OHO95

リニアコライダーの物理

藤井恵介

高エネルギー物理学研究所

高エネルギー物理学とは？

物質の究極の構成要素の間の相互作用（力の本質）を解明することを目的とする学問

素粒子の世界を記述する言葉

自然の言葉の文法 = 場の量子論

基本粒子 ←－－→ 量子場

－－－→ 対象とする客体の性質に依らない

自然の語る物語 = ラグランジアン

$$\mathcal{L}(\partial_\mu\phi,\phi)$$

－－－→ 客体に固有な性質

どういう基本粒子が存在し
どういう相互作用をするか？

の全てはラグランジアンにある

最小作用原理

作用 $S=\int d^4x\ \mathcal{L}(\partial_\mu\phi,\phi)$

$\delta S=0$ －－－→ オイラー・ラグランジュ方程式

$$\frac{\partial\mathcal{L}}{\partial\phi}=\partial_\mu\left(\frac{\partial\mathcal{L}}{\partial(\partial_\mu\phi)}\right)$$

運動方程式は最小作用原理で与えられる

ラグランジアンが与えられれば少なくとも原理的には問題とする客体の時間発展が追える

高エネルギー物理学 =
究極のラグランジアンの探究

自然の語る物語の中心テーマは何か？

何がラグランジアンを決めているのか？

対称性と保存則

ある連続変換

$$x \to x'$$
$$\phi(x) \to \phi'(x')$$

の下に

作用

$$S = \int d^4x \, \mathcal{L}(\partial_\mu \phi, \phi) \quad \longleftrightarrow \quad \exists \text{保存量}$$

が不変（対称）

例）

時空の
- 並進対称性 ―→ エネルギー・運動量保存則
- 回転対称性 ―→ 角運動量保存則

”自然の語る物語の中心テーマが対称性ではないか？”と思わせる最初の深遠なる結果（ネーターの定理）

逆に作用がある対称性を持つべしという要求はラグランジアンの形を強く制限する

十分多くの対称性を要求すればラグランジアンが一意的に決まるのではないか？

中心テーマ＝対称性
これがラグランジアンを決定！

外部空間（時空）の対称性

ポアンカレ群の変換に対する対称性

→
- 並進群　（時空の平行移動）
- ローレンツ群（ローレンツ変換⊃空間回転）

―→ 自由場のラグランジアンの決定

相互作用まで含めたラグランジアンを決めるには

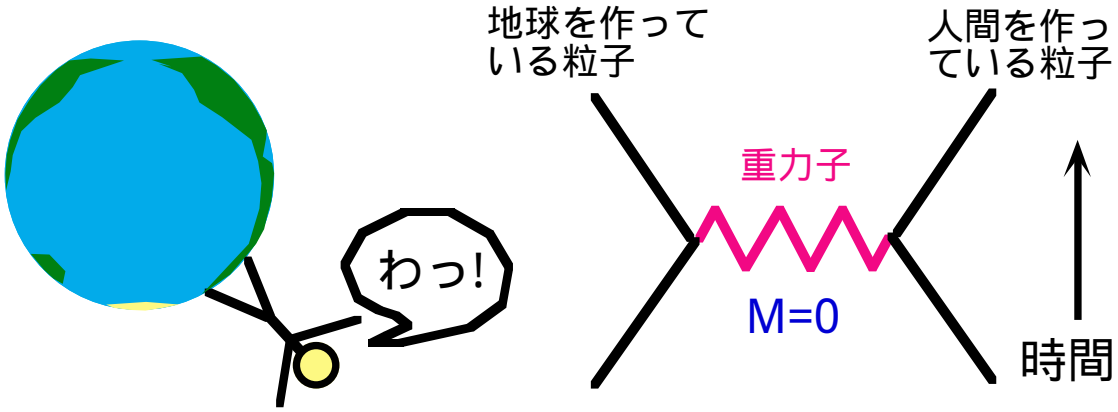
内部空間の対称性

自然界の四つの力

現在、自然界には少なくとも四つの力があることが知られている

重力

みんな良く知っている私達を地球に引っ張りつけている重力

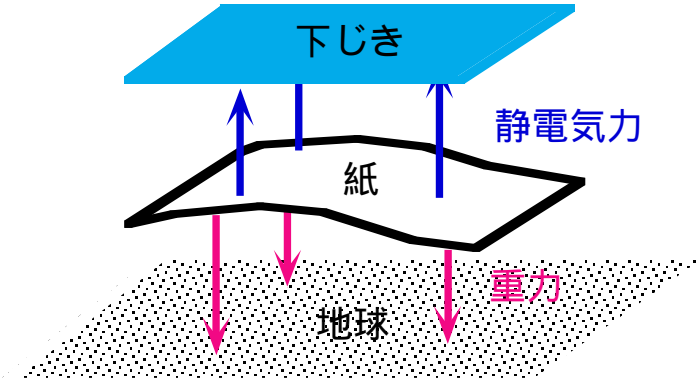


重力＝重力子の交換

重力は質量に比例する　一方、質量はエネルギーと等価である

$E = mc^2$（アインシュタインの関係式）

従って、重力は全ての粒子に働く　しかし、素粒子の質量は非常に小さい　従って現在の加速器で到達できるようなエネルギーでは素粒子間の重力は非常に小さく無視できるが、宇宙創成直後の超々高エネルギーでは重要になってくる

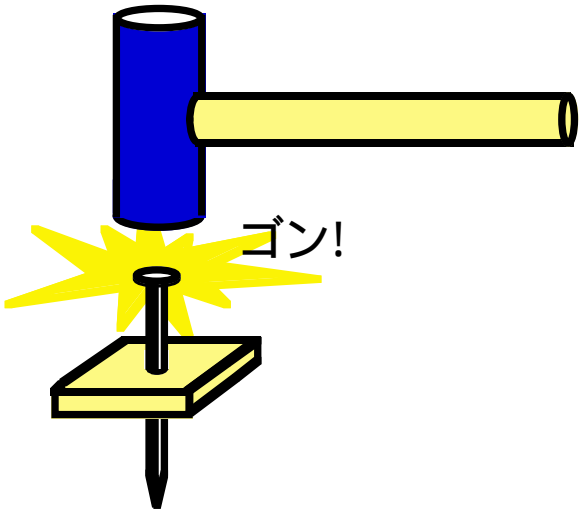


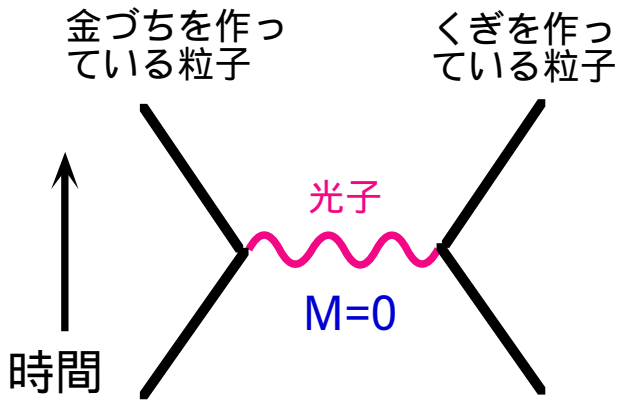
重力は弱い！

地球全体が紙を引っ張る重力よりも帯電した下じきが紙を引っ張る静電気力の方が強い

電磁気力

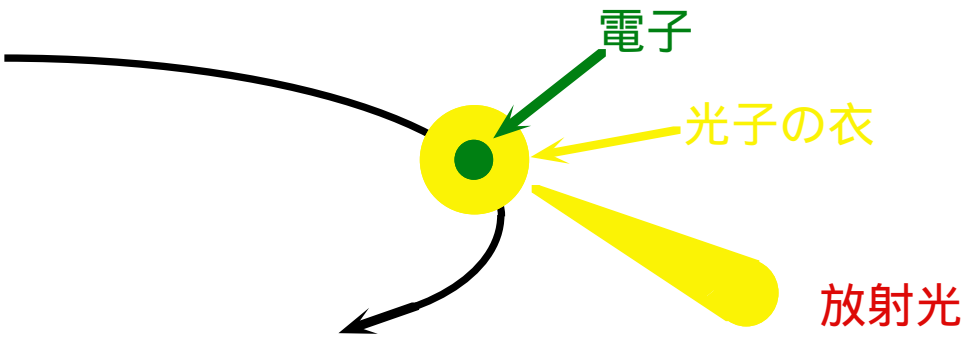
良く知られている静電気や磁石の力だけでなく、我々が日常経験する重力以外の全ての力は電磁気力
特に、電子と原子核を結び付け原子を作る力、原子同士を結び付け分子を作る力は、電磁気力である





電磁気力＝光子の交換

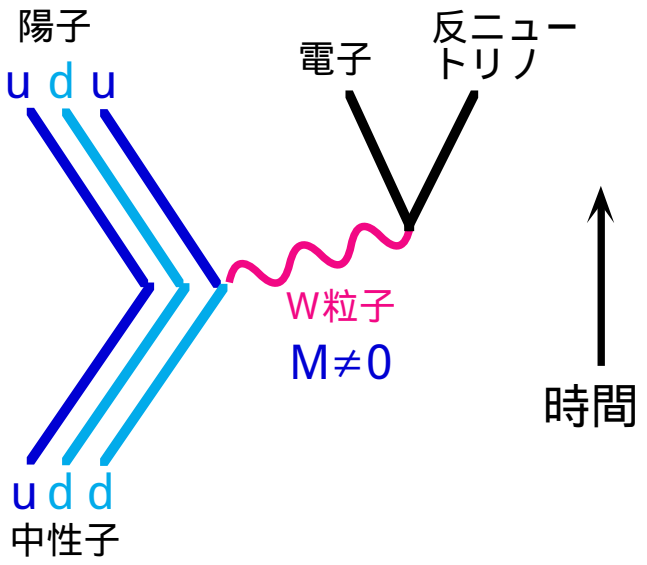
電磁気力は電荷に比例する　電荷を持った粒子は、目に見えない光子（仮想光子）をお手玉しながら走っている　言い換えれば、荷電粒子は光子の衣を着ている



電子が電磁石などで急に向きを変えられると、光子の衣が引きちぎれて飛び出す　これが放射光である

弱い力

原子核のベータ崩壊等の原因となる（粒子の種類を変えることの出来る）力。日常世界で経験することのない力だが、ミクロの世界では重要となる



弱い力＝W,Z粒子の交換

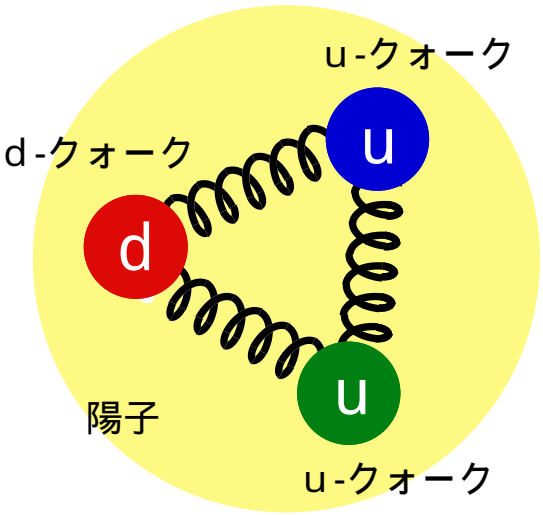
弱い力を媒介する力の粒子、W、Zは大きな質量を持っている。そのため、力の本質的な強さを表わす結合定数は電磁気力と同程度であるが、力が届く距離が非常に短く、力の見かけの強さは弱い　従って、日常世界で感じることはない

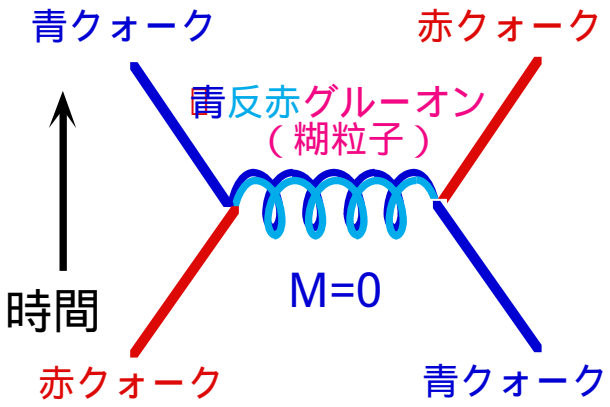
現在では、W、Z粒子は、もともと光子と同様に質量を持たないゲージ粒子であるが、真空中のヒッグス場との相互作用により質量を持ったと考えられ（質量の起源のページ参照）電弱力としてまとめれている

電磁気力：光子（γ）
弱い力　：W粒子, Z粒子
} → { U(1)電弱力
SU(2)電弱力

強い力

クォークを結び付け、陽子（ｐ）や中性子（ｎ）等の核子を作り、またそれら核子から原子核を作る力





強い力＝グルーオンの交換

強い力は色荷（カラー）に比例する　クォークの色荷には赤、青、緑の三原色（もちろん本当の色ではない）がある　強い力を媒介する力の粒子グルーオンには白を除く色の組み合わせ

3（赤,青,緑）×3（反赤,反青,反緑）－1（白）＝ 8

つまり８種類あり、いずれも質量を持たない　しかし、グルーオン自体がカラーを持ちグルーオンをお手玉するので、力は距離が離れるほど強くなり、核子（陽子、中性子）の大きさ程度以上の距離になると全体として白色の状態しか安定に存在できない（カラーの閉じ込め）　従って、強い力の到達距離は、グルーオンが質量を持たないにもかかわらず短く、日常感じることはない

強い力　：グルーオン（糊粒子: ｇ）⟶ SU(3)強い力

力（相互作用）の本質

電子を良く見てみると

加速器 = 分解能の良い虫眼鏡

光子をお手玉しながら走っている！

近くに他の電子が来てお手玉を取ってしまうと、その光子の持っていた運動量分だけ各々の電子の運動量が変化する

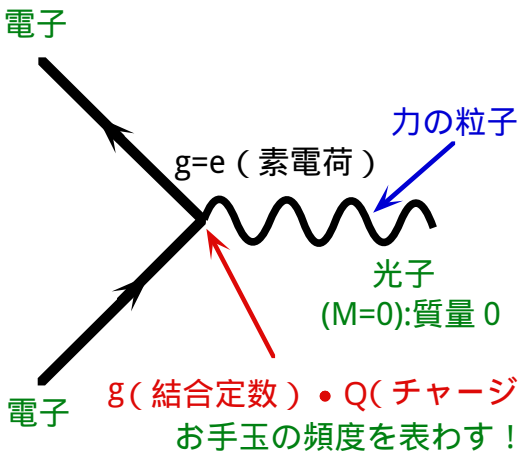
ニュートンの運動方程式

$$\frac{d}{dt}P = F$$

運動量変化　　力

相互作用（力）＝力の粒子の交換!!

