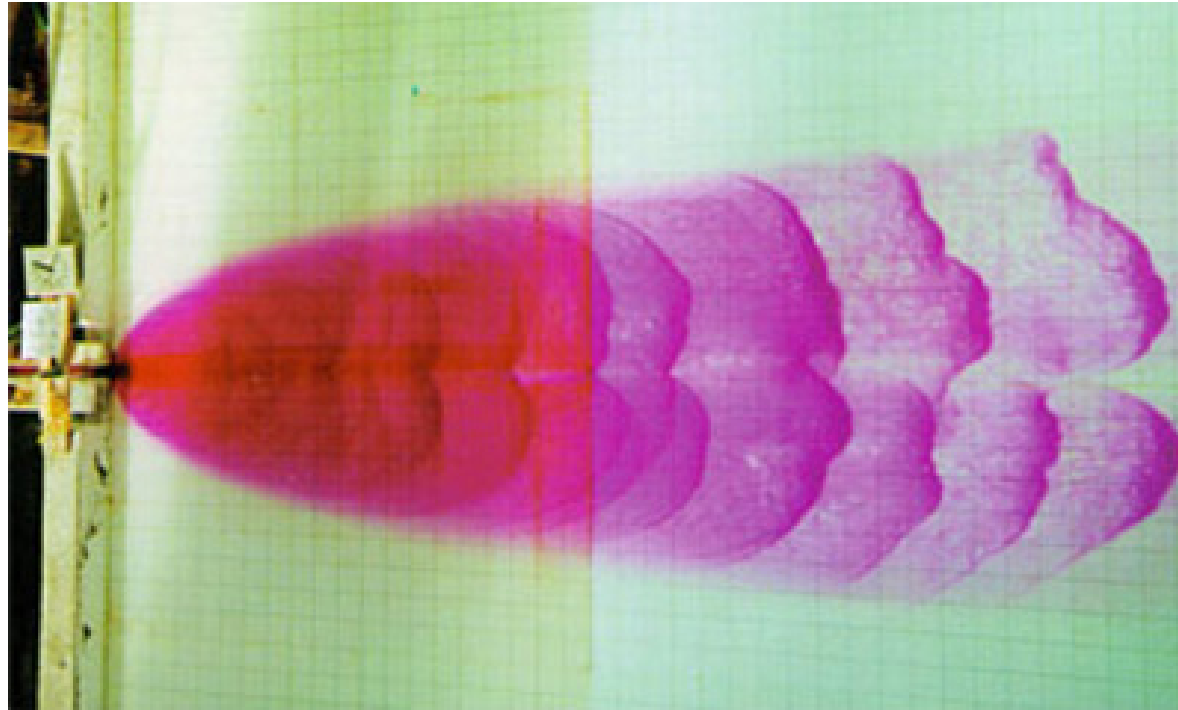
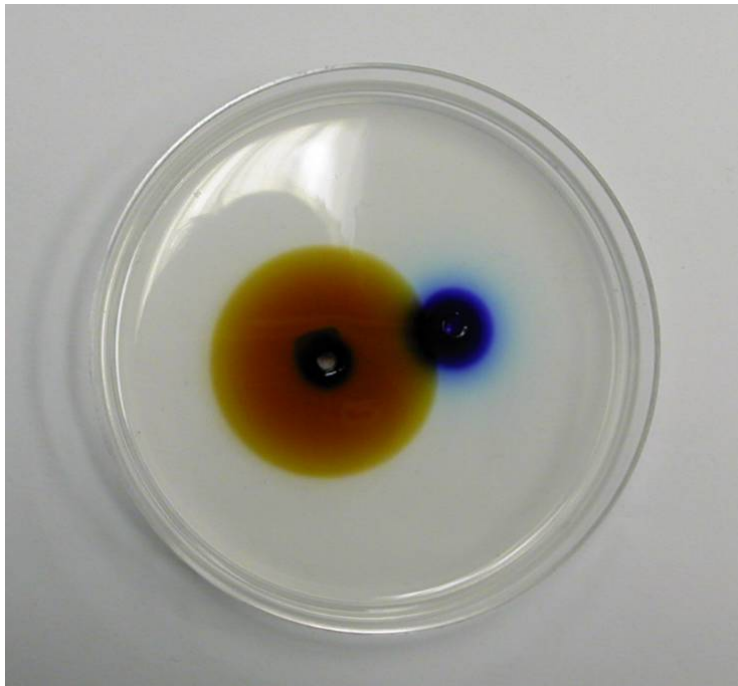


