

# แรง มวล และกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน

## สภาพธรรมชาติของการเคลื่อนที่

นักวิทยาศาสตร์ในสมัยก่อน ๆ คิดว่าสภาพธรรมชาติของวัตถุคือหยุดนิ่ง แม้ในปัจจุบันนี้ก็ตาม คนส่วนใหญ่ก็ยังคิดเช่นนี้ ทั้งนี้เพราะว่าจากประสบการณ์ในชีวิตประจำวัน เมื่อเราผลักวัตถุให้เคลื่อนที่ไปบนพื้น วัตถุจะเคลื่อนที่ช้าลง ๆ แล้วในที่สุดก็หยุดนิ่ง หรือถ้าเราปัดวัตถุไปในอากาศ ในที่สุดวัตถุนั้นก็จะตกลงมาหยุดนิ่งบนพื้น และถ้าเราต้องการให้วัตถุเคลื่อนที่ไปเรื่อย ๆ ด้วยความเร็วคงตัว เราต้องออกแรงผลักไปเรื่อย ๆ นานก่อนหน้าสมัยของกาลิเลโอ ผู้คนเชื่อกันว่าการเคลื่อนที่ของวัตถุที่ตกลงมาจากที่สูงเกิดจาก "แรงโน้มถ่วง" ในสมัยนั้นเป็นที่คิดกันว่าอัตราเร็วของวัตถุแปรผันตรงกับแรงที่กระทำต่อวัตถุ แต่กาลิเลโอได้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าวัตถุที่อยู่ใกล้ผิวโลกตกลงมาด้วยความเร่งคงที่ ไม่ใช่ด้วยอัตราเร็วคงที่ ดังนั้นสิ่งที่จะบอกว่ามีแรงกระทำต่อวัตถุหรือไม่นั้นคือการเปลี่ยนการเคลื่อนที่ และความคิดแบบเก่าที่ว่า ถ้าไม่มีแรงก็หมายถึงไม่มีการเคลื่อนที่นั้นได้กลายเป็นความคิดใหม่ที่ว่า ถ้าไม่มีแรง ก็ไม่มีการเปลี่ยนสภาพการเคลื่อนที่

ถ้าแรงทำให้วัตถุมีความเร่ง แทนที่จะทำให้วัตถุมีความเร็วคงตัว แล้วทำไมเราจึงต้องใช้แรงหรือเครื่องยนต์อย่างใดอย่างหนึ่งเพื่อทำให้วัตถุเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงตัว คำตอบก็คือ เมื่อผลักให้วัตถุเคลื่อนที่ไปด้วยตัวเอง วัตถุเคลื่อนที่ช้าลงเพราะมีแรงเสียดทานจากพื้นและแรงหน่วงอื่น ๆ กระทำต่อวัตถุ บนพื้นผิวดวัตถุเคลื่อนที่ไปได้ระยะสั้น ๆ แล้วก็หยุด แต่ถ้าพื้นลื่นมาก ๆ เช่นบนพื้นน้ำแข็ง วัตถุจะเคลื่อนที่ไปได้ระยะไกลมาก ๆ ก่อนที่จะหยุด (ในท้องปฏิบัติการ เราอาจใช้ถาดที่โรยเม็ดพลาสติกเล็ก ๆ หรือโต๊ะลม) แม้ว่าเราจะไม่สามารถกำจัดอิทธิพลจากวัตถุอื่น ๆ ได้หมด แต่เราก็เริ่มคิดต่อออกไปได้ว่า ถ้าไม่มีแรงใด ๆ กระทำต่อวัตถุเลย วัตถุคงเคลื่อนที่ต่อไปด้วยความเร็วคงตัว

## วัตถุเสรี

เราจะเรียกวัดวที่ไม่อยู่ภายใต้อิทธิพลจากวัตถุอื่นใดเลยว่าเป็นวัตถุเสรี จริง ๆ แล้ววัตถุเสรีอย่างแท้จริงไม่มี แต่ถ้าวัตถุนั้นอยู่ห่างจากวัตถุอื่นมาก ๆ เราอาจประมาณว่าวัตถุนั้นเป็นวัตถุเสรีได้

กฎการเคลื่อนที่ของนิวตันข้อที่หนึ่ง หรือกฎของความเฉื่อย

แม้ว่าข้อสังเกตที่ได้กล่าวมาเป็นข้อสังเกตที่ได้จากวัตถุที่มีขนาด เราคิดว่ามันเป็นจริงสำหรับอนุภาค เสรี เราสรุปเป็นกฎว่า

*อนุภาคเสรีจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงตัว นั่นคือ ด้วยความเร่งเป็นศูนย์*

กฎนี้เรียกว่ากฎของความเฉื่อยหรือกฎการเคลื่อนที่ของนิวตันข้อที่หนึ่งตามนิวตันซึ่งเป็นผู้ที่รวบรวมสรุปกฎเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ขึ้นมา

## กรอบอ้างอิง

เนื่องจากการเคลื่อนที่เป็นสิ่งที่ต้องวัดเทียบกับจุดอ้างอิงจุดใดจุดหนึ่ง เราต้องบอกด้วยว่าการเคลื่อนที่นั้นใครเป็นผู้สังเกตหรือว่าเทียบกับอะไร นอกจากจุดอ้างอิงแล้ว เราต้องเลือกแกนอ้างอิงที่มีทิศพร้อมสเกลความยาว ("ไม้บรรทัด") บนแกนเพื่อใช้บอกพิกัดของวัตถุ เราเรียกชุดของจุดอ้างอิงพร้อมระบบแกนว่าระบบพิกัด นอกจากตำแหน่งแล้ว เรายังสนใจว่าวัตถุอยู่ที่ตำแหน่งนั้น ๆ ที่เวลาใดด้วย ดังนั้นเราต้องมีชุดนาฬิกาที่ได้ตั้งเวลาตรงกันและเดินพร้อมกันประจำอยู่ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ที่ระบบพิกัดเพื่อใช้จับเวลา

กรอบอ้างอิงประกอบด้วย (1) ระบบพิกัด (2) ชุดนาฬิกาที่เทียบเวลากันไว้แล้วและเดินพร้อมกันประจำอยู่ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ที่ระบบพิกัด

## กรอบอ้างอิงเฉื่อย

เราจะสมมุติว่ากฎของความเฉื่อยใช้กับการเคลื่อนที่เทียบกับผู้สังเกตซึ่งถือได้ว่าเป็นวัตถุเสรี คือไม่อยู่ภายใต้อิทธิพลของสิ่งอื่นใด เราเรียกผู้สังเกตแบบนี้ว่าผู้สังเกตเฉื่อย และเรียกกรอบอ้างอิงที่ใช้นี้ว่ากรอบอ้างอิงเฉื่อย (กรอบอ้างอิงประกอบด้วยระบบพิกัดสำหรับวัดตำแหน่งและนาฬิกาสำหรับวัดเวลา)

