Sci
V15N2P1

TOE

ประยงค์ พงษ์ทองเจริญ[1]

ผู้เขียนมีความประสงค์จะนำเรื่องที่เข้าใจยากมาอธิบายให้ผู้สนใจโดยทั่วไปได้เกิดความเข้าใจในความคิดหลัก ด้วยความมุ่งหมายดังกล่าว ภาษาที่ใช้จึงไม่ใช่ภาษาการเขียนหนังสือที่ดี เพราะต้องการให้เป็นการพูดคุยกันปรกติ ซึ่งผู้เขียนเองก็ทำได้ไม่ดีนัก การอธิบายอาศัยอ้างอิงจากประสบการณ์ที่คาดว่าผู้อ่านมีอยู่ และในบางครั้งบางคราวก็ต้องขยายประสบการณ์ของผู้อ่านโดยวิธีอุปมาอุปมัยกับตัวอย่างที่ผู้อ่านมีประสบการณ์อยู่ก่อนแล้ว เรื่องที่เขียนทั้งหมดจะมีสี่ตอนด้วยกัน หากไม่ขัดข้องด้วยเหตุสุดวิสัยก็คาดว่าจะทำได้จบ หากผู้อ่านจะได้แสดงความเห็นให้ทราบว่าความประสงค์ที่ผู้เขียนทดลองสัมฤทธิ์ผลหรือไม่ก็จะเป็นที่ขอบคุณยิ่ง

เมื่อผู้เขียนยังเป็นเด็ก ได้อ่านเรื่องจีนหลายเรื่อง เรื่องจีนสมัยโน้นมักเป็นเรื่องอิงพงศาวดารการสู้รบระหว่างแคว้นต่างๆ ตัวเอกของเรื่องมักมีกำลังภายนอกกล้าแข็ง เป็นศิษย์อาจารย์ที่เก่งกล้าและมีของวิเศษที่อาจารย์มอบให้ไว้ใช้ในยามรบพุ่งทำศึกสงคราม เรื่องจีนสมัยโน้นจึงมีความสนุกไม่แพ้เรื่องจีนกำลังภายในที่นิยมอ่านกันแพร่หลายในปัจจุบัน ผลของการสู้รบนอกจากจะขึ้นอยู่กับฝีมือของนายทัพว่าฝ่ายใดจะเก่งกว่ากันแล้ว ยังขึ้นอยู่กับว่านายทัพฝ่ายใดจะมีของวิเศษเลิศกว่ากันอีกด้วย

มีของวิเศษชิ้นหนึ่งที่จัดเป็นฝ่ายตรงข้าม เป็นบ่วงบาศก์วิเศษที่มีชื่อว่า 'เล่งคุนเซาะ' เมื่อผู้ใช้บริกรรมคาถากำกับแล้วเหวี่ยงขึ้นไปบนอากาศ บ่วงบาศก์วิเศษนี้จะฉวัดเฉวียนเปลี่ยนรูปและเข้ารัดมัดศัตรูได้

บ่วงบาศก์วิเศษในวิชาฟิสิกส์นั้นวิเศษยิ่งกว่าของวิเศษเสียอีก เพราะมีเค้าบ่งชี้ว่าจะสามารถนำไปสู่ทฤษฎีสุดยอดที่นักฟิสิกส์แสวงหา ทฤษฎีที่ว่านี้คือ TOE บางท่านอาจสงสัยว่านิ้วเท้าจะมาเกี่ยวข้องอะไรกับวิชาฟิสิกส์ และบางท่านที่อยู่ในแวดวงของภาษาอังกฤษหรือที่ต้องสอบ TOEFL เพื่อไปศึกษาต่อในสหรัฐอเมริกาอาจสงสัยว่าการทดสอบภาษาอังกฤษ (Test Of English) ในฐานะเป็นภาษาต่างประเทศหรือไม่ก็ตามที จะเกี่ยวข้องอย่างไรกับทฤษฎีสุดยอดทางฟิสิกส์

TOE เป็นคำย่อมาจาก Theory Of Everything หรืออาจเรียกได้ว่าทฤษฎีแก้วสารพัดนึก คือเป็นทฤษฎีเดียวที่อธิบายได้ทุกสิ่งทุกอย่างตั้งแต่ควาร์ก (quark) ถึงเอกภพ (universe) เรียกว่าสุดวิเศษหรือสุดยอด เช่นเดียวกับห้างสรรพสินค้าที่โฆษณาว่าสามารถหาซื้อทุกสิ่งได้ตั้งแต่ไม้จิ้มฟันจนถึงเรือรบ

TOE และบ่วงบาศก์วิเศษ (super string) เกี่ยวข้องกันอย่างไรนั้น คงจะต้องรอจนทราบความเป็นมาของ TOE เสียก่อน และในการอธิบายความเป็นมาของ TOE เราจะแบ่งอธิบายเป็นตอนๆ ไป

---

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

ในประวัติพัฒนาการของวิชาฟิสิกส์ มีความขัดแย้งเชิงความคิดเกี่ยวกับธรรมชาติอยู่สามเรื่องใหญ่ๆ ด้วยกัน และการคลี่คลายปัญหาความขัดแย้งดังกล่าวได้นำวิชาฟิสิกส์ให้ก้าวหน้าสูงขึ้นไปอีกระดับหนึ่ง

ความขัดแย้งประการแรกที่ตระหนักกันดีในตอนปลายของคริสต์ศตวรรษที่ 19 เป็นเรื่องสมบัติที่น่าฉงนของการเคลื่อนที่ของแสง เรื่องย่อๆ มีอยู่ว่า ตามกฎการเคลื่อนที่ของไอแซก นิวตัน (Isaac Newton) ถ้าเราวิ่งเร็วพอ เราคงจะไล่ตามแสงที่ฉายจากกระบอกไฟฉายได้ทัน(!) แต่ตามทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic theory) ของ เจมส์ คลาร์ก แมกซเวลล์ (James Clerk Maxwell) จะไม่มีทางไล่แสงได้ทันไม่ว่าจะวิ่งเร็วสักเพียงไร อัลเบิร์ต ไอน์สไตน์ (Albert Einstein) ได้เสนอทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ (special theory of relativity) เพื่อขจัดความขัดแย้งนี้ให้สิ้นไป แม้ว่าจะคลี่คลายความไม่ลงตัวระหว่างทฤษฎีสัมพัทธภาพของนิวตันและทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกซเวลล์ได้ แต่ก็ต้องเสียบางสิ่งเพื่อแลกเปลี่ยน คือต้องยอมเปลี่ยนความเชื่อความเข้าใจเกี่ยวกับอวกาศ (space) และเวลา (time) เสียใหม่ ทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษของไอน์สไตน์บอกว่า ไม่อาจยึดถือความเชื่อเรื่องอวกาศและเวลาที่มีมาแต่เดิมว่าเป็นสิ่งไม่เปลี่ยนแปลงเสมือนรอยจารึกบนหินที่ทุกคนเห็นเหมือนๆ กัน แต่อวกาศและเวลาตามทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษเป็นเสมือนสิ่งที่ดึงให้ยืดได้หดได้ ขึ้นอยู่กับสถานะการเคลื่อนที่

การพัฒนาทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษได้สร้างเวทีและจัดฉากสำหรับความขัดแย้งประการที่สองทันที ข้อสรุปข้อหนึ่งของผลงานของไอน์สไตน์ คือ จะไม่มีสิ่งใด แม้กระทั่งอิทธิพลใดหรืออำนาจรบกวนใด ที่สามารถเดินทางได้เร็วกว่าอัตราเร็วของแสง แต่ผลงานของนิวตันว่าด้วยความโน้มถ่วงสากล (universal gravitation) ตั้งอยู่บนสมมุติฐานว่า แรงโน้มถ่วงถูกส่งผ่านเป็นระยะทางไกลแสนไกลได้โดยฉับพลัน คือไม่เสียเวลาเลย อีกครั้งหนึ่งที่ไอน์สไตน์ก้าวเข้ามาคลี่คลายความขัดแย้งนี้ด้วยทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป (general theory of relativity) ใน ค.ศ. 1915 ทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปได้ปัดความเชื่อเดิมเรื่องอวกาศและเวลาให้สัมระเนระนาดเช่นเดียวกับทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ ไม่เพียงแต่อวกาศและเวลาจะได้รับอิทธิพลจากสถานะการเคลื่อนที่เท่านั้น แต่ยังยับย่นและโค้งงอสนองตอบต่อสสารและพลังงานที่อยู่ ณ ที่นั้น ความยับย่นของแพรพรรณของอวกาศและเวลาเป็นตัวส่งแรงโน้มถ่วงจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง ดังจะได้เห็นเมื่ออธิบายถึงเรื่องนั้น อวกาศและเวลาจึงไม่ใช่เป็นฉากในโรงละครของเอกภพที่ไม่เปลี่ยนแปลงสำหรับให้เหตุการณ์ในเอกภพได้แสดงบทบาทของตน แต่เป็นตัวละครในเหตุการณ์เสียเองตามทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษและทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป

ประวัติศาสตร์ของฟิสิกส์ซ้ำรอยอีกครั้งหนึ่ง ขณะที่การค้นพบทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปคลี่คลายความขัดแย้งอย่างหนึ่งไปได้ แต่ก็นำไปสู่ความขัดแย้งอีกประการหนึ่ง ในสามทศวรรษแรกนับจาก ค.ศ. 1900 นักฟิสิกส์ได้พัฒนากลศาสตร์ควอนตัม (quantum mechanics) เพื่อสนองตอบต่อปัญหาหลายเรื่องที่เกิดขึ้นเมื่อนำฟิสิกส์ตามแนวคิดในศตวรรษที่ 19 มาอธิบายโลกของจุลภาค ความขัดแย้งประการที่สามเป็นความขัดแย้งที่ลึก ยากที่จะคลี่คลาย เกิดจากความไม่ลงตัว เข้ากันไม่ได้ระหว่างกลศาสตร์ควอนตัมกับทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป อวกาศตามทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปซึ่งเป็นผิวโค้งเรขาคณิตที่เปลี่ยนแปลงอย่างค่อยเป็นค่อยไป ขัดแย้งอย่างรุนแรงกับอวกาศที่ได้รับการบ่งชี้จากพฤติกรรมของจุลอนุภาคในเอกภพว่าขมุกขมัวไม่ชัดเจนตามกลศาสตร์ควอนตัม ความขัดแย้งนี้เป็นหัวใจของปัญหาของฟิสิกส์ยุคใหม่ และต้องรอมาจนทศวรรษ 1980 ที่ทฤษฎีบ่วงบาศก์วิเศษเข้ามาคลี่คลาย รายละเอียดของความขัดแย้งต่างๆ เหล่านี้ และการคลี่คลายเป็นสิ่งที่เราจะพยายามทำความกระจ่างต่อไป

Sci
V15n2p3

1

ความขัดแย้งระหว่างทฤษฎีสัมพัทธ์ของนิวตัน กับ ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกซเวลล์

ใน ค.ศ. 1831 ไมเคิล ฟาราเดย์ (Michael Faraday) นักฟิสิกส์อังกฤษ ได้แสดงให้เห็นว่า กระแสไฟฟ้าทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็ก และแท่งแม่เหล็กที่เคลื่อนที่เข้าหรือออกในขดลวดตัวนำจะทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในขดลวดตัวนำ ในทศวรรษ 1860 แมกซเวลล์ได้ศึกษาการทดลองของฟาราเดย์ และประสบความสำเร็จในการรวมแรงแม่เหล็กและแรงไฟฟ้าเข้าเป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และอธิบายปรากฏการณ์เกี่ยวกับแม่เหล็กและไฟฟ้าทั้งหมดได้ด้วยสมการคณิตศาสตร์ชุดหนึ่ง เรียกว่า สมการแม่เหล็กไฟฟ้า นอกจากจะรวมแม่เหล็กและไฟฟ้าเข้าเป็นเรื่องเดียวกันแล้ว ทฤษฎีของแมกซเวลล์ยังแสดงอย่างที่ไม่เคยคาดหมายมาก่อนว่า การเปลี่ยนแปลงแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วตายตัวและไม่เปลี่ยนแปลง และความเร็วนี้ยังเท่ากับความเร็วของแสงอีกด้วย จากข้อเท็จจริงนี้ แมกซเวลล์ตระหนักว่าแสงนั้นแท้ที่จริงแล้วคือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งซึ่งมีอันตรกิริยาทางเคมีกับเรตินาของตาทำให้เห็นเป็นภาพ ยิ่งกว่านั้น (และสำคัญด้วย) ทฤษฎีของแมกซเวลล์ยังแสดงอีกด้วยว่า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทุกชนิด รวมทั้งแสงที่มองเห็น เป็นผู้เดินทางที่ไม่รู้จักเหน็ดเหนื่อย ไม่เคยหยุด ไม่เคยเคลื่อนที่ช้าลง แสงเคลื่อนที่ด้วยความเร็วของแสงเสมอ

ทุกสิ่งทุกอย่างดูดี จนกระทั่งไอน์สไตน์ ซึ่งขณะนั้นมีอายุได้เพียง 16 ปีเท่านั้น ได้ตั้งคำถามว่า จะเกิดอะไรขึ้นถ้าเราไล่ตามแสงด้วยความเร็วเท่ากับแสง โดยใช้เหตุผลตามกฎการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของนิวตัน เราจะเห็นแสงอยู่นิ่ง คลื่นแสงจะเป็นคลื่นนิ่ง แต่ตามทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกซเวลล์ ไม่มีแสงที่อยู่นิ่ง ไม่เคยมีใครจับแสงที่อยู่นิ่งไว้ในมือได้เลย นี่คือปัญหาขัดแย้งประการแรกที่เราเคยกล่าวถึง โชคดีที่ไอน์สไตน์ไม่ได้ระแคะระคายว่านักฟิสิกส์ชั้นนำของโลกหลายคนก็กำลังขบคิดหาทางคลี่คลายปัญหานี้อยู่ เพราะถ้าทราบก็อาจถูกพาให้เฉไฉไปได้ ไอน์สไตน์หมกมุ่นอยู่กับปัญหาความขัดแย้งระหว่างแมกซเวลล์กับนิวตันอยู่โดยลำพังถึงประมาณสิบปี

ต่อไปนี้จะอธิบายว่าไอน์สไตน์แก้ปัญหาความขัดแย้งด้วยทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษอย่างไร และทฤษฎีนี้ได้เปลี่ยนความเข้าใจของเราเกี่ยวกับอวกาศและเวลาอย่างไร สาระสำคัญของทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษเป็นเรื่องว่าโลกจะปรากฏอย่างไรต่อปัจเจกบุคคลซึ่งเรียกว่า "ผู้สังเกต" ที่กำลังเคลื่อนที่สัมพัทธ์กัน ปัญหานี้เหมือนกับเป็นปัญหาลับสมองซึ่งไม่น่าจะมีความสำคัญอะไร แต่ในมือของไอน์สไตน์กลับเป็นตรงกันข้าม เรื่องผู้สังเกตวิ่งไล่ตามแสงมีความสำคัญที่ลึกซึ้งต่อการเข้าใจสถานการณ์ธรรมดาที่สุดที่ปรากฏต่อปัจเจกบุคคลที่เคลื่อนที่สัมพัทธ์กัน

1.1 ข้อบกพร่องของความสำนึกรู้เอง

ประสบการณ์สามัญเป็นตัวอย่างที่ดีที่แสดงว่าแต่ละบุคคลมีข้อสังเกตในเรื่องเดียวกันแตกต่างกัน ในสายตาของคนขับรถ ต้นไม้ที่อยู่ข้างถนนดูว่าเคลื่อนที่ แต่ในสายตาของผู้ที่นั่งอยู่ข้างทาง ต้นไม้อยู่นิ่ง ทำนองเดียวกัน คนขับรถเห็นแผงหน้าปัดอยู่นิ่งๆ (หวังว่าคงไม่เห็นเป็นอย่างอื่น!) แต่กับคนที่ยืนอยู่ข้างถนน แผงหน้าปัดและรถทั้งคันเคลื่อนที่ สิ่งเหล่านี้เป็นสมบัติพื้นฐานและความสำนึกรู้เองว่าโลกเปลี่ยนแปลงอย่างไรโดยที่เราไม่ได้เอาใจใส่มากนัก

ทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษบอกว่า ความแตกต่างระหว่างผลสังเกตของคนทั้งสองเป็นเรื่องละเอียดอ่อนและลึกซึ้ง ทฤษฎีนี้ระบุ (ฟังแล้วแปลก) ว่า ผู้สังเกตที่เคลื่อนที่สัมพัทธ์กันจะสังเกตเห็นระยะทางและเวลาแตกต่างกัน หมายความว่านาฬิกาข้อมือสองเรือนเหมือนกันทุกประการที่คนสองคนที่เคลื่อนที่สัมพัทธ์กันใส่จะเดิน *ในอัตราที่ต่างกัน* และจะบอกเวลาต่างกันระหว่างเหตุการณ์สองเหตุการณ์ ดังที่จะได้เห็นต่อไป ข้อแถลงนี้ไม่ได้ปรักปรำว่านาฬิกาเดินไม่เที่ยง แต่เป็นข้อแถลงที่เป็นความจริงเกี่ยวกับตัวเวลาเอง

