

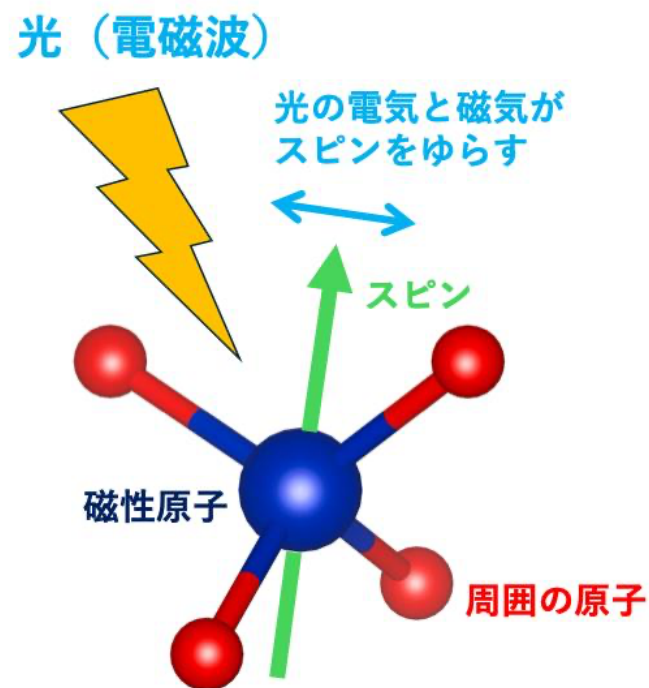
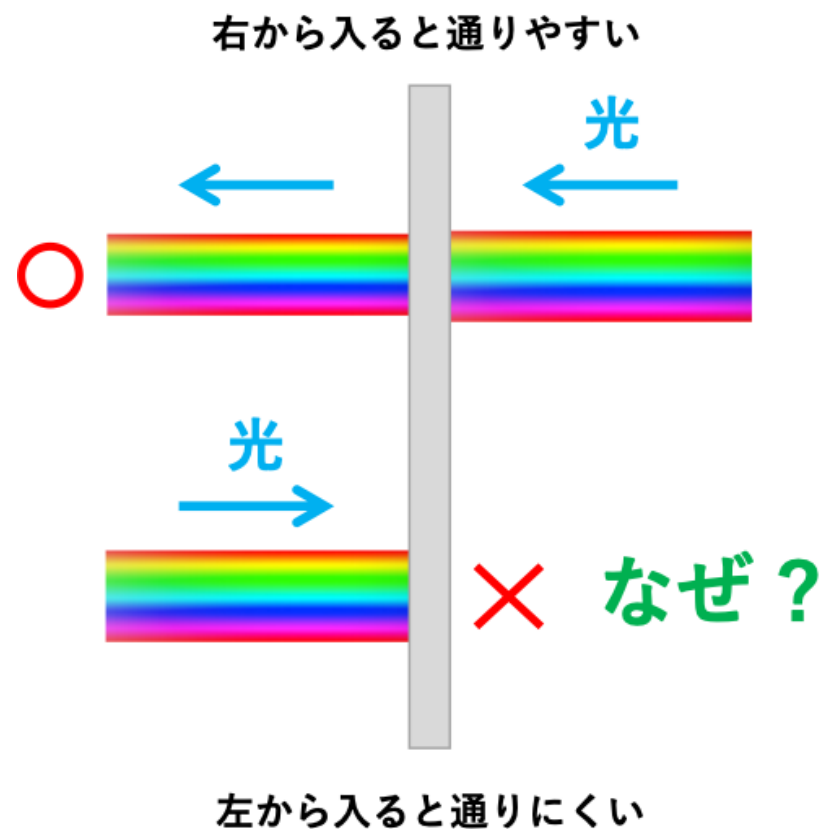
光が『片道だけ』通れる世界 ～電気と磁気がつくる不思議な効果～



静岡大学 理学部

松本 正茂

研究内容



共同研究者

赤木 暢	(神戸大学)
鳴海 康雄	(大阪大学)
大久保 晋	(神戸大学)
太田 仁	(神戸大学)
萩原 正幸	(大阪大学)

本日の内容

1. 電気と磁気
2. 電磁波
3. 角運動量とスピン
4. MRI
5. 電子スピン共鳴
6. 一方向透過性
7. マグノン崩壊

本日の内容

1. 電気と磁気
2. 電磁波
3. 角運動量とスピン
4. MRI
5. 電子スピン共鳴
6. 一方向透過性
7. マグノン崩壊

1. 電気と磁気

歴史



MS Copilotで生成した教育用模式図

紀元前600年頃

タレス／古代の人々

静電気・磁気

こすった琥珀の吸引と、天然磁石が鉄を引く現象を認識。

1600年

W. ギルバート

電気と磁気を区別

摩擦電気と磁石の力を別の現象として整理。

1820～1826年

エルステッド／アンペール

電流と磁界

電流が磁界をつくると発見し、関係を数学的に体系化。

1831年

M. ファラデー

電磁誘導

変化する磁界が電流を生むことを発見。

1830～1840年代

M. ファラデー

「場」の考え方

電界・磁界が空間に広がり、力を伝えると提唱。

1864～1865年

J. C. マクスウェル

光は電磁波

電界・磁界の波が光速で伝わると理論化。

1887～1888年

H. ヘルツ

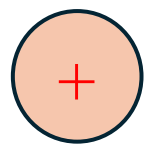
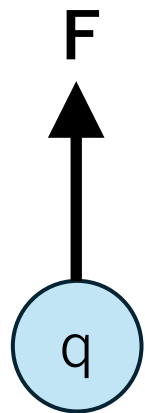
電磁波を実証

電磁波を人工的に発生・検出し、光との共通性を確認。

1. 電気と磁気

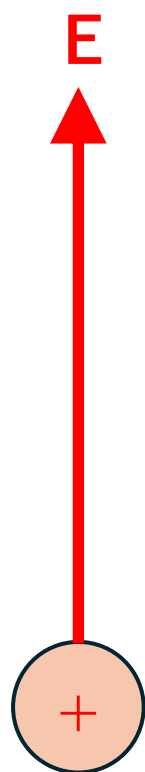
電場

電荷 q に
力が働く



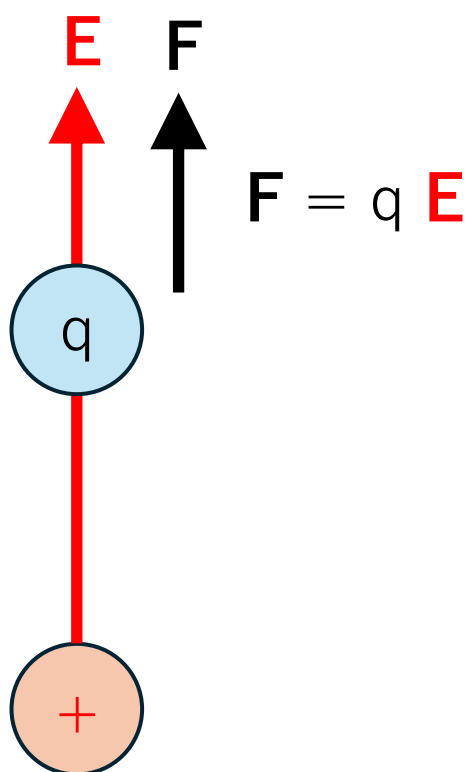
電荷

電荷 q を置かなくても
電場が存在する

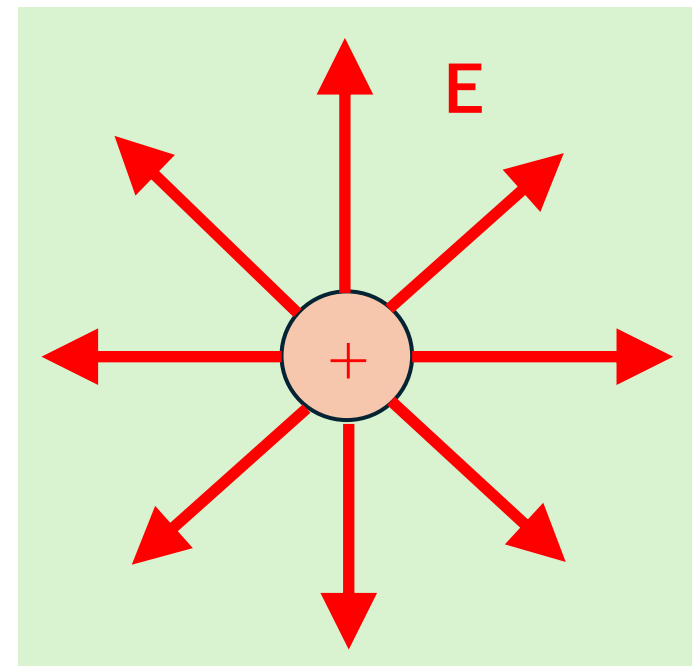


電荷

電場の中に電荷を
置くと力が働く



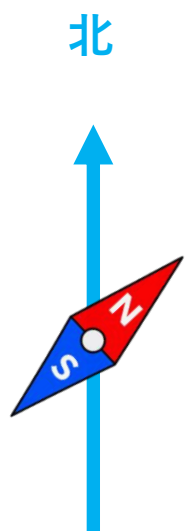
電荷



電荷から電場が出ている

1. 電気と磁気

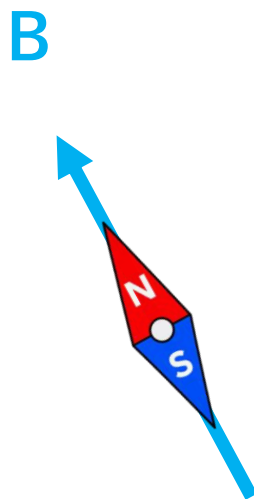
磁場



方位磁石は
Nが北を向く



磁石の向く方向に
磁場が存在している

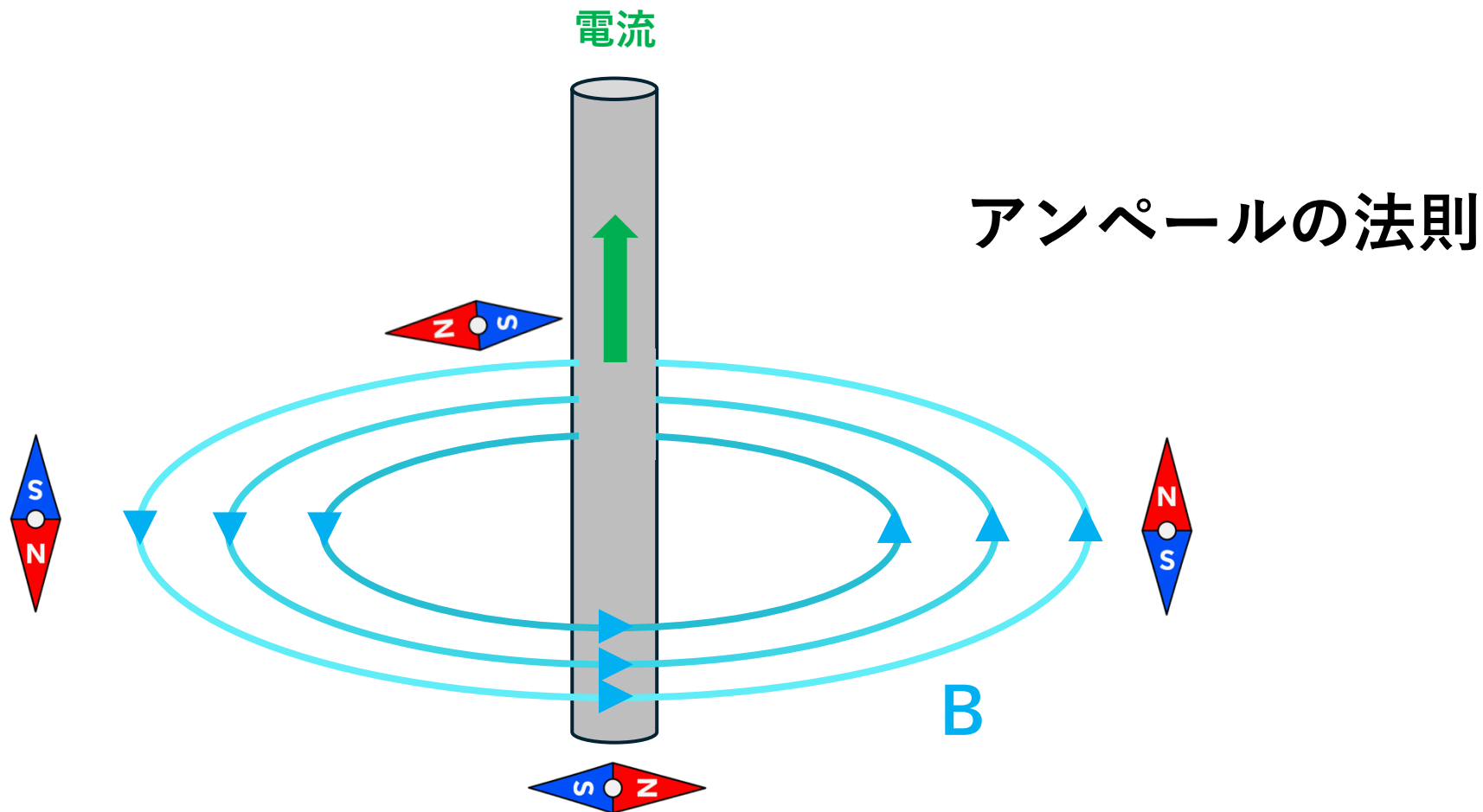


電場 E : 電荷に力を及ぼす

磁場 B : 磁石に力を及ぼす

電荷や磁石を置かない場合も
電場と磁場は存在する

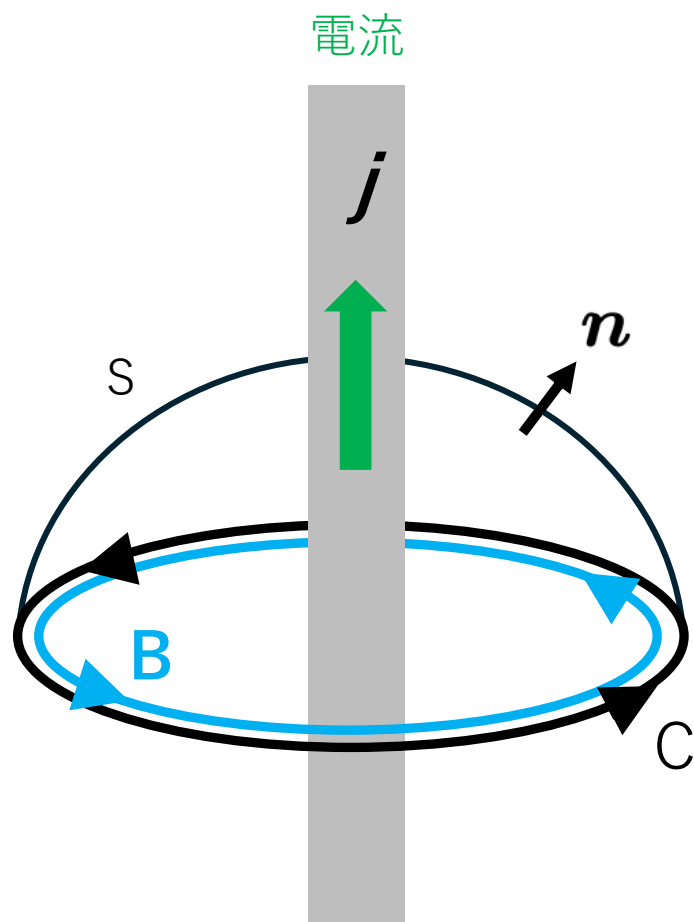
ファラデー



電流の向きに対して**右ネジの方向**に回転する磁場ができる

1. 電気と磁気

アンペールの法則



経路Cに沿って
回転してる磁場

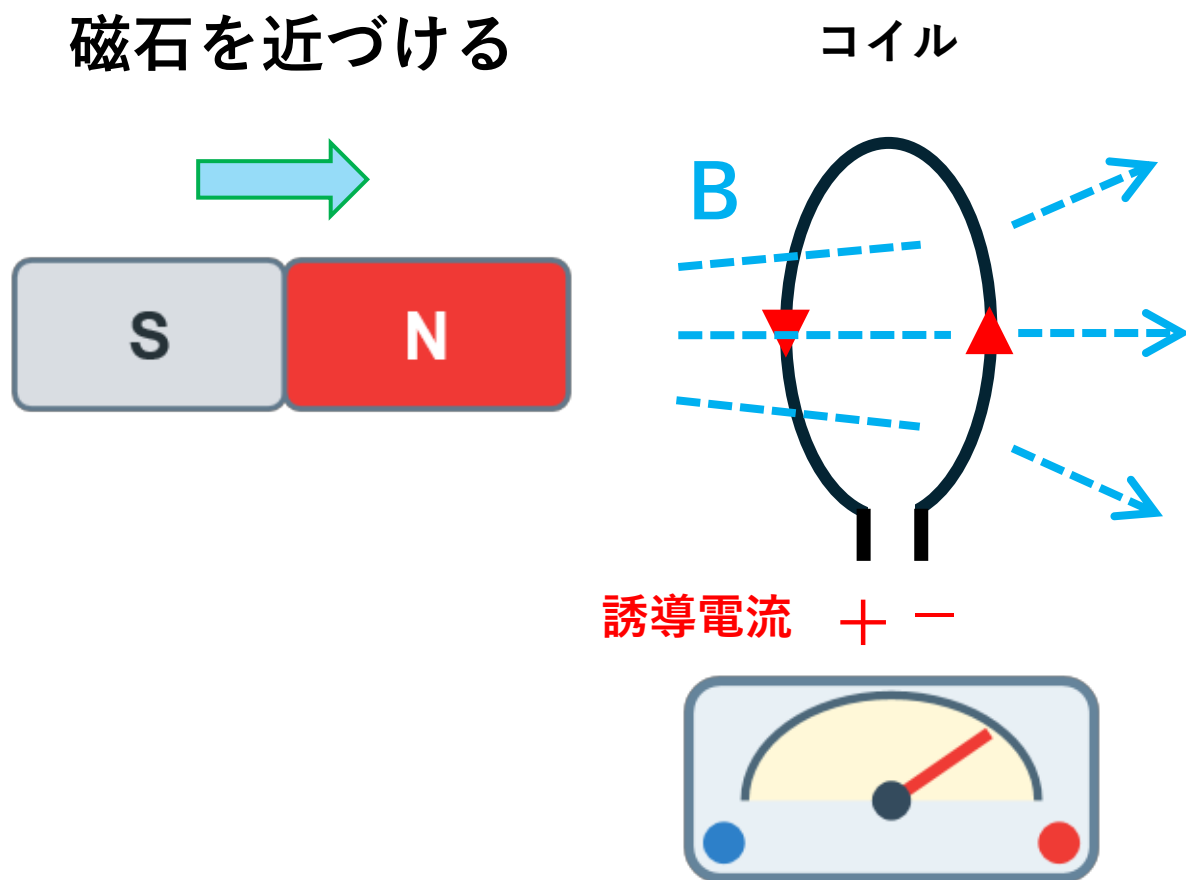
電流密度の
表面積分

$$\oint_C d\mathbf{r} \cdot \mathbf{B} = \mu_0 \int_S dS \mathbf{n} \cdot \mathbf{j}$$

