

電子の自転「スピン」を用いた エネルギー変換技術

東北大学 金属材料研究所
東北大学 原子分子材料科学高等研究機構(WPI- AIMR)
ERATO 齊藤スピン量子整流プロジェクト総括
齊藤 英治

本日の内容

- ▶ エネルギー技術の根幹「整流」とは？
- ▶ 電子の自転「スピン」とは？
- ▶ スピンの流れ「スピン流」とは？
- ▶ スピン流の物理法則の発見
- ▶ スピンによる整流効果 – 新しい発電原理の発見-

電子の自転「スピン」の物理法則を活用した、
全く新しいエネルギー技術を開拓する。

本日の内容

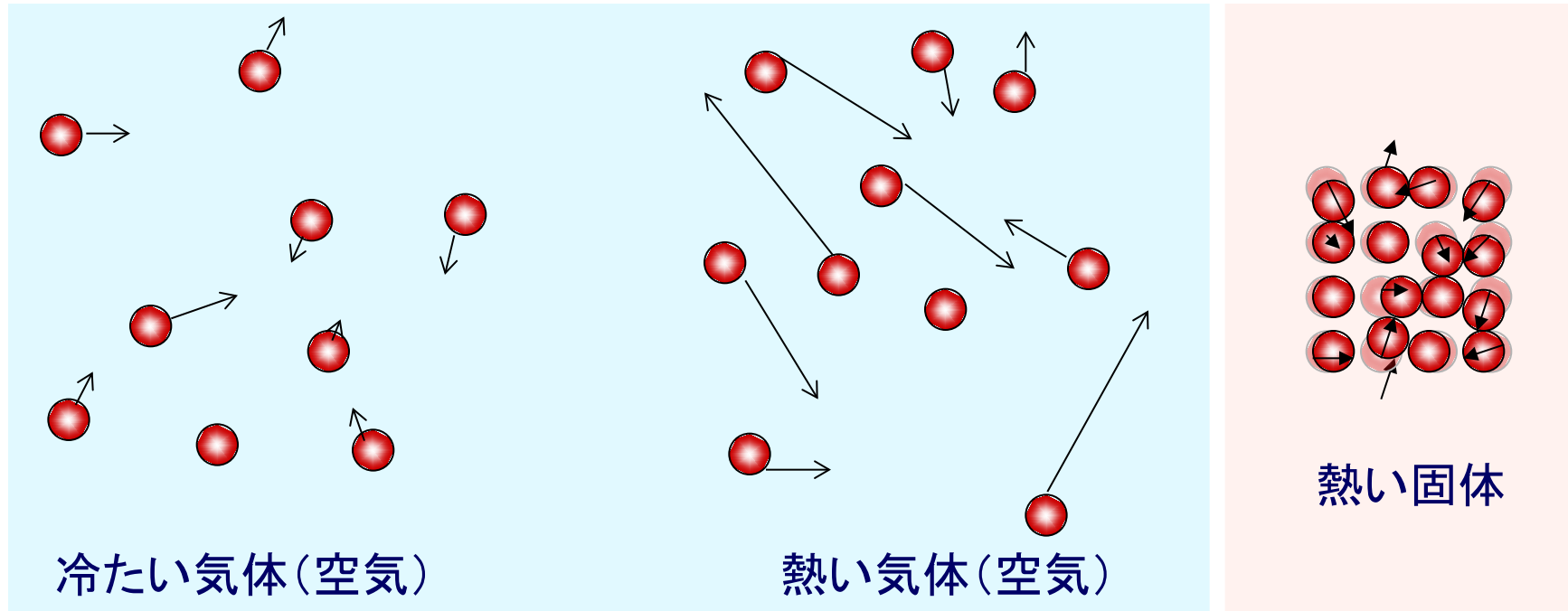
- ▶ エネルギー技術の根幹「整流」とは？
- ▶ 電子の自転「スピン」とは？
- ▶ スピンの流れ「スピン流」とは？
- ▶ スピン流の物理法則の発見
- ▶ スピンによる整流効果 – 新しい発電原理の発見–

電子の自転「スピン」の物理法則を活用した、
全く新しいエネルギー技術を開拓する。

身近なエネルギー「熱」を利用するにはどうすればよいか？

- ▶ 熱とは、原子や分子のランダムな運動 ⇒ 最もありふれたエネルギー

熱の利用技術の開発はエネルギー問題や環境問題の解決に不可欠



身の周りに溢れる熱エネルギー

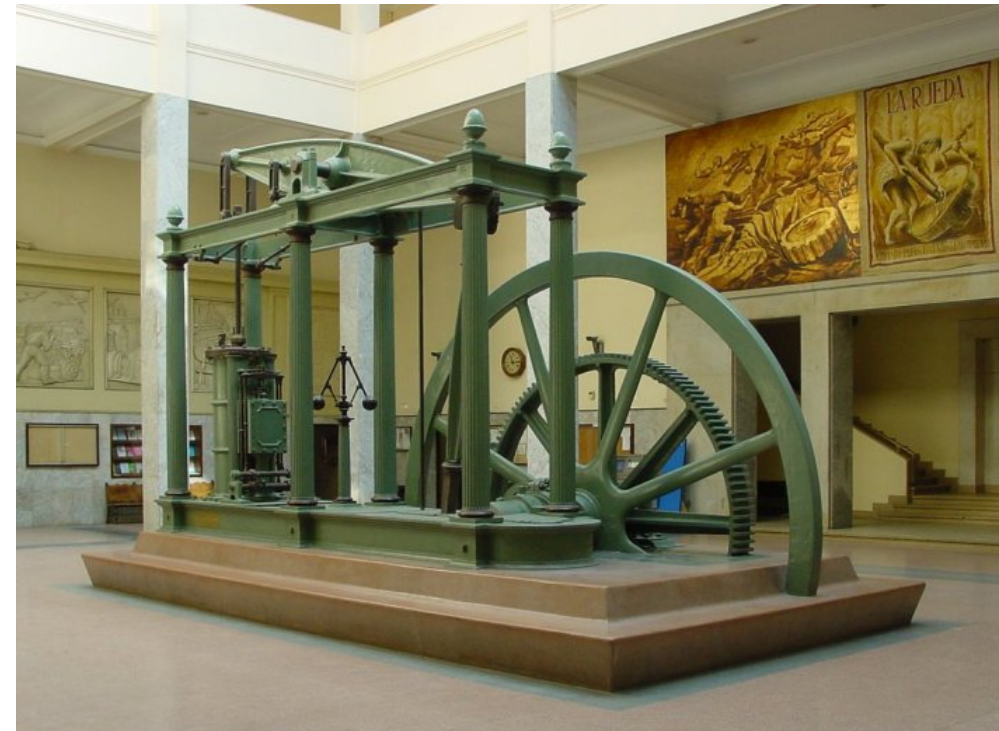


「整流」とは乱雑な運動から一方向の運動を取り出すこと

最古の熱機関: Heron Alexandrinus の
蒸気機関 (古代アレクサンドリア)



ワットの蒸気機関(1769)



機械的な整流、物質の組合せによる整流、他には？

電子の自転「スピン」を使うとどうなる？

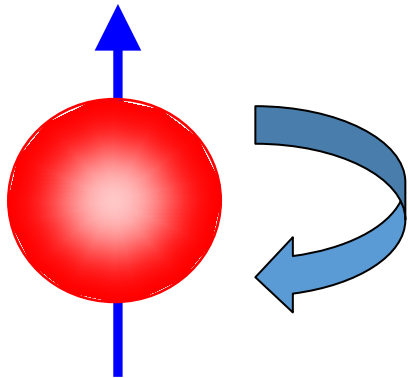
本日の内容

- ▶ エネルギー技術の根幹「整流」とは？
- ▶ 電子の自転「スピン」とは？
- ▶ スピンの流れ「スピン流」とは？
- ▶ スピン流の物理法則の発見
- ▶ スピンによる整流効果 – 新しい発電原理の発見–

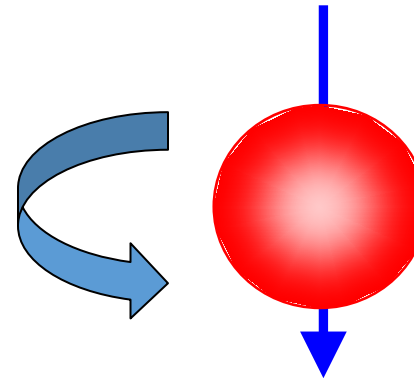
電子の自転「スピン」の物理法則を活用した、
全く新しいエネルギー技術を開拓する。

