Sci
V16N1P1

TOE ตอนที่ 2
ความขัดแย้งระหว่างทฤษฎีแรงโน้มถ่วงสากล กับทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ

ประยงค์ พงษ์ทองเจริญ[1]

ไอน์สไตน์ได้ใช้ทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษคลี่คลายความขัดแย้งระหว่างความสำนึกรู้เองเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ที่มีมานานแล้วกับความคงตัวของอัตราเร็วของแสง คำตอบสรุปโดยย่อคือ ความสำนึกรู้เองของเรานั้นไม่ถูกต้อง เพราะได้ข้อมูลมาจากการเคลื่อนที่ซึ่งมีอัตราเร็วต่ำเทียบกับอัตราเร็วของแสง และอัตราเร็วต่ำเหล่านั้นบดบังไม่ให้เห็นลักษณะที่แท้จริงของอวกาศและเวลา ทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษเผยธรรมชาติที่แท้จริงของอวกาศและเวลาให้ทราบ และแสดงว่าต่างกับความเชื่อที่มีมาแต่เดิมอย่างฟ้ากับดิน การปรับเปลี่ยนความเข้าใจของเราในเรื่องความเข้าใจที่เป็นพื้นฐานเกี่ยวกับอากาศและเวลาไม่ใช่เรื่องเล็กๆ ไอน์สไตน์พบว่าในบรรดาความขัดข้องไม่เข้าใจต่างๆ มีอยู่เรื่องหนึ่งที่ใหญ่หลวงกว่าทุกเรื่อง คือ ข้อแถลงที่ว่าไม่มีอะไรเร็วกว่าแสงเข้ากันไม่ได้กับทฤษฎีแรงโน้มถ่วงสากลของนิวตันที่เสนอไว้ตั้งแต่ช่วงปลายของศตวรรษที่ 17 และเป็นที่ยอมรับนับถือกันอยู่ ดังนั้นในขณะที่คลี่คลายปัญหาหนึ่งได้ (ดูตอนที่ 1) ทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษสร้างปัญหาใหม่ขึ้นอีกปัญหาหนึ่งทันทีหลังจากศึกษาอย่างขะมักเขม้นอยู่ถึงสิบปี ไอน์สไตน์ได้คลี่คลายปัญหาใหม่ไปได้ด้วยทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป อีกครั้งหนึ่งที่ไอน์สไตน์ได้ปฏิวัติความเข้าใจเรื่องอวกาศและเวลาของเรา โดยแสดงว่าอวกาศและเวลาโค้งงอ ยับย่นและบิดเบี้ยว เพื่อสื่อแรงโน้มถ่วง

2.1 ทัศนะของนิวตันเรื่องแรงโน้มถ่วง

นิวตันได้ปฏิรูปการวิจัยทางวิทยาศาสตร์ใหม่ โดยนำคณิตศาสตร์มาใช้ในการศึกษาวิชาฟิสิกส์อย่างเต็มที่ นิวตันนับได้ว่าเป็นปราชญ์ผู้ยิ่งใหญ่ท่านแรกในวงการวิทยาศาสตร์ หากเขาพบว่าตรงที่ใดยังขาดคณิตศาสตร์สำหรับการค้นคว้า เขาจะบัญญัติคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมขึ้นมาใช้ เป็นเวลาเกือบสามร้อยปีหลังนิวตันจึงได้มีผู้ยิ่งใหญ่ที่ทัดเทียมกันปรากฏในวงการวิทยาศาสตร์อีก สิ่งที่เกี่ยวข้องกับเราตรงนี้คือทฤษฎีแรงโน้มถ่วงของท่าน

แรงโน้มถ่วงเกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันของเราไปเสียทุกเรื่อง แรงนี้ยึดเราและสิ่งต่างๆ รอบตัวเราให้อยู่บนพื้นโลก เหนี่ยวรั้งอากาศที่เราหายใจไม่ให้หนีไปสู่ห้วงอวกาศ แรงโน้มถ่วงยึดให้ดวงจันทร์เคลื่อนที่ในวงโคจรรอบโลก และยึดให้โลกเคลื่อนที่ในวงโคจรรอบดวงอาทิตย์ กล่าวได้ว่า แรงโน้มถ่วงกำหนดจังหวะการฟ้อนของจักรวาลที่ดำเนินไปอย่างไม่รู้เหนื่อยและได้จังหวะสอดคล้องกันอย่างพอเหมาะโดยสมาชิกของจักรวาล ได้แก่ ดาวเคราะห์น้อย ดาวเคราะห์ ดวงดาว และดาราจักร นับเป็นจำนวนได้ล้านของล้านของล้าน อิทธิพลของนิวตัน

[1] รองศาสตราจารย์ ดร.
ประธานคณะกรรมการจัดตั้งศูนย์วิทยาศาสตร์ศึกษา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ พ.ศ. 2518-2526.

ที่ยั่งยืนมากกว่าสามร้อยปีเป็นเหตุให้เรายอมรับโดยดุษณี ไม่เคยคิดสงสัยเลยแม้แต่น้อยว่าแรงเพียงแรงเดียว คือแรงโน้มถ่วง เป็นตัวการที่กำหนดปรากฏการณ์ต่างๆ ทั้งบนโลกและนอกโลกได้สารพัดอย่าง ก่อนนิวตันไม่เคยมีใครนึกเลยว่า ผลแอปเปิลที่ตกจากต้นลงบนพื้น จะมีกฎเกณฑ์ทางฟิสิกส์เดียวกันกับที่ดาวเคราะห์โคจรรอบดวงอาทิตย์ ด้วยความกล้าหาญชาญชัยที่จะเชิดชูสัจธรรมของวิทยาศาสตร์ นิวตันได้ประสานฟิสิกส์ที่ปกครองโลกและสวรรค์ให้เป็นหนึ่งเดียว และประกาศว่าแรงโน้มถ่วงเป็นตัวการในอาณาจักรทั้งสอง

ตามทัศนะของนิวตัน แรงโน้มถ่วงนับได้ว่าเป็นตัวถ่วงดุลหรือสร้างดุลที่สมบูรณ์แบบ เขาประกาศว่า *ทุกสิ่ง* (ไม่มียกเว้น) ออกแรงโน้มถ่วงดึงดูด*ทุกสิ่ง* (ไม่มียกเว้น) ไม่ว่าจะมีองค์ประกอบทางกายภาพเป็นอย่างไร *ทุกสิ่ง* ออกแรงโน้มถ่วง และในขณะเดียวกันก็ได้รับแรงโน้มถ่วง โดยใช้ข้อมูลจากการศึกษาวิเคราะห์ของโยฮันส์ เคปเลอร์ (Johannes Kepler) ว่าด้วยการเคลื่อนที่ของดาวเคราะห์ นิวตันพบว่า ความแรงของแรง (ดึงดูด) โน้มถ่วงระหว่างวัตถุสองก้อนขึ้นอยู่เฉพาะกับสองสิ่งด้วยกัน คือ ปริมาณสารที่ประกอบเป็นวัตถุ และระยะห่างระหว่างวัตถุทั้งสอง ปริมาณสารหมายถึงสสาร ซึ่งคือจำนวนโปรตอน นิวตรอน และอิเล็กตรอน ซึ่งกำหนด*มวล*ของวัตถุอีกต่อหนึ่ง ทฤษฎีแรงโน้มถ่วงสากลบอกว่า ความแรงของแรงดึงดูดระหว่างวัตถุสองก้อนจะมีค่ามากสำหรับวัตถุคู่ที่มีมวลมาก และมีค่าน้อยสำหรับวัตถุคู่ที่มีมวลน้อย และยังบอกอีกว่าความแรงของแรงดึงดูดมีค่ามากถ้าระยะห่างระหว่างวัตถุมีค่าน้อย และมีค่าน้อยถ้าระยะห่างมีค่ามาก

นิวตันยังค้นพบมากกว่าคำอธิบายเชิงคุณภาพนี้อีก และเขียนสมการที่อธิบายความแรงของแรงโน้มถ่วงระหว่างวัตถุสองก้อนได้เป็นเชิงปริมาณ[1] ถ้าเขียนเป็นคำพูด สมการของนิวตันแถลงว่า แรงโน้มถ่วงระหว่างวัตถุสองก้อนจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับผลคูณของมวล และเป็นปฏิภาคผกผันกับกำลังสองของระยะห่างระหว่างวัตถุทั้งสอง 'กฎของความโน้มถ่วง' นี้ สามารถใช้ทำนายการเคลื่อนที่ของดาวเคราะห์และดาวหางรอบดวงอาทิตย์และดวงจันทร์รอบโลก และจรวดที่ทะยานขึ้นไปสำรวจดาวเคราะห์ ได้ดีพอๆ กับการเคลื่อนที่ใกล้ผิวโลก เช่น กระสุนปืนพุ่งฝ่าอากาศ นักกระโดดน้ำจากกระดานสปริงลงสู่สระ ความสอดคล้องระหว่างผลการทำนายและการเคลื่อนที่สังเกตได้จริงๆ ดีมาก ผลสำเร็จนี้เองทำให้ทฤษฎีของนิวตันได้รับการยอมรับอย่างไม่มีข้อแม้ใดๆ จนกระทั่งถึงต้นศตวรรษที่ 20 การค้นพบทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษโดยไอน์สไตน์ได้สร้างข้อสงสัยเกินกว่าที่ทฤษฎีแรงโน้มถ่วงสากลของนิวตันจะอธิบายได้

2.2 ความไม่ลงรอยระหว่างความโน้มถ่วงกับทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ

สาระที่เป็นหัวใจของทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษได้แก่อัตราเร็วของแสงเป็นเพดานของอัตราเร็ว เป็นเรื่องสำคัญที่จะต้องตระหนักว่า เพดานนี้เป็นเพดานไม่เพียงแต่ของอัตราเร็วของวัตถุเท่านั้น ยังเป็นเพดานของอัตราเร็วของสัญญาณหรืออิทธิพลทุกชนิดด้วย พูดตรงๆ ก็คือ ไม่มีทางใดเลยที่จะส่งข่าวสารหรืออิทธิพลจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้เร็วกว่าอัตราเร็วของแสง แน่ละ อิทธิพลที่ส่งออกไปด้วยอัตราเร็วน้อยกว่าแสงมีมากมายด้วยกัน เป็นต้นว่าเสียงพูดและเสียงอื่นๆ ถูกนำไปด้วยการสั่นสะเทือนที่เดินทางในอากาศได้เร็วประมาณ 700 ไมล์ต่อชั่วโมง ซึ่งน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราเร็วของแสง 670 ล้านไมล์ต่อชั่วโมง ผลต่างของความเร็วนี้ปรากฏชัดเมื่อเกิดพายุฟ้าคะนอง แม้ว่าฟ้าแลบและฟ้าร้องจะเกิดพร้อมกัน เราจะเห็นฟ้าแลบก่อนได้ยินเสียงฟ้าร้อง ทฤษฎี

---

[1] $F = Gm_1m_2/r^2$ ในเมื่อ F แทนแรงโน้มถ่วง m_1 และ m_2 เป็นมวลของวัตถุที่ออกแรงโน้มถ่วงดึงดูดซึ่งกันและกัน r เป็นระยะห่างระหว่างวัตถุทั้งสอง และ G คือค่าคงตัวสากล

สัมพัทธภาพพิเศษบอกเราว่า ในทางตรงข้าม สัญญาณอะไรก็ตามที่มาถึงเราก่อนแสงที่ส่งมาพร้อมกันเป็นไปไม่ได้ ไม่เคยมีอะไรเลยที่วิ่งชนะโฟตอน

สังเกตข้อความต่อไปนี้ให้ดีๆ ตามทฤษฎีแรงโน้มถ่วงของนิวตัน วัตถุก้อนหนึ่งออกแรงโน้มถ่วงฉุดวัตถุอีกก้อนหนึ่งด้วยความแรงขึ้นอยู่กับมวลและระยะห่างระหว่างวัตถุทั้งสองเท่านั้น ความแรงไม่ได้ขึ้นอยู่กับว่าวัตถุก้อนหนึ่ง *อยู่ในบริเวณอิทธิพล* ของวัตถุอีกก้อนหนึ่งนานเท่าไร หมายความว่าถ้ามวลหรือระยะห่างระหว่างวัตถุทั้งสองก้อนจะได้เปลี่ยนไป ตามทฤษฎีของนิวตัน วัตถุทั้งสองจะรู้สึก*ทันที* ถึงความเปลี่ยนแปลงในแรงโน้มถ่วงซึ่งมีต่อกันและกัน ยกตัวอย่างเช่น ทฤษฎีของแรงโน้มถ่วงของนิวตันอ้างว่า ถ้าดวงอาทิตย์เกิดระเบิดตูม โลกซึ่งอยู่ห่างออกไปถึง 93 ล้านไมล์จะเคลื่อนที่ออกนอกแนววงโคจรรูปวงรีตามปรกติทันที แม้ว่าแสงที่บอกถึงการระเบิดจะใช้เวลาถึง 8 นาทีเคลื่อนที่จากดวงอาทิตย์มาถึงโลก ในทฤษฎีของนิวตัน ความรู้ว่าดวงอาทิตย์ระเบิดแล้วถูกส่งถึงโลกทันที ผ่านการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นทันทีทันควันในแรงโน้มถ่วงที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของโลก

ข้อสรุปนี้ขัดแย้งโดยตรงกับทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ เนื่องจากทฤษฎีนี้ประกันไว้ว่าจะไม่มีข่าวสารใดถูกส่งไปได้เร็วกว่าอัตราเร็วของแสง การส่งสัญญาณไปถึงปลายทางทันที (ไม่ใช้เวลาเลย) จึงฝ่าฝืนทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษเต็มประตู

ในตอนต้นศตวรรษที่ 20 ไอน์สไตน์ได้ตระหนักว่า ทฤษฎีแรงโน้มถ่วงของนิวตันขัดแย้งกับทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษของเขา ด้วยความมั่นใจในความถูกต้องของทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ และไม่ได้สนใจกับหลักฐานการทดลองสูงเป็นภูเขาที่สนับสนุนทฤษฎีของนิวตัน ไอน์สไตน์ลงมือแสวงหาทฤษฎีแรงโน้มถ่วงใหม่ที่จะลงรอยกับทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษของเขาได้ และความมุ่งมั่นในเรื่องนี้นำเขาไปสู่การค้นพบทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป ซึ่งทำให้ความเข้าใจเรื่องอวกาศและเวลาต้องเปลี่ยนไปอย่างมากอีกครั้งหนึ่ง

2.3 รูปธรรมของความโน้มถ่วง

แม้จะยังไม่ได้ค้นพบทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ ทฤษฎีแรงโน้มถ่วงของนิวตันก็ยังบกพร่องในประเด็นสำคัญอยู่ประเด็นหนึ่ง แม้ว่าจะสามารถใช้ทฤษฎีนี้ทำนายอย่างแม่นยำมากว่าวัตถุเคลื่อนที่อย่างไรภายใต้อิทธิพลของแรงโน้มถ่วง ทฤษฎีนี้ไม่เคยชี้แจงให้เข้าใจเลยว่าแรงโน้มถ่วงคืออะไร กล่าวคือ วัตถุสองก้อนที่ไม่ได้สัมผัสกันเลย แยกกันอยู่คนละที่ อาจห่างกันหลายร้อยล้านไมล์ถ้าไม่มากกว่านั้น มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของกันและกันได้อย่างไร ความโน้มถ่วงส่งอิทธิพลโดยทางใด ปัญหานี้เป็นปัญหาที่นิวตันเองก็ตระหนักดีอยู่ นิวตันยอมรับแรงโน้มถ่วงโดยไม่ไปเสียเวลาพะวงในเรื่องที่เขาคิดไม่ตก และได้พัฒนาสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายผลของแรงโน้มถ่วง โดยไม่ได้ชี้แจงว่าแรงนี้ส่งถึงกันได้อย่างไร นิวตันได้มอบ "คู่มือผู้ใช้" สำหรับความโน้มถ่วงให้กับโลก ซึ่งมีคำอธิบายว่าจะใช้อย่างไร เหมือนกับเวลาไปซื้อเครื่องซักผ้าก็จะได้คู่มือบอกให้กดปุ่มตั้งเพื่อใช้น้ำมากน้ำน้อย ซักแบบประหยัดหรือปรกติจะทำอย่างไร คำอธิบายซึ่งนักฟิสิกส์ นักดาราศาสตร์ และวิศวกร นำมาใช้อย่างได้ผลดียิ่งสำหรับคำนวณแนวการเคลื่อนที่ของจรวดไปดวงจันทร์ ดาวอังคาร และดาวเคราะห์ดวงอื่นในระบบสุริยะ สำหรับทำนายสุริยุปราคาและจันทรุปราคา สำหรับทำนายการเคลื่อนที่ของดาวหางและอื่นๆ แต่นิวตันปล่อยให้กลไกภายในหรือสิ่งที่บรรจุอยู่ใน "กล่องดำ" ของความโน้มถ่วงยังคงเป็นความลึกลับอยู่ต่อไป เมื่อท่านใช้เครื่องเล่นแผ่นซีดี (CD) หรือเครื่องคอมพิวเตอร์ที่บ้านหรือที่ทำงาน ท่านอาจพบว่าตนเองอยู่ในสถานะที่คล้ายๆ กัน คือไม่ทราบว่าข้างในเครื่องทำงานอย่างไร ตราบเท่าที่ท่านทราบว่าจะกดตรงไหน หมุนตรงไหน ทำตามคำสั่ง