表面Sを貫く電流が
回転する磁場 $\mathbf{B}$ を作る

1. 電気と磁気

電磁誘導

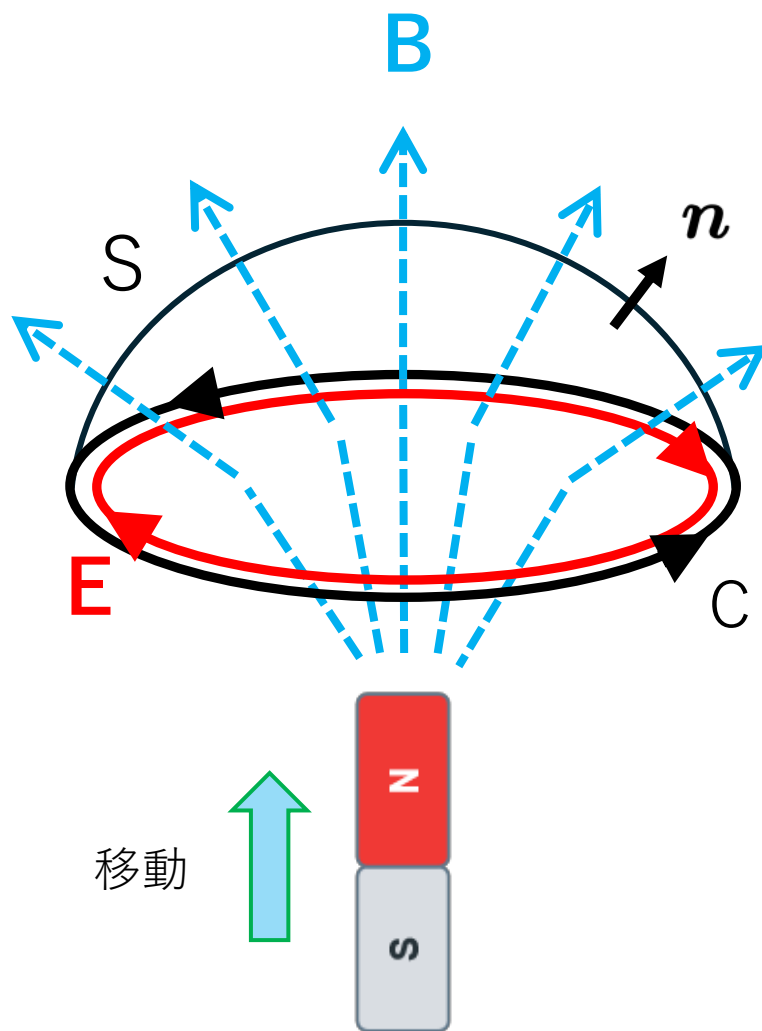


ファラデーの法則

コイルを貫く磁束が変化しない方向に
電流が流れる（電圧が発生する）

1. 電気と磁気

ファラデーの法則



回転する電場が
発生する

表面Sを貫く
磁束の時間変化

$$-\oint_C d\mathbf{r} \cdot \mathbf{E} = \int_S dS \, \mathbf{n} \cdot \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

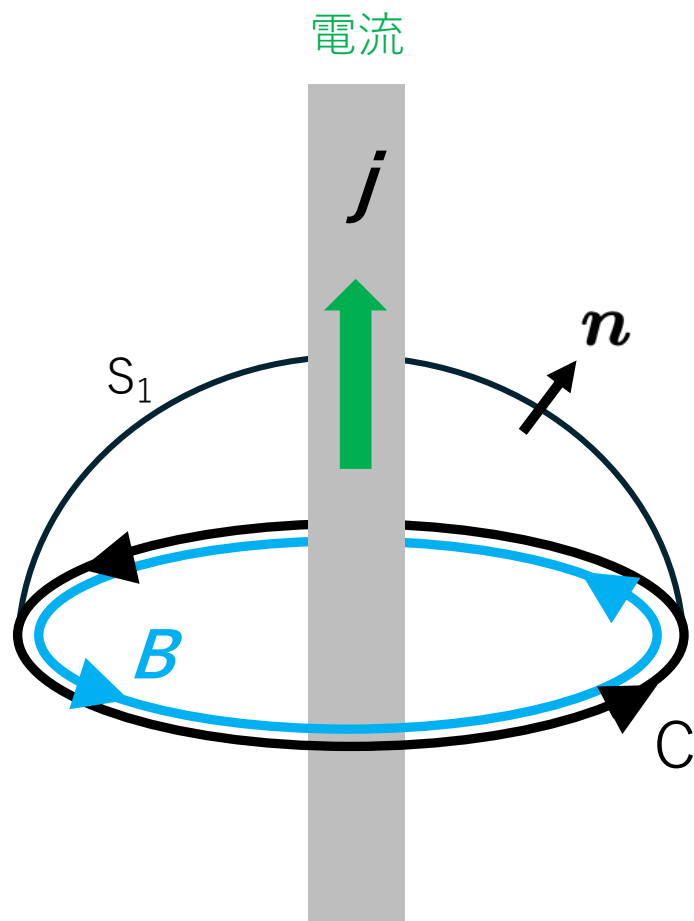
電場： 電流を流す力

本日の内容

1. 電気と磁気
- 2. 電磁波**
3. 角運動量とスピン
4. MRI
5. 電子スピン共鳴
6. 一方向透過性
7. マグノン崩壊

2. 電磁波

アンペール・マクスウェルの法則



経路Cに沿って
回転してる磁場

電流密度の
表面積分

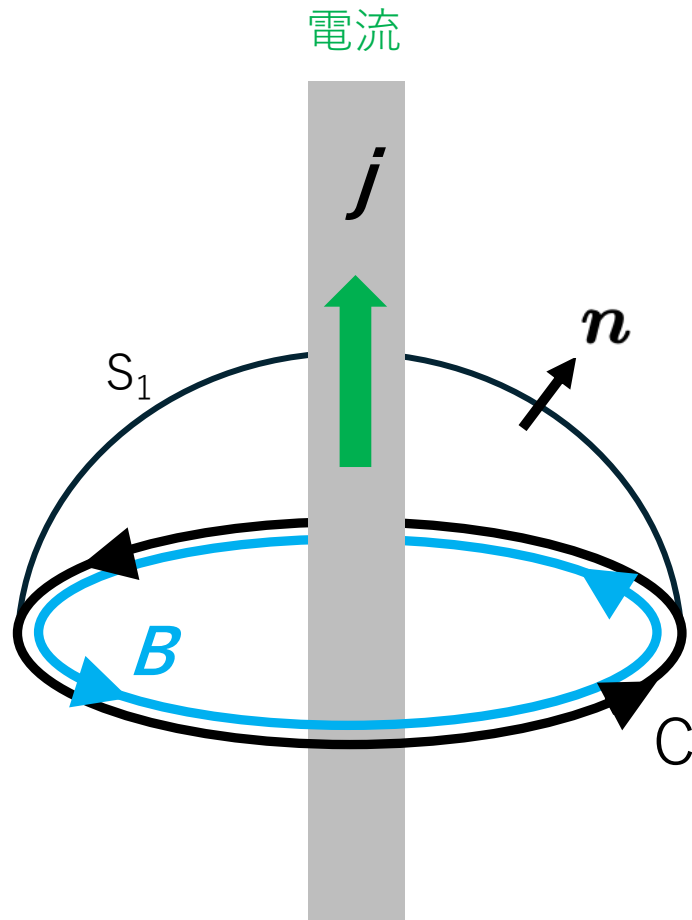
$$\oint_C d\mathbf{r} \cdot \mathbf{B} = \mu_0 \int_{S_1} dS \mathbf{n} \cdot \mathbf{j}$$

表面 S_1 を貫く電流が
回転する磁場 $\mathbf{B}$ を作る

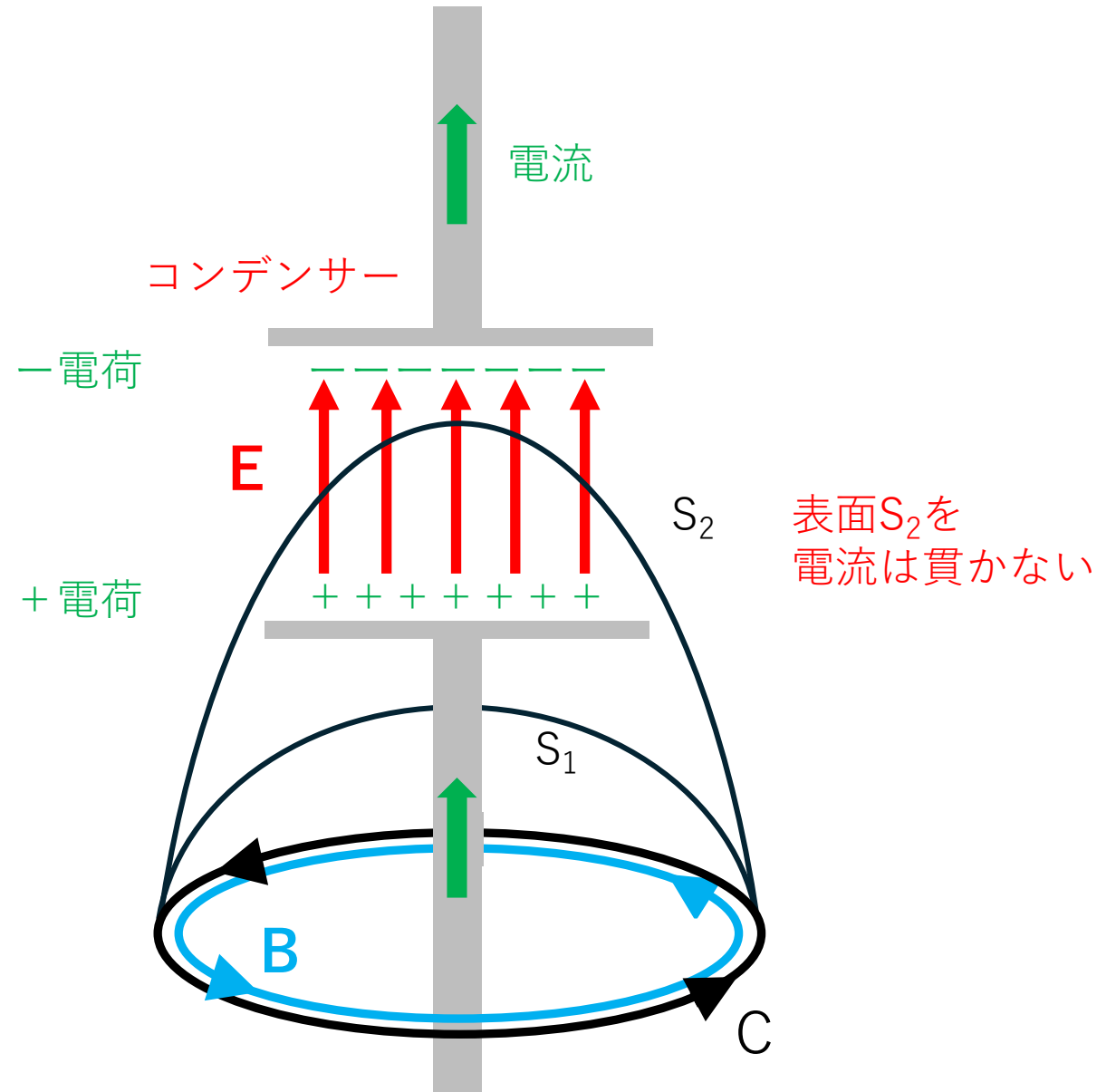
アンペールの法則

2. 電磁波

アンペール・マクスウェルの法則



表面 S_1 を貫く電流が
回転する磁場 B を作る



2. 電磁波

アンペール・マクスウェルの法則

電荷の保存則

$$\operatorname{div} \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial t} \rho = 0$$

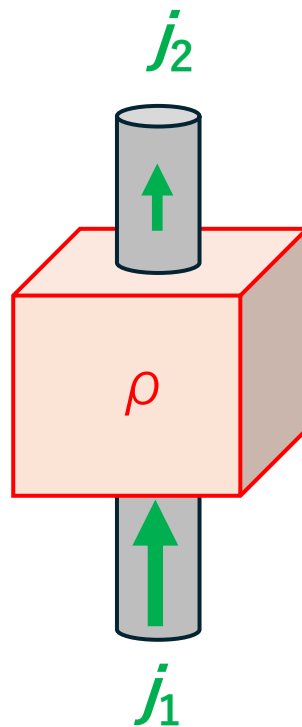
$$\operatorname{div} \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial t} \varepsilon_0 \operatorname{div} \mathbf{E} = 0$$

$$\operatorname{div} \left(\mathbf{j} + \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right) = 0$$

電流密度

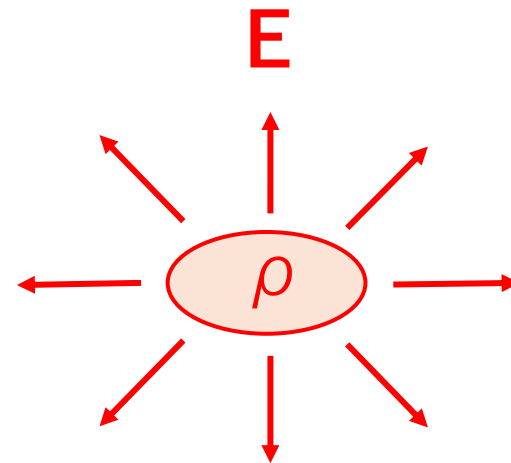
変位電流密度

出たり入ったりする量の合計（出た量をプラス）



電流が流れ込むと
電荷が増える

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = \frac{1}{\varepsilon_0} \rho$$



電荷があると
電場は湧き出す

2. 電磁波

アンペール・マクスウェルの法則

電荷の保存則

$$\operatorname{div} \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial t} \rho = 0$$

$$\operatorname{div} \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial t} \varepsilon_0 \operatorname{div} \mathbf{E} = 0$$

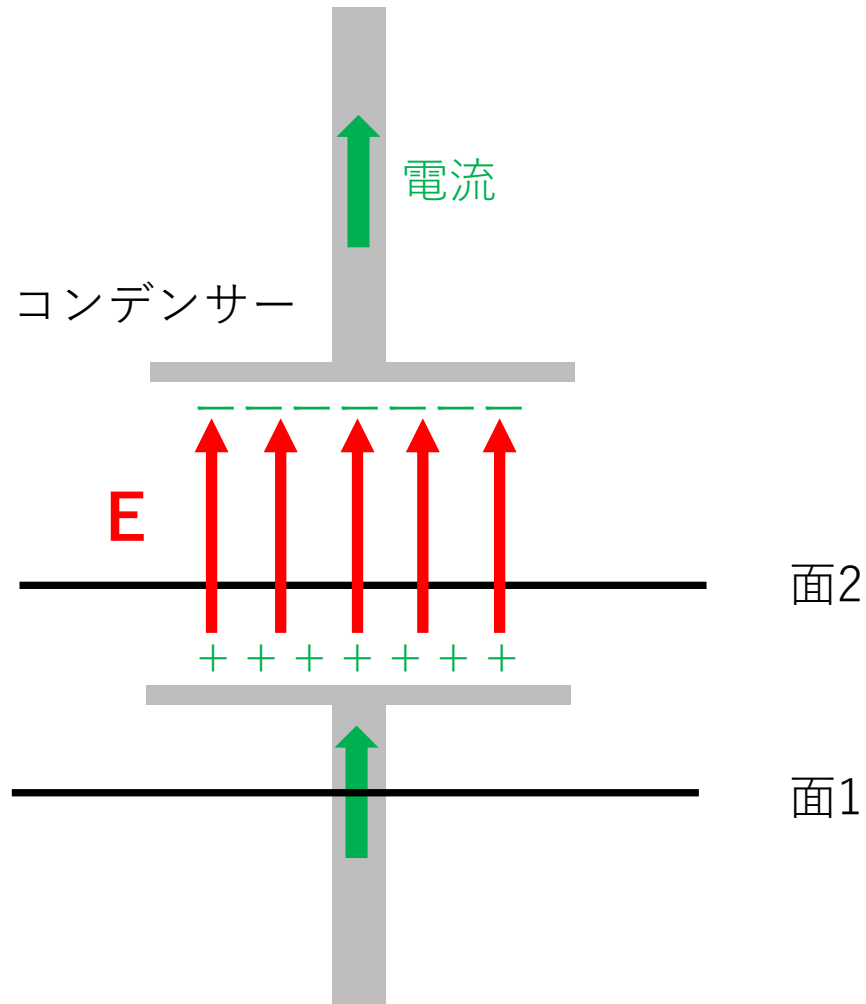
$$\operatorname{div} \left(\mathbf{j} + \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right) = 0$$

