Thai Journal of Physics Vol. 40 No. 2 (2023) 35-48

Article

คลื่นความโน้มถ่วงกับยุคใหม่ของฟิสิกส์ดาราศาสตร์และจักรวาลวิทยา

Gravitational Waves: New Era of Astrophysics and Cosmology

นนทพัทธ์ วานเวียง

Nontapat Wanwieng

สถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม อำเภอแม่ริม จังหวัดเชียงใหม่ 50180

National Astronomical Research Institute of Thailand (Public Organization), Maerim, Chiangmai 50180 Thailand

*Corresponding author E-mail: nontapat_w@cmu.ac.th

วันที่รับบทความ: 4 ธันวาคม 2566, วันแก้ไขบทความ: 9 กุมภาพันธ์ 2567, วันตอบรับบทความ: 11 กุมภาพันธ์ 2567

Received: 4th December 2023, Revised: 9th February 2024, Accepted: 11th February 2024

บทคัดย่อ

การค้นพบคลื่นความโน้มถ่วงได้เปิดฉากยุคใหม่ของการศึกษาฟิสิกส์ดาราศาสตร์และจักรวาลวิทยา โดยมอบเครื่องมือสดใหม่ในการเปิดเผยสัจจะความจริงที่ซ่อนอยู่ของเอกภพ บทความนี้จะเจาะลึกถึงแหล่งกำเนิดของคลื่นความโน้มถ่วงเหล่านี้ ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่การรวมกันของหลุมดำและดาวนิวตรอนในระบบดาวคู่และเหตุการณ์ทรงพลังอื่น ๆ ในขณะเดียวกันก็สำรวจความสำคัญของพวกมันในสาขาวิจัยฟิสิกส์มูลฐาน ฟิสิกส์ดาราศาสตร์ และจักรวาลวิทยา ตั้งแต่การทดสอบทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปของไอน์สไตน์อย่างเข้มงวดในสภาวการณ์สุดขั้ว ไปจนถึงศักยภาพในการเปิดเผยกระบวนทัศน์ฟิสิกส์ใหม่ การผสานวิธีการของดาราศาสตร์ดั้งเดิมเข้ากับการสังเกตการณ์คลื่นความโน้มถ่วงซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพของการใช้วิธีที่หลากหลายเพื่อทำความเข้าใจปรากฏการณ์ฟากฟ้า บทบาทสำคัญของคลื่นความโน้มถ่วงในจักรวาลวิทยา การปรับปรุงการวัดระยะห่างเชิงจักรวาลและความเข้าใจของเราเกี่ยวกับวิถีวิวัฒนาการของเอกภพ บทความนี้สรุปผลกระทบที่สำคัญของการสังเกตการณ์คลื่นความโน้มถ่วง โดยให้ข้อมูลภาพกว้างของหนทางสู่การบรรลุความเข้าใจที่ลึกซึ้งเกี่ยวกับธรรมชาติที่แท้จริงของจักรวาลของเรา

คำสำคัญ: คลื่นความโน้มถ่วง, ฟิสิกส์ดาราศาสตร์, จักรวาลวิทยา, ฟิสิกส์มูลฐาน, หลุมดำ, ดาวนิวตรอน

Abstract

The discovery of gravitational waves has inaugurated a new era in astrophysics and cosmology, providing novel tools to unveil the hidden reality of the universe from a new perspective. This review article delves deeply into the sources generating these cosmic ripples, encompassing compact binary mergers and powerful celestial events, while exploring their significance in fundamental physics, astrophysics, and cosmology. From rigorously testing

Einstein's theory of General Relativity in extreme scenarios to the potential of revealing new physics paradigms, the article highlights the synergy between conventional astronomy and gravitational wave observations, showcasing the effectiveness of employing diverse methodologies to comprehend celestial events. Moreover, the role of gravitational waves in cosmology becomes evident, with the potential to refine our measurements of cosmic distances and reshape our understanding of the universe's evolutionary path. In essence, the article encapsulates the substantial impact of gravitational wave observation, shedding light on a pathway towards attaining a profound understanding of the true nature of our universe.

Keywords: Gravitational wave, Astrophysics, Cosmology, Fundamental physics, Black hole, Neutron star

บทนำ

"ไม่มีประสบการณ์ใดจะท้าทายสติปัญญาและจินตนาการของเรามากไปกว่าการได้ค้นพบว่าตลอดช่วงศตวรรษที่ผ่านมา สิ่งที่เรารู้และเข้าใจเกี่ยวกับเอกภพเป็นเพียงแค่เศษเสี้ยวหนึ่งของสภาพความจริงที่มันเป็น"
(ไบรอัน กรีน)[1]

1. หน้าต่างบานใหม่ถูกเปิดออกแล้ว

ก่อนปี ค.ศ. 1945 ความรู้ความเข้าใจของมนุษยชาติเกี่ยวกับเอกภพแทบทั้งหมด มาจากการรวบรวมแสงด้วยกล้องโทรทรรศน์และดวงตาของเรา มันฉายภาพของจักรวาลอันเงียบสงบ ไร้เรื่องราว มีเพียงดวงดาวสุกสว่างที่เคลื่อนตัวอย่างเชื่องช้าและเนบิวลาอันสวยงามตระการตา ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1945 เป็นต้นมา ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีได้ผลักดันให้ "หน้าต่างสู่เอกภพ" บานใหม่เปิดออกทีละบาน โดยลำดับ คือ คลื่นวิทยุ (ราวปี ค.ศ. 1945) รังสีเอ็กซ์ (ราวปี ค.ศ. 1963) รังสีอินฟราเรด (ราวปี ค.ศ. 1965) รังสีอัลตราไวโอเลต (ราวปี ค.ศ. 1968) รังสีแกมมา (ราวปี ค.ศ. 1972) คลื่นมิลลิเมตรและใต้มิลลิเมตร (ราวปี ค.ศ. 1973) รังสีอัลตราไวโอเลตพลังงานสูงหรืออียูวี (ราวปี ค.ศ. 1975) หน้าต่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแต่ละบานเหล่านี้นำไปสู่การปฏิวัติความเข้าใจที่เรามีต่อเอกภพครั้งใหญ่ มันทำให้เราได้รู้จักกับซูเปอร์โนวา ควอซาร์ ดาวนิวตรอน รังสีไมโครเวฟพื้นหลังของจักรวาล การเกิดใหม่ของดาวจากเศษซากซูเปอร์โนวา โมเลกุลอินทรีย์ที่ลอยกระจัดกระจายอยู่ในห้วงอวกาศ คอสมิกเมเซอร์[2] และอีกมากมาย มันทำให้เราตระหนักได้ว่าเอกภพเต็มไปด้วยสิ่งแปลกประหลาด น่ามหัศจรรย์และทรงพลังเกินกว่าที่เราเคยจินตนาการถึง

การตรวจพบคลื่นความโน้มถ่วงโดยตรงเป็นครั้งแรกถูกประกาศให้โลกรู้เมื่อวันที่ 11 กุมภาพันธ์ ค.ศ. 2016 ด้วยถ้อยแถลงแห่งชัยชนะ "สุภาพบุรุษและสุภาพสตรี เราได้ตรวจพบคลื่นความโน้มถ่วง ...เราทำมันได้แล้ว"[3] การมีอยู่ของคลื่นความโน้มถ่วงถูกทำนายครั้งแรกตั้งแต่ปี ค.ศ. 1916 โดยอัลเบิร์ต ไอน์สไตน์ บรรดานักวิทยาศาสตร์ได้ทุ่มเทพยายามตรวจวัดหาสัญญาณนี้มาโดยตลอดนับตั้งแต่ทศวรรษ 1960 เป็นต้นมา แต่ก็ไม่ประสบความสำเร็จ สาเหตุก็เพราะว่าคลื่นความโน้มถ่วงมีความเข้มที่อ่อนมากเกินกว่าที่เทคโนโลยีในช่วงเวลานั้น

---

[1]จากหนังสือ "ทอถักจักรวาล (The fabric of the cosmos)" เขียนโดย ไบรอัน กรีน แปลโดย ดร. อรรถกฤต ฉัตรภูติ

[2]MASER ย่อมาจาก Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation คือรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าความเข้มสูงในย่านไมโครเวฟที่ถูกปลดปล่อยมาจากโมเลกุลบางชนิด เช่น โมเลกุลน้ำ โดยกระบวนการเปล่งแบบถูกกระตุ้น แบบเดียวกันกับการผลิตแสงเลเซอร์ จึงมีสมบัติหลายประการที่เหมือนกัน แหล่งกำเนิดเมเซอร์ในอวกาศ เช่น แก๊สที่ปกคลุมดาวหาง ชั้นบรรยากาศของดาวฤกษ์ เมฆแก๊สก่อกำเนิดดวงดาว เป็นต้น

