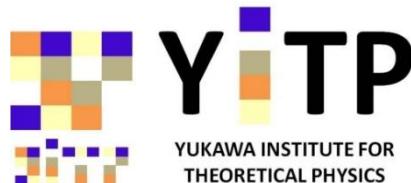


超弦理論 の 奇跡

– 究極の物質像をめぐって –

杉本 茂樹

(京都大学・基礎物理学研究所)



今日は、

「この世が何でできているのか？」

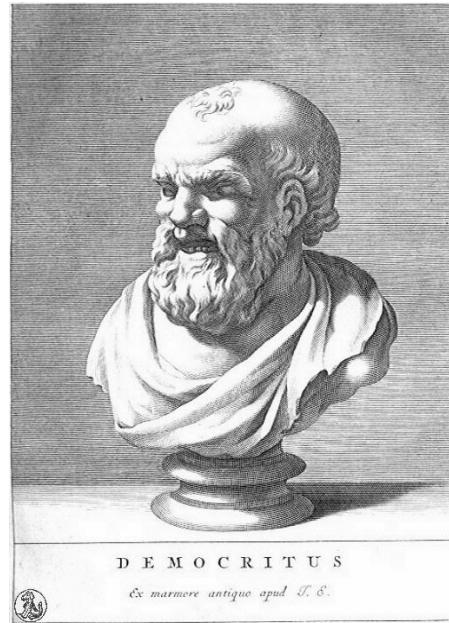
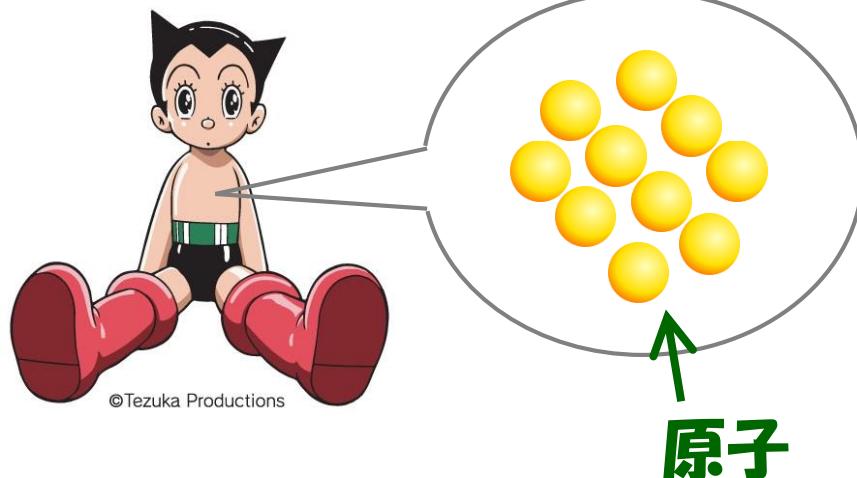
をとことん考えてみよう。



古代ギリシャにこんなこと言う人がいた。

この世は**原子(アトム)**
と空虚な空間からなる。

原子：これ以上分割できない粒



DEMOCRITUS

Ex marmore antiquo apud T. S.

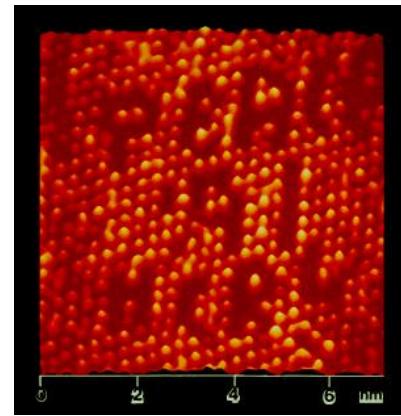
(画像: Wikipedia より)

デモクリトス

(紀元前 460 – 370 頃)

- ◆ この考えは19~20世紀の科学者たちによって科学的に実証され、物質は100種類ほどの「原子」からなるという物質像が得られた。

1 H																		2 He
3 Li	4 Be																	
11 Na	12 Mg																	
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	
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	
55 Cs	56 Ba	57-71 La-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	
87 Fr	88 Ra	89-103 Ac-Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn							

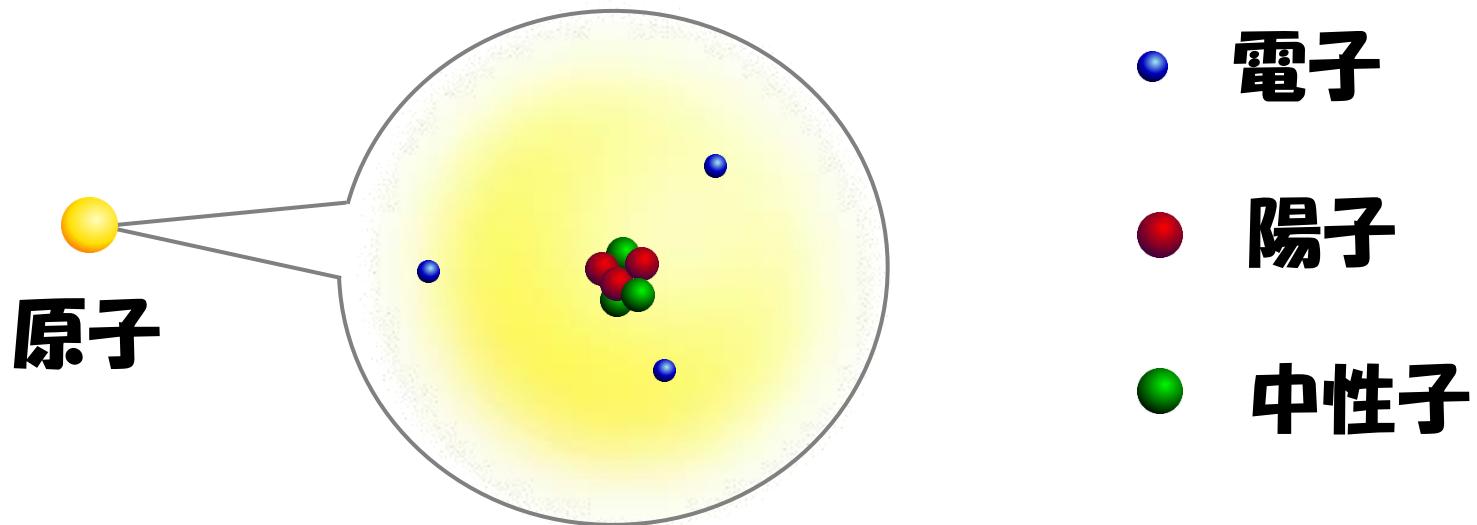


(写真:日立製作所 中央研究所)

