



ICECUBE
GEN2

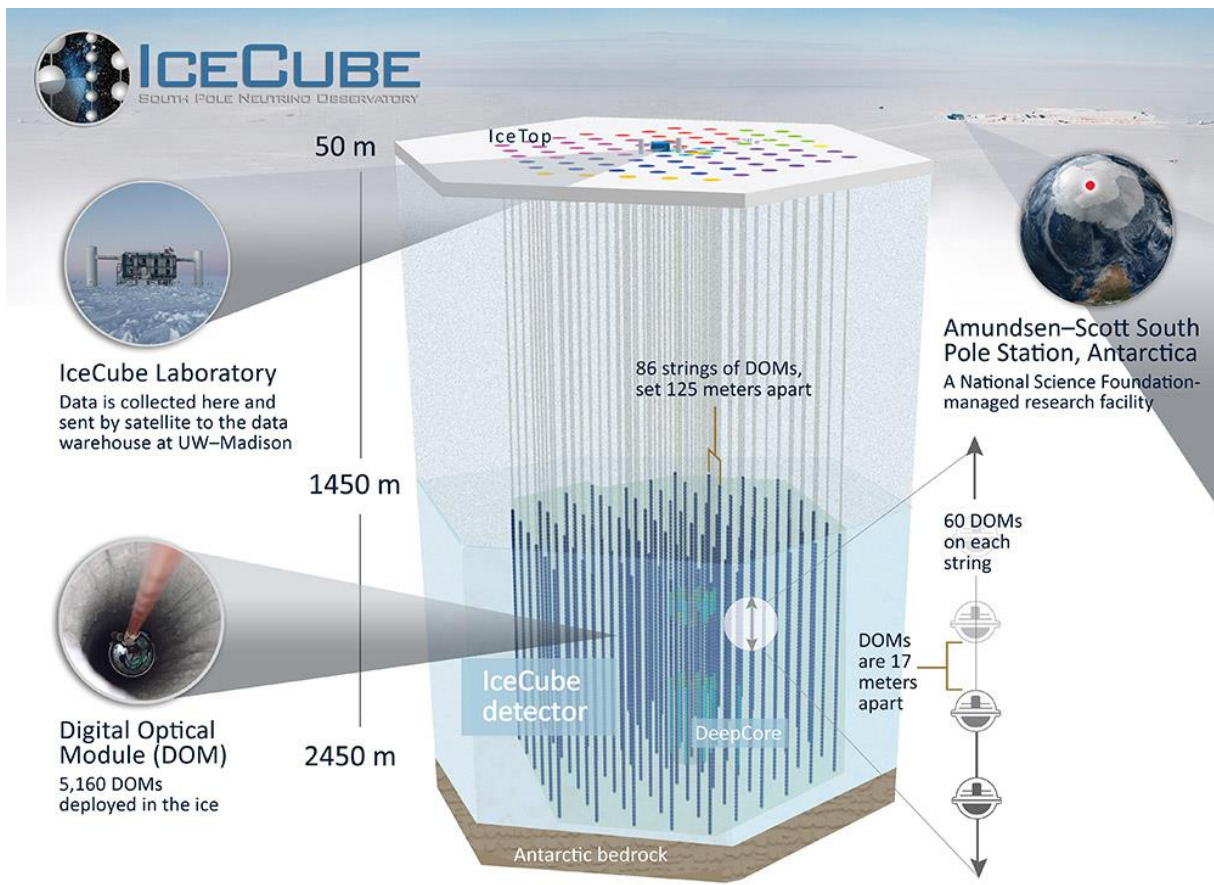


大口径光電子増倍管の2次元レーザー 照射システムのアップグレード

八田 修平

IceCube実験

宇宙ニュートリノを捉える実験
電荷をもたず、弱い力のみ作用
→高エネルギー宇宙線の放射源天体からも直進



DOM (Digital Optical Module)

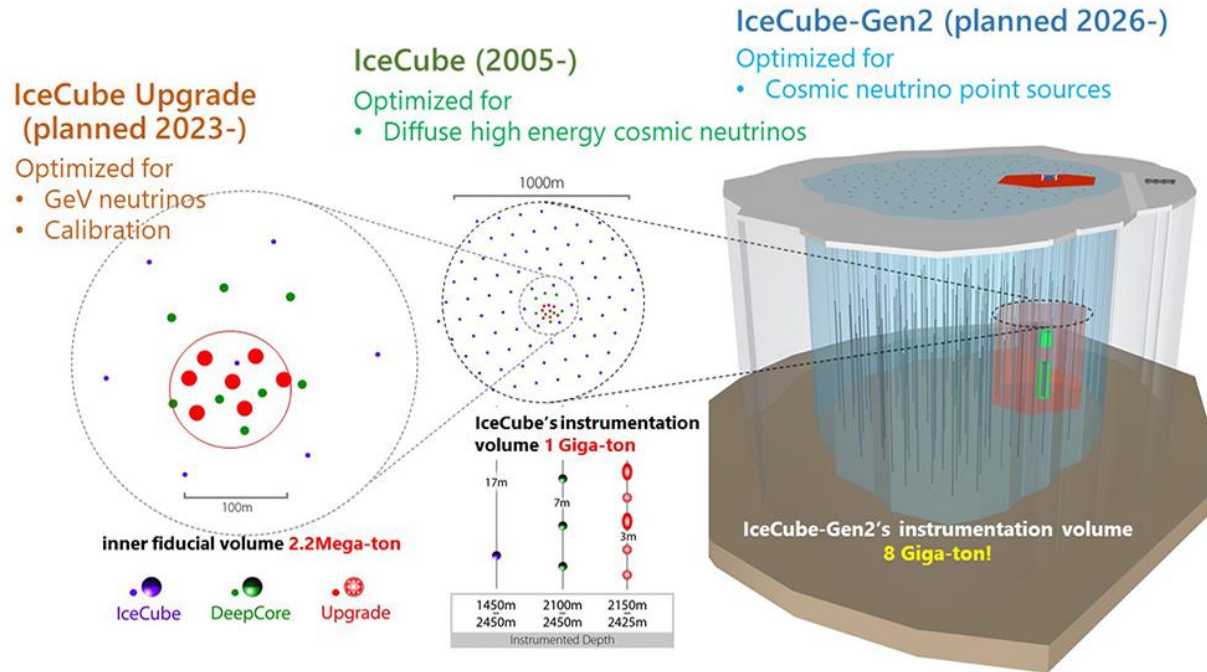


- 現行のIceCubeで5160 台稼働
- ニュートリノと氷中の核子の反応によるチェレンコフ光を観測
- 微弱な光を検出するため
光電子増倍管 (PMT) を搭載

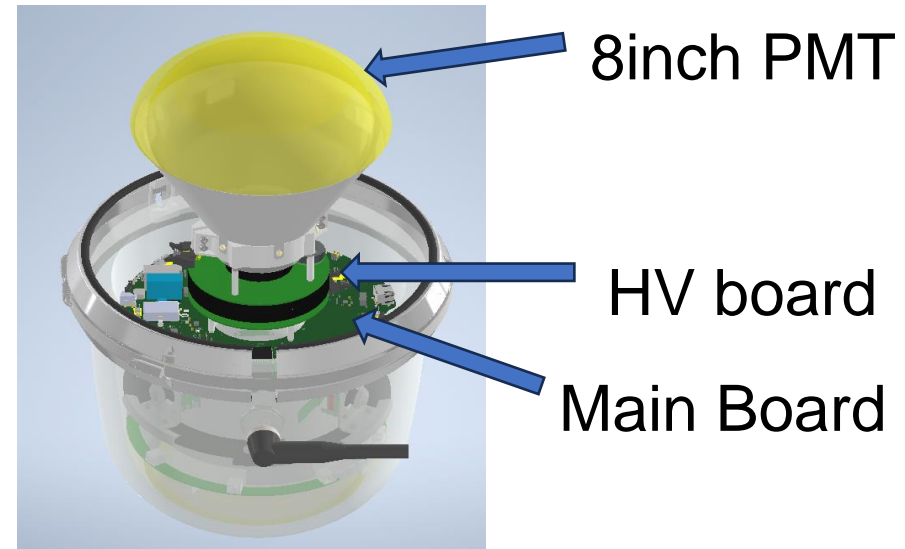
IceCube-Upgrade計画

特徴

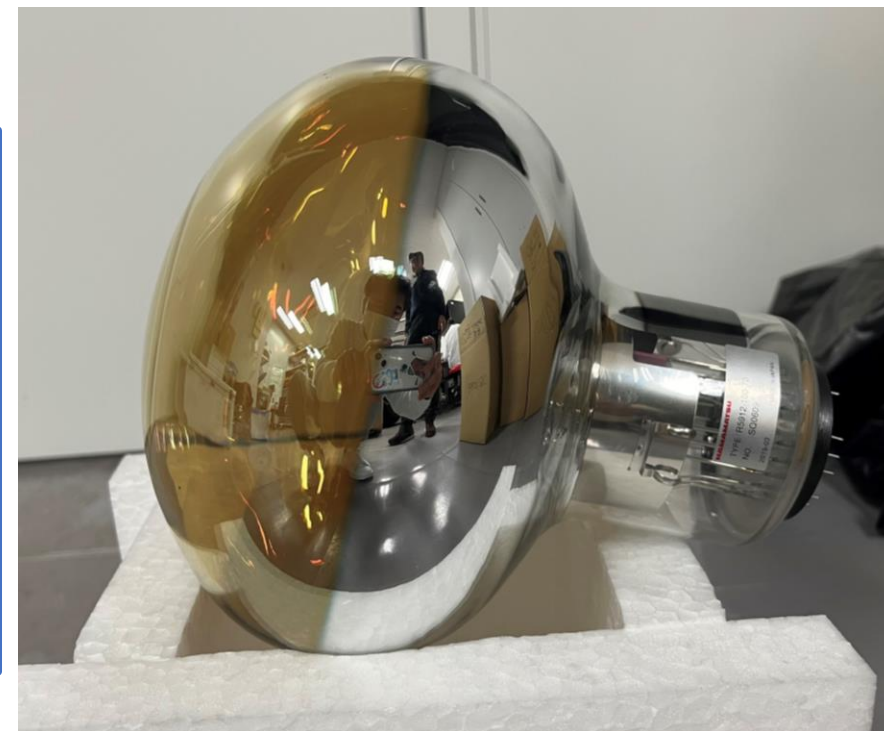
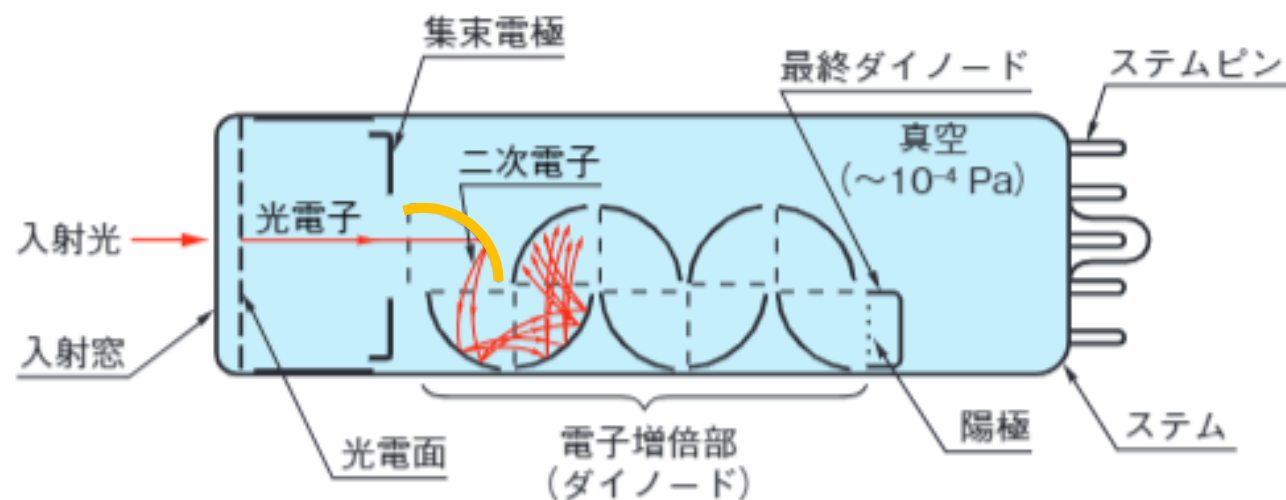
IceCubeの中心付近に、より密になるように
新型光検出器を約700台設置。



D-Egg 検出器



光電子増倍管 (PMT)