電流密度

変位電流密度

$$\mathbf{j} + \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

$$\mathbf{j} + \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$



出たり入ったりする量の合計（出た量をプラス）

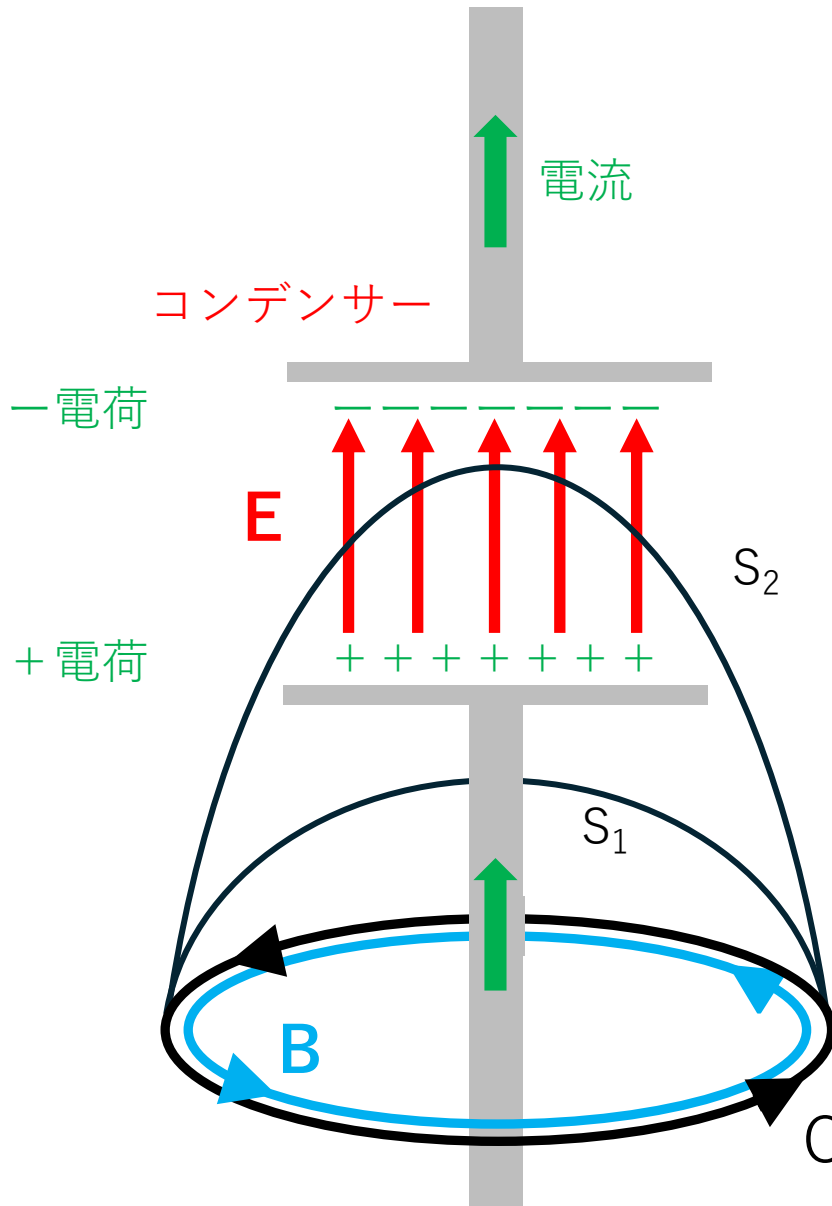
2. 電磁波

アンペール・マクスウェルの法則

電荷の保存則を満たす

$$\oint_C \mathbf{dr} \cdot \mathbf{B} = \mu_0 \int_S dS \, \mathbf{n} \cdot \left(\mathbf{j} + \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right)$$

電場の時間変化は
電流と同じように
回転する磁場を生み出す

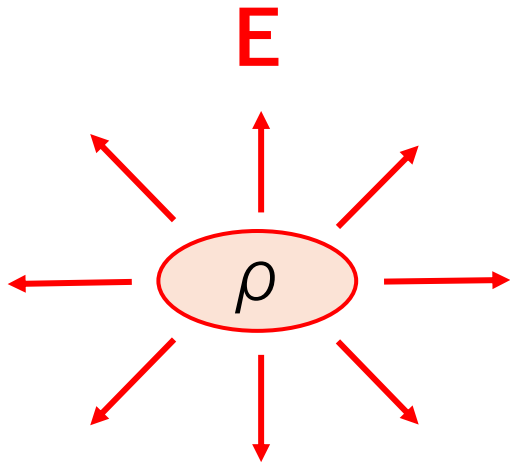


2. 電磁波

マクスウェル方程式

電場に関するガウスの法則

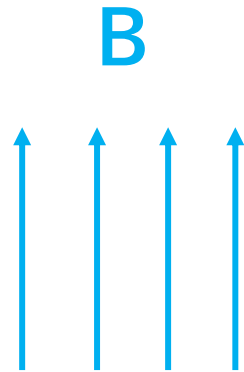
$$\operatorname{div} \mathbf{E} = \frac{1}{\varepsilon_0} \rho$$



電荷があると
電場は湧き出す

磁場に関するガウスの法則

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0$$



磁場は湧き出さない

アンペール・マクスウェルの法則

$$\operatorname{rot} \mathbf{B} = \mu_0 \left(\mathbf{j} + \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right)$$

ファラデーの法則

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

2. 電磁波

真空中の電磁場

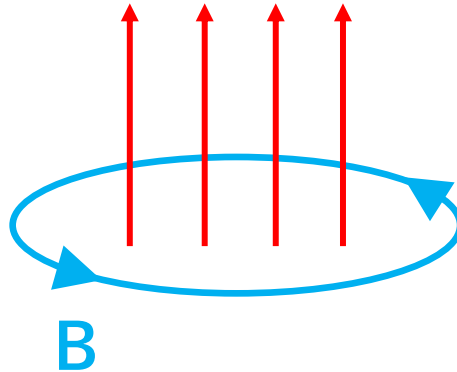
電荷はゼロ $\rho = 0$

電流はゼロ $j = 0$

電荷と電流がなくても
電場と磁場は存在できる

$$\text{rot} \mathbf{B} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

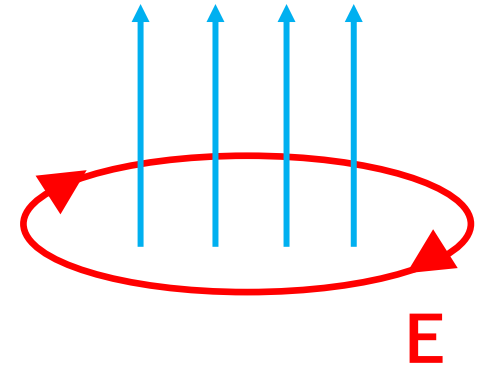
$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$



電場が増えると
右ネジの方向に回転する
磁場ができる

$$\text{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

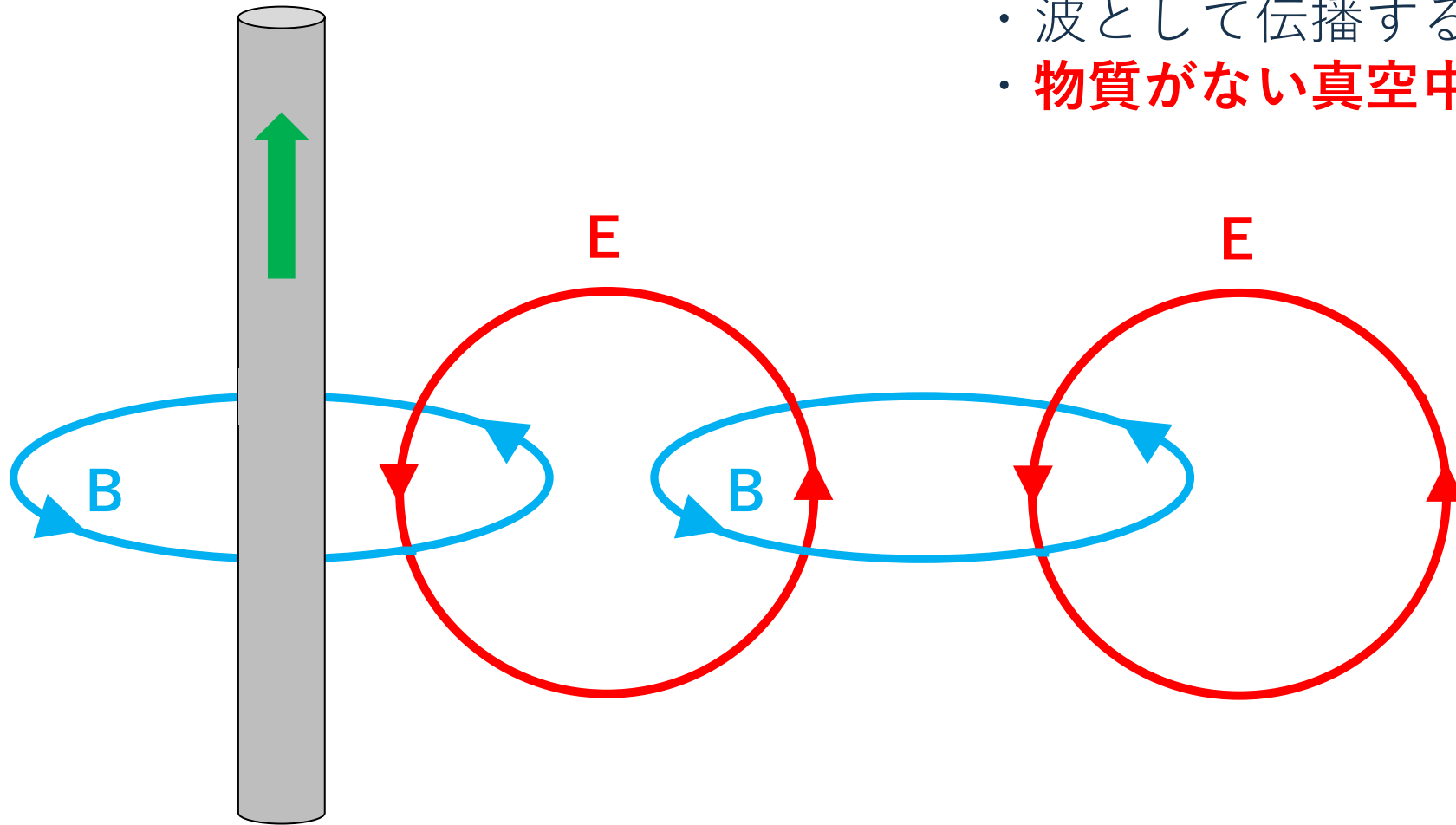


電場が増えると
右ネジの方向に回転する
磁場ができる

2. 電磁波

電場と磁場の波のイメージ

電流

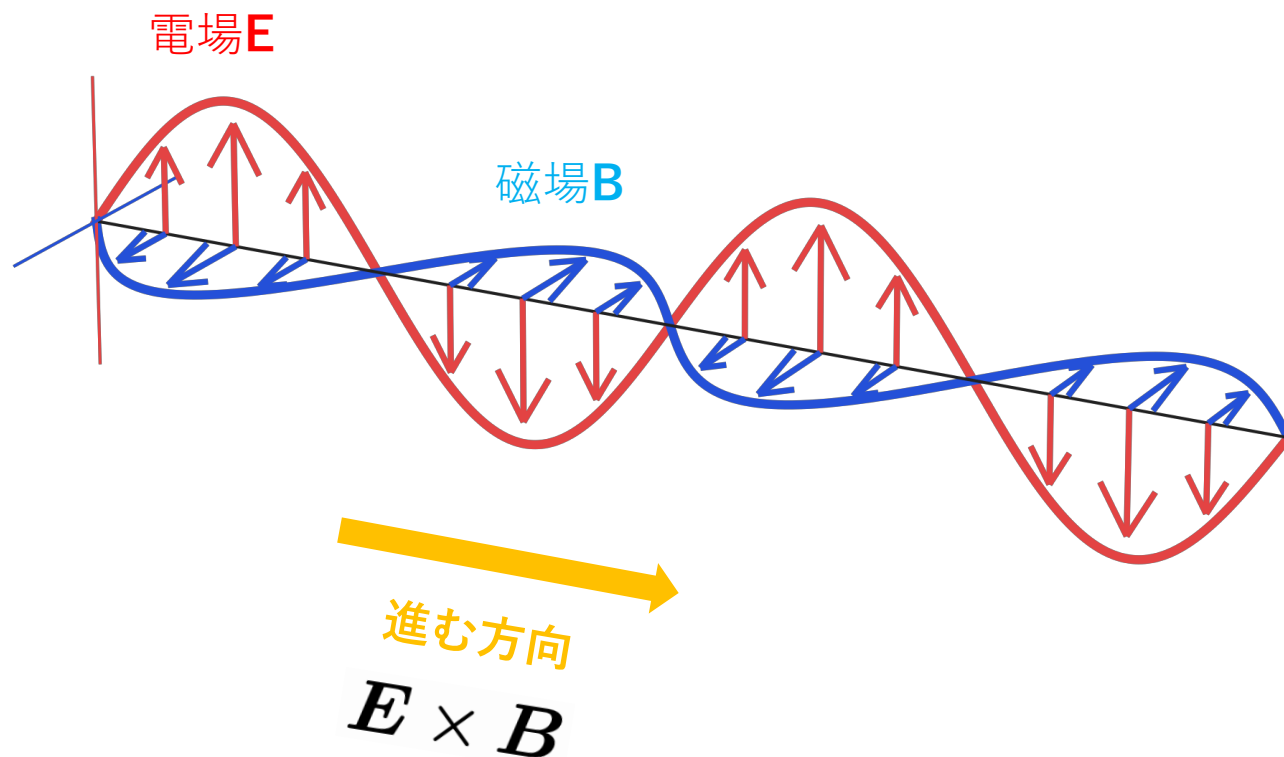


- ・ 磁場が電場を作り、電場が磁場を作る
- ・ 波として伝播する
- ・ **物質がない真空中でも伝播**する

(あくまでもイメージです)

