

物質科学ことはじめ(その2)

物質の個性(物性)は どこから生まれるか



物性研究所
家 泰弘

物質科学ことはじめ

第4回(5月7日)

現代社会と物質科学,
原子・分子・物質の構造

第5回(5月13日)

物質の個性(物性)はどこから生まれるか

第6回(5月20日)

奇妙な量子の世界

今日のおはなし

- 温度について(前回の補足)

- 物質の構造

 - 原子の並び方

- 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

 - 金属・絶縁体・半導体

 - 第三歩: 協力現象と相転移

 - 磁性を例として



熱とは何か？ 温度とは何か？



ラヴォアジエ

燃焼が「酸素との結合」であることを示し、
当時主流であった「フロギストン説」を否定

「近代化学の父」と称せられる

熱は物質の一種であると考え、
「カロリック」という元素を想定

ダヴィッド画
ラヴォアジエと妻マ
リー＝アンヌ・ピエ
レット・ポールズ



ベンジャミン・トンプソン
(ランフォード伯)

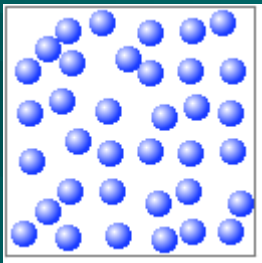
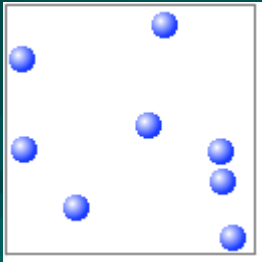
砲身の切削工程で、いくらでも熱
が発生することから、カロリック説
を否定。

熱は運動の一形態であると結論

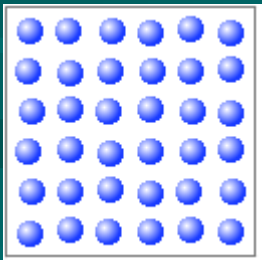


温度とは何か

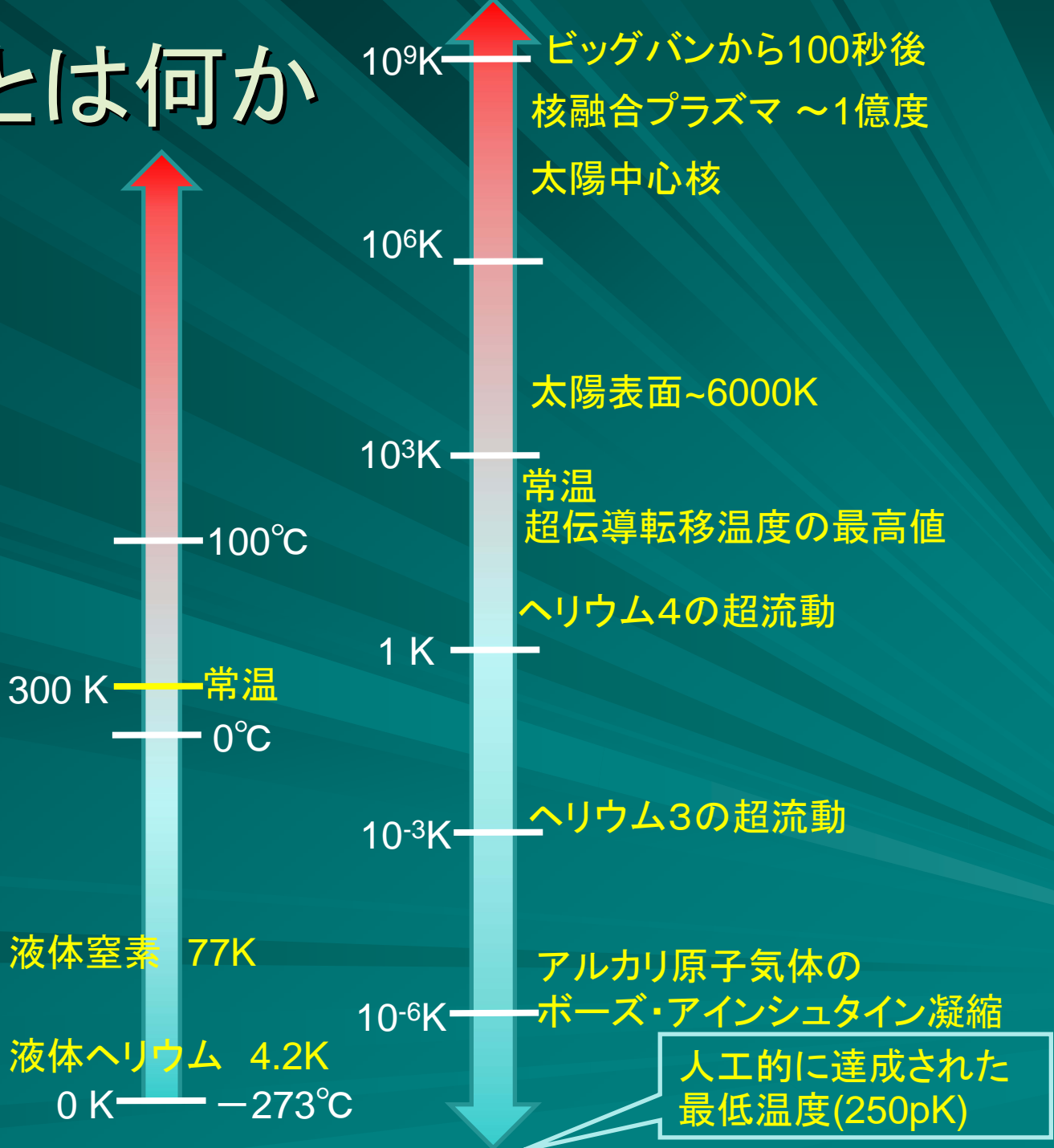
気体状態
(高温)



液体状態



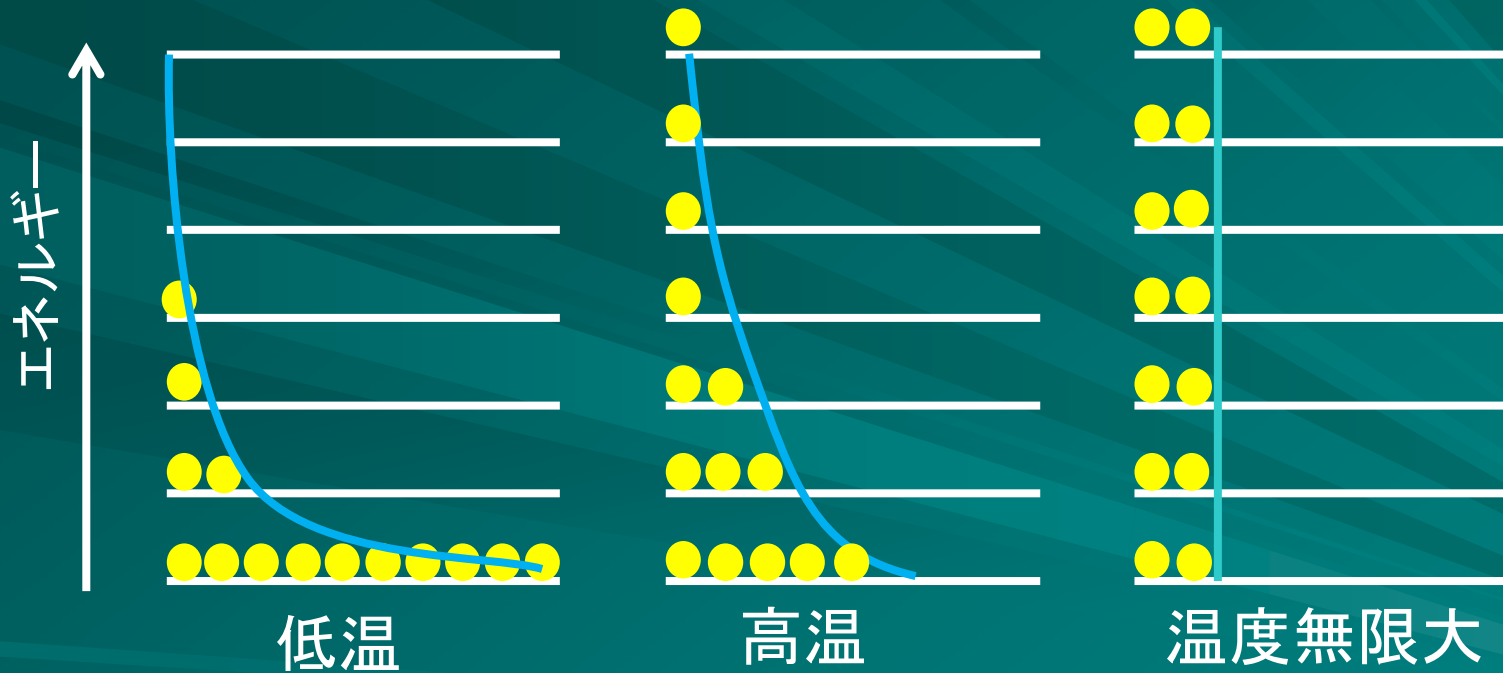
固体状態
(低温)



温度とは何か？

エネルギー分布

温度が高いということは、エネルギーの高い状態を占める粒子の割合が大きいということ



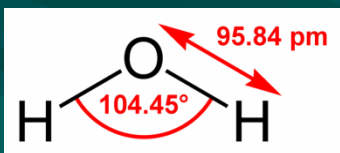
「負の温度」は「逆転分布」の状態。
負の温度は温度無限大よりも「熱い」

物質の構造

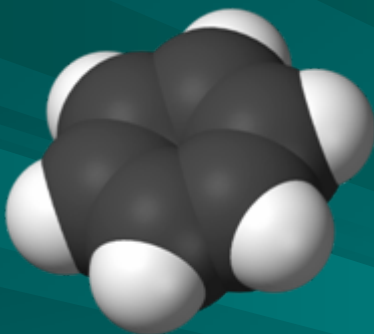
原子の並び方

分子のいろいろ

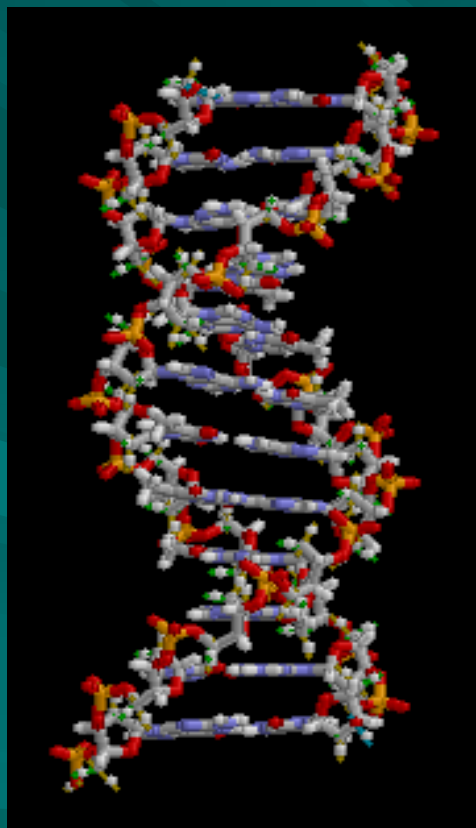
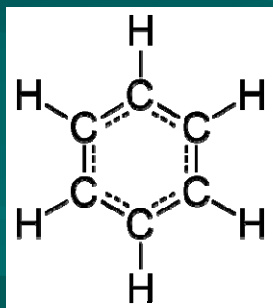
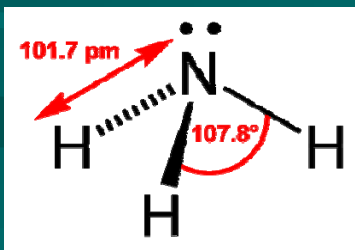
水