ในทำนองเดียวกัน ผู้สังเกตสองคนที่ถือไม้บรรทัดเหมือนกันทุกประการ และเคลื่อนที่สัมพัทธ์กัน จะวัดระยะทางเดียวกันได้ไม่เท่ากัน ที่เป็นเช่นนี้ไม่ใช่เป็นเพราะไม้บรรทัดไม่เที่ยงหรือผู้วัดวัดไม่ถูกต้อง เครื่องวัดที่ละเอียดและเที่ยงที่สุดในโลกยืนยันว่าอวกาศและเวลาตามที่วัดเป็นระยะทางและช่วงเวลา แต่ละคนจะเห็นไม่ตรงกัน ตามคำอธิบายที่ไอน์สไตน์แจงอย่างละเอียด ทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษขจัดข้อขัดแย้งระหว่างความสำนึกรู้เองของเราเกี่ยวกับการเคลื่อนที่กับสมบัติของแสง แต่ก็ต้องมีสนนราคาแลกเปลี่ยน คือแต่ละคนที่เคลื่อนที่สัมพัทธ์กันจะสังเกตอวกาศหรือเวลาได้ไม่ตรงกัน

นับตั้งแต่ไอน์สไตน์ได้บอกกล่าวกับชาวโลกถึงการค้นพบที่น่าตื่นเต้นของเขาจนถึงปัจจุบันเป็นเวลาเกือบร้อยปีแล้ว แต่พวกเราเกือบทุกคนยังมองอวกาศและเวลาในลักษณะที่เป็นสิ่งสัมบูรณ์ คือไม่ขึ้นกับสิ่งอื่นและไม่ขึ้นกับการเคลื่อนที่ของผู้สังเกต ทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษไม่ใช่ของที่เรากินเราใช้อยู่ทุกวี่ทุกวัน จึงไม่ใช่สิ่งที่เราคุ้นเคย ความหมายโดยนัยของทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษจึงไม่ได้เป็นส่วนของความสำนึกรู้ของเรา เหตุผลก็เป็นเรื่องธรรมดา ผลกระทบของทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษขึ้นอยู่กับว่าเราเคลื่อนที่เร็วเท่าไร ความเร็วขนาดความเร็วของรถยนต์ เครื่องบิน หรือแม้กระทั่งความเร็วของกระสวยอวกาศ มีผลกระทบน้อยมาก ผลต่างระหว่างการสังเกตอวกาศและเวลาของปัจเจกบุคคลที่อยู่นิ่งบนโลกกับที่อยู่ในรถหรือบนเครื่องบินนั้น*มีจริง* แต่ค่อนข้างน้อยมาก ไม่เป็นที่สังเกตได้ แต่หากว่าเราเดินทางในยานอวกาศในอนาคตที่เคลื่อนที่ได้เร็วเกือบเท่าความเร็วของแสง ผลของสัมพัทธภาพพิเศษจะมีมากพอสมควร แต่การเคลื่อนที่ด้วยความเร็วมากๆ ดังกล่าวยังคงอยู่ในแวดวงของนวนิยายวิทยาศาสตร์ จะอย่างไรก็ตาม ในโอกาสต่อไปเราจะพูดถึงการทดลองที่ชาญฉลาดที่ทำให้สามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนและเที่ยงตรงถึงสมบัติสัมพัทธ์ของอวกาศและเวลาที่ทฤษฎีของไอน์สไตน์ทำนายไว้

เพื่อพอให้คุ้นเคยกับขนาดที่เกี่ยวข้อง เราจะสมมุติว่าไมเคิลและราล์ฟ สองพี่น้องนักแข่งรถฟอร์มูลาร์ 1 ช่วยกันทดสอบรถแข่งคันหนึ่งบนทางตรงที่ใช้เพื่อการขับทดสอบโดยเฉพาะ ไมเคิลขอให้ราล์ฟยืนอยู่ข้างทางคอยจับเวลาที่เขาจะขับรถเป็นระยะทาง 1 ไมล์ พร้อมกันนั้นเขาก็ใช้นาฬิกาจับเวลาจับเวลาเองด้วยเพื่อจะได้ยันกับเวลาที่ราล์ฟจับได้ หลังจากเร่งรถมาระยะหนึ่งจนมีความเร็ว 120 ไมล์ต่อชั่วโมง (ซึ่งนับว่าเป็นความเร็วที่ต่ำมากสำหรับไมเคิล เพราะเขาสามารถขับได้เร็วกว่า 180 ไมล์ต่อชั่วโมงได้อย่างสบายในการแข่งจริงซึ่งทางมีทั้งตรงทั้งโค้ง และมีรถหลายคันแย่งกันแซง) เขารักษาความเร็วนี้ในขณะที่เขาขับผ่านช่วงทางระยะ 1 ไมล์ที่ตกลงจะจับเวลากัน ก่อนมีทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษของไอน์สไตน์ ใครๆ ก็ต้องลงความเห็นว่าทั้งราล์ฟและไมเคิลต้องจับเวลาได้เท่าๆ กันถ้านาฬิกาของคนทั้งสองเดินเที่ยงตรงด้วยกัน แต่ตามทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ นาฬิกาของราล์ฟจับเวลาได้ 30 วินาที ในขณะที่นาฬิกาของไมเคิลจับเวลาได้ 29.999 999 999 999 52 วินาที น้อยกว่าเวลาที่ราล์ฟจับได้เพียงนิดเดียว ผลต่างของเวลาทั้งสองน้อยเหลือเกินจนกระทั่งจะตรวจพบได้ก็ต้องใช้เครื่องวัดเวลาที่มีความเที่ยงและละเอียดเกินสมรรถนะของนาฬิกาจับเวลาที่ต้องกดปุ่มเริ่มและหยุด รวมทั้งเครื่องจับเวลาการแข่งขันกีฬาโอลิมปิก หรือแม้แต่นาฬิกาอะตอมที่เที่ยงที่สุด จึงไม่เป็นที่น่าประหลาดว่าเราไม่เคยพบหรือรู้สึกในประสบการณ์ในชีวิตประจำวันของเราว่าช่วงเวลานี้ขึ้นอยู่กับสถานะการเคลื่อนที่

ในการวัดความยาวก็จะมีความไม่สอดคล้องในผลการวัดคล้ายๆ กัน ตัวอย่างเช่น ในการขับผ่านครั้งหนึ่ง ราล์ฟใช้วิธีที่แยบยลวัดความยาวของรถที่ไมเคิลขับ เขากดปุ่มเริ่มให้นาฬิกาเดินขณะที่กันชนหน้าของรถมาถึงเขาพอดี และกดปุ่มให้นาฬิกาหยุดเดินขณะที่กันชนหลังผ่านพ้นเขาไปพอดี โดยที่ราล์ฟทราบว่าไมเคิลขับรถด้วยความเร็ว 120 ไมล์ต่อชั่วโมง เขาจึงหาความยาวของรถได้โดยคูณความเร็วด้วยช่วงเวลาที่อ่านได้จากนาฬิกาจับเวลา ก่อนสมัยของไอน์สไตน์ ไม่เคยมีใครตั้งข้อสงสัยเลยว่าความยาวที่ราล์ฟวัดได้โดยวิธีอ้อมนี้จะไม่ตรงกับความยาวที่ไมเคิลวัดขณะที่รถจอดอยู่นิ่งๆ ตรงกันข้าม ทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษบอกว่าถ้าราล์ฟและไมเคิลทำการวัดตามวิธีที่กล่าวมาแล้ว และไมเคิลพบว่ารถคันนี้มีความยาว 16 ฟุต การวัดของราล์ฟจะได้ความยาวของรถเป็น 15.999 999 999 999 74 ฟุต น้อยกว่าความยาวที่ไมเคิลวัดได้เล็กน้อย เช่นเดียวกับการวัดเวลา เครื่องมือวัดธรรมดาไม่สามารถตรวจพบความแตกต่างจำนวนน้อยมากเพียงนี้ได้

แม้ว่าความแตกต่างจะน้อยนิด แต่ก็แสดงให้เห็นถึงความบกพร่องในความเชื่อที่ยึดถือกันอย่างทั่วถ้วนทุกคนว่า อวกาศและเวลาเป็นสิ่งสัมบูรณ์ ไม่เปลี่ยนแปลงด้วยปัจจัยอื่น เมื่อความเร็วสัมพัทธ์ของผู้สังเกตเช่นราล์ฟและไมเคิลมีค่ามากขึ้นๆ ความบกพร่องก็จะยิ่งปรากฏชัดเจนขึ้นโดยลำดับ จะให้ความแตกต่างมีผลพอสังเกตได้ ความเร็วที่เกี่ยวข้องเทียบกับความเร็วสูงสุดที่เป็นไปได้ คือความเร็วของแสง จะต้องเป็นเศษส่วนที่มีขนาดพอสมควร ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกซเวลล์และผลการทดลองแสดงว่าแสงมีความเร็วประมาณ 186,000 ไมล์ต่อวินาที หรือประมาณ 670 ล้านไมล์ต่อชั่วโมง ความเร็วนี้มากพอที่แสงจะเคลื่อนที่รอบโลกได้ 7 รอบเศษในหนึ่งวินาที ถ้าไมเคิลเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 580 ล้านไมล์ต่อชั่วโมง (!) (ประมาณ 87 เปอร์เซ็นต์ของความเร็วของแสง) แทนที่จะเป็น 120 ไมล์ต่อชั่วโมง คณิตศาสตร์ของทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษทำนายว่าราล์ฟจะวัดความยาวของรถได้เพียงประมาณ 8 ฟุต ซึ่งต่างไปมากจากที่ไมเคิลวัดได้ (หรือที่ระบุรายการเฉพาะไว้ในคู่มือเจ้าของรถ) เช่นเดียวกัน เวลาที่วิ่งระยะทาง 1 ไมล์วัดโดยราล์ฟจะมีค่าประมาณสองเท่าของเวลาที่วัดโดยไมเคิล

ยังไม่มีอะไรที่จะมีความเร็วสูงถึงขนาดนั้น ผลของการ "ยืดของเวลา" (time dilation) และ "การหดแบบลอเรนต์ซ" (Lorentz contraction) อย่างที่ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้ถูกเรียก จึงน้อยมากสำหรับสิ่งที่เกิดขึ้นทุกวี่ทุกวัน ถ้าเราเกิดมีชีวิตอยู่ในโลกที่ทุกสิ่งทุกอย่างเคลื่อนที่ด้วยความเร็วใกล้ความเร็วของแสง การสำนึกรู้เองในสมบัตินี้ของเวลาและอวกาศย่อมจะเกิดขึ้นเองและถือเป็นเรื่องธรรมดา เพราะว่าจะเป็นประสบการณ์ที่พบเห็นคุ้นเคยอยู่เป็นประจำ จนกระทั่งไม่มีความจำเป็นต้องนำมาพูดกัน เหมือนกับที่เราไม่ต้องพูดถึงการเคลื่อนที่ปรากฏของต้นไม้ข้างทางที่ได้กล่าวถึงเมื่อตอนต้น แต่เนื่องจากเราไม่ได้มีชีวิตอยู่ในโลกเช่นนั้น เรื่องเช่นนี้จึงเป็นเรื่องที่ไม่คุ้นเคย ความเข้าใจและการยอมรับในเรื่องจึงต้องอาศัยว่าเราต้องเปลี่ยนโลกทัศน์เสียใหม่ ดังที่จะได้กล่าวต่อไป

1.2 หลักของสัมพัทธภาพ

รากฐานของทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษมีอยู่สองประการซึ่งเป็นโครงสร้างง่ายๆ แต่ฝังรากลึก ประการแรกดังที่ได้กล่าวแล้วคือสมบัติของแสงซึ่งจะได้กล่าวโดยละเอียดในหัวข้อถัดไป ประการที่สองเป็นเรื่องนามธรรมอยู่บ้าง คือไม่ได้เกี่ยวข้องกับกฎของฟิสิกส์ในเรื่องใดเรื่องหนึ่งโดยเฉพาะ แต่เกี่ยวข้องกับกฎของฟิสิกส์ทั้งหมด เราเรียกรากฐานประการนี้ว่า หลักของสัมพัทธภาพ (principle of relativity) หลักของสัมพัทธภาพมีข้อเท็จจริงง่ายๆ เป็นหลักให้พิง กล่าวคือ เมื่อใดก็ตามที่เรากล่าวถึงอัตราเร็วหรือความเร็ว (ซึ่งหมายถึงอัตราเร็วของวัตถุและทิศทางการเคลื่อนที่) เราจะต้องระบุเสมอว่าอะไรหรือใครเป็นคนวัด ความหมายและความสำคัญของถ้อยแถลงนี้เข้าใจได้ไม่ยากนักจากการไตร่ตรองสถานการณ์ต่อไปนี้

สมมุติว่าสมศักดิ์ ซึ่งสวมชุดอวกาศมีไฟฉายสีแดงที่เปิดแว้บๆ ติดอยู่ ลอยอยู่ในอวกาศที่ว่างเปล่าจริงๆ และมืดสนิท ห่างจากดาวเคราะห์ ดาวฤกษ์ และดาราจักรทั้งหมด ในมุมมองหรือตามความรู้สึกของสมศักดิ์ เขาอยู่นิ่งๆ ท่ามกลางความมืดมิดและสม่ำเสมอของจักรวาล สมศักดิ์มองห่างออกไป เขาเห็นแสงกระพริบสีเขียวเคลื่อนที่เข้ามาใกล้เข้าๆ ท้ายที่สุด เมื่อเข้ามาใกล้พอควร สมศักดิ์เห็นว่าเป็นเพื่อนร่วมอวกาศชื่อสมศรีกำลังเคลื่อนที่เข้ามา สมศักดิ์และสมศรีโบกมือทักทายกัน ต่อจากนั้นสมศรีก็เคลื่อนที่ห่างสายตาออกไป สถานการณ์เดียวกันนี้ สมศรีก็สามารถเล่าได้ตรงกันจากมุมมองของเธอ เริ่มต้นด้วยสมศรีอยู่โดยลำพังในความมืดมิดของอวกาศ ห่างออกไปเธอเห็นแสงกระพริบสีแดงเคลื่อนที่เข้ามาใกล้เข้าๆ ท้ายที่สุด เมื่อเข้ามาใกล้พอควร สมศรีจึงเห็นว่าไฟกระพริบสีแดงนั้นติดอยู่กับชุดอวกาศที่เพื่อนร่วมอวกาศชื่อสมศักดิ์สวมใส่อยู่และกำลังเคลื่อนที่เข้ามา เมื่อสมศักดิ์ผ่าน เขาโบกมือทักทายและเธอก็โบกมือตอบ ต่อจากนั้นสมศักดิ์ก็เคลื่อนที่ห่างสายตาออกไป

สถานการณ์ทั้งสองนี้ที่จริงเป็นสถานการณ์เดียวกัน แต่มองจากคนละมุมมอง ซึ่งต่างก็ถูกต้องด้วยกัน ผู้สังเกตแต่ละคนรู้สึกว่าตนเองอยู่นิ่งและเห็นว่าอีกฝ่ายหนึ่งเคลื่อนที่ มุมมองของแต่ละฝ่ายก็ใช้ได้และมีเหตุผล เนื่องจากมีสมมาตรระหว่างนักท่องอวกาศทั้งสอง ตามเหตุผลขั้นพื้นฐานจึงไม่มีทางกล่าวได้ว่ามุมมองหนึ่ง 'ถูก' และอีกมุมมองหนึ่ง 'ผิด' แต่ละฝ่ายอ้างได้อย่างชอบธรรมว่ามุมมองของตนเป็นความจริง

ตัวอย่างที่ยกมานี้ชี้ให้เห็นความหมายของหลักของสัมพัทธภาพได้อย่างดี คือการเคลื่อนที่เป็นสิ่งสัมพัทธ์ เราสามารถพูดได้ว่าสิ่งหนึ่งสิ่งใดเคลื่อนที่ก็ต่อเมื่ออ้างว่าสัมพัทธ์หรือเปรียบเทียบกับอีกสิ่งหนึ่ง ดังนั้น ประโยค "สมศักดิ์เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว 10 ไมล์ต่อชั่วโมง" จึงไม่ได้มีความหมาย เพราะเราไม่ได้ระบุว่าเปรียบเทียบกับอะไร แต่ประโยค "สมศักดิ์เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว 10 ไมล์ต่อชั่วโมงผ่านสมศรี" มีความหมายเพราะได้กำหนดเอาสมศรีเป็นหลักเปรียบเทียบ ตามตัวอย่าง ประโยคหลังตรงกับ "สมศรีเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว 10 ไมล์ต่อชั่วโมงผ่านสมศักดิ์ (ในทิศตรงข้าม)" หรืออีกนัยหนึ่ง การเคลื่อนที่ไม่ใช่สิ่งสัมบูรณ์ การเคลื่อนที่เป็นสิ่งสัมพัทธ์