# ปรากฏการณ์ขนส่ง



# การฟุ้งของ โมเลกุล

การฟุ้งหรือ diffusion เป็นปรากฏการณ์ที่พบเห็นได้ทั่วไปในชีวิตประจำวัน ซึ่งเราพอจะสรุปลักษณะของการฟุ้งได้คร่าวๆดังนี้



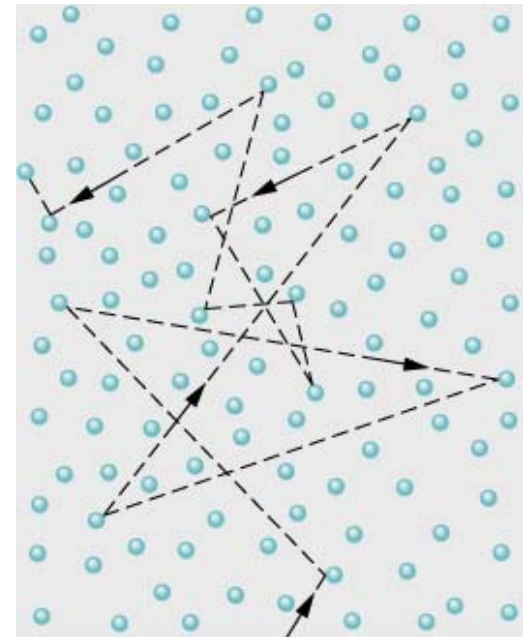
1 การฟุ้งจะเกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลมีการกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ หรือ ความเข้มข้นของโมเลกุลที่ตำแหน่งต่างๆ ไม่เท่ากัน

2 การฟุ้งมีทิศออกจากบริเวณที่มีความเข้มข้นของโมเลกุลมาก ไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นของโมเลกุลน้อย หรือ เกิดในทิศทางที่ความเข้มข้นของโมเลกุลลดลง

# การเคลื่อนที่แบบบราวน์ (Brownian motion)

ในบทนี้เราจะพิจารณาการฟุ้งทั้งในระดับใหญ่ๆ (Macroscopic) และในระดับโมเลกุล (Microscopic) ซึ่งในระดับโมเลกุล การฟุ้งเกิดจากอนุภาคที่ถูกชนไปชนมาแล้วกระจายออกไปด้วยลักษณะการเคลื่อนที่แบบบราวน์ (Brownian movement) การฟุ้งจึงเป็นการส่งผ่านโมเลกุล หรือ เคลื่อนย้ายมวลของสาร จากตำแหน่งหนึ่งไปตำแหน่งอื่น โดยไม่ต้องมีแรงภายนอกมากระทำ

การเคลื่อนที่แบบ Brownian



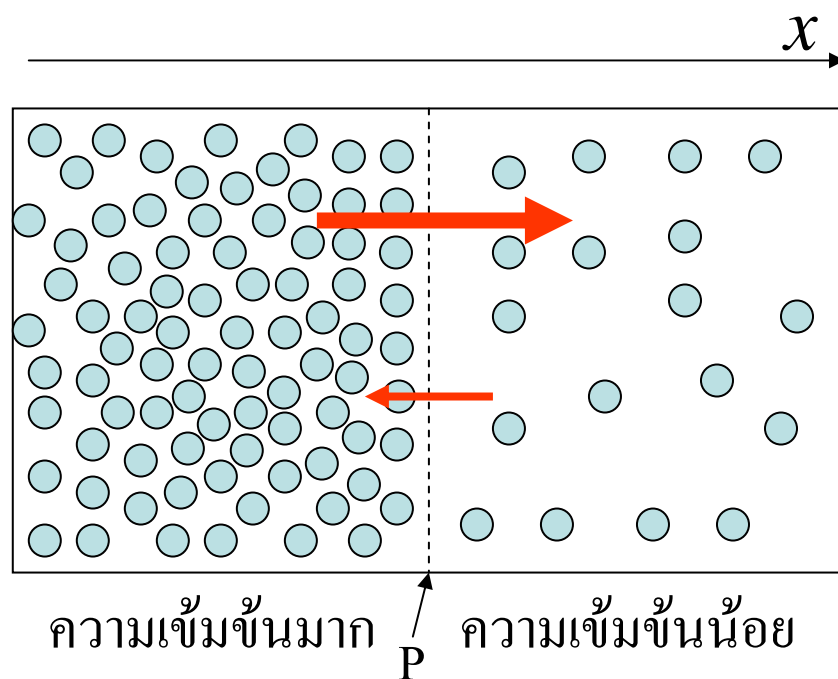
# World Year of Physics 2005



- Einstein Miraculous years
- ครบรอบ 100 ปี ทฤษฎีโฟโตอิเล็กทริก
- ครบรอบ 100 ปี ทฤษฎีสัมพัทธภาพ
- ครบรอบ 100 ปี ทฤษฎีการเคลื่อนที่แบบ Brownian

