

物理実験学(1)

河野能知、kono.takanori@ocha.ac.jp

理論と実験

物理現象

現象の記述

関連する現象の統一的理解

新しい現象の予言

現象の観測や物理量の測定

理論的に予言される現象の検証

現象の本質を解き明かすような測定

講義の目的

- 物理学を研究する上での「常識」を身に付ける
 - よい実験をするとはどういうことか
 - 実験結果を正しく解釈できるようになる
 - 何を測定していて、どのような理論で解釈できるか
 - 疑問をはさむ余地があるか。暗黙のうちに何か仮定されていないか
- 実験の基礎知識
 - 測定と誤差、データ解析、電子回路
 - データ解析(フーリエ変換、統計)
 - 結晶構造、放射線計測、実験環境(低温、真空)、電子回路
- 目標
 - 実験に主体的に取り組むようになる
 - 講義で学ぶことがどのような現象を記述するものかイメージを持てるようになる
 - 実験を自分で設計できるようになる
 - 実験論文を読めるようになる

講義の内容

- 導入

- 現代物理学の紹介
- 簡単な実験の例
- 物理量と単位・単位系

- 技術的なこと

- 測定と誤差
- データ解析(最小二乗法、統計的手法、フーリエ変換)
- 結晶構造、放射線計測、実験環境(低温、真空)、電子回路

- 実験の具体例

- 歴史的な実験の論文を読んでみる

物理学による自然界の記述(1)

高校までの物理

力学

- 速度、加速度
- 運動量、エネルギー
- **運動方程式**

電磁気

- 電荷、電流
- 電場、磁場
- **Maxwell方程式**

熱

- 熱量、温度、圧力
- **状態方程式**

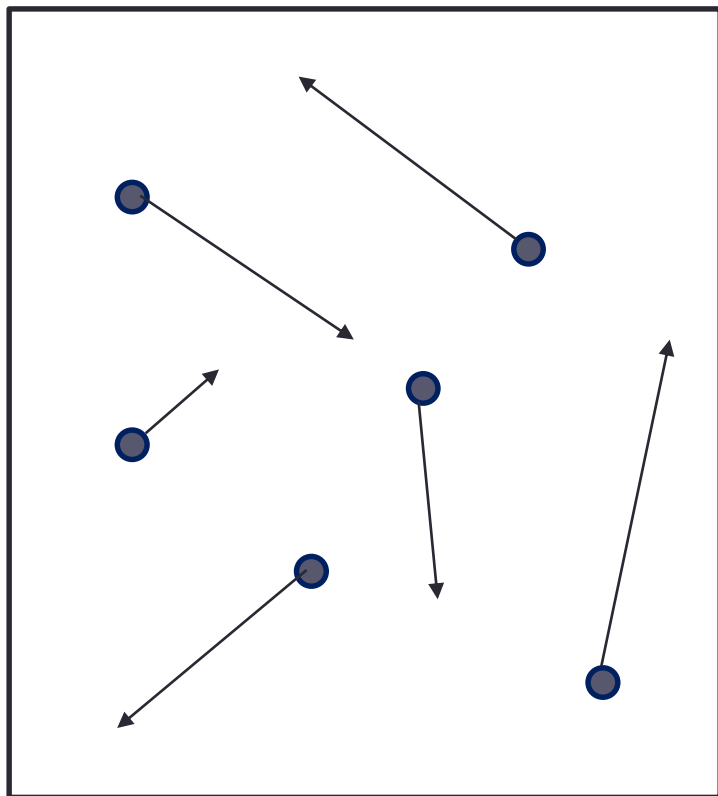
波 (音波、光)

