รางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ประจำปี ค.ศ. 2017: การค้นพบคลื่นความโน้มถ่วง

(Gravitational Wave Discovery)

อินฎา ทองกุล

สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

บทคัดย่อ

บทความนี้มาจากการบรรยายเรื่องโนเบลสาขาฟิสิกส์ ปี 2560 ในการประชุมเครือข่ายความร่วมมือฟิสิกส์อีสานใต้ (SIP: Southern Isaan Physics Consortium) ที่จัดขึ้นที่มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา เมื่อวันที่ 22 พฤศจิกายน พ.ศ. 2560 การบรรยายได้แสดงให้เห็นว่า การค้นพบคลื่นความโน้มถ่วงจากการหลอมรวมของหลุมดำคู่โดยเครื่องวัด Advanced LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) สามารถเป็นหนึ่งในการค้นพบทางวิทยาศาสตร์ที่ยิ่งใหญ่ที่สุดในศตวรรษ การมีส่วนสำคัญในการสร้างสถานีวัด LIGO และการสังเกตการณ์คลื่นความโน้มถ่วงของ ไรเนอร์ ไวส์ (Rainer Weiss), แบร์รี บาริช (Barry Barish) และ คิป ธอร์น (Kip Thorne) ทำให้ได้รับรางวัลโนเบลประจำปี 2560 การบรรยายนี้ยังได้ให้ฟิสิกส์เชิงแนวคิดที่อยู่เบื้องหลังภาพปฏิวัติของกาล-อวกาศตามทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป ประวัติของการตรวจวัดคลื่นความโน้มถ่วง รวมถึงอภิปรายอุปสรรคในการพัฒนาการตรวจวัด

Abstract

This article is from the lecture on the Nobel Prize in Physics 2017 given in SIP Meeting (Southern Isaan Physics Consortium) held at Nakhon Ratchasima Rajabhat University on 2nd November 2017. The article shows how the recent detection of the gravitational wave from the binary black hole merger by Advanced LIGO detector can become one of the biggest scientific discoveries of the century. The contributions to the LIGO Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) and the observation of gravitational waves of Rainer Weiss, Barry C. Barish and Kip S. Thorne were awarded Nobel Prized in Physics 2017. The article also provides the conceptual physics behind the revolutionary pictures of the space-time according to the general theory of relativity. The history of the gravitational wave detection and the obstacles to its development are also discussed.

Key words: Gravitational Wave, General Relativity, Black Hole, Binary Black Hole, Neutron Star

สิ่งหนึ่งที่อยู่คู่เผ่าพันธุ์ของมนุษย์เรามาโดยตลอด คือ จิตวิญญาณแห่งการผจญภัย ความกระหายอยากจะบุกเบิกดินแดน ใหม่ ๆ อยากไปในที่ไม่เคยไป อยากสัมผัสประสบการณ์ที่ไม่เคยได้สัมผัสมาก่อน แรงผลักดันแบบเดียวกันนี้เองที่ทำให้เราสามารถขยายการรับรู้ของเราได้ไพศาลกว่าสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ที่เคยมีมาบนโลกใบนี้ ผึ้งอาจมองเห็นแสงในย่านอัลตราไวโอเลตได้ งูอาจเห็นในแสงอินฟราเรดได้ แต่ด้วยวิชาฟิสิกส์ มนุษย์เราสามารถรับรู้ได้แทบจะทุกแถบสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

Photo: A. Mahmoud
Rainer Weiss
Prize share: 1/2

Photo: A. Mahmoud
Barry C. Barish
Prize share: 1/4

Photo: A. Mahmoud
Kip S. Thorne
Prize share: 1/4

รูปที่ 1 *ผู้ที่ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ประจำปี พ.ศ. 2560 ทั้งสามท่าน โดยมี R. Weiss นักทดลอง และ K. S. Thorne นักทฤษฎีเป็นผู้ก่อตั้งโครงการ LIGO ร่วมกับ R. Drever ผู้ล่วงลับ ท่านที่สาม B. C. Barish เป็นผู้อำนวยการสถาบันที่มีส่วนสำคัญที่ทำให้โครงการ LIGO ก้าวหน้าอย่างมาก (เครดิตภาพ: https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2017)*

ลองคิดดูว่ามันเป็นสิ่งที่น่าอัศจรรย์ขนาดไหน คลื่นความโน้มถ่วง การกระเพื่อมของกาลอวกาศที่มีมาตั้งแต่ช่วงเวลากำเนิดของเอกภพ แต่กลับไม่มีสติปัญญาใดบนโลกใบนี้สามารถรับรู้ หรือแม้กระทั่งจินตนาการถึงได้ว่ามันมีอยู่ ดังที่ Heisenberg เคยกล่าวไว้ว่า "*เอกภพของเราไม่เพียงแต่แปลกประหลาดกว่าที่เราคิด แต่ยังมันแปลกประหลาดกว่าที่เราจะสามารถคิดได้*" [1] มนุษย์เราสามารถจินตนาการถึงคลื่นความโน้มถ่วงได้อย่างถูกต้องเมื่อประมาณร้อยปีที่แล้วนี้เอง เพราะต้องอาศัยการปฏิวัติความเข้าใจในกาล-อวกาศ (space-time) ใหม่จากทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปจึงจะทำให้ "มองเห็น" คลื่นความโน้มถ่วงได้ Einstein จึงได้เป็นคนแรกที่ค้นพบคลื่นความโน้มถ่วงบนแผ่นกระดาษ แต่หลังจากที่ได้ลองประมาณแอมพลิจูดของคลื่นความโน้มถ่วงจากปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่อาจเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นความโน้มถ่วงได้ Einstein ก็เชื่อว่ามนุษย์เราคงไม่สามารถตรวจวัดคลื่นนี้ได้ในอีกพันปี หรือต่อให้อีกหมื่นปีข้างหน้า เพราะการกำเนิดคลื่นความโน้มถ่วงจากการเคลื่อนที่ของวัตถุทางดาราศาสตร์ที่รู้จักในสมัยนั้นได้คลื่นที่มีแอมพลิจูดน้อยมากเกินกว่าลิมิตของเครื่องมือฟิสิกส์ที่สามารถสร้างได้ในโลกแห่งความเป็นจริงมากมายนัก

แต่ทว่าเพียงหนึ่งร้อยปีหลังจากการค้นพบคลื่นความโน้มถ่วงบนกระดาษ ฟิสิกส์และดาราศาสตร์ก็ก้าวหน้าอย่างก้าวกระโดด เอกภพได้เผยความแปลกประหลาดให้มนุษย์เราได้ตื่นเต้นมากมาย เทหวัตถุอันพิสดารต่าง ๆ เช่น หลุมดำ ดาวนิวตรอน พัลซาร์ ได้ถูกค้นพบ เมื่อนักทฤษฎีรุ่นหลังได้ลองคำนวณการเคลื่อนที่ของเทหวัตถุแสนประหลาดเหล่านี้ ก็พบว่าการเคลื่อนที่ของพวกมันสามารถให้คลื่นความโน้มถ่วงที่มีแอมพลิจูดโตกว่าที่ Einstein เคยประมาณไว้ได้อย่างมหาศาล เมื่อประกอบกับความก้าวล้ำทางเทคโนโลยีของมนุษย์ที่สามารถวัดการเปลี่ยนแปลงน้อย ๆ ได้ละเอียดอย่างเหลือเชื่อ เช่น การวัดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของกระจกระดับ 1 ใน 10^{-21} ส่วนของความยาวหนึ่งกิโลเมตรได้ [2] นับเป็นการวัดตำแหน่งที่เหลือเชื่อมาก เพราะการขยับของกระจกดังกล่าวคือความยาวประมาณหนึ่งในพันของนิวเคลียสของอะตอมเท่านั้น (กระจกจะขยับเพียงระยะ 10^{-18} เมตร) นอกจากนี้ยังมีความสำเร็จของการคำนวณที่สามารถทำได้รวดเร็ว

ด้วยเทคนิคที่มาจากงานวิจัยเกี่ยวกับการคำนวณเชิงตัวเลขของทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปที่ได้พัฒนาต่อเนื่องมาเป็นเวลา 30-40 ปีและเพิ่งมีความก้าวหน้าที่สำคัญพอดี สุดท้ายที่ขาดไม่ได้คือ ประมวลผลของซูเปอร์คอมพิวเตอร์ที่ทรงพลังในยุคเรา ทุกสิ่งที่กล่าวมาทำให้สถานการณ์เปลี่ยนไป สิ่งที่ครั้งหนึ่ง Einstein เคยเชื่อว่าไม่สามารถวัดได้ก็กลับกลายเป็น “*สามารถตรวจวัดได้*” การค้นพบคลื่นความโน้มถ่วงได้จึงไม่ได้เป็นเพียงแค่ผลงานระดับรางวัลโนเบลชิ้นหนึ่ง โดยคนกลุ่มหนึ่งเท่านั้น แต่มันแสดงถึงความก้าวหน้าอย่างที่สุดของวิทยาการในหลาย ๆ ด้านของมนุษย์เรารวมกัน

วันแห่งการค้นพบคลื่นความโน้มถ่วง GW150914

ปี ค.ศ. 2015 เป็นปีที่ทุกสิ่งทุกอย่างเป็นใจสำหรับการค้นพบ สถานีตรวจวัดคลื่นความโน้มถ่วง LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) สองแห่งในประเทศสหรัฐอเมริกา ได้กลับมาเริ่มทำงานอีกครั้ง ภายหลังจากปิดเพื่อทำการอัพเกรดใหญ่ใน ค.ศ. 2010 ทำไมการอัพเกรดครั้งนี้จึงสำคัญนัก? เหตุผลคือ คลื่นความโน้มถ่วงก็เหมือนคลื่นชนิดอื่น ๆ เช่น คลื่นแสง หรือ คลื่นเสียง หากเราคิดว่าคลื่นแผ่ออกไปทุกทิศทุกทางเท่า ๆ กัน พลังงานของคลื่นมันก็จะถูกเฉลี่ยให้เท่า ๆ กันตามพื้นที่ทรงกลมของหน้าคลื่น ดังนั้นแอมพลิจูดของคลื่นความโน้มถ่วงที่เราตรวจวัดได้จึงแปรผกผันกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดกำลังสอง ด้วยเหตุนี้ ความไวของเครื่องมือวัด (instrument sensitivity) จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เราสามารถ *“ฟัง”* ได้ไกลแค่ไหน การฟังได้ไกลมีผลมาก เพราะปรากฏการณ์ที่ทำให้เกิดคลื่นความโน้มถ่วงที่มีกำลังสูง อย่างหลุมดำสองหลุมรวมกัน หรือ ดาวนิวตรอนสองดวงรวมกัน ไม่ใช่เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้ถี่ ๆ ภายในกาแล็กซีหนึ่ง บางทีรอกันเป็นพันปี เป็นหมื่นปีก็อาจจะไม่มีเหตุการณ์แบบนี้เกิดขึ้นในกาแล็กซีของเราเลยก็ได้ แต่เอกภพประกอบด้วยกาแล็กซีจำนวนมหาศาล (มีประมาณ 2×10^{12} กาแล็กซีในเอกภพที่สามารถสังเกตการณ์ได้) เราจึงอาจมองได้ว่ามีเหตุการณ์แบบนี้เอกภพอยู่ตลอดเวลา เพียงมันอยู่ไกลจากโลกของเราเกินไป แอมพลิจูดของคลื่นความโน้มถ่วงที่เดินทางมาถึงจึงน้อยเกินกว่าที่จะตรวจวัดด้วยเครื่องมือของเรา ดังนั้นยิ่งเราฟังได้ไกลเท่าไร ก็จะยิ่งเพิ่มความถี่ของการเกิดเหตุการณ์ที่จะตรวจวัดได้

LIGO เริ่มสร้างเมื่อ ค.ศ. 1994 และเริ่มทำการตรวจวัดในช่วงแรกปี ค.ศ. 2002-2010 แต่ไม่พบอะไร เพราะโชคไม่ดีที่ไม่มีเหตุการณ์ที่เกิดคลื่นความโน้มถ่วงกำลังสูงอยู่ใกล้โลกพอในช่วงเวลาดังกล่าว ต่อมาโครงการ LIGO ซึ่งนำโดยผู้อำนวยการ Barry C. Barish (หนึ่งในผู้ที่ได้รับรางวัลโนเบลปี 2017) สามารถของบประมาณมาปรับปรุงความไวได้ การอัพเกรดนี้ใช้เวลา 5 ปี ด้วยเงินทุนประมาณ 200 ล้านดอลลาร์ ภายหลังจากอัพเกรดเป็น Advanced LIGO (ย่อเป็น aLIGO) แล้ว ความไวของเครื่องจะสามารถฟังการหลอมรวมของหลุมดำคู่ มวลประมาณ 30 เท่าของดวงอาทิตย์ที่ห่างออกไป 1.3 Gpc (4.1×10^{22} กิโลเมตร) หรือ การหลอมรวมกันของดาวนิวตรอนคู่ที่ห่างออกไป 75 Mpc (2.3×10^{22} กิโลเมตร) ซึ่งเพียงพอที่จะมีโอกาสตรวจวัดเหตุการณ์สองแบบดังกล่าวได้ประมาณแบบละ 3-300 ครั้งต่อปี [3] ตัวเลขการประมาณกว้าง ๆ นี้ เพราะเรายังไม่ได้ข้อสรุปที่แน่นอนขึ้นกับแบบจำลองและความรู้ทาง ดาราศาสตร์ฟิสิกส์ (astrophysics) ที่เปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา ว่าระบบหลุมดำคู่ หรือ ดาวนิวตรอนคู่จะเกิดได้มากน้อยเพียงใด ดังนั้นจำนวนครั้งของเหตุการณ์ LIGO สามารถวัดจริงได้ต่อปีจึงเป็นข้อมูลสำคัญที่จะใช้ในการปรับปรุงทฤษฎีทางดาราศาสตร์ฟิสิกส์เพื่ออธิบายอัตราการเกิดของดาวนิวตรอนและหลุมดำในกาแล็กซีต่าง ๆ ให้แม่นยำยิ่งขึ้น

คลื่นความโน้มถ่วงแรกที่ถูกค้นพบเรียกว่า GW150914 ตามชื่อ คือ ตรวจวัดเมื่อวันที่ 14 กันยายน ค.ศ. 2015 แต่ทว่าตามกำหนดการ aLIGO จะเริ่มเดินเครื่องเก็บข้อมูลในวันที่ 18 กันยายน ดังนั้นในวันที่ 14 กันยายน จึงเป็นเพียงการเดินเครื่องทดสอบซึ่งเรียกว่า engineering run number 8 หรือ ER8 ก่อนที่การเดินเครื่องเพื่อการสังเกตการณ์ (observing run) ครั้งแรกหรือ O1 ในสัปดาห์ถัดไป ระหว่างที่ทำการทดสอบเครื่องจะมีการปล่อยสัญญาณปลอม (blind injection) เข้าไปในระบบเพื่อทดสอบว่าหากมีคลื่นความโน้มถ่วงมา

จริง ๆ ทีมงานและเครื่องจะตรวจจับได้หรือไม่ ในช่วงทดสอบเครื่อง ER8 ทีมงานคิดว่าควรจะตรวจเจอสัญญาณปลอมประมาณสี่ครั้งและก่อนหน้านี้ถูกพบไปแล้วสองครั้ง คนแรกที่สังเกตเห็น GW150914 คือ Marco Drago [5] ซึ่งเป็นนักวิจัยหลังปริญญาเอกที่สถาบันวิจัยในประเทศเยอรมนี โดยเขาได้ตั้งอีเมลแจ้งเตือนไว้หากเครื่องตรวจพบอะไร เพราะเขาต้องการตรวจสอบ "โดยทันที" หลังจากที่ตรวจจับสัญญาณได้ การที่ Drago ตัดสินใจทำแบบนี้ดูจะเป็นการขยันเกินปกติ มันไม่ใช่สิ่งที่คนอื่น ๆ ในทีมวิจัยเขาทำกัน เพราะช่วงนี้เป็นเพียงการเดินเครื่องทดสอบ สิ่งที่ตรวจพบได้ควรจะเป็นสัญญาณปลอมหรือไม่ก็สัญญาณรบกวนเพียงแค่นั้น ดังนั้นคนที่ LIGO เมื่อเห็นว่าสัญญาณเข้ามา พวกเขาก็จะเพียงแค่ดูและตรวจสอบไปทีละอัน ทำตามหน้าที่ไป ไม่มีใครรีบเร่งอะไร เพราะคิดว่ามันคงเป็นสัญญาณปลอมเพื่อทดสอบเครื่องเท่านั้น แต่ครั้งนี้ Drago สังเกตเห็นว่าสัญญาณที่ตรวจเจอมันดูสะอาดผิดปกติ แตกต่างจากสัญญาณปลอมที่เคยทดสอบมาก่อนหน้านี้ เขาก็เลยสอบถามไปทางฝั่งอเมริกาว่าช่วงเวลาดังกล่าวมีใครฉีดสัญญาณปลอมเพื่อทำการทดสอบหรือไม่ คำตอบคือ ไม่มี หลังจากได้สอบถามกันจนแน่ใจเป็นเวลา 1 ชั่วโมง Drago ก็ได้ส่งอีเมลฉบับประวัติศาสตร์ถึงผู้ร่วมโครงการ LIGO คนอื่น ๆ ว่า *ได้พบสัญญาณที่น่าสนใจ (interesting event) จาก ER8 เมื่อชั่วโมงที่ผ่านมา* [5]

