超弦理論って何?

京都大学
基礎物理学研究所

菅野 颯人

YUKAWA INSTITUTE FOR THEORETICAL PHYSICS

今から話すこと

超弦理論?

ざっくりいうと、

この世界は小さな「ひも」でできているかも?

っていうお話です。

始めに、自己紹介 (1)

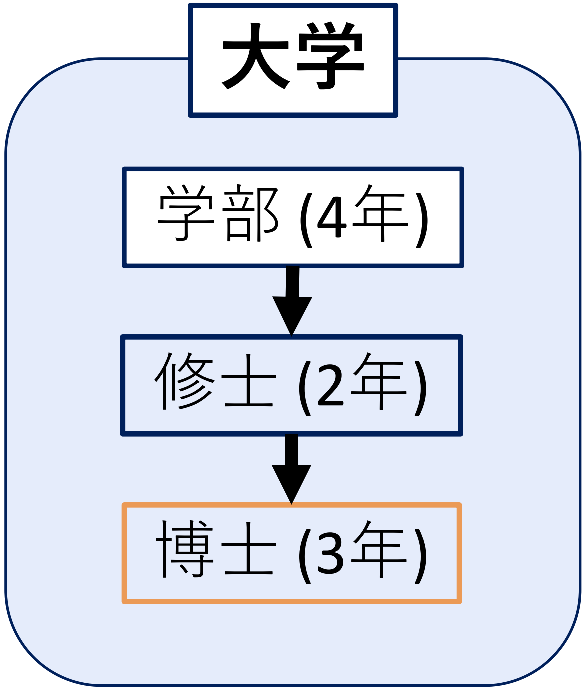
菅野 颯人 (かんの はやと)

- 1996年生まれ (24歳)
- 京都大学 理学研究科 博士1年
- 「基礎物理学研究所」というところで研究してます
- 専門：素粒子論

始めに、自己紹介 (1)

菅野 颯人 (かんの はやと)

- 1996年生まれ (24歳)
- 京都大学 理学研究科 博士1年
- 「基礎物理学研究所」というところで研究してます
- 専門：素粒子論

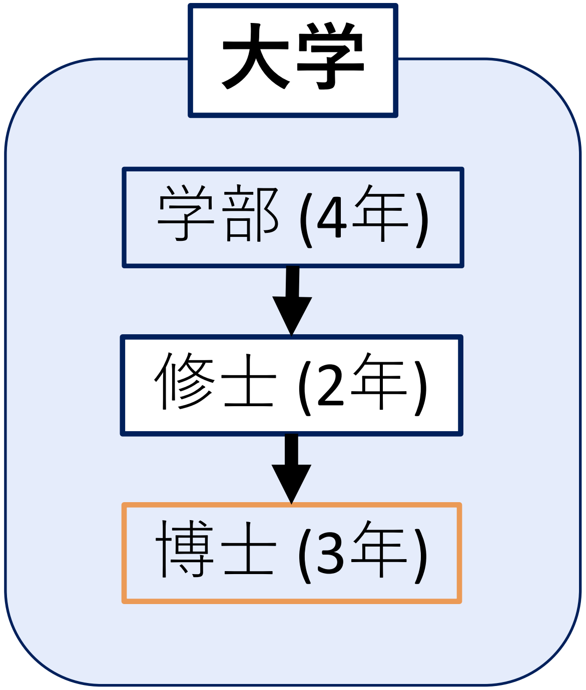


- 出身：茨城県
- 高校：茨城県立 水戸第一高校
- 学部：九州大学 理学部物理学科
- 修士：京都大学 理学研究科

始めに、自己紹介 (1)

菅野 颯人 (かんの はやと)

- 1996年生まれ (24歳)
- 京都大学 理学研究科 博士1年
- 「基礎物理学研究所」というところで研究してます
- 専門：素粒子論

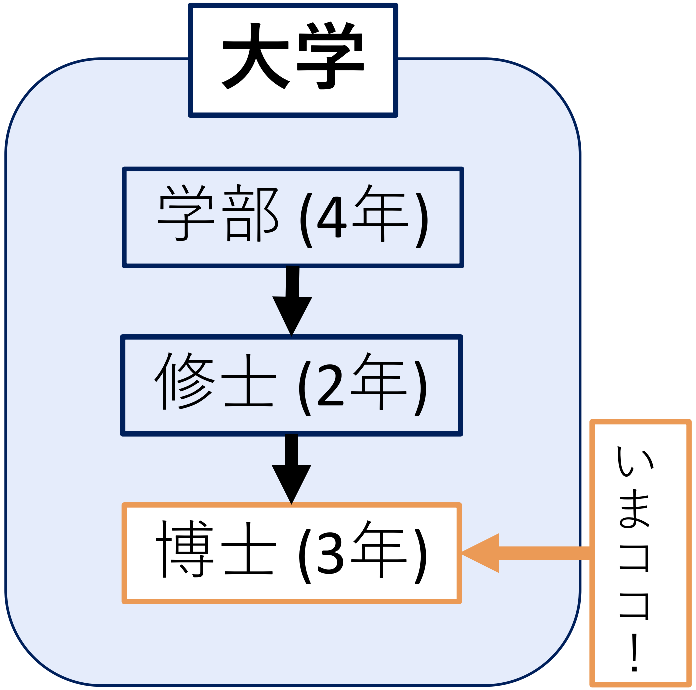


- 出身：茨城県
- 高校：茨城県立 水戸第一高校
- 学部：九州大学 理学部物理学科
- 修士：京都大学 理学研究科

始めに、自己紹介 (1)

菅野 颯人 (かんの はやと)

- 1996年生まれ (24歳)
- 京都大学 理学研究科 博士1年
- 「基礎物理学研究所」というところで研究してます
- 専門：素粒子論



- 出身：茨城県
- 高校：茨城県立 水戸第一高校
- 学部：九州大学 理学部物理学科
- 修士：京都大学 理学研究科

始めに、自己紹介 (2)

基礎物理学研究所

Webページ：https://www.yukawa.kyoto-u.ac.jp/

- 京大の附置研究所の1つ
- 国内の主要な理論物理学の研究拠点
- 英語名：Yukawa Institute for Theoretical Physics

目次

1. はじめに
    - 自己紹介

2. 導入 (3)
    - この世界は何からできてるの?

