

■本資料のご利用にあたって(詳細は「利用条件」をご覧ください)

本資料には、著作権の制限に応じて次のようなマークを付しています。
本資料をご利用する際には、その定めるところに従ってください。

***** : 著作権が第三者に帰属する著作物であり、利用にあたっては、この第三者より直接承諾を得る必要があります。

CC : 著作権が第三者に帰属する第三者の著作物であるが、クリエイティブ・コモンズのライセンスのもとで利用できます。

 : パブリックドメインであり、著作権の制限なく利用できます。

なし : 上記のマークが付されていない場合は、著作権が東京大学及び東京大学の教員等に帰属します。
無償で、非営利的かつ教育的な目的に限って、次の形で利用することを許諾します。

- I 複製及び複製物の頒布、譲渡、貸与
- II 上映
- III インターネット配信等の公衆送信
- IV 翻訳、編集、その他の変更
- V 本資料をもとに作成された二次的著作物についての I からIV

ご利用にあたっては、次のどちらかのクレジットを明記してください。

東京大学 UTokyo OCW 学術俯瞰講義
Copyright 2015, 家泰弘

The University of Tokyo / UTokyo OCW The Global Focus on Knowledge Lecture Series
Copyright 2015, Yasuhiro Iye

2015年度春期 学術俯瞰講義
「宇宙・物質・社会」

2015年5月19日(火)
第2限(10:25-12:10)
@21 KOMCEE

第6回 物性科学はじめての三歩

物性研究所
家 泰弘



俯瞰講義の俯瞰

序論・物質の科学史

宇宙の成立ちと物質の起源

第1回(家)

第2-3回(村山)

宇宙

宇宙
素粒子
太陽系

第4回(浅井)

第5回(永原)

物質の応用

物質

原子・分子

物質の理解

結晶 物性

第6回(家)

社会

ソフトマター

第7回(田中)

放射線

超伝導

第8回(飯本)

レアメタル

人工光合成

発光ダイオード

半導体人工物質

計算科学

第9回(石坂)

第13回(岡部)

第12回(堂免)

第11回(川崎)

第10回(福島)

前回までのおさらい

ビッグバン
(宇宙開闢)

水素とヘリウム
の生成

重力による
星の形成

星の内部の核融合
による元素生成

宇宙の膨張と冷却

超新星爆発による
物質散布

138億年後

現在

生物進化
人類の誕生

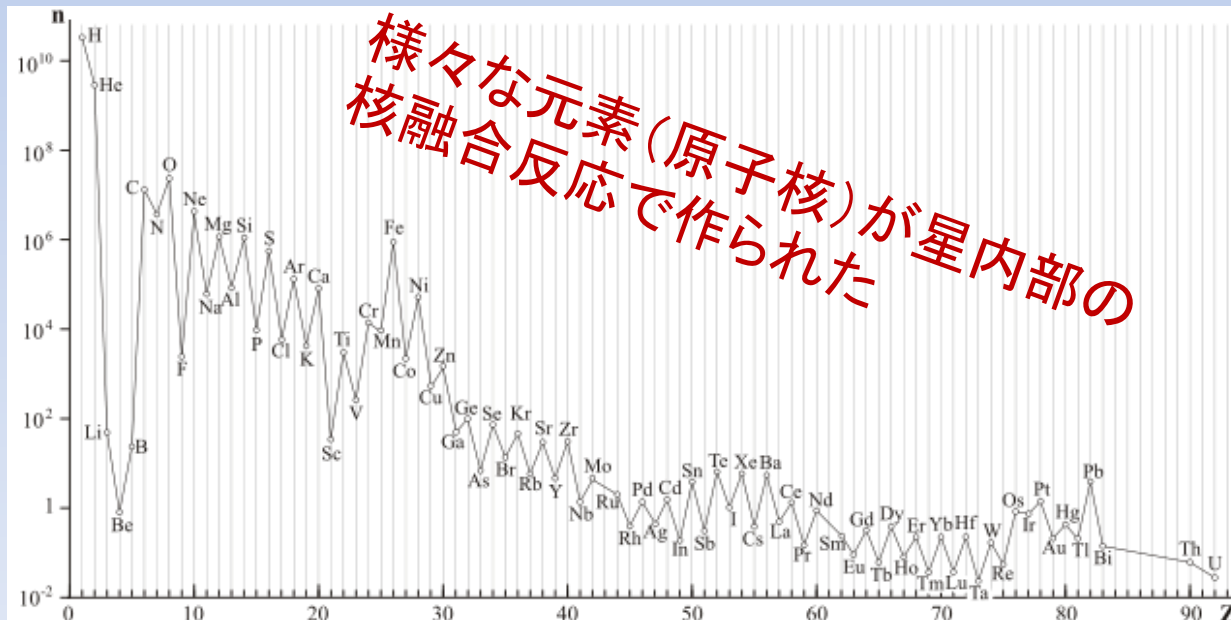
原始生命
の誕生

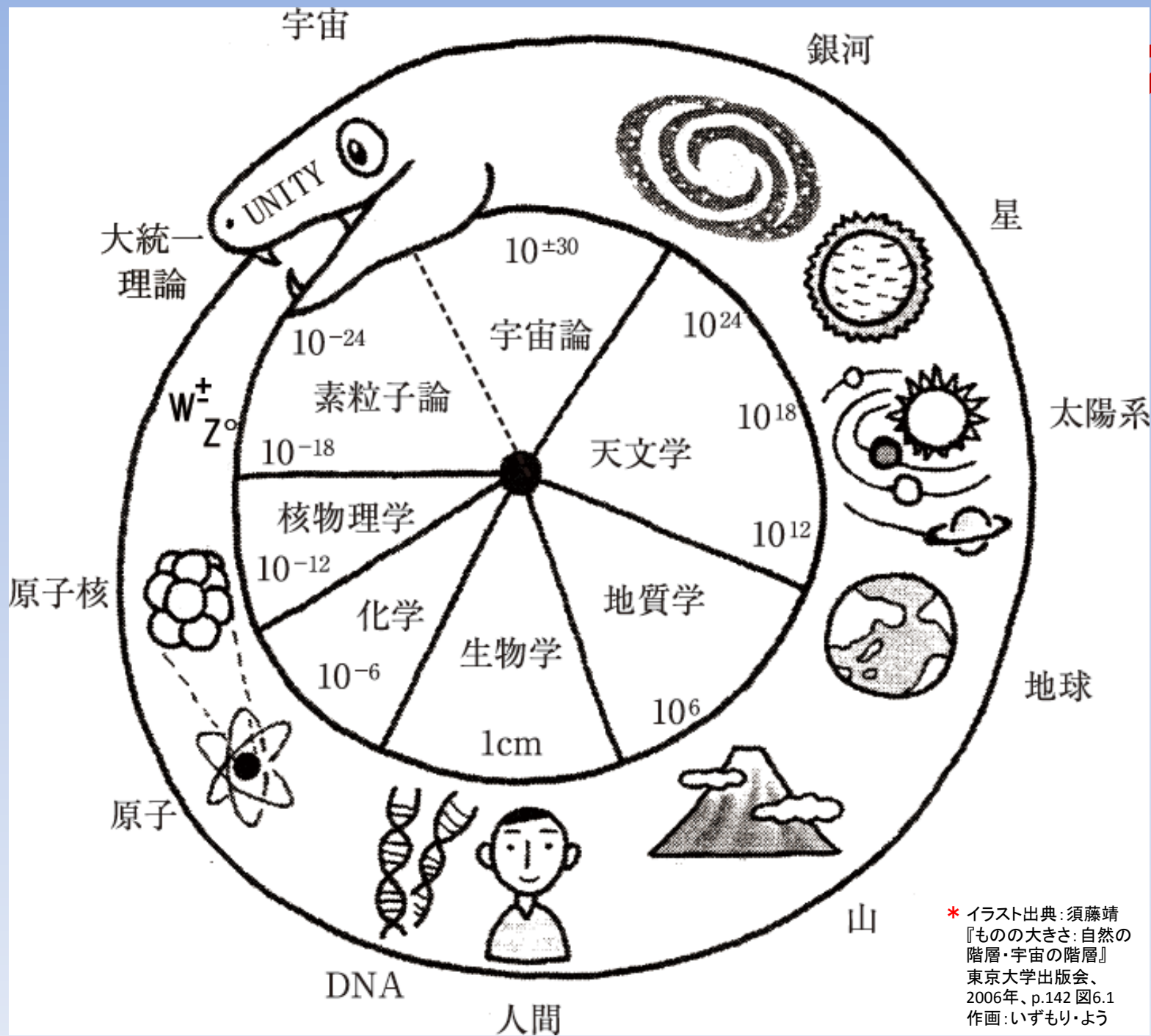
habitable zone
の形成

惑星系の生成

様々な元素(原子核)が星内部の
核融合反応で作られた

100種類ほどの元素
から構成される多様
な物質の世界





* イラスト出典: 須藤靖
『ものの大きさ: 自然の
階層・宇宙の階層』
東京大学出版会、
2006年、p.142 図6.1
作画: いずもり・よう

現代社会と物性科学

現代社会と物性科学

Photo by Gona.eu, from Wikimedia Commons
(2013/12/12) http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Macintosh_Quadra_840AV_logic_board_820-0382-10_%28661-1700%29.jpg

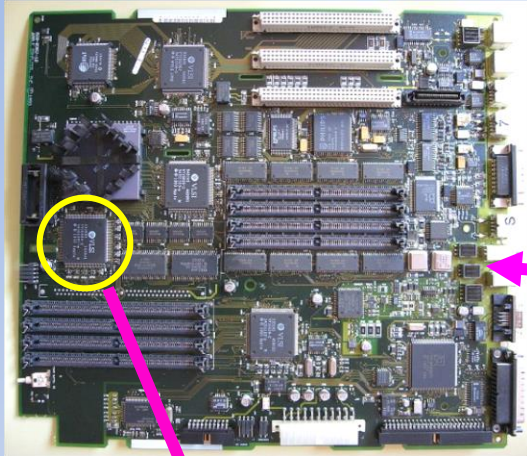


Photo by Evan-Amos, from Wikimedia Commons (2013/12/12)
<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Laptop-hard-drive-exposed.jpg>

コンピューター

ハードディスク(磁気メモリ)

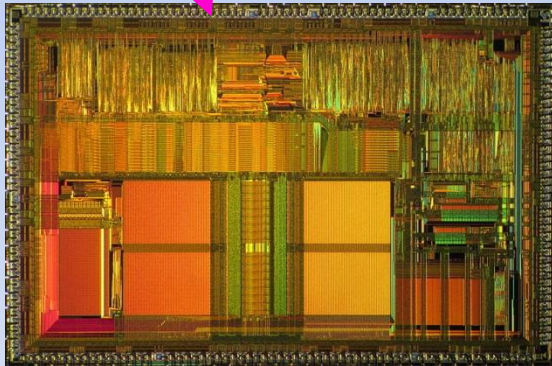


Photo by Pauli Rautakorpi,
from Wikimedia Commons
(2013/12/12)
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Intel_80486SX2_die.JPG

CPU(中央演算装置)

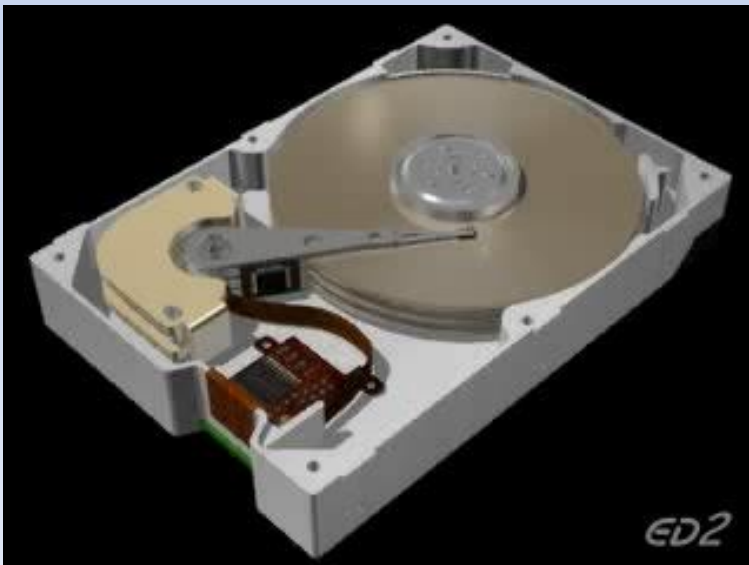
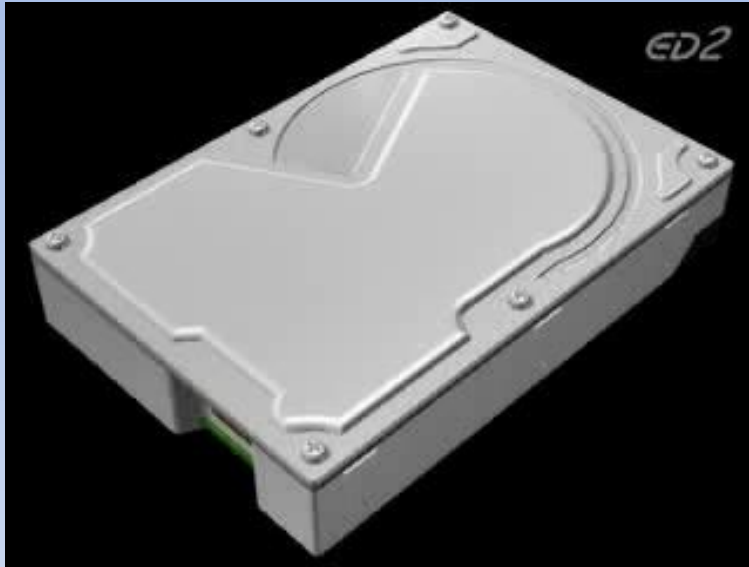
磁性体の磁区構造

量子力学にもとづく
物性物理学

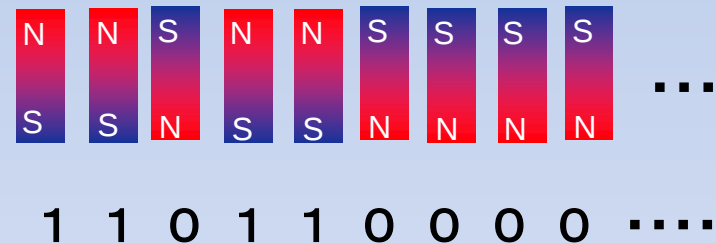
半導体の中の電子のふるまい

記憶装置(磁性体)