「スピン」は、電子が持つ自転的な性質

アップ(上向き)スピン



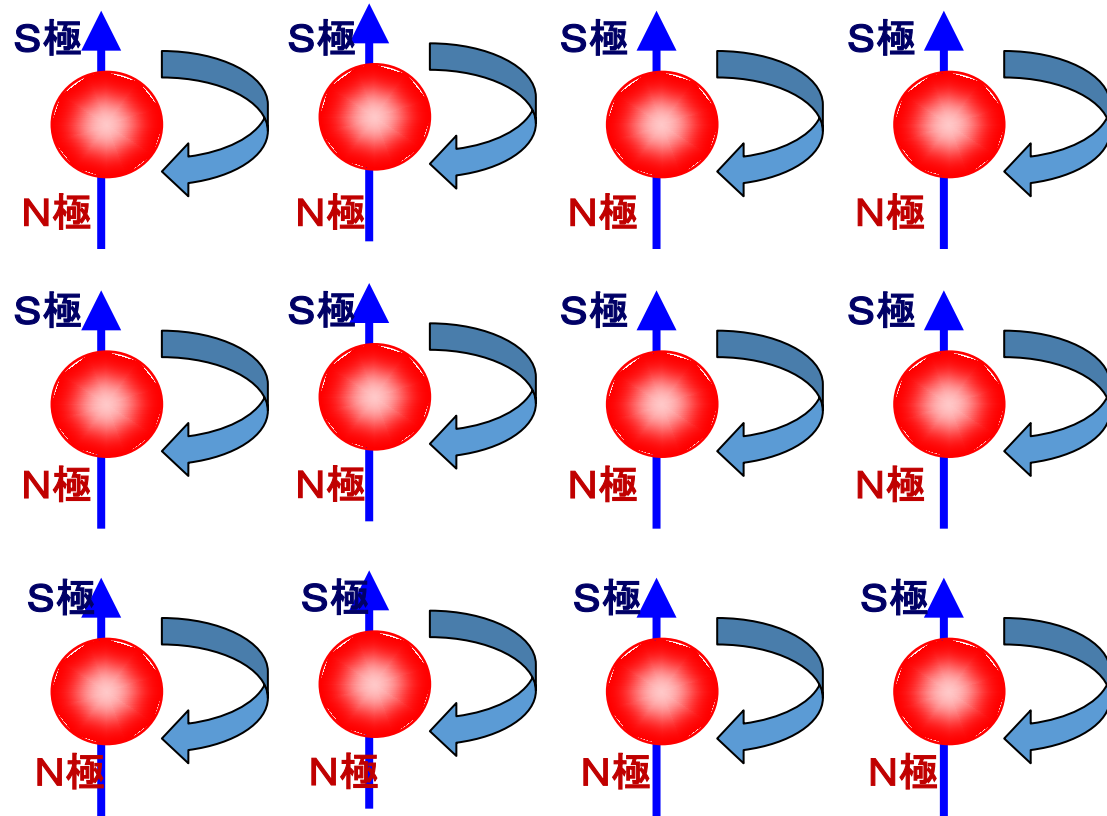
ダウン(下向き)スピン



回転軸の向き(矢印)が回転方向を表わす。

「スピン」は、磁石の起源

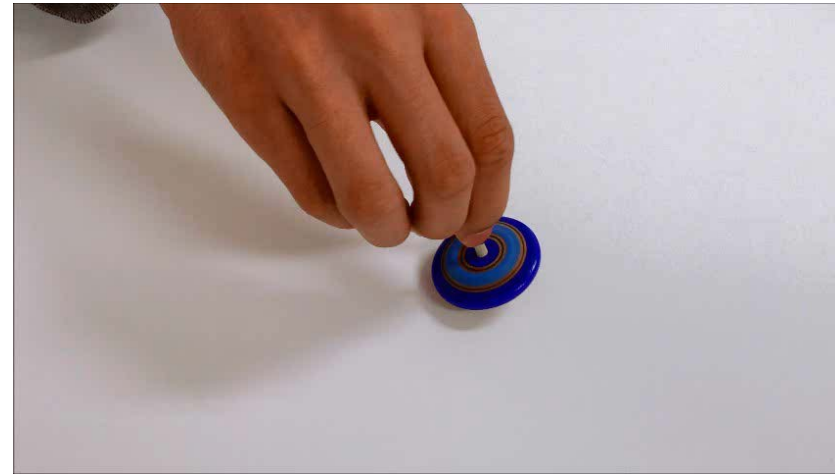
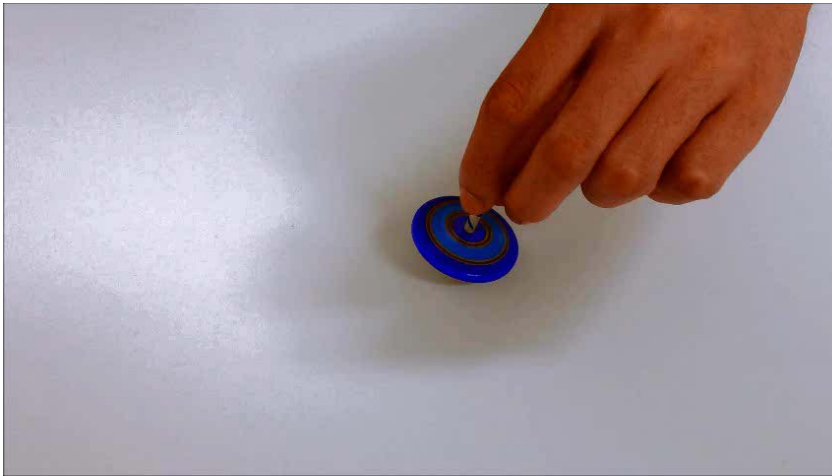
多数の電子がスピンを揃えていると、磁石になる。



「スピン」は、首振り運動（歳差運動）をする。

回転している物に力が加わると、歳差運動（首ふり運動）をする。

歳差方向（首ふりの方向）は、物体の回転方向によって決まる。

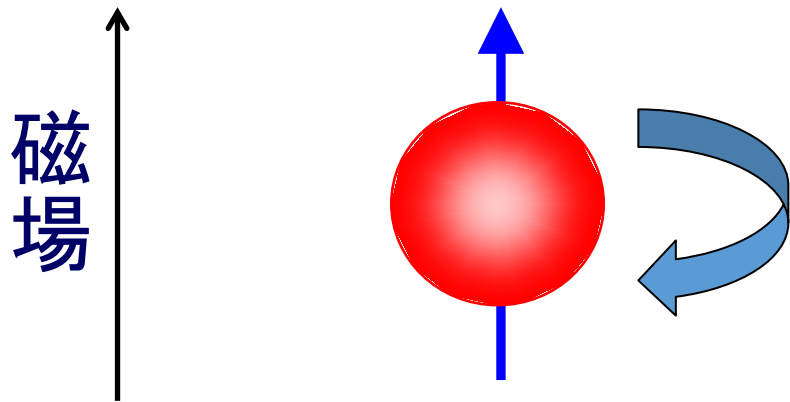


↑ コマを回す向きを変えると、首ふり方向が反転する ↑

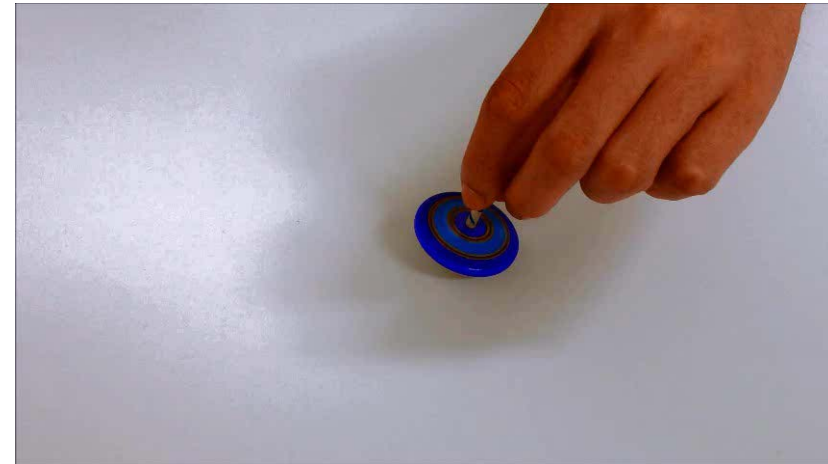
「スピン」は、止まらない回転である。

電子のスピンは、止まることがなく、一定の回転数 $\hbar/2$ ($\hbar \sim 1.054 \times 10^{-34} \text{Js}$) で内部磁場に対して反時計回りだけに回り続ける。