บนจอได้ ไม่ว่าท่านหรือใครก็ไม่มีความจำเป็นจะต้องไปรู้ว่าเครื่องทำงานอย่างไร แต่เมื่อเครื่องเล่นซีดีหรือคอมพิวเตอร์เกิดเสียใช้การไม่ได้ขึ้นมา การซ่อมต้องอาศัยผู้ที่มีความรู้ในการทำงานภายในของเครื่องแน่ๆ ในทำนองเดียวกัน ไอน์สไตน์ตระหนักว่า ถ้าไม่นับผลการทดลองที่สนับสนุนทฤษฎีแรงโน้มถ่วงของนิวตันนานถึงประมาณ 300 ปีแล้ว ทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษของเขาเองให้ความหมายลึกๆ ว่า ทฤษฎีของนิวตัน "ชำรุด" และในการซ่อมจะต้องรู้จริงๆ ในปัญหาเรื่องธรรมชาติที่แท้จริงของความโน้มถ่วงและอย่างหมดเปลือกด้วย

ใน ค.ศ. 1907 ขณะที่ครุ่นคิดถึงปัญหาเหล่านี้ในห้องทำงานที่สำนักงานจดทะเบียนสิทธิบัตรที่กรุงเบอร์น (Bern) ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ ไอน์สไตน์เริ่มมองเห็นแนวคิดที่เป็นหัวใจรางๆ แต่ก็ยังอยู่ในลักษณะที่ผสุบๆ โผล่ๆ แต่ท้ายที่สุดนำเขาไปสู่ทฤษฎีใหม่ของความโน้มถ่วงที่แหวกแนวไปจากเดิมอย่างมาก แนวคิดไม่เพียงแต่เติมเต็มทฤษฎีของนิวตัน แต่ยังปฏิรูปความคิดเรื่องความโน้มถ่วง และที่สำคัญที่สุดคือ การปฏิรูปนี้ยังสอดคล้องกับทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษด้วย

แนวความคิดของไอน์สไตน์เกี่ยวพันกับปัญหาที่ท่านอาจอึดอัดใจในตอนที่กล่าวถึงความขัดแย้งประการแรกในวิชาฟิสิกส์ (ตอนที่ 1) ในตอนนั้นเราได้ย้ำว่า เราสนใจทำความเข้าใจว่าโลกปรากฏอย่างไรต่อปัจเจกบุคคลที่เคลื่อนที่สัมพัทธ์กันด้วยความเร็วคงตัว โดยเปรียบเทียบด้วยความระมัดระวังผลการสังเกตของปัจเจกบุคคลดังกล่าว เราพบความหมายที่น่าทึ่งของธรรมชาติของอวกาศและเวลา แต่กับคนที่รู้สึกว่า *เคลื่อนที่ด้วยความเร่ง* ผลการสังเกตของปัจเจกบุคคลพวกหลังนี้จะมีความซับซ้อนที่จะวิเคราะห์มากกว่าผลที่ผู้สังเกตที่เคลื่อนที่อย่างสง่างามด้วยความเร็วคงตัวพบ แต่ไม่ว่าจะอย่างไร เราสามารถตั้งคำถามได้ว่า มีวิธีใดไหมที่จะเอาชนะความซับซ้อนและนำการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งเข้ามาเป็นส่วนของความเข้าใจใหม่เรื่องอวกาศและเวลา

ความคิดที่ทำให้ไอน์สไตน์เป็นสุขมากที่สุด คือความคิดที่แสดงว่าจะเปลี่ยนการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งมาเป็นความเข้าใจใหม่เกี่ยวกับอวกาศและเวลาได้อย่างไร เพื่อจะได้มีความเข้าใจกระจ่างในประเด็นนี้ เราจะเล่านิทานสมมุติที่เกิดในปี ค.ศ. 2050 ในนิทานนี้ ให้ท่านเป็นตัวละครที่เป็นหัวหน้ากองผู้เชี่ยวชาญด้านวัตถุระเบิดของตำรวจสันติบาลและท่านเพิ่งได้รับโทรศัพท์ที่แจ้งมาด้วยความกระวนกระวายว่ามีผู้พบลูกระเบิดอยู่กลางกรุงวอชิงตันดีซี หลังจากที่เร่งไปตรวจ ท่านพบว่าลูกระเบิดที่ท่านพบนั้นร้ายกว่าลูกระเบิดในฝันร้ายเสียอีก ลูกระเบิดเป็นลูกระเบิดนิวเคลียร์และมีอำนาจระเบิดร้ายแรง จนถึงแม้จะนำไปฝังลึกในดินหรือปล่อยให้จมที่ก้นทะเลลึก แรงระเบิดก็ยังจะสามารถสร้างความเสียหายได้อย่างใหญ่หลวง หลังจากศึกษากลไกการจุดระเบิดของลูกระเบิดด้วยความระมัดระวัง ท่านทราบว่าไม่มีหนทางที่จะปลดชนวนระเบิดได้ ยิ่งกว่านั้นท่านยังพบอีกว่ามีการออกแบบเป็นกับดักที่พิสดารในลูกระเบิดนี้อีกด้วย ลูกระเบิดวางอยู่บนเครื่องชั่ง ถ้าเข็มเครื่องชั่งผิดจากค่าที่อ่านได้ในปัจจุบันไป 50 เปอร์เซ็นต์ ลูกระเบิดจะระเบิดทันที ตามกลไกที่ตรวจพบ มีเวลาอยู่ 1 สัปดาห์ที่ท่านจะต้องจัดการกับลูกระเบิดนี้ให้ได้ เพราะถึงเวลานั้นลูกระเบิดจะระเบิดเอง ชะตากรรมของผู้คนจำนวนหลายล้านขึ้นอยู่กับท่าน และผลกระทบที่ตามมาภายหลังอาจทำให้มนุษยชาติบนโลกถูกทำลายไปหมด ท่านจะทำอย่างไรดี

หลังจากแน่ใจแล้วว่าไม่มีทางใดๆ ทั้งบนโลกหรือภายในโลกที่จะปลอดภัยพอที่จะระเบิดลูกระเบิดนี้ทิ้งได้ ท่านรู้สึกว่าเหลือทางเลือกเพียงทางเดียวเท่านั้น คือใช้จรวดส่งลูกระเบิดนี้ออกไปให้ไกลแสนไกลในอวกาศ ซึ่งถ้ามีการระเบิดก็จะไม่มีอันตรายหรือความเสียหายใดๆ เกิดขึ้นบนโลก ท่านแสดงความเห็นนี้ในที่ประชุมของคณะทำงานเฉพาะกิจเรื่องนี้ และเกือบจะทันทีที่ท่านพูดจบ นักวิทยาศาสตร์หนุ่มชื่อไอแซกก็ลุกขึ้นแสดงความเห็นซึ่งทำให้ความหวังของท่านดับวูบทันที "แผนของท่านมีปัญหานะครับ" ไอแซกเริ่มต้น "เมื่อลูกระเบิดห่างออกไปจาก

โลก น้ำหนักจะลดลง เพราะแรงโน้มถ่วงที่เป็นแรงดึงดูดของโลกจะลดลง หมายความว่าเข็มของเครื่องชั่งจะลดลง ทำให้เกิดการระเบิดก่อนที่ลูกระเบิดจะถูกพาออกไปไกลจนพ้นเขตอันตราย" ก่อนที่ท่านจะมีเวลากลั่นกรองความเห็นของไอแซกอย่างละเอียด อัลเบิร์ตนักวิทยาศาสตร์หนุ่มอีกคนหนึ่งสอดขึ้น "ถ้าคิดดูให้ดี ยังมีปัญหาอีกอย่างหนึ่งนะครับ" อัลเบิร์ตหยุดเพียงแค่หายใจ แล้วพูดต่อไปว่า "ปัญหานี้สำคัญพอ ๆ กับข้อทักท้วงของไอแซก แต่เห็นไม่ชัดเท่า เพราะฉะนั้นขอให้ท่านให้เวลาผมอธิบายสักหน่อย" ท่านพยายามยกมือทำท่าให้อัลเบิร์ตสงบปากสงบคำ เพราะต้องการสมาธิไตร่ตรองคำทักท้วงของไอแซก แต่ก็เหมือนกับครั้งก่อน ๆ ลองอัลเบิร์ตได้เริ่มพูดแล้วก็ยากที่จะยั้งเขาไว้ได้

"ในการส่งลูกระเบิดออกไปสู่อวกาศ เราจะต้องใช้จรวดบรรทุกออกไป ขณะที่จรวดเร่งทะยานขึ้นเพื่อออกไปสู่อวกาศ เข็มบนเครื่องชั่งจะแสดงน้ำหนัก *เพิ่มขึ้น* เป็นเหตุให้ลูกระเบิดระเบิดก่อนที่จะนำออกไปได้ไกลในอวกาศ ท่านคงเห็นนะครับว่าฐานของลูกระเบิดซึ่งวางบนเครื่องชั่งจะกดลงบนเครื่องชั่งหนักกว่าเมื่อตอนอยู่นิ่ง ๆ แบบเดียวกับที่หลังของเรากดแผ่นรองหลังของเก้าอี้มากขึ้นขณะที่เร่งรถยนต์ให้เร็วขึ้น ลูกระเบิดจะกดเครื่องชั่งแบบเดียวกับที่หลังของเรากดแผ่นรองหลังของเก้าอี้รถ เมื่อเครื่องชั่งถูกกด เข็มก็จะแสดงน้ำหนักมากขึ้น และตรงนี้เองที่จะเป็นเหตุให้เกิดการระเบิดถ้าหากตัวเลขที่อ่านเพิ่มขึ้น 50 เปอร์เซ็นต์"

ท่านขอบคุณอัลเบิร์ตที่เขาแสดงความเห็น แต่ท่านไม่ได้ตั้งใจฟังอัลเบิร์ตเพราะกำลังคิดถึงสิ่งที่ไอแซกพูด ท่านประกาศอย่างหมดอาลัยตายอยากว่า ความหวังต้องสลายหายวับไปเพราะโดนหมัดจัง ๆ เพียงหมัดเดียว และคำทักท้วงของไอแซกก็ได้ทำหน้าที่เหมือนหมัดเพชรฆาต ด้วยความรู้สึกหมดหวัง ท่านถามที่ประชุมว่าใครมีข้อเสนอแนะอย่างอื่นอีกบ้าง ถึงตรงนี้อัลเบิร์ตมีความเห็นที่ทำให้ทุกคนต้องนิ่งฟังด้วยใจจดใจจ่อ "คิดดูอีกทีหนึ่ง" อัลเบิร์ตพูดต่อ "ผมคิดว่าความเห็นของท่านยังใช้ได้อยู่ ข้อสังเกตของไอแซกว่าความโน้มถ่วงลดลงขณะที่ลูกระเบิดถูกนำออกไปห่างโลกหมายความว่าเข็มบนเครื่องชั่งจะอ่านได้ *น้อยลง* ข้อสังเกตของผมที่ว่าความเร่งขึ้นของจรวดจะทำให้ลูกระเบิดกดเครื่องชั่งหนักขึ้นหมายความว่าเครื่องชั่งจะอ่านได้ *มากขึ้น* เมื่อนำข้อสังเกตทั้งสองมาพิจารณาร่วมกัน จะเห็นว่าถ้าเราปรับความเร่งด้วยความระมัดระวังทุกขณะที่จรวดทะยานขึ้น ปรากฏการณ์ทั้งสองจะ *หักทอนกันได้พอดี* โดยเฉพาะในตอนต้น ๆ ของการยกตัวขึ้น เมื่อจรวดยังรู้สึกแรงโน้มถ่วงเต็มที่ การเร่งจะต้องไม่มากเกินไปนักจนเลยขีดจำกัด 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อจรวดอยู่ห่างจากโลกมากขึ้น ๆ และรู้สึกแรงโน้มถ่วงน้อยลง ๆ เราต้องเพิ่มความเร่งขึ้นเพื่อชดเชย ค่าที่อ่านได้เพิ่มขึ้นจากความเร่งขึ้นจะสามารถปรับให้เท่ากับค่าที่อ่านได้ลดลงจากแรงโน้มถ่วงที่ลดลง ดังนั้น ที่จริงแล้วเราสามารถจะรักษาเข็มบนเครื่องชั่งให้อ่านค่าเดิม ไม่เปลี่ยนแปลงเลย"

ข้อเสนอแนะของอัลเบิร์ตเริ่มมีความหมาย "หรือพูดอีกอย่างหนึ่ง" ท่านพูดโต้ตอบ "ความเร่งขึ้นสามารถทดแทนความโน้มถ่วงได้ เราสามารถเลียนผลของความโน้มถ่วงได้ด้วยการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งที่เหมาะสม"

"ถูกเผงทีเดียวครับ" อัลเบิร์ตสนับสนุน

"ดังนั้น" ท่านพูดต่อ "เราสามารถส่งลูกระเบิดออกไปสู่อวกาศโดยปรับความเร่งของจรวดอย่างพอเหมาะพอดีให้ค่าที่อ่านได้บนเครื่องชั่งไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้น จึงหลีกเลี่ยงไม่ให้มีการระเบิดจนกระทั่งลูกระเบิดอยู่ห่างจากโลกเป็นระยะที่ปลอดภัย" ดังนั้น โดยเอาความเร่งขึ้นมาทดแทนความโน้มถ่วงและใช้วิทยาศาสตร์ของจรวดในศตวรรษที่ยี่สิบเอ็ด ท่านสามารถช่วยโลกให้พ้นมหันตภัยได้

การรู้ว่าความโน้มถ่วงและการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งเกี่ยวพันกันอย่างลึกซึ้งเป็นความเข้าใจสำคัญที่ทำให้ไอน์สไตน์มีความสุขที่สุด แม้ว่านิทานตัวอย่างเรื่องลูกระเบิดเน้นสาระสำคัญของความคิดของไอน์สไตน์ แต่จะมี

