

LHC と ATLAS の運転状況とヒッグス粒子探索

高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所

徳 宿 克 夫

katsuo.tokushuku@kek.jp

2012 年 (平成 24 年) 8 月 20 日

1 LHC の運転状況

LHC 加速器は完成直後に液体ヘリウムの大量流出という大事故を起こしたが [1], そこから復帰して最初の衝突に成功してからは, ほぼ順調に性能を上げてきた。図 1 は, 各年のルミノシティの積算状況を示したものである [2]。2010 年と 2011 年は重心系エネルギー 7 TeV で, 2012 年は 8 TeV で運転している。2010 年の CERN の目標は年間 1 fb^{-1} であったが, それを大きく上回る約 5 fb^{-1} に到達した。2012 年は, 6 月のメンテナンス期までで, すでに昨年を超えるデータが集まった。8 月末現在で, 10 fb^{-1} を超えており, 12 月までには 20 fb^{-1} に迫ると期待される。

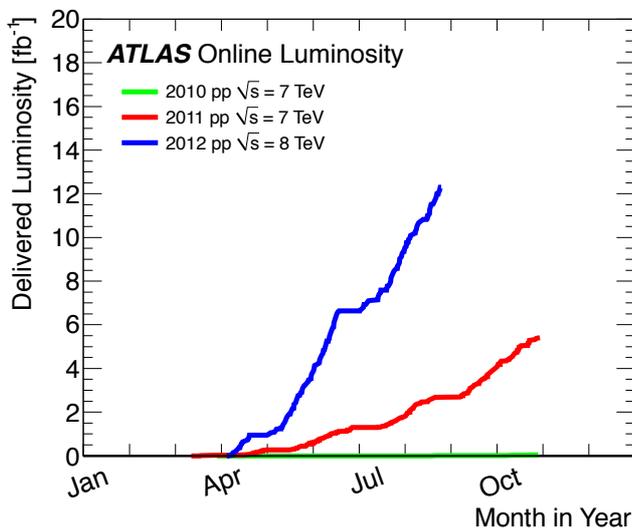


図 1: 2010 - 2012 年の各年の積分ルミノシティの移り変わり。2010 年は全体で 35 pb^{-1} であり, x 軸にほぼ重なってプロットされている [2]。

このような順調な加速器の立ち上がりをもう少し詳しく見るために, ルミノシティが何で決まるかを復習してみよう。ルミノシティ (L) は

$$L = \frac{n_b \cdot N_{bunch1} \cdot N_{bunch2} \cdot f}{4\pi \cdot \beta^* \cdot \epsilon_n} \cdot R,$$

ここで n_b は衝突するバンチの数, $N_{bunch1,2}$ はそれぞれのバンチ内の陽子数, f は周回周波数, β^* は衝突点でのベータ関数, ϵ_n は規格化したエミッタンス, R は有限交差角などからくるそのほかの因子である。

周回周波数は LHC の周長と光速で決まっている。最終的にはバンチ間隔は 25 ns にするが, とりあえず 2012 年までは 50 ns 間隔で詰めているので, 最大で約 1400 バンチになる。図 2 の変遷から明らかなように, 2011 年の 6 月までは, LHC 加速器の調整もかねてバンチの数を徐々に増やしていき, それとともにルミノシティが上がっていった。しかしその後もルミノシティはどんどん改善していった。これは, 前段加速器を含む全体の性能が優れていて, ビームエミッタンスが設計値よりよかったこと, バンチあたりの陽子数を設計値より上げられたこと ($1 \times 10^{19} \rightarrow 1.6 \times 10^{19}$ 個), が大きい。さらに β^* も 2011 年に 2.0 m から 1.0 m に, そして今年さらさら 0.6 m まで小さくできた。

