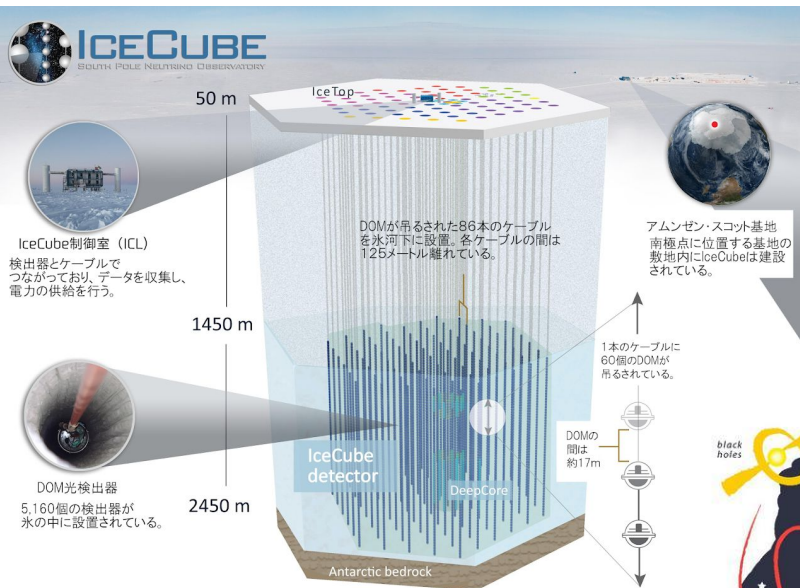


IceCube-Gen2実験用光検出器D2DOMに使用する、
光電子増倍管と2種類の読み出し基板wuBaseの性
能評価

2024年2月21日(水)

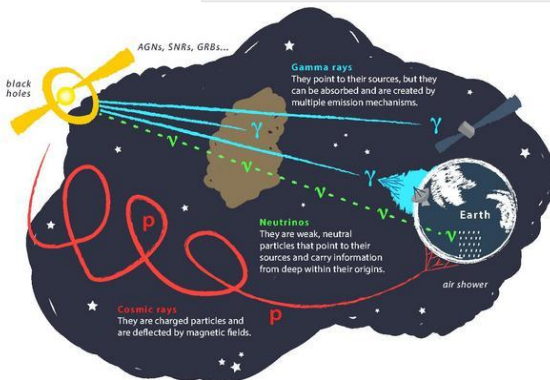
辻 智紀

IceCube実験の概要



IceCube実験

- 南極の氷の中に宇宙ニュートリノを検出する装置を埋め込み捉える実験。
- 氷の中に入射されたニュートリノと氷の中の核子との反応によって発生したチェレンコフ光を観測。
- 南極の氷は内部が暗い + 内圧によって不純物が少なく透明。
⇒チェレンコフ光の特定に適した環境となっている。



宇宙ニュートリノ

- 宇宙空間上の磁場や電場などに影響されないため、直進性と透過性を持っている。
- この性質により、ニュートリノが発生した天体の特定が容易。
- ニュートリノ自体を直接観測するのは難しい。

IceCube-Gen2実験

現行のIceCube実験: 右図の赤い領域で行っている。
約 1km²の領域に5160個の検出器を
設置。

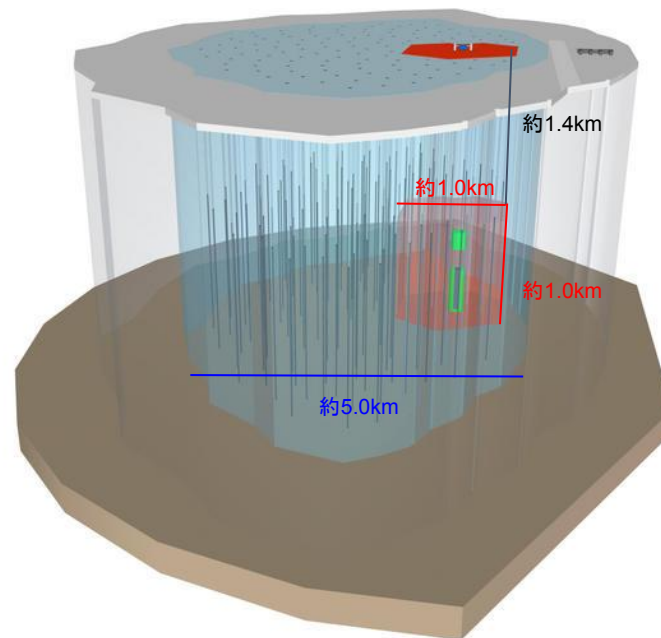
IceCube-Gen2実験: 高いエネルギーを持つニュートリノを検出するためのアップグレード。検出領域の体積が約8倍になり、検出器は2027年までに約10000個を埋める予定。



- ・ニュートリノ検出頻度の向上が見込める。
- ・飛来したニュートリノの方向の角度分解能が向上する。

しかし、検出器の間隔が広がる問題がある。

➡より「高感度な検出器の開発」が必要

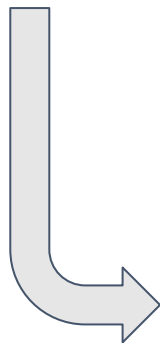


IceCube-Gen2の全体図



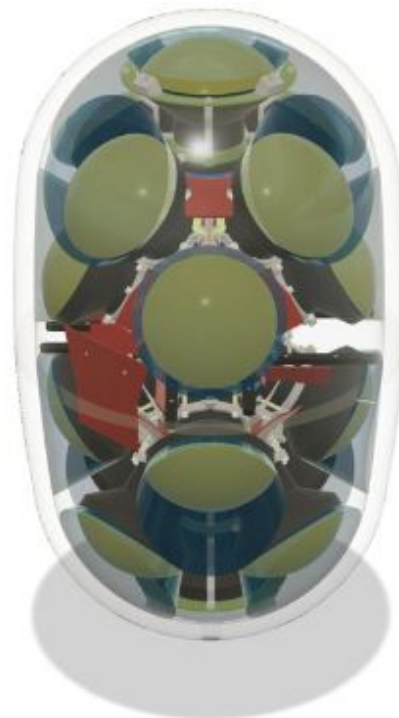
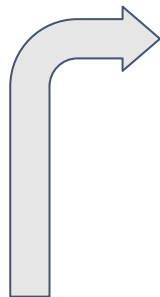
DOM (Digital Optical Module)

