วารสารฟิสิกส์ไทย

Thai Journal of Physics

วารสารสำหรับผู้ที่รักและสนใจในแวดวงฟิสิกส์ ISSN 0857-1449

ปีที่ 28 ฉบับที่ 3 : กันยายน 2554 – พฤศจิกายน 2554



รางวัลโนเบลประจำปี 2011:
ชะตากรรมของเอกภพภายใต้พลังงานมืด

เปิดตัวนายกสมาคมฟิสิกส์ไทยคนปัจจุบัน

การเอาชนะข้อจำกัดของการเลี้ยวเบนในกล้องจุลทรรศน์แบบ Near-Field

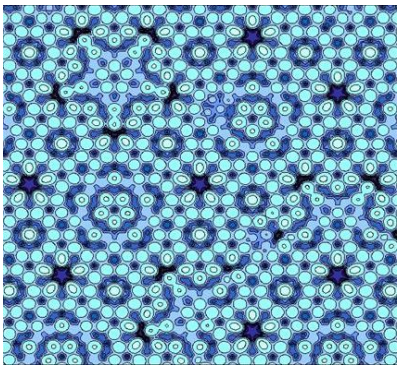
ไฟ(ฟ้า)ใต้น้ำ

ความลึกลับของอุณหพลศาสตร์ ตอนที่ 2

รูปประกอบจากสรุปข่าว หน้า 2

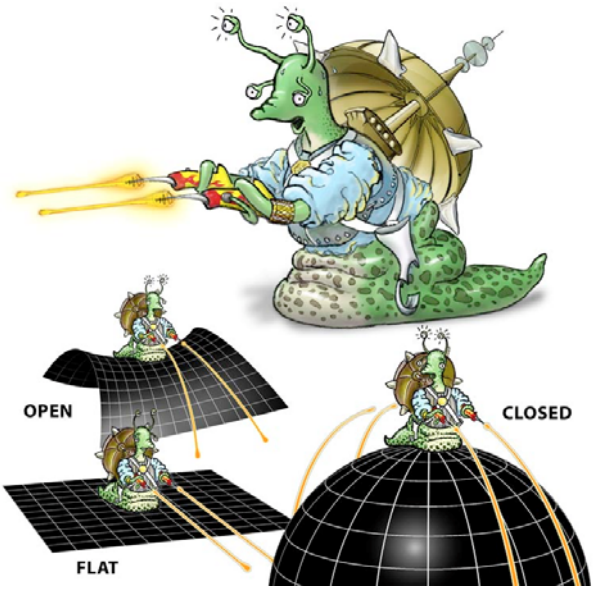


ซอล เพิร์ลมุตเตอร์ (Saul Perlmutter) ไบรอัน ชมิดท์ (Brian Schmidt) และ อดัม รีสส์ (Adam Riess) ผู้ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ ประจำปี 2011

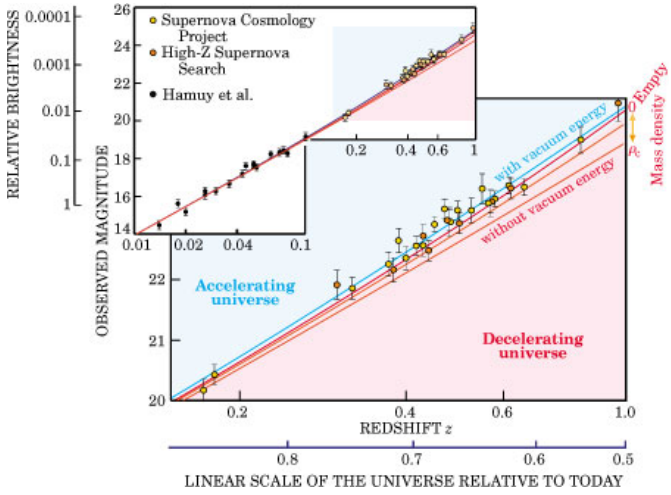


แบบจำลองพื้นผิวอะตอมควอซีคริสตัล

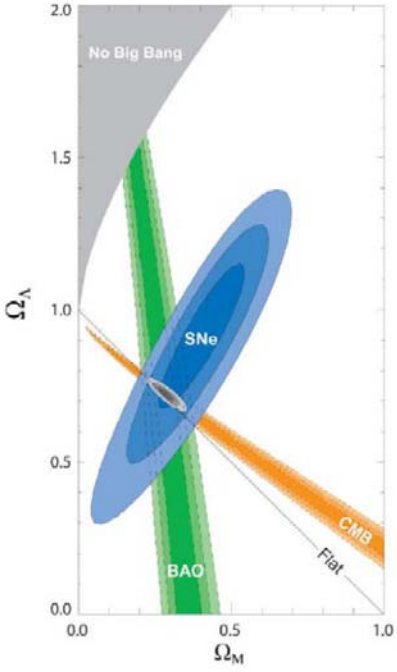
รูปประกอบจากบทความ “รางวัลโนเบลประจำปี 2011: ชะตากรรมของเอกภพภายใต้พลังงานมืด” หน้า 5 – 10



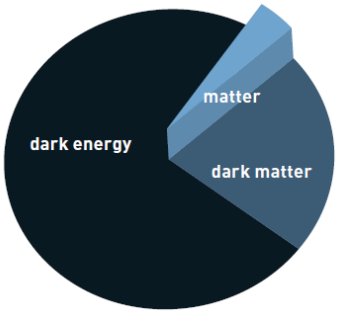
รูปที่ 1



รูปที่ 2



รูปที่ 3



รูปที่ 4

สารบัญ

สวัสดี 1

สรุปข่าว 2

เปิดตัวนายกสมาคมฟิสิกส์ไทยคนปัจจุบัน 3
รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา อมรกิจบำรุง
สันติ แม้นศิริ

รางวัลโนเบลประจำปี 2011: 5
ชะตากรรมของเอกภพภายใต้พลังงานมืด
วิรินทร์ สนธิเศรษฐี, อัจฉรา เสรีเพียรเลิศ และ เควิด รูฟโฟโล

การเอาชนะข้อจำกัดของการเลี้ยวเบน 11
ในกล้องจุลทรรศน์แบบ Near-Field
วรศม กุนทีกาญจน์

ไฟ(ฟ้า)ใต้น้ำ 18
สุรเชษฐ์ หลิมกำเนิด

สุรเชษฐ์ หลิมกำเนิดความลึกลับของอุณหพลศาสตร์ ตอนที่ 2: 23
กฎข้อที่ 0 ของอุณหพลศาสตร์
ชาญกิจ คันฉ่อง

สวัสดี

กลับมาพบกันอีกครั้งหนึ่งกับวารสารฟิสิกส์ไทย ก่อนอื่นผมขอกล่าวสวัสดีกับผู้อ่านทุกท่าน ข่าวแรกที่อยากแจ้งให้ท่านผู้อ่านทราบคือทางวารสารอยู่ระหว่างการจัดตั้งกองบรรณาธิการใหม่ โดยมี ดร. ประพงษ์ คล้ายสุบรรณ์ ได้ให้เกียรติเป็นที่ปรึกษา ทั้งนี้กองบรรณาธิการจะพยายามอย่างยิ่งในการสรรหาสาระข่าวสารดีๆมาเผยแพร่สืบทอดวัตถุประสงค์เดิมต่อไป หากมีข้อผิดพลาดประการใดต้องขออภัยมา ณ ที่นี้และยินดีเป็นอย่างยิ่งที่จะได้รับฟังข้อเสนอแนะเพื่อการแก้ไขปรับปรุง

สำหรับในฉบับนี้ขอประเดิมด้วยบทความแนะนำนายกสมาคมฟิสิกส์ไทยคนปัจจุบัน รศ. ดร. วิทยา อมรกิจบำรุง และต่อด้วยบทความที่มีเนื้อหาเกี่ยวข้องกับผลงานของนักวิทยาศาสตร์สามท่านที่ได้รับรางวัลโนเบลประจำปี 2011 ซึ่งเป็นการค้นพบการขยายตัวด้วยความเร่งของจักรวาลภายใต้พลังมืด จากนั้นจะเป็นบทความเกี่ยวกับกล้องจุลทรรศน์แบบ Near-Field ซึ่งเป็นงานเขียนของนักศึกษาไทยที่ได้รับการตีพิมพ์ลงในวารสาร Science เมื่อไม่นานนี้

ในหลายเดือนที่ผ่านมาเกิดสถานการณ์น้ำท่วม มีข่าวเกี่ยวกับผู้ถูกไฟฟ้าช็อตเสียชีวิตหลายราย กลายเป็นที่มาของบทความน่าสนใจเรื่อง ไฟ(ฟ้า)ใต้น้ำ และท้ายสุดเป็นเรื่องความลึกลับของอุณหพลศาสตร์ ตอนที่ 2 ต่อจากฉบับที่แล้วครับ

กองบรรณาธิการ

กองบรรณาธิการ ชาญกิจ คันฉ่อง, พวงรัตน์ ไพเราะ, พรรัตน์ วัฒนกสิวิชช์ (และสมาชิกใหม่ที่รอแต่งตั้ง) **หัวหน้ากองบรรณาธิการ** วรวัฒน์ มีวาสนา **ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ** ประพงษ์ คล้ายสุบรรณ์ **ภาพและออกแบบปก** วรวัฒน์ มีวาสนา **เลขานุการกองบรรณาธิการ** วรวัฒน์ มีวาสนา **จำนวนพิมพ์** 2,000 เล่ม

ติดต่อกองบรรณาธิการ วารสารฟิสิกส์ไทย สมาคมฟิสิกส์ไทย อาคารสุรพัฒน์ 3 ถนนมหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 โทรศัพท์: 044-217040 โทรสาร: 044-217047 อีเมลล์: worawat@g.sut.ac.th **วารสารฟิสิกส์ไทย** เป็นวารสารราย 3 เดือน มีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่สาระ ข่าวสาร และเป็นสื่อสัมพันธ์ในมวลหมู่สมาชิกและผู้ที่สนใจในแวดวงฟิสิกส์ ส่งเสริมให้เกิดการแลกเปลี่ยนข้อมูลและประสบการณ์เกี่ยวกับฟิสิกส์ในวงกว้างที่สร้างสรร โดยความคิดเห็นและทัศนะที่ปรากฏอยู่ในบทความต่างๆ เป็นเฉพาะของผู้เขียนแต่ละท่าน สมาคมฟิสิกส์ไทยไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

Website: www.thps.org **ผู้ดูแล:** ณัฐวุฒิ สุรเดช

คณะกรรมการสมาคมฟิสิกส์ไทย ประจำวาระปี 2554 – 2556 **นายกสมาคมฯ** รศ. ดร. วิทยา อมรกิจบำรุง **อุปนายก** รศ. ดร. วีระพงษ์ แพสุวรรณ **เลขาธิการ** ผศ. ดร. เอกพรรณ สวัสดิ์ชีตัง **เหรัญญิก** ศ. ดร. ชูกิจ ลิมปิจำนงค์ **นายทะเบียน** รศ. ดร. สันติ แม้นศิริ **ปฏิคม** ผศ. ดร. รัตติกร ยิ้มนิรัญ **บรรณาธิการวารสารฟิสิกส์ไทย** ดร. วรวัฒน์ มีวาสนา **ประชาสัมพันธ์** ดร. อเนก เจริญภักดี **รองเลขาธิการ** ผศ. ดร. ทศวรรษ สีตะวัน **กรรมการ** รศ. ดร. ประยูร ส่งสิริฤทธิกุล, ดร. สาโรช รุจิรวรรธน์, ดร. ประพงษ์ คล้ายสุบรรณ์, ผศ. ดร. ศุภกร รักใหม่, ผศ. ดร. ขจรยศ อยู่ดี, ผศ. รัจนา ชินพิทักษ์, รศ. ดร. ธีรวรรณ บุญญวรรณ, ผศ. ดร. ธนากร โอสถจันทร์, ผศ. ดร. นิรันดร์ วิทิตอนันต์, ดร. สิรพัฒน์ ประโทนเทพ, ดร. ณัฐพร ฉัตรแถม

สรุปข่าว

รางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ ประจำปี 2011



Saul Perlmutter Brian Schmidt Adam Riess

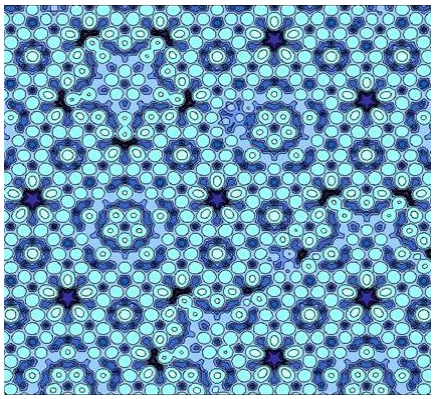
ในเดือนตุลาคมที่ผ่านมาได้มีการประกาศรางวัลโนเบลในด้านสาขาฟิสิกส์ให้แก่ ซอล เพิร์ลมุตเตอร์ (Saul Perlmutter) ไบรอัน ชมิดท์ (Brian Schmidt) และ อดัม รีสส์ (Adam Riess) โดยทั้งสามท่านเกิดในประเทศสหรัฐอเมริกาทั้งหมดและปัจจุบัน เพิร์ลมุตเตอร์ ทำงานที่ Lawrence Berkeley National Laboratory และ รีสส์ ทำงานที่ Johns Hopkins University ประเทศสหรัฐอเมริกา ส่วนชมิดท์ ทำงานอยู่ที่ Australian National University ประเทศออสเตรเลีย นักวิทยาศาสตร์ทั้งสามท่านได้รับรางวัลในฐานะเป็นผู้ค้นพบการขยายตัวด้วยความเร่งของจักรวาลด้วยการสังเกตจากซูเปอร์โนวาที่อยู่ไกลมากๆ เนื้อหาเกี่ยวกับผลงานนี้สามารถอ่านต่อได้จากบทความในหน้า 5

ที่มา

[1] http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2011/

ผลงานจากวารสารฟิสิกส์ Physical Review Letters คว้ารางวัลโนเบลสาขาเคมี ประจำปี 2011

เป็นอีกครั้งที่เราได้ยินคำว่าฟิสิกส์ที่มาเกี่ยวข้องกับรางวัลโนเบลสาขาเคมี ตัวอย่างที่เคยมีมา เช่น รางวัลโนเบลสาขาเคมีประจำปี 1998 ที่ได้มอบให้แก่นักฟิสิกส์ วอลเตอร์ โคห์น (Walter Kohn) ผู้ให้กำเนิดทฤษฎีเดนซิตีฟังก์ชันนอล เป็นต้น ในคราวนี้ผลงานที่ตีพิมพ์ในวารสารฟิสิกส์ Physical Review Letters 53, 1951 (1984) ทำให้ แดน เชชท์มัน (Dan Shechtman) จาก Technion – Israel Institute of Technology ประเทศอิสราเอล เป็นผู้คว้ารางวัลโนเบลสาขาเคมีของปี 2011 ผลงานของท่านเป็นการค้นพบควอซีคริสตัล (Quasicrystal) หรือผลึกที่มีสมมาตรแกนหมุนห้าเท่าได้ ซึ่งดูขัดกับสมมาตรแบบคลาสสิกที่มีแกนหมุนได้เฉพาะ 2, 3, 4 และ 6 ด้านเท่าเท่านั้น อาจจะลองนึกถึงว่ากระเบื้องสี่เหลี่ยมจัตุรัสสามารถปูพื้นให้เติมพื้นที่นั้นเป็นเรื่องง่าย แต่ถ้าจะเปลี่ยนมาใช้เป็นกระเบื้องห้าเหลี่ยมด้านเท่าแทนคงต้องลำบากคิดกันหน่อยว่าจะปูพื้นอย่างไรจึงเต็มพื้นที่ได้ ด้านล่างเป็นตัวอย่างแบบจำลองพื้นผิวอะตอมของควอซีคริสตัลซึ่งเป็นโลหะผสมอะลูมิเนียม-พัลลาเดียม-แมงกานีส



ที่มา

[1] http://nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2011/

[2] http://en.wikipedia.org/wiki/Quasicrystal

LHC ค้นพบอนุภาคใหม่

ก่อนจะได้ฉลองวันคริสต์มาสก็มีเรื่องน่าตื่นเต้น ที่นักวิจัยจาก University of Birmingham และ Lancaster University ได้ค้นพบอนุภาคใหม่ชื่อ chi b(3P) ที่แสดงถึงการรวมกันแบบใหม่ของบิวตีควาร์กและปฏิควาร์ก การค้นพบดังกล่าวยังถือเป็นการค้นพบอนุภาคใหม่ครั้งแรกที่ได้จากเครื่องตรวจจับขนาดใหญ่ ATLAS ที่ Large Hadron Collider (LHC) เราคงต้องหวังกันว่าครั้งถัดไปเราจะได้เจออนุภาค Higgs

ที่มา

[1] http://www.sciencedaily.com/releases/2011/12/111222102947.htm

เปิดตัวนายกสมาคมฟิสิกส์ไทยคนปัจจุบัน รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา อมรกิจบำรุง

สันติ แม้นศิริ[1]



รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา อมรกิจบำรุง
นายกสมาคมฟิสิกส์ไทย

สวัสดีครับ เริ่มต้นศักราชใหม่ 2555 ผมได้รับเกียรติจากบรรณาธิการให้เขียนแนะนำนายกสมาคมฟิสิกส์ไทยคนปัจจุบัน **รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา อมรกิจบำรุง** ในตอนแรกผมเองก็ไม่กล้าที่จะเขียนเพราะยังไม่มีประสบการณ์ในการเขียนบทความในรูปแบบนี้มาก่อนเลย อย่างไรก็ตาม ในฐานะที่เป็นสมาชิกสมาคมฟิสิกส์ไทย เป็นลูกศิษย์ที่เคยเรียนฟิสิกส์รวมถึงเป็นเพื่อนร่วมงานของรองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา อมรกิจบำรุง การได้รับเกียรติให้เขียนถึงท่านซึ่งเป็นทั้งอาจารย์และนายกสมาคมฟิสิกส์ไทยคนปัจจุบันจึงนับได้ว่าเป็นเกียรติสูงสุดของผู้เขียน

รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา อมรกิจบำรุง เป็นชาวจังหวัดหนองคายโดยกำเนิด เข้าเรียนระดับประถมศึกษาและระดับมัธยมที่จังหวัดหนองคาย จากนั้นสอบเข้าเรียนต่อระดับอุดมศึกษาโดยได้เข้าเรียนและสำเร็จการศึกษาปริญญาตรี โท และเอก สาขาฟิสิกส์ จากภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในระหว่างการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาได้มีโอกาสทำงานวิจัยด้านฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำกับนักฟิสิกส์ระดับประเทศหลายท่านรวมถึง Prof. I-Ming Tang ศาสตราจารย์ ดร.วิรุฬห์ สายคณิต และดร.วิโรจน์ ตันตราภรณ์ ในระหว่างศึกษาระดับปริญญาเอก ดร.วิทยา ได้มีโอกาสไปทำวิจัยที่ศูนย์วิจัย R & D ของบริษัท General Electric (GE) ประเทศสหรัฐอเมริกา ภายใต้การดูแลของ ดร.วิโรจน์ ตันตราภรณ์ ซึ่งเป็นขณะนั้นเป็นนักวิจัยระดับแนวหน้าของ GE เป็นเรื่องที่น่ายินดีและภูมิใจอย่างยิ่งที่ ดร.วิทยา เป็นนิสิตคนแรกที่จบปริญญาเอก สาขาฟิสิกส์ ของภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีความเชี่ยวชาญในเรื่องของระบบสุญญากาศและสารกึ่งตัวนำเป็นอย่างดี ภายหลังสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอก ดร.วิทยา ได้เริ่มทำงานเป็นอาจารย์สังกัดภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น เมื่อปี พ.ศ. 2524 และได้ทำงานที่นี่จนถึงปัจจุบัน ปัจจุบัน ดร.วิทยา ดำรงตำแหน่งหัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ และยังได้รับความไว้วางใจจากมหาวิทยาลัยขอนแก่นให้ดำรงตำแหน่งผู้อำนวยการศูนย์วิจัยนาโนเทคโนโลยีบูรณาการ ซึ่งเป็นหนึ่งในศูนย์วิจัยเฉพาะทางระดับแนวหน้า ของมหาวิทยาลัยขอนแก่น และเป็นหนึ่งในแปดของศูนย์เครือข่ายทางด้านนาโนเทคโนโลยีของศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ

ในด้านครอบครัว รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา อมรกิจบำรุง สมรสกับผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจารี อมรกิจบำรุง มีบุตรและธิดา 2 คน คือนายลัญจกร อมรกิจบำรุง (ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) และนางสาวอุรสวดี อมรกิจบำรุง (ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวัสดุศาสตร์และนาโนเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น) ดร.วิทยา มีบุคลิกนุ่มนวล สุขุม รอบคอบ เป็นที่น่าเคารพนับถือและมีความเป็นผู้นำสูง เป็นที่รักของครอบครัว เพื่อนร่วมงาน และลูกศิษย์

[1] อาจารย์ (รศ. ดร.) สาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 1 ภาพห้องปฏิบัติการณ์ทดลองของ รศ. ดร. วิทยา อมรกิจบำรุง ที่ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ล่างซ้ายเป็นภาพขยายของตัวอย่างฟิล์มบางเพชรที่ปลูกได้ที่ห้องปฏิบัติการ

ในแวดวงวิชาการและงานวิจัยด้านฟิล์มบางของประเทศไทย เมื่อเอ่ยชื่อถึง "*วิทยา อมรกิจบำรุง (Vittaya Amornkitbamrung)*" แล้ว น้อยคนนักที่จะไม่รู้จักชื่อนี้ ดร.วิทยา เป็นอาจารย์นักวิจัยผู้บุกเบิกงานวิจัยทางด้านฟิล์มบางเพชรและฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรคนแรกๆ ของประเทศไทย โดยมีประสบการณ์การวิจัยในด้านนี้กว่า 20 ปี เป็นผู้ร่วมก่อตั้งห้องปฏิบัติการฟิสิกส์ของแข็ง และได้พัฒนาระบบและเครื่องมือการเตรียมฟิล์มบางแบบต่างๆ โดยเฉพาะระบบ *Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition* ซึ่งเป็นเครื่องมือวิจัยขั้นสูงที่พัฒนาขึ้นเองในประเทศไทย สามารถลดการนำเข้าเครื่องมือราคาสูง สามารถเพิ่มศักยภาพการแข่งขันด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของประเทศ โดยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นนี้ได้ใช้ในการเรียนการสอนและวิจัยของนักศึกษาโดยเฉพาะนักศึกษาระดับปริญญาโทและเอกซึ่งได้ร่วมพัฒนาและใช้เครื่องมือนี้โดยสำเร็จการศึกษาไปแล้วมากกว่า 10 คน จากการที่ท่านเป็นผู้บุกเบิกและทำวิจัยด้านฟิล์มบางเพชรและฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรมาอย่างต่อเนื่องและยาวนาน แทบจะหายใจเข้า-ออกเป็น "*เพชร*" จนได้รับสมญานามจากเหล่าลูกศิษย์ว่าท่านเป็น "*ปรมาจารย์แห่งการปลูกและเจียระไนเพชร*" แท้จริงแล้ว การที่ศิษย์ของท่านกล่าวเช่นนี้ไม่ใช่เพียงเพราะท่านมีความเชี่ยวชาญด้านการปลูกผลึกฟิล์มบางเพชรและฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรเท่านั้น แต่ท่านยังเป็นอาจารย์ที่เป็นที่รักและเคารพ และเป็นแบบอย่างที่ดีให้กับลูกศิษย์ทั้งอดีตและปัจจุบันที่เคยเรียนที่ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น เป็นช่างเจียระไนเพชรชั้นยอด โดยในกระบวนการเจียระไนของท่านนั้นได้บรรจงสรรค์สร้างเพชรแต่ละเม็ดดุจงานศิลป์ที่ต้องใช้เวลาบ่มเพาะ ใส่ความอุตสาหะ อดทน และที่สำคัญต้องฝึกใจให้เปิดกว้าง พร้อมรับฟัง ปรับแก้ไขให้ได้ในสิ่งที่งดงามและมีคุณค่ามากที่สุด ซึ่งจะเห็นได้ว่าเพชรที่ท่านได้เจียระไนหลายต่อหลายเม็ดได้กลายมาเป็นเพชรเม็ดงาม มีคุณค่าและเจิดจรัสในวงการฟิสิกส์ไทยในปัจจุบัน

