

บทที่ 2

การเคลื่อนที่แบบเชิงเส้น*

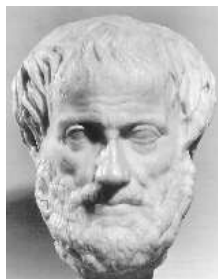
มนุษยชาติสนใจที่จะเรียนรู้ความเป็นไปและตัวการความเข้าใจในสิ่งที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ เพื่อที่จะสามารถอธิบายปรากฏการณ์ธรรมชาติต่างๆ ได้และสามารถทำนายอนาคตได้ว่าปรากฏการณ์เหล่านั้นจะเกิดขึ้นซ้ำอีกเมื่อใด

ผู้สนใจเรียนรู้ในสมัยโบราณจะได้รับการขนานนามว่า นักปรัชญา (Philosopher) นักปรัชญาเหล่านี้ได้ทำการศึกษาถึงศาสตร์ต่างๆ อย่างลึกซึ้งและกว้างขวาง อาทิ นักปรัชญาชาวกรีกโบราณเมื่อกว่า 2,000 ปีก่อน พยายามศึกษาและทำความเข้าใจฟิสิกส์บางประเด็นอย่างที่เราศึกษาอย่างทุกวันนี้ พวกเขาให้ความสนใจคุณสมบัติของแสงเป็นอย่างดี แต่ก็ยังสับสนในกรณีที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของวัตถุ ซึ่งต่างจากที่พบกันในปัจจุบันเป็นอย่างมาก

2.1 แนวความคิดเรื่องการเคลื่อนที่

แนวความคิดเรื่องการเคลื่อนที่เปลี่ยนไปตามยุคสมัย ตั้งแต่อริสโตเติล มาถึงกาลิเลโอ นิวตัน และไอน์สไตน์ในปัจจุบัน แต่เพื่อให้เนื้อหาเป็นที่เข้าใจได้ง่าย ในบทนี้จึงจะกล่าวถึงแนวความคิดของอริสโตเติล จนถึงกาลิเลโอก่อน ส่วนแนวความคิดถัดจากนั้นจะกล่าวถึงต่อไป ในบทนี้จะแบ่งช่วงการเปลี่ยนแปลงแนวความคิดเรื่องการเคลื่อนที่ที่สำคัญต่อไปนี้

แนวความคิดเรื่องการเคลื่อนที่ของอริสโตเติล



อริสโตเติล (Aristotle, 384-322 ปีก่อนคริสตกาล) จัดแบ่งการเคลื่อนที่เป็นสองกลุ่มคือ การเคลื่อนที่โดยธรรมชาติและการเคลื่อนที่โดยการบังคับ การเคลื่อนที่โดยธรรมชาติ จะเป็นไปด้วยธรรมชาติของวัตถุเอง อริสโตเติลคิดว่าวัตถุทุกอย่างในจักรวาลจะต้องมีที่อยู่เหมาะสม เมื่อพิจารณาในมุมมองนี้ ถ้าวัตถุที่ไม่ได้อยู่ในที่ที่เหมาะสมจะพยายามกลับไปในจุดนั่นเอง ถ้าธรรมชาติของวัตถุอยู่ที่พื้นดิน ก้อนดินที่อยู่ใต้อากาศจะต้องตกลงสู่พื้นดินด้วยตัวของมันเอง ถ้าธรรมชาติของวัตถุอยู่ในอากาศ ค้อนที่พวยพุ่งจะลอยขึ้นสู่อากาศ ถ้าธรรมชาติของวัตถุผสมผสานพื้นดินและอากาศ เช่น ขนนก จะค่อยๆ ตกสู่พื้นดิน แต่จะไม่

* เรียบเรียงจาก Hewitt, P., "Conceptual Physics", 6th Edition, Harper Collins Pub., 1989.



รวดเร็วก่อนดิน ซึ่งอริสโตเติลสรุปว่า **โดยธรรมชาติวัตถุจะตกสู่พื้นได้เร็วกว่าเป็นสัดส่วนตรงกับน้ำหนักที่มากกว่า** กล่าวคือวัตถุที่หนักกว่าอีกก้อนสองเท่าจะตกลงพื้นได้เร็วกว่าเป็นสองเท่า

การเคลื่อนที่โดยธรรมชาติบนพื้นโลกจะมีทิศทางเคลื่อนที่ในแนวตรงได้ทั้งพุ่งขึ้นหรือตกลงสู่โลก แต่การเคลื่อนที่โดยธรรมชาติทรงวัตถุบนฟากฟ้า (ดวงดาว) จะเคลื่อนที่ในแนววงกลม ซึ่งต่างจากการเคลื่อนที่แนวตรง ก็จะไม่มีการเริ่มต้นหรือจุดสุดท้าย แต่จะวนทับในเส้นทางเดิมไม่เปลี่ยนแปลง และอริสโตเติลยังเชื่ออีกว่า วัตถุบนฟากฟ้า (ซึ่งถูกเรียกว่าสวรรค์ในยุคกลาง) จะต้องใช้กฎที่แตกต่างกับบนพื้นโลกโดยที่วัตถุบนสวรรค์จะเป็นทรงกลมสมบูรณ์ประกอบด้วยสสารที่มีการเปลี่ยนแปลง ที่เขาเรียกว่าอีเทอร์ (Ether) (ดวงจันทร์เป็นวัตถุบนฟากฟ้าเพียงชนิดเดียวที่เราสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงของการเคลื่อนที่และความไม่สมบูรณ์ได้ ซึ่งคนในยุคกลางเชื่อว่า ดวงจันทร์ซึ่งเป็นวัตถุบนสวรรค์ได้รับผลกระทบจากโลก เพราะอยู่ใกล้และได้รับอิทธิพลจากโลกมากเกินไป)

การเคลื่อนที่โดยการบังคับเป็นผลจากแรงดึงและแรงผลักเช่นคนผลักรถให้เคลื่อนหรือยกของหนักขึ้นจากพื้น แรงลมที่กระทำต่อเรือ ซึ่งเป็นผลให้วัตถุมีการเคลื่อนที่ได้ อริสโตเติลสรุปการเคลื่อนที่โดยการบังคับว่ามีสาเหตุจากภายนอกและกระทำต่อวัตถุ วัตถุจะไม่เคลื่อนที่เอง แต่จะเกิดจากแรงผลักและดึง

แนวความคิดเกี่ยวกับการเคลื่อนที่โดยบังคับนี้เกิดข้อยุ่ยากขึ้นเมื่อเราพยายามนำมาอธิบายการดึงและผลักในบางเหตุการณ์ เช่น การยิงธนู หลังจากที่ลูกศรพุ่งออกจากคันธนู แล้วลูกศรยังคงเคลื่อนที่ต่อไปได้ จึงดูเหมือนว่าการเคลื่อนที่นี้ต้องมีแรงผลักจากบางสิ่งบางอย่างในอากาศ

โดยสรุป อริสโตเติลคิดว่าการเคลื่อนที่ทุกอย่างเป็นผลจากธรรมชาติหรือจากการผลักและดึง และเมื่อวัตถุอยู่ที่ที่เหมาะสม วัตถุจะไม่เคลื่อนที่จนกว่าจะมีแรงกระทำจากภายนอก ซึ่งผลจากความเชื่อในความคิดนี้ คือ โลกของเราจำเป็นต้องอยู่ในสถานะหรือที่ที่เหมาะสมเสมอตามธรรมชาติ ตามความเชื่อของอริสโตเติลเพราะแรงที่จะทำให้โลกเคลื่อนที่ได้มันเกินกว่าที่เราจะจินตนาการได้ (หรือไม่สมเหตุผลที่จะเกิดขึ้น) ตามทฤษฎีนี้จึงเป็นที่ประจักษ์ในเวลานั้นว่า **โลกของเราไม่เคลื่อนที่หรือหยุดนิ่ง** ความเชื่อนี้ได้รับการยอมรับต่อมาอีกกว่า 2000 ปี จนกระทั่งมีการเปลี่ยนแปลงแนวความคิดในศตวรรษที่ 16 เป็นต้นมา

