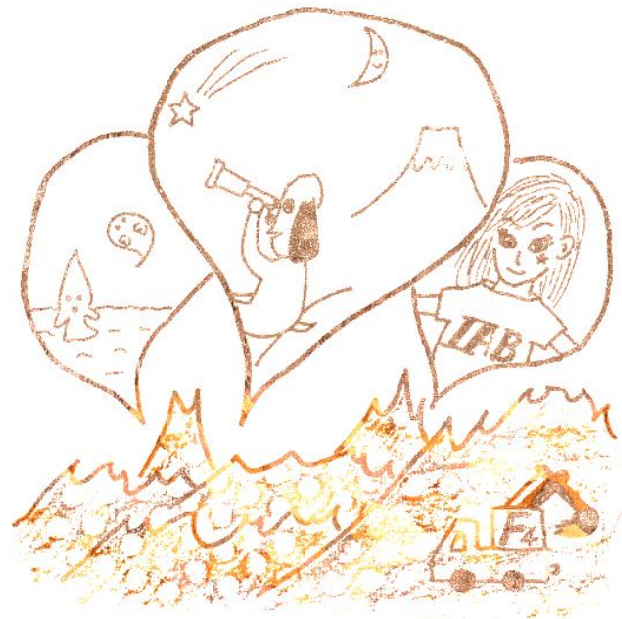


現代の標準的な素粒子像



HAPPY 2006!

信州大学 理学部

川村 嘉春

@ 物理学最前線

2006. 11. 14 (火)

今日の私の使命

研究室の紹介
と現代の標準的
な素粒子像およ
びそれを超える
試みについて簡
単に紹介するこ
と



今日の話の内容

1. はじめに
2. 準備
3. 標準的な素粒子像
4. 超弦理論
5. まとめ

1. はじめに

☆物理学とは

☆研究室の紹介

私の希望



☆ 物理学とは

物(もの)の理(ことわり)を探求する学問

広辞苑によると、

自然科学の一部門；自然現象を支配する法則を発見し、その帰結を研究して体系化することにより、自然現象の理解に寄与すると共に、応用への道を開く学問分野

(私の)仕事 「自然法則の発見と体系化」

研究対象の物(もの)とは何か？

自然界に存在するさまざまなもの

◎ ミクロの世界

「分子、原子、原子核、電子、
クォーク、・・・」

◎ 身の回りの物および者

◎ 超マクロの世界 「宇宙」

◎ 「時間」 や 「空間」 も物理学の
研究対象

→ 『物理学は守備範囲の広い学問』

理(ことわり)とは何か？

物(もの)が従う自然法則

◎ 身の回りの物体

→ ニュートンの運動の法則、
ガウスの法則、アンペールの法
則、電磁誘導の法則、・・・

◎ 分子、原子、・・・

→ 量子力学、場の量子論

◎ 時間と空間

→ 一般相対性理論

◎ 完成度の高い部門

(主に3年次までに習得)

古典力学、電磁気学、熱力学、
統計力学、相対性理論、量子力学

◎ 盛んに研究がなされている部門

(4年次にその基礎を学ぶ)

原子核物理学、素粒子物理学、
宇宙物理学、物性物理学、
生物物理学、・・・

素粒子論研究室の紹介

メンバー(と物理学最前線のタイトル)

小竹先生 (素粒子物理学と対称性)

美谷島先生 (QGPについて)

奥山先生 (超弦理論の最前線)

Y. K. (現代の標準的な素粒子像)

学生 D1:1名、M2: 1名、M1 : 6名、
S4: 9名

研究室で4年生は？

◎ 卒研ゼミ（テキストに基づく輪講）

◎ 卒研のテーマ(Web Site参照)

