今年度(2018年度)からCDFデータからATLASデータに移行。

Z粒子の質量測定

実験Ⅲ素粒子テーマ6回目

LHC加速器とATLAS実験 加速器実験での粒子同定・計測の原理 質量測定の原理 Ntupleデータの解析

バックグラウンドの誤差

■ 必ず誤差も含めて記録する。

- 2つのバックグラウンド見積もりの整合性は、誤差以
 内で一致しているかどうかで考える。
- □ 誤差が計算されてないと、チェックができない。
- レポートに書く時も誤差をつける。
 - □ 誤差がついてないレポートは減点します。
- 誤差のつけ方は与えられているので、実際計算してみると、簡単です。

今日の課題

- 新しいセットアップ(ストッパーを変更)に変更してデータ収集
 - 現データ収集の停止
 - 時刻・カウンタを同時に止め、計数を忘れずに記録する
 - 「Terminate」ボタンでデータ取得を終わること。ウィンドウ右
 上の「×」を押さない!
 - ストッパーをに交換し、データ収集開始

アップデートしたデータの解析(30分くらいで終える)

- バックグラウンド2通りは、誤差付きでやってみること。
- 発展的な解析手法は、今日Z粒子の解析を終えたあとか、次回以降にも時間を取れる。
- Z粒子の質量解析

<u>□ Ntupleデータの解析</u>

停電について

- 昨日、電源作業があったため、いったんデータ収 集を停め、再開した。
 - □ データファイルは停電前・後の2ファイルある。
 - 停電前のスケーラーカウントは、テーブルに写真があ あります。
- TAがデータの連結作業をします。



2つの誤差評価が一致しない班は、
 昨日以降のデータだけではどうか、考えてみよう。

ストッパーの種類

■金属の種類と、原子番号

- □ アルミ13、ステンレス(鉄)26、銅29、チタン22
- 手を切らないように気を付けること!

これまでのストッパー:

□ 1, 2班はアルミ

□ 3,4班は銅

各班、1回はアルミでデータを取るようにしましょう。

LHC加速器とATLAS実験

世界最高エネルギーの加速器実験。



物質を細分化していくと何に行き着くか? それ以上分けられない物質は? ⇒ 物質の究極の構成要素=素粒子







(実際に陽子を衝突させるとき、これほど単純なことがおこっているわけではない...。)

最近から近未来の最高エネルギー加速器



LHC加速器

- 陽子·陽子衝突型加速器
- 重心系エネルギー:現在8TeV、最終的には14TeV
- 周長 27km (~山手線一周:35km)
- 超伝導電磁石1700台(うち1232台が8テスラ・ダイポール)



The LHC injection complex



LHC実験

アルプス山脈

2010年 LHC加速器稼動開始(E_{CM} = 7 TeV)

 2012年 LHC加速器のATLAS/CMS両実験がヒッグス粒子を発見

 2015年 エネルギーを13 TeVに増強

 2020年 いまの~10倍のデータセット

 203X年 いまの~100倍のデータセット









円周27km 陽子を7TeVまで加速して正面復





粒子検出に用いられる技術(例)



微弱な光を電気信号 に変換する。 左のシンチレータと組 み合わせて荷電粒子 をとらえる。

荷電粒子の通過に伴い微弱な光を出す

荷電粒子の通過した位置を数十ミクロン間隔で埋め込まれた電極により測定





荷電粒子が通ると充満されているガス が電離してワイヤーに信号を残す







ATLAS検出器

さまざまな種類の粒子線検出器を組み合わせ、加速器反応でできた粒子の種類を同定 、運動量を精密測定する。 44m



ЬIJ

粒子の種類によって、検 出器内の物質との反応 の仕方が違う。 とくに、止まるまでに到

達する深さに注目。

粒子の同定、電荷・運動量の測定





ジェット クォーク間のポテンシャル $V(r) = \frac{4}{3}\frac{\alpha_S}{r} + kr$ $\simeq \frac{0.2}{r} + 1 \cdot r$ (GeV) r in units of 10^{-13} cm