แนวความคิดของคอปเปอร์นิคัส



นักดาราศาสตร์ชาวโปแลนด์ชื่อ คอปเปอร์นิคัส (Nicolaus Copernicus, ค.ศ. -- 1543) ได้รายงานการสำรวจดวงดาวต่างๆในจักรวาลแล้วค้นพบว่า **โลกเราไม่ได้หยุดนิ่งแต่เคลื่อนที่และโคจรไปรอบดวงอาทิตย์** ซึ่งขัดแย้งอย่างรุนแรงต่อความเชื่อในแนวความคิดของอริสโตเติล ซึ่งมีอำนาจทางความคิดต่อ

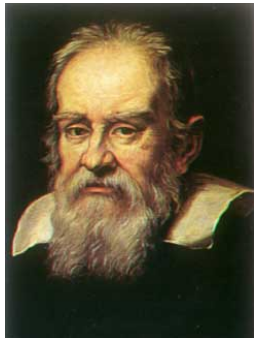
ศาสนจักรในเวลานั้นเป็นอย่างมาก จึงถือเป็นการท้าทายต่ออำนาจการปกครองโดยตรง

เป็นเวลาหลายปีที่เขาค้นพบที่เกิดขึ้นนี้แต่ไม่กล้าที่จะเปิดเผยต่อสาธารณะ ด้วยสองเหตุผลหลัก ประการแรกเขากลัวการลงโทษ เนื่องจากความเชื่อหรือทฤษฎีที่ขัดแย้งจากความเชื่อร่วมกันจะกระทบแนวความคิด



โดยรวมของสังคม และประการที่สองเขาไม่ยอมรับผลการทดลองหรือการค้นพบครั้งนั้นเนื่องจากเขาไม่สามารถยอมรับแนวความคิดที่โลกเคลื่อนที่ได้ แต่ในที่สุดเขาตัดสินใจตีพิมพ์ผลงานชิ้นนี้ในวันสุดท้ายของชีวิต

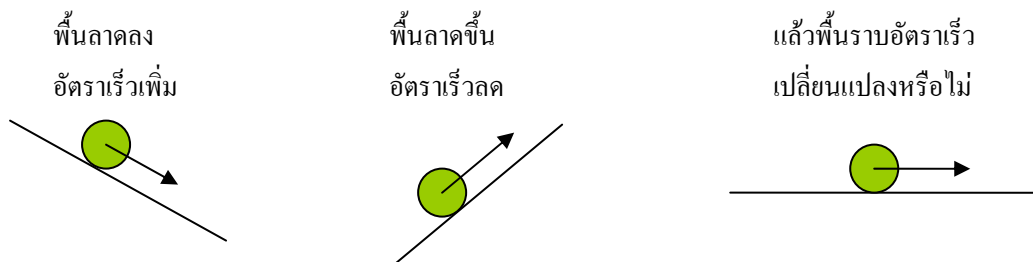
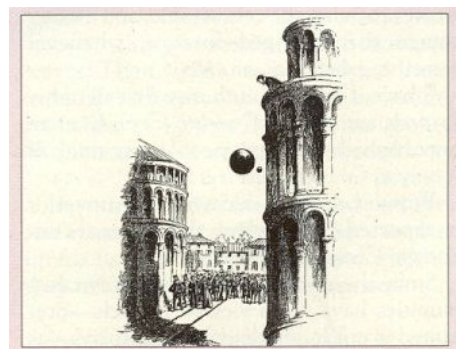
แนวความคิดของกาลิเลโอ



กาลิเลโอ (Galileo Galilei, 1564-1642) นักวิทยาศาสตร์ชั้นนำในศตวรรษที่ 16 เป็นผู้ที่มีแนวความคิดของคอปเปอร์นิคัสที่ว่าโลกไม่ได้หยุดนิ่งเป็นจริงขึ้นมา โดยการล้มล้างแนวความคิดการเคลื่อนที่แบบอริสโตเติล ผ่านการสังเกตและการทดลอง ชั้นแรกเขาโค่นล้มสมมุติฐานของอริสโตเติลเกี่ยวกับการตกของวัตถุที่ว่า วัตถุที่หนักกว่าจะตกถึงพื้นเร็วกว่าเป็นจำนวนเท่าตามน้ำหนัก โดยการที่เขาปล่อยวัตถุที่น้ำหนักต่างกันให้ตกจากยอดหอเอนที่เมืองปิซา ประเทศอิตาลี

และทำการเปรียบเทียบการตก ผลที่ได้ปรากฏว่า **ก้อนหินที่หนักกว่าอีกก้อนเป็นสองเท่าไม่ได้ตกเร็วกว่าเป็นสองเท่า** ตามแนวของอริสโตเติล และยังพบอีกว่าถ้าไม่นับผลกระทบจากแรงต้านอากาศ วัตถุหลายๆก้อนที่น้ำหนักต่างกันถูกปล่อยในเวลาเดียวกันตกกระทบพื้นพร้อมๆกัน แต่ผู้ที่เข้าชมการทดลองนี้จำนวนมากเหยียดต่อนักวิทยาศาสตร์หนุ่มผู้นี้ และยังคงยึดมั่นแนวความคิดของอริสโตเติลต่อไปอย่างเหนียวแน่น

อริสโตเติลสังเกตธรรมชาติ โดยการพิจารณาสิ่งที่เกิดขึ้นรอบๆตัวแทนที่จะเข้าไปพิจารณาปัญหาที่ซับซ้อน เขาวางแนวความคิดว่าการเคลื่อนที่ของวัตถุจำเป็นต้องเกี่ยวข้องกับการเสียดทานหรือการต้านทานถ้าไม่จากอากาศก็จากน้ำ เขาไม่เคยเชื่อว่าสุญญากาศจะเป็นไปได้ ดังนั้นจึงไม่เคยพิจารณาการเคลื่อนที่ใดๆโดยปราศจากตัวกลางนั้นจึงเป็นเหตุผลที่ว่าทำให้ของวัตถุเคลื่อนที่ที่ไม่เป็นไปตามธรรมชาติจำเป็นต้องมีการผลักหรือดึง ซึ่งเป็นหลักการพื้นฐานที่กาลิเลโอปฏิเสธอย่างรุนแรง เพราะเขาเชื่อว่า ถ้าไม่มีการรบกวนใดๆต่อวัตถุที่กำลังเคลื่อนที่ วัตถุก็จะเคลื่อนที่ต่อไปในแนวตรงได้ตลอดกาล โดยไม่จำเป็นต้องมีการผลัก การดึง หรือแรงชนิดใดๆมากระทำ

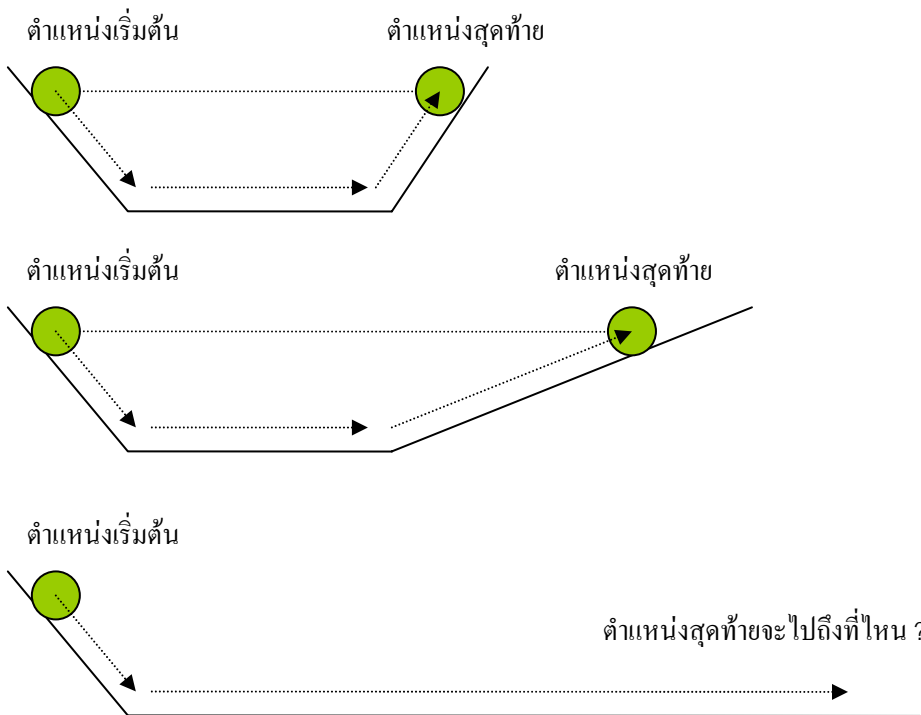


เขาทดสอบสมมุติฐานนี้จากการทดลองการเคลื่อนที่ของวัตถุหลายๆชนิดบนพื้นเอียง เขาสังเกตว่าลูกบอลที่กลิ้งลงมาจากพื้นลาดลงจะเคลื่อนที่เร็วขึ้นๆ ขณะที่ลูกบอลที่กลิ้งขึ้นพื้นลาดขึ้นกลับเคลื่อนที่ช้าลงๆ



