

# 磁気物理工学の講義概要

講義ノート:

<http://kitaokalab.mp.es.osaka-u.ac.jp>

1. 磁性の起原
2. 結晶中の磁性イオン
3. 交換相互作用と磁性体の種類
4. 分子場近似による磁気転移温度
5. 核磁気共鳴の原理
  - a) 磁場中でのスピンの運動
  - b) 磁気共鳴の統計力学的取扱い
6. フーリエ変換型NMRの実際
7. 原子核スピンと電子スピンの相互作用
8. ケミカルシフトと分子共有結合
9. NMRの応用
  - a) 高分解NMR
  - b) NMRイメージング (MRI) の原理と実際

オフィスアワー: 12:00-

レポート提出期限

木曜日 17:00まで

提出場所: F 2 1 7

## 生活の中の物性物理学

太陽電池



液晶



パソコン



宇宙ステーションで



ロボット



# 鮮やか実験映像：

## 半導体青色レーザーの実現でノーベル物理学賞

### 生活の中の永久磁石

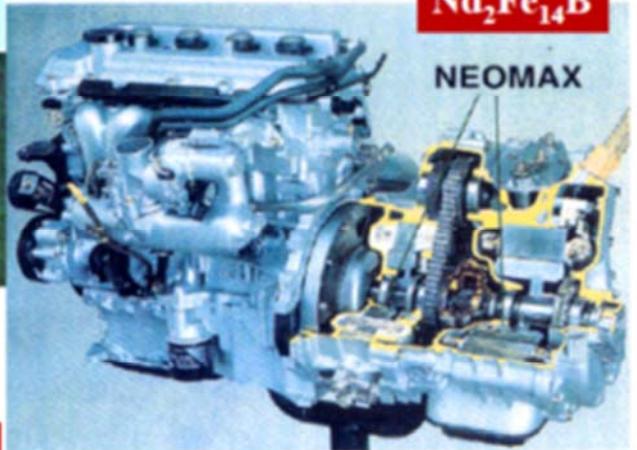
MRI



電気自動車



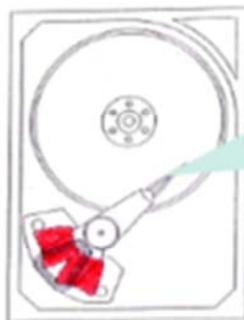
$Nd_2Fe_{14}B$



磁気記憶媒体

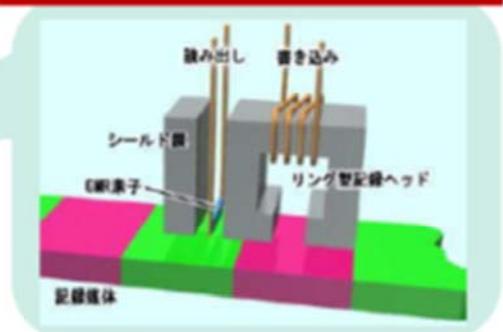


ハードディスク



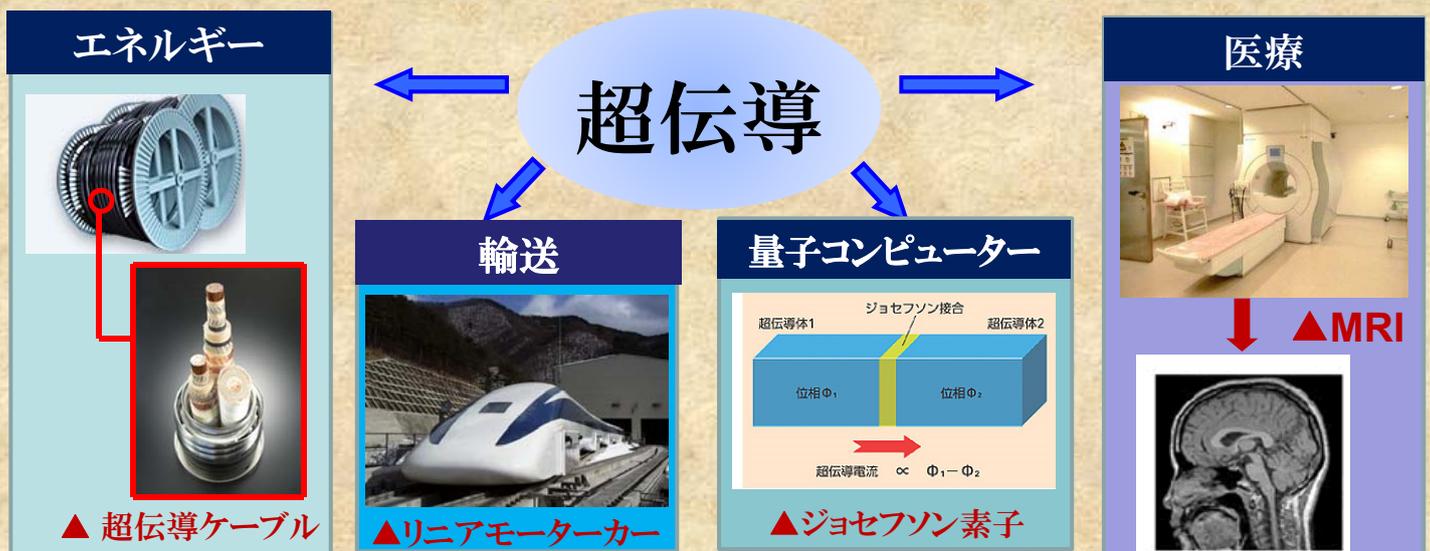
Rotary Voice Coil Motor

情報読み取り磁気デバイス



# 鮮やか実験映像：永久磁石

## 超伝導の応用：イノベーションへ



超伝導は低温にならないと発現しない

冷却にコストが必要

高温で  
超伝導になる物質が必要

# 身近な超伝導応用として 超伝導リニアモーターカー

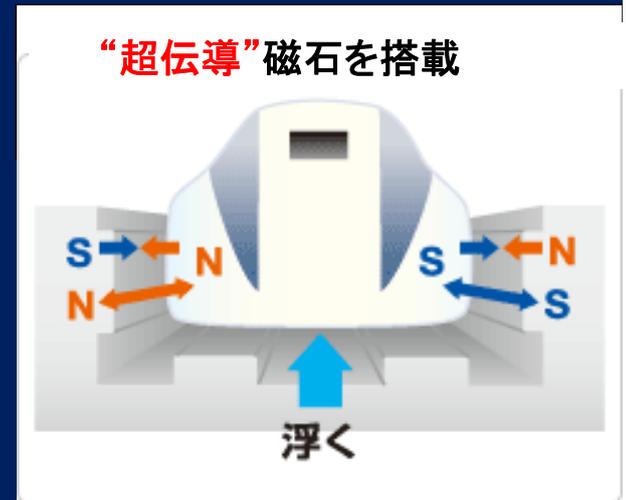


鉄道として世界最高  
581 km/h  
東京～大阪間約1時間



2014年度に着工。  
東京～名古屋間で  
2027年に開業。  
2035年には大阪  
まで延伸

朝日新聞より転載  
2011年4月21日



## 物質世界、魅惑の現象とからくりは？

物質では、構成元素の種類や原子配列の違いを反映した様々な環境下で**無数の電子がお互いに影響を与え合い**ながら運動。

このことが物質の性質に**無限とも言える多様性**を与える。電子がお互いに**影響しあう様子の違い**によって、物質は**永久磁石**となったり、電気抵抗がゼロになる**超伝導**を発現。

# 金属

# 絶縁体



銅



ダイヤモンド

提供：八木健彦氏

なぜ「金属」と「絶縁体」の違いが生まれるか？

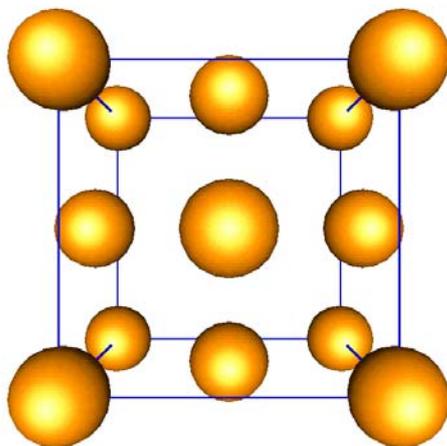
# 金属

# 絶縁体



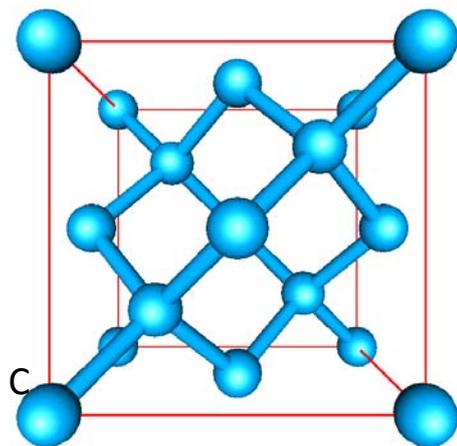
銅

ダイヤモンド



Cu

電子数29個



C

電子数6個

原子の間隔

2~3 Å (1 Å = 10<sup>-8</sup>cm)

原子の数

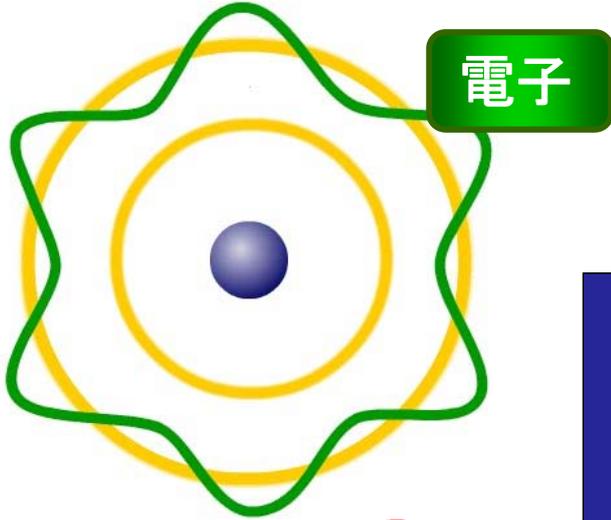
10<sup>22</sup>~10<sup>23</sup>/cm<sup>3</sup>



