

# 学術俯瞰講義

## 多彩な物質の世界

宇宙から地球への遙かな旅

原子・電子・分子のふるまいが生む物質の多様性

### 第5回

現代社会と物質科学,

原子から固体へ

東京大学物性研究所

家 泰弘



†:このマークが付してある著作物は、第三者が有する著作物ですので、同著作物の再使用、同著作物の二次的著作物の創作等については、著作権者より直接使用許諾を得る必要があります

2010年11月4日  
学術俯瞰講義

# ハイテク社会の科学難民(?)

- 現代社会に生きる人々は日々、科学・技術の成果を享受している。
- 一方で、それら日常の便利な機器はブラックボックス化しており、一般市民や若者のサイエンス・リテラシーはむしろ以前より低下しているのではないか。
- 科学・技術は「誰か他の人がやってくれること」になりつつある。
- 科学的知識に立脚して冷静になさるべき重大選択が多々あるのだが・・・知識がなければマスコミに盲従か情緒的判断に陥りがち。

# 物理を学ぶ効用

- 科学を専門としない人が物理を学ぶ効用は何かといえば、それは「常識がつく」ことではないだろうか。たとえば「エネルギー保存則」や「エントロピー増大の法則」や「因果律」といった科学の根本原理に反するような怪しげな超常現象の話を怪しいと直観（直感ではなく）できる常識である。健全な懷疑精神と言っても良いかもしれない。
- 一方、物理を専門とする者にとって研究活動の醍醐味は何かといえば、それは「常識」が破られる快感であると思う。

# 講義プラン

第1~4回 駒宮 幸男先生・須藤 靖先生 素粒子・宇宙  
「ミクロな素粒子からマクロな宇宙へ」

第5~7回 家 泰弘・小島 憲道先生 物性科学  
「原子・電子・分子のふるまいが生む物質の多様性」

家担当分

第5回 現代社会と物質科学, 原子から固体へ

第6回 量子の世界:ナノサイエンス, 超伝導, 超流動

第8~10回 杉山 雄一先生 創薬科学  
「望ましい性質を持つ物質の探索と創成－創薬科学の分野から」

第11~12回 小関 敏彦先生・鳥海 明先生 材料工学  
「物質が変わる－物質から材料へ」

第13回 小宮山宏先生 地球環境／システム工学  
「小さな地球を永遠に」

# 今日のお話

現代社会と物質科学, 原子から固体へ

スケールのお話

現代社会と物質科学

物理学の基本概念(のいくつか)

物性物理学とは何をする学問か

量子力学と原子構造

原子から固体へ

# 参考書(ちょっと宣伝)

物性研究所創立50周年記念出版

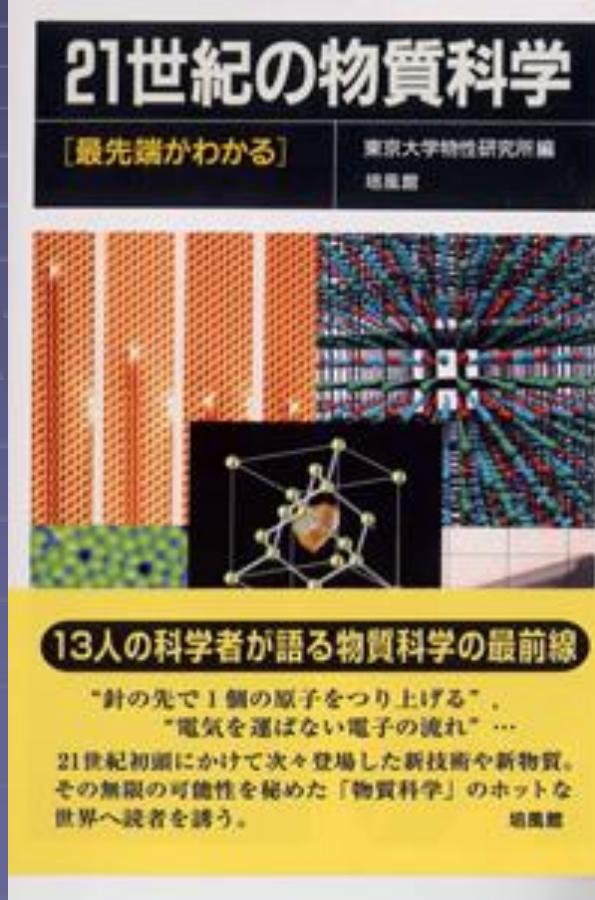
「21世紀の物質科学」

物性研究所編



+

柏キャンパスの物性研究所



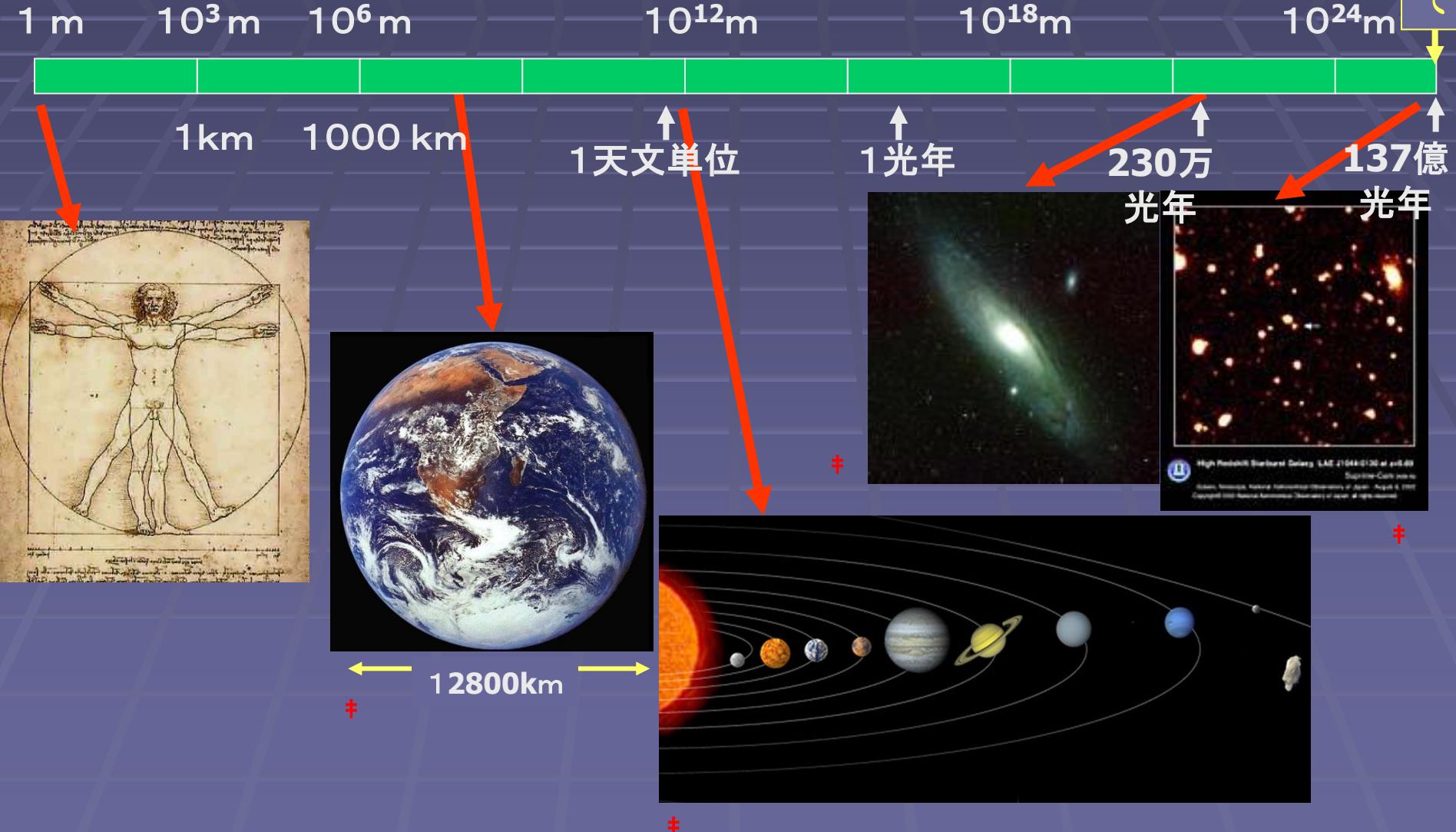
+

培風館 (¥2000+税)