จึงให้เหตุผลต่อไปว่า ถ้าลูกบอลกลิ้งไปบนพื้นราบก็ไม่ควรที่จะมีอัตราเร็วเพิ่มขึ้นหรือลดลง แต่ในที่สุดลูกบอลจะมาถึงจุดหยุดนิ่งไม่ใช่เป็นเพราะธรรมชาติของมันแต่เป็นเพราะความเสียดทาน เขาสนับสนุนแนวความคิดนี้ด้วยการสังเกตการเคลื่อนที่บนพื้นที่มีผิวเรียบขึ้น และพบว่าเมื่อพื้นผิวเรียบขึ้นคือมีความเสียดทานน้อยลง การเคลื่อนที่ของวัตถุจะยืดหยุ่นไปได้ยาวนานกว่า หรือเมื่อความเสียดทานน้อยลง การเคลื่อนที่ก็จะเข้าสู่อัตราเร็วที่ลดลงทีละน้อยหรือค่อนข้างจะคงที่ เขาจึงกล่าวว่า ถ้าไม่มีความเสียดทานหรือแรงต้านทานอื่นใด วัตถุที่เคลื่อนที่อยู่บนพื้นราบคงจะเคลื่อนที่ต่อไปตลอดกาล

เพื่อยืนยันสมมติฐานข้อนี้ เขานำพื้นเอียงขึ้นและเอียงลงสองอันมาชนกัน เขาสังเกตว่าลูกบอลที่ถูกปล่อยจากจุดหนึ่งบนด้านหนึ่งของพื้นเอียงที่ลาดลง จะกลิ้งลงมาและกลิ้งขึ้นไปบนพื้นลาดขึ้น จนหยุด ณ ตำแหน่งที่มีความสูงเกือบเท่าเดิม เขาให้เหตุผลว่าจะมีเพียงความเสียดทานเท่านั้นที่กั้นไม่ให้ลูกบอลกลิ้งไปจนมีความสูงเท่าเดิม และเมื่อเขาเปลี่ยนพื้นเป็นพื้นทึบขึ้นลูกบอลก็จะกลิ้งขึ้นไปจนสูงใกล้เคียงความสูงเริ่มต้นมากขึ้น ต่อมาเขาเปลี่ยนให้ด้านพื้นลาดขึ้นมีความชันลดลง พบว่าลูกบอลกลิ้งไปจนมีความสูงเท่าเดิม แต่ต้องกลิ้งไปไกลกว่า ทุกครั้งที่ลดความชันลง ก็จะได้ผลเหมือนเดิมคือลูกบอลกลิ้งไปจนมีความสูงเท่าเดิม แต่ต้องไปไกลยิ่งขึ้นเรื่อยๆ เขาจึงตั้งเป็นคำถามไว้ว่า “ถ้ามีพื้นราบที่ยาวมาก ลูกบอลจะต้องกลิ้งไปไกลเท่าไรเพื่อที่ที่มีความสูงเท่าเดิม” ซึ่งจะตอบได้อย่างชัดเจนว่า “ตลอดกาล- เพราะมันจะไม่มีทางไปถึงความสูงเริ่มต้นได้เลย”



กาลิเลโอวิเคราะห์เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ในอีกทางหนึ่ง เพราะว่า การเคลื่อนที่ลงจากพื้นเอียงอันแรกเหมือนกันทั้งสามกรณี อัตราเร็วของลูกบอลที่เริ่มต้นเคลื่อนที่ขึ้นพื้นเอียงอันที่สองจึงต้องเท่ากัน ถ้าลูกบอลกลิ้งขึ้นพื้นที่มีความชันมากๆ อัตราเร็วจะลดฮวบลงทันที แต่กับพื้นที่มีความชันน้อยๆ อัตราเร็วจะลดลงช้าๆ



หรือกลิ้งไปได้ยาวนานกว่า นั่นคือความชันน้อยๆ ลูกบอลจะสูญเสียอัตราเร็วช้ากว่า ในกรณีสุดขั้วที่พื้นไม่มี ความชันเลย –พื้นราบ- ลูกบอลก็ไม่ควรที่จะสูญเสียอัตราเร็วเลย นั่นคือถ้าไม่มีแรงใดมาขัดขวาง ลูกบอลมี แนวโน้มที่จะเคลื่อนที่ไปตลอดกาลโดยปราศจากการสูญเสียอัตราเร็ว คุณสมบัติที่วัตถุเคลื่อนที่ต่อเนื่องไปนี้ เขาเรียกว่า **ความเฉื่อย (inertia)**

แนวคิดเรื่องความเฉื่อยของกาลิเลโอนี้ ทำให้ทฤษฎีการเคลื่อนที่ของอริสโตเติลไม่ได้รับการยอมรับอีก ต่อไป อริสโตเติลคิดไม่ถึงเรื่องความเฉื่อยเนื่องจากเขาเองไม่สามารถนึกถึงการเคลื่อนที่ใดๆที่ปราศจากการ เสียชทาน เพราะเขาประสบแต่การเคลื่อนที่ที่ต้องมีการต้านทานซึ่งเป็นศูนย์กลางของแนวความคิดของเขาเอง และแนวความคิดดังกล่าวก็ได้หน่วงความก้าวหน้าทางฟิสิกส์มาถึง 2000 ปี ความคิดรวบยอดของกาลิเลโอเรื่องความเฉื่อย จึงแสดงให้เห็นว่าไม่จำเป็นต้องมีแรงใดๆ (ผลักหรือดึง) เพื่อให้โลกเคลื่อนที่ไปได้เรื่อยๆ ซึ่งเป็นแนวทางใหม่ที่ทำให้ไอแซก นิวตันสามารถอธิบายการเคลื่อนที่ต่างๆของจักรวาลด้วยกฎการเคลื่อนที่อันใหม่ ซึ่งแม้ต่อมากฎของนิวตันไม่ถูกต้องในบางกรณี ที่ต้องอธิบายด้วยทฤษฎีสัมพัทธภาพ (Theory of Relativity) ของไอน์สไตน์ก็ตาม

2.2 การเคลื่อนที่แบบเชิงเส้น

อริสโตเติลเชื่อว่า เมื่อวัตถุมี *ระยะห่าง* จากที่ที่มันควรอยู่ จะทำให้มันเคลื่อนที่ แต่กาลิเลโอทำลายความคิดดังกล่าวดังที่กล่าวมาแล้ว และเชื่อว่าเราควรให้ความสำคัญกับ *เวลา* มากกว่า สำหรับการอธิบายการเคลื่อนที่ โดยอธิบายการเคลื่อนที่ในเทอมของ *อัตราการเปลี่ยนแปลงต่อเวลา* อัตราการเปลี่ยนแปลงต่อเวลาของปริมาณหนึ่ง คือปริมาณนั้นหารด้วยค่าเวลา ซึ่งจะเป็นค่าที่บอกเราว่าบางสิ่งเกิดขึ้นได้รวดเร็วเพียงใด หรือบางสิ่งเปลี่ยนแปลงไปมากเท่าไรเมื่อเวลาช่วงเวลาหนึ่งผ่านไป อัตราที่บ่งบอกการเคลื่อนที่ คือ *อัตราเร็ว* *ความเร็ว* และ *ความเร่ง* โดยในบทนี้เราจะพิจารณาการเคลื่อนที่ที่ไปตามแนวเส้นตรงเท่านั้น การเคลื่อนที่ในรูปแบบอื่นจะพิจารณาในบทต่อไป

