

物質の中に広がる
量子力学の世界

物性物理学

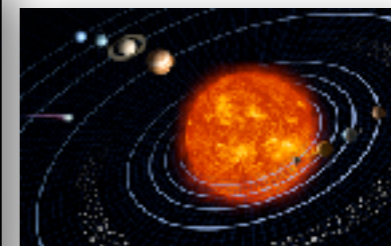
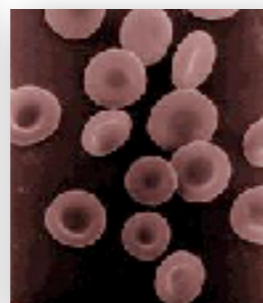
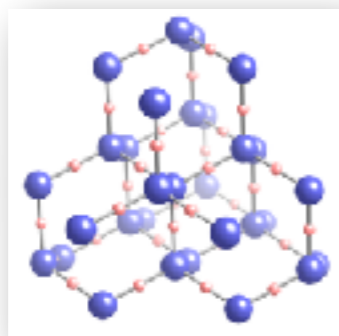
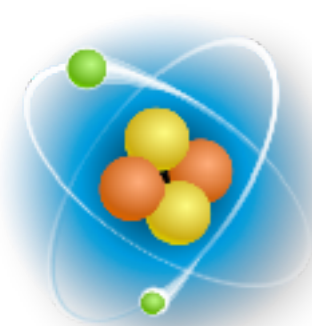
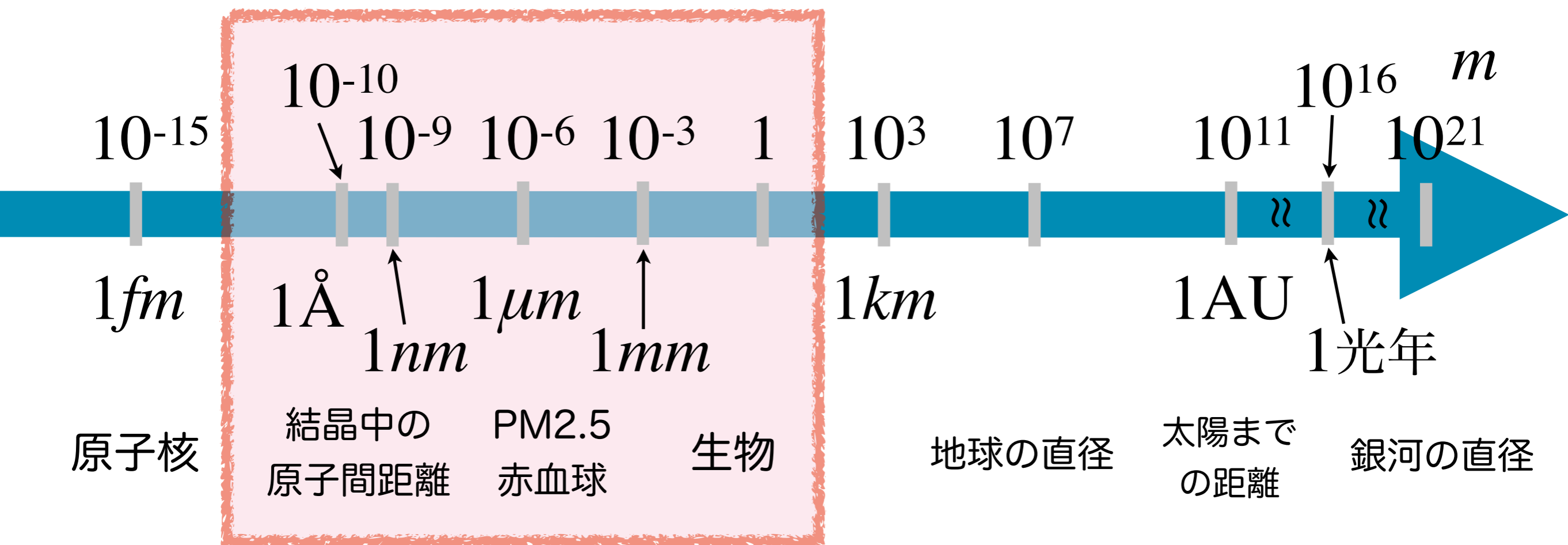
量子力学と統計力学を駆使して

物質の力で世界を変革していく

求 幸年

世界の階層構造：長さスケール

物性物理学がターゲットとするスケール

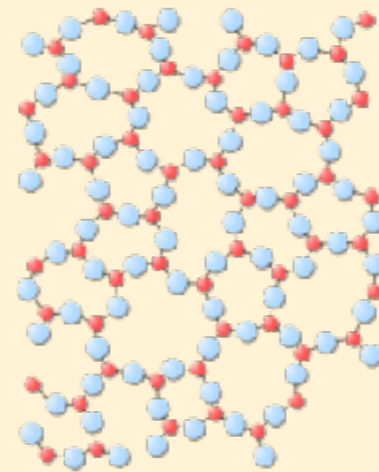
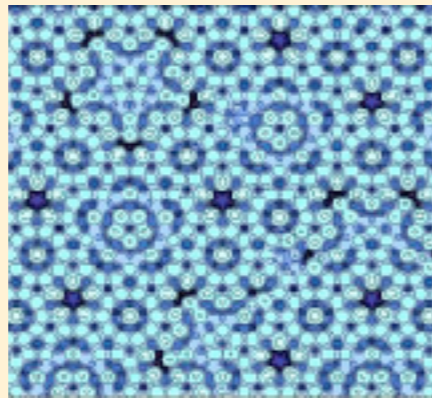
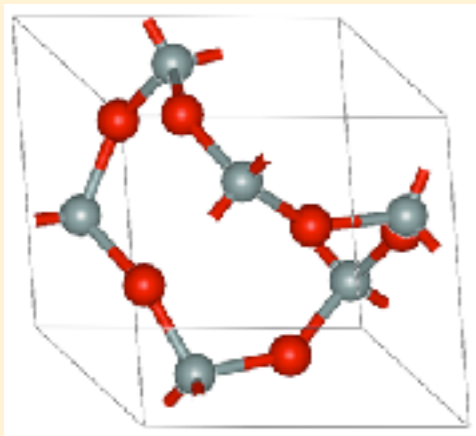