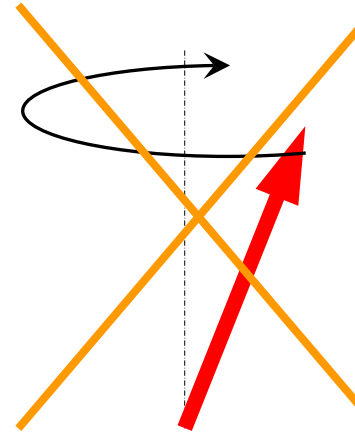
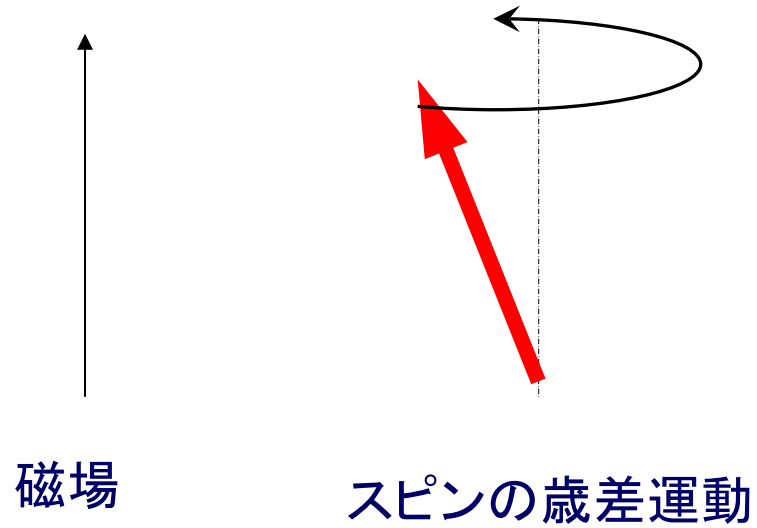
電子スピン(止まらない)



コマ(やがて止まる)



スピンの運動は、特定の方向しか回らない



本日の内容

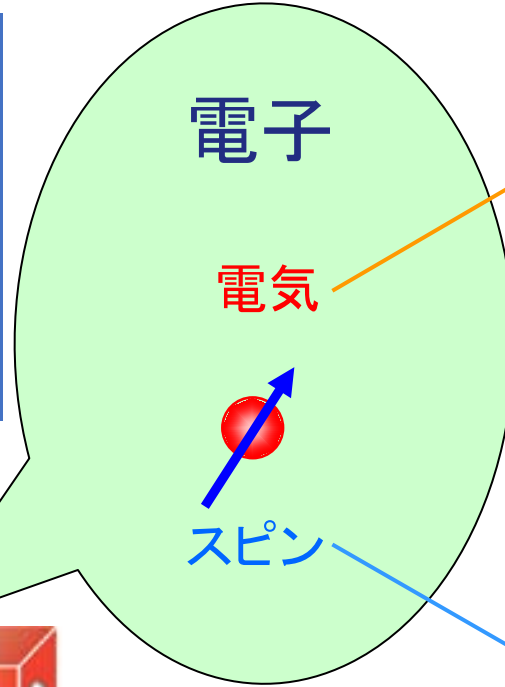
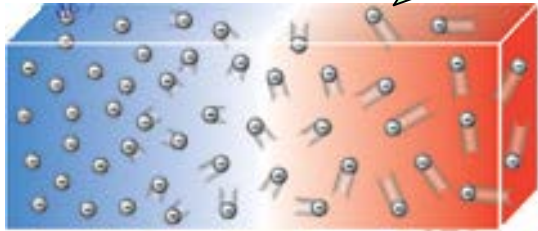
- ▶ エネルギー技術の根幹「整流」とは？
- ▶ 電子の自転「スピン」とは？
- ▶ スピンの流れ「スピン流」とは？
- ▶ スピン流の物理法則の発見
- ▶ スピンによる整流効果 – 新しい発電原理の発見–

電子の自転「スピン」の物理法則を活用した、
全く新しいエネルギー技術を開拓する。

スピン流（電流のスピン版）：スピンの流れ

「ナノテクノロジー」：
1ミリの10万分の1くら
いの世界を扱う技術
によって観測可能に。

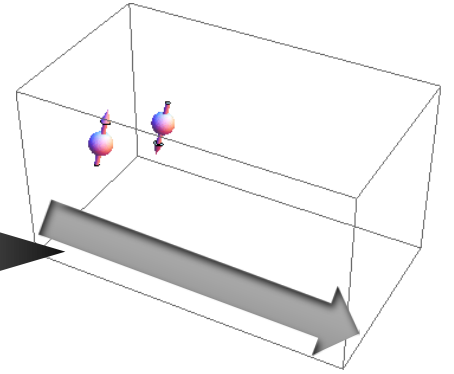
物質



電気

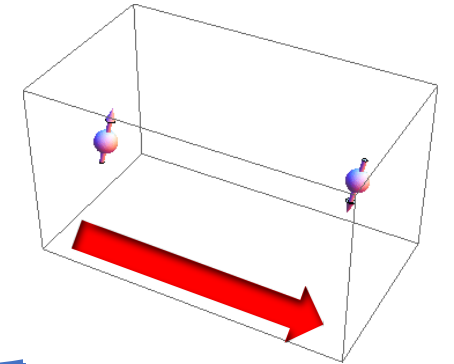
電流

試料の端まで届く



スピン流

1ミリの千分の1くらいで
消えてしまう。



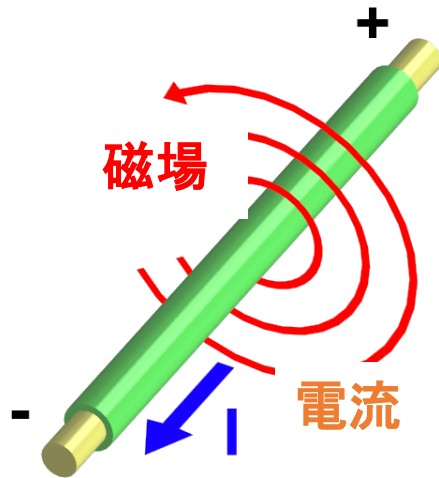
本日の内容

- ▶ エネルギー技術の根幹「整流」とは？
- ▶ 電子の自転「スピン」とは？
- ▶ スピンの流れ「スピン流」とは？
- ▶ **スピン流の物理法則の発見**
- ▶ スピンによる整流効果 – 新しい発電原理の発見–

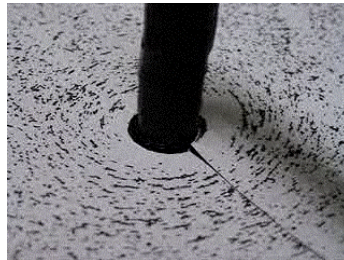
電子の自転「スピン」の物理法則を活用した、
全く新しいエネルギー技術を開拓する。

電流の基礎法則は「アンペールの法則」と「ファラデーの法則」

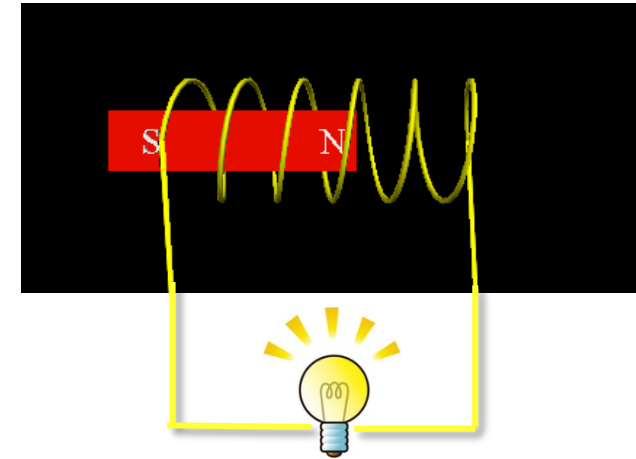
「アンペールの法則」
電流が流れると磁場ができる



電流の周りの砂鉄



ファラデーの電磁誘導
磁場が変化すると電流が流れる



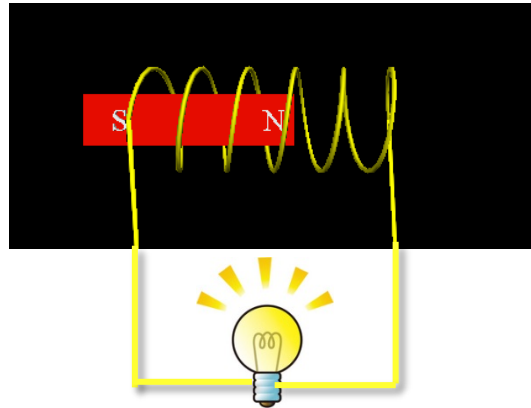
マイケル・ファラデー(1791-1867)