3. なぜ弦理論を考えるのか (4)
    - 素粒子標準模型と4つの力

4. 弦理論ってどんな理論? (6)
    - どんな理論を考えるのか

5. 弦理論の応用 (3)・まとめ (2)
    - 弦理論が現実世界に応用できる
    - 弦理論とは何だったのか

突然ですが、問題

目の前にある「モノ」を小さくしていくと…?

- 例：「紙」

突然ですが、問題

目の前にある「モノ」を小さくしていくと…?

- 例：「紙」
  - 取り敢えず小さくしてみよう

突然ですが、問題

目の前にある「モノ」を小さくしていくと…?

- 例：「紙」
  - 取り敢えず小さくしてみよう
  - ちぎる?ハサミで切る?

突然ですが、問題

目の前にある「モノ」を小さくしていくと…?

- 例：「紙」
  - 取り敢えず小さくしてみよう
  - ちぎる?ハサミで切る?
  - 更に小さくしてみる

突然ですが、問題

目の前にある「モノ」を小さくしていくと…?

- 例：「紙」
  - 取り敢えず小さくしてみよう
  - ちぎる?ハサミで切る?
  - 更に小さくしてみる
  - 顕微鏡で見てみる?

突然ですが、問題

目の前にある「モノ」を小さくしていくと…?

- 例：「紙」
  - 取り敢えず小さくしてみよう
  - ちぎる?ハサミで切る?
  - 更に小さくしてみる
  - 顕微鏡で見てみる?
  - セルロース : $-[C_6H_{10}O_5]-$

突然ですが、問題

目の前にある「モノ」を小さくしていくと…?

- 例：「紙」
  - 取り敢えず小さくしてみよう
  - ちぎる?ハサミで切る?
  - 更に小さくしてみる
  - 顕微鏡で見てみる?
  - セルロース : $-[C_6H_{10}O_5]-$
  - C H O

突然ですが、問題

目の前にある「モノ」を小さくしていくと…?

- 例：「紙」
  - 取り敢えず小さくしてみよう
  - ちぎる?ハサミで切る?
  - 更に小さくしてみる
  - 顕微鏡で見てみる?
  - セルロース : $-[C_6H_{10}O_5]-$
  - C H O
  - 原子?

突然ですが、問題

目の前にある「モノ」を小さくしていくと…?

- 例：「紙」
  - 取り敢えず小さくしてみよう
  - ちぎる?ハサミで切る?
  - 更に小さくしてみる
  - 顕微鏡で見てみる?
  - セルロース：$-[\mathrm{C_6H_{10}O_5}]-$
  - C H O
  - 原子?

- この世界にあるものは全て「原子」からできている

原子?

周期＼族	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H 水素 Hydrogen 1.00798																	2 He ヘリウム Helium 4.0026
2	3 Li リチウム Lithium 6.968	4 Be ベリリウム Beryllium 9.01218											5 B 硼(ホウ)素 Boron 10.814	6 C 炭素 Carbon 12.0106	7 N 窒素 Nitrogen 14.0069	8 O 酸素 Oxygen 15.9994	9 F 弗(フッ)素 Fluorine 18.9984	10 Ne ネオン Neon 20.1797
3	11 Na ナトリウム Sodium 22.9898	12 Mg マグネシウム Magnesium 24.306											13 Al アルミニウム Aluminum 26.9815	14 Si 珪(ケイ)素 Silicon 28.085	15 P 燐(リン) Phosphorus 30.9738	16 S 硫黄 Sulfur 32.068	17 Cl 塩素 Chlorine 35.452	18 Ar アルゴン Argon 39.948
4	19 K カリウム Potassium 39.0983	20 Ca カルシウム Calcium 40.078	21 Sc スカンジウム Scandium 44.9559	22 Ti チタン Titanium 47.867	23 V バナジウム Vanadium 50.9415	24 Cr クロム Chromium 51.9961	25 Mn マンガン Manganese 54.938	26 Fe 鉄 Iron 55.845	27 Co コバルト Cobalt 58.9332	28 Ni ニッケル Nickel 58.6934	29 Cu 銅 Copper 63.546	30 Zn 亜鉛 Zinc 65.38	31 Ga ガリウム Gallium 69.723	32 Ge ゲルマニウム Germanium 72.630	33 As 砒(ヒ)素 Arsenic 74.9216	34 Se セレン Selenium 78.971	35 Br 臭素 Bromine 79.904	36 Kr クリプトン Krypton 83.798
5	37 Rb ルビジウム Rubidium 85.4678	38 Sr ストロンチウム Strontium 87.62	39 Y イットリウム Yttrium 88.9058	40 Zr ジルコニウム Zirconium 91.224	41 Nb ニオブ Niobium 92.9064	42 Mo モリブデン Molybdenum 95.95	43 Tc テクネチウム Technetium [99]	44 Ru ルテニウム Ruthenium 101.07	45 Rh ロジウム Rhodium 102.906	46 Pd パラジウム Palladium 106.42	47 Ag 銀 Silver 107.868	48 Cd カドミウム Cadmium 112.414	49 In インジウム Indium 114.818	50 Sn 錫(スズ) Tin 118.710	51 Sb アンチモン Antimony 121.760	52 Te テルル Tellurium 127.60	53 I 沃(ヨウ)素 Iodine 126.904	54 Xe キセノン Xenon 131.293
6	55 Cs セシウム Cesium 132.905	56 Ba バリウム Barium 137.327	※1	72 Hf ハフニウム Hafnium 178.49	73 Ta タンタル Tantalum 180.948	74 W タングステン Tungsten 183.84	75 Re レニウム Rhenium 186.207	76 Os オスミウム Osmium 190.23	77 Ir イリジウム Iridium 192.217	78 Pt 白金(プラチナ Platinum 195.084	79 Au 金 Gold 196.967	80 Hg 水銀 Mercury 200.592	81 Tl タリウム Thallium 204.384	82 Pb 鉛 Lead 207.2	83 Bi ビスマス Bismuth 208.980	84 Po ポロニウム Polonium [210]	85 At アスタチン Astatine [210]	86 Rn ラドン Radon [222]
7	87 Fr フランシウム Francium [223]	88 Ra ラジウム Radium [226]	※2	104 Rf ラザホージウム Rutherfordium [267]	105 Db ドブニウム Dubnium [268]	106 Sg シーボーギウム Seaborgium [271]	107 Bh ボーリウム Bohrium [272]	108 Hs ハッシウム Hassium [277]	109 Mt マイトネリウム Meitnerium [276]	110 Ds ダームスタチウム Darmstadtium [281]	111 Rg レントゲニウム Roentgenium [280]	112 Cn コペルニシウム Copernicium [285]	113 Nh ニホニウム Nihonium [278]	114 Fl フレロビウム Flerovium [289]	115 Mc モスコビウム Moscovium [289]	116 Lv リバモリウム Livermorium [293]	117 Ts テネシン Tennessine [293]	118 Og オガネソン Oganesson [294]