นอกเหนือจากงานวิจัยด้านฟิล์มบางเพชรและฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร ปัจจุบัน ดร.วิทยา และกลุ่มวิจัยยังได้ทำการวิจัยด้านพลังงานทดแทน โดยเน้นที่การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมจากธรรมชาติ (Natural dye-sensitized solar cells) และงานวิจัยด้านวัสดุผันไฟฟ้าจากความร้อน (Thermoelectric materials) งานวิจัยทั้งสองด้านนี้สามารถผลิตกำลังคนทางด้านฟิสิกส์เชิงวัสดุและนาโนเทคโนโลยีให้กับประเทศไทยมากกว่า 20 คน

จากประสบการณ์และความทุ่มเททั้งในด้านการสอนและวิจัย รวมถึงการได้เข้ามามีส่วนร่วมในกิจกรรมต่างๆ ของสมาคมฟิสิกส์ไทยมาอย่างต่อเนื่องและยาวนาน เชื่อได้ว่ารองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา อมรกิจบำรุง ในฐานะนายกสมาคมฟิสิกส์ไทยจะนำพาสมาคมนี้ก้าวไปข้างหน้าอย่างมั่นคง สู่สังคมฟิสิกส์ยุคใหม่ที่สามารถยกระดับมาตรฐานฟิสิกส์ไทยสู่สากลได้ในอนาคตอันใกล้นี้

รางวัลโนเบลประจำปี 2011: ชะตากรรมของเอกภพภายใต้พลังงานมืด

วิรินทร์ สนธิ์เศรษฐี[1,2,3], อัจฉรา เสรีเพียรเลิศ[3,4] และ เดวิด รูฟโฟโล[3,5]

รางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปีนี้ได้มอบให้กับผลงานของนักฟิสิกส์สามท่านที่เปิดเผยชะตากรรมของทุกสรรพสิ่งในเอกภพว่ากำลังเดินทางไปสู่จุดสิ้นสุดอันหนาวเย็นและเดียวดาย

ผู้ได้รับรางวัลโนเบลประจำปี 2011 ทั้งสามท่านซึ่งได้แก่ ซอล เพิร์ลมุตเตอร์ (Saul Perlmutter) ไบรอัน ชมิดท์ (Brian Schmidt) และ อดัม รีสส์ (Adam Riess) ได้ทำการสำรวจและค้นหาซูเปอร์โนวาชนิดหนึ่งเอ (Type Ia supernovae) ภายใต้โครงการ Supernova Cosmology Project (SCP) ที่นำโดยซอล เพิร์ลมุตเตอร์ และโครงการ High-z Supernova Search Team (HZT) ของไบรอัน ชมิดท์ และ อดัม รีสส์ โดยมีข้อสรุปที่ตรงกันว่าแสงจากซูเปอร์โนวาเหล่านั้นมีความสว่างน้อยกว่าที่นักฟิสิกส์เคยคาดไว้ อันมีความหมายว่ากาแล็กซีต่างๆ กำลังวิ่งออกจากกันด้วยความเร่ง

ข้อสรุปของทั้งสองทีมนี้แสดงให้เห็นว่าเอกภพกำลังขยายตัวด้วยความเร่งซึ่งจะทำให้ในอีกหมื่นล้านปีจากนี้เอกภพจะมีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างมหาศาล กาแล็กซีส่วนใหญ่ จะอยู่ห่างกันมากขึ้น และในที่สุดเอกภพจะหนาวเย็นขึ้น (Heat death)

อัตราการขยายตัวของเอกภพแบบมีความเร่งนี้ เป็นหลักฐานอย่างดีในการสนับสนุนสมมติฐานของการมีอยู่ของพลังงานมืด (Dark energy) ซึ่งนักฟิสิกส์หลายท่านเชื่อว่าเป็นสิ่งที่คอยผลักดันให้เอกภพมีการขยายตัวด้วยความเร่งถึงแม้เรื่องราวเกี่ยวกับพลังงานมืดนี้ยังคงเป็นปริศนาสำหรับฟิสิกส์ในปัจจุบัน

เหตุใดเอกภพจึงขยายตัวแบบเร่ง และพลังงานมืดทำให้เอกภพขยายตัวเร็วขึ้นได้อย่างไร บทความนี้จะนำผู้อ่านย้อนอดีตกลับไปสู่จุดเริ่มต้นของการค้นพบการขยายตัวของเอกภพ และทฤษฎีต่างๆ ที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ เหล่านั้น

เอกภพขยายตัวได้อย่างไร

การเฝ้ามองดูท้องฟ้ายามค่ำคืนเพื่อทำความเข้าใจความเป็นไปของตนเอง และสวรรค์นั้นมีอยู่ในแทบทุกอารยธรรมโบราณ ไม่ว่าจะเป็นฮินดู บาบิโลเนียน กรีก หรือ จีน โดยความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับดวงดาวของมนุษย์ในสมัยโบราณนั้นมักจะเชื่อมโยงไปกับความเชื่อทางศาสนา จนกระทั่งนิโคลัส โคเปอร์นิคัส โจฮาเน เคปเลอร์ และ กาลิเลโอ กาลิเลอิ ได้ทำให้ความรู้ความเข้าใจของเอกภพและดวงดาวแยกตัวออกมาจากความเชื่อทางศาสนาและไสยศาสตร์และกลายเป็นทฤษฎีทางวิทยาศาสตร์อย่างแท้จริงในศตวรรษที่ 17

จากกฎของเคปเลอร์ ต่อมาไอซัคนิวตันได้พัฒนาเป็นกฎความโน้มถ่วงสากลและกฎการเคลื่อนที่ของนิวตันอันนำไปสู่ความรู้ความเข้าใจของการเคลื่อนที่ของดวงดาวต่างๆ อย่างสมบูรณ์

ด้วยทฤษฎีของนิวตันและการสังเกตด้วยเทคโนโลยีสมัยนั้นมนุษย์ก่อนทศวรรษที่ 20 จึงสรุปความรู้ความเข้าใจที่มีต่อเอกภพว่าเอกภพทั้งหมดคือกาแล็กซีทางช้างเผือก และแม้ว่าดวงดาวต่างๆ อาจจะมีการเกิดและดับไปบ้าง แต่ในภาพรวมนั้นนักวิทยาศาสตร์เข้าใจว่ากาแล็กซีทางช้างเผือกก็จะคงอยู่ในรูปแบบเดิมไม่เปลี่ยนแปลงชั่วนิรันดร์ จนกระทั่งเอ็ดวินฮับเบิลได้ศึกษาดาวแปรแสงซีฟีด (Cepheid variables) ที่อยู่ห่างไกล เนื่องจากดาวฤกษ์ประเภทนี้มีความสว่างมาตรฐานจึงสามารถใช้เป็น “เทียนมาตรฐาน” (Standard candle) และวัดระยะทางได้ จากนั้นเขาพบว่านอกจากกาแล็กซีทางช้างเผือกแล้วยังมีกาแล็กซีอื่นๆ อีก 46 กาแล็กซี นอกจากนี้ฮับเบิลยังค้นพบว่าเอกภพต่างๆ กำลังเคลื่อนที่ออกจากกันซึ่งนำไปสู่ข้อสรุปที่ว่าเอกภพนั้นไม่ได้

[1] นักศึกษาระดับปริญญาเอก ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
[2] อาจารย์ประจำสาขาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
[3] ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์
[4] นักวิจัย (ดร.) ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
[5] อาจารย์ (ศ.ดร.) ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

เป็นสิ่งที่คงเดิมชั่วนิรันดร์แต่เอกภพกำลังขยายตัวอยู่ตลอดเวลา และในอดีตคงมีขนาดเล็กมาก (ตอน Big Bang)

ก่อนหน้าที่ฮับเบิลจะค้นพบหลักฐานนี้ก็เริ่มมีหลักฐานที่แสดงให้เห็นว่าเอกภพอาจจะไม่ได้คงตัวทั้งจากการสังเกตและการทำนายทางทฤษฎี ไม่ว่าจะเป็นการที่นักดาราศาสตร์พบว่าแสงจากเนบิวลาทั้งหลายได้เลื่อนไปทางแสงสีแดง ซึ่งสามารถตีความได้ว่าเป็นผลจากปรากฏการณ์ดอปเปลอร์อันเนื่องจากเทหวัตถุต่างๆ กำลังวิ่งออกจากเรา หรือ ผลจากการทำนายของทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปของไอน์สไตน์

ในปี ค.ศ. 1916 อัลเบิร์ต ไอน์สไตน์ ได้เสนอมุมมองใหม่เกี่ยวกับแรงโน้มถ่วงที่แตกต่างจากของนิวตันโดยนิวตันมองว่าแรงโน้มถ่วงเป็นแรงชนิดหนึ่งซึ่งไม่แตกต่างจากแรงอื่นๆ ในแง่มุมที่เป็นสาเหตุที่ทำให้วัตถุต่างๆ เคลื่อนที่ด้วยความเร่งไปในอวกาศและเวลา โดยอวกาศและเวลานั้นเป็นสิ่งสัมบูรณ์ไม่สามารถมีสิ่งใดมาทำให้เปลี่ยนแปลงไปได้ แต่ในมุมมองของไอน์สไตน์นั้น แรงโน้มถ่วงเป็นสิ่งพิเศษแตกต่างจากแรงอื่นๆ โดยแรงโน้มถ่วงนั้นไม่ได้ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของวัตถุโดยตรง แต่แรงโน้มถ่วงเป็นผลจากการที่มวลสารและพลังงานทุกชนิดทำให้อวกาศและเวลารอบๆ นั้นมี “ความโค้งงอ” ซึ่งทำให้วัตถุอื่นที่เคลื่อนที่อยู่ในอวกาศและเวลานี้ เกิดการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ไปด้วยซึ่งจากภายนอกดูเหมือนมีแรงกระทบจึงเปลี่ยนความเร็ว ผู้อ่านอาจจะจินตนาการถึงแรงโน้มถ่วงของดวงอาทิตย์ที่ดึงดูดให้โลกโคจรอยู่รอบดวงอาทิตย์ด้วยทฤษฎีของไอน์สไตน์โดยสมมติให้อวกาศและเวลาคือแผ่นยางที่ขึงตึง แล้วให้ดวงอาทิตย์เป็นลูกโบว์ลิ่งที่วางอยู่บนแผ่นยางนี้ ซึ่งลูกโบว์ลิ่งนี้จะทำให้แผ่นยางยุบลง (แผ่นยางโค้ง) ซึ่งถ้ามีลูกกอล์ฟลูกหนึ่งที่เราอาจจินตนาการว่าเป็นโลกกำลังเคลื่อนที่อยู่ใกล้ๆ ลูกโบว์ลิ่ง ลูกกอล์ฟจะไม่สามารถเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงได้แต่จะวิ่งไปตามเส้นโค้งอันเนื่องมาจากรอยบุ๋มที่เกิดจากลูกโบว์ลิ่ง จากตัวอย่างนี้แสดงให้เห็นว่าในมุมมองของสัมพันธภาพทั่วไปของไอน์สไตน์โลกเคลื่อนที่โคจรรอบดวงอาทิตย์ไม่ได้เกิดจากแรงโน้มถ่วงจากดวงอาทิตย์ที่กระทำต่อโลกโดยตรง แต่ดวงอาทิตย์ทำให้อวกาศและเวลาตรงที่โลกเคลื่อนที่อยู่โค้งงอจนทำให้โลกเคลื่อนที่เป็นเส้นโค้งโคจรรอบดวงอาทิตย์ในที่สุด จากความแตกต่างของแรงโน้มถ่วงกับแรงอื่นๆ นี้นั้นทำให้เดนนิส โอเวอร์บาย (Denis Overbye) มองว่า “ในบางมุมมองแรงโน้มถ่วงก็ไม่ได้เป็นแรง แต่เป็นผลอันเนื่องมาจากความโค้งของอวกาศและเวลา”

หลังจากพัฒนาทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปสำเร็จไอน์สไตน์ประสบความสำเร็จในการประยุกต์ทฤษฎีของเขากับปัญหาความโน้มถ่วงหลายๆ ปัญหารวมทั้งปัญหาที่ทฤษฎีของนิวตันไม่สามารถแก้ไขได้ที่เรียกว่าการนำหน้าของจุดเพอริฮีเลียนของวงโคจรดาวพุธ (Precession of the perihelion of Mercury’s orbit) โดยทฤษฎีของไอน์สไตน์ทำนายได้อย่างแม่นยำ หรือ การทำนายว่าแสงจะเดินทางเป็นเส้นโค้งภายใต้แรงโน้มถ่วง ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการสังเกตการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแสงจากดาวฤกษ์ต่อเมื่อวิ่งผ่านใกล้ดวงอาทิตย์ซึ่งสังเกตได้ระหว่างการเกิดสุริยุปราคาเต็มดวงในปีค.ศ. 1919 แต่ผลของการทำนายโดยทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปกลับสร้างความกังวลใจให้กับไอน์สไตน์เมื่อทฤษฎีนี้ถูกนำไปประยุกต์เพื่อทำความเข้าใจเอกภพโดยรวม เพราะทฤษฎีทำนายว่าเอกภพไม่สามารถอยู่นิ่งได้ อวกาศสามารถยืดหรือหดตัวได้ ซึ่งดูเหมือนจะไม่สอดคล้องกับความคิดในยุคนั้นว่าเอกภพมีขนาดที่คงที่ดังที่กล่าวมาในตอนต้น จึงทำให้ไอน์สไตน์ต้องกลับมาทบทวนทฤษฎีของเขาใหม่ ด้วยเวลาไม่นานนักเขาได้ปรับทฤษฎีนั้นโดยการใส่เทอมลงไปในสมการของเขาที่เรียกว่า “ค่าคงที่ของจักรวาล (The cosmological constant)” ซึ่งเราเขียนด้วยสัญลักษณ์ Λ

เพื่อทำความเข้าใจว่าค่าคงที่ของจักรวาลทำให้เอกภพสามารถรักษาขนาดให้คงที่ได้อย่างไร เราอาจจะเริ่มจากการใช้ความรู้ทางฟิสิกส์ระดับมัธยมปลายมาช่วยได้ นั่นคือเราทุกคนได้เรียนรู้ว่าแรงโน้มถ่วงของโลกทำให้ลูกบอลที่ถูกขว้างขึ้นไปต้องเคลื่อนที่ช้าลงเรื่อยๆ และตกลงมาสู่พื้นอีกครั้ง แต่ถ้าเมื่อใดที่มีแรงต้านแรงดึงดูดเช่นแรงลอยตัวที่เพียงพอที่จะหักล้างกับแรงโน้มถ่วงของโลก เราก็จะสามารถทำให้ลูกบอลลอยอยู่นิ่งๆ ได้ ด้วยแนวความคิดเดียวกันนี้ค่าคงที่ของจักรวาลจึงเปรียบเสมือนแรงลอยตัวที่คอยค้ำจุนไม่ให้เอกภพเกิดการขยายตัวหรือหดตัวอันเนื่องมาจากแรงดึงดูดของสสารและพลังงานอื่นๆ ทั้งหมดในเอกภพ

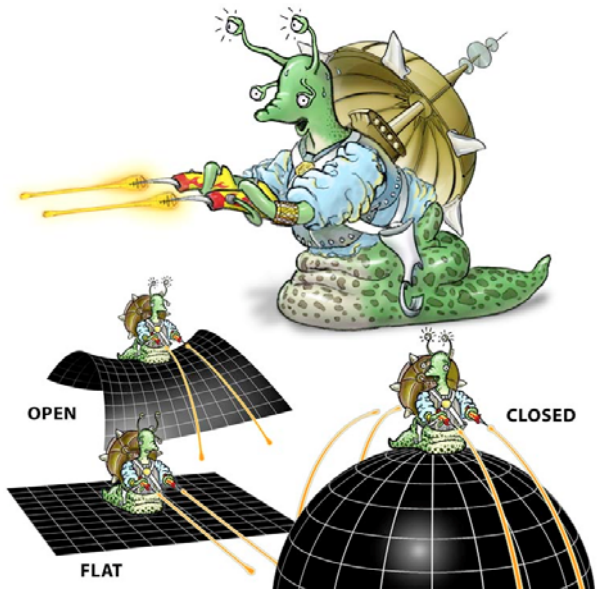
แต่ค่าคงที่ของจักรวาลก็สร้างความสบายใจให้แก่ไอน์สไตน์ได้ไม่นาน เพราะหลังจากนั้นไม่นานฮับเบิลก็แสดงหลักฐานให้เห็นว่าจริงแล้วเอกภพกำลังขยายตัวอยู่ ไม่ได้มีรูปร่างคงที่ดังการทำนายของทฤษฎีของเขาหลังใส่ค่าคงที่ของจักรวาล

ซึ่งทำให้ไอน์สไตน์ถึงกับกล่าวว่าการใส่ค่าคงที่ของจักรวาลลงไปในสมการของเขานั้นเป็นความผิดพลาดครั้งใหญ่ของเขา

การค้นพบของฮับเบิลที่ว่ากาแล็กซีต่างๆ กำลังวิ่งออกจากเราในทุกทิศทุกทางนั้นทำให้เข้าใจได้ว่าในอดีตอันไกลเอกภพโดยรวมมีขนาดเล็กและมีความหนาแน่นพลังงานสูง จากนั้นมีการขยายตัวที่เรียกว่า Big Bang ซึ่งเป็นผลให้กาแล็กซี่และองค์ประกอบต่างๆ ของจักรวาลกระจายหนีออกในทุกทิศทุกทางอย่างที่เป็นอยู่นี้

สัมพัทธภาพทั่วไปสามารถอธิบายการค้นพบของฮับเบิลและ Big Bang ได้ดีกว่านั้น โดยอธิบายว่าอวกาศขยายตัวมาเป็นพันๆ ล้านปี แล้ว และในขณะที่มันขยายตัว กาแลกซี่ต่างๆ ก็ถูกลากออกให้หนีออกจากกันเรื่อยๆ อาจมองว่าสามมิติในอวกาศของเราเสมือนกับสองมิติบนผิวลูกโป่งที่มีจุดสีแต้มกระจายอยู่ทั่วไป โดยจุดแต้มสีเหล่านี้จะเสมือนกาแล็กซี่ต่างๆ ในขณะที่เราเป่าลมให้ลูกโป่งขยายตัวใหญ่ขึ้น ทุกๆ จุดบนผิวลูกโป่งจะอยู่ห่างกันมากขึ้นเรื่อยๆ ด้วยแบบจำลองนี้ทุกๆ จุดสีบนลูกโป่งจะมีความเท่าเทียมกันไม่มีจุดใดเป็นจุดพิเศษ เพราะถ้าคุณจินตนาการว่าคุณหดตัวให้เล็กพอที่จะไปยืนอยู่บนจุดใดๆ บนลูกโป่งนี้ได้ คุณจะพบว่าไม่ว่าคุณจะไปยืนอยู่บนจุดใดบนลูกโป่งนี้คุณก็จะพบว่าจุดอื่นๆ กำลังวิ่งหนีออกจากคุณไปในทุกทิศทุกทาง ซึ่งสอดคล้องกับหลักฐานทางดาราศาสตร์อื่นๆ

นอกจากทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปจะอธิบายการขยายตัวของเอกภพดังที่กล่าวไปแล้วนั้น ทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปยังสามารถทำนายถึงคุณสมบัติทางเรขาคณิต (ความโค้ง) ของเอกภพอีกด้วย โดยมีสามรูปแบบที่เป็นไปได้ คือ แบบแบน แบบปิด และแบบเปิด ในรูปที่ 1 เรขาคณิตสามแบบนี้สาธิตด้วยการ์ตูนของปลิงต่างดาวที่ยิงปืนเลเซอร์สองกระบอกในทิศทางที่ขนานกัน โดยเรขาคณิตสามรูปแบบนี้สามารถอธิบายโดยเปรียบเทียบกับเรขาคณิตบนพื้นผิวสองมิติ ดังนี้ เรขาคณิตแบบแบนเปรียบได้กับเรขาคณิตที่วาดบนกระดาษแผ่นราบ นั่นคือ เส้นขนานจะไม่เคยตัดกัน และมุมภายในสามเหลี่ยมจะรวมกันได้ 180 องศา เรขาคณิตแบบปิดจะเปรียบได้กับเรขาคณิตที่วาดบนพื้นผิวทรงกลม นั่นคือ เส้นขนานจะมาตัดกันได้ที่จุดจุดหนึ่ง มุมภายในสามเหลี่ยมจะรวมกันได้มากกว่า 180 องศา และสุดท้ายมีเรขาคณิตแบบเปิดซึ่งเปรียบเสมือนกับเรขาคณิตที่วาดบนพื้นผิวอานม้า นั่นคือ เส้นขนานจะแยกออกจากกัน และ มุมภายในของสามเหลี่ยมจะรวมกันได้น้อยกว่า 180 องศา



รูปที่ 1 ปลิงต่างดาวสาธิตเรขาคณิตของเอกภพ [http://abyss.uregon.edu/~js/cosmo/lectures/lec15.htm]

ตามทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปนั้นความโค้งหรือเรขาคณิตของอวกาศขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของมวลสารและพลังงานทั้งหมดที่มีอยู่ในเอกภพ ดังนั้นเรขาคณิตของเอกภพนั้นจะสามารถตัดสินได้จาก พารามิเตอร์ความหนาแน่น (density parameter “Ω”) โดย Ω เป็นอัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของมวลสารและพลังงานทั้งหมดที่มีอยู่ในเอกภพ กับ ความหนาแน่นวิกฤติ โดยความหนาแน่นวิกฤติเป็นความหนาแน่นของมวลสารและพลังงานที่มีค่าทำให้เอกภพมีเรขาคณิตแบบแบนได้พอดี ดังนั้น ถ้า $\Omega > 1$ ความหนาแน่นมวลสารและพลังงานจะมีค่ามากจนดึงเอกภพให้มีรูปร่างเหมือนทรงกลมดังรูปทรงเรขาคณิตแบบปิด และ ถ้า $\Omega < 1$ ความหนาแน่นมวลสารและพลังงานจะมีค่าน้อยและเอกภพจะเหมือนอานม้าดังรูปทรงเรขาคณิตแบบเปิด

