最高エネルギー宇宙線

メンバー：青野心平，大﨑蒼汰，梶田翠れん，近藤倭人，髙橋駿

SUPERVISOR：さこ隆志先生

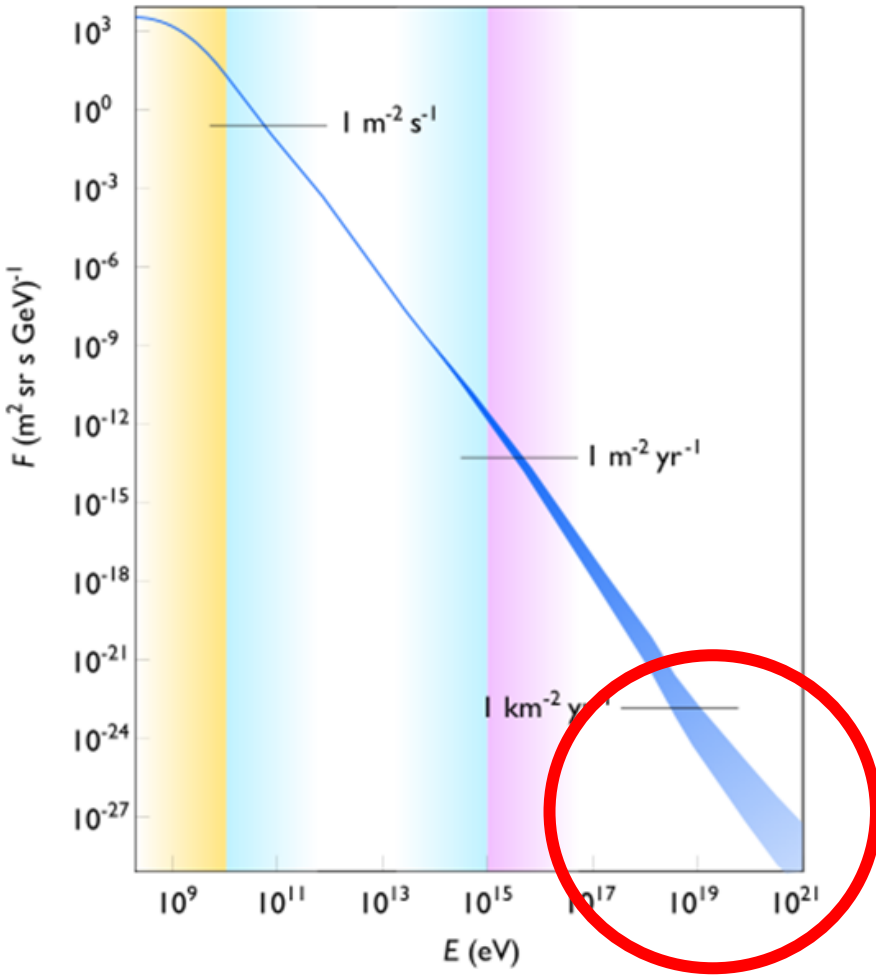
SUPPORTER：木戸英治さん，高橋薫さん，小山千里さん，丹下雄太さん，樋口さん，岡崎さん

最高エネルギー宇宙線とは

宇宙線：宇宙から降り注ぐ高エネルギー原子核

(例)陽子、ヘリウム原子核

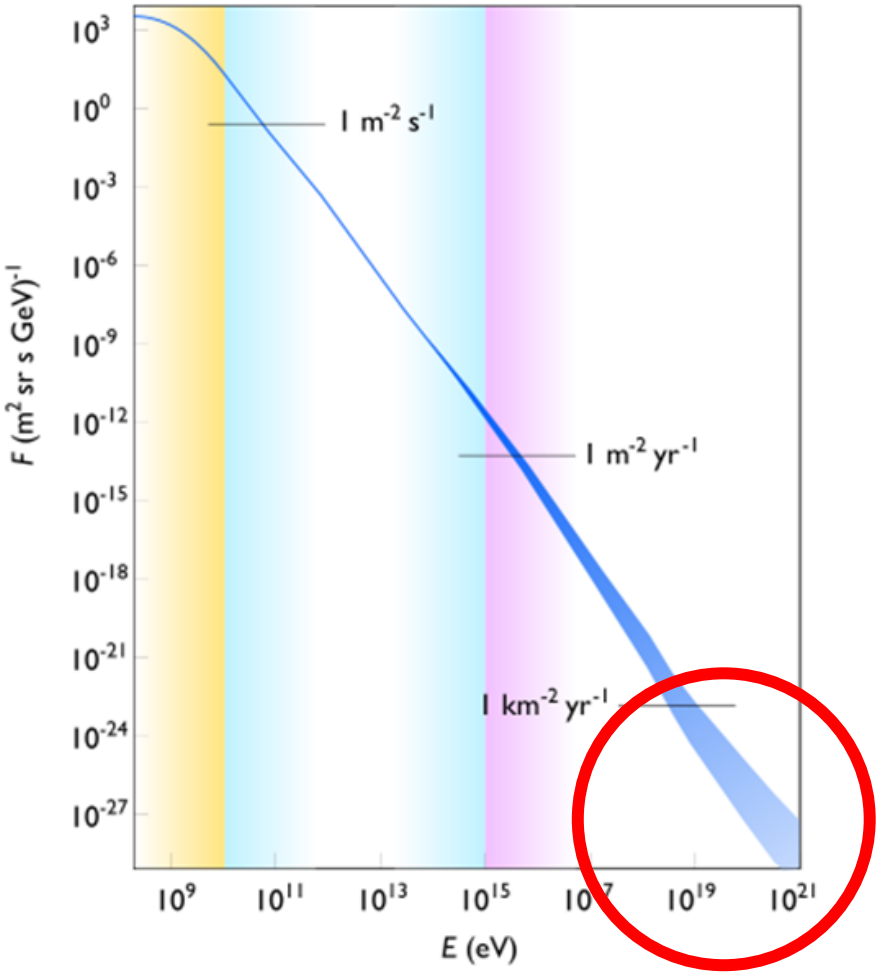
その中でも10^{20}eV付近の高エネルギー帯を指す



最高エネルギー宇宙線とは

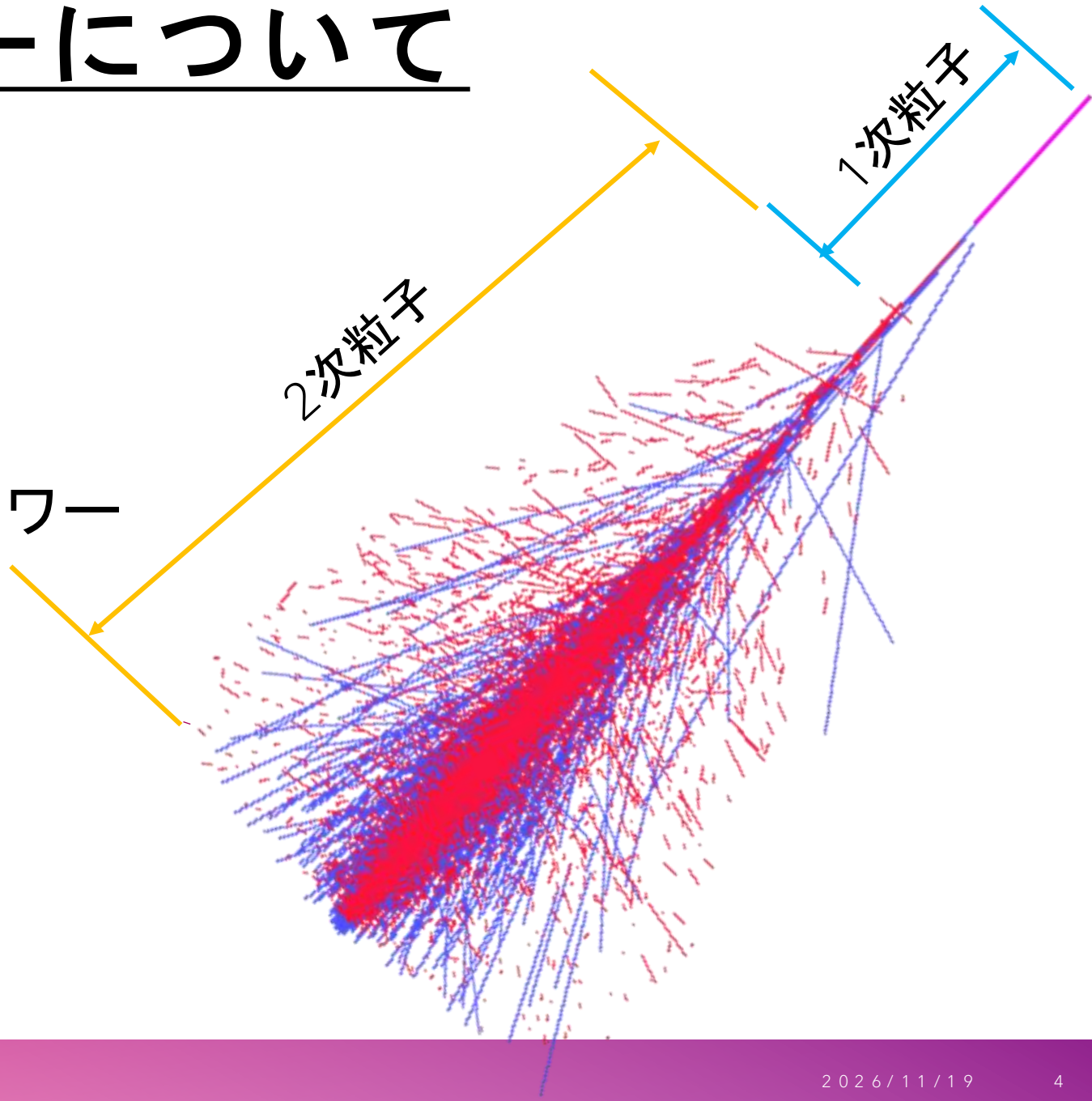
最高エネルギーは到来頻度が低い
(>10^{18}eVで1km^{2}に一年に一個)

直接的には見るのが難しい



宇宙線空気シャワーについて

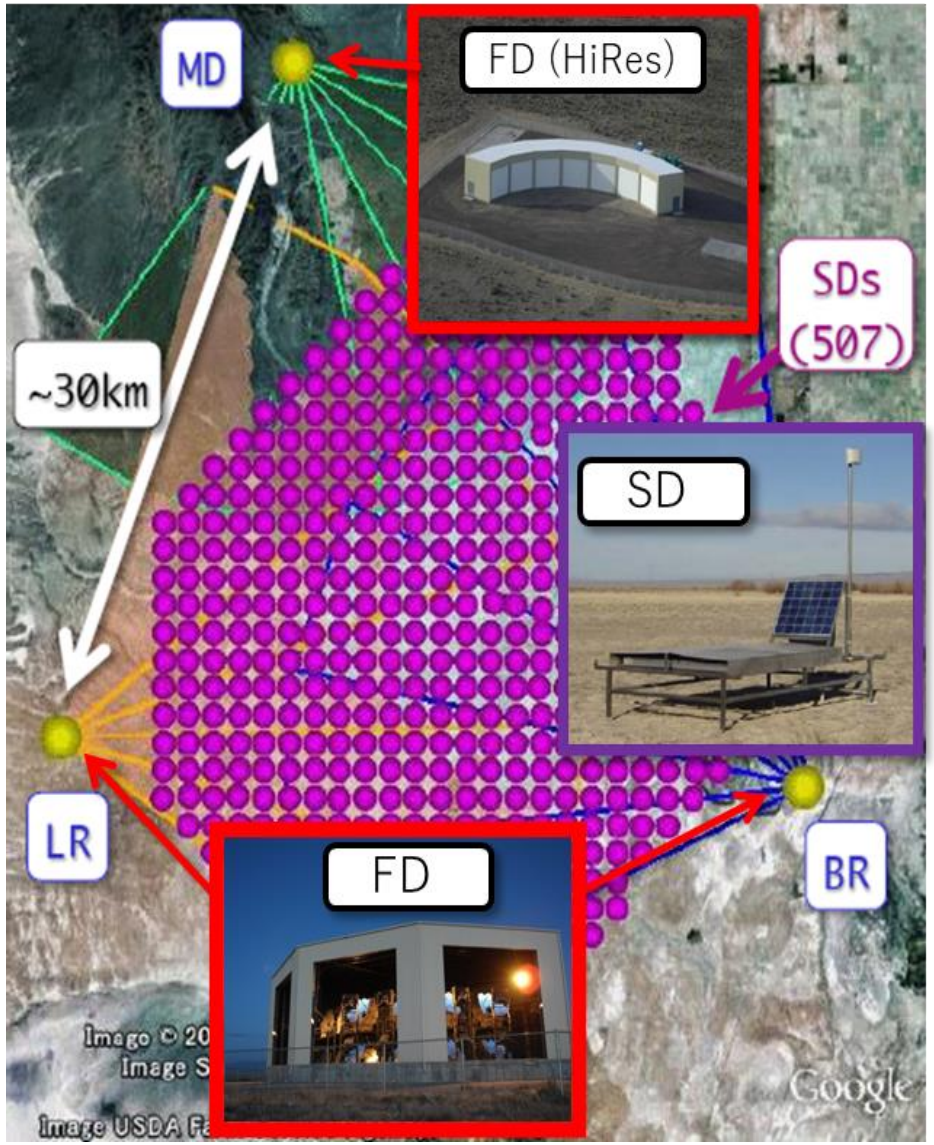
高エネルギーの宇宙線が大気中の
原子核と衝突し、大量の粒子がシャワー
のように地上に降り注ぐ現象。



