

宇宙はどのようにしてできたか？

広島工業大学

鈴木 貴

2011・12・17

1 なぜ素粒子で宇宙がわかるの？

広大な宇宙を知るためには、極微の世界 – 素粒子の世界 – を調べる以外に方法はない。なぜ、正反対のスケールがつながっているのか？

■ 宇宙とは

- 4次元時空（時間＋空間）*1）：

およそ 137 億年前に「ビッグバン」により誕生し膨張を続けている（1927 年 ハッブル）*2）。膨張は現在加速していることが最近確認された（1997 年）*3）。

- 時空の中に含まれる「もの」：

構成要素	説明	質量比
素粒子	通常物質を作る最小の粒子	4%
暗黒物質	ダークマターとも呼ばれ、質量だけをもつ正体不明の物質	23%
暗黒エネルギー	ダークエネルギーとも呼ばれ、招待不明であるが、宇宙を「加速膨張」させている謎のエネルギー	73%

【Note】上の表の「質量比」とは、宇宙の全質量に占める割合を示す。全体の「96%」が正体不明！！

■ 宇宙の進化と構造を知る方法

方法 1：望遠鏡で遠くを直接観測する

遠くを見るほど過去が見える。（例：太陽は 500 秒前、アンドロメダ星雲は 230 万年前の映像を見ている）

もっと遠くを見れば、ビッグバンまで見えるの？ ところが …

【宇宙の晴れ上がり】ビッグバンから 38 万年後

宇宙の温度が 3000 度にまで冷えて原子が誕生したとき、ようやく光は直進できるようになった。これを、宇宙の晴れ上がりという。それ以前の宇宙は「透明」ではなく、光は直進できなかったため「ビッグバン ～ 38 万年」の間の映像を見ることはできない。

【宇宙マイクロ波背景放射】

現在、「晴れ上がり」当時の光が観測されている^{*4)}。ビッグバンの有力な証拠である。

方法2：素粒子を探る

時間をさかのぼると宇宙の体積は小さくなり、温度が上昇してエネルギーが高い状態になる。

物質がバラバラに壊れ、最終的に素粒子が現れる。

原子よりも小さな世界を探れば、宇宙の晴れ上がり以前の世界を知ることができる。

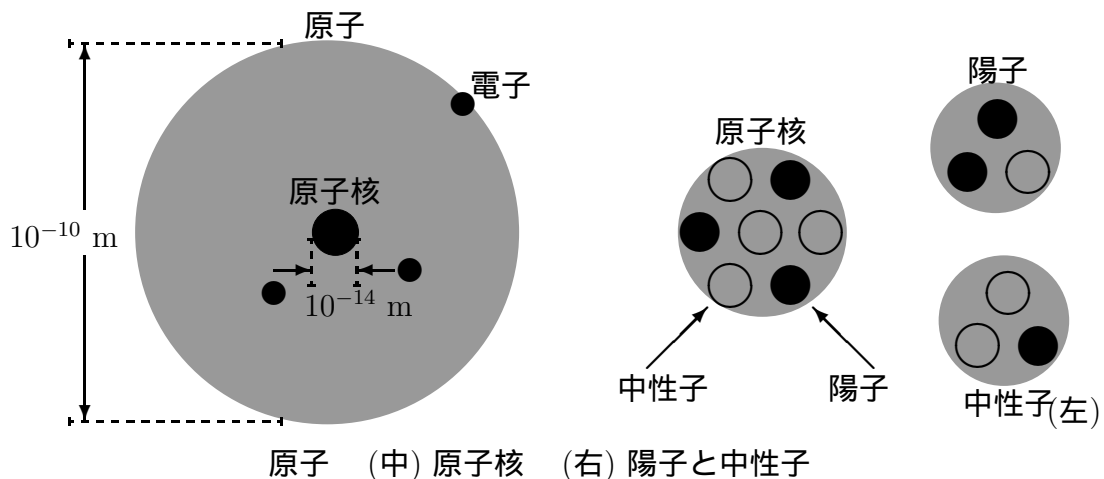
2 宇宙の構成要素 – 素粒子の世界

宇宙に存在するあらゆる物質は何からできているのか？その最小の粒子を「素粒子」と呼ぶ。

あらゆる物質を壊していくと、いろいろな種類の元素(原子)が現れる。しかし、原子は素粒子ではない！原子をさらに壊していくと何が現れてくるのだろうか？

原子の構造

$$\text{原子} \rightarrow \begin{cases} \text{電子：} & \text{レプトンと呼ばれる素粒子} \\ \text{原子核} \rightarrow \begin{cases} \text{陽子} & \rightarrow 3\text{つのクォーク (u, u, d)} \\ \text{中性子} & \rightarrow 3\text{つのクォーク (u, d, d)} \end{cases} \end{cases}$$



