



ฟิสิกส์ 2

ระดับมหาวิทยาลัย

เล่ม 4

$$E=mc^2$$



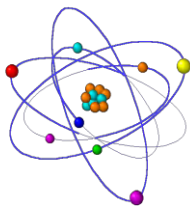
แนะนำ
ร้านฟิสิกส์ออนไลน์
๑๐๐ พณ. สุภาณี สุภาพ
ในแอปพลิเคชัน และ TikTok
ใช้ QR Code โหลดแอป



SHOPEE Lazada

ราคา
199
บาท

เรียบเรียงโดย : ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุชาติ สุภาพ
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



ฟิสิกส์ ๒

ระดับมหาวิทยาลัย เล่ม 4

ผศ.สุชาติ สุภาพ

พิมพ์และจำหน่ายโดย

สุชาติ สุภาพ

133/471 หมู่ ๒ (ติดกับ สนง.ที่ดินบางบัวทอง) ต.พิมลราช อ.บางบัวทอง

จ.นนทบุรี 11110

E-mail suchart11111@hotmail.com

พิมพ์ที่ หจก. SPS 1999 ม.เพชรบูรณ์ เขตคันนายาว กรุงเทพฯ ๑ 10230

คำนำ

หนังสือ พิสิทธ์ ๒ เล่มนี้ จัดทำขึ้นเพื่อเป็นสื่อการเรียนรู้สำหรับนักเรียน นิสิต นักศึกษา และผู้สนใจ ที่ต้องการเปิดประตูสู่โลกพิสิทธ์สมัยใหม่ ซึ่งเป็นรากฐานของเทคโนโลยีล้ำหน้าที่เราใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เครื่องมือทางการแพทย์ พลังงานนิวเคลียร์ หรือแม้แต่การทำความเข้าใจโครงสร้างของจักรวาล เนื้อหาในเล่มนี้ครอบคลุม 4 หัวข้อสำคัญ ได้แก่

- ทฤษฎีสัมพัทธภาพ ซึ่งเปลี่ยนมุมมองของเราเกี่ยวกับเวลา อวกาศ และมวล ด้วยแนวคิดที่ดูขัดแย้งกับสามัญสำนึกแต่ได้รับการยืนยันจากการทดลองแล้ว
- พิสิทธ์อะตอม ที่อธิบายโครงสร้างของอะตอม การจัดเรียงอิเล็กตรอน และเส้นสเปกตรัม ซึ่งเป็นพื้นฐานของการพัฒนาเลเซอร์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์
- พิสิทธ์ควอนตัม ที่พาเราเข้าสู่โลกของอนุภาคขนาดเล็ก ซึ่งพิสิทธ์ดั้งเดิมไม่สามารถอธิบายได้ และเต็มไปด้วยพฤติกรรมที่คาดไม่ถึง
- พิสิทธ์นิวเคลียร์ ที่เปิดเผยพลังงานมหาศาลในแกนกลางของอะตอม อธิบายปฏิกิริยานิวเคลียร์ การสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี และการประยุกต์ใช้ในโลกรจริง

ผู้เขียนมุ่งหวังว่าหนังสือเล่มนี้จะช่วยให้ผู้อ่านได้เรียนรู้พิสิทธ์ในรูปแบบที่เข้าใจง่าย เชื่อมโยงกับปรากฏการณ์รอบตัว และเสริมสร้างพื้นฐานที่มั่นคงเพื่อการศึกษาขั้นสูงต่อไปในอนาคตขอให้ทุกท่านสนุกกับการเรียนรู้ และจงอย่าหวั่นไหวต่อคำถามกับธรรมชาติของจักรวาล

หรือถ้าท่านสนใจหนังสือในรูปแบบ E-BOOK ก็มีจำหน่ายที่เว็บไซต์ ร้านนายอินทร์ , MEB , อุกปิ , ซีเ็ด , hystexts , ศูนย์หนังสือจุฬาฯ และ DDebook

สำหรับท่านที่สนใจหนังสือของกระผมแต่หาซื้อตามร้านหนังสือทั่วไปไม่ได้ สามารถซื้อออนไลน์ที่แอปต่าง ๆ โดยสแกน QR โค้ดข้างล่างนี้

(ที่ชอบปีมีหนังสือมากที่สุด)



สุชาติ สุภาพ

มือถือ 083-920-3825

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 15 ทฤษฎีสัมพัทธภาพ	5
15.1 สัมพัทธภาพ	8
15.2 กรอบอ้างอิง	9
15.3 สัจพจน์ของไอส์ไตน์	10
15.4 ความเป็นเวลาเดียวกัน	23
15.5 สัมพัทธภาพแบบกาลิเลโอ	24
15.6 การแปลงสมการแบบลอเรนทซ์	27
15.7 กลศาสตร์เชิงสัมพัทธภาพ	33
บทที่ 16 ฟิสิกส์อะตอม	42
16.1 แบบจำลองอะตอมของทอมสัน	42
16.2 สเปกตรัมของอะตอม	44
16.3 แบบจำลองอะตอมของโบร์	48
16.4 สเปกตรัมของอะตอมไฮโดรเจน	54
16.5 การทดลองของแฟรงค์และเฮิร์ตซ์	58
16.6 การจัดเรียงอิเล็กตรอนในอะตอม	68
16.7 เลเซอร์เบื้องต้น	71
บทที่ 17 ฟิสิกส์ควอนตัมเบื้องต้น	78
17.1 การแผ่รังสีของวัตถุดำ และสมมติฐานของพลังค์	79
17.2 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก	88
17.3 ปรากฏการณ์คอมป์ตัน	97
17.4 สเปกตรัมที่เปล่งออกมาจากอะตอม	102
17.5 ทวิภาคของคลื่นและอนุภาค	103
17.6 หลักความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์ก	107
บทที่ 18 ฟิสิกส์นิวเคลียร์	111
18.1 นิวเคลียส	113
18.2 ความสมดุลระหว่างมวล-พลังงาน	118
18.3 ขนาดของนิวเคลียส	120
18.4 แรงนิวเคลียร์	122
18.5 พลังงานยึดเหนี่ยวภายในนิวเคลียส	125

