

LHC で期待されている物理

東京大学 素粒子物理国際研究センター

浅井 祥仁

Shoji.Asai@cern.ch

2006年(平成18年)3月1日

素粒子物理学の緊急かつ重大な課題は、(1)質量起源の解明、(2)標準理論を超える新しい物理の枠組みの発見、この二点に尽きる。この目的のため、LHC 計画が立てられ、人類未到の TeV 領域での素粒子現象の直接研究が 2007 年から開始される。LHC で期待される成果のうち、初期の“発見の物理”に絞って今回紹介する。

1. はじめに –LHC 計画–

90 年代、LEP、SLC、Tevatron 実験の成果により、標準理論は非常に高い精度で検証され、力の源がゲージ対称性であることが示された。しかしゲージ対称性のもとではすべての素粒子の質量はゼロであり、素粒子の質量の起源は未解決な問題として残ったままである。そのもっとも有望な答えが、真空を満たすヒッグス場と自発的対称性の破れであり、その直接証拠であるヒッグス粒子の発見と研究が強く待たれている。

また標準理論は、対称性のより高い理論の低エネルギー近似であり、TeV 領域に新しい物理があることが数多くの実験事実や理論的な考察から示唆されている。特に TeV 領域に超対称性粒子が存在すると力が大統一されることが示され、宇宙の暗黒物質のよい候補となることから、その発見への期待が高まっている。超対称性以外にも、TeV 領域の余剰次元や、テクニカラーモデルなど標準理論を超えた新しい物理の可能性がある。

CERN は、このような素粒子物理学の現状に鑑み、ヒッグス粒子の確実な発見と質量起源の解明、および超対称性など標準理論を超える TeV 領域の新しい素粒子現象を発見するため、LHC (Large Hadron Collider) [1]の建設を進めている。

LHC は、右の写真(図 1)に示す円周 27km の地下トンネルに、8.4T の強力な超伝導マグネットを隙間なく配置し、7TeV に加速した陽子と陽子を衝突させる実験である。陽子・陽子重心エネルギーは 14TeV であるが、実効的な衝突エネルギーはおおよそ数 TeV である。これは従来のエネルギーフロンティアである LEP/Tevatron の約 10~20 倍のエネルギーに相当するものであり、TeV 領域の新しい素粒子現象の“直接探索”が可能な真正正銘の TeV コライダーである。



図 1 LHC トンネル航空写真：左下はジュネーブ空港

実験開始予定まであと一年余りとなり、加速管の設置が急速に進んでいる。2007 年 2 月に、設置が終了し、その後、真空引き、冷却を行い、春・夏頃からビーム・コミッションを開始、2007 年末から衝突実験を開始する予定である。まずはデザインルミノシティの 1/100 で検出器のコミッションを行う。積算ルミノシティ 100pb^{-1} 程度の予定である。勿論、数百 pb^{-1} で出来る物理の準備研究は各物理ワーキンググループで始めている。2008 年は、デザインルミノシティの 1/10 程度での実験を行い、一年程度で積算 $L=10\text{fb}^{-1}$ のデータを収集する予定である。蛇足ではあるが、LHC は Tevatron と異なり、陽子・陽子コライダーなので、衝突頻度が反陽子のルミノシティで制限される心配はない。本文に示す様に、ヒッグス粒子、超対称性粒子の発見には 10fb^{-1} のデータで十分であり、2008 年終わりから 2009 年前半には、今ここにまとめる物理成果が期待できる。2009 年以降はデザインルミノシティまで徐々に衝突頻度をあげ、最終的に現在の KEK-B と同程度の $10^{34}\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$ に達する計画である。この衝突頻度で年間 100fb^{-1} のデータが蓄積さ

れ、そこで発見されたヒッグス、超対称性粒子の様々な性質を詳しく研究することが可能となる。

2. ATLAS 検出器

LHC 加速器には、ATLAS と CMS の二つの汎用検出器があり、日本の研究機関は、ATLAS 検出器（図 2）に参加している。検出器の各部分の量産はほぼ終了し、現在最終組み立てを行っている。現在の実験ホールの状況を写真（図 3）に示す。写真の中央奥に見えるのがカロリメータ（EM+HAD）であり、周りをバレルトロイド磁石が囲んでいる。これから、最内部の内部飛跡検出器および外側のミュオン検出器とエンドキャップ検出器が組み込まれる予定である。

ATLAS 検出器[2]は主に三つの要素で構成されている。中央部は、シリコン（ピクセル、ストリップ）と TRT（遷移輻射トラッカー）による飛跡検出器で、2T のソレノイド磁場の中で荷電粒子の運動量を精密に測定する。その外側には、液体アルゴンカロリメータによる電磁シャワー検出器が設置され、高いエネルギー・位置分解能での電子、 γ の検出が可能である。ハドロンカロリメータはシンチレータタイルで構成されている。最外部は、トロイド空心磁場によるミュオン検出器で構成されている。エネルギー分解

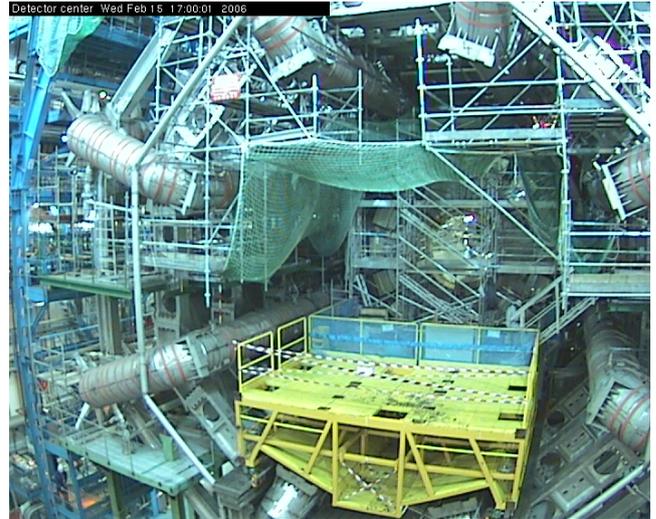


図 3 ATLAS 検出器の組み立ての現状（2006 年 2 月）

能の概算値は、 $P_t = 100\text{ GeV}$ の粒子に対して、電子、 γ が 1.5%、ミュオンが 2%、ジェットが 8% 程度である[2]。

高い分解能を得るため 160M チャンネルもの読み出しがあり、しかも 25 nsec ごと（40 MHz）に反応が起こるため、高速の読み出しエレクトロニクスの開発は不可欠だった。日本は、これまでエンドキャップのミュオン・トリガーチャンバーとそのエレクトロニクスの開発・製作、ソレノイド磁石、シリコン・ストリップの製作に貢献してきた。