# กฎของฟิคค์

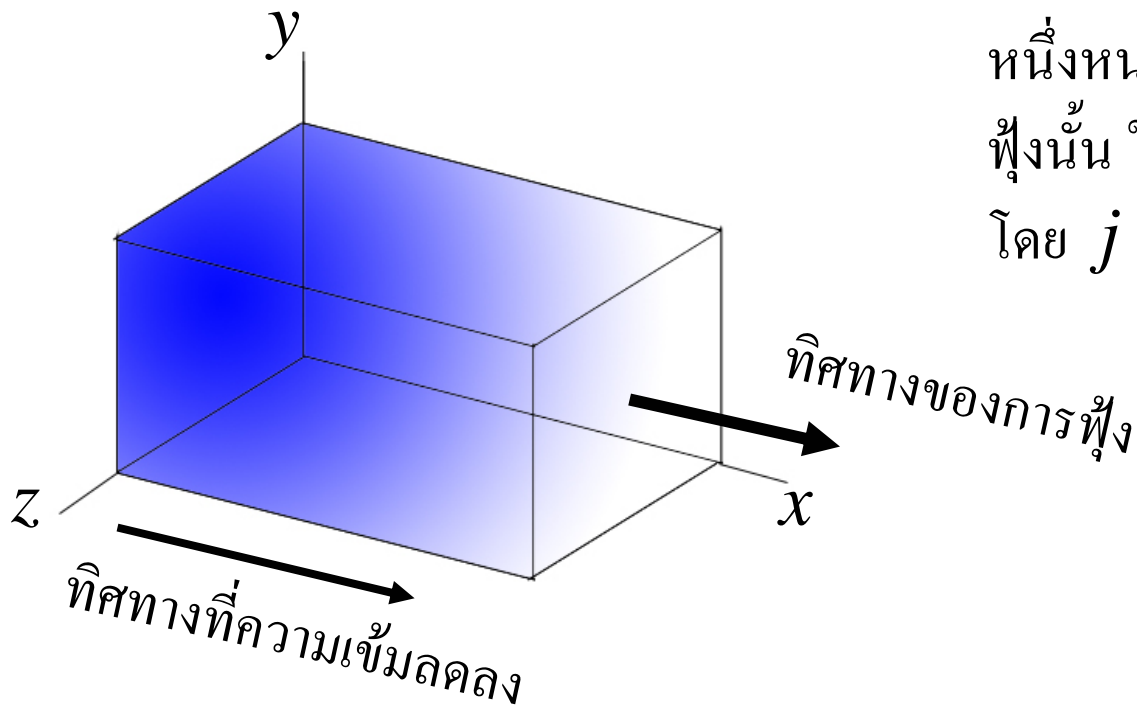
สมมุติว่ามีก๊าซชนิดหนึ่ง ซึ่งถูกกั้นด้วยผนัง P ดังรูป ก๊าซทางด้านซ้ายของผนังมีความเข้มข้นของโมเลกุลมากกว่า ก๊าซทางด้านขวา โดยที่อุณหภูมิของทั้งสองด้านเท่ากัน (พลังงานจลน์เฉลี่ยเท่ากัน)



เมื่อยกผนัง P ออก โมเลกุลของก๊าซที่อยู่ใกล้ผนังทั้งด้านซ้ายและด้านขวาจะเกิดการชนกันแล้วกระจายไปอยู่อีกด้านหนึ่งได้ แต่เนื่องจากด้านซ้ายมีความเข้มข้นมากกว่า จึงทำให้ผลลัพธ์ของกระบวนการฟุ้งของโมเลกุลมีทิศจากซ้ายไปขวา

