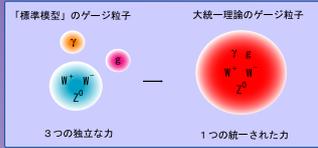


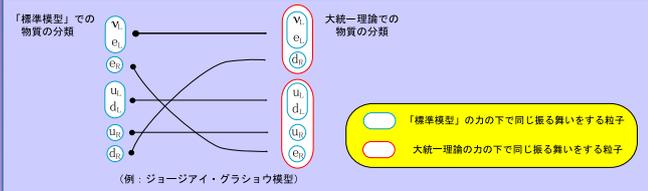
# 力の統一と超対称性

## 大統一理論

大統一理論では、3つの力が1つの力に統一される



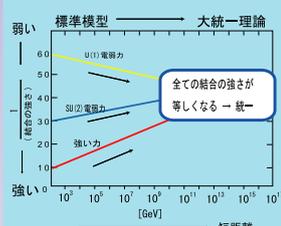
大統一理論では、物質の種類も統一されていく



「標準模型」では、物質間に働く電磁気力、弱い力、強い力は、それぞれゲージ粒子の媒介として統一に理解されています。ただし、「標準模型」においては、3つの力はそれぞれ独立な力で、それぞれの力に応じて3種類のゲージ粒子が存在します。これらの3つの力を1種類のゲージ粒子の媒介による一つの力として説明しようという考え方が大統一理論です。

しかしながら、現在分かっている3つの力は、それぞれ強さが大きく異なっており、とても同じ一つの力として説明出来るように見えません。この点については次のように考えられています。量子力学を考えると、結合の強さは距離に応じて変化する性質があります。もし、3つの力に対応した結合の強さが、現在観測されている距離よりもずっとマイクロな領域で成り立っていると等しくなれば、大統一理論がいうマイクロな領域で成り立っていると考えることが出来ます。このことから、大統一理論は、「標準模型」よりもはるかにマイクロな領域の現象を記述する理論として期待されています。

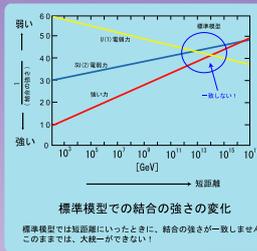
大統一理論では、力の統一と同時に物質の種類も統一されていくことが期待されています。ちょうど「標準模型」で左巻き電子とニュートリノが同じ1つのものとして理解された様に、大統一理論では、より多くの物質が同じ1種類の粒子として理解されると考えられています。



3つの「結合の強さ」の変化  
距離に応じてそれぞれが変化する。大統一理論では非常にマイクロな領域で3つの結合の強さが等しくなる。

## 超対称性への道

### 大統一へ向けての問題点



標準模型では短距離にいったときに、結合の強さが一致しません。このままでは、大統一ができない！

### 「標準模型」と大統一理論を直接つなげるのは困難

「標準理論」と大統一理論の間をつなぐ理論が存在すると考えられる

大統一理論を説明しましたが、「標準模型」のままでは大統一理論にうまくつながらないという以下のような指摘があります。まず、各力の結合の強さは、距離に応じて変化するという性質があります。現在観測されている3つの力の結合の強さはそれぞれ異なっていますが、もし統一されるのなら、よりマイクロな領域ではそれらが一致するはずですが、ところが「標準模型」では3つの結合の強さがうまく一致しないことが分かってきました。そのため大統一理論になる前に「標準模型」は何らかの修正を受けるのではないだろうかと考えられています。

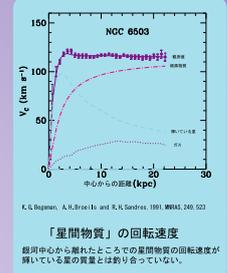
### 暗黒物質の存在

#### 「標準模型」の粒子では説明出来ない

#### 「標準理論」を超えた理論に含まれる粒子の可能性

また、「標準模型」の枠内ではうまく説明できない現象の一つに宇宙の暗黒物質の存在があります。「標準模型」の中には暗黒物質の適当な候補が存在しないため、暗黒物質は「標準模型」を超えた理論に含まれる粒子であることが期待されています。後で説明する超対称性を持つ「標準模型」には、そのような暗黒物質の候補が含まれていると考えられています。

暗黒物質  
観測された星間物質の回転速度から必要とされる銀河の質量が、観測できている物質の約10倍も必要であることが知られています。このことから、宇宙には数々が知らないまだ観測されていない物質が存在すると考えられ、その物質は暗黒物質と呼ばれています。暗黒物質は宇宙物理学および素粒子物理学における大きな問題となっています。



「星間物質」の回転速度  
銀河中心から離れたところでの星間物質の回転速度が観測されている星の質量と釣り合っていない。

### 超対称性が問題を解決してくれる？

上で書いたような問題を解決するために、標準模型に何らかの修正を加える必要があります。修正した理論のなかで最も有力な理論の一つと考えられているのが述べた超対称性を持つように拡張された標準模型です。