磁気ハードディスク



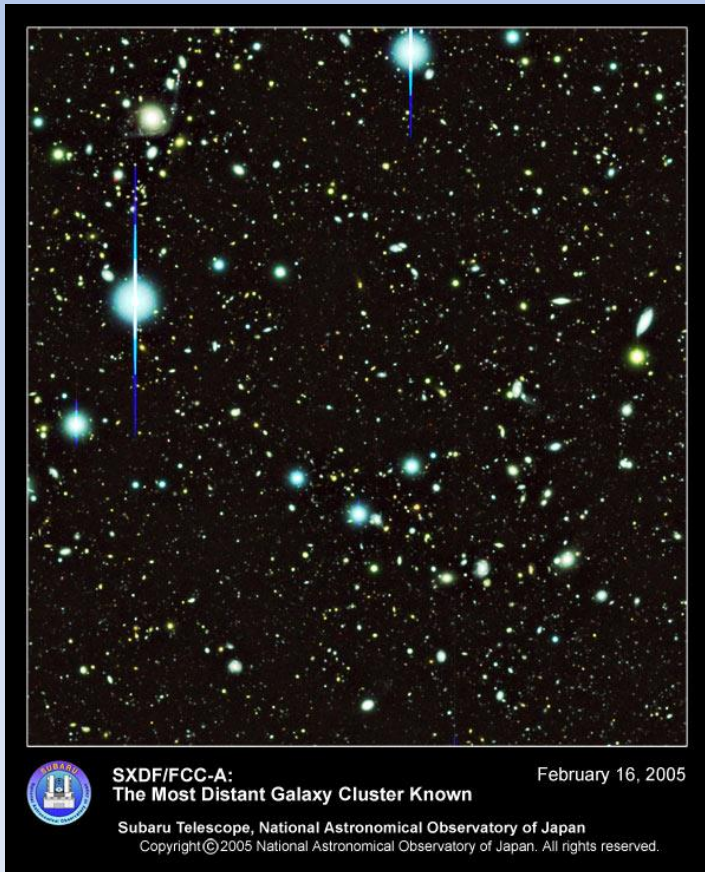
デジタル情報を、磁性体の
磁化の向きとして記録



* 出典:「情報機器と情報社会のしくみ素材集」<http://www.sugilab.net/jk/johokiki/index.html>
[上]1504-1-A「ハードディスクドライブのしくみ:ハードディスクドライブの動き」
[下]1504-2-A「ハードディスクドライブのしくみ:書き込みのしくみ」

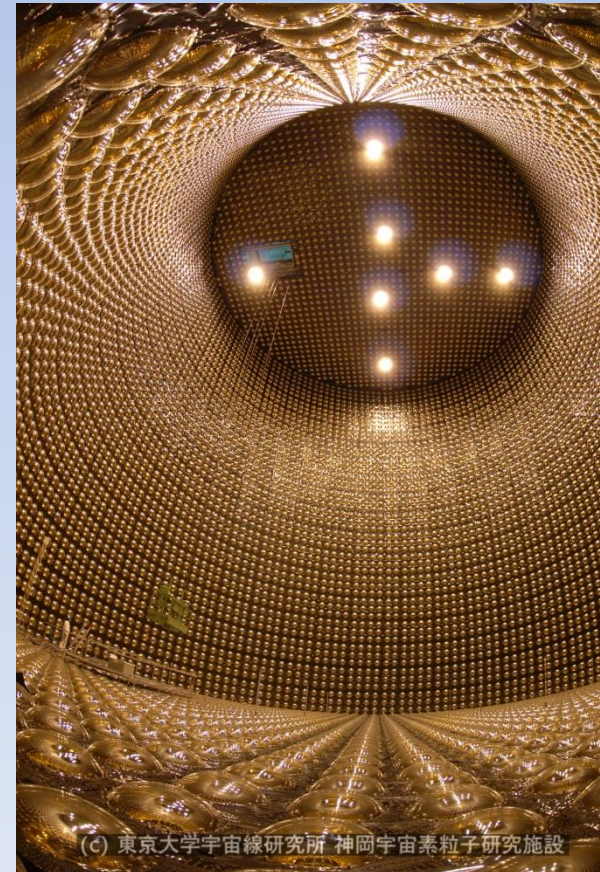
素粒子・宇宙研究にも

すばる望遠鏡
CCDカメラ



* 提供: 国立天文台

スーパーカミオカンデ
光電子増倍管



* クレジット: 東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設

先端医療にも

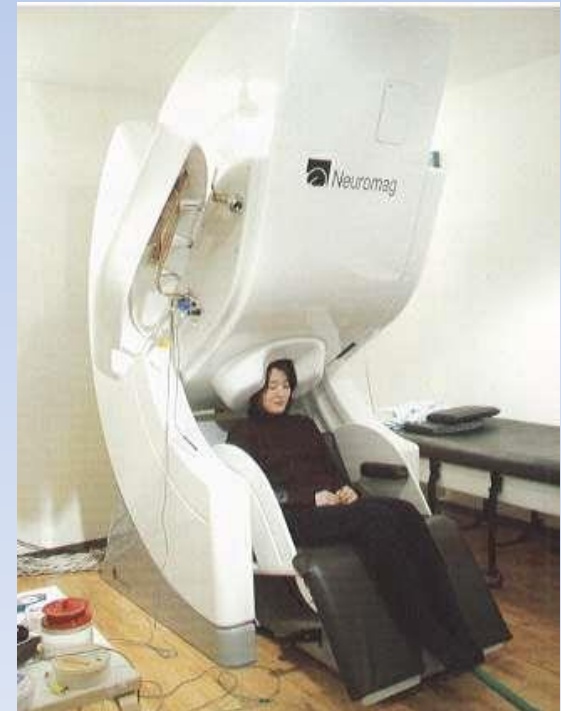
MRI（磁気共鳴画像診断装置）



Image by KasugaHuang, from Wikimedia Commons [CC BY-SA 3.0](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Modern_3T_MRI.JPG)
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Modern_3T_MRI.JPG

MEG（脳磁図）装置

SQUID（超伝導干渉素子）を用いた微弱磁気信号の検出



* 出典：橋詰顕「脳磁図（MEG）」『広大フォーラム』第33期1号
<http://home.hiroshima-u.ac.jp/~forum/33-1/forum8.html>

身近なところにも

- 発光ダイオード
- 液晶(ディスプレイ)
- 光ファイバー
- 高強度繊維
- 高分子ゲル
- 形状記憶合金
- 燃料電池
- 光触媒
- 太陽光発電
- ■■■■■



* 提供: 小豆畑敬氏(弘前大学)

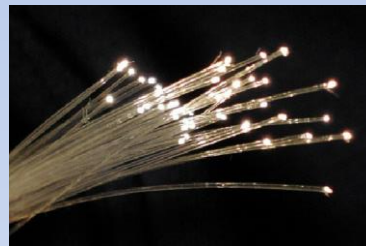
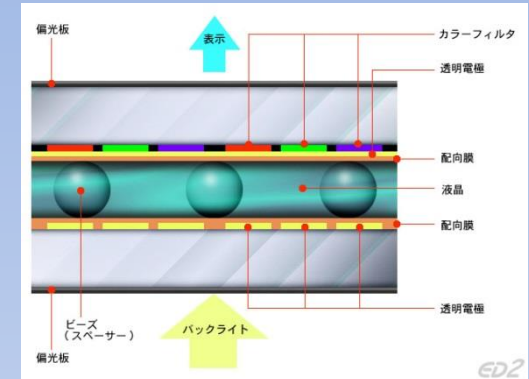
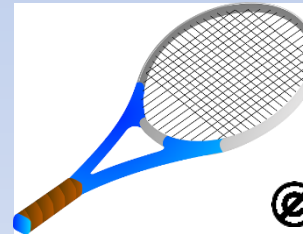
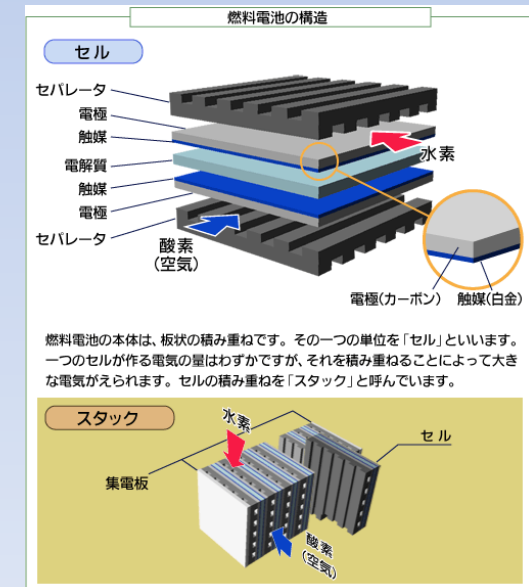


Photo by BigRiz, from Wikimedia Commons (2014/01/07)
CC BY-SA 3.0
<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fiberoptic.jpg>



* 出典:「情報機器と情報社会のしくみ素材集」
<http://www.sugilab.net/jk/joho-kiki/index.html>
1603-2-A「液晶パネルの断面構造」



* 出典: 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)

物性科学とは何をする学問か？

- ダイヤモンドはなぜ硬い？
- ルビーが赤いのはなぜ？
- 金・銀・銅の色はどこから？
- 鉄はなぜ磁石になる？
- 銅はなぜ電気を良く通す？
- 超伝導はどうして起こる？
- ■■■■■■

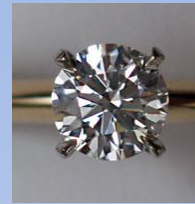


Photo by CrucifiedChrist, from Wikimedia Commons
CC BY 1.0
<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diamond.jpg>



Photo by Michelle Jo, from Wikimedia Commons
CC BY 3.0
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ruby_gem.JPG

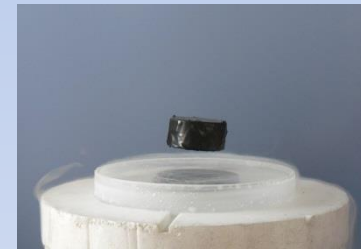
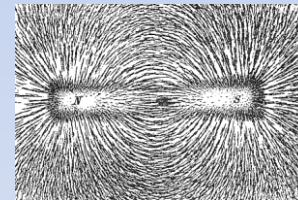
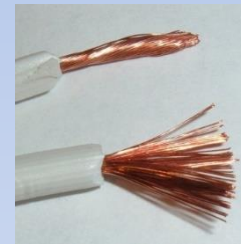
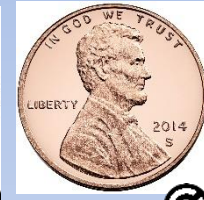
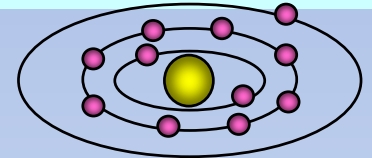


Photo by Mai-Linh Doan, from Wikimedia Commons
CC BY-SA 3.0
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Meissner_effect_p1390048.jpg

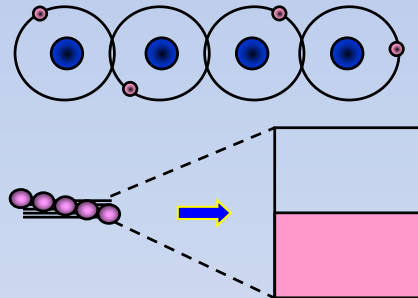
物質の性質を，それを構成する原子の性質から理解する。
それらの知識をもとに，新たな性質を持つ物質を開発する。

物性科学 はじめの三歩

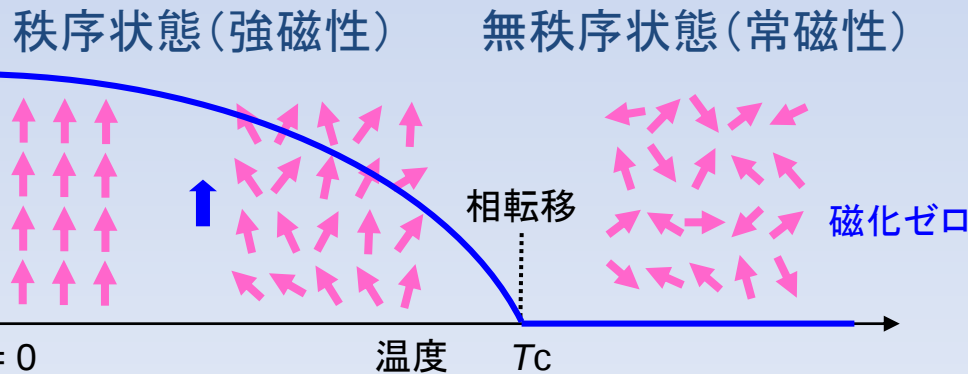
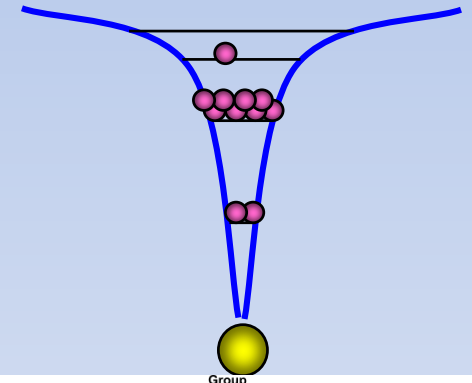
< 第一歩 >
原子の構造と周期律