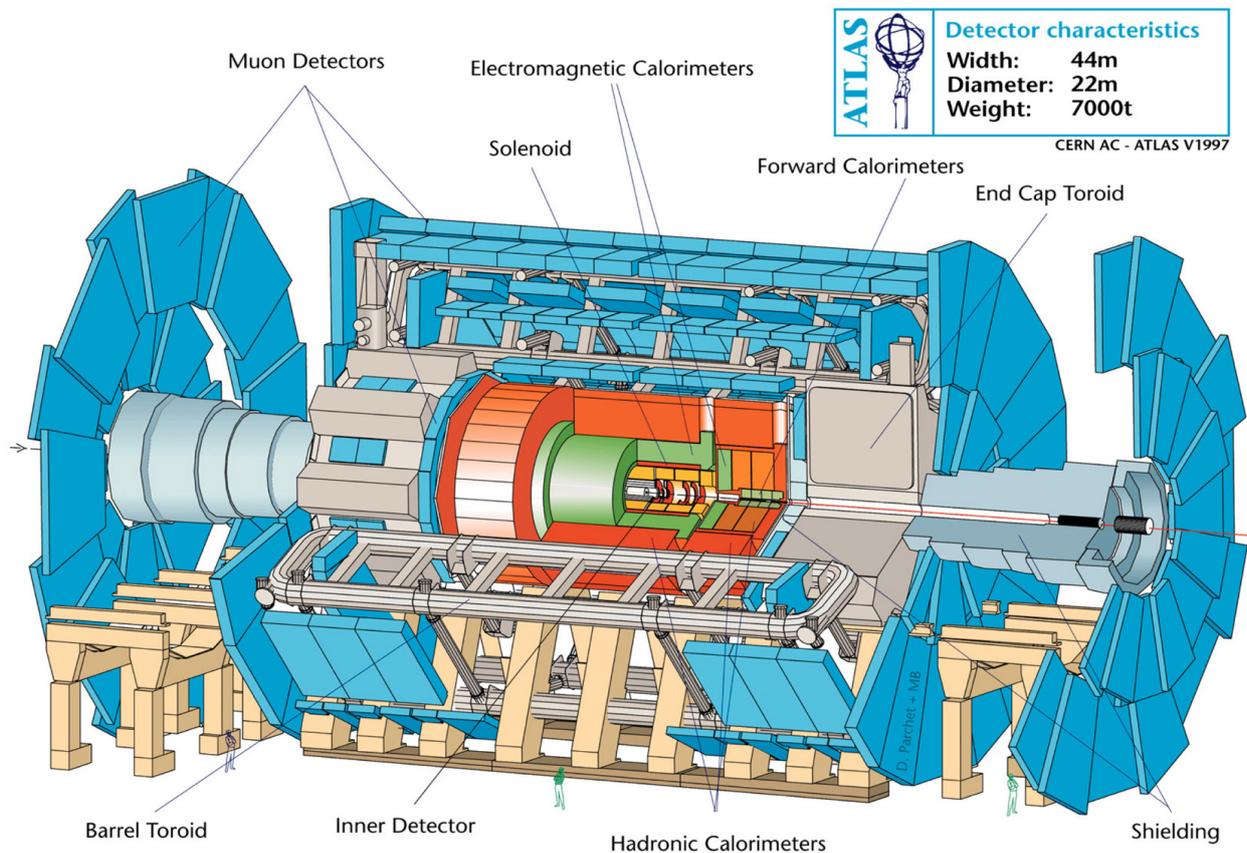


図 2 ATLAS 検出器の完成予想図（高さ 22m 長さ 44m）

ATLAS 実験で収集されるデータは年間約 3 ペタバイトという膨大なものであり、必要とされる計算機資源は、disk, cpu とともに従来の計算機システムでは対応が不可能である。そこで、世界中の参加各国が「地域解析センター」を立ち上げ、高速ネットワークでこれらをつなぎ、大きな一つの計算機のように扱い、解析に必要な計算機資源を賄う計画 (LHC computing GRID 計画) である。GRID 技術を用いて世界中に分散した計算機を統合し、膨大なサイズのデータを解析するシステムである。日本では東京大学で、この地域解析センターの準備を行なっている。

3. 質量起源 (H ヒッグス粒子)

LHC での標準理論ヒッグス粒子の生成は、生成断面積の大きな順に以下の四つがある。

1. $gg \rightarrow H$ (gluon fusion 過程): 重心系エネルギーが 14 TeV と高いため、ヒッグスのような比較的軽い粒子は小さ目の運動量を担うパートンからの生成が可能となる。グルオン分布関数は“small x 領域”で $1/x$ の大きな貢献をするため、トップ・クォークのループを介したこの過程は生成断面積が大きい。
2. $qq \rightarrow qqH$ (vector boson fusion 過程): クォークから放出された二つのゲージボソンから、ヒッグス粒子が生成されている。LHC は pp コライダーであるため、大きな運動量を担うクォーク同士の反応が起こり易いため、反応断面積が大きい。またゲージ粒子を放出して反跳したクォークに起因する大きな横運動量を持つジェットが二本観測される特徴を持っている。
3. $qq \rightarrow (W/Z)H$ (W/Z associate production 過程): Tevatron/LEP などの粒子・反粒子コライダーで有望な生成過程である。
4. $gg \rightarrow tH$ (top associate production): 対生成されたトップ・クォークから、 H が放出される過程であり、top quark の湯川結合と言う重要な情報を含んでいる。

生成断面積をヒッグス粒子の質量の関数として図 4 に示す。質量が 100 ~ 200 GeV の場合、四つのすべての生成過程で観測可能な断面積である。一方 1 TeV 付近と重いヒッグス粒子に対しても、グルオン・フュージョンとベクターボソン・フュージョンの両生成過程は有意な生成断面積を持っている。

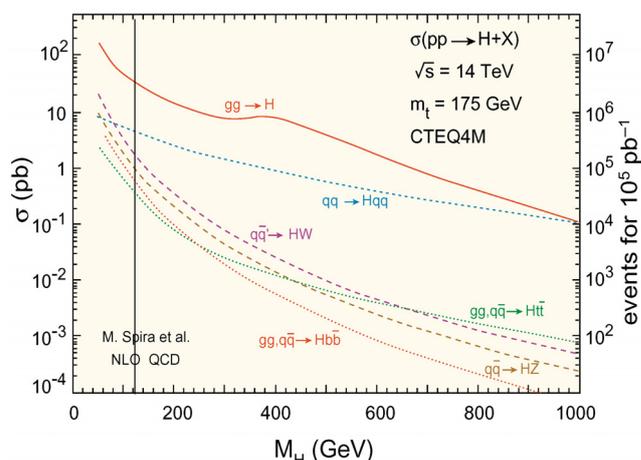


図 4 ヒッグス粒子の生成断面積 (NLO) [3]