素粒子

宇宙にある物質の最小単位は「クォーク」と「レプトン」と呼ばれる2種類の素粒子である。クォークとレプトンには、それぞれ6コずつの粒子があり^{*5)}、あらゆる物質はこれらの12個の素粒子を組み合わせで作られている(表1, 表2を参照してください)。

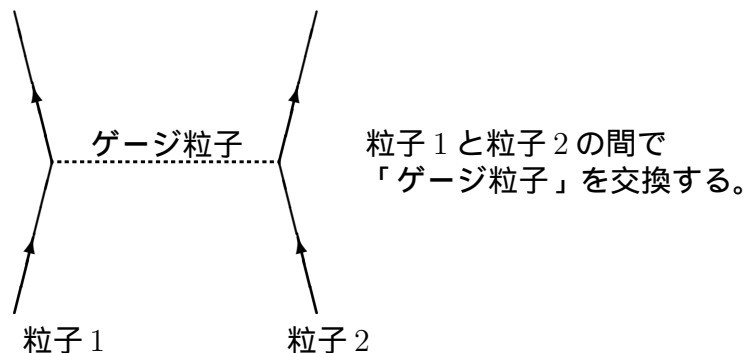
【Note】 暗黒物質は、クォークでもレプトンでもない未知の物質である。

3 宇宙を支える力

宇宙にある物質は素粒子が結びついて作られ、それが宇宙全体を形作っている。素粒子どうしはどのような力で結びついているのか？力を理解することが、宇宙の解明の鍵を握る。

■ 力が働くメカニズム

力は、粒子の間で力を伝達する粒子(ゲージ粒子という)を交換することで発生する^{*6)}。



■ 宇宙を支える4つの力

現在、宇宙には4つの力(相互作用)が存在することが知られている。それぞれの力ではゲージ粒子が異なり、力の強さも到達距離もまったく異なる。

(詳細は、表3を参照してください。)

(i) 重力：ゲージ粒子は「重力子」(未発見)

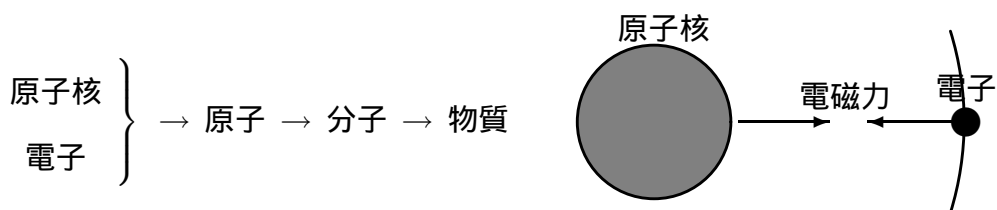
「万有引力」とも呼ばれ、質量をもつ粒子どうしに働く引力のこと。非常に弱い力であり、天体ほどの質量にならないと顕著にならない。しかし、大規模な宇宙の構造を支配しているのは重力である。

物質 → 天体 → 銀河 → 銀河団 → 超銀河団

一般相対性理論 (アインシュタイン) によれば, 重力の本質は「時空の歪み」であり, 宇宙の質量が宇宙の時空構造を決めてしまう。

(ii) 電磁力: ゲージ粒子は「光子」*7)