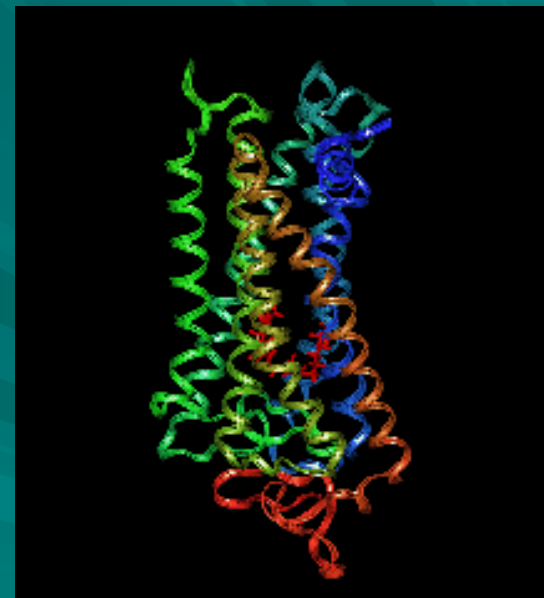
ベンゼン



アンモニア



DNA

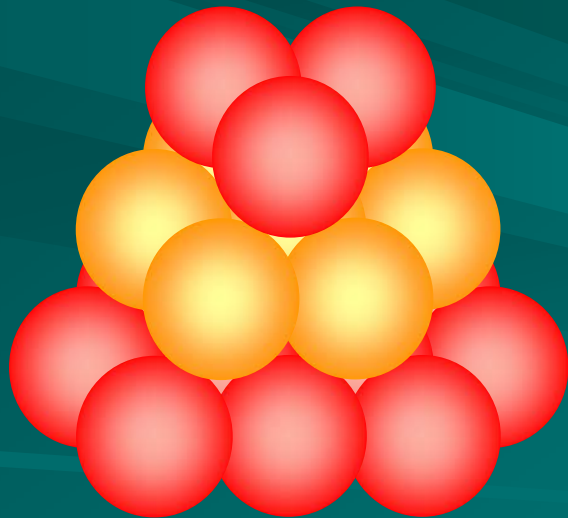


ロドプシン

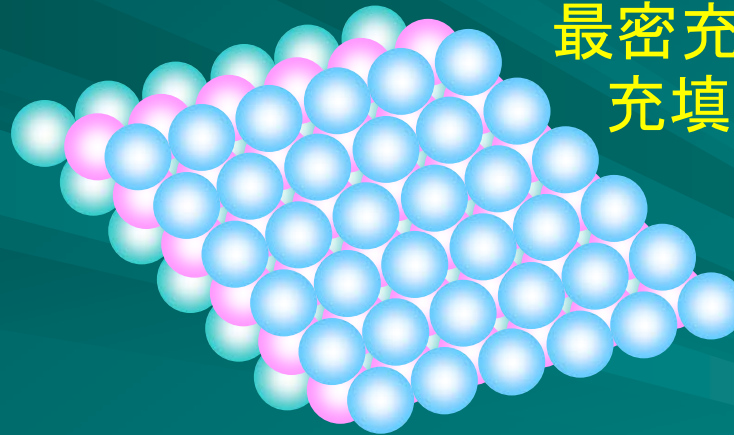
結晶構造

どういう原子配列が最も安定
(エネルギーが低い)か？

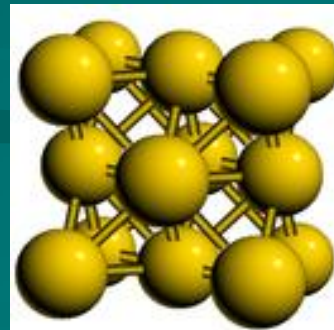
単純な例：果物屋の店先にオレンジを
積み上げる ⇒ 球のパッキング問題



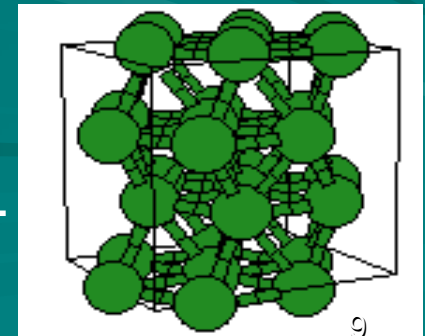
面心立方格子
fcc



最密充填構造
充填率74%

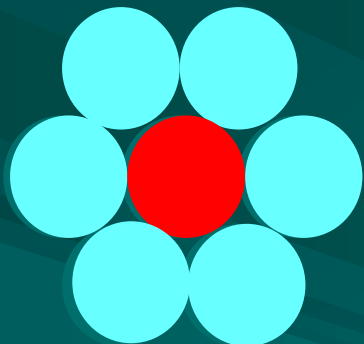


六方稠密格子
hcp

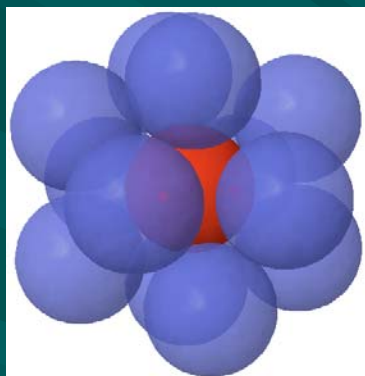


【余談】 ケプラー予想

1つの球の周りに、同じ大きさの球を最大何個までくっつけられるか？ Kissing number problem



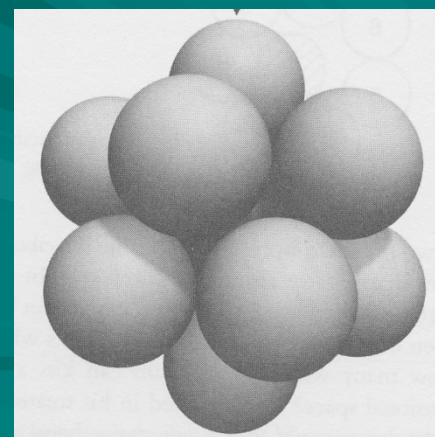
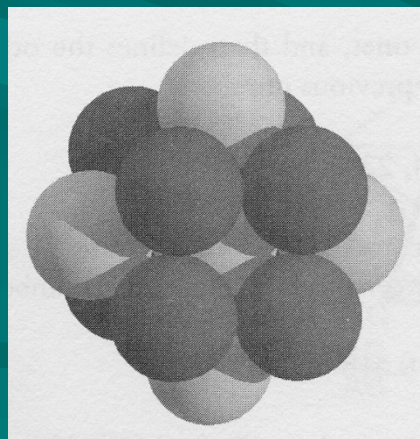
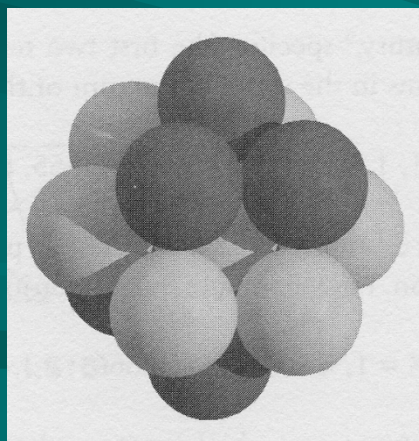
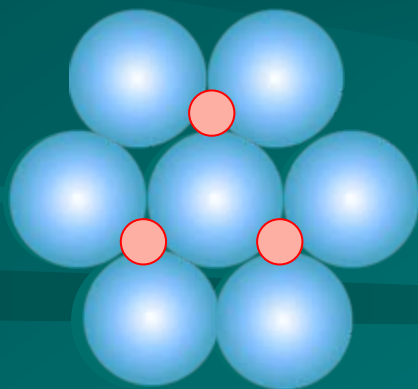
2次元なら簡単
6個



3次元では？
12個 ← ケプラー予想



12個をくっつけるやりかたはいろいろ

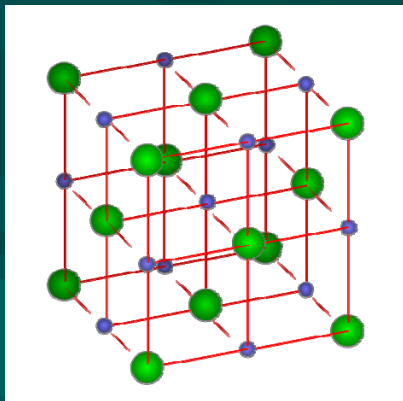


面心立方配置

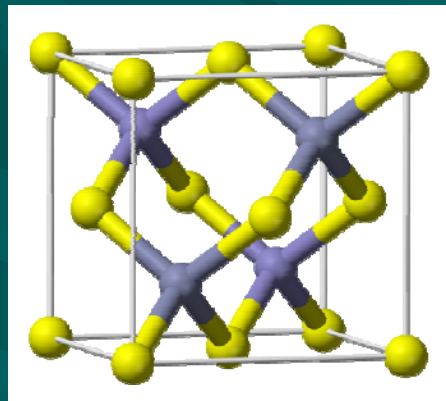
正二十面体配置

数学的に厳密な証明は1997年になってようやく。

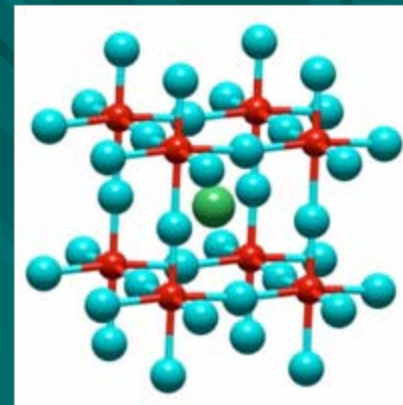
いろいろな結晶構造



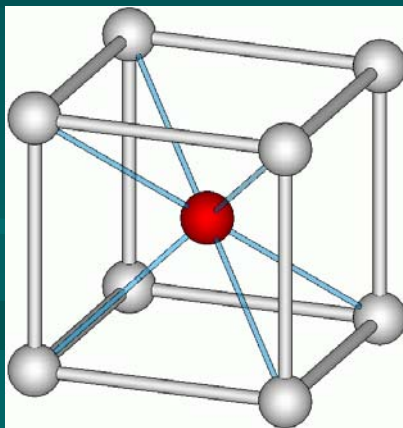
NaCl



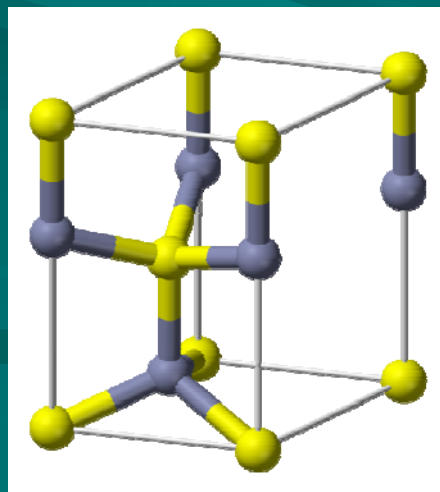
GaAs



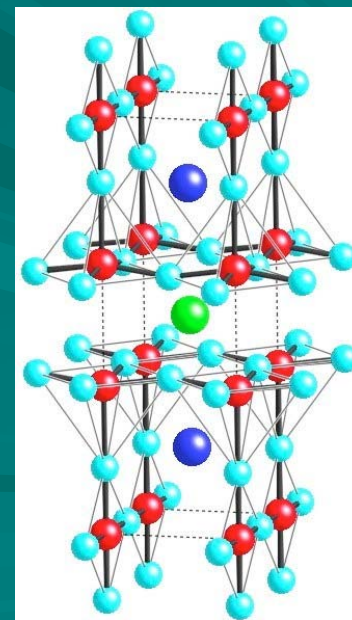
TiBaO₃



CsCl



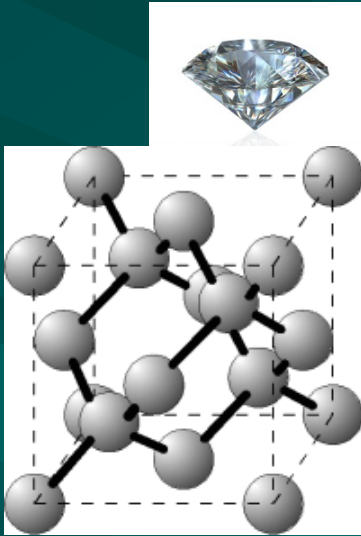
GaN



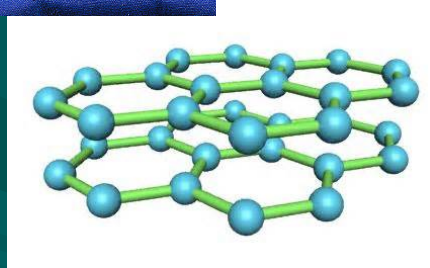
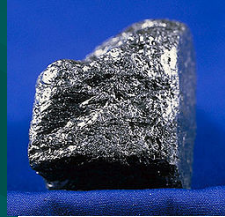
YBa₂Cu₃O₇

炭素七変化

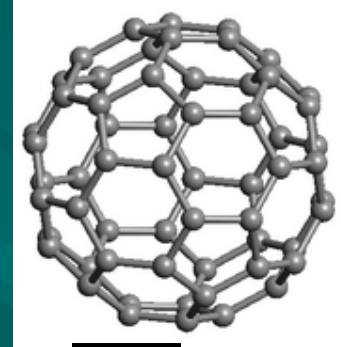
炭素原子だけからなる様々な物質



ダイヤモンド

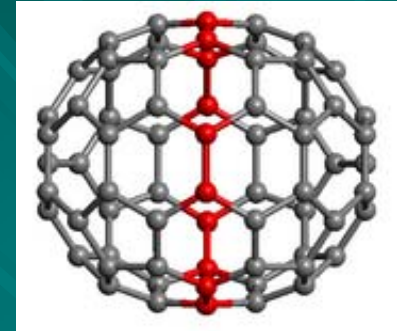


グラファイト(黒鉛)