จากความพยายามในการวัดความหนาแน่นของมวลสารและพลังงาน ทำให้พบหลักฐานหลายอย่างที่ชี้ว่าเอกภพของเรามีรูปทรงที่มีเรขาคณิตแบบแบน ดังนั้นก่อนหน้าการค้นพบของซอล เพิร์ลมุตเตอร์ (Saul Perlmutter) ไบรอัน ชมิดท์ (Brian Schmidt) และ อดัม รีสส์ (Adam Riess) ในการสำรวจและค้นหาซูเปอร์โน

วาชนิดหนึ่งเอ นั้น นักฟิสิกส์มีสมมติฐานว่าเอกภพมีลักษณะแบบแบนและกำลังขยายตัวด้วยความเร็วที่ลดลงเรื่อยๆ (มีความหน่วง) อันเนื่องมาจากแรงดึงดูดของแรงโน้มถ่วงจากสสารและพลังงาน แต่ดังที่กล่าวไปในตอนต้น ด้วยความพยายามอย่างยิ่งยวดของนักฟิสิกส์ผู้รับรางวัลโนเบลประจำปี 2011ทั้งสามและผู้ร่วมงานของเขาในการวิเคราะห์ผลจากการสังเกตซูเปอร์โนวาชนิดหนึ่งเอ พวกท่านพบว่าการขยายตัวของเอกภพในช่วง 7 พันปีแรกจะขยายตัวด้วยอัตราลดลง แต่นับตั้งแต่เอกภพมีอายุได้ 7 พันล้านปีแล้ว อัตราการขยายตัวไม่ได้ลดลงเลยแม้แต่น้อย ในทางตรงกันข้ามอัตราการขยายตัวของเอกภพกลับเพิ่มขึ้น แต่ดังที่กล่าวไปแล้วว่ามวลสารและพลังงานโดยทั่วไปนั้นจะดึงดูดให้เอกภพขยายตัวด้วยความหน่วง ดังนั้นจากผลการสังเกตเหล่านี้จึงมีความจำเป็นที่ต้องมีทฤษฎีที่อธิบายถึงสิ่งที่คอยผลักดันให้เอกภพขยายตัวด้วยความเร่ง โดยสิ่งนั้นถูกเรียกว่า “พลังงานมืด”

พลังงานมืด

มีแนวความคิดหลายอย่างมากที่พยายามอธิบายว่าพลังงานมืดคืออะไร แนวคิดที่ง่ายที่สุดคือการอธิบายว่าพลังงานมืดคือค่าคงที่ของจักรวาล Λ ซึ่งไอน์สไตน์เคยใช้เพื่อคอยผลักดันต้านแรงดึงดูดของสสารและพลังงานซึ่งส่งผลให้เอกภพสามารถคงอยู่ในรูปแบบเดิม แต่หลังจากการค้นพบของฮับเบิล แนวความคิดนี้ก็ถูกพับเก็บไปโดยไอน์สไตน์ แต่ในปัจจุบันนักฟิสิกส์ได้นำเอาแนวคิดเรื่องค่าคงที่ของจักรวาลมาใช้อีกครั้ง โดยไม่ใช่เพื่อให้เอกภพคงรูปร่างแบบเดิมไม่เปลี่ยนแปลง แต่ใช้เพื่ออธิบายการที่ทำให้เอกภพมีการขยายตัวแบบมีความเร่ง

ตามที่ชื่อว่า “ค่าคงที่ของจักรวาล” ก็ต้องใช้กับสิ่งคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาและไม่ขึ้นกับตำแหน่งจึงสม่ำเสมอทั่วทั้งจักรวาล ดังนั้นจึงสามารถอธิบายผลการสังเกตการขยายตัวของเอกภพด้วยซูเปอร์โนวาชนิดหนึ่งเอได้ดังต่อไปนี้ เรขาคณิตแบบแบนชี้ให้เห็นว่า $\Omega = 1$ แต่เราอาจมองว่าส่วนหนึ่งของ Ω เกี่ยวข้องกับ Λ ซึ่งเรียกว่า Ω_Λ และส่วนที่เหลือคือ Ω_M ซึ่งหมายถึงความหนาแน่นของสสารและพลังงานในรูปแบบ “ปกติ” (รวมทั้ง “dark matter” ซึ่งมองไม่เห็นแต่มีแรง Ω_Λ โน้มถ่วงที่ดึงดูดและเกาะกลุ่มกันในกาแล็กซี่เหมือนสสารธรรมดา) ปรากฏว่าในช่วง 7 พันล้านปีแรกนั้น เอกภพยังมีขนาดเล็กอยู่จึงทำให้ Ω_M สูงกว่า Ω_Λ อย่างมาก จึงส่งผลให้แรงดึงดูดเอาชนะแรงผลักได้ ดังนั้นเอกภพจึงขยายตัวด้วยความหน่วงในช่วง 7 พันล้านปีแรก แต่ภายหลังจาก 7 พันล้านปีไปแล้วเอกภพขยายตัวและมีปริมาตรสูงซึ่งทำให้ความหนาแน่น Ω_M ลดลงจนน้อยกว่า Ω_Λ จึงทำให้แรงผลักชนะแรงดึงดูดและเอกภพมีการขยายตัวด้วยความเร่ง

ถ้าเราสมมติว่า “พลังงานมืด” ที่ทำให้เอกภพขยายตัวแบบเร่งคือค่า $\Lambda > 0$ นั่นเอง ค่า Λ นั้นจะต้องคงที่ แต่นักฟิสิกส์ยังไม่แน่ใจนักว่าพลังงานมืดจำเป็นต้องมีคุณสมบัติว่าคงที่หรือไม่ นักฟิสิกส์บางคนจึงคิดว่าค่าคงที่ของจักรวาลนั้นอาจเป็นเพียงส่วนประกอบส่วนหนึ่งของพลังงานมืด และเรียกพลังงานทั้งหมดที่ประกอบรวมกันเป็นพลังงานมืดว่า “ควินเทสเซนซ์ (quintessence)” โดยเป็นการยืมชื่อมาจากชื่อของธาตุที่ 5 ของนักปราญช์ชาวกรีกโบราณนอกเหนือจาก ดิน น้ำ ลม และไฟ

อย่างไรก็ตามในขณะนี้ยังไม่มีใครที่สามารถอธิบายได้แน่นอนว่าควินเทสเซนซ์คืออะไร แต่ก็มีนักฟิสิกส์บางคนเชื่อว่าทฤษฎีซูเปอร์สตริงจะให้คำตอบนี้แก่เราได้ในอนาคต

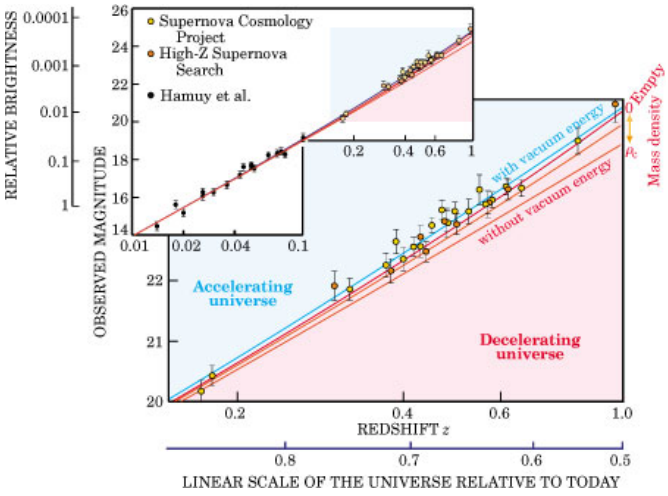
หลักฐานที่มีอยู่สำหรับพลังงานมืดจากการสังเกตซูเปอร์โนวาชนิดหนึ่งเอ

สาเหตุที่นักฟิสิกส์ใช้ซูเปอร์โนวาชนิดหนึ่งเอซึ่งเป็นเทียนมาตรฐาน (Standard candles) ในการศึกษาเอกภพ เนื่องด้วยซูเปอร์โนวาชนิดหนึ่งเอนี้มีข้อได้เปรียบที่กราฟความสว่างต่อเวลา (light curve) ของมันมีรูปร่างคล้ายกันหมด ข้อได้เปรียบอีกอย่างหนึ่งของการสังเกตซูเปอร์โนวาชนิดหนึ่งเอคือ มีความสว่างสูงมาก ซึ่งทำให้เราสามารถสังเกตซูเปอร์โนวาชนิดหนึ่งเอได้จากกาแล็กซีหลายชนิด ทั้งกาแล็กซีที่มีอายุมากแล้วและกาแล็กซีที่อายุน้อย ลักษณะเฉพาะของซูเปอร์โนวาชนิดหนึ่งเอคือ จะไม่มีแถบจากธาตุไฮโดรเจนในสเปคตรัม แต่มีแถบ Si II ที่ 615 nm

ซูเปอร์โนวาชนิดหนึ่งเอนี้เกิดจากการระเบิดของดาวแคระขาวในระบบดาวคู่ ลองจินตนาการถึงดวงอาทิตย์ เมื่อมันเผาไหม้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนไปจนหมดแล้ว จะกลายเป็นดาวยักษ์แดง (หรือ “ปีศาจแดง”) แล้วเปลี่ยนเป็นดาวแคระขาว คือมีขนาดเท่ากับโลก ในขณะที่มวลยังคล้ายเดิม และมากกว่าโลกถึง 300,000 เท่า ต่อเมื่อสสารอัดแน่นถึงขนาดพวกอิเล็กตรอนจะมี quantum degeneracy โดยฟังก์ชันคลื่นทับกันและอิเล็กตรอนจะ delocalized ทั่วดาวทั้งดวง ความดันเนื่องจากอิเล็กตรอนเหล่านี้เรียกว่า degeneracy pressure หากดาวแคระขาวนั้น มีดาวคู่ มันจะดูดมวล

บางส่วนจากคู่ของมัน เมื่อดาวแคระขาวมีมวลมากขึ้น จนเกินค่าค่าหนึ่งที่เรียกว่ามวลจันทรสิกขา (Chandrasekhar mass) คือประมาณ 1.4 เท่าของมวลของดวงอาทิตย์ Degeneracy pressure จะไม่สามารถต้านแรงดึงดูดทางโน้มถ่วงได้และดาวแคระขาวทั้งดวงจะระเบิดเป็นซูเปอร์โนวาชนิดหนึ่งเอ

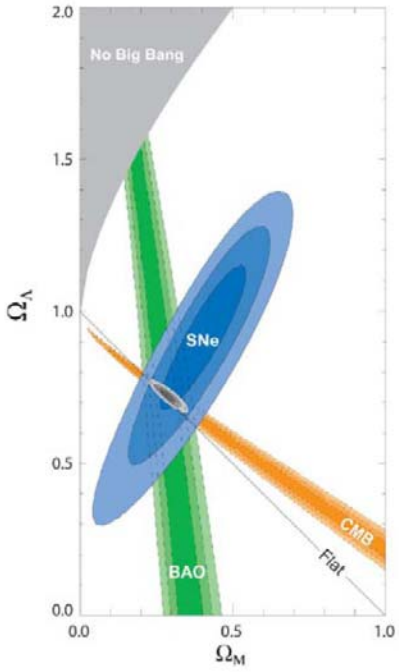
เนื่องจากซูเปอร์โนวาชนิดหนึ่งเอมีความสว่างที่คล้ายกันหมดจนใช้เป็นเทียนมาตรฐาน เราสามารถวัดความสว่างที่สังเกต (L; observed magnitude) โดย $L \propto R^{-2}$ ทำให้เราทราบระยะทาง R ที่นี้นักดาราศาสตร์จะต้องสังเกตซูเปอร์โนวาชนิดหนึ่งเอนี้จากภาพถ่าย CCD โดยวัดความสว่างรวมถึง Redshift (z) ของมัน เมื่อนำค่าความสว่างกับ Redshift มาพล็อตจะได้ฮับเบิลไดอะแกรม (Hubble diagram) ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ฮับเบิลไดอะแกรมของซูเปอร์โนวาชนิดหนึ่งเอ [http://abyss.uoregon.edu/~js/images//cosmo_sn.jpg]

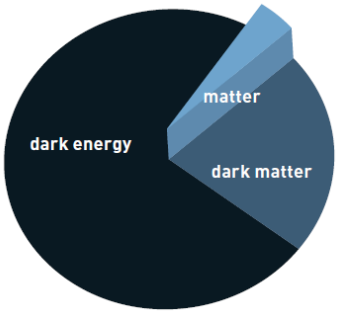
รูปที่ 2 แสดงผลการสังเกตซูเปอร์โนวาชนิดหนึ่งเอด้วยจุดในขณะที่เส้นทึบแต่ละเส้นแสดงผลการทำนายของแบบจำลองแบบต่างๆ ผู้อ่านจะเห็นได้ว่าในช่วงแรกของกราฟ ($z < 0.1$) เส้นกราฟของแบบจำลองแต่ละแบบยังไม่มีความแตกต่างกัน แต่ในช่วงที่ค่าเรดชิฟมีค่ามากกว่า 0.1 ขึ้นไป ($z > 0.1$) เส้นกราฟของแต่ละแบบจำลองเริ่มให้ผลทำนายที่แตกต่างกัน ในกราฟนี้แบบจำลองแต่ละแบบมีความแตกต่างกันที่ค่าความหนาแน่นของมวลสารและพลังงาน และ อัตราส่วนของสสารต่อพลังงานสุญญากาศ (พลังงานมืด) กราฟเส้นสีแดงจะแสดงแบบจำลองในกรณีที่ไม่มีพลังงานสุญญากาศ โดยกราฟสีแดงแต่ละเส้นจะแตกต่างกันที่ค่าความหนาแน่นมวลสาร ค่าความหนาแน่นมวลสารของกราฟสีแดงแต่ละเส้นจะมีค่าตั้งแต่เท่ากับความหนาแน่นวิกฤตจนถึงมีค่าเป็นศูนย์ ผู้อ่านจะเห็นได้ว่าข้อมูลที่ได้ไม่สอดคล้องกับเส้นสีแดงเส้นใดเลย แต่แบบจำลองที่สอดคล้องกับผลการสังเกตที่สุดคือกราฟเส้นสีน้ำเงิน โดยกราฟเส้นสีน้ำเงินแสดงแบบจำลองที่ความหนาแน่นของสสารและพลังงานทั้งหมดในเอกภพรวมกันเท่ากับค่าความหนาแน่นวิกฤติ และ มีพลังงานมืดเป็นส่วนประกอบ

ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อนำผลการสังเกตนี้รวมเข้ากับการสังเกตการแผ่รังสีคอสมิค-ไมโครเวฟพื้นหลัง (Cosmic microwave background radiation) และการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของกาแล็กซี่ (Spatial correlation between galaxies) ทำให้สรุปอย่างเชื่อมั่นได้ว่าเอกภพมีรูปร่างแบบแบน ($\Omega = 1$) และกำลังขยายตัวด้วยความเร่ง ดังรูปที่ 3 (บริเวณวงรีสีเทาเข้มที่เกิดจากการอินเตอร์เซ็คชันของการทดลองทั้งสาม)



รูปที่ 3 ภาพแสดงการรวมผลของการสังเกตซูเปอร์โนวา (SNe), การแผ่รังสีคอสมิค-ไมโครเวฟพื้นหลัง (CMB) และ การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของกาแล็กซี่ หรือ การสั่นเชิงอะคูสติกของแบริออน (BAO) รูปจาก [4]

และยังทำให้ทราบอีกว่าเอกภพมีพลังงานมืดเป็นส่วนประกอบอยู่ประมาณ 70 เปอร์เซนต์ สสารปกติที่เป็นส่วนประกอบของกาแล็กซี่ ของดวงดาว ของมนุษย์ ของพืช ที่เราสามารถมองเห็นได้อีกประมาณ 5 เปอร์เซนต์ และประมาณ 25 เปอร์เซนต์ที่เหลือคือสสารที่ไม่สามารถมองเห็นได้ นั่นคือไม่เปล่งแสงแต่ให้แรงดึงดูดจากความโน้มถ่วงได้เหมือนสสารปกติ จึงถูกเรียกว่าสสารมืด (dark matter)



รูปที่ 4 ค่าประมาณอัตราส่วนของพลังงานมืด และสสารในเอกภพ รูปจาก [3]

บทสรุป

การค้นพบของซอล เพิร์ลมุตเตอร์ (Saul Perlmutter) ไบรอัน ชมิดท์ (Brian Schmidt) และ อดัม รีสส์ (Adam Riess) ในการสำรวจและค้นหาซูเปอร์โนวาชนิดหนึ่งเอ เมื่อรวมเข้ากับการสังเกตการแผ่รังสีคอสมิค-ไมโครเวฟพื้นหลัง (Cosmic microwave background radiation) และการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของกาแล็กซี่ (Spatial correlation between galaxies) ทำให้เราทราบว่าเอกภพมีรูปทรงเรขาคณิตแบบแบน นั่นคือความหนาแน่นของสสารและพลังงานทั้งหมดในเอกภพรวมกันเท่ากับค่าความหนาแน่นวิกฤติ และกำลังขยายตัวด้วยความเร่ง ซึ่งหมายความว่าเอกภพส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยพลังงานมืดที่คอยผลักให้เอกภพขยายตัวด้วยความเร่ง และมีสสารทั้งแบบปกติและสสารมืดที่คอยดึงดูดเอกภพให้ขยายตัวด้วยความหน่วงในปริมาณที่น้อยกว่าพลังงานมืดมาก แต่อย่างไรก็ตามพลังงานมืดยังคงเป็นยังคงเป็นปริศนาสำหรับฟิสิกส์ในปัจจุบัน

เอกสารอ้างอิง

[1] Green Brian. The Fabric of the Cosmos. Alfred A. Knopf, New York, 2004.

[2] Gribbin, John. Almost Everyone's Guide to Science. Weidenfeld & Nicolson: London, 1998.

[3] http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2011/popular-physicsprize2011.pdf

[4] http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2011/advanced-physicsprize2011.pdf

[5] http://www.unm.edu/~hdelaney/3params.html

[6] http://abyss.uoregon.edu/~js/lectures/cosmo_101.html

การเอาชนะข้อจำกัดของการเลี้ยวเบนในกล้องจุลทรรศน์แบบ Near-Field

วรศม กุนทีกาญจน์[1]

อันตรกิริยาระหว่างสสารและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้เกิดปรากฏการณ์ต่างๆที่พบเห็นได้ในชีวิตประจำวันตั้งแต่การเกิดรุ้งกินน้ำและการมองเห็นสี มนุษย์ยังได้นำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปใช้ประดิษฐ์อุปกรณ์ต่างๆ เช่น กล้องถ่ายรูป เตาไมโครเวฟ อุปกรณ์สื่อสาร เป็นต้น ในส่วนของงานวิจัยทางวิทยาศาสตร์ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นได้นำไปใช้ในการศึกษาคุณสมบัติของสสาร ทำให้เกิดการพัฒนากล้องจุลทรรศน์แบบต่างๆขึ้น อย่างเช่น กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน หรือ Scanning Electron Microscope (SEM) เป็นต้น อย่างไรก็ดี กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่เป็นการวัดแสงที่มาจากระยะไกล (far-field) ความละเอียดของกล้องจุลทรรศน์ชนิดนี้จึงถูกจำกัดโดยข้อจำกัดของการเลี้ยวเบน (Diffraction Limit) เช่น การมองหลอดไฟเล็กๆสองดวงที่ระยะไกลๆถ้าหลอดไฟทั้งวางอยู่ใกล้กันมากเกินระยะหนึ่ง เราอาจจะมองเห็นหลอดไฟทั้งสองเป็นเหมือนหลอดไฟเพียงดวงกัน ข้อจำกัดของการเลี้ยวเบนจะเป็นตัวกำหนดระยะที่ว่านี้

เนื่องจากความก้าวหน้าของนาโนเทคโนโลยีก่อให้เกิดความสนใจในศึกษาคุณสมบัติของสารที่ระดับนาเมตรเพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดการพัฒนากล้องจุลทรรศน์ชนิดลอดผ่านแบบกวาดหรือ Scanning Tunneling Microscope (STM)[1]ที่ใช้คุณสมบัติความเป็นคลื่นของอิเล็กตรอนทำให้สามรถมองเห็นได้แม้กระทั่งขนาดของอะตอม อีกตัวอย่างคือ กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม หรือ Atomic Force Microscope (AFM) ทำงานโดยใช้หลักการการวัดแรงแวนเดอร์วาลล์ (Van der Waals force)[2]นอกจากนี้ยังมีการพัฒนากล้องจุลทรรศน์แบบระยะสนามใกล้ Near-field Microscopy โดยการใช้หลักการที่ว่าสสารมีอันตรกิริยาระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และทำให้สามารถมองเห็นพื้นผิวของสารที่ความละเอียดระดับนาโนเมตรได้เช่นกันแต่ยังมีจุดเด่นที่สามารถใช้ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของสสารบางส่วนที่เทคนิคอื่นอาจจะไม่สามารถวัดได้

บทความนี้จะกล่าวถึง หลักการทำงานของ Near-field Microscopy ประวัติโดยย่อของการพัฒนากล้องจุลทรรศน์ชนิดนี้ และตัวอย่างกล้องจุลทรรศน์สองชนิดที่ใช้หลักการนี้ในการทำงาน อันได้แก่ Scanning Microwave Microscope (SMM) และ Scanning Near-field Optical Microscopy รวมไปถึงการประยุกต์ใช้เทคนิคนี้ในงานวิจัยสาขาต่างๆ

หลักการทำงานของ Near-field Microscopy

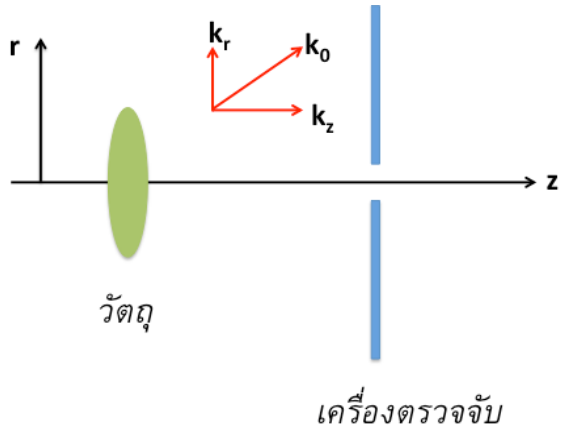
ในช่วงปลายศตวรรษที่ 19 Abbe and Rayleigh ได้คำนวณว่า ค่าความละเอียด (resolution) ของกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้แสง (Optical Microscope) นั้น ถูกจำกัดด้วย ความสัมพันธ์ ที่เรียกกันว่า Abbe Barrier หรือ ข้อกำจัดของการเลี้ยวเบน (Diffraction Limit) ดังนี้

$$\Delta x = 0.61\lambda / n \sin \Theta_{max} \qquad (1)$$

โดย λคือความยาวคลื่น, n คือ ดัชนีการหักเหแสงและ Θ_{max} คือ มุมที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถรับแสงได้ซึ่งเกี่ยวข้องกับ ขนาดของอุปกรณ์วัดแสง จะเห็นได้ว่าหากเราต้องการเพิ่มกำลังขยายของกล้องจุลทรรศน์ชนิดนี้ จะต้องใช้แสงที่มีความยาวคลื่นที่สั้นลง เช่น ใช้คุณสมบัติความเป็นคลื่นของอีเล็กตรอนใน Scanning Electron Microscope หรือ การใช้รังสี x-ray อย่างไรก็ดี คลื่นความยาวคลื่นสั้น เป็นคลื่นที่มีพลังงานสูง ก่อให้เกิดการทำลายพื้นผิวของสารที่ต้องการจะศึกษา และยังจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่มีราคาสูงอีกด้วย