力（相互作用）の要（バーテクス）



g: 大　⟷　相互作用が強い

力の見かけの強さと力の粒子の質量: M

M: 小 → お手玉が遠くまで届く
M=0 → 無限遠まで届く(遠距離力)
M: 大 → お手玉が遠くまで届かない
(近距離力)

力の本質的強さはｇで決まるが、見かけの強さはM にもよる！

内部空間の対称性と粒子の統一

内部空間とは？

時空の各点での場の粒子の種類の自由度に対応する空間

例）

クォークには色（カラー）と呼ばれる自由度がある

$q=\begin{pmatrix} q_R \\ q_G \\ q_B \end{pmatrix}$ ：各成分が複素場からなる３次元ベクトル

↓

色空間のベクトル

この向きがクォークの色

自由クォーク場のラグランジアン

$$\mathcal{L}_0(\partial_\mu q, q)=\bar{q}\,(i\gamma^\mu\partial_\mu - m)q$$

は（従って当然作用も）このベクトル空間の回転（$SU(3)_C$）

$$q=\begin{pmatrix} q_R \\ q_G \\ q_B \end{pmatrix} \longrightarrow q'=U(\theta)\begin{pmatrix} q_R \\ q_G \\ q_B \end{pmatrix}$$

$$U(\theta)=e^{i\mathbf{T}\cdot\theta}\in SU(3)$$

$\mathbf{T}=(T_1,T_2,\cdots,T_8)$ ： 8 つの $SU(3)$ 群の生成子

で対称

$$\mathcal{L}_0(\partial_\mu q', q')=\mathcal{L}_0(\partial_\mu q, q)$$

＊）クォークの３つの色は絶対的な意味を持たない

＊）赤・緑・青は３つのクォークというより１つのクォークの３つの状態

いくつかの粒子の場を作用を不変にするような対称変換で移りあう１つの多重項に入れられれば、それらの粒子が統一されたことになる

局所ゲージ対称性と力

大局的ゲージ対称性

一般に n 種類の場からなる多重項に、時空間の位置（x）によらない内部空間の回転（大局的ゲージ変換）

$$\Psi = \begin{pmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_2 \\ \mathrm{M} \\ \Psi_n \end{pmatrix} \quad \text{内部空間の回転} \quad U(\theta) = e^{i\mathbf{T}\cdot\theta} \quad \Psi' = U(\theta)\Psi$$

をしてもラグランジアンは不変

$$\mathcal{L}_0(\partial_\mu \Psi', \Psi') = \mathcal{L}_0(\partial_\mu \Psi, \Psi)$$

Ψ と $\Psi' = U(\theta)\Psi$ は物理的に区別できない

局所ゲージ対称性

それならば時空間の位置（x）ごとに勝手な内部空間の回転

$$U(\theta(x)) = e^{i\,\mathbf{T}\cdot\theta(x)}$$

をしても物理は不変であって欲しい

しかし

$$\partial_\mu U(\theta(x)) = U(\theta(x))\partial_\mu + \left(\partial_\mu U(\theta(x))\right) \neq U(\theta(x))\partial_\mu$$

だから、ラグランジアンはもはや不変でなくなる

$$D'_\mu U(\theta(x)) = U(\theta(x)) D_\mu$$

となるような共変微分（ D_μ ）を見つければよい

共変微分とゲージ場

$$D_\mu = \partial_\mu + igW_\mu$$

↓ ゲージ場 (a=1,...,n)

$$W_\mu = W_\mu^a T_a$$

↓ ゲージ群の生成子

$$\mathbf{T} = (T_1, T_2, \mathrm{L}\ , T_n)$$

ゲージ場が局所ゲージ変換で

$$W_\mu \to W'_\mu = UW_\mu U^{-1} - \frac{i}{g}U(\partial_\mu U^{-1})$$

と変換すれば

$$D'_\mu U(\theta(x)) = U(\theta(x))D_\mu$$

従って、新しいラグランジアン

$$\mathcal{L}_0(D_\mu\Psi, \Psi) = \overline{\Psi}(i\gamma^\mu D_\mu - m)\Psi$$
$$= \overline{\Psi}(i\gamma^\mu\partial_\mu - m)\Psi - g(\overline{\Psi}\gamma^\mu\Psi)W_\mu$$

は、局所ゲージ変換で不変

結合定数

物質場とゲージ場の相互作用項が出現

ゲージ場の運動項も必要

ゲージ場から作られるテンソル場

$$W_{\mu\nu} = -\frac{i}{g}\left[D_\mu, D_\nu\right]$$
$$= \partial_\mu W_\nu - \partial_\nu W_\mu + ig\left[W_\mu, W_\nu\right]$$

は、局所ゲージ変換に対して共変的に変換する

$$W'_{\mu\nu} = UW_{\mu\nu}U^{-1}$$

従って、このテンソル場から作られるゲージ場のラグランジアン

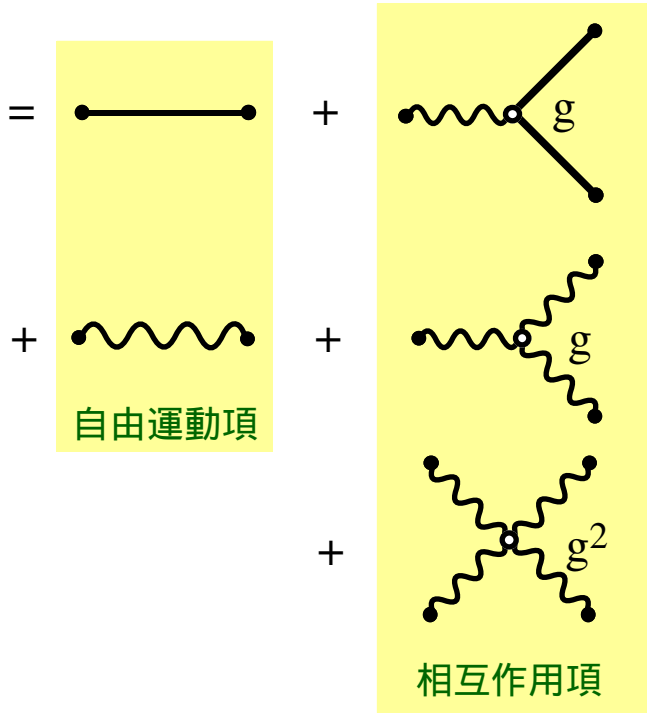
$$\mathcal{L}_G = -\frac{1}{2}Tr\ W_{\mu\nu}W^{\mu\nu}$$ ⟶ ゲージ場の自己相互作用項が出現

は、局所ゲージ変換で不変

局所ゲージ不変なラグランジアン

物質粒子の部分とゲージ粒子の部分を合わせて

$$\mathcal{L} = \overline{\Psi}(i\gamma^{\mu}D_{\mu} - m)\Psi - \frac{1}{2}Tr\ W_{\mu\nu}W^{\mu\nu}$$



局所ゲージ対称性の要求

---→ { 力の粒子（ゲージ粒子）の存在（存在論理）
ゲージ粒子と物質粒子の相互作用の決定
結合定数 = 各対称性に 1 つ（普遍的相互作用）

対称性と力の本質的関係
ゲージ原理

ゲージ原理の直観的解釈

簡単のため内部空間が複素１次元の場合を考える

例）量子電気力学

広い意味での位相変換　　単なる位相変換

$$U(\theta(x)) = e^{i\,\mathbf{T}\cdot\theta(x)} \quad \longrightarrow \quad U(\theta(x)) = e^{\,i\theta(x)}$$

量子力学

粒子は波動性を持つ

$$\phi(x) = e^{\,ip\cdot x}$$

平面波（自由粒子）

$$p\cdot x = Et - \mathbf{p}\cdot\mathbf{x} \quad (\mathrm{h} = c = 1)$$

$$\longrightarrow \quad |\mathbf{p}| = \frac{1}{\lambda} \quad \text{（ドブロイ）}$$

局所ゲージ変換（時空の各点での勝手な位相変換）

$$U(\theta(x)) = e^{\,i\theta(x)}$$

$$\phi(x) \quad \longrightarrow \quad e^{\,i\theta(x)}\phi(x) = e^{\,i[\theta(x) - p\cdot x]}$$

波長に変調がかかってしまう

このままでは運動量が保存しない

位相の基準点を時空の各点で独立に決めてやれば良い

$$iD_\mu = i\partial_\mu - e\,A_\mu$$

位相の基準点としての
ゲージ場

対称性と質量

ゲージ粒子の質量

質量項

$$\mathcal{L}_M = M^2\, W_\mu W^\mu$$

はゲージ変換に対して不変でない

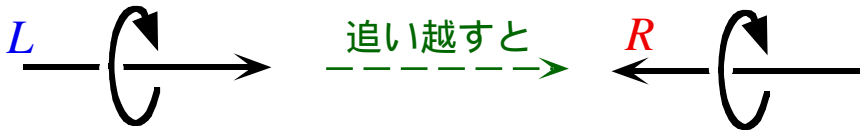
ゲージ対称性はゲージ粒子の質量項を禁止する

物質粒子の質量

質量項

$$\mathcal{L}_m = -m\,\overline{\Psi}\Psi = -m(\overline{\Psi}_R\Psi_L + \overline{\Psi}_L\Psi_R)$$

は右巻と左巻を混ぜ合わせる



物質場を含むその他の部分

$$\mathcal{L}_p = \overline{\Psi}_L\, i\gamma^\mu D_\mu \Psi_L + \overline{\Psi}_R\, i\gamma^\mu D_\mu \Psi_R$$

は右巻と左巻を混ぜ合わせない

質量項が無ければ右巻と左巻は別の粒子と見なせ別々の対称性を持ちうる（カイラル対称性）

カイラル対称性は物質粒子の質量項を禁止する

標準理論は、カイラル対称性を持つ理論

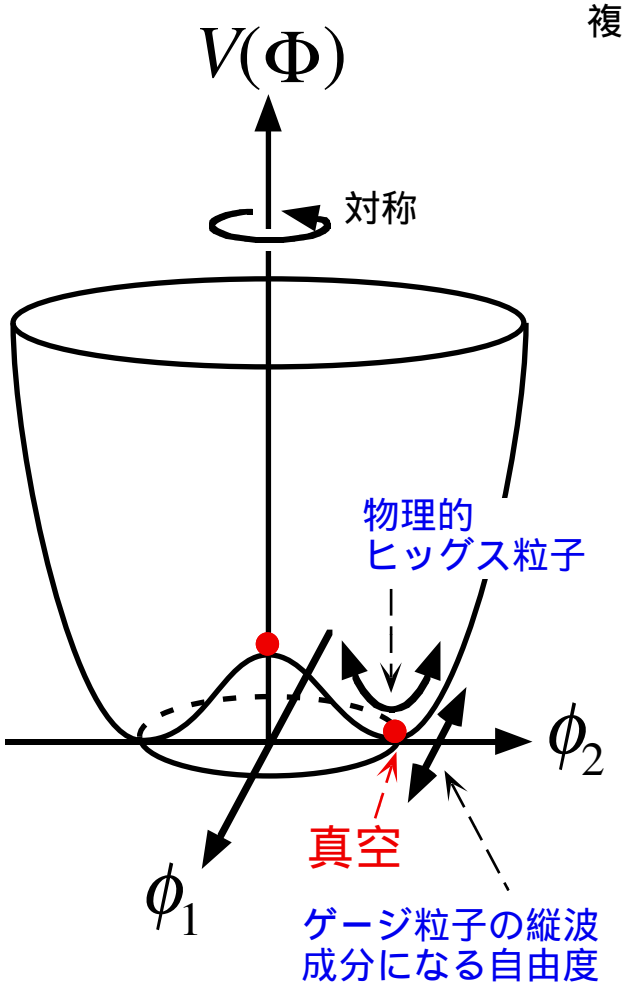
難問

どうやって、ラグランジアンの対称性を保ったままゲージ粒子や物質粒子の質量を生成するのか？

自発的対称性の破れ

ラグランジアンの対称性を保ったまま現象の対称性を破るには？

ヒッグス場



複素 2 次元のスカラー場（ヒッグス場）：Φ

$$V(\Phi)=\mu^2|\Phi|^2+\lambda|\Phi|^4$$

$$\mu^2<0$$

ゲージ変換（V軸の回りの回転）でポテンシャルは不変

ラグランジアンは対称

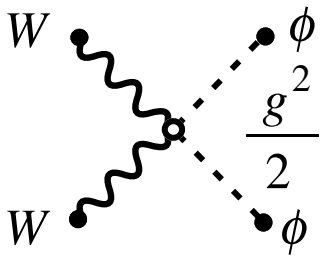
ゲージ変換（V軸の回りの回転）で真空（エネルギー最低の状態）は不変でない

$$\langle\Phi\rangle=\frac{v}{\sqrt{2}}$$

真空は対称性を破っている

一方、ゲージ場とヒッグス場との相互作用はゲージ原理で決まり

$$\mathcal{L}_S=(D_\mu\Phi)^+(D^\mu\Phi)-V(\Phi)$$



$$\langle\Phi\rangle=\frac{v}{\sqrt{2}}$$

ゲージ粒子の質量項が出現

$$\left(\frac{gv}{2}\right)^2 W_\mu W^\mu$$

$$M=\frac{1}{2}gv$$

質量の起源の直観的解釈

質量とは？

ニュートンの運動方程式

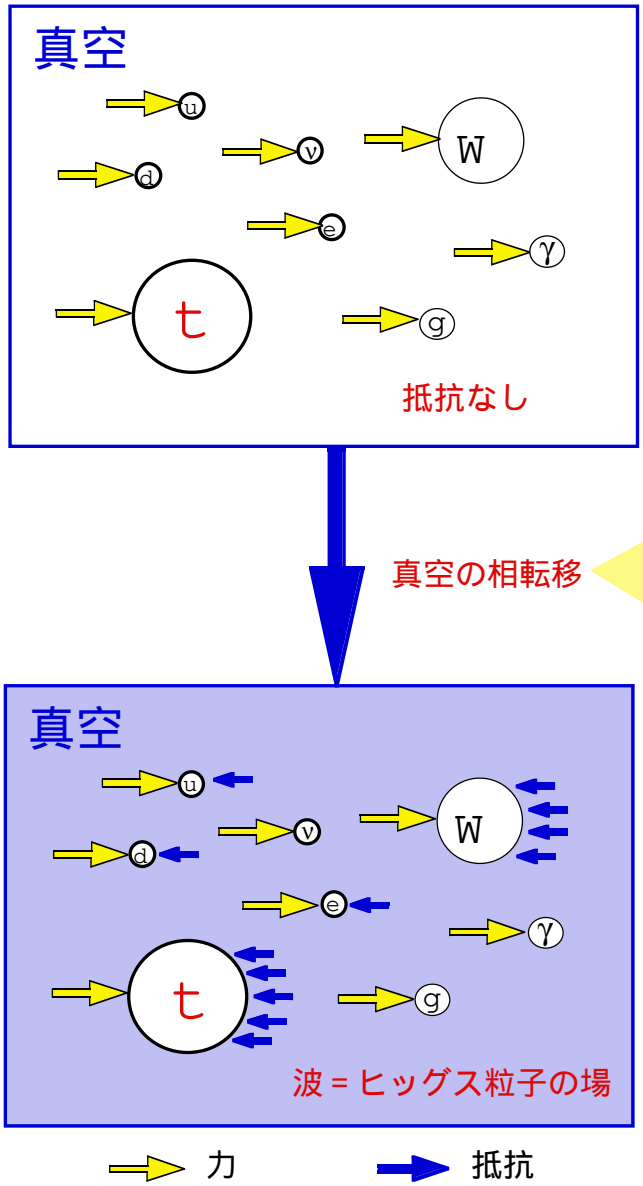
F(力) = m(質量)× a (加速度)

$$m(\text{質量}) = \frac{F(\text{力})}{a(\text{加速度})}$$

力を加えたときの加速されにくさ

同じ力を加えたとき、加速度の大きい粒子ほど質量は小さく、加速度の小さい粒子ほど質量は大きい

質量の起源は？



標準理論の考え方

ビックバン直後

ヒッグス粒子の場が無い状態がエネルギー最低（真空）

真空から抵抗を受けないので粒子の質量は0

宇宙が膨張するとともに冷え、水蒸気が水になるように真空にヒッグス粒子の場が凝結する

現在

真空にはヒッグスが充満している！

粒子を加速しようとすると、ヒッグスにぶつかる

m(質量)
= g(衝突確率) x v(ヒッグスの密度)

ぶつかりやすいほど重い!!

