

PMTの性能評価及び 水チェレンコフ光検出

長澤広武 西本卓真

1. 実験の動機・最終目標
2. チェレンコフ光の説明
3. PMT・ゲインカーブ
4. PMT・1光電子測定
5. 水チェレンコフ光実験

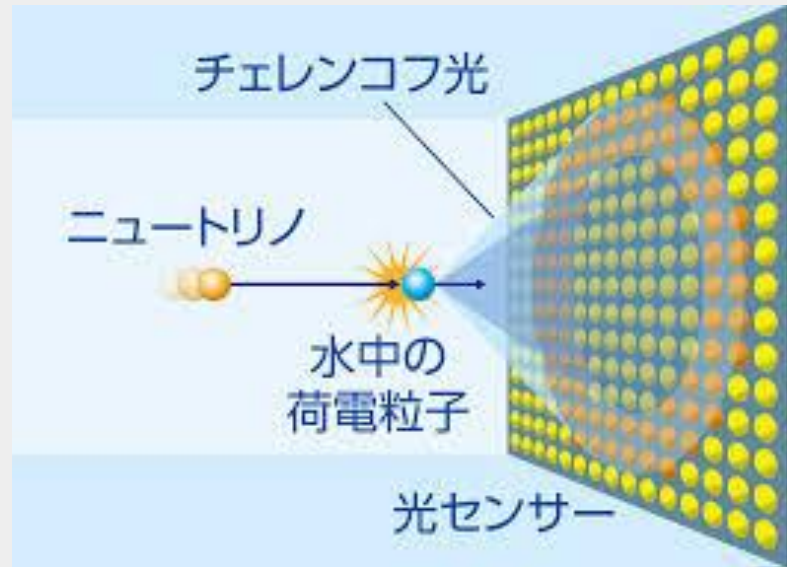
1. 実験の動機・最終目標
2. チェレンコフ光の説明
3. PMT・ゲインカーブ
4. PMT・1光電子測定
5. 水チェレンコフ光実験

●実験の動機

宇宙線研究の最先端で使用されているスーパーカミオカンデの実験原理の理解を深めたいと考えたから。

●実験の最終目標

スーパーカミオカンデで実際に使用されているPMTを用いて、ミニチュア版を製作し、チェレンコフ光を実際に測定すること。



スーパーカミオカンデの実験原理

出典：<http://www.hyper-k.org/cherenkov.html>

1. 実験の動機・最終目標
2. チェレンコフ光の説明
3. PMT・ゲインカーブ
4. PMT・1光電子測定
5. 水チェレンコフ光実験

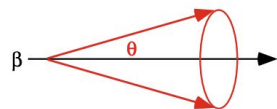
●チェレンコフ光とは

チェレンコフ光は、水中を走る荷電粒子の速度が光の速度より速くなると放出される光のこと。

●測定により分かること

光センサーから得られた光の量やリングの形、光の到達時間などから、ニュートリノのエネルギー、方向、種類などを決定出来る。

粒子速度 $v >$ 物質中の光速 $n' = c/n$ (Frank, Tamm)



発生角度 $\cos\theta = \frac{1}{n\beta}$ $\beta_{th} > \frac{1}{n}$

発生光子数 :
$$N(\beta) = 2\pi\alpha l z^2 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \left(1 - \frac{1}{(n\beta)^2} \right)$$

チェレンコフ光に関する物理量

引用 : http://lambda.phys.tohoku.ac.jp/~kobayash/4nen/files/GT04mar_Nonaka_ppt.pdf

1. 実験の動機・最終目標
2. チェレンコフ光の説明
3. PMT・ゲインカーブ
 - a. セットアップ
 - b. 実験結果・考察
4. PMT・1光電子測定
5. 水チェレンコフ光実験

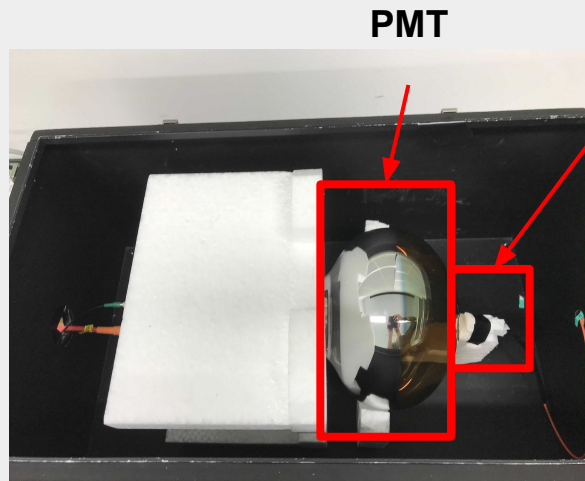
1. 実験の動機・最終目標
2. チェレンコフ光の説明
3. PMT・ゲインカーブ
 - a. セットアップ
 - b. 実験結果・考察
4. PMT・1光電子測定
5. 水チェレンコフ光実験

セットアップ① (PMT)

PMTにかかる電圧と検出される信号のADC値の関係を調べることで、PMTの性能(増幅率)を相対評価。



35cm

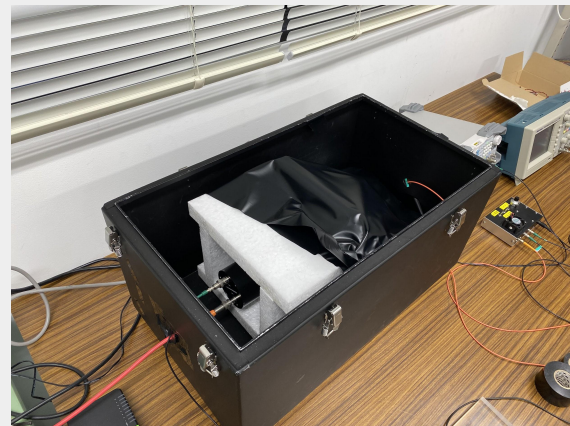


PMT

LED

暗箱内部のPMTと光源。固定したPMTの正面にLEDを設置した。

暗箱内部をブラックシートで覆い遮光した。



セットアップ① (PMT)

PMTに光源以外の光が出来るだけ入らないようにするべく、暗箱とブラックシートで遮光した。



↑
暗箱でPMTと光源を覆った。

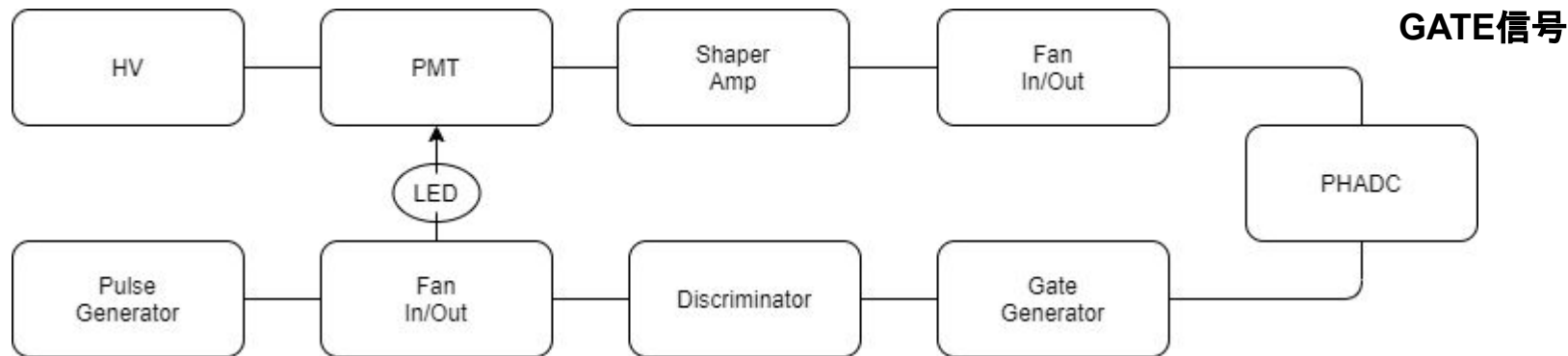
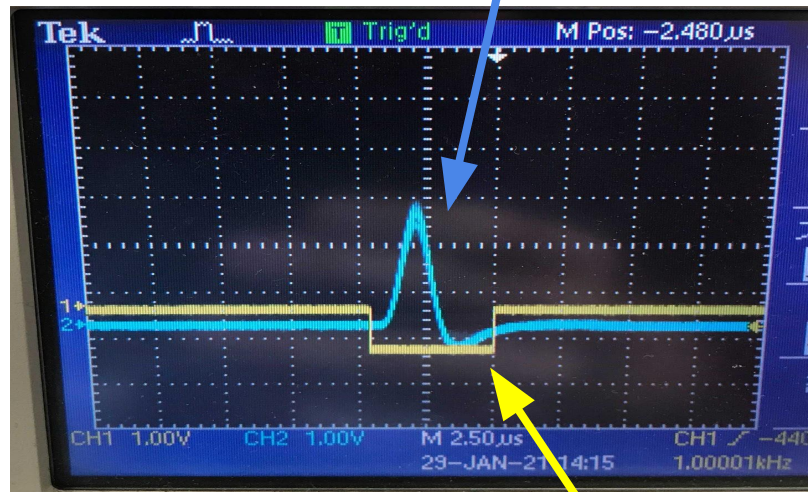