TA実験

・アメリカのユタ州で行われている大規模実験

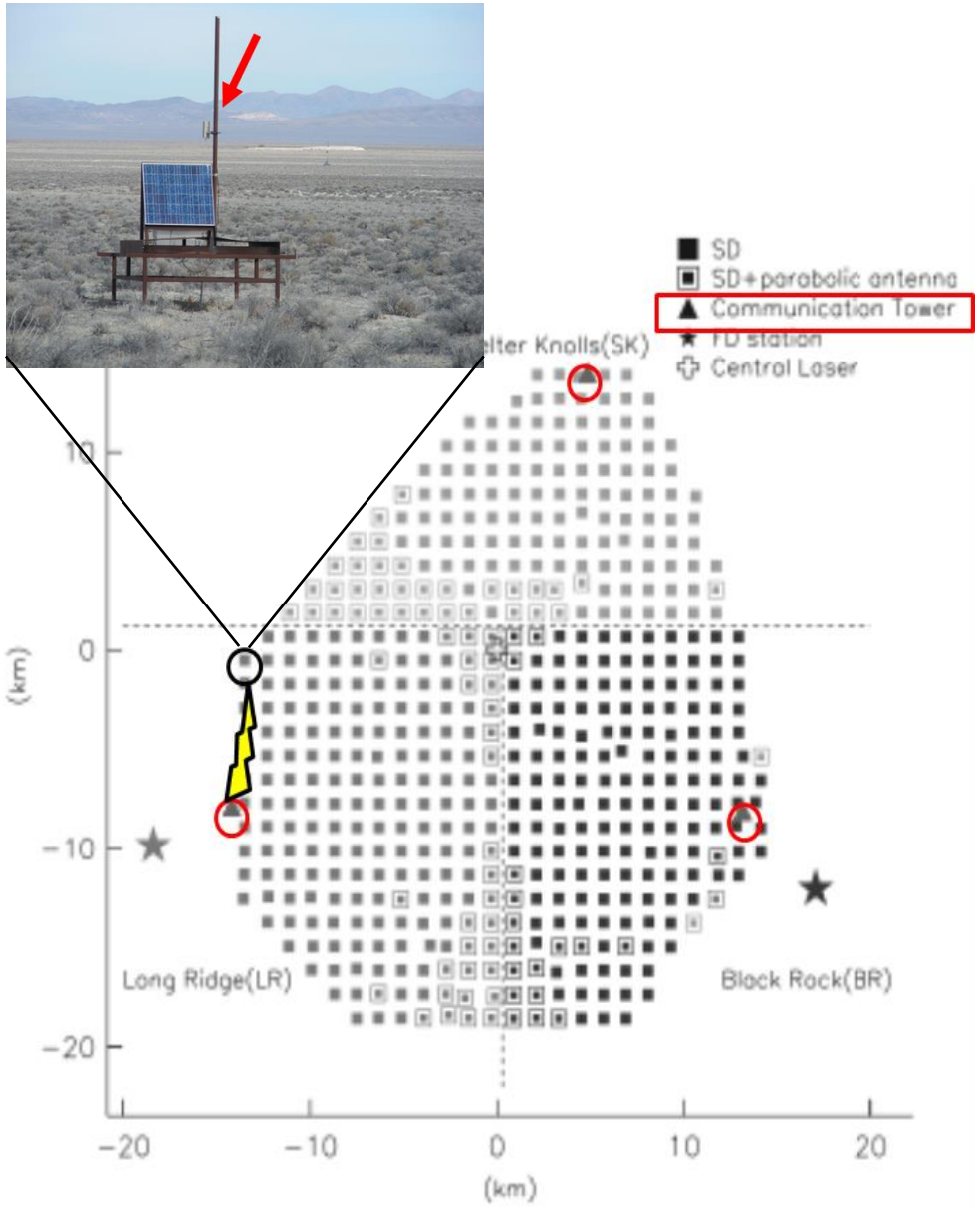
・507台の検出器を1.2km間隔で配置し、700km^{2}の範囲で実験を行っている



ＴＡ実験

各検出器にWiFiのアンテナがついており、

WiFiを用いて通信塔とデータのやり取り

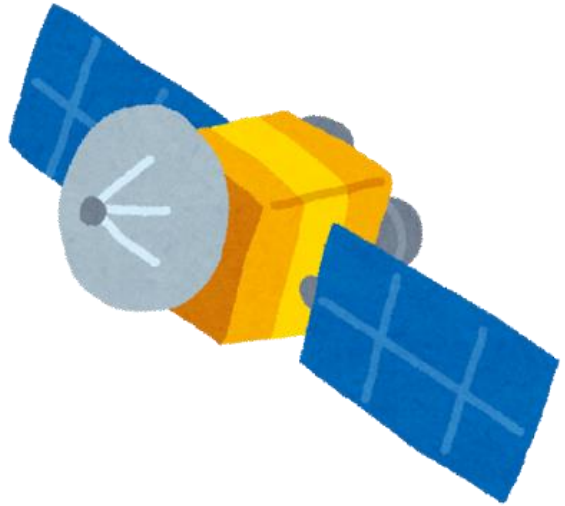


しかし…

- 検出器のアンテナの向きが強風でずれる
- 通信塔を自分たちで用意する必要あり
- 将来もっと広い面積にしたときに今と同じように観測できるのか

スターリンクとは

- アメリカのSpacex社が提供している衛星インターネットサービス
- 低高度軌道で地球を周回している衛星と通信を行っている
- 現在約8000基の衛星が通信をしている



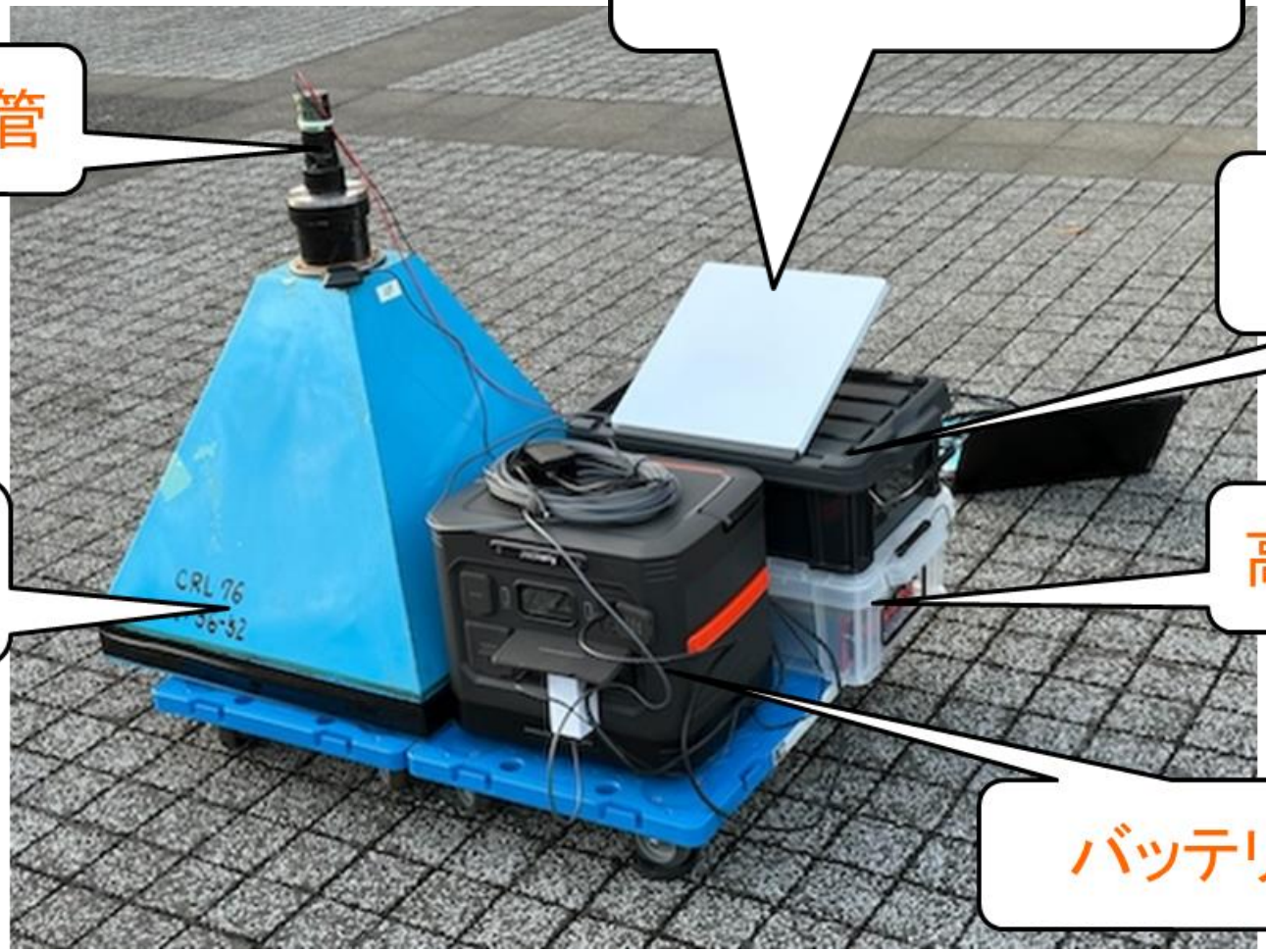
スターリンクのメリット

- 地上回線が届きにくい山間部や離島などでも、通信環境が作れる
- 低軌道衛星なので通信の遅延が少なく高速で行える
- 専用のアプリとアンテナがあれば誰でもすぐに使える

世界初の試み

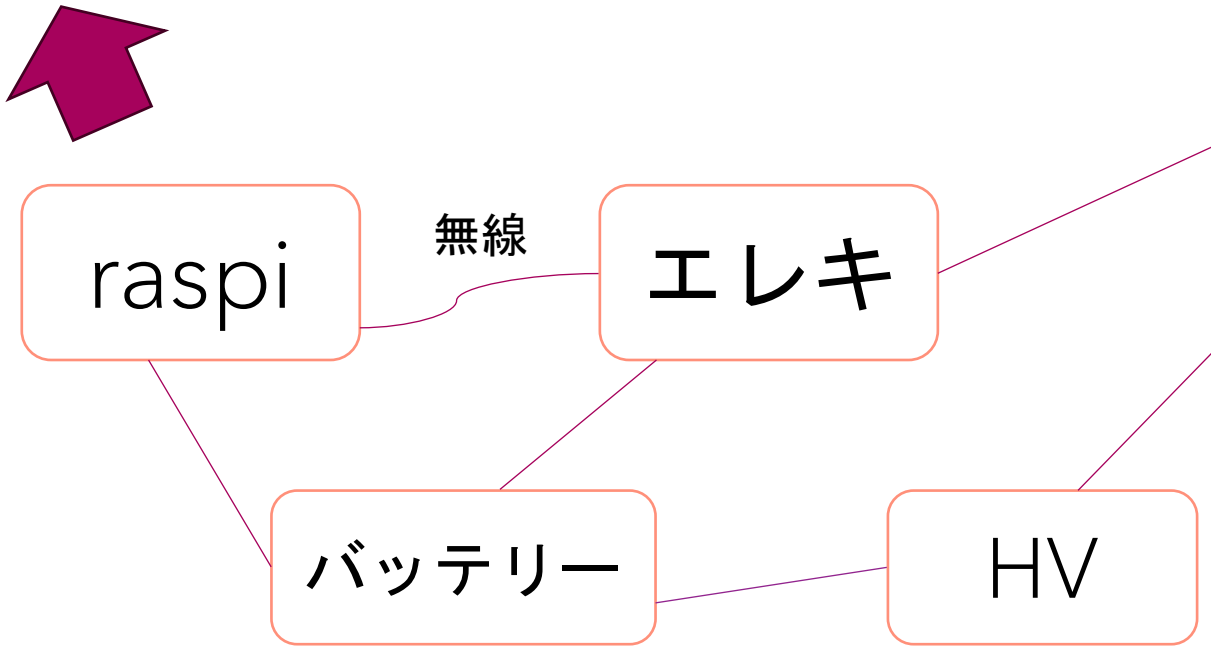
(多分…)

実験装置

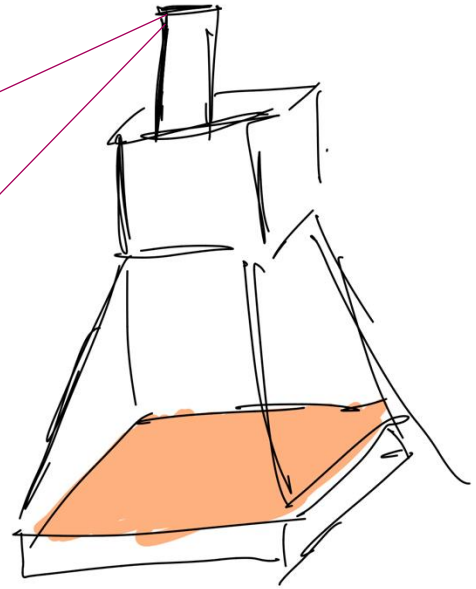

StarLinkアンテナ
光電子増倍管
TA実験の
信号処理回路
プラスチック
シンチレータ
高電圧モジュール
バッテリー

回路図

starlinkへ



PMT



シンチレーション

通信図





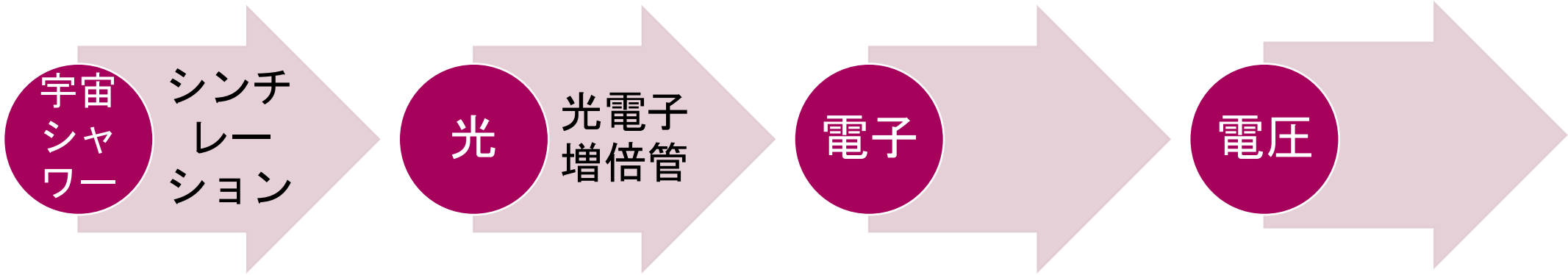
Watch SpaceX's Starlink 'Train' in the Sky