- ・現行の直径 330 mmの球体型光検出器。
- ・上半球が検出用基板、下半球がPMTとなっている。



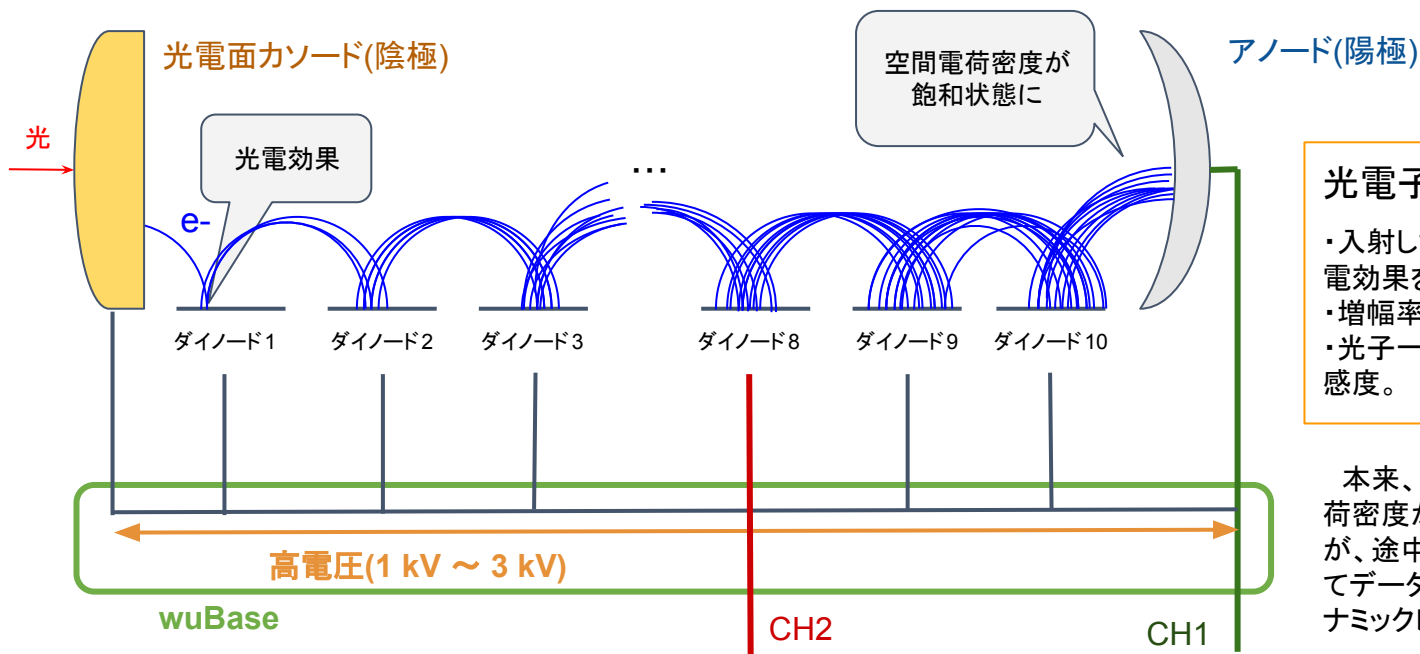
D-Egg

- ・DOMの後に導入予定の検出器。
- ・PMTが上下に搭載され、量子効率が上がっている。
- ・ガラスの透明度、シリコン樹脂の透明度も上昇。
- ・直径が300 mmとなっており、氷の掘削コストを削減。



D2DOM

- ・最新のIceCube-Gen2用光検出器。
- ・内部に18個の4インチPMTを搭載し、検出面積がDOMの約4倍に。
- ・赤道直径が305 mmとなりコンパクトに。
- ・氷河内の圧力や温度に耐える構造。
- ・消費電力4 W以下であることも特徴。



光電子増倍管 (PMT)

- ・入射した光子をダイノードにおいて 光電効果を用いて増幅させる装置。
- ・増幅率は $10^5 \sim 10^7$
- ・光子一個単位での検出が可能な超高感度。

本来、アノード(陽極)において、空間電荷密度が高くなることで飽和状態となるが、途中の8番目のダイノードをCH2としてデータを取り出すことで、実質的なダイナミックレンジの向上を可能にしている。