生成されたヒッグス粒子はすぐに崩壊する。140 GeV より軽い場合は $bb, \tau\tau$ と分岐比は小さいが $\gamma\gamma$ へ崩壊する。160 GeV より重くなると、主要な崩壊モードは、 WW と ZZ となる。

生成 4 過程 \times 崩壊 5 過程の組み合わせのうち、実験初期の段階で有効なチャンネルをまとめると、下表 (表 1) の 6 チャンネルである。

ヒッグス粒子が軽い場合 (< 140 GeV)、重要となるのが、(1) ベクターボソン・フュージョン過程で生成され、タウペアーに崩壊した場合と、(2) グルオン・フュージョン過程およびベクトルボソン・フュージョン過程で生成されたヒッグス粒子が 2γ に崩壊するチャンネルが最初の発見チャンネルであることが期待されている。一方、ヒッグス粒子が 140 GeV より重い場合は、 ZZ を介した 4 レプトンモードと WW が主要な発見モードになる。

表 1 標準模型ヒッグス研究で有効なチャンネルのまとめ

生成過程	崩壊過程	有効な領域とその効果	
Gluon Fusion	$H \rightarrow \gamma\gamma$	110 ~ 140 GeV	発見・質量測定 spin = 0 の傍証
	$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$	140 ~ 1000 GeV	発見・質量、spin、結合定数測定
Vector Boson Fusion	$H \rightarrow \tau\tau$	110 ~ 140 GeV	発見・結合定数測定
	$H \rightarrow WW$	130 ~ 200 GeV	発見・結合定数測定
	$H \rightarrow \gamma\gamma$	110 ~ 140 GeV	発見・質量測定
ttH	$H \rightarrow bb$	110 ~ 130 GeV	Y_t の測定

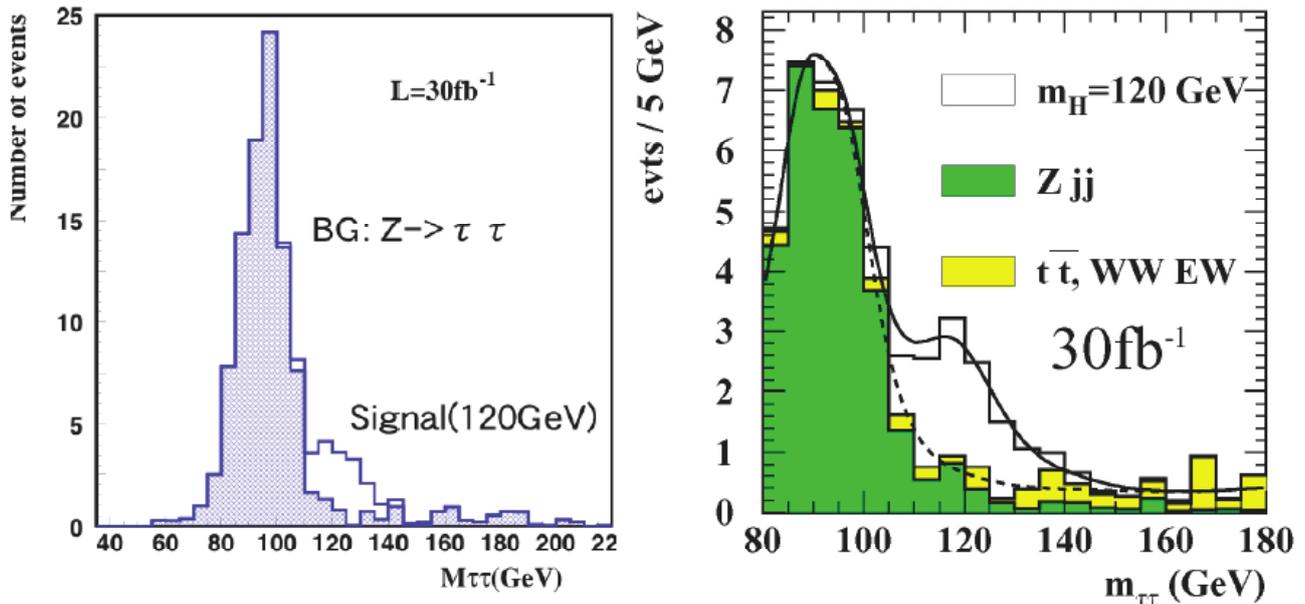


図5 再構成されたタウペアの不变質量分布
 左：一方のタウがハドロニック崩壊、一方がレプトニック崩壊した場合 右：ともにレプトニック崩壊した場合
 灰色の分布はドレル・マンバックグラウンドで、120 GeV のところのピークが信号である。

(1) ベクターボソン・フュージョン過程で生成され、タウペアに崩壊した場合、横方向の消失運動量の情報を用いて、タウが再構成可能である。これにより、ヒッグス粒子の質量の再構成が可能であり、図5に示すようにドレル・マン過程のバックグラウンドから分離し、ヒッグスの質量(図中では120 GeV)の位置にきれいなピークが観測される[4]。このチャンネルの解析の鍵となるのが横方向の消失運動量の正確な測定にある。キャリブレーションは勿論のこと、ハドロン・EMの正しい補正、物質や検出器からの漏れの補正、ノイズ、パイルアップの補正の向上などの研究課題が現在精力的に進められている。

図6は、積算ルミノシティ 30 fb^{-1} でどれだけの確度で発見が可能であるかを、質量の関数として表している。114 GeV以下の軽い領域はLEPですでに棄却されている。200 GeVより重い場合でも、 20σ 以上の有意な検出が可能である。この図が示す様に、このチャンネルの発見能力は、 $L=30 \text{ fb}^{-1}$ で $5 \sim 6\sigma$ であるが、初年度の 10 fb^{-1} では、 3σ 程度であり、他のチャンネル ($H \rightarrow \gamma\gamma$) の助けが必要である。

(2) 液体アルゴン電磁カロリメータが γ 線検出を担っており、高い放射線環境でも $\gamma\gamma$ 不変質量分解能 2 GeV (for 120 GeV) での測定が可能である。このため連続分布のバックグラウンドから信号のシャープなピークが分離可能である。二つの γ 線だけを要求 (inclusive study) すると、 2γ のバックグラウンドが比較的大きい(図7左)。そこで従来は図6に示す様に大きな発見能力はないと思われていた (5σ に達するには $L=100 \text{ fb}^{-1}$ が必要)。