凝縮系

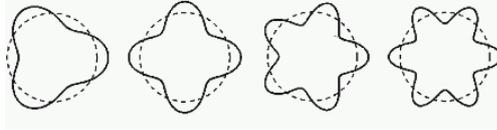
# 原子の中の電子 → 量子化

原子

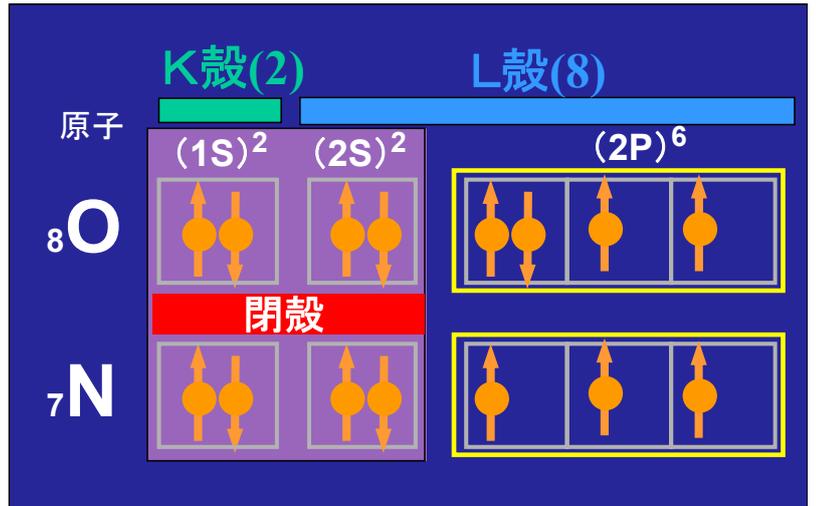
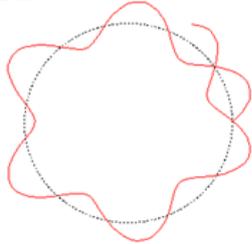


電子

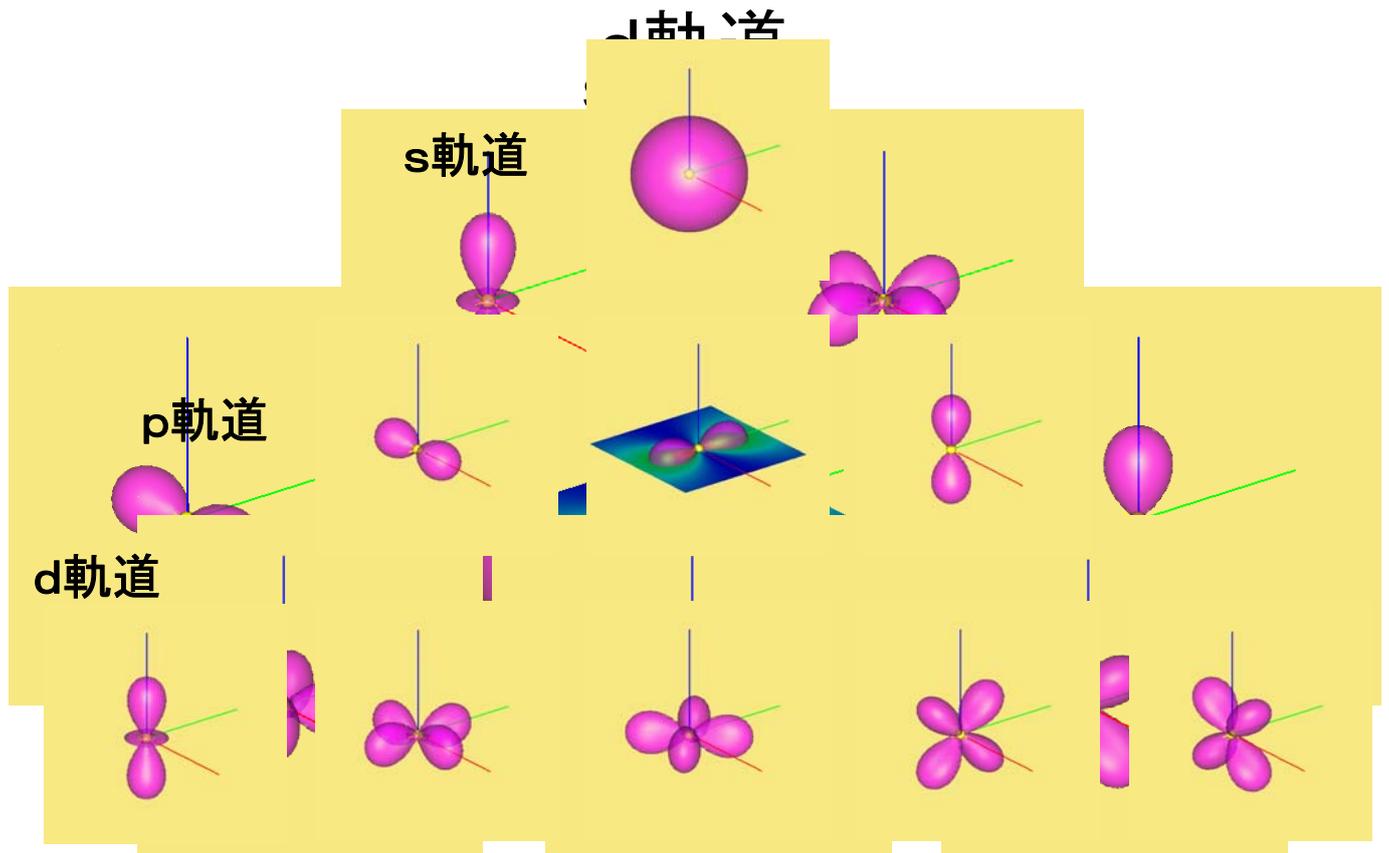
「ボーアの量子化条件」  
定在波のみ存在できる



存在できない  
波動状態 →



# いろいろな軌道：電子の存在確率

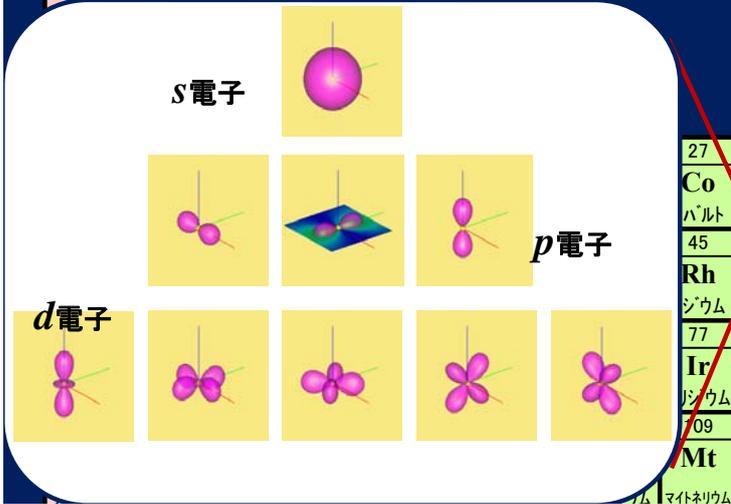


# 「物性物理学」とは、、、

物質の性質（物性）を理解し可能性を追求する学問

非周期，非対称，不均質、  
不均一，ランダム

原子から



アモルファス太陽電池

金属ガラス  
高強度・高靱性

アモルファス鉄心  
モーター  
世界最高効率（96%）

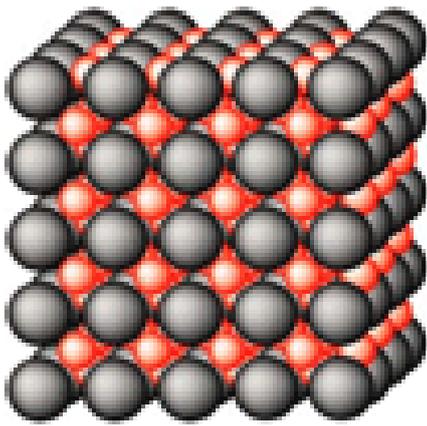
10<sup>23</sup>個もの原子の集合体  
としての性質は？

導電材料、絶縁素材、半導体素材、  
超伝導材料、磁性材料、熱電材料、  
特殊素材、..... いろいろ！

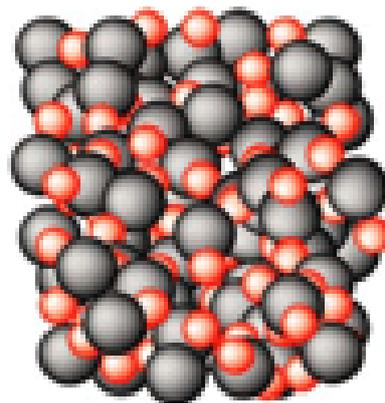
物質科学（物性物理学）  
→ 10<sup>23</sup>個もの電子が織りなす  
新しい物質・物性・機能応用

## 複雑構造材料の機能

バルク状のアモルファス合金(液体急冷)と金属ガラス(液体徐冷、ガラス転移)



結晶



アモルファス合金  
金属合金ガラス

ガラス形成能の高いZr-Be-Ti-Cu-Ni合金、この金属ガラスは商品  
化され優れたガラス形成能、高い反発係数、高強度、優れた鋳造  
性、優れた腐食特性などからゴルフクラブや携帯電話のフレーム、  
Parmのシャーシ、腕時計のケーシングなどへの応用

# 身近なところから先端分野まで、幅広く活躍している 低膨張・結晶化ガラス

日本電気硝子 × 先端精密



- 普通のガラスのコップに熱湯を注ぐと割れる。これは、ガラスの内側と外側との温度差による膨張の差によって引き起こされる現象。
- **結晶化という技術を活かして**、耐熱衝撃性や機械的強度、電気的特性に優れた、ほとんど膨張しないガラス「低膨張結晶化ガラス」の開発。
- 極わずかな膨張が大きな影響を与える光学機器や光通信、液晶や半導体製造などの厳密な精度や精確性、寸法安定性が求められる分野などの技術の進歩に貢献。

## 永久磁石の不思議な世界

# 「電気」・「磁気」との出会い

## 電気 (Electricity)

ギリシャ語の「琥珀(コハク)」に由来  
Elektron (エレクトロン)



