วารสารฟิสิกส์ไทย

Thai Journal of Physics

วารสารสำหรับผู้ที่รักและสนใจในแวดวงฟิสิกส์ ISSN 0857-1449

ปีที่ 29 ฉบับที่ 1 : มีนาคม 2555 – พฤษภาคม 2555

การใช้แบบจำลอง ‘อาทิตย์ทรงกลด’ ไขปริศนาธรรมชาติ

หอดูดาวแห่งชาติเฉลิมพระเกียรติ 7 รอบพระชนมพรรษา

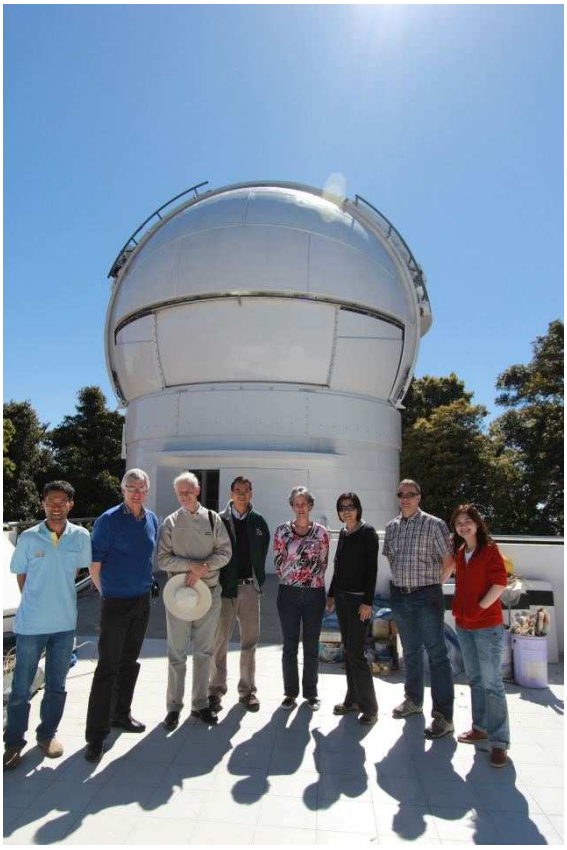
การก่อตัวของดาวฤกษ์ในกาแล็กซี

OCT: นวัตกรรมของภาพถ่ายทางการแพทย์

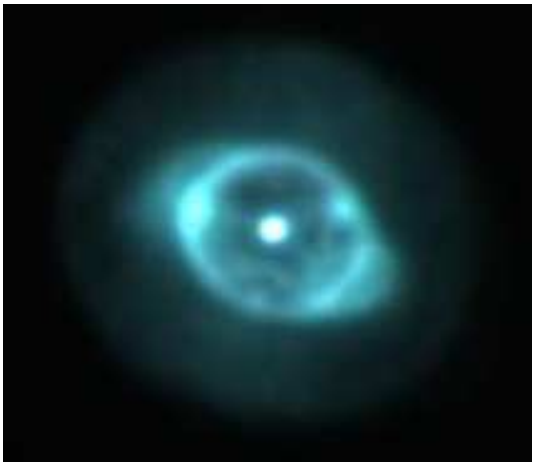
มารู้จักจักรวาลแบบพองตัวกันเถอะ!: ตอนแรก

หมายเหตุ รูปจากปกเป็นอาทิตย์ทรงกลดที่ราชาเทวะ ภาพโดย ทวี ขนขจี (หน้า 9)

รูปประกอบจากบทความ “หอดูดาวแห่งชาติเฉลิมพระเกียรติ 7 รอบพระชนมพรรษา” หน้า 2-4



รูปที่ 1



รูปที่ 4

รูปประกอบจากบทความ “การก่อตัวของดาวฤกษ์ในกาแล็กซี” หน้า 5-8

รูปที่ 1

รูปที่ 2

รูปประกอบจากบทความ “การใช้แบบจำลอง ‘อาทิตย์ทรงกลด’ไขปริศนาธรรมชาติ” หน้า 9-14

รูปที่ 3

สารบัญ

สวัสดี

กลับมาพบกันอีกครั้งหนึ่งกับวารสารฟิสิกส์ไทย หลังจากห่างหายกันไปนานหลายเดือน หลังจากวารสารฉบับที่แล้วได้ตีพิมพ์ไปผมก็มีเหตุให้เดินทางตลอดและพร้อมกับมีสมาชิกตัวน้อยเพิ่มมาด้วยก็เลยจัดทำรูปเล่มได้ช้ากว่าที่ควรมาก ผมหัวหน้ากองบรรณาธิการขอรับผิดและขออภัยกับผู้แต่งที่ได้ส่งบทความดีๆมาให้ก่อนหน้านี้นานแล้วด้วยนะครับ

สำหรับบทความในฉบับนี้เริ่มต้นด้วยบทความแนะนำหอดูดาวแห่งชาติเฉลิมพระเกียรติ 7 รอบพระชนมพรรษา ซึ่งอยู่บนภูเขาที่สูงที่สุดในประเทศไทย จากนั้นเป็นบทความที่อธิบายว่าดาวฤกษ์เกิดการก่อตัวได้อย่างไรในกาแล็กซี ตามมาด้วยบทความที่มีภาพสวย ๆ ของอาทิตย์ทรงกลดแบบต่าง ๆ (เช่น ปกหน้า) โดยมีการใช้แบบจำลองปรากฏการณ์นี้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จากนั้นเป็นเรื่องเกี่ยวกับนวัตกรรมการถ่ายภาพที่มีชื่อว่า Optical Coherence Tomography (OCT) ซึ่งถือเป็นการประยุกต์ใช้ความรู้ทางฟิสิกส์เข้ากับการถ่ายภาพที่มีประโยชน์อย่างมากทางการแพทย์ และปิดท้ายด้วยบทความอธิบายเกี่ยวกับจักรวาลแบบพองตัว ตอนแรก (ตอนจบจะอยู่ในฉบับถัดไป)

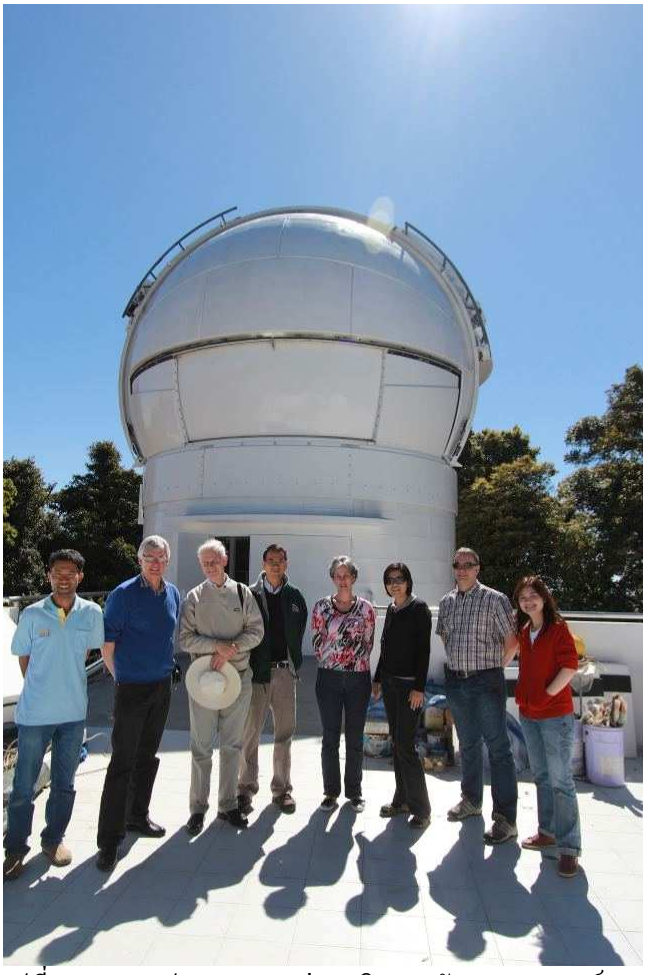
ทั้งนี้ขอหมายเหตุว่า ในวารสารฉบับนี้จะเริ่มมีการลงโฆษณา เกี่ยวกับเครื่องมือวิจัยต่างๆ โดยหวังว่าอาจจะมีประโยชน์สำหรับงานวิจัยของบางท่าน ทั้งนี้ถ้าผู้อ่านมีข้อเสนอแนะสามารถติดต่อมาทางกองบรรณาธิการตามอีเมลล์ด้านล่างได้เลยครับ

กองบรรณาธิการ

ติดต่อกองบรรณาธิการ วารสารฟิสิกส์ไทย สมาคมฟิสิกส์ไทย สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000 โทรศัพท์: 044-224319 โทรสาร: 044-224651 อีเมลล์: worawat@g.sut.ac.th **วารสารฟิสิกส์ไทย** เป็นวารสารราย 3 เดือน มีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่สาระ ข่าวสาร และเป็นสื่อสัมพันธ์ในมวลหมู่สมาชิกและผู้ที่สนใจในแวดวงฟิสิกส์ ส่งเสริมให้เกิดการแลกเปลี่ยนข้อมูลและประสบการณ์เกี่ยวกับฟิสิกส์ในวงกว้างที่สร้างสรร โดยความคิดเห็นและทัศนะที่ปรากฏอยู่ในบทความต่างๆ เป็นเฉพาะของผู้เขียนแต่ละท่าน สมาคมฟิสิกส์ไทยไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป **Website:** www.thps.org

หอดูดาวแห่งชาติเฉลิมพระเกียรติ 7 รอบพระชนมพรรษา

กันต์ธนากร น้อยเสนา[1] และ ศรัณย์ โปษยะจินดา[2]



รูปที่ 1 แสดงรูปหอดูดาวแห่งชาติ และนักดาราศาสตร์จากต่างประเทศและในประเทศที่มาเยี่ยมชม (โดย นายศุภฤกษ์ คฤหานนท์)

เป็นเรื่องที่น่าตื่นเต้นสำหรับวงการวิทยาศาสตร์ในประเทศไทยเป็นอย่างมากที่วันนี้ประเทศไทยได้มีหอดูดาวขนาดใหญ่ พร้อมอุปกรณ์วิทยาศาสตร์ที่จะใช้ในการศึกษาวิจัยทางดาราศาสตร์ของประเทศ หอดูดาวแห่งชาติเฉลิมพระเกียรติฯ ได้ถูกสร้างขึ้นที่อุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์ จ.เชียงใหม่ ตำแหน่งพิกัดที่ละติจูด 18° 34' 21" N ลองจิจูด 98° 29 ' 07" E สูงจากระดับน้ำทะเล 2,457 เมตร โดยอยู่ภายใต้การดูแลของสถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) กล้องโทรทรรศน์ของหอดูดาวนี้เป็นแบบ Ritchey-Chretien ซึ่งใช้กระจกสะท้อนแสงขนาด 2.4 เมตร เป็นกระจกปฐมภูมิ (Primary Mirror) โดยหอดูดาวแห่งชาติเฉลิมพระเกียรติฯ นี้เป็นโครงการในพระราชดำริของสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี สร้างขึ้นในวโรกาสเฉลิมพระเกียรติพระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว ในโอกาสที่วันพระราชสมภพครบ 200 ปี และในวโรกาสมหามงคลที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว ทรงเจริญพระชนมพรรษาครบ 7 รอบ 84 พรรษา โดยพระมหากรุณาธิคุณจากสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดชทรงพระราชทานชื่อ “หอดูดาวแห่งชาติเฉลิมพระเกียรติ 7 รอบพระชนมพรรษา” ในวันที่ 29 กันยายน 2554

การสำรวจพื้นที่เพื่อที่จะก่อสร้างหอดูดาวสำคัญมาก โดยต้องอยู่สูงจากระดับน้ำทะเลมากกว่า 2,000 เมตร และห่างไกลจากชุมชนเพื่อหลีกหนีจากแสงไฟรบกวน และฝุ่นละออง การก่อสร้างหอดูดาวบนภูเขาสูงจึงมีความเหมาะสมที่สุด ซึ่งดอยอินทนนท์อยู่สูงจากระดับน้ำทะเลเฉลี่ย 2,565 เมตร (สำนักอุทยานแห่งชาติ, 2555) จึงเหมาะสมที่จะใช้เป็นพื้นที่ในการสร้างหอดูดาว ไม่เพียงแต่มีระดับความสูงจากระดับน้ำทะเลที่สุดในประเทศแล้ว ยังพร้อมไปด้วยความอำนวยสะดวกต่างๆ แต่ที่ยิ่งไปกว่านั้น คือ หอดูดาวถูกสร้างบนพื้นที่ว่าง จึงไม่ต้องตัดต้นไม้ในขณะที่ทำการก่อสร้างเลย หลังจากนั้นสถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติได้ดำเนินการทดสอบทัศนวิสัยท้องฟ้า(Seeing Test) เพื่อประเมินความเหมาะสมต่อการสร้างหอดูดาว โดยทดสอบด้วยวิธีการวัดความสว่างของดาวสองดวงที่อยู่ใกล้กันด้วยกล้องโทรทรรศน์ขนาดเล็กพร้อมกล้องซีซีดี แล้ววัดตำแหน่งของดาวทั้งสองที่ขยับไปมาเนื่องจากอากาศเคลื่อนที่ แล้วบันทึกค่าที่ดาวเปลี่ยนตำแหน่งไปบนพิกเซลของซีซีดี (Differential Image Motion Monitor, DIMM) และได้ตรวจวัดสภาพทางอุตุนิยมวิทยาด้วยสถานีตรวจวัดอากาศ ทั้งนี้ได้เริ่มเก็บข้อมูลตั้งแต่ตั้งแต่ เดือน มีนาคม 2549 ถึง เดือน มกราคม 2550 รวมระยะเวลาที่ใช้ในการศึกษา 11 เดือน

[1] เจ้าหน้าที่เทคนิคดาราศาสตร์ สำนักปฏิบัติการและพัฒนาหอดูดาว สถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ

[2] รองผู้อำนวยการ (ดร.) สถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ

(สถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ, 2550) จากการเก็บข้อมูลพบว่าค่าเฉลี่ยของทัศนวิสัยท้องฟ้า มีค่าประมาณ 0.9 พิลิปดา ซึ่งค่าการทดสอบสภาพท้องฟ้าที่ได้นี้ มีเหมาะสมต่อการสร้างหอดูดาว และยังมีค่าใกล้เคียงกับหอดูดาวขนาดใหญ่ที่สำคัญดังนี้

หอดูดาวที่สำคัญของต่างประเทศ	ค่าเฉลี่ย(")
Mauna Kea Observatory (MKO)	0.45
Mt. Graham (Emerald Peak sites)	0.55-0.63
MMT (Mt.Hopkins/summit)	0.60
European Southern Obs. (VLT site)	0.66
Magellan (Las Campanas) & ESO (La Silla)	0.76
Thai Astronomical Observatory	0.90

นอกจากนั้นสภาพอากาศบนดอยอินทนนท์ก็ยังเอื้ออำนวยต่อการสังเกตการณ์ทางดาราศาสตร์เป็นอย่างมาก โดยในฤดูหนาวท้องฟ้าจะเปิดตลอดฤดูและมีอุณหภูมิโดยเฉลี่ยประมาณ 10 องศาเซลเซียส ในบางคืนอุณหภูมิจะลงต่ำสุดได้ถึง -1 องศาเซลเซียส สำหรับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่วัดได้ในฤดูหนาวจะต่ำกว่า 10 เปอร์เซนต์ แต่ในฤดูฝนความชื้นสัมพัทธ์บนยอดดอยสูงเกือบถึง 100 เปอร์เซนต์ ทำให้หอดูดาวต้องปิดการให้บริการในช่วงที่ความชื้นในอากาศสูง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อนับวันที่ท้องฟ้าเปิดตลอดทั้งปี พบว่าเราสามารถเปิดหอดูดาวเพื่อเก็บข้อมูลทางดาราศาสตร์ตั้งแต่เดือนพฤษจิกายนถึงมีนาคม รวมแล้วไม่น้อยกว่า 151 วัน คิดเป็นร้อยละ 41.34 ของทั้งปี

รูปที่ 2 แสดงหอดูดาว และอาคารปฏิบัติการ ซึ่งจะเห็นกระจก 2.4 เมตรอยู่ภายใน (โดย นายศุภฤกษ์ คฤหานนท์)

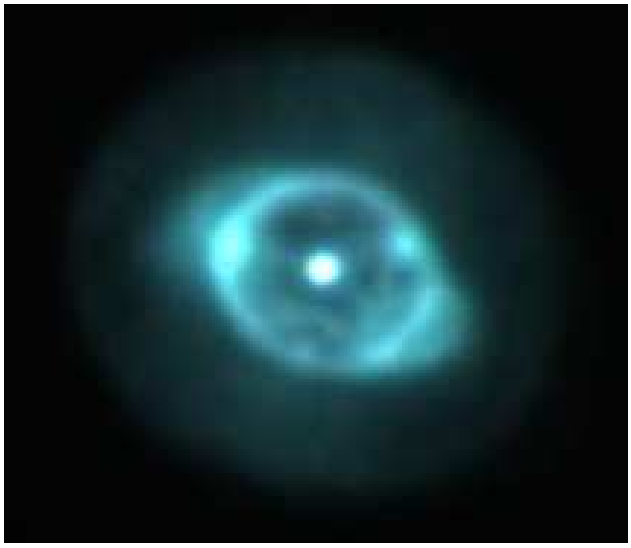
ที่ทำงาน และที่พักสำหรับนักดาราศาสตร์ซึ่งลักษณะของหอดูดาวแห่งชาติเฉลิมพระเกียรติฯ นี้มีฐานเป็นทรงกระบอก และมีตัวโดมเป็นลักษณะทรงกลมติดตั้งด้านบน จากพื้นถึงยอดโดมรวมแล้วมีความสูงถึง 17 เมตร เพื่อให้สูงกว่าต้นไม้โดยรอบ ฐานของกล้องโทรทรรศน์เป็นแบบแนวขอบฟ้า (Alt-azimuth) ซึ่งมีระบบที่ติดตามตำแหน่งของดาวได้แม่นยำมาก สำหรับตัวกระจกปฐมภูมิที่ใหญ่ถึง 2.4 เมตรนั้น มีค่าเฉพาะที่นักวิจัยควรจะรู้ดังตาราง

คุณสมบัติของกระจก	ค่าเฉพาะ
Primary Focal Ratio	f/1.5
System focal Ratio	f/10
Plate Scale	8.6 arcsec/mm
Unvignetted Field of View	14.6 arcmin

รูปที่ 3 แสดงตัวกล้องโทรทรรศน์ โดยที่ด้านขวาของกล้องจะเห็นที่ติดอุปกรณ์สำหรับบันทึกข้อมูลทางดาราศาสตร์ (Rotator Instrument)

ตัวกล้องโทรทรรศน์ได้สร้างแบบ Ritchey-Chretien เพื่อให้สามารถติดอุปกรณ์ในการเก็บข้อมูลได้หลายตัวพร้อมกัน และสามารถเลือกทิศทางออกของแสงไปด้านข้างของกล้องโทรทรรศน์ได้ถึง 2 ทิศทางด้วยกัน โดยตัวกระจกปฐมภูมิติดบนฐานแนวขอบฟ้าและกระจกทุติยภูมิถูกติดตั้งไว้หน้ากระจกปฐมภูมิ เพื่อสะท้อนแสงกลับ แล้วกระจกใบที่สามจะสะท้อนแสงออกไปด้านข้างของกล้องโทรทรรศน์ ซึ่งด้านข้างที่แสงถูกส่งออก

มานั้นจะมีกระจกใบที่สี่ที่อยู่ภายใน Rotator Instrument ทำหน้าที่สะท้อนแสงไปยังอุปกรณ์ที่เลือกบันทึก โดยเราสามารถติดอุปกรณ์ในการเก็บข้อมูลเข้ากับ Rotator Instrument ได้มากถึง 4 ตัว ทำให้นักดาราศาสตร์ไม่ต้องเสียเวลาในการถอดเปลี่ยนอุปกรณ์ ดร.ศรัณย์ โปษยะจินดา รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ กล่าวว่าเป็นเวลานานเกือบ 15 ปี กว่าที่ประเทศไทยเราจะมีหอดูดาวขนาดใหญ่ที่สามารถทำวิจัยในระดับสากลได้ โดยแนวคิดและโครงการริเริ่มของการสร้างหอดูดาวเริ่มขึ้นในปี พ.ศ. 2540 จนกระทั่งวันนี้หอดูดาวแห่งชาติพร้อมให้นักดาราศาสตร์ตลอดจนนิสิตนักศึกษา ครูอาจารย์ระดับมัธยมศึกษา ได้เข้ามาทำการศึกษาวิจัย และปีนี้จะเป็นปีแรกที่นักดาราศาสตร์ไทยจะได้ทำการศึกษาวิจัยด้วยหอดูดาวที่ทันสมัยของคนไทย



รูปที่ 4 แสดง NGC 3242 (Ghost of Jupiter) เป็นภาพเนบิวลาดาวเคราะห์ ถ่ายด้วยกล้อง 2.4 เมตร (โดย นายสมสวัสดิ์ รัตนสูรย์)

เอกสารอ้างอิง

[1] สถาบันวิจัยดาราศาตร์แห่งชาติ. (2550). รายงานโครงการสำรวจสถานที่ตั้งหอดูดาวแห่งชาติ. Chiang Mai: 2550.