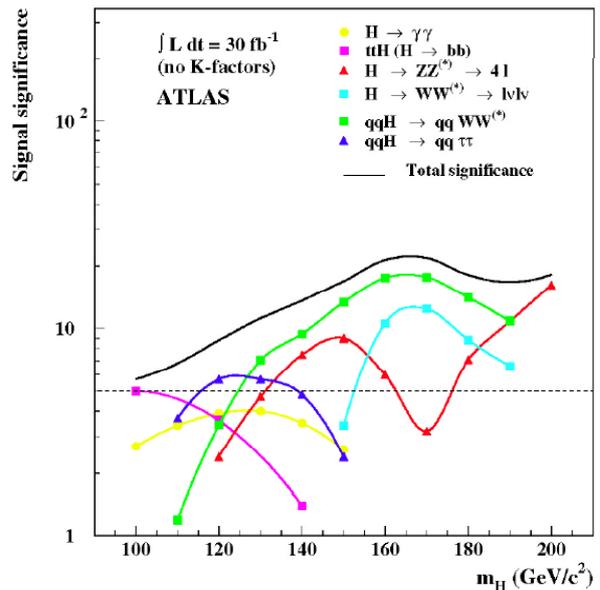


図6 標準理論ヒッグスの発見能力 ($L = 30 \text{ fb}^{-1}$)

われわれとアメリカグループの最近の研究で、一本、または二本の高い横運動量ジェットを要求することで発見能力が飛躍的に向上することが分かった。高い横運動量のジェットを要求することで、ヒッグスの信号は、グルオン・フュージョン生成過程の割合が減り、ベクターボソン・フュージョン過程の割合が増える。一方バックグラウンドは、高い横運動量のジェットを要求することで効率よく抑えられ、 S/N は向上する(図7右)。ベクターボソン・フュージョン過程は、二本の高い横運動量のパートンを tree level

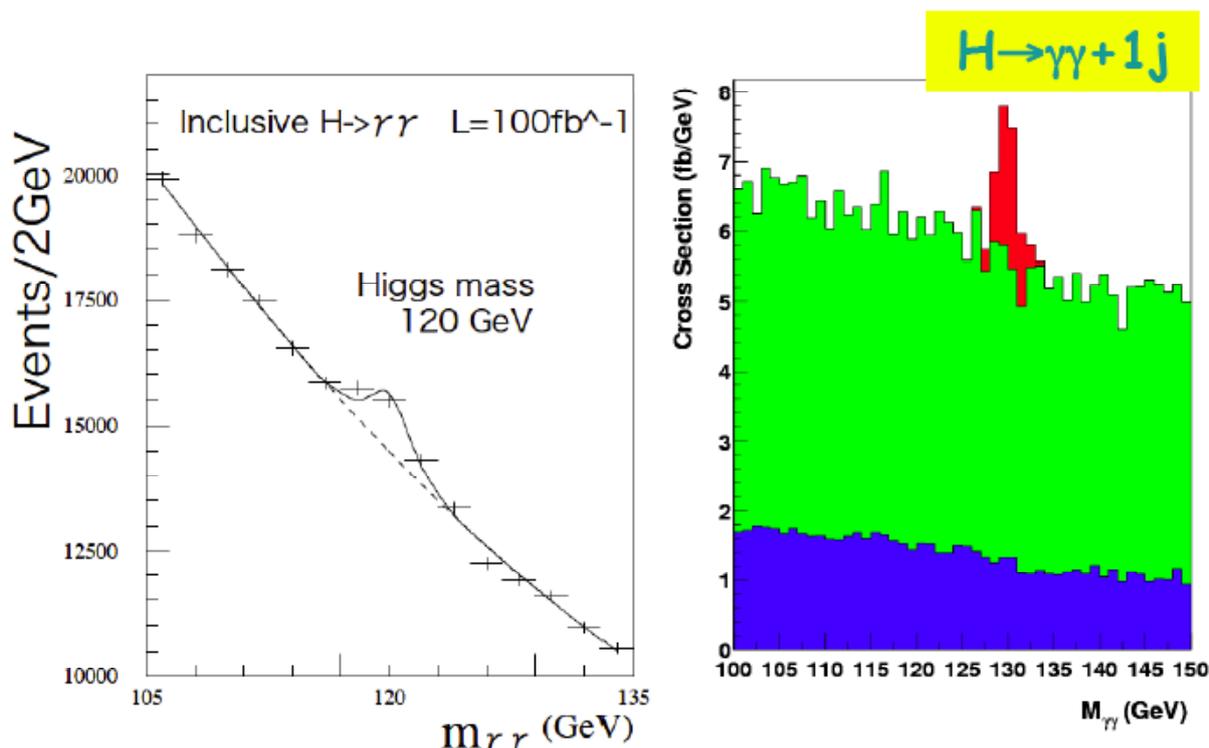


図7 2γ の不変質量 左: Inclusive 右: 高い横運動量のジェットを一本要求

で含んでいるので、予言の不定性が少ない。一方、グルオン融合生成過程での高い横運動量のジェットは高次の補正から出てくるもので、バックグラウンドも含めて更なる理論的な研究が必要であるが、高いS/Nが期待されている。

$L=10\text{fb}^{-1}$ での $H \rightarrow \gamma\gamma$ の発見能力を質量の関数として、図8に示す。高い横運動量を持つジェットの的本数ごとに発見能力を示している。どの解析も単独では 3σ 程度であるが、三種類の解析を合わせた発見能力は、 5σ を超えている。

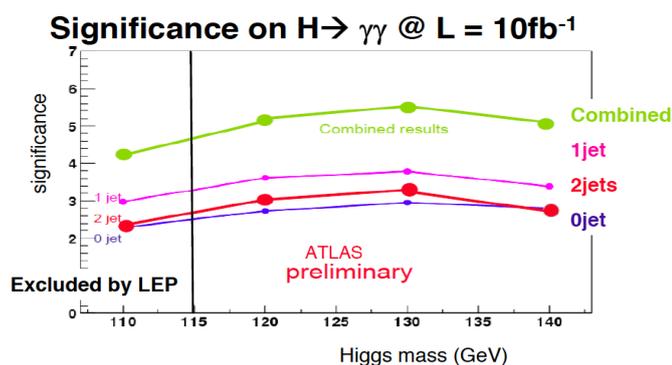


図8 ヒッグス粒子発見能力 2γ 崩壊

まとめると、(1)は横方向消失運動量の評価とドレル・ヤン過程の理解が鍵であり、 $L=10\text{fb}^{-1}$ で 3σ の兆候が捕らえられる。これとは独立に、 $\gamma\gamma$ を用いたチャンネル(2)では、単独に 5σ の発見が可能である。この研究は、 γ 線の再構成とジェットとの分離が実験技術の鍵であり、消失運動