搭載するPMTの概要



Layer1

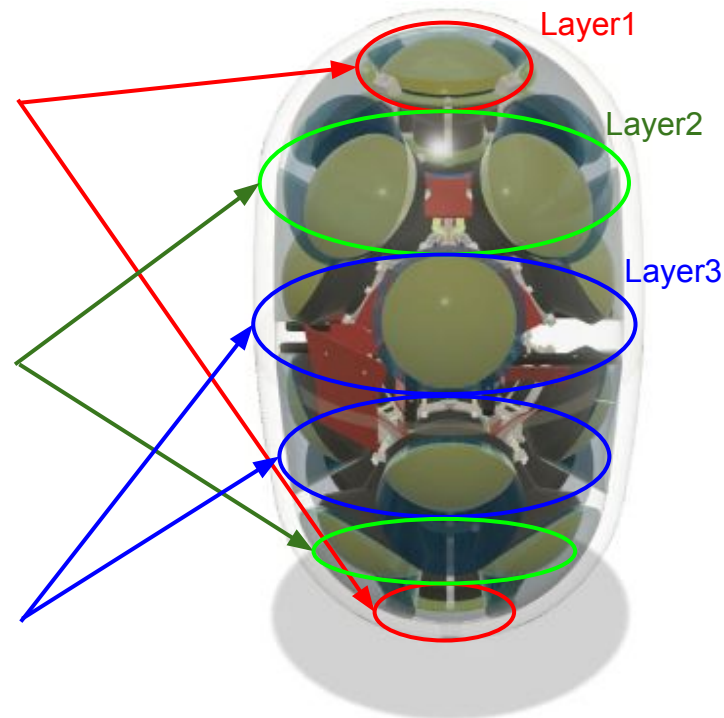
D2DOMの上下に一つずつ搭載する。

Layer2

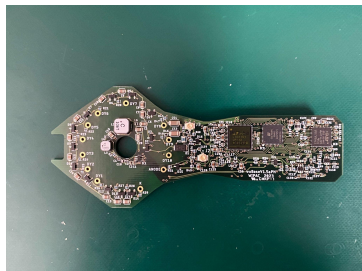
D2DOMのLayer1とLayer3の間に上下4つずつ、計8つ搭載する。

Layer3

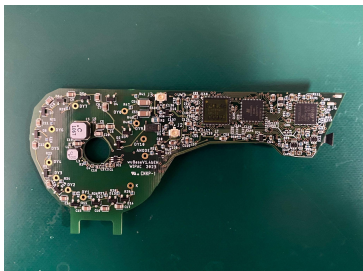
D2DOMの中央部に上下4つずつ、計8つ搭載する。



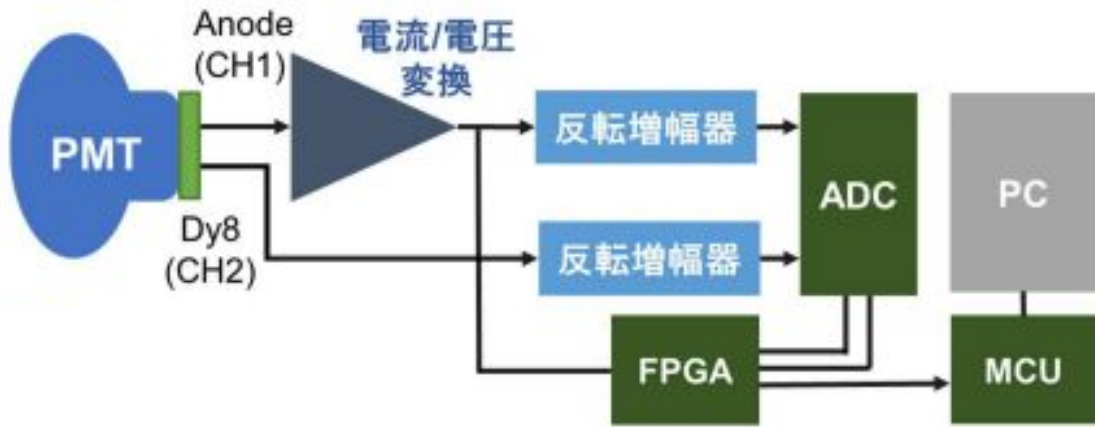
読み出し用基板(wuBase)



Polar wuBase
・Layer1とLayer2のPMTに装着するための読み出し基板。
・前方にPMT分圧回路、後方にADC, FPGA, MCUが搭載されている。



Equatorial wuBase
・Layer3のPMTに装着するための読み出し基板。
・抵抗の配列や機能などはPolarと変わらない。



wuBaseの性能

- ・ PMTへの高電圧の供給が可能
- ・ PMTからの情報の処理、収集
- ・ 消費電力150 mW以下
- ・ 60 MHz、12 bitsデータ取得
- ・ CHを2つ持つことでダイナミックレンジが拡張

目的: D2DOMの内部に搭載するPMTとwuBaseの性能評価する。

PMTの性能評価

測定はgel padを装着した状態で行う。
以下の2測定を行い、使用可能だと判断できる値かどうか評価する。

・gain測定

gain: PMTで増倍される光子の増倍率。

・Darkrate測定

Darkrate: PMTに光を当てないときに検出される信号頻度のこと。

wuBaseの性能評価

wuBaseV1.4bとwuBaseV1.4cとの比較を行う。
V1.4cは「ダイナミックレンジの拡張」を目的としてV1.4bを改良した基板。目標: 5000 PE程度

・Linearity測定

入射した光子数と観測した光子数をプロットすると、線形的に変化することが予想される。

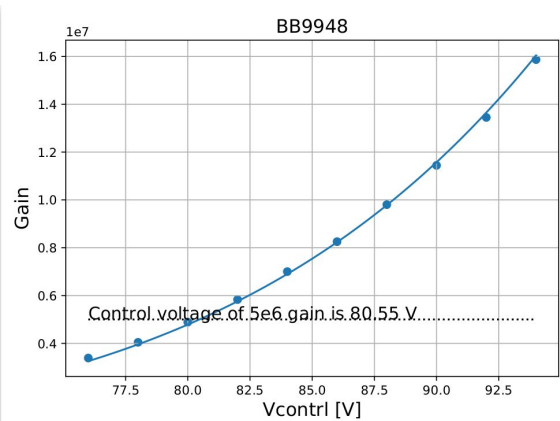
・時間分解能(Time resolution測定)