スピン流にも対応した基礎法則があるはず。

電流の基礎法則

電磁誘導

磁場→電流



アンペールの法則

電流→磁場



スピン流の基礎法則

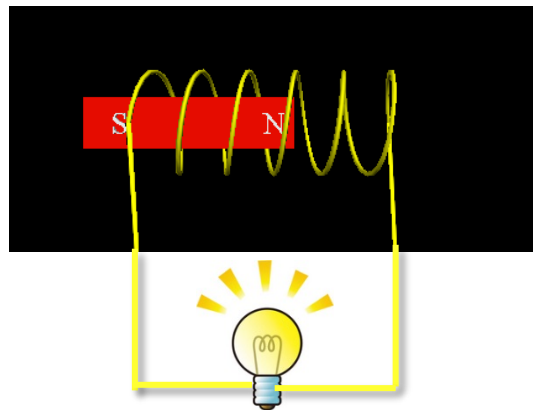


スピン流の基礎法則の発見！

電流の基礎法則

電磁誘導

磁場→電流



アンペールの法則

電流→磁場

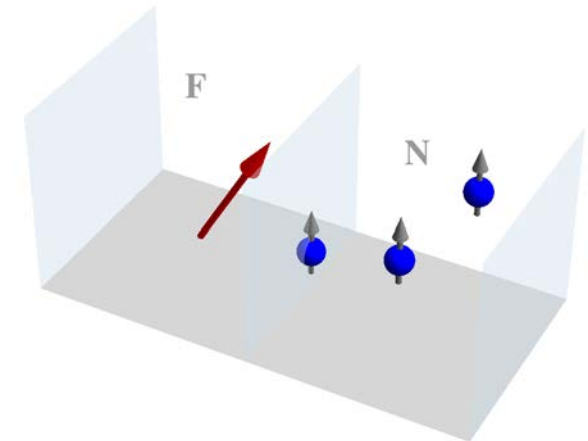


スピン流の基礎法則

スピンプンピング

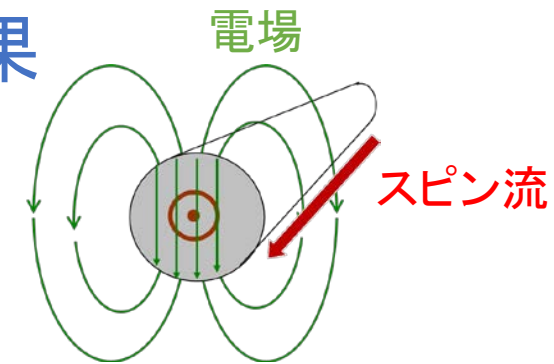
磁化運動

→スピン流



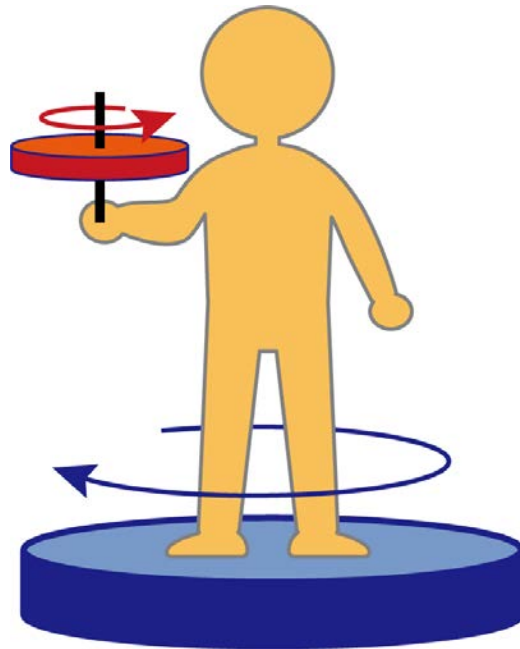
逆スピinhall効果

スピン流→電場



スピン流の基礎法則は角運動量保存則として理解できる。

物理法則：（等方的世界では）回転の総量は変わらない。



<http://www.youtube.com/watch?v=NDH3Uo99K2M>

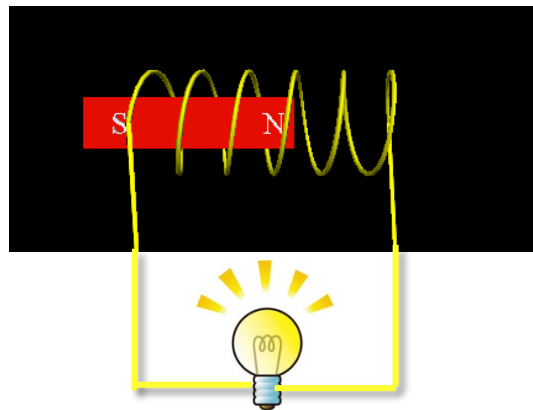
どこかの回転量が減ったとき、必ず他のどこかの回転量が増えている。

スピン流の基礎法則の発見！

電流の基礎法則

電磁誘導

磁場→電流



アンペールの法則

電流→磁場

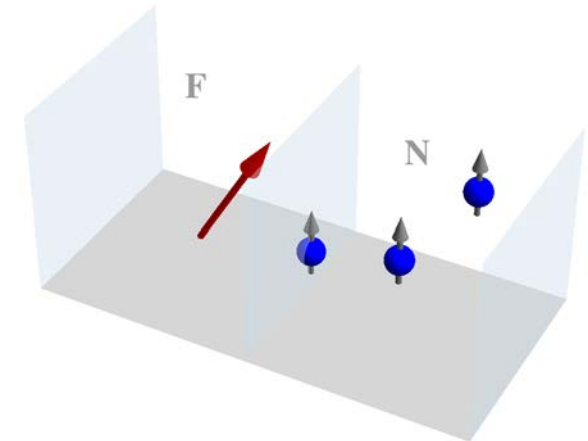


スピン流の基礎法則

スピンプンピング

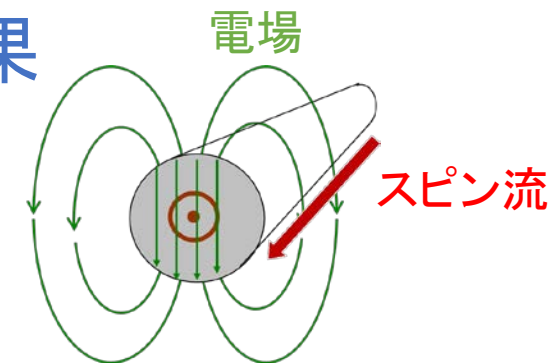
磁化運動

→スピン流



逆スピinhall効果

スピン流→電場

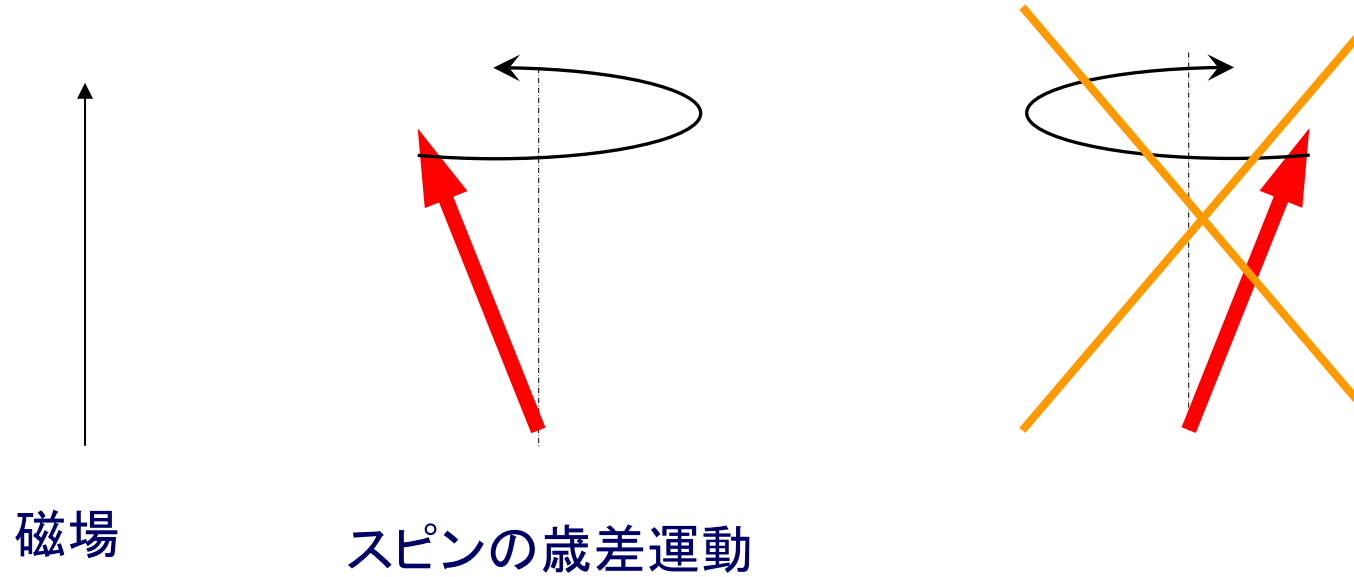


本日の内容