ในทางปฏิบัติเราถือว่าผู้สังเกตที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่เทียบกับดวงดาวที่อยู่ไกลมาก ๆ เป็นผู้สังเกตเฉื่อย ผู้สังเกตเฉื่อยต่าง ๆ อาจเคลื่อนที่สัมพัทธ์กันด้วยความเร็วคงตัว ดังนั้นอนุภาคเสรีซึ่งอยู่นิ่งเทียบกับผู้สังเกตเฉื่อยผู้หนึ่งอาจปรากฏต่อผู้สังเกตเฉื่อยอื่นว่ากำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงตัว

## มวลและโมเมนตัม

จากกฎข้อที่หนึ่ง อนุภาคจะเปลี่ยนสภาพการเคลื่อนที่ถ้าได้รับอิทธิพลจากอนุภาคอื่น สมมุติว่าแทนที่เราจะสังเกตอนุภาคโดดเดี่ยวอนุภาคเดียว เราสังเกตอนุภาคสองอนุภาคที่ได้รับอิทธิพลจากแต่ละอีกอนุภาคเท่านั้น โดยที่นอกเหนือจากนี้แล้วเป็นอนุภาคที่อยู่โดดเดี่ยวจากอนุภาคอื่นทั้งหมด เนื่องจากแต่ละอนุภาคต่างได้รับอิทธิพลจากอีกอนุภาคหนึ่ง อนุภาคทั้งสองจะมีความเร็วไม่คงที่ แต่เปลี่ยนไปตามเวลา อัตราเร็วอาจมีขนาดเปลี่ยนไป และ/หรือเส้นทางการเคลื่อนที่อาจเบนไปจากแนวเดิม เราสามารถศึกษาการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ของอนุภาคสองอนุภาคจากการทดลองชนกันของอนุภาคมูลฐาน

สมมุติว่าเราสังเกตอนุภาคทั้งสองที่เวลาสองเวลา ครั้งแรกที่เวลา  $t_i$  ให้อนุภาคทั้งสองมีความเร็ว  $\vec{v}_1^i$  และ  $\vec{v}_2^i$  (เราใช้สัญลักษณ์ที่มีลูกศรข้างบนเพื่อแสดงว่าปริมาณนี้มีทั้งขนาดและทิศทาง ในกรณีการเคลื่อนที่ในแนวตรง ทิศจะแทนด้วยเครื่องหมายบวก-ลบ ปริมาณที่ต้องบอกทั้งขนาดและทิศเรียกว่าปริมาณเวกเตอร์) และต่อมาที่เวลา  $t_f$  ให้อนุภาคทั้งสองมีความเร็ว  $\vec{v}_1^f$  และ  $\vec{v}_2^f$  ตามลำดับ ความเร็วที่เปลี่ยนไปของอนุภาคที่หนึ่งและสองคือ

$$\Delta \vec{v}_1 = \vec{v}_1^f - \vec{v}_1^i \quad \text{และ} \quad \Delta \vec{v}_2 = \vec{v}_2^f - \vec{v}_2^i$$

จากผลการทดลองพบว่า

1. ความเร็วที่เปลี่ยนไป  $\Delta \vec{v}_1$  และ  $\Delta \vec{v}_2$  ของอนุภาคทั้งสองมีทิศตรงกันข้ามเสมอ
2. นอกจากนั้นอัตราส่วนระหว่างขนาดของความเร็วที่เปลี่ยนไปของอนุภาคทั้งสองก็มีขนาดคงที่ด้วย (จริง ๆ แล้ว ถ้าความเร็วของอนุภาคมีขนาดใกล้อัตราเร็วของแสง ข้อความนี้ไม่จริง) นั่นคือ

$$\frac{|\Delta \vec{v}_1|}{|\Delta \vec{v}_2|} = \text{ค่าคงที่}$$

ถ้าเราเรียกค่าคงที่นี้ว่า  $k_{2,1}$  สมการข้างบนจะกลายเป็น

$$\frac{|\Delta \vec{v}_1|}{|\Delta \vec{v}_2|} = k_{2,1}$$

สมมุติว่าเราทำการทดลองใหม่ระหว่างอนุภาคที่หนึ่งกับอนุภาคที่สาม และระหว่างอนุภาคที่สองกับอนุภาคที่สาม เราจะได้ความสัมพันธ์ในทำนองเดียวกันกับสมการข้างบน คือ

$$\frac{|\Delta \vec{v}_1|}{|\Delta \vec{v}_3|} = k_{3,1} \quad \text{และ} \quad \frac{|\Delta \vec{v}_2|}{|\Delta \vec{v}_3|} = k_{3,2}$$

จากผลการทดลอง เราพบว่า

$$k_{3,2} = \frac{k_{3,1}}{k_{2,1}}$$

สมการนี้ไม่ได้เป็นผลโดยตรงจากสามสมการก่อนหน้านี้นี้ ที่จริงแล้วขนาดของความเร็วที่เปลี่ยนไปในสามสมการไม่ได้เกี่ยวข้องกันเลย  $|\Delta \vec{v}_1|$  ไม่ได้เท่ากับ  $|\Delta \vec{v}_2|$  และปริมาณอื่น ๆ ก็เช่นกัน

เราอาจประมาณการทดลองเหล่านี้ในห้องปฏิบัติการได้โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่าโต๊ะลมกับแผ่นวัตถุกลม แล้วถ่ายภาพการทดลองที่เวลาต่าง ๆ โดยใช้สโตรโบสโคป ผลการทดลองประมาณว่าเป็นไปตามที่เราได้บรรยายมาสำหรับอนุภาค แต่ที่เราสามารถทำได้มากกว่าก็คือเราสามารถเอาแผ่นกลมซ้อนกันแล้วทำการทดลองชนกันได้ ผลการทดลองปรากฏว่าวัตถุที่มีจำนวนชั้นแผ่นกลมมากมีขนาดของความเร็วที่เปลี่ยนไปน้อย ดังนั้นขนาดความเร็วที่เปลี่ยนไปมีค่าขึ้นกับสมบัติของวัตถุ

เราสามารถอธิบายผลการทดลองที่กล่าวมาทั้งหมดได้ดังนี้: ค่าคงที่  $k_{2,1}$ ,  $k_{3,1}$  และอื่น ๆ มีความสัมพันธ์กับอนุภาคหรือวัตถุที่มีอันตรกิริยาต่อกันแต่ไม่ขึ้นกับธรรมชาติของอันตรกิริยา ดังนั้นเราอาจพูดได้ว่าแต่ละอนุภาคหรือวัตถุมีสมบัติเฉพาะตัวที่เรียกว่ามวล  $m$  ทั้งนี้โดยนิยาม เราให้อัตราส่วนระหว่างมวล  $m_2/m_1$  ของอนุภาคที่มีอันตรกิริยาต่อกันมีค่าเท่ากับ  $k_{2,1}$  และอื่น ๆ นั่นคือ

$$k_{2,1} = \frac{m_2}{m_1}, \quad k_{3,1} = \frac{m_3}{m_1} \quad \text{และ} \quad k_{3,2} = \frac{m_3}{m_2}$$