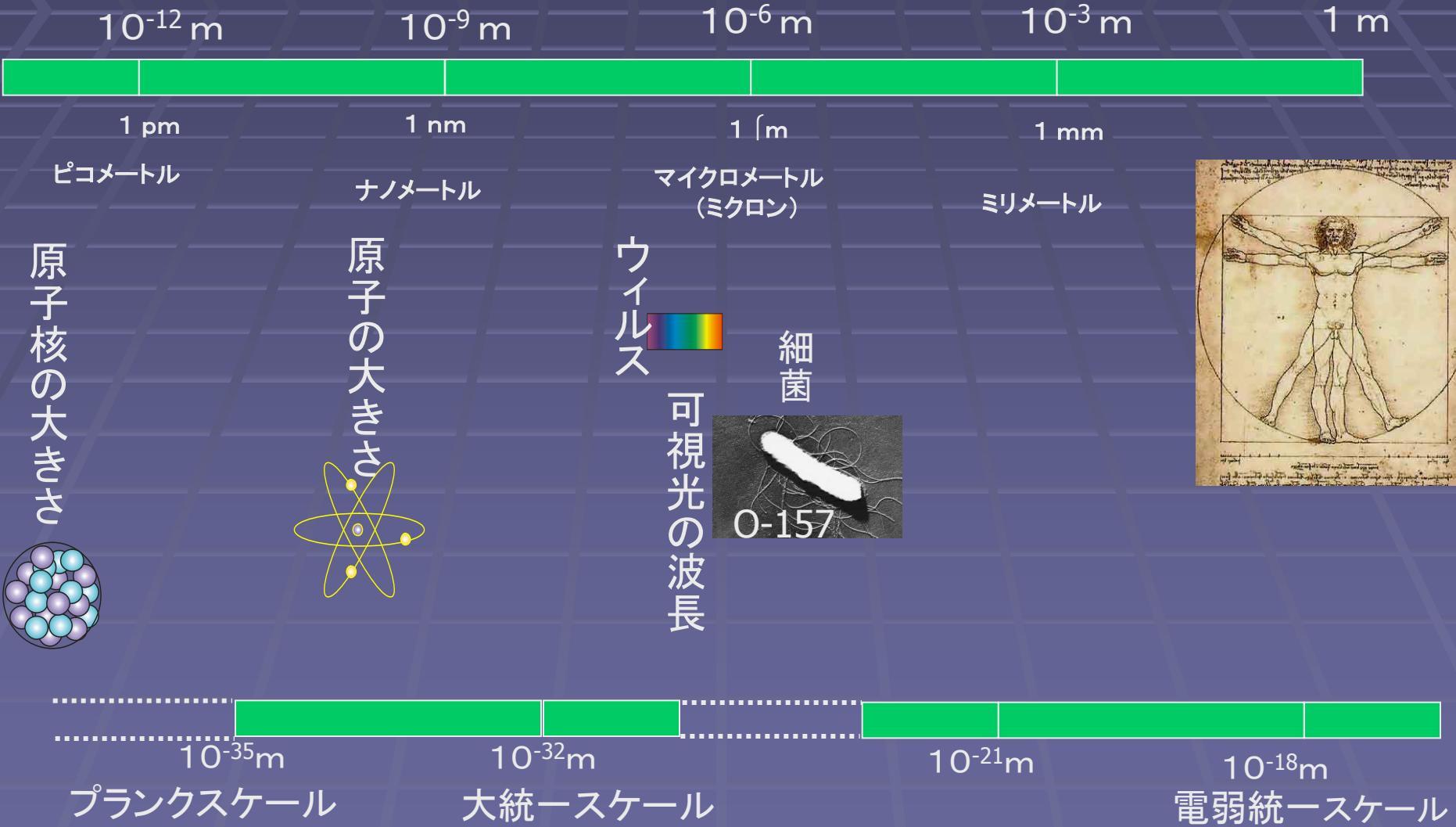
# スケールのお話

# スケールの大きな話

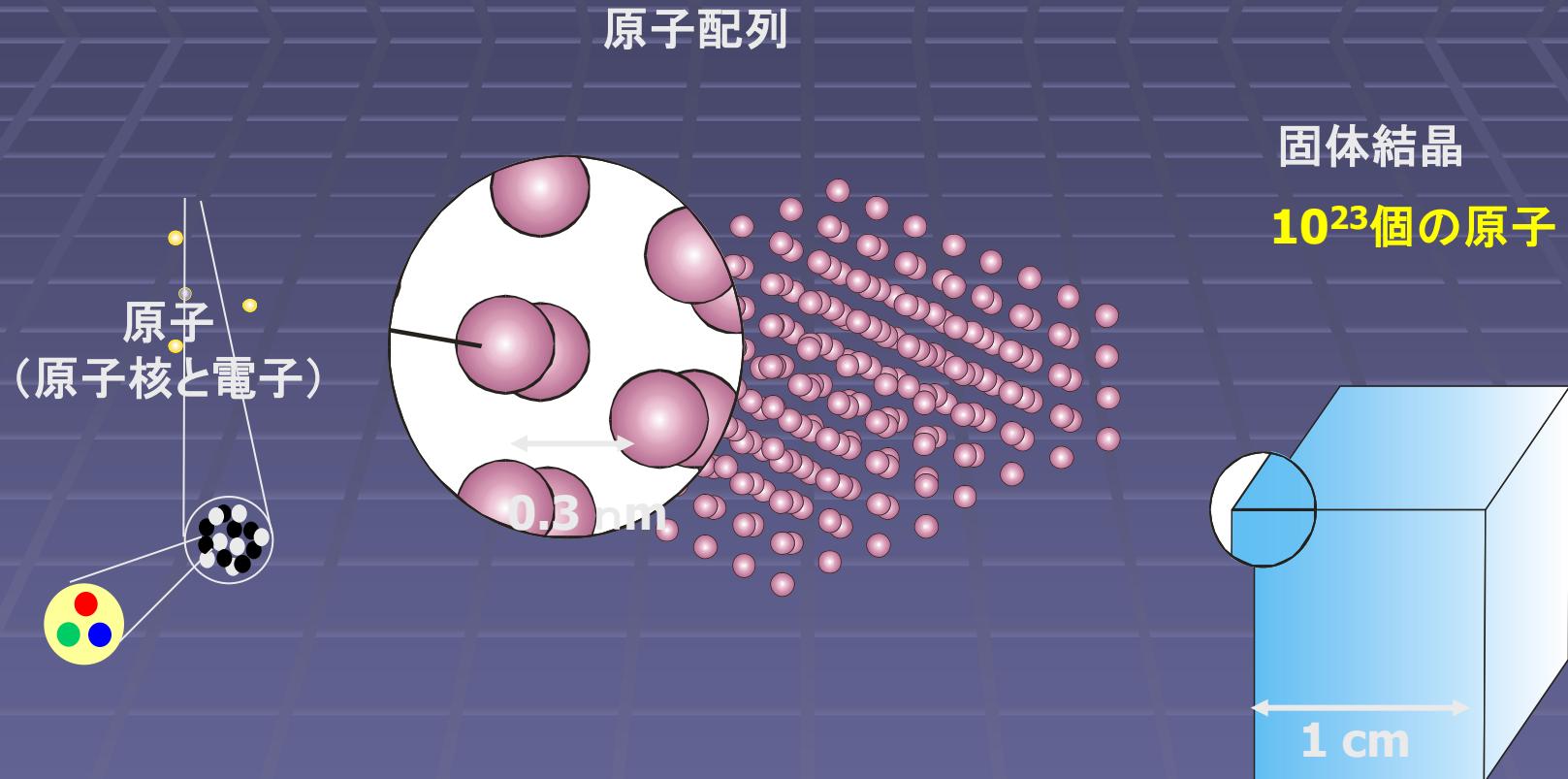
宇宙の果て



# スケールの小さな話



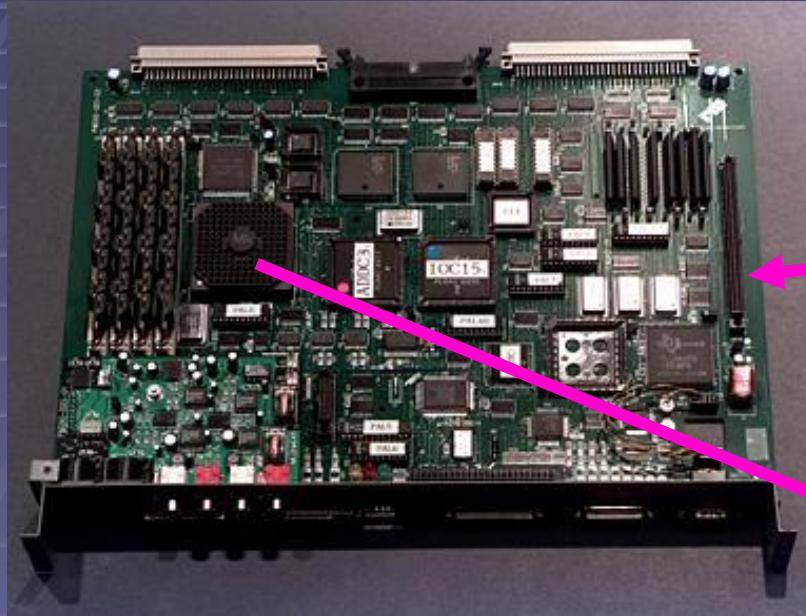
# 物質世界の階層構造



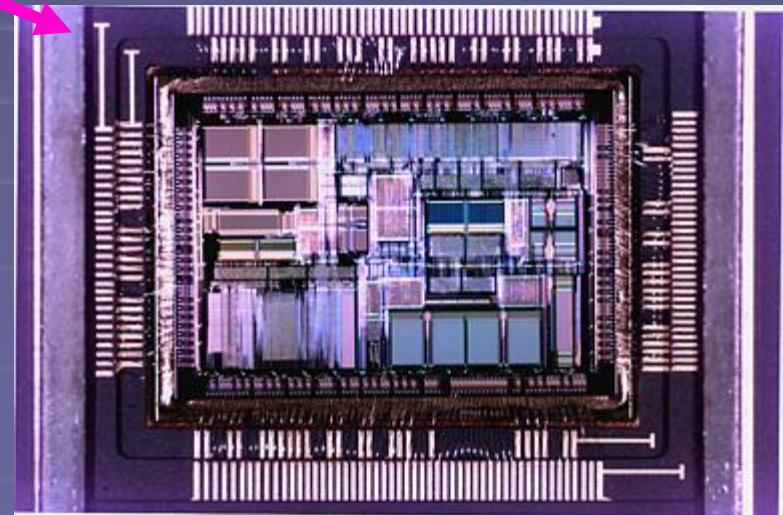
# 现代社会と物理学

# コンピューター

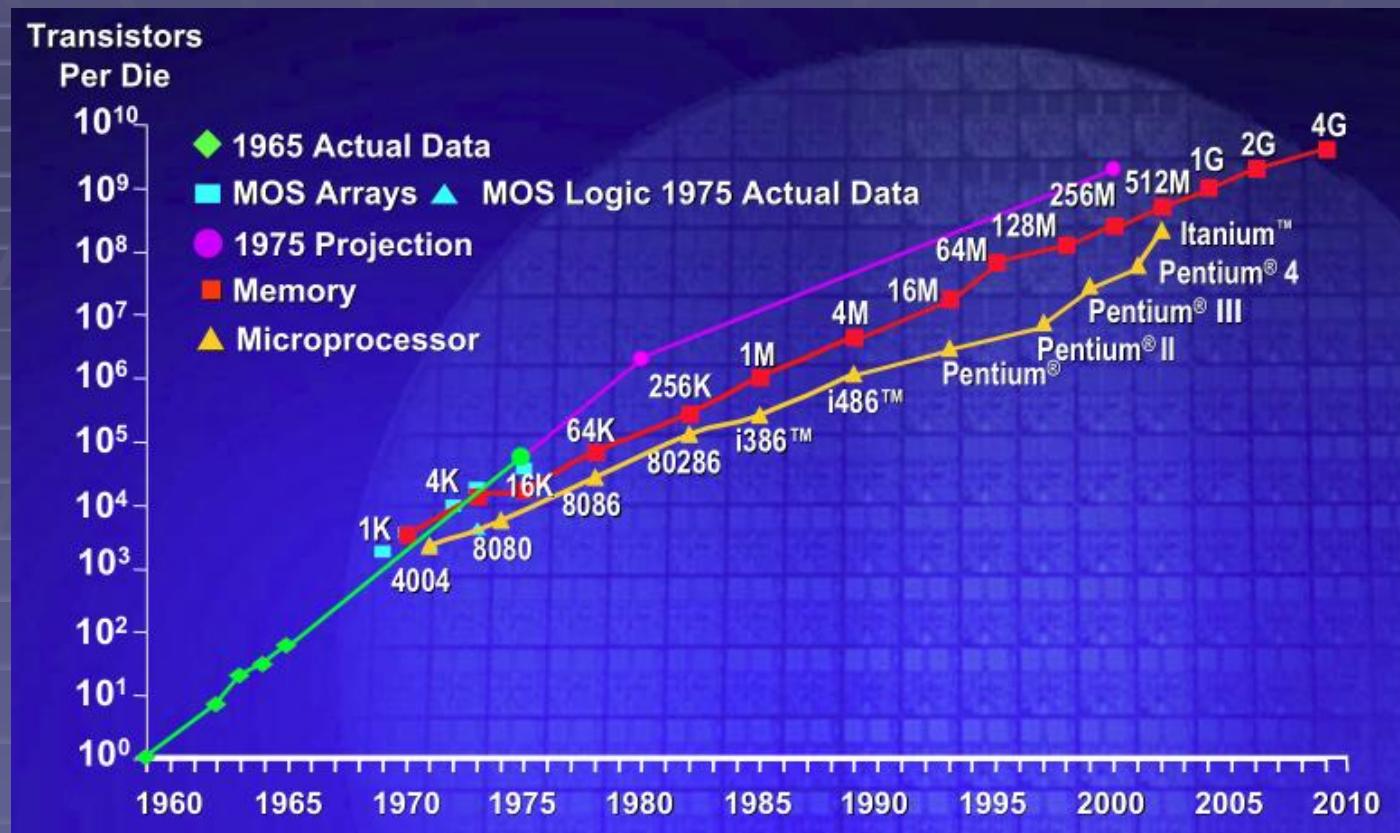
## パソコンコンピューター



半導体の中の電子  
のふるまい  
量子力学に基づく  
物性物理学



# ムーア(Moore)の法則



LSI(大規模集積回路)の集積度、つまり単位面積あたりのトランジスタの数は約1年半ごとに倍増する。

⇒ 鳥海先生の講義

# 記憶装置

磁気ハードディスク



CD-ROM/DVD



半導体メモリー

フラッシュメモリー  
強誘電体メモリー



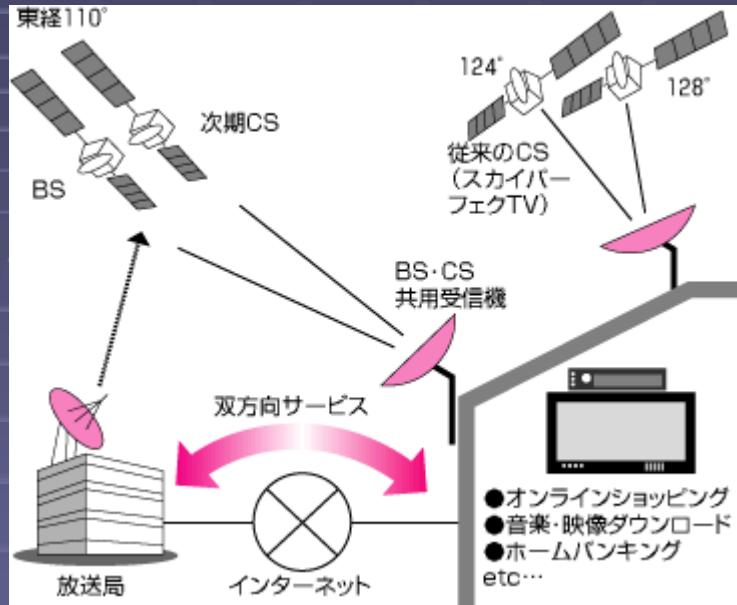
デジタル情報を磁性体の  
磁化の向きとして記録

ディスクの記録面につけた凹凸  
によるレーザーの反射の違い

# 無線(高周波), 光通信

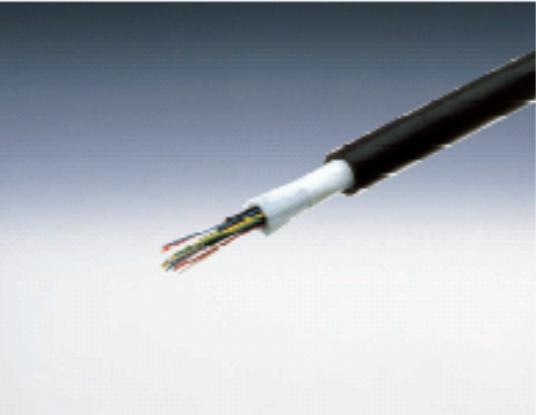


携帯電話



衛星通信  
衛星放送

高移動度トランジスタ  
HEMT



光ファイバー



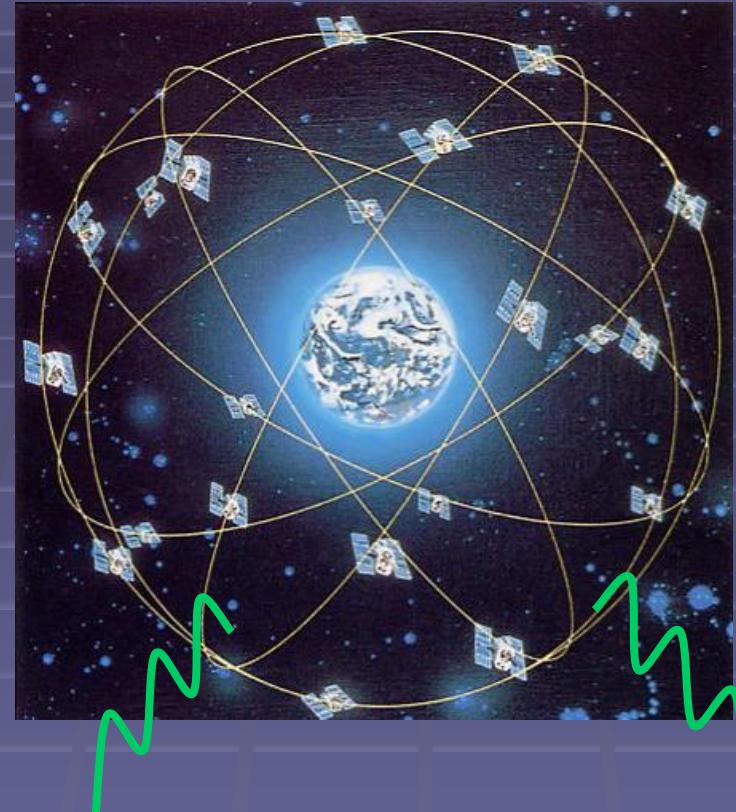
発光ダイオード  
半導体レーザー

# ナビ GPS(Global Positioning System)

24台の衛星を軌道上に配置.

「三角測量」により位置を割り出す.

正確な計時が重要. 衛星には原子時計が搭載されている.

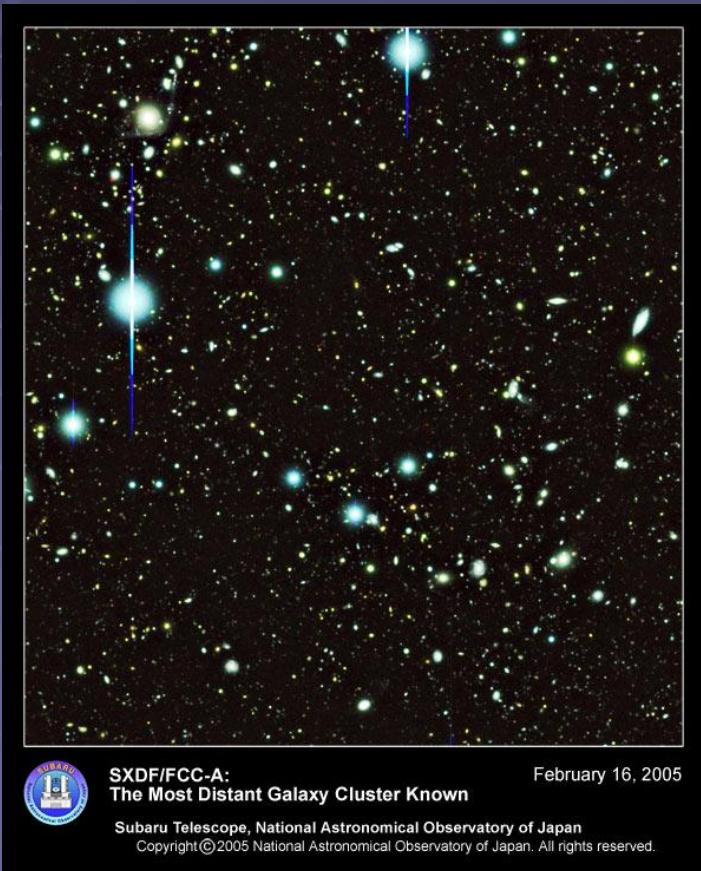


GPSが機能するためには特殊相対論および一般相対論の補正が必須

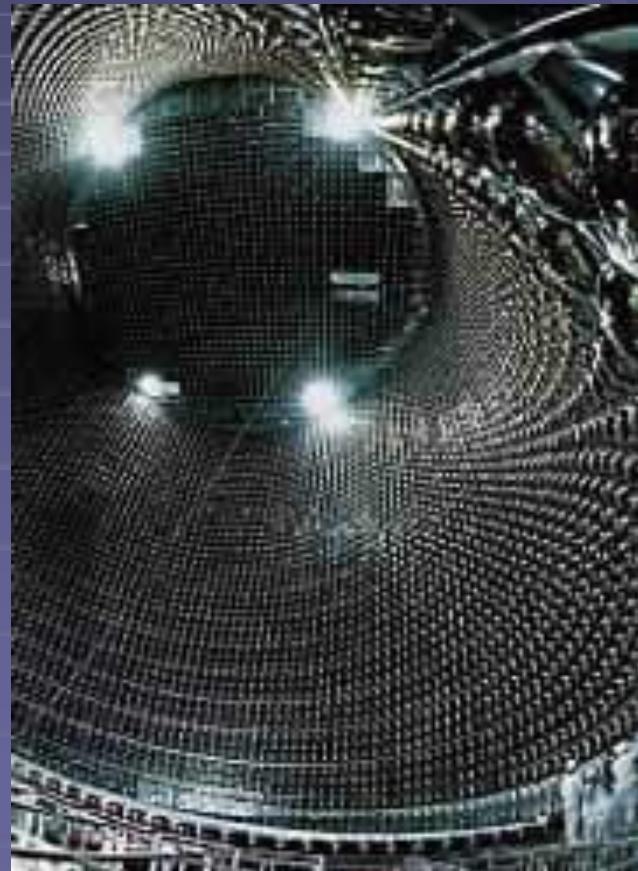


# 素粒子・宇宙研究にも

すばる望遠鏡  
CCDカメラ



スーパー・カミオカンデ  
光電子増倍管