↑
暗箱に加えて、ブラックシートを4枚を上から被せることでさらに遮光した。

セットアップ② (GATE)

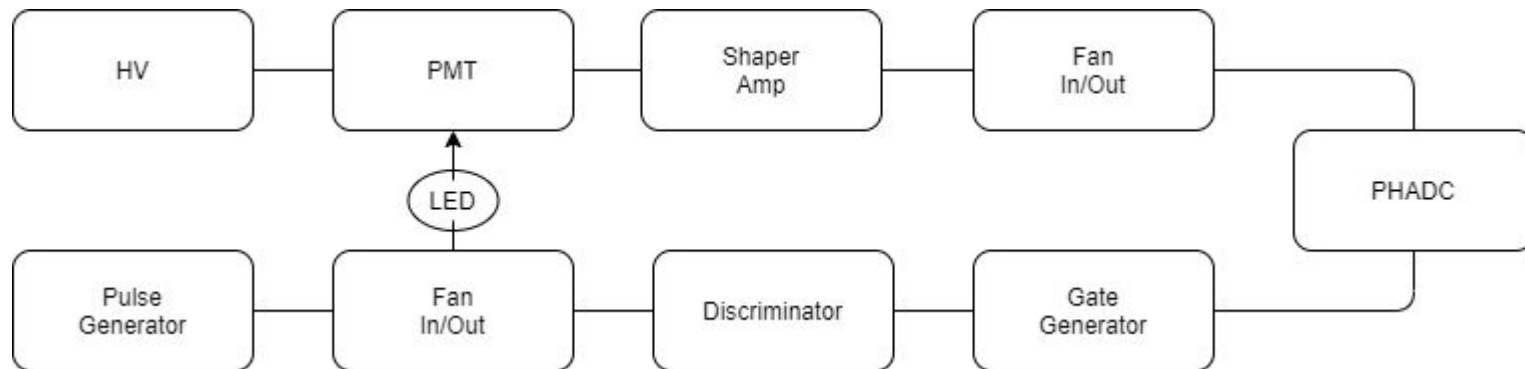
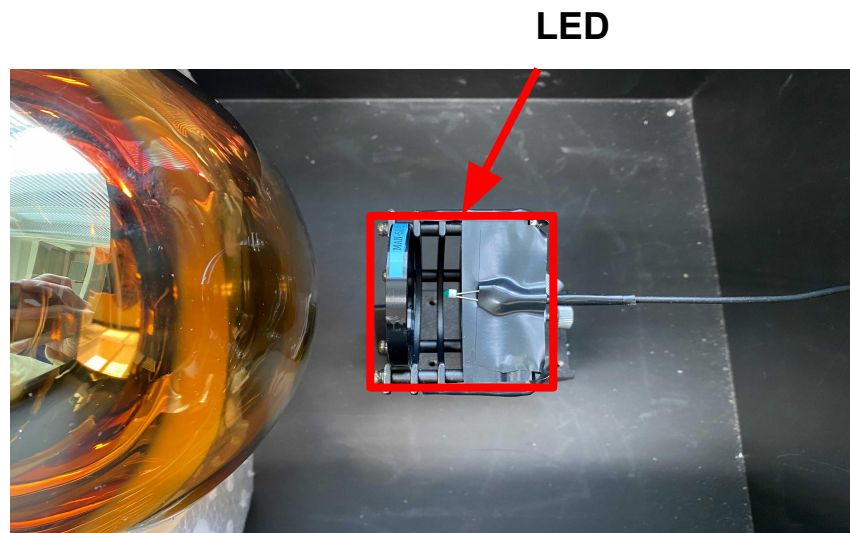
Gate GeneratorのDelay機能でPMTの信号がGATE内に入るように調整した。黄線はパルスジェネレータの信号によって開かれたGATE信号、青線はShaper Ampを通したPMTの信号。(Shaper Ampのゲインは20倍に設定。)

Shaper Ampを通したPMTの信号



セットアップ③ (光源)

光源にはLEDを用い、パルスジェネレーターでパルス信号を送り発光させた。PMTとの間に減光フィルターを設置。



1. 実験の動機・最終目標
2. チェレンコフ光の説明
3. PMT・ゲインカーブ
 - a. セットアップ
 - b. 実験結果・考察**
4. PMT・1光電子測定
5. 水チェレンコフ光実験

測定結果 (状況I. 減光99.95%/Shaper AmpのGain=20/Pulsevolt=10)

状況I. Pedestal=150.811±1.9605						
HV	Mean	Sigma		MEAN-Pedestal	Sigma	
1800	13036	865.93	→	12885	865.93	
1700	8395.5	620.08	→	8244.7	620.08	
1600	5271.4	404.50	→	5120.6	404.51	
1500	3217.8	250.69	→	3067.0	250.69	
1400	1902.9	149.26	→	1752.1	149.28	
1300	1112.6	85.462	→	961.80	85.485	
1200	653.38	47.732	→	502.57	47.772	
1100	386.61	20.310	→	235.80	20.404	
1000	252.91	18.238	→	102.10	18.343	

※測定値はROOTでガウスフィッティングを行い、その Mean値を使った。
(このページ以降の実験でも同様に測定値を決定した。)

測定結果 (状況II. 減光95%/Shaper AmpのGain=20/Pulsevolt=10.8)

状況II. Pedestal=150.098±13.586									
HV	Mean	Sigma		MEAN-Pedestal	Sigma		MEAN	Sigma	
1000	13481	394.14	→	13331	394.37	→	102.10	18.834	
900	6035.4	208.76	→	5885.3	209.20	→	45.075	8.3622	
800	2839.4	114.73	→	2689.3	115.54	→	20.597	3.8533	
700	961.35	34.950	→	811.25	37.498	→	6.2132	1.1672	
600	367.88	19.370	→	217.79	23.660	→	1.6680	0.3537	
500	162.56	10.675	→	12.457	17.278	→	0.095406	0.1335	

※状況 I のセッティングだとノイズと区別出来なくなったため、減光フィルターと Pulsevolt を変え光量を状況 I の 108倍にした。

※HV1000VのMean値を比較し、状況 I だった場合の値を算出した。

(誤差伝播)

誤差伝播の法則を用いて、ゲインカーブの測定において発生した誤差を計算した。

HVの値によって光量を変化させ、それぞれ状況I、状況IIと呼ぶことにする。

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (5)$$

そして計測値を用いた計算結果 y の精度 σ_y は、誤差伝播の法則により次式で計算できる。多変数なので偏微分を利用している。

$$\sigma_y^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \right)^2 \sigma_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \right)^2 \sigma_{x_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} \right)^2 \sigma_{x_n}^2 \quad (6)$$

なお、この法則が成り立つのは、計測値 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ が互いに独立な場合である。もし独立ではなく、何らかの相関関係がある場合は、共分散を考慮する必要がある。