สมมติให้ความเข้มข้นของโมเลกุลมีค่าต่างๆกันตามแนวแกน  $x$  ดังรูป  
แต่ความเข้มข้นของโมเลกุลบนระนาบทุกๆ ระนาบซึ่งตั้งฉากกับแกน  $x$  มีค่าเท่ากัน  
ดังนั้นเราความเข้มข้นจึงเป็นฟังก์ชันของ  $x$

$$n = n(x)$$



ให้  $j$  เป็นความหนาแน่นกระแสนุภาค (particle current density) ซึ่งหมายถึง จำนวนอนุภาคสุทธิซึ่งเคลื่อนผ่านพื้นที่ หนึ่งหน่วยซึ่งตั้งฉากกับทิศทางของการ พุ่งนั้น ในหนึ่งหน่วยเวลา โดย  $j$  มีหน่วยเป็น ( $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )

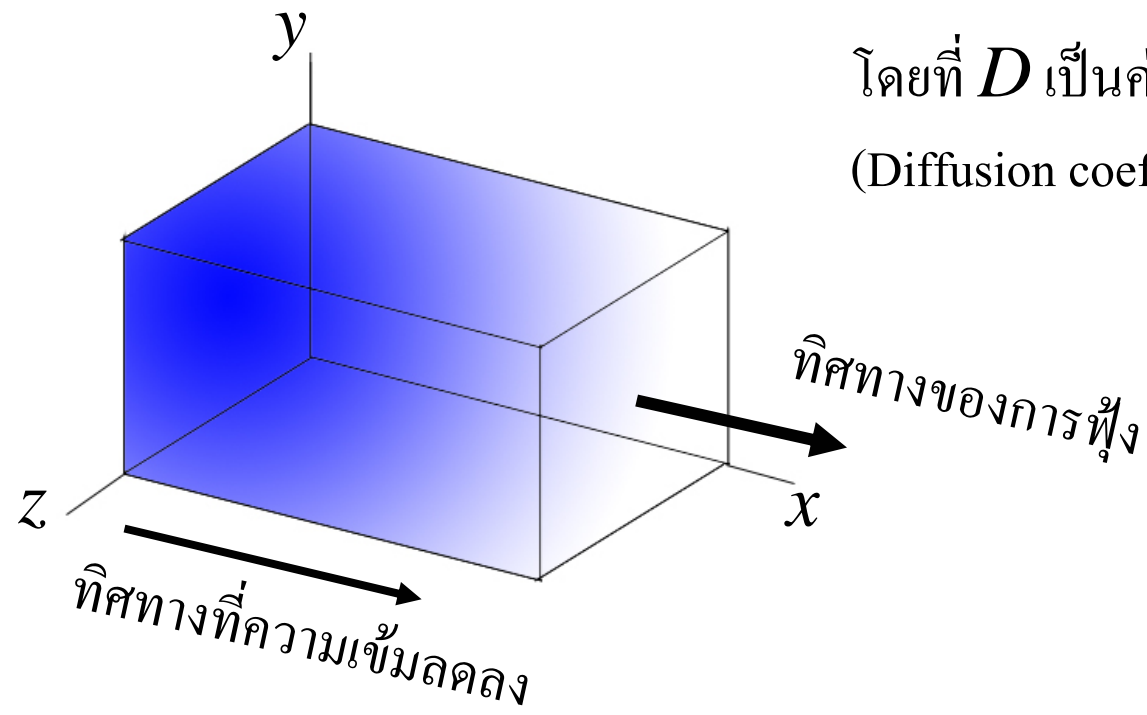
จากการทดลองพบว่า  $j$  จะแปรผันตามค่าความแตกต่างของความเข้มข้นของโมเลกุลต่อระยะทาง หรือ เกรเดียนท์ของความเข้มข้น (concentration gradient)  $\frac{\partial n}{\partial x}$  ซึ่งเขียนเป็นสมการได้เป็น

กฎของฟิคส์ (Fick's law)



$$j(x) = -D \frac{\partial n}{\partial x}$$

โดยที่  $D$  เป็นค่าคงที่ เรียกว่า สัมประสิทธิ์การฟุ้ง (Diffusion coefficient)



# Gradient

เกรเดียนท์ เป็นตัวดำเนินการทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเวกเตอร์ (Vector operator) โดยปกติจะใช้สัญลักษณ์  $\vec{\nabla}$  บางครั้งอ่านว่า เดล (Del) ในกรณีที่ทำกับฟังก์ชัน  $f(x, y, z)$  จะเขียนได้เป็น

$$\vec{\nabla}f(x, y, z) = \hat{i} \frac{\partial}{\partial x} f + \hat{j} \frac{\partial}{\partial y} f + \hat{k} \frac{\partial}{\partial z} f$$

