

学術俯瞰講義

137億年の「物質」の旅

ビッグバンからみどりの地球へ

第4回～第6回 物質の性質

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

学術俯瞰講義 ⇒ 「文理両道」のススメ

- (幸か不幸か) 東京大学に入学してしまった皆さんは, (好むと好まざるとにかかわらず) 将来社会の中枢(だけに限らないが) で活躍することが求められる.
- そのために, 専門の学識と幅広い教養を身につけることが期待される.
- それらの素養はまた, 自らの人生を豊かにする鍵でもある.
- (陰の声: 自分はどうなんだ)
- ⇒ 教員というのは, 自分のことをとりあえず棚に上げて学生に要求を出すのが商売.

物理学を学ぶ効用

- 物理を専門としない人が物理を学ぶ効用は何かといえ、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物理学の原理に反するような怪しげな超常現象の話が怪しいと直観できる常識である。
- 一方、物理を専門とする者にとって物理の醍醐味は何かといえ、それは「常識が破られる快感」であると思う。
- 講義では、物質科学・物性物理の基本的考え方と、サプライズを伝えたい。

講義プラン

第1～3回 須藤 靖先生 「物理学的世界観」

第4～6回 家 泰弘担当 「物質の性質」

第4回 現代社会と物質科学

物性物理学とは何をする学問か

第5回 原子から固体へ

多様な物質・多彩な物性

第6回 原子を操る・量子を操る

—ハイテクとナノサイエンス

第7～9回 柴崎 正勝先生 「物質の創成」

第10回 藤嶋 昭先生 「特別講義 物華天宝」

第11～13回 小宮山宏先生 「物質の利用」

今日のお話

現代社会と物質科学
物性物理学とは何をする学問か

スケールのお話
現代社会と物理学
物理学の中の物性物理学
量子力学と原子構造

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



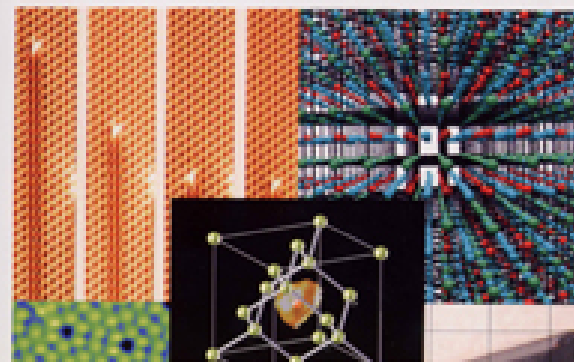
柏キャンパスの物性研究所



21世紀の物質科学

【最先端がわかる】

東京大学物性研究所編
培風館



13人の科学者が語る物質科学の最前線

“針の先で1個の原子をつり上げる”
“電気を運ばない電子の流れ”…

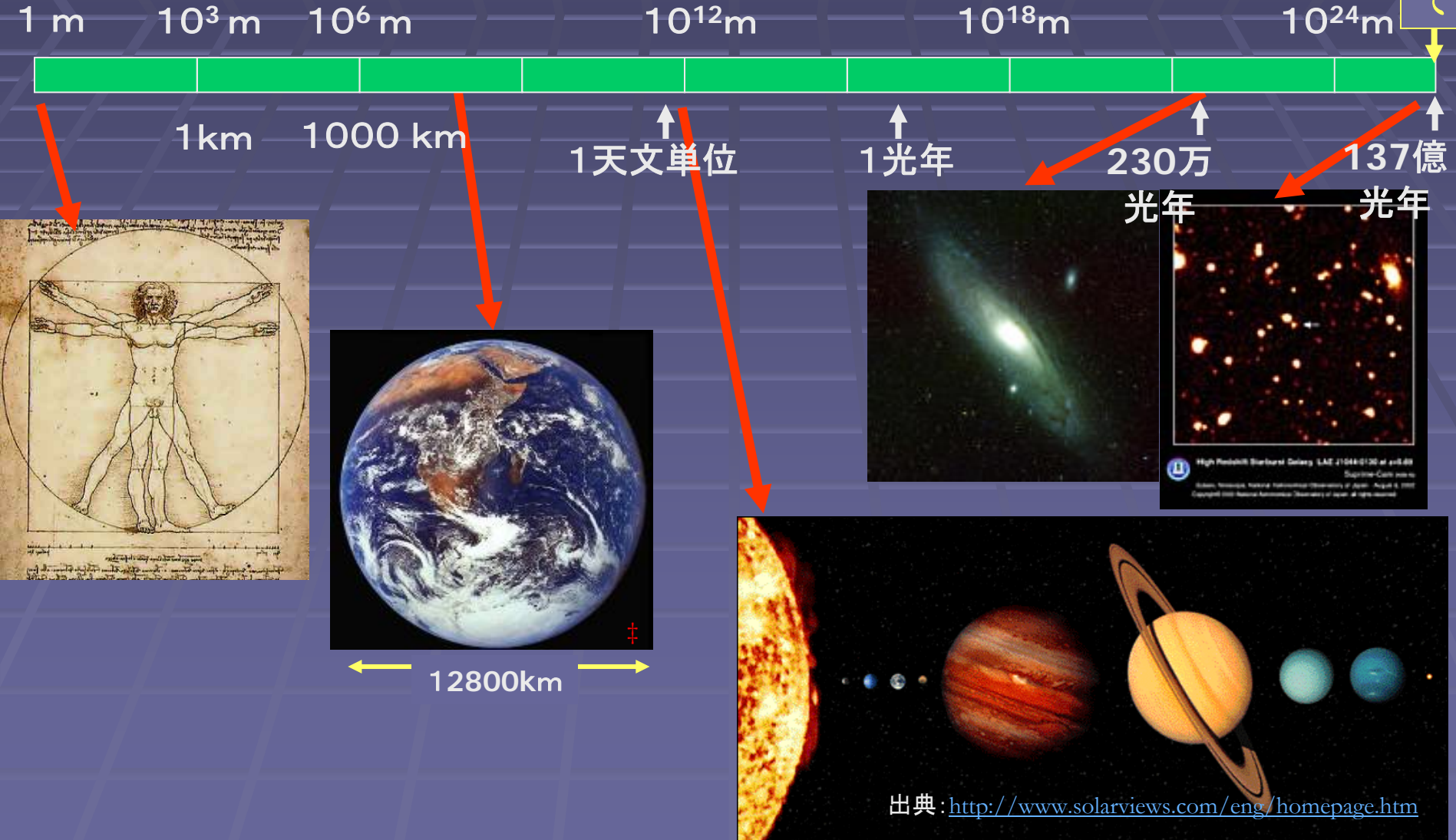
21世紀初頭にかけて次々登場した新技術や新物質。その無限の可能性を秘めた「物質科学」のホットな世界へ読者を誘う。 培風館

