

海外派遣事業報告書

山田美帆

高エネルギー加速器科学研究科 素粒子原子核専攻

派遣先：スイス 欧州原子核研究機構（CERN）

2011/04/08 - 2011/09/13

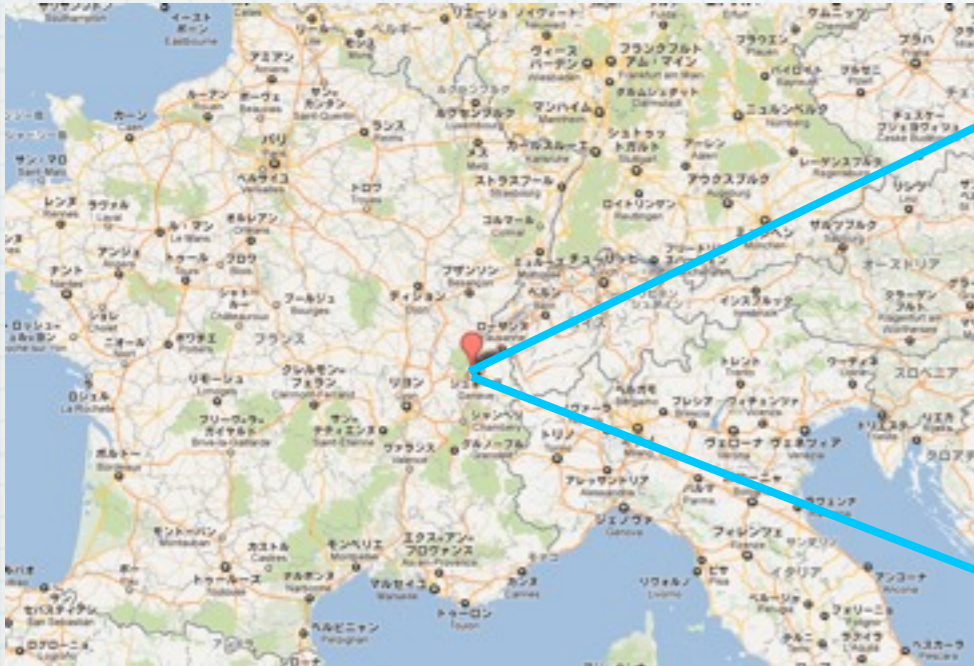
CERN

世界最大規模の素粒子物理学の研究所



the European Organization
for Nuclear Research

スイス ジュネーブ郊外 フランスとの国境をまたいでいる



ATLAS実験
(地下100m)

◆CERNで行われている実験

● LHC実験

- ATLAS
- CMS
- ALICE
- LHCb
- LHCf
- TOTEM
- MoEDAL

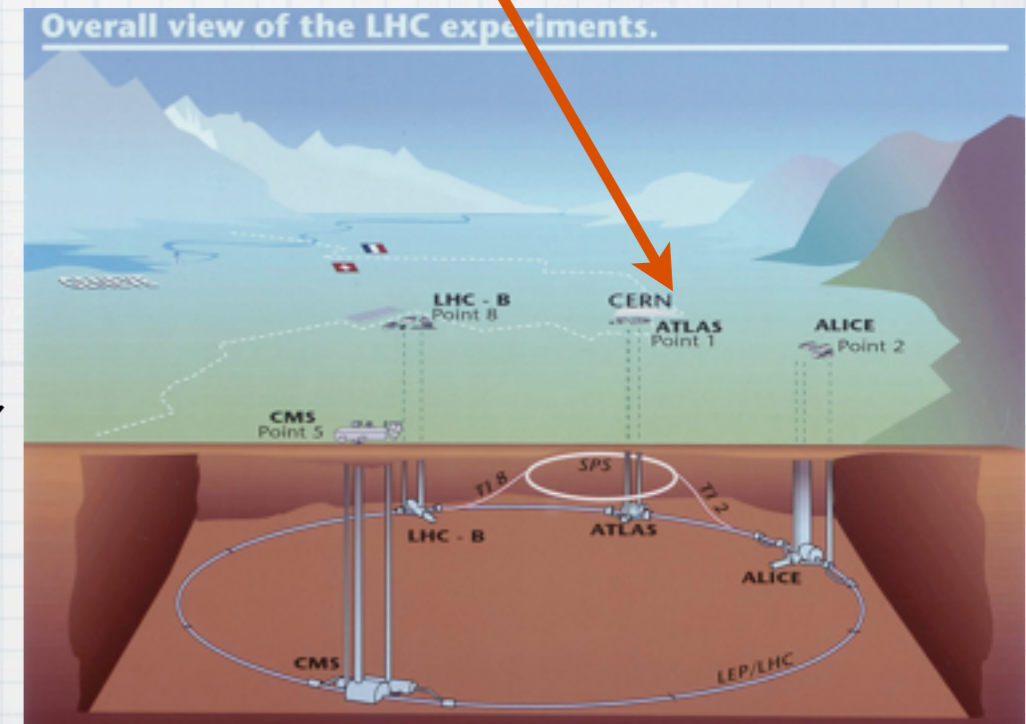
- その他 とにかくたくさん
<http://greybook.cern.ch/>