引用 : <http://www.infra.kochi-tech.ac.jp/takagi/Survey1/3Error.pdf>

状況I. 減光99.95%/Gain=2/Pulsevolt=10

x: Mean

y : Pedestal

$f(x,y)=(\text{Mean})-(\text{Pedestal})=x-y$

状況II. 減光95%/Gain=20/Pulsevolt=10.8

x : Mean-Pedestal(状況I, HV=1000)

y : Mean-Pedestal(状況II, HV=1000)

z : Mean-Pedestal(状況II)

$f(x,y,z)=\{\text{Mean-Pedestal(状況II)}\} \times (\text{倍率}) = z \times (x/y)$

※倍率(=x/y)はHVの値によって変化しないものと考え、HV=1000の倍率を用いた。

ゲインカーブ・片対数グラフ

縦軸:ADC値、横軸:HV

$$y=a*x**b+c$$

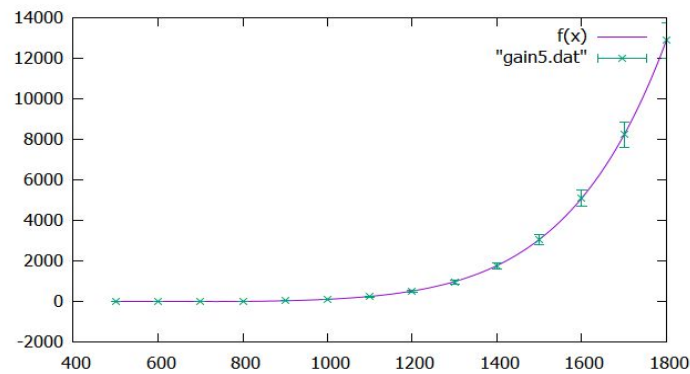
でフィッティングすることにした。

Final set of parameters		Asymptotic Standard Error	
a	= 3.36952e-22	+/- 5.6e-23	(16.62%)
b	= 7.85908	+/- 0.02157	(0.2745%)
c	= -17.5408	+/- 6.928	(39.5%)

correlation matrix of the fit parameters:

	a	b	c
a	1.000		
b	-1.000	1.000	
c	-0.563	0.560	1.000

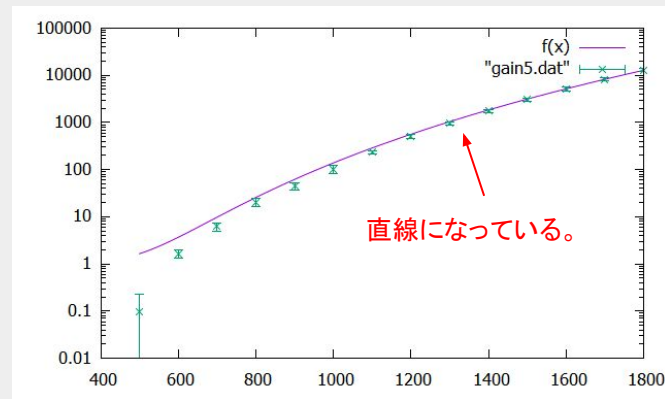
縦軸:ADC



横軸:HV

図1: ADCとHVの関係

縦軸:ADC



横軸:HV

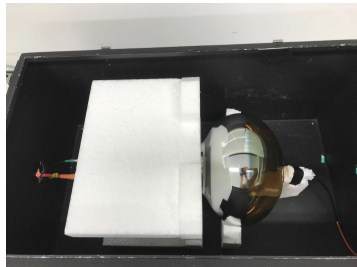
図2: 図1の片対数グラフ

1. 実験の動機・最終目標
2. チェレンコフ光の説明
3. PMT・ゲインカーブ
4. PMT・1光電子測定
 - a. セットアップ
 - b. 実験目的
 - c. 実験結果・考察
5. 水チェレンコフ光実験

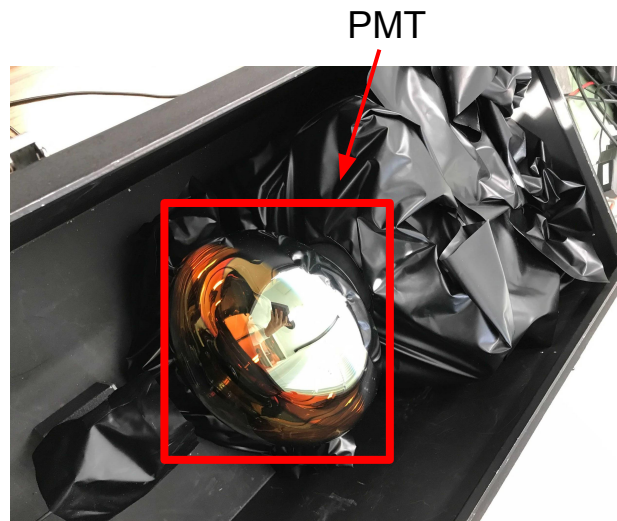
1. 実験の動機・最終目標
2. チェレンコフ光の説明
3. PMT・ゲインカーブ
4. PMT・1光電子測定
 - a. セットアップ
 - b. 実験目的
 - c. 実験結果・考察
5. 水チェレンコフ光実験

セットアップ (PMT)

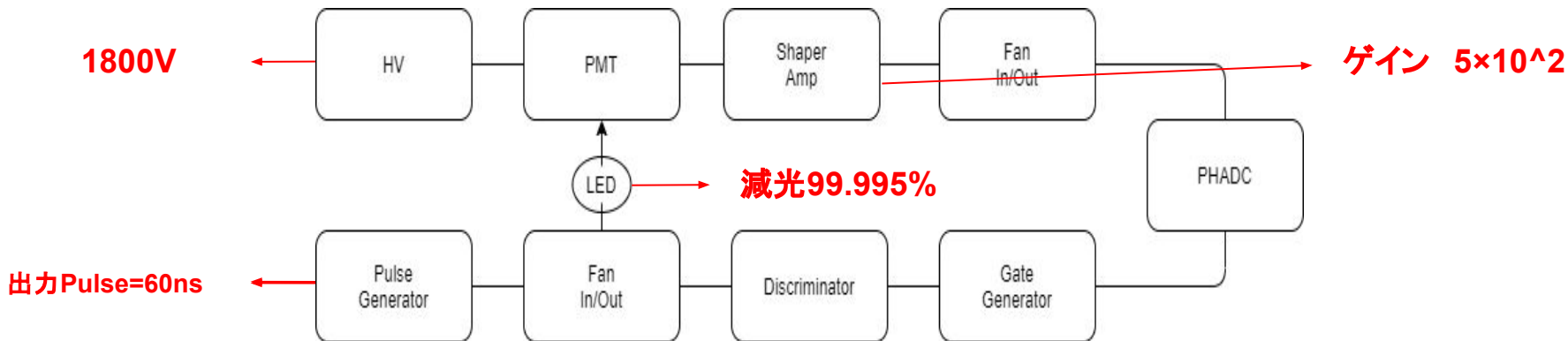
使用した回路はゲインカーブに実験と同じ。より大きいゲインに設定できるShaper Ampに取り替え、ノイズ対策としてPMTを固定していた白い発泡スチロールを暗幕で覆った。



Before

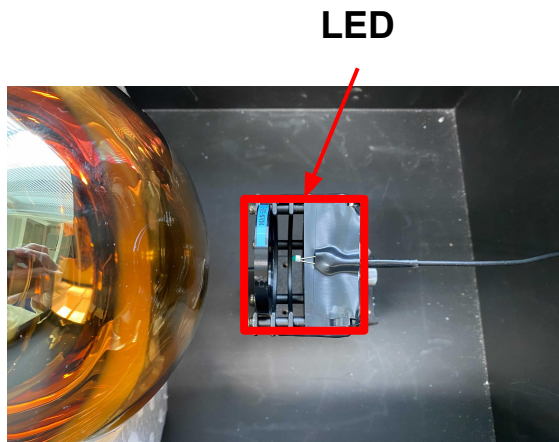


After

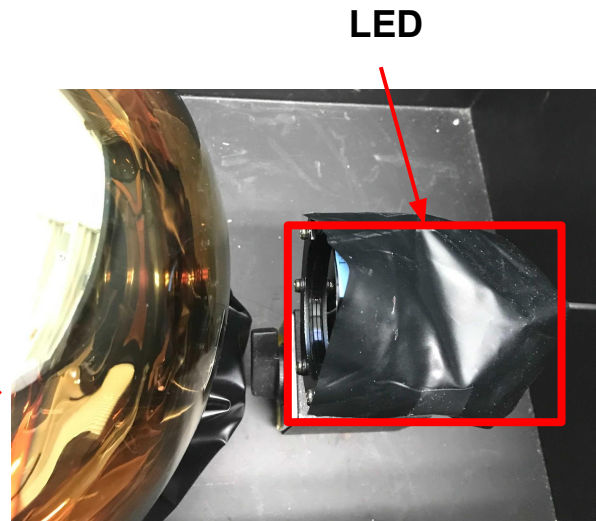


セットアップ (LED)