โดยที่  $m_1$ ,  $m_2$  และ  $m_3$  เป็นสมบัติเฉพาะตัวของวัตถุ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ จากข้างบนจะเห็นได้ว่า

$$k_{3,2} = \frac{m_3}{m_2} = \frac{m_3}{m_1} \frac{m_1}{m_2} = \frac{m_3}{m_1} \frac{m_2}{m_1} = \frac{k_{3,1}}{k_{2,1}} \text{ ตามผลการทดลอง}$$

ถ้าเราทำการทดลองแล้วพบว่า  $k_{2,1} = 2$  นั้นหมายความว่าวัตถุที่สองมีมวลเป็นสองเท่าของวัตถุที่หนึ่ง แต่เราไม่รู้ว่า  $m_1$  และ  $m_2$  มีค่าเท่าไร และมวลคืออะไร สิ่งที่เรารู้ทั้งหมดตอนนี้คืออัตราส่วนระหว่างมวล  $m_1$  และ  $m_2$

ดังนั้นถ้าเราต้องการกำหนดค่าให้กับมวลของวัตถุต่าง ๆ เราต้องเริ่มต้นโดยการกำหนดค่ามาตรฐานให้กับมวลของวัตถุหนึ่งและให้วัตถุนี้มีมวลหนึ่งหน่วย เช่น 1 kg จากผลการทดลองและนิยามของอัตราส่วน  $k_{2,1}$  ในรูปของมวล  $m_1$  และ  $m_2$  เราได้ว่า

$$\frac{|\Delta \vec{v}_1|}{|\Delta \vec{v}_2|} = k_{2,1} = \frac{m_2}{m_1}$$

ถ้าเราตั้งชื่อมวล  $m_1$  ว่า กิโลกรัม และใช้สัญลักษณ์ย่อว่า kg นั่นคือ ให้  $m_1 = \text{kg}$  เราจะได้ว่า

$$m_2 = \frac{|\Delta \vec{v}_1|}{|\Delta \vec{v}_2|} \text{ kg}$$

ด้วยวิธีนี้เราสามารถหาค่ามวลของวัตถุใด ๆ ได้จากสมการ  $\frac{|\Delta \vec{v}_1|}{|\Delta \vec{v}_2|} = k_{2,1} = \frac{m_2}{m_1}$  เราเห็นได้ว่าการขนกันระหว่างวัตถุสองชิ้น วัตถุซึ่งมีมวลมากกว่าจะมีขนาดของความเร็วที่เปลี่ยนไปน้อยกว่า หรือพูดอีกอย่างหนึ่งก็คือวัตถุซึ่งมีมวลมากมีความลังเลหรือความเฉื่อยในการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่มาก

เมื่อพิจารณาด้วยว่าความเร็วที่เปลี่ยนไป  $\Delta \vec{v}_1$  และ  $\Delta \vec{v}_2$  มีทิศตรงกันข้าม เราได้ว่า

$$\Delta \vec{v}_1 = -\left(\frac{m_2}{m_1}\right) \Delta \vec{v}_2 \quad \text{หรือ} \quad m_1 \Delta \vec{v}_1 = -m_2 \Delta \vec{v}_2$$

แทนค่า  $\Delta \vec{v}_1 = \vec{v}_1^f - \vec{v}_1^i$  และ  $\Delta \vec{v}_2 = \vec{v}_2^f - \vec{v}_2^i$  และจัดรูปแบบสมการเสียใหม่ เราจะได้ว่า

$$m_1 \Delta \vec{v}_1 = m_1 (\vec{v}_1^f - \vec{v}_1^i) = -m_2 (\vec{v}_2^f - \vec{v}_2^i) \quad \text{หรือ} \quad m_1 \vec{v}_1^f + m_2 \vec{v}_2^f = m_1 \vec{v}_1^i + m_2 \vec{v}_2^i$$

ปริมาณมวลคูณความเร็วจะเป็นปริมาณที่เราจะพบบ่อยมากในฟิสิกส์ เราเรียกปริมาณนี้ว่า *โมเมนตัม* และใช้สัญลักษณ์แทนว่า  $\vec{p}$

$$\text{มวล} \times \text{ความเร็ว} \equiv \text{โมเมนตัม} \\ \vec{p} \equiv m\vec{v}$$

โมเมนตัมเป็นปริมาณที่สำคัญมากในฟิสิกส์ จากนิยามของโมเมนตัมและสมการข้างบนนี้ เราสรุปว่าในการขนกันระหว่างอนุภาคสองอนุภาคที่โดดเดี่ยวจากอิทธิพลอื่น โมเมนตัมทั้งหมดหลังชนมีค่าเท่ากับโมเมนตัมทั้งหมดก่อนชน นั่นคือ

$$\vec{p}_1^f + \vec{p}_2^f = \vec{p}_1^i + \vec{p}_2^i$$

## กฎการคงตัวของโมเมนตัม

ในย่อหน้าที่แล้วเราพิจารณาอันตรกิริยาระหว่างวัตถุสองชิ้น แล้วพบว่าโมเมนตัมของวัตถุทั้งสองรวมกันมีค่าคงตัวไม่ขึ้นกับเวลา ที่จริงแล้วข้อความนี้เป็นจริงสำหรับกลุ่มของวัตถุใด ๆ ซึ่งโดดเดี่ยวที่ไม่มีอันตรกิริยากับวัตถุอื่นนอกกลุ่ม ถ้าเราทำการทดลองเราจะพบว่าโมเมนตัมทั้งหมดมีค่าคงตัวในเวลา เราสรุปความจริงนี้เป็นกฎเรียกว่ากฎการคงตัวของโมเมนตัม ดังนี้

ในระบบโดดเดี่ยวใด ๆ ผลบวกเชิงเวกเตอร์ของโมเมนตัมทั้งหมดของระบบมีค่าคงตัวไม่ขึ้นกับเวลา ในรูปของสมการเราเขียนว่า  $\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3 \dots =$  ค่าคงตัว โดยที่  $\vec{p}_1, \vec{p}_2$  และ  $\vec{p}_3$  คือโมเมนตัมของอนุภาคในระบบโดดเดี่ยวนั้น จากนิยามของโมเมนตัมเราอาจเขียนสมการข้างบนในรูปของมวลและความเร็วได้ว่า

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 + m_3\vec{v}_3 \dots = \text{ค่าคงตัว}$$

หน่วยของมวลและโมเมนตัม

ในระบบ SI มวลมีหน่วยเป็นกิโลกรัม (kg) และโมเมนตัมมีหน่วยเป็นกิโลกรัม·เมตร/วินาที (kg·m/s)