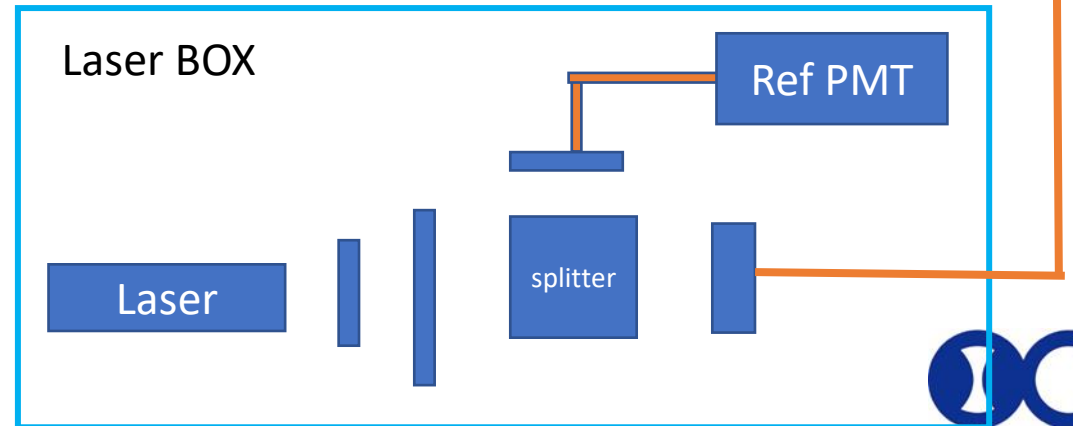
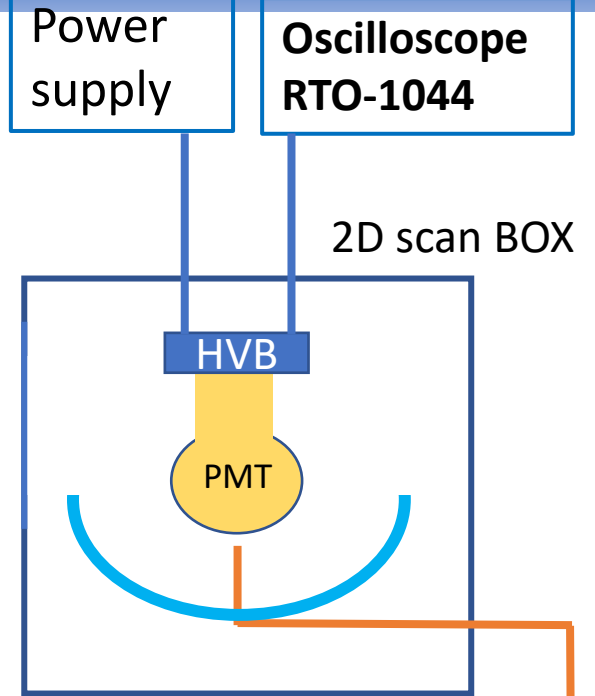
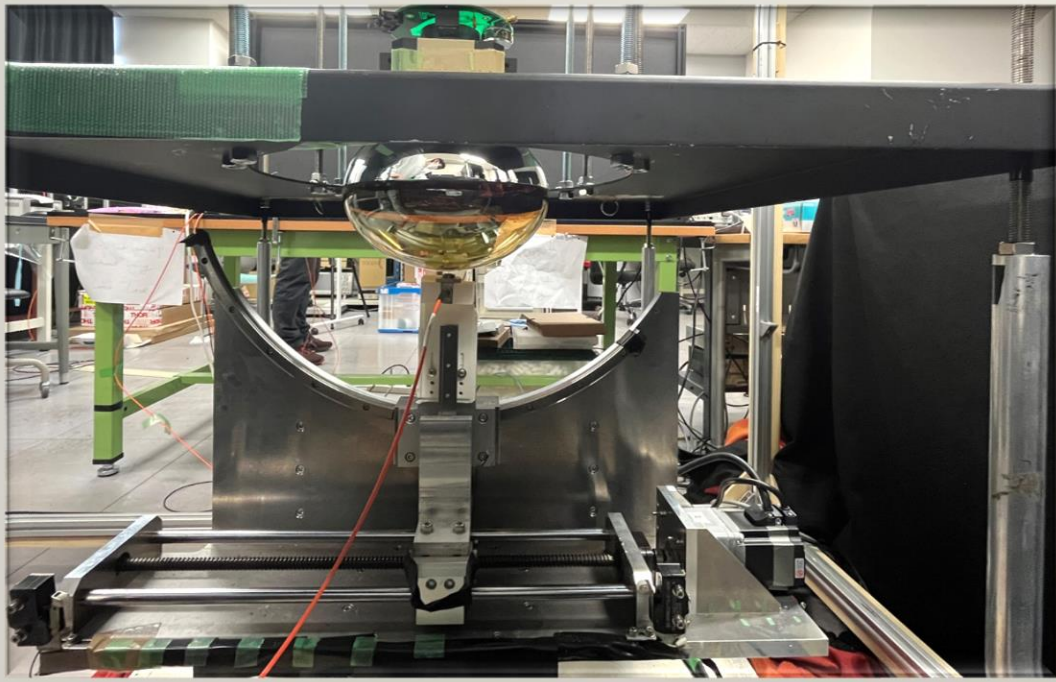
光電子増倍管の構造図
(浜松フォトニクスのHPより)

- ・ ガラス窓を透過した光は光電面内の電子を励起する
- ・ 光電子は集束電極で加速され、第一ダイノードに衝突し二次電子を放出 (電子増倍)
- ・ その後、複数段のダイノードでこれを繰り返し、二次電子群は最終的に $10^6 \sim 10^7$ 倍になる

2D スキャンシステムとは？

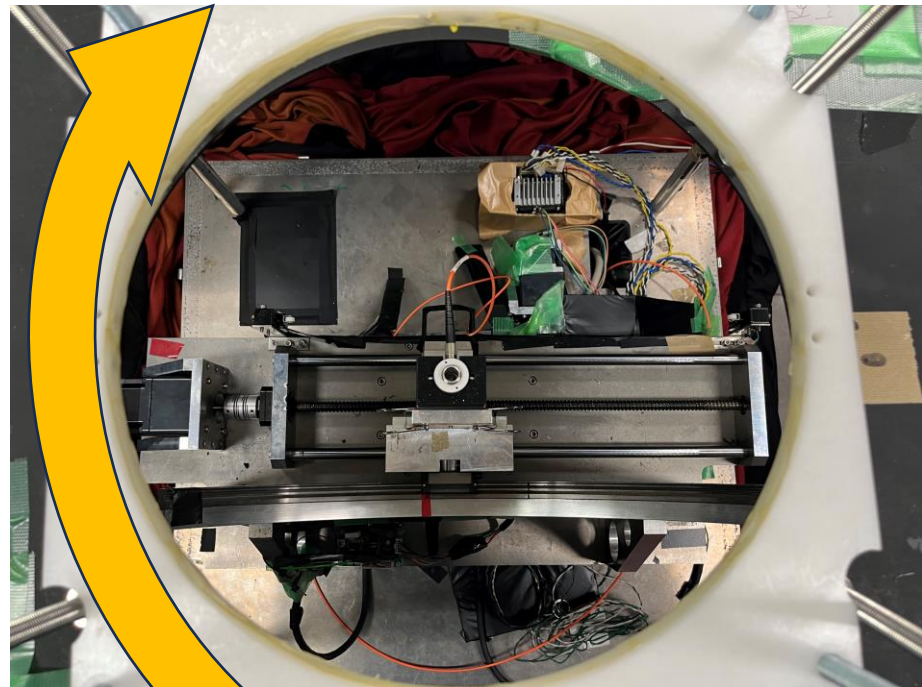
2D Scan Box の外観

真横から見ると ↓



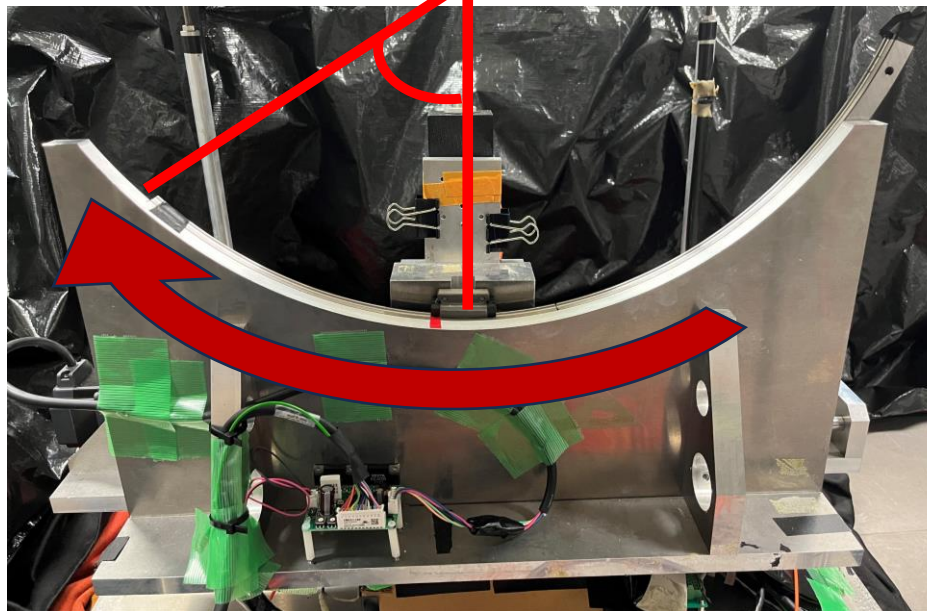
装置の内部構成

0 ~ 360°



Azimuth

0 ~ 60°



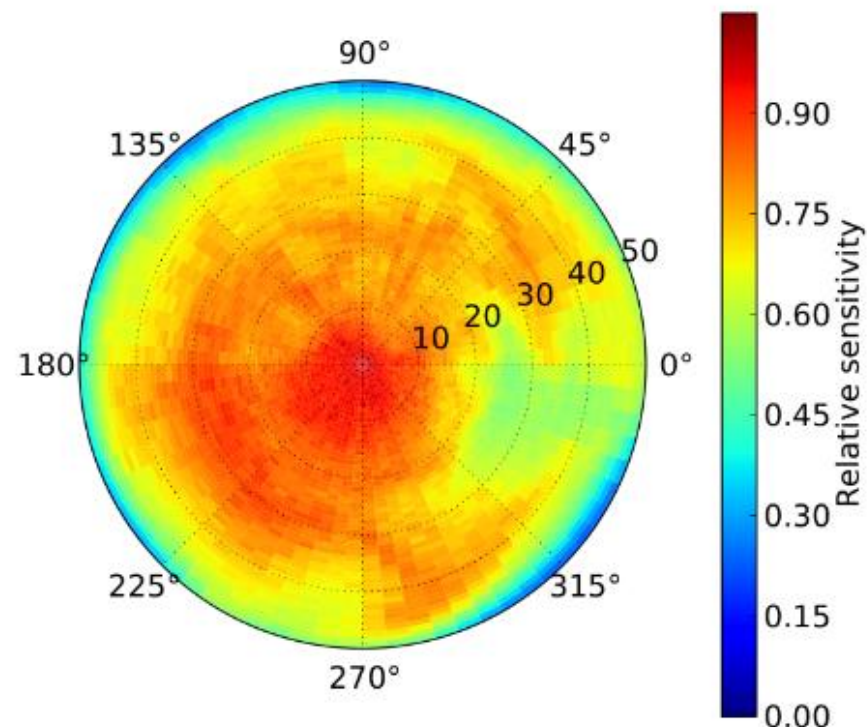
Zenith

- Azimuth (0 ~ 360°) 方向：モーターで回転テーブルを回している
- Zenith (0 ~ 60°) 方向：レーザーの載った台がU字ステージ上を移動することで角度変更が可能
- モーターの回転数は少ないうえで精度を出すため、ギアで減速している
- モーターの回転方向と回転数の指令を与えて動かしている

2D スキャンシステムの役割

- PMTは光電面に光が当たって、電気信号を取り出すが、光電面の位置によって、感度の差がある。

位置による感度の違いを2次元測定器で調べることで、測定精度を上げたり、シミュレーションの精度を上げる事ができる



相対強度：
中心を1として規格化

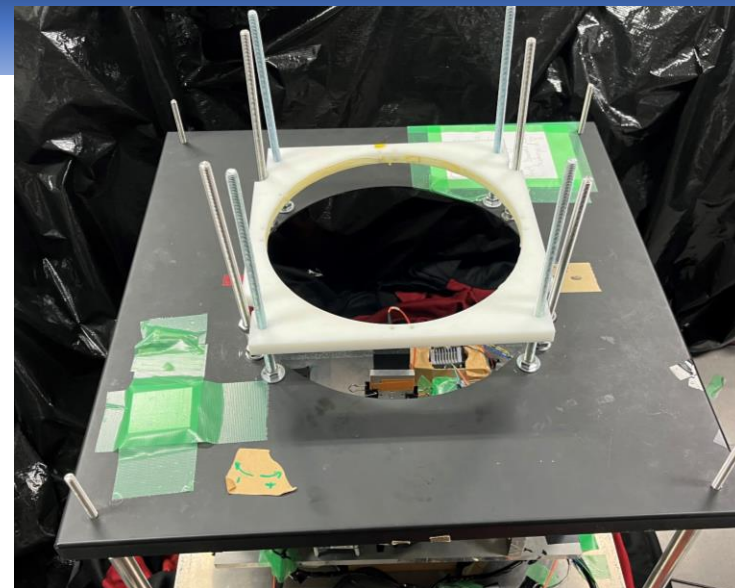
卒業研究

テーマ：古いモーターと古いコードを新しいものに置き換え、旧装置と同程度の試験ができる、改善されたシステムを構築する

(旧モーターの動作設定はそのまま使用し、モーターの駆動にはpythonコードを用いる)