[3]จาก https://www.bbc.com/news/av/science-environment-35554081

จะสามารถตรวจวัดได้ และเรายังมีความรู้ความเข้าใจไม่เพียงพอ จนกระทั่งมันถูกตรวจวัดได้ในวันที่ 15 กันยายน ค.ศ. 2015 โดยเครื่องตรวจวัดแบบมาตรแทรกสอดเลเซอร์ภาคพื้นดิน Advanced LIGO ทั้งสองเครื่อง (LIGO เป็นชื่อย่อของ Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) เครื่องหนึ่งตั้งอยู่ที่เมืองแฮนฟอร์ด มลรัฐวอชิงตัน และอีกเครื่องอยู่ที่ เมืองลิฟวิงตัน มลรัฐลุยเซียนา ของสหรัฐอเมริกา การประกาศการค้นพบเกิดขึ้นในปีถัดไปหลังจากการวิเคราะห์สัญญาณอย่างระมัดระวังและถี่ถ้วนเพื่อให้มั่นใจว่าสัญญาณอ่อน ๆ ที่ตรวจวัดได้นี้เป็นคลื่นความโน้มถ่วงจริง ไม่ใช่ความบังเอิญของสัญญาณรบกวนจากแหล่งอื่น ๆ ในเวลานั้นนักฟิสิกส์ดาราศาสตร์ทั่วทั้งโลกต่างเฝ้าจับตาการค้นพบนี้อย่างตื่นเต้นและจดจ่อ เพราะมันจะเป็นจุดเปลี่ยนสำคัญในประวัติศาสตร์ของการศึกษาฟิสิกส์ดาราศาสตร์และจักรวาลวิทยา สัญญาณการปะทุของคลื่นความโน้มถ่วงที่ถูกตรวจวัดได้เป็นครั้งแรกนี้ถูกตั้งชื่อว่า GW150914 [1] แอมพลิจูดของสัญญาณซึ่งแปรผันตรงกับความเครียด (Strain) (อัตราส่วนของระยะห่างระหว่างวัตถุที่เปลี่ยนไปต่อระยะห่างปกติ) ที่เกิดขึ้นในเครื่องตรวจวัดเมื่อมีคลื่นความโน้มถ่วงผ่านเข้ามา อยู่ในอันดับ 10^{-21} ความถี่ของสัญญาณกวาดสูงขึ้นจาก 35 Hz ตอนที่เข้ามาในเครื่องตรวจวัด ไปจนถึงค่าสูงสุดที่ 250 Hz จากการเปรียบเทียบรูปสัญญาณที่ตรวจวัดได้กับรูปสัญญาณที่จำลองด้วยคอมพิวเตอร์ นักวิทยาศาสตร์ของ LIGO-Virgo[4] สามารถบอกได้ว่าสัญญาณนี้เป็นคลื่นความโน้มถ่วงจากการรวมกันระหว่างหลุมดำสองดวงที่มีมวล 36 และ 29 เท่าของมวลดวงอาทิตย์ อยู่ห่างจากโลกออกไปราว 1.3 พันล้านปีแสง หลุมดำที่เกิดจากการรวมตัวมีมวล 62 เท่าของมวลดวงอาทิตย์ ส่วนต่างมวลที่หายไปประมาณ 3 เท่าของมวลดวงอาทิตย์ถูกปลดปล่อยออกไปในรูปของคลื่นความโน้มถ่วง เหตุการณ์การปะทุของคลื่นความโน้มถ่วงนี้กินระยะเวลาประมาณ 0.2 วินาทีเท่านั้น ทว่าเป็นเหตุการณ์ที่ทรงพลังที่สุดในทางดาราศาสตร์เท่าที่เราเคยตรวจพบมา การค้นพบนี้นอกจากจะเป็นหลักฐานยืนยันคำทำนายการมีอยู่ของคลื่นความโน้มถ่วงตามทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปของไอน์สไตน์แล้ว ยังเป็นข้อพิสูจน์ว่าเราสามารถตรวจวัดมันได้อีกด้วย และนี่จะเป็นจุดเริ่มต้นของการศึกษาฟิสิกส์ดาราศาสตร์และจักรวาลวิทยาในยุคใหม่

การสังเกตการณ์คลื่นความโน้มถ่วงจะกลายเป็นเครื่องมือทรงประสิทธิภาพที่ทำให้เราเข้าถึงรายละเอียดที่ “มองไม่เห็น” ด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเนื่องจากธรรมชาติที่แตกต่างกันอย่างสิ้นเชิงของปรากฏการณ์เหล่านี้ อันได้แก่ [2]

- คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คือ การสั่นกระเพื่อมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่กระจายออกไปในกาลอวกาศ ส่วนคลื่นความโน้มถ่วง คือ การสั่นกระเพื่อมของกาลอวกาศที่แผ่กระจายด้วยอัตราเร็วแสง
- คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เราสังเกตได้จากแหล่งกำเนิดทางดาราศาสตร์นั้นเป็นการผสมรวมกันของคลื่นจำนวนมากที่เปล่งมาจากอะตอม โมเลกุล และอนุภาคมีประจุต่าง ที่เป็นองค์ประกอบของวัตถุที่เป็นแหล่งกำเนิด ดังนั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแทบทั้งหมดที่เราสังเกตได้จึงไม่มีความอาพันธ์ (Incoherence) ในขณะที่คลื่นความโน้มถ่วงที่เกิดจากการเคลื่อนที่หรือการเคลื่อนไหวของก้อนสสาร (Bulk) ที่มีความเข้มข้นของพลังงานสูง คลื่นที่ถูกผลิตขึ้นจะมีความอาพันธ์สูงกว่ามาก
- คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีความยาวคลื่นสั้นมากเมื่อเทียบกับขนาดของแหล่งกำเนิดของมัน (เช่น กลุ่มแก๊สชั้นบรรยากาศของดวงดาว จานพอกพูนมวลของหลุมดำ เป็นต้น) เราจึงสามารถแปลงสัญญาณเพื่อสร้างเป็นภาพของแหล่งกำเนิดเหล่านี้ได้ ส่วนคลื่นความโน้มถ่วงทางดาราศาสตร์ ความยาวคลื่นจะมีขนาดพอ ๆ กับแหล่งกำเนิดหรือโตกว่ามาก จึงไม่สามารถนำมาสร้างเป็นภาพของแหล่งกำเนิดของมันได้ ในแง่นี้การสังเกตการณ์คลื่นความโน้มถ่วงจึงคล้ายกับการ “ฟัง” มากกว่าการ “ดู” และคลื่นความโน้มถ่วงถูกเปรียบเปรยเป็นท่วงทำนองแห่งกาลอวกาศ
- คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกดูดกลืนและกระเจิงได้อย่างง่ายดายโดยสสารที่กระจายตัวอยู่ในอวกาศ ในขณะที่คลื่นความโน้มถ่วงเดินทางผ่านสสารตัวกลางไปได้โดยแทบไม่เกิดการกระเจิงเลยไม่ว่าสสารเหล่านั้นจะอยู่ในรูปแบบใดก็ตาม

---

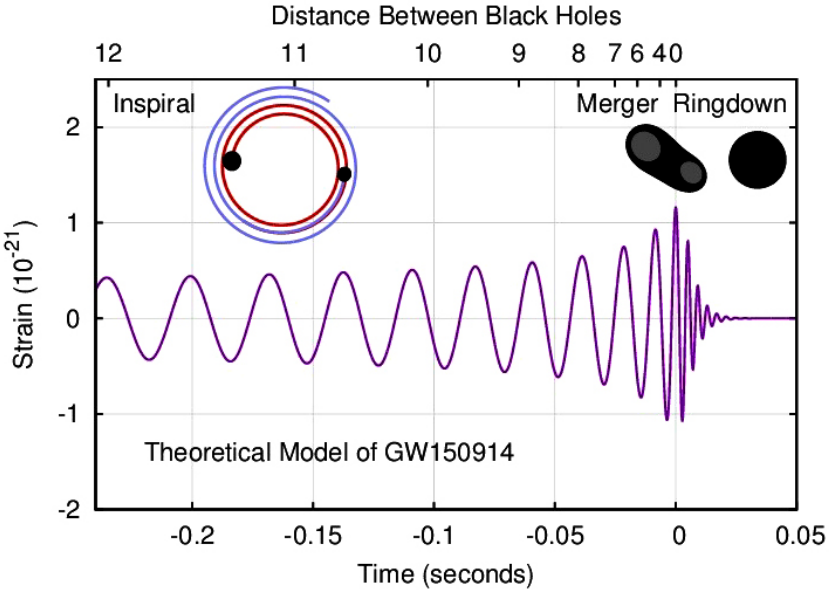
[4]Virgo ในที่นี้เป็นชื่อของสถานีสังเกตการณ์คลื่นความโน้มถ่วงในยุโรป เป็นมาตรแทรกสอดเลเซอร์คล้ายกับ LIGO

2. วงชิมโฟนีของเอกภพ

วัตถุใดก็ตามที่มีมวลไม่ว่าจะเป็นรถยนต์ เครื่องบิน ก้อนหิน หรือแม้กระทั่งตัวคุณเอง เมื่อเคลื่อนที่ด้วยความเร่งก็สามารถสร้างคลื่นความโน้มถ่วงได้ แต่วัตถุเหล่านี้มีมวลและความเร่งต่ำมากจนคลื่นความโน้มถ่วงที่แผ่ออกมามีความอ่อนเกินกว่าจะตรวจวัดได้ด้วยวิธีการใด ๆ แหล่งกำเนิดที่ผลิตคลื่นความโน้มถ่วงที่มีความเข้มข้นสูงพอจะถูกตรวจวัดได้จะต้องมีมวล (หรือทั่วไปกว่าคือ ความหนาแน่นของพลังงาน-โมเมนตัม) และความเร่งที่สูงมาก ๆ ซึ่งทั้งหมดเป็นวัตถุในทางฟิสิกส์ดาราศาสตร์นั่นเอง ตัวอย่างของแหล่งกำเนิดที่น่าสนใจเช่น ระบบคู่ของหลุมดำ และ/หรือ ดาวนิวตรอน ที่โคจรรอบกัน การยุบตัวทางความโน้มถ่วงของดาวที่สิ้นอายุขัย การระเบิดซูเปอร์โนวา ดาวนิวตรอนที่หมุน และกระบวนการบางอย่างในเอกภพยุคเริ่มแรก

2.1 ระบบดาวคู่

แหล่งกำเนิดคลื่นความโน้มถ่วงที่น่าสนใจที่สุดและเป็นที่เข้าใจมากที่สุดสำหรับนักฟิสิกส์ คือ ระบบดาวคู่ที่ประกอบด้วย ดาวมวลอัดแน่น (Compact stars)[5] เช่น ดาวนิวตรอนคู่ หลุมดำคู่ หรือระบบคู่ของดาวนิวตรอนกับหลุมดำ แต่ละระบบจะสร้างคลื่นความโน้มถ่วงที่มีรูปแบบเฉพาะตัว แต่ทั้งหมดมีกลไกการเกิดคลื่นที่เหมือนกัน คือ การโคจรหมุนวนเข้าหากัน (Inspiral orbiting) การรวมตัว (Merger) และริงดาวน์ (Ring down) (ดังรูปที่ 1)



รูปที่ 1 *รูปคลื่นความโน้มถ่วง GW150914 จากการรวมกันของหลุมดำคู่ในสามระยะคือ ระยะการโคจรหมุนวนเข้าหากัน การรวมตัวกัน และริงดาวน์*

[ที่มา: https://astrobites.org/2017/11/07/challenges-with-testing-the-no-hair-theorem/]

ในเฟสของการโคจรหมุนวนเข้าหากันนั้นเกิดขึ้นอย่างยาวนานหลายล้านปี ในระหว่างการโคจรหมุนวนเข้าหากันจะมีการแผ่คลื่นความโน้มถ่วงซึ่งนำพาพลังงานและโมเมนตัมเชิงมุมของระบบออกไปด้วย ผลคือระบบจะสูญเสียพลังงานอย่างต่อเนื่อง ทำให้ระยะห่างระหว่างดาวหดสั้นลงในขณะที่อัตราเร็วในการโคจรเพิ่มขึ้น และแผ่คลื่นความโน้มถ่วงความถี่สูงขึ้นและเข้มข้นขึ้นเรื่อย ๆ การสังเกตการณ์คลื่นความโน้มถ่วงจากระบบดาวคู่จะให้