クォークは単独に取り出せない ある程度離れると真空からq-qbar対 を作ったほうがエネルギー的に得 ある程度離れるとバラバラに千切れる → クォークはハドロン粒子群(ジェット)とし て観測される



Isolation

- µ粒子が周りの粒子からどのくらい「孤 立」しているか
 - *η*-φ平面内でΔ*R*=√(Δη²+ Δφ²) < 0. 4のコーンの中に入ってくるエネルギーの内µ粒子の分を除いたもの, η=-In tan(θ/2)
- Isolation が大きい場合
 - ジェットの中に含まれるハドロンをµ粒子と間 違えた
 - ジェットの中に含まれるハドロンが崩壊してµ 粒子となった

$$Z \rightarrow \mu\mu$$
のミューオン



ハドロンの崩壊で生成 されたミューオン



LHCでのZボソン生成と Zボソンと2体崩壊の運動力学

現在の素粒子物理(標準理論)





全ての粒子に対して、反粒子がある

□ 質量その他の性質が粒子と全く同じで、電荷だけ反対。

	<u> </u>	J	
u	С	t	+2 /3
d	S	b	-1/3
			電荷
v_e	v_{μ}	$\nu_{ au}$	0
<i>e</i> ⁻	μ^{-}	τ^{-}	-1

歩
と



反粒子

u	ī	Ī	-2 /3
d	<u></u> <i>S</i>	b	+1/3
			電荷
$\overline{\nu_e}$	$\overline{\nu_{\mu}}$	$\overline{\nu_{\tau}}$	0
<i>e</i> +	μ^+	$ au^+$	+1



反陽子

電荷-1



反中性子
電荷0



CERN's Accelerator Complex









 光子は、物質中の原子核のつくる電場の中で、 電子・陽電子対に変換する(対生成)。



(時間を反転して)陽電子は、物質中の電子と対 消滅して、光子になる。

ヴァレンス・クォークとシー・クォーク

陽子は、クォーク3つがグルーオンが媒介する強い相互作用でくっついている。(valence quark)



- クォークどうしを結び付けている疲惫がします。
 ーオンは、クォーク・反クォーク対になり、
 すぐにグルーオンに戻ることを繰り返している。(sea quark)
- 陽子の加速器衝突では、valence quark だけでなく、グルーオンや、sea quarkも 反応する。

LHCでのZ粒子の生成と崩壊



Z粒子の質量は陽子の約90倍

- 大型の高エネルギー加速器で ないと作れない
- Z粒子はレプトン対または クォーク対に崩壊
 - □ 崩壊分岐比
 - Br(Z→µ⁺µ⁻)~3%
 - □ 崩壊幅
 - Γ≡1/τ~2.5 GeV
 - □ 寿命

т~0.08 fm~3x10⁻²⁵s

2体崩壊する粒子の不変質量(1)

崩壊によって生じた粒子が相対論的速度で運動しているときは質量は保存しない

$$m_X \neq m_a + m_b$$

エネルギー,および運動量は保存する ⇒4元運動量は保存する

$$p_X^\mu = p_a^\mu + p_b^\mu$$

4元運動量 $p^{\mu} = (E, \vec{p})$ ローレンツベクトル

 $\vec{p_b}$

 $p^0 = E$ $p^1 = p_x$ $p^2 = p_y$ $p^{3} = p_{z}$



2体崩壊する粒子の不変質量(3)