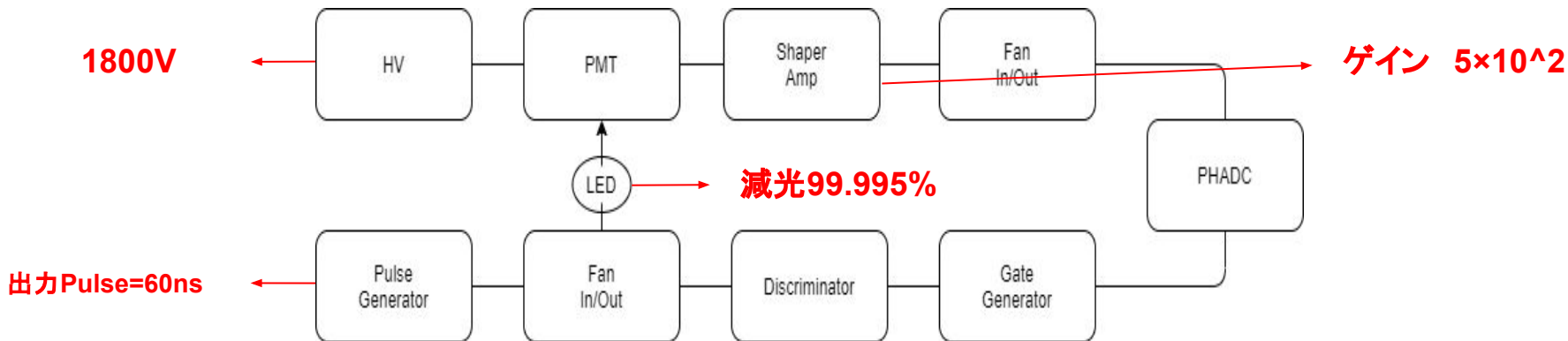
減光されたLEDの光のみが入るように、LEDの周りも暗幕で覆った。



Before



After



1. 実験の動機・最終目標
2. チェレンコフ光の説明
3. PMT・ゲインカーブ
4. PMT・1光電子測定
 - a. セットアップ
 - b. 実験目的
 - c. 実験結果・考察
5. 水チェレンコフ光実験

●実験目的

1光電子を測定することで、使用しているPMTのGainを調べる。その実験結果を基にして水チェレンコフ光実験を行う

●実験結果の予想

使用しているPMTの仕様書によると 10^7 程度になると予想される

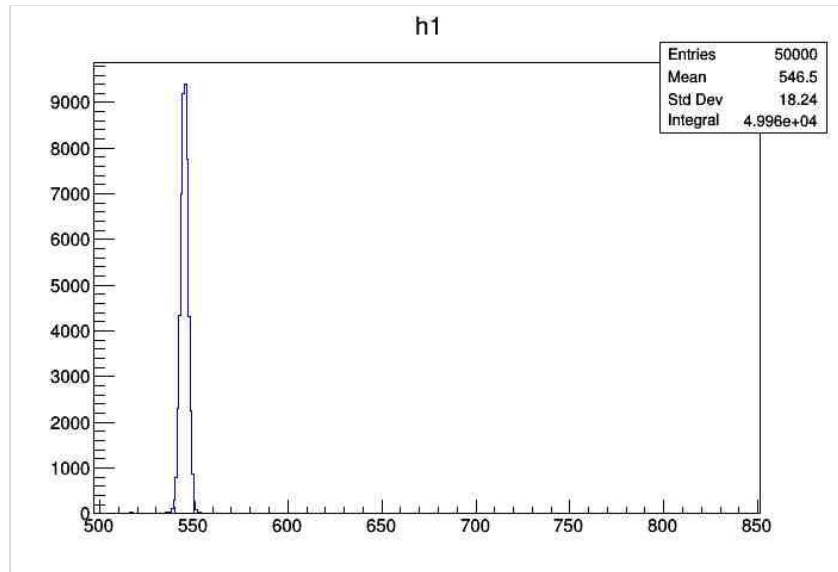
(参考) Gainの計算式

電気素量×Gain×ShaperAmpのGain×光電子数
=出力電圧/抵抗×時間幅

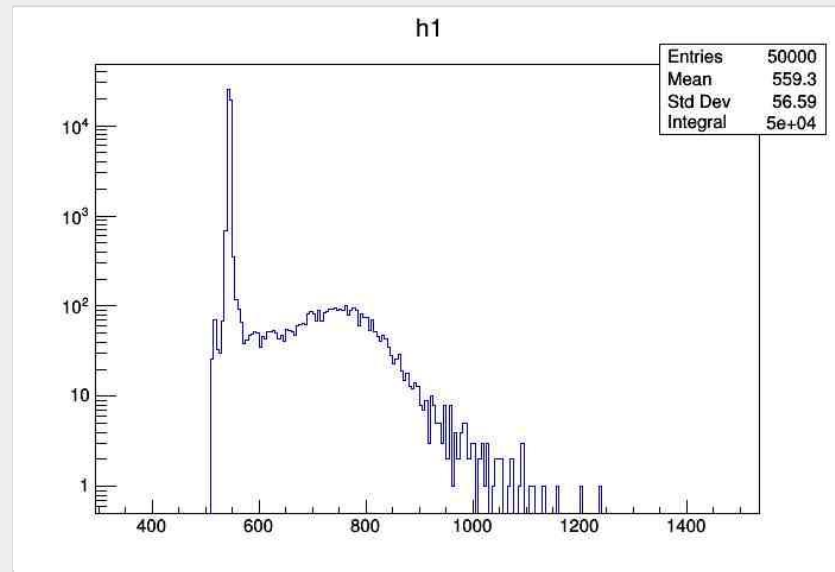
1. 電気素量... 1.60217×10^{-19}
2. Shaper AmpのGain...500
3. 光電子数...1とする(後述)
4. 出力電圧...後述
5. 抵抗... 50Ω
6. 時間幅...後述

1. 実験の動機・最終目標
2. チェレンコフ光の説明
3. PMT・ゲインカーブ
4. PMT・1光電子測定
 - a. セットアップ
 - b. 実験目的
 - c. 実験結果・考察
5. 水チェレンコフ光実験