[5]Compact stars หรือ Compact objects ในฟิสิกส์ดาราศาสตร์มักหมายถึงดาวแคระขาว (White dwarf) ดาวนิวตรอน และหลุมดำเป็นหลัก

ข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติของแหล่งกำเนิดที่ผลิตคลื่นความโน้มถ่วงออกมา สมบัติดังกล่าวแบ่งได้เป็นสมบัติภายใน (Intrinsic properties) และสมบัติภายนอก (Extrinsic properties) สมบัติภายใน หมายถึง สมบัติที่เกี่ยวข้องกับตัวแหล่งกำเนิด เช่น มวลและสปิน ความเยื้องศูนย์กลางของวงโคจร (Eccentricity) ส่วนสมบัติภายนอก คือ สมบัติที่อิงอยู่กับการสังเกตการณ์ของเราบนโลก เช่น ระยะทางจากโลกถึงแหล่งกำเนิดคลื่นความโน้มถ่วงนั้น ทิศทางของระนาบการโคจรรอบกันและกันของวัตถุในระบบดาวคู่ ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดบนทรงกลมท้องฟ้า เป็นต้น เราเรียนรู้สมบัติเหล่านี้จาก การประมาณค่าพารามิเตอร์ (Parameter estimation) ซึ่งเป็นเทคนิควิธีทางสถิติในการเปรียบเทียบรูปคลื่นความโน้มถ่วงจากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ กับรูปสัญญาณจริงที่ตรวจวัดได้ การเปรียบเทียบนี้จะบอกเราว่าค่าสมบัติของแหล่งกำเนิดที่สอดคล้องกับข้อมูลสังเกตการณ์นั้นควรเป็นเท่าใด

คลื่นความโน้มถ่วงในช่วงของการรวมตัว (Merger) ของดาวจะให้ข้อมูลอีกประเภทแก่เรา ในกรณีการรวมตัวของหลุมดำสองดวง คลื่นความโน้มถ่วงจะมีแอมพลิจูดเพิ่มสูงขึ้นอย่างมากและความโค้งของกาลอวกาศรอบ ๆ ขอบฟ้าเหตุการณ์ของหลุมดำที่เข้ารวมตัวกันจะถูกกระตุ้นให้เกิดการสั่นสะเทือนที่ไม่เป็นเชิงเส้นอย่างรุนแรง ปรากฏการณ์ที่ จอห์น วีลเลอร์ เรียกว่า พลวัตเชิงเรขาคณิต (Geometrodynamics) ซึ่งยังไม่เป็นที่เข้าใจกันดี โดยเฉพาะในกรณีการชนระหว่างหลุมดำหมุนสองดวงที่แกนหมุนของแต่ละดวงไม่ได้อยู่ในทิศทางเดียวกัน หรือไม่ได้มีทิศทางเดียวกับแกนของระนาบการโคจรรอบกัน การหมุนของหลุมดำแต่ละดวงจะลากจูงอวกาศรอบ ๆ ให้หมุนวนไปกับมัน ระบบนี้จึงเหมือนมีทอร์นาโดสองลูกของหลุมดำแต่ละดวงหมุนวนเข้าหากัน และล้อมรอบไปด้วยทอร์นาโดขนาดใหญ่ของกาลอวกาศที่ถูกลากจูงโดยการโคจรของหลุมดำทั้งสอง รายละเอียดพลวัติของระบบที่ซับซ้อนเช่นนี้ จะเข้ารหัสไว้ในคลื่นความโน้มถ่วงที่แผ่ออกมาซึ่งเราสามารถสกัดข้อมูลเหล่านี้เพื่อทำความเข้าใจแง่มุมที่ลึกซึ้งของความโน้มถ่วงได้

การรวมตัวระหว่างดาวนิวตรอนสองดวงจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติของสสารนิวเคลียร์ภายในแกนของดาวนิวตรอน การตรวจพบคลื่นความโน้มถ่วงจากการชนกันของดาวนิวตรอนสองดวงในเหตุการณ์ GW180917 มีความสำคัญอย่างยิ่งยวดต่อความเข้าใจในฟิสิกส์ดาราศาสตร์ จักรวาลวิทยา และฟิสิกส์มูลฐาน เหตุผลที่ทำให้เหตุการณ์นี้น่าสนใจเป็นพิเศษมีสองประการ ประการแรก ตั้งแต่มีการตรวจพบคลื่นความโน้มถ่วงที่ผ่านมา นี่เป็นเหตุการณ์แรกที่มีการปะทุของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาในเวลาไล่เลี่ยกันกับคลื่นความโน้มถ่วง คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปลดปล่อยครอบคลุมหลายย่านความถี่ ตั้งแต่ย่านพลังงานสูงของรังสีแกมมาไปจนถึงย่านความถี่ต่ำของคลื่นวิทยุ ประการที่สอง มันถูกปลดปล่อยออกมาจากการชนของดาวนิวตรอนสองดวง โดยทั่วไป ดาวนิวตรอนมีมวลน้อยกว่าหลุมดำ คาดกันว่าดาวนิวตรอนมีมวลไม่เกิน 3 เท่าของมวลดวงอาทิตย์ ในขณะที่หลุมดำมวลดาวฤกษ์ที่ถูกค้นพบโดย LIGO และ Virgo นั้น มีมวลมากกว่า 10 เท่าของดวงอาทิตย์ นอกจากนี้ สิ่งที่แตกต่างกันระหว่างหลุมดำกับดาวนิวตรอน คือ หลุมดำเป็นความโค้งของกาลอวกาศล้วน ๆ มวลของมันกระจุกตัวอยู่ที่ศูนย์กลาง กล่าวได้ว่า หลุมดำเป็นบริเวณของที่ว่าง ส่วนดาวนิวตรอนเป็นวัตถุที่มีโครงสร้างเป็นเนื้อสสารกระจายตัวในขอบเขตจำกัด ในขณะที่ดาวนิวตรอนสองดวงหมุนวนเข้าหากันในระยะห่างที่ใกล้กันมากนั้น ผลของความโน้มถ่วงไทดัลของดาวแต่ละดวงจะทำให้โครงสร้างของดาวบิดเบี้ยวไปจากปรกติ และทิ้งร่องรอยอันเป็นลักษณะเฉพาะไว้ในคลื่นความโน้มถ่วงที่ถูกปลดปล่อยออกมา GW170817 คือ สัญญาณคลื่นความโน้มถ่วงจากการชนกันระหว่างดาวนิวตรอนสองดวงที่ถูกตรวจวัดได้ครั้งแรกโดย Advanced LIGO/Virgo [3]

สำหรับการชนระหว่างดาวนิวตรอนกับหลุมดำ จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ นักฟิสิกส์พบว่าถ้าดาวนิวตรอนที่หมุนวนตกเข้าไปในหลุมดำมวลมากกว่า 10 เท่าของดวงอาทิตย์ มันจะถูกกลืนกินเข้าไปทั้งดวง แต่ในกรณีหลุมดำมีมวลต่ำกว่า 10 เท่าของดวงอาทิตย์โดยเฉพาะหลุมดำที่หมุนเร็วมาก ๆ ความโน้มถ่วงไทดัลของมันจะรุนแรงมากพอที่จะฉีกดาวนิวตรอนให้บิดเบี้ยว ก่อนที่จะถูกกลืนกินโดยหลุมดำ เรายังมีความเข้าใจน้อยมากเกี่ยวกับกระบวนการนี้ เช่นเดียวกับการชนกันระหว่างดาวนิวตรอนสองดวง คลื่นความโน้มถ่วงที่แผ่ออกมาจะช่วยให้เราเข้าใจสสาร นิวเคลียร์ของดาวนิวตรอนได้ เหตุการณ์ GW200105 และ GW200115 เป็นคลื่นความโน้มถ่วงสองสัญญาณแรกที่ตรวจวัดได้จากการชนกันระหว่างหลุมดำกับดาวนิวตรอน เป็นหลักฐานสนับสนุนการมีอยู่ของระบบหลุมดำ-ดาวนิวตรอน [4]

เมื่อคลื่นความโน้มถ่วงของการรวมตัวของดาวแผ่กระจายออกจากแหล่งกำเนิด พลังงานที่ผันผวนของมันสามารถผลิตคลื่นความโน้มถ่วงทุติยภูมิซึ่งเรียกว่า “ความทรงจำของคริสโทดูลู (Christodoulou memory)” ขึ้นมา [5] ในขณะที่คลื่นความโน้มถ่วงปฐมภูมิมีความถี่อยู่ในแถบ kHz แต่จะมีคลื่นทุติยภูมิสั่นกระเพื่อมในสเกลเวลาเดียวกับการกระจายตัวของพลังงาน คือ ราว ๆ 0.01 วินาที คลื่นทุติยภูมิจึงมีความถี่ในอันดับ 100 Hz ซึ่งอยู่ในแถบความถี่สูงซึ่งเครื่องตรวจวัดภาคพื้นดินของ LIGO/Virgo ปฏิบัติการอยู่ อย่างไรก็ตาม ความทรงจำของคริสโทดูลูนี้ค่อนข้างอ่อนมาก ความหวังในการตรวจพบสัญญาณนี้และศึกษามันต้องฝากไว้กับเครื่องตรวจวัดความไวสูงในอนาคต โดยเฉพาะเครื่องตรวจวัดภาคอวกาศ LISA ซึ่งคาดว่าน่าจะตรวจวัดสัญญาณนี้ได้จากการชนกันของหลุมดำมวลยิ่งยวด [6]

2.2 เอกภพยุคเริ่มแรก

คลื่นความโน้มถ่วงจากบิ๊กแบง

ในช่วงเอกภพยุคเริ่มแรก (Early universe) เอกภพที่สังเกตได้ในปัจจุบันยังมีขนาดเพียงแค่ความยาวพลังค์นั้น ความผันผวนทางควอนตัมของสนามความโน้มถ่วงที่ออกมาจากบิ๊กแบงจะถูกขยายให้ใหญ่ขึ้นโดยการพองตัว (Inflation) ของเอกภพในยุคเริ่มแรก ความผันผวนแบบสุ่มของกาลอวกาศที่ถูกขยายให้ใหญ่โตมโหฬารนี้จะกลายเป็น “คลื่นความโน้มถ่วงบรรพกาล” ที่แผ่ไปทั่วอวกาศเช่นเดียวกับการแผ่รังสีไมโครเวฟพื้นหลัง ถ้าเราตรวจพบคลื่นความโน้มถ่วงนี้ได้ เราจะเข้าใจการกำเนิดของเอกภพได้ดีขึ้นมาก ความเข้าใจของเราในตอนนี้บ่งชี้ว่าคลื่นดึกดำบรรพ์เหล่านี้จะมีความเข้มสูงสุดในช่วงความถี่ที่ต่ำมาก ๆ กล่าวคือในย่านออตโตถึงเฟมโตเฮิรตซ์ ส่วนความยาวคลื่นของพวกมันมีขนาดพอ ๆ กับขนาดของเอกภพที่เราสังเกตได้เลย น่าเสียดายที่สัญญาณคลื่นความโน้มถ่วงเหล่านี้ไม่ได้อยู่ในพิสัยที่มาตรแทรกสอดเลเซอร์ภาคพื้นดินที่เรามีในปัจจุบันจะตรวจวัดได้ ในช่วงต้นของทศวรรษ 1990 นักจักรวาลวิทยาตระหนักได้ว่าคลื่นความโน้มถ่วงที่มีความยาวคลื่นหลายล้านปีแสงเหล่านี้น่าจะทิ้งร่องรอยไว้ในรังสีไมโครเวฟพื้นหลังของจักรวาลที่กระจายอยู่เต็มอวกาศ การวิเคราะห์ร่องรอยในรังสีไมโครเวฟพื้นหลังน่าจะนำไปสู่การค้นพบคลื่นเหล่านี้