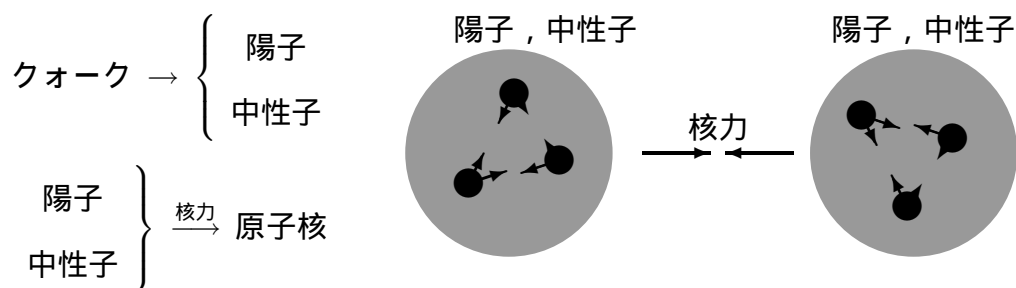
電荷をもつ粒子どうしに働く力であり, 原子核と電子を結びつけて原子を作るときの力である。



重力を除けば, 普段私たちが体験する力, たとえば物を押す力や摩擦力, 風の力などはすべて電磁力である。

(iii) 強い力: ゲージ粒子は「グルーオン」

クォークどうしを結びつけて陽子や中性子を作る力であり, さらに陽子や中性子を結びつけて原子核を作る「核力」*8) のもとになっている。



(iv) 弱い力: ゲージ粒子は「W 粒子, Z 粒子」

素粒子の種類を変える作用を引き起こす。たとえば,

$$u \text{ クォーク} \longleftrightarrow d \text{ クォーク} \quad \text{電子} \longleftrightarrow \text{ニュートリノ}$$

この結果 β 崩壊が起こり, 中性子が陽子に姿を変える *9)。

物質を壊してバラバラにするためには, これらの結合力に逆らって素粒子どうしを引きちぎらなければならない。

大きなエネルギーが必要

初期の宇宙は温度が高く, これらの力に打ち勝つだけの十分なエネルギーに充ちていた。

4 時間をさかのぼる – 宇宙の晴れ上がり以前を探る

望遠鏡で観測不可能な「宇宙の晴れ上がり」以前の宇宙では、何が起きていたのか？時間をさかのぼって宇宙創成の瞬間に迫ってみよう。

時間	温度 (K)	できごと
38 万年	3000	原子 → 物質 → 恒星 → 銀河 の形成を経て、現在の宇宙 宇宙の晴れ上がり
38 万年	3000	電磁力を引きちぎる 原子核 (軽い元素) と電子が、電磁力に打ち勝ってバラバラに存在している。この時期の宇宙には光子が大量に存在しているが、原子核や電子と相互作用して直進できない。これらの原子核は、3 分～20 分の間に核力につかまって形成された。
3 分	10^9	核力を引きちぎる 陽子と中性子が、核力に束縛されずバラバラに存在している。さらに、電子やニュートリノ、光子も宇宙を満たしている。
10^{-6} 秒	10^{13}	強い力を引きちぎる クォークが強い力に打ち勝って、バラバラに存在している。素粒子 (クォークとレプトン) が宇宙を満たしている時期である。
10^{-11} 秒	10^{15}	電磁力と弱い力が 1 つの力に統一される 電磁力と弱い力が区別できなくなり「電弱力」として統一される。宇宙に存在する力は、重力、強い力、電弱力の 3 つである。

【Note】

この時期までの宇宙に存在する物質の振る舞いは、「標準理論」と呼ばれる理論に基づき、理論的かつ実験的にほぼ解明されている。なお、 10^{-12} 秒 (10^{16} K) の宇宙を再現する実験が開始された^{*10)}。

一方、時空の構造 (重力) の理論は、「一般相対性理論」が唯一のものである。

5 ビッグバンとそれ以前

さらに時間をさかのぼると ...

標準理論が適用できなくなる。

いくつかのシナリオが考えられているが、残念ながらここからは未解決！

時間	温度 (K)	できごと
10^{-32} 秒	?	インフレーションの終わり：宇宙の加熱（これがビッグバン？） インフレーション期：空間が急激に膨張し、宇宙の体積は 10^{30} 倍以上になる。
10^{-35} 秒	10^{28}	インフレーションの始まり
10^{-38} 秒	10^{29}	強い力と電弱力が1つの力に統一される 電弱力と強い力が区別できなくなり、宇宙の力は重力と「大統一力」の2つになる。また、クォークとレプトンの区別もなくなり、素粒子は唯一の物質粒子になる。
10^{-43} 秒	10^{32}	重力と大統一力が1つの力に統一される 完全なる統一：重力も統一され、時空と物質の区別すらできなくなる。
宇宙創成	?	「無」からの創成 ... 一体何が？

6 宇宙の真の姿 – 宇宙は10次元 !?