※1 ランタノイド系	57 La ランタン Lanthanum 138.905	58 Ce セリウム Cerium 140.116	59 Pr プラセオジム Praseodymium 140.908	60 Nd ネオジム Neodymium 144.242	61 Pm プロメチウム Promethium [145]	62 Sm サマリウム Samarium 150.36	63 Eu ユウロピウム Europium 151.964	64 Gd ガドリニウム Gadolinium 157.25	65 Tb テルビウム Terbium 158.925	66 Dy ジスプロシウム Dysprosium 162.500	67 Ho ホルミウム Holmium 164.930	68 Er エルビウム Erbium 167.259	69 Tm ツリウム Thulium 168.934	70 Yb イッテルビウム Ytterbium 173.045	71 Lu ルテチウム Lutetium 174.967
※2 アクチノイド系	89 Ac アクチニウム Actinium [227]	90 Th トリウム Thorium 232.038	91 Pa プロトアクチニウム Protactinium 231.036	92 U ウラン Uranium 238.029	93 Np ネプツニウム Neptunium [237]	94 Pu プルトニウム Plutonium [239]	95 Am アメリシウム Americium [243]	96 Cm キュリウム Curium [247]	97 Bk バークリウム Berkelium [247]	98 Cf カリホルニウム Californium [252]	99 Es アインスタイニウム Einsteinium [252]	100 Fm フェルミウム Fermium [257]	101 Md メンデレビウム Mendelevium [258]	102 No ノーベリウム Nobelium [259]	103 Lr ローレンシウム Lawrencium [262]

Wikipediaより引用

原子って何からできてるの?

- 原子核 (+)、電子(-)
- 原子核 ＝ 陽子 + 中性子

素粒子!

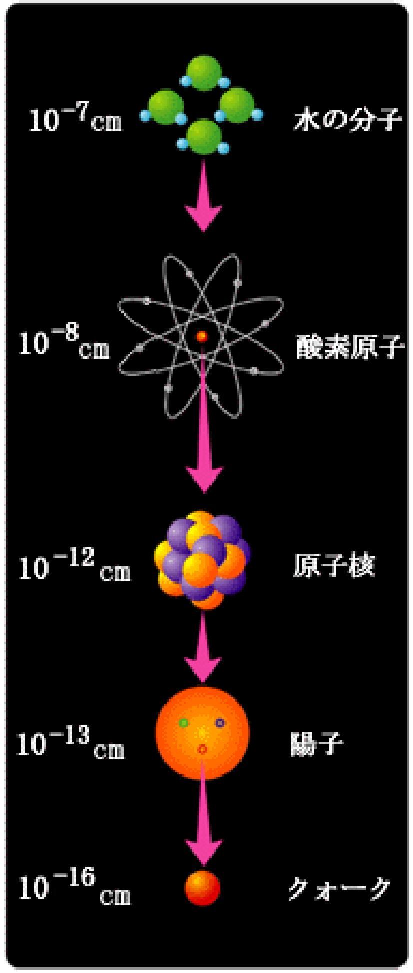
素粒子：これ以上細かくできないもの

- 陽子 = 「クォーク」の集まり
- 電子は素粒子

素粒子!