培風館 (¥2000+税)

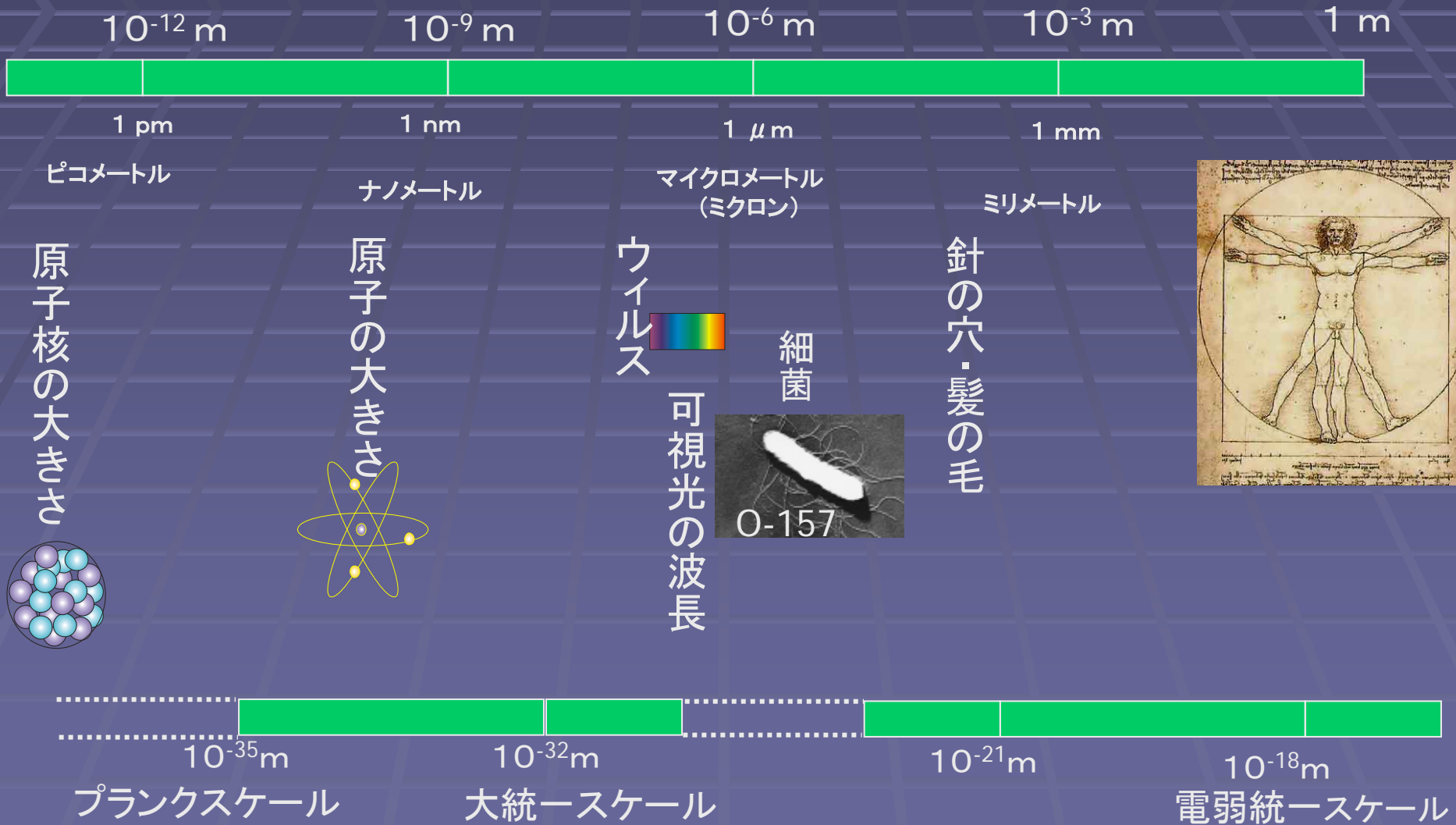
スケールのお話

スケールの大きな話

宇宙の果て



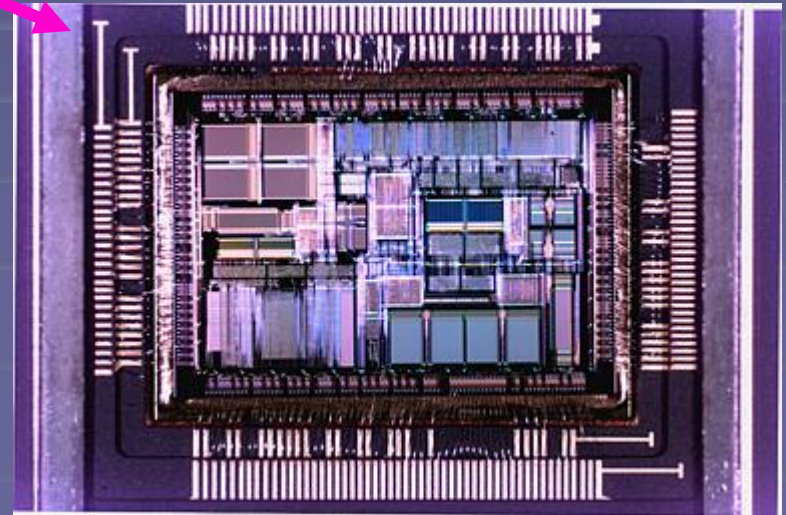
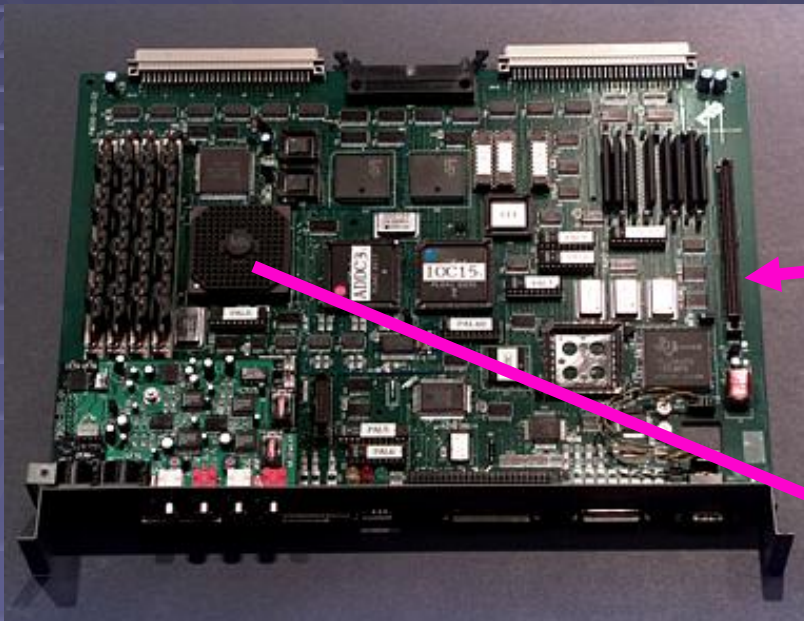
スケールの小さな話