## 超対称性

### 超対称性とは？



### 標準模型の超対称化

超対称化された「標準模型」では、それぞれの粒子にスーパーパートナーが導入される

ゲージ粒子のスーパーパートナー (スピン1/2)	
名前	
フォティン	$\tilde{\gamma}$
ウィーノ	$\tilde{W}^{\pm}, \tilde{Z}, \tilde{A}$
グリューノ	$\tilde{g}$

物質粒子のスーパーパートナー (スピン0)	
スレプトン	スクワーク
フレーバー	フレーバー
スカラー電子	スカラーアップクォーク
スカラーニュートリノ	スカラーダウンクォーク
スカラーアップクォーク	スカラーアップクォーク
スカラーダウンクォーク	スカラーダウンクォーク
スカラーニュートリノ	スカラーニュートリノ
スカラータウレプトン	スカラータウレプトン
スカラーボトムクォーク	スカラーボトムクォーク

超対称化された標準模型は超対称標準模型と呼ばれます。この模型では標準模型に現れる粒子それぞれに対してスーパーパートナーが存在します。例えば、電子に対してはスカラー電子(ボース粒子)が、光子に対してはフォティン(フェルミ粒子)が導入されます。

### 超対称性のその他の効用

超対称性は、重力を含めた統一理論を考える際に重要な役割を果たすと考えられている

超対称性は、このパネルで述べる以外にも、以下のような点で重要だと考えられています。まず、重力も含めた4つの力を統一した理論として期待されている超弦理論も、超対称化された理論です(「弦理論とM理論」の参照)。ここでは、超対称性は理論的な整合性から要求されます。さらに、超対称化することにより、理論は数学的に非常に良い性質を持つようになるため、理論的な探求が行いやすくなります。そのため、難しい問題を解くための足がかりとして、超対称化された模型が広く用いられています。

### 超対称性の下でボース粒子とフェルミ粒子が対になる

超対称性はボース粒子とフェルミ粒子をペアにする考えです。ペアになった粒子はスピン以外の性質が全て同じになります。ある模型を超対称化する際には、このペアリングのために別の模型にあった粒子とペアとなる新しい粒子を導入する必要があります。そのため、単純に考えて粒子の数は超対称化によって倍になります。この新しい粒子はスーパーパートナーと呼ばれています。

### この世界での超対称性は近似的なもの？

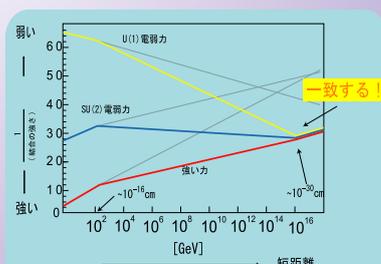
スーパーパートナーは、まだ実験で見つからない「標準模型」の粒子よりも非常に重い



超対称性が厳密に存在している場合には、我々が見ることのできる粒子とそのスーパーパートナーが同じ質量を持ちます。しかし、スーパーパートナーの存在は実験で未だに確認されておらず、同じ質量を持っていることが分かっています。そのため、超対称標準模型では超対称性は近似的にしか成り立っておらず、スーパーパートナーの質量は非常に重いと考えられています。

## 超対称標準模型の特長

### 大統一 超対称標準模型では、結合の強さがマイクロな領域で良く一致する



超対称標準模型では、スーパーパートナーが加わることで結合の強さが一致するようになります

超対称標準模型では加わったスーパーパートナーの効果により左図のように、結合の強さの変化率が $10^{-16}$ cmから変化します。その結果、およそ $10^{-16}$ cmほどの距離において3つの力の結合の強さが一致します。このように標準模型を超対称化するだけで力の統一が起こるようになることから標準模型を超えた理論として期待もたれています。

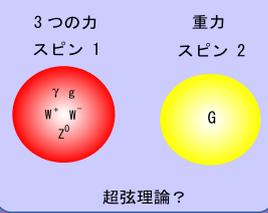
### 暗黒物質

#### 超対称標準模型には暗黒物質の良い候補が含まれている

超対称標準模型では、電荷を持たずニュートリノ程度しか力を感じない不安定なスーパーパートナーが存在します。この粒子の持つ性質が期待されている暗黒物質に相応しいため、この未知の粒子は暗黒物質の候補の一つとなっています。

### 重力について

ここまでは、重力以外の3つの力について考えてきました。これらの力がマイクロな世界でどのように振舞うかについては、かなり分かってきています。しかし、重力のマイクロな世界での振舞いについてはまだわかっていません。宇宙初期やブラックホールなどには、そのようなマイクロな重力理論が必要になります。完全に満足いく定式化はまだありませんが、重力もほかの3つの力と同じように、グラビトンと呼ばれるゲージボソンの媒介で記述できると考えられています。ただし、他のゲージ粒子のスピンが1であるのに対し、グラビトンのスピンは2です。このことが、重力を他の3つの力と同じ枠組みで扱うことを困難にする原因の1つになっています。超弦理論ではスピンの1と2の粒子が強い振動の仕方から自然に出てくるため、4つの力を統一に扱うことができるのではないかと期待されています。



素粒子論研究室