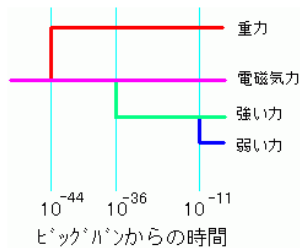


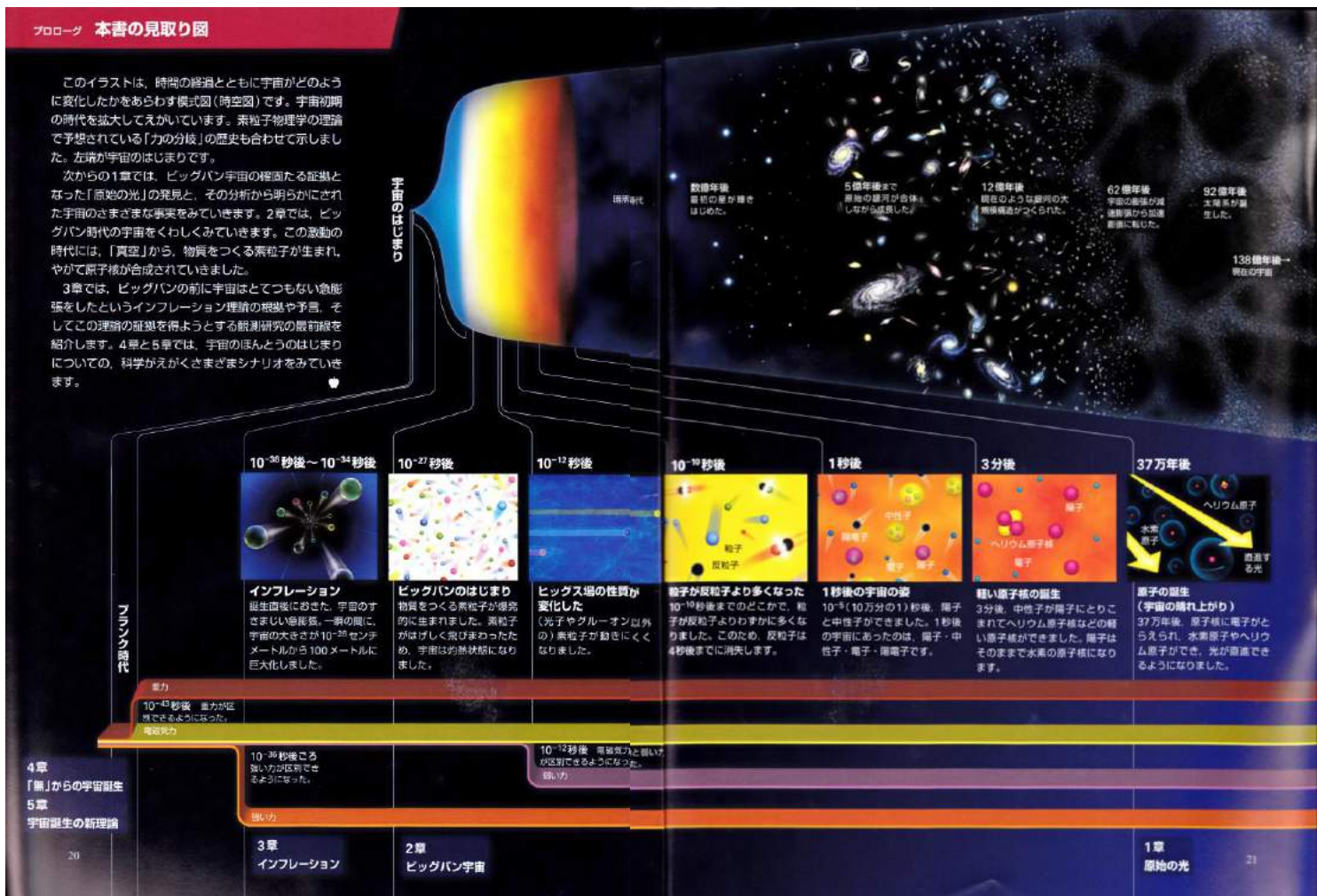
●最新量子論

万物の理論とは、自然界に存在する4つの力、すなわち電磁気力・弱い力・強い力・重力を統一的に記述する理論（統一場理論）の試みである。本来、これらの4つの力は、1つの力であったものが分化して現在のような力になったとされている。