Z→µ⁺µ⁻の場合 M_Z に比べてM_µは非常に小さいので次のように近似できる

$$E_{\mu} = \sqrt{m_{\mu}^2 + \vec{p}_{\mu}^2} \simeq |\vec{p}_{\mu}|$$
$$M_Z^2 = m_{\mu^+}^2 + m_{\mu^-}^2 + 2(E_{\mu^+}E_{\mu^-} - \vec{p}_{\mu^+} \cdot \vec{p}_{\mu^-})$$
$$\simeq 2(|\vec{p}_{\mu^+}||\vec{p}_{\mu^-}| - \vec{p}_{\mu^+} \cdot \vec{p}_{\mu^-})$$

$$M_Z \simeq \sqrt{2(|\vec{p}_{\mu^+}||\vec{p}_{\mu^-}| - \vec{p}_{\mu^+} \cdot \vec{p}_{\mu^-})}$$

■ Z→µ⁺µ⁻の崩壊においてµ粒子の運動量が測定 できればZ粒子の質量が測定できる

$Z \rightarrow \mu^{-} \mu^{+}$ 事象の再構成(例)



2012年7月ヒッグス粒子の発見



2012年7月ヒッグス粒子の発見






実験サイドとしては:

- いろいろな理論があり、どれが本当かはこれから検証していく。
- 最先端の新粒子探索でも、今日みなさんが習う、不変質量を組む手法が重要な役割を果たしている

LHCでのヒッグス粒子発見



 $m_H = 125.3 \pm 0.7 \text{ GeV}/c^2$





EXPERIMENT Run Number: 191426, Event Number: 86694500 Date: 2011-10-22 15:30:29 UTC

ヒッグス粒子の発見の歴史

1960年代初頭 自発的対象性の破れ (南部陽一郎)

1964年 ヒッグス機構 (Brout-Englert, Higgs)

1967年 電弱相互作用の統一理論 (Glashaw,Weinberg,Salam)

- 電磁気力と弱い相互作用の統一的記述。
- 弱い相互作用の媒介粒子W、Zの質量の起 源を説明。
- ヒッグス粒子の存在を予言。

■ ヒッグス場=真空の構造。 1983年 W,Z粒子の発見 2012年 ヒッグス粒子の発見





アングレール・ヒッグス 2013年 ノーベル賞



グラショー・ワインバーグ・サラム 1979年 ノーベル賞

重い粒子を発見するための加速器エネルギ 4元運動量pに対して p²はローレンツ不変量 $m_X^2 = p_X^2 = (p_a + p_b)^2$ (Z粒子崩壊の運動学) この式は、aとbが融合して重い粒子Xが生成したときにも成り立つ。 **m**_b^p_b $m_X^2 = p_X^2 = (p_a + p_b)^2$ $= p_a^2 + 2p_a \cdot p_b + p_b^2$ $= m_a^2 + m_b^2 + 2(E_a E_b - \overrightarrow{p_a} \cdot \overrightarrow{p_b})$ 加速器では、ビーム粒子はa=b=electronまたは、quark(陽子・ 陽子の場合)。 • $m_e = 0.511 \text{ MeV}/c^2$, $m_q = \mathbf{X} + \text{MeV}/c^2$, $m_p = 1 \text{ GeV}/c^2$ 探している粒子は m_x ~数百 GeV/ c^2 (m_{μ} = 125GeV/ c^2) • $m_a = m_b \sim 0$ で近似してよい。 • $|\overrightarrow{p_a}| = \sqrt{E_a^2 - m_a^2} \sim E_a \equiv \frac{E_{CM}}{2}, \quad |\overrightarrow{p_b}| \sim E_b \equiv \frac{E_{CM}}{2}$ 加速器では、aとbは正面衝突

• $\overrightarrow{p_a} \cdot \overrightarrow{p_b} = |\overrightarrow{p_a}| \cdot |\overrightarrow{p_b}| \cdot \cos(180^\circ) = -|\overrightarrow{p_a}| \cdot |\overrightarrow{p_b}| \sim -E_a \cdot E_b$ $m_X^2 = 2(E_a E_b - (-E_a E_b)) = E_{CM}^2$

加速器で生成できる粒子の質量m_Xは、重心系エネルギーE_{CM}程度である。 重い新粒子を探すには、エネルギーの高い加速器が必要!!