## แรงและกฎข้อที่สองของนิวตัน

พิจารณาการชนกันของแผ่นวัตถุกลมสองชิ้นบนโต๊ะลื่นอีกที กฎการคงตัวของโมเมนตัมบอกเราว่าโมเมนตัมทั้งหมดของวัตถุทั้งสองชิ้นมีค่าคงตัว แต่ไม่ได้หมายความว่าโมเมนตัมของวัตถุแต่ละชิ้นต้องมีค่าคงตัวด้วย วัตถุทั้งสองอาจวิ่งผ่านกันไปได้โดยที่โมเมนตัมของวัตถุแต่ละชิ้นมีค่าคงตัว หรือมีโมเมนตัมเปลี่ยนไปก็ได้ เช่นในกรณีที่ว่าวัตถุทั้งสองเป็นก้อนแม่เหล็ก เราเรียกสิ่งที่ทำให้วัตถุแต่ละชิ้นมีโมเมนตัมเปลี่ยนไปว่าแรง นั่นคือโมเมนตัมวัตถุจะเปลี่ยนไปเมื่อมีแรงหนึ่งกระทำต่อวัตถุนั้น ในชีวิตประจำวันเราทำให้วัตถุเปลี่ยนการเคลื่อนที่ได้โดยการผลักวัตถุนั้น เราอาจผลักแรงหรือค่อยและในทิศต่าง ๆ กัน ถ้าเราต้องการให้วัตถุเปลี่ยนการเคลื่อนที่ในช่วงเวลาที่สั้นกว่า เราต้องผลักแรง ในเวลาที่เท่ากันถ้าเราต้องการให้โมเมนตัมของวัตถุเปลี่ยนไปมากเราต้องผลักแรง และเราสามารถเปลี่ยนทิศการเคลื่อนที่โดยการผลักในทิศต่าง ๆ กัน ดังนั้นวิธีหนึ่งที่จะใช้วัดขนาดและทิศของแรงที่กระทำต่อวัตถุหนึ่งคือวัดอัตราที่แรงนั้นทำให้โมเมนตัมของวัตถุเปลี่ยนไปต่อเวลา เราให้นิยามแรงเฉลี่ย  $\vec{F}_{\text{เฉลี่ย}}$  ที่กระทำต่อวัตถุในช่วงเวลาจาก  $t$  ถึง  $t + \Delta t$  ว่า

$$\vec{F}_{\text{เฉลี่ย}} = \frac{\vec{p}(\text{ที่เวลา } t + \Delta t) - \vec{p}(\text{ที่เวลา } t)}{\Delta t} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$$

แรงที่เวลา  $t$  ใด ๆ หาได้จากแรงเฉลี่ยเมื่อช่วงเวลา  $\Delta t$  มีค่าเข้าใกล้ศูนย์

$$\vec{F}(\text{ที่เวลา } t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\vec{p}(\text{ที่เวลา } t + \Delta t) - \vec{p}(\text{ที่เวลา } t)}{\Delta t} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

นี่คือกฎของนิวตันข้อที่สองซึ่งกล่าวว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของอนุภาคต่อเวลาที่เวลาขณะหนึ่งมีค่าเท่ากับแรงสุทธิที่กระทำต่ออนุภาคในขณะนั้น

ถ้าอนุภาคเป็นอนุภาคเสรี นั่นคือไม่มีแรงกระทำ โมเมนตัมของอนุภาคจะคงตัว

## หน่วยของแรง

แรงมีหน่วยของโมเมนต์ต่อเวลา ในระบบ SI แรงจึงมีหน่วยเป็นกิโลกรัม.เมตร ต่อวินาทีกำลังสอง ( $\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$ ) ซึ่งมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่านิวตัน (N) นั่นคือ  $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$

## กฎข้อที่สามของนิวตัน

โดยการใช้นิยามของแรง เราสามารถเขียนกฎการคงตัวของโมเมนต์ในกรณีของระบบโดดเดี่ยวซึ่งประกอบด้วยอนุภาคสองอนุภาคที่ออกแรงกระทำต่อกันเท่านั้นดังนี้ จาก

$$\vec{p}_1^f + \vec{p}_2^f = \vec{p}_1^i + \vec{p}_2^i$$

เราเขียนใหม่ว่า  $\vec{p}_1^f - \vec{p}_1^i = -(\vec{p}_2^f - \vec{p}_2^i)$  หรือ  $\Delta\vec{p}_1 = -\Delta\vec{p}_2$

เมื่อหารสมการข้างบนทั้งสองข้างด้วย  $\Delta t$  เราจะได้ว่า

$$\frac{\Delta\vec{p}_1}{\Delta t} = -\frac{\Delta\vec{p}_2}{\Delta t}$$

พิจารณาสมการข้างบนนี้เมื่อ  $\Delta t$  มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ และใช้นิยามของแรง เราจะได้ว่า

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$$

โดยที่  $\vec{F}_1$  คือแรงที่อนุภาคที่ 2 ทำต่ออนุภาคที่ 1 และ  $\vec{F}_2$  คือแรงที่อนุภาคที่ 1 ทำต่ออนุภาคที่ 2 สรุปได้ว่า

เมื่ออนุภาคสองอนุภาคมีอันตรกิริยาต่อกัน แรงที่อนุภาค 1 กระทำต่ออนุภาค 2 มีขนาดเท่ากับแรงที่อนุภาค 2 กระทำต่ออนุภาค 1 แต่ว่ามีทิศตรงกันข้าม

นี่คือกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สามของนิวตัน สังเกตว่ากฎนี้เป็นผลมาจากกฎการคงตัวของโมเมนต์และกฎข้อที่สองของนิวตัน บางทีเราเรียกกฎนี้ว่ากฎของแรงกิริยาและแรงปฏิกิริยา

หมายเหตุ:

1. เราจะเรียกแรงใดเป็นแรงกิริยาก็ได้ แรงอีกแรงหนึ่งจะเป็นแรงปฏิกิริยา
2. แรงที่เป็นแรงคู่กิริยา-ปฏิกิริยากันต้องเป็นแรงชนิดเดียวกัน เช่นเป็นแรงไฟฟ้าเหมือนกัน
3. ถ้าให้แรงที่อนุภาค 1 กระทำต่ออนุภาค 2 เป็นแรงกิริยาแล้ว แรงคู่ปฏิกิริยาของแรงนี้ต้องเป็นแรงที่อนุภาค 2 กระทำต่ออนุภาค 1 ไม่ใช่แรงคู่อื่น เช่นแรงที่อนุภาค 3 กระทำต่ออนุภาค 1

## แรงสุทธิและกฎการ"บวก"แรง

ที่ผ่านมาเราพิจารณาการกระทำระหว่างอนุภาคสองอนุภาคเท่านั้น ดังนั้นจะมีแรงเพียงแรงเดียวจากอีกอนุภาคหนึ่งเท่านั้นที่กระทำต่ออนุภาคที่เราสนใจ คำถามก็คือ ถ้ามีอนุภาคหลายอนุภาคกระทำต่อกัน ทำให้อนุภาคหนึ่งอยู่ภายใต้อันตรกิริยาจากหลายอนุภาคพร้อมกัน อนุภาคนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์อย่างไร

สมมุติว่าเราพิจารณาการทดลองสามารถทดลองต่อไปนี้ ครั้งแรกเราให้อนุภาคสองอนุภาค (เรียกว่าอนุภาค 1 และ 2) กระทำต่อกัน เราพบว่าโมเมนตัมของอนุภาค 1 ที่เปลี่ยนไปเนื่องจากแรงที่อนุภาค 2 กระทำมีค่าเท่ากับ

$$\left(\frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}\right)_1 \text{ โดย } 2$$

