

# 物理Ⅱ

後期第11回 電流と磁場

運動する電荷が磁場から受ける力

教科書 p109-112

# 今日の内容

電気力 = 電荷 × 電場

$$F = qE$$

磁気力 = **運動する** 電荷 × 磁場  
~~磁荷~~

$$F = qvB$$

1. 電荷は電場と磁場の両方から力を受ける。電場は電荷に仕事をし、磁場は運動する電荷の運動の向きを変える（磁場は仕事をしない）。
2. 電流が磁場から受ける力は、導線を流れる個々の電子が磁場から受ける力の総和であることを理解する。
3. **一様な磁場**の中では、電荷は**円運動**をすることを理解する。



ブラウン管テレビに磁石を近づけると歪む



CERN: 欧州原子核研究機構

# 電荷に作用する力

静電気力 電場から受ける力

$$F = qE$$

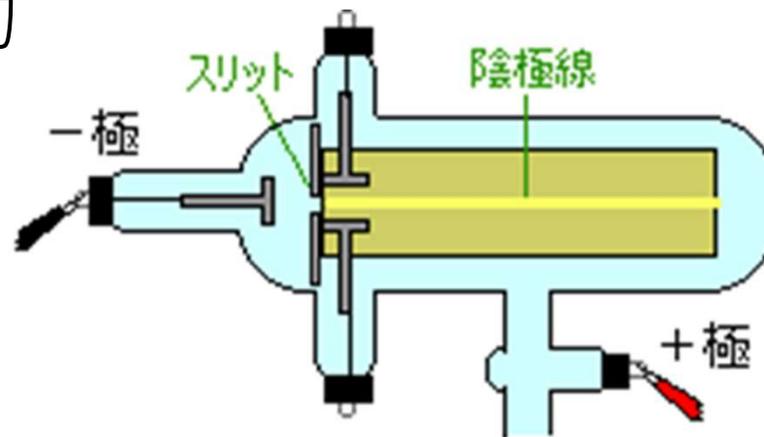
大きさ：電荷 × 電場

向き：電場と同じ向き

高電圧で電子を加速する

$$\frac{1}{2}mv^2 = eV$$

電荷の運動エネルギー = 電場のした仕事



放電管の負極から正極に向かう電子ビーム

1 Vで加速

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

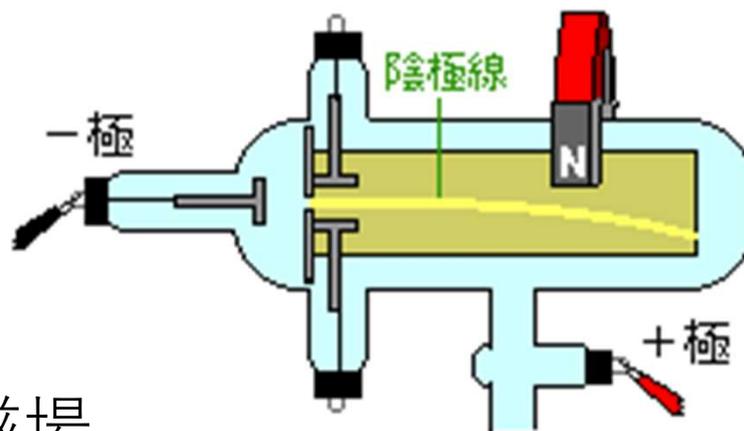
$$1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$$

# ローレンツ力 磁場から受ける力

$$F = qvB$$

ローレンツ力 = 運動する電荷 × 磁場

~~磁荷~~



U磁石を近づけると、電子ビームの進路が曲がる

磁場により電荷はローレンツ力を受けて運動の向きを変える

# ローレンツ力

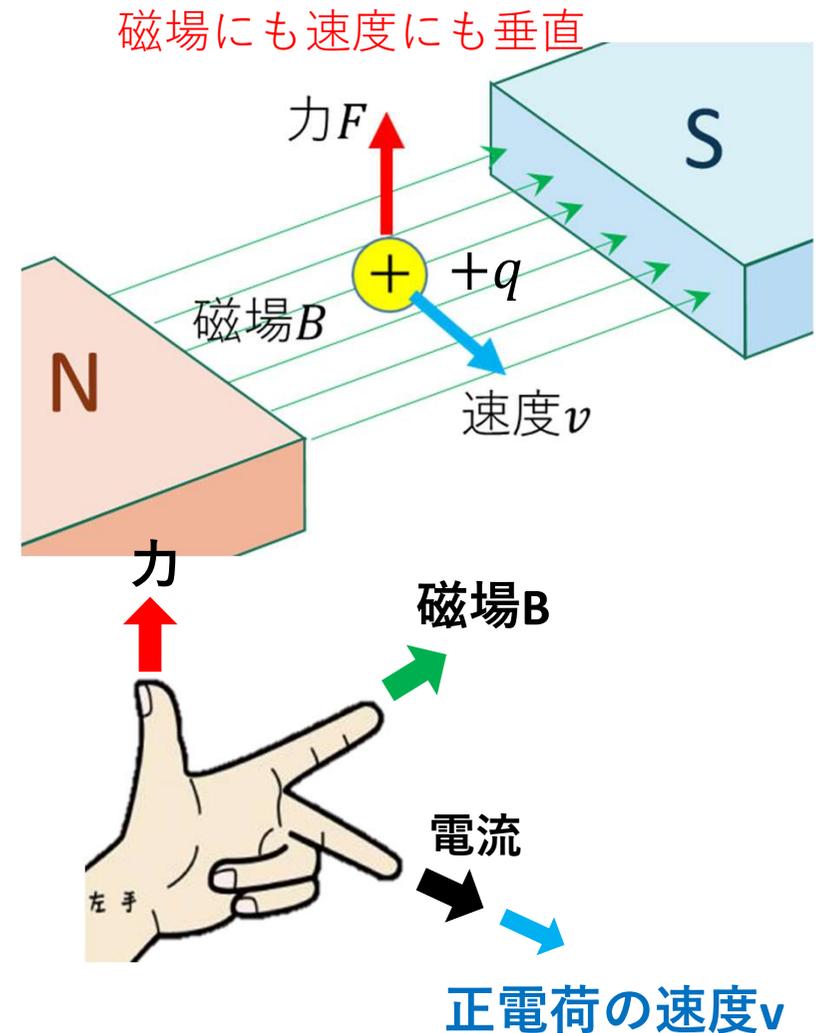
磁束密度  $B$  の磁場で、電荷  $q$  の粒子が磁場に垂直に速度  $v$  で動いているとき