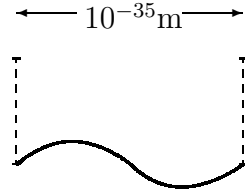
宇宙創成直後 (10^{-43} 秒 まで) の宇宙の姿はどのようなものだったのか？

この時期の宇宙を司る物理の法則は？時空自身が量子的な揺らぎ^{*11)}によって「ぐにゃぐにゃ」になっているため、重力の理論（一般相対性理論）の適用限界

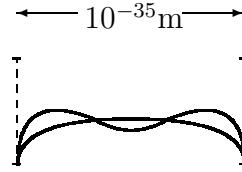
「超弦理論（スーパーstring理論）」^{*12)} が現時点での最有力候補

超弦理論

すべての物質の最小単位は粒子ではなく、 10^{-35} m 程度の長さの「弦 (ひも)」である。



開弦



閉弦

【Note】現在の加速器で確認できる長さのスケールは 10^{-18} m 程度であり、そのスケールで弦を見ると、弦は小さな点粒子として観測される。私たちは、これを「素粒子」として観測している。

弦の種類	対応する素粒子
開弦	物質粒子：クォーク，レプトン 力の伝達粒子：光子 (電磁力)，グルーオン (強い力)， W 粒子と Z 粒子 (弱い力)
閉弦	重力の伝達粒子：重力子

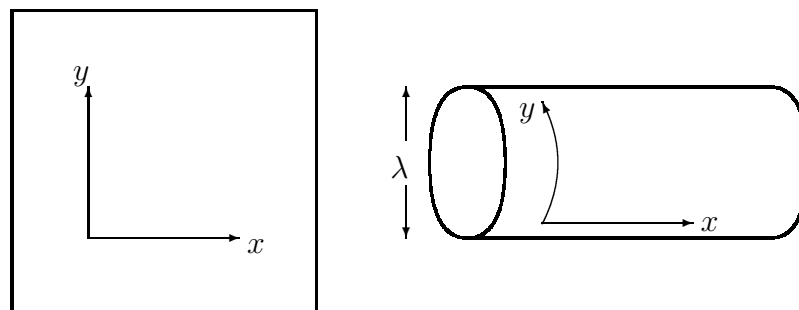
超弦理論の予言

弦が安定に存在するためには、宇宙は「10 次元」に限られる！

4 次元以外の 6 次元はどこにあるの？

■ コンパクト化

6 次元は観測できないほどに小さく丸まっている。



この図は、開いた2次元空間(左)の y 方向だけがコンパクト化されて、サイズが λ 程度の小さな領域に丸められている。その結果、1次元(x 方向)だけが大きな次元として残っている。

λ が充分小さければその方向は見えず、1次元空間として観測される。

■ 膜宇宙 (ブレンワールド) シナリオ：最新の考え方

超弦理論の構成要素には「弦」だけでなく、特別な性質をもつ4次元の「膜(ブレン)」も含まれていた！特別な性質とは…

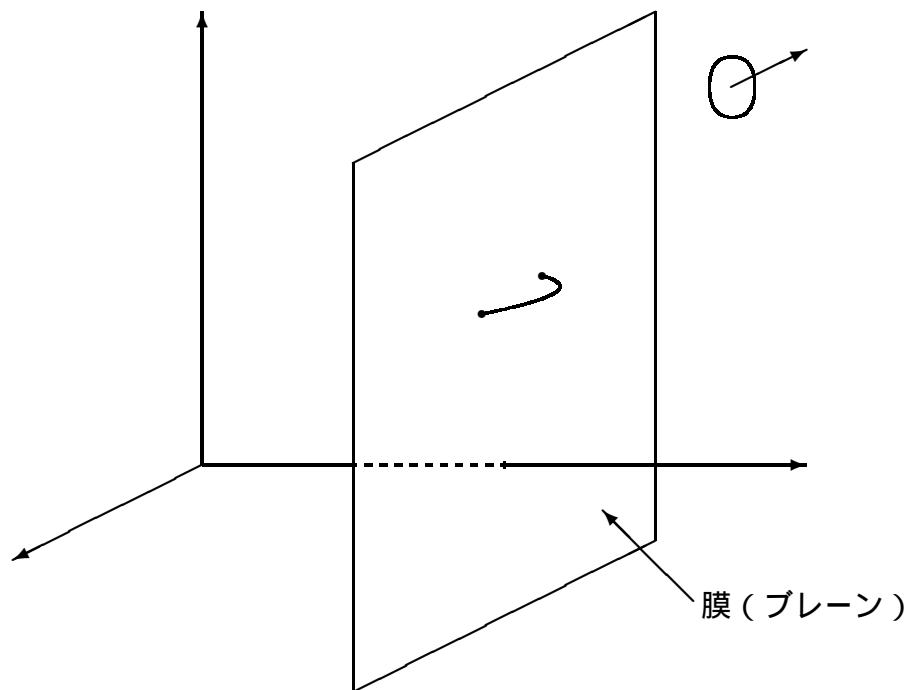
10次元時空の中に浮かぶ4次元の膜で、その膜にエネルギーが局在し、「開弦」の端点が貼りついている。