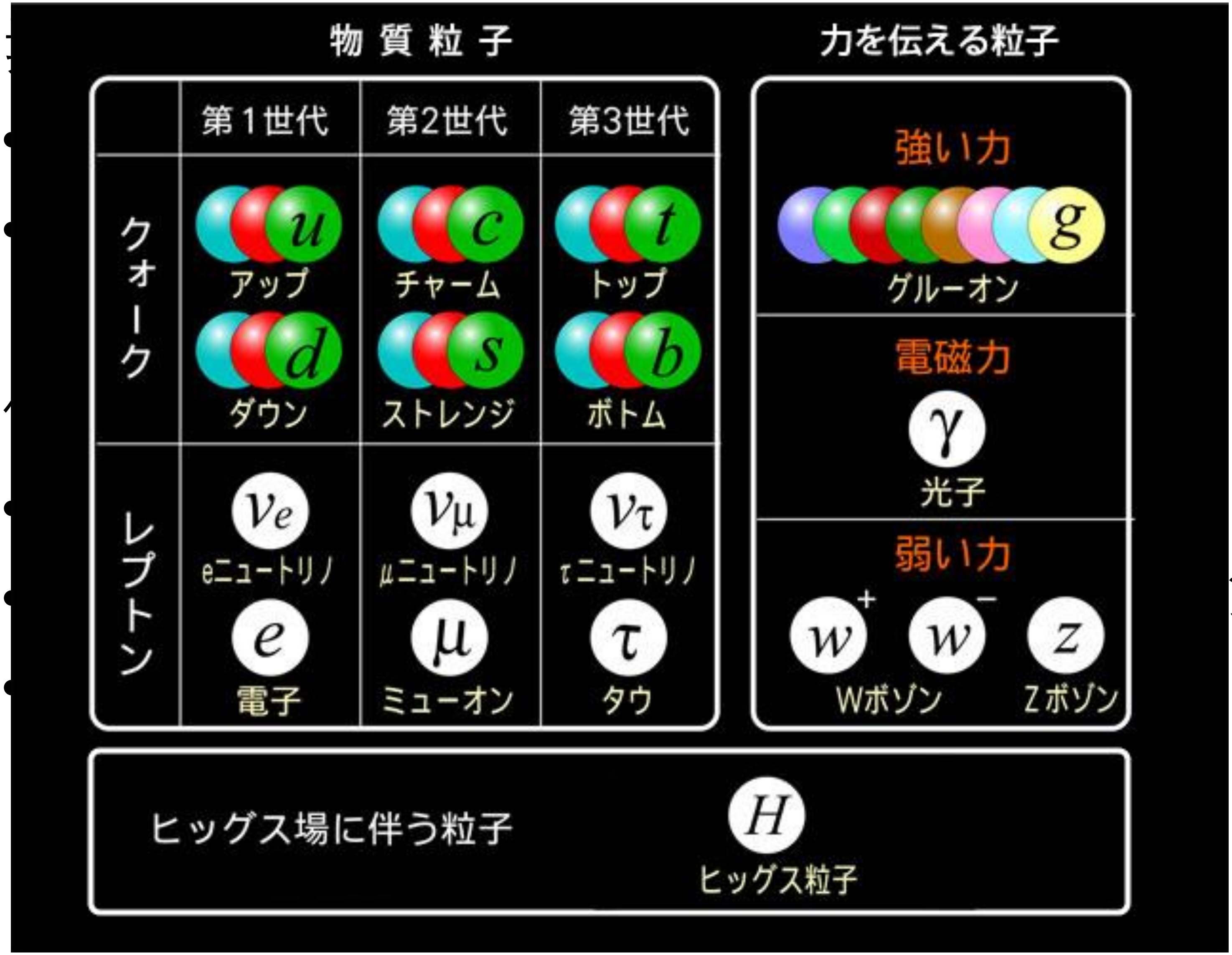
素粒子：これ以上細かくできないもの

- 陽子 = 「クォーク」の集まり
- 電子は素粒子



KEK HPより引用

素粒子!