ATLAS-Japan group

← KEK(総研大)	首都大学東京	大阪大学
	筑波大学	神戸大学
	東京大学	岡山大学
	早稲田大学	広島工業大学
	東京工業大学	京都教育大学
		長崎総合科学大学

LHC加速器では、素粒子標準模型で予
言されているヒッグス粒子の探索や、
素粒子標準模型を超えたSUSYなどの
新しい物理の探索が行われています。

LHC加速器



海外派遣前準備

すでに、2010年6月よりCERNに長期滞在していたため、滞在のための準備は2010年4月～5月頃に行いました。

長期滞在に必要なもの

- VISA フランスに家を借りる場合、もしくは連続して3ヶ月以上滞在する場合は必要です。
- 滞在許可証 VISAの期限は3ヶ月なので、CERNに着いたら長期滞在のための滞在許可書の申請をする。
- 家 スイス、フランスどちらにも住むことができますが、フランスの方が家賃が安いのでフランスに借りています。
- 銀行口座 生活するにはお金が必要です。スイスのUBSという銀行に口座を作りました。
- 車 CERNから徒歩／自転車圏内に家を借りるのは難しいので、移動手段が必要です。

家の賃貸情報、中古車情報はCERNの"CERN market"というWebページで見ることができます。

語学

- 英語 CERN内は色々な国の人がいるので基本的に英語です。
特に、英会話教室に通って準備をするということはありませんでした。
私がいたオフィスには日本人、ドイツ人、ギリシャ人、グルジア人がいました。
彼らとの会話やミーティングに参加することで徐々に英語に慣れていきました。
- フランス語 CERNはスイスにありますが、ジュネーブ付近はフランス語です。
挨拶や数字など、ごくごく簡単なものは覚えました。
英語が話せる人もいますが、フランス語を話せばより楽しい生活なると思います。
役所などでフランス語の書類を書くときにとても苦労しました。

自分の研究に関わる準備

研究テーマ：トッパークォーク対生成微分断面積($d\sigma/dm_{t\bar{t}}$)の測定

(トッパークォーク対の生成断面積をトッパークォーク対不変質量で微分した量)

第一歩目

トッパークォーク対生成微分断面積はまだATLASで測定されておらず、5月末にキックオフミーティングがありました。キックオフミーティングにて各大学、研究機関はグループへの参加意思表示（人員やどの辺りに興味があるかを発表）をし、まず、コンビナー（グループのまとめ役）に自分の存在を認識してもらいました。ATLASは3000人の共同研究者がいて、それぞれのサブグループにもたくさん人がいるので、まずコンビナーやグループ内の人たちに自分の存在を知ってもらうことが大切になります。

第二歩目～

キックオフミーティングに出ただけでは、そのうち存在を忘れられてしまいます。週に1度、グループ内でミーティングを行うことになったので、なるべく毎週、進展状況を報告するようにしました。非常に基本的なことですが、一人で閉じこもってもくもくとデータを解析しても仕方がないので、グループ内の人と議論することが重要です。博士論文を書くには一通りの解析を自分一人で行わなければいけませんが、巨大な国際共同実験であるATLASでは、一人でなんでもかんでもできるわけではありません。そのため、ある部分は共同研究者の人たちと分担して作業を行います。作業を分担して、効率的にデータを解析するにはグループ内の人とのコミュニケーションが必要です。

研究 - 素粒子標準模型を越えて -

◆電弱対称性の破れ

まだ、ヒッグスは見つかっていないので、SMヒッグス機構以外の、素粒子標準模型を超えた理論(BSM)にも電弱対称性の破れを説明できる可能性はまだある。

- テクニカラー、トップカラーモデル

トップクォークと非常に強く結合するZ'ボソンが導入される

→トップクォーク対不変質量分布に鋭いピークを作る

- MSSMモデル

擬スカラーヒッグスボソンとトップクォークが強く結合し、やはりピークを作る

◆重力相互作用を含めた4つの相互作用の統一

「なぜ重力相互作用だけが他の相互作用に比べて非常に弱いのか」階層性問題

- ランドール - サラムモデル

- カルザ - クラインモデル

→いずれのモデルにおいてもトップクォーク対不変質量分布にピークを作る

▣▶ トップクォーク対の不変質量分布はBSM(Beyond the Standard Model)に対して非常に高い感度を持っている。

不変質量分布を一生懸命眺めるよりは、より定量的に、例えば微分断面積をSMもしくはBSMを仮定した理論値と比較してみる。

PhD Thesis ?