実験データ



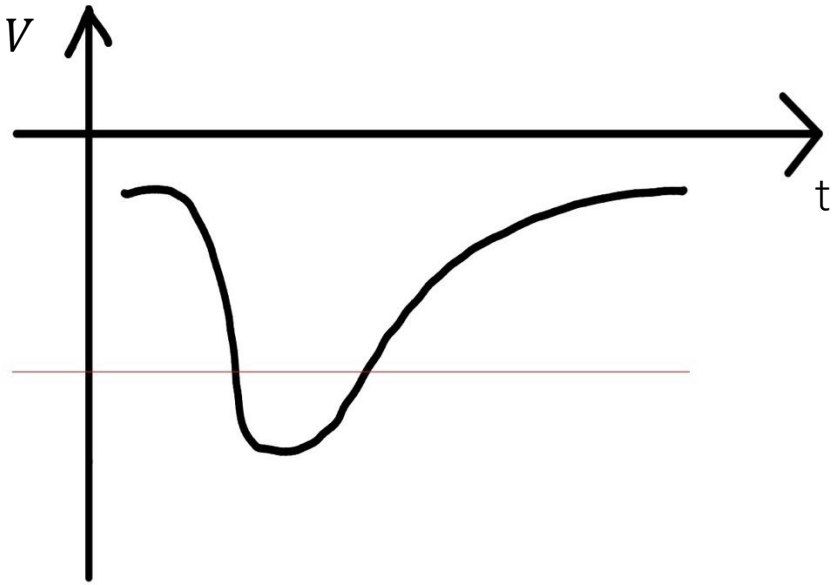
1秒に1回通信

宇宙線シャワーの計測



宇宙線シャワーの計測

- 入射した宇宙線シャワーの粒子数に比例するような電圧の波形が得られる。特定の電圧(粒子数)を超えたときに、シグナルの検出とみなされる。



検出！

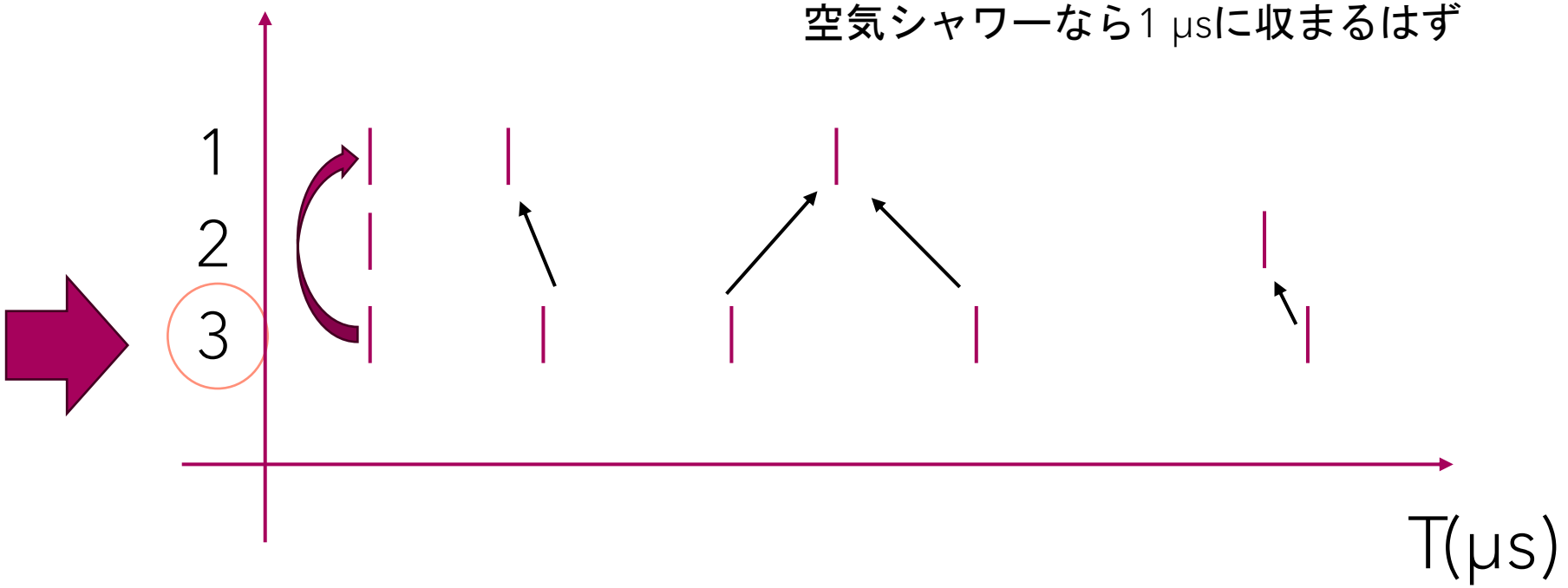
得られるデータ

```
#T 00000004 260309 071537 29 337 0
#T 00000005 260309 071538 40 338 0
7002 4527
7002 7564
7002 11323
7002 13253
7002 15335
7002 17309
7002 17765
7002 20391
7002 24532
7002 33327
7002 35117
7002 37783
7002 39547
```

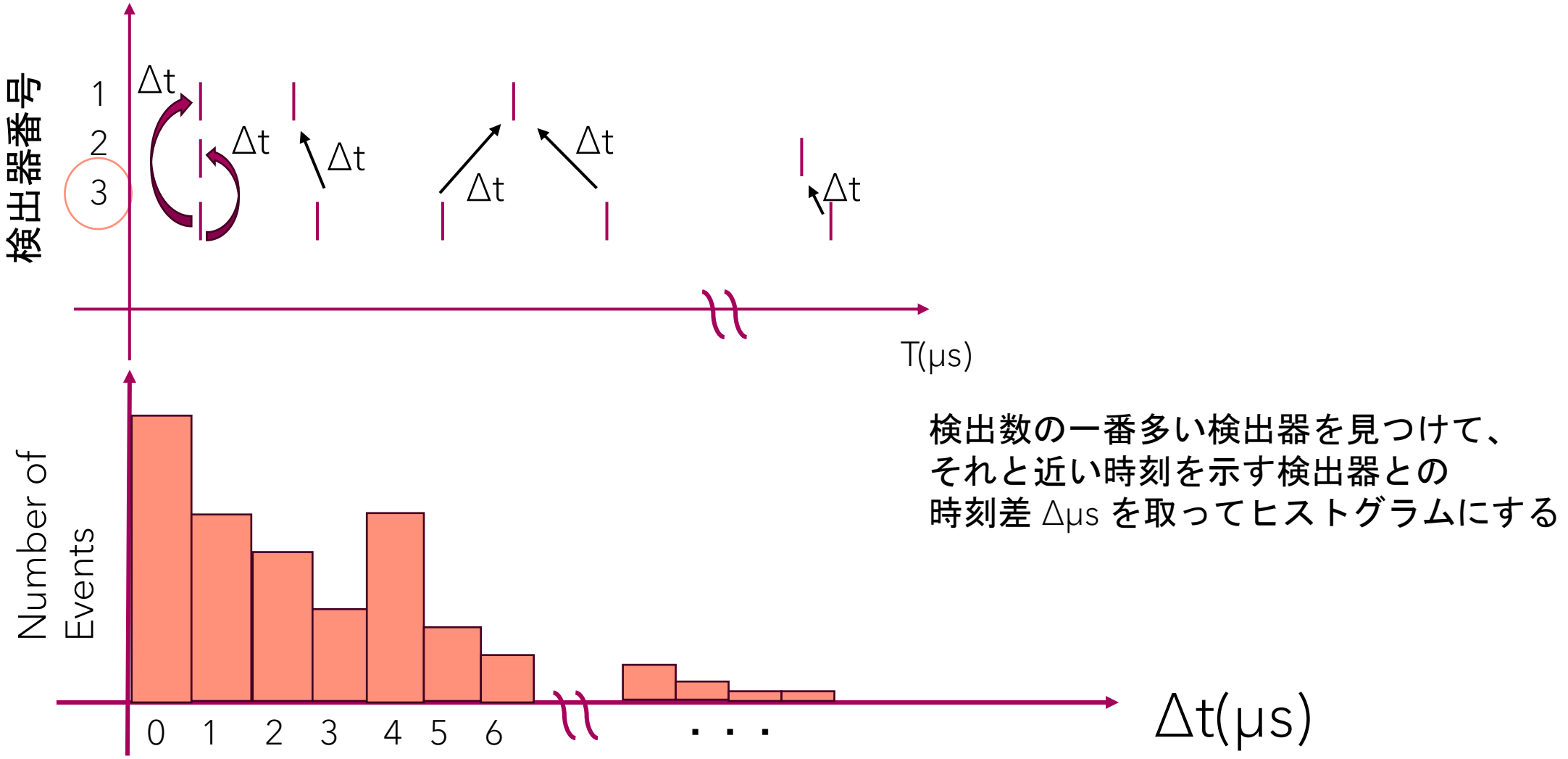
```
7002 64687
7002 65654
7002 66464
7002 67613
7002 69155
#T 00000006 260309 071539 40 339 0
#T 00000007 260309 071540 40 340 0
7002 1837
7002 1946
7002 2793
7002 4716
7002 8317
7002 9937
```

シグナルの時間間隔を求めるために

光速を考えると検出器間隔約100 mで、
同時検出になるものは単一の一次宇宙線から来た
空気シャワーなら1 μsに収まるはず



シグナルの時間間隔を求めるために



検出数の一番多い検出器を見つけて、
それと近い時刻を示す検出器との
時刻差 Δμs を取ってヒストグラムにする

例えば

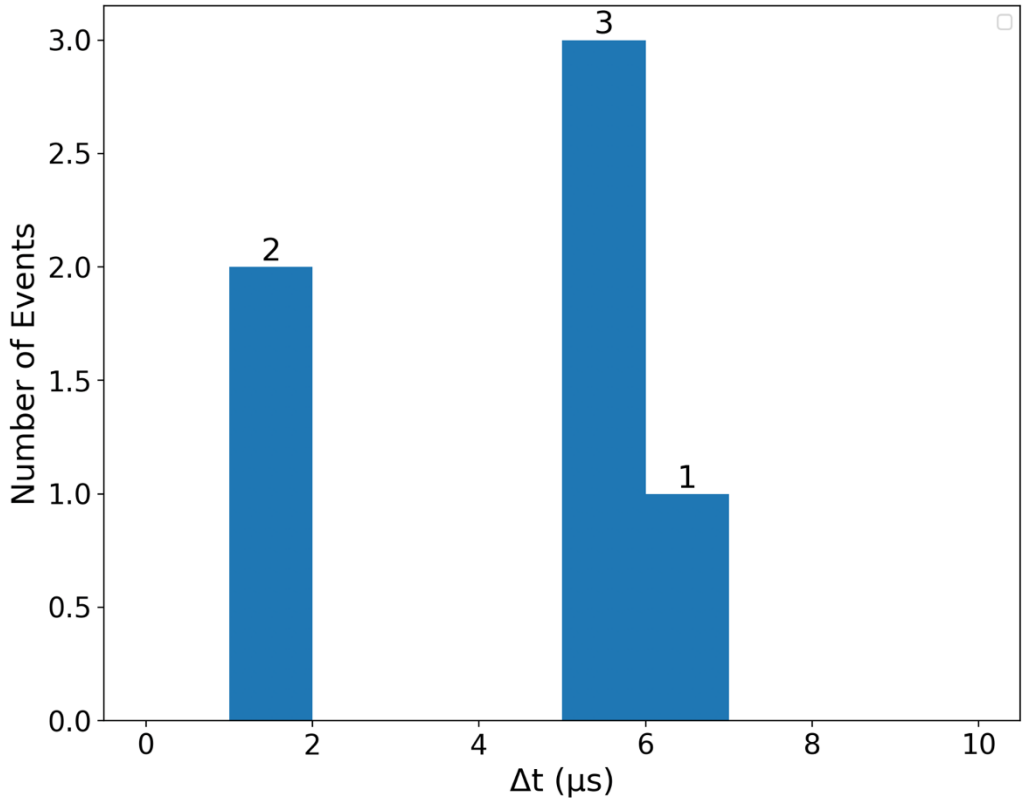
#T 00000188 260309 070000
7001 133715
7003 133721
7001 133722
7001 521143
7003 521148
7001 811840
7001 811844
7003 811845
7003 990411
7001 990416

例えば

#T 00000188 260309 070000
7001 133715
7003 133721
7001 133722
7001 521143
7003 521148
7001 811840
7001 811844
7003 811845
7003 990411
7001 990416

例えば

#T 00000188 260309 070000
7001 133715
7003 133721
7001 133722
7001 521143
7003 521148
7001 811840
7001 811844
7003 811845
7003 990411
7001 990416