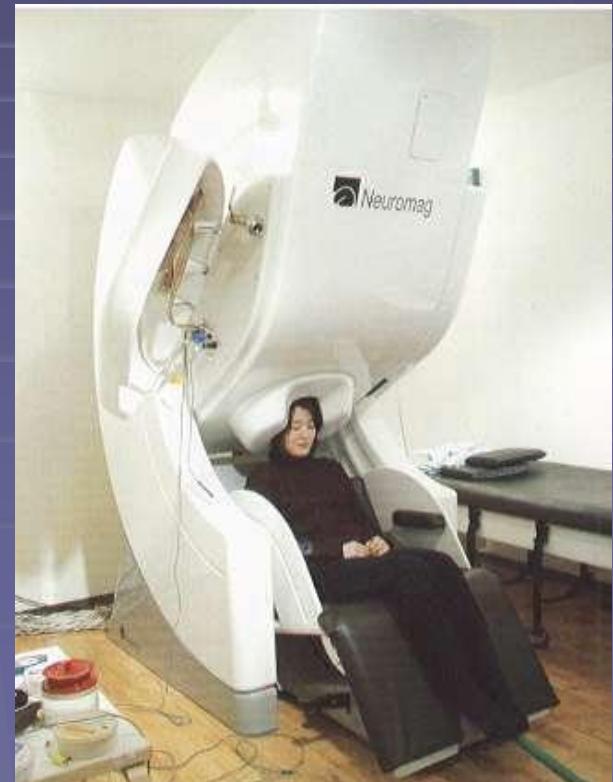


# 先端医療にも

## MRI（磁気共鳴画像診断装置）



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



# 身近なところにも

- 液晶（ディスプレイ）
- 高強度纖維（テニスラケット）
- 高分子ゲル（紙おむつ）
- 形状記憶合金
- 燃料電池
- 光触媒
- 太陽光発電
- .....

# 物理学の基本概念 (のいくつか)

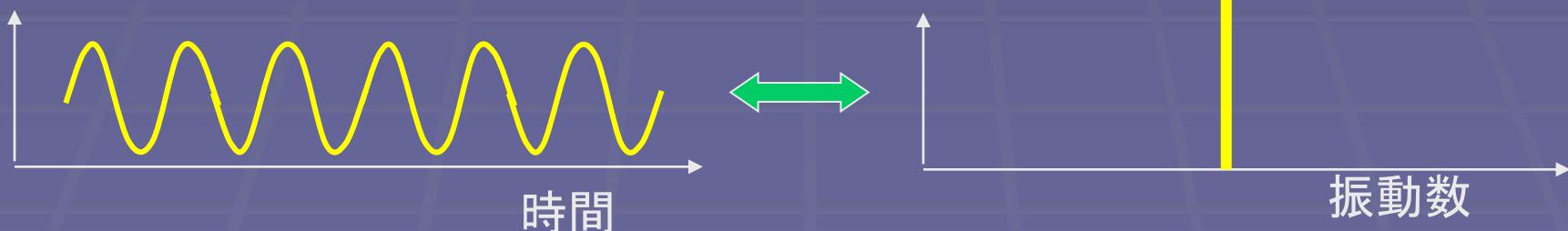
# 因果律

- 結果が原因に先行することはない。  
ある事象の効果(物理的影響)が過去に遡及することはない。
  - ⇒ タイムマシンの不可能性
  - ⇒ 量子力学の観測問題における  
遅延選択実験(delayed choice experiment)
- ある地点から別の地点へ、影響が光速より速く伝わることはない。  
光速によって結びつかない時空の事象間に  
因果関係はあり得ない。

# 対称性と保存則

「対称性あるところ保存則あり」ネーターの定理

- 空間の一様性(宇宙のどこでも物理法則は同じ)  
⇒ 運動量保存則
- 空間の等方性(どちらを向いても物理法則は同じ)  
⇒ 角運動量保存則
- 時間の一様性(物理法則はいつでも同じ)  
⇒ エネルギー保存則



# 熱力学の法則

## ■ 第一法則：エネルギー保存則

⇒ 第一種永久機関の不可能性

There is no free lunch.

*You cannot win.*

入力よりも大きな出力エネルギーを生み出す夢のエンジン

## ■ 第二法則：エントロピー増大則

⇒ 第二種永久機関の不可能性

Left alone, things tend to get messy.

*You cannot break even.*

エントロピー  $S$ ：系の無秩序の度合い

効率100%で熱エネルギーを仕事に変える夢の熱機関

系がとり得る  
微視的状態の数

$$S = k_B \log \Omega$$

## ■ 第三法則：絶対零度は到達不可能

ボルツマン定数

# 平衡／非平衡

- 平衡状態への緩和.
- 一般に物理系は放っておけば平衡状態(自由エネルギー最低の状態)へと向かう.