研究の対象

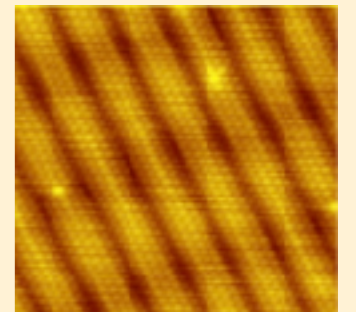
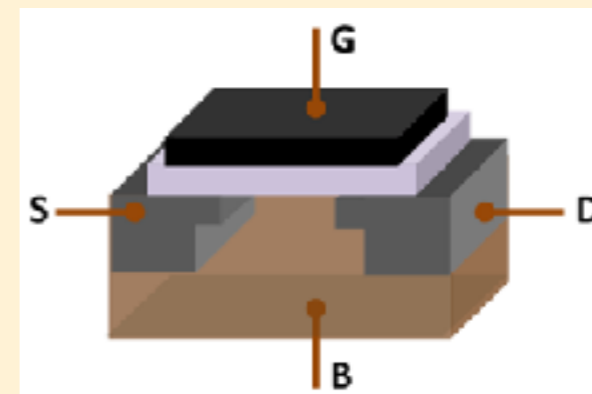
物質科学（マテリアルサイエンス）

物理学・化学・電気工学・材料工学にまたがる広大な研究分野

固体（結晶，準結晶，アモルファス，…）



表面・界面，ナノ構造



ソフトマター，プラズマ，流体，…

共通する普遍的な側面

- 非常に多く（アボガドロ数程度 $\sim 10^{23}$ ）の原子核と電子
- 相互作用する多粒子系 = 多体問題

More is different.

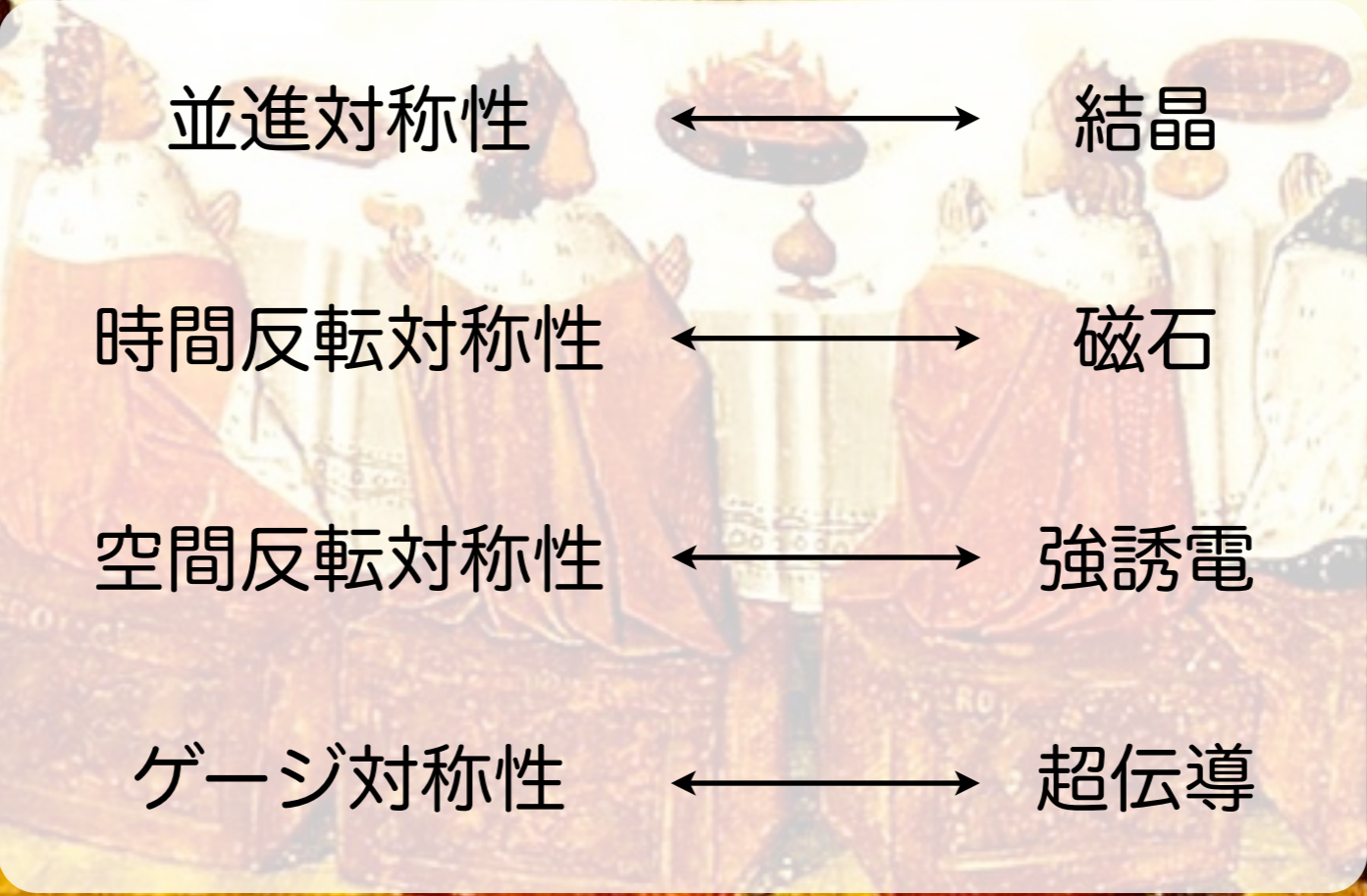
by P. W. Anderson (1972)



reductionism vs. constructionism
(還元主義 vs. 構成主義)

intensive vs. extensive
(集約的な vs. 広範な)