คุณค่ายิ่งขึ้นหากจะเรียบเรียงความเสียใหม่ให้อยู่ในกรอบความคิดใกล้เคียงกับตอนที่ 1 ด้วยความมุ่งหมายนี้ ให้จินตนาการว่าท่านอยู่ในตู้รถไฟที่ปิดสนิท ไม่มีหน้าต่างและ *ไม่ได้* เคลื่อนที่ด้วยความเร่ง จะไม่มีหนทางเลยที่ท่านจะหาอัตราเร็วของท่านได้ ทุกที่ภายในตู้เหมือนกัน และการทดลองตรงที่ใดๆ ภายในตู้จะให้ผลตรงกัน ไม่ว่าท่านจะมีความเร็วเท่าไรก็ตาม ที่เป็นพื้นฐานยิ่งกว่าคือ เมื่อไม่มีสิ่งภายนอกสำหรับเปรียบเทียบ จะไม่มีทางที่จะบอกอัตราเร็วของสถานะการเคลื่อนที่ของท่านได้เลย แต่ในอีกด้านหนึ่ง ถ้าท่านเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง แม้การสังเกตของท่านจะถูกจำกัดอยู่เฉพาะภายในตู้ที่ปิดสนิทไม่เห็นภายนอก ท่านก็ยัง*รู้สึกแรง*ที่กระทำกับตัวท่านได้ เป็นต้นว่าถ้าเก้าอี้ที่ท่านนั่ง (หันหน้าไปทางเดียวกับรถไฟ) ตรึงแน่นอยู่กับพื้นของตู้ เมื่อรถเร่งไปข้างหน้าท่านจะรู้สึกแรงที่เก้าอี้ดันหลังท่าน หรือถ้าท่านอยู่ในลิฟต์ที่เร่งขึ้น ท่านจะรู้สึกแรงที่พื้นตู้ลิฟต์ดันเท้า สิ่งที่ไอน์สไตน์ตระหนักก็คือ ภายในตู้ปิดทึบ ท่านจะไม่สามารถแยกแยะสถานการณ์ที่มีความเร่งจากสถานการณ์ที่ *ไม่มีความเร่ง* แต่มี *ความโน้มถ่วง* ถ้าปรับขนาดของความเร่งให้พอดีกับความโน้มถ่วง แรงที่ท่านรู้สึกได้จากสนามแรงโน้มถ่วงหรือจากการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งจะไม่แตกต่างกันเลย ถ้าตู้ทึบที่ท่านอยู่ตั้งนิ่งอยู่บนพื้นโลก ท่านจะรู้สึกแรงที่คุ้นเคยที่พื้นดันรับเท้า เหมือนกับท่านรู้สึกเมื่ออยู่ในลิฟต์ที่มีความเร่งขึ้น นี่คือสิ่งที่อัลเบิร์ตใช้แก้ปัญหาเรื่องส่งลูกระเบิดของผู้ก่อการร้ายขึ้นไปในอวกาศ ถ้าตู้ที่นั่งอยู่ตั้งโดยเอาด้านที่ใช้หลังพิงลงข้างล่าง ท่านจะรู้สึกว่าที่พิงหลังของเก้าอี้ดันหลัง (ป้องกันไม่ให้ท่านตก) เช่นเดียวกับเมื่อตู้ถูกเร่งในแนวราบ ไอน์สไตน์เรียกความแยกแยะไม่ได้ระหว่างความโน้มถ่วงกับความเร่งว่า *หลักสมมูลย์* (equivalence principle) หลักนี้เป็นหัวใจของทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป

คำอธิบายนี้แสดงว่าทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปต่อเติมเสริมงานที่ทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษเริ่มไว้จนเสร็จสมบูรณ์ โดยอาศัยหลักสัมพัทธภาพทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ เราสามารถประกาศว่ามีประชาธิปไตยในการเลือกจุดสังเกตที่มีตำแหน่งดีเห็นอะไรๆ ได้ทั่ว กล่าวคือ กฎของฟิสิกส์เหมือนกันหมดสำหรับผู้สังเกตที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงตัว แต่ประชาธิปไตยตามทฤษฎีนี้เป็นประชาธิปไตยไม่เต็มใบ เพราะกีดกันทัศนะของคนอื่นๆ จำนวนมากออกไป ได้แก่ ทัศนะของปัจเจกบุคคลที่เคลื่อนที่ด้วยความเร่ง ความเห็นของไอน์สไตน์ใน ค.ศ. 1907 แสดงแก่เราว่า จะยอมรับทัศนะของทุกคนภายในกรอบของความเสมอภาคได้อย่างไร คือทั้งทัศนะของคนที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงตัวและทัศนะของคนที่เคลื่อนที่ด้วยความเร่ง เนื่องจากไม่มีความแตกต่างระหว่างจุดสังเกตที่มีตำแหน่งดีที่มีความเร่งโดย *ไม่มี* ความโน้มถ่วง และจุดสังเกตที่มีตำแหน่งดีที่ไม่มีความเร่งแต่ *มี* ความโน้มถ่วง เราสามารถแถลงทัศนะของคนกลุ่มหลังโดยประกาศว่า *ผู้สังเกตทุกคนไม่ว่าจะมีสถานะการเคลื่อนที่เป็นอย่างไร อาจอ้างได้ว่าตนอยู่นิ่ง "และโลกที่เหลือเคลื่อนที่ผ่านไป" ตราบเท่าที่เขาได้ผนวกสนามความโน้มถ่วงที่เหมาะสมไว้ในคำบรรยายของสิ่งแวดล้อมโดยรอบ* ตามความหมายนี้ โดยการรวมความโน้มถ่วงเข้าไว้ด้วยทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปประกันว่าจุดสังเกตตำแหน่งดีทุกจุดมีฐานะเท่าเทียมกันหมด (ดังที่เราจะพบภายหลัง คำรับประกันนี้มีความหมายว่าความแตกต่างระหว่างผู้สังเกตในตอนที่ 1 ที่เคลื่อนที่ด้วยความเร่ง - ดังที่สมศักดิ์ใช้เครื่องไอพ่นไล่ตามสมศรี และแก่ช้ากว่าสมศรี - มีคำอธิบายอื่นที่แทนกันได้หากตัดความเร่งออกและใช้ความโน้มถ่วงแทน)

ความเกี่ยวข้องที่ลึกซึ้งระหว่างความโน้มถ่วงและการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งเป็นเรื่องน่าทึ่ง แต่ทำไมจึงทำให้ไอน์สไตน์มีความสุขมาก เหตุผลในเรื่องนี้ก็คือ ความโน้มถ่วงเป็นสิ่งลึกลับ เป็นแรงที่ยิ่งใหญ่ ซาบซึมอยู่ทุกหนทุกแห่งในจักรวาล แต่เป็นสิ่งที่ไม่มีใครเคยรู้เห็นหรืออธิบายว่าแรงนี้มีกลไกกระทำอย่างไร แต่การเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง แม้ว่าจะซับซ้อนกว่าการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงตัว แต่มีความเป็นรูปธรรม รู้ได้เห็นได้ โดยการค้นพบ

ความเชื่อมโยงขั้นมูลฐานระหว่างทั้งสองสิ่ง ไอน์สไตน์ตระหนักว่าเขาสามารถอาศัยความเข้าใจเรื่องการเคลื่อนที่เป็นเครื่องมือสำคัญทำความเข้าใจเรื่องความโน้มถ่วงได้ การเปลี่ยนยุทธศาสตร์นี้เป็นแผนปฏิบัติไม่ใช่เรื่องง่ายแม้จะโดยอัจฉริยะของไอน์สไตน์ แต่ท้ายที่สุดแนวทางนี้บังเกิดผลเป็นทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป ความสำเร็จเกิดขึ้นได้หลังจากไอน์สไตน์กำหนดความเชื่อมโยงข้อที่สองในการประสานความโน้มถ่วงและการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งให้เป็นเรื่องเดียวกัน นั่นคือ *ความโค้ง* ของอวกาศและเวลา

2.4 ความเร่งและการงอโค้งของอวกาศและเวลา

ไอน์สไตน์ศึกษาทำความเข้าใจความโน้มถ่วงอย่างอดตาหลับขับตานอน หลังจากที่ตระหนักถึงความเกี่ยวข้องระหว่างความโน้มถ่วงกับการเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง ไอน์สไตน์มีความก้าวหน้าขั้นสำคัญไปอีกขั้นหนึ่งใน ค.ศ. 1912 สืบเนื่องจากการประยุกต์ทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษเพื่อโยงความโน้มถ่วงกับการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งเพื่อที่จะได้เข้าใจขั้นนี้ในเหตุผลของไอน์สไตน์ เป็นการง่ายที่สุดที่จะมุ่งมองที่ตัวอย่างเฉพาะของการเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง (เข้าใจกันว่าไอน์สไตน์เองก็ได้พิจารณาตัวอย่างนี้) ขอให้ระลึกว่าวัตถุเคลื่อนที่ด้วยความเร่งหากอัตราเร็วหรือทิศทางของการเคลื่อนที่เปลี่ยน เพื่อความเรียบง่าย เราจะพิจารณาการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งที่เฉพาะทิศทางของการเคลื่อนที่ *เท่านั้น* ที่เปลี่ยน แต่อัตราเร็วคงที่ เจาะจงลงไปก็คือ เราจะพิจารณาการเคลื่อนที่เป็นวงกลมด้วยอัตราเร็วคงตัว ดรงนี้ผู้อ่านคงต้องใช้จินตนาการประกอบ สมมุติว่ามี "เครื่อง" เป็นภาชนะโลหะรูปทรงกระบอกขนาดใหญ่ ด้านบนเปิด และหมุนรอบแกนตรงกลางด้วยอัตราเร็วสูงมากและคงตัว (คล้ายกับจานเสียงสำหรับเล่นเพลง สมัยก่อนที่จะมีเทปเพลงหรือแผ่นซีดี ที่ริมนอกของจานมีขอบตั้งขึ้นมา) เช่นเดียวกับการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งทั้งหลาย เราจะรู้สึกหรือรับรู้การเคลื่อนที่นี้ เราจะรู้สึกว่าตัวเราถูกดึงออกไปจากศูนย์กลางตามแนวรัศมี และผนังภาชนะของ "เครื่อง" ที่เรายืนพิงอยู่จะดันหลังเราบังคับให้เราเคลื่อนที่เป็นวงกลม (ที่จริงแม้จะไม่เกี่ยวกับคำอธิบายตรงนี้ การหมุนของ "เครื่อง" จะกดร่างกายท่านให้แนบกับผนังของ "เครื่อง" ด้วยแรงซึ่งหากพื้นที่ที่ท่านยืนหายวับไปกับตา ท่านจะไม่ตกลงทางด้านกันภาชนะหากอัตราเร็วของการหมุนมากพอ) ถ้าอัตราเร็วของการหมุนคงตัวและไม่มีอาการโคลง ท่านยืนพิงผนังภาชนะแล้วหลับตา แรงที่กดที่หลังจะเหมือนกับมีเตียงนอนรองรับ เผลอๆ อาจเกือบหลงไปว่าท่านนอนอยู่บนเตียงก็เป็นได้ ที่ว่า "เกือบ" เพราะยังคงรู้สึกความโน้มถ่วง "ในแนวดิ่ง" ตามปรกติอยู่ จึงยังไม่สามารถหลอกตัวเองได้สำเร็จ แต่ถ้า "เครื่อง" นี้หมุนอยู่ในอวกาศไกลๆ จากโลก และหมุนในอัตราที่พอดิบพอดี ท่านจะรู้สึกเหมือนนอนอยู่บนเตียงที่บ้าน ยิ่งกว่านั้น เมื่อท่าน "ตื่น" และลุกขึ้นเดินบนผนังด้านในของทรงกระบอก ท่านจะรู้สึกเหมือนกับเดินอยู่บนพื้นห้องที่บ้าน จริงๆ แล้วเขาออกแบบสถานีอวกาศให้หมุนแบบนี้เพื่อสร้างความรู้สึก "ลวง" ว่ามีความโน้มถ่วงเท่าเดิมในอวกาศ

โดยการให้การเคลื่อนที่ด้วยความเร่งเป็นการหมุนของ "เครื่อง" เพื่อลอกเลียนความโน้มถ่วง เราสามารถจะติดตามความคิดของไอน์สไตน์และเริ่มต้นหาว่าอวกาศและเวลาจะปรากฏต่อคนที่อยู่ใน "เครื่อง" อย่างไร เหตุผลของไอน์สไตน์ซึ่งปรับให้เข้ากับตัวอย่างของเราเป็นดังนี้ เราในฐานะผู้สังเกตที่อยู่นิ่งจะสามารถวัดเส้นรอบวงและรัศมีของ "เครื่อง" ได้โดยง่าย เป็นต้นว่า ในการวัดเส้นรอบวง เราอาจวางทาบไม้บรรทัดจากต้นถึงปลายเป็นวงไปตามขอบของ "เครื่อง" และในการวัดรัศมีก็วางไม้บรรทัดต่อกันจากต้นถึงปลายจากเพลากลางไปถึงขอบของ "เครื่อง" เราคาดจากเรขาคณิตที่เรียนในโรงเรียนได้ว่า อัตราส่วนของเส้นรอบวงต่อรัศมีจะเป็นสองเท่าของจำนวนที่เรียกว่าพาย (π) หรือ 6.28 เหมือนกับอัตราส่วนที่คิดจากวงกลมใดๆ ที่เขียนบนแผ่นกระดาษ แต่สิ่งนี้จะเป็นอย่างไรในมุมมองของคนที่อยู่ใน "เครื่อง"

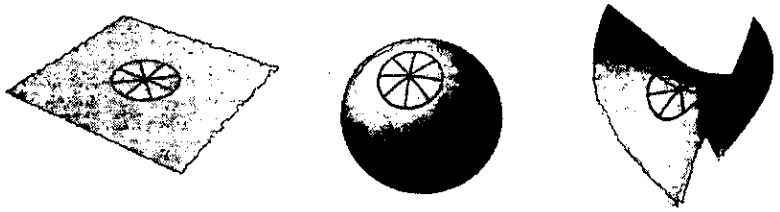
เพื่อหาคำตอบนี้ เราขอร้องให้สมัครกับสมานซึ่งอยู่ใน "เครื่อง" ให้ทำการวัดให้เรา เราโยนไม้บรรทัดให้กับสมัครสำหรับวัดเส้นรอบวง และโยนไม้บรรทัดให้กับสมานสำหรับวัดรัศมี ส่วนเราเองคอยสังเกตอยู่ข้างนอก ในขณะที่สมัครวัดเส้นรอบวง เราที่อยู่ข้างนอกเห็นทันทีว่าเขาจะต้องได้คำตอบต่างจากเรา ในขณะที่สมัครวางไม้บรรทัดตามแนวเส้นรอบวง เราสังเกตเห็นว่า *ความยาวของไม้บรรทัดสั้นลง* ที่สั้นลงไปไม่ใช่อะไรอื่น แต่เป็นการหดตัวแบบลอเรนต์ซที่ได้กล่าวถึงในตอนที่ 1 ซึ่งได้บอกว่าความยาวของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่จะสั้นลง ไม้บรรทัดสั้นลงหมายความว่าจะต้องทาบไม้บรรทัดจากต้นถึงปลาย *มาก* ครั้งขึ้นจึงจะตลอดความยาวของเส้นรอบวง เนื่องจากสมัครเห็นว่าไม้บรรทัดของเขายาว 1 ฟุต (เนื่องจากไม่มีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างเขากับไม้บรรทัด เขาจึงเห็นไม้บรรทัดของเขายาว 1 ฟุตตามปรกติ) หมายความว่าสมัครจะวัดเส้นรอบวงได้ *ยาวกว่าเรา* (แม้ว่าฟังดูจะเป็นความจริงที่ขัดแย้งกันในตัว กล่าวคือ ความยาวของเส้นรอบวงของ "เครื่อง" ที่หมุนน่าจะหดสั้นลงเช่นเดียวกับไม้บรรทัด ดังนั้น สมัครจึงน่าจะวัดเส้นรอบวงได้ยาวเท่ากับเรา แต่ขอให้ระลึกว่า ตลอดเรื่องที่กล่าวถึงนี้ "เครื่อง" หมุนตลอดเวลา เราไม่เคยวิเคราะห์ "เครื่อง" ที่อยู่นิ่งๆ ดังนั้น ตามทัศนะของเราในฐานะผู้สังเกตที่อยู่นิ่ง ผลต่างระหว่างการวัดเส้นรอบวงของเรากับของสมัครจึงเป็นผลที่ไม้บรรทัดของสมัครหดสั้นแบบลอเรนต์ซอย่างเดียว "เครื่อง" หมุนอยู่เมื่อเราทำการวัด และยังคงหมุนอยู่เหมือนเดิมเมื่อเรามองดูสมัครทำการวัด เนื่องจากเราเห็นไม้บรรทัดของเขาสั้นลง เราตระหนักว่าสมัครจะต้องวางไม้บรรทัดทาบจากต้นถึงปลายมากครั้งกว่าจึงจะตลอดความยาวของเส้นรอบวง ดังนั้น จึงได้ผลเป็นความยาวของเส้นรอบวงยาวกว่าที่เราได้ การหดตัวแบบลอเรนต์ซของเส้นรอบวงของ "เครื่อง" จะมีความสำคัญหากเราเปรียบเทียบ "เครื่อง" ตอนที่หมุนกับตอนที่หยุดนิ่ง)

