現代物理学

第4回目

素粒子の世界

もっと詳しく知りたい人は,例えば下記を参照 http://ccwww.kek.jp/pdg/cpep/adventure_home.html

(素粒子)物理学者の気持ち

物理学とは…

様々な自然現象を支配する物理法則を,<mark>実験事実に</mark> 基づいて探求する分野

めざすところ:

<u>なるべく単純でなるべく普遍的で自然な</u>模型によって, 自然現象を明解に説明する。

オッカムの剃刀「ある現象を説明する仮説が複数ある場合, より仮定の少ない仮説を選択せよ」

素粒子物理とは?

쓫 この世界の成り立ちを知りたい

☆ 物質を拡大していくと,原子・分子という粒でできている

☆ さらに拡大すると何が見えてくるか?(登場人物は何か?)

☆ 粒同士の間にはどんな力(相互作用)が作用するか?

쓫 これらをできるだけ普遍的な枠組みで調べていきたい



運動の法則



- ☆ 慣性の法則:物体に外部から力が作用しなければ,静止している物体は静止し続け,運動している物体は速度を保って等速度運動を続ける
- \Rightarrow 運動方程式: ma = F これを解けば物体の運動状態が決定される
- ☆ 作用反作用の法則:力は相互作用である
 - 物理学では、運動方程式を解くことにより、現象の予言 が出来る。
 - 広義には量子力学の基礎方程式(シュレディンガー方程式) なども運動方程式とよばれる

運動方程式の作り方

運動方程式は解くのが大変なこともあるが,何よりも 大変なのは,適切な運動方程式を立てること

運動方程式を得るための常套手段

- ラグランジアンという世界を記述できる1つの関数を用意する ↓
 - これさえあれば、そこから必要な運動方程式
 - を作る手段は確立されている(解析力学)
- やるべきこと:現実世界に即したラグランジアンを作ること [登場する粒子の性質 相互作用の種類(ゲージ対称性)
- 解析力学は,「応用力学2」で学びます。先取りして自習したい人は相談にのります。



- 1. 時空の構造を決める(単純には4次元時空を仮定)
- 2. 登場人物(どんな粒子が存在するか)を決める
- 3. ラグランジアンの満たすべき<mark>対称性</mark>と,そのもとでの変換 性を決める
 - → 各粒子の相互作用が決まる
- 4. 対称性が許す項を全て含むようなラグランジアンを書く ※実際は他にもいろいろやりますが…
- 5. いろいろな現象に対応する予言が得られる ▲
 実験によって確認する
- 登場人物(粒子の種類)と対称性(相互作用)を決めるのが重要

地上と天上の物理法則の統一

ニュートンは地上の物理(落体の法則)と天上の物理(惑星運動) を支配する法則を統一した。



が作用する



"素粒子"たちの発見

原子説への道のり

1661年:ボイルによる元素の定義

「元素」=「実験でそれ以上単純なものに不可分なもの」

1774年: ラボアジエによる質量保存の法則の発見

「物質が化合・分解しても物質全体の質量和は変わらない」 1799年:プルーストによる定比例の法則の発見

「化学反応の際,関係する物質の質量比は常に一定である」

↓ 化学反応=基本粒子の組み換え?

1803年: ドルトンによる倍数比例の法則の発見

「A,B2つの元素からなる2種類以上の化合物X,Yがあるとき (例えば一酸化炭素と二酸化炭素),Aの一定量に対してX,Yに 含まれるBの量は簡単な整数比になる。」

分子の発見

ドルトンの原子説

- 「単体も化合物も原子からできている。元素の原子は固有の大 きさ・質量・形をもち,それ以上分割できない。化合物は原子 が結合したもので,物質の変化は原子の組替えによる。」
- 1805年: ゲイ=リュサックによる気体反応の法則
 - 「気体同士の反応では反応の関係する気体の体積について,同
- 温・同圧のもとでは簡単な整数比が成り立つ」





1811年: アヴォガドロによる分子説

「同温,同圧,同体積の気体はその種類に関係なく,同数の 分子を含む」

水素 酸素 水蒸気 これによって,気体反応の法則もうまく説明できた それでもなお,分子の存在は仮説でしかなかった

分子の発見



18年代後半: ボルツマンらによって,**気体分子運動論**が発展 気体分子の力学的ふるまいから,気体の状態変化を説明

しかし,実は<u>熱力学の完成度があまりにも高いために</u> 分子の存在はなかなか受けいれられなかった。

知覚も実証もされない分子や原子は科学的ではない という考え(単なる作業仮説にすぎない) ↓対立 分子や原子は実在である

1897年: J. J. トムソンによる電子の発見 ↓ 分子・原子が実在する蓋然性が増していく

分子の発見

ブラウン運動:液体中の微粒子が不規則に運動する現象。 植物学者ブラウンが1827年頃に発見。

1905年:アインシュタインよる「ブラウン運動は液体の分 子の不規則な衝突が原因である」という仮説 $D = \frac{RT}{N_A} \frac{1}{6\pi\eta r}$