ประเด็นสำคัญในสถานการณ์ที่นำมาเป็นตัวอย่างคือ ทั้งสมศักดิ์และสมศรีไม่ได้ถูกฉุด ผลัก หรือกระทำโดยแรงหรืออิทธิพลใดที่มีผลต่อการเคลื่อนอย่างเรื่อยๆ เรียบๆ การเคลื่อนที่ไร้แรงกระทำและมีความเร็วคงตัว ดังนั้น จึงให้ถ้อยแถลงที่เฉพาะลงไปอีกได้ว่า การเคลื่อนที่ที่ไร้แรงกระทำมีความหมายเฉพาะเมื่อเปรียบเทียบกับสิ่งอื่น ความขยายนี้ทำให้กระจ่างขึ้น เพราะถ้ามีแรงมาเกี่ยวข้อง แรงจะทำให้ความเร็วของผู้สังเกตเปลี่ยน คือเปลี่ยนอัตราเร็วหรือเปลี่ยนทิศทาง หรือเปลี่ยนทั้งสองอย่าง และการเปลี่ยนแปลงนี้รู้สึกได้ ตัวอย่างเช่น ถ้าสมศักดิ์มีเครื่องไอพ่นเล็กๆ ติดอยู่กับชุดอวกาศ เมื่อเครื่องพ่นไอออกไปทางด้านหลัง เขาจะรู้สึกอย่างแน่นอนว่าเขาเคลื่อนที่ ความรู้สึกนี้เป็นสมบัติที่มีอยู่ในตัวเรา หากเครื่องไอพ่นทำงาน สมศักดิ์จะทราบว่าเขาเคลื่อนที่แม้ว่าจะหลับตาสนิทซึ่งทำให้ไม่สามารถเปรียบเทียบกับวัตถุอื่นได้ แม้ว่าจะไม่มีการเปรียบเทียบดังกล่าว เขาก็ไม่อาจกล่าวได้ว่าเขาอยู่กับที่ในขณะที่โลกส่วนที่เหลือเคลื่อนที่ผ่านเขาไป การเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสม่ำเสมอเป็นสิ่งสัมพัทธ์ แต่การเคลื่อนที่ที่มีแรงกระทำ หรืออีกนัยหนึ่ง การเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง ไม่ได้เป็นอย่างนั้น (เราจะสำรวจถ้อยแถลงนี้ในตอนที่พูดเรื่องการเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง และพิจารณาทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปของไอน์สไตน์)

การจัดฉากของนิทานหรือสถานการณ์ข้างต้นให้อยู่ในความมืดของอวกาศอันว่างเปล่าช่วยให้มีความเข้าใจโดยได้เอาสิ่งที่คุ้นเคยเช่นถนนหนทางและตึกรามบ้านช่องออกไป เพราะเรามักถืออย่างไม่มีเหตุผลว่าสิ่งเหล่านั้นคือสิ่งที่ "อยู่กับที่" ไม่ยิ่งหย่อนไปกว่าฉากในอวกาศ หลักเกณฑ์เดียวกันเป็นจริงสำหรับฉากบนพื้นดินด้วย และเป็นสิ่งที่เราประสบได้ทุกคน ตัวอย่างเช่น ท่านหลับไปบนรถไฟและเผอิญตื่นขึ้นตอนที่รถขบวนของท่านกำลังผ่านกับรถอีกขบวนหนึ่งบนรางขนาน เมื่อมองผ่านหน้าต่างก็เห็นเพียงแต่รถขบวนที่สองซึ่งบังสายตาไม่ให้

เห็นวัตถุอื่นใดอีก ท่านอาจงงอยู่ชั่วครู่ไม่แน่ใจว่ารถขบวนที่ท่านนั่งเคลื่อนที่ หรือรถอีกขบวนหนึ่งเคลื่อนที่ หรือเคลื่อนที่ด้วยกันทั้งสองขบวน ถ้ารถขบวนที่ท่านนั่งสั่นหรือกระชากหรือเปลี่ยนทิศทางโดยวิ่งตามรางโค้ง ท่านจะรู้สึกว่าท่านเคลื่อนที่ แต่ถ้าการเคลื่อนที่ของรถไฟเรียบ ไม่กระตุก กระชาก หรือสะเทือน - ความเร็วของรถไฟคงตัว - ท่านจะสังเกตพบแต่การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของรถโดยบอกไม่ได้แน่ว่ารถขบวนใดเคลื่อนที่

ลองขยับไปใกลอีกสักก้าวหนึ่ง ให้จินตนาการว่าท่านนั่งอยู่บนรถไฟดังที่กล่าวอยู่ขบวนหนึ่งและดึงม่านปิดหน้าต่างให้สนิทโดยไม่ให้มีทางเห็นสิ่งที่อยู่ภายนอกตู้รถที่นั่ง และสมมุติว่ารถไฟวิ่งด้วยความเร็วคงตัวไม่เปลี่ยนแปลงเลยแม้แต่น้อย จะไม่มีทางใดเลยที่ท่านจะทราบสถานะการเคลื่อนที่ของท่านได้ ทุกส่วนของตู้จะยังคงเหมือนเดิมไม่ว่ารถจะจอดอยู่นิ่งๆ หรือเคลื่อนที่ไปตามรางด้วยความเร็วสูง ไอน์สไตน์ได้นำความคิดสรุปนี้มาแถลงในรูปเฉพาะ ความคิดนี้สืบย้อนหลังไปได้ถึงสมัยของกาลิเลโอ (Galileo) รูปเฉพาะที่ไอน์สไตน์แถลงคือเป็นไปไม่ได้ที่เราหรือใครๆ ก็ตามที่ร่วมเดินทางด้วย จะทำการทดลองภายในตู้รถที่ปิดสนิทหาว่ารถไฟเคลื่อนที่หรือไม่ได้เคลื่อนที่ คำแถลงนี้ชี้ประเด็นหลักของสัมพัทธภาพอีก กล่าวคือ เนื่องจากการเคลื่อนที่ทั้งหลายที่ปราศจากแรงกระทำเป็นสิ่งสัมพัทธ์ จึงมีความหมายเมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุอื่นหรือบุคคลอื่นที่เคลื่อนที่โดยไม่มีแรงกระทำด้วยเท่านั้น ไม่มีวิธีใดที่เราจะทราบเกี่ยวกับสถานะการเคลื่อนที่ของเราได้โดยไม่ได้เปรียบเทียบโดยตรงหรือโดยอ้อมกับวัตถุ "ภายนอก" การเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงตัวที่ "สัมบูรณ์" นั้นไม่มี มีแต่เปรียบเทียบกับสิ่งอื่นเท่านั้นจึงมีความหมาย

จริงๆ แล้วไอน์สไตน์ตระหนักดีว่า หลักของสัมพัทธภาพมีความหมายที่สำคัญยิ่งขึ้นไปอีก กล่าวคือ กฎของฟิสิกส์ไม่ว่าจะเป็นกฎอะไรก็ตาม จะต้องเหมือนกันอย่างสัมบูรณ์สำหรับผู้สังเกตที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงตัว ถ้าสมศักดิ์และสมศรีไม่ได้ล่องลอยไปเฉยๆ ในอวกาศ แต่แต่ละคนทำการทดลองเรื่องเดียวกันในสถานีอวกาศของตน ผลการทดลองที่แต่ละคนพบจะตรงกัน อีกครั้งหนึ่งที่แต่ละคนจะเชื่อว่าสถานีอวกาศของเขาอยู่กับที่แม้ว่าสถานีอวกาศทั้งสองจะเคลื่อนที่สัมพัทธ์กัน ถ้าเครื่องมือของคนทั้งสองเหมือนกันทุกประการ ก็ไม่มีอะไรจะแสดงความแตกต่างระหว่างการทดลองทั้งสอง การทดลองทั้งสองจึงมีสมมาตรกันครบถ้วน กฎของฟิสิกส์ซึ่งแต่ละคนหาได้จากการทดลองย่อมจะตรงกันทุกประการด้วย ทั้งตัวผู้ทดลองและการทดลองจะไม่รู้สึก - ไม่ขึ้นกับ - การเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ความคิดสรุปง่ายๆ เช่นนี้ได้ชี้ให้เห็นสมมาตรอย่างสมบูรณ์ระหว่างผู้สังเกต ความคิดสรุปนี้เองรวมอยู่ในหลักของสัมพัทธภาพ อีกสักครู่เราจะนำหลักนี้ไปใช้ซึ่งจะมีผลที่ลึกซึ้งขึ้น

1.3 ความเร็วของแสง

ดังได้กล่าวแล้วว่ารากฐานของสัมพัทธภาพพิเศษอีกประการหนึ่งเกี่ยวข้องกับแสงและสมบัติการเคลื่อนที่ของแสง ตรงกันข้ามกับคำกล่าวอ้างของเราว่าประโยค "สมศักดิ์เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 10 ไมล์ต่อชั่วโมง" ไม่มีความหมายหากไม่มีหลักสำหรับเปรียบเทียบ ความพยายามในช่วงร่วมร้อยปีที่ผ่านมาของนักฟิสิกส์ทดลองได้แสดงว่า ผู้สังเกตทุกคนไม่ว่าจะเป็นใครก็ตาม ต่างเห็นพ้องต้องกันว่าแสงเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 670 ล้านไมล์ต่อชั่วโมง ไม่ว่าจะเปรียบเทียบกับอะไรก็ตาม

ข้อเท็จจริงนี้ทำให้เราต้องปฏิวัติทัศนะเกี่ยวกับเอกภพเสียใหม่ เราจะเริ่มทำความเข้าใจกับความหมายของเรื่องนี้โดยเปรียบต่างกับถ้อยแถลงคล้ายๆ กันที่ประยุกต์กับวัตถุที่สามัญกว่า ลองจินตนาการถึงวันที่อากาศแจ่มใส แดดไม่ร้อน ลมพัดเอื่อยๆ เย็นสบาย คุณกับเพื่อนชวนกันไปเล่นเทนนิส ขณะที่ตัดผ่านสนามฟุตบอลเพื่อไปยังสนามเทนนิส คุณเห็นสนามฟุตบอลมีหญ้าที่เพิ่งตัดใหม่ๆ เรียบ นุ่ม จึงชักชวนเพื่อนให้อบอุ่นกล้ามเนื้อ

และฝึกสายตาโดยเอาลูกเทนนิสมาปาและรับกลับไปกลับมาด้วยความเร็ว 20 ฟุตต่อวินาที เล่นกันได้สักครู่หนึ่งก็เกิดอากาศวิปริต ฟ้าแลบและฟ้าคะนองอย่างน่าสะพึงกลัว คุณและเพื่อนจึงวิ่งไปหลบอยู่ภายในอาคาร อากาศวิปริตอยู่ชั่วครู่แล้วก็แจ่มใสดามเดิมเหมือนไม่มีอะไรเกิดขึ้น คุณและเพื่อนจึงออกไปเล่นปาและรับลูกเทนนิสกันตามเดิม แต่คราวนี้มีอะไรบางอย่างเปลี่ยนแปลงในตัวเพื่อนของคุณ ผมของเขาชี้ชัน แววตาดุดัน คล้ายกับเป็นบ้า และในมือแทนที่จะเป็นลูกเทนนิสก็กลายเป็นลูกระเบิดมือ ด้วยความตกใจคุณรีบวิ่งหนีด้วยความเร็ว 12 ฟุตต่อวินาที เมื่อเพื่อนขว้างลูกระเบิดมือใส่คุณ ลูกระเบิดวิ่งเข้าหาคุณ แต่เนื่องจากคุณวิ่งหนี ความเร็วที่ลูกระเบิดวิ่งเข้าหาจึงน้อยกว่า 20 ฟุตต่อวินาที ประสบการณ์สามัญบอกว่าลูกระเบิดวิ่งเข้าหาคุณด้วยความเร็ว (20 - 12) = 8 ฟุตต่อวินาที

ลองนำเอาข้อสังเกตเรื่องลูกเทนนิส ระเบิดมือ มาเปรียบเทียบกับแสง เพื่อให้การเปรียบเทียบกระชับขึ้น ให้คิดว่าลำแสงประกอบด้วย "ห่อ" เล็กๆ หรืออนุภาคเล็กๆ ที่เรียกว่าโฟตอน (โฟตอนเป็นอีกรูปหนึ่งของแสงที่ไอน์สไตน์เสนอใน ค.ศ. 1905) เมื่อเราฉายแสงจากกระบอกไฟฉายหรือส่งลำแสงเลเซอร์ออกไป มีผลเท่ากับเราส่งโฟตอนออกเป็นสายในทิศที่เราหันกระบอกไฟฉายหรือปืนเลเซอร์ไปเช่นเดียวกับที่พิจารณาเรื่องลูกระเบิดมือ เราจะพิจารณาว่าการเคลื่อนที่ของโฟตอนจะเป็นอย่างไรจากมุมมองของผู้ที่กำลังเคลื่อนที่ สมมุติว่าเพื่อนของคุณเปลี่ยนลูกระเบิดมือเป็นปืนเลเซอร์ ถ้าเขาเล็งและยิงแสงเลเซอร์มาที่คุณ และถ้าคุณมีเครื่องมือวัดที่เหมาะสม จะพบว่าความเร็วของโฟตอนในลำแสงเลเซอร์เป็น 670 ล้านไมล์ต่อชั่วโมง จะเกิดอะไรขึ้นถ้าคุณวิ่งหนีเหมือนเมื่อตอนที่ถูกไล่ปาด้วยลูกระเบิดมือ ความเร็วของโฟตอนที่คุณวัดได้จะเป็นเท่าไร เพื่อให้เรื่องสมจริงยิ่งขึ้น สมมุติว่าคุณหนีไปในยานเอนเตอร์ไพรส์ของกัปตันเคิร์กที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 100 ล้านไมล์ต่อชั่วโมง ถ้าคิดด้วยเหตุผลตามทัศนะของนิวตัน คุณคาดว่าโฟตอนจะเคลื่อนที่ตามด้วยความเร็วที่ช้าลงเนื่องจากคุณหนี เฉพาะลงไปก็คือ คาดว่าโฟตอนจะเคลื่อนที่เข้าหาด้วยความเร็ว (670 ล้านไมล์ต่อชั่วโมง - 100 ล้านไมล์ต่อชั่วโมง) 570 ล้านไมล์ต่อชั่วโมง

หลักฐานที่เพิ่มพูนขึ้นเรื่อยๆ จากการทดลองที่หลากหลายนับแต่ทศวรรษ 1880 เป็นต้นมา พร้อมกับการวิเคราะห์อย่างละเอียดถึงการแปลความหมายของทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกซเวลล์ว่าด้วยแสง ทำให้ประชาคมของนักวิทยาศาสตร์เชื่อมั่นมากขึ้นมาเรื่อยๆ ว่าเราจะไม่มีทางเห็นโฟตอนเคลื่อนที่ช้าลง *แม้ว่าเราจะหนีโฟตอน แต่เราก็ยังจะคงวัดความเร็วของโฟตอนที่วิ่งเข้าหาได้ 670 ล้านไมล์ต่อชั่วโมง ไม่น้อยไปกว่านั้นแม้แต่น้อย* แม้ว่าฟังครั้งแรกจะรู้สึกว่าไม่น่าเชื่อ ไม่เหมือนสิ่งที่เกิดขึ้นเมื่อเราวิ่งหนีลูกระเบิดมือ แต่ความเร็วของโฟตอนที่วิ่งเข้าหาเราจะมีค่า 670 ล้านไมล์ต่อชั่วโมงเสมอ ความข้อนี้ยังเป็นความจริงถ้าเราวิ่งเข้าหาโฟตอนที่เคลื่อนที่มาหาเราหรือวิ่งไล่ตามโฟตอนที่เคลื่อนที่หนีเรา ความเร็วของโฟตอนที่เข้าหาหรือที่หนีห่างจะไม่เปลี่ยนแปลง และจะปรากฏว่าเคลื่อนที่ได้ 670 ล้านไมล์ต่อชั่วโมง ไม่ว่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างต้นกำเนิดโฟตอนกับผู้สังเกตจะเป็นอย่างไรก็ตาม ความเร็วของแสงจะคงตัวเสมอ

ข้อจำกัดทางเทคโนโลยีทำให้ "การทดลอง" ด้วยแสงอย่างที่อธิบาย ไม่อาจทำได้จริงๆ อย่างไรก็ตาม อาจทำการทดลองที่พอเทียบเคียงกันแทนได้ ตัวอย่างเช่น ใน ค.ศ. 1913 นักฟิสิกส์ชื่อ วิลเลม เดอ ซิตเตอร์ (Willem de Sitter) ได้เสนอว่า ดาวคู่ (binary stars) [ดาวสองดวงที่หมุนรอบกันและกัน] ที่หมุนอย่างรวดเร็วอาจใช้สำหรับวัดผลของต้นกำเนิดแสงที่เคลื่อนที่ที่มีต่อความเร็วของแสง การทดลองต่างๆ ที่หลากหลายในเรื่องความเร็วของแสงในช่วง 80 ปีที่ผ่านมายืนยันว่า ความเร็วของแสงที่มาจากดวงดาวที่เคลื่อนที่จะมีค่า *เท่ากับ* ความเร็วของแสงจากดวงดาวที่อยู่นิ่ง คือ 670 ล้านไมล์ต่อชั่วโมง ถ้าผิดพลาดก็ไม่มากพอที่เครื่องมือที่

ละเอียดขึ้น เที่ยงขึ้น จะวัดได้ ยิ่งกว่านั้น การทดลองอีกเป็นจำนวนมากในร้อยปีที่ผ่านมา - การทดลองที่วัดความเร็วของแสงในสถานการณ์ต่างๆ และการทดสอบความหมายโดยนัยจำนวนมากที่เกิดจากสมบัติเฉพาะนี้ของแสง ดังที่ได้พิจารณาเมื่อครู่ - ต่างก็ยืนยันภาวะคงที่ของความเร็วของแสง