1.Introduction

- The Standard Model
- The Top Quark
- Top Quark Production
- Top Quark Decay
- Top Quark Mass
- Beyond the Standard Model

2.ATLAS Detector

- LHC Accelerator Complex
- The ATLAS Detector
 - Inner Detector
 - Calorimeters
 - Muon Detector
 - Trigger System

3.Event Selection

- Electron
- Muon
- Jet
- b tagging
- Missing Transverse Energy
- The Lepton+Jets Event Selection

4.Top Pair Invariant Mass Reconstruction

5.Top Pair Invariant Mass Unfolding

6.Top Pair Differential Cross Section Measurement

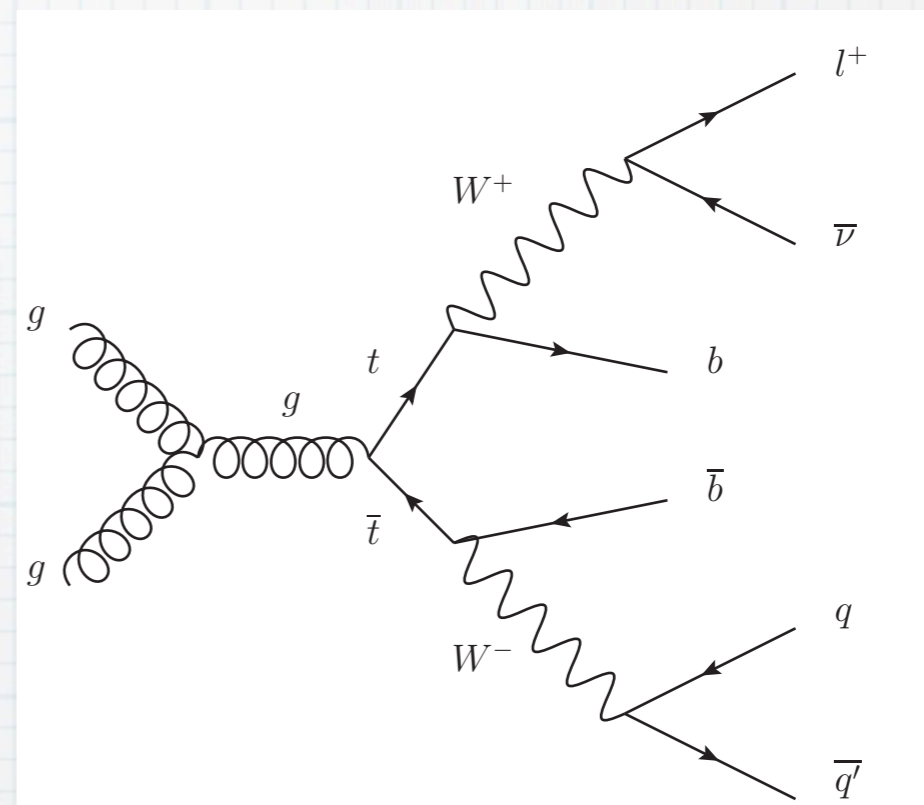
7.Limit for BSM

8.Systematic Uncertainties

9.Results and Conclusion

博士論文の目次を作って、最終的に微分断面積の測定をするには何が必要か、ということを考えてみました。

黒字は現在進行中、赤字はまだ手つかずの所です。



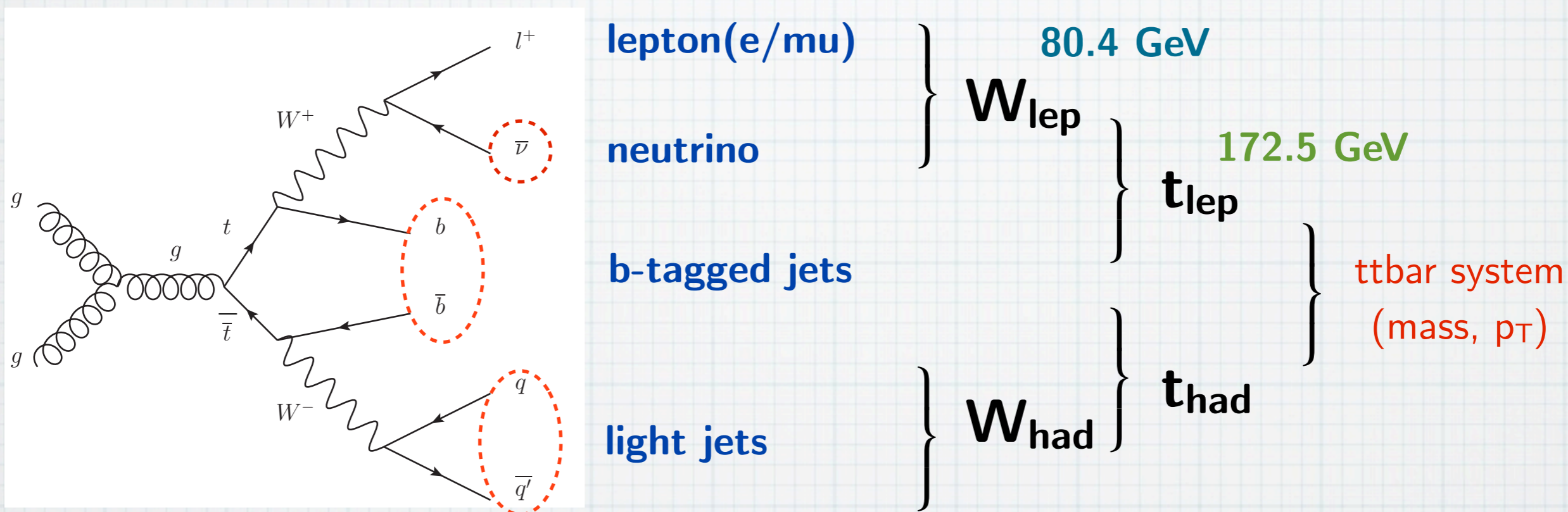
top quark pair production and decaying to lepton+jets