- 波長、振動数、速度、周期
- 反射、屈折、回折、干渉
- **波動方程式**

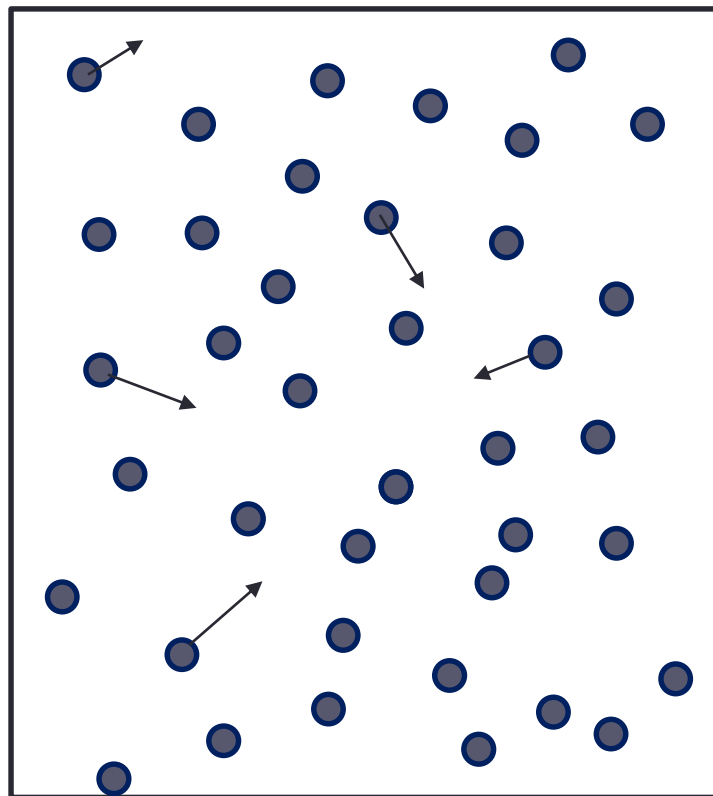


身近にある現象を記述するのに適した「概念」と「基礎方程式」

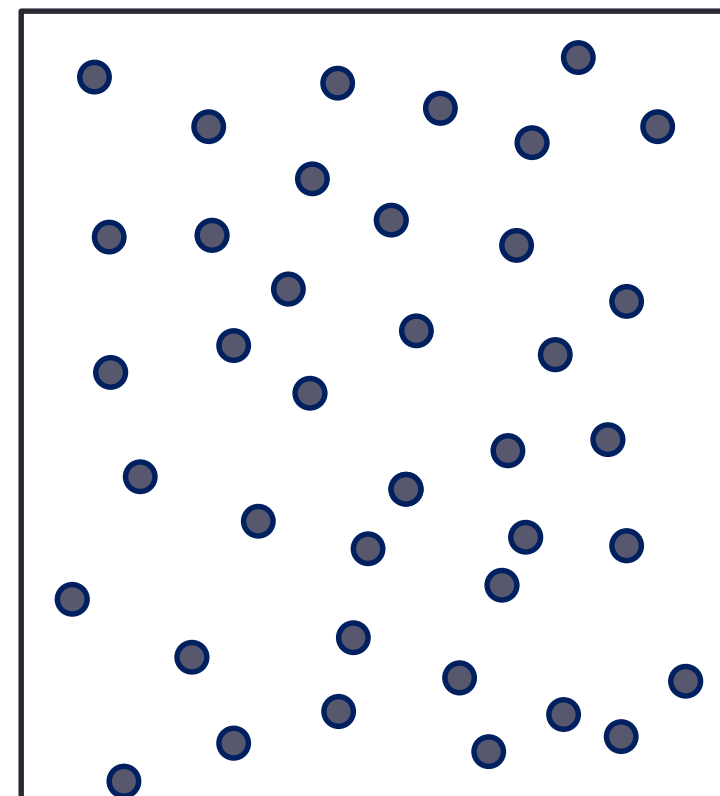
物質の構成要素としての原子・分子



気体



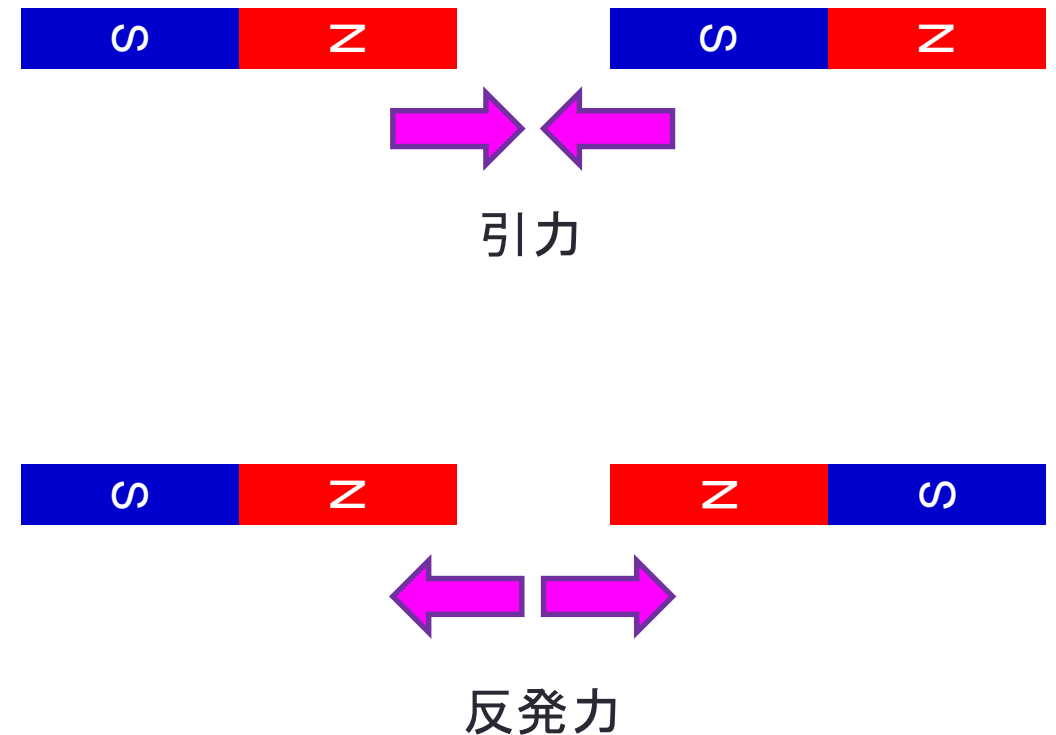
液体



固体

電磁気

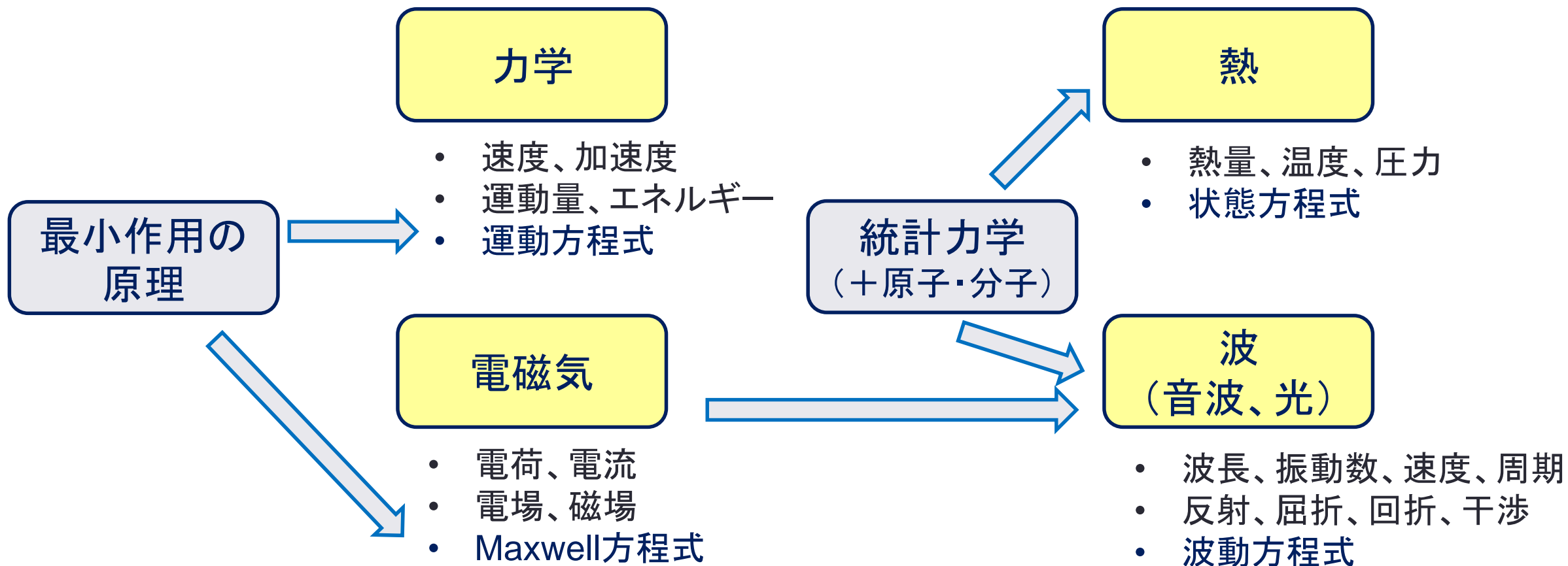
- 電荷・電流 ($\rho(x), \vec{j}(x)$)
 - 電流の担い手としての電子
- 電場・磁場 ($\vec{E}(x), \vec{B}(x)$)
 - 電磁力を媒介する波動
- ローレンツ力
 - 荷電粒子と電磁場との相互作用
- 電磁波
 - 空間を伝播する波



原子像による物理の統一

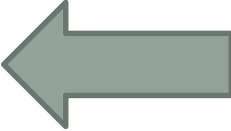
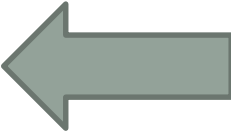
- 物理的自由度
 - 質点: $m, Q, \vec{x}(t), \vec{v}(t)$
 - 場: $\vec{E}(x), \vec{B}(x)$
- 物理法則
 - 系を記述する自由度とLagrangianが決まれば、最小作用の原理から運動方程式が導かれる
- 力学、電磁気学
 - この枠組みで記述できる
- 熱力学
 - 力学と電磁気学の法則にしたがう多数の粒子 + 大統計 → マクロな量の関係式
- 波動
 - 電磁場、光: 基本的自由度
 - 音波: 原子の振動が引き起こす波

物理学による自然界の記述(2)



- 運動方程式は「最小作用の原理」から導かれるものである。
 - (扱う現象によって系を記述する自由度が異なるだけ)
- 膨大な数の粒子からなる系に現れる「マクロな量」(圧力、温度、...)の間の関係式