量の評価法の確立よりは容易である。この様に、鍵となる実験技術・バックグラウンドともに二つのチャンネルで大きく異なり、二つのチャンネルで同時に見えることが確実な発見を行う上で重要な点である。

140GeVよりヒッグス粒子が重い場合は、 ZZ 、 WW へのゲージ粒子への崩壊が主流となる。これらを介してレプトン対に崩壊するモードが高い発見能力を有する。この場合はレプトンの再構成が実験技術の鍵となり、図6が示すように、 $L=30\text{fb}^{-1}$ のルミノシティで 10σ 以上の確度での発見が可能である。

$H \rightarrow WW$ に崩壊し、 W がレプトンに崩壊した場合は、二つのレプトンの運動量と横方向の消失運動量(二つのニュートリノに対応)から計算される横方向質量

$$M_T^2 = 2\vec{p}_T \cdot \vec{p}_T (1 - \cos \phi)$$

が、ヒッグス粒子の質量に関係している。図9に横方向質量分布を示す。二つのニュートリノが存在するため、ピークをなさないがヒッグスの質量をエッジとする分布(ヤコビアンピーク)が、高いS/Nで観測され、発見能力は 5σ を優にこえる。

これと同時に、 $H \rightarrow ZZ \rightarrow \ell\ell\ell\ell$ 四つのレプトンが観測されるゴールデンチャンネルが観測される。四つのレプトンの不変質量を組むとききれいなピークが観測され、バックグラウンドからの分離も容易である[5]。

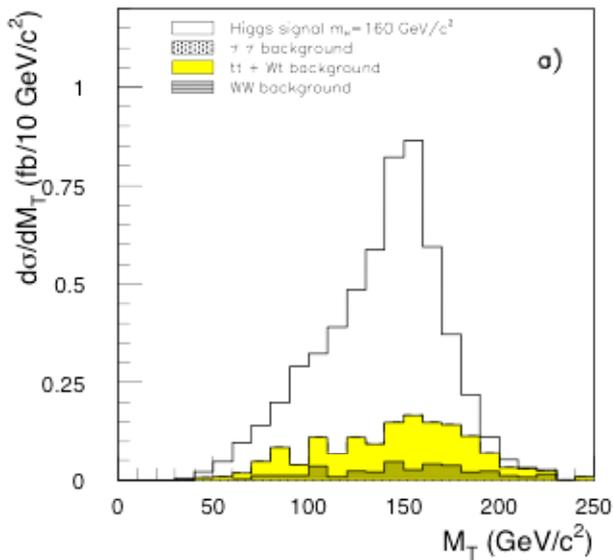


図9 $H \rightarrow WW \rightarrow$ レプトン対崩壊の横方向質量分布

超対称性ヒッグス粒子の発見能力

超対称性が存在する場合、ヒッグス場の二重項は最低でも二つ必要であり、結果四種類のヒッグスが登場する。これらのヒッグスの性質を決めるのが tree level で $(M_A, \tan\beta)$ の二つのパラメータである[3]。 $\tan\beta$ は、二つのヒッグス場の真空期待値の比であり、 M_A は重いヒッグス粒子の質量である。軽く CP 変換に対して偶のヒッグス (h) は、その質量が 130–140 GeV 以下であり、性質は標準理論ヒッグスに似ている。このため、140 GeV 以下の先に述べた研究がそのまま適用される。従って h は実験初期で必ず発見されることになる。

$\tan\beta (> 10)$ が大きくなると、重く CP 変換に対して偶のヒッグス (H) や奇のヒッグス粒子 (A) のダウンタイプ・クォークへの結合が $\tan\beta$ に比例して大きくなり、 $gg \rightarrow bbH, bbA$ (生成過程の第四番目の過程) の生成断面積が著しく大きくなる。 H/A は 10% の分岐比でタウペアへ崩壊するため、ベクターボソン・フュージョン生成過程のタウペア崩壊の解析 (図 6) が適用出来て、これを発見することが可能である。また荷電ヒッグス (H^+) も $\tan\beta > 10$ で発見可能となり、複数種類のヒッグス粒子が観測される。一方、 $\tan\beta = 3 \sim 8$ 程度の中間領域では、 $M_A > 200 \text{ GeV}$ の領域では、 h だけが観測される[5]。

4. 超対称性粒子の探索

– 標準理論を超えて –

自然界の基本粒子は、スピンの違いにより、ボーズ粒子とフェルミ粒子に大別されている。超対称性は、ボーズ粒子とフェルミ粒子とを交換するもっとも基本的な対称性であり、超対称性理論では、スピンの 1/2 違う超対称性パ-

ートナーが存在する。もし、超対称性が完全な対称性ならば、粒子と超対称性パートナーは同じ質量を持っている。しかし、現実には超対称性パートナーは見つかっていない。これは、何らかの理由で超対称性が“破れ”ていて、結果、超対称性パートナーが数 TeV 程度ほどの重さを持っていると考える。LEP での結合定数の精密測定の結果 (図 10)、TeV 領域に超対称性粒子が存在すると力の大統一があることが示唆された。

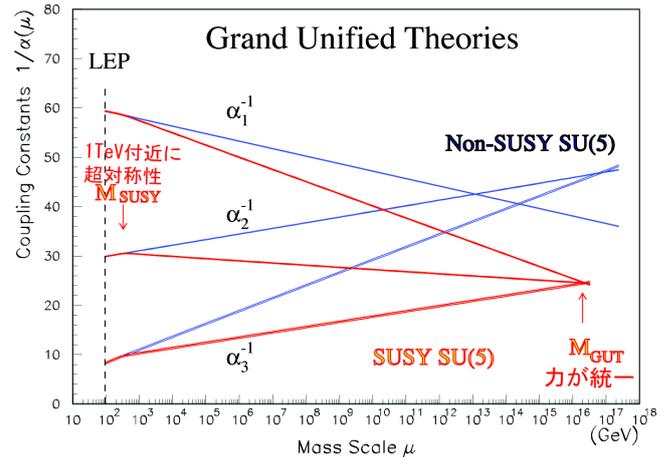


図 10 三つの力の強さのスケール依存性

TeV 領域に超対称性粒子が存在する場合と標準モデル粒子だけの二つの場合を示した。

この超対称性の“破れ”の導入の仕方によってモデルやパラメータの自由度が残る。破れを伝える機構が重力であるモデルが、gravity mediation モデルであり、ゲージ結合で伝搬される gauge mediation と双壁をなしている。そのうち、前者は宇宙の暗黒物質のよい候補を出してくれる。一般に、CP 位相まで入れて 120 以上のパラメータが許されるが、“もっともらしい”仮定 (主観が入る話だが) を入れて自由度を減らす。もっとも自由度が少ないのが mSugra model である。

mSugra の特徴を整理してみる[6]。GUT スケールですべての「スカラー粒子の質量 m_0 」、「ゲージノの質量 $m_{1/2}$ 」を自由パラメータにして、TeV 領域まで繰り込み群方程式でのばす。図 11 がその様子を示したものである。ヒッグスは、真空期待値 (負の mass) を持つよう「Higgsino mixing の μ 」の値は 符号の自由度を除いて決まる。これ以外には、第三世代に主に影響を与える「スカラーの三点結合定数 A 」と「ヒッグス場の真空期待値の比 $\tan\beta$ 」が自由なパラメータである。図 11 に示す様に、強い相互作用をする粒子は重くなる。また弱い相互作用をする粒子も、しない粒子より若干重くなる。