< 第二歩 >
原子から固体へ

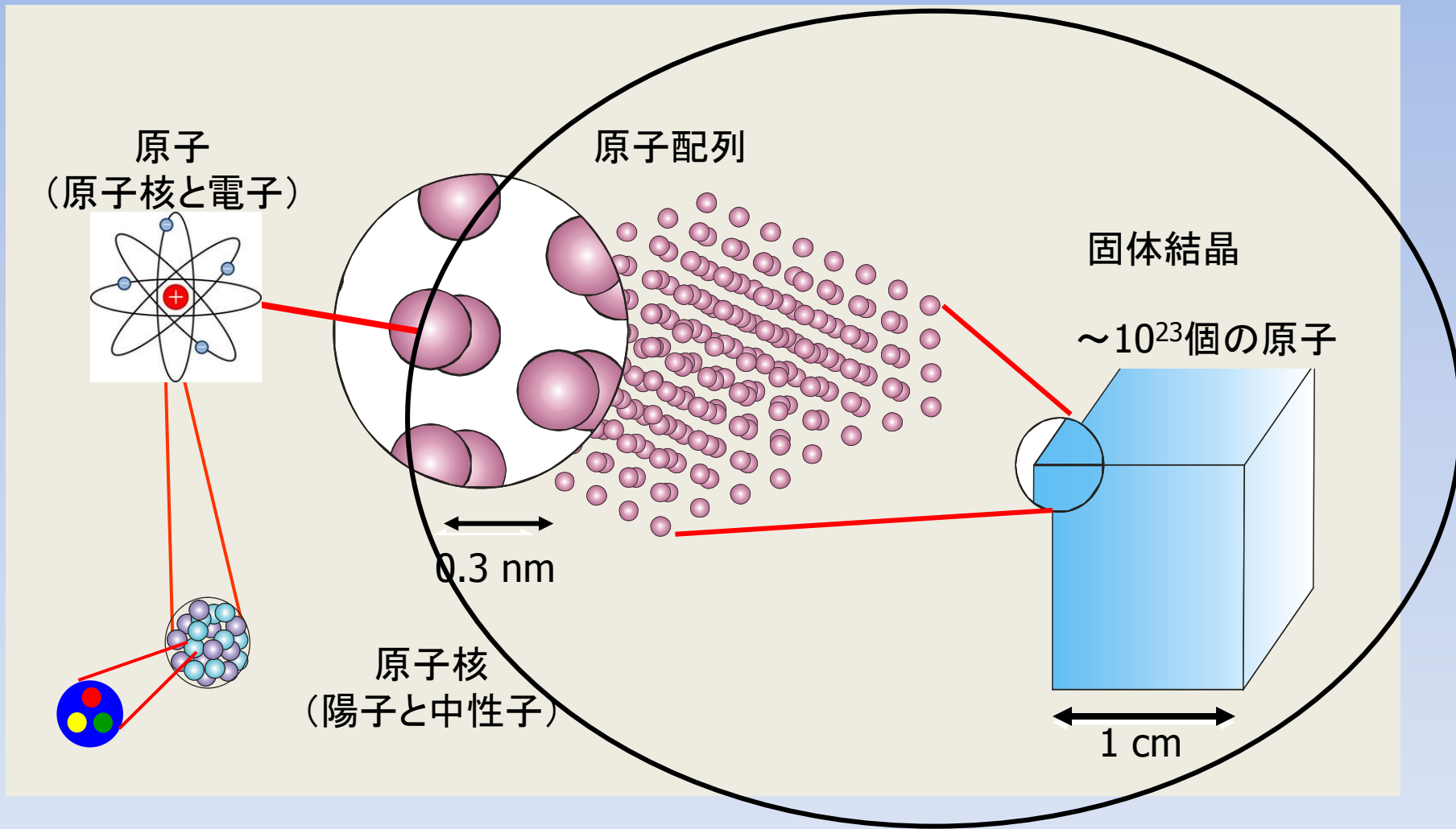


< 第三歩 >
協力現象と相転移



		Group																III		IV		V		VI		VII		VIII																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
Period	1	I																		II																		2		He																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
	2	3		H																		4		Be																		5		B		6		C		7		N		8		O		9		F		10		Ne																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
	3	11		Na																		12		Mg																		13		Al		14		Si		15		P		16		S		17		Cl		18		Ar																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
	4	19		K																		20		Ca		21		Sc		22		Ti		23		V		24		Cr		25		Mn		26		Fe		27		Co		28		Ni		29		Cu		30		Zn		31		Ga		32		Ge		33		As		34		Se		35		Br		36		Kr																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
	5	37		Rb																		38		Sr		39		Y		40		Zr		41		Nb		42		Mo		43		Tc		44		Ru		45		Rh		46		Pd		47		Ag		48		Cd		49		In		50		Sn		51		Sb		52		Te		53		I		54		Xe																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
	6	55		Cs																		56		Ba		*		72		Hf		73		Ta		74		W		75		Re		76		Os		77		Ir		78		Pt		79		Au		80		Hg		81		Tl		82		Pb		83		Bi		84		Po		85		At		86		Rn																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	7	87		Fr																		88		Ra		**		104		Rf		105		Db		106		Sg		107		Bh		108		Hs		109		Mt		110		Ds		111		Rg		112		Cn		113		Uut		114		Fl		115		Uup		116		Lv		117		Uus		118		Uuo																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
8	119		Uuh																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																</	

自然界の階層構造



物性科学はこの領域を扱う

物性物理の登場人物たち

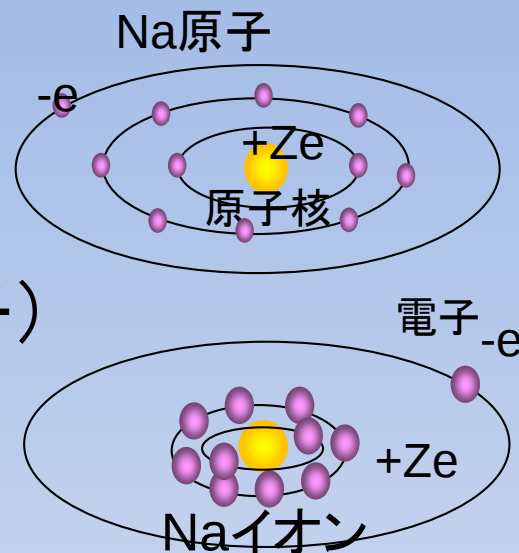
登場人物（「素」粒子）

電子

原子核 $\Rightarrow$ イオン（原子核＋内殻電子）

光子（電磁波）

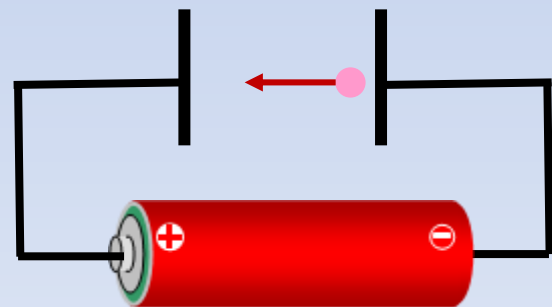
「素」粒子の間に働く力： 電磁相互作用



典型的なエネルギースケール

“電子ボルト (eV)”

電子を1ボルトの電位差で加速した時の
運動エネルギー



可視光のエネルギーはだいたい 1eV

* 出典: 便利な素材のページ
<http://blog-imgs-11.fc2.com/o/e/k/oekaki777/bennri1.htm>

身近な例

乾電池は1.5V

電子のやりとりによる起電力



* 出典: 便利な素材のページ
<http://blog-imgs-11.fc2.com/o/e/k/oekaki777/bennri1.htm>

レーザーポインター

赤色光 $\sim 1.5\text{eV}$, 緑色光 $\sim 2.5\text{eV}$



Photo by PiccoloNamek, from Wikimedia Commons [CC BY-SA 3.0](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:BG-LED.jpg)
<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:BG-LED.jpg>

そもそも可視光はなぜ1～3eV程度か
ロドプシン: 網膜の受光タンパク質
光のエネルギーを吸収して変化

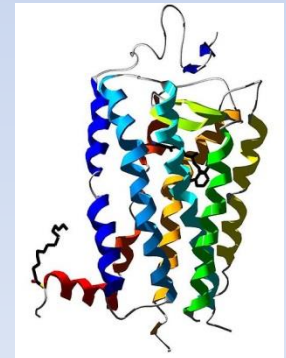


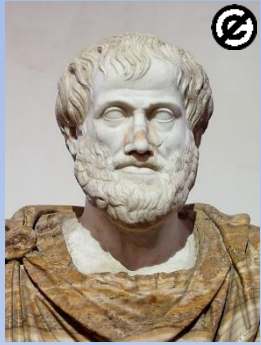
Image of 1L9H (Okada et.al.(2002) Functional role of internal water molecules in rhodopsin revealed by X-ray crystallography, PNAS, vol.99:5982-5987) created by S. Jähnichen with spdbv/POV Ray.

*

< 第一歩 >

原子の構造と周期律

元素/原子論の系譜



アリストテレス
(エンペドクレス)の
四大元素論



ジャービル・イブ
ン・ハイヤーン

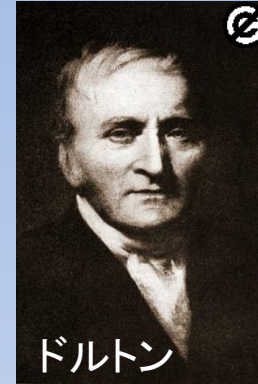


パラケルスス

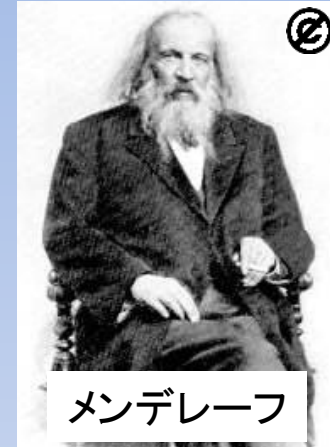


ラヴォアジェ

質量保存の法則



ドルトン

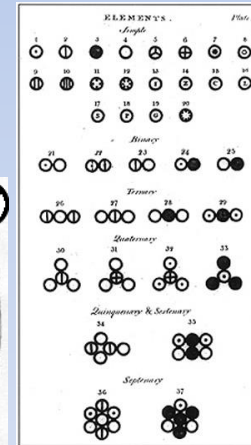


メンデレーフ

錬金術



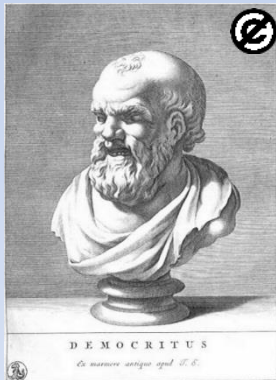
近代化学



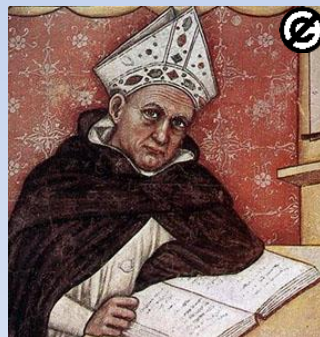
②

By Armtuk, from Wikimedia
Commons [CC BY-SA 3.0](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Periodic_Table_Armtuk3.svg)
[http://commons.wikimedia.org/wiki/
/File:Periodic_Table_Armtuk3.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Periodic_Table_Armtuk3.svg)

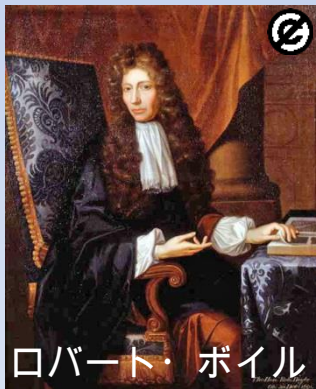
元素周期律



デモクリトスの
素朴原子論



アルベルトウス
・マグヌス



ロバート・ボイル



アヴォガドロ

原子量の概念

アヴォガドロの法則

元素周期表

By Armtuk, from Wikimedia
Commons [CC BY-SA 3.0](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Periodic_Table_Armtuk3.svg)
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Periodic_Table_Armtuk3.svg

		Group																	
		I	II											III	IV	V	VI	VII	VIII
Period	1	1 H																	2 He
	2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
	3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
	4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
	5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
	6	55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
	7	87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo
	8	119 Uun																	
* Lanthanides			57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu		
** Actinides			89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr		

中国語版周期表

Image by 林勇智, from Wikimedia Commons **CC BY-SA 2.5**
<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Periodic-table.png>

周期	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
族	I A	II A											III A	IV A	V A	VI A	VII A	0
1	1 H 氫																	2 He 氦
2	3 Li 鋰	4 Be 鈹											5 B 硼	6 C 碳	7 N 氮	8 O 氧	9 F 氟	10 Ne 氖
3	11 Na 鈉	12 Mg 鎂											13 Al 鋁	14 Si 矽	15 P 磷	16 S 硫	17 Cl 氯	18 Ar 氬
4	19 K 鉀	20 Ca 鈣	21 Sc 釷	22 Ti 鈦	23 V 釩	24 Cr 鉻	25 Mn 錳	26 Fe 鐵	27 Co 鈷	28 Ni 鎳	29 Cu 銅	30 Zn 鋅	31 Ga 鎵	32 Ge 鍮	33 As 砷	34 Se 硒	35 Br 溴	36 Kr 氪
5	37 Rb 銣	38 Sr 銻	39 Y 釔	40 Zr 鋯	41 Nb 鈮	42 Mo 鉬	43 Tc 錳	44 Ru 鈷	45 Rh 銑	46 Pd 鈀	47 Ag 銀	48 Cd 鎘	49 In 銦	50 Sn 錫	51 Sb 銻	52 Te 碲	53 I 碘	54 Xe 氙
6	55 Cs 銫	56 Ba 鋇	57-71 釷系	72 Hf 鈦	73 Ta 鉭	74 W 鎢	75 Re 銑	76 Os 銱	77 Ir 銱	78 Pt 鉑	79 Au 金	80 Hg 汞	81 Tl 鉍	82 Pb 鉛	83 Bi 鉍	84 Po 鉷	85 At 砹	86 Rn 氡
7	87 Fr 釷	88 Ra 鐳	89-103 釷系	104 Rf 鑪	105 Db 鈹	106 Sg 鑪	107 Bh 鉈	108 Hs 鑪	109 Mt 鎇	110 Ds 鎇	111 Rg 鎇	112 Uub	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo
	釷系元素		57 La 釷*	58 Ce 鈰	59 Pr 鐑	60 Nd 釷	61 Pm 鉕	62 Sm 釷	63 Eu 鎔	64 Gd 釷	65 Tb 釷	66 Dy 鐒	67 Ho 釷	68 Er 鉕	69 Tm 釷	70 Yb 鐒	71 Lu 鑪	
	釷系元素		89 Ac 釷**	90 Th 釷	91 Pa 鐳	92 U 鈾	93 Np 釷	94 Pu 鈾	95 Am 錒	96 Cm 錒	97 Bk 釷	98 Cf 釷	99 Es 鐳	100 Fm 鐳	101 Md 釷	102 No 鐳	103 Lr 鐳	
					鹼金屬		鹼土金屬		釷系元素		釷系元素		過渡金屬					
					主族金屬		類金屬		非金屬		鹵素		惰性氣體					