ในอีเมลดังกล่าว Drago ต้องการส่งหา CBC Group เป็นหลัก (พร้อมทั้ง CC ให้คนอื่น ๆ ในทีม LIGO) ชื่อกลุ่มวิจัย CBC ย่อมาจาก compact binary coalescence ซึ่งเป็นกลุ่มที่ทำการคำนวณการโคจรรอบกันของคู่ compact object อย่างหลุมดำหรือดาวนิวตรอน ว่าจะปล่อยคลื่นความโน้มถ่วงออกมาอย่างไร เมื่อคิดตามทฤษฎี คู่ของหลุมดำ หรือ คู่ของดาวนิวตรอน เมื่อโครจรรอบกันอย่างรวดเร็ว เราอาจมองได้คล้าย ๆ ดัมเบลที่หมุนวนในน้ำสร้างคลื่นน้ำที่ดึงพลังงานของการหมุนออกไป คลื่นความโน้มถ่วงก็คล้ายกับคลื่นน้ำในกรณีของดัมเบล มันจะดึงพลังงานออกจากระบบการโคจรของคู่ของหลุมดำ (หรือดาวนิวตรอน) ทำให้โมเมนตัมเชิงมุมเปลี่ยนไป คู่มวลดังกล่าวจึงไม่สามารถคงระยะวงโคจรเดิมอยู่ได้ เมื่อสูญเสียพลังงานมวลทั้งสองจะโคจรใกล้กันมากขึ้นๆ ในลักษณะของวงก้นหอยจนหลอมรวมกันในท้ายที่สุด ในทางเทคนิคสูตรการแผ่คลื่นความโน้มถ่วงในลักษณะดังกล่าวเรียก สูตรขั้วสี่ (quadrupole) (เพราะคำนวณจากการเปลี่ยนแปลงระดับโมเมนต์ขั้วสี่ (quadrupole moment) ของแหล่งกำเนิดคลื่นซึ่งเป็นมวลที่เคลื่อนที่ในทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป) โดยไอน์สไตน์เป็นคนแรกที่สามารถหาสูตรนี้ได้ [6] และสูตรขั้วสี่นี้นำไปสู่การค้นพบคลื่นความโน้มถ่วงโดยอ้อมจากการตรวจวัดระยะของวงโคจรที่ลดลงของ พัลซาร์คู่ Hulse-Taylor ที่ค้นพบเมื่อปี ค.ศ. 1974 [8] (ทั้ง Hulse และ Taylor ได้รับรางวัลโนเบลปี ค.ศ. 1993) ถือเป็นหลักฐานสำคัญที่ทำให้รัฐบาลสหรัฐใช้ในการตัดสินใจให้ทุนมูลค่าหลายร้อยล้านดอลลาร์ในการทำโครงการ LIGO เพื่อตรวจวัดคลื่นความโน้มถ่วงให้ได้โดยตรง

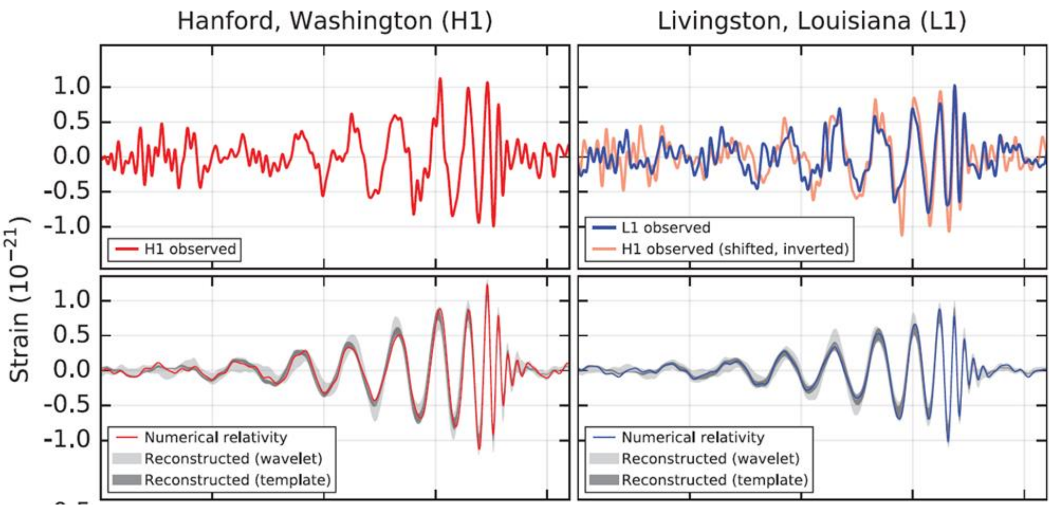
กลุ่มวิจัย CBC ได้ลองคำนวณรูปร่างลักษณะของคลื่นความโน้มถ่วงที่จะปล่อยออกมาจากการควงสว่านของคู่หลุมดำ หรือคู่ดาวนิวตรอนกว่า 250,000 รูปแบบที่เป็นไปได้ ซึ่งต้องใช้เทคนิคสุดล้ำใหม่ ๆ ในการคำนวณเชิงตัวเลขของทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปและต้องใช้เครื่องซุปเปอร์คอมพิวเตอร์จึงจะสามารถทำการคำนวณดังกล่าวได้ เมื่อ LIGO ได้รูปแบบคลื่นความโน้มถ่วงมา กลุ่มวิจัย CBC จะเป็นผู้เปรียบเทียบให้ว่าคลื่นดังกล่าวน่าจะมาจากเหตุการณ์ใด 1 ใน 250,000 แบบที่รู้จัก

ยี่สิบนาทีหลังจากอีเมลของ Drago ก็มีอีเมลตอบกลับถึงผู้ร่วมโครงการ LIGO ว่า "this is a nice inspiral with Mchirp = 27 Mo." [5] ซึ่งในเบื้องต้นทีมที่ดูรูปแบบคลื่น (waveform) ได้คาดว่าคลื่นความโน้มถ่วงลักษณะนี้น่าจะเกิดจากวงโคจรแบบก้นหอยควงเข้าหากัน (inspiral) ของมวลขนาด 27 เท่าของดวงอาทิตย์สองมวล ข้อความสั้น ๆ ที่ทีม CBC ตอบมานี้มีความหมายสำคัญอย่างไร? คำว่า chirp แปลตรง ๆ ก็แปลว่าเสียงร้องของนก เป็นศัพท์ที่ใช้บรรยายลักษณะของคลื่นความโน้มถ่วงก่อนที่ compact object จะรวมกัน ซึ่งก่อนเวลาที่มวลทั้งสองจะรวมกัน คลื่นความโน้มถ่วงจะมีความถี่ที่สูงขึ้นแบบเสียง chirp (เพราะเมื่อวงโคจรสั้นลง ความถี่ในการวนรอบกันก็สูงขึ้น)

คลื่นความโน้มถ่วงนอกจากจะพาพลังงานออกจากวงโคจรแล้วยังผลักให้มวลทั้งสองใกล้กันมากขึ้น โคจรรอบกันด้วยความถี่ที่สูงขึ้น ความเร็วในการโคจรเข้าใกล้แสงมากขึ้น ซึ่ง Mchirp หรือมวล M ที่ทำให้เกิดคลื่นลักษณะดังกล่าว สามารถดูได้จากรูปที่ 2 และหาก Mchirp มีมวล 27 เท่าของดวงอาทิตย์จริงก็เป็นเรื่องที่น่าตื่นเต้น เพราะสัญญาณจะไม่สามารถมาจากคู่ของดาวนิวตรอนซึ่งโดยปกติมวลสูงสุดจะไม่เกิน 2-3 เท่าของดวงอาทิตย์ได้ นั่นคือ GW150914 จะต้องมาจากคู่ของหลุมดำเท่านั้น นั่นหมายความว่า การค้นพบนี้นับว่าเป็นครั้งแรกที่สามารถตรวจจับสัญญาณที่มาจากการรวมตัวของหลุมดำคู่ และเป็นการยืนยันได้ครั้งแรกว่า ระบบหลุมดำคู่มีอยู่จริง

หลังจากการวิเคราะห์ข้อมูลอย่างละเอียดแล้วเสร็จ วันที่ 11 กุมภาพันธ์ ค.ศ. 2016 ทีมวิจัยคลื่นความโน้มถ่วง LIGO และ Virgo (สถานีตรวจวัดคลื่นความโน้มถ่วงอีกแห่งที่อิตาลี) ได้ร่วมกันประกาศการค้นพบคลื่นความโน้มถ่วง GW1509 ว่าเกิดจากระบบหลุมดำคู่ที่มีมวล 36 และ 29 เท่าของดวงอาทิตย์ที่อยู่ห่างออกไป 400 Mpc (1.234×10^{22} กิโลเมตร) ซึ่งถือว่าเป็นระยะที่ไกลมาก ลองเทียบขนาดของกลุ่มกาแล็กซีท้องถิ่น (Local Group galaxies) ของเราที่มีขนาด 3.1 Mpc ประกอบด้วยกาแล็กซีประมาณ 50 กาแล็กซี นั่นคือการอัพเกรด aLIGO ก็เพื่อจะฟังได้ไกลพอ ระยะเกิน 1000 Mpc จึงมีจำนวนกาแล็กซีมากพอจะมีความน่าจะเป็นที่ทำให้เกิดเหตุการณ์แบบนี้ให้ตรวจวัดได้เพียงประมาณ 1-10 ครั้งต่อปี (อัพเดทการประมาณจากการวัดจริง)

เหตุที่ต้องทำคำนวณต้นแบบการหลอมของคู่หลุมดำคู่ไว้ถึง 250,000 แบบ (ด้วยความยากลำบาก) ก็เพราะเขาต้องการเพิ่มค่าทางสถิติให้มากพอที่จะประกาศการค้นพบ ในกรณีของ GW150914 ทีมวิจัยคลื่นความโน้มถ่วง LIGO และ Virgo สามารถระบุด้วยระดับความเชื่อมั่นทางสถิติ 99.9994% (5.1 sigma) ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานของการค้นพบทางฟิสิกส์ในปัจจุบัน ความสำเร็จของทีม LIGO และ Virgo ดังกล่าวเป็นเพียงปลายยอดของภูเขาน้ำแข็งที่โผล่พ้นน้ำให้เราเห็น ก่อนที่จะมีการค้นพบดังกล่าว ฟิสิกส์ทั้งภาคทฤษฎีและภาคการทดลองต้องผ่านบททดสอบที่สำคัญและท้าทายอย่างยิ่งหลายต่อหลายครั้ง คำตอบที่ได้ระหว่างทางก็ได้เปลี่ยนความรู้ความเข้าใจของมนุษย์เราที่มีต่อธรรมชาติไปอย่างมากมาย ซึ่งบทความนี้จะลำดับให้อ่านกันในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 2 สัญญาณของคลื่นความโน้มถ่วงที่ถูกตรวจวัดได้ครั้งแรก ในวันที่ 14 กันยายน พ.ศ. 2559 จะเห็นได้ว่ารูปแบบคลื่นที่ตรวจวัดได้จากสองสถานีที่เป็นอิสระต่อกันมีรูปแบบที่เหมือนกันเป็นการตัดข้อสงสัยเรื่องที่ว่าเป็นสัญญาณจะเกิดขึ้นโดยความบังเอิญไม่ใช่สัญญาณจริง โดยสัญญาณที่ตรวจวัดได้จากสถานีทั้งสองแห่งถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณเชิงตัวเลขจากทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปที่คำนวณรอไว้ 250,000 รูปแบบ รูปแบบของคลื่นที่ตรงกันมากสุดจะถูกนำไปใช้บอกแหล่งที่มาของคลื่นความโน้มถ่วง (เครดิตภาพ [4])

ทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป: ฟิสิกส์พื้นฐานของคลื่นความโน้มถ่วง

คลื่นความโน้มถ่วง แปลตรงตัวก็คือ คลื่นของความโน้มถ่วง ซึ่งตามความรู้ในปัจจุบันความโน้มถ่วงไม่ใช่อะไรอื่น มันคือผลของการบิดโค้งของกาล-อวกาศอันเนื่องจากการมีอยู่ของมวลตามทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป ผลของการบิดโค้งนี้ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของวัตถุทำให้มันเปลี่ยนจากสภาพการเคลื่อนที่จากกฎข้อที่ 1 ของ Newton (ใน 3 มิติ) เราจึงมองเห็นว่า “มี” แรงโน้มถ่วงมากระทำ สำหรับกาล-อวกาศที่แบนราบไม่มีแรงโน้มถ่วง

การรักษาสภาพการเคลื่อนที่ของวัตถุตามกฎข้อที่ 1 ของ Newton ก็คือ หยุดนิ่ง หรือเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงด้วยความเร็วคงที่ ในทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปมองว่าเป็นการเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่สั้นที่สุด หรือ เส้น geodesic ไปตามกาล-อวกาศที่บิดโค้ง โดยมีแหล่งกำเนิดการบิดโค้งจากการมีอยู่ของมวลอื่น ส่วนวัตถุมวลทดสอบที่ไม่มีแรงอื่นมากระทำแท้จริงแล้วก็ยังเคลื่อนที่ไปตามเส้น geodesic เช่นเดิม แต่การบิดโค้งของกาล-อวกาศ 4 มิติทำให้เส้นทางของวัตถุเปลี่ยนไปจากที่เคยเป็นเส้นตรงก็เปลี่ยนไปเป็นเส้นโค้งใน 3 มิติแทน เส้นโค้งที่เกิดขึ้นจากผลดังกล่าว สามารถนำไปใช้อธิบายวงโคจรของดวงดาวต่าง ๆ ได้เหมือนกฎความโน้มถ่วงของ Newton ทุกประการในกรณีที่สนามแรงโน้มถ่วงไม่เข้มมาก และสำหรับกรณีที่สนามแรงโน้มมีความเข้มสูง เช่น บริเวณโดยรอบของ compact object อย่างหลุมดำ หรือดาวนิวตรอน ผลเฉลยของสมการจีโอเดสิกตามทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปจะให้เส้นทางการเคลื่อนที่ของวัตถุแตกต่างจากกฎของนิวตันค่อนข้างมาก และได้รับการยืนยันว่าสอดคล้องกับผลของการสังเกตการณ์เป็นอย่างดี

การบิดโค้งของกาล-อวกาศสามารถบรรยายด้วยการเปลี่ยนไปของระยะห่างเล็ก ๆ ระหว่างจุดสองจุด ลองจินตนาการถึงแผ่นยางที่ถูกตีตารางให้แต่ละช่องเท่ากันถูกขึงให้ตึงแบบแทรมโพลีน (Trampoline) เมื่อเราวางก้อนหินหนัก ๆ สักก้อนลงไปตรงกลาง บริเวณที่ยางยืดออกจะทำให้ช่องตารางในบริเวณนั้นเปลี่ยนไป ถ้าเรามีคณิตศาสตร์ที่บรรยายการยืดของช่องตารางได้ เราก็อาจคำนวณกลับหาได้ว่าหินมีมวลเท่าใดจึงจะทำให้ช่องตารางยืดได้ในลักษณะนั้น การมีอยู่ของมวลก็ทำให้ระยะห่างเล็ก ๆ ระหว่างจุดสองจุดในกาล-อวกาศ 4 มิติรอบ ๆ มวลนั้นเปลี่ยนไป เมื่อมวลมีขนาดใหญ่ก็จะทำให้การบิดโค้งก็มากทำให้เราเห็นเป็นสนามความโน้มถ่วงที่มีความเข้มสูง

เมื่อคลื่นความโน้มถ่วงเคลื่อนเข้ามาในบริเวณหนึ่ง มันจะทำให้ระยะห่างระหว่างจุดสองจุดในกาล-อวกาศเปลี่ยนไป คลื่นความโน้มถ่วงเป็นคลื่นที่มีตัวกลางเป็นเพียงกาล-อวกาศเท่านั้น ดังนั้นต่อให้บริเวณนั้นเป็นที่ว่างเปล่าหรือสุญญากาศ คลื่นความโน้มถ่วงก็สามารถเคลื่อนที่ผ่านไปได้ เช่นเดียวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถเดินทางได้แม้ในสุญญากาศ แต่สิ่งที่ทำให้คลื่นความโน้มถ่วงต่างจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคือ ไม่มีอะไรมาขวางกั้นมันได้ มันสามารถเคลื่อนผ่านได้ทุกสิ่งทุกอย่าง การเคลื่อนผ่านของมันเป็นเพียงแค่สร้างการเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างจุดสองจุดบนวัตถุนั้นเล็กน้อย แล้วก็ผ่านไปเฉย ๆ เมื่อผ่านไปแล้ว ตัวกลางซึ่งก็คือ กาล-อวกาศก็จะกลับมาเป็นเหมือนเดิม ไม่ทิ้งร่องรอยไว้ เช่นเดียวกับคลื่นอื่น ๆ เช่น คลื่นน้ำ หรือ คลื่นเสียงก็ไม่ทิ้งร่องลอยไว้ในน้ำหรืออากาศเมื่อมันเคลื่อนที่ผ่านไปแล้ว