自由エネルギー (free energy)

$$F = U - TS$$

エネルギー

温度

エントロピー

似非科学やインチキ発明家の  
言うところの「フリーエネルギー」(タダで無尽蔵に得られる  
エネルギー)とは全く別物

絶対零度( $T=0$ )では単純に  
エネルギー最低の状態(基底  
状態)が実現.  
高温ではエントロピー項が効く

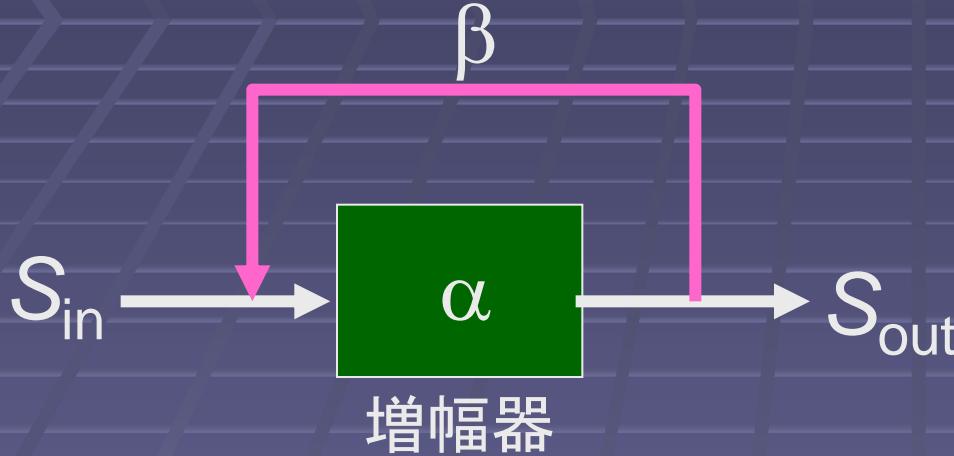
自由エネルギーが最低となる状態がある温度で入れ替わる  
⇒ 相転移現象

# 線型／非線型

- 線型方程式：変数の1次しか現れない方程式。
- 多くの物理は線型（微分）方程式で表される。
  - ニュートン方程式（古典力学）、マックスウェル方程式（電磁気学）、シュレーディンガー方程式（量子力学）
  - 非線型方程式の例：ローレンツ方程式（力オス現象）、ナヴィエ・ストークス方程式（流体力学）など
- 方程式が線型  $\Rightarrow$  重ね合わせの原理が成り立つ  
 $X$ と $Y$ が解なら、足したもの( $X+Y$ )も解
- 式が非線型になるととたんに難しくなる

# フィードバック

出力の一部を入力に加えること



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

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

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

④  $\beta$ が負の場合  
negative feedback

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

④  $\beta$ が正の場合  
positive feedback

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

$\alpha\beta = 1$  で発振

物性科学とは何をする学問か？

# 科学と技術

現象の記述と原理の解明  
知の構築と体系化

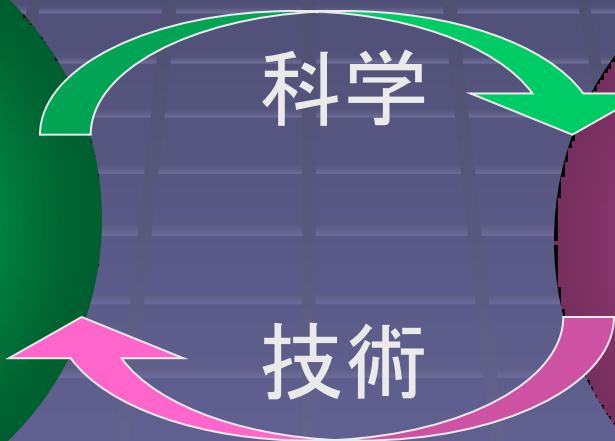
実在世界

科学

知の世界

技術

知の実践  
価値の実現



# 数物系科学

数学

物理学

天文学

地球・惑星物理学

宇宙物理学

素粒子物理学

(高エネルギー物理学)

原子核物理学

原子・分子物理学

プラズマ物理学

物性物理学

生物物理学

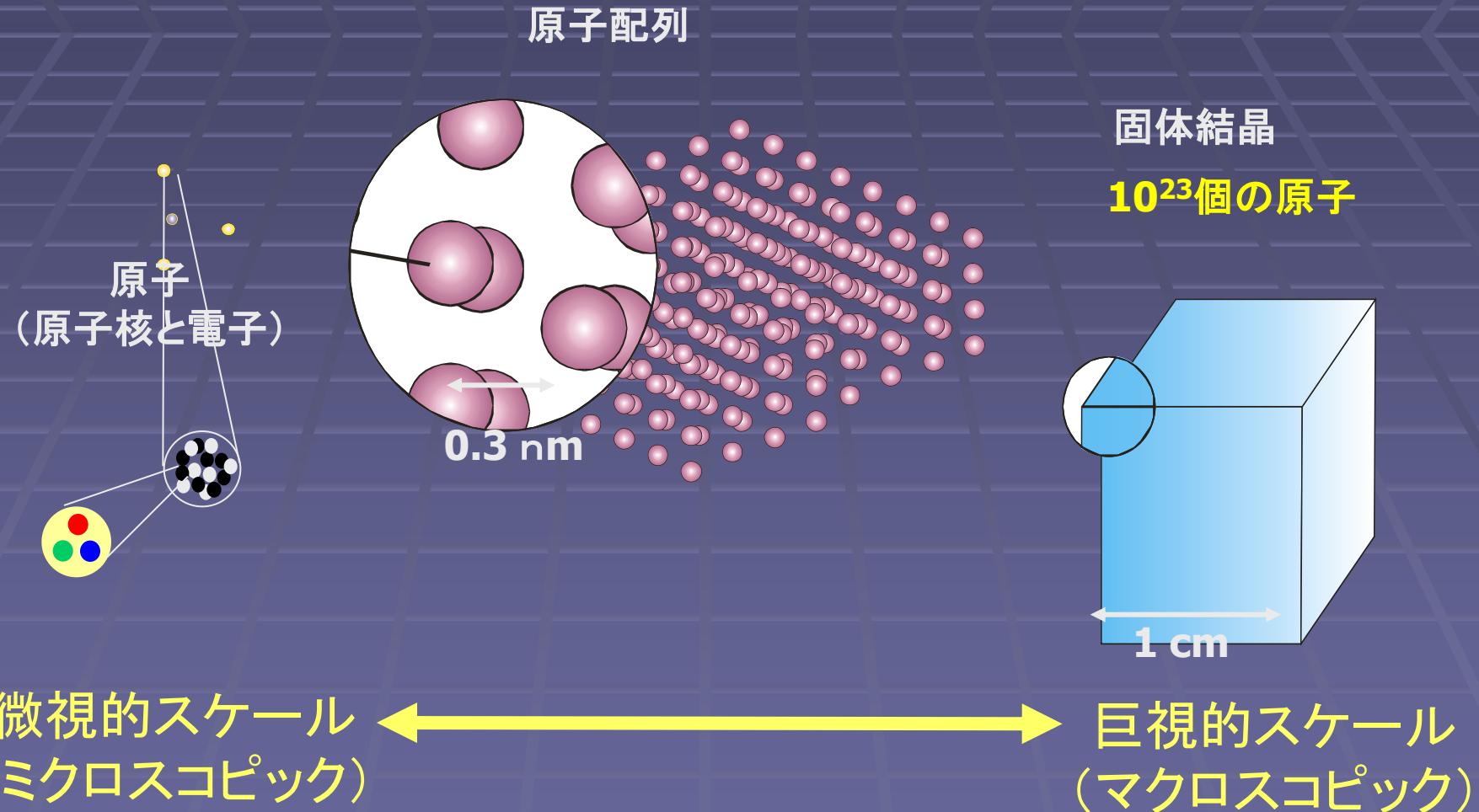
化学

工学

# 物理学的精神

- 物理学(窮理学)的精神: ——「**自然界を根源的かつ論理的に理解したい**」という志向  
**自然界の論理構造を解き明かす**
- 素粒子物理学・宇宙物理学 根源的問い
  - 世界の究極の構成要素は何か?
  - 宇宙の始まりは? 終わりは?
- 物性物理学(凝縮系物理学)
  - さまざまな物質が示す性質(物性)を解き明かす.
  - 多様性・複雑性が本質的に重要
  - しかし博物学ではなく、基本原理からの理解、物質に関する統一的・普遍的知識を追い求める

# 物質世界の階層構造



# 物理学的世界像

## 還元主義 (reductionism)

ある階層の系のふるまいを、より基本的な階層の法則に還元して理解する。

究極の構成要素と力は何か  $\Rightarrow$  素粒子物理学

しかし、究極の構成要素と力がわかればすべてがわかるかというと決してそうではない

自然界の各階層にはそれぞれの物理がある

## 創発現象 (emergence)

互いに相互作用する「個」の集団が、「個」の性質からは予測できないような質的に新しいふるまいを示すこと

多体系のふるまい：相転移

例：超伝導、生命現象

More is different. (P.W.Anderson)

# 物性研究の営み

- 多様な物質の多彩な性質(物性)を物理学の基本原理に基づいて理解する営み
  - 多様性といつても「博物学」ではない. 普遍性, 統一原理を追求める
- 特徴
  - 実験ができる ( $\Leftrightarrow$  宇宙物理学, 地球惑星物理学)
  - スモールサイエンス ( $\Leftrightarrow$  ビッグサイエンス)
  - 化学, 応用物理学とシームレスにつながる, いずれ生命科学も?
- 「理解」したかどうか
  - 実験と理論の比較: モデルと検証のサイクル
  - 計算物性の台頭

# 多様な物質、多彩な物性

- ダイヤモンドはなぜ硬い？
- ルビーはなぜ赤い？
- 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？
- 光ファイバー
- 液晶
- .....



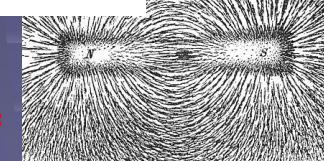
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:CZ\\_brilliant.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:CZ_brilliant.jpg)



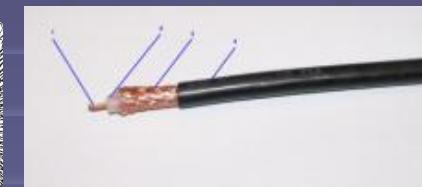
[http://ja.wikipedia.org/wiki/ファイル:Cut\\_Ruby.jpg](http://ja.wikipedia.org/wiki/ファイル:Cut_Ruby.jpg)



[http://ja.wikipedia.org/wiki/ファイル:Bar\\_magnet.jpg](http://ja.wikipedia.org/wiki/ファイル:Bar_magnet.jpg)



<http://ja.wikipedia.org/wiki/ファイル:Magnet0873.png>



[http://ja.wikipedia.org/wiki/ファイル:Rg213\\_1.jpg](http://ja.wikipedia.org/wiki/ファイル:Rg213_1.jpg)



[http://ja.wikipedia.org/wiki/ファイル:Shilirren\\_texture.jpg](http://ja.wikipedia.org/wiki/ファイル:Shilirren_texture.jpg)

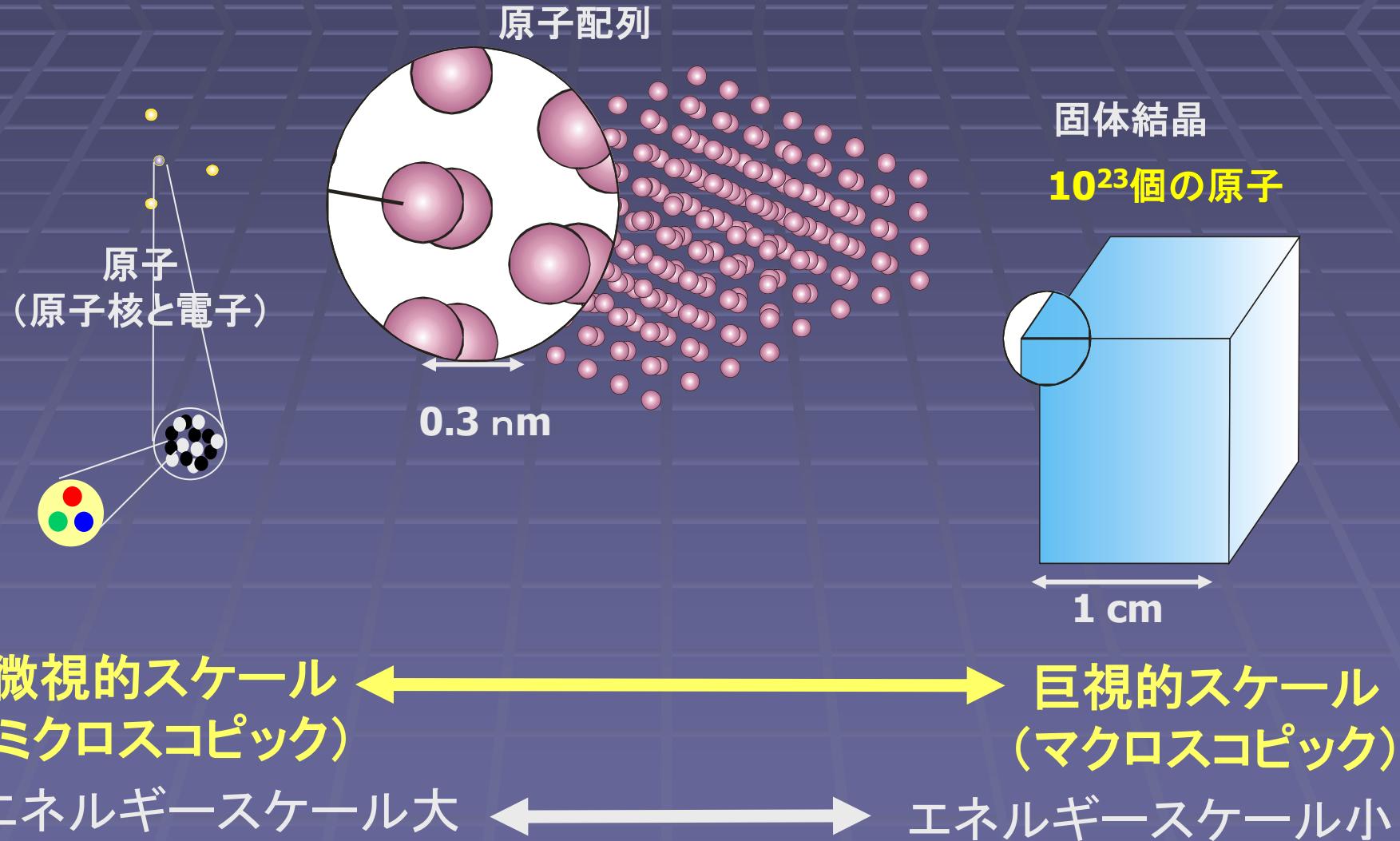


[http://ja.wikipedia.org/wiki/ファイル:Meissner\\_effect\\_p1390048.jpg](http://ja.wikipedia.org/wiki/ファイル:Meissner_effect_p1390048.jpg)