ในการวัดความยาวของรัศมี สมานวางไม้บรรทัดจากต้นถึงปลายไปตลอดความยาวรัศมีตามแนวคานรองพื้น จากทัศนะของเราจะเห็นว่า สมานวัดความยาวรัศมีได้เท่ากับเรา เหตุผลก็คือ ไม้บรรทัดไม่ได้ชี้ในแนวเดียวกับการเคลื่อนที่ (ต่างจากเมื่อวัดเส้นรอบวง) แต่ตั้งฉากกับแนวการเคลื่อนที่ ดังนั้น จึงไม่มีการหดสั้นในส่วนของความยาวไม้บรรทัด สมานจึงวัดความยาวรัศมีได้เท่ากับเรา

แต่ตอนนี้เมื่อสมัครกับสมานคำนวณอัตราส่วนของความยาวเส้นรอบวงกับรัศมีของ "เครื่อง" เขาจะได้ผลเป็นจำนวนที่มากกว่าคำตอบของเรา คือ 2π เพราะเส้นรอบวงยาวขึ้นแต่รัศมีเท่าเดิม ตรงนี้แปลก เพราะเหตุไรของที่มีรูปเป็นวงกลมจึงฝืนกฎของกรีกโบราณที่ว่าอัตราส่วนนี้จะเท่ากับ 2π *พอดี*

ไอน์สไตน์มีคำอธิบายในเรื่องนี้ดังต่อไปนี้ กฎของกรีกโบราณเป็นจริงสำหรับวงกลมที่เขียนบนผิวราบ แต่เช่นเดียวกับกระจกโค้งเป็นคลื่นอย่างที่มีใน "ห้องภาพเพี้ยน" ที่ทำให้ภาพของเราบิดเบี้ยวไปจากปรกติ วงกลมที่เขียนบนผิวโค้งหรือโค้งงอจะมีระยะระหว่างจุดต่างๆ บนภาพเพี้ยนไปจากปรกติ อัตราส่วนของเส้นรอบวงของวงกลมกับรัศมีโดยทั่วไปจึง *ไม่ใช่* 2π

เพื่อเป็นตัวอย่าง รูป 2.1 เปรียบเทียบวงกลมสามวงที่มีรัศมีเท่ากัน ให้สังเกตว่าเส้นรอบวงของวงกลมทั้งสาม *ไม่* เท่ากัน เส้นรอบวงของวงกลมในรูป (ข) ซึ่งเขียนบนผิวของทรงกลมจะ *น้อยกว่า* เส้นรอบวงของวงกลมที่เขียนบนผิวราบดังรูป (ก) แม้ว่าจะมีรัศมีเท่ากัน ลักษณะโค้งของผิวทรงกลมเป็นเหตุให้เส้นรัศมีของวงกลมเบียดเข้าหากันเล็กน้อย ทำให้เส้นรอบวงของวงกลมลดลงเล็กน้อย เส้นรอบวงของวงกลมใน (ค) ที่เขียนบนผิวโค้งรูปอานม้าจะ *มากกว่า* เส้นรอบวงของวงกลมที่เขียนบนผิวราบ ลักษณะโค้งของผิวโค้งรูปอานม้าทำให้เส้นรัศมีของวงกลมถ่างห่างจากกันเล็กน้อย มีผลให้เส้นรอบวงของวงกลมเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ข้อสังเกตเหล่านี้มีความหมายว่าอัตราส่วนของเส้นรอบวงต่อรัศมีของวงกลมในรูป (ข) จะน้อยกว่า 2π เล็กน้อย ในขณะที่อัตราส่วนเดียวกันในรูป



(ก) (ข) (ค)

รูป 2.1 เส้นรอบวงของวงกลมที่เขียนบน (ก) ผิวราบ (ข) ผิวโค้งของทรงกลม และ (ค) ผิวโค้งแบบอานม้า รัศมีของวงกลมทั้งสามเท่ากัน

(ค) จะมากกว่า 2π เล็กน้อย แต่ค่าที่เบี่ยงเบนไปจาก 2π โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าที่มากกว่าที่พบใน (ค) คือสิ่งที่เราพบใน "เครื่อง" หมุน ข้อสังเกตนี้ทำให้ไอน์สไตน์เสนอความคิดว่า การโค้งของผิวเป็นคำอธิบายการฝ่าฝืน "เรขาคณิตของยูคลิด" ปรกติ เรขาคณิตของผิวราบของกรีกโบราณซึ่งใช้สอนเด็กในโรงเรียนกันมานานเป็นพันปี ไม่เป็นจริงสำหรับคนที่อยู่ใน "เครื่อง" ที่หมุน จะต้องใช้เรขาคณิตบนผิวโค้งดังรูป 2.1 (ค) แทน

ไอน์สไตน์ตระหนักว่า ความสัมพันธ์เชิงเรขาคณิตที่คุ้นเคยกันของระยะตามกฎเกณฑ์ของกรีกที่เหมาะกับรูปเรขาคณิตบนผิวราบ เช่น วงกลมบนโต๊ะราบ *ไม่เป็นจริง* ในทัศนะของผู้สังเกตที่เคลื่อนที่ด้วยความเร่ง ที่จริงเราได้พูดถึงการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งเพียงแบบเดียว แต่ไอน์สไตน์ได้แสดงว่า ผลแบบเดียวกัน คือการโก่งงอของอวกาศ เป็นจริงทุกกรณีสำหรับการเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง

จริงๆ แล้ว การเคลื่อนที่ด้วยความเร่งไม่เพียงแต่ทำให้เกิดการโก่งงอของอวกาศเท่านั้น ยังทำให้เกิดการโก่งงอของเวลาด้วย (ตามประวัติ ไอน์สไตน์มุ่งศึกษาการโก่งงอของเวลาก่อน และต่อมาจึงได้ตระหนักถึงความสำคัญของการโก่งงอของอวกาศ) ไม่ใช่เรื่องที่น่าประหลาดอะไรเลยในระดับหนึ่งที่เวลาได้รับผลกระทบด้วย ตามที่ได้อธิบายไว้ในตอนที่ 1 ว่าทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษแสดงการประสานระหว่างอวกาศและเวลาเป็นสิ่งเดียวกัน โดยการถักอวกาศและเวลาเข้าด้วยกันเป็นโครงสร้างประสานของอวกาศเวลา ทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษประกาศว่า "อะไรที่เป็นจริงสำหรับอวกาศจะเป็นจริงสำหรับเวลาด้วย" แต่เรื่องนี้ก็เกิดมีปัญหาขึ้นมา ในขณะที่เราสามารถถือว่าอวกาศที่โก่งงอมีภาพที่มีรูปร่างโค้ง แต่เวลาที่โก่งงอล่ะ จริงๆ หมายถึงอะไร

เพื่อให้พอได้เห็นภาพเลาๆ เราจะขอร้องให้สมัครกับสมานที่อยู่ใน "เครื่อง" ที่กำลังหมุนด้วยความเร็วคงตัว ทำการทดลองดังต่อไปนี้ สมัครยืนเอาหลังพิงกับขอบของ "เครื่อง" ตรงปลายของคานรองพื้นคานหนึ่งที่ทอดจากกึ่งกลางไปยังขอบ ในขณะที่สมานคลานจากตรงกลางตามแนวของคานนี้ไปหาสมัคร ทุกๆ สองสามฟุต สมานหยุดคลาน อ่านเวลาที่นาฬิกาข้อมือ และเปรียบเทียบเวลากับนาฬิกาของสมัคร เราจะสรุปเกี่ยวกับเวลาของนาฬิกาของคนทั้งสองได้เป็นอย่างไร ในทัศนะของเราที่อยู่นิ่งๆ เราสามารถจะทำนายคำตอบได้ว่านาฬิกาของคนทั้งสองจะไม่ตรงกัน การที่เราสรุปได้คำตอบอย่างนี้เพราะเราตระหนักว่าสมัครกับสมานเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วต่างกัน ใน "เครื่อง" จุดที่ยิ่งห่างจุดกึ่งกลางจะต้องเคลื่อนที่ไกลกว่าจึงจะได้หนึ่งรอบ และดังนั้นจึงมีอัตราเร็วมากกว่า แต่ตามทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ ยิ่งท่านเคลื่อนที่เร็ว นาฬิกาของท่านจะ 'ติ๊ก' ช้าลง ดังนั้น เราจึงทราบว่านาฬิกาของสมัครจะ 'ติ๊ก' ช้ากว่านาฬิกาของสมาน ยิ่งกว่านั้น ทั้งสมัครและสมานจะพบว่า ในขณะที่สมานเข้าใกล้สมัครมากขึ้น อัตราการ "ติ๊ก" ของนาฬิกาของสมานจะช้าลงเข้าใกล้อัตราการ 'ติ๊ก' ของนาฬิกาของสมัคร

ผลการวิเคราะห์นี้สะท้อนข้อเท็จจริงว่า เมื่อสมานออกไปใกล้ปลายรัศมี อัตราเร็วของเขาจะเข้าใกล้อัตราเร็วของสมัคร

เราสรุปได้ว่า ในทัศนะของผู้สังเกตที่อยู่บน "เครื่อง" หมุน เช่นสมัครกับสมาน อัตราที่เวลาผ่านไปขึ้นอยู่กับตำแหน่ง ซึ่งในกรณีนี้คือตำแหน่งห่างจากศูนย์กลางของ "เครื่อง" นี่คือสิ่งที่เราเรียกว่าการโก่งงอของเวลา เวลาจะโก่งงอหากอัตราที่ผ่านต่างกันจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง ที่สำคัญต่อการอธิบายปัจจุบันโดยเฉพาะคือ สมานยังจะสังเกตพบอย่างอื่นด้วยขณะที่เขาคลานออกไปตามแนวรัศมี เขาจะรู้สึกว่าถูกดึงออกไปทางด้านนอกแรงขึ้นเรื่อยๆ เพราะว่าไม่เพียงแต่อัตราเร็วของเขาเพิ่มขึ้นเท่านั้น แต่ความเร่งของเขาก็เพิ่มขึ้นด้วยในขณะที่เขาออกห่างยิ่งขึ้นๆ จากศูนย์กลางของ "เครื่อง" หมุน บน "เครื่อง" ที่หมุนด้วยอัตราเร็วคงตัว เราจะเห็นว่าความเร่งที่มากขึ้นหมายถึงนาฬิกาที่เดินช้าลง กล่าวคือ ความเร่งที่มากขึ้นมีผลให้เวลาโก่งงอมากขึ้น

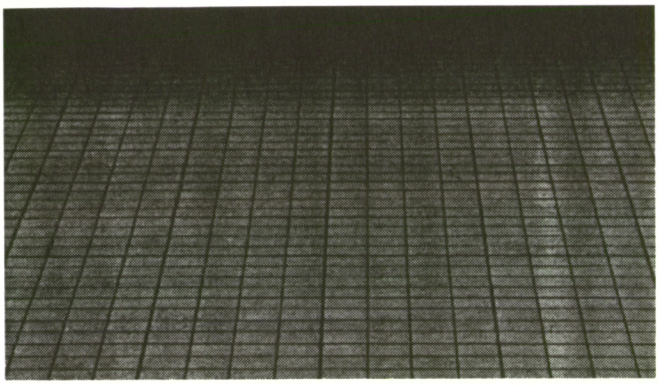
ข้อสังเกตเหล่านี้นำไอน์สไตน์ไปสู่ก้าวกระโดดสุดท้าย เนื่องจากเขาได้แสดงแล้วว่าความโน้มถ่วงและการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งนั้นจริงๆ แล้วแยกกันไม่ออก และเนื่องจากตอนนี้เขาได้แสดงอีกว่าการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งเกี่ยวข้องกับการโก่งงอของอวกาศและเวลา เขาจึงเสนอสิ่งที่อยู่ภายใน 'กล่องดำ' ของความโน้มถ่วง ซึ่งคือกลไกที่ความโน้มถ่วงทำงาน ตามทฤษฎีของไอน์สไตน์ ความโน้มถ่วงคือความโก่งงอของอวกาศและเวลา เราจะพิจารณาต่อไปว่าหมายความว่าอย่างไร

2.5 หลักเบื้องต้นของทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป

เพื่อให้พอคุ้นกับทัศนะใหม่ของความโน้มถ่วง เราจะพิจารณาตัวอย่างที่ชอบใช้กันเสมือนกับเป็นต้นแบบ ได้แก่ ดาวเคราะห์เช่นโลก ที่โคจรรอบดาวฤกษ์เช่นดวงอาทิตย์ ตามทัศนะของนิวตันเรื่องความโน้มถ่วง ดวงอาทิตย์ยึดให้โลกโคจรรอบด้วย 'สายรั้ง' ความโน้มถ่วงที่มองไม่เห็น และพุ่งออกไปยึดโลกทันทีด้วยวิธีที่ไม่แจ้งชัดข้ามอวกาศอันกว้างไกล (และทำนองเดียวกัน โลกก็ส่ง "สายรั้ง' ไปยึดดวงอาทิตย์ด้วย) ไอน์สไตน์ได้เสนอความคิดเห็นว่าสิ่งที่เกิดขึ้นจริงๆ เป็นอย่างไร จะช่วยการอธิบายแนวความคิดของไอน์สไตน์ได้มากหากเรามีแบบจำลองอวกาศเวลาที่เห็นชัดเป็นรูปธรรมที่เราสามารถจัดการได้อย่างสะดวก จะทำอย่างนั้นได้เราจะทำเรื่องให้ง่ายขึ้นสองอย่าง อย่างแรกคือในตอนนี้เราจะยังไม่นึกถึงเวลา แต่จะสนใจเฉพาะแบบจำลองที่เห็นได้ของอวกาศอย่างเดียว เราจะเอาเวลาเข้ามารวมด้วยในอีกไม่นาน เพื่อให้เราสามารถเขียนรูปและจัดการกับภาพให้เห็นได้บนหน้ากระดาษ เราจะใช้อวกาศสองมิติแทนอวกาศสามมิติเป็นส่วนใหญ่ ภาพในใจที่เราได้จากคิดถึงแบบจำลองที่มีมิติต่ำสามารถขยายใช้ได้กับแบบจำลองที่มีมิติทางกายภาพสามมิติ ดังนั้น แบบจำลองง่ายๆ จึงเป็นอุปกรณ์สำหรับอธิบายหรือสอนหนังสือได้เป็นอย่างดี

ในรูป 2.2 เราอาศัยการทำให้ง่ายทั้งสองอย่าง และเขียนรูปแบบจำลองสองมิติของบริเวณอวกาศของเอกภพ ตารางในรูป แสดงวิธีกำหนดตำแหน่งที่สะดวก เช่น ตารางที่เกิดจากถนนในเมืองตัดกันจะช่วยในการบอกตำแหน่งที่อยู่สำหรับจ่าหน้าซองจดหมาย ในอวกาศสามมิติจะต้องกำหนดตำแหน่งในแนวดิ่งด้วย เช่นชั้นของอาคาร แต่เราจะตัดมิติที่สามคือความสูงออกไปให้เหลือเพียงอวกาศสองมิติ เพื่อความชัดเจนของภาพ

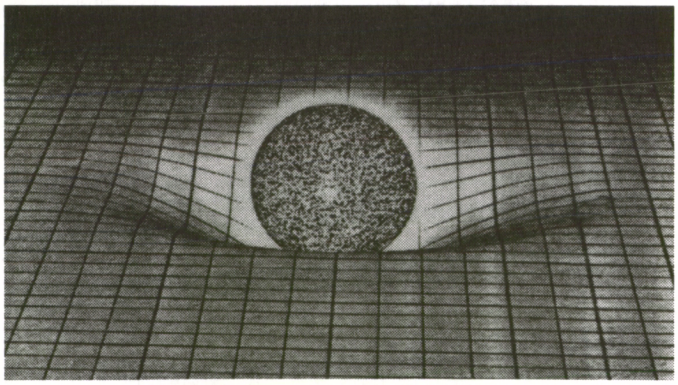
ไอน์สไตน์มีความเห็นว่า อวกาศจะแบนราบในกรณีที่ไม่มีสสารหรือพลังงานอยู่ ในแบบจำลองสองมิติข้อความข้างบนมีความหมายว่า 'รูปร่าง' ของอวกาศจะเหมือนกับผิวของโต๊ะที่ราบเรียบ ดังในรูป 2.2 ภาพนี้คือภาพของอวกาศของเอกภพที่ยึดถือกันมาเป็นเวลาหลายพันปี แต่เกิดอะไรขึ้นกับอวกาศเมื่อมีสิ่งที่มีมวลมาก



