแบบต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้นในระดับความลึกจากพื้นผิวระดับต่างๆ ได้ นอกจากนี้ การศึกษาเขตพลาสติกยังมีความเป็นไปได้ เนื่องจากในวัสดุเปราะ การผิดรูปแบบพลาสติกส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับการเกิดรอยแตกระดับจุลภาค (Microfracture) ในบริเวณเขตพลาสติก รอยแตก

ดังกล่าวเมื่อผ่านกระบวนการขัดเป็นชั้น จะสามารถมองเห็นได้เป็นหลุม (Pullout) ซึ่งเกิดจากการหลุดของวัสดุบริเวณผิว (Chipping) ส่วนลักษณะวงแสงจาง (Halo) รอบรอยกดในกรณีที่ต้องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope) เกิดขึ้นเนื่องจากการกระเจิงของแสงในบริเวณที่มีรอยแตกในแนวตั้งฉากกับแรงกดบริเวณฐานของรอยกด (Lateral cracks) ซึ่งแสดงขอบเขตพลาสติกโดยคร่าวๆ ได้ เนื่องจากในขณะที่มีแรงกด รอยแตกดังกล่าวจะขยายตัวออกแล้วหยุดที่บริเวณขอบบริเวณรอยต่อของเขตพลาสติกกับเขตยืดหยุ่น

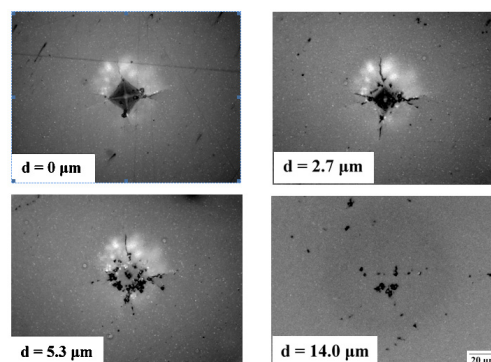


รูปที่ 4 ลำดับขั้นตอนการเกิดรอยแตกเมื่อมีแรงกดมากกระทำต่อพื้นผิวในกรณีของหัวกดแบบวิกเกอร์ส [3] โดยบริเวณสีเข้มแสดงเขตพลาสติก

จากการทดลองโดยวิธีการขัดเป็นชั้นของอลูมินา (อลูมิเนียมออกไซด์ จัดเป็นเซรามิกชนิดหนึ่ง) ซึ่งเป็นวัสดุเปราะ โดยรอยกดเกิดจากแรงกด 9.8 N (1 kg load) พบว่ารอยกดมีขนาดประมาณ 40 μm ดังรูปที่ 5ก) บนพื้นผิวสามารถสังเกตเห็นรอยแตกในแนวตั้งฉากกับรอยกด (Radial cracks) ได้ชัดเจน และบริเวณวงแสงจางแสดงขอบเขตพลาสติกโดยคร่าวๆ เมื่อขัดชิ้นงานลึกลงไปตามรูปที่ 5ข) จะเริ่มสังเกตเห็นบริเวณที่เป็นหลุมขนาดเล็กสีดำรอบรอยกด ซึ่งเป็นบริเวณเขตพลาสติกซึ่งเกิดรอยแตกจุลภาค และจะเห็นได้ชัดเจนขึ้นเมื่อขัดชิ้นงานลึกลงไปตามรูปที่ 5ค) โดยหลุมขนาดเล็กสีดำนี้ คือ หลุมซึ่งเกิดจากการหลุดของวัสดุบริเวณผิว (Pullout) และเมื่อขัดชิ้นงานจนกระทั่งความลึกมากกว่าความลึกของรอยกดและความลึกของเขตพลาสติก (รูปที่ 5ง)) จะไม่สามารถสังเกตเห็นสิ่งใดนอกจากผิวของชิ้นงานที่ขัดเรียบ

อย่างไรก็ตาม การศึกษาการผิดรูปบริเวณรอบรอยกดของวัสดุเปราะโดยการขัดเป็นชั้นยังมีข้อจำกัดหลายประการทั้งใน

ด้านความละเอียดและความสามารถในการจำแนกเขตพลาสติกอย่างชัดเจน เนื่องจากเขตพลาสติกในบางพื้นที่ไม่มีการเกิดรอยแตกระดับจุลภาค และที่สำคัญ การศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงไม่สามารถบ่งบอกเขตยืดหยุ่น ซึ่งมีการผิดรูปของวัตถุโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพ เทคโนโลยีในปัจจุบันมีความก้าวหน้าไปมาก นักวิทยาศาสตร์สามารถเอาชนะข้อจำกัดต่างๆ ที่กล่าวมา โดยใช้เทคนิคและเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ใหม่ๆ เพื่อศึกษาการผิดรูปบริเวณรอบรอยกดของวัสดุเปราะ ซึ่งหากผู้เขียนมีโอกาสจะนำมาเล่าสู่กันฟังในโอกาสต่อไป



รูปที่ 5 ลักษณะรอยกดวิกเกอร์สบนพื้นผิวของอลูมินาหลังจากกระบวนการขัดเป็นชั้นที่ระดับความลึกจากผิวต่างๆ ก) ระดับพื้นผิว (0 μm) ข) ระดับความลึก 2.7 μm ค) ระดับความลึก 5.3 μm และ ง) ระดับความลึก 14.0 μm [4]

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณอาจารย์ชาญกิจ คันถ่อง ผู้ให้คำแนะนำทางด้านการใช้ภาษาไทยและศัพท์บัญญัติแก่ผู้เขียนและช่วยปรับปรุงบทความจนกระทั่งมีความสมบูรณ์และชัดเจนยิ่งขึ้น

แหล่งข้อมูลอ้างอิง

- [1] www.gordonengland.co.uk/hardness/Vickers.htm
- [2] www.csm-instruments.com/fr/Vickers-indentation-using-CSMs-Micro-Scratch-Tester
- [3] Brian Lawn, Fracture of Brittle Solids—Second Edition.
- [4] Apichart Limpichaipanit, Wear and Indentation of Alumina/Silicon Carbide Nanocomposites—DPhil Thesis 2008.

การประชุมผู้ได้รับรางวัลโนเบลครั้งที่ 60 ณ เมืองลินเดา ประจำปี 2553

“ด้วยสำนึกในพระมหากรุณาธิคุณ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี”

นิธิวดี ไทยเจริญ¹

การประชุมผู้ได้รับรางวัลโนเบลจัดขึ้นเป็นประจำทุกปี ณ เกาะลินเดา ซึ่งเป็นเกาะเล็กๆ ทางตอนใต้ของสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี ผู้สนับสนุนหลักของการประชุมนี้คือ Countess Bettina Bernadotte การประชุมนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปิดโอกาสให้นักวิจัยรุ่นเยาว์ได้มีโอกาสแลกเปลี่ยนความรู้กับนักวิทยาศาสตร์รางวัลโนเบล โดยปกติแล้วการประชุมดังกล่าวจะจัดให้หมุนเวียนแต่ละสาขาในทุกๆ ปี แต่สำหรับปี 2553 นี้พิเศษกว่าปีอื่นๆ เนื่องจากการประชุมผู้ได้รับรางวัลโนเบลรวมถึงสามสาขาในคราวเดียวกัน (Multidisciplinary Meeting) ประกอบไปด้วยสาขาฟิสิกส์ เคมี และแพทยศาสตร์หรือสรีรวิทยา ช่วงเวลาจัดงานคือวันที่ 27 มิถุนายน – 2 กรกฎาคม 2553 โดยมีนักวิทยาศาสตร์ผู้ได้รับรางวัลโนเบลเข้าร่วมในการประชุมครั้งนี้ 59 คน และมีนักวิจัยรุ่นเยาว์เข้าร่วมการประชุมทั้งสิ้น 650 คนจาก 68 ประเทศทั่วโลก

ประเทศไทยส่งผู้แทนเข้าร่วมประชุมทั้งสิ้น 6 คน ได้แก่ 1. นายสุธีรักษ์ ฤกษ์ดี จบปริญญาตรีสาขาเคมีจากมหาวิทยาลัยมหิดลและกำลังรอศึกษาต่อต่างประเทศ 2. น.ส.นิธิวดี ไทยเจริญ นักศึกษาปริญญาโท สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 3. นายสิทธิชัย อุปะละ นักศึกษาปริญญาตรีคณะแพทยศาสตร์ ศิริราชพยาบาล 4. นายสุรเชษฐ์ หลิมกำเนิด อาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 5. นายฉัตรชัย เหมือนประสาท อาจารย์ภาควิชาสรีรวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล 6. นายวรพจน์ นิลรัตนกุล แพทย์ประจำบ้านปี 2 ภาควิชาอายุรศาสตร์ คณะแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วันที่ 26 มิถุนายน 2553 ชาวชนทุกคนเดินทางโดยเที่ยวบิน TG970 ออกจากท่าอากาศยานสุวรรณภูมิท่ามกลางสาย

ฝนที่โปรยปรายมาตั้งแต่ช่วงค่ำ ไปถึงจุดหมาย ณ ท่าอากาศยานชวริค สมาพันธรัฐสวิส เวลาประมาณ 9.30 นาฬิกาตามเวลาท้องถิ่น แล้วจึงขับรถไฟลิ่งไปยังเมืองลินเดา สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี ทิวทัศน์สองข้างทางเต็มไปด้วยทุ่งหญ้า พื้นที่เพาะปลูก สลับกับบ้านหลังเล็กหลังน้อยกระจายโดยทั่วไป สุดขอบฟ้าทางทิศตะวันตกมองเห็นทิวทัศน์ของเทือกเขาแอลป์ ผ่านทะเลสาบคอนสแตนซ์ซึ่งมีเรือใบใหญ่ๆ น้อยๆ ได้ลมนอยู่ จนในที่สุดขบวนรถไฟก็มาถึงจุดหมายปลายทาง ณ สถานีรถไฟลินเดา



ชาวชนไทยเกือบทั้งหมดได้พักอยู่ที่ Gasthof Inselgraben ซึ่งเป็นโรงแรมเล็กๆ ในเกาะลินเดา ยกเว้นคุณหมอวรพจน์ซึ่งได้พักอยู่บนแผ่นดินใหญ่ แต่เนื่องจากยังไม่สามารถเข้าที่พักได้จึงพากันไปรับประทานอาหารที่ร้านใกล้ๆ ที่พัก แต่ด้วยเมนูอาหารเป็นภาษาเยอรมันจึงทำให้บางคนไม่ทราบว่าจะรับประทานอะไรอยู่ รู้เพียงแต่ว่าถ้าจะรับประทานหมดก็แทบจะลมหันเลี้ยวทีเดียว เมื่อเปิดพจนานุกรมดูถึงทราบว่าได้ผลสั่งเมนูเนื้อพะไปเสียแล้ว หลังจากรับประทานอาหารเสร็จและเข้าที่พักเรียบร้อยแล้ว ชาวชนไทยก็พากันเดินสำรวจทั่วเกาะ พบว่าตลอดบริเวณริมทะเลสาบจะเห็นผู้คนนั่งรับประทานอาหารหรือจิบเบียร์พร้อมชมทะเลสาบ มีชายหาดาวสีขาวและแต่งตัวในชุดพื้นเมืองขึ้น

¹ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

เป็นอนุสาวรีย์ให้ผู้คนมาถ่ายรูปด้วย ส่วนบริเวณถนนใหญ่กลางเกาะเต็มไปด้วยร้านรวงขายของที่ระลึกและของใช้จำพวกอื่นๆ



เมื่อถึงเวลาลงทะเบียนร่วมงาน ชาวชนทุกคนไปยัง Inselhalle (Insel แปลว่า island และ halle แปลว่า hall) ซึ่งเปรียบเสมือนศูนย์บัญชาการในการจัดการประชุมครั้งนี้ แต่ละคนได้รับป้ายชื่อ และกำหนดการพร้อมแผนที่เกาะ โดยในช่วงเช้าของทุกวันทุกคนจะมาฟังบรรยายพร้อมกันที่ Inselhalle ส่วนในช่วงบ่ายจะเป็น discussion panel อันเป็นโอกาสอันดีที่ชาวชนจะได้สนทนากับนักวิทยาศาสตร์รางวัลโนเบลอย่างเป็นทางการโดยที่สื่อมวลชนไม่สามารถเข้าไปบันทึกภาพได้ ทั้งนี้สถานที่สนทนาจะแตกต่างกันไปแต่ยังอยู่ภายในเกาะ โดยชาวชนต้องใช้แผนที่มาประกอบการเดินทางไปยังสถานที่ดังกล่าวเสมือนการเดินทางตามลายแทงเพื่อหาขุมทรัพย์ นอกจากนี้ชาวชนแต่ละคนยังได้รับบัตรเชิญเข้าร่วมในโอกาสพิเศษต่างๆ กัน เช่น การรับประทานอาหารร่วมกับนักวิทยาศาสตร์รางวัลโนเบล โดยในเย็นวันนี้เอง อ.สุรเชษฐ์ และข้าพเจ้า ได้รับเชิญให้ไปร่วมงานเลี้ยงสังสรรค์ เราจึงกลับมาที่พักเพื่อเปลี่ยนเครื่องแต่งกายก่อนจะไปร่วมงาน