$$F = qvB$$

大きさ 電荷  $\times$  速さ  $\times$  磁場

向き フレミングの左手の法則

電荷が正の場合は、親指の向きにローレンツ力を受ける



例題 1 を解きましょう。

## 例題 1

ローレンツ力の大きさ

演習書 後期 10-B[1]

磁束密度が  $B = 4.0 \times 10^{-5} \text{ T}$  の一様な磁場中に垂直に、帯電した粒子が速さ  $v = 5.0 \times 10^6 \text{ m/s}$  で運動している。粒子に働くローレンツ力の大きさはいくらか。また、このときの加速度はいくらか。ただし、陽子の電荷は  $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ 、質量は  $1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$  とする。

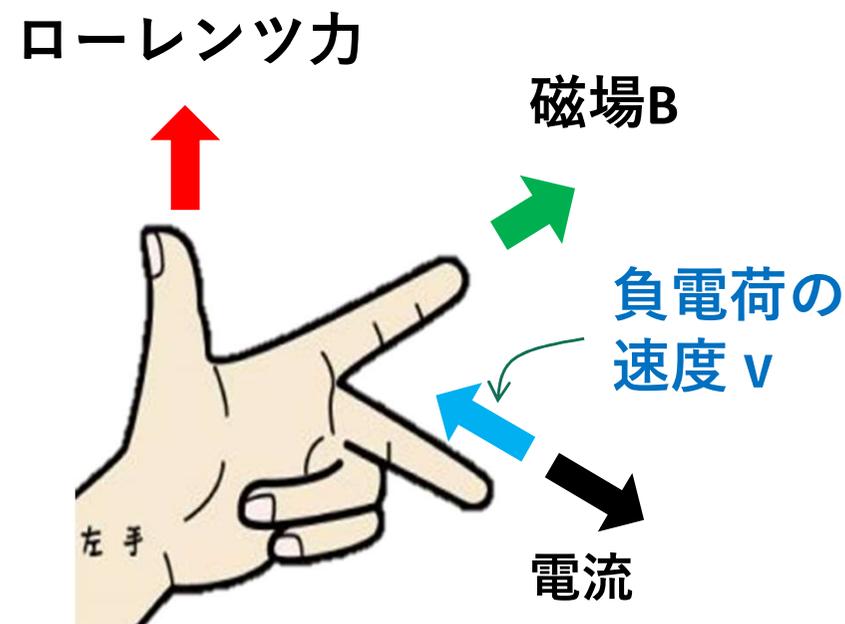
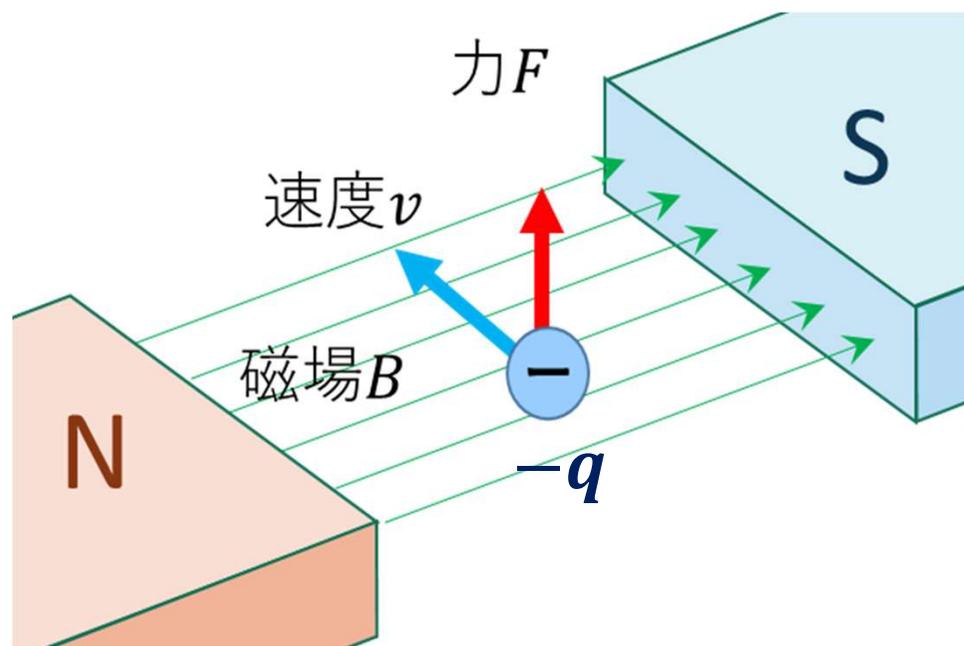
## 例題 1 解答例

$$\begin{aligned} F = qvB &= 1.6 \times 10^{-19} \times 5.0 \times 10^6 \times 4.0 \times 10^{-5} \\ &= 3.2 \times 10^{-17} \text{ N} \end{aligned}$$