◎ 今週の物理（木曜日5時限）

M1, S4向けのセミナー形式

による連続講座

私の希望

場の量子論を習得し、標準模型の枠組みを理解しよう！

なぜなら、標準模型は素粒子の究極の理論を探求する際の出発点だから、

2. 準備

キーワード

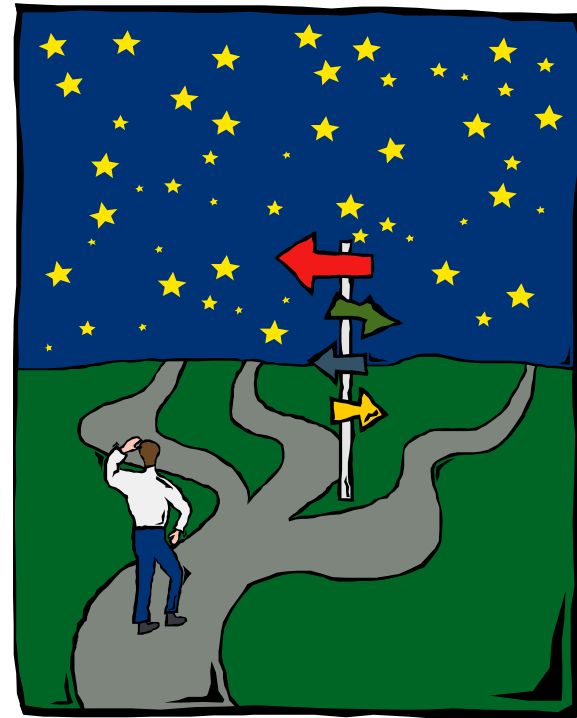
☆原理、法則

☆構成要素

☆場の量子

☆相互作用

☆対称性



研究分野：**素粒子物理学**

最終目標：**自然界を支配する基本的な原理や法則を解明し、それらを総合的・統一的に記述する理論体系を構築する。**

- ① **基本的な構成要素は何か？**
- ② **基本的な相互作用は何か？**
- ③ **どのように記述されるのか？**

法則について

「法則の分類」

- 運動に関する法則（運動の法則）
- 相互作用に関する法則（力の法則）

「法則の整理整頓」

- 現象を統一的に記述すること
- 法則をより基本的な原理や法則から導くこと

構成要素について

「素粒子＝場の量子」で
ポアンカレ変換の既約表現に属する。

→ 相対論的な波動方程式に従う。

(例) 光子 → マックスウェル方程式
電子 → ディラック方程式

時空に関する対称性により、運動の
法則が決定される！

相互作用について

「相互作用＝力を媒介する場の量子のやりとり」

ゲージ原理：時空の各点で独立な変換を行っても物理法則は変わらない。

(例) 量子電磁力学のゲージ変換
一般相対性理論の一般座標変換

局所的な対称性により相互作用の形
(力の法則) が決定される！

素粒子が関与する現象をよく
記述する共通の‘言語’は

相対論的な
場の量子論

3. 標準的な素粒子像

キーワード

☆クォーク

☆レプトン

☆ゲージ原理

☆ヒッグス機構

☆超対称性

☆力の大統一



① 基本的な構成要素は何か？

② 基本的な相互作用は何か？

③ どのように記述されるのか？

① 基本粒子

a. 物質粒子：物質を構成する粒子

クォーク：u d c s t b スピン1/2

レプトン：電子(e) μ τ ν_e ν_μ ν_τ

b. ゲージ粒子：力を媒介する粒子

強い力 → グルーオン

弱い力 → W、Z 粒子 スピン1

電磁気力 → 光子(γ)

c. ヒッグス粒子：真空状態を決める

スピン0 粒子 未発見！

d. 重力子 スピン2 未発見！

② 基本的な相互作用

- (1) 強い相互作用 グルーオン
クォークを束縛し、核子や中間子などを構成する相互作用
- (2) 電磁相互作用 光子
- (3) 弱い相互作用 ウィークボソン
原子核などを崩壊させる相互作用
- (4) 重力相互作用 重力子

③ 記述方法

素粒子の標準模型「クォークとレプトンを物質に関する基本粒子として、それらの間に働く(重力を除く)3つの力をゲージ相互作用とする特殊相対論的な場の量子論」により総合的に記述することができる。

標準模型の特徴

- 力はそれを媒介するゲージ粒子により作用する。
- ゲージ原理(ゲージ変換の下での不変性つまりゲージ対称性)により、理論の形が決まる。
- 対称性の自発的な破れにより、物質粒子および弱い相互作用を媒介するゲージ粒子が質量を獲得する。
ヒッグス機構(～超伝導の類似物)

・ 現在までに行われたあらゆる実験結果と整合性がある。

ならば、標準模型は素粒子の究極の理論か？

答えは「残念ながらNo！」

なぜなら ‘究極の理論の資格’
に欠けているから

‘究極の理論の資格’

- 指導原理から一意的に理論が決まること
- 基本粒子や基本的なパラメータの数ができる限り少ないこと
- パラメータの間の微調整がないこと
- 量子論的に重力が矛盾なく記述されていること

標準模型の資格審査

- 模型の枠組みの存在理由が不明
理論の構造は実験により確定した。
- 基本的な粒子やパラメータの数が多すぎる。 $19(+\alpha)$ 個のパラメータ
- 自然さの問題（微調整の問題）
- 重力を含んでいない。