รูป 2.2 อวกาศแบนราบ

เช่นดวงอาทิตย์อยู่ในอวกาศ คำตอบก่อนสมัยไอน์สไตน์ก็คือ *ไม่มีอะไร* เกิดขึ้น อวกาศ (และเวลา) ถูกมองเสมือนเป็นโรงละครที่อยู่นิ่งๆ เป็นแต่เพียงเวทีสำหรับให้เหตุการณ์ในเอกภพเป็นตัวละครแสดง แต่เหตุผลของไอน์สไตน์ที่เชื่อมโยงกันเป็นลูกโซ่ดังที่เราติดตามมาโดยตลอดนำไปสู่ข้อสรุปที่ต่างออกไป

วัตถุขนาดใหญ่เช่นดวงอาทิตย์ และที่จริงแล้ววัตถุใดๆ ก็เหมือนกัน จะออกแรงโน้มถ่วงกระทำกับวัตถุอื่น ในตัวอย่าง ลูกระเบิดของผู้ก่อการร้าย เราได้ทราบว่าแรงโน้มถ่วงกับการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งแยกกันไม่ออก ในตัวอย่างเรื่อง "เครื่อง" หมุนเราได้ทราบว่าการอธิบายความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ (อัตราส่วนของเส้นรอบวงกับรัศมีของวงกลม) ของการเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง *ต้องการ* ความสัมพันธ์ในอวกาศที่มีความโค้ง ความเชื่อมโยงระหว่างแรงโน้มถ่วง การเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง และอวกาศโค้งหรือโก่งงอ เป็นเหตุให้ไอน์สไตน์ตั้งข้อเสนอที่น่าสนใจยิ่งว่า มวลเช่นของดวงอาทิตย์ทำให้แพรพรรณของอวกาศรอบๆ งอโค้ง ดังเช่นที่แสดงในรูป 2.3 ตัวอย่างที่มีประโยชน์และมักใช้อยู่บ่อยๆ คือ การเปรียบเปรยว่าคล้ายกับแผ่นหรือผืนยางเหนียวและบางที่มีลูกโบว์ลิ่งวางอยู่ แพรพรรณของอวกาศจะผิดเพี้ยนจากผิวราบเรียบเนื่องจากมีวัตถุขนาดใหญ่เช่นดวงอาทิตย์



รูป 2.3 วัตถุขนาดใหญ่เช่นดวงอาทิตย์ทำให้อวกาศโก่งงอคล้ายกับผลที่เกิดขึ้น เมื่อวางลูกโบว์ลิ่งบนผืนยางเหนียวและบาง

ยิ่งวัตถุมีมวลมากยิ่งทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของอวกาศโดยรอบมาก หมายความว่า วัตถุยิ่งมีมวลมาก อิทธิพลความโน้มถ่วงที่วัตถุนั้นมีต่อวัตถุอื่นจะยิ่งมาก สอดคล้องอย่างเที่ยงตรงกับประสบการณ์ของเรา อย่างที่สอง เช่นเดียวกับที่ความผิดเพี้ยนของแผ่นยางเนื่องจากลูกโบว์ลิ่งยิ่งน้อยลงเมื่ออยู่ห่างออกไป ปริมาณของความโก่งงอของอวกาศเนื่องจากวัตถุขนาดใหญ่เช่นดวงอาทิตย์จะลดลงในขณะที่ระยะห่างจากดวงอาทิตย์เพิ่มขึ้น นี่ก็ตรงกับความเข้าใจของเราอีก คือ ความโน้มถ่วงมีอิทธิพลลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างวัตถุเพิ่มมากขึ้น

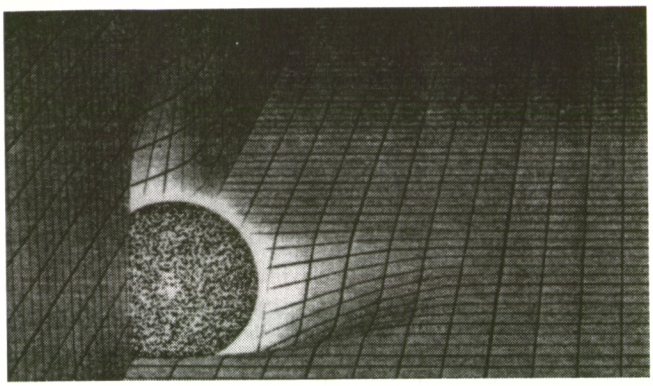
ประเด็นสำคัญที่ต้องสังเกตข้อหนึ่งคือ ลูกปืนเองก็ทำให้แผ่นยางโก่งงอไปด้วยแม้จะเพียงเล็กน้อย ในทำนองเดียวกัน โลกซึ่งเป็นวัตถุขนาดใหญ่จะทำให้แพรพรรณของอวกาศโก่งงอด้วย แม้จะน้อยกว่าดวงอาทิตย์มาก นี่คือคำอธิบายตามภาษาของทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปที่โลกดึงดวงจันทร์ไว้ให้อยู่ในวงโคจร และที่โลกยึดเราทุกคนให้อยู่บนผิวโลก ในขณะที่นักดิ่งอวกาศพุ่งลงสู่โลก เขาลื่นไหลลงมาตามรอยเว้าในแพรพรรณของอวกาศที่มีเหตุมาจากมวลของโลก ยิ่งกว่านั้น เราทุกคนก็เหมือนกับวัตถุขนาดใหญ่ทั้งหลาย จะทำให้แพรพรรณของอวกาศที่อยู่ชิดกับร่างกายของเราโก่งงอ แม้ว่ามวลของร่างกายมนุษย์ซึ่งโดยเปรียบเทียบแล้วน้อยมาก จะทำให้เกิดรอยบุ๋มได้เพียงเล็กๆ

โดยสรุป ไอน์สไตน์เห็นด้วยกับข้อแถลงของนิวตันที่ว่า "ความโน้มถ่วงจะต้องมีตัวการ" และลุกขึ้นรับคำท้าของนิวตันว่า "จะต้องปล่อยให้เป็นหน้าที่ของผู้อ่านที่จะต้องหาตัวการนี้" ตัวการของความโน้มถ่วงตามความคิดของไอน์สไตน์คือแพรพรรณของจักรวาล

2.6 คำเตือน

ภาพเปรียบเทียบที่เป็นแผ่นยางกับลูกโบว์ลิ่งมีประโยชน์มาก เพราะทำให้เห็นได้ชัดเจนและเข้าใจความหมายว่า ที่ว่าแพรพรรณของอวกาศโก่งงอนั้นคืออย่างไร นักฟิสิกส์นิยมใช้ภาพเปรียบเทียบนี้หรืออย่างอื่นที่คล้ายๆ กันเพื่อชี้นำความคิดความเข้าใจเกี่ยวกับความโน้มถ่วงและความโก่งงอของอวกาศ อย่างไรก็ตาม แม้ว่าภาพเปรียบเทียบของแผ่นยางกับลูกโบว์ลิ่งจะมีประโยชน์อย่างมาก แต่ก็ใช่ว่าจะสมบูรณ์ดีทุกด้าน และเพื่อความชัดเจน คงจะต้องชี้ให้เห็นความบกพร่องสักสองสามเรื่อง

ประการแรก เมื่อดวงอาทิตย์ทำให้แพรพรรณของอวกาศโดยรอบโก่งงอ ไม่ได้หมายความว่าอวกาศ "ถูกฉุดให้หย่อนลงเป็นแอ่ง" โดยความโน้มถ่วง อย่างเช่นในกรณีของลูกโบว์ลิ่งซึ่งทำให้แผ่นยางโค้งเป็นแอ่งเพราะถูกฉุดเข้าหาโลกด้วยความโน้มถ่วง ในกรณีของดวงอาทิตย์ไม่มีวัตถุอื่นมาทำหน้าที่ "ฉุด" ไอน์สไตน์บอกกับเราว่าการโก่งงอของอวกาศคือตัวความโน้มถ่วงเอง การที่มีวัตถุขนาดใหญ่อยู่ในอวกาศ จะทำให้อวกาศสนองตอบโดยโก่งงอ ในทำนองเดียวกัน โลกไม่ได้ถูกบังคับให้อยู่ในวงโคจรเพราะแรงฉุดโน้มถ่วงของวัตถุอื่นที่คอยชักจูงให้เคลื่อนที่อยู่ในหุบของอวกาศโดยรอบที่โก่งงอ อย่างที่เกิดขึ้นกับลูกปืนบนแผ่นยางที่โก่งงอ แต่ไอน์สไตน์แสดงว่าวัตถุเคลื่อนที่ในอวกาศ (จะให้ตรงก็ต้องว่าอวกาศเวลา) ตามแนว 'สั้นที่สุด' 'ตามแนวง่ายที่สุด' หรือตามแนวที่มี 'ความต้านทานน้อยที่สุด' ถ้าอวกาศโก่งงอ แนวเหล่านี้จะโค้งตามไปด้วย ดังนั้น แม้ว่าแบบจำลองลูกโบว์ลิ่งและแผ่นยาง จะทำให้เห็นเป็นภาพว่า วัตถุเช่นดวงอาทิตย์ทำให้อวกาศโดยรอบโก่งงอและมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของวัตถุอื่น กลไกทางฟิสิกส์ที่ทำให้เกิดความผิดเพี้ยนเหล่านี้แตกต่างกันโดยสิ้นเชิง ความผิดเพี้ยนแรกอาศัยความสำนึกรู้เองของเราเรื่องความโน้มถ่วงตามกรอบความคิดของนิวตันที่ยึดถือกันมา ในขณะความเพี้ยนหลังเป็นการกำหนดรูปใหม่ของความโน้มถ่วงว่าเป็นอวกาศโค้ง



รูป 2.5 การโก่งงอของอวกาศสามมิติรอบดวงอาทิตย์

ข้อบกพร่องประการที่สองของภาพเปรียบเทียบมาจากแผ่นยางเป็นของสองมิติ ในความเป็นจริง แม้ว่ายากที่จะนึกภาพออก ดวงอาทิตย์ (และวัตถุขนาดใหญ่ทั้งหลาย) จะทำให้อากาศสามมิติที่อยู่โดยรอบโก่งงอ รูป 2.5 เป็นความพยายามหยาบๆ ที่จะแสดงสถานการณ์ดังกล่าว อวกาศที่อยู่รอบๆ ดวงอาทิตย์ - "ข้างล่าง", "ข้างๆ", "ข้างบน" - จะถูกทำให้เพี้ยน รูป 2.5 แสดงตัวอย่างบางส่วนของอวกาศที่โก่งงอ วัตถุเช่นโลกเคลื่อนที่ *ผ่าน* อวกาศสามมิติที่โก่งงอเนื่องจากดวงอาทิตย์ ท่านอาจรู้สึกอึดอัดกับภาพนี้ ทำไมโลกจึงไม่ชนกับ "ด้านตั้ง" ของอวกาศที่โก่งงอดังในภาพ ขอให้ระลึกว่า อวกาศไม่ได้เป็นกำแพงตันต่างจากแผ่นยาง ที่จริง แผ่นตารางที่งอโค้งดังในรูปเป็นเพียงแผ่น (ช่วยสายตา) ไม่กี่แผ่นที่ผ่านอวกาศสามมิติที่ตัวท่าน โลก และทุกสิ่ง 'จม' อยู่ภายใน และเคลื่อนที่ได้อย่างเสรี บางทีท่านอาจรู้สึกว่าคำอธิบายเช่นนี้ยิ่งทำให้ปัญหาแย่ไปใหญ่ ทำไมเราจึงไม่ *รู้สึก* สัมผัสอวกาศถ้าเราจมอยู่ในแพรพรรณของอวกาศ แต่จริงๆ แล้วเรารู้สึก เรารู้สึกความโน้มถ่วงและอวกาศเป็นตัวกลางสำหรับสื่อสารแรงโน้มถ่วง นักฟิสิกส์ชื่อดัง จอห์น วีลเลอร์ (John Wheeler) ใช้คำพูดว่า "มวลจับอวกาศและสั่งให้โก่งงอ อวกาศจับมวลและสั่งให้เคลื่อนที่"

ข้อบกพร่องประการที่สามของภาพเปรียบเทียบ คือ เราได้ละเว้นไม่พูดถึงมิติเวลา เราทำเช่นนี้เพื่อประโยชน์ในความชัดเจนของภาพ แม้ว่าทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษจะบอกว่าให้ถือมิติเวลาทัดเทียมกับมิติอวกาศสามมิติ แต่เป็นการยากที่จะ "เห็น" เวลา แต่อย่างที่ได้แสดงในตัวอย่างเรื่อง 'เครื่อง' หมุน ความเร่ง - หรืออีกนัยหนึ่งใช้เป็นแรงโน้มถ่วงแทนเสียได้ - ทำให้ *ทั้งอวกาศและเวลา* โก่งงอ (ที่จริงคณิตศาสตร์ของทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป แสดงว่าในกรณีของวัตถุที่เคลื่อนที่ช้า เช่น โลกโคจรรอบดวงดาวเช่นดวงอาทิตย์ การโก่งงอของเวลามีผลกระทบที่สำคัญต่อการเคลื่อนที่ของโลกยิ่งกว่าการโก่งงอของอวกาศ) เราจะย้อนกลับมาพูดถึงการโก่งงอของเวลาหลังหัวข้อถัดไป

คำเตือนทั้งสามข้อนี้สำคัญ ถ้าท่านระลึกถึงคำเตือนนี้ได้เสมอ ก็พอจะยอมรับภาพเปรียบเทียบแผ่นยางกับลูกโบว์ลิ่งได้ว่าแทนผลสรุปภาพของความโน้มถ่วงตามทัศนะใหม่ของไอน์สไตน์

2.7 การคลี่คลายความขัดแย้ง

โดยการให้อวกาศและเวลาเป็นตัวละครที่มีบทเล่นเสียเอง ไอน์สไตน์ได้เสนอภาพความคิดว่าความโน้มถ่วงทำงานอย่างไร ปัญหาที่เป็นหัวใจคือการให้ความหมายกับแรงโน้มถ่วงในรูปแบบใหม่จะคลี่คลายความขัดแย้งระหว่างทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษกับทฤษฎีความโน้มถ่วงของนิวตันได้หรือไม่ คำตอบก็คือได้ ภาพเปรียบเทียบแผ่นยางกับลูกโบว์ลิ่งจะให้แนวคิดที่จำเป็นแก่เราอีกครั้งหนึ่ง ลองจินตนาการว่าเรามีลูกปืนกลิ้งอยู่ในแนวเส้นตรงบนแผ่นยางราบซึ่งยังไม่มีลูกโบว์ลิ่ง เมื่อวางลูกโบว์ลิ่งลงบนแผ่นยาง ผลกระทบจะเกิดขึ้นกับการเคลื่อนที่ของลูกปืน แต่ *ไม่ได้เป็นไปโดยฉับพลัน* ถ้าหากได้ถ่ายภาพยนตร์ของลำดับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นและนำมาฉายดูแบบช้าจะเห็นว่าอิทธิพลที่เกิดจากการวางลูกโบว์ลิ่งจะแผ่ขยายคล้ายกับระลอกคลื่นในบ่อน้ำและในที่สุดจะไปถึงลูกปืน สักครู่หนึ่งการสั่นสะเทือนของแผ่นยางจึงหยุดและแผ่นยางจะอยู่นิ่งในลักษณะที่โก่งงอ