<http://ja.wikipedia.org/wiki/ファイル:Fibreoptic.jpg>

# 物質世界の階層構造



# エネルギー・スケール

エネルギーの単位：

ジュール

$$J = \text{kg m}^2/\text{s}^2$$

運動エネルギー

$$\text{質量} \times \text{長さ}^2/\text{時間}^2$$

$$\frac{1}{2}mv^2$$

電子ボルト

1Vの電位差で加速したときに  
電子が持つエネルギー

$$e = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$$

$$1 \text{eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{J}$$

プランク定数

$$\begin{aligned} h &= 6.62 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s} \\ &= 4.13 \times 10^{-15} \text{eV} \cdot \text{s} \end{aligned}$$

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}$$

# 物性物理の登場人物たち

登場人物（「素」粒子）

電子

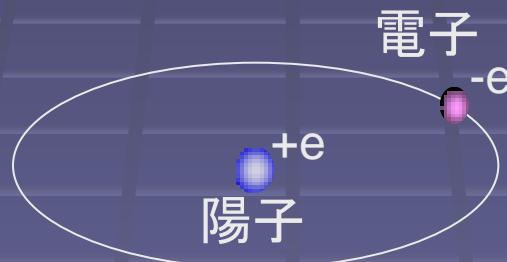
原子核（陽子 + 中性子）

水素原子

$$e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$m_e = 0.91 \times 10^{-30} \text{ kg}$$

$$m_p \approx m_n \approx 1840 m_e$$



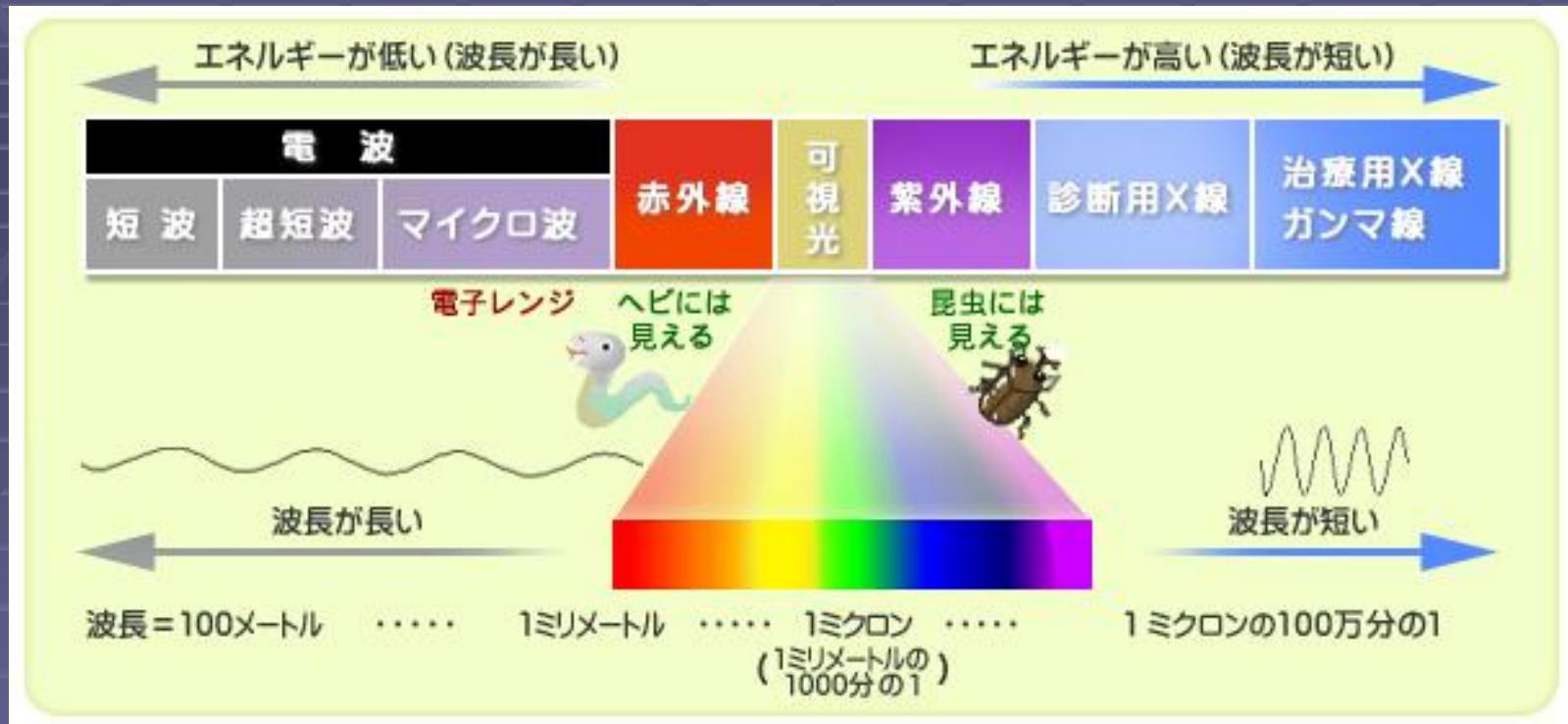
「素」粒子の間に働く力： 電磁相互作用

光（電磁波） 光子

$$h\nu$$

$$h = 6.62 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

# 光(電磁波)



1eVのエネルギーを持つ光の振動数, 波数, 波長

$$h\nu = 1 \text{ eV} \leftrightarrow \nu = 2.42 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

$$\leftrightarrow \frac{\nu}{c} = 8070 \text{ cm}^{-1} \leftrightarrow \lambda = 1240 \text{ nm}$$

光の量子: 光子(フォトン)

# 対象となる物質系

固体(単結晶, 多結晶)

乱れた結晶(不純物, 欠陥, ……)

アモルファス, ガラス, 準結晶

液体, 量子液体

微粒子, クラスター

表面, 界面

人工結晶(超格子), ナノ構造

ソフトマター(高分子, 液晶, ゲル)

原子気体(ボース凝縮体)

# 物質の性質

- 電気的性質
  - 伝導（金属, 絶縁体, 半導体）
  - 強誘電性
  - 超伝導
- 磁気的性質
  - 強磁性（鉄はどうして磁石になる？）
- 光学的性質
  - 宝石の色, 金属光沢,
  - 発光（発光ダイオード, 半導体レーザー）

# 物質と物理環境

物性：外から加える場(刺激)に対する応答  
物質が置かれる環境によって異なるふるまい

- 温度
- 圧力, 応力
- 電場
- 磁場
- 光(電磁波)との相互作用
- 試料サイズ

# 原子の構造

# 元素周期表

## 元素の周期表

1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8	1B	2B	3B	4B	5B	6B	7B	0		
1 H								2 He									
2 Li	4 Be							5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne				
3 Na	12 Mg							13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar				
4 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 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 Cs	56 Ba	L	Hf	Ta	W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7 Fr	88 Ra	A															
		L	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
		A	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	Bk	Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

- 典型金属元素
- 半金属元素
- 非金属元素
- 遷移金属元素
- 希ガス

水平リーベ、僕の船……

# 元素はどこから来たか？

⇒ 須藤先生の講義

1. 宇宙開闢(ビッグバン)によって、水素・ヘリウムなど軽い原子核ができた。
2. 重力によって星が形成され、星の内部での核融合反応によって、より重い原子核(鉄まで)が合成され、超新星爆発で宇宙に撒き散らされる。

星は元素の「圧力釜」。

\* われわれの身体もみな「星屑」からできている。

# 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	0
族	IA	IIA																	2 He 氦
1	1 H 氢																		
2	3 Li 鋰	4 Be 铍																	
3	11 Na 鈉	12 Mg 鎂	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				
4	19 K 鉀	20 Ca 鈣	21 Sc 釔	22 Ti 鈦	23 V 钒	24 Cr 鉻	25 Mn 錳	26 Fe 鐵	27 Co 鈷	28 Ni 鎳	29 Cu 銅	30 Zn 鋅	31 Ga 鎗	32 Ge 矽	33 As 砷	34 Se 硒	35 Br 溴	36 Kr 氖	
5	37 Rb 鉀	38 Sr 鈦	39 Y 鈦	40 Zr 鈽	41 Nb 鈮	42 Mo 鉻	43 Tc 錳	44 Ru 鉻	45 Rh 鉻	46 Pd 鉻	47 Ag 銀	48 Cd 鎘	49 In 鎘	50 Sn 鎘	51 Sb 鎘	52 Te 碲	53 I 碘	54 Xe 氙	
6	55 Cs 鉀	56 Ba 鈦	57- 71 Hf 鈽系	72 Ta 鉻	73 W 鉻	74 Re 鉻	75 Os 鉻	76 Ir 鉻	77 Pt 鉻	78 Au 鉻	79 Hg 汞	80 Tl 鉻	81 Pb 鉻	82 Bi 鉻	83 Po 鉻	84 At 砹	85 Rn 氡	86 At 砹	
7	87 Fr 鈽	88 Ra 鈽系	89- 103 Rf 鈽	104 Db 鉻	105 Sg 鉻	106 Bh 鉻	107 Hs 鉻	108 Mt 鉻	109 Ds 鉻	110 Rg 鉻	111 Cn 鉻	112 Uut 鉻	113 Uuq 鉻	114 Uup 鉻	115 Uuh 鉻	116 Uus 鉻	117 Uuo 鉻	118 Uuo 鉻	
	镧系元素		57 La 釔	58 Ce 釔	59 Pr 釔	60 Nd 釔	61 Pm 釔	62 Sm 釔	63 Eu 釔	64 Gd 釔	65 Tb 釔	66 Dy 釔	67 Ho 釔	68 Er 釔	69 Tm 釔	70 Yb 釔	71 Lu 釔		
	锕系元素		89 Ac 锕	90 Th 钍	91 Pa 镤	92 U 鈾	93 Np 鈶	94 Pu 钚	95 Am 钚	96 Cm 钚	97 Bk 钚	98 Cf 钚	99 Es 钚	100 Fm 钚	101 Md 钔	102 No 锘	103 Lr 铹		
	<span style="background-color: red;">鹼金屬</span> <span style="background-color: orange;">鹼土金屬</span> <span style="background-color: yellow;">鑭系元素</span> <span style="background-color: green;">銅系元素</span> <span style="background-color: lightblue;">過渡金屬</span> <span style="background-color: lightblue;">主族金屬</span> <span style="background-color: lightgreen;">類金屬</span> <span style="background-color: lightgreen;">非金屬</span> <span style="background-color: yellow;">鹵素</span> <span style="background-color: cyan;">惰性氣體</span>																		

# 元素周期表

## 元素の周期表

A standard periodic table of elements is shown, divided into seven horizontal rows (periods) and 18 vertical columns (groups). The table uses color-coding to categorize elements: orange for typical metals, light green for semi-metals, light blue for non-metals, yellow for transition metals, and pink for noble gases. The first period (H and He) and the last two columns of the second period (Ne and Ar) are also pink. The table includes element symbols, atomic numbers, and some chemical names for the transition metals.