開弦はその膜の中に閉じ込められていて、10次元を動くことはできない。

膜宇宙のシナリオ

宇宙に存在するあらゆる「物質」は開弦から作られているため、ブレンから出ることができない。また、光などのゲージ粒子も開弦なのでブレンの中しか移動することができず、ブレンの外を知覚することができない。

観測されている「4次元宇宙」はこのブレンではないか!?



A 物質をつくる素粒子の種類

現在の物理学 (標準理論) に登場する素粒子を表 1 , 表 2 に示す。これらの粒子はすでに実験的に発見されている。

表 1: 物質粒子 (クォーク族)

	第 1 世代		第 2 世代		第 3 世代	
クォーク名	u	d	c	s	t	b
電荷	$+\frac{2}{3}e$	$-\frac{1}{3}e$	$+\frac{2}{3}e$	$-\frac{1}{3}e$	$+\frac{2}{3}e$	$-\frac{1}{3}e$
質量	10	20	3000	200	3.7×10^5	9400

表 2: 物質粒子 (レプトン族)

	第 1 世代		第 2 世代		第 3 世代	
レプトン名	電子 (e)	ν_e	ミュー粒子 (μ)	ν_μ	タウ粒子 (τ)	ν_τ
電荷	$-e$	0	$-e$	0	$-e$	0
質量	1	$< 10^{-4}$	210	< 1	3600	< 140

【注】

- 「電荷」に現れる e は電気素量と呼ばれ、電子の電気量 (の絶対値) である。
- 「質量」の値は、電子の質量を「1」とした値である。
(電子の質量は $m_e = 9.1 \times 10^{-31}$ kg である。)
- レプトンの各世代に含まれる ν はニュートリノであり、それぞれ電子ニュートリノ (ν_e)、 μ ニュートリノ (ν_μ)、 τ ニュートリノ (ν_τ) である。
- クォーク、レプトンとも、各世代に含まれる素粒子どうしは、「弱い力」によってお互いに移り変わる。
- 第 2, 3 世代の粒子は重く不安定で、軽い第 1 世代の粒子に向かって崩壊する。
通常の物質は、安定な第 1 世代の粒子だけで構成されている。

B 4つの力

「現在」自然界にある力を表3に示す。

表 3: 自然界に存在する力

	ゲージ粒子	力の強さ	到達距離	性 質
重力	重力子	10^{-40}	∞	質量をもつ粒子間に働く引力であり、時空の構造に密接に関係する。
電磁力	光子	1	∞	電荷をもつ粒子間で作用する。
強い力	グルーオン	100 ~ 1000	$\sim 10^{-15}$ m	クォークどうしを結びつける力である。レプトンには作用しない。
弱い力	W 粒子, Z 粒子	10^{-3}	$\sim 10^{-16}$ m	表 1, 2 の各世代に含まれる 1 つの粒子を、もう 1 つの粒子に変える。

【注】

- ゲージ粒子は 2 つの素粒子の間で交換される粒子であり、この粒子のキャッチボールによって力が伝わる。
- 表中の「力の強さ」は、電磁力の強さを「1」とした値である。

力の統一を表 4 に示す。

【Note】力が統一されるとは、ゲージ粒子が区別できなくなることであり、同時にその力が作用する対称 (物質粒子や時空) にも差異がなくなることである。つまり、力の統一は物質の統一と同じことである。