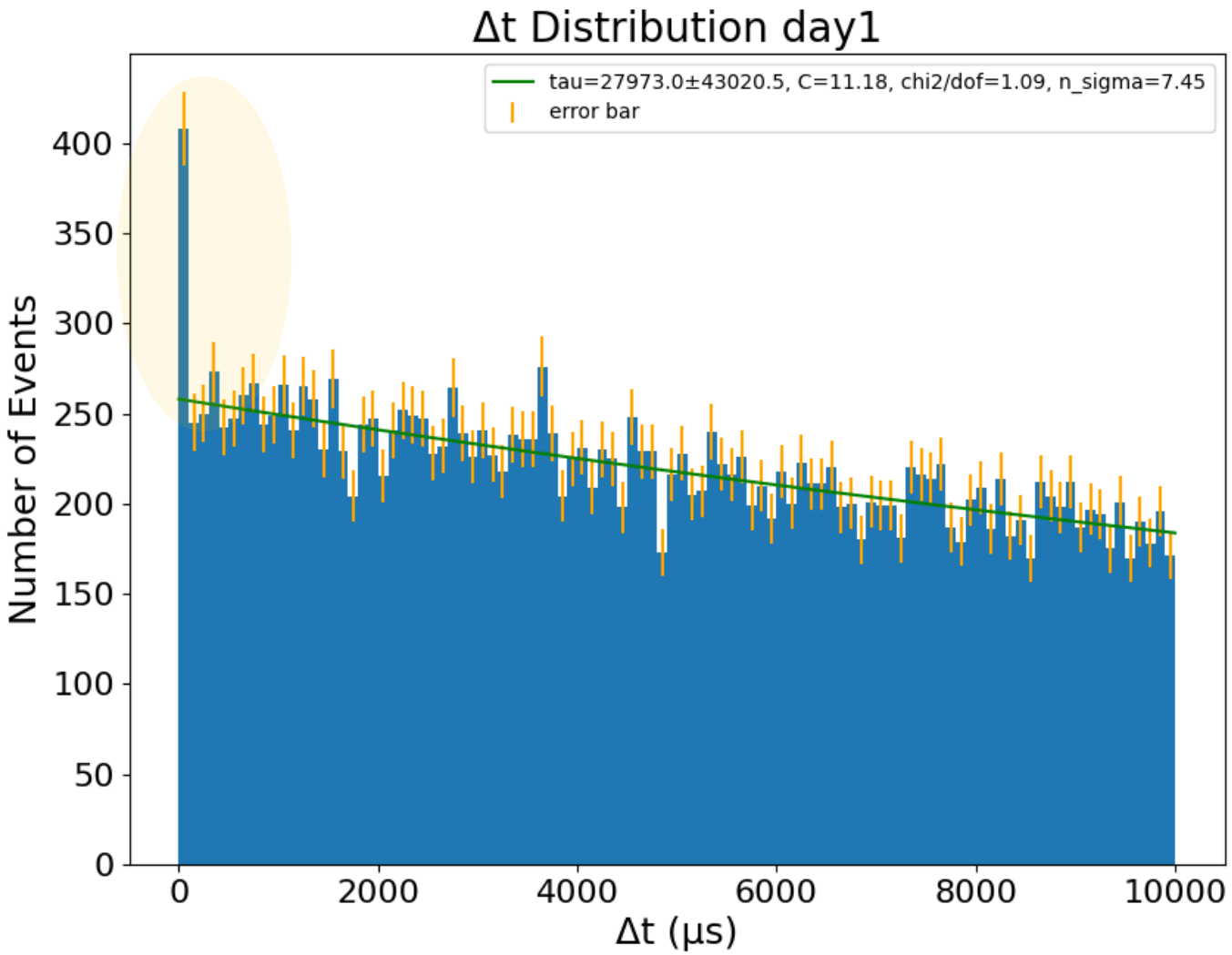


観測１日目の宇宙線



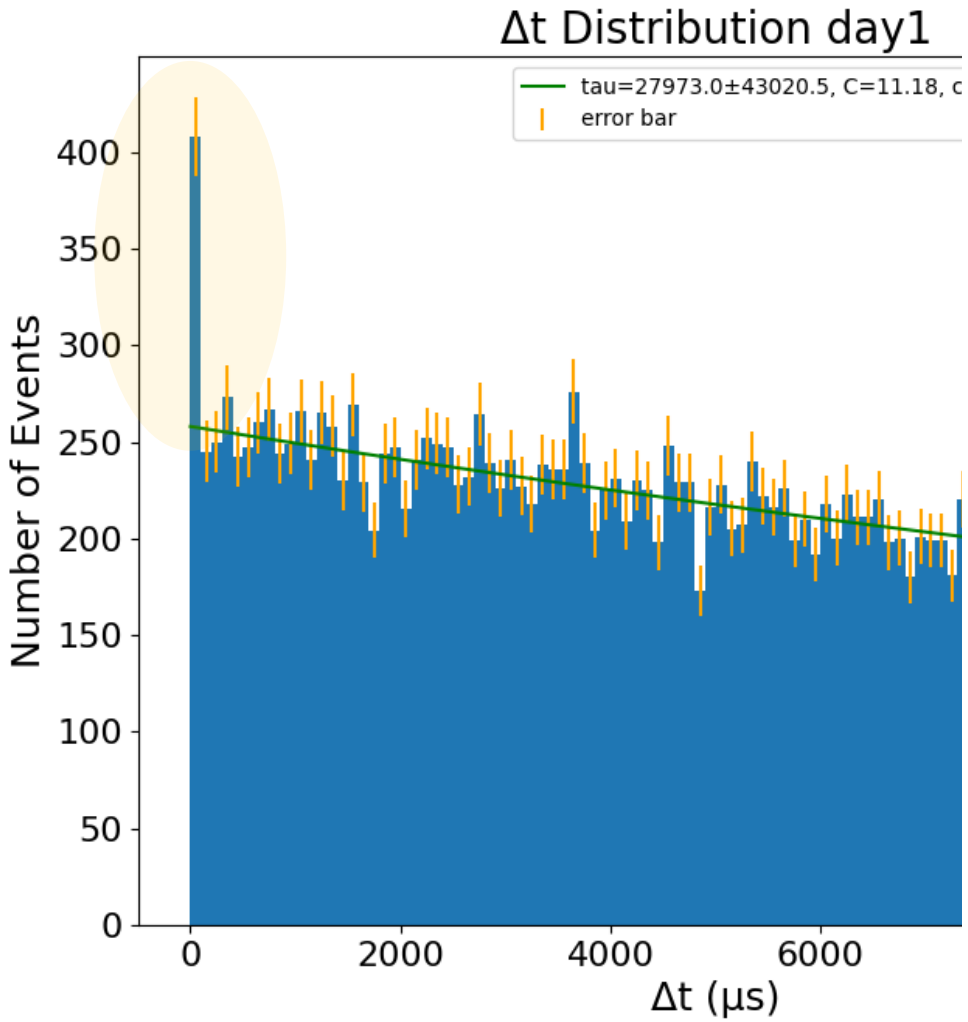
検出器：3台 (1台不良)
観測時間：0.8時間

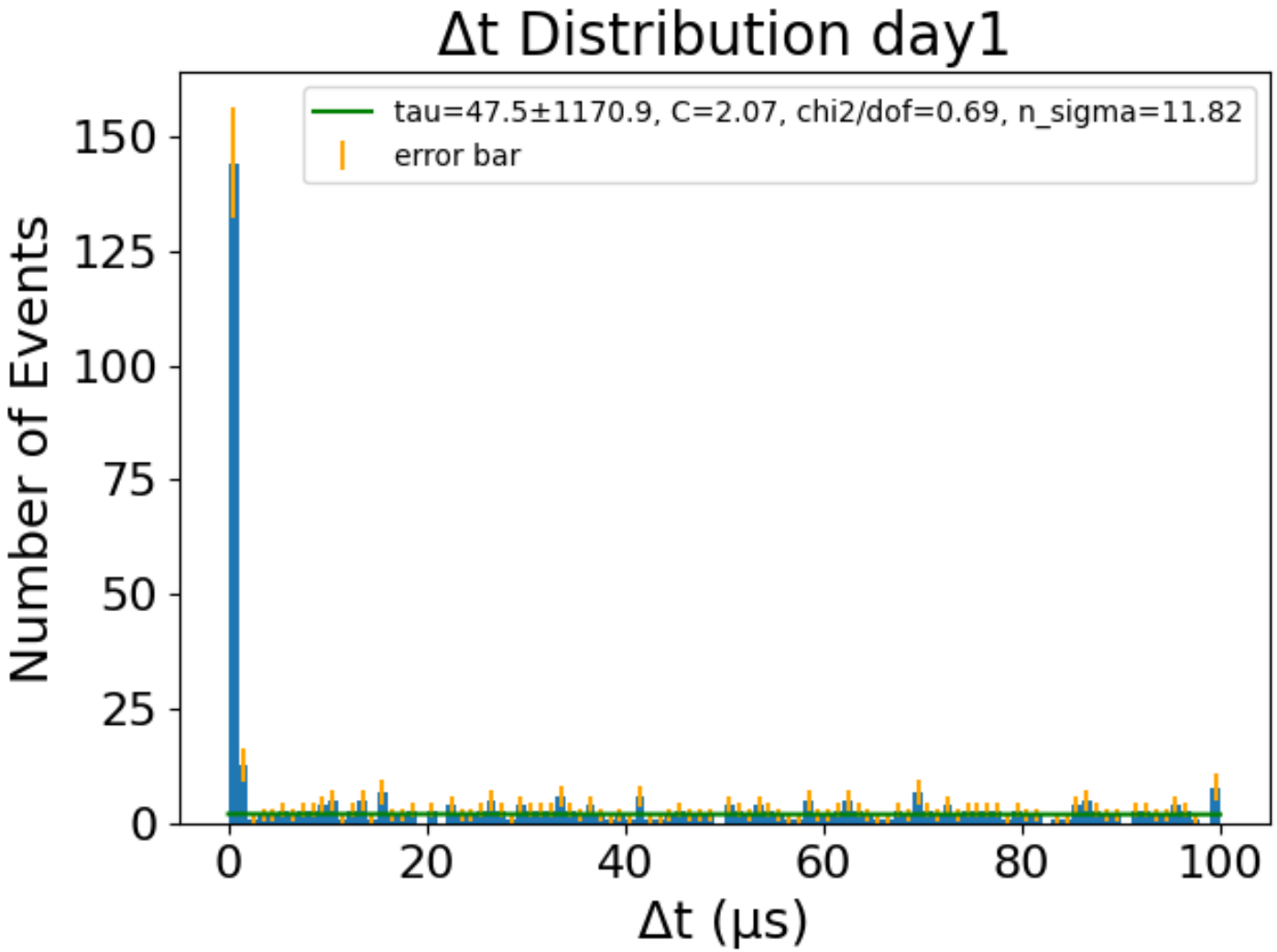
観測１日目の結果


Δt Distribution day1
tau=27973.0±43020.5, C=11.18, chi2/dof=1.09, n_sigma=7.45
error bar
Number of Events
0
50
100
150
200
250
300
350
400
0
2000
4000
6000
8000
10000
Δt (μs)