LHC での超対称性生成過程と崩壊過程を整理する[6]。陽子はクォークとグルオンで主に構成されているので、強い

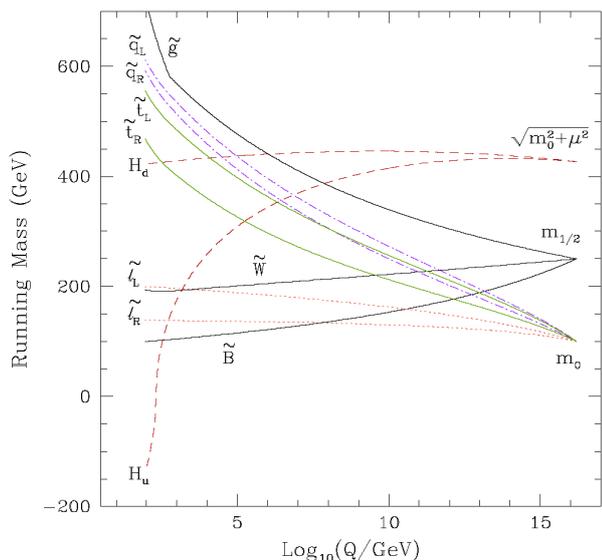


図 11 超対称性粒子質量のスケール依存性

相互作用を通して、スカラー・クォークとグルイーノが生成される。これが LHC での超対称性粒子の主要生成過程である。これらは、ただの強い相互作用であるので、スカラー・クォークとグルイーノの質量以外あまりモデルに依存しない。また、強い相互作用なので生成断面積は大きい。これらの質量が 1 TeV の時、生成断面積は 3 pb である。これは、 $L=10\text{fb}^{-1}$ の初年度で三万事象も生成されることを意味している。質量が 2 TeV の場合でも生成断面積は 20 fb と十分大きい。

スカラー・クォークとグルイーノは、運動学的に可能なら強い相互作用を通して二体に崩壊する。これが不可能なら電弱相互作用で二ないし三体に崩壊する。この結果出てきた電弱ゲージノは二つのフェルミオンと一番軽いニュートラリーノに崩壊する。一番軽いニュートラリーノは安定であり、検出器を反応せずに通り抜ける。

これらのカスケード崩壊の様子を、おおざっぱに模式的に書くと、図 12 になる。

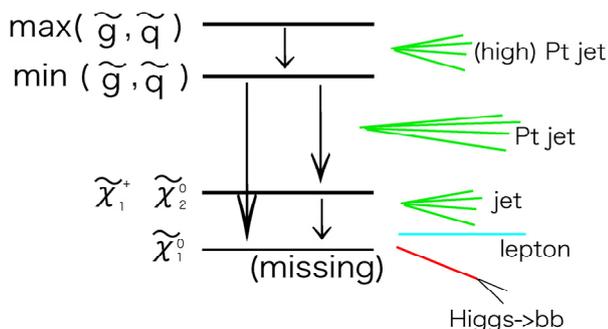


図 12 カスケード崩壊の模式図

まずスカラー・クォークとグルイーノが生成され、そのうちの重い方は軽い状態へ強い相互作用を通して崩壊する。続けて、大きな横運動量をもったジェットを放出して電弱ゲージノへ崩壊する。これから、ジェットやレプトンが放出され、最終的には、一番軽い超対称性粒子（ニュートラリーノ）が運動量をもって逃げる。

図 13 にシミュレーションした事象例を示す。超対称性事象の特徴は、(1) 大きな横方向消失運動量、(2) 高い横運動量をもった複数のジェット、(3) 時々レプトンを含むといった特徴的なものである。

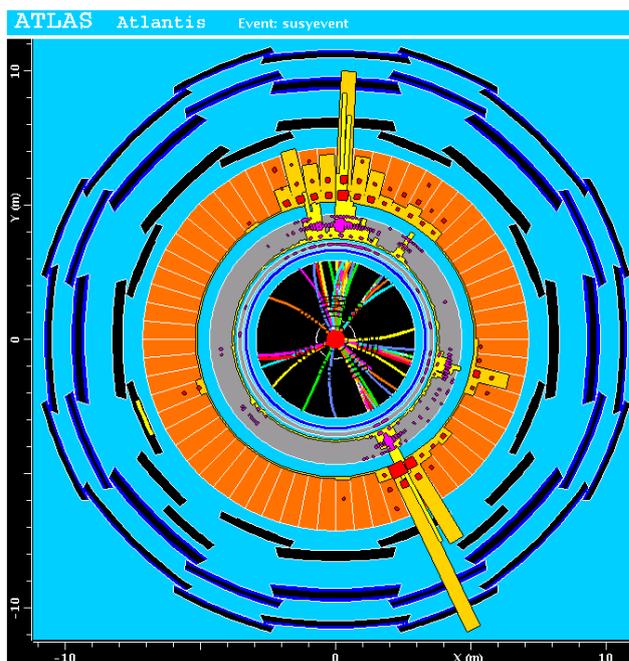


図 13 シミュレートした超対称性事象

一方、バックグラウンドとなるのが、 W/Z +ジェット、トップ・クォークペア生成、マルチ・ジェット生成過程である。標準的な超対称性事象選択を要求した後の信号とバックグラウンドの分布を図 14 に示す。ともに、分布の横軸は、横方向消失運動量とジェット 4 本の横運動量のスカラー和である。ハッチのついたヒストグラムがバックグラウンドの合計であり、実線が超対称性信号（スカラー・クォークとグルイーノの質量が 1 TeV の場合）を示す。図 14 左図のレプトンがない場合は、信号の統計が多い反面、バックグラウンドも厳しい。一方、レプトンを一本要求すると、図 14 右図のように、大部分のバックグラウンドは抑えることが可能となり、クリアーに信号を捕らえることが可能である。これらのバックグラウンドの詳細な研究はわれわれが世界に先駆けておこなったものである。