ในการทดลองที่สองเราเอาอนุภาค 2 ออก แล้วใส่อนุภาค 3 เข้าไปแทน ให้มีอันตรกิริยากับอนุภาค 1 โดยที่เราเริ่มต้นให้อนุภาค 1 อยู่ในสภาวะตั้งต้นเหมือนกับการทดลองแรก เราพบว่าในการทดลองนี้โมเมนตัมที่เปลี่ยนไปของอนุภาค 1 เนื่องจากแรงที่อนุภาค 3 กระทำมีค่าเท่ากับ

$$\left(\frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}\right)_1 \text{ โดย } 3$$

ในตอนสุดท้าย เราให้อนุภาคทั้งสามมีอันตรกิริยาต่อกันพร้อมกัน โดยเริ่มต้นการทดลองให้อนุภาคทั้งสามอยู่ในสภาวะทุกอย่างเหมือนกับการทดลองครั้งที่หนึ่งและสอง เราพบว่าโมเมนตัมที่เปลี่ยนไปของอนุภาค 1 มีค่าเท่ากับผลบวกเวกเตอร์ ของโมเมนตัมที่เปลี่ยนไปในการทดลองที่หนึ่งและสอง นั่นคือ

$$\left(\frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}\right)_1 \text{ โดย } 2 \text{ และ } 3 = \left(\frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}\right)_1 \text{ โดย } 2 + \left(\frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}\right)_1 \text{ โดย } 3$$

ถ้าเราให้นิยามแรงสุทธิที่กระทำต่ออนุภาคในกรณีที่มีอันตรกิริยาจากหลายแหล่งกระทำต่ออนุภาคพร้อมกันว่าเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของอนุภาคนั้นเทียบกับเวลา เราจะได้ว่า

$$\vec{F}_1^{\text{สุทธิ}} \text{ โดย } 2 \text{ และ } 3 = \vec{F}_1 \text{ โดย } 2 + \vec{F}_1 \text{ โดย } 3$$

นั่นคือแรงรวมกันแบบเวกเตอร์

กฎนิวตันข้อที่สองในกรณีที่มีแรงหลายแรงกระทำพร้อมกัน

จากที่พิจารณาข้างบน เราเขียนกฎข้อที่สองของนิวตันในกรณีที่มีแรงหลายแรงกระทำต่ออนุภาคพร้อมกันเสียใหม่ว่า

แรงสุทธิที่กระทำต่ออนุภาคมีค่าเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเทียบกับเวลา

โดยที่ แรงสุทธิมีค่าเท่ากับผลบวกเวกเตอร์ของแรงต่าง ๆ ที่กระทำต่ออนุภาคพร้อมกันในขณะนั้น

ถ้าเรารวมข้อความทั้งสองเข้าด้วยกัน เราได้ว่า

ผลบวกเชิงเวกเตอร์ของแรงต่าง ๆ ที่กระทำต่ออนุภาคพร้อมกันมีค่าเท่ากับ

อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของอนุภาคเทียบกับเวลาที่ขณะนั้น

เนื่องจากมวลของอนุภาคมีค่าคงตัว ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมมีค่าเท่ากับมวลคูณกับอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็ว หรือเท่ากับมวลคูณความเร่งนั่นเอง

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = m\vec{a}$$

ดังนั้นเราเขียนกฎของนิวตันข้อที่สองในอีกรูปหนึ่งได้ว่า

ผลบวกเชิงเวกเตอร์ของแรงต่าง ๆ ที่กระทำต่ออนุภาคพร้อมกันมีค่าเท่ากับมวลของอนุภาคคูณกับความเร่งของอนุภาคที่ขณะนั้น

ในรูปของสัญลักษณ์ เราเขียนว่า

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots + \vec{F}_n = \frac{d\vec{p}}{dt} = m\vec{a}$$

โดยที่  $n$  คือจำนวนแรงทั้งหมดที่กระทำต่ออนุภาค

บางครั้งเราเขียนสมการข้างบนโดยใช้สัญลักษณ์ย่อแทนผลบวกของแรงตั้งแต่แรงที่ 1 ถึงแรงที่  $n$  ว่า  $\sum_{i=1}^n \vec{F}_i$  นั่นคือ

$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots + \vec{F}_n$$

กฎข้อที่สองของนิวตันจึงกลายเป็น  $\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = m\vec{a}$

หมายเหตุ ในภาษาอังกฤษคำว่าผลบวกคือ Sum แต่แทนที่จะใช้ s เป็นอักษรย่อของ Sum เขาใช้อักษรกรีก  $\Sigma$  (ออกเสียงว่า ซิกม่า) ซึ่งตรงกับอักษร s ในภาษาอังกฤษแทนจะได้ไม่สับสนกับสัญลักษณ์ที่ใช้ภาษาอังกฤษอยู่แล้ว

แรงต่าง ๆ

กฎของนิวตันเป็นกฎที่บอกความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ แต่ไม่ได้บอกว่าแรงนั้นมาจากไหน และมีลักษณะอย่างไร เมื่อเราสังเกตรอบตัวเรา ๆ เห็นแรงต่างกันหลายชนิด แรงที่เราผลักประตูให้เปิดออก แรงที่เท้าดันพื้นเวลาเดิน แรงที่เรายกของ แรงเสียดทานที่ทำให้ของซึ่งไกลไปบนพื้นหยุด แรงที่ทำให้วัตถุตกลงมาจากที่สูง แรงที่แม่เหล็กกระทำต่อกัน และแรงอื่น ๆ อีกมากมาย แต่แรงที่เราสังเกตเห็นในชีวิตประจำวันเป็นแรงที่เกิดกับระบบซับซ้อนซึ่งประกอบด้วยอนุภาคจำนวนมากมาย แรงที่โลกดึงดูดวัตถุเป็นผลรวมของแรงจากอนุภาคจำนวนมากมายของโลกต่ออนุภาคต่าง ๆ ที่ประกอบเป็นวัตถุนั้น แรงที่พื้นโต๊ะกระทำต่อหนังสือบนโต๊ะเป็นผลเนื่องจากแรงจากอนุภาคหลายอนุภาคของโต๊ะที่กระทำต่ออนุภาคต่าง ๆ ของหนังสือ

ในปัจจุบันเราพบว่าแรงซับซ้อนทั้งหลายที่เราสังเกตเห็นในธรรมชาติสามารถคิดได้ว่าเป็นผลจากอันตรกิริยาพื้นฐานสี่ชนิดระหว่างอนุภาคมูลฐานที่ประกอบกันเป็นสสาร อันตรกิริยาพื้นฐานสี่ชนิดนี้คือ อันตรกิริยาโน้มถ่วง อันตรกิริยาไฟฟ้าแม่เหล็ก อันตรกิริยานิวเคลียร์อย่างแรง และอันตรกิริยานิวเคลียร์อย่างอ่อน ในชีวิตประจำวัน อันตรกิริยาที่มีอิทธิพลโดยตรงมากที่สุดคืออันตรกิริยาโน้มถ่วง และรองลงมาคืออันตรกิริยาไฟฟ้า