運動方程式より

$$a = \frac{F}{m} = \frac{3.2 \times 10^{-17}}{1.67 \times 10^{-27}} = 1.9 \times 10^{10} \text{ m/s}$$

# 電子などの負電荷が磁場中を運動しているとき



負電荷の場合は、負電荷の速度と逆向き（電流の向き）に中指を揃えて、親指の向きにローレンツ力を受ける

# 磁場 $B$ と粒子の運動方向 $v$ が角度 $\theta$ をなすとき

速度  $v$  を磁場方向と垂直方向に分解し

$$F = qvB \sin \theta$$

$\theta = 0^\circ$  のとき  $F = 0$  [N]

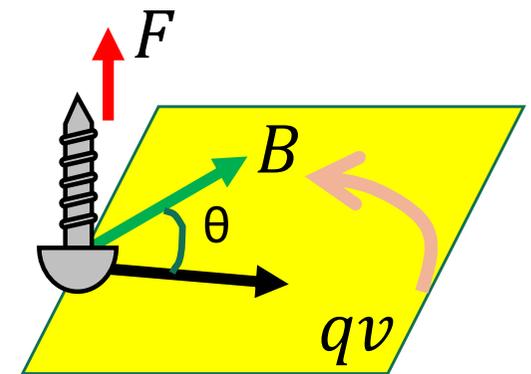
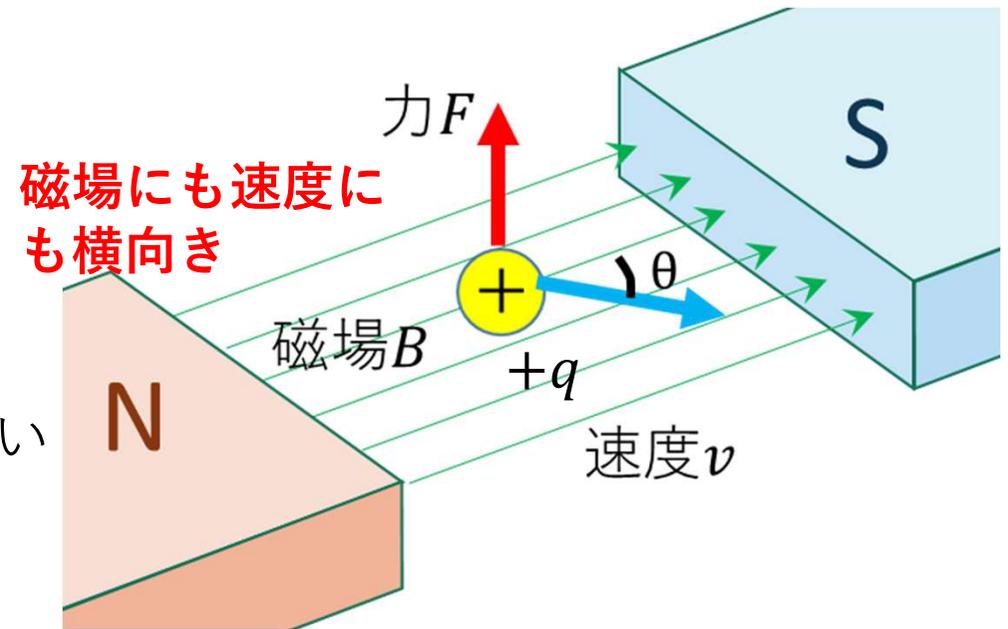
磁場と速度が平行なときは力を受けない

$\theta = 90^\circ$  (垂直) のとき

$$F = qvB$$
 [N]

$\theta = 180^\circ$  のとき

磁場と速度が平行なときは力を受けない



例題 2 を解きましょう。

## 例題2

### ローレンツ力の向き

次の(1)から(4)に示す磁場中で荷電粒子運動している。フレミングの左手の法則を用いて、ローレンツ力の向きを書き込みなさい。

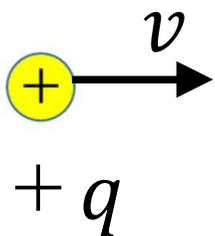
(1) 正電荷

(2) 負電荷

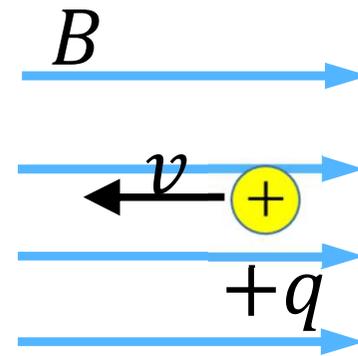
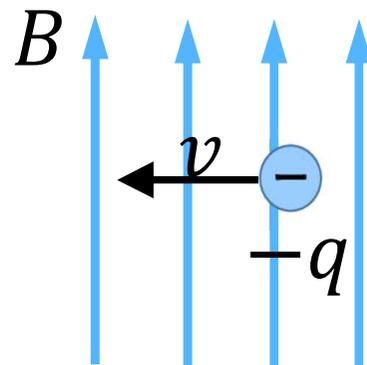
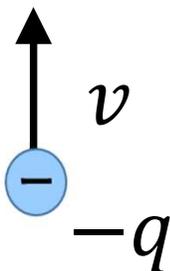
(3) 負電荷