หากท่านรู้สึกว่ายอมรับคุณสมบัติข้อนี้ของแสงไม่ได้ก็ไม่ต้องตำหนิตัวเอง เพราะไม่ใช่ท่านคนเดียวที่รู้สึกเช่นนี้ เมื่อตอนเปลี่ยนศตวรรษที่ 19 เป็นศตวรรษที่ 20 นักฟิสิกส์พยายามหาข้ออ้างต่างๆ นานามาปฏิเสธภาวะคงตัวของความเร็วของแสง แต่ไม่สำเร็จ ตรงกันข้าม ไอน์สไตน์อ้าแขนรับความคงตัวของความเร็วของแสงด้วยความยินดี เพราะความคงตัวนี้คือคำอธิบายความขัดแย้งที่รบกวนจิตใจของเขาตั้งแต่ยังเป็นเด็กหนุ่ม ไม่ว่าเราจะวิ่งไล่แสงโดยวิธีใด แสงจะหนีเราด้วยความเร็วของแสงเสมอ เราไม่อาจให้แสงมีความเร็วผิดไปจาก 670 ล้านไมล์ต่อชั่วโมงแม้แต่น้อย อย่าว่าแต่จะทำให้ลดลงจนรู้สึกว่าอยู่นิ่งเลย จึงเป็นอันว่า ปิดพิจารณาคดีเรื่องวิ่งไล่ตามแสงไม่ทันลงได้ ชัยชนะเหนือปฏิทรรศน์หรือความขัดแย้งระหว่างความเห็นสองความเห็นที่ต่างก็เป็นความจริงไม่ใช่ชัยชนะที่เล็กน้อย ไอน์สไตน์ตระหนักว่าการที่แสงมีความเร็วคงตัวนั้นหมายถึงความล่มสลายของฟิสิกส์ของนิวตัน

1.4 ความจริงและผลสืบเนื่อง

ที่พูดว่าอัตราเร็วนั้น หมายถึงว่าวัตถุเคลื่อนได้ไกลเท่าไรในช่วงเวลาที่กำหนดให้ช่วงหนึ่ง ถ้าเราอยู่ในรถที่เคลื่อนที่ 65 ไมล์ต่อชั่วโมง หมายความว่าเราจะเดินทางได้ 65 ไมล์ ถ้าเรารักษาสถานะการเคลื่อนที่นี้ไว้ได้คงเส้นคงวาตลอดหนึ่งชั่วโมง พูดอย่างนี้อัตราเร็วก็เป็นเรื่องธรรมดา และท่านอาจสงสัยว่าทำไมเราจึงต้องวุ่นวายเกี่ยวกับอัตราเร็วของลูกเทนนิสและโฟตอนและถือเป็นเรื่องใหญ่โต แต่ลองคิดดูให้ดี *ระยะทาง* เป็นแนวคิดเกี่ยวกับอวกาศโดยเฉพาะคือปริมาณที่บอกว่ามีอวกาศอยู่ระหว่างจุดสองจุดมากน้อยเท่าใด ช่วงเวลาเป็นแนวคิดเกี่ยวกับเวลาระหว่างเหตุการณ์สองเหตุการณ์ว่ามากน้อยเท่าไร อัตราเร็วจึงเกี่ยวข้องอย่างแนบแน่นกับแนวคิดของเราเรื่องอวกาศกับเวลา เมื่อพูดเสียใหม่อย่างนี้ จะเห็นว่าข้อเท็จจริงจากการทดลองใดๆ ที่ฝืนความเชื่อสามัญเกี่ยวกับอัตราเร็ว เป็นต้นว่าอัตราเร็วคงตัวของแสง มีศักยภาพที่จะฝืนความเชื่อสามัญของเราเกี่ยวกับอวกาศและเวลาเอง ด้วยเหตุนี้เอง ข้อเท็จจริงที่แปลกเกี่ยวกับอัตราเร็วของแสงจึงควรได้รับการตรวจสอบอย่างละเอียด การตรวจสอบโดยไอน์สไตน์นำเขาไปสู่ข้อสรุปที่น่าทึ่งอย่างยิ่ง

1.5 ผลกระทบต่อเวลา (ตอนที่ 1)

โดยอาศัยความพยายามเพียงเล็กน้อย เราสามารถใช้ความคงตัวของอัตราเร็วของแสงแสดงว่าความเข้าใจเรื่องเวลาอย่างที่เราคุ้นเคยกันเป็นความเข้าใจที่ไม่ถูกต้อง ลองจินตนาการว่ามีประธานาธิบดีของสองประเทศที่มีกรณีพิพาทกันนั่งอยู่คนละปลายของโต๊ะเจรจายาว ทั้งสองฝ่ายเพิ่งตกลงกันได้ที่จะหยุดยิง แต่ไม่มีฝ่ายใดยอมลงนามในข้อตกลงก่อนอีกฝ่ายหนึ่ง เพราะรู้สึกว่าการกระทำเช่นนั้นเป็นเสมือนว่าตนเป็นฝ่ายแพ้และเสียเกียรติอย่างยิ่ง เลขาธิการสหประชาชาติซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการเจรจาไกล่เกลี่ยมีข้อเสนอที่หลักแหลม ว่าจะเอาหลอดไฟตั้งไว้บนโต๊ะกึ่งกลางระหว่างประธานาธิบดีทั้งสองพอดี เดิมทีเดียวหลอดไฟดับ เมื่อกดสวิตช์แสงที่ออกมาจากหลอดไฟจะไปถึงท่านประธานาธิบดีทั้งสองพร้อมกัน เนื่องจากทั้งสองท่านอยู่ห่างจากหลอดไฟเท่ากัน ท่านประธานาธิบดีทั้งสองยินยอมที่จะลงนามในข้อตกลงเมื่อเห็นแสง แผนนี้ถูกนำมาใช้และมีการลงนามหยุดยิงด้วยความเต็มใจเมื่อเห็นว่าไม่มีฝ่ายใดได้เปรียบเสียเปรียบกัน

อิ่มเอิบด้วยความสำเร็จในครั้งนั้น ท่านเลขาธิการสหประชาชาติได้นำวิธีเดียวกันนี้ไปใช้กับประเทศคู่กรณีพิพาทที่ท่านสามารถไกล่เกลี่ยให้เจรจาตกลงยุติความเป็นปรปักษ์ต่อกันได้ แต่มีข้อแตกต่างจากการลงนามในข้อตกลงสันติภาพครั้งก่อนโน้น คือคราวนี้การลงนามของประมุขของสองประเทศกระทำในรถไฟที่กำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงตัว ประธานาธิบดีของสองประเทศคู่กรณีนั่งที่ปลายโต๊ะยาวคนละข้าง ประธานาธิบดีของประเทศหันหน้าสถาน (Hannahstan) นั่งหันหน้าไปทางเดียวกับทิศทางการเคลื่อนที่ของรถไฟ ส่วนประธานาธิบดีของประเทศหันหลังสถาน (Hanlangstan) หันหน้าในทางตรงข้าม ท่านเลขาธิการสหประชาชาติมีความคุ้นเคยกับข้อเท็จจริงว่ากฎของฟิสิกส์จะเหมือนกันไม่ผิดเพี้ยนไม่ว่าผู้สังเกตจะมีสถานะการเคลื่อนที่อย่างไร ตราบเท่าที่การเคลื่อนที่นี้ไม่เปลี่ยนแปลง จึงไม่ได้ให้ความสนใจกับความแตกต่างของสถานที่การลงนามครั้งนี้กับครั้งที่แล้ว และยังคงใช้แสงจากหลอดไฟฟ้าเป็นสัญญาณการลงนามตามเดิม ประธานาธิบดีของทั้งสองประเทศลงนามในข้อตกลง และฉลองการสิ้นสุดภาวะความเป็นปรปักษ์กันพร้อมด้วยคณะที่ปรึกษาและผู้ติดตาม

ในขณะที่ฉลองการลงนามอยู่บนรถไฟนั้น มีข่าวรายงานเข้ามาว่า ประชาชนของทั้งสองประเทศซึ่งได้เฝ้าดูพิธีลงนามอยู่ที่ชานชลาข้างรถไฟที่เคลื่อนที่ผ่านเกิดการต่อสู้กัน ทุกคนที่อยู่บนรถไฟผิดหวังและไม่เชื่อหูว่าเหตุผลที่เกิดการต่อสู้กันขึ้นมาอีกเพราะประชาชนของประเทศหันหน้าสถานกล่าวหาว่าถูกหลอก เพราะประธานาธิบดีของเขาลงนามในข้อตกลง *ก่อน* ประธานาธิบดีของหันหลังสถาน เนื่องจากทุกคนบนรถไฟจากทั้งสองฝ่ายเห็นพ้องต้องกันว่าการลงนามนั้นกระทำพร้อมกัน จะเป็นไปได้อย่างไรที่ผู้สังเกตภายนอกที่เฝ้าดูพิธีอยู่จะเห็นเป็นอย่างอื่น

เราจะพิจารณามุมมองของผู้สังเกตที่อยู่บนชานชลาให้ละเอียด เดิมทีเดียวหลอดไฟฟ้าบนโต๊ะดับมืด และพอถึงเวลาหนึ่งก็สว่างขึ้นส่งลำแสงวิ่งไปหาประธานาธิบดีทั้งสอง จากมุมมองของคนบนชานชลา ประธานาธิบดีของหันหน้าสถานเคลื่อนเข้าหาแสง ในขณะที่ประธานาธิบดีของหันหลังสถานถอยหนีจากแสง ที่เดินทางมาจากหลอดไฟ สำหรับผู้สังเกตบนชานชลาแล้วย่อมเป็นที่ชัดเจนว่า ลำแสงไม่ต้องเดินทางไปไกลก็ไปถึงประธานาธิบดีของหันหน้าสถานซึ่งเคลื่อนเข้าหาแสงที่เดินทางมา เมื่อเทียบกับระยะทางที่แสงเดินทางเข้าหาประธานาธิบดีของหันหลังสถานซึ่งถอยหนีแสง นี่ไม่ใช่ถ้อยแถลงเกี่ยวกับอัตราเร็วของแสงขณะที่เคลื่อนที่เข้าหาประธานาธิบดีทั้งสอง - เราได้พบแล้วว่า ไม่ว่าสถานะการเคลื่อนที่ของต้นกำเนิดแสงหรือผู้สังเกตจะเป็นอย่างไร อัตราเร็วของแสงจะคงเดิมเสมอ แต่เรากำลังอธิบายว่า ผู้สังเกตจากจุดได้เปรียบบนชานชลาเห็นชัดว่าแสงแรกที่ออกจากหลอดไฟจะต้องเดินทาง *ไกล* เท่าไรจึงจะถึงประธานาธิบดีแต่ละท่าน เนื่องจากระยะทางนี้สำหรับประธานาธิบดีแห่งหันหน้าสถานน้อยกว่าระยะทางสำหรับประธานาธิบดีแห่งหันหลังสถาน และเนื่องจากอัตราเร็วของแสงที่ไปยังประธานาธิบดีทั้งสองเท่ากัน แสงจึงถึงประธานาธิบดีของหันหน้าสถานก่อน นี่คือเหตุผลที่ประชาชนแห่งหันหน้าสถานอ้างว่าถูกหลอก

เมื่อผู้สื่อข่าว CNN สัมภาษณ์ประชาชนของหันหน้าสถานที่อยู่ในเหตุการณ์ออกอากาศ ท่านเลขาธิการสหประชาชาติ ประธานาธิบดีทั้งสอง และที่ปรึกษาทั้งหมดต่างก็ไม่เชื่อหู พวกเขาทุกคนเห็นพ้องกันว่าหลอดไฟถูกยึดอยู่ตรงกลางระหว่างประธานาธิบดีทั้งสองอย่างมั่นคงไม่ได้เคลื่อนที่ ดังนั้น แสงที่ออกจากหลอดไฟจึงเดินทางเท่ากันไปถึงประธานาธิบดีแต่ละท่าน เนื่องจากอัตราเร็วของแสงที่ไปทางซ้ายและไปทางขวาเท่ากัน พวกเขาจึงเชื่อว่า และก็เป็นจริงตามการสังเกตด้วยว่า แสงถึงประธานาธิบดีทั้งสองพร้อมกัน

ใครถูกกันแน่ คนที่อยู่บนรถไฟหรืออยู่นอกรถไฟ การสังเกตและการอธิบายสนับสนุนของแต่ละฝ่าย หาข้อตำหนิไม่ได้ คำตอบก็คือทั้งสองฝ่ายต่างก็ถูก เหมือนกับนักท่องอวกาศสมศักดิ์กับสมศรีซึ่งต่างมีมุมมองที่ถูกต้องพอๆ กัน ความละเอียดอ่อนของเรื่องนี้ก็คือ ความจริงของแต่ละฝ่ายขัดแย้งกัน เรื่องนี้เป็นประเด็นปัญหาการเมืองด้วย ประธานาธิบดีทั้งสองลงนามพร้อมกันหรือไม่ การสังเกตและเหตุผลข้างบนนำเราไปสู่ข้อสรุปที่จะเลี่ยงอย่างไรก็ไม่พ้นว่า *ตามที่คนที่อยู่บนรถไฟเห็นประธานาธิบดีทั้งสองลงนามพร้อมกัน* ในขณะเดียวกัน *ตามคนที่อยู่บนชานชลาเห็น ประธานาธิบดีทั้งสองลงนามไม่พร้อมกัน* หรืออีกนัยหนึ่ง สิ่งที่เกิดขึ้นพร้อมกันตามทัศนะของผู้สังเกตบางคน ไม่ได้เกิดพร้อมกันตามทัศนะของคนอื่น ถ้าทั้งสองพวกเคลื่อนที่สัมพัทธ์กัน

ข้อสรุปนี้ฟังแล้วออกจะงงๆ เป็นข้อสรุปที่แสดงถึงความเข้าใจที่ลึกซึ้งในธรรมชาติของความเป็นจริงที่เคยค้นพบ อย่างไรก็ตาม นานหลังจากที่ท่านอ่านเรื่องนี้แล้ว หากท่านจำอะไรในบทนี้ไม่ได้เลยยกเว้นแต่ความพยายามเจรจาเลิกเป็นปรปักษ์กันที่ไม่เป็นผล ท่านก็จะได้สาระสำคัญของการค้นพบของไอน์สไตน์ โดยไม่ต้องใช้คณิตศาสตร์ขั้นสูงหรือตรรกศาสตร์ที่ยืดยาวซับซ้อน ลักษณะที่ไม่ได้คาดหมายก่อนเลยแม้แต่น้อยของเวลาปรากฏตามมาโดยตรงจากความคงตัวของอัตราเร็วของแสง ดังที่สถานการณ์ตามที่ได้กล่าวมาแสดงให้เห็น ให้สังเกตว่า ถ้าอัตราเร็วของแสงไม่คงที่ แต่มีสมบัติตามความสำนึกรู้เองของเราที่มีรากฐานจากการเคลื่อนที่ช้าๆ เช่น การเคลื่อนที่ของลูกเทนนิส ผู้สังเกตบนชานชลาก็จะเห็นพ้องกับผู้สังเกตบนรถไฟ ผู้สังเกตบนชานชลายังคงอ้างว่าโฟตอนจะต้องเคลื่อนที่เพื่อไปให้ถึงประธานาธิบดีแห่งหันหลังสถานไกลกว่าที่จะไปถึงประธานาธิบดีของหันหน้าสถาน อย่างไรก็ตาม ความสำนึกรู้เองตามปรกติมีนัยว่าแสงที่วิ่งเข้าหาประธานาธิบดีของหันหลังสถานจะเคลื่อนที่เร็วกว่า เพราะได้รับการ "ผลัก" จากรถไฟที่เคลื่อนที่ไปข้างหน้า เช่นเดียวกัน ผู้สังเกตบนชานชลาจะเห็นแสงเข้าหาประธานาธิบดีของหันหน้าสถานด้วยอัตราเร็วที่ช้าลง เพราะถูก "ฉุดรั้ง" ไว้ด้วยการเคลื่อนที่ของรถไฟ เมื่อนำผลกระทบ (ที่ผิด) ที่มีต่ออัตราเร็วของแสงมาพิจารณาด้วย ผู้สังเกตบนชานชลาจะเห็นแสงไปถึงประธานาธิบดีทั้งสองพร้อมกัน อย่างไรก็ตาม ในโลกแห่งความเป็นจริง แสงไม่ได้เคลื่อนที่เร็วขึ้นหรือช้าลง ผู้สังเกตบนชานชลาจึงมีความชอบธรรมที่จะอ้างว่าแสงถึงประธานาธิบดีของหันหน้าสถานก่อน

ภาวะคงตัวของอัตราเร็วของแสงบังคับให้เราต้องยกเลิกความเชื่อที่เคยมีมาแต่โบร่ำโบราณว่า ภาวะพร้อมกันเป็นสิ่งสากลที่ทุกคนต่างเห็นพ้องกัน ไม่ว่าแต่ละคนจะมีสถานะการเคลื่อนที่อย่างไร นาฬิกา 'สากล' ที่เคยเชื่อกันว่าเดินติ๊กๆ เป็นวินาทีเท่ากันหมดบนโลก บนดาวอังคาร บนดาวพฤหัสบดี และในดาราจักรแอนโดรเมดา และทุกซอกทุกมุมของเอกภพนั้น ไม่มี ตรงกันข้าม ผู้สังเกตที่เคลื่อนที่สัมพัทธ์กัน จะเห็นต่างกันว่าเหตุการณ์อะไรบ้างเกิดขึ้นพร้อมกัน นี่เป็นอีกครั้งหนึ่งที่เหตุผลของข้อสรุป - สมบัติเฉพาะที่พบจริงของโลกที่เราดำรงชีวิตอยู่ - เป็นสิ่งที่ไม่สู้จะคุ้นเคย ที่เป็นดังนี้ เพราะว่าผลกระทบของอัตราเร็วคงตัวของแสงค่อนข้างจะน้อยมาก เมื่ออัตราเร็วของการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของผู้สังเกตเป็นอัตราเร็วที่พบเห็นเป็นประจำในชีวิตประจำวัน ถ้าโต๊ะเจรจายาว 100 ฟุต และรถไฟเคลื่อนที่ 10 ไมล์ต่อชั่วโมง ผู้สังเกตบนชานชลาจะ "เห็น" แสงไปถึงประธานาธิบดีของหันหน้าสถานประมาณหนึ่งในพันล้านล้าน (10^{-15}) วินาทีก่อนที่ไปถึงประธานาธิบดีของหันหลังสถาน แม้ว่าความแตกต่างนี้จะเป็นความแตกต่างจริง แต่น้อยมากเสียเหลือเกินจนไม่อาจบอกได้โดยตรงจากประสาทสัมผัส ถ้ารถวิ่งเร็วกว่านี้มาก คือ 600 ล้านไมล์ต่อชั่วโมง (!) จากมุมมองของคนที่อยู่บนชานชลา แสงจะใช้เวลาไปถึงประธานาธิบดีของหันหลังสถานนานกว่าเวลาที่ไปถึงประธานาธิบดีของหันหน้าสถานเกือบ 20 เท่า ที่อัตราเร็วสูง ผลกระทบที่น่างุนงงของทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษยิ่งชัดเจนขึ้น