[1] นักศึกษาระดับปริญญาเอก สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ Stanford University สหรัฐอเมริกา

ความสัมพันธ์ในสมการที่ (1) นั้นถือว่าเป็น การประมาณค่าของกล้องจุลทรรศน์แบบระยะสนามไกล (Far-field Microscopy) ซึ่งใช้ในกรณีที่แหล่งกำเนิดแสงและเครื่องตรวจจับอยู่ไกลจากวัตถุที่สนใจมากกว่าความยาวคลื่น คลื่นที่เคลื่อนที่ไปสู่กล้องจุลทรรศน์นั้นเป็นคลื่นชนิดแพร่กระจาย (Propagating Wave) ซึ่งต่างจากกล้องจุลทรรศน์แบบระยะสนามใกล้ (Near-field Microscopy) โดยมีจุดกำเนิดแสงหรือตัววัดแสง หรือทั้งสองสิ่งนั้นอยู่ห่างจากวัตถุที่สนใจน้อยกว่าความยาวคลื่นใน near-field นั้น ความละเอียดจะขึ้นอยู่กับขนาดของเข็มวัด (Probe) และไม่ถูกจำกัดด้วย Diffraction Limit ลักษณะของคลื่นในNear-field นั้นจึงเป็น Non-propagating หรือ Nonradiative ซึ่งเราเรียกว่าคลื่นชนิดนี้ว่า*คลื่นอีวาเนสเซนต์* (Evanescent Waves)



รูปที่ 1 ภาพจำลองการทำงานของกล้องจุลทรรศน์

ข้อแตกต่างระหว่างความละเอียดใน far-field และ near-field นั้น สามารถอธิบายได้ในโดเมนความถี่เชิงพื้นที่ (Spatial Frequency Domain) [3] รูปที่ 1 แสดงให้เห็นถึงการเดินทางของแสงจากวัตถุไปยังกล้องจุลทรรศน์ ในพิกัดทรงกระบอก (Cylindrical Coordinate) โดยมีความสัมพันธ์ของเวคเตอร์ k_r และ k_z กับความยาวคลื่น คือ $\sqrt{k_r^2+k_z^2}=k_0=\frac{2\pi}{\lambda}$ ซึ่งจะสังเกตได้ว่าความละเอียดของกล้องจุลทรรศน์นั้น แปรผันตรงกับค่า $\frac{2\pi}{k_r}$ อย่างไรก็ดี สำหรับ propagating wave ใน far-field จะต้องเดินทางไปยังกล้องจุลทรรศน์ที่อยู่ไกล ค่าของ k_z จะต้องเป็นจำนวนจริง ดังนั้น $k_r < k_0$ และความละเอียดจึงมีค่าน้อยกว่า $\lambda/2$ ไม่ได้ ในทางกลับกันหากเราอนุญาตให้ k_z เป็นจำนวนจินตภาพได้ k_r จะสามารถมีค่าที่สูงกว่า k_0 และ ความละเอียดจะมีค่าน้อยกว่าความยาวคลื่นซึ่งก็คือสามารถเอาชนะ Abbe barrier ได้ คิดในอีกมุมหนึ่งก็คือการเลี้ยวเบนของแสงใน far-field ตัดเอาส่วนที่มีความถี่สูง ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้ภาพมีความคมชัด และมีความละเอียดสูงออกไปนั่นเอง

ปัญหาต่อมาก็คือ เราจะหาวิธีที่จะสามารถตรวจวัด Evanescent Wave ได้อย่างไรหากพิจารณาการเคลื่อนที่ของ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากจุดกำเนิดแสงที่มีความถี่เดียว (Monochromatic Light Source)

$$f(\vec{r}) = \frac{A}{r}e^{i\vec{k_0}\cdot\vec{r}-i\omega t} \qquad (2)$$

โดย A คือ ขนาดของคลื่น (Amplitude), k_0 คือ เลขคลื่น (Wavenumber) $=\frac{2\pi}{\lambda}$, และ ωคือ ความถี่เชิงมุม (Angular Frequency)

พิจารณาเฉพาะส่วนที่เกี่ยวข้องกับ k_0 ละส่วนที่เกี่ยวข้องกับเวลาคือ $i\omega t$ โดย Fourier Transform $f(\vec{r})$ได้

$$F(\vec{k}) = \int \frac{A}{r}e^{ik_0 r}e^{-i(k_x x+k_y y+k_z z)}\mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}z \qquad (3)$$

ดังนั้น$f(\vec{r})$สามารถเขียนในรูปของ $F(\vec{k})$ ได้ดังนี้

$$f(\vec{r}) = \int F(\vec{k})e^{i(k_x X+k_y y+k_z z)}\mathrm{d}k_x\mathrm{d}k_y\mathrm{d}k_z \qquad (4)$$

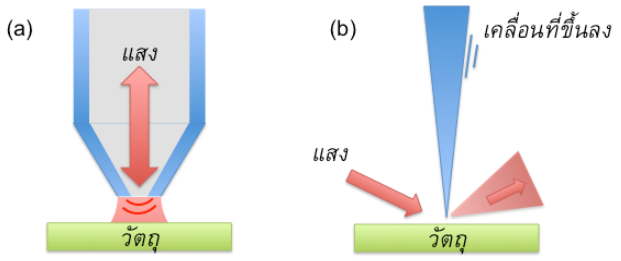
ในที่นี้อนุญาตให้ k_x, k_y และ k_z เป็นจำนวนจินตภาพได้ โดยมีข้อจำกัดคือ $\sqrt{k_x^2+k_y^2+k_z^2}=k_0$

จากสมการที่ (4) จะเห็นได้ว่าจุดกำเนิดแสงจุดเดียวกันจะสร้างคลื่นทั้งแบบ Propagating Wave และ Evanescent Wave แต่คลื่น Evanescent Wave นั้นจะลดความเข้มลงอย่างรวดเร็วกว่าด้วยอัตราแบบชี้กำลัง (Exponential Decay) ดังนั้น ที่ระยะห่างจากวัตถุออกไปหนึ่งความยาวคลื่นจึงเหลือเพียงคลื่นใน Far-field Limit การจะสามารถตรวจจับ Evanescent Wave และเอาชนะ Diffraction Limit จะต้องนำเอาเครื่องตรวจจับหรือ จุดกำเนิดแสงไปวางไว้ใกล้วัตถุที่สนใจในระยะทางที่น้อยกว่าความยาวคลื่นโดยค่าความละเอียดใน Near-field จึงดีกว่า ใน Far-field ที่ความยาวคลื่นเดียวกัน นอกจากนี้ มีงานวิจัยที่แสดงให้เห็นว่า เราสามารถ

เอาชนะ Diffraction Limit ที่ Far-field ได้โดยการแก้ที่สัมประสิทธิ์ 0.61 ในสมการของ Abbe ผู้ที่สนใจสามารถหาอ่านเพิ่มเติมได้จากเอกสารอ้างอิง[4]

กว่าจะมาเป็น Near-field

ในปี ค.ศ. 1928 Edward Hutchinson Synge ชาวไอริช จาก เมือง Dublin ได้เสนอกล้องจุลทรรศน์แบบใหม่ ที่มีความละเอียดไม่ถูกจำกัดที่ Diffraction Limit โดยใช้หลักการของ Near-field Microscopy โดยนำ อนุภาคที่ทำจากทองมาวางไว้ใกล้กับเนื้อเยื่อที่สนใจเพื่อใช้เป็นตัวกระเจิงแสง หรือใช้แสงส่องผ่านหลอดแก้วปลายแหลม ที่ปลายมีรูขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่น และผิวด้านนอกเคลือบด้วยวัตถุทึบแสง ดังที่แสดงในรูปที่ 2 ในปัจจุบันเข็มทั้งสองแบบนี้ใช้กันอย่างแพรหลายใน Scanning Near-field Optical Microscopy (SNOM) นอกจากนี้ Syngeยังเป็นผู้แรกที่กล่าวถึงวิธีการวัดแบบกวาด (Scanning) ที่ใช้อย่างแพร่หลายในเทคโนโลยีหลายๆแขนง เช่น โทรทัศน์ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) นอกจากนี้ Synge ยังเสนอให้ใช้ Piezo-resistive Transducer ในการวัดแบบกวาดเป็นผู้แรก ในปี 1931 Piezo-resistive Material เป็นสารที่สามารถยืดหดได้ด้วยแรงดันไฟฟ้า ในปัจจุบันสารชนิดนี้เป็นส่วนประกอบหลักของกล้องจุลทรรศน์แบบกวาด (Scanning Probe Microscope) ตามที่ Syngeได้เสนอไว้ทุกประการ

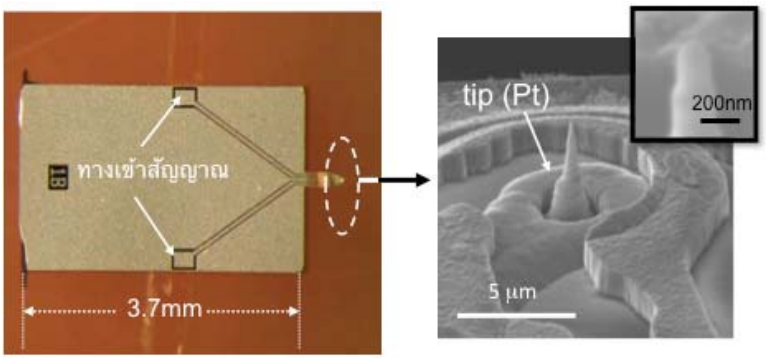


รูปที่ 2 (a) เข็มแบบหลอดแก้ว (b) เข็มแบบกระเจิงแสง

ในจดหมายที่อัลเบิร์ต ไอน์สไตน์ ตอบSyngeในช่วงต้นปี ค.ศ. 1928 ไอน์สไตน์ได้วิจารณ์ว่าวิธีที่Syngeเสนอจะถูกต้องตามหลักทฤษฎี แต่ก็ไม่สามารถนำไปปฏิบัติได้ถึงกับคอมเมนต์เป็นภาษาเยอรมันว่า *Prinzipiell Unbrauchbar* เนื่องจากหลักการ Near-field ของ Synge ถือว่าเป็นการปฏิวัติหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์ในขณะนั้น และจำเป็นจะต้องใช้อุปกรณ์ที่ล้ำหน้าเทคโนโลยีที่มีอยู่ในขณะนั้นมาก อย่างไรก็ดี ในปีเดียวกันนั้น Synge ตอบกลับไอน์สไตน์ไปด้วยความมั่นใจว่า “*Sure that some idea of the kind will be made use of ultimately, but it obviously requires to drop into the brain of an experimental genius.*”

ในช่วงแรกการพิสูจน์หลักการ (Proof of Principle) ของ Near-field Microscopy นั้นทำได้ที่ความถี่ไมโครเวฟเท่านั้น[5], [6] เนื่องจากเป็นคลื่นที่มีความยาวคลื่นสูง ทำให้สามารถสร้างเข็มวัด และวางเข็มวัดที่ระยะที่สั้นกว่าความยาวคลื่นได้ง่าย โดยความละเอียดที่ได้นั้น แม้จะน้อยกว่าความยาวคลื่นตามหลักการของ near-field แต่ก็ไม่ได้ความละเอียดในระดับนาโนเมตร อย่างไรก็ดี การพิสูจน์ในส่วนของความถี่ของแสงในช่วงที่ตามองเห็นนั้นไม่สามารถทำได้จนกระทั่ง 50 ปีต่อมา เมื่อมีการคิดค้น Scanning Tunneling Microscope (STM) ในปี ค.ศ. 1981 ซึ่งเป็นเทคโนโลยีสำคัญในการวางเข็มวัดไว้ใกล้วัตถุด้วยความแม่นยำในระดับนาโน ดังนั้นในปี ค.ศ.1982 เพียงแค่หนึ่งปีหลังจากการพัฒนา STM นักวิจัยจากIBM Research Laboratory ประเทศสวิซเซอร์แลนด์ สองท่านคือ Winfried Denk และ Dieter W. Pohl ก็สามารถพัฒนา Near-field Optical Microscope ได้สำเร็จ ผู้ที่สนใจประวัติของSyngeสามารถอ่านรายละเอียดได้ที่เอกสารอ้างอิง [7] และประวัติการพัฒนา Near-field Optics จากเอกสารอ้างอิง [4]

ปัจจุบัน Near-field Microscopy ได้แตกแขนงเป็นสาขาต่างๆ มากมาย เช่น การสร้างกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้หลักการของ Near-field Microscopy ผสมผสานกับ Atomic Force Microscopy (AFM) เกิดเป็นอุปกรณ์ที่มีความสามารถทั้ง AFM และ Near-field Microscopy เช่น Near-field Optical Microscope (NSOM), Scanning Microwave Microscope (SMM) เป็นต้น กล้องจุลทรรศน์เหล่านี้มีประโยชน์ต่อการศึกษาคุณสมบัติของสารในระดับนาโน ซึ่งมักจะมีคุณสมบัติต่างจาก ระดับไมโคร



รูปที่ 3 เข็มที่ใช้ใน SMM ผลิตโดยใช้ MEMS technology ส่วนที่เป็นปลายแหลม (tip) ทำจากแพลตินั่มโดยเครื่อง Focus-ion Beam (FIB)

Near-field Microscopy อีกสาขาหนึ่งคือการศึกษาคุณสมบัติของคลื่นใน near-field ที่มีการรวมพลังงานไว้ที่จุดเล็กๆ ซึ่งปฏิกิริยาของคลื่นกับสารนั้นต่างจากคลื่นใน far-field จึงทำให้เกิดสาขา Nano-optics, Nano-photonics, Nanoplasmonics [8], และSingle Molecule Spectroscopy เป็นต้น นอกจากนี้ยังรวมไปถึงการพัฒนา Ultra-sensitive Detection และ Nano-attenna [9] อีกด้วย

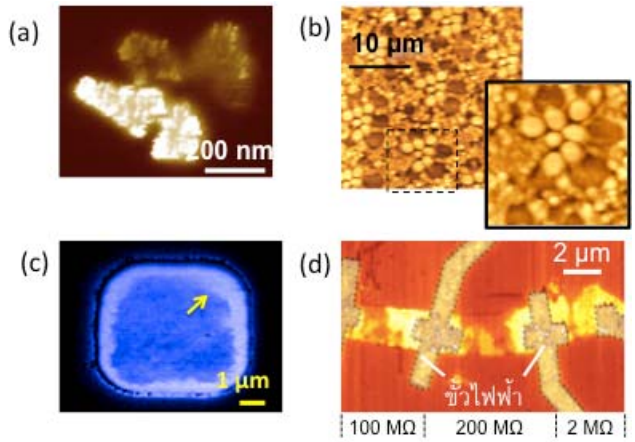
จะเห็นได้ว่าแนวความคิดของSyngeนับเป็นจุดเริ่มต้นของงานวิจัยมากมายในหลายสาขาจนไม่สามารถนำมายกตัวอย่างในที่นี้ได้ทั้งหมด ถึงแม้ว่า Synge จะไม่ได้มีอาชีพเป็นนักวิจัยตั้งแต่ต้น อย่างไรก็ดี เป็นที่น่าเสียดายที่เพียงไม่กี่ปีหลังจากการเริ่มต้นทำงานสาขาวิทยาศาสตร์ Synge มีปัญหาทางประสาท จึงต้องใช้บั้นปลายของชีวิตในสถานพยาบาลในกรุงดับลิน

Scanning Microwave Microscopy (SMM)

ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นว่า หลักการของ Near-field Microscopy นั้นได้ถูกพิสูจน์ให้เห็นครั้งแรกที่ความถี่ไมโครเวฟ ด้วยเหตุผลว่าคลื่นไมโครเวฟมีความยาวคลื่นสูง (ประมาณ 0.03 – 0.3 เมตรในอากาศ) จึงสามารถตรวจจับคลื่นอีวาเนสเซนส์ได้ง่าย นอกจากนี้ ความถี่ไมโครเวฟยังเป็นความถี่ที่ใช้ในการสื่อสารโทรคมนาคม ดั้งนั้นการศึกษาสมบัติของสสารที่ความถี่ไมโครเวฟจึงมีความสำคัญต่อเทคโนโลยี นักวิจัยจึงมีความพยายามในการพัฒนา Scanning Microwave Microscopy (SMM) เพื่อเป็นกล้องจุลทรรศน์อเนกประสงค์ โดยในช่วงแรกใช้เข็มวัดที่ยื่นออกจาก Microwave Cavity (รูปที่ 2) หรือใช้ ปลายของ Transmission Line [10]อย่างไรก็ดี เข็มวัดชนิดนี้มีขนาดใหญ่ ค่าความละเอียดจึงไม่สูงมาก อีกทั้งยังไม่เสถียรเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ต่อมาจึงได้มีการใช้ “เทคโนโลยีเมมส์” Micro-Electro-MechanicalSystem (MEMS) มาใช้ในการผลิตเข็มที่มีขนาดเล็กลงและความละเอียดที่สูงขึ้น (10-100 นาโนเมตร) อีกทั้งสามารถใส่เข้าไปในแพลตฟอร์มของ AFM ได้[11] รูปที่ 3 เป็นตัวอย่างของเข็มที่ใช้ใน SMM จาก Stanford University ต่อมาบริษัท Agilent Technology Inc. เป็นบริษัทแรกที่ผลิตอุปกรณ์ SMM บน AFM แพลตฟอร์ม ออกมาจำหน่าย

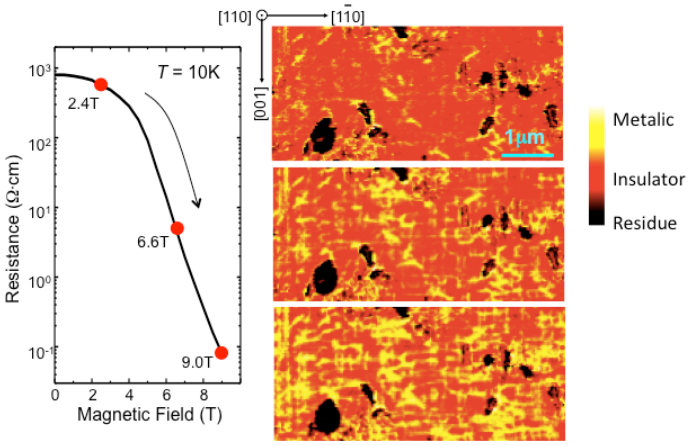
ผู้เขียนได้มีส่วนร่วมในการพัฒนากล้องจุลทรรศน์ SMM เพื่อประยุกต์ใช้ในการศึกษาสสารทั้งที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิต่ำ โดยคุณสมบัติพิเศษของ SMM คือความสามารถในการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) และค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ค่าสองค่านี้ เป็นค่าที่มีความสำคัญสำหรับการศึกษาคุณสมบัติเชิงไฟฟ้าของสสาร แต่มีอุปกรณ์น้อยชิ้นที่สามารถวัดค่าเหล่านี้ได้ที่ความละเอียดระดับนาโน ดังนั้น SMM จึงมีประโยชน์หลากหลาย ทั้งในสาขา ฟิสิกส์ประยุกต์ วิศวกรรมไฟฟ้า วัสดุศาสตร์ และฟิสิกส์สสารควบแน่น (Condensed matter Physics) ในที่นี้ขอยกตัวอย่างการประยุกต์ใช้กล้องจุลทรรศน์ชนิดนี้ในงานวิจัยมาสี่ตัวอย่าง รูปที่ 4(a) คือแกรฟีน (Graphene) สังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมี ซึ่งมักจะมีค่าความต้านทานสูงกว่า วิธีที่ใช้สก๊อตเทป ภาพที่ได้จากการวัดด้วย SMM แสดงให้เห็นได้ว่า บางจุดของชิ้นแกรฟีนซึ่งเป็นส่วนบกพร่อง (defect) มีสีเข้ม ซึ่งเป็นจุดที่มีความต้านทานสูง [12]รูปที่ 4(b) แสดงให้เห็นโครงสร้างของเซลล์ส่วนตาของแมลงที่เรียกว่า **Drosophila compound eyes**ซึ่งเป็นการใช้ SMM เพื่อเป็นกล้องจุลทรรศน์ความละเอียดสูง คล้ายกับกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง [13]รูปที่

4(c) คือ Two-dimentional Electron Gas ใน GaAsHeterostructure ที่อุณหภูมิ 2 K ภายใต้สนามแม่เหล็ก 6.24 T ในภาพแสดงการก่อตัวของ Edge State [14]ซึ่งเป็นลักษณะพิเศษของQuantum Hall Effectซึ่งเป็นปรากฏการณ์ทางควันตัมฟิสิกส์ที่สำคัญค้นพบโดย Klaus von Klitzingและได้รับรางวัลโนเบลในปีค.ศ. 1985 รูปที่ 4(d)เป็นภาพของ In_2Se_3Nanoribbon**บนฟิล์ม** $SiO_2In_2Se_3$**เป็นสารจำพวก**Phase-change Material **สารชนิดนี้มีหลายเฟสที่อุณหภูมิห้องและในแต่ละเฟสมีความต้านทานที่ต่างกันคุณสมบัตินี้ทำให้สารกลุ่มนี้เหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์เก็บข้อมูลภาพจาก** MIM **แสดงให้เห็นว่าริบบินนาโนชิ้นนี้มีส่วนที่มีการนำไฟฟ้าต่างกัน โดยสีเหลืองหมายถึงมีความนำไฟฟ้าสูง ส่วนสีแดงมีความนำไฟฟ้าต่ำ ด้านล่างของภาพคือความต้านทานที่วัดได้จาก ขั้วไฟฟ้าทั้งสี่ขั้ว ซึ่งมีค่าต่างกัน จะเห็นได้ว่า ค่าที่ได้จากการวัดความต้านทานสอดคล้องกับภาพ** MIM **อย่างเช่นตรงกลางของริบบินนี้ มีความต้านทานสูง เพราะว่ามีส่วนที่มีสีแดงเป็นส่วนใหญ่ ส่วนด้านขวาของริบบินมีความต้านทานต่ำ เพราะว่ามีส่วนที่มีสีเหลืองเป็นส่วนใหญ่ [15]**