Zボソン・データ解析

Ntupleデータを使った解析

- µ粒子の候補を二つ含む事象を集めたデータ
- 事象ごとに様々な変数を持つ
 - □ 衝突点のZ座標
 - □ µ粒子候補1の運動量
 - □ µ粒子候補1の電荷
 - □ µ粒子候補2の運動量
 □ などなど
- どんな変数が使えるかは、テキストの表を参照のこと.
 - 。変数名の大文字・小文字
 に気をつけること。

Event #	P _{x1}	P _{y1}	P _{z1}	Q ₁	P _{x2}	
1			••			
2						
М						
n						

解析の流れ(myZmass.C)

- Ntupleデータから1事象分もってくる
- 信号事象(Z→µ⁺µ⁻)か雑音事象か取捨選択(カット)する(CUTというbool型変数)
- µ粒子候補1と候補2の2体の不変質量m_{µµ}を計算する (massという関数の中身を正しいものに変更する).
- ヒストグラムにm_{µµ}の値を1事象分積む
- 次の事象に移る





- ガウス関数でフィットする
- 測定結果の中心値
 - □ ピークの位置
- 測定結果の誤差



□ ガウス関数のフィットパラメータ(mean)の誤差

- □ ガウス分布(標準偏差σ)する変数をNサンプル取ってきたとき、その中心値がもつ誤差:σ/√N
 - フィットパラメータの誤差は、ほぼ、これに近い大きさになるはず(確認しながら進むこと).

本日のZ粒子の質量解析作業の流れ

- ROOTの基本操作を理解
 - Ntupleデータを読み込んで、ある変数のヒストグラム(条件付で)
 プロットできるようになる
- M_{µµ}分布のプロット
 - myZmass.C (ROOTのマクロ)の中のM_{µµ}を計算する部分を完 成させる.
 - editor(emacs)を使う, \$ emacs myZmass.C &
 - □ Gaussian fit がうまくいかない場合は,fit範囲を調節する.
 - □ Gaussian fit の結果から M_zの測定値を<mark>誤差つきで</mark>求める.

プログラミングのコツ

■ 文法は、正確に。

- y=x と y==x は全然ちがう意味。
 - □ y=x は yにxを代入。
 - □ y==x は yとxが同じなら真
- 文末(一個一個の処理の終わり)は必ず;を付ける。
- コマンドや変数名の綴りは正確に。
- 括弧(),{}の対応をしっかりとる。
- もともとできているプログラム部分・テキストの付録Eを 参考に、書式をしっかり書くと余計なバグが出なくてす むはず。

実験スケジュール

- 第1回:素粒子物理概説、μ粒子寿命測定法、
 同軸ケーブルとインピーダンス、NIMモジュールの機能.
 第2回:シンチレーション・カウンターの理解、HVカーブの測定.
 第3回:タイミング・カーブの測定
 第4回:寿命測定回路のセットアップ、寿命データ収集開始(Al)
 第5回:[データ収集継続(Al)]UNIX入門、PAWを用いたμ粒子寿命測定 データの解析法
 第6回:[データ収集継続(Fe)]Z粒子質量測定法概説、CDF検出器の概説、 Event display、Z粒子の質量
- 第7回: $[データ収集継続(Fe)] 軽い粒子(J/<math>\psi$)の質量
- 第8回:データ解析とグループ内でのまとめ
- 第9回:発表·討論
- レポート提出:第9回の一週間後が締め切り

発表会(9回目授業)

- 発表: ~30分/グループ(10分以内程度/人)
 - □ 必ず全員が話すように発表を分担すること。
 - □ 同じ班内で、発表テーマが重ならないように。
- 書架カメラ+プロジェクター(A4普通紙横向き)
- PowerPoint 使用可
 - ノートPC(D-sub15ピン出力端子付)持参かPowerPointファ イルをUSBメモリに入れて持ってくる.
- 発表内容
 - μ粒子寿命測定/Z質量・J/ψ質量解析
 その他,実験の内容,テキスト中の課題,素粒子物理に関して興味あること
- この実験の内容を全く知らない人でも理解できるように説明する。
- 授業スライドなど、他人の作ったスライドを参考にするのは構わないが、そのまま流用は禁止。