1908年:J. ペランがブラウン運動に関する精密な実験を 行い,アインシュタインが解析の結果導いた予言が正し いことを確認した。

様々な手段でアヴォガドロ定数を測定

→ いずれも実験誤差の範囲内で一致

分子の存在が確立





1897年: J. J. トムソンによる電子の発見

- 1898年 キュリー夫妻によるラジウム(放射性元素)発見 エネルギー保存則の破れ?
- 1902年 ラザフォード&ソディー 放射性元素変換説 元素=不変なものという概念が崩れる
- 1908年 ラザフォード α線=ヘリウム原子核を示す
- 1911年 ラザフォード 原子核の発見
- 1920年 ラザフォード 中性子の存在を予言
- 1932年 チャドウィック 中性子を発見
- 1938年 ハーン&マイトナー 核分裂の発見



トムソンの原子模型



http://sf-fantasy.com/



α 粒子散乱の軌道



長岡の原子模型



http://sf-fantasy.com/

ラザフォードの原子模型



http://ne.phys.kyushu-u.ac.jp/seminar/MicroWorld/

http://ne.phys.kyushu-u.ac.jp/seminar/MicroWorld/

クォークの発見

1935年 核力模型と中間子の予言 湯川秀樹 1947年 宇宙線中のパイ中間子発見 パウエル 1950-1960年代 多数のハドロンの発見と分類 e.g. 中野-西島-ゲルマンの法則

1964年 坂田模型

1964年 ゲルマン,ツワイク クォーク模型

クォークは数学上の道具?実在?

1968年 深非弾性散乱実験(SLAC)でクォーク の存在を確認





<u>pdg.lbl.gov</u>

ニュートリノ



1970年代:太陽からのニュートリノを観測 1987年:超新星からのニュートリノを観測 ニュートリノ天文学の幕開け

1998年:ニュートリノ振動発見(ニュートリノ質量発見)

我々は何でできているか?



素粒子標準模型



物質粒子たち

物質はフェルミオンという種類の粒子でできている

☆物質フェルミオンはスピン1/2の粒子

- ☆ 左手フェルミオンと右手フェルミオンが存在
- ☆ 一般に,フェルミオンが質量を持つためには,右手 と左手がそろっている必要がある

標準模型の物質粒子をもう少し正確に書くと…



ゲージ粒子たち

相互作用を媒介するのがゲージ粒子

© higgstan.com





ゲージ粒子と相互作用

どのゲージ粒子をやりとりするかは,粒子の性質次第 例1:グルーオンは色付き粒子(クォーク)しか直接の やりとりがない

クォーク同士を核子中に閉じ込める強い相互作用 はグルーオンが媒介する



<u>www-jlc.kek.jp</u>より

例2:Wボゾンは左手フェルミオンの間でやり取りされ

ベータ崩壊を引き起こす

る。(右手フェルミオンとは結合しない)





標準模型の歴史

<u>www.kek.jp</u>より



2000年にはヒッグス粒子以外の全ての登場人物が揃っていた!

ヒッグス粒子の発見 2012年7月4日 ヒッグス粒子発見





ヒッグス粒子の発見

実際は、大量のデータを用いて解析された結果の発見



ヒッグス粒子の発見によって,標準模型は確立した!

ヒッグス機構と質量





我々は物質の根源を記述する究極の物理法則を手に入れた?

ほぼ全ての素粒子物理学者はそう思っていない

実際,標準模型では解決できない問題が存在する!

標準模型の欠点

- ☆ ニュートリノ質量が入っていない
- ☆ 電弱相互作用と強い相互作用,重力相互作用の統一は? $m_h^2 = m_h^{2(0)} - \delta m_h^2$ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ $\mathcal{O}(10^2 \text{GeV})^2 \mathcal{O}(10^{19} \text{GeV})^2$

쓫 フェルミオンの質量間の階層性

쓫 何故同じような物質フェルミオンの組が3つあるのか?

쓫 陽子(uudクォーク)と電子の電荷の絶対値が何故等しいのか

などなど

ヒッグス粒子とは何者なのかが全く不明

ニュートリノの話

ニュートリノ

☆素粒子(物質粒子)の一種
 ☆電荷はない(別名:中性微子)→ほぼ見えない/感じない
 ☆原子を構成する粒子ではない



ニュートリノとは?