解析コードをpythonを使ったものにアップデートする



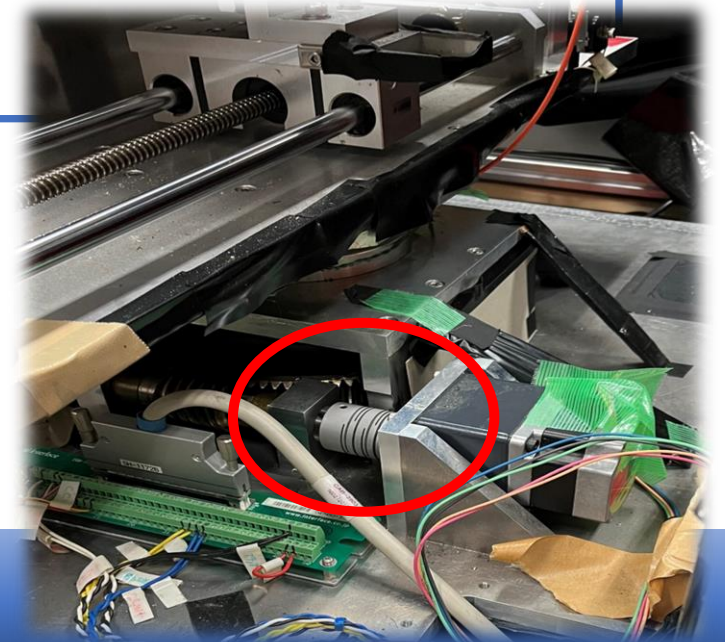
2D scan box 内部の様子

なぜ、モーターとPCをアップデートするのか？

- ・ 現行のモーター系は古く、プログラム実行中に時々止まってしまうことがある
(モータ系は2004年製造)
- ・ 現在位置のモニタ機能が無いので、途中でPCのプログラムが止まると、今レーザーがどこにいるかわからなくなってしまう。
 - ・ 現在位置が分からないまま動かすと、Azimuth方向に2回転してケーブルを切る事故が起こる。
 - ・ PCからの制御ができない場合は、2D Scan Box を開けて、手で回転機構を回して、元に戻す必要がある。(20~30分以上かかり重労働 ...)
- ・ PCの能力不足 (遅い、容量少ない)



- ・ 新しいPCにリプレースする
- ・ モーターを、現在位置モニタのできるものに変える



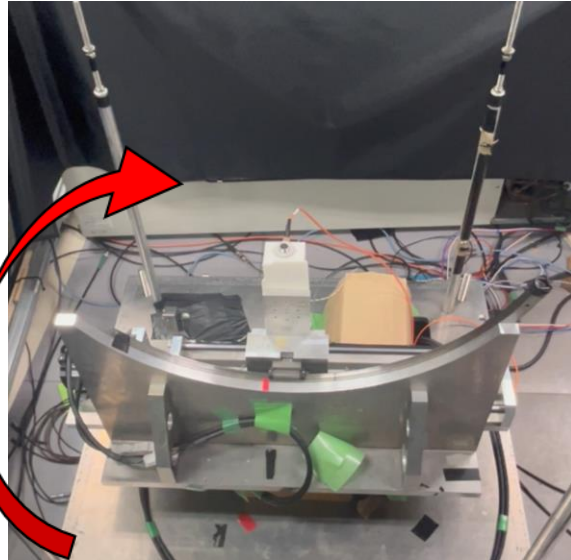
位置決め運転の仕組み

1パルス送るとモーターが1 step動くようになっている。

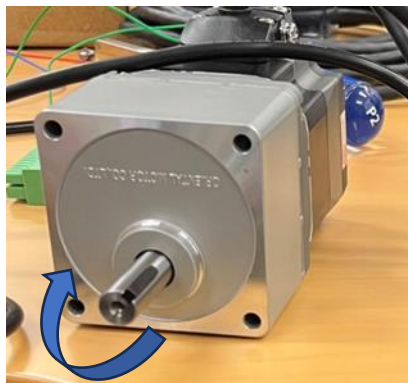
(今回は $0.072^\circ/\text{step}$ を採用)

■ azimuthの場合

[Turntable 1回転] = [モーター200回転]



turntable



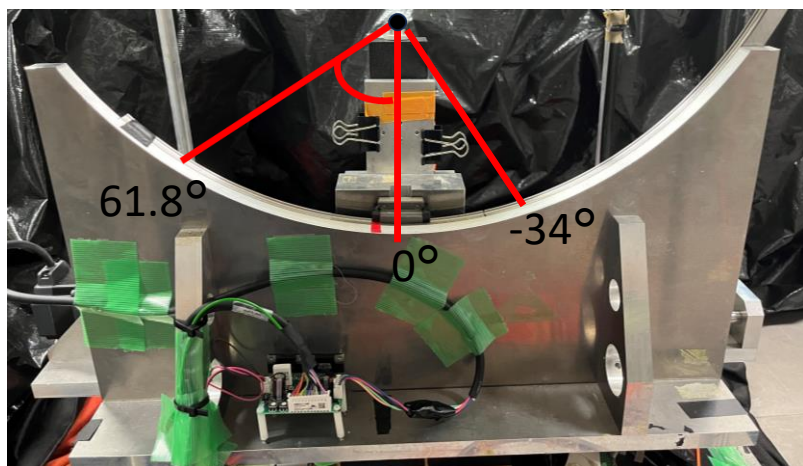
motor

Motor's step degree : 0.072 degrees/step

Max azimuth step : 1×10^6 (360° をカバー)

Moving full step : $0.072 \times 10^6 = 7.2 \times 10^4$ degrees

7.2×10^4 degrees \div 360 degrees = 200 revs



Zenith stage

■ Zenith の場合

[$0^{\circ} \rightarrow 61.8^{\circ}$ まで移動] = [モーター64.3回転]

motor's step degree : 0.072 degrees/step

Max zenith step : 504044 steps

0 ~ 61.8 degrees : 321544 steps

$0.072 \times 321544 \div 360 = \underline{64.3 \text{ revs}}$

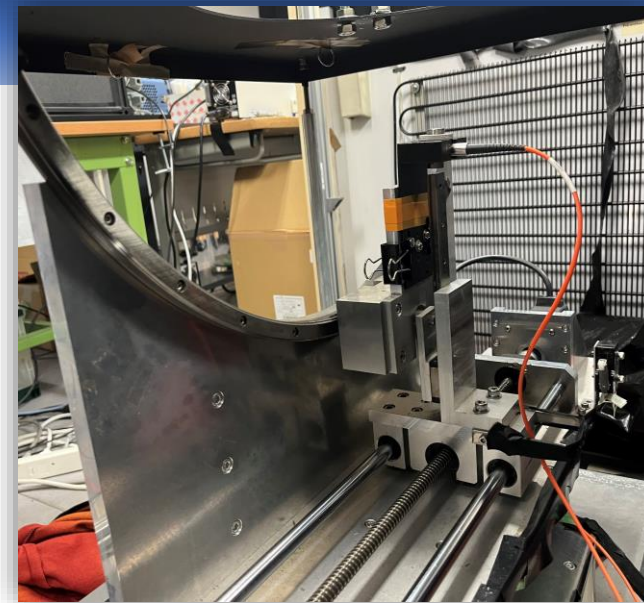
角度からstep数への変換

■ azimuthの場合

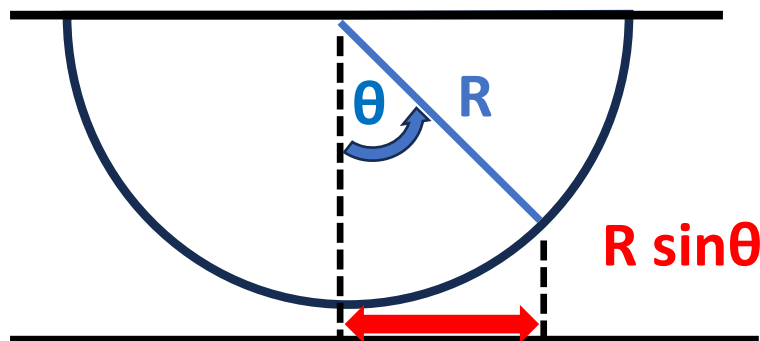
$$\text{Step} = \frac{(\text{角度})}{360} \times 10^6 \dots\dots$$

■ Zenith の場合

ボールねじのリード: $\frac{40.73 \text{ cm}}{100.8 \text{ revs.}} = 0.404 \text{ cm/revs.}$ (ボールねじ1回転でレーザーが0.404 cm進む)



(R = 30 cm)



$$R \sin\theta = 0.404 \times \left[\frac{0.072 (^\circ/\text{step}) \times \text{Step}}{360} \right]$$

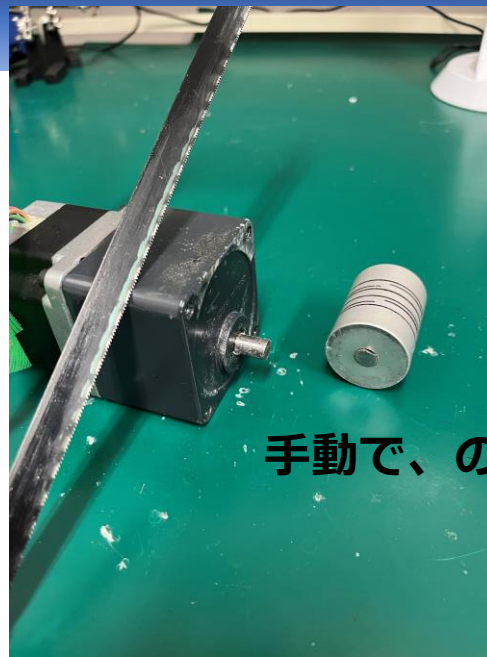
ボールねじが何回転するか

$$\text{Step} = \frac{R \sin\theta \times 360}{0.404 \times 0.072}$$

設置

① Azimuth

カップリング なかなか外せない...

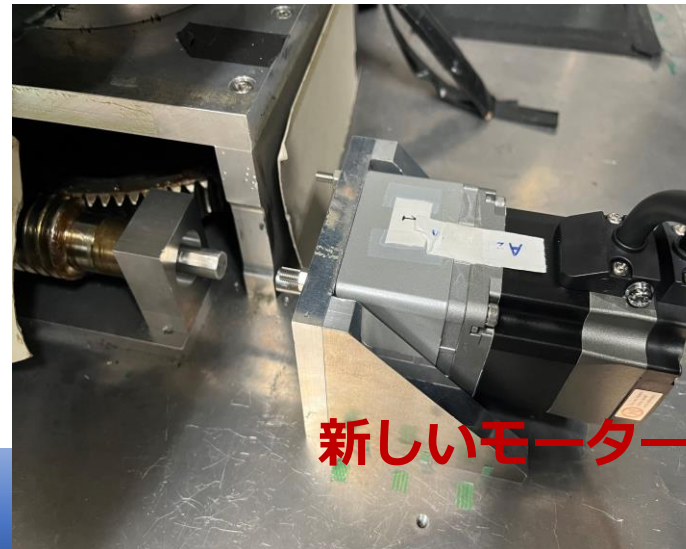


手動で、のこぎりで切断

新しいカップリング



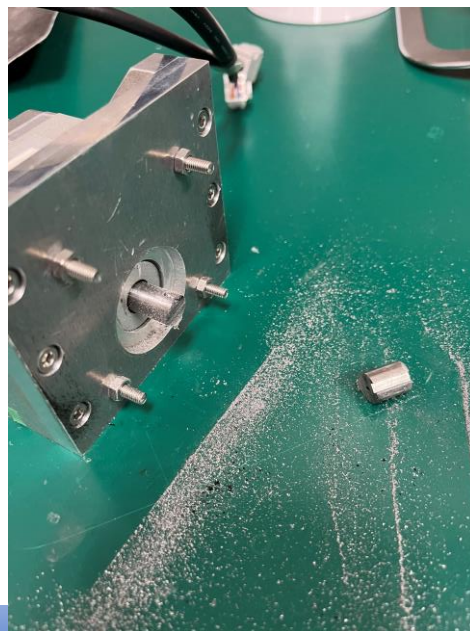
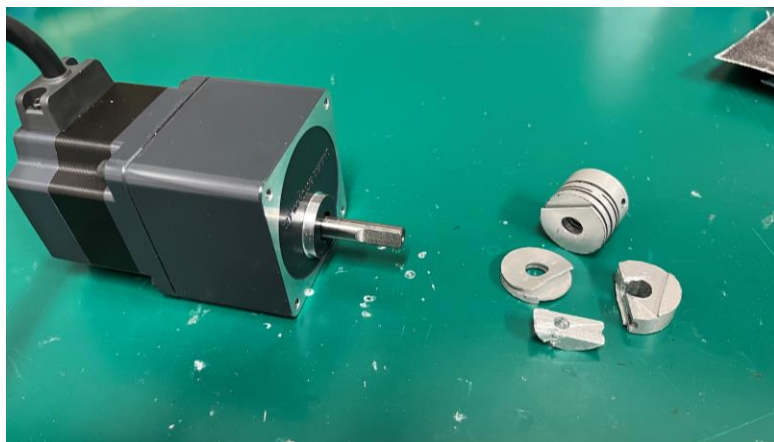
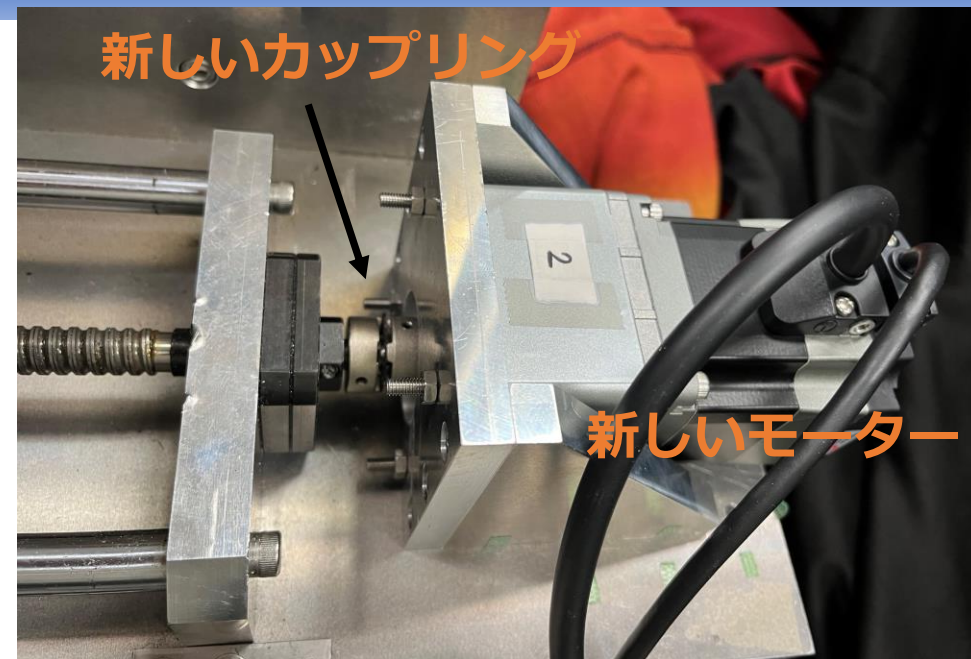
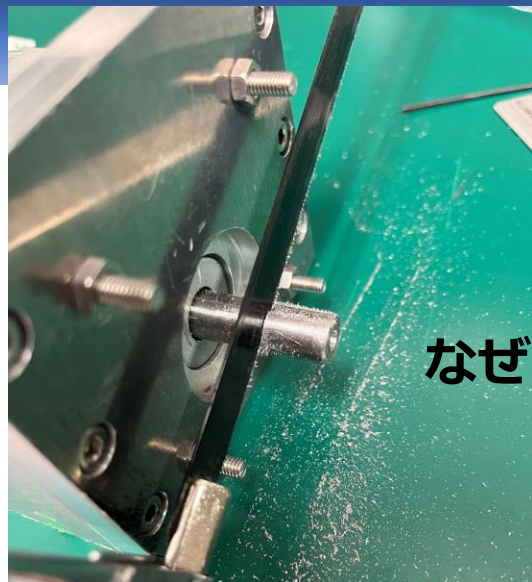
取り付け完了!