คอสมิกสตริง

คอสมิกสตริงเป็นวัตถุหนึ่งมิติในสมมุติฐานทางทฤษฎี นักวิทยาศาสตร์คาดการณ์ว่ามันอาจถูกสร้างขึ้นในเอกภพยุคเริ่มแรก การเปลี่ยนเฟสของเอกภพในยุคเริ่มแรกอาจทำให้เกิดรอยตำหนิขึ้นในโครงสร้างของกาลอวกาศ[6] ในลักษณะที่คล้ายกันกับรอยตำหนิที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนเฟสของน้ำเป็นน้ำแข็ง นักวิทยาศาสตร์เคยคิดกันว่าคอสมิกสตริงเหล่านี้น่าจะมีส่วนเกี่ยวข้องกับการก่อตัวของโครงสร้างขนาดใหญ่ (เช่น กาแล็กซี) ในเอกภพยุคแรก อย่างไรก็ตาม จากการวิเคราะห์ความไม่สม่ำเสมอของอุณหภูมิในรังสีไมโครเวฟพื้นหลังของจักรวาลได้แสดงให้เห็นว่าหากคอสมิกสตริงเหล่านั้นมีอยู่จริง ก็มีอยู่ในสัดส่วนที่น้อยมาก ๆ และไม่ได้มีบทบาทสำคัญในการก่อตัวของโครงสร้างขนาดใหญ่มากนัก ความสนใจในคอสมิกสตริงจึงลดน้อยลงไปในเวลานั้น

ช่วงต้นทศวรรษ 2000 แนวคิดเรื่องคอสมิกสตริงกลับมามีชีวิตชีวาอีกครั้ง เมื่อนักฟิสิกส์ตระหนักว่าคอสมิกสตริงสามารถถูกสร้างขึ้นมาในบริบทของทฤษฎีสตริง ทฤษฎีสตริงบางทฤษฎีเสนอว่าสตริงมูลฐานสามารถถูกจับยึดให้มีขนาดใหญ่โตมโหฬารได้โดยการขยายตัวของเอกภพ เรียกว่าคอสมิกซูเปอร์สตริง ทั้งคอสมิกสตริงที่เกิดจากการเปลี่ยนเฟสและคอสมิกซูเปอร์สตริงต่างก็วิวัฒน์ไปในเวลาตามการขยายตัวของเอกภพ ปัจจุบันยังไม่พบหลักฐานยืนยันการมีอยู่ของคอสมิกสตริงทั้งสองแบบ สิ่งที่ทำให้คอสมิกซูเปอร์สตริงน่าสนใจคือมันให้แนวทางในการพิสูจน์ทฤษฎีสตริง วิธีที่จะสามารถตรวจหาคอสมิกซูเปอร์สตริงได้ คือ การสังเกตการณ์คลื่นความโน้มถ่วงที่พวกมันสร้างขึ้น การศึกษาเชิงทฤษฎีบ่งว่าเมื่อคอสมิกซูเปอร์สตริงสองอันตัดกันหรือม้วนตัวเป็นวง วงลูปที่เกิดขึ้นจะแยกตัวออกมาจากจุดตัดเป็นลูปอิสระ การสั่นไหวของลูปสตริงจะสูญเสียพลังงานไปในรูปของการแผ่คลื่นความโน้มถ่วง ส่งผลให้วงลูปหดเล็กลงและสลายหายไปในที่สุด คลื่นความโน้มถ่วงที่มีความเข้มสูงสุดจะถูกสร้างขึ้นโดย

[6]ในทางเทคนิคเรียกว่า ตำหนิเชิงทอพอโลยี (Topological defect)

จุดปลายแหลมของลูปสตริง การรวมเข้าด้วยกันของหลาย ๆ สัญญาณจะกลายเป็นสัญญาณพื้นหลังแบบสุ่มของคลื่นความโน้มถ่วง [7]

2.3 การยุบตัวทางความโน้มถ่วงและการระเบิดของดาว

ดาวนิวตรอนและหลุมดำที่มีมวลระดับมวลดาวฤกษ์ถือกำเนิดจากการยุบตัวทางความโน้มถ่วงของดาวมวลมากที่วิวัฒน์มาถึงระยะสุดท้าย หรือในบางกรณีอาจถือกำเนิดจากดาวแคระขาวที่พอกมวลจากดาวคู่ในระบบมากเกินขีดจำกัดแล้วเกิดการยุบตัวของแกนดาว เมื่อดาวฤกษ์เผาผลาญเชื้อเพลิงไฮโดรเจนของมันหมดไป ความดันจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่ต่อต้านการบีบอัดทางความโน้มถ่วงของตัวมันก็จะสูญหายไปด้วย ในที่สุดมันจะยุบตัวกลายเป็นดาวแคระขาว หรือดาวนิวตรอน หรือไม่ก็หลุมดำ ขึ้นอยู่กับมวลตั้งต้นของมัน ถึงแม้นักดาราศาสตร์จะตรวจพบซูเปอร์โนวาที่เกิดขึ้นมาแล้วอย่างดาษดื่นในห้วงอวกาศ แต่กลไกที่ชัดเจนของการยุบตัวและการระเบิดกลับยังไม่เป็นที่เข้าใจดี นั่นเป็นเพราะว่ารายละเอียดของมันมีความซับซ้อนอย่างมาก และอาจจะแตกต่างกันไปสำหรับการยุบตัวของแกนดาวแต่ละดวงที่มีขนาดและมวลแตกต่างกัน การยุบตัวทางความโน้มถ่วงของแกนดาวและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของมันในระหว่างกระบวนการระเบิด พลังงานส่วนหนึ่งจะถูกปลดปล่อยออกมาในรูปของคลื่นความโน้มถ่วงที่มีลักษณะเฉพาะตัวในแถบสเปกตรัมความถี่สูง [8]

2.4 ดาวนิวตรอนหมุน

แหล่งกำเนิดคลื่นความโน้มถ่วงที่เป็นไปได้อีกประเภทหนึ่งซึ่งอยู่ประจำที่และให้สัญญาณคลื่นความโน้มถ่วงแบบต่อเนื่องเกือบความถี่เดียว คือ ดาวอัดแน่นที่หมุนรอบตัวเองด้วยอัตราเร็วสูง อย่างเช่น ดาวนิวตรอนซึ่งเป็นซากเหลือของดาวมวลมากที่ใช้เชื้อเพลิงนิวเคลียร์หมดไปและเกิดหลังการระเบิดซูเปอร์โนวา ปัจจุบันเรารู้ว่าดาวนิวตรอนมีอยู่จริงจากการค้นพบพัลซาร์ สำหรับพัลซาร์ที่สร้างคลื่นความโน้มถ่วงได้นั้นจะต้องมีรูปทรงที่อสมมาตรรอบแกนหมุน ความอสมมาตรอาจเกิดขึ้นจากสาเหตุต่าง ๆ เช่น เกิดจากการแข็งตัวของเปลือกดาวนิวตรอนที่เพิ่งเกิดขึ้นมาหลังจากการระเบิดซูเปอร์โนวา หรือเกิดจากการพอกพูนของสสารที่ตกลงไปบนดาว หรือเกิดจากพลวัติภายในแกนดาว คลื่นความโน้มถ่วงที่ถูกสร้างขึ้นจะมีความถี่เดียวกับความถี่ในการหมุนของดาว หรือไม่ก็เป็นสองเท่าของความถี่ในการหมุนของดาว ขึ้นกับสาเหตุของความอสมมาตร ในกรณีแรกจะเกิดขึ้นจากการส่ายในขณะหมุน หรือเป็นเพราะว่าแกนของดาวไม่ได้ล็อกติดกับเปลือกดาวอย่างสมบูรณ์ทำให้ความหนาแน่นภายในมีการกระจายตัวรอบแกนหมุน ส่วนกรณีหลังเกิดจากสาเหตุอสมมาตรแบบอื่น

นอกเหนือจากแหล่งกำเนิดที่กล่าวมาข้างต้น นักวิทยาศาสตร์ยังคาดหวังว่าอาจจะตรวจพบคลื่นความโน้มถ่วงจากแหล่งกำเนิดที่เราไม่รู้จักมาก่อน คลื่นความโน้มถ่วงเหล่านี้อาจมีรูปแบบที่ต่างไปจากที่เรารู้จัก [9] และมันจะนำพาเราไปสู่ความเข้าใจใหม่ ๆ ต่อเอกภพของเรา

3. คุณูปการของการสังเกตการณ์คลื่นความโน้มถ่วง

เนื่องจากคลื่นความโน้มถ่วงถูกผลิตขึ้นมาในกระบวนการที่รุนแรงทางดาราศาสตร์ รวมทั้งแหล่งกำเนิดของพวกมันก็มีสมบัติที่สุดขั้วเช่นกัน ด้วยเหตุนี้การสังเกตการณ์คลื่นความโน้มถ่วงจึงเป็นเครื่องมือชั้นดีในการตรวจสอบฟิสิกส์มูลฐาน และอาจเป็นกุญแจไขปริศนาทางฟิสิกส์ที่ยังไม่มีคำตอบหลาย ๆ ประการ ไม่ว่าในด้านการทดสอบความถูกต้องของทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปของไอน์สไตน์และทฤษฎีความโน้มถ่วงทางเลือก และในด้านดาราศาสตร์คลื่นความโน้มถ่วง ซึ่งเป็นการเปิดช่องทางใหม่ในการศึกษาวิจัยฟิสิกส์ดาราศาสตร์ เช่น