อัตราเร็ว

สิ่งต่างๆที่กำลังเคลื่อนที่จะเดินทางไปได้ระยะทางหนึ่งในเวลาที่กำหนด เช่น รถยนต์วิ่งไปบนถนนได้หลายกิโลเมตรในเวลาหนึ่งชั่วโมง อัตราเร็ว ก็คือการวัดว่าบางสิ่งเคลื่อนที่ได้เร็วเพียงใด เป็นอัตราที่ถูกวัดในเทอมของระยะทางหารด้วยหนึ่งหน่วยเวลา หรือ

$$\text{อัตราเร็ว} = \frac{\text{ระยะทาง}}{\text{เวลา}}$$

หน่วยในการวัดอัตราเร็วนี้ อาจขึ้นกับสิ่งที่ต้องการวัด เช่นกับรถยนต์เราอาจวัดในหน่วยของกิโลเมตรต่อชั่วโมง (km/h) ที่เรารู้คุ้นเคยกัน แต่กับระยะทางสั้นๆเราควรใช้หน่วยเมตรต่อวินาที (m/s) มากกว่า และ



หน่วยเมตรต่อวินาทีนั้นเป็นหน่วยในระบบ SI ที่ใช้กันทั่วไปในการศึกษาวิทยาศาสตร์ เพื่อให้เกิดความคุ้นเคยกับหน่วยเล็ก ๆ อย่างเมตรต่อวินาที ตารางข้างล่างเปรียบเทียบอัตราเร็วระหว่างทั้งสองหน่วย

| | | |
|----------|---|--------|
| 20 km/h | = | 6 m/s |
| 40 km/h | = | 11 m/s |
| 60 km/h | = | 17 m/s |
| 80 km/h | = | 22 m/s |
| 100 km/h | = | 28 m/s |

ตาราง 2.1 เปรียบเทียบอัตราเร็วโดยประมาณระหว่างสองหน่วย

อัตราเร็ว ณ ขณะเวลาใดๆ คืออัตราเร็วของบางสิ่ง ณ ขณะเวลาใดๆที่เรากำลังสังเกต อัตราเร็วของรถยนต์ที่แสดงที่มาตรวัดอัตราเร็ว เช่นเรามักจะพูดกันในปัจจุบันว่าไม่ขับรดด้วยอัตราเร็วเกิน 90 กิโลเมตรต่อชั่วโมง กล่าวคือ ไม่ขับรดให้มีอัตราเร็ว ณ ขณะใดๆให้สูงกว่า 90 กิโลเมตรต่อชั่วโมงนั่นเอง และมันหมายความว่าถ้ารถยังคงเคลื่อนที่ไปเร็วเท่านั้นต่อไป ใน 1 ชั่วโมง รถก็จะวิ่งไปได้ระยะทาง 90 กิโลเมตรนั่นเอง

อัตราเร็วเฉลี่ย ปกติรถคงจะไม่วิ่งด้วยอัตราเร็วที่คงที่ตลอดเวลา เพราะตลอดทริปการเดินทางจะต้องมีการเปลี่ยนอัตราเร็วขึ้นลงตลอด เราจึงต้องแยกให้ออกระหว่างอัตราเร็ว ณ ขณะเวลาใดๆและอัตราเร็วเฉลี่ย โดยที่อัตราเร็วเฉลี่ยหาได้จาก

$$\text{อัตราเร็วเฉลี่ย} = \frac{\text{ระยะทางทั้งหมดตลอดการเดินทาง}}{\text{เวลาที่ใช้ในการเดินทาง}}$$

เราหาอัตราเร็วเฉลี่ยได้ง่ายๆ เช่น เราขับรดไปได้ระยะทาง 10 กิโลเมตรใช้เวลาทั้งหมด 1 ชั่วโมง หาอัตราเร็วเฉลี่ยได้เท่ากับ 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง หรือ ขับรดต่อเนื่องจากกรุงเทพไปเชียงใหม่ได้ระยะทาง 800 กิโลเมตรและใช้เวลาไป 10 ชั่วโมง

$$\text{อัตราเร็วเฉลี่ย} = \frac{\text{ระยะทางทั้งหมดตลอดการเดินทาง}}{\text{เวลาที่ใช้ในการเดินทาง}} = \frac{800\text{km}}{10\text{h}} = 80 \text{ km/h}$$

จะเห็นว่าอัตราเร็วเฉลี่ยไม่ได้บ่งบอกถึงการเปลี่ยนอัตราเร็วของรถ ณ ขณะใดๆ เลย และโดยทั่วไปอัตราเร็วเฉลี่ยจะแตกต่างอัตราเร็ว ณ ขณะใดๆเสมอ ยกเว้นว่ารถจะวิ่งด้วยอัตราเร็วคงที่ตลอดการเดินทาง



ตัวอย่าง 2.1 ถ้าแมววิ่งไปเป็นระยะ 10 เมตร ใช้เวลาวิ่ง 2 วินาที อยากรทราบ
อัตราเร็วเฉลี่ย

คำตอบ

ตัวอย่าง 2.2 รถยนต์วิ่งด้วยอัตราเร็วเฉลี่ย 60 km/h อยากรทราบระยะทางที่รถวิ่ง
ได้ในช่วงเวลา 4 ชั่วโมง

คำตอบ

ความเร็ว

ในชีวิตประจำวันเรามักจะใช้คำว่า อัตราเร็ว และ ความเร็ว ในความหมายเดียวกัน แต่ทั้งสองคำมีความหมายที่แตกต่างกัน เมื่อเราบอกว่ารถเดินทางด้วยอัตรา 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง นั้นจะเป็นอัตราเร็ว แต่ถ้าเราบอกว่ารถเดินทางไปทางทิศเหนือด้วยอัตรา 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงนั้น จะเป็นความเร็ว นักแข่งรถจะใส่ใจกับอัตราเร็วของรถคือขับรถได้เร็วเท่าไร ส่วนนักบินจำเป็นต้องใส่ใจกับความเร็วคือเครื่องบินจะบินไปได้เร็วเท่าไรและ *ในทิศทางใด* นั่นคือเมื่อเราอธิบายการเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วและทิศทาง เรากำลังพูดถึง *ความเร็ว*