(3) 正電荷

$B \otimes$

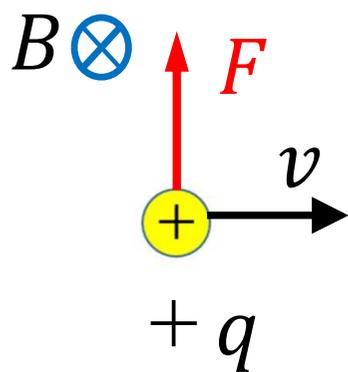


$B \odot$

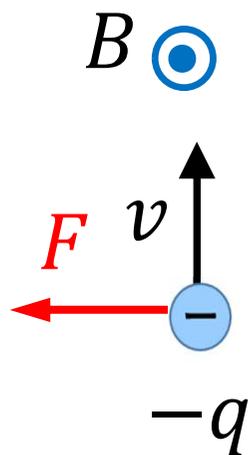


## 例題2 解答例

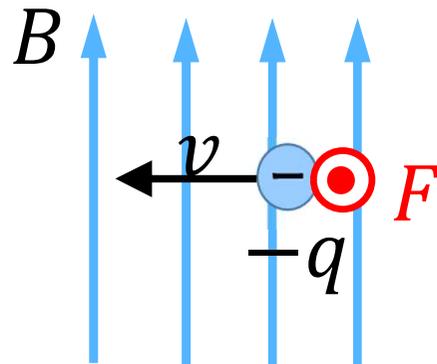
(1) 正電荷



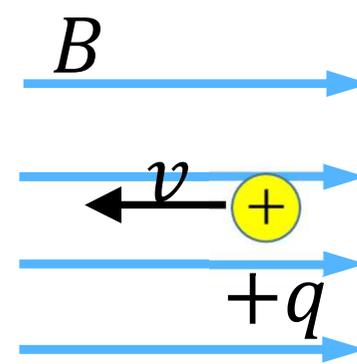
(2) 負電荷



(3) 負電荷



(3) 正電荷



負電荷の速度と逆向きに  
中指を揃えてフレミング  
の左手の法則を使う

磁場と速度  
が平行なと  
きは力を受  
けない

# 電流が受ける力とローレンツ力は同等

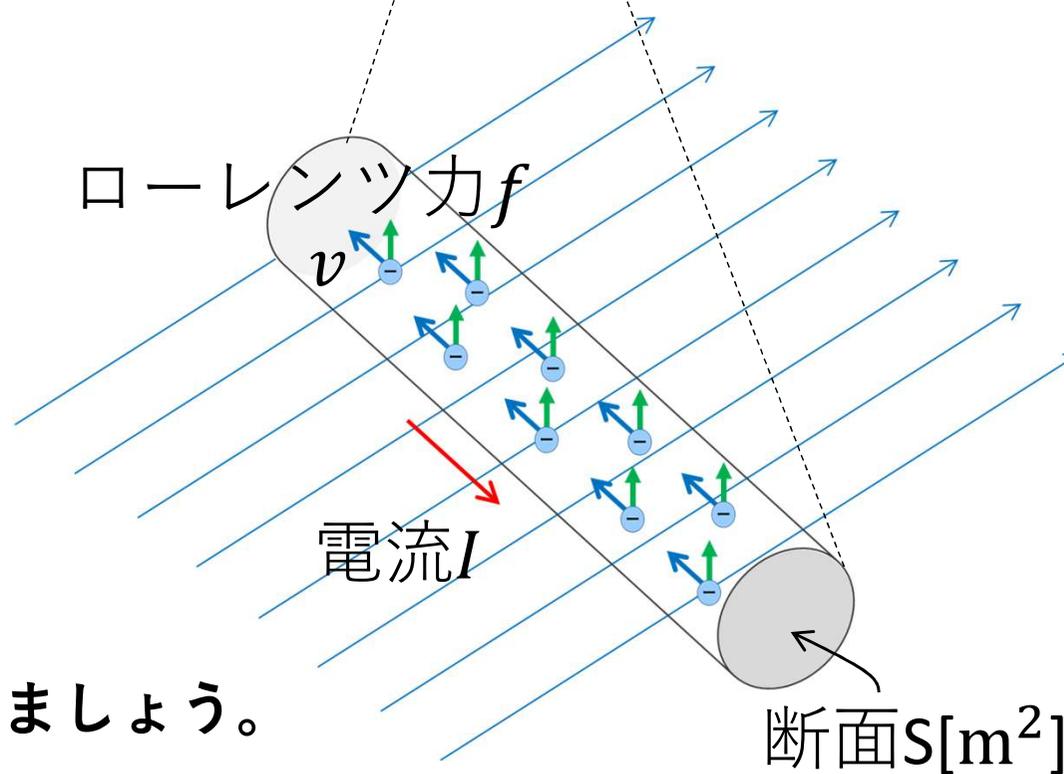
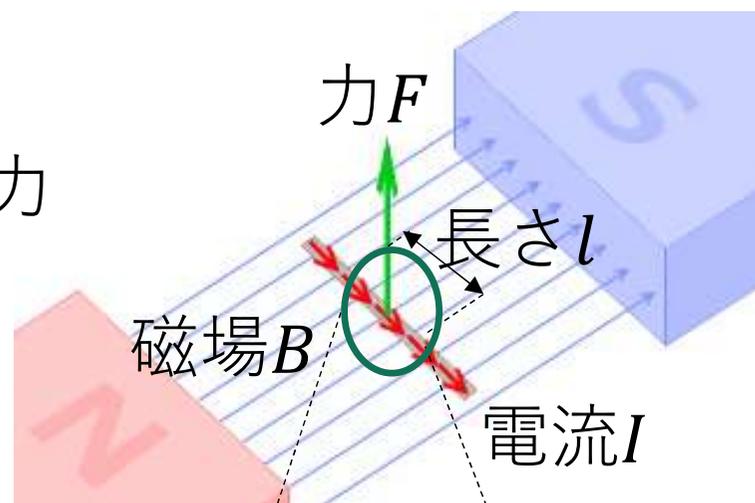
導体中の電子が受けるローレンツ力