แม่เหล็ก อันตรกิริยาทั้งสองเป็นอันตรกิริยาที่มีพิสัยไกล แรงโน้มถ่วงออกแรงดูดอย่างเดียว จึงมีผลสะสมเมื่อวัตถุขนาดใหญ่กระทำต่อวัตถุใด ๆ ส่วนแรงไฟฟ้ามีทั้งแรงดูดและแรงผลักแล้วแต่ชนิดของประจุไฟฟ้าที่กระทำต่อกัน เนื่องจากประจุไฟฟ้าในชีวิตประจำวันมีจำนวนประจุบวกและลบประมาณเท่ากัน อิทธิพลจึงหักล้างกันและเหลือผลปรากฏไม่เด่นชัด ส่วนอันตรกิริยานิวเคลียร์ทั้งสองชนิดเป็นอันตรกิริยาที่มีพิสัยสั้นมาก เราสังเกตเห็นผลของอันตรกิริยานี้ไม่ได้โดยตรง แต่สังเกตเห็นผลทางอ้อมจากการยึดเหนี่ยวของอนุภาคในนิวเคลียสของอะตอมและจากการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี

เมื่อเราเรียนสูงขึ้นเราจะพบว่ากฎของนิวตันใช้กับระบบที่ประกอบด้วยหลายอนุภาคได้ แต่ตำแหน่งและความเร่งที่จะใช้ในกฎของนิวตันต้องเป็นตำแหน่งและความเร่งของจุดที่เรียกว่าจุดศูนย์กลางมวลของระบบและต้องคิดว่ามวลทั้งหมดของระบบไปรวมอยู่ที่จุดนั้น ดังนั้นเพื่อที่เราจะได้ใช้กฎของนิวตันได้ทันทีกับปรากฏการณ์หลายอย่างในชีวิตประจำวัน เราจะจำลองว่าระบบหลาย ๆ ชนิดเป็นอนุภาคและความเร่งที่กระทำระหว่างระบบเหล่านั้นเป็นแรงที่กระทำระหว่างอนุภาคที่แทนระบบ แรงหลายชนิดในชีวิตประจำวันสามารถถือได้ว่าเป็นแรงเดี่ยวกระทำต่อระบบที่เราสนใจ แรงเหล่านี้คือ น้ำหนัก แรงเสียดทาน แรงตึงจากที่ผิว แรงดึงเชือก และแรงสปริง เราสามารถแบ่งชนิดของแรงออกเป็นสองชนิดใหญ่ ๆ คือ แรงสัมผัส และแรงจากระยะไกล ตัวอย่างของแรงจากระยะไกล ๆ คือแรงโน้มถ่วง แรงสัมผัสเป็นแรงที่เกิดขึ้นเมื่อวัตถุมีการสัมผัสกันระหว่างผิวและเป็นแรงที่กระทำที่ผิววัตถุ เช่น แรงเสียดทาน แรงผลัก

## น้ำหนัก

แรงที่เราคุ้นเคยที่สุดคือแรงโน้มถ่วงที่โลกกระทำต่อตัวเรา เราเรียกแรงนี้ว่าน้ำหนักและมักใช้สัญลักษณ์ว่า  $\vec{W}$  จากการทดลองเราพบว่าที่บริเวณ ๆ หนึ่งที่ผิวโลกเมื่อปล่อยให้วัตถุตกลงมาในสุญญากาศ วัตถุทุกชิ้นตกลงมาด้วยความเร่งเท่ากัน ให้  $\vec{g}$  เป็นความเร่งนี้ เนื่องจากวัตถุมีความเร่ง แสดงว่าต้องมีแรงสุทธิที่ไม่เป็นศูนย์กระทำต่อวัตถุ แรงนี้คือแรงโน้มถ่วงที่โลกกระทำต่อวัตถุ เราหาแรงนี้ได้จากกฎข้อที่สองของนิวตันที่ว่าผลบวกของแรงทั้งหมดที่กระทำต่อวัตถุมีค่าเท่ากับมวลคูณความเร่งของวัตถุ

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots + \vec{F}_n = \frac{d\vec{p}}{dt} = m\vec{a}$$

เนื่องจากมีแรงโน้มถ่วงจากโลก  $\vec{W}$  กระทำเพียงแรงเดียว และ  $\vec{g}$  คือความเร่งของวัตถุ เราได้ว่า

$$\vec{W} = m\vec{g}$$

โดยที่  $m$  คือมวลของวัตถุ

หมายเหตุ: 1. มักใช้  $g$  แทนขนาดของความเร่งของวัตถุที่ตกลงมาอย่างเสรีภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก ค่า  $g$  มีค่าขึ้นกับท้องถิ่นแต่ละแห่ง ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องมีค่าเท่ากัน โดยทั่วไปเราใช้ค่าเฉลี่ย  $g$  เท่ากับ  $9.8 \text{ m/s}^2$  แต่เพื่อความสะดวกในการคำนวณ บ่อยครั้งที่เราใช้ค่าประมาณเท่ากับ  $10 \text{ m/s}^2$

2. ในชีวิตประจำวัน เรามักได้ยินคำพูดว่า "วัตถุหนัก 60 kg" ซึ่งไม่ค่อยถูกนัก เพราะน้ำหนักเป็นแรง แต่ kg เป็นหน่วยของมวล ที่ถูกเราควรพูดว่า "วัตถุนั้นถูกโลกดึงดูดด้วยแรงขนาดเท่ากับ  $60 \text{ kg} \times 9.8 \text{ m/s}^2 = 588 \text{ N}$  หรือ  $60 \text{ kg} \times 9.8 \text{ m/s}^2 = 588 \text{ N}$ " หรือ "วัตถุมีมวล 60 kg"

3. บางครั้งเราใช้คำว่าน้ำหนักในความหมายว่าเป็นแรงที่วัตถุกระทำต่อเครื่องชั่งหรือสิ่งที่ยึดไว้ที่วัตถุ ถ้าเราชั่งน้ำหนักตัวขณะอยู่ในลิฟท์ที่กำลังเคลื่อนที่ขึ้นด้วยความเร่ง ตาชั่งจะอ่านค่าได้มากกว่าตอนที่ลิฟท์อยู่นิ่งทั้ง ๆ ที่แรงโน้มถ่วงของโลกกระทำต่อตัวเรามีขนาดเท่ากันในทุกสองกรณี

ข้อควรระวัง:  $g$  เป็นความเร่ง ไม่ใช่แรง

### แรงดึงเชือก

เชือกเป็นวัตถุที่ออกแรงดึงได้อย่างเดียว ถ้าเราพยายามใช้เชือกดันวัตถุ เชือกจะยุบ ออกแรงดันไม่ได้ ดังนั้นทิศทางที่แรงดึงเชือกกระทำต่อวัตถุคือออกจากวัตถุเสมอ ในระดับเบื้องต้น เพื่อความง่ายในการศึกษาเราสมมุติว่าเชือกของเราเป็นเชือกอุดมคติคือไม่มีมวล ซึ่งมีผลทำให้ขนาดของแรงดึงในเชือกมีค่าเท่ากันตลอดทั้งเส้น บางครั้งเราใช้เชือกกับรอกเพื่อเปลี่ยนทิศของแรงดึงเชือก