2. 電磁波

電磁波が伝播する例



電場ベクトルから磁場ベクトルへ向かって回転したとき
右ネジに進む方向

波の進む速さを計算すると

$$\frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = c$$

光の速さと
同じになった

ϵ_0 真空の誘電率

μ_0 真空の透磁率

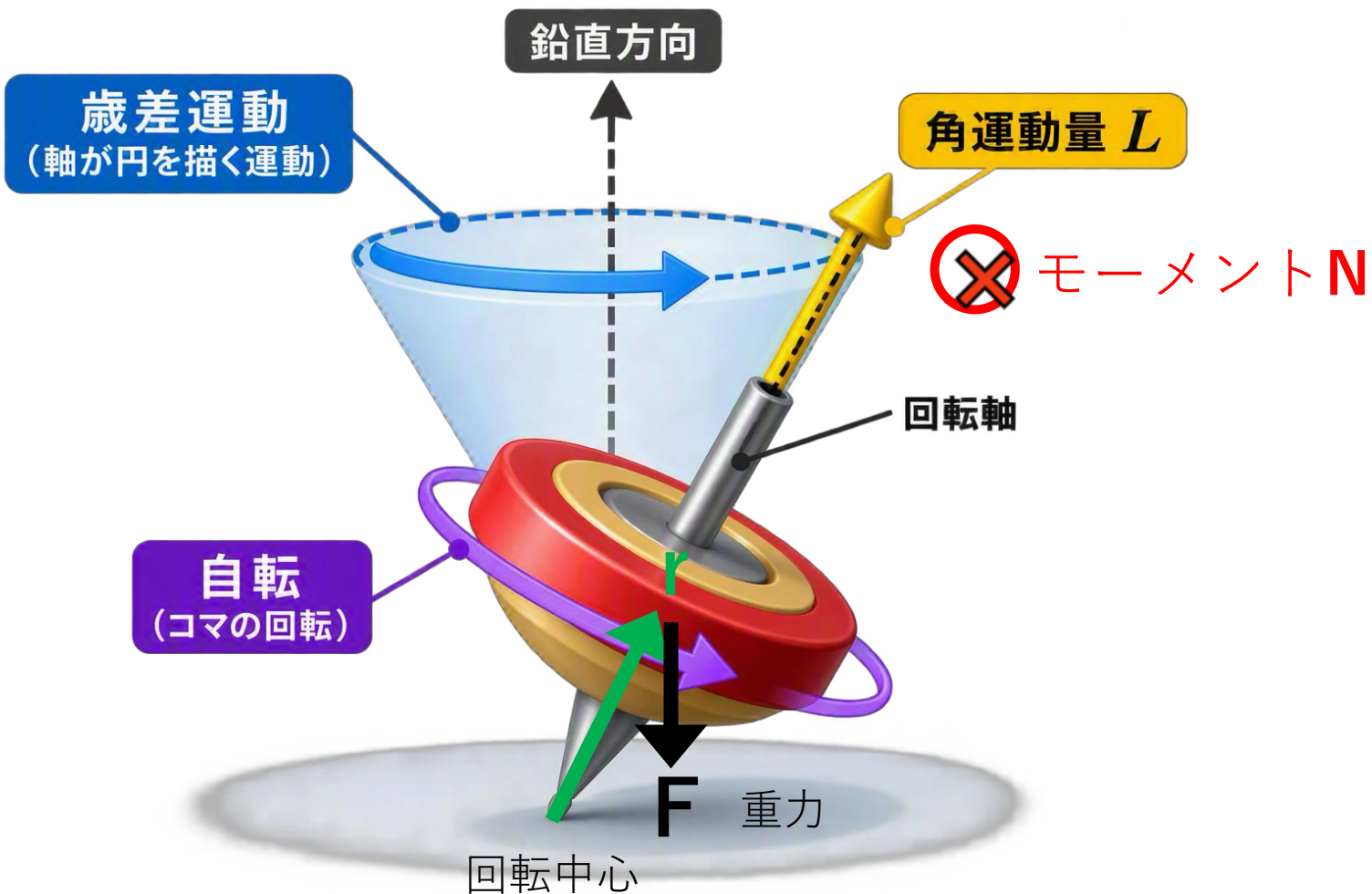
光は電磁波である！

本日の内容

1. 電気と磁気
2. 電磁波
- 3. 角運動量とスピン**
4. MRI
5. 電子スピン共鳴
6. 一方向透過性
7. マグノン崩壊

3. 角運動量とスピン

コマの歳差運動



力のモーメント (トルク)

$$\mathbf{N} = \mathbf{r} \times \mathbf{F}$$

運動方程式力

$$\frac{d\mathbf{L}}{dt} = \mathbf{N}$$

3. 角運動量とスピン

スピンと磁石

電子と陽子はスピン1/2を持つ

磁場中の磁石

水素原子

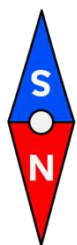
磁場

B

磁石のエネルギー

高い

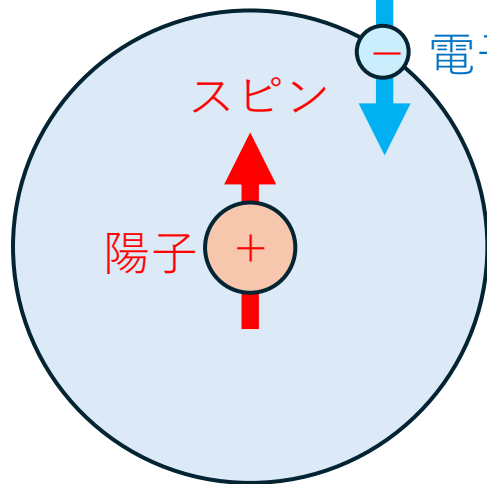
低い



スピン

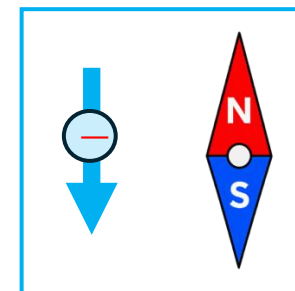
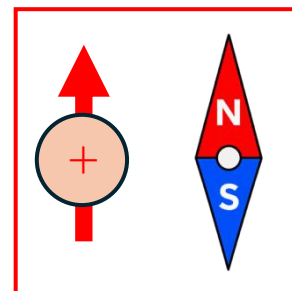
電子

陽子



陽子

電子



B

エネルギー

量子状態

高い

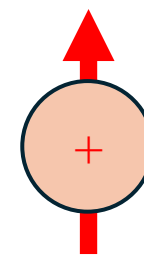
$|\downarrow\rangle$

ダウン

低い

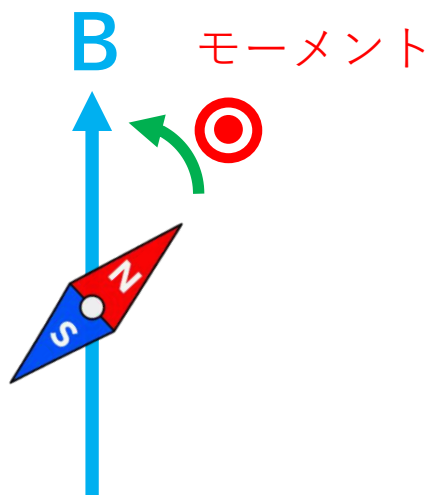
$|\uparrow\rangle$

アップ

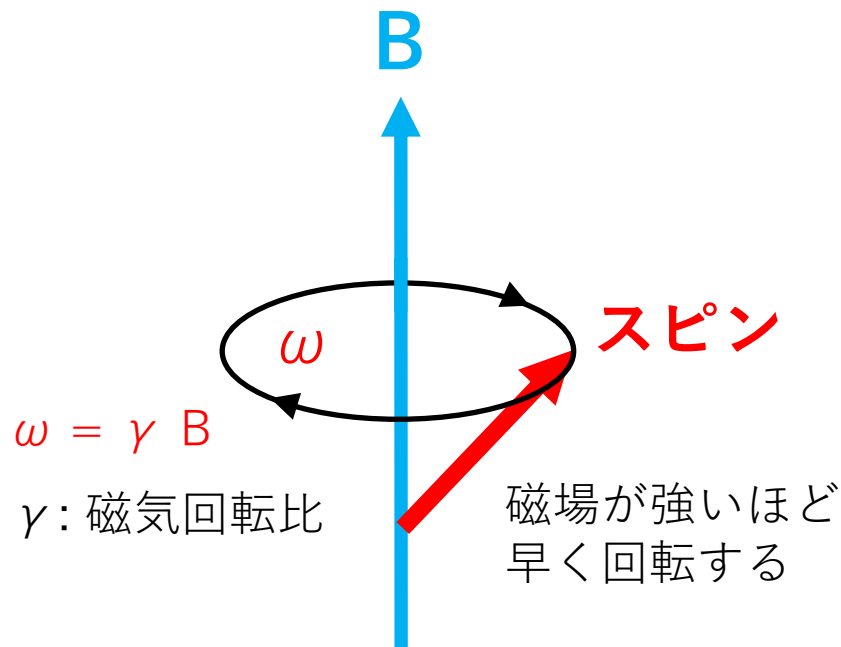


陽子

3. 角運動量とスピン スピンの歳差運動



磁場は磁石を回転させる力を生む

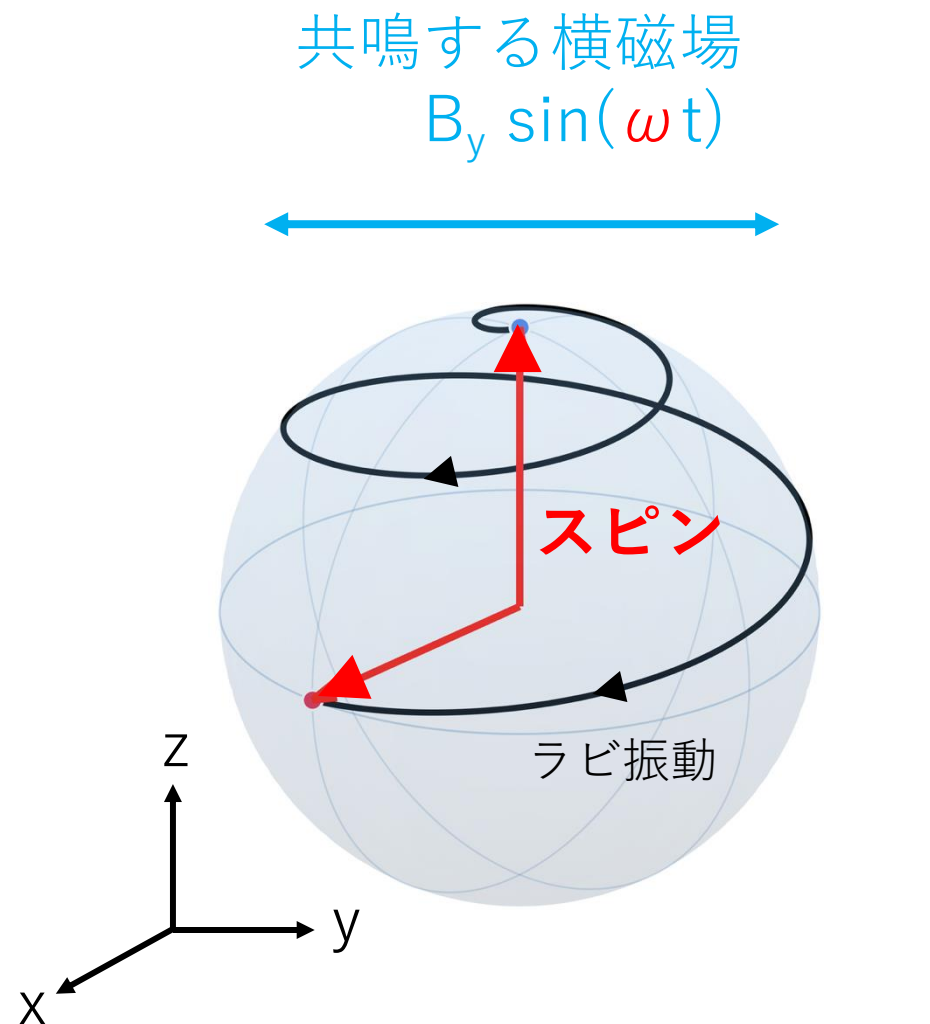


一般的なスピンの量子状態

$$|\psi(t)\rangle = \underline{c_1(t)} |\uparrow\rangle + \underline{c_2(t)} |\downarrow\rangle$$

複素数

- ・ アップとダウンの重ね合わせ
- ・ いろいろな方向を向いたスピンの状態を表現できる



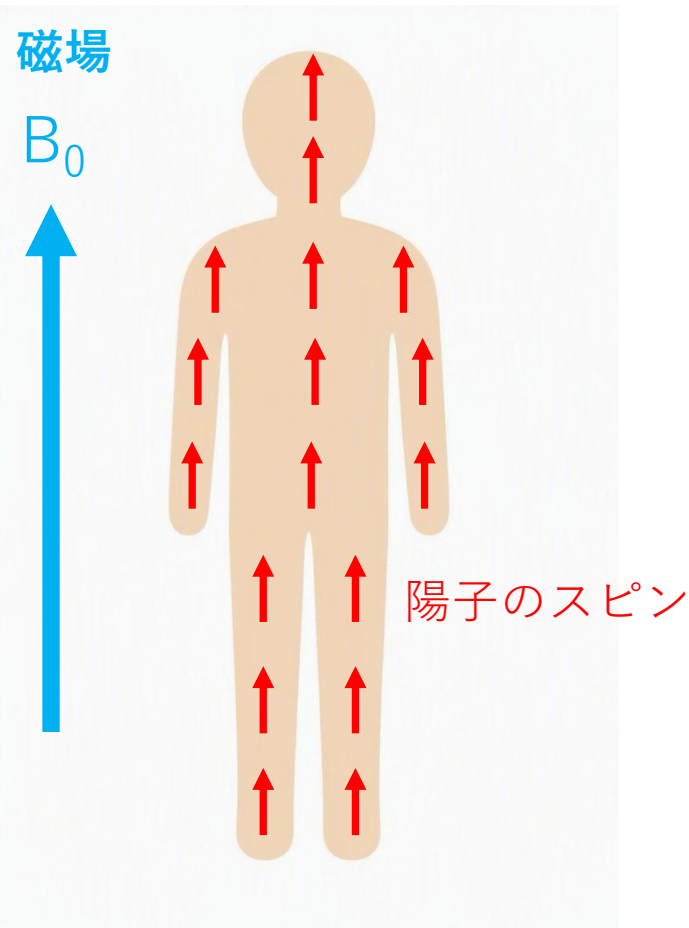
本日の内容

1. 電気と磁気
2. 電磁波
3. 角運動量とスピン
- 4. MRI**
5. 電子スピン共鳴
6. 一方向透過性
7. マグノン崩壊

4. MRI 磁気共鳴画像法 (Magnetic Resonance Imaging)

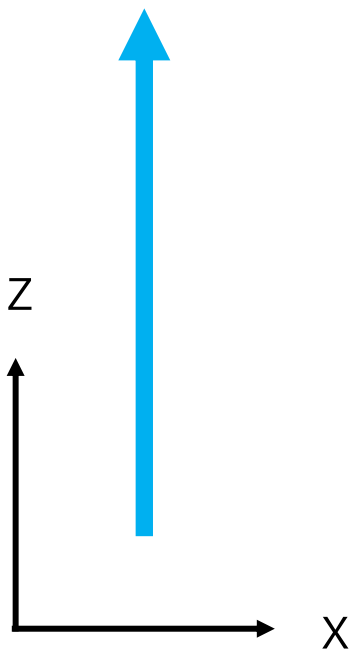
- ・ 生体には水素原子がある
- ・ 水素の原子核は陽子
- ・ 陽子はスピンを持つ

