研究発表

FAT システム光ファイバーデータの解析

Kim Yonghyunn
共同実験者：田中 彰

2021年2月24日(水)

目次

1 研究テーマ

- 何を測定するのか
- D-Egg
- FATとは？
- キャリブレーション

2 研究目的

- 目的
- 測定背景

3 原理

- PMT
- ポアソン分布

4 実験

- セットアップ
- 測定方法
- データ解析
- 実験結果

5 結論

- 考察

※付録：参考文献

1

研究テーマ

何を測定するのか

FAT過程でD-Egg(検出器)に用いる
光ファイバーのキャリブレーション

D-Egg(検出器)

- 卵のような形をした光検出器
- この光検出器を用いてニュートリノの測定を行う予定。

図1　D-Egg光検出器 [1]

FATとは？

- FAT(final acceptance testing)とは、工学的に装置の規格や性能の要件が満たされているかを判断するために、最終段階で行われるテストである。

- 本研究では、ニュートリノ測定するための検出器D-eggを南極と似ている環境の冷凍庫の中で、上と下から光を入射させることで行われる。

キャリブレーション

- 実験器具の誤差を把握しないまま実験を続けると、測定値を正確に得るのができない。
- このような実験器具の個体差を把握、補正することが**キャリブレーション**である。

2

研究目的

目的

- 本研究では、FATに用いる光ファイバーを実験対象とする。
- 各光ファイバーの性能を検出器で測定、相対比較することで光ファイバー間の個体差を把握する。
- キャリブレーションを行うことで正しい実験データを得られるようにする。
- データ解析から得られたキャリブレーション結果について信頼性を検証し、誤差の理由を調べる。

測定背景

- 検出器は小さい光量差でも敏感なスケールで測定される装置なので、キャリブレーションは必ず必要な過程である。
- 光ファイバーから伝われて出ている光子を直接測定できる方法があると良いが、現実的に難しい。

3

原理

PMT

PMT(光電子増倍管、photomultiplier tube)は、光電効果により放出された電子を増幅することにより、高い感度で測定できる光検出器である。

図2　PMTの内部構造 [2]

ポアソン分布

- 定義：ある時間中に平均λ回発生する現象が、ある時間内にk回起きる確率は下の式で現せる。

$$P(X = k) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k}$$

- <u>ポアソン分布の性質</u>
  i. <u>平均(λ)が十分大きい</u>と<u>ガウス分布に近似</u>する。
  ii. <u>√平均(λ) = 標準偏差(σ)</u>

ポアソン分布

- PMTの光電面に光子が衝突して光電効果が起きる時、理想的に放出される光電子の個数より、ゆらぎをもって検出される。このような放出される光電子の離散的な変化はポアソン分布に従う。
- ある程度多くの量の測定が必要。また、誤差も考慮しなければいけない

図3　光電面での光電効果

図4　光電子数の分布

4

実験

セットアップ

図5 冷凍庫内暗室配置

図6 冷凍庫

セットアップ

図7 測定装置の構成図

測定方法

１．箱の上面と下面の中心に穴をあけ、上面ではTopファイバー、下面ではBottomファイバーを設置、調節をする。

図8 箱とファイバー

２．TopファイバーとBottomファイバーの光が垂直に入るように、同じPMTを上向きと下向きに交代でひっくり返しながらD-Eggのプロトタイプを作る。

図9 上向きと下向きに設定したPMT

測定方法

３．PMTを箱の中に入れ、外部から残光(ノイズ)が入らないように遮光テープで封をする。

図10 箱にいれたPMT

４．PMTを動作させるために電圧をかける。

図11 ケーブルで繋がっているD-egg(PMT)と電力源

測定方法

5．レーザーの光がフィルターを通じて、光ファイバーのPMTと反対側の先に入るように設置する。

6．レーザーの電源をつけ、フィルター（100、50、10、5、1、0.1%）を設定する。

図12 レーザーとフィルターの配置

測定方法

7. オシロスコープで波形を確認して、波形が切れずに画面に最大限に埋まるように、マニュアルで、時間軸と電圧軸を調整する。。

8. 適切なイベント回数（1万回）を設定して、コンピューターで波形を取得する。

図13 波形を出力したときのオシロスコープ

データ解析

１．波形の生データを取得する。

図14　生データの波形

	event_id	time	waveform
0	0	-1.040000e-08	0.016617
1	0	-1.030000e-08	0.016617
2	0	-1.020000e-08	0.008712
3	0	-1.010000e-08	0.008712
4	0	-1.000000e-08	0.008712
...	...	...	...
3995	0	3.891000e-07	0.008712
3996	0	3.892000e-07	0.008712
3997	0	3.893000e-07	0.032427
3998	0	3.894000e-07	0.000806
3999	0	3.895000e-07	0.016617

1万回

図15　数値データ（HDF5 file）

データ解析

2. 電圧値を時間で積分することで電荷量を求める。このとき、ノイズの平均からベースラインを決めて、波形の部分だけを積分するようにする。

図16 ノイズからベースラインを決める

図17 積分して電荷量を計算

データ解析

3. フィルター0.1%の時、電荷量のヒストグラムから、ピークのPEがSPE（光電子１個）になるようにを基準を取って、増幅率（G）を決定する。

SPE = 1

?