$$f = qvB$$

は、電流が磁場から受ける力

$$F = IBl$$

と同等



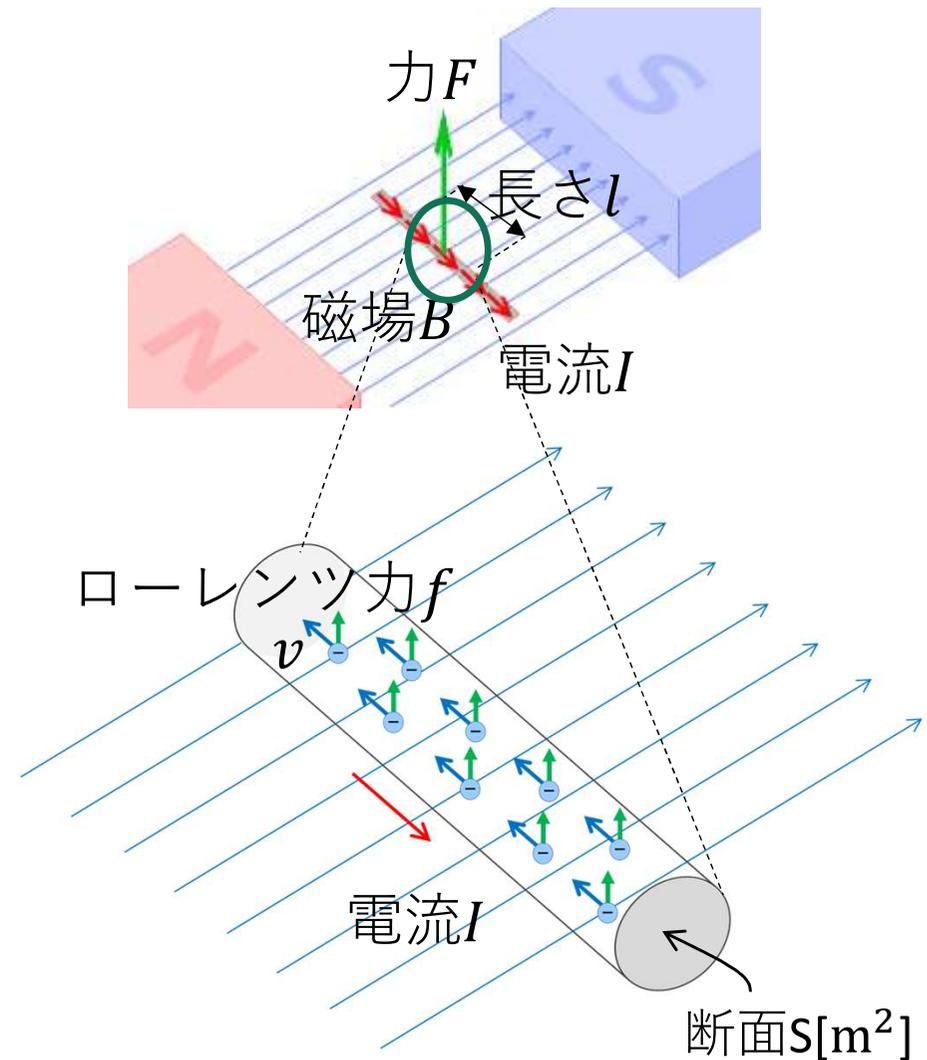
例題3を解きましょう。

### 例題3

電流が受ける力とローレンツ力

教科書p110 例題12

自由電子に働くローレンツ力の総和が電流に働く力となることを示しなさい。



### 例題3 解答例

導線の断面積  $S[\text{m}^2]$ 、自由電子の密度  $n[\text{個}/\text{m}^3]$ 、  
電子の平均の速さ  $v[\text{m}/\text{s}]$ 、  
電気素量(電子の電気量)  $e[\text{C}]$ 、磁束密度  $B[\text{T}]$  とおく。