新しいモーター

設置

② Zenith

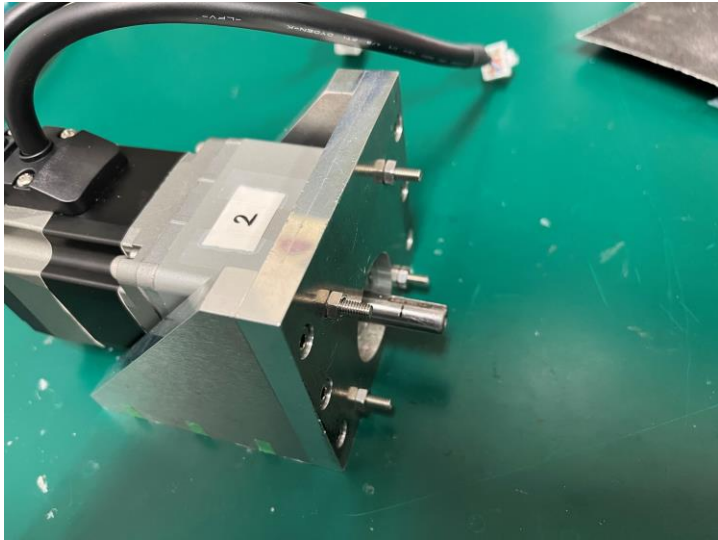


取り付け完了!

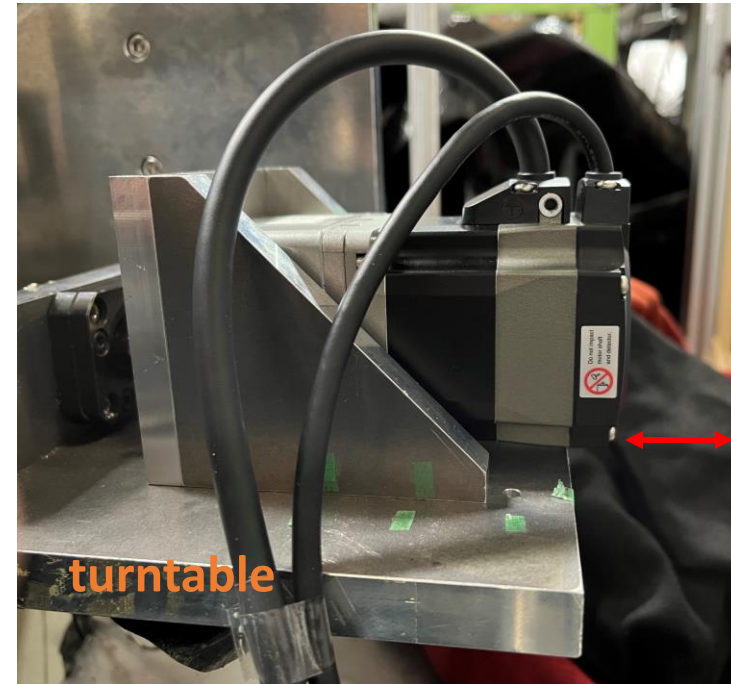
なぜ 切断したか?

新しいモーターは旧モーターより大きく、ターンテーブル内にスペースがないため

→ モーターのシャフトを切断し調整することにした
(1.3 cm)



Before



After

1.3 cm

調整完了!

位置読み込みのコード作り

① PCからドライバへ位置読み込み命令を送る

② 位置情報の部分だけを抽出する

③ 抽出した16進数を10進数に変換する

0x14585 → 83333

(ASCII コード表に対応 eg.) E → 0x45)

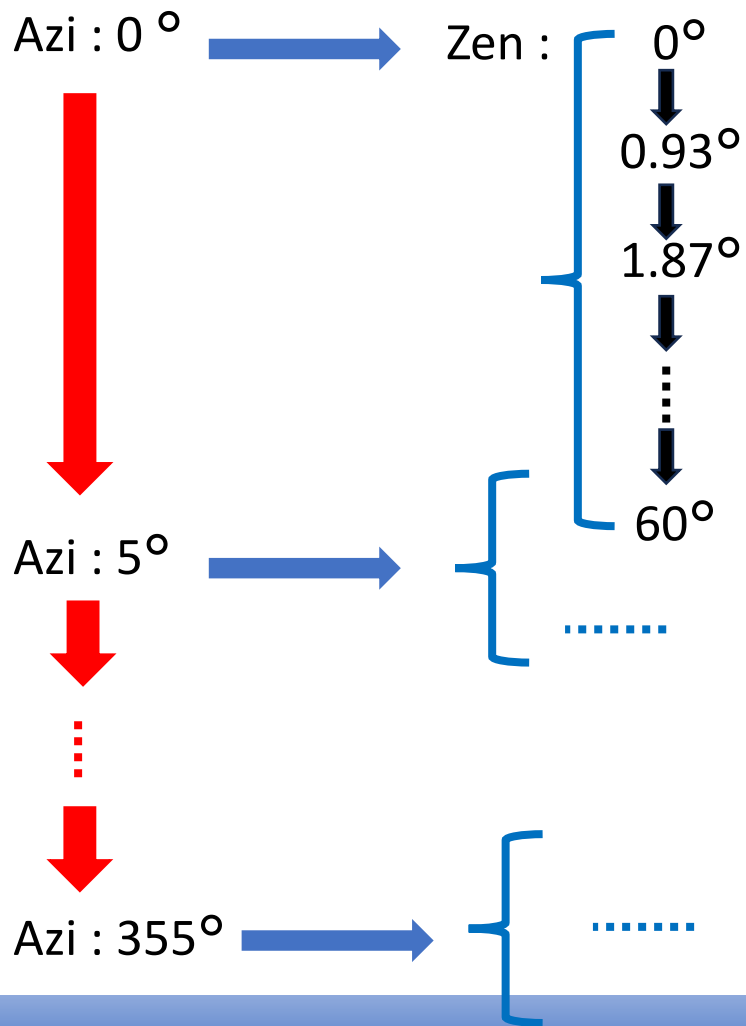
④ 得られた10進数を使って座標（角度）に変換する

- Absolute rotation sensor によって位置情報を読み出している
- 電源断、プログラム停止後も正しい位置を表示してくれる

```
● ratafia@ratafia-desktop:~/motor$ /bin/python3 /home/
b'\x02\x03\x04\x00\x00\x00\x00\xc93'
b'\x00\x00\x00\x00'
0 0x0
b'\x01\x03\x04\x00\x01E\x85X\xc0'
b'\x00\x01E\x85'
83333 0x14585
read_location: (zenith, azimuth) = (0.0, 29.99988)
● ratafia@ratafia-desktop:~/motor$
```


測定

Azimuth 72地点、Zenith 64地点計測。
(72 × 64 = 計4608点のデータ)



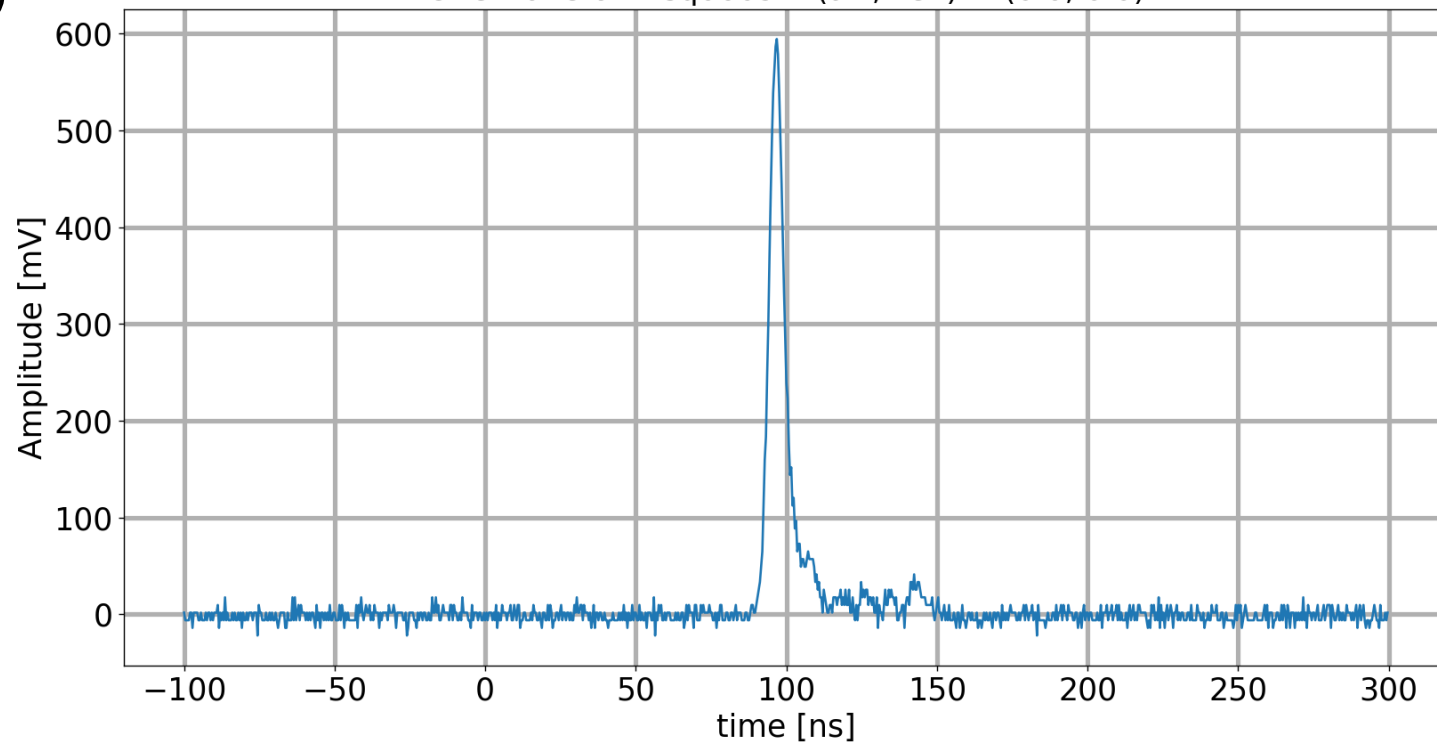
(Azi : 0, 5, 10, ... , 350, 355)

(Zen : 0, 0.93, 1.87, ... , 60)