元素周期表

By Armtuk, from Wikimedia
 Commons [CC BY-SA 3.0](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Periodic_Table_Armtuk3.svg)
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Periodic_Table_Armtuk3.svg

		Group																							
		I	II											III	IV	V	VI	VII	VIII						
Period	1	1 H																							2 He
	2	3 Li	4 Be																		10 Ne				
	3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl		18 Ar					
	4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr						
	5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe						
	6	55 Cs	56 Ba	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	86 Rn						
	7	87 Fr	88 Ra	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	118 Uuo						
	8	119 Uun																							
				* Lanthanides																					
			** Actinides																						

周期律が成り立つのはなぜか？

One-minute 量子力学

ミクロの世界のふるまいを記述する理論体系

原子・分子の構造

固体の中の電子のふるまい

光と物質の相互作用

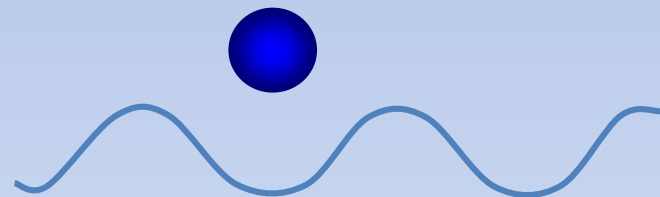
光 $\Rightarrow$ 波であり粒子である

電子 $\Rightarrow$ 粒子であり波である

粒子性：離散的，1個1個

波動性：重ね合わせ，干渉

エネルギーと運動量
をもつ実体(量子)



存在確率の波

粒子だとか**波**だとかいうのは，われわれが日常的(古典力学的)現象の類推で，量子力学的現象をイメージしようとするときにそういう言葉しか持ち合わせないことの反映

エネルギーの量子化

量子力学によれば電子は**粒子**であると同時に**波**の性質も示す

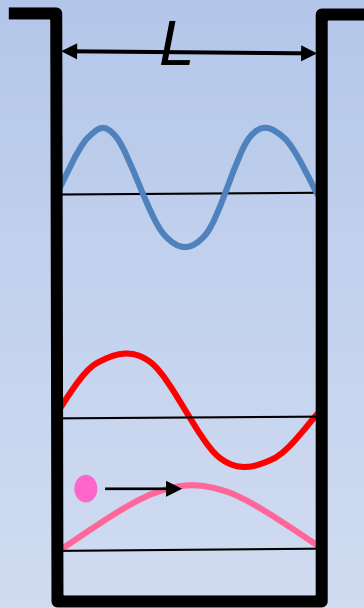
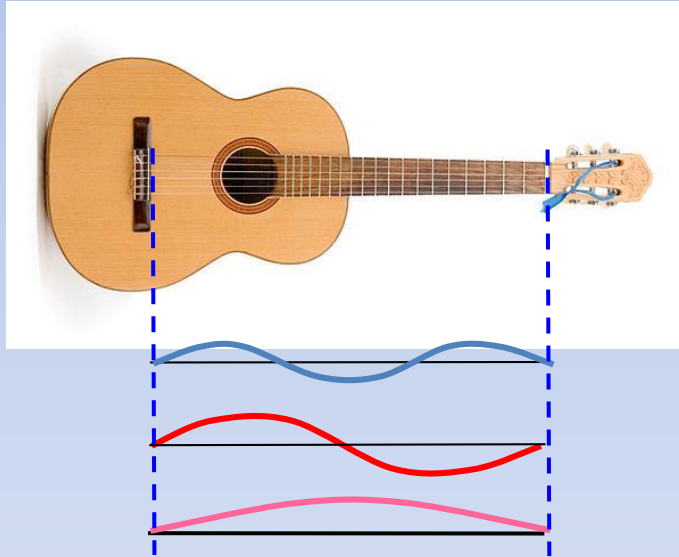


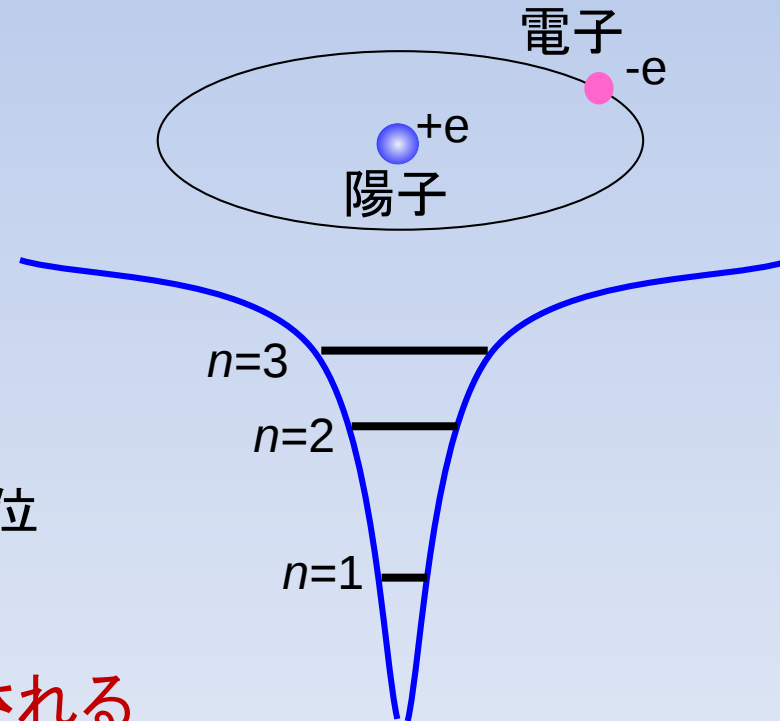
Photo by PJ, from Wikimedia Commons [CC BY-SA 3.0](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Guitar_1.jpg)
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Guitar_1.jpg



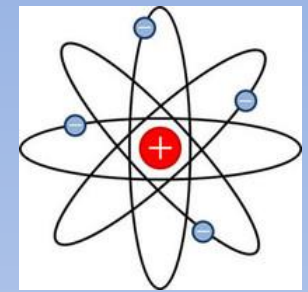
箱の中の電子 定在波 $\Rightarrow$ 離散的エネルギー準位
(電子が収まる部屋)

エネルギー準位は「量子数」 n で指定される

水素原子:
原子核(陽子)の周りを電子が回る

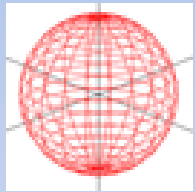


回転の自由度

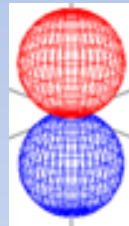
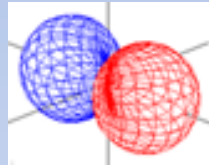
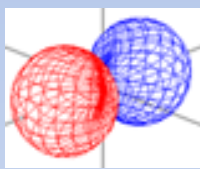


軌道運動の自由度

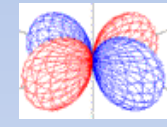
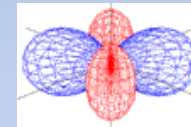
s 軌道
 $L=0$



p 軌道
 $L=1$

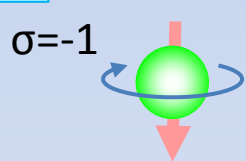
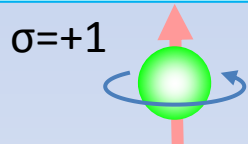


d 軌道
 $L=2$



電子の雲(確率分布)

スピンの自由度



電子の3次元空間での回転運動に関係した量子数 l, m と、スピン(自転)に関係した量子数 σ がある.

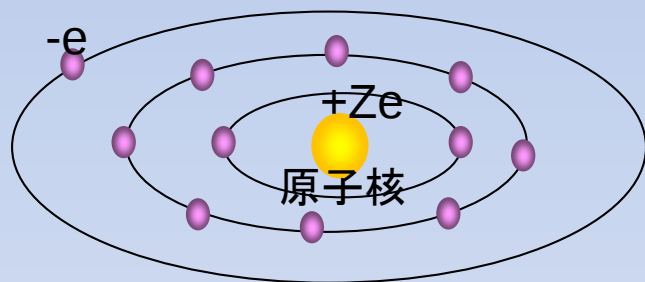
⇒ 電子のエネルギー準位は (n, l, m, σ) で指定される.

原子の電子配置

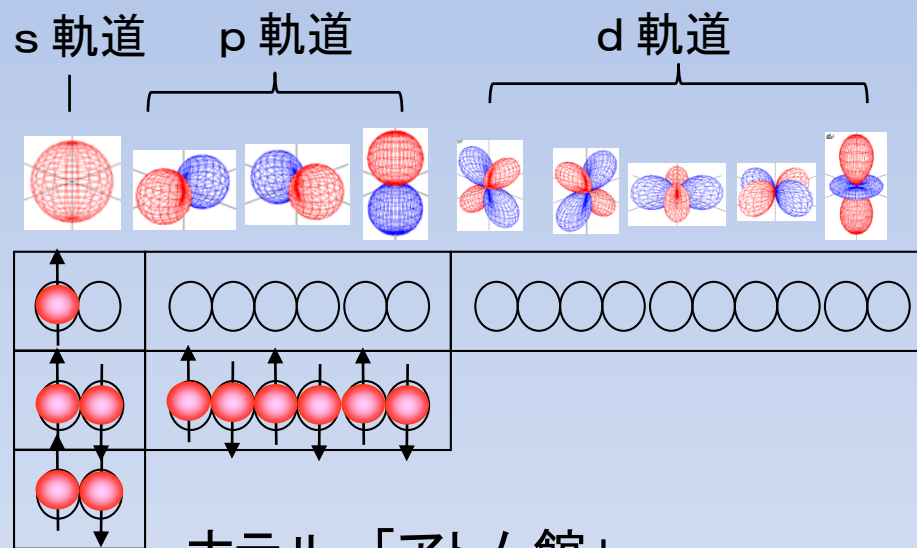
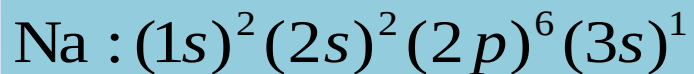
多電子原子: $+Ze$ の電荷をもつ原子核と Z 個の電子

電子は各エネルギー準位に1個ずつ収容される。

各軌道状態には, 上向きスピンと下向きスピンの計2個の電子が収容できる。



Na: $Z=11$



ホテル「アトム館」

1階の客室 1

2階の客室 1 + 3

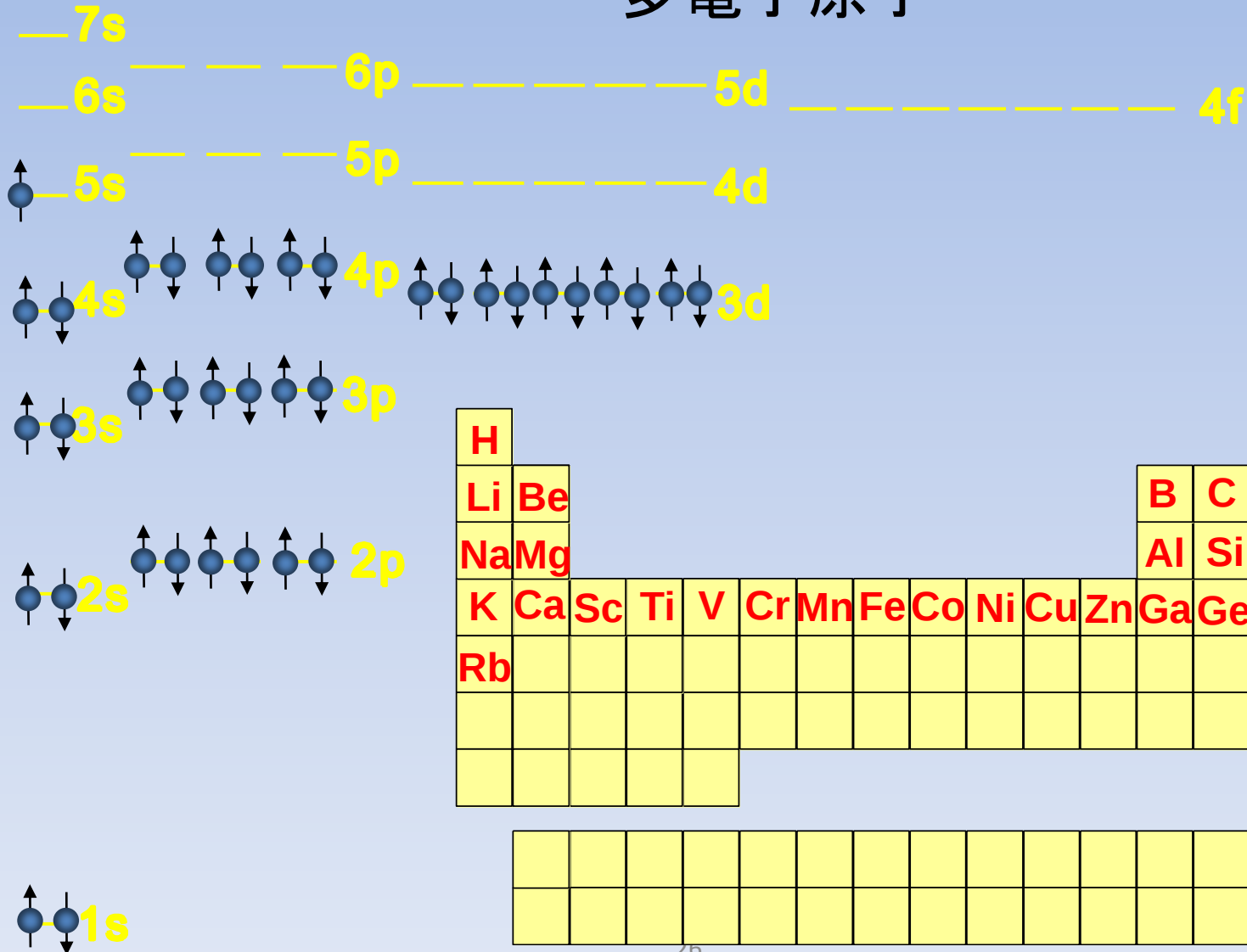
3階の客室 1 + 3 + 5

.....