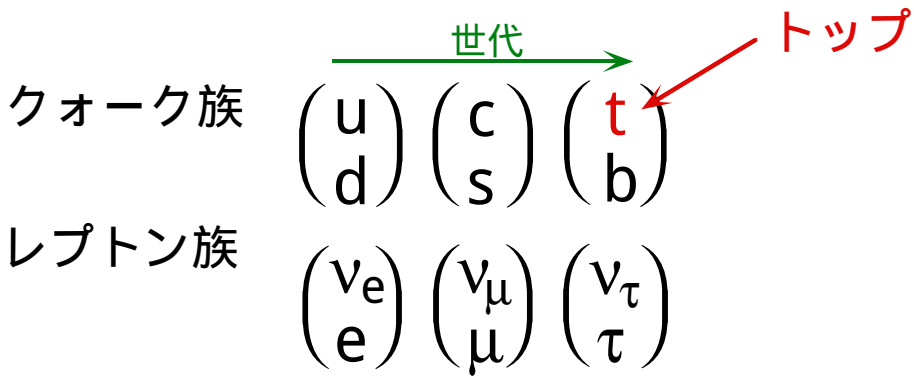
標準理論の世界像

今までの知識の集大成

ゲージ群

$$SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y$$

物質粒子



力を媒介する粒子(ゲージ粒子)

電磁気力：光子 (γ)
弱い力　：W粒子, Z粒子　} → { U(1)電弱力 / SU(2)電弱力
強い力　：グルーオン (g_i ; i=1,..,8) → SU(3)強い力

粒子の質量の元となる粒子

ヒッグス 粒子 (H)　：　未発見

物質粒子とその間の力の極めて正確な記述に成功

粒子と力のさらなる統一を求めて我々が次に探究すべき対称性は何なのか？

標準理論の問題点

標準理論にもの申す！

実は不満はいっぱいあるが、代表的なものを挙げれば

1）力の統一理論になっていない！

$$\underbrace{\underset{g_3}{SU(3)_C} \otimes \underset{g_2}{SU(2)_L} \otimes \underset{g_1}{U(1)_Y}}$$

結合定数が１つでない！

１つの力でない！

－－→ 力の統一というからには１つの対称性にして結合定数を１つにせよ！

－－→ そもそも重力はどうしてくれる？

2）ヒッグス質量の量子補正の発散

$$\delta M_H^2 \approx \int_{M_W}^{M_X} d\mu \left(\text{-}\bigcirc\text{-} + \text{-}\bigcirc\text{-} + \text{-}\bigcirc\text{-} + \cdots \right)$$

$$\approx C \cdot \frac{\alpha}{\pi} \cdot \left(M_X^2 - M_W^2 \right)$$

標準理論の適用限界のエネルギー

量子補正

観測不能な短い時間の間にヒッグスが他の粒子に化けたり、他の粒子をお手玉したりする

運動エネルギー ←－→ 質量

ゲージ粒子の質量 ←－→ ゲージ対称性で守られている

物質粒子の質量 ←－→ カイラル対称性で守られている

ヒッグス粒子には守護神がいない！

可能な解決法

もっと対称性を！

ゲージ力の統一（大統一理論：GUT）

クォークとレプトンを同じものと見なす変換に対する対称性を要求すると結合定数が１つになる

力の粒子

電磁気力：光子（γ）
弱い力　：W粒子, Z粒子　} → { U(1)電弱力, SU(2)電弱力
強い力　：グルーオン（g_i ; i=1,..,8）→ SU(3)強い力

は、同じ力の粒子の異なる状態となる

宇宙創成直後の超高エネルギー

$$M_X \gtrsim 10^{15}\ \mathrm{GeV}$$

で、この大きな対称性が標準理論の対称性へと破れたとする

大統一のゲージ群　　標準理論のゲージ群

$$G_{GUT} \longrightarrow SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y$$

自発的な対称性の破れ

宇宙が時間とともに冷え、エネルギーが下がるとともに元々１つだった力が、現在の３つのゲージ力に分離した

力の強さとエネルギー

不確定性原理と真空偏極

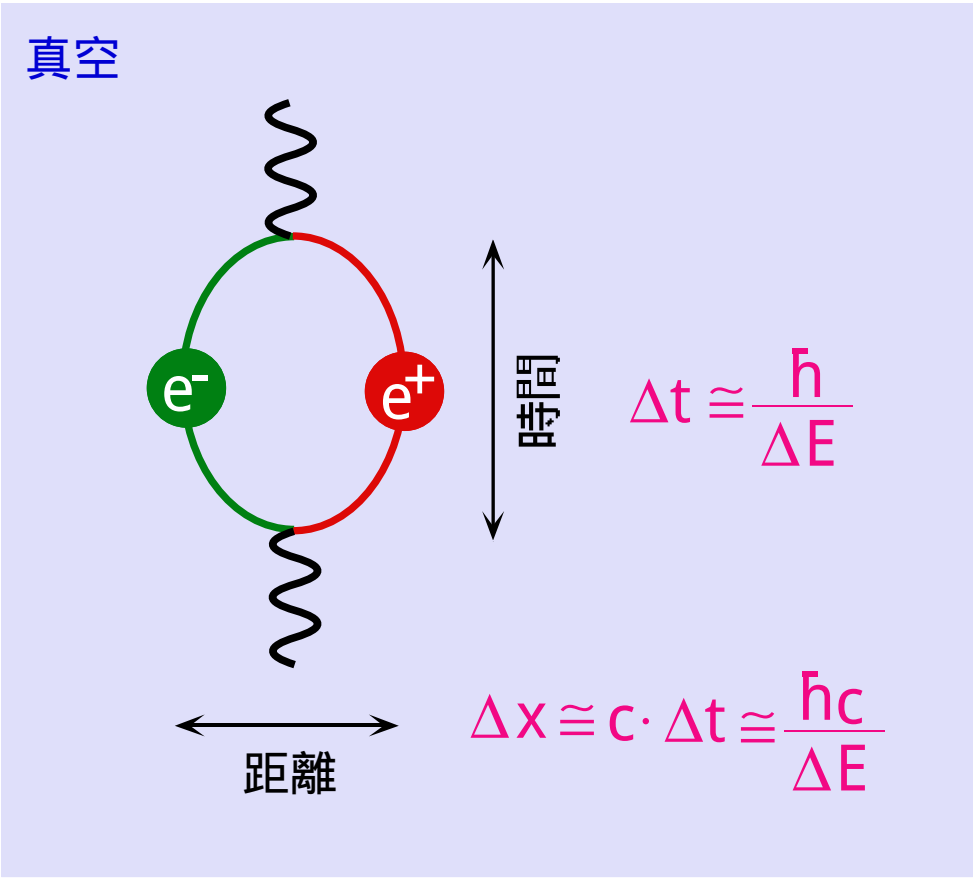
不確定性原理によれば、非常に短い時間の間ではエネルギーの不定性がいくらでも大きくなる

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{1}{2}\hbar$$

もし、十分時間が短くて

$$\Delta E \cong \frac{\hbar}{\Delta t} \gtrsim 2\,mc^2$$

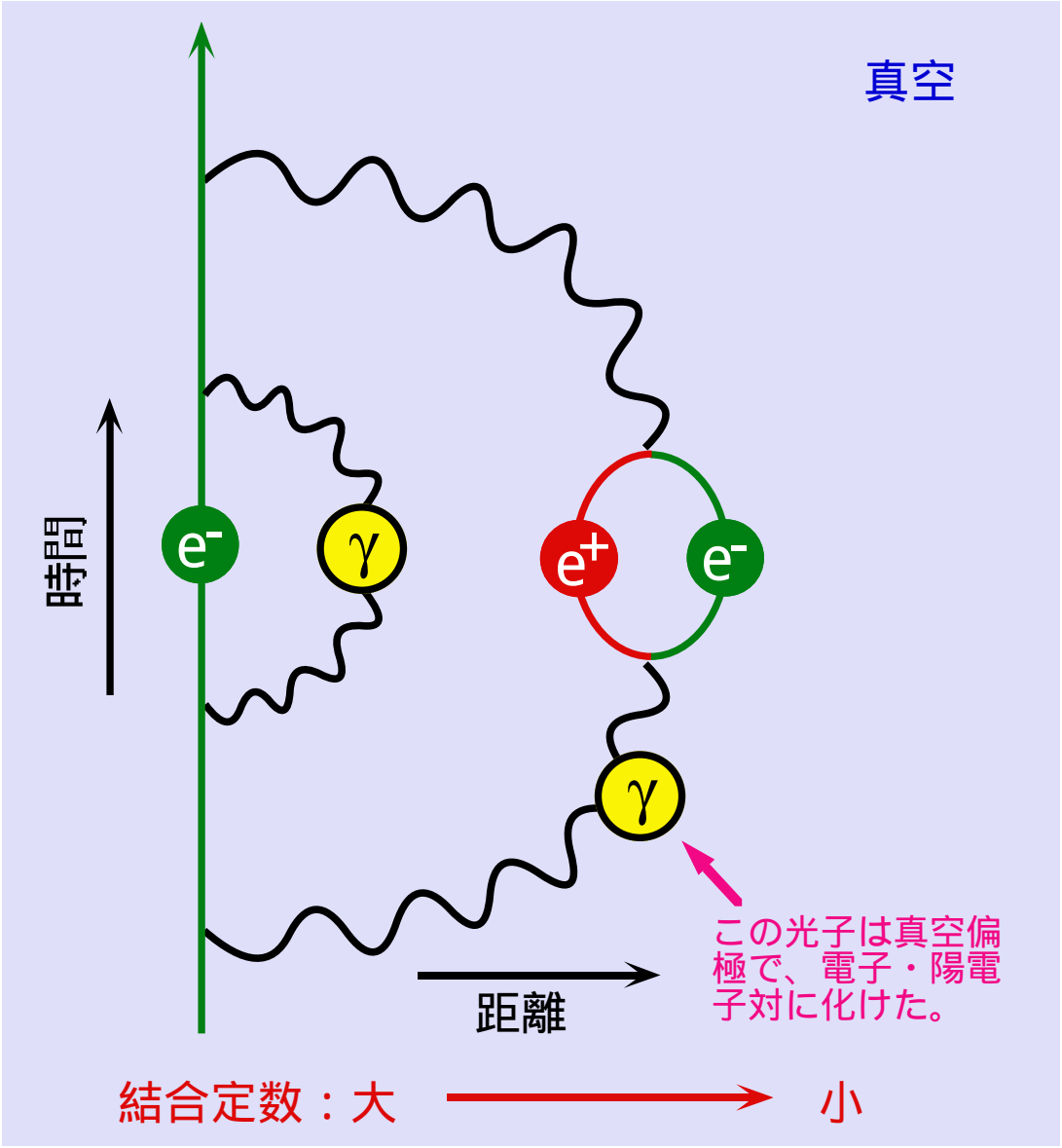
ならば、力の粒子は他の粒子・反粒子対に化けることが出来る



エネルギーを上げていくと、より短い時間の間に起こること、より短い距離で起こることが見えてくる

結合定数とエネルギー（電磁気力の場合）

力の粒子は、瞬間的に粒子・反粒子対に化ける。すると、力の伝達をすべき力の粒子が減り力が弱くなる

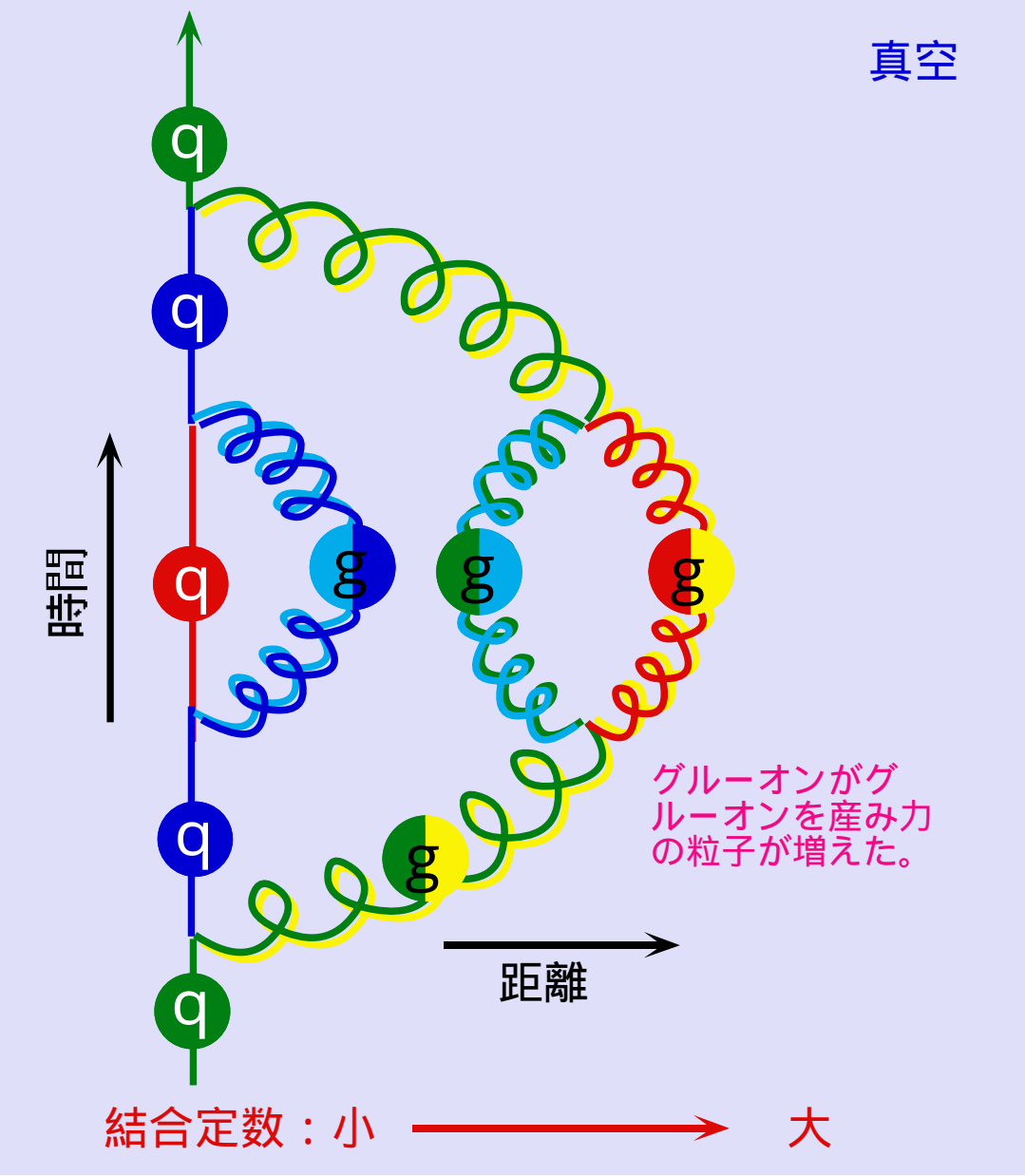


電子から投げられた光子は真空偏極によって瞬間的に電子・陽電子対に化ける　光子が飛ぶ距離が長いほど、化ける確率は高い　従って光子のお手玉の数は、電子を見る距離、つまりエネルギーによる

力の強さ（結合定数）は、エネルギーによる！

結合定数とエネルギー（強い相互作用の場合）

強い相互作用の場合も、真空偏極のクォーク・反クォーク対は、お手玉のグルーオンを減らし、遠距離で結合定数（カラー荷）を小さくする　しかし、強い相互作用の力の媒介粒子（グルーオン）はそれ自身カラー荷を持っている（電磁気力の力の媒介粒子である光子は電荷を持っていない）従ってグルーオンはグルーオンをお手玉できる



真空偏極のクォーク・反クォーク対がお手玉のグルーオンを減らす効果より、お手玉のグルーオンがさらにお手玉のグルーオンを産みだす効果の方が大きい　従って、遠距離（つまり低エネルギー）ほど力の粒子が増え力が強くなる　ついには無限に力が強くなる（閉じ込め）

超対称性とは？

フェルミオンとボソン

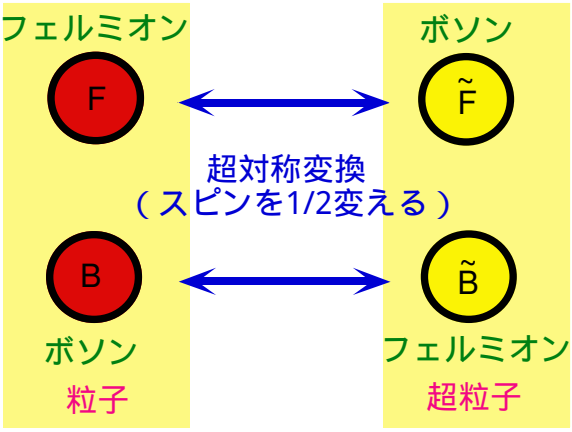
基本粒子は、スピンが整数 (J=0,1,..) か半整数 (J=1/2,3/2,..) かによってボソンとフェルミオンに分類される