แต่ในวิชานี้เราจะพิจารณากรณี 1 มิติ คือ ความเข้มเป็นฟังก์ชันของตัวแปรเพียงตัวเดียว

$$\vec{\nabla}n(x) = \hat{i} \frac{\partial}{\partial x} n(x) + \hat{j} \frac{\partial}{\partial y} n(x) + \hat{k} \frac{\partial}{\partial z} n(x) = \hat{i} \frac{\partial}{\partial x} n(x)$$

นั่นคือ

$$\vec{\nabla}n(x) = \left( \frac{\partial n}{\partial x} \right) \hat{i}$$

เกรเดียนท์ของ  $n(x)$  คือ เวกเตอร์ ซึ่งมีขนาด  $\partial n / \partial x$

มีทิศไปทาง  $+x$  (ทิศเดียวกับ  $\hat{i}$ ) ถ้า  $(\partial n / \partial x) > 0$

มีทิศไปทาง  $-x$  (ทิศเดียวกับ  $-\hat{i}$ ) ถ้า  $(\partial n / \partial x) < 0$

ตัวอย่างการประยุกต์เกรเดียนท์ แรงอนุรักษ์เขียนได้ในรูปเกรเดียนท์ของศักย์

$$\vec{F} = -\vec{\nabla}V$$

เช่น

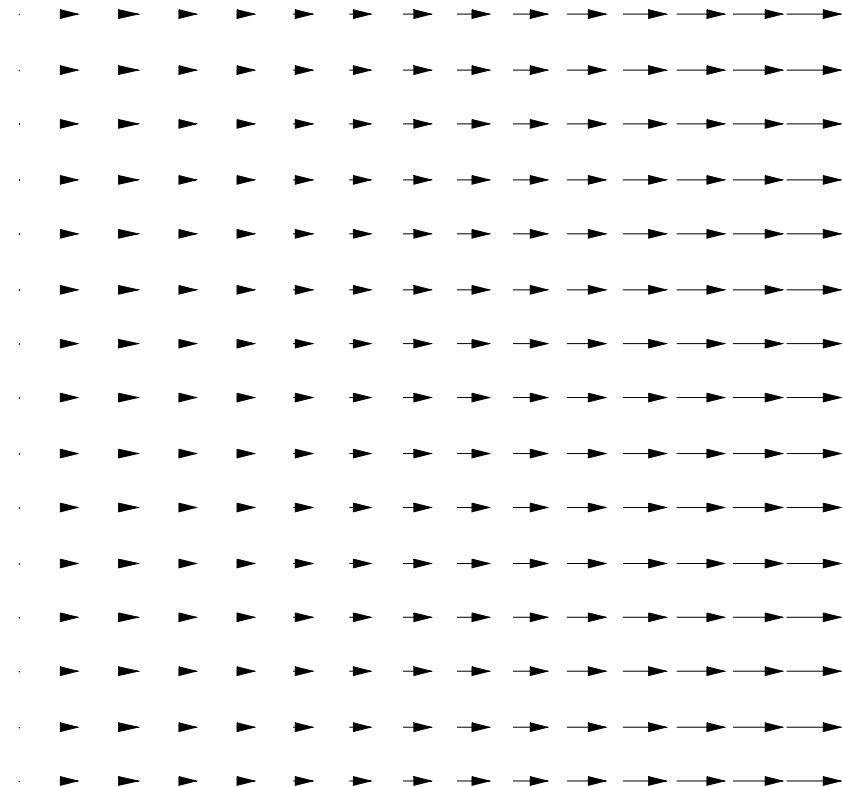
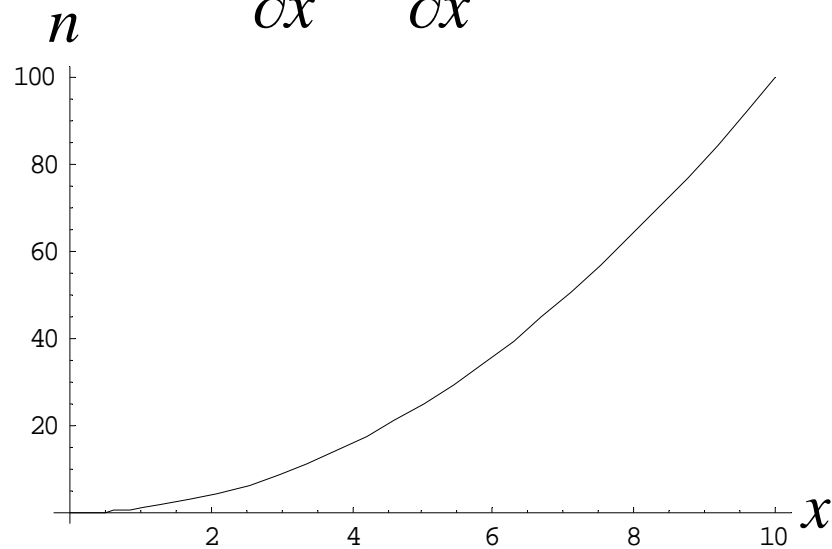
$$V(r) = -\frac{GMm}{r}, \quad \rightarrow \quad F = -\frac{\partial}{\partial r}V(r) = GMm \frac{\partial}{\partial r}(r^{-1}) = -\frac{GMm}{r^2}$$