自然さの問題

ヒッグス粒子の質量の2乗は一般に $O(\Lambda^2/100)$ の量子補正を受ける。

Λ : 理論の適応限界のエネルギースケール

$$(\text{観測質量})^2 = (\text{裸の質量})^2 + O(\Lambda^2/100)$$

→ Λ が大 → 不自然な微調整が必要？

$$(\text{観測質量}) = O(100) \text{ GeV}$$

$$\rightarrow \Lambda = O(1000) \text{ GeV} = O(1) \text{ TeV}$$

→ TeVスケールに新しい物理がある！

自然界が微調整を好まないならば、標準模型の適応限界のエネルギースケール(Λ)は、 $O(1)$ TeVである。

→ TeVスケールに未知の物理が存在する！

① 標準模型を超える物理 (TeVスケールの物理) は何か？

② 究極の理論は何か？

③ 如何にしてそれらを検証するのか？

主流の考え方 (王道)

① 標準模型 → 超対称性標準模型
→ 超対称性大統一理論

② {標準模型等 = 点粒子に基づく
ゲージ場の理論} → 超弦理論
ひも (弦)

③ ポスト標準模型

↔ 究極の理論
精密測定

超対称性 (TeVスケールの物理の候補)

ボース粒子 \leftrightarrow フェルミ粒子

の下で不変な理論

予言：標準模型のすべての粒子に対して、ゲージ量子数が同じでスピンの1/2だけ異なる粒子が存在するに違いない。

大統一理論 (力の大統一)

より大きなゲージ対称性に基づく
3つの力の統一および物質の統一
を実現する理論

基本的なアイデアの原型

$$\begin{pmatrix} e_{\uparrow} \\ e_{\downarrow} \end{pmatrix} \Rightarrow e \quad \begin{pmatrix} p \\ n \end{pmatrix} \Rightarrow N$$

電子 核子

力の大統一

より大きなゲージ対称性に基づく
3つの力の統一の実現

$$\begin{pmatrix} \gamma \\ W, Z \\ G_{\mu}^a \end{pmatrix} \Rightarrow A_{\mu}^{\alpha} \quad \text{ゲージ粒子}$$

予言：ゲージ結合定数が一致する。

物質の統一

より大きなゲージ対称性に基づく
物質の統一の実現

$$\begin{pmatrix} e^- \\ \nu_e \\ u \\ d \end{pmatrix} \Rightarrow \psi^i \quad \text{物質粒子}$$

予言：質量の間に関係が付く。

4. 超弦理論



HAPPY 2006!

今年もよろしくお願ひ申し上げます



今年もよろしくお願ひ申し上げます

超弦理論の資格審査 のための条件

- 指導原理から一意的に理論が決まる。
- 基本粒子や基本的なパラメータの数ができる限り少ない。
- 自然さの問題が解消されている。
- 量子論的に重力を矛盾なく記述している。
- 有効理論として、標準模型（or ポスト標準模型）が導かれる。

理論の一意性について

共形不変性

Lorentz不変性

超対称性

→ 10次元で5種類の
超ひも理論

→ 11次元でM理論？

対称性により高次元時空上で理論の
枠組みが限定される！

共形不変性

→場の量子論のゲージ対称性

基本的な構成要素はひも（弦）



太さはゼロ。

長さはきわめて短い。

→ 点粒子に見える。

基本的なパラメータは弦の張力 T

$$[T] = M^2$$

ひもは様々な配位・状態をとる。

「我々が(標準模型において)異なる粒子として観測しているものが、実はひものとする配位や状態の違いにすぎない」と解釈される。

{クォーク、レプトン、
光子、W、Z、グルーオン、ヒッグス粒子} \in 

→ 物質と力と真空状態の統一?!