รูปที่ 4 การใช้ SMM เพื่อศึกษาสารชนิดต่างๆ (a) แกรฟีน (b) Drosophila compound eyes (c) **ลูกศรชี้ตรง** Edge State **ของ** Two-dimensional Electron Gas **ใน** GaAs Heterostructure (d) In_2Se_3Nanoribbon **ด้านล่างของภาพแสดง คือความต้านทานที่วัดได้ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสี่ขั้ว**

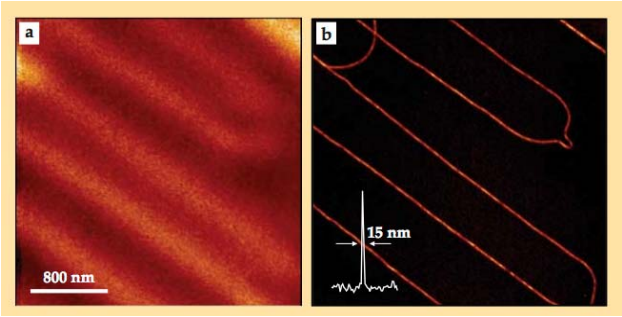
งานวิจัยหลักของผู้เขียนคือการใช้กล้องจุลทรรศน์ SMM ในการศึกษาสารในกลุ่มสารประกอบ Manganese Oxideซึ่งสารในกลุ่มนี้มีปรากฏการณ์ Colossal Magnetoresistance (CMR) ผู้อ่านน่าจะคุ้นเคยกับปรากฏการณ์ Giant Magnetoresistance (GMR) ค้นพบโดย Albert Fert และ Peter Grünberg และเป็นหัวข้อที่ได้รับรางวัลโนเบลในปี 2007 ปรากฏการณ์ CMR นั้นคล้ายกับ GMR คือ ความต้านทานของสาร เปลี่ยนแปลงในสนามแม่เหล็ก ต่างกันที่ใน CMR นั้นความต้านทานเปลี่ยนแปลงหลายสิบเท่า รูปที่ 5ทางด้านขวาเป็นตัวอย่างของความต้านทาน ของสารประกอบ Manganese Oxide มีสูตรทางเคมีว่า $Nd_{0.5}Sr_{0.5}MnO_3$ฟิลม์บนพื้นผิวของ $SrTO_3$ที่อุณหภูมิ 10 K ภายใต้สนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นจาก 0 T ไปยัง9 T จะเห็นได้ว่าความต้านทานลดลงจาก 1000 kΩเป็น 0.1 Ωอย่างไรก็ดีฟิสิกส์ของ CMR นั้นต่างกับ GMR เพราะว่าสารประกอบ Manganese Oxide เหล่านี้ถือเป็น Strongly Correlated Material คือปฏิกิริยาระหว่างอีเล็กตรอนในสสารเหล่านี้มีค่าสูงไม่สามารถใช้โมเดล Free Electron ได้



รูปที่ 5 Metal-to-Insulator Transition **ใน สนามแม่เหล็กของฟิล์ม** $Nd_{0.5}Sr_{0.5}MnO_3$ทางด้านซ้ายคือกราฟความต้านทานในฟังชั่นของสนามแม่เหล็กรูปทางขวาจากบนลงล่างคือภาพ SMM ที่สนามแม่เหล็ก 2.4 T, 6.6 T และ 9 T ตามลำดับสีเหลืองคือเฟสโลหะ สีแดง คือ เฟสฉนวน และสีดำ คืออนุภาคบนผิวของฟิล์ม ลูกศรแสดงแกนผลึกของฟิล์มชิ้นนี้

ปรากฏการณ์ CMR ในสารประกอบ Manganese Oxide นั้นเป็นผลพวงจากการเกิด Metal-to-Insulator Transition (MIT)คือการเปลี่ยนจากเฟสฉนวน (Insulating Phase)เป็นเฟสโลหะ (Metallic Phase)คล้ายๆกับการเปลี่ยนสถานะของน้ำจากของแข็งเป็นของเหลว ซึ่ง MIT สามารถกระทำได้โดยการเปลี่ยน

สนามแม่เหล็ก หรือ อุณหภูมิ เป็นต้น ลักษณะพิเศษของสารประกอบ Manganese Oxide คือการมีอยู่ร่วมกัน (phase co-existence) ของเฟสฉนวน และเฟสโลหะ ในระหว่างMIT การศึกษาการมีอยู่ร่วมกันระหว่างสองเฟสนั้นสามารถทำได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ SMM รูปที่ 5 ทางด้านขวาเป็นภาพที่ได้จากศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์ SMM ที่สนามแม่เหล็ก 2.4 T, 6.6 T และ 9 T ที่จุดจุดเดียวกัน โดยเฟสฉนวนคือสีแดงเฟสโลหะคือสีเหลืองและสีดำคืออนุภาคบนพื้นผิวของสารซึ่งใช้เป็นจุดอ้างอิงจะเห็นได้ว่าที่สนามแม่เหล็ก 2.4 T นั้นมีเฟสโลหะเพียงเล็กน้อย จึงความต้านทานสูง ที่สนามแม่เหล็ก 9 T เฟสโลหะเพิ่มจำนวนขึ้น และต่อกันเป็นเครือข่ายทำให้ความต้านทางลดลงอย่างรวดเร็ว โดยที่เนื้อที่บางส่วนยังเป็นเฟสฉนวนอยู่นอกจากนี้การก่อตัวของเฟสโลหะยังมีลักษณะเป็นเส้นเรียงตัวตามแกนของผลึก [001] และ [1$\underline{1}$0]บ่งบอกถึงอิทธิพลของแรงเครียดจากพื้นผิวของ $SrTiO_3$ต่อ MIT จะเห็นได้ว่าสำหรับสารประกอบ Manganese Oxide การศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์ SMM นั้นได้ข้อมูลมากกว่าการศึกษาโดยการวัดความต้านทาน (Transport Study) เป็นอย่างมาก[16]



รูปที่ 6: Single-wall Carbon Nanotube จาก (a) กล้อง Confocal Microscope (b) กล้อง Near-field Microscope ทั้งสองภาพถ่ายที่ตำแหน่งเดียวกัน ณ ความยาวคลื่น 1580 cm^{-1}

Scanning Near-field Optical Microscopy (SNOM)

ปัจจุบัน SNOM ก็ถูกนำไปผสานรวมกับเครื่อง AFM เช่นกัน โดยมักจะใช้เลเซอร์ที่สามารถ เปลี่ยนความยาวคลื่นได้เป็นแหล่งกำเนิดแสงทำให้อุปกรณ์ชนิดนี้ เป็นได้ทั้ง Microscopy และ Spectroscopy หมายความว่ามีความละเอียดสูง (ประมาณ 10 นาโนเมตร) และสามารถใช้ศึกษาอันตรกิริยาของสารกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความยาวคลื่นต่างๆได้ รูปที่ 6 แสงภาพถ่ายเปรียยเทียบความละเอียดของกล้องจุลทรรศน์ใน Far-field และ Near-field ที่ความยาวคลื่นเดียวกัน ในภาพคือSingle-wall Carbon Nanotube ที่จุดจุดเดียวกัน โดยใช้ Confocal Microscope ในรูป 6(a) และ ใช้ Near-field Microscope ในรูป 6(b) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความละเอียดที่สูงกว่า ของกล้องจุลทรรศน์ Near-field อย่างชัดเจน (อ้างอิงจาก [9])

บทสรุป

ที่กล่าวมาข้างต้นเป็นเพียงแค่ตัวอย่างของการใช้หลักการของ Near-field Microscopy เพื่อพัฒนากล้องจุลทรรศน์ชนิดต่างๆ โดยไม่ได้จำกัดที่แสงในช่วงที่ตามองเห็น จะเห็นได้ว่าการใช้หลักการของ Near-field Microscopy ไม่เพียงแต่สามารพัฒนาความละเอียดของกล้องจุลทรรศน์ให้สามารถมองเห็นโครงสร้างที่เล็กลง แต่ยังให้ข้อมูลเพิ่มเติมจากอันตรกิริยาระหว่างสสารกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้เราสามารถเรียนรู้ฟิสิกส์ของสารนั้นๆ มากขึ้น ซึ่งมีประโยชน์ต่องานวิจัยทั้งสายประยุกต์ และสายบริสุทธิ์ เนื่องจากพื้นที่มีจำกัดผู้เขียนจึงละรายละเอียดบางอย่างไว้ ซึ่งผู้อ่านสามารถอ่านเพิ่มเติมได้จากเอกสารอ้างอิงในส่วนท้าย

ผู้เขียนขอขอบคุณ รุ่นทิวา เมธาอาภานนท์และคุณ มนรวี แป้นเจริญ ผู้เขียนจบการศึกษาระดับปริญญาตรีจาก Physics Department, Brown Unversity, USA ขณะนี้กำลังศึกษาอยู่ที่ Applied Physics Department, Stanford University, USA โดยทำงานวิจัยเกี่ยวข้องกับพัฒนาและการประยุกต์ใช้ Near-field Microwave Microscopy โดยเฉพาะการศึกษาสารประกอบ Manganese Oxide ผู้ใดสนใจที่จะใช้กล้องจุลทรรศน์ชนิดนี้สามารถติดต่อได้ที่ wkundhik@stanford.edu

เอกสารอ้างอิง

[1] G. Binnig, H. Rohrer, C. Gerber, and E. Weibel, “Surface Studies by Scanning Tunneling Microscopy,” *Physical Review Letters*, vol. 49, no. 1, pp. 57-61, Jul. 1982.

[2] พิศิษฐ สิงห์ใจ, “ฟิสิกส์ของ AFM: กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (1),” *วารสารฟิสิกส์ไทย*, 2547.

[3] Z. Wang, “Evanescent microwave probe: applications and implications,” Stanford University. Dept. of Physics, Stanford, CA, 2004.

[4] N. Lukas, “Chapter 5 The history of near-field optics,” vol. 50, Elsevier, 2007, pp. 137-184.

[5] R. F. Soohoo, “A Microwave Magnetic Microscope,” *Journal of Applied Physics*, vol. 33, p. 1276, 1962.

[6] E. A. Ash and G. Nicholis, “Super-resolution Aperture Scanning Microscope,” *Nature*, vol. 237, no. 5357, pp. 510-512, Jun. 1972.

[7] Dennis McMullan, “The prehistory of scanned image microscopy. Part I: Scanned optical micro-scopes,” *Royal Microscopical Society Proceedings*, vol. 25, no. 2, pp. 127-131, 1990.

[8] M. I. Stockman, “Nanoplasmonics: The physics behind the applications,” *Physics Today*, vol. 64, p. 39, 2011.

[9] L. Novotny, “From near-field optics to optical antennas,” *Physics Today*, vol. 64, p. 47, 2011.

[10] S. Kalinin, S. V. Kalinin, and A. Gruverman, *Scanning probe microscopy: electrical and electromechanical phenomena at the nanoscale*. Springer, 2007.

[11] K. Lai, W. Kundhikanjana, M. A. Kelly, and Z.-X. Shen, “Nanoscale microwave microscopy using shielded cantilever probes,” *Applied Nanoscience*, vol. 1, pp. 13-18, Apr. 2011.

[12] W. Kundhikanjana, K. Lai, H. Wang, H. Dai, M. A. Kelly, and Z.-xun Shen, “Hierarchy of Electronic Properties of Chemically Derived and Pristine Graphene Probed by Microwave Imaging,” *Nano Letters*, vol. 9, no. 11, pp. 3762-3765, Nov. 2009.

[13] K. Lai, M. B. Ji, N. Leindecker, M. A. Kelly, and Z. X. Shen, “Atomic-force-microscope-compatible near-field scanning microwave microscope with separated excitation and sensing probes,” *Review of Scientific Instruments*, vol. 78, no. 6, pp. 063702-5, Jun. 2007.

[14] K. Lai, W. Kundhikanjana, M. A. Kelly, Z.-X. Shen, J. Shabani, and M. Shayegan, “Imaging of Coulomb-Driven Quantum Hall Edge States,” *Physical Review Letters*, vol. 107, no. 17, p. 176809, Oct. 2011.

[15] K. Lai ,H. Peng, W. Kundhikanjana, D. T. Schoen, C. Xie, S. Meister, Y. Cui, M. A. Kelly and Z.X. Shen, “Nanoscale Electronic Inhomogeneity in In2Se3 Nanoribbons Revealed by Microwave Impedance Microscopy,” *Nano Letters*, vol. 9, no. 3, pp. 1265-1269, Mar. 2009.

[16] K. Lai, M. Nakamura, W. Kundhikanjana, M. Kawasaki, Y. Tokura, M. A. Kelly,and Z.X. Shen , “Mesoscopic Percolating Resistance Network in a Strained Manganite Thin Film,” *Science*, vol. 329, no. 5988, pp. 190-193, Jul. 2010.

ไฟ(ฟ้า)ใต้น้ำ

สุรเชษฐ์ หลิมกำเนิด[1]

ระหว่างที่เขียนบทความนี้ประเทศของเรากำลังเผชิญหน้ากับอภิมหาอุทกภัยที่ว่ากันว่ายิ่งใหญ่ที่สุดในรอบศตวรรษ จากข่าวตามหน้าหนังสือพิมพ์ฉบับนี้ (24 พ.ย. 2554) มีผู้เสียชีวิตอันมีสาเหตุมาจากน้ำท่วมมากกว่า 600 รายแล้ว และกว่า 100 รายในจำนวนนั้นเสียชีวิตจากกรณีไฟฟ้าลัดวงจร จากปัญหาดังกล่าว หลายหน่วยงานซึ่งรวมทั้งภาควิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยได้มีการประดิษฐ์อุปกรณ์วัดกระแสไฟฟ้ารั่ว เพื่อผู้ประสบภัยจะได้ใช้เป็นเครื่องมือเบื้องต้นในการป้องกันอันตรายจากไฟช็อต อุปกรณ์เหล่านี้อยู่ในรูป ไม้วัดทดสอบไฟรั่ว กระทงวัดไฟฟ้า หรือแม้กระทั่งไขควงวัดไฟที่ขายทั่วไปตามท้องตลาด ผู้เขียนจึงเห็นควรว่าน่าจะมีการศึกษาทางทฤษฎีเกี่ยวกับกรณีไฟรั่วใต้น้ำเอาไว้บ้าง เพื่อประกอบการตัดสินใจใช้งานอุปกรณ์วัดไฟฟ้าต่าง ๆ เหล่านี้ ให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและความปลอดภัยสูงสุด

เต้าปลั๊กไฟตัวเมียที่พบกันทั่วไปตามบ้านเราจะมีรูเสียบสองรูเป็นอย่างน้อย รูหนึ่งจะเป็น Live ส่วนอีกรูจะเป็น Neutral ซึ่งรูด้าน Live เป็นด้านเดียวที่มี‘ไฟ’อยู่ สิ่งที่เราต้องการทราบเกี่ยวกับไฟฟ้าที่รั่วอยู่ใต้น้ำก็คือความต่างศักย์ภายในน้ำที่บริเวณต่าง ๆ โดยกระแสไฟฟ้าจะวิ่งในแนวตั้งฉากกับผิวสมศักย์จากตัวปลั๊กไปยังจุดอื่น ๆ เพื่อความง่ายในการหารูปร่างหน้าตาของสนามศักย์ภายใต้น้ำ ในการคำนวณชั้นต้นเราจะสมมติว่ารู Live นี่แหละที่จมน้ำที่ระดับความลึก L และจะแทนตัวรูด้วยประจุไฟฟ้าขนาด Q ซึ่งลอยอยู่เหนือพื้นที่ทำหน้าที่เป็นดินหรือสายดิน (ground) ที่ระยะ h ปัญหาดังกล่าวสามารถแปลงเป็นโจทย์ทางไฟฟ้าได้ดังนี้

“จงคำนวณหาสนามศักย์ $V(x,y)$ เนื่องจากประจุขนาด Q ภายในบริเวณฉนวนที่มีค่าไดอิเล็กตริก (dielectric) ϵ_w หนา L โดยด้านหนึ่งประกบด้วยแผ่นโลหะที่มีศักย์ไฟฟ้าเป็น 0 ส่วนอีกด้านหนึ่งประกบกับฉนวนอีกประเภทหนึ่ง (อากาศ) ที่มีค่าไดอิเล็กตริก ϵ_a”

วิธีการที่ง่ายที่สุดในการแก้โจทย์ในลักษณะนี้คือการใช้เทคนิคประจุเสมือน (Image charge) ที่อยู่ในแบบเรียนพื้นฐานของวิชาไฟฟ้าและแม่เหล็กในระดับปริญญาตรีทั่วไป [1,2] แต่ที่พิเศษขึ้นมาหน่อยก็ตรงที่เงื่อนไขขอบมีสองด้านและแตกต่างกัน [3] เราลองมาพิจารณาเงื่อนไขขอบกันอย่างละเอียดนะครับ

เงื่อนไขขอบ

- รอยต่อระหว่าง พื้น-น้ำ (ระนาบ x-y ที่ความสูง $z=0$)

เนื่องจากเรากำหนดให้พื้นเป็น ground ค่าของศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณนี้จึงถูกตรึงอยู่ที่ $V(z=0)=0$ โดยผิวรอยต่อทำตัวเป็นผิวสมศักย์ผิวหนึ่ง สนามไฟฟ้าที่บริเวณผิวนี้ ($z=0^+$) จำเป็นต้องตั้งฉากกับผิวตลอดระนาบ

- รอยต่อระหว่าง น้ำ-อากาศ (ระนาบ x-y ที่ความสูง $z=L$)

ที่บริเวณนี้ สนามไฟฟ้าในแนวขนานกับผิวต้องต่อเนื่องจากน้ำไปยังอากาศ ($E_{//}^w = E_{//}^a$) เช่นเดียวกับการกระจัดไฟฟ้า (Displacement current) ในแนวตั้งฉากกับผิว ($D_{\perp}^w = D_{\perp}^a$) โดยเงื่อนไขทั้งคู่เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\left.\frac{\partial V^a}{\partial r}\right|_{z=L^+} = \left.\frac{\partial V}{\partial r}\right|_{z=L^-}, \qquad \epsilon_a \left.\frac{\partial V^a}{\partial z}\right|_{z=L^+} = \epsilon_w \left.\frac{\partial V}{\partial z}\right|_{z=L^-} \tag{1}$$

ในที่นี้ V^a แทนสนามศักย์บริเวณอากาศเหนือน้ำ ค่าไดอิเล็กตริกสำหรับน้ำที่อุณหภูมิห้องอยู่ที่ประมาณ $\epsilon_w \approx 80$ ส่วนของอากาศอยู่ที่ $\epsilon_a \approx 1$ [4] เราจะใช้พิกัดทรงกระบอก (Cylindrical coordinates) (r,z) ในการแก้ปัญหาเนื่องจากระบบของเรามีสมมาตรรอบเส้นตรงแนวดิ่งที่วิ่งผ่านประจุ

[1] อาจารย์ (อ. ดร.) ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ควรวางประจุเสมือนที่ตำแหน่งใด ด้วยขนาดเท่าไร?

หัวใจหลักในการแก้ปัญหาด้วยเทคนิค Image charge อยู่ที่ตำแหน่งและวิธีการในการวางประจุเสมือนโดยยังคงอนุรักษ์เงื่อนไขขอบเอาไว้ สำหรับโจทย์ข้อนี้ เราสามารถหาตำแหน่งที่ควรวางประจุเสมือนได้โดยการคิดว่า เงื่อนไขขอบทั้งสองด้านเปรียบเสมือนกระจกสองบาน กระจกบานล่างที่ตำแหน่ง ground ($z=0$) เป็นกล้าย 'กระจกเงา' ที่สะท้อนแสงได้เต็มที่ ส่วนกระจกบานบนที่ตำแหน่งอากาศ ($z=L$) ทำตัวเสมือน 'กระจกขุ่น' ที่สะท้อนแสงบางส่วนพร้อมปล่อยให้แสงส่วนที่เหลือหลุดลอดออกไปเหนือน้ำได้ ตำแหน่งที่ควรนำประจุเสมือนไปวางคือตำแหน่งภาพของประจุที่สะท้อนไปมาระหว่างกระจกทั้งสองบานนี้ กล่าวคือ ประจุเสมือนมีจำนวนไม่จำกัด และมีขนาดของประจุแตกต่างกันไปตามตำแหน่งที่วาง ตัวอย่างเช่น กระจก ground สะท้อนประจุที่ตำแหน่ง h ไปปรากฏยังตำแหน่ง $-h$ และประจุทั้งคู่ก็ถูกสะท้อนโดยกระจกขุ่นด้านบนไปยังตำแหน่ง $2L+h$ และ $2L-h$ ฯลฯ สรุปได้ว่า ตำแหน่งของประจุทั้งหมดอยู่ที่

$$z_i=(-1)^i h+2\lceil i/2L\rceil, \qquad i=0,\pm1,\pm2,\ldots$$

โดยที่ $i=0$ แสดงถึงตัวประจุจริงและเครื่องหมาย $\lceil\ \rceil$ แสดงถึง Ceiling function หรือกระบวนการหารแล้วปัดเศษขึ้น (ซึ่งมักพบร่วมกับ Floor function, $\lfloor\ \rfloor$, หรือการหารแล้วปัดเศษลง)

ขนาดของประจุเสมือนจะมีค่าเปลี่ยนไปขึ้นกับตำแหน่งและจำนวนครั้งที่เกิดการสะท้อน ประจุเสมือนที่ปรากฏภาพจากผิว ground จะมีขนาดเป็นค่าลบของคู่ของมันก่อนสะท้อน เช่น จาก q เป็น $-q$ ส่วนประจุเสมือนในกระจกขุ่นด้านผิวอากาศ จะมีขนาดเปลี่ยนไปจากเดิมด้วยสัมประสิทธิ์ α ซึ่งเราจะหาค่าของมันต่อไป ตามตำแหน่งที่แสดงข้างต้น ขนาดของประจุเป็นไปตามลำดับ:

$$Q_i=(-1)^{\lfloor i/2\rfloor}\alpha^{\lfloor(|i|+\Theta[i])/2\rfloor}Q$$

โดยเรานิยามฟังก์ชัน $\Theta[i]=1$ สำหรับ $i\geq 0$ และ $\Theta[i]=0$ สำหรับ $i<0$ และ $Q_0=Q$ แทนขนาดของประจุจริง

สนามศักย์ใต้น้ำและเหนือน้ำ

ค่าของสนามศักย์ $V(r,z)$ สามารถคำนวณได้จากผลบวกของศักย์จากจุดประจุทั้งจริงและเสมือน ดังนี้

$$V(r,z)=\frac{1}{4\pi\epsilon_w}\sum_{i=-(N-1)}^{N}\frac{Q_i}{\sqrt{(z-z_i)^2+r^2}} \qquad (2)$$

ค่าของอนุกรมจะลู่สู่ค่าจริงทางทฤษฎีในลิมิตของ $N\to\infty$ ในชั้นต้นเราจะเห็นว่าเงื่อนไขขอบแรก ($V(z=0)=0$) เกิดจากการที่ประจุที่ตำแหน่ง i ให้ค่าสนามหักล้างกับประจุที่ตำแหน่ง $-(i+1)$ ในทุกจุดตลอดระนาบนี้