- ◆ 1億種類以上もある化学物質の材料は、たった100種類ほどの原子である！
 - ◆ これによって物質の化学的性質の理解が飛躍的に進んだ。

しかし、それで話は終わらなかつた。

原子もまだ分割できる！



- ◆ 100種類以上ある原子の材料は、電子、陽子、中性子というたつた3種類の粒子である！
- ◆ エレクトロニクスなど、現在の私たちの生活を支える様々なテクノロジーはこの理解なしには成り立たない。

教訓

複雑なものがより基本的なものの組み合わせとして理解できる（統一される）と科学が進歩する。

- ◆ では、陽子、中性子、電子は何でできているのか？
- ◆ 何かより基本的なものからできているとすると、それは何からできているのか？
- ◆ そうやってとことん考えて行ったらどこに行きつくのか？

今日はこの**究極の物質像**を求める人類の挑戦についてお話ししたいと思います。

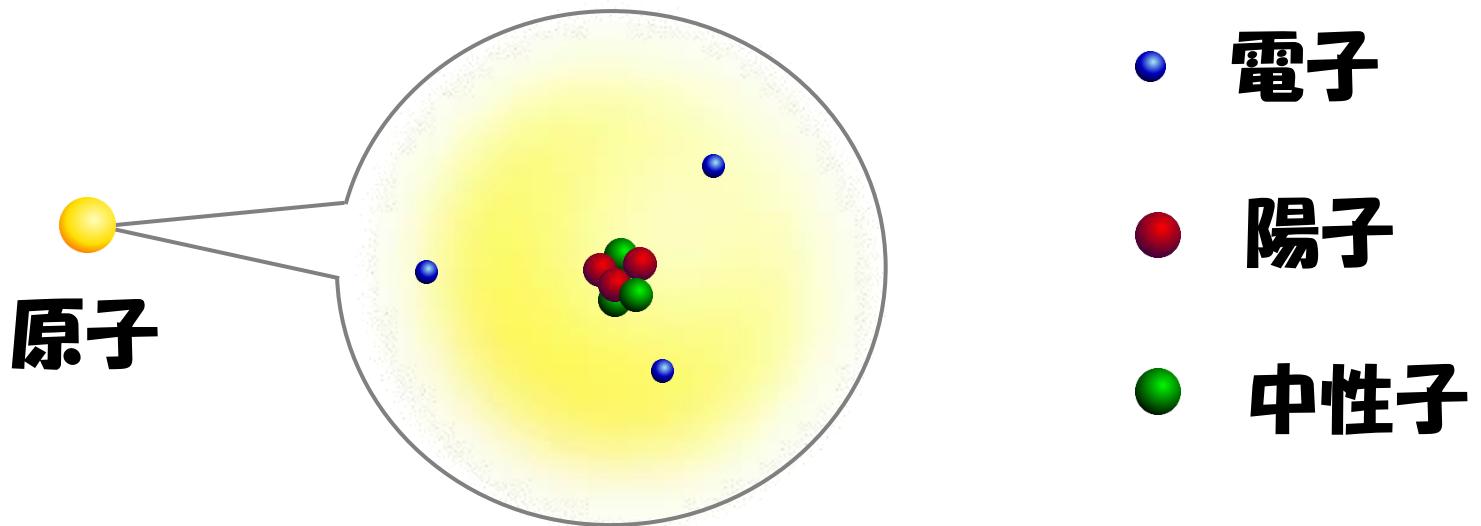
Plan

- ① 素粒子の理論
- ② 超弦理論
- ③ 時空の次元について
- ④ 弦か素粒子か？
- ⑤ まとめと展望

①

素粒子の理論

◆ さっきてきた原子模型



どこかおかしいと思いませんか？

◆ 陽子はプラスの電荷をもつ粒子、中性子は電荷を持たない。なんでバラバラにならないのか？

→ 電気の力よりも強い力（核力）でくっついている！

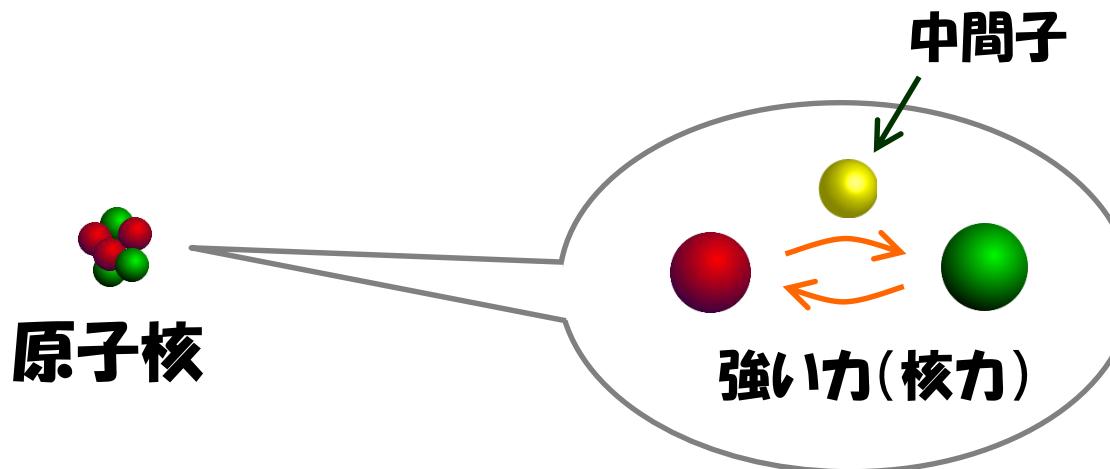
湯川理論 (1935)