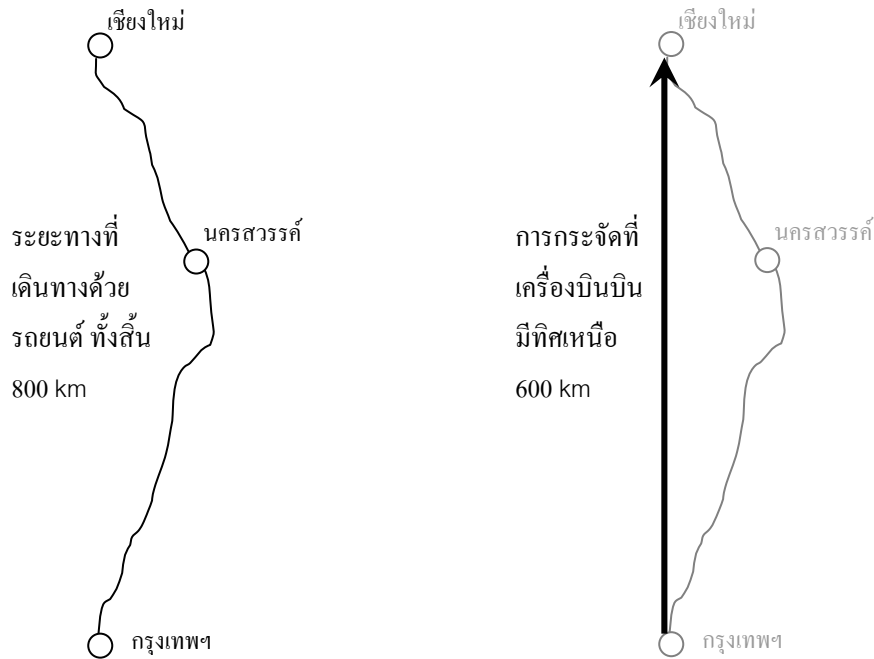
ความเร็วเฉลี่ยและความเร็ว ณ ขณะใดๆ จะนิยามได้เหมือนกับในเทอมของอัตราเร็ว โดยทั่วไปถ้าเรากล่าวถึงความเร็ว จะหมายถึงความเร็ว ณ ขณะเวลาใดๆ ถ้ารถวิ่งไปด้วยความเร็วไม่เปลี่ยนและคงที่ แล้วความเร็วเฉลี่ยและความเร็ว ณ ขณะใดๆจะมีค่าเท่ากัน เหมือนอย่างที่เราพูดถึงอัตราเร็ว แต่ความเร็วคงที่และอัตราเร็วคงที่อาจไม่เหมือนกันได้ เพราะความเร็วคงที่หมายถึงการเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วคงที่และไม่มีการเปลี่ยนทิศทาง รถวิ่งวนเป็นวงกลมด้วยอัตราเร็วคงที่จะไม่มีความเร็วคงที่ เนื่องจากความเร็วเปลี่ยนเมื่อทิศการเคลื่อนที่เปลี่ยนไป

การกระจัด

ถ้าเราขับรถจากกรุงเทพฯไปเชียงใหม่ และเลี้ยวไปใช้เส้นทางผ่านนครสวรรค์ วัดระยะทางได้ทั้งหมดประมาณ 800 กิโลเมตร และใช้เวลาขับรถทั้งสิ้น 10 ชั่วโมง แสดงว่าเราขับรถด้วยอัตราเร็วเฉลี่ย 80 km/h แต่ถ้าเรานั่งเครื่องบินจากสนามบินดอนเมืองตรงไปทางเหนือไปยังสนามบินเชียงใหม่ เครื่องบินบินได้ระยะทาง 600 กิโลเมตร ใช้เวลา 1 ชั่วโมงครึ่ง เราจะเรียกระยะทางที่มีทิศทางนี้ว่า *การกระจัด* ซึ่งใน



เหตุการณ์นี้กล่าวได้ว่า การกระจัดของเครื่องบินมีทิศเหนือเป็นระยะทาง 600 km และมีความเร็ว 400 km/h ไปทางทิศเหนือ



โดยทั่วไปใช้สัญลักษณ์ d แทนระยะทาง s แทนการกระจัด และ \bar{v} แทนความเร็วเฉลี่ย หาได้จาก

$$\bar{v} = \frac{s}{t}$$

ในการเคลื่อนที่ในแนวตรง ถ้าเราทราบความเร็วเฉลี่ย เราจะสามารถหาการกระจัดได้จาก

$$s = \bar{v}t$$

ความเร่ง

เราอาจเปลี่ยนความเร็วของบางสิ่งได้จาก การเปลี่ยนอัตราเร็ว การเปลี่ยนทิศการเคลื่อนที่ หรือการเปลี่ยนทั้งอัตราเร็วและทิศการเคลื่อนที่ เรานิยามอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วว่า *ความเร่ง* , a

$$\text{ความเร่ง} = \frac{\text{การเปลี่ยนความเร็ว}}{\text{ช่วงเวลา}}$$

หรือ

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

เมื่อ เครื่องหมาย Δ หมายถึงการเปลี่ยนแปลง (อ่านว่า เดลตา)



จะเห็นว่าในการขับรถจากหยุดนิ่งให้มีความเร็ว รถจะมีความเร่ง นั่นคือมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วเทียบกับเวลา สมมุติว่าเราเร่งเครื่องรถอย่างสม่ำเสมอในทุกๆ 1 วินาทีจากความเร็ว 30 km/h ไปมีความเร็ว 35 km/h และ 40 km/h ในวินาทีถัดมา จะเห็นว่าความเร็วเปลี่ยนแปลง 5 km/h ในทุกๆวินาทีที่เรากล่าวได้ว่ารถมีความเร่ง 5 km/h.s หรือ ประมาณ 1.25 m/s · s หรือ 1.25 m/s²

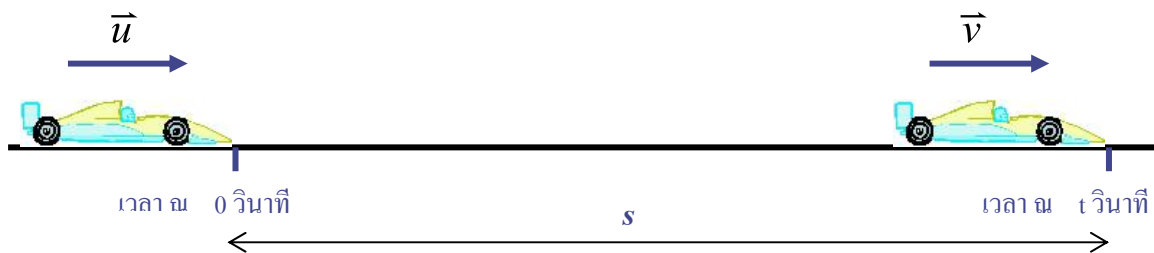
คำว่า ความเร่ง นั้นอาจหมายถึงการลดลง หรือการเพิ่มขึ้นของความเร็วใน 1 วินาที เช่นเมื่อเราเหยียบเบรกรถ ซึ่งเป็นการต้านการเร่งความเร็วขึ้น นั่นคือเป็นการลดลงของความเร็วใน 1 วินาที หรือ *ความเร่งเป็นลบ*

เราจะมี ความเร่งเมื่อขับรถเข้าโค้ง แม้จะขับด้วยอัตราเร็วคงที่ เพราะว่าทิศทางการเคลื่อนที่ของเราเปลี่ยน ดังนั้นความเร็วเปลี่ยน เราจะรู้สึกถึงความเร่งนี้เมื่อรถวิ่งจนสุดโค้ง ด้วยเหตุนี้เราจึงเห็นความแตกต่างของอัตราเร็วและความเร็วและได้นิยามความเร่งเป็นอัตราที่ความเร็วเปลี่ยนต่อเวลา (ไม่ใช่การเปลี่ยนอัตราเร็วต่อเวลา)

ในบางเหตุการณ์เราจะแยกความเร็วและความเร่งได้ เช่นเราสามารถยืนนิ่งๆ ใต้ขบวนรถแข่งที่แล่นเร็วไปบนทางด่วนด้วยความเร็วคงที่ หรือแม้แต่จะโยนเหรียญขึ้นในอากาศและรับเหมือนกับรถหยุดนิ่งกับที่ แต่ถ้าคนขับรถแข่งเร่งความเร็วขึ้น หรือลดความเร็วลง หรือแม้แต่เข้าโค้ง เราคงจะรู้สึกเหล่านั้นได้ยากขึ้น นั่นเป็นผลมาจากความเร่งนั่นเอง

ความจริงแล้ว ความเร่งที่กล่าวถึงนี้เป็นค่า *ความเร่งเฉลี่ย* ในช่วงเวลาหนึ่ง เช่นถ้าที่เวลาเริ่มต้นวินาทีที่ 0 รถยนต์มีความเร็วเริ่มต้น u และเมื่อเวลาผ่านไป t รถมีความเร็ว v เราบอกได้ว่าระยะคันนี้มีความเร่งเฉลี่ยในช่วงเวลาดังกล่าวเป็น