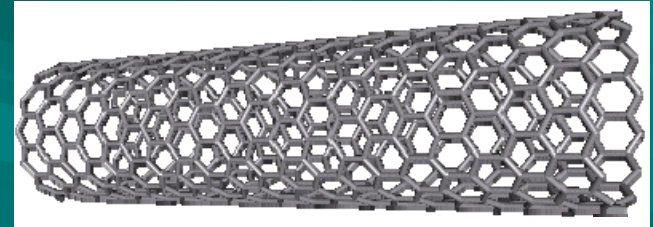


C_{60}

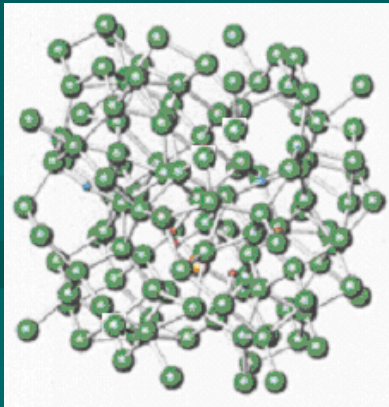
フラーレン



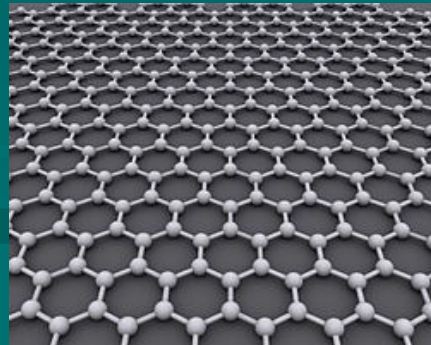
C_{70}



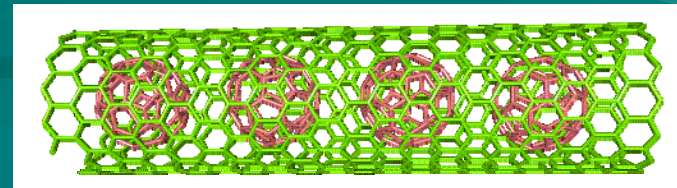
カーボン ナノチューブ



アモルファス カーボン



グラフェン



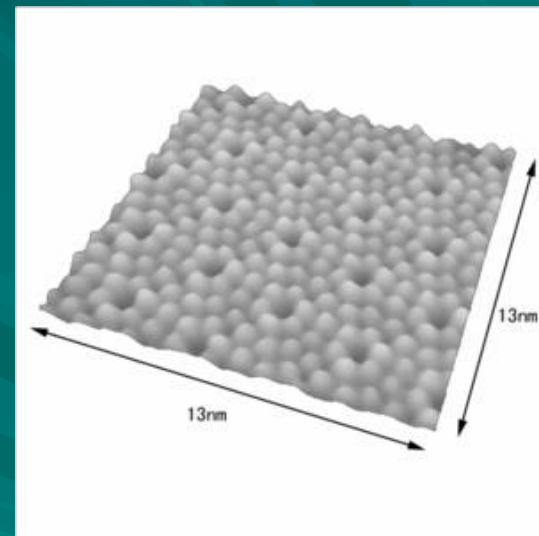
カーボン ピーポッド

物質の構造をどうやって調べる

(1) 原子の配列を直接的に観察する

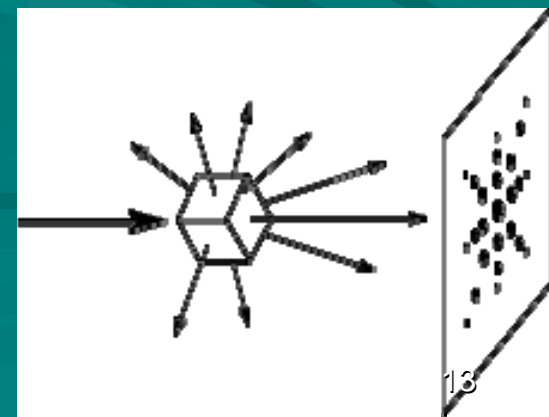
超高分解能電子顕微鏡

走査プローブ顕微鏡

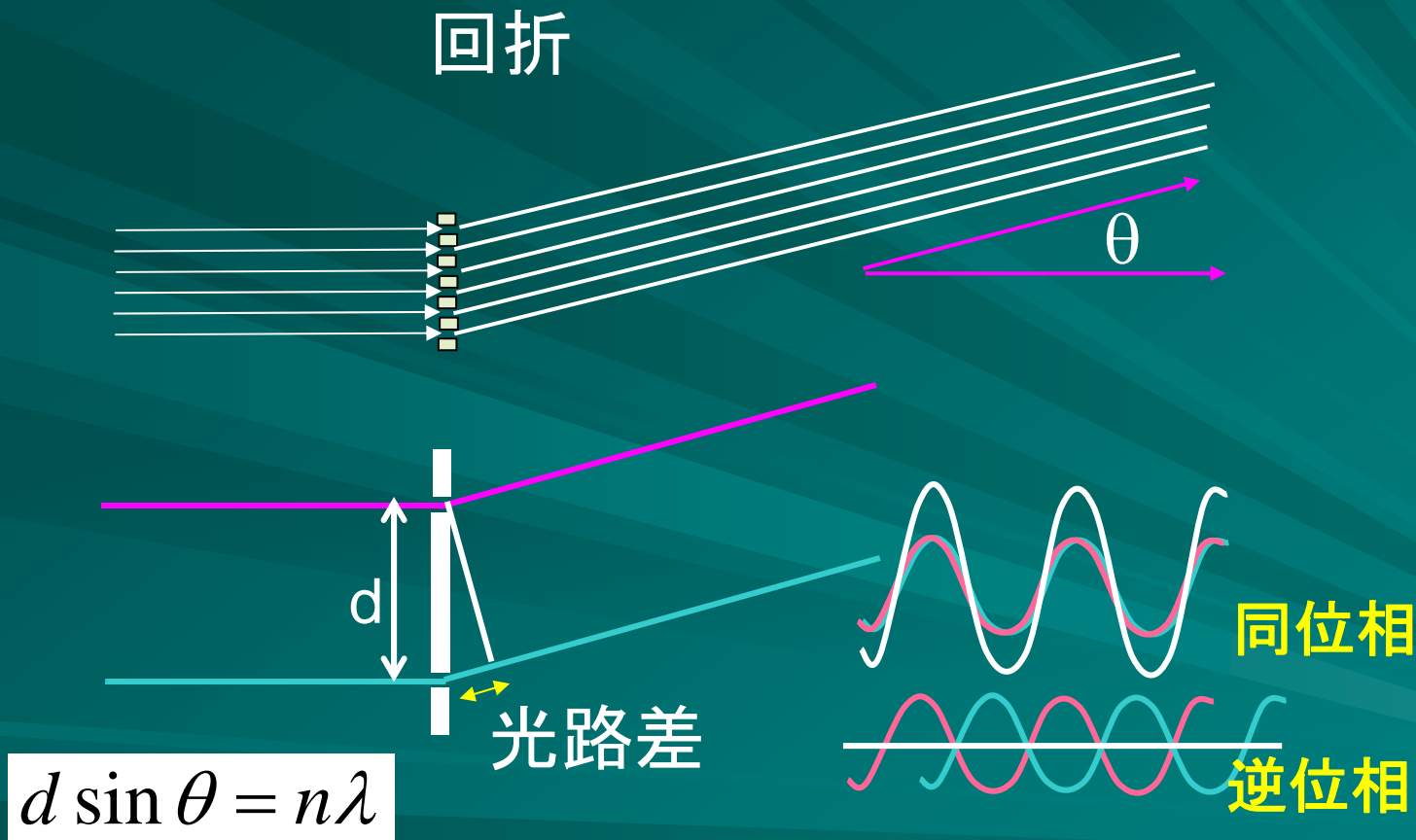


(2) 回折現象を利用する

X線回折 (電子線や中性子線も使われる)



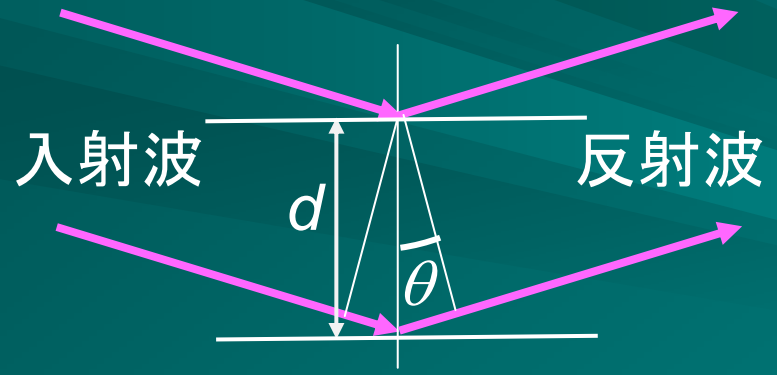
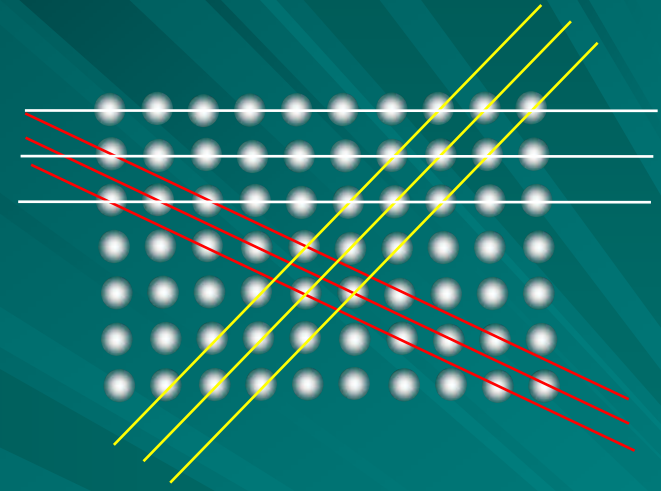
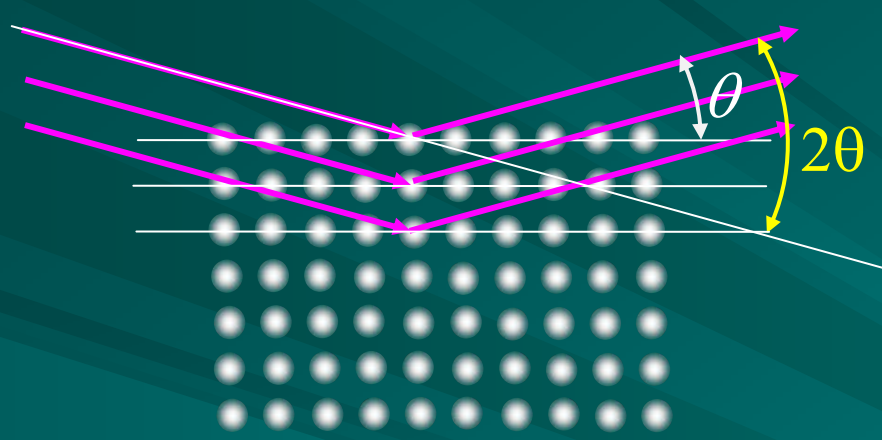
周期構造を回折で調べる



原子間隔 $\sim 0.3 \text{ nm}$ \Leftrightarrow \sim X線の波長

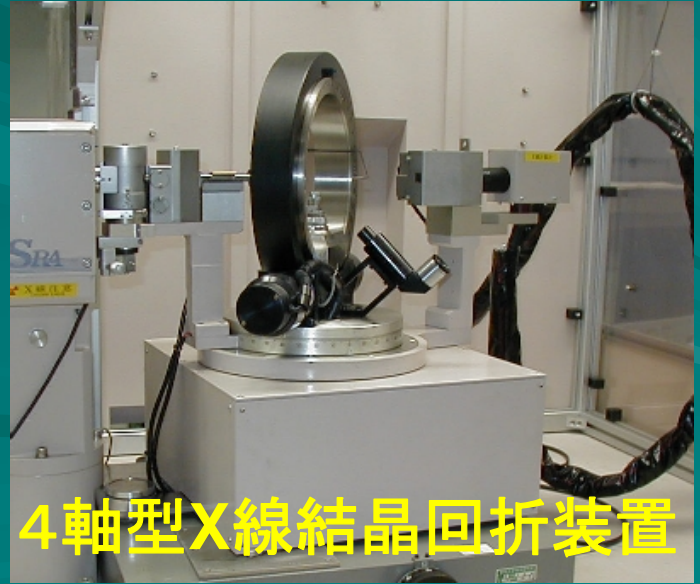
電子線, 中性子線の回折も利用される.

結晶構造解析



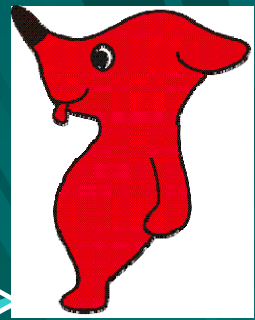
$2d \sin \theta = n\lambda$ ブラッグ条件

原子層の間隔がわかる





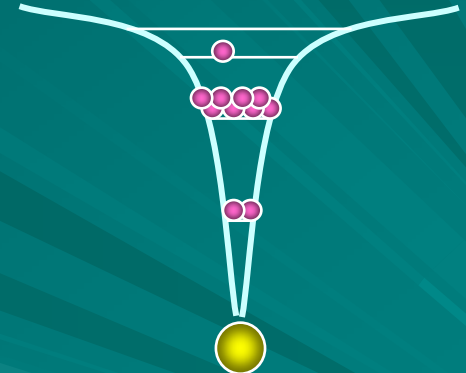
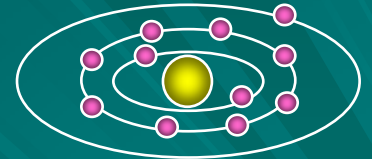
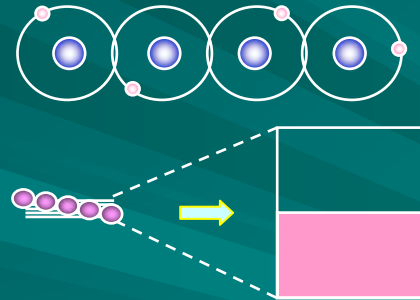
物性科学 はじめの三歩



＜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

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

元素周期表

1																	18	
1	2											13	14	15	16	17	18	
H	He																	He
Li	Be	B	C	N	O	F	Ne											Ne
Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar											Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
Cs	Ba	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn		
Fr	Ra	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt											
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Mn	No	Lr		