3.1 การทดสอบความถูกต้องของทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปของไอน์สไตน์และทฤษฎีความโน้มถ่วงทางเลือกอื่น ๆ

ทฤษฎีทางวิทยาศาสตร์ใด ๆ ที่ถูกเสนอขึ้นมาต้องพร้อมได้รับการตรวจสอบอยู่เสมอ ตลอดช่วงเวลาที่ผ่านมาทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปของไอน์สไตน์ประสบความสำเร็จอย่างสูงในการอธิบายผลสังเกตการณ์ทางฟิสิกส์ดาราศาสตร์ อย่างไรก็ตาม มีปัญหาจำนวนหนึ่งที่บ่งชี้ว่าทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปยังไม่ใช่ทฤษฎีที่ถูกต้องสมบูรณ์ มันอาจเป็นเพียงการประมาณที่ดีของทฤษฎีที่ทั่วไปกว่าซึ่งสามารถแก้ปัญหาของทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปได้ทั้งหมด

ตัวอย่างปัญหาที่สัมพัทธภาพทั่วไปแก้ไม่ได้ เช่น ปัญหาการสูญหายของข้อมูลไปในหลุมดำซึ่งขัดแย้งกับหลักการนิยัตินิยม (Determinism) ของสถานะทางฟิสิกส์หรือหลักยูนิทาริตี้อันเป็นหัวใจของกลศาสตร์ควอนตัม [10] ปัญหาการมีอยู่ของภาวะเอกฐานของกาลอวกาศ [11] เช่น ที่ศูนย์กลางของหลุมดำมีความหนาแน่นและความโค้งของกาลอวกาศมีค่าเป็นอนันต์ [12] ปัญหาค่าคงที่ของจักรวาลซึ่งมีบทบาทในการผลักดันให้เอกภพขยายตัวด้วยความเร่ง ยังไม่สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองมาตรฐานของฟิสิกส์อนุภาคที่เรามีในปัจจุบัน [13]

นอกจากนี้ การสืบเสาะความวิปลาสของความโน้มถ่วง (Gravity anomaly) ซึ่งหมายถึงพฤติกรรมของความโน้มถ่วงที่เบี่ยงเบนหรือผิดแผกไปจากที่คาดการณ์ตามทฤษฎีที่เราเชื่อถือในปัจจุบัน หรือการละเมิดกฎฟิสิกส์ในทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป โดยการสังเกตการณ์อาจให้เบาะแสบางอย่างที่ช่วยให้เราค้นพบทฤษฎีความโน้มถ่วงทางเลือกอื่นที่สมบูรณ์กว่าได้ การสังเกตการณ์ทางความโน้มถ่วงที่แม่นยำ เช่น การสังเกตการณ์พัลซาร์ของฮัลส์และเทเลอร์ สนับสนุนทั้งทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปของไอน์สไตน์และทฤษฎีความโน้มถ่วงทางเลือกหลายทฤษฎี และการสังเกตการณ์คลื่นความโน้มถ่วงน่าจะให้ผลสังเกตการณ์ที่สามารถใช้ตัดสินบางทฤษฎีว่าจะถูกถอดถอนออกไปในอนาคต ตามทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป คลื่นความโน้มถ่วงซึ่งบรรยายในทางคณิตศาสตร์ด้วยสนามเทนเซอร์นั้นเดินทางด้วยอัตราเร็วแสงและมีโพลาไรเซชันสององค์ประกอบ แต่ในทฤษฎีความโน้มถ่วงทางเลือกบางทฤษฎี เช่น ทฤษฎีที่ใช้สนามสเกลาร์และสนามเทนเซอร์ในการบรรยายความโน้มถ่วงให้ผลว่า คลื่นความโน้มถ่วงมีโพลาไรเซชันมากกว่าสององค์ประกอบ และกราวิตอนซึ่งเป็นควอนตัมของความโน้มถ่วงนั้นอาจจะมีมวลนิ่งไม่เป็นศูนย์ส่งผลให้คลื่นความโน้มถ่วงเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วต่ำกว่าแสงได้ [14] ตามทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปของไอน์สไตน์ กาลอวกาศในบริเวณรอบของหลุมดำที่หมุนถูกบรรยายได้ด้วยเรขาคณิตที่มีพลวัตหนึ่งเดียว (Unique) ที่เรียกว่า ผลเฉลยของเคอร์ (Kerr solution) การสังเกตการณ์คลื่นความโน้มถ่วงที่แผ่ออกมาจากหลุมดำขนาดเล็กที่ตกลงไปในหลุมดำมวลยิ่งยวดที่หมุน จะเป็นวิธีที่เป็นไปได้ในการทดสอบทฤษฎีบทการมีผลเฉลยหนึ่งเดียวของหลุมดำ (Black hole uniqueness theorem) [15]

การสังเกตการณ์ทางดาราศาสตร์รังสีเอ็กซ์ ให้หลักฐานทางอ้อมที่หนักแน่นว่า การปะทุของรังสีเอ็กซ์อันเจิดจ้านั้นมีหลุมดำอาศัยอยู่ ลักษณะเฉพาะของหลุมดำเหล่านี้สามารถบ่งบอกได้จากโหมดการสั่นกึ่งปกติ (Quasi-normal modes) ของหลุมดำโดยการตรวจวัดได้จากคลื่นความโน้มถ่วงที่มีความถี่และรูปแบบเฉพาะตัวที่แผ่ออกมา

กฎข้อที่สองของกลศาสตร์หลุมดำ หรือที่รู้จักในอีกชื่อหนึ่งคือ ทฤษฎีบทพื้นที่ของฮอว์คิง เป็นอีกตัวอย่างหนึ่งของทฤษฎีที่สามารถทดสอบได้ด้วยการสังเกตการณ์คลื่นความโน้มถ่วง ทฤษฎีบทนี้กล่าวว่าพื้นที่ทั้งหมดของขอบฟ้าเหตุการณ์ของหลุมดำแบบฉบับจะต้องไม่ลดลงตามเวลา นี่เป็นผลสืบเนื่องของสัมพัทธภาพทั่วไปและสมมุติฐานการเซนเซอร์ของจักรวาล (Cosmic censorship hypotheses) หากระบบหลุมดำคู่ประพฤติตัวตามทฤษฎีบทนี้แล้วล่ะก็ ผลรวมของพื้นที่ของฟ้าเหตุการณ์ของหลุมดำสองดวงที่เข้าชนกันจะต้องไม่มากไปกว่าพื้นที่ขอบฟ้าเหตุการณ์ของหลุมดำที่เป็นผลลัพธ์จากการรวมตัว ตามทฤษฎีสัมพัทธภาพของไอน์สไตน์พื้นที่ขอบฟ้าเหตุการณ์ของหลุมดำสามารถคำนวณได้จากมวลและอัตราเร็วในการหมุนของมัน ซึ่งอนุมานได้จากสัญญาณคลื่นความโน้มถ่วงที่ตรวจวัดได้ ดังนั้นจึงสามารถทดสอบความถูกต้องของทฤษฎีบทพื้นที่ของฮอว์คิงได้ [16]

3.2 การค้นหาสมการสถานะของสสารความหนาแน่นสูงยิ่งยวด

ดาวนิวตรอนจัดเป็นดาวที่มวลอัดแน่น เนื้อในของดาวนิวตรอนเป็นสสารในสภาวะสุดขั้ว แกนของมันมีความหนาแน่นสูงยิ่งกว่าความหนาแน่นอิ่มตัวของนิวเคลียส (Nuclear saturation density) ของอะตอมเสียอีก มันจึงเป็นวัตถุสสารที่มีความหนาแน่นสูงที่สุดในเอกภพเท่าที่เรารู้จักในตอนนี้ ดาวนิวตรอนถูกค้นพบมาหลายทศวรรษแล้ว แต่สมบัติทางฟิสิกส์และโครงสร้างภายในของมันยังไม่เป็นที่เข้าใจกันดี แกนของมันอาจจะเป็นนิวเคลียสขนาดใหญ่ หรือเป็นทะเลของควาร์กและกลูออนอิสระ โดยที่แกนของดาวนิวตรอนนั้น นิวคลีออนอาจเกิดการเปลี่ยนสถานะไปเป็นพลาสมาควาร์ก-กลูออนได้ในสภาวะที่ความหนาแน่นสูงมาก ๆ สิ่งนี้อาจเกิดขึ้นในดาวนิวตรอนที่มีมวลสูงกว่าปรกติ ซึ่งเป็นผลลัพธ์จากการรวมกันของดาวนิวตรอนสองดวงที่ดำรงอยู่ได้ชั่วขณะหนึ่งก่อนจะยุบตัวทางความโน้มถ่วงไปเป็นหลุมดำ นักฟิสิกส์ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและความหนาแน่น ซึ่งเรียกว่า สมการสถานะ (Equation of state) ในการบรรยายสมบัติของสสารดาวนิวตรอน เนื่องจากเราไม่ทราบ

สมการสถานะที่แท้จริงของดาวนิวตรอน จึงมีแบบจำลองทางทฤษฎีจำนวนมากถูกเสนอขึ้นมาโดยอาศัยพื้นฐานความรู้ของฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์ดาราศาสตร์ การสังเกตการณ์คลื่นความโน้มถ่วงสามารถช่วยนักฟิสิกส์แก้ปัญหานี้และค้นพบสมการสถานะที่ถูกต้องของสสารดาวนิวตรอนได้ ในขณะที่ดาวนิวตรอนกับดาวที่เป็นคู่ของมันอีกดวง (ซึ่งอาจเป็นหลุมดำหรือดาวนิวตรอน) หมุนวนเข้าหากันในระยะที่ใกล้กันมากนั้น ผลของความโน้มถ่วงไทดัลของดาวคู่ของมันจะบีบอัดให้โครงสร้างของดาวนิวตรอนบิดเบี้ยวไปจากปรกติ ในทางเทคนิคปริมาณของการบิดเบี้ยวนี้เรียกว่า การผิดรูปจากแรงไทดัล (Tidal deformation) ซึ่งขึ้นกับขนาดของดาวและสมการสถานะของสสารดาวนิวตรอน นอกจากนี้ ค่านี้จะโตขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างดาวคู่หดสั้นลง ความบิดเบี้ยวของดาวนิวตรอนเหนี่ยวนำให้ศักย์โน้มถ่วงเปลี่ยนไปและทิ้งร่องรอยอันเป็นลักษณะเฉพาะตัวไว้ในคลื่นความโน้มถวงที่ถูกปลดปล่อยออกมา ดังนั้นโดยการตรวจวัดคลื่นความโน้มถ่วงจะให้ข้อมูลที่สามารถนำไปอนุมานสมบัติของดาวนิวตรอนและสมการสถานะของมัน การตรวจพบคลื่นความโน้มถ่วง GW170817 ของหอสังเกตการณ์ LIGO และ Virgo ซึ่งสอดคล้องกับการชนกันระหว่างดาวนิวตรอนสองดวง ทำให้นักฟิสิกส์สามารถระบุขีดจำกัดของค่าการผิดรูปจากแรงไทดัลได้ นำไปสู่การระบุขีดจำกัดรัศมีของดาวนิวตรอนและช่วยถอดถอนสมการสถานะบางอันออกไป [16]