物質粒子はフェルミオン

力の粒子（ゲージ粒子）はボソン

ヒッグス粒子もボソン

フェルミオンとボソン間の対称性



超対称性が本当であれば、全ての粒子にそれとスピンが1/2だけ違う相棒（超対称粒子）があることになる

例えば、スピンが1/2の電子には、スピンが0の相棒、超電子が存在することになる

この変換で作用が不変

超対称性の御利益

$m_{\tilde{F}} = 0$（カイラル対称性）$\xrightarrow{\text{超対称性}}$ $m_B = 0$

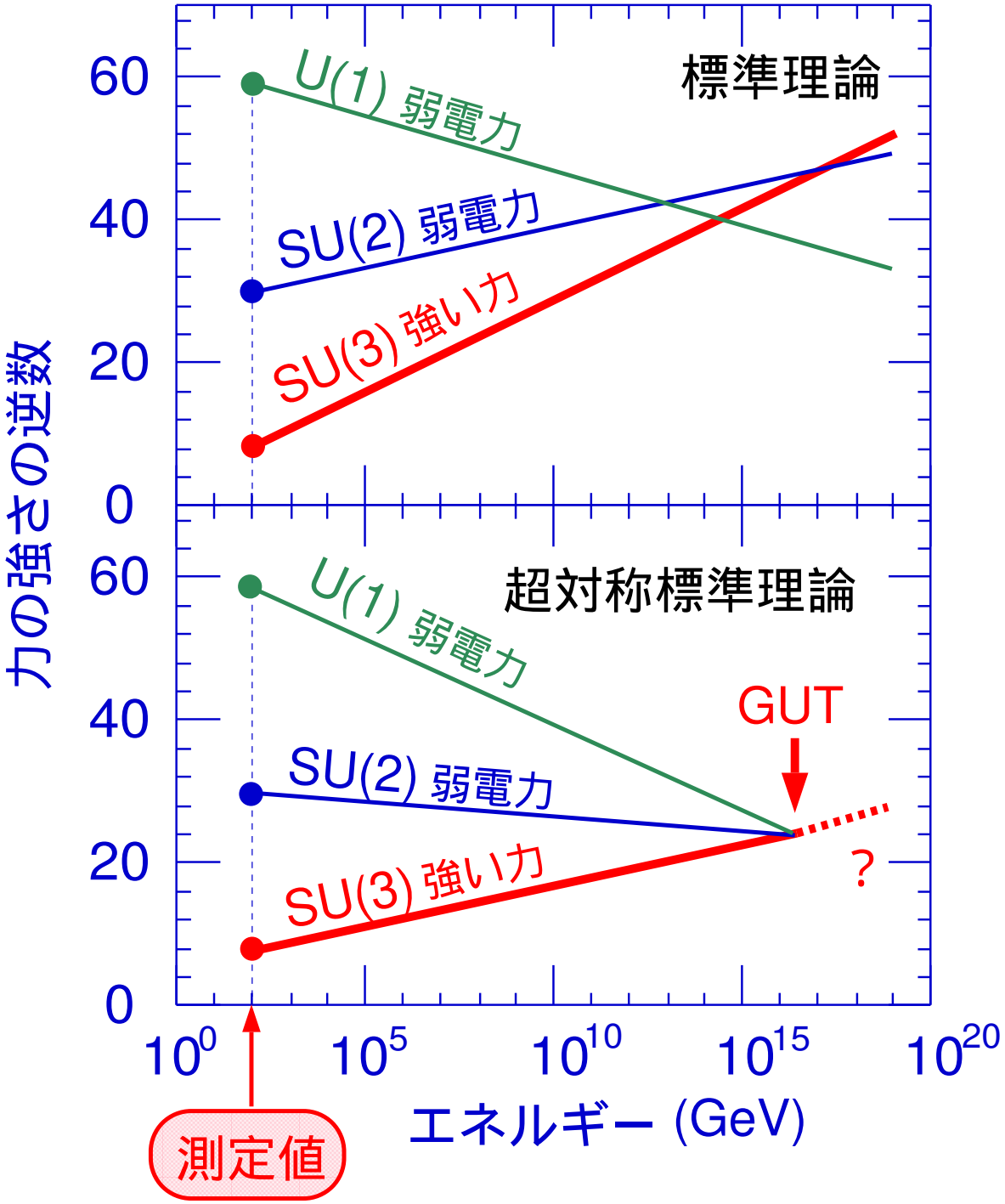
ヒッグス質量の量子補正の発散をなくす

超対称性を局所ゲージ対称性にすると重力が自然に出てくる

重力まで含めた力の超大統一の可能性

力の大統一：起源は一つ？

最新の測定値から宇宙初期の超高エネルギー状態の時の結合定数を推定すると



超対称性の可能性が高い！

超対称性ならば

ヒッグス粒子の質量

標準理論はヒッグス粒子の質量を予言できない

$$M_H = \sqrt{2\lambda}\, v$$

v ← ヒッグス場の真空期待値

$v = 250\ \mathrm{GeV}$

λ ← ヒッグスの自己相互作用の結合定数

標準理論では任意

超対称性

λ と g（ゲージ結合定数）を関係つける

軽いヒッグスが存在する！

$$M_H \lesssim 150\ \mathrm{GeV}$$

－－－－－→ 見つからなければ、超対称性の死

超対称粒子の質量

超対称性が破れていなければ

$$m(\text{粒子}) = \tilde{m}(\text{超粒子})$$

超粒子は１つも見つかっていない！ －→ 超対称性は、破れている

しかし、むやみに破れていてはいけない！

$$\delta M_H^2 \approx C \cdot \frac{\alpha}{\pi}(\tilde{m}^2 - m^2)$$

超粒子の質量が粒子の質量に比べて大きすぎるとヒッグス質量の量子補正の問題に逆戻り

$$\tilde{m} \lesssim O(1\ \mathrm{TeV})$$

全ての基本粒子にそれとスピンが1/2違う超対称粒子の相棒がいる

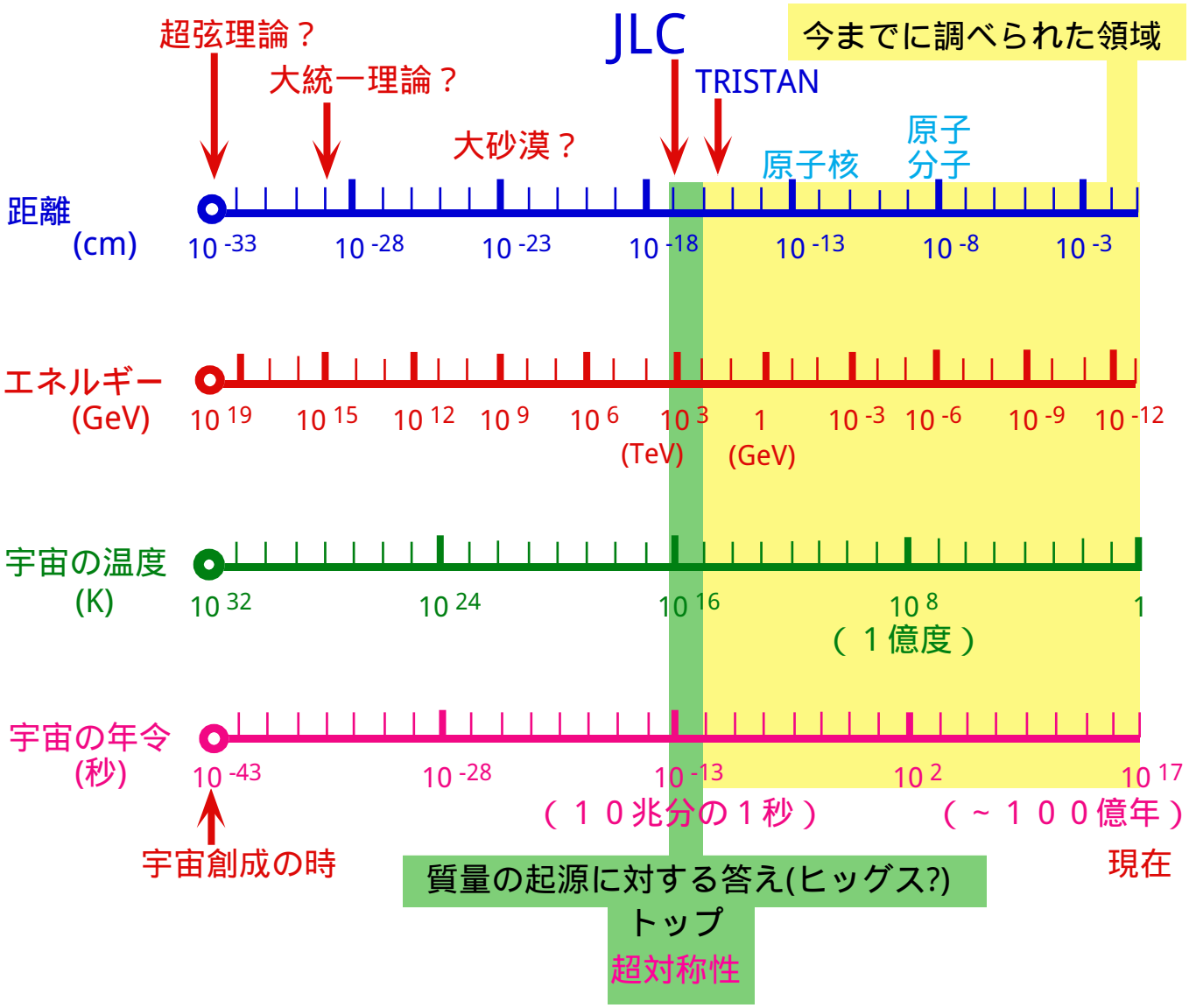
JLCで見つかる可能性が大きい！

JLCの探るエネルギー領域

エネルギーと距離(不確定性原理)

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{1}{2}\hbar$$

極微の世界を見るには超高エネルギーが必要



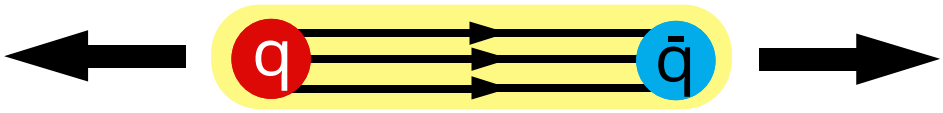
一度、超対称大統一理論が確かめられれば、 15 桁上のエネルギーまで成り立つ理論を手に入れたことになる

宇宙創成の瞬間に迫る初めての現実的可能性！

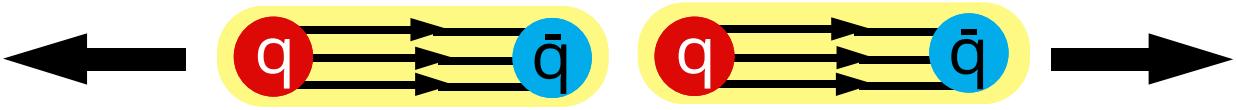
強い相互作用と閉じ込め

クォークと反クォークの対を引き離そうとすると

グルーオンはそれ自身がカラー荷を持ちお互いに引き合うので、カラー力線はゴム紐状になって引き伸ばされ、エネルギーが蓄えられる



カラー力線はゴム紐状になっているので、距離が離れるほど力は強くなる　さらに引っ張ると、ついには蓄えられたエネルギーで、真空から新しいクォーク・反クォーク対を作れるようになる



真空から産まれたクォーク・反クォーク対

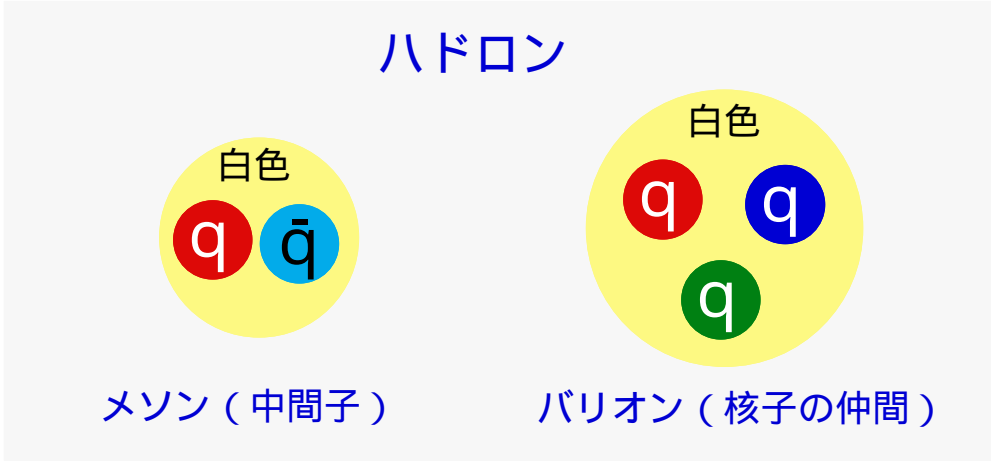
従って、クォークまたは反クォークを単独で取り出すことはできない
同様にグルーオンを単独で取り出すこともできない　つまり常に白色の状態しか安定に存在できない（ジェットの生成）

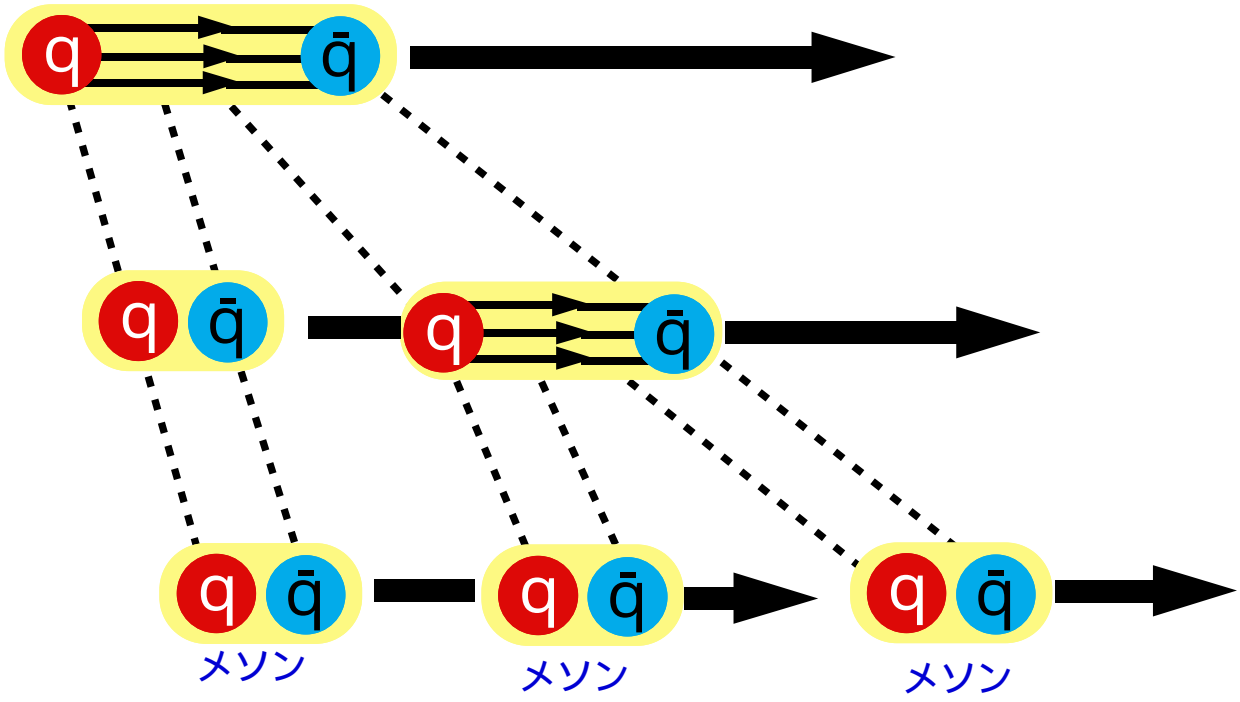
カラーを持った粒子（クォーク、反クォーク、グルーオン）は閉じ込められている！

カラーの閉じ込めとジェットの生成

ジェットの生成

対生成したクォーク・反クォークは、カラーの閉じ込めのため、白色状態であるハドロン（メソン、バリオン）からなる多数の粒子の束（ジェット）になる。実験で直接観測できるのは、カラーを持ったクォーク・反クォーク・グルーオンではなくジェット