レポートに関して

- 締め切り: 発表会の一週間後
- 提出先:自然学系棟D208(内線4270)
 - 室内テーブル上の実験III用レポート提出BOX
 - 連絡先:内線4270 佐藤, ksato@hep.px.tsukuba.ac.jp
- 手書き・ワープロどちらでもよい。
- 自分の言葉でやったことを纏めること。
- 課題は、やってあれば多少のプラス点。
- **丸写しは大幅減点**の対象とする。
 - □ テキスト・授業スライドの丸写し
 - □ 友達のレポートを丸写し
 - □ 過去の先輩のレポートの丸写し
 - たまに、課題を丸写しで出す人がいる。バレバレなのでやめましょう。



評価:出席点9点,成績点10点(発表3点,レポート7点)

今日の課題

- 新しいセットアップ(ストッパーを変更)に変更してデータ収集
 - 現データ収集の停止
 - 時刻・カウンタを同時に止め、計数を忘れずに記録する
 - 「Terminate」ボタンでデータ取得を終わること。ウィンドウ右 上の「×」を押さない!
 - ストッパーをに交換し、データ収集開始

アップデートしたデータの解析(30分くらいで終える)

- バックグラウンド2通りは、誤差付きでやってみること。
- 発展的な解析手法は、今日Z粒子の解析を終えたあとか、次回以降にも時間を取れる。
- Z粒子の質量解析

<u>■ Ntupleデータの解析</u>

授業中必要に応じて見て



2つの方法で求めてみて、 それらが誤差の範囲で 一致することを確認する こと

- 方法2:
 - SCALERの計数から、バックグラウンドの数を見積もる。
 - S1&S2のようにコインシデンスをとると宇宙線中のミュー 粒子を捕まえられる。
 - S3単独ではほとんどノイズである。
 - 実際に、S3の計数はS1&S2よりずっと多いか、各自 確認すること。



(テキスト2-19式)

方法2での誤差、ヒント

- 実験結果には誤差を必ずつけること。中心値だけでは測定値としての意味をなさない。
 - □ フィットで求めた場合→統計誤差はフィットから得られる。
 - □ 方法2の誤差に関するヒント
 - テキスト2-19式で
 - $N_{BG} = f_{S3} \cdot T' \cdot Rgate = n/t \cdot T' \cdot 20x10^{-6} \cdot N/T$
 - = $(20x10^{-6} \cdot T')/(t \cdot T) \times n \cdot N$
 - $\Delta N_{BG} = (20 \times 10^{-6} \cdot T')/(t \cdot T) \times \sqrt{[(\Delta n \cdot N)^2 + (n\Delta \cdot N)^2]}$

 $= N_{BG} x \sqrt{[(\Delta n/n)^2 + (\Delta N/N)^2]}$

• $(\Delta N_{BG}/N_{BG}) = \sqrt{[(\Delta n/n)^2 + (\Delta N/N)^2]}$

時間計測の誤差は小さい と考える(1週間ほど走ら せて、誤差は秒程度)

積の形になっている式の誤差の伝搬を考えるときは、誤差の伝 搬の計算を、相対誤差(ΔX/X)の表記に持っていくと計算が簡 単になる。

ROOTのC言語あれこれ

テキスト付録Eの、ROOT入門を参照のこと

■ bool型変数

- □ true(0以外)/false(0)の二値をとる変数の型
- 組み込み関数
 - □ sqrt(x) ... xの平方根を返す
 - □ fabs(x) ... xの絶対値を返す
- 条件演算子(bool型の値を返す)
 - □ x == y ... xとyが等しいときtrueを返す
 - □ x != y ... xとyが等しくないときtrueを返す
 - □ x>y, x<y, x>=y, x<=y
 - □ x && y, x || y … x AND y, x OR y (x,y はbool型)
 - 例) fabs(x)<5 && fabs(y)<2



■ P39表中 EtCal1 → IsoCal1 EtCal2 → IsoCal2 ■ IsoCal1,IsoCal2の単位はMeV

質量計算が正しくできたら...