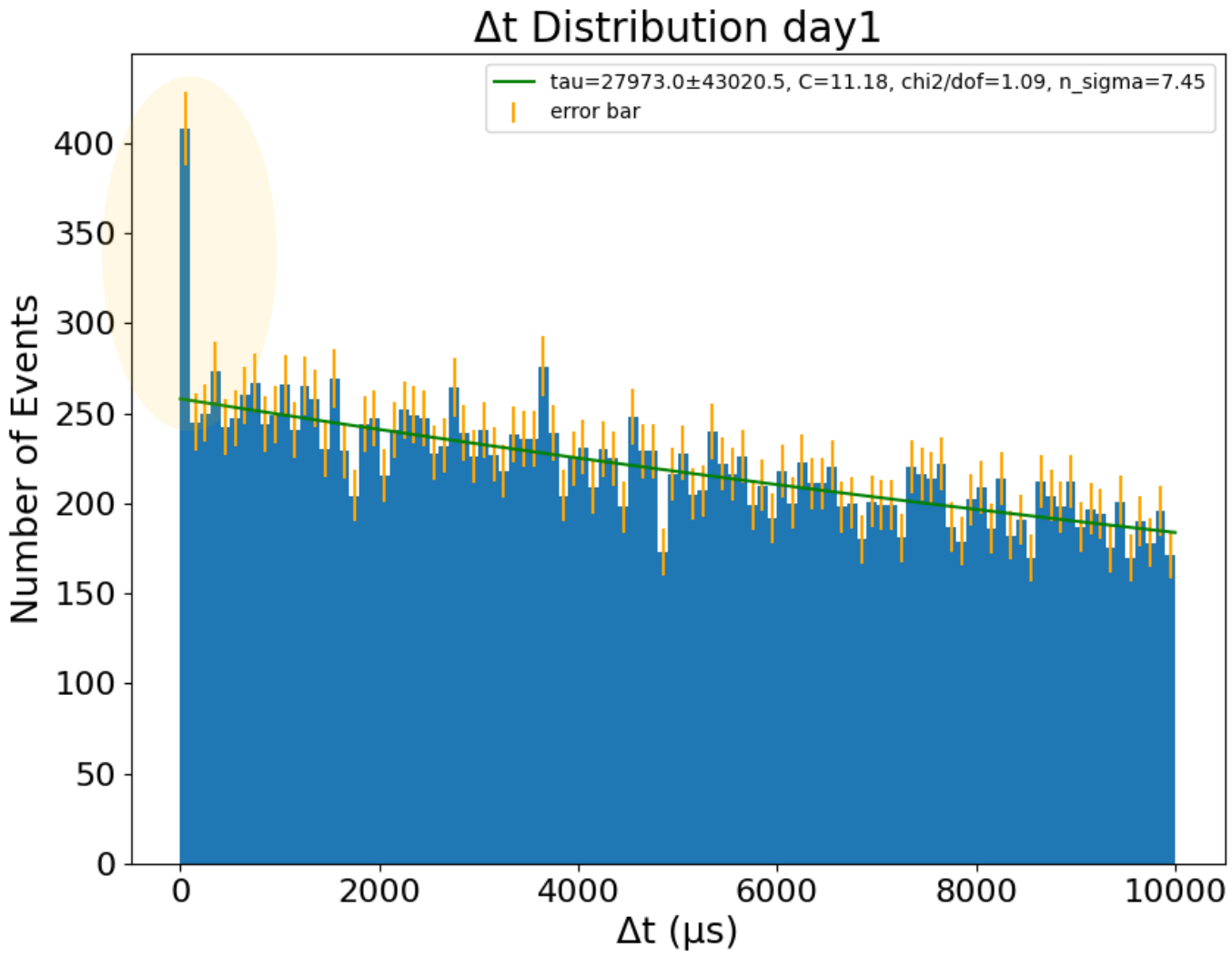
観測1日目の宇宙線

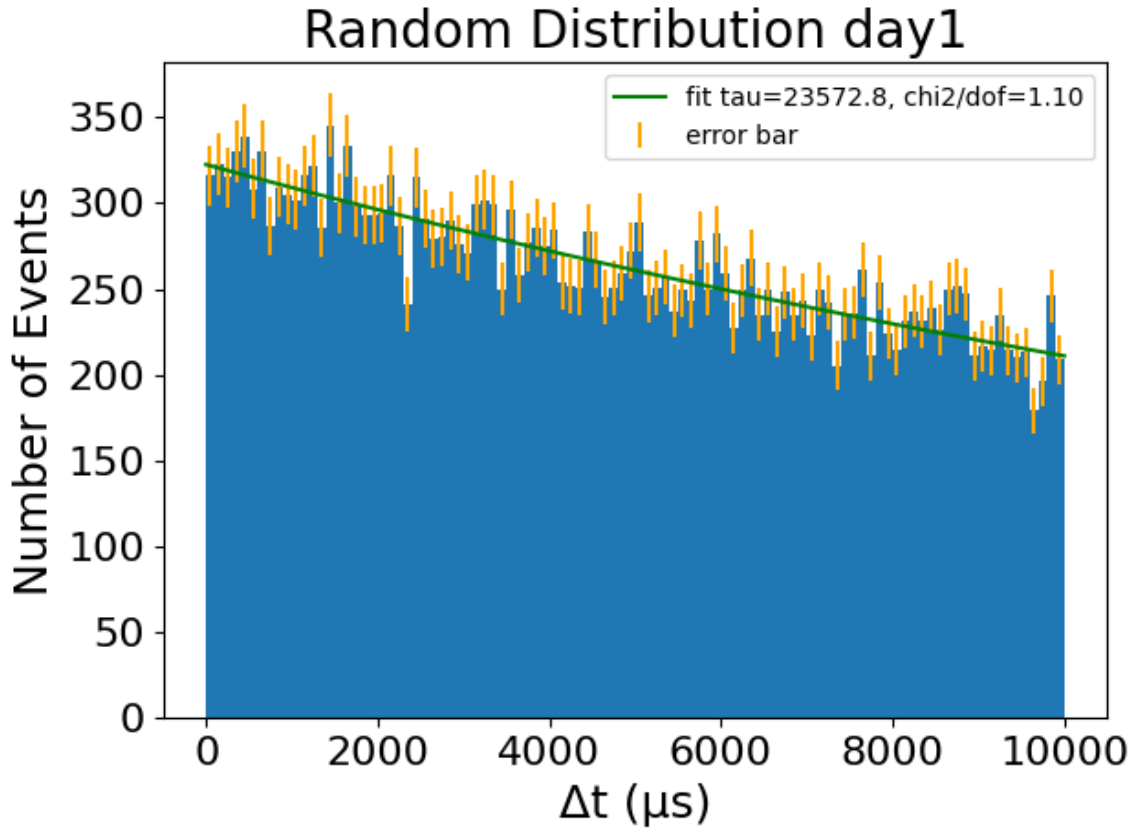
↓Δt　0~100μs



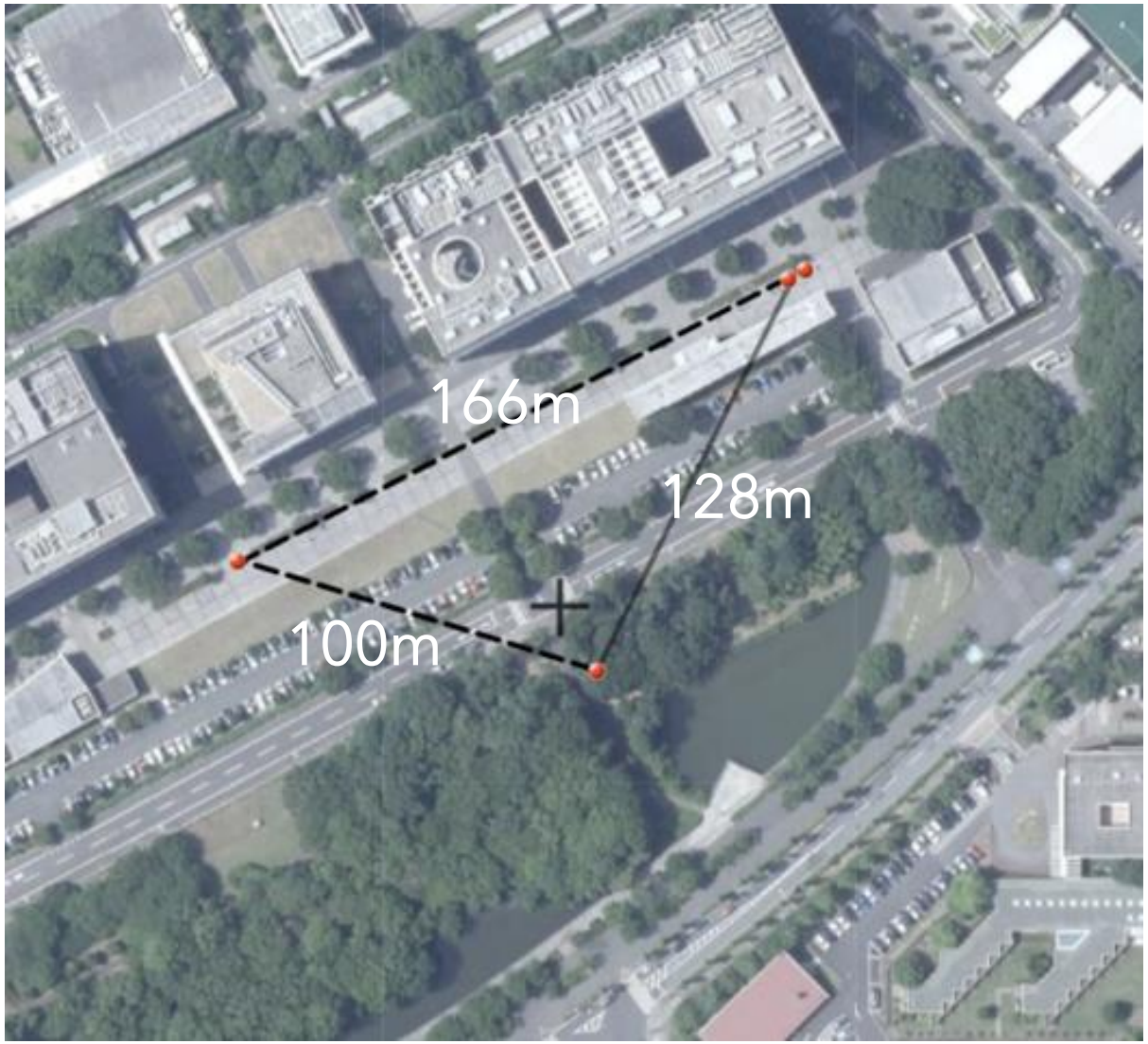


観測１日目の結果


Δt Distribution day1
tau=27973.0±43020.5, C=11.18, chi2/dof=1.09, n_sigma=7.45
error bar
Number of Events
Δt (μs)
0
50
100
150
200
250
300
350
400
0
2000
4000
6000
8000
10000


Random Distribution day1
fit tau=23572.8, chi2/dof=1.10
error bar
Number of Events
Δt (μs)
0
50
100
150
200
250
300
350
0
2000
4000
6000
8000
10000