ภายในเรือมีดนตรีเล่นและมีอาหารคอยบริการ มีนักวิทยาศาสตร์รางวัลโนเบลและนักวิทยาศาสตร์รุ่นเยาว์จำนวนหนึ่งได้รับเชิญมาเช่นเดียวกัน พวกเราพบว่าชาวชนจากชาติอื่นได้ติดตามข่าวสารความไม่สงบของบ้านเมืองเราและมีคำถามถึงเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น ซึ่งพวกเราที่มีหน้าที่ชี้แจงว่าเหตุรุนแรงจำกัดอยู่เพียงบางบริเวณของกรุงเทพมหานครเท่านั้น ในบริเวณอื่นยังคงปกติและยินดีต้อนรับนักท่องเที่ยวตามเดิม ข้าพเจ้าได้ชมพระอาทิตย์ตกเวลาประมาณสามทุ่มตามเวลาที่ท้องถิ่น ก่อนที่เรือจะเทียบท่าและแยกย้ายกันกลับที่พักของตน

วันที่ 27 มิถุนายน 2553 ในช่วงเช้าของวันนี้ ชาวชนทั้งหกคนได้มีโอกาสรับเสด็จสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี ณ โรงแรม Bayerischer Hof โดยพระองค์ท่านมีพระราชปฏิสันถารกับผู้มาเฝ้าทูลละอองพระบาทรับเสด็จอย่างเป็นทางการเอง ยังความปลื้มปิติยินดีแก่ผู้มารับเสด็จเป็นอย่างยิ่ง



หลังจากเสร็จสิ้นการรับเสด็จ ชาวชนทั้งหกได้รับประทานอาหารกลางวันร่วมกับ Prof. Harald zur Hausen พร้อมภรรยา โดยนักวิทยาศาสตร์ผู้ได้รับรางวัลโนเบลสาขาแพทยศาสตร์หรือสรีรวิทยาในปี 2008 จากการค้นพบไวรัส HPV ซึ่งก่อให้เกิดมะเร็งปากมดลูก โดยท่านชักชวนให้ข้าพเจ้าเข้ามาวิจัยทางการแพทย์ด้วย นอกจากนี้ข้าพเจ้ายังได้มีโอกาสสนทนากับภรรยาของท่านซึ่งท่านได้แนะนำให้ข้าพเจ้าหาโอกาสเดินทางไปยังที่ต่างๆ และเรียนรู้ชีวิตจากผู้คน ข้าพเจ้าสอบถามภรรยาของท่านถึงชีวิตของท่านภายหลังรับรางวัลโนเบล ซึ่งท่านกล่าวว่ามันเหมือนความฝัน แต่ทั้งนี้เราอย่ามัวติดอยู่ในความฝัน ต้องใช้ชีวิตอยู่ในความเป็นจริงด้วย



ในช่วงบ่าย ชาวชนทั้งหกคนเข้าร่วมพิธีเปิดการประชุมผู้ได้รับรางวัลโนเบล ครั้งที่ 60 โดยมูลนิธิการประชุมผู้ได้รับรางวัลโนเบล ขอพระราชทานพระราชวโรกาสถวายพระเกียรติ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารีเป็นสมาชิกสภาที่

ปริญญาดุษฎีบัณฑิต เนื่องจากพระองค์ทรงเสียสละและทุ่มเทให้กับงานทางด้านวิทยาศาสตร์ สนับสนุนการศึกษาวิทยาศาสตร์ เชื่อมโยงวิทยาศาสตร์และทำให้เกิดการบูรณาการ ภายหลังพิธีเปิดได้มีพิธีลงนามในข้อตกลงความร่วมมือระหว่างสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติและมูลนิธิการประชุมผู้ได้รับรางวัลโนเบลโดยมีสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี เป็นองค์สักขีพยาน และได้มีพระราชปฏิสันถารกับคณะเยาวชน ถึงความสำคัญของการประชุมครั้งนี้

เนื่องจากในวันนี้ทีมชาติเยอรมันสามารถเอาชนะทีมชาติอังกฤษในการแข่งขันฟุตบอลโลกปี 2010 แพนบอลชาวเมืองเบียร์จึงดีใจกันยกใหญ่ ตามถนนในตอนค่ำมีรถราขวักไขว่กวดเตรเสียงดังสนั่นเป็นสัญลักษณ์แทนการฉลองชัย แทบจะทำให้ข้าพเจ้านอนหลับไม่ได้เลยทีเดียว

วันที่ 28 มิถุนายน 2553 การบรรยายในเช้าวันนี้ประกอบด้วย Ada Yonath ในสาขาเคมี กล่าวเรื่องความมหัศจรรย์ของไรโบโซมซึ่งนำไปสู่การออกแบบยาปฏิชีวนะที่ดีขึ้น Jack Szostak ในสาขาแพทยศาสตร์กล่าวถึงการสังเคราะห์ Artificial Cell ตามมาด้วย John Mather ในสาขาฟิสิกส์มาบรรยายเกี่ยวกับประวัติศาสตร์ของเอกภพ Harald zur Hausen ในสาขาแพทยศาสตร์แสดงให้เห็นว่าการติดเชื้อไวรัสหรือแบคทีเรียสามารถนำไปสู่การเกิดโรคมะเร็งได้ Luc Montagnier ในสาขาแพทยศาสตร์บรรยายถึงการใช้นาโนไฟฟ้าในการกระตุ้นให้ DNA ปลอ่ยคลื่นความถี่ต่ำ และปิดท้ายด้วย Françoise Barré-Sinoussi ในสาขาแพทยศาสตร์กับเนื้อหาเรื่องวิวัฒนาการของโรคเอดส์

เย็นวันนี้มีงาน European Get-together ภายในงานมีการจัดที่นั่งเป็นโต๊ะยาว แต่ละโต๊ะจะมีนักวิทยาศาสตร์รางวัลโนเบลพร้อมภรรยาที่นั่งอยู่ แล้วให้นักวิทยาศาสตร์รุ่นเยาว์สามารถเลือกที่นั่งได้ตามชอบใจ บรรดาผู้ที่เข้าร่วมงานมีการแต่งกายอย่างหลากหลาย บางคนแต่งชุดประจำชาติของตน บางคนแต่งเสื้อยืดกางเกงขาสั้น โดยให้เหตุผลว่าที่พักอยู่ไกลมากจนกระทั่งไม่มีเวลากลับไปเปลี่ยนชุด ข้าพเจ้าได้นั่งร่วมโต๊ะกับ Ivar Giaever ผู้ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี 1973 ซึ่งต่อมาได้ผันงานวิจัยไปในด้านชีวฟิสิกส์

ภายหลังจากที่ทุกคนรับประทานอาหารกันอย่างอิ่มหน่ำสำราญแล้ว Countess Bettina Bernadotte จึงเปิดการเดินร่ายแบบ

โปโลเนซ (polonaise dance) แต่เนื่องจากผู้ร่วมงานเพศชายมีจำนวนมากกว่าเพศหญิง ทำให้เหลือกลุ่มผู้ร่วมงานเพศชายซึ่งไม่มีคู่เต้นรำ พวกเขาจึงแก้ปัญหาโดยการจับคู่เต้นกันเอง เป็นที่ตลกขบขันแก่ผู้ร่วมงานยิ่งนัก เมื่อมองดูไปยังคู่เต้นอื่นๆ ก็พบว่าแต่ละคู่เต้นตามความพอใจของตน บางคู่ท่าเต้นดูสนุกสนานเร้าใจกว่าจังหวะดนตรีเสียอีก เมื่อถึงเวลาอันสมควร เยาวชนแต่ละคนก็แยกย้ายกันกลับที่พักเพื่อพักผ่อนและเตรียมความพร้อมในการฟังบรรยายในวันต่อมา

วันที่ 29 มิถุนายน 2553 ในวันนี้การบรรยายช่วงแรกอยู่ในหัวข้อเกี่ยวกับเรื่องแสง โดย Roger Tsien ในสาขาเคมี บรรยายเกี่ยวกับการนำโปรตีนเรืองแสงมาทำเครื่องหมายอวัยวะและเส้นใยประสาทเพื่อช่วยในการผ่าตัด เขาทั้งทำว่า อย่าให้รางวัลเป็นแรงจูงใจในการทำงาน และจงพยายามหาเพื่อนร่วมงานที่ดี ตามมาด้วย Theodor Hänsch ในสาขาฟิสิกส์บรรยายเรื่องวิวัฒนาการของเลเซอร์และการใช้ประโยชน์ในปัจจุบันซึ่งพบว่าสามารถใช้เลเซอร์ความถี่สูงเทียบวัดเวลามาตรฐานแทนที่นาฬิกาอะตอม หรือการวัดรัศมีของโปรตอนใหม่ซึ่งให้ค่าน้อยกว่าค่าเดิมถึง 4% นอกจากนี้ก็มี Robert Horvitz ในสาขาแพทยศาสตร์บรรยายเกี่ยวกับศึกษาอินที่ทำหน้าที่ควบคุมการมีชีวิตอยู่และการตายของเซลล์เพื่อนำมารักษาโรค และ Martin Chalfie ในสาขาเคมีบรรยายเกี่ยวกับการใช้โปรตีนเรืองแสงในการทำเครื่องหมายเพื่อติดตามการแสดงออกของยีน โดยเขาเล่าว่า ประสบการณ์เป็นสิ่งสำคัญที่จะช่วยพัฒนางานวิจัยให้ก้าวหน้า และพบว่านักเรียนและผู้ทำวิจัยหลังปริญญาเอกมักจะเป็นผู้ค้นพบสิ่งใหม่ด้วย



ในวันนี้ยังมีช่วงพิเศษซึ่งเชิญนักวิทยาศาสตร์รางวัลโนเบลจำนวนห้าคนในสามสาขามาร่วมสนทนาในหัวข้อ Impact of Chemistry and Physics to Biomedicine. Where is the Future? โดยมีคำถามถึงบทบาทของงานวิจัยด้านฟิสิกส์ที่มีต่องานวิจัยทาง

การแพทย์ โดยเครื่องมือที่เห็นพ้องต้องกันว่ามีความสำคัญเป็นอันดับหนึ่งคือ เครื่อง MRI ซึ่งใช้ในการสร้างภาพเสมือนจริงของอวัยวะโดยใช้สนามแม่เหล็กความเข้มสูงนั่นเอง นอกจากนี้ยังมีความคิดเห็นเกี่ยวกับการร่วมมือกันทำงานในระหว่างสาขา และมีคำถามจากเยาวชนว่าต่อจากนี้ไปเราควรจะค้นพบอะไร โดยมีความเห็นว่าจะค้นพบวิธีประดิษฐ์คอมพิวเตอร์ที่สามารถคิดเองได้ และปิดท้ายด้วยคำตอบที่ว่า If we knew, it would already have been discovered!