現代社会と物理学

コンピューター

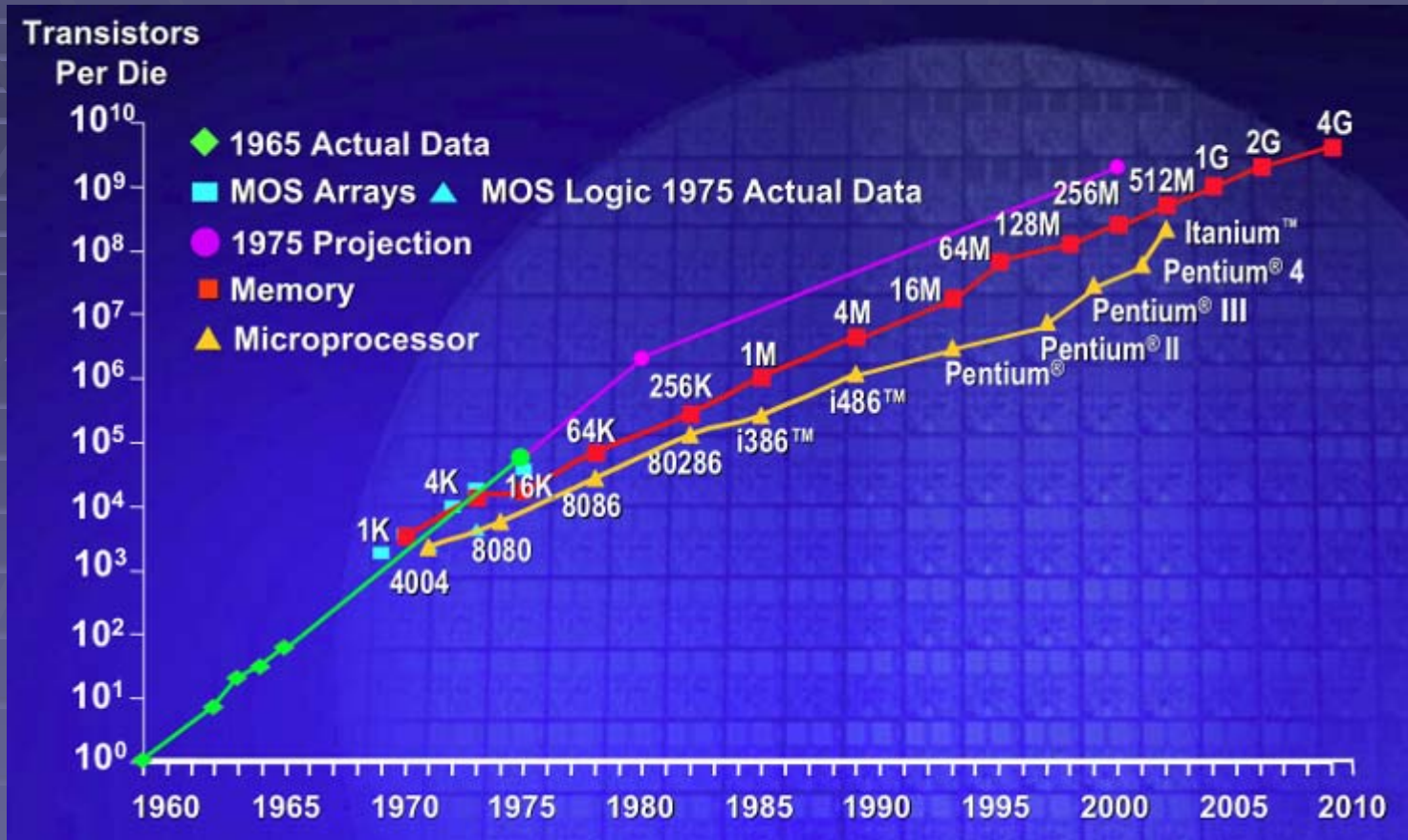
パーソナルコンピューター



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

“Integrated Circuit Complexity”



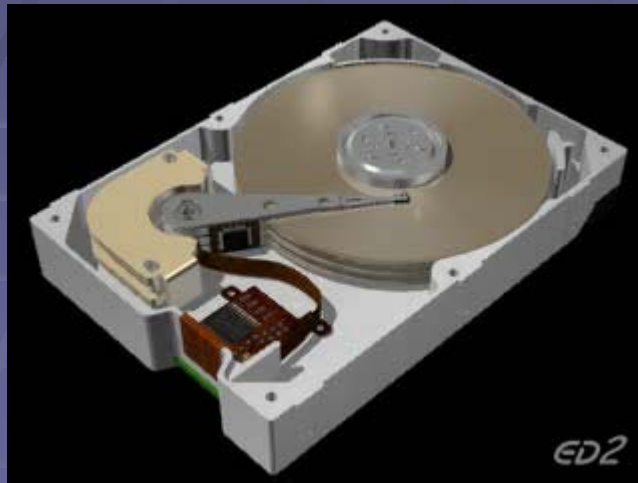
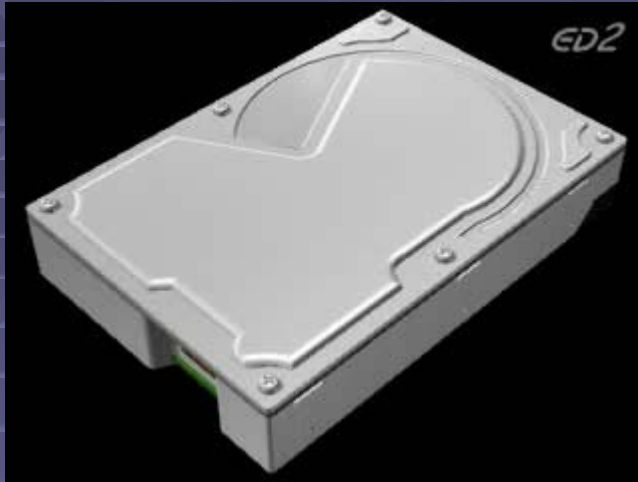
Gordon E. Moore “NO EXPONENTIAL IS FOREVER...”