1地点で200回、レーザーからのパルスを測定する

PMT 出力波形

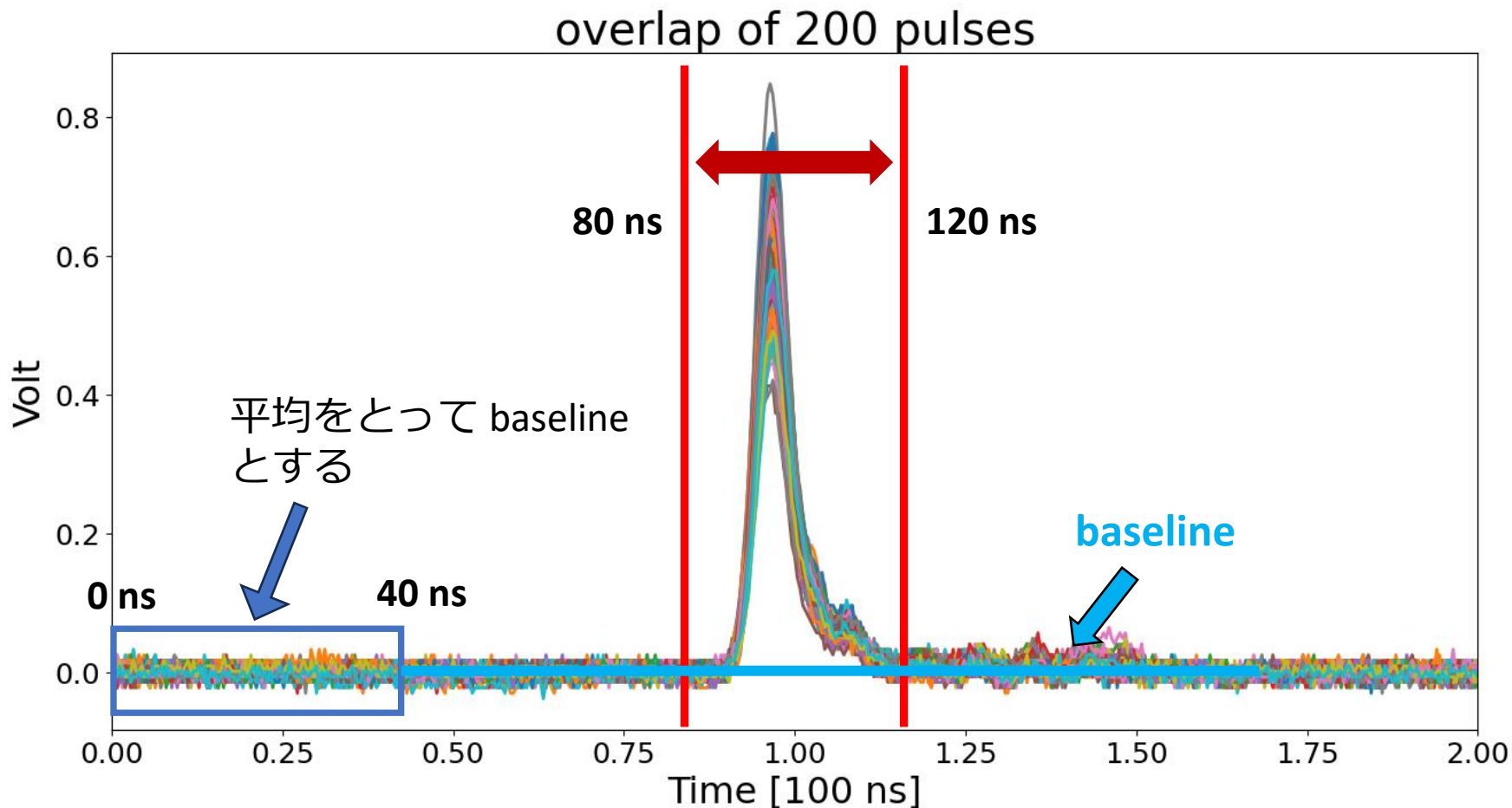
One waveform sq0609 (azi, zen) = (0.0, 0.0)



— 解析 —

① 電荷を計算する

得られた測定データをもとに電荷を計算する



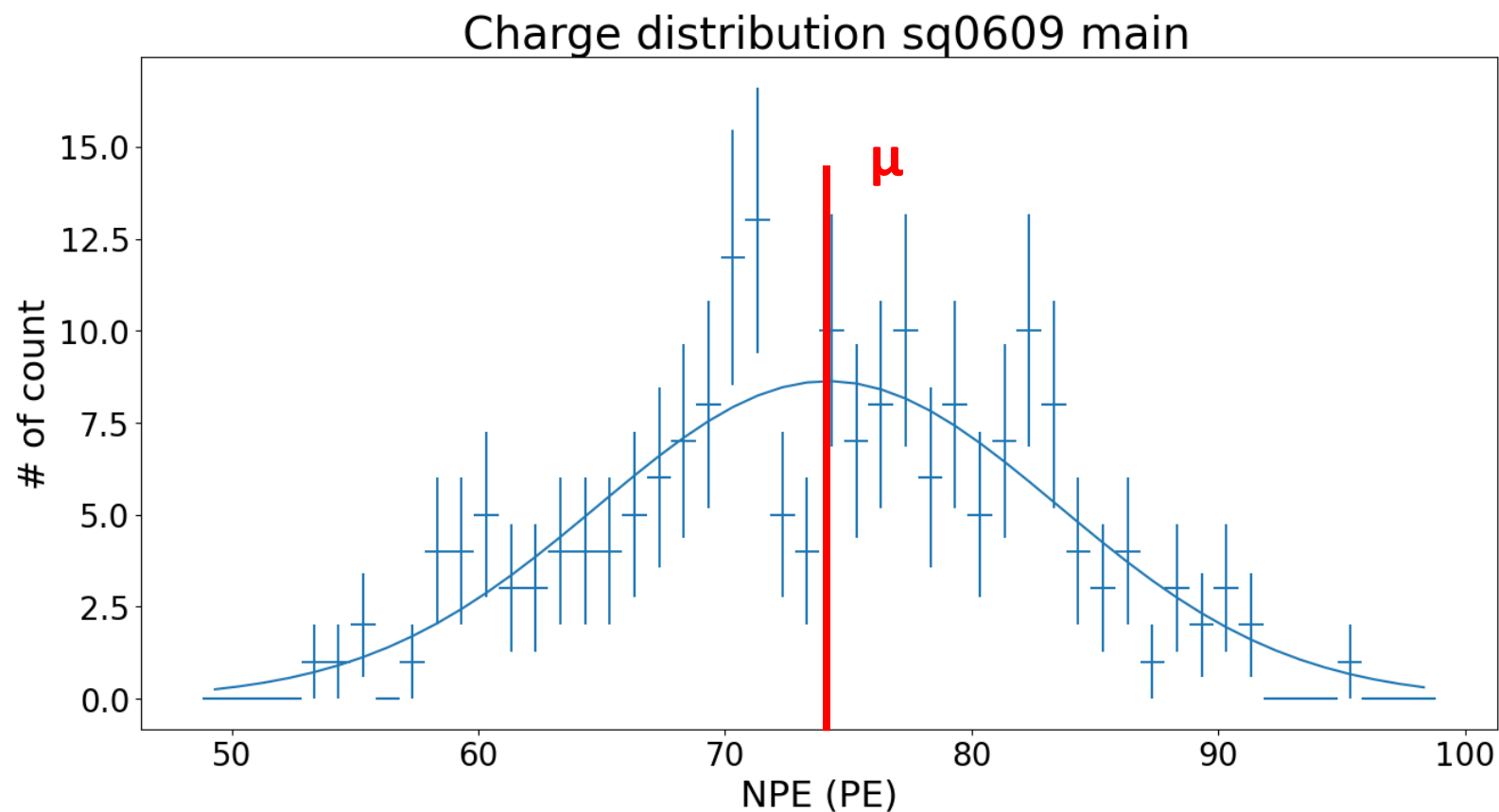
・ 積分範囲 : 80 ~ 120 ns

・ 電荷の計算式

$$Q = \int \frac{V}{R} dt$$

($R = 36.92 [\Omega]$ を用いている)

② 電荷の平均値 μ を求める



- 1地点あたり200個の電荷データをヒストグラムにし、ガウス関数でフィッティングする。

- その際、電荷の平均値 μ を求める。この μ をその地点での電荷の値とする。

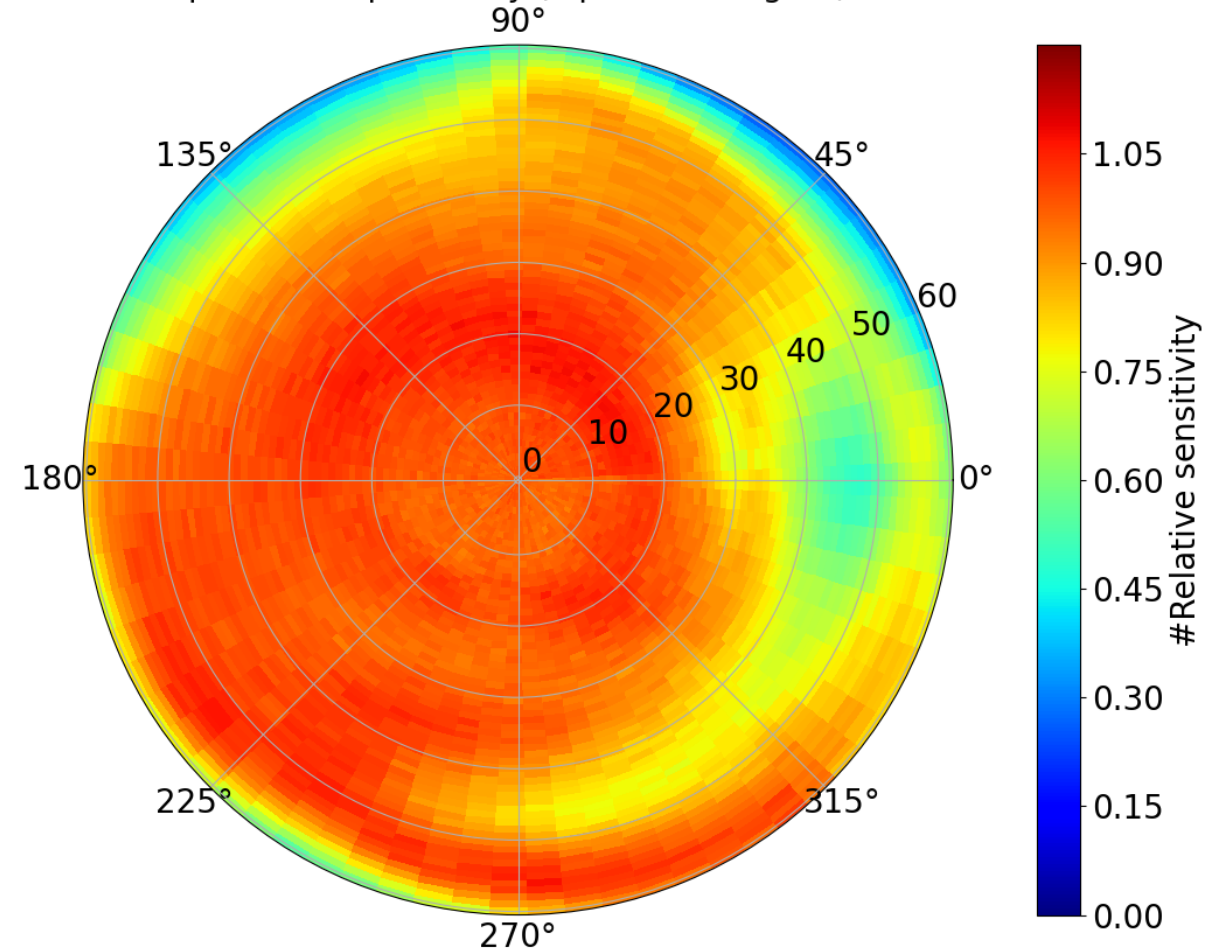
PMTのゲインが 10^7 なので

$$\begin{aligned} 1 \text{ PE} &= 1.6 \times 10^{-12} \text{ [C]} \\ &= 1.6 \text{ [pC]} \end{aligned}$$

③ カラーマップ表示

各地点ごとの電荷の平均値 μ をカラーマップで2次元表示する

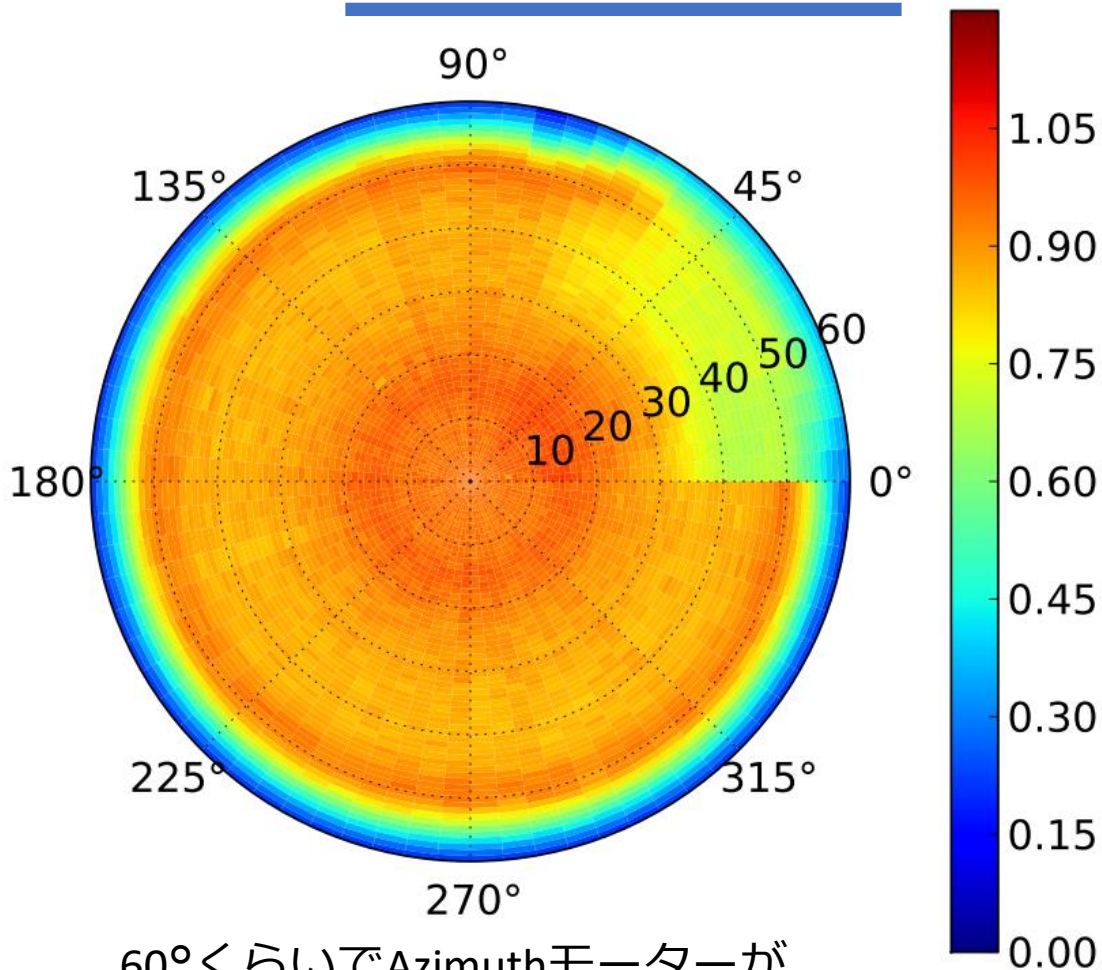
position dependency (sq0609: 0 degree)