光

- 光の性質
 - 直進性、反射、速度
 - 屈折、回折、干渉、波長、
 - 色、エネルギー
 - 光に関連する現象
 - 発光
 - 光の吸収
- 
- 

- 光を波として考えることで理解できる

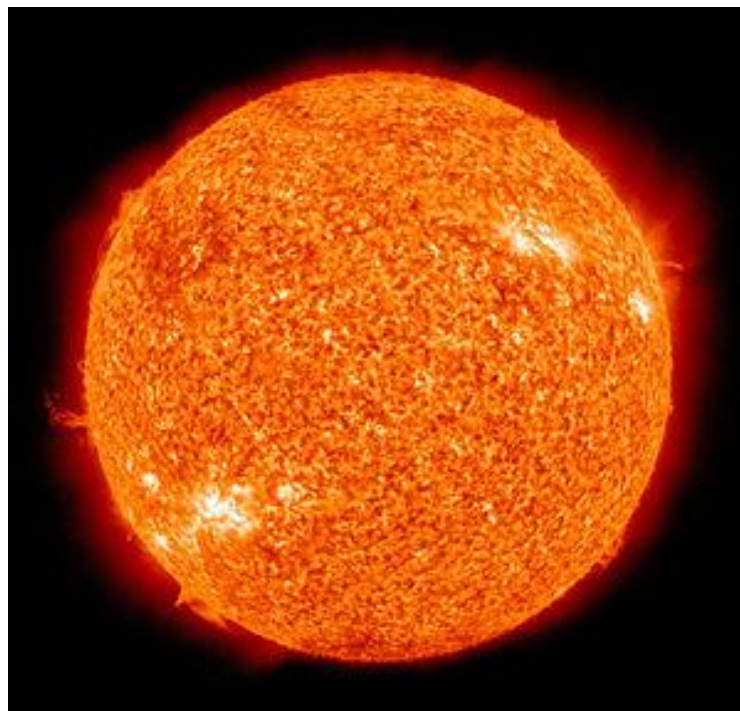
- 光と物質との相互作用
- 本質的に量子力学として扱う必要がある



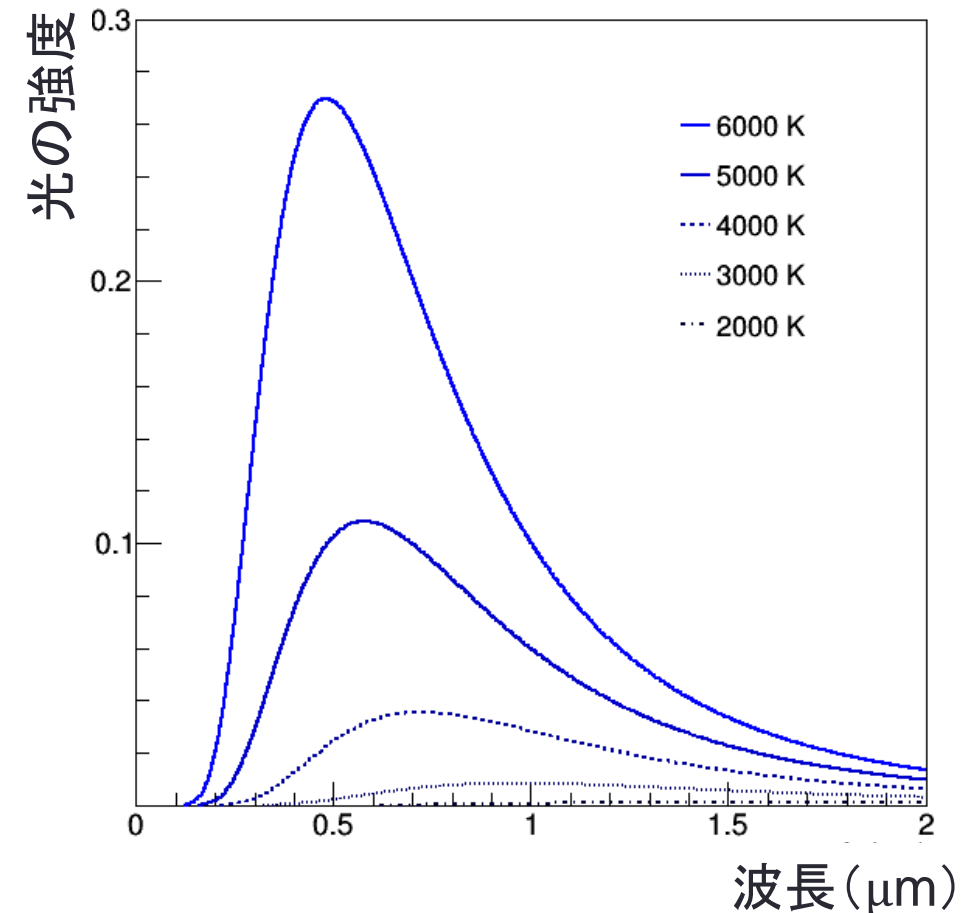
場の量子論

黒体放射

発光の仕組みの一つ



太陽は、表面温度約6,000度の黒体放射で光っている



- 温度 T の熱平衡状態にある光子の集まり
- 光子のエネルギー $E = h\nu = hc/\lambda$

量子力学

- 光と物質の相互作用
- 原子・分子内の電子のエネルギー準位
 - K, L, M, ... 殻
- 太陽のスペクトル内の吸収線
 - 特定の波長の光だけ吸収される