時間分解能: 波をトリガしてから検出するまでのタイムラグ。

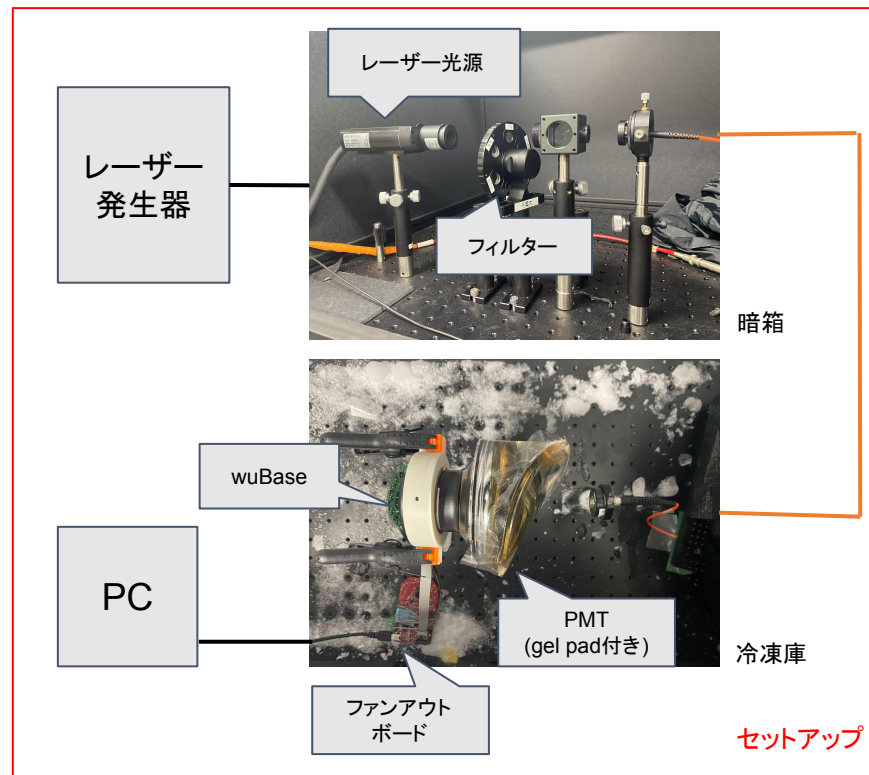
PMTの性能評価方法

gain測定

- ・PMTに2 V刻みの10段階の電圧を加える。
- ・ゲインをそれぞれの電圧で測定。
- ・フィッティングし、4インチPMTの適正ゲインである 5.0×10^6 となる電圧を計算する。

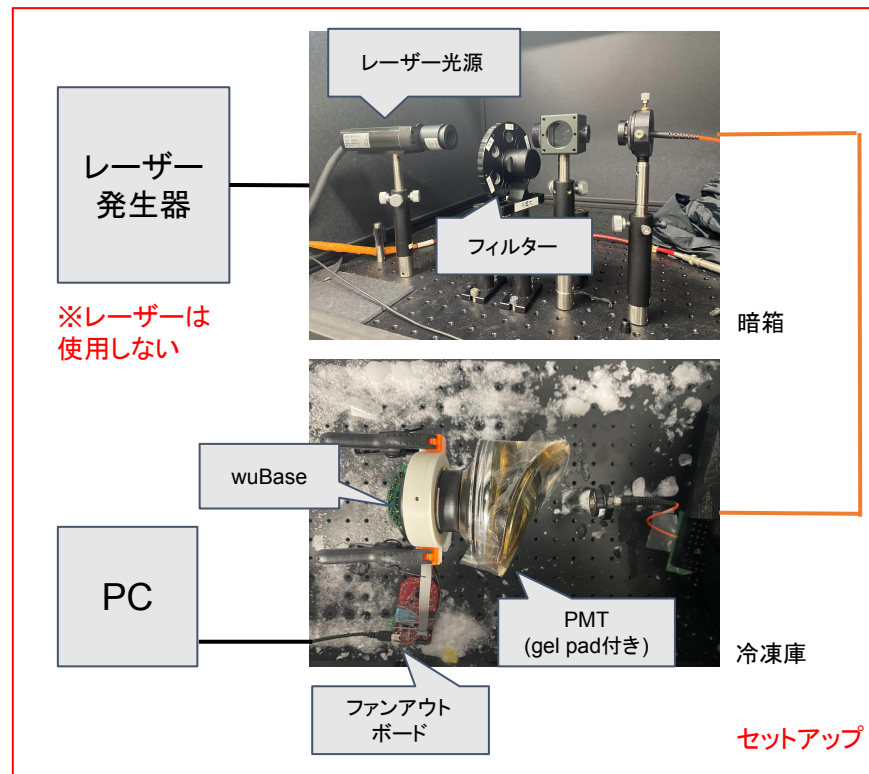
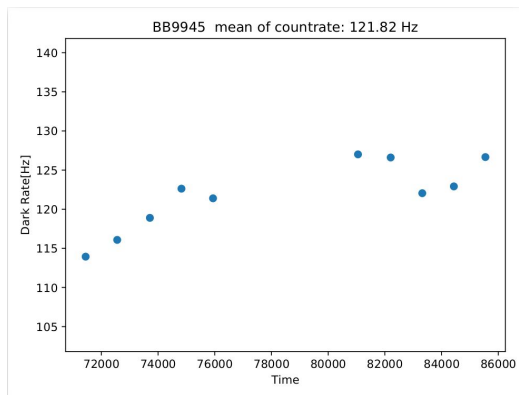


※横軸は「制御電圧」の値であり、実際にwuBaseに加印する電圧はこの12倍の大きさである。

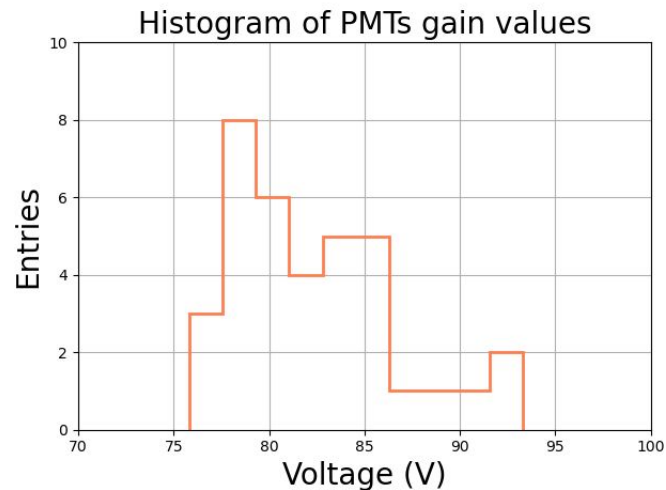


Darkrate測定

- ・PMTに遮光カバーを被せ 12時間暗室の冷凍庫に 放置。
- ・300 sの測定を10回繰り返す。
- ・10回の測定結果の平均値を、その PMTの測定結 果として用いる。