แพรพรรณของอวกาศก็เป็นแบบเดียวกัน เมื่อไม่มีมวล อวกาศจะแบนราบ และวัตถุเล็กๆ จะอยู่นิ่งๆ หรือเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงตัวไปเรื่อยๆ อย่างมีความสุข ถ้ามีวัตถุขนาดใหญ่ปรากฏขึ้น อวกาศจะโก่งงอ และเช่นเดียวกับกรณีของแผ่นเยื่อบาง ความเพี้ยนของอวกาศจะไม่เกิดขึ้นในทันทีทันใด แต่จะกระจายออกจากวัตถุขนาดใหญ่นั้น และท้ายที่สุดได้เป็นรูปที่โก่งงอซึ่งสื่อสารแรงดึงดูดโน้มถ่วงของวัตถุใหญ่นั้น ในภาพเปรียบเทียบอิทธิพลที่มีต่อแผ่นยางบางจะเคลื่อนที่ไปตามแผ่นยางด้วยอัตราเร็วที่กำหนดโดยสารที่เป็นเนื้อแผ่นยางนั้น ในทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป ไอน์สไตน์สามารถคำนวณได้ว่าอิทธิพลที่มีต่อแพรพรรณของเอกภพเคลื่อนที่ได้เร็วเท่าไร และพบว่าเคลื่อนที่ได้ *เท่าอัตราเร็วของแสง* พอดิบพอดี หมายความว่า ในตัวอย่างสมมุติที่กล่าวถึงแต่ต้นว่าการระเบิดดับสูญของดวงอาทิตย์มีผลกระทบต่อโลกจากสาเหตุที่แรงดึงดูดโน้มถ่วงร่วมเปลี่ยนแปลง โลกจะไม่ได้รับผลกระทบทันที แต่เป็นว่าขณะที่วัตถุเปลี่ยนไม่ว่าจะเป็นตำแหน่งหรือระเบิดเป็นชิ้นเล็กชิ้นน้อย จะทำให้ความเพี้ยนในแพรพรรณของอวกาศเวลาแผ่ออกด้วยอัตราเร็วเท่าแสง สอดคล้องอย่างแท้จริงกับค่าสูงสุดในอัตราเร็วในจักรวาลตามทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ ดังนั้น เราที่อยู่บนโลกจะเห็นความวิบัติบนดวงอาทิตย์ขณะเดียวกับที่เรารู้สึกผลความเปลี่ยนแปลงของความโน้มถ่วง คือประมาณ 8 นาทีหลังดวงอาทิตย์ระเบิด ทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปของไอน์สไตน์จึงคลี่คลายความขัดแย้งได้สำเร็จ อิทธิพลของความโน้มถ่วงจะวิ่งเร็วเคียงบ่าเคียงไหล่กับโฟตอน แต่เอาชนะโฟตอนไม่ได้

2.8 การโก่งงอของเวลาอีกครั้งหนึ่ง

ภาพดังเช่นที่แสดงในรูป 2.1, 2.3, และ 2.5 แสดงให้เห็นสาระสำคัญในความหมายของอวกาศที่โก่งงอ การโก่งงอทำให้รูปร่างของอวกาศผิดเพี้ยนไป นักฟิสิกส์ได้พยายามคิดภาพคล้ายๆ กันเพื่อสื่อความหมายของการโก่งงอของเวลา แต่ภาพเหล่านั้นค่อนข้างยากที่จะชี้แจง จึงจะไม่กล่าวถึง แต่เราจะเลียนแบบสมัครกับสมานบน "เครื่อง" หมุน และพยายามทำให้ประสบการณ์เรื่องการโก่งงอของเวลาซึ่งถูกชักนำด้วยความโน้มถ่วงสื่อความหมายกับเรา

ในความพยายามดังกล่าว เราจะไปเยี่ยมสมศักดิ์กับสมศรี ซึ่งคราวนี้ไม่ได้อยู่ในอวกาศที่ห่างไกล มืดและว่างเปล่าต่อไปอีกแล้ว แต่ล่องลอยอยู่ใกล้ๆ กับระบบสุริยะ คนทั้งสองยังมีนาฬิกาดิจิตอลติดอยู่กับชุดอวกาศเหมือนเดิมและได้ตั้งเวลาให้ตรงกันแล้ว เพื่อให้ง่าย เราจะไม่พิจารณาถึงอิทธิพลของดาวเคราะห์และพิจารณาเฉพาะสนามความโน้มถ่วงของดวงอาทิตย์ ให้ใช้จินตนาการด้วยว่ามียานอวกาศลอยอยู่ใกล้ๆ สมศักดิ์กับสมศรี และ

ปล่อยสายเคเบิลยาวไปจนใกล้ผิวของดวงอาทิตย์ สมศักดิ์โหนเคเบิลไต่ลงไปใกล้ดวงอาทิตย์ ขณะที่ไต่ลงสมศักดิ์หยุดเป็นระยะๆ เพื่อเปรียบเทียบอัตราที่เวลาผ่านไปบนนาฬิกาของคนทั้งสอง การโก่งงอของเวลาที่ทำนายโดยทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปของไอน์สไตน์ชี้ว่านาฬิกาของสมศักดิ์เดินช้ากว่านาฬิกาของสมศรี ในขณะที่สนามความโน้มถ่วงที่เขาได้รับยิ่งแรงขึ้น นั่นคือยิ่งใกล้ดวงอาทิตย์มากขึ้น นาฬิกาของเขาจะยิ่งเดินช้าลง ในความหมายนี้ความโน้มถ่วงได้ทำให้เวลาและอวกาศด้วยเพี้ยนไป

ควรสังเกตว่ากรณีนี้ต่างจากกรณีในตอนที่ 1 ซึ่งสมศักดิ์และสมศรีอยู่ในอวกาศที่ว่างเปล่า และเคลื่อนที่สัมพัทธ์กันและกันด้วยความเร็วคงตัว ในกรณีปัจจุบัน ไม่มีสมมาตรระหว่างคนทั้งสอง สมศักดิ์จะรู้สึกแรงความโน้มถ่วงมากขึ้นๆ เขาจะต้องจับสายเคเบิลให้มั่นคงยิ่งขึ้นขณะเข้าใกล้ดวงอาทิตย์เพื่อป้องกันไม่ให้หลุดลงสู่ดวงอาทิตย์ ซึ่งต่างจากสมศรี ทั้งสองฝ่ายเห็นพ้องกันว่านาฬิกาของสมศักดิ์เดินช้า ไม่มี "มุมมองที่เหมือนกัน" ที่เปลี่ยนบทบาทของคนทั้งสองแล้วยังสลับข้อสรุปข้างบนได้ ที่จริงนี่คือสิ่งที่เราเคยพบในตอนที่ 1 เมื่อสมศักดิ์ใช้เครื่องไอพ่นไล่ตามสมศรีด้วยความเร่ง ความเร่งที่สมศักดิ์รู้สึกมีผลให้นาฬิกาของเขาช้าลงเทียบกับนาฬิกาของสมศรี เนื่องจากในตอนนี้เราทราบแล้วว่าความรู้สึกว่าเคลื่อนที่ด้วยความเร่งเหมือนกับความรู้สึกว่าได้รับแรงโน้มถ่วง สถานการณ์ปัจจุบันที่สมศักดิ์โหนสายเคเบิลก็เป็นเรื่องที่มีหลักการอย่างเดียวกัน และนี่ก็เป็นอีกครั้งหนึ่งที่เราพบว่านาฬิกาของสมศักดิ์และทุกสิ่งทุกอย่างเกี่ยวกับตัวเขาเชื่องช้าเปรียบเทียบกับนาฬิกาและทุกสิ่งทุกอย่างของสมศรี

ในสนามของความโน้มถ่วงที่ผิวของดวงดาวขนาดปานกลางเช่นดวงอาทิตย์ การเดินช้าของนาฬิกานั้นน้อยมาก ถ้าสมศรีอยู่ห่างจากดวงอาทิตย์พันล้านไมล์เมื่อสมศักดิ์ไต่สายเคเบิลลงไปจนห่างจากผิวของดวงอาทิตย์สองสามไมล์ นาฬิกาของสมศักดิ์จะ 'ติ๊ก' ด้วยอัตราประมาณ 99.9998 เปอร์เซ็นต์ของนาฬิกาของสมศรี นั่นคือช้ากว่าแต่เพียงนิดเดียว แต่ถ้าสมศักดิ์ถูกหย่อนลงไปด้วยสายเคเบิลจนเกือบถึงผิวของดาวนิวตรอน (neutron star) ที่มีมวลประมาณเท่ากับมวลของดวงอาทิตย์ แต่มวลยัดเยียดกันจนมีความหนาแน่นพันล้านล้านเท่าของความหนาแน่นของดวงอาทิตย์ สนามความโน้มถ่วงที่แรงขนาดนี้จะทำให้นาฬิกาของสมศักดิ์ 'ติ๊ก' ด้วยอัตราประมาณ 76 เปอร์เซ็นต์ของนาฬิกาของสมศรี สนามความโน้มถ่วงที่แรงกว่า เช่น ที่ข้างนอกหลุมดำ (black hole ซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป) เพียงเล็กน้อย จะทำให้การผ่านไปของเวลาเป็นไปอย่างเชื่องช้ามากยิ่งขึ้น สนามโน้มถ่วงที่ยิ่งแรง ยิ่งทำให้เวลาผิดเพี้ยนไปมาก

2.9 การทดลองยืนยันทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป

ผู้ที่ศึกษาทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปส่วนใหญ่จะชื่นชมหลงไหลในความงามของทฤษฎี โดยการแทนทัศนะแบบนิวตันในเรื่องอวกาศ เวลา และความโน้มถ่วง ซึ่งมีลักษณะเย็นชาจืดชืดและเป็นเหมือนเครื่องจักรกล ด้วยคำอธิบายที่แสดงความเปลี่ยนแปลงและเป็นแบบเรขาคณิตของอวกาศเวลาที่โค้งงอ ไอน์สไตน์ได้ถักทอความโน้มถ่วงเข้าเป็นแพรพรรณพื้นฐานของเอกภพ แทนที่จะเป็นสิ่งที่เสริมเติมลงไปบนโครงสร้าง ความโน้มถ่วงกลายเป็นองค์ประกอบของเอกภพในระดับที่พื้นฐานที่สุด การเสกชีวิตให้กับอวกาศและเวลาโดยยอมให้โค้งโก่งงอ และเป็นระลอก ทำให้เกิดผลที่เราเรียกว่าความโน้มถ่วง

ถึงไม่เอาความงดงามมาเป็นเกณฑ์ ข้อทดสอบสุดท้ายของทฤษฎีทางกายภาพได้แก่ความสามารถที่ทฤษฎีนั้นจะอธิบายและทำนายปรากฏการณ์ทางกายภาพได้อย่างแม่นตรง ตั้งแต่แรกตั้งในตอนปลายศตวรรษ 1600 จนถึงต้นศตวรรษ 1900 ทฤษฎีความโน้มถ่วงของนิวตันผ่านข้อทดสอบนี้โดยได้คะแนนเต็ม ไม่ว่าจะประยุกต์เข้า

กับเรื่องโยนลูกบอลล์ขึ้นไปในอากาศ ปล่อยสิ่งของจากหน้าต่างตกลงสู่พื้น ดาวหางอ้อมรอบดวงอาทิตย์ หรือดาวเคราะห์โคจรรอบดวงอาทิตย์ ทฤษฎีความโน้มถ่วงของนิวตันให้คำอธิบายที่แม่นตรงมากของสิ่งที่สังเกตได้ทั้งหลายทั้งปวง และยังให้คำทำนายที่ได้รับการยืนยันครั้งแล้วครั้งเล่าในสถานการณ์หลายหลาก เหตุที่เกิดมีข้อกังขากับทฤษฎีที่ประสบความสำเร็จจากการทดลองยืนยันต่างๆ นี้ ได้แก่ สมบัติที่แรงโน้มถ่วงถูกส่งไปถึงที่หมายได้โดยฉับพลัน ขัดแย้งกับทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ ดังที่เคยได้เน้นย้ำ

แม้ว่าทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษจะเป็นหัวใจของความเข้าใจในระดับพื้นฐานเรื่องอวกาศ เวลา และการเคลื่อนที่ แต่ผลของทฤษฎีนี้มีค่าน้อยมากในโลกของเราที่ทุกสิ่งทุกอย่างมีความเร็วต่ำ เช่นเดียวกัน ความบ่ายเบนระหว่างทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปของไอน์สไตน์ (ซึ่งเป็นทฤษฎีความโน้มถ่วงที่เข้ากันได้กับทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ) และทฤษฎีความโน้มถ่วงของนิวตัน ก็มีค่าน้อยมากในสถานการณ์สามัญส่วนมาก ตรงนี้มีทั้งข้อดีและข้อเสีย ที่ว่าเป็นข้อดีก็เพราะว่า ทฤษฎีใดๆ ที่อ้างว่าจะมาทดแทนทฤษฎีความโน้มถ่วงของนิวตันจะต้องสอดคล้องอย่างใกล้ชิดกับทฤษฎีของนิวตันในทุกเรื่องที่ทฤษฎีของนิวตันได้รับการยืนยันจากการทดลอง ที่ว่าเป็นข้อเสียก็เป็นเพราะว่ามีความยากลำบากที่จะตัดสิน (ว่าถูกหรือผิด) ทฤษฎีทั้งสองโดยการทดลอง การแสดงความแตกต่างระหว่างทฤษฎีของนิวตันและทฤษฎีของไอน์สไตน์ต้องอาศัยการวัดที่เที่ยงตรงจริงๆ ในการทดลองที่ไวต่อความแตกต่างของทฤษฎีทั้งสอง ถ้าท่านตีลูกเทนนิส จะสามารถใช้ทฤษฎีความโน้มถ่วงของนิวตันและของไอน์สไตน์ทำนายว่าลูกเทนนิสตกตรงไหน คำทำนายจะแตกต่างกัน แต่ความแตกต่างจะน้อยมากจนเกินกว่าสมรรถนะของเครื่องมือที่จะตรวจพบจากการทดลอง จึงต้องหาการทดลองที่พิเศษ และไอน์สไตน์ได้เสนอการทดลองหนึ่งขึ้นมา

เราเห็นดวงดาวในตอนกลางคืน แต่ที่จริงในตอนกลางวันดาวดวงนั้นก็ยังอยู่ที่เดิม แต่เรามองไม่เห็นเพราะอยู่ไกล แสงที่เห็นเป็นจุดจะถูกกลบด้วยความกล้าของแสงอาทิตย์ แต่ในระหว่างสุริยุปราคา ดวงจันทร์บดบังแสงจากดวงอาทิตย์ไว้ชั่วคราว ทำให้เห็นดวงดาวที่ห่างไกลได้ อย่างไรก็ตาม ดวงอาทิตย์แม้จะถูกบังก็ยังมีอิทธิพลอยู่ดี แสงจากดวงดาวบางดวงที่อยู่ห่างไกลจะต้องผ่านเข้ามาใกล้ดวงอาทิตย์เมื่อเดินทางมายังโลก ทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปของไอน์สไตน์ทำนายว่าดวงอาทิตย์จะทำให้อวกาศและเวลาที่อยู่รอบๆ โก่งงอ และความเพี้ยนที่เกิดขึ้นนี้จะ *มีอิทธิพลต่อทางเดินของแสงจากดวงดาว* เพราะโฟตอนจากดวงดาวที่อยู่ไกลจะเดินทางไปตามแพรพรรณของเอกภพ ถ้าแพรพรรณโก่งงอ การเคลื่อนที่ของโฟตอนก็จะได้รับผลกระทบเช่นเดียวกับวัตถุ การเบนของทางเดินของแสงจะมากที่สุดสำหรับสัญญาณแสงที่เฉียดดวงอาทิตย์มายังโลก สุริยุปราคาทำให้สามารถเห็นแสงที่เฉียดดวงอาทิตย์มาได้โดยไม่ถูกกลบหายด้วยแสงจ้าของดวงอาทิตย์