- ▶ エネルギー技術の根幹「整流」とは？
- ▶ 電子の自転「スピン」とは？
- ▶ スピンの流れ「スピン流」とは？
- ▶ スピン流の物理法則の発見
- ▶ スピンによる整流効果 – 新しい発電原理の発見-

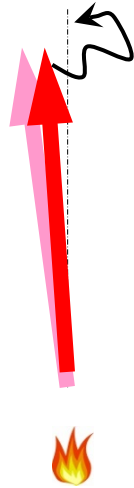
電子の自転「スピン」の物理法則を活用した、
全く新しいエネルギー技術を開拓する。

スピンは歳差運動するが、特定の方向しか回らない



スピンは歳差運動するが、特定の方向しか回らない

温度が低いとき

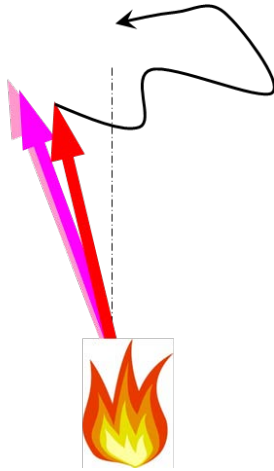


温度が高いとき



問題意識

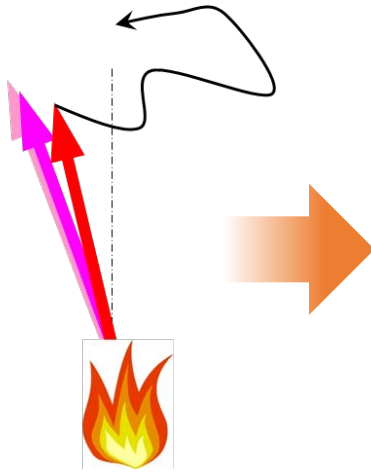
熱ゆらぎによる
一方向歳差運動



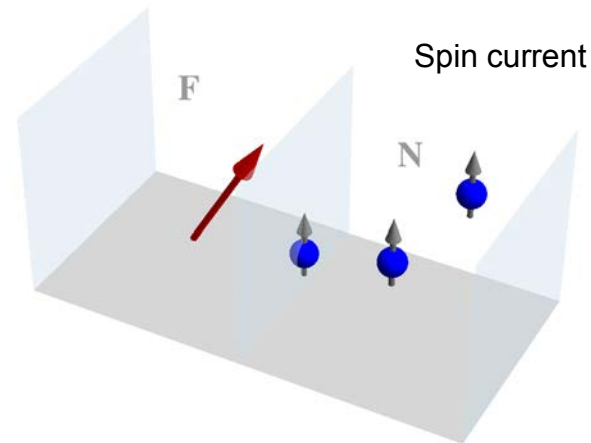
←磁性体中のスピン運動は一方向

問題意識

熱ゆらぎによる
一方向歳差運動

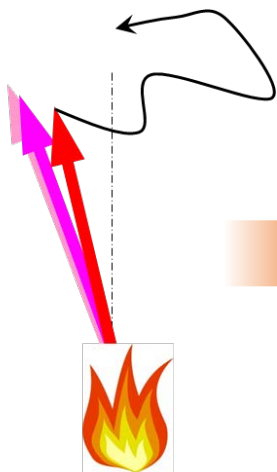


スピンプンプ
一方向磁化歳差
→ スピン流



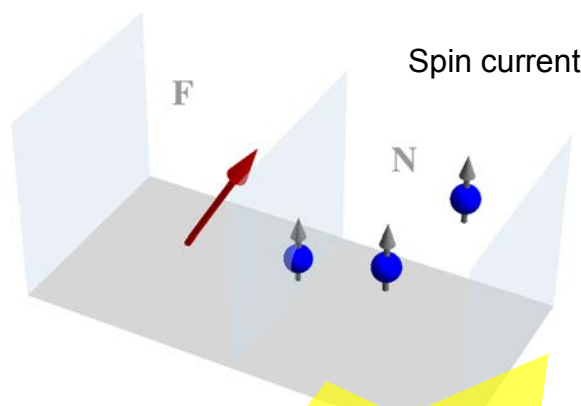
問題意識

熱ゆらぎによる
一方向歳差運動

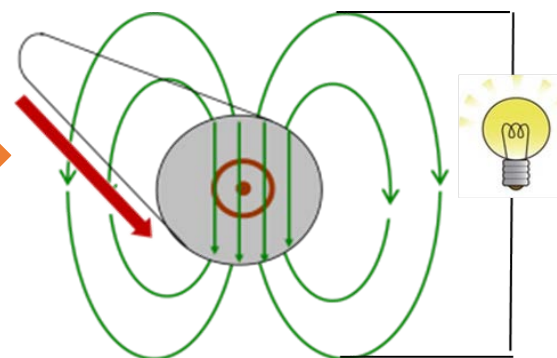


スピンプンプ
一方向磁化歳差運動

→ スピン流



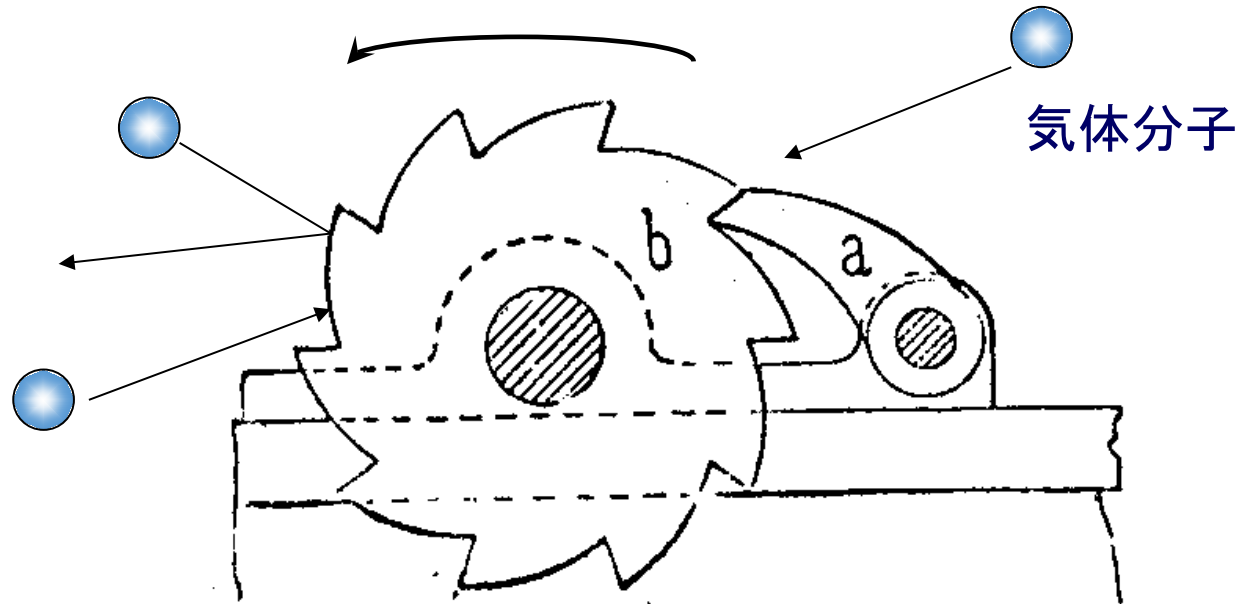
逆スピントール効果
スピン流 → 電圧



仕事

自然からエネルギーを取り出せる？

ファインマンラチェットのパラドクス



リチャード・ファインマン
(1918-1988)