実験1「gain測定」



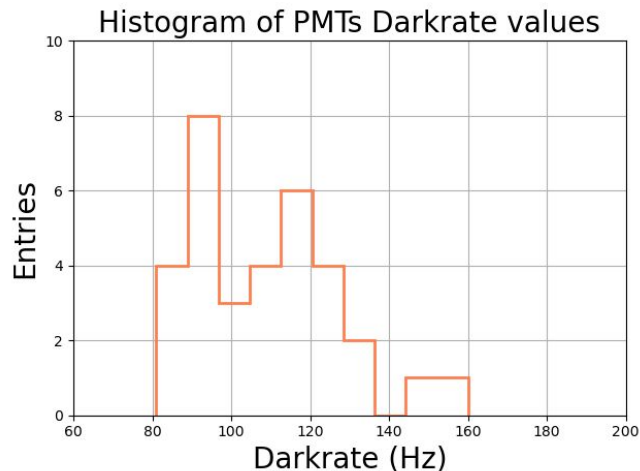
	All	Layer1	Layer2	Layer3
平均値 (V)	82.4	84.2	83.1	81.3
標準偏差 (V)	4.36	5.21	5.10	3.22

結果

- ・gainが 5.0×10^6 である電圧は80 Vほど。
- ・gel padによるLayerごとの違いは全体平均の2~3%程度。
- ・標準偏差は平均の約5.3%



D2DOMへの実装に適しており、
品質のばらつきが少なく安定した性能



結果

- ・Darkrateは108 Hz程度
- ・Layerごとの値の差は小さい
- ・標準偏差は平均値の約13~20%

そもそもPMTは個体ごとのDarkrateのバラつきが大きくなっており、200 Hzを超えるレベルでなければ許容範囲である。

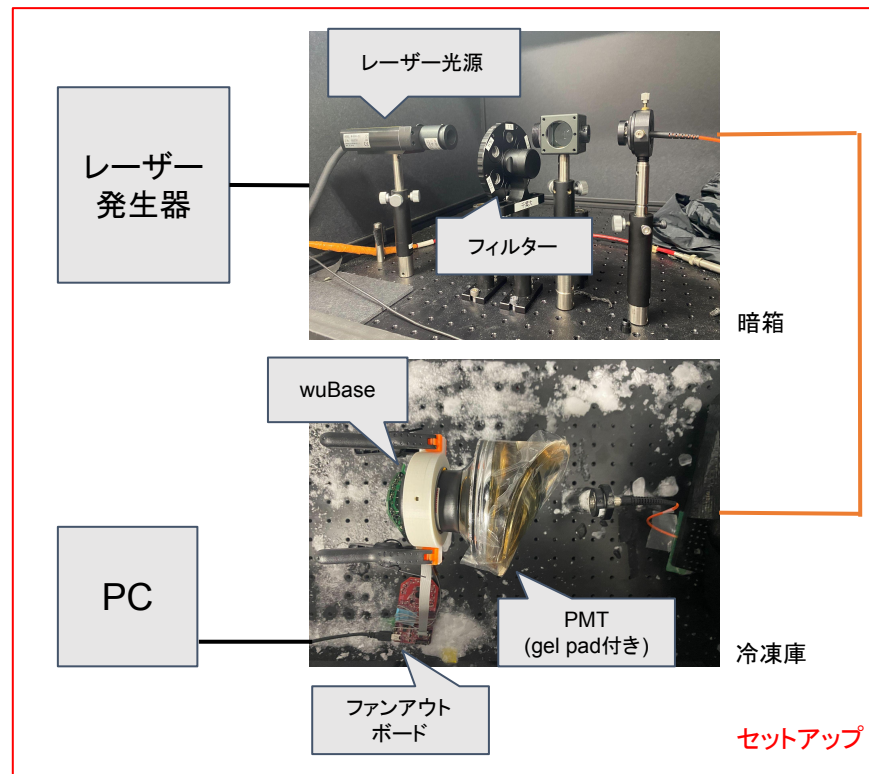


Darkrateは使用できる許容範囲にあり、Layerごとのgelの量や形の影響は見られなかった。

	All	Layer1	Layer2	Layer3
平均値(Hz)	108.6	102.7	109.0	109.9
標準偏差(Hz)	18.7	17.1	14.5	23.0