導線を通る電流  $I[\text{A}]$  は

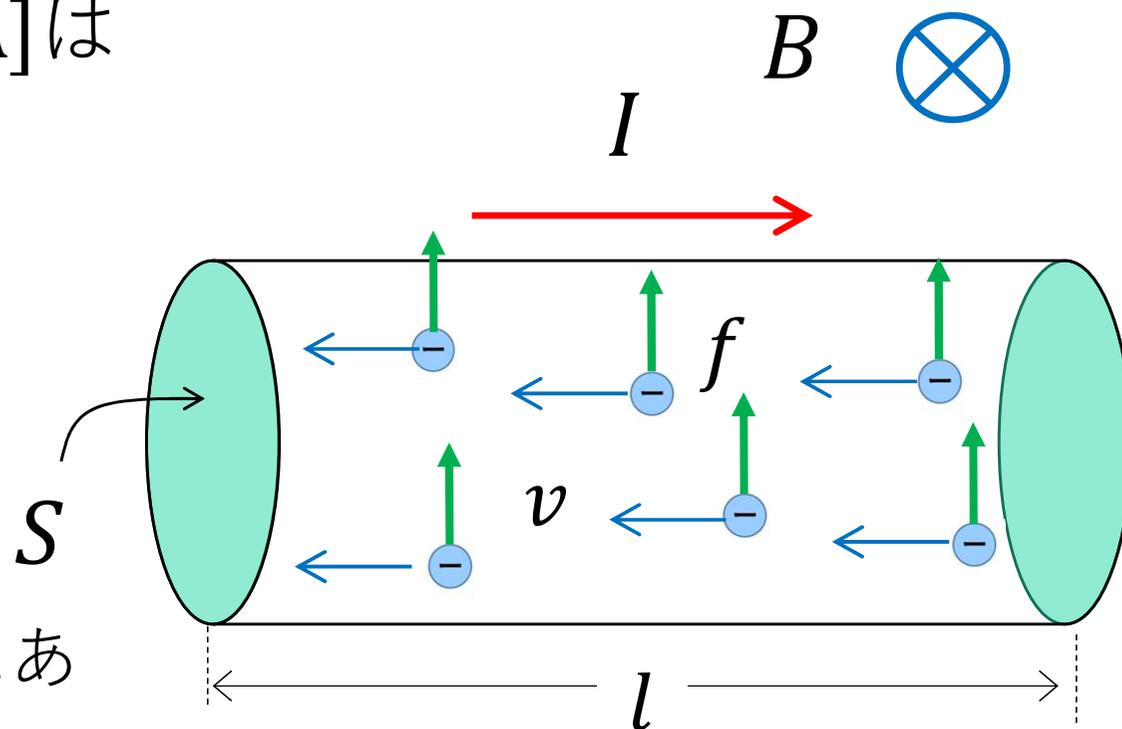
$$I = qnSv$$

自由電子1個あたりが受けるローレンツ力  $f$  は

$$f = qvB$$

導線の長さ  $l[\text{m}]$  あたりにある自由電子の個数は

$$nSl \text{ 個}$$



教科書p63-64、  
後期講義8回目講義を参照

これより、導線 $l[m]$ の中の自由電子が受けるローレンツ力の総和は

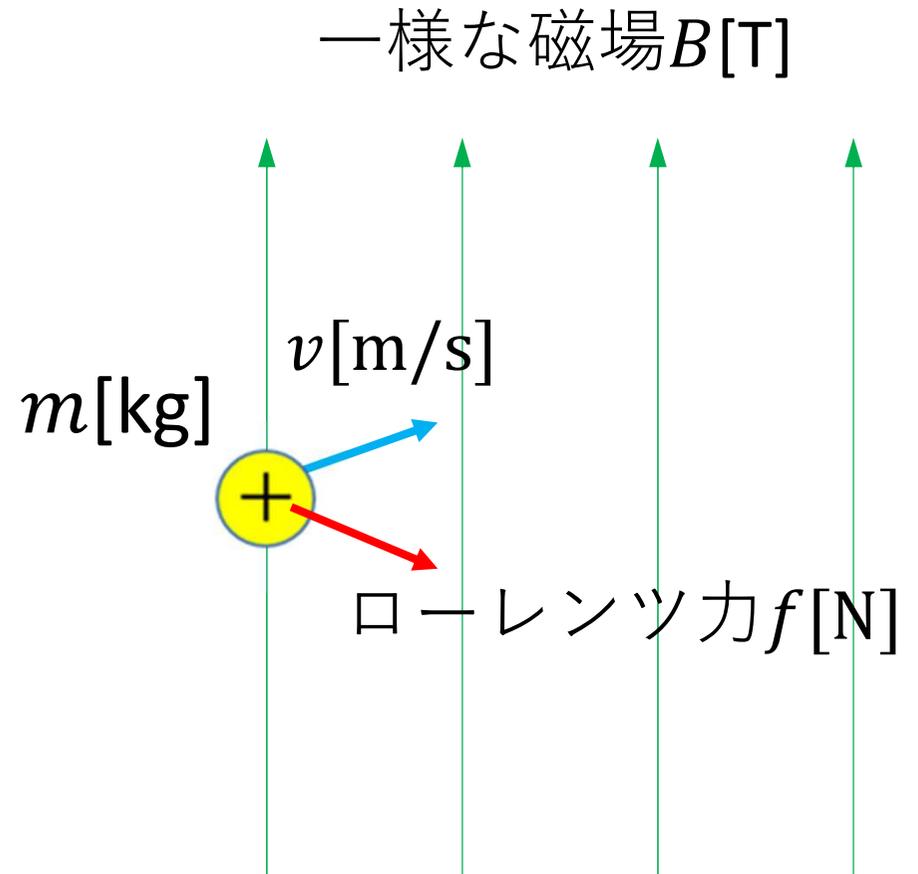
$$\begin{aligned} F &= f \times nSl = qvB \times nSl \\ &= (qnSv)Bl \\ &= IBl \end{aligned}$$