$$PE \times e \times G = Q$$

1.602 ×10^{-19} [C]

$$G = \frac{Q}{e \times PE} = \frac{Q}{e \times 1}$$

G ：増幅率
e ：電気素量
Q ：全電荷
PE ：光電子数

図18　電荷量のヒストグラム

データ解析

4.　求めた増幅率を用いて、それぞれのフィルターにおける光電子数を計算した後、光電子数のヒストグラムを描く。

5. 各フィルターにおいて、TopファイバーとBottomファイバーの光電子数の平均計算して、比率を求める。その比率を用いてヒストグラムを調節し、一致しているかを調べる。

$$\text{topに対するbottomの比率} = \frac{bottom\text{ファイバーの}PE\text{の平均}}{top\text{ファイバーの}PE\text{の平均}}$$

実験結果

各生データの波形からVの最低値を取って、ヒストグラムを描いて、正規性(ガウス分布)を検定することからイベント回数が十分かを確認。

図19　Vのmin値

図20　Vのmin値のヒストグラム

実験結果

イベント回数	平均±1×標準偏差	平均±2×標準偏差	平均±3×標準偏差
（理論値）	68.2	95.4	99.7
2000	66.6	95.1	99.8
3000	70.4	94.7	99.9
5000	68.2	95.1	99.8
8000	68.5	95.6	99.7
10000	68.1	95.0	99.8

表1　フィルター100％の時の各イベント回数におけるVminヒストグラムの信頼区間（％）

⇒イベント回数10000回の設定は問題ない

実験結果：ゲインの推定

図21 増幅率の計算 2

- Top fiber : $\mu = 0.625$

$$G = 0.625 \times 10^7$$

- Bottom fiber : $\mu = 0.662$

$$G = 0.662 \times 10^7$$

実験結果：キャリブレーション

⇒前回の田中くんの、比率と違う

	top		bottom
フィルター(%)	**平均**	**比率** (bottom/top%)	**平均**
100	349.1	**85.7**	299.3
50	208.3	**86.1**	179.3
10	53.11	**84.2**	44.74
5	26.50	**84.0**	22.25
1	3.665	**89.7**	3.286
0.1	0.2064	**80.8**	0.1668

表2　各フィルターにおけるキャリブレーション

実験結果

図24　各フィルターにおけるキャリブレーション

実験結果

田中くんの計算値

フィルター(%)	比率 1 (bottom/top%)	比率 2 (bottom/top%)
100	**90.02**	**85.7**
50	**87.83**	**86.1**
10	**87.68**	**84.2**
5	**87.31**	**84.0**
1	**89.97**	**89.7**
0.1	**100.0**	**80.8**

表3　各フィルターにおけるキャリブレーション比較

実験結果

なぜ違うのか？
一つずつ検証していく。

図21 増幅率の計算 2

実験結果

①bins設定

bins = 100

$G = 0.625 \times 10^7$

bins = 300

$G = 0.643 \times 10^7$

実験結果

②切りの基準店

切りの基準点= 0.20

$$G = 0.625 \times 10^7$$

切りの基準点= 0.04

$$G = 0.615 \times 10^7$$

実験結果

領域に含まれているデータ量：1829

全体データ量10000に比べて少ない
⇒　誤差範囲が広いかもしれない

- データ数1829の誤差範囲

$$\sqrt{\frac{\mu}{n}} = \sqrt{\frac{0.625}{1829}} = 0.0185$$

$$\Rightarrow \mu = 0.625 \pm 0.0185$$

データ数が増えるとの誤差範囲が減る

- データ数10000の誤差範囲

$$\sqrt{\frac{\mu}{n}} = \sqrt{\frac{0.625}{10000}} = 0.00790$$

$$\Rightarrow \mu = 0.625 \pm 0.00790$$

実験結果

ポアソン分布のゆらぎ > 測定値のゆらぎ
本来ポアソン分布の理論曲線より幅が広くなるはずだが、そうはなっていない

図22　Topファイバーの各フィルターにおける光電子数のヒストグラム

実験結果

ポアソン分布のゆらぎ > 測定値のゆらぎ
本来ポアソン分布の理論曲線より幅が広くなるはずだが、そうはなっていない

図23　Bottomファイバーの各フィルターにおける光電子数のヒストグラム

実験結果

ポアソン分布とずれたのは、このsaturationが問題なのかもしれない → 要検討

図24　各フィルターにおけるキャリブレーション

5

結論

考察

- 本研究から2つ（Top、Bottom）のファイバーをキャリブレーションして、どのくらいの性能差があるのか把握できた。

- データから解析する数値を活用して、今後D-eggのFATの作業でファイバー個体差の影響を補正することができる。

本研究の限界

- フィルター100%、50%の時、疑問がある実験結果については、サチュレーション効果が原因であると予想する。（ポアソン分布のゆらぎ > 測定値のゆらぎ）

- もっと正確なキャリブレーションをするために増幅率の計算について、より誤差を減らす必要がある。

- これについて、別の方法の実験で、追加的な検証が必要と思われる。

※参考文献

[1]ハドロン宇宙国際研究センター「IceCube検出器｜ニュートリノ天文学」http://www.icehap.chiba-u.jp/icecube/detector/index.html21/2/19

[2] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/52/Photomultipliertube.svg

吉田泰三（1982）『物理学実験』学術図書出版社

20201008_FATCaT-fatWorkshop.pdf (Colin Burreson)