核力を伝える役割を果たす“中間子”
と呼ばれる粒子の存在を予言



湯川秀樹

→ 1947年に予言通り発見された！



では、あらゆる物質の材料は

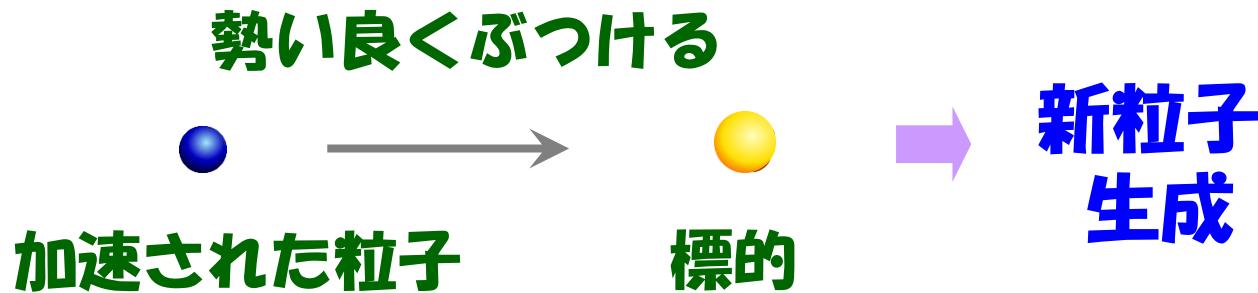


電子 陽子 中性子 中間子

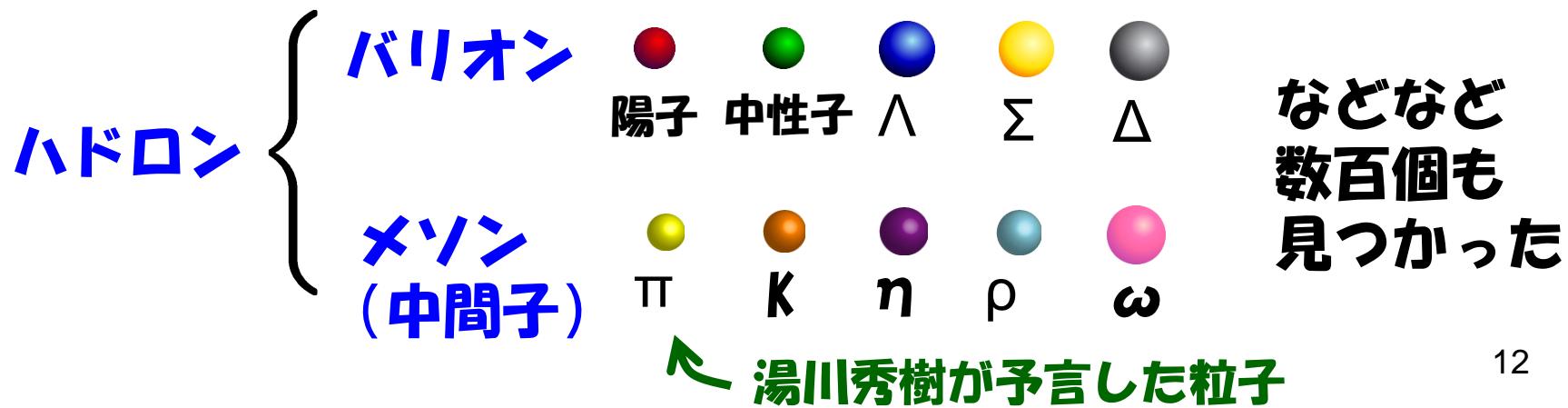
の4種類の粒子と考えて正しいだろうか？

しかし、世の中、
そんなに単純ではなかった。

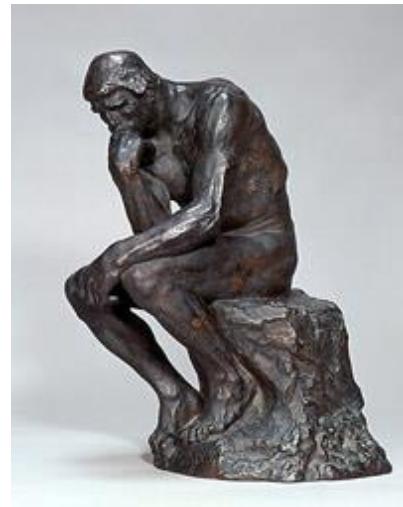
20世紀の中ごろ、素粒子実験の進歩 に伴って、新しい粒子が次々に見つかった。



◆ 大まかな分類



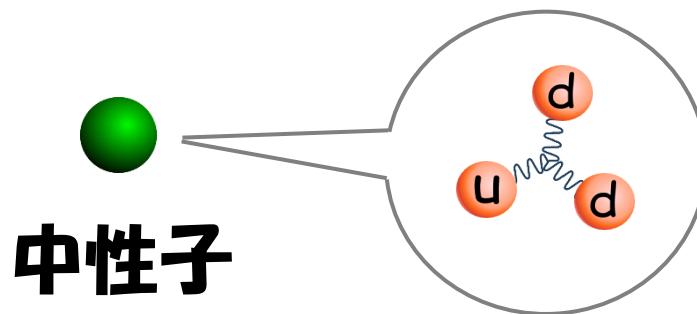
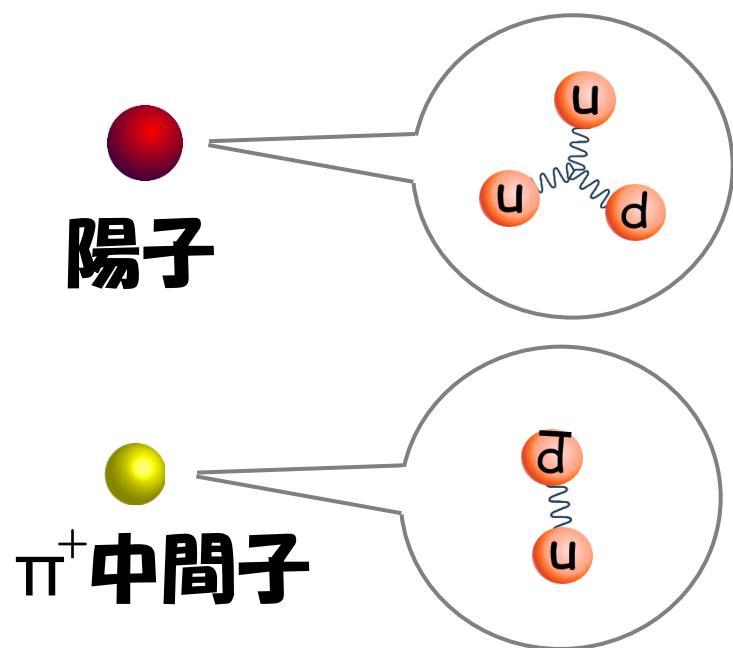
どうしよう？