$$E = \frac{\vec{p}^2}{2m}$$



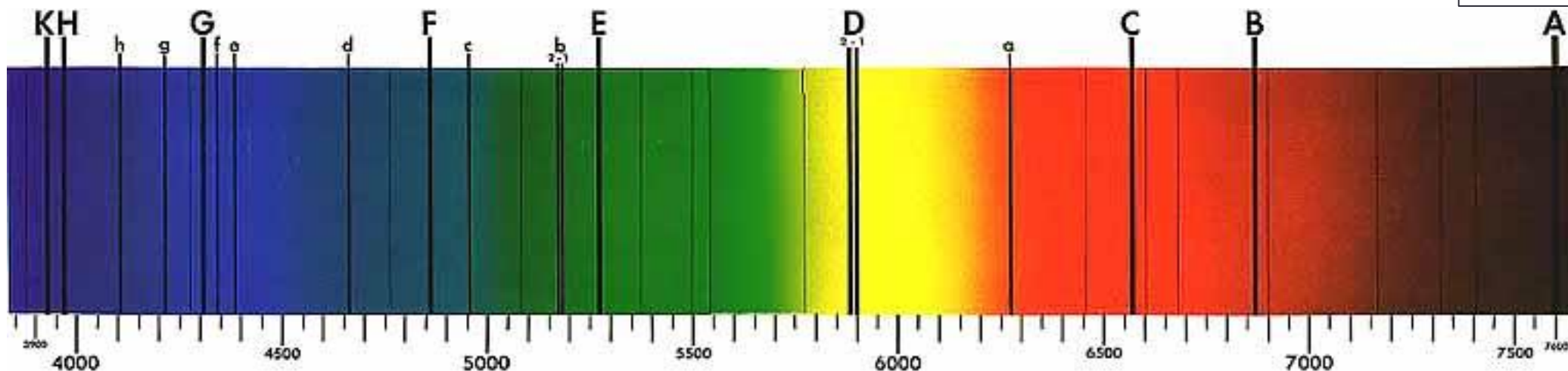
正準量子化

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



$$E_n, \psi_n(x)$$

基本は水素原子内の
電子状態



放射線

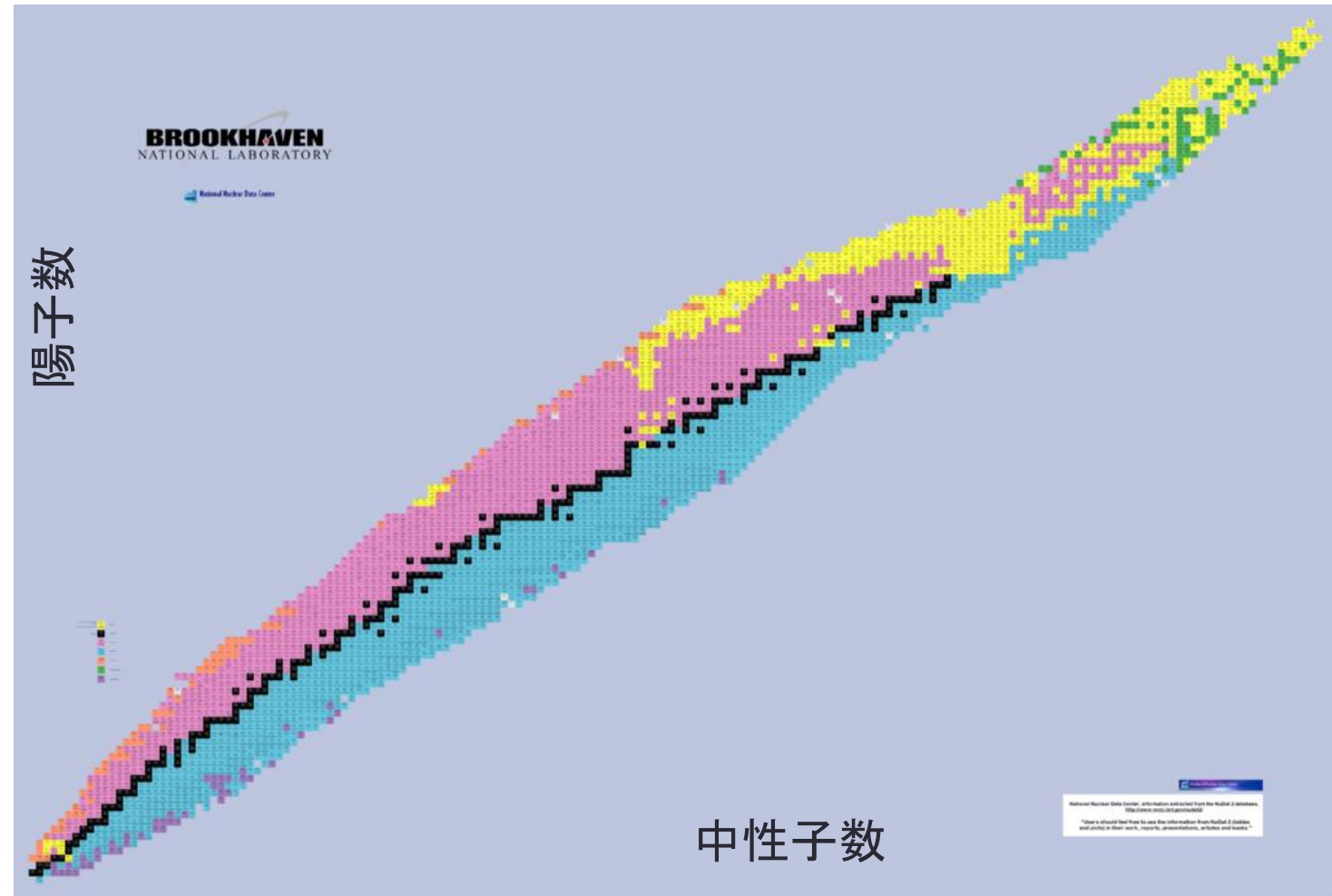
放射性物質

自発的に「放射線」を放出する物質

- α 線: ヘリウム原子核
- β 線: 電子
- γ 線: 光子

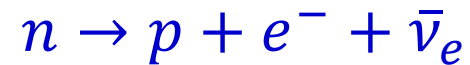
原子核

- 有限個の陽子と中性子の集まり
- 陽子数と中性子数のバランスが悪いと不安定で、より安定な状態に遷移する



放射性物質の崩壊

ベータ崩壊



これによって、元素の変換が起こる。 $(Z, N) \rightarrow (Z+1, N-1)$ 、Z: 原子番号、N: 中性子数

この反応をどう理解したらよいか？

- 中性子は陽子、電子とニュートリノから構成されている？
- 中性子が他の3つの粒子に変わっている？ 保存則は？
- 陽子や中性子が原子核を構成する仕組みは？ 強く束縛する力は何か？