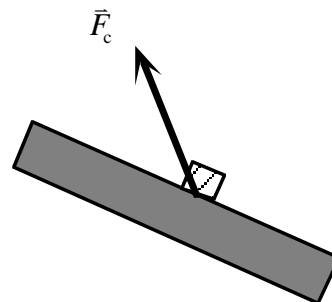
### แรงเสียดทานและแรงปฏิกิริยาดังฉาก

เมื่อผิววัตถุสองชิ้นสัมผัสกัน เช่นเมื่อบางหนังสือลงบนโต๊ะจะมีแรงปฏิกิริยา ที่ผิวโต๊ะกระทำต่อผิวหนังสือ แรงนี้เป็นแรงสัมผัส ซึ่งเกิดจากอันตรกิริยาไฟฟ้าแม่เหล็กระหว่างอะตอมของผิวโต๊ะและอะตอมของหนังสือเมื่อวัตถุทั้งสองเข้าใกล้กัน แรงนี้อาจมีองค์ประกอบทั้งในแนวขนานกับผิวสัมผัสและองค์ประกอบในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัส เราเรียก องค์ประกอบในแนวขนานกับผิวสัมผัสว่าแรงเสียดทาน และเรียกองค์ประกอบในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัสว่าแรงปฏิกิริยาดังฉาก เมื่อวัตถุอยู่นิ่งบนผิวโต๊ะระดับจะมีแรงปฏิกิริยาดังฉากที่โต๊ะกระทำต่อวัตถุในทิศขึ้นแต่เพียงแรงเดียว แรงนี้ต้านกับแรงโน้มถ่วงหรือน้ำหนักของโลกดึงวัตถุลงมาในแนวตั้งและมีขนาดเท่ากับน้ำหนักวัตถุพอดี แต่ถ้าเราออกแรงกดวัตถุลงไปด้วยหรือวางวัตถุก้อนอื่นทับบนวัตถุก้อนแรก แรงปฏิกิริยาดังฉากก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยและมีขนาดเท่ากับน้ำหนักวัตถุบวกกับขนาดของแรงที่กระทำเพิ่มหรือเท่ากับน้ำหนักทั้งหมดของวัตถุทั้งสองชิ้นรวมกัน

### แรงเสียดทาน

อันตรกิริยาระหว่างวัตถุที่แตะกันแต่ไม่ติดกัน

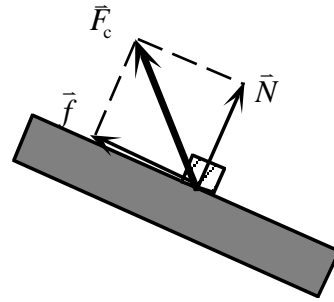
พิจารณาวัตถุแข็งสองวัตถุซึ่งแตะซึ่งกันและกันแต่ไม่ติดกัน (นั่นคือไม่ได้เหนียวติดกันหรือว่าทากาวติดกัน) ตัวอย่างเช่น กล้องที่วางอยู่บนโต๊ะ หรือกล้องที่ไถลลงมาจากทางลาด เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างอะตอมใกล้ผิวที่แตะกัน จะมีแรงสัมผัสที่วัตถุหนึ่งกระทำต่ออีกวัตถุหนึ่ง ตัวอย่างเช่นแรง  $\vec{F}_c$  ในรูปขวามือ



ตามธรรมชาติแล้วแรงสัมผัส  $\vec{F}_c$  ไม่ได้มีทิศตั้งฉากหรือว่าขนานกับผิวสัมผัส แต่ว่ามักมีประโยชน์ที่จะแตกแรงนี้ออกเป็นแรงองค์ประกอบสองแรงที่ทิศตั้งฉากและขนานกับผิวสัมผัสนี้ นั่นคือเราสามารถเขียนได้ว่า

$$\vec{F}_c = \vec{N} + \vec{f}$$

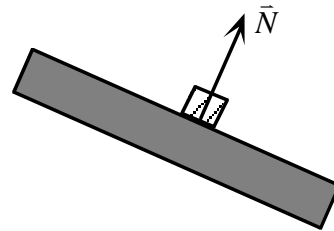
โดยที่แรงองค์ประกอบ  $\vec{N}$  ที่มีทิศตั้งฉากกับผิวเรียกว่าแรงตั้งฉาก และแรงองค์ประกอบ  $\vec{f}$  ที่ขนานกับผิวเรียกว่าแรงเสียดทาน ประโยชน์ที่ได้จากการแยกแรงออกเป็นแรงองค์ประกอบสองแรงก็คือทำให้เราสามารถแยกพิจารณาคุณสมบัติของแรงแต่ละแรงได้



### แรงตั้งฉาก

อะตอมที่อยู่ใกล้ผิวสัมผัสของวัตถุที่แตะกันจะออกแรงผลักดันไม่ให้วัตถุเข้าใกล้กันมากขึ้น นั่นคือต้านการอัดของวัตถุ แต่ว่าแรงอะตอมไม่ได้ต้านการที่วัตถุจะแยกออกจากกัน (เพราะว่าผิวสัมผัสไม่ได้เหนียวติดกัน)

แรงตั้งฉากที่วัตถุหนึ่งกระทำต่อวัตถุที่แตะกัน จะกระทำในทิศที่ออกจาก วัตถุที่กระทำนั้น นั่นคือแรงเป็นแรงผลัก ดังในรูปขวามือ นอกจากนั้น แรงนี้มีค่าเป็นศูนย์ถ้าวัตถุไม่ได้แตะซึ่งกันและกัน



ในชีวิตจริงเมื่อวัตถุแตะกัน แรงที่วัตถุหนึ่งกระทำต่ออีกวัตถุหนึ่งจะทำให้ผิวสัมผัสของวัตถุยุบตัวลงไป เช่น เมื่อเอาของวางบนเก้าอี้นวม ผิวเก้าอี้นวมที่ยุบลงจะออกแรงตั้งฉากขึ้นต้านวัตถุ แต่ว่ามีหลายกรณีที่ผิววัตถุยุบตัวน้อยมาก เช่นเมื่อเอาวัตถุหนักวางบนแผ่นไม้หนา เราอาจประมาณว่าผิวไม่ได้ยุบเลย และถือว่าวัตถุเป็นวัตถุแข็งเกร็งที่รูปร่างไม่เปลี่ยนแปลง เราสรุปคุณสมบัติของแรงตั้งฉากได้ดังนี้:

### แรงตั้งฉาก

ทิศ: ตั้งฉากกับผิวสัมผัส เป็นแรงผลัก (ต้านการอัด)

ขนาด: เป็นศูนย์ถ้าวัตถุไม่แตะกัน ไม่เป็นศูนย์ถ้าแตะกัน มีขนาดเปลี่ยนไปตามแรงที่กดผิว

## ทิศและขนาดของแรงเสียดทาน

แรงเสียดทานเป็นแรงที่ต้านการไถลระหว่างวัตถุที่มีผิวสัมผัสกัน เราอาจหาทิศของแรงเสียดทานได้ดังนี้