# ตัวอย่าง Gradient ของฟังก์ชัน 1 ตัวแปร

$$n(x) = x^2$$

$$\vec{\nabla} n(x) = 2x \hat{i}$$

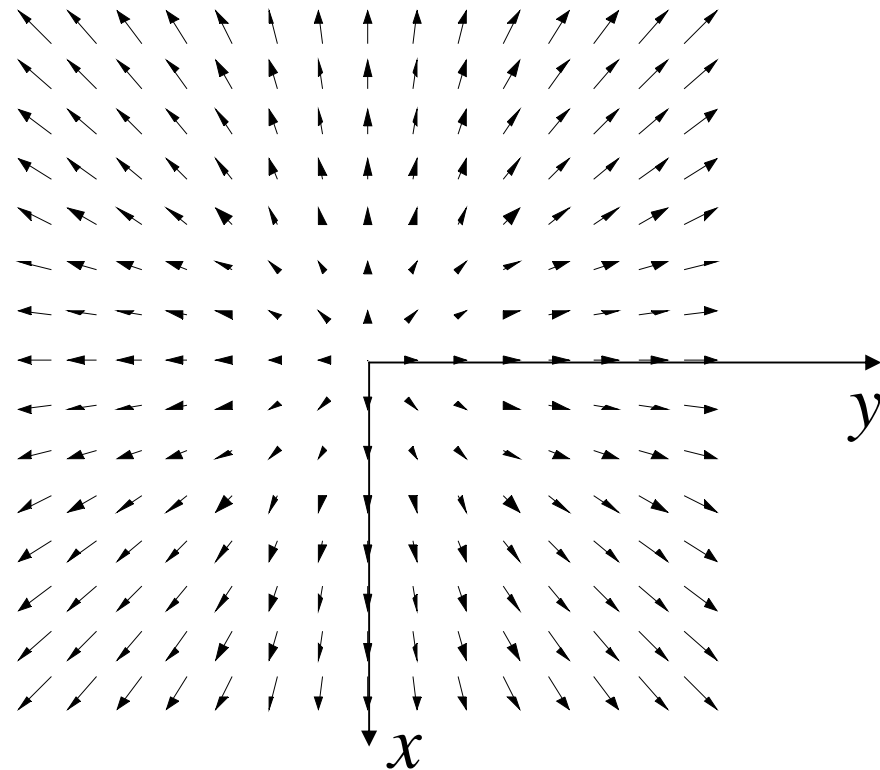
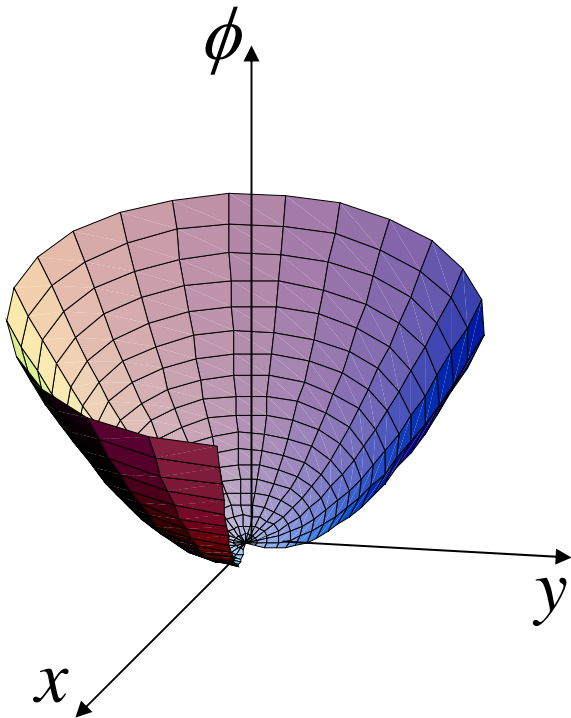
$$\frac{\partial n}{\partial x} = \frac{\partial x^2}{\partial x} = 2x$$