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v - u}{t}$$



และเมื่อย้ายข้างสมการจะได้ว่า

$$v = u + at$$

เนื่องจากการเคลื่อนที่นี้มีความเร่งคงที่ เมื่อเวลาผ่านไป t การกระจัด s สามารถหาได้จากค่าความเร็วเฉลี่ยตลอดการเคลื่อนที่ซึ่งมีค่า $\frac{u + v}{2}$ คือ $s = \frac{u + v}{2}t$ และถ้าเราแทนค่า v จากสมการข้างต้นได้เป็น



$$s = ut + \frac{1}{2}at^2$$

สมการการเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยความเร่งคงที่

ถึงจุดนี้เราพอสรุปสมการที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยความเร่งคงที่ได้ ดังนี้

$$s = vt$$

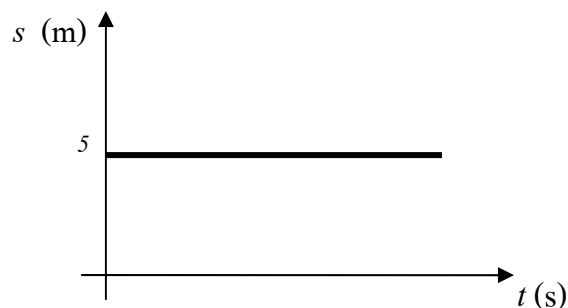
$$v = u + at$$

$$s = ut + \frac{1}{2}at^2$$

ถ้าเราพิจารณาสมการการเคลื่อนที่ทีละขั้นและเขียนเป็นกราฟแสดงการเคลื่อนที่ คือ

1. วัตถุหยุดนิ่ง (ความเร็วเป็นศูนย์)

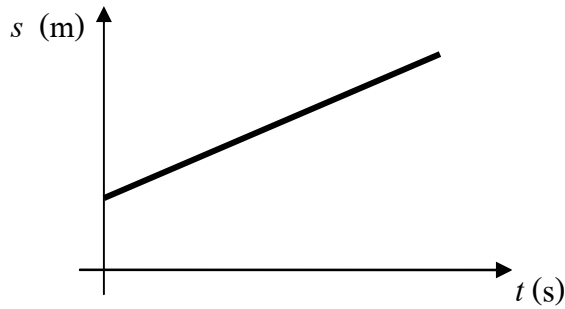
ในกรณีนี้ วัตถุไม่มีการเคลื่อนที่ใดๆเลย แม้เวลาผ่านไปนานเท่าใด การกระจัดจะมีค่าเท่าเดิมเหมือนหรือเท่ากับตอนเริ่มต้นเสมอ (เช่นถ้าการกระจัดเริ่มต้นมีค่า 5 เมตรทางทิศตะวันออก ก็จะมีค่าเท่าเดิมไปตลอดเพราะไม่มีการเคลื่อนที่ใดๆเลย)



2. เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ (ความเร่งเป็นศูนย์)

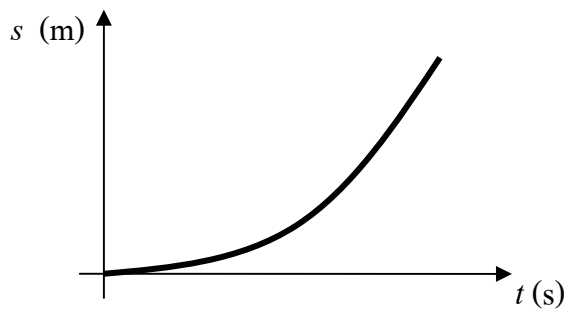
เมื่อวัตถุเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ หมายถึงในทุกๆวินาที จะมีการกระจัดเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ ตามค่าความเร็วตามสมการ $s = vt$ ซึ่งกราฟระหว่าง s กับ t จะเป็นกราฟเส้นตรง





3. เคลื่อนที่ด้วยความเร่งคงที่

เมื่อเคลื่อนที่ด้วยความเร่งคงที่ หมายถึงในทุกๆวินาทีวัตถุจะมีความเร็วเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ และการกระจัดหาได้จากสมการ $s = ut + \frac{1}{2}at^2$ ซึ่งเป็นสมการกำลังสอง กราฟจะเป็นรูปพาราโบลา



ความเร่งที่เกิดบนพื้นเอียง

กาลิเลโอสร้างความคิดรวบยอดเกี่ยวกับความเร่งจากการทดลองการเคลื่อนที่ของวัตถุบนพื้นเอียง ความสนใจหลักของเขาอยู่ที่การตกสู่พื้นของวัตถุ และเนื่องจากในสมัยนั้นยังไม่มีอุปกรณ์ที่ใช้จับเวลาที่เหมาะสม เขาจึงใช้พื้นเอียงเพื่อที่จะทำให้การเคลื่อนที่ด้วยความเร่งที่ไม่สูงมาก และจะได้สังเกตการทดลองได้อย่างระมัดระวัง

เขาพบว่าลูกบอลกลิ้งลงมาจากพื้นเอียงจากหอคุนึ่ง ลูกบอลจะมีอัตราเร็วที่เพิ่มขึ้นๆในอัตราที่เท่าเดิม ในทุกวินาที นั่นคือลูกบอลเคลื่อนที่ด้วยความเร่งคงที่ ตัวอย่างเช่น ลูกบอลที่ทำการทดลองกลิ้งลงมาจากพื้นเอียงที่ทำมุมค่าหนึ่ง อาจพบว่าเมื่ออัตราเร็วที่เพิ่มขึ้น 2 เมตรต่อวินาทีในทุกๆวินาที หรือมีความเร่งคงที่เท่ากับ 2 m/s^2 นั่นเอง ความเร็ว ณ ระยะเวลาใดๆที่ทุกๆช่วงเวลา 1 วินาที ที่ความเร่งค่านี้ จะเป็น 0, 2, 4, 6, 8, 10, ... เมตรต่อวินาที นั่นคือความเร็ว ณ ระยะเวลาหนึ่ง หลังจากที่ถูกลบออกจากหอคุนึ่ง หาได้ง่ายจากความเร่งคูณกับเวลาที่ผ่านไป