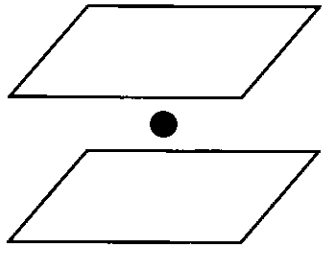
1.6 ผลกระทบที่มีต่อเวลา (ตอนที่ 2)

เป็นการยากที่จะให้นิยามที่เป็นนามธรรมของเวลา ความพยายามที่จะให้นิยามมักจะต้องลงเอยด้วยการใช้คำว่า "เวลา" อีก หรือมิฉะนั้นก็ต้องใช้ภาษาอย่างเลี้ยวลดคดเคี้ยว เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้คำว่า "เวลา" เพื่อกำหนดนิยามของเวลา แทนที่จะเดินตามแนวทางเช่นนั้น เราจะใช้แนวทางที่ปฏิบัติได้จริง คือนิยามเวลาว่าคือสิ่งที่วัดได้ด้วยนาฬิกา แน่ละ การให้นิยามเช่นนี้เท่ากับผลักภาระไปให้กับการให้นิยามของคำว่า "นาฬิกา" เราสามารถคิดอย่างหลวมๆ ตรงนี้ได้ว่า นาฬิกาคือเครื่องที่มีการเคลื่อนที่เป็นวัฏจักรที่สม่ำเสมออย่างแท้จริง เราวัดเวลาโดยนับจำนวนรอบหรือวัฏจักรที่นาฬิกาของเราเปลี่ยนแปลง นาฬิกาที่คุ้นเคยกัน เช่น นาฬิกาข้อมือเข้าเกณฑ์ตามนิยามนี้ คือมีเข็มที่เคลื่อนที่เป็นวัฏจักรที่สม่ำเสมอ และเราวัดเวลาที่ผ่านไปโดยนับจำนวนรอบ (หรือเศษส่วนของรอบ) ที่เข็มเคลื่อนที่ไประหว่างเหตุการณ์ที่สังเกต

แน่นอนว่า ความหมายของ "การเคลื่อนที่เป็นวัฏจักรที่สม่ำเสมออย่างแท้จริง" ย่อมเกี่ยวข้องโดยลึกๆ กับเรื่องเวลา เนื่องจาก "สม่ำเสมอ" หมายถึงช่วงเวลาที่เท่ากันของแต่ละวัฏจักร ในเชิงปฏิบัติ เราทำตามนี้โดยสร้างนาฬิกาให้มีองค์ประกอบทางกายภาพง่ายๆ ที่โดยเหตุผลพื้นฐานเราคาดว่าจะเปลี่ยนเป็นรอบซ้ำแล้วซ้ำอีก โดยรอบหนึ่งไม่ได้ผิดแผกไปจากอีกรอบหนึ่งแต่อย่างไร นาฬิกาตั้งพื้นที่มีลูกตุ้มแกว่งกลับไปกลับมา และนาฬิกาอะตอมซึ่งอาศัยกระบวนการอะตอมซ้ำแบบ เป็นตัวอย่างง่ายๆ

เป้าหมายของเราคือหาความเข้าใจว่าการเคลื่อนที่มีผลต่อเวลาที่ผ่านไปอย่างไร และเนื่องจากเราให้นิยามของเวลาในเชิงปฏิบัติเกี่ยวกับนาฬิกา เราจึงปรับคำถามเป็นว่า การเคลื่อนที่มีผลต่อการเดิน 'ติ๊ก' ของนาฬิกาอย่างไร เป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องย้ำไว้ก่อนว่า การพิจารณาของเราไม่เกี่ยวข้องกับว่าชิ้นส่วนของเครื่องนาฬิกาเรือนหนึ่งเป็นอย่างไรเมื่อถูกเขย่าหรือเหวี่ยงเนื่องจากการกระทบกระแทก ที่จริงแล้วเราจะพิจารณาการเคลื่อนที่ง่ายที่สุดและเรียบที่สุดเท่านั้น คือการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงตัวอย่างแท้จริงซึ่งไม่มีการกระทบกระแทกแต่อย่างไร เราสนใจปัญหาสากลว่าการเคลื่อนที่มีผลกระทบต่อเวลาที่ผ่านไปอย่างไร และจะมีผลขั้นมูลฐานต่อการเดิน 'ติ๊ก-ต๊อก' ของนาฬิกาใดๆ และทุกๆ เรือน ไม่ว่าจะออกแบบหรือสร้างไว้อย่างไรก็ตามที

เพื่อความมุ่งหมายดังกล่าว เราจะใช้นาฬิกาที่ใช้หลักง่ายที่สุด (แต่ไร้ประโยชน์เชิงปฏิบัติที่สุด) ซึ่งจะเรียกว่า 'นาฬิกาแสง' ประกอบด้วยกระจกราบสองแผ่นยึดให้ห่างและขนานกันโดยหันหน้ากระจกให้หากัน และมีโฟตอนของแสงโฟตอนเดียวสะท้อนขึ้นลงระหว่างกระจกทั้งสองแผ่น (ดูรูป 1.1) ถ้ากระจกห่างกัน 6 นิ้ว โฟตอนจะใช้เวลาประมาณหนึ่งส่วนในพันล้านส่วนของวินาทีในการเคลื่อนที่ไป-กลับครบหนึ่งรอบ ทุกครั้งที่โฟตอนเคลื่อนที่ครบหนึ่งรอบ นับได้ว่านาฬิกาแสง 'ติ๊ก' หนึ่งครั้ง 'ติ๊ก' พันล้านครั้ง นับเป็นเวลาได้หนึ่งวินาที

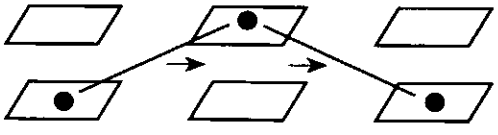


รูป 1.1 นาฬิกาแสงประกอบด้วยกระจกเงาสองแผ่นมีโฟตอนสะท้อนอยู่ระหว่างกระจก นาฬิกาจะติ๊ก 1 ครั้งเมื่อโฟตอนเคลื่อนที่ไป-กลับครบ 1 รอบ

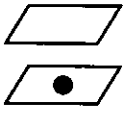
เราสามารถใช้นาฬิกาแสงได้เหมือนนาฬิกาจับเวลาเพื่อวัดเวลาที่ผ่านไประหว่างเหตุการณ์สองเหตุการณ์ด้วยกัน เราเพียงแต่นับจำนวนติ๊กระหว่างช่วงที่ต้องการทราบเวลาแล้วคูณด้วยเวลาของหนึ่งติ๊ก ตัวอย่างเช่น ถ้าเราจับเวลาแข่งม้าและนับจำนวนติ๊กระหว่าง 'เริ่ม' จนถึงหลักชัย สมมุติว่าได้ 55 พันล้านติ๊ก เราสรุปได้ว่าม้าวิ่งตลอดระยะทางได้ 55 วินาที

เหตุที่เราใช้นาฬิกาแสงในการอธิบาย เป็นเพราะว่าความเรียบง่ายไม่มีกลไก ทำให้ขจัดรายละเอียดต่างๆ ที่ไม่จำเป็นไปได้ ดังนั้น จึงทำให้เราเข้าใจกระจ่างว่าการเคลื่อนที่มีผลกระทบต่อเวลาที่ผ่านไปอย่างไร เพื่อให้ชัดเจน สมมุติว่าเราหาเวลาที่ผ่านไปโดยนั่งเฝ้าคอยนับจำนวนติ๊กของนาฬิกาแสงที่ตั้งอยู่บนโต๊ะข้างๆ และแล้วทันใดนั้นมีนาฬิกาแสงเรือนที่สองเคลื่อนที่ผ่านไปด้วยความเร็วคงตัว (รูป 1.2) คำถามที่เราถามก็คือ นาฬิกาแสงที่เคลื่อนที่จะติ๊กด้วยอัตราเร็วเดียวกันกับนาฬิกาแสงที่อยู่นิ่งหรือไม่

ในการตอบคำถามข้อนี้ ให้พิจารณาจากมุมมองของเราว่าโฟตอนของนาฬิกาแสงที่เคลื่อนที่จะมีแนวการเคลื่อนที่อย่างไรจึงจะเดินได้หนึ่งติ๊ก โฟตอนเริ่มออกจากฐาน (กระจกแผ่นล่าง) ของนาฬิกาเรือนที่เคลื่อนที่ ดังรูป 1.2 และเคลื่อนไปยังกระจกแผ่นบน เนื่องจากตามมุมมองของเรานาฬิกาเคลื่อนที่ โฟตอนจึงต้องเคลื่อนที่เป็นมุมดังที่แสดงในรูป 1.3 ถ้าโฟตอนไม่ได้เคลื่อนที่ตามแนวที่แสดงนี้ มันจะไม่ถูกสะท้อนด้วยกระจกเงาแผ่นบนและหลุดพ้นแบบไปแล้วไปลับออกไปในอวกาศ เนื่องจากนาฬิกาแสงที่เคลื่อนที่มีความชอบธรรมที่จะอ้างว่าตัวเองอยู่นิ่งและสิ่งอื่นเคลื่อนที่ เราทราบว่าโฟตอนจะกระทบกระจกบน ดังนั้น ทางเดินของโฟตอนที่แสดงไว้จึงถูกต้อง โฟตอนสะท้อนจากกระจกบนแล้วเดินทางตามแนวทะแยงมาชนกระจกล่าง นาฬิกาแสงที่เคลื่อนที่จะติ๊กครั้งหนึ่ง สาระที่ง่ายแต่สำคัญคือ แนวเฉียงๆ ที่เราเห็นโฟตอนเคลื่อนที่ยาวกว่าแนวขึ้นลงตรงๆ ที่โฟตอนในนาฬิกาแสงที่อยู่นิ่งเดินทาง เพิ่มเติมจากเดินทางขึ้นลงแล้ว โฟตอนในนาฬิกาแสงที่เคลื่อนที่ยังจะต้องเคลื่อนที่ไปทางขวาอีกด้วยตามมุมมองของเรา ยิ่งกว่านั้นความคงตัวของความเร็วแสงบอกกับเราว่า โฟตอนของนาฬิกาที่เคลื่อนที่มีอัตราเร็วเท่ากับโฟตอนของนาฬิกาที่อยู่นิ่ง แต่เนื่องจากจะต้องเคลื่อนที่ไกลกว่าจึงจะได้หนึ่งติ๊ก นาฬิกาที่เคลื่อนที่จึงติ๊กไม่บ่อยเท่านาฬิกาที่อยู่นิ่ง การถกแถลงอย่างง่ายๆ นี้ชี้ให้เห็นว่า จากมุมมองของเรา นาฬิกาแสงที่เคลื่อนที่ติ๊กช้ากว่านาฬิกาที่อยู่นิ่ง และเนื่องจากเราตกลงก่อนแล้วว่าจำนวนติ๊กหมายถึงเวลาที่ผ่านไปแล้วเท่าไร จึงเห็นว่านาฬิกาที่ผ่านไปช้าลงสำหรับนาฬิกาที่เคลื่อนที่



รูป 1.2 นาฬิกาแสงที่เคลื่อนที่และที่อยู่นิ่ง



รูป 1.3 แสดงทางเดินของโฟตอนด้วยเส้นทะแยงในส่วนบนของรูป 1.2

ท่านอาจสงสัยว่าข้อสรุปนี้คงสะท้อนความจริงที่เกิดกับนาฬิกาแสงโดยเฉพาะ แต่คงจะไม่เป็นจริงกับนาฬิกาตั้งพื้น (นาฬิการุ่นคุณปู่) หรือโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับนาฬิกาข้อมือ (ฝังเพชร) ยี่ห้อโรเล็กซ์ที่ท่านใส่ เวลาที่วัดด้วยนาฬิกาที่ใช้และคุ้นเคยกันจะช้าลงด้วยหรือเปล่า ลองเอานาฬิกาข้อมือโรเล็กซ์ติดไปกับด้านบนของนาฬิกาแสงและทดลองแบบเดิมซ้ำอีกครั้งดังที่พิจารณาแล้ว นาฬิกาแสงที่อยู่นิ่งและนาฬิกาข้อมือโรเล็กซ์ที่ติดอยู่ด้วยจะ

วัดช่วงเวลาได้เท่ากัน โดยนาฬิกาแสงจะติ๊กหนึ่งพันล้านครั้งทุกๆ วินาทีบนนาฬิกาข้อมือโรเล็กซ์ แต่จะเป็นอย่างไรกับนาฬิกาแสงที่เคลื่อนที่กับนาฬิกาข้อมือโรเล็กซ์ที่ติดไปด้วย อัตราการติ๊กของนาฬิกาข้อมือโรเล็กซ์ที่เคลื่อนที่จะช้าลงพอดีกับนาฬิกาแสงที่มันติดอยู่ด้วยหรือไม่ เพื่อที่จะได้ไม่มีข้อกังขา สมมุติว่าระบบนาฬิกาแสง + นาฬิกาข้อมือโรเล็กซ์เคลื่อนที่เพราะถูกตรึงอยู่กับพื้นของตู้รถไฟที่ปราศจากหน้าต่าง รถไฟเคลื่อนที่ไปบนรางตรงอย่างเรียบ ไม่เร่ง ไม่กระตุก ด้วยอัตราเร็วคงที่ ตามหลักของสัมพัทธภาพ ไม่มีทางใดที่ผู้อยู่บนรถไฟจะตรวจพบอิทธิพลของการเคลื่อนที่ของรถไฟ แต่ถ้านาฬิกาแสงและนาฬิกาข้อมือโรเล็กซ์จะเกิดเดินไม่ตรงกัน ก็จะเป็นที่สังเกตได้ว่านี่คืออิทธิพลของการเคลื่อนที่ของรถไฟ แต่นาฬิกาแสงที่เคลื่อนที่และนาฬิกาโรเล็กซ์ที่ติดอยู่ด้วยจะ *ต้องวัดช่วงเวลาได้เท่ากัน* นาฬิกาข้อมือโรเล็กซ์ฝังเพชรอย่างดีที่สุดจะต้อง*ช้าลง*เท่ากับนาฬิกาแสงพอดี ไม่ว่านาฬิกาจะเป็นยี่ห้ออะไร สร้างอย่างไร นาฬิกาที่เคลื่อนที่สัมพัทธ์กันจะบันทึกเวลาที่ผ่านไปด้วยอัตราต่างกัน

การถกแถลงด้วยนาฬิกาแสงแสดงให้เห็นชัดว่า ผลต่างอย่างเที่ยงของเวลาระหว่างนาฬิกาที่อยู่กับที่กับนาฬิกาที่เคลื่อนที่ขึ้นอยู่กับว่าโฟตอนของนาฬิกาที่เคลื่อนที่ต้องเดินทางไกลเท่าไรจึงจะครบหนึ่งรอบ และเรื่องนี้ขึ้นกับนาฬิกาที่เคลื่อนที่เคลื่อนที่เร็วเท่าไรอีกต่อหนึ่ง ตามทัศนะของผู้สังเกตที่อยู่นิ่ง ยิ่งนาฬิกาเคลื่อนที่เร็วเท่าไร โฟตอนจะยิ่งต้องเคลื่อนที่ไปทางขวาไกลขึ้น เราสรุปว่าเมื่อเปรียบเทียบกับนาฬิกาที่อยู่นิ่ง อัตราการติ๊กของนาฬิกาที่เคลื่อนที่ยิ่งช้าลงๆ ในขณะที่นาฬิกาเคลื่อนที่เร็วขึ้นๆ

เพื่อให้กะขนาดได้ ให้สังเกตว่าโฟตอนเคลื่อนที่ขึ้นลงหนึ่งรอบในหนึ่งในพันล้านวินาที นาฬิกาที่สามารถเคลื่อนที่ได้เป็นระยะทางมากพอสมควรในช่วงเวลาของหนึ่งติ๊กจะต้องเคลื่อนที่เร็วมากทีเดียว นั่นคือเป็นเศษส่วนที่มีขนาดพอสมควรของอัตราเร็วของแสง ถ้านาฬิกาเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วที่คุ้นเคยกันทั่วๆ ไป เช่น 10 ไมล์ต่อชั่วโมง ระยะทางที่จะต้องเคลื่อนที่ไปทางขวาในช่วงหนึ่งติ๊กนั้นน้อยแสนน้อย คือประมาณ 15 ส่วนในหนึ่งพันล้านส่วนของฟุต ระยะที่โฟตอนต้องเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นนั้นน้อยมาก จึงมีผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่ออัตราการติ๊กของนาฬิกาที่เคลื่อนที่ และโดยหลักของสัมพัทธภาพอีกครั้งหนึ่ง ข้อสรุปนี้เป็นความจริงสำหรับนาฬิกาทุกเรือน นั่นคือเป็นความจริงสำหรับตัวเวลาเองด้วย นี่คือเหตุผลที่ว่าเพราะเหตุไรมนุษย์อย่างเราๆ ซึ่งเคลื่อนที่สัมพัทธ์กันในอัตราที่ช้า โดยทั่วไปจึงไม่รู้สึกถึงความผิดเพี้ยนของเวลาที่ผ่านไป ผลนี้แม้ว่าจะมีอยู่จริงๆ แต่ก็น้อยมากเสียเหลือเกิน ถ้าเราคว้านาฬิกาที่เคลื่อนที่แล้วพาไปด้วยอัตราเร็วสามในสี่ส่วนของอัตราเร็วของแสง สมการของทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษจะแสดงว่าผู้สังเกตที่อยู่นิ่งจะเห็นนาฬิกาที่เคลื่อนที่นี้ติ๊กด้วยอัตราประมาณสองในสามของนาฬิกาของเขา นับว่าเป็นผลที่มีค่ามากทีเดียว