ひとりでの回ってしまうのでは？
(「熱力学の第二法則」に反するような錯覚)

もし温度差があれば、自発的に回ってもよい

スピンの「ラチェット」を使って、熱から電気を作る方法

生成されるスピン流

$$\langle I_z \rangle \simeq \frac{\gamma \hbar g_r k_B}{2\pi M_s V_a} (T_F^m - T_N)$$

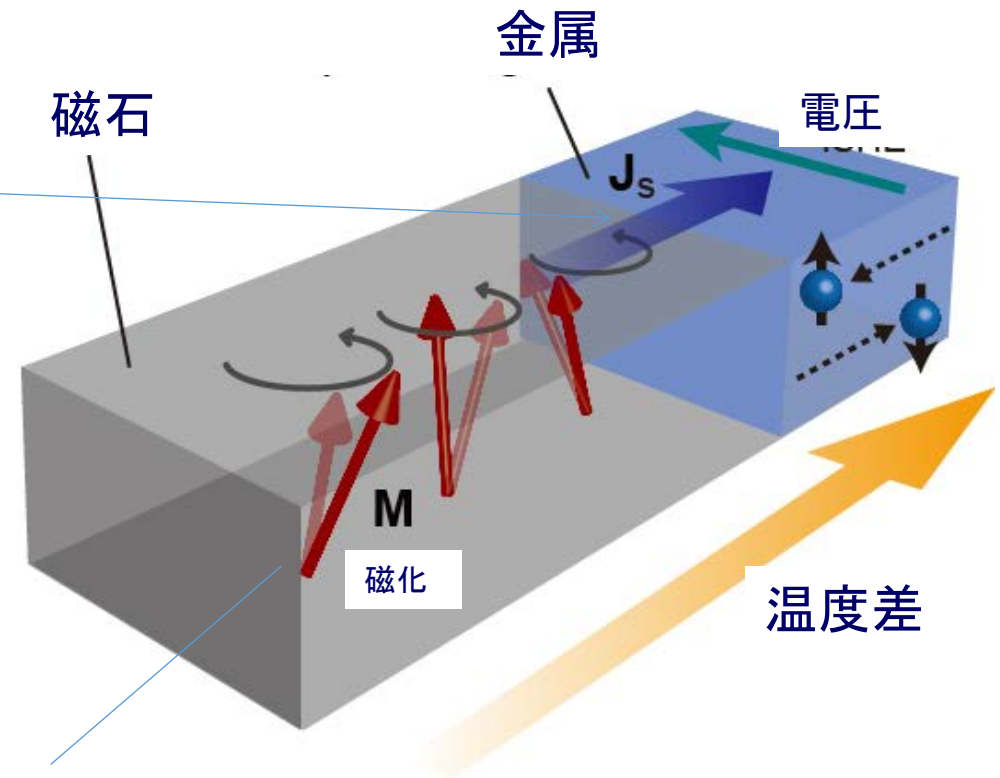
磁石の温度:

(スピンの
ゆらぎの大きさ)

—

金属の温度:

(電子の
ゆらぎの大きさ)

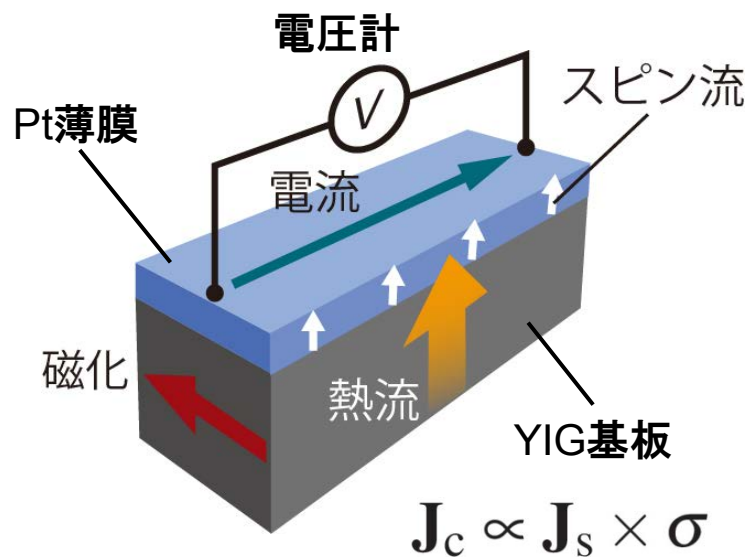


スピンの「ラチェット」が熱揺らぎを整流

スピンゼーベック熱電素子の実現に向けて

NEC

Empowered by Innovation



試料サイズ：

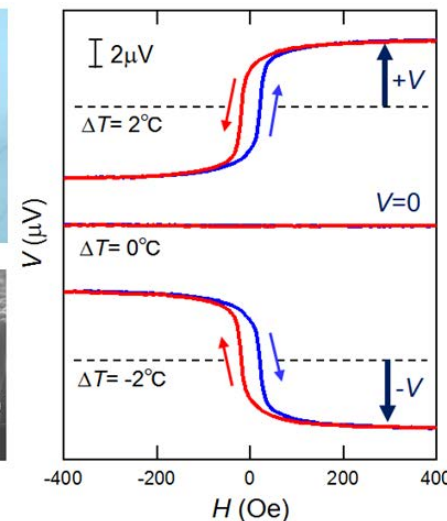
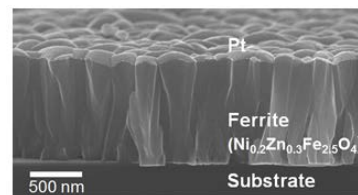
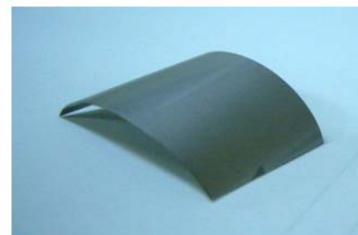
YIG基板： 6 mm x 2 mm x 1 mm