このうち、電磁気力と弱い力はワインバーグ・サラム理論（電弱理論）によって電弱力という形に統一されている。電弱力と強い力を統一的に記述する理論は大統一理論（GUT: *Great Unification Theory*）と呼ばれ、現在研究が進められている。最終的には重力も含めた全ての力を統一的に記述する理論が考えられ、これを万物の理論または超大統一理論（SUT; *Super Unification Theory*）という。

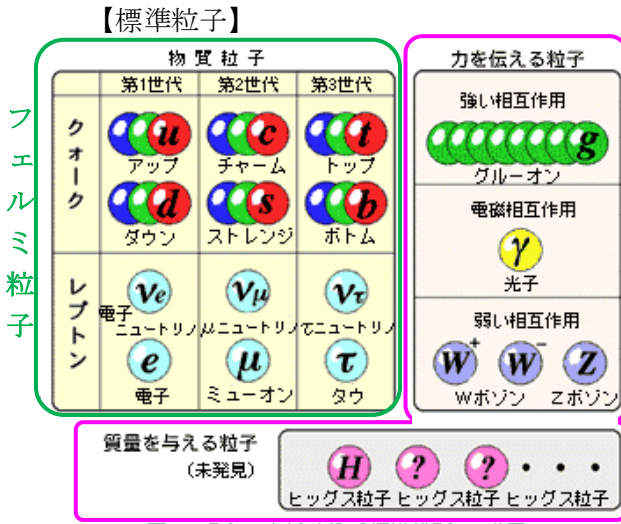


力	強さ[N]	影響範囲[m]	ゲージ粒子
重力	10^{-40}	無限大	グラビトン(重力子)
電磁気力	10^{-2}	無限大	フォトン(光子)
強い力	10^0	10^{-15}	グルーオン
弱い力	10^{-5}	10^{-18}	ウィークボゾン(W^{\pm}, Z^0)



●素粒子の標準理論

素粒子物理学において、強い相互作用、弱い相互作用、電磁相互作用の3つの基本的な相互作用を記述するための理論のひとつである。ワインバーグ・サラム理論や量子色力学やヒッグス機構を含む理論の総称である。



- ・ハドロン：陽子・中性子・中間子
 - ・フェルミオン：物質を構成する粒子(クォークとレプトンの2種)
 - ・ゲージ粒子：素粒子間の相互作用(力)を伝え運ぶ粒子
注)左の図には、重力子が入っていません
 - ・ヒッグス粒子：素粒子に質量を与える
- 実験で確認されているいろいろな素粒子反応は、今日では「標準模型」と言われている理論でうまく説明できる。標準模型の中心となっているのは、電磁気力と弱い力の統一理論(グラشوウ・ワインバーグ・サラム理論)とそれぞれ6種類あるクォークと軽粒子(レプトン)のパラメーター(質量、電荷など)

図1 現在の素粒子像「標準模型」の世界

であり、これにより、電磁気力や弱い力による反応の確率などはすべて高い精度で計算可能である。また、量子色力学(QCD)を適用すれば、高いエネルギーでのクォークやグルーオンの関与する反応についても正確に計算できる。標準模型の予言と矛盾するような実験事実は今のところ存在しない。標準模型に登場する粒子で最後まで発見されずにいた中性のヒッグス粒子も2012年に発見され、すべての素粒子が出そろった。