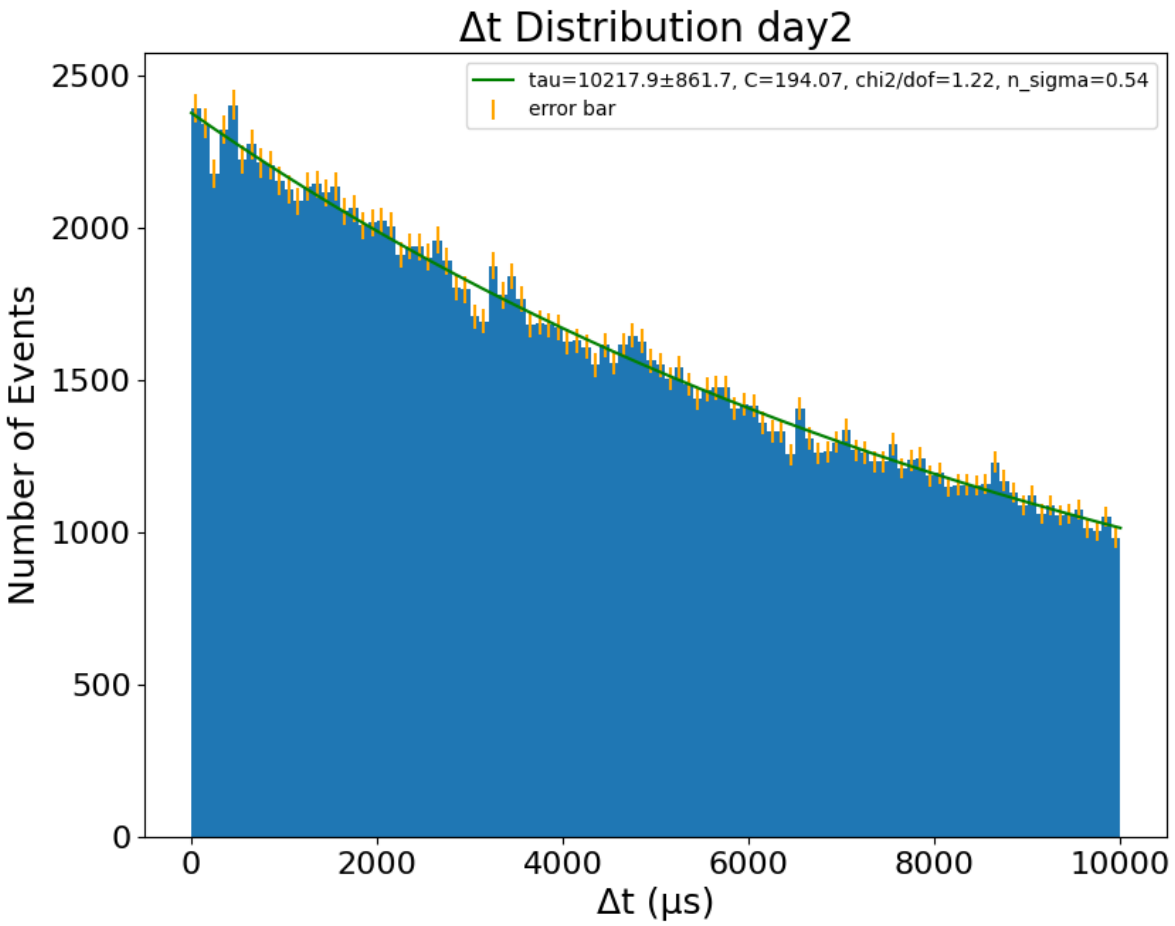
観測２日目の宇宙線

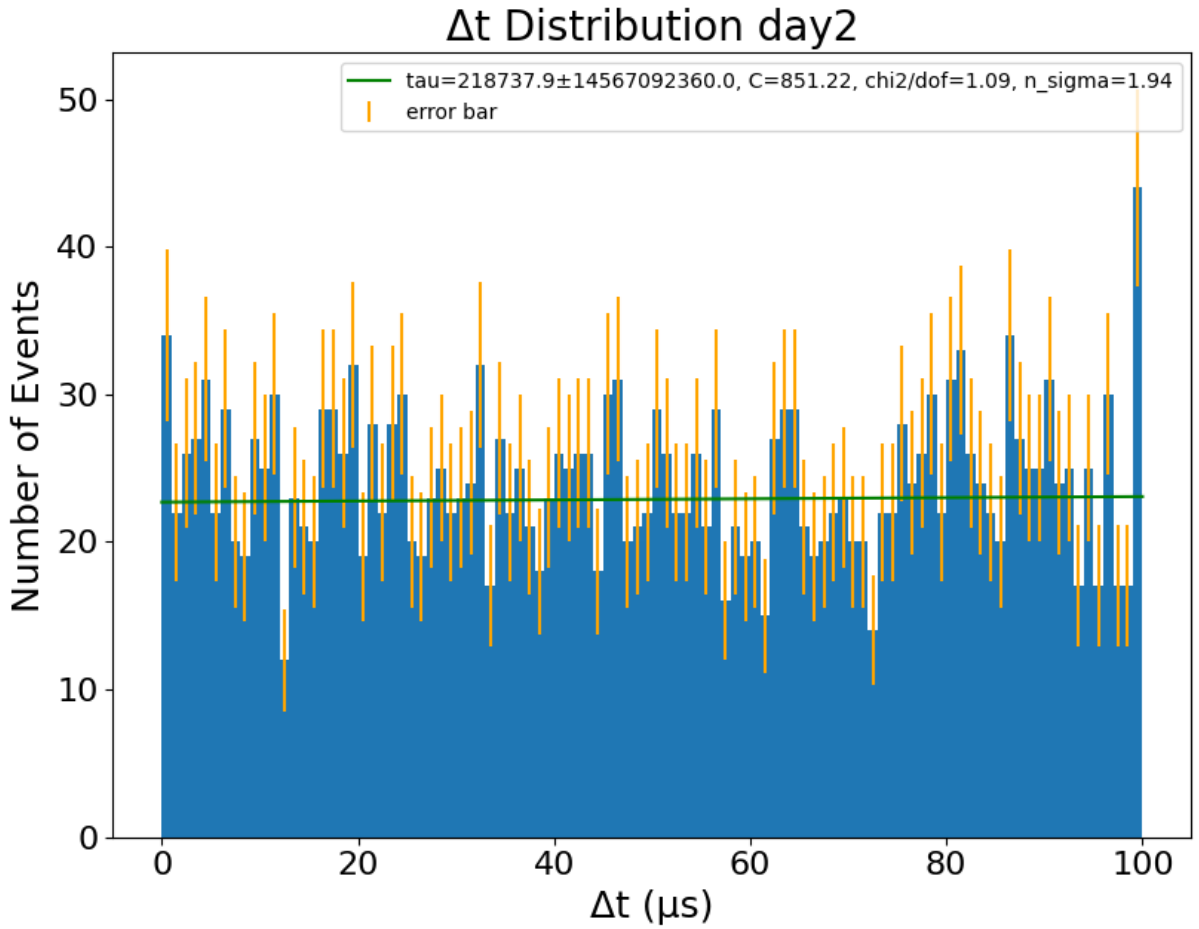


検出器：3台
観測時間：2.6時間

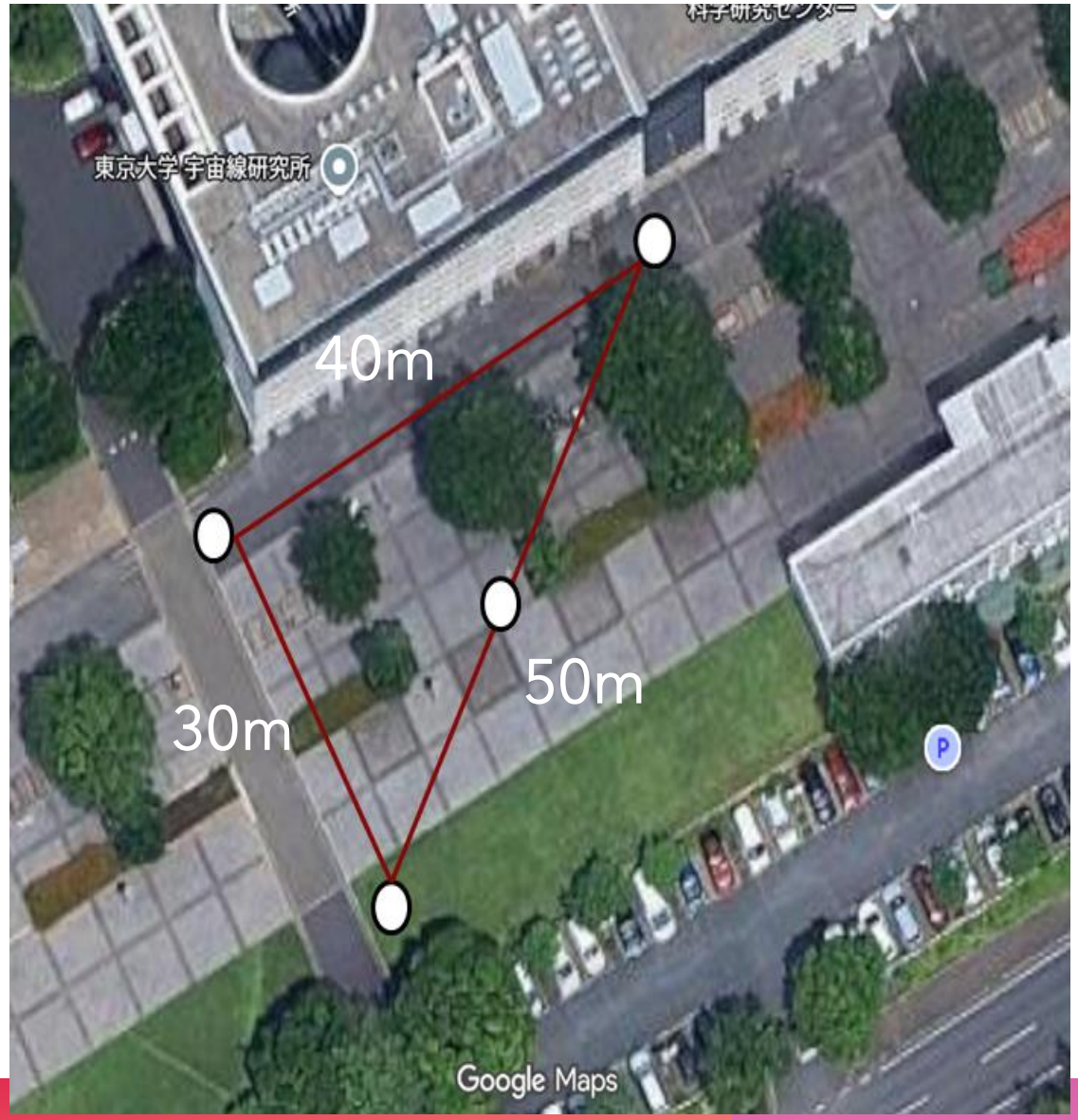
観測２日目の宇宙線

↓Δt　0~100μs





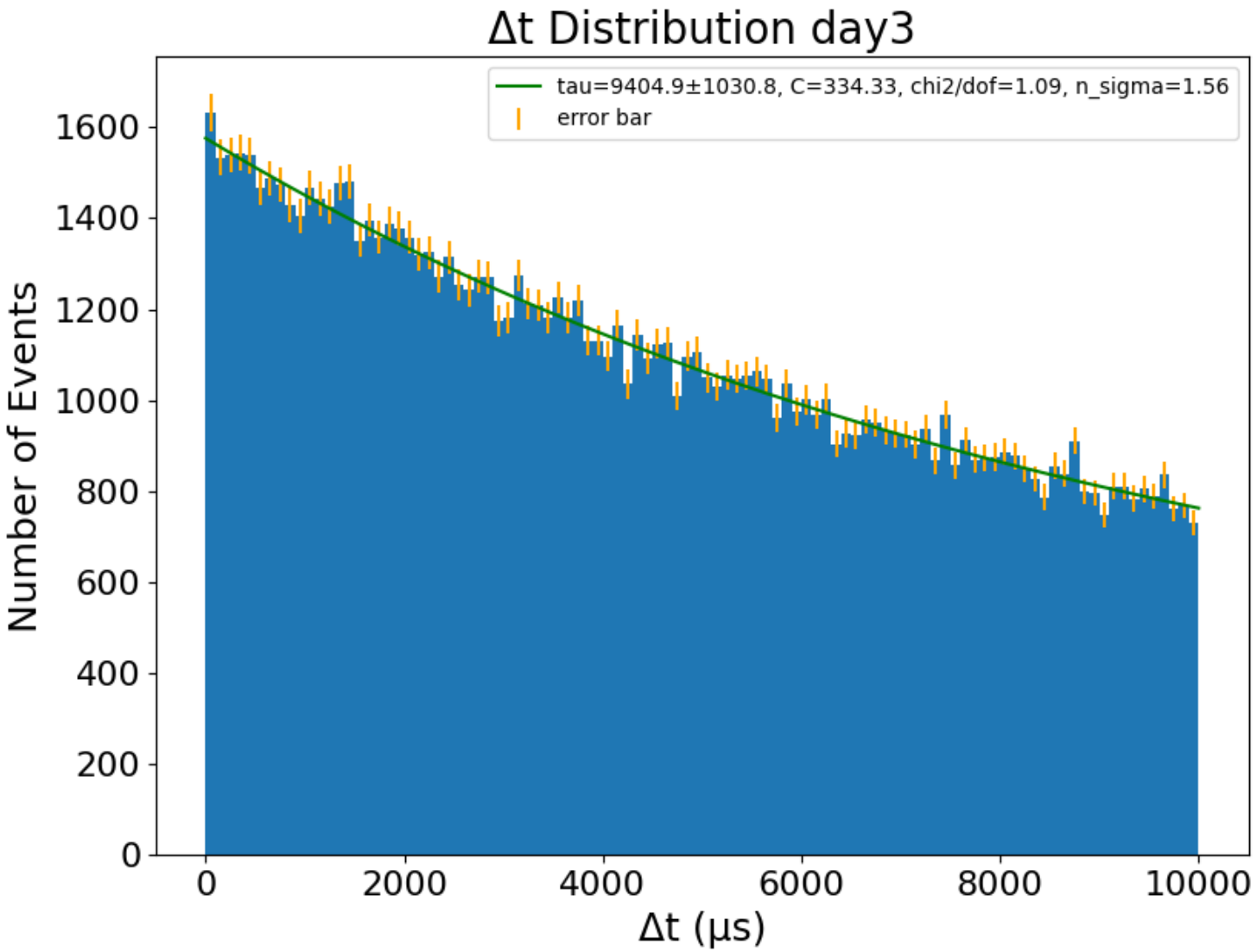
観測３日目の宇宙線



検出器：3台
観測時間：2.1時間

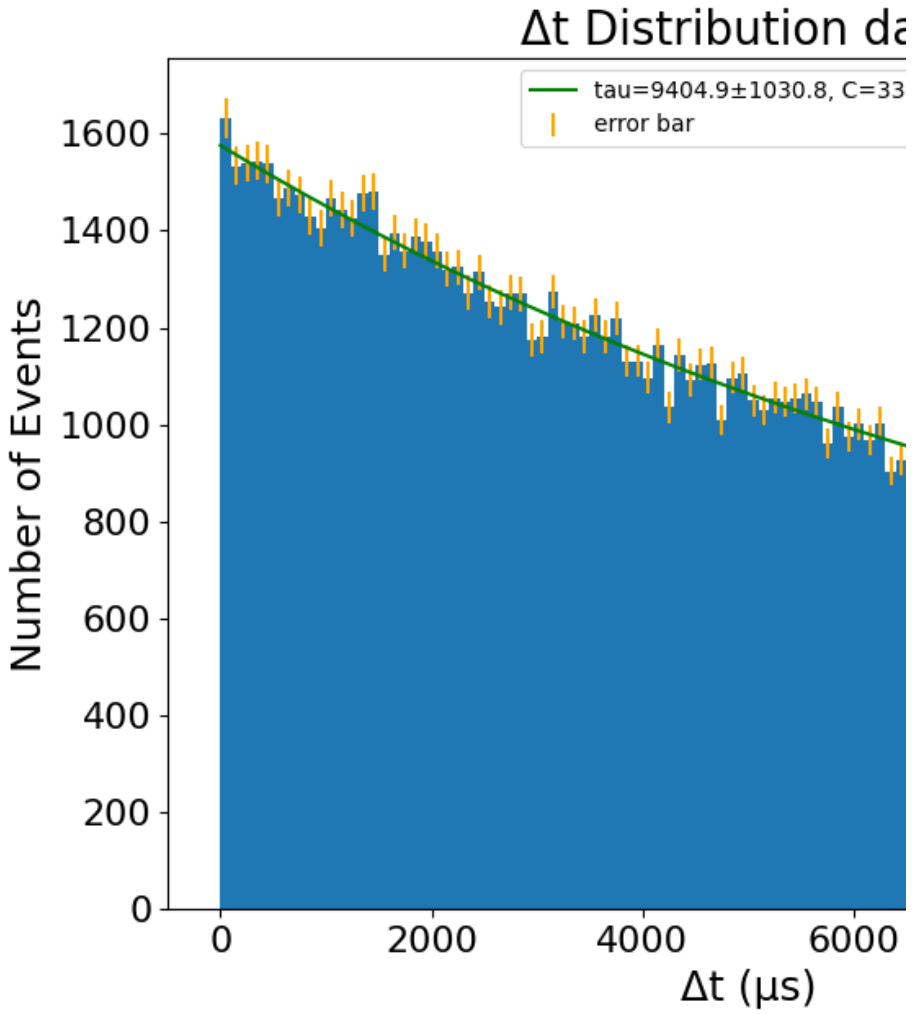


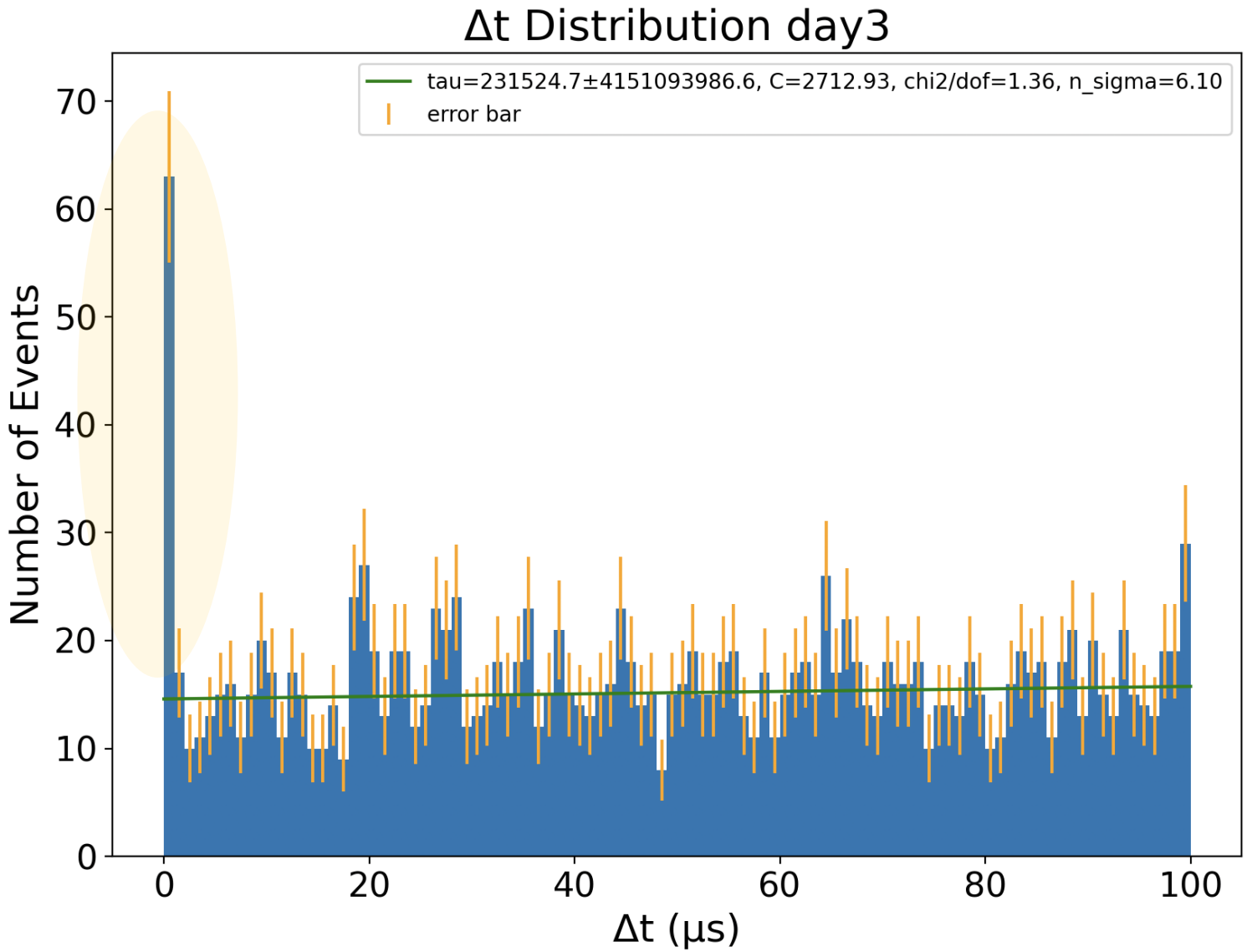
観測３日目の宇宙線


Δt Distribution day3
tau=9404.9±1030.8, C=334.33, chi2/dof=1.09, n_sigma=1.56
error bar
Number of Events
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
0
2000
4000
6000
8000
10000
Δt (μs)