ในเย็นวันนี้ เยาวชนทุกคนได้รับเชิญให้เข้าร่วมงาน Grill and Chill ซึ่งเป็นการรับประทานอาหารเย็นร่วมกับชาวเมืองบริเวนริมทะเลสาบคอนสแตนซ์ โดยเปิดโอกาสให้ชาวเมืองได้มีโอกาสสนทนากับเยาวชน ลักษณะอาหารเป็นอาหารจำพวกปิ้งย่าง มีเพื่อนชาวจีนบอกข้าพเจ้าว่าเขาฟังเยาวชนไทยพูดกันคล้ายกำลังร้องเพลง นอกจากนี้ เพื่อนชาวจีนยังได้เล่าให้กลุ่มเยาวชนฟังว่าก่อนหน้านี้เขาต้องทำนาไปด้วยเพื่อหาทุนเรียนระดับปริญญาเอก ทำให้ข้าพเจ้ารู้สึกชื่นชมและตระหนักว่าเรายังสบายกว่าเขามากนัก ข้าพเจ้าสังเกตว่าเยาวชนจีนมีการแข่งขันสูงมาก โดยหากได้รับทุนศึกษาต่อต่างประเทศแล้วจะต้องพยายามหางานทำต่อในประเทศนั้นๆ ให้จงได้และจะต้องประสบความสำเร็จกลับไป มิฉะนั้นแล้วเขาจะต้องกลับไปทำงานในไร่ที่บ้านเกิดนั่นเอง



วันที่ 30 มิถุนายน 2553 ในเช้าวันนี้เริ่มต้นด้วย Aaron Ciechanover ในสาขาเคมีมาบรรยายเกี่ยวกับการสลายตัวของโปรตีนภายในเซลล์ Gerardus 't Hooft ในสาขาฟิสิกส์บรรยายเรื่องการค้นพบที่ทำลายและสำคัญในทางฟิสิกส์ Martin Evans ในสาขาแพทยศาสตร์บรรยายเกี่ยวกับการสร้างสเต็มเซลล์ และให้ข้อคิดว่าโอกาสมักจะเกิดขึ้นกับผู้ที่เตรียมพร้อมเท่านั้น (ยกจากคำกล่าวของ Louis Pasteur) นอกจากนี้ยังมี Oliver Smithies ในสาขาแพทยศาสตร์เล่าประสบการณ์งานวิจัยของตนจากสมุดบันทึกของ

ห้องปฏิบัติการซึ่งมีการทำงานแม้ในวันหยุดขึ้นปีใหม่หรือวันเกิดของตนเอง David Gross ในสาขาฟิสิกส์บรรยายเรื่อง Frontier of Physics โดยได้ยกคำถามที่ยังค้างคาใจนักฟิสิกส์และคำตอบที่เป็นไปได้ โดยเขาทิ้งท้ายไว้ว่า “The fun is just beginning.” ปิดท้ายการบรรยายด้วย Kurt Wüthrich ในสาขาเคมีบรรยายเรื่องโครงสร้างของโปรตีน

เย็นวันนี้ผู้เข้าร่วมการประชุมทุกคนได้รับเชิญไปในงานคอนเสิร์ตเครื่องสาย Verbier Festival Chamber Orchestra ณ โรงละครประจำเมือง (Stadtttheatre) เยาวชนไทยได้รับฟังการแสดงดนตรีกันอย่างเต็มอิมก่อนที่จะกลับที่พักเพื่อเตรียมรับฟังการบรรยายในวันรุ่งขึ้น

วันที่ 1 กรกฎาคม 2553 การบรรยายในวันสุดท้ายนี้เริ่มต้นโดย Jean-Marie Lehn ในสาขาเคมีมาบรรยายเกี่ยวกับการสังเคราะห์โพลีเมอร์ที่มีพลวัตในเชิงกลหรือเชิงทัศนศาสตร์ James W. Cronin ในสาขาฟิสิกส์บรรยายเรื่องการตรวจพบรังสีคอสมิก John Walker ในสาขาเคมีบรรยายเรื่องโมโตคอนเดรีย และพูดถึง Sanger อาจารย์ของเขาผู้ซึ่งได้รับรางวัลโนเบลถึง 2 ครั้งได้กล่าวกับเขาภายหลังได้รับรางวัลโนเบลว่า “When the party is over, get back to the laboratory and win another one!” และ Albert Fert ในสาขาฟิสิกส์บรรยายเกี่ยวกับ Spintronics และปรากฏการณ์ Giant Magnetic Resonance



หลังรับประทานอาหารว่าง นักวิทยาศาสตร์รางวัลโนเบลจำนวนห้าคนในสามสาขามาร่วมกันสนทนาในหัวข้อ Being a Scientist โดยพวกเขาไม่เคยคิดว่าทำงานหนัก เพราะสนุกกับสิ่งที่ทำอยู่จนเหมือนกับว่าได้เล่นตลอดเวลา และยังย้ำเตือนทุกคนให้เล่นมากๆ ด้วย นอกจากนี้สำหรับคำถามว่าเมื่อใดที่ควรจะหยุดงานวิจัยนั้น นักวิทยาศาสตร์รางวัลโนเบลแนะนำว่าควรหยุดทำงานวิจัยเมื่อรู้สึกว่าการงานนั้นไม่น่าสนใจ อย่าหยุดทำเพราะยอมแพ้

หรือเพราะคนอื่นบอกให้หยุด แม้ว่าคนๆ นั้นจะเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาหรือนักวิทยาศาสตร์รางวัลโนเบลก็ตาม

ในเย็นวันนี้มีงาน Bavarian Night โดยมีรัฐมนตรีวิทยาศาสตร์ของแคว้นบาวาเรีย (รัฐหนึ่งในสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี) มากล่าวแนะนำการศึกษาและงานวิจัยของแคว้น พร้อมทั้งให้ตัวแทนเยาวชนในแคว้นมานำเสนอผลงานวิจัย จากนั้นจึงเป็นช่วงรับประทานอาหารซึ่งเป็นอาหารพื้นเมืองประกอบด้วย เนื้อสัตว์และไส้กรอก มีเพรพเชลเส้นผ่านศูนย์กลางราวๆ หนึ่งฟุต ให้รับประทาน หลังจากนั้นจึงมีการเดินรำแบบบาวาเรียซึ่งข้าพเจ้าได้รับเชิญให้ออกไปเดินด้วย ท่าเต้นรำประกอบเพลงมีจังหวะสนุกสนานแต่คู่เต้นหมุนตัวข้าพเจ้าไปมาอยู่ตลอดเวลาจนทำให้ข้าพเจ้ารู้สึกมีแรงเล็กน้อยหลังการเดินรำครั้งนี้

วันที่ 2 กรกฎาคม 2553 ในวันนี้ ผู้เข้าร่วมการประชุมเดินทางโดยเรือสำราญไปยัง เกาะไมเนา ซึ่งเป็นเกาะส่วนตัวของตระกูล Bernadotte ในวันนี้สภาพอากาศปลอดโปร่ง ท้องฟ้าแจ่มใส เหมือนจะเป็นใจให้การเดินทางไปเยี่ยมชมเกาะในครั้งนี้ ระหว่างการเดินทางจะเห็นปราสาทใหญ่อยู่ริมทะเลสาบราวกับเป็นเมืองในเทพนิยาย ข้าพเจ้าถือโอกาสบนเรือนี่สนทนากับเพื่อนหลากหลายชาติ เมื่อถึงเกาะไมเนา ทุกคนก็เข้าร่วมการเสวนาเรื่อง Energy and Sustainability ซึ่งชี้ให้เห็นถึงปัญหาเรื่องพลังงานที่เกิดขึ้นพร้อมทั้งเสวนาถึงแนวทางการแก้ไข เมื่อเสร็จสิ้นการเสวนาแล้วผู้เข้าร่วมประชุมก็แยกย้ายกันไปรับประทานอาหารกลางวันกันตามชอบใจในร้านอาหารซึ่งมีอยู่ทั่วเกาะ ข้าพเจ้าเลือกไส้กรอกรมควันและเฟรนช์ฟราย พร้อมของหวานคือบลูเบอร์รี่พาย เมื่อพิจารณาถึงปริมาณอาหารมีอยู่นี้แล้วคิดว่าสามารถทำให้ข้าพเจ้าอิ่มได้จนถึงมือเย็นเลยทีเดียว หลังจากรับประทานอาหารเสร็จ ผู้เข้าร่วมประชุมสามารถเดินชมทัศนียภาพโดยรอบ โดยภายในเกาะมีการจัดแบ่งพื้นที่ออกเป็นหลายส่วน มีพรรณไม้แปลกๆ จำนวนมาก มีการปลูกดอกไม้สลับสีแต่งเป็นตัวสัตว์ กระทั่งจำลองแสดงวิถีชีวิตของชนพื้นเมือง นิทรรศการเรื่องพลังงาน สวนผีเสื้อ และสวนกุหลาบนานาพันธุ์



เมื่อถึงเวลานัดหมาย ผู้เข้าร่วมประชุมทุกคนก็ไปรวมตัวกันหน้าคฤหาสน์ของเจ้าของเกาะเพื่อเข้าร่วมพิธีปิดการประชุมครั้งนี้ โดย Countess Bettina Bernadotte ได้กล่าวขอบคุณทุกท่านที่มาร่วมงาน และผู้เข้าร่วมประชุมจากราชอาณาจักรเนเธอร์แลนด์เป็นตัวแทนของเยาวชนทั้งหมดในการกล่าวปิดท้ายการประชุมครั้งนี้ก่อนที่จะเดินทางกลับไปยังเกาะลินเดาและแยกย้ายกันกลับภูมิลำเนาของตน

วันที่ 3 กรกฎาคม 2553 ทุกคนจับรถไฟไปยังสนามบินชูริกในตอนเช้า ระหว่างการเดินทางนี้ กระเป๋าทันทีที่ทางผู้จัดงานได้มอบให้เป็นที่ระลึกแก่ผู้ร่วมงานทุกคน จะเป็นปัญหาไม่น้อย เนื่องจากสัมภาระดังกล่าวมีน้ำหนักมาก หากบรรจุลงในกระเป๋าเดินทางแล้ว น้ำหนักของกระเป๋าเดินทางจะเกินจากข้อกำหนดของสายการบิน ทุกคนจึงจำเป็นต้องหอบหิ้วสัมภาระดังกล่าวติดตัวไว้ตลอดเวลา เมื่อถึงท่าอากาศยานชูริก เยาวชนก็นำเอกสารประกอบการเดินทางไปให้เจ้าหน้าที่ของท่าอากาศยานตรวจสอบและจ่ายจ่ายชื่อของที่ระลึก ของฝากยอดนิยมซึ่งเยาวชนส่วนใหญ่เลือกซื้อคือช็อคโกแลต จากนั้นจึงเดินทางโดยเที่ยวบิน TG791 กลับมายังประเทศไทย

พวกเราได้รับการบริการอย่างดีจากพนักงานต้อนรับของสายการบิน ซึ่งคอยถามไถ่และช่วยนำสัมภาระไปเก็บไว้บนชั้นวางของเหนือศีรษะ หลังจากการเดินทางเป็นเวลากว่าสิบชั่วโมง ทุกคนก็ถึงท่าอากาศยานสุวรรณภูมิโดยสวัสดิภาพ

เหล็ยมเพชรเม็ดงามวิชาแม่เหล็กไฟฟ้า: ตอนที่ 7 สูตรการกระจายในความถี่และมุมของพลังงานการแผ่ รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าโดยอนุภาคประจุเร่ง

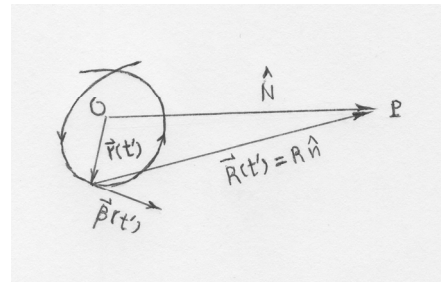
ชาญกิจ คั่นฉ่อง¹

1. บทนำ

สูตรการกระจายในความถี่และมุมของพลังงานการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าโดยอนุภาคประจุเคลื่อนที่ด้วยความเร่งเป็นเครื่องมือทางทฤษฎีหนึ่งในการอธิบายสเปกตรัมของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่กำเนิดจากเครื่องเร่งอนุภาค และเป็นทฤษฎีพื้นฐานหนึ่งของฟิสิกส์เครื่องเร่งอนุภาค (particle accelerator physics) ซึ่งมีในตำรามาตรฐานทางไฟฟ้าพลศาสตร์แบบฉบับ (classical electrodynamics) และตำรามาตรฐานทางฟิสิกส์เครื่องเร่ง [1-3] สังเกตว่าในตำรามาตรฐานข้างต้น การพิสูจน์หรือการคำนวณเอกลักษณ์บางประการของสูตรดังกล่าวมีความลึกซึ้งแต่เขียนไว้กระชับมาก ผมได้มีโอกาสทำความเข้าใจสูตรดังกล่าว จึงนำมาขยายความในที่นี้ ซึ่งสามารถเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่เริ่มศึกษาวิชาไฟฟ้าพลศาสตร์แบบฉบับในหัวข้อการแผ่รังสีของอนุภาคประจุในเครื่องเร่งอนุภาค

2. พลังงานการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าโดยอนุภาคประจุเร่ง

พิจารณาโครงสร้างของระบบการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าจากหนึ่งอนุภาคประจุเคลื่อนที่ด้วยความเร่งดังรูปที่ 1 เมื่อให้จุด O เป็นจุดอ้างอิงที่ใกล้กับบริเวณการเคลื่อนที่ของอนุภาคและสะดวกแก่การวิเคราะห์การแผ่รังสี, จุด P เป็นจุดสังเกตรังสี ณ ตำแหน่ง $\vec{x}$ เทียบกับจุด O โดยรังสีที่ไปถึงจุด P ณ เวลา t เริ่มกำเนิดจากอนุภาคประจุที่เลขอยู่ที่ตำแหน่ง $\vec{r}(t')$ ณ เวลาในอดีต t' (retarded time), $\vec{R}(t') = R\hat{n} \equiv \vec{x} - \vec{r}(t')$ คือการกระจัดจากอนุภาคประจุที่ $\vec{r}(t')$ ไปยัง P, และ $\hat{N}$ เป็นเวกเตอร์ 1 หน่วยที่แสดงทิศจากจุด O ไปยัง P



รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างของระบบการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าจากหนึ่งอนุภาคประจุเร่ง

จากระบบในรูปที่ 1 โดยทฤษฎีไฟฟ้าพลศาสตร์แบบฉบับได้ว่า พลังงานการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งหมดที่มีความถี่ $\omega = 2\pi f$ ของ 1 อนุภาคประจุ “ทราบเท่าที่อนุภาคยังมีความเร่ง” ในทิศ $\hat{N}$ จากจุดกำเนิด O ต่อหนึ่งหน่วยมุมตันและหนึ่งหน่วยความถี่อยู่ในรูป [1]

$$\begin{aligned} & \frac{d^2 W}{d\omega d\Omega}(\omega, \hat{N}) \\ &= 2 \left| \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} dt e^{i\omega t} \sqrt{\frac{c}{4\pi}} [R \vec{E}_{\text{rad}}]_{\text{ret}} \right|^2 \\ &= \frac{e^2}{4\pi^2 c} \left| \int_{-\infty}^{\infty} dt e^{i\omega t} \left[\frac{\hat{n} \times [(\hat{n} - \vec{\beta}) \times \dot{\vec{\beta}}]}{(1 - \vec{\beta} \cdot \hat{n})^2} \right]_{\text{ret}} \right|^2 \\ &\approx \frac{e^2}{4\pi^2 c} \left| \int_{-\infty}^{\infty} dt \left[\frac{\hat{N} \times [(\hat{N} - \vec{\beta}) \times \dot{\vec{\beta}}]}{(1 - \vec{\beta} \cdot \hat{N})^2} \right] e^{i\omega(t - \hat{N} \cdot \vec{r}(t)/c)} \right|^2 \\ &\dots (2.1) \end{aligned}$$

¹อาจารย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

โดยที่ $\vec{E}_{\text{rad}}$ คือ สนามไฟฟ้าในส่วนที่ขึ้นกับความเร่งซึ่งมีลักษณะที่ลดลงช้าโดยเป็นส่วนกลับของระยะทางจากอนุภาคประจุที่ $\vec{r}(t')$, เครื่องหมาย $[\]_{\text{ret}}$ หมายถึง การหาค่าที่ Retarded time t' , $\vec{\beta} \equiv \frac{\dot{\vec{r}}}{c}$, $\dot{\vec{\beta}} \equiv \frac{\ddot{\vec{r}}}{c}$, และ เครื่องหมาย $|I(\omega)|^2 \equiv I^*(\omega)I(\omega)$ หมายถึง ค่าสมบูรณ์กำลังสองของจำนวนเชิงซ้อน (การมีจำนวนเชิงซ้อนมาจากการใช้เทคนิคการแปลงฟูเรียร์ (Fourier transform) มาวิเคราะห์สเปกตรัม) มีข้อสังเกตเกี่ยวกับสูตร (2.1) ดังนี้

ก) รูปหลังเครื่องหมายเท่ากับที่สองเป็นอินทิกรัลของตัวแปรเวลา t ที่เป็นเวลาที่สังเกตรังสีได้ ณ จุดสังเกตรังสี ซึ่งสัมพันธ์กับเวลา t' ที่อนุภาคกำลังให้กำเนิดห้วงรังสีดังกล่าว โดยระยะเวลาทั้งสองสัมพันธ์กันตามสมการ $c = \frac{R(t')}{t - t'}$

ข) รูปในบรรทัดสุดท้ายเป็นรูปที่ได้ใช้การประมาณว่า $|\vec{x}| \approx R \gg |\vec{r}(t')|$ ในการประมาณ $\hat{n}(t')$ ในรูป $\hat{N}$ ซึ่งไม่ขึ้นกับ t' และได้เปลี่ยนตัวแปรการอินทิเกรตจาก t เป็น t' แต่เพื่อความสะดวกได้ละเครื่องหมาย "Prime" ออกโดยเขียนเป็น " t "

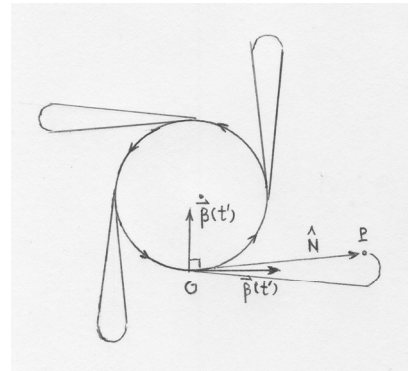
ค) การเป็น "พลังงานการแผ่รังสีทั้งหมดของหนึ่งอนุภาคประจุรอบเท่าที่อนุภาคยังมีความเร่ง" ดูเหมือนไม่สมเหตุผลเพราะเมื่ออนุภาคประจุถูกเร่งอยู่ในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตลอดเวลา ก็จะต้องมีความเร่งและแผ่พลังงานรังสีออกมาตลอดเวลา ถ้าเช่นนั้นค่า $\frac{d^2 W}{d\omega d\Omega}$ ควรจะลู่ออกสู่อินฟินิตี้ ลองวิเคราะห์คำตอบดังนี้

ในกรอบของอนุภาค ณ เวลา t' (หรือในขอบเขตไม่สัมพัทธภาพ) ที่มี $\vec{\beta}(t') \rightarrow 0$ แต่ $\dot{\vec{\beta}}(t') \neq 0$ ปริมาณ $\frac{dW}{d\Omega}$ มีโครงสร้าง "ตัวเศษ" ที่ทำให้การกระจายตามทิศ $\hat{n}(t')$ รอบๆ อนุภาคประจุที่เวลา t' มีลักษณะคล้าย "รูปโดนัท" ที่มี $\dot{\vec{\beta}}$ ร้อยทะลุตรงกลางและตั้งฉากกับวงแหวน (ซึ่งเกี่ยวกับ สูตรลาร์มอร์ (Larmor formula)) [3]

ส่วนในกรอบห้องปฏิบัติการที่อนุภาคประจุเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วระดับสัมพัทธภาพ $\frac{dW}{d\Omega}$ จะมีโครงสร้าง "ตัวส่วน" ที่เป็นกำลังของตัวประกอบ (factor) $(1 - \vec{\beta} \cdot \hat{n})$ ซึ่งจะเห็นจาก (2.1) ว่าตัวหารเช่นนี้มีค่าน้อยสุดที่บริเวณทิศ $\hat{n}$ ที่อยู่ในทิศเดียวกับ $\vec{\beta}(t')$ และถ้าค่า $\beta \rightarrow 1$ ตัวหารนี้จะลู่เข้าสู่ศูนย์ในบริเวณทิศ $\hat{n}$

ดังกล่าว ทำให้มีแนวโน้มที่ $\frac{dW}{d\Omega}$ มีค่ามากพิเศษในบริเวณทิศ $\hat{n}$ นี้

ดังนั้นเมื่อรวมผลของ "ตัวเศษ" เข้ากับ "ตัวส่วน" ทำให้ยิ่งอนุภาคประจุเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว $\beta \rightarrow 1$ มากเท่าใด ก็ยิ่งทำให้ "วงแหวนโดนัท" ของ $\frac{dW}{d\Omega}$ เบ้และงอกพจน์ที่เกี่ยวกับ $\vec{\beta}(t')$ ขึ้นมาโดยเข้าสู่ทิศ $\vec{\beta}(t')$ มากขึ้นเท่านั้น [1, 3] เปรียบเสมือนกับอนุภาคประจุเป็นรถที่วิ่งเร็วๆ และ $\frac{dW}{d\Omega}$ ทำตัวเป็นไฟฉายที่ติดอยู่หน้ารถ เช่น การแผ่รังสีจากประจุเคลื่อนที่ตามเส้นทางวงกลมดังรูปที่ 2 [1, 2] ซึ่งสำหรับผู้สังเกตที่จุด $\vec{x}$ หนึ่งๆ จะมีโอกาสได้รับพลังงานจากรังสีอย่างเต็มที่เมื่อมี "ลำไฟฉาย" นี้กวาดผ่านเท่านั้น ดังนั้นในทางปฏิบัติ อินทิกรัล (2.1) มีผลมากเฉพาะในช่วงเวลาที่มี "ลำไฟฉาย" 1 ห้วง (pulse) กวาดผ่านจุดสังเกตรังสี $\vec{x}$ เท่านั้น จึงไม่ลู่ออกสู่อินฟินิตี้ แม้ว่าจะเป็นอินทิกรัลที่มีขอบเขต $t \rightarrow \pm\infty$ สำหรับอนุภาคที่ถูกเร่งตลอดเวลาก็ตาม



รูปที่ 2 แสดงลักษณะการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบเครื่องเร่งอนุภาคตามเส้นทางวงกลม [1, 2]

ง) สำหรับระบบเครื่องเร่งอนุภาคตามเส้นทางวงกลมที่มีโครงสร้างตามรูปที่ 2 ซึ่งให้รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่เรียกว่า รังสีซินโครตรอน (synchrotron radiation) [1-3] ในระบบเครื่องเร่งจริง มีอนุภาคประจุหลายอนุภาคเคลื่อนที่วนหลายๆ รอบในรูปกระแส I ทำให้จุดสังเกตรังสีที่กำหนดไว้ได้รับรังสีหลายๆ ห้วงต่อเนื่องกัน ดังนั้นปริมาณที่มีประโยชน์กว่าในการวิเคราะห์สเปกตรัม คือ ฟลักซ์โฟตอนเชิงสเปกตรัม (spectral photon flux) ต่อหนึ่งหน่วยมุมตันในช่วงความถี่ $\Delta\omega$ สำหรับกระแส I [3]

$$\frac{d^2 \dot{N}_{ph}}{d\omega d\Omega} \equiv \frac{\Delta\omega}{\hbar\omega} \frac{I}{e} \frac{d^2 W}{d\omega d\Omega} \quad (2.2)$$

ซึ่งนิยามจาก $\frac{d^2 W}{d\omega d\Omega}$ ที่เป็พลังงานรังสีต่อหนึ่งหน่วยความถี่ และหนึ่งหน่วยมุมตันของหนึ่งห้วงรังสีจากหนึ่งอนุภาค แล้วหารด้วย $\hbar\omega$ จะได้ “จำนวนโฟตอน” (ถึงแม้ว่าเป็นทฤษฎีแบบฉบับ), คูณด้วย $\Delta\omega$ จะได้พลังงานเฉลี่ยในช่วงความถี่ $\Delta\omega$, และคูณด้วย $\frac{I}{e}$ ก็จะได้พลังงานของทุกอนุภาคประจุที่ผ่านไปต่อหนึ่งหน่วยเวลา โดยที่ e คือขนาดประจุของหนึ่งอนุภาค เช่น อิเล็กตรอน

3. สูตรการกระจายในความถี่และมุมของพลังงานการแผ่รังสีโดยอนุภาคประจุเร่ง

ในที่นี้เราจะพิจารณาสูตรการหา $\frac{d^2 W}{d\omega d\Omega}$ ตาม (2.1)

ซึ่งมีรูปที่ให้ผลสมมูล (equivalent) กัน 3 รูป ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{d^2 W}{d\omega d\Omega}(\omega, \hat{N}) &= \frac{e^2}{4\pi^2 c} \left| \int_{-\infty}^{\infty} dt \left\{ \frac{\hat{N} \times \left[(\hat{N} - \vec{\beta}) \times \dot{\vec{\beta}} \right]}{(1 - \vec{\beta} \cdot \hat{N})^2} \right\} \right|^2 \\ &\dots (3.1a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{e^2}{4\pi^2 c} \omega^2 \left| \int_{-\infty}^{\infty} dt e^{i\omega(t - \hat{N} \cdot \vec{r}(t)/c)} \hat{N} \times (\hat{N} \times \vec{\beta}) \right|^2 \\ &\dots (3.1b) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{e^2}{4\pi^2 c} \omega^2 \left| \int_{-\infty}^{\infty} dt e^{i\omega(t - \hat{N} \cdot \vec{r}(t)/c)} \hat{N} \times \vec{\beta} \right|^2 \\ &\dots (3.1c) \end{aligned}$$

พิจารณาการแสดงความสมมูลกันของสูตรทั้งสามดังนี้

3.1) การแสดงจาก (3.1a) $\rightarrow$ (3.1b) และจาก (3.1b) $\rightarrow$ (3.1a)