これじゃあ、美しくない
もっとすっきり理解できなか？

歴史は繰り返される

ハドロンはさらに小さな粒子
(クォーク) に分割できる！



電荷

u	: アップクォーク	+ 2/3
d	: ダウンクォーク	- 1/3
\bar{d}	: d の反粒子	+ 1/3

何百種類もあるハドロンたちは、クォークの組み合わせとして理解できる！

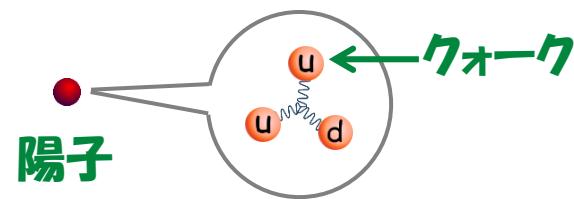
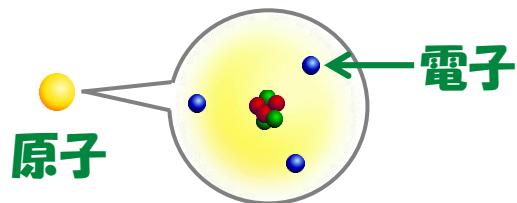


ゲルマン ツヴァイク

素粒子とは？

- ◆ 現在のところ、もうこれ以上、細かく分割できないと考えられている粒子を「素粒子」と呼ぶ。
- ◆ 素粒子には内部構造はなく、大きさのない点粒子であると考えられている。

例) 電子やクォークなどは素粒子。
原子や陽子などは素粒子ではない。



現在見つかっている素粒子

アップクォークの仲間が**3種類**

u
c
t

d
s
b

クォーク

ダウンクォークの仲間が**3種類**

電子の仲間が**3種類**

電子

e
μ
τ

ν_e
 ν_μ
 ν_τ

レプトン

ニュートリノの仲間が**3種類**

力を媒介する粒子

光子

q

g

Z

W^\pm

(重)

電磁気力
強い力
弱い力
重力

ここは
未完成

2012年に見つかったヒッグス粒子 H

これらを含む素粒子理論は**標準模型**と呼ばれ、
現在までに行われたほとんどすべての実験を
高い精度で再現する非常に優れた理論である。

ここで、ちょっと立ち止まって考えてみる。

「果たして、これが我々の求める
究極の物質像 なのだろうか？」



- ◆ 素粒子の表は 1 ページに収まった。
しかし、まだちょっと多すぎやしないか？
- ◆ 実は、重力を素粒子の理論に組み込もう
とすると、理論が破綻してしまう！

→ これが究極の物質像ではありえない！

「では、どうしたらよいか？」

- ◆ クォークや重力子などももっと基本的な粒子に分割できたりしないか？
 - 可能性はあるかも知れないが、うまくいく理論は見つかっていない。
- ◆ 待てよ、物質の最小単位が粒子でないといけないなんて、誰が決めたんだ？
- ◆ 粒子ではないとしたら、どんな可能性があるだろうか？
- ◆ 例えば、粒子ではなく「ひも」だとしたら？

→ **超弦理論**



②

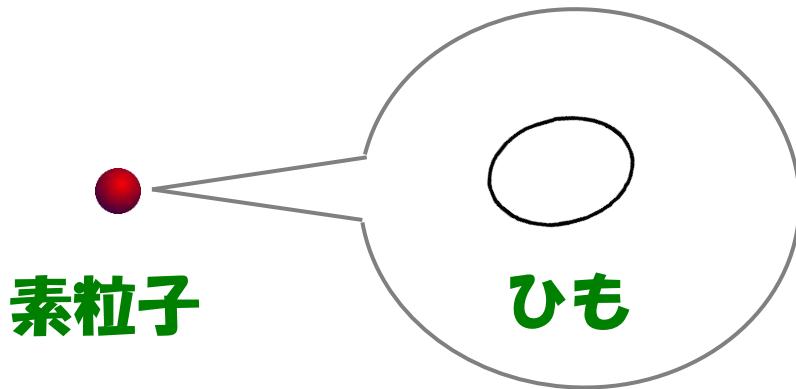
超弦理論

弦理論とは？

提唱者の一人



素粒子を拡大してみたとき、
ひも状をしていったとしたら？



南部陽一郎氏

この仮説に基く理論のことを

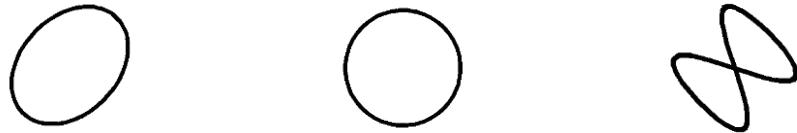
弦理論、ひも理論、超弦理論、などと呼ぶ。

1960年代の末にハドロンに関する研究から生まれた。

もっとかっこいい動画



何がうれしいのか？



同じひもでも、振動の仕方が違えば性質も異なってくる。

いろいろな種類の素粒子をたった一つのひもから導き出せる可能性がある！

アップクォークの仲間が**3種類**

u c t

ダウンクォークの仲間が**3種類**

d s b

電子の仲間が**3種類**

e μ τ

ニュートリノの仲間が**3種類**

ν_e ν_μ ν_τ

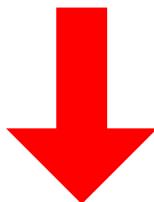
力を媒介する粒子

γ g Z W^\pm (重)