物性物理の登場人物たち

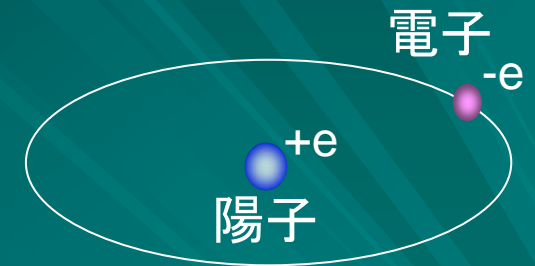
登場人物（「素」粒子）

電子

原子核（陽子と中性子からなる）

光子（電磁波）

水素原子

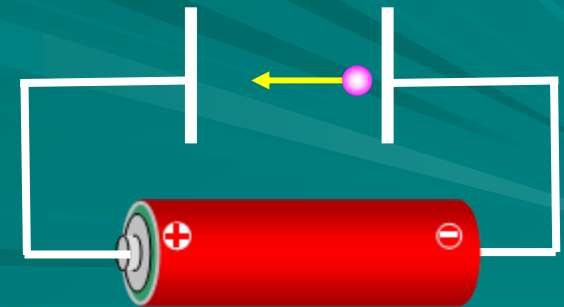


「素」粒子の間に働く力： 電磁相互作用

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

身近な例

乾電池は1.5V

電子のやりとりによる起電力



レーザーポインター

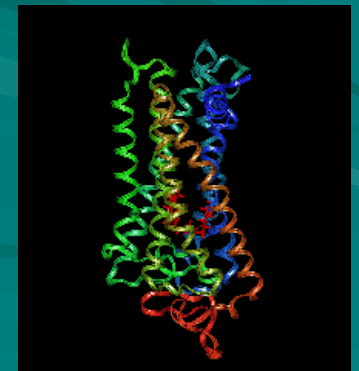
赤色光 $\sim 1.5\text{eV}$, 緑色光 $\sim 2.5\text{eV}$



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



量子力学

ミクロの世界のふるまいを記述する理論体系

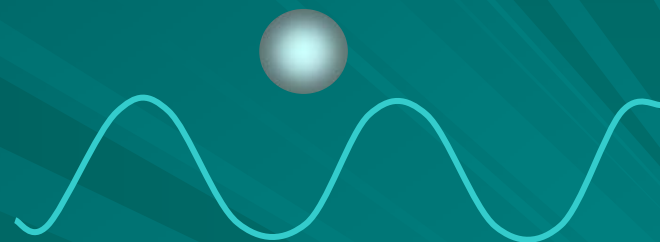
原子・分子の構造

固体の中の電子のふるまい

光と物質の相互作用

光 波であり粒子である

電子 粒子であり波である



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

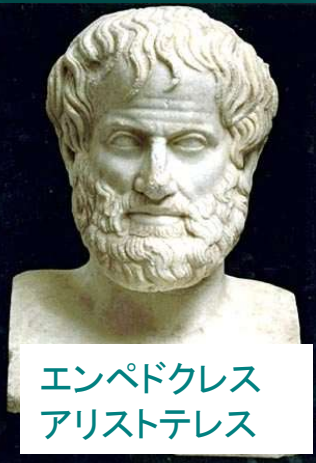
粒子性: 離散的, 1個1個

波動性: 重ね合わせ, 干渉

< 第一歩 >

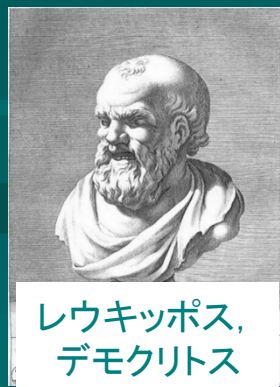
原子の構造と周期律

錬金術から近代化学へ 元素と原子の概念形成

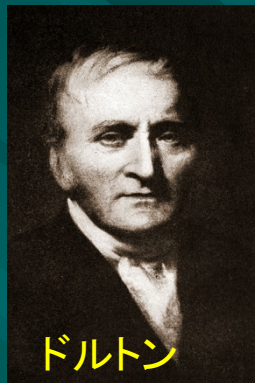


四元素説

原子説



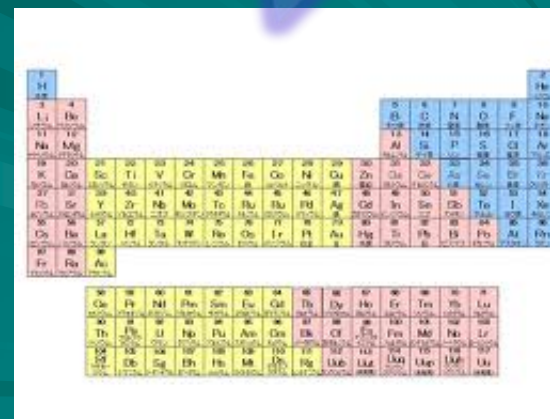
元素の概念
単体と化合物



化学的原子論



元素周期律



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----

元素周期表

1 1.008 H 水素																	18 4.003 He ヘリウム
2 6.941 Li リチウム	2 9.012 Be ベリリウム											13 10.81 B ホウ素	14 12.01 C 炭素	15 14.01 N 窒素	16 16.00 O 酸素	17 19.00 F フッ素	18 20.18 Ne ネオン
11 22.99 Na ナトリウム	12 24.31 Mg マグネシウム	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 26.98 Al アルミニウム	14 28.09 Si ケイ素	15 30.97 P リン	16 32.07 S 硫黄	17 35.45 Cl 塩素	18 39.95 Ar アルゴン
19 39.10 K カリウム	20 40.08 Ca カルシウム	21 44.96 Sc スカンジウム	22 47.88 Ti チタン	23 50.94 V バナジウム	24 52.00 Cr クロム	25 54.94 Mn マンガン	26 55.85 Fe 鉄	27 58.93 Co コバルト	28 58.69 Ni ニッケル	29 63.55 Cu 銅	30 65.39 Zn 亜鉛	31 69.72 Ga ガリウム	32 72.61 Ge ゲルマニウム	33 74.92 As ヒ素	34 78.96 Se セレン	35 79.90 Br 臭素	36 83.80 Kr クリプトン
37 85.47 Rb ルビジウム	38 87.62 Sr ストロンチウム	39 88.91 Y イットリウム	40 91.22 Zr ジルコニウム	41 92.91 Nb ニオブ	42 95.94 Mo モリブデン	43 (99) Tc テクネチウム	44 101.1 Ru ルテニウム	45 102.9 Rh ロジウム	46 106.4 Pd パラジウム	47 107.9 Ag 銀	48 112.4 Cd カドミウム	49 114.8 In インジウム	50 118.7 Sn スズ	51 121.8 Sb アンチモン	52 127.6 Te テルル	53 126.9 I ヨウ素	54 131.3 Xe キセノン
55 132.9 Cs セシウム	56 137.3 Ba バリウム	57-71 ランタノイド	72 178.5 Hf ハフニウム	73 180.9 Ta タンタル	74 183.8 W タングステン	75 186.2 Re レニウム	76 190.2 Os オスミウム	77 192.2 Ir イリジウム	78 195.1 Pt 白金	79 197.0 Au 金	80 200.6 Hg 水銀	81 204.4 Tl タリウム	82 207.2 Pb 鉛	83 209.0 Bi ビスマス	84 (210) Po ポロニウム	85 (210) At アスタチン	86 (222) Rn ラドン
87 (223) Fr フランシウム	88 (226) Ra ラジウム	89-103 アクチノイド	104 (261) Rf ラザフォルジウム	105 (262) Db ドブニウム	106 (263) Sg シーボーギウム	107 (262) Bh ボーリウム	108 (265) Hs ハッシュウム	109 (266) Mt マイトネリウム									

典型非金属元素
 典型金属元素
 遷移金属元素

族番号 → 1
 原子量 → 1.008
 原子番号 → 1
 H
 水素
 元素記号
 元素名

ランタノイド	57 138.9 La ランタン	58 140.1 Ce セリウム	59 140.9 Pr プラセオジウム	60 144.2 Nd ネオジウム	61 (145) Pm プロメチウム	62 150.4 Sm サマリウム	63 152.0 Eu ユウロピウム	64 157.3 Gd ガドリニウム	65 158.9 Tb テルビウム	66 162.5 Dy ジスプロシウム	67 164.9 Ho ホルミウム	68 167.3 Er エルビウム	69 168.9 Tm ツリウム	70 173.0 Yb イットルビウム	71 175.0 Lu ルテチウム
アクチノイド	89 (227) Ac アクチニウム	90 232.0 Th トリウム	91 231.0 Pa プロトアクチニウム	92 238.0 U ウラン	93 (237) Np ネプツニウム	94 (239) Pu プルトニウム	95 (243) Am アメリシウム	96 (247) Cm キュリウム	97 (247) Bk バークリウム	98 (252) Cf カリホルニウム	99 (252) Es アインスタイニウム	100 (257) Fm フェルミウム	101 (258) Md メンデレビウム	102 (259) No ノーメリウム	103 (262) Lr ローレンシウム

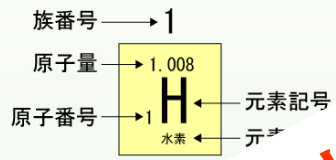
中国語版周期表

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 B			IV B	V B	VI B	VII B	VIII		I B	II B	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 鉀	38 Sr 銻	39 Y 釷	40 Zr 鋯	41 Nb 鎳	42 Mo 鉬	43 Tc 錳	44 Ru 鈷	45 Rh 銠	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 鈷	73 Ta 鉭	74 W 鎢	75 Re 錳	76 Os 銱	77 Ir 銥	78 Pt 鉑	79 Au 金	80 Hg 汞	81 Tl 鉍	82 Pb 鉛	83 Bi 鉍	84 Po 釷	85 At 砒		86 Rn 氡	
7	87 Fr 鈷	88 Ra 鐳	89-103 釷系	104 Rf 釷	105 Db 錒	106 Sg 釷	107 Bh 錒	108 Hs 錒	109 Mt 錒	110 Ds 錒	111 Rg 錒	112 Uub 錒	113 Uut 錒	114 Uuq 錒	115 Uup 錒	116 Uuh 錒	117 Uus 錒		118 Uuo 錒	
	釷系元素		57 La 釷*	58 Ce 鈷	59 Pr 錯	60 Nd 釷	61 Pm 鉅	62 Sm 釷	63 Eu 鎳	64 Gd 釷	65 Tb 鉍	66 Dy 鎳	67 Ho 鈦	68 Er 鉀	69 Tm 鈳	70 Yb 鎳	71 Lu 釷			
	錒系元素		89 Ac 錒**	90 Th 釷	91 Pa 釷	92 U 鈷	93 Np 錒	94 Pu 釷	95 Am 錒	96 Cm 錒	97 Bk 錒	98 Cf 錒	99 Es 錒	100 Fm 釷	101 Md 錒	102 No 錯	103 Lr 錒			
			鹼金屬		鹼土金屬		釷系元素		錒系元素		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

1 1.008 1 H 水素																	18 4.003 2 He ヘリウム														
2 6.941 3 Li リチウム	9.012 4 Be ベリリウム											16 16.00 8 O 酸素	17 19.00 9 F フッ素	20.18 10 Ne ネオン																	
22.99 11 Na ナトリウム	24.31 12 Mg マグネシウム																	26.98 13 Al アルミニウム	28.09 14 Si ケイ素	30.97 15 P リン	32.07 16 S 硫黄	35.45 17 Cl 塩素	39.95 18 Ar アルゴン								
39.10 19 K カリウム	40.08 20 Ca カルシウム	44.96 21 Sc スカンジウム	47.88 22 Ti チタン	50.94 23 V バナジウム	52.00 24 Cr クロム	54.94 25 Mn マンガン	58.93 26 Fe 鉄	63.55 27 Co コバルト	65.39 28 Ni ニッケル	69.72 29 Cu 銅	65.39 30 Zn 亜鉛	69.72 31 Ga ガリウム	72.61 32 Ge ゲルマニウム	74.92 33 As ヒ素	78.96 34 Se セレン	79.90 35 Br 臭素	83.80 36 Kr クリプトン														
85.47 37 Rb ルビジウム	87.62 38 Sr ストロンチウム	88.91 39 Y イットリウム	91.22 40 Zr ジルコニウム	92.91 41 Nb タンタル	95.94 42 Mo モリブデン	97.90 43 Tc テクネチウム	102.9 44 Ru ルテチウム	106.4 45 Rh ロジウム	107.9 46 Pd パラジウム	107.9 47 Ag 銀	112.4 48 Cd カドミウム	114.8 49 In インジウム	118.7 50 Sn スズ	121.8 51 Sb アンチモン	127.6 52 Te テルル	126.9 53 I ヨウ素	131.3 54 Xe キセノン														
132.9 55 Cs セシウム	137.3 56 Ba バリウム	140.9 57 La ランタノイド	140.1 58 Ce セリウム	140.9 59 Pr プラセオジム	144.2 60 Nd ネオジム	(145) 61 Pm プロメチウム	150.4 62 Sm サマリウム	152.0 63 Eu ユロピウム	157.3 64 Gd ガドリニウム	158.9 65 Tb テルビウム	162.5 66 Dy ジスプロシウム	164.9 67 Ho ホルミウム	167.3 68 Er エルビウム	168.9 69 Tm ツリウム	173.0 70 Yb イットルビウム	(210) 71 Lu ルテチウム	(210) 72 Hf ハフニウム	(210) 73 Ta タンタル	(210) 74 W タングステン	186.2 75 Re レニウム	190.2 76 Os オスミウム	192.2 77 Ir イリジウム	195.1 78 Pt 白金	197.0 79 Au 金	200.6 80 Hg 水銀	204.4 81 Tl タリウム	207.2 82 Pb 鉛	209.0 83 Bi ビスマス	(210) 84 Po ポロニウム	(210) 85 At アスタチン	(222) 86 Rn ラドン
(223) 87 Fr フランシウム	(226) 88 Ra ラジウム	(227) 89 Ac アクチノイド	(227) 90 Th トリウム	232.0 91 Pa プロトアクチニウム	231.0 92 U ウラン	(237) 93 Np ネプツニウム	(239) 94 Pu プルトニウム	(243) 95 Am アメリシウム	(247) 96 Cm キュリウム	(247) 97 Bk バークリウム	(252) 98 Cf カリホルニウム	(252) 99 Es アインスタイニウム	(257) 100 Fm フェルミウム	(258) 101 Md メンデレビウム	(259) 102 No ノーメリウム	(262) 103 Lr ローレンシウム															