KEK HPより引用

3. なぜ弦理論を考えるのか

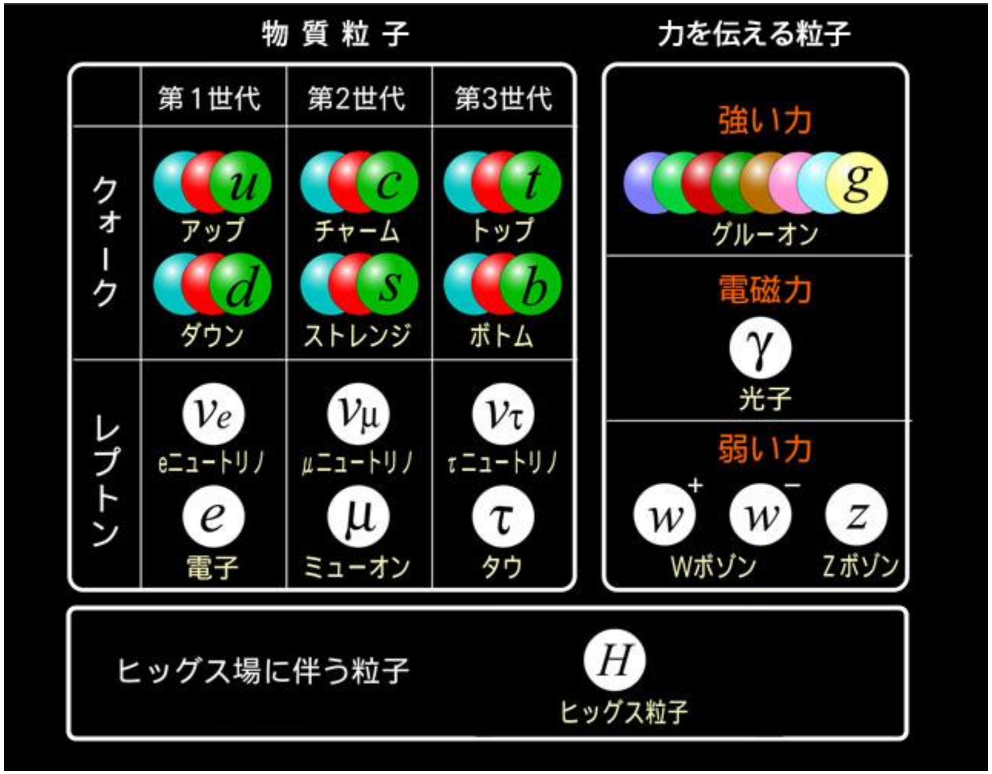
標準模型

素粒子の理論

- 現在知られている素粒子は17種類
- 「標準模型」(Standard Model, SM)と呼ばれる理論で記述されることが知られている。

これで完成?

- 現在、知られている力は4種類
- 標準模型には3種類しか含まれていない!



KEK HPより引用

4つの力

標準模型に含まれている力

- 電磁気力
- 強い力
  - 原子核内部で働いている力
  - 陽子と中性子をつなぎとめている
- 弱い力
  - 中性子は単独だと陽子に崩壊する
  - これは「弱い力」によって引き起こされる

標準模型に含まれていない力

- 重力

相対性理論と量子論

相対性理論

- アインシュタインが作った
- 「特殊相対性理論」と「一般相対性理論」がある
- 一般相対性理論が重力の理論

量子論

- 「量子力学」
- 全ての理論は量子論で書けるはず → 「量子化」
- 標準模型は「量子論 + 特殊相対論」→「場の量子論」

→ 一般相対論は量子論ではない!

重力の量子化

重力理論も量子論として扱いたい

- 一般相対論を標準模型と同じ枠組み(場の量子論)で書けば良い
  - 一般相対論は、場の量子論の性質を満たさない (繰り込み可能性)

  → そのままでは量子化できない

- 一般相対論を量子化するには、新しい理論を考える必要がある!

→重力と場の量子論を統一的に扱う理論

→超弦理論!

4. 弦理論ってどんな理論?

弦理論は「ひも」の理論

超弦理論とはどういう理論か

- この世界は小さな「ひも(弦)」からできていると考える

弦理論は「ひも」の理論

超弦理論とはどういう理論か

- この世界は小さな「ひも(弦)」からできていると考える
  - 点粒子ではなく、ひも
  - 現在「素粒子」と考えられている「粒子」よりもさらに小さい
  - 具体的には、10^{-35}mくらい (プランクの長さと呼ばれる) (0.00000000000000000000000000000000001m)

弦理論は「ひも」の理論

超弦理論とはどういう理論か

- この世界は小さな「ひも(弦)」からできていると考える
  - 点粒子ではなく、ひも
  - 現在「素粒子」と考えられている「粒子」よりもさらに小さい
  - 具体的には、10^{-35}mくらい (プランクの長さと呼ばれる) (0.0000000000000000000000000000000000001m)
- 「ひも」が振動することで標準模型にあるような「粒子」を作り出す
- 「超」は「超対称性」

弦理論は「ひも」の理論

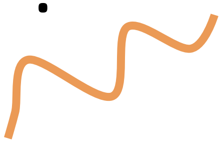
超弦理論とはどういう理論か

- この世界は小さな「ひも(弦)」からできていると考える
  - 点粒子ではなく、ひも
  - 現在「素粒子」と考えられている「粒子」よりもさらに小さい
  - 具体的には、10^{-35}mくらい (プランクの長さと呼ばれる)(0.00000000000000000000000000000000001m)
- 「ひも」が振動することで標準模型にあるような「粒子」を作り出す
- 「超」は「超対称性」
- 10次元時空上の理論 (!)
  - 空間9次元、時間1次元
  - 10次元以外の場合、理論に矛盾が出ることが知られている

ひもの運動 (1)

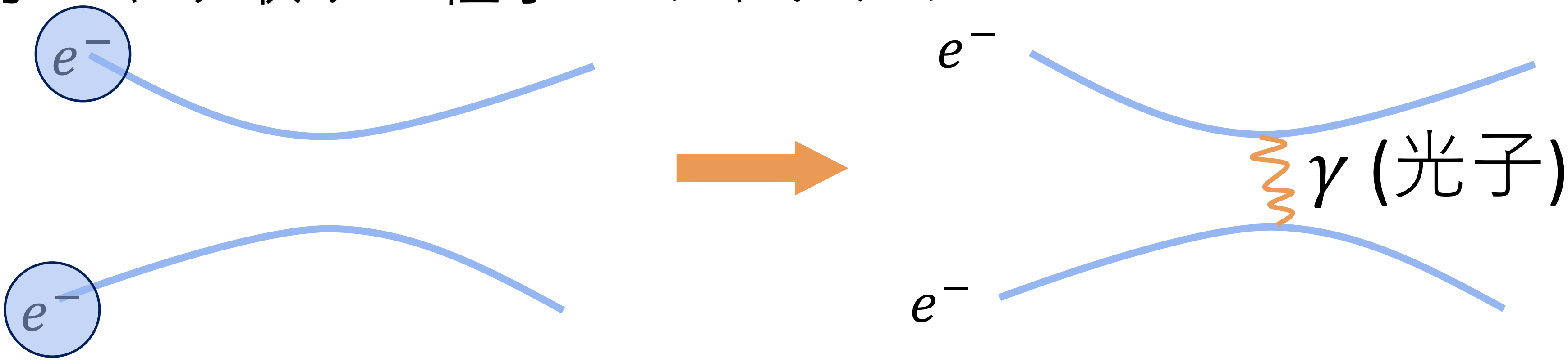
超弦理論ではどのような現象が起こるのか?