มุมที่ทางเดินของแสงเบนไปอาจวัดได้ด้วยวิธีธรรมดา การเบนของทางเดินของแสงจากดวงดาวทำให้มีการเปลี่ยนตำแหน่งปรากฏของดวงดาว จะสามารถวัดการเปลี่ยนตำแหน่งได้โดยเปรียบเทียบตำแหน่งปรากฏนี้กับ *ตำแหน่งจริง* จากการสังเกตตำแหน่งของดวงดาวนั้นในตอนกลางคืน (โดยไม่มีอิทธิพลของดวงอาทิตย์ที่ทำให้เกิดการโก่งงอ) ซึ่งกระทำเมื่อโลกอยู่ในตำแหน่งเหมาะ ก่อนนั้นหรือหลังนั้นหกเดือน ในเดือนพฤศจิกายน ค.ศ. 1915 ไอน์สไตน์ได้ใช้ความเข้าใจใหม่เรื่องความโน้มถ่วงคำนวณมุมที่แสงจากดวงดาวที่เฉียดดวงอาทิตย์จะเบนไป และได้ค่ามุม 0.00049 องศา (1.75 พิลิปดา ในเมื่อ 1 องศาเท่ากับ 3,600 พิลิปดา) มุมน้อยๆ แค่นี้มีขนาดประมาณมุมที่ปิดด้วยเหรียญ 5 บาทวางตั้งห่างออกไป 2 ไมล์ การวัดมุมเล็กๆ ขนาดนี้สามารถใช้เทคโนโลยีที่มีอยู่ขณะนั้นวัดได้ โดยการคะยั้นคะยอของเซอร์ แฟรงค์ ไดสัน (Sir Frank Dyson) ผู้อำนวยการหอดูดาวกรีนิช เซอร์ อาเทอร์ เอ็ดดิงตัน (Sir Arthur Eddington) นักดาราศาสตร์ชื่อดังและเลขาธิการของราชดาราศาสตร์สมาคม

แห่งประเทศอังกฤษ ได้นำคณะสำรวจไปยังเกาะปรินซิปี (Principe) ที่อยู่นอกชายฝั่งอาฟริกาตะวันตกเพื่อทดสอบคำทำนายของไอน์สไตน์ ในระหว่างที่มีสุริยุปราคาเมื่อวันที่ 29 พฤษภาคม ค.ศ. 1919

ในวันที่ 6 พฤศจิกายน 1919 หลังจากการวิเคราะห์ภาพถ่ายสุริยุปราคาที่เกาะปรินซิปีผ่านไป 5 เดือน (และภาพสุริยุปราคาอื่นที่นักดาราศาสตร์อีกชุดหนึ่งจากสหราชอาณาจักร นำโดย ชาร์ลส์ เดวิดสัน (Charles Davidson) และ แอนดรูว์ ครอมเมลิน (Andrew Crommelin) ถ่ายที่เมืองโซบราล (Sobral) ในประเทศบราซิล) ที่ประชุมร่วมของราชบัณฑิตสถานและราชดาราศาสตร์สมาคม ได้ออกแถลงการณ์ว่าคำทำนายของไอน์สไตน์ที่อาศัยหลักของทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปได้รับการยืนยัน ข่าวความสำเร็จนี้ (การเปลี่ยนความคิดเรื่องเวลาและอวกาศ) แพร่กระจายไปอย่างรวดเร็วทั้งในประชาคมนักฟิสิกส์และนอกประชาคมนักฟิสิกส์ ได้รับการตีพิมพ์ในหนังสือพิมพ์เป็นพาดหัวตัวโตว่าเป็นการปฏิวัติทางวิทยาศาสตร์ เป็นทฤษฎีใหม่ของเอกภพ และเป็นการล้มทฤษฎีของนิวตัน ไอน์สไตน์กลายเป็นดาราที่มีชื่อเสียงระดับโลกขึ้นมาทันที นับเป็นความสำเร็จที่ยิ่งใหญ่ของไอน์สไตน์

ในปีต่อๆ มาหลังการทดลองนี้ ได้มีคำวิจารณ์ตำหนิการทดลองยืนยันทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปที่กระทำโดยเอ็ดดิงตัน การทดลองที่ต้องมีการวัดหลายเรื่องที่ยาก ละเอียด และต้องระมัดระวังเป็นพิเศษ ทำให้ยากที่จะทำซ้ำและกลายเป็นปัญหาเรื่องความน่าเชื่อถือของการทดลองเดิม อย่างไรก็ตาม ใน 40 ปีหลังนี้ มีการทดลองหลายการทดลองที่อาศัยความก้าวหน้าของเทคโนโลยี ตรวจสอบแง่มุมต่างๆ ของทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปอย่างละเอียด คำทำนายของทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปได้รับการยืนยันเสมอ ไม่เป็นที่สงสัยอีกต่อไปแล้วว่า คำอธิบายเรื่องความโน้มถ่วงของไอน์สไตน์ไม่เพียงแต่สอดคล้องกับทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษเท่านั้น ยังให้คำทำนายใกล้เคียงกับผลการทดลองยิ่งกว่าทฤษฎีของนิวตันเสียอีก

2.10 หลุมดำ มหาระเบิด และอวกาศที่ขยายตัว

สัมพัทธภาพพิเศษมีผลปรากฏชัดเมื่อสิ่งทั้งหลายเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง สัมพัทธภาพทั่วไปเป็นเรื่องสำคัญเมื่อสิ่งที่เกี่ยวข้องมีขนาดใหญ่มาก มีมวลมาก ซึ่งทำให้เกิดความโก่งงอในอวกาศและเวลาอย่างมาก เราจะลองพิจารณาตัวอย่างสองตัวอย่างด้วยกัน

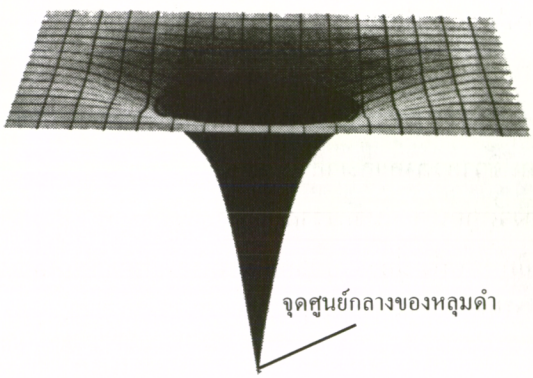
ตัวอย่างแรกเป็นการค้นพบโดยนักดาราศาสตร์เยอรมัน คาร์ล ชวาสชิลด์ (Karl Schwarzchild) ในขณะที่ศึกษาความโน้มถ่วงของไอน์สไตน์ตอนว่างจากการคำนวณวิถีกระสุนปืนใหญ่ในแนวรบด้านรัสเซียระหว่างสงครามโลกครั้งที่หนึ่ง เมื่อ ค.ศ. 1916 ที่น่าทึ่งก็คือ เพียงไม่กี่เดือนหลังจากไอน์สไตน์เสนอทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปเป็นที่เรียบร้อย ชวาสชิลด์สามารถใช้ทฤษฎีนี้สร้างความเข้าใจอย่างสมบูรณ์และไม่ต้องประมาณถึงวิธีที่อวกาศและเวลาโก่งงอใกล้ๆ กับดาวฤกษ์ที่เป็นทรงกลมที่สมบูรณ์ ชวาสชิลด์ส่งผลการคำนวณจากแนวรบรัสเซียไปให้ไอน์สไตน์ และไอน์สไตน์เสนอผลงานนี้ในนามของชวาสชิลด์ต่อบัณฑิตสภาของปรัสเซีย

นอกเหนือไปจากการยืนยันและการคำนวณอย่างเที่ยง (ไม่มีการประมาณ) ถึงการโก่งงอของอวกาศดังที่แสดงในรูป 2.4 ผลงานของชวาสชิลด์ซึ่งปัจจุบันนี้เรียกว่าผลเฉลยของชวาสชิลด์ เผยให้เห็นความหมายที่น่าตื่นเต้นของสัมพัทธภาพทั่วไป เขาได้แสดงว่าถ้ามวลของดวงดาวยัดเยียดอยู่กันภายในบริเวณทรงกลมที่เล็กมากพอ จนมวลหารด้วยรัศมีของดวงดาวมีค่ามากกว่าขนาดวิกฤตขนาดหนึ่ง การโก่งงอของอวกาศเวลาจะมากจน *ไม่ว่าอะไรก็ตาม* รวมทั้งแสงที่เฉียดเข้าไปใกล้ดวงดาว จะหนีแรงโน้มถ่วงที่คอยจับยึดของดวงดาวไปไม่พ้น เนื่องจากแม้แต่แสงก็ไม่สามารถหนี "ดาวที่ดัดแน่น" ออกมาได้ จึงเรียกกันแต่เดิมว่า *ดาวดำหรือดาวเยือกแข็ง* อีก

หลายปีต่อมา จอห์น วีลเลอร์ ได้ให้ชื่อว่าหลุมดำ (black hole) แทน ซึ่งเรียกกันติดปากมาจนทุกวันนี้ ที่เรียกว่าหลุมเพราะอะไรก็ตามที่เข้าไปใกล้เมื่อตกลงไปแล้วก็จะไม่มีทางหลุดออกมา ที่มีคำว่าดำประกอบก็เพราะไม่สามารถแม้แต่จะส่งแสงออกมา

เราแสดงผลเฉลยของชวาสชิลด์ได้ดังรูป 2.6 แม้ว่าหลุมดำจะมีชื่อเสียว่ามากด้วย 'โลภะ' คือ จะกละอะไรเข้าใกล้ก็จับกินหมด วัตถุที่ผ่านหลุมดำในระยะที่ 'ปลอดภัย' จะถูกบ่ายเบนได้แบบเดียวกับเมื่อผ่านดวงดาวธรรมดาและเดินทางต่อไปได้อย่างปกติสุข แต่วัตถุซึ่งไม่ว่าจะเป็นอะไรก็ตามที่เข้าไปใกล้เกินไป - เกินกว่าสิ่งที่เรียกว่า *เส้นขอบเหตุการณ์* (event horizon) ของหลุมดำ - ย่อมหมายถึงสิ้นชะตากรรม เพราะจะถูกฉุดเข้าสู่ศูนย์กลางของหลุมดำอย่างหลีกหนีไม่พ้น และถูกกระทำด้วยแรงที่เพิ่มขึ้นๆ และท้ายที่สุดก็เป็นแรงเค้นโน้มถ่วงที่ทำลายทุกอย่าง ยกตัวอย่างเช่น ถ้าท่านตกหันเท้าชี้เข้าหาเส้นขอบเหตุการณ์ ในขณะที่เข้าหาจุดศูนย์กลางของหลุมดำจะรู้สึกไม่สบายมากขึ้นๆ แรงโน้มถ่วงของหลุมดำจะเพิ่มขึ้นอย่างมากมายจนแรงฉุดที่เท้าจะมากกว่าแรงฉุดที่ศีรษะมาก (เนื่องจากเท้าของท่านอยู่ใกล้จุดศูนย์กลางของหลุมดำมากกว่าศีรษะ) แรงกว่ามากๆ ท่านจะถูกดึงให้ยืดด้วยแรงซึ่งจะฉีกร่างของท่านเป็นส่วนๆ

ในทางตรงกันข้าม ถ้าท่านระมัดระวังในการท่องลัดเลาะใกล้ๆ กับหลุมดำ แต่ระวังตัวไม่ก้าวล้ำเส้นขอบเหตุการณ์ ท่านอาจใช้หลุมดำทำสิ่งมหัศจรรย์ได้ เป็นต้นว่าในจินตนาการ ท่านค้นพบหลุมดำซึ่งมีมวลประมาณ 1,000 เท่าของมวลดวงอาทิตย์ และท่านโรยตัวลงไปด้วยสายเคเบิล เหมือนกับที่สมศักดิ์เคยทำใกล้ๆ กับผิวดวงอาทิตย์ จนอยู่เหนือเส้นขอบเหตุการณ์ของหลุมดำประมาณ 1 นิ้ว อย่างที่เราได้เคยกล่าวแล้ว สนามความโน้มถ่วงทำให้เกิดการโก่งงอของเวลา หมายความว่าท่านจะผ่านเวลาไปอย่างเชื่องช้า จริงๆ แล้ว เวลาที่ผ่านไปของท่าน *จะเชื่องช้ามาก* เนื่องจากหลุมดำมีสนามโน้มถ่วงที่แรงมาก นาฬิกาของท่านจะ 'ติ๊ก' ประมาณ 1,000 เท่าช้ากว่าของเพื่อนๆ ที่อยู่บนโลก ถ้าท่านอยู่เหนือเส้นขอบเหตุการณ์ของหลุมดำเล็กน้อยเป็นเวลาสักหนึ่งปี แล้วไต่สายเคเบิลขึ้นมายังยานท่องดวงดาวเพื่อเดินทางกลับโลกเป็นระยะเวลาสั้นๆ สบายๆ เมื่อถึงบ้านท่านจะพบว่า



รูป 2.6 หลุมดำทำให้แพรพรรณของอวกาศเวลาโดยรอบโก่งงออย่างมากจนกระทั่งทุกสิ่งที่เข้าไปภายในเส้นขอบเหตุการณ์ - แสดงด้วยวงกลมดำ - จะไม่สามารถหนีหลุดแรงโน้มถ่วงที่คอยจับไว้ได้ ไม่มีใครรู้ว่าเกิดอะไรขึ้นลึกลงไปในหลุมดำ

เวลาผ่านไปแล้วถึงพันปีนับแต่ท่านจากบ้านไป ท่านจึงสามารถใช้หลุมดำเป็นคล้ายๆ กับเครื่องกลเวลา ซึ่งทำให้ท่านสามารถเดินทางไปถึงอนาคตอันไกลของโลกได้

เพื่อให้พอกะขนาดได้ถูกต้อง ดวงอาทิตย์จะเป็นหลุมดำถ้ารัศมีจริงๆ ซึ่งประมาณเท่ากับ 450,000 ไมล์ มีค่าลดลงเหลือน้อยกว่า 2 ไมล์เล็กน้อย ความหนาแน่นของดวงอาทิตย์ตามที่สมมุติจะประมาณได้ว่า 1 ช้อนชาของดวงอาทิตย์จะหนักพอๆ กับภูเขาหิมาลัยทั้งลูก ถ้าจะทำให้โลกกลายเป็นหลุมดำ จะต้องอัดให้เหลือเป็นทรงกลมรัศมีน้อยกว่าครึ่งนิ้ว นักฟิสิกส์มีความไม่แน่ใจอยู่เป็นเวลานานว่าสสารจะอยู่ยัดเยียดกันเช่นนั้นได้จริงๆ หรือมีหลายคนคิดว่าหลุมดำเป็นเพียงจินตนาการของนักทฤษฎีที่คิดจนเครียด

อย่างไรก็ตาม ในทศวรรษที่แล้ว หลักฐานการทดลองที่เพิ่มขึ้นๆ ชี้ว่าหลุมดำมีอยู่จริง แน่ละ เนื่องจากเป็นหลุม 'ดำ' จึงไม่อาจสังเกตเห็นได้โดยตรงโดยการใช้กล้องโทรทรรศน์ส่องดูไปทั่วท้องฟ้า นักดาราศาสตร์จึงค้นหาหลุมดำโดยแสวงหาพฤติกรรมที่ผิดปกติของดวงดาวที่ส่งแสงสว่างออกมาได้ตามปกติแทน ด้วยอาจมีบางดวงอยู่นอกเส้นขอบเหตุการณ์ของหลุมดำเพียงเล็กน้อยก็เป็นได้ ตัวอย่างเช่น ฝุ่นธุลีและแก๊สที่ชั้นนอกๆ ของดวงดาวธรรมดาที่อยู่ไม่ไกลนักจะตกไปสู่เส้นขอบเหตุการณ์ของหลุมดำ สิ่งเหล่านี้จะถูกเร่งให้เคลื่อนที่เร็วเกือบเท่าอัตราเร็วของแสง ด้วยอัตราเร็วดังกล่าว แรงเสียดทานภายในสารที่ไหลพรูเข้าหาหลุมดำจะทำให้มีความร้อนเกิดขึ้นอย่างมาก จนแก๊สและผงฝุ่น 'เปล่งแสง' ส่งทั้งแสงสว่างปกติและรังสีเอ็กซ์ออกมา เนื่องจากการแผ่รังสีเกิดขึ้นนอกเส้นขอบเหตุการณ์ รังสีจึงสามารถหนีหลุมดำและเคลื่อนผ่านอวกาศมาถึงโลกซึ่งเราจะสังเกตและศึกษาได้โดยตรง สัมพัทธภาพทั่วไปทำนายรายละเอียดของสมบัติของรังสีเอ็กซ์ที่ออกมา การค้นพบสมบัติที่ได้ทำนายไว้เหล่านี้จะเป็นหลักฐานทางอ้อมแต่หนักแน่นว่ามีหลุมดำอยู่จริง ตัวอย่างเช่น มีหลักฐานเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ชี้ว่ามีหลุมดำขนาดใหญ่มาก ประมาณสองล้านห้าแสนเท่าของดวงอาทิตย์ อยู่ตรงกลางของดาราจักรทางช้างเผือกของเรา และหลุมดำขนาดมหึมานี้ก็ยังนับว่าเล็กมากเมื่อเปรียบเทียบกับหลุมดำที่นักดาราศาสตร์เชื่อว่ามีอยู่ตรงกลางของควอซาร์ (quasar) ที่มีความสว่าง ซึ่งมีกระจัดกระจายอยู่ทั่วจักรวาล หลุมดำเหล่านี้อาจมีมวลเป็นหลายพันล้านเท่าของดวงอาทิตย์