3.3 สำรวจสสารมืดและสมบัติของมัน

หลักฐานจากการสังเกตการณ์ทางดาราศาสตร์ทำให้นักวิทยาศาสตร์คิดว่า กาแล็กซีต่าง ๆ ปกคลุมด้วยกลุ่มเมฆของสสารมืดที่กันไม่ให้ดาวในกาแล็กซีหลุดออกไปจากการโคจรของพวกมัน ถ้าปราศจากสสารมืดกาแล็กซีและโครงสร้างขนาดใหญ่จะไม่อาจก่อตัวและดำรงอยู่ได้ เอกภพของเราประกอบด้วยสสารมืดในสัดส่วนประมาณ 85% ของสสารทั้งหมด (หรือประมาณ 27% ของสสาร-พลังงานทั้งหมดในเอกภพ) แบบจำลองทางทฤษฎีจำนวนมาก (ยากจะนับจำนวน) ถูกเสนอขึ้นมาเพื่ออธิบายสมบัติอันน่าพิศวงของสสารมืด บางแบบจำลองเสนอว่าสสารมืดประกอบขึ้นจากอนุภาคมวลต่ำในระดับ 10^{-22} eV [17] บางสมมติฐานเสนอว่าหลุมดำบรรพกาล (Primordial black hole) ซึ่งในทางทฤษฎีนั้นสามารถมีมวลสูงพอ ๆ กับมวลของดวงอาทิตย์ อาจเป็นสสารมืดในรูปแบบหนึ่ง [18] ส่วนแบบจำลองสสารมืดที่ได้รับความนิยมสูงคือ วิมพ์ (WIMP) ซึ่งเป็นอนุภาคมวลสูงที่ทำอันตรกิริยาอย่างอ่อน (Weakly interacting massive particle) หรืออาจเป็น อนุภาคแอกซิออน (Axion) ซึ่งถูกเสนอขึ้นครั้งแรกเพื่อแก้ปัญหาประจุ-พาริตี้แบบเข้ม (Strong CP problem) ในทฤษฎีควอนตัมโครโมไดนามิกส์ (QCD) เนื่องจากแอกซิออนสามารถมีมวลที่ต่ำมาก (ต่ำกว่า 1 eV มาก) และประพฤติตัวเหมือนของไหลไม่สัมพัทธภาพซึ่งปรากฏอยู่ทั่วไปในเอกภพ นักจักรวาลวิทยาจึงเสนอว่าแอกซิออนเป็นอีกหนึ่งในแคนดิเดทของสสารมืด การสังเกตการณ์คลื่นความโน้มถ่วงสามารถช่วยให้เราค้นหาสสารมืดและระบุสมบัติทางฟิสิกส์ของมันในหลาย ๆ วิธี เช่น ถ้าสสารมืดในสภาพของไหลมีอยู่จริง มันควรส่งผลกระทบต่อพลวัติของระบบหลุมดำคู่ในรูปของแรงหน่วงการเคลื่อนที่ และเราสามารถตรวจวัดร่องรอยของผลกระทบเหล่านั้นได้จากการวิเคราะห์ความถี่ของสัญญาณคลื่นความโน้มถ่วงที่แผ่ออกมาจากระบบหลุมดำคู่

สสารมืดอาจมีองค์ประกอบ (อย่างน้อยบางส่วน) เป็นอนุภาคโบซอนที่มีมวลเบามาก ๆ อย่างเช่นโฟตอนมืด โดยมีมวลได้ตั้งแต่ 10^{-33}–10^{-11} eV แม้ว่าอนุภาคสสารมืดแทบไม่ทำอันตรกิริยากับอนุภาคในแบบจำลองมาตรฐาน แต่หลักความสมมูลของไอน์สไตน์บ่งว่ามันทำอันตรกิริยาทางความโน้มถ่วงอย่างแน่นอน (เช่นเดียวกับหลุมดำ) และให้ผลที่สามารถสังเกตการณ์ได้ ยกตัวอย่าง สนามโบซอนของแอกซิออนที่มีความยาวคลื่นคอมพ์ตันพอ ๆ กับขนาดของหลุมดำทางดาราศาสตร์จะถูกจับไว้ในสถานะกักขัง (Bound states) รอบหลุมดำ ก่อตัวเป็นระบบที่เรียกว่า “อะตอมเชิงความโน้มถ่วง (Gravitational atom)” ระบบนี้คล้ายกับอะตอมสามัญตรงที่สถานะกักขังที่เป็นไปได้มีลักษณะเป็นควอนตัม และข้อที่ต่างกับอะตอมสามัญคือแรงยึดเหนี่ยวเป็นแรงโน้มถ่วงของหลุมดำและอนุภาคในสถานะกักขังเป็นโบซอนซึ่งไม่ได้เป็นไปตามหลักกีดกันของเพาลี ดังนั้นในแต่ละสถานะกักขังสามารถมีโบซอนจำนวนเท่าใดก็ได้ การเปลี่ยนระดับพลังงานของแอกซิออนในอะตอมเชิงความโน้มถ่วงและกระบวนการประลัยของแอกซิออนด้วยกันไปเป็นกราวิตอนจะแผ่คลื่นความโน้มถ่วงที่มีลักษณะเฉพาะตัวและสามารถสังเกตได้

[19] เครื่องตรวจวัดภาคพื้นดินจะค้นหาสัญญาณนี้สำหรับแอกซิออนที่มีมวลในช่วง 10^{-13}–10^{-10} eV ส่วนเครื่องตรวจวัดในอวกาศอย่าง LISA จะครอบคลุมสัญญาณที่สอดคล้องกับโบซอนมวลเบากว่า

เครือข่ายความร่วมมือหอสังเกตการณ์คลื่นความโน้มถ่วง LIGO, Virgo และ KAGRA ถูกออกแบบมาเพื่อตรวจหาคลื่นความโน้มถ่วงจากการรวมกันของหลุมดำหรือดาวนิวตรอน การระเบิดของดาว การหมุนของดาวนิวตรอนที่อสมมาตร แต่เครื่องตรวจวัดเหล่านี้มีความไวมากพอที่จะสามารถตรวจวัดสสารมืดที่ทำอันตรกิริยาโดยตรงกับมัน ที่จริงแล้ว มีหลายแคนดิเดทของสสารมืดที่สามารถทำอันตรกิริยากับเครื่องตรวจวัดคลื่นความโน้มถ่วงแบบมาตรแทรกสอดเลเซอร์ เช่น สเกลาร์ดิเลตอน (Scalar dilaton) สามารถเปลี่ยนแปลงมวลของอิเล็กตรอนรวมถึงค่าคงที่ทางฟิสิกส์บางตัว เช่น ทำให้เกิดการกวัดแกว่งของรัศมีโบร์ของอะตอมในส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องตรวจวัด [20] นอกจากนี้ แอกซิออน สามารถเปลี่ยนแปลงความเร็วเฟสโพลาไรเซชันวงกลมของโฟตอนของลำแสงเลเซอร์ที่เคลื่อนที่ในแต่ละแขนของมาตรแทรกสอดเลเซอร์ [21] โฟตอนมืด (Dark photon) ซึ่งคาดว่ามีมวลน้อยกว่าอิเล็กตรอนราวยี่สิบอันดับของขนาด สามารถทำอันตรกิริยากับโปรตอนและนิวตรอนหรือแค่กับนิวตรอนอย่างเดียวในกระจกของมาตรแทรกสอดส่งผลให้เกิดแรงกวัดแกว่งในเครื่องตรวจวัด [22]

หลุมดำบรรพกาล (Primordial black hole) ก็เคยถูกเสนอว่าเป็นส่วนประกอบหนึ่งของสสารมืดเนื่องจากมันไม่เปล่งแสงใด ๆ และทำอันตรกิริยาโน้มถ่วงอย่างเดียว ในอดีตนักวิทยาศาสตร์หลายกลุ่มค้นหาการมีอยู่ของมันในหลาย ๆ วิธี เช่น การเฝ้าติดตามการเคลื่อนที่ของดาวในกระจุกดาวที่อยู่ไกลโพ้นหรือมองหาการเบี่ยงเบนทางเดินของแสงที่เฉียดเข้าใกล้หลุมดำบรรพกาล การตรวจหาเบาะแสการแผ่รังสีฮอว์กิง เป็นต้น ที่ผ่านมายังไม่พบวัตถุใดที่มีสมบัติตรงกับหลุมดำดังกล่าว นักวิทยาศาสตร์จึงยังไม่สามารถระบุสมบัติเฉพาะของมันและไม่สามารถอนุมานได้ว่าพวกมันมีจำนวนมากน้อยเพียงใดในเอกภพของเรา อย่างไรก็ตาม การสังเกตการณ์คลื่นความโน้มถ่วงจะเป็นเครื่องมือใหม่ในการสำรวจและวิธีศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของมัน

3.4 ระบบคู่ของดาวนิวตรอนและดาวแคระขาวมีการกระจายตัวอย่างไรในกาแล็กซี

LISA ซึ่งเป็นเครื่องตรวจวัดคลื่นความโน้มถ่วงแบบมาตรแทรกสอดภาคอวกาศที่มีแผนปฏิบัติการในทศวรรษหน้านี้ จะสามารถตรวจวัดคลื่นความโน้มถ่วงจากระบบดาวคู่ของดาวนิวตรอนและดาวแคระขาวภายในกาแล็กซีของเราและระบุตำแหน่งที่อยู่ของพวกมัน เนื่องจากระบบดาวคู่เหล่านี้เป็นวัตถุตั้งต้นของซูเปอร์โนวาชนิด 1เอ และพัลซาร์มิลลิวินาที การสำรวจการกระจายตัวของประชากรของระบบเหล่านี้จะช่วยให้เข้าใจวิวัฒนาการของพวกมันได้ดีขึ้น

