

「物質」=「力」=「空間」!?

超弦理論の予言する世界

第105回サイエンスカフェ
2016年4月28日

静岡大学理学部物理学科講師
森田 健
専門 素粒子理論



1

今日の講演の予定:

1. 素粒子物理学の現状:
素粒子物理学ではこの世界を
どこまで理解したのか?
2. 超弦理論
超弦理論とは?
超弦理論の描く世界

2

素粒子物理学ではこの世界をどこまで理解したのか?

物理学における基本要素3つ。

「物質」: 物質はどこまで分解できるか?

「力」: 物質の間にどんな力が働くか?

「時間、空間」: どんな性質か? 宇宙とは?

→ これらの性質を解明するのが
素粒子物理の目的。

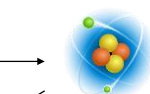
3

物質

物質はどこまで分解できるか?

4

物質とは?



原子=電子+原子核 (陽子+中性子)



H

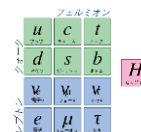
?

「素粒子標準模型」
12種類の粒子 + ヒッグス粒子

5

力

物質の間にどんな力が働くか?



H

6

力とは?

素粒子の間に働く力: 現在**4種類**の**力**が知られている。

重力 電磁気力 強い力 弱い力

電気の力
←⊖ ⊕→
⊕→ ←⊖

磁力
[磁石のイラスト]

「静電気」も「電気の力」
imgurより

電気と磁力は関係している。

例) 電磁石 [電磁石のイラスト]

7

力とは?

素粒子の間に働く力: 現在**4種類**の**力**が知られている。

重力 電磁気力 強い力 弱い力

電磁気力、強い力、弱い力
電磁気の力によく似た素粒子の間に働く力

この3種類は似た力

8

重力とは?

9

重力とは?

重力は不思議な力

- 重い物も軽い物も同じ早さで落ちる。(加速が重さによらない。)
- 光 (質量=0)も重力を受ける。
- 電気のように + や - が無い。
- **全ての物が引きつけ合う。(万有引力)**

アインシュタイン

一般相対性理論: **重力 = 空間のゆがみ**
質量は空間を曲げ、物質は曲がった空間の中を動いている。

空間そのものが曲がっているので全ての物の運動が影響を受ける。

10

重力とは?

一般相対性理論: 物理学の革命

一般相対性理論により、「**空間**」そのものが物理の対象になった。

- ビッグバン (宇宙に始まりがあった)
- ブラックホール (入ったら出られない空間)
- ワームホール
- タイムマシン

11

ここまでのまとめ

- 13種類の物質
- 物質の間に働く力: 4種類
重力、**電磁気**、**強い力**、**弱い力**
- 「重力」=「空間」

	クォーク			
	u	c	t	
	d	s	b	
レプトン	e	μ	τ	H

12

力の重要な性質 「力の**変化**は**波**として伝わる。」

13

力の重要な性質:「力の**変化**は**波**として伝わる。」

4種類の力: **重力** **電磁気**の力 **強い**力 **弱い**力

似た力

「電磁気」の力 = 「波」



→ 動かしてみるとわかる。

14

力の重要な性質:「力の**変化**は**波**として伝わる。」

4種類の力: **重力** **電磁気**の力 **強い**力 **弱い**力

似た力

「電磁気」の力 = 「波」



携帯の電波が建物の中でも届く。→ 波だから。(波の**回折**、**屈折**)

15

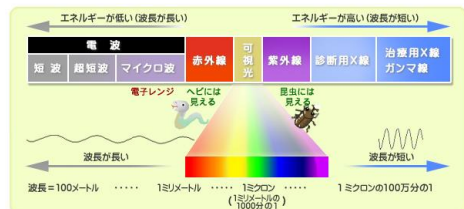
力の重要な性質:「力の**変化**は**波**として伝わる。」

4種類の力: **重力** **電磁気**の力 **強い**力 **弱い**力

似た力

「電磁気」の力 = 「波」

実は「電磁気」の力=「電磁波」=「光」



放射線サイトより 16

力の重要な性質:「力の**変化**は**波**として伝わる。」

4種類の力: **重力** **電磁気**の力 **強い**力 **弱い**力

似た力

「電磁気」の力 = 「波」

実は「電磁気」の力=「電磁波」=「光」

強い力、**弱い**力も電磁気によく似ているので
やっぱり波として伝わる。

→ **重力**は?