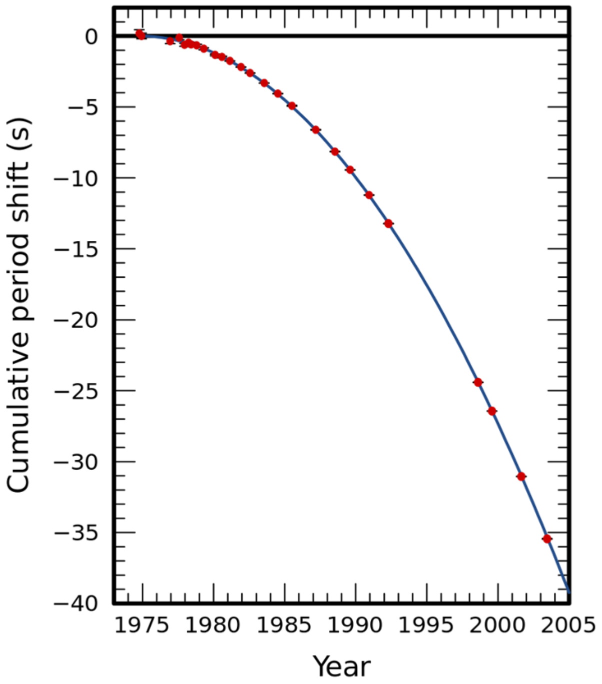
ภาพของกาล-อวกาศอันแสนอัศจรรย์

แม้คลื่นความโน้มถ่วงจะเหมือนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตรงที่สามารถเดินทางผ่านบริเวณที่ว่างเปล่าได้เหมือนกัน โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ แต่คลื่นความโน้มถ่วงใช้กาล-อวกาศเป็นตัวกลางในการเคลื่อนที่ ท่านผู้อ่านลองคิดดูว่ามันน่าอัศจรรย์เพียงใด ในบริเวณที่ไม่มีอะไรอยู่เลย คือ ไม่ว่าเราจะพยายามนำมวลสารและพลังงานออกจากบริเวณนั้นอย่างไรก็ตาม หากมันยังสามารถเป็น "บริเวณ" ได้ คือ ยังเป็นกาล-อวกาศ ก็จะต้องมีโครงสร้างบางอย่างที่สามารถสั่น ยืดหด เป็นตัวกลางของคลื่นความโน้มถ่วง และที่สำคัญโครงสร้างนั้นสามารถส่งผ่านพลังงานจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งได้

คำถามเกี่ยวกับกาล-อวกาศที่ลึกซึ้ง เช่น กาล-อวกาศ เป็นสิ่งที่มีอยู่จริงหรือไม่ เป็นมรดกที่ทิ้งไว้โดยบิดาของวิชาฟิสิกส์อย่าง Newton บางคำถามที่ดูง่าย ๆ เช่น ทุกคนรู้ว่าโลกหมุนรอบตัวเอง 1 รอบใช้เวลา 24 ชั่วโมง แต่ถ้าในเอกภพนี้ไม่มีมวลอื่นอยู่เลย เราจะรู้ได้อย่างไรว่าโลกหมุนรอบตัวเอง 1 รอบใช้เวลา 23 ชั่วโมง 56 นาที 4 วินาที หรือ ถามแบบเบื้องต้นที่สุด ถ้าไม่มีมวลอื่นในอวกาศอยู่เลย เราจะรู้ได้อย่างไรว่าโลกหมุนอยู่หรือไม่ มันจะหมุนเทียบกับอะไร อวกาศ (แกน xyz) มันเป็นสิ่งที่มีอยู่ได้อย่างสัมบูรณ์ด้วยตัวของมันเอง (เป็น absolute space) หรือไม่? หรือมันจะมีอยู่ได้ก็ต่อเมื่อมีมวลอื่น ๆ อยู่เพื่อให้เปรียบเทียบสัมพัทธ์กัน เช่น ต้องมีมวลอย่างน้อยสองมวล ระยะทางจึงจะมีความหมาย? คำถามถึงการมีอยู่ของกาล-อวกาศในลักษณะนี้ Newton ได้ถามเป็นคนแรก ๆ (ดูเรื่อง ถังน้ำของนิวตัน หรือ Newton's bucket) และมีนักคิดพยายามจะตอบคำถามนี้เรื่อยมา แต่ไม่ได้มีความก้าวหน้าเท่าไร จนกระทั่ง ปี ค.ศ.1883 นักฟิสิกส์และปรัชญา Ernst Mach ได้เสนอคำตอบหนึ่ง ซึ่งกลายเป็น Mach's principle ซึ่งบอกว่าการหมุนของโลกจะมีได้ก็ต้องมีมวลอื่น ๆ ในเอกภพอยู่ด้วย หรือ กล่าวให้ชัดเจนกว่านั้นคือ ตัวกรอบอ้างอิงหรือพิกัดในอวกาศที่นำมาใช้อธิบายการเคลื่อนที่ หรือการหมุน มันจะต้องคิดมาจากการกระจายตัวของมวลอื่น ๆ ในเอกภพ แนวคิดของ Mach นี่เองที่ Einstein นำไปพัฒนาเป็นทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป

กาล-อวกาศตามความรู้ในปัจจุบัน จึงไม่ใช่แค่ที่ว่างและเวลาที่นักฟิสิกส์นิยามขึ้นเพื่อความสะดวกในการวัด แต่เป็นสิ่งที่มีตัวตน ทำให้เปลี่ยนแปลงได้ แม้แต่การหมุนของโลกเองก็สามารถทำให้กาล-อวกาศที่อยู่รอบๆ ถูกลากให้หมุนตามไปด้วย เหมือนกับภาพน้ำในถังเครื่องซักผ้าที่ถูกปั่นให้หมุนวน ปรากฏการณ์นี้เรารู้จักกันในชื่อของ Lense–Thirring effect ซึ่งค้นพบหลังจากมีทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปเพียงสองปีและได้รับการยืนยันว่าจริงด้วยผลการทดลองจากดาวเทียม Gravity Probe B เมื่อประมาณสิบปีที่แล้ว ปรากฏการณ์อันพิสดารต่าง ๆ เกี่ยวกับการมีตัวตนของกาล-อวกาศได้รับการทดลองพิสูจน์ยืนยันด้วยการทดลองมากมาย สำหรับนักวิจัยที่สนใจเรื่องเหล่านี้สามารถอ่านได้จากงานของ Will [6] ทฤษฎีและการทดลองเกี่ยวกับสัมพัทธภาพทั่วไปได้ก้าวหน้าเป็นอย่างมาก ในปัจจุบัน การค้นพบพัลซาร์คู่อย่าง J0737-3039 สามารถพิสูจน์ยืนยันทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปว่าถูกต้องแม่นยำถึง 0.05% [7]

หลักฐานการส่งผ่านพลังงานในรูปของคลื่นความโน้มถ่วงถูกค้นพบครั้งแรกโดยกล้องโทรทรรศน์วิทยุ Arecibo ในปวยร์โตริโก (Puerto Rico) เป็นการตรวจสอบการสูญเสียพลังงานของวงโคจรพัลซาร์คู่ในกาแล็กซีของเรา โดย R. Hulse และ J. Taylor ได้ค้นพบระบบพัลซาร์คู่ PSR 1913+16 เมื่อปี ค.ศ. 1974 ซึ่งเป็นระบบดาวนิวตรอนคู่ดังกล่าวมีมวลแต่ละอันประมาณ 1.4 เท่าของดวงอาทิตย์ตามลิมิตที่คำนวณโดย S. Chandrasekhar พอดี คาบของวงโคจรของดาวคู่นี้ประมาณ 0.32 วัน ซึ่งทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปทำนายว่าวงโคจรจะสูญเสียพลังงานในรูปของคลื่นความโน้มถ่วงทำให้คาบเปลี่ยนแปลงลดลงด้วยอัตราประมาณ 2.4×10^{-12} วินาทีต่อหนึ่งวินาที [8] จากการเก็บข้อมูลจริงพบว่าสอดคล้องกับที่ทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปทำนายไว้ โดยคลาดเคลื่อนไม่เกิน $0.13\pm 0.21\%$ และเมื่อนำ การเลื่อนไปสะสม ของ epoch of periastron (จุดที่ใกล้ที่ดาวไปใกล้กันที่สุด) มาเขียนกราฟก็พบว่าสอดคล้องกับทฤษฎีเป็นอย่างดี (ดูรูปที่ 3) จึงยืนยันได้ว่ามีสิ่งที่เรียกว่าคลื่นความโน้มถ่วงขโมยพลังงานออกไปจากวงโคจรของดาวคู่นี้จริง



รูปที่ 3 *แสดงการสูญเสียพลังงานของวงโคจรระบบพัลซาร์คู่ PSR 1913+16 โดยพล็อต การเลื่อนไปสะสม ของ epoch of periastron ที่สังเกตได้ในปีต่าง ๆ เทียบกับทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป บางช่วงที่จุดห่างเกิดจากการปิดอัพเกรดของกล้องโทรทัศน์ การเก็บข้อมูลเป็นระยะเวลา 30 ปี พบว่าผลการสังเกตการณ์สอดคล้องกับทฤษฎีคลื่นความโน้มถ่วงเป็นอย่างดี (เครดิตภาพ [8])*

ซิมโฟนีอันแผ่วเบาในโรงละครเอกภพ

การค้นพบคลื่นความโน้มถ่วง GW150914 จากการเต้นรำรอบกันและกันของคู่หลุมดำนำไปสู่รางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ประจำปี ค.ศ. 2017 หลุมดำเป็นหนึ่งเทหวัตถุที่มีความแปลกพิสดารที่สุดที่มนุษย์เราค้นพบ เพราะมันไม่ได้ประกอบขึ้นจากสสาร เหมือนโลก ดาวฤกษ์ หรือแม้แต่ ดาวนิวตรอน โดยแท้จริงแล้วหลุมดำประกอบขึ้นจากกาล-อวกาศล้วน ๆ โดยมีขนาดของขอบฟ้าเหตุการณ์ (event horizon) กำกับโดยรัศมี Schwarzschild ใช้บรรยายตัวมันเท่านั้น (สำหรับหลุมดำแบบไม่หมุนและไม่มีประจุ) ดังนั้นในทางทฤษฎี หลุมดำที่ขนาดเท่ากัน (มวลเท่ากัน) จะมีความเหมือนกันทุกประการ ไม่สามารถแยกแยะได้ตาม no-hair theorem ดังนั้นถ้าเราพบหลุมดำที่มีมวลขนาดใหญ่หลุมหนึ่ง เราจะไม่มีทางบอกได้เลยว่าหลุมมาจากไหน มันอาจเกิดขึ้นจากดาวที่มีมวลมาก ๆ ยุบตัวกลายเป็นหลุมดำ หรือเป็นหลุมดำขนาดเล็กที่กินแก๊สและดาวข้างเคียงจนมันตัวอ้วนขึ้น หรือเกิดจากการหลอมรวมของหลุมดำขนาดเล็กกว่าสองหลุม ทั้งนี้เพราะว่าหลุมดำจะไม่เก็บประวัติศาสตร์ของตนเองไว้เลย แถมยังทำลายประวัติและข้อมูลที่แฝงอยู่ในวัตถุทุกสิ่งที่มันดูดกลืนเข้าไป อะไรก็ตามที่ผ่านขอบฟ้าเหตุการณ์ของหลุมดำไปแล้วจะไม่มีวันได้กลับออกมาอีก มันจะถูกทำลายสูญสลายกลายเป็นกาล-อวกาศที่เป็นส่วนหนึ่งของหลุมดำไป เป็นความเรียบง่าย เป็นความสวยงามและเป็นสมมาตรที่สมบูรณ์ ด้วยเหตุนี้คลื่นความโน้มถ่วง GW150914 จึงเปรียบเหมือนบทเพลงซิมโฟนีที่บันทึกไว้ในกาล-อวกาศของเอกภพ [2] เพียงชิ้นเดียวที่บอกให้เรารู้ได้ว่า เจ้าหลุมดำมวล 62 เท่าของดวงอาทิตย์ที่ห่างออกไป 440 Mpc นั้นเกิดจากหลุมดำสองหลุมมาหลอมรวมกัน และถ้าวันที่ 14 กันยายน ค.ศ. 2015 เราไม่ได้วัดคลื่นความโน้มถ่วง

เราจะไม่มีทางรู้ได้เลยว่า ณ ที่ไกลออกไปตรงนั้นมีหลุมดำอยู่ เพราะหลังจากการหลอมรวมกันสำเร็จก็จะไม่มีการปล่อยคลื่นความโน้มถ่วงพลังงานสูงอีกต่อไป บทเพลงซิมโฟนีได้สิ้นสุดลง เหลือแต่เพียงความเงียบงันที่เราวัดไม่ได้

ตามความรู้ในปัจจุบัน ขอบฟ้าเหตุการณ์ของหลุมดำเปรียบได้กับเขตสิ้นสุดพรมแดนของฟิสิกส์ทฤษฎี เลยจากขอบฟ้าเหตุการณ์เข้าไปในหลุมดำ จะเป็นที่สิงสถิตของปีศาจร้ายที่ชื่อว่า ภาวะเอกฐาน (singularity) ซึ่งเป็นบริเวณนั้นทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปไม่สามารถใช้ได้ พวกเราอาจรู้สึกปลอดภัยที่ปีศาจร้ายถูกกักขังไว้ในกรงของขอบฟ้าเหตุการณ์ แต่ความจริงไม่ได้เป็นเช่นนั้น ย้อนไป ค.ศ. 1955 มีงานวิจัยจากนักฟิสิกส์ชาวอินเดีย A. K. Raychaudhuri ได้เขียนสมการแสดงพฤติกรรมทั่วไปในการไหลของกลุ่มเส้น geodesics ในสนามความโน้มถ่วง ซึ่งรู้จักกันในปัจจุบันในชื่อ สมการ Raychaudhuri ซึ่งประมาณสิบปีต่อมานักคณิตศาสตร์ชาวอังกฤษ R. Penrose และ Hawking ก็ได้ใช้สมการนี้พิสูจน์ได้ว่าหลุมดำทุกหลุมจะต้องมีภาวะเอกฐาน ยิ่งไปกว่านั้นถ้าใช้ทฤษฎีบทนี้กับเอกภพก็จะได้ว่า ย้อนไปตอนจุดเริ่มต้นทุกสิ่งทุกอย่างในเอกภพล้วนมาจากสภาวะเอกฐาน ปีศาจร้ายเคยอยู่ทุกหนทุกแห่ง คลื่นความโน้มถ่วงจึงเป็น สัญญาณที่ปล่อยออกมาจากบริเวณที่ใกล้ภาวะเอกฐานได้มากที่สุดแล้ว

คลื่นความโน้มถ่วงเป็นสัญญาณทางฟิสิกส์ชนิดเดียวที่มาจากบริเวณขอบฟ้าเหตุการณ์ได้ งานวิจัยเกี่ยวกับหลุมดำที่ผ่านมา จะวัดสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากอนุภาคเคลื่อนที่รอบหลุมดำใน accretion disk หรือ ตรวจวัดลำแสงที่ทรงพลังอย่าง relativistic jets ก็ถือว่าเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นไกลจากขอบฟ้าเหตุการณ์ออกไปมาก มีแต่คลื่นความโน้มถ่วงที่สามารถทะลุทะลวงได้ทุกสิ่งเท่านั้นที่จะออกมาจากบริเวณขอบฟ้าเหตุการณ์แล้วเดินทางมาถึงเราได้ ส่วนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่กำเนิดใกล้ขอบฟ้าเหตุการณ์จะถูกอนุภาคโดยรอบหลุมดำบดบังไม่สามารถหลุดออกมาได้ ไม่มาถึงเรา ในส่วนของเอกภพวิทยาก็เช่นกัน สัญญาณที่พาเราไปใกล้จุดกำเนิดของเอกภพมากที่สุด ก็คือ คลื่นความโน้มถ่วง มันพาเราย้อนเวลาไปได้ไกลกว่า คลื่นไมโครเวฟ หรือ คลื่นอินฟาเรด ที่ใช้ศึกษาเอกภพเป็นหลักอยู่ในปัจจุบัน