コハクと毛皮がこすれると  
静電気が発生

## 磁気 (Magnetism)

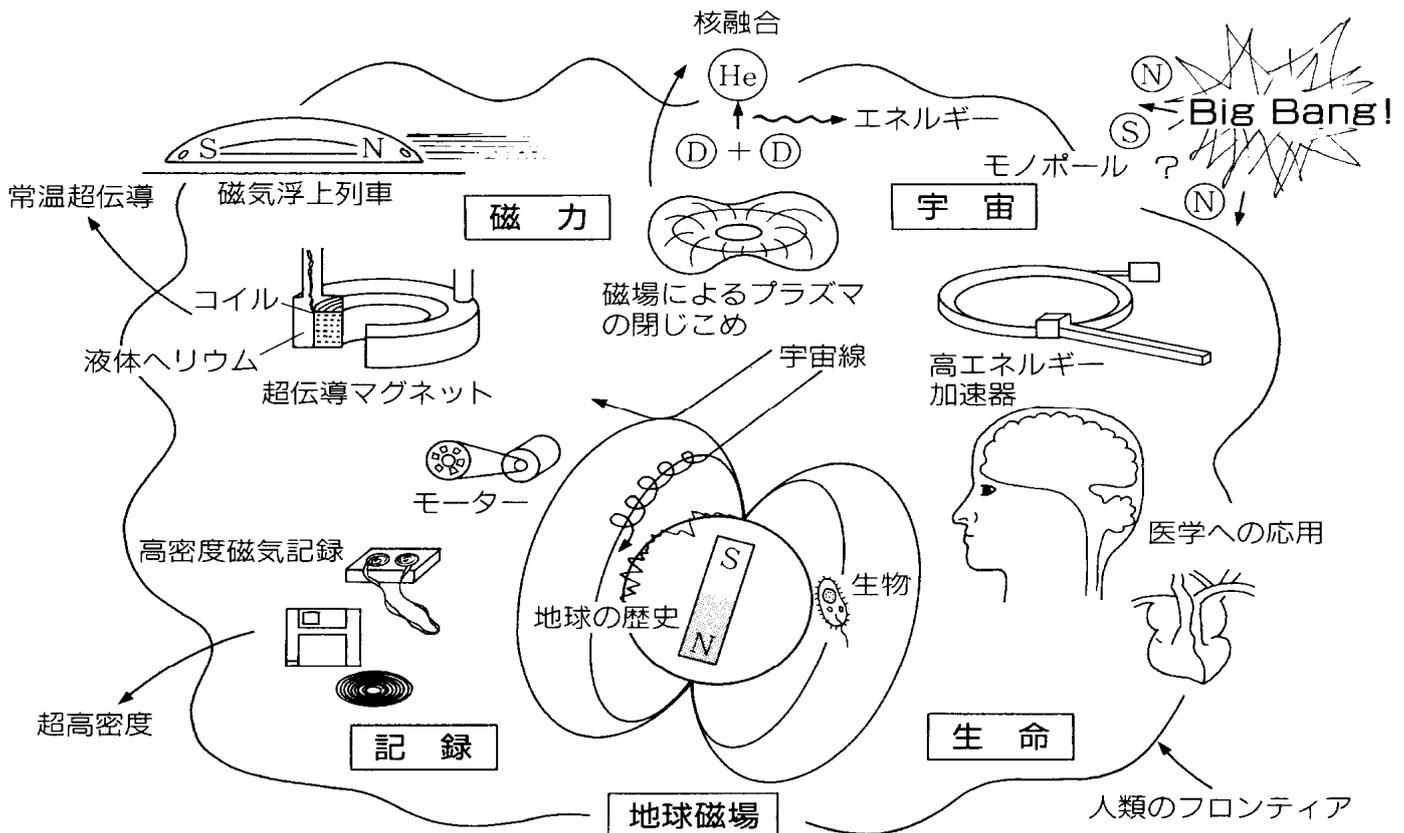
古代ギリシアでは、鉄を引き寄せ  
る石として磁石はすでに知られ  
ていた。→「マグネシアの石」



天然磁石

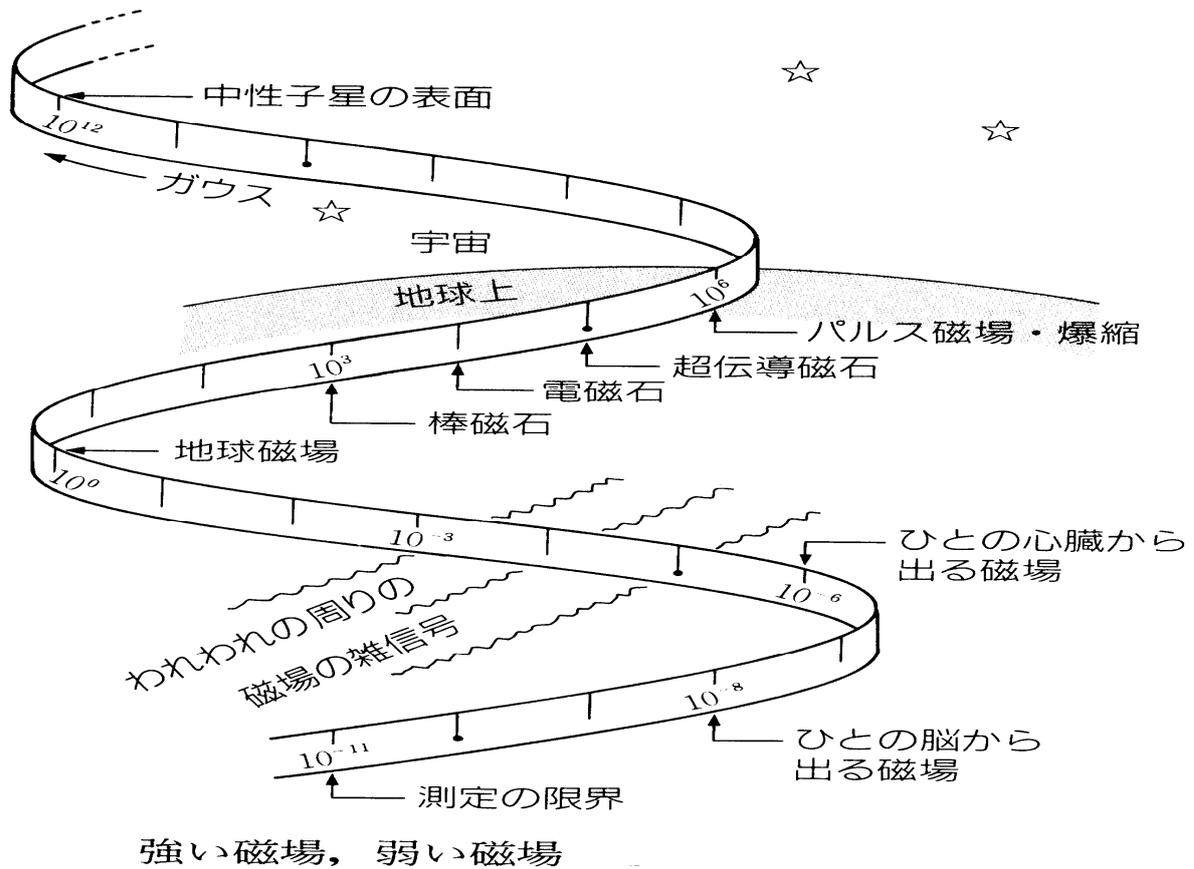
→古代から「何か見えざる力」の存在に気づく

## 磁気世界の鳥瞰図



われわれの周りにはさまざまな磁気が存在する。

# 強い磁場から弱い磁場の分布

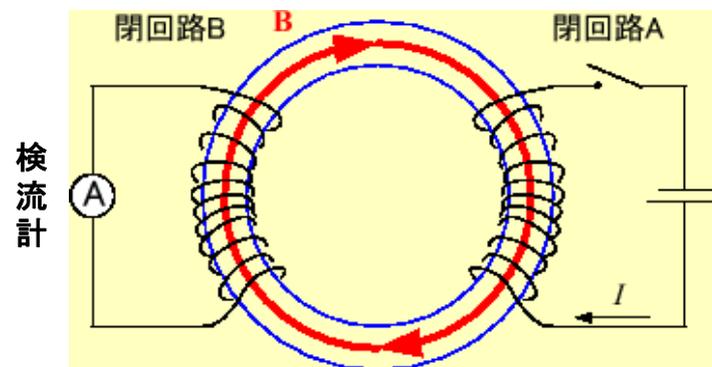


ファラデー  
(イギリス)

「電気から磁気が発生。  
ならばその逆も可能ではないか？」

## 「電場」と「磁場」の統一的理解を目指す

1831 ファラデーが電磁誘導現象を発見

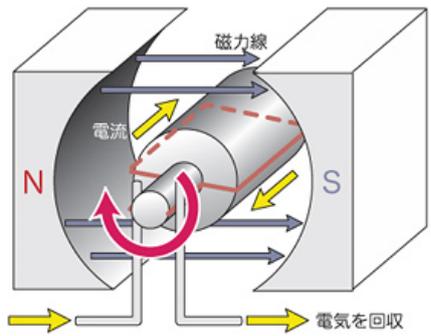


閉回路AのスイッチのON/OFFの瞬間  
にだけ、閉回路Bに電流が流れた。

セレンディピティ (serendipity)

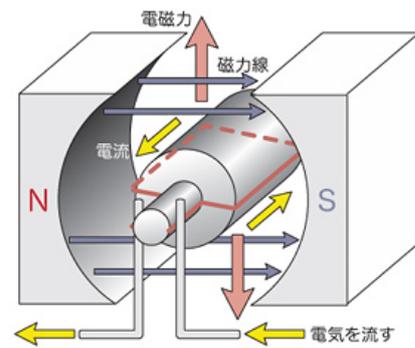
磁力線の概念を思いつく  
(現象から豊かな想像力)

# 発電機



→ 動力源から電気を

# 電動機 (モーター)

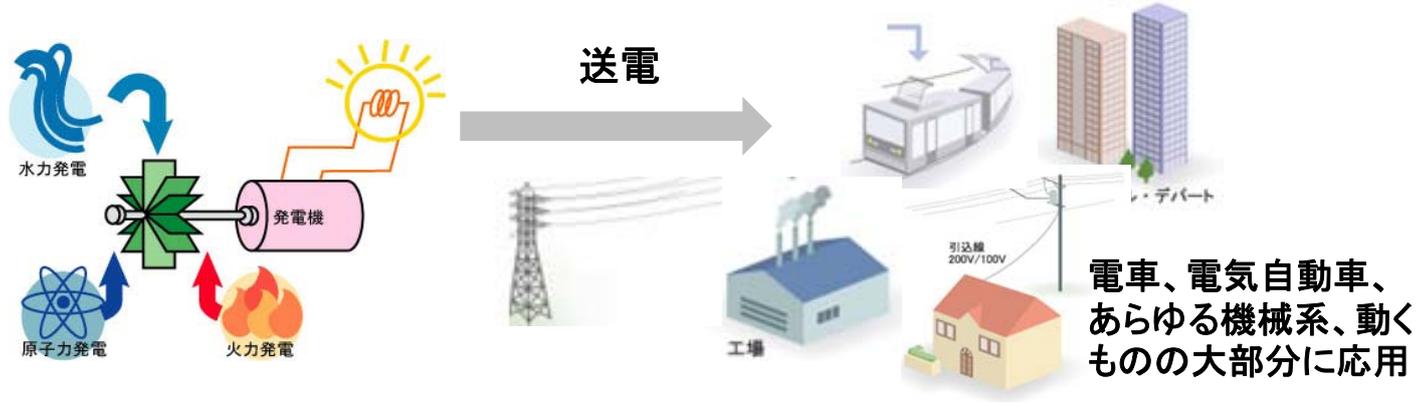


→ 電気から動力を

ヘンリー (アメリカ)