1.7 ชีวิตของคนวิ่ง

เราได้ทราบแล้วว่าความคงตัวในอัตราเร็วของแสงมีความหมายลึกๆ ว่านาฬิกาที่เคลื่อนที่ติ๊กช้ากว่านาฬิกาที่อยู่นิ่ง และโดยหลักของสัมพัทธภาพ สิ่งนี้จะต้องเป็นจริงไม่ใช่เฉพาะกับนาฬิกาแสง แต่เป็นจริงกับนาฬิกาทุกชนิดทุกเรือน และเป็นจริงกับตัวเวลาเองด้วย เวลาผ่านไปค่อนข้างช้าสำหรับผู้ที่เคลื่อนที่เปรียบเทียบกับผู้ที่อยู่นิ่ง ถ้าเหตุผลง่ายๆ ที่นำเรามาสู่ข้อสรุปนี้ถูกต้อง เราจะสามารถมีชีวิตยืนนานกว่าหรือไม่หากเคลื่อนที่แทนที่จะอยู่กับที่ เพราะถ้าเวลาผ่านไปช้ากว่าสำหรับคนที่เคลื่อนที่เปรียบเทียบกับคนที่อยู่นิ่งแล้ว ความแตกต่างนี้ก็ไม่ควรจะเป็นจริงจำกัดอยู่เฉพาะเวลาที่วัดด้วยนาฬิกา แต่ควรจะเป็นจริงกับเวลาที่วัดด้วยการเต้นของหัวใจและการเสื่อมโทรมของส่วนต่างๆ ของร่างกายด้วย เรื่องนี้เป็นกรณีที่ได้รับการยืนยันโดยตรง ไม่ใช่ด้วยอายุของมนุษย์ แต่เป็นอายุของอนุภาคบางชนิดในโลกของอนุภาค คือ มิวออน (muon) แต่ยังมีอุปสรรคอยู่ประการหนึ่ง

ที่ป้องกันไม่ให้เราได้ดื่ม "น้ำอมฤต" แห่งความหนุ่มสาวตลอดกาลที่ค้นพบได้

เมื่ออยู่นิ่งๆ ในห้องปฏิบัติการ มิวออนดำรงอยู่ได้ก่อนสลายโดยกระบวนการคล้ายกับการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี ช่วงชีวิตของมิวออนโดยเฉลี่ยนานประมาณสองในล้านส่วนของวินาที การสลายตัวนี้เป็นข้อเท็จจริงทางการทดลองที่มีหลักฐานจำนวนมากสนับสนุน คล้ายกับว่ามิวออนดำรงชีวิตอยู่โดยมีปืนจ่ออยู่ที่ขมับ พอมีอายุครบสองในล้านส่วนของวินาทีก็จะเหนี่ยวไกโป้งระเบิดเป็นอิเล็กตรอนและนิวตริโน แต่ถ้ามิวออนไม่ได้อยู่นิ่งๆ ในห้องปฏิบัติการ แต่เคลื่อนที่ในเครื่องมือที่เรียกว่าเครื่องเร่งอนุภาคจนมีความเร็วเกือบเท่าอัตราเร็วของแสง ชีวิตโดยเฉลี่ยที่วัดได้ของมิวออนที่วิ่งเร็วจี๋จะยืนยาวขึ้นอย่างมาก เรื่องนี้เกิดขึ้นจริงๆ ที่อัตราเร็ว 667 ล้านไมล์ต่อชั่วโมง (ประมาณ 99.5% ของอัตราเร็วของแสง) ชีวิตของมิวออนจะยาวนานขึ้นประมาณ 10 เท่า คำอธิบายเรื่องนี้ตามทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษคือ "นาฬิกาข้อมือ" ที่มิวออนใส่เดินช้ากว่านาฬิกาในห้องปฏิบัติการมาก ดังนั้นหลังจากที่นาฬิกาในห้องปฏิบัติการบอกว่ามิวออนควรจะเหนี่ยวไกระเบิดตัวเองให้เป็นจุล นาฬิกาข้อมือของมิวออนที่เคลื่อนที่เร็วจี๋บอกว่าชะตากรรมยังมาไม่ถึง เรื่องการสลายตัวของมิวออนเป็นหลักฐานตรงและน่าตื่นเต้นของผลกระทบของการเคลื่อนที่ที่มีต่อช่วงเวลา หากมนุษย์สามารถเคลื่อนที่ได้เร็วเท่ากับมิวออน ชีวิตของมนุษย์จะยาวนานขึ้นเป็นจำนวนเท่าเดียวกันกับมิวออน คือแทนที่จะมีอายุแค่ 70 ปี ก็จะมีอายุยืนถึง 700 ปี

ตอนนี้ก็มาถึง อุปสรรค แม้ว่าผู้สังเกตในห้องปฏิบัติการจะเห็นมิวออนที่เคลื่อนที่เร็วมีอายุยืนกว่าพรรคพวกที่อยู่นิ่ง ที่เป็นดังนี้เพราะว่าเวลา *ผ่านไปอย่างเชื่องช้า* สำหรับมิวออนที่เคลื่อนที่ เวลาที่ช้าลงไม่ได้เกิดเฉพาะกับนาฬิกาข้อมือที่มิวออนใส่เท่านั้น แต่เกิดกับกิจกรรมทั้งหลายที่มิวออนทำด้วย เป็นต้นว่าถ้ามิวออนที่อยู่นิ่งอ่านหนังสือได้ 100 เล่มในขณะที่มีชีวิตอยู่สั้นๆ มิวออนลูกพี่ลูกน้องที่เคลื่อนที่เร็วก็จะสามารถอ่านหนังสือได้ชุด 100 เล่มเดียวกันด้วย เพราะถึงแม้จะปรากฏว่ามีชีวิตยืนกว่ามิวออนที่อยู่นิ่ง ความเร็วในการอ่าน รวมถึงทุกสิ่งทุกอย่างในชีวิต ก็จะเชื่องช้าตามไปด้วย ตามทัศนะนี้ มิวออนที่เคลื่อนที่จะมีอายุยืนกว่ามิวออนที่อยู่นิ่ง แต่ "ปริมาณของชีวิต" ที่มิวออนทั้งสองประสบก็จะเท่ากันอย่างไม่มีผิดเพี้ยน ข้อสรุปเดียวกันนี้เป็นจริงสำหรับมนุษย์ที่เคลื่อนที่อย่างรวดเร็วและมีอายุยืนเป็นหลายร้อยปี ในทัศนะของคนเหล่านั้น ชีวิตก็ดำเนินไปโดยปรกติ แต่ในทัศนะของเรา คนเหล่านั้นดำเนินชีวิตอย่างเชื่องช้าเหลือแสน กว่าจะปฏิบัติภารกิจอย่างหนึ่งสำเร็จคิดเป็นเวลาของเรานานเหลือเกิน

1.8 ใครเคลื่อนที่กันแน่

สัมพัทธภาพของการเคลื่อนที่เป็นทั้งกุญแจสำคัญในอันที่จะไขความกระจ่างไปสู่ทฤษฎีของไอน์สไตน์ และมีศักยภาพเป็นต้นกำเนิดของความสับสน ท่านคงจะได้สังเกตแล้วว่า การกลับทัศนะจะสลับบทบาทของมิวออน 'ที่เคลื่อนที่' ซึ่งมีนาฬิกาที่เราอธิบายว่าเดินช้ากับมิวออนและนาฬิกาที่อยู่นิ่ง เช่นเดียวกับที่สมศักดิ์และสมศรีต่างมีความชอบธรรมที่จะประกาศว่าตนเองอยู่กับที่ แต่อีกฝ่ายหนึ่งต่างหากที่เคลื่อนที่ มิวออนที่เราเคยบอกว่าเคลื่อนที่ก็มีความชอบธรรมเต็มที่ที่จะประกาศว่า ในทัศนะของตน ตนอยู่กับที่ มิวออนที่ 'อยู่นิ่ง' ต่างหากที่เป็นฝ่ายเคลื่อนที่ในทิศตรงข้าม การถกแถลงที่ใช้ในตอนนั้นก็นำมาใช้ใหม่ได้ดีพอๆ กันในทัศนะใหม่ และนำไปสู่ข้อสรุปที่ดูคล้ายจะตรงข้ามว่านาฬิกาข้อมือของมิวออนที่เราเคยบอกว่าอยู่นิ่งจะเดินช้าเทียบกับนาฬิกาข้อมือของมิวออนที่เราเคยบอกว่าเคลื่อนที่

เราได้เคยพบกับสถานการณ์ซึ่งต่างทัศนะกันนำไปสู่ผลที่ขัดแย้งกันโดยสิ้นเชิง คือกรณีพิธีลงนามในข้อตกลงโดยอาศัยแสงจากหลอดไฟฟ้าเป็นสัญญาณ ในกรณีนั้นเราถูกบังคับโดยการใช้เหตุผลขั้นมูลฐานของทฤษฎี

สัมพัทธภาพพิเศษให้ต้องเลิกเชื่อความคิดเห็นที่ยึดติดในจิตสำนึกว่าทุกคนเห็นสอดคล้องกันว่าเหตุการณ์ใดเกิดขึ้นพร้อมกัน ไม่ว่าแต่ละคนจะมีสถานะการเคลื่อนที่เป็นอย่างไร ความไม่สอดคล้องกันในตอนนี้ดูแล้วยิ่งเลวร้ายกว่า จะเป็นไปได้อย่างไรกันที่ผู้สังเกตสองคนต่างฝ่ายต่างอ้างว่านาฬิกาข้อมือของอีกฝ่ายหนึ่งเดินช้ากว่า ยิ่งตลกขึ้นไปใหญ่ที่ทัศนะของมิวออนแต่ละตัวต่างก็ถูกต้องแต่ตรงกันข้าม คล้ายกับจะนำเราไปสู่ข้อสรุปที่แต่ละฝ่ายจะอ้างอย่างหนักแน่นและน่าเศร้าว่า ตนจะเป็นฝ่ายตายก่อน เรากำลังรับทราบว่าโลกมีสิ่งที่แปลกและคาดไม่ถึง แต่เราหวังว่าเราไม่ได้อยู่ในอาณาจักรแห่งความเหลือเชื่อเชิงตรรกศาสตร์ กำลังเกิดอะไรขึ้นกันแน่

เช่นเดียวกับเรื่องที่ดูเหมือนขัดแย้งกันทั้งหลายในทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ เมื่อผ่านการพิจารณาตรวจสอบอย่างละเอียด เรื่องกลืนไม่เข้าคายไม่ออกเชิงตรรกศาสตร์ก็คลี่คลายลงเองได้ด้วยดีและเผยให้มีความเข้าใจใหม่ในการทำงานของเอกภพ เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้สิ่งที่ยิ่งแปลกมาเปรียบเทียบกับมนุษย์ เราจะเปลี่ยนจากมิวออนมาเป็นสมศักดิ์กับสมศรี ซึ่งนอกจากจะมีแสงกระพริบแล้วตอนนี้ยังมีนาฬิกาดิจิตอลติดอยู่ที่ชุดอวกาศด้วย ตามทัศนะของสมศักดิ์ เขาเป็นฝ่ายอยู่นิ่งในขณะที่สมศรีซึ่งมีไฟกระพริบสีเขียวและนาฬิกาดิจิตอลขนาดใหญ่ไผล่มาแต่ไกล ผ่านเขาและลับตาไปในอวกาศอีกด้านหนึ่ง สมศักดิ์สังเกตว่านาฬิกาของสมศรีเดินช้าเปรียบเทียบกับนาฬิกาของเขา (อัตราที่ช้าลงขึ้นอยู่กับว่าเขาผ่านกันเร็วมากเท่าไร) ถ้าเขามีความละเอียดลออขึ้นอีกเล็กน้อย เขาคงจะสังเกตได้ด้วยว่า นอกจากเวลาที่ผ่านไปบนนาฬิกาของสมศรีแล้ว ทุกสิ่งทุกอย่างเกี่ยวกับสมศรี - ท่าทางที่โบกมือขณะผ่านกัน การยิ้มและอื่นๆ - เกิดขึ้นเหมือนดูภาพยนตร์ช้า ตามทัศนะของสมศรี ทุกอย่างเกี่ยวกับสมศักดิ์และนาฬิกาของสมศักดิ์ก็เป็นดังข้อสังเกตข้างบนด้วย

แม้ว่าสองทัศนะนี้ดูจะขัดกัน ลองพยายามหาการทดลองที่จะเผยความเหลือเชื่อเชิงตรรกศาสตร์ การทดลองง่ายที่สุดคือจัดการให้สมศักดิ์และสมศรีตั้งนาฬิกาให้ตรงกัน ให้อ่าน 12.00 น. ขณะที่ผ่านกันพอดี เมื่อเคลื่อนที่ออกห่างจากกัน ต่างฝ่ายต่างอ้างว่านาฬิกาของอีกฝ่ายหนึ่งเดินช้า เพื่อเผชิญกับความขัดแย้งซึ่งๆ หน้า ต้องให้สมศักดิ์และสมศรีกลับมาพบกันอีกทีและเปรียบเทียบเวลาที่ผ่านไปกันโดยตรง แต่จะทำอย่างไรล่ะ สมศักดิ์มีเครื่องไอพ่นติดอยู่ด้านหลังซึ่ง ตามทัศนะของเขา ถ้าใช้ก็สามารถไล่ตามสมศรีทัน แต่ถ้าเขาใช้ สมมาตรระหว่างทัศนะของคนทั้งสองซึ่งเป็นต้นเหตุแห่งความขัดแย้งจะถูกทำลาย เพราะคราวนี้สมศักดิ์เคลื่อนที่ด้วย *ความเร่ง* ไม่ใช่การเคลื่อนที่โดยเสรีไร้แรงกระทำอีกต่อไป ถ้าเขาไล่กันทันโดยวิธีนี้เวลาบนนาฬิกาของสมศักดิ์จะผ่านไปน้อยกว่า เพราะคราวนี้ตัวเขาเองรู้สึกตัวดีว่าเขาเคลื่อนที่ ทัศนะของสมศักดิ์และสมศรีเปรียบเทียบกันต่อไปไม่ได้อีกแล้ว เพราะไม่ได้มีฐานะทัดเทียมกัน โดยการเดินเครื่องไอพ่นสมศักดิ์ได้สละคำอ้างว่าเขาอยู่นิ่งไปเสียแล้ว

ถ้าสมศักดิ์ไล่ตามสมศรีในลักษณะนี้ ความแตกต่างระหว่างเวลาของนาฬิกาทั้งสองเรือนจะขึ้นอยู่กับความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างคนทั้งสอง และรายละเอียดว่าสมศักดิ์ใช้เครื่องไอพ่นของเขาอย่างไร ตามที่คุ้นเคยกันดีแล้ว ถ้าอัตราเร็วที่เกี่ยวข้องมีค่าน้อย ความแตกต่างของเวลาจะน้อยมาก แต่ถ้าอัตราเร็วคิดเป็นสัดส่วนของความเร็วของแสงแล้วมีค่าพอสมควร ความแตกต่างอาจเป็นนาที วัน ปี ศตวรรษ หรือมากกว่านั้น เพื่อเป็นตัวอย่างที่ชัดเจน สมมุติว่าอัตราเร็วสัมพัทธ์ของสมศักดิ์และสมศรีเป็น 99.5 เปอร์เซ็นต์ของอัตราเร็วแสงขณะที่เขาผ่านกันไปคนละทาง สมมุติต่อไปว่าสมศักดิ์รอไป 3 ปีตามนาฬิกาของเขาก่อนที่จุดเครื่องไอพ่นให้ทำงานครู่หนึ่ง ซึ่งส่งให้เขาไล่ตามสมศรีด้วยอัตราเร็วเดียวกับตอนที่สวนทางกัน คือ 99.5 เปอร์เซ็นต์ของอัตราเร็วของแสง เมื่อเขาทันสมศรีเวลาบนนาฬิกาของสมศักดิ์จะแสดงเวลาที่ผ่านไปเป็น 6 ปี เพราะจะต้องใช้เวลาถึง 3 ปีจึงจะไล่ตามทัน แต่คณิตศาสตร์ของทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษแสดงว่าเวลาบนนาฬิกาสมศรีผ่านไปแล้ว 60 ปี นี่ไม่ใช่ตาฝาด สมศรีจะต้องทบทวนความจำเก่าๆ ย้อนไปถึง 60 ปีจึงจะระลึกได้ว่าเคยสวนทางกับสมศักดิ์ใน

อวกาศ สำหรับสมศักดิ์แล้วการพบครั้งแรกเพิ่งผ่านไปเพียง 6 ปีเท่านั้นเอง ในความหมายหนึ่งการเคลื่อนที่ของสมศักดิ์ทำให้เขาเป็นนักท่องเวลาที่แท้จริง ในอีกความหมายหนึ่งเขาเดินทางเข้าไปในอนาคตของสมศรี