(各客室はツイン)

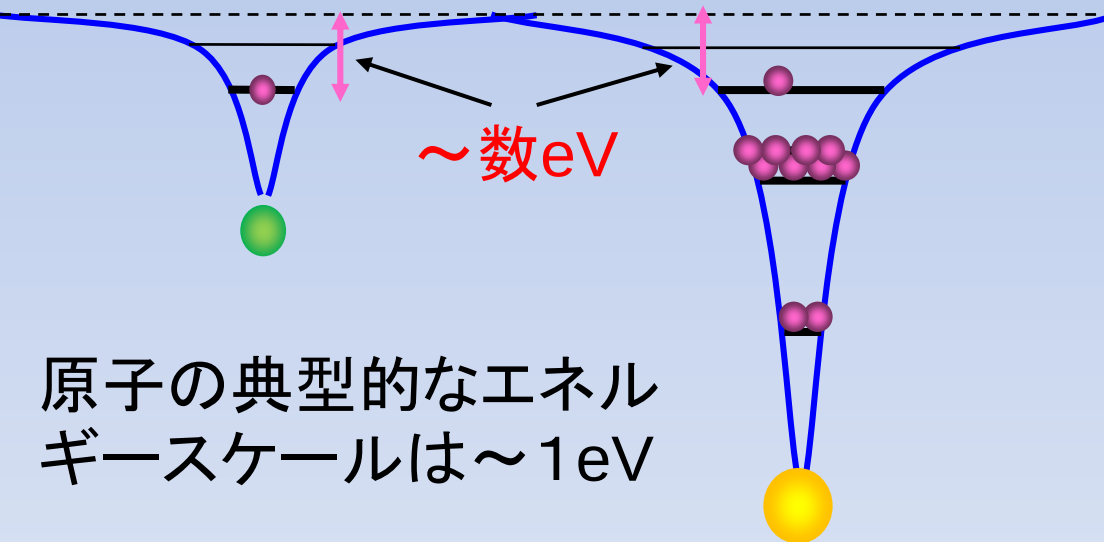
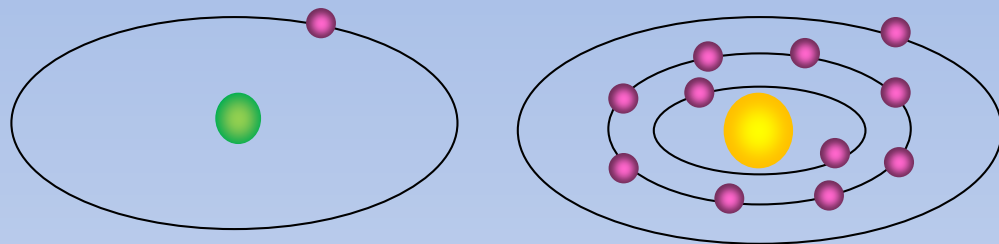
電子エネルギー準位の詰め方

多電子原子



価電子

原子の化学的性質を決めているのは最外殻の電子(価電子)



最外殻の電子配置が似た原子は互いに似た化学的性質を示す
⇒ 元素周期律

ここでちょっと休憩



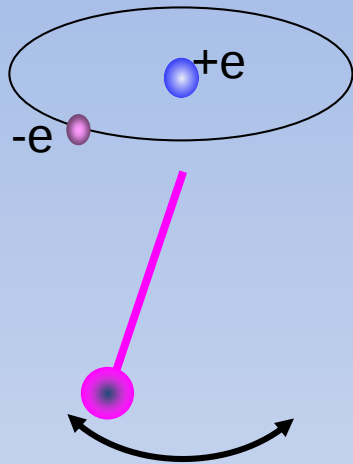
* 画像出典: イラストレーターaiフリー素材
<http://homepage.lipcream.org>

質問はありますか？

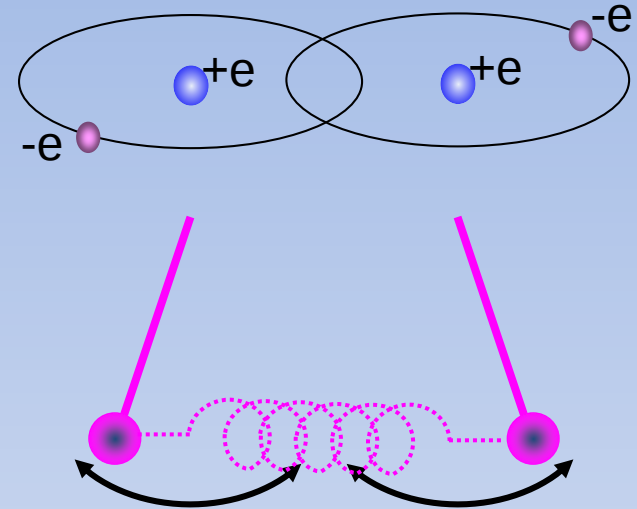
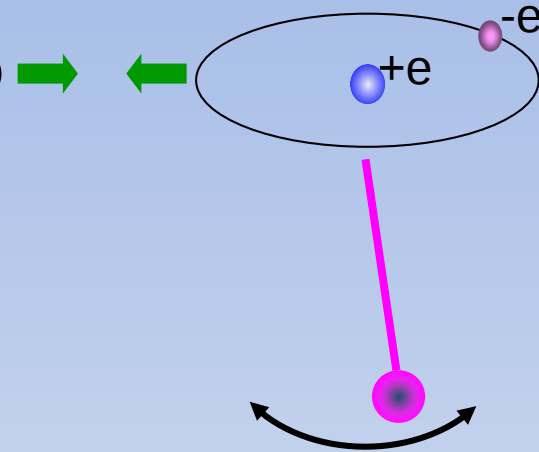
＜第二步＞ 原子から固体へ

2個の原子を近づける

水素原子

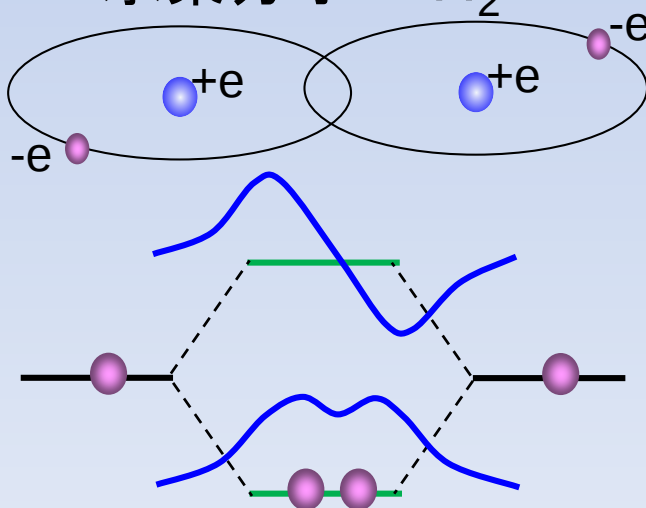


水素原子



逆位相の振動
高い振動数(エネルギー)

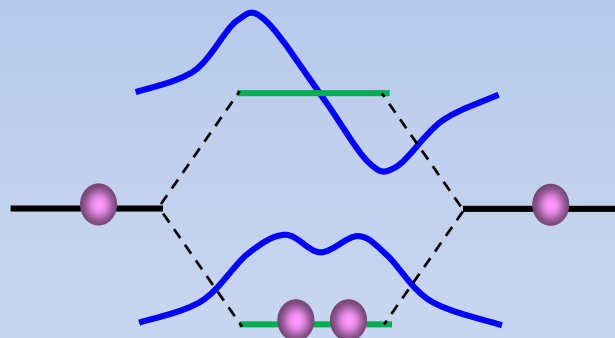
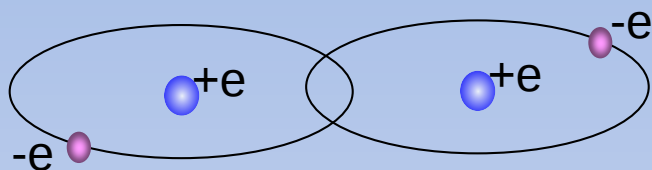
水素分子: H_2



同位相の振動
低い振動数(エネルギー)

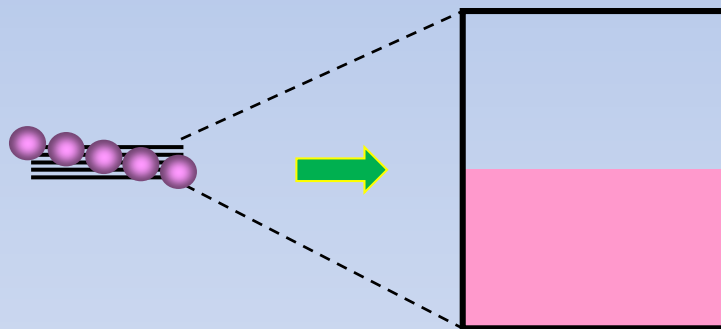
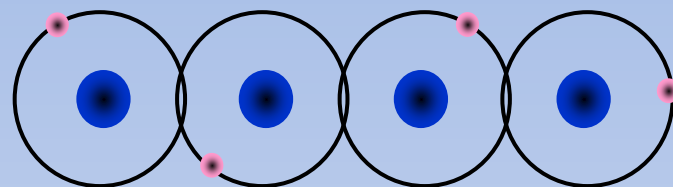
原子をたくさんならべる

水素分子: H_2



エネルギー準位が
2つに分裂する

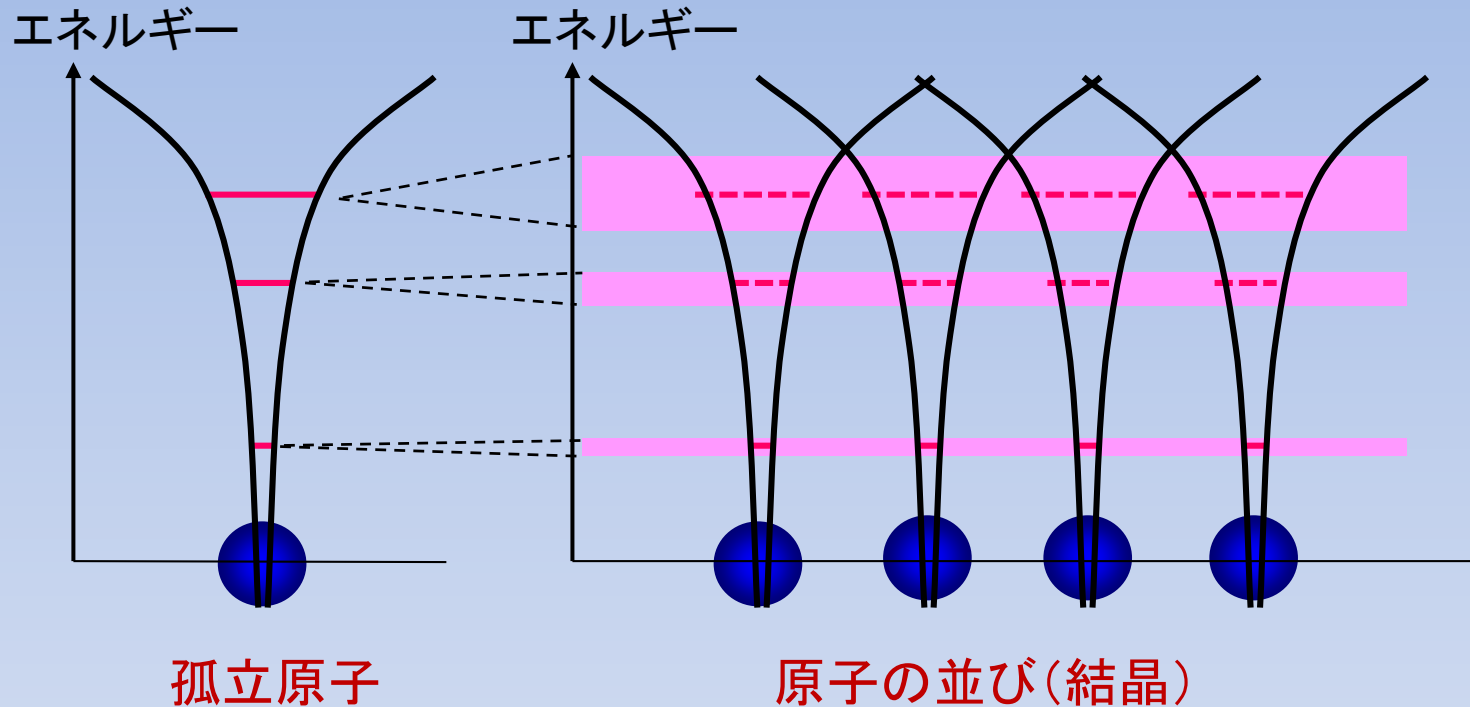
水素原子を周期的に並べる



エネルギー準位がある範囲に広がる
→ エネルギーバンド(帯)

隣接原子の電子雲の重なり合いによって電子の跳び移りが起こり、電子は結晶全体を動き回る

跳び移りによるエネルギー幅の広がり

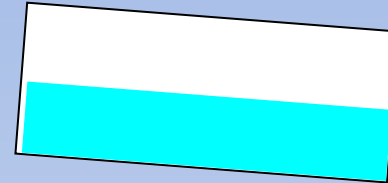
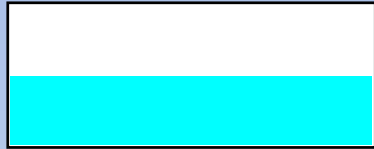


原子の電子エネルギー準位が、電子の跳び移りによって、それぞれ広がってエネルギーバンドを形成する

このエネルギーバンドのどこまで電子が詰まっているかによって、電子の動きやすさが大きく異なる

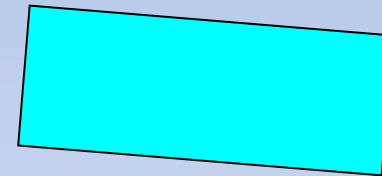
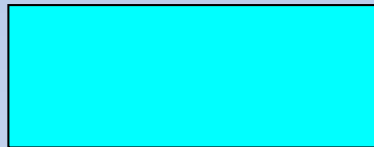
金属と絶縁体