Pt薄膜： 6 mm x 0.5 mm x 15 nm

絶縁体に取り付けた金属膜に
温度差に比例した電圧が生じる

やわらかい
発電シートを作れる

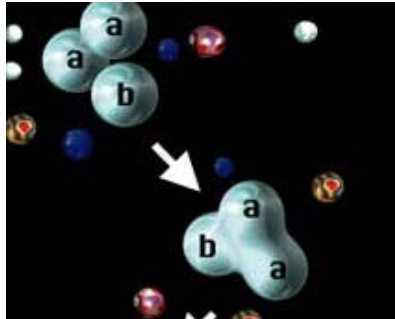
フィルム上にめっきし
発電シートを作る



塗布技術を応用すれば大面積からの熱電変換が可能に！

この原理で、いろいろなものから発電可能なはず

化学反応から発電

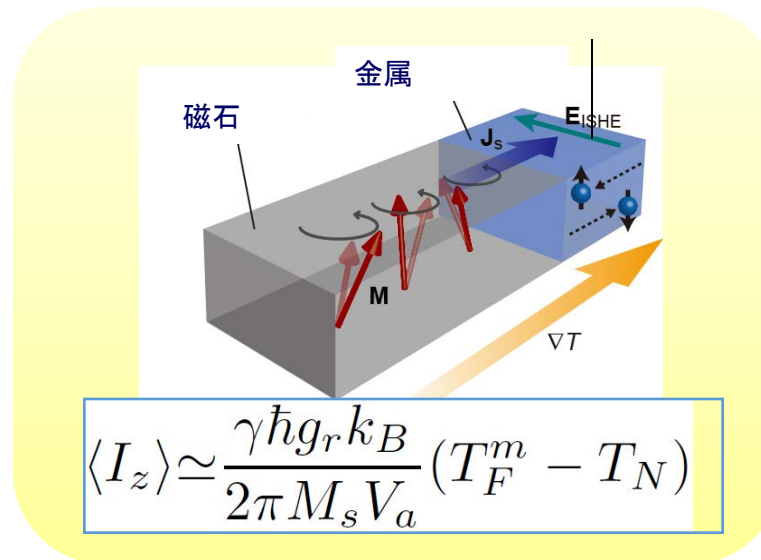


生体の運動から発電



電源、センサー

新しい発電の原理

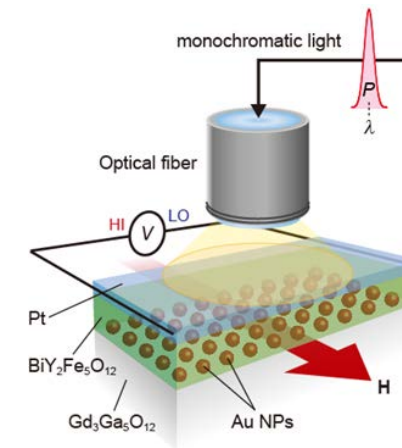


放射線から発電

X線
ガンマ線
中性子

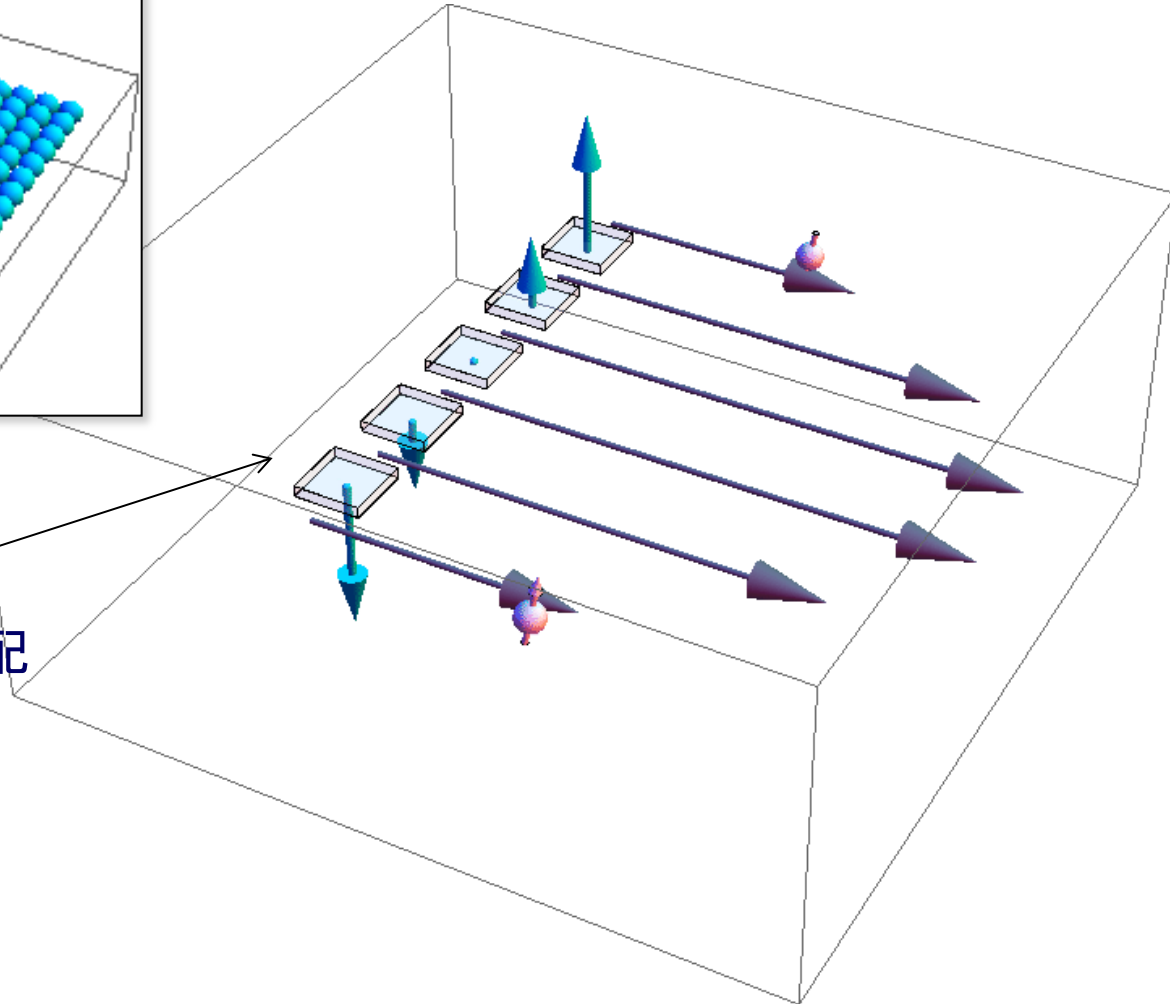
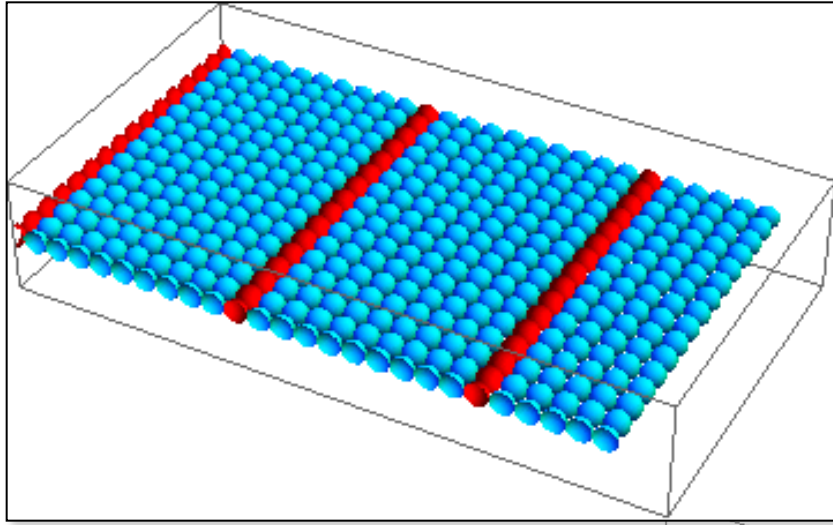
放射線測定