‡ Intel Copyright Permission Department

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.

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

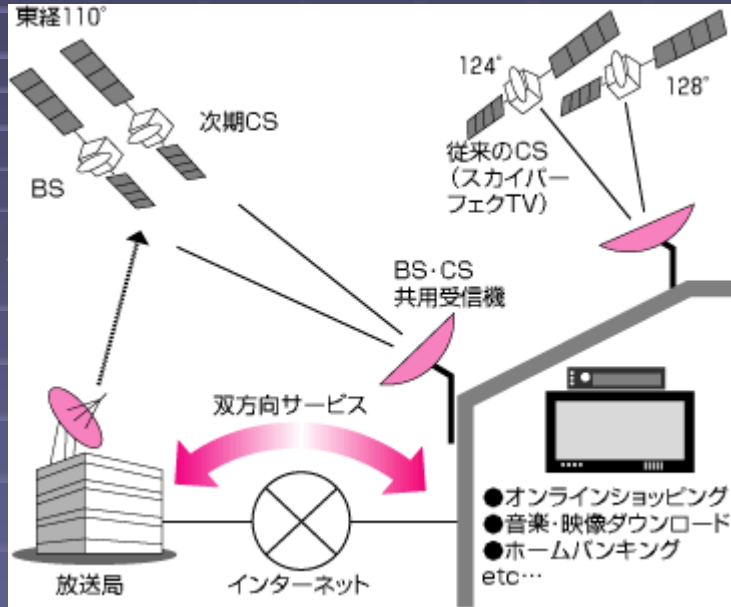
デジタル情報を磁性体の
磁化の向きとして記録

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



光ファイバー

高移動度トランジスタ
HEMT



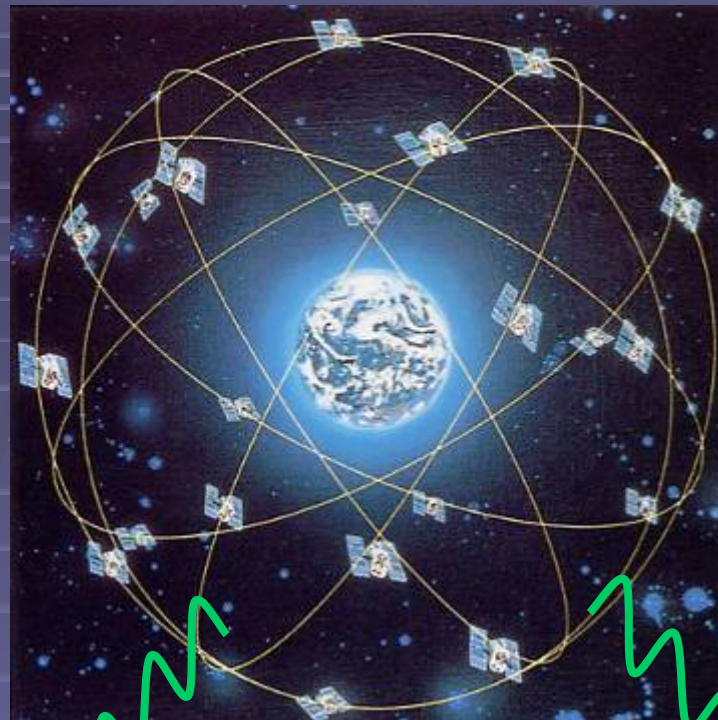
発光ダイオード
半導体レーザー

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

$2\pi\lambda$
 $\frac{c}{f}$
 λ

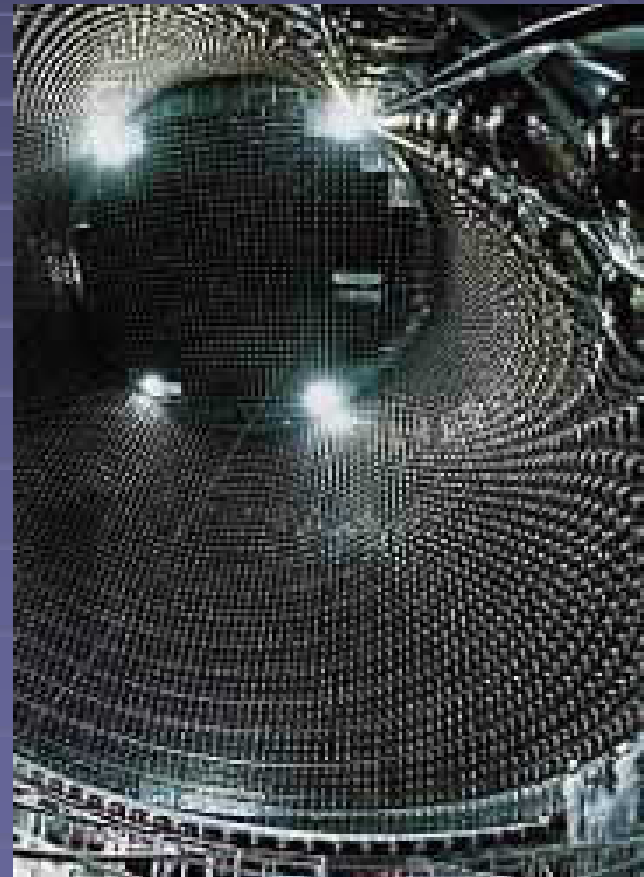


素粒子・宇宙研究にも

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

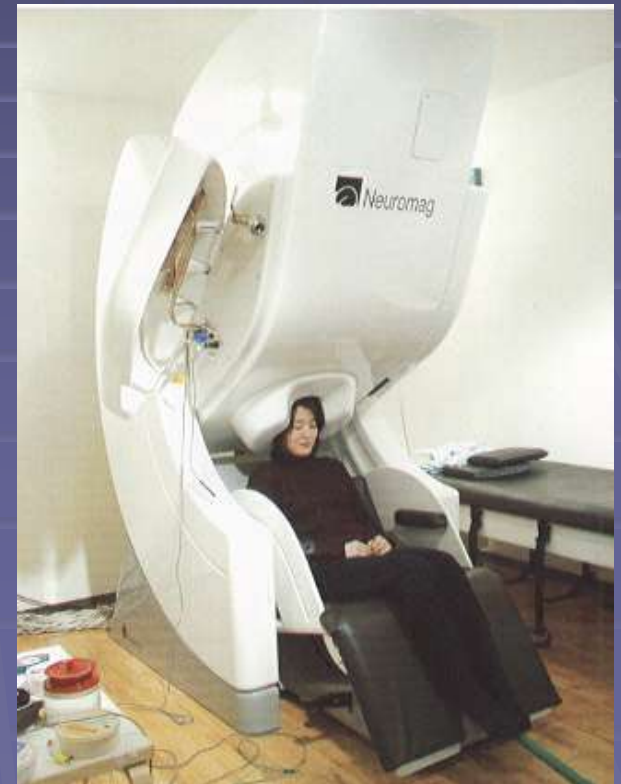


先端医療にも

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

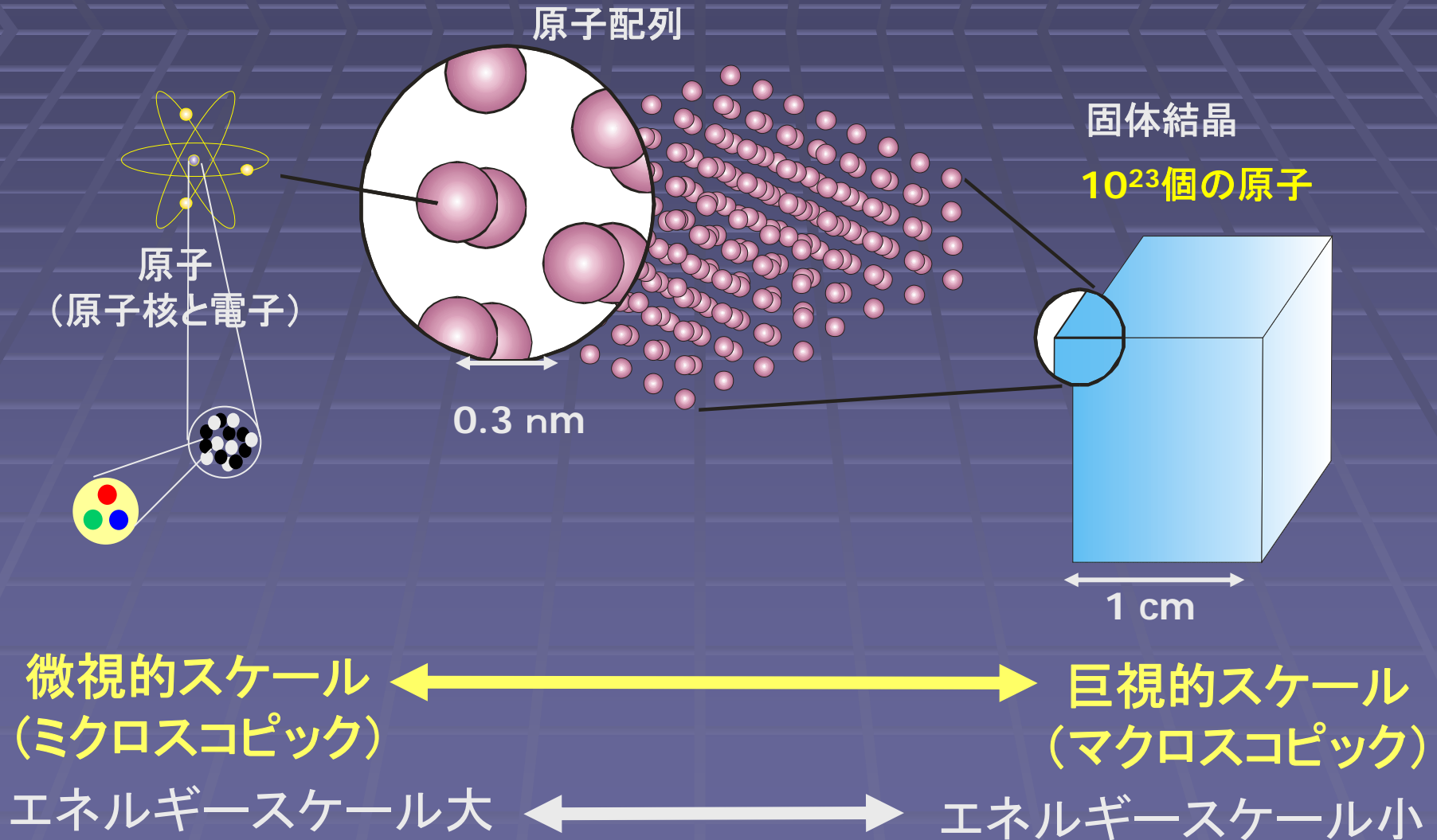
- 液晶（ディスプレイ）
- 高強度繊維（テニスラケット）
- 高分子ゲル（紙おむつ）
- 形状記憶合金
- 燃料電池
- 光触媒 ⇒ 藤嶋先生の講義
- 太陽光発電 ⇒ 小宮山総長の講義
-

物理学の中の物性物理学

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
- 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
 - しかし博物学ではなく, 普遍性・統一性を求める

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 ⇒ 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)

物性物理学の意義

物質の性質を物理学の基本原理に基づいて理解したいという知的欲求

⇒ **物質観の構築**

物性を理解し, 利用する. 有用な機能の開拓と制御

⇒ **工学とも密接な関係**

Curiosity-Driven Research (学術研究)と

Mission-Oriented Research (目的志向型研究)

しかしこれらの間に境はなく, 1人の研究者の意識の中でも, ある割合で共存する.

物性物理学の意義

物性物理学と素粒子・原子核物理学や宇宙物理学との間の概念のキャッチボール

相転移： 自発的対称性の破れ

南部・ゴールドストーン モード \Leftrightarrow ヒッグス機構

漸近的自由性：

クォークの閉じ込め \Leftrightarrow 近藤効果

トポロジカル励起, 量子位相

.....