การแสดงจาก (3.1a) $\rightarrow$ (3.1b) สามารถใช้การอินทิเกรตโดยแยกส่วน (integration by parts) [1] ซึ่งมีประเด็นหลักซึ่งที่เราจะขยายความในที่นี้ จากเอกลักษณ์ที่ใช้ทำอินทิเกรตโดยแยกส่วนว่า

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\hat{N} \times (\hat{N} \times \vec{\beta})}{1 - \vec{\beta} \cdot \hat{N}} \right] = \frac{\hat{N} \times \left[(\hat{N} - \vec{\beta}) \times \dot{\vec{\beta}} \right]}{(1 - \vec{\beta} \cdot \hat{N})^2} \quad (3.2)$$

จาก (3.1a) พิจารณาอินทิกรัลรูป

$$\begin{aligned} I &\equiv \int_{-\infty}^{\infty} dt e^{i\omega(t - \hat{N} \cdot \vec{r}(t)/c)} \frac{\hat{N} \times \left[(\hat{N} - \vec{\beta}) \times \dot{\vec{\beta}} \right]}{(1 - \vec{\beta} \cdot \hat{N})^2} \\ &= \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_{-\infty}^{\infty} dt \left[\frac{\hat{N} \times (\hat{N} \times \vec{\beta})}{1 - \vec{\beta} \cdot \hat{N}} \right] e^{i\omega(t - \hat{N} \cdot \vec{r}(t)/c) - \varepsilon|t|} \\ &\dots (3.3) \end{aligned}$$

ซึ่งมีการจัดรูปใหม่โดยใส่ตัวประกอบ $e^{-\varepsilon|t|}$ แล้วทำลิมิต $\varepsilon \rightarrow 0$ (จะอธิบายเหตุผลต่อไป) เรามีเอกลักษณ์ที่ใช้ในการอินทิเกรตโดยแยกส่วน I ต่อไปนี้

$$\theta(t) \equiv \begin{cases} 1; & t \geq 0 \\ 0; & t < 0 \end{cases} \text{ และ } \frac{d\theta(t)}{dt} = \delta(t) \quad (3.4)$$

$$\theta(t) - \theta(-t) = \begin{cases} 1; & t > 0 \\ 0; & t = 0 \text{ และ} \\ -1; & t < 0 \end{cases}$$

$$\frac{d}{dt}(\theta(t) - \theta(-t)) = 2\delta(t) \quad (3.5)$$

$$-\varepsilon|t| = -\varepsilon(\theta(t) - \theta(-t))t = \begin{cases} -\varepsilon t; & t > 0 \\ 0; & t = 0 \\ \varepsilon t; & t < 0 \end{cases} \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} \frac{d(-\varepsilon|t|)}{dt} &= -\varepsilon[(\theta(t) - \theta(-t)) + 2\delta(t)t] \\ &= \begin{cases} -\varepsilon; & t > 0 \\ 0; & t = 0 \\ \varepsilon; & t < 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (3.7)$$

และ $2\delta(t)t = 0$ พิจารณาอินทิเกรตโดยแยกส่วน I โดยให้

$$\begin{aligned} u(t; \varepsilon) &\equiv e^{i\omega \left(t - \hat{N} \cdot \vec{r}(t)/c - \frac{\varepsilon}{i\omega} |t| \right)}; \\ dv &\equiv d \left[\frac{\hat{N} \times (\hat{N} \times \vec{\beta})}{1 - \vec{\beta} \cdot \hat{N}} \right] \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$du(t; \varepsilon) = dt i\omega \left[\frac{1 - \vec{\beta} \cdot \hat{N}}{i\omega} (\theta(t) - \theta(-t)) \right] u$$

ได้ว่า

$$\begin{aligned}
 I &= \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_{-\infty}^{\infty} dv u(t; \varepsilon) \\
 &= \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left(u(t; \varepsilon) v \Big|_{-\infty}^{\infty} - \int_{-\infty}^{\infty} du(t; \varepsilon) v \right) \\
 &= - \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_{-\infty}^{\infty} dt \left\{ i\omega \left[\frac{1 - \vec{\beta} \cdot \hat{N}}{-\frac{\varepsilon}{i\omega} (\theta(t) - \theta(-t))} \right] \right. \\
 &\quad \left. u(t; \varepsilon) \frac{\hat{N} \times (\hat{N} \times \vec{\beta})}{1 - \vec{\beta} \cdot \hat{N}} \right\} \quad \dots (3.9)
 \end{aligned}$$

โดยที่ในลิมิต $t \rightarrow \pm\infty$ พจน์ $u(t; \varepsilon) v \Big|_{-\infty}^{\infty}$ หายไป และในลิมิต $\varepsilon \rightarrow 0$ ทำให้ได้อินทิกรัล I ในรูปอินทิกรัล I' ต่อไปนี้

$$I' \equiv -i\omega \int_{-\infty}^{\infty} dt e^{i\omega(t - \hat{N} \cdot \vec{r}(t)/c)} \hat{N} \times (\hat{N} \times \vec{\beta}) \quad (3.10)$$

เมื่อนำ I' แทนที่ I ใน (3.1a) ก็จะได้ (3.1b) มีข้อสังเกตต่อความแตกต่างระหว่างอินทิกรัลรูป I กับ I' ดังนี้

ก. สำหรับ I ในรูป $\int_{-\infty}^{\infty} dv u(t)$ ที่ไม่ใช่ตัวประกอบ $e^{-\varepsilon|t|}$ และลิมิต $\varepsilon \rightarrow 0$ ไม่สามารถทำอินทิเกรตโดยแยกส่วนโดยตรงได้ เพราะในลิมิต $t \rightarrow \pm\infty$ พจน์ขอบ (boundary term) $\int_{-\infty}^{\infty} duv = u(t)v \Big|_{-\infty}^{\infty}$ มีความหมายไม่กำหนด แต่เมื่อจัดรูปใหม่เป็น $\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_{-\infty}^{\infty} dv u(t; \varepsilon)$ ก็จะใช้อินทิกรัล $\int_{-\infty}^{\infty} dv u(t; \varepsilon)$ ในการทำอินทิเกรตโดยแยกส่วนแทน ซึ่งเมื่อทำอินทิเกรตโดยแยกส่วนและทำลิมิต $\varepsilon \rightarrow 0$ แล้วจะทำให้ได้ค่า I กลับมาดังเดิม จะเห็นว่าตัวประกอบ $e^{-\varepsilon|t|}$ มีบทบาทในการกวดการแกว่งกวัดของ $u(t; \varepsilon)$ ที่ $t \rightarrow \pm\infty$ ให้ลู่อู่เข้าสู่ศูนย์ เพื่อให้ค่าลิมิต $u(t; \varepsilon) v \Big|_{-\infty}^{\infty}$ มีความหมาย จึงสามารถดำเนินการอินทิเกรตโดยแยกส่วนในรูปนี้ได้

ประเด็นนี้คล้ายกับ อนุพันธ์ของฟังก์ชันเดลตาดีแรก ที่นิยามผ่านการอินทิเกรตโดยแยกส่วน ดังนี้

$$\begin{aligned}
 &\int_{-\infty}^{\infty} dt \frac{d}{dt} \delta(t - \tau) f(t) \\
 &\equiv \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_{-\infty}^{\infty} dt \frac{d}{dt} \delta_{\varepsilon}(t - \tau) f(t) \\
 &= \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left(\delta_{\varepsilon}(t - \tau) f(t) \Big|_{-\infty}^{\infty} - \int_{-\infty}^{\infty} dt \frac{d}{dt} \delta_{\varepsilon}(t - \tau) f(t) \right) \quad (3.11) \\
 &= - \int_{-\infty}^{\infty} dt \frac{d}{dt} \delta(t - \tau) f(t)
 \end{aligned}$$

โดยที่ $\delta_{\varepsilon}(t - \tau)$ เป็นฟังก์ชันเรียบที่มีสมบัติว่า เมื่อทำลิมิต $\varepsilon \rightarrow 0$ จะให้ผลที่สอดคล้องกับสมบัติต่างๆ ของฟังก์ชันเดลตา เช่น

$$\begin{aligned}
 \int_{-\infty}^{\infty} dt \delta(t - \tau) &\equiv \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_{-\infty}^{\infty} dt \delta_{\varepsilon}(t - \tau) = 1 \\
 \delta(t - \tau) f(t) \Big|_{-\infty}^{\infty} &\equiv \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} (\delta_{\varepsilon}(t - \tau) f(t) \Big|_{-\infty}^{\infty}) = 0
 \end{aligned}$$

จะเห็นว่าในการนิยามอนุพันธ์ของฟังก์ชันเดลตา (3.11) จะใช้ฟังก์ชัน $\delta_{\varepsilon}(t - \tau)$ ในการทำอินทิเกรตโดยแยกส่วนแทน แล้วค่อยทำลิมิต $\varepsilon \rightarrow 0$ ซึ่งมีบทบาทคล้ายกับ $u(t; \varepsilon)$ ใน (3.8) ฟังก์ชัน $\delta_{\varepsilon}(t - \tau)$ มีได้หลายรูป [4] เพื่อให้เห็นเป็นรูปธรรมจะยกตัวอย่างเพียงรูปเดียวคือ

$$\delta_{\varepsilon}(t - \tau) = \frac{1}{\varepsilon\sqrt{\pi}} e^{-(t - \tau)^2 / \varepsilon^2} \quad (3.12)$$

ข. ถ้ากำหนดเงื่อนไขที่ตัวถูกอินทิเกรต (integrand) ที่ไม่ใช่ฐานหลักฟูเรียร์ (Fourier basis) ของ I' ไม่สามารถทำให้อินทิกรัลลู่เข้าได้ เช่น มีช่วง $-\tau < t < \tau$ ที่อนุภาคประจุมี $\dot{\vec{\beta}} \neq 0$ แต่เมื่อพ้นจากช่วงนี้ นั่นคือช่วง $-\infty < t < -\tau$ และ $\tau < t < \infty$ อนุภาคประจุนี้มี $\dot{\vec{\beta}} = 0$ และ $\vec{\beta} = \text{const}$ ซึ่งมี $\hat{N} \times (\hat{N} \times \vec{\beta}) = \text{const}$ ถ้าพิจารณาอินทิกรัล I และ I' ในช่วงที่มี $\vec{\beta} = \text{const}$ ดังกล่าวอย่างผิวเผิน จะเห็นว่าช่วงดังกล่าวของอินทิกรัลรูป I มีค่าเท่ากับศูนย์ ขัดแย้งกับ ช่วงที่สมนัยกัน (correspond) ในอินทิกรัลรูป I' ที่ไม่น่าจะเท่ากับศูนย์ แต่เนื่องจากเราได้อินทิเกรตตัวแปร t ในขอบเขตกว้างมากจนถึง $t \rightarrow \pm\infty$ ซึ่งตัวประกอบ $e^{i\omega t}$ แกว่งกวัดตามเวลาตลอดช่วงดังกล่าว ทำให้โดยเฉลี่ยแล้วหักล้างกันเองหายไปอินทิกรัล I'

ช่วงดังกล่าว สำหรับตัวประกอบ $e^{-i\omega\hat{N}\cdot\vec{r}(t)/c}$ เนื่องจาก $\vec{B} = \text{const}$ ทำให้ $\vec{r}(t) = (a\hat{r})t$ ดังนั้นตัวประกอบนี้ก็ยังคงมีรูปร่างคล้ายกับ $e^{-i\omega t}$ และยังคงหักล้างกันเองหายไปอินทิกรัล I' ช่วงดังกล่าว ดังนั้นภายใต้เงื่อนไขนี้ยังคงได้ว่า $I = I'$

ประเด็นนี้คล้ายกับฟังก์ชันเดลตาดีแรก (Dirac delta function) ในรูปอินทิกรัลฟูรีเยร์

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dt e^{i(\omega - \omega_0)t} C = \delta(\omega - \omega_0) C \quad (3.13)$$

โดยที่ $C = \text{const}$ จะเห็นว่าเมื่อ $\omega \neq \omega_0$ ตัวถูกอินทิเกรตมีตัวประกอบ $e^{i(\omega - \omega_0)t}$ แกว่งกวัดขึ้นลงตลอดช่วงกว้างมาก $-\infty < t < \infty$ เมื่ออินทิเกรตแล้วจึงหักล้างกันเองโดยเฉลี่ยหายไป แต่เมื่อ $\omega = \omega_0$ ตัวถูกอินทิเกรตเป็นค่าคงที่ $e^{i(\omega - \omega_0)t} = 1$ ไม่หักล้างกันตลอดช่วง $-\infty < t < \infty$ ทำให้อินทิกรัลพุ่งออก