3.5 มีหลุมดำมากแค่ไหนในเอกภพ

นักฟิสิกส์จำแนกหลุมดำในเอกภพของเราเป็นสามประเภทหลัก ๆ ตามมวลของพวกมัน คือ หลุมดำมวลดาวฤกษ์ (Stellar-mass; BHs) หลุมดำมวลยิ่งยวด (Supermassive black holes; SMBHs) และหลุมดำมวลปานกลาง (Intermediated mass black holes; IMBHs) ในบรรดาหลุมดำเหล่านี้ หลุมดำมวลดาวฤกษ์มีมวลน้อยที่สุด พวกมันอาจมีมวลได้ตั้งแต่ 3 เท่าของมวลดวงอาทิตย์ถึง 100 เท่าของมวลดวงอาทิตย์ และคาดว่าน่าจะกำเนิดขึ้นจากการตายของดาวฤกษ์มวล 20 ของดวงอาทิตย์ขึ้นไป (เป็นข้อสรุปจากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์) ปัจจุบันหอสังเกตการณ์คลื่นความโน้มถ่วง Advanced LIGO/Virgo ตรวจพบคลื่นความโน้มถ่วงจากรวมกันของหลุมดำและดาวนิวตรอน 90 สัญญาณแล้ว [23]

3.6 หลุมดำมวลยิ่งยวดเกิดขึ้นมาตอนไหนและเกิดขึ้นอย่างไร

หลุมดำมวลยิ่งยวดคือหลุมดำที่มีมวลมากกว่า 100,000 เท่าของดวงอาทิตย์ มีบางทฤษฎีที่เสนอว่าหลุมดำประเภทนี้เกิดจากการรวมกันของหลุมดำหลาย ๆ ดวงเป็นลำดับขั้น เรียกว่า *ฉากทัศน์ลำดับขั้นการรวมตัว (Hierarchical merger scenario)* อย่างไรก็ตามหลุมดำตั้งต้นหรือที่เรียกว่าเมล็ดพันธ์หลุมดำ (Seed black hole) นั้นยังไม่เป็นที่ทราบกันแน่ชัดว่าเกิดขึ้นอย่างไรและเมื่อไหร่ บางสมมติฐานเสนอว่าเกิดจากการยุบตัวทางความโน้มถ่วงโดยตรงของกลุ่มแก๊สที่กระจุกตัวหนาแน่นในเอกภพยุคแรก [24,25] ที่ผ่านมาการสังเกตการณ์ทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเผยให้เห็นว่ามีหลุมดำมวลยิ่งยวดอยู่ ณ ใจกลางกาแล็กซีส่วนใหญ่ของเอกภพ นอกจากนี้การ

สังเกตการณ์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้หลักฐานที่บ่งชี้ว่ามีการรวมตัวกันของหลุมดำมวลยิ่งยวดด้วย อย่างไรก็ตามการตรวจวัดคลื่นความโน้มถ่วงจากการรวมตัวของหลุมดำมวลยิ่งยวดอยู่นอกขอบเขตความไวของเครื่องตรวจวัดภาคพื้นดินที่เรามีในปัจจุบัน มันจะเป็นภารกิจหลักของหอสังเกตการณ์ภาคอวกาศอย่าง LISA ที่จะเกิดขึ้นในอนาคตอันใกล้ ด้วยความไวของ LISA จะสามารถวัดมวลของหลุมดำและระยะทางจากแหล่งกำเนิดได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ ตามฉากทัศน์การรวมตัวเป็นลำดับขั้น อัตราความถี่ที่สามารถตรวจวัดได้ของ LISA อาจสูงถึงสองเหตุการณ์ต่อสัปดาห์ ทำให้สามารถติดตามรอยทางประวัติศาสตร์การเติบโตของหลุมดำมวลยิ่งยวดได้และนำไปสู่การทำความเข้าใจวิวัฒนาการของกาแล็กซีอีกด้วย

3.7 มีหลุมดำมวลปานกลางจริงไหม

หลุมดำประเภทที่สามซึ่งก็คือ หลุมดำมวลปานกลาง ซึ่งมีชื่อเรียกตรงไปตรงมาเพราะมีมวลอยู่ระหว่างหลุมดำมวลดาวฤกษ์และหลุมดำมวลยิ่งยวด กล่าวคือ อยู่ในระหว่าง 100-100,000 เท่าของดวงอาทิตย์ บางทฤษฎีเสนอว่าหลุมดำประเภทนี้เป็นซากที่เหลือจากการยุบตัวทางความโน้มถ่วงของดาวมวลมากที่มีองค์ประกอบของธาตุหนักกว่าฮีเลียมในรุ่นแรก (Low-metallicity population III) มีทฤษฎีอื่นที่เสนอว่าหลุมดำมวลปานกลางเกิดจากการรวมตัวเป็นลำดับของดาวในกระจุกดาวที่มีอายุไม่มากนัก ปัจจุบัน HLX-1 เป็นแคนดิเดทของหลุมดำมวลปานกลางที่เป็นไปได้สูงจากการสังเกตการณ์ในย่านรังสีเอ็กซ์ ซึ่งอนุมานว่ามีมวลอยู่ในช่วง 3,000–300,000 เท่าของมวลดวงอาทิตย์ หลุมดำมวลปานกลางสามารถตรวจพบได้โดยตรงจากคลื่นความโน้มถ่วงที่ปลดปล่อยออกมาจากการชนของระบบดาวคู่ที่มีอย่างน้อยดวงหนึ่งเป็นหลุมดำมวลปานกลางโดยหอสังเกตการณ์ Advanced LIGO และ Advanced Virgo [26] ระบบคู่ของหลุมดำมวลปานกลางสามารถใช้เป็นห้องปฏิบัติการที่สมบูรณ์แบบสำหรับทดสอบทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป ระบบหลุมดำมวลปานกลางบางระบบอาจมีอสมมาตรของมวลสูงมาก (Highly asymmetric) ระบบดาวคู่ที่มีอสมมาตรของมวลสามารถแผ่คลื่นความโน้มถ่วงฮาร์มอนิกสูงพร้อมกับฮาร์มอนิกมูลฐานของมัน การตรวจพบสัญญาณ GW190412 แสดงให้เห็นว่ามีโหมดอันดับสูงดังกล่าวอยู่จริง นี่เป็นครั้งแรกที่นักวิทยาศาสตร์สามารถตรวจวัดฮาร์มอนิกอันดับห้าที่สมบูรณ์แบบของคลื่นความโน้มถ่วงจากการชนกันของหลุมดำ การตรวจพบระบบอสมมาตรของหลุมดำคู่ยังช่วยเปิดกว้างความเข้าใจของเราเกี่ยวกับสมบัติพื้นฐานของหลุมดำ เช่น มวล สปิน และประจุไฟฟ้า ตามทฤษฎีบทหลุมดำไม่มีขน และยังให้ข้อมูลเกี่ยวกับวิวัฒนาการของดาวฤกษ์

3.8 เลนส์ความโน้มถ่วง

นักวิทยาศาสตร์สามารถศึกษาปรากฏการณ์เลนส์ความโน้มถ่วงจากคลื่นความโน้มถ่วง เลนส์ความโน้มถ่วงเกิดจากการบิดโค้งของกาลอวกาศรอบ ๆ วัตถุมวลมากจนสามารถเบี่ยงเบนเส้นทางหรือสมบัติบางอย่างของคลื่นที่เดินทางผ่านมันได้ในลักษณะคล้ายกับปรากฏการณ์ที่แสงผ่านเลนส์ แต่นอกจากเลนส์ความโน้มถ่วงจะทำการเบี่ยงเบนแสงที่ผ่านหรือเฉียดเข้าใกล้แล้ว คลื่นความโน้มถ่วงที่เดินทางผ่านบริเวณของเลนส์ก็เกิดปรากฏการณ์นี้เช่นกัน การเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นความโน้มถ่วงเมื่อผ่านเลนส์จะขึ้นกับธรรมชาติของเลนส์ เลนส์ของวัตถุมวลมาก เช่น กาแลกซีหรือกระจุกกาแลกซี จะส่งผลต่อรูปคลื่นในรูปแบบเฉพาะตัวที่ต่างจากเลนส์ของหลุมดำ [27]

3.9 การวัดอัตราการขยายตัวของเอกภพ

เป็นระยะเวลาเกือบศตวรรษแล้ว ตั้งแต่ครั้งที่นักวิทยาศาสตร์เริ่มตระหนักว่าเอกภพของเรากำลังขยายตัว เป็นการค้นพบที่ปฏิวัติความเข้าใจที่เรามีต่อเอกภพและเป็นหลักฐานสนับสนุนทฤษฎีบิ๊กแบงที่ว่าเอกภพมีจุดกำเนิดและมีการวิวัฒนาการ ซึ่งเป็นหนึ่งแนวคิดหลักของจักรวาลวิทยาสมัยใหม่ การขยายตัวของเอกภพทำให้กาแล็กซีและวัตถุต่าง ๆ เคลื่อนที่หนีห่างจากกัน หนึ่งในพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญยิ่งยวดในจักรวาลวิทยาคือค่าคงที่ฮับเบิล มันบอกถึงอัตราการขยายตัวของเอกภพโดยเฉลี่ย อย่างไรก็ตาม สองวิธีหลัก ๆ ดั้งเดิมที่ใช้หาค่าคงที่ฮับเบิล ได้แก่ การวัดรังสีไมโครเวฟพื้นหลังซึ่งเป็นข้อมูลจากเอกภพยุคเริ่มแรก กับการวัดระยะทางและเรดชิฟท์ของซูเปอร์โนวาในเอกภพยุคท้าย ให้ค่าที่ไม่สอดคล้องกันในระดับที่เป็นปัญหา เรียกว่า ฮับเบิลเทนชัน (Hubble tension) [28] จุดนี้เองที่วิธีการใหม่ในการวัดค่าคงที่ฮับเบิลด้วยคลื่นความโน้มถ่วงจะมาช่วยคลี่คลายปัญหา [29]

การวัดค่าคงที่ฮับเบิลต้องใช้ข้อมูลสองอย่าง คือ ระยะทางเชิงการส่องสว่าง (Luminosity distance) และเรดชิฟท์ของแหล่งกำเนิด ส่วนแนวคิดหลักของวิธีใหม่นี่คือเราหาระยะทางของแหล่งกำเนิดได้จากการวิเคราะห์สัญญาณคลื่นความโน้มถ่วงที่ปลดปล่อยมาจากระบบคู่หลุมดำหรือดาวนิวตรอน และหาเรดชิฟท์ของแหล่งกำเนิดจากการสังเกตการณ์เชิงแสง ระบบดาวคู่ที่เปล่งคลื่นความโน้มถ่วงในที่นี้จะเรียกว่า “ไซเรนมาตรฐาน (Standard siren)” ซึ่งมีบทบาทเทียบเคียงได้กับ “เทียนไขมาตรฐาน (Standard candle)” ของดาราศาสตร์ ในกรณีที่ไซเรนมาตรฐานไม่มีการเปล่งรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาโดยตรง (ไซเรนมืด) เช่น ระบบหลุมดำคู่ จะใช้เรดชิฟท์ของกาแล็กซีที่ไซเรนนั้นอาศัยอยู่แทน สำหรับไซเรนที่ปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในกระบวนการปะทุของคลื่นความโน้มถ่วง (ไซเรนสว่าง) เช่น การชนระหว่างดาวนิวตรอน จะสามารถวัดเรดชิฟท์ของแหล่งกำเนิดได้โดยตรง