เงื่อนไขขอบที่สองต้องใช้ความพยายามนิดหน่อยในการพิจารณา ขั้นแรกเราต้องคำนวณสนามศักย์ $V^a(r,z)$ บนอากาศก่อน เพื่อจะทำการหาค่า α ที่ทำให้อนุพันธ์ในแนวขนานของทั้งสองฝั่งเชื่อมกันได้พอดีตามสมการข้างต้น ตำแหน่งและขนาดของประจุเสมือนบริเวณเหนือน้ำมีความต่างจากบริเวณใต้น้ำอยู่บ้าง ลองสมมติตัวเองว่าอยู่เหนือน้ำแล้วมองลงไปใต้ผิวน้ำซึ่งทำตัวเหมือนกระจกขุ่น ภาพที่เห็นจะเป็นประจุเสมือนที่เรียงตัวกันในแนวยาว ตามสมการ $z_i^a=z_i$ เฉพาะค่า $i=0,-1,-2,\ldots$ เท่านั้น ขนาดของประจุเหล่านี้ลดลงจากในกรณีที่อยู่ใต้น้ำแม้ว่าทุกตัวจะอยู่ที่ตำแหน่งเดิมเมื่อเทียบกับกรณีใต้น้ำ ทั้งนี้เนื่องจาก 'อำนาจ' ของประจุโดนลดกำลังลงจากการส่งผ่านระนาบกระจกมัวออกมาเหนืออากาศ กำหนดให้ขนาดของประจุที่ทะลุออกมามีค่าลดลงด้วยอัตรา β ซึ่งหมายความว่า $Q_i^a=\beta Q_i$ สำหรับ $i\leq 0$ จะได้ว่า

$$V^a(r,z)=\frac{1}{4\pi\epsilon_a}\sum_{i=-(N-1)}^{0}\frac{\beta Q_i}{\sqrt{(z-z_i)^2+r^2}} \qquad (3)$$

คราวนี้เราก็พร้อมแล้วในการหาค่า α และ β จากเงื่อนไขขอบระหว่างน้ำและอากาศ จากสมการความต่อเนื่องของอนุพันธ์ของศักย์ในแนวขนานระหว่างสองตัวกลาง จะได้ว่า

$$\left.\frac{\partial V^a}{\partial r}\right|_{z=L^+}=\left.\frac{\partial V}{\partial r}\right|_{z=L^-}$$

$$-\frac{1}{4\pi\epsilon_a}\sum_{i=-(N-1)}^{0}\frac{\beta Q_i r}{\left((L-z_i)^2+r^2\right)^{3/2}}=-\frac{1}{4\pi\epsilon_a}\sum_{i=-(N-1)}^{N}\frac{Q_i r}{\left((L-z_i)^2+r^2\right)^{3/2}} \qquad (4)$$

เนื่องจากจำนวนพจน์ของอนุกรมทั้งสองข้างของสมการแตกต่างกัน ก่อนจะดำเนินการต่อเราควรจัดการให้ค่าดังกล่าวเท่ากันก่อน โปรดสังเกตว่า

$$z_i=-z_{1-i}+2L, \qquad Q_i=\alpha Q_{1-i}$$

ทำให้เราเปลี่ยนรูปอนุกรมทางขวามือของสมการ (4) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\sum_{i=-(N-1)}^{N}\frac{Q_i r}{\left((L-z_i)^2+r^2\right)^{3/2}} &= \sum_{i=-(N-1)}^{0}\frac{Q_i r}{\left((L-z_i)^2+r^2\right)^{3/2}}+\sum_{i=1}^{N}\frac{Q_i r}{\left((L-z_i)^2+r^2\right)^{3/2}}\\ &= \sum_{i=-(N-1)}^{0}\frac{Q_i r}{\left((L-z_i)^2+r^2\right)^{3/2}}+\sum_{i=1}^{N}\frac{\alpha Q_{1-i} r}{\left((L+z_{1-i}-2L)^2+r^2\right)^{3/2}}\\ &= \sum_{i=-(N-1)}^{0}\frac{Q_i r}{\left((L-z_i)^2+r^2\right)^{3/2}}+\sum_{i=-(N-1)}^{0}\frac{\alpha Q_i r}{\left((z_i-L)^2+r^2\right)^{3/2}}\\ &= \sum_{i=-(N-1)}^{0}\frac{(1+\alpha)Q_i r}{\left((L-z_i)^2+r^2\right)^{3/2}}\end{aligned}$$

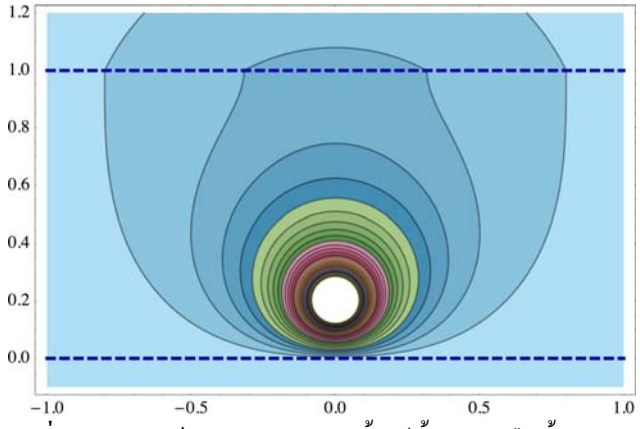
ดังนั้นอนุกรมทั้งสองฟากของสมการ (4) จะเท่ากันในทุก ๆ พจน์ก็ต่อเมื่อ

$$\frac{1+\alpha}{\epsilon_w}=\frac{\beta}{\epsilon_a}$$

ในลักษณะเดียวกันสมการ $\epsilon_a \partial V^a/\partial z|_{z=L^+} = \epsilon_w \partial V/\partial z|_{z=L^-}$ จะให้ความสัมพันธ์ $\beta = 1-\alpha$ (ซึ่งสอดคล้องกับการตีความของเราในการนิยาม α และ β ที่ทำหน้าที่คล้ายคลึงกับสัมประสิทธิ์การสะท้อนและการส่งผ่านของแสง) สรุปได้ว่า

$$\alpha=\frac{\epsilon_w-\epsilon_a}{\epsilon_w+\epsilon_a},\qquad \beta=\frac{2\epsilon_a}{\epsilon_w+\epsilon_a}$$

เมื่อนำทั้งคู่ไปแทนในค่าของลำดับ Q_i ในสมการ (2) และ (3) จะให้ศักย์ไฟฟ้าทั้งใต้น้ำและเหนือน้ำ จุดสำคัญอยู่ที่ว่าเงื่อนไขขอบทั้งสองได้รับการตอบสนองพจน์ต่อพจน์ ทำให้ถึงแม้ว่าเราจะรวมอนุกรมไม่ถึงอนันต์ก็ตาม ผลเฉลยจะยังคงความถูกต้องของเงื่อนไขขอบเอาไว้ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการคำนวณใช้งานจริงด้วยจำนวนพจน์ที่จำกัด



รูปที่ 1 ผิวสมศักย์บริเวณรอบประจุทั้งใต้น้ำและเหนือน้ำ ตำแหน่งของประจุอยู่สูงจากพื้นดิน 20 เซนติเมตร (บริเวณส่วนกลางของตำแหน่งสีขาว) เส้นประแสดงตำแหน่งของพื้น (ล่าง) และผิวน้ำ (บน)

รูปที่ 1 แสดงเส้นสมศักย์ในรูปภาคตัดขวางในแนวลึกของน้ำรอบประจุ ตำแหน่งของประจุอยู่สูงจากพื้น 20 เซนติเมตร และระดับน้ำลึก 1.0 เมตร จะเห็นว่าศักย์ไฟฟ้าลดลงอย่างรวดเร็วที่ระยะห่างจากตัวประจุและมีค่าต่ำมากที่บริเวณผิวน้ำ ระยะระหว่างเส้นสมศักย์แสดงถึงความต่างศักย์ซึ่งจะมีค่ามากบริเวณระดับน้ำที่ลึกระดับใกล้เคียงกับตำแหน่งของประจุ

แล้วผลจากผนังบ้านล่ะ?

ในความเป็นจริงคงไม่มีบ้านไหนที่ปลั๊กไฟลอยอยู่กลางบ้านเป็นแน่ ปลั๊กแทบทุกตัวย่อมต้องติดอยู่กับฝาบ้าน เราสามารถจำลองว่าฝาบ้านเป็น Ground อีกตัวหนึ่งซึ่งเชื่อมต่อมาจากพื้น สนามศักย์ที่เราหามาต้องรับการปรับเปลี่ยนเล็กน้อยในกรณีนี้ สมมติว่ากำแพงบ้านวางตัวตามระนาบ y-z ณ ตำแหน่ง $x=0$ และประจุอยู่ที่ $(\delta,0,h)$ ระนาบผนังใหม่จะทำตัวเหมือนกับกระจกเงาอีกบานหนึ่งที่คอยสะท้อนภาพประจุออกมา เราจึงมีประจุเสมือนสองแถวอยู่ห่างกันเป็นระยะ 2δ สนามศักย์ใต้น้ำแบบมีกำแพงมีรูปร่างดังนี้

$$V(x,y,z)=\frac{1}{4\pi\epsilon_w}\sum_{i=-(N-1)}^{N}\frac{Q_i}{\sqrt{(x-\delta)^2+y^2+(z-z_i)^2}}-\frac{Q_i}{\sqrt{(x+\delta)^2+y^2+(z-z_i)^2}}$$

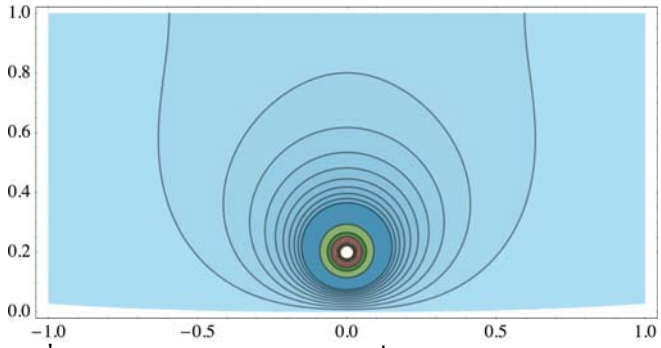
สนามศักย์เหนือน้ำก็สามารถปรับรูปได้จาก V^a ที่มีอยู่แล้วในลักษณะเดียวกัน ค่าของ δ ที่กำหนดเอาไว้นี้ไม่สามารถนำมาหาลิมิตเข้าใกล้ 0 ได้ (แม้ว่าเป็นสิ่งที่น่าจะทำก็ตาม) [5]

จากประจุสู่ทรงกลมตัวนำ

สำหรับผู้ที่อยากเล่นกับไฟจริง ๆ จะพบว่าโจทย์ที่ผู้เขียนตั้งไว้ในตอนต้นค่อนข้างจำกัด การที่เราใช้จุดประจุทำให้เราไม่สามารถควบคุมความต่างศักย์ได้จริง ยิ่งใกล้จุดประจุเข้าเท่าไร ความต่างศักย์จะยิ่งสูงขึ้นจนเป็นอนันต์ หากเราต้องการจำลองสถานการณ์ให้ใกล้เคียงกับความจริงยิ่งขึ้น เราควรสามารถกำหนดศักย์ไฟฟ้าสูงสุด (220 V) เอาไว้ที่บริเวณปลั๊กได้ด้วย ซึ่งเงื่อนไขที่เพิ่มขึ้นนี้สามารถแก้ไขได้โดยการแทนที่ประจุ Q ด้วยตัวนำทรงกลมรัศมี R โดยตรึงศักย์บริเวณผิวของตัวนำไว้ที่ V_m นั่นเอง

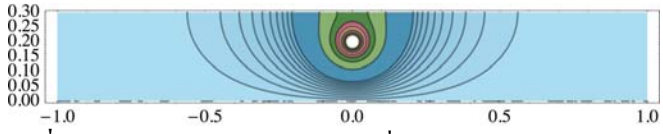
แต่โชคร้ายตรงที่ว่า โจทย์ปรับปรุงใหม่ของเรามีความซับซ้อนทางคณิตศาสตร์ค่อนข้างสูง วิธีการที่(ผู้เขียนคิดว่า)ง่ายที่สุดในการแก้ปัญหาทำได้โดยการแก้ Laplace's equation ใน Bispherical coordinates ซึ่งในพิกัดใหม่นี้ เราสามารถหาผลเฉลยของ Laplace's equation โดยใช้เทคนิคการแยกตัวแปรได้ (Separation of variables) จากนั้นทำการแก้ปัญหาศักย์ระหว่างทรง

กลมตัวนำสองก้อนที่มีศักย์ที่ผิวเป็น V_m และ $-V_m$ (แทนเงื่อนไขขอบระหว่างน้ำกับพื้น [6]) หลังจากที่เราได้สนามศักย์ของระบบคู่ทรงกลมตัวนำแล้ว เราจะทำการคัดลอกคู่ทรงกลมนี้อนันต์ครั้ง คล้ายกับการสะท้อนด้วยกระจกมัวที่ผิวน้ำ โดยแต่ละครั้งของการสะท้อนขนาดของศักย์ที่ผิวทรงกลมเสมือนจะลดลงไปเรื่อย ๆ จะเห็นว่ากระบวนการหลักในการแก้ปัญหายังเหมือนเดิม ผู้เขียนจึงขอแสดงเพียงผลที่ได้จากการคำนวณเท่านั้นดังนี้



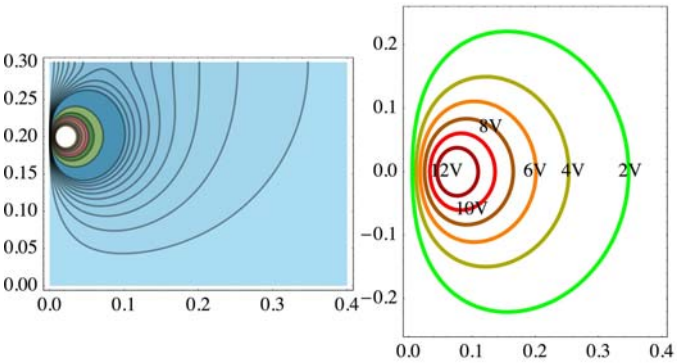
รูปที่ 2 ผิวสมศักย์รอบทรงกลมตัวนำที่มีศักย์ขนาด 220 V รัศมี 2.0 เซนติเมตร และระดับ 80 เซนติเมตรจากผิวน้ำซึ่งมีความลึก 1 เมตร

รูปที่ 2 แสดงศักย์ไฟฟ้าใต้น้ำรอบตัวนำทรงกลมรัศมี 2.0 เซนติเมตร และมีศักย์ขนาด 220 V อยู่บริเวณผิว จุดศูนย์กลางของตัวนำอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกันกับตำแหน่งของประจุในตอนที่แล้ว ลักษณะของเส้นสมศักย์เหมือนกันกับกรณีของประจุ ในภาพแสดงภาคตัดของผิวสมศักย์ในระนาบ x-z ที่ตำแหน่ง $y=0$ โดยศักย์จากรอบนอกสู่ส่วนกลางมีขนาด 2, 4, 6, 8, ..., 20 V จากนั้นขนาดกระโดดเป็น 40, 60, 80, ..., 220 V ตามลำดับ จากภาพจะเห็นว่าความต่างศักย์มีค่าค่อนข้างต่ำจนกระทั่งระยะใกล้ตัวนำมาก ๆ (ซึ่งเราจำลองเป็นกรณีปลายสายไฟเปลือยที่จุ่มน้ำอยู่) ในกรณีนี้ระยะดังกล่าวอยู่ที่ประมาณ 10-20 เซนติเมตร



รูปที่ 3 ผิวสมศักย์รอบทรงกลมตัวนำที่มีศักย์ขนาด 220 V รัศมี 2 เซนติเมตร อยู่ที่ระดับความลึก 10 เซนติเมตรจากผิวน้ำ

ในกรณีที่น้ำตื้น (น้ำลึก 30 เซนติเมตรและตัวนำอยู่ที่ตำแหน่งเดิม ดังแสดงในรูปที่ 3) ระยะการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ไม่ต่างจากกรณีที่น้ำลึกมากนัก **แต่สิ่งที่แตกต่างกันอย่างสิ้นเชิงคือ เราสามารถจะตรวจวัดความต่างศักย์ได้ตั้งแต่ที่บริเวณผิวน้ำ ซึ่งหมายความว่าอุปกรณ์ตรวจวัดประเภทที่ลอยอยู่บริเวณผิวน้ำจะให้ความแม่นยำในกรณีที่ใช้กับน้ำตื้นเท่านั้น!**



รูปที่ 4 (ซ้าย) ผิวสมศักย์บริเวณรอบตัวนำทรงกลม โดยที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของตัวนำกับผนังมีค่า 2.0 เซนติเมตร จำนวนและขนาดของผิวสมศักย์ที่แสดงมีค่าเดียวกันกับกรณีในรูปที่ 3; (ขวา) เส้นสมศักย์เมื่อมองจากผิวน้ำ (ระนาบ x-y และ z=30 เซนติเมตร)

ส่วนกรณีที่พบตามบ้านเรือนทั่วไปที่ไฟรั่วจากบริเวณเต้าเสียบซึ่งอยู่ติดกับกำแพง เราสามารถจำลองได้โดยการนำตัวนำทรงกลมไปวางไว้ใกล้ ๆ กับตัวกำแพง โดยระยะห่างที่เลือกใช้ในการจำลองมีค่า δ = 2.0 เซนติเมตร ผู้เขียนพบว่าศักย์ไฟฟ้ามีขนาดลดลงรวดเร็วกว่ากรณีที่ไม่มีกำแพงค่อนข้างมาก ศักย์ไฟฟ้าลดลงจนแทบจะเป็นศูนย์ที่ระยะห่างจากตัวนำเพียงครึ่งเมตร รูปที่ 4 (ซ้าย) แสดงถึงผิวสมศักย์รอบตัวนำที่อยู่ห่างจากกำแพงที่ตำแหน่ง $x=0$ เพียงเล็กน้อย จำนวนและขนาดของผิวสมศักย์ที่แสดงเอาไว้ตรงกันกับกรณีไร้ผนัง รูปที่ 4 (ขวา) แสดงเส้นสมศักย์เมื่อมองจากด้านบนลงมายังผิวน้ำที่ตำแหน่ง $z=L$ บริเวณที่มีศักย์สูงสุดมีค่าของศักย์ไม่เกิน 14 V เท่านั้น การจะตรวจวัดไฟรั่วจากบริเวณผิวน้ำอย่างเดียวต้องกระทำที่บริเวณเหนือน้ำใกล้กับปลั๊กไฟมาก ๆ จึงจะพบความต่างศักย์ในขนาดที่พออ่านค่าได้ สังเกตว่าทั้งสองกรณี กระแสจะพยายามวิ่งไปยังบริเวณ Ground ที่ใกล้ที่สุดก่อนเสมอ และหาก Ground อยู่ใกล้มาก เช่น ฝาผนัง กระแสที่แผ่ออกไปยังบริเวณอื่นจะอ่อนกำลังลง

อย่างไรก็ตามการเลือกรัศมีของตัวนำและค่า δ ส่งผลอย่างยิ่งต่อทั้งขนาดและระยะการกระจายตัวของศักย์ ผลที่ยกมาแสดงนี้จึงเป็นเพียงตัวอย่างเพื่อให้เห็นภาพในเชิงปริมาณสำหรับกรณีเดียวเท่านั้น ค่าของสนามและรูปร่างของผิวสมศักย์ย่อมแตกต่างจากนี้ในสถานการณ์อื่น เช่น หากลดขนาดของตัวนำทรงกลมลงจากรัศมี 2 เซนติเมตร เหลือ 0.5 เซนติเมตร และลด

ระยะห่างจาก 2 เซนติเมตร ลงมาอยู่ที่ 1 เซนติเมตร ผิวสมศักย์ขนาด 20 V ซึ่งแต่เดิมแผ่ออกมาถึงบริเวณ 10 เซนติเมตรจากผนังจะลดอำนาจการแผ่ลงมาอยู่ที่เพียง 4 เซนติเมตร และที่ผิวน้ำจะไม่ปรากฏบริเวณที่มีศักย์ไฟฟ้าเหนือกว่า 2 V อยู่เลย

คำเตือนทิ้งท้าย

ข้อมูลที่ผู้เขียนได้เสนอในบทความนี้เป็นเพียงที่ได้จากการจำลองในกรณีอุดมคติเท่านั้น ในความเป็นจริง ปัจจัยภายนอกอื่น ๆ ย่อมทำให้ขนาดและรูปร่างของสนามศักย์เปลี่ยนแปลงไปและทำให้ทิศทางการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนตามไปด้วย ตัวอย่างเช่น น้ำที่ท่วมขังอาจมีสภาพการนำไฟฟ้าแตกต่างจากน้ำบริสุทธิ์ที่เราจำกัดสมบัติทั้งหมดเอาไว้ด้วยตัวแปร ϵ_w เพียงตัวเดียว สภาพพื้นและสภาพโดยรวมของห้องอาจเหนี่ยวนำให้กระแสไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปในทิศทางใดทางหนึ่งมากเป็นพิเศษ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่มีตัวนำปรากฏอยู่ เช่น การที่กระแสไฟรั่วจากเครื่องใช้ไฟฟ้า ไม่ใช่จากปลั๊กไฟโดยตรง เครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีผิวเป็นโลหะจะเสริมให้มีตำแหน่งของศักย์ 220 V มีขนาดใหญ่ขึ้นกว่าขนาดของรูปลั๊กเป็นอย่างยิ่ง กรณีนี้ย่อมส่งผลร้ายยิ่งกว่าการที่ปลั๊กไฟรั่วอย่างเทียบกันไม่ได้ นอกจากนี้การแต่งกาย หรือลักษณะการก้าวเดินของผู้ประสบภัยในบริเวณน้ำท่วมก็อาจมีส่วนต่อการโดนไฟดูดได้เช่นกัน กล่าวคือ หากผู้เคราะห์ร้ายเดินลงจากบันไดโดยขาข้างหนึ่งอยู่เหนือน้ำและอีกข้างก้าวลงสู่น้ำในบริเวณที่มีศักย์สูง กระแสไฟจะวิ่งจากขาข้างที่จมน้ำสู่อีกข้างผ่านหัวใจได้ ซึ่งอันตรายกว่าการที่เขากระโดดลงน้ำด้วยขาทั้งสองข้างชิดกัน (อาจจะเป็นท่าที่แปลกหน่อยแต่ในทางฟิสิกส์น่าจะปลอดภัยกว่ามาก!)