ชวาสชิลด์เสียชีวิตด้วยโรคผิวหนังที่ได้รับเชื้อจากแนวรบรัสเซีย หลังจากค้นพบผลเฉลยที่ตั้งชื่อตามชื่อของเขาเพียงสองสามเดือน เขามีอายุได้เพียง 42 ปี ระยะเวลาเพียงสั้นๆ ที่เขารู้จักและใช้ทฤษฎีความโน้มถ่วงทั่วไปของไอน์สไตน์ ได้เผยความลึกลับที่น่าทึ่งด้านหนึ่งของธรรมชาติให้เป็นที่ประจักษ์

ตัวอย่างที่สองเป็นเรื่องที่สัมพัทธภาพทั่วไปไขปัญหาเรื่องกำเนิดและวิวัฒนาการของเอกภพ ดังที่เห็นแล้วทฤษฎีสัมพัทธภาพของไอน์สไตน์ชี้ว่าอวกาศและเวลาสนองตอบต่อมวลและพลังงาน ความเพี้ยนของอวกาศเวลามีผลกระทบต่อการเคลื่อนที่ของวัตถุอื่นๆ ในจักรวาลตรงบริเวณที่โก่งงอ และวิถีที่วัตถุเหล่านี้เคลื่อนที่ก็จะมีผลต่อการโก่งงอของอวกาศเวลาอีกต่อหนึ่งเนื่องจากมวลและพลังงานของวัตถุเหล่านั้น และก็มีผลกระทบต่อการเคลื่อนที่ของวัตถุเหล่านั้นอีก เป็นอย่างนี้ซ้ำแล้วซ้ำอีกคล้ายกับการเริงระบำภายในจักรวาลที่เชื่อมโยงถึงกัน โดยอาศัยสมการของสัมพัทธภาพทั่วไปซึ่งมีรากฐานมาจากเรขาคณิตของอวกาศโค้งที่คิดขึ้นมาโดยนักคณิตศาสตร์ที่ยิ่งใหญ่ในศตวรรษที่ 19 ยอร์จ เบอร์นฮาร์ด รีมันน์ (Georg Bernhard Riemann) ไอน์สไตน์สามารถอธิบายวิวัฒนาการร่วมของอวกาศเวลาและสสารได้ในเชิงปริมาณ ความประหลาดใจที่ยิ่งใหญ่บังเกิดขึ้นเมื่อเขาเปลี่ยนจากประยุกต์สมการกับกรณีเฉพาะๆ ภายในเอกภพ เช่น ดาวเคราะห์หรือดาวหางโคจรรอบดวงดาว เป็นประยุกต์กับเอกภพโดยรวม คือ ได้ข้อสรุปที่น่าอัศจรรย์ยิ่งว่า *ขนาดของเอกภพจะต้องเปลี่ยนแปลงกับเวลา* นั่นคือ แพร

26 ก.ค. 2544

พรรณของเอกภพยืดออกหรือหดเข้า ไม่ใช่อยู่เฉยๆ สมการของสัมพัทธภาพทั่วไปแสดงสิ่งนี้อย่างชัดเจน

ข้อสรุปนี้เกินความคาดคิดแม้แต่กับไอน์สไตน์เอง เขาเองเป็นคนที่ล้มเลิกความเชื่อในความสำนึกรู้เองของทุกคนในเรื่องธรรมชาติของอวกาศและเวลาซึ่งถูกสร้างขึ้นมาจากประสบการณ์ประจำวันเป็นเวลาหลายพันปี แต่ความคิดว่าเอกภพเป็นสิ่งที่มีอยู่ตลอดมาไม่เปลี่ยนแปลง เป็นความเชื่อที่ฝังแน่น แม้กระทั่งนักคิดที่แหวกแนวอย่างไอน์สไตน์ก็ยากที่จะเลิกเชื่อได้ ด้วยเหตุนี้ไอน์สไตน์จึงได้ดัดแปลงสมการของเขาโดยเติมสิ่งที่เรียกว่า *ค่าคงตัวจักรวาล* (cosmological constant) ลงไปในสมการ เพื่อให้เขาหลีกเลี่ยงข้อสรุปนี้ไปได้ และยึดถือเอกภพที่มีขนาดไม่เปลี่ยนแปลงต่อไปได้อย่างมีความสุข อย่างไรก็ตาม อีก 12 ปีต่อมา โดยการวัดดาราจักรที่อยู่ไกลๆ อย่างละเอียด นักดาราศาสตร์อเมริกัน ชื่อ เอ็ดวิน ฮับเบิล (Edwin Hubble) ได้สรุปอย่างชัดเจนว่าเอกภพ *ขยายตัว* ประวัติวิทยาศาสตร์ได้กล่าวเกี่ยวกับเรื่องนี้ไว้ว่า ไอน์สไตน์ได้ย้อนกลับไปดูสมการรูปเดิมอีกครั้ง และกล่าวว่าการดัดแปลงสมการเป็นการกระทำที่ผิดพลาดอย่างมหันต์ในชีวิตของเขา หากไม่ถือเอาการไม่ยอมรับข้อสรุปแรกเป็นเรื่องสำคัญ ต้องถือว่าทฤษฎีของไอน์สไตน์เป็นต้นตอของความคิดเรื่องการขยายตัวของเอกภพ ที่จริงในตอนต้นของทศวรรษ 1920 หลายปีก่อนการวัดของฮับเบิล นักดาราศาสตร์ที่เชี่ยวชาญเรื่องดาวตก ชื่อ อเล็กซานเดอร์ ฟรีด์มันน์ (Alexander Friedmann) ได้ใช้สมการดั้งเดิมของไอน์สไตน์แสดงอย่างละเอียดพอควรว่า ดาราจักรทั้งหมดจะถูกพาไปด้วยผืนแพรพรรณของเอกภพที่ยืดออก และดังนั้นจึงถอยห่างออกจากกันและกันด้วยความเร็ว การสังเกตของฮับเบิลและของคนอื่นๆ อีกต่อมาเป็นจำนวนมากได้ยืนยันข้อสรุปที่น่าแปลกใจนี้จากสัมพัทธภาพทั่วไป โดยการเสนอคำอธิบายการขยายตัวของเอกภพ ไอน์สไตน์ได้บรรลุถึงจุดสุดยอดของความสำเร็จด้วยปัญญา

แพรพรรณของอวกาศยืดออก ดังนั้น จึงเพิ่มระยะห่างระหว่างดาราจักรที่ถูกพาไปในการขยายตัวของเอกภพ ภาพการขยายตัวของเอกภพที่เห็นได้ง่ายกว่า คือ นึกภาพดาราจักรเสมือนจุดสีที่แต้มลงบนผิวลูกโป่งเมื่อเป่าลูกโป่งให้พองออก แต้มสีบนผิวลูกโป่งจะถอยห่างออกจากกันและกันในลักษณะเดียวกับที่ฮับเบิลสังเกตเห็นเอกภพขยายตัว เราสามารถใช้จินตนาการมองวิวัฒนาการของเอกภพย้อนเวลาเพื่อทราบกำเนิดของเอกภพได้ การมองย้อนหลังคือการให้แพรพรรณของเอกภพหดตัว ทำให้ดาราจักรเคลื่อนที่ใกล้กันๆ เรื่อยๆ คล้ายกับสิ่งที่อยู่ในหม้อ (หุงต้ม) ความดัน ในขณะที่เอกภพหดย่อลง อัดให้ดาราจักรอยู่ชิดกัน อุณหภูมิของเอกภพเพิ่มขึ้น ดวงดาวแตกกระจายและมีพลาสมา (plasma) ของอนุภาคมูลฐานที่ร้อนจัด เมื่อแพรพรรณของเอกภพหดต่อไป อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ไม่หยุดเช่นเดียวกับความหนาแน่นของพลาสมาของอนุภาคมูลฐาน ตามจินตนาการที่เราหมุนนาฬิกากลับเป็นเวลาเท่าอายุของเอกภพที่เราสังเกตในปัจจุบัน คือประมาณ 15,000 ล้านปี เอกภพจะถูกบีบอัดจนเหลือขนาดเล็ก สสารที่เคยเป็นทุกสิ่งทุกอย่าง เป็นต้นว่า รถยนต์ บ้าน ตึกอาคาร ภูเขา โลก ดวงจันทร์ ดาวเสาร์ ดาวพฤหัสบดี ดาวเคราะห์ทุกดวง ดวงอาทิตย์ และดาวฤกษ์ทุกดวงในดาราจักรทางช้างเผือก ดาราจักรแอนโดรเมดาซึ่งมีดาวถึงแสนล้านดวง และทุกๆ อย่างในดาราจักรมากกว่าแสนล้านดาราจักรถูกบีบจนมีความหนาแน่นมากอย่างไม่น่าเชื่อ เมื่อหมุนนาฬิกากลับย้อนไปเรื่อยๆ จักรวาลทั้งหมดจะถูกบีบจนเหลือขนาดเท่าผลส้ม ผลมะนาว เมล็ดถั่ว เม็ดทราย และยังเล็กต่อไปได้อีก ถ้านึกอย่างนี้ต่อไปอีกจนถึง "ในตอนแรก" เอกภพจะเริ่มต้นจากเป็น จุด ซึ่งสสารและพลังงานถูกอัดจนมีความหนาแน่นและอุณหภูมิที่คิดอย่างไรก็นึกภาพไม่ออก เชื่อกันว่าลูกไฟจักรวาลหรือมหาระเบิด (big bang) ระเบิดตูมจากสถานะนี้ ส่งเมล็ดเชื้อที่วิวัฒนาการเป็นเอกภพที่เรารู้จักในปัจจุบัน

ภาพของมหาระเบิดที่เป็นการระเบิดให้กำเนิดจักรวาลส่งสสารของเอกภพออกไปเหมือนสะเก็ดของลูกระเบิดที่แตกตูม เป็นภาพที่มีประโยชน์ แต่อาจทำให้เข้าใจผิดได้ ลูกระเบิดระเบิดที่ตำแหน่งหนึ่ง *ในอวกาศ* และที่ขณะหนึ่ง *ในเวลา* สารของลูกระเบิดแตกกระจายออกไปในอวกาศโดยรอบ ในมหาระเบิดจะไม่มีอวกาศโดยรอบ ขณะที่เราย้อนวิวัฒนาการของเอกภพถอยหลังไปหาในตอนแรก การบีบอัดของสสารของเอกภพเกิดขึ้นเพราะ *อวกาศทั้งหมด* หดย่อลง การย้อนวิวัฒนาการจากขนาดผลส้ม ขนาดเมล็ดถั่ว ขนาดเม็ดทราย นั้นเป็นการพูดถึงเอกภพ *ทั้งหมด* ไม่ใช่บางสิ่งภายในเอกภพ ย้อนกลับไปถึงในตอนแรก จะไม่มีอวกาศภายนอกจุดระเบิดปฐมภูมิ มหาระเบิดนั้นก็คือการระเบิดของอวกาศที่ถูกอัด ซึ่งขยายออกคล้ายคลื่นในมหาสมุทร พาสสารและพลังงานไปแม้จนกระทั่งทุกวันนี้

2.11 สัมพัทธภาพทั่วไปถูกหรือผิด

ยังไม่เคยมีใครพบค่าที่เบี่ยงเบนไปจากคำทำนายของสัมพัทธภาพทั่วไปในการทดลองที่อาศัยเทคโนโลยีระดับที่มีในปัจจุบัน เวลาเท่านั้นที่จะบอกว่าการทดลองที่มีความเที่ยงมากกว่าจะพบความเบี่ยงเบนหรือไม่ในที่สุด และดังนั้นจะบอกด้วยว่าทฤษฎีเป็นแต่เพียงการอธิบายธรรมชาติโดยประมาณ การทดสอบทฤษฎีอย่างมีระบบด้วยความแม่นตรงที่เพิ่มขึ้นๆ เป็นวิธีหนึ่งที่ทำให้วิทยาศาสตร์ก้าวหน้าไป แต่ไม่ใช่วิธีเดียว จริงๆ แล้วเราได้เคยทราบเรื่องนี้แล้ว กล่าวคือ การค้นหาทฤษฎีใหม่ของความโน้มถ่วงเริ่มขึ้นไม่ใช่จากการทดลองที่หักล้างทฤษฎีของนิวตัน แต่จากความขัดแย้งระหว่างทฤษฎีความโน้มถ่วงของนิวตันกับอีก *ทฤษฎี* หนึ่ง คือทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ ต้องรอจนกระทั่งการค้นพบสัมพัทธภาพทั่วไปซึ่งเป็นทฤษฎีความโน้มถ่วงที่ถูกเสนอขึ้นมาแข่งขัน และความบกพร่องด้านการทดลองของทฤษฎีของนิวตันถูกชี้ให้เห็นโดยแสดงว่ามีความแตกต่างระหว่างทฤษฎีทั้งสอง แม้ว่าจะน้อยมาก (แต่วัดได้) ก็ตาม ดังนั้น ความไม่สอดคล้องอย่างสม่ำเสมอของทฤษฎีสามารถมีบทบาทสำคัญในการขับเคลื่อนวิทยาศาสตร์ไปสู่ความก้าวหน้าเช่นเดียวกับข้อมูลจากการทดลอง

ในครึ่งหลังของศตวรรษที่ผ่านมา คือศตวรรษที่ 20 ฟิสิกส์ต้องเผชิญกับความขัดแย้งทางทฤษฎีอีกเรื่องหนึ่งซึ่งมีความรุนแรงพอๆ กับความขัดแย้งระหว่างทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษกับทฤษฎีความโน้มถ่วงของนิวตัน ปรากฏว่าทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปก็มีความขัดแย้งขั้นมูลฐานกับอีกทฤษฎีหนึ่งที่ได้รับการทดสอบแล้วเป็นอย่างดี คือ ทฤษฎีกลศาสตร์ควอนตัม (quantum mechanics) เกี่ยวกับสาระที่กล่าวแล้วในตอนที่ 2 นี้ ความขัดแย้งที่ว่านี้ป้องกันไม่ให้นักฟิสิกส์เข้าใจว่าอะไรเกิดขึ้นกับอวกาศ เวลา และมวล เมื่อถูกอัดเต็มที่ขณะที่เกิดมหาระเบิดหรือที่จุดศูนย์กลางของหลุมดำ แต่โดยทั่วไปแล้ว ความขัดแย้งสะกิดให้เราตื่นตัวถึงความบกพร่องในความเข้าใจขั้นมูลฐานของธรรมชาติ การคลี่คลายความขัดแย้งในเรื่องนี้หลบรอดความพยายามของนักฟิสิกส์ทฤษฎีที่ยิ่งใหญ่หลายต่อหลายคน ทำให้ความขัดแย้งนี้มีชื่อเสียงในฐานะปัญหาที่เป็นหัวใจของฟิสิกส์ทฤษฎีสมัยใหม่ ความเข้าใจความขัดแย้งต้องอาศัยความคุ้นเคยกับเรื่องหลักๆ ของทฤษฎีควอนตัม ซึ่งจะกล่าวถึงในตอนที่ 3[2]

[2] รายชื่อหนังสืออ่านประกอบจะให้ไว้ในตอนสุดท้าย