- 典型非金属元素
- 典型金属元素
- 遷移金属元素

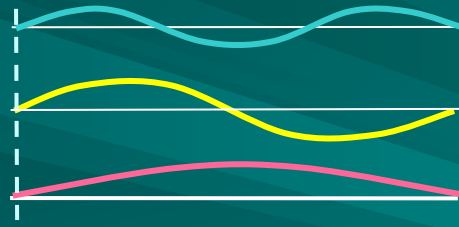
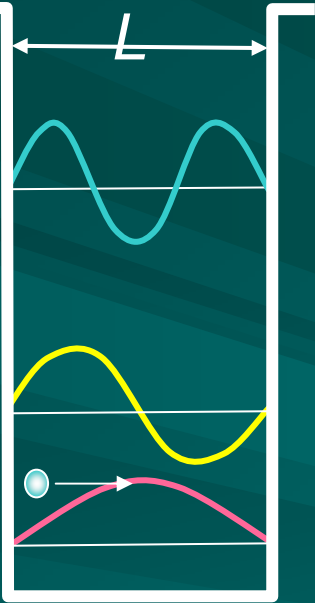


周期律が成り立つのはなぜか？

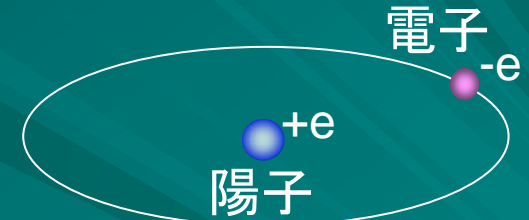
ランタノイド	138.9 57 La ランタン	140.1 58 Ce セリウム	140.9 59 Pr プラセオジム	144.2 60 Nd ネオジム	(145) 61 Pm プロメチウム	150.4 62 Sm サマリウム	152.0 63 Eu ユロピウム	157.3 64 Gd ガドリニウム	158.9 65 Tb テルビウム	162.5 66 Dy ジスプロシウム	164.9 67 Ho ホルミウム	167.3 68 Er エルビウム	168.9 69 Tm ツリウム	173.0 70 Yb イットルビウム	175.0 71 Lu ルテチウム
アクチノイド	(227) 89 Ac アクチニウム	232.0 90 Th トリウム	231.0 91 Pa プロトアクチニウム	238.0 92 U ウラン	(237) 93 Np ネプツニウム	(239) 94 Pu プルトニウム	(243) 95 Am アメリシウム	(247) 96 Cm キュリウム	(247) 97 Bk バークリウム	(252) 98 Cf カリホルニウム	(252) 99 Es アインスタイニウム	(257) 100 Fm フェルミウム	(258) 101 Md メンデレビウム	(259) 102 No ノーメリウム	(262) 103 Lr ローレンシウム

エネルギーの量子化

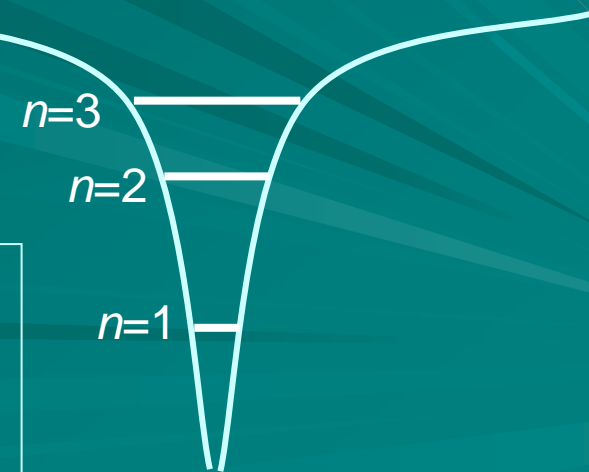
量子力学によれば電子は**粒子**であると同時に**波**の性質も示す



水素原子：
原子核（陽子）の周りを電子が回る



箱の中の電子 定在波 ⇒ 離散的エネルギー準位
(電子が収まる部屋)

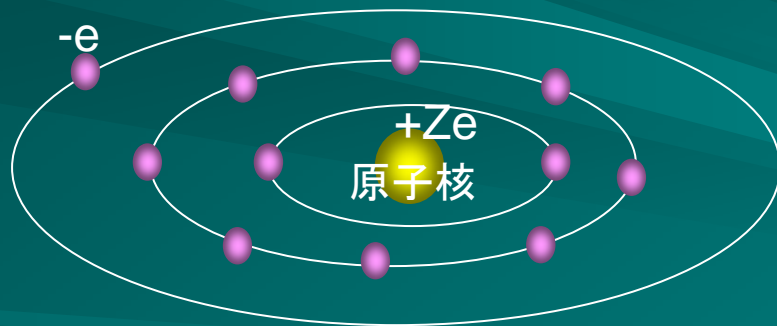


エネルギー準位を指定する n を「量子数」と呼ぶ
さらに、回転運動に関係した量子数 l, m と、
スピン(自転)に関係した量子数 σ がある。
⇒ 電子のエネルギー準位は (n, l, m, σ) で指定される。

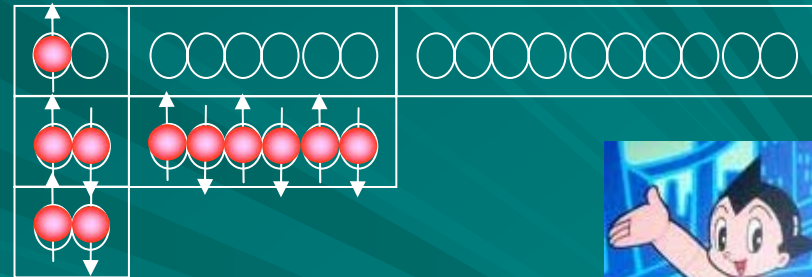
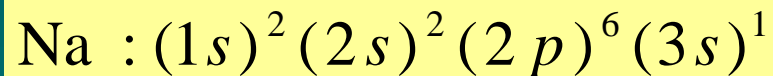
原子の電子配置

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個ずつ收容される
(各状態には, 上向きスピンの電子と下向きスピンの電子の計2個が收容できる)



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

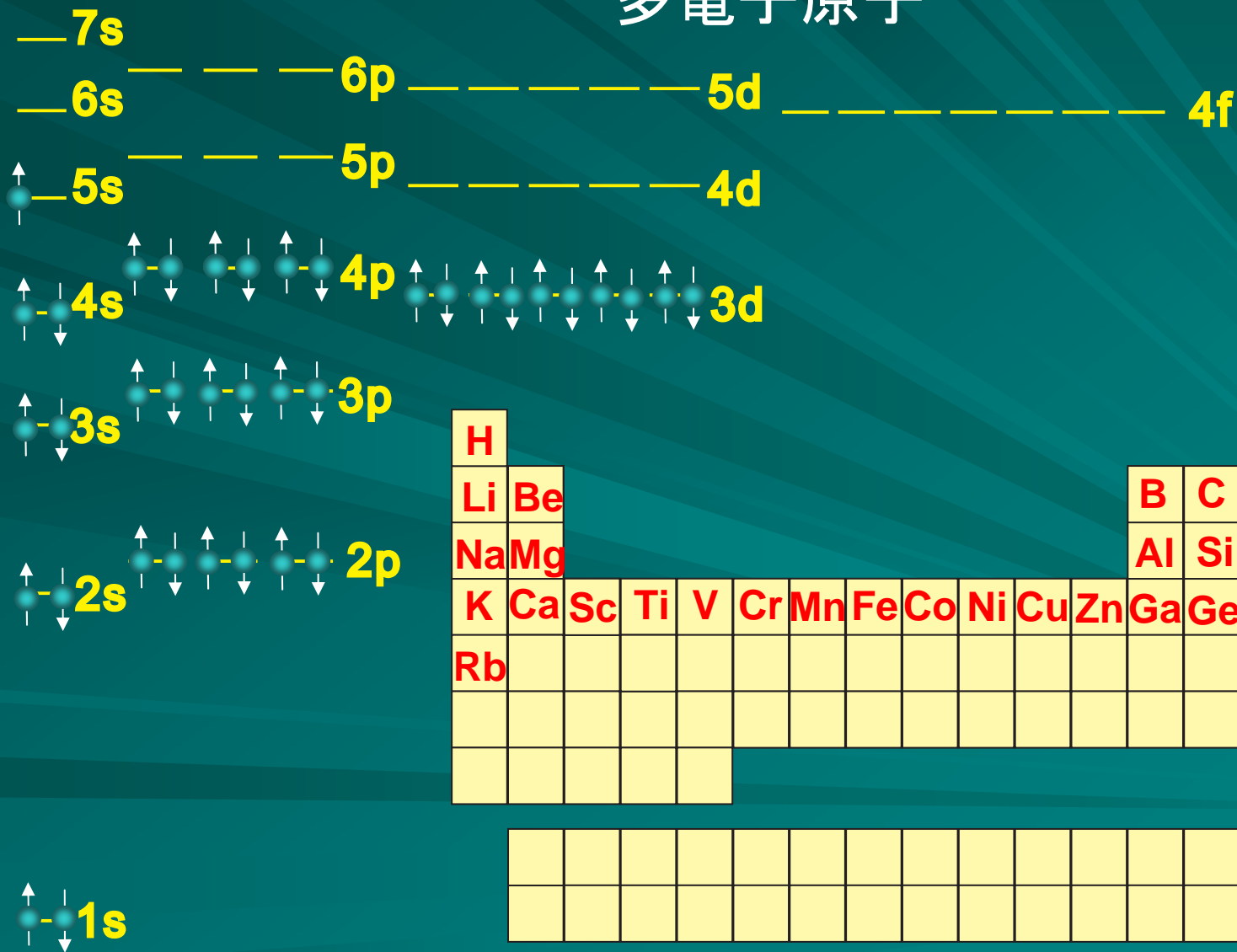
.....

(各客室はツイン)



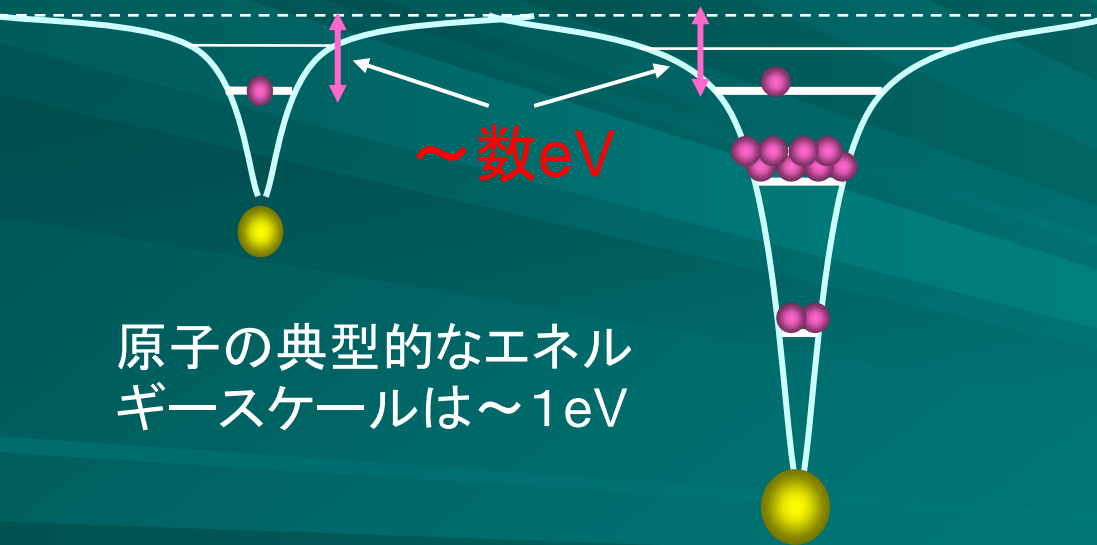
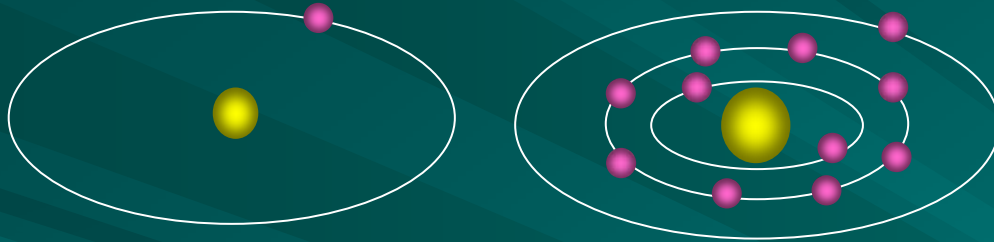
電子エネルギー準位の詰まり方

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**

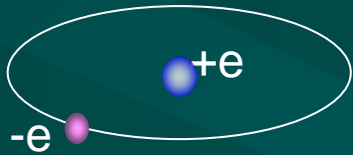
＜第二步＞

原子から固体へ

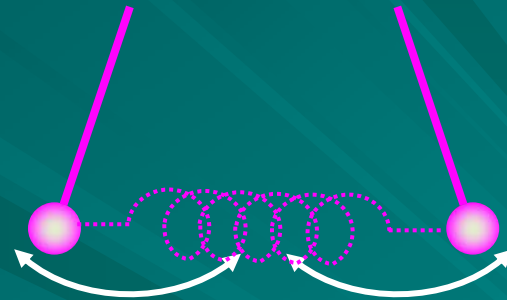
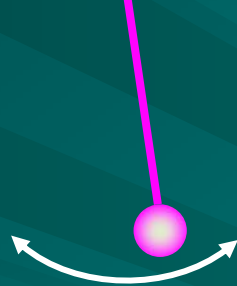
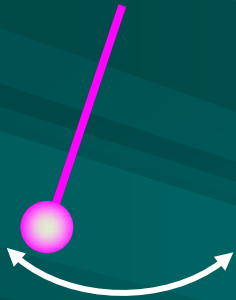
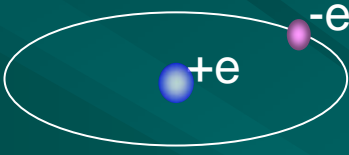
— 金属・絶縁体・半導体 —