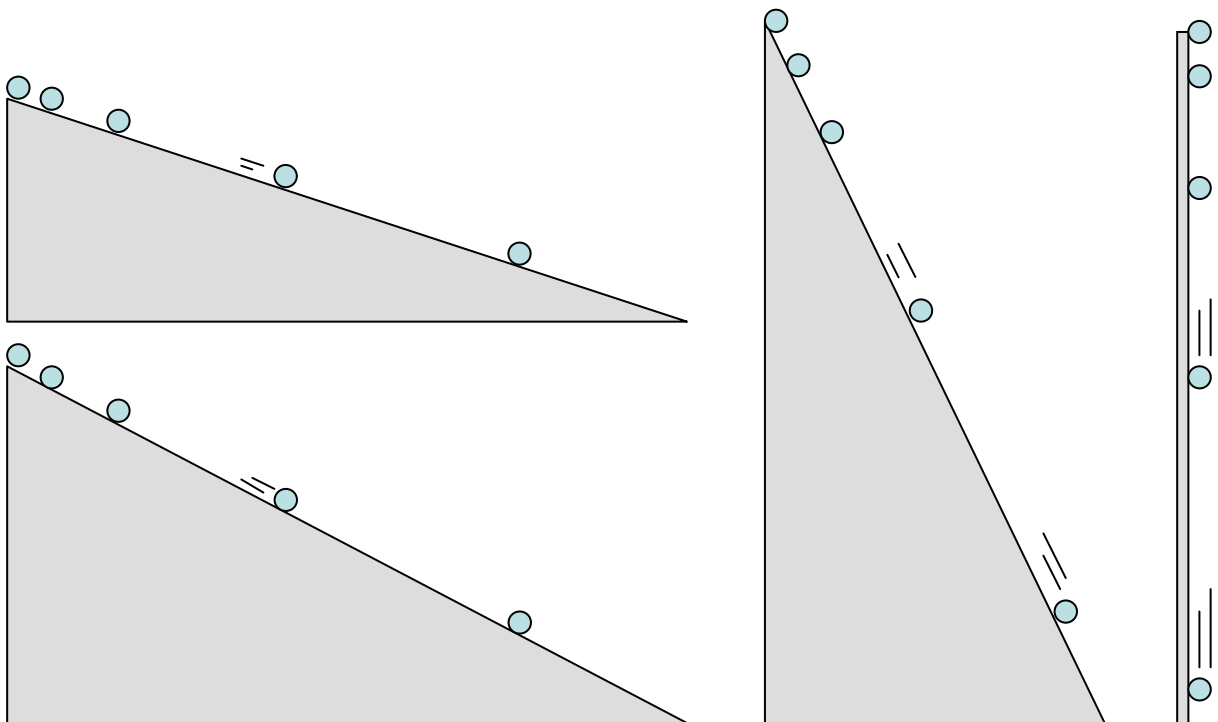


ความเร็วของวัตถุ = ความเร่ง × เวลา

หรือ

$$v = at$$

กาลิเลโอพบว่าถ้าปรับให้พื้นเอียงชันขึ้นจะเกิดความเร็วสูงขึ้น ลูกบอลจะมีความเร็วสูงสุดเมื่อพื้นเอียงถูกปรับจนเป็นแนวตั้ง และความเร็วนี้จะมีค่าเท่ากับวัตถุที่ตกสู่พื้น โดยไม่ต้องคำนึงถึงขนาดและน้ำหนัก กาลิเลโอพบว่าเมื่อแรงต้านอากาศมีผลน้อยมากจนตัดทิ้งได้ วัตถุทุกชนิดตกสู่พื้นโลกด้วยความเร่งที่เท่ากัน

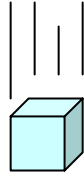


การตกอย่างอิสระ

สิ่งต่างๆตกสู่พื้นโลกด้วยแรงจากแรงโน้มถ่วงของโลก เมื่อวัตถุที่กำลังตกสู่พื้นโดยปราศจากการต้านทานจากสิ่งต่างๆ กล่าวคือ ไม่มีความเสียดทานจากอากาศหรือสิ่งอื่นใด และตกลงด้วยอิทธิพลจากแรงโน้มถ่วงเพียงอย่างเดียว เราเรียกว่าวัตถุดังกล่าวอยู่ในสภาวะการตกอย่างอิสระ



| เวลาที่ตก (s) | ความเร็ว(m/s) |
|---------------|---------------|
| 0 | 0 |
| 1 | 10 |
| 2 | 20 |
| 3 | 30 |
| 4 | 40 |
| 5 | 50 |
| ... | ... |
| t | 10t |



ตารางข้างๆแสดงค่าอัตราเร็ว ณ ระยะเวลาใดๆของกล่องที่ตกอย่างอิสระในทุกๆช่วงเวลา 1 วินาที สิ่งที่น่าสนใจคือการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราเร็วดังกล่าว ในทุกวินาทีที่กล่องกำลังตก จะมีอัตราเร็วเพิ่มขึ้น 10 เมตรต่อวินาที การเพิ่มขึ้นในทุกวินาทีนี้ก็คือความเร่ง ความเร่งที่เกิดจากการตกอย่างอิสระสู่พื้นโลกจะมีค่าประมาณ 10 เมตรต่อวินาที ในทุกวินาที หรือ 10 m/s^2

ในกรณีที่วัตถุตกอย่างอิสระ เราจะใช้สัญลักษณ์ g แทนค่าความเร่ง (โดย g นี้แทนคำว่า gravity ซึ่งหมายถึงแรงโน้มถ่วง) แม้ว่าค่า g ในที่ต่างๆบนพื้นโลกจะแตกต่างกัน

เล็กน้อย ค่าเฉลี่ยที่ยอมรับกันทั่วไปมีค่าเท่ากับ 9.8 m/s^2 โดยเราจะปัดเศษให้เป็น 10 m/s^2 เพื่อง่ายต่อการทำความเข้าใจในที่นี้

จากตารางข้างบน จะเห็นว่าค่าความเร็ว ณ ระยะเวลาใดๆของวัตถุที่กำลังตกจากหยุดนิ่งก็สอดคล้องกับสมการที่กาลิเลโอใช้อธิบายเรื่องพื้นเอียงคือ

$$\text{ความเร็วของวัตถุ} = \text{ความเร่ง} \times \text{เวลา}$$

ถ้าความเร็ว ณ ระยะเวลาใดๆ ของวัตถุที่ตกอย่างอิสระจากหยุดนิ่งเป็น v หลังจากเวลา t จะเขียนได้เป็น

$$v = gt$$

โดยที่ความเร่ง $g = 10 \text{ m/s}^2$ และเรียกว่าเป็น ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก

ในการหาการกระจัด s เมื่อวัตถุถูกปล่อยให้ตกอย่างอิสระ (ความเร็วเริ่มต้นเป็น 0) เมื่อเวลา t หาได้จาก

$$s = \frac{1}{2}gt^2$$

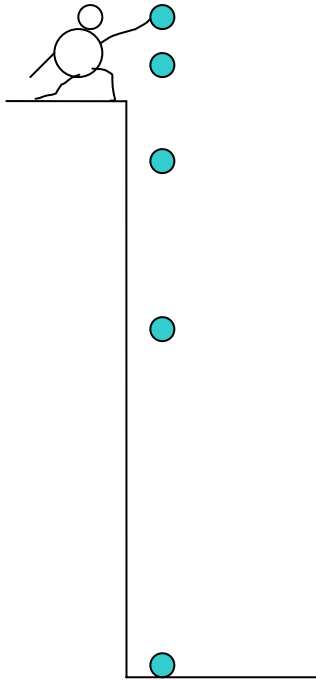
แล้วถ้าเราขว้างให้วัตถุตกลงสู่พื้นโลกด้วยความเร็วค่าหนึ่งก่อนเป็น u ความเร็วหลังจากที่เวลาผ่านไป t หาได้จาก $v = u + gt$ และการกระจัดที่วัตถุตกลงมาในเวลา t หาได้จาก

$$s = ut + \frac{1}{2}gt^2$$



ตัวอย่าง 2.1 ปล่อยก้อนหินให้ตกอย่างอิสระจากตึกที่ความสูง 80 เมตร อยากรหาบเวลาที่ก้อนหินตกลงถึงพื้นหลังจากปล่อยมือ (กำหนดค่า $g = 10 \text{ m/s}^2$)

คำตอบ



การปล่อยก้อนหินให้ตกอย่างอิสระจะหมายถึงว่าความเร็วเริ่มต้นหรือ $u = 0$ สมการการเคลื่อนที่นี้จึงเขียนได้ว่า

$$s = 0 + \frac{1}{2}gt^2 \quad \text{และ}$$

$$t^2 = \frac{2s}{g}$$

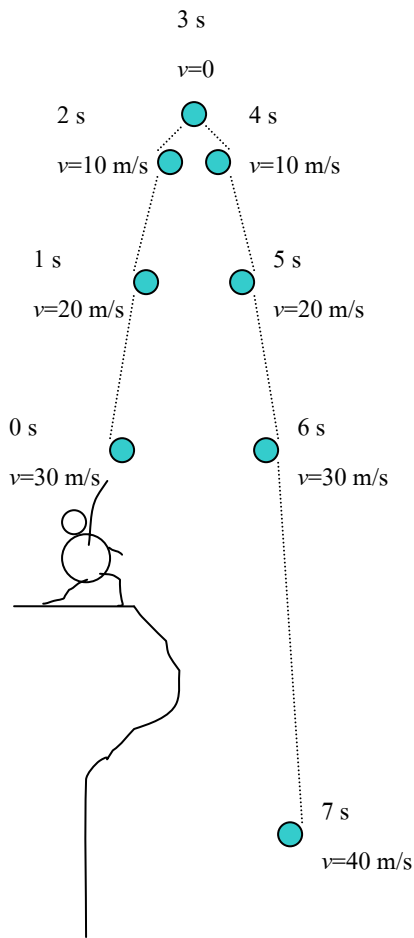
$$= \frac{2 \cdot 80}{10}$$

$$= 16$$

$$t = \sqrt{16} = 4 \text{ s}$$

หลังจากที่ปล่อยก้อนหินให้ตกอย่างอิสระ อีก 4 วินาทีจะตกลงถึงพื้น





ที่ผ่านมาเราพิจารณาวัตถุที่ตกลงสู่พื้นโลกในแนวของแรงโน้มถ่วงโลก ที่นี้ถ้าเราโยนวัตถุขึ้นในแนวตรงบ้าง แทนที่ที่วัตถุหลุดจากมือ จะยังคงเคลื่อนที่ขึ้นไปสักพักและตกกลับลงมา ที่จุดสูงสุดที่วัตถุเปลี่ยนแปลงทิศทางจากเคลื่อนที่ขึ้นเป็นตกลงมา อัตราเร็ว ณ ขณะนั้นจะเป็นศูนย์ แล้วมันจะเริ่มตกกลับลงมาว่า กลับว่า ถูกปล่อยให้ตกอย่างอิสระ ณ ตำแหน่งสูงสุดนั้น