1光電子測定：実験結果

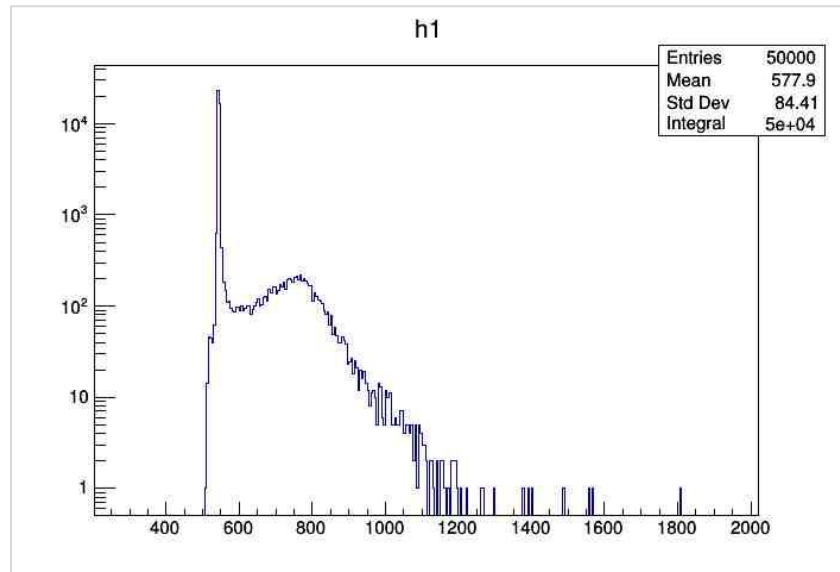


(i) Pulsevolt=0V

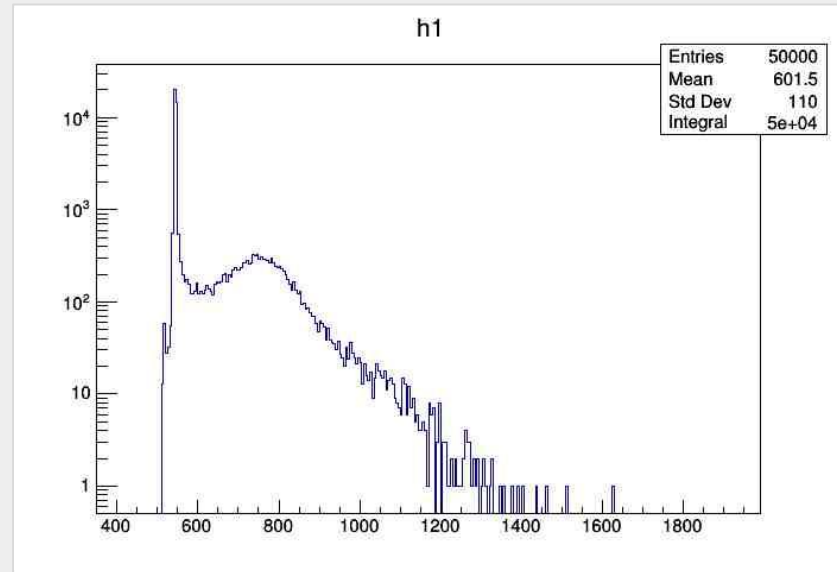


(ii) Pulsevolt=3.0V

1光電子測定：実験結果

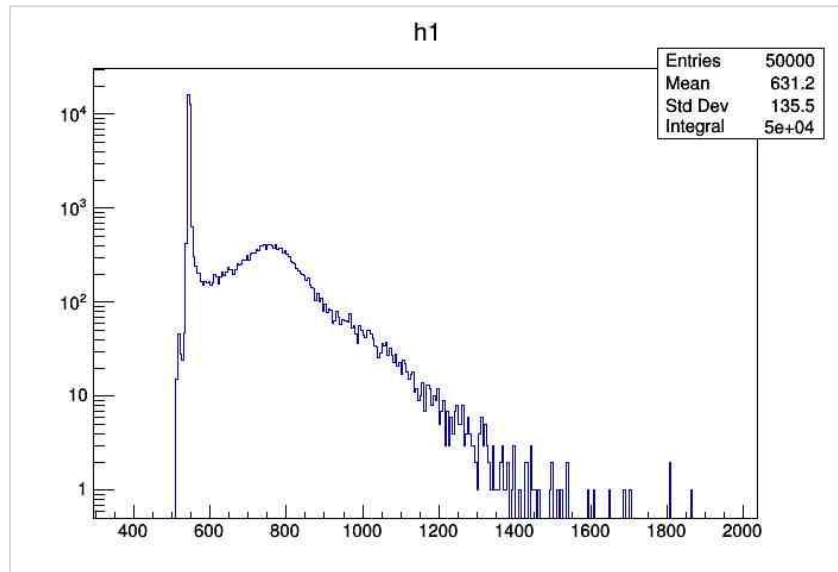


(iii) Pulsevolt=4.0V

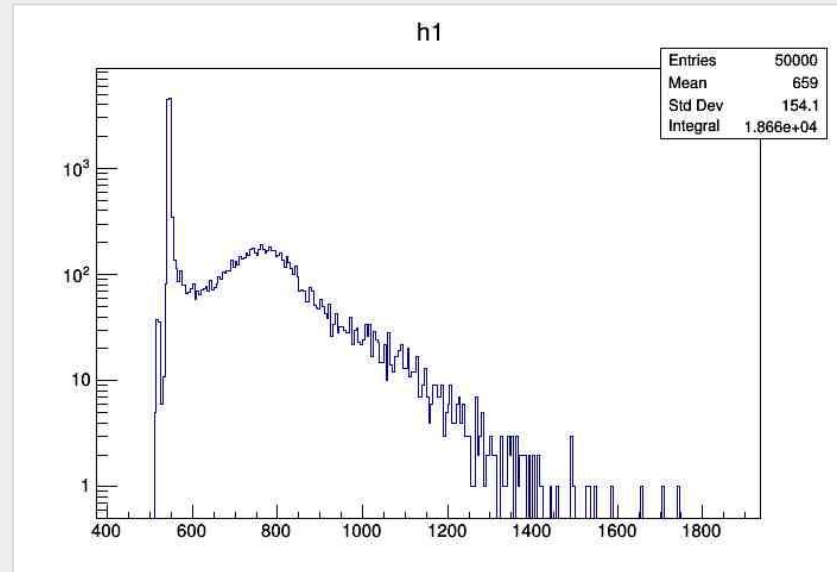


(iv) Pulsevolt=5.0V

1光電子測定：実験結果

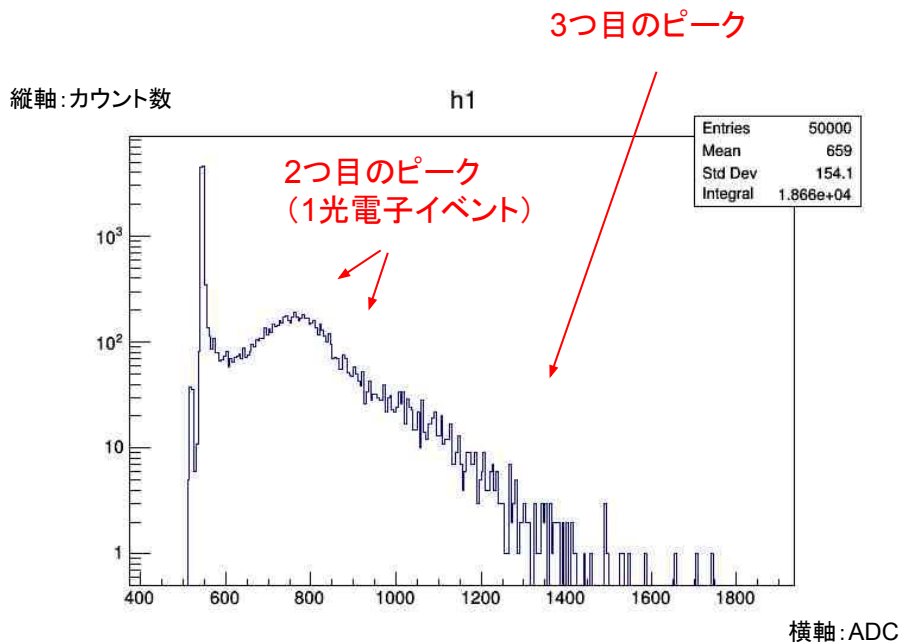


(v) Pulsevolt=6.0V



(vi) Pulsevolt=6.9V

1光電子測定：実験結果



(前) Pulsevolt=5.0V

左の図から以下の2点が分かる

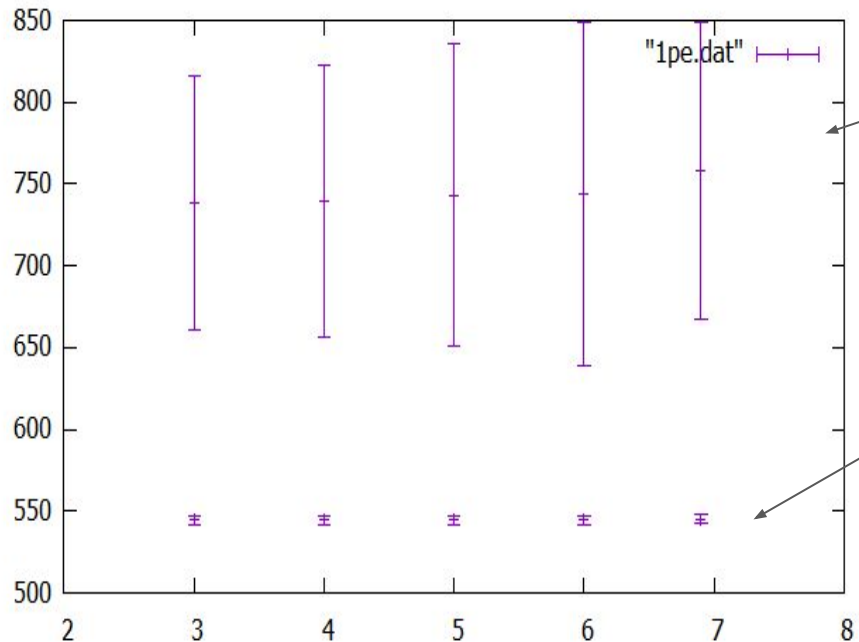
1. 光量を変化させたときに2つ目のピークの山が動かない。
2. 光量を増やしていくと3つ目のピークの山が現れ、それが整数倍ぐらいの値になっている。