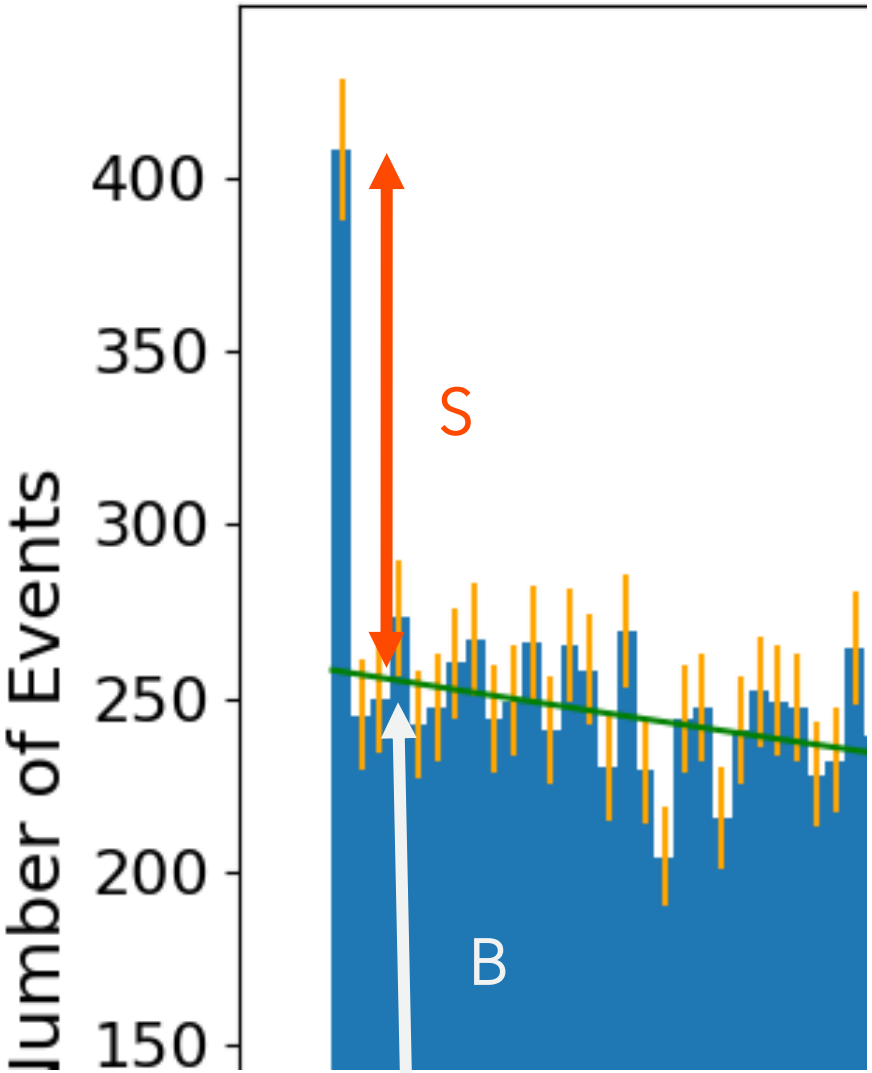
観測３日目の宇宙線

↓Δt　0~100μs

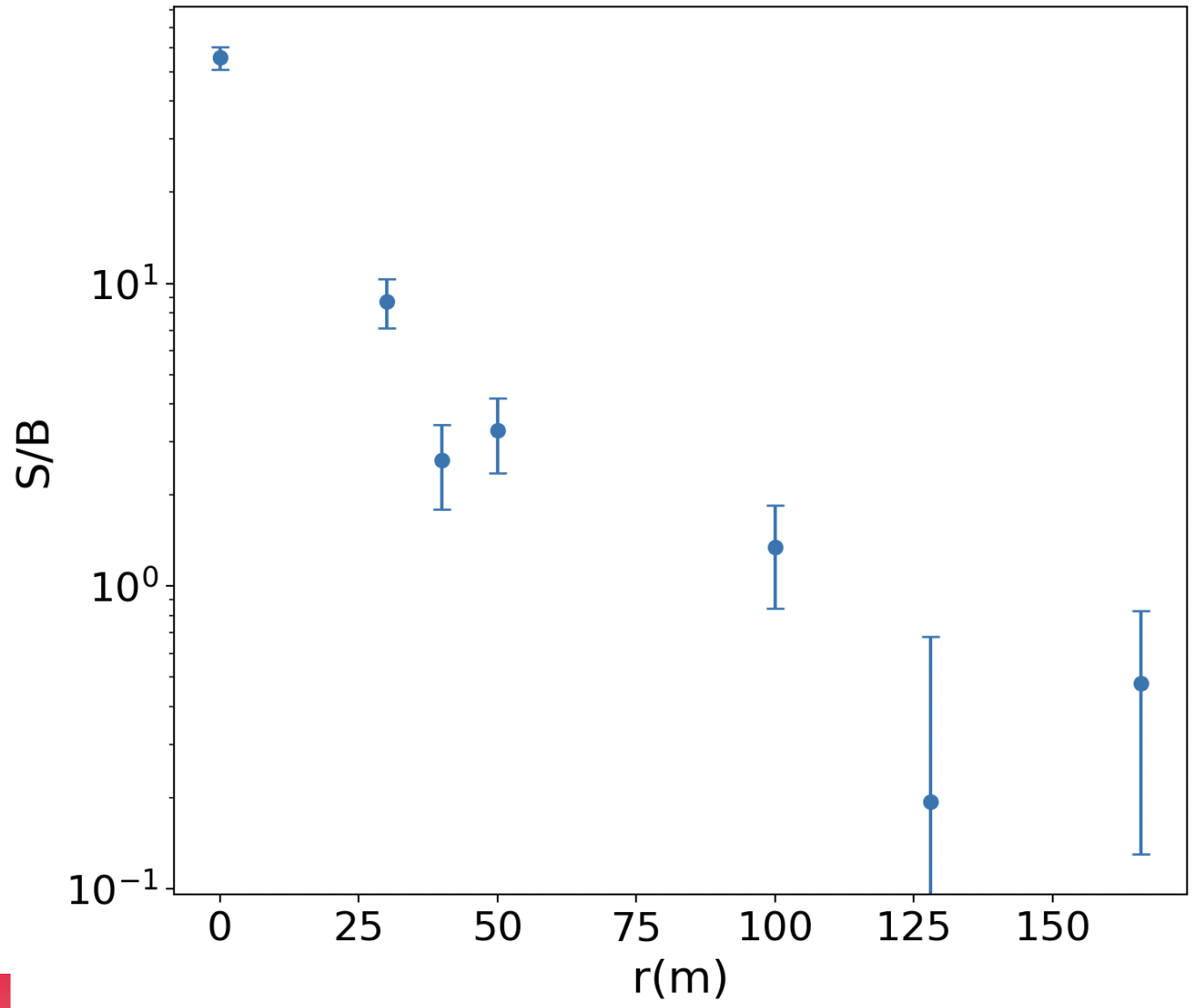




検出器間の距離とシグナル



検出器間の距離とシグナル



検出器の間隔が広がると
低エネルギーのシャワーを
検出できない確率が高くなる

検出器間の距離rが
大きくなると、S/Bが低下

→シグナルは
空気シャワーである

結論

スターリンクを使って同一の一次宇宙線からの

空気シャワーを測定することができた。

世界初！

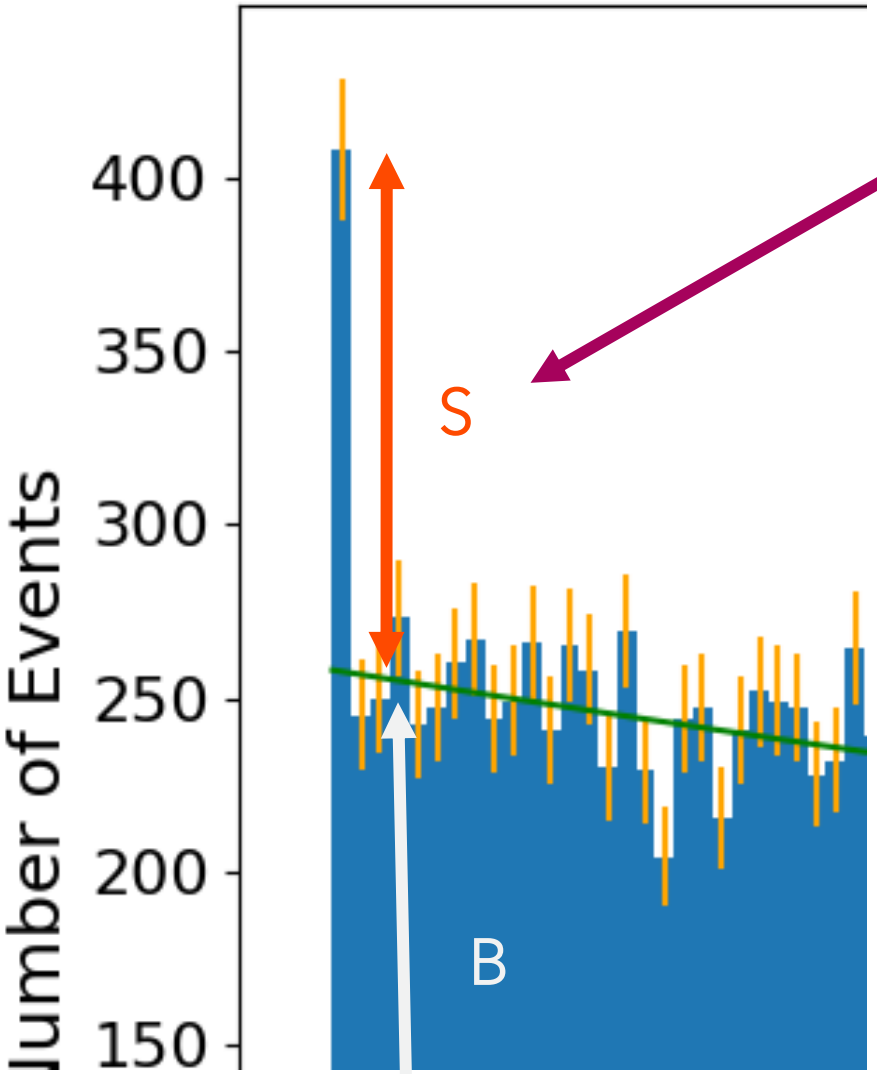
スターリンクの性能評価

ここまで：スターリンクを使って同一の一次宇宙線からの空気シャワーが検出できることがわかった

でも、どのくらいしっかり宇宙線を検出できている？

検出されるシャワーの数の理論値と比較することで
スターリンクの性能評価を試みる

検出器間の距離とシグナル



このSで評価する

検出されるシャワー数の理論的な求め方

・到来する一次宇宙線の粒子数S

$$S = T\Omega \int_0^\infty \mathrm{A}(E) F(E)\, dE$$

T /s：時間，　Ω / sr：立体角，　A / m^2: 面積，　$F/\mathrm{s}^{-1}\mathrm{sr}^{-1}\mathrm{m}^{-2}\mathrm{eV}^{-1}$: フラックス

F の推定

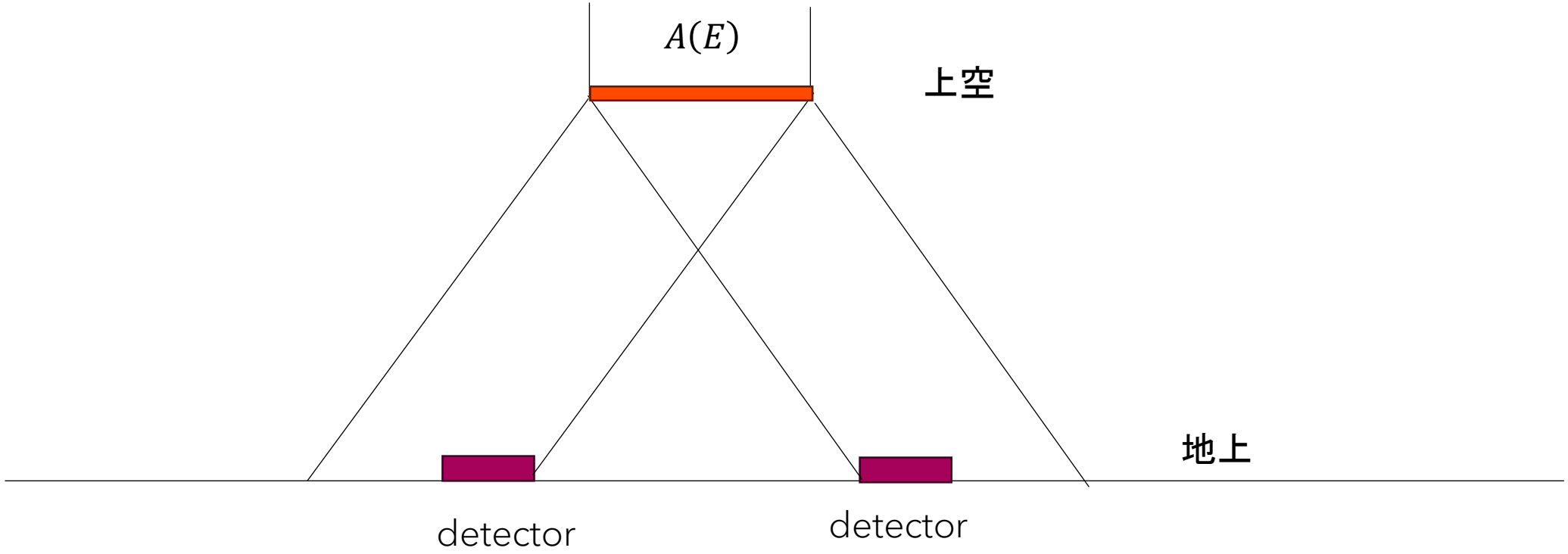
- エネルギーEの宇宙線の到来頻度は

$$F(E) = F_0 \times \left(\frac{E}{E_0}\right)^{-3}$$

  で表されることが、知られている。

- 到来頻度とは、単位面積、単位時間、単位立体角、単位エネルギー当たりに何個粒子数がやってくるか

$A(E)$の求め方(真上)