2個の原子を近づける

水素原子

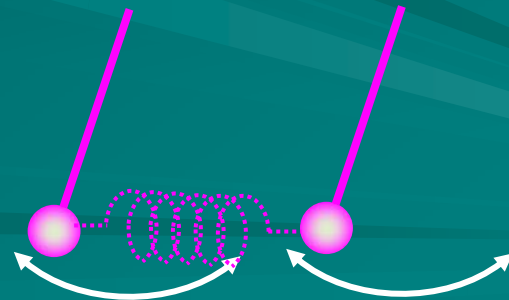
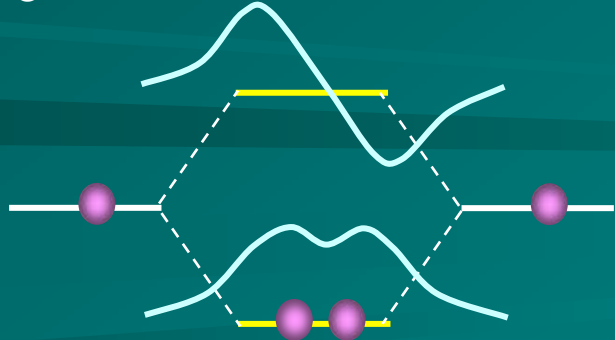


水素原子



逆位相の振動
高い振動数(エネルギー)

水素分子: H_2



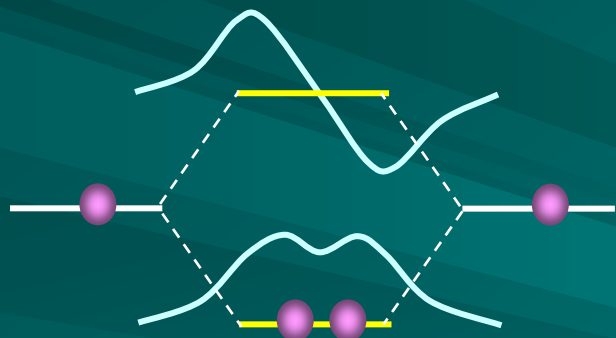
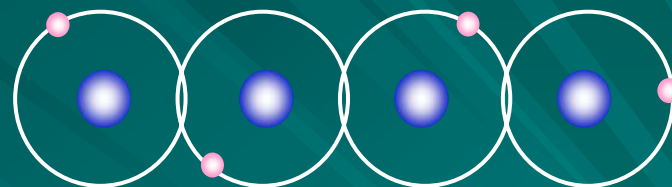
同位相の振動
低い振動数(エネルギー)

原子をたくさんならべる

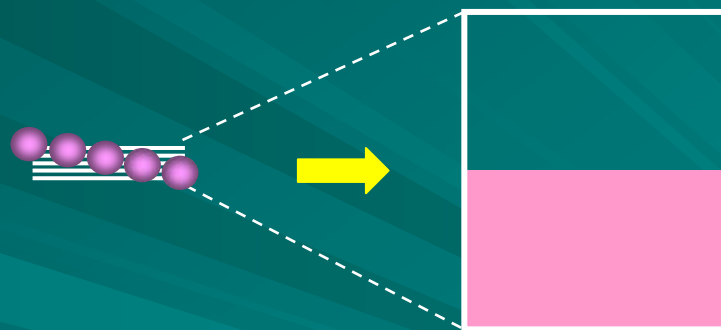
水素分子: H_2



水素原子を周期的に並べる



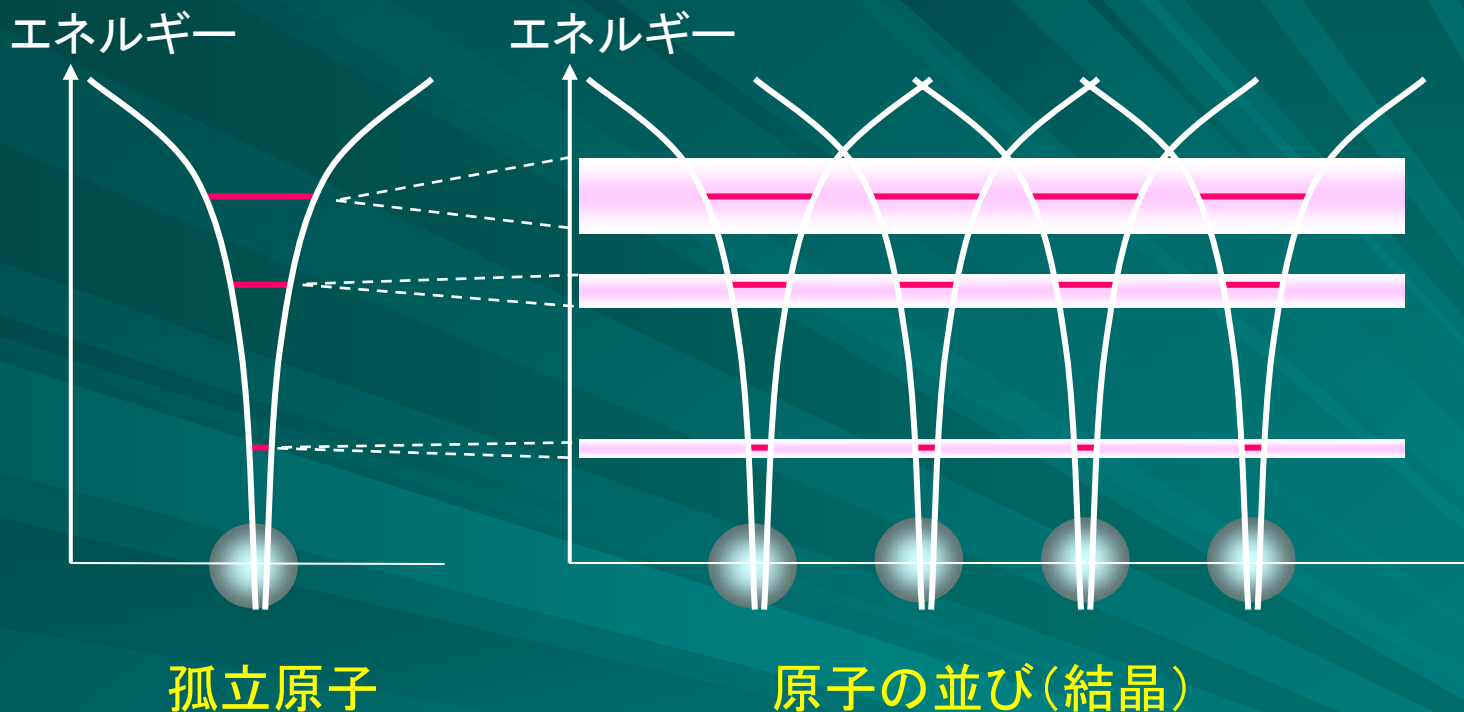
エネルギー準位が
2つに分裂する



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

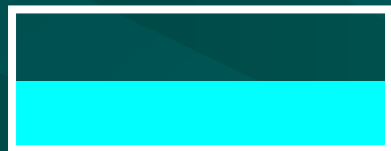


原子の電子エネルギー準位が、電子の跳び移りによって、それぞれ広がってエネルギーバンドを形成する

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

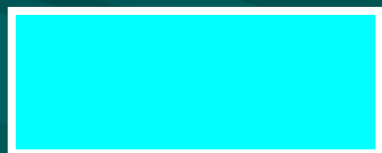
途中まで詰まったバンド



電流が流れる

電場をかける

完全に詰まったバンド



電流は流れない

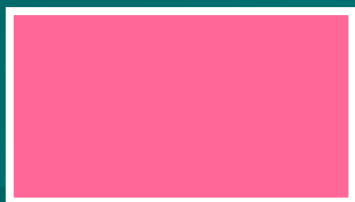
エネルギー ↑



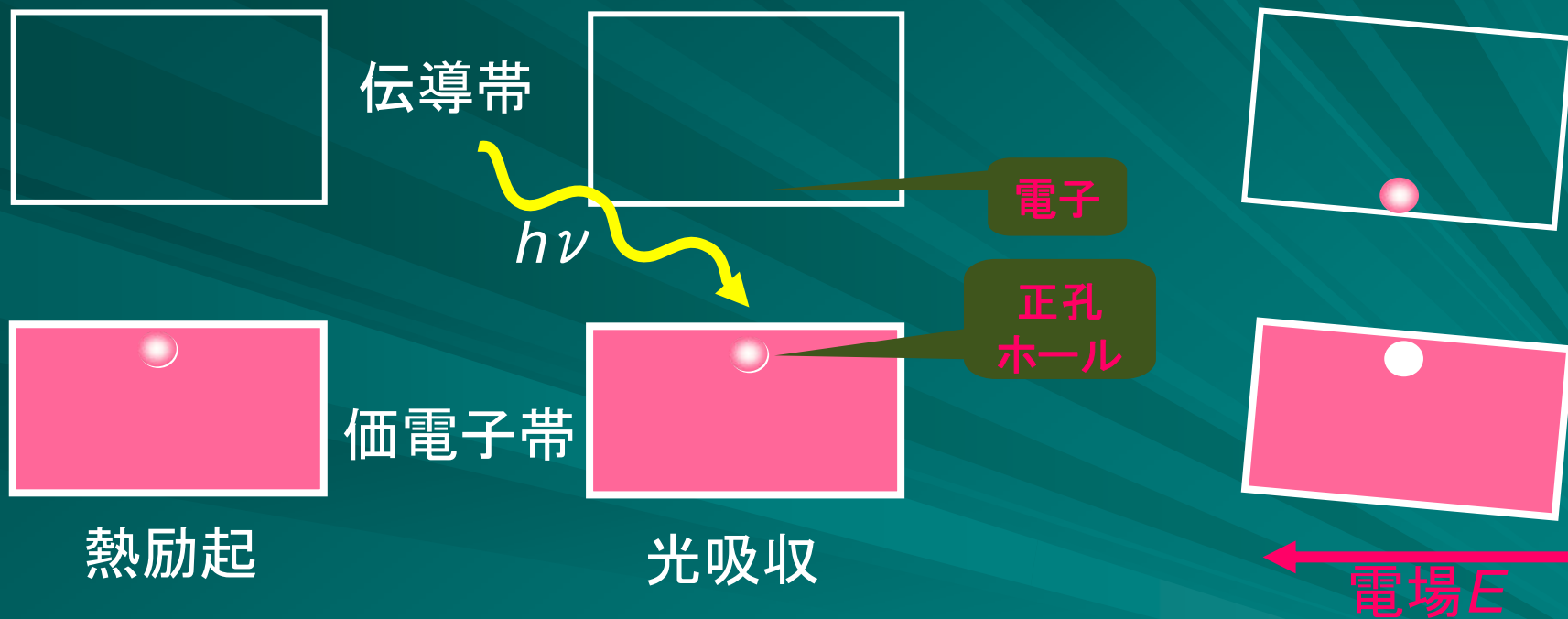
金属



絶縁体
(バンド絶縁体)

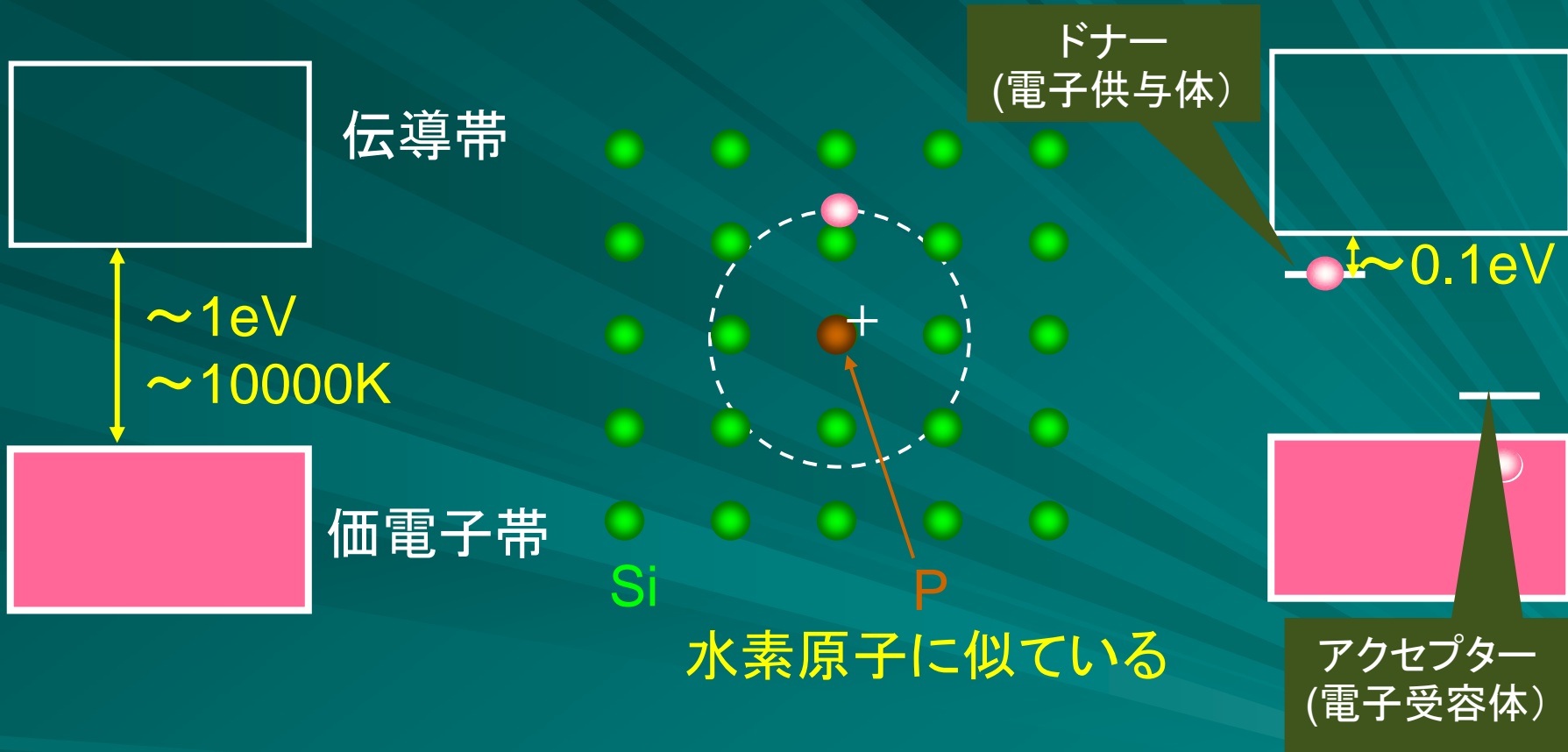


半導体の電子と正孔(ホール)