以上より、2つ目のピークの山が1光電子イベントであると推察出来る

1光電子測定：実験結果

縦軸：ADC



横軸：Pulsevolt

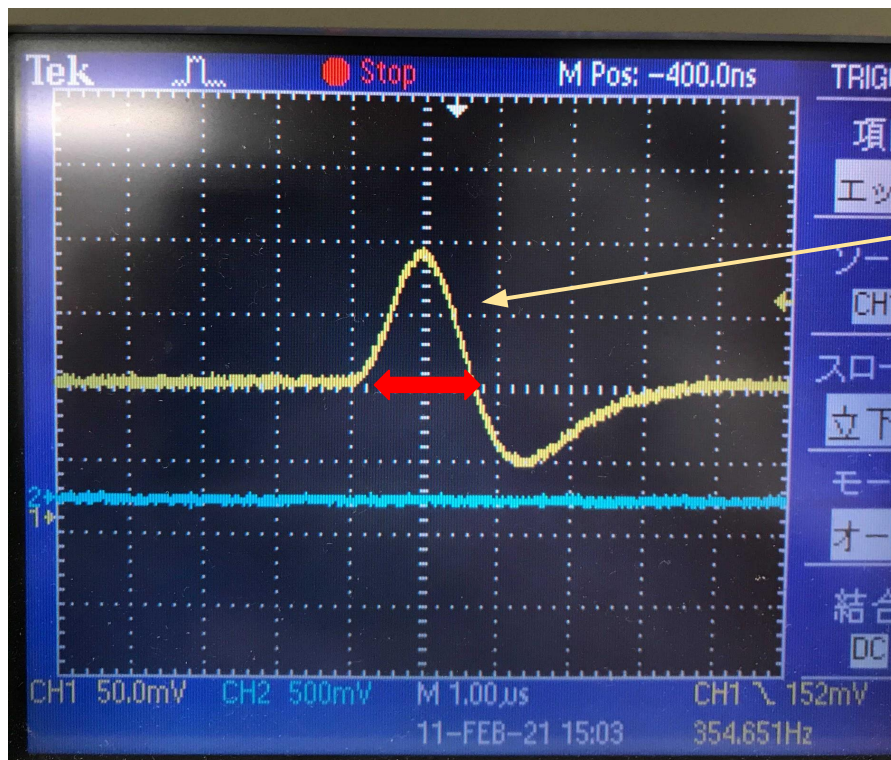
二つ目の山のピーク

⇒位置がほとんど変化していないことが読み取れる。

Pedestal

(一つ目の山のピークを使った。)

1光電子測定：オシロスコープ



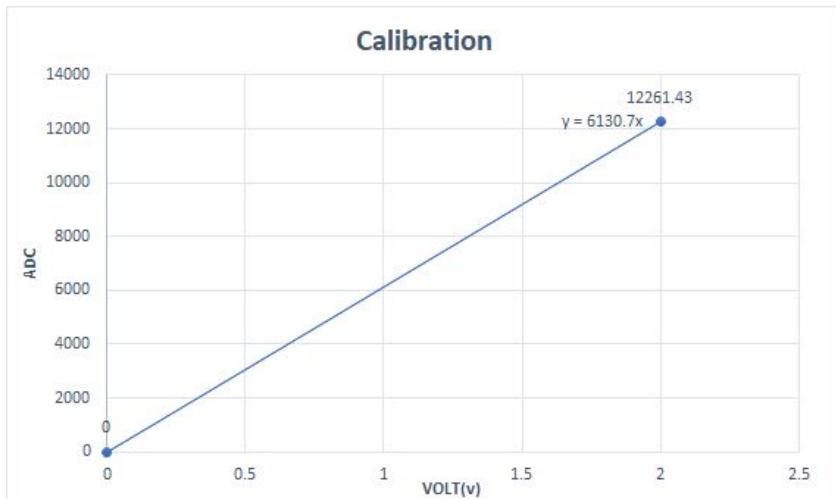
Shaper Ampを通したPMTの信号

上の図は抵抗 50Ω のときの出力波形。ここから、ゲインを計算するときの時間幅を $1.6\mu\text{s}$ とした。

1光電子測定 : Calibration

(i)Calibrationをするためにパルスジェネレーターで2V(Pulsevolt=4.0V/Offset=2.0V)のパルス波を出力し、PHADCに読み込ませた。(表2)

$$\text{ADC} = 6130.7 \times \text{VOLT} \quad (\text{※pedestal考慮}) \cdots (\text{※})$$



(ii)ADC値は既知より(※)式からVOLTを計算する

Pulsevolt	adc-ped	(adc-ped)→v
0v	-	-
3.0v	193.81	0.031613
4.0v	194.97	0.031802
5.0v	198.44	0.032368
6.0v	199.26	0.032501
6.9v	213.04	0.034749

1光電子測定:PMTのGainの算出

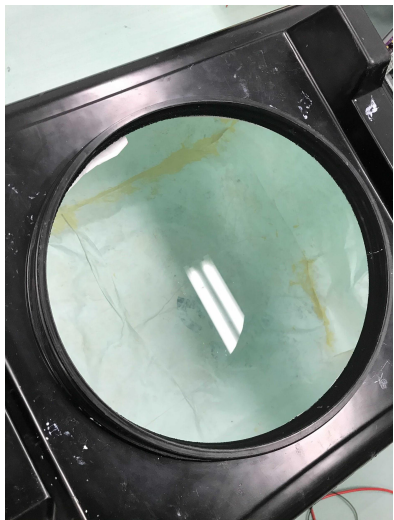
Pulsevolt	Pedestal	Sigma(ped)	mean1	Sigma(adc)	Gain
0v	545.02	2.0609	-	-	-
3.0v	544.64	2.5566	738.45	77.862	1.2628E+07
4.0v	544.61	2.5795	739.57	82.869	1.2703E+07
5.0v	544.62	2.6123	743.06	92.310	1.2930E+07
6.0v	544.76	2.6582	744.01	104.62	1.2983E+07
6.9v	545.24	2.7591	758.28	90.713	1.3881E+07

1. 実験の動機・最終目標
2. チェレンコフ光の説明
3. PMT・ゲインカーブ
4. PMT・1光電子測定
5. 水チェレンコフ光実験
 - a. セットアップ
 - b. 実験結果・考察

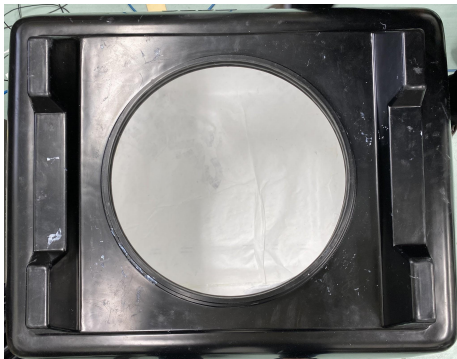
1. 実験の動機・最終目標
2. チェレンコフ光の説明
3. PMT・ゲインカーブ
4. PMT・1光電子測定
5. 水チェレンコフ光実験
 - a. セットアップ
 - b. 実験結果・考察