対称性の破れ



全ての物質は高々100種類程度の 元素の組み合わせで出来ている

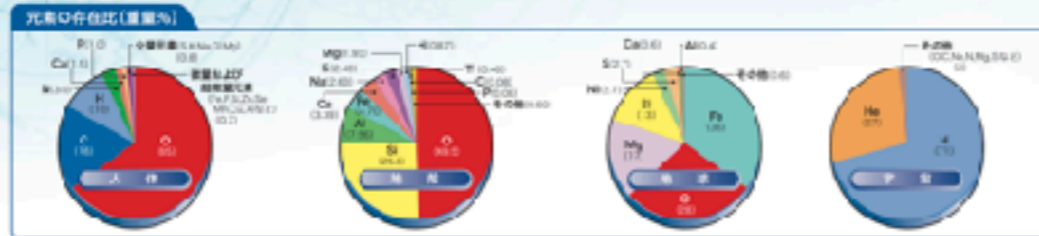
元素周期表

Periodic Table of the Elements

自然も暮らしもすべて元素記号で書かれている



メンデレーエフ (Dmitri Ivanovich Mendeleev, 1834-1907)
1869年、ロシアのペテルスブルグ大学の化学者メンデレーエフが、当時知られていた約60種類の元素を(1)原子量に按じて(2)性質の類似と結合してできる物質の組成(たとえば、ナトリウムは塩化ナトリウムはNaClをつくる)などの性質が周期的に変化する規則「周期律」を発見した。有数の化学者として知られるようになった。1869年に発見された元素を(3)周期表に記した。1869年に発見された元素の性質が周期的に変化する規則を発見した。現代では周期表は、すべての人が知っている化学や物理学の基本となっている。



1	1 H Hydrogen	2	3 He Helium	4	5 Li Lithium	6	7 Be Beryllium	8	9 B Boron	10	11 C Carbon	12	13 N Nitrogen	14	14 Si Silicon	15	15 P Phosphorus	16	16 S Sulfur	17	17 Cl Chlorine	18	18 Ar Argon																																		
2	19 K Potassium	20	20 Ca Calcium	21	21 Sc Scandium	22	22 Ti Titanium	23	23 V Vanadium	24	24 Cr Chromium	25	25 Mn Manganese	26	26 Fe Iron	27	27 Co Cobalt	28	28 Ni Nickel	29	29 Cu Copper	30	30 Zn Zinc	31	31 Ga Gallium	32	32 Ge Germanium	33	33 As Arsenic	34	34 Se Selenium	35	35 Br Bromine	36	36 Kr Krypton																						
3	37 Rb Rubidium	38	38 Sr Strontium	39	39 Y Yttrium	40	40 Zr Zirconium	41	41 Nb Niobium	42	42 Mo Molybdenum	43	43 Tc Technetium	44	44 Ru Ruthenium	45	45 Rh Rhodium	46	46 Pd Palladium	47	47 Ag Silver	48	48 Cd Cadmium	49	49 In Indium	50	50 Sn Tin	51	51 Sb Antimony	52	52 Te Tellurium	53	53 I Iodine	54	54 Xe Xenon																						
4	55 Cs Cesium	56	56 Ba Barium	57-71	Lanthanoids (ランタノイド)	72	72 Hf Hafnium	73	73 Ta Tantalum	74	74 W Tungsten	75	75 Re Rhenium	76	76 Os Osmium	77	77 Ir Iridium	78	78 Pt Platinum	79	79 Au Gold	80	80 Hg Mercury	81	81 Tl Thallium	82	82 Pb Lead	83	83 Bi Bismuth	84	84 Po Polonium	85	85 At Astatine	86	86 Rn Radon																						
5	87 Fr Francium	88	88 Ra Radium	89-103	Actinoids (アクチノイド)	104	104 Rf Rutherfordium	105	105 Db Dubnium	106	106 Sg Seaborgium	107	107 Bh Bohrium	108	108 Hs Hassium	109	109 Mt Meitnerium	110	110 Ds Darmstadtium	111	111 Rg Roentgenium	112	112 Cn Copernicium	113	113 Nh Nihonium	114	114 Fl Flerovium	115	115 Mc Moscovium	116	116 Lv Livermorium	117	117 Ts Tennessine	118	118 Og Oganesson																						
6	105 La Lanthanum	106	106 Ce Cerium	107	107 Pr Praseodymium	108	108 Nd Neodymium	109	109 Pm Promethium	110	110 Sm Samarium	111	111 Eu Europium	112	112 Gd Gadolinium	113	113 Tb Terbium	114	114 Dy Dysprosium	115	115 Ho Holmium	116	116 Er Erbium	117	117 Yb Ytterbium	118	118 Lu Lutetium	119	119 Ac Actinium	120	120 Th Thorium	121	121 Pa Protactinium	122	122 U Uranium	123	123 Np Neptunium	124	124 Pu Plutonium	125	125 Am Americium	126	126 Cm Curium	127	127 Bk Berkelium	128	128 Cf Californium	129	129 Es Einsteinium	130	130 Fm Fermium	131	131 Md Mendelevium	132	132 No Nubolium	133	133 Lr Lawrencium