【標準理論の限界】

- ・四つの力のうち、電磁気力、弱い力、強い力の三つをヤン=ミルズ理論に基づき量子論的に記述することに成功している。しかし、残りの一つである重力についてはその記述を欠いている。言い換えれば、重力を媒介するとされる重力子は標準模型の粒子のリストに含まれていない。
- ・陽子崩壊が予言されるが、カミオカンデなどの実験で陽子崩壊を実証するための実験が続けられているが、2014年現在、実験的証拠は得られていない。
- ・電荷を持つ軽粒子(レプトン)はなぜ3種類あるのか？
- ・ダウンクォークの電荷は、なぜ電子の電荷の1/3なのか？
- ・アクシオンと呼ばれる新しい粒子の存在が予言される。
- ・1998年に神岡鉱山に設置されたスーパーカミオカンデによりニュートリノ振動が発見されたが、これは質量を持ったニュートリノが存在することの証明となっている。標準模型ではニュートリノの質量は厳密に0であるため、この実験結果は標準模型には何らかの修正が必要であることを示すものである。
- ・現在の宇宙のエネルギー密度の約1/4を暗黒物質が占めていることが明らかになっているが、標準模型には暗黒物質の候補となる粒子が存在しない。そのため、暗黒物質の正体を素粒子に求める場合は標準模型の拡張が必要である。
- ・標準模型に含まれるフェルミオンは粒子と反粒子の2種類に分類される。粒子と反粒子はほぼ対等な存在であるが我々の住む宇宙では粒子の量が反粒子に比べて多い。この非対称性はバリオン数の非対称性として知られている。標準模型はヒッグスとフェルミオンの結合を通してCP対称性の破れを引き起こすことが可能であり、これにより粒子・反粒子数の非対称性を生み出せることが知られているが、標準模型の持つ位相だけでは十分なバリオン数を作り出すことが出来ないことが知られている。

表1.素粒子の質量

粒子のなまえ	質量
クォーク	
アップ	3
ダウン	6
ストレンジ	120
チャーム	1200
ボトム	4200
トップ	174000
レプトン	
電子ニュートリノ	~0
ミューニュートリノ	~0
タウニュートリノ	~0
電子	0.5
ミュー	106
タウ	1777

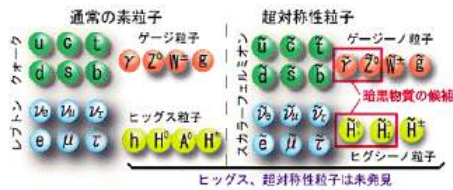
単位は百万電子ボルト(MeV)

●大統一理論

電磁気力と弱い力の統一理論と強い力の理論である量子色力学 (QCD)は、すでにそれぞれが独立に確立しているが、この両者を統一するのが、大統一理論である。大統一理論は、クォークと軽粒子が、対称的に分類できること、双方の理論がともにゲージ不変性を持っていることに着目して作られている。大統一理論には、簡単なものから、複雑化されたものまでいくつかの種類がある。大統一理論が予言する特徴的な現象は非常に高エネルギーの反応におけるものがおもで、加速器実験での実証は困難である。また、大統一理論は、陽子の崩壊を予言するが、これもまだ実証されていない。

●超対称性理論

統一理論においては、電磁気力と弱い力が破れるエネルギースケールに対応するヒッグス粒子が予言される(中性のヒッグス粒子を2012年に発見)が、これを単純な素粒子と考えると、その質量の大きさに別の観点から問題が生じる。それを解決する方法として、「超対称性理論 (SUSY)」や複合粒子模型が提唱されている。前者は、新しい対称性(超対称性)を仮定するもので、これは、SUSY粒子と呼ばれる大量の未発見の粒子の存在を要求する。後者は、ヒッグス粒子などが、単純な素粒子ではなく、いくつかの素粒子が集合してできたものとする考えである。双方とも、一応もってもらいたい理論であるので、実験的に実証しようという努力が多くなされているが、今のところ、決定的な手がかりは得られていない。