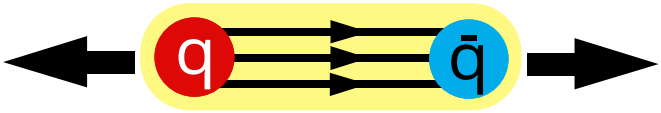




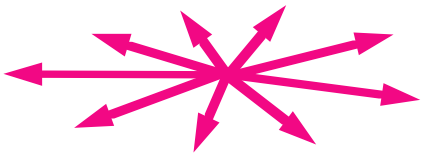
エネルギーが高くなるほどより多くのハドロンからなるジェットが生成される

よりジェットらしく

低エネルギー



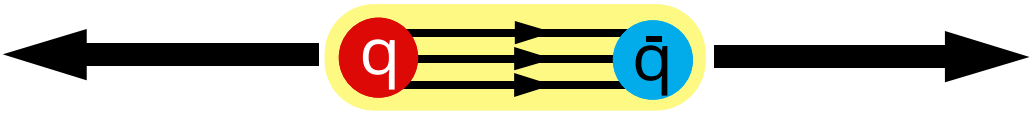
実験で見えるジェットの形



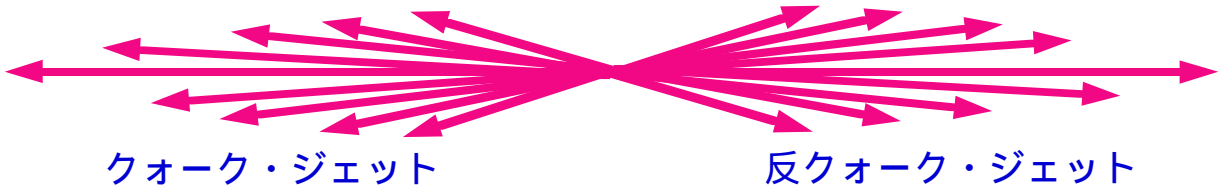
粒子の数は少なく、ジェットの形はまるい

何が起きたのか良く解からない

高エネルギー



実験で見えるジェットの形



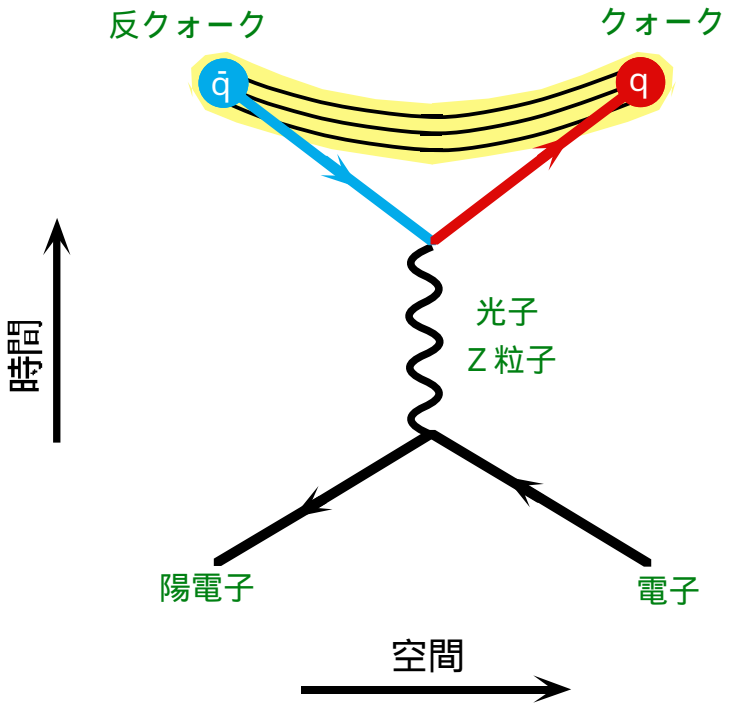
粒子の数が増し、ジェットが細くなり、よりジェットらしくなる

クォーク・反クォークの対生成が起きたことが２本のジェットから解かる

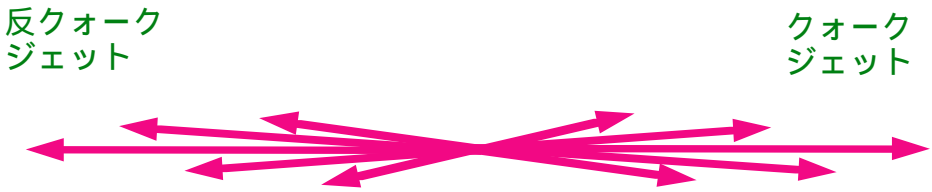
電子・陽電子衝突における ジェットの生成

クォーク・反クォーク対の生成

ファイマン図では



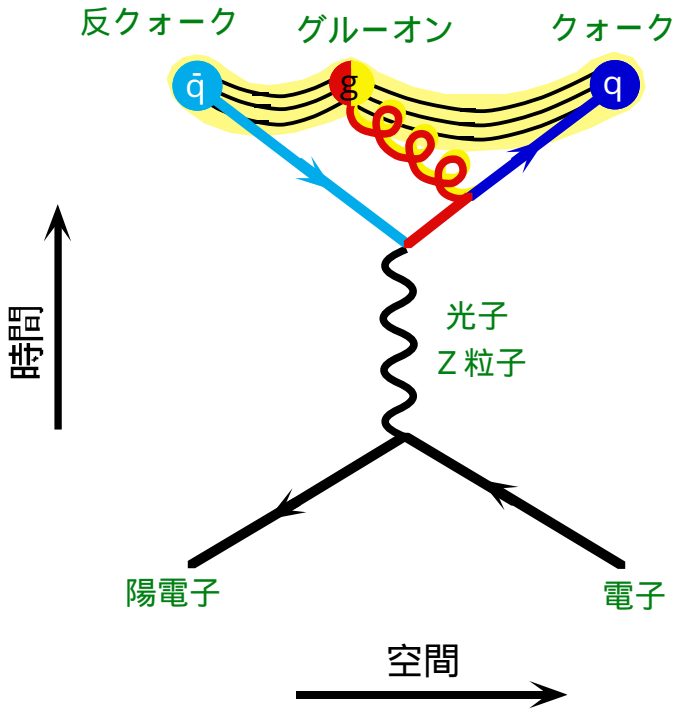
実験で見えるジェットの形は



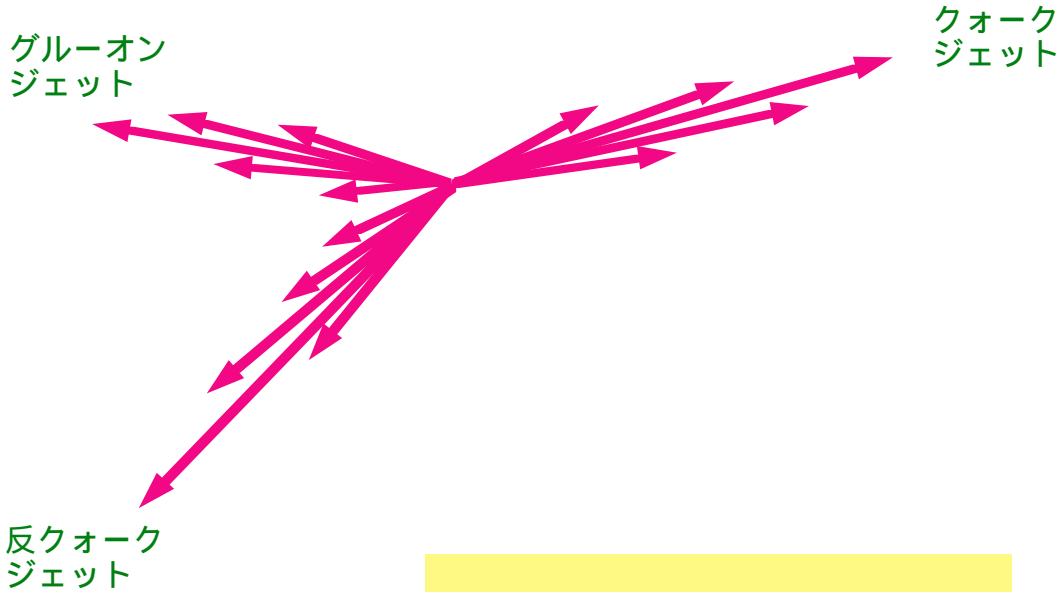
2ジェット事象

クォーク・反クォーク対＋グルーオンの生成

ファイマン図では



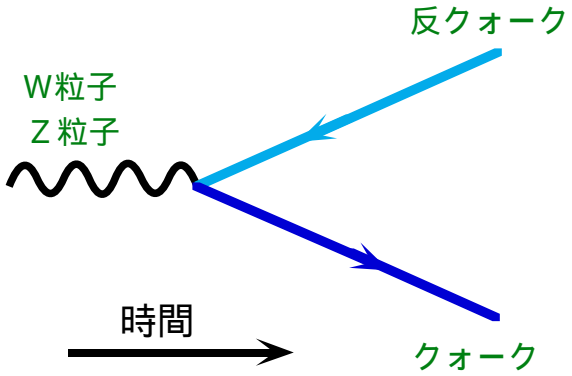
実験で見えるジェットの形は



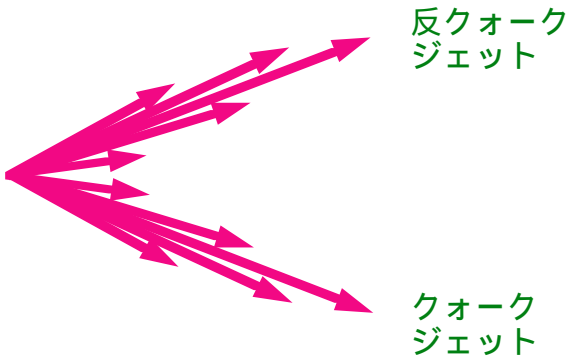
3ジェット事象

W粒子、Z粒子の崩壊

ファイマン図では

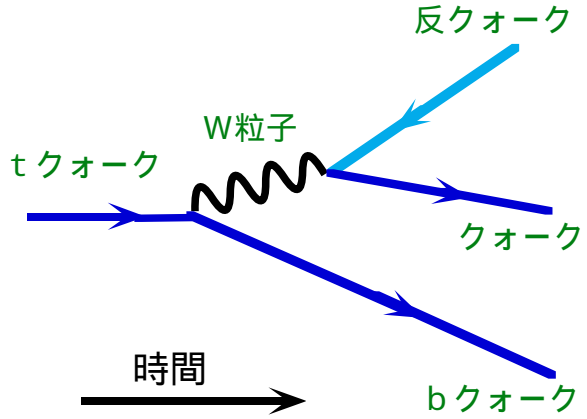


実験で見えるジェットの形は

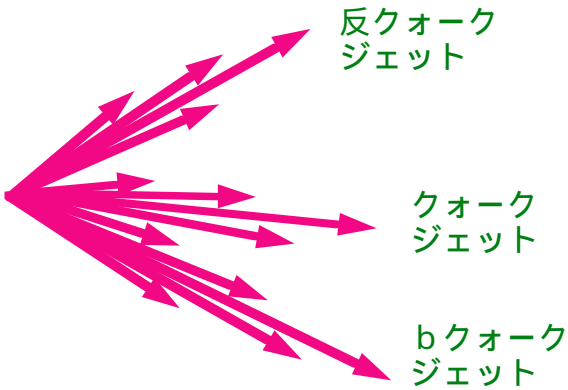


トップクォークの崩壊

ファイマン図では

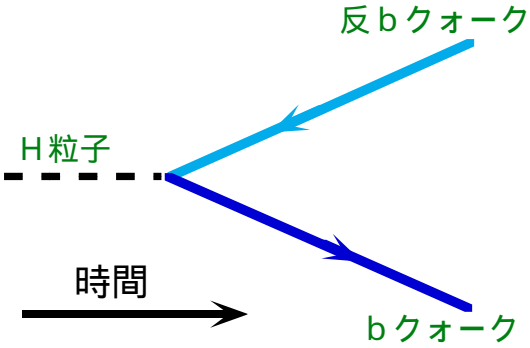


実験で見えるジェットの形は

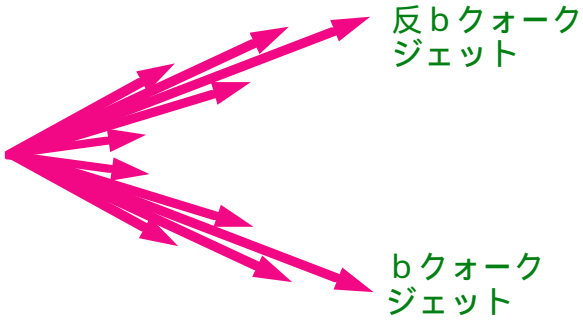


ヒッグス粒子の崩壊

ファイマン図では



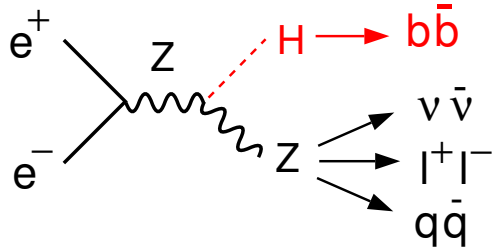
実験で見えるジェットの形は

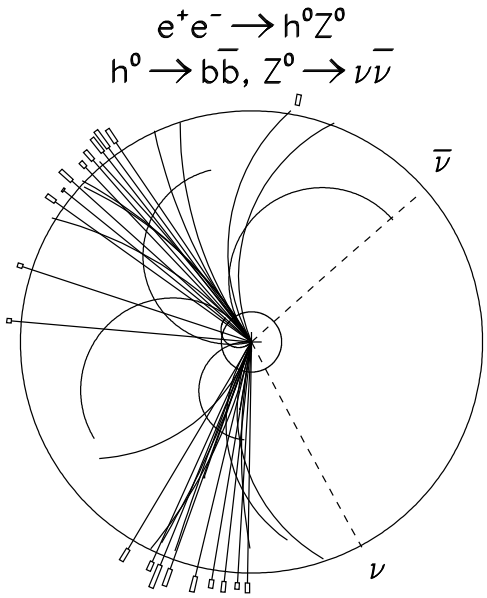


JLCのエネルギーでは、ジェットがよりジェットらしくなり、ファイマン図に現われるクォークや反クォーク、W粒子、Z粒子、グルーオン等の基本粒子がジェットとして識別できるようになる