- (1) หาว่าวัตถุจะเคลื่อนที่สัมพัทธ์กันอย่างไรถ้าไม่มีแรงเสียดทาน
- (2) ทิศของแรงเสียดทานเป็นทิศที่ต้านการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ที่อาจเกิดขึ้น

เราอาจพิจารณาแรงเสียดทานเป็น 2 กรณีคือ

(1) **แรงเสียดทานจลน์:** ในกรณีนี้วัตถุเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างกันโดยที่ความเร็วสัมพัทธ์ไม่เท่ากับศูนย์ จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนขนาดของแรงเสียดทานจลน์ต่อขนาดของแรงตั้งฉากระหว่างผิวมีค่าคงตัว

$$\frac{f_k}{N} = \mu_k$$

เราเรียกค่าคงตัว  $\mu_k$  ว่า **สัมประสิทธิ์ของความเสียดทานจลน์** ค่านี้ขึ้นกับลักษณะของคู่วิวสัมผัส

(2) **แรงเสียดทานสถิต:** ในกรณีนี้วัตถุอยู่นิ่งเทียบกับวัตถุที่แตะกัน แรงเสียดทานสถิตมีค่าไม่คงตัว โดยอาจมีค่าได้ตั้งแต่ศูนย์ และเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามที่จำเป็นต้องใช้เพื่อไม่ให้มีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างผิว แต่ที่ไม่อาจเพิ่มขึ้นเกินค่าสูงสุดค่าหนึ่ง จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนขนาดของแรงเสียดทานสถิตสูงสุดต่อขนาดของแรงตั้งฉากระหว่างผิวมีค่าคงตัว

$$\frac{f_{s,\max}}{N} = \mu_s$$

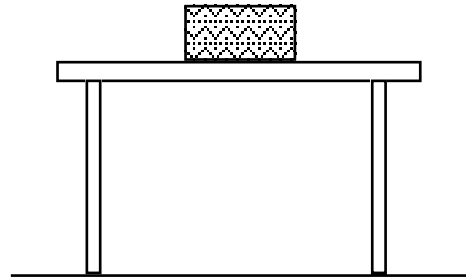
เราเรียกค่าคงตัว  $\mu_s$  ว่า **สัมประสิทธิ์ของความเสียดทานสถิต** ค่านี้ขึ้นกับลักษณะของคู่วิวสัมผัส

## แบบฝึกหัดพื้นฐานเกี่ยวกับแรงเสียดทานและแรงตั้งฉาก

### ลังบนโต๊ะ

ลังใบหนึ่งมวล 5.0 kg วางอยู่บนโต๊ะในแนวระดับ ดังรูป

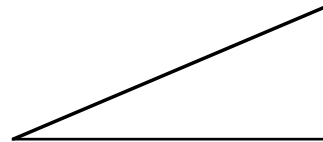
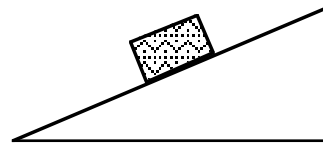
1. จงหาแรงตั้งฉาก (ขนาดและทิศ) ที่โต๊ะกระทำต่อลัง แรงเสียดทานที่โต๊ะกระทำต่อล้งมีค่าเท่าไร
2. จงหาแรงตั้งฉาก (ขนาดและทิศ) ที่ลังกระทำต่อโต๊ะ แรงเสียดทานที่ลังกระทำต่อโต๊ะมีค่าเท่าไร
3. สมมุติว่าล้งมีมวลมากกว่า 5.0 kg แรงตั้งฉากที่โต๊ะกระทำต่อล้งจะมีขนาด มากขึ้น น้อยลง หรือเท่าเดิม ผิวโต๊ะจะเปลี่ยนรูปอย่างไร
4. ถ่าล้งมีมวลมาก ๆ จะเกิดอะไรขึ้นกับโต๊ะ



### ลังไถลงพื้นเอียง

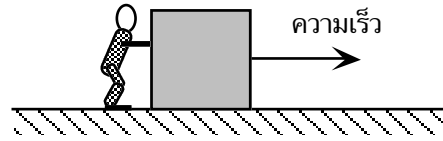
รูปแรกขวามือแสดงให้เห็นลังไถลงมาตามพื้นลาด

1. ในรูปที่สองให้วาดลูกศร (จากลัง) แสดงทิศของแรงตั้งฉากและแรงเสียดทานที่พื้นลาดกระทำต่อล้ง เขียนขนาดของแรง (N และ  $f$  กำกับ) ที่ลูกศร
2. ในรูปล่างให้วาดลูกศร (จากด้านบนของพื้นลาด) แสดงแรงตั้งฉากและแรงเสียดทานที่ล้งกระทำต่อพื้นลาด เขียนขนาดของแรงกำกับที่ลูกศร



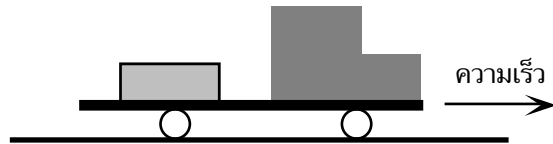
### สิ่งที่ถูกผลักไปตามพื้น

รูปขวามือแสดงให้เห็นสิ่งที่ถูกผลักไปตามพื้นระดับ โดยที่สิ่งเคลื่อนที่ไปทางขวามือด้วยอัตราเร็วที่เพิ่มขึ้น จงหาทิศของแรงเสียดทานที่พื้นกระทำต่อสิ่งนี้ อยู่ในทิศเดียวกัน หรือตรงกันข้ามกับความเร็วของสิ่งสัมพัทธ์กับพื้น



### ลิ้งบนรถบรรทุกที่กำลังเคลื่อนที่

รูปขวามือแสดงให้เห็นลิ้งบนหนึ่งบนพื้นรถบรรทุกที่กำลังเคลื่อนที่ไปทางขวามือ ลิ้งอยู่นิ่งเทียบกับพื้นรถ



1. ในขณะที่รถกำลังเคลื่อนที่ไปทางขวามือด้วยอัตราเร็วคงตัว แรงเสียดทานที่รถกระทำต่อลิ้งมีค่าเท่าไร

2. ในขณะที่รถกำลังเคลื่อนที่ไปทางขวามือด้วยอัตราเร็วที่เพิ่มขึ้น แรงเสียดทานที่รถกระทำต่อลิ้งมีทิศไปทางไหน ทิศนี้เป็นทิศเดียวกับทิศของความเร็วของรถเทียบกับถนน หรือว่าทิศตรงข้าม

### แรงที่เกี่ยวข้องกับการเดิน

ในขณะที่เดินไปตามพื้นราบ เราจะดันเท้าของเราไปกับพื้น ทำให้เท้าของเราออกแรงทำต่อพื้นไปทางด้านหลัง

1. จงหาทิศของแรงเสียดทานที่พื้นกระทำต่อเท้า แรงนี้เร่งคนไปทางทิศไหน

2. ถ้าพื้นปกคลุมแผ่นน้ำแข็งบาง ๆ ทำให้ไม่มีแรงเสียดทานระหว่างพื้นและเท้า เราจะเดินได้ไหม