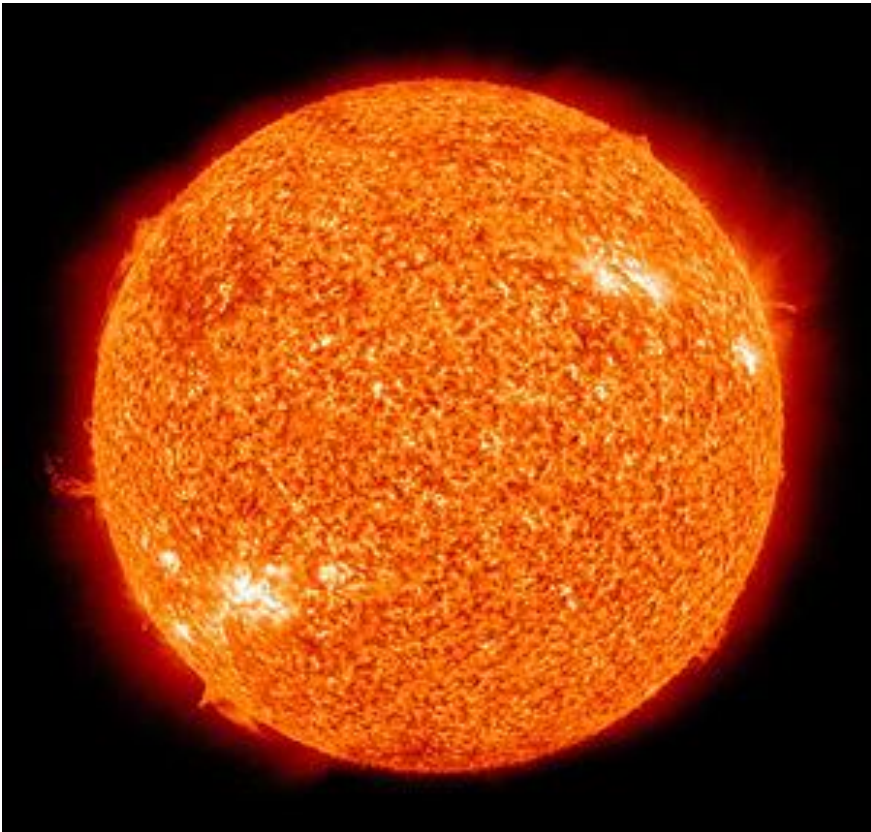


素粒子物理

素粒子物理

- 反粒子
- 粒子の生成・消滅
 - 粒子・反粒子の対生成
 - 真空の構造
- 相互作用
 - 電磁気力、強い力、弱い力、(重力)
 - ゲージ対称性(場の位相変換)
- ハドロン
 - 強い力による束縛状態の総称(陽子や中性子の仲間)
- 自然界の対称性
 - 時空間や場の内部空間の対称性

恒星



恒星のエネルギー源は何か？

- 放射によってエネルギーを失っているはず



太陽は核融合反応によってエネルギーが供給されている

- ${}^1\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \bar{\nu}_e$
- ${}^2\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$
- ${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^1\text{H} + {}^1\text{H}$