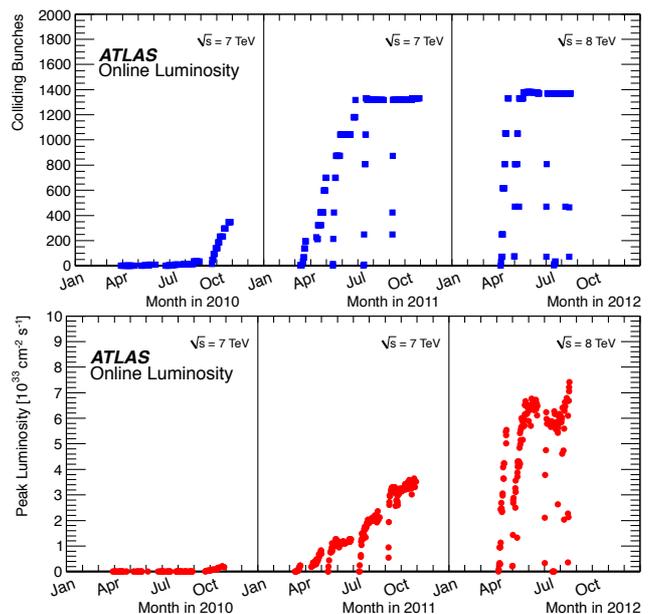


図 2: LHC 過去 3 年間の陽子バンチ数の変移 (上図) とルミノシティの変移 (下図) [2]。

設計値ルミノシティの $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ に対し、現在の最大は $7.7 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ である。 n_b が半分であることを考えると、バンチあたりでは既に凌駕している。エネルギーとともに β^* も小さくできるので、2015年以降のフルエネルギーの運転では、設計値の3倍程度のルミノシティが出るのではないかとわれている。

LHC の運転は、4つの実験が、場合によっては互いに相容れない要求を満たすために複雑である。ルミノシティだけをとりても、ATLAS と CMS 実験はとにかくできるだけ（しかも、相手より最低でも同じだけの）高いルミノシティを要求するが、LHCb 実験は B 中間子の同定を安定して行うために常に一定のルミノシティがほしい（図3）。ALICE 実験は TPC 内で事象のパイルアップを嫌うため、ATLAS などより 10000 分の 1 低いルミノシティを要求する。さらに、陽子陽子の全断面積を測定する TOTEM 実験のためには、 β^* の大きな特別な運転が必要になる。これらをほぼ満たしながら、6月の時点までにほぼ予定通りの積分ルミノシティを ATLAS と CMS 実験に与えてくれたことに関して、LHC 加速器のグループにとっても感謝している。

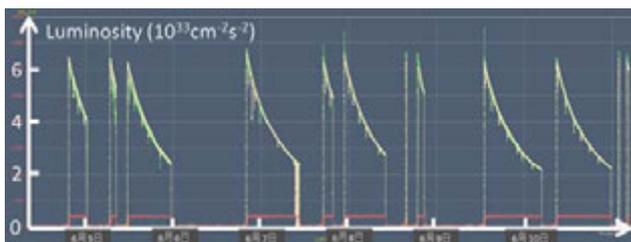


図 3: 2012年6月5日からの1週間のルミノシティ移り変わり。ATLAS と CMS のプロットは互いに重なっていて識別できないが、ルミノシティは $6 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を超えて始まり、時間とともに低くなっていく。一方で LHCb 実験のルミノシティは下の方の平らになっている線で、バンチあたりの陽子陽子衝突数が常に1程度になるように、 $\sim 4 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ に保たれている。

このように LHC は順調に運転が進んでいるが、懸念材料も何点かある。トンネル内の放射線量が上がってきていて、制御回路に single-event-upset によるエラーが起こることもわかり、クリティカルな回路を遠方に移動した。一番の懸念は UFO の出現である。Unidentified Falling Object の略で、突如 LHC のビームロスがリングのどこかで発生する。何かが陽子ビームの軌道に落ちてきていると思われるが、この名前が付けられた。2つのコンポーネントがあり、一つは LHC へのビーム入射時にキッカー磁石の近辺でよく出現しており、キッカーの動作と関連していると考えられるが、もう一つのコンポーネントは時間的にも場所的にもランダムに起こっているように見える。LHC の貯蔵されているビームのエネルギーはすでに 100MJ をこえ、最終的には 360MJ