[2] สำนักอุทยานแห่งชาติ. (14 มีนาคม 2555). สำนักอุทยานแห่งชาติ กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่าและพันธ์พืช. เรียกใช้เมื่อ 14 มีนาคม 2555 จาก http://park.dnp.go.th/visitor/

การก่อตัวของดาวฤกษ์ในกาแล็กซี

วิเชียร ไกรวัฒนวงศ์[1]

ในปัจจุบัน งานวิจัยทางด้านฟิสิกส์ดาราศาสตร์สาขากาแล็กซีมีความคืบหน้าไปมากพอสมควร หัวข้องานวิจัยที่ได้รับความสนใจศึกษาและเป็นที่ถกเถียงกันมากในหมู่นักฟิสิกส์ดาราศาสตร์สาขานี้ประเด็นหนึ่งก็คือ เรื่องเกี่ยวกับการก่อตัวของดาวฤกษ์ในกาแล็กซี

กาแล็กซีเป็นวัตถุท้องฟ้าซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของโครงสร้างใหญ่ของเอกภพ ดังนั้นในการทำความเข้าใจถึงการเติบโต และความเป็นไปของเอกภพที่เราอาศัยอยู่ว่าจะมีวิวัฒนาการไปสู่สภาพใดในอนาคต จึงต้องทำความเข้าใจถึงวิวัฒนาการของกาแล็กซีเหล่านี้เป็นเบื้องต้น ในการศึกษาการวิวัฒนาการของกาแล็กซีอาจแบ่งประเภทของกาแล็กซีอย่างกว้างๆ ออกเป็นสองจำพวกตามลักษณะสภาพแวดล้อมที่กาแล็กซีอาศัยอยู่ ได้แก่ **กาแล็กซีที่อยู่ในกระจุกกาแล็กซี (Cluster Galaxies)** และกาแล็กซีที่อยู่เป็นเอกเทศ ไม่เป็นสมาชิกของกระจุกกาแล็กซีใดเรียกว่า **กาแล็กซีสนาม (Field Galaxies)** กาแล็กซีทั้งสองจำพวกจะมีขั้นตอนวิวัฒนาการที่แตกต่างกันมาก อันเนื่องจากการมีสภาพแวดล้อมที่มีความหนาแน่นของจำนวนกาแล็กซีสมาชิกหรือกาแล็กซีเพื่อนบ้านที่มีมากน้อยต่างกัน สำหรับกาแล็กซีที่อยู่ในกระจุกกาแล็กซีที่มีความหนาแน่นของจำนวนกาแล็กซีสมาชิกมากกว่า จะมีปรากฏการณ์ของการเคลื่อนที่เข้าใกล้กัน เฉี่ยวกัน ชนกัน และถึงขั้นรวมกัน ซึ่งเกิดขึ้นได้เป็นเรื่องปกติ ยกตัวอย่างเช่นการชนกันของสองกาแล็กซี NGC 2207 กับ IC 2163 ดังแสดงในรูปที่ 1 ปรากฏการณ์เหล่านี้เป็นกระบวนการที่มีส่วนในการเร่งเร้าให้เกิดมีการเปลี่ยนแปลงและการวิวัฒนาการที่รวดเร็วยิ่งขึ้น กาแล็กซีทางช้างเผือกที่ระบบสุริยะของเราอาศัยอยู่ถูกจัดเป็นกาแล็กซีในกระจุกกาแล็กซี และมีขั้นตอนวิวัฒนาการไม่แตกต่างไปจากกาแล็กซีในกระจุกกาแล็กซีอื่นๆ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่จะเกิดขึ้นภายในของกาแล็กซีทางช้างเผือกในอนาคตจะต้องส่งผลกระทบโดยตรงต่อระบบสุริยะของเราอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ดังนั้นการทำความเข้าใจในวิวัฒนาการของกาแล็กซีจึงเป็นการทำความเข้าใจอนาคตของเราเอง บทความนี้จะมุ่งเน้นถึงความก้าวหน้าทางด้านงานวิจัยในประเด็นที่เกี่ยวกับวิวัฒนาการของกาแล็กซีในกระจุกกาแล็กซีเป็นสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกระจุกกาแล็กซีในระยะใกล้ ซึ่งเป็นกาแล็กซีในยุคปัจจุบันที่ผ่านวิวัฒนาการมาอย่างยาวนาน เนื่องจากแสงหรือรังสีแม่เหล็กไฟฟ้ามีอัตราเร็วจำกัด ดังนั้นแสงที่เราได้รับจากกาแล็กซีที่อยู่ใกล้ ก็มีแนวโน้มที่จะกำเนิดจากกาแล็กซีที่มีอายุมากกว่ากาแล็กซีที่อยู่ไกลขึ้น

ในระยะเวลาหลายทศวรรษที่ผ่านมา การศึกษาค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับวิวัฒนาการของกาแล็กซีภายใต้สภาพแวดล้อมในกระจุกกาแล็กซี ซึ่งมีความหนาแน่นของจำนวนกาแล็กซีมากกว่ากาแล็กซีที่อยู่เป็นเอกเทศนอกกระจุกกาแล็กซีนั้น แม้จะมีความคืบหน้าไปมาก แต่ยังคงเต็มไปด้วยข้อโต้แย้งตามมาอีกมากด้วยเช่นกัน จนอาจกล่าวได้ว่ายิ่งค้นพบคำตอบก็ยิ่งพบเจอคำถาม กระบวนการหนึ่งที่ถูกศึกษาวิเคราะห์วิจารณ์กันมากในสาขานี้ ได้แก่ การก่อตัวของดาวฤกษ์ใหม่ที่เกิดขึ้นอย่างฉับพลันเป็นจำนวนมากภายในระยะเวลาอันสั้น คืออยู่ในช่วงประมาณ 100 – 1,000 ล้านปี กลไกที่จะขับเคลื่อนการเปลี่ยนแปลงภายในกาแล็กซีเหล่านี้จะต้องมีอิทธิพลต่อวิวัฒนาการของกาแล็กซีอย่างมาก กลไกมากมายได้ถูกเสนอขึ้นเพื่อใช้อธิบายถึงสาเหตุที่ทำให้กาแล็กซีมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้สภาพแวดล้อมในกระจุกกาแล็กซี และชักนำให้เกิดการก่อตัวของดาวฤกษ์ใหม่เหล่านี้ หรือแม้แต่กลไกการหยุดยั้งการก่อตัวของดาวฤกษ์ใหม่ก็มีอิทธิพลสำคัญต่อวิวัฒนาการของกาแล็กซีไม่น้อยเลย [1, 2] นอกจากนี้ยังส่งผลให้กาแล็กซีถูกทำให้เปลี่ยนแปลงรูปทรงโครงสร้าง และคุณสมบัติทางฟิสิกส์บางประการจนถูกจัดชนิดเปลี่ยนไปจากเดิม ในสภาพแวดล้อมที่มีความหนาแน่นของจำนวนกาแล็กซีสมาชิกมากขึ้นเมื่อเข้าใกล้บริเวณศูนย์กลางของกระจุกกาแล็กซีมากขึ้น จะพบว่ามีจำนวนของกาแล็กซีชนิดทรงรีและชนิดเลนส์มากขึ้น แต่จำนวนกาแล็กซีชนิดกังหันกลับลดลง [3]

[1] อาจารย์ (ดร.) ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

รูปที่ 1 ภาพการชนกันของสองกาแล็กซี NGC 2207 กับ IC 2163 ที่กำลังกลืนกินซึ่งกันและกันอย่างช้าๆ รูปจาก Debra Meloy Elmegreen (Vassar College), and the Hubble Heritage Team (AURA/STScI/NASA)

กลไกที่สำคัญกลไกหนึ่งก็คือ **กลไกอันตรกิริยากาแล็กซี-กาแล็กซี (Galaxy-galaxy interaction)** เป็นกลไกที่เกิดขึ้นได้กับกาแล็กซีตั้งแต่สองกาแล็กซีขึ้นไป เมื่อมีการเคลื่อนที่เข้ามาในระยะใกล้และเนิ่นช้าเพียงพอที่จะเกิดแรงไทดัล (Tidal Force) ของกาแล็กซีทั้งสองกระทำซึ่งกันและกัน (แรงไทดัล คือ แรงโน้มถ่วงที่วัตถุหนึ่งกระทำต่ออีกวัตถุหนึ่งในแต่ละส่วนไม่เท่ากัน อันเนื่องมาจากระยะทางของแต่ละส่วนนั้นห่างจากวัตถุที่กระทำไม่เท่ากัน) และเหนี่ยวรั้งแก๊ส ให้ขมวดหนาแน่นขึ้นในบางบริเวณ เช่น บริเวณแขนของกังหัน (ในกรณีของกาแล็กซีชนิดกังหัน) หรือบริเวณใกล้ศูนย์กลางของกาแล็กซี จนเข้าสู่สภาวะของการก่อตัวของดาวฤกษ์ใหม่ได้พร้อมๆกันเป็นจำนวนมาก [2] ดังแสดงตัวอย่างของการเกิดกลไกอันตรกิริยากาแล็กซี-กาแล็กซีในรูปที่ 2 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณแก๊สที่มีเหลืออยู่ในกาแล็กซีนั้นๆ หรืออาจเป็นแก๊สที่ได้รับมาใหม่จากการเข้ารวมตัวของกาแล็กซีแคระซึ่งมีมวลน้อยกว่า 100 – 10,000 เท่าของกาแล็กซีชนิดกังหัน แต่อุดมไปด้วยแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์ที่ยังไม่เคยถูกใช้ก่อตัวเป็นดาวฤกษ์มาก่อน ซึ่งเป็นวัตถุดิบอย่างดีในการก่อตัวของดาวฤกษ์ใหม่ในรุ่นถัดไป ทั้งผลการวิจัยจากการจำลอง (Simulation) [4, 5] และข้อมูลสังเกตการณ์จากการศึกษาต่างๆ [6-8] ชี้ตรงกันว่า อันตรกิริยากาแล็กซี-กาแล็กซีมีอิทธิพลอย่างมากในการจุดระเบิดก่อเกิดดาวฤกษ์ในบริเวณรอบๆศูนย์กลางของกาแล็กซี จากการไหลของแก๊สเข้าสู่ส่วนในของศูนย์กลางกาแล็กซีแล้วถูกอัดแน่นจนก่อตัวเป็นดาวฤกษ์ขึ้น (จุดระเบิดในที่นี้ หมายถึงเมื่อแก๊สยุบตัวลงเพื่อก่อตัวเป็นดาวฤกษ์เกิดใหม่ต้องมีการจุดระเบิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ก่อนเสมอ จึงจะถือว่าแก๊สก้อนนั้นได้กลายเป็นดาวฤกษ์เกิดใหม่แล้วโดยสมบูรณ์ ซึ่งเป็นขั้นตอนตามปกติของกระบวนการก่อตัวเป็นดาวฤกษ์) และในบางกรณีก็มีอิทธิพลในระดับปานกลางในการจุดระเบิดก่อเกิดดาวฤกษ์ในบริเวณจานหรือแขนกังหันของกาแล็กซีร่วมด้วย กลไกอันตรกริยากาแล็กซี-กาแล็กซีนี้ยังหมายรวมถึงกรณีที่กาแล็กซีเคลื่อนที่เข้ามาเฉี่ยวชนกันรวมตัวกันในท้ายที่สุดอีกด้วย

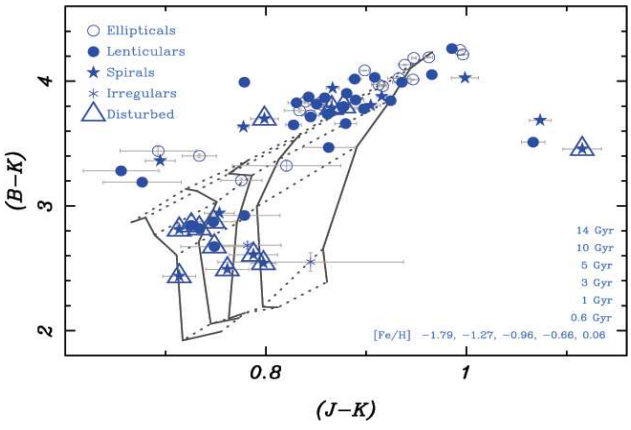
รูปที่ 2 ภาพซ้ายเป็นภาพถ่ายในย่านแสงที่ตามองเห็นของกลุ่มกาแล็กซีที่มีชื่อว่า Stephan's Quintet แสดงอันตรกิริยากาแล็กซี-กาแล็กซีภายหลังการเฉี่ยวชนกันในบริเวณที่มีจำนวนกาแล็กซีหนาแน่น ภาพขวา (เล็ก) มีการเน้นให้เห็นบริเวณที่มีการก่อตัวของดาวฤกษ์หนาแน่นอันเป็นผลของอันตรกิริยากาแล็กซี-กาแล็กซีภายหลังการเฉี่ยวชนกัน ด้วยแถบสีฟ้าซึ่งเป็นส่วนของภาพถ่ายรังสีเอ็กซ์ที่ซ้อนทับลงบนภาพถ่ายย่านแสงที่ตามองเห็น รูปจาก X-ray: NASA/CXC/CfA/E. O'Sullivan Optical: NASA, ESA, and the Hubble SM4 ERO Team

อีกกลไกหนึ่งที่มีบทบาทสำคัญ แต่เป็นกลไกที่หยุดยั้งการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่คือ **กลไกการฉีกทึ้งด้วยความดันกระแทก (Ram-pressure striping)** กลไกนี้ทำงานเมื่อมีกาแล็กซีตกเข้ามาในกระจุกกาแล็กซี ซึ่งโดยปกติกาแล็กซีที่ตกเข้ามาในกระจุกกาแล็กซีจะเคลื่อนที่เข้ามาด้วยความเร็วสูงประมาณ 1,000 km s^{-1} ท่ามกลางสสารภายในกระจุกกาแล็กซีที่มีความหนาแน่นสูง (10^{-4} – 10^{-3} atom cm^{-3}) และอุณหภูมิสูง (10^{7} - 10^{8} K) การปะทะนี้จะสร้างแรงดันมาขับไล่แก๊สและฝุ่นภายในกาแล็กซีนั้นออกไป [2,

9] ทำให้เหลือวัตถุดิบในการสร้างดาวฤกษ์ลดน้อยลง จนเป็นการยับยั้งการก่อตัวของดาวฤกษ์ที่อาจเกิดขึ้นด้วยกลไกอื่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับกาแล็กซีชนิดกังหัน [10] อย่างไรก็ตาม แก๊สโมเลกุลของกาแล็กซีที่กำลังตกเข้ามาในกระจุกกาแล็กซียังสามารถถูกชักนำให้ก่อตัวเป็นดาวฤกษ์ใหม่ได้ ทั้งในบริเวณนิวเคลียสและจานของกาแล็กซีนั้น อันเนื่องจากกลไกของอันตรกิริยาเชิงไทดัลระหว่างสนามพลังงานศักย์โน้มถ่วงของกระจุกกาแล็กซีกับกาแล็กซีนั้น กลไกนี้คล้ายคลึงกับกลไกอันตรกิริยากาแล็กซี-กาแล็กซี หากแต่เป็นกลไกที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างสนามพลังงานศักย์โน้มถ่วงของกระจุกกาแล็กซีทั้งกระจุกที่กระทำต่อกาแลกซีสมาชิก ซึ่งผลกระทบนี้อาจมีอิทธิพลมากกว่ากลไกการฉีกทึ้งด้วยความดันกระแทกต่อกระบวนการการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่ [11, 12] และเนื่องจากว่า ดาวฤกษ์ที่ก่อตัวขึ้นจากกระบวนการเร่งเร้าภายในกระจุกกาแล็กซีแบบนี้จะให้ดาวฤกษ์มวลมากเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมีอายุสั้นถึงสั้นมากในราวไม่กี่ร้อยล้านปี และเมื่อดาวฤกษ์ประเภทนี้ตายลง จะเกิดการระเบิดเป็นซูเปอร์โนวาทั้งสิ้น ดังนั้นลมขับดันของซูเปอร์โนวาที่เกิดขึ้นจากบริเวณที่เคยก่อตัวของดาวฤกษ์ใหม่นี้ จะขับไล่แก๊สไฮโดรเจนที่เหลืออยู่ภายใต้สนามของแรงโน้มถ่วงที่ดึงไว้อย่างอ่อนๆ ให้กระจายออกไปจากระนาบของจานกาแล็กซีเสียมาก [10, 11] ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งในการยับยั้งการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่ในรุ่นต่อไปด้วยเช่นกัน

การศึกษาการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่สามารถตรวจวัดได้หลายวิธี และการตรวจวัดที่เป็นที่ยอมรับและนิยมกันมากวิธีหนึ่งคือการตรวจวัดจากเส้นไฮโดรเจนอัลฟา Kennicutt (1983, 1998) [7, 13] ได้เสนอว่าเส้นไฮโดรเจนอัลฟาสามารถใช้วัดอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่ในกาแล็กซีได้ โดยมีแนวความคิดว่าดาวฤกษ์เกิดใหม่ซึ่งส่วนใหญ่เป็นดาวมวลมากจะมีอุณหภูมิสูง จึงแผ่รังสีอัลตราไวโอเลตออกสู่อวกาศ และเมื่อสารระหว่างดาวรอบๆดาวดวงนั้น ซึ่งส่วนใหญ่เป็นแก๊สไฮโดรเจนจะดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเลตนี้ไว้ จนกระทั่งเกิดความร้อนขึ้นมากพอที่จะแผ่เส้นไฮโดรเจนอัลฟาออกมาให้เราเห็น ดังนั้นเส้นไฮโดรเจนอัลฟาจึงสะท้อนถึงปริมาณการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่ได้เป็นอย่างดี Sakai et al. (2002) [14] ใช้เทคนิคนี้ในการศึกษาอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่ในกลุ่มกาแล็กซีหนึ่งที่ตกเข้ามาในกระจุกกาแล็กซี Abell 1367 และพบว่า กาแล็กซีกลุ่มนี้ประกอบไปด้วยกาแล็กซียักษ์สองกาแล็กซีคือ CGCG 97-114 และ CGCG 97-125 พร้อมด้วยกาแล็กซีแคระหลายกาแล็กซีที่กำลังมีการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่ในอัตราที่สูง ซึ่งกาแล็กซีกลุ่มนี้กำลังเคลื่อนที่ตกเข้ามาด้วยความเร็วเฉลี่ยประมาณ 1,700 km s^{-1} Sakai et al. (2002) [14] ระบุว่า การก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่ของกาแล็กซีในกลุ่มนี้เกิดจากกลไกของอันตรกิริยากาแล็กซี-กาแล็กซี และการรวมกันของบางคู่กาแล็กซีในระหว่างที่ตกเข้ามาในกระจุกกาแล็กซี Abell 1367

ในช่วงระยะเวลาหลายทศวรรษที่ผ่านมา มีกลุ่มนักวิจัยหลายกลุ่มที่เสนอแบบจำลองต่างๆมากมายเพื่อบ่งชี้ อายุเฉลี่ย และค่าปริมาณโลหะเฉลี่ยในรูปของสัดส่วนของธาตุเหล็กต่อไฮโดรเจน ([Fe/H]) ของดาวฤกษ์สมาชิกในกาแล็กซีที่กำลังพิจารณาโดยการใช้ค่าดัชนีสีของดาวฤกษ์ในช่วงแสงที่ตามองเห็นและคลื่นอินฟราเรด โดยอายุเฉลี่ยของดาวฤกษ์สมาชิกในกาแล็กซีบ่งชี้ถึงปริมาณการก่อตัวของดาวฤกษ์ในช่วงเวลาต่างๆกันที่ผ่านมา และค่าปริมาณโลหะเฉลี่ยของดาวฤกษ์สมาชิกในกาแล็กซีบ่งชี้ว่าแก๊สที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการสร้างดาวฤกษ์ที่ผ่านมาเป็น แก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์ หรือ แก๊สที่ปนเปื้อนธาตุหนักซึ่งมาจากการแตกสลายของดาวรุ่นก่อนหน้านี้ มากน้อยเท่าใด ทั้งสองปริมาณบอกกล่าวถึงวิวัฒนาการที่กาแล็กซีนี้เคยประสบมานั่นเอง



รูปที่ 3 ภาพแสดงแบบจำลองของ Pietrinferni et al. (2004) ที่ใช้ในการประมาณค่าอายุเฉลี่ย และค่าปริมาณโลหะเฉลี่ยของดาวฤกษ์สมาชิกของกาแล็กซีในกระจุกกาแล็กซี Abell 1367 [16] (Kriwattanawong et al. 2011)

Pietrinferni et al. (2004) [15] ได้เสนอแบบจำลองหนึ่งที่ใช้จำแนกค่าอายุเฉลี่ยและค่าปริมาณโลหะเฉลี่ยของดาวฤกษ์

สมาชิกของกาแล็กซี ดังแสดงในรูปที่ 3 กล่าวคือแกนตั้งแทนค่าดัชนีสี (B-K) และแกนนอนแทนค่าดัชนีสี (J-K) แบบจำลองของ Pietrinferni et al. (2004) [15] นี้แสดงด้วยกริดสองมิติ คือ เส้นประแสดงตำแหน่งของวัตถุที่มีอายุเท่ากัน โดยเริ่มจากอายุน้อยสุด 600 ล้านปี (เส้นล่างสุด) จนถึง 14,000 ล้านปี (เส้นบนสุด) และ เส้นทึบแสดงตำแหน่งของวัตถุที่มีปริมาณโลหะเท่ากัน โดยเริ่มจากค่าปริมาณโลหะ [Fe/H] ต่ำสุดที่ -1.79 (เส้นซ้ายสุด) ไปจนถึง 0.06 (เส้นขวาสุด) และตำแหน่งค่าดัชนีสีทั้งสองของกาแล็กซีถูกระบุลงในแผนภาพ ด้วยสัญลักษณ์ที่แตกต่างกันตามชนิดของกาแลกซีที่ศึกษา โดยที่วงกลมเปิดแทนกาแล็กซีทรงรี, วงกลมปิดแทนกาแล็กซีชนิดเลนส์, ดาวห้าแฉกแทนกาแล็กซีชนิดกังหัน, ดอกจันแทนกาแล็กซีชนิดไร้รูปทรง และสามเหลี่ยมแทนกาแล็กซีที่มีลักษณะถูกรบกวนไม่ว่าจะเป็นกาแล็กซีชนิดใดก็ตาม โดยกาแล็กซีที่ถูกรบกวนนี้ คือกาแล็กซีที่มีโครงสร้างชัดเจนแต่มีลักษณะเว้าแหว่งหรือบิดเบี้ยวไม่สมมาตร อันเนื่องจากการถูกเฉี่ยว ถูกชนหรือเพิ่งผ่านการรวมตัวกับกาแล็กซีอื่นในอดีตเมื่อไม่นานมานี้ หรืออาจเป็นกาแล็กซีคู่ที่อยู่ใกล้กันมากพอที่จะเกิดกลไกอันตรกิริยากาแล็กซี-กาแล็กซีได้ Kriwattanawong et al. (2011) [16] ระบุว่ากาแล็กซีที่มีลักษณะถูกรบกวนในกระจุกกาแล็กซี Abell 1367 มีแนวโน้มที่จะประสบกับสภาวะของการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่ในระดับสูง และส่งผลให้ค่าปริมาณโลหะเฉลี่ยของดาวฤกษ์สมาชิกในกาแล็กซีกลุ่มนี้ น้อยกว่า กาแล็กซีปกติ (ที่ไม่มีลักษณะบ่งชี้ว่าถูกรบกวน) ซึ่งเป็นกลุ่มกาแล็กซีที่ถูกพบการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่ไม่โดดเด่นมากนักหรือไม่พบเลยในกระจุกกาแล็กซีอื่นทั่วไป นอกจากนี้กาแล็กซีในกระจุกกาแล็กซี Abell 1367 นี้ยังสนับสนุนความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณโลหะเฉลี่ยกับมวลของกาแล็กซีในแนวทางเดียวกันกับที่ Gallazzi et al. (2004) [17] และ Nelan et al. (2005) [18]ได้เคยรายงานไว้ว่ากาแล็กซีที่มีมวลมากกว่าจะมีค่าปริมาณโลหะเฉลี่ยของดาวฤกษ์สมาชิกสูงกว่ากาแล็กซีที่มีมวลน้อยกว่า

ยังมีคำถามอื่นอีกมากมายที่นักฟิสิกส์ดาราศาสตร์สาขานี้กำลังค้นหาคำตอบ อาทิเช่น แก๊สที่ใช้ในการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่เหล่านี้ แท้จริงแล้วมีมาแต่ดั้งเดิมในกาแล็กซีเองหรือได้รับแก๊สใหม่มาจากการตกใส่ของกาแล็กซีแคระที่ใกล้ๆโดยรอบ, ทำไมกาแล็กซีแคระเล็กๆหรี่ๆมากมายที่เพิ่งถูกค้นพบใหม่อันเนื่องจากเทคโนโลยีของกล้องโทรทรรศน์และอุปกรณ์ที่มีการพัฒนาให้ดีขึ้น ถึงมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่หลากหลายและแตกต่างออกไปมากจากกาแล็กซียักษ์ทั่วไปที่เรารู้จักเป็นอย่างดี เช่น ค่าดัชนีสี ความเข้มของเส้นไฮโดรเจน อายุเฉลี่ย และ ค่าปริมาณโลหะเฉลี่ย เป็นต้น กาแล็กซีแคระเหล่านี้ก่อตัวมาอย่างไร มีวิวัฒนาการอย่างไร และมีส่วนในวิวัฒนาการของกาแล็กซียักษ์ทั่วไปหรือไม่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งมีบทบาทต่อวิวัฒนาการของเอกภพด้วยหรือไม่ มากน้อยแค่ไหนอย่างไร คำถามมากมายต่างๆเหล่านี้ยังคงรอคอยการค้นหาคำตอบ เพื่อที่จะได้พบเจอคำถามถัดไปอย่างไม่มีวันสิ้นสุด ประหนึ่งว่าเป็นรางวัลหล่อเลี้ยงนักค้นหาให้ค้นหาต่อไป

เอกสารอ้างอิง

[1] Kennicutt, R. C. 1998, ARA&A, 36, 189

[2] Boselli, A. & Gavazzi, G. 2006, PASP, 118, 517

[3] Dressler, A. 1980, ApJ, 236, 351

[4] Mihos, J. C., Richstone, D. O., & Bothun, G. D. 1992, ApJ, 400, 153

[5] Iono, D., Yun, M. S., & Mihos, J. C. 2004, ApJ, 616, 199

[6] Keel, W. C., Kennicutt, R. C., Hummel, E., & van der Hulst, J. M. 1985, AJ, 90, 708

[7] Kennicutt, R. C., Roettiger, K. A., Keel, W. C., van der Hulst, J. M., & Hummel, E. 1987, AJ, 93, 1011

[8] Moss, C. 2006, MNRAS, 373, 167

[9] Gunn, J. E. & Gott, J. R. I. 1972, ApJ, 176, 1

[10] Byrd, G. & Valtonen, M. 1990, ApJ, 350, 89

[11] Henriksen, M. & Byrd, G. 1996, ApJ, 459, 82

[12] Fujita, Y. 1998, ApJ, 509, 587

[13] Kennicutt, R. C. 1983, ApJ, 272, 54

[14] Sakai, S., Kennicutt, R. C., van der Hulst, J. M., & Moss, C. 2002, ApJ, 578, 842

[15] Pietrinferni, A., Cassisi, S., Salaris, M., & Castelli, F. 2004, ApJ, 612, 168

[16] Kriwattanawong, W., Mouhcine, M., & James, P. A., "Star Formation Activity in Nearby Cluster Galaxies: Metallicity Change", 2011, ASP Conf. Ser., The 11th Pacific Rim Conference on Stellar Astrophysics, 451, 225

[17] Gallazzi, A., Charlot, S., Brinchmann, S., White, S. D. M., & Tremonti, C. A. 2005, MNRAS, 362, 41

[18] Nelan, J. E., Smith, R. J., Hudson, M. J., Wegner, G. A., Lucey, J. R., Moore, S. A. W., Quinney, S. J., & Suntzeff, N. B., 2005, ApJ, 632, 137

การใช้แบบจำลอง ‘อาทิตย์ทรงกลด’ ไขปริศนาธรรมชาติ

บัญชา ธนบุญสมบัติ[1,*]

ใครก็ตามที่ได้เห็นปรากฏการณ์อาทิตย์ทรงกลด (solar halos) แบบแปลกๆ (ที่ไม่ใช่เพียงแค่วงกลมรอบดวงอาทิตย์) ก็น่าจะประทับใจไม่น้อย และอาจจะสงสัยว่าแถบสีและเส้นแสงแบบต่างๆ ดังกล่าวเกิดขึ้นได้อย่างไร

การเกิดอาทิตย์ทรงกลดอธิบายโดยย่อได้ว่า ผลึกน้ำแข็งในเมฆหักเหหรือสะท้อนแสงอาทิตย์ แต่เนื่องจากผลึกเหล่านี้มีหลายรูปทรง (รูปที่ 1) และรูปทรงเดียวกันยังอาจเอียงตัวในอากาศแตกต่างกันได้หลายทิศทาง ทำให้เส้นทางที่แสงอาทิตย์พุ่งเข้ามายังผลึกและหักเห (หรือสะท้อน) ออกไปแตกต่างกัน ปรากฏเป็นรูปแบบการทรงกลดแตกต่างกันมาถึงราว 50 รูปแบบได้นั่นเอง [1]

รูปที่ 1. รูปร่างของผลึกน้ำแข็งที่อาจทำให้เกิดอาทิตย์ทรงกลด (ที่มา http://atoptics.co.uk/halo/platcol.htm)

เพื่อให้เข้าใจเรื่องนี้ชัดเจนยิ่งขึ้น ผู้เขียนขอใช้อาทิตย์ทรงกลดเมื่อวันจันทร์ที่ 16 พฤษภาคม พ.ศ. 2554 ซึ่งเกิดขึ้นที่กรุงเทพและปริมณฑลเป็นกรณีศึกษาแบบลงรายละเอียด ในช่วงท้ายของบทความจะนำเสนอผลการจำลองการทรงกลดรูปแบบอื่นๆ โดยย่อเพื่อให้เห็นความหลากหลายของปรากฏการณ์และขีดความสามารถของโปรแกรมคำนวณที่ใช้

อาทิตย์ทรงกลดเมื่อวันที่ 16 พฤษภาคม 2554 ที่กรุงเทพและปริมณฑล

เมื่อวันจันทร์ที่ 16 พฤษภาคม 2554 ได้เกิดอาทิตย์ทรงกลดในกรุงเทพและปริมณฑล โดยมีผู้เก็บภาพไว้ได้หลายคน แต่ในที่นี้จะขอเลือกใช้ภาพ 2 ภาพ ต่อไปนี้ ได้แก่ ภาพอาทิตย์ทรงกลดที่ ต.ราชาเทวะ อ.บางพลี จ.สมุทรปราการ เมื่อเวลา 9:32 น. ถ่ายโดยคุณทวี ขนขจี (รูปที่ 2) และ ภาพอาทิตย์ทรงกลดที่ อ.คลองสาน กรุงเทพมหานคร เมื่อเวลา 10:52 น. ถ่ายโดยคุณรุจิรา สาธิตภัทร (รูปที่ 3)

รูปที่ 2. อาทิตย์ทรงกลดที่ราชาเทวะ ภาพโดย ทวี ขนขจี

ในรูปที่ 2 ปรากฏการทรงกลดอย่างน้อย 3 แบบ ได้แก่ (ก) วงกลม 22 องศา (22-degree halo) ซึ่งเป็นวงกลมเส้นจางๆ รอบดวงอาทิตย์ (ข) การทรงกลดแบบเซอร์คัมสไครบด์ (circumscribed halo) ซึ่งเป็นวงรีเส้นค่อนข้างเข้ม โดยมีขอบบนและขอบล่างแตะวงกลม 22 องศา และ (ค) เส้นวงกลมพาร์ฮีลิก (parhelic circle) ซึ่งเป็นเส้นโค้งหงายลากผ่านดวงอาทิตย์

[1] นักวิชาการ (ดร.) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)

รูปที่ 3 อาทิตย์ทรงกลดที่คลองสาน ภาพโดย รุจิรา สาธิตภัทร

ส่วนในรูปที่ 3 ปรากฏการทรงกลดอย่างน้อย 2 แบบ ได้แก่ (ก) การทรงกลดแบบเซอร์คัมสไครบด์ ซึ่งเป็นเส้นโค้งหงายด้านบนของภาพ และ (ข) เส้นอินฟราแลตเทอรัล (infralateral arc) ซึ่งเป็นแถบสีรุ้งด้านล่างของภาพ

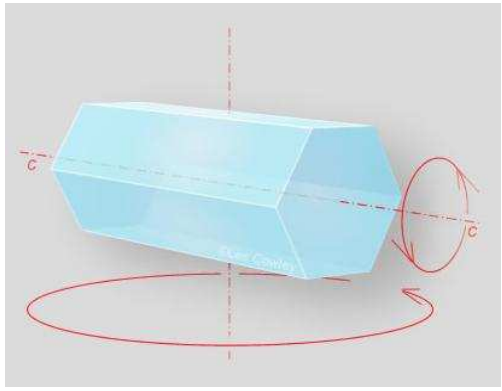
แม้ว่ารูปแบบของอาทิตย์ทรงกลดที่ราชาเทวะและที่คลองสานจะดูแตกต่างกันอย่างมาก อีกทั้งสถานที่ทั้งสองก็อยู่ห่างกัน และเวลาที่ถ่ายภาพได้ก็แตกต่างกัน แต่ผู้เขียนจะขอแสดงให้เห็นว่า อาทิตย์ทรงกลดทั้งสองภาพนี้สามารถอธิบายได้โดยใช้ผลึกน้ำแข็งชุดเดียวกัน ด้วยเหตุผลดังต่อไปนี้

1) มุมเงยของดวงอาทิตย์ของสถานที่ทั้งสองแห่ง ณ เวลาเดียวกันใกล้เคียงกันมาก ทำให้สามารถประมาณได้ว่าการทรงกลดเกิดที่ตำแหน่งเดียวกันในการคำนวณ (เลือกใช้พิกัดของราชาเทวะในบทความนี้) ตัวอย่างเช่น ที่เวลา 9:32น. มุมเงยของดวงอาทิตย์ (sun altitude) ที่ราชาเทวะ ประมาณ 51 องศา และที่คลองสานประมาณ 50.8 องศา ความแตกต่างของมุมเพียง 0.2 องศา แทบไม่มีผลต่อรูปร่างปรากฏของเส้นทรงกลดหากมีผลึกน้ำแข็งลักษณะเดียวกันกระจายปกคลุมท้องฟ้า

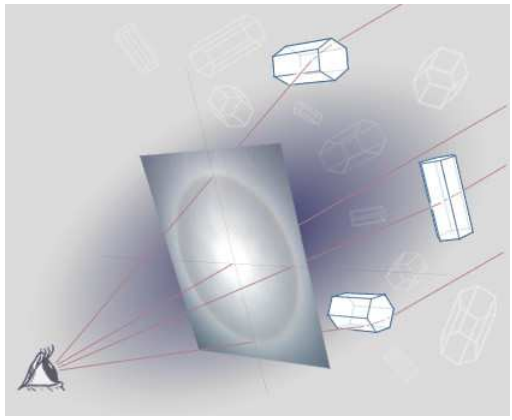
มุมเงยของดวงอาทิตย์คำนวณโดยโปรแกรม NOAA Solar Calculator ตามแหล่งข้อมูลอ้างอิง [3] ส่วนการระบุสถานที่ได้ใช้พิกัดของสถานีตำรวจภูธรราชาเทวะ (ละติจูด 13.71N และลองจิจูด 100.77E) และพิกัดของสำนักงานเขตคลองสาน (ละติจูด 13.73N และ 100.51E) เป็นตัวแทนในการคำนวณ

2) ผลึกน้ำแข็งที่ทำให้เกิดรูปแบบการทรงกลดน่าจะเป็นชุดเดียวกัน เนื่องจากการทรงกลดในรูปที่ 1 และ 2 อาจจำลองได้โดยการใช้ผลึกน้ำแข็ง 2 ชุดย่อย ดังนี้

ผลึกชุดย่อยที่ 1 ผลึกน้ำแข็งรูปแท่ง (columnar ice crystal) วางตัวในแนวนอน (รูปที่ 4) เนื่องจากผลึกลักษณะนี้จะให้เส้นการทรงกลดแบบเซอร์คัมสไครบด์ เส้นวงกลมพาร์ฮีลิกและเส้นอินฟราแลตเทอรัล อย่างไรก็ดี เส้นวงกลมพาร์ฮีลิกอาจเกิดจากผลึกน้ำแข็งแบบแผ่นได้ด้วยเช่นกัน แต่ในที่นี้จะไม่พิจารณาผลึกลักษณะนี้เนื่องจากจะทำให้เกิดเส้นการทรงกลดรูปแบบอื่นๆ ที่ไม่ปรากฏในภาพ



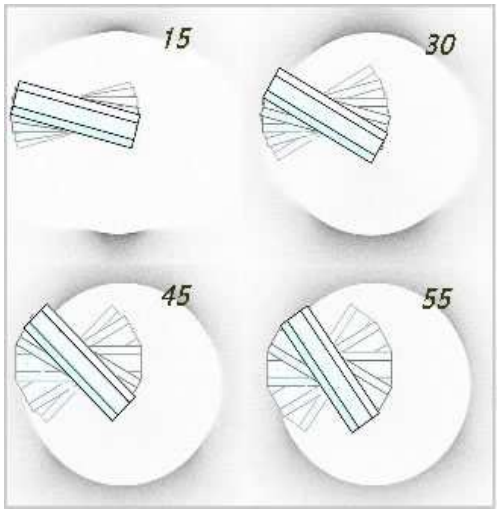
รูปที่ 4 ผลึกน้ำแข็งรูปแท่งวางตัวในแนวนอน



รูปที่ 5 กลไกการเกิดวงกลม 22 องศา (ที่มา http://atoptics.co.uk/halo/circ2.htm)

ผลึกชุดย่อยที่ 2 : ผลึกน้ำแข็งรูปแท่ง วางตัวอย่างไร้ทิศทางแน่นอน เนื่องจากผลึกลักษณะนี้จะทำให้เกิดการทรงกลดแบบวงกลม 22 องศา ในทางปฏิบัติ ผลึกน้ำแข็งรูปแท่งเฉพาะที่มี

แกนผลึกตั้งฉากกับทิศทางของรังสีจากดวงอาทิตย์โดยประมาณ เท่านั้นที่จะทำให้เราเห็นอาทิตย์ทรงกลดแบบนี้ (รูปที่ 5) อย่างไรก็ดี ควรรู้ไว้ด้วยว่าผลึกไม่จำเป็นต้องเรียงตัวไร้ทิศทางอย่างสมบูรณ์แบบ เพราะเพียงแค่เบี่ยงเบนไปจากแนวนอนในช่วง 30-45 องศา ก็พอทำให้เราเห็นการทรงกลดแบบวงกลม 22 องศา โดยที่เส้นจะเข้มด้านบนและล่างแล้ว (รูปที่ 6)



รูปที่ 6 การเอียงตัวของผลึกกับการเกิดวงกลม 22 องศา (ที่มา http://atoptics.co.uk/halo/random.htm)

การคำนวณรูปแบบอาทิตย์ทรงกลด

ผู้เขียนใช้โปรแกรม HaloPoint 2.0 ซึ่งพัฒนาโดย Jukka Ruoskanen ในการจำลองเหตุการณ์ โปรแกรมนี้และคู่มือการใช้งานสามารถดาวน์โหลดได้จากเว็บตามแหล่งข้อมูลอ้างอิง [4] โดยในที่นี้จะให้ข้อมูลไว้พอสังเขป เพื่อให้คุณผู้อ่านที่สนใจสามารถทดลองสร้างทรงกลดจำลองได้ด้วยตนเอง

เพื่อให้เห็นภาพรวมในการเกิดอาทิตย์ทรงกลดรูปแบบต่างๆ ผู้เขียนได้เพิ่มเงื่อนไขในการคำนวณว่า ผลึกน้ำแข็งทั้งสองชุดย่อยกระจายปกคลุมท้องฟ้าตลอดช่วงเวลา 6:00 น. ถึง 11:30 น. ซึ่งจะช่วยให้เราได้เห็นอาทิตย์ทรงกลดรูปแบบอื่นๆ ที่อาจเกิดขึ้นนอกเหนือจากภาพที่ราชาเทวะ (เวลา 9:32 น.) และภาพที่คลองสาน (เวลา 10:52 น.) อีกด้วย

การจำลองเหตุการณ์เริ่มจากการคำนวณมุมเงยของดวงอาทิตย์ (ที่มองเห็นจากราชาเทวะ) ตั้งแต่เวลา 6:00 น. ไปจนถึง 11:30 น. โดยมีระยะห่างกัน 30 นาที จากนั้นจึงใช้โปรแกรมคำนวณรูปแบบอาทิตย์ทรงกลดที่มุมเงยต่างๆ โดยระบุลักษณะของผลึกน้ำแข็งตามชุดผลึกย่อยทั้งสอง

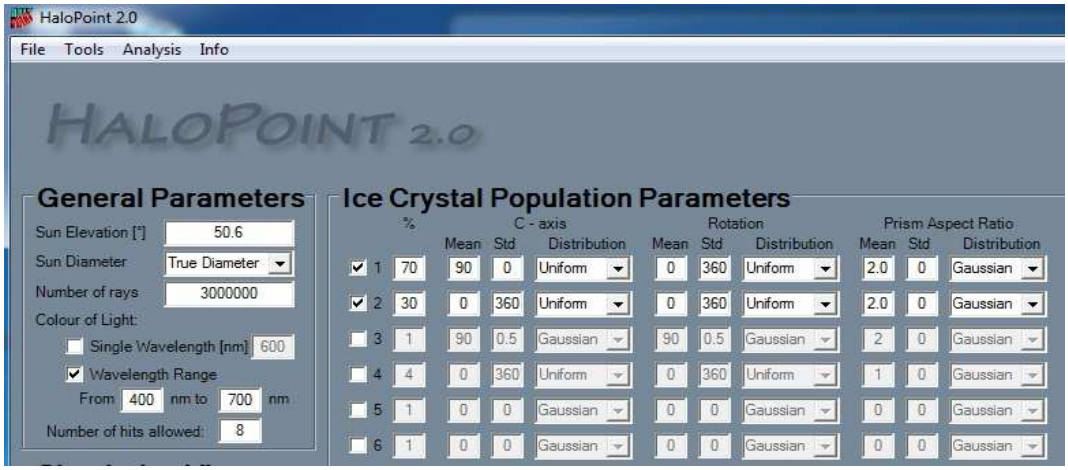
ในการคำนวณได้ใช้ข้อมูลดังตัวอย่างต่อไปนี้ (รูปที่ 7) ช่อง General Parameters : Sun Elevation = 50.6 องศา (มุมเงยของดวงอาทิตย์ที่เวลา 9:30 น.) ช่อง Ice Crystal Population Parameters ติ๊กช่อง 1 และ 2 สำหรับผลึกชุดย่อยที่ 1และ 2 ตามลำดับ โดยที่สำหรับผลึกทั้งสองชุด ลองใช้ค่า Prism Aspect Ratio โดยเลือก Mean = 2.0 และ Std = 0 (หมายถึง ผลึกรูปแท่งซึ่งมีความสูงเป็น 2 เท่าของความกว้าง) ผลึกชุดย่อยที่ 1 (ปริมาณ 70%) มีค่า C-axis คือ Mean = 90 และ Std = 0 และค่า Rotation คือ Mean = 0 และ Std = 360 (หมายถึง ผลึกรูปแท่งวางตัวในแนวนอน โดยผลึกอาจหมุนรอบแกนได้อย่างอิสระ 360 องศา) ผลึกชุดย่อยที่ 2 (ปริมาณ 30%) มีค่า C-axis คือ Mean = 0 และ Std = 360 และค่า Rotation คือ Mean = 0 และ Std = 360 (หมายถึง ผลึกรูปแท่งวางตัวอย่างไร้ทิศทาง) ในส่วนการแสดงผลกราฟิก ให้เลือกหรือกรอกข้อมูลต่างๆ ในช่อง Simulation View ดังต่อไปนี้ : Lens Type = Rectilinear, Focal Length (mm) = 12, Sensor Size (mm) W = 34 และ H = 34 และ Center of Image = Sun

ผลการจำลองเหตุการณ์

จากผลการจำลองพบว่า เมื่อเวลาผ่านไปดวงอาทิตย์จะอยู่สูงจากขอบฟ้ามากขึ้น (มุมเงยสูงขึ้น) โดยรูปแบบการทรงกลดจะเปลี่ยนแปลงไปตามมุมเงยดังนี้

วงกลม 22 องศา (22-degree halo) เส้นวงกลมนี้ปรากฏในทุกช่วงเวลา โดยมีข้อสังเกตว่าวงกลมนี้ถูกการทรงกลดแบบเซอร์คัมสไครบด์ทับซ้อนในช่วงเวลา 11:00 น. (มุมเงย 71.7 องศา) และเวลา 11:30 น. (มุมเงย 78.4 องศา) เนื่องจากการทรงกลดแบบเซอร์คัมสไครบด์จะมีรูปร่างเป็นวงกลมขนาด 22 องศาเมื่อมุมเงยมีค่าเกิน 70 องศาขึ้นไป

เส้นสัมผัสบน (upper tangent arc) เส้นนี้มีลักษณะคล้ายตัว V เมื่อเวลา 6:00 น. โดยปลายแหลมแตะส่วนบนของวงกลม 22 องศา เมื่อมุมเงยสูงขึ้น เส้นนี้จะมีมุมป้านขึ้นและจะเชื่อมต่อกับเส้นสัมผัสล่างเมื่อเวลาประมาณ 8:30 น. (มุมเงย 36.4 องศา) เมื่อเส้นสัมผัสบนเชื่อมต่อกับเส้นสัมผัสล่างจะเรียกว่า การทรงกลดแบบเซอร์คัมสไครบด์



รูปที่ 7 ข้อมูลที่กรอกในโปรแกรม HaloPoint 2.0 สำหรับการคำนวณอาทิตย์ทรงกลดใน

เส้นสัมผัสล่าง (lower tangent arc) เส้นนี้ปรากฏให้เห็นเหนือขอบฟ้าก่อนเวลา 8:00 น. โดยมีลักษณะคล้ายตัว V กลับหัว ส่วนแหลมแตะขอบล่างของวงกลม 22 องศา (หากเส้นสัมผัสล่างอยู่ต่ำกว่าขอบฟ้าจะมองไม่เห็น ยกเว้นผู้มองอยู่ในที่สูงกว่าระดับพื้น) เมื่อมุมเงยมากขึ้น เส้นสัมผัสล่างจะเชื่อมต่อกับเส้นสัมผัสบนเรียกว่า การทรงกลดแบบเซอร์คัมสไครบด์ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

การทรงกลดแบบเซอร์คัมสไครบด์ (circumscribed halo) การทรงกลดแบบนี้เกิดขึ้นเมื่อเส้นสัมผัสบนและเส้นสัมผัสล่างมาเชื่อมต่อกัน (ในกรณีนี้คือเวลาประมาณ 8:30 น. หรือมุมเงย 36.4 องศา)

แง่มุมที่สำคัญก็คือ รูปร่างของการทรงกลดแบบเซอร์คัมสไครบด์เปลี่ยนแปลงไปตามมุมเงยของดวงอาทิตย์ กล่าวคือ เริ่มจากรูปร่างคล้ายๆ แว่นตานักประดาน้ำ จากนั้นเส้นข้างจะหดเข้ากลายเป็นวงรี (เวลา 9:30น. มุมเงย 50.6 องศา) และเมื่อหดไปเรื่อยๆ ก็จะกลายเป็นวงกลมทับซ้อนกับวงกลม 22 องศาในที่สุด (เวลา 11:00 น. มุมเงย 71.7 องศา) น่ารู้ไว้ด้วยว่า วงกลมที่เกิดจากการทรงกลดแบบเซอร์คัมสไครบด์จะมีเส้นสว่างและสีสันจัดจ้านกว่าวงกลม 22 องศาแบบปกติ

เส้นเซอร์คัมสไครบด์รูปวงรีนี้เองที่ปรากฏในภาพอาทิตย์ทรงกลดที่ราชาเทวะ (รูปที่ 2)

วงกลมพาร์ฮีลิก (parhelic circle) การทรงกลดแบบนี้มีลักษณะเป็นเส้นวงรอบตัดผ่านดวงอาทิตย์ โดยที่มุมเงยต่ำๆ เส้นนี้จะลากวนรอบท้องฟ้า แต่เมื่อมุมเงยสูงขึ้น เส้นวงรอบนี้จะมีขนาดหดเล็กลงเรื่อยๆ

เส้นซูปราแลตเทอรัล (supralateral arc) เส้นนี้ปรากฏอยู่ด้านบนวงกลม 22 องศา โดยมีลักษณะเป็น 2 เส้นแยกจากกันที่เวลา 6:00 น. และเชื่อมต่อกันเป็นเส้นเดียวในช่วงเวลา 6:30-7:30 น.

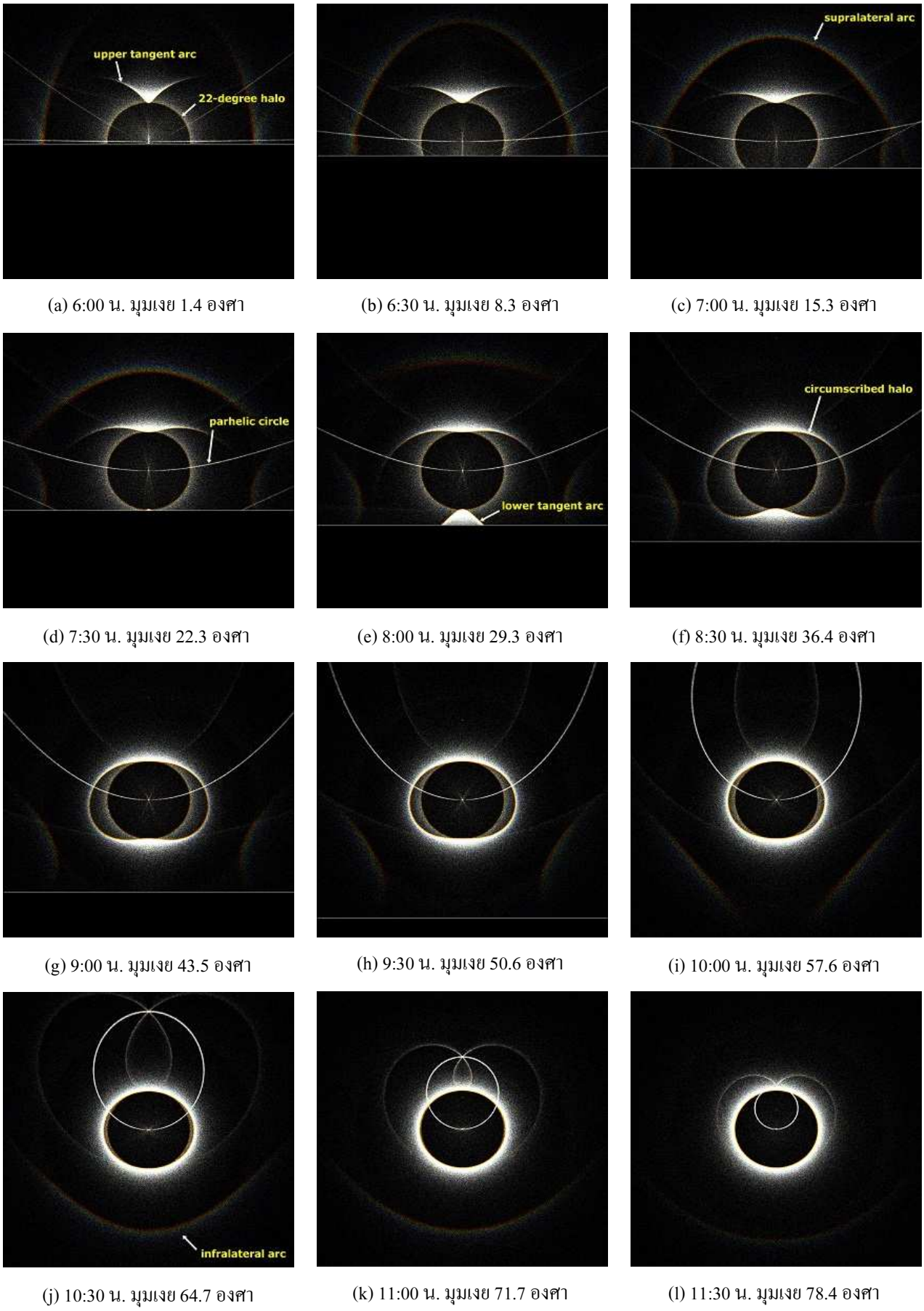
เส้นอินฟราแลตเทอรัล (infralateral arc) เส้นนี้ปรากฏอยู่ด้านข้างวงกลม 22 องศา โดยมีลักษณะเป็น 2 เส้นแยกจากกันที่เวลา 6:30 น. แต่เมื่อมุมเงยสูงขึ้น ก็จะค่อยๆ เลื่อนลงไปทางด้านล่างของดวงอาทิตย์ และในที่สุดก็เชื่อมต่อกันเป็นเส้นเดียวที่เวลา 10:30 น.

เส้นอินฟราแลตเทอรัลนี้เองที่ปรากฏอย่างชัดเจนในภาพอาทิตย์ทรงกลดที่คลองสาน (รูปที่ 3)

จากผลการคำนวณจะเห็นว่า ภาพอาทิตย์ทรงกลดที่ราชาเทวะ (รูปที่ 1) ใกล้เคียงกับรูปที่ 8(h) และภาพอาทิตย์ทรงกลดที่คลองสาน (รูปที่ 2) ใกล้เคียงกับรูปที่ 8(k) ซึ่งเป็นข้อสนับสนุนสมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณตั้งแต่ต้น

ผู้อ่านที่สนใจกรณีศึกษาอาทิตย์ทรงกลดเมื่อวันที่ 16 พฤษภาคม 2554 ที่ราชาเทวะและคลองสาน สามารถชมคลิปสรุปภาพรวมปรากฏการณ์ได้ตามแหล่งข้อมูลอ้างอิง [5]

มีข้อสังเกตที่ควรทราบว่า ปรากฏการณ์ทรงกลดตามรูปแบบในรูปที่ 8 นี้เกิดขึ้นเป็นระยะ เช่น เมื่อวันที่ 5 กันยายน 2554 ที่อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย (อยู่ติดกับมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต) ก็เกิดเส้นทรงกลดวงกลมและวงรีคล้ายรูปที่ 8(h) เมื่อเวลาประมาณ 9:30 น. ทำให้ผู้เขียนสามารถคาดการณ์ได้ล่วงหน้าว่าลักษณะเส้นทรงกลดจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรได้อย่างแม่นยำ ซึ่งหมายความว่าการทรง



(a) 6:00 น. มุมเงย 1.4 องศา (b) 6:30 น. มุมเงย 8.3 องศา (c) 7:00 น. มุมเงย 15.3 องศา

(d) 7:30 น. มุมเงย 22.3 องศา (e) 8:00 น. มุมเงย 29.3 องศา (f) 8:30 น. มุมเงย 36.4 องศา

(g) 9:00 น. มุมเงย 43.5 องศา (h) 9:30 น. มุมเงย 50.6 องศา (i) 10:00 น. มุมเงย 57.6 องศา

(j) 10:30 น. มุมเงย 64.7 องศา (k) 11:00 น. มุมเงย 71.7 องศา (l) 11:30 น. มุมเงย 78.4 องศา

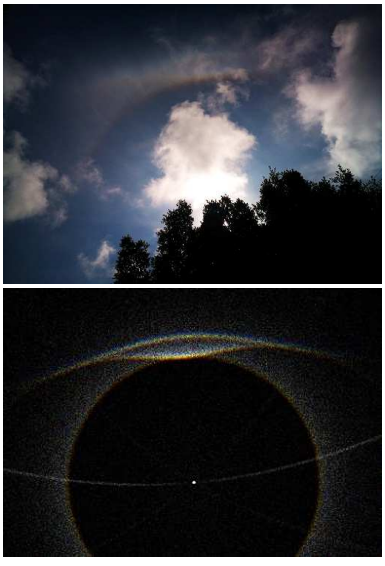
รูปที่ 8 ผลการจำลองอาทิตย์ทรงกลดเมื่อวันที่ 16 พฤษภาคม 2554 ที่กรุงเทพและปริมณฑล

กลดในครั้งนี้สามารถใช้แบบจำลองผลึกน้ำแข็งเดียวกับ (หรือใกล้เคียงกับ) แบบจำลองที่ใช้สำหรับวันที่ 16 พฤษภาคม 2554 นั่นเอง (อย่างไรก็ดี หากต้องการความแม่นยำ ก็จำเป็นต้องวัดความเข้มของเส้นทรงกลดที่เวลาต่างๆ เพื่อปรับแบบจำลองผลึกน้ำแข็งให้ได้ความเข้มใกล้เคียงกับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น)

กรณีศึกษาอื่นๆ ที่น่าสนใจ

ตัวอย่างอาทิตย์ทรงกลดและการจำลองเหตุการณ์ต่อไปนี้ ผู้อ่านที่สนใจสามารถศึกษาได้จากแหล่งข้อมูลอ้างอิง [6]

รูปที่ 9 การทรงกลดแบบ upper tangent arc บนเส้นทางเพชรบูรณ์-หล่มสัก ภาพถ่ายโดย Wanna Tantanawat ภาพจำลองโดยผู้เขียน



รูปที่ 10 การทรงกลดแบบ 22-degree halo, upper tangent arc, parhelic circle และ suncave Parry arc ที่ อ.แม่ริม จ.เชียงใหม่ ภาพถ่ายโดย เกศราภรณ์ แสงแก้ว ภาพจำลองโดยผู้เขียน

รูปที่ 11 การทรงกลดแบบ circumzenithal arc, upper tangent arc และ sundogs ที่ อ.ขลุง จ.จันทบุรี ภาพถ่ายโดย รุจิณี สันติกุล ภาพจำลองโดยผู้เขียน

สรุป

เราสามารถสร้างแบบจำลองผลึกน้ำแข็งในเมฆเพื่อให้เข้าใจการเกิดอาทิตย์ทรงกลดรูปแบบต่างๆ ได้ คุณผู้อ่านที่เริ่มสนใจลองหาโอกาสสังเกตท้องฟ้าให้บ่อยยิ่งขึ้น และอาจลองใช้โปรแกรม HaloPoint 2.0 ที่แนะนำไว้ได้ ไม่แน่ว่าคุณอาจจะสนุกสนานกับการตามล่าอาทิตย์ทรงกลดเหมือนกับอีกหลายๆ คนก็เป็นได้!

*E-mail : buncha2509@gmail.com
Facebook: www.facebook.com/buncha2509
ผู้ก่อตั้งชมรมคนรักมวลเมฆ
www.facebook.com/groups/CloudLoverClub

เอกสารอ้างอิง

[1] http://atoptics.co.uk/halosim.htm
[2] http://cloudloverclub.com/pages/sarakadee-halo/
[3] http://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc
[4] http://www.jukri.net/halopoint2.html
[5] http://photopeach.com/album/12aiy1y
[6] http://cloudloverclub.com/pages/simulation-examples/

OCT: นวัตกรรมของภาพถ่ายทางการแพทย์

พนมศักดิ์ มีมนต์[1]

Optical Coherence Tomography หรือ OCT ถือได้ว่าเป็นเทคโนโลยีใหม่ ที่เพิ่งถือกำเนิดได้เพียง 2 ทศวรรษเท่านั้น แต่ทว่าถือเป็นอีกหนึ่งก้าวสำคัญของการพัฒนาระบบถ่ายภาพเพื่อประโยชน์ทางการแพทย์ ซึ่งจนถึงปัจจุบัน เทคโนโลยี OCT ได้ถูกพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว และได้รับความสนใจเป็นอย่างมากจากวงการแพทย์ทั่วโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้งานทางด้านการตรวจวินิจฉัยและติดตามความผิดปกติของจอประสาทตา ซึ่งถือได้ว่ามีความก้าวหน้าอย่างมากและได้ถูกใช้งานในระดับคลินิกในหลายๆ ประเทศ รวมทั้งในประเทศไทยเราด้วย บทความนี้ เป็นการแนะนำประวัติ ความเป็นมา และหลักการทำงานพื้นฐานตลอดจนพัฒนาการของเทคโนโลยี OCT ซึ่งเป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีที่สำคัญ ที่เข้ามามีบทบาททางด้านการแพทย์และสาธารณะสุข ทั้งในปัจจุบันและต่อไปในอนาคต

นับเป็นเวลานานกว่าหลายพันปีมาแล้ว ที่มนุษย์เรามีความต้องการที่จะเอาชนะขีดจำกัดในการมองเห็น ซึ่งระบบการรับภาพของมนุษย์มีข้อจำกัดทางกายภาพในแง่ของขนาดวัตถุที่เราสามารถแยกแยะได้ (resolution) โดยมุมที่เล็กที่สุดที่ตาคนเราสามารถแยกแยะได้ (angular resolution) จะอยู่ที่ประมาณ 0.02-0.03 องศา ซึ่งเทียบเท่ากับความสามารถในการแยกแยะวัตถุขนาด 30-50 เซนติเมตร ที่วางห่างออกไปจากผู้สังเกตการณ์เป็นระยะ 1 กิโลเมตร หรือ การแยกแยะขนาดของเส้นผมที่ระยะ 25 เซนติเมตรจากดวงตาของเรา อุปกรณ์แรกๆ ที่มีการประดิษฐ์คิดค้นขึ้นเพื่อขยายขีดจำกัดการมองเห็นของมนุษย์ ก็คือ *แว่นขยาย* (magnifying glass) นั่นเอง ซึ่งเป็นในลักษณะของเลนส์นูนชิ้นเดียวที่มีกำลังขยายที่ทำให้เกิดขนาดภาพที่ใหญ่กว่าขนาดวัตถุจริงมากๆ และทำให้เราสามารถมองเห็นอนุภาคหรือสสารที่มีขนาดเล็กเกินกว่าที่จะสามารถแยกแยะได้ด้วยตาเปล่า อีกทั้ง ยังเป็นที่มาของการผลิตอุปกรณ์สำคัญอย่าง *แว่นตา* ที่มีใช้งานกันอย่างแพร่หลายจนถึงปัจจุบัน

แรงผลักดันที่สำคัญประการหนึ่งของการพัฒนาทางเทคโนโลยีที่ช่วยในการขยายขอบข่ายการรับรู้ของมนุษย์ ก็คือความต้องการที่จะเอาชนะโรคภัยไข้เจ็บต่างๆ พัฒนาการของอุปกรณ์ถ่ายภาพทางการแพทย์เริ่มขึ้นอย่างจริงจังนับตั้งแต่มีการคิดค้น *กล้องจุลทรรศน์* ขึ้นในราวต้นศตวรรษที่ 16 ทั้งนี้ ไม่ได้มีหลักฐานปรากฏแน่ชัดว่าใครคือบุคคลแรกที่ประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์ขึ้น แต่เชื่อว่าน่าจะเป็น Hans และ Zacharias Jansen สองพ่อลูกช่างทำเลนส์ชาวดัตช์ในราวปี ค.ศ. 1590 [1] ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวได้รับการอธิบายในเชิงหลักการโดย Galileo Galilei ในเวลาต่อมาในราว ค.ศ. 1609 และเป็นการจุดประกายให้มีการศึกษาและใช้งานกล้องจุลทรรศน์กันอย่างแพร่หลายจนถึงปัจจุบัน ซึ่งกล้องจุลทรรศน์ถือได้ว่าเป็นอุปกรณ์ชิ้นแรกที่ประกอบไปด้วยการทำงานร่วมกันของเลนส์หลายๆ ชิ้น (compound lenses) เพื่อเพิ่มขีดความสามารถของระบบในการขยายภาพของวัตถุที่มีขนาดเล็กมากๆ ในระดับไมครอนได้ (1 ไมครอน มีขนาดโดยประมาณเท่ากับ 1 ใน 100 ของขนาดเส้นผมของเรา) กล้องจุลทรรศน์โดยทั่วไปใช้ตาของเราเป็นตัวรับภาพ ดังนั้นจึงถูกออกแบบเพื่อการใช้งานในช่วงแสงปกติที่ตามองเห็น (visible range) เป็นหลัก ทั้งนี้ เป็นที่ทราบกันดีว่า จอประสาทตาของมนุษย์เรามีการตอบสนองต่อแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนมิเตอร์เท่านั้น ซึ่งก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่จำกัดขีดความสามารถในการสังเกตการณ์ของมนุษย์

ในปี 1895 William Roentgen ค้นพบรังสีเอ็กซ์ (X-rays) และภายหลังได้ถูกประยุกต์ใช้งานในการถ่ายภาพโครงกระดูกในร่างกายมนุษย์ รวมถึงการประยุกต์ใช้ในการตรวจหาความผิดปกติของเนื้อเยื่อของอวัยวะบางส่วน เช่น ปอด ลำไส้ และไต เป็นต้น ซึ่งถือได้ว่าเป็นหนึ่งก้าวสำคัญของพัฒนาการภาพถ่ายทางการแพทย์ของโลก และยิ่งไปกว่านั้น วิวัฒนาการทางเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ในช่วงทศวรรษ 1960 ได้นำไปสู่การคิดค้น X-ray Computed Tomography หรือที่เรียกกันสั้นๆ ว่า CT หรือ X-ray CT ในราวทศวรรษที่ 1970 [2] และได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องจน

[1] อาจารย์ (ดร.) สาขาวิชาเทคโนโลยีเลเซอร์และโฟตอนนิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

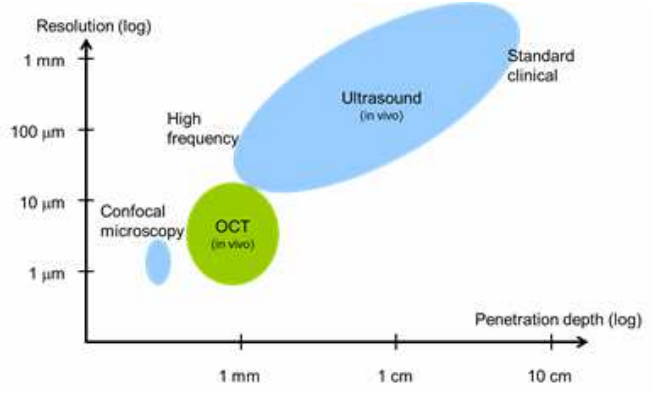
นำไปสู่การใช้งานในระดับคลินิกในปี 1979 [3] อย่างไรก็ตาม การใช้ X-rays ในการถ่ายภาพทางการแพทย์มีข้อจำกัดอยู่ค่อนข้างมาก เนื่องจากมีความเสี่ยงต่ออันตรายจากกัมมันตภาพรังสี ซึ่งอาจส่งผลให้ไปทำลายเซลล์ปกติ ทำให้ช่วงเวลาของการฉายรังสีถูกจำกัด และยากต่อการออกแบบเพื่อการถ่ายภาพเนื้อเยื่ออ่อน

อัลตราซาวด์ หรือ ultrasonography เป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีที่มีความสำคัญอย่างยิ่งยวดต่อวงการแพทย์ ถึงแม้ว่าอัลตราซาวด์จะถูกคิดค้นขึ้นมาก่อน CT แต่ก็เพิ่งได้รับการพัฒนาและนำไปใช้งานในคลินิกอย่างจริงจังในช่วงไม่กี่ทศวรรษที่ผ่านมาเท่านั้น จุดเด่นของอัลตราซาวด์คือความสามารถในการถ่ายภาพอวัยวะภายในของร่างกายเราโดยไม่ต้องทำการผ่าตัดและปราศจากผลกระทบข้างเคียงใดๆ ต่อเนื้อเยื่อ โดยเฉพาะการถ่ายภาพเนื้อเยื่ออ่อนซึ่งถือได้ว่าเป็นจุดด้อยของ X-rays CT จึงทำให้ในปัจจุบัน มีการประยุกต์ใช้อัลตราซาวด์ในทางการแพทย์อย่างแพร่หลายและยังคงได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง [4]

Magnetic Resonance Imaging หรือ MRI เป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีที่ถูกคิดค้นและพัฒนาขึ้นเพื่อการถ่ายภาพทางการแพทย์ โดย MRI ถูกคิดค้นขึ้นในราวทศวรรษที่ 1970 ซึ่งมีจุดเด่นในด้านความละเอียดในการถ่ายภาพที่สูง อีกทั้งไม่มีข้อจำกัดในด้านความลึกของการถ่ายภาพ อย่างไรก็ตาม MRI ก็มีข้อจำกัดในด้านของต้นทุนการสร้างที่สูง และความซับซ้อนของระบบ รวมถึงความเร็วในการถ่ายภาพที่ช้ากว่า CT และ อัลตราซาวด์ นอกจากนั้น MRI ยังต้องอาศัยแท่นแม่เหล็กขนาดใหญ่ ทำให้ยากต่อการเคลื่อนย้าย หรือทำให้มีขนาดกะทัดรัด [5]

พัฒนาการอันก้าวหน้าของเทคโนโลยีเลเซอร์และโฟตอนนิกส์ในช่วงไม่กี่ทศวรรษที่ผ่านมา ทำให้เทคนิคการถ่ายภาพทางการแพทย์ด้วยแสงเลเซอร์ได้รับความสนใจมากขึ้น ซึ่งการถ่ายภาพด้วยเลเซอร์มีจุดเด่นในเรื่องของ ความไวต่อการตรวจจับสัญญาณ (sensitivity) และความละเอียดในการถ่ายภาพในระดับไมครอนหรือเล็กกว่าไมครอน โดยไม่ก่อให้เกิดอันตรายใดๆ ต่อเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต (Non-invasive) นอกจากนี้แล้ว อุปกรณ์ทางแสงยังง่ายต่อการออกแบบให้มีขนาดกะทัดรัดและสามารถเคลื่อนย้ายได้โดยง่ายอีกด้วย ตัวอย่างของเทคโนโลยีภาพถ่ายทางการแพทย์ด้วยแสงเลเซอร์ที่มีใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ได้แก่ กล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอล (Confocal Microscope) [6] กล้องจุลทรรศน์แบบฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescence Microscope)[7] เทคนิคการถ่ายภาพฟลูออเรสเซนต์ด้วยกระบวนการของ two-photon และ multi-photon [8,9] รวมถึงเทคนิคการถ่ายภาพตัดขวางด้วยแสงเลเซอร์อย่าง Diffused Optical Tomography (DOT) และ Optical Coherence Tomography (OCT)

OCT นับได้ว่าเป็นเทคโนโลยีใหม่เมื่อเทียบกับเทคโนโลยีภาพถ่ายทางการแพทย์อื่นๆ ข้างต้น ซึ่ง OCT ถูกนำเสนอครั้งแรกในปี ค.ศ. 1991 โดยทีมนักวิจัยของ MIT ภายใต้การนำของ James Fujimoto [10] OCT เป็นเทคนิคการถ่ายภาพเชิงแสงที่สามารถถ่ายภาพตัวขวางของเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตได้ที่ความละเอียดเชิงลึกในระดับไมครอน และที่ความลึกของการถ่ายภาพโดยเฉลี่ย 1-2 มิลลิมิเตอร์ ทั้งยังมีความเร็วในการถ่ายภาพที่สูงอีกด้วย OCT จึงเปรียบเสมือนเป็นการรวมจุดเด่นของการถ่ายภาพตัดขวางแบบอัลตราซาวด์และการถ่ายภาพแบบความละเอียดสูงในระดับไมครอนของกล้องจุลทรรศน์เข้าด้วยกัน (รูปที่ 1) ซึ่งระบบ OCT ในปัจจุบัน สามารถถ่ายภาพตัดขวางแบบสามมิติได้ภายในเสี้ยววินาทีเท่านั้น OCT จึงเป็นความหวังของการตรวจวินิจฉัยในระดับเซลล์โดยไม่ต้องมีการตัดชิ้นเนื้อเยื่อออกมาทดสอบ (biopsy) ซึ่งนอกจากจะสามารถช่วยลดความเจ็บปวดของคนไข้ที่รับการรักษาแล้ว ยังสามารถลดค่ารักษาพยาบาลได้ในระยะยาว



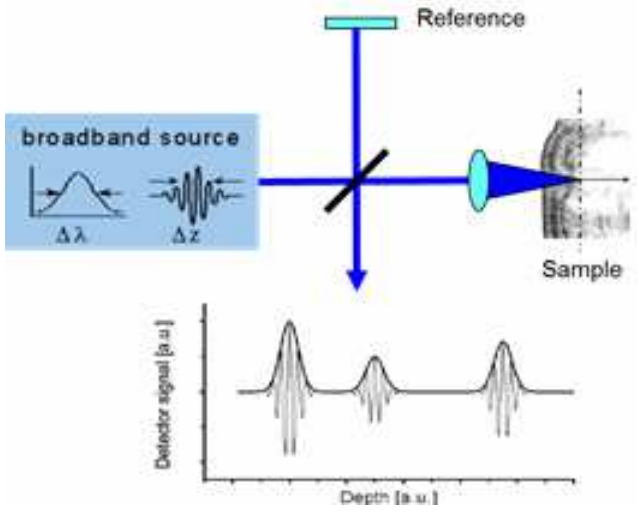
รูปที่ 1. แผนภาพเปรียบเทียบคุณลักษณะด้านความละเอียดและความลึกของการถ่ายภาพของ confocal microscopy, OCT, และ ultrasound imaging [13]

ความสามารถของ OCT ในการถ่ายภาพตัดขวางของวัตถุตัวอย่าง (Sample) อาศัยหลักการของ Low-Coherence Interferomery หรือ LCI [11,12] ซึ่งหลักการทำงานของ OCT สามารถอธิบายโดยสังเขปได้ดังนี้ แสงจาก broadband laser ที่ความยาวคลื่นในย่านอินฟราเรดช่วงสั้น (Near Infrared หรือ NIR)

จะถูกลำเลียงเข้าสู่ระบบการแทรกสอดของแสง ซึ่งโดยทั่วไปจะนิยมใช้ระบบการแทรกสอดแบบไมเคลสัน (Michelson interferometer) แสงเลเซอร์ชนิด low coherence หรือ broadband laser ถือได้ว่าเป็นหัวใจสำคัญของระบบ OCT โดยเป็นตัวกำหนดความละเอียดของการถ่ายภาพในแนวลึก (depth resolution) ของระบบ OCT ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ [13]

$$\Delta z = \frac{2\ln 2}{\pi}\left(\frac{\lambda_0^{\,2}}{\Delta\lambda}\right) \qquad (1)$$

โดย λ_0 คือ central wavelength ของแหล่งกำเนิดแสง และ Δz และ $\Delta\lambda$ คือ full width at half-maximum (FWHM) ของ depth resolution และ power spectrum bandwidth ของแหล่งกำเนิดแสงตามลำดับ ซึ่งจากสมการสามารถตีความได้ว่าความละเอียดเชิงลึกของ OCT แปรผกผันกับความกว้างของสเปคตรัม ยิ่งแหล่งกำเนิดแสงมีความกว้างของสเปคตรัมมากขึ้น ก็จะยิ่งให้ความละเอียดของการถ่ายภาพในแนวลึกมากขึ้นซึ่งส่งผลต่อความสามารถของระบบในการแยกแยะความหนาของชั้นตัวอย่าง



รูปที่ 2. ระบบ TD-OCT อย่างง่าย [13]

ในระบบแทรกสอดแสงแบบไมเคลสัน (รูปที่ 3.) แสงจากแหล่งกำเนิดจะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกเป็นแสงอ้างอิง (reference beam) ซึ่งจะถูกสะท้อนกลับด้วยกระจก (reference mirror) และลำเลียงต่อไปยังอุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มแสง (photodetector) ที่เอาท์พุตของระบบแทรกสอด แสงส่วนที่สองจะถูกโฟกัสด้วยเลนส์ไปยังตัวอย่างที่ต้องการถ่ายภาพ ซึ่งเลนส์ตัวเดียวกันนี้ก็จะทำหน้าที่ในการรับสัญญาณแสงที่สะท้อนกลับมาจากตัวอย่าง (backscattering light) ซึ่งเกิดจากความไม่เท่ากันของค่าดัชนีหักเหของแสงที่ตำแหน่งต่างๆ ในชิ้นตัวอย่าง (refractive index variation) ดังนั้น ความละเอียดเชิงพื้นที่ (spatial resolution) ของระบบในแนวขนาน (lateral resolution) จึงถูกกำหนดด้วย diffraction limit resolution ของเลนส์ที่ใช้ ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก Rayleigh resolution criterion [14] ได้ดังนี้

$$\Delta x = 1.22\lambda\left(\frac{f}{D}\right) \qquad (2)$$

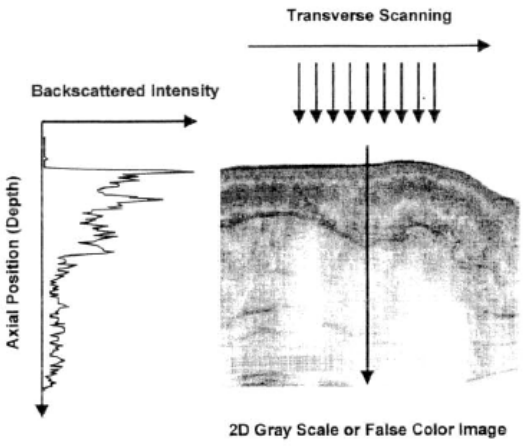
โดย f แทนความยาวโฟกัสของเลนส์ และ D คือ ขนาดของ Entrance Pupil ซึ่งถูกกำหนดโดยขนาดของลำแสงที่มาตกกระทบเลนส์ จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 1 และ 2 จะสังเกตได้ว่าคุณสมบัติที่น่าสนใจประการหนึ่งของ OCT คือ ความละเอียดของการถ่ายภาพในแนวลึก (Axial resolution) และในแนวขวาง (Lateral resolution) เป็นอิสระต่อกัน นั่นหมายความว่าความละเอียดในทั้งสองแกนสามารถถูกพัฒนาและเลือกใช้แยกกันได้ตามความเหมาะสมของการใช้งานโดยไม่ส่งผลกระทบซึ่งกันและกัน

แสงสะท้อนจากตัวอย่างจะถูกลำเลียงไปยังทางออกของระบบแทรกสอด และถูกแทรกสอดเข้ากับแสงอ้างอิงโดยการเลื่อนตำแหน่งของกระจกใน reference arm เป็นระยะทางตามความลึกที่ต้องการ (ดูรูปที่ 4. ประกอบ) ภาพตัดขวางของวัตถุตัวอย่างจะถูกสร้างขึ้นจากแอมปลิจูดที่แตกต่างกันของการสะท้อนที่ความลึกต่างๆ จากผิวของตัวอย่าง [13] ระบบ OCT ที่มีการสแกนของกระจกอ้างอิงแบบนี้ เรียกว่า Time Domain OCT หรือ TD-OCT [10] ซึ่งความเร็วในการถ่ายภาพของระบบมักจะถูกจำกัดโดยความเร็วของการเคลื่อนที่ของกระจกอ้างอิง ซึ่งมีความเร็วโดยประมาณไม่เกิน 2,000 Depth-scans ต่อวินาที โดยหนึ่งรอบการเคลื่อนที่ของกระจกอ้างอิงจะได้ 2 Depth-scans

เพื่อเอาชนะข้อจำกัดในด้านความเร็วของการถ่ายภาพของ TD-OCT ในปี 1995 Fercher *et. al.* ได้นำเอาหลักของการแทรกสอดในโดเมนความถี่ (spectral interference) [14] มาประยุกต์ใช้กับ OCT เรียกว่า Frequency Domain OCT (FD-OCT) หรือ Spectral Domain OCT (SD-OCT) [15] และนำมาซึ่งพัฒนาการที่

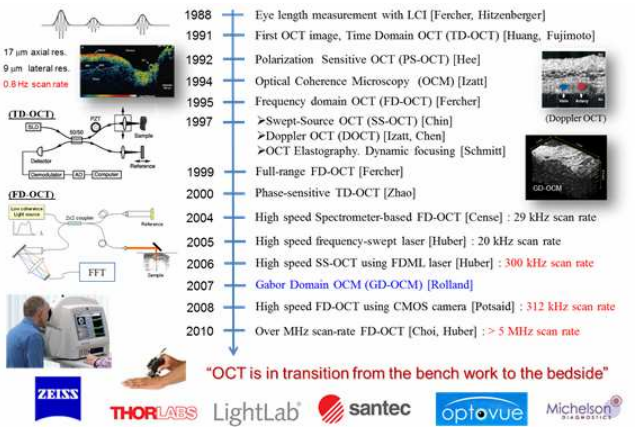
สำคัญสองประการ คือ ความไวต่อสัญญาณที่เล็กมากๆ และความเร็วของการตรวจจับและบันทึกสัญญาณ ที่เพิ่มขึ้นอย่าง

ชัดเจนเมื่อเทียบกับ TD-OCT เนื่องจากไม่ต้องมีการเคลื่อนที่ของกระจกอ้างอิงอีกต่อไป [16-18] FD-OCT สร้างภาพตัดขวางของตัวอย่างโดยการฉายแสงเลเซอร์ชนิด broadband ให้ไปตกกระทบลงบนผิวตัวอย่าง (sample) แล้ววัดการแทรกสอดในโดเมนความถี่ระหว่างสัญญาณที่สะท้อนมาจากตัวอย่างและคลื่นแสงอ้างอิง ซึ่งสามารถวัดได้โดยใช้สเปคโตรมิเตอร์เชิงแสง (optical spectrometer) ซึ่งเมื่อนำไปผ่านการแปลงแบบฟูริเยร์แล้ว จะได้สัญญาณในโดเมนพื้นที่ (spatial domain) ที่สัมพันธ์กับความสามารถในการสะท้อนของแสงที่ระดับความลึกต่างๆ ภายใต้พื้นผิว (depth-resolved reflectivity profile) ของวัตถุตัวอย่าง อีกทั้ง เมื่อประกอบกับการสแกนลำแสงในแนวขนานกับพื้นผิวตัวอย่าง (transverse scanning หรือ lateral scanning) แล้ว ก็จะสามารถสร้างภาพตัดขวางได้ดังแสดงในรูปที่ 5 [13]

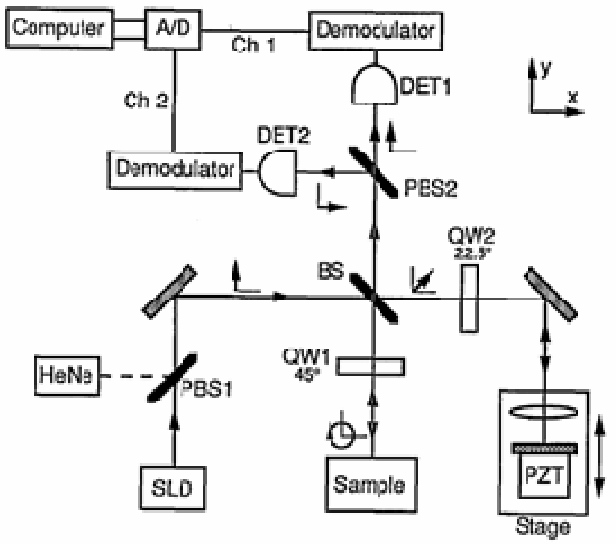


รูปที่ 5. การสร้างภาพตัดขวางของระบบ OCT [13]

รูปที่ 4 แสดงพัฒนาการที่สำคัญของเทคโนโลยี OCT ในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมา นับตั้งแต่มีการนำเสนอระบบ OCT ครั้งแรกในปี ค.ศ. 1991 จนถึงปี 2010 ด้วยหลักการทำงานของ OCT ที่คล้ายคลึงกับทั้งกล้องจุลทรรศน์และอัลตราซาวด์ การพัฒนาในยุคแรกๆ จึงเป็นการประยุกต์ใช้เทคนิคต่างๆ ที่มีอยู่แล้วในสองระบบข้างต้นมาใช้กับ OCT โดยตรง อย่างไรก็ตาม ความท้าทายอยู่ที่การออกแบบระบบควบคุมแสงให้ทำงานที่ต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถตอบสนองความต้องการใช้งานในทางการแพทย์โดยเฉพาะในเรื่องของความเร็วในการถ่ายภาพ และอีกหนึ่งความพยายามในการผลักดันเทคโนโลยี OCT เพื่อการใช้งานในเชิงการวินิจฉัยทางการแพทย์ก็คือ การพัฒนาเทคนิคเพื่อการวิเคราะห์ฟังก์ชันการทำงานของเนื้อเยื่อตัวอย่าง หรือที่เรียกว่า Functional OCT เช่น Polarization Sensitive OCT, Doppler OCT และ OCT elastography เป็นต้น



รูปที่ 4. พัฒนาการที่สำคัญของ OCT ในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมา

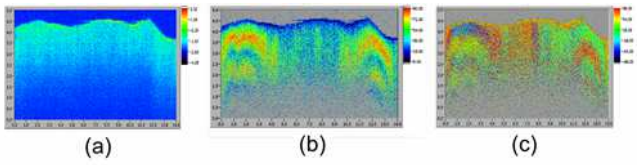


รูปที่ 5. PS-OCT ที่นำเสนอโดย Hee et. al. ในปี ค.ศ. 1992 ซึ่งยังคงถูกใช้งานมาจนถึงปัจจุบัน [19]

ในปี 1992 เพียงแค่หนึ่งปีนับจากการนำเสนอ OCT ระบบแรก Hee *et. al.* ได้นำเสนอระบบ Polarization Sensitive OCT หรือ PS-OCT [19] ดังแสดงในรูปที่ 5. โดยถูกออกแบบให้เป็นระบบแบบ free-space เพื่อให้ง่ายต่อการควบคุมโพลาไรเซชันของแสง หลักการทำงานคร่าวๆ ของ PS-OCT คือ เป็นการตรวจจับสัญญาณการแทรกสอดของแสงที่มีโพลาไรเซชันทั้งในแนวตั้ง (Vertical polarization) และในแนวนอน (Horizontal polarization) ซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์หาค่า birefringence [19]

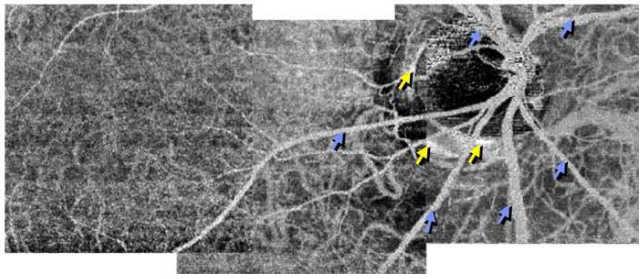
และ optic-axis orientation [20] ของวัตถุตัวอย่างได้ดังแสดงใน **Error! Reference source not found.** ซึ่งความแตกต่างในด้านรูปร่างของเนื้อเยื่อส่วนต่างๆ ของสิ่งมีชีวิตโดยเฉพาะเนื้อเยื่อที่มีลักษณะเป็นเส้นใย ทำให้เกิดคุณสมบัติ

birefringence ที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถให้ข้อมูลที่สำคัญในการตรวจหาความผิดปกติของเนื้อเยื่อได้ จึงทำให้ PS-OCT เป็นอีกหนึ่งเทคนิคที่ได้รับความสนใจ และได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน เช่น การพัฒนาระบบ polarization sensitive FD-OCT, [21] การพัฒนาระบบ PS-OCT สำหรับการถ่ายภาพ depth-resolved Stokes vector, [22-24] การพัฒนาระบบ PS-OCT ในใยแก้วนำแสง, [23,24] การพัฒนาระบบ PS-OCT สำหรับการถ่ายภาพ depth-resolved Jones parameters, [25-27] รวมถึงความพยายามในการพัฒนาระบบ PS-OCT ที่สามารถทำงานได้โดยใช้เซ็นเซอร์เพียงชุดเดียวเพื่อลดต้นทุนในการผลิตของระบบ [28-30] เป็นต้น



รูปที่ 6. รูปแสดงภาพที่ได้จากการวิเคราะห์สัญญาณในระบบ PS-OCT ได้แก่ (a) reflectivity (b) birefringence, and (c) optic axis orientationของเนื้อส่วนอกของไก่ [20]

นอกจาก PS-OCT แล้ว อีกหนึ่งเทคนิคที่สำคัญของ Functional OCT ก็คือ Doppler OCT ซึ่งเป็นเทคนิคที่ได้แนวคิดมาจากพัฒนาการของเทคโนโลยีอัลตราซาวด์ [31] ซึ่งเทคนิคของ Doppler imaging ได้ถูกนำมาประยุกต์กับ OCT ครั้งแรกในปี 1997 [32,33] ซึ่งต้องใช้เวลานานถึงกว่า 6 ปีนับตั้งแต่มี OCT ขึ้นมา ทั้งนี้สาเหตุหลักน่าจะมาจากการขาดเทคโนโลยีที่เอื้อต่อการตรวจวัดเฟสของสัญญาณการแทรกสอดของแสง ซึ่งต้องอาศัยเซนเซอร์แสงที่มีความไวของการตรวจจับสัญญาณที่สูงมากๆ ในปัจจุบันพัฒนาการของระบบ Doppler OCT เป็นไปอย่างรวดเร็วโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อถูกนำมารวมกับความเร็วของ FD-OCT [34-36] นำมาซึ่งเทคนิคของ Doppler OCT ที่สำคัญมากมายหลายเทคนิค เช่น เทคนิค short-time Fourier transform [32,33] Phase-resolved Doppler[37] Resonant Doppler[38] Speckle variant detection[39] Optical angiography[40] Full-range Doppler[41] Multi-VDR Doppler[42] และเทคนิค Time-frequency analysis[43] เป็นต้น ซึ่งเทคนิค Doppler OCT เหล่านี้มีส่วนสำคัญที่จะนำไปสู่การพัฒนาเทคนิคของภาพถ่ายทางการแพทย์เพื่อการตรวจติดตามความผิดปกติของระบบเส้นเลือดฝอย (Micro vasculature) ในส่วนต่างๆ ของร่างกายมนุษย์ โดยเฉพาะในจอประสาทตา (รูปที่ 6) และภายใต้ผิวหนัง ซึ่งความผิดปกติของระบบเส้นเลือดฝอยเป็นหนึ่งในตัวบ่งชี้ที่สำคัญของการเสื่อมของจอประสาทตาในผู้สูงอายุและผู้ป่วยเบาหวาน รวมถึงการก่อตัวของเซลล์มะเร็งภายใต้ผิวหนัง เป็นต้น [35,44-46]

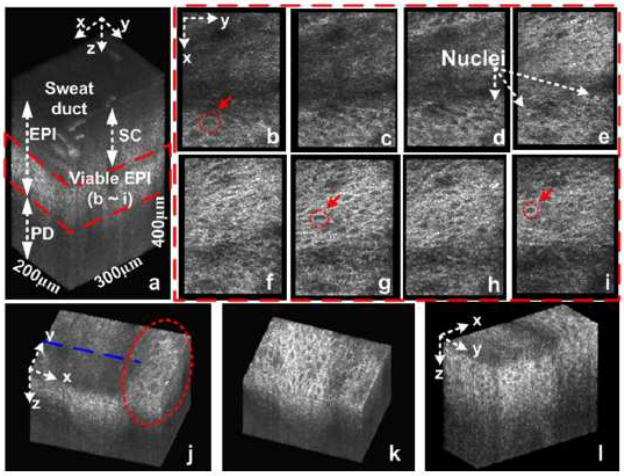


รูปที่ 6. ภาพตัวอย่างเครือข่ายเส้นเลือดฝอยในจอประสาทตา ที่ถ่ายโดยระบบ Doppler OCT [47]

ในส่วนของการพัฒนาประสิทธิภาพทางด้าน Lateral resolution ของระบบ OCT นั้นก็ได้รับความสนใจไม่น้อยเช่นกัน ดังตัวอย่างของการพัฒนาระบบ Optical Coherence Microscopy หรือ OCM [48] ที่ถูกนำเสนอโดย Izatt *et. al.* ในปี ค.ศ. 1994 ซึ่งคุณสมบัติสำคัญที่แตกต่างจาก OCT แบบเดิมก็คือ การใช้ microscope objective ที่มีกำลังขยายสูงในระดับเดียวกับกล้องจุลทรรศน์ เพื่อเพิ่มขีดความสามารถด้าน lateral resolution สำหรับการใช้งานเพื่อการถ่ายภาพในระดับเซลล์ ซึ่งแน่นอนว่าต้องใช้ความละเอียดของ lateral resolution ในระดับที่เล็กกว่า 1 ไมครอนลงไป หรือเทียบได้กับการใช้เลนส์ที่มี Numerical Aperture หรือ NA มากกว่า 0.4 ขึ้นไปนั่นเอง ทั้งนี้ สิ่งที่ทำให้ OCM แตกต่างจากกล้องจุลทรรศน์แบบปกติ ก็คือความสามารถในการแยกแยะเชิงลึก (axial resolution หรือ depth resolution) โดยอาศัยคุณสมบัติ low-coherence ของ broadband light source ซึ่งเป็นจุดเด่นของระบบถ่ายภาพแบบ OCT นั่นเอง [49]

อย่างไรก็ตาม ด้วยคุณสมบัติทางด้าน Depth-of-Focus (DOF) ของเลนส์ที่มีกำลังขยายสูงๆ ทำให้ OCM มีขีดจำกัดของ

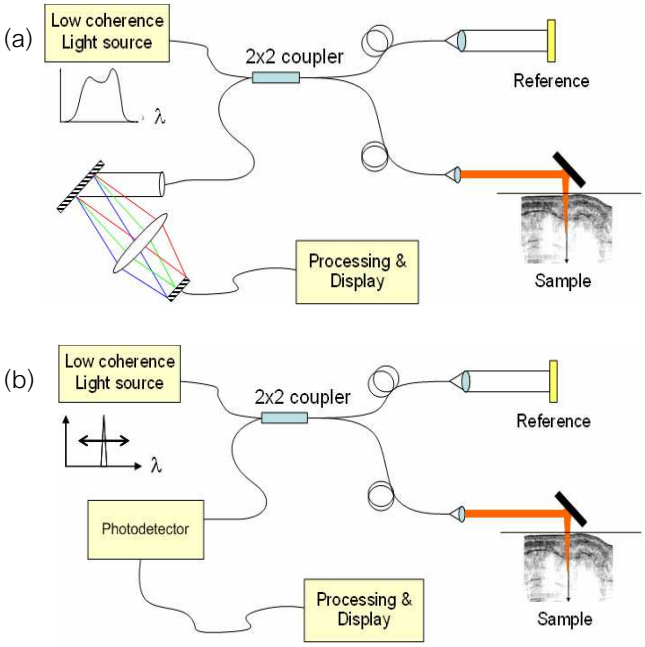
มุมมองเชิงลึก (Axial Field-of-View หรือ Depth-of-Field) ซึ่งมีขนาดสั้นมากๆ [50] และเป็นอุปสรรคสำคัญในการผนึกจุดเด่นด้านความละเอียดในการถ่ายภาพของ OCM และความเร็วในการถ่ายภาพของ FD-OCT เข้าด้วยกัน ทั้งนี้ ได้มีการนำเสนอแนวคิดที่หลากหลายในการที่จะประสานทั้งสองระบบเข้าด้วยกัน เช่น การประยุกต์ใช้เทคนิค C-mode หรือ C-scanning ของอัลตราซาวด์ [51,52] และเทคนิค Dynamic Focusing แบบต่างๆ [53-55] รวมถึงเทคนิค Multi-beam OCT [56] เป็นต้น วิวัฒนาการหนึ่งที่น่าสนใจของการรวม OCM และ FD-OCT เข้าด้วยกันอย่างลงตัว คือเทคนิคของ Gabor Domain OCM ซึ่งถูกนำเสนอโดย Rolland *et. al.* ในปลายปี 2007



รูปที่ 7. แสดงความสามารถของ GD-OCM ในการถ่ายภาพในระดับเซลล์ใต้ผิวหนังของมนุษย์ [60]

ทั้งนี้ ความสำเร็จของ GD-OCM เป็นผลพวงจากพัฒนาการที่สำคัญสามด้าน ได้แก่ 1) การพัฒนา Dynamic Focus Microscope ที่มี Liquid Lens เป็นส่วนประกอบสำคัญ[57,58] 2) ระบบสเปคโตรมิเตอร์ความเร็วสูงที่ใช้ CMOS camera เป็นตัวตรวจจับแสง [59] และ 3) เทคนิค Gabor Fusion เพื่อการประมวลผลสัญญาณที่ได้จาก GD-OCM [60] ซึ่งล่าสุด GD-OCM ได้แสดงให้เห็นถึงความสามารถของเทคโนโลยี OCT ในการถ่ายภาพในระดับเซลล์ (รูปที่ 7) ภายใต้ชั้นผิวหนังของมนุษย์โดยไม่ต้องผ่านการผ่าตัด หรือควักชิ้นเนื้อออกมาทดสอบ [61] ซึ่งนับเป็นก้าวที่สำคัญของการพัฒนาไปสู่ Optical Biopsy ในอนาคตอันใกล้

พัฒนาการที่สำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งอีกด้านหนึ่งของ OCT ก็คือความเร็วของการถ่ายภาพ ซึ่งในปัจจุบัน OCT มีความเร็วในระดับที่สามารถถ่ายภาพสามมิติได้ภายในเวลาไม่ถึงวินาที ทั้งนี้ จุดเปลี่ยนที่ถือได้ว่าเป็นพัฒนาการทางด้านความเร็วแบบก้าวกระโดดก็คือการเปลี่ยนจาก TD-OCT มาเป็น FD-OCT ดังที่ได้เกริ่นไว้ในตอนแรก ในปัจจุบัน FD-OCT แยกออกได้เป็นสองเทคนิคใหญ่ๆ ได้แก่ spectrometer-based FD-OCT และ swept-source based FD-OCT ดังแสดงในรูปที่ 9. ข้อแตกต่างที่ชัดเจนระหว่างทั้งสองเทคนิคนี้ก็คือแหล่งกำเนิดแสงและระบบเซ็นเซอร์แสงที่ใช้ โดย spectrometer-based FD-OCT ใช้แหล่งกำเนิดแสงแบบ broadband และใช้สเปคโตรมิเตอร์ในการตรวจจับสัญญาณการแทรกสอด ในทางกลับกัน swept-source based FD-OCT ใช้แหล่งกำเนิดแสงชนิดพิเศษที่ส่งออกแสงแบบความถี่เดียวแต่ทว่ามีการกวาดความถี่ของแสงที่ส่งออกเป็นช่วงกว้างหนึ่งของย่านความถี่แสง ซึ่งเทียบเท่ากับแสงแบบ broadband อย่างไรก็ตามเนื่องจาก ณ ช่วงเวลาหนึ่งๆ ซึ่งสั้นมากๆ ในระดับ 10^{-6} วินาทีแสงที่ออกมามีแค่ความถี่เดียว ดังนั้นสัญญาณการแทรกสอดจึงสามารถตรวจจับได้โดยไม่ต้องใช้สเปคโตรมิเตอร์ แต่ใช้เพียงแค่ photodetector เท่านั้น ทั้งนี้จุดสำคัญอยู่ที่อุปกรณ์ในการแปลงสัญญาณจากอนาลอกไปเป็นดิจิตอลที่ต้องมีความเร็วในการแปลงสัญญาณที่สูงกว่าความเร็วในการกวาด



รูปที่ 9. (a) spectrometer-based FD-OCT และ (b) swept-source based FD-OCT

ความถี่ของแหล่งกำเนิดแสง นอกจากความแตกต่างดังกล่าวแล้ว องค์ประกอบอื่นๆ แทบจะเหมือนกันทุกประการ

ถึงแม้ว่าหลักการของระบบ FD-OCT ทั้งสองแบบจะถูกนำเสนอขึ้นพร้อมๆ กัน แต่ระบบที่ได้รับความนิยมในช่วงแรกๆ คือ spectrometer-based FD-OCT ทั้งนี้สืบเนื่องมาจากแหล่งกำเนิดแสงแบบกวาดความถี่ในยุคแรกๆ มีข้อจำกัดทางด้านความเร็วอย่างมาก จุดเปลี่ยนที่สำคัญที่นำไปสู่พัฒนาการทางด้านความเร็วแบบก้าวกระโดดของ spectrometer-based FD-OCT คือความก้าวหน้าของเทคโนโลยีเซ็นเซอร์แสงแบบ Charge-Couple Device (CCD) ซึ่งก็ต้องรอจนถึงหลังปี ค.ศ. 2000 ในปี ค.ศ. 2004 Cense et. al. นำเสนอระบบ spectrometer-based FD-OCT ที่มีความเร็วในการถ่ายภาพสูงถึง 29 ภาพต่อวินาที ซึ่งเทียบเท่ากับความเร็วในการถ่ายภาพแบบวิดีโอ [46] ยิ่งไปกว่านั้น ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา พัฒนาการของเทคโนโลยี Complementary Metal-Oxide Semiconductor (CMOS) ได้เปิดมิติใหม่ของการถ่ายภาพตัดขวางเชิงแสงแบบ OCT โดยในปี ค.ศ. 2008 Potsaid et. al. ได้นำเสนอระบบ spectrometer-based FD-OCT ที่ใช้กล้อง CMOS ความเร็วสูงที่พัฒนาโดยบริษัท Basler Vision Technologies เป็นเซ็นเซอร์แสงในสเปคโตรมิเตอร์ ซึ่งสามารถบันทึกสัญญาณได้ในความเร็วสูงถึงกว่า 300,000 สเปคตรัมต่อวินาที [59] ในส่วนของ swept-source based FD-OCT นั้น ได้รับการพัฒนาอย่างจริงจังในราวปี ค.ศ. 2005 โดยการผลักดันของ Huber et. al. ผู้มีบทบาทสำคัญในการพัฒนาเลเซอร์แบบกวาดความถี่ความเร็วสูง โดยใช้หลักการของ fiber-ring resonator [62] ซึ่งภายหลังได้ถูกพัฒนาต่อไปสู่ระบบเลเซอร์กวาดความถี่ที่เรียกว่า Fourier Domain Mode Locking (FDML) [63] ซึ่งในปัจจุบันสามารถให้ความเร็วในการถ่ายภาพสูงกว่าหนึ่งล้านสเปคตรัมต่อวินาที ด้วยข้อได้เปรียบในด้านความเร็วในการถ่ายภาพทำให้ระบบ OCT ที่นิยมใช้ในปัจจุบันล้วนเป็นแบบ FD-OCT เป็นส่วนใหญ่

ด้วยประสิทธิภาพของ OCT ที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว ทำให้ในปัจจุบัน OCT ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานวินิจฉัยทางการแพทย์ด้านต่างๆ อย่างกว้างขวาง เช่น การถ่ายภาพจอประสาทตา การถ่ายภาพไขมันส่วนเกินในหลอดเลือด การตรวจหาความผิดปกติในทางเดินอาหาร ทางเดินหายใจ และทางเดินปัสสาวะ การตรวจมะเร็งในระบบขับถ่าย การตรวจความผิดปกติในช่องปากและฟัน รวมถึงการถ่ายภาพผิวหนังเพื่อตรวจจับการก่อตัวของมะเร็งผิวหนัง และการใช้ประโยชน์ในด้านศัลยกรรมและความงาม เป็นต้น ซึ่งในบรรดาการใช้งานทั้งหมด การถ่ายภาพจอประสาทตาด้วย OCT ถือได้ว่ามีความก้าวหน้าสูงสุด และเป็นที่ยอมรับในวงการจักษุแพทย์ และในปัจจุบัน ก็ได้มีการนำเอา OCT เข้ามาใช้งานในระดับคลินิกและโรงพยาบาลมากขึ้น โดยเฉพาะในประเทศผู้นำทางเทคโนโลยีอย่างเช่น อเมริกา ญี่ปุ่น และหลายๆ ประเทศในแถบยุโรป เป็นต้น ในประเทศไทยเราเอง ก็เริ่มมีการนำ OCT เข้ามาใช้ในการตรวจรักษาและติดตามความผิดปกติของจอประสาทตาบ้างแล้ว แต่ยังจำกัดอยู่ในวงแคบ เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีใหม่ จึงมีต้นทุนค่อนข้างสูงอยู่ ทั้งนี้ ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา ได้มีหลายๆ บริษัทได้ให้ความสนใจและเริ่มพัฒนาและผลิตระบบ OCT เชิงพาณิชย์กันอย่างจริงจังมากขึ้น ซึ่งคาดว่าในอนาคตอันใกล้ต้นทุนของระบบ OCT เชิงพาณิชย์จะลดลงและจะมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

[1] Abramowitz, M. et al., <http://www.olympusmicro.com/primer/anatomy/anatomy.html> (2009).

[2] Kalender, W. A. Physics in Medicine and Biology 51, 29 (2006).

[3] Hounsfield, G. N. Neurosurgical Classics, 8 (1992).

[4] Erikson, K. R. et al. IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics 21, 144-170 (1974).

[5] Broady, A. S. & Gooding, C. A. Pediatrics in Review 8, 87-92 (1986).

[6] Minsky, M. US Patent Number 3,013,467 (1961).

[7] Rost, F. W. D., Fluorescence microscopy. 183-195 (Cambridge Univ Pr, 1995).

[8] So, P. T. C. et al. Annual Review of Biomedical Engineering 2, 399-429 (2000).

[9] Denk, W. et al. Science 248, 73 (1990).

[10] Huang, D. et al. Science 254, 1178-1181 (1991).

[11] Fercher, A. F. et al. Optics Letters 13, 186-188 (1988).

[12] Davidson, M. et al. Integrated Circuit Metrology, Inspection, and Process Control. (ed K. M. Monahan) 233-247 (Proc. SPIE).

[13] Bouma, B. E. & Tearney, G. J., Handbook of Optical Coherence Tomography. (Marcel Dekker, Inc., 2002).

[14] Born, M. & Wolf, E., Principles of Optics (Cambridge University Press, 1999).

[15] Fercher, A. F. et al. Optics Communications 117, 43-48 (1995).

[16] Choma, M. et al. Optics Express 11, 2183-2189 (2003).

[17] De Boer, J. F. et al. Optics Letters 28, 2067-2069 (2003).

[18] Leitgeb, R. et al. Optics Express 11, 889-894 (2003).

[19] Hee, M. R. et al. Journal of the Optical Society of America B9, 903-908 (1992).

[20] Hitzenberger, C. et al. Optics Express 9, 780-790 (2001).

[21] Gotzinger, E. et al. Optics Express 13, 10217-10229 (2005).

[22] De Boer, J. F. et al. Optics Letters 24, 300-302 (1999).

[23] Saxer, C. E. et al. Optics Letters 25, 1355-1357 (2000).

[24] Zhang, J. et al. Optics Express 12, 6033-6039 (2004).

[25] Jiao, S. & Wang, L. V. Optics Letters 27, 101-103 (2002).

[26] Jiao, S. et al. Optics Letters 28, 1206-1208 (2003).

[27] Park, B. et al. Optics Express 13, 3931-3944 (2005).

[28] Baumann, B. et al. Optics Express 15, 1054-1063 (2007).

[29] Cense, B. et al. Optics Express 15, 2421-2431 (2007).

[30] Fan, C. et al. Optics Express 15, 7950-7961 (2007).

[31] Sigel, B. Ultrasound in Medicine & Biology 24, 169-176 (1998).

[32] Chen, Z. et al. Optics Letters 22, 64-66 (1997).

[33] Izatt, J. A. et al. Optics Letters 22, 1439-1441 (1997).

[34] Davis, A. M. et al. Journal of the Optical Society of America A25, 3134-3143 (2008).

[35] Leitgeb, R. et al. Optics Express 11, 3116-3121 (2003).

[36] Mariampillai, A. et al. Optics Express 15, 1627-1638 (2007).

[37] Zhao, Y. et al. Optics Letters 25, 114-116 (2000).

[38] Bachmann, A. H. et al. Optics Express 15, 408-422 (2007).

[39] Mariampillai, A. et al. Optics Letters 33, 1530-1532 (2008).

[40] Wang, R. K. et al. Optics Express 15, 4083-4097 (2007).

[41] Meemon, P. et al. Biomedical Optics Express 1, 537-552 (2010).

[42] Meemon, P. & Rolland, J. P. Biomedical Optics Express 1, 955-966 (2010).

[43] Szkulmowski, M. et al. Optics Express 16, 6008-6025 (2008).

[44] Wojtkowski, M. et al. Optics Letters 27, 1415-1417 (2002).

[45] White, B. et al. Optics Express 11, 3490-3497 (2003).

[46] Cense, B. et al. Optics Express 12, 2435-2447 (2004).

[47] Jaillon, F. et al. Biomedical Optics Express 2, 1147-1158 (2011).

[48] Izatt, J. A. et al. Optics Letters 19, 590-592 (1994).

[49] Drexler, W. et al. Optics Letters 24, 1221-1223 (1999).

[50] Schmitt, J. M. et al. Optics Communications 142, 203-207 (1997).

[51] Sherar, M. D. et al. Nature 330, 493-495 (1987).

[52] Huber, R. et al. Optics Express 13, 10523-10538 (2005).

[53] Qi, B. et al. Optics Communications 232, 123-128 (2004).

[54] Cobb, M. J. et al. Optics Letters 30, 1680-1682 (2005).

[55] Lexer, F. et al. Journal of Modern Optics 46, 541-553 (1999).

[56] Holmes, J. & Hattersley, S. Proc. SPIE7168, 71681N (2009).

[57] Murali, S. et al. Optics Express 15, 15854-15862 (2007).

[58] Murali, S. et al. Optics Letters 34, 145-147 (2009).

[59] Potsaid, B. et al. Optics Express 16, 15149-15169 (2008).

[60] Rolland, J. P. et al. Optics Express 18, 3632-3642 (2010).

[61] Lee, K. S. et al. Optics Letters 36, 2221-2223 (2011).

[62] Huber, R. et al. Optics Express 13, 3513-3528 (2005).

[63] Huber, R. et al. Optics Express 14, 3225-3237 (2006).

มารู้จักจักรวาลแบบพองตัวกันเถอะ! ตอนแรก

พงษ์พิชิต จันทร์นุ้ย [1,2] และ อรุณี ชูนาวา[3]

พักสมองสองนาที

ตั้งแต่ตัดสินใจเลือกเรียนฟิสิกส์ ผม (หนึ่งในผู้เขียน) เดินอยู่บนถนนสายนี้ไม่น้อยกว่า 9 ปี ได้เห็นการเปลี่ยนแปลงในแวดวงวิทยาศาสตร์บ้านเราก็ไม่น้อย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแวดวงฟิสิกส์ สิ่งหนึ่งที่พอจะพูดได้ก็คือจำนวนนักเรียนที่เลือกเรียนฟิสิกส์ลดน้อยลง ทำไมนะ!

ทางผู้เขียนมองว่าหนึ่งในสาเหตุของปัญหานี้คือฟิสิกส์เป็นวิชาที่ยาก ค่าลงทะเบียนก็แพง แถมได้ผลตอบแทนไม่คุ้มทุน นักเรียนที่เลือกเรียนฟิสิกส์ในปัจจุบันนี้ไม่ได้มีใจรักในฟิสิกส์จริงๆ หากแต่เกิดจากปัจจัยอื่นๆ

อยากให้ผู้อ่านลองจินตนาการดูว่าจะเกิดอะไรขึ้นหากวันหนึ่งข้างหน้าไม่มีคนเรียนฟิสิกส์เลย? ถ้าเป็นเช่นนั้นสิ่งเร้นลับทั้งหลายที่รอคอยการเปิดเผยก็คงถูกปิดผนึกอยู่อย่างนั้นเป็นแน่ อย่างไรก็ตามการเลือกเรียนสาขาต่างๆนั้นขึ้นอยู่กับรสนิยมและความถนัด ไม่ว่าใครจะเลือกเรียนอะไรก็ขอให้ใช้ความรู้ความสามารถที่มีอยู่ให้เต็มที่ ส่วนตัวผมรู้สึกโชคดีมากที่ได้เรียนสาขานี้และได้มีโอกาสแบ่งปันประสบการณ์ต่างๆ แม้ว่ายังน้อยนิดเมื่อเทียบกับความกว้างใหญ่ไพศาลของจักรวาล ก่อนที่พื้นที่ตรงนี้จะหมดลงเสียก่อน เราเริ่มไปสำรวจจักรวาลพร้อมๆกันเถอะ

บทความของเราที่ปรากฏในวารสารฟิสิกส์ไทยเรื่อง “เราเข้าใจจักรวาลดีแค่ไหน?”[8] เป็นเรื่องราวที่กล่าวถึงองค์ประกอบและการขยายตัวของจักรวาล ซึ่งเกี่ยวข้องกับงานที่ได้รับรางวัลโนเบลสาขา ฟิสิกส์ในปี พ.ศ. 2554 อาจได้ผ่านตาผู้อ่านมาบ้าง เราได้รู้ว่าสิ่งที่เรามองเห็นเป็นเพียง 4 เปอร์เซ็นต์ของทุกๆสิ่งที่ประกอบขึ้นเป็นจักรวาล!

สำหรับบทความนี้ เราจะย้อนเวลากลับไป ณ วินาทีเสี้ยวหนึ่งหลังจากบิ๊กแบง ตามพวกเรามาได้เลย

(ยัง) ไม่มีอะไรสมบูรณ์แบบ

จุดกำเนิดของจักรวาลยังคงเป็นหนึ่งในปริศนาทางธรรมชาติที่ยังไม่สามารถอธิบายได้ อาจเป็นไปได้ว่ากุญแจที่เรามียังไม่ใช่กุญแจมาสเตอร์ที่ไขได้พอดิบพอดี นานเท่าไหร่แล้วที่ความเข้าใจของเรา ยังถูกปกคลุมไปด้วยชั้นของหมอกแห่งความลึกลับ

ในมุมมองทางจักรวาลวิทยา แบบจำลองบิ๊กแบง (Big Bang model) ประสบความสำเร็จอย่างน่าทึ่งในการอธิบายข้อมูลต่างๆที่ได้จากการวัด คำทำนายจากแบบจำลองบิ๊กแบงช่วยให้เราเข้าใจวิวัฒนาการของจักรวาลตั้งแต่เสี้ยวหนึ่งของวินาทีแรกจนถึงปัจจุบัน นอกจากนั้นแล้วแบบจำลองบิ๊กแบงสามารถทำนายถึงการมีอยู่ของธาตุเบาดั้งเดิม (primordial light elements) เช่น ไฮโดรเจนและฮีเลียม การมีอยู่ของรังสีไมโครเวฟพื้นหลังแบบสม่ำเสมอ (Isotropic Microwave Background) เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม ก็(ยัง)ไม่มีอะไรสมบูรณ์แบบ แบบจำลองดังกล่าวได้ทิ้งปัญหาบางประการไว้ให้ชนรุ่นหลังได้ปวดหัวกันเล่นๆ ตัวอย่างของปัญหาดังกล่าวนั้นได้แก่ ต้นกำเนิดเอกพันธ์และการแบนราบของอวกาศ (homogeneity and flatness of spatial sections) ต้นกำเนิดของสสารและการแผ่รังสี ต้นกำเนิดของความไม่สมมาตรระหว่างสสารและปฏิสสาร (matter-antimatter asymmetry) ต้นกำเนิดและธรรมชาติของสสารมืด (dark matter) และพลังงานมืด (dark energy) เป็นต้น

ก็อย่างที่เกริ่นไว้ เพียงแต่ปัญหาที่เรามีนั้นไม่ได้แก้ง่ายๆเสียด้วยสิ จะใช้วิธีการเดียวกันกับอิคคิวซังก็คงต้องนั่งเกาหัวอยู่ตรงนั้น แถมยังไม่รู้ว่าจะคิดออกไหม คำถามก็คือ แล้วเราจะแก้มันได้อย่างไร?

---

[1] นักศึกษาปริญญาเอก สาขาฟิสิกส์ แห่ง CP3-Origins และ DIAS มหาวิทยาลัยเซาท์เทิร์นเดนมาร์ก ประเทศเดนมาร์ก

[2] อาจารย์สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ว.กำแพงแสน จ.นครปฐม

[3] ครูหมวดวิชาภาษาต่างประเทศ โรงเรียนพุนพินพิทยาคม จังหวัดสุราษฎร์ธานี

ปัญหาที่ค้างคาใจ

เราทราบกันดีว่ามีปัญหาอยู่ไม่น้อยที่คอยขัดขาแบบจำลองบิ๊กแบง ในที่นี้เราจะขอกล่าวถึงปัญหาพื้นฐาน 3 ประการ ดังนี้

Q1 ปัญหาการแบนราบของอวกาศ (flatness problem)

ในการเขียนแต่ละวรรคแต่ละตอน ทางผู้เขียนตั้งใจจะหลีกเลี่ยงการใช้สมการที่ยุ่งยากเพราะเล็งเห็นแล้วว่าอาจทำให้ผู้อ่านเกิดอาการเบื่อได้ง่าย แต่บางครั้งก็ไม่สามารถทำเช่นนั้นได้อย่างเช่นในหัวข้อนี้ ทางผู้เขียนจะขออธิบายผ่านสมการทางคณิตศาสตร์ทั้งนี้ก็เพื่อให้เข้าใจ ง่ายยิ่งขึ้น

เริ่มต้นเราจะขออ้างสมการของฟริดมานก่อน และจะทำการหาที่มาที่ไปอย่างคร่าวๆในตอนต่อจากนี้ สมการที่ว่านั้น คือ

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{k}{a^2}, \qquad (1)$$

โดยที่ H คือ ตัวแปรฮับเบิล (Hubble parameter) G คือค่าความโน้มถ่วงสากล ρ คือความหนาแน่น a คือ สเกล แฟคเตอร์ (scale factor) k คือ ค่าคงที่ซึ่งมีค่าเป็น +1, -1 และ 0 แทนลักษณะทางเรขาคณิตของอวกาศแบบปิด แบบเปิดและแบบแบนราบตามลำดับ

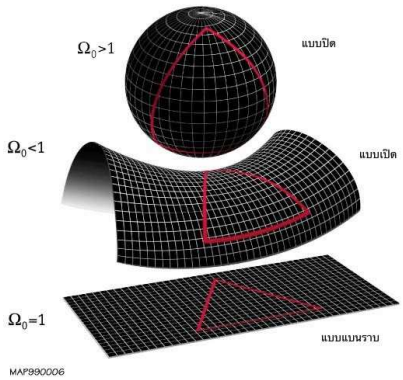
เพื่อความสะดวกเราจะกำหนดให้ $8\pi G = 1$ และนิยามโอเมกา (Ω) ดังนี้

$$\Omega(t) = \frac{\rho(t)}{\rho_{cri}(t)}, \qquad (2)$$

ในที่นี้ ความไม่สมมาตรคือความไม่เท่ากัน

โดยที่ $\rho_{cri}(t)$ คือความหนาแน่นวิกฤต (critical density) กำหนดด้วย

$$\rho_{cri} = 3H^2. \qquad (3)$$



รูปที่ 1 ลักษณะทางเรขาคณิตของอวกาศ

แทนสมการ (2) และ (3) ลงใน (1) เราพบว่า [7]

$$\Omega(t) - 1 = \frac{k}{(Ha)^2}. \qquad (4)$$

จากสมการ (4) เราปรับแต่งจนได้สมการที่มีทั้ง Ω และ k ต่อไป กำหนดให้ t_i เป็นอายุของจักรวาลตอนต้นๆ t_0 เป็นอายุของจักรวาล ในขณะนี้ และ t เป็นอายุของจักรวาลที่เวลาใดๆ ซึ่ง $t_i < t$ เราจะได้ว่า

$$\Omega(t_i) - 1 = [\Omega(t_0) - 1]\left(\frac{\dot{a}(t_0)}{\dot{a}(t_i)}\right)^2, \qquad (5)$$

โดยที่ $\dot{a}$ แทนอนุพันธ์ของ a เทียบกับเวลา t เพื่อความกระจ่างในปัญหา เรากำหนดเวลาอย่างคร่าวๆตามวิวัฒนาการของจักรวาล ในหน่วยวินาที (s) ดังนี้

$$t_0 \sim 4.7\times10^{17}\, s, \qquad (6)$$

$$t_{rm} \sim 2.0\times10^{12}\, s, \qquad (7)$$

$$t_{BBN} \sim 2.0\times10^{2}\, s, \qquad (8)$$

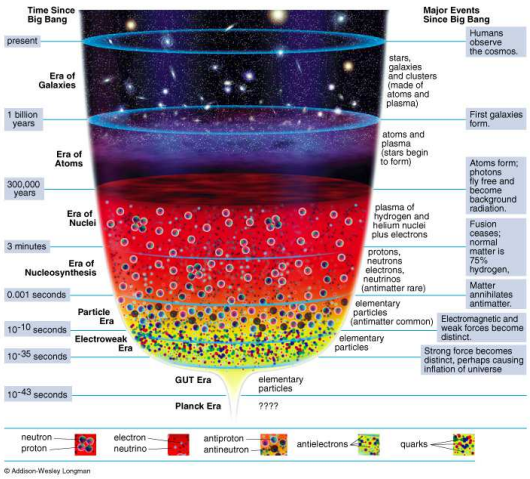
และ

$$t_P \sim 5.0\times10^{-44}\, s, \qquad (9)$$

โดยที่ t_P คือเวลาของแพลงค์ (Planck time) t_{rm} คือเวลา ณ ที่มีความเท่ากันระหว่างสสารและการแผ่รังสี (radiation-matter equality) t_{BBN} คือเวลา ณ การสังเคราะห์ทางนิวเคลียร์ (Nucleosynthesis)

เพื่อกันลืม เรามีข้อมูลจากการวัดค่าของ $\Omega(t_0)$ ดังนี้[1]

$$\Omega(t_0) = 1.0023^{+0.0056}_{-0.0054}. \qquad (10)$$



รูปที่ 2 แสดงวิวัฒนาการของจักรวาล

แทนเวลาที่ได้ระบุไว้ลงในสมการ (5) เราพบว่า

$$\Omega(t_{rm})-1<10^{-4}, \quad (11)$$

ทั้งนี้ค่าที่ได้ใน (11) เราทำการคำนวณโดยใช้สเกลแฟคเตอร์ในช่วง สสารครองจักรวาล (matter dominated universe) คือ

$$a \propto t^{\frac{2}{3}}. \quad (12)$$

นอกจากนี้แล้ว เรายังพบอีกว่า

$$\Omega(t_{BBN})-1<10^{-17}, \quad (13)$$

$$\Omega(t_{P})-1<10^{-64}. \quad (14)$$

บันทึกกันลืมไว้ว่าค่าที่ได้ใน (13)-(14) เราทำการคำนวณ โดยใช้สเกลแฟคเตอร์ในช่วงรังสีครองจักรวาล (radiation dominated universe) คือ

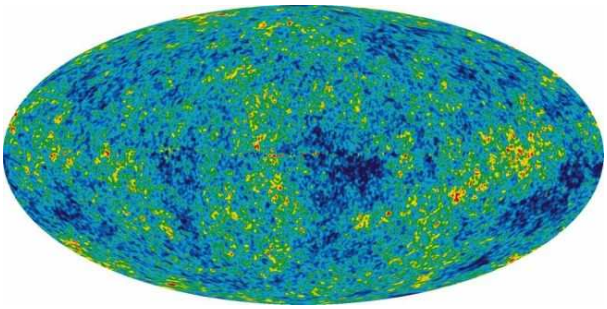
$$a \propto t^{\frac{1}{2}}. \quad (15)$$

คำถามหน้าไมล์ตอนนี้ก็คือแล้วเราจะคำนวณค่าเหล่านั้นทำไม มันบอกอะไรเราบ้าง คำตอบก็คือยิ่งเราย้อนเวลาไปสู่บิ๊กแบงมากขึ้นเท่าใด ค่า Ω ก็ยิ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 มากขึ้นเท่านั้น คำถามต่อไปคือ อะไรเป็นตัวบังคับ หัวเรือให้ค่า Ω เข้าใกล้ 1

ยิ่งไปกว่านั้นหาก Ω เข้าใกล้ 1 ตามสมการ (4) เราทราบเป็นนัยๆว่าค่าคงที่ k ยิ่งเข้าใกล้ 0 อีกด้วย หาก k มีค่าเข้าใกล้ 0 นั่นก็แสดงว่าจักรวาลของเรามีแนวโน้มที่จะมีลักษณะแบบแบนราบ (flatness) คำถามคือเป็นไปได้อย่างไร

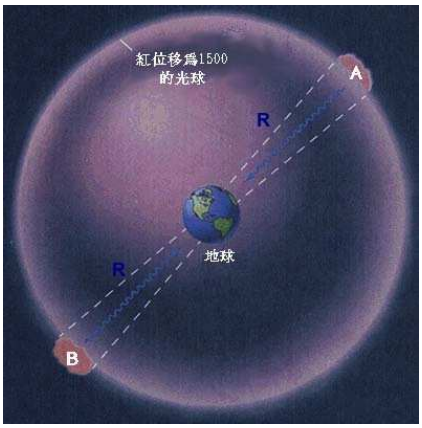
Q2 ปัญหาเส้นขอบฟ้าเหตุการณ์ (horizon problem)

เพื่อให้เข้าใจได้ง่าย เราจะขอยกตัวอย่างดังต่อไปนี้ สมมุติทรงกลมแทนขอบข่ายการมีอยู่ของรังสีไมโครเวฟพื้น หลัง (Cosmic Microwave Background; CMB)



รูปที่ 3 แผนภาพรังสีไมโครเวฟพื้นหลังหรือซีเอ็มบี (CMB)

ตำแหน่งกึ่งกลางทรงกลมคือโลก ระยะทางจากโลกถึงขอบทรงกลม เท่ากับ R กำหนดตำแหน่ง A และ B ดังรูปที่ 4



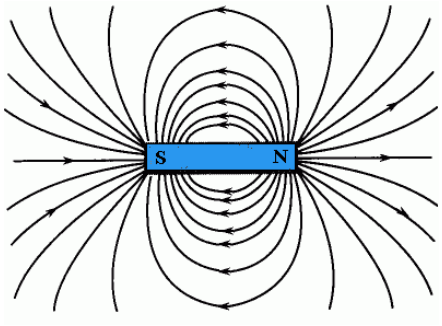
รูปที่ 4 ตำแหน่ง A และ B ณ เส้นขอบฟ้าเหตุการณ์

ข้อมูลที่ได้จากการวัดบอกเราว่ารังสีไมโครเวฟพื้นหลังหรือซีเอ็มบีได้ถือกำเนิดขึ้นราวๆ 380,000 ปี หลังจากบิ๊กแบง แล้วเกิดอะไรขึ้นในขณะที่จักรวาลมีอายุได้ 380,000 ปี พิจารณารูปที่ 4 เราจะทราบว่าช่วงเวลาจากโลก (กึ่งกลาง) ถึงตำแหน่ง A จะมีค่าเท่ากับช่วงเวลาจากโลกถึงตำแหน่ง B คือ 380,000 ปี

แต่ข้อมูลที่บันทึกได้บอกเราว่าอุณหภูมิของซีเอ็มบี แทบจะไม่ต่างกันเลยไม่ว่าเราจะมองไปในทิศทางไหน A หรือ B หรือทิศอื่นๆ โดยเฉลี่ยแล้วมีค่าประมาณ 2.7 เคลวิน (Kelvin) คำถามคือมันเป็นเช่นนั้นได้อย่างไร ในเมื่อตำแหน่ง A และ B อยู่ห่างกัน 760,000 ปี ซึ่งมากกว่าอายุของจักรวาลในขณะนั้นที่ 380,000 ปี พูดง่ายๆก็คือข้อมูล เช่น อุณหภูมิจากซีเอ็มบีที่ตำแหน่ง A ไม่มีทางที่จะเคลื่อนที่ไปยัง ตำแหน่ง B ได้ เพราะห่างกัน 2 เท่าของอายุของจักรวาล แล้วซีเอ็มบีมีอุณหภูมิเท่ากันที่ 2.7 เคลวิน ได้อย่างไร

Q3 ปัญหาแม่เหล็กขั้วเดียว (monopole problem)

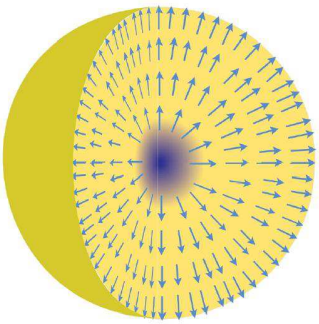
หากมีคำถามว่าแม่เหล็กมีกี่ขั้ว ตอบได้ทันทีเลยว่า 2 ขั้ว คือขั้วเหนือและขั้วใต้ ไม่ว่าเราจะตัดแท่งแม่เหล็กให้ขาดออกจากกันอย่างไร แม่เหล็กก็จะมี 2 ขั้วเสมอ



รูปที่ 5 ตัวอย่างภาพแม่เหล็กสองขั้ว

แต่เรารู้หรือไม่ว่าแบบจำลองบิ๊กแบงทำนายเอาไว้ ว่ามีแม่เหล็กขั้วเดียว (monopole) เกิดขึ้นในช่วงที่จักรวาลยังแบเบาะ หากถามว่าเรารู้ได้อย่างไรว่ามีแม่เหล็กขั้วเดียวจริงๆ เป็นคำถามที่ดี! คำตอบก็คือก็ทฤษฎีมันบอกเราแบบนั้น

เวลาผ่านไปวันแล้ววันเล่า จากวันเป็นเดือน จากเดือนเป็นปี จากปีเป็นทศวรรษ แล้วยังไงกัน เราก็ยังไม่เจอแม่เหล็กขั้วเดียวไงละ นี่แหละเป็นปัญหาที่คาใจเหล่านักฟิสิกส์ทั้งหลายหากมันมีอยู่จริงแล้ว มันไปอยู่ที่ไหนล่ะ?



รูปที่ 6 ตัวอย่างภาพแม่เหล็กขั้วเดียว [2]

คำตอบที่น่าประทับใจ

เหล่านักวิทยาศาสตร์จำนวนไม่น้อยที่อยากจะเป็นคนแรกที่สามารถปักธงบนยอดเขาแห่งความสำเร็จ แต่จะประสบผลสำเร็จได้นั้นมันไม่ใช่กล้วยๆเลย มีนักวิทยาศาสตร์ท่านหนึ่งกล่าวว่าเรากำลังยืนอยู่บนไหล่คนอื่น พูดง่ายๆก็คือเราอาศัยความรู้เก่าๆที่มันตกตะกอนใช้เป็นใบเบิกทางเพื่อเดินขึ้นบันไดในขั้นที่สูงขึ้นและมองได้ไกลยิ่งขึ้น

ตอนนี้เราพร้อมแล้วที่จะตอบคำถามปัญหาเงื่อนไขเริ่มต้น (initial conditions) ทั้ง 3 ที่ได้กล่าวไว้ การพองตัว (Inflation) ถือเป็นพระเอกขี่ม้าขาวสำหรับเรื่องนี้เลยทีเดียว!

แบบจำลองการพองตัวถือได้ว่าเป็นเป็นแบบจำลองแรกที่ส่งออกแนวความคิดใหม่จากฟิสิกส์ของอนุภาคไปสู่จักรวาลวิทยา ต่อไปนี้เราจะเห็นว่าทำไมการพองตัวคือพระเอกสำหรับงานปัญหาเงื่อนไขเริ่มต้น

A1 ปัญหาการแบนราบของอวกาศ (flatness problem)

แบบจำลองการพองตัวบอกเราว่าในขณะที่จักรวาลพองตัวนั้นสเกลแฟคเตอร์ประพฤติตัวดังนี้

$$a(t) = e^{Ht}, \qquad (16)$$

โดยที่ H มีค่าคงที่ตลอดการพองตัว และ $a(t_0) = 1$ ลองคิดเล่นๆโดยนำสเกลแฟคเตอร์ในสมการ (16) แทนลงไปในสมการ (4) เราพบว่า

$$\Omega(t) - 1 \propto ke^{-2Ht}. \qquad (17)$$

เนื่องจากเทอมขวามือของสมการ (17) ลดลงแบบเอกซ์โปเนนเชียล (exponential decay) ดังนั้นในช่วงของการพองตัว เราสามารถตัดมันทิ้งไปได้เลย เมื่อ $ke^{-2Ht} \approx 1$ เราจะได้ว่า

$$\Omega(t) \approx 1. \qquad (18)$$

ทำการคำนวณโดยพิจารณาว่าสเกลแฟคเตอร์ขยายตัวแบบเอกซ์โปเนนเชียล (exponential expansion) เราจะสามารถอธิบายได้ว่าทำไม Ω มีค่าเข้าใกล้ 1

A2 ปัญหาเส้นขอบฟ้าเหตุการณ์ (horizon problem)

แบบจำลองการพองตัวกล่าวว่าก่อนเกิดการพองตัว ชิ้นส่วนต่างๆในจักรวาลขณะนั้นเชื่อมตลอดถึงกัน สามารถแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างชิ้นส่วนได้ (causually connected patch) ทำให้ทุกๆชิ้นส่วน มีข้อมูล เช่นอุณหภูมิที่เหมือนๆกัน

การพองตัวมีเวทมนต์ที่สามารถแช่แข็งข้อมูล (freeze out) ในชิ้นส่วนเหล่านั้นให้เป็นอยู่อย่างที่เคยเป็นและทำการดีดชิ้นส่วนเหล่านั้นให้กระจายไปในทุกทิศทุกทางมีผลทำให้ซีเอ็มบีมีอุณหภูมิเท่ากันที่ 2.7 เคลวิน

A3 ปัญหาแม่เหล็กขั้วเดียว (monopole problem)

แม่เหล็กขั้วเดียวถือได้ว่าเป็นวัตถุโบราณ (relic) ว่ากันว่ามีแม่เหล็กขั้วเดียวถือกำเนิดขึ้นในช่วงที่จักรวาลยังแบเบาะและก่อนมีการพองตัวเช่นเคย การพองตัวเปรียบได้กับพ่อมดมีเวทมนต์

ที่สามารถทำให้แม่เหล็กขั้วเดียวเจือจางลง ทำให้เราไม่สามารถวัดได้

สิ่งนี้ไม่ได้เกิดขึ้นโดยบังเอิญ แต่เกิดขึ้นเนื่องจากช่วงการพองตัว สเกลแฟคเตอร์ขยายตัวแบบเอกซ์โปเนนเชียล ทุกสิ่งทุกอย่างถูกดีดออกและเจือจางอย่างรวดเร็ว

ข้อมูลจากแฟ้มประวัติ

แนวความคิดเกี่ยวกับวิวัฒนาการของจักรวาลที่เรียกว่าการพองตัว (inflation) มีมานานโข นานจนอาจพูดได้ว่ามีมาก่อนพวกเราหลายๆคนเกิดเสียด้วยซ้ำ แต่หลายคนเชื่อว่าแบบจำลองแรกของการพองตัวเกิดขึ้นราวๆ ค.ศ. 1979 ในขณะนั้นอเล็กซี สเตโรบินสกี้ [3] (Alexei Starobinsky) ซึ่งพำนักอยู่ที่บ้านเกิดในสหภาพโซเวียตได้ เสนอแบบจำลองที่มีความซับซ้อนมากทีเดียวและไม่ได้ใช้ชื่อว่าแบบจำลองการพองตัวซะด้วยสิ ว่ากันว่าแบบจำลองดังกล่าวตั้งอยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีควอนตัมของแรงโน้มถ่วง (quantum theory of gravity) และถูกขนานนามว่าแบบจำลองสเตโรบินสกี้

รูปที่ 7 Alexei Starobinsky

เพราะความยากลำบากของนักวิทยาศาสตร์ในสหภาพโซเวียตในการเดินทางและติดต่อสื่อสารกับผู้ร่วมงาน และสังคมจากภายนอก สิ่งนี้คืออุปสรรคทำให้ข่าวสารต่างๆไม่ได้รั่วไหลออกจากสหภาพโซเวียตเลย ทำให้แนวความคิดของสเตโรบินสกี้ถูกละเลยไปอย่างน่าเสียดาย

ในปี ค.ศ. 1981 อลัน กูธ [4] (Alan Guth) ได้ตีพิมพ์ผลงานของแบบจำลองการพองตัวที่มีรายละเอียดต่างจากแบบจำลองของสเตโร บินสกี้ ว่ากัน (อีกแล้ว) ว่า อลัน กูธ ไม่ได้รู้เรื่องแบบจำลองของสเตโรบินสกี้แต่อย่างใด พูดง่ายๆก็คือ อลัน กูธ คงไม่ได้ลอกงานของสเตโรบินสกี้ แหล่งข่าวแจ้งมาว่าแบบจำลองของ อลัน กูธ เข้าใจได้ง่ายกว่าของสเตโรบินสกี้ เยอะเลย

รูปที่ 8 Alan Guth

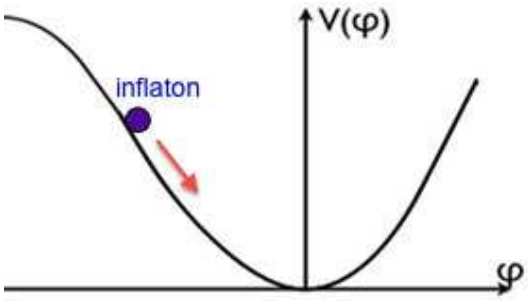
ดูเหมือนโชคจะเป็นใจให้ อลัน กูธ เพราะเขาทำงานอยู่ที่อเมริกา ทำไม่น่ะหรือ เหตุผลง่ายๆก็คือว่า อลัน กูธ สามารถเผยแพร่ งานของเขาได้อย่างอิสระ เขาได้เดินทางพบปะและพูดคุยกับผู้ร่วมงานของเขาแทบจะทั่วโลกเลยก็ว่าได้ ความเป็นอิสระดูเหมือนจะเป็นโบนัสเล็กๆให้ อลัน กูธ เพราะเขาได้ชื่อว่าเป็นผู้ให้กำเนิดทฤษฎีการพองตัวนั่นเอง

แม้ อลัน กูธ จะได้ชื่อว่าเป็นบิดาของทฤษฎีการพองตัว แต่แบบจำลองของเขาก็มีข้อบกพร่อง แบบจำลองการพองตัวของอลัน กูธ มีตอนหนึ่งกล่าวไว้ว่า หลังจากการพองตัวยุติลง จักรวาลในขณะนั้นเต็มไปด้วยฟองอากาศ (bubbles) ซึ่งจะขยายตัวตามวิถีของมันเองและมีการชนกันระหว่างฟองอากาศด้วยกันเอง

สิ่งที่ทำให้แบบจำลองนั้นไม่ได้เป็นสิ่งที่เรียกได้ว่าตรงออกมาจากคัมภีร์คือเราไม่พบชิ้นส่วนหลักฐานใดๆเลยสำหรับฟองอากาศที่ อลัน กูธ ได้เสนอไว้

หนึ่งปีต่อมาคือในปี 1982 อังเดร ลินด์ [5] (Andrei Linde) และนักฟิสิกส์อีก 2 ท่าน คือ พอล สไตน์ฮาร์ด (Paul Steinhardt) และ อังเดรียส์ อัลบรีชท์ [6] (Andreas Albrecht) เสนอแบบจำลองการพองตัวแนวใหม่ (new Inflation) ที่เรียกว่าการพองตัวแบบสโลโรล (slow-roll inflation)

แบบจำลองดังกล่าวอาศัยเพียงสนามสเกลาร์ (scalar field) เช่นเดียวกับอนุภาคฮิกส์ (Higgs particle) เรียกว่า อินเฟลตอน (Inflaton) φ อินเฟลตอนจะเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งต่ำสุดของพลังงานศักย์ $V(\varphi)$ ของมันดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 แสดงพลังงานศักย์ของ inflation

เราขอละการหาที่มาที่ไปของสมการการเคลื่อนที่ของอินเฟลตอนไว้ในตอนต่อไปซึ่งจะเป็นตอนจบ ในที่นี้ขอคัดลอกมาให้ดูก่อน สมการการเคลื่อนที่ของอินเฟลตอน คือ

$$\ddot{\varphi} + 3H\dot{\varphi} + \frac{dV(\varphi)}{d\varphi} = 0. \qquad (19)$$

การเคลื่อนตัวของอินเฟลตอนจะเป็นแบบอย่างช้าๆ ทั้งนี้เนื่องจากการขยายตัวของจักรวาลในขณะที่อินเฟลตอนเคลื่อนที่ก่อให้เกิดแรงเสียดทานหรือแรงหน่วงกระทำต่ออินเฟลตอน (drag/damped force) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $3H\dot{\varphi}$

เอกสารอ้างอิง

[1] N. Jarosik et al., “Seven-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Sky Maps, Systematic Errors, and Basic Results 2010” [arXiv:1001.4744]

[2] ภาพโดย Usama Al Khawaja

[3] A. A. Starobinsky, “A New Type of Isotropic Cosmological Models Without Singularity", Phys. Lett. B 91 (1980) 90

[4] A. H. Guth, “The Inflationary Universe: A Possible Solution to the Horizon and Flatness Problems", Phys. Rev. D 23 (1981) 347

[5] A. D. Linde, “A New Inflationary Universe Scenario: A Possible Solution of the Horizon, Flatness, Homogeneity, Isotropy and Primordial Monopole Problems", Phys. Lett. B 108 (1982) 389

[6] A. Albrecht and P. J. Steinhardt, “Cosmology for Grand Unified Theories with Radiatively Induced Symmetry Breaking", Phys. Rev. Lett. 48 (1982) 1220

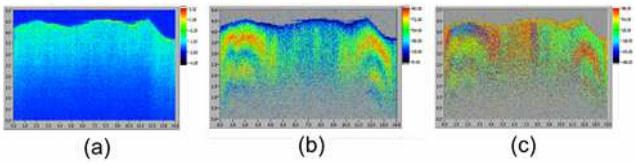
[7] P. Channuie, “Dynamical Origin of Inflation”. PhD thesis (in preparation)

[8] พงษ์พิชิต จันทร์นุ้ย และ อรุณี ชูนาวา “เราเข้าใจจักรวาลดีแค่ไหน?” วารสารฟิสิกส์ไทย ฉบับ มิถุนายน-สิงหาคม 2554

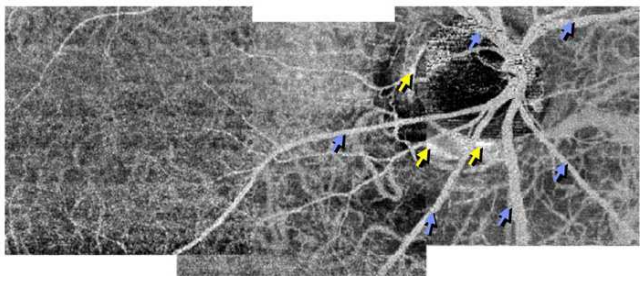
รูปประกอบจากบทความ “การใช้แบบจำลอง ‘อาทิตย์ทรงกลด’ไขปริศนาธรรมชาติ” หน้า 9-14 (ต่อ)

รูปที่ 9

รูปประกอบจากบทความ “OCT: นวัตกรรมของภาพถ่ายทางการแพทย์” หน้า 15 – 22

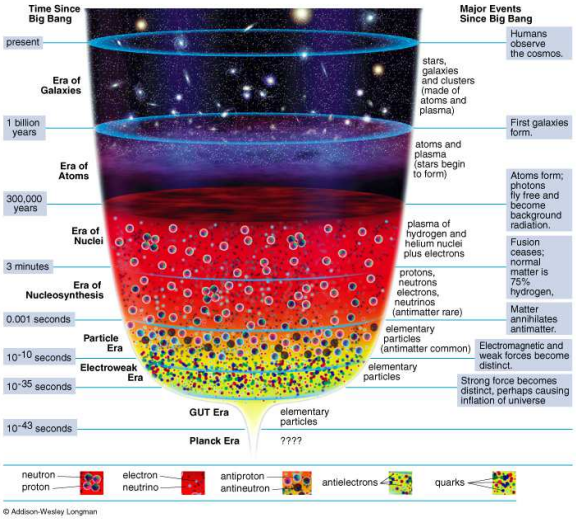


รูปที่ 6

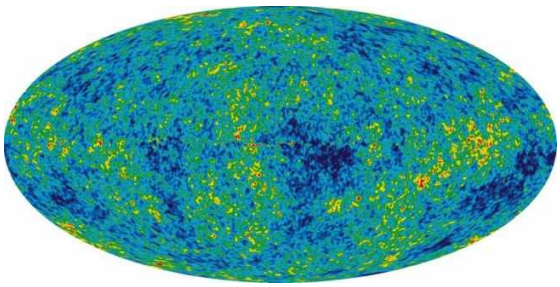


รูปที่ 7

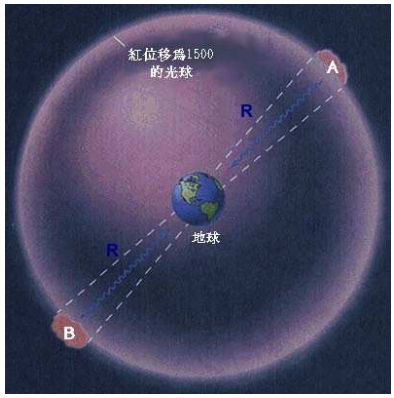
รูปประกอบจากบทความ “มารู้จักจักรวาลแบบพองตัวกันเถอะ!: ตอนแรก” หน้า 23 – 28



รูปที่ 2



รูปที่ 3



รูปที่ 4

7th Siam Physics Congress, SPC2012, May 9-12, 2012 Ayutthaya, Thailand

แล้วพบกันใหม่ที่งาน SPC2013 จ. เชียงใหม่....

สมาคมฟิสิกส์ไทย

สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถนนมหาวิทยาลัย

ต. สุรนารี อ. เมือง

จ. นครราชสีมา 30000

THAI PHYSICS SOCIETY

School of Physics, Suranaree Univ. of Technology

111 University Avenue

Tambon Suranaree, Muang District

Nakhon Ratchasima 30000

ชำระค่าฝากส่งเป็นรายเดือน

ใบอนุญาตเลขที่ 187/2552

ปท.จ. นครราชสีมา

สิ่งตีพิมพ์

หากไม่ถึงผู้รับ โปรดส่งคืนสมาคมฟิสิกส์ไทย