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

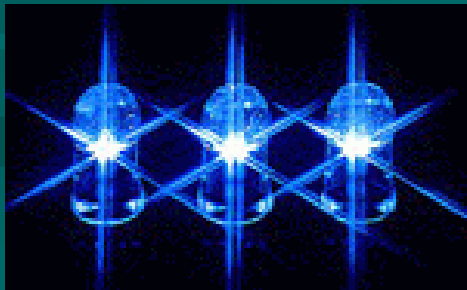
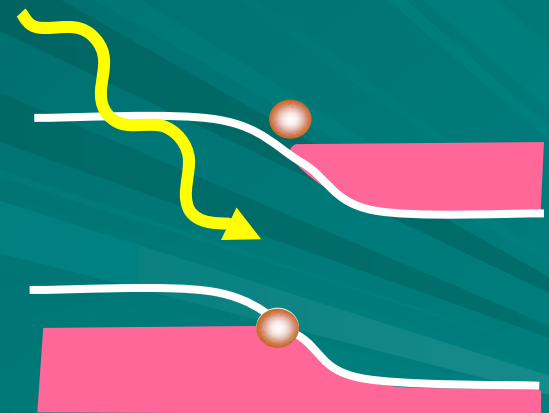
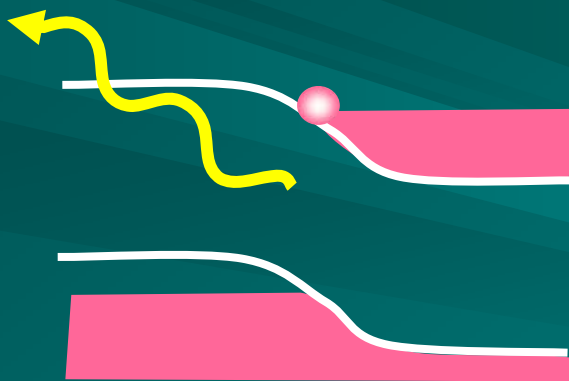
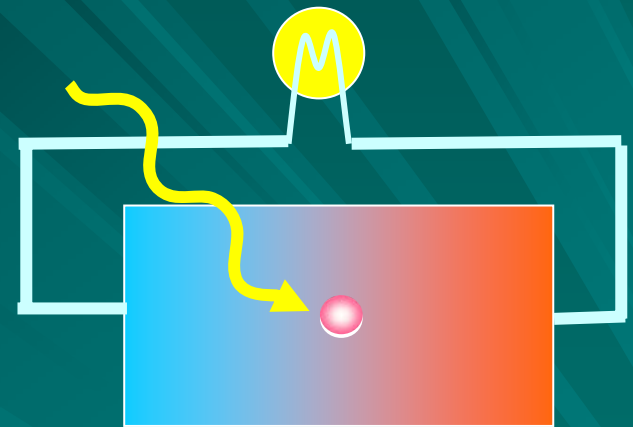
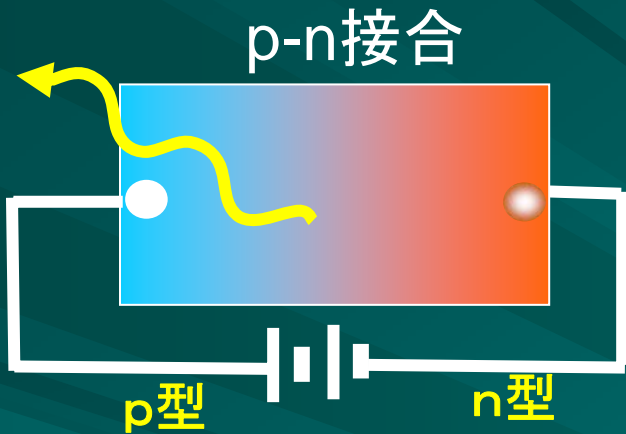
ドーピング



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



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

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 —

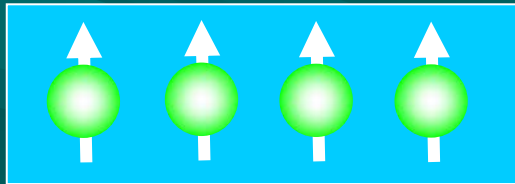
強磁性

ある物質が磁石（強磁性体）であるためには

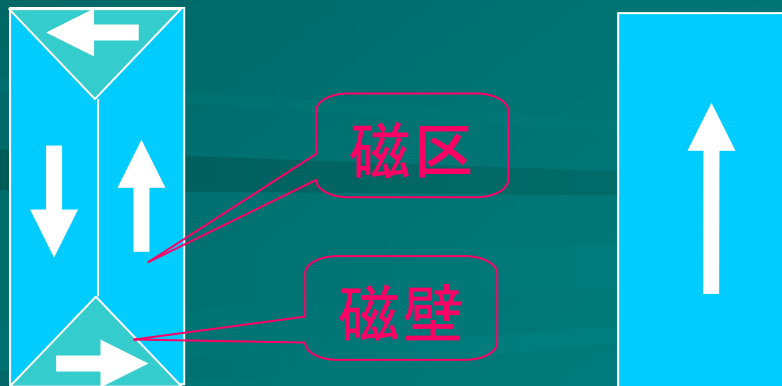
(1) 原子（あるいは分子）が磁気モーメント（ミクロの磁石）をもつ



(2) それらの磁気モーメントが同じ向きにそろおう

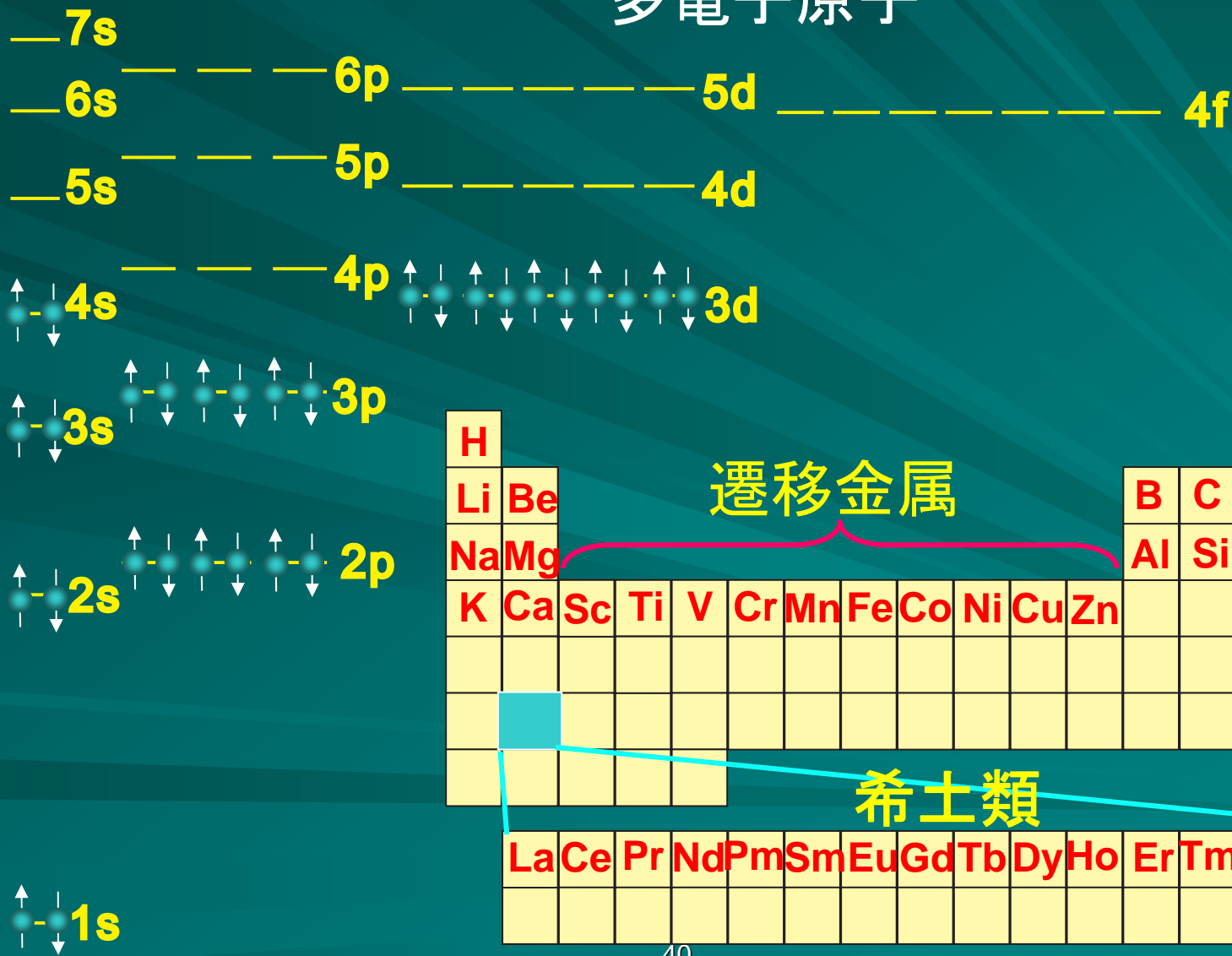


(3) マクロな試料が全体として磁化をもつ



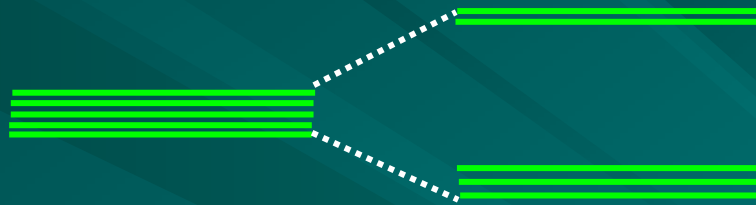
電子エネルギー準位の詰まり方

多電子原子



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

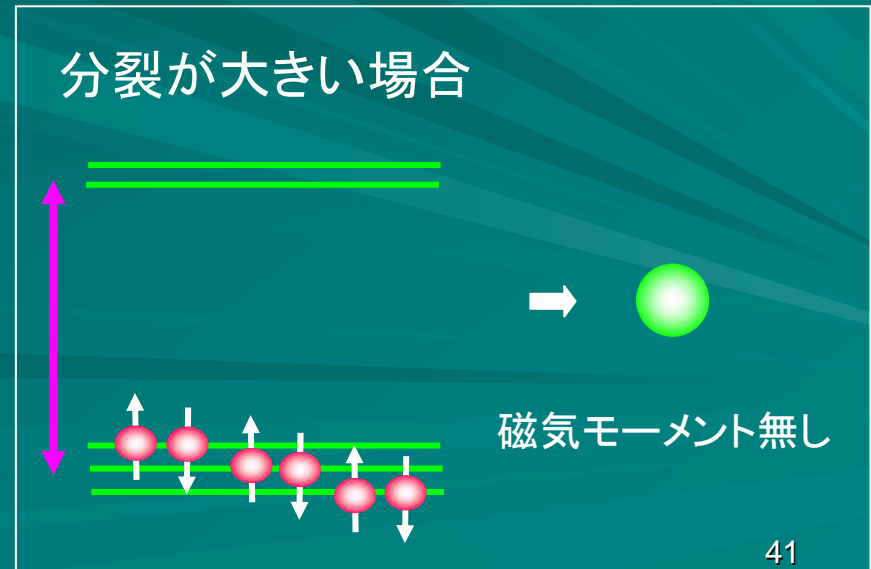
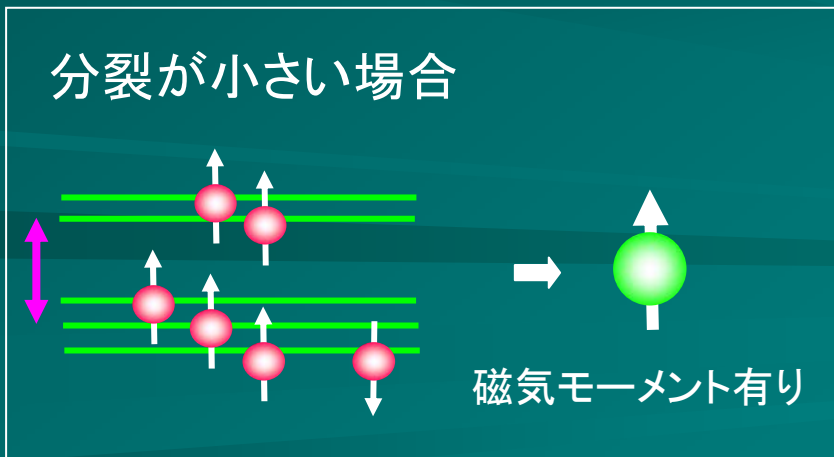