これは、一様な磁場 $B[T]$ に垂直におかれた導線 $l[m]$ あたりに流れる電流 $I$ が受ける力

# ローレンツ力と円運動

磁束密度 $B$ [T]の**一様な磁場**に**垂直**に、質量 $m$ [kg]、電荷 $q$ [C]の粒子が飛び込んだとき

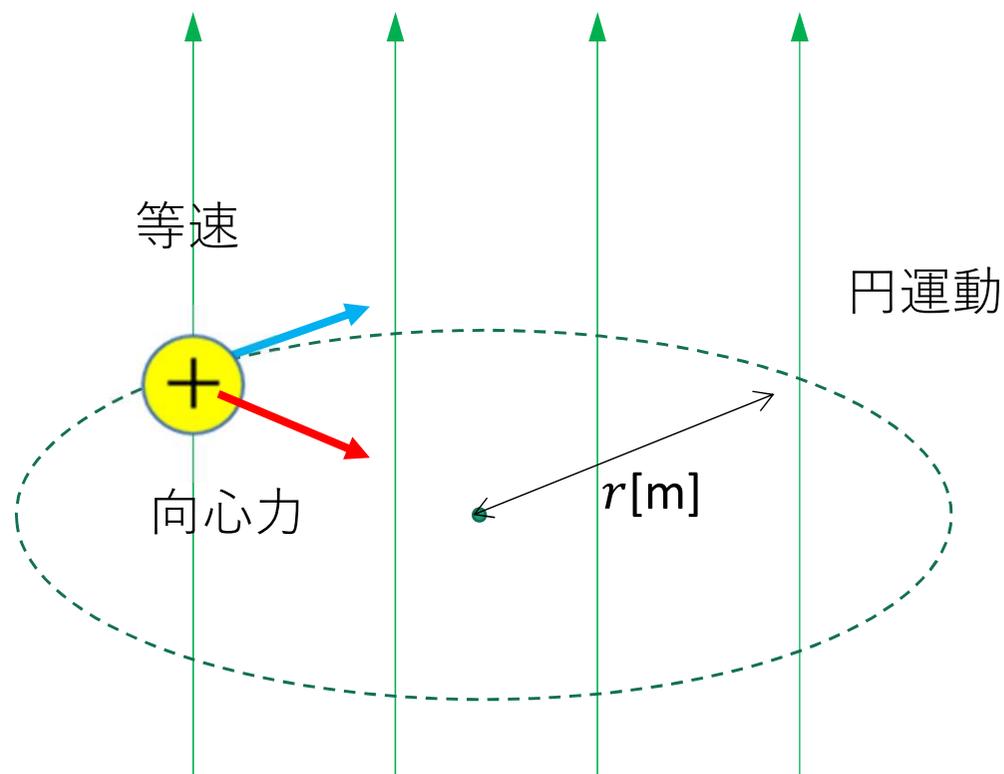
- 電荷にローレンツ力 $f$ が働く
- フレミングの左手の法則より $f$ は $v$ に垂直



- ・ 磁場中の運動は円運動

電荷は進む向きと垂直方向のローレンツ力を受け、速さを変えず、軌道が曲げられる。ローレンツ力は進行方向に常に垂直に働くため、軌道が曲げられて円軌道を描く。

電荷はローレンツ力が向心力となり、**等速円運動**をする



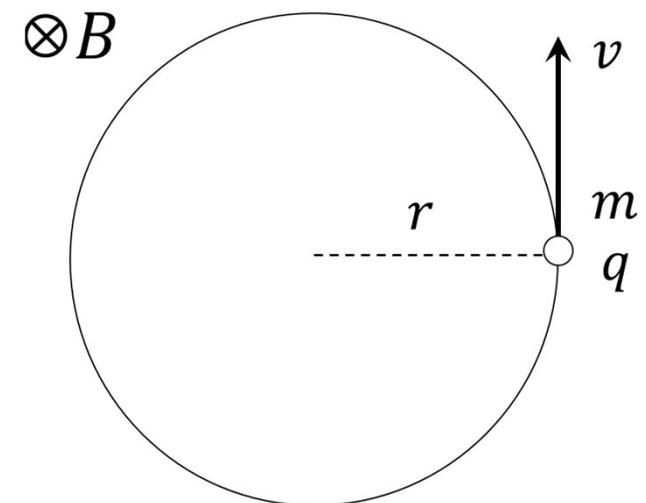
例題 3 を解きましょう

## 例題4

演習書 後期 10-B[2]

図のように，紙面に対して垂直に表から裏に向かう磁束密度  $B$  の一様な磁場がある。この磁場に垂直に，質量  $m$ ，電気量  $q$  のイオンを速さ  $v$  で入射すると，イオンは半径  $r$  の円軌道を運動する。

- (1) イオンに働くローレンツ力の向きを図示せよ。また，イオンの電荷は正か負のどちらか。
- (2) イオンの運動方程式を書け。
- (3) イオンの円運動の半径  $r$  および周期  $T$  を  $m, q, v, B$  で表せ。



## 例題4 解答例

(1) 粒子の受ける力は右図

電荷は正。

フレミングの左手の法則を図の $B, v, f$ に当てはめると、中指と $v$ の向きが同じになるため。(逆向きだったら負電荷)

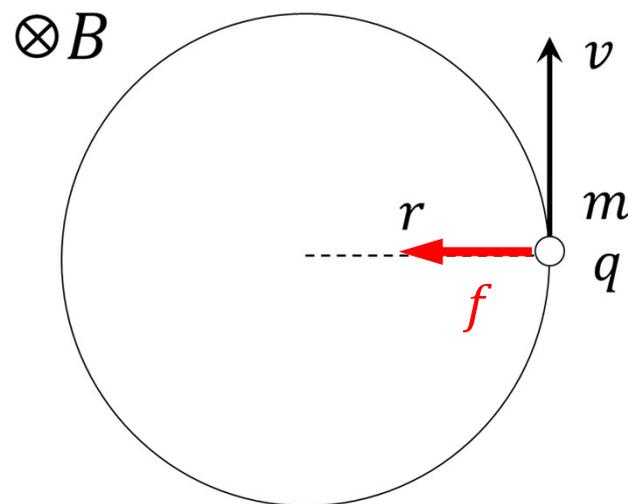
(2)  $m \frac{v^2}{r} = qvB$       ⇐ 覚えよう