- (Azimuth, Zenith) = (0.0, 0.0) [degree]
の値を用いて規格化

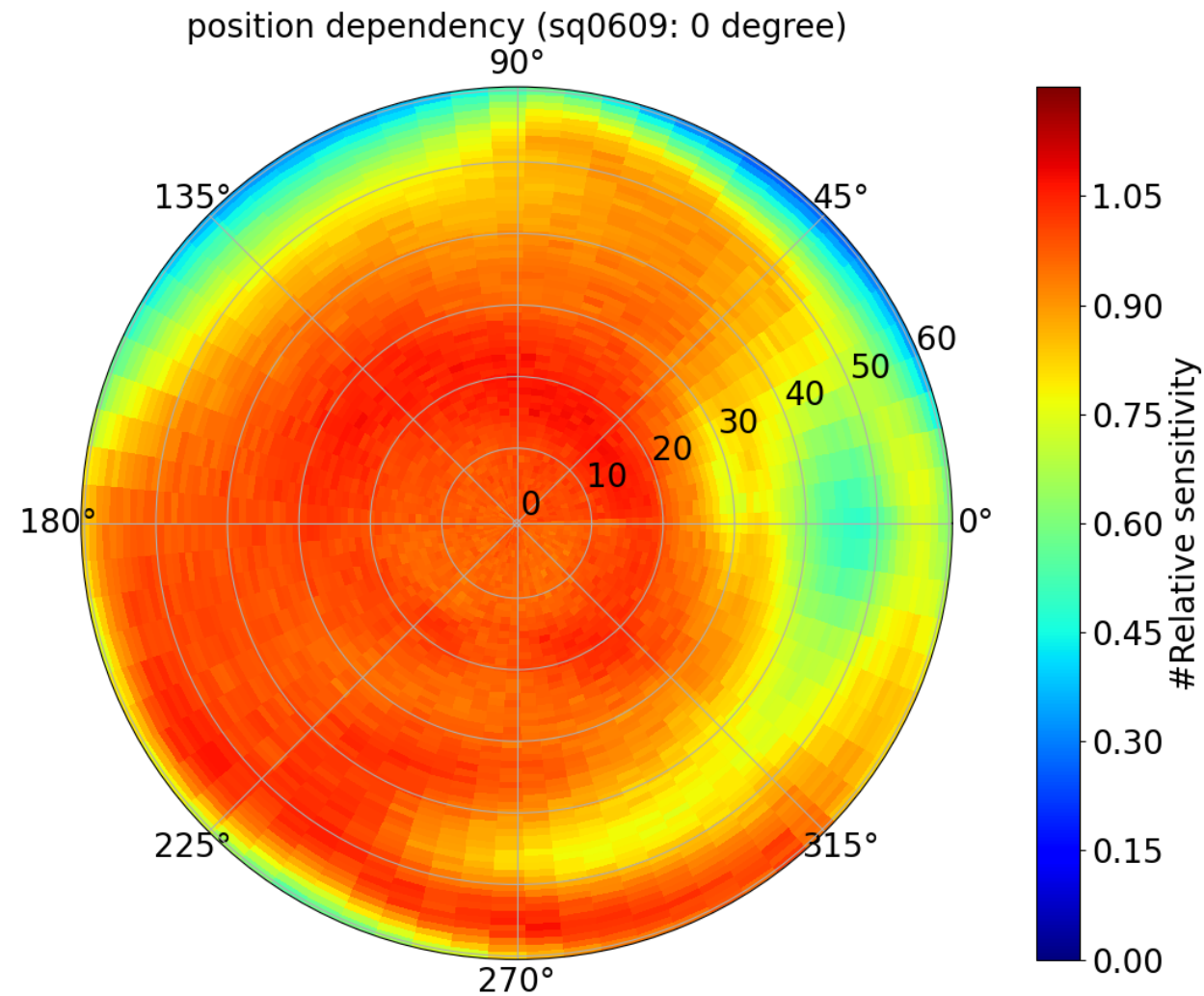
比較

旧モーターでの測定



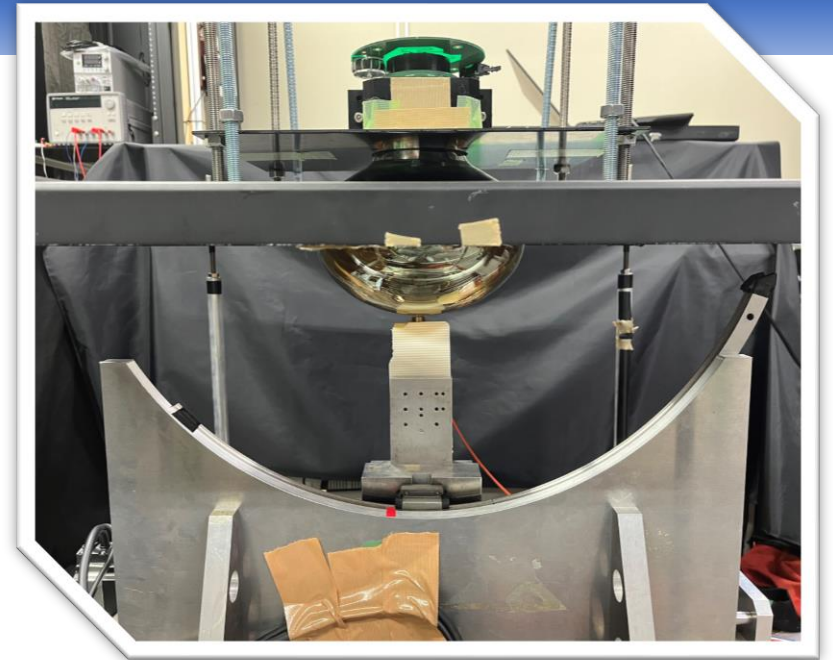
60°くらいでAzimuthモーターが止まってしまった...

新モーターでの測定



まとめ

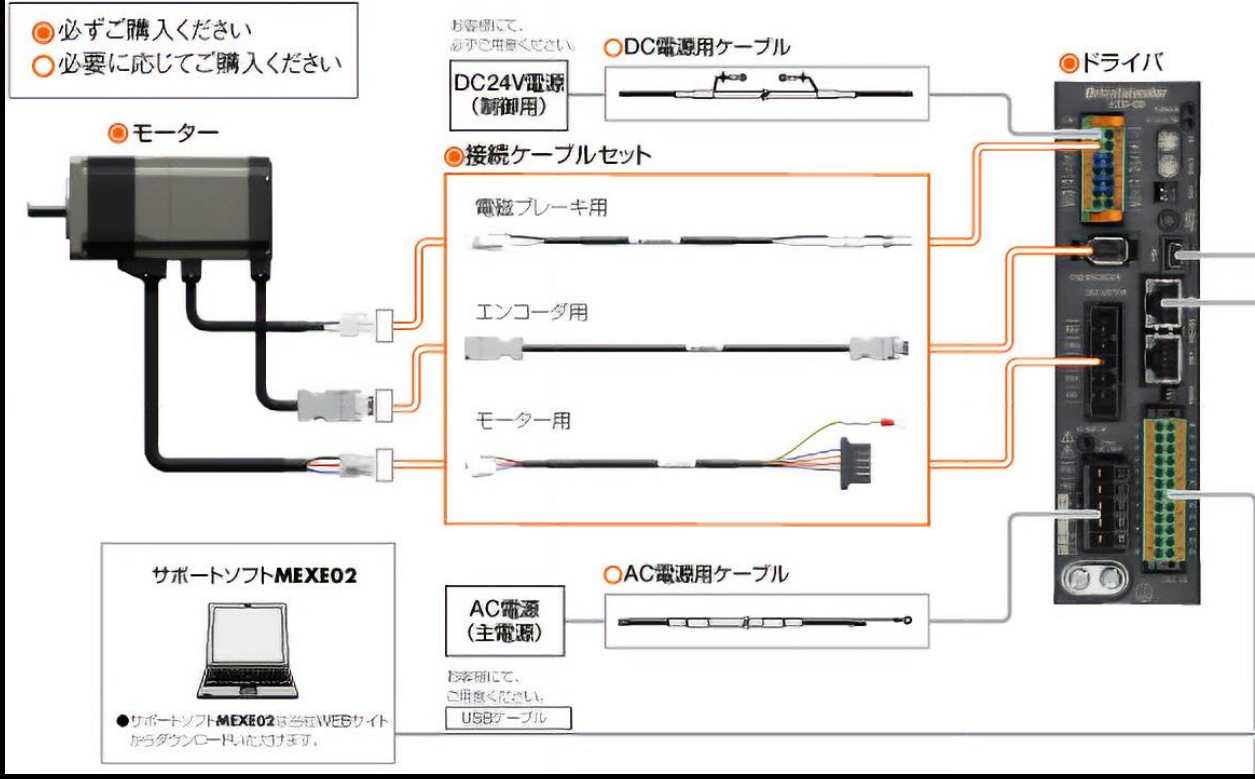
- 古いモーターを、位置読み込み機能の搭載された新しいモーターにリプレイスした
- 測定結果を解析し、旧モーターで得られた結果との比較した
→ 妥当な結果が得られた
- 旧システムよりアップデートした測定システムを構築できた
- 今後の展望
→ 卒業までに、システム使用にあたってのマニュアルを作ること



Back Up

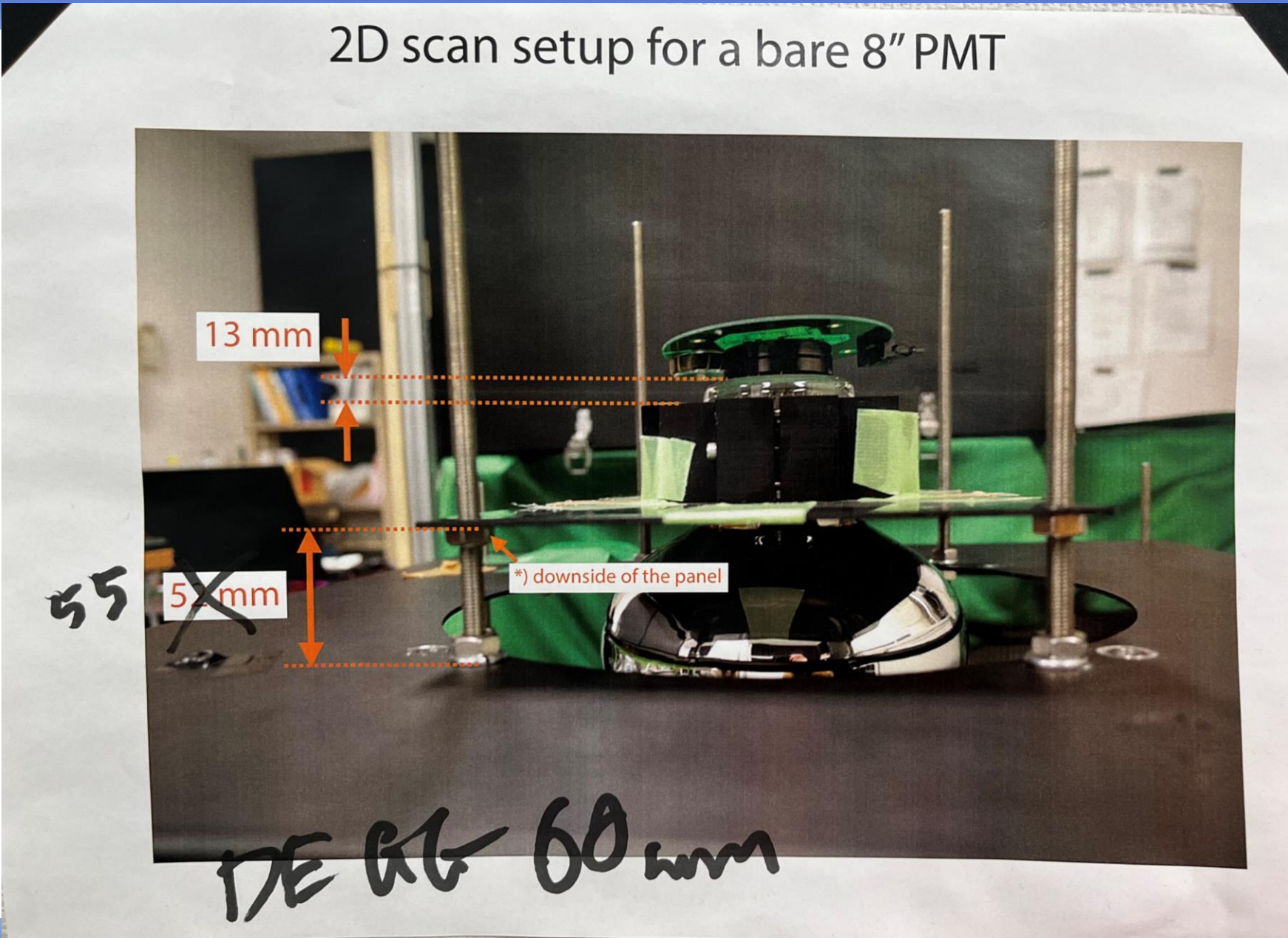
Structure

●標準タイプ電磁ブレーキ付モーターと位置決め機能内蔵タイプまたはRS-485通信付きパルス列入力タイプのドライバを組み合わせた場合
位置決め機能内蔵タイプのドライバでI/O制御または、RS-485通信で使用した場合の構成例です。
モーター、ドライバ、接続ケーブルセット/可動接続ケーブルセットは、別手配です。