ヒッグス粒子

H

全部、
同じひも！

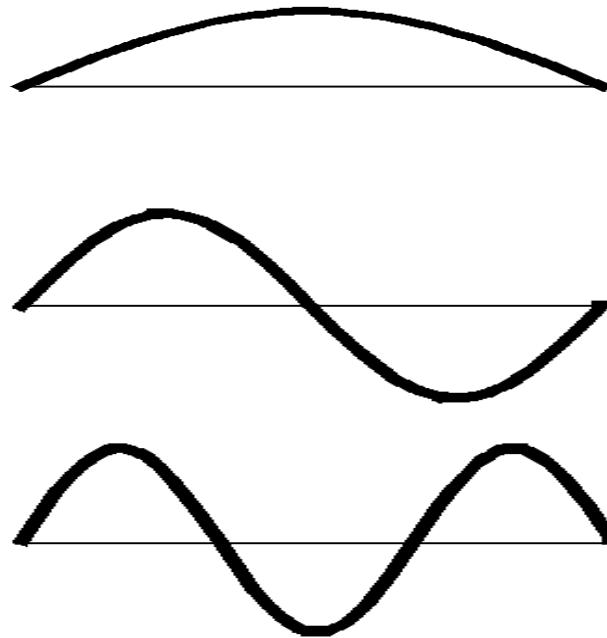


ひも

さっき出てきた
素粒子の表

たくさんある素粒子が
たった一つのひもに**統一**される
かも知れない！

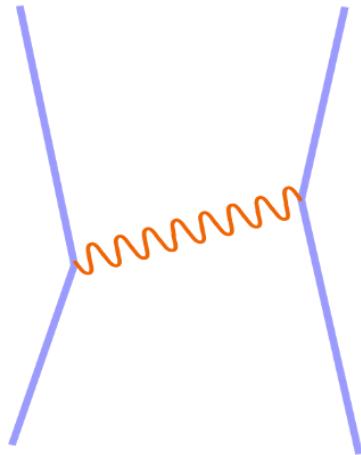
弦の振動



同じ弦でも違った音が出る。

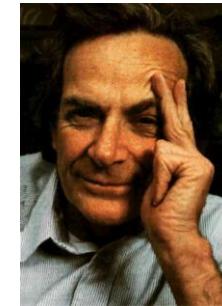
同じ弦からさまざま粒子が生じる
というのも、これと同じ原理

力の起源

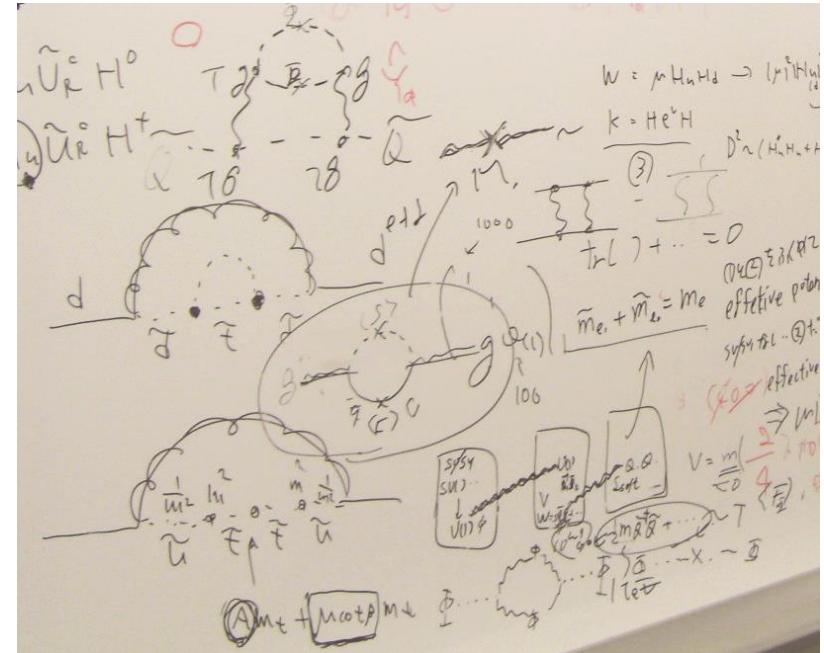


Feynman図

素粒子に働く力や反応率
はこのような絵を描く
ことで計算できる。

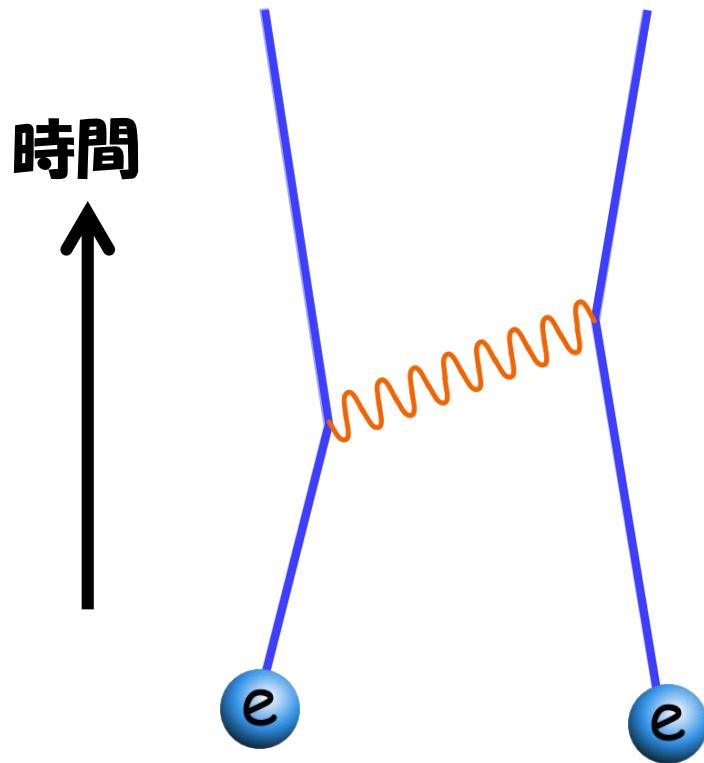


ファインマン

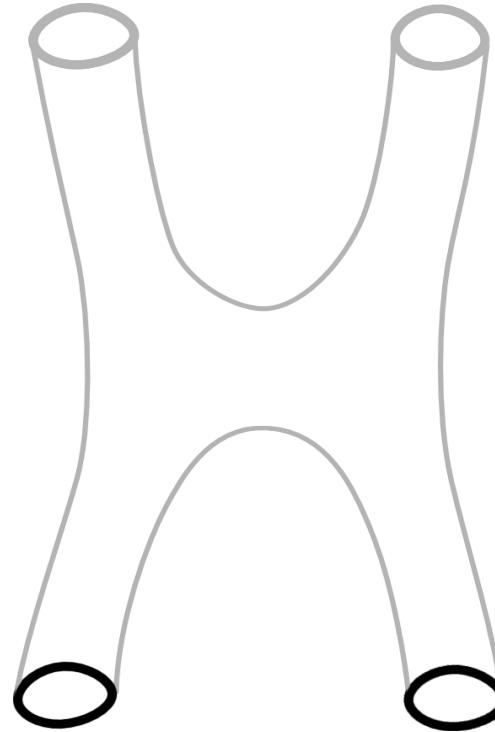


ある日の素粒子論研究室の白板

素粒子の相互作用



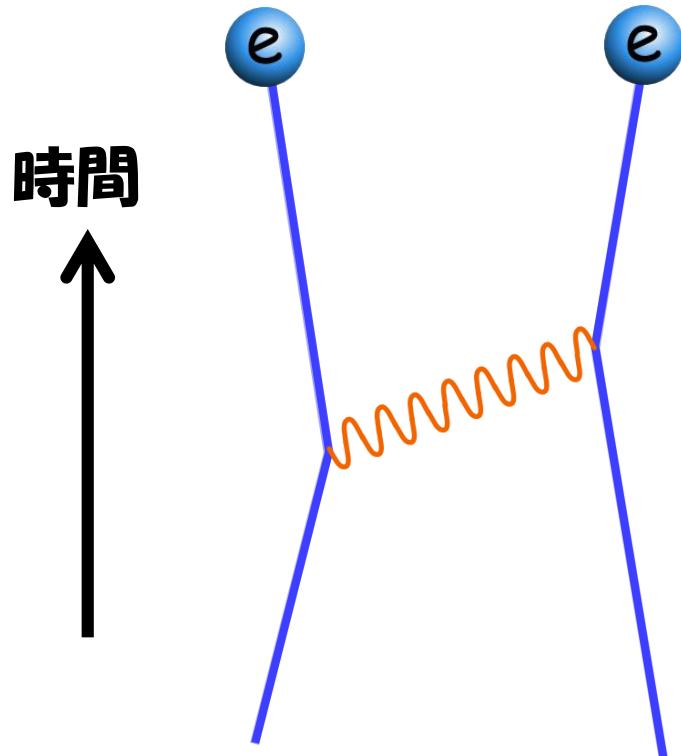
弦の相互作用



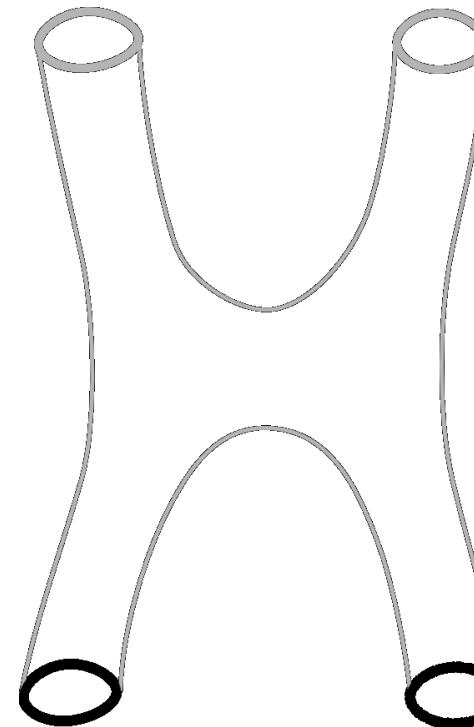
光子をキャッチボール