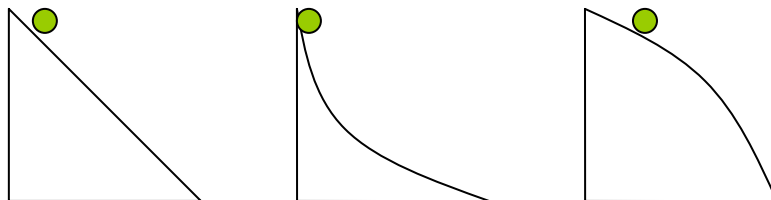
ในช่วงที่เคลื่อนที่ขึ้น ความเร็วจะค่อยๆลดลงจากจุดที่เราโยนจนเป็นศูนย์ หรือมีความเร็วนั้นเอง และมีความเร่งเป็นลบ เนื่องจากมีทิศตรงข้ามกับความเร็ว นั่นคือความเร็วลดลง 10 m/s ในทุกๆวินาที หรือมีค่าความเร่งเป็น -10 m/s^2 ซึ่งเป็นความเร่งอันเดียวกับตอนที่มันเคลื่อนที่ตกลงมา สิ่งที่น่าสนใจคืออัตราเร็ว ณ ขณะใดๆ ที่ตำแหน่งความสูงเดียวกันมีค่าเท่ากัน ไม่ว่าวัตถุจะกำลังเคลื่อนที่ขึ้นหรือลง (ดูรูป) แต่แน่นอนว่าความเร็วมีทิศตรงกันข้าม

สรุป

สิ่งที่ได้กล่าวมาแล้วเป็นการทำความเข้าใจเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ในแนวตรงหรือเชิงเส้น ซึ่งเป็นที่เข้าใจอย่างผิดพลาดมากกว่าสองพันปี จนกระทั่งกาลิเลโอได้ให้คำอธิบายไว้อย่างชัดเจน แต่อาจทำให้เราใช้เวลาในการทำความเข้าใจสักสองถึงสามชั่วโมง

คำถามท้ายบท

- รูปใดต่อไปนี่ที่ลูกบอลกลิ้งลงเขาด้วยความเร็วที่เพิ่มขึ้น แต่ความเร่งลดลง



- โยนก้อนหินขึ้นในแนวตรง ด้วยความเร็ว 30 m/s จากหน้าผาสูง เมื่อก้อนหินตกกลับลงมา ผ่านหน้าผา และตกต่อไปที่พื้นด้านล่าง ถ้าหน้าผาสูง 80 เมตร อยากทราบเวลาที่ก้อนหินใช้ในการเคลื่อนที่ครั้งนี้



| | |
|------------------------------|-------------------------------|
| หนังสืออิเล็กทรอนิกส์ | |
| ฟิสิกส์ 1(ภาคกลศาสตร์(| ฟิสิกส์ 1 (ความร้อน) |
| ฟิสิกส์ 2 | กลศาสตร์เวกเตอร์ |
| โลหะวิทยาฟิสิกส์ | เอกสารคำสอนฟิสิกส์ 1 |
| ฟิสิกส์ 2 (บรรยาย(| แก้ปัญหาฟิสิกส์ด้วยภาษา C |
| ฟิสิกส์พิศวง | สอนฟิสิกส์ผ่านทางอินเทอร์เน็ต |
| ทดสอบออนไลน์ | วิดีโอการเรียนการสอน |
| หน้าแรกในอดีต | แผ่นใสการเรียนการสอน |
| เอกสารการสอน PDF | กิจกรรมการทดลองทางวิทยาศาสตร์ |
| แบบฝึกหัดออนไลน์ | สุดยอดสิ่งประดิษฐ์ |
| การทดลองเสมือน | |
| บทความพิเศษ | ตารางธาตุไทย1) 2 (Eng) |
| พจนานุกรมฟิสิกส์ | ลับสมองกับปัญหาฟิสิกส์ |
| ธรรมชาติมหัศจรรย์ | สูตรพื้นฐานฟิสิกส์ |
| การทดลองมหัศจรรย์ | ดาราศาสตร์ราชมงคล |
| แบบฝึกหัดกลาง | |
| แบบฝึกหัดโลหะวิทยา | แบบทดสอบ |
| ความรู้รอบตัวทั่วไป | อะไรเอ่ย ? |
| ทดสอบ)เกมเศรษฐี(| คติปริศนา |
| ข้อสอบเอนทรานซ์ | เฉลยกลศาสตร์เวกเตอร์ |
| คำศัพท์ประจำสัปดาห์ | |
| ความรู้รอบตัว | |
| การประดิษฐ์ของโลก | ผู้ได้รับโนเบลสาขาฟิสิกส์ |
| นักวิทยาศาสตร์เทศ | นักวิทยาศาสตร์ไทย |
| ดาราศาสตร์พิศวง | การทำงานของอุปกรณ์ทางฟิสิกส์ |
| การทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ | |

|  การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ 1 ผ่านทางอินเทอร์เน็ต  | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 1. การวัด | 2. เวกเตอร์ |
| 3. การเคลื่อนที่แบบหนึ่งมิติ | 4. การเคลื่อนที่บนระนาบ |
| 5. กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน | 6. การประยุกต์กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน |
| 7. งานและพลังงาน | 8. การดลและโมเมนตัม |
| 9. การหมุน | 10. สมดุลของวัตถุแข็งเกร็ง |
| 11. การเคลื่อนที่แบบคาบ | 12. ความยืดหยุ่น |
| 13. กลศาสตร์ของไหล | 14. ปริมาณความร้อน และ กลไกการถ่ายโอนความร้อน |
| 15. กฎข้อที่หนึ่งและสองของเทอร์โมไดนามิก | 16. คุณสมบัติเชิงโมเลกุลของสสาร |
| 17. คลื่น | 18. การสั่น และคลื่นเสียง |
|  การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ 2 ผ่านทางอินเทอร์เน็ต  | |
| 1. ไฟฟ้าสถิต | 2. สนามไฟฟ้า |
| 3. ความกว้างของสายฟ้า | 4. ตัวเก็บประจุและการต่อตัวต้านทาน |
| 5. ศักย์ไฟฟ้า | 6. กระแสไฟฟ้า |
| 7. สนามแม่เหล็ก | 8. การเหนี่ยวนำ |
| 9. ไฟฟ้ากระแสสลับ | 10. ทรานซิสเตอร์ |
| 11. สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและเสาอากาศ | 12. แสงและการมองเห็น |
| 13. ทฤษฎีสัมพัทธภาพ | 14. กลศาสตร์ควอนตัม |
| 15. โครงสร้างของอะตอม | 16. นิวเคลียร์ |
|  การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ทั่วไป ผ่านทางอินเทอร์เน็ต  | |
| 1. จลศาสตร์ (kinematic) | 2. จลพลศาสตร์ (kinetics) |
| 3. งานและโมเมนตัม | 4. ซิมเปิลฮาร์โมนิก คลื่น และเสียง |
| 5. ของไหลกับความร้อน | 6. ไฟฟ้าสถิตกับกระแสไฟฟ้า |
| 7. แม่เหล็กไฟฟ้า | 8. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับแสง |
| 9. ทฤษฎีสัมพัทธภาพ อะตอม และนิวเคลียร์ | |