การนำนาฬิกาทั้งสองเรือนมาเปรียบเทียบกันโดยตรงอาจดูคล้ายกับเป็นวิธีส่งกำลังบำรุง ซึ่งเป็นความน่ารำคาญอย่างหนึ่งเท่านั้น แต่จริงๆ เป็นหัวใจของเรื่องทีเดียว เราอาจคิดหากลเม็ดได้หลายอย่างด้วยกันเพื่อหลบเลี่ยงจุดอ่อนในการคลี่คลายข้อขัดแย้ง แต่ทุกวิธีก็ไม่ประสบความสำเร็จ ตัวอย่างเช่น แทนที่จะเอานาฬิกามาเปรียบเทียบกันโดยตรง จะเป็นอย่างไรถ้าสมศักดิ์กับสมศรีเปรียบเทียบนาฬิกากันโดยสื่อสารกันด้วยโทรศัพท์มือถือ ถ้าการสื่อสารโดยวิธีนี้พูดปุ๊บได้ยินปั๊บ เราก็ต้องเผชิญกับความไม่คงเส้นคงวาที่ยากจะผ่านข้ามไปได้ เหตุผลตามทัศนะของสมศรีคือ นาฬิกาของสมศักดิ์เดินช้า ดังนั้น เขาจะต้องบอกเวลาที่ผ่านไปน้อย เหตุผลตามทัศนะของสมศักดิ์คือ นาฬิกาของสมศรีเดินช้า ดังนั้น เธอจะต้องบอกเวลาที่ผ่านไปน้อย ทั้งสองคนจะถูกด้วยกันคงเป็นไปไม่ได้ และเราก็ประสบปัญหาแบบเดิม จุดสำคัญก็คือโทรศัพท์มือถือก็เหมือนกับเครื่องมือสื่อสารทั้งหลายที่ไม่ได้ส่งสัญญาณปุ๊บก็ถึงปั๊บทันที แต่สัญญาณต้องใช้เวลาในการเดินทาง โทรศัพท์มือถือส่งสัญญาณเป็นคลื่นวิทยุซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเช่นเดียวกับคลื่นแสง สัญญาณที่ส่งถึงกันจึงเดินทางด้วยอัตราเร็วของแสง หมายความว่ากว่าสัญญาณจะไปถึงผู้รับก็สิ้นเวลาจำนวนหนึ่ง เวลาที่สิ้นไปนี้ทำให้ทัศนะของแต่ละคนไปด้วยกันได้อย่างพอเหมาะพอดี

เราจะดูเรื่องนี้จากทัศนะของสมศักดิ์ก่อน สมมุติว่าทุกๆ ชั่วโมงเมื่อเข็มสั้นชี้ตรงชั่วโมงพอดี สมศักดิ์ตะโกนใส่โทรศัพท์มือถือคล้ายกับทหารตระเวนขานยามในภาพยนตร์ "เวลาเที่ยงคืน ทุกสิ่งเป็นปรกติ" "เวลาหนึ่งนาฬิกา ทุกสิ่งเป็นปรกติ" เช่นนี้ต่อๆ ไป ตามทัศนะของเขา นาฬิกาของสมศรีเดินช้า สมศรีคงจะได้รับข่าวก่อนที่เข็มสั้นของนาฬิกาของเธอจะชี้ที่ชั่วโมง สมศักดิ์สรุปโดยวิธีนี้ว่าสมศรีคงจะต้องยอมรับว่านาฬิกาของเธอเดินช้า แต่แล้วเขาฉุกคิดได้ว่า "เนื่องจากสมศรีถอยห่างไปจากเรา สัญญาณที่เราส่งไปโดยโทรศัพท์มือถือจะต้องเดินทางไกลขึ้นจึงจะไปถึงสมศรี บางทีเวลาเดินทางที่เพิ่มขึ้นนี้อาจชดเชยเวลาที่นาฬิกาของสมศรีเดินช้าได้พอดี" การที่สมศักดิ์ตระหนักว่ามีผลที่แข่งขันกัน - การเดินช้าของนาฬิกาของสมศรีสู้กับเวลาการเดินทางของสัญญาณจากเขา - เป็นแรงบันดาลใจให้เขาต้องคิดและหาผลรวมเชิงปริมาณว่าเวลาทั้งสองชดเชยกันแล้วเป็นอย่างไร ผลลัพธ์ที่เขาพบ คือ เวลาเดินทางของสัญญาณ *มีผลชดเชยมากกว่า* การเดินช้าของนาฬิกาของสมศรี เขาได้ข้อสรุปที่น่าแปลกใจว่า สมศรีจะได้รับสัญญาณบอกชั่วโมงของนาฬิกาของเขา *หลัง* จากที่นาฬิกาของเธอเลยชั่วโมงนั้นไปแล้วจริงๆ แล้ว เนื่องจากสมศักดิ์ทราบจากสมัยเมื่อเป็นนักเรียนร่วมชั้นกันว่าสมศรีเก่งในวิชาฟิสิกส์ เขาจึงทราบว่าเธอจะเอาเวลาการเดินทางของสัญญาณมาคิดด้วยเมื่อเธอจะลงความเห็นเกี่ยวกับนาฬิกาของเขาตามสัญญาณที่ส่งมาทางโทรศัพท์มือถือ การคำนวณเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยแสดงว่า แม้จะนำเวลาการเดินทางของสัญญาณมาคิดด้วย การวิเคราะห์สัญญาณของสมศักดิ์โดยสมศรีจะนำเธอไปสู่ข้อสรุปว่า นาฬิกาของสมศักดิ์เดินช้ากว่านาฬิกาของเธอ

เหตุผลเดียวกันนี้นำมาประยุกต์ใช้ได้ทุกอย่างเมื่อเอาทัศนะของสมศรีเป็นหลัก โดยเธอเป็นคนส่งสัญญาณบอกชั่วโมงไปให้สมศักดิ์ทราบ ตามทัศนะของสมศรี การเดินช้าของนาฬิกาของสมศักดิ์ทำให้เธอคิดว่าสมศักดิ์คงจะได้รับสัญญาณบอกชั่วโมงจากเธอ *ก่อน* ที่สมศักดิ์จะขานชั่วโมงของเขาเอง แต่เมื่อเธอนึกถึงระยะทางที่สัญญาณของเธอจะต้องเคลื่อนที่ไกลขึ้นจึงจะไปถึงสมศักดิ์ที่ถอยห่างออกไปในความมืด สมศรีตระหนักว่าสมศักดิ์จะได้รับสัญญาณ *หลัง* จากที่เขาส่งสัญญาณบอกชั่วโมงของเขาไปแล้ว และเช่นเดียวกันสมศรีตระหนักว่าถ้าสมศักดิ์คิดถึงเวลาการเดินทางของสัญญาณ สมศักดิ์คงจะสรุปจากการขานบอกชั่วโมงของเธอว่านาฬิกาของเธอเดินช้ากว่านาฬิกาของเขา

ดราบใดที่สมศักดิ์และสมศรีไม่ได้เคลื่อนที่ด้วยความเร่ง ทัศนะของคนทั้งสองยังมีฐานะทัดเทียมเสมอกัน แม้ว่าจะดูเหมือนว่าขัดแย้งกัน แต่คนทั้งสองต่างตระหนักว่าการที่ต่างฝ่ายต่างคิดว่านาฬิกาของอีกฝ่ายหนึ่งเดินช้า เป็นความคงเส้นคงวาที่สมเหตุสมผล

1.9 ผลของการเคลื่อนที่ต่ออวกาศ

การพิจารณาที่ผ่านมาเผยให้เห็นว่า ผู้สังเกตเห็นนาฬิกาที่เคลื่อนที่เดินช้ากว่านาฬิกาของตน นั่นคือ การเคลื่อนที่มีผลกระทบกับเวลา จากนี้อีกไม่กี่ก้าวก็จะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่มีผลกระทบต่ออวกาศอย่างน่าทึ่งพอๆ กับที่มีผลกระทบต่อเวลา ย้อนกลับไปหาไมเคิลและราล์ฟอีกครั้งหนึ่ง ขณะที่รถจอดอยู่ในห้องแสดง ไมเคิลวัดความยาวของรถอย่างละเอียดลออด้วยแถบวัดระยะ ขณะที่ไมเคิลขับรถผ่านไปบนถนนที่ใช้ทดลองขับ ราล์ฟไม่อาจใช้วิธีเดียวกันวัดความยาวของรถได้ ดังนั้น เขาจึงต้องใช้วิธีอ้อมวิธีหนึ่งอย่างที่ได้เคยชี้แจงแล้ว คือราล์ฟใช้นาฬิกาจับเวลากดให้เดินเมื่อกันชนหน้าของรถมาถึงเขาพอดี และกดให้หยุดเมื่อกันชนหลังผ่าน โดยการคูณเวลาที่ผ่านไปกับอัตราเร็วของรถ ราล์ฟสามารถคำนวณหาความยาวของรถได้

โดยใช้ความรู้ใหม่ที่เราได้เกี่ยวกับเวลา เราตระหนักว่า **ในทัศนะของไมเคิล** เขาอยู่นิ่งในขณะที่ราล์ฟเคลื่อนที่ ดังนั้น ไมเคิลจึงเห็นนาฬิกาของราล์ฟเดินช้า ผลก็คือว่า ไมเคิลตระหนักดีว่าการวัดความยาวของรถทางอ้อมจะให้ผลสั้นกว่าที่เขาวัดในห้องแสดง เนื่องจากในการคำนวณของราล์ฟ (ความยาวเท่ากับอัตราเร็วคูณด้วยเวลาที่รถผ่าน) เขาใช้เวลาที่ผ่านไปจากนาฬิกาที่เดินช้า ถ้านาฬิกาเดินช้าเวลาที่ผ่านไปจะน้อย และผลการคำนวณจะให้ความยาวที่สั้นกว่า

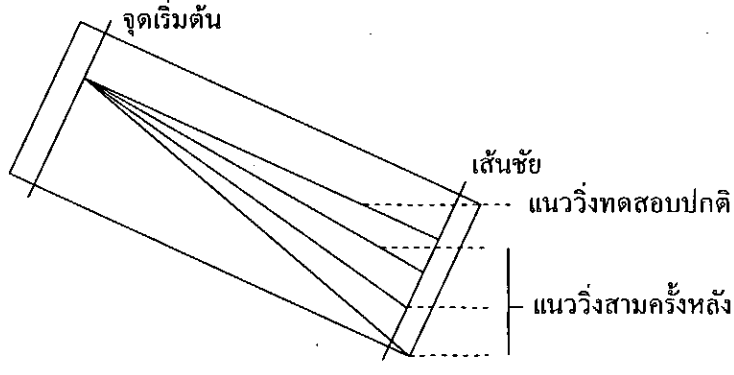
ดังนั้น ราล์ฟจะสังเกตว่าความยาวของรถขณะที่เคลื่อนที่น้อยกว่าความยาวของรถที่อยู่กับที่ นี่คือตัวอย่างของปรากฏการณ์ทั่วไปที่ผู้สังเกตเห็นวัตถุที่เคลื่อนที่ว่าสั้นลงในทิศทางของการเคลื่อนที่ ตัวอย่างเช่น สมการของทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษแสดงว่าถ้าวัตถุเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว 98 เปอร์เซ็นต์ของอัตราเร็วของแสง ผู้สังเกตที่อยู่นิ่งจะเห็นว่าวัตถุนั้นสั้นกว่าเมื่ออยู่นิ่ง 80 เปอร์เซ็นต์ ปรากฏการณ์นี้เป็นคล้ายในรูป 1.4

รูป 1.4 วัตถุที่เคลื่อนที่สั้นลงในทิศทางการเคลื่อนที่

1.10 การเคลื่อนที่ผ่านอวกาศเวลา

ความคงตัวของอัตราเร็วของแสงมีผลให้ต้องเปลี่ยนทัศนะที่เคยยึดถือเป็นประเพณีมาแต่ดั้งเดิมว่าอวกาศและเวลาเป็นสิ่งสัมบูรณ์ ไม่ขึ้นกับผู้สังเกต มาเป็นความเห็นใหม่ว่า อวกาศและเวลาขึ้นอยู่อย่างแนบแน่นกับการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างผู้สังเกตกับสิ่งที่ถูกสังเกต ที่จริงเราจบตรงนี้ก็คงได้โดยตระหนักว่าวัตถุที่เคลื่อนที่มีการเปลี่ยนแปลงที่เชื่องช้าและหน้าหลังสั้น แต่ทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษทำให้มีทัศนะที่เป็นเอกภาพที่ลึกซึ้งสำหรับรวมปรากฏการณ์เหล่านี้เข้าด้วยกัน

ในอันที่จะเข้าใจประสบการณ์นี้ ลองจินตนาการถึงการขับรถยนต์ที่ทำไม่ได้จริงในเชิงปฏิบัติ สมมุติว่าเราสามารถเร่งให้รถมีอัตราเร็วเกียร์สูง 100 ไมล์ต่อชั่วโมงได้อย่างรวดเร็ว และรักษาอัตราเร็วนี้ไว้ได้ ไม่มีเร็วกว่าช้ากว่าแม้แต่น้อย จนกระทั่งดับเครื่องและหยุดไปเอง และจินตนาการเพิ่มเติมอีกว่า ด้วยชื่อเสียงที่โด่งดังในฐานะเป็นนักขับรถแข่งที่ชำนิชำนาญ ไมเคิลได้รับการขอร้องให้ทดสอบรถโดยขับบนทางตรงกว้างกลางทะเลทราย เนื่องจากระยะระหว่างจุดเริ่มต้นและเส้นชัยเป็น 10 ไมล์ รถควรจะวิ่งตลอดระยะทางนี้ได้ในเวลาหนึ่งในสิบส่วนของชั่วโมง หรือ 6 นาที ราล์ฟซึ่งทำหน้าที่เป็นวิศวกรเครื่องยนต์สำหรับการทดสอบครั้งนี้ตรวจบันทึกข้อมูลจากการทดสอบหลายสิบครั้ง และรู้สึกไม่ค่อยสบายใจที่เห็นว่า แม้เวลาที่จับได้ส่วนใหญ่จะเป็น 6 นาที แต่เวลาสองสามครั้งหลังนานกว่ามาก คือ 6.5, 7 และแม้กระทั่ง 7.5 นาที ตอนแรกเขาสงสัยว่าเครื่องยนต์มีปัญหา เนื่องจากเวลาดังกล่าวบ่งชี้ว่ารถวิ่งด้วยอัตราเร็วช้ากว่า 100 ไมล์ต่อชั่วโมงในการวิ่งสามครั้งหลัง แต่เมื่อตรวจสอบรถอย่างละเอียด เขาพบว่ารถยังอยู่ในสภาพสมบูรณ์ โดยที่ไม่สามารถอธิบายเวลาที่นานผิดสังเกตได้ เขาจึงถามไมเคิลถึงการทดสอบขับสองสามครั้งหลัง ไมเคิลมีคำอธิบายง่ายๆ เขาบอกกับราล์ฟว่าเนื่องจากทางวิ่งวิ่งจากตะวันออกไปตะวันตก พอตกบ่ายแสงตะวันแยงตาเขา ในการทดสอบสองสามครั้งหลังแสงอาทิตย์เข้าตาเขาอย่างมากจนทนไม่ได้ เขาจึงขับเฉียงไปเล็กน้อย เขาเขียนแนวที่เขาวิ่งสามครั้งหลังหยาบๆ ให้ราล์ฟดู ดังที่แสดงในรูป 1.5 คำอธิบายสำหรับเวลาที่นานกว่าก็ชัดเจนดี ระยะจากจุดเริ่มต้นถึงเส้นชัยเมื่อทางเฉียงยาวขึ้นกว่าเดิม และเมื่อยังใช้อัตราเร็วเท่าเดิม 100 ไมล์ต่อชั่วโมงจึงต้องใช้เวลามากขึ้น พูดอีกอย่างหนึ่งก็คือ เมื่อวิ่งรถไปตามทางเฉียงส่วนหนึ่งของ 100 ไมล์ต่อชั่วโมงถูกใช้ไปในการวิ่งจากใต้ไปเหนือ ทำให้อัตราเร็วสำหรับวิ่งจากตะวันออกไปตะวันตกลดไปบ้าง หมายความว่าจะต้องใช้เวลานานกว่าจึงจะถึงเส้นชัย



รูป 1.5 แนวที่ไมเคิลขับรถ

ตามที่กล่าวไว้ คำอธิบายของไมเคิลเข้าใจได้ไม่ยาก อย่างไรก็ตาม เป็นการคุ้มค่าที่จะดัดแปลงคำอธิบายเสียใหม่เพื่อเตรียมตัวสำหรับการก้าวกระโดดเชิงความคิด แนวเหนือ - ใต้และแนวตะวันออก - ตะวันตก เป็นมิติของอวกาศสองมิติที่เป็นอิสระกันที่รถสามารถวิ่งได้ (รถอาจวิ่งในแนวตั้งถ้าถนนขึ้นเขา แต่เราจะไม่พูดถึงมิตินั้น) คำอธิบายของไมเคิลแสดงว่า แม้รถจะวิ่งด้วยอัตราเร็ว 100 ไมล์ต่อชั่วโมงในการทดสอบทุกครั้ง แต่ในการวิ่งทดสอบสามครั้งหลัง อัตราเร็วถูกแบ่งระหว่างสองมิติ ดังนั้น จึงปรากฏว่าวิ่งช้ากว่า 100 ไมล์ต่อชั่วโมงในแนวตะวันออก - ตะวันตก ในการวิ่งทดสอบครั้งก่อนๆ อัตราเร็ว 100 ไมล์ต่อชั่วโมงเป็นอัตราเร็วที่วิ่งในแนวตะวันออก - ตะวันตกทั้งหมด ในการวิ่งสามครั้งหลังส่วนหนึ่งของอัตราเร็วนี้ถูกใช้ไปในการเคลื่อนที่แนวเหนือ - ใต้ด้วย