表 4: 力の統一

時刻 (s)	$\sim 10^{-11}$	$10^{-11} \sim 10^{-38}$	$10^{-38} \sim 10^{-43}$	$10^{-43} \sim$
力 (相互作用)	重力			超弦理論
	強い力		大統一	
	電磁力	電弱力		
	弱い力			

C 補 足

- *1) 相対性理論によれば、時間と空間とは別のものではなく、お互いに影響を及ぼし合う。たとえば、速く動いている乗りものの中や重力が強い場所 (これらは空間的な事柄) では、時間の進み方が遅くなる。このように、時間と空間は切り離せるものではなく、1つの対象「時空」として扱わなければならない。
- *2) 観測によって、遠くの銀河ほど速いスピードで遠ざかっていることが確認された。距離 L のところにある銀河の後退スピード v は、 $v = H_0 L$ で与えられる。これをハッブルの法則という。比例定数 H_0 をハッブル定数といい、最新の観測によれば $H_0 = 22.6 \text{ km}/(\text{s} \cdot 100 \text{ 万光年})$ である。つまり、銀河が地球から 100 万光年遠くなるにつれて後退スピードは 22.6 km/s だけ速くなることを示している。
- *3) およそ 50 億年前に、宇宙が減速膨張から加速膨張に転じたことの証拠が発見された。2011 年のノーベル賞は、この発見者に与えられた。
- *4) 宇宙のあらゆる方角から降り注いでいるマイクロ波のことである。その波長はガモフ (ビッグバン理論の提唱者) が予言した値とほぼ一致していたことから、ビッグバン仮説の有力な証拠とみなされた。マイクロ波とは、波長が 10 cm 程度の「電磁波」である。
- *5) クォークはゲルマンによって 1964 年に予言された。ゲルマン自身は 3 つのクォークを想定したが、クォークが 6 個あることを予言したのは小林誠と益川俊英である (1973 年)。1995 年にトップクォークが発見されて、すべてのクォークが出そろい、両氏は 2008 年にノーベル賞を受賞した。
- *6) このような力の伝達メカニズムは、「ゲージ理論」と呼ばれる理論の帰結である。現在の素粒子物理学はゲージ理論が土台となっている。
- *7) 光の正体は電磁波であるとともに、「光子」と呼ばれる粒子の集まりでもある。1905 年にアインシュタインによって指摘された。
- *8) 1930 年代に入ると中性子が発見され、原子核の構造が明らかになった。当時は重力と電磁力しか知られていなかったため、原子核という狭い領域の中に、陽子どうしがなぜ電気力の反発力に打ち勝って結びついていられるのか、また電気をもたない中性子もなぜ飛び散らないのかが大きな疑問であった。湯川秀樹は 1934 年に新たな力として核力を提案し、それを伝える「中間子」を予言した。その後、1960 年代にクォークが理論的に予言されると、本質的な力は「強い力」であり、核力はその 2 次的な力であることが理解された。中間子は 2 個のクォークでできている。

- *9) 中性子を作るクォークは (u, d, d) , 陽子は (u, u, d) で作られている。中性子の中の1つのdクォークがuクォークに変化することで, 中性子が陽子に変わる。
- *10) フランスとスイスの国境にまたがる CERN 研究所の大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) が 2008 年から運転を開始し, 標準理論に現れる素粒子の中で唯一の未発見の粒子である「ヒッグス粒子」を探している。円周 27 km の加速器で, 陽子どうしを光速の 99.999999% に加速して正面衝突をさせる。さらに, 標準理論を超える現象, たとえば暗黒物質や 5 次元目の時空をも発見できるかも !?
- *11) 量子的な揺らぎとは, 微視的な世界に必然的に表れる「振動」もしくは「ぼやけ」のようなもの。たとえば電子のような素粒子は, 私たちが想像する「粒」ではなく, 絶えず振動してある程度の幅をもって揺らいでいる。時空も微視的に見れば, 時空の「点」が揺らいでぼやけている。このような揺らいだ時空を取り扱う理論は, いまだにできていない。
- *12) もともとは, 1960 年代に南部陽一郎が「強い力」のモデルとして提唱した理論である。その後, 閉弦が重力子と見なせることが明らかになり, 現在では, 4 つの力の統一理論の最有力候補である。