ย้อนไปเมื่อประมาณปี ค.ศ. 1957 มีนักฟิสิกส์คนหนึ่งที่วุฒิการศึกษาสูงสุดปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตร์จากโรงเรียนนายเรือสหรัฐ ชื่อ J. Weber ได้ศึกษาทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปในกลุ่มวิจัยของ John Wheeler จนเชี่ยวชาญ [2] เขารู้สึกว่าการวัดคลื่นความโน้มถ่วงแม้จะยากจนเกือบเป็นไปไม่ได้ แต่ก็เป็นสิ่งสำคัญมากคุ้มค่ามากที่จะลองวัดดู Weber จึงได้ทุ่มเทออกแบบหาวิธีจะวัดคลื่นความโน้มถ่วงให้ได้ แต่ละแนวคิดใหม่ๆ ที่คิดได้ ถูกคำนวณเพื่อทดสอบความเป็นไปได้ จดรวมกันในสมุดบันทึกที่หนาร่วม 300 หน้า จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1959 Weber ได้สร้างเครื่องตรวจวัดจากเซนเซอร์ที่ทำจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric) ติดบนแท่งอลูมิเนียมยาว 2 เมตร เรียกว่า Weber bar (ดูรูปที่ 4) ในเวลานั้นเขาไม่รู้ว่าคลื่นความโน้มถ่วงจะมีความถี่เท่าใด เลยใช้ความถี่จากวัตถุที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วแสงรอบ compact object ซึ่งจะให้คลื่นความโน้มถ่วงประมาณ 10,000 Hz ตามการออกแบบความถี่ธรรมชาติของ Weber bar จะมีค่าประมาณ 1,660 Hz นั่นก็หมายความว่าถ้าโชคดีก็อาจมีคลื่นความโน้มถ่วงที่ความถี่ต่ำลงมาที่บาร์ก็จะวัดได้ ในช่วงแรกมีเพียง Weber คนเดียวที่ทำการทดลองแบบนี้ แต่หลังจากที่เขาตีพิมพ์ว่าเขา “ตรวจพบ” คลื่นความโน้มถ่วงเมื่อปี ค.ศ. 1968 ก็จุดประกายให้กลุ่มวิจัยอื่น ๆ ทั่วโลกเป็นร้อยกลุ่มทำงานวิจัยตาม น่าเสียดายที่ไม่มีใครทำตามได้สำเร็จเลย

Kip Thorne แห่ง California Institute of Technology หนึ่งในผู้ที่ได้รับรางวัลโนเบลประจำปี ค.ศ. 2017 เป็นคนหนึ่งที่พยายามบอกว่าผลการทดลองของ Weber ไม่เป็นจริง ย้อนกลับไปในช่วงเวลานั้นหัวข้องานวิจัยที่ร้อนแรงที่สุด คือ หลุมดำ ซึ่งมีนักฟิสิกส์ระดับเทพมากมายอยู่ในสนามแข่งขัน เช่น Hawking ผู้นำทีมอังกฤษ หรือ คู่หูอาจารย์-ศิษย์ Zeldovich และ Novikov ผู้นำทีมรัสเซีย หรือ Wheeler และลูกศิษย์ (ซึ่งรวม Thorne ด้วย) ผู้นำทีมอเมริกา เนื่องจาก Thorne ไม่ชอบบรรยากาศการแข่งขันที่กดดันแบบนี้ เขาจึงรู้สึกว่า

หลุมดำไม่น่าสนใจสำหรับการทำวิจัยเป็นเรื่องหลัก เขาอยากมองหาเรื่องอื่นที่ทำแล้วได้เป็นผู้ริเริ่มให้คนอื่นๆ ตามมากกว่า และเมื่อมีการทดลองของ Weber ขึ้นมา เขาจึงหันมาสนใจงานวิจัยด้านคลื่นความโน้มถ่วงแทน ในตอนนั้นเป็นงานวิจัยที่ดูไม่มีอนาคต ไม่มีคนสนใจเท่าไร ปัญหาที่น่าสนใจเมื่อมีการทดลองแล้วก็คือ คลื่นความโน้มถ่วงจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของ Weber bar ที่หนัก 1 ตัน ยาว 2 เมตรได้มากน้อยเท่าไร ปริมาณที่ต้องคำนวณให้ได้ คือ strain นิยามคือ $\Delta L/L$ เมื่อ L คือ ความยาวของสิ่งที่จะวัดคลื่นความโน้มถ่วง และ ΔL คือ ความยาวของเครื่องมือวัดที่เปลี่ยนไป Thorne และนักทฤษฎีคนอื่น ๆ ลองคำนวณค่า strain ที่มากที่สุด ที่เกิดจากคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงสุดที่จะเดินทางมาถึงโลกเราได้ เขาได้ strain $\Delta L/L = 10^{-21}$ ซึ่งหากแทน L = 2 เมตร ก็จะได้การเปลี่ยนแปลงความยาวของ Weber bar มีค่าน้อยเพียงหนึ่งส่วนล้านเท่าของขนาดของนิวเคลียสของอะตอม ต่อเซนเซอร์ดีแค่ไหนก็วัดไม่ได้ ขนาดของ Weber bar เล็กเกินไป และ คลื่นความโน้มถ่วง ซิมโฟนีของเอกภพมันแผ่วเบาจนเกินไป

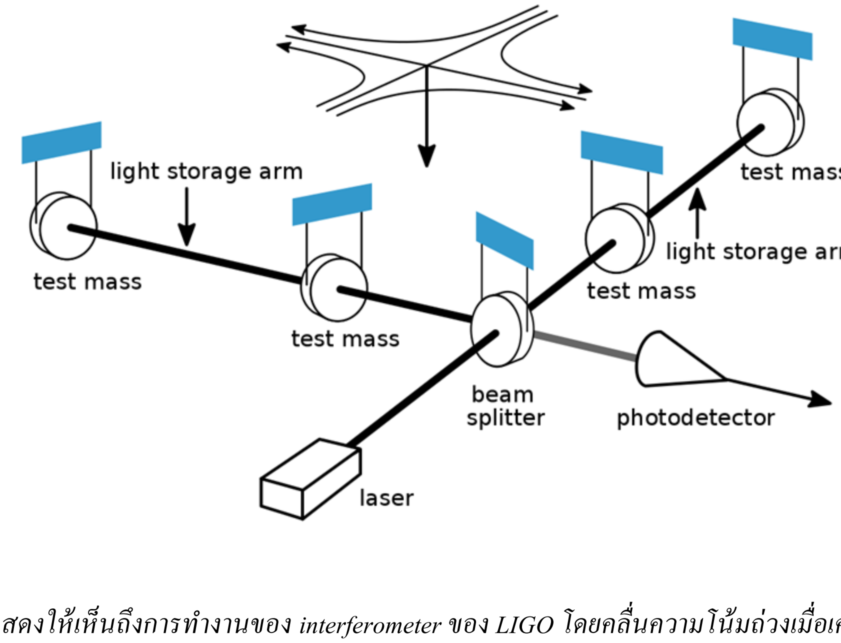
รูปที่ 4 *J. Weber และเครื่องวัดคลื่นความโน้มถ่วงของเขา ซึ่งทำจากแท่งอะลูมิเนียมและวัดความยาวของแท่งที่เปลี่ยนแปลงด้วยเซนเซอร์ที่ทำจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (เครดิตภาพ University of Maryland Libraries) ซึ่งแท่งอลูมิเนียมดังกล่าวมีขนาดเล็กเกินกว่าคลื่นความโน้มถ่วงจะสร้างความเปลี่ยนแปลงของความยาวให้ตรวจวัดได้*

กำเนิด LIGO

เมื่อ Thorne หันมาจับเรื่องคลื่นความโน้มถ่วงเต็มตัว เขาก็อยากสร้าง Weber bar ที่สามารถวัดคลื่นความโน้มถ่วงได้จริง แม้เขาจะทำการคำนวณพบว่าคลื่นความโน้มถ่วงทำให้ขนาดของ Weber bar เปลี่ยนแปลงน้อยมาก ๆ ก็ตาม แต่กระนั้นก็ตาม Thorne ก็ยังมีความหวังว่าเทคโนโลยีจะสร้างเซนเซอร์ที่ไวพอที่จะวัดได้ ดังนั้นในปี ค.ศ. 1976 เขาพยายามทำแผนขอทุนเพื่อสร้างเครื่องวัดคลื่นความโน้มถ่วงจาก Caltech และพยายามดึงตัวนักฟิสิกส์ชาวรัสเซีย V. Braginsky ที่เป็นมือหนึ่งด้านการทดลองวัดคลื่นความโน้มถ่วงมาร่วมทีม แต่การเมืองระหว่างสหรัฐกับรัสเซียในช่วงสงครามเย็นมันไม่ง่าย Braginsky ไม่อยากมีปัญหาจึงแนะนำให้ Thorne ไปดึง Ronald Drever ที่อยู่ University of Glasgow มาร่วมทีมแทน

การดึง Drever ถือเป็นจุดเปลี่ยนที่สำคัญในประวัติศาสตร์การค้นพบคลื่นความโน้มถ่วง เพราะ Drever เป็นคนที่ทักท้วง Thorne ว่าเครื่องวัดความโน้มถ่วงแบบ Weber bar มันมีข้อจำกัดเกินไป ไม่มีอนาคต ซึ่งแม้แต่ Braginsky เองที่เป็นผู้เชี่ยวชาญอันดับหนึ่งของโลกในด้านนี้ได้ลองใช้หลักความไม่แน่นอนของ Heisenberg ตรวจสอบค่าที่ละเอียดสูงสุดที่เครื่องวัดแบบ Weber bar ว่าจะสามารถวัดได้ละเอียดแค่ไหนในทางทฤษฎี และพบว่าการเปลี่ยนแปลงความยาวของแท่งวัดตาม strain ที่ได้จากการคำนวณของ Thorne จะมี ΔL ที่เล็กเกินกว่าลิมิตทางควอนตัมของเครื่องมือวัดเสียอีก ดังนั้น Drever กล่อมให้ Thorne เลิกสร้าง Weber bar แล้วหันไปใช้การวัดระยะที่เปลี่ยนไปจากการแทรกสอดของแสงแทน เครื่องมือดังกล่าวเรียกว่า interferometer (ดูรูปที่ 5) ใช้หลักการเดียวกับการทดลอง Michelson และ Morley ที่เป็นพื้นฐานของทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ แต่ในทางเทคนิคแล้วเครื่องที่วัดคลื่นความโน้มถ่วงได้จริงซับซ้อนกว่าเครื่อง Michelson และ Morley มหาศาล ถ้าเริ่มจาก interferometer เราสามารถขยายแขนของเครื่องวัดให้ยาวเป็นกิโลเมตรก็ได้ แม้จะยุ่งยากมากในแง่การทดลอง แต่ในทางทฤษฎีสามารถทำได้ นับเป็นหนทางที่จะเอาชนะควอนตัมลิมิต ย้อนกลับไปดู จะพบว่าแนวคิดที่จะใช้ interferometer ในการวัดคลื่นความโน้มถ่วงไม่ได้ใหม่ ได้ถูกเสนอมาก่อนหน้านั้นโดยชาวรัสเซีย M. Gertenshtein และ V. I. Putovoit ในปี ค.ศ. 1962 หรือแม้แต่ Weber เองในปี ค.ศ. 1964 แต่ที่เสนอมาเป็นแบบง่าย ๆ ยังห่างไกลจากการนำไปใช้งานได้จริง

Rainer Weiss แห่ง Massachusetts Institute of Technology (MIT) หนึ่งในผู้รับรางวัลโนเบล ค.ศ. 2017 ซึ่งไม่ได้ทราบงานของทั้งสองกลุ่มข้างต้นมาก่อน ได้เสนอเครื่องวัดคลื่นความโน้มถ่วงที่ปรับปรุงให้ซับซ้อนกว่า มีความเป็นไปได้ในการวัดมากกว่าในปี ค.ศ.1969 ซึ่งพอถึงช่วงยุคหลังของทศวรรษที่ 1970 เครื่องวัดแบบ interferometer ก็ได้พัฒนาความไวในการวัดจนกลายเป็นคู่แข่งที่สำคัญของ Weber bar ซึ่ง Drever ก็ได้นำเอา interferometer ในท้องตลาดปรับปรุงการออกแบบให้ชาญฉลาดยิ่งขึ้นเป็นงานที่สำคัญ ซึ่งทำให้เขาเป็นตัวเต็งคนหนึ่งที่จะได้รับรางวัลโนเบล เสียดายที่ Drever ได้เสียชีวิตก่อนเมื่อต้นปี ค.ศ. 2017 จึงไม่ได้รับรางวัล



รูปที่ 5 *แผนภาพอย่างง่ายที่แสดงให้เห็นถึงการทำงานของ interferometer ของ LIGO โดยคลื่นความโน้มถ่วงเมื่อเคลื่อนที่มาจากด้านบนดังภาพ จะทำให้ความยาวแขนของเครื่องวัดเปลี่ยนแปลงไป ความเปลี่ยนแปลงสามารถอ่านได้จากริ้วของการแทรกสอดที่เกิดขึ้น (เครดิตภาพ Wikimedia Commons)*

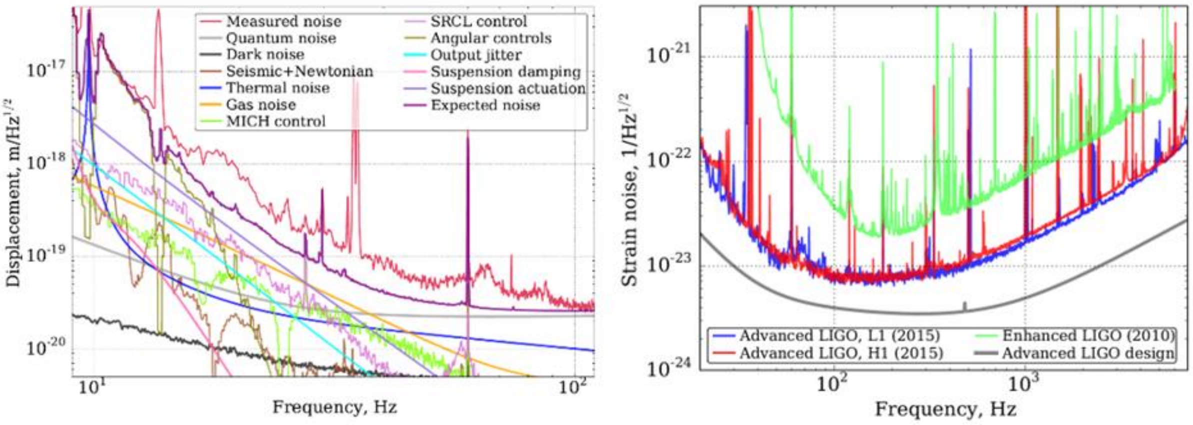
ในตอนแรกสองห้องปฏิบัติการที่ MIT นำโดย Weiss และที่ Caltech นำโดย Drever และ Thorne เป็นกลุ่มวิจัยที่แยกกัน และเป็นคู่แข่งกัน แต่ผู้ให้ทุนหลัก National Science Foundation (NSF) เห็นว่าเป็นการประหยัดภาษีประชาชนอเมริกันมากกว่า หากสองกลุ่มวิจัยนี้ถูกควบรวมกัน ทำงานร่วมกัน ซึ่งแน่นอนเสือสองตัวเมื่อต้องมาอยู่ถ้ำเดียวกันก็ไม่มีใครยอมใคร Thorne ต้องทำหน้าที่เป็นกาวใจประสานให้กลุ่มใหม่ดำเนินงานต่อไปได้ นั่นคือช่วงเวลาเริ่มแรกของ LIGO ที่ดูขลุกขลักอยู่บ้างเป็นธรรมดา แต่สุดท้ายก็ผ่านไปได้ด้วยดี แม้แต่หลังจากหมดยุคของผู้อาวุโสแล้ว นักวิจัยหน้าใหม่ในรุ่นต่อมาก็ต้องยังต้องผ่านร้อน ผ่านหนาว ผ่านการดูถูก ดูแคลนมากมาย ผ่านช่วงเวลาอันยาวนานเป็นสิบปีของการตรวจวัดแล้วไม่เจออะไร จนบางคนล้อว่าเป็นเครื่องวัดการสั่นสะเทือนของฝูงควายไบซัน หรือเครื่องตรวจจับแผ่นดินไหวหรือเปล่า วันดีคืนดี ก็เจอชาวบ้านเอาปืนมายิงอุโมงค์เพราะมันขวางทางสัญจรก็มี [9]

อุปสรรคและชัยชนะของทีมวิจัย LIGO

รางวัลโนเบลอาจมีไว้สำหรับผู้อาวุโส 2-3 คนที่ริเริ่มต้นโครงการ LIGO แต่กว่าเครื่องมือจะผ่านการพัฒนาให้วัดได้จริงต้องผ่านความล้มเหลวและชัยชนะของนักวิจัยของนักวิจัยที่เข้ามาและออกไปในโครงการ LIGO อีกหลายร้อยหลายพันชีวิต ในส่วนนี้ของบทความ ผู้เขียนจะขอใช้ “ตัวเลข” เป็นการบอกเล่าเรื่องราวเพื่อให้เห็นภาพความยากลำบากว่าเป็นอย่างไร