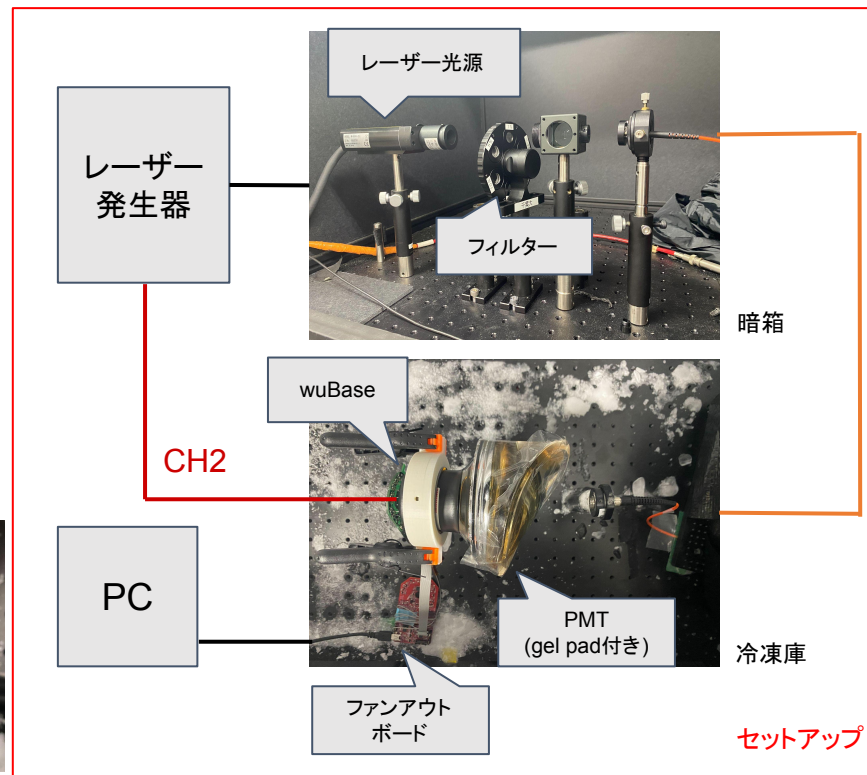
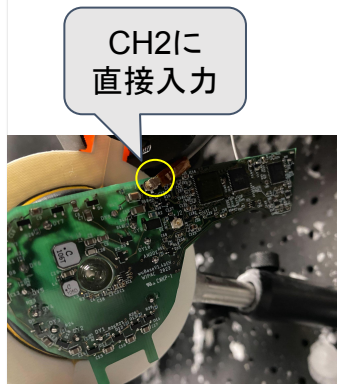
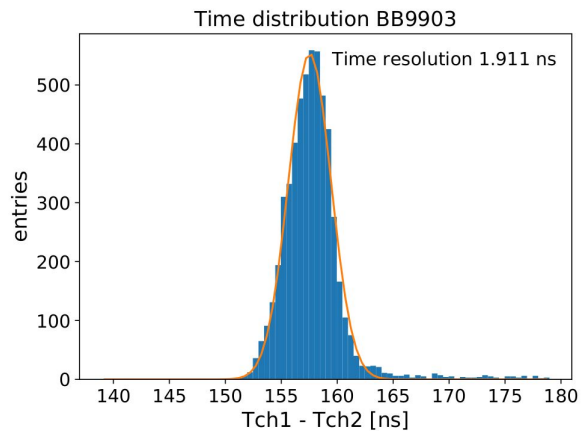
Linearity測定

- ・レーザーを照射しない場合のピークと光子数を測定。
- ・レーザーの光量を15段階で変化させ、その波形のピーク、電荷を光子数に変換。
- ・プロットし、線形性を確認。



Time resolution測定

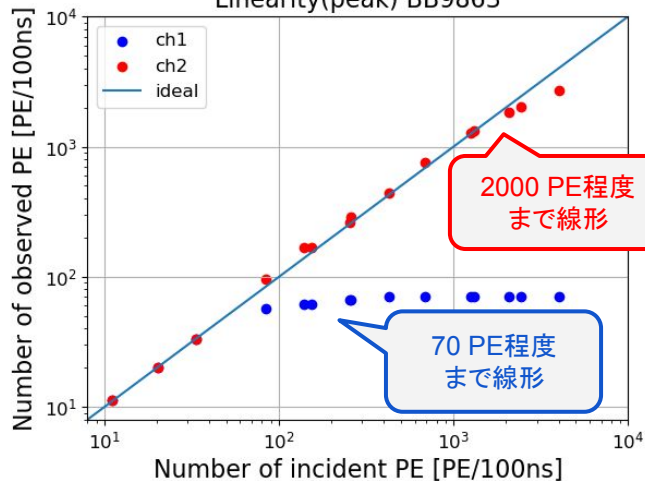
- ・レーザーと同期した信号を直接 CH2に入力。
- ・信号とレーザー光の検出の時間差をヒスト化。
- ・フィッティングし、標準偏差を時間分解能とする。