สารบัญ

หน้า

18.6 แบบจำลองของนิวเคลียส	132
18.7 การพบกัมนัธภาพรังสี	139
18.8 เถ็ขรภาพของนิวเคลียส	143
18.9 การสลายตัวของธาตุกัมนัธรังสี	144
18.10 ครั้งชีวิต	146
18.11 ชีวิตเฉลี่ย	148
18.12 อนุกรมกัมนัธรังสี	152
18.13 สมดุลกัมนัธรังสี	155
18.14 ประเภทการสลายตัวของนิวเคลียสกัมนัธรังสี	158
18.15 ปฏิกริยานิวเคลียร์	162
18.16 พลังงานนิวเคลียร์	168

%%%%%%%%%

บทที่ 15

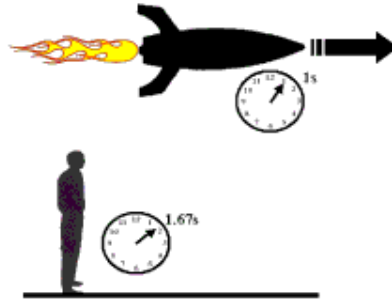
ทฤษฎีสัมพัทธภาพ

ในโลกรอบฟิสิกส์ยุคก่อนศตวรรษที่ 20 กฎของนิวตันสามารถอธิบายการเคลื่อนที่ของวัตถุได้อย่างแม่นยำในแทบทุกสถานการณ์ ตั้งแต่การตกของแอปเปิลไปจนถึงการโคจรของดาวเคราะห์ แต่เมื่อมนุษย์เริ่มสำรวจปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระดับความเร็วสูงใกล้ความเร็วแสง หรือในสนามแรงโน้มถ่วงที่รุนแรงมากๆ กลับพบว่ากฎของนิวตันไม่สามารถใช้อธิบายสิ่งเหล่านั้นได้อย่างครบถ้วน ในช่วงต้นศตวรรษที่ 20 นักฟิสิกส์หนุ่มนามว่า อัลเบิร์ต ไอน์สไตน์ ได้เสนอแนวคิดใหม่ที่ปฏิวัติวงการฟิสิกส์อย่างสิ้นเชิง แนวคิดนี้คือ ทฤษฎีสัมพัทธภาพซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วนสำคัญ คือ ทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ และ ทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป ทฤษฎีสัมพัทธภาพไม่เพียงเปลี่ยนวิธีที่เรามองเวลาและอวกาศ แต่ยังทำให้เราเข้าใจถึงธรรมชาติของแรงโน้มถ่วงใหม่ทั้งหมด แนวคิดที่ว่า “เวลาไม่แน่นอน” หรือ “มวลสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงาน” ล้วนมาจากทฤษฎีนี้ทั้งสิ้น ปรากฏการณ์อย่าง GPS ที่เราใช้ในชีวิตประจำวัน หรือภาพหลุมดำที่นักดาราศาสตร์บันทึกไว้ ก็ล้วนเกี่ยวข้องกับหลักการในทฤษฎีนี้ ในบทนี้จะพาไปศึกษาไปสำรวจโลกของสัมพัทธภาพโลกที่เวลาไม่คงที่ อวกาศไม่แน่นอน และพลังงานสามารถเท่ากับมวลตามสูตรอันโด่งดังของไอน์สไตน์ $E = mc^2$

ทฤษฎีสัมพัทธภาพ เป็นทฤษฎีที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงโน้มถ่วง ความเร็ว เวลา หรือมวลสารกับพลังงาน เนื้อหาของทฤษฎีสัมพัทธภาพหลายเรื่องขัดกับสามัญสำนึกของมนุษย์อย่างรุนแรง เช่น บอกว่าเวลาเป็นปริมาณที่มีค่าขึ้นอยู่กับความเร็วและความโน้มถ่วง และความเร็ว นอกจากนี้ยังได้กล่าวอีกว่า เวลานั้นสามารถย้อนกลับได้ ถ้าเราอยู่ในยานที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วมากกว่าแสง ทฤษฎีนี้ฟังดูแล้วแปลกมากไม่น่าจะเป็นไปได้ แต่ทฤษฎีนี้ก็ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าเป็นจริง

ถ้าสมมติให้การเดินของนาฬิกาแทนช่วงเวลาที่ผ่านมา ถ้าใช้นาฬิกาโบราณ (แบบลูกตุ้ม) นำนาฬิกาชนิดนี้ถ่านไปวางไว้ในที่ที่มีแรงดึงดูดต่างกันเวลาก็จะต่างกัน เช่น นาฬิกาแบบการแกว่งของลูกตุ้มเมื่อวางไว้ที่ขอดเขากับที่เชิงเขา นาฬิกาทั้งสองก็จะบอกเวลาไม่เท่ากันเป็นต้น

ถ้าสมมติให้การเดินของนาฬิกาแทนช่วงเวลาที่ผ่านมา ถ้าใช้นาฬิกาโบราณ (แบบลูกตุ้ม) นำนาฬิกาชนิดนี้ถ่านไปวางไว้ในที่ที่มีแรงดึงดูดต่างกันเวลาก็จะต่างกัน เช่น วางไว้ที่ขอดเขากับที่เชิงเขา เวลาที่ได้ก็จะไม่เท่ากัน สำหรับนาฬิกาที่เที่ยงตรงที่สุดในโลกในปัจจุบันคือนาฬิกาอะตอม ถ่านนาฬิกาชนิดนี้ 2 เรือน เรือนที่ นำไปวางไว้ในยานอวกาศที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงมาก (ใกล้ได้ขงความเร็วแสง) เรือนที่ 2 วางบนโลก ก็จะพบว่านาฬิกา 2 เรือนนี้แสดงเวลาไม่เท่ากัน



รูป 15.1 เวลาเป็นปริมาณที่ขึ้นอยู่กับความเร็ว

ทฤษฎีสัมพัทธภาพ

ทฤษฎีสัมพัทธภาพเป็นทฤษฎีที่กล่าวถึงการวัดปริมาณต่างๆทางฟิสิกส์ เช่น เวลา ระยะทาง โมเมนตัม พลังงาน พลังงานจลน์ ของสิ่งต่างๆ เมื่อผู้วัดหรือผู้สังเกตอยู่ในกรอบอ้างอิงที่หยุดนิ่ง หรืออยู่ในกรอบอ้างอิงที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วใกล้เคียงกับความเร็วแสง