ตามทฤษฎี เมื่อลองใส่ค่าการรบกวนเล็กๆ $h_{\mu\nu}$ จากกาล-อวกาศแบนราบใน สมการ Einstein เราจะได้สมการคลื่นของการรบกวนดังนี้ $\partial^{\mu}\partial^{\nu}h_{\mu\nu} = 0$ ซึ่งก็คือ สมการคลื่นความโน้มถ่วง นั่นเอง เมื่อลองคำนวณกรณีง่ายๆ ตามตำรามาตรฐาน [10] จะได้ขนาดของการรบกวน (แอมพลิจูดของคลื่น) ที่เกิดจากระบบมวล M เท่ากันสองมวลโคจรรอบกันด้วยรัศมี R คือ $h \approx (4\pi^2GMR^2f^2)/c^4r$ เมื่อแทนค่าตัวเลขทางดาราศาสตร์คร่าวๆ เช่น $M \sim 10^{30}$ kg, $R \sim 20$ km และ ความถี่ $f \sim 400$ Hz ตามสถานการณ์นี้ คือ ดาวคู่ที่มีมวลประมาณดวงอาทิตย์ โคจรรอบกันด้วย 15% ของความเร็วแสงซึ่งได้ความถี่ประมาณ 400 Hz ลองให้แหล่งกำเนิดคลื่นนี้อยู่ไม่ไกลมากไป $r= 10^6$ ly $=9.5\times10^{18}$ km เราจะได้ $h \approx 10^{-21}$ จาก strain ที่เคยกล่าวถึง $\Delta L/L = h$ เมื่อแทนค่า $L =1$ km เราจะได้ $\Delta L \approx 10^{-18}$ m นี่คือ การเปลี่ยนแปลงระยะห่างกระจกที่ทีม LIGO ต้องวัดให้ได้ ระยะที่ว่านี้เล็กแค่ไหน ลองพิจารณาขนาดโดยประมาณของนิวเคลียสของอะตอมไฮโดรเจน คือ 1.2×10^{-15} m นั่นคือ ทีม LIGO ต้องวัดการขยับของกระจกที่น้อยประมาณหนึ่งในพันของขนาดนิวเคลียสของอะตอมไฮโดรเจนให้ได้ ถือเป็นเรื่องที่เหลือเชื่อมาก

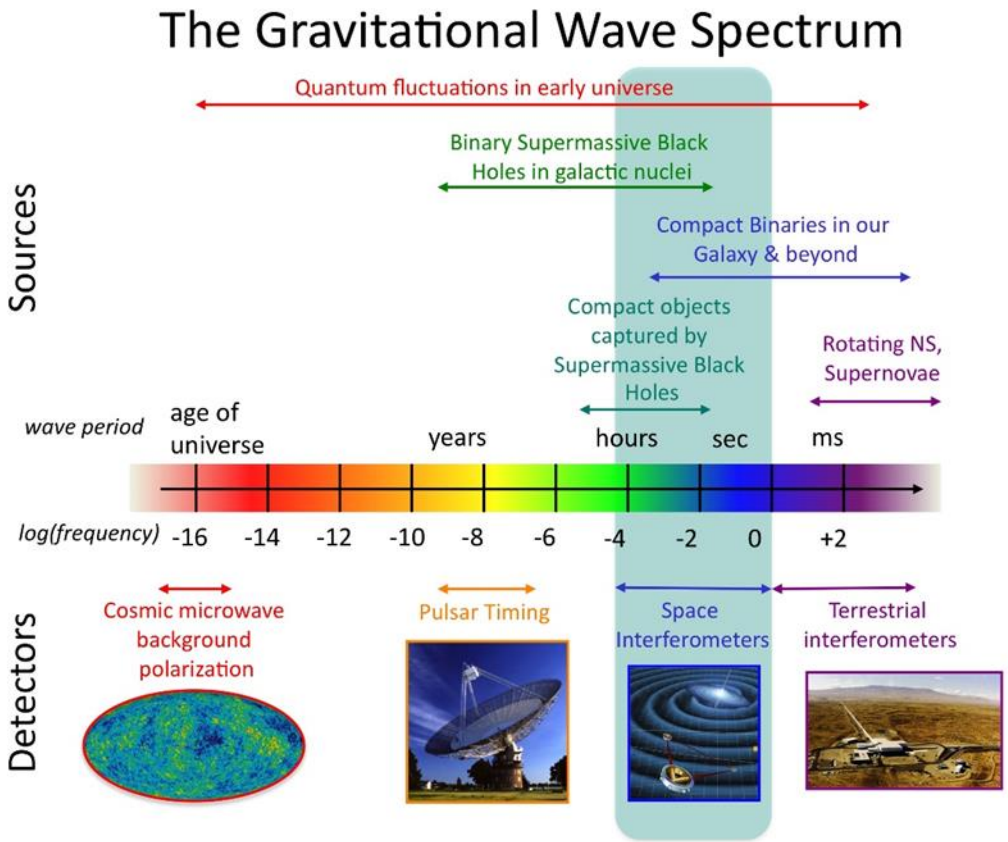
แล้วทีม LIGO สามารถทำได้แค่ไหน จากการบรรยายของท่าน Kip Thorne ที่ผู้เขียนได้ร่วมรับฟังเมื่อปลายปี ค.ศ. 2011 [11] ท่านบอกว่าตามแผน ปี ค.ศ. 2017 LIGO จะวัด strain ได้ละเอียดถึง $\Delta L/L = h = 10^{-23}$ นั่นหมายถึง การขยับของกระจกมีระยะประมาณหนึ่งส่วนแสนเท่าของขนาดนิวเคลียสของอะตอมไฮโดรเจน!!! การทดลองที่แม่นยำน่าเหลือเชื่อนี้ต้องมีพื้นฐานจากระบบอุโมงค์สุญญากาศที่ยาวและดีที่สุดในโลกของ LIGO การแขวนกระจกที่นิ่งอย่างที่สุด สามารถตัดการไหวสะเทือนต่างๆ (seismic noise) ได้อย่างเยี่ยมยอด ในแง่ทฤษฎี เมื่อเราพิจารณากระจกของ LIGO ที่หนักประมาณ 40 กิโลกรัมจึงนับว่าเป็นวัตถุขนาดใหญ่ ระดับขนาดของมนุษย์ แต่เรากำลังสนใจพฤติกรรมระดับควอนตัมของมัน ก็คือ เรากำลังดูการเคลื่อนไหวของกระจกในระยะทางที่เล็กกว่าขนาดของนิวเคลียสของอะตอมเสียอีก จะว่าไปนี่ก็คือเป็นการทดลองตามทฤษฎีควอนตัมแขนงใหม่ ที่ชื่อว่า quantum nondemolition measurement เป็นสาขา Braginsky และ Thorne ร่วมกันพัฒนาขึ้นมาเพื่อการวัดคลื่นความโน้มถ่วงโดยเฉพาะ จากคำบอกเล่าของ อาจารย์ ดร. ธารา เฉลิมทรงศักดิ์ นักวิจัยไทยที่ร่วมพัฒนา interferometer รุ่นที่ 3 (ที่จะใช้ในการอัพเกรดครั้งต่อไปของโครงการ LIGO) ท่านเล่าว่า นักศึกษาแค่ทำวิจัยการลดสัญญาณรบกวน (noise) เพียงบางเส้นก็เพียงพอแล้วสำหรับการจบปริญญาเอก สัญญาณรบกวนที่สามารถเกิดกับเครื่องวัดมีได้มากมาย แค่แขวนไว้เฉยๆ โมเลกุลของแก๊สที่ยังหลงเหลือจากการทำสุญญากาศมาชนก็เป็นสัญญาณรบกวนแล้ว แม้กระทั่งสิ่งที่จะใช้วัด แสงเองก็ทำให้เกิดสัญญาณรบกวน ความดันที่เกิดจากแสงเลเซอร์กำลังสูง (เพราะแขนยาว 4 กิโลเมตร) ก็ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนที่น่ากลัว เอาเข้าจริง ถ้าเราจะจำกัดการสั่นของกระจกให้ $\Delta L < 10^{-19}$ m อะไรก็เป็นสัญญาณรบกวนได้ทั้งนั้น การวัดคลื่นความโน้มถ่วงได้จึงสะท้อนถึงความก้าวล้ำทางเทคโนโลยีและวิศวกรรมของมนุษย์เราในยุคปัจจุบันอย่างแท้จริง



รูปที่ 6 *ภาพด้านซ้าย เป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดจากฟิสิกส์ที่แตกต่างกัน ดังที่แสดงเป็นเส้นสีต่าง ๆ เมื่อรวมสัญญาณรบกวนทุกอันเข้าด้วยกันจะได้เส้น expected noise ที่จะบอกถึงความไวของเครื่องวัด LIGO, ภาพด้านขวา แสดงความไวของเครื่อง LIGO กล่าวคือ เครื่องจะวัดได้ก็ต่อเมื่อสัญญาณ strain มีค่ามากกว่าเส้นผลรวมของสัญญาณรบกวน จากภาพจะเห็นว่าเครื่องจะวัดได้ไวที่สุดช่วง 100-1,000 Hz ซึ่ง aLIGO ถูกออกแบบให้วัด strain ได้เล็กกว่า* 10^{-23} *เลยทีเดียว (เครดิตภาพ [12])*

ก้าวสู่โลกใบใหม่ที่ท้าทาย

ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว คลื่นความโน้มถ่วงเป็นสัญญาณฟิสิกส์เพียงหนึ่งเดียวที่พาเราเข้าใกล้ปีศาจ singularity ที่คอยหลอกหลอนทฤษฎีฟิสิกส์ได้มากที่สุด จะไม่มีสัญญาณฟิสิกส์อื่น ๆ จากบริเวณนั้นสามารถส่งผ่านเดินทางมาถึงเครื่องวัดของมนุษย์ได้ตามทฤษฎีฟิสิกส์ที่มีอยู่ในปัจจุบัน คลื่นความโน้มถ่วงเป็นสัญญาณเดียวที่เกิดบริเวณขอบฟ้าเหตุการณ์ของหลุมดำที่เราสามารถวัดได้ เป็นสัญญาณที่พาเราเข้าใกล้จุดกำเนิดของเอกภพ หรือ บิ๊กแบง หรือช่วงเวลา singularity ของกาลอวกาศในอดีตได้มากที่สุด ถ้าหากในอนาคตมีการตรวจพบคลื่นความโน้มถ่วงที่มีลักษณะ scale invariant หรือ คลื่นความโน้มถ่วงที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกัน แต่มีลักษณะของคลื่นเป็นแบบเดียวกัน ก็จะเป็นหลักฐานที่สำคัญที่ยืนยันว่ากลไกการกำเนิดของเอกภพในช่วงเริ่มแรกมีการพองตัวของเอกภพ (ทฤษฎี inflation) มีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว (เร็วกว่าความเร็วแสง) เอกภพใหญ่โตขึ้นอย่างมหาศาล จนทำให้ quantum fluctuation ที่เกิดขึ้นในทุกสเกลเล็ก ๆ ในฟิสิกส์ระดับจุลภาคถูกขยายตัวตามเอกภพกลายเป็นปริมาณมหาภาคให้เราตรวจวัดได้ คลื่นความโน้มถ่วงประเภทนี้มีชื่อเรียกว่า primordial gravitational wave ซึ่งคลื่นที่ใหญ่ที่สุดจะมีขนาดพอ ๆ กับเอกภพของเราและมีขนาดเล็กไล่ย่อยลงไปในทุกสเกล ดังรูปที่ 7 การตรวจพบ primordial gravitational wave จะแสดงถึงความสวยงามอัศจรรย์ของฟิสิกส์ทฤษฎี



รูปที่ 7 *สเปกตรัมของคลื่นความโน้มถ่วง แหล่งกำเนิด และเครื่องมือหรือปรากฏการณ์ที่ใช้วัด จะเห็นว่า interferometer ที่วัดบนโลกอย่าง LIGO ถูกจำกัดด้วยขนาดทำให้สามารถวัดได้เพียงคลื่นความโน้มถ่วงคลื่นสั้นที่มีความถี่สูง ในขณะที่คลื่นความโน้มถ่วงคลื่นยาว สามารถมีคาบเป็นสิบปีถึงพันล้านปีหรือเทียบเท่าอายุของเอกภพ สังเกตว่า primordial gravitational wave ถ้ามีอยู่จริง มันจะมีสเกลของความยาวคลื่นในทุกสเกล เนื่องจาก quantum fluctuation ในช่วงเริ่มแรกของเอกภพสามารถมีได้ทุกสเกล (เครดิตภาพ http//lisa.nasa.gov)*

จากรูปที่ 7 สเปกตรัมของคลื่นความโน้มถ่วง ผู้อ่านจะเห็นได้ว่า LIGO เป็นเพียงแค่จุดเริ่มต้นของการตรวจวัดคลื่นที่ความถี่สูงประมาณ 100-1000 Hz และความยาวคลื่นสั้นๆ ระดับกิโลเมตร ซึ่งพอที่อุปกรณ์ที่มีขนาด 4 กิโลเมตรของ LIGO จะสามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ จากภาพจะเห็นได้ว่ายังมีสามารถมีคลื่นความโน้มถ่วงที่มีขนาดใหญ่ที่เกิดจากปรากฏการณ์อื่น ๆ อีกมากมาย แนวคิดที่จะวัดคลื่นความโน้มถ่วงที่มีความยาวคลื่นมากขึ้นเหล่านั้นก็ตรงไปตรงมาไม่ซับซ้อน คือ เราต้องเปลี่ยนไปใช้เครื่องมือวัดที่มีขนาดใหญ่ขึ้นนั่นเอง เช่น โครงการ Laser Interferometer Space Antenna หรือ LISA จะใช้ยานอวกาศสามลำ วางตัวเป็นสามเหลี่ยมด้านเท่ายาวด้านละ 2.5 ล้านกิโลเมตรนอกโลก แต่ก็ยังใช้หลักการเดียวกับ LIGO คือใช้ interferometer ในการวัด สำหรับปรากฏการณ์ที่ปล่อยคลื่นที่มีขนาดยาว เช่น ปรากฏการณ์ compact object ถูกกลืนโดยหลุมดำมวลยิ่งยวด (supermassive blackhole) ที่มีมวลอยู่ในช่วง 10^5-10^7 เท่าของดวงอาทิตย์ โดยคลื่นที่เกิดขึ้นอาจมีคาบตั้งแต่ 10 วินาทีถึง 3 ชั่วโมง

สำหรับคลื่นความโน้มถ่วงที่มีขนาดใหญ่กว่านั้น เราคงไม่สามารถสร้าง interferometer ที่มีขนาดใหญ่ตามได้ แต่โชคดีที่เรามีฟิสิกส์ว่า อัตราเร็วของคลื่นความโน้มถ่วงจะคงที่เท่ากับความเร็วแสง ดังนั้นหากคลื่นความโน้มถ่วงมีความยาวคลื่นมาก ความถี่หรือการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นก็จะอย่างช้าๆ ในช่วงคลื่นถัดไปของคลื่นความโน้มถ่วง คาบของมันอาจกินเวลาถึง 30 ปี เราจึงใช้ปรากฏการณ์ทางดาราศาสตร์ในการตรวจวัดได้ เช่น โครงการ Square Kilometre Array หรือ SKA ซึ่งเป็นโครงการยักษ์ในการติดตั้งกล้องดาราศาสตร์วิทยุ

จำนวนหลายพันจาน ให้มีพื้นที่รับสัญญาณรวมกัน 1 ตารางกิโลเมตร จะสามารถจับการเคลื่อนที่ของพัลซาร์ได้แม่นยำและกินพื้นที่ท้องฟ้าได้กว้างอย่างไม่เคยมีมาก่อน การวัดระยะห่างที่เปลี่ยนไประหว่างกันของพัลซาร์หลาย ๆ ดวงเนื่องจากคลื่นความโน้มถ่วงเคลื่อนที่ผ่านก็สามารถนำไปสู่การตรวจวัดคลื่นได้ ซึ่ง SKA ไม่ได้เป็นโครงการที่สร้างขึ้นเพื่อวัดคลื่นความโน้มถ่วงโดยตรง การวัดคลื่นเป็นเพียงผลพลอยได้หนึ่ง ยังมีปรากฏการณ์ดาราศาสตร์อื่น ๆ อีกมากมายที่ SKA จะวัดได้ หรือวัดได้ละเอียดอย่างไม่เคยเป็นมาก่อน

สุดท้ายคลื่นความโน้มถ่วงที่มีสเกลขนาดประมาณเอกภพและลักษณะของ scale invariant สามารถวัดได้จากปรากฏการณ์โพลาไรเซชันของคลื่นไมโครเวฟพื้นหลัง (B-mode polarization) ซึ่งทิ้งร่องรอยลักษณะ curl คล้ายกับคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็ก (ที่มาของชื่อ B-mode หรือโหมดของสนามแม่เหล็ก) ไว้ในรังสีไมโครเวฟพื้นหลัง โครงการตรวจวัด CMB polarization หลายโครงการตั้งอยู่ที่ขั้วโลกใต้ ผู้อ่านอาจเคยได้ยินมาว่า ประมาณปี ค.ศ. 2014 มีข่าวฮือฮาว่าโครงการ BICEP2 สามารถตรวจพบ B-mode polarization ซึ่งเป็นการยืนยันการมีอยู่ของ primordial gravitational wave จากทฤษฎี inflation ได้ แต่ว่าต่อมาทีมวิเคราะห์ข้อมูลของดาวเทียม Planck ก็ออกมาบอกว่าฝุ่นจากกาแล็กซีทางช้างเผือกก็สามารถให้แสงโพลาไรซ์ปรากฏในรังสีไมโครเวฟพื้นหลังได้เช่นเดียวกัน เป็นสัญญาณรบกวนที่มากเกินไป จนสามารถกลบผลการตรวจวัด ทำให้ BICEP 2 ไม่สามารถเคลมการค้นพบได้ ในปัจจุบันการค้นหา B-mode polarization ก็ยังคงดำเนินการกันต่อไป แข่งกันว่าโครงการใดจะวัดได้ก่อน