## 人類の生活・社会基盤の革命



電車、電気自動車、あらゆる機械系、動くものの大部分に応用

# Maxwell 方程式 (1865)

## 電磁気学の完成

- ①  $\nabla \cdot D = \rho$
- ②  $\nabla \cdot B = 0$
- ③  $\nabla \times E + \frac{\partial B}{\partial t} = 0$
- ④  $\nabla \times H - \frac{\partial D}{\partial t} = j$

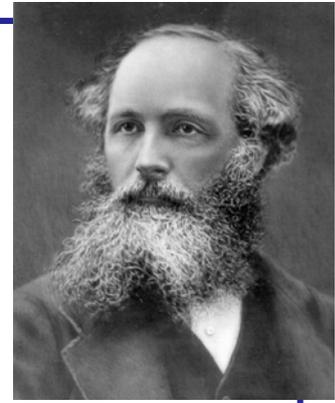
変位電流の(理論上の整合性という観点から)導入

波動方程式

$$\nabla^2 \vec{E} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

$$\nabla^2 \vec{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}$$

電気と磁気の美しい対称性



マックスウェル (イギリス) (1831-1879)

- 電磁波の予言 (導線がない空間も電磁場は伝わる)
- 光の電磁波説 を提唱 (1871)

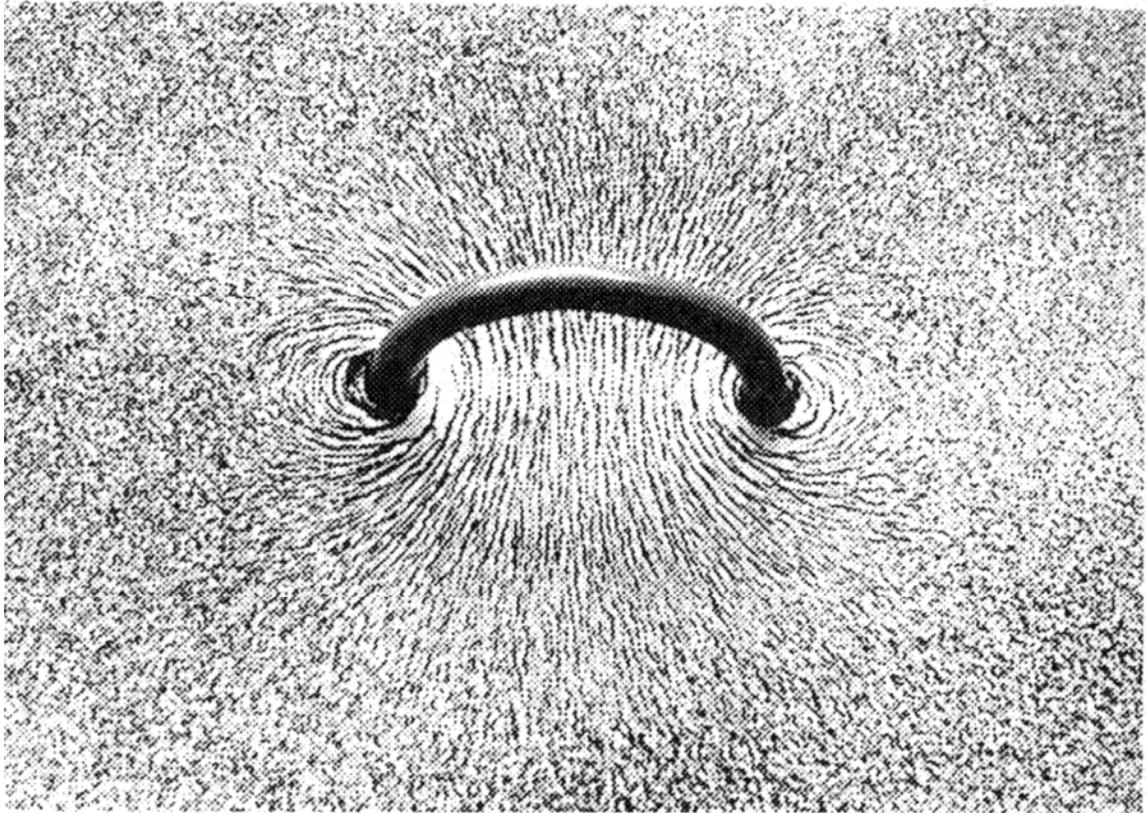
実験と理論は車の両輪

# 電磁波の発見 (1888)



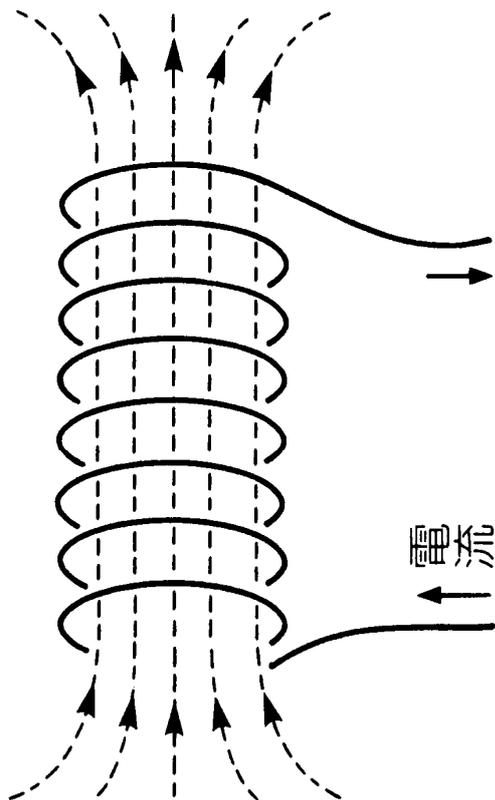
ヘルツ(ドイツ) 電磁波の放射の存在を、実験的に初めて実証

# 電流による磁場の発生

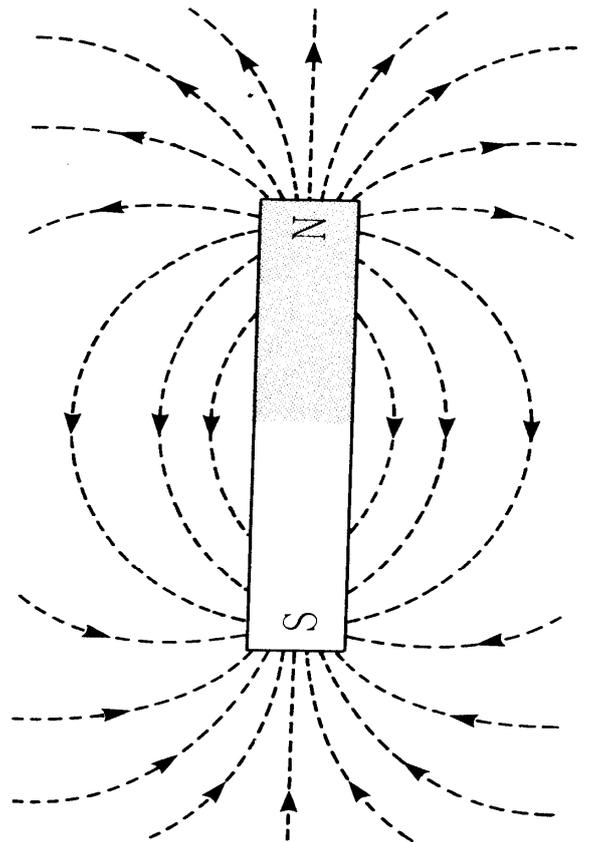


円電流のまわりの砂鉄が描く磁力線

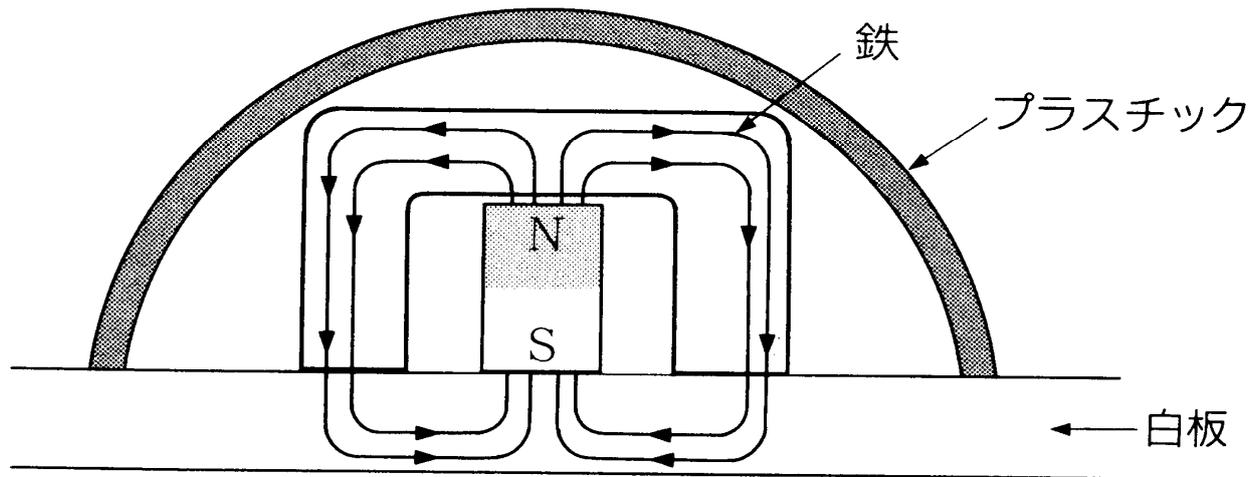
## コイルに流れる電流による磁場



## 永久磁石による磁場の発生

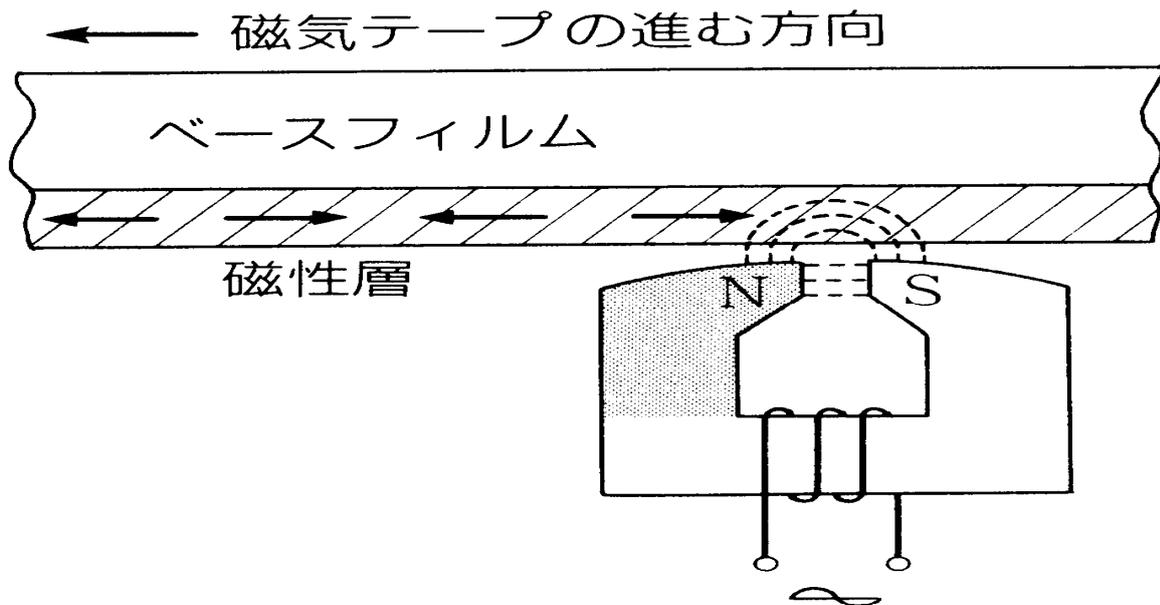