その原子が置かれた
環境(結晶場)によっ
て, 5つのエネルギー
準位が分裂する

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)

Fe²⁺ (d電子が6個) の例



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はなにか？



~~古典電磁気学の
磁気双極子相互作用？~~

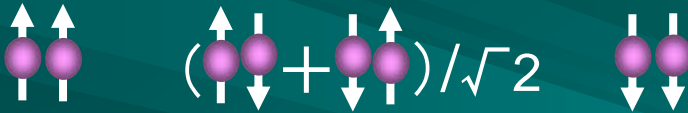
相互作用として弱すぎる
(エネルギー < 1K)



量子力学的な効果
交換相互作用

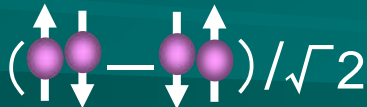
(スピンに向きによるクーロン相互作用の違い)

2つのスピンの平行 (スピン3重項)



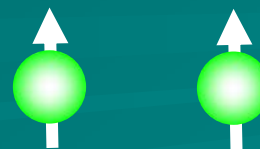
↑ ↓
クーロン相互作用エネルギーに差
(交換相互作用)

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

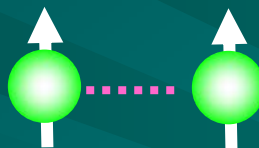
熱ゆらぎ

⇒ それぞれが勝手な方向を
向こうとする



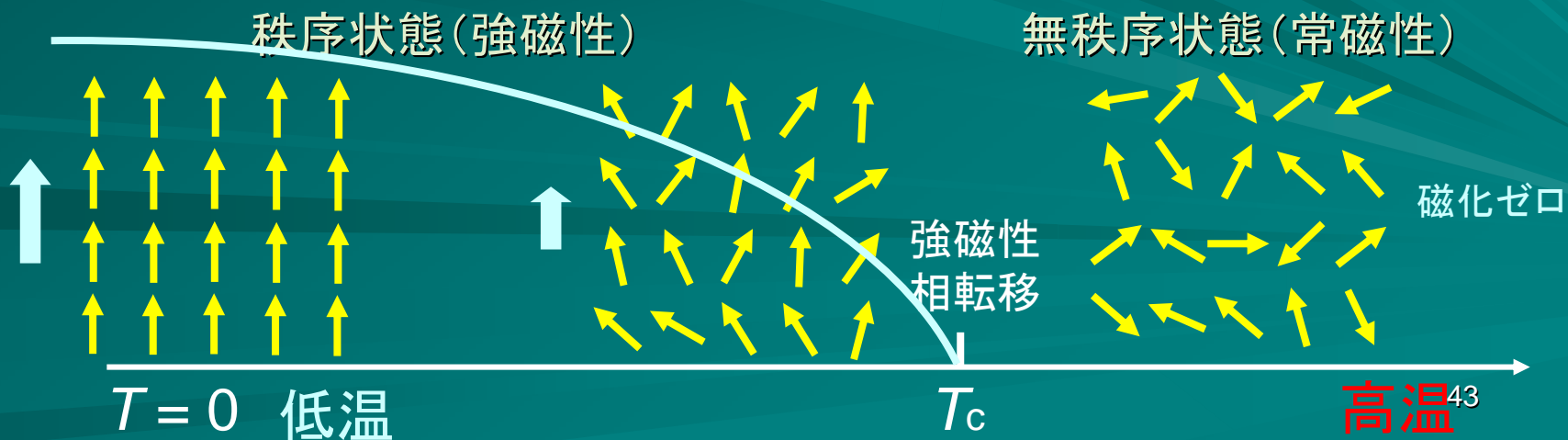
「好き勝手な方向を向きたい」

強磁性的相互作用 ($J > 0$)
⇒ 隣と平行になろうとする



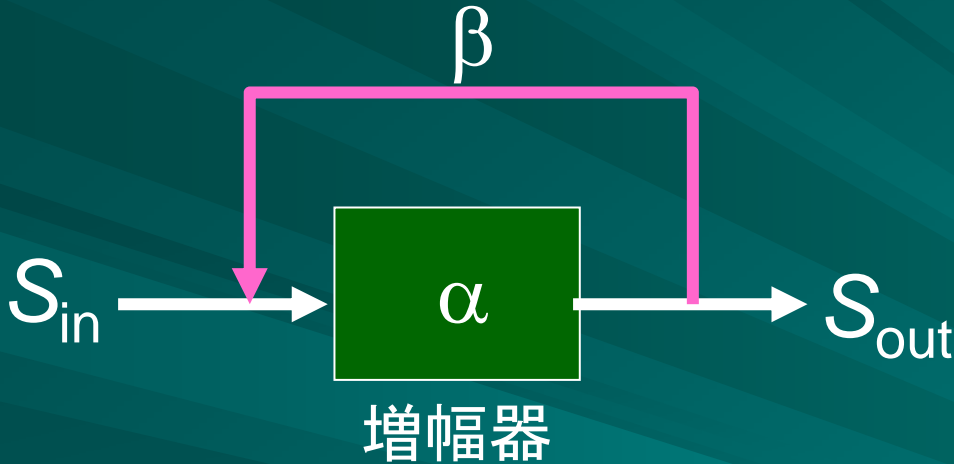
「でも隣近所とも折り合わない」と

「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

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

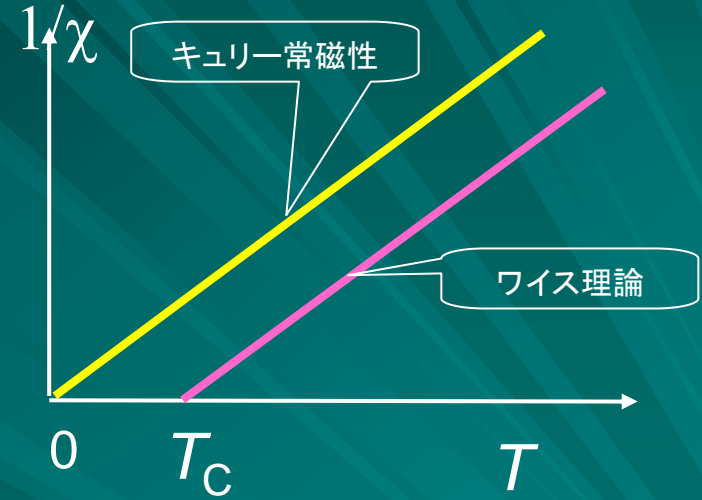
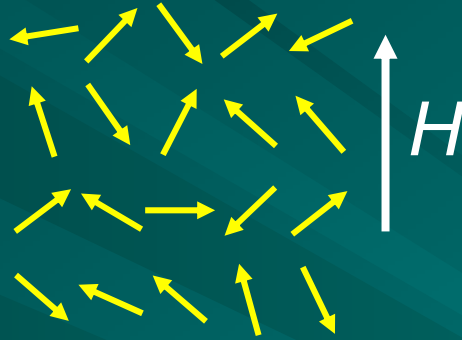
強磁性の平均場理論 (ワイス理論)

キュリー常磁性 (かけた磁場に比例した磁化)

$$M = \chi H$$

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

χ : 磁化率



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

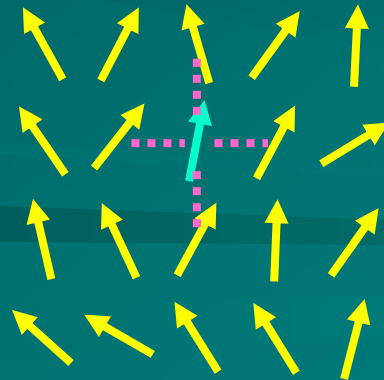
協力現象: 一種のフィードバック機構

外部磁場

周りの磁気モーメントによる有効磁場

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

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



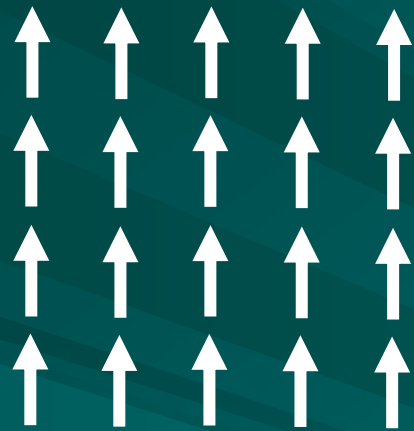
$$M = \frac{C/T}{(1 - \beta C/T)} H$$

$$= \frac{C}{(T - T_C)} H \quad (T_C \equiv \beta C)$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\chi} = \frac{1}{C} (T - T_C)$$

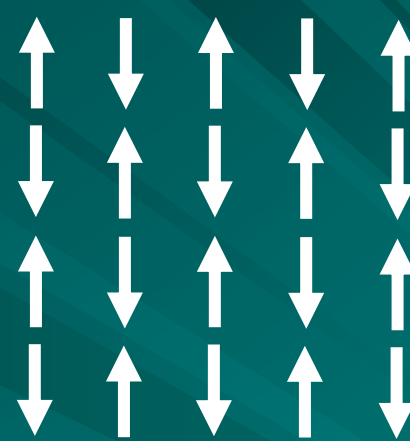
T_C : 強磁性転移温度

磁気秩序のいろいろ

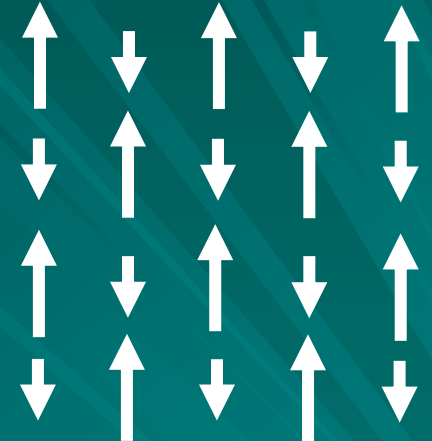


秩序状態

強磁性
(マクロな磁化あり)

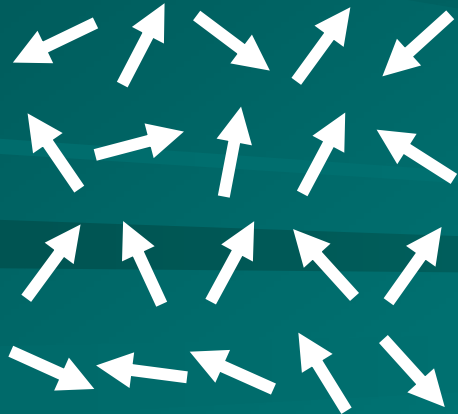


反強磁性
(マクロな磁化なし)



フェリ磁性
(マクロな磁化あり)

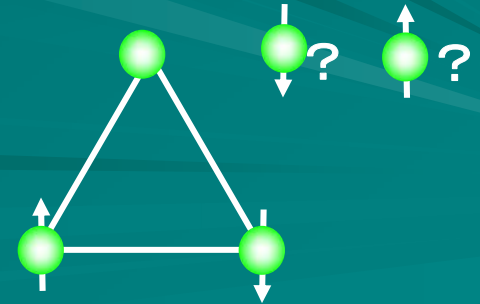
高温では



無秩序状態

常磁性 (マクロな磁化なし)

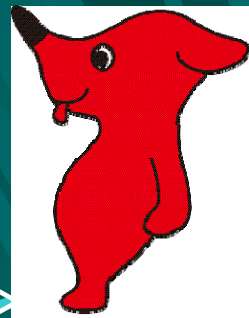
配置が三角形だったら？



フラストレーション⁴⁶



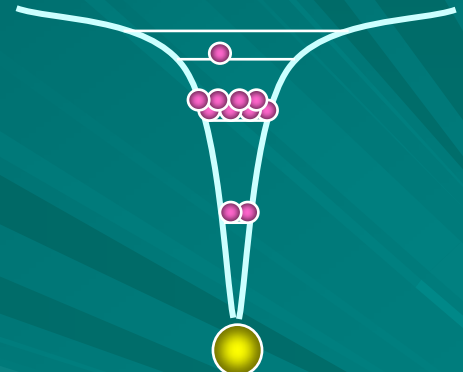
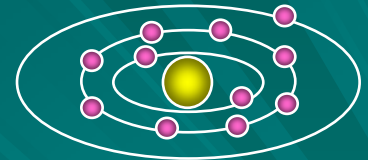
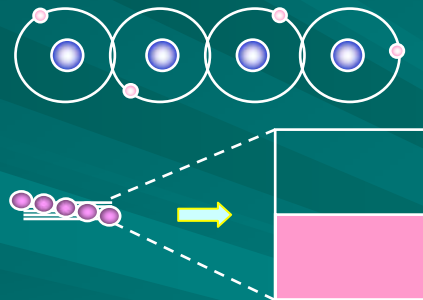
物性科学 はじめの三歩



< 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

元素周期表

1																	18
1	2											13	14	15	16	17	18
H	He											B	C	N	O	F	Ne
3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18		
Li	Be	B	C	N	O	F	Ne	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar		
19	20									29	30	31	32	33	34	35	36
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
55	56											81	82	83	84	85	86
Cs	Ba	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104
Fr	Ra	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt										
f-block elements																	
La		Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
Ac		Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Mn	No	Lr		

第5回： 物質の個性（物性）はどこから生まれるか

- 温度について（前回の補足）
- 物質の構造
 - － 原子の並び方
- 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
金属・絶縁体・半導体
 - － 第三歩： 協力現象と相転移
磁性を例として