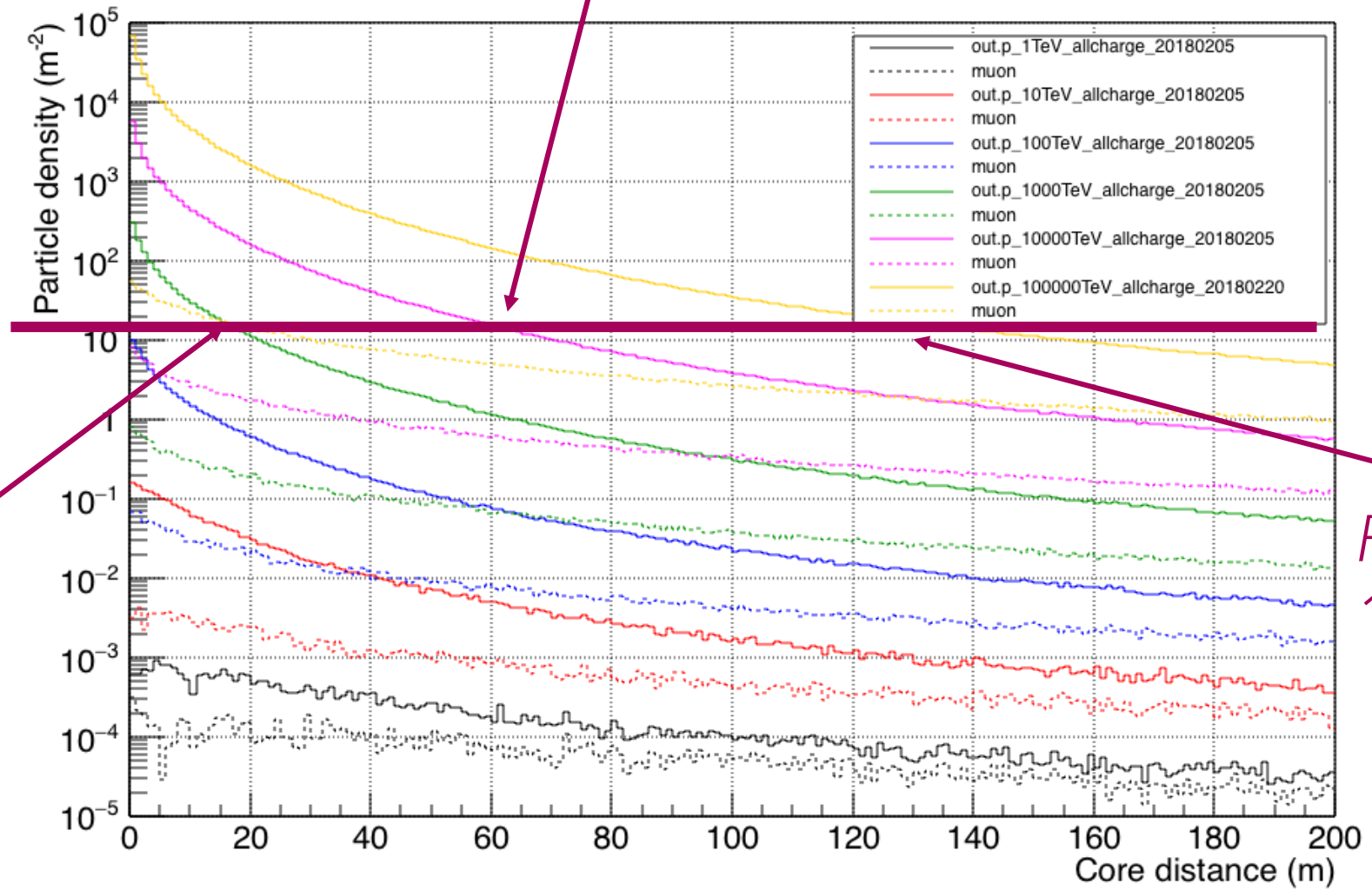


Aの推定

$$S = T\Omega \int_0^\infty \mathrm{A}(E)F(E)\,dE$$

R=60 m 10 PeV

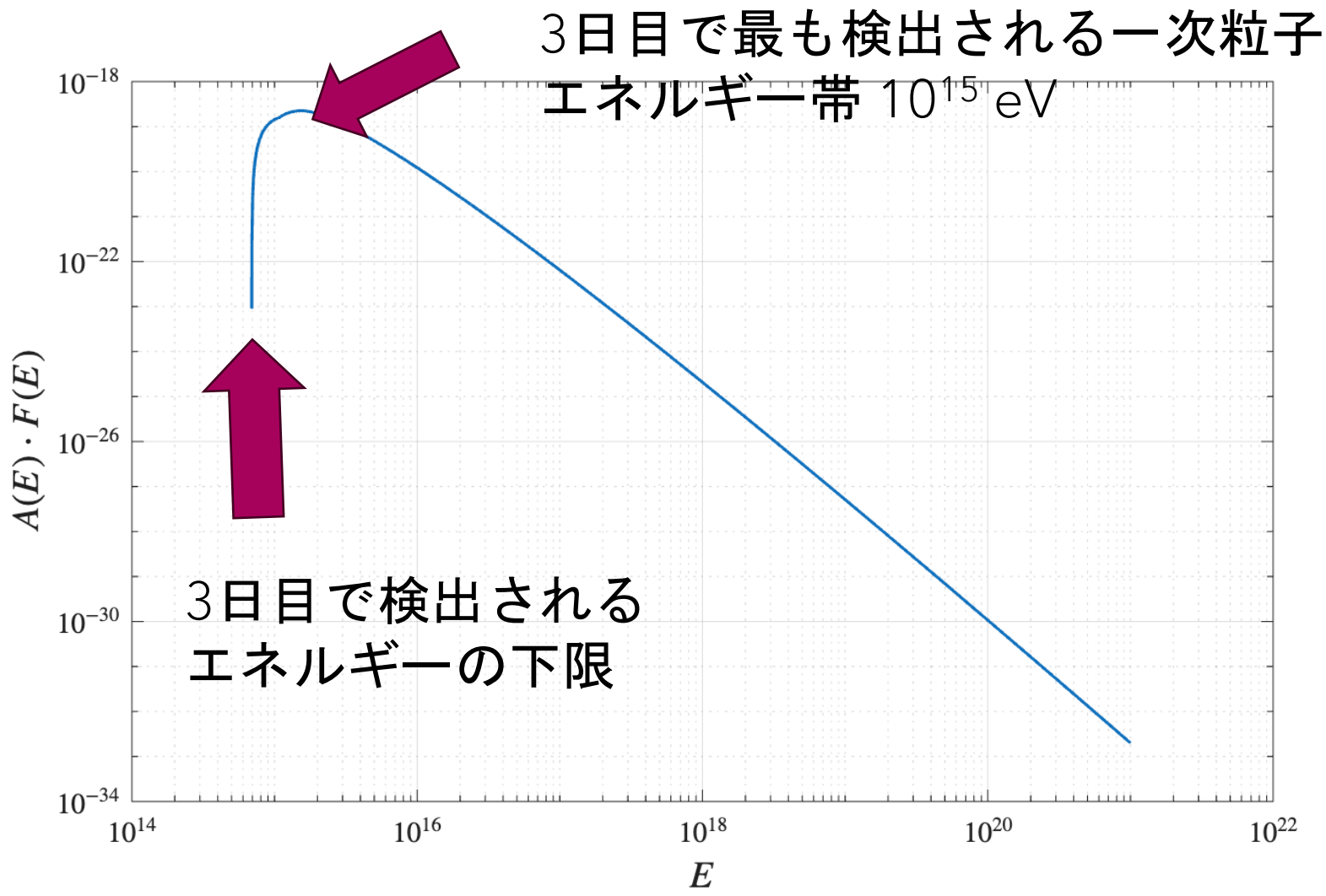
12個/m^2



R=15 m
1 PeV

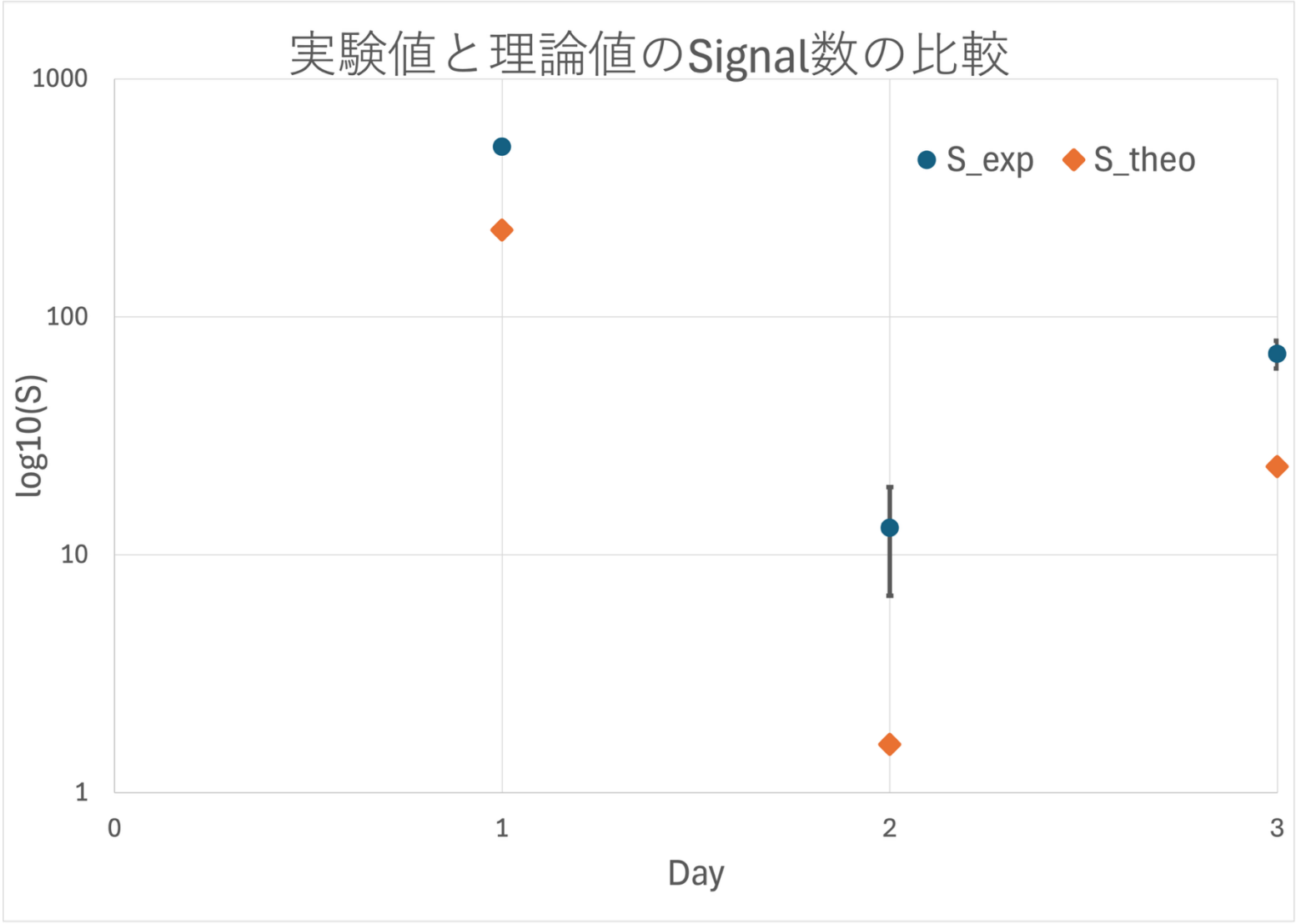
R=130 m
100 PeV

3日目の配置での$A(E)$ $F(E)$



計算VS実験

・計算値と実験値はオーダーで一致



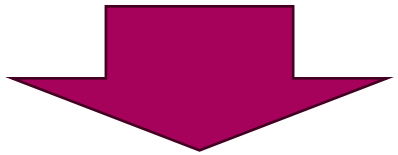
考察・結論

計算値と実験値のオーダーでの一致

→ Starlink 通信を用いて得たシャワーの数は妥当

まとめ

- 世界で初めてスターリンクを用いて宇宙線空気シャワーが検出ができた。
- 検出したシャワーの数は推定値と同じオーダーであった。



スターリンク通信は本実験規模で有用
今後の大規模な実験での有用性の検証が待たれる

追加考察

・理論値は実験値よりも小さかった

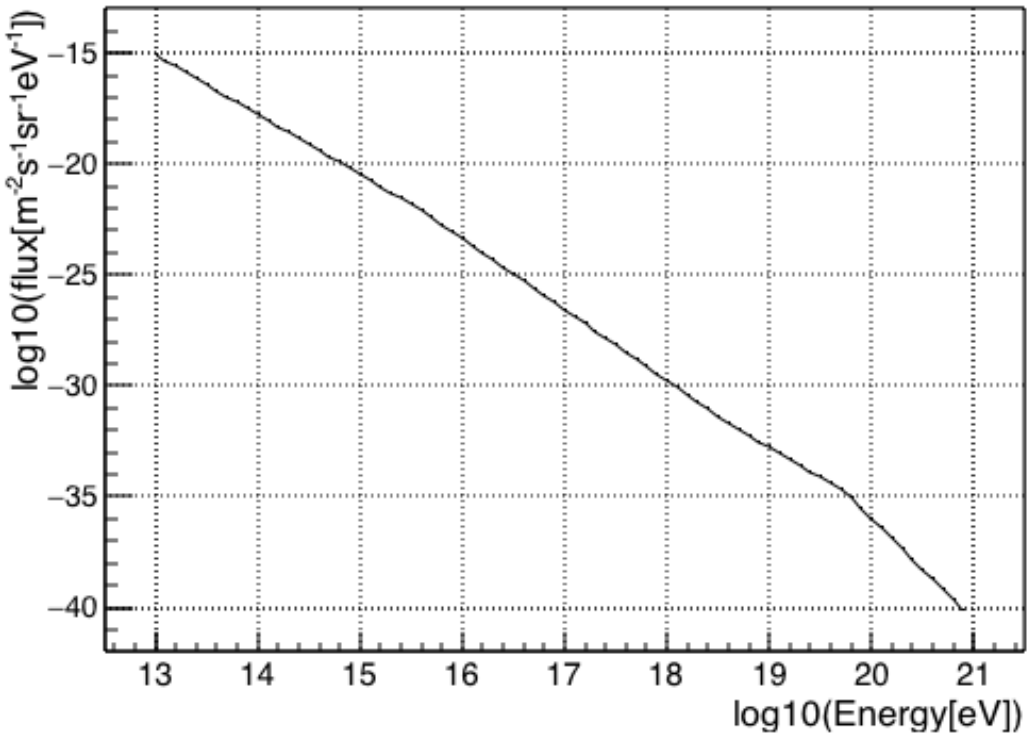
実験：トリガのかかる粒子数密度が 12 より小さかった可能性

計算：S を過小評価していた可能性 i.e. 斜め入射を考えていない

$$\rho(R,\theta,E) = \rho_0 \times \left(\frac{E/eV}{2.17\times10^{17}}\right)^{\alpha} \times \left(\frac{R}{R_M}\right)^{-1.2} \cdot \left(1+\frac{r/m}{91.6}\right)^{-(\eta-1.2)} \cdot \left[1+\left(\frac{r/m}{1000}\right)^2\right]^{-0.6}$$

$$\eta(\theta) = \beta - \gamma(\sec\theta - 1)$$

補足：宇宙線の微分頻度F_0

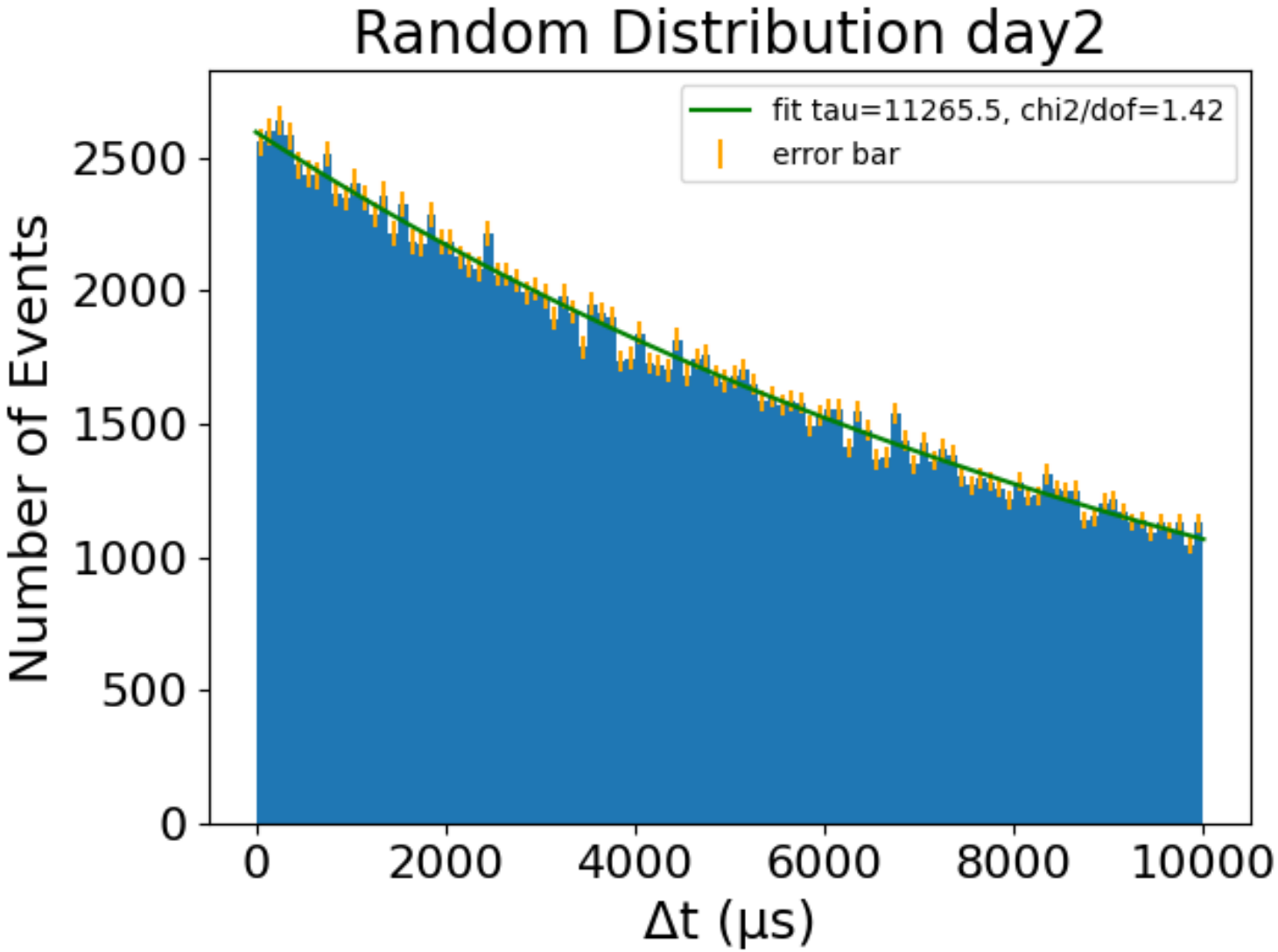


出 典