ความเชื่อดั้งเดิมของทุกคนก่อนที่จะมีทฤษฎีสัมพัทธภาพ เชื่อกันว่าระยะทางและเวลา ไม่ว่าใครในจักรวาลนี้จะเป็นคนวัด ก็จะต้องวัดได้ค่าที่เท่ากัน และไอน์สไตน์ไม่ได้เชื่อเช่นนั้น เพราะไอน์สไตน์สามารถพิสูจน์ได้ว่าระยะทางและเวลา เป็นปริมาณที่มีค่าขึ้นอยู่กับความเร็วที่เคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างผู้สังเกตกับสิ่งที่ถูกสังเกต (หรือสิ่งที่ต้องการวัด) ด้วย

ทฤษฎีสัมพัทธภาพเสนอโดยอัลเบิร์ต ไอน์สไตน์ และมี 2 ภาค ได้แก่

1) ทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ เป็นทฤษฎีที่ไอน์สไตน์เป็นผู้เสนอขึ้นมาในปี ค.ศ. 1905 เป็นทฤษฎีที่กล่าวถึงการวัดปริมาณต่างๆดังกล่าวก่อนหน้านี้ โดยผู้วัดหรือผู้สังเกตและสิ่งที่ต้องการวัดหยุดนิ่งหรือเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงตัว (ใกล้เคียงกับความเร็วแสง) และทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ ก็นำไปสู่หลักการสมมูลของสสารและพลังงาน และนำไปสู่สมการความสัมพันธ์ระหว่างมวลสารกับพลังงานคือ $E = mc^2$

2) ทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป เป็นทฤษฎีที่ไอน์สไตน์เป็นผู้เสนอขึ้นมาในปี ค.ศ. 1916 เพื่อให้ใช้ได้กับกรณีที่ผู้สังเกตและสิ่งที่ต้องการวัดเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง

ทฤษฎีสัมพัทธภาพ เป็นทฤษฎีที่ขัดแย้งกับสามัญสำนึกของมนุษย์เป็นอย่างมาก เช่นตามทฤษฎีสัมพัทธภาพ ยืนยันว่าเวลาของเหตุการณ์เดียวกันถ้าผู้สังเกตอยู่ในกรอบอ้างอิงอยู่ในกรอบอ้างอิงที่หยุดนิ่ง เทียบกับเหตุการณ์นั้น กับผู้สังเกตที่อยู่ในกรอบอ้างอิงที่เคลื่อนที่ จะเห็นช่วงเวลาของเหตุการณ์นั้น มีช่วงเวลาไม่เท่ากัน

ถึงแม้ว่าทฤษฎีสัมพัทธภาพจะดูแปลกประหลาดจนยากจะยอมรับได้ แต่ก็เป็นที่ยอมรับกันทั่วไป นอกจากนั้นทฤษฎีสัมพัทธภาพก็ยืนยันว่าจะไม่มีวัตถุใดที่สามารถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับแสงในสุญญากาศได้

กรอบอ้างอิง

ในโลกของฟิสิกส์ การอธิบายการเคลื่อนที่ของวัตถุไม่สามารถทำได้อย่างสมบูรณ์หากปราศจากมุมมองที่ชัดเจนว่า "ผู้สังเกต" อยู่ที่ใดหรือมองจากที่ไหน แนวคิดนี้นำไปสู่หลักการพื้นฐานที่เรียกว่า กรอบอ้างอิง ซึ่งเป็นแนวคิดสำคัญในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัตถุในกลศาสตร์

กรอบอ้างอิง หมายถึง ระบบพิกัดหรือจุดมองที่ใช้ในการสังเกตและอธิบายตำแหน่ง ความเร็ว และการเร่งของวัตถุ โดยผู้สังเกตที่อยู่ในกรอบอ้างอิงนั้นจะเป็นผู้วัดค่าทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่

ประเภทของกรอบอ้างอิง

1. กรอบอ้างอิงเฉื่อย

- เป็นกรอบที่ไม่เร่ง (หรือเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่)
- กฎของนิวตันสามารถใช้ได้ตรงไปตรงมา
- เช่น ผู้สังเกตบนพื้นโลกในบริเวณที่ไม่มีการเร่งสูง

2. กรอบอ้างอิงไม่เฉื่อย

- เป็นกรอบที่มีการเร่ง เช่น รถที่กำลังออกตัว
- ต้องใช้ "แรงเสมือน" เช่น แรงหนีศูนย์กลาง เพื่ออธิบายการเคลื่อนที่ให้สอดคล้องกับกฎนิวตัน

ความสำคัญของกรอบอ้างอิง

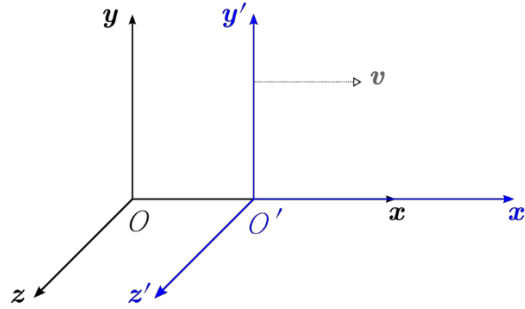
- การอธิบายการเคลื่อนที่ของวัตถุ เช่น การตกของลูกบอล หรือการเคลื่อนที่ของดาวเคราะห์ ต้องระบุกรอบอ้างอิงให้ชัดเจน
- ใช้ใน กลศาสตร์คลาสสิก และเป็นพื้นฐานในการต่อขยายสู่ กลศาสตร์สัมพัทธภาพของไอน์สไตน์
- มีบทบาทสำคัญในระบบนำทาง เช่น GPS ที่ต้องแปลงพิกัดจากกรอบอ้างอิงหนึ่งไปสู่อีกกรอบหนึ่งอย่างแม่นยำ

การบอกรายละเอียดเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของสิ่งใด ๆ ทำได้โดยการบอกตำแหน่ง และเวลาที่สิ่งเหล่านั้นอยู่ โดยตำแหน่งและเวลา ก็เป็นปริมาณสัมพัทธ์เช่นเดียวกับความเร็วที่จะต้องมีการเปรียบเทียบเสมอ