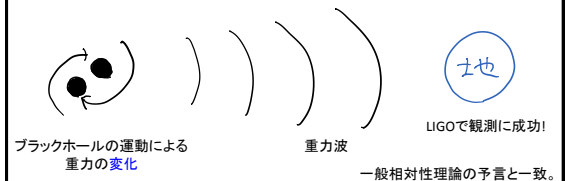
17

力の重要な性質:「力の**変化**は**波**として伝わる。」

4種類の力: **重力** **電磁気**の力 **強い**力 **弱い**力

似た力

重力の変化も波として伝わる: **重力波**



18

ここまでのまとめ

- 13種類の物質
- 物質の間に働く力: 4種類
重力、電磁気、強い力、弱い力
- 「力」は「波」として伝わる。
- 「重力」=「空間」

フェルミオン			
u $\frac{2}{3}, \frac{1}{2}$	c $\frac{2}{3}, \frac{1}{2}$	t $\frac{2}{3}, \frac{1}{2}$	
d $-\frac{1}{3}, \frac{1}{2}$	s $-\frac{1}{3}, \frac{1}{2}$	b $-\frac{1}{3}, \frac{1}{2}$	H $1, 0, 1$
ν_e $0, \frac{1}{2}$	ν_μ $0, \frac{1}{2}$	ν_τ $0, \frac{1}{2}$	
e $-\frac{1}{3}, \frac{1}{2}$	μ $-\frac{1}{3}, \frac{1}{2}$	τ $-\frac{1}{3}, \frac{1}{2}$	
レプトン			

19

量子力学

物質や力の本質とは？

20

量子力学

- 物質 → 粒子 (つぶ) & 波
- 力 (例: 光) → 粒子 & 波
「物質」も「力」も本質的に違いがありません。

シンプル！

量子力学の二重性:

「物質」も「力」も波として伝わり、粒子として観測される。

我々も波? 直感的には理解不可能 (大学物理の最難関)

物質が波の証拠の一部を紹介する。

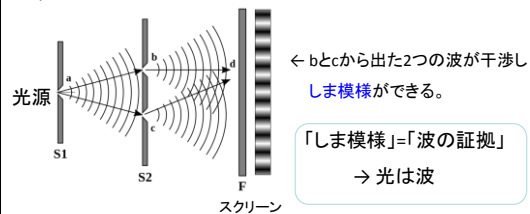
21

量子力学

物質が波として伝わる証拠: 電子の干渉

◆ 干渉: 2つの波が強め合ったり弱め合ったりする現象。

例) 光の干渉



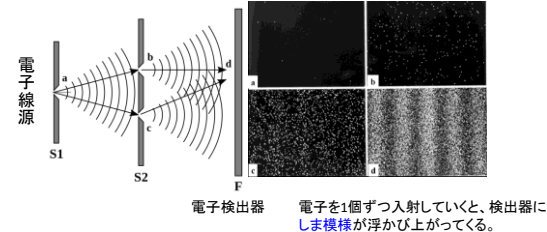
22

量子力学

物質が波として伝わる証拠: 電子の干渉

◆ 干渉: 2つの波が強め合ったり弱め合ったりする現象。

電子の干渉

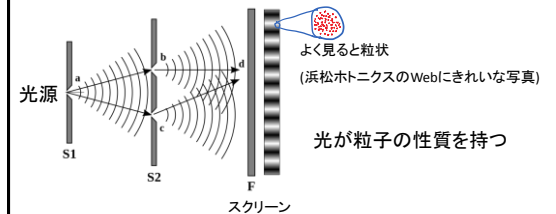


→ 確かに電子は干渉を起こす。(電子が波として伝わる証拠!)