光から発電



ソーラーセル、
センサー

流体渦による「磁場勾配」→スピンの流を作る



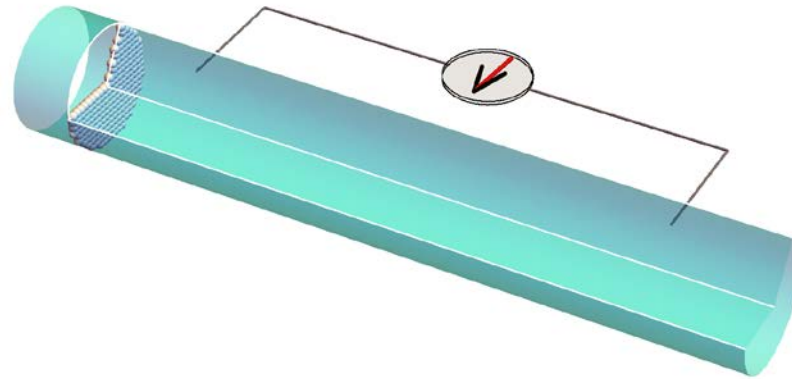
流れの渦の勾配＝磁場の勾配



スピンの流を作る

スピン流体発電の発見（流体運動からスピン流・電圧）

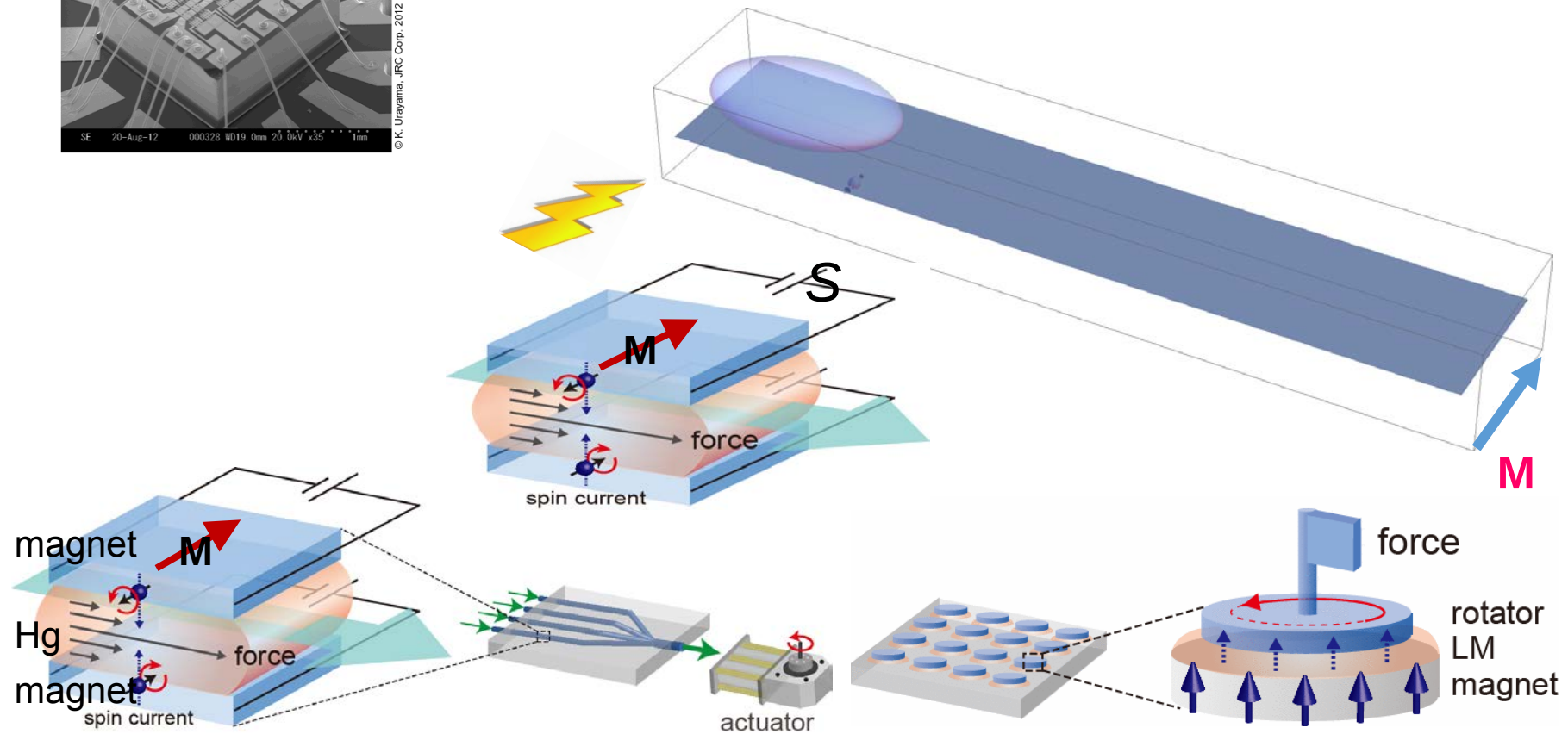
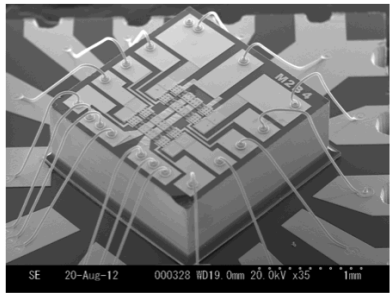
流体の渦が有効磁場として働き、液体中にスピン流を流して発電する。



流体の機械的運動から、スピン流を介した発電のメカニズム。スピン流体発電(SHD)

スピン流と機械運動

マイクロ機械との融合により多種の応用が開ける

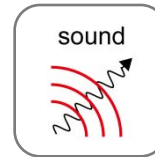
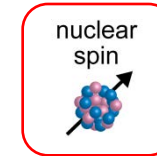
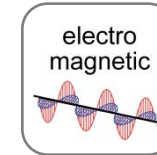
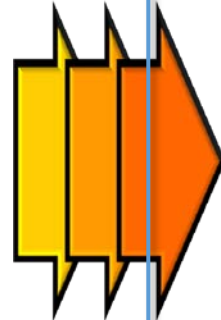


まとめと展望

古典的整流 (18世紀 産業革命)

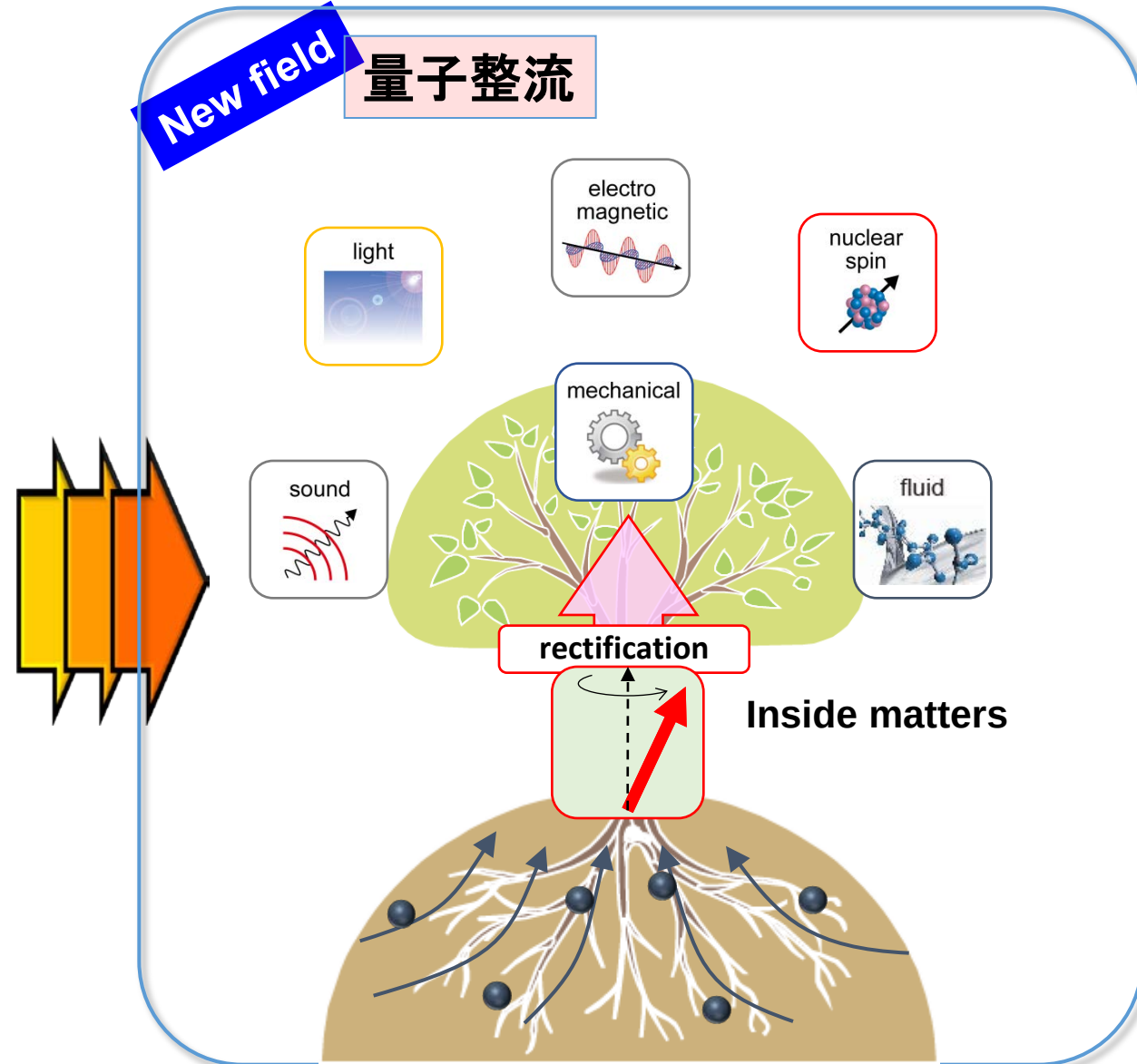
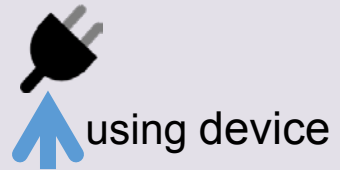


using device



まとめと展望

古典的整流 (18世紀 産業革命)



電子の自転「スピン」を用いた新たなエネルギー技術

- ▶ エネルギー技術の根幹は、ランダムな運動から「利用できる一方向の運動」として取り出す「整流」である。
- ▶ 電子の「スピン」は、一方向の回転である。
- ▶ スピンをミクロな整流器として利用することで、新たなエネルギー変換原理が発見された。熱、光、音などから、電力・運動を取り出すことができる。



New Spin Paradigm

Opening the new horizon of spin science combining all electrons properties:
charge, magnet momentum, and angular momentum.

We are at the front line of spin science.