การบอกตำแหน่งของสิ่งใด ๆ จะไม่มีความหมายชัดเจนถ้าไม่มีตำแหน่งอื่นที่ใช้ในการเปรียบเทียบ และเนื่องจากการบอกตำแหน่งจำเป็นต้องทราบจุดอ้างอิงจึงนิยามใช้แกนโคออร์ดิเนตเป็นสิ่งอ้างอิงเพราะบอกได้ทั้งทิศและระยะทาง ซึ่งเราเรียกแกนโคออร์ดิเนตนี้ว่า กรอบอ้างอิง

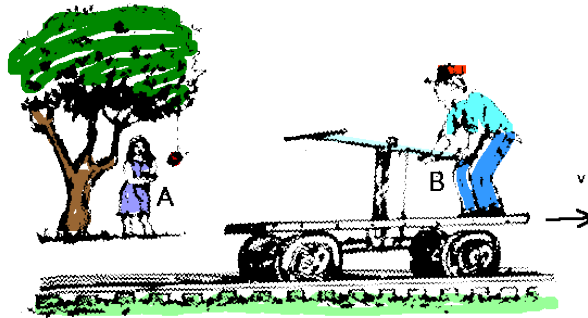
กรอบอ้างอิงหมายถึงระบบโคออร์ดิเนตที่ผู้สังเกตหนึ่งๆ ใช้ในการสังเกตการณ์เคลื่อนที่ของวัตถุ กรอบอ้างอิงที่หยุดนิ่งหรือกรอบอ้างอิงมีความเร็วคงตัว เรียกว่า กรอบอ้างอิงเฉื่อย

กรอบอ้างอิงเฉื่อยมีความสำคัญต่อวิชาฟิสิกส์เป็นอย่างมาก เพราะเป็นกรอบอ้างอิงที่กฎการเคลื่อนที่ของนิวตันเป็นจริง



รูป 15.2 กรอบอ้างอิง xyz และกรอบอ้างอิง $x'y'z'$

กรอบอ้างอิงมีความสำคัญต่อการศึกษาเกี่ยวกับการเคลื่อนที่อย่างมาก เพราะว่าถ้าผู้สังเกตอยู่ในกรอบอ้างอิงที่ต่างกัน ก็จะเห็นการเคลื่อนที่ของสิ่งเดียวกันมีลักษณะการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกัน ดังรูป



รูป 15.3 ผู้สังเกต A และ B อยู่ในกรอบอ้างอิงที่ต่างกัน

ผู้สังเกต A และผู้สังเกต B จะเห็นลักษณะการเคลื่อนที่ของผลไม้ที่กำลังตกลงมาแตกต่างกัน เนื่องจากผู้สังเกตทั้งสองอยู่ในกรอบอ้างอิงที่ต่างกัน คือผู้สังเกต A อยู่ในกรอบอ้างอิงที่หยุดนิ่งส่วนผู้สังเกต B อยู่ในกรอบอ้างอิงที่เคลื่อนที่

15.1 สภาพสัมพัทธ์ (Relativity)

ลองจินตนาการว่า คุณกำลังนั่งอยู่บนรถไฟที่กำลังแล่นไปอย่างราบรื่น และมีเพื่อนอีกคนยืนอยู่ที่ชานชาลา ทั้งสองคนมองเห็นโลกในลักษณะที่ต่างกัน สำหรับคุณที่นั่งอยู่บนรถไฟ จะเห็นเพื่อนที่ยืนอยู่ที่ชานชาลา กำลังเคลื่อนที่ถอยหลัง แต่สำหรับเพื่อนคนนั้น กลับเห็นว่ารถไฟและคุณกำลังเคลื่อนที่ผ่านเขาไป ปรากฏการณ์เช่นนี้สะท้อนให้เห็นแนวคิดพื้นฐานของสิ่งที่เรารู้จักว่า "สภาพสัมพัทธ์" ซึ่งหมายถึง การสังเกตและการวัดปรากฏการณ์ต่าง ๆ มักขึ้นอยู่กับกรอบอ้างอิงของผู้สังเกต กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ **"การเคลื่อนที่" ไม่ใช่สิ่งที่แน่นอนตายตัว** แต่ขึ้นอยู่กับว่าผู้สังเกตอยู่ในตำแหน่งใด แนวคิดเรื่องสภาพสัมพัทธ์เริ่มต้นจากแนวคิดพื้นฐานในฟิสิกส์คลาสสิกที่เสนอโดยกาลิเลโอ และพัฒนาอย่างก้าวกระโดดโดยอัลเบิร์ต ไอน์สไตน์ ซึ่งนำเสนอทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษและทั่วไปที่เปลี่ยนความเข้าใจของเราต่อเวลา อวกาศ และแรงโน้มถ่วง ในบทเรียนนี้ นักศึกษาจะได้เรียนรู้ว่า ทำไมการเคลื่อนที่ถึงไม่เป็นสากล ทำไมเวลาจึงไม่คงที่สำหรับทุกคน และอะไรคือผลลัพธ์ที่น่าทึ่งจากแนวคิดเรื่อง "สภาพสัมพัทธ์" ซึ่งไม่เพียงแต่อธิบายจักรวาลในระดับใหญ่ แต่ยังมีส่วนต่อเทคโนโลยีในชีวิตประจำวันของเราด้วย

ปริมาณหลายปริมาณเป็นปริมาณสเกลาร์ หรือเป็นปริมาณที่ต้องมีสิ่งเปรียบเทียบกับ เช่น ความเร็ว พลังงานจลน์ ฯลฯ

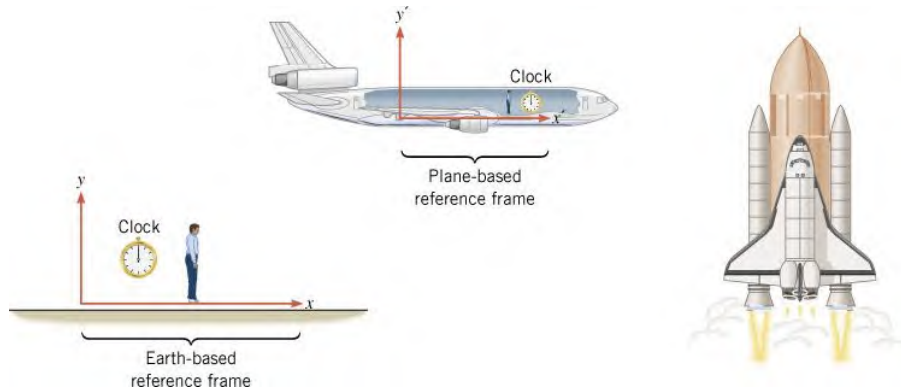
สภาพสเกลาร์ เป็นสภาพที่มีการเปรียบเทียบกับกัน เพื่อให้ได้มาซึ่งค่าที่ต้องการ