- ・ スピンはエネルギーの低いアップ状態にある
- ・ z_0 の場所のスピンのみが**選択的に共鳴して横倒し**になる

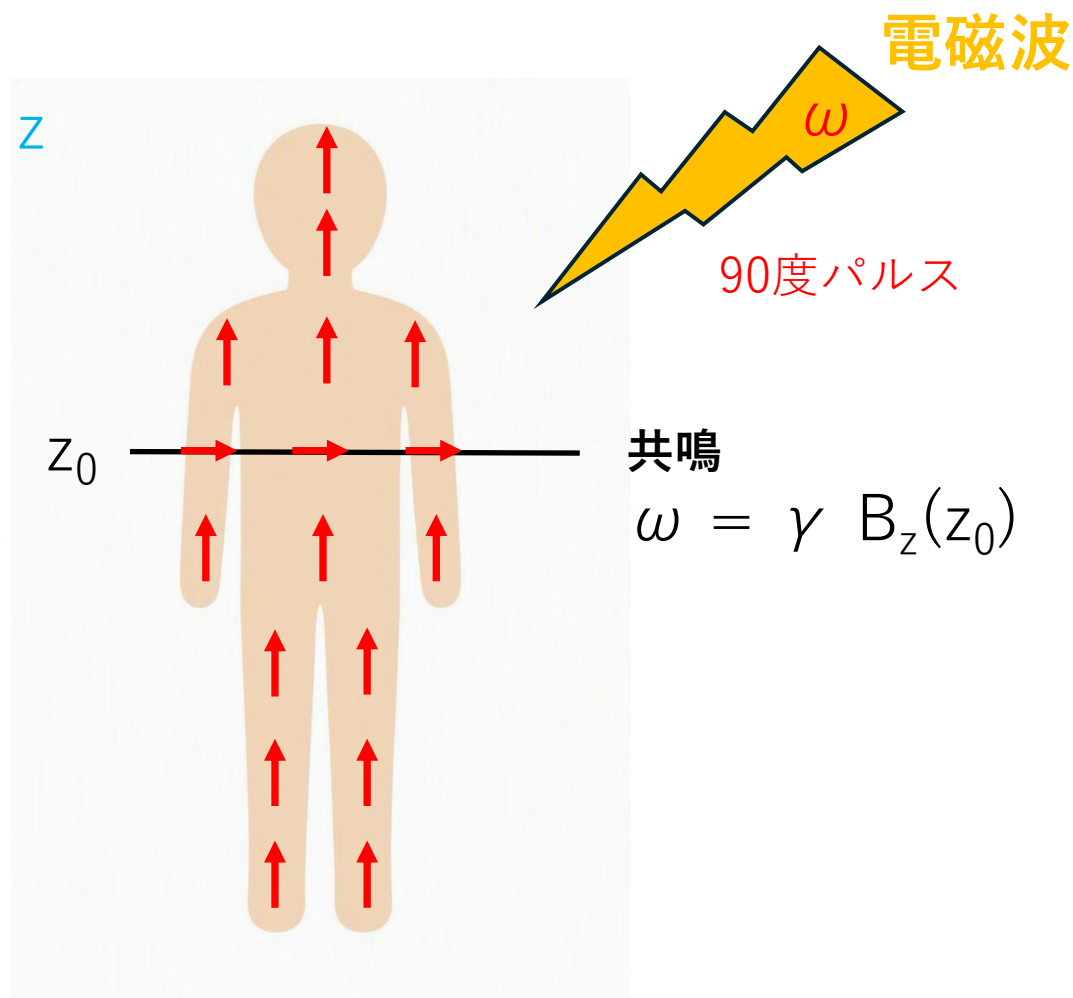


磁場勾配

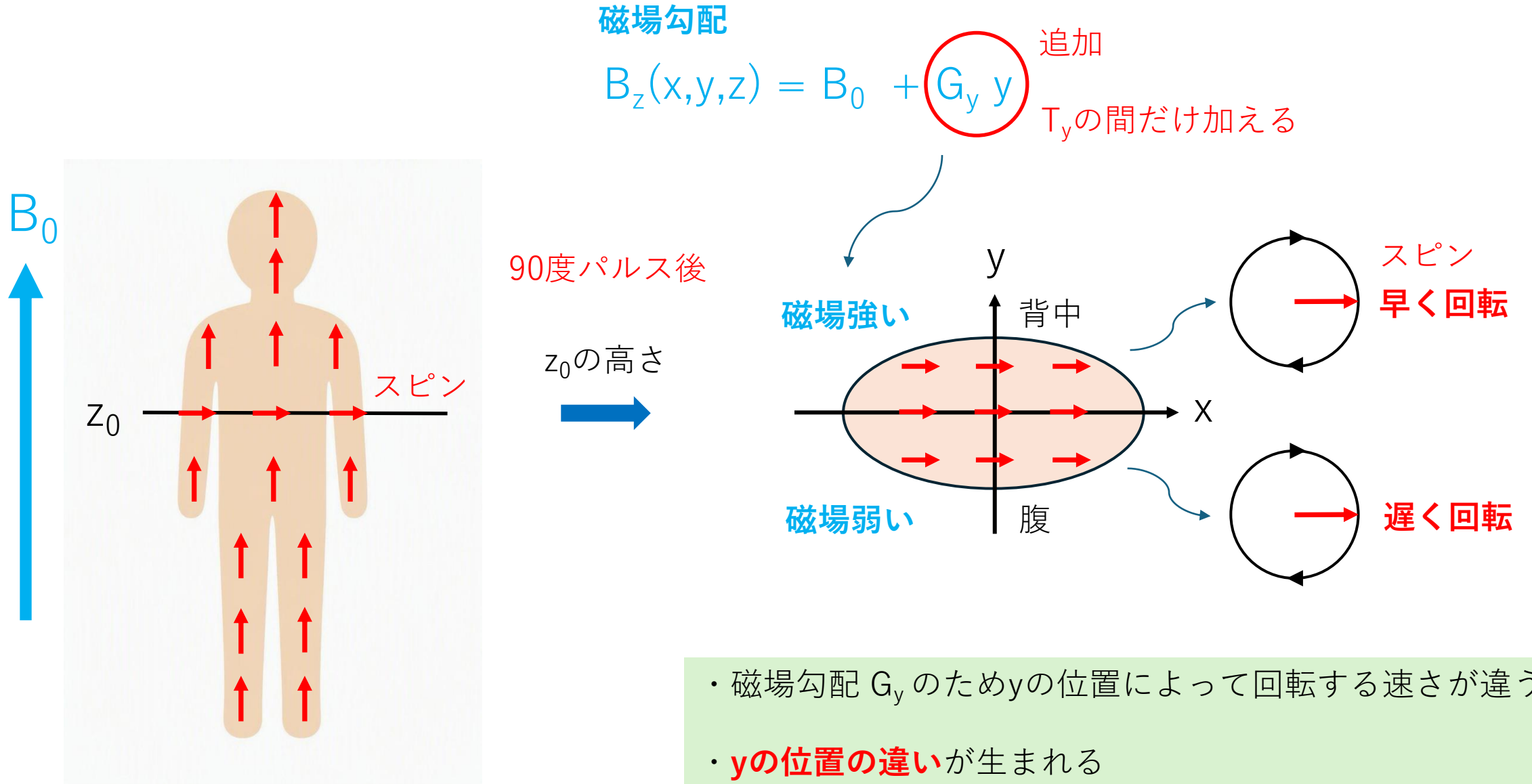
$$B_z(z) = B_0 + G_z z$$



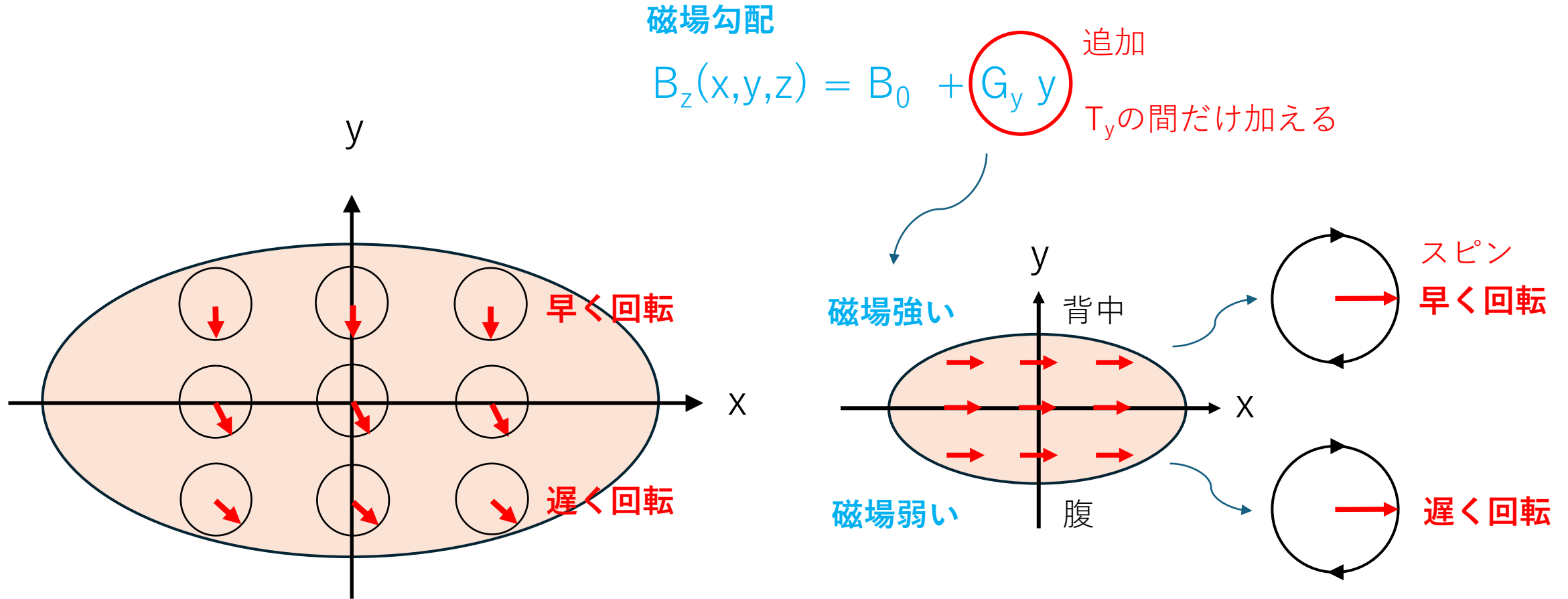
z によって磁場が変化



4. MRI

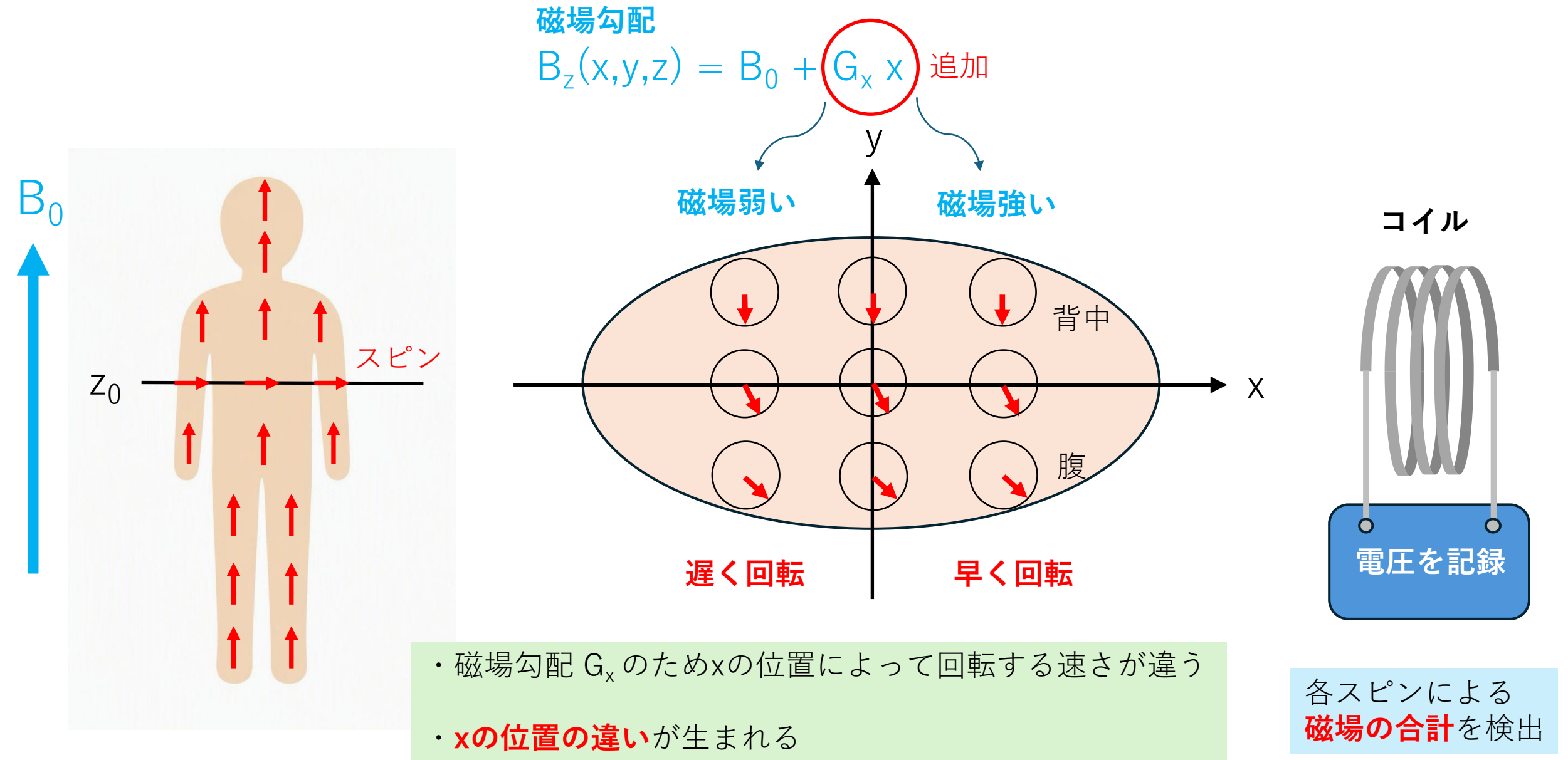


4. MRI



- ・ 磁場勾配 G_y のため y の位置によって回転する速さが違う
- ・ **y の位置の違い** が生まれる

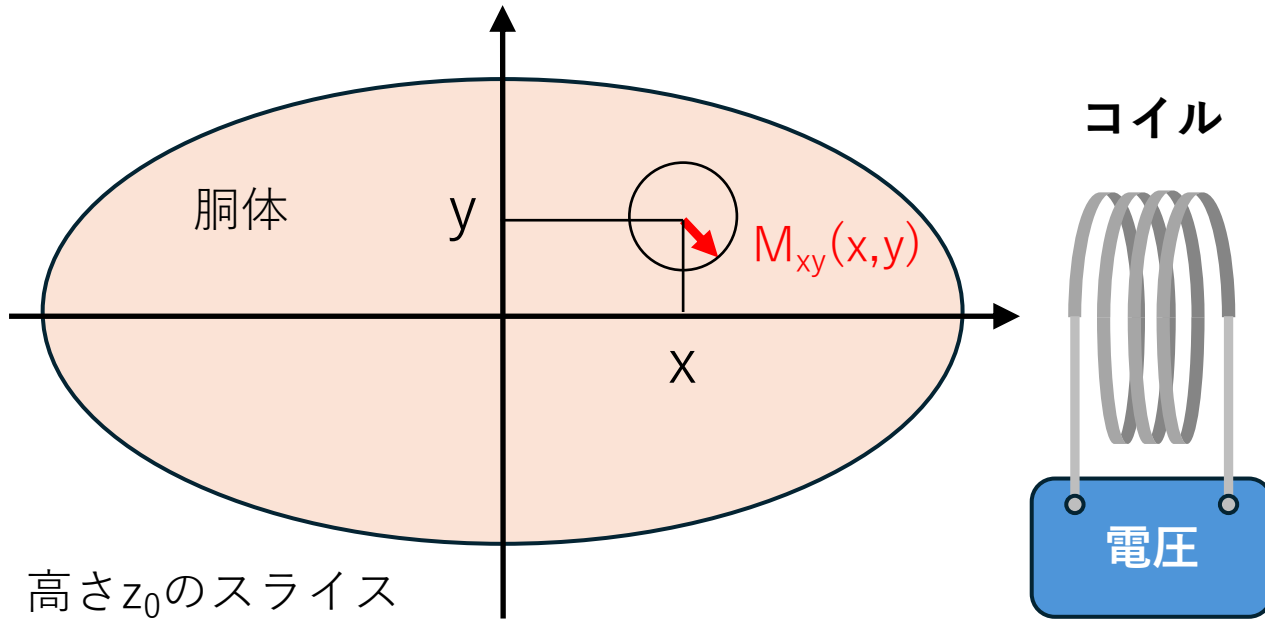
4. MRI



4. MRI

磁場勾配

$$B_z(x,y,z) = B_0 + G_x x$$



位置 (x,y) にあるスピンによる電圧の合計

$$V(k_x, k_y) = \int dx \int dy M_{xy}(x, y) e^{-i2\pi(k_x x + k_y y)}$$

2次元フーリエ変換

磁場勾配

$$k_y = \frac{\gamma}{2\pi} G_y T_y \quad y\text{方向} \quad T_y\text{の間}$$
$$k_x = \frac{\gamma}{2\pi} G_x t \quad x\text{方向} \quad \text{測定の間}$$

G_y の値 256種類
1スライス 10秒から30秒

フーリエ逆変換

$$M_{xy}(x, y) = \int dk_x \int dk_y V(k_x, k_y) e^{i2\pi(k_x x + k_y y)}$$

- ・ 位置 (x,y) の水素濃度がわかる
- ・ どこに、どのような物質があるかわかる

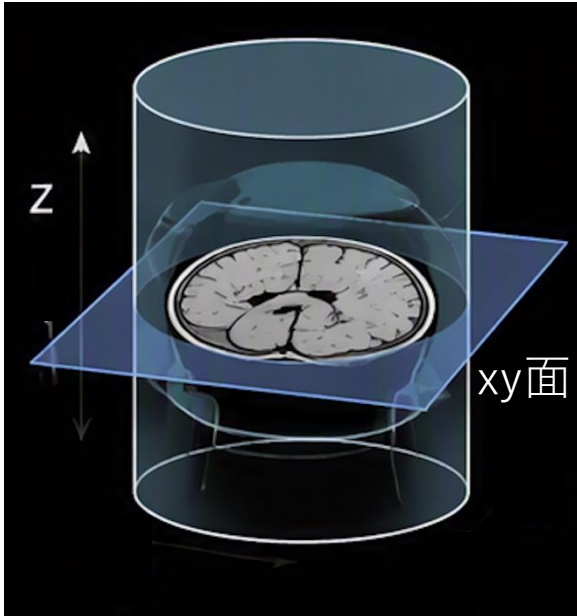
2003年 ノーベル生理学・医学賞

ポール・ラウターバー (アメリカの化学者)

ピーター・マンズフィールド (イギリスの物理学者)