23

量子力学

「電磁気の力」=「光」も粒子: 光子



→ 光子と電子はともに「粒子」と「波」の性質を持つ。

24

量子力学

◆ 4つの「力」とその粒子

電磁気力=光 → 光子

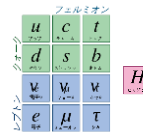
強い力 → グルオン

弱い力 → Zボソン、Wボソン

重力 → 重力子 (未発見)

25

前半のまとめ



- 13種類の物質
- 物質の間に働く力: 4種類
重力、電磁気、強い力、弱い力
- 物質も力も波として伝わり、粒子として観測される。
(量子力学)
- 「空間」=「重力」(一般相対性理論)

26

超弦理論

27

前半の復習

- 13種類の物質

- 4種類の力

- 波 & 粒子



波として伝わり、粒子として観測される。

- 「空間」=「重力」

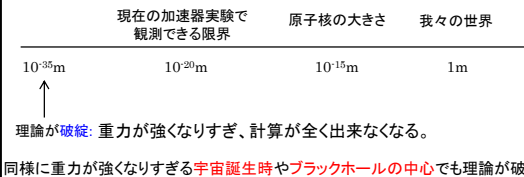
量子力学

一般相対性理論

28

「量子力学」+「一般相対性理論」の予言

10⁻³⁵m程度の世界で
→ 「量子力学」+「一般相対性理論」が破綻する。



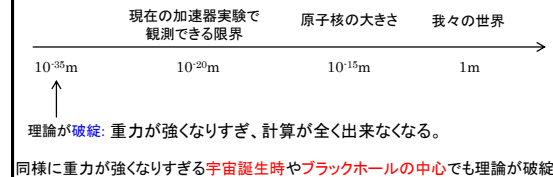
29

「量子力学」+「一般相対性理論」の破綻は
新しい理論が必要なことを意味する。

→ 様々な試行錯誤。唯一まくいきそうなのが超弦理論

10⁻³⁵m程度の世界で

「量子力学」+「一般相対性理論」が破綻する。



30

超弦理論(仮説) (1960年代 多数の研究者: Veneziano、南部、...)

量子力学: 物質=「波」&「粒子」

超弦理論: 物質=「波」&「ひも」

10⁻³⁵m程度(?)

量子力学 粒子
波として伝わる

超弦理論 ひも
波として伝わる

弦理論は重力の問題を回避し、
どんなにミクロでも破綻の無い理論になる。

超弦理論

予測: 「量子力学」+「一般相対性理論」が破綻する10⁻³⁵m
より手前で「超弦理論」の兆しが観測されるのでは?

超弦理論

現在の加速器実験で
観測できる限界

原子核の大きさ

我々の世界

10⁻³⁵m 10⁻²⁰m 10⁻¹⁵m 1m

重力のせいで理論が破綻

超弦理論の特徴

- 「物質」=「力」=「空間」
- 9次元空間
- 物理定数が一つ

「物質」=「力」=「空間」

量子力学: 物質=「波」&「粒子」

様々な種類の粒子が存在し、粒子の性質(質量、電荷、etc)は粒子毎に異なる。

電子 クォーク 光子 重力子

超弦理論: 物質=「波」&「ひも」

「ひも」の種類は一種類しかない。
(他の物質を加えると理論が破綻)

「ひも」は切れたり、くっついたり出来る

電子 クォーク 光子 重力子 未発見の粒子 etc.

「ひも」が異なる振動をすると、異なる性質を示す。→この違いが粒子の違い。

「物質」=「力」=「空間」

「物質」や「力」や「空間」は同じ弦の異なる側面を見ているだけ。

物質 力 空間

電子 クォーク 光子 重力子 未発見の粒子 etc.