ひもの質量の2乗は T を単位にして量子化される。

$$(Mass)^2 = 2\pi T \cdot n$$

予想： T が十分大きい場合、我々の観測する粒子は $n = 0$ の状態に属する。

6次元コンパクト化の後、 $n = 0$ の状態を求めることによって、4次元時空上の場の理論が求められる。

自然さの問題に対して

一つの可能性は「超対称性」

→超対称性を持ったひも理論

他の可能性として

「複合粒子」

「余剰次元」

標準模型が重力を含んでいない？ (重力の量子化)という問題に対して

- 重力を媒介する粒子(重力子)もひものある配位・状態として含まれている。
- ひもの拡がりが必要なカットオフのスケールとなり発散のない理論となる。

→ 重力を含む無矛盾な量子論の
最有力候補！

☆ 現在の弦理論を超えて

10次元で5種類の超弦理論の存在

- 「双対性」と呼ばれる性質により関係が付く！
- 拡がりを持った物体 (D-brane)の出現
- 背後により基本的な理論の存在？！

「M理論」？

M=Membrane, Magic, Mysterious,
Miracle, . . . , Matrix, Mother

超弦理論・M理論は 最終理論か？

現時点では、最有力候補。
明確な答えを得るためには、
「M理論」の定式化
標準模型の導出
量子重力絡みの問題の解決
が必要不可欠！

5. まとめ

素粒子の究極の理論への道のりは険しい。標準模型を超える物理に対する実験・観測が乏しい。 → 実験屋さんに期待しよう。

理論的には、指導原理が不足している。 → モーゼのようにシナイ山をさまよう？

100年ほど前に起きた革命（アインシュタインの再来？）が必要？！

2005~7年がおもしろい？

その根拠(と言えるほどのものではないが)

① 弦理論の流行に関する10年周期説？

1984年 第1次の流行 (量子異常項の相殺、4次元ひも模型の構築)

1994年 第2次の流行 (D-brane、双対性、M理論)

② 1905年 アインシュタインによる革命的な仕事 → 第2のアインシュタインの出現？！

③ 2006年は朝永博士生誕百年 2007年は湯川博士生誕百年

自然界が微調整を好まないならば、標準模型の適応限界のエネルギースケール(Λ)は、 $O(1)$ TeVである。

→ TeVスケールに未知の物理が存在する！

2007年、LHCが動き出す！

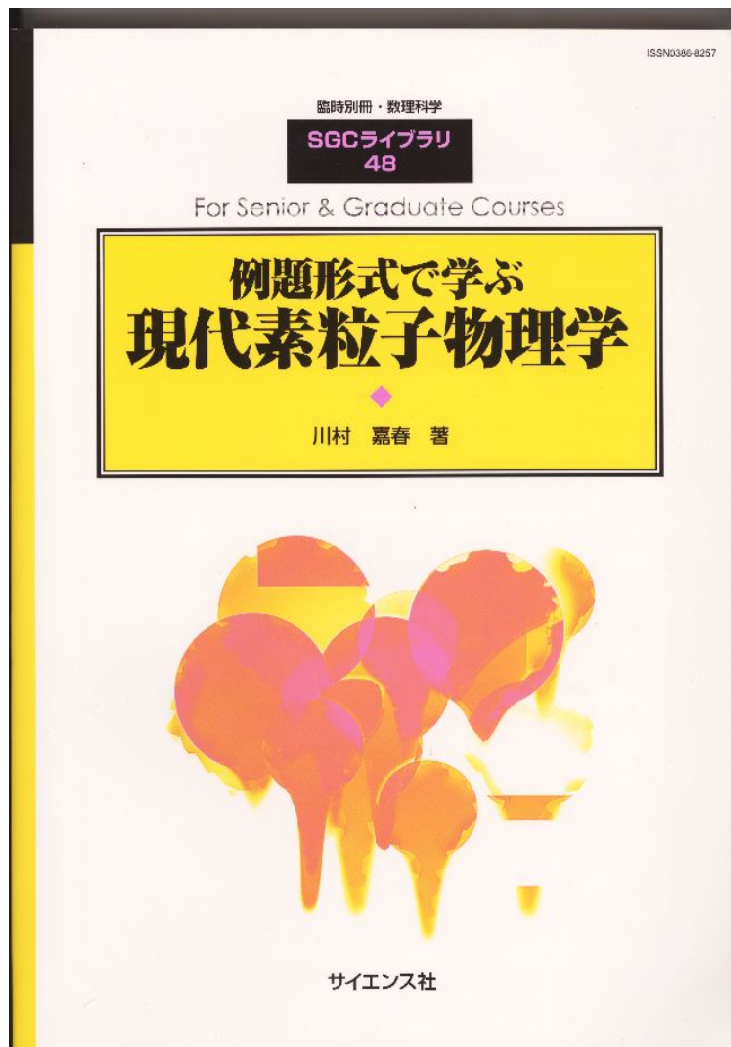
→ 活躍の舞台がすぐそこにある！

若い皆様のご活躍を期待いたします。
ご清聴ありがとうございました。

おしまい



好評発売中！！



例題形式で学ぶ 現代素粒子物理学

本体1886円;サイエンス社