# 文房具カラーマグネット



文房具のカラーマグネットも磁束の閉じ込めの1つの例である。磁石の周りにできる磁気回路で磁束を閉じ込めるので、強い力で金属面に張りつく。

# 磁気記録の原理



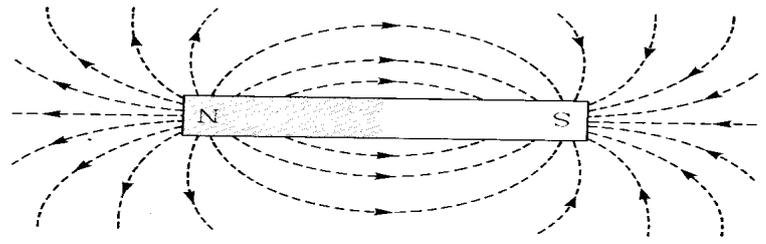
磁気テープは矢印の方向に動いており、磁性層の小さい磁石は磁気ヘッドによって次々と磁化されていく。

# 「磁石」の「見えざる力」の謎が解明 (20世紀)

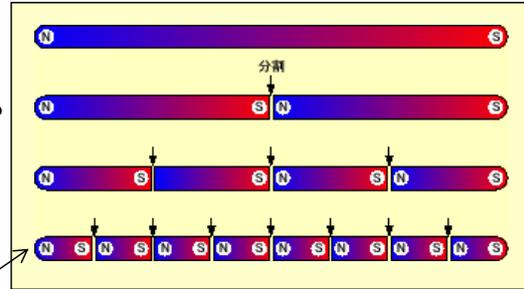
磁石の「見えざる力」の謎



Magnetite(磁鉄鋼)



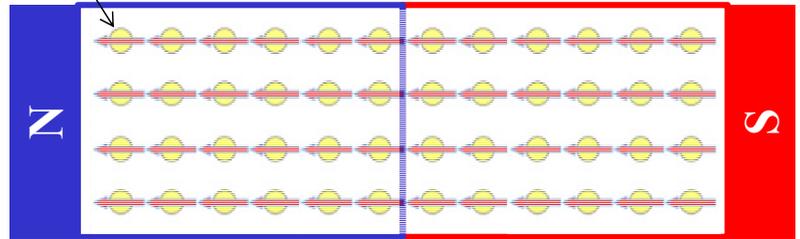
磁石を究極に分割していくと、最後は...



電子スピン



ミクロに見た永久磁石



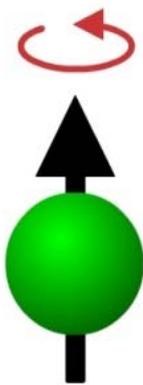
原子物理・量子力学の発展  
(20世紀初頭、ヨーロッパ中心)

磁石の謎の解明

## 電子のスピンはミクロな磁石！

電子はコマのように回る(スピンする)

大きさ  
 $S=1/2$



上向き  
(左まわり)

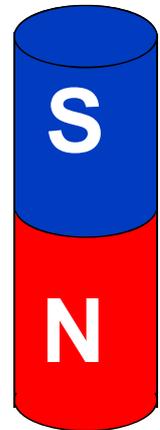
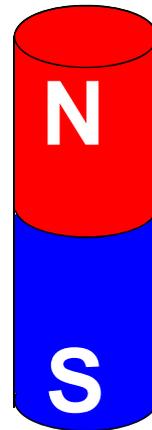
$$S_z = 1/2$$



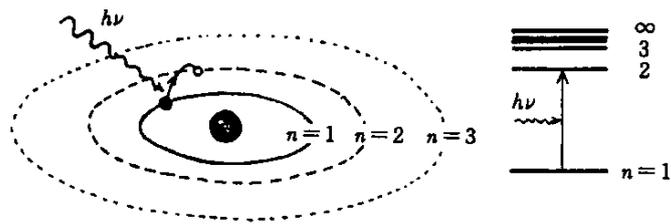
下向き  
(右まわり)

$$S_z = -1/2$$

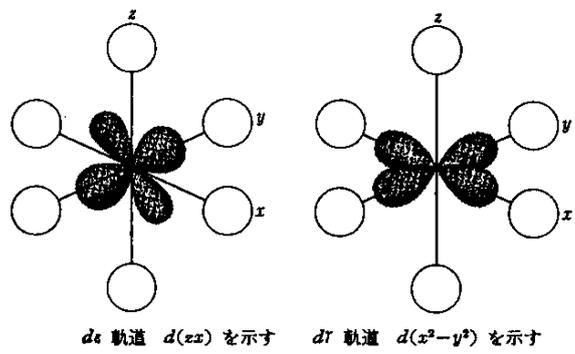
=



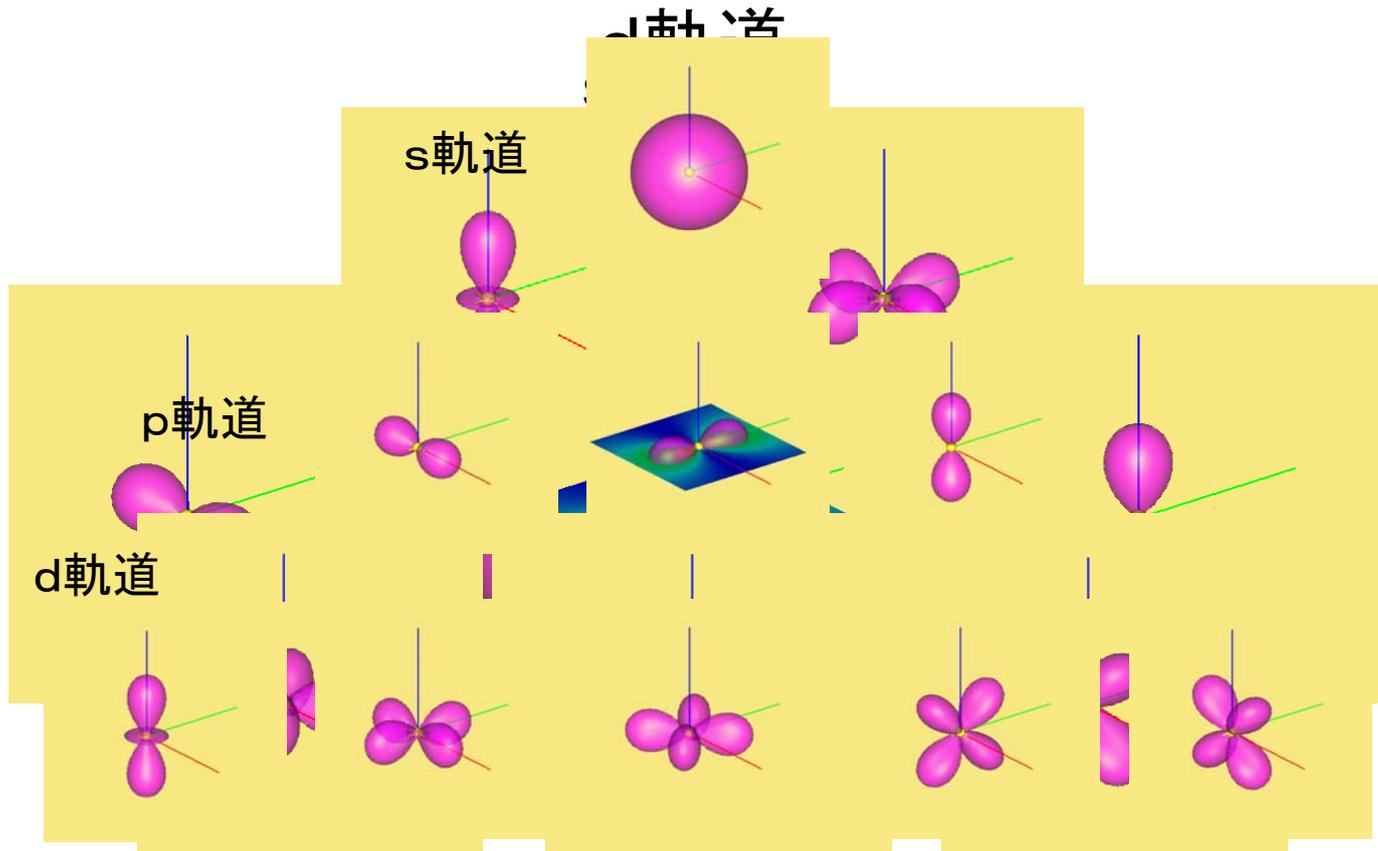
# 原子磁石の起源



不閉殻の  $d$  ( $l=2$ ) 殻や  $f$  殻 ( $l=3$ ) が原子磁石の担い手



# いろいろな軌道：電子軌道



# 周期表

(基底状態の中性原子の外殻電子配置)