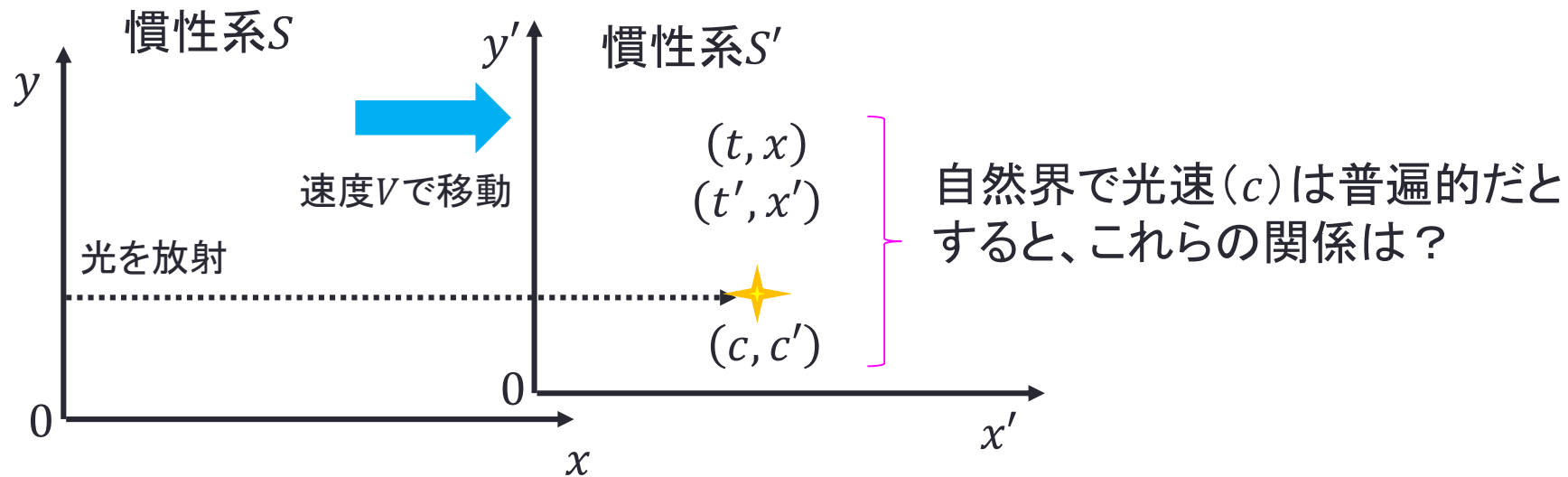
燃料の水素やヘリウムが尽きたらどうなるか？

- 太陽の場合はそれで終わり
- 太陽より重い星では重力により、より高温高密度状態が実現されて、より重い核種の核反応によりエネルギーが供給される

→ 恒星の進化

光速度の普遍性

光の速度は、誰から見ても同じ ← マイケルソン・モーリーの実験



$$x = ct$$

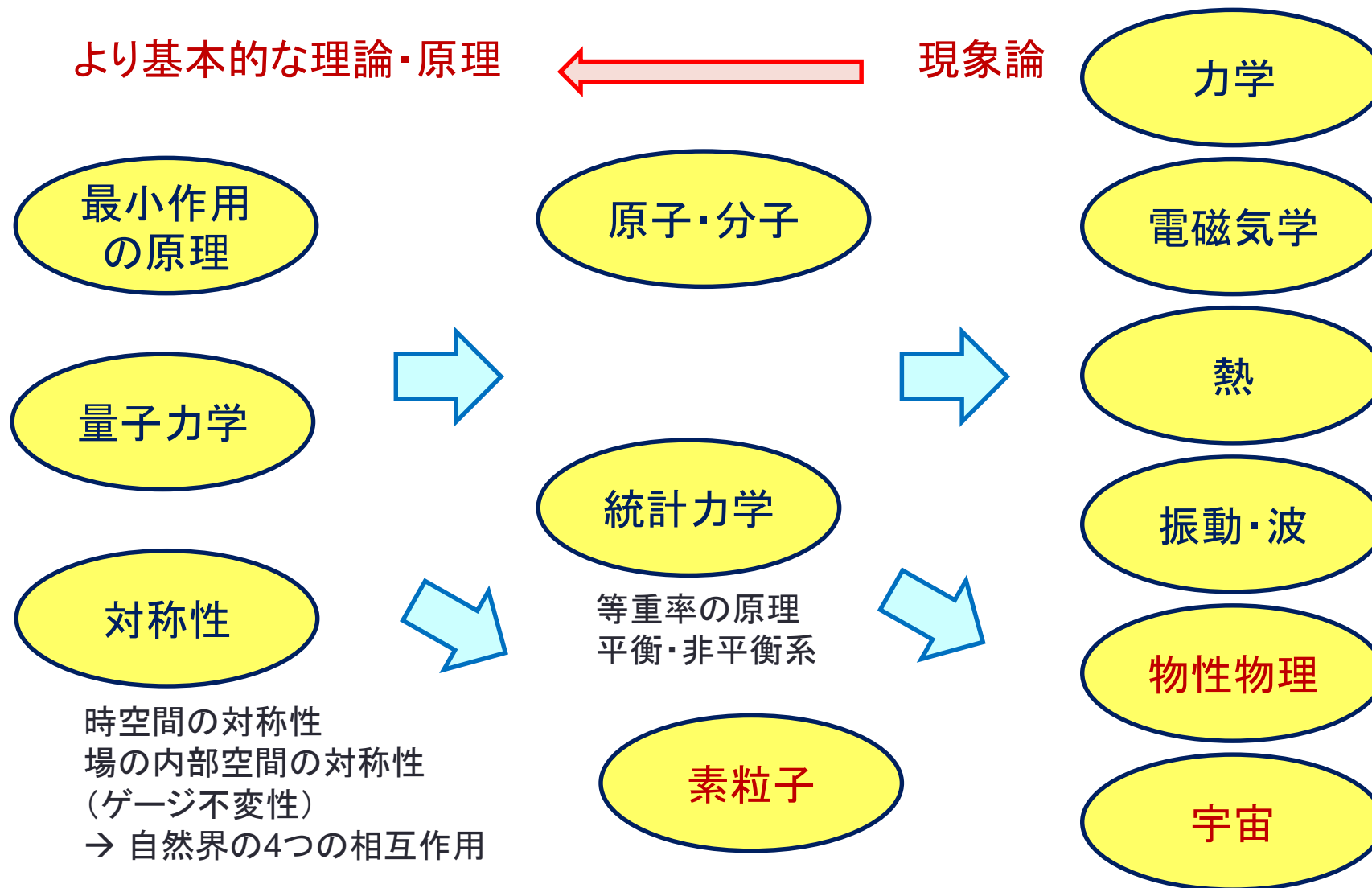
$$x' = c't'$$

但し、経験的に $c = c'$

ガリレイ変換 $x = x' + Vt$ は成り立たない。

→ ローレンツ変換、相対性原理

物理学の深化



物質の性質

原子像に基づく物質の構造

- 結晶と非結晶
- 原子配置



物質の性質

- 硬さや弾力性
- 電氣的性質
- 熱的性質
- 磁氣的性質
- 光學的性質

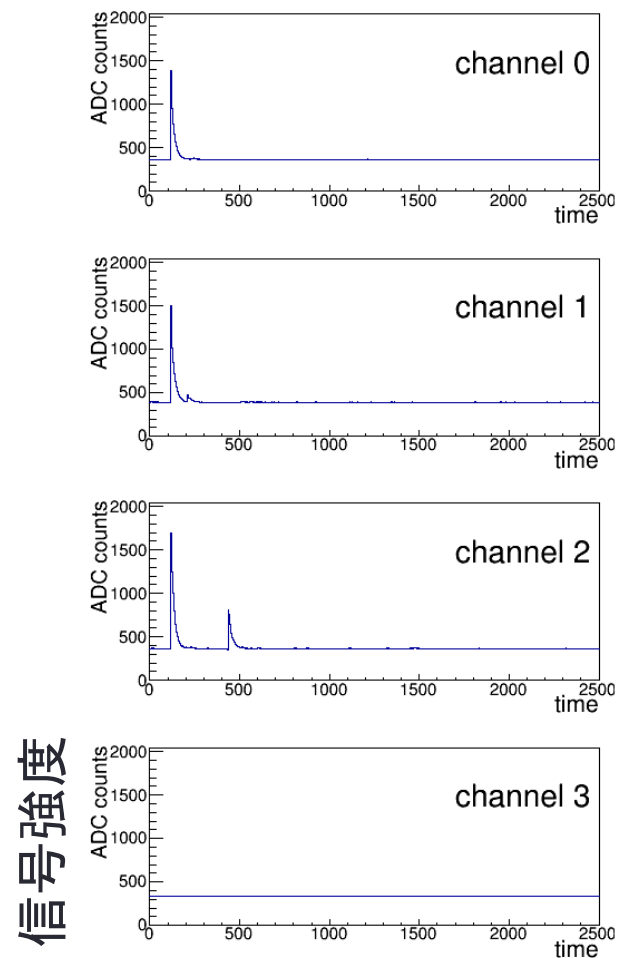
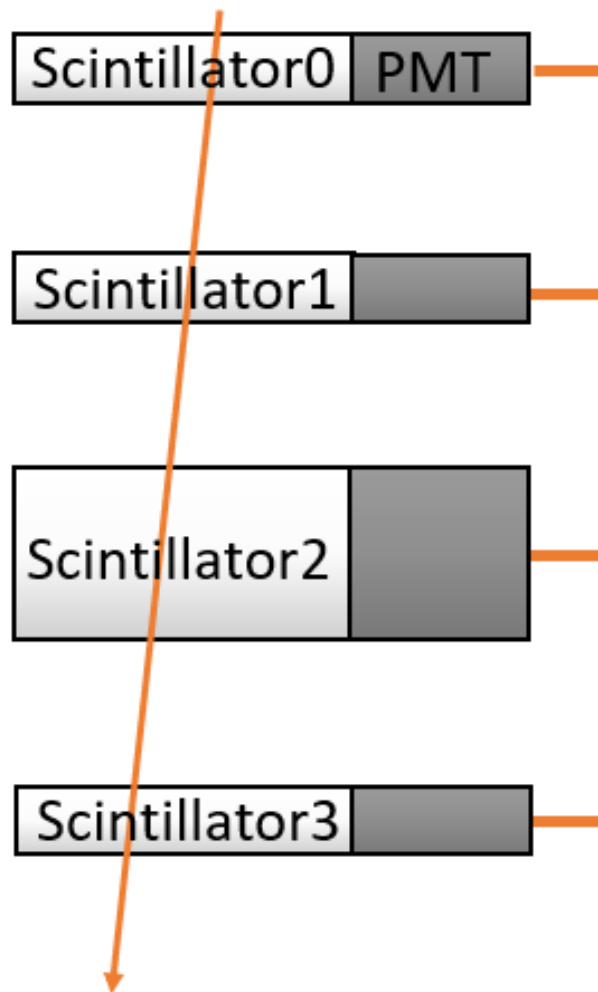
量子力学に基づく物質中の電子状態