トップクォーク対の生成と崩壊の様子
(レプトン+ジェッツチャネル)

終状態にレプトンとニュートリノ(ただし、消失横方向エネルギーとして観測される)、ボトムクォークによるジェット(以後、b-jet)、ライトクォークによるジェット(以後、l-jet)が存在することが特徴。

Top Pair Invariant Mass Reconstruction

トップクォーク対の不変質量を計算するには観測された各オブジェクトがどちらのトップクォークから来たものか判断しなければいけません。(topかanti-topかということ)



基本的に、lepton+jets channelで解析を行う。

(di-lepton channelでの $ttbar$ system reconstructionは難しい)

◆Objects

- lepton(identified e or mu)
- neutrino : W massを仮定することにより、neutrino p_z を計算する
- b-tagged jet : 4本のjetのうち少なくとも1本はb-tagされることを要求
- light jets : b-tagされなかったもの

D論を書くにあたって必要なこと

- Event Selection
- Control Plots(Basic Kinematics check)

もう少し掘り下げてみました。

まずはイベントセレクションをして、なるべくトップクォーク対事象をつかまえてきます。各オブジェクトの基本的な運動学(運動量やエネルギーなど)の様子をデータとシミュレーションで比較して、背景事象の寄与がきちんと理解できているか確認します。

- pretag 終状態にb-jetがいるのは非常に特徴的。
- tagged b-jetの有無によって背景事象を押さえる。

- Reconstruction of $m_{t\bar{t}}$
- Unfolding $m_{t\bar{t}}$
- Measurement of $d\sigma/dm_{t\bar{t}}$ (Counting experiment)
- Estimation of systematics uncertainties

↑ 微分断面積の中心値だけしか
求まっていない

- Luminosity
- QCD(normalization, shape)
- Objects
 - Electron(trigger SF, reco. eff. SF ID eff. SF, energy scale, energy resolution)
 - Muon(trigger SF, reco. eff. SF, momentum scale, momentum resolution)
 - Jet(JES, pile-up, b-jet energy scale, jet reco. eff. JER)
 - MET(Cell Out+Soft Jet, pile-up, LAr problem)
 - b-tag(tag eff. SF, mistag rate error)
 - Others(pile-up, PDF)
- $t\bar{t}$ (ISR/FSR, MC generator, PS/fragmentation, Color reconnection, top mass)
- W+jets(normalization, shape, amount of heavy flavor)
- Z+jets(normalization, shape)
- Other MC(Single top normalization, Di-boson normalization)