「ひも」が異なる振動をすると、異なる性質を示す。→この違いが粒子の違い。

超弦理論の特徴

- 「物質」=「力」=「空間」
- 9次元空間
- 物理定数が一つ

超弦理論

弦理論: 物質=「波」&「ひも」

弦理論は勝手な空間では成立しない。

空間が「3次元」:	NG	3次元空間
空間が「9次元」:	OK (電子やクォークOK)	
	「超弦理論」と呼ばれる。	
空間が「25次元」:	OK (電子やクォーク多分NG)	

37

超弦理論の特徴: 9次元空間

★ 9次元空間 → 3次元空間 + 6次元空間

我々の3次元空間

???

ということ???

いくつか可能性がある。

今日はそのうち1つを紹介。

38

超弦理論の特徴: 9次元空間

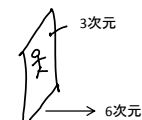
★ 9次元空間 → 3次元空間 + 6次元空間

例) マンガの中の人(2次元)



マンガの中の光も物も紙から出てこれなかったら
マンガの中の人はこの世が3次元だと気づかない。

→ 我々が自由に動けるのが3次元に広がった世界に限られていたら、
6次元を感じなくても矛盾は無い。



39

超弦理論の特徴: 9次元空間

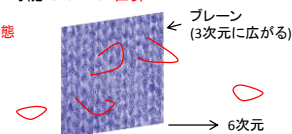
★ 9次元空間 → 3次元空間 + 6次元空間

◆ 超弦理論ではこのような世界が可能: プレーン世界

プレーン: 3次元に広がる弦の特殊な状態

我々はプレーンの中だけを
自由に動ける。

→「プレーン」=「マンガの紙」



理論的にも実験的にも
9次元空間は問題ではない。

40

超弦理論の特徴

- 「物質」=「力」=「空間」
- 9次元空間
- 物理定数が一つ

41

超弦理論の特徴

★ 物理定数が一つ

物理定数とは?

→この世の中にある変化しない量

例)

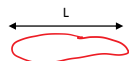
- ニュートン定数 G
- 電子の質量 m_e
- クォークの質量 m_q
- etc

現在の物理学では数十個このような量がある。

42

超弦理論の特徴

★ 物理定数が一つ



超弦理論には物理定数が1つ(基本長さ L)しか存在しない。

例)

- ニュートン定数 G
- 電子の質量 m_e
- クォークの質量 m_q
- etc

これらの定数の数の違い
「1個」vs「数十個」
は何を意味しているのか?

これら数十個の量は
「基本長さ L 」に
よってあらわされるはず。

現在の物理学では数十個このような量がある。

43

超弦理論の特徴

★ 「物理定数」が別の量で表される例: 地上の重力加速度 g

$$g = \frac{GM}{R^2}$$

G : ニュートン定数

M : 地球の質量

R : 地球の半径

→ より基本的な量であらわせる。

→ 変化しても良い。

例)

- ニュートン定数 G
- 電子の質量 m_e
- クォークの質量 m_q
- etc

これらの定数の数の違い
「1個」vs「数十個」
は何を意味しているのか?

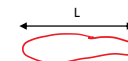
これら数十個の量は
「基本長さ L 」に
よってあらわされるはず。

現在の物理学では数十個このような量がある。 → 変化しても良い。

44

超弦理論の特徴

★ 物理定数が一つ



超弦理論には物理定数が1つ(基本長さ L)しか存在しない。

例)

- ニュートン定数 G
- 電子の質量 m_e
- クォークの質量 m_q
- etc

基本長さ L が唯一変化しない量。
今まで定数だと考えられていた量は
全て変化する可能性がある。

現在の物理学では数十個このような量がある。

45

超弦理論の特徴

- 「物質」=「力」=「空間」
- 9次元空間
- 物理定数が一つ

超弦理論は非常にシンプル。

1種類の弦、1つの定数によって
世界が構成されていることを予言する。

46

超弦理論の描く世界

超弦理論の描く世界

★ ほとんどの「物理定数」は「定数」でない。

- ニュートン定数 G
- 電子の質量 m_e
- クォークの質量 m_q
- etc

これらは定数で無い → 変化しても良い。

これらの「定数」の値が異なる宇宙では何が起きるか?