実験技術で重要となるのは、横方向消失エネルギーの評価、高い (TeV) 領域での検出器のキャリブレーション、実験データを用いたバックグラウンド評価と、トリガーで

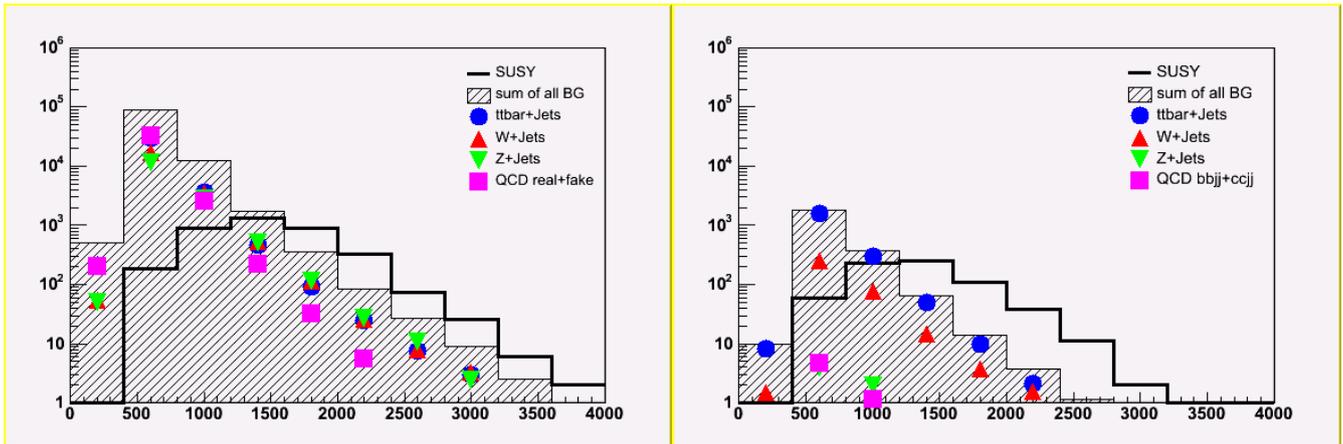


図 14 Effective Mass (消失横運動量とジェット4本の横運動量のスカラー和) 分布

左:レプトンがない場合 右:レプトン一つある場合 ともに無色のヒストグラムはスカラークォークとグルイーノの質量が1TeVの信号、ハッチのついたヒストグラムがバックグラウンド (内訳は、 がtop、 がW、 がZ、 がQCD)。

ある。現在のバックグラウンド研究は leading order のジェネレーターを用いた研究であるため、スケール依存性が大きい。実験開始後は、バックグラウンドをシミュレーションを用いて評価することはない。実験データを用いた評価が必要となる。超対称性事象の寄与の少ない、低い横運動量ジェットや小さい横方向消失エネルギー領域で評価したバックグラウンドを、高い領域へ外挿する手法を用いる。従って分布の形の研究が重要である。また、レプトンを含まない事象のトリガーは一般にハドロンコライダーでは難しい。カロリメータ情報を用いて、高い横運動量のジェットが複数存在する場合 (multijet-trigger) や大きな横方向消失エネルギーがあった場合 (missing E_T trigger) のトリガーの開発が必要である。

超対称性粒子の発見能力を図 15 に示す。横軸、縦軸は mSUGRA のパラメータであり、対応するグルイーノとスカラー・クォークの質量を等高線で加えてある。これらの質量が2TeV 以下の場合、 $L=10\text{fb}^{-1}$ で 5σ 発見が可能である。結合定数の統一が示唆したように、超対称性粒子は数 TeV 以下の領域に存在すると考えられている。また、理論の「自然さ」という点からも、この領域に存在すると考えられている。

この発見能力は、モデルの細かな点には依存しない。発見で重要になるのは、第 0 近似で、スカラー・クォークとグルイーノの質量 (これが生成断面積を決める) とこれらとの粒子とミッシングの原因である、一番軽いニュートラリーノとの質量差である。この二つが発見にとって大切なパラメータである。

第一次近似としては、レプトンを含む崩壊分岐の割合 (バックグラウンドが変わる) と図 12 に示したカスケードの段数である。これらはモデルや m_0 、 $m_{1/2}$ 以外のパラメータにも依存する。

こうして発見された事象が超対称性起源であることを証明することも極めて重要な仕事である。mSUGRA が正しいモデルなら (信じている人は天然記念物ですが)、カスケード崩壊の各過程で放出される粒子の運動学的な end point から、スピンや粒子の質量を決定することが出来る。しかし mSUGRA を超えて、より一般的な研究となると、LHC ではなかなか難しく、系統的な研究が待たれる。

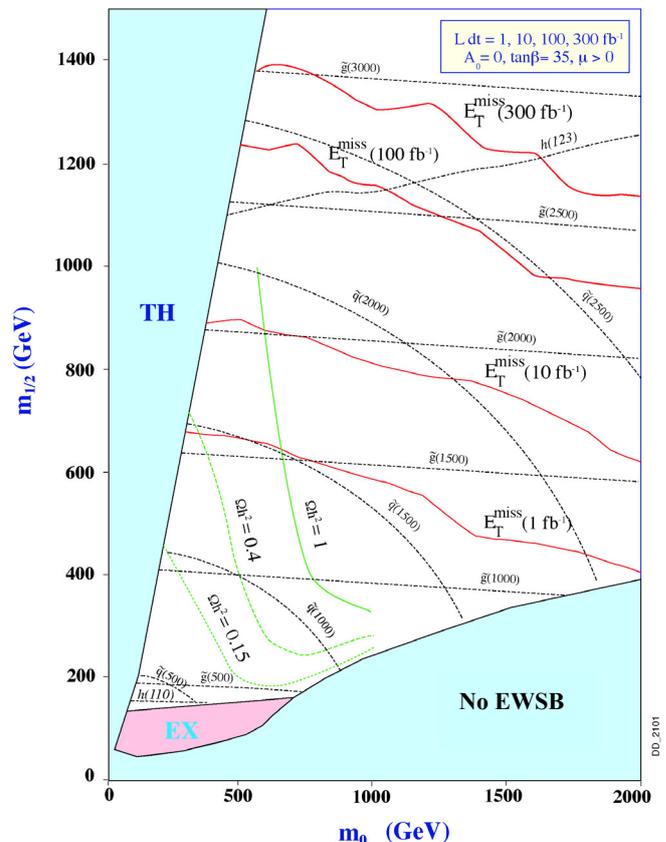


図 15 超対称性粒子の発見能力

5. 量子重力や余剰次元空間

重力の強さのスケールがプランク・スケールであり、電弱対称性の破れのスケールと 17 桁も異なることが、重力まで含めた統一で大きな問題（階層問題）となる。この問題を解決する一つの方法は超対称性である。超対称性はトップの湯川結合により、自然に電弱対称性の破れのスケールを作ると同時に、高次補正の発散をスピンの違いで絶妙にキャンセルしている。