途中まで詰まったバンド



電流が流れる

完全に詰まったバンド



電流は流れない

電場をかける

エネルギー ↑



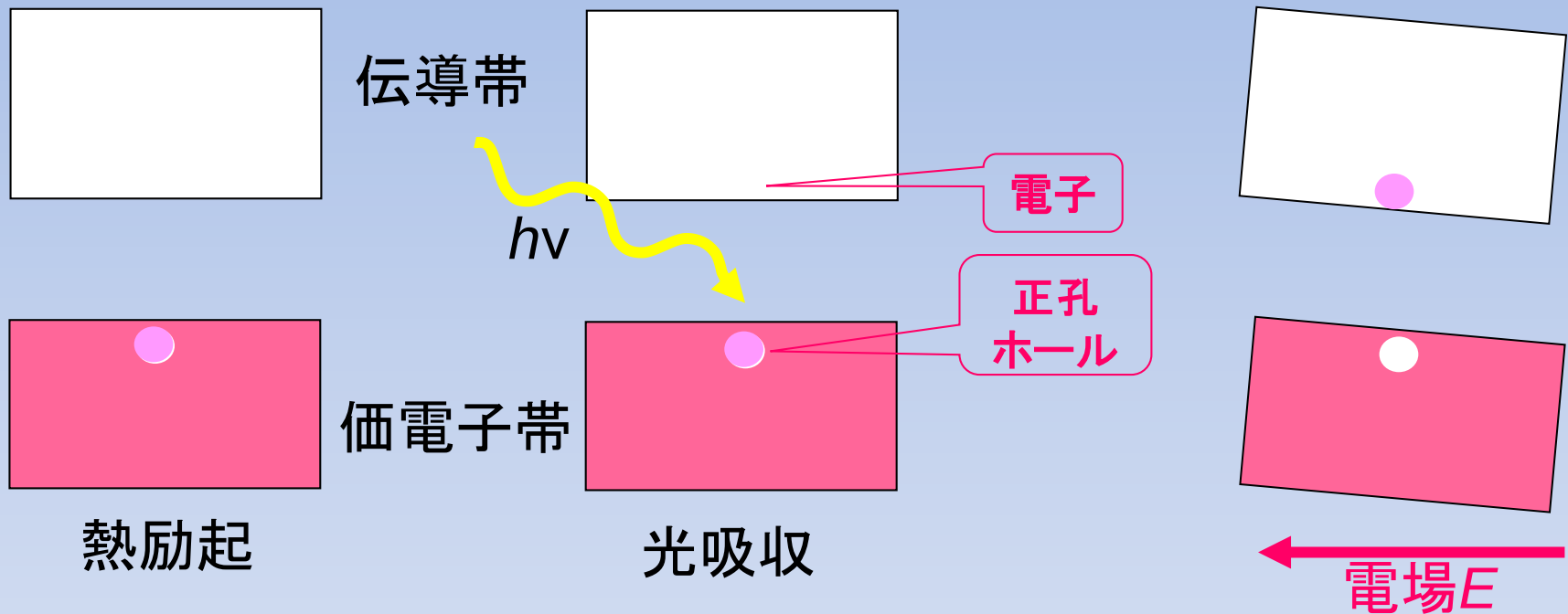
金属



絶縁体
(バンド絶縁体)

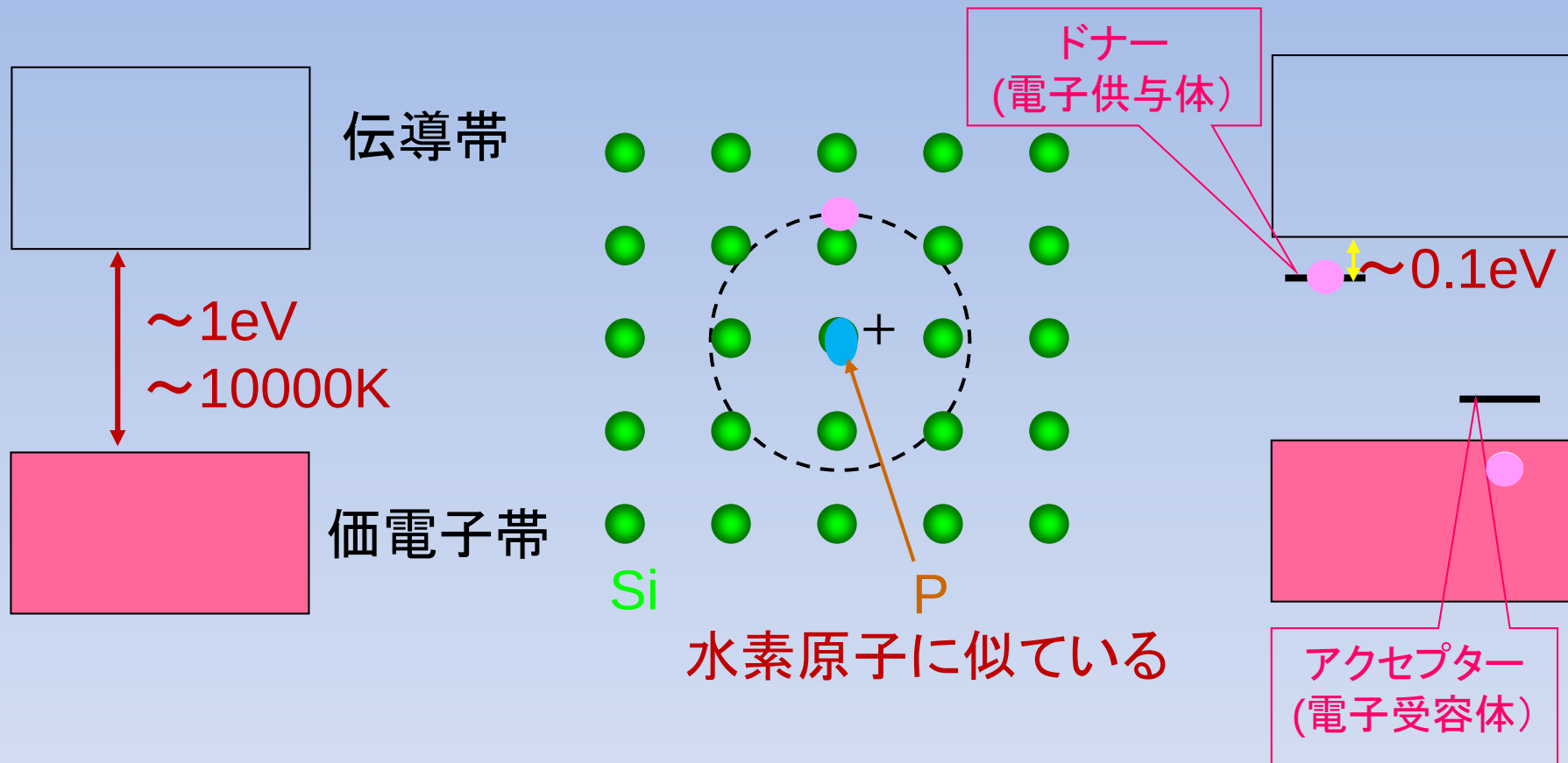


半導体の電子と正孔(ホール)



半導体では熱励起または光吸収によって生成される少数のキャリアー(伝導帯の電子, 価電子帯の正孔)が電気伝導を担う

ドーピング



ドナー(電子供与体)不純物を添加して、伝導帯に電子が供給されるようにしたものをn-型半導体、アクセプター(電子受容体)不純物を添加して、価電子帯に正孔ができるようにしたものをp-型半導体という

発光ダイオード

太陽光発電

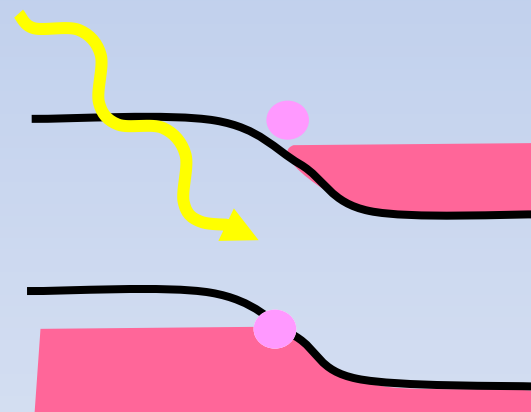
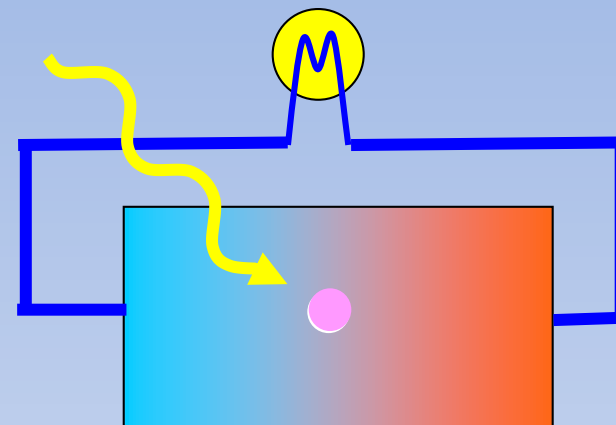
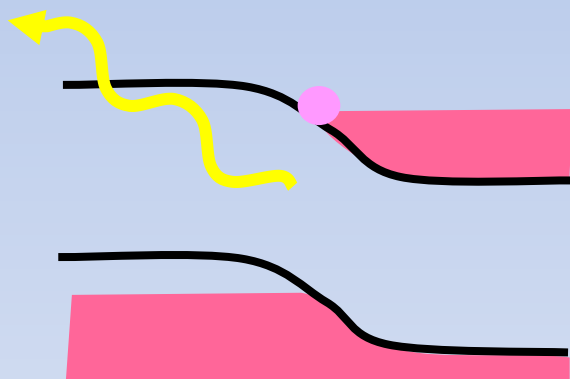
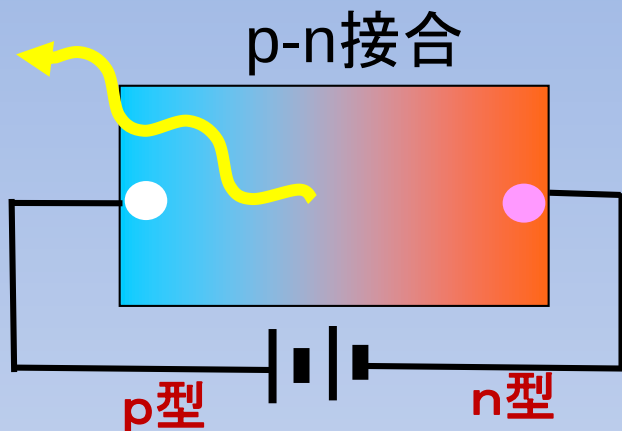


Photo by
PiccoloNamek,
from Wikimedia
Commons
CC BY-SA 3.0
<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:RGB-LED.jpg>