中心値だけでなく、誤差の評価もしなければいけません。左のリストが系統誤差として考えられるものです。

オブジェクトや寄与する背景事象が多いほど、考えなければいけない不定性は増えます。

↑ 微分断面積の中心値と誤差が求まり、
測定そのものは完了

- Limits for BSM

↑ BSMに対して何か分かるはず

Top Pair Differential Cross Section Measurement

先行研究として、米国フェルミ研究所のCDF実験にて微分断面積が測定されています。ATLAS実験でも同様の手法で微分断面積を測定しようとしています。

◆ Counting Experiment

Observed number of events $\rightarrow N_i$

Expected number of background events $\rightarrow N_i^{bkg}$

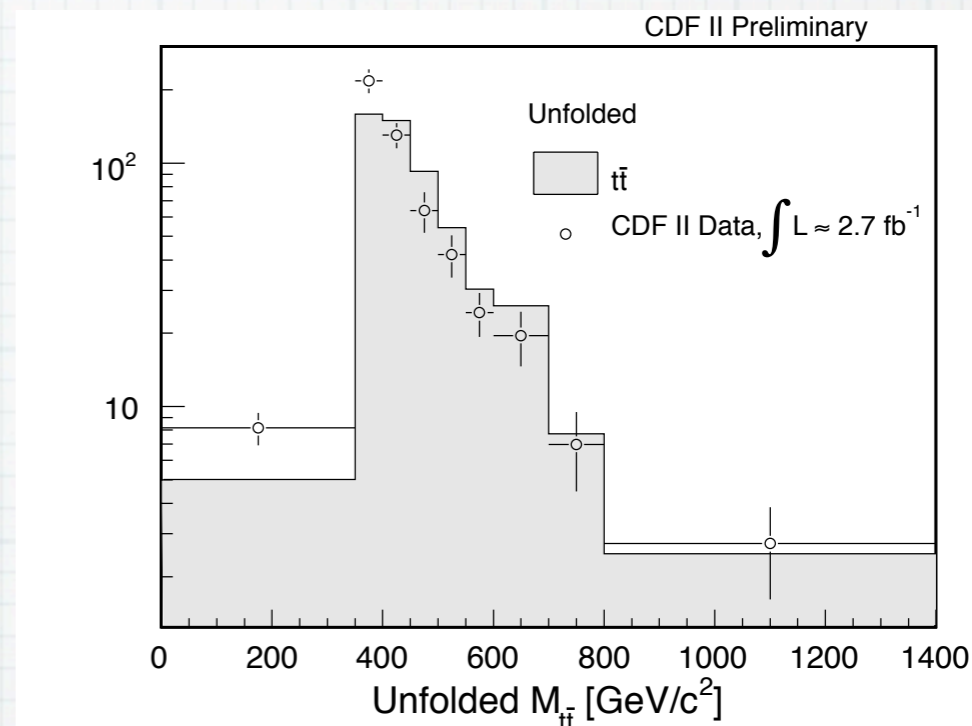
$$\frac{d\sigma_i}{dm_{t\bar{t}}} = \frac{N_i - N_i^{bkg}}{A_i \int L dt \Delta_{m_{t\bar{t}}}^i}$$

Acceptance $\rightarrow A_i$

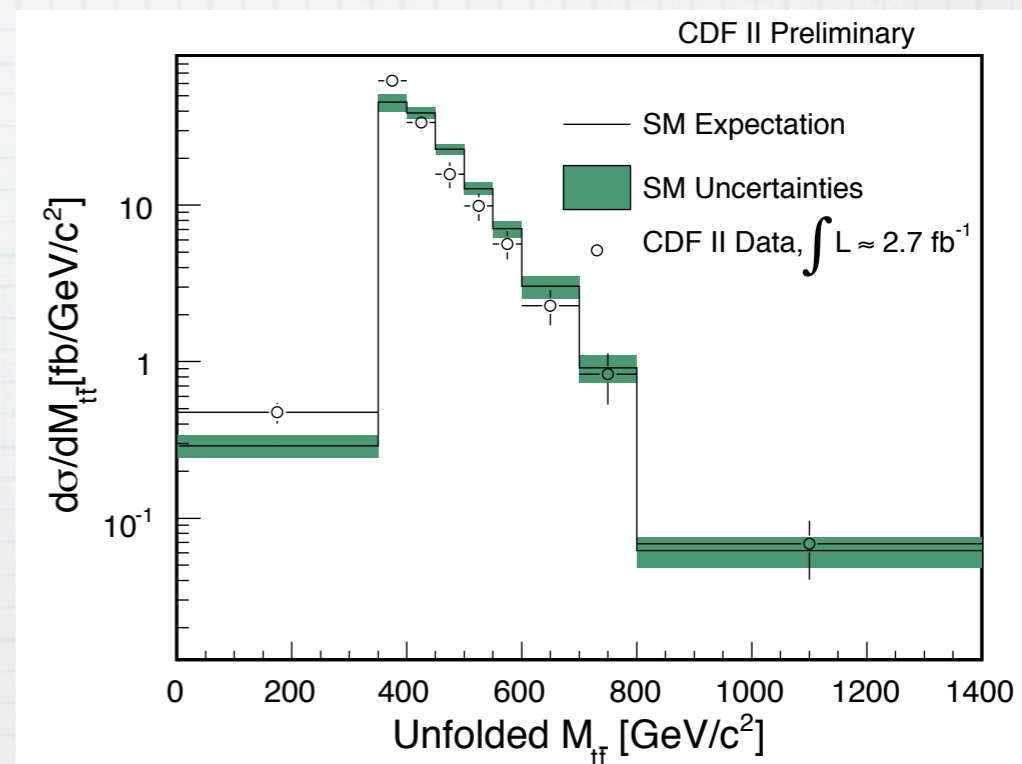
Integrated luminosity $\rightarrow \int L dt$