รูป 15.4 พลังงานจลน์ของลูกปืนจะเป็นศูนย์ เมื่อเทียบกับสิ่งที่มีความเร็วเท่าลูกปืน กระสุนปืนจะไม่มี ความหมายหรือไม่สามารถทำอะไรได้เลย ถ้าสิ่งที่ลูกปืนต้องการทำลายมีความเร็วเท่ากับลูกปืน

15.2 กรอบอ้างอิง (Frame of Reference)

กรอบอ้างอิง หมายถึง ระบบพิกัดใด ๆ ที่นำมาใช้ในการอ้างอิงตำแหน่งของผู้สังเกต และผู้ถูกสังเกต



รูป 15.5 กรอบอ้างอิงที่ต่างกัน



รูป 15.6 ผู้สังเกตที่อยู่ในกรอบอ้างอิงต่างกัน จะเห็นเหตุการณ์เดียวกัน ไม่เหมือนกัน

กรอบอ้างอิงที่ไม่มีความเร่งเรียกว่า “กรอบอ้างอิงเฉื่อย” กรอบอ้างอิงอื่น ๆ ที่มีความเร็วสัมพัทธ์คงตัว เมื่อเทียบกับกรอบเฉื่อย ข้อมเป็นกรอบเฉื่อยด้วย

15.3 สัจพจน์ของไอน์สไตน์ (Einstein's postulates)

เมื่อเราพูดถึง “ทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ” ของไอน์สไตน์ หลายคนอาจนึกถึงสมการอันโด่งดัง $E = mc^2$ แต่ก่อนที่ไอน์สไตน์จะมาถึงจุดนั้น เขาได้เริ่มต้นจาก “สมมุติฐานพื้นฐาน” เพียงสองข้อ หรือที่เรียกว่า สัจพจน์ (postulates) ซึ่งเป็นรากฐานของทฤษฎีทั้งหมด สัจพจน์ทั้งสองข้อนี้เรียบง่ายอย่างน่าทึ่ง แต่กลับมีพลังอธิบายความจริงของธรรมชาติที่ลึกซึ้งและขัดแย้งกับสามัญสำนึกของมนุษย์ในหลาย ๆ ด้าน มันทำให้เรารู้ว่า “เวลา” ไม่ได้เดินเท่ากันสำหรับทุกคน และ “ความยาว” ของวัตถุก็อาจเปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับความเร็วที่ผู้สังเกตเคลื่อนที่ ไอน์สไตน์เชื่อว่ากฎฟิสิกส์ควรใช้ได้เหมือนกันในทุกกรอบอ้างอิงที่ไม่เร่ง (กรอบเฉื่อย) และเขายืนยันว่า ความเร็วแสงในสุญญากาศย่อมคงที่เสมอไม่ว่าจะวัดจากกรอบไหน สัจพจน์ ๑ ข้อนี้คือกุญแจที่นำไปสู่การค้นพบใหม่ทั้งหมดเกี่ยวกับเวลา อวกาศ มวล และพลังงาน

การจะทำอะไรโดยเฉพาะอย่างซึ่งการจะค้นหาความจริงของธรรมชาติ ก่อนอื่นก็ต้องเข้าใจกฎของธรรมชาติเสียก่อน โดยทั่วไปแล้วกฎของธรรมชาติจะเป็นกฎง่าย ๆ เสมอ เช่น พลังงานต้องไม่หายไปไหน แต่สามารถเปลี่ยนรูปได้ หรือ $action = reaction$ สำหรับทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ และสมการที่เป็นส่วนหนึ่งของทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ ก็ตั้งอยู่บนกฎของธรรมชาติที่เรียกว่า สัจพจน์ของไอน์สไตน์ ๒ ข้อดังนี้

- 1) กฎของฟิสิกส์เป็นจริงทุก ๆ กรอบเฉื่อย
- ๒) อัตราเร็วของแสงในสุญญากาศที่วัดในกรอบเฉื่อยจะมีค่าเท่ากัน ไม่ว่าผู้วัดความเร็วของแสงจะมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วและทิศทางอย่างไร



รูป 15.7 คนในรถ และคนที่ยืนบนถนน จะเห็นแสงมีความเร็วเท่ากัน

จากหลักความจริงเกี่ยวกับแสง ทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่ไม่น่าเชื่อหลายอย่าง เช่น

1) ผู้สังเกตที่หยุดนิ่งเห็นฟ้าผ่าลงมาพร้อมกัน แต่ผู้สังเกตที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง จะเห็นว่าฟ้าผ่าเกิดขึ้นไม่พร้อมกัน

2) เวลาในยานอวกาศที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงมาก กับเวลาบนโลกไม่เท่ากัน

3) ยานอวกาศหรือสิ่งใด ๆ ที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงมาก ความยาวจะหดสั้นลง

1) ผู้สังเกตที่หยุดนิ่งเห็นฟ้าผ่าพร้อมกัน แต่ผู้สังเกตที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงมาก เห็นว่าฟ้าผ่าเกิดขึ้นไม่พร้อมกัน

ในธรรมชาติมีสิ่งแปลกประหลาด เหลือเชื่อ และขัดกับสามัญสำนึกหลายสิ่งหลายอย่าง ถ้าเราไม่มีการคิดวิเคราะห์ ก็คงจะไม่ได้พบกับความแปลกประหลาดเหลือเชื่อและขัดกับสามัญสำนึกเหล่านี้ ตัวอย่างของความแปลกประหลาด เหลือเชื่อ และขัดกับสามัญสำนึก เช่น