4. MRI

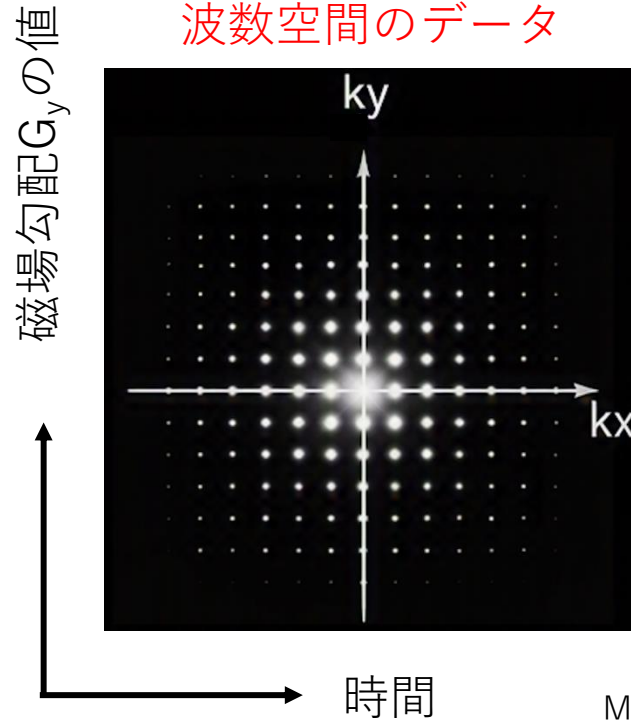
z方向にスライスを選択



90度パルスで
スピンを横へ倒す



波数空間のデータ



測定結果



再構成されたMRI画像



MS Copilotで生成した教育用模式図（実際の患者画像ではありません）

フーリエ逆変換

MRIは物理の宝庫

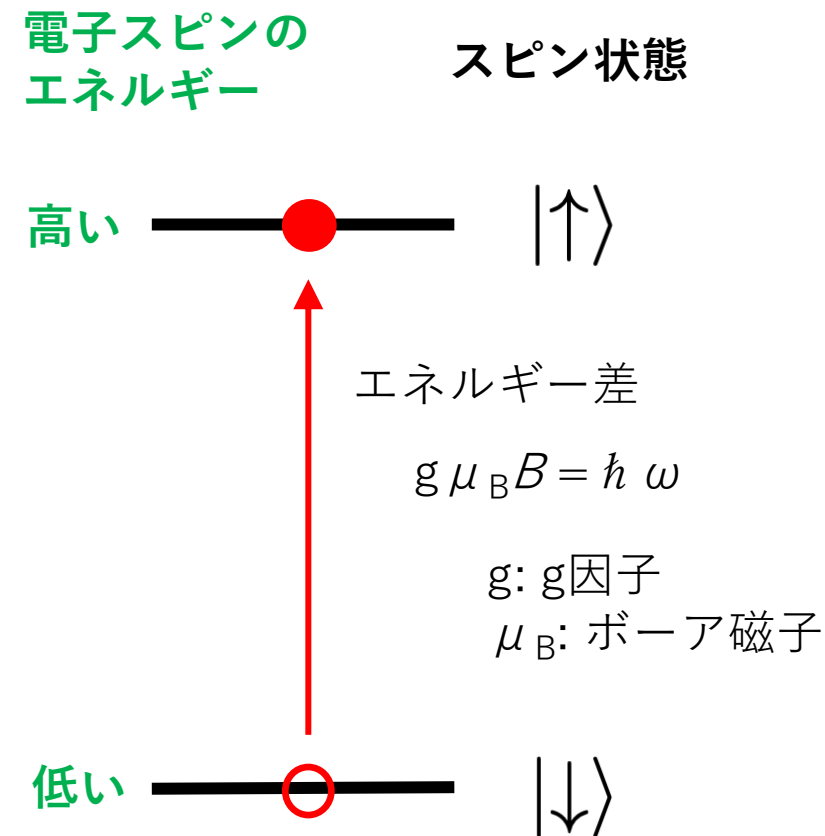
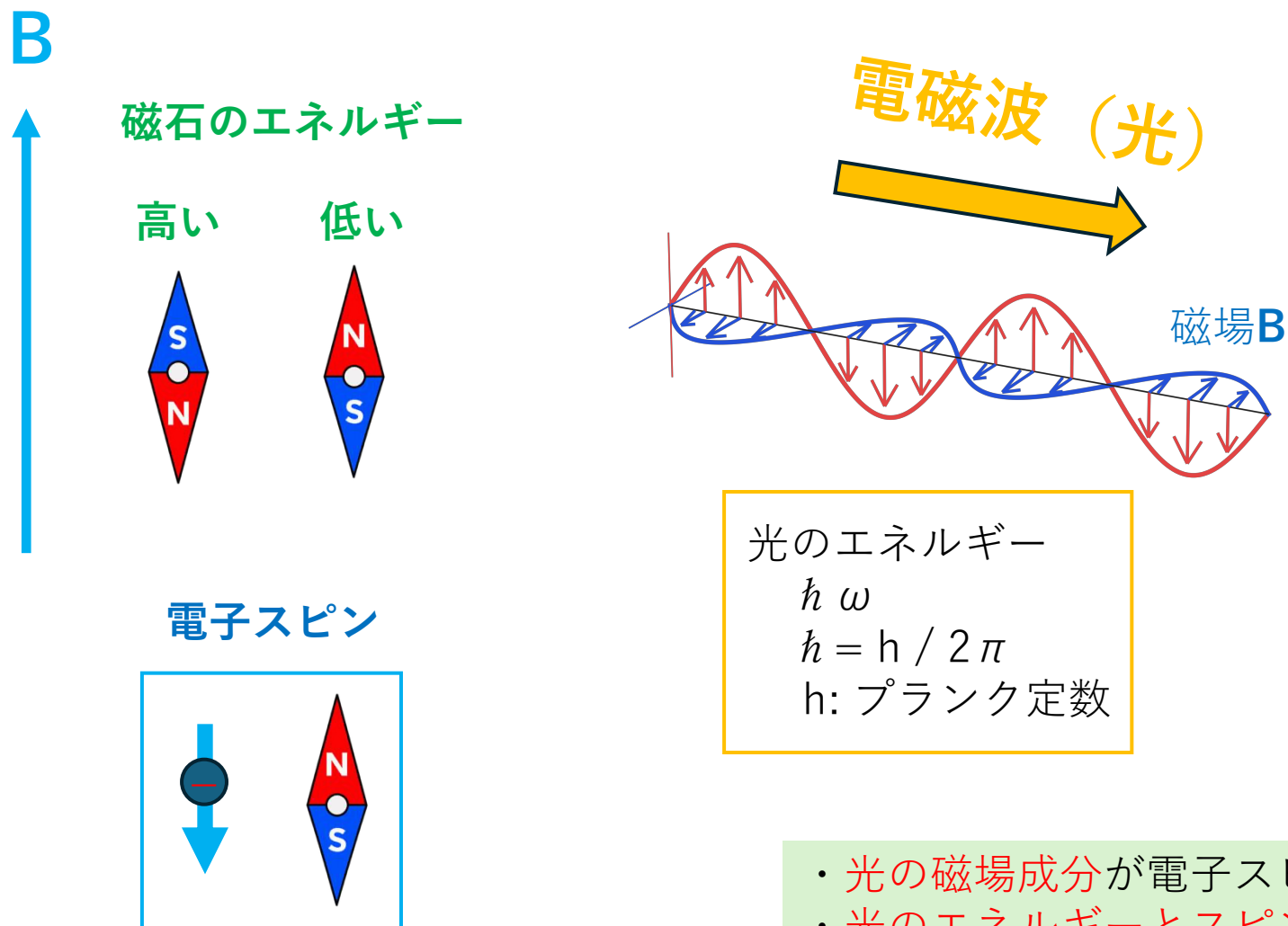
- ・ 超伝導磁石（ニオブチタン） $T_c = 9.2\text{K}$ (-264°C) $B = 1.5\text{T} \sim 3\text{T}$
- ・ 空間分解能 $0.5\text{mm} \sim 1\text{mm}$ (xy方向) $2\text{mm} \sim 5\text{mm}$ (z方向)
- ・ 1つのスライス $10\text{秒} \sim 30\text{秒}$
- ・ MRI装置の値段 $8\text{千万円} \sim 2\text{億円}$

- ・ 電気、磁気、電磁波
- ・ スピン
- ・ 超伝導
- ・ 数理

本日の内容

1. 電気と磁気
2. 電磁波
3. 角運動量とスピン
4. MRI
- 5. 電子スピン共鳴**
6. 一方向透過性
7. マグノン崩壊

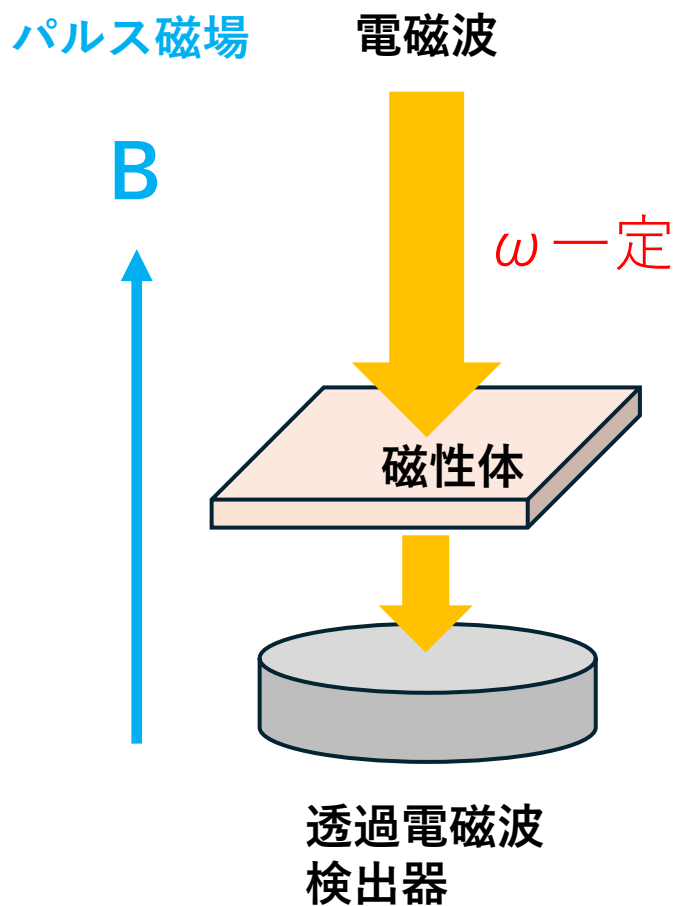
5. 電子スピン共鳴 (ESR: Electron Spin Resonance)



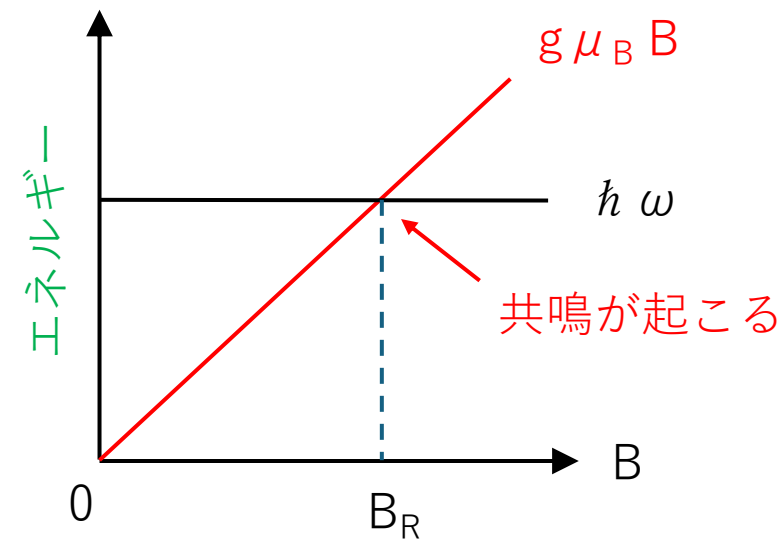
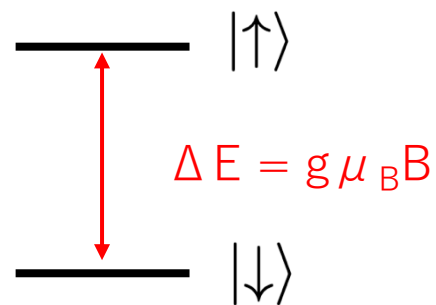
- ・ 光の磁場成分が電子スピンを揺らす
- ・ 光のエネルギーとスピンのエネルギー差が一致する場合 (共鳴)
スピンの向きが反転する (光が吸収される)

5. 電子スピン共鳴

強磁場ESR

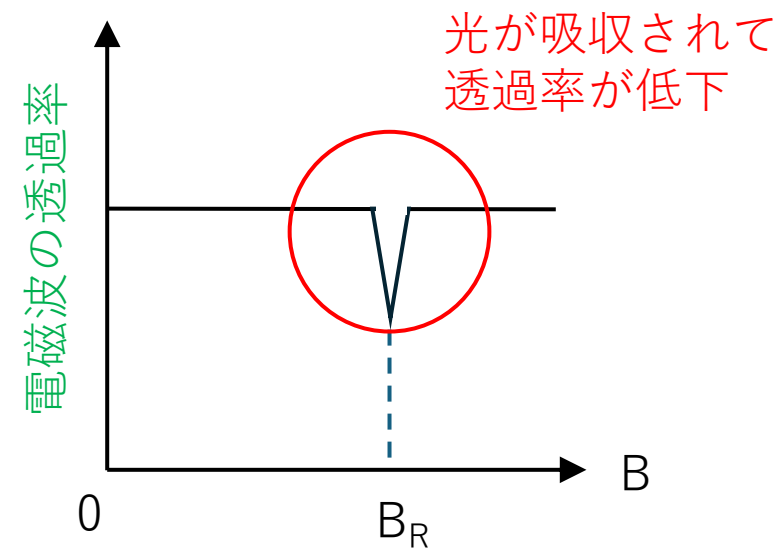


エネルギー差



通常のESR装置
約0.3T、9GHz程度

大阪大学
先端強磁場科学研究センター
50T～80T、3THz程度



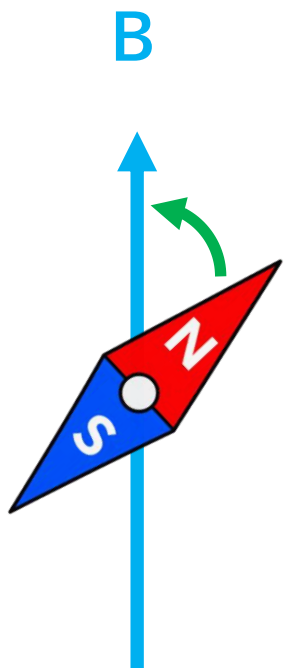
本日の内容

1. 電気と磁気
2. 電磁波
3. 角運動量とスピン
4. MRI
5. 電子スピン共鳴
- 6. 一方向透過性**
7. マグノン崩壊

6. 一方向透過性

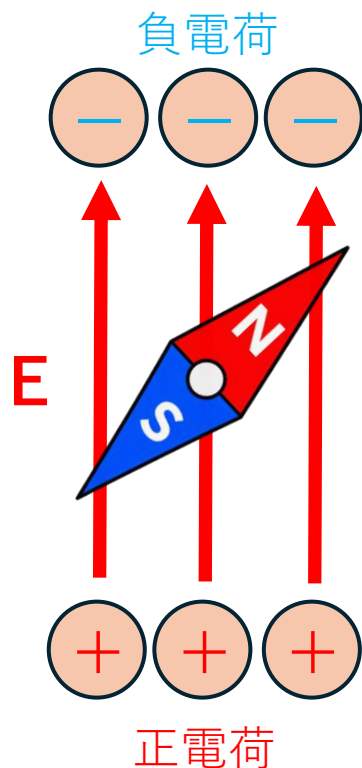
スピン軌道相互作用

磁石と磁場



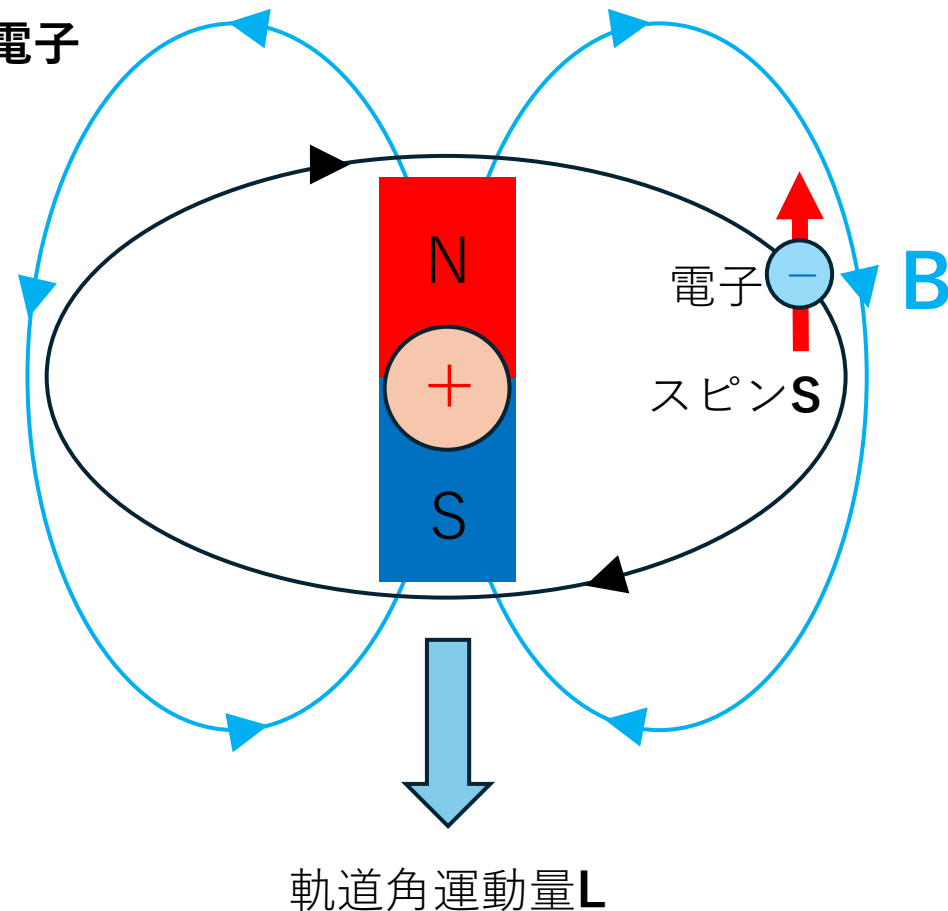
磁場に反応する

磁石と電場



電場に反応しない

原子の中の電子



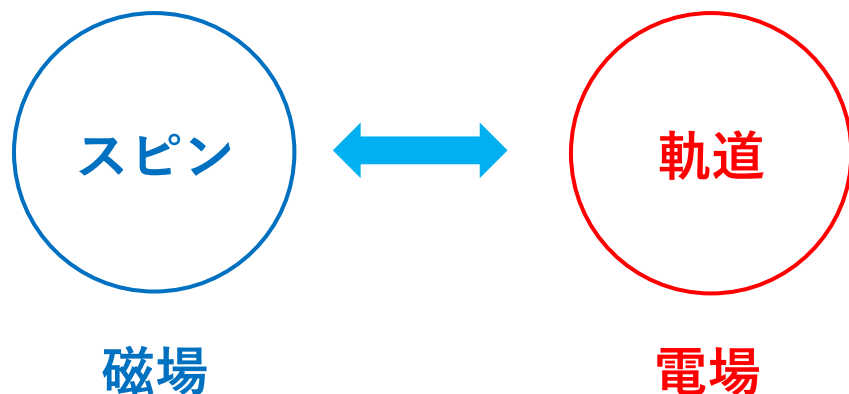
- 電子の軌道角運動量 L とスピン S は逆を向いたがる
- 軌道は電子の位置に関係
- 軌道は電場に影響される