光子：電磁気力を媒介する素粒子

素粒子の相互作用



弦の相互作用



ひもはひものまま
物質と力の起源も統一！

超弦理論の奇跡

詳しい解析によると、

- ◆ こうして生じる力の中に**重力**が自然に含まれていた！
- ◆ しかも、ミクロな世界でも矛盾を含まない、
まともな**重力理論**になっている！
- ◆ さらに、さっきの素粒子の表が**(ほぼ)**再現できる！

つまり、

たった一つの「ひも」から
欲しかったものが全部出てくる！



究極の統一理論の候補！

これこそ、人類が2000年以上にも渡って
探し求めてきた究極の物質像かも！？

さて、この理論、本当だったらすごいけど、

本当に正しいのか？

まだはっきりとした結論には至っていない。

課題

- ◆ 先ほど、「素粒子の表が(ほぼ)再現できる！」と言ったが、「ほぼ」を「完全に」にしないといけない。
- ◆ その上で、何か新たな予言をして、実験で確かめる必要がある。

今後の研究に期待！

③

時空の次元について

超弦理論の驚くべき予言

我々の常識：

この世には、時間方向と空間方向を
合わせて **4次元** の方向がある。

超弦理論の予言：

時間と空間とを合わせて **10次元** ある！



(イラスト: 松本ふりつつ)