- ☆ 素粒子(物質粒子)の一種 ☆ 電荷はない(別名:中性微子)→ほぼ見えない/感じない
- ☆ 原子を構成する粒子ではない



歴史の話



1970年代、太陽からのニュートリノを観測 1987年:超新星からのニュートリノを観測 ニュートリノ天文学の幕開け

1998年:ニュートリノ振動発見(ニュートリノ質量発見)

ニュートリノはどこにでもいる





数は多いがその存在に我々はほとんど気づかない





ニュートリノを「見る」

確かに透過力は強いが数が多い

多量の物質を用意して待てば、稀に物質と反応すると期待

5万トンの水槽を地下1000メートルに建設 ニュートリノが水と反応して出す光を見る

ニュートリノが叩き出した荷電粒子が走ることによってチェレンコフ光が発生します。

SuperKamiokande

ニュートリノの種類判別

SuperKamiokande

ミューオンニュートリノ 電子ニュートリノ

陽子などと反応してミューオンを蹴り出す 水中の電子を蹴り出す 電子は水中で電磁シャワーを発生するので,リングがぼやける

SKでは、時間、方向、エネルギー、種類が分かる

大気ニュートリノ振動

ニュートリノは3種類存在(電子型,ミュー型,タウ型) もし<mark>ニュートリノ質量に差があれば</mark>,空間を伝わる間に, 距離に応じて型が変化する(ニュートリノ振動)

太陽ニュートリノ問題

複数の実験で,電子ニュートリノ の数が予測の1/3であることが以 前から指摘されていた

©<u>higgstan.com</u>

SNO実験

加速器ニュートリノ

地球ニュートリノ

Kamlandでは地球内部からくるニュートリノも観測

青ダッシュ:原子炉 緑ドット:Th 茶ドット:¹³C+α→¹⁶O+n

各種ニュートリノ振動実験により、 ニュートリノ質量に差があることが明確になった 各種実験の結果: $m_2^2 - m_1^2 \simeq 8 \times 10^{-5} \text{eV}^2$ $|m_3^2 - m_2^2| \simeq 2.5 \times 10^{-3} \text{eV}^2$ 質量の絶対値はまだわかっていない m^2 β崩壊の実験から上限はわかっている Inverted Norma m32 $m \lesssim 2 \text{ eV}$ solar~7×10⁻⁵eV² atmospheric

-2×10-3eV2

solar~7×10-5e

neutel11.wordpress.com

 m_2^2 -

 $m_1^2_{-}$

0

atmospheric ~2×10⁻³eV²

m22

0

 $1 \text{ eV} \simeq 1.8 \times 10^{-36} \text{ kg}$

電子と比べても1000分の1くらい

標準模型とニュートリノ質量

標準模型が提唱された時点では,ニュートリノ質量がある かどうか不明だった(小さいことは分かっていた)

> とりあえず質量が0となるように模型を作った 右手ニュートリノが登場人物表にないのはこのせい

ニュートリノが質量を持てるような模型の拡張が必要

標準模型+ニュートリノ質量

☆ クォーク,電子,ニュートリノなどのフェルミ粒子には右 手型と左手型が存在

☆ 右と左が揃えば質量(ディラック質量)が存在

☆ 標準模型には右手ニュートリノがない

☆ 右巻きニュートリノを足せば質量獲得(小ささの謎は?)

☆ ニュートリノに限り,左巻きだけでも質量(マヨラナ質量) が持てる!(しかも自然に小さくなる)

標準模型=究極の基本理論の可能性はなくなる

(寄り道)ニュートリノ質量あれこれ

1957年:ニュートリノー反ニュートリノ振動を予測

1962年:ニュートリノ振動の理論(牧-中川-坂田)

ニュートリノ振動に登場する混合行列を PMNS(ポンテコルボ-牧-中川-坂田)行列 という

ビレンキー、ペトコフ
土井、小谷、西浦、奥田、高杉
シュスター、バレ

シーソー模型

標準模型の拡張の可能性

非常に重い<mark>右手ニュートリノ</mark>を導入することで,小さな ニュートリノ質量を自然に説明する模型

$$\begin{pmatrix} 0 & m_D \\ m_D & M_R \end{pmatrix}^{m_D} \xrightarrow{m_D} m_{\nu} \simeq \frac{m_D^2}{M_R}$$

右手ニュートリノだけは, ヒッグス機構と無関係な マヨラナ質量を基本理論の 範疇で持つことができる。

ニュートリノ質量模型あれこれ

他にも様々な模型が提唱されている

- ☆ ニュートリノにだけ関係するような新しいヒッグス場を 導入する
- ☆ 時空が4次元ではなく5次元以上と仮定し,余剰次元の効 果で質量を抑制する
- 쓫 輻射補正によって小さな質量を生成する