6. 一方向透過性

スピン軌道相互作用

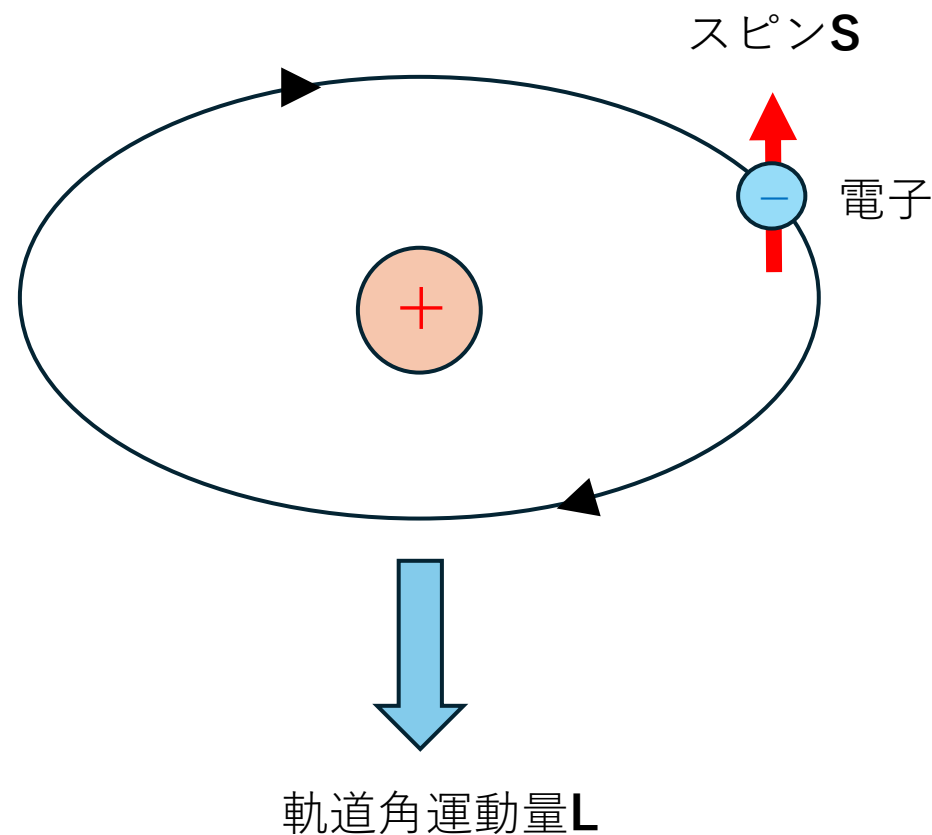
エネルギー

$$\mathcal{H}_{\text{SO}} = \frac{\hbar}{2m^2c^2} \underbrace{\mathbf{S}}_{\text{スピン}} \cdot (\nabla V(\mathbf{r}) \times \underbrace{\mathbf{p}}_{\text{運動量}})$$



- ・ 電場によってスピンの応答する可能性がある
- ・ **電気磁気効果**

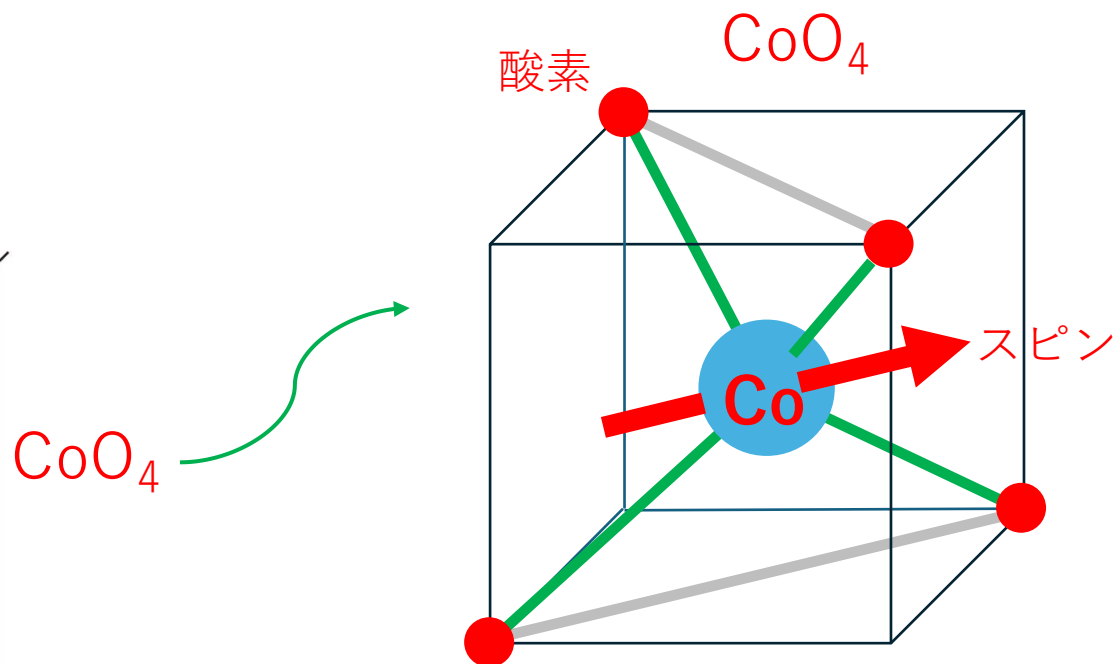
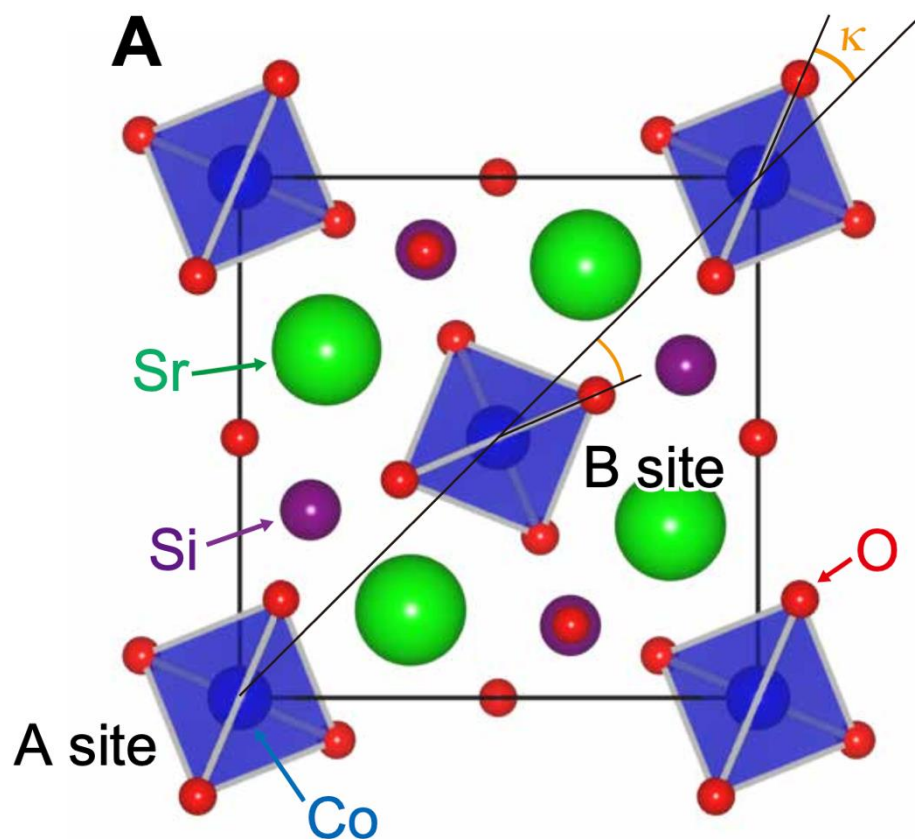
原子の中の電子



6. 一方向透過性 オケルマナイト (Åkermanite)

天然鉱物 $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$ (非磁性)

磁性体の例 $\text{Sr}_2\text{CoSi}_2\text{O}_7$

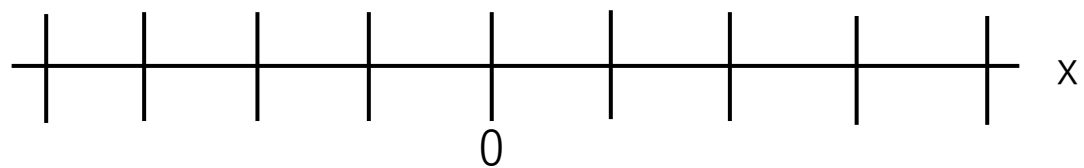


T. Arima (2007)

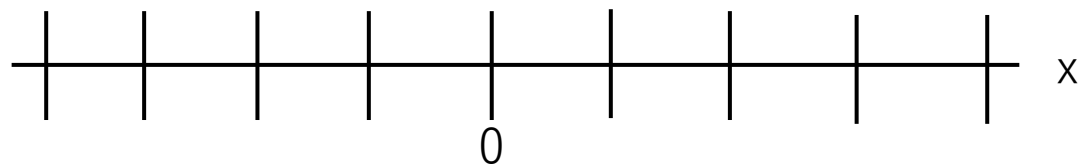
- ・ コバルトと酸素の間で電子を共有
- ・ コバルトのスピン向きで酸素の電荷分布が変化
- ・ スピンによって電気双極子が発生
- ・ **スピンは電場に応答する (電気磁気効果)**

6. 一方向透過性

空間反転対称性の破れ

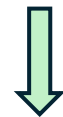
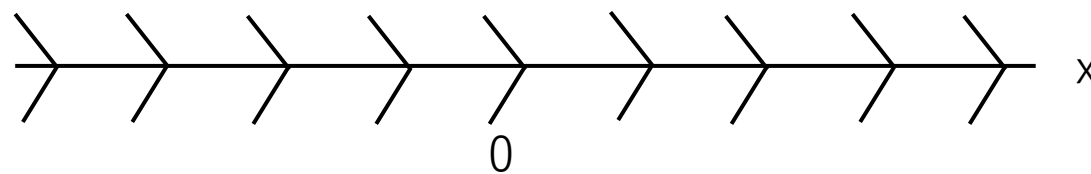


$x \rightarrow -x$ (空間反転)

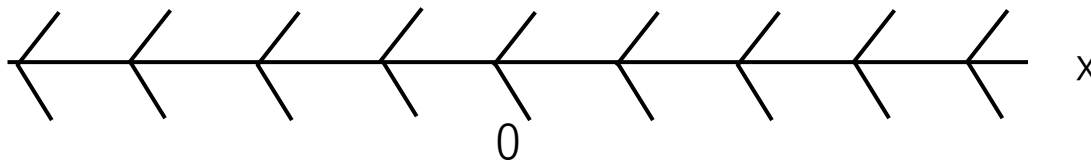


元に戻る (等価)

空間反転対称性がある



$x \rightarrow -x$ (空間反転)

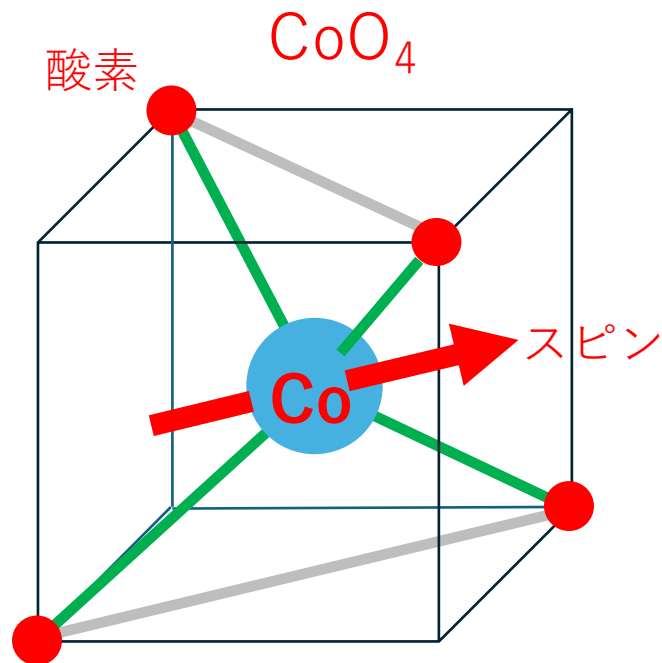


元に戻らない (非等価)

空間反転対称性が破れている

6. 一方向透過性

空間反転対称性の破れ



電気磁気効果

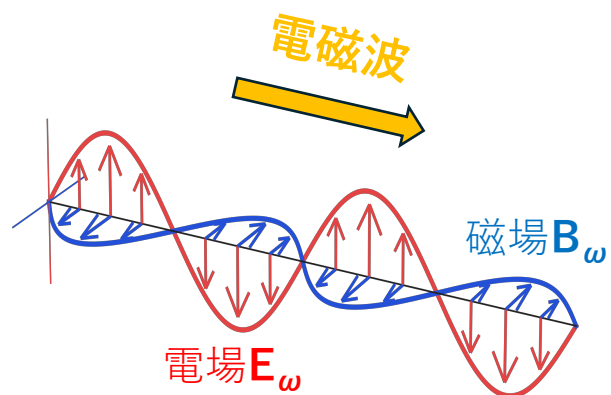
- (1) コバルトのスピンによって酸素の電子密度が変化
- (2) 電荷の分布は非対称
- (3) 電気双極子を生じる
- (4) 電場とスピンの結合する

空間反転して元に戻らない（非等価）

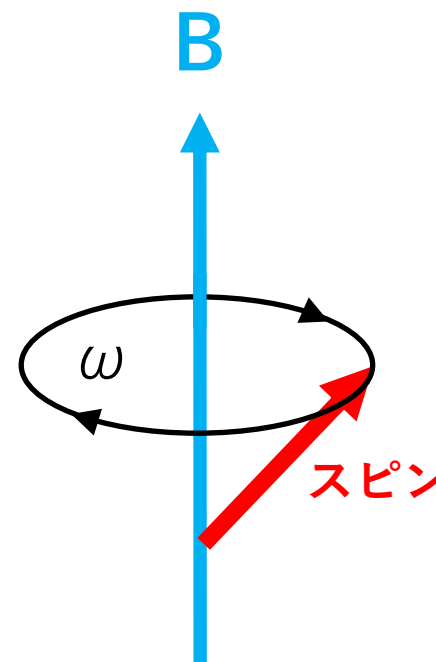
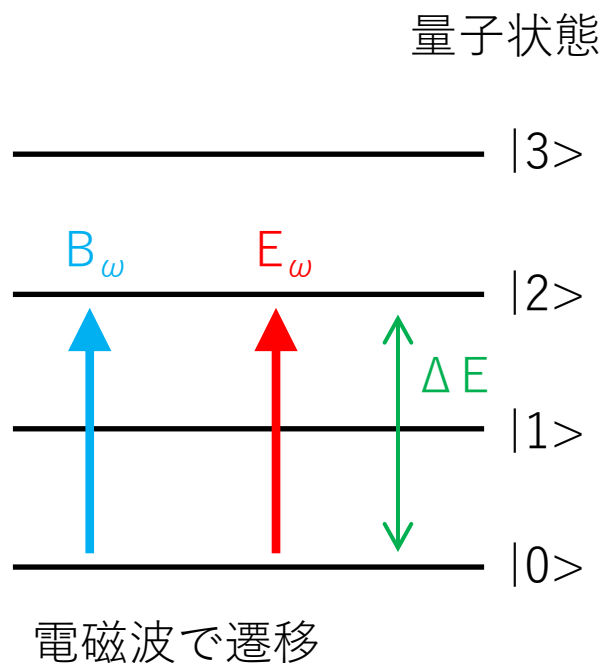
空間反転対称性が破れている

6. 一方向透過性

光でスピンを揺らす

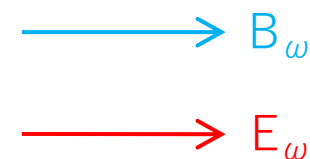


Co²⁺ イオン
スピン $S=3/2$ (4状態)