Bin width $\rightarrow \Delta_{m_{t\bar{t}}}^i$

CDF II Preliminary, $\int \mathcal{L} \approx 2.7 \text{ fb}^{-1}$				
Δ_{JES}^{data} (after correction) [σ_{JES}]	1.3 ± 0.5			
$M_{t\bar{t}}$ [GeV/c^2]	$d\sigma/dM_{t\bar{t}}$ [$\text{fb}/\text{GeV}/c^2$]			
≤ 350	0.47 ± 0.07 (stat.)	± 0.08 (syst.)	± 0.03 (lumi.)	
350-400	62.3 ± 7.0 (stat.)	± 7.9 (syst.)	± 3.7 (lumi.)	
400-450	33.8 ± 4.0 (stat.)	± 3.0 (syst.)	± 2.0 (lumi.)	
450-500	15.8 ± 3.0 (stat.)	± 1.3 (syst.)	± 0.9 (lumi.)	
500-550	9.9 ± 2.0 (stat.)	± 0.9 (syst.)	± 0.6 (lumi.)	
550-600	5.7 ± 1.2 (stat.)	± 0.7 (syst.)	± 0.3 (lumi.)	
600-700	2.3 ± 0.6 (stat.)	± 0.4 (syst.)	± 0.1 (lumi.)	
700-800	0.83 ± 0.30 (stat.)	± 0.17 (syst.)	± 0.05 (lumi.)	
800-1400	0.07 ± 0.03 (stat.)	± 0.02 (syst.)	± 0.004 (lumi.)	
Integrated Cross Section [pb]	6.9 ± 1.0 (stat.+JES)			



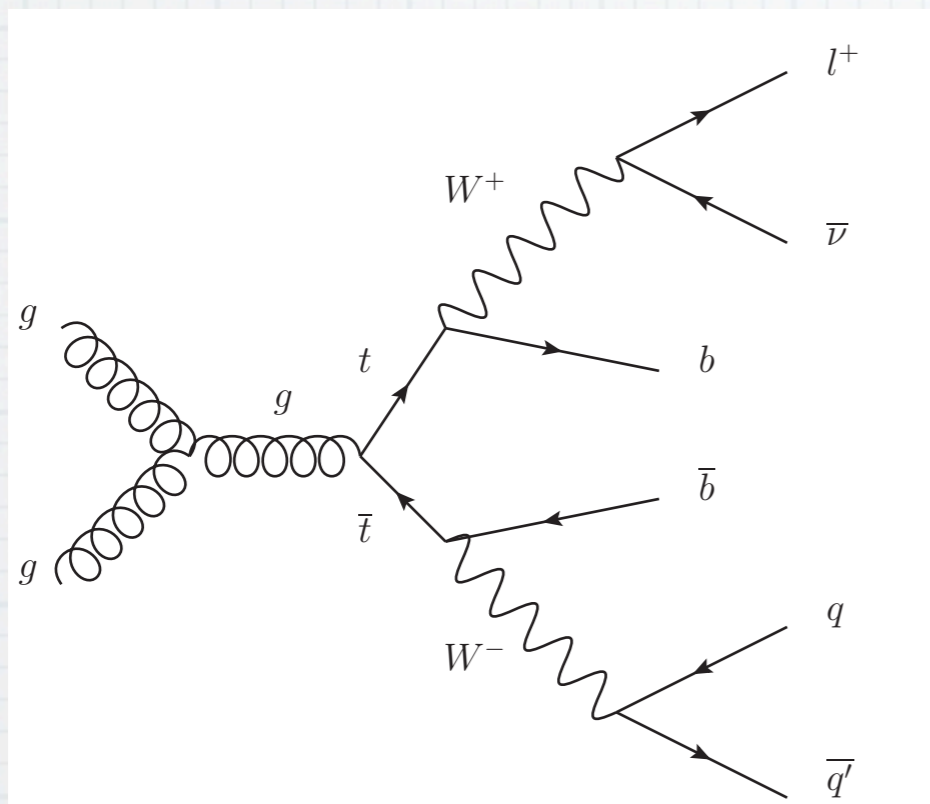
ttbar system mass distribution



differential cross section

Event Selection

以上をふまえて、シミュレーションと測定データに対して、イベントセレクションを実際に行ってみました。
トップクォーク対が崩壊して出てくるオブジェクトの運動量やエネルギーは高いことが特徴的です。



Electron channel

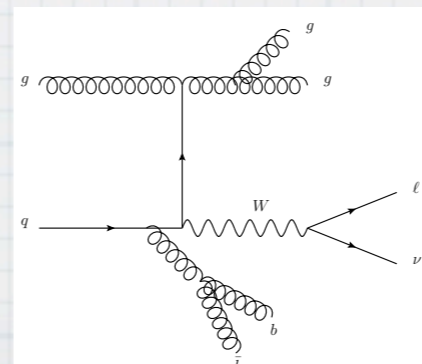
- EF_e20_medium
- ET > 25 GeV
- $|\eta| < 2.47$ ($1.37 < |\eta| < 1.47$)
- Missing ET > 35 GeV
- Transverse Mass > 25 GeV
- at least 4 jets with $p_T > 25$ GeV, $|\eta| < 2.5$
- at least 1 jet b-tagged with SV0 weight > 5.85

Muon channel

- EF_mu18
- $p_T > 20$ GeV
- $|\eta| < 2.5$
- Missing ET > 20 GeV
- MET + mT > 60 GeV
- at least 4 jets with $p_T > 25$ GeV, $|\eta| < 2.5$
- at least 1 jet b-tagged with SV0 weight > 5.85