になる。このビームが間違っってビームパイプや、超伝導磁石などに当たれば大事故につながるので、ビームが不安定になった場合は、速やかにビームをダンプするシステムが構築されている。UFO が出現すると、ビームが不安定ということでダンプされてしまい、実験時間がどんどん減ってしまう。ビームダンプの閾値を適切にすることによって影響を少なくしたのと、運転と共に徐々にではあるが UFO の出現が減る傾向があるので、現在の運転では目立たなくなっている。しかし、LHC 改造後の 2015 年からは、ビームエネルギーが上がりバンチ数も増えるので、ビームダンプの条件も厳しく設定する必要があり、UFO の頻度によっては積分ルミノシティを稼ぐ上で大きな問題になる可能性がある。原因の究明と対策が待たれる。

ビームダンプに関して余話をもう一つ。前段のように、ビームが不安定になった時に必ずビームをダンプするために何重ものプロテクションがかけられているが、2012年6月20日に一つ穴が見つかった。あるモニター関連のトリガー同期システムの +12V 電源がショートした場合に、ビームダンプ信号がきちんと伝わらなくなることが判明した。電源の異常は感知できるがその情報がビームダンプに反映されていなかった。その時点で異常があったわけではないが、LHC クルーは即座に貯蔵していたビームをダンプし、この欠点を直した上で運転を再開した。雷が多いシーズンを前にした周到な判断だが、このようなことから、如何に LHC のビーム強度が脅威であり、LHC の運転の上で CERN が気を使っているかわかると思う。

2 ATLAS 実験の運転状況

順調な LHC の運転とともに、ATLAS 実験も着実にデータを集めた。8月24日時点で、LHC が供給したルミノシティが 12.24 fb^{-1} で、ATLAS が記録したのが 11.46 fb^{-1} であることから、かなりのいい効率でデータが取れていることがわかる。

LHC のバンチあたりのルミノシティが設計値を超えているということは、バンチの一交差で起こる陽子・陽子衝突の数が ATLAS の設計で念頭においたものより多くなっているということの意味する。図4は、バンチ交差あたりに起こる陽子・陽子の衝突数 (μ) を表すプロットである。ルミノシティの上がった 2012 年には平均で 20 の衝突があり、最近のピークルミノシティでは 40 近くになっている。ちなみに、この図は、実際に衝突の数を測定して作っているのではなく、測定したバンチあたりのルミノシティに陽子・陽子非弾性散乱の断面積 (8TeV だと 73.0mb) をかけて出しているが、実際に飛跡検出器で測定したバーテックスの数とよい相関がみ

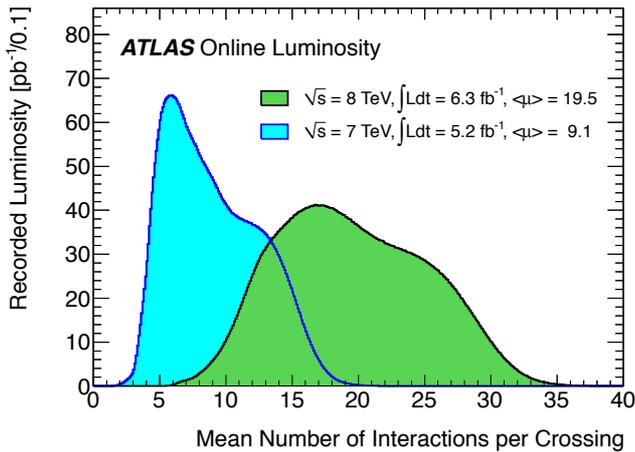


図 4: 2011 年および 2012 年に収集したデータにおける、一回のバンチ交差に起きる陽子・陽子衝突の個数 (μ) の分布 [2]。

られている。

10 年ぐらい前に建てた LHC の戦略では、最初の 3 年間はルミノシティを低く抑え、 $\mu \sim 2$ 程度のクリーンな環境でヒッグス粒子の発見をめざし、そのあとで設計値のルミノシティ ($\mu \sim 20$) に上げてデータを稼ぐという議論であったのに対し、いきなり、大きなパイルアップの状況で始めることになってしまった。