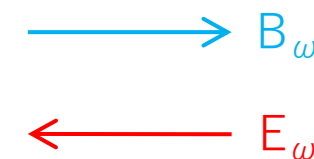


共鳴条件
 $\hbar \omega = \Delta E$

B_ω と E_ω の揺らせ方



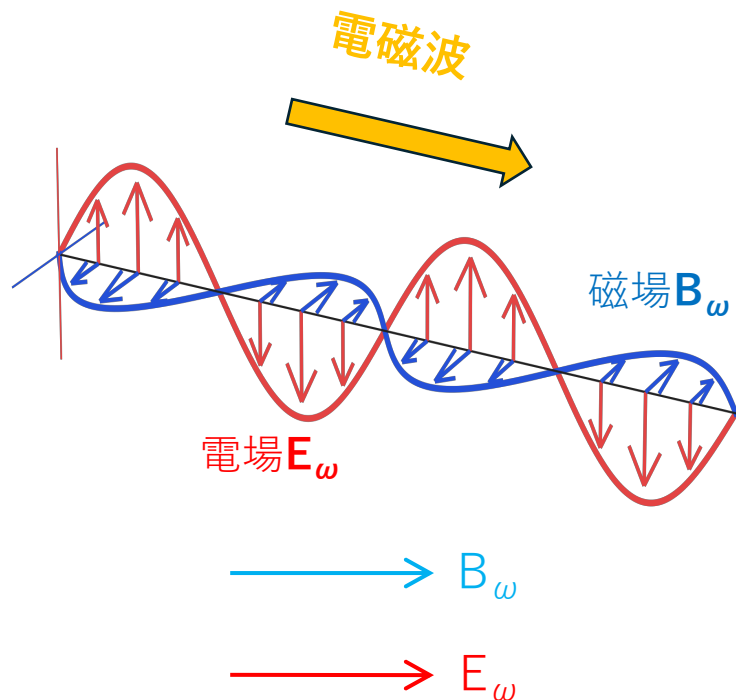
同じタイミング
強め合う



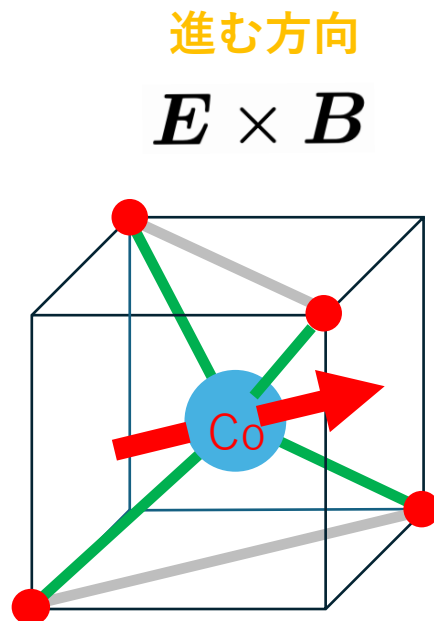
逆のタイミング
弱め合う

6. 一方向透過性

光の進む方向を逆にする



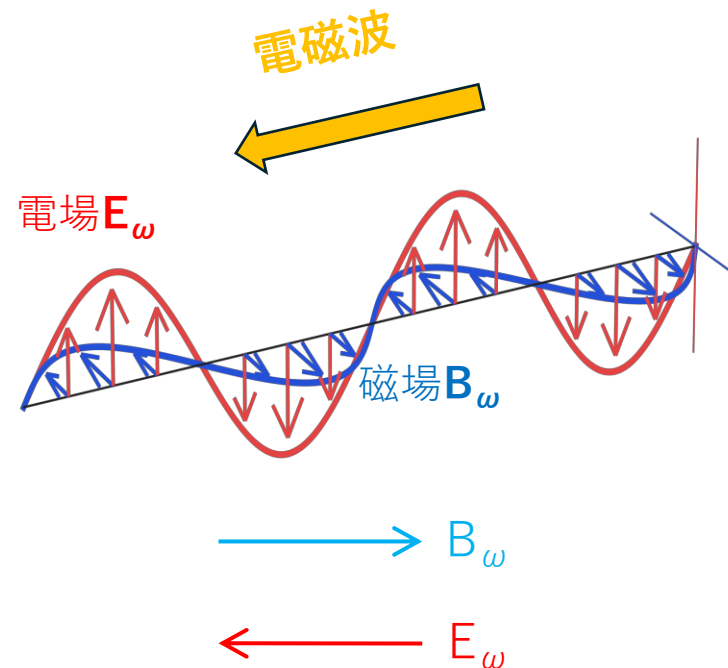
同じタイミング
強め合う



スピンの揺らせ方

光の進む方向

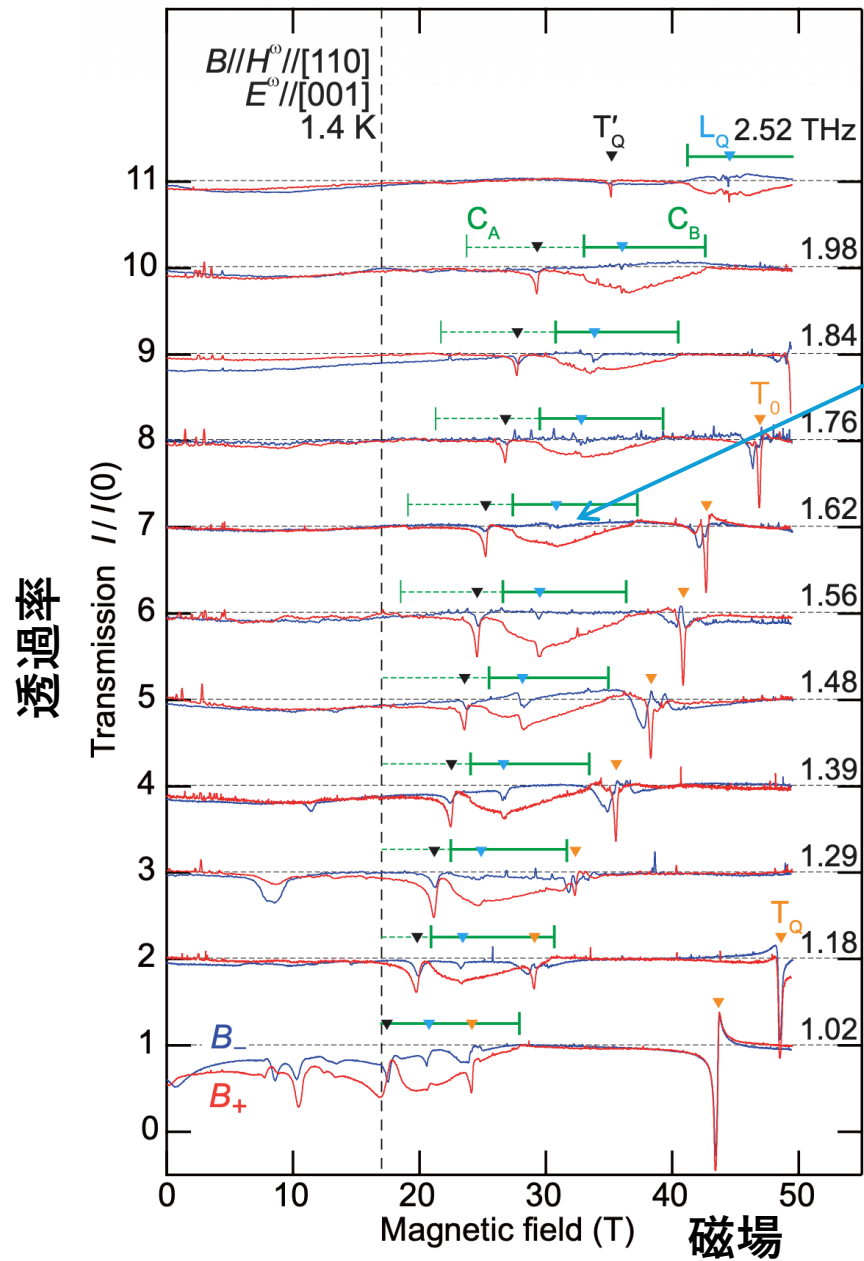
- ・ 強め合う (協力的)
- ・ 弱め合う (じゃまする)



逆のタイミング
弱め合う

6. 一方向透過性

実験結果



光の方向を反転

周波数

- ・ 赤色の方向でのみ透過率が減少（方向二色性）
- ・ 広い磁場領域でおこる（なぜ？）

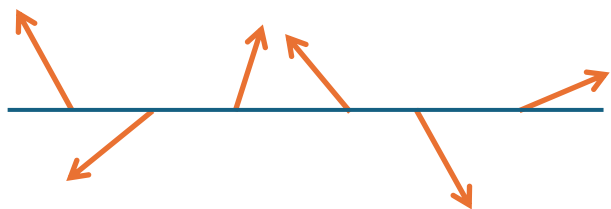
本日の内容

1. 電気と磁気
2. 電磁波
3. 角運動量とスピン
4. MRI
5. 電子スピン共鳴
6. 一方向透過性
- 7. マグノン崩壊**

7. マグノン崩壊

磁気秩序

常磁性（ばらばら）



強磁性（そろう）



- ・ スピンを揺らすと波のように伝播する
- ・ 量子力学を適用すると粒子として記述される
- ・ **マグノン**と呼ばれる（磁性の粒子）

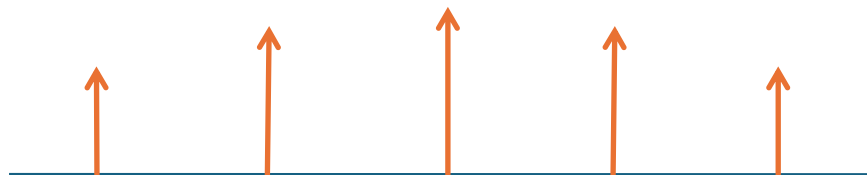
横モード（Nambu-Goldstone モード）

方向（位相）のゆらぎ

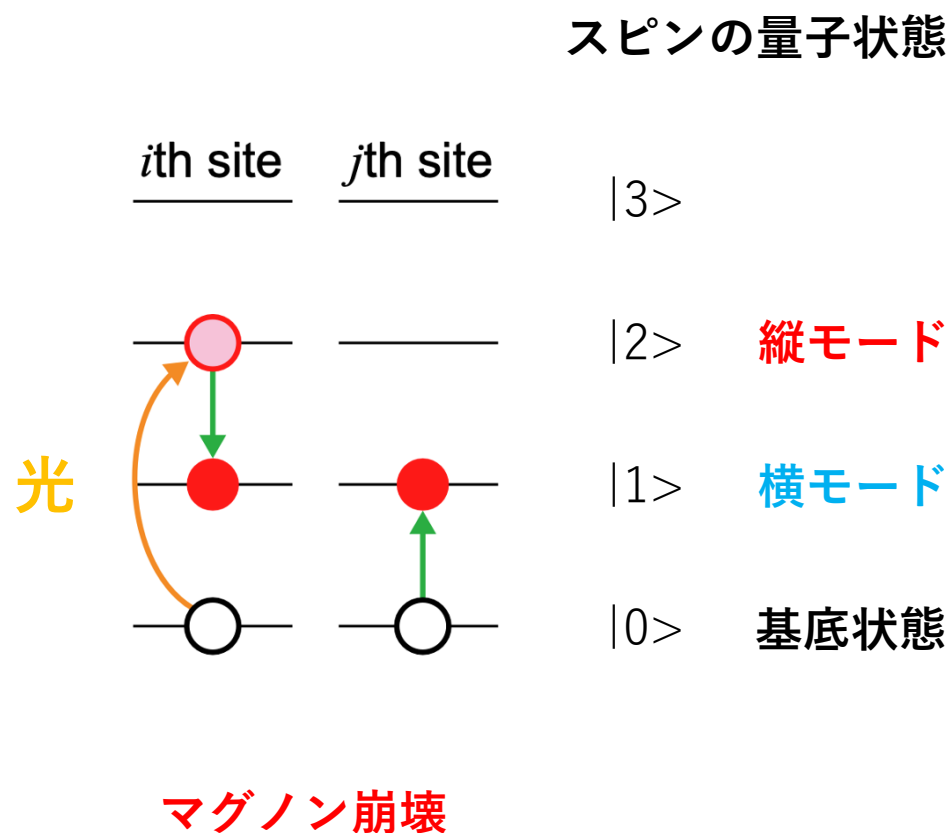


縦モード・振幅モード（Higgs amplitude モード）

大きさ（振幅）のゆらぎ



7. マグノン崩壊



光による遷移

- $|0\rangle$ から $|2\rangle$

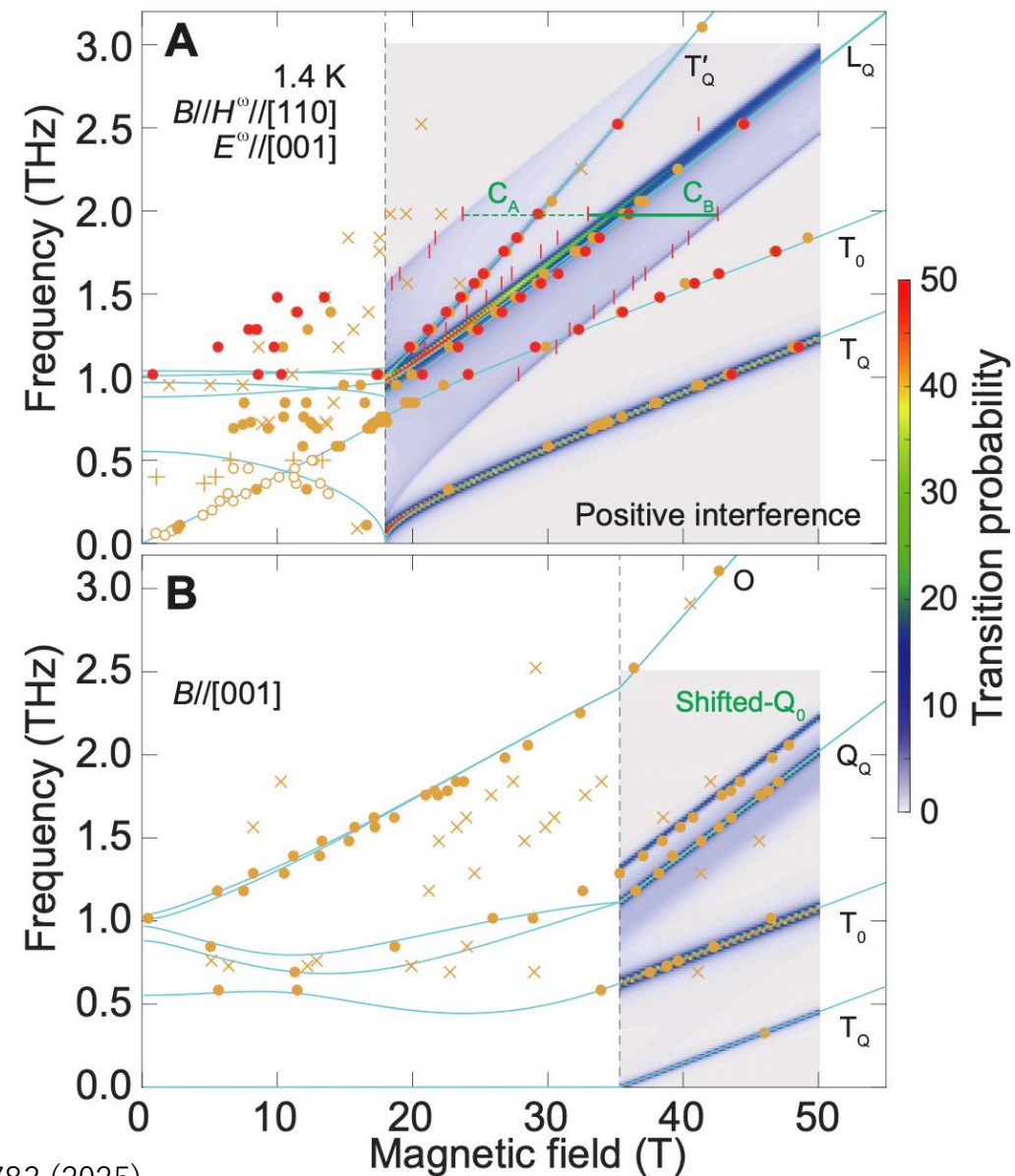
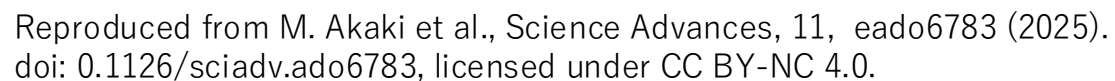
スピン間相互作用による遷移

- $|2\rangle$ が $|1\rangle$
- 隣のスピンの $|0\rangle$ から $|1\rangle$

結果的に

- 光によって **横モードが2つ励起** される (**2マグノン励起**)
- 横モードのマグノンは様々なエネルギーを取り得る
- **いろいろな ω で共鳴**が起こる
- **信号が広がる**

実験結果と計算結果



光スイッチ

磁場でNDDの大きさを変調できる（透過率が磁場で変化）。
光スイッチ／変調器として利用できる。

アイソレータ

レーザー等で問題となる戻り光（逆向き伝搬）を抑制できる。
発振安定化などに寄与する光アイソレータの原理となり得る。

広帯域一方向透過性

パルス信号は広い周波数成分を含む。
広帯域で成立すれば、短パルスTHz信号に対しても非相反素子として動作できる。

まとめ

- (1) 光は電気と磁気の波
- (2) スピンは磁石の性質を持つ
- (3) スピンは磁場に応答する
- (4) 空間反転対称性のない環境では、スピンは電場にも応答できる
- (5) 空間反転対称性のない磁性体

- ・ 光の進む方向を変えると光の透過性が変化（一方向透過性）
- ・ 光で励起した**マグノンが崩壊**すると広い周波数で共鳴がおこる
- ・ **広い周波数で動作可能な一方向透過性の新しい原理を開拓**