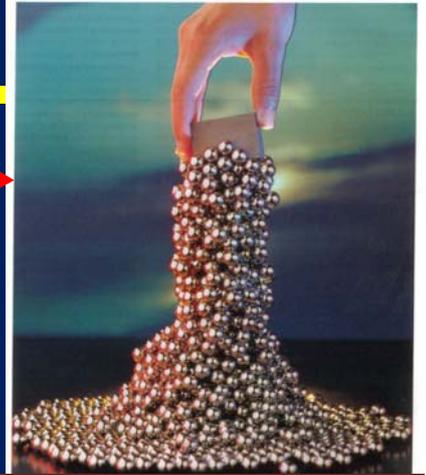
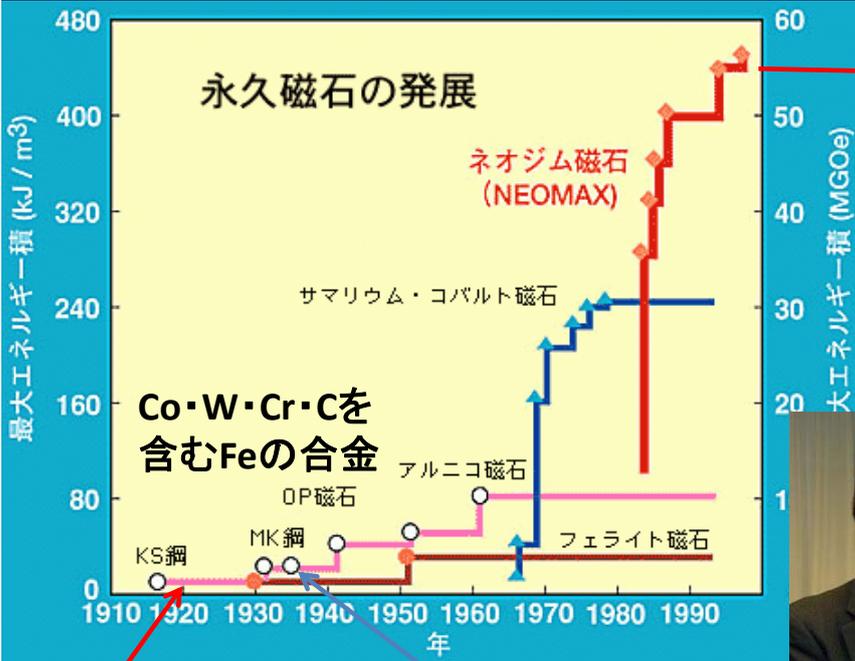
原子およびイオンの電子配置を示す記号については、すべての初歩的な原子物理学の教科書において述べられている。文字  $s, p, d, \dots$  は  $n$  を単位とする軌道角モーメント  $0, 1, 2, \dots$  をもっている電子を示す。文字の左側の数字は軌道の主量子数を示す。右肩上の数字はその軌道の電子数を示す。

## 3d 遷移磁性元素

## 4f 希土類磁性元素

H <sup>1</sup>																	He <sup>2</sup>					
1s																	1s <sup>2</sup>					
Li <sup>3</sup>	Be <sup>4</sup>															B <sup>5</sup>	C <sup>6</sup>	N <sup>7</sup>	O <sup>8</sup>	F <sup>9</sup>	Ne <sup>10</sup>	
2s	2s <sup>2</sup>															2s <sup>2</sup> 2p	2s <sup>2</sup> 2p <sup>2</sup>	2s <sup>2</sup> 2p <sup>3</sup>	2s <sup>2</sup> 2p <sup>4</sup>	2s <sup>2</sup> 2p <sup>5</sup>	2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup>	
Na <sup>11</sup>	Mg <sup>12</sup>															Al <sup>13</sup>	Si <sup>14</sup>	P <sup>15</sup>	S <sup>16</sup>	Cl <sup>17</sup>	Ar <sup>18</sup>	
3s	3s <sup>2</sup>															3s <sup>2</sup> 3p	3s <sup>2</sup> 3p <sup>2</sup>	3s <sup>2</sup> 3p <sup>3</sup>	3s <sup>2</sup> 3p <sup>4</sup>	3s <sup>2</sup> 3p <sup>5</sup>	3s <sup>2</sup> 3p <sup>6</sup>	
K <sup>19</sup>	Ca <sup>20</sup>	Sc <sup>21</sup>	Ti <sup>22</sup>	V <sup>23</sup>	Cr <sup>24</sup>	Mn <sup>25</sup>	Fe <sup>26</sup>	Co <sup>27</sup>	Ni <sup>28</sup>	Cu <sup>29</sup>	Zn <sup>30</sup>	Ga <sup>31</sup>	Ge <sup>32</sup>	As <sup>33</sup>	Se <sup>34</sup>	Br <sup>35</sup>	Kr <sup>36</sup>					
4s	4s <sup>2</sup>	3d	3d <sup>2</sup>	3d <sup>3</sup>	3d <sup>4</sup>	3d <sup>5</sup>	3d <sup>6</sup>	3d <sup>7</sup>	3d <sup>8</sup>	3d <sup>10</sup>	3d <sup>10</sup>	4s <sup>2</sup> 4p	4s <sup>2</sup> 4p <sup>2</sup>	4s <sup>2</sup> 4p <sup>3</sup>	4s <sup>2</sup> 4p <sup>4</sup>	4s <sup>2</sup> 4p <sup>5</sup>	4s <sup>2</sup> 4p <sup>6</sup>					
Rb <sup>37</sup>	Sr <sup>38</sup>	Y <sup>39</sup>	Zr <sup>40</sup>	Nb <sup>41</sup>	Mo <sup>42</sup>	Tc <sup>43</sup>	Ru <sup>44</sup>	Rh <sup>45</sup>	Pd <sup>46</sup>	Ag <sup>47</sup>	Cd <sup>48</sup>	In <sup>49</sup>	Sn <sup>50</sup>	Sb <sup>51</sup>	Te <sup>52</sup>	I <sup>53</sup>	Xe <sup>54</sup>					
5s	5s <sup>2</sup>	4d	4d <sup>2</sup>	4d <sup>4</sup>	4d <sup>5</sup>	4d <sup>6</sup>	4d <sup>7</sup>	4d <sup>8</sup>	4d <sup>10</sup>	4d <sup>10</sup>	4d <sup>10</sup>	5s <sup>2</sup> 5p	5s <sup>2</sup> 5p <sup>2</sup>	5s <sup>2</sup> 5p <sup>3</sup>	5s <sup>2</sup> 5p <sup>4</sup>	5s <sup>2</sup> 5p <sup>5</sup>	5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup>					
Cs <sup>55</sup>	Ba <sup>56</sup>	La <sup>57</sup>	Hf <sup>72</sup>	Ta <sup>73</sup>	W <sup>74</sup>	Re <sup>75</sup>	Os <sup>76</sup>	Ir <sup>77</sup>	Pt <sup>78</sup>	Au <sup>79</sup>	Hg <sup>80</sup>	Tl <sup>81</sup>	Pb <sup>82</sup>	Bi <sup>83</sup>	Po <sup>84</sup>	At <sup>85</sup>	Rn <sup>86</sup>					
6s	6s <sup>2</sup>	4f	4f <sup>14</sup>	5d	5d <sup>2</sup>	5d <sup>3</sup>	5d <sup>4</sup>	5d <sup>5</sup>	5d <sup>6</sup>	5d <sup>7</sup>	5d <sup>8</sup>	5d <sup>10</sup>	5d <sup>10</sup>	5d <sup>10</sup>	6s <sup>2</sup> 6p	6s <sup>2</sup> 6p <sup>2</sup>	6s <sup>2</sup> 6p <sup>3</sup>	6s <sup>2</sup> 6p <sup>4</sup>	6s <sup>2</sup> 6p <sup>5</sup>	6s <sup>2</sup> 6p <sup>6</sup>		
Fr <sup>87</sup>	Ra <sup>88</sup>	Ac <sup>89</sup>															6s <sup>2</sup> 6p	6s <sup>2</sup> 6p <sup>2</sup>	6s <sup>2</sup> 6p <sup>3</sup>	6s <sup>2</sup> 6p <sup>4</sup>	6s <sup>2</sup> 6p <sup>5</sup>	6s <sup>2</sup> 6p <sup>6</sup>
7s	7s <sup>2</sup>	6d	6d <sup>2</sup>	6d <sup>3</sup>	6d <sup>4</sup>	6d <sup>5</sup>	6d <sup>6</sup>	6d <sup>7</sup>	6d <sup>8</sup>	6d <sup>10</sup>	6d <sup>10</sup>	7s <sup>2</sup> 7p	7s <sup>2</sup> 7p <sup>2</sup>	7s <sup>2</sup> 7p <sup>3</sup>	7s <sup>2</sup> 7p <sup>4</sup>	7s <sup>2</sup> 7p <sup>5</sup>	7s <sup>2</sup> 7p <sup>6</sup>					
Ce <sup>58</sup>	Pr <sup>59</sup>	Nd <sup>60</sup>	Pm <sup>61</sup>	Sm <sup>62</sup>	Eu <sup>63</sup>	Gd <sup>64</sup>	Tb <sup>65</sup>	Dy <sup>66</sup>	Ho <sup>67</sup>	Er <sup>68</sup>	Tm <sup>69</sup>	Yb <sup>70</sup>	Lu <sup>71</sup>									
4f <sup>2</sup>	4f <sup>3</sup>	4f <sup>4</sup>	4f <sup>5</sup>	4f <sup>6</sup>	4f <sup>7</sup>	4f <sup>7</sup>	4f <sup>8</sup>	4f <sup>10</sup>	4f <sup>11</sup>	4f <sup>12</sup>	4f <sup>13</sup>	4f <sup>14</sup>	4f <sup>14</sup>									
6s <sup>2</sup>	6s <sup>2</sup>	6s <sup>2</sup>	6s <sup>2</sup>																			
Th <sup>90</sup>	Pa <sup>91</sup>	U <sup>92</sup>	Np <sup>93</sup>	Pu <sup>94</sup>	Am <sup>95</sup>	Cm <sup>96</sup>	Bk <sup>97</sup>	Cf <sup>98</sup>	Es <sup>99</sup>	Fm <sup>100</sup>	Md <sup>101</sup>	No <sup>102</sup>	Lr <sup>103</sup>									
-	5f <sup>2</sup>	5f <sup>3</sup>	5f <sup>4</sup>	5f <sup>6</sup>	5f <sup>7</sup>	5f <sup>7</sup>	5f <sup>7</sup>	5f <sup>7</sup>														
6d <sup>2</sup>	6d	6d	6d	6d																		
7s <sup>2</sup>	7s <sup>2</sup>	7s <sup>2</sup>	7s <sup>2</sup>																			

## 強い永久磁石の研究開発は我が国の伝統



世界最強永久磁石  
Nd2Fe14B

KS鋼 (1916):  
Co・W・Cr・Cを含むFeの合金。

東北帝国大学  
本多光太郎

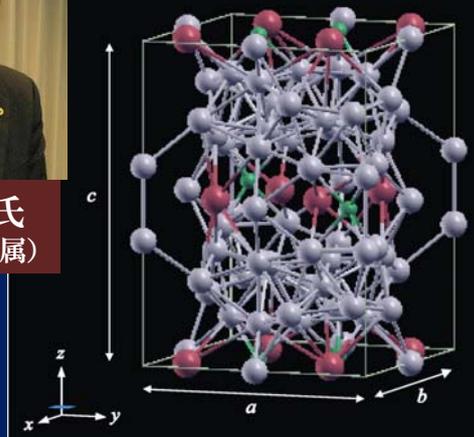


MK鋼 (1931):