ลักษณะประหลาดของอินทิกรัล I และ I' เป็นผลสืบเนื่องจากการอินทิเกรตตัวแปร t ในช่วงกว้างมากจนถึงลิมิต $t \rightarrow \pm\infty$ บนฐานหลักฟูรีเยร์ที่แกว่งกวัด ซึ่งดูไม่ค่อยสมเหตุสมผล แต่เนื่องจากตัวถูกอินทิเกรตที่แสดงการกระจายพลังงานการแผ่รังสีของอนุภาคสัมพัทธภาพ มีลักษณะเป็นห้วงคล้ายการกวาดลำแสงของไฟฉายคิดหนักรถยนต์ดังที่กล่าวมา จึงทราบว่าอินทิกรัลที่เกี่ยวข้องคู่เข้า การพิจารณาอินทิเกรตในช่วง $-\infty < t < \infty$ ก็เพื่อความสะดวกในการใช้เทคนิคการแปลงฟูรีเยร์มาวิเคราะห์สเปกตรัม แต่ “มีราคาที่ต้องจ่ายไป” (ขี้คำพูดใน [4]) คือ มีลักษณะไม่กำหนดในการหาค่าและดำเนินการกับอินทิกรัลซึ่งต้องใช้เทคนิคการให้ความหมายของการดำเนินการนี้ภายใต้ลิมิต $\varepsilon \rightarrow 0$ ที่คล้ายกับการให้ความหมายของการดำเนินการกับฟังก์ชันเดลตาดีแรก

การกำหนดตัวประกอบ $e^{-\varepsilon|t|}$ และทำลิมิต $\varepsilon \rightarrow 0$ เป็นเพียงเทคนิควิธีการอินทิเกรต ถึงแม้ว่าพจน์ขอบดังกล่าว

$\int_{-\infty}^{\infty} d(uv) = u(t)v|_{-\infty}^{\infty}$ มีความหมายไม่กำหนด แต่เราควรสามารถอธิบาย “ให้เห็นภาพ” ได้ว่าทำไมมีค่าเข้าสู่ศูนย์ ไม่เช่นนั้นก็ยังคงไม่ได้อธิบายว่าทำไมอินทิกรัล I (3.3) เท่ากับอินทิกรัล I' (3.10) จะเห็นว่าเมื่อมองอินทิกรัลในพจน์ขอบนี้แบบผลบวกกริมันน์ ไม่ว่าอย่างไรพจน์อื่นๆ ของผลบวกกริมันน์ก็หักล้างกันเองเหลือแต่พจน์ขอบของผลบวกเท่านั้น ดังสมการ

$\int_{-T}^T dF(t) = -F(-T) + F(T)$ ซึ่งถ้า $-F(-T)$ และ $F(T)$ ไม่เท่ากับศูนย์ อินทิกรัลนี้ก็ไม่เท่ากับศูนย์ แต่ถ้าให้ที่ขอบ $t \rightarrow \pm\infty$ มีค่า $\lim_{t \rightarrow \pm\infty} F(t)$ “ไม่ลู่ออกและไม่กำหนด” เช่น $F(t) = e^{i\omega t} v(t)$ โดยที่ $\lim_{t \rightarrow \pm\infty} v(t) \rightarrow \text{const}$ ไม่ว่าจะให้ $|T|$ มีค่ามากเท่าใด จะเห็นว่ายังคงมีพจน์ที่ไปหักล้างพจน์ $-F(-T)$ และ $F(T)$ อยู่เสมอ ดังสมการ

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} dF &= \int_{-\infty}^{-T} dF + \int_{-T}^T dF + \int_T^{\infty} dF \\ &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left\{ \dots + [-F(-T - \Delta t) + F(-T)] \right. \\ &\quad \left. + [-F(-T) + F(T)] \right. \\ &\quad \left. + [-F(T) + F(T + \Delta t)] + \dots \right\} \end{aligned}$$

เนื่องจากมีการหักล้างกันเองเช่นนี้เกิดขึ้นตลอดช่วง $-\infty < t < \infty$ โดยไม่มีพจน์ขอบให้สิ้นสุดและค่า $|F(\pm T)|$ ก็ไม่มากขึ้นเรื่อยๆ จึงสรุปว่าอินทิกรัลที่เป็นพจน์ขอบนี้ “เป็นศูนย์”

สำหรับการแสดงจาก (3.1b) $\rightarrow$ (3.1a) นั้น มีกล่าวถึงใน [2] โดยเป็นกระบวนการอินทิเกรตโดยแยกส่วนที่ย้อนกลับกับข้างต้น และใช้เทคนิคการสร้างตัวประกอบ $e^{-\varepsilon|t|}$ และลิมิต $\varepsilon \rightarrow 0$ เช่นเดียวกัน

3.2) การแสดง (3.1b) = (3.1c)

ใน [2] กล่าวถึง การแสดงจาก (3.1b) $\rightarrow$ (3.1c) สั้นๆ ซึ่งสรุปแบบรวบรัดในที่นี้ได้ว่า สามารถเปลี่ยนตัวประกอบ $\hat{N} \times (\hat{N} \times \vec{B})$ ในอินทิกรัล (3.1b) ให้เป็น $\hat{N} \times \vec{B}$ ได้เนื่องจาก

$$|\hat{N} \times (\hat{N} \times \vec{B})| = |\hat{N} \times \vec{B}|$$

แม้ว่าเป็นเวกเตอร์ต่างทิศทางกันก็ตาม ในทำนองเดียวกัน $\vec{E}_{\text{rad}} = -[\hat{n} \times \vec{B}_{\text{rad}}]_{\text{ret}}$ กล่าวคือ เมื่อให้

$$\vec{B}(t) \equiv \hat{N} \times (\hat{N} \times \vec{B}(t))$$

และ

$$\vec{C}(t) \equiv \hat{N} \times \vec{B}(t)$$

สามารถแสดงได้ว่า

$$\vec{B}(t) \cdot \vec{B}(t) = \vec{C}(t) \cdot \vec{C}(t)$$

แต่ถ้าต้องการแสดงจาก (3.1b) $\rightarrow$ (3.1c) ตรงๆ สังเกตว่า เครื่องหมาย $| \cdot |^2$ อยู่ภายนอกอินทิกรัล นั้นแสดงว่า ตัวถูกอินทิเกรตที่ทำผลคูณดอท (dot product) กันอยู่คนละช่วงเวลา ดังนั้น เพื่อให้เคร่งครัด เราต้องตรวจสอบเอกลักษณ์ในรูปแบบ $\vec{B}(t) \cdot \vec{B}(t') = \vec{C}(t) \cdot \vec{C}(t')$ พิจารณาดังนี้

สูตร (3.1b) และ (3.1c) มีโครงสร้างต่อไปนี้อยู่ตามลำดับ

$$\begin{aligned} I_b &\equiv \left| \int_{-\infty}^{\infty} dt E(t) \vec{B}(t) \right|^2 \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} dt \int_{-\infty}^{\infty} dt' E^*(t) E(t') \vec{B}(t) \cdot \vec{B}(t') \\ I_c &\equiv \left| \int_{-\infty}^{\infty} dt E(t) \vec{C}(t) \right|^2 \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} dt \int_{-\infty}^{\infty} dt' E^*(t) E(t') \vec{C}(t) \cdot \vec{C}(t') \end{aligned}$$

จากเอกลักษณ์เวกเตอร์ได้ว่า

$$\begin{aligned} \vec{B}(t) \cdot \vec{B}(t') &= \vec{C}(t) \cdot \vec{C}(t') - [\hat{N} \cdot \vec{C}(t')][\vec{C}(t) \cdot \hat{N}] \\ &= \vec{C}(t) \cdot \vec{C}(t') \\ &\quad - [\vec{B}(t') \cdot (\hat{N} \times \hat{N})][\vec{B}(t) \cdot (\hat{N} \times \hat{N})] \\ &= \vec{C}(t) \cdot \vec{C}(t') - 0 \end{aligned} \quad (3.14)$$

เพราะฉะนั้น $I_b = I_c$ และ (3.1b) = (3.1c)

4. สรุป

เราสรุปความหมายของสูตรการกระจายในความถี่และ มุมของพลังงานการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าโดยอนุภาคประจุเร่ง และแสดงความสมมูลกันของสูตรดังกล่าว 3 รูป ซึ่งการแสดงนี้มี ประเด็นลึกซึ้ง ได้แก่ ความหมายของอินทิกรัลที่มีตัวถูกอินทิเกรต ที่มีตัวประกอบ $e^{i\omega t}$ ในช่วง $-\infty < t < \infty$ และเทคนิคที่ใช้ ดำเนินการกับอินทิกรัลดังกล่าวที่มีความหมายภายใต้ลิมิตคล้ายกับ เทคนิคที่ใช้ในการดำเนินการเกี่ยวกับฟังก์ชันเดลตาดีแรก แต่ใน ตำรามาตรฐานมักกล่าวถึงอย่างกระชับ เรานำมาขยายความในที่นี้ ซึ่งน่าจะเป็นประโยชน์แก่ผู้เริ่มศึกษาวิชาไฟฟ้าพลศาสตร์แบบ ฉบับในหัวข้อการแผ่รังสีของอนุภาคประจุเร่งในเครื่องเร่งอนุภาค

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics* (John Wiley & Sons, New York, 1975), 2nd ed.
- [2] C. A. Brau, *Modern Problems in Classical Electrodynamics* (Oxford, New York, 2004).
- [3] H. Wiedemann, *Particle Accelerator Physics* (Springer-Verlag, 2007), 3rd ed.
- [4] F. W. Byron and R. W. Fuller, *Mathematics of classical and quantum physics* (Dover, 1992).

International Young Physicists' Tournament (IYPT) or Physics World Cup

นฤมล สุวรรณจันทร์¹

เมื่อพูดถึงการแข่งขันในวิชาฟิสิกส์ระดับนานาชาติ คนส่วนใหญ่คงคุ้นกับการแข่งขันฟิสิกส์โอลิมปิกระดับนานาชาติ หรือ International Physics Olympiad (IPhO) ซึ่งนับถึงปัจจุบันก็เป็นครั้งที่ 41 แต่จะมีคนไทยสักกี่คนที่รู้จักการแข่งขัน International Young Physicists' Tournament (IYPT) หรือ Physics World Cup ซึ่งในปี พ.ศ. 2553 นี้เป็นการแข่งขันครั้งที่ 23 แล้ว IYPT มีลักษณะอย่างไร ใครเป็นผู้เข้าแข่งขัน แล้วมีประโยชน์กับการศึกษาฟิสิกส์อย่างไร ผู้เขียนอยากแบ่งปันประสบการณ์ที่ได้ไปสังเกตการณ์และร่วมเป็นกรรมการในการตัดสินการแข่งขันนี้

การแข่งขัน “The 23rd International Young Physicists' Tournament (IYPT) 2010” จัดขึ้นที่กรุงเวียนนา ประเทศออสเตรีย ระหว่างวันที่ 9-16 กรกฎาคม 2553 IYPT เป็นการแข่งขันของนักเรียนระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากประเทศต่างๆ ทั่วโลก การแข่งขันมีลักษณะเป็นทีม ประกอบด้วยตัวแทน 3-5 คน แต่ละทีมจะต้องศึกษาและไขปัญหาที่ได้กำหนดไว้จำนวน 17 ข้อ ปัญหาดังกล่าวไม่ใช่ปัญหาที่พบในบทเรียนทั่วไป ซึ่งมีวิธีการแก้ปัญหาที่ชัดเจน มีคำตอบตายตัว หรือที่เรียกว่าเป็นปัญหาปลายปิด ดังเช่นปัญหาที่ใช้ในการแข่งขันฟิสิกส์โอลิมปิก แต่ปัญหาที่ใช้ใน IYPT มีลักษณะปลายเปิด คือ คำตอบมีได้หลากหลาย ขึ้นกับมุมมองวิธีการในการแก้ปัญหา และวิธีการในการศึกษา ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับงานวิจัย นั่นคือ นักเรียนต้องใช้ความรู้ฟิสิกส์และกระบวนการวิทยาศาสตร์เพื่อไขปัญหา ตัวอย่างลักษณะปัญหาที่ใช้ใน IYPT เช่น

1. **ปัญหาที่นักเรียนต้องสร้างเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูงสุด** เช่น ปัญหาในปี 2553 ปืนใหญ่แม่เหล็กไฟฟ้า [1] โซลินอยด์สามารถนำมาใช้เพื่อยิงลูกบอลเล็กๆ โดยอาศัยพลังงานจากตัวเก็บประจุจ่ายให้แก่ขดลวดโซลินอยด์ จงสร้างอุปกรณ์โดยใช้ตัวเก็บประจุซึ่งสามารถให้

ความต่างศักย์สูงสุด 50 โวลต์ และศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้อง พร้อมทั้งหาอัตราเร็วสูงสุดของลูกบอล