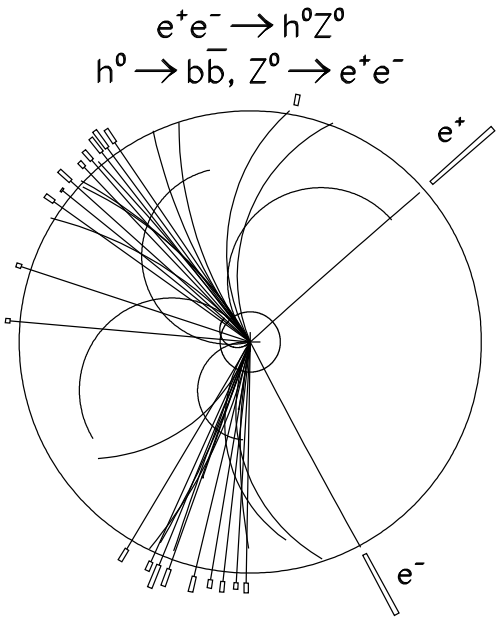
ヒッグス粒子の探索

ヒッグス粒子の生成事象の例

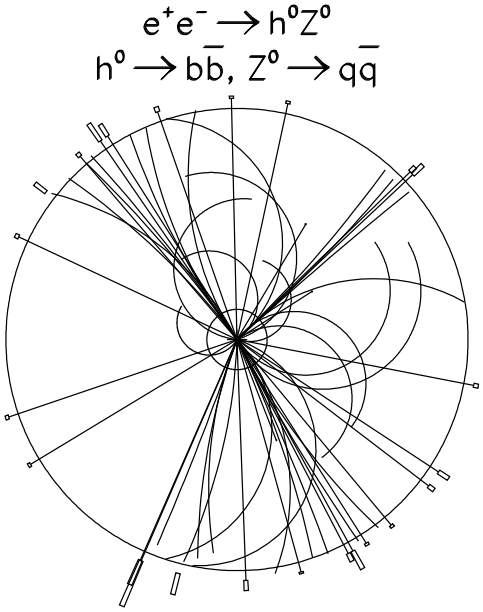




2 ジェット



2 ジェット + レプトン



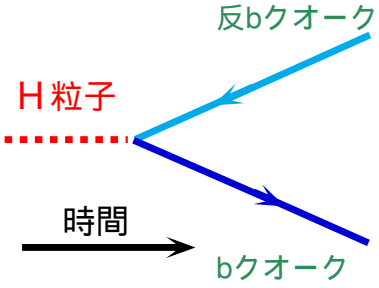
4 ジェット

----------→ 独立な 3 つのモード

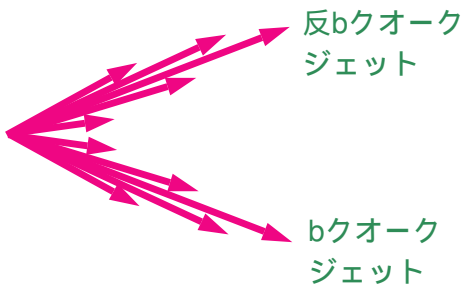
BG: ZZ, eνW, WW は b-ジェット検出で落とす！

２ジェット不変質量分布

ファイマン図では

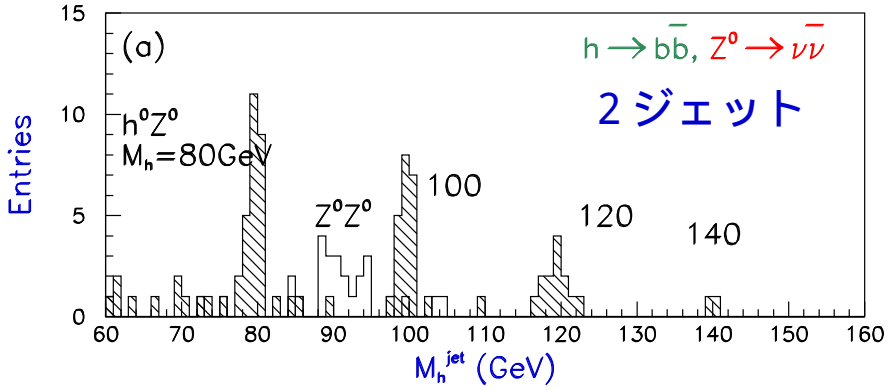


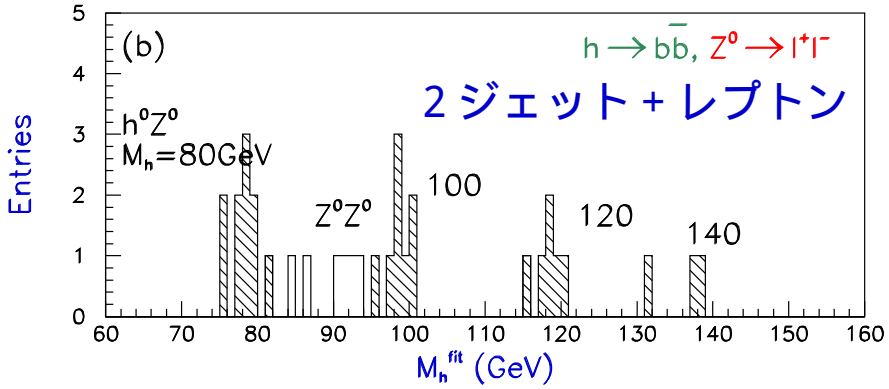
実際に見えるジェットの形は

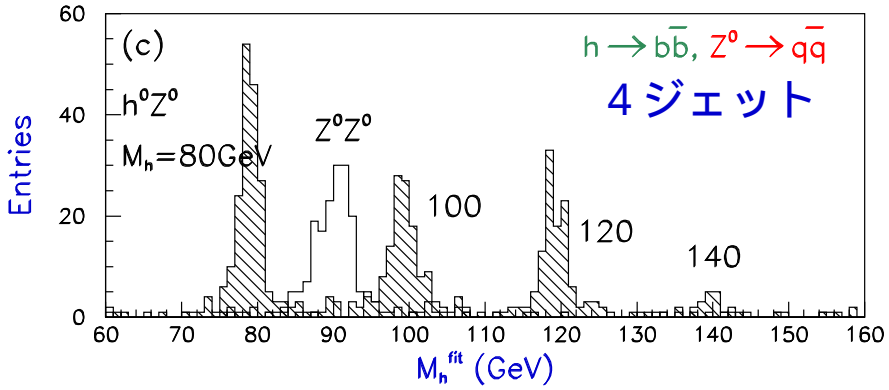


$\sqrt{s}=300GeV$, $\int Ldt=4fb^{-1}$

約１０日

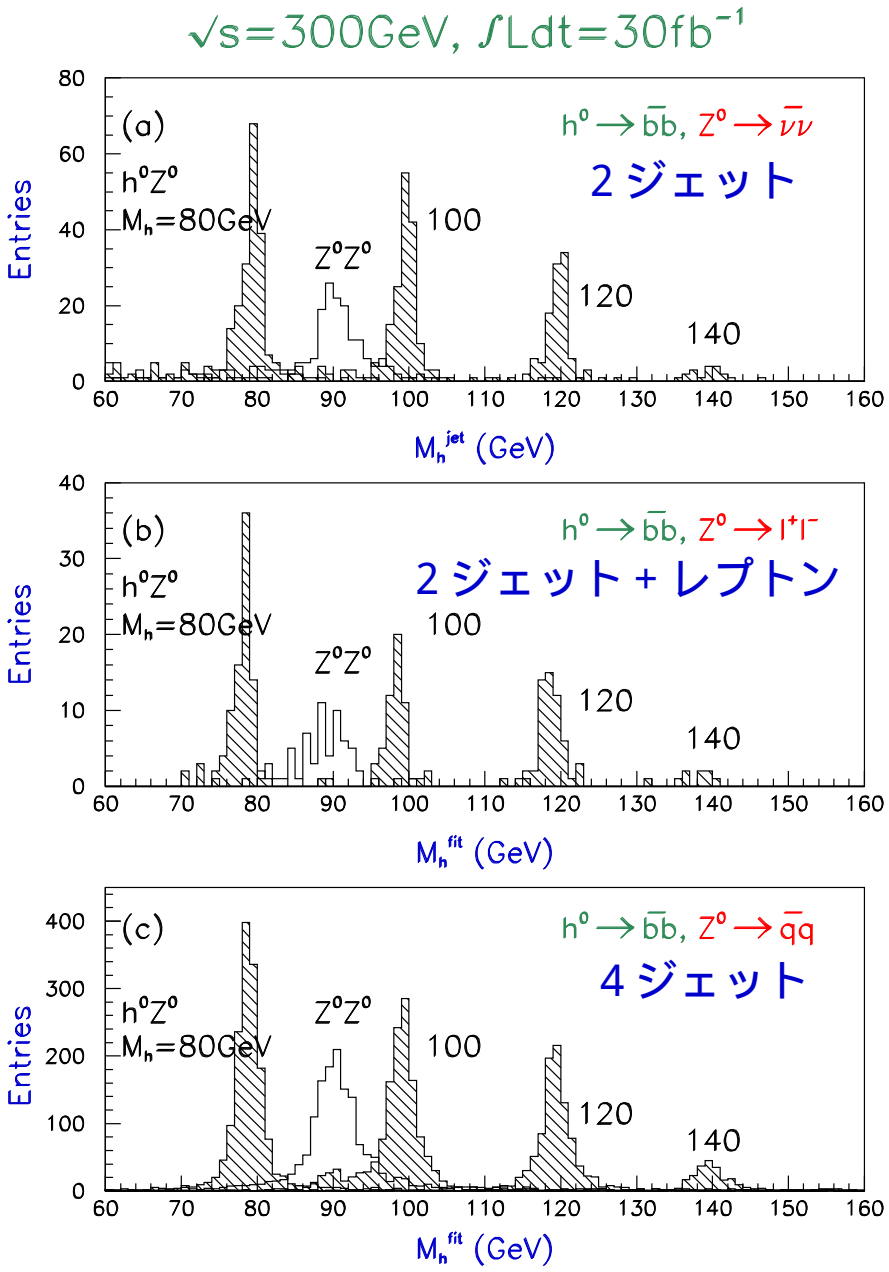






簡単に見つかる

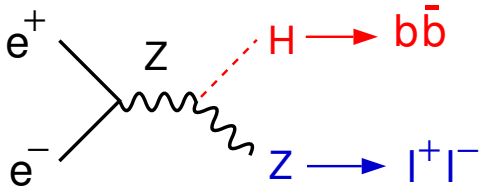
１００日も経てば



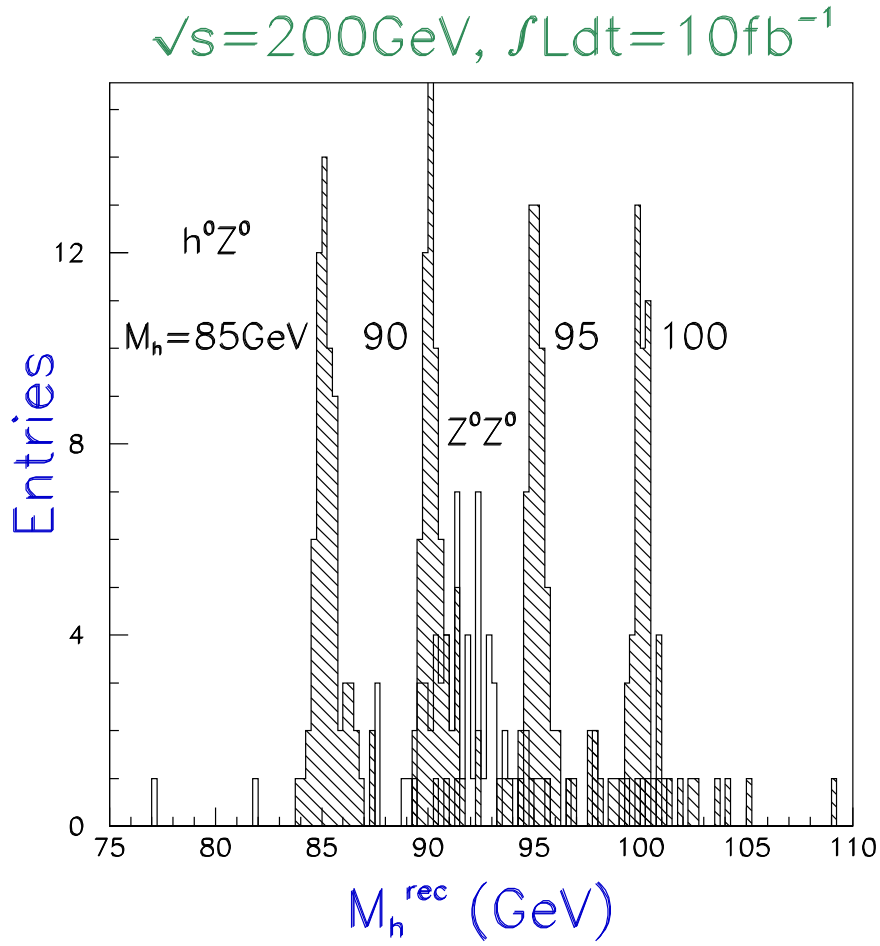
すぐたまる！

ヒッグス粒子の精密測定

ビームエネルギーを最適化する
ビームエネルギー幅を小さくする



反跳質量分布を見る



ΔMH = ±10~50 MeV
ΔΓH = 200 MeV

崩壊分岐比や生成断面積の精密測定も可能

ヒッグスの物理のまとめ

JLC-I

重心系エネルギー = 300~500 GeV

ヒッグスの最も居そうな所を完全にカバー

居なければ

------→ 大統一 / 超対称性 } 死ぬ！

大砂漠の有無を決する現在の高エネルギー物理学最大の分岐点！

------→ JLC-I が方向を決める！

もし見つかったなら

精密測定

------→ $H = H_{\text{標準理論}}$ or Not ?

将来の最大の分岐点！

------→ ハドロンコライダーではだめ
JLC-I が方向を決める！

超対称性の物理

軽いヒッグスの発見

------→ 大砂漠が有力

ヒッグス質量に対する
量子補正の発散の問題

超対称性が有力

しかし

軽いヒッグスの存在は超対称性の証明
にはならない！

------→ 超粒子を発見しなければだめ

超粒子の発見

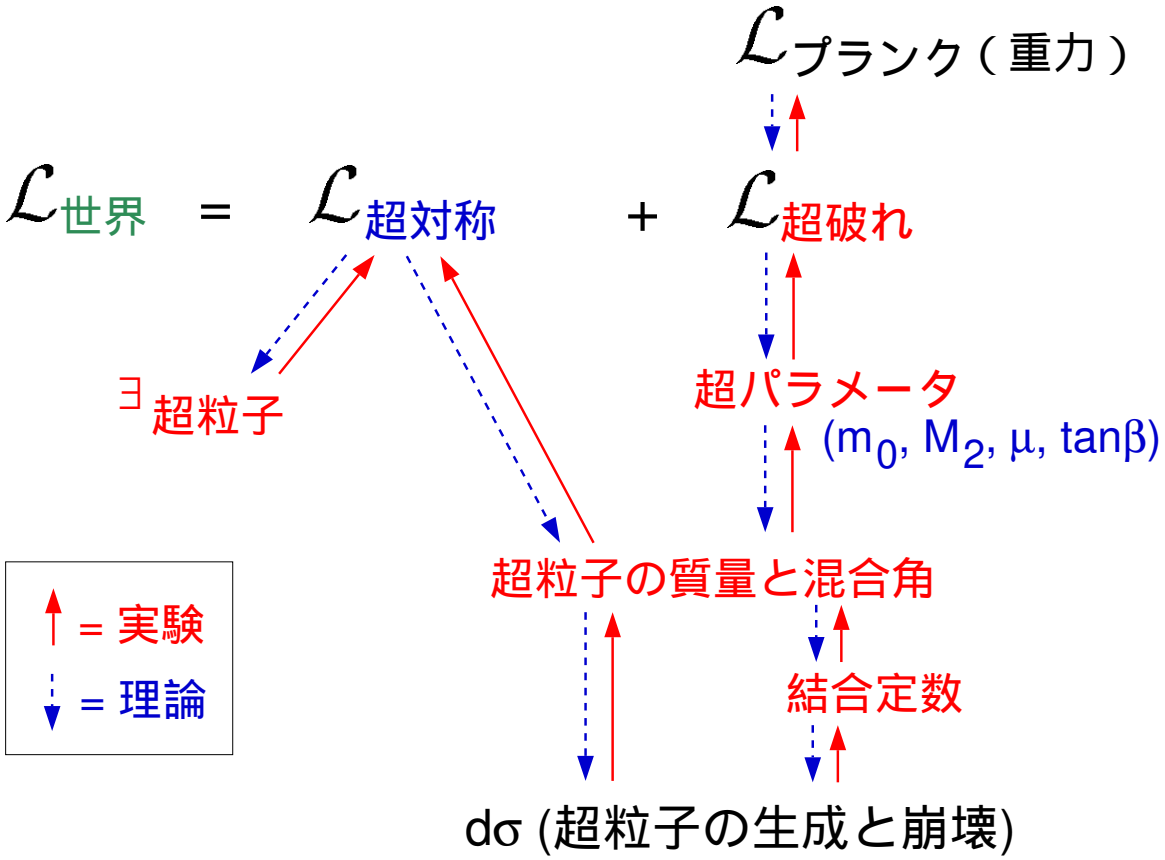
もし見つかったなら

超粒子の性質は重力が重要な役割を果たす
超高エネルギーの物理で決まっている

精密測定

------→ プランク世界をのぞく最初の
現実的な可能性が開ける！

超対称性を調べることでプランク世界が分かるということの意味



JLC での超物理

＊）超粒子の発見

------► $\exists\,\mathcal{L}_{超対称}$

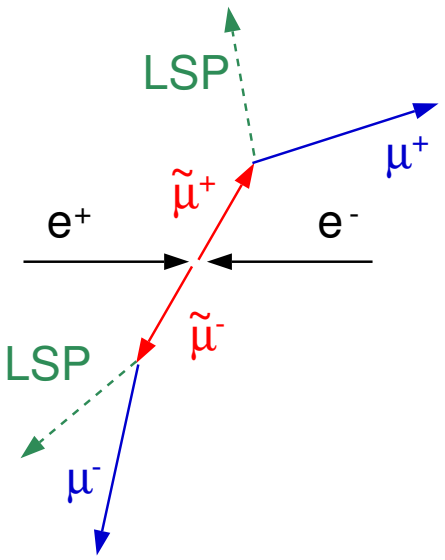
＊）その研究（dσ 測定）

------► $\mathcal{L}_{超破れ}$ ------► $\mathcal{L}_{プランク}$?