การใช้งานอุปกรณ์ที่เริ่มแพร่หลายในปัจจุบันสำหรับวัดกระแสไฟฟ้าบริเวณน้ำท่วมควรพิจารณาถึงตำแหน่งและการจัดวางหัววัดด้วย ที่สำคัญผู้ใช้งานควรจะมีพื้นฐานทางไฟฟ้าอยู่บ้างเพื่อป้องกันมิให้เกิดอันตรายเนื่องจากความรู้เท่าไม่ถึงการณ์ จากการคำนวณเราเห็นว่าสนามศักย์มีความแตกต่างกันอย่างยิ่งระหว่างที่บริเวณผิวน้ำและที่ระดับความลึกต่าง ๆ โดยเฉพาะที่ระดับความลึกเดียวกับตำแหน่งของปลั๊กไฟ **ดังนั้นการแปรความผลจากการวัดกระแสหรือความต่างศักย์ที่ระดับน้ำเพียงอย่างเดียวย่อมไม่แน่นอนและมีความเสี่ยงสูงอย่างยิ่ง** นอกจากนี้หากปลายหัววัดสองด้านที่ใช้วัดความต่างศักย์วางตัวขนานกับผิวสมศักย์ผิวใดผิวหนึ่งด้วยความบังเอิญ ผลที่ได้จะไม่สามารถชี้ชัดถึงความปลอดภัยรอบบริเวณตรวจวัดได้ อุปกรณ์ที่มีหัววัดหลายหัวจึงน่าจะช่วยเพิ่มความเชื่อมั่นในการใช้งานมากกว่า

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ ผศ. ดร. ขจรยศ อยู่ดี สำหรับคำแนะนำและการพูดคุยเกี่ยวกับไฟฟ้าลัดวงจร ผศ.ดร.สกุลธรรม เสนาะพิมพ์ และ อ. อำนาจ สาธานนท์ สำหรับเทคนิคและวิธีการทำงานของ “ชุดทดสอบไฟรั่ว” ในน้ำ รวมถึงอาจารย์ในภาควิชาฯ อีกบางส่วนที่ร่วมกันประดิษฐ์ขึ้น และ อ.ดร. ปนัดดา เดชาดิลก สำหรับข้อมูล Finite-element calculation ที่อาจารย์ทำขึ้นอย่างรวดเร็วเพื่อเปรียบเทียบกับผลทางทฤษฎีในบทความนี้ และท้ายที่สุดผู้เขียนขอส่งกำลังใจไปยังผู้ที่ประสบภัยทุกท่านมา ณ โอกาสนี้ด้วย ขอให้ทุกท่านผ่านวิกฤตนี้ด้วยสติพร้อมทั้งกำลังใจที่เข้มแข็งครับ

เอกสารอ้างอิง

[1] J. D. Griffiths, *Introduction to Electrodynamics*, 3rd ed. (Prentice Hall, 1998).

[2] R. P. Feynman, R. Leighton, and M. Sands, *Feynman Lectures on Physics, Mainly Electromagnetism and Matter*. (Addison-Wesley, 1989).

[3] ผู้อ่านที่สนใจการแก้ปัญหานี้สำหรับเงื่อนไขขอบที่ซับซ้อนยิ่งขึ้นสามารถศึกษาได้ที่
T. Takashima, R. Ishibashi, “Electric Fields in Dielectric Multi-Layers Calculated by Digital Computer,” IEEE Trans. Electr. Insul. **EI-13** (1978).

[4] http://en.wikipedia.org/wiki/Relative_permittivity

[5] เนื่องจากลิมิตดังกล่าวมีค่าเป็นศูนย์ และหากเราใช้ Taylor expansion สิ่งที่ได้ย่อมเหมือนกับการทำ multipole expansion นั่นเอง

[6] A. H. Van Tuyl, “Electrostatic problems for two conducting spheres,” SIAM J. Math. Anal. **20**, 1293 (1989). สำหรับผู้ที่สนใจการแก้โจทย์คู่ทรงกลมตัวนำโดยเทคนิค Image charge ท่านสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ที่
H. Wallen, and A. Sihvola, “Polarizability of conducting sphere-doublets using series of images,” J. Appl. Phys. **96**, 2330 (2004). รวมถึงเอกสารอ้างอิงที่ระบุภายในบทความ

ความลึกลับของอุณหพลศาสตร์ ตอนที่ 2: กฎข้อที่ 0 ของอุณหพลศาสตร์

ชาญกิจ คันฉ่อง[1]

1. บทนำ

ก. ทำไมมักเลือก พิกัดอุณหพลศาสตร์พื้นฐาน (basic thermodynamic coordinates) ของระบบอุทกสถิตเนื้อเดียว (homogeneous hydrostatic system) ที่มีปริมาณสสารคงที่ เป็น (P,V,T)?

ข. ทำไมสถานะสมดุลความร้อนของระบบนี้บรรยายได้ด้วย 3 ตัวแปรนี้ ? และทำไมใน 3 ตัวแปรนี้มีเพียง 2 ตัวแปรเท่านั้นที่อิสระต่อกัน ?

ผมสงสัยประเด็นเหล่านี้ตั้งแต่เริ่มเรียนวิชาอุณหพลศาสตร์ใหม่ๆ เมื่อศึกษามากขึ้นก็พบว่า เกี่ยวข้องกับกฎข้อที่ 0 ของอุณหพลศาสตร์และงานอุณหพลศาสตร์ (thermodynamic work) ซึ่งผมจะมาทำความเข้าใจในบทความนี้ และจะทำความเข้าใจส่วนอื่นๆ ของวิชาอุณหพลศาสตร์ในตอนต่อๆ ไป โดยใช้ **วิธีระบบสัจพจน์ (axiomatic approach)** เป็นกุญแจไข

ระบบสัจพจน์ คือ การเรียบเรียงวิชาความรู้จากคำพื้นฐานและสัจพจน์พื้นฐาน แล้วใช้ตรรกศาสตร์หรือการอ้างเหตุผลอย่างเคร่งครัดนำไปสู่ทฤษฎีบทและการประยุกต์ใช้กรณีต่างๆ ตามประวัติศาสตร์ แนวการศึกษานี้เริ่มมีการใช้อย่างโดดเด่นในวิชาเรขาคณิตโดยยุคลิด สังเกตว่าเนื้อหาวิชาฟิสิกส์แบบฉบับ (classical physics) อื่นๆ ได้แก่ วิชากลศาสตร์แบบฉบับ และวิชาไฟฟ้าพลศาสตร์ สามารถทำให้อยู่ในรูประบบสัจพจน์ได้ง่าย เพราะว่าด้วยพลศาสตร์ของอนุภาคและสนามในอวกาศ-เวลา ซึ่งอวกาศ-เวลาเป็นปริภูมิ (space) ที่มีสมบัติเรขาคณิตโดยธรรมชาติ ดังนั้นอนุภาคและสนามที่อยู่ในอวกาศ-เวลาก็ต้องมีสมบัติสอดคล้องกับสมบัติเรขาคณิตของอวกาศ-เวลาด้วย

แต่วิชาอุณหพลศาสตร์ล่ะ? ไม่น่าแปลกใจว่าการเรียบเรียงในระบบสัจพจน์ทำได้ยากกว่า เพราะระบบในวิชาอุณหพลศาสตร์เป็นสสารมหภาค ที่มีสถานะเป็นตัวแปรพิกัดอุณหพลศาสตร์ที่ไม่ได้มีเรขาคณิต “ในตัว” (inherent) ดังนั้นการก่อรูป (formulation) กฎอุณหพลศาสตร์โดยวิธีมาตรฐานจึงอาศัยวิธีเชิงปรากฏการณ์หรือ “อุปกรณ์” ที่ใช้จัดการกับสมบัติสสาร เช่น ภาชนะ ลูกสูบ เทอร์โมมิเตอร์ แหล่งความร้อน (heat reservoir) เครื่องยนต์คาร์โนต์ เป็นต้น แต่วิธีทรงพลังที่สุดที่ทำให้วิชาอุณหพลศาสตร์เป็นระบบสัจพจน์ก็คือการทำให้เป็นเรขาคณิต (geometrization) เพราะเราจะสามารถใช้แคลคูลัสของปริภูมิและวัตถุเรขาคณิตในการก่อรูปกฎพื้นฐานของอุณหพลศาสตร์ตั้งแต่ต้น การศึกษาวิชาอุณหพลศาสตร์ในระบบสัจพจน์โดยวิธีเชิงเรขาคณิตริเริ่มมานานโดย C. Carathéodory [1] และ M. Born [2] แต่ในตำราต่างๆ มักกล่าวถึงอย่างไม่เต็มรูปแบบนัก เพราะเป็นวิธีที่ซับซ้อนนั่นเอง ในบทความชุดนี้ เราจะทำความเข้าใจต่อบางประเด็นเหล่านี้ให้ละเอียดขึ้น

2. งานอุณหพลศาสตร์

พิจารณาระบบก้อนสสารในกรอบศูนย์กลางมวล การเปลี่ยนแปลงพิกัดอุณหพลศาสตร์ที่เป็น สมบัติของสสาร ในระบบ สามารถส่งแรงหรือสนามกระทำงานกลกับสิ่งแวดล้อมได้ ปริมาณที่เขียนในรูปพิกัดอุณหพลศาสตร์ที่มีค่าสมมูลกับงานกลที่เกิดขึ้นนี้ เรียกว่า **งานอุณหพลศาสตร์** หรือเรียกสั้นๆ ว่า **งาน (work)** (มุมมองนี้ ทำให้ชัดเจนขึ้นจาก [3]) กล่าวในเชิงกลศาสตร์ งานกลนี้เป็นงานกลที่สิ่งแวดล้อมกระทำโดยแรงหรือสนามที่มาจากการเปลี่ยนแปลงพิกัดอุณหพลศาสตร์ของระบบนั้น เรามีข้อตกลงเครื่องหมายของงานอุณหพลศาสตร์ ดังนี้

[1]อาจารย์ (ดร.) ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

บทนิยาม 2.1 เครื่องหมายของงานอุณหพลศาสตร์ (W)

ก) งานอุณหพลศาสตร์ที่ก่อให้เกิดแรงหรือสนามจากระบบกระทำงานกลที่มีค่ามากกว่าศูนย์กับสิ่งแวดล้อม จะมีค่า $W > 0$ และกล่าวว่า ระบบทำงานเอง (Work is done by system.) หรือ สิ่งแวดล้อมได้รับงานจากระบบ

ข) งานอุณพลศาสตร์ที่ก่อให้เกิดแรงหรือสนามจากระบบกระทำงานกลที่มีค่าน้อยกว่าศูนย์กับสิ่งแวดล้อม จะมีค่า $W < 0$ และกล่าวว่า สิ่งแวดล้อมทำงานให้กับระบบ (Work is done on system.)

หมายเหตุ:

1. แม้ก้อนสสารอยู่ในสมดุลกล ก็สามารถทำงานอุณหพลศาสตร์ได้ เช่น ในขณะที่แรงลัพธ์ที่กระทำกับก้อนสสารเป็นศูนย์ ก้อนสสารก็สามารถส่งแรงหรือสนามกระทำงานกลกับสิ่งแวดล้อมเฉพาะที่ (local) ตามจุดต่างๆ บนผิวได้

2. ถ้าก้อนสสารไม่ได้อยู่ในสมดุลกล เช่น ศูนย์กลางมวลเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง หรือมีการไหลของก้อนสสาร ก้อนสสารจะสามารถทำงานกลโดยแรงลัพธ์ภายนอก แล้วส่งแรงขับดันหรือสนามกระทำงานกลกับสิ่งแวดล้อม แม้งานในส่วนนี้สามารถทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของก้อนสสารได้ก็ตาม แต่ไม่นับเป็นงานอุณหพลศาสตร์ ซึ่งนับเฉพาะส่วนที่เขียนในรูปพิกัดอุณหพลศาสตร์ได้เท่านั้น การคิดสมการอนุรักษ์พลังงานในกรณีนี้ให้ครบถ้วน ต้องคิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานทุกชนิดของก้อนสสาร ได้แก่ งานกลโดยการไหลและเปลี่ยนตำแหน่งของก้อนสสาร พลังงานจลน์มหภาค และพลังงานศักย์มหภาค, งานจากแรงเสียดทาน, งานอุณหพลศาสตร์, ความร้อน, และ พลังงานภายใน เป็นต้น เช่น สมการพลังงานสำหรับการไหลคงตัว (energy equation for steady flow) [3]

สำหรับระบบเนื้อเดียว (homogeneous system) สามารถมีงานอุณหพลศาสตร์หลายชนิด กล่าวคือ $i = 1,2,..,m$ โดยแต่ละชนิด i สมนัย (correspond) กับงานกลชนิด i งานอุณหพลศาสตร์แต่ละชนิดสามารถเขียนในรูปพิกัดอุณหพลศาสตร์ที่เป็นสมบัติของสสารในระบบล้วนๆ เรียกว่า **พิกัดงานอุณหพลศาสตร์ (thermodynamic work coordinates)** หรือ **พิกัดงาน (work coordinates)** หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง ชนิดของงานกลที่สิ่งแวดล้อมกระทำโดยแรงหรือสนามจากระบบสสาร จะกำหนดชนิดของงานอุณหพลศาสตร์ที่สมมูลกันและกำหนดชนิดของพิกัดอุณหพลศาสตร์ของระบบในส่วนที่เรียกว่า พิกัดงาน นั่นเอง ถ้างานอุณหพลศาสตร์แต่ละชนิด $i = 1,2,..,m$ ไม่ขึ้นแก่กัน หมายถึง การที่ระบบให้หรือรับงานชนิดที่ i จะไม่ทำให้เกิดการให้หรือรับงานชนิดที่ $j \neq i$ ตามไปด้วย

งานอุณหพลศาสตร์ของระบบเนื้อเดียวโดยทั่วไปเขียนได้ในรูป

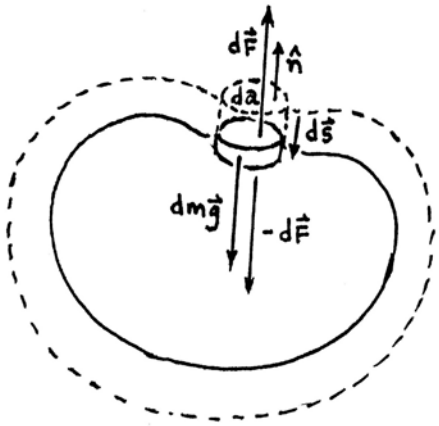
$$W = \int_{\mathrm{i}}^{\mathrm{f}} \bar{\mathrm{d}}W = \sum_{i=1}^{m} \int_{\mathrm{i}}^{\mathrm{f}} \mathrm{d}Y^i \, X^i \qquad (2.1)$$

โดยที่ $\left(X^i, Y^i\right);\ i = 1,2,..,m$ คือ พิกัดงานของระบบ ซึ่งพิกัดงานแต่ละชนิด i ประกอบด้วย extensive quantity X^i คู่ (conjugate) กับ intensive quantity Y^i เสมอ ส่วนสัญลักษณ์ $\bar{\mathrm{d}}W$ แสดงผลต่างอนุพัทธ์ไม่แม่นตรง (inexact differential) เราจะเริ่ม geometrize วิชาอุณหพลศาสตร์โดยกำหนดให้ปริภูมิของพิกัดงานเป็นปริภูมิแบบยุคลิด (Euclidean space) ซึ่งเป็นปริภูมิที่ง่ายที่สุด เราเรียกปริภูมิของพิกัดงานว่า **แผนภูมิงาน (work diagram)**

ตัวอย่าง งานในระบบอุทกสถิต

พิจารณาชิ้นประกอบผิว (surface element) $\mathrm{d}a$ หนึ่งๆ บนผิวนอกของระบบก้อนสสารในกรอบศูนย์กลางมวล เมื่อสสารใต้ผิว $\mathrm{d}a$ ขยาย (หรือ หดตัว) ตามระยะ $\mathrm{d}\bar{s} = \mathrm{d}s\hat{n}$ โดยกำหนดให้ $\hat{n}$ ตั้งฉากกับ $\mathrm{d}a$ ออกไปภายนอกก้อนสสาร และ $\mathrm{d}s > 0$ (หรือ $\mathrm{d}s < 0$) หมายถึง ระบบขยายตัว (หรือ หดตัว) ณ บริเวณ $\mathrm{d}a$ วัตถุที่อยู่ประชิดผิว $\mathrm{d}a$ ด้านนอก เช่น ลูกสูบ ก็จะได้รับ แรงกล $\mathrm{d}\vec{F}$ จากก้อนสสาร และมีแรงคู่กิริยา $-\mathrm{d}\vec{F}$ กระทำกับก้อนสสารใต้ผิว $\mathrm{d}a$ พอดีด้วย ดังแสดงในรูปที่ 1 ดังนั้นงานอุณหพลศาสตร์ $\bar{\mathrm{d}}(\mathrm{d}W)$ ของก้อนสสารที่ผิว $\mathrm{d}a$ จึงมีค่าสมมูลหรือเท่ากับ งานกล $\mathrm{d}\bar{s} \cdot \mathrm{d}\vec{F}$ ที่วัตถุประชิดผิวภายนอกกระทำอันเนื่องจากได้รับแรง $\mathrm{d}\vec{F}$ จากก้อนสสาร

$$\begin{aligned} \bar{\mathrm{d}}(\mathrm{d}W) &\equiv \mathrm{d}\bar{s} \cdot \mathrm{d}\vec{F} \\ &= \mathrm{d}a\,\mathrm{d}s\,\hat{n} \cdot \frac{\mathrm{d}\vec{F}}{\mathrm{d}a} = \mathrm{d}a\,\mathrm{d}s\,P \end{aligned} \qquad (2.2)$$



รูปที่ 1 การทำงานอุณหพลศาสตร์ของระบบอุทกสถิตในกรณีที่สสารหดตัว ณ บริเวณ $\mathrm{d}a$

สังเกตว่า งานกล $\mathrm{d}\vec{s}\cdot\mathrm{d}\vec{F}$ ที่วัตถุภายนอกกระทำและสมมูลกับงานอุณหพลศาสตร์นั้น ใช้แรง $\mathrm{d}\vec{F}$ ที่กระทำต่อวัตถุประชิดผิวภายนอก มาจากก้อนสสาร และมีทิศดันออกจากก้อนสสารเสมอ ไม่ว่ากรณีขยายตัว $\mathrm{d}s>0$ หรือหดตัว $\mathrm{d}s<0$ ก็ตาม ทำให้ความดัน $P=\hat{n}\cdot\dfrac{\mathrm{d}\vec{F}}{\mathrm{d}a}>0$ เสมอ ในขณะที่ระบบยังมีแรงอื่นๆ เช่น กรณีที่มีแรงภายนอกกระทำต่อวัตถุประชิดผิวภายนอก (เช่น มีน้ำหนักกดลงบนลูกสูบ ดัง รูปที่ 1) ก็จะส่งแรงกระทำต่อก้อนสสารทำให้ก้อนสสารหดตัว และมีแรงปฏิกิริยากระทำย้อนกลับต่อวัตถุประชิดผิวภายนอก ในตัวอย่างนี้ แรงปฏิกิริยานี้เองที่เป็นแรง $\mathrm{d}\vec{F}$ ที่ทำงานกลกับสิ่งแวดล้อมที่สมมูลกับงานอุณหพลศาสตร์ ประเด็นเหล่านี้ชวนให้สับสนได้ง่ายมาก

ต่อไปเราจะรวมค่างานอุณหพลศาสตร์ทั้งหมดของระบบนี้โดยรวมพื้นที่ผิวของก้อนสสารทั้งหมด ซึ่งสามารถเขียนในรูปพิกัดอุณพลศาสตร์ (V,P) ดังนี้

$$\begin{aligned}\bar{\mathrm{d}}W &= \oint \mathrm{d}\left(\bar{\mathrm{d}}W\right) = \oint_A \mathrm{d}a\left(P\,\mathrm{d}s\right) \\ &= \mathrm{d}V\,P\end{aligned} \qquad (2.3)$$

และเรียกว่า **งานอุทกสถิต (hydrostatic work)** มีข้อสังเกตในอินทิกรัลข้างต้นว่าระยะ $\mathrm{d}s$ และ P อาจขึ้นกับตำแหน่งของ $\mathrm{d}a$ ได้ เช่น ระบบที่ไม่อยู่ในสมดุลความร้อน ค่า P อาจขึ้นกับตำแหน่ง

3. สมดุลความร้อนและกฎข้อที่ 0 ของอุณหพลศาสตร์

สมดุลความร้อนและกฎข้อที่ 0 ของอุณหพลศาสตร์เป็นประเด็นที่เกี่ยวข้องกันและมีโครงสร้างร่ำรวย ได้แก่ สมดุลความร้อน, กฎข้อที่ 0 ของอุณหพลศาสตร์, สมการสถานะ, และ อุณหภูมิ ซึ่งในที่นี้เราจะเรียกรวมๆ ว่า **“กฎข้อที่ 0 ของอุณหพลศาสตร์”** ประกอบด้วยสัจพจน์ที่เกี่ยวข้องกัน ต่อไปนี้

สัจพจน์ 0.1 สมดุลความร้อน

การเปลี่ยนแปลงของระบบโดดเดี่ยวจะค่อยๆ ช้าลงจนกระทั่งถึง **สถานะสมดุลความร้อน (thermal equilibrium state)** ที่ไม่เปลี่ยนแปลงในเวลา โดยในแต่ละส่วนที่เป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous part) ของระบบจะมีแต่ละ intensive quantity ในค่าเท่ากันทุกจุดในส่วนนั้น

สัจพจน์ 0.2 การสมมูลกันของสมดุลความร้อน (สัจพจน์นี้มีชื่อเรียกมาตรฐานว่า กฎข้อที่ 0 ของอุณหพลศาสตร์)

เมื่อระบบ A และ B ใดใด มีสมดุลความร้อนกับระบบ C แล้วระบบ A กับ B ก็มีสมดุลความร้อนต่อกันด้วย เขียนเป็นประโยคสัญลักษณ์ดังนี้

$$A\equiv C \text{ และ } B\equiv C \text{ แล้ว } A\equiv B \qquad (3.1)$$

สัจพจน์ 0.3 ไอโซเทอร์ม (isotherm) หรือ พื้นผิวอุณหภูมิเท่า

ให้ระบบประกอบ (composite system) เป็นระบบโดดเดี่ยว ประกอบด้วยระบบย่อย A และ B ใดใดซึ่งต่างก็เป็นระบบเนื้อเดียวที่สัมผัสแบบแลกเปลี่ยนความร้อนกัน ให้ A มีพิกัดงานเป็น $\left(X^A,Y^A\right)$ และ B มีพิกัดงานเป็น $\left(X^B,Y^B\right)$ ซึ่งพิกัดงานของระบบทั้งสองอาจเป็นคนละชนิดก็ได้ เมื่อระบบย่อยทั้งหมดอยู่ในสมดุลความร้อนเดียวกัน (ตามนิยามในสัจพจน์ 0.1 และ 0.2) จะได้ว่า ในแผนภูมิงานของ A มีพื้นผิวต่อเนื่องที่เรียกว่า **ไอโซเทอร์ม (isotherm)** สมนัยกัน 1 ต่อ 1 กับไอโซเทอร์มในแผนภูมิงานของระบบ B โดยที่ไอโซเทอร์มของแต่ระบบบรรยายได้ด้วยสมการไอโซเทอร์ม (isotherm equation) ต่อไปนี้ตามลำดับ

$$f^A\left(X^A, Y^A, n^A\right) = t^A\left(t^B\right) \quad (3.2)$$

$$f^B\left(X^B, Y^B, n^B\right) = t^B\left(t^A\right) \quad (3.3)$$

โดยให้ n^A, n^B เป็นปริมาณของสสาร (เช่น จำนวนโมล) ของแต่ละระบบตามลำดับ ส่วนฟังก์ชัน $t^A = t^A\left(t^B\right)$ และ $t^B = t^B\left(t^A\right)$ เป็นฟังก์ชันทางเดียว (monotonic function) แสดงถึง การสมนัยกัน 1 ต่อ 1 ระหว่างไอโซเทอร์มทั้งสอง