●超ひも理論 (超弦理論)

物質の基本的単位を、大きさが無限に小さな0次元の点粒子ではなく、1次元の弦(超ひもの大きさは 10^{-35} [m])であると考える弦理論に、超対称性という考えを加え、拡張したもの。超ひも理論、スーパーストリング理論とも呼ばれる。

《現在考えるいろいろな素粒子の全容》

表・話・編・歴		物理学における粒子の一覧		[隠す]
素粒子	フェルミ粒子	クォーク	アップ(u)・ダウン(d)・チャーム(c)・ストレンジ(s)・トップ(t)・ボトム(b)	
		レプトン	電子(e ⁻)・陽電子(e ⁺)・ミュー粒子(μ [±])・タウ粒子(τ [±])・ニュートリノ(ν _e ・ν _μ ・ν _τ)	
	ボース粒子	ゲージ粒子	光子(γ)・ウィークボソン(W [±] ・Z)・グルーオン(g)	
		スカラー粒子	ヒッグス粒子(H ⁰)	
	その他	ゴースト場		
仮説上の素粒子	超対称性粒子	ボシーノ	ゲージノ:フォティノ・ウィーノ・ジーノ・グレイノ・グラビティノ ヒグシーノ・ニュートラリーノ・チャージーノ・アクシーノ	
		スフェルミオン	スクォーク・スレプトン	
	ゲージ粒子	重力子・Xボソン・Yボソン・Wボソン・Zボソン		
	位相欠陥	モノポール・宇宙ひも		
	その他	アクシオン(A ⁰)・ディラトン・マヨロン(J)・ステライルニュートリノ・プレオン・タキオン		
複合粒子	ハドロン	バリオン/ハイペロン	核子(p・n)・反核子(p̄・n̄)・Δ・Λ・Σ・Ξ・Ω	
		中間子/クォーコニウム	π・K・ρ・J/ψ・Y・η・φ・ω・θ・B・D・T	
		異種原子	ポジトロニウム・ミューオニウム・バイオニウム・プロトニウム	
	その他	原子核・ハイパー核・ダイクォーク・原子・分子・イオン・超原子・超分子		
仮説上の複合粒子	異種ハドロン	異種バリオン	ペンタクォーク・ダイバリオン	
		異種中間子	テトラクォーク・ハイブリッドメソン・グルーボール	
	その他	中間子分子・ボメロン		
準粒子		ダヴィッドソフリトン・励起子・マグノン・フォノン・プラズモン・ボラリトン・ポーラロン・ロトン		

標準理論を超えるためには

2012年8月31日

標準理論最後の立役者であるヒッグス粒子と見られる粒子が見つかったことを受け、加速器を使った高エネルギー物理学の研究は、標準理論を超える物理の探索へと広がってゆきます。今回のハイライトでは、標準理論の何が超えられなければならないのかをとりあげます。

標準理論は、これまでに加速器によってその存在が確かめられた素粒子の性質や、「電磁気力」、「弱い力」、「強い力」の3つの力によって引き起こされる素粒子反応の法則をまとめたものです。また、それら3つの力にも、関係する素粒子が存在するとした理論で、その存在も加速器実験により確かめられています。

更に標準理論では力を伝える素粒子たちはもともと質量がゼロであることが要求されます。しかし実際には弱い力を担う素粒子は陽子の約80倍～90倍も重い素粒子です。この解決策として標準理論には2008年にノーベル物理学賞を受賞された南部博士の「自発的対称性の破れ」を介して質量を得るようになったとする「仕組み」が組み込まれています。この「仕組み」が働いている証拠となるのがヒッグス粒子の存在でした。弱い力を伝える素粒子たちに質量を与える仕組みは「ヒッグス機構」と呼ばれます。弱い力の素粒子たちの質量の関係はヒッグス機構により予測することができ、その値は実験値とよく一致しています。