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**
 - 多様性といっても「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 (⇔ 宇宙物理学, 地球惑星物理学)
 - スモールサイエンス (⇔ 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

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

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

- 構造的性質

- 結晶構造(固体, 液体, ガラス, ...)
- 組成

- 力学的性質

- 鋼鉄は硬く, 金は柔らかい,
- ガラスは硬いが脆い
- ダイヤモンドは硬い, グラファイト(黒鉛)は硬いがへき開しやすい(はがれやすい)

- 熱的性質

- 銅は熱伝導が良く, ステンレス鋼は悪い

物質の性質

- 電氣的性質
 - 伝導（金属，絶縁体，半導体）
 - 強誘電性
 - 超伝導
- 磁氣的性質
 - 強磁性（鉄はどうして磁石になる？）
- 光學的性質
 - 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

量子力学と原子の構造

元素の周期律表

元素の周期表

	1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8	1B	2B	3B	4B	5B	6B	7B	0																
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	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	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	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	¹⁰⁴ Rf	¹⁰⁵ Db	¹⁰⁶ Sg	¹⁰⁷ Bh	¹⁰⁸ Hs	¹⁰⁹ Mt	¹¹⁰ Ds	¹¹¹ Rg	¹¹² Cn	¹¹³ Nh	¹¹⁴ Fl	¹¹⁵ Mc	¹¹⁶ Lv	¹¹⁷ Ts	¹¹⁸ Og

周期律はなぜ成立するか？

- 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

物性物理の登場人物たち

登場人物（「素」粒子）

電子

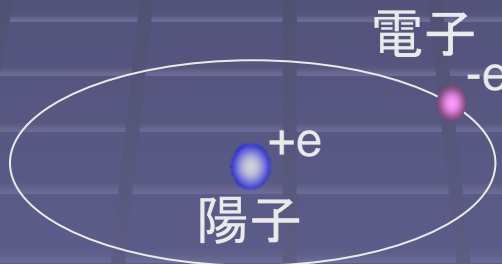
原子核（陽子＋中性子）

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

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

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

水素原子



「素」粒子の間に働く力： 電磁相互作用

光（電磁波）

光子 $h\nu$

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

エネルギースケール

エネルギーの単位:

ジュール $J = \text{kg m}^2/\text{s}^2$

質量 × 長さ² / 時間²

運動エネルギー

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

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

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

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

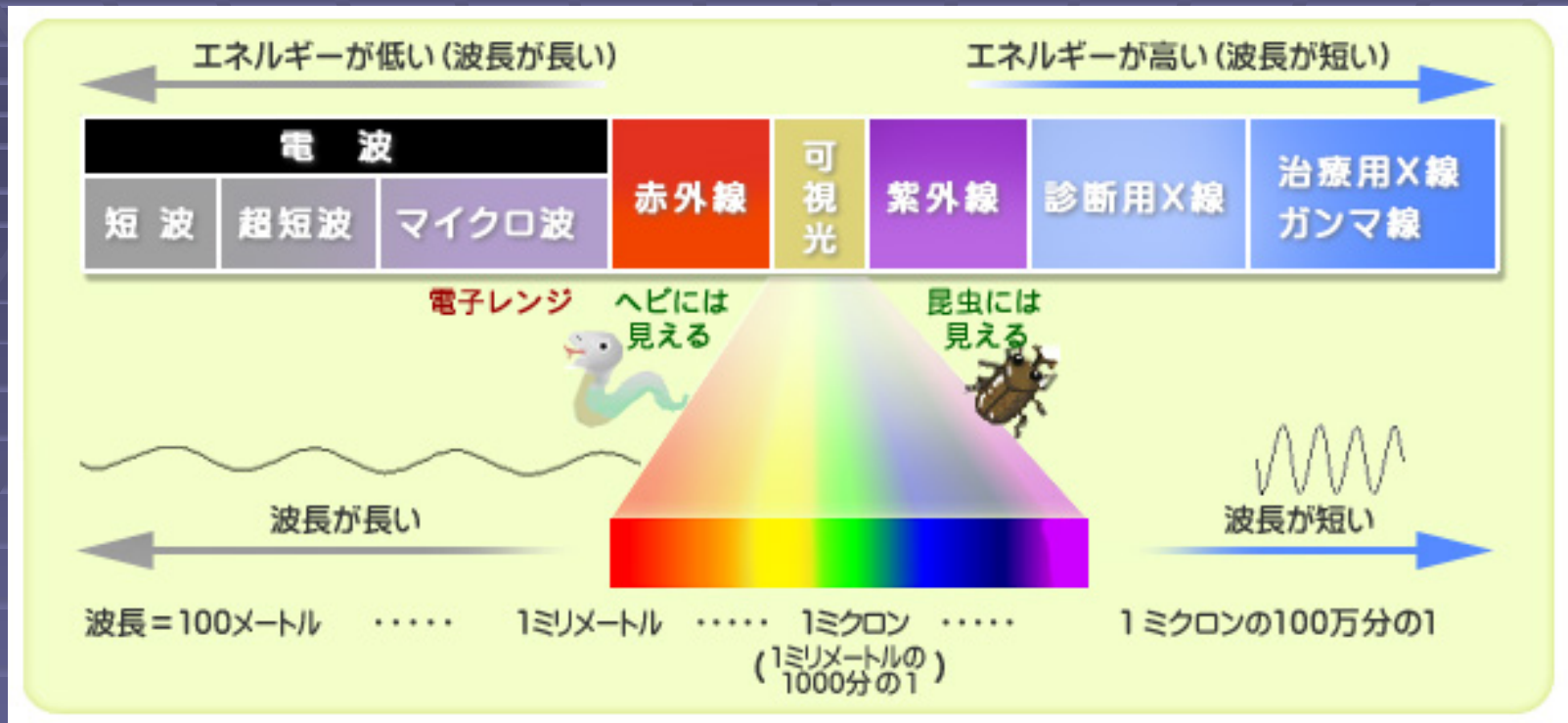
プランク定数

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

$$= 4.13 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$$

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

光(電磁波)



放射線影響研究所 <http://www.rerf.or.jp/general/whatis/index.html> より 2009. 3

1 eV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)

量子力学

“電子など量子力学的粒子は粒子であり波である”

ド・ブロイ波長 λ

運動量と波数, 波長の関係

$$p = \hbar k = \hbar \frac{2\pi}{\lambda}$$

その状態を表す波動関数 $\psi(x, y, z)$ は
シュレーディンガー方程式に従う

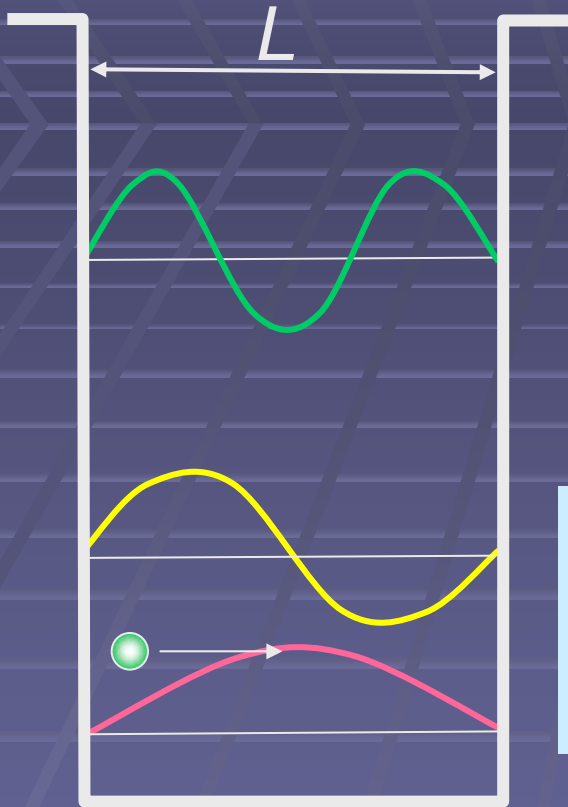
$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(r) \right) \psi(x, y, z) = E \psi(x, y, z)$$