## ตัวอย่าง Gradient ของฟังก์ชัน 2 ตัวแปร

$$\phi(x, y) = x^2 + y^2$$

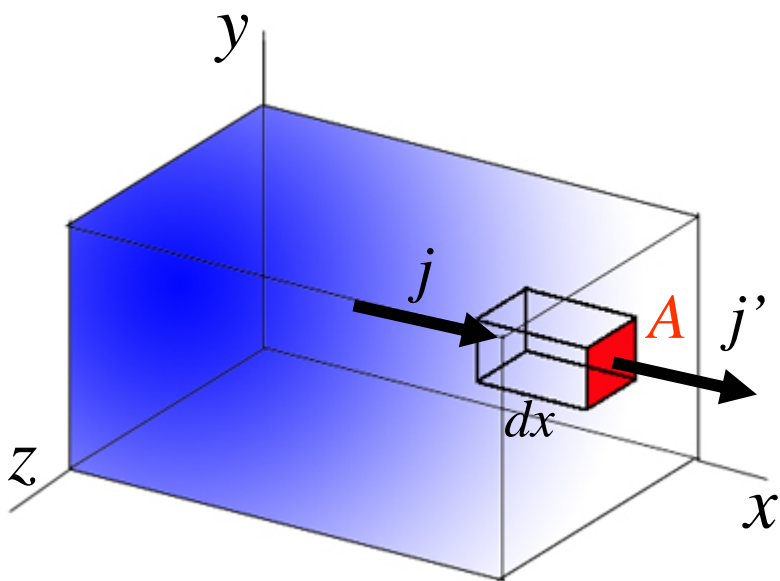
$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \phi &= \frac{\partial \phi}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial \phi}{\partial y} \hat{j} = \hat{i} \frac{\partial}{\partial x} (x^2 + y^2) + \hat{j} \frac{\partial}{\partial y} (x^2 + y^2) \\ &= 2x \hat{i} + 2y \hat{j}\end{aligned}$$



# สมการการฟุ้ง

พิจารณาปริมาตรเล็กๆ  $dV$  ความยาว  $dx$  พื้นที่หน้าตัด  $A$  ที่ตั้งฉากกับแกน  $x$  ดังรูป ให้กระแสโมเลกุลที่ไหลเข้ามาในปริมาตรทางผนังด้านซ้ายเท่ากับ  $j$  และกระแสโมเลกุลที่ไหลออกทางผนังด้านขวาเท่ากับ  $j'$  จากกฎการอนุรักษ์ของมวลจะได้ว่า

$$\text{จำนวนโมเลกุลที่สะสมในปริมาตร} = \text{โมเลกุลที่ไหลเข้า} - \text{โมเลกุลที่ไหลออก}$$



จำนวนโมเลกุลที่สะสมในปริมาตรหาได้จาก

$$n dV$$

อัตราการสะสมโมเลกุลในปริมาตรคือ

$$\frac{\partial n}{\partial t} dV$$

$j$  เป็นจำนวนอนุภาคซึ่งเคลื่อนผ่าน ต่อพื้นที่ ต่อหนึ่งหน่วยเวลา ดังนั้นจำนวนโมเลกุลที่ไหลเข้าปริมาตรต่อหนึ่งหน่วยเวลาคือ  $jA$  และจำนวนโมเลกุลที่ไหลออกคือ  $j'A$