2. **ปัญหาที่นักเรียนต้องศึกษาตัวแปรหรือปัจจัยที่มีผลต่อสิ่งที่เกิดขึ้น** เช่น ปัญหาในปี 2552 เรื่องการแห้ง [2] ศึกษากระบวนการแห้งตัวของกระดาษที่เปียกชื้นแผ่นหนึ่งที่วางตัวในแนวตั้งว่าขอบเขตของการแห้งตัวเคลื่อนที่อย่างไร

ปัญหาทั้งสองนั้น ไม่สามารถได้คำตอบจากการนั่งคิดคำนวณ แต่ต้องทำการทดลองจริงเพื่อศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ต้องสืบค้นข้อมูลเพื่อหาทฤษฎีที่นำมาใช้ศึกษา ต้องออกแบบการทดลองเพื่อตอบโจทย์ปัญหา นี่เป็นเพียงการเริ่มต้นเท่านั้น เพราะการแข่งขันนี้ ไม่เพียงแต่จะต้องทำการทดลอง ซึ่งเน้นการทำงานร่วมกันเป็นทีม นักเรียนยังต้องนำเสนอสิ่งที่ศึกษามาและโน้มน้าวให้ผู้ฟังยอมรับในทฤษฎีที่ตนนำเสนอ อีกทั้งยังต้องฟังและทำความเข้าใจสิ่งที่นักเรียนจากทีมอื่นเสนอเพื่อหาประเด็นในการซักค้าน ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับการได้เวทีฟิสิกส์

เนื่องจากนักเรียนต้องทำการทดลองจริงเพื่อให้ตรงตามวัตถุประสงค์ของแต่ละปัญหา โจทย์ปัญหาทั้ง 17 ข้อ จึงประกาศให้ทราบล่วงหน้าเป็นเวลาประมาณ 1 ปี เพื่อให้ให้นักเรียนมีเวลามากพอที่จะศึกษาปัญหาต่างๆ เหล่านั้นอย่างลึกซึ้ง โดยอาศัยความช่วยเหลือจากคุณครูในระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย และคำแนะนำจากอาจารย์ในระดับมหาวิทยาลัย

วัตถุประสงค์ของการแข่งขัน หรืออีกนัยหนึ่ง เหตุผลในการเข้าร่วมการแข่งขัน

การแข่งขันนี้มุ่งเน้นไปที่การทำงานร่วมกันของนักเรียนทุกคนในทีม ซึ่งต่างจากการแข่งขันโดยทั่วไป ทุกคนในทีมต้อง

¹อาจารย์ (ดร.) ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ช่วยเหลือกัน แต่ละคนในทีมมีความรู้ฟิสิกส์ที่ดี สามารถนำเอาความรู้ฟิสิกส์ที่มีอยู่มาไขปัญหาที่ไม่เจอในชั้นเรียน ต้องรู้จักประยุกต์ความรู้ในการไขปัญหา มองปัญหาในแง่มุมที่ไม่มีในตำรา รู้จักการสืบค้นข้อมูล มีทักษะในการโน้มน้าวด้วยเหตุและผล ผลการทดลองต้องน่าเชื่อถือและถูกต้องสอดคล้องกับทฤษฎี เนื่องจากการแข่งขันระดับนานาชาติ ภาษาที่ใช้คือภาษาอังกฤษ ดังนั้นนักเรียนต้องสามารถสื่อสารด้วยภาษาอังกฤษได้ดินนอกเหนือไปจากความรู้ฟิสิกส์ที่ดี

การแข่งขันนี้ นอกจากพัฒนาความรู้ด้านฟิสิกส์ของนักเรียนแล้ว ยังเป็นการพัฒนาเพื่อฝึกศักยภาพที่มีอยู่ในตัวครูอีกด้วย เนื่องจากจะต้องมีความร่วมมือระหว่างครูในโรงเรียนมัธยมศึกษาตอนปลายกับอาจารย์ในมหาวิทยาลัยในการไขปัญหาดังกล่าว ครูจะเป็นผู้ดูแลนักเรียนให้คิดค้นหาวิธีการในการแก้ปัญหา โดยมีอาจารย์จากมหาวิทยาลัยเป็นพี่เลี้ยงคอยให้คำแนะนำและคำปรึกษา

เนื่องจากการแข่งขันมีลักษณะเป็นทีม จึงต้องอาศัยความสามัคคีในทีม มีการแบ่งงานกันทำ และทุกคนช่วยเหลือกันและกัน ทั้งก่อนและระหว่างการแข่งขัน ซึ่งถือเป็นการฝึกทักษะการทำงานร่วมกันให้รู้จักเสียสละและรู้จักบทบาทหน้าที่ของตนในฐานะผู้นำหรือผู้ตาม การยอมรับความคิดเห็น และการรู้จักโต้แย้งอย่างมีเหตุผล ซึ่งหาไม่ได้ในการแข่งขันฟิสิกส์อื่นๆ

ลักษณะโจทย์ปัญหา

โจทย์ปัญหาทั้ง 17 ข้อ มีลักษณะเป็นคำถามปลายเปิดเกี่ยวกับปรากฏการณ์ที่สามารถพบเห็นได้ในชีวิตประจำวัน ซึ่งนักเรียนจะต้องศึกษาถึงตัวแปรหรือปัจจัยที่เกี่ยวข้อง หาเงื่อนไขที่ทำให้ผลลัพธ์มีค่าสูงสุด หรือต่ำสุด โดยนักเรียนจะต้องค้นคว้าข้อมูลที่เกี่ยวข้อง ทั้งในแง่ของทฤษฎีและการทดลอง ออกแบบและสร้างอุปกรณ์การทดลอง หาปัจจัยที่มีผล กำหนดตัวแปรต้นเพื่อศึกษาตัวแปรตาม วิเคราะห์ผลการทดลอง และสรุปผลให้ตรงกับประเด็นที่ถามในโจทย์ปัญหา

เนื่องจากโจทย์ปัญหาเป็นคำถามปลายเปิด จึงอาจมีแนวคำตอบได้มากกว่า 1 คำตอบ ปรากฏการณ์หนึ่งๆ อาจอธิบายโดยใช้หลายทฤษฎี ทำให้ได้หลากหลายมุมมอง แต่หากทฤษฎีที่นักเรียนใช้อธิบายนั้นผิด เราสามารถบอกได้ทันที แต่เราคงไม่

สามารถฟันธงว่าถูกต้อง 100% หรือไม่ จนกว่าจะได้ทำการทดลองซ้ำอย่างละเอียดและควบคุมตัวแปรอย่างดี

ลักษณะการแข่งขัน

การแข่งขันแบ่งออกเป็น 2 รอบใหญ่ๆ ได้แก่ รอบคัดเลือกซึ่งต้องแข่งขัน 5 สนาม และรอบชิงชนะเลิศ

การแข่งขันแต่ละรอบประกอบด้วยตัวแทนจาก 3 ประเทศ (ทีม) ผลัดกันทำหน้าที่เป็นฝ่ายนำเสนอ (reporter) ฝ่ายซักค้าน (opponent) และฝ่ายวิพากษ์ (reviewer) โดยมีคณะกรรมการซึ่งเรียกว่าคณะลูกขุน (juror) 7-8 คน จากประเทศต่างๆ ที่ไม่ได้แข่งขันในรอบนั้นๆ ให้คะแนนแต่ละทีม ในส่วนของการนำเสนอ การซักค้าน และการวิพากษ์ ของนักเรียนในแต่ละรอบ

ในปี 2553 ซึ่งเป็นการแข่งขันครั้งที่ 23 มีประเทศเข้าแข่งขันทั้งสิ้น 23 ประเทศ ได้แก่ ออสเตรเลีย นิวซีแลนด์ จีน ไต้หวัน สิงคโปร์ เกาหลี อิหร่าน เคนยา ไนจีเรีย อังกฤษ ออสเตรีย จอร์เจีย โปแลนด์ โครเอเชีย สวีเดน สวิสเซอร์แลนด์ ฝรั่งเศส เยอรมันนี เบลารุส บัลแกเรีย รัสเซีย สโลวาเกีย สาธารณรัฐเชค

กฎกติกาการแข่งขัน [3]

ในแต่ละสนามของการแข่งขัน จะมีทีมเข้าร่วมการแข่งขัน 3 ทีม ขึ้นกับจำนวนประเทศที่เข้าแข่งขันทั้งหมด คือ ฝ่ายนำเสนอ ฝ่ายซักค้าน และฝ่ายวิพากษ์ ในกรณีที่มี 4 ทีม [4] จะมีฝ่ายสังเกตการณ์ (observer) เพิ่มขึ้นมา การแข่งขันแต่ละสนามจะมี 3 ยก ในแต่ละยก แต่ละทีมจะผลัดกันเป็นฝ่ายนำเสนอ ฝ่ายซักค้าน และฝ่ายวิพากษ์ ดังแสดงในตาราง

	ยกที่ 1	ยกที่ 2	ยกที่ 3
ทีมที่ 1	ฝ่ายนำเสนอ	ฝ่ายซักค้าน	ฝ่ายวิพากษ์
ทีมที่ 2	ฝ่ายวิพากษ์	ฝ่ายนำเสนอ	ฝ่ายซักค้าน
ทีมที่ 3	ฝ่ายซักค้าน	ฝ่ายวิพากษ์	ฝ่ายนำเสนอ

ในแต่ละชก แต่ละทีมส่งตัวแทน 1 คน ตัวแทนเท่านั้นจึงมีสิทธิพูด โดยคนอื่นๆ อาจช่วยถาม หรือช่วยตอบคำถามโดยการส่งกระดาษให้นักเรียนที่เป็นตัวแทนในชกนั้นๆ เท่านั้น

หน้าที่ของแต่ละฝ่ายมีดังนี้

ฝ่ายนำเสนอ นักเรียนนำเสนอสิ่งที่ได้ศึกษามา ทฤษฎีที่ใช้ การทดลอง ความสอดคล้องระหว่างแบบจำลองและผลการทดลอง โดยต้องพยายามโน้มน้าวให้ผู้ฟังยอมรับในทฤษฎีและข้อสรุปที่นำเสนอ

ฝ่ายซักค้าน นักเรียนกล่าวถึงข้อดีและข้อเสียของผู้นำเสนอ ถามคำถามผู้นำเสนอ และวิจารณ์สิ่งที่ถูกนำเสนอ ชี้ประเด็นที่ไม่ถูกต้อง หรือข้อผิดพลาดในการตีความโจทย์ปัญหา หรือข้อสรุป ถามคำถามที่นำไปสู่การอภิปราย ไม่ใช่คำถามประเด็นที่ตอบใช่หรือไม่ใช่ และไม่ควรนำเสนอสิ่งที่ตนได้ศึกษามา

ฝ่ายวิพากษ์ นักเรียนแสดงความคิดเห็นทั้งในแง่บวกและแง่ลบ เกี่ยวกับบทบาทของผู้นำเสนอและผู้ซักค้าน รวมถึงเนื้อหาการอภิปราย

การแข่งขันเริ่มจาก

- **ท้าววล 1 นาที** หัวหน้าทีมฝ่ายซักค้านท้าว (ควล) หัวหน้าทีมฝ่ายนำเสนอโดยการเลือกปัญหา 1 ปัญหา จาก 17 ปัญหา
- **รับหรือปฏิเสธคำท้า 1 นาที** หัวหน้าทีมฝ่ายนำเสนอใช้เวลา 1 นาที เพื่อตอบรับคำท้าหรือปฏิเสธคำท้า แต่ตลอดการแข่งขันรอบคัดเลือก 5 สนาม แต่ละทีมสามารถปฏิเสธคำท้าได้ 3 ครั้ง โดยไม่ถูกหักคะแนน
- **ฝ่ายนำเสนอเตรียมตัว 5 นาที** เมื่อฝ่ายเสนอรับคำท้าผู้นำเสนอซึ่งเป็นใครก็ได้ในทีม จะเตรียมตัวเพื่อการนำเสนอ รวมถึงการต่อคอมพิวเตอร์เข้ากับเครื่องฉายภาพ หากเกิดปัญหาขึ้นก็ต้องแก้ไขปัญหาละเฉพาะเอง โดยไม่มีการต่อเวลาให้
- **นำเสนอ 12 นาที**