一家に1枚周期表

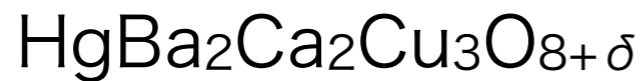
無限の可能性

元素の組み合わせ
+
様々な結晶構造
↓
無限種の物質

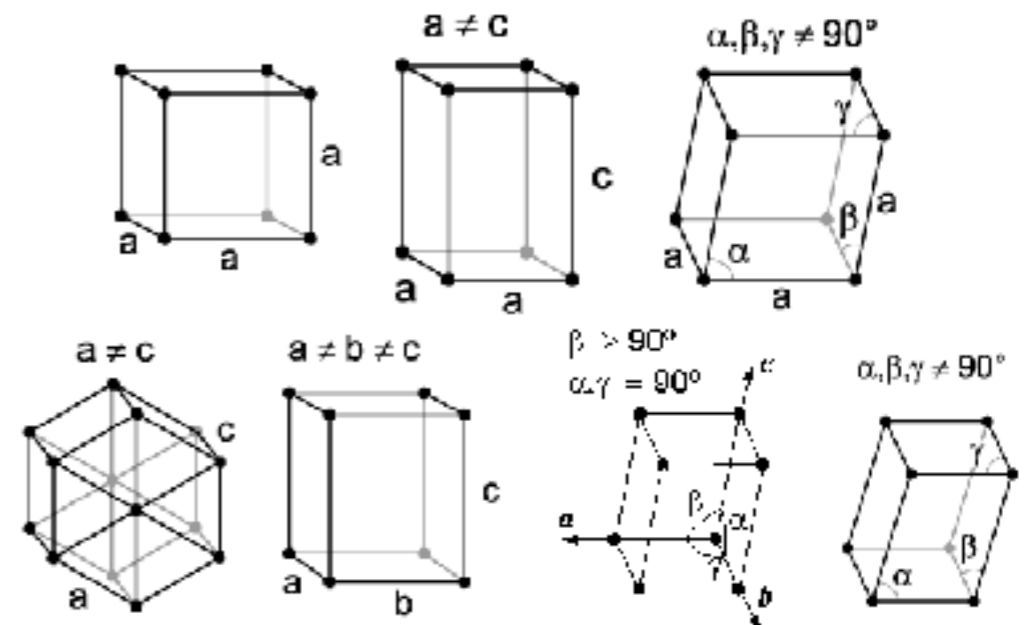
Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 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 Nh	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo

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

例) 最も高い転移温度をもつ超伝導物質



$$T_c = 134\text{K} = -139^\circ\text{C}$$



全く何の知識も無しに
見つけ出すことは不可能!

物性物理学が目指すもの

物質が示す
不思議な性質を
理解する

物質が隠し持つ
面白い性質や
役に立つ機能を
引き出す

これまで
世界になかった
物質を創り出す

物質の力で世界を変革していく

世界を変革する物質・機能

- 高温（室温）超伝導：エネルギーロスのない送電網
- 高移動度をもつ半導体：高速処理の可能な半導体素子
- 高性能な磁石：高密度記憶デバイス，超小型モーター
- 高性能な強誘電体：大容量コンデンサー，強誘電メモリー
- 高性能な熱電物質：排熱利用によるエネルギー問題解決
- 高い磁気抵抗効果をもつ物質：高密度記憶デバイス
- etc.

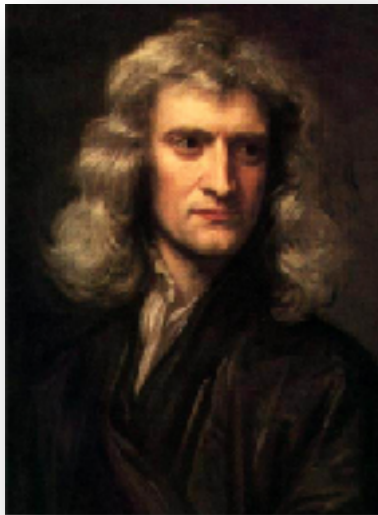
では、どうやって革新を探求するのか？

物質は原子核と電子で出来ている
物質の性質を決める主役 = 電子

電子や原子核 → 量子力学に従って運動する

アボガドロ数程度の電子や原子核の運動を
全て追いかけることは（現時点では）不可能
→ 量子統計力学による取り扱い

古典力学 → 量子力学



ニュートンの運動方程式

$$\vec{F} = m\vec{a} = m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2}$$

ある時刻における状態が求まれば
全ての時刻での運動が決まる

● ラプラスの悪魔 —決定論的世界観—

もしもある瞬間における全ての物質の力学的状態と力を知ることができ、かつもしもそれらのデータを解析できるだけの能力の知性が存在するとすれば、この知性にとっては、不確実なことは何もなくなり、その目には未来も（過去同様に）全て見えているであろう。

(Pierre-Simon Laplace, 1812)



古典力学 → 量子力学



シュレーディンガー方程式

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\vec{r}, t) = \hat{H} \Psi(\vec{r}, t)$$

電子や原子といった
極微の世界を
記述する基本方程式

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} \quad h: \text{プランク定数}$$

$\Psi(\vec{r}, t)$: 波動関数

\hat{H} : ハミルトニアン演算子

$|\Psi(\vec{r}, t)|^2$: 量子的な粒子が時刻 t , 位置 \vec{r} に存在する **確率**

粒子の運動を決定論的に追いかけることは原理的に出来ない

● ハイゼンベルグの不確定性関係

$$\Delta x \Delta p \gtrsim \frac{\hbar}{2}$$

量子的な粒子の位置 x と運動量 p を
同時に $\frac{\hbar}{2}$ 以上の精度で測定することは
原理的に出来ない



量子統計力学

- 統計力学：多数の粒子からなる系の巨視的な性質を統計的（確率的）な視点から記述
- 量子統計力学：量子力学に従う多数の粒子に対する統計力学

エネルギー



ボース粒子

ひとつの量子力学的な状態にいくらかでも粒子を詰めることができる

光子, ヒッグス粒子, ^4He , etc.