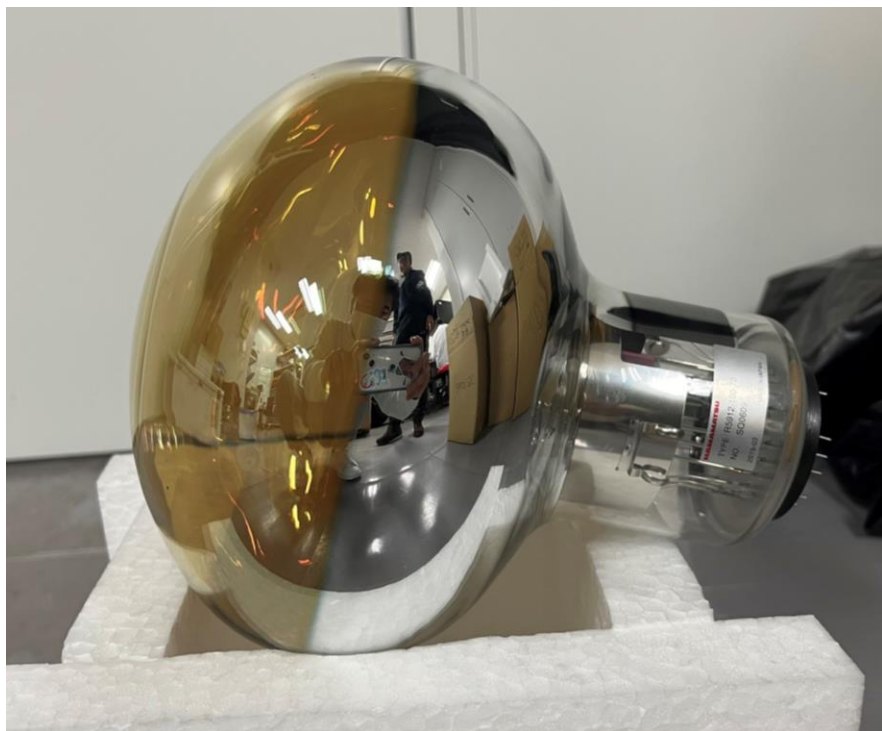


Pre-test on the desk

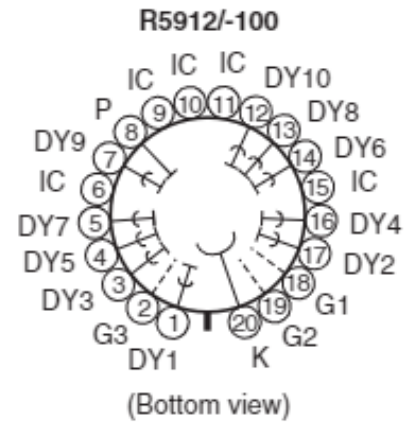
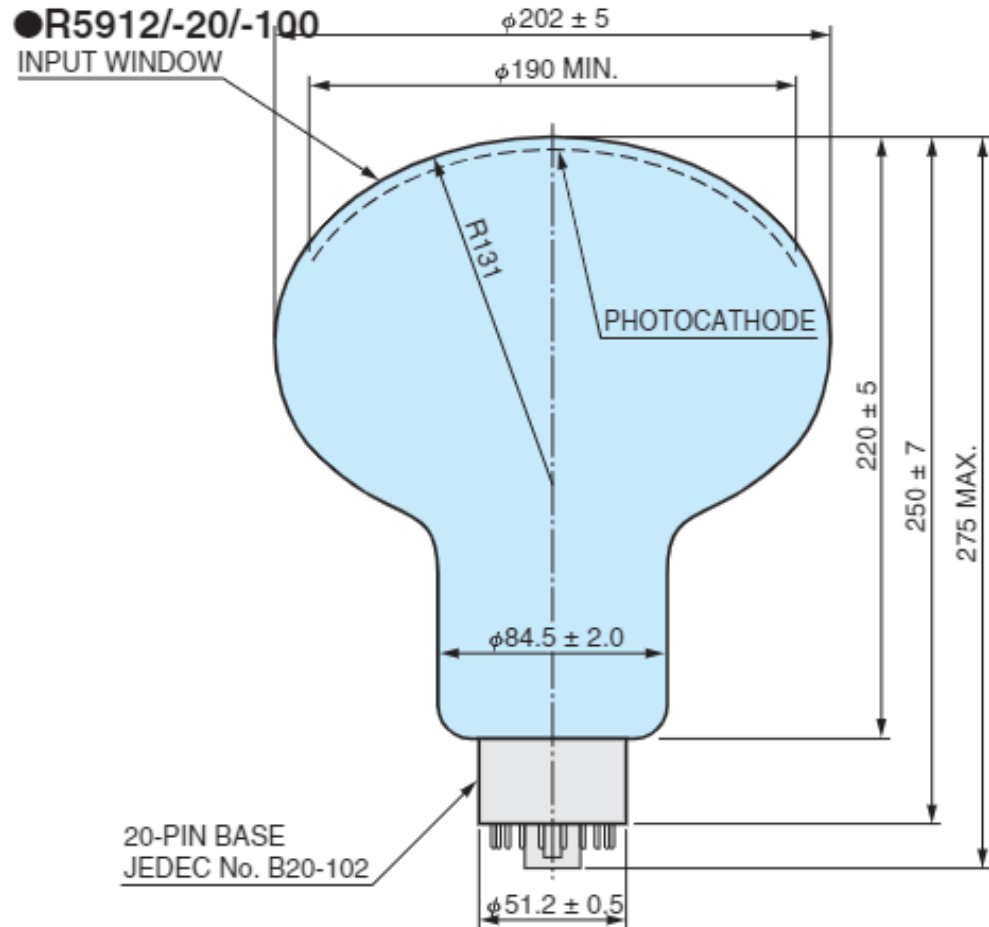
2D scan setup for a bare 8" PMT



PMT 写真



DIMENSIONAL OUTLINE (Unit: mm)



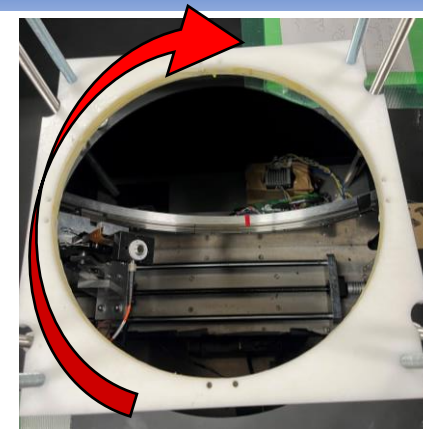
SW リミット
HW リミット

- Information about the number of revolution and speed on the old system

→ use it on the new system

Max azimuth step : 1×10^6 steps (Covering 360 degrees)

Motor's step degree : **0.072** degrees/step



turntable



motor



Moving full step : $0.072 \times 10^6 = 7.2 \times 10^4$ degrees

7.2×10^4 degrees \div 360 degrees = 200 revs

Azimuth velocity : 8000 steps/sec



The time to revolve the turntable is :

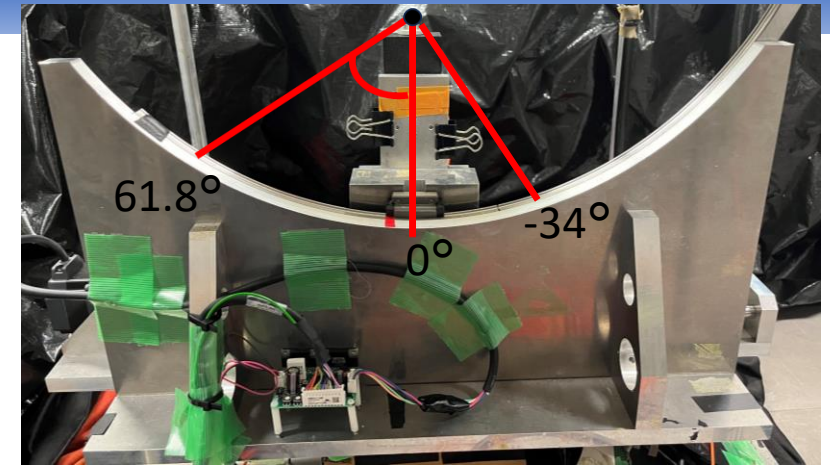
$10^6 \div 8000 =$ 125 seconds

For the Zenith ...

Max zenith step : 504044 steps (Covering -34 ~ 61.8 degrees)

motor's step degree : 0.072 degrees/step

Center : 182500 steps



Zenith stage

➔ 0 ~ 61.8 degrees : 321544 steps

$$0.072 \times 321544 \div 360 = \underline{64.3 \text{ revs}}$$

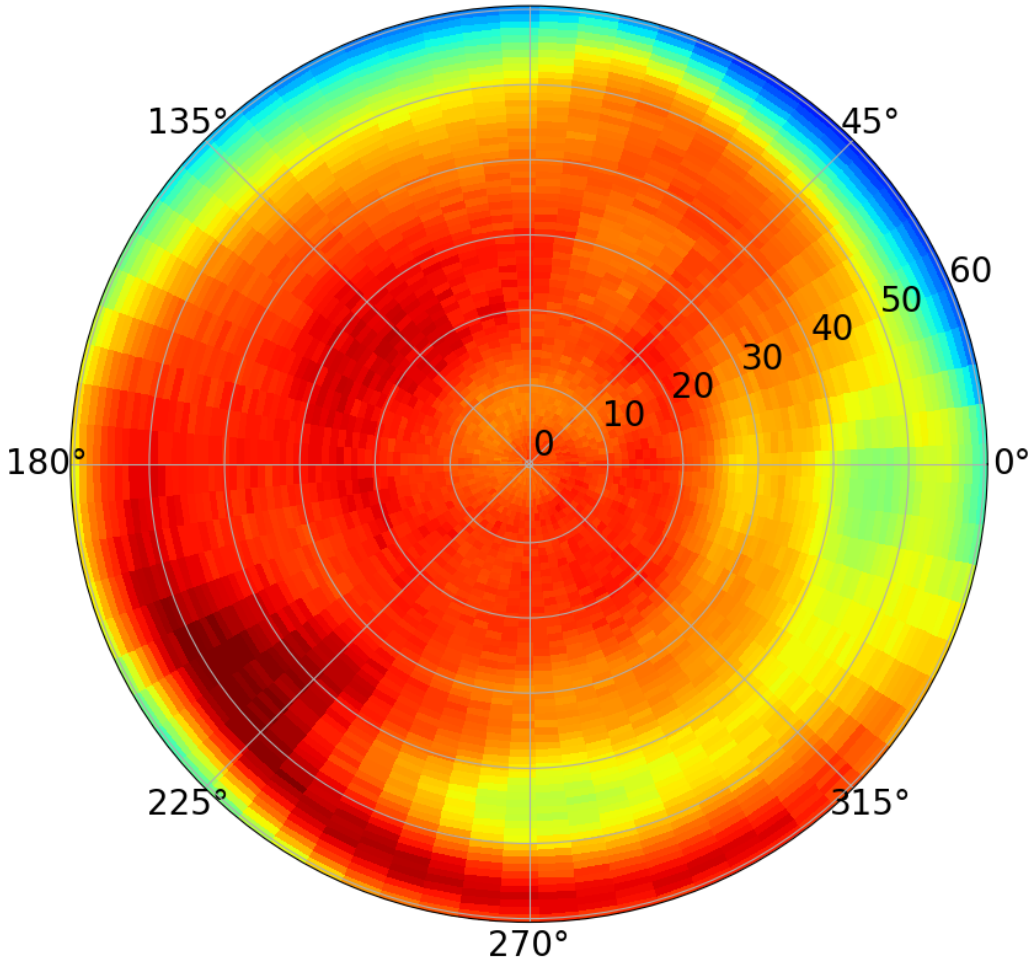
Zenith velocity : 4000 steps/sec

➔ 0 ~ 61.8 degrees (321544 steps)