Higgs の探索の上では、この環境は厳しいものである。崩壊して出てくる粒子が全部同じ衝突点から来ていることを確認する必要がある、これは $H \rightarrow \gamma\gamma$ のような飛跡のないチャンネルでも同様である。ほかの衝突から出てくる粒子が重なってしまうので、その補正をしっかりと行う必要がある。消失横運動量など、事象全体から計算する物理量が一番影響を受け、jet のエネルギーの補正も大きい。しかし、電子など、カロリメータ上で比較的コンパクトなものでも補正なしではすまされない。詳細は省くが、補正後、Z の崩壊からくる電子のエネルギーでモニターして、期間内に 0.1% のエネルギー測定 of 安定度を達成できている。

ルミノシティの増加と共に、大変なのがトリガーとデータプロセスのグループである。データを書き込めるだけ取り込んでしまうと、オフラインでの事象再構成も多くの時間がかかってしまい、解析が間に合わなくなる。2012 年は $7 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ のルミノシティを想定して、最終的に取り込むデータ量を 400 Hz 程度とすること、ただし、来年から 2 年間ほぼ新しいデータが取れないことを考慮して、緊急性のないデータサンプルはさらに 200 Hz 分程度取り込んでおき、これは来年以降に再構成・物理解析を行おうとしている。日々のトリガーレートを各物理対象ごとに分けたものを図 5 に示す。Delayed と書かれている分が後者にあたる。主要トリガーでは、ヒッグス粒子探索でも鍵となる、光子・電子

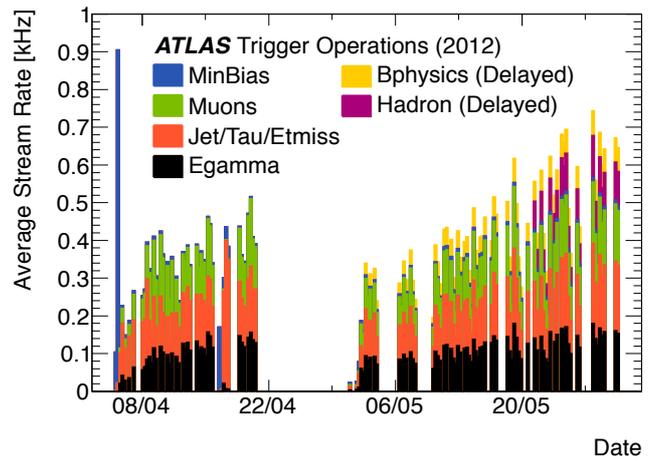


図 5: 2012 年のデータ収集での各トリガーオブジェクト毎のデータ書き込みレートの遷移 [3]。

トリガー (Egamma), Jet/Tau/Emiss トリガー, Muon トリガーが、レートをほぼ三分しているのがわかる。

このようにして取り込んだデータは、世界中に散らばったグリッドコンピュータ上で再構成され、物理解析に使われる。実データとともにモンテカルロデータの生成と解析も含めると、ATLAS 全体では世界中で約 80 のコンピュータセンターで、常に 10 万以上のジョブが走っている。LHC 実験の成功の大きな要因の一つが、このグリッドコンピューティングがうまく動いたということであるといえる。これがなければ、6 月中旬までに取ったデータを使って 7 月 4 日に (preliminary とはいえ) 結果を出せなかつただろう。