実験3「Linearity測定」

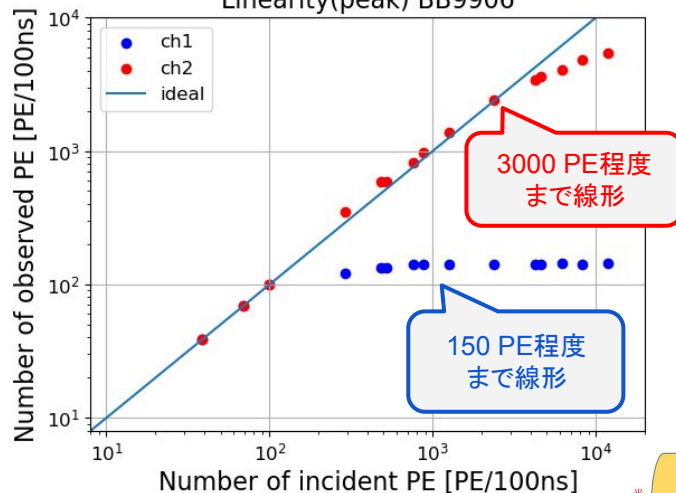
wuBaseV1.4b

Linearity(peak) BB9863



wuBaseV1.4c

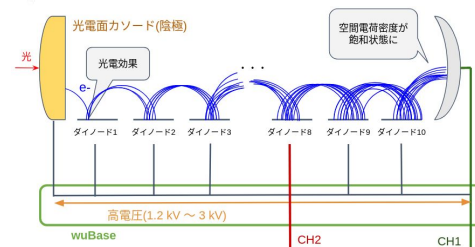
Linearity(peak) BB9906



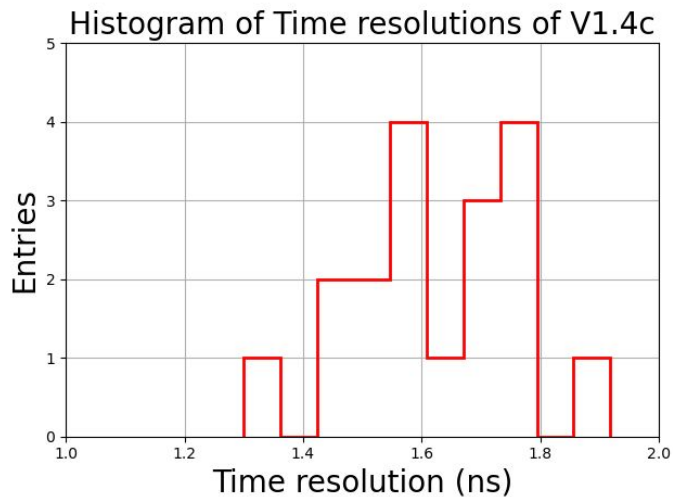
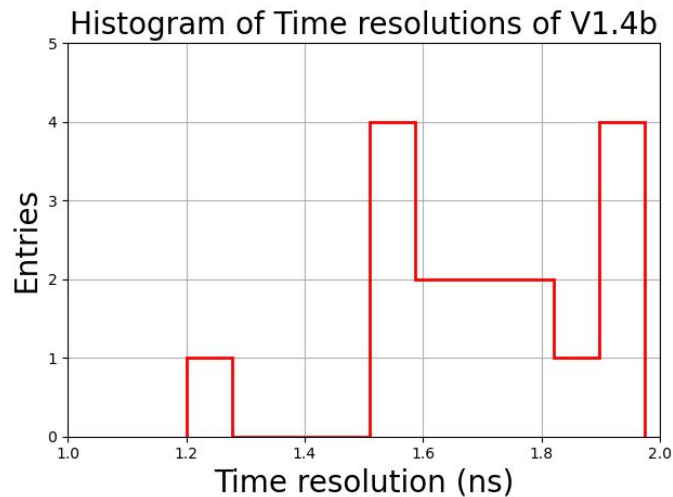
各wuBaseはD2DOM1個分、各18枚ずつ検証した。結果として各wuBaseに対し、ほぼ同様の線形性が得られた。

CH1とCH2両方において観測できる光子数が上昇。

→ **ダイナミックレンジの拡大が確認できた**



実験4「Time Resolution測定」



※wuBaseV1.4bとwuBaseV1.4cを装着したPMTは各18個(D2DOM1個分)

・全体的なTime resolutionが小さくなっている。



時間分解能が向上したと考えられる。

PMTの性能評価

- ・gainは非常に安定しており、実験導入に十分な値を示した。
- ・Darkrateは値はすべて許容範囲で、Layerごとの値の違いも小さくなっていた。
→ Layerごとのgelの量や形の寄与は少ない。
- ・これはPMTの製作会社の企業努力による部分が多い。

wuBaseの性能評価

- ・wuBaseV1.4cは、目的としていたダイナミックレンジの拡張が確認できた。
- ・時間分解能の低下が懸念されたが、むしろ向上していることが分かった。
- ・D2DOMIに実装する際の検出目標は5000 PEであるがまだそこまでは至っていない。

・さらなるwuBaseの改良

- ・現状使用しているwuBaseはV1.4だが、V1.5の導入を進めている。
- ・V1.5はV1.4cと抵抗の配列は変わらないが、基盤の形の変更が予定されている。

・別の製造会社のPMTの使用の検討

- ・PMT自体の価格が低く製造コストの削減が見込める。
- ・性能への信頼性がまだ薄く、使用可能か実験し判断する必要がある。
- ・wuBaseも新たな規格で作る必要がある。

・測定の同時並行を可能にする

- ・現状、測定に時間がかかりすぎる。
- ・D2DOMを月に2台ずつ、計10台製造する予定。
- ・月にD2DOM2台分のPMT36個を測定することは現実的ではない。
- ・4つのPMTを同時計測できるように装置やプログラムを改良する。

Back Up

測定に必要な時間

	測定時間
gain測定	30 min
Darkrate測定	12 + 2 hour
Linearity測定	1 hour
Time resolution 測定	15 min