* 主な背景事象 (終状態がよく似ている)

W+jets, QCD multi jets, Z+jets, di-boson(WW, WZ, ZZ)



W+jets

Top Pair Invariant Mass Reconstruction

❖ イベントセレクションで各オブジェクトの定義はできているが（どれがレプトンでどれがジェットかということ）、トップクォーク対を再構成するには各オブジェクトがどちらのトップクォークから生成されたものであるかを知らなければならない。下のような Likelihood Function を定義して判断する。

◆ Likelihood Function

$$\begin{aligned}
 L = & BW \{m(q_1 q_2) | m_W, \Gamma_W\} \cdot BW \{m(l\nu) | m_W, \Gamma_W\} \cdot \\
 & BW \{m(q_1 q_2 b_{\text{had}}) | m_{\text{top}}, \Gamma_{\text{top}}\} \cdot BW \{m(l\nu b_{\text{had}}) | m_{\text{top}}, \Gamma_{\text{top}}\} \cdot \\
 & W \left(\tilde{E}_{\text{jet}_1} | E_{b_{\text{had}}} \right) \cdot W \left(\tilde{E}_{\text{jet}_2} | E_{b_{\text{lep}}} \right) \cdot W \left(\tilde{E}_{\text{jet}_3} | E_{q_1} \right) \cdot W \left(\tilde{E}_{\text{jet}_4} | E_{q_2} \right) \cdot \\
 & W \left(\tilde{E}_x^{\text{miss}} | p_{x,\nu} \right) \cdot W \left(\tilde{E}_y^{\text{miss}} | p_{y,\nu} \right) \cdot \begin{cases} W \left(\tilde{E}_l | E_l \right), & \text{single electron channel} \\ W \left(\tilde{p}_{T,l} | p_{T,l} \right), & \text{single muon channel} \end{cases}
 \end{aligned}$$

BW Breit-Wigner function

W Transfer function: maps the measured energy (momentum) of an object to the energy (momentum) of the final state particle

\tilde{x} measured value

b_{had} hadronic b quark

b_{lep} leptonic b quark

q_1, q_2 quarks from the decay of the W boson

⇒ この likelihood が最小になる組み合わせを探す

結果...

非常に残念ながら、ATLAS実験に限らず、CERNで行われているほとんどの実験は各実験グループで公式な結果として承認されたものしか、外に出せないことになっています。トッパークォーク対生成微分断面積の測定は、まだ解析が現在進行中のため、ATLAS実験の承認を受けていません。

そのため、ここに各種プロットを載せることはできません。ご了承下さい。

今のところ、8ページ目の赤線付近まで進んでいます。

しかし、グループ内の人たちの解析に追いついていくのがやっとなりで、自分で考えて解析をし、みんなと議論して、より良い測定結果を出すというところまで行けていません...