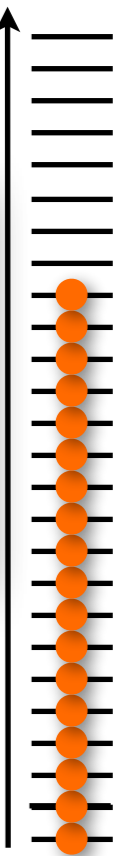
統計的な性質が異なる2つの粒子

フェルミ粒子

ひとつの量子力学的な状態には粒子をひとつずつしか詰めることが出来ない

電子, 陽子, 中性子, ニュートリノ, etc.

エネルギー



研究の最先端 [1] 高温超伝導

J. G. Bednorz and K. A. Müller (1986)
1987年 ノーベル物理学賞

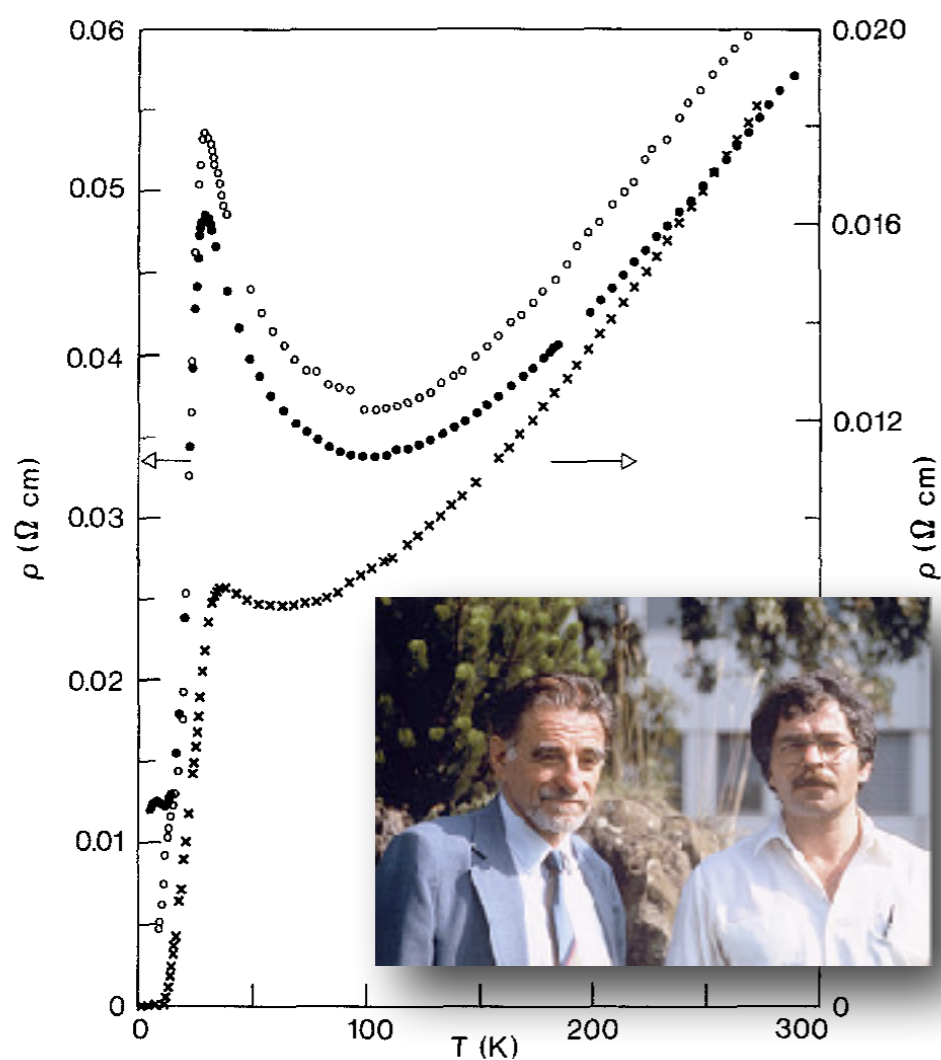
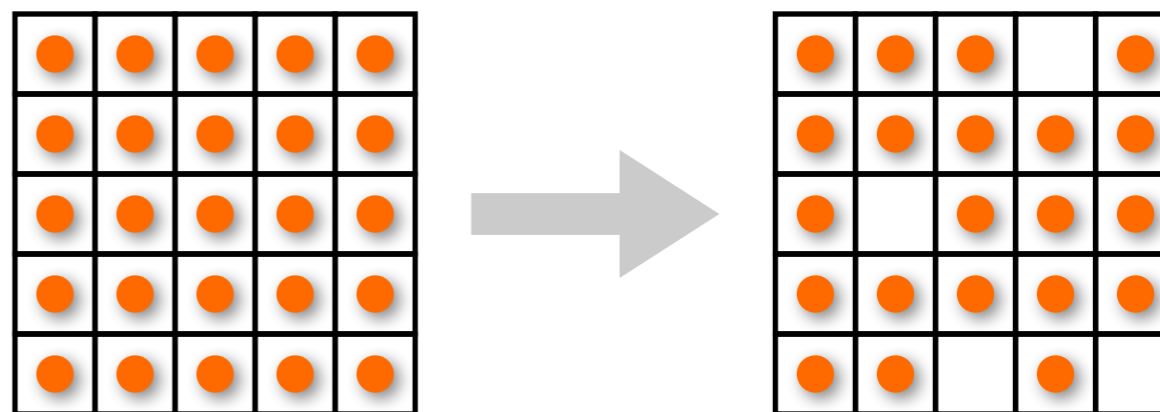


Fig. 1. Temperature dependence of resistivity in $\text{Ba}_x\text{La}_{5-x}\text{Cu}_5\text{O}_{5(3-y)}$ for samples with $x(\text{Ba})=1$ (upper curves, left scale) and $x(\text{Ba})=0.75$ (lower curve, right scale). The first two cases also show the influence of current density

..... 何が革新的だったのか?