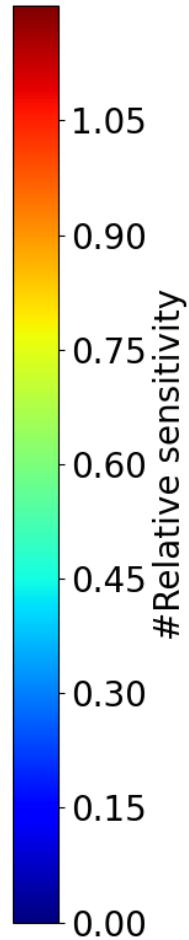
$$321544 \div 4000 = \underline{80.3 \text{ seconds}}$$

position dependency (sq0644: 0 degree)

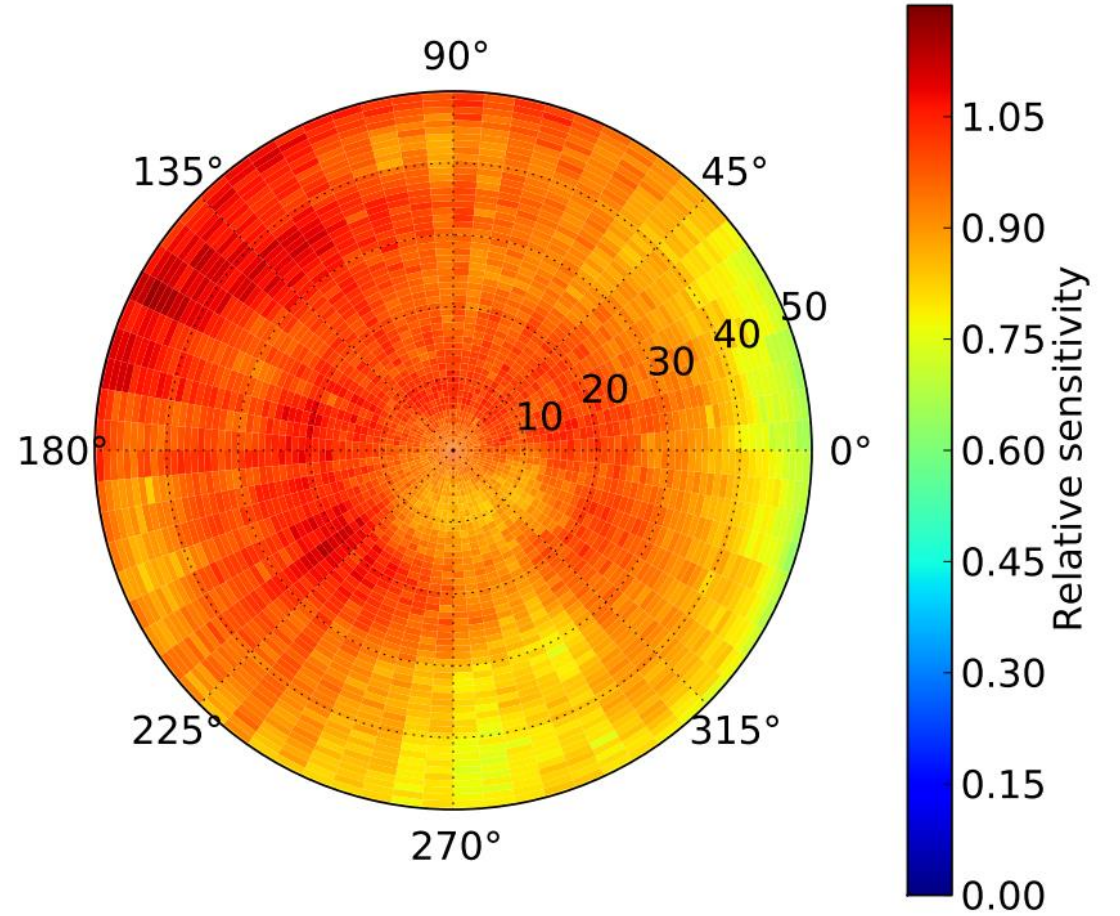
90°



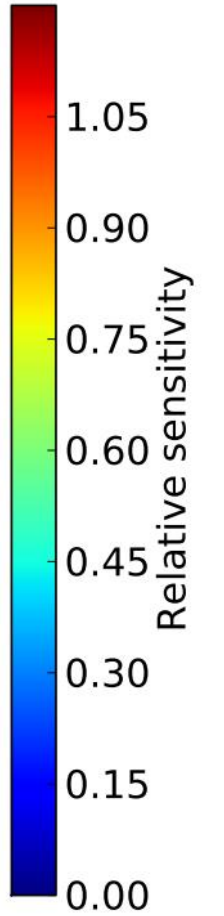
New Motor (Non Magnetic)



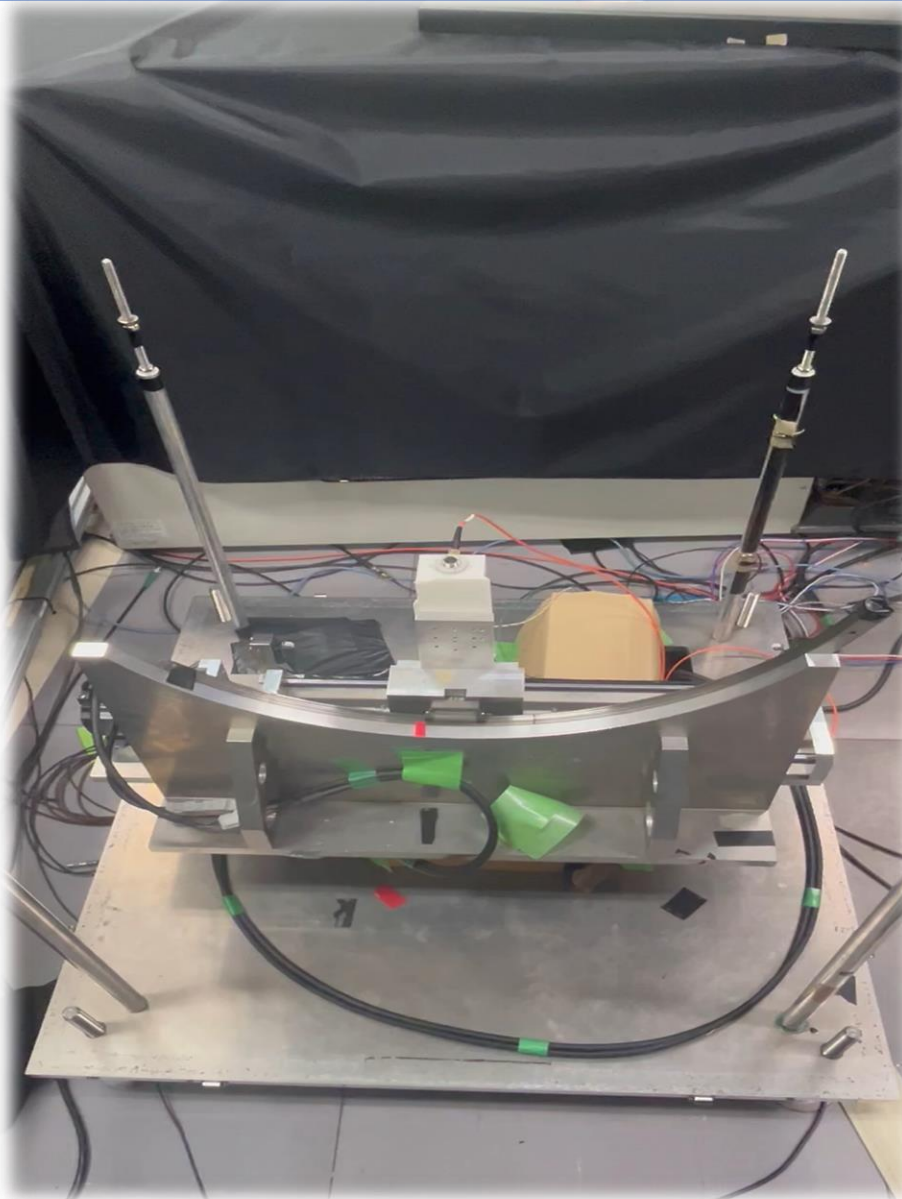
90°



Old Motor (Magnetic)



Test Run



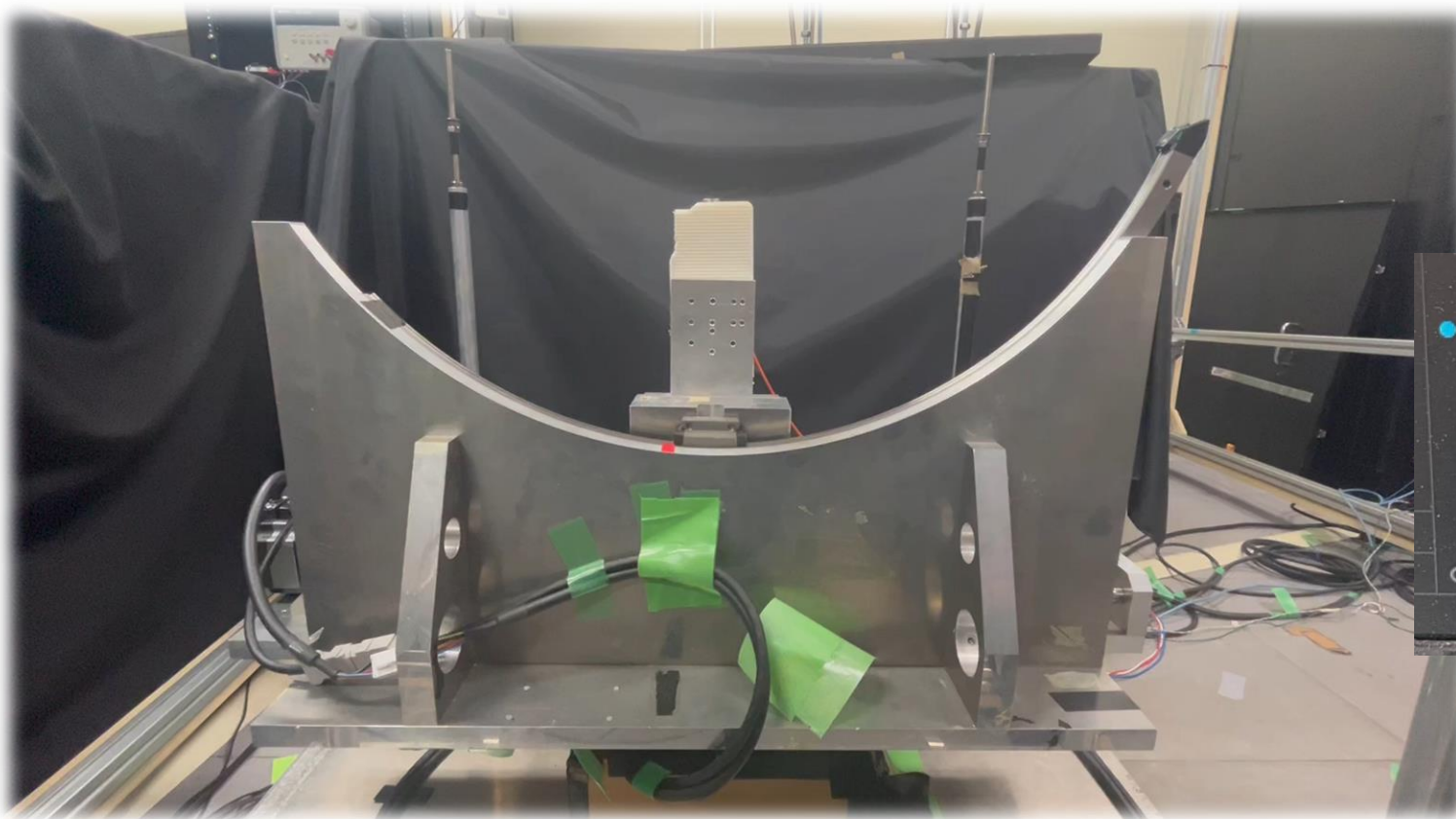
Order : Azimuth
0 → 30 degrees

The location is correct ?

```
PROBLEMS 2 OUTPUT DEBUG CONSOLE TERMINAL PORTS J
• ratafia@ratafia-desktop:~/motor$ /bin/python3 /home/ra
b'\x02\x03\x04\x00\x00\x00\x00\xc93'
b'\x00\x00\x00\x00'
0 0x0
b'\x01\x03\x04\x00\x01E\x85X\xc0'
b'\x00\x01E\x85'
83333 0x14585
read_location: (zenith, azimuth) = (0.0, 29.99988)
o ratafia@ratafia-desktop:~/motor$
```

Reading location is also correct !

Test Run



Order : Zenith
0 → 60 degrees

The location is correct ?

```
PROBLEMS 4 OUTPUT DEBUG CONSOLE TERMINAL PORTS JUPYTER
• ratafia@ratafia-desktop:~/motor$ /bin/python3 /home/ratafia/m
b'\x02\x03\x04\x00\x04\xe8\x08\xc74'
b'\x00\x04\xe8\x08'
321544 0x4e808
b'\x01\x03\x04\x00\x00\x00\x00\xfa3'
b'\x00\x00\x00\x00'
0 0x0
read location: (zenith, azimuth) = (59.999973592259096, 0.0)
○ ratafia@ratafia-desktop:~/motor$
```

Reading location is also correct !