冬になると世界各地で素粒子物理学実験の国際会議が開催されるので、まずはそこでの発表を目指して積極的に解析を進めていきたいと思っています。

研究以外の活動

旅行

スイスはフランス、ドイツ、イタリアに接しているなので、旅行に行くにはとても良い場所です。

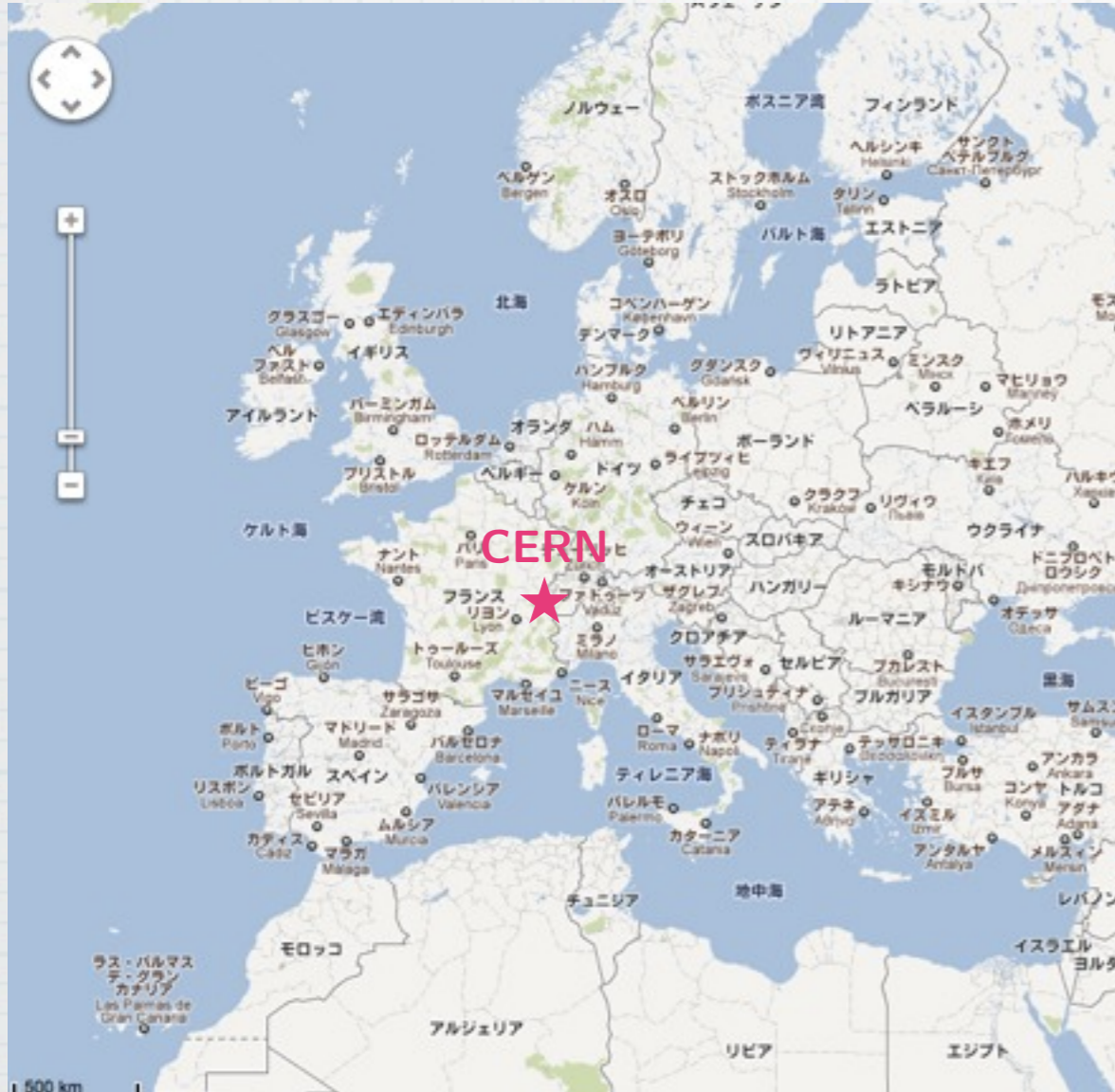
格安飛行機もあるので、その気になればスペインやイギリス、北欧にも日本から行くよりははるかに気軽に行けます。

もちろん、スイス国内も観光スポットはたくさんあります。特にアルプスの山々はとてもきれいです。

CERNから近い山といえば、モンブラン（車で2時間くらい）で、天気の良い日にはCERNからモンブランの頂上がよく見えます。

2010～2011年で訪れた場所

パリ、モナコ、ニース、アルル、シャモニー、ブルゴーニュ、アビニオン、ミラノ、フィレンツェ、ピサ、バチカン、ローマ、ボローニャ、ベネツィア、チューリッヒ



スポーツ

ヨーロッパと言えばやはりサッカー。ワールドカップが開催されていたときは、CERN内でも非常に盛り上がっていて、夕方レストランで中継を観戦している人がたくさんいました。

また、スイスはマルチナ・ヒンギスやロジャー・フェデラーなど、世界ランク1位を取った有名なテニスプレイヤーがいます。スイスに限らずヨーロッパ内ではテニス人口も多く、週末はテニスコートを借りてテニスをしていました。

海外派遣費用

渡航費

ジュネーブまでの航空券は旅行代理店で探してもらいました。

時期にも多少よりますが、航空会社を選ばなければ、15万円前後でジュネーブまで行けます。

(スカンジナビア航空、スイス航空、KLM、エールフランスなど)

生活費

家賃は月500ユーロです。間取りは2K。CERN付近ではかなり安い家賃ですが、公共交通機関がないので車が必須です。

ジュネーブは特に物価が高いので、気軽に外食はできません。日本なら学生にも優しい安いファミレスや定食屋さんがありますが、ジュネーブ付近では1食30スイスフラン（もしくはユーロ）を覚悟する必要があります。

なので、夕食は基本的にスーパーで食材を買って、自炊していました。

昼食はCERN内のレストランで食べていますが、大体1食10スイスフラン程度。日本の大学の学食に比べると少なくとも倍の値段はします。

ジュネーブ付近で生活するにはとにかく食費がかかります。

奨学金、出張費など

大学の授業料は日本学生支援機構からの奨学金で支払い、海外派遣費もしくはKEKからの出張費でCERNでの生活費は賄っています。普通に生活する分には特に支障はありません。

後輩へ

CERNでは、ATLAS実験に限らず、たくさんの世界最先端の素粒子実験が行われています。

また、たくさんの国から色々な研究者が来ているため、その人たちとのコミュニケーションは異文化に触れるという点でもとても良い経験になります。

日本国内でもノーベル賞級の素晴らしい素粒子物理学の研究がされていますが、外国に出て外国の研究者とともに自分の興味ある物理をするというのもまた、将来、第一線で活躍する研究者になるための修行になると思います。

CERN以外でも他のヨーロッパ国内、アメリカにも素粒子物理学のための研究所があるので、海外に自分の活躍の場を探してみるのもどうでしょうか。