FキストP36最後の段落-P37に書いてある ATLAS実験での標準カットを適用してみる。



バックアップ

現在の素粒子物理(標準理論)



ヒッグス粒子測定の最前線

- ヒッグス粒子を測定することは、真空の構造の本質的に理解 することにつながる。
 - ヒッグス粒子は、まったく新しい種類の粒子。新物理と強く
 関連がある可能性も高い。
- 現在までのところ、測定結果は標準理論とよく一致しているが、測定精度がまだまだ低い。



今後の素粒子物理の課題

- 現在までの素粒子実験の結果は、標準理論の予言とよく一致している(素粒子物 理では、実験結果とキッチリ比較できる理論がある)。
- ヒッグス粒子の発見で、標準理論が予言していた粒子は全部発見が済んだ。
 - → 標準理論は完成した!
 - → 究極の理論が完成??



- 現在までの素粒子実験の結果は、
- ヒッグス粒子の発見で、標準理論が んだ。
 - → 標準理論は完成した!
 - → 究極の理論が完成??
- 標準理論の問題点
 - □ 重力が入っていない。



- □ 自然界に反物質が存在しないのはなぜか?
- ヒッグス機構では、力を媒介する粒子の質量は説明する、クォーク・レプトンの質量は説明がない。
 - 全部基本粒子の割に、レプトンとクォークの質量のばらつきが 異常に大きいのはなぜか?
 M_{top}/M_e ~O(10⁵)
- なぜクォークやニュートリノが、粒子混合をしているのかの説明もない。
- なぜ3世代あるのか説明していない。現状は、元素が100種類ほど ある周期表と似ている。

さらに小さいスケールで、新しい物理があるはず。

標準理論で説明できない実験事実

- 宇宙観測の結果
 - □ 暗黒物質は確実にある。

⇒標準理論の粒子では説明で きない。

- 標準理論では宇宙の質量構成の 5%しか説明できない。
- 暗黒物質を構成する未知の物質は 、素粒子加速器で作り出して詳しく 研究するべき。





標準理論を超えた物理は間違いなくある。 <u>素粒子実験で発見することが不可欠。</u>



実験サイドとしては:

いろいろな理論があり、どれが本当かはこれから検証していく。



実験サイドとしては:

- いろいろな理論があり、どれが本当かはこれから検証していく。
- → 理論家がテキトーなことをたくさん言ってるけど、一個でも正しいのか?
- 誰も思いついていないような物理が見つかる可能性も大きい!!
 - 実験で実証しないかぎり、結論はでない。

新しい物理を探す物理解析の手法

最先端の物理解析でも、今日みなさんが習う、 不変質量を組む手法が重要な役割を果たしている



$2\gamma, P_T^1 > 40, P_T^2 > 30.$ 2通りのカットで解析。



	Spin 0	Spin 2			
Mass (GeV)	~750	~770			
Local Significance	3.8σ	3.9σ			
Global Significance	2.1σ	2.1σ			
ATLAS $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}, 3.2$	fb ⁻¹ Spin-0 Selecti - 3.5 - 3.6 - 2.5 - 2.5 - 1.5 - 1.5 - 0.5 - 0.5	Local significance [o] uo			
m _x [GeV]					








物質を細分化していくと何に行き着くか? それ以上分けられない物質は? ⇒ 物質の究極の構成要素=素粒子 そろそろもう一段小さい 物質の構造が見えてく る?