1) เวลาของแต่ละคน(ที่อยู่ ณ สถานที่ต่างกัน) ไม่เท่ากัน

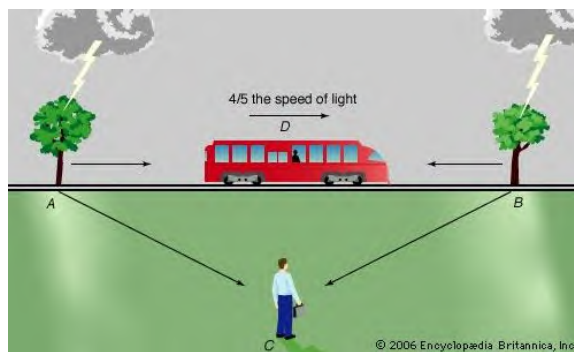
2) เวลาไม่ได้เป็นค่าสัมบูรณ์ เวลา 1 ชั่วโมง ของคนบนโลก คนที่อยู่บนดวงจันทร์ คนที่อยู่ในสถานีอวกาศไม่เท่ากัน

3) ความยาวของสิ่งต่างๆ ก็ไม่ได้เป็นค่าสัมบูรณ์ เช่น ถ้าคนๆหนึ่งวัดความยาวของสิ่งหนึ่งได้เท่ากับ 1 เมตร คนอื่นก็ไม่จำเป็นต้องวัดได้ 1 เมตรเท่ากัน

4) สิ่งที่ผู้สังเกตคนหนึ่งเห็นว่าเกิดขึ้นพร้อมกัน ผู้สังเกตคนอื่นอาจจะเห็นว่ามันเกิดขึ้นพร้อมกันหรือไม่พร้อมกันก็ได้

ต่อไปจะได้กล่าวถึงรายละเอียดของเหตุการณ์ดังกล่าว ดังนี้

ถ้าผู้สังเกต C เห็นว่ามีฟ้าผ่าลงมาขั้วต้นไม้ A และ B พร้อม ๆ กัน แต่ผู้สังเกต B (อยู่ในรถบัส) ที่แล่นด้วยความเร็วสูงมาก ($\frac{4}{5}$ ความเร็วแสง) จะเห็นว่าฟ้าผ่าเกิดขึ้นไม่พร้อมกัน



รูป 15.8 คนในรถ และคนที่ยืนบนถนน เห็นเหตุการณ์ฟ้าผ่าต่างกัน

ผู้สังเกต B (อยู่ในรถบัส) จะเห็นฟ้าผ่าลงมาที่ต้นไม้ B ก่อน หลังจากนั้นจึงจะเห็นฟ้าผ่าลงมาที่ต้นไม้ A เนื่องจากการมองเห็นเกิดจากแสงเดินทางมากเข้าตาเราและการเดินทางของแสงต้องใช้เวลา (หรือ

พูดง่าย ๆ ว่ารถแล่นหนึ่งแสงฟ้าผ่าที่ต้นไม้อ A แต่แล่นเข้าหาแสงฟ้าผ่าที่ต้นไม้อ B ทำให้แสงจากแหล่งกำเนิดทั้งสองเดินทางมาถึงผู้สังเกตในเวลาต่างกัน)

ถึงแม้ว่าเหตุการณ์ดังกล่าวจะไม่เกิดขึ้นในชีวิตประจำวันของทุกคน แต่นักศึกษาก็จำเป็นต้องมีจินตนาการที่กว้างไกล

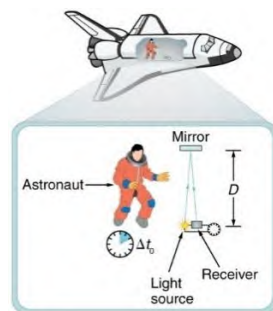
เหตุการณ์ดังกล่าวอาจเปรียบเทียบกับเกิดการฟ้าผ่า คนที่อยู่ใกล้ ๆ บริเวณที่เกิดฟ้าผ่า ก็จะเห็นว่าเมื่อเกิดฟ้าผ่าประกายไฟกับเสียงฟ้าผ่าเกิดขึ้นพร้อมกัน แต่คนที่อยู่ไกล ๆ จะเห็นว่าประกายไฟ กับเสียงฟ้าผ่าเกิดขึ้นไม่พร้อมกัน เป็นต้น

2) เวลาในยานอวกาศกับเวลาบนโลกไม่เท่ากัน

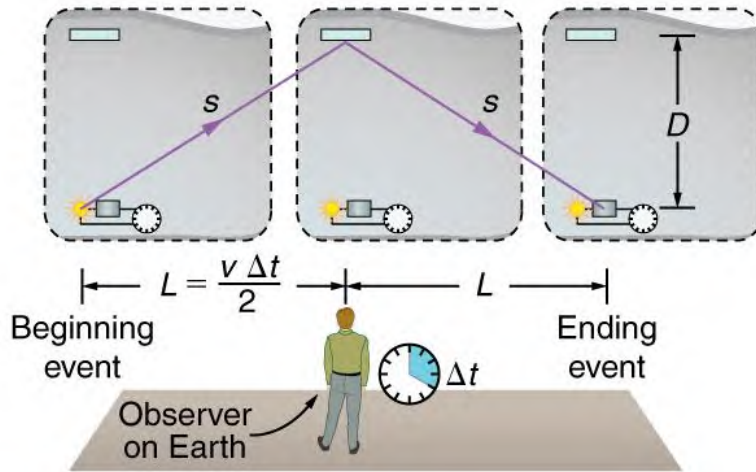
นักศึกษาเชื่อหรือไม่ว่า ถ้าฝาแฝดสองคนแยกจากกัน โดยคนหนึ่งอยู่บนโลก และอีกคนเดินทางไกลมาก ๆ ด้วยยานอวกาศที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงมาก ๆ เช่นเดี๋ยวก่อน เมื่อฝาแฝดคนที่เดินทางไกลกลับมาซึ่งโลก ฝาแฝดทั้งสองจะมีอายุไม่เท่ากัน (จะบ้าหรือ มีใครคิดแบบนี้ขึ้นมาอีก) คำตอบคือจริงเขาจะมีอายุไม่เท่ากัน นี่ไม่ใช่แค่เรื่องแต่งในนิยายวิทยาศาสตร์ แต่เป็นผลลัพธ์ที่แท้จริงตามทฤษฎีสัมพัทธภาพของไอน์สไตน์ ตามหลักฟิสิกส์พบว่า เวลาไม่ได้เดินเท่ากันสำหรับทุกคน ขึ้นอยู่กับว่าเราอยู่ที่ไหน และเคลื่อนที่เร็วแค่ไหน ในทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ เมื่อวัตถุเคลื่อนที่ใกล้ความเร็วแสง “นาฬิกา” ที่อยู่กับวัตถุนั้นจะเดินช้าลง เมื่อเทียบกับนาฬิกาของผู้ที่อยู่นิ่ง หรือเคลื่อนที่ช้ากว่าปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “การขยายของเวลา” (*time dilation*) นอกจากนี้ ทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปยังอธิบายว่า สนามแรงโน้มถ่วงก็มีผลต่อการเดินของเวลาเช่นกัน นาฬิกาที่อยู่ในบริเวณที่มีแรงโน้มถ่วงมากจะเดินช้ากว่านาฬิกาที่อยู่ในที่ที่มีแรงโน้มถ่วงน้อย ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นจริงจนต้องนำมาแก้ไขในระบบ GPS ที่เราใช้ในชีวิตประจำวัน เนื่องจากนาฬิกาที่ดาวเทียมกับนาฬิกาบนโลกจะบอกช่วงเวลาต่างกัน (แม้จะใช้นาฬิกาที่เที่ยงตรงที่สุด) บทหัวข้อนี้จะพานักศึกษาไปสำรวจความจริงอันน่าทึ่งเกี่ยวกับ “เวลา” ที่ไม่แน่นอนเหมือนที่เราคิด พร้อมทั้งอธิบายว่าเพราะเหตุใดนักบินอวกาศอาจมีอายุน้อยกว่าคนที่รออยู่บนโลกเมื่อกลับมา!