กลับมาที่ LIGO บ้าง ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2015 การตรวจพบคลื่นความโน้มถ่วงทั้งหมดแทบทั้งหมดเป็นกรณีหลุมดำคู่ มีเพียง 1 เหตุการณ์ที่เกิดในปี ค.ศ. 2017 (GW170817) เป็นกรณีดาวนิวตรอนคู่ ซึ่งตัวเลขจากการนับดังกล่าวก็สามารถนำไปปรับแบบจำลองทางดาราฟิสิกส์ดึงอัตราการเกิดของ compact object ที่ปัจจุบันเป็นเพียงการประมาณกว้าง ๆ ให้แม่นยำมากขึ้น และถ้ามองเลียนแบบสิ่งที่เกิดในเครื่องเร่งอนุภาค เมื่อพิจารณาการหลอมกันของดาวนิวตรอน ลักษณะโครงสร้างของดาวก็อาจส่งลักษณะพิเศษของสัญญาณบางอย่างแฝงมากับคลื่นความโน้มถ่วงก็ได้ ซึ่งอันนี้จะต้องพึ่งความแม่นยำที่มากขึ้นในอนาคต นอกจากนี้ยังมีปัญหาการเปลี่ยนรูปร่างแล้วกลับสู่ทรงกลมอย่างรวดเร็ว (pulsation) ของหลุมดำตอนที่มันหลอมกัน ยังมีผลการคำนวณที่สำคัญมากมายที่ทำนายไว้ในช่วงยุคทองของงานวิจัยหลุมดำ เช่นงานของ S. Chandrasekhar ที่ยังรอการพิสูจน์ ในปัจจุบันการคำนวณเชิงตัวเลขของทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปก็สามารถบอกได้ว่า คลื่นความโน้มถ่วงที่มาจากกรณีต่าง ๆ เช่น หลุมดำหมุนหรือไม่หมุนมารวมกันจะแตกต่างกันอย่างไรซึ่งการวัดคลื่นความโน้มถ่วงในอนาคตอาจบอกได้ คลื่นความโน้มถ่วงยังอีกบทบาทหนึ่งที่สำคัญ คือ เป็นหนึ่งใน multimessenger astronomy ร่วมกับรังสีแกมมาและอนุภาคนิวทริโนในการเติมเต็มข้อมูลซึ่งกันและกันในการตรวจวัดปรากฏการณ์ทางดาราศาสตร์ต่าง ๆ เช่น การศึกษาคู่ของหลุมดำและดาวนิวตรอน เป็นต้น โดยสถานีวัดคลื่นความโน้มถ่วงบนโลกจะทำหน้าที่เป็นผู้ชี้เป้าว่าเหตุการณ์ที่สนใจเกิดขึ้นบริเวณไหน จากนั้นกล้องตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าก็จะหันกล้องไปหา และสถานีตรวจอนุภาคนิวทริโนก็จะนำข้อมูลข้อมูลที่วัดได้ในช่วงเวลาเดียวกันมาร่วมกันอธิบายปรากฏการณ์ที่ศึกษา

นอกเหนือจากที่เล่ามาทั้งหมดก็ยังเหลือเรื่องราวอีกมากมายที่ยังไม่ได้กล่าวถึง แต่ที่มีอยู่ก็น่าจะพอแสดงให้ผู้อ่านได้เห็นว่ารางวัลโนเบลปี ค.ศ. 2017 เหมือนเป็นจอกศักดิ์สิทธิ์ (holy grail) ของวงการฟิสิกส์ทฤษฎีและการทดลองอย่างแท้จริง มันอาจเป็นการค้นพบที่เกี่ยวกับแรงโน้มถ่วงที่ยิ่งใหญ่สุดอันสุดท้ายที่จะเกิดขึ้นในชั่วชีวิตของพวกเราทุกคนก็ได้ มันเป็นงานวิจัยที่ความสำเร็จที่เริ่มมาจากความล้มเหลวของผู้กล้าฝัน มาจากการต่อสู้ต่อไปอย่างไม่ยอมแพ้ของนักวิจัยหลายร้อยหลายพันชีวิตทำงานต่อเนื่องกันมาเป็นเวลาร่วมสี่สิบปีกว่าจะทำให้สิ่งที่คนเคยคิดว่าเป็นไปไม่ได้สามารถเป็นไปได้ นับเป็นช่วงหนึ่งของประวัติศาสตร์ฟิสิกส์ที่งดงาม น่าศึกษา และจรรโลงใจเป็นอย่างยิ่ง หวังว่าผู้อ่านที่ได้รับรู้เรื่องราวนี้ จะเกิดความประทับใจบ้างไม่มากก็น้อย เช่นเดียวกับที่ผู้เขียนได้รับอย่างมากมายในการอ่าน ค้นคว้าเพื่อมาเขียนบทความนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] W. Heisenberg, "Across the Frontiers", Harper & Row, 1974.

[2] K. S. Thorne, "Black Holes and Time Warps", W. W. Norton & Company, 1995.

[3] B. Schutz, "Gravitational Waves: Astronomy for 21st Century", 7th International Conference on Gravitation and Cosmology, Goa, India, December 2011.

[4] B. P. Abbott el al. (LIGO Collaboration and Virgo Collaboration), "Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger", Phys. Rev. Lett. 116, 061102 (2016).

[5] H. Collins, "Gravity's Kiss", MIT Press, 2018.

[6] E. Poisson and C. M. Will, "Gravity: Newtonian, Post-Newtonian, Relativistic", Cambridge University Press, 2014.

[7] M. Kramer et al., "Tests of general relativity from timing the double pulsar", Sci. 314, 97 (2006).

[8] J. M. Weisberg and J. H. Taylor, "The relativistic binary pulsar B1913+16: Thirty years of observations and analysis", Binary Radio Pulsars (ASP Conference Series) **328**, 25 (2005).

[9] ธารา เฉลิมทรงศักดิ์, "Gravitational wave", การบรรยายที่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2559.

[10] M. P. Hobson, G. P. Efstathiou and A. N. Lasenby, "General Relativity: An Introduction for Physicists", Cambridge University Press (2006).

[11] K. Thorne, "Black hole research: A new golden age", 7th International Conference on Gravitation and Cosmology, Goa, India, December 2011.

[12] D. V. Martynov el al. (LIGO Collaboration), "The sensitivity of the advanced LIGO detectors at the beginning of gravitational wave astronomy", Phys. Rev. D 93, 112004 (2016).

Thai Journal of Physics Vol. 34 No. 1-2 (2017) 17-24

การจำลองการทำงานของเลนส์แม่เหล็ก

อัสมา สาเมาะ, นวลจุฑา เนียมจันทร์ และ ชัยโรจน์ ใหญ่ประเสริฐ

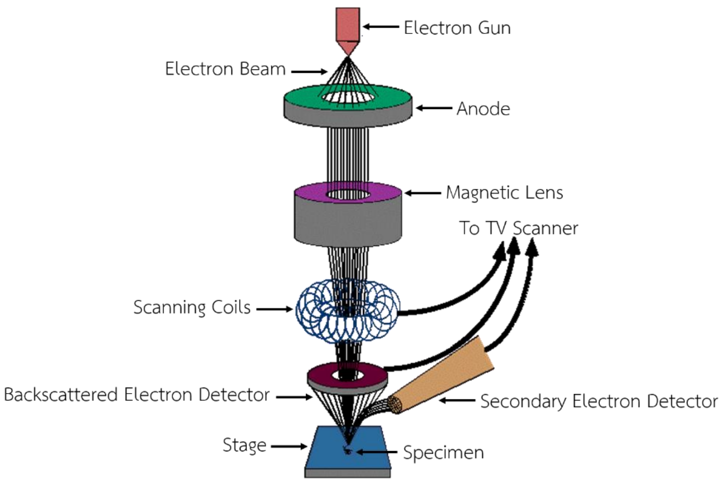
สาขาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอจำลองการทำงานของเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม Comsol เพื่อศึกษาความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กภายในเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนจำนวนรอบขดลวด จากนั้นสามารถแสดงตำแหน่งของลำอิเล็กตรอนที่ผ่านเลนส์แม่เหล็กในกล้องจุลทรรศน์ และอุปกรณ์อื่นๆ

บทนำ

เลนส์แม่เหล็ก (Magnetic Lens) เป็นส่วนสำคัญของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopes: SEM) [1] ซึ่งสร้างภาพของชิ้นงานโดยการใช้ลำอิเล็กตรอนพลังงานสูง เมื่อลำอิเล็กตรอนถูกสแกนลงบนชิ้นงาน อิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับมาจะให้ข้อมูลรายละเอียด ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงาน โดยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า ทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอน ซึ่งกว้างประมาณ 10 นาโนเมตร ให้ไปยังผิวของชิ้นงาน



***รูปที่ 1** แสดงส่วนประกอบและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (เครดิตภาพ [2])*

อนุภาค ได้แก่ อิเล็กตรอน จะถูกปล่อยจากแหล่งกำเนิด และผ่านเข้ามาในคอลิเมเตอร์ ซึ่งทำให้ลำของอนุภาคแคบลง โดยคอลิเมเตอร์นี้จะรวบรวมอิเล็กตรอนที่กระจัดกระจายอยู่ มีขดลวด DC อย่างง่ายสร้างแกนสนามแม่เหล็กขึ้น สนามแม่เหล็กนี้ ส่งผลให้อิเล็กตรอนถูกกระทำโดยแรงในแนวรัศมี ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นเกลียวรอบแกน ซึ่งมีองค์ประกอบของความเร็วในแนวตั้งฉากกับแกนของสนามแม่เหล็กสูง ดังนั้นรัศมีของเกลียวจะลดลง ซึ่งจะได้ลำขนานของอิเล็กตรอนเข้ามาในเลนส์บรรจบกันกลายเป็นจุด หากบริเวณที่สนามแม่เหล็กกระทำต่ออิเล็กตรอนมีขนาดเล็กพอ ขดลวดนี้จะประพฤติตัวเสมือนเลนส์นูนบาง และเลนส์นี้จะถูกแสดงในรูปแบบของรู

สมการที่เกี่ยวข้อง

กำหนดให้	q	คือ ประจุ	หน่วย C
	$\mathbf{E}$	คือ สนามไฟฟ้า	หน่วย N/C
	$\mathbf{H}$	คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก	หน่วย A/m
	$\mathbf{B}$	คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก	หน่วย T
	$\mathbf{v}$	คือ ความเร็วของอนุภาค	หน่วย m/s
	$\mathbf{J}$	คือ ความหนาแน่นกระแส	
	I_{enc}	คือ กระแสไฟฟ้าทั้งหมดภายในวงปิด	หน่วย A

ดังนั้น $I_{enc} = \int \mathbf{J} \cdot d\mathbf{a}$

$\mathbf{A}$	คือ ศักย์เวกเตอร์แม่เหล็ก	หน่วย $\mathrm{V \cdot s \cdot m^{-1}}$
σ	คือ ค่าการนำไฟฟ้าของตัวกลาง	
$\mathbf{f}$	คือ แรงต่อหน่วยประจุ	หน่วย N/C
$d\boldsymbol{l}$	คือ เวกเตอร์แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ที่มีระยะสั้นมากๆ	
$d\mathbf{a}$	คือ เวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับพื้นผิวที่ถูกปิดล้อมด้วย $d\boldsymbol{l}$	
N	คือ จำนวนขดลวด	หน่วย รอบ
I_{coil}	คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด	หน่วย A
A	คือ พื้นที่หน้าตัดของขดลวด	หน่วย $\mathrm{m^2}$
$\mathbf{e}_{\mathrm{coil}}$	คือ Local coil direction	

สมการการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุภายในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้าอยู่ในรูป

$$\frac{d}{dt}(m\mathbf{v}) = q[\mathbf{E} + (\mathbf{v} \times \mathbf{B})] \tag{1}$$

โดยมีงานรวมที่กระทำต่ออนุภาคโดยสนามแม่เหล็กเท่ากับศูนย์

จาก **Ampere's Law**

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\boldsymbol{l} = \mu_0 I_{enc}$$

จาก **Stokes' theorem**

$$\begin{aligned}\int (\nabla \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{a} &= \oint \mathbf{B} \cdot d\boldsymbol{l} \\ &= \mu_0 I_{enc} \\ &= \mu_0 \int \mathbf{J} \cdot d\mathbf{a}\end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}$$

หรือ

$$\nabla \times \frac{1}{\mu_0}\mathbf{B} = \mathbf{J}$$

จาก $\mathbf{H} \equiv \frac{1}{\mu_0}\mathbf{B}$

ดังนั้น $$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \tag{2}$$

จาก **Maxwell's Equation**

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

<u>**นิยาม**</u> หาก divergence ของ vector field $\mathbf{B}$ เท่ากับศูนย์ สามารถเขียน $\mathbf{B}$ ให้อยู่ในรูป curl ของ vector potential ($\mathbf{A}$)

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \Leftrightarrow \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$

ดังนั้น $$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \tag{3}$$

เพื่อให้กระแสไหล จะต้องมีแรงกระทำต่อประจุ ความเร็วของประจุที่เคลื่อนที่ขึ้นอยู่กับแรงที่กระทำ และธรรมชาติของวัสดุนั้น โดยสำหรับสารส่วนใหญ่ ความหนาแน่นกระแส ($\mathbf{J}$) แปรผันตามแรงต่อหน่วยประจุ ($\mathbf{f}$)

$$\mathbf{J} = \sigma\mathbf{f}$$

ในกรณีของแรงแม่เหล็กไฟฟ้า จะสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$\mathbf{J} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

แต่เนื่องจากความเร็วของประจุมีค่าน้อยมาก จึงสามารถละเทอมหลังได้ และประมาณเป็น

$$\mathbf{J} = \sigma\mathbf{E} \tag{4}$$

สำหรับการกำหนดค่าใน Multi-Turn Coil มีสมการที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

$$\mathbf{J}_e = \frac{N I_{coil}}{A}\mathbf{e}_{coil} \tag{5}$$

ขั้นตอนการจำลอง

ทำการจำลองเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม Comsol Multiphysics version 4.3 [3,4]

1. เริ่มต้นที่ Model Wizard เลือก 3D เลือก AC/DC และเลือก Magnetic Field (mf) โดยทำการศึกษาที่ไม่ขึ้นกับเวลา

2. กำหนดตัวแปร และค่าคงที่ต่างๆ

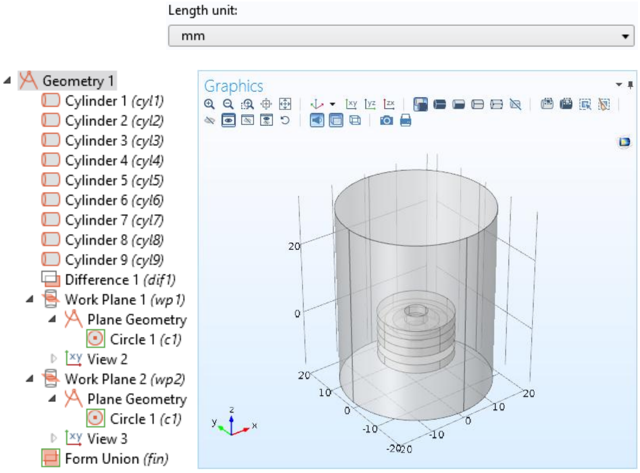
- ตัวแปรต้น คือ จำนวนรอบขดลวด
- ตัวแปรตาม คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก
- ตัวแปรควบคุม คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าขดลวด, รูปทรงของเลนส์แม่เหล็ก

Parameters

Name	Expression	Value	Description
Ic	0.32[A]	0.32 A	Coil current
Nc	1000	1000	Number of turns in coil

รูปที่ 2 แสดงการกำหนดค่า Parameters

3. สร้าง Geometry



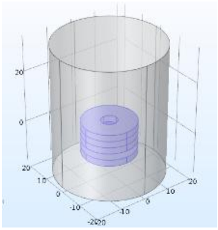
รูปที่ 3 แสดงการสร้าง Geometry

4. ระบุคุณสมบัติของ Material ในแต่ละบริเวณ

Material 1 (mat1)

Material Contents

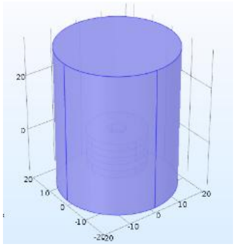
Property	Name	Value	Unit	Property
Electrical conductivity	sigma	6e7	S/m	Basic
Relative permittivity	epsilonr	1	1	Basic
Relative permeability	mur	1	1	Basic



Material 2 (mat2)