測定する前には数値のブレを少なくするため、1時間ほどPMTに電圧をかける必要がある。

1つのPMTにつき、gain, Darkrate, Time resolution の3測定で約3時間かかる。

また、Darkrate測定は夜中に暗室に12時間放置する必要があり、現状では1日1つが限度である。



36 PMT / month は現状不可能である。

Linearity測定における光量変化方法

3パターン



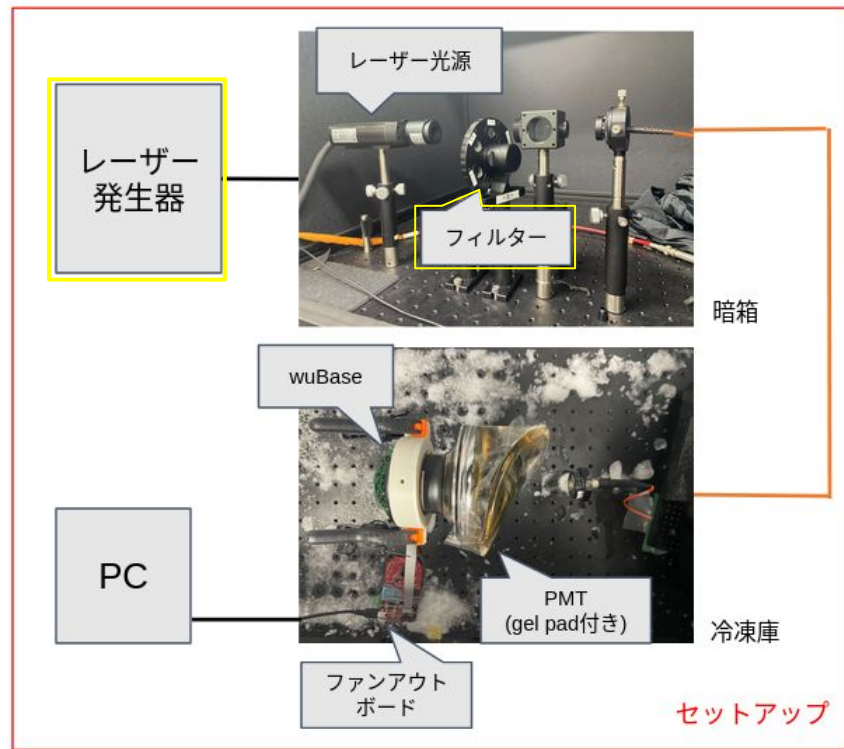
・ダイヤルを回すことで、光量を細かく設定できる。

×

5パターン



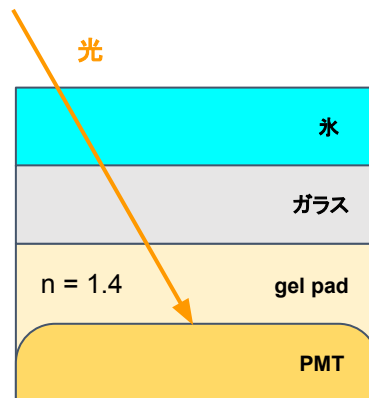
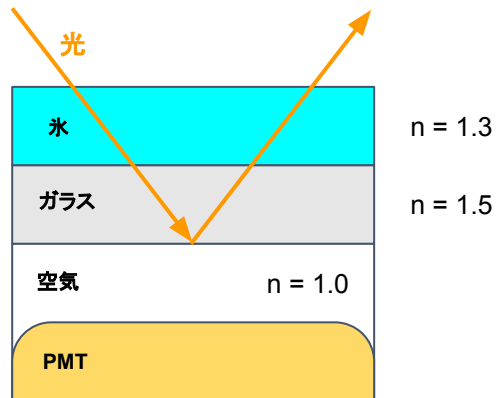
・フィルターを回すことで6段階まで可変できる。
(0.1倍にするフィルターは未使用)



gel padの必要性

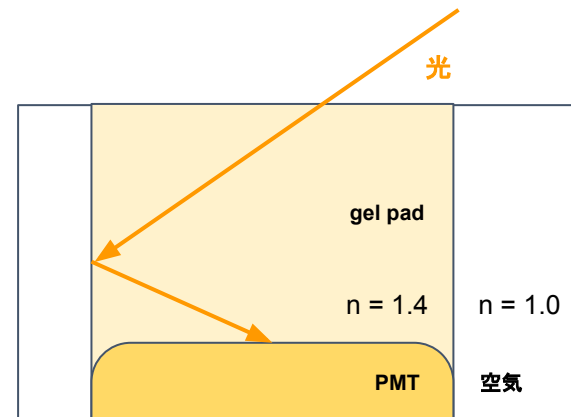
1. PMTへ光を通す

gel padがない場合、ガラスと空気層との屈折率の差によって、全反射が起こってしまい、PMTへ光が当たらない。
そこで、ガラスとPMTの間にガラスとの屈折率の差が小さいgel padを噛ますことで、PMTへ光が届くようになる。



2. gel内部で光を反射させる

gel padと空気層の屈折率の差によって、gel pad 内部に入射した光が境界面で全反射する。これにより、PMTへの集光精度がよくなる。

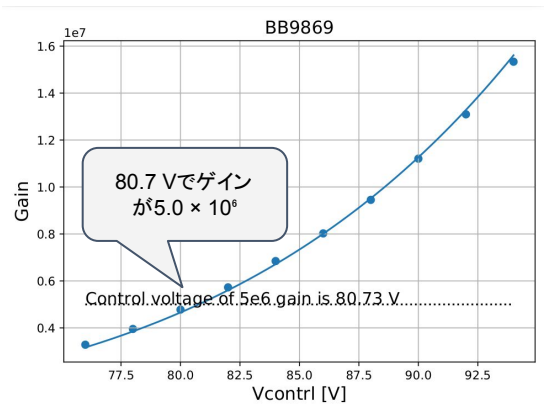


制御電圧の補正

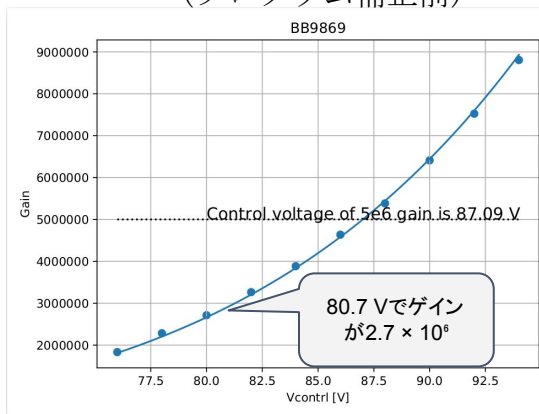
V1.4bは予めゲインが分かっているPMTを用いて較正したことがあり、正しいことが分かっている。新しく製作したV1.4cは既存のプログラムでは正しくデータが得られない。

そこで、同じPMTをV1.4bとV1.4cの両方でgain測定し、その値をもとにV1.4cを使用する際にプログラムを補正した。

wuBaseV1. 4b



wuBaseV1. 4c
(プログラム補正前)



V1.4cでも制御電圧80.7 Vにおいてgainが 5.0×10^6 となるように全体に補正值1.85 (≡ $5.0 \times 10^6 / 2.7 \times 10^6$) をかければ良いことが分かった。
別のPMTについても同様に計算したところ、係数が約1.85であることに変わりはなく、V1.4cを用いても正常な値が得られるようになった。