セットアップ①(タンク)

800mm×640mm×580mm
の水タンクを使用。反射率
を向上させるために内側に
タイベックシートをセメダイン
で2重に貼った。



水を入れた様子。



水を入れる前

PMTを入れるときの
様子。水を入れたタ
ンクの蓋にPMTを取り
付けた。



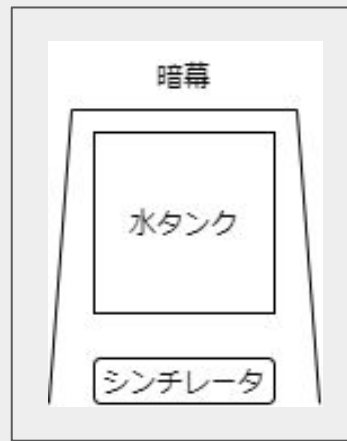
水チェレンコフ検出
器の様子。水を入
れたタンクの蓋に
PMTを取り付け、
全体を暗幕で覆い
遮光した。

セットアップ②(コインシデンス)

シンチレータと水タンクでコインシデンスをとることで、検出信号が宇宙線由来であることを確認。



P6部屋に転がっていたシンチレータを使用。



シンチレータと
PMT

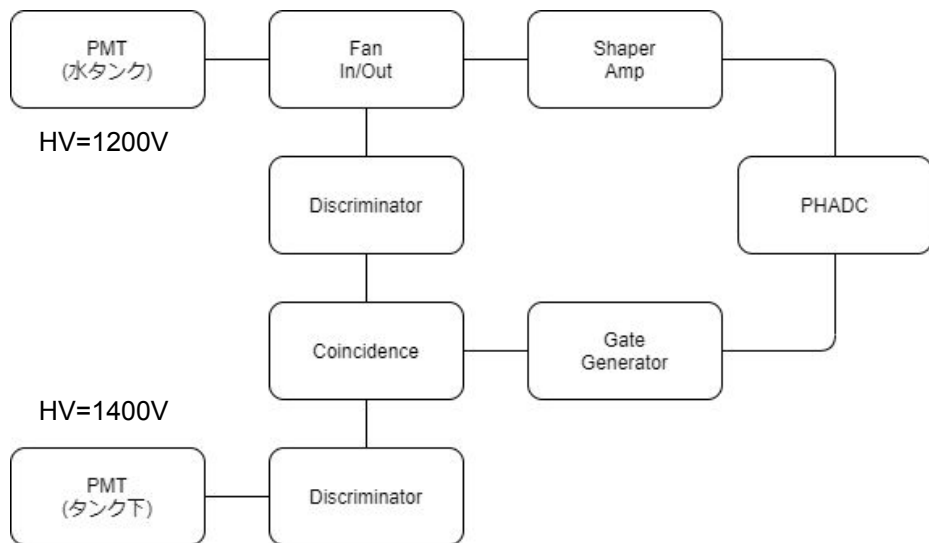


台車に乗せた水タンクの下にシンチレータを置いてコインシデンスをとった。縦に降ってくる宇宙線に反応。

セットアップ②(コインシデンス)

水タンクのPMTと、タンクの下に設置したPMTでコインシデンスをとった。

(ともに threshold = -100mV)

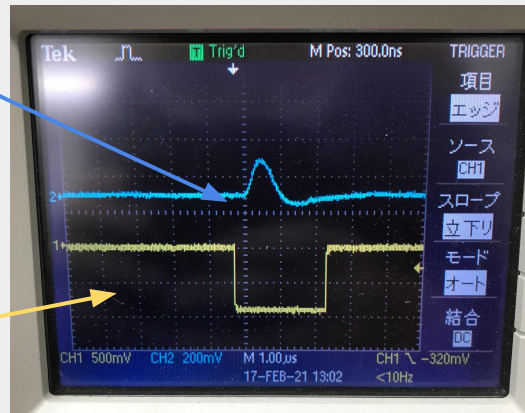


水タンクのPMTからの信号

シンチレータからの信号

Shaper Ampを通した水タンクPMTからの信号

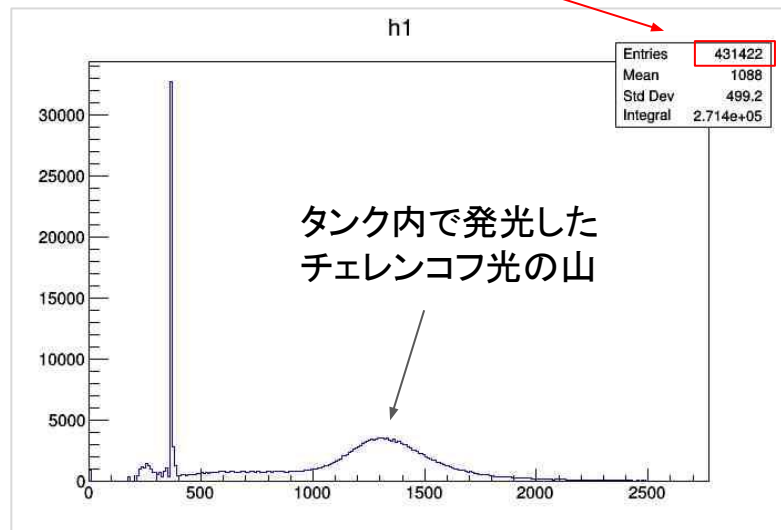
コインシデンスによって開かれたGATE信号



1. 実験の動機・最終目標
2. チェレンコフ光の説明
3. PMT・ゲインカーブ
4. PMT・1光電子測定
5. 水チェレンコフ光実験
 - a. セットアップ
 - b. 実験結果・考察**

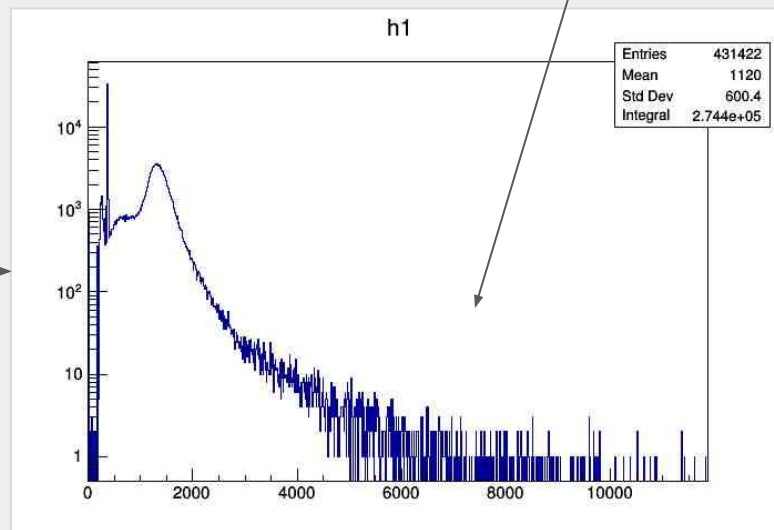
実験結果：ヒストグラム表示

- 1.測定期間：2/13 1:01~2/16 23:30
 - 2.測定回数：連続した50万回測定(1回の測定で約1h)
- ※備考：同じ数値がかなり連続していたので、uniqコマンドで除去した。



2/16の全データ

対数表示



2/16の全データ
(対数表示)

対数表示ではピークに続く長い
尾が確認できる。

実験考察

検出されたチェレンコフ光のADC値と1200Vでのゲインから、検出光子数を計算。

どれくらいの明るさだったのかを数字で表示してみる。

→1800Vでゲイン=1.2*10^7ぐらい。
(1p.e.実験より)

→ゲインカーブから1200Vのときのゲインを計算。(ゲインカーブ実験より)

日付	mean	(adc)→v	光電子数
2/13	1371.7	0.22374	5.4977E+03
2/14	1345.1	0.21940	5.3910E+03
2/15	1318.8	0.21512	5.2858E+03
2/16	1312.5	0.21408	5.2604E+03



代入する値			
時間幅	1.00E-06	Gainの平均値	1.3025E+07
Shaper's Gain	10	Gainの変換率	0.039004
電気素量	1.60E-19	Gain(1200V)	5.0803E+05
抵抗	50		