ต่อไปนี้จะแสดงให้เห็นว่าเวลาในยานอวกาศกับเวลาบนโลกไม่เท่ากัน ดังนี้

- 1) ให้นักบินอวกาศ ฉายแสงจากพื้นขึ้นไปยังเพดานยานอวกาศที่มีกระจกสะท้อนแสง แล้วจับเวลาเมื่อแสงสะท้อนกลับลงมา

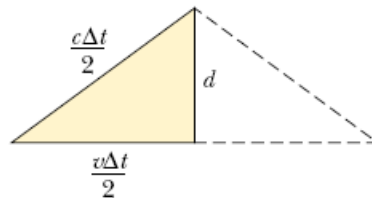


- 2) ให้ผู้สังเกตบนโลกมีกล้องวิเศษที่สามารถมองเห็นการทดลองบนยานอวกาศได้



รูป 15.9 ทางเดินของแสงที่ผู้สังเกตบนโลกมองเห็น

3) ให้นักบินอวกาศ และผู้สังเกตบนโลก ทำการคำนวณหาช่วงเวลาที่แสงเดินทางไปและกลับ



รูป 15.10 ทางเดินของแสงที่ผู้สังเกตบนโลกมองเห็น

การคำนวณหาช่วงเวลาที่แสงเดินทางไปและกลับของนักบินอวกาศทำได้ง่ายมาก คือเวลาเท่ากับระยะทางหารด้วยเวลา หรือเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\Delta t_p = \frac{2d}{c} \quad (15-1)$$

เมื่อ Δt_p คือช่วงเวลาระหว่างเหตุการณ์ ที่วัดโดยผู้สังเกตที่อยู่นิ่งเทียบกับเหตุการณ์ เวลานั้นเรียกว่า *proper time*

การคำนวณหาช่วงเวลาที่แสงเดินทางไปและกลับของผู้สังเกตบนโลกทำได้ดังนี้
เนื่องจากผู้สังเกตบนโลกจะเห็นลำแสงเดินทางเป็นรูปคล้ายสามเหลี่ยม จากรูป 15.9
จากรูป 15.10 และจากกฎของพีทาโกรัส

$$\begin{aligned} \left(\frac{c\Delta t}{2}\right)^2 &= d^2 + \left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2 \\ \left(\frac{c\Delta t}{2}\right)^2 - \left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2 &= d^2 \\ c^2\Delta t^2 - v^2\Delta t^2 &= 4d^2 \\ \Delta t^2(c^2 - v^2) &= 4d^2 \\ \Delta t^2 &= \frac{4d^2}{c^2 - v^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta t &= \sqrt{\frac{4d^2}{c^2 - v^2}} \\ \Delta t &= \frac{2d}{\sqrt{c^2 - v^2}} \\ \Delta t &= \frac{2d}{c\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (15 - 2)\end{aligned}$$

แทนสมการ (15 - 1) ในสมการ (15 - 2) ได้

$$\Delta t = \frac{\Delta t_p}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = \gamma \Delta t_p \quad (15 - 3)$$

เมื่อ Δt คือช่วงเวลาของเหตุการณ์ที่วัดโดยผู้สังเกตที่เคลื่อนที่เทียบกับเหตุการณ์

Δt_p คือช่วงเวลาของเหตุการณ์ที่วัดโดยผู้สังเกตที่หยุดนิ่งเทียบกับเหตุการณ์ เราเรียกช่วงเวลานี้ว่า Proper time

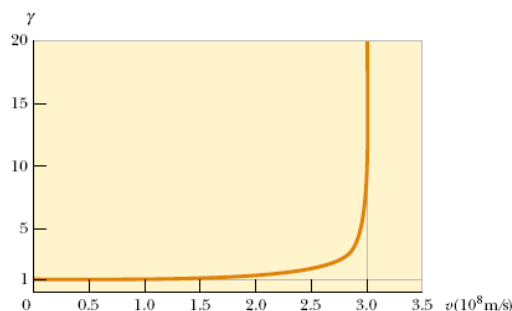
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

γ เรียกว่า Lorentz factor

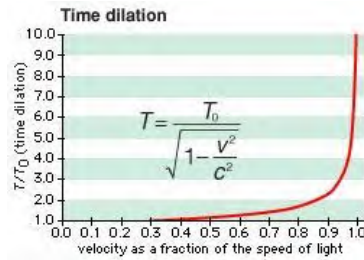
สรุป 1) เวลาไม่ใช่ปริมาณสัมบูรณ์

2) ไม่มีใครสามารถสร้างนาฬิกาที่บอกเวลาได้ตรงกันในทุกสถานที่ได้

ที่ความเร็วอื่น ๆ Lorentz factor มีค่าประมาณ 1 เมื่อความเร็วเท่ากับแสง Lorentz factor จะมีค่าเป็นอนันต์