- 素粒子に対応するのは開弦
- 重力(=空間の曲がり具合い)に対応するのは閉弦
- 弦は切れたりつながったりする



素粒子(標準模型)では

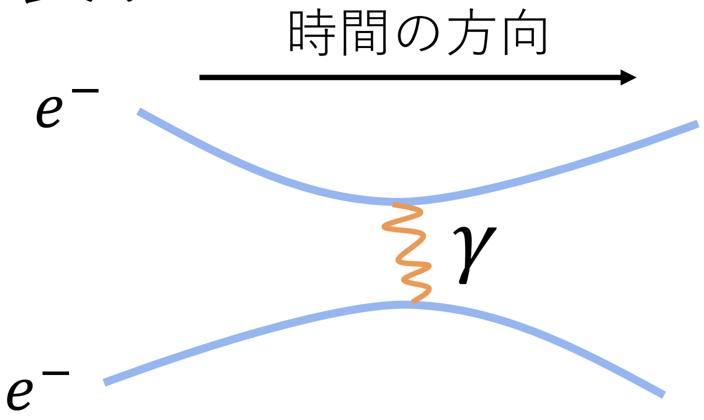
- 力のやり取り = 粒子のキャッチボール



ひもの運動 (2)

素粒子の反応をひもで表す

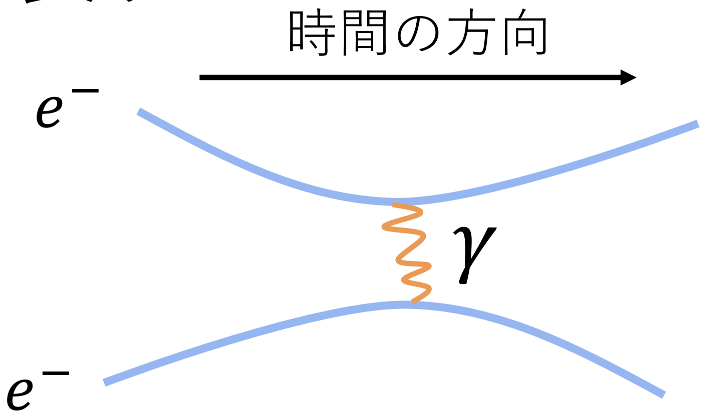
- 例：電子の散乱
- 素粒子の場合、



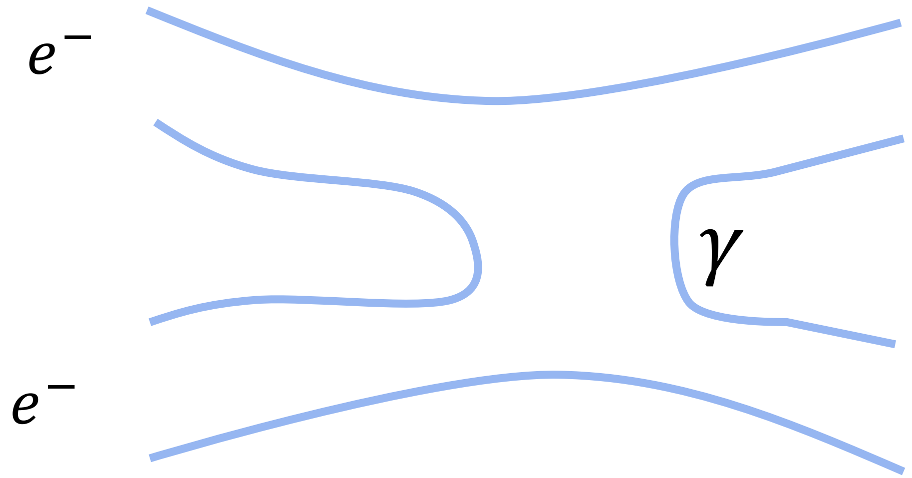
ひもの運動 (2)