$$\nabla^2 \equiv \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

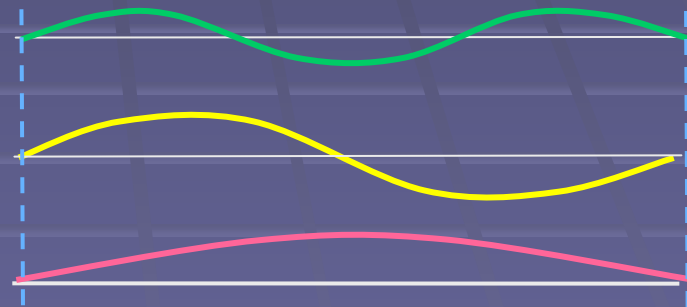
粒子の存在確率

$$|\psi(x, y, z)|^2$$

エネルギーの量子化



$$\lambda = \frac{2L}{n}$$
$$(n = 1, 2, 3, \dots)$$



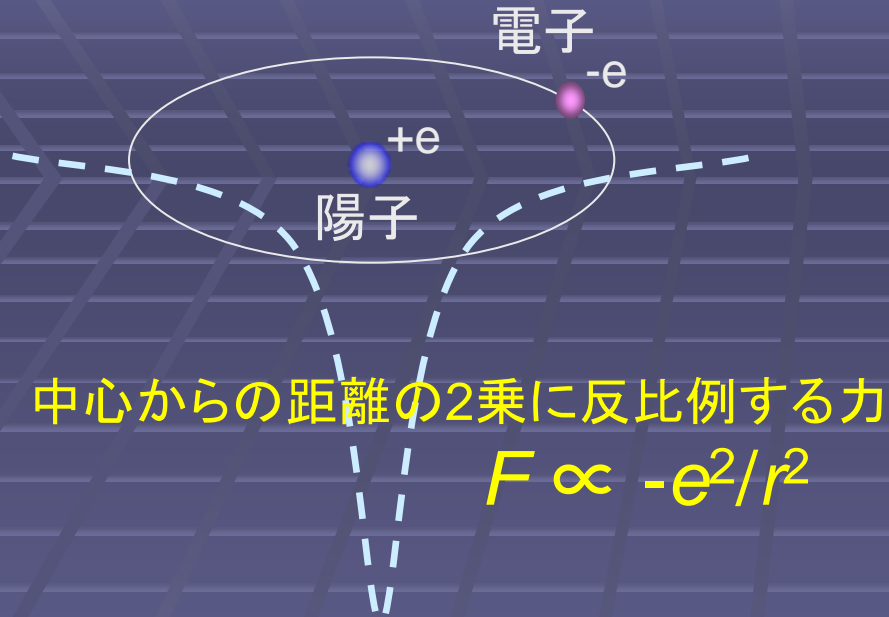
箱の中の電子 \Rightarrow 定在波：離散的エネルギー準位

$$p = \hbar \frac{2\pi}{\lambda} = \hbar \frac{2\pi}{2L} n$$



$$E = \frac{p^2}{2m} = \frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\pi}{L} n \right)^2 \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

水素原子

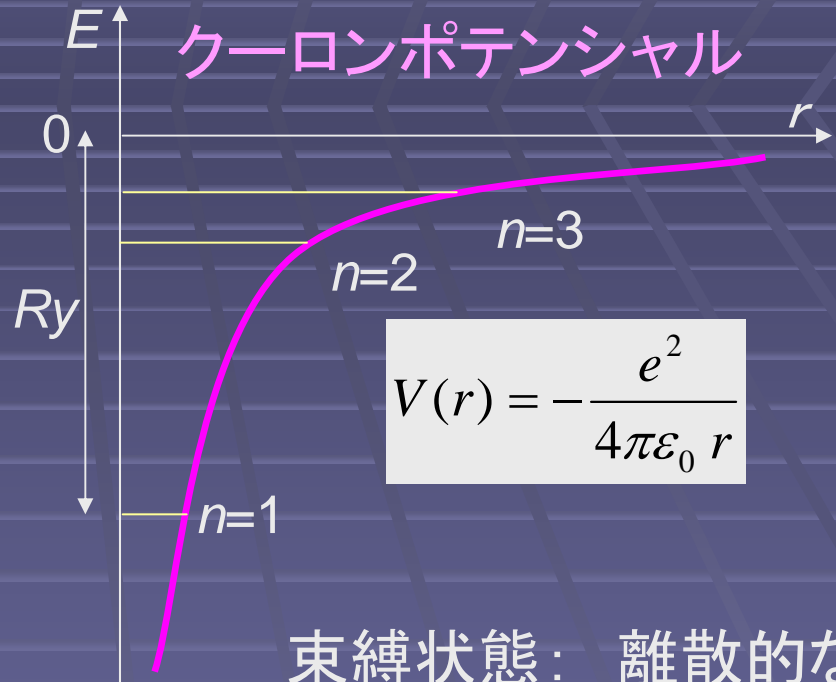


ボーア半径

$$a_0 = \frac{4\pi\epsilon_0\hbar^2}{me^2} = 0.053 \text{ nm}$$

リュードベリ定数

$$Ry = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{me^4}{2\hbar^2} = 13.6 \text{ eV}$$