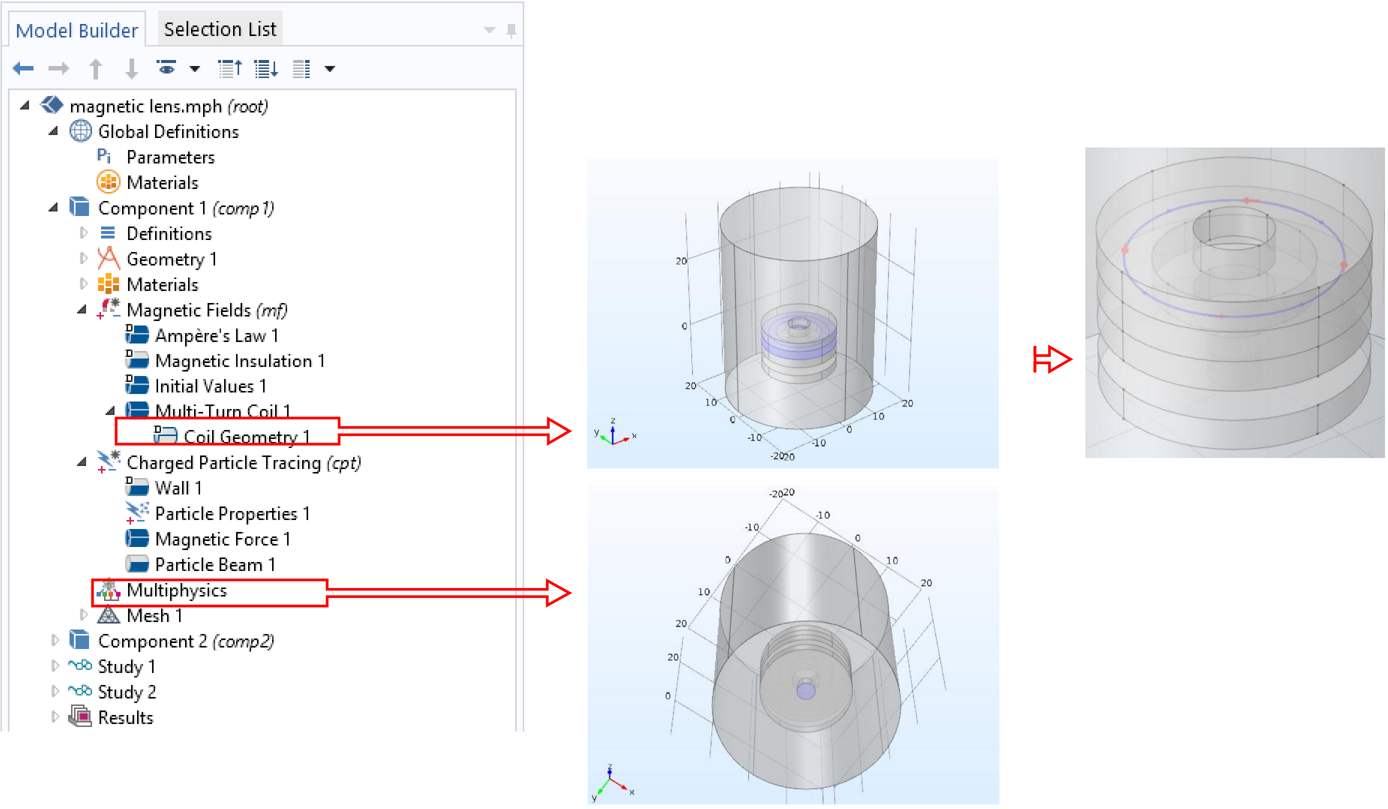
Material Contents

Property	Name	Value	Unit	Property
Electrical conductivity	sigma	0	S/m	Basic
Relative permittivity	epsilonr	1	1	Basic
Relative permeability	mur	1	1	Basic



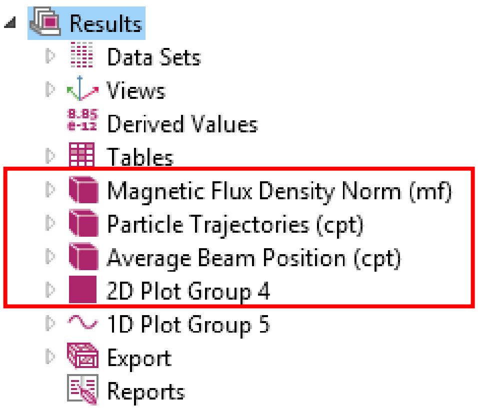
รูปที่ 4 แสดงการระบุคุณสมบัติของ Material ในบริเวณต่างๆ

5. เพิ่ม Physics ให้กับ Geometry



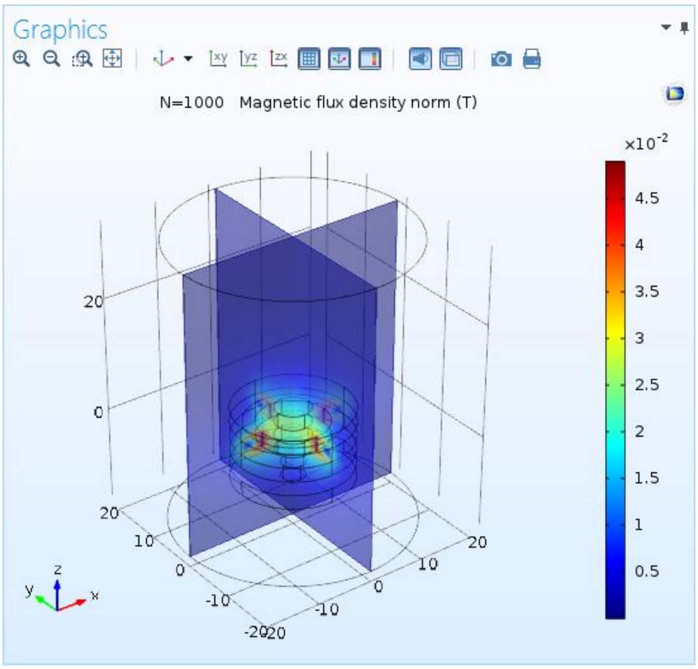
รูปที่ 5 แสดงการกำหนด Physics ของ Geometry ในแต่ละบริเวณ

6. เลือกการแสดงผลที่สนใจ และทำการ Compute



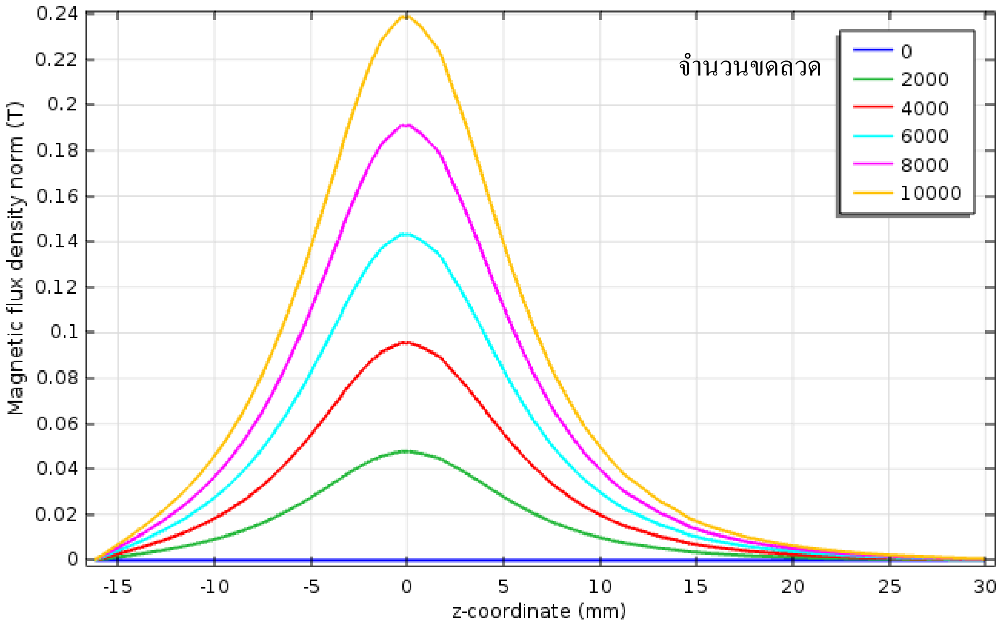
รูปที่ 6 แสดงการเลือกการแสดงผล

ผลการจำลองและอภิปรายผล

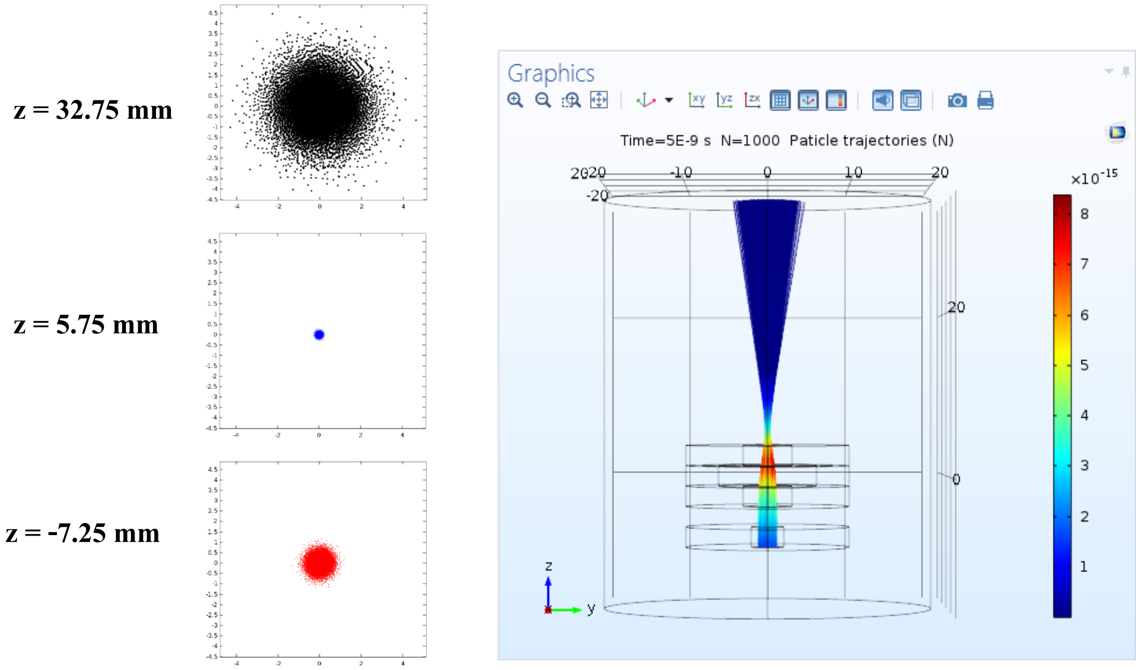


***รูปที่ 7** แสดงความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กภายในเลนส์แม่เหล็ก*

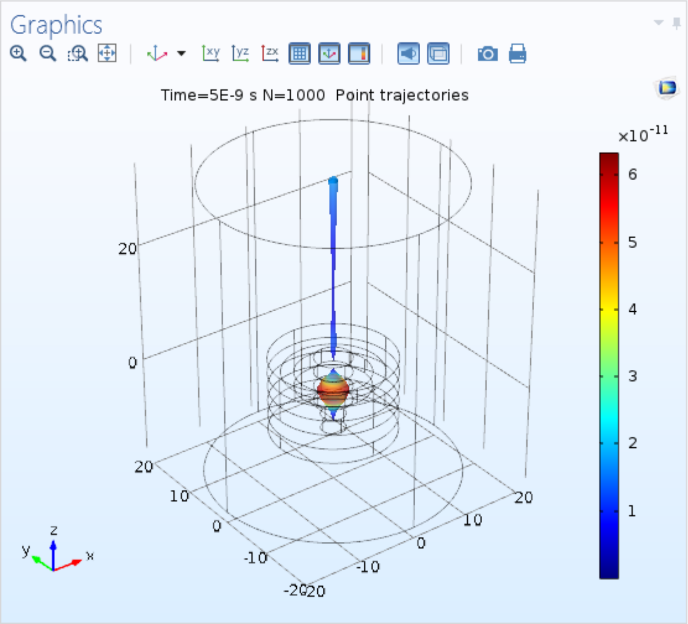
จากสมการ (5) เมื่อให้จำนวนขดลวดเพิ่มขึ้น จะเห็นว่าสนามแม่เหล็กจะมีค่าสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 8



***รูปที่ 8** แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กและระยะตามแนวแกน z เมื่อขดลวดมี 0-10000 รอบ*



รูปที่ 9 แสดงตำแหน่งของอิเล็กตรอนในระนาบ xy (ซ้าย), เส้นทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านเลนส์แม่เหล็ก (ขวา)



รูปที่ 10 แสดง Average Beam Position

จากความสัมพันธ์ระหว่างความยาวโฟกัส และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าขดลวด สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$f = K\frac{\mathrm{V}}{I^2} \tag{6}$$

เมื่อ K คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นกับโครงสร้างและจำนวนของขดลวด

V คือ accelerating voltage

I คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าขดลวด

จากสมการ (6) จะเห็นว่า ความยาวโฟกัสจะเพิ่มขึ้นตามพลังงานของอิเล็กตรอน หรือ V เนื่องจากอิเล็กตรอนจะมีความเร็วสูงขึ้น นั่นคือ อิเล็กตรอนจะใช้เวลาน้อยลงในการถูกกระทำจากแรงจากสนามแม่เหล็ก แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อให้กระแส หรือจำนวนขดลวดเพิ่มขึ้น ความเข้มของสนามแม่เหล็กจะมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่เป็นเกลียวที่แคบลง และเข้าสู่ระยะโฟกัส ดังรูปที่ 9 ที่แสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านขดลวด โดยอิเล็กตรอนจะถูกโฟกัสที่ตำแหน่งใดๆ ตามแนวแกน z และในรูปที่ 10 แสดงค่าเฉลี่ยของพื้นที่ที่ลำอิเล็กตรอนซ้อนทับกัน โดยที่บริเวณขดลวดจะมีค่าสูงที่สุด

สรุป

จากผลการจำลอง แสดงการสร้างสนามแม่เหล็กในการโฟกัสลำอิเล็กตรอนด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า โดยสนามแม่เหล็กที่สร้างได้จากขดลวด จะขึ้นกับจำนวนรอบของขดลวด ซึ่งแสดงผลได้ดังกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กและระยะตามแนวแกน z (แกนของเลนส์แม่เหล็ก) โดยพบว่า เมื่อให้จำนวนขดลวดเพิ่มขึ้น สนามแม่เหล็กในบริเวณแกนกลางของเลนส์แม่เหล็กมีค่าสูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ผ่านบริเวณดังกล่าวถูกกระทำจากสนามแม่เหล็กมากขึ้น ทำให้บรรจบกันที่จุดโฟกัสที่ระยะสั้นลง ส่งผลให้ระยะโฟกัสของเลนส์แม่เหล็กลดลง

เอกสารอ้างอิง

[1] R. F. Egerton, “Physical Principles of Electron Microscopy: An Introduction to TEM, SEM and AEM”, Springer, 2016.

[2] https://www.purdue.edu/ehps/rem/rs/sem.htm

[3] Comsol Multiphysics User’s guide, version 4.3, 2012

[4] https://www.comsol.com/model/magnetic-lens-10185

Effects of Design Parameters on Magnetic Fields Generated by Synchrotron Undulator

Supagorn RUGMAI[1], Suthon SRIVARO[2] and Chitnarong SIRISATHITKUL[3*]

[1] School of Science, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

[2] School of Engineering and Resources, Walailak University, Nakhon Si Thammarat, Thailand

[3] School of Science, Walailak University, Nakhon Si Thammarat, Thailand

(*Corresponding author's e-mail: chitnarong.siri@gmail.com)

Abstract

Magnetic fields from a planar undulator for a synchrotron source are simulated by using Radia program. The undulator consists of 4 arrays of permanent magnets. Each array has 41 bars of magnet whose remanent magnetization is perpendicular to the adjacent one. The simulated magnetic field is periodic and dependent on configuration of the magnets including the gap and the magnetic period length. Magnetic field can be adjusted by translating an array of magnet relative to each other. The variation of this field with the translation is symmetric with respect to its direction. By the calculation of the force from the simulated magnetic field, the zig-zag electron trajectory in the horizontal plane is obtained and leads to the synchrotron radiation.

Keywords: Undulator, permanent magnets, synchrotron radiation, magnetic field simulation

Introduction

In 2001, the Siam Photon Source has first produced synchrotron light in Thailand. Now, the facility is equipped with beam lines for photoemission spectroscopy, photoelectron emission microscopy, x-ray lithography, x-ray fluorescence, x-ray absorption spectroscopy and small angle x-ray scattering and has increasing contributions in material science, biomedical science, physics, chemistry and biology research [1-4]. In the synchrotron facility, electromagnetic wave of high intensity and brilliance is emitted by electrons, accelerated closed to the speed of light, in the bending magnets around the storage ring. Some applications of the synchrotron radiation such as soft x-ray spectroscopy, spin-resolved photoelectron spectroscopy and magnetic circular dichroism require either circularly polarized light or variably polarized light. In order to meet these requirements, the Siam Photon Source needs insertion devices in a straight section of its storage ring. Insertion devices are classified into 2 types according to their wiggler strength (K) [5].

$$K = 0.934\, B_0 \lambda_p \tag{1}$$

where λ_p is the magnetic period length and B_0 is the peak magnetic field. The device with a low wiggler strength (K <<1) is called undulator. The undulator offers a high intensity light whereas the wiggler, the other type of insertion device with a larger wiggler strength, is often used when the high photon energy is needed [5].