รูป 15.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Lorentz factor กับอัตราเร็ว



การยืดของเวลา

เวลาเป็นสิ่งที่เราคำนวณในชีวิตประจำวัน เราเชื่อว่าเวลาผ่านไปเท่ากันสำหรับทุกคน ไม่ว่าจะอยู่ที่ไหนหรือกำลังทำอะไร แต่ความเข้าใจแบบนั้นใช้ไม่ได้ เมื่อเราก้าวเข้าสู่โลกของฟิสิกส์สัมพัทธภาพ หนึ่งในแนวคิดที่น่าทึ่งที่สุดจาก ทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษของไอน์สไตน์ คือปรากฏการณ์ที่เรียกว่า “การยืดของเวลา” หรือ *Time Dilation* ซึ่งระบุว่า เวลาไม่ได้เดินเท่ากันเสมอสำหรับผู้สังเกตที่อยู่ในกรอบอ้างอิงต่างกัน เมื่อวัตถุเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงมาก ใกล้เคียงกับความเร็วแสง นาฬิกาที่เคลื่อนไปพร้อมกับวัตถุนั้นจะเดินช้าลงเมื่อเทียบกับนาฬิกาของผู้สังเกตที่อยู่นิ่ง ตัวอย่างเช่น นักบินอวกาศที่เดินทางด้วยความเร็วสูงจะมีอายุต่ำกว่าผู้ที่อยู่บนโลก นี่ไม่ใช่เรื่องสมมุติ แต่เป็นสิ่งที่สามารถพิสูจน์ได้จากการทดลองจริง ในหัวข้อนี้ เราจะทำความเข้าใจว่าทำไมเวลา “ยืดออก” ได้เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น และแนวคิดนี้มีผลกระทบต่อวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอย่างไร โดยเฉพาะในด้านอวกาศ การสื่อสาร และระบบ GPS ที่เราพึ่งพาอยู่ทุกวัน

การยืดของเวลาเป็นเรื่องที่ขัดกับความรับรู้ของคนทั่วไปเป็นจำนวนมาก แต่ก็ได้รับการพิสูจน์แล้วว่า การยืดของเวลาเป็นเรื่องจริง ที่จะเกิดขึ้นกับสิ่งที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกันชื่อ *Hafele* และ *Keating* ได้ทำการทดลองโดยนำนาฬิกาอะตอมไว้ในเครื่องบินเพื่อทดสอบทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ แล้วพบว่านาฬิกาที่อยู่ในเครื่องบินที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงจะเดินช้ากว่านาฬิกาเรือนที่หยุดนิ่งจริง

หลักฐานที่พิสูจน์เกี่ยวกับการยืดของเวลาอีกวิธีหนึ่งก็คือ การที่อนุภาคพลังงานสูงที่มีชื่อว่ามิวออนที่เกิดจากรังสีคอสมิก เป็นอนุภาคกัมมันตรังสีที่มีอายุเฉลี่ยประมาณ 2 ไมโครวินาที และเกิดขึ้นที่ความสูงประมาณ 4.8 กิโลเมตร และเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงมาก สามารถพบได้ที่ระดับน้ำทะเลซึ่งเป็นผลมาจากการยืดของเวลา เนื่องจากถ้าไม่คิดการยืดของเวลา อนุภาคนี้อาจจะเคลื่อนที่ลงมาได้เพียงประมาณ 600 เมตรเท่านั้น

ตัวอย่าง 15.1 อนุภาคมิวออนเป็นอนุภาคที่ไม่เสถียร เมื่ออยู่นิ่งมันจะสลายตัวในเวลา 2.2 ไมโครวินาที อย่างไรก็ตามถ้าอนุภาคมิวออนเคลื่อนที่เข้ามาขงพื้นโลกพร้อมกับรังสีคอสมิกด้วยความเร็ว 0.99c ผู้สังเกตบนโลกจะเห็นอนุภาคมิวออนมีอายุนานเท่าใด

วิธีทำ จาก

$$\Delta t = \frac{\Delta t_p}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

$$\Delta t = \frac{2.2}{\sqrt{1 - \left(\frac{0.99c}{c}\right)^2}}$$

$$\Delta t = \frac{2.2}{\sqrt{1 - 0.9801}}$$

$$\Delta t = 15.5954 \text{ ไมโครวินาที} \quad \text{ตอบ}$$

ตัวอย่าง 15.2 จากตัวอย่าง 15.1 ผู้สังเกตบนโลกจะเห็นอนุภาคมิวออนเคลื่อนที่ได้ระยะทางเท่าใด ?

วิธีทำ จาก

$$\text{ระยะทาง} = \text{ความเร็ว} \times \text{เวลา}$$

$$= 0.99c \times 15.5954$$

$$= (0.99 \times 3 \times 10^8) \times 15.595 \times 10^{-6}$$

$$= 4.63 \times 10^3 \text{ m} \quad \text{ตอบ}$$

ตัวอย่าง 15.3 ผาแฝดคู่อึ่งชื่อ Speedo และ Goslo เมื่อพวกเขาอายุได้ 20 ปี Speedo ได้ออกเดินทางไปยังดาวดวงหนึ่ง ซึ่งอยู่ห่างออกไป 20 ปีแสง ด้วยยานอวกาศที่แล่นด้วยความเร็ว $0.95c$ จงหาว่าเมื่อ Speedo กลับมา อายุของผาแฝดทั้งสองเท่ากับเท่าใด ?



วิธีทำ จาก

$$\text{ระยะทาง} = \text{ความเร็ว} \times \text{เวลา}$$

$$40 \text{ ปีแสง} = 0.95c \times \text{เวลา}$$

$$\text{เวลา} = 42.1 \text{ ปี}$$

อายุของ Goslo

$$= 62.1 \text{ ปี}$$

ตอบ

อายุของ Speedo หาได้จาก

$$\Delta t = \frac{\Delta t_p}{\sqrt{1 - \left(\frac{0.95c}{c}\right)^2}}$$

$$42.1 = \frac{\Delta t_p}{\sqrt{1 - \left(\frac{0.95c}{c}\right)^2}}$$

$$\Delta t_p = 13.16$$

อายุของ Speedo

$$= 33.16 \text{ ปี}$$

ตอบ