束縛状態： 離散的な
エネルギー準位

$$E_n = -\frac{1}{n^2} Ry$$

$$\langle r \rangle_n = n^2 a_0$$

水素原子のエネルギー準位

動径(中心からの距離)方向の運動 ⇒ 離散的エネルギー準位

中心の周りの回転運動 ⇒ 角運動量の量子化

角運動量子数

$$l = 0, 1, 2, \dots, \infty$$

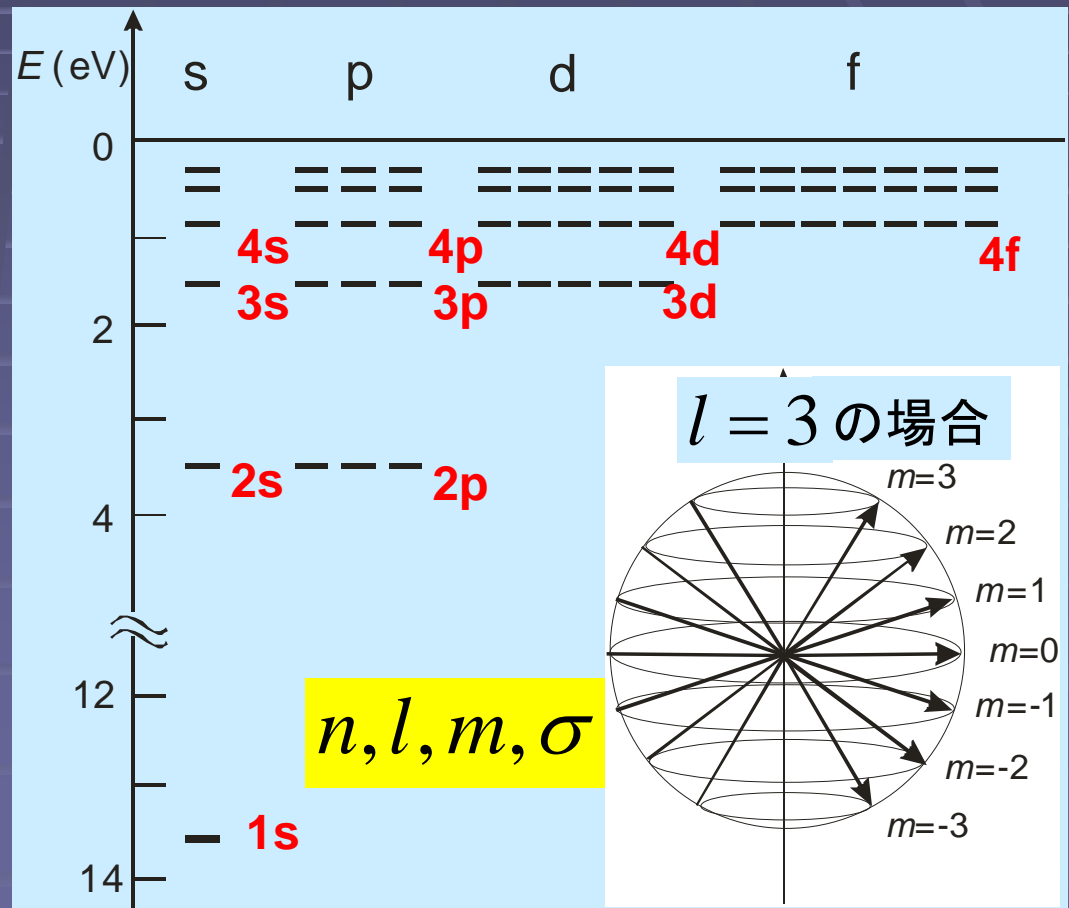
$$m = -l, -(l-1), \dots, (l-1), l \quad (2l+1)$$

主量子数 $n = l, l+1, \dots, \infty$

電子はスピン(自転)の自由度を持つ(ただし上向きか下向きかのみ)



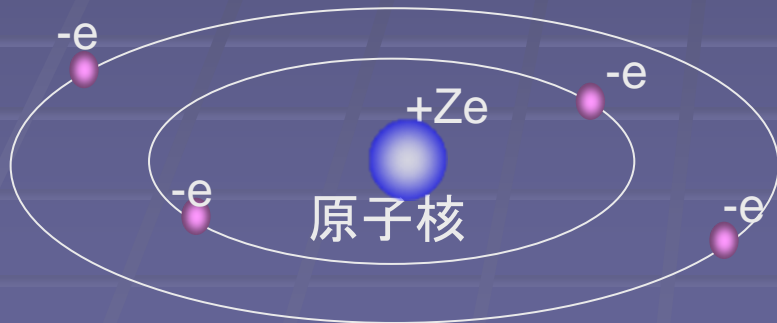
スピン量子数 $\sigma = \pm 1$



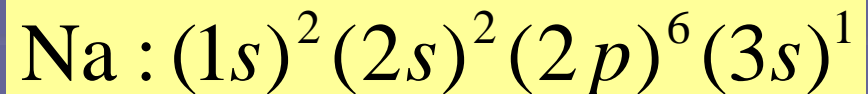
原子の電子エネルギー準位

多電子原子: $+Ze$ の電荷をもつ原子核と Z 個の電子

電子はフェルミ粒子 $\Rightarrow (n, l, m, \sigma)$ で指定される
エネルギー準位に1個ずつ収容される



Na: $Z=11$



原子の電子エネルギー準位

電子はフェルミ粒子 $\Rightarrow (n, l, m, \sigma)$ で指定されるエネルギー準位に1個ずつ収容される

n の値で指定される殻(シェル)構造

$$n=1 \quad 2 \times 1 \quad = 2$$

$$n=2 \quad 2 \times (1+3) \quad = 8$$

$$n=3 \quad 2 \times (1+3+5) \quad = 18$$

1つの殻が完全に埋まるような原子の数 2,10,18,36...
はエネルギー的に安定

希ガス(不活性ガス)原子:

He, Ne, Ar, Kr, Xe

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 $k_B T$

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

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

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

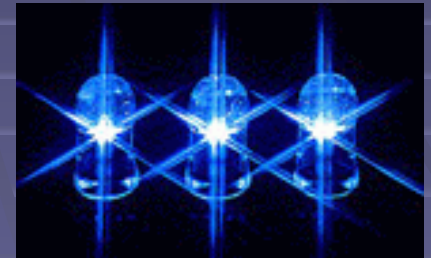
乾電池は1.5V

電子のやりとりによる起電力



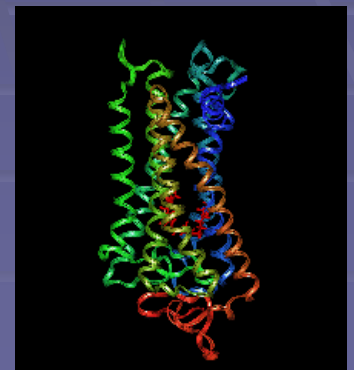
レーザーポインター

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 $\sim\text{eV}$ 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



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
- 量子力学と原子構造
 - 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 $\sim eV$