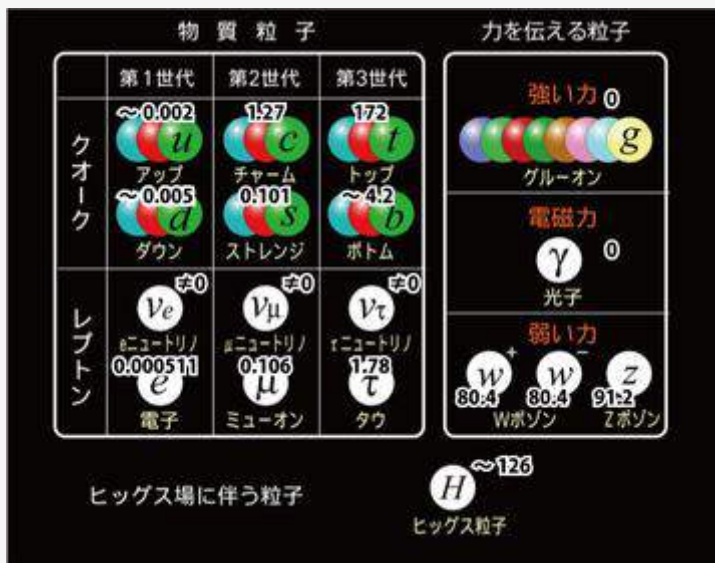


図1 標準理論に現れる素粒子の表。数字は10億電子ボルト(GeV)を単位として表した素粒子の質量。ニュートリノにも質量があることがわかってはいるが、その値はまだ決定されていない。質量がゼロであるのは、光子とグルーオンだけである。

電子などのレプトンやクォークに関しては、それぞれの粒子とヒッグス場との反応の大きさ(結合)である「湯川結合」によりその質量が決まると考えています。湯川結合の「湯川」は、1949年に日本人として最初のノーベル賞を受賞された湯川秀樹博士に由来します。図1は電子やクォークの質量をまとめたものです。世代数が大きくなるにつれて質量が大きくなる傾向が見てとれます。電荷を持っている素粒子のなかで、一番質量が小さいのは電子です。一方、現在観測できる素粒子で一番質量が大きいのはトップクォークで、トップクォークの質量は電子の約33万7千倍です。何故33万7千倍なのか?と

の問いに対して、標準理論はトップクォークの湯川結合が電子のそのの 33 万 7 千倍だからとの答えにとどまります。標準理論を超えるためには、まず、それぞれの素粒子の湯川結合の大きさを測定し、この考えを検証する必要があります。

そもそも、何故世代が存在するのかを標準理論は扱っていません。小林・益川理論によれば、少なくとも 3 世代あれば、クォークが関係する反応に関して物質と反物質の性質に差異が生じることが指摘され、実際に KEKB ファクトリーの Belle(ベル)実験や、米国 SLAC 国立加速器研究所の PEP-II(ペップ・ツー)加速器で行われた BaBar(ババー)実験により、小林・益川理論が実証されました。標準理論には、3 世代版の小林・益川理論が取り込まれていますが、ほぼ同じパターン(世代)が 3 つ組み込まれる必然性の理由は明らかになっていません。