東京帝国大学  
三島徳七



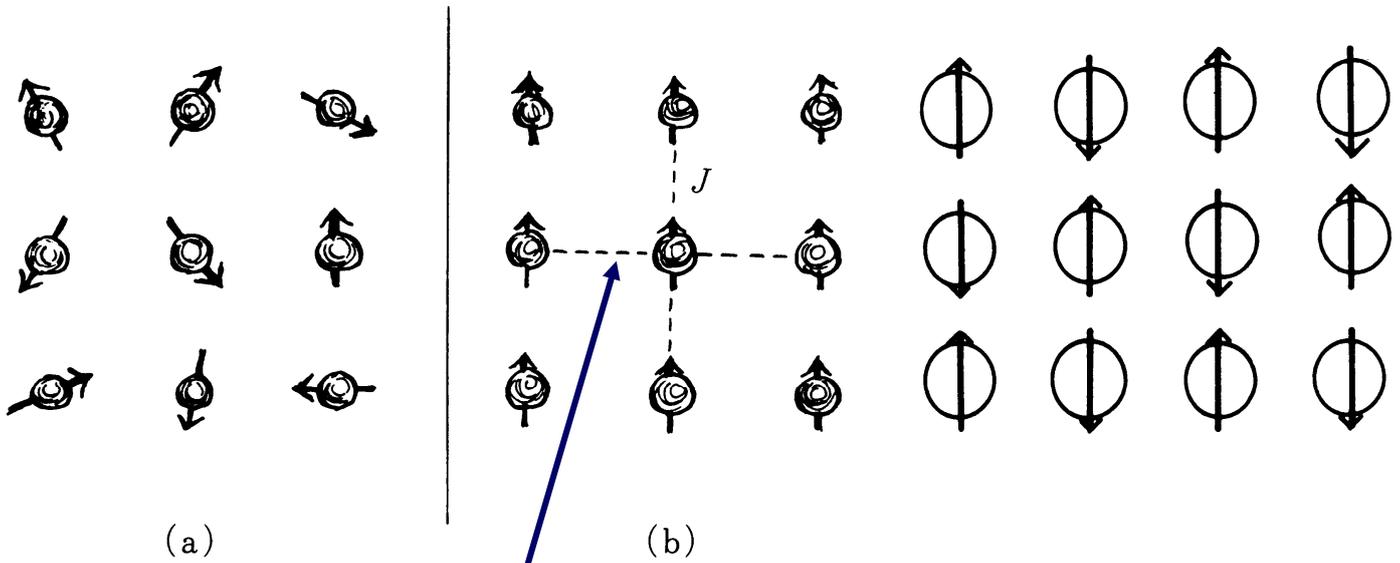
佐川真人氏  
(住友特殊金属)



常磁性体

強磁性体

反強磁性体



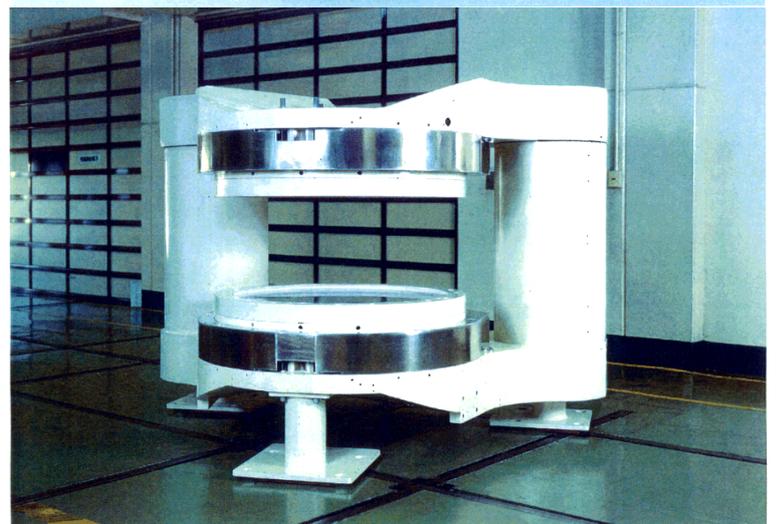
量子力学的交換相互作用

磁気共鳴画像診断装置

Magnetic Resonance Imaging

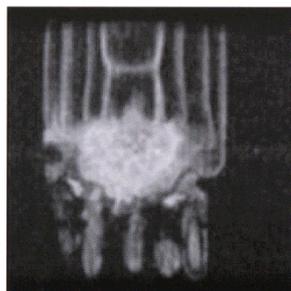


Nd-Fe-B系永久磁石を用いたMRI用磁石



Compact MR Microscope

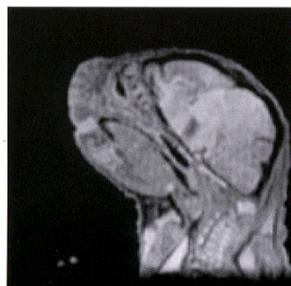
# MRmicro



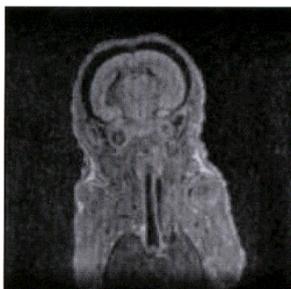
Welsh onion (60 $\mu$ m)<sup>3</sup>



Asparagus (200 $\mu$ m)<sup>3</sup>



Mouse embryo *in vitro* (100 $\mu$ m)<sup>3</sup>



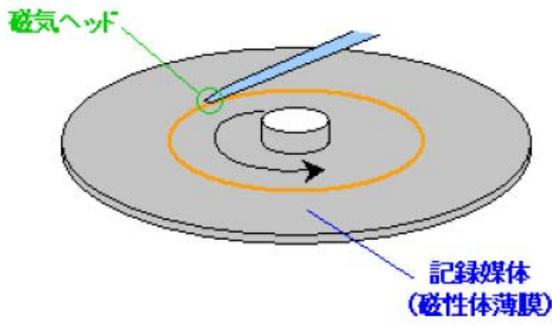
Mouse embryo *in vitro* (150 $\mu$ m)<sup>3</sup>



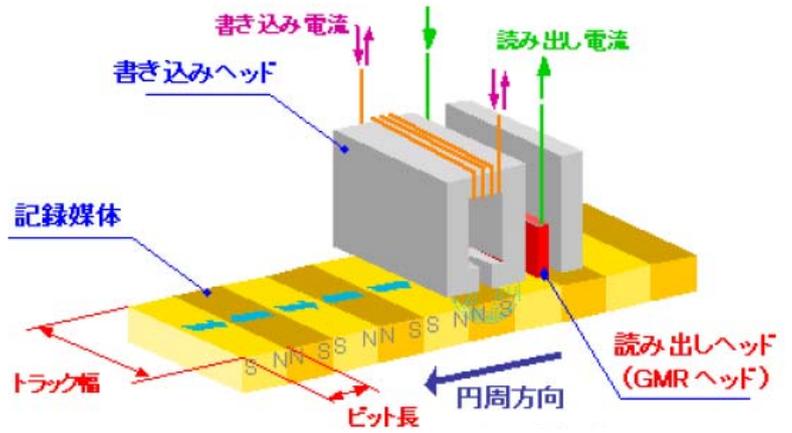
スピントロニクスの基盤技術と

次世代デバイスについて

# Application of Magneto-resistive effect



Structure of HardDisc

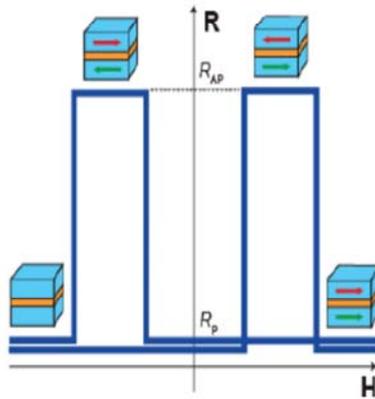


Magneto-resistive device structure

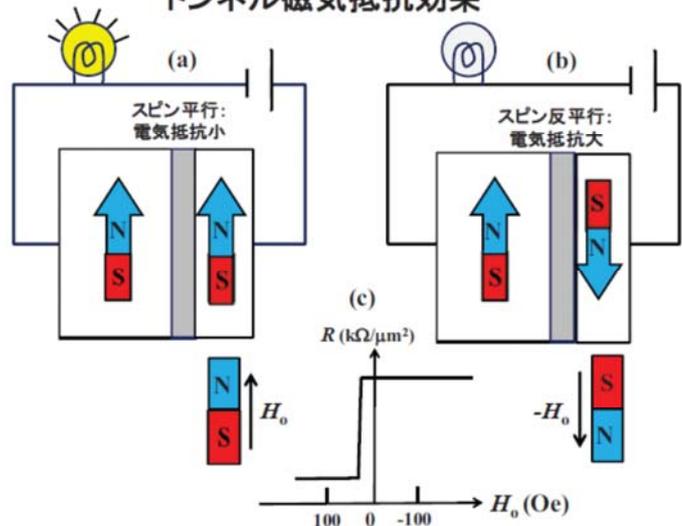
(a) 強磁性トンネル接合 (MJT)



(b) トンネル磁気抵抗効果 (TMR効果)



トンネル磁気抵抗効果



# 「巨大磁気抵抗効果の発見」 に2007年ノーベル物理学賞

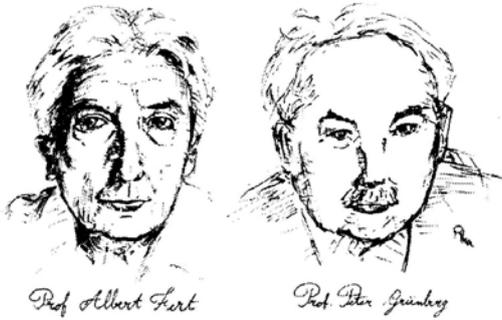


図1 アルベール・フェール先生とペーター・グ  
ルンベルグ先生。

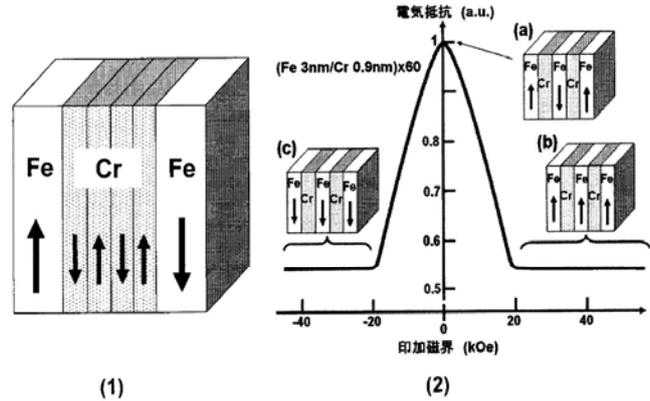


図2 (1) 強磁性層間の磁氣的結合の模式図。層状反強磁性体（1原子層ごとに磁化の向きが反転する物質）であるCrを偶数原子層挟めば2つのFe層の磁化は反平行に配置するのではないだろうか？ (2) 4.2 KにおけるFe/Cr人工格子の電気抵抗の外部磁界依存性。① (a) 外部磁界が無いときは、強磁性層間の反強磁性的な結合により隣り合う磁化が反平行になっている。 (b, c) 外部から磁界を加えると磁化が磁界の向きに平行に揃い抵抗値が下がる。