3.10 พลังงานมืด

แบบจำลองบิ๊กแบงมาตรฐาน (Standard model of Big Bang cosmology) ของเอกภพตามทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปที่เอกภพประกอบด้วยสสาร สสารมืด และพลังงานมืดในรูปค่าคงที่เอกภพ (Cosmological constant) สามารถอธิบายผลการสังเกตการณ์ต่าง ๆ ของเอกภพได้เป็นอย่างดี [30] เช่น การค้นพบรังสีไมโครเวฟพื้นหลังของจักรวาล การตรวจพบว่าเอกภพขยายตัวด้วยอัตราเร่ง เป็นต้น แต่พลังงานมืดในรูปค่าคงที่เอกภพมีปัญหาสำคัญบางประการ เช่น ปัญหา Fine-tuning ที่ถ้าค่าคงที่เอกภพปรับเปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อย เอกภพจะมีชะตากรรมที่แตกต่างไปอย่างสิ้นเชิง มีแบบจำลองพลังงานมืดในรูปแบบสนามที่มีพลวัตถูกเสนอขึ้นหลายรูปแบบ การสังเกตการณ์คลื่นความโน้มถ่วงจะเป็นอีกเครื่องมือหนึ่งในการทำความเข้าใจการขยายตัวแบบมีความเร่งและธรรมชาติของพลังงานมืดผ่านระบบคู่ของดาวนิวตรอนหรือหลุมดำซึ่งทำหน้าที่เป็นไซเรนมาตรฐาน ภารกิจของ LISA และเครื่องตรวจวัดคลื่นความโน้มถ่วงภาคพื้นดินรุ่นที่สามในอนาคต ซึ่งมีศักยภาพในการสำรวจเอกภพได้ไกลออกไปมากขึ้น (เรดชิฟท์สูง) จะสามารถตรวจวัดปริมาณของพลังงานมืดและอาจจะค้นพบสมการสถานะของมันด้วย [31]

บทสรุป

เพียงไม่กี่ปีหลังจากที่มีการตรวจพบคลื่นความโน้มถ่วงได้ครั้งแรก เครือข่ายความร่วมมือของหอสังเกตการณ์คลื่นความโน้มถ่วงภาคพื้นดินก็ได้ตรวจวัดการปะทุของคลื่นความโน้มถ่วงจากการรวมกันในระบบคู่หลุมดำ-หลุมดำ และหลุมดำ-ดาวนิวตรอน ได้หลายสิบเหตุการณ์ ทำให้เราสั่งสมความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับระบบเหล่านี้มากขึ้นเรื่อย ๆ ในขณะเดียวกันการสังเกตการณ์คลื่นความโน้มถ่วงก็ใช้ทดสอบทฤษฎีฟิสิกส์มูลฐานต่าง ๆ เช่น ทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป ทฤษฎีความโน้มถ่วงรูปแบบอื่น ๆ กฎพื้นที่ของฮอว์คิง เป็นต้น นอกจากนี้ยังมอบวิธีสืบเสาะเนื้อในของดาวนิวตรอน สมบัติของสสารมืด พลังงานมืด และวิธีวัดอัตราการการขยายตัวของเอกภพที่แม่นยำขึ้น ในทศวรรษหน้านี้เทคโนโลยีการตรวจวัดระลอกคลื่นของกาลอวกาศทั้งภาคพื้นดินและอวกาศจะสุกงอมและพร้อมให้เราใช้สำรวจห้วงลึกของเวลาและอวกาศ เติมเต็มความรู้ความเข้าใจของเราที่มีต่อจักรวาลแห่งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] B. P. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott, M. R. Abernathy, F. Acernese, K. Ackley, C. Adams, T. Adams, et al., “Observation of gravitational waves from a binary black hole merger”, Physical Review Letters, 116, 061102 (2016).

[2] G. Auger and E. Plagnol, “An overview of gravitational waves: Theory, sources and detection”, World Scientific (2017).

[3] B. P. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott, F. Acernese, K. Ackley, C. Adams, T. Adams, P. Addesso, et al., “GW170817: Observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral”, Physical Review Letters, 119, 161101 (2017).

[4] R. Abbott, T. D. Abbott, S. Abraham, F. Acernese, K. Ackley, A. Adams, C. Adams, R. X. Adhikari, et al., "Observation of gravitational waves from two neutron star–black hole coalescences", The Astrophysical Journal Letters, 915, L5 (2021).
[5] K. S. Thorne, "Gravitational-wave bursts with memory: The Christodoulou effect", Physical Review D, 45, 520–524 (1992).
[6] M. Favata, "Nonlinear gravitational-wave memory from binary black hole mergers", The Astrophysical Journal, 696, L159 (2009).
[7] J. Aasi, J. Abadie, B. P. Abbott, R. Abbott, T. Abbott, M. R. Abernathy, T. Accadia, F. Acernese, et al. "Constraints on cosmic strings from the LIGO-Virgo gravitational-wave detectors", Physical Review Letters, 112, 131101 (2014).
[8] C. D. Ott, " The gravitational-wave signature of core-collapse supernovae", Classical and Quantum Gravity, 26, 063001 (2009).
[9] N. Aggarwal, O. D. Aguiar, A. Bauswein, G. Cella, S. Clesse, A. M. Cruise, V. Domcke, D. G. Figueroa, A. Geraci, M. Goryachev, H. Grote, M. Hindmarsh, F. Muia, N. Mukund, D. Ottaway, M. Peloso, F. Quevedo, A. Ricciardone, J. Steinlechner, S. Steinlechner, S. Sun, M. E. Tobar, F. Torrenti, C. Ünal and G. White, "Challenges and opportunities of gravitational-wave searches at mHz to GHz frequencies", Living Reviews in Relativity, 24, 4 (2021).
[10] W. G. Unruh and R. M. Wald, "Information loss", Reports on Progress in Physics, 80, 092002 (2017).
[11] R. Penrose, "Gravitational collapse and space-time singularities", Physical Review Letters, 14, 57 (1965).
[12] S. W. Hawking and R. Penrose, "The singularities of gravitational collapse and cosmology", Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 314, 529–548 (1970).
[13] P. J. E. Peebles and B. Ratra, "The cosmological constant and dark energy", Reviews of Modern Physics, 75, 559 (2003).
[14] H. Özer and O. Delice, "Gravitational waves in Brans–Dicke theory with a cosmological constant", The European Physical Journal C, 81, 326 (2021).
[15] I. Ota, "Black hole spectroscopy: Prospects for testing the nature of black holes with gravitational wave observations", arXiv:2208.07980 [gr-qc] (2022).
[16] M. Isi, W. M. Farr, M. Giesler, M. A. Scheel and S. A. Teukolsky, "Testing the black-hole area law with GW150914", Physical Review Letters, 127, 011103 (2021).
[17] R. Brito, S. Ghosh, E. Barausse, E. Berti, V. Cardoso, I. Dvorkin, A. Klein and P. Pani, "Gravitational wave searches for ultralight bosons with LIGO and LISA", Physical Review D, 96, 064050 (2017).
[18] B. Carr, F. Kühnel and M. Sandstad, "Primordial black holes as dark matter", Physical Review D, 94, 083504 (2016).
[19] L. Hui, J. P. Ostriker, S. Tremaine and E. Witten, "Ultralight scalars as cosmological dark matter", Physical Review D, 95, 043541 (2017).
[20] H. Grote and Y. Stadnik, "Novel signatures of dark matter in laser-interferometric gravitational-wave detectors", Physical Review Research, 1, 033187 (2019).
[21] K. Nagano, T. Fujita, Y. Michimura and I. Obata, "Axion dark matter search with interferometric gravitational wave detectors", Physical Review Letters, 123, 111301 (2019).
[22] R. T. Co, A. Pierce, Z. Zhang and Y. Zhao, "Dark photon dark matter produced by axion oscillations", Physical Review D, 99, 075002 (2019).
[23] R. Abbott, T. D. Abbott, F. Acernese, K. Ackley, C. Adams, N. Adhikari, R. X. Adhikari, V. B. Adya, et al., "GWTC-3: Compact binary coalescences observed by LIGO and Virgo during the second part of the third observing run", arXiv:2111.03606 [gr-qc] (2021).

[24] M. C. Begelman, M. Volonteri and M. J. Rees, "Formation of supermassive black holes by direct collapse in pre-galactic haloes", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 370, 289-298 (2006).
[25] M. Volonteri, "The formation and evolution of massive black holes", Science, 337, 544-547 (2012).
[26] R. Abbott, T. D. Abbott, F. Acernese, K. Ackley, C. Adams, N. Adhikari, R. X. Adhikari, V. B. Adya, et al., "Search for intermediate-mass black hole binaries in the third observing run of advanced LIGO and advanced Virgo", Astronomy & Astrophysics, 659, A84 (2022).
[27] R. Abbott, H. Abe, F. Acernese, K. Ackley, S. Adhicary, N. Adhikari, R. X. Adhikari, V. K. Adkins, et al., "Search for gravitational-lensing signatures in the full third observing run of the LIGO-Virgo network", arXiv:2304.08393 [gr-qc] (2023).
[28] E. Valentino, O. Mena, S. Pan, L. Visinelli, W. Yang, Ai. Melchiorr, D. F. Mota, A. G. Riess and J. Silk, "In the realm of the Hubble tension—A review of solutions", Classical and Quantum Gravity, 38, 153001 (2021).
[29] S. Mastrogiovanni, C. Karathanasis, J. Gair, G. Ashton, S. Rinaldi, H.-Y. Huang and G. Dálya, "Cosmology with gravitational waves: A review", Annalen der Physik, 2022, 2200180 (2022).
[30] A. Liddle, "An introduction to modern cosmology", John Wiley & Sons (2015).
[31] R. Abbott, H. Abe, F. Acernese, K. Ackley, N. Adhikari, R. X. Adhikari, V. K. Adkins, V. B. Adya, et al., "Constraints on the cosmic expansion history from GWTC-3", arXiv:2111.03604 [astro-ph.CO] (2021).