放出される光の色は
半導体のバンドギャップ
で決まる

1eV ~ 3eV
赤外 ~ 青色³⁶

発光ダイオード

< 第三步 >

協力現象と相転移
— 磁性を例として —

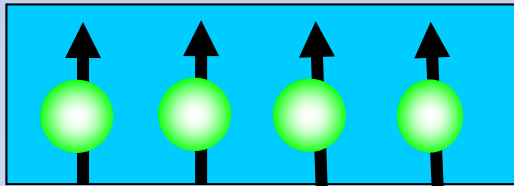
強磁性

ある物質が磁石（強磁性体）であるためには

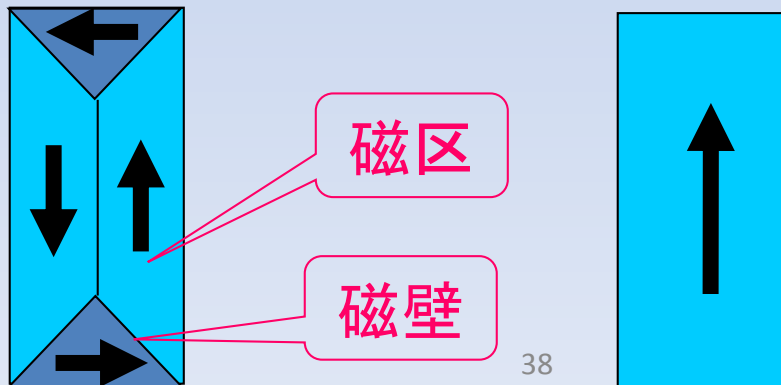
(1) 原子（あるいは分子）が磁気モーメント（ミクロの磁石）をもつ



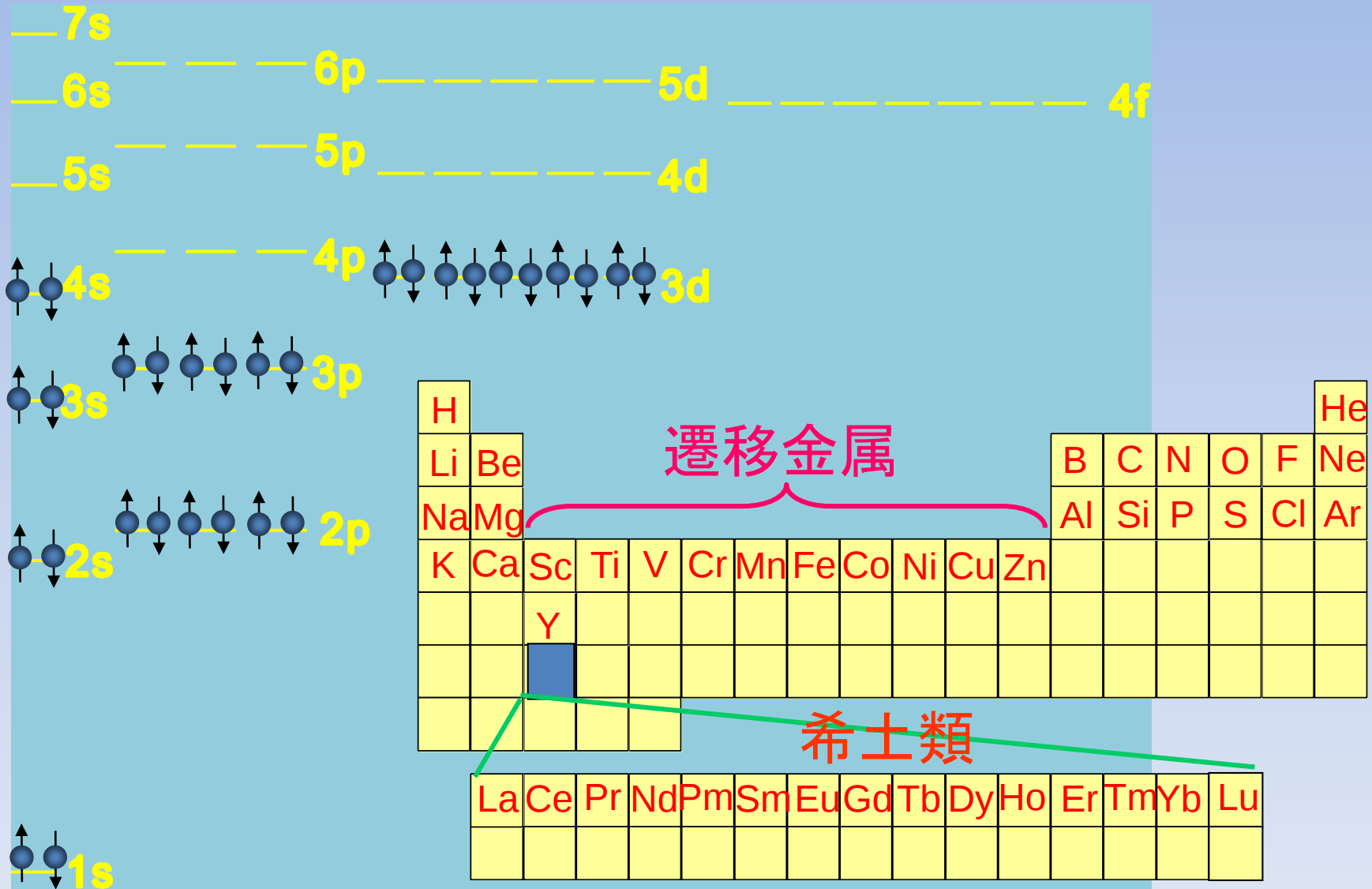
(2) それらの磁気モーメントが同じ向きにそろう



(3) マクロな試料が全体として磁化をもつ



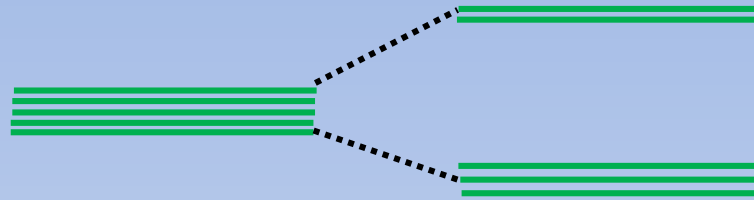
電子エネルギー準位の詰まり方



原子の磁気モーメント

原子の d 軌道

↑スピン, ↓スピン
に対してそれぞれ
5つの席がある



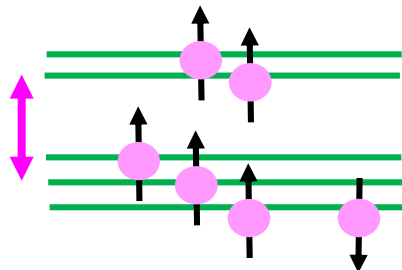
その原子が置かれた
環境(結晶場)によっ
て, 5つのエネルギー
準位が分裂する

ここに電子をどう詰めるか？

電子間のクーロン反発をできるだけ避けるには,
スピンの向きを同じにそろえるほうが得(フント則)

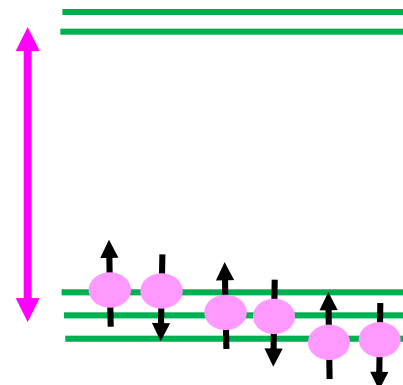
Fe^{2+} (d電子が6個) の例

分裂が小さい場合



磁気モーメント有り

分裂が大きい場合



磁気モーメント ゼロ

原子の磁気モーメントをそろえる力

原子の磁気モーメントをそろえる力とは何か？



~~古典電磁気学の
磁気双極子相互作用？~~

相互作用として弱すぎる
(エネルギー < 1K)

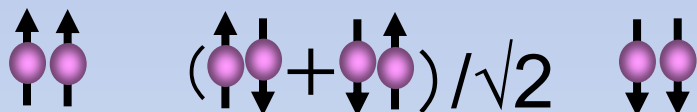


量子力学的な効果

交換相互作用

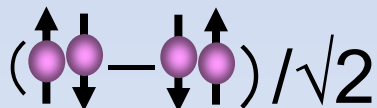
(スピンの向きによるクーロン相互作用の違い)

2つのスピンの平行 (スピン3重項)



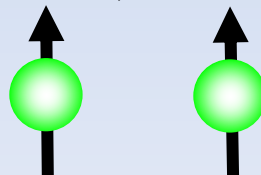
↑ ↓
クーロン相互作用エネルギーに差
(交換相互作用)

2つのスピンの反平行 (スピン1重項)

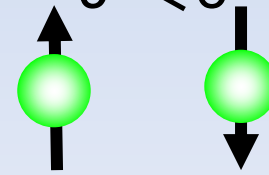


$$\text{エネルギー} = -J \mathbf{s}_1 \cdot \mathbf{s}_2$$

強磁性的
 $J > 0$



反強磁性的
 $J < 0$

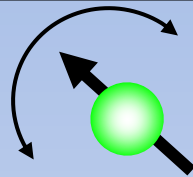


磁気秩序(協力現象と相転移)

磁性体＝原子の磁気モーメント(ミクロな磁石)の集合体

熱ゆらぎ

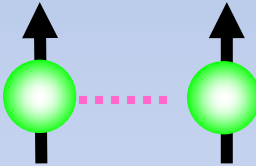
⇒ それぞれが勝手な方向
を向こうとする



「好き勝手な方向を向きたい」

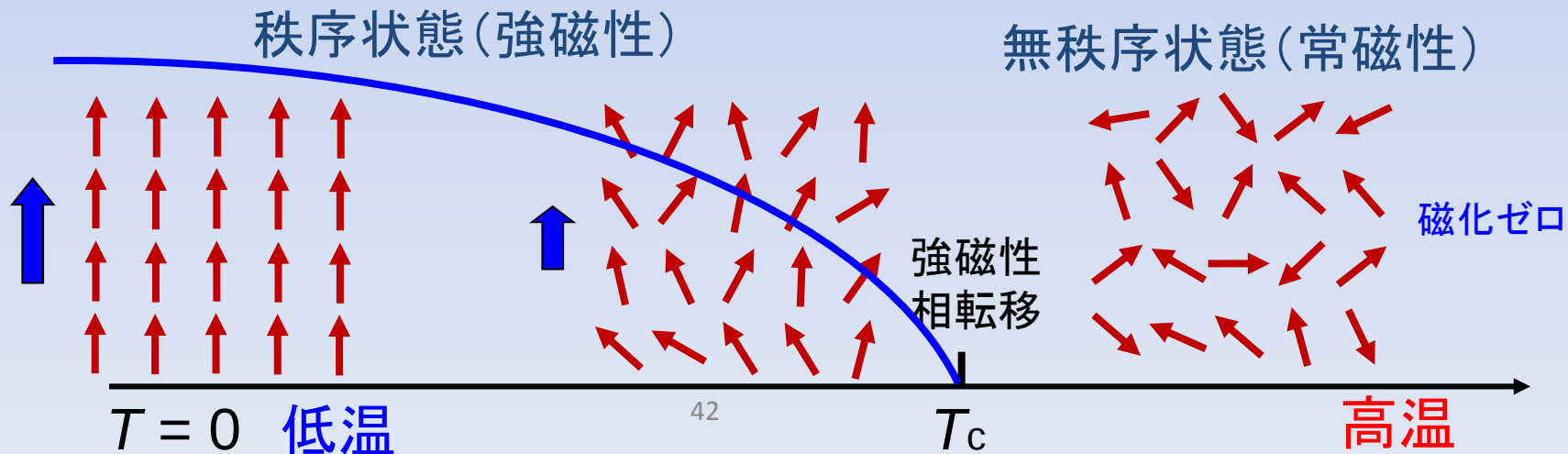
強磁性的相互作用 ($J > 0$)

⇒ 隣と平行になろうとする



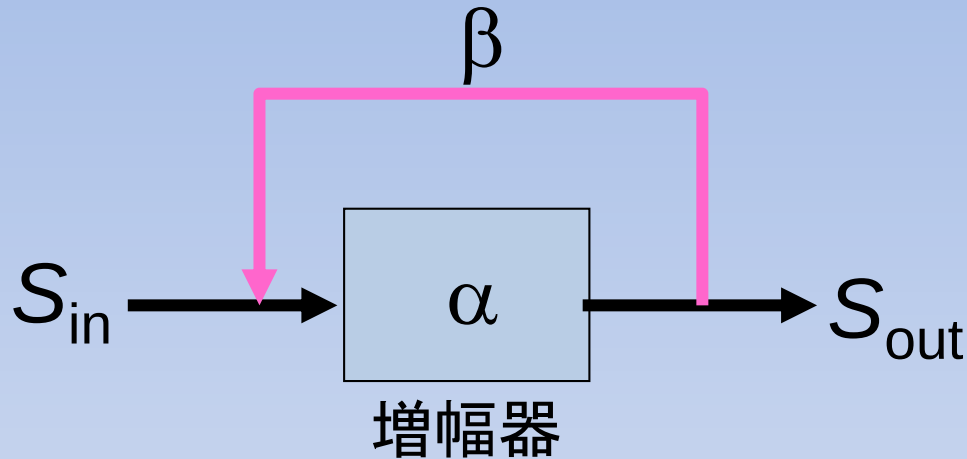
「でも隣近所とも折り合わない」と

「周りが皆、そっちを向くのなら
自分も」



フィードバック

出力の一部を入力に加えること



$$S_{out} = \alpha S_{in}$$

$$S_{out} = \alpha (S_{in} + \beta S_{out})$$

$$S_{out} = \frac{\alpha}{(1 - \alpha\beta)} S_{in}$$

β が負の場合
negative feedback

$$S_{out} = \frac{\alpha}{(1 + \alpha|\beta|)} S_{in} \sim \frac{1}{|\beta|} S_{in} \quad \text{安定性}$$

β が正の場合
positive feedback

$$S_{out} = \frac{\alpha}{(1 - \alpha\beta)} S_{in} \quad \alpha\beta = 1 \text{で発振}$$

例：マイクをスピーカーに向けてしまった時に出るノイズ

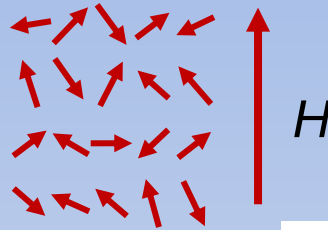
強磁性の平均場理論(ワイス理論)

キュリー常磁性(外からかけた磁場に比例した磁化)

$$M = \chi H$$

$$\chi = \frac{C}{T}$$

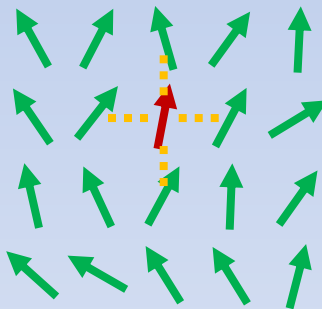
χ : 磁化率



理想気体のボイル・シャルルの法則と同じ

$$\frac{n}{V} = \frac{1}{RT} p$$

磁気モーメント間の相互作用を平均場として採り入れる



外部磁場

周りの磁気モーメントによる有効磁場

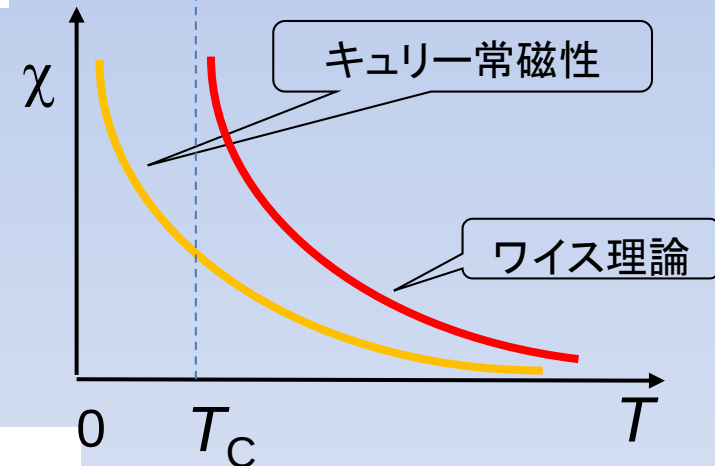
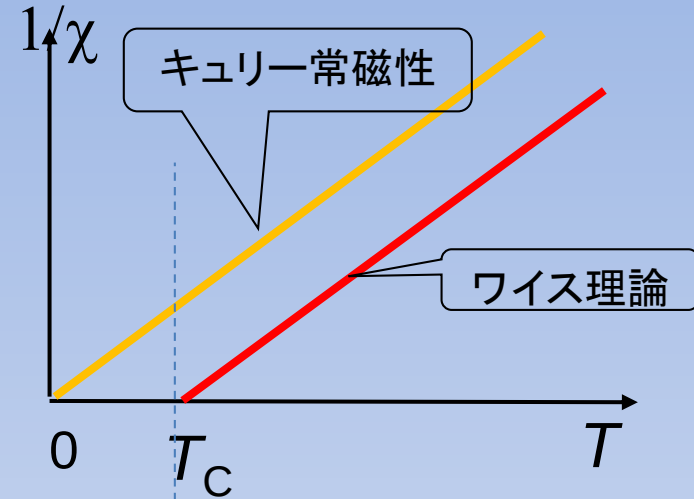
$$M = \frac{C}{T} (H + \beta M)$$

$$M \left(1 - \beta \frac{C}{T} \right) = \frac{C}{T} H$$

$$M = \frac{C/T}{(1 - \beta C/T)} H$$

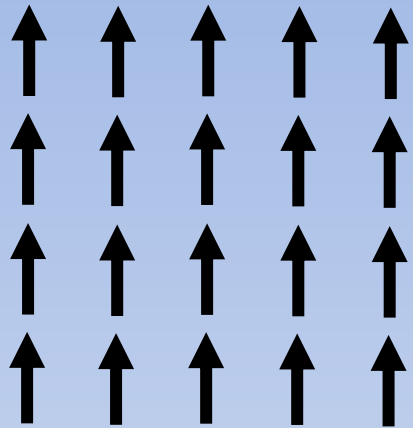
$$= \frac{C}{(T - T_C)} H \Rightarrow \chi = \frac{C}{T - T_C}$$