素粒子の反応をひもで表す

- 例：電子の散乱
- 素粒子の場合、



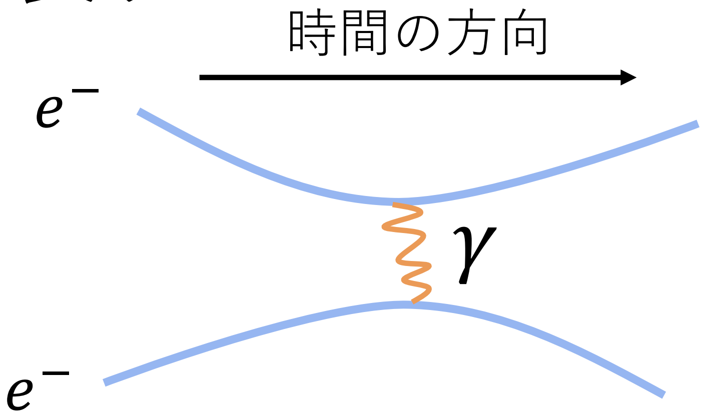
- これを弦理論で書くと、
  - 電子：開弦
  - 光子：開弦



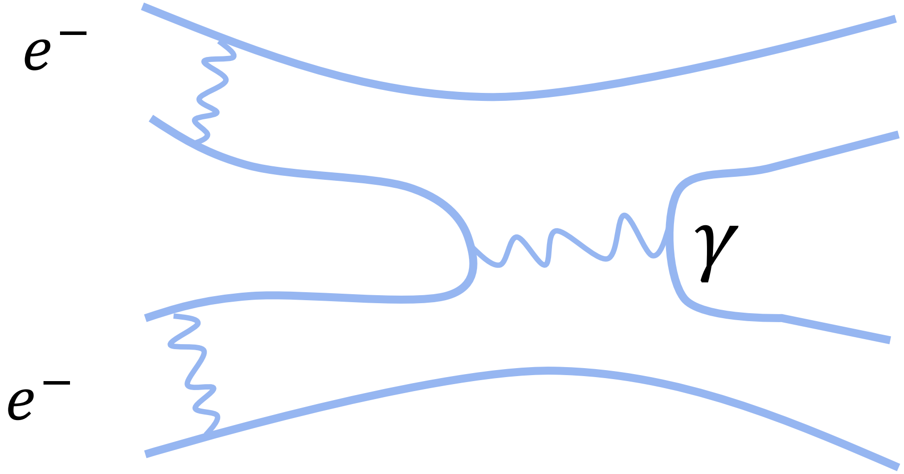
ひもの運動 (2)

素粒子の反応をひもで表す

- 例：電子の散乱
- 素粒子の場合、



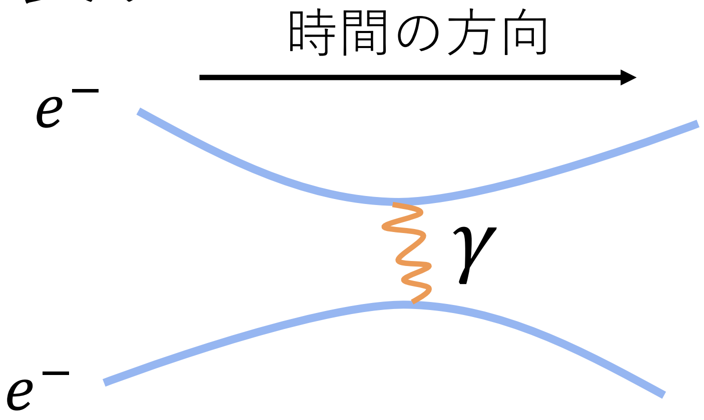
- これを弦理論で書くと、
  - 電子：開弦
  - 光子：開弦



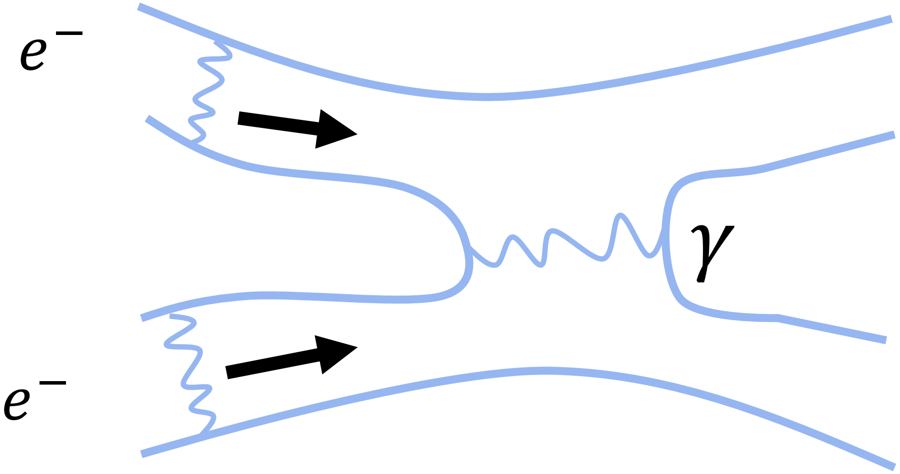
ひもの運動 (2)

素粒子の反応をひもで表す

- 例：電子の散乱
- 素粒子の場合、



- これを弦理論で書くと、
  - 電子：開弦
  - 光子：開弦



D-ブレーン

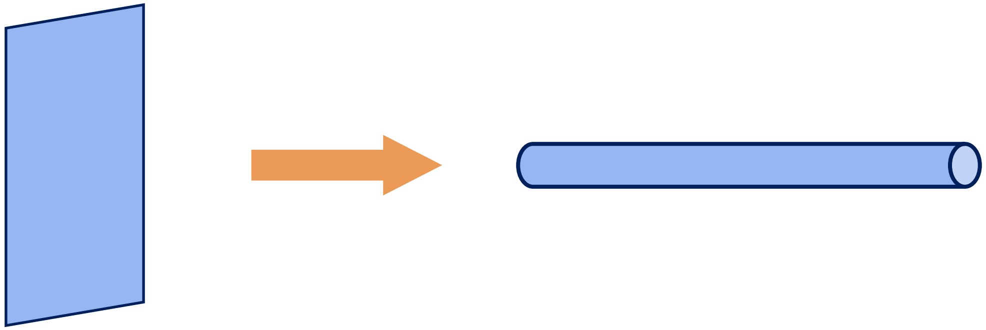
ひも以外にも何かいる!

- 開弦の端は自由には取れない
- D-ブレーン：開弦の端が動ける空間
  - 開弦はD-ブレーンの上を自由に動ける
  - D-ブレーンから離れることは出来ない
  - D-ブレーンは閉弦を吸ったり吐いたりできる
- Dp-ブレーン：空間p次元、時間1次元方向に広がる

標準模型は出せるのか? (1)

超弦理論が正しいと思うと?