นอกจากนี้ ระบบทั้งสองสามารถมีสมดุลความร้อนหลายแบบ แต่ละระบบจึงมีหลายไอโซเทอร์มในแผนภูมิงาน และเรียกแต่ละคู่ของไอโซเทอร์มที่สมนัยกันระหว่างระบบว่า **ไอโซเทอร์มที่สมนัยกัน (corresponding isotherms)**

จากสมการ (3.2)-(3.3) สามารถแสดงได้ว่าไอโซเทอร์มของแต่ละระบบไม่ตัดกัน เช่น ในระบบ A สมการ (3.2) แสดงถึงเราสามารถจัดรูปทุกสมการไอโซเทอร์มของ A ให้มีฟังก์ชัน $f^A = f^A\left(X^A, Y^A, n^A\right)$ เดียวกันได้ ดังนั้นไอโซเทอร์มที่ต่างกันของ A คู่หนึ่งต้องมีค่า t ไม่เท่ากัน เช่น $t_1 \neq t_2$ ถ้าสมมุติว่าไอโซเทอร์มทั้งสองในแผนภูมิงานตัดกัน จะมีจุดตัด $\left(X_c, Y_c\right)$ ที่มี $t_1 = f^A\left(X_c, Y_c, n\right)$ และ $t_2 = f^A\left(X_c, Y_c, n\right)$ ซึ่งเกิดข้อขัดแย้งกับความจริงที่ว่า $t_1 \neq t_2$ อนึ่ง เราสามารถพบสารที่มีไอโซเทอร์มตัดกัน เช่น น้ำในอุณหภูมิบริเวณรอบๆ 4 องศาเซลเซียส [4] ในกรณีนี้แสดงถึงข้อสมมุติที่ว่าระบบมีแค่พิกัดงาน $\left(X, Y\right)$ ผิด ต้องมีพิกัดงานชนิดอื่นที่ขึ้นแก่กันเพิ่มในสมการ (3.2) ด้วย จากการที่แต่ละระบบมีไอโซเทอร์มไม่ตัดกัน ก็สามารถใช้ตัวแปร t^A, t^B ในการลำดับ (label) ไอโซเทอร์มที่อยู่ถัดกันไปของแต่ละระบบอย่างต่อเนื่อง

หมายเหตุ:

1) สัจพจน์ 0.1 ทำให้ก้อนสสารเนื้อเดียวที่สมดุลความร้อนมีค่าพิกัดอุณหพลศาสตร์ที่แน่นอน ส่วนสัจพจน์ 0.3 สามารถประยุกต์ใช้กับระบบเนื้อผสม (heterogeneous system) โดยมองว่าเป็นหลายระบบเนื้อเดียวที่สัมผัสแบบแลกเปลี่ยนความร้อนกัน

2) ระบบที่มีปริมาณสสารไม่คงที่ก็สามารถมีสมดุลความร้อนได้ แต่ไม่มีสมดุลเคมี เช่น ระบบก้อนน้ำแข็งที่กำลังละลาย ในเฟสน้ำแข็งสามารถมีทุก intensive quantity เท่ากันและคงที่ทั่วทั้งเฟส

3) สำหรับระบบ A หนึ่งๆ แต่ละไอโซเทอร์มในแผนภูมิงาน แสดงถึง การสามารถมีพิกัดงาน $\left(X^A, Y^A\right)$ หลายค่าที่สมดุลความร้อนเดียวกัน กล่าวอีกนัยหนึ่ง สัจพจน์ 0.3 แสดงถึง การสามารถทำงานกับก้อนสสารที่สัมผัสกับแหล่งความร้อนภายนอกอย่างช้ามากๆ จนทำให้พิกัดงานเปลี่ยนโดยยังรักษาสมดุลความร้อนเดิมไว้ได้

4) สำหรับระบบ A ที่มีพิกัดงานหลายชนิด $i = 1, 2, 3, .., m$ ที่ไม่ขึ้นแก่กัน สามารถใช้สัจพจน์ 0.3 กับพิกัดงานแต่ละชนิด กล่าวคือ ในพิกัดงานแต่ละชนิด i ต่างก็มีสมการไอโซเทอร์มที่สมนัยกับไอโซเทอร์มหนึ่งของ B ดังสมการ

$$t^{A^i}\left(X^{A^i}, Y^{A^i}, n^A\right) = t^{A^i}\left(t^B\right) \quad (3.4)$$

4. อุณหภูมิ

จากสัจพจน์ 0.1, 0.2 และ 0.3 สามารถแสดงได้ว่ามีปริมาณหนึ่งที่สามารถใช้ลำดับทุกคู่ไอโซเทอร์มที่สมนัยกันระหว่าง A กับ B ดังทฤษฎีบทต่อไปนี้

ทฤษฎีบท 4.1 อุณหภูมิ

สำหรับระบบเนื้อเดียว A และ B ที่อยู่ในสมดุลความร้อนเดียวกัน มีปริมาณบางอย่างที่เป็นฟังก์ชันของพิกัดงานในแต่ละระบบ เท่ากัน เราสามารถใช้ปริมาณนี้ลำดับคู่ไอโซเทอร์มที่สมนัยกันระหว่างระบบทั้งสอง หรืออีกนัยหนึ่ง สามารถใช้ค่าปริมาณนี้ตัดสินการอยู่ในสมดุลความร้อนเดียวกันของระบบได้

<u>แสดง</u> ตามขั้นตอนดังนี้ (วิธีแสดงนี้ ผมปรับปรุงขึ้นจาก [2, 4-6])

(1) ให้ระบบเนื้อเดียว A กับ B มีสมดุลความร้อนเดียวกัน จากสัจพจน์ 0.2 สามารถมีระบบ C ที่มีสมดุลความร้อนเดียวกับ A และ B

(2) ให้ระบบ A, B และ C มีพิกัดงานเป็น $\left(X^A, Y^A\right)$, $\left(X^B, Y^B\right)$ และ $\left(X^C, Y^C\right)$ ตามลำดับ เมื่อระบบ $A \equiv C$ และ $B \equiv C$ มีสมดุลความร้อนเดียวกัน จาก

สัจพจน์ 0.3 สมการ (3.2)-(3.3) ได้สมการไอโซเทอร์มของแต่ละคู่ที่สมนัยกันว่า

$$A \equiv C \Rightarrow \begin{cases} t^A = f^A\left(X^A, Y^A, n^A\right) \\ t^C = f^C\left(X^C, Y^C, n^C\right) \end{cases} \qquad (4.1)$$

$$B \equiv C \Rightarrow \begin{cases} t^B = f^B\left(X^B, Y^B, n^B\right) \\ t^C = f^C\left(X^C, Y^C, n^C\right) \end{cases} \qquad (4.2)$$

โดยที่คู่ของ $\left(t^A, t^C\right)$ และคู่ของ $\left(t^B, t^C\right)$ ต่างก็สมนัยกันด้วยฟังก์ชันทางเดียว ทำให้เขียนได้ว่า

$$\begin{aligned} t^C &= t^C\left(f^A\right) = g^A\left(X^A, Y^A, n^A\right) \\ t^C &= t^C\left(f^B\right) = g^B\left(X^B, Y^B, n^B\right) \end{aligned} \qquad (4.3)$$

(3) จาก (4.1)-(4.3) เขียนใหม่ในแบบเดียวกันว่า

$$\begin{aligned} t &\equiv h^A\left(X^A, Y^A, n^A\right) \\ &= h^B\left(X^B, Y^B, n^B\right) = h^C\left(X^C, Y^C, n^C\right) \end{aligned} \qquad (4.4)$$

ดังนั้นสรุปคือ ระบบเนื้อเดียวใดใด A, B, C ที่อยู่ในสมดุลความร้อนเดียวกัน จะมีปริมาณบางอย่างเท่ากัน โดยเป็นฟังก์ชันของพิกัดงานภายในแต่ละระบบ เรียกว่า **อุณหภูมิ** ใช้สัญลักษณ์ t ดัง (4.4) สำหรับระบบเนื้อเดียวหนึ่งๆ เช่น A เรียก สมการไอโซเทอร์มในรูปปริมาณ t ดังบรรทัดแรกของ (4.4) ว่า **สมการสถานะ** ของระบบ A ตัวอย่างเช่น ระบบแก๊สอุดมคติ ซึ่งเป็นระบบอุทกสถิตที่ง่ายที่สุด มีสมการสถานะเป็น $T = h(V,P,n) = \dfrac{PV}{nR}$ โดยที่ T เป็นสเกลอุณหภูมิแก๊สอุดมคติ

(4) ในข้อ (1) ถ้าให้ระบบ A เป็นระบบ D^1 และให้ระบบ B เป็นระบบ D^2 โดยที่ตัวเลข $i = 1,2$ แสดงชนิดของงานอุณหพลศาสตร์ $\bar{\mathrm{d}}W^i = \mathrm{d}Y^i\, X^i$ ที่ไม่ขึ้นแก่กันของระบบชนิดเดียวกัน D ซึ่งประกอบด้วยสสารเนื้อเดียวชนิดเดียวกันในปริมาณเท่ากัน เมื่อพิจารณาไอโซเทอร์มของพิกัดงานแต่ละชนิด i ของระบบ D โดยแยกกัน จาก (3.4) ก็จะได้สมการสถานะของแต่ละพิกัดงาน i ในทำนองเดียวกับ (4.4) ว่า

$$t = h^{D^i}\left(X^i, Y^i, n^D\right); \quad i = 1,2 \qquad (4.5)$$

ตัวอย่างเช่น แก๊สออกซิเจน [6] ที่เป็นทั้งระบบอุทกสถิตและระบบพาราแมกนีติก ซึ่งมีทั้งงานอุทกสถิต (2.3) และงานในการเปลี่ยนแปลง magnetization ภายในเนื้อสาร และมีทั้งสมการสถานะของแก๊สและสมการสถานะแม่เหล็ก ที่ไม่ขึ้นแก่กันตามลำดับ เว้นแต่มีอุณหภูมิร่วมกัน

5. สมการสถานะและพื้นผิวสมดุล

เมื่อสิ่งแวดล้อมทำงานกลชนิด i เป็นผลให้พิกัดงานชนิด i ของระบบเปลี่ยนโดยไม่เกี่ยวกับพิกัดงานชนิดอื่น และสามารถถ่ายทอดความร้อนที่สังเกตไม่ได้จากพิกัดงานออกไป พิกัดงานที่เปลี่ยนไปสามารถไปอยู่บนไอโซเทอร์มอื่นหรือมีอุณหภูมิเปลี่ยนไปได้ ดังนั้น **พิกัดอุณหพลศาสตร์พื้นฐาน** ของระบบที่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงประเภทนี้จึงมีแค่ $\left(t, X^i, Y^i\right)$ ซึ่งประกอบด้วย อุณหภูมิ และ พิกัดงานที่เกี่ยวข้องกับงานอุณหพลศาสตร์ที่พิจารณา โดยรวมเป็นปริมาณที่ใช้บรรยายสถานะสมดุลความร้อนของระบบและวัดจากการทดลองได้โดยตรง ตัวอย่างเช่น ระบบอุทกสถิต มีงานอุณหพลศาสตร์เป็น $\bar{\mathrm{d}}W = \mathrm{d}VP$ ดังนั้นมี (t,V,P) เป็นพิกัดอุณหพลศาสตร์พื้นฐานนั่นเอง นี่คือคำตอบของคำถาม ก. ในบทนำ

สำหรับระบบเนื้อเดียว A หนึ่งๆ ที่มีพิกัดอุณพลศาสตร์พื้นฐานเป็น (t, X, Y) เมื่อเราขยายแผนภูมิงานโดยรวมมิติของตัวแปร t เข้าไป และยังคงกำหนดให้เป็นปริภูมิแบบยุคลิด ก็ได้ปริภูมิที่เรียกว่า **แผนภูมิ YXt (YXt diagram)** เช่น แผนภูมิ PVT ของระบบแก๊สอุดมคติ

ในเมื่อระบบหนึ่งๆ มีพิกัดอุณหพลศาสตร์พื้นฐานเป็น (t, X, Y) จากกฎข้อที่ 0 ของอุณหพลศาสตร์ (สัจพจน์ 0.1, 0.2, 0.3) สามารถแสดงได้ว่า ที่สถานะสมดุลความร้อน, (t, X, Y) มีความสัมพันธ์กันตามสมการสถานะ (4.4) และก่อรูปเป็น **พื้นผิวสมดุล (equilibrium surface)** 2 มิติ ในแผนภูมิ YXt 3 มิติ ดังนั้นสถานะสมดุลความร้อนจึงอยู่บนพื้นผิว 2 มิติที่มีตัวแปรอิสระเพียง 2 ตัวในแผนภูมิ YXt ก็ได้คำตอบของคำถาม ข. ในบทนำ

6. สรุป

เราได้เรียบเรียงและอธิบายการก่อรูปประเด็นที่เกี่ยวข้องกับสมดุลความร้อนและกฎข้อที่ 0 ของอุณหพลศาสตร์อย่างเป็นระบบ ได้แก่ประเด็น งานอุณหพลศาสตร์, พิกัดงาน, สมดุลความร้อน, กฎข้อที่ 0 ของอุณหพลศาสตร์, อุณหภูมิ, และ สมการสถานะ ในรูประบบสัจพจน์โดยวิธีเชิงเรขาคณิต ซึ่งจะเป็นฐานในการทำความเข้าใจการวัดอุณหภูมิ, กฎข้อที่ 1 และ 2 ของอุณหพลศาสตร์อย่างเป็นระบบในตอนต่อๆ ไป

เอกสารอ้างอิง

[1] C. Carathéodory, “Investigation into the Foundations of Thermodynamics,” translated from “Untersuchungen über die Grundlagen der Thermodynamik,” *Math. Ann.* (Berlin), **67**, 355-386 (1909), in J. Kestin (ed. and trans.) *The Second Law of Thermodynamics* (Dowden, Hutchinson & Ross, Stroudsberg, Pennsylvania, 1976).

[2] M. Born, “Antecedence: Thermodynamics,” in *Natural Philosophy of Cause and Chance* (Oxford University, Oxford, 1949), reprinted in J. Kestin (ed.) *The Second Law of Thermodynamics* (Dowden, Hutchinson & Ross, Stroudsberg, Pennsylvania, 1976).

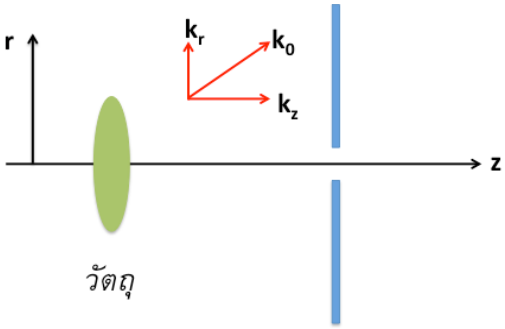
[3] F. W. Sears, *An Introduction to Thermodynamics, the Kinetic Theory of Gases, and Statistical Mechanics* (Addison-Wesley, Reading, 1953), 2nd ed.

[4] L. Balamuth, H. C. Wolfe, and M. W. Zemansky, “The Temperature Concept from Macroscopic Point of View,” *Am. J. Phys.*, **9**, No. 4, 199-203 (1941).

[5] A. R. Miller, “The Concept of Temperature,” *Am. J. Phys.*, **20**, No. 8, 488-491 (1952).

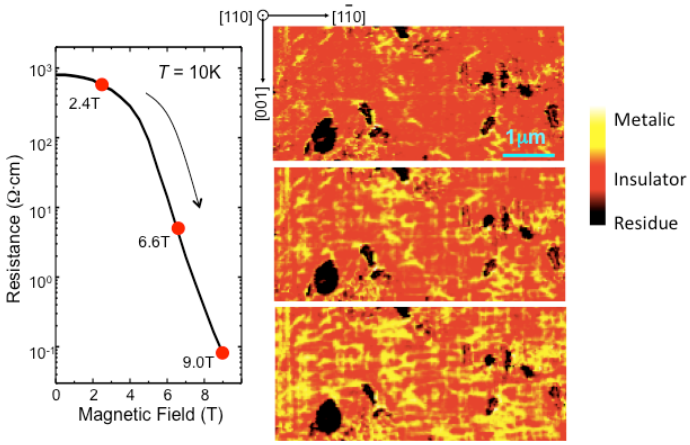
[6] M. W. Zemansky and R. Dittman, *Heat and Thermodynamics* (McGraw-Hill, New York, 1981), 6th ed.

รูปประกอบจากบทความ “การเอาชนะข้อจำกัดของการเลี้ยวเบนในกล้องจุลทรรศน์แบบ Near-Field” หน้า 11 – 17

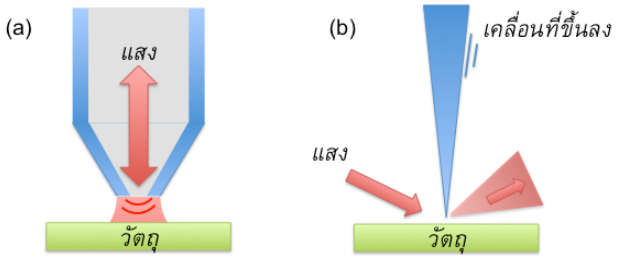


เครื่องตรวจจับ

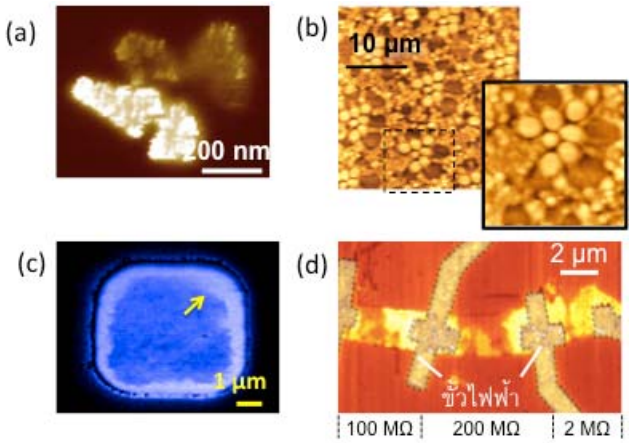
รูปที่ 1



รูปที่ 5

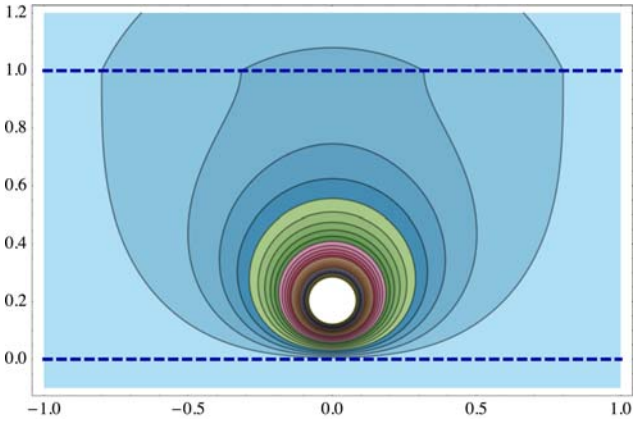


รูปที่ 2



รูปที่ 4

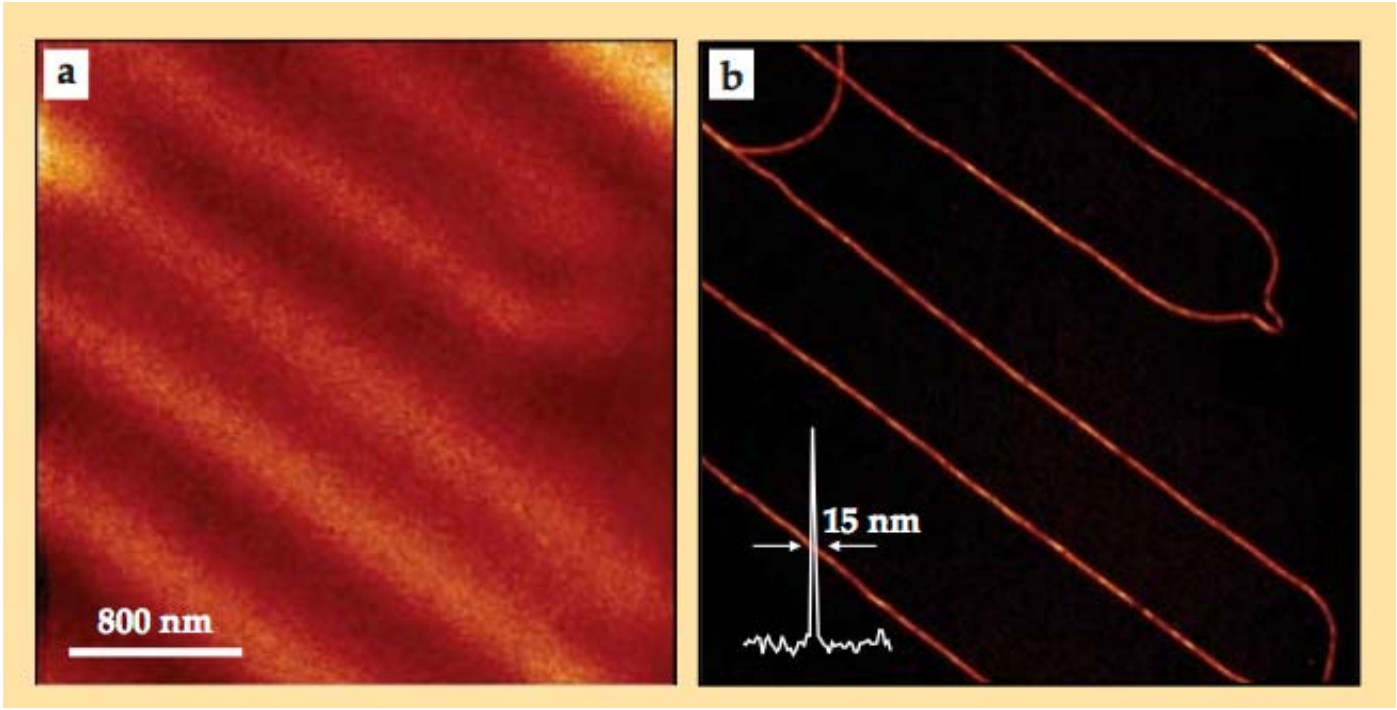
รูปประกอบจากบทความ “ไฟ(ฟ้า)ใต้น้ำ” หน้า 18 – 22



รูปที่ 1

การเอาชนะข้อจำกัดของการเลี้ยวเบนในกล้องจุลทรรศน์แบบ Near-Field

(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