- どのような構造がどのような物性を発現させるか
- 何をどう測定するか
- 外部パラメータ(温度、圧力、電磁場、...)によって物性がどう変化するか
- 20世紀の産業の発展に大きく貢献

実験の例： ミューオンの寿命測定

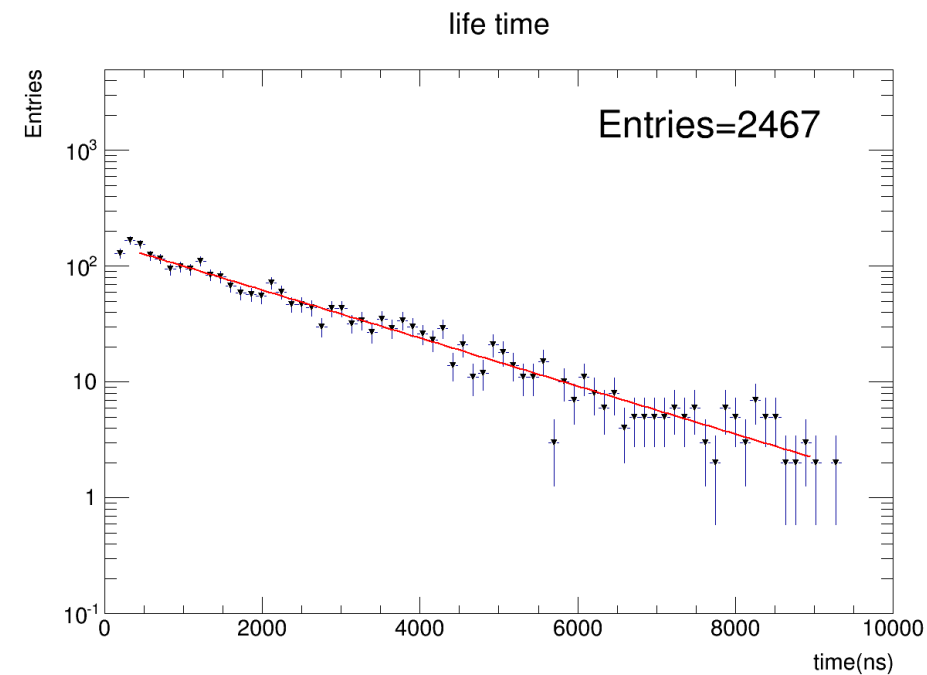
- ミューオンという素粒子 (μ^+, μ^-)
 - 電子と同じような性質を持つ (電荷 = $\pm e$) けど、電子の約200倍の質量を持つ粒子。
 - 宇宙線に由来するミューオンが上空から手のひらに毎秒1個くらい通り抜けている。
- ミューオンの崩壊
- ミューオンの寿命 (定義)
 - 多数のミューオンに対して、時刻 t におけるミューオンの数を $N(t)$ とおくと、
 - $N(t) - N(t + \Delta t) = \Gamma N(t) \Delta t$ (時間間隔 Δt の間にある割合の粒子が崩壊する)
 - $N(t) = N(t = 0) e^{-t/\tau}$,
 - $\Gamma = 1/\tau$, この τ を寿命と呼ぶ。

ミューオンの寿命測定の実験



信号強度

時間(ns)



まとめ

Backup slides