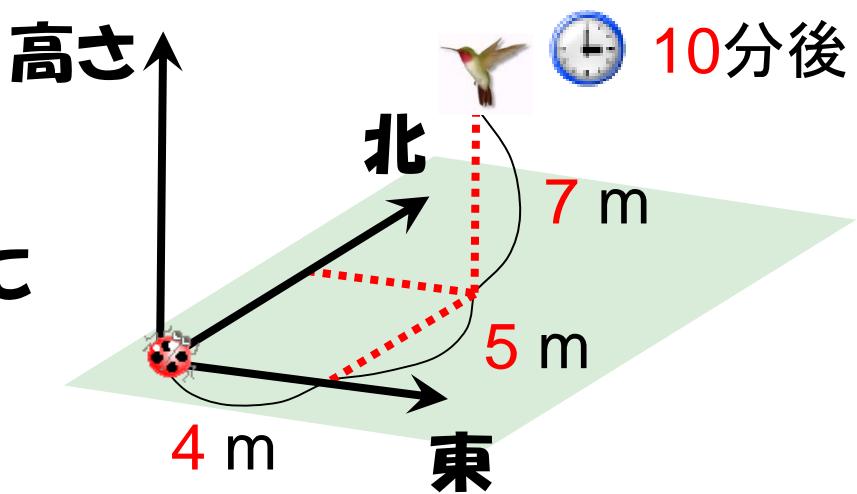
次にこれを
説明しよう。

我々の常識：

時間方向と空間方向を合わせて 4次元

つまり、待ちあわせをするのに 4 つの数字を指定する必要がある、という意味。

(例) ここから
東に 4 メートル
北に 5 メートル
高さ 7 メートルの場所に
10 分後に待ち合わせ

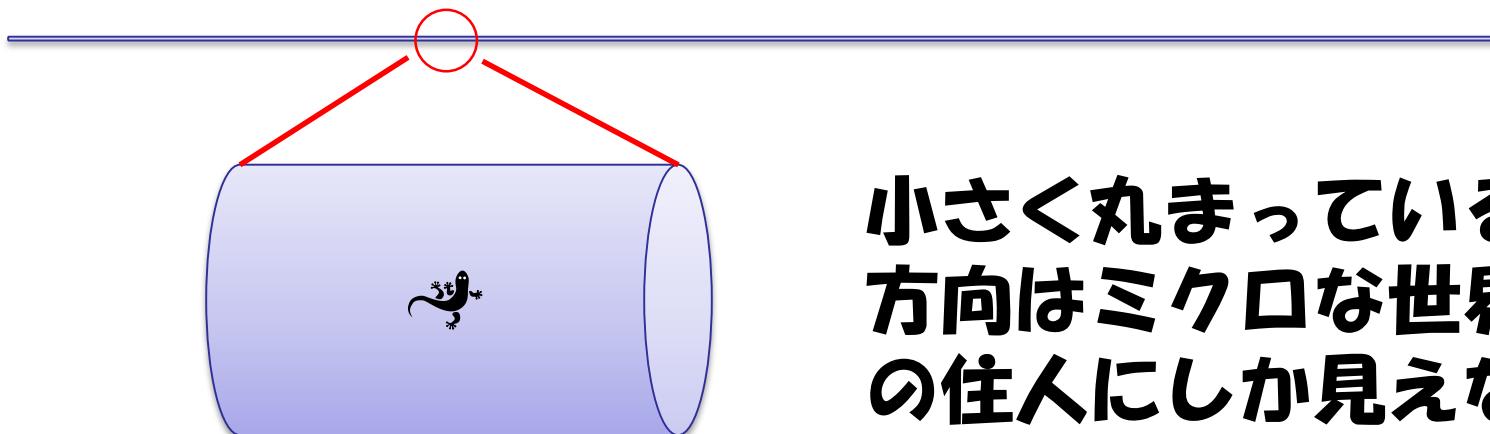


超弦理論の予言：

時間と空間とを合わせて 10 次元 ある！

- 超弦理論は現在の実験技術では感知できない余分な6次元方向（余剰次元）隠れていることを予言する。
- 何故、見えないのか？

余剰次元は、非常に小さく丸まって
いるために見えないと考えられている。



小さく丸まっている
方向はミクロな世界
の住人にしか見えない！

余分な6次元が小さく丸まっているとは？

(ソニー科学館「宇宙のはじまりの物語」より)

(科学館ソニー・エクスプローラサイエンス@お台場にて3D公開中) 35

別の可能性：フレインワールド

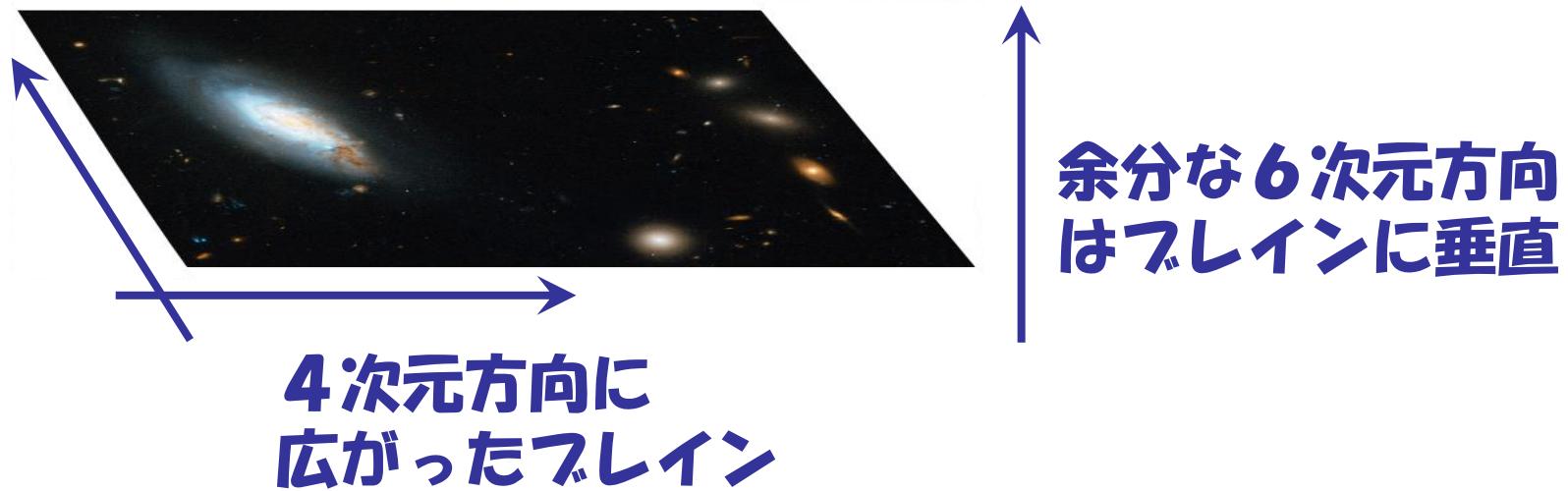
- 実は、超弦理論には、ひもだけではなく、**Dフレイン**と呼ばれる広がった物体もある。