3 Higgs 探索

次からの記事で各崩壊モードでのヒッグス粒子探索の話がはじまるので、最後にこの章で、LHC でのヒッグス粒子生成に関して、簡単にまとめておく。

ヒッグス機構は primal には W/Z ボソンに質量を与える仕組みであるからこれらの粒子と強く結合する。またフェルミオンへの分岐では重い粒子ほど結合が強くなる ($\Gamma \propto m_f^2$)。一方陽子の中はほとんどが軽いクォークとグルーオンからできている。この結果陽子・陽子衝突でヒッグス粒子の生成に一番効く過程は、グルーオンとグルーオンがぶつかって、(重い) クォークのループが回りそこからヒッグス粒子ができるという、グルーオン融合過程になる。その約一桁落ちで、各陽子のクォークから W/Z ボソンが出てそれが融合する、ベクターボソン融合過程 (VBF) が効く。図 6 が標準理論でのヒッグス粒子の生成断面積の予想値である [4]。グルーオン融合過程 ($pp \rightarrow H$), VBF ($pp \rightarrow qqH$), および、ベクターボソンとの随伴生成の予想値が書かれている。線の太さは摂動計算の高次の効果などの理論的不定性と陽

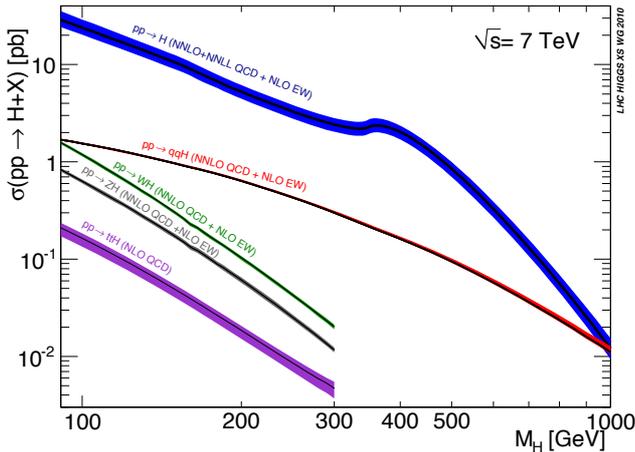


図 6: ヒッグス粒子の質量と陽子・陽子衝突での生成断面積の関係。重心系エネルギーが7 TeV の場合 [4]。

子内のクォーク・グルーオンの分布 (PDF) の不定性を含んだ範囲を示す。図に示しているようにすでに Next-to-Next-to-Leading-Order まで理論計算が進んでいる。このような理論の進歩と、陽子内の (PDF) の測定の進歩も、LHC でのヒッグス粒子探索に大きな貢献をしている。

とにかくヒッグス粒子の崩壊物のみを使って探索を行う場合は、グルーオン融合過程が効く。ただし、一般にバックグラウンドとなる反応が非常に多いので、信号が埋もれてしまいがちである。一方 VBF 過程で生成される場合は、ヒッグスからの生成物のほかにも特徴的な信号がでる。一つはベクターボソンを出して反跳したクォークが、高い横運動量を持ってそれぞれの陽子の進行方向に出てくるため、高い $|\eta|$ 領域¹それぞれにジェットが出る点、もう一つはヒッグス粒子は W や Z ボソンの融合から生成されるため、ヒッグス粒子の作られる低い $|\eta|$ 領域には余計なジェットが出にくいことである。また、一般的に VBF で作られるヒッグス粒子のほうが高い横運動量を持ちやすい。このような VBF の特徴を使うことによって、バックグラウンド事象を減らして S/N を上げることができる。ただし、シグナルも大きく減らしてしまうので、ルミノシティが少ない初期の探索ではかえって感度を下げることもなりうる。以下の記事でみるように、解析ではこの辺のバランスを取りながら進めている。

図 7 は、ヒッグス粒子の生成断面積にそれぞれのモードの崩壊比をかけた値が、ヒッグス粒子の質量と共にどう変わるかを示している。ヒッグス粒子が崩壊してできる W や Z ボソンがさらに崩壊するので、それも加味した図である。また、VBF で生成した場合も分けて書いてある。きれいなのは崩壊粒子を全部捕まえて、親の質

¹ η は pseudorapidity で $\eta = -\ln(\tan(\theta/2))$; 前方 (陽子の進行方向) に行くほど大きな絶対値をとる。