- **คำถามจากฝ่ายซักค้าน 2 นาที** ผู้ซักค้านซึ่งเป็นใครก็ได้ในทีม จะถามคำถามผู้นำเสนอในประเด็นต่างๆ
- **ฝ่ายซักค้านเตรียมตัว 3 นาที** เพื่อเตรียม Power Point ชี้ข้อดีและข้อเสีย รวมทั้งเสนอประเด็นที่ต้องการถกอภิปราย
- **อภิปราย 15 นาที** ผู้ซักค้านเสนอข้อดี ข้อเสีย และอภิปรายกับผู้นำเสนอ
- **คำถามจากฝ่ายวิพากษ์ 3 นาที** ซักถามทั้งผู้นำเสนอและผู้ซักค้าน
- **ฝ่ายวิพากษ์เตรียมตัว 2 นาที** เพื่อเตรียม Power Point
- **วิพากษ์ 4 นาที** ชี้ข้อดีและข้อเสียของทั้งฝ่ายนำเสนอและฝ่ายซักค้าน และสรุปประเด็นที่ได้จากอีกสองฝ่าย
- **สรุปโดยฝ่ายนำเสนอ 2 นาที** ผู้นำเสนอมีโอกาสครั้งสุดท้ายเพื่อชี้แจงประเด็นที่ถกค้างไว้ หรือตอบคำถามที่ยังไม่ตอบ
- **คำถามจากคณะกรรมการ 5 นาที** สามารถซักถามตัวแทนทั้ง 3 ฝ่าย โดยถามเพื่อให้ได้คำตอบที่สั้น ใช่หรือไม่ โดยไม่ต้องการคำอธิบายยืดเยื้อ

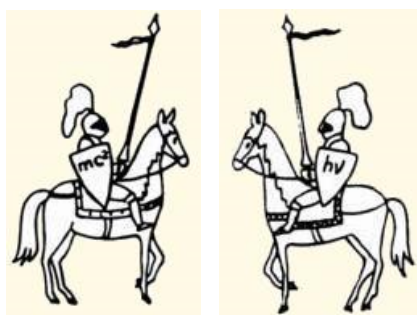
ใน 1 ชก ใช้เวลา 55 นาที แต่ละสนามมี 3 ชก ใช้เวลารวมโดยประมาณ 3 ชั่วโมง ตลอดเวลา 3 ชั่วโมงนี้ นักเรียนทั้ง 3 ทีม รวมถึงคณะกรรมการต้องตั้งใจฟังการนำเสนอจากนักเรียนทั้งสามทีม ถือว่าเป็นการแข่งขันที่เข้มข้นในเชิงวิชาการมาก

จำนวนทีมที่ได้เหรียญคือ ครึ่งหนึ่งของจำนวนทีมที่เข้าแข่งขันทั้งหมด โดยพิเศษขึ้น ทีมที่มีคะแนนสูงสุด 3 หรือ 4 ทีมจากการแข่งขัน 5 สนาม จะได้เหรียญทองและเข้าสู่รอบชิงเพื่อหาผู้ชนะซึ่งจะได้ถ้วย (winner's cup) ทีมที่ได้คะแนนสูงสุดรองลงมา 5 ทีม จะได้เหรียญเงิน จำนวนทีมที่เหลือจะได้เหรียญทองแดง ตัวอย่างเช่น ปี 2553 มีทีมเข้าร่วมการแข่งขัน 23 ทีม ดังนั้น จะมีทีมที่ได้เหรียญ $23/2 = 11.5$ แต่พิเศษขึ้นเป็น 12 นั่นคือ 12 ทีม โดยมีเหรียญทอง 4 ทีม เหรียญเงิน 5 ทีม และเหรียญทองแดง 3 ทีม อีก 11 ทีม ไม่ได้เหรียญ

จะว่าไปการแข่งขันนี้ก็คล้ายกับการได้วาทิด้วยหัวข้อทางฟิสิกส์ซึ่งจะต้องหักล้างกันด้วยเหตุและผล โน้มน้าวให้ผู้ฟังคล้อยตามในสิ่งที่นำเสนอให้ได้ ไม่ว่าจะอยู่ในบทบาทใด ที่สำคัญคือ ต้องยอมรับการถูกวิพากษ์วิจารณ์โดยไม่ใช้อารมณ์ นอกจากความรู้ด้านทฤษฎีแล้ว นักเรียนยังต้องมีทักษะภาษาอังกฤษที่ดีควบคู่ไปด้วย ต้องนำเสนอด้วยบุคลิกที่น่าเชื่อถือ ด้วยความรู้และความเข้าใจฟิสิกส์ที่ลึกซึ้ง ต้องหาประเด็นโต้แย้งได้อย่างถูกต้องตามแนวคิดหลักอย่างมีเหตุผล

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์ของการแข่งขันเป็นรูปอัศวินขี่ม้าถือธง หันหน้าเข้าหากัน ในลักษณะของการทำศึก จึงเป็นที่มาของชื่อการแข่งขันภาษาไทยว่า “ฟิสิกส์สัประยุทธ์” เสนอโดย ดร. บุรินทร์ อัสวพิภพ



รูปที่ 1 สัญลักษณ์ของการแข่งขัน IYPT

IYPT ในประเทศไทย

สำหรับประเทศไทย ในปี 2551 ทางโรงเรียนมหิดลวิทยานุสรณ์ได้ส่งผู้แทนไปสังเกตการณ์จำนวน 3 ท่าน ที่ประเทศโครเอเชีย เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการเข้าร่วมการแข่งขัน



รูปที่ 2 ตัวแทนนักเรียนไทย 5 คน จากโรงเรียนมหิดลวิทยานุสรณ์ เข้าร่วมการแข่งขัน IYPT 2009, Tianjin, ประเทศจีน



รูปที่ 3 ทีมไทยขึ้นรับประกาศนียบัตรเข้าร่วมการแข่งขัน IYPT 2009, Tianjin, ประเทศจีน

ในปี 2552 โรงเรียนมหิดลวิทยานุสรณ์ได้นำร่องโดยการส่งทีมนักเรียน 5 คน พร้อมผู้นำทีม 2 ท่าน เข้าแข่งขันเป็นครั้งแรก และมีผู้แทนจากสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) จำนวน 4 ท่าน เข้าร่วมสังเกตการณ์ที่ประเทศจีน ทีมไทยได้อันดับที่ 26 จากจำนวนประเทศที่เข้าแข่งทั้งสิ้น 27 ประเทศ ครั้งนี้ ผู้เขียนได้เข้าร่วมในฐานะผู้นำทีมคนหนึ่งและมีโอกาสทำหน้าที่เป็นกรรมการ รู้ลึกทั้งในความสามารถของเด็กมัธยมปลายจากประเทศต่างๆ ความคิดสร้างสรรค์ในการออกแบบการทดลอง การค้นคว้าข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ซึ่งทฤษฎีบางทฤษฎีก็ไม่เคยได้อินมาก่อน การช่วยเหลือซึ่งกันและกันของนักเรียนในทีม การนำเสนอด้วยบุคลิกที่น่าเชื่อถือ การทำหน้าที่ของผู้นำทีมของนักเรียนในบางประเทศ (ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับกัปตันทีมฟุตบอล) แม้ว่าบางครั้งอาจไม่ถูกต้องนักในแง่ของฟิสิกส์ แต่ก็เรียกได้ว่า “มาดกินขาด”



รูปที่ 4 พิธีเปิด IYPT 2010, Vienna, ประเทศออสเตรีย

และในปี 2553 นี้ สสวท. ได้ส่งผู้แทนจากมหาวิทยาลัยในภูมิภาคต่างๆ เข้าร่วม สังเกตการณ์อีกครั้งรวมทั้งสิ้น 5 คน เพื่อสร้างเครือข่ายในการร่วมฝึกอบรมนักเรียน และผู้เขียนซึ่งไปร่วมในฐานะกรรมการอิสระ หากประเทศไทยต้องการส่งนักเรียนเข้าร่วมการแข่งขันอย่างเป็นทางการ



รูปที่ 5 ผู้แทนจากมหาวิทยาลัยและ สสวท. 5 ท่าน



รูปที่ 6 ผู้เขียนในฐานะกรรมการอิสระ

คำถามคือ เราพร้อมหรือยังที่จะพัฒนาศักยภาพของนักเรียนให้พร้อมที่จะเป็นนักวิจัยที่ดีต่อไปในอนาคต และที่สำคัญคือการสร้างความร่วมมือระหว่างครูในโรงเรียนมัธยมศึกษาตอนปลายกับอาจารย์ในระดับมหาวิทยาลัยกันอย่างจริงจัง เพื่อพัฒนาวิทยาศาสตร์ไทยให้ก้าวไกล ให้ครูคิด ค้นคว้านอกตำรา โดยเฉพาะความสามารถในการทำวิจัยเชิงวิทยาศาสตร์ได้อย่างมีเหตุผล ซึ่งหากโครงการนี้สำเร็จ จะเป็นการพัฒนาศักยภาพของทั้งนักเรียนและครูในการวิจัยเพื่อให้เห็นประโยชน์ของการเรียนฟิสิกส์ ซึ่งรวมไปถึงการนำไปสู่การแก้ปัญหาต่างๆ ในชีวิตประจำวัน

ฟิสิกส์โอลิมปิกเน้นการแก้ปัญหาฟิสิกส์และทักษะการทดลองรายบุคคล แม้ว่าแต่ละประเทศส่งผู้เข้าแข่งขันเป็นทีม แต่การได้เหรียญนั้นขึ้นกับความสามารถของแต่ละคน แต่สำหรับ IYPT เน้นการทำงานร่วมกันเป็นทีมอย่างแท้จริง ตัวแทนหนึ่งคนนำเสนอ คนอื่นที่เหลือในทีม ต้องช่วยจด ช่วยเตรียม หรือช่วยคิดหาคำตอบเมื่อผู้นำเสนอถูกถาม ทุกคนในทีมจะต้องช่วยกันแก้ปัญหาเฉพาะหน้าทั้งปัญหาด้านฟิสิกส์และปัญหาด้านเทคนิคอื่นๆ ที่อาจเกิดขึ้นได้

ปัจจุบันการแข่งขันเชิงวิชาการที่ทุกคนในทีมช่วยเหลือซึ่งกันและกันในลักษณะเช่นนี้ นับวันจะน้อยลงเรื่อยๆ หากเราต้องการสร้างความเข้มแข็งและความก้าวหน้าให้กับวงการวิทยาศาสตร์บ้านเรา และกระตุ้นให้นักเรียนสนใจวิทยาศาสตร์มากขึ้น การแข่งขันในลักษณะนี้น่าจะเป็นอีกหนทางหนึ่งที่กระตุ้นให้นักเรียนเกิดการเรียนรู้องค์ความรู้ใหม่ๆ นอกตำรา รู้จักการสืบค้นข้อมูล ตัดสินใจได้ว่าข้อมูลที่ได้มามีความน่าเชื่อถือเพียงใด นอกจากนั้น ยังสามารถนำความรู้ที่เรียนมาไปใช้ในการไขปัญหาต่างๆ ที่ไม่เคยคิดมาก่อน ฝึกการทำงานร่วมกันเป็นทีมเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด ฝึกการยอมรับความคิดเห็นที่แตกต่างด้วยเหตุผล และผล ทั้งหมดนี้เป็นสิ่งที่เราต้องการมิใช่หรือ

หมายเหตุ

[1] Electromagnetic cannon; A solenoid can be used to fire a small ball. A capacitor is used to energize the solenoid coil. Build a device with a capacitor charged to a maximum 50V. Investigate the relevant parameters and maximize the speed of the ball.

[2] Drying; Investigate the drying process of a vertical wet paper sheet. How does the boundary of drying move?

[3] ในที่นี้จะขอล่าอย่างคร่าวๆ รายละเอียดสามารถอ่านได้ที่ www.iypt.org

[4] ทีมที่เข้ารอบชิงชนะเลิศ คือ ทีมที่ได้คะแนนสูงสุด 3 หรือ 4 อันดับแรก

รูปประกอบจากบทความ “การประชุมผู้ได้รับรางวัล
โนเบลครั้งที่ 60 ณ เมืองลินเคา ประจำปี 2553” หน้า 17 – 21



รูปประกอบจากบทความ “*International Young
Physicists’ Tournament (IYPT) or Physics World Cup*” หน้า 28
– 32



รูปที่ 2



รูปที่ 3

การประชุมผู้ได้รับรางวัลโนเบลครั้งที่ 60 ณ เมืองลินเดา
(ดูรายละเอียดภายในเล่ม)



สมาคมฟิสิกส์ไทย

อาคารสุรพัฒน์ 3 ถนนมหาวิทยาลัย

ต. สุรนารี อ. เมือง

จ. นครราชสีมา 30000

ตู้ ปณ. 93 ปณจ. นครราชสีมา 30000

THAI PHYSICS SOCIETY

Surapat 3 Building, University Avenue

Tambon Suranaree, Muang District

Nakhon Ratchasima 30000

P.O. Box 93 Nakhon Ratchasima 30000

ชำระค่าฝากส่งเป็นรายเดือน

ใบอนุญาตเลขที่ 187/2552

ปท.จ. นครราชสีมา

สิ่งตีพิมพ์

หากไม่ถึงผู้รับ โปรดส่งคืนสมาคมฟิสิกส์ไทย