1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8	1B	2B	3B	4B	5B	6B	7B	0		
1 H								2 He									
2 Li	Be							5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne				
3 Na	Mg							13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar				
4 K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5 Rh	Sr	Y	Zr	Nb	Ta	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	50 In	51 Sn	52 Sb	53 Te	54 I	Xe
6																	
7																	

## 周期律はなぜ成立するか？

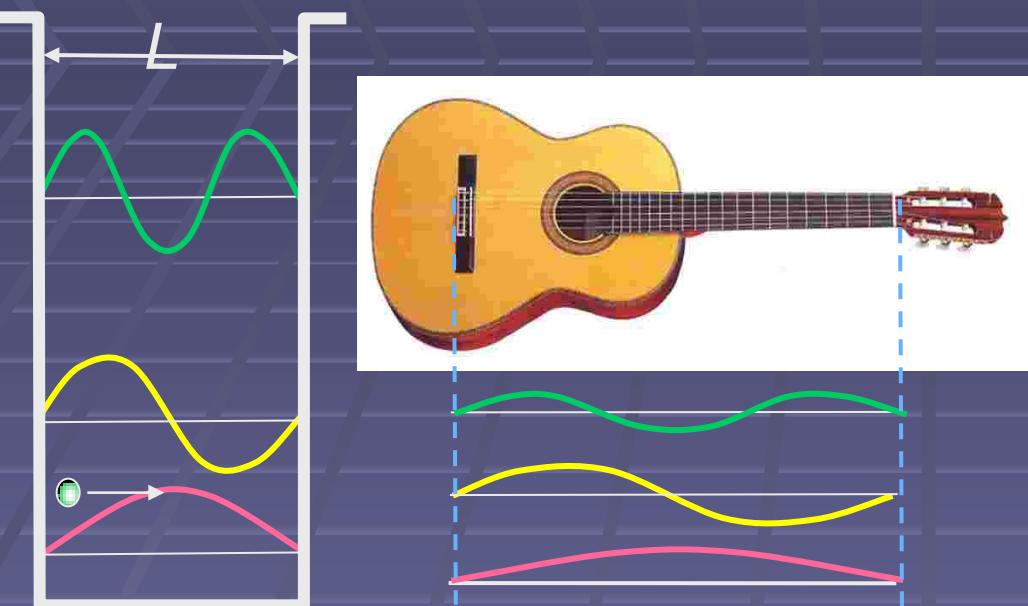
The table shows the lanthanide and actinide series, which are placed below the main periodic table. The lanthanides (L) are numbered 57 to 71, and the actinides (A) are numbered 89 to 103. The elements in these series are also color-coded according to the periodic table's categories.

L	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
A	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

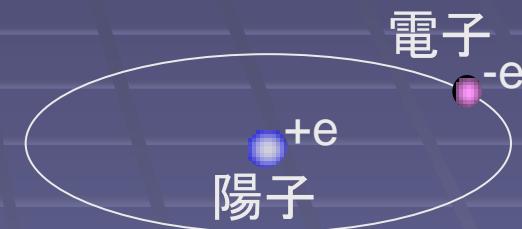
- 典型金属元素
- 半金属元素
- 非金属元素
- 遷移金属元素
- 希ガス

# 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  $\Rightarrow$  離散的エネルギー準位  
(電子が収まる部屋)

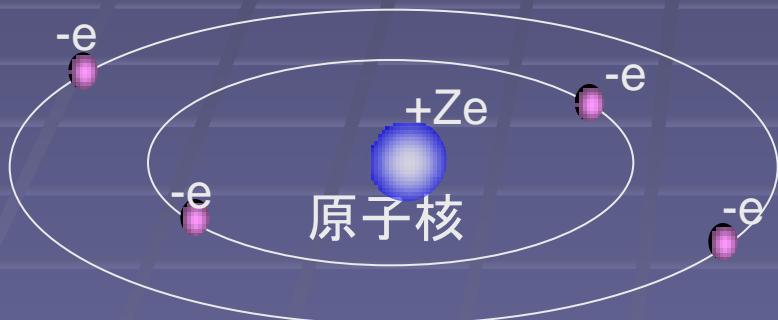
エネルギー準位を指定する  $n$  を「量子数」と呼ぶ  
さらに、回転運動に関係した量子数  $l, m$  と、  
スピン(自転)に関係した量子数  $\sigma$  がある。  
 $\Rightarrow$  電子のエネルギー準位は  $(n, l, m, \sigma)$  で指定される。



# 原子の電子エネルギー準位

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スピン 1 個ずつ収容される

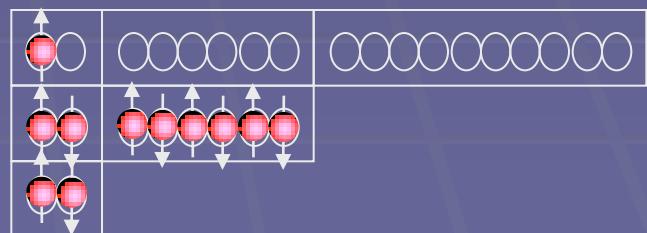


Na:  $Z=11$

Na:  $(1s)^2 (2s)^2 (2p)^6 (3s)^1$

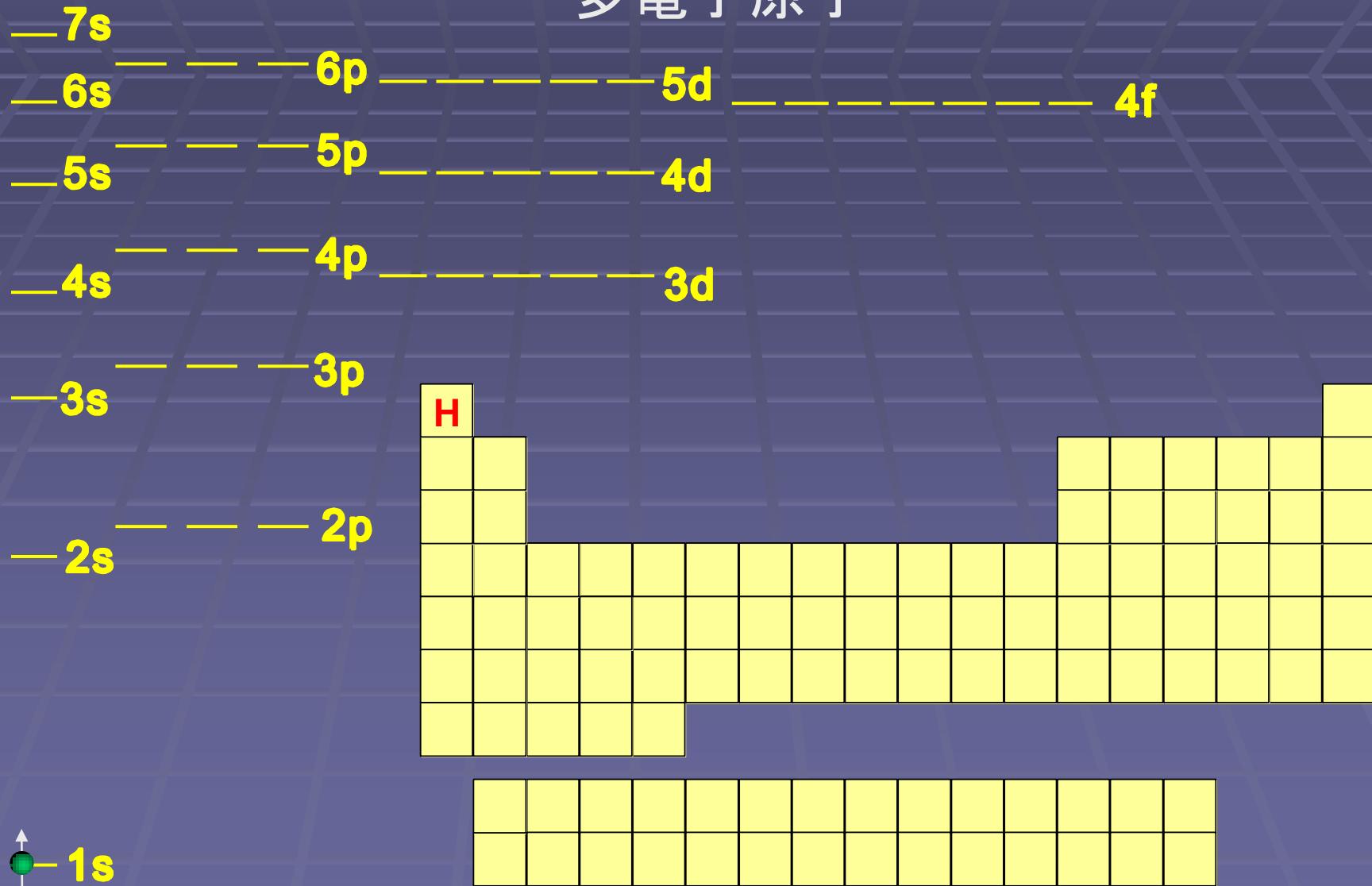
Hotel 「ATOM」  
1階の客室 1  
2階の客室 1 + 3  
3階の客室 1 + 3 + 5  
.....

(各客室はツイン)