超粒子の探索

超粒子生成のシグナル

例）超ミュー粒子の対生成



LSP（一番軽い超粒子）

安定かつ測定器にかからない

↓

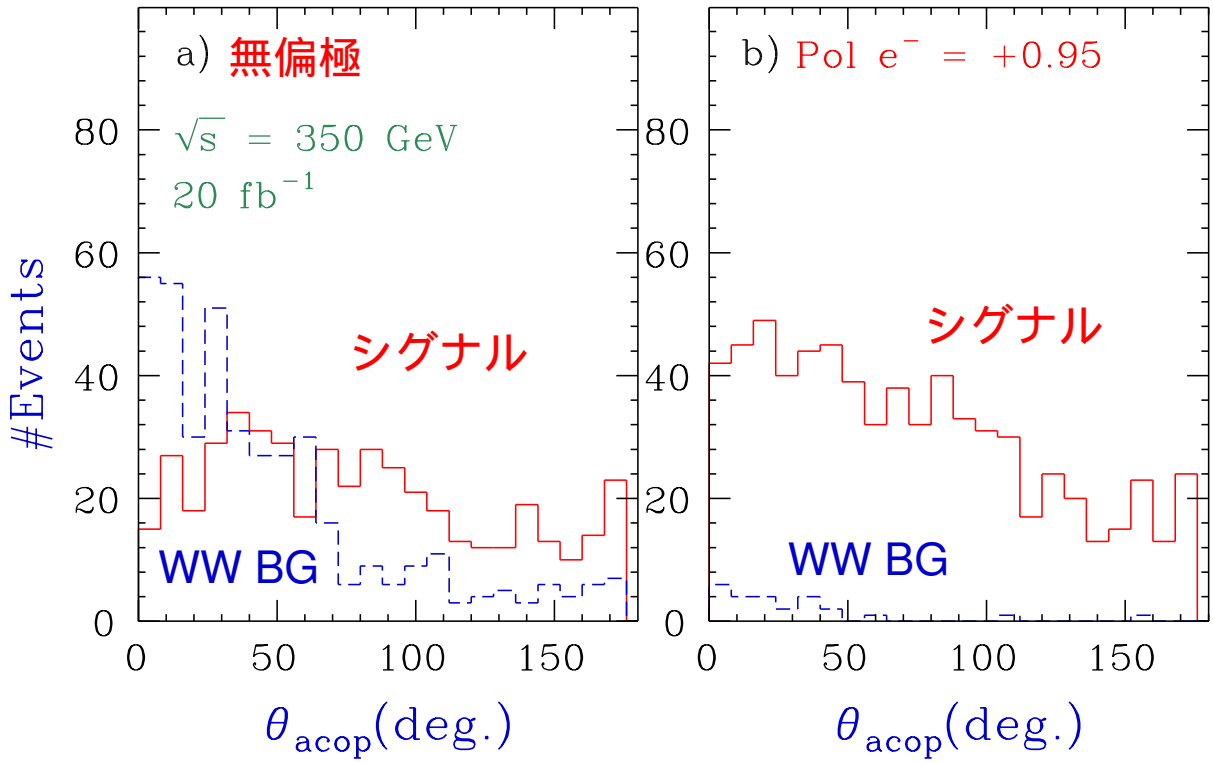
横運動量欠損

↓

曲がった事象

偏極電子ビームが強力

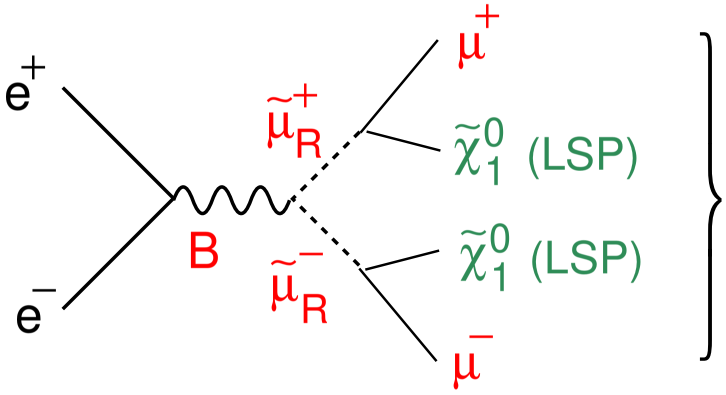
$e^+e^- \to \tilde{\mu}_R^+ \tilde{\mu}_R^-$



極めて純度の高い超粒子のサンプルが得られる

--------► 精密測定が可能！

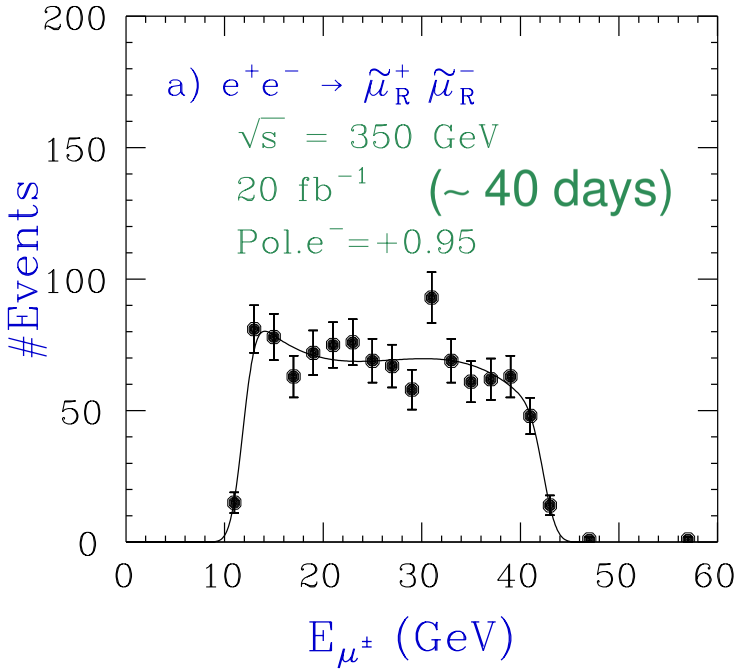
超粒子の質量の決定

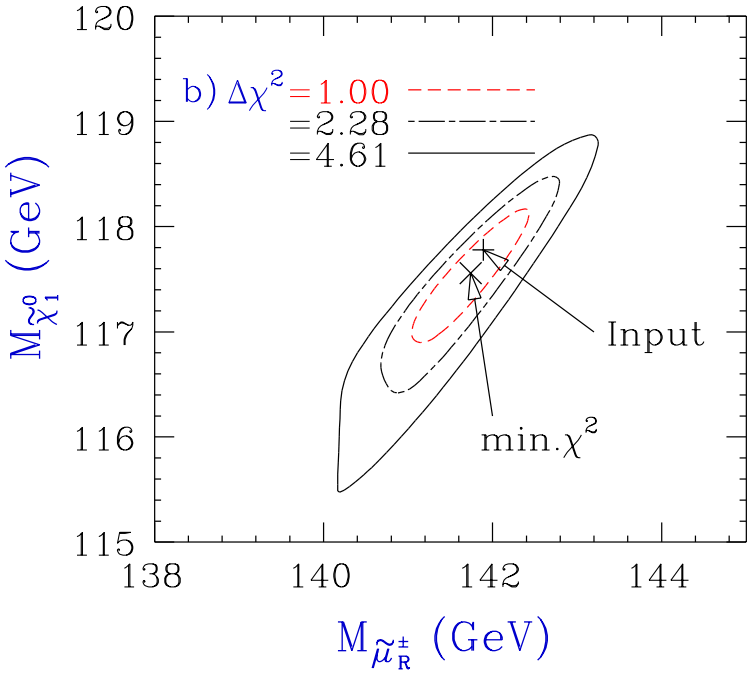


$E_{\mu^{\pm}}$ を測る

エンドポイント

→ $(m_{\tilde{\mu}^{\pm}_R}, m_{\tilde{\chi}^0_1})$





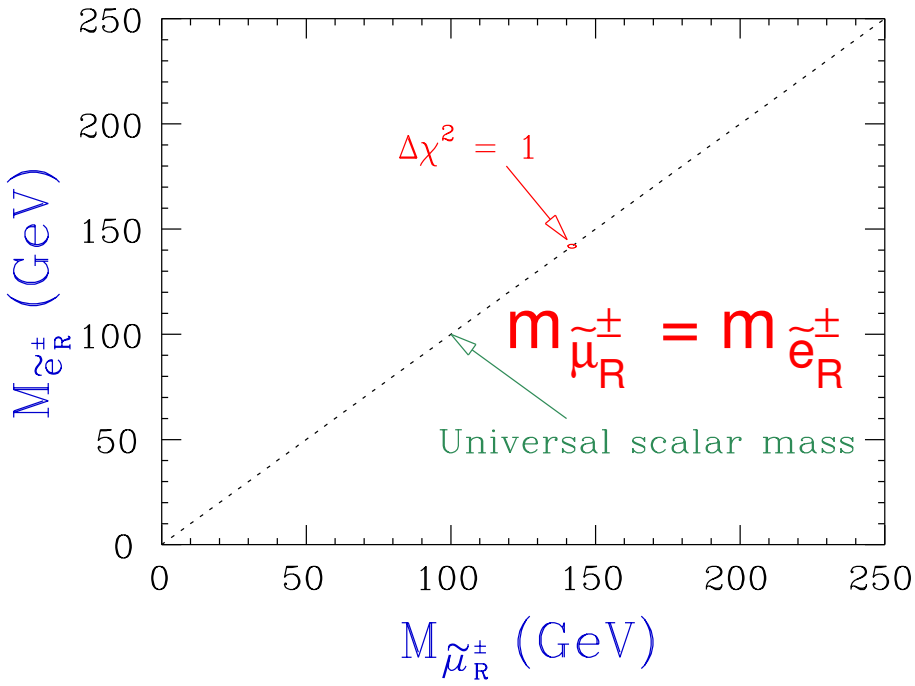
→ $\Delta m/m \lesssim 1\%$!

超重力理論 (~ $\mathcal{L}_{\text{プランク}}$)