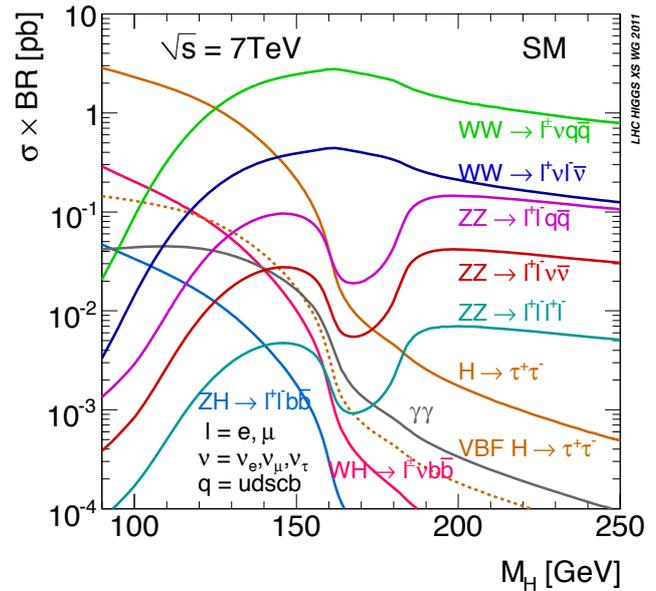


図 7: 各崩壊モードで見た場合の見かけのヒッグス粒子の生成断面積 [4]。

量を再構成できる場合で、 $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow \ell^+ \ell^- \ell^+ \ell^-$ 崩壊である。 $H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell^+ \ell^- \nu \bar{\nu}$ はニュートリノが2つ出てしまうので質量の再構成はできないが2つのレプトンと消失横運動量というきれいな信号になるのと、比較的分岐比が高い。これらの3つの崩壊モードがヒッグス粒子発見でもっとも重要になってくるモードである。ヒッグス粒子の質量が120 GeV 近辺の場合は、これらの崩壊モードすべてに感度があるので、多角的な探索ができる。

さらに、ヒッグス粒子がフェルミオンと結合することをきちんと示すためには $H \rightarrow b\bar{b}$ や、 $H \rightarrow \tau^+ \tau^-$ 崩壊を見るのが重要になる。

2012年6月中旬のLHC加速器スタディが始まる前まで、8 TeVの運転で約 6 fb^{-1} のデータを集めることができ、ATLAS と CMS の両実験はメルボルンで開かれる国際会議ICHEPで暫定結果を発表することにしていた。6月21-22日に開かれたCERN理事会で各メンバー国の代表から、会議で発表する前にセミナーを開いてCERNでまず結果を発表すべきであるという意見が続出した。Heuer 所長は7月1日にはオーストラリアにいる予定にしていた一方で、実験グループは7月7日に会議で発表するという予定でグループ内の承認スケジュールを決めており、それほど前倒しての発表はできない。やはりCERN所長は超音速ジェットを持つべきだという冗談もでていたが、結局Heuer所長(と実験グループ代表)は予定を変更し、7月4日午前にCERNでセミナーを行うこととなった。同時に同日夕方になっているメルボルンのICHEPの会場と双方向ネットワークをつなぎ、ICHEP参加者とも情報を共有できるようにし

た。その結果は日本のテレビ・新聞でもトップで伝える内容となった。その内容は次からの4つの記事で詳しく説明される。

参考文献

- [1] 近藤敬比古 「LHC 加速器の現状と CERN の将来計画」
高エネルギーニュース **27-3**, 163 (2008);
- [2] これらのルミノシティに関するプロットは ATLAS の Web 上で常にアップデートされており最新の情報を得ることができる:
<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/LuminosityPublicResults>;
- [3] <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/TriggerOperationPublicResults>;
- [4] S. Dittmaier *et al.* (LHC Higgs Cross Section Working Group): arXiv:1101.0593
最新情報, 特に重心系エネルギー 8 TeV 場合の図などは, LHC Higgs Cross Section Working Group の Web ページを参照のこと:
<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/LHCPhysics/CrossSections>