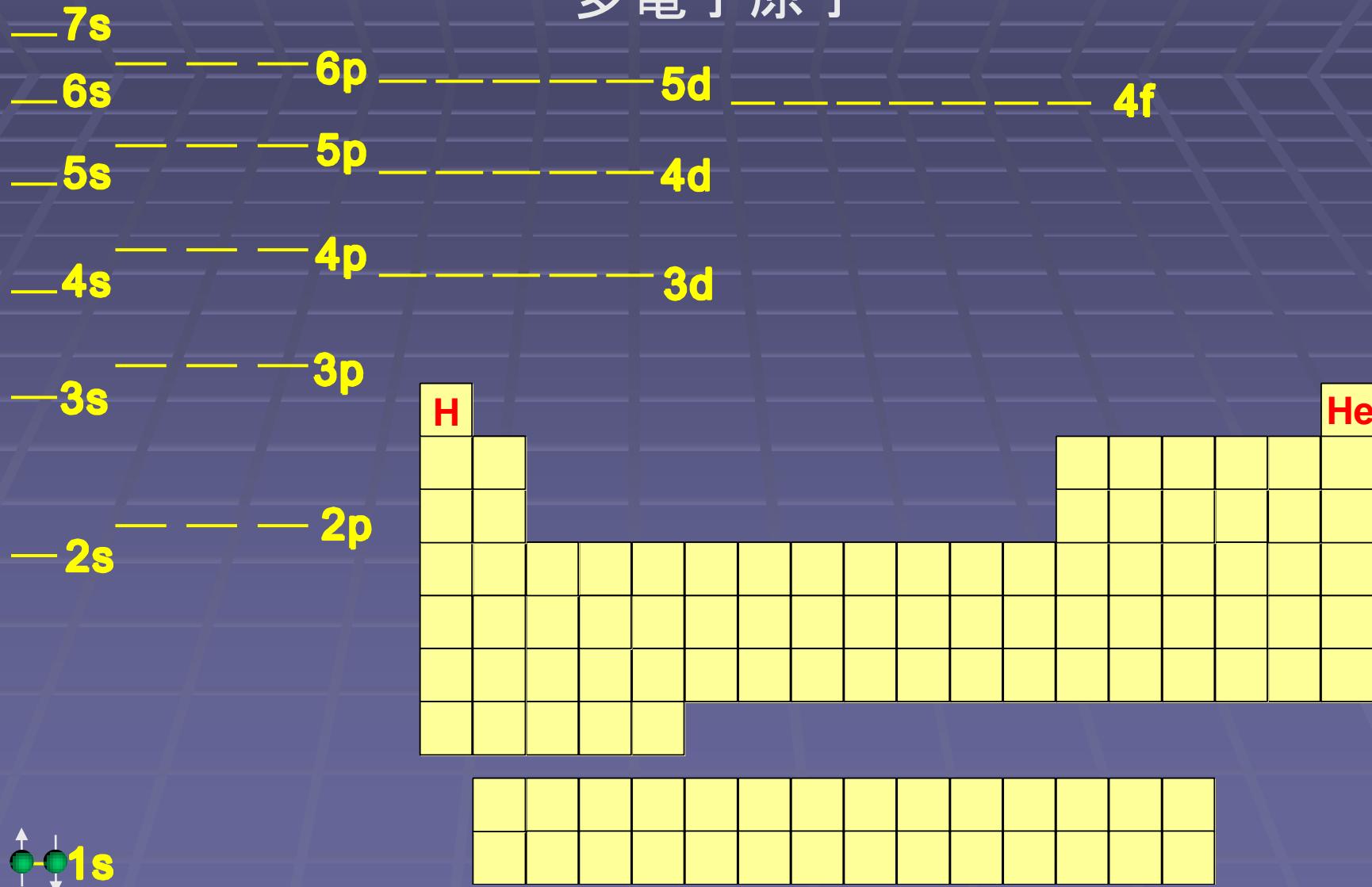
# 電子エネルギー準位の詰まり方

## 多電子原子



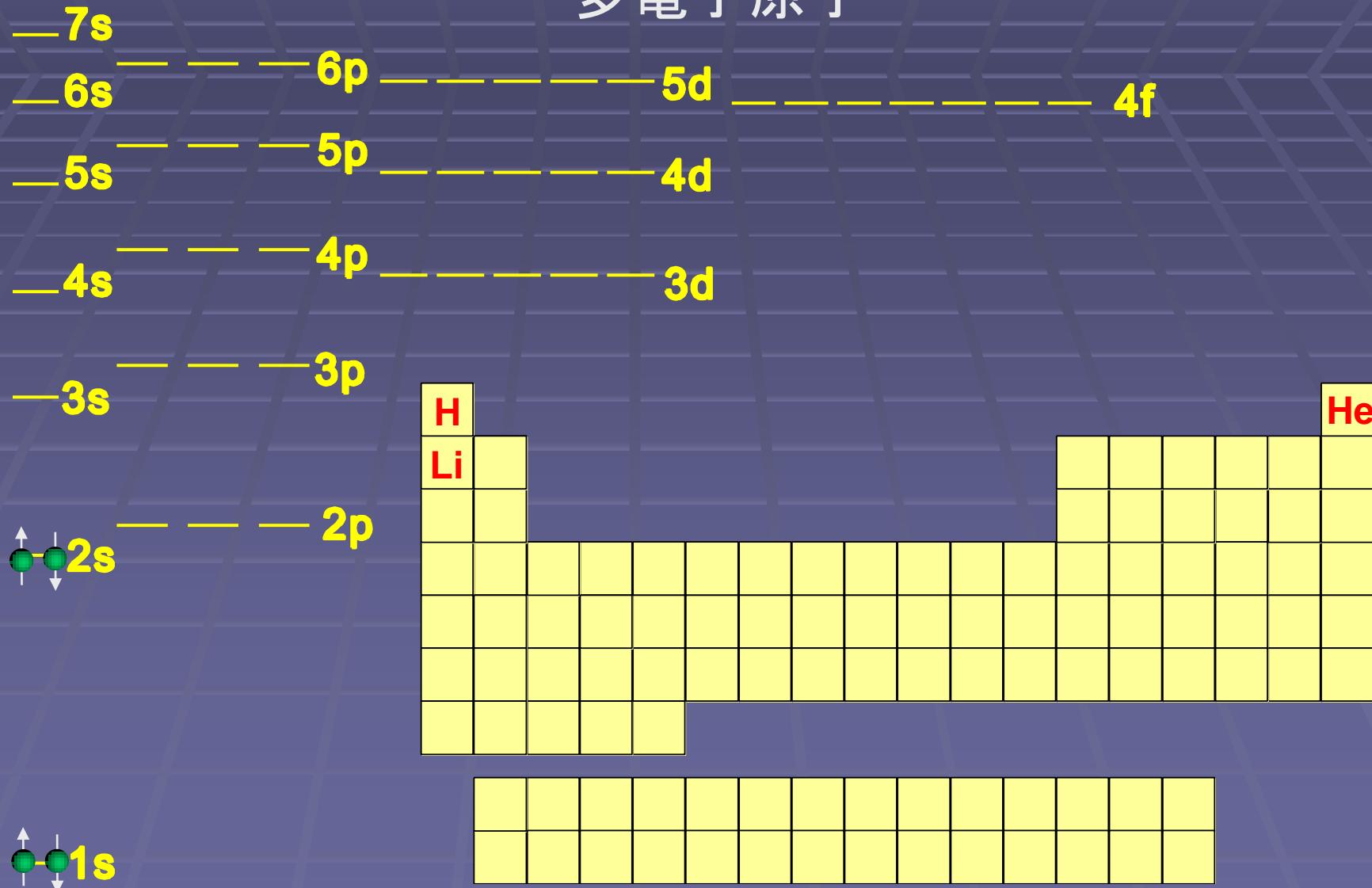
# 電子エネルギー準位の詰まり方

## 多電子原子



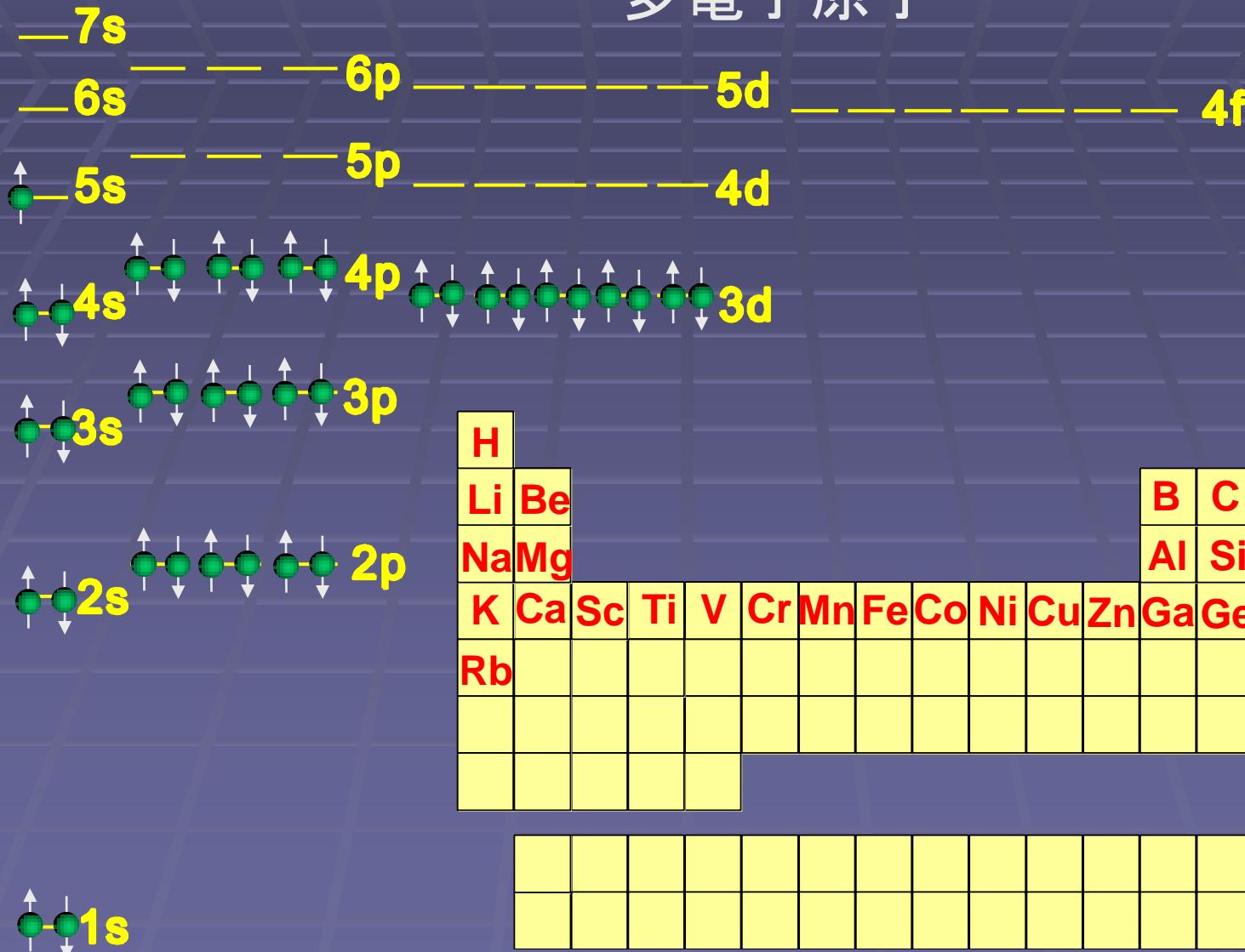
# 電子エネルギー準位の詰まり方

# 多電子原子



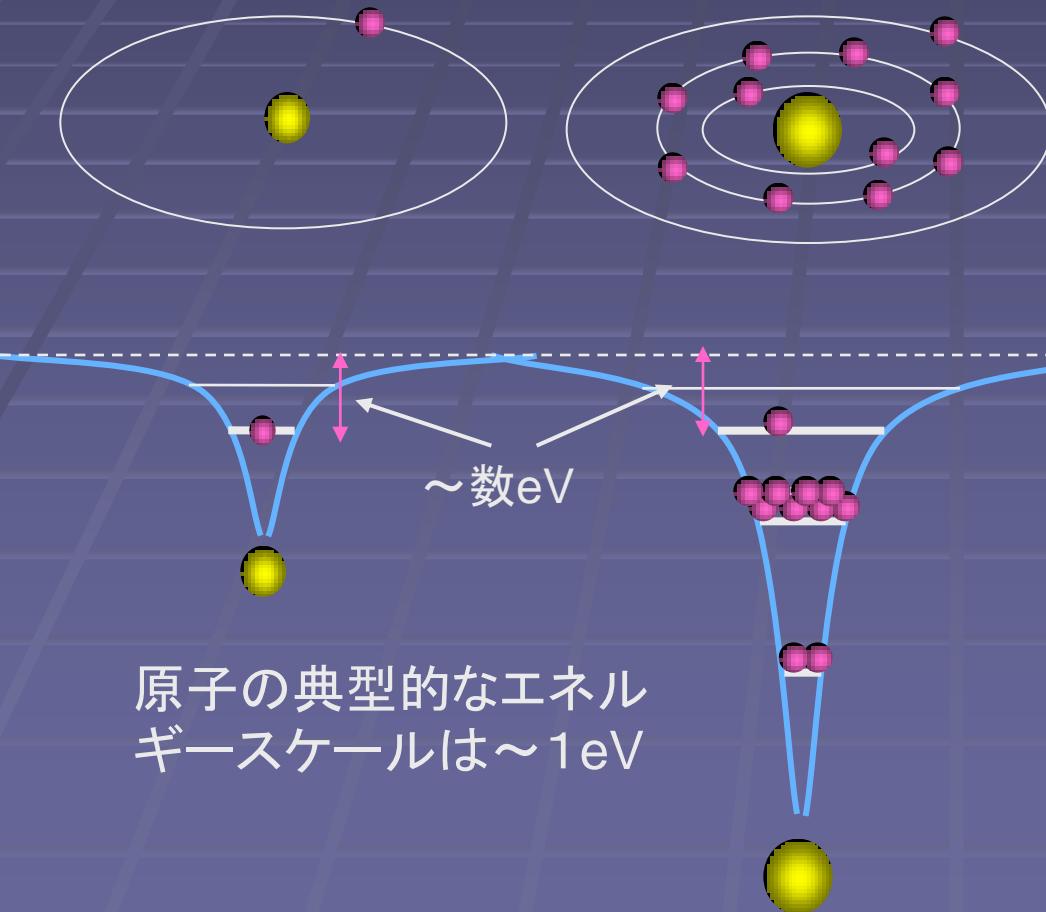
# 電子エネルギー準位の詰まり方

# 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)



# 元素周期律

物性にとって重要なのは最外殻の電子（原子から離れやすい）⇒ **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**

周期律表を覚えるよりも、周期律がなぜ成り立つかを理解することが重要  
(もちろん覚えているに越したことはないが)

周期律表を覚えるなら「すいへーりーべ…」ではなくて縦に覚えよう。

# 原子の電子エネルギー準位

$Z$ が大きい原子ほど原子核のクーロン引力は強くなるが、周りの電子も多くなるので、かなりの程度相殺され、結局、最外殻の電子のエネルギー準位は数eV程度になる

物性物理学のエネルギースケールは 数eV~meV

温度  $T \leftrightarrow$  熱エネルギー  $k_B T$

$$k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K} \quad \text{ボルツマン定数}$$

$$\text{常温} \quad T = 300 \text{ K} \quad \leftrightarrow \quad k_B T = 25 \text{ meV}$$