実験結果：光電子数

時間が経過するにつれて検出
光電子数が減少した。



実験考察

光電子数の減少

→タンク内で発光しているチェレンコフ光の光量が減ったと推察。

要因①：水が汚くなった

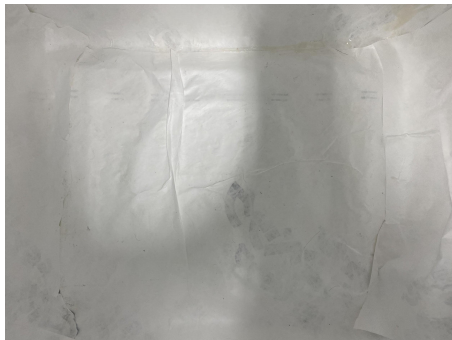
→測定を始める前の水タンクの写真がないために比較できないが、記憶の限りだとそこまで水が汚くなっているとは思えない。

要因②：水量の減少

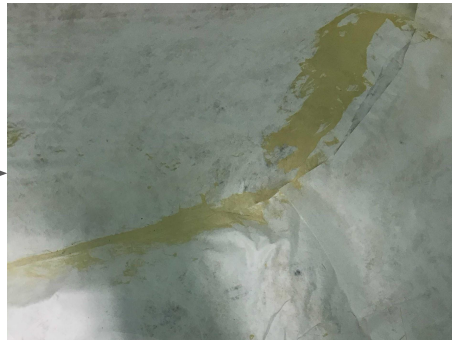
→タンク内は完全に密閉されているので、蒸発の影響は小さいと考えられる。水漏れもなし。

要因③：タイベックシート・セメダインの劣化

→劣化により、反射率が低下した可能性。水を入れる前と測定後で比較すると白さは若干変わっている。



Before(水を入れる前)

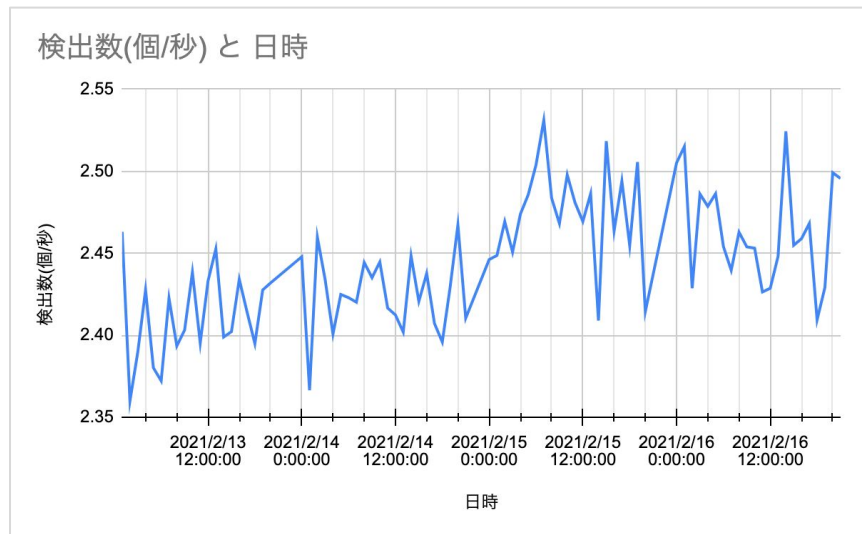


After(測定後)

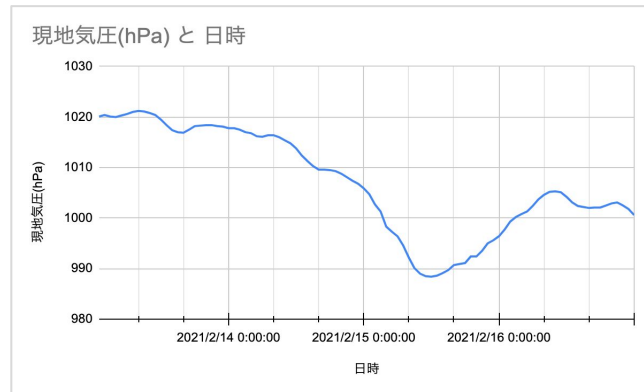
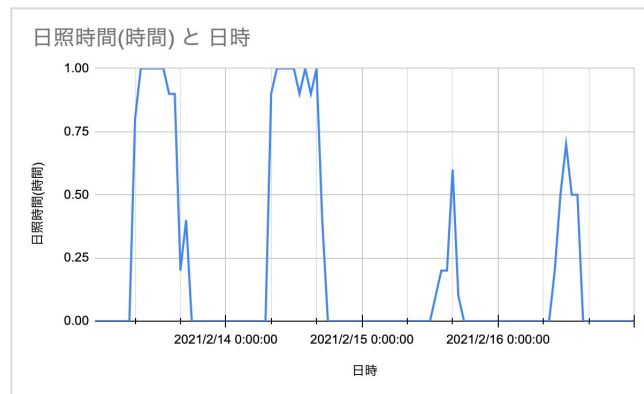
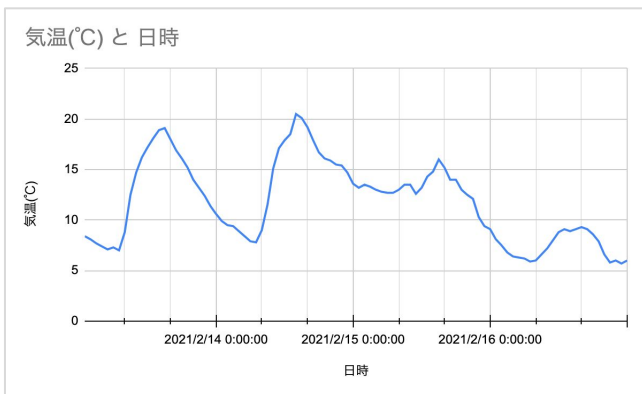
実験結果：検出数及びmean

日付	検出数	mean	sigma
2/13	2.4117	1371.7	198.76
2/14	2.4249	1345.1	184.93
2/15	2.4740	1318.8	194.11
2/16	2.4639	1312.5	169.24

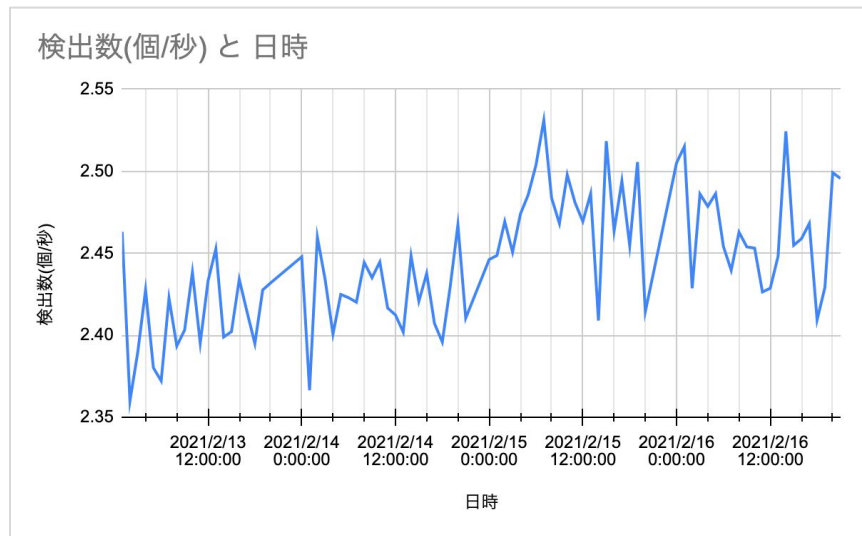
実験結果：検出数及びmean



実験条件：気温,日照時間,降水量,現地気圧



実験結果：検出数及びmean



検出数と気象条件に目立った相関は見られなかった。

謝辭

ご静聴ありがとうございました。

高田先生、藤井先生、津田さんには実験装置の操作の説明や実験方針の決め方など様々な面でお世話になりました。この場を借りて感謝申し上げます。