→ 数%でも変化したら、**生命は存在できない**。

安定な銀河系形成、安定な恒星(太陽)、安定な恒星の核融合、
安定な炭素元素、酸素元素、ビッグバンや恒星内部や超新星爆発による元素生成、 etc

Epelbaum et al 2013, etc

48

超弦理論の描く世界

★ ほとんどの「物理定数」は「定数」でない。

- ニュートン定数 G
 - 電子の質量 m_e
 - クォークの質量 m_q
 - etc
- これらは定数で無い→変化しても良い。

全ての「定数」が非常に都合の良い値になっていないと
生命は存在できない。

→ こんな事がありえるのか？

可能性その1: 神様が生命のためにこの宇宙を作った。

可能性その2: 宇宙がたくさんある。

49

超弦理論の描く世界

★ ほとんどの「物理定数」は「定数」でない。

- ニュートン定数 G
 - 電子の質量 m_e
 - クォークの質量 m_q
 - etc
- これらは定数で無い→変化しても良い。

宇宙がたくさんある？

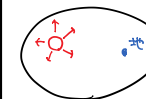


「定数」の異なる宇宙がたくさんあり、
その中には生命が存在可能なものがあり、我々はその中にいる。50

超弦理論の描く世界

★ 宇宙の崩壊？

宇宙がたくさんあると言うことは、我々の宇宙の中で新しい宇宙が
生まれるかもしれない。(真空の崩壊)



光速で広がり全てを飲み込み破壊する壁ができる。
(壁の内側では「物理定数」が異なる世界)

人類は生き残れるのか？

Pratap Kashyap et al 2015

- 「真空の崩壊」はめったに起こらない。(137億年は起きていない。)
- 宇宙自身も膨張しているので、もし崩壊が起きても遠くならしばらくは問題ない。
- 種を残すためには宇宙に人類がバラバラに住んだ方が良い。
(どこかは生き残る可能性が高い)

51

超弦理論の描く世界

超弦理論を解明し、宇宙の未来を理解する必要がある。

人類は生き残れるのか？

Pratap Kashyap et al 2015

- 「真空の崩壊」はめったに起こらない。(137億年は起きていない。)
- 宇宙自身も膨張しているので、もし崩壊が起きても遠くならしばらくは問題ない。
- 種を残すためには宇宙に人類がバラバラに住んだ方が良い。
(どこかは生き残る可能性が高い)

52

本日のまとめ

素粒子物理学の現状

- 13種類の物質

アップ型クォーク	u	c	t
	d	s	b
	$\bar{u}$	$\bar{d}$	$\bar{t}$
ダウン型クォーク	$\bar{c}$	$\bar{s}$	$\bar{b}$
レプトン	e	μ	τ

H

- 物質の間に働く力: 4種類
- 「空間」=「重力」
- 電子の質量など数十個の物理定数



超弦理論 (仮説)

- 「物質」も「力」も「空間」も「弦」から作られる。
- 9次元空間
- たった1つの物理定数

54

超弦理論の今後の課題

- 見えない6次元空間
- 我々の世界の再現
(電子やクォークの質量などをきちんと再現できるか?)
- なぜ我々の宇宙は3次元空間か? (静岡大学 土屋先生)
- 宇宙は1つか?
- なぜ超弦理論か?
- 超弦理論以外の可能性は無いのか?

若い学生さん達は是非、素粒子物理を学んで
一緒にこれらの謎に挑戦して欲しいです。

55