(3) 運動方程式を半径 $r$ について解くと

$$r = \frac{mv^2}{qvB} = \frac{mv}{qB}$$

周期は $T = 2\pi r/v$ より

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi}{v} \times \frac{mv}{qB} = \frac{2\pi m}{qB}$$

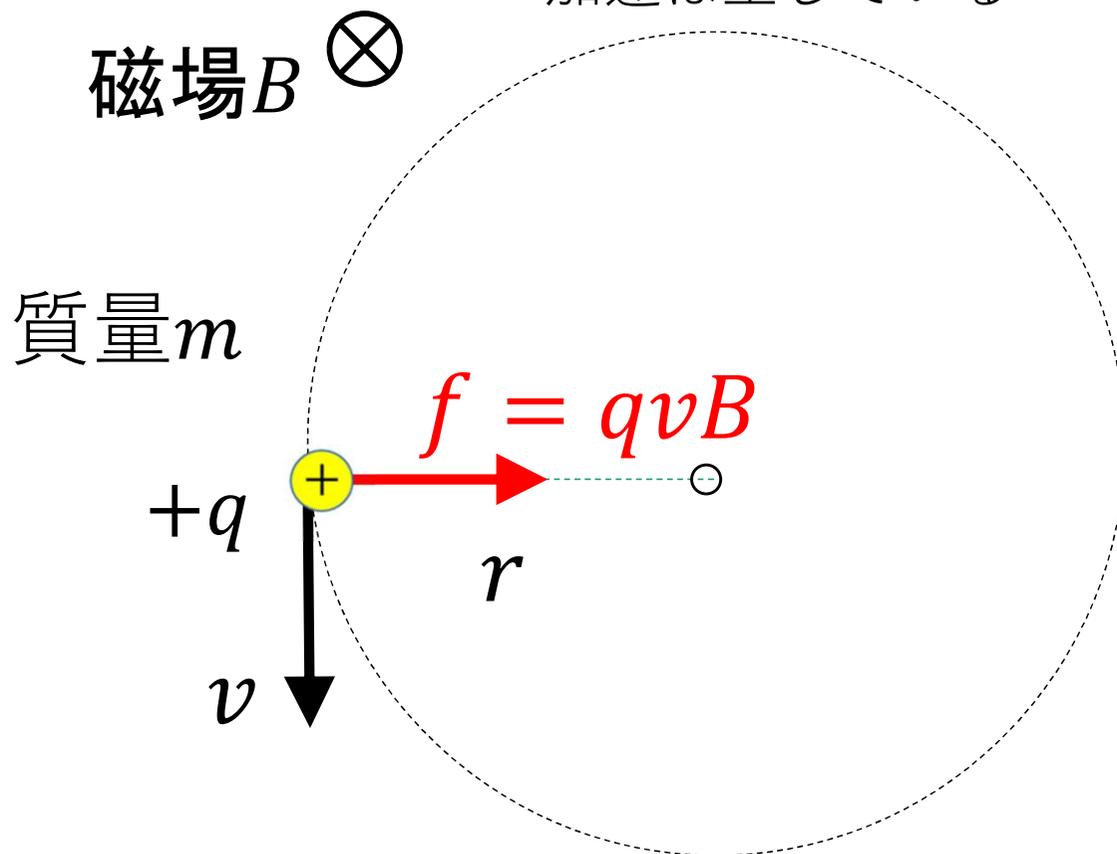


# 等速円運動の運動方程式

$$m \frac{v^2}{r} = qvB$$

ローレンツ力が向心力

向心加速度：速度の向きを変えるだけでも加速は生じている



# 円運動の半径と周期

半径  $r = \frac{mv}{qB}$

周期  $T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{qB}$

1周するのに要する時間

半径や速度に無関係！

質量  $m$  2倍 →

半径  $r$  2倍 周期  $T$  2倍

磁場  $B$  2倍 →

半径  $r$  1/2倍 周期  $T$  1/2倍

電荷  $q$  2倍 →

半径  $r$  1/2倍 周期  $T$  1/2倍

速さ  $v$  2倍 →

半径  $r$  2倍 周期  $T$  変化しない

例題 4 を解きましょう

## 例題5

演習書 後期10-B[3]

磁束密度  $B = 5.0 \times 10^{-5}$  T の一様な磁場中で、磁場に垂直に、電子が速さ  $v = 3.0 \times 10^7$  m/s で円軌道を回っている。

(1) 電子にはたらくローレンツ力の大きさはいくらか。

(2) 円運動の半径と周期を求めよ。

ただし、電子の電荷は  $-1.6 \times 10^{-19}$  C, 質量は  $9.11 \times 10^{-31}$  kg とする。

## 例題5 解答例

$$\begin{aligned} F = evB &= 1.6 \times 10^{-19} \times 3.0 \times 10^7 \times 5.0 \times 10^{-5} \\ &= 2.4 \times 10^{-16} \text{ N} \end{aligned}$$

$$r = \frac{mv}{eB} = \frac{9.1 \times 10^{-31} \cdot 3.0 \times 10^7}{1.6 \times 10^{-19} \cdot 5.0 \times 10^{-5}} = 3.4 \text{ m}$$

$$T = \frac{2\pi m}{qB} = \frac{2\pi \cdot 9.1 \times 10^{-31}}{1.6 \times 10^{-19} \cdot 5.0 \times 10^{-5}} = 7.1 \times 10^{-7} \text{ m}$$