ไอน์สไตน์พบว่า ความเห็นนี้โดยเฉพาะ - การแบ่งปันของการเคลื่อนที่ระหว่างมิติต่างๆ - เป็นฐานของทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษที่น่าทึ่ง ตราบเท่าที่เราตระหนักว่าไม่เพียงแต่มิติของอวกาศเท่านั้นที่ได้รับแบ่งปันการเคลื่อนที่ของวัตถุ แต่มิติ *เวลา* ก็ได้รับแบ่งปันการเคลื่อนที่นี้ด้วย จริงๆ แล้ว ในสถานการณ์ส่วนมาก *เกือบทั้งหมด* ของการเคลื่อนที่ของวัตถุเป็นการเคลื่อนที่ผ่านเวลา ไม่ใช่ผ่านอวกาศ เราจะดูว่าที่กล่าวนี้หมายความว่าอย่างไร

การเคลื่อนที่ผ่านอวกาศเป็นสิ่งที่เราคุ้นเคยมาตั้งแต่เด็กแต่เล็ก แต่ตัวเรา เพื่อนเรา ข้าวของของเรา และสิ่งอื่นๆ *เคลื่อนที่ผ่านเวลา* ด้วย แม้ว่าเราจะไม่ได้คิดถึงสิ่งต่างๆ ในลักษณะนั้น เมื่อเราดูนาฬิกาข้อมือหรือนาฬิกาติดฝาผนัง แม้กระทั่งนั่งดูโทรทัศน์อยู่เฉยๆ เข็มชี้เวลาบนนาฬิกาเปลี่ยนไปเรื่อยๆ อย่างคงตัว เราจึง "เคลื่อนที่ไปข้างหน้าในเวลา" อย่างคงตัว เราและทุกสิ่งทุกอย่างรอบๆ ตัวเราแก่ขึ้น ขยับจากขณะหนึ่งของเวลาไปสู่อีกขณะหนึ่งอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ จริงๆ แล้ว นักคณิตศาสตร์ เฮอร์มันน์ มินเคาสกี้ (Hermann Minkowsky) และในที่สุดไอน์สไตน์ด้วย มีความเห็นว่าเวลาเป็นอีกมิติหนึ่งของเอกภพ ซึ่งเขาเรียกว่ามิติที่สี่ มิตินี้คล้ายกับมิติของอวกาศสามมิติที่เราอยู่ภายใน แม้ว่าฟังดูจะเป็นนามธรรม ข้อคิดเห็นที่ให้เวลาเป็นอีกมิติหนึ่ง จริงๆ แล้วก็เป็นรูปธรรม เมื่อเราต้องการนัดหมายกับใคร เราบอกเขาว่าเราจะพบเขาที่ไหน "ในอวกาศ" ตัวอย่างเช่น ชั้น 6 ของสำนักงานใหญ่ธนาคารไทยพาณิชย์ ตรงมุมที่ถนนพหลโยธินและถนนรัชดาภิเษกตัดกัน มีข้อมูลอยู่สามอย่าง (ชั้น 6 ถนนพหลโยธิน ถนนรัชดาภิเษก) แสดงตำแหน่งเฉพาะในอวกาศสามมิติของเอกภพที่สำคัญพอๆ กันคือ เราต้องบอกเวลาด้วยว่าเราต้องการพบคนที่เรานัดเมื่อไร เป็นต้นว่า 9.00 น. ข้อมูลชิ้นสุดท้ายนี้บอกว่าที่ไหน "ในเวลา" เราจะพบกัน ดังนั้น จะต้องกำหนดเหตุการณ์ด้วยข้อมูลสี่อย่าง สามอย่างในอวกาศและอีกอย่างหนึ่งในเวลา เรากล่าวว่า ข้อมูลดังกล่าวกำหนดตำแหน่งของเหตุการณ์ในอวกาศและเวลา หรือสั้นๆ ในอวกาศเวลา (spacetime) ในความหมายนี้ เวลาจึงเป็นอีกมิติหนึ่ง

เนื่องจากทัศนะใหม่นี้อ้างว่าอวกาศและเวลาเป็นแต่เพียงตัวอย่างที่ต่างกันของมิติเท่านั้น เราจะสามารถพูดถึงอัตราเร็วของวัตถุในเวลาในลักษณะคล้ายกับอัตราเร็วของวัตถุในอวกาศได้หรือไม่ คำตอบก็คือ ได้

คำบอกใบ้ที่สำคัญว่าจะทำอย่างไร มาจากข้อมูลที่เป็นหัวใจของสิ่งที่เราได้พบมาแล้ว เมื่อวัตถุเคลื่อนที่ผ่านอวกาศสัมพัทธ์กับเรา นาฬิกาของวัตถุนั้นจะเดินช้าเทียบกับนาฬิกาของเรา นั่นคือ อัตราเร็วของการเคลื่อนที่ผ่านเวลาช้าลง การก้าวกระโดดเชิงความคิดอยู่ที่ความเห็นต่อไปนี้ของไอน์สไตน์ ไอน์สไตน์ประกาศว่า วัตถุทุกชนิดในเอกภพเคลื่อนที่ผ่านอวกาศเวลาเสมอด้วยอัตราเร็วตายตัวค่าหนึ่งคืออัตราเร็วของแสง ความเห็นนี้ฟังค่อนข้างแปลก เราคุ้นเคยอยู่กับการเคลื่อนที่ซึ่งวัตถุมีอัตราเร็วน้อยกว่าแสงอยู่มาก เราย้ำเรื่องนี้ซ้ำแล้วซ้ำอีกว่าเพราะเหตุไรผลของสัมพัทธภาพพิเศษจึงเป็นสิ่งที่ไม่มีใครคุ้นเคยกันในชีวิตประจำวัน ทุกอย่างที่กล่าวมาเป็นความจริง ในตอนนี้เราพูดถึงอัตราเร็วรวมของวัตถุผ่านทั้งสี่มิติ คือสามมิติของอวกาศและหนึ่งมิติของเวลา อัตราเร็วของวัตถุในความหมายทั่วไปนี้เองที่เท่ากับอัตราเร็วของแสง เพื่อให้เข้าใจเรื่องนี้มากขึ้นและเพื่อเผยให้เห็นความสำคัญของเรื่อง เราตั้งข้อสังเกตเหมือนกับกรณีของรถที่เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเดียว (ที่เป็นจริงไม่ได้ในเชิงปฏิบัติ) ที่กล่าวมาแล้วว่า อัตราเร็วตายตัวอาจถูกแบ่งปันกันระหว่างมิติต่างๆ คือมิติที่ต่างกันของอวกาศและมิติเวลา ถ้าวัตถุอยู่นิ่งๆ กับที่ (สัมพัทธ์กับเรา) และดังนั้น จึงไม่ได้เคลื่อนที่ผ่านอวกาศเลย โดยเปรียบเทียบกับการขับทดสอบรถครั้งแรกๆ การเคลื่อนที่ทั้งหมดของวัตถุถูกใช้ไปในการเดินทางผ่านมิติเดียว ซึ่งในกรณีนี้คือมิติเวลา ยิ่งกว่านั้น วัตถุทุกชนิดที่อยู่นิ่งสัมพัทธ์กับเราและกับกันและกันเอง เคลื่อนที่ผ่านเวลา - ต่างก็แก่ขึ้น - ด้วยอัตราเร็วเท่ากันหมด ถ้าวัตถุเคลื่อนที่ผ่านอวกาศด้วย หมายความว่าบางส่วนของการเคลื่อนที่ผ่านเวลาในตอนก่อนจะต้องถูกแบ่งไป เหมือนกับเมื่อรถเคลื่อนที่เฉียงๆ การแบ่งปันการเคลื่อนที่มีความหมายว่าวัตถุเคลื่อนที่ผ่านเวลา

ช้าลงเทียบกับวัตถุที่อยู่นิ่ง เนื่องจากบางส่วนของการเคลื่อนที่ถูกแบ่งไปใช้ในการเคลื่อนที่ผ่านอวกาศ นั่นคือ นาฬิกาของวัตถุจะติ๊กช้าลงถ้าเคลื่อนที่ผ่านอวกาศ นี่คือสิ่งที่เราได้พบมาก่อนแล้ว ตอนนี้เราเห็นว่าเวลาจะช้าลงเมื่อวัตถุเคลื่อนที่สัมพัทธ์กับเรา เพราะการเคลื่อนที่ของวัตถุผ่านเวลาถูกปันไปเป็นการเคลื่อนที่ผ่านอวกาศเสียบ้าง อัตราเร็วของวัตถุผ่านอวกาศจึงเป็นแต่เพียงการสะท้อนว่าการเคลื่อนที่ผ่านเวลาถูกปันไปมากน้อยเท่าไร

จะเห็นทันทีว่ากรอบความคิดนี้ได้บรรจุข้อเท็จจริงไว้ว่ามีขีดจำกัดของความเร็วของวัตถุในอวกาศ อัตราเร็วสูงสุดผ่านอวกาศเกิดขึ้นถ้าการเคลื่อนที่ผ่านเวลา *ทั้งหมด* ถูกเปลี่ยนไปเป็นการเคลื่อนที่ผ่านอวกาศ เรื่องนี้เกิดขึ้นเมื่อการเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วของแสงผ่านเวลาในตอนแรกถูกเปลี่ยนเป็นการเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วของแสงผ่านอวกาศ โดยที่การเคลื่อนที่ผ่านเวลาได้ถูกแบ่งปันไปหมดแล้ว นี่จึงเป็นอัตราเร็วสูงสุดผ่านอวกาศที่วัตถุ - วัตถุใดๆ ก็ได้ทั้งนั้น - สามารถมีได้ ตรงนี้เปรียบได้กับขับทดสอบรถในแนวเหนือ - ใต้โดยตรง เช่นเดียวกับที่รถไม่มีอัตราเร็วเหลืออยู่สำหรับการเคลื่อนที่ในมิติตะวันออก - ตะวันตก อะไรก็ตามที่เคลื่อนที่ผ่านอวกาศด้วยอัตราเร็วเท่ากับแสง จะไม่มีอัตราเร็วเหลืออยู่สำหรับการเคลื่อนที่ผ่านเวลา ดังนั้น แสงจึงไม่แก่ โฟตอนที่เกิดขึ้นเมื่อตอนมหาระเบิดจะมีอายุในวันนี้เท่ากับเมื่อตอนที่เกิด ที่อัตราเร็วของแสงเวลาจะหยุดนิ่ง

1.11 $E = mc^2$

แม้ว่าไอน์สไตน์จะไม่ได้ชักชวนให้เรียกทฤษฎีของเขาว่า "สัมพัทธภาพ" (เขาเสนอชื่อทฤษฎีว่า "ความไม่แปรเปลี่ยน" เพื่อสะท้อนความคงตัวของอัตราเร็วของแสง และอื่นๆ) ความหมายของชื่อทฤษฎีนี้เป็นที่ชัดเจนแล้วในปัจจุบัน ผลงานของไอน์สไตน์ได้แสดงว่าแนวคิดเช่นอวกาศและเวลาซึ่งแต่ก่อนนั้นถือว่าแยกกันและเป็นสิ่งสัมบูรณ์ จริงๆ แล้วเกี่ยวพันกันอย่างแนบแน่นและเป็นสิ่งสัมพัทธ์ ไอน์สไตน์ยังได้แสดงเพิ่มเติมอีกว่าสมบัติเชิงฟิสิกส์ของโลกมีความเกี่ยวพันกันอย่างคาดไม่ถึงอีกด้วย สมการที่มีชื่อเสียงที่สุดของเขาเป็นตัวอย่างที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่ง ในสมการนี้ ไอน์สไตน์ได้บอกว่า พลังงาน (E) ของวัตถุและมวล (m) ของวัตถุนั้น ไม่ได้เป็นความคิดเห็นที่เป็นอิสระจากกัน เราสามารถหาพลังงานจากความรู้เกี่ยวกับมวล (โดยคูณมวลด้วยอัตราเร็วของแสงยกกำลังสอง c^2) หรือเราสามารถหามวลจากความรู้เกี่ยวกับพลังงาน (โดยหารพลังงานด้วยกำลังสองของอัตราเร็วของแสง) หรืออีกนัยหนึ่ง พลังงานและมวล - คล้ายกับดอลลาร์และบาท - เป็นสกุลเงินที่แลกเปลี่ยนกันได้ ผิดจากเงินตรงที่อัตราแลกเปลี่ยนนั้นมีค่าตายตัวไม่เปลี่ยนแปลงตลอดกาล ในขณะที่ดอลลาร์กับบาทมีอัตราเปลี่ยนแปลงที่ผันผวนวันต่อวันในระยะนี้ค่อนข้างมาก จนมีผู้ได้กำไรหรือขาดทุนไปคนละมากๆ เนื่องจากอัตราแลกเปลี่ยนพลังงานและมวลมีค่ามาก (c^2 เป็นจำนวนที่มีค่ามาก) มวลเพียงนิดเดียวก็เปลี่ยนเป็นพลังงานได้จำนวนมาก โลกได้รับทราบอำนาจทำลายที่ใหญ่หลวงจากการเปลี่ยนมวลน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ของยูเรเนียม 2 ปอนด์ให้เป็นพลังงานที่เมืองฮิโรชิมา สักวันหนึ่ง โดยใช้โรงไฟฟ้าที่อาศัยนิวเคลียร์ฟิวชัน เราอาจใช้สูตรของไอน์สไตน์ผลิตพลังงานให้เพียงพอกับความต้องการพลังงานของโลกทั้งหมดจากน้ำทะเลที่มีอยู่มากมาย

จากทัศนะมิติเวลาซึ่งเป็นแนวคิดที่เราเน้นในตอนที่ผ่านมา สมการของไอน์สไตน์ทำให้เรามีคำอธิบายที่เป็นรูปธรรมสำหรับหัวใจของเรื่องว่าไม่มีอะไรเคลื่อนที่เร็วกว่าอัตราเร็วของแสง ท่านอาจสงสัยว่าทำไมเราไม่เอาวัตถุบางอย่าง เป็นต้นว่ามิวออนที่เครื่องเร่งอนุภาคเร่งจนมีอัตราเร็ว 667 ล้านไมล์ต่อชั่วโมง (99.5 เปอร์เซ็นต์ของอัตราเร็วของแสง) และ "ผลักให้แรงขึ้นอีกสักหน่อย" จนมีอัตราเร็ว 99.9 เปอร์เซ็นต์ของอัตราเร็วของแสง และ "ผลักให้แรงขึ้นอีก" บังคับให้มิวออนข้ามกำแพงอัตราเร็วแสง สูตรของไอน์สไตน์อธิบายว่าเป็นเพราะเหตุไรความพยายามเช่นนั้นจึงไม่มีทางสำเร็จ อะไรที่ยิ่งเคลื่อนที่เร็วยิ่งมีพลังงานมาก และจากสูตรของไอน์สไตน์

เราเห็นว่าอะไรที่ยิ่งมีพลังงานมากยิ่งมีมวลมาก มิวออนที่เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว 99.9 เปอร์เซ็นต์ของอัตราเร็วแสง จะมีมวลมากกว่ามิวออนที่อยู่นิ่งมาก ที่จริงแล้วจะมีมวลถึง 22 เท่าของมวลของมิวออนที่อยู่นิ่ง ยิ่งวัตถุมีมวลมากขึ้นยิ่งยากลำบากที่จะเพิ่มอัตราเร็ว ผลักเด็กที่ขี่รถจักรยานเป็นเรื่องหนึ่ง แต่ผลักรถสิบล้อให้เคลื่อนที่เป็นคนละเรื่องกันเลยทีเดียว ดังนั้น เมื่อมิวออนเคลื่อนที่เร็วขึ้นก็ยิ่งยากขึ้นที่จะทำให้มีอัตราเร็วเพิ่มขึ้น ที่อัตราเร็ว 99.999 เปอร์เซ็นต์ของอัตราเร็วแสง มวลของมิวออนจะเพิ่มขึ้นถึง 224 เท่า ที่ 99.99999999 เปอร์เซ็นต์ของอัตราเร็วแสง มวลของมิวออนเพิ่มขึ้นมากกว่า 70,000 เท่า เนื่องจากมวลของมิวออนเพิ่มขึ้นได้โดยไม่มีขีดจำกัด ในขณะที่อัตราเร็วเฉียดอัตราเร็วแสงเข้าทุกที จะต้องใช้การผลักด้วยพลังงาน *อนันต์* ที่จะให้ถึงหรือข้ามกำแพงอัตราเร็วแสง แน่ละ นี่เป็นสิ่งที่เป็นไปไม่ได้ และจะไม่มีอะไรสามารถมีอัตราเร็วมากกว่าแสงไปได้

เราจะได้พบในตอนต่อไปว่า ข้อสรุปนี้ได้เพาะเมล็ดของความขัดแย้งใหญ่ข้อที่สองที่ฟิสิกส์ต้องเผชิญในระหว่างศตวรรษที่ผ่านมา และในที่สุดก็เป็นสิ่งชี้ชะตากรรมของทฤษฎีที่เป็นที่ยอมรับและยกย่องหวงแหน ได้แก่ ทฤษฎีแรงโน้มถ่วงสากลของของนิวตัน[2]

[2] รายชื่อหนังสืออ่านประกอบจะให้ไว้ในตอนสุดท้าย