- 超弦理論から標準模型が導出できるはず
- 超弦理論：10次元
- 標準模型：4次元



- 10次元時空の一部を「丸める」ことで小さくし、4次元にする (コンパクト化という)
  - 「超弦理論から標準模型が出せるか」という問題は「10次元時空をどうコンパクト化して4次元を出すのか」という問題を経由する必要がある
  - 実際に、ある特殊な方法でコンパクト化をすれば標準模型が出ることは知られている

標準模型は出せるのか? (2)

標準模型は「導出」できるか?

- コンパクト化の方法はどう決まるのか?
  - 宇宙初期には超弦理論がただ存在していて、そこから「勝手に」標準模型になったはず
  - コンパクト化の方法は無数にあり、それを決める方法は分かっていない
- Theory of everything?
  - 超弦理論はコンパクト化の方法によってさまざまな理論(場の量子論)が作れる
  - 超弦理論から作れる膨大な理論の中から、なぜ標準模型が選ばれてこの世界になったのか、未だ誰も知らない…

5. 弦理論の応用

弦理論の応用

超弦理論を使って現実世界を記述する

- 超弦理論から直接標準模型を出すのは難しい
- 超弦理論の性質を上手く使って、現実世界を記述する理論の性質を調べることが出来る
    - 超弦理論は場の量子論と重力理論(一般相対論)を含む
    - 解くのが難しい場の量子論を、重力理論を使って記述できる場合がある、という性質がある
    - AdS/CFT対応
- 様々な応用がある
    - 原子核理論、物性理論(金属などの結晶中の現象)、宇宙論など
- 具体例を見てみよう

例：QCDを解く (1)

QCD

- 「強い力」で記述される、原子核中の理論
- 場の量子論の中でも解くのが難しい

QCDの解き方

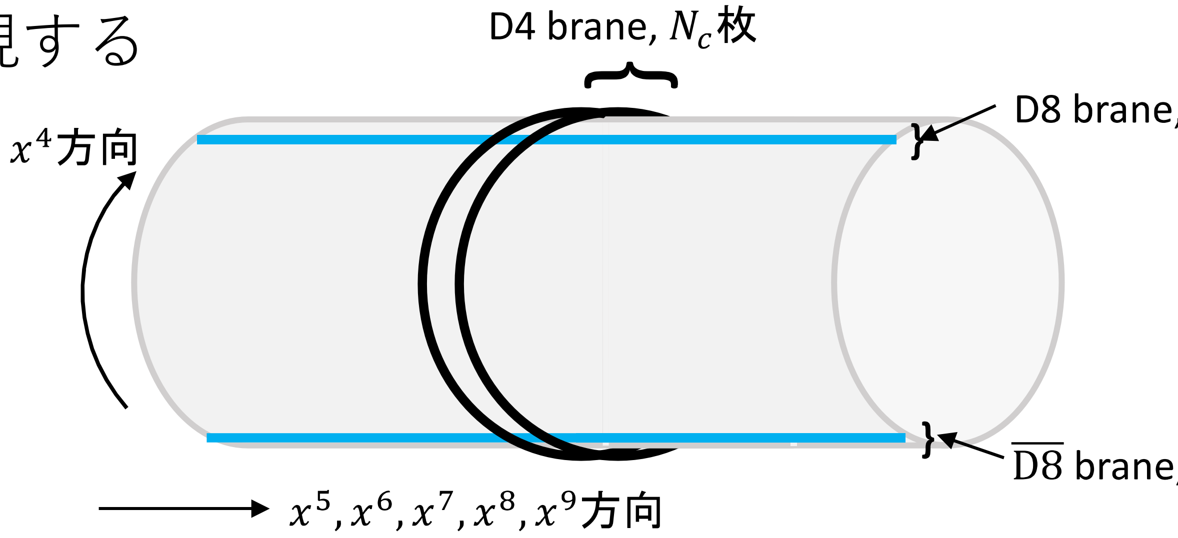
- 格子QCD
  - スーパーコンピュータを使って力業で解く
  - 「富岳」など、最先端のスパコンが使われる
  - とっても大変
- 弦理論を使って簡単に解けないか?

例：QCDを解く (2)

ホログラフィックQCD

- 弦理論を使ってQCDを解く!
- D-ブレーンを上手く並べてその上にQCDを作る
- D-ブレーン上のQCD(場の量子論)を重力理論で書き換える
  - 計算が簡単、基本的には手で計算できる
  - 実験値を上手く再現する

→現実世界に使える!



超弦理論をもっと知るには

文献

- 講談社ブルーバックス
  - 非専門家向けに入門的な科学の話題を扱う新書シリーズ
  - 超弦理論について書いてある本もある
- 「超ひも理論をパパに習ってみた」橋本幸士 著、講談社
  - 漫画版もあります
- 「はじめての〈超ひも理論〉」川合光著、講談社現代新書
  - (ちょっと古いです)
- 雑誌「Newton」
- 他にもいろいろ、書店で探してみるといいかも

画像引用元 (アクセス日 : 2021年6月)

- KEK webサイト : https://www.kek.jp/ja/
  KEK イメージアーカイブ : https://www.kek.jp/ja/publicrelations/imagearchive/
- 周期表の画像 : http://www.chiba-kc.ac.jp/user/~iseri/siryo/atom.pdf

今日伝えたかったこと

この世界は「ひも」でできているかも?

- 重力を量子化できる最有力理論

超弦理論は未だ分かっていないことが沢山ある

- この世界を弦理論から導けるのか?
  - どうやって4次元時空を出すのか?
  - 素粒子の「標準模型」はどうやって出るのか?

- 弦理論の応用
  - 弦理論の性質を利用して現実世界の研究ができる!

- 超弦理論に関する研究が世界中で進められている!