อัตราการสะสมโมเลกุลในปริมาตร = อัตราการไหลเข้า - อัตราการไหลออก

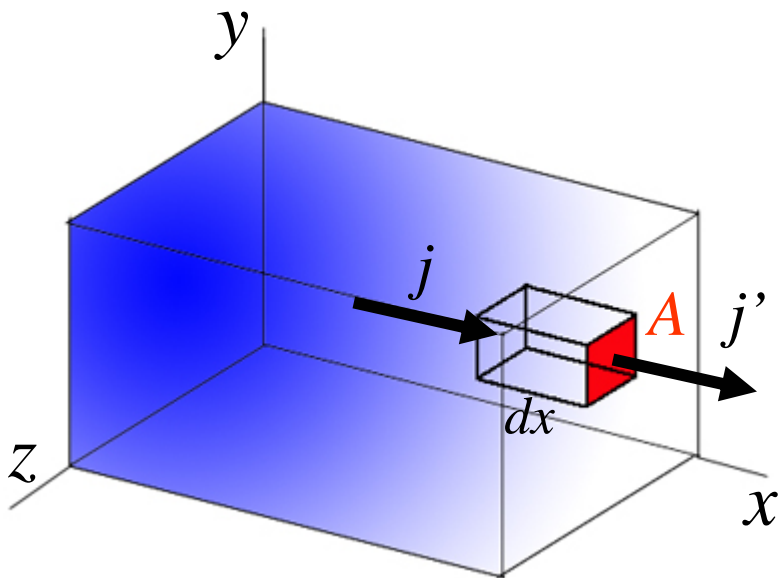
$$\frac{\partial n}{\partial t} dV = jA - j'A = -(j' - j)A = -(dj)A$$

หรือ

$$\frac{\partial n}{\partial t} dV = -\frac{\partial j}{\partial x} A dx$$

และเมื่อแทนค่า

$$dV = A dx$$



จะได้ว่า

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{\partial j}{\partial x}$$

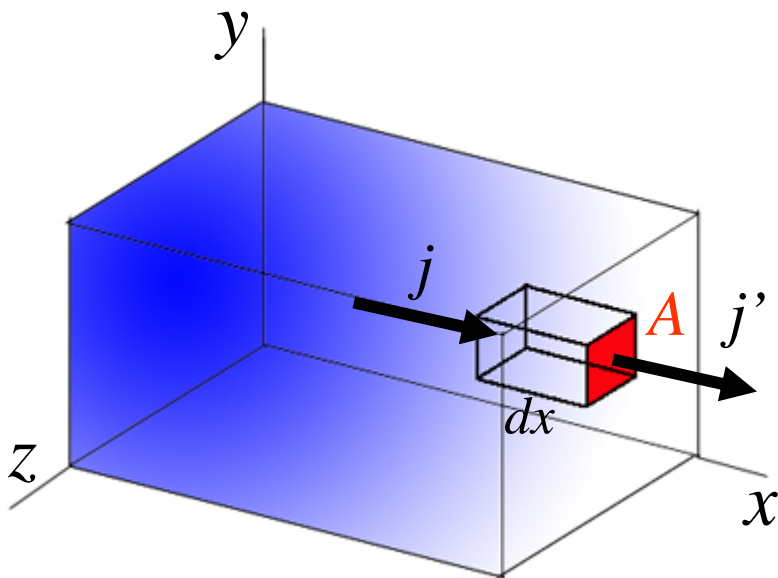
และเมื่อแทนค่ากฎของฟิคส์จะได้ว่า

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} \leftarrow \text{กฎข้อที่ 2 ของฟิคส์}$$

สมการนี้มีชื่อว่า สมการการฟุ้ง หรือ (diffusion equation) เป็นสมการเชิงอนุพันธ์อันดับสองหลายตัวแปร คำตอบของสมการคือ


$$n = n(x, t)$$

จะบอกค่าความเข้มข้นที่ตำแหน่ง  $x$  และเวลา  $t$  ต่างๆ



การหาคำตอบทั่วไปของสมการนี้ค่อนข้างซับซ้อน ดังนั้นเราจะพิจารณากรณีพิเศษ

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	

 <b>การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ 1 ผ่านทางอินเทอร์เน็ต</b> 	
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
 <b>การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ 2 ผ่านทางอินเทอร์เน็ต</b> 	
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
 <b>การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ทั่วไป ผ่านทางอินเทอร์เน็ต</b> 	
1. จลศาสตร์ (kinematic)	2. จลพลศาสตร์ (kinetics)
3. งานและโมเมนตัม	4. ซิมเปิลฮาร์โมนิก คลื่น และเสียง
5. ของไหลกับความร้อน	6. ไฟฟ้าสถิตกับกระแสไฟฟ้า
7. แม่เหล็กไฟฟ้า	8. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับแสง
9. ทฤษฎีสัมพัทธภาพ อะตอม และนิวเคลียร์	