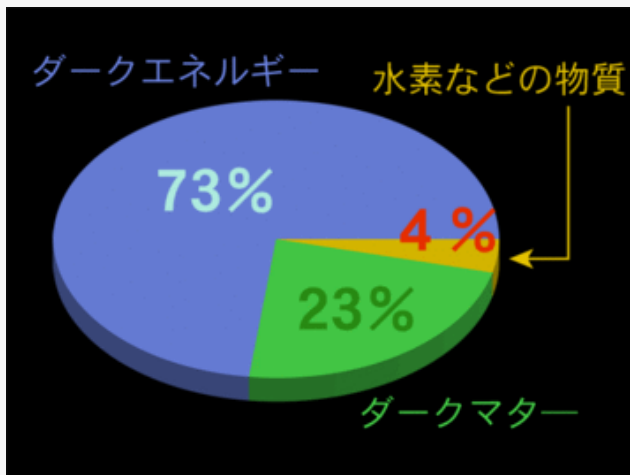


図2 標準理論に現れる素粒子は、全宇宙の 4%しか占めていないことがわかっている。残りの 96%は、標準理論に登場しない未知の物質やエネルギーで構成されている。

もうひとつの標準理論の明らかな不備は、天文観測からその存在がほぼ明らかとされているダークマターに相当する素粒子が、この理論には現れていないことです。ダークマターが素粒子として存在するならば、それには強い力や電磁気力が働きません。また、太陽系は天の川銀河の中で約秒速 250km/秒の速さで回転しており、銀河の回転がほぼ一定の速さであることからダークマターも我々の近辺では同程度の速度で飛びまわっていると考えられます。この秒速 250km/秒という速度は、宇宙を漂っている粒子としては比較的遅いため、高速度で漂う粒子を「ホット(熱い)粒子」と呼ぶのに対して、ダークマターは「コールド(冷たい)粒子」と呼ばれます。標準理論のなかで、強い力も電磁気力も感じない素粒子の典型はニュートリノなので、ニュートリノがダークマターの候補と考えられた時期もありました。しかし、宇宙全体のニュートリノの量の試算や、ニュートリノは「ホット粒子」に分類されるなどのため、今ではニュートリノはダークマター候補とならないことがわかっています。結局、標準理論には、ダークマターの役割を担う素粒子が現れておらず、天文観測の結果に答えるためには、標準理論の素粒子表を拡大する必要があります。

ダークマターが素粒子として存在するならば、十分なエネルギーがあれば加速器によって直接生成することができます。LHC 実験による重い新粒子の発見という形で、素粒子表にダークマターが加わる可能性の研究が精力的になされています。ダークマターに相当する素粒子の発見は、それは即ち、標準理論を超える理論構築の第一歩となります。

光速より早い粒子：タキオン

光速でのみ走る粒子：光子（質量ゼロ）、グルーオン

光速より遅い粒子：レプトン[電子・ニュートリノなど6種]、クォーク[6種]、Wボゾン・Zボゾン、ヒッグス粒子、反粒子、超対称性粒子(SUSY)、X粒子、重力子

素粒子物理の新たな世界

・標準模型を覆す、第五の力について、情報、コメント求む

2011年4月9日、朝日新聞の記事ですが

米フェルミ国立加速器研究所(イリノイ州)は7日、同研究所の大型加速器テバトロンで、[現代素粒子物理学の枠組みである「標準模型」で想定されない全く未知の粒子が見つかった可能性がある](#)、と発表した。自然界にある4種類の力以外の力の存在を示唆しており、確認されれば、私たちの自然観を変えるノーベル賞級の発見となる。

自然界には、比較的なじみのある重力や電磁力に加え、原子核の中で陽子や中性子を結びつける「強い力」と、原子核の崩壊を起こす「弱い力」と計四つの力があると考えられる。標準模型は重力を除く三つをうまく説明し、反する現象がほとんど見つからないことから、自然の状態を説明するのに都合がいいと考えられている。ところがテバトロンの実験で、トップクォークと呼ばれる素粒子よりやや軽い質量(140ギガ電子ボルト程度)を持ち、[「第5の力」ともいべき未知の力の特徴がある粒子の存在を示すデータが得られた](#)。

この粒子は質量の起源とされる「ヒッグス粒子」、宇宙の質量の約2割を占める暗黒物質の候補「超対称性粒子」といった存在が想定されながらも未発見の粒子とは別だ。

現在99.93%の確率で確認しているが、素粒子物理学の慣例で確率99.9999%で確認しないと「発見」と見なされないため、テバトロンの実験チームは、ヒッグス粒子探しなどで競う欧州の大型加速器LHCのチームとも協力してデータを積み重ね、確認を目指す。

・