## スピントロニクスの基盤デバイス

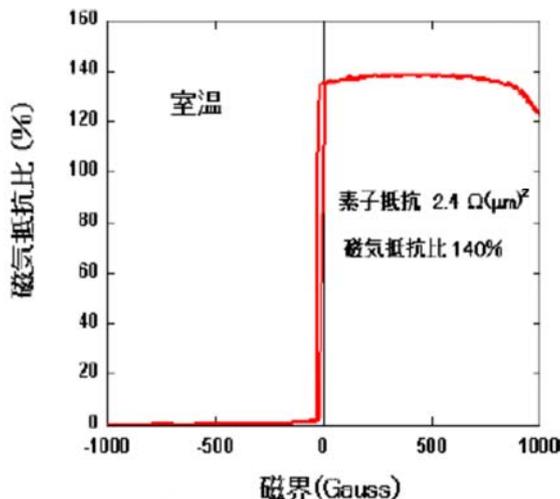


図8: 新型TMR素子の特性  
素子抵抗: 1平方ミクロン当たり  
 $2.4 \Omega$   
磁気抵抗比: 140% (室温)

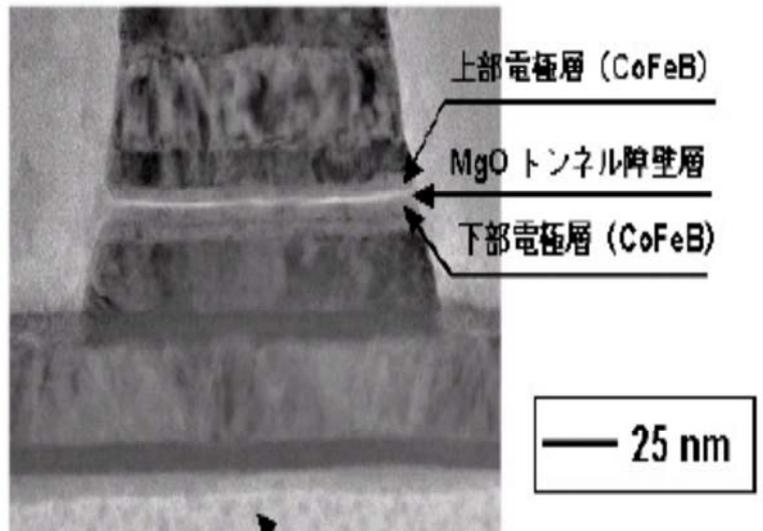
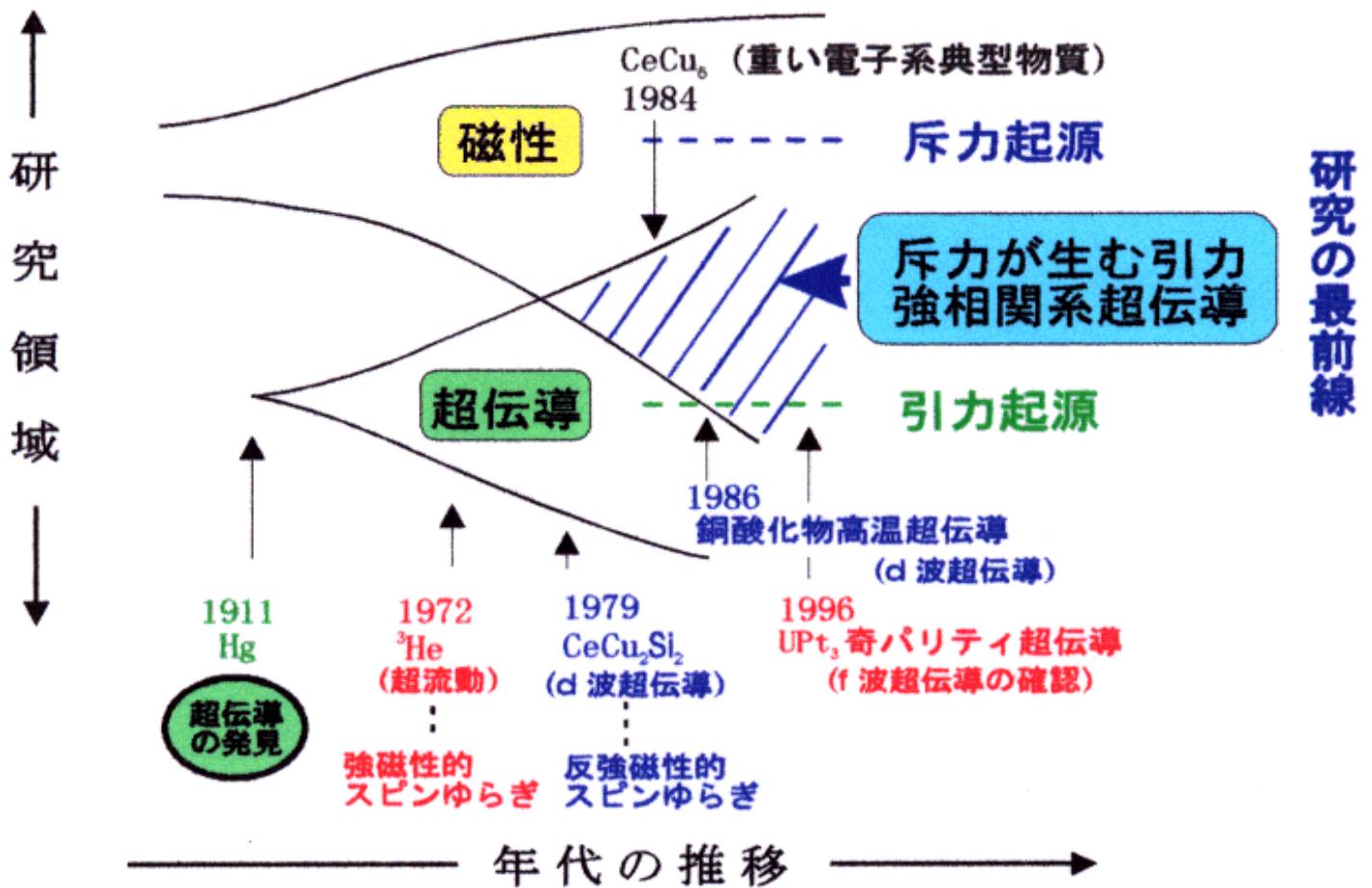


図9: 作製したTMR素子の断面を  
示す電子顕微鏡写真

図1 <磁性と超伝導の研究領域の推移>



## 生活の中の永久磁石

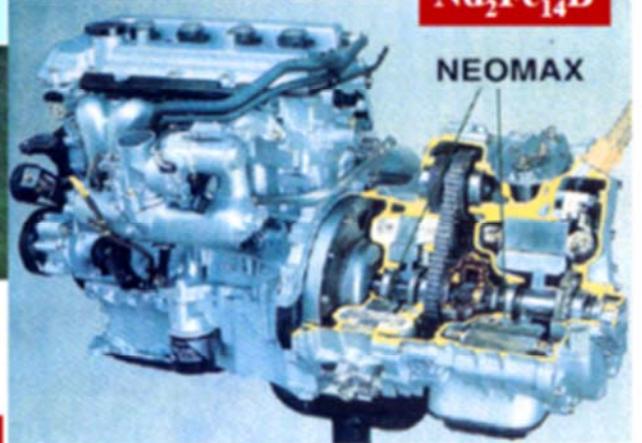
MRI



電気自動車



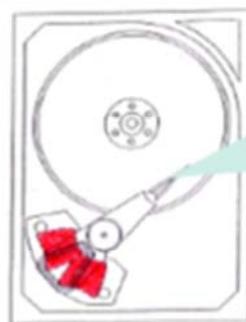
$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$



磁気記憶媒体

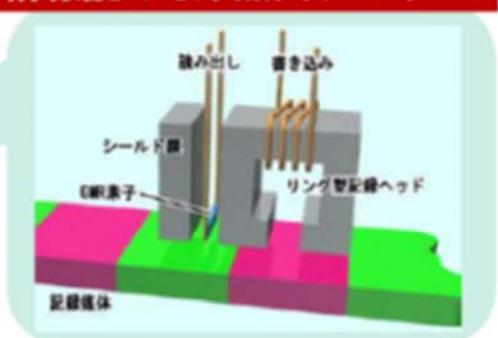


ハードディスク



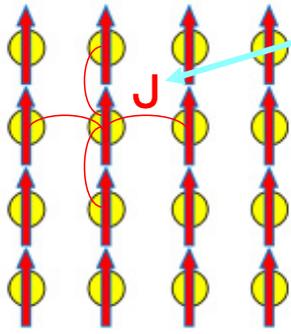
Rotary Voice Coil Motor

情報読み取り磁気デバイス



# 電子スピンの秩序（強磁性体と反強磁性体）

## 強磁性体

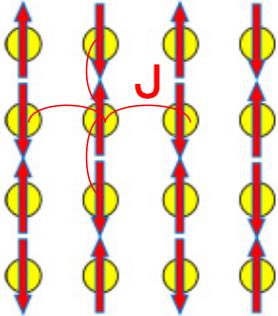


量子力学的  
交換相互作用(J)

$$-J_{12} \mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{S}_2$$

- (i)  $J_{12} > 0$  の物質  
 $\mathbf{S}_1$ と $\mathbf{S}_2$ は同方向を向く  
→ 強磁性

## 反強磁性体



- (ii)  $J_{12} < 0$  の物質  
 $\mathbf{S}_1$ と $\mathbf{S}_2$ は逆方向を向く  
→ 反強磁性

## 世界最強永久磁石

ネオマックス  
 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$   
(日立金属)