- Dフレインにはいろいろな次元のものがあり、4次元時空の方向に広がったものもある。

- 我々の住む世界が4次元に広がったDフレインの上に実現されているという可能性がある。

こんな感じ

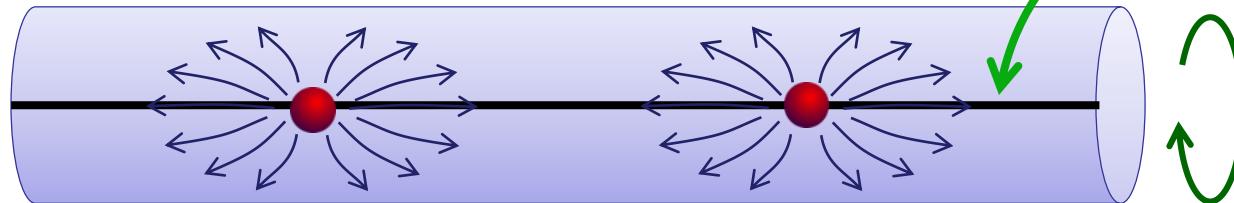


- 余剰次元はやはり丸まっているといけないといけないが、場合によっては、0.1ミリくらいの大きな大きさである可能性もまだ否定されていない。

フレインワールド

余分な次元はどうすれば見えるか？（その1）

- ◆ 重力は余剰次元に染み出す。



フレイン世界

余剰次元
の方向

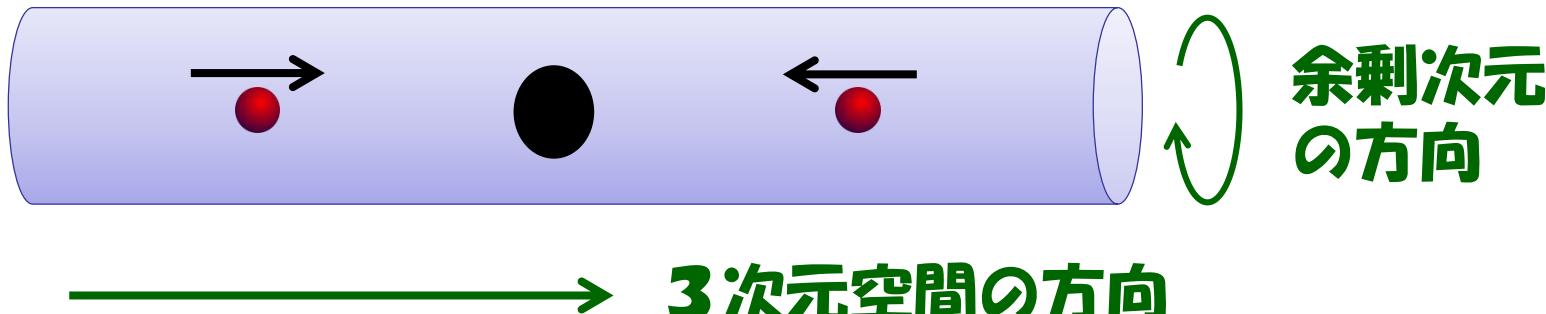
→ 3次元空間の方向

- ◆ 余剰次元の大きさと同じくらい
近距離では、重力がニュートンの
万有引力の法則から少しずれる。
→ 近距離での重力を測定すれば良い。



余分な次元はどうすれば見えるか？（その2）

2つの粒子を衝突させる



- ◆ ミニブラックホールができることがある。

余分な次元はどうすれば見えるか？（その3）

2つの粒子を衝突させる



→ 3次元空間の方向

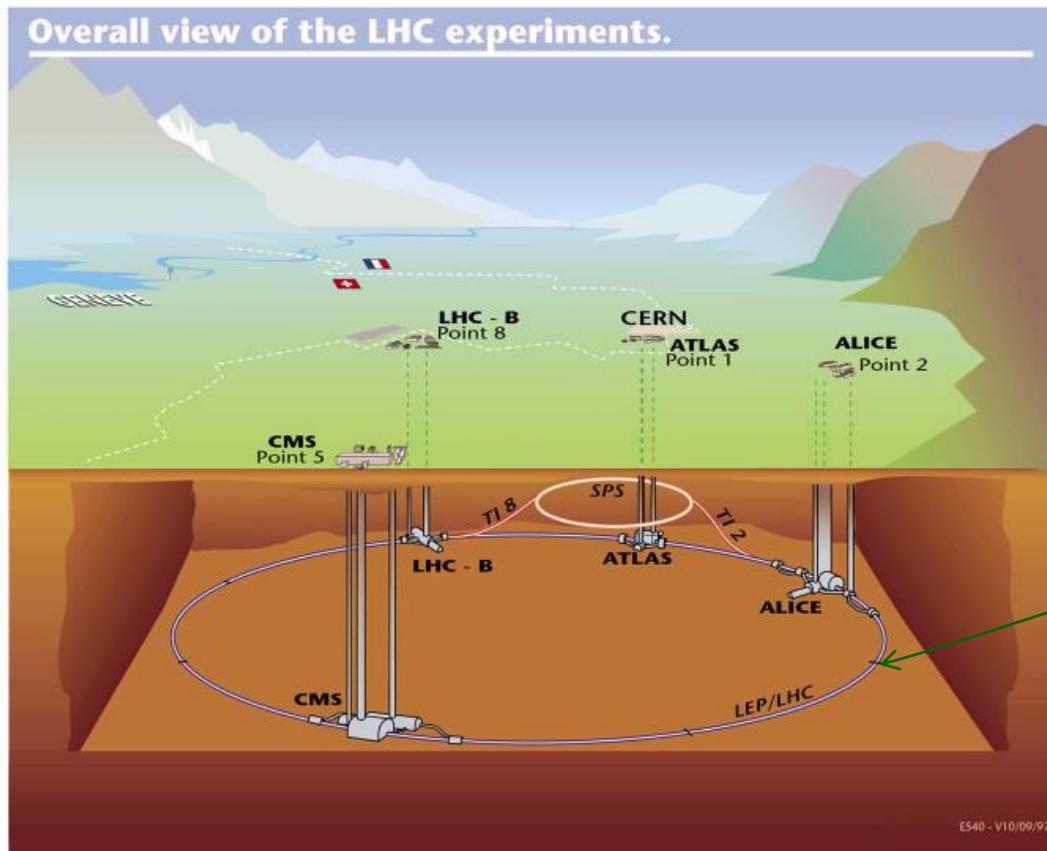
- ◆ ミニブラックホールができることがある。
- ◆ ミニブラックホールはすぐにいろんな粒子を放射（ホーキング放射）して消滅すると考えられている。

→ その様子が観測できれば良い！



ホーキング

LHC (史上最高エネルギーの実験装置)



このリングに
陽子を走らせて
正面衝突させる

運が良ければ余分な次元が見えるかも知れない。
今、稼働中なので、楽しみに待ちましょう。

④

弦か素粒子か？

ここで、またどんでん返し

1997年、マルダセナが驚くべき
予想を打ち立てた。



おおざっぱに言うと（ある状況では） マルダセナ

「超弦理論 と 素粒子の理論 は
実は同じ理論である」



当時の弦理論の国際会議で、
マルダセナ ダンス
(「マカレナ」の替え歌)
を踊っている物理学者たち

つまり、究極の物質像の 答えは一つではないかも知れない！

実は同じもの



クォークと反クォークが
くっついた状態

開いたひも

「見かけ上、全然違う理論だが、計算結果は
すべて同じになる」という可能性がある。

この場合、ひもは素粒子そのものではなく、
中間子など、素粒子の結合状態を表す。

弦理論に基く計算結果の例

(名大の酒井氏
との共同研究)

◆ ρ 中間子と a_1 中間子 の質量比

計算結果 : 1.53

実験結果 : 1.59

◆ π 中間子の大きさ (電荷の広がり具合)

計算結果 : 0.690 fm 実験結果 : 0.672 fm

(1 fm = 1ミリの 1兆分の 1)

かなりうまく行っているようだ !

⑤ まとめと展望

- ◆ たった1種類のひもから、この世に存在するあらゆる物質が構成される。
これ以上、単純になることがあるだろうか？
- ◆ もともと重力理論や素粒子の統一理論を作るために考案された理論ではないのに、なぜか重力を取り込むのに成功し、しかも大統一理論らしきものを含んでいる。
これは奇跡としか言いようがない！

- ◆ 超弦理論が本当に我々の期待するような究極の理論なのかどうかは、まだ分からぬいが、
「ものすごい理論」であることは完全に確立している。
- ◆ ハドロンの理論としての超弦理論は、実験ともかない良く合い、新たな予言も与えている。
かつては超弦理論は実験で検証不能な理論だとする批判もあったが、それはもはや過去の話。

- ◆ ただし、この理論は信じられないくらい奥が深く、現在のところ、我々は弦理論のごく一部の側面しか理解できていないと感じる。
- ◆ この先、どんなドラマが待ち受けていることか、今後の研究に期待したい。

おつかれさまでした！