化学や生物現象のエネルギースケールはこのくらい

# 身近な例

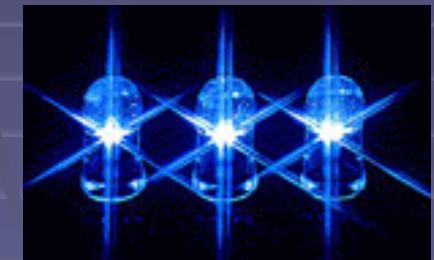
乾電池は1.5V

電子のやりとりによる起電力



レーザーpointer

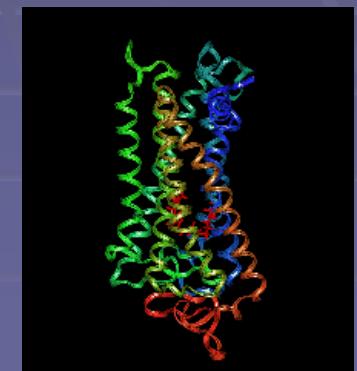
赤色光  $\sim 1.5\text{eV}$ , 緑色光  $\sim 2.5\text{eV}$



そもそも可視光はなぜ $\sim\text{eV}$ 程度か

ロドプシン: 網膜の受光タンパク質

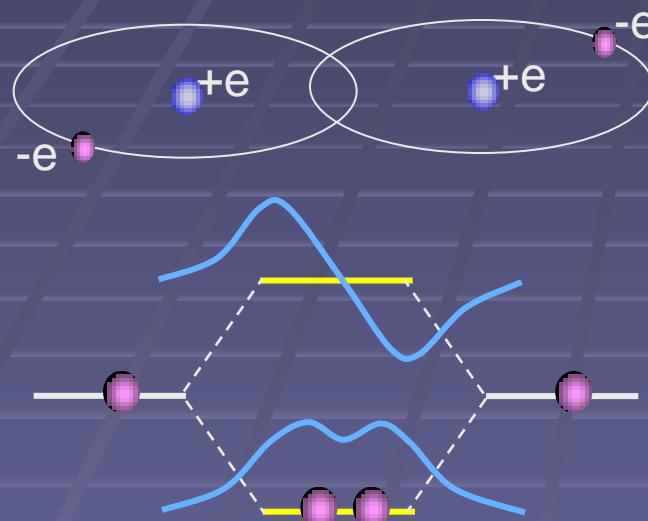
可視光に相当するエネルギー準位差



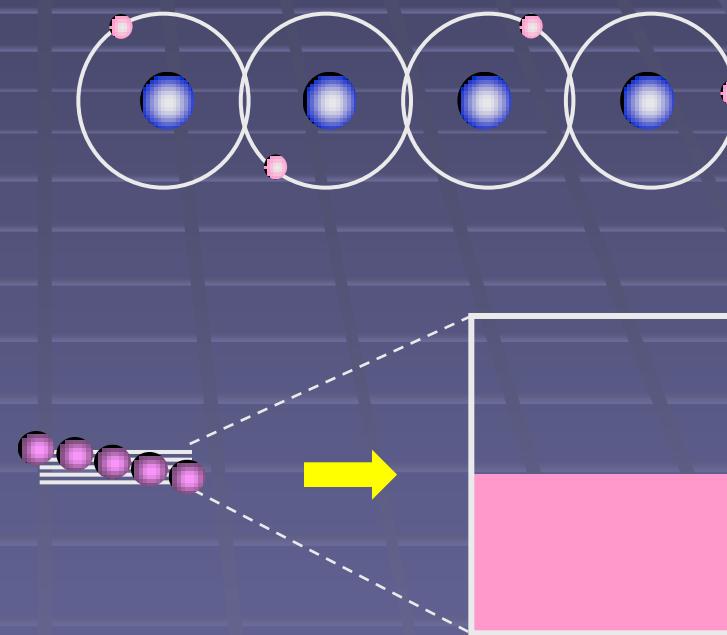
原子から固体へ

# 原子をならべる

水素分子:  $H_2$

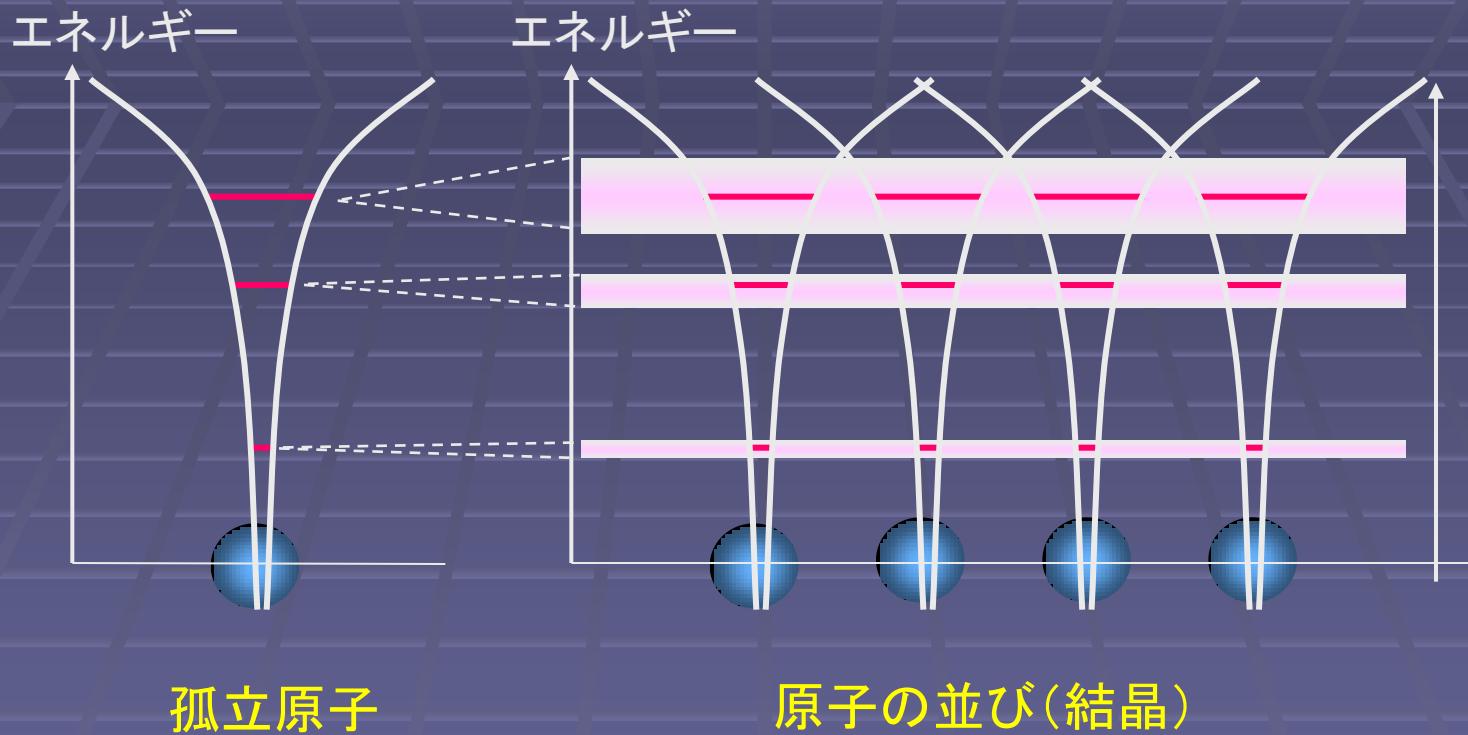


水素原子を周期的に並べる



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

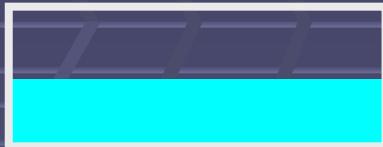
# 飛び移りによるエネルギー幅の広がり



原子の電子エネルギー準位が、電子の飛び移りによって、それぞれ広がってエネルギー-bandを形成する

# 金属と絶縁体

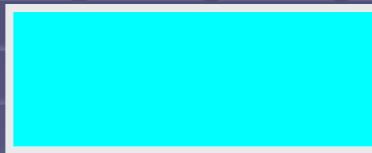
途中まで詰まったバンド



電流が流れる

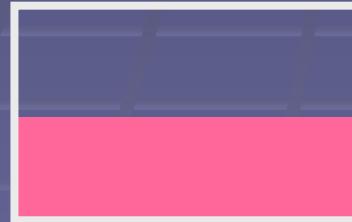
電場をかける

完全に詰まったバンド

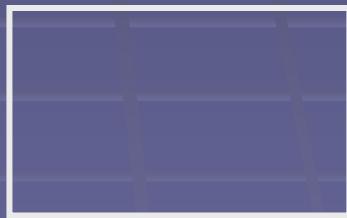


電流は流れない

エネルギー



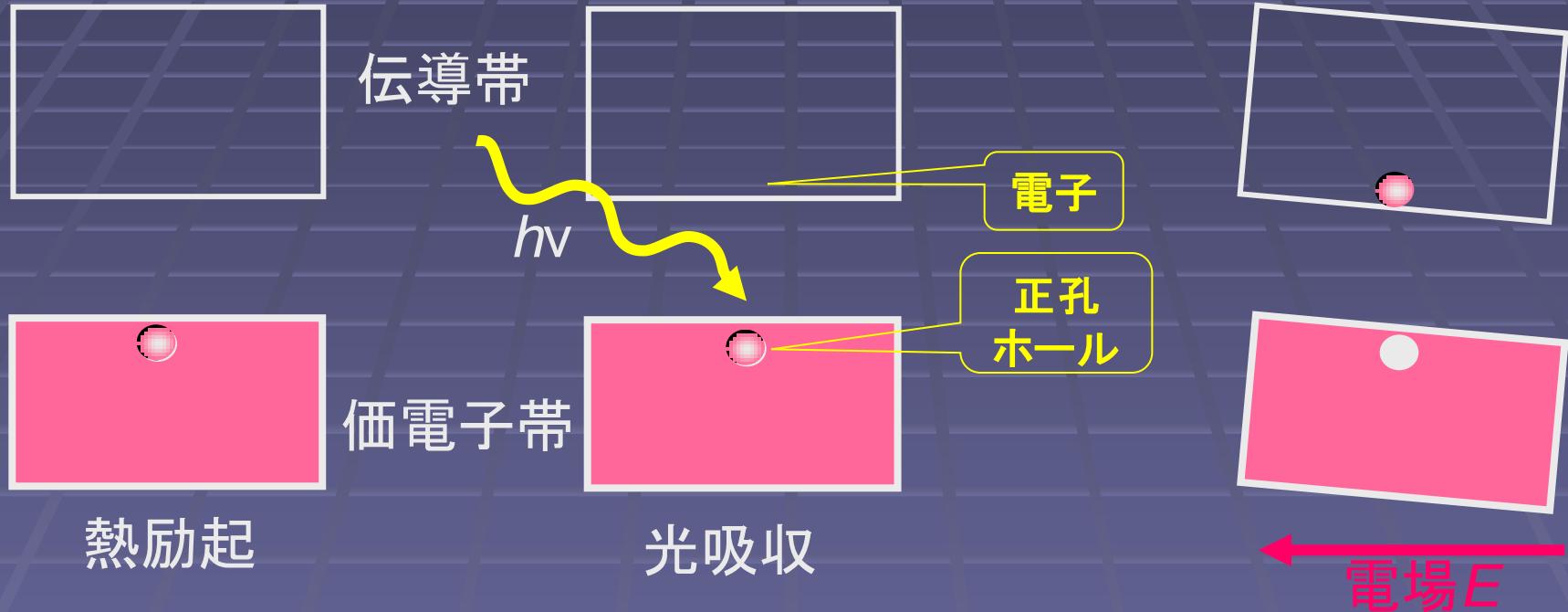
金属



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收によって生成される少数のキャリアー(伝導帶の電子, 価電子帶の正孔)が電気伝導を担う

# 今日のまとめ

- スケールの話
  - 原子(ミクロ)と物質(マクロ)
- 現代文明と物理学
- 物理学の基礎概念(のいくつか)
- 物理学の中の物性物理学
  - 多様性の中に普遍性・統一性を求める
- 自然界の階層性
  - 創発性, 相転移
- 原子の構造
  - 周期律が成り立つ理由  $\leftrightarrow$  原子の構造
  - 物性物理(および化学・生物)のエネルギー・スケールは~eV
- 原子から固体へ
  - 電子バンド構造: 金属・絶縁体・半導体