$(T_C \equiv \beta C)$ T_C : 強磁性転移温度



協力現象: 一種のフィードバック機構

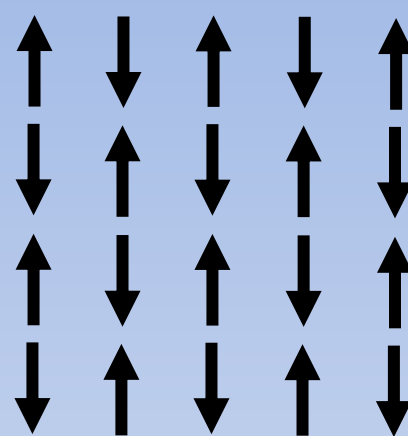
磁気秩序のいろいろ



秩序状態

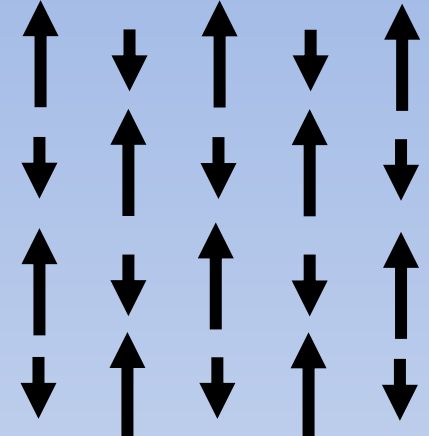
強磁性

(マクロな磁化あり)



反強磁性

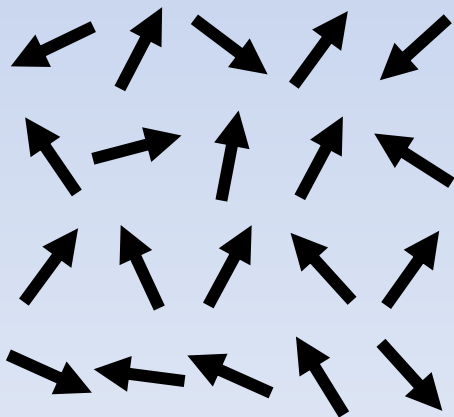
(マクロな磁化なし)



フェリ磁性

(マクロな磁化あり)

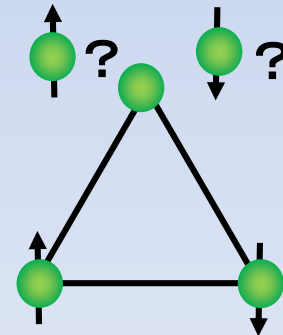
高温では



無秩序状態

常磁性(マクロな磁化なし)

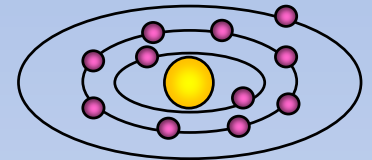
配置が正三角形だったら？



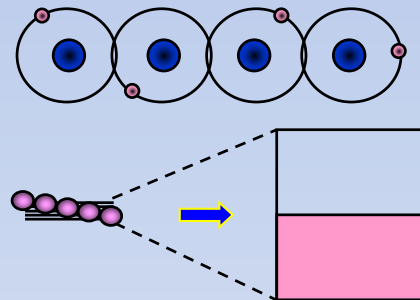
“フラストレーション”

物性科学 はじめの三歩

＜第一歩＞
原子の構造と周期律



＜第二歩＞
原子から固体へ



＜第三歩＞
協力現象と相転移

秩序状態 (強磁性)

無秩序状態 (常磁性)

相転移

磁化ゼロ

$T = 0$

温度

T_c

By Armtuk, from Wikimedia Commons [CC BY-SA 3.0](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Periodic_Table_Armtuk3.svg)
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Periodic_Table_Armtuk3.svg

まとめ：物性科学は何をする学問か？

多様な物質の性質（物性）を物理学や化学の基本原理に基づき、原子や電子のミクロなレベルから理解しようとする学問。

あらゆる物質は原子からできている。

100種類余の元素の組み合わせ ⇒ 多様性

自然界に存在しない物質を人工的に創り出されることも盛んに行われている。

一つの物質でも、それが置かれる物理環境（高圧力，強磁場，極低温など）によって、全く異なる顔を見せる。

物質の中で何が起きているかを、さまざまな実験手法，理論モデルを駆使して調べ，統一的理解を目指す。

多様な物質の中には有用な性質を持つものも少なくない

⇒ 応用物理学、材料工学の研究対象として洗練して行く。

⇒ 機能材料・デバイス・システムとして社会実装

<さらに先へ>

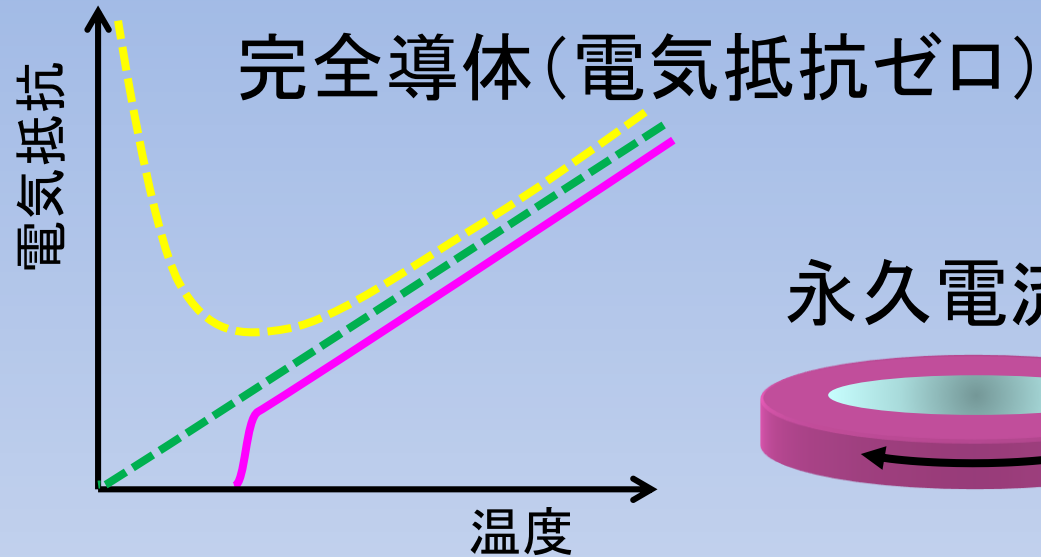
多様な物質
多彩な物性

超伝導の発見(1911年)

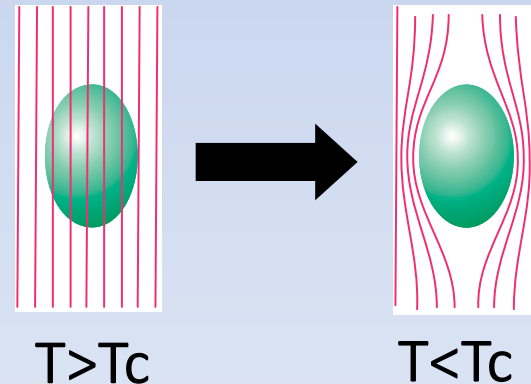
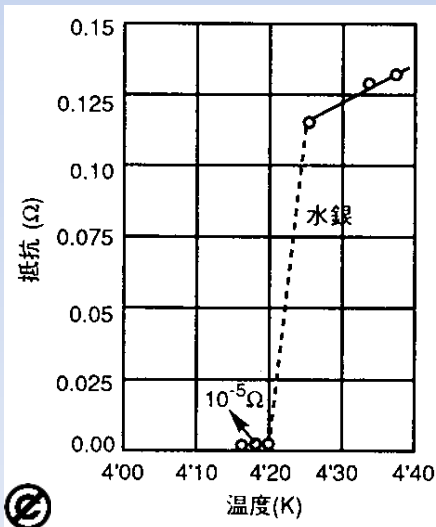


カメリン・オンネス

低温物理学の父
初めてヘリウムの液化
に成功(1908)



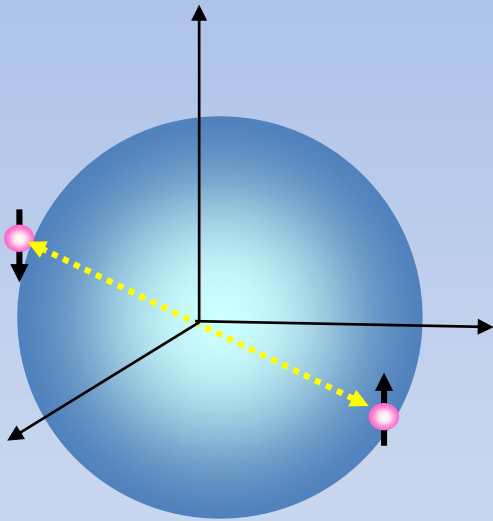
完全反磁性(マイスナー効果)



超伝導状態では磁場が排除される

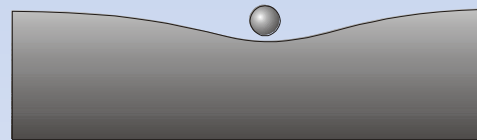
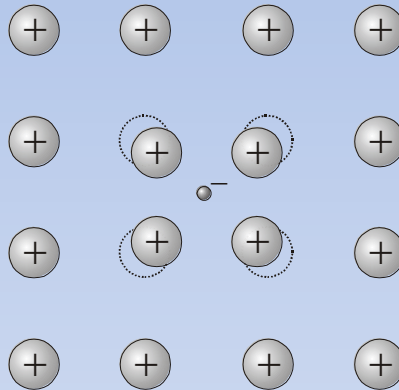
超伝導の機構

クーパ対の形成

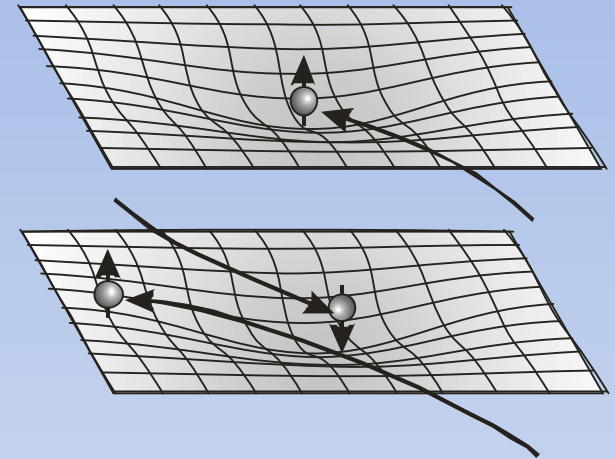


フェルミ面上の2個の電子に引力が働くと、束縛状態(クーパ対)が形成される。

引力の起源は？ 電子格子相互作用



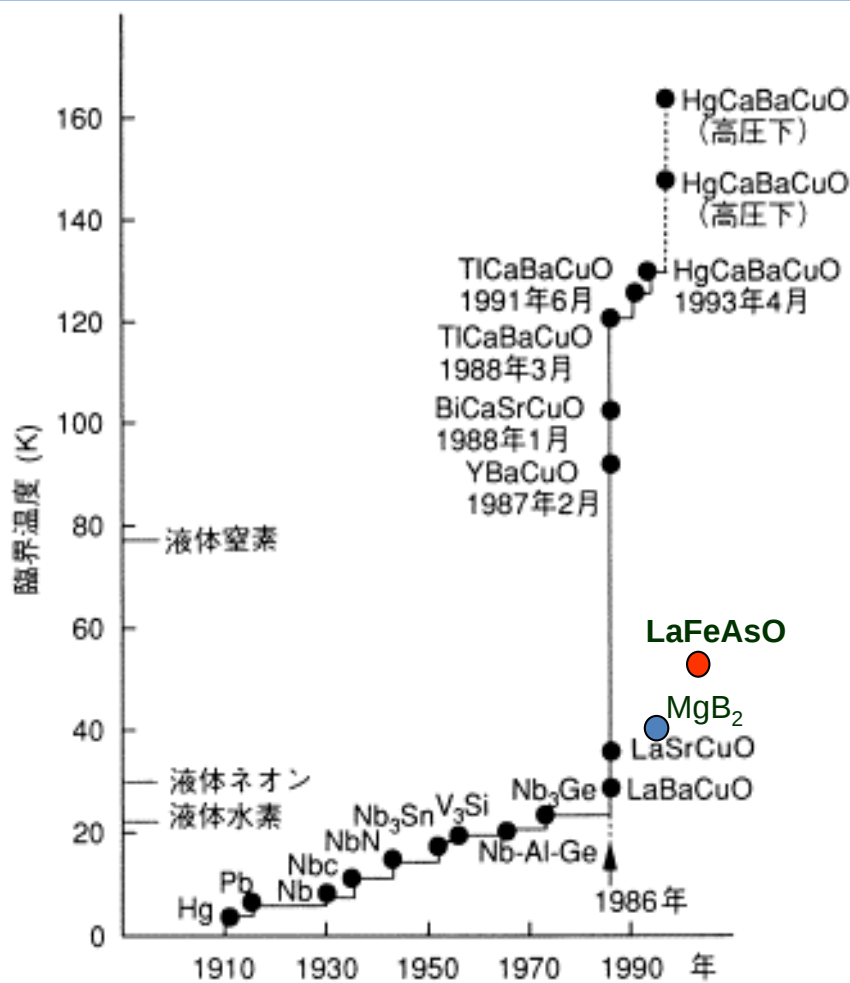
超伝導転移温度



電子格子相互作用を介した電子間引力が電子間のクーロン斥力に打ち勝って正味の引力が働けばよい

$$T_c = 1.14 \Theta_D \exp\left(-\frac{1}{N(0)V}\right)$$

室温超伝導は可能か？



超伝導転移温度

$$T_c = 1.14 \Theta_D \exp\left(-\frac{1}{N(0)V}\right)$$

格子振動の特征的エネルギー尺度

電子格子相互作用の強さ

30K程度が限界？

$$T_c \approx T^* \exp\left(-\frac{1}{\lambda}\right)$$

電子間引力を媒介する
素励起の特征的エネルギー尺度

相互作用の強さ

室温超伝導：不可能であるという理由はない

俯瞰講義の俯瞰

序論・物質の科学史

宇宙の成立ちと物質の起源

第1回(家)

第2-3回(村山)

宇宙

宇宙
素粒子
太陽系

第4回(浅井)

第5回(永原)

物質の応用

物質

原子・分子

物質の理解

結晶 物性

第6回(家)

社会

ソフトマター

第7回(田中)

放射線

超伝導

第8回(飯本)

レアメタル

人工光合成

発光ダイオード

半導体人工物質

計算科学

第9回(石坂)

第13回(岡部)

第12回(堂免)

第11回(川崎)

第10回(福島)