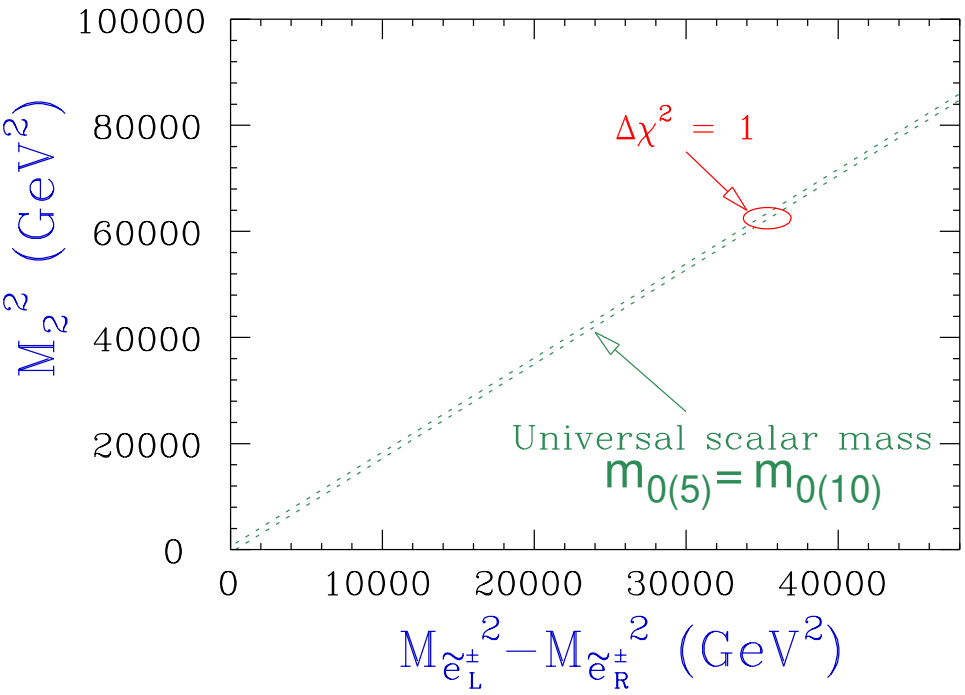
「重力で超対称性をやぶる」のテスト

全てのスカラー粒子は大統一の
エネルギーで同じ質量

世代によらないこと



右巻き・左巻きによらないこと

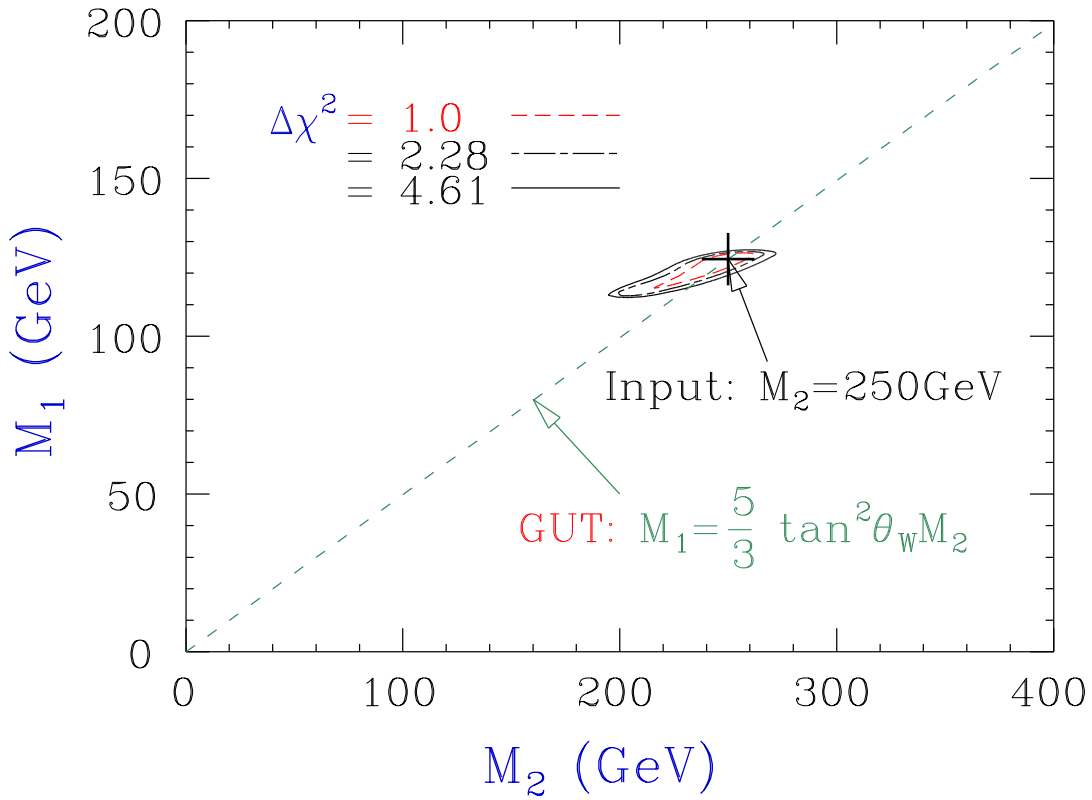


本当に大統一か？

大統一のエネルギーでの
ゲージー質量：共通

大統一 ⇢ $\dfrac{M_i}{\alpha_i(m_Z)} = \dfrac{M}{\alpha_{GUT}}$

$$i = \begin{cases} 1\ U(1)_Y \\ 2\ SU(2)_L \\ 3\ SU(3)_C \end{cases}$$



⇢ こうなれば大統一を信じるしかない！

$\mathcal{L}_{大統一}$ のテスト！

超対称性の物理のまとめ

JLC-I の発見能力は LHC と同程度

---------→ 見つかった後は JLC-I の完勝！

↓

$m_{超}$ } 測定
$\sigma_{超}$

JLC での超物理

↓

$\mathcal{L}_{超破れ}$

↓

$\mathcal{L}_{プランク}$ に迫る！

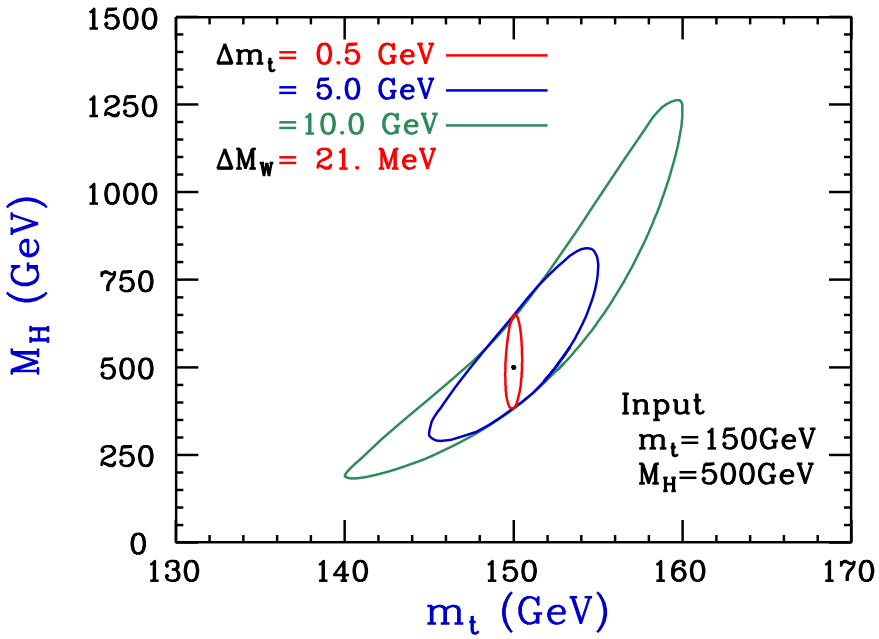
もし軽いヒッグスが見つからなかったら

W粒子とトップクォークの質量の精密測定

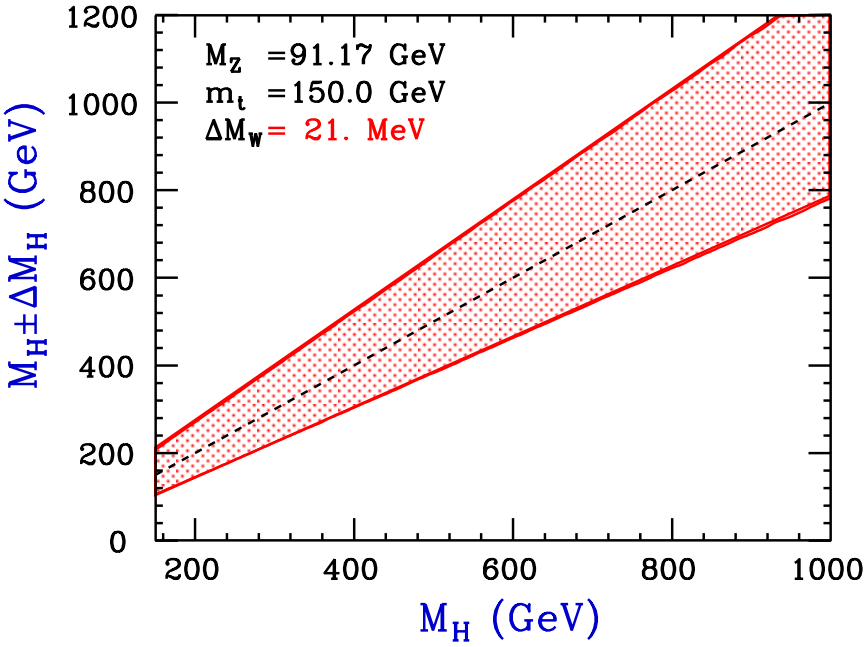
(M_Z, M_W, m_t, M_H) 間の関係

LEP　　JLC-I

質量の量子補正



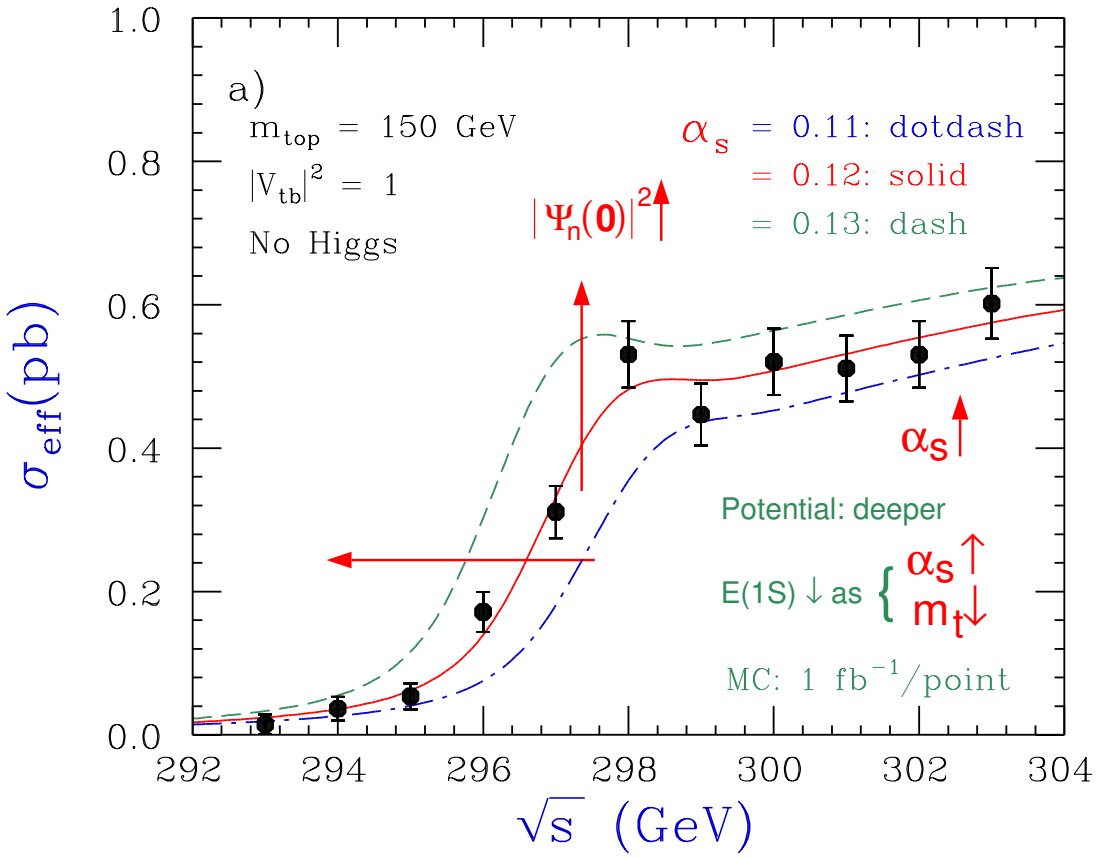
ヒッグス粒子の質量の決定精度

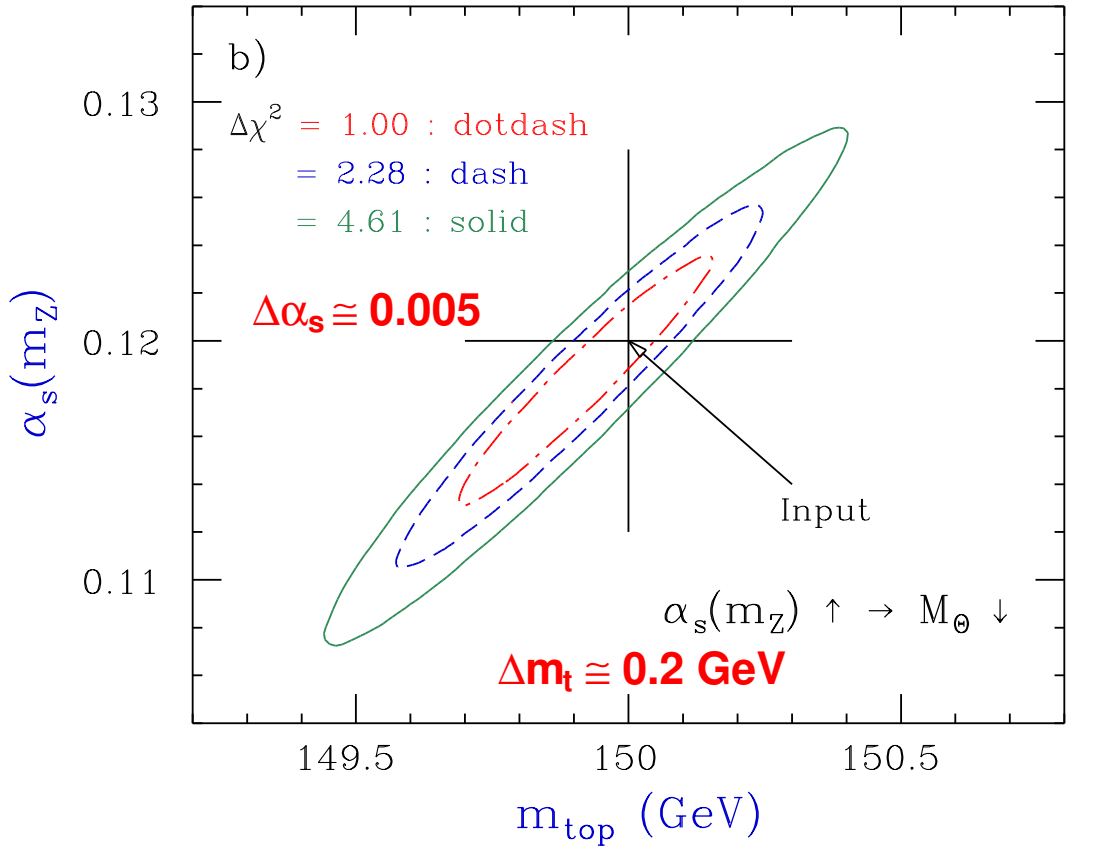


次に行くべきエネルギーが決まる！

トップクォーク対の生成断面積の測定

~20 days





-------► トップの質量と強い力の結合定数の精密測定

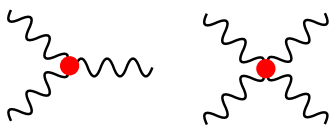
もし求まった M_H が非常に大きかったら

ヒッグス粒子は存在しないのかも知れない

重要な質問

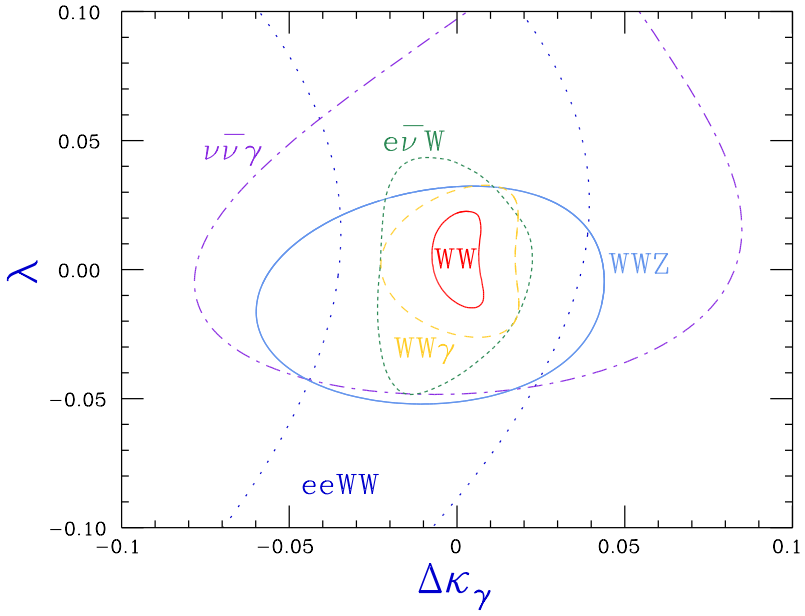
W や Z は本当にゲージ粒子なのかそれともより基本的な粒子からなる複合粒子なのか？

ゲージ粒子なら相互作用はゲージ原理で決まっている ----→ ゲージ相互作用からのずれ（異常結合）を探せ！

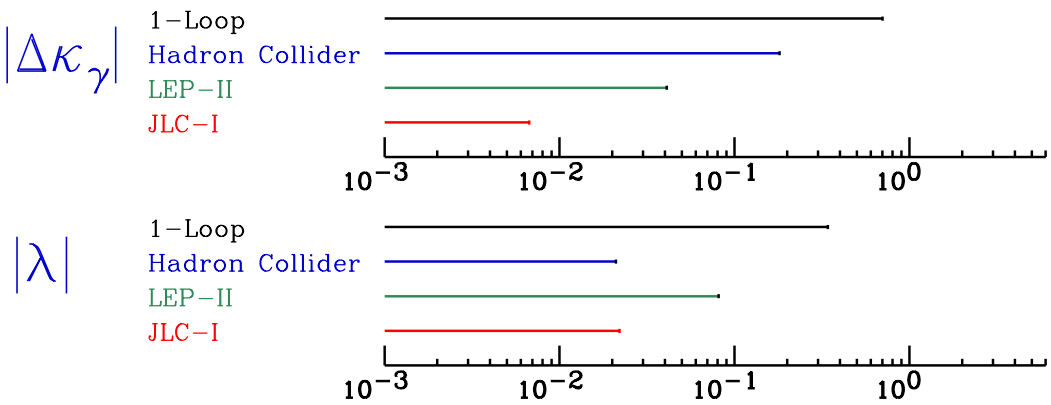


$$\mu_W = \frac{e}{2M_W}(2 + \Delta\kappa_\gamma + \lambda)$$

$$Q_W = \frac{e}{M_W^2}(-1 - \Delta\kappa_\gamma + \lambda)$$



異常結合に対する感度の比較



----------→ １％以下の精度で異常結合検出できる！

JLC-I の精度はハドロンコライダーに勝る！

全体のまとめ

物理学の内的論理

= 対称性 ⇢ 自然の語る物語の中心テーマ

↓

特にゲージ対称性

ゲージ原理

対称性 ⇢ { 粒子の統一 / 力の統一 / 発散の除去

⇢ $\mathcal{L}_{\text{超大統一}}$ には抗し難い魅力がある！

JLC-I はこれがあさはかな人類の妄想か否かを判定してくれる！

⇢ $\mathcal{L}_{\text{超大統一}}$ が本当ならば

JLC-I

$$\sqrt{s} = 300 \sim 500\ \text{GeV}$$

は

$$\mathcal{L}_{\text{究極}}$$

への現実的な一歩を踏み出させてくれる！

一刻も早くJLC-I を作るべし！