これと異なる立場で、物理の唯一のスケールが、電弱対称性が破れのスケールだけであり、プランク・スケールは幻想に過ぎないと言う考え方[7]がある（「階層」などがもとともとない）。われわれの世界が四次元でなくて、もっと高い次元（余剰次元）で構成され、この余った次元が小さくコンパクト化している。スピン 0 や 1/2 の粒子は、四次元の面から離れることは出来ないが、重力（スピン 2）は、四次元以外にこの小さくコンパクト化空間も含めて自由に伝搬しているため、重力が他の力と比べて小さく見えるというシナリオである。電弱理論のエネルギースケールより少し高い TeV 領域で空間がコンパクト化されている場合、TeV コライダーである LHC で今までの素粒子物理では考えられない面白い現象が起きる。高いエネルギーをもったパートン同士が、コンパクト化した空間より小さなインパクトパラメータで衝突すると、重力が他の相互作用と同程度に大きな力として働き、重力の効果が直接観測出来る。このうち、ミニブラックホールとグラビトン放射について今回まとめる。

5-1 ブラックホール

重力が結構強い力であるため、天体的な質量でしか意味をなさなかったシュバルツシルト半径 R_s が、

$$R_s = \frac{1}{\sqrt{\pi} M_p} \left[\frac{M_{BH}}{M_p} \left(\frac{8\Gamma\left(\frac{n+3}{2}\right)}{n+2} \right)^{\frac{1}{1+n}} \right]$$

（ M_p が TeV オーダーの余剰次元のスケール、 n が余剰次元、 M_{BH} が質量）

LHC のエネルギー程度で有限となり、これより小さなインパクトパラメータでパートンが衝突すると、ブラックホールが生成される。図 16 は、ブラックホールが生成され、ホーキング放射で崩壊した時の予想図である。高いエネルギーをもった粒子が複数観測される（multiplicity が高い）特徴的な信号である。粒子のフレーバーについても平等な点が特徴である。このため、バックグラウンドは少なく、発見が容易である。また、生成断面積も $\text{pb}(M=8 \text{ TeV})$

$\sim \text{nb}(M=2 \text{ TeV})$ と大きく、LHC では、余剰次元が 6 TeV より低いエネルギーにコンパクト化されている場合は発見が可能である[8]。これらはわれわれが示した結果である。ただ、古典的な扱いしかしていないため、生成断面積の計算に量子力学的な効果を入れたり、黒色放射からのズレなど理論的な研究がまだまだ必要である[8]。

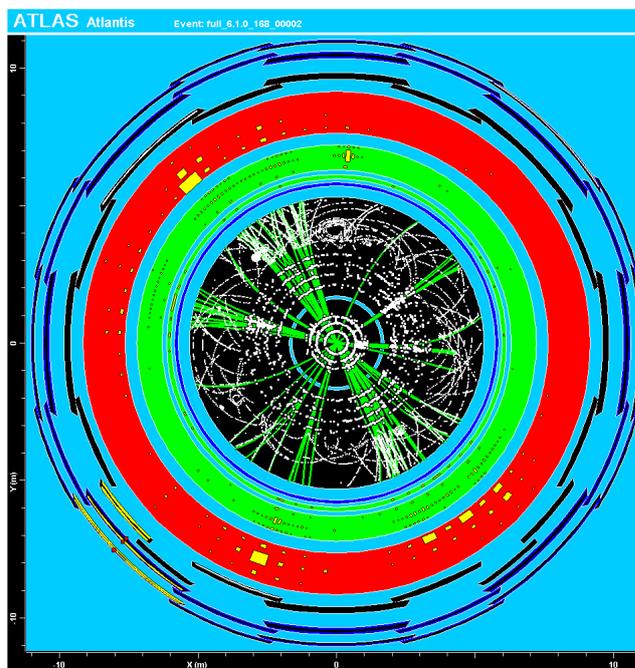


図 16 シミュレートしたブラックホール事象

5-2 グラビトンの放射

さらに TeV 領域では、重力も他の力同様の結合強度をもつことになるため、グラビトンを含む素粒子反応が日常の様に観測される。生成されたグラビトンは検出を逃れるため、大きなミッシングエネルギーとして観測される。 $gg \rightarrow gG$ は断面積が大きく、モノジェットとして観測され、この場合も数 TeV までの余剰次元を探ることが出来る。

標準理論を超える「TeV 領域の物理」を直接探索することが可能である。具体的に述べたヒッグス粒子、超対称性粒子や余剰次元の研究のみならず、階層問題を解決するため最近提唱されたりトルヒッグスモデルや、さらには EWSB を説明するためのヒッグスレスモデルといった様々な新しい理論も LHC 実験でどのような観測が可能であるか精力的に研究されている。

LHC は、TeV 領域の新しい物理に対して大きなポテンシャルを有し、2007 年の実験開始が新しい物理の扉を開くものと思われる。

参考文献

- [1] LHC 計画についての一般的な資料：
[http://lhc-machine-outreach.web.cern.ch/
lhc-machine-outreach/](http://lhc-machine-outreach.web.cern.ch/lhc-machine-outreach/)
- [2] ATLAS 検出器の資料：
<http://atlas.web.cern.ch/Atlas/internal/tdr.html>
若手向けに各検出器をまとめた資料：
<http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/~asai/lhcwg/Main.html>
検出器のパフォーマンス：
[http://atlas.web.cern.ch/
Atlas/GROUPS/PHYSICS/TDR/access.html](http://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/TDR/access.html)
の中の TDR Vol. 1。
- [3] M. Spira and P. Zerwas, hep-ph/9803257.
- [4] S. Asai *et al.*, Eur. Phys. J. C32S2 (2004) 19-54.
少し古い結果は、 [2]の TDR Vol. 2 第 19 章。
- [5] Hadron Collider での Higgs レビュー：
V.Boscher and K.Jakobs, Int. J. Mod. Phys. A20 (2005)
2523-2602.
- [6] 手前味噌ですが、筆者による LHC での超対称性研究の
連続講義「LHC の為の SUSY 講座」の PDF ファイル：
<http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/~asai/Lecture/>
- [7] N. Arkani-Hamed *et al.*, Phys. Lett. B429 (1998) 263,
L.Radall and R. Sundrum, Phys. Rev. Lett. 83 (1999)
4690.
- [8] J. Tanaka *et al.*, Eur. Phys. J. C41 (2005) 19-33,
C. M. Harris *et al.*, JHEP 0505 (2005) 053.