Planar undulators, permanent magnet based devices, are installed in synchrotron facillities worldwide [6-8]. In a design called APPLE II (Advanced Planar Polarized Light Emitted) [6], there are 4 rows of magnetic bars. Two rows are placed above electron beams and parallel to the other 2 rows beneath them. In each row, the magnetization of each magnetic

bar is perpendicular to the adjacent one. Electrons travel in the gap between the rows of magnets have helical trajectory due to periodic magnetic fields in horizontal and vertical directions. As a result, high intensity x-rays are emitted whose polarization is changed by translating a row of the magnet relative to the other.

Before constructions, magnetic fields in any insertion devices have to be calculated. Radia, a freeware developed by researchers at European Synchrotron Radiation Facility since 1997 [9], offers a convenient and efficient way for such simulations. The program, coded by object-oriented C++ with Mathematica user interface, employs boundary integral method to calculate magnetic fields from either electromagnets or permanent magnets. A previous study on undulators showed that it gave similar results to the simulation by a Fortran code [10]. Its versatility extends to the possible calculations of magnetic field in other devices. In this work, we implement Radia to show magnetic fields and resulting electron trajectories in a planar undulator

Methods

To simulate the magnetic field from the APPLE planar undulator, 4 arrays of permanent magnets are drawn on Radia. Their geometry and the coordinates are indicated in Figure 1. Each array has 41 magnets (only 12 bars are exemplified in Figure 1) whose dimensions are 100 × 20 × 25 mm^3. The remanent magnetization of the magnets is set at 1.38 T, which is realistically obtainable in Nd-Fe-B based permanent magnets. For an exception, the bars at both ends are smaller and supply weaker field than the rest in the array to compensate the orbit distortion of electrons [5]. The magnetic field is calculated as a function of several parameters namely an undulator gap (Gap), magnetic period length (λ_p) and the length of array translation (ID Length). In additions, the relation between the magnetic pole width and the maximum magnetic field, also known as peak field, is studied. Finally, the trajectory of an electron in this magnetic field can also be calculated from the force acting on it.

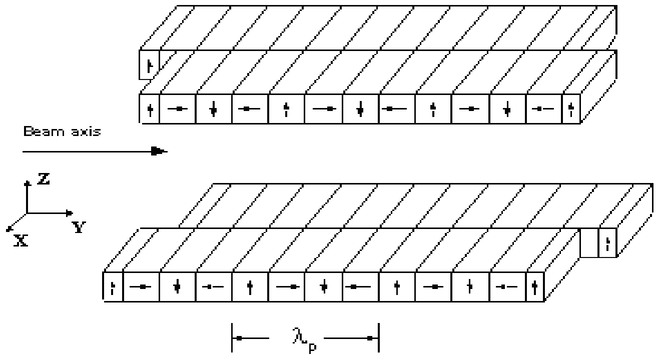


Figure 1 *Diagram of planar undulator.*

Results and discussion

By setting the conditions x = z = 0, Gap = 10 mm, λ_p = 80 mm, the vertical magnetic field (B_z) along the y-axis shown in Figure 2 for 10 periods (Nper = 10) is periodic. The field has its peaks around 0.5 T. From such figures, the peak field can be deduced in the case of varying pole widths at a constant gap of 30 mm. The peak field in Figure 3 has roughly linear variation with the pole widths of less than 5 mm. The sensitivity of peak field to the change in pole width is reduced from 5 mm and approached saturation from 20 mm. This justifies the selection of magnets' size in Figure 1.

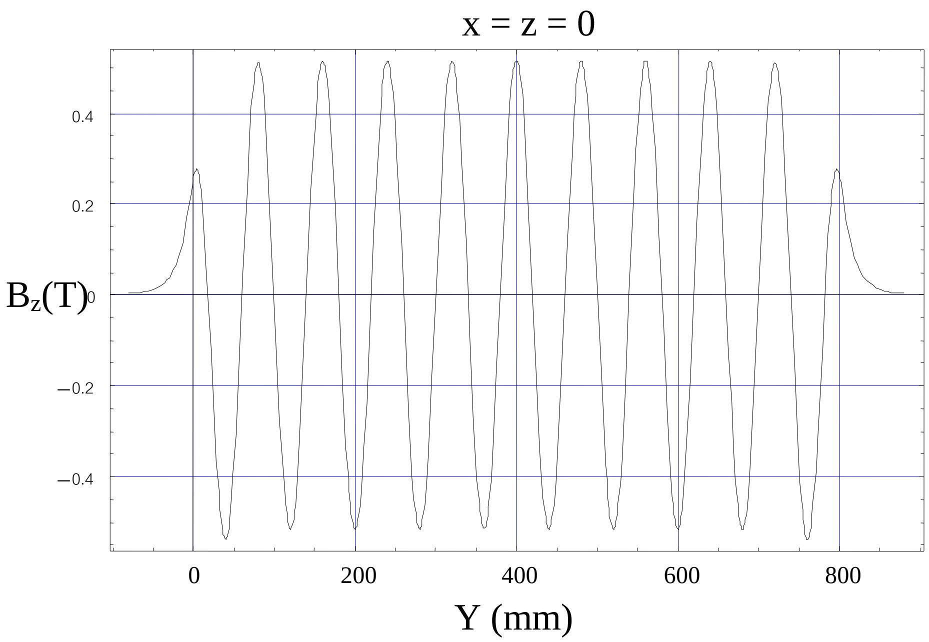


Figure 2 *Simulated vertical magnetic field along the y-axis in planar undulator.*

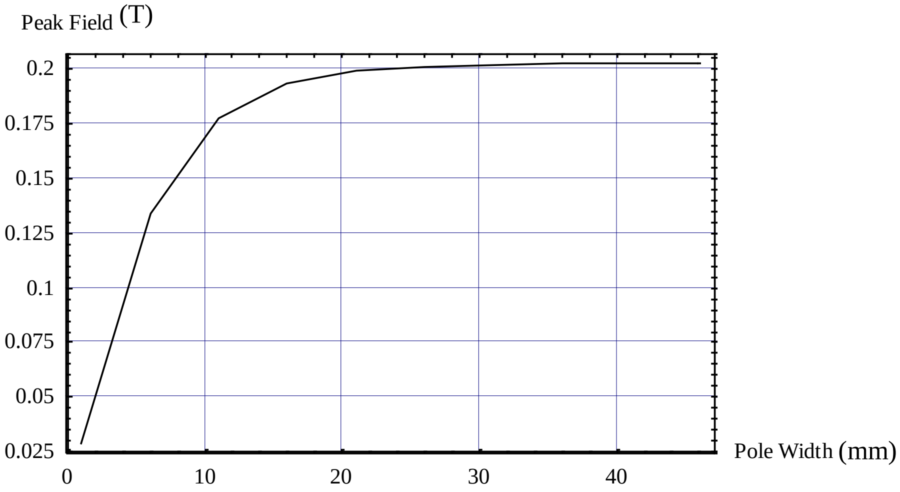


Figure 3 *Peak field obtained from undulator by simulation as a function of pole width.*

The dependence of B_z on Gap, λ_p and ID Length is shown in Figure 4. The B_z is about 1.2 T in the case of 3 mm gap and steadily decreased with increasing gap from 5 to 21 mm as shown in Figure 4(a). The trend can be easily understood because the arrangement with magnets closer each other should lead to higher magnetic fields. However, it must be taken into account that the gap larger than 20 mm is typically required to accommodate vacuum pipes of the real storage ring. In contrast to the dependence on the gap, B_z in Figure 4(b) is not monotonically changed with λ_p. It initially increased with λ_p up to 70 mm, attaining the maximum and then gradually reduced with the further increase in λ_p. It follows that λ_p between 70 and 90 mm is preferred in the constructions of undulators of this design. By setting the conditions for large B_z (Gap = 10 mm, λ_p = 80 mm), B_z is plotted as a function of ID length in Figure 4(c). The field is periodic with a maximum value of 1.2 T and, hence, symmetric to the direction of the translation.

In a similar fashion, the horizontal magnetic field can also be simulated. In Figure 5, an electron follows a zig-zag path in the horizontal (x-y) plane of the helical planar undulator. Such deviation of electrons in response to magnetic field in the undulator is required for synchrotron radiation because the bending of relativistic electrons leads to the soft x-ray emission. Moreover, the photon energy from the synchrotron radiation can be calculated from the peak field which is beyond the scope of this work.

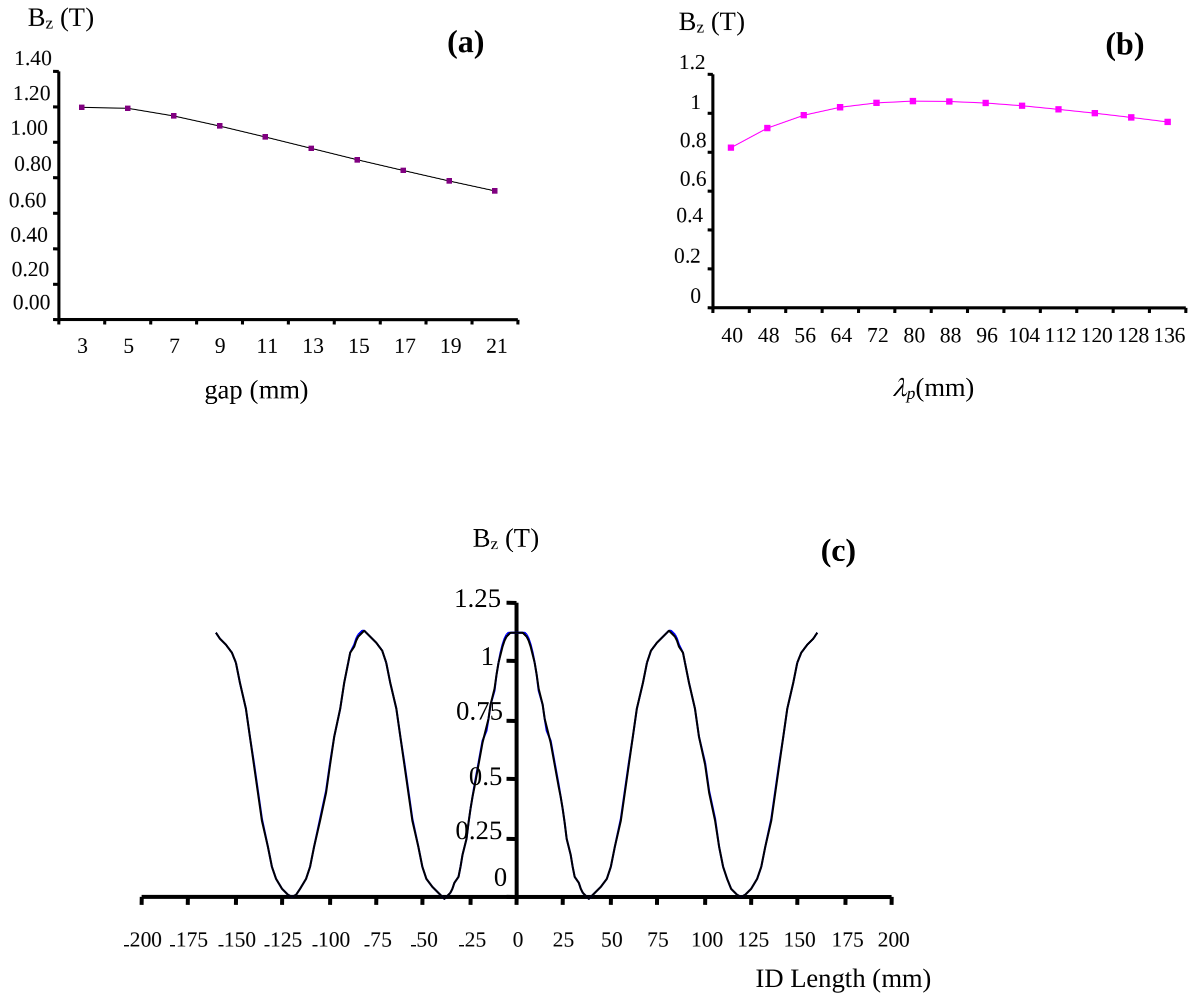


Figure 4 *Peak magnetic field in the z-axis as a function of (a) gap, (b) period and (c) ID-length.*

Conclusions

From simulations by Radia program, the magnetic field from the planar undulator and hence the electron trajectories in this insertion device are dependent on the gap, the magnetic period length and the translation of magnetic array. The magnetic field is periodic and reduced with the gap. To obtain large magnetic fields, the optimum length of magnetic period and translation can be found from the simulation.

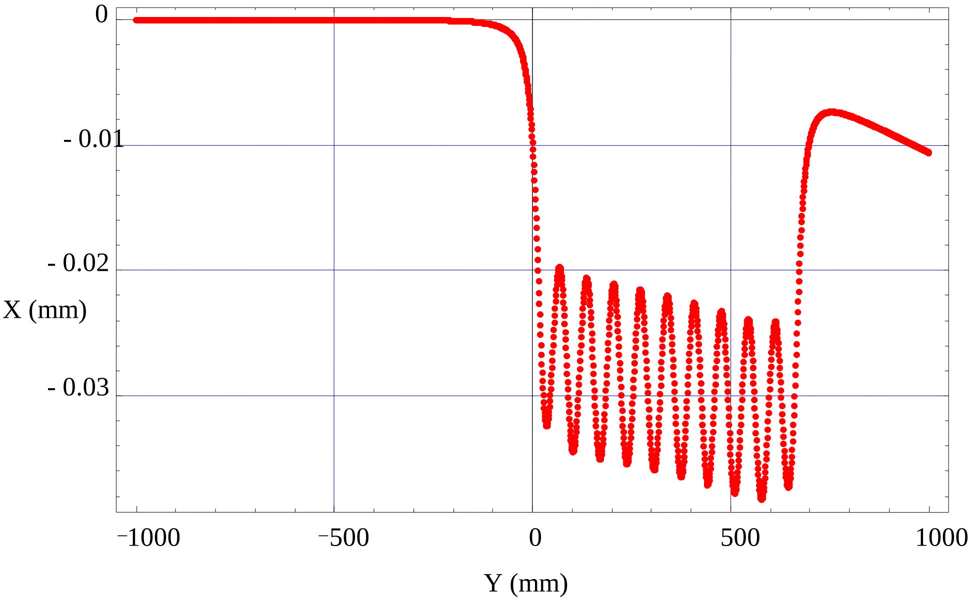


Figure 5 *Calculated electron trajectory in horizontal plane of planar undulator.*

Acknowledgments

This work is funded by Thailand's Synchrotron Research Light Institute.

References

[1] W. Klysubun, P. Sombunchoo, W. Deenan and C. Kongmark, "Performance and status of beamline BL8 at SLRI for X-ray absorption spectroscopy", *J. Synchrotron Radiat*. 19, 930 (2012).

[2] Y. Poo-arporn, P. Chirawatkul, W. Saengsui, S. Chotiwan, S. Kityakarn, S. Klinkhieo, J. Hormes and P. Songsiriritthigul, "Time-resolved XAS (Bonn-SUT-SLRI) beamline at SLRI", *J. Synchrotron Radiat*. 19, 937 (2012).

[3] S. Tancharakorn, W. Tanthanuch, N. Kamonsutthipaijit, N. Wongprachanukul, M. Sophon, S. Chaichuay, C. Uthaisar and R. Yimnirun, "The first microbeam synchrotron X-ray fluorescence beamline at the Siam Photon Laboratory", *J. Synchrotron Radiat*. 19, 536 (2012).

[4] S. Soontaranon and S. Rugmai, "Small angle X-ray scattering at Siam Photon Laboratory. *Chin. J. Phys*. 50, 204 (2012).

[5] T. Dasri, "U60 Undulator: An insertion device for the Siam Photon Source", *Walailak J. Sci. & Tech*. 8, 1(2011).

[6] S. Sasaki, K. Yanagida, H. Kobayashi and Y. Miyahara, "First observation of undulator radiation from APPLE-1", *Nucl. Instrum. Meth. A*. 347, 87(1994).

[7] C. S. Hwang and S. Yeh, "Various polarization features of a variably polarized undulator with different phasing modes", *Nucl. Instrum. Meth. A*, 420, 29 (1999).

[8] T. Dasri and S. Rugmai, "The effects of undulator field on stored electron beam", *Walailak J. Sci. & Tech*. 9, 83 (2012).

[9] O. Chubar, P. Elleaume and J. Chavanne, "A three-dimensional magnetostatics computer code for insertion devices", *J. Synchrotron Radiat*. 5, 481 (1998).

[10] T. Dasri, S. Siriwattanapaitoon, W. Chachai and S. Rugmai, "Characterization of soft X-ray undulator for the Siam Photon Source", *Nucl. Instrum. Meth. A*. 582, 40 (2007).