電気が流れないセラミックに少し混ぜ物をする事で高い転移温度を持つ超伝導が現れることを見出した

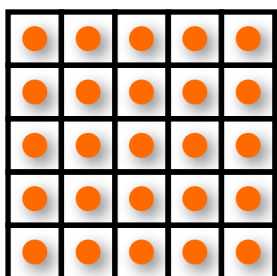


例) 最も高い転移温度をもつ超伝導物質
 $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$

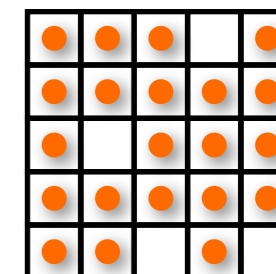
$$T_c = 134\text{K} = -139^\circ\text{C}$$

(月面の夜間気温 -170°C)

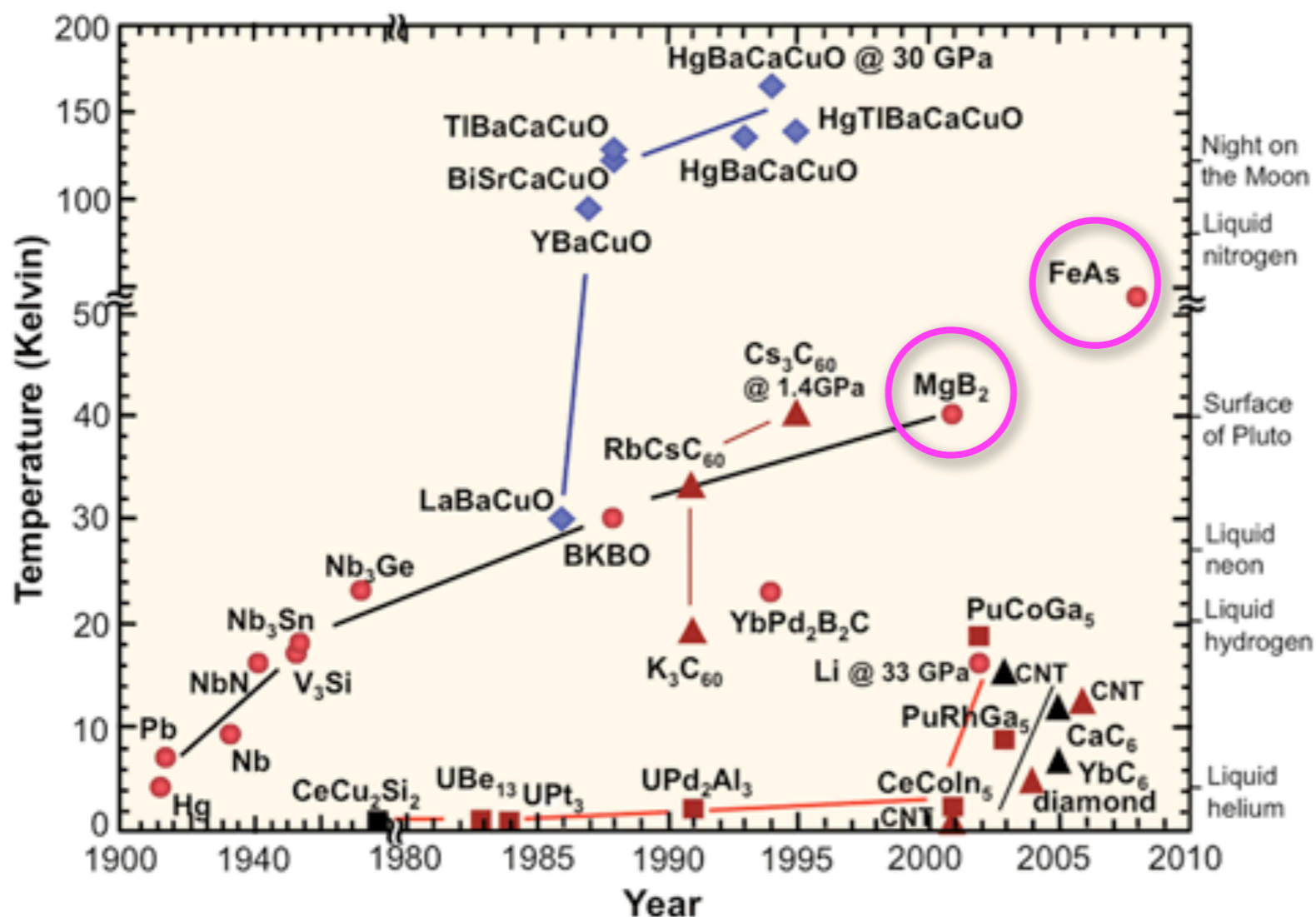
研究の最先端 [1] 高温超伝導



発見から30年近く経つがメカニズムは未解明



電子の間に働く強い相互作用が鍵？：強相関電子系



多くの日本発超伝導体



前野 悦輝 教授
(京都大学)
Sr₂RuO₄

秋光 純 教授
(青山学院大学)
MgB₂



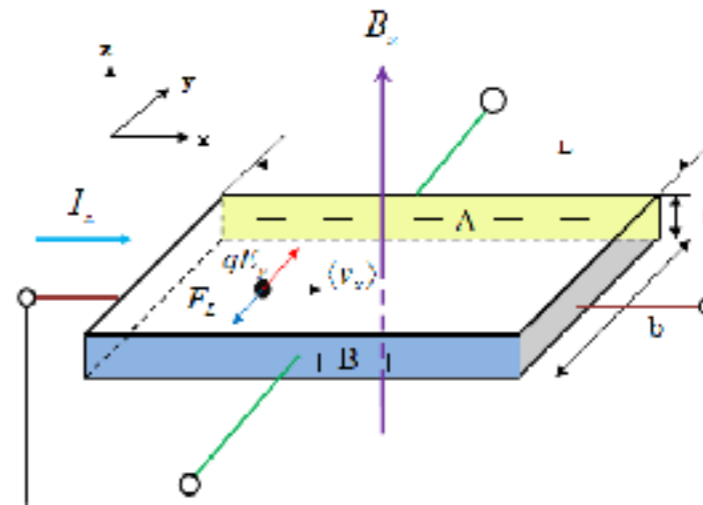
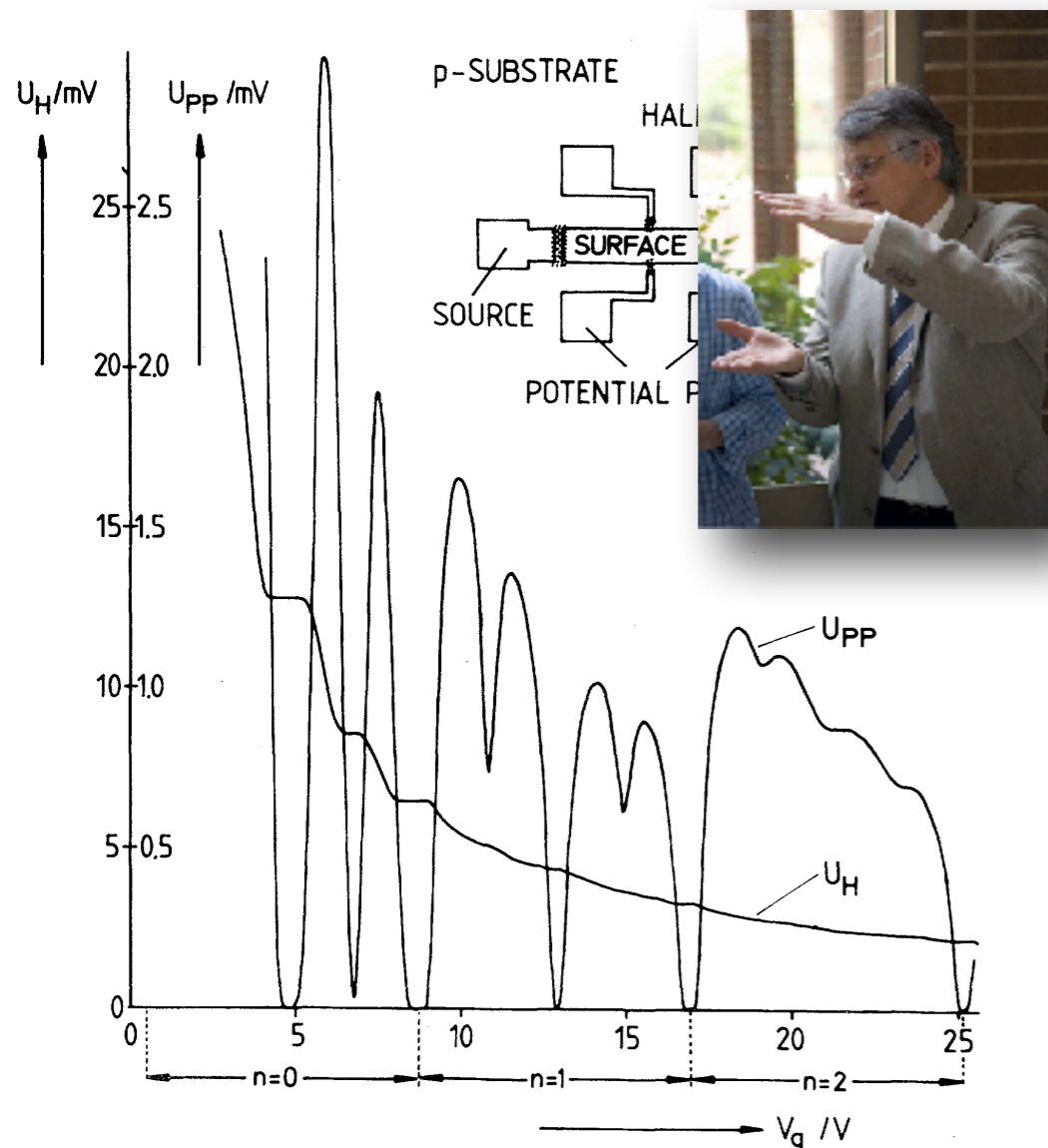
細野 秀雄 教授
(東京工業大学)
LaTMPnO

研究の最先端 [2]

量子ホール効果

K. von Klitzing *et al.* (1980)
1985年 ノーベル物理学賞

ホール効果：電流に垂直な方向に磁場をかけると
電子に働くローレンツ力に起因して電流と磁場の
両方に直交する方向に起電力が発生する



何が革新的だったのか？

2次元面に閉じ込められた電子に
強い磁場をかけるとホール抵抗が
量子化することを見出した

→ 日常のスケールで量子力学の世界が現れた

量子ホール効果

ホール抵抗：
$$R_H = \frac{1}{n} \frac{h}{e^2} \quad (n \text{は整数})$$

巨視的な測定量に整数が現れる

強い磁場のもとで電子の運動が量子化
→ 離散的なエネルギー準位（ランダウ準位）の形成

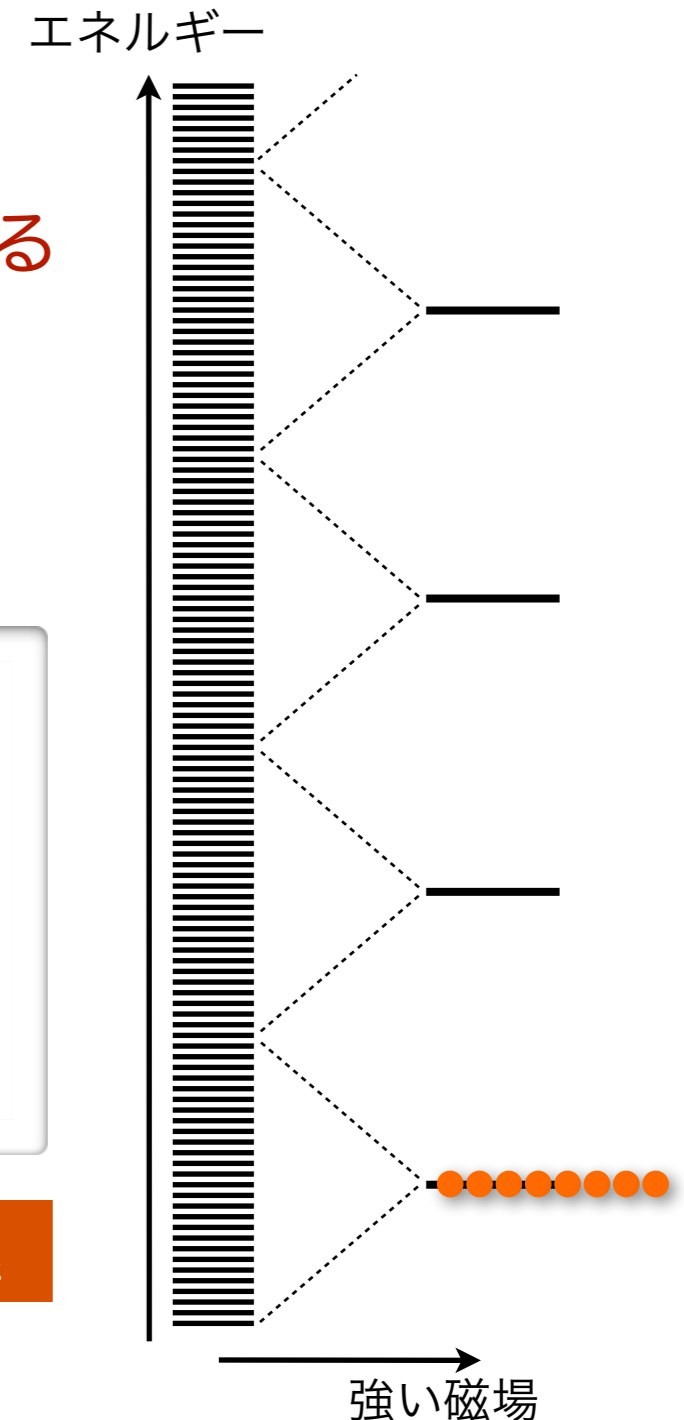
フォン・クリッツィング定数：

$$R_K = \frac{h}{e^2} = 25.812804434(84) \text{ k}\Omega \quad \text{10桁の精度！}$$

試料の大きさや形，クオリティーなどに依らない普遍定数

量子化（整数化）：系のもつトポロジカルな性質に強く関連

トポロジー（位相幾何学）：連続変形によるカタチの分類法



トポロジカル絶縁体

C. L. Kane and E. J. Mele (2005)
20XX年 ノーベル物理学賞？

トポロジカル絶縁体：物質の内部は電気を通さない絶縁体にもかかわらず表面が金属的になる特殊な絶縁体

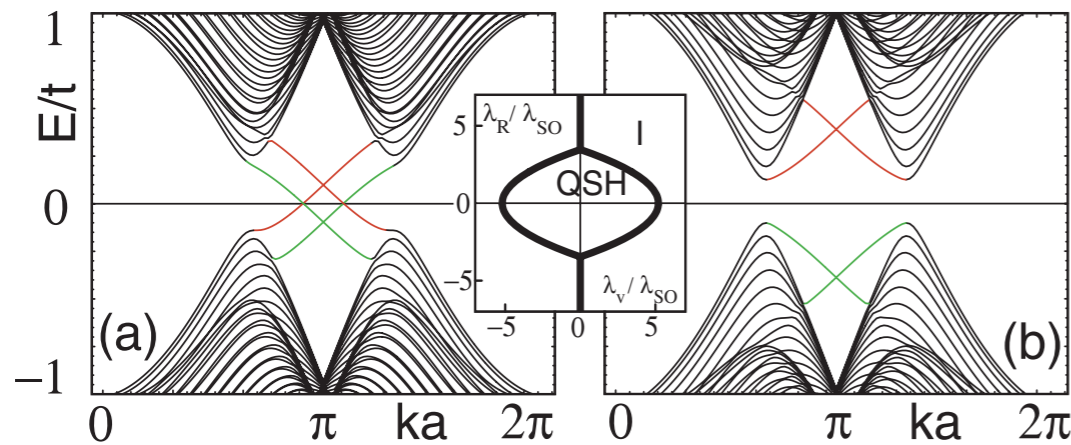


FIG. 1 (color online). Energy bands for a one-dimensional “zigzag” strip in the (a) QSH phase $\lambda_v = 0.1t$ and (b) the insulating phase $\lambda_v = 0.4t$. In both cases $\lambda_{SO} = .06t$ and $\lambda_R = .05t$. The edge states on a given edge cross at $ka = \pi$. The inset shows the phase diagram as a function of λ_v and λ_R for $0 < \lambda_{SO} \ll t$.

何が革新的か？

対称性により保護された表面状態
相対論的な粒子であるヘリカルな
ディラック粒子の出現
理論が実験を先導

理論的な新しい提案，実験的な検証・物質探索
新しいエレクトロニクスへの応用の可能性

急速に研究が進展中