

วารสารฟิสิกส์ไทย

Thai Journal of Physics

วารสารสำหรับผู้รักและสนใจในแวดวงฟิสิกส์

ISSN 0857-1449

ปีที่ 29 ฉบับที่ 4 : ธันวาคม 2555 – กุมภาพันธ์ 2556

ห้องวิจัยทัศนศาสตร์เชิงอะตอมควอนตัม

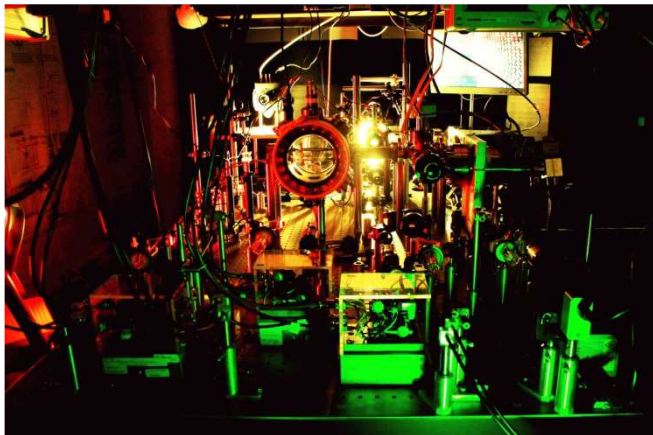
อนุภาคอิเล็กตรอน: ภาคนำ

ลักษณะการว่ายน้ำที่สัมพันธ์กับเลเซอร์อินดักซ์

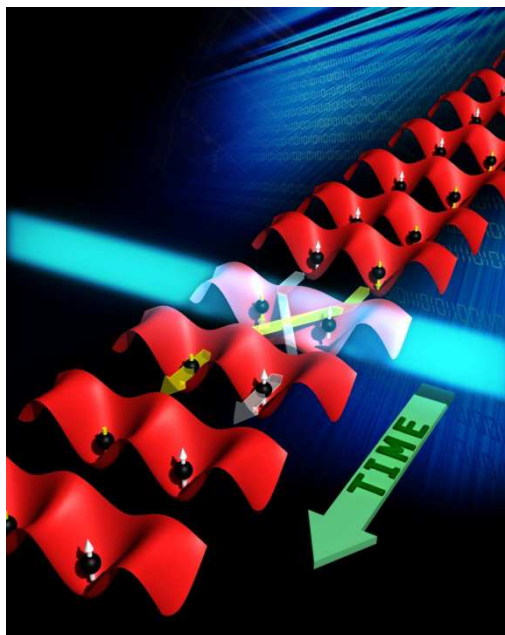
เราทราบอายุของเอกภพได้อย่างไร?

STEM กับ ฟิสิกส์สัพราคอนดักเตอร์ (IYPT)

รูปประกอบจากบทความ “ห้องวิจัยทัศนศาสตร์เชิงอะตอม
ควอนตัม” หน้า 2-6



รูปที่ 1



รูปที่ 6



รูปที่ 5

รูปประกอบจากบทความ “อนุภาคฮิกส์โบซอน: ภาคนำหน้า” หน้า
7-13



รูปที่ 3

สารบัญ

สวัสดิ์	1
ห้องวิจัยทัศนศาสตร์เชิงอะตอมควอนตัม	2
วราณท์ อนุกุล	
อนุภาคฮิกส์โบซอน: ภาคแนะนำ	7
อิชฎา ทองกุล และ วรินทร์ ศรีทะวงศ์	
ลักษณะการว่ายน้ำที่สัมพันธ์กับเลขเรย์โนลด์	12
ปนัดดา เชาวลิต	
เราทราบอายุของเอกภพได้อย่างไร?	19
พงษ์พิชิต จันทน์นัย	
STEM กับ ฟิสิกส์ประยุกต์ (IYPT)	25
นฤมล สุวรรณจันทร์	



สวัสดิ์

กลับมาพบกันอีกครั้งกับวารสารฟิสิกส์ไทย ในฉบับที่แล้วเราพูดถึงรางวัลโนเบลจากการควบคุมอะตอมเดี่ยว ในบทความแรกของฉบับนี้จะมารู้จักกับห้องทัศนศาสตร์เชิงอะตอมที่มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ที่พยายามกักขังอะตอมเดี่ยวเช่นกัน ซึ่งถ้าสำเร็จก็น่าจะเป็นที่แรกของประเทศไทย

ในบทความต่อมาจะเป็นการทำความรู้จักกับอนุภาคฮิกส์โบซอนกันมากขึ้นซึ่งมีข่าวฮือฮาเกี่ยวกับรายการการค้นพบที่ผ่านมา โดยผู้เขียนได้เปรียบเทียบความรู้ที่คิดว่าอนุภาคฮิกส์อาจจะเปรียบเสมือนอะตอมในยุคสมัยเรา บทความต่อมาเป็นเรื่องของนกว่ายน้ำที่ว่ายน้ำได้เร็วที่สุดซึ่งพบว่าลักษณะการว่ายน้ำจะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับขนาดของนกว่ายน้ำนั้นๆ และจากนั้นมาเรียนรู้เกี่ยวกับเอกภพของเราและวิธีการคำนวณอายุกัน

ในบทความสุดท้ายจะเกี่ยวกับการเรียนการสอนสำหรับนักเรียนในระดับมัธยมศึกษาในโครงการ STEM และ IYPT ที่ดูแลโดย สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.)

กองบรรณาธิการ

กองบรรณาธิการ ชาญกิจ กันถ่อง, พวงรัตน์ ไพเราะ, พรรณี วัฒนกุลวิชัย, ชิตณรงค์ ศิริสถิตย์กุล, สมศักดิ์ แดงดี, สตรีรัตน์ ไรต์, นววรรณ สงวนศักดิ์, เข้ม พุ่มสะอาด, ณัฐพร ฉัตรเกษม, อัสวิน สันทรัพย์, วรพงศ์ รักเรืองเดช, สุรเชษฐ์ หลิมกำเนิด, สุปรีย์ พินิจสุนทร, ชุตินทร พันธุ์วงศ์ หัวหน้ากองบรรณาธิการ วรวัฒน์ มีวาสนา ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ ประพงษ์ คล้ายสุบรรณ์ ภาพและออกแบบปก วรวัฒน์ มีวาสนา เลขานุการกองบรรณาธิการ นิชชาวัลย์ แก่นจักร จำนวนพิมพ์ 1,000 เล่ม

ติดต่อกองบรรณาธิการ วารสารฟิสิกส์ไทย สมาคมฟิสิกส์ไทย สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000 โทรศัพท์: 044-224549 โทรศัพท์: 044-224651 อีเมล: worawat@g.sut.ac.th วารสารฟิสิกส์ไทย เป็นวารสารราย 3 เดือน มีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่สาระ ข่าวสาร และเป็นสื่อสัมพันธ์ในมวลหมู่สมาชิกและผู้ที่เกี่ยวข้องในแวดวงฟิสิกส์ ส่งเสริมให้เกิดการแลกเปลี่ยนข้อมูลและประสบการณ์เกี่ยวกับฟิสิกส์ในวงกว้างที่สร้างสรรค์ โดยความคิดเห็นและทักษะที่ปรากฏอยู่ในบทความต่างๆ เป็นเฉพาะของผู้เขียนแต่ละท่าน สมาคมฟิสิกส์ไทยไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป Website: www.thps.org

คณะกรรมการสมาคมฟิสิกส์ไทย ประจำปี 2554 – 2556 นายกสมาคมฯ รศ. ดร. วิทยา อมรกิจบำรุง อุปนายก รศ. ดร. วีระพงษ์ แพสุวรรณ เลขาธิการ ผศ. ดร. เอกพรรณ สวัสดิ์ตั้ง เหรียญฤกษ์ ศ. ดร. ชูกิจ ภูมิปัญญาญ์ นายทะเบียน ศ. ดร. สันติ แม่นศิริ ปฏิคม ผศ. ดร. รัตติกร ยืนนิรัญ บรรณาธิการวารสารฟิสิกส์ไทย ดร. วรวัฒน์ มีวาสนา ประธานสัมพันธ์ ดร. อนนก เจริญภักดี รองเลขาธิการ ผศ. ดร. ทศวรรษ สีตะวัน กรรมการ รศ. ดร. ประยูร ส่งศิริฤทธิกุล, ดร. สาโรช รุจิวรรณ, ดร. ประพงษ์ คล้ายสุบรรณ์, ผศ. ดร. ศุภกร รักใหม่, ผศ. ดร. ขจรยศ อยู่ดี, ผศ. รังนา ชินพิทักษ์, รศ. ดร. ชีววรรณ บุญญวรรณ, ผศ. ดร. ธนากร โอสดจันทร์, ผศ. ดร. นิรันดร์ วิทิตอนันต์, ดร. สิริพัฒน์ ประโทนเทพ, ดร. ณัฐพร ฉัตรเกษม

ห้องวิจัยทัศนศาสตร์เชิงอะตอมควอนตัม

วารานท์ อนุกุล¹

งานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์ในปัจจุบันมีความคาบเกี่ยวระหว่างสาขามากขึ้น และกำลังมุ่งหน้าไปสู่การศึกษาระบบที่มีขนาดเล็กลงเรื่อยๆ ในมาตราส่วนไม่ว่าอะตอม การเชื่อมโยงวิทยาศาสตร์ไปสู่เทคโนโลยีเพื่อการใช้งานจริงในยุคแห่งควอนตัมนี้ ต้องการความสามารถในการบังคับควบคุมสถานะและอันตรกิริยาระหว่างอะตอม เพื่อให้ปรากฏการณ์ทางควอนตัมแสดงออกได้ชัดเจนขึ้น ต้องลดความสำคัญของการรบกวนพลศาสตร์ลง และการออกแบบสถานะทางควอนตัมตามต้องการก็มีความเป็นไปได้ นั่นหมายถึงว่าระบบอะตอมเย็นจะเป็นสสารตั้งต้นของการทดลองที่ขาดไม่ได้

ความรู้และวิศวกรรมอันเป็นผลผลิตจากการทดลองที่สามารถเอาชนะขีดจำกัดทางกายภาพได้อย่างต่อเนื่องและโดดเด่นที่ผ่านมาของสาขาวิจัยอะตอม-โมเลกุล-ทัศนศาสตร์ ได้ถูกนำไปประยุกต์เข้ากับฟิสิกส์ในหลากหลายแขนงบนทุกสเกลของขนาดวัตถุและพลังงาน เทคนิคเชิงทัศนศาสตร์-อะตอมที่ปรับเปลี่ยนกรอบความคิดเชิงการทดลอง และหยิบยื่นความน่าจะเป็นใหม่ๆ ได้ผลักดันกระบวนการวิจัยในสาขาเคมีกายภาพ ชีววิทยาโมเลกุล วัสดุศาสตร์นาโน วิศวกรรมการคำนวณและการสื่อสาร ฯลฯ ไปสู่ขีดจำกัดใหม่ที่คาดไม่ถึง งานวิจัยฟิสิกส์ทดลองขั้นมูลฐานในสถานะสุดขีดที่สามารถเข้าถึงได้ด้วยระบบไดโอดเลเซอร์ราคาถูกที่พัฒนาขึ้นในห้องวิจัยทัศนศาสตร์เชิงอะตอมควอนตัม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จะเป็นการวางรากฐานสำหรับความพร้อมที่จะรองรับเทคโนโลยีเชิงควอนตัมในหลากหลายด้าน อาทิเช่น การคำนวณเชิงควอนตัม สารสนเทศเชิงควอนตัม วงจรอิเล็กทรอนิกส์นาโน ฯลฯ การก้าวเข้าสู่การวิจัยที่ติดเทียมกันกับอารยประเทศดังกล่าวจะส่งผลโดยตรงต่อความเชื่อมั่นในการลงทุน การต่อรองทางการทูต ความยั่งยืนของสวัสดิภาพเชิงเศรษฐกิจ ความสามารถในการแข่งขันบนเวทีระบบเศรษฐกิจโลก ตลอดจนถึงอธิปไตยของประเทศ

ด้วยเหตุนี้ ห้องวิจัยทัศนศาสตร์เชิงอะตอมควอนตัม

(QAO lab) ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ (ThEP) ตั้งอยู่ที่ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จึงได้จัดทำโปสเตอร์ประชาสัมพันธ์[1] ส่งไปทั่วประเทศ ในเดือนเมษายน 2556 เพื่อเชิญชวนนักวิจัย และนักศึกษาที่มุ่งมั่นไม่ย่อท้อมาร่วมกันทำให้ทั้ง 6 โปรแกรมวิจัยดังที่จะอธิบายต่อไปให้มีความเข้มแข็ง (แต่ละโปรแกรมวิจัยประกอบไปด้วยโครงการวิจัยย่อยซึ่งสามารถอ่านได้จาก www.qaocmu.org) ห้องวิจัยฯ คาดหวังถึงความร่วมมือในต่างสาขาวิชาอันจะสร้างโอกาสที่จะได้ทำงานวิจัยบังคับควบคุม โลกควอนตัม และขยายขอบเขตของความรู้ทางฟิสิกส์ออกไป เวลานั้นมาถึงแล้ว!

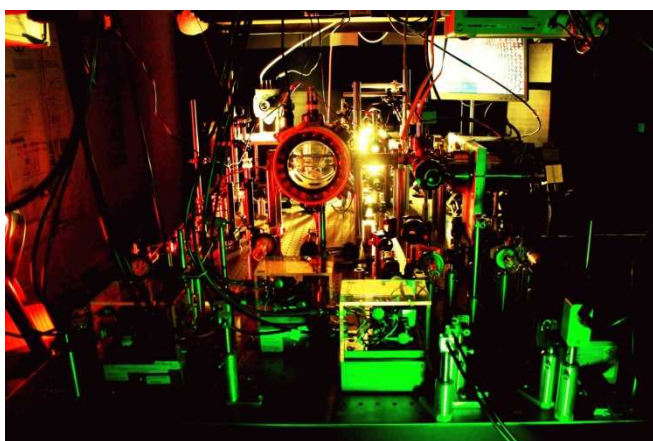
บทนำ

การค้นพบสารควบแน่นโบส-ไอน์สไตน์ (BEC) ในปี พ.ศ.2538 ได้เปลี่ยนแปลงฟิสิกส์ของอะตอม-โมเลกุล-ทัศนศาสตร์ (AMO) แบบดั้งเดิม ที่ขับเคลื่อนโดยการศึกษากระบวนการกระเจิงและเทคนิคสเปกโตรสโกปี ไปสู่โฉมใหม่ที่ได้ปฏิบัติแนวคิดการทดลองและเปิดไฟส่องทางไปสู่การทำความเข้าใจปัญหาฟิสิกส์สำคัญๆ มากมาย นับจากนั้นมา นักฟิสิกส์ทั้งหลายได้ร่วมเป็นพยานในบทบาทที่ขาดมิได้ของภาคทฤษฎีที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการบังคับควบคุมโลกควอนตัมอย่างน่าทึ่ง ข้อมูลที่ส่งออกมาในมุมมองของการวัดที่ไว ละเอียด และถูกต้องที่สุดเท่าที่โลกจะให้ได้ ได้รับการตระหนักถึงในทุกๆ สาขาของฟิสิกส์ทดลองตลอดระยะเวลา 15 ปีที่ผ่านมา มีนักฟิสิกส์สาขาอะตอม-โมเลกุล-ทัศนศาสตร์ถึง 11 คนที่ได้รับรางวัลโนเบล ในขณะที่เหตุการณ์สำคัญต่างๆ ได้รับการปักหลักไม่ลืมหูลืมตาไปตามถนนแห่งเกียรติภูมิ การวัดเชิงควอนตัมที่ได้พิสูจน์ความมีอยู่จริงของสิ่งที่เคยถูกเรียกว่า “เป็นไปไม่ได้” ได้ก้าวขึ้นสู่หนึ่งในสิบอันดับสูงสุดของการค้นพบที่ยิ่งใหญ่แห่งปีของ Physics World เป็นระยะเวลา 4 ปี อย่างต่อเนื่องนับจาก พ.ศ. 2552 เป็นต้นมา แนวโน้มงานวิจัยที่จะดำเนินต่อไปนี้เป็นเครื่องยืนยันถึงการเข้าสู่ยุคควอนตัมอัน

¹อาจารย์ (ดร.) ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ยิ่งใหญ่และงดงามที่เราอยู่ในปัจจุบัน ในฟิสิกส์สาขาที่แสงอาพันธ์ ถูกใช้แทนตาและมือเพื่อที่มนุษย์จะสามารถเห็น จัปตอง และปรับเปลี่ยนสถานะของแต่ละอะตอม ในระดับที่ไม่เคยคิดว่าจะเป็นไปได้มาก่อน เราอาจบอกได้ด้วยใจความมั่นใจว่า ประโยชน์ที่ว่า “อนาคตของมวลมนุษยชาติไว้กับระดับความสามารถในการบังคับควบคุมโลกควอนตัม” นั้นคงไม่ใช่คำถาม “จริงหรือไม่” อีกต่อไป

นอกเหนือไปจากพันธสัญญาหลักในด้านการศึกษาศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ แล้ว ศูนย์ยังได้ให้ความสำคัญกับความก้าวหน้าในงานวิจัยสาขาอะตอม-โมเลกุล-ทัศนศาสตร์ และคาดหมายว่า งานวิจัยพื้นฐานที่ขอบเขตใหม่ของฟิสิกส์เหล่านั้น จะช่วยรังสรรค์ผลิตผลเชิงอุตสาหกรรมไปสู่เทคโนโลยีระดับแนวหน้า พร้อมทั้งชักนำให้เกิดสภาพเศรษฐกิจที่พึ่งพาตนเองได้ ในวันนี้ ห้องวิจัยทัศนศาสตร์เชิงอะตอมควอนตัม ปฏิบัติการกิจภายใต้ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ กำลังทำงานวิจัยขั้นรากฐานเพื่อครอบคลุมการทดลองที่มีสาระสำคัญเกี่ยวข้องกับระบบคำนวณเชิงควอนตัมโดยใช้อะตอม ไปจนถึงการจำลองสถานะเชิงควอนตัมโดยใช้อะตอมริดเบอร์กสำหรับการทำความเข้าใจปรากฏการณ์เชิงดาราศาสตร์ สำหรับงานวิจัยในปัจจุบันและแผนกำหนดการในห้าปีข้างหน้าจะยกขึ้นมาแสดงในหัวข้อข้างล่างนี้

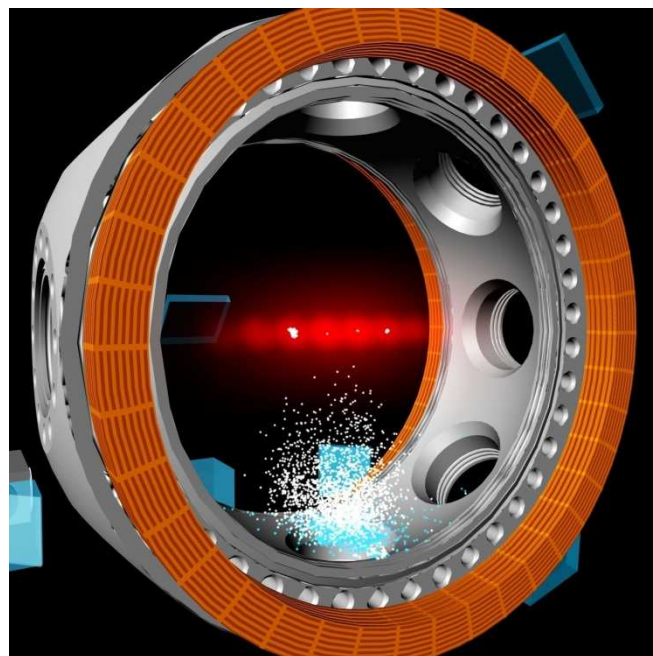


รูปที่ 1 บรรยายภาพ และ อุปกรณ์การทดลองสำหรับงานวิจัยสาขาอะตอม-โมเลกุล-ทัศนศาสตร์ ภายในห้องวิจัยทัศนศาสตร์เชิงอะตอมควอนตัม ภายใต้ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ ที่มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

1. ระบบอะตอมเย็น

ห้องวิจัยทัศนศาสตร์เชิงอะตอมควอนตัมได้ถือกำเนิดในปี พ.ศ. 2552 และนับจากนั้น ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากศูนย์

ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ในการสร้างระบบอะตอมเย็นโดยใช้อะตอมธาตุรูบิเดียม งานวิจัยในช่วงต้นมีเป้าหมายอยู่ที่การผลิตสารควบแน่นโบส-ไอน์สไตน์ และจัดเตรียมกลุ่มอะตอมเย็นเพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับนักวิจัยในหลากหลายสาขาวิชา หลายปีที่ผ่านมา ห้องวิจัยฯ ได้ผลิตระบบไดโอดเลเซอร์ความเสถียรสูง ติดตั้งระบบสเปกโตรสโกปีแบบปราศจากปรากฏการณ์ดอปเปลอร์สำหรับกำเนิดความถี่มาตรฐาน ซึ่งได้นำไปสู่ผลสำเร็จในการสร้างระบบกักขังและทำความเย็นทัศนศาสตร์เชิงแม่เหล็ก (MOT: Magneto-Optical Trap) เป็นครั้งแรกในประเทศไทยเมื่อเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2554 ทุกวันนี้ในห้องวิจัยเราสามารถผลิตกลุ่มก๊าซเย็นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 150 ไมโครเคลวิน และใช้มันสาธิตเทคนิคมาตรฐานอื่นๆ ในการกักขังและทำความเย็นที่ใช้กันในห้องวิจัยทั่วโลก



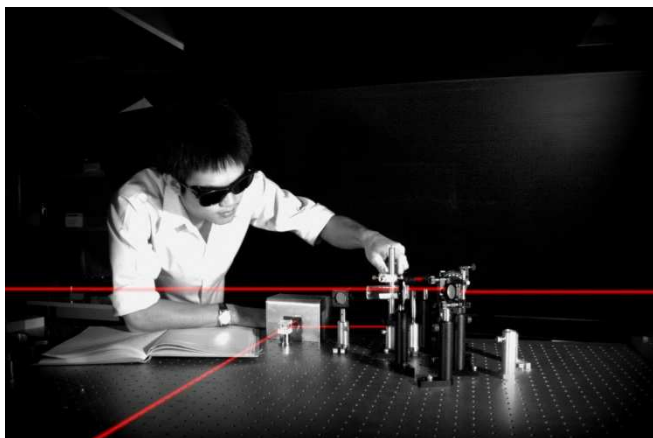
รูปที่ 2 ภาพจำลองการทดลองการกักขังอะตอมเดี่ยวในคลื่นนิ่งของแสงในหนึ่งมิติ

2. อะตอมเดี่ยวกักขัง

เมื่อสามารถควบคุมความสัมพันธ์เฟสของสถานะควอนตัมของอะตอมอย่างน้อย 30 ตัวได้ ระบบของอะตอมที่ประกอบกันขึ้นนี้ จะมีศักยภาพในปฏิบัติการจำลองระบบธรรมชาติ (เช่น ระบบโมเลกุลที่ซับซ้อนของยา) ที่เหนือกว่าซูเปอร์คอมพิวเตอร์เชิงคลาสสิกที่เร็วที่สุดในปัจจุบัน ความสามารถในการคำนวณจะเร่งความก้าวหน้าด้านระเบียบ

วิธีการในทุกสาขาวิชาอย่างไม่เคยปรากฏมาก่อน และจะนำเข้าสู่การปฏิวัติทางเทคโนโลยีอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

ในการที่จะใช้เครื่องคำนวณเชิงควอนตัมได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ ระบบอะตอมเดี่ยวจะต้องถูกเตรียมให้อยู่ในสถานะที่กำหนดไว้ก่อน ณ เวลาที่ต้องการ ด้วยเหตุนี้โครงการวิจัย “อะตอมเดี่ยวกักขังในลำเลเซอร์โฟกัส” จึงได้ถูกจัดเตรียมในห้องวิจัยฯ สำหรับขั้นตอนอันสำคัญยิ่งนี้ ระบบที่ทำงานได้อย่างสมบูรณ์จะสามารถขยายมาตราส่วนขึ้นไปสู่การกักขังเชิงทัศนศาสตร์ในสามมิติ ซึ่งเป็นหนึ่งในระบบที่มีศักยภาพสูง และคาดหวังว่าจะเป็นมาตรฐานในการสร้าง อุปกรณ์ประตูสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ควอนตัม (Quantum Electronic Gate) และหน่วยความจำควอนตัม บนพื้นฐานของอะตอมเย็น โดยในรูปแบบข้างต้นแสดงภาพจำลองของการทดลองการกักขังอะตอมเดี่ยวในคลื่นนิ่งของแสงในหนึ่งมิติ ที่จะเกิดขึ้นในไม่กี่เดือนข้างหน้า โดยลำแสงสีแดงแสดงคลื่นนิ่งของลำแสงเลเซอร์ที่ปรับความถี่ให้เหมาะสมเมื่อเทียบกับความถี่ก่าทอนของอะตอม และจุดสีขาวในคลื่นนิ่งสีแดงแสดงอะตอมเดี่ยวที่ถูกกักขัง ในขณะที่จุดสีขาวด้านล่างแสดงถึงอะตอมที่ตกลงตามแรงโน้มถ่วงของโลกภายในห้องสุญญากาศ



รูปที่ 3 ชุดอุปกรณ์ทัศนศาสตร์และระบบเลเซอร์แม่นยำสูงเพื่อใช้ในการวิจัยฟิสิกส์สาขาอะตอม-โมเลกุล-ทัศนศาสตร์

3. ระบบเลเซอร์

ปริมาณการผลิตเชิงอุตสาหกรรมของเลเซอร์ไดโอดสำหรับเครื่องใช้ไฟฟ้าได้ลดทอนต้นทุนการผลิตต่อหน่วยลง ในขณะที่การใช้งานในรูปแบบที่หลากหลายทำให้มีไดโอดเปล่งเลเซอร์ให้เลือกใช้ได้ในช่วงแสงที่กว้างขึ้น ส่วนหนึ่งของแสงเหล่านี้อยู่ในช่วงที่ตามองเห็นและสามารถปรับให้สั้นพ้องกับ

ระดับพลังงานแยกละเอียดไฮเปอร์ (Hyperfine Structure) ของอะตอมธาตุโลหะหมู่แอลคาไลได้ เลเซอร์ไดโอดราคาถูกลงได้เปิดโอกาสให้กับการทดลองสาขาฟิสิกส์ของอะตอมสำหรับทุกประเทศโดยแทบไม่ขึ้นกับสถานภาพทางเศรษฐกิจ

ห้องวิจัยทัศนศาสตร์เชิงอะตอมควอนตัมได้พัฒนาเทคนิคในการควบคุมเลเซอร์ไดโอดชนิดฟาบรี-เพอร์โร (Fabry-Pérot) ให้มีความเสถียรอยู่ในช่วงหนึ่งในร้อยล้านส่วนซึ่งจำเป็นสำหรับการทดลองเชิงอะตอม-โมเลกุล-ทัศนศาสตร์ยุคใหม่ ระบบเลเซอร์จำนวน 6-10 ชุดในการทดลองหนึ่งๆต้องทำงานได้พร้อมๆกันที่ความยาวคลื่นต่างกันเล็กน้อย ห้องวิจัยฯ จึงได้ริเริ่มระบบควบคุมเลเซอร์อัตโนมัติเพื่อที่จะดึงเอาศักยภาพ และความเป็นไปได้ที่เลเซอร์ทั้งหมดจะสามารถควบคุมได้ด้วยนักทดลองเพียงหนึ่งคน และเมื่อประกอบเข้ากับระบบขยายกำลังเลเซอร์แบบชิปเพียบเพอร์ (Tapered Diode Laser Amplifier Chip) ระบบเลเซอร์กำลังสูงที่ได้จะมีทั้ง แถบความถี่ช่วงแคบ และความเสถียรสูง ตามต้องการ



รูปที่ 4 ภาพเปรียบเทียบเชิงศิลปะ สื่อถึงการใช้อุปกรณ์วิจัยสำหรับอะตอมริดเบิร์กเพื่อเป็นหน้าต่างในการมองรายละเอียดทางดาราศาสตร์

4. อะตอมริดเบิร์ก

การทดลองที่ขอบเขตของความรู้ด้านฟิสิกส์ในสภาวะสุดขีด ตัวอย่างเช่น สภาวะใกล้แยกตัวเป็นไอออนของอะตอมอุณหภูมิต่ำกว่าไมโครเคลวิน และการวัดที่แม่นยำสูง ไม่เพียงแต่จะเชื่อมเส้นทางวิจัยในสาขาดาราศาสตร์และอะตอม-โมเลกุล-ทัศนศาสตร์เข้าไว้ด้วยกัน แต่ยังได้นำไปสู่การทำงานร่วมกันอย่างใกล้ชิดที่รู้จักในนามของ “นักดาราศาสตร์ทดลอง” เป็นครั้งแรกในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ความร่วมมือกันระหว่าง สถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) และ ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุ

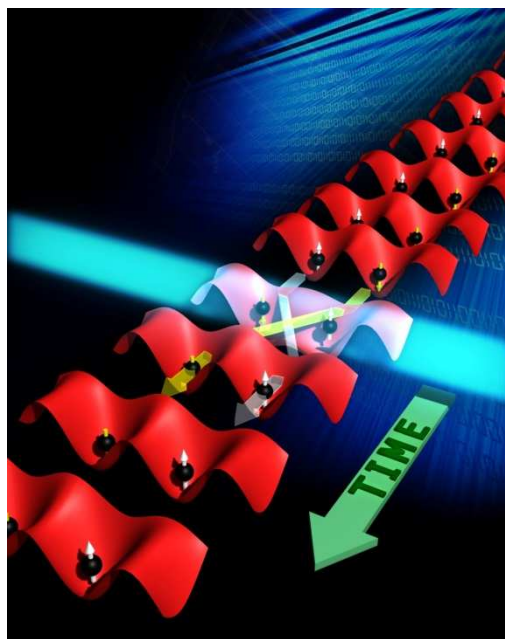
ศาสตราจารย์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ แสดงถึงแผนการทำงานที่จะทำให้ นักฟิสิกส์ดาราศาสตร์สามารถศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างดวงดาวได้ใน ห้องวิจัยบนพื้นโลก โครงการคาดหมายที่จะศึกษาข้อมูลการ ดูดกลืนเลเซอร์ และสร้างแบบจำลองใหม่เพื่อแสดงถึงการมีอยู่จริง ของเส้นสเปกตรัมดูดกลืนของอะตอมริดเบอร์กในจักรวาลช่วง เริ่มต้น และเนื่องจากเป็นระบบที่ควบคุมได้ในห้องวิจัย การตาม ร่องรอยต้นตอของ แถบดูดกลืนพรมาวระหว่างดวงดาว (IDB: Interstellar Diffusion Bands) ซึ่งยังไม่เป็นที่เข้าใจมากกว่า 90 ปี โดยใช้ปรากฏการณ์สตาร์กก็จะเป็นไปได้ อันที่จริงแล้วแทบไม่ จำเป็นต้องกล่าวถึงความจริงที่ว่า อะตอมริดเบอร์ก เป็น ส่วนประกอบหลักที่จำเป็นในการวัดแบบไม่ทำลายสถานะเชิง ควอนตัม ซึ่งเป็นเทคนิคหลักของผลงานที่ได้รับรางวัลโนเบลสาขา ฟิสิกส์ปี พ.ศ. 2555 เมื่อมองไปข้างหน้า ประเทศไทยจะเป็นหนึ่งในไม่กี่ประเทศทั่วโลกที่สามารถผลิตและใช้งานอะตอมริดเบอร์ก ได้ในมุมมองที่ไม่เคยเกิดขึ้นมาก่อน



รูปที่ 5 ภาพเชิงจินตนาการ แสดงรูปแบบและขนาดของไมโครชิป อะตอมแบบพกพา

5. ไมโครชิปอะตอม

ห้องวิจัยมีเป้าหมายที่จะยุบระบบทำความเย็นและกักขัง เพื่อบรรจุส่วนที่สำคัญลงในปริมาตรน้อยกว่า 8 ลูกบาศก์ เซนติเมตร อะตอมเดี่ยวที่ได้จะลอยอยู่บนแผนวงจรบนซิลิคอนชั้น เล็กที่ถูกจำกัดบริเวณด้วยเทคนิคฟิสิกส์เชิงแม่เหล็ก ระบบ ดังกล่าวถือได้ว่าเป็นต้นแบบของไมโครชิปอะตอมแบบพกพา ไมโครชิปทั้งชิ้นจะบรรจุไว้ในลูกบาศก์แก้วสุญญากาศที่ปราศจากข้อ สายไฟฟ้า แต่จะบังคับควบคุมได้ผ่านทางแสงและแม่เหล็ก กล่าว ง่ายๆ ว่าด้วยแนวความคิดนี้ เราสามารถพกพาลูกบาศก์แก้วนี้ไปได้ ทุกที่ และเมื่อไถ่ลงไปในเครื่องกักขังที่มีให้ใช้ทั่วไปแล้ว เราจะ มีระบบอะตอมเดี่ยวกักขังที่ใช้งานได้ทันที ทั้งนี้หากย้อนดูในช่วง 5 นาทีแรกของภาพยนตร์ปี 2544 เรื่อง “Artificial Intelligence” แล้ว เราก็จะสามารถจินตนาการตามได้ถึงการทำงานของไมโคร ชิปอะตอมที่ทำงานในแบบที่ควรจะเป็น



รูปที่ 6 แสดงตัวอย่างหนึ่งของการจำลองเชิงควอนตัม โดยเทคนิค การสลับคู่สปิน (ลูกศรเหลือง และ ขาว) ของอะตอมในแลตทิซเชิง แสงในหนึ่งมิติ (บ่อสีแดง) ด้วยแสงช่วยปฏิสัมพันธ์ระหว่าง อะตอม (สีฟ้า) สำหรับสาริตประตูลักษณะอิเล็กทรอนิกส์ ควอนตัม (Quantum Electronic Gate) หรือ ศึกษาสมบัติทาง แม่เหล็กของระบบที่มีสหสัมพันธ์สูง (Strongly Correlated System) เช่น หากอะตอมที่ถูกกักขังอยู่ในสถานะริดเบอร์ก (Rydberg State) เราสามารถที่จะศึกษา สถานะแม่เหล็ก (Magnetic Order) ในระบบที่มีสหสัมพันธ์ทางควอนตัมสูง (Strongly Correlated Quantum System) ได้

6. การจำลองเชิงควอนตัม

การบังคับควบคุมกลุ่มของอนุภาคในหน่วยควอนตัมเป็นงานที่ต้องอาศัยความอดทนและไม่ว่างของนักฟิสิกส์ในอนาคตอีกหลายสิบปี ความสามารถดังกล่าวจะเป็นแรงขับเคลื่อนไปสู่จุดหมายของการใช้งานได้จริงเชิงวิศวกรรม การศึกษาระบบหลายอนุภาคที่แปลกใหม่และบอบบางต้องการสภาวะรวมกลุ่มคล้ายคลึงกันที่ควบคุมได้และมีแฮมิลโตเนียนที่สอดคล้องต้องกันภายใต้แบบแผนที่เทียบเคียงได้นี้ นักวิจัยกำลังใช้ระบบอะตอมเย็นซึ่งในที่นี้คือ แลตทิซเชิงแสงที่สามารถสร้างรูปแบบของระบบบ่อศักย์กักขังในเชิงเรขาคณิตที่หลากหลาย ให้เหมาะสมกับสมมาตรแลตทิซของของแข็ง เพื่อทำการควบคุมสถานะเชิงอิเล็กทรอนิกส์เชิงการเลื่อนตำแหน่ง และเชิงการสั่น พร้อมกับอันตรกิริยาระหว่างอะตอมที่ปรับเปลี่ยนได้ คำถามเกี่ยวกับระบบสสารที่ไม่เคยสามารถตามรอยได้โดยใช้เครื่องคำนวณเชิงคลาสสิก หรือเอเอ็มไม่ถึงในแง่ของสภาวะทดลอง จะได้รับการระบุชี้ชัดปัจจุบันงานวิจัยของห้องวิจัยทัศนศาสตร์เชิงอะตอมควอนตัมเกี่ยวข้องกับการทดลองเชิงประจักษ์ของแบบจำลองอย่างง่ายสำหรับกลุ่มอนุภาคประกอบที่เกี่ยวข้องกัน กล่าวคือ แบบจำลองโบส-ฮับบาร์ด ซึ่งเป็นแบบจำลองของระบบอนุภาคโบซอนหลายตัวที่มีปฏิสัมพันธ์กันในแลตทิซ ภายในเวลาอีกไม่นานนัก เมื่อระบบเลเซอร์กำลังสูงสามารถใช้งานได้ ห้องวิจัยจะสามารถผลิตระบบกักขังแลตทิซเชิงแสงที่กระชับเพียงพอสำหรับการจำลองเชิงควอนตัมของระบบสปินกัปซิง (Frustrated Spin Systems)

ความก้าวหน้าล่าสุด

นักวิจัยยังคงค้นหาพัฒนาระบบไดโอดเลเซอร์ที่ดีขึ้นสำหรับการทดลองฟิสิกส์ของอะตอม โดยออกแบบให้สามารถทำการปรับ และล็อกค่าความถี่ได้อัตโนมัติ ความสำเร็จที่ได้จะทำให้นักศึกษาที่ขาดประสบการณ์ด้านการทดลองสามารถเข้าสู่ฟิสิกส์

ได้เร็วขึ้น อีกทั้งยังทำให้นักเคมีควอนตัมสามารถใช้งานระบบอะตอมเย็นเพื่อศึกษาการเกิดพันธะเคมีได้ในลักษณะ “อะตอมต่ออะตอม” ณ เวลานี้ เรากำลังทุ่มเทเพื่อก้าวข้ามงานเตรียมการทดลองสองส่วนสุดท้ายที่สำคัญ นั่นคือ วงจรจับสัญญาณเพื่อเลื่อนความถี่แสงโดยใช้คลื่นเสียง และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงานของทุกอุปกรณ์โดยใช้ภาษาไพธอน (Python Programming Language) ไม่กี่เดือนนับจากนี้ เมื่อเลเซอร์ได้รับการปรับละเอียด และลำดับเวลาสำหรับกระบวนการต่างๆ ถูกแก้ไขให้สอดคล้องกันอย่างเป็นระบบ ความสามารถในการกักขัง “อะตอมเดี่ยว” จะเป็นหลักไมล์แรกของสาขาวิจัยฟิสิกส์ของอะตอม-โมเลกุล-ทัศนศาสตร์ในประเทศไทย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ อาจารย์ชาญกิจ คันถ่อง และ อาจารย์นฤพนธ์ ฉัตรทิบาล สำหรับการแก้ไข ตรวจทาน คำแนะนำ และการปรับปรุงบทความชิ้นนี้ ขอขอบคุณ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ ที่ให้การสนับสนุนห้องปฏิบัติการฯ มาตลอดสามปีที่ผ่านมา ผู้เขียนขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร สถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) และ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) สำหรับความช่วยเหลือด้านอุปกรณ์ที่จำเป็น สำหรับการทดลองในห้องปฏิบัติการฯ

เอกสารอ้างอิง

[1] บทความนี้คัดลอกมาจากโปสเตอร์ประชามัมพันธ์ และเพิ่มเติมรายละเอียดบางส่วน ในกรณีที่ต้องการให้ส่งโปสเตอร์ไปที่หน่วยงานของท่าน สามารถติดต่อขอโปสเตอร์ได้โดยช่องทางจดหมายอิเล็กทรอนิกส์ waranont@qaocmu.org หรือทางโทรศัพท์ 053942650-3 ต่อ 118

อนุภาคฮิกส์โบซอน: ภาคแนะนำ

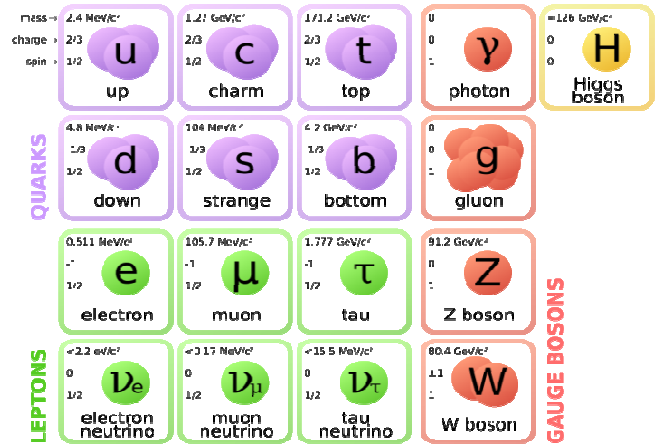
อิชญา ทองกุล¹ และ วรินทร์ ศรีทะวงศ์²

หากโลกกำลังจะพบกับภัยพิบัติครั้งยิ่งใหญ่ ความรู้ทางวิทยาศาสตร์ทั้งมวลของมนุษยชาติกำลังจะถูกทำลายลงจนหมดสิ้น และสมมุติว่าเรามีโอกาสที่จะทิ้งข้อความสุดท้ายไว้สั้นๆเพียงหนึ่งประโยคให้คนรุ่นต่อไปที่ที่ยังหลงเหลืออยู่บนโลก เริ่มสร้างอารยธรรมใหม่จากศูนย์ เราจะเลือกฝากข้อความไว้อย่างไรดี? สำหรับ ริชาร์ด ฟายน์แมน (Richard Feynman) ท่านเลือกจะบอกว่า [1]

“สิ่งทั้งปวงประกอบขึ้นจากอะตอม”

การที่มนุษย์เราเชื่อในอะตอมนับเป็นการเปลี่ยนกระบวนทัศน์ (paradigm shift) ที่สำคัญและทรงพลังที่สุดในโลกวิทยาศาสตร์ เปรียบได้กับการที่เด็กเล็กๆคนหนึ่งหลงเข้ามาในเลโก้แลนด์ แล้วค้นพบว่าความหลากหลายแตกต่างของรูปร่างสารพัดรูปแบบ ที่ต่อเป็นรถ เป็นเรือ เป็นเครื่องบิน แท้จริงแล้วมาจากการเรียงตัวกันของตัวต่อรูปร่างซ้ำๆไปซ้ำมา เมื่อเด็กน้อยเข้าใจ เริ่มศึกษาชิ้นส่วนพื้นฐานย่อยๆของเลโก้ เรียนรู้บทบาทการเชื่อมต่อระหว่างกัน ก็จะสามารถต่อเลโก้ตามรูปแบบใหม่ที่ตัวเองต้องการได้อย่างไร้ขีดจำกัด มนุษย์เราเองก็เล่นและเรียนรู้ธรรมชาติในลักษณะนี้มาตลอด ณ เวลานี้ ชุดตัวต่อเลโก้ที่ดีที่สุดที่เราถือคือ แบบจำลองมาตรฐานของฟิสิกส์อนุภาค (standard model of particle physics) ประกอบด้วยตัวต่อหรืออนุภาคมูลฐานจำนวน 61 อนุภาค (ดูในรูปที่ 1) เชื่อมต่อกันด้วยกฎเกณฑ์ตามทฤษฎีสนามควอนตัม (Quantum Field Theory ซึ่งต่อไปจะเรียกย่อเป็น QFT) ทฤษฎีแบบจำลองมาตรฐานประสบความสำเร็จในการอธิบายปรากฏการณ์ธรรมชาติต่างๆที่มนุษย์เรารู้จักได้เกือบทั้งหมด โดยที่ฮิกส์โบซอนเป็นอนุภาคตัวสุดท้ายในทฤษฎีนี้ที่เพิ่งถูกค้นพบ

หากมองย้อนไปในประวัติศาสตร์จะพบว่าบทบาทของอนุภาคฮิกส์นับตั้งแต่เริ่มเสนอเมื่อปี ค.ศ.1964 จวบจนกระทั่งก่อนหน้าการค้นพบ มีความคล้ายคลึงกับบทบาทของอะตอมในช่วงที่



รูปที่ 1 สัญลักษณ์แทนอนุภาคมูลฐานในแบบจำลองมาตรฐาน โดยมีอนุภาคฮิกส์โบซอน (Higgs boson) ทำหน้าที่ให้มวลแก่อนุภาคอื่นๆ [2]

เริ่มเข้ามาในวิชาฟิสิกส์ใหม่ๆพอสมควร ย้อนกลับไปประมาณปี ค.ศ.1870 ลุดวิก โบลทซ์มันน์ (Ludwig Boltzmann) ได้นำอะตอมเข้ามาในฟิสิกส์ในฐานะ “ตัวเลโก้พื้นฐาน” ที่ใช้คำนวณสถานะของสสารเพื่อให้สอดคล้องกับทฤษฎีอุณหพลศาสตร์ โดยที่ยังไม่เคยค้นพบ “อะตอม” จากการทดลองโดยตรงมาก่อน สถานการณ์ของอนุภาคฮิกส์โบซอนก็มีส่วนคล้ายกัน เป็นอนุภาคพื้นฐานที่ถูกค้นพบจากความสอดคล้องลงตัวของทฤษฎีของแบบจำลองมาตรฐาน โดยไม่เคยมีอนุภาคประเภทเดียวกันนี้ปรากฏในการทดลองมาก่อน แม้ว่าหลังจากนั้นไม่นานจะมีคนเสนอวิธีทดสอบหาอนุภาคฮิกส์ที่สามารถทำได้จริง แต่ทว่าความพยายามในการค้นหาอนุภาคฮิกส์ด้วยเครื่องเร่งอนุภาคที่ดีที่สุดที่มนุษย์เรามีในแต่ละยุคสมัยต้องลงเอยด้วยความล้มเหลวครั้งแล้วครั้งเล่าต่อเนื่องกันเป็นเวลา 30-40 ปี สถานการณ์อันน่าท้อแท้ใจในการตามล่าหาอนุภาคฮิกส์ทำให้นักฟิสิกส์จำนวนมากถึงกับถอดใจ เริ่มคิดกันแล้วว่าอนุภาคฮิกส์อาจจะไม่มีจริงในธรรมชาติก็ได้ แม้แต่นักฟิสิกส์ชื่อดังอย่าง สตีเฟน ฮอว์กิง (Stephen Hawking) ก็ยังเคยทำพนันเลยว่า เราจะ ไม่พบอนุภาคฮิกส์ในเครื่องเร่งอนุภาค LHC

¹ นักวิจัยหลังปริญญาเอก (ดร.) ที่ Harish-Chandra Research Institute อินเดีย

² นักวิจัยหลังปริญญาเอก (ดร.) สาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ที่ CERN ซึ่งงานนี้ท่านก็เพิ่งเสียเงินเดิมพันไป (อีกครั้ง)

จากหน้าประวัติศาสตร์เราได้รู้ว่า แม้โบลทซ์มันน์จะสามารถนำอะตอม (ตลอดจนโมเลกุลของก๊าซ) ไปสร้างวิชา **กลศาสตร์สถิติ**ที่สามารถอธิบายวิชาอุณหพลศาสตร์จากทฤษฎีพื้นฐานคือกลศาสตร์นิวตันได้อย่างสำเร็จงดงามแต่ก็ยังไม่เพียงพอจะทำให้ นักฟิสิกส์ส่วนใหญ่ในสมัยนั้นหันมาเชื่อในอะตอม ผู้คนในวงการฟิสิกส์ยังพากันโจมตีงานของโบลทซ์มันน์อย่างรุนแรง บ้างก็พูดว่างานของโบลทซ์มันน์เป็นเพียงงานของนักคณิตศาสตร์สถิติเพื่อ “ไม่จัดเป็นฟิสิกส์” ไม่ได้อยู่ในโลกแห่งความเป็นจริง ความขอกซ้ำที่โบลทซ์มันน์ได้รับจากการถูกโจมตีทางวิชาการอย่างรุนแรง คงจะเป็นสาเหตุหนึ่งที่ผลักดันให้เขาเป็นโรคซึมเศร้า จนต้องจบชีวิตลงด้วยการฆ่าตัวตาย แต่ทว่า ภายหลังจากความตายของโบลทซ์มันน์ไม่ถึงสามปี นักทดลอง Jean Baptiste Perrin ก็นำการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน ไปวัดขนาดของอะตอม (จริงๆคือโมเลกุลของน้ำ) ได้สำเร็จ ซึ่งไอเดียที่ Perrin ใช้ในการทดลองนี้มาจากงานของ อัลเบิร์ต ไอน์สไตน์ (Albert Einstein) หนึ่งในนักฟิสิกส์จำนวนหยิบมือเดียวบนโลกตอนนั้นที่มองออกว่าโบลทซ์มันน์มาถูกทางแล้ว เพราะไอน์สไตน์เชื่อในอะตอมจึงพยายามหาการทดลองที่สนับสนุนการมีอยู่ของอะตอม เมื่อนักฟิสิกส์ได้ “เห็น” อะตอมโดยงานไอน์สไตน์และ Perrin จนเชื่อว่าอะตอมมีจริง อะตอมก็กลายเป็นจุดเริ่มต้น

ของการบุกเบิกไปสู่ดินแดนฟิสิกส์ใหม่ที่อยู่พ้นจากประสบการณ์ทั้งหมดที่มนุษย์เราเคยสังขมา นั่นคือ **ดินแดนของกลศาสตร์ควอนตัม** หลังจากนั้นเราก็สามารถเล่นกับกฎธรรมชาติและเทคโนโลยีใหม่ๆ ได้อย่างน่าอัศจรรย์ใจ ราวกับพอมดมึงเวทย์ในนิทาน วิชาควอนตัมทำให้เรามีคอมพิวเตอร์ มีสมาร์ตโฟนใช้ สามารถสร้างวัสดุคุณสมบัติพิเศษแบบต่างๆ ได้อย่างที่ไม่มีอารยธรรมใดในอดีต เคยนึกฝันว่าจะทำได้มาก่อน

การค้นพบอนุภาคฮิกส์ของ CERN ที่ประกาศไปเมื่อวันที่ 4 กรกฎาคม ค.ศ.2012 ก็นับว่ามีความสำคัญในระดับเดียวกับการค้นพบอะตอมของ Perrin เพียงแต่ตอนนี้เรายังไม่รู้เท่านั้นเองว่า กล้องแห่งกาลเวลาจะนำพามนุษย์เราไปสู่ดินแดนใหม่แบบไหน มันจะน่าตื่นเต้นเหมือนกับตอนเราเข้าสู่ดินแดนของกลศาสตร์ควอนตัมช่วงต้นของศตวรรษที่ยี่สิบหรือไม่ คำตอบเหล่านี้ กาลเวลาจะเป็นผู้เฉลยแก่เราเอง

มองในมุมของความครามา ก็ต้องนับว่า **ปีเตอร์ ฮิกส์ (Peter Higgs)** ยังโชคดีกว่าโบลทซ์มันน์มากมายนัก เพราะท่านยังมีชีวิตอยู่จนถึงวันแห่งการรอคอย วันที่เทคโนโลยีของโลกพร้อมสำหรับการสร้างเครื่องเร่งอนุภาค LHC เครื่องมือที่นำไปสู่การค้นพบ แอ้มยังเป็นวันที่คนทั้งโลกได้มีโอกาสร่วมยินดีไปพร้อมกับท่านฮิกส์ผ่านทาง webcast ถ่ายทอดสดจาก CERN โดยได้ฟังผลการทดลองประวัติศาสตร์นี้พร้อมกันทั่วทั้งโลก ในวันนั้นเราได้เห็นภาพท่านฮิกส์อดแว่นช้ำน้ำตา แห่งความปลื้มปิติใจ เมื่อการรอคอยเป็นเวลายาวนานห้าสิบปีของท่านได้สิ้นสุดลง “ขาข้างหนึ่ง” ของท่านก็ได้ก้าวเข้าสู่ทำเนียบของนักฟิสิกส์รางวัลโนเบลไปแล้ว



รูปที่ 2 บรรดาภาสในห้องประชุมที่ศูนย์วิจัย CERN ขณะทีประกาศการค้นพบอนุภาคฮิกส์โบซอน [3]



รูปที่ 3 ปีเตอร์ ฮิกส์เช็ดน้ำตาแห่งความปิติหลังจากได้ฟังการประกาศการค้นพบอนุภาคที่ถูกเรียกตามชื่อของเขา[4]

อนุภาคฮิกส์เปรียบได้กับอะตอมของทฤษฎีการเสถียร

สำหรับผู้เขียน ความโรแมนติกของการค้นพบอนุภาคฮิกส์ ไม่ใช่เป็นเพียงการค้นพบอนุภาคตัวหนึ่งซึ่งมนุษย์เฝ้าถึง

มันมายาวนานห้าสิบปี เหตุผลที่ทำให้การค้นพบอนุภาคฮิกส์เป็นประวัติศาสตร์หน้าสำคัญของฟิสิกส์ก็คือ **การมีอยู่ของอนุภาคฮิกส์ถือเป็นการพิสูจน์ยืนยันในขั้นสุดท้ายว่าแนวคิดสวยงามที่สุดอันหนึ่งในโลกฟิสิกส์ทฤษฎีที่เริ่มศึกษาต่อเนื่องกันมาประมาณร้อยปีนั้นถูกต้อง** แนวคิดที่ว่านั่นก็คือ ทฤษฎีที่ว่าด้วย **สมมาตร (symmetry) และการเสียสมมาตร (symmetry breaking)** อันเป็นเสาหลักที่สำคัญที่สุดของโลกฟิสิกส์ทฤษฎีสมัยใหม่ ทำให้เราสามารถสร้างทฤษฎีที่สามารถอธิบายแรงพื้นฐานได้สามแรง คือ 1.แรงแม่เหล็กไฟฟ้า 2.แรงนิวเคลียร์แบบอ่อน (weak force) 3.แรงนิวเคลียร์แบบเข้ม (strong force) รวมเข้าด้วยกันเป็นทฤษฎีเดียวได้สำเร็จ เกิดเป็น **แบบจำลองมาตรฐานของฟิสิกส์อนุภาค** ทฤษฎีที่สามารถบรรยายธรรมชาติได้ดีที่สุดเท่าที่มนุษย์เรามีอยู่ในปัจจุบัน ในบทความชิ้นนี้และชิ้นต่อไป ผู้เขียนจะพยายามเขียนเรียบเรียงเรื่องราวมหากาพย์ของการพัฒนาแนวคิดในเรื่องของสมมาตรและการเสียสมมาตรจนนำไปสู่บทสรุปที่มีมาเมื่อห้าสิบปีที่แล้วว่าอนุภาคฮิกส์อยู่จริงในธรรมชาติ

ในส่วนของ**สมมาตร** บทความชุดนี้อาจจะทำให้ผู้อ่านไปเริ่มกันตั้งแต่ตอนที่นักคณิตศาสตร์ระดับสุดยอดมาร่วมสมัยกับไอน์สไตน์ นั่นคือ Hermann Weylเสนอให้นำ **สมมาตรเกจ (gauge symmetry)** ไปใช้รวมแรงแม่เหล็กไฟฟ้าและแรงโน้มถ่วงเข้าด้วยกัน (ค.ศ. 1918) ซึ่งในสมัยนั้นนักฟิสิกส์ท่านอื่นๆรวมทั้งไอน์สไตน์ก็ไม่เชื่อแนวคิดนี้ ต่อมาเมื่อมีการค้นพบแรงนิวเคลียร์แบบอ่อน Chen Ning Yang และ Robert Mills นำไอดีสมมาตรเกจของ Weyl มาปรับใหม่ พัฒนาต่อจนเป็นภาษาคณิตศาสตร์ที่สวยงามสามารถอธิบายแรงพื้นฐานทั้งสามได้ด้วยทฤษฎีเดียว แต่ทฤษฎีนี้ก็ยังมีปัญหา คือ มวลของอนุภาคสื่อแรงในทฤษฎีมีค่าเท่ากับศูนย์จึงไม่สามารถนำไปอธิบายแรงนิวเคลียร์แบบอ่อนได้ เพราะแรงนั้นจำเป็นต้องอธิบายด้วยอนุภาคสื่อแรงที่มีมวลมากต่อไปผู้อ่านจะพบว่า ความพยายามจะแก้ปัญหานี้ชักนำไปให้ Francois Englert และ Robert Brout เสนอแนวคิดสำคัญที่เรารู้จักกันปัจจุบันในชื่อของ **กลไกฮิกส์ (Higgs mechanism)** ซึ่งทำให้ทฤษฎีของ Yang และ Mills ที่เคยใช้ได้เฉพาะอนุภาคสื่อแรงที่ไม่มีมวลเปลี่ยนไปใช้กับอนุภาคสื่อแรงที่มีมวลได้แม้ว่า Englert และ Brout จะไม่ได้กล่าวตรงๆในงานวิจัยชิ้นนั้นถึงการมีอยู่ของอนุภาคฮิกส์ แต่สนามฮิกส์ (Higgs field) ก็ถือว่าเป็นหัวใจในทฤษฎีของพวกเขา และตามพจนานุกรมของทฤษฎี QFT สนามของอนุภาค

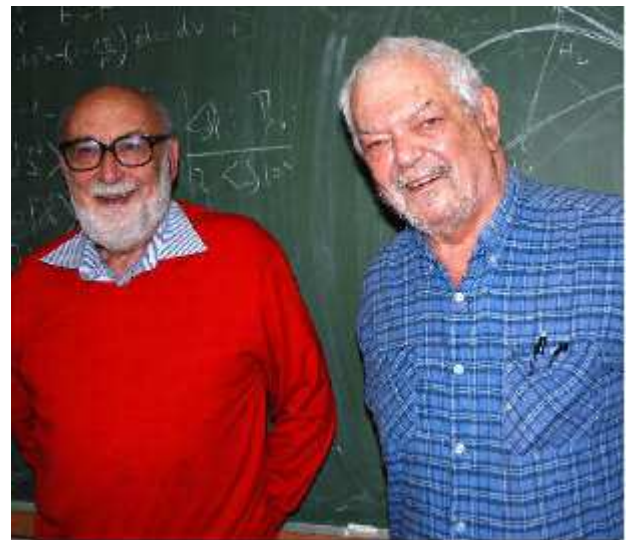
หรือตัวอนุภาคถือว่าเป็นสิ่งเดียวกันอยู่แล้ว งานวิจัยของทั้งสองท่านนี้ได้รับการตีพิมพ์ก่อนหน้างานของท่านฮิกส์ จึงสมควรนับเครดิตเป็นผู้ค้นพบอนุภาคฮิกส์ได้เช่นกัน งานนี้ท่าน Englert ไม่ควรพลาดรางวัลโนเบล แต่น่าเศร้าที่ท่าน Brout ได้ล่วงลับไปก่อนแล้ว

ในส่วนของการ**เสียสมมาตร** เราจะเริ่มจากแนวคิดอันสวยงามของแวร์เนอร์ ไฮเซนเบิร์ก (Werner Heisenberg) หนึ่งในบิดาของทฤษฎีควอนตัม ท่านได้ใช้การเสียสมมาตรอธิบายการเกิดสภาพแม่เหล็ก (ค.ศ. 1928) ในยุคต่อมานักฟิสิกส์จากฝั่งรัสเซีย เลฟ ดาวิดวิช ลันดา (Lev Davidovich Landau) ได้นำการเสียสมมาตรไปใช้อธิบายการเปลี่ยนสถานะของสสาร และ Vitaly L. Ginzburg ก็ต่อยอดแนวคิดนี้ร่วมกับท่านลันดา กลายเป็นทฤษฎีที่ประสบความสำเร็จในการอธิบายสภาพการนำไฟฟ้าชนิดยิ่งยวดที่ 1 (type-I superconductivity) ทางฝั่งอเมริกาก็ไม่ขมน้อยหน้า สามนักฟิสิกส์ คือ John Bardeen, Leon N. Cooper และ John R. Schrieffer นำการเสียสมมาตรไปสร้าง **ทฤษฎี BCS** อันลือลั่น (และได้รับรางวัลโนเบลไปเมื่อปี ค.ศ. 1972) เป็นทฤษฎีที่สามารถอธิบายสภาพการนำไฟฟ้าชนิดยิ่งยวดจากพฤติกรรมการจับคู่*อิเล็กตรอน (Cooper pair)* ซึ่งต่อมาภายหลังก็มีผู้แสดงว่าทฤษฎีทั้งสองนั้นสะท้อนภาพจากธรรมชาติหนึ่งเดียวกัน โดยที่นักฟิสิกส์จากฝั่งรัสเซียมองจากภาพรวมใหญ่ของปรากฏการณ์ ในขณะที่ฝั่งอเมริกามองจากภาพย่อยคือจากพฤติกรรมของอิเล็กตรอนไล่ขึ้นไปสู่ภาพใหญ่ ความสำเร็จอันน่าตื่นใจของการอธิบายสภาพตัวนำยิ่งยวดนี้ได้นี้ เข้าใจให้ Yoichiro Nambu อุดรทนไม่ได้ต้องหยิบยืมเอาไอดีของทฤษฎี BCS มาใช้ในโลกของฟิสิกส์อนุภาค จนสามารถอธิบายการกลไกการเกิด*มวลของไพออน (pion mass)* จากภาพของการเสียสมมาตรได้สำเร็จทำให้ท่านได้รับรางวัลโนเบลไปเมื่อ ค.ศ. 2008 ท่านผู้อ่านสามารถย้อนอ่านเรื่องของ Nambu ได้จากบทความ “รางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ประจำปี พ.ศ. 2551 "Symmetry Breaking"” ใน วารสารฟิสิกส์ไทย ฉบับ ธันวาคม 2551-กุมภาพันธ์ 2552 โดย ชาญกิจ คันถ่อง และผู้เขียน งานของ Nambu นี้เองเป็นแรงจูงใจให้นักฟิสิกส์หลายท่านพยายามเล่นเลียนแบบสร้างทฤษฎีแนว BCS ในโลกของฟิสิกส์อนุภาคอย่างจริงจัง แต่ก็เกิดปัญหาไปต่อไม่ได้เพราะมี**ทฤษฎีบทพิสูจน์**ได้ว่า **อนุภาคใหม่ที่เกิดขึ้นจากการเสียสมมาตรจะเป็นอนุภาคไม่มีมวล** สามารถตรวจพบได้ง่าย แต่ทว่าตามความรู้ในสมัยนั้นไม่มีผลการ

ทดลองใดเลยที่บอกว่ามีอนุภาคไร้มวลอื่นนอกจากโฟตอน (อนุภาคของแสง) และอนุภาคนิวทริโน ณ เวลานั้นดูเหมือนว่าความฝันที่จะนำทฤษฎีการเสถียรสมมาตรที่ประสบความสำเร็จในวิชาสารควบแน่น (condensed matter physics) มาหลอมรวมกับฟิสิกส์อนุภาคเดินมาถึงทางตัน อย่างไรก็ตามนักวิจัยจำนวนหนึ่งยังไม่ยอมยกธงขาว ซึ่งหนึ่งในนั้นก็มีท่านอิกส์ รวมอยู่ด้วย พวกเขาพยายามหาช่องโหว่ของทฤษฎีบทแล้วพบว่าสมมาตรเกจในทฤษฎีของ Yang และ Mills ก็เป็นทางเลือกหนึ่งเพราะเป็นสมมาตรที่อยู่ในข้อบกพร่องของทฤษฎีบทพอลี เมื่อนำสมมาตรเกจมารวมกับทฤษฎีการเสถียรสมมาตรก็กลายเป็น **กลไกฮิกส์** เป็นวิธีแก้ที่ทำให้อนุภาคที่เกิดจากทฤษฎีการเสถียรสมมาตรมีมวลได้ (ท่านอิกส์ภูมิใจสูงใจส่วนทางกับ Englert และ Brout กล่าวคือ อยากให้ทฤษฎีการเสถียรสมมาตรใช้ได้ จึงนำสมมาตรเกจมาใช้ในขณะที่สองท่านหลังอยากให้ทฤษฎีสมมาตรเกจใช้ได้จึงต้องนำการเสถียรสมมาตรมาให้มวลแก่อนุภาคสื่อแรง) จากนั้นสมมาตรเกจและกลไกฮิกส์ก็ถูกพัฒนาต่อไปจนกลายเป็นหัวใจของทฤษฎีแบบจำลองมาตรฐานฯ และ**ผลพลอยได้ทางทฤษฎีของกลไกฮิกส์ก็คือการมีอยู่ของอนุภาคฮิกส์โบซอนที่เพิ่งค้นพบไปนั่นเอง**(มาถึงตรงนี้ผู้อ่านอย่าเพิ่งถอดใจ ที่เล่ามาข่อยๆแน่นๆด้านบนนี้ ขอให้มองคล้ายกับตัวอย่างหนึ่งเพื่อให้เห็นภาพรวมของสิ่งที่เราจะเขียนในรายละเอียดของบทความภาคต่อไป)

กล่าวโดยสรุปคือ บทความชุดนี้ตั้งใจจะนำเสนอเรื่องราวพัฒนาการของทฤษฎีสมมาตรเกจและกลไกฮิกส์ ไล่เรียงไปจนถึงการค้นพบอนุภาคฮิกส์ และอยากจะคุยถึงฟิสิกส์ใหม่ที่ผุดขึ้นว่าการค้นพบอนุภาคฮิกส์จะนำทางเราไป มันคงเป็นเรื่องยากที่จะรวบรวมผลงานฟิสิกส์ที่สำคัญทั้งหมดมาเขียนถึงในบทความได้อย่างครบถ้วน เพราะเรื่องราวพัฒนาการของ**ทฤษฎีสมมาตร-เสถียรสมมาตร**นั้นเกี่ยวเนื่องกับนักฟิสิกส์มากมายหลายท่าน หลายยุคสมัย กินเวลารวมกันร่วมร้อยปี เป็นมหากาพย์เรื่องยาว ลองนับแค่เฉพาะนักฟิสิกส์ที่ยังมีชีวิตอยู่ในปัจจุบัน ก็มีอย่างน้อย 4-6 ท่านแล้วที่นับได้ว่ามีส่วนในการร่วมพัฒนากลไกฮิกส์ในระดับที่สำคัญไม่ยิ่งหย่อนไปกว่าผลงานของท่านอิกส์เลย เพียงแต่ชื่อของท่านอิกส์ติดตลาดที่สุดท่านนั่นเอง (เกิดจาก Steven Weinberg อ้างอิงผิดในเปเปอร์สำคัญที่ท่านเสนอแบบจำลองมาตรฐานฯ โดยไปอ้างถึงผลงานของท่านอิกส์เดียวๆ ไม่ได้ตรวจสอบว่างานของ Englert และ Brout ได้รับการตีพิมพ์ก่อน ซึ่งในช่วงเวลาใกล้เคียงกันก็ยังมีการ

ร่วมกันของนักฟิสิกส์อีกสามท่าน คือ G. Guralnik, C. R. Hagen และ T. Kibble สามารถอธิบายกลไกฮิกส์ด้วยรูปแบบที่ต่างกันไปวารสาร Physical Review Letters ซึ่งตีพิมพ์งานวิจัยทั้งสามชิ้นในปี ค.ศ. 1964ให้เครดิตว่าเป็นการค้นพบที่เป็นอิสระต่อกัน และในกรณีดังกล่าวนี้ American Physical Society ได้มอบรางวัล Sakurai Prize ประจำปีพ.ศ. 2553 ให้กับนักวิจัยทั้งห้าท่านที่ยังมีชีวิตอยู่ในฐานะผู้ที่ค้นพบกลไกฮิกส์ ปัญหาต่อไปคงไปตกแก่คณะกรรมการโนเบลที่สามารถเลือกผู้ที่ได้รับรางวัลได้แค่เพียงสามท่านเท่านั้น สำหรับลำดับทางประวัติศาสตร์และรายละเอียดที่มากขึ้นของงานในส่วนนี้จะมิในบทความอีกภาคต่อไป)



รูปที่ 4 Francois Englert (สวมแว่น) และ Robert Broutผู้ล่วงลับ ทั้งสองท่านนี้เป็นทีมวิจัยที่ตีพิมพ์ผลงานบรรยายกลไกฮิกส์(Higgs mechanism) เป็นทีมแรก ก่อนที่งานของท่านปีเตอร์ อิกส์จะได้รับการตีพิมพ์เพียงเล็กน้อย[5]

มาทำความรู้จักความพิเศษของฮิกส์โบซอน

อนุภาคฮิกส์โบซอนมีความพิเศษที่ทำให้มันแตกต่างจากอนุภาคทั้งหมดที่มนุษย์เราเคยรู้จักมา นั่นคือ**อนุภาคฮิกส์โบซอนเป็นอนุภาคมูลฐานแบบสเกลาร์ตัวแรกที่เราค้นพบ**ในชั้นเรียนฟิสิกส์เรารู้ว่าปริมาณสเกลาร์เป็นปริมาณที่ซับซ้อนน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับปริมาณทางฟิสิกส์แบบอื่นๆเช่น เวกเตอร์หรือเทนเซอร์ อนุภาคสเกลาร์ก็อาจมองได้ว่าเป็นอนุภาคที่เรียบง่ายที่สุดสามารถบรรยายได้ด้วยตัวเลขที่ไม่ต้องมีปริมาณที่เกี่ยวกับทิศทางกำกับ อย่างที่กล่าวไปข้างต้นของบทความว่า **อนุภาคสเกลาร์มีความเกี่ยวพันแนบแน่นกับการเสถียรสมมาตร** แต่นอกจาก

อนุภาคฮิกส์แล้วยังมีทฤษฎีฟิสิกส์ระดับสูงที่ตั้งสมมุติฐานถึงอนุภาคสเกลาร์อื่นๆ เช่น นักฟิสิกส์เราเชื่อกันว่าในช่วงเวลาเลี้ยววินาทีแรกหลังบิกแบง ขณะที่เอกภพยังมีระดับพลังงานสูงมากก็อาจมีสมมาตรบางอย่างที่เรายังไม่รู้จัก ต่อมาเมื่อเอกภพขยายตัวทำให้ระดับพลังงานลดลงทำให้เกิดการเสียสมมาตรซึ่งทำให้เกิดอนุภาคสเกลาร์บางตัวขึ้นมาและจากความเรียบง่ายของอนุภาคสเกลาร์ก็ทำให้มันเข้ากันได้พอดีกับทฤษฎีที่ง่ายที่สุดที่บรรยายการขยายตัวของเอกภพ ตามแบบจำลองทางเอกภพวิทยาที่ได้รับการยอมรับมากที่สุดในปัจจุบัน เราเชื่อว่าในช่วงเริ่มแรกของการกำเนิดเอกภพจะมีอนุภาคสเกลาร์ที่เรียกว่า inflaton เป็นตัวขับเคลื่อนให้เอกภพขยายตัวด้วยความเร่ง (บางขณะอาจขยายตัวด้วยความเร็วมากกว่าแสง) ซึ่งต่อมาอนุภาค inflaton ก็สลายตัวกลายเป็นอนุภาคต่างๆ ส่วนใหญ่ที่เราสังเกตได้ในปัจจุบัน นอกจากนี้อนุภาคประเภทสเกลาร์ยังมีบทบาทสำคัญในการต่อเติมทฤษฎีต่างๆ ที่เรามีอยู่เช่น ต่อเติมทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปกลายเป็น scalar-tensor theory ซึ่งอาจเรียกได้ว่าเป็นรูปแบบทฤษฎีแรงโน้มถ่วงที่กว้างขวางครอบคลุมกว่าทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปของไอน์สไตน์ เป็นทฤษฎีที่มีบทบาทสำคัญยิ่งที่จะทดสอบว่ารูปแบบสมการแรงโน้มถ่วงใหม่ๆ จะตรงกับการทดลองหรือไม่ ยิ่งไปกว่านั้นทฤษฎีระดับสูงอีกมากมาย เช่น ทฤษฎีสตริง (string theory) ก็จำเป็นต้องมีอนุภาคสเกลาร์เกิดขึ้นมาเพื่ออธิบายกลไกบางอย่างที่สำคัญในทฤษฎี

แต่ปัญหาสำคัญที่คาใจฟิสิกส์ทั้งหลายตลอดมาก็คือ เรายังไม่เคยพบอนุภาคมูลฐานที่เป็นแบบสเกลาร์ในการทดลองเลย การค้นพบอนุภาคฮิกส์โบซอนจึงเหมือนตราประทับสำคัญที่ยืนยันว่าอนุภาคมูลฐานแบบสเกลาร์สามารถมีได้จริงในธรรมชาติ ทฤษฎีต่างๆ ที่ลงแรงสร้างกันขึ้นมาก็มีความหวังว่าจะถูกต้อง (มากขึ้น)

ต่อให้เราไม่พิจารณาว่าอนุภาคฮิกส์มาจากการเสียสมมาตรจึงเป็นอนุภาคสเกลาร์ เราก็จะเห็นว่าความเป็นสเกลาร์ของอนุภาคฮิกส์ก็แฝงอยู่ในบทบาทของมันอยู่ดี กล่าวคือ อนุภาคฮิกส์โบซอนทำหน้าที่ให้มวลแก่อนุภาคมูลฐานอื่นๆ ในแบบจำลองมาตรฐาน สามารถมองได้ดังนี้

ตามแบบจำลองมาตรฐานฯ ในโลกที่ปราศจากฮิกส์โบซอนอนุภาคมูลฐานต่างๆ ในแบบจำลอง เช่น อิเล็กตรอน หรือควาร์ก จะมีมวลเท่ากับศูนย์ (เนื่องมาจากสมมาตรในทฤษฎีอันตรกิริยาแบบอ่อน) ซึ่งตามทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษอนุภาคเหล่านั้น

จะต้องเคลื่อนที่ด้วยความเร็วแสงคงที่เสมอทุกกรอบอ้างอิง ไม่ขึ้นกับผู้สังเกตการณ์ เมื่อเป็นดังนี้เองก็**จะไม่สามารถเกิดขึ้นมาได้** เพราะไม่มีอนุภาคใดเคลื่อนที่ช้าพอที่จะถูกกักในบริเวณที่จำกัดก่อเกิดเป็นโครงสร้างต่างๆ ของอะตอม นอกจากนี้ในแบบจำลองมาตรฐานฯ แรงพื้นฐานต่างๆ ถูกมองว่าเกิดจากอนุภาคสื่อแรง หากว่าอนุภาคที่สื่อแรงมีมวลเป็นศูนย์ ระยะทำการของแรงจะไกล แรงสามารถแผ่ไปในอวกาศได้อย่างไม่จำกัด ทำให้แรงนั้นกลายเป็นแรงที่เราพบเห็นอยู่แล้วในชีวิตประจำวัน เช่น แม่เหล็กไฟฟ้าหรือแรงโน้มถ่วง สำหรับแรงแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีโฟตอนหรืออนุภาคของแสงซึ่งไม่มีมวล ทำหน้าที่ที่สื่อแรงนั่นเอง ปรากฏการณ์ของการประทุของพายุสุริยะก็เป็นตัวอย่างหนึ่งซึ่งแสดงให้เห็นว่าระยะทำการของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถมีขนาดใหญ่มากกว่าขนาดของโลกได้สบายๆ ในขณะที่แรงนิวเคลียร์แบบอ่อนซึ่งรับผิดชอบการสลายตัวของนิวเคลียสของอนุภาคต่างๆ มีระยะทำการของแรงจำกัดอยู่แค่ภายในนิวเคลียส ซึ่งตามทฤษฎีแล้วอนุภาคสื่อแรงของแรงนิวเคลียร์แบบอ่อนจะต้องมีมวลมาก จึงทำให้มันเคลื่อนที่ได้ช้าและหยุดก่อนที่จะออกไปพ้นรัศมีของนิวเคลียส ระยะทำการของแรงจึงถูกจำกัดไว้แค่นั้น ในกรณีนี้ฮิกส์โบซอนก็ถูกนำมาใช้อธิบายแรงที่มีระยะทำการสั้นว่า **อนุภาคสื่อแรงมีอันตรกิริยากับฮิกส์โบซอนมาก ทำให้มันมีมวลมากจึงสื่อแรงไปไม่ได้ไกล**

เพื่อที่จะทำความเข้าใจว่าฮิกส์โบซอนให้มวลแก่อนุภาคอื่นๆ ได้อย่างไร เราจำเป็นต้องรู้จักภาษาที่ใช้บรรยายโลกของฟิสิกส์อนุภาคก่อน นั่นคือ ภาษาของทฤษฎีสันตวนควอนตัม (QFT) ทฤษฎีอันเกิดจากรวมกันของทฤษฎีควอนตัมและทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ เมื่อสมการ $E=mc^2$ จากทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษมาอยู่ในโลกของควอนตัม ก็ยังทำให้เส้นบางๆ ที่กั้นแบ่งระหว่างสสารและพลังงานดูบางางลงไปอีก การสร้างและทำลายอนุภาคเกิดขึ้นได้เสมอ มีการเปลี่ยนกลับไปกลับมาระหว่างมวลและพลังงานอยู่ตลอดเวลาทำให้จำนวนของอนุภาคในระบบที่กำลังศึกษาอยู่ไม่คงที่ การติดตามหาสมการการเคลื่อนที่ของอนุภาคเป็นรายตัวแบบในกลศาสตร์นิวตันหรือทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษจึงเป็นสิ่งที่ไร้ประโยชน์ไป ในวิชา QFT เราจึงเปลี่ยนจากการบรรยายระบบด้วยอนุภาคไปเป็น **สนาม (field)** แทน

สนามฮิกส์โบซอน (Higgs boson field) จึงเป็นสิ่งที่นักฟิสิกส์เราให้ความสนใจอย่างแท้จริงมากไปกว่าอนุภาคฮิกส์โบ

ซอนที่เพิ่งค้นพบไป สิ่งที่ทำให้เราตื่นเต้นกับการค้นพบอนุภาคฮิกส์ก็เพราะว่ามันพิสูจน์ว่าสนามฮิกส์โบซอนมีจริงนั่นเอง

ภาพของสนามฮิกส์โบซอนก็คล้ายคลึงกับภาพของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เราคุ้นเคยกันเป็นอย่างดี สนามเป็นปริมาณฟิสิกส์ที่เรานิยามไว้ทั่วทุกจุดในกาลอวกาศ (space-time) ของบริเวณหนึ่งๆ ตัวอย่างเช่น สนามไฟฟ้าจะเป็นปริมาณฟิสิกส์ที่จะบอกเราว่า ณ จุดใดๆ ณ เวลาใดๆ ในบริเวณที่เราสนใจนั้นแรงไฟฟ้ามีขนาดเท่าไรและมีทิศไปทางใด นอกจากนี้ยังมีสนามแม่เหล็กที่บ่งบอกแรงแม่เหล็กในอวกาศเวลา รวมเป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งบรรยายด้วยปริมาณเวกเตอร์ ดังนั้นจึงเป็นสนามเวกเตอร์ สำหรับสนามฮิกส์โบซอนซึ่งบรรยายมวลอนุภาคซึ่งเป็นปริมาณที่ไม่ขึ้นกับทิศทางการเคลื่อนที่ ไม่ขึ้นกับทิศของโมเมนตัมเชิงมุมของตัวอนุภาค (หรือสปินของอนุภาค) จึงสมควรถูกบรรยายด้วยสนามสเกลาร์ (scalar field) ส่งผลให้อนุภาคฮิกส์ซึ่งเกิดจากสนามนี้ต้องเป็นอนุภาคสเกลาร์ซึ่งมีสปินเป็นศูนย์ สอดคล้องกับผลการค้นพบอนุภาคใหม่ที่ LHC

ในโลกของฟิสิกส์อนุภาค สปิน (spin) หรือปริมาณโมเมนตัมเชิงมุมแบบควอนตัมของตัวอนุภาคเองจะมีค่าเป็นจำนวนเท่าของ $\hbar$ หรือ $\frac{1}{2}\hbar$ ทำให้เราสามารถแบ่งอนุภาคมูลฐานเป็นสองประเภท คือ 1.โบซอน (bosons) ซึ่งเป็นอนุภาคที่มีสปินเป็นจำนวนเต็ม (0,1,2,...) ซึ่งจะเป็นอนุภาคสื่อแรง 2.เฟอร์มิออน (fermions) ซึ่งเป็นอนุภาคที่มีสปินเป็นครึ่งของจำนวนเต็ม ($1/2, 3/2, \dots$) ซึ่งจะกลายเป็นอนุภาคสสารเพราะอนุภาคประเภทนี้ตัวอย่างเช่น อิเล็กตรอนจะต้องการพกฎการกีดกันของเพาลี (Pauli exclusion principle) ทำให้การจัดเรียงตัวของอนุภาคในสถานะพื้นของระบบก็กินพื้นที่ในอวกาศเกิดเป็นโครงสร้างต่างๆของสสารในอดีตที่ผ่านมาเราค้นพบอนุภาคโบซอนต่างๆที่มีสปินเป็น 1 ซึ่งทำหน้าที่สื่อแรงพื้นฐานในแบบจำลองมาตรฐานครบทั้งสามแรงแล้ว การค้นพบอนุภาคฮิกส์ก็อาจมองได้ว่าเป็นการค้นพบโบซอนที่เป็นอนุภาคสื่อแรงใหม่ เป็นอันตรกิริยาใหม่ที่อยู่นอกเหนือจากแรงพื้นฐานสี่แรงที่เรารู้จักอยู่แล้ว ดังนั้นแรงใหม่นี้เราอาจจะเรียกกันว่า แรงฮิกส์ (Higgs force) ก็ได้เป็นแรงที่ทำให้เกิดมวลของอนุภาคมูลฐาน โดยที่อนุภาคมูลฐานเกือบทั้งหมดในแบบจำลองมาตรฐานฯ สามารถรับรู้แรงฮิกส์ได้มากน้อยต่างกันไป มวลของอนุภาคเหล่านั้นจึงต่างกันไป แต่ทว่าแรงฮิกส์เป็นแรงที่ถูกจัดให้มี

ขนาดตามมวลของอนุภาคที่วัดได้ จึงไม่นับเป็น universal force เหมือนกับแรงพื้นฐานทั้งสี่

มวลจากสนามฮิกส์ทางรอดหรือปัญหาใหม่?

การเกิดมวลของอนุภาคในสนามฮิกส์โบซอน ก็คล้ายกับสถานการณ์ของลูกเหล็กกลมลูกแช่น้ำ อยู่ในแท่งน้ำ ขนาดใหญ่ หากเราทำการทดลองออกแรงผลักให้ลูกเหล็กแล้ววัดความเร็ว เราจะรู้สึกเหมือนว่าลูกเหล็กมันมีมวลมากขึ้นเมื่อเทียบกับตอนที่อยู่ในอากาศ เพราะมีแรงต้านการเคลื่อนที่เพิ่มจากความหนืดของของเหลว ถ้าเราไม่สนใจเรื่องของฟิสิกส์เกี่ยวกับความหนืด ก็น่าจะคาดว่าการทดลองแบบหยาบๆต่อไป เราอาจใช้กฎข้อที่สองของนิวตันสรุปว่า ความเฉื่อยหรือมวลของลูกกลมมีค่ามากขึ้นตามความหนืดของของเหลวที่แวดล้อม เช่น มวลของลูกเหล็กในกิลีเซอรินจะมากกว่ามวลของลูกเหล็กที่อยู่ในน้ำ หรืออากาศ แต่เมื่อทำการทดลองแยกแยะอย่างละเอียดก็จะพบว่าแรงต้านการเคลื่อนที่เพิ่มนั้นไม่ใช่มวลเพิ่มขึ้นมาจริงๆ เพราะแรงต้านที่เพิ่มจะเป็นไปตามกฎฟิสิกส์ของความหนืด ไม่ได้เพิ่มขึ้นตามกฎข้อที่สองของนิวตัน แต่ถ้าหากลูกเหล็กทรงกลมอยู่ในของเหลวพิเศษที่ความหนืดนั้นให้สภาพด้านการเคลื่อนที่เหมือนมวลที่เพิ่มขึ้นพอดีล่ะ? แรงจากความหนืดจะแยกออกจากความเฉื่อยจากมวลได้ไหม? ความหนืดมองไปก็คล้ายกับอันตรกิริยาระหว่างอนุภาค(เหมือนลูกเหล็กทรงกลม) และสนาม (เหมือนของเหลวที่ล้อมรอบ) ตามทฤษฎีแบบจำลองมาตรฐานฯ อนุภาคต่างๆจะเกิดมาแบบมวลเป็นศูนย์ หากอนุภาคใดมีอันตรกิริยากับสนามฮิกส์มากก็มีสภาพด้านการเคลื่อนที่มากทำให้อนุภาคนั้นมีมวลก็มากตาม ซึ่งในรายละเอียดจริงๆแล้ว

“สภาพด้านการเคลื่อนที่อันเกิดจากอันตรกิริยากับสนามฮิกส์” นั้นเป็นเพียงการพูดแบบหลวมๆไม่รัดกุม เพราะมวลในวิชาฟิสิกส์อนุภาคมีความหมายครอบคลุมไปไกลไปกว่าที่เราใช้อธิบายความเฉื่อยในกลศาสตร์นิวตันและทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษอยู่พอสมควร มวลที่เกิดจากอนุภาคฮิกส์จริงๆ ถ้าจะพูดแบบดิบๆก็คือรูปแบบของค่า coupling ระหว่างสนามฮิกส์และสนามของอนุภาคนั้นๆที่เกิดขึ้นภายหลังการเสียดสมมาตรสามารถมองรวมเป็นทอมมวลในสมการการเคลื่อนที่ของอนุภาคตามทฤษฎีสัมพัทธภาพ ค่าความแรง coupling ของอนุภาคใดๆกับสนามฮิกส์โบซอนสามารถมองเป็นขนาดของมวลของอนุภาคนั้นๆ

จะว่าไปแล้วนักทฤษฎีแนวลิ้งซึ่งหลายท่านก็ยังไม่พอใจคำตอบกับที่ใช้ได้และสอดคล้องกับผลการทดลองอย่างเชื่อมโยงอย่างกลไกในแบบจำลองมาตรฐาน เพราะทฤษฎียังไม่ได้อธิบายปัญหาที่ลิ้งซึ่งข้อที่ว่า กลไกใดทำหน้าที่จัดระบบระเบียบให้มวลของอนุภาคต่างๆที่เราค้นพบเป็นเช่นในปัจจุบัน ทำไมบางอนุภาคมีมวลน้อยเหลือเกิน ทำไมบางอนุภาคมีมวลมากเหลือเกิน การจะเลียงบาลีไปตอบว่าที่มวลมันมากเพราะมันมีอันตรกิริยากับสนามฮิกส์มากก็ดูจะเป็นคำตอบที่ไม่น่าพอใจ เพราะเราก็ไม่รู้ผู้ใดว่าอะไรเป็นเหตุผลเบื้องหลังที่ทำให้อนุภาคบางตัวมีอันตรกิริยากับสนามฮิกส์มากกว่าอนุภาคอื่นๆ

หมายเหตุว่า สนามฮิกส์ทำหน้าที่ให้มวลกับอนุภาคมูลฐานในทฤษฎีแบบจำลองมาตรฐาน ซึ่งไม่ใช่มวลส่วนใหญ่ของสสารที่เราสัมผัสได้ในชีวิตประจำวัน เราคิดว่ามวลเกือบทั้งหมดของอะตอมจะอยู่ที่นิวเคลียสซึ่งเป็นการประกอบกันของโปรตอนและนิวตรอน แต่ทว่ามวล ~95% ของมวลของโปรตอนและนิวตรอนนั้นมาจาก “มวลที่ไม่ได้มาจากมวล” ซึ่งก็คือสภาพความเฉื่อยที่มาจาก back-reaction ของสนามกลูออนซึ่งให้อนุภาคสื่อแรงสำหรับแรงนิวเคลียร์แบบเข้ม กลไกการเกิดมวลแบบเดียวกันนี้ไม่ใช่ไอเดียใหม่ แต่เป็นกลไกเดียวกับที่ Hendrik Lorentz ได้เสนอไว้เพื่ออธิบายว่ามวลของอิเล็กตรอนเกิดจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตั้งแต่สมัยที่เราเพิ่งค้นพบอิเล็กตรอนเมื่อ 120 ปีที่แล้ว [6]

แต่สุดท้ายแล้วภาพต่างๆของสนามฮิกส์ที่ผู้คนยอมรับกันว่าแก้ปัญหามาตรฐานได้ อาจนำเราไปสู่ปัญหาเก่าแก่ชวนสยของของฟิสิกส์ทฤษฎี นั่นคือ ปัญหาค่าของพลังงานสุญญากาศ (vacuum energy problem) ลองคิดดูง่ายๆ ถ้ามวลของอนุภาคตัวหนึ่งมีค่าคงที่เท่ากันเสมอไม่ขึ้นกับว่ามันอยู่ตรงไหนในเอกภพ ก็ต้องตีความได้ว่า ในสุญญากาศทั่วทุกหนแห่งในเอกภพจะต้องมีสนามฮิกส์มาล่ออยู่แล้วเพื่อทำอันตรกิริยารับการมีมวลของอนุภาคใดๆเพราะถ้าไม่มีสนามฮิกส์อยู่ตรงนั้นมันก็จะไม่มีมวล ที่นี้ขนาดของมวลอนุภาคฮิกส์ที่เพิ่งค้นพบคือ 125 GeV ($125 \times 10^9 \text{ eV}$) ซึ่งเมื่อคิดตามทฤษฎี QFT ก็จะส่งผลต่อระดับพลังงานสุญญากาศอย่างมหาศาล ในวิชา QFT เราสามารถปิดตาไม่มองระดับพลังงานสุญญากาศที่เกิดจากสนามฮิกส์ก็ได้ เพราะสมการที่บรรยายสิ่งที่สังเกตได้ของระบบมักอยู่ในรูปผลต่างของพลังงาน ไม่จำเป็นต้องดูระดับพลังงานรวมทั้งหมด แต่สำหรับ

ทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปนั้นต่างออกไป สภาพความโค้งของกาลอวกาศซึ่งก็คือแรงโน้มถ่วงที่บรรยายการขยายตัวของเอกภพนั้นจะคิดจากพลังงานรวมทั้งหมดที่มีอยู่ในเอกภพ ค่าความหนาแน่นของพลังงานสุญญากาศที่แตกต่างกันแม้เพียงน้อยนิดก็อาจทำให้ชะตากรรมของเอกภพเปลี่ยนไปได้อย่างสบายๆ ตัวอย่างเช่นประเภทของสนามสเกลาร์ที่เรียกรวมกันว่า quintessence ระดับพลังงานของมันน้อยมากเทียบได้กับมวลของนิวทริโนเท่านั้น (~2 eV) แต่ในฐานะของพลังงานสุญญากาศที่มีทุกหนทุกแห่งมันก็มากพอที่จะทำให้เอกภพขยายตัวด้วยความเร่งในเวลาปัจจุบัน นักฟิสิกส์รางวัลโนเบล Martinus J. G. Veltman เคยชี้ให้เห็นถึงปัญหาพลังงานสุญญากาศจากสนามฮิกส์ดังนี้ ถ้าหากอนุภาคฮิกส์มีมวลประมาณมวลของอนุภาคสื่อแรงของแรงนิวเคลียร์แบบอ่อน คือประมาณ 100 GeV (ซึ่งปัจจุบันพบว่ามวลฮิกส์มากกว่านี้เล็กน้อย) ความหนาแน่นของพลังงานสุญญากาศที่เกิดจากสนามฮิกส์จะมีค่าเป็นสิบล้านล้านเท่าของความหนาแน่นของสสารในนิวเคลียส [7] มันเป็นค่าความหนาแน่นที่มหาศาลมาก หากโลกทั้งใบถูกบีบอัดให้มีความหนาแน่นเท่านั้นก็จะกลายเป็นทรงกลมที่มีขนาดใหญ่ไม่เกินสองเท่าของลูกเทนนิส แต่ค่าความหนาแน่นของพลังงานสุญญากาศจริงที่วัดจากดาราศาสตร์คือ 10^{-29} กรัมต่อลบ.ซม. น้อยกว่าค่าคำนวณจากสนามฮิกส์ถึง 10^{56} เท่า

แล้วพลังงานสุญญากาศมหาศาลที่เกิดจากสนามฮิกส์หายไปไหน?

แสดงว่าธรรมชาติจะต้องมีกลวิธีอันแยบยลในการจัดการกับพลังงานสุญญากาศที่เรายังไม่รู้ การค้นพบอนุภาคฮิกส์จึงเหมือนการเปิดประตูไปเผชิญปัญหาพื้นฐานเก่าๆหลายอันที่เราเคยเลียงไว้ยังไม่ได้ทำความเข้าใจให้ดีพอ นอกจากปัญหาพลังงานสุญญากาศแล้ว มวลของอนุภาคฮิกส์ที่ค้นพบไป 125 GeV เหมือนเป็นค่าที่วางอยู่บนตำแหน่งพิเศษมาก มันเป็นค่าอยู่ตรงขอบของทฤษฎีต่างๆที่เราอยากทดสอบพอที่ เกือบจะหลุดค่ามวลอนุภาคฮิกส์ที่แบบจำลองมาตรฐานอยากได้ และก็ “เบาไป” เพราะแค่เพิ่งเหลื่อมเข้าสู่ขอบเขตมวลของอนุภาคฮิกส์ตามทฤษฎีของ composite Higgs (เช่น technicolor) ทฤษฎีที่บอกว่าอนุภาคฮิกส์อาจประกอบขึ้นมาจากอนุภาคอื่นหลายอนุภาค หากพูดถึงสมมาตรที่มาแรงอย่าง supersymmetry (SUSY) นางเอกที่ถูกนำมาใช้แก้ปัญหาทางทฤษฎีที่สำคัญหลายอันได้อย่างลงตัวสวยงาม

อ่านต่อหน้า 30

ลักษณะการว่ายน้ำที่สัมพันธ์กับเลขเรย์โนลด์

ปนัดดา เชาวลิตก¹

ผู้อ่านบางท่านน่าจะยังคงจำภาพยนตร์เกี่ยวกับกระบวนการปฏิสนธิได้ ภาพสเปิร์ม (spermatozoa) จำนวนหลายร้อยล้านตัวแข่งกันว่ายน้ำเข้าหาไข่ (ovum) โดยกติกาที่ง่าย ๆ ก็ชนะหรือตาย สเปิร์มสเปิร์มที่ว่ายน้ำได้เร็วที่สุดจะได้รับรางวัลคือส่วนหัวของมันซึ่งบรรจุรหัสพันธุกรรมจะได้ผสมกับไข่และเป็นที่มาของไซโกตและเอ็มบริโอ ในขณะที่หางที่คมประโชยน์แล้วก็จะถูกสลัดทิ้ง ส่วนสเปิร์มอื่น ๆ ที่เหลืออีกจำนวนมหาศาลก็จะตายทั้งหมดภายใน 20 นาทีถึง 7 วันขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม จนอาจจะกล่าวได้ว่าขั้นตอนแรกของการคัดสรรทางธรรมชาติในการกำเนิดของสิ่งมีชีวิตหลายชนิดคือการคัดสรรนักรว่ายน้ำที่เก่งที่สุดระดับหนึ่งในร้อยล้าน ลักษณะการว่ายน้ำของสเปิร์มคือจะโบกหาง (flagellum) คล้ายกับการสะบัดแส้ ที่นี้ลองนึกดูเล่น ๆ ว่าหากมีสเปิร์มประหลาดตัวหนึ่งที่ตัดสินใจเปลี่ยนวิธีการว่ายน้ำจากการโบกหางของมันในลักษณะคล้ายการสะบัดแส้แบบเดียวกับสเปิร์มอื่น ๆ เป็นการว่ายน้ำในลักษณะเดียวกับปลา คือโบกหางไปมาในแนวซ้ายและขวาของลำตัว (สมมติให้สเปิร์มสามารถทำเช่นนั้นได้) จะเกิดอะไรขึ้นกับสเปิร์มตัวนั้น เรื่องที่จะเกิดขึ้นก็คือสเปิร์มนี้คงจะได้เป็นหนึ่งในสเปิร์มหลายร้อยล้านตัวที่ตายโดยไม่ได้ผสมกับไข่ และที่แย่ไปกว่านั้นคือสเปิร์มที่ว่ายน้ำแบบเดียวกับปลานี้ น่าจะอยู่รังท้ายสุดเพราะมันจะว่ายน้ำอยู่อยู่กับที่ ตัวอย่างง่าย ๆ นี้แสดงให้เห็นว่ามีความแตกต่างพื้นฐานบางประการระหว่างลักษณะการว่ายน้ำแบบโบกหางและการใช้ครีบของปลา และลักษณะการว่ายน้ำของสเปิร์ม บทความนี้มีจุดประสงค์ที่จะอธิบายที่มาของความแตกต่างนี้ และหลักการฟิสิกส์เชิงกลที่อธิบายการว่ายน้ำของนักรว่ายน้ำขนาดจิ๋วเช่น สเปิร์ม แบคทีเรีย ฯลฯ

การว่ายน้ำโดยใช้แรงปฏิกิริยา

ก่อนที่จะพิจารณาการว่ายน้ำทั้งสองแบบ จะกล่าวถึงนิยามของการ "ว่ายน้ำ" ของสิ่งมีชีวิตเป็นอันดับแรก ในที่นี้ การ

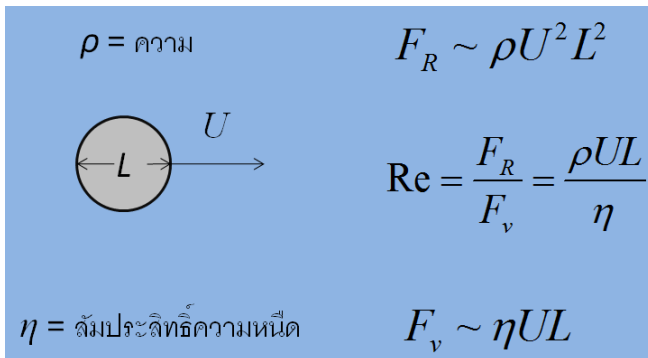
ว่ายน้ำคือ periodic body deformation หรือการที่สิ่งมีชีวิตบิดตัวแบบซ้ำ ๆ เพื่อให้ตนเองเคลื่อนที่ไปข้างหน้า สำหรับสิ่งมีชีวิตที่มักจะพบเห็นได้ด้วยตาเปล่า การบิดตัวนี้คือการสร้างโมเมนตัมให้กับของเหลว หรือออกแรงกระทำกับของเหลวเพื่ออาศัยแรงปฏิกิริยาที่ของเหลวกระทำกับสิ่งมีชีวิตผลักดันให้มันเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ต้องการ ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดที่สุดคือการว่ายน้ำของกบ กบจะใช้เท้าหลังถีบน้ำไปทางด้านหลัง ในทางกลับกันแรงปฏิกิริยาที่น้ำกระทำกับเท้ากบก็จะผลักดันตัวกบให้เคลื่อนที่ไปทางด้านหน้า การว่ายน้ำของปลา นากินปลา จะเห็น และมนุษย์หรือแม้แต่การเคลื่อนที่ของเรือหางยาวก็อาศัยหลักการเดียวกัน โดยจะเห็นได้จากคลื่นน้ำซึ่งเคลื่อนที่ไปทางด้านหลัง แรงปฏิกิริยาซึ่งน้ำกระทำกับสิ่งมีชีวิตหรือวัตถุนั้นก็ผลักดันให้สิ่งมีชีวิตหรือวัตถุเคลื่อนที่ไปทางด้านหน้า

แรงต้านการเคลื่อนที่เนื่องจากความหนืดของของเหลวและตัวเลขเรย์โนลด์

แล้วปัญหาของสเปิร์ม ตลอดจนถึงสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กอื่น ๆ ก็อะไร เหตุใดพวกมันจึงไม่สามารถอาศัยแรงปฏิกิริยาขับเคลื่อนไปทางด้านหน้าได้ เพื่อที่จะเข้าใจเรื่องนี้อย่างชัดเจน ลองนึกภาพวัตถุทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง L เคลื่อนที่ในของเหลวด้วยอัตราเร็ว U และพิจารณาแรงต่าง ๆ ที่กระทำกับวัตถุนั้น แน่นอนว่าเนื่องจากวัตถุออกแรงกระทำกับของเหลว จะทำให้มีแรงปฏิกิริยาซึ่งของเหลวกระทำกับวัตถุซึ่งในที่นี้ขอเรียกว่า F_R (inertia force) ถ้าสเกลความยาวของวัตถุคือ L และอัตราเร็วของวัตถุคือ U สเกลเวลาของการเคลื่อนที่ของวัตถุคือ L/U ความเร่งของวัตถุโดยประมาณคือ $U/(L/U) = U^2/L$ หากกำหนดให้ของเหลวนี้นี้มีความหนาแน่น ρ และมีสัมประสิทธิ์ความหนืด η จะได้ค่าประมาณของแรงปฏิกิริยาที่ของเหลวกระทำกับวัตถุดังนี้ [1]

¹อาจารย์ (ดร.) ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$F_R = ma \approx \rho L^3 \left(\frac{U^2}{L} \right) = \rho U^2 L^2 \quad (1)$$



รูปที่ 1 วัตถุทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง L เคลื่อนที่ในของเหลวด้วยความเร็ว U ในของเหลวความหนาแน่น ρ และมีสัมประสิทธิ์ความหนืด η

นอกจากนี้แล้วยังมีแรงต้านการเคลื่อนที่เนื่องจากความหนืดของของเหลว F_v (viscous force) แรงต้านการเคลื่อนที่ซึ่งของเหลวกระทำกับวัตถุจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของวัตถุ และจะทำให้วัตถุเคลื่อนที่ช้าลง ในกลศาสตร์ของไหล สัมประสิทธิ์ความหนืดเชิงกล (kinematic viscosity) ของของไหล หรืออัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ความหนืดและความหนาแน่นของของไหล (η / ρ) จะถูกมองว่าเป็นสัมประสิทธิ์การแพร่ของโมเมนตัมในของไหล ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดเชิงกลของของไหลยิ่งสูง โมเมนตัมในของไหลนั้นจะยิ่งแพร่กระจายหายไปอย่างรวดเร็ว ค่าประมาณของแรงต้านการเคลื่อนที่ซึ่งของเหลวกระทำกับวัตถุสามารถคำนวณได้จากหลักการวิเคราะห์เชิงมิติ (dimensional analysis) คือพิจารณาจากหน่วยของสัมประสิทธิ์ความหนืด ในหน่วย SI หน่วยของสัมประสิทธิ์ความหนืดคือ Pa.s หรือ (N/m²).s เมื่อพิจารณาอย่างระมัดระวังจะพบว่าหน่วยของสัมประสิทธิ์ความหนืดคือ หน่วยของแรง (N) หารด้วยผลคูณระหว่างหน่วยของความยาว (m) และหน่วยของอัตราเร็ว (m/s) ดังนั้นแรงต้านการเคลื่อนที่ซึ่งของเหลวกระทำกับวัตถุสามารถเขียนได้ดังสมการด้านล่าง

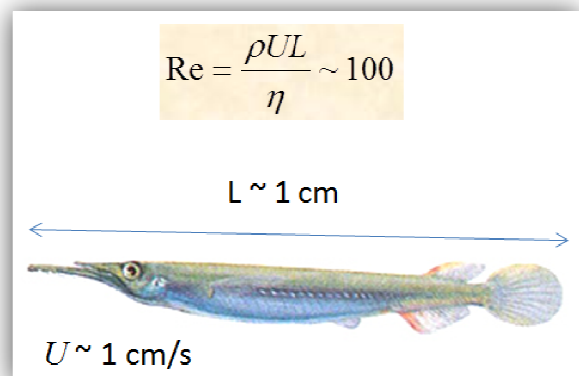
$$F_v \approx \eta UL \quad (2)$$

จากสมการ (1) และ (2) สามารถหาอัตราส่วนระหว่างแรงปฏิกิริยาและแรงต้านการเคลื่อนที่ซึ่งของเหลวกระทำกับวัตถุได้ดังนี้

$$Re = \frac{F_R}{F_v} = \frac{\rho U^2 L^2}{\eta UL} = \frac{\rho UL}{\eta} \quad (3)$$

Re รู้จักกันในชื่อตัวเลขเรย์โนลด์ส์คืออัตราส่วนระหว่างแรงปฏิกิริยาและแรงต้านการเคลื่อนที่ดังกล่าว ซึ่งเป็นปริมาณไร้มิติ (dimensionless parameter) ถ้า $Re \gg 1$ แรงปฏิกิริยาซึ่งของเหลวกระทำกับวัตถุจะมีค่ามากกว่าแรงต้านการเคลื่อนที่เป็นอย่างมาก หาก $Re = 1$ หมายความว่าแรงทั้งสองมีขนาดใกล้เคียงกัน และถ้า $Re \ll 1$ ก็หมายความว่าแรงต้านการเคลื่อนที่เนื่องจากความหนืดของของเหลวมีค่าสูงกว่าแรงปฏิกิริยาที่ของเหลวกระทำกับวัตถุมาก

หากลองคำนวณค่าตัวเลขเรย์โนลด์ส์ของการเคลื่อนที่ของปลาเข็มและสเปิร์มของมนุษย์ในลักษณะค่าประมาณ (order of magnitudes) ปลาเข็มมีความยาวลำตัวอยู่ในหลักเซนติเมตร ($L \approx (0.01 \text{ m})$) และเคลื่อนที่ด้วยความเร็วในหลักเซนติเมตรต่อวินาที หรือ $U \approx (0.01 \text{ m/s})$ ค่าความหนาแน่นของน้ำคือ 10^3 kg/m^3 และสัมประสิทธิ์ความหนืดโดยประมาณคือ 10^{-3} Pa.s ดังนั้นค่าตัวเลขเรย์โนลด์ส์คำนวณจากสมการที่ 3 จะได้ $Re \approx 100$ คือแรงปฏิกิริยาที่ของเหลวกระทำกับปลานั้นมีขนาดมากกว่าแรงต้านการเคลื่อนที่เนื่องจากความหนืดอยู่ในหลักเป็นร้อยเท่า ปลาเข็มจึงสามารถว่ายน้ำโดยใช้แรงปฏิกิริยาที่น้ำกระทำกับปลาผลักดันให้ลำตัวเคลื่อนที่ไปข้างหน้าได้อย่างสบาย

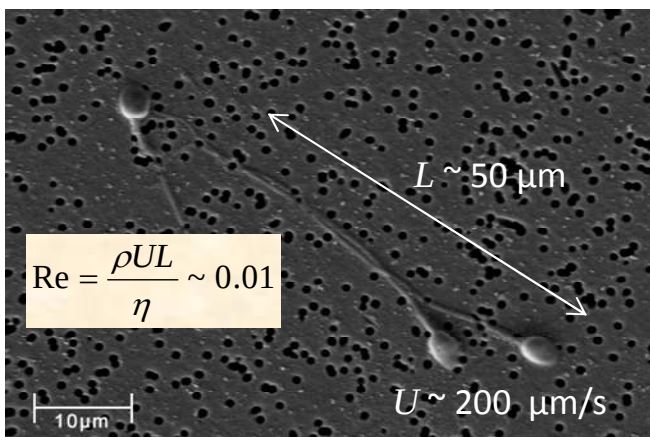


รูปที่ 2 สเตลความยาวและอัตราเร็วของปลาเข็มตลอดจนการคำนวณตัวเลขเรย์โนลด์จากการว่ายน้ำของปลาเข็ม [7]

ในทางกลับกันสเปิร์มของมนุษย์มีขนาดประมาณ 50 ไมโครเมตร และอัตราเร็วประมาณ 200 ไมโครเมตรต่อวินาที หากกำหนดให้ความหนาแน่นและสัมประสิทธิ์ความหนืดของของเหลวมีค่าประมาณความหนาแน่นและสัมประสิทธิ์ความหนืด

ของน้ำจะได้ค่าตัวเลขเรย์โนลด์จากการเคลื่อนที่ของสเปิร์มคือ $Re \approx 10^{-2}$ นั่นคือแรงปฏิกิริยาที่ของเหลวกระทำกับวัตถุมีขนาดประมาณ 0.01 เท่าของแรงต้านการเคลื่อนที่เนื่องจากความหนืด ทำให้การว่ายน้ำโดยใช้แรงปฏิกิริยาที่ของเหลวกระทำกับสเปิร์มขับเคลื่อนลำตัวไปทางด้านหน้าไม่ได้ผล [2]

เป็นที่น่าสังเกตว่าแม้ว่าจะให้ปลาเข็มและสเปิร์มว่ายน้ำในของเหลวชนิดเดียวกันคือน้ำ ที่อุณหภูมิเดียวกัน มีความหนาแน่นและสัมประสิทธิ์ความหนืดค่าเดียวกัน ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่ต่างกันนั้นสามารถใช้ตีความได้ว่าน้ำนั้นเป็นของเหลวที่หนืดน้อยสำหรับปลาเข็มเพราะแรงต้านการเคลื่อนที่เนื่องจากความหนืดมีขนาดเล็กเพียง 1% ของแรงปฏิกิริยาที่น้ำกระทำกับปลาเข็ม แต่ของเหลวชนิดเดียวกันนี้กลับจัดเป็นของเหลวที่หนืดมากสำหรับสเปิร์ม ดูได้จากแรงต้านทานการเคลื่อนที่เนื่องจากความหนืดที่สูงกว่าแรงปฏิกิริยาที่น้ำกระทำกับสเปิร์มถึง 100 เท่า ในการพิจารณาของเหลวใด ๆ ว่า "หนืดหรือไม่หนืด" นั้นไม่สามารถจะพิจารณาจากสัมประสิทธิ์ความหนืดได้เพียงอย่างเดียว แต่จะต้องพิจารณาสเกลความยาวและสเกลอัตราเร็วของระบบตลอดจนความหนาแน่นของของเหลวนั้นด้วย ก็จะต้องพิจารณาจากตัวเลขเรย์โนลด์ของระบบนั่นเอง



รูปที่ 3 สเกลความยาวและอัตราเร็วของสเปิร์มตลอดจนการคำนวณตัวเลขเรย์โนลด์ของการว่ายน้ำของสเปิร์ม [8]

สภาพผันกลับได้ของการไหลแบบสโตกส์ (Reversibility of Stokes Flow)

ความสำคัญของตัวเลขเรย์โนลด์ยังสามารถพิจารณาได้จากการทำให้สมการนาวิเอ-สโตกส์และสมการต่อเนื่องไร้หน่วย (nondimensionalization of Navier-Stokes and continuity

equations) สมการนาวิเอ-สโตกส์แบบ steady state และสมการต่อเนื่องสำหรับของไหลนิวโตเนียนแบบอัดไม่ได้ (incompressible Newtonian fluid) สามารถเขียนได้ดังสมการด้านล่าง

$$\rho \mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V} = -\nabla P + \eta \nabla^2 \mathbf{V} \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (5)$$

โดย P คือความดัน และ $\mathbf{V}$ คือความเร็วของของไหลในทางกลศาสตร์ของไหล ส่วนสมการที่ 5 หรือสมการต่อเนื่องได้มาจากการอนุรักษ์มวลของของไหลซึ่งมีความหนาแน่นคงที่ หากกำหนดให้สเกลความยาวของระบบคือ L สเกลความเร็วของระบบคือ U และกำหนดให้หน่วยของตัวแปรไร้หน่วยเป็นดังสมการต่อไปนี้

$$\tilde{x} = x/L \quad (6a)$$

$$\tilde{y} = y/L \quad (6b)$$

$$\tilde{z} = z/L \quad (6c)$$

$$\tilde{V} = V/U \quad (6d)$$

แทนค่าตัวแปรไร้หน่วยเหล่านี้ลงในสมการที่ 4 และ 5 จะได้สมการนาวิเอ-สโตกส์และสมการต่อเนื่องซึ่งไร้หน่วยดังสมการด้านล่าง

$$Re \tilde{\mathbf{V}} \cdot \nabla \tilde{\mathbf{V}} = -\tilde{\nabla} \tilde{P} + \tilde{\nabla}^2 \tilde{\mathbf{V}} \quad (7)$$

$$\tilde{\nabla} \cdot \tilde{\mathbf{V}} = 0 \quad (8)$$

โดยสัญลักษณ์ $\tilde{\nabla} = (1/L)\nabla$ และ $\tilde{P} = P/(\eta UL)$ และ Re คือตัวเลขเรย์โนลด์ดังในสมการที่ 3 ในกรณีที่ $Re \ll 1$ สมการที่ (7) สามารถเขียนได้ใหม่ดังนี้

$$0 \approx -\tilde{\nabla} \tilde{P} + \tilde{\nabla}^2 \tilde{\mathbf{V}} \quad (9)$$

นั่นคือในกรณีที่ $Re \ll 1$ การขนส่งโมเมนตัมในของไหลถูกกำหนดโดยกระบวนการ viscous dissipation สมการนาวิเอ-สโตกส์ (7) กลายเป็นสมการสโตกส์ (9) ถ้าแก้สมการนี้พร้อมกับสมการต่อเนื่อง (8) ก็จะได้ความดันและความเร็วของของไหลที่ตำแหน่งต่างๆ เป็นที่น่าสังเกตว่าทั้งสมการสโตกส์และสมการต่อเนื่องนั้นเป็นสมการเชิงเส้น คำตอบของสมการเหล่านี้จะแปรผันตรงกับเงื่อนไขขอบ (boundary condition)

แล้วเรื่องทั้งหมดนี้เกี่ยวข้องกับการว่ายน้ำของสิ่งมีชีวิตต่างๆอย่างไร การที่คำตอบของสมการ (8) และ (9) แปรผันตรงกับเงื่อนไขขอบเป็นที่มาของสภาพผันกลับได้ของการไหลแบบสโตกส์ เพื่อให้เข้าใจได้ง่ายขึ้น ลองพิจารณาการว่ายน้ำของปลา สมมุติให้ปลานี้เคลื่อนที่ด้วยการสลับหางไปมาในแนวซ้าย

และขาของลำตัว เนื่องจากคำตอบของสมการ (8) และ (9) แปรผันตรงกับเงื่อนไขขอบแรงที่น้ำกระทำกับร่างกายของปลาจากการโบกหางจากซ้ายไปขวาและแรงค้ำถ่วงที่กระทำกับปลาจากการโบกหางจากขวาไปซ้ายนั้นจะมีขนาดเท่ากันแต่ทิศทางตรงกันข้าม ดังนั้นแรงลัพธ์ที่กระทำกับปลาโดยรวมในหนึ่งรอบการบิดตัว (โบกหางจากซ้ายไปขวาและขวาไปซ้าย) จะมีค่าเท่ากับศูนย์ ทำให้ไม่มีการเคลื่อนที่ลัพธ์เกิดขึ้นดังที่ภาพยนตร์เพื่อการศึกษาของ G.I. Taylor [3] ได้แสดงให้เห็น G.I. Taylor ได้สร้าง "ปลาจำลอง" โดยใช้มอเตอร์ซึ่งดันท้ายต่อกับแท่งแข็งเกร็ง เมื่อมอเตอร์ทำงาน แท่งนี้จะบิดไปมาในแบบเดียวกับการเคลื่อนที่ของหางปลา ในระหว่างการทดลอง "ปลาจำลอง" ถูกหย่อนลงในน้ำธรรมดา และในกลีเซอรินซึ่งมีสัมประสิทธิ์ความหนืดสูง และเป็นที่มาของค่าตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำ สิ่งที่เกิดขึ้นคือ "ปลาจำลอง" สามารถว่ายน้ำข้างหน้าได้อย่างสบายในน้ำ แต่ว่ากลับว่ายอยู่กับที่ในกลีเซอริน Ed Purcell [1] กล่าวว่าในปี 1976 ว่าการว่ายน้ำแบบ "1 บานพับประตู่" (one-hinged motion) คือการว่ายน้ำใช้มอเตอร์ซึ่งทำงานคล้ายบานพับประตู่ 1 บานพับจะไม่สามารถสร้างการเคลื่อนที่ลัพธ์ได้หากค่าตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำมาก ๆ



(4a)



(4b)

รูปที่ 4 "ปลาจำลอง" จากการทดลองของ G.I. Taylor [3] มอเตอร์ซึ่งดันท้ายต่อกับแท่งแข็งเกร็ง เมื่อมอเตอร์ทำงาน แท่งนี้จะบิดไปมาในแบบเดียวกับการเคลื่อนที่ของหางปลา 4a) ภาพ "ปลาจำลอง" ว่ายน้ำข้างหน้าได้ในน้ำ 4b) ภาพ "ปลาจำลอง" ว่ายอยู่กับที่ในกลีเซอริน

E.coli ตัวแทนนักว่ายน้ำขนาดเล็กและการว่ายน้ำโดยใช้แรงดันการเคลื่อนที่เนื่องจากความหนืด

ถ้าสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กทั้งหลายเช่น สเปิร์ม หรือแบคทีเรียไม่สามารถว่ายน้ำโดยใช้แรงปฏิกิริยาที่น้ำกระทำกับพวกมันขับเคลื่อนไปทางด้านหน้า พวกมันว่ายน้ำได้อย่างไร ในบรรดานักว่ายน้ำขนาดเล็กเหล่านี้ สิ่งมีชีวิตที่ถูกศึกษามากที่สุดคือแบคทีเรีย *Escherichia coli* หรือ *E.coli* ซึ่งมีลักษณะลำตัวเป็นแท่งทรงกระบอก (บางครั้งในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ถูกมองว่าเป็นทรงรี) ต่อกับหาง (flagellar) ประมาณ 2-6 เส้น หางแต่ละเส้นยาวประมาณ 7 ไมโครเมตรและหมุนได้เนื่องจากต่อกับ "มอเตอร์" ซึ่งฝังอยู่ในผนังเซลล์ ในระหว่างที่ *E.coli* ว่ายน้ำเป็นเส้นตรงไปข้างหน้า หางเหล่านี้จะหมุนพันกันเป็นเกลียวด้วยอัตราประมาณ 100 Hz ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาหากมองจากทางด้านหลัง ขณะที่ลำตัวทรงกระบอกจะหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาในอัตราประมาณ 10 Hz [4] ทอร์กลัพธ์ของ *E.coli* จะเท่ากับศูนย์ และโดยรวมร่างกายของ *E.coli* จะเคลื่อนที่ไปทางด้านหน้าเป็นเส้นตรง การเคลื่อนที่แบบนี้ถูกเรียกว่าการ "วิ่ง" ของ *E.coli* [5] เพราะ *E.coli* มีขนาด 9-12 μm โดยเฉลี่ย และอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ 25-35 ไมโครเมตรต่อวินาทีทำให้สามารถสรุปได้ว่า การเคลื่อนที่ของสิ่งมีชีวิตชนิดนี้นั้นในน้ำนั้นให้ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำ ($Re \approx 0.0002-0.0005$)

หากลองพิจารณาการเคลื่อนที่ของหางของ *E.coli* โดยอาศัยการวิเคราะห์ของ E. Lauga และ T.R. Powers [2] เพื่อให้เข้าใจ *E.coli* จะถูกจำลองโดยให้ลำตัวเป็นทรงกลมห้าง (prolate ellipsoid) ต่อกับหาง 1 เส้นลักษณะเป็นเกลียวดังแสดงในรูปที่ 5 (เนื่องจากในระหว่างการ "วิ่ง" หางทั้งหมดของ *E.coli* จะพันรวมกันเป็นเกลียว แบบจำลองนี้จึงไม่ห่างจากความเป็นจริงมากนัก) รูปร่างของหางนี้กำหนดโดยใช้ tangent vector $\mathbf{t}(s)$ ที่ระยะทาง s นับจากต้นหางคือส่วนของหางที่ติดกับ prolate ellipsoid ลองพิจารณาส่วนเล็ก ๆ ของหางดังกล่าว

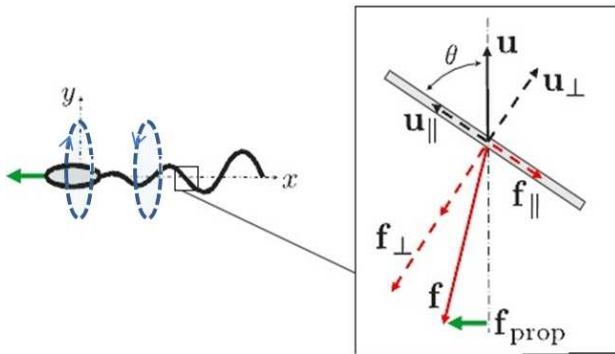
นี้ซึ่งกำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว u ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น component ซึ่งขนานและตั้งฉากกับ tangent vector ที่ตำแหน่งดังกล่าวดังนี้ [2]

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_{\parallel} + \mathbf{u}_{\perp} \quad (10)$$

โดย $\mathbf{u}_{\parallel}$ คือความเร็วในทิศทางขนานและ $\mathbf{u}_{\perp}$ คือความเร็วในทิศทางตั้งฉากกับหางของ *E.coli* ณ ตำแหน่งนั้น ๆ แรงด้านการเคลื่อนที่ซึ่งของเหลวกระทำกับส่วนเล็ก ๆ ของหางของ *E.coli* สามารถเขียนได้ดังสมการด้านล่าง

$$\mathbf{f} = -b_{\parallel}\mathbf{u}_{\parallel} - b_{\perp}\mathbf{u}_{\perp} \quad (11)$$

โดยที่ $b_{\parallel}$ และ $b_{\perp}$ คือสัมประสิทธิ์แรงด้านการเคลื่อนที่ (drag coefficients) ในทิศทางขนานและตั้งฉากกับหางของ *E.coli* ณ ตำแหน่งนั้นตามลำดับ (สำหรับหางซึ่งมีขนาดยาว และมีลักษณะเป็นเกลียวมีความยาวคลื่นคงที่ $b_{\parallel}/b_{\perp} \approx 0.5$)



รูปที่ 5 แผนภูมิแสดงทิศทางของความเร็วของตำแหน่งหนึ่งบนหางของ *E.Coli* และแรงที่ของเหลวกระทำกับหางนั้น [2]

จากรูปที่ 5 อัตราเร็วของหางสามารถแยกออกได้เป็นอัตราเร็วในทิศทางขนานและตั้งฉากกับหางของ *E.coli* ได้คือ $u_{\parallel} = u \cos \theta$ และ $u_{\perp} = u \sin \theta$ และสามารถเขียนขนาดของแรงในทิศทางขนานและตั้งฉากกับหางของ *E.coli* ได้คือ $f_{\parallel} = -b_{\parallel}u \cos \theta$ และ $f_{\perp} = -b_{\perp}u \cos \theta$ ตามลำดับเช่นกัน ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ในระหว่างการ "วิ่ง" ของ *E.coli* หางนั้นจะหมุนวนเข็มนาฬิกา (ถ้ามองจากด้านหลัง) ในระนาบ y-z ในรูป 5 แรงในทิศทางที่จะผลักดันให้ *E.coli* เคลื่อนที่ไปทางด้านหน้า ($\mathbf{f}_{\text{prop}}$) นั้นคือ component ของ $\mathbf{f}$ ในทิศทางตั้งฉากกับ $\mathbf{u}$ ในแนว -x-direction ดังในรูป และเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\mathbf{f}_{\text{prop}} = (b_{\parallel} - b_{\perp})u \sin \theta \cos \theta \mathbf{e}_x \quad (12)$$

สังเกตว่าถ้า $b_{\parallel} = b_{\perp}$ จะทำให้ $\mathbf{f}_{\text{prop}} = 0$ นั่นคือจะไม่มีแรงที่ของเหลวกระทำกับวัตถุในทิศทางขับเคลื่อนไปทางด้านหน้า

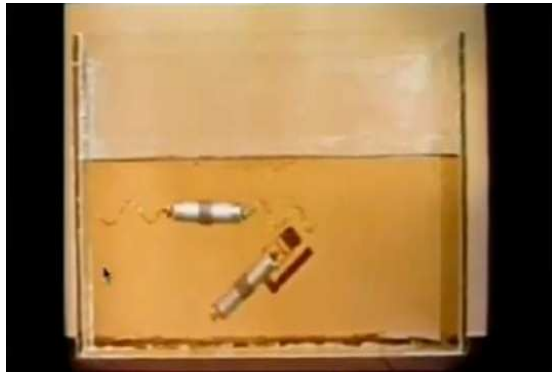
เพราะ $\mathbf{f}$ จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับ $\mathbf{u}$ และขนานกับหางของ *E.coli* เสมอคืออยู่ในระนาบ y-z เท่านั้น เงื่อนไขที่สำคัญที่ทำให้ *E.coli* ใช้แรงด้านการเคลื่อนที่เนื่องจากความหนืดของของเหลวขับเคลื่อนตนเองไปข้างหน้าได้นั้นคือสัมประสิทธิ์แรงด้านการเคลื่อนที่ ในทิศทางขนานและตั้งฉากกับหางของ *E.coli* จะต้องมีความไม่เท่ากัน

เงื่อนไขที่สำคัญอีกข้อคือทั้งความเร็วของหาง (u) และมุม orientation ของความเร็วของหาง (θ) ณ ตำแหน่งนั้น ๆ จะต้องมีการเปลี่ยนแปลงเป็นฟังก์ชันคาบไปพร้อมๆ กัน [2] ดังจะเห็นได้จากสมการที่ 12 ว่าหากในการเคลื่อนที่ 1 รอบ ความเร็วของหางของ *E.coli* มีการเปลี่ยนแปลงจาก u เป็น $-u$ และกลับมายัง u อีกครั้งโดยที่ θ ลงที่จะทำให้แรงลัพธ์ในการเคลื่อนที่ 1 รอบมีค่าเป็นศูนย์ แต่ในความเป็นจริง ในระหว่างการ "วิ่ง" ของ *E.coli* หางของ *E.coli* จะหมุนแบบทวนเข็มนาฬิกา ทำให้ในระหว่างการเปลี่ยนแปลงความเร็วจาก u มาเป็น $-u$ มุมระหว่างความเร็วและ tangent vector ของหางจะมีการเปลี่ยนแปลงจากมุม θ มาเป็น π และกลายมาเป็น $-\theta$ การเปลี่ยนแปลงทั้งความเร็วและ มุม orientation ของความเร็วของส่วนเล็ก ๆ ของหางในลักษณะนี้จะทำให้เกิด $\mathbf{f}_{\text{prop}}$ ลัพธ์ในทิศทางคงที่ สังเกตว่า $\mathbf{f}_{\text{prop}}$ นั้นเป็นแรงขับเคลื่อนสำหรับส่วนเล็ก ๆ ของหาง แรงขับเคลื่อนไปทางด้านหน้ากระทำกับ *E.coli* สามารถหาได้จากผลบวกหรือค่าปริพันธ์ของแรงดังกล่าวที่ทุก ๆ ตำแหน่งบนหางของ *E.coli*

บทความนี้ใช้ *E.coli* เป็นตัวอย่างในการศึกษาการว่ายน้ำที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำ แต่หลักการเดียวกันสามารถนำไปใช้กับสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กอื่น ๆ โดยเฉพาะสิ่งมีชีวิตที่เคลื่อนที่ด้วยการใช้มอเตอร์ชีวภาพในการหมุนอวัยวะที่ใช้ในการเคลื่อนที่ภาพยนตร์ของ G.I. Taylor ได้พิสูจน์หลักการข้อนี้ด้วยการนำขดลวดแบบเดียวกับสปริงมาติดทางด้านหน้าและด้านหลังของมอเตอร์ซึ่งหากมอเตอร์ทำงานเกลียวขดลวดทั้งสองก็จะหมุนแบบเดียวกับการหมุนของส่วน (หรือการหมุนของหางของ *E.coli*) G.I. Taylor นำมอเตอร์พร้อมขดลวดนั้นไปใส่ลงในกลีเซอริน พบว่าการหมุนของขดลวดนี้ทำให้ทั้งระบบ (มอเตอร์และขดลวด) เคลื่อนที่ไปทางด้านหน้าในของเหลวซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดสูงอย่างกลีเซอรินได้



(6a)



(6b)

รูปที่ 6 "มอเตอร์ชีวภาพจำลอง" จากการทดลองของ G.I. Taylor [3] ด้านท้ายของมอเตอร์ต่อกับขดลวด เมื่อมอเตอร์ทำงาน แขนนี้จะเคลื่อนที่ในลักษณะเดียวกับการหมุนของสว่าน 6a) ภาพของ "มอเตอร์ชีวภาพจำลอง" เปรียบเทียบกับ "ปลาจำลอง" (ดูรายละเอียดเกี่ยวกับ "ปลาจำลอง" ในรูปที่ 4) 6b) ภาพ "มอเตอร์ชีวภาพ" ไปข้างหน้าได้ในขณะที่ "ปลาจำลอง" ว่ายอยู่กับที่และกำลังจะจมลง

สรุป

ตัวอย่างการว่ายน้ำในลักษณะต่าง ๆ ที่ได้นำมาแสดงในบทความนี้แสดงให้เห็นว่ามีความเกี่ยวเนื่องอย่างชัดเจนระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์และลักษณะการว่ายน้ำของสิ่งมีชีวิต สิ่งมีชีวิตขนาดใหญ่ เช่น มนุษย์ ปลา วาฬ ฯลฯ ซึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงจะทำให้ค่าตัวเลขเรย์โนลด์สูง สิ่งมีชีวิตเหล่านี้จะเคลื่อนที่ด้วยการออกแรงกระทำกับของเหลวและอาศัยแรงปฏิกิริยาที่ของเหลวกระทำกลับขับเคลื่อนร่างกายไปทางด้านหน้า ในขณะที่สิ่งมีชีวิตขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก เช่น แบคทีเรีย สเปิร์ม โปรโตซัว สาหร่ายบางชนิด ฯลฯ ซึ่งว่ายน้ำด้วยอัตราเร็วไม่สูงและมีค่าตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำจะไม่สามารถว่ายน้ำโดยใช้แรงปฏิกิริยาได้เนื่องจาก

ความหนืดของของเหลวจะทำให้โมเมนต์ที่สิ่งมีชีวิตสร้างขึ้นหายไประยะรวดเร็ว สิ่งมีชีวิตขนาดเล็กเหล่านี้ว่ายน้ำโดยใช้แรงต้านทานการเคลื่อนที่เนื่องจากความหนืดของของเหลวผลักดันตัวมันไปทางด้านหน้าโดยอาศัยสัมประสิทธิ์แรงต้านการเคลื่อนที่ที่ไม่เท่ากันในแต่ละทิศทาง และการเปลี่ยนแปลงของความเร็วและมุม orientation ของความเร็วแต่ละส่วนเล็กๆ ของอวัยวะที่ใช้ในการว่ายน้ำไปพร้อมๆ กันเป็นฟังก์ชันคาบ ความเข้าใจเกี่ยวกับหลักการพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กเหล่านี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เชิงเทคโนโลยีชีวภาพเช่นการคัดแยก *E.coli* โดยใช้ขนาดด้วยการ "หลอก" ให้ *E.coli* ขนาดต่างๆ กันให้ว่ายน้ำออกจากกันโดยใช้ microfluidic devices ซึ่งมีลักษณะเป็นช่องซึ่งมีรัศมีความโค้งต่างกัน [2,6] หรือการประดิษฐ์หุ่นยนต์ขนาดเล็กให้สามารถแหวกว่ายในของเหลวซึ่งมีสัมประสิทธิ์ความหนืดสูง

เอกสารอ้างอิง

- [1] E. Purcell, "Life at Low Reynolds Number", Am. J. Phys. 45, 3 (1977).
- [2] E. Lauga, T.R. Powers, "The Hydrodynamics of Swimming Organism", Rep. Prog. Phys. 72, 1 (2009).
- [3] ภาพยนตร์ Low Reynolds Number Flow ของ G.I. Taylor (The National Committee for Fluid Mechanics Film, National Science Foundation) สามารถดูได้จาก <http://techtv.mit.edu/videos/35-1-961-lecture-11-8211-low-reynolds-number-fluid-dynamics-stokes-flow>
- [4] E. Lauga W.R. DiLuzio, G.M. Whitesides, H.A. Stone, "Swimming in Circles: Motion of Bacteria near Solid Boundaries", Biophys. J. 90, 400 (2006)
- [5] H. C. Berg, "E.coli in Motion" (Springer, 2004).
- [6] W.R. DiLuzio, L. Turner, M. Mayer, P. Garstecki, D. B. Weibel, H.C. Berg, G. M. Whitesides, "Escherichia coli swimming on the right-hand side", Nature 435, 1271 (2005)
- [7] <http://aqua.club.net/forum/lite.php?topic=110852.0>
- [8] <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Spermatozoa-human-3140x.jpg>

เราทราบอายุของเอกภพได้อย่างไร?

พงษ์พิชิต จันทรน้อย¹

อารัมภบท...

เป็นที่ทราบกันดีว่าเอกภพกว้างใหญ่ไพศาลนักซึ่งเราเองก็ยังไม่รู้ว่ามีขอบเขตหรือไม่ความมโหฬารนี้ชี้ให้เห็นว่า ดาวเคราะห์สีน้ำเงินหรือว่าโลกของเราเป็นเพียงจุดเล็กๆเท่านั้นเองลองจินตนาการเล่นๆจะเป็นไปไหม!

ถ้าเราเปรียบเทียบเอกภพว่าเป็นเขาวงกต เราคงมีเขาวงกตที่สลับซับซ้อน ประดับประดาไปด้วย ดวงดาว กาแล็กซี และสิ่งต่างๆที่อาจอยู่นอจินตนาการอื่นๆ อีกมากมาย ซึ่งสิ่งเหล่านี้ถ้าจะนึกไปก็มีวิวัฒนาการมานานนับพันล้านปีที่อยู่มาจนวันนี้สุดท้ายก็ต้องมีอายุเท่ากับอายุของเอกภพ แต่เอ... แล้วเอกภพนี้มีอายุเท่าไรหนอ แล้วเราจะรู้ได้อย่างไรละ

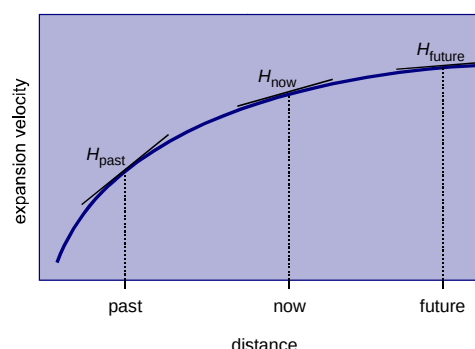
การประมาณอายุของสิ่งที่เราไม่รู้ต้นกำเนิดนั้นยากกว่าการที่ตำรวจนักสืบต้องหาที่มาของวัตถุกระสุนจากรอยบนผนังเสียอีกข้อมูลล่าสุดจากทางดาราศาสตร์บอกเราว่าเอกภพเกิดเมื่อประมาณ 12 ถึง 14 พันล้านปีที่แล้ว นักดาราศาสตร์ประมาณอายุของเอกภพได้หลายวิธีเช่น 1) จากการมองหาดาวที่มีอายุเก่าแก่ที่สุด หรือ 2) การวัดอัตราการขยายตัวของเอกภพแล้วจึงทำการประมาณย้อนกลับไปยังจุดเริ่มต้นวิธีการแรกอาจต้องขึ้นกับโชคพอสมควร ในบทความนี้ ผู้เขียนจะกล่าวถึงแนวคิดและการคำนวณทางคณิตศาสตร์ของวิธีการที่สอง คือเราจะมาดูกันคร่าว ๆ ว่าเขาคำนวณหาอายุของเอกภพกันอย่างไร?

ในส่วนแรกของบทความ ผู้เขียนจะกล่าวถึงการประมาณอายุเอกภพโดยใช้สมมุติฐานที่ง่ายที่สุดก่อน และในส่วนต่อ ๆ มา ก็จะกล่าวถึงการประมาณที่ซับซ้อนและละเอียดขึ้น

A recap: หวนคิดถึงอดีต

ในการประมาณอายุของเอกภพเราใช้ปริมาณที่แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร็วในการขยายตัวของเอกภพ เรียกว่า ค่าคงที่ฮับเบิล H (Hubble constant) แต่ก่อนไปต่อขอแทรกนิยามตรงนี้ว่า “ค่าคงที่” จริงๆ แล้วก็ไม่ได้อิงที่เสียทีเดียว!

เพียงแต่ว่าในช่วงเวลาสั้นๆ เท่านั้น (ดูจากรูปที่ 1 ฮับเบิลได้วัดค่า H ไว้เมื่อราวๆ ปี ค.ศ.1920 และตอนนี้ค่าคงที่ฮับเบิลก็ได้เปลี่ยนไปจากเดิมที่เขาเคยบันทึกไว้แล้วเล็กน้อย)



รูปที่ 1 ค่าคงที่ฮับเบิล (H) ณ เวลาใดๆ[1]

ที่นี้เรามาดูกันว่า ค่าคงที่ฮับเบิลนี้ มีที่มาอย่างไรนานมาแล้ว (แต่ไม่นานเท่าอายุของเอกภพ) เอ็ดวิน ฮับเบิล (Edwin Hubble) วัดแถบสเปกตรัมของแสงที่ถูกปล่อยออกจากกาแล็กซีอันไกลโพ้น (distant galaxy) และพบว่าแถบที่วัดได้จะเลื่อนไปยังแถบสีแดง (red shift) ยิ่งแหล่งกำเนิดแสงอยู่ไกลออกไปมากเท่าไรสเปกตรัมของแสงที่วัดได้ก็ยิ่งเลื่อนออกห่างจากสีแดงมากขึ้นเท่านั้น[2] ฮับเบิลอธิบายการเลื่อนของแถบสเปกตรัมดังกล่าวว่าเกิดจากการที่ “ที่ว่าง”(space) ระหว่างกลุ่มของกาแล็กซีมีระยะมากขึ้นๆหรือกาแล็กซีกำลังเคลื่อนที่ห่างออกจากกันนั่นเอง นั่นก็หมายความว่าเอกภพกำลังขยายตัว ฮับเบิลขยายความต่อดัวยสูตรดังนี้

$$v = Hd \quad (1)$$

ในที่นี้ v คือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของกาแล็กซี d คือ ระยะห่างระหว่างกาแล็กซีถึงโลก(ผู้วัด) และ H คือ ค่าคงที่ฮับเบิล สมมุติว่ากาแล็กซีอันไกลโพ้นหนึ่งกำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v เป็นระยะทาง d คำถามคือ มันจะใช้เวลาในการเคลื่อนที่มานานเท่าไรแล้ว? คำตอบของคำถามนี้จะมีค่าประมาณเท่ากับอายุของเอกภพ!

¹อาจารย์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

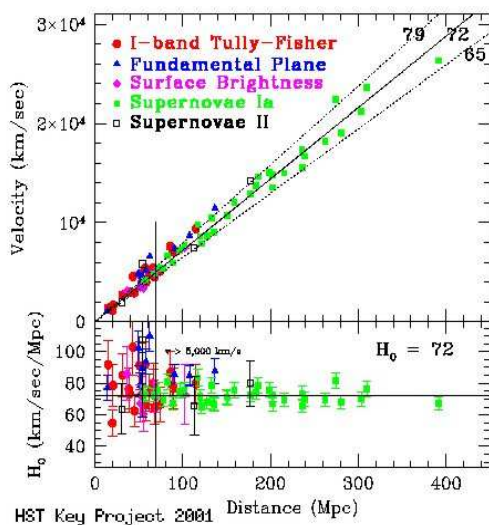
จากคำถามดังกล่าวนี้ เราสามารถคำนวณเวลาด้วยสูตรง่าย ๆ ดังนี้

$$\frac{d}{v} = \frac{1}{H} \quad (2)$$

จะเห็นว่า $1/H$ มีหน่วยเดียวกับเวลา ดังนั้นเมื่อเราทราบ H เราจะสามารถหาอายุจักรวาลได้

แล้วเราจะต้องทำอย่างไรจึงจะสามารถหาค่า H ได้?

คำตอบก็คือ ค่าของ H สามารถคำนวณได้จากชุดข้อมูลซึ่งได้จากการสังเกต ดังตัวอย่างในรูปที่ 2



รูปที่ 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของกาแล็กซีและระยะทาง

Warm up: แบบฝึกหัดที่ไม่ยาก

ขำเลียงมองสมการที่ 2 อีกสักครั้ง ทีนี้ข้อมูลจากกราฟบอกอะไรแก่เรา? โอ้! กราฟบอกเราเป็นนัยว่าความชันมีค่าเท่ากับ H เข้าทางเราแหละคราวนี้! ไม่รอช้า คำนวณความชันกราฟแต่ เอ๊ะ! ตัวเลข 79 72 65 คือค่าอะไร? ไข่แล้วครับ ตัวเลขเหล่านั้นคือค่าความชันของเส้นกราฟแต่ละเส้น ขออนุญาตใช้ค่ากลาง 72 ก็แล้วกัน เหตุผลก็เพราะว่าเมื่อกวาดสายตาลงมาสักนิดเราเห็น $H_0=72$ ค่านี้คือค่าคงที่ฮับเบิลปัจจุบัน (present time, $t=t_0$) (ขณะที่เรากำลังอ่านบทความนี้ ค่า H_0 อาจไม่ใช่ 72 แล้วก็ได้)

เนื่องจากระยะทางในดาราศาสตร์เป็นสเกลที่ใหญ่มาก ๆ จะใช้หน่วยเมตรเห็นทีจะไม่สะดวก ด้วยเหตุผลนี้กระมัง นักดาราศาสตร์จึงบัญญัติหน่วยใหม่ขึ้น คือ พาร์เซก (parsec, pc) ซึ่งระยะทาง 1 พาร์เซกมีค่า(ในหน่วยเมตร)ประมาณ 3.09 ตามด้วย

ศูนย์อีก 16 ตัว (3.09×10^{16} เมตร) เราสังเกตเห็นว่าค่าคงที่ฮับเบิลมีหน่วยเป็น $\text{km} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$

เพื่อให้การเดินทางไปกับบทความนี้ราบรื่นขอแวะพักทบทวนการเปลี่ยนหน่วยกันก่อนเริ่มต้นด้วยการหาความสัมพันธ์ระหว่าง หน่วย วินาที sec และหน่วย ปี yr ทำได้ดังนี้

$$\begin{aligned} 1 \text{ yr} &= 365 \text{ days} \times 24 \frac{\text{hours}}{\text{day}} \times 60 \frac{\text{min}}{\text{hour}} \times 60 \frac{\text{sec}}{\text{min}} \\ &= 3.16 \times 10^7 \text{ sec} \end{aligned}$$

จากคณิตศาสตร์ข้างบนนี้เอง เราสามารถเปลี่ยนหน่วยวินาที ไปเป็นหน่วย ปี หรือหน่วย ปี ไปเป็นหน่วย วินาที กลับไปกลับมาได้ ไม่ยาก ที่แวะพักทบทวนเรื่องการเปลี่ยนหน่วยก็เพราะว่าผลลัพธ์สุดท้ายที่ได้มักจะออกมาในหน่วย วินาที แต่ถ้าใช้หน่วยดังกล่าวแล้ว ตัวเลขจะใหญ่มาๆ แถมเข้าใจได้ยากอีกต่างหาก ดังนั้นนักดาราศาสตร์มักจะคุยกันในหน่วยปี

ออกเดินทางต่อกับแบบฝึกที่ไม่ยากนี้คือ การเปลี่ยนหน่วยของ H_0 ไปเป็นหน่วยที่เราคุ้นเคย ดังนี้

$$\begin{aligned} 1 \text{ km} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1} &= 1 \text{ km} \cdot \text{sec}^{-1} (3.09 \times 10^{19} \text{ km})^{-1} \\ &= 1 \text{ km} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{km}^{-1} (3.09 \times 10^{19})^{-1} \quad (3) \\ &= 3.24 \times 10^{-20} \text{ sec}^{-1} \text{ km} \cdot \text{km}^{-1} \\ &= 3.24 \times 10^{-20} \text{ sec}^{-1} \end{aligned}$$

ในที่นี้ M (เมกะ) เป็นคำอุปสรรคแทน 10^6

ดังนั้น $H_0=72 \text{ km} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ ในหน่วยที่เกี่ยวกับวินาที คือ

$$\begin{aligned} 72 \text{ km} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1} &= 72 \times (3.24 \times 10^{-20}) \text{ sec}^{-1} \quad (4) \\ &= 2.33 \times 10^{-18} \text{ sec}^{-1} \end{aligned}$$

ดูเหมือนตอนนี้เราพร้อมที่จะคำนวณหาอายุของเอกภพกันแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็แค่หาส่วนกลับของ H_0 ดังนี้

$$\begin{aligned} t_0 &= \frac{1}{H_0} = \frac{1}{2.33 \times 10^{-18} \text{ sec}^{-1}} \quad (5) \\ &= 4.29 \times 10^{17} \text{ sec} \end{aligned}$$

เปลี่ยนเป็นหน่วยปี จะได้

$$t_0 = \frac{4.29 \times 10^{17} \text{ sec}}{3.16 \times 10^7 \text{ sec/yr}} = 1.36 \times 10^{10} \text{ yr} \quad (6)$$

นั่นก็หมายความว่าเอกภพในขณะนี้มียุขประมาณ 13.6 พันล้านปี ไม่เลวเลยใช่ไหมหะครับ! ผลที่เราได้สอดคล้องกับตัวเลขที่เขาเชื่อกันอยู่เชียวนะ! สังเกตเห็นว่าผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นหลักพันล้าน (โชคดียิ่งที่เราเกิด มาในสมัยที่มีการคิดค้นเลขยกกำลังเรียบร้อยแล้ว ไม่เช่นนั้นการสื่อสารคงล่าช้ากว่าที่เดียว นั่งเขียนเลข ศูนย์ กันจนเมื่อยมือแย่เลย!)

More Challenges: ตรงนี้แหละ! ทำทาย(กว่า)!

ดูเหมือนว่าการคำนวณของเราที่ผ่านมายังเป็นสมมุติฐานที่ง่ายอยู่ ยังไม่ได้ใช้ความรู้ทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนซักเท่าไร ท่านผู้อ่านอย่าเพิ่งคิดว่ามีเพียงเท่านี้ การวอร์มอัพของเราเป็นเพียงขั้นตอนการเรียกน้ำจิ้ม เอ้ย น้ำย่อย เท่านั้น ที่กล่าวเช่นนั้นก็เพราะว่าการประมาณอายุของเอกภพสามารถคำนวณโดยใช้องค์ประกอบอื่นได้อีกถ้าเปรียบกับการซักผ้าแล้วละก็ ที่ผ่านมางอยู่ในขั้นตอนการนำผ้าลงเครื่องและเปิดน้ำเข้าเครื่อง ต่อจากนี้เราคงพร้อม แล้วที่จะใส่เป่าเอมวอชชีลเวอร์นาโนเพื่อให้ผ้าขาวดังที่ต้องการ

ในหัวข้อนี้เราจะเอาจริงแล้วนะ! เราจะเริ่มใช้สมมุติฐานที่ใกล้เคียงความจริงมากขึ้น กล่าวคือ ที่ว่าเอกภพของเรา หรือสิ่งที่อยู่ระหว่างกาแล็กซีนั้นไม่ได้ว่างเปล่าจนกระทั่งประกอบไปด้วยหลายสิ่ง บ้างก็เคลื่อนที่ช้า ช้ากว่าอัตราเร็วแสงซึ่งก็คือ สสารธรรมดา(matter) บ้างก็เคลื่อนที่เร็วมากๆ เท่ากับอัตราเร็วแสงซึ่งก็คือ คลื่นหรือรังสี (radiation) เป็นต้น

เอกภพมีวิวัฒนาการผ่านมาหลายยุคหลายสมัย โดยมีบางช่วงบางตอนที่ถูกครอบครองโดยสสาร (matter-dominated universe) บางช่วง สิ่งที่เราควบคุมเอกภพก็เป็นคลื่นหรือรังสี (radiation-dominated universe) แล้วตอนนี้กลายเป็นแบบไหน? คำตอบอยู่ที่ผลการประกาศรางวัลโนเบลปี พ.ศ.2554 นั่นนั่นเอง เอกภพในตอนนี้ถูกครอบครองโดยสิ่งที่เราเรียกว่า พลังงานมืด (dark energy)

Setup: หาสูตรกันก่อน

เกริ่นนำมาพอหอมปากหอมคอ มาเข้าเรื่องกันดีกว่า ในบทความนี้ เรายังไม่ได้พูดถึงเครื่องมือหรือเครื่องมือทางคณิตศาสตร์ในการสำรวจเอกภพกันเลย เครื่องมือที่มีความสำคัญมากในเรื่องนี้ก็คือ สมการของฟรีดแมนน์ ผู้เขียนเองได้เขียนบทความเกี่ยวกับเรื่อง

ดังกล่าว ไว้เป็นที่เรียบร้อยแล้ว เพื่อไม่ให้เป็นการเสียเวลาสำหรับพื้นที่ตรงนี้ อยากให้ผู้อ่านหาอ่านเพิ่มเติมจากเอกสารอ้างอิงเอานะครับ[3,4,5]

สมการของฟรีดแมนน์ที่สำคัญสำหรับพื้นที่ตรงนี้ คือ

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{k}{a^2}, \Omega(t) \equiv \frac{\rho(t)}{\rho_{cri}(t)} \quad (7.1)$$

และ

$$\frac{k}{(Ha)^2} = \Omega(t) - 1, \rho_{cri}(t) \equiv \frac{3H^2}{8\pi G} \quad (7.2)$$

ในที่นี้ a คือค่าสเกลแฟกเตอร์ เครื่องหมาย “จุด” บน $a(t)$ แทนอนุพันธ์เทียบกับเวลา ρ คือ ความหนาแน่นพลังงาน (energy density) k เป็นค่าคงที่ คือ -1,0,1 (เป็นค่าคงที่ที่บ่งบอกว่า เอกภพของเราแบนราบหรือไม่ เช่น ถ้า $k=0$ เอกภพแบนราบ) และ G คือ ค่าคงที่ความโน้มถ่วงสากล (universal gravitational constant) มี ค ่า เ ท ่า กั บ $6.67 \times 10^{-11} \text{Nm}^2\text{kg}^{-2}$ ค ่า ห น ด ใ ห้ $a_0 = a(t=t_0) = 1$ จากสมการ (7.2) เราพบว่า

$$k = H_0^2(\Omega_0 - 1), \rho_{cri,0} = \frac{3H_0^2}{8\pi G} \quad (8)$$

แทนสมการ (8) ลงในสมการ (7.1) เราจะได้

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{H_0^2(\Omega_0 - 1)}{a^2} \quad (9)$$

ใช้ $H = \dot{a}/a$ และหารสมการข้างบนตลอดด้วย H_0^2 เราสามารถเขียนสมการ (9) ได้เป็น

$$\frac{H(t)^2}{H_0^2} = \frac{\rho(t)}{\rho_{cri}(t)} - \frac{(\Omega_0 - 1)}{a^2} \quad (10)$$

เรารู้ดีว่าเอกภพของเราไม่ได้ว่างเปล่า ดังนั้นเราจึงเขียนสมการ (10) ในแบบทั่วไปดังนี้

$$\frac{H(t)^2}{H_0^2} = \sum_{\alpha=R,M,\Lambda,\dots} \frac{\rho_\alpha(t)}{\rho_{cri}(t)} - \frac{(\Omega_0 - 1)}{a^2} \quad (11)$$

เราใช้เครื่องหมาย Σ รวมทุกองค์ประกอบที่มีอยู่ในเอกภพ (สสาร คลื่น และรังสีต่างๆ เป็นต้น) ตัวอย่าง เช่น

- ความหนาแน่นของพลังงานในช่วงที่สสารครอบครอง เอกภพแปรผกผันกับกำลังสามของสเกลแฟกเตอร์ $\rho_M = \rho_{M,0}a^{-3}$

- ความหนาแน่นของพลังงานในช่วงที่คลื่นหรือรังสี
ครอบครองเอกภพแปรผกผันกับกำลังสี่ของสเกลแฟก
เตอร์ $\rho_R = \rho_{R,0} a^{-4}$
- ความหนาแน่นของพลังงานในช่วงที่ค่าคงที่จักรวาล
วิทยาครอบครองเอกภพมีค่าคงที่
 $\rho_\Lambda = \rho_{\Lambda,0} = \text{constant}$ เป็นต้น

หลังจากรวมทุกอย่างองค์ประกอบข้างต้นในสมการ (11) เราจะได้

$$\frac{H(t)^2}{H_0^2} = \frac{\Omega_{M,0}}{a^3} + \frac{\Omega_{R,0}}{a^4} + \Omega_{\Lambda,0} + \frac{(1-\Omega_0)}{a(t)^2} \quad (12)$$

ในที่นี้

$$\Omega_{M,0} = \frac{\rho_{M,0}}{\rho_{cri,0}}, \Omega_{R,0} = \frac{\rho_{R,0}}{\rho_{cri,0}}, \quad (13)$$

$$\Omega_{\Lambda,0} = \frac{\rho_{\Lambda,0}}{\rho_{cri,0}}, \Omega_0 = \Omega_{M,0} + \Omega_{R,0} + \Omega_{\Lambda,0} \quad (14)$$

แลมดา (Λ) แทนค่าคงที่เอกภพวิทยา ทั้งนี้เราเชื่อกันว่า แลมดา
เป็นค่าความหนาแน่นพลังงานคงที่ซึ่งกระจายอยู่ในอวกาศอย่าง
สม่ำเสมอ ผลจากการสังเกตและทดลองบอกเราว่า Ω_0 มีค่าเข้า
ใกล้ 1 มากๆ

ต่อไปคูณสมการ (12) ด้วย a^2 ตลอด จากนั้นถอดรากที่
สองของผลที่ได้ เราพบว่าสมการ (12) เปลี่ยนเป็น

$$H_0^{-1} \dot{a}(t) = \sqrt{\frac{\Omega_{M,0}}{a(t)} + \frac{\Omega_{R,0}}{a(t)^2} + \Omega_{\Lambda,0} a(t)^2 + (1-\Omega_0)} \quad (15)$$

มาถึงขั้นตอนสุดท้ายที่เราต้องหาผลเฉลยของสมการ (15) โดยการ
อินทิเกรต จะได้

$$t = H_0^{-1} \int_0^{a(t)} \frac{da}{\sqrt{\frac{\Omega_{M,0}}{a(t)} + \frac{\Omega_{R,0}}{a(t)^2} + \Omega_{\Lambda,0} a(t)^2 + (1-\Omega_0)}} \quad (16)$$

ปัญหาของเราตอนนี้คือเราเจอกับคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นมิตรเอา
เสียเลย พุดง่าย ๆ คือเราแทบไม่สามารถหาคำตอบที่อยู่ในรูป
ฟังก์ชันที่เรารู้จักได้ เอาเข้าจริงๆ เราก็ต้องหันหน้าไปพึ่งวิธีการเชิง
ตัวเลขเข้ามาช่วย อืม แต่ว่าถ้าเราไม่อยากจะใช้วิธีเชิงตัวเลข เราจะ
ทำอย่างไร

จริงๆ แล้วเรายังอาจทำให้สมการที่ (16) ง่ายขึ้นได้โดย
การประมาณซึ่งนักฟิสิกส์ทำกันบ่อยถ้าทำได้ในที่นี้เราสามารถ
ประมาณได้ใน 3 แบบต่อไปนี้

รังสีครอบครองเอกภพ: radiation only

สถานการณ์ของเราตอนนี้คือเราต้องการประมาณหาผล
เฉลยของสมการ (16) โดยเริ่มต้นสมมุติก่อนว่า เอกภพถูก
ครอบครองด้วยรังสีหรือคลื่นมากกว่าถูกครอบครองด้วยสสารและ
ค่าคงที่ของเอกภพอยู่มาซึ่งทำให้ในกรณีนี้ สมการ (16) ลดรูปได้
เป็น

$$t = H_0^{-1} \int_0^{a(t)} \frac{da}{\sqrt{\frac{\Omega_{R,0}}{a(t)^2} + (1-\Omega_0)}} \quad (17)$$

กำหนดให้ $a_0 = a(t=t_0) = 1$ เราทราบความสัมพันธ์ระหว่าง
red shift z (ซึ่งเป็นค่าที่เราวัดได้) และ สเกลแฟกเตอร์ $a(t)$ ว่าเป็น
 $1+z = 1/a$ ดังนั้นเราสามารถเขียนสมการ (17) ในเทอม z ได้
ดังนี้

$$t = H_0^{-1} \int_0^{(1+z)^{-1}} \frac{da}{\sqrt{\Omega_0 a^{-2} + 1 - \Omega_0}}, \quad \Omega_{R,0} = \Omega_0 \quad (18)$$

สังเกตได้ว่าสเกลเวลาของอายุเอกภพถูกกำหนดด้วย H_0^{-1} ผลเฉลย
ของสมการ (18) ในเทอมของ z และ Ω_0 คือ [3]

$$t = H_0^{-1} \frac{\sqrt{\Omega_0(1+z)^2} - \sqrt{\Omega_0(1+z)^2 - \Omega_0 + 1}}{(\Omega_0 - 1)(1+z)} \quad (19)$$

เรารู้ได้ว่า Ω_0 มีค่าใกล้ 1 มากๆ อาศัยเงื่อนไขนี้กระจายสมการ(19)
รอบ $\Omega_0 = 1$ ในการหาอายุปัจจุบันของเอกภพเรากำหนดค่า
 $z = 0$ เราพบว่าอายุปัจจุบันของเอกภพในกรณีนี้ คือ [3]

$$t_0 \approx \frac{1}{2} H_0^{-1} \left[1 - \frac{1}{4} (\Omega_0 - 1) + \dots \right] \quad (20)$$

จากสมการ (19) เราใช้เงื่อนไข $1+z \gg \Omega_0^{-1}$ ประมาณหาเวลา
ในช่วงต้นๆ t (early time) และพบว่า [3]

$$t \approx \frac{1}{2} (1+z)^{-2} H_0^{-1} \Omega_0^{-1/2} \quad (21)$$

ในกรณีนี้ พิจารณาสมการ (20) ถ้า Ω_0 มีค่าใกล้ 1 มากๆ อายุ
ปัจจุบันของเอกภพมีค่าประมาณ $H_0^{-1} / 2$ เมื่อใช้ค่า
 $H_0 = 72 \text{ km} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ เราพบว่าอายุปัจจุบันของเอกภพ
สำหรับกรณีนี้มีค่าประมาณ 6.8 พัน ล้านปี

สสารครอบครองเอกภพ: matter only

สำหรับกรณีนี้ เราสมมุติว่าจักรวาลของเรามีสสาร
มากกว่าอย่างอื่นมากๆ ขั้นตอนของการคำนวณก็คล้ายๆกับแบบ
แรก จากสมการ(16) เราจะได้

$$t = H_0^{-1} \int_0^{a(t)} \frac{da}{\sqrt{\left[\frac{\Omega_{M,0}}{a(t)} + (1 - \Omega_0) \right]}} \quad (22)$$

กำหนดให้ $a_0 = a(t=t_0)=1$ กับความสัมพันธ์ระหว่าง z เหมือนเคย และได้ว่า

$$t = H_0^{-1} \int_0^{(1+z)^{-1}} \frac{da}{\sqrt{\Omega_0 a^{-1} + (1 - \Omega_0)}}, \quad \Omega_{M,0} = \Omega_0 \quad (23)$$

พิจารณากรณีที่ Ω_0 มีค่ามากกว่า 1 ผลของการอินทิเกรตสมการ (23) คือ [3]

$$t = H_0^{-1} \frac{\Omega_0}{2(\Omega_0 - 1)^{3/2}} \times \left[\cos^{-1} \left(\frac{\Omega_0 z - \Omega_0 + 2}{\Omega_0 z + \Omega_0} \right) - \frac{2(\Omega_0 - 1)^{1/2} (\Omega_0 z + 1)^{1/2}}{\Omega_0 (1 + z)} \right], \quad \Omega_0 > 1 \quad (24)$$

ส่วนกรณีที่ Ω_0 มีค่าเท่ากับ 1 ผลของการอินทิเกรตสมการ (23) คือ

$$t = \frac{2}{3} H_0^{-1} (1 + z)^{-3/2}, \quad \Omega_0 = 1 \quad (25)$$

กำหนดค่า $z=0$ เราพบว่า

$$t_0 = H_0^{-1} \frac{\Omega_0}{2(\Omega_0 - 1)^{3/2}} \times \left[\cos^{-1} (2\Omega_0^{-2} - 1) - \frac{2(\Omega_0 - 1)^{1/2}}{\Omega_0} \right] \quad (26)$$

$$t_0 = \frac{2}{3} H_0^{-1}, \quad \Omega_0 = 1 \quad (27)$$

เราเห็นว่า Ω_0 มีค่าใกล้ 1 มากๆ อาศัยเงื่อนไขนี้กระจายสมการ (26)

รอบ $\Omega_0 = 1$ ในการหาอายุปัจจุบันของ

เอกภพเรากำหนดค่า $z=0$ เราพบว่าอายุปัจจุบันของเอกภพในกรณีนี้ คือ [3]

$$t_0 \approx \frac{2}{3} H_0^{-1} \left[1 - \frac{1}{5} (\Omega_0 - 1) + \dots \right] \quad (28)$$

จากสมการ (24) เราใช้เงื่อนไข $1+z \gg \Omega_0^{-1}$ ประมาณหาเวลาในช่วงต้นๆ t (early time) และพบว่า [3]

$$t \approx \frac{2}{3} (1+z)^{-3/2} H_0^{-1} \Omega_0^{-1/2} \quad (29)$$

ในกรณีนี้ พิจารณาสมการ (26) ถ้า Ω_0 มีค่าใกล้ 1 มากๆ อายุปัจจุบันของเอกภพมีค่าประมาณ $2H_0^{-1}/3$

เมื่อใช้ค่า $H_0 = 72 \text{ km} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ เราพบว่าอายุปัจจุบันของเอกภพสำหรับกรณีนี้มีค่าประมาณ 9.1 พันล้านปี

สสารและค่าคงที่เอกภพวิทยา: Matter and cosmological constant

ตัวอย่างสุดท้าย เราคิดว่าเอกภพถูกรอบครองด้วยสสาร และค่าคงที่เอกภพวิทยานอกจากนั้นแล้วเรา สมมติด้วยว่าเอกภพมีลักษณะแบบแบนราบ นั่นคือ จากสมการ (7) พิจารณาในกรณีที่ $k=0$ ดังนั้น เราพบว่าสมการ (7) เปลี่ยนรูปเป็น

$$\frac{H(t)^2}{H_0^2} = \frac{\Omega_{M,0}}{a^3} + (1 - \Omega_{M,0}), \quad \Omega_{\Lambda,0} = 1 - \Omega_{M,0} \quad (30)$$

ใช้วิธีการเดียวกันกับตัวอย่างข้างต้น เราสามารถจัดรูปสมการ (30) ได้ดังนี้

$$t = H_0^{-1} \int_0^{(1+z)^{-1}} \frac{da}{\sqrt{\Omega_{M,0} a^{-1} + (1 - \Omega_{M,0}) a^2}} \quad (31)$$

หลังจากอินทิเกรต เราพบว่า [4]

$$t = H_0^{-1} \frac{2}{3\sqrt{1 - \Omega_{M,0}}} \ln \left[\left(\frac{a}{a_{M\Lambda}} \right)^{3/2} + \sqrt{1 + \left(\frac{a}{a_{M\Lambda}} \right)^3} \right] \quad (32)$$

ในที่นี้

$$a_{M\Lambda} = \left(\frac{\Omega_{M,0}}{\Omega_{\Lambda,0}} \right)^{1/3} = \left(\frac{\Omega_{M,0}}{1 - \Omega_{M,0}} \right)^{1/3} \quad (33)$$

ในกรณีนี้ เราสามารถคำนวณอายุของเอกภพได้โดยอาศัยสมการ (32) โดยพิจารณาที่ $a_0 = a(t=t_0)=1$ อายุปัจจุบันของเอกภพ t_0 คือ

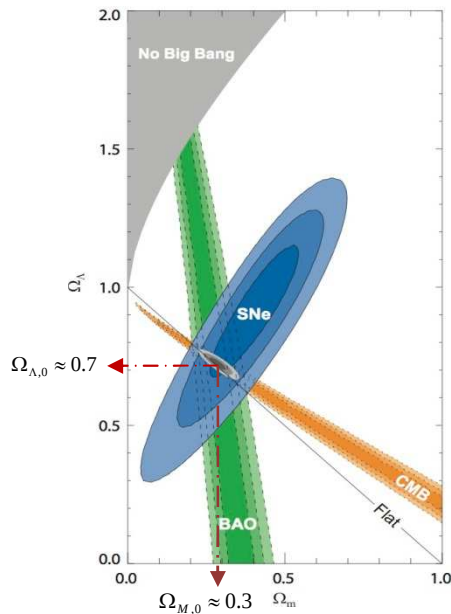
$$t_0 = H_0^{-1} \frac{2}{3\sqrt{1 - \Omega_{M,0}}} \ln \left[\frac{\sqrt{1 - \Omega_{M,0}} + 1}{\sqrt{\Omega_{M,0}}} \right] \quad (34)$$

เราสามารถคำนวณออกมาเป็นตัวเลขได้ก็ต่อเมื่อทราบค่า $\Omega_{M,0}$ ซึ่งต้องอาศัยผลจากการทดลอง โชคดีที่ เรามีผลดังกล่าวแล้ว

[8]งานที่ค้างอยู่ตอนนี้จึงมีเพียงแทนค่าดังกล่าวลงไป ในสมการ (34) โดยการอ่านค่า $\Omega_{M,0}$ จากรูปที่ 3 กล่าวคือ รูปที่ 3 แสดงข้อมูล $\Omega_{M,0}$ และ $\Omega_{\Lambda,0}$ ที่วัดได้จาก BAO SNe และ CMB เราเลือกใช้ค่าของ $\Omega_{M,0}$ ตรงบริเวณที่ BAO SNe และ CMB ให้ผลสอดคล้องกัน (contour ทับกัน) และพบว่า $\Omega_{M,0} = 0.3$ ดังนั้น

$$t_0 = 0.964 H_0^{-1} \quad (35)$$

หากเราใช้ค่า $H_0 = 72 \text{ km} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ เราพบว่าอายุปัจจุบันของเอกภพในกรณีนี้มีค่าประมาณ 13.1 พันล้านปี (ในเอกสารอ้างอิงที่ 4 จะใช้ $H_0 = 70 \text{ km} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ ซึ่งจะได้ค่า $t_0 = 13.5$ พันล้านปี)



รูปที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\Omega_{\Lambda,0}$ และ $\Omega_{M,0}$

บทสรุปของบทความ

เราได้คำนวณหาอายุของเอกภพตามองค์ประกอบที่เป็นไปได้ ผู้เขียนคาดหวังเล็กๆว่าบทความนี้จะสามารถไขความสงสัยให้ผู้อ่านในเรื่องดังกล่าวได้บ้าง ผลการคำนวณที่ได้กล่าวไว้นั้น อาจทำให้เราเกิดความสงสัยยิ่งขึ้นไปอีก เหตุผลก็คือว่า แล้วแบบไหนละคือโมเดลที่ถูกต้อง? อย่างที่ได้จั่วหัวไว้ตั้งแต่ต้นว่า ปัจจุบันเราเชื่อว่าจักรวาลมีอายุราวๆ 12 ถึง 14 พันล้านปี แม้ผลการคำนวณของเราในบางจุดจะทำให้เราใจชื้นขึ้นมาได้บ้างเพราะค่าที่ได้อยู่ในช่วงดังกล่าว แต่ถึงกระนั้นก็ตาม วัตถุประสงค์ของผู้เขียนคือเสนอหรือชี้แนะแนวทางของการคำนวณเท่านั้นเพราะที่จริงแล้วเรายังต้องรวมทุกอย่างองค์ประกอบซึ่งเราเพิ่มองค์ประกอบมาก

ขึ้น ก็ยังดูเหมือนเราจะได้ค่าที่เราพอใจมากยิ่งขึ้น ดังจะเห็นได้จากโมเดลสุดท้ายของเรา

นอกจากนี้แล้ว ยังมีการคำนวณที่นอกเหนือจากที่ได้กล่าวไว้บทความนี้โดยการใช้องค์ประกอบ เช่น [4]

- สสาร + ($k \neq 0$) + ค่าคงที่จักรวาลวิทยา
- รังสีหรือคลื่น + สสาร เป็นต้น

ถ้าจะให้ฟันธงตอนนี้ก็คงยาก เพราะความรู้เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ตัวอย่างได้แก่ นิวตรอนและโปรตอน เราเคยเชื่อว่าอนุภาคทั้งสองนั้นเป็นอนุภาคมูลฐาน (อนุภาคที่ไม่มีโครงสร้างย่อยภายใน) ซึ่งตำราเรียน ในเมืองไทยก็ยังคงเขียนอย่างนั้น ภายหลังจากการค้นพบ ควาร์ก (quark) ทำให้เรารู้ว่า นิวตรอนและโปรตอน ไม่ใช่อนุภาคมูลฐานอีกต่อไป แต่โปรตอนและนิวตรอนประกอบไปด้วยควาร์กสามตัว ดังนั้น คงต้องรอดูกันต่อไปว่าจะมีหลักฐานหรือข้อมูลใหม่ที่เจาะมาลบความรู้เดิมๆหรือไม่

เอกสารอ้างอิง

- [1] นำมาจาก *Physics World*, July 1999
- [2] อ่านเพิ่มเติมได้จากบทความเรื่อง “เราเข้าใจจักรวาลดีแค่ไหน?” เขียนโดย พงษ์พิชิต จันทรนุ้ยและอรุณี ชูนาว่า วารสารฟิสิกส์ไทย ปีที่ 28 ฉบับที่ 2: มิถุนายน 2554 - สิงหาคม 2554 หน้า 24-28
- [3] Edward W. Kolb and Michael S. Turner, “*The Early Universe*” (Addison-Wesley, 1990)
- [4] Barbara Ryden, “*Introduction to cosmology*” (Addison-Wesley, 2003)
- [5] Phongpichit Channuie, “*Dynamical Origin of Inflation*”, PhD thesis (in preparation)
- [6] อ่านเพิ่มเติมได้จากบทความเรื่อง “มารู้จักจักรวาลแบบพองตัวกันเถอะ!: ตอนแรก” เขียนโดย พงษ์พิชิต จันทรนุ้ย และอรุณี ชูนาว่า
- [7] อ่านเพิ่มเติมได้จากบทความเรื่อง “มารู้จักจักรวาลแบบพองตัวกันเถอะ!: ตอนจบ” เขียนโดย พงษ์พิชิต จันทรนุ้ย และอรุณี ชูนาว่า
- [8] M. Kowalski, et al., “*Supernova Cosmology Project Collaboration: Improved Cosmological Constraints from New, Old and Combined Supernova Datasets*” *Astrophys. J.* **686** (2008) 749

STEM กับ ฟิสิกส์สู่ประยุท (IYPT)

นฤมล สุวรรณจันทร์¹

ในวงการศึกษานี้ต่างก็พูดถึง STEM ในหลากหลายแง่มุม STEM คืออะไร ถ้าถามชาวบ้านทั่วไปที่พอมีความรู้ภาษาอังกฤษอยู่บ้างก็จะได้คำตอบว่า "ลำดับ" หรือ สเต็มเซลล์ทำให้หน้าแดง แต่ถ้าถามนักการศึกษาที่อาจจะได้คำตอบว่า "การสอนแบบบูรณาการ ซึ่งน่าจะเป็นคำย่อของอะไรสักอย่าง" และเมื่อถามต่อไปว่า ถ้า STEM คือคำย่อ น่าจะมาจากคำใดบ้าง คำตอบหนึ่งคือ "Science, Technology, Education and Mathematics" แต่ก็ไม่ได้ถูกต้องเสียทีเดียว เพราะ STEM นั้นย่อมาจาก "Science, Technology, Engineering and Mathematics" โดย Science นี้ประกอบด้วยหลากหลายสาขาทางวิทยาศาสตร์ เช่น เคมี ชีววิทยา ฟิสิกส์ ธรณีวิทยา และอื่นๆ ซึ่งหลายๆ ประเทศให้ความสนใจจัดตั้ง STEM Education ขึ้นมา เราลองมาดูกันว่า STEM Education นั้นมีความน่าสนใจอย่างไร

STEM Education คืออะไร

STEM Education [1-5] คือ การบูรณาการเพื่อนำความรู้ในวิชาวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี วิศวกรรมศาสตร์ และคณิตศาสตร์ มาประยุกต์ใช้เพื่อหาคำตอบของปัญหา โดยมีเป้าหมายเพื่อให้ผู้เรียนพัฒนาทักษะ ความรู้ ความสามารถในการแก้ปัญหา หรือเพื่อให้ผู้เรียนคิดเป็นและทำเป็น นั่นเอง

ในประเทศสหรัฐอเมริกาซึ่งถือเป็นต้นกำเนิดของ STEM นั้นมีที่มาจากบัณฑิตที่จบการศึกษาไม่สามารถทำงานที่ใช้เทคโนโลยีระดับสูงได้ (high technology jobs) ปัญหานี้อาจเป็นผลมาจากการเรียนการสอนในแต่ละสาขาที่แยกกันอย่างชัดเจนหรือแยกความรู้เป็นส่วนๆ แบบต่างคนต่างสอน หรือวิชาใดวิชาหนึ่ง ฟิสิกส์ก็สอนแต่ฟิสิกส์ เคมีก็สอนเฉพาะเคมี คณิตศาสตร์ก็สอนแต่คณิตศาสตร์ โดยไม่เน้นการเรียนที่ใช้ความรู้ด้านวิศวกรรมศาสตร์มากนัก และไม่มีการนำความรู้ด้านต่างๆ มาบูรณาการเพื่อใช้แก้ปัญหา เมื่อบัณฑิตจบออกไปจึงไม่สามารถนำความรู้ที่ได้เรียนมาแก้ปัญหาในชีวิตจริงได้ รัฐบาลประเทศสหรัฐอเมริกาจึงได้มีนโยบายการศึกษาที่จะส่งเสริมการเรียนการ

สอนให้มีลักษณะเป็นแบบบูรณาการ โดยเน้นความรู้ด้านวิศวกรรมศาสตร์มากขึ้น เพื่อยกระดับคุณภาพของบัณฑิตในประเทศ และมุ่งเน้นไปที่ผู้เรียนในระดับมัธยมศึกษาที่จะต้องมีความรู้ด้านวิศวกรรมเพิ่มเติมขึ้นมา และทำต่อเนื่องไปในระดับอุดมศึกษา เพื่อให้ผู้เรียนเหล่านั้นคุ้นเคยกับการบูรณาการวิชาทั้งสี่สาขา และสามารถนำความรู้ไปต่อยอดหรือแก้ปัญหาเมื่อทำงานต่อไป จะสังเกตเห็นได้ว่า STEM ในประเทศสหรัฐอเมริกา นั้น ได้รับการสนับสนุนอย่างมากจากองค์การนาซาซึ่งเป็นหน่วยงานที่ต้องการผู้มีความรู้ความสามารถในทุกด้านของ STEM

สำหรับประเทศไทย STEM อาจจะเป็นคำใหม่ และมีการตีความได้หลากหลายตามแต่ผู้สนใจ เนื่องจากไม่ได้นิยามตายตัวว่าหมายถึงอะไร บางท่านอาจตีความว่าเป็นหลักสูตรการศึกษาที่นำความรู้ด้านวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ เทคโนโลยี และคณิตศาสตร์มาบูรณาการเพื่อตอบโจทย์ปัญหา บางท่านอาจเห็นว่ามันคือกระบวนการเรียนรู้ซึ่งต้องบูรณาการความรู้ทั้งสี่สาขาเพื่อแก้ปัญหา อย่างไรก็ตามไม่ว่าจะเป็นหลักสูตรหรือกระบวนการต่างก็มุ่งหวังสิ่งเดียวกัน นั่นคือ การบูรณาการความรู้ทั้งสี่สาขาเข้าด้วยกัน ไม่ใช่แต่ละสาขามีวิธีการสอนโดยไม่มีความสัมพันธ์กัน

เป้าหมายของ STEM Education

จากที่กล่าวแล้วว่า STEM Education คือ การบูรณาการความรู้ทางด้านวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ เทคโนโลยี และคณิตศาสตร์ โดยมีเป้าหมายหลัก คือ พัฒนาศักยภาพของผู้เรียนให้สามารถนำความรู้ที่มีไปใช้แก้ปัญหาในชีวิตจริงได้ ให้ผู้เรียนคิดเป็น ทำเป็น แก้ปัญหาเป็น วิเคราะห์เป็น เนื่องจากทักษะดังกล่าวคือ เป้าหมายหลักของผู้จ้างงานทั่วไป ความรู้ด้านทฤษฎีในตำราบางครั้งไม่สามารถแก้ปัญหาในชีวิตจริงได้ เพราะผู้เรียนไม่เคยได้รับการฝึกฝนให้นำความรู้ไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาเชิงบูรณาการ

ถ้าเช่นนั้นแล้ว เราจะมีวิธีหรือกระบวนการใดที่จะ

¹ อาจารย์ (ดร.) ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สามารถช่วยสนับสนุน ส่งเสริมให้เด็กไทยของเรามีโอกาสเข้าถึง STEM Education ได้บ้าง ผู้เขียนมีโอกาสสัมผัสและมีส่วนร่วมในกิจกรรมอย่างหนึ่งซึ่งน่าจะเป็นตัวอย่างหนึ่งของ STEM Education ได้ จึงขอถือโอกาสนี้แลกเปลี่ยนความคิดเห็นเกี่ยวกับ STEM Education ในแง่มุมของกิจกรรมที่เรียกว่า IYPT หรือในชื่อภาษาไทยว่า ฟิสิกส์สัประยุทธ์ ซึ่งเป็นการแข่งขันที่ใช้ความรู้ทางด้านวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ เทคโนโลยี และคณิตศาสตร์ โดยนำความรู้ด้านทฤษฎีในศาสตร์ต่างๆ ดังกล่าวมาบูรณาการเพื่อหาคำตอบหรืออธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ ผ่านการทดลองทางวิทยาศาสตร์ ทำให้เกิดกระบวนการคิดอย่างมีเหตุมีผล และเป็นระบบ อีกทั้งอาจเป็นจุดเริ่มในการคิดเพื่อสร้างนวัตกรรมใหม่ๆ ซึ่งนับว่าสอดคล้องกับ STEM Education เป็นอย่างมาก

ฟิสิกส์สัประยุทธ์

ฟิสิกส์สัประยุทธ์ หรือ International Young Physicists' Tournament (IYPT) [6, 7] เป็นการแข่งขันวิชาฟิสิกส์ของนักเรียนในระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากประเทศต่างๆ ทั่วโลก โดยแข่งขันเป็นทีมๆ ละ 3-5 คน โดยนำเสนอเป็นภาษาอังกฤษ แข่งรอบละ 3 ทีม โดยแต่ละทีมจะทำหน้าที่ต่างกันในแต่ละรอบ โจทย์ปัญหาปลายเปิดจำนวน 17 ข้อ จะถูกประกาศล่วงหน้าเป็นเวลา 1 ปี โดยเป็นโจทย์ปัญหาที่จะต้องทำการทดลองเพื่อหาคำตอบ จึงเน้นที่การทำการทดลองเป็นหลัก ตัวอย่างเช่น ให้นักเรียนสร้างเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูงสุด หรือศึกษาตัวแปรหรือปัจจัยที่มีผลต่อปรากฏการณ์ที่ต้องการให้ศึกษา เนื่องจากเป็นโจทย์ปัญหาปลายเปิด คำตอบจึงมีได้หลากหลาย ขึ้นกับมุมมอง วิธีการในการแก้ปัญหา และวิธีการในการศึกษา โจทย์ปัญหาทั้งหมดไม่สามารถได้คำตอบจากการคิดคำนวณเพียงอย่างเดียว แต่ต้องทำการทดลองจริงเพื่อศึกษาตัวแปรหรือปัจจัยที่เกี่ยวข้อง โดยนักเรียนจะเริ่มจากการสืบค้นข้อมูลและตัดสินใจว่าข้อมูลที่ได้มามีความน่าเชื่อถือเพียงใด ศึกษาตัวแปรหรือปัจจัยที่เกี่ยวข้อง สร้างอุปกรณ์หรือเครื่องมือ วางแผนและออกแบบการทดลอง เก็บข้อมูล วิเคราะห์และสรุปผล ซึ่งมีลักษณะการทำงานคล้ายกับงานวิจัยของนักวิทยาศาสตร์ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า การแก้โจทย์ปัญหา IYPT นี้ มีลักษณะคล้ายกับการเรียนการสอนแบบ Problem Based Learning นอกจากนั้น ขั้นตอนและกระบวนการในการแก้โจทย์ปัญหาเหล่านี้ นับเป็นก้าวแรกของการทำงานวิจัย

หลังจากที่นักเรียนแต่ละทีมได้หาคำตอบสำหรับโจทย์ปัญหาทั้ง 17 ข้อเป็นเวลาประมาณ 1 ปีแล้ว เมื่อถึงกำหนดจัดการแข่งขัน ในแต่ละรอบของการแข่งขันจะแบ่งเป็น 3 ฝ่าย

1. ฝ่ายแรก (ฝ่ายนำเสนอ หรือ reporter) นำเสนอสิ่งที่ได้ศึกษามา เริ่มตั้งแต่กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ การออกแบบการทดลอง ผลการทดลอง การวิเคราะห์ผลซึ่งต้องแสดงให้เห็นความสอดคล้องระหว่างผลการทดลองของตนเองและทฤษฎีที่ใช้

2. เมื่อนำเสนอจบ ฝ่ายที่สอง (ฝ่ายซักค้าน หรือ opponent) จะซักค้าน โดยตั้งคำถามและนำอภิปรายเกี่ยวกับสิ่งที่ฝ่ายนำเสนอได้ทำการทดลองมา ความน่าเชื่อถือของทฤษฎีที่ฝ่ายนำเสนอใช้ ตัวแปรหรือปัจจัยที่เกี่ยวข้องว่าเหมาะสมหรือไม่ความเป็นไปได้ของผลการทดลอง ความสอดคล้องระหว่างผลการทดลองและทฤษฎี

3. เมื่อซักค้านจบ ฝ่ายที่สาม (ฝ่ายวิพากษ์ หรือ reviewer) จะวิพากษ์ทั้งฝ่ายนำเสนอและฝ่ายซักค้าน โดยตั้งคำถามทั้งสองฝ่าย และวิจารณ์แต่ละฝ่ายว่ามีจุดเด่นและจุดด้อยใดบ้าง รวมทั้งกล่าวสรุปประเด็นที่ทั้งสองฝ่ายอภิปราย

นักเรียนจะทำหน้าที่ทั้งสามฝ่ายได้ดีก็ต่อเมื่อ มีความรู้และความเข้าใจในการทดลองเป็นอย่างดี ทั้งในด้านทฤษฎี และเทคนิคในการทำการทดลอง เพื่อจะสามารถเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของการทำการทดลอง ทฤษฎีและผลการทดลองที่ฝ่ายอื่นนำเสนอได้ว่ามีความเกี่ยวข้อง สอดคล้องหรือขัดแย้งกันหรือไม่อย่างไร

ความยากง่ายของการแก้โจทย์ปัญหา IYPT นี้ จะขึ้นกับผู้ศึกษาเป็นหลัก หากเป็นนักเรียนในระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย อาจแก้โจทย์ปัญหาในลักษณะที่ไม่ซับซ้อนมากนัก เนื่องจากยังมีความรู้ไม่มากพอ ตัวแปรที่ศึกษาก็มีจำนวนน้อยกว่า เครื่องมือที่ใช้ก็สามารถหาได้ง่าย แต่หากต้องการศึกษาในระดับลึกมากขึ้น เช่นเดียวกับงานวิจัย ก็ต้องใช้พื้นฐานความรู้ในระดับที่สูงขึ้น และใช้อุปกรณ์หรือเครื่องมือที่มีความละเอียดแม่นยำสูงขึ้น โจทย์เหล่านี้สามารถเป็นหัวข้อโครงงานวิทยาศาสตร์ หรือแม้กระทั่งหัวข้อวิทยานิพนธ์ก็ได้เช่นกัน

เมื่อลองวิเคราะห์ลักษณะของโจทย์ปัญหาสำหรับการแข่งขัน IYPT พบว่าสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลักๆ ได้แก่

1. การสร้างอุปกรณ์หรือเครื่องมือให้มีประสิทธิภาพสูงสุด
2. การศึกษาตัวแปรหรือปัจจัยในปรากฏการณ์ต่างๆ

ตัวอย่างโจทย์เกี่ยวกับการสร้างอุปกรณ์หรือเครื่องมือ

โจทย์ปัญหา IYPT ปี 2012 เรื่อง โคมลอย

โคมลอย (หรือที่คนไทยรู้จักกันในชื่อ โคมยี่เป็ง) ที่ทำจากกระดาษลอยได้โดยใช้เทียนไข 1 เล่ม จงออกแบบและสร้างโคมลอยซึ่งใช้เทียนไขเพียง 1 เล่ม เพื่อให้ลอยขึ้นไปเป็นระยะ 2.5 เมตร โดยใช้เวลาน้อยที่สุด (เริ่มต้นจับเวลาตั้งแต่เริ่มจุดเทียน) จงสืบเสาะปัจจัยที่เกี่ยวข้อง



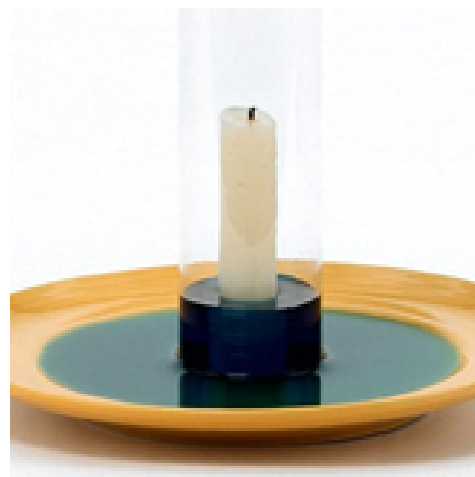
รูปที่ 1 ประเพณีลอยโคมยี่เป็ง

การแก้โจทย์ปัญหานี้ นักเรียนจะต้องออกแบบโคมลอยรูปทรงต่างๆ (ใช้ความรู้คณิตศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์) เช่น ทรงกลม ทรงรี หรือลูกบาศก์ ซึ่งมีปริมาตรใกล้เคียงกัน ทำเทียนเอง (ใช้ความรู้เคมี) หาวิธีเพิ่มความร้อนให้กับอากาศร้อนภายในโคม และศึกษาการเคลื่อนที่ของอากาศร้อน-เย็นภายในและภายนอกของโคมลอย (ใช้ความรู้ฟิสิกส์) ออกแบบการทดลองกำหนดตัวแปรหรือปัจจัยที่จะศึกษา เก็บและบันทึกข้อมูลวิเคราะห์ข้อมูล และสรุปผลที่ได้จากการทดลอง ขั้นตอนเหล่านี้เน้นกระบวนการคิดแบบนักวิทยาศาสตร์ และเน้นการบูรณาการศาสตร์ต่างๆ

ตัวอย่างโจทย์เกี่ยวกับการศึกษาตัวแปรหรือปัจจัย

โจทย์ปัญหา IYPT ปี 2013 เรื่อง น้ำขึ้น

เติมน้ำในจานและนำเทียนไขวางตั้งในแนวตั้งตรงกลางจาน จากนั้นจุดเทียนไข และครอบเทียนไขด้วยแก้วใส จงสืบเสาะและอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2 การทดลองคว่ำแก้วครอบเทียนไขที่ติดไฟในจานที่บรรจุของเหลว [8]

โจทย์ปัญหานี้มีความน่าสนใจ เนื่องจากเป็นชุดสาธิตที่ใช้สอนนักเรียนในระดับประถมศึกษาหรือมัธยมศึกษากันอย่างแพร่หลาย สิ่งที่เกิดขึ้น คือ เมื่อนำแก้วใสรอบเทียนไขที่ติดไฟระดับน้ำในแก้วจะสูงขึ้น เปลวไฟจะค่อยๆ หริ่งและดับในที่สุด โดยเหตุผลที่มักนำมาใช้อธิบาย ได้แก่

1. เปลวไฟเหนือเทียนไขต้องใช้แก๊สออกซิเจนในการเผาไหม้ เมื่อนำแก้วครอบเทียนไขที่ติดไฟ แก๊สออกซิเจนภายในแก้วถูกใช้ไปจนหมด เป็นผลให้เทียนไขดับ โดยมีแก๊สชนิดอื่นๆ หลงเหลืออยู่ เช่น แก๊สไนโตรเจน แก๊สอาร์กอน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และอื่นๆ โดยแก๊สเหล่านี้จะมีความดันภายในแก้วต่ำกว่าความดันบรรยากาศภายนอกแก้ว ทำให้น้ำจากจานถูกดันให้เคลื่อนที่สูงขึ้นไปภายในแก้ว

2. อีกเหตุผลหนึ่งที่ใช้ในการอธิบาย คือ เมื่อนำแก้วครอบเทียนไขที่ติดไฟ อากาศในแก้วจะร้อนขึ้น อากาศร้อนจะขยายตัวเป็นผลให้อากาศถูกดันออกมาได้ปากแก้ว ซึ่งสังเกตได้จากฟองอากาศที่เกิดขึ้นเมื่อนำแก้วครอบเทียนไขในช่วงแรก เมื่อเทียนไขดับ อากาศภายในแก้วจะเริ่มเย็น โดยอากาศเย็นจะหดตัวและดึงน้ำจากภายนอกซึ่งอยู่บนจานเข้าไปในแก้ว

เหตุผลทั้งสองข้ออธิบายมานี้ ถูกต้องหรือไม่ นักเรียนควรตรวจสอบและยืนยันเหตุผลดังกล่าว โดยอาจใช้เหตุผลดังกล่าวเป็นสมมติฐานในการทดลอง แล้วหาวิธีในการตรวจสอบสมมติฐานดังกล่าว ตัวอย่างเช่น

เหตุผลแรก กล่าวว่า ระดับน้ำที่สูงขึ้นเป็นผลมาจากปริมาณแก๊สออกซิเจนภายในแก้วถูกใช้ไปจนหมด เป็นผลให้ความดันอากาศภายในแก้วต่ำกว่าความดันอากาศภายนอกแก้ว เพื่อตรวจสอบเหตุผลนี้ ควรตั้งสมมติฐานว่า ปริมาณแก๊สออกซิเจนและความดันอากาศภายในแก้วมีผลต่อระดับน้ำที่สูงขึ้น ดังนั้นนักเรียนควรหาวิธีหรือออกแบบการทดลองเพื่อวัดปริมาณแก๊สออกซิเจนภายในแก้ว ความดันภายในแก้ว ความดันภายนอกแก้ว และความสูงของระดับน้ำในแก้ว โดยต้องกำหนดตัวแปรควบคุมคือ ปริมาตรอากาศภายในแก้วตอนเริ่มต้น ชนิดของเทียนไขที่ใช้ ชนิดและปริมาณของเหลวที่ใส่ในจาน โดยวัดปริมาณทั้งสามตั้งแต่เริ่มจุดเทียนไขจนกระทั่งระดับน้ำภายในแก้วหยุดนิ่ง

สำหรับเหตุผลที่สอง กล่าวว่า หลังจุดเทียนไขอากาศร้อนภายในจะขยายตัวและดันอากาศออกมา เมื่อเทียนดับอากาศเย็นภายในแก้วจะหดตัวและดึงน้ำเข้าไปในแก้ว เพื่อตรวจสอบเหตุผลนี้ สมมติฐานควรจะเป็น อุณหภูมิและความดันอากาศภายในแก้วมีผลต่อระดับน้ำที่สูงขึ้น ดังนั้น นักเรียนควรหาวิธีหรือออกแบบการทดลองเพื่อวัดอุณหภูมิ ความดันอากาศภายในแก้ว และความสูงของระดับน้ำในแก้ว โดยมีตัวแปรควบคุมเช่นเดียวกับกรณีแรก นอกจากนั้น อาจเปลี่ยนชนิดของเทียนไขเพื่อดูปัจจัยของการให้ความร้อน โดยวัดปริมาณทั้งสามตั้งแต่เริ่มจุดเทียนไขจนกระทั่งน้ำหยุดนิ่งในแก้ว แล้วศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันอากาศกับระดับน้ำที่สูงขึ้นที่เวลาต่างๆ

เมื่อได้ผลการทดลองแล้ว ควรศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณต่างๆ ว่าเป็นไปตามที่ตั้งสมมติฐานไว้หรือไม่ หากเป็นจริงตามสมมติฐาน ก็ศึกษาต่อไปว่า ปริมาณเหล่านั้นสัมพันธ์กันอย่างไร สามารถใช้ทฤษฎีใดเพื่ออธิบายสิ่งที่เกิดขึ้นได้บ้าง จากนั้น ก็สรุปผลการศึกษา แต่หากผลการทดลองไม่เป็นไปตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ ก็ต้องศึกษาต่อไปว่า เพราะเหตุใดจึงไม่เป็นไปตามนั้น ทฤษฎีใดที่บอกถึงความขัดแย้งดังกล่าว

จากที่กล่าวมานี้ โจทย์ปัญหาเกี่ยวกับการสร้างอุปกรณ์หรือเครื่องมือ จะเป็นงานวิจัยที่อาศัยความรู้และทักษะด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีเป็นหลัก ส่วนโจทย์ปัญหาที่เกี่ยวกับการศึกษาตัวแปรหรือปัจจัยในปรากฏการณ์ต่างๆ นั้นจะเน้นไปที่การบูรณาการความรู้ของสาขาต่างๆ ด้านวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ โดยโจทย์ทั้งสองรูปแบบนั้น นักเรียนจะต้อง

บูรณาการความรู้จากศาสตร์หลายแขนง มีการศึกษาอย่างเป็นระบบและถูกต้องตามกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ โดยเริ่มจากการทำความเข้าใจโจทย์ปัญหา การค้นคว้าข้อมูลอ้างอิงจากแหล่งต่างๆ การตั้งสมมติฐาน การออกแบบการทดลอง การทำการทดลอง การนำทฤษฎีมาใช้อธิบายผลการทดลองว่าสอดคล้องกันหรือไม่ อย่างไร ซึ่งจะนำไปสู่การวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองทั้งหมดนี้เป็นกระบวนการสำคัญของการบูรณาการองค์ความรู้จากหลากหลายศาสตร์ด้วยกระบวนการคิดอย่างมีเหตุมีผลและเป็นระบบ

จะเห็นว่า การแก้โจทย์ปัญหา IYPT ซึ่งมีลักษณะปลายเปิดนี้ มีความท้าทาย เนื่องจากไม่มีคำตอบที่แน่นอนตายตัว ไม่สามารถหาคำตอบได้จากการคิดคำนวณเพียงอย่างเดียว แต่จะได้คำตอบจากการทดลอง ผู้วิจัยต้องตั้งสมมติฐานเกี่ยวกับสิ่งต่างๆ ที่เป็นไปได้ แล้วทำการทดลองเพื่อทดสอบสมมติฐานเหล่านั้น ต้องบูรณาการความรู้ในหลากหลายสาขา อาจนับเป็นก้าวแรกสู่การทำงานวิจัยในระดับมืออาชีพ เนื่องจากในงานวิจัยนั้น ผู้วิจัยจะไม่ทราบคำตอบของสิ่งที่ศึกษา เพราะหากทราบคำตอบแล้วก็คงไม่จำเป็นต้องทำงานวิจัยอีกต่อไป เช่นเดียวกับโจทย์ปัญหา IYPT นี้ ซึ่งนับเป็นเสน่ห์ของการแก้โจทย์ปัญหา IYPT นอกจากนั้น การนำเสนอและถูกซักค้านโดยตัวแทนประเทศอื่นซึ่งทำการทดลองเรื่องเดียวกัน โดยปัจจัยที่จะศึกษาอาจเหมือนหรือต่างกัน จึงทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ เช่นเดียวกับการนำเสนอผลงานของนักวิจัยในเวทีนานาชาติ

บทส่งท้าย

หากเรากำลังมองหากิจกรรมที่สอดคล้องกับ STEM Education แล้วละก็ฟิสิกส์สัประยุทธ์น่าจะเป็นกิจกรรมแรกๆ ที่ตอบโจทย์ของ STEM Education ได้เป็นอย่างดี การแข่งขันฟิสิกส์สัประยุทธ์ หรือ IYPT นี้เป็นกิจกรรมที่นักเรียนจะต้องใช้ความรู้หลากหลายแขนงวิชาและทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ในการหาคำตอบของปัญหา โดยการสร้างแบบจำลองทางทฤษฎีที่เหมาะสม ออกแบบการทดลองที่ดี เพื่อให้ได้ข้อสรุปที่มีเหตุผลในการอธิบายปรากฏการณ์นั้นๆ นอกจากนี้ ในบางปัญหาอาจต้องสร้างอุปกรณ์หรือเครื่องมือซึ่งต้องมีการประยุกต์ใช้ความรู้พื้นฐานเชิงวิศวกรรม ทำให้เกิดการพัฒนาทักษะด้านต่างๆ เช่น คิดเป็น ทำเป็น แก้ปัญหาเป็น ตลอดจนการทำงานเป็นทีม ซึ่งทักษะเหล่านี้

เป็นสิ่งจำเป็นมากต่อการใช้ชีวิตในยุคปัจจุบัน จุดเด่นอีกประการหนึ่งของการแข่งขันนี้คือการอภิปรายและซักค้านโดยนักเรียนจากประเทศอื่น จะทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนเรียนรู้ คิดและอภิปรายอย่างมีเหตุผลที่ถูกต้องตามหลักการทางวิทยาศาสตร์ นับเป็นโอกาสที่ทางสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) และสำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน (สพฐ.) ได้เล็งเห็นประโยชน์และคุณค่าของกิจกรรมฟิสิกส์สัญจร และจัดการอบรมครูห้องเรียนวิทยาศาสตร์ในสังกัด สพฐ. เพื่อเตรียมความพร้อมของครูสำหรับกิจกรรมฟิสิกส์สัญจรนี้ขึ้น เพื่อถ่ายทอดกระบวนการในการแก้โจทย์ปัญหา การวิเคราะห์ปัญหา การออกแบบการทดลอง การวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง ให้ครูมีความพร้อมและความมั่นใจในการถ่ายทอดทักษะการทดลองทางวิทยาศาสตร์ที่ถูกต้องให้กับนักเรียน นอกจากนี้ กิจกรรมฟิสิกส์สัญจรยังถูกจัดให้เป็นหนึ่งในกิจกรรมสำหรับห้องเรียนวิทยาศาสตร์ (สาขาฟิสิกส์) ของโรงเรียน

ในสังกัด สพฐ. โรงเรียนจุฬาภรณฯ และโรงเรียนที่เป็นศูนย์พสวท. เพื่อให้โรงเรียนส่งตัวแทนโรงเรียนเข้าแข่งขันในระดับประเทศ และระดับนานาชาติต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] <http://missionstem.nasa.gov/>
- [2] <http://www.pbs.org/teachers/stem/>
- [3] <http://www.madriserschools.org/domain/498>
- [4] <http://changetheequation.org/why-stem>
- [5] <http://designtechology.ipst.ac.th/uploads/STEMEducation.pdf>
- [6] <http://iypt.org/Home>
- [7] นฤมล สุวรรณจันทร์ดี (2553) International Young Physicists' Tournament (IYPT) วารสารฟิสิกส์ไทย, 27 (2) 28-32
- [8] <http://www.stevespanglerscience.com/lab/experiments/why-does-the-water-rise>

“อนุภาคอีกสั้าจะเป็นเสมือน “อะตอม” ในยุคสมัยเรา”

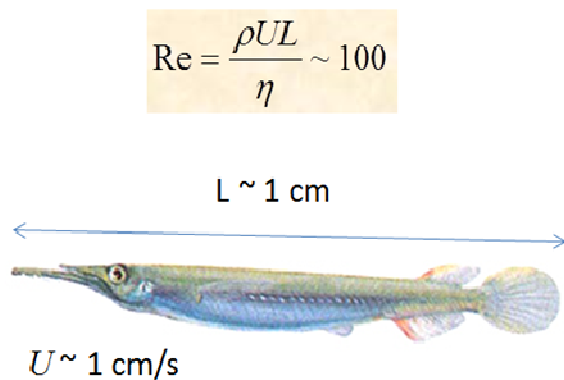
ต่อมาจากหน้า 13

ทั้งยังเป็นทฤษฎียอดนิยมที่ใช้อธิบายสสารมืด (dark matter) ซึ่งเป็นสิ่งที่อยู่นอกเหนือแบบจำลองมาตรฐานฯ มวลของอนุภาคอีกสั้าที่เราค้นพบก็จัดว่า“หนักไป” เกือบจะหลุดจากขอบเขตมวลของอีกสั้าตามแบบจำลอง SUSY ที่ง่ายที่สุด (นั่นคือแบบจำลอง minimal supersymmetric standard model หรือ MSSM) นับว่าธรรมชาติได้เลือกมวลของอนุภาคอีกสั้าให้อยู่ในบริเวณที่ทดสอบทฤษฎีต่างๆ ได้อย่างสนุกที่สุด จึงไม่แปลกที่มันจะเป็นบริเวณที่เราสแกนข้ามกันไปข้ามกันมาหลายปี เมื่อตรวจสอบดูเสถียรภาพของสุญญากาศ (vacuum stability) มวลของอนุภาคอีกสั้าที่เราวัดได้ (125-126 GeV) ก็ไปอยู่ในบริเวณที่เกือบจะทำให้เอกภพไม่มีเสถียรภาพพอดี ปัญหาฟิสิกส์ที่ทำทนายทฤษฎีใหม่ๆ เหล่านี้ผู้เขียนตั้งใจจะนำมาทยอยเล่าลงในรายละเอียดอีกทีต่อบทความตอน “อนุภาคอีกสั้าโบซอน: ภาควิสมมาตร” ที่วางแผนไว้ว่าจะเขียนต่อไปฉบับถัดไป และทั้งหมดที่เล่ามานี้ ก็เพียงหวังว่าจะทำให้หลายท่านเกิดความรู้สึกแบบเดียวกับผู้เขียนว่า

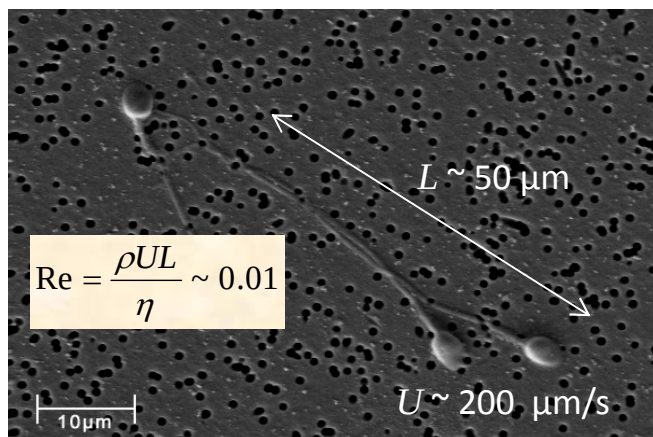
เอกสารอ้างอิง

- [1] Richard P. Feynman, R. B. Leighton and M. Sands “Six Easy Pieces: Essentials of Physics Explained by Its Most Brilliant Teacher”, Basic Books; fourth edition (Mar. 2011)
- [2] http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Standard_Model_of_Elementary_Particles.svg
- [3] <http://www.nytimes.com>
- [4] <http://www.dailymail.co.uk>
- [5] <http://blog.sciencenet.cn/blog-3779-620297.html>
- [6] F. Wilczek, “Origins of Mass,” arXiv:1206.7114
- [7] M. J. Veltman, “The Higgs Boson,” Scientific American, vol. 255, p.76 (Nov. 1986)
- [8] P. Higgs, “My Life as a Boson,” [<http://www.ph.ed.ac.uk/higgs/life-boson>]

รูปประกอบจากบทความ “ลักษณะการว่ายน้ำที่สัมพันธ์กับเลขเรย์โนลด์” หน้า 14 - 19

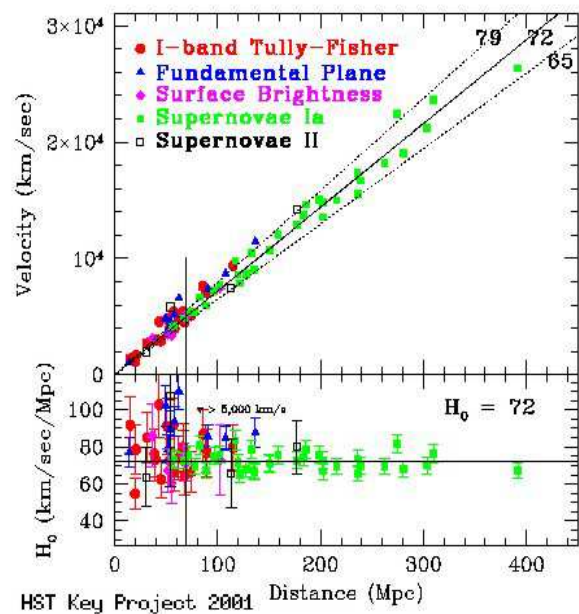


รูปที่ 2



รูปที่ 3

รูปประกอบจากบทความ “เราทราบอายุของเอกภพได้อย่างไร?” หน้า 20-25



รูปที่ 2

รูปประกอบจากบทความ “STEM กับ ฟิสิกส์สัประยุทธ์ (IYPT)” หน้า 26-30



รูปที่ 1



รูปที่ 2

หมายเหตุ รูปปกหลังมาจาก Lukiyanova Natalia / frenta/Shutterstock, <http://scienceillustrated.com.au/>

“ลักษณะการว่ายน้ำที่สัมพันธ์กับเลขเรย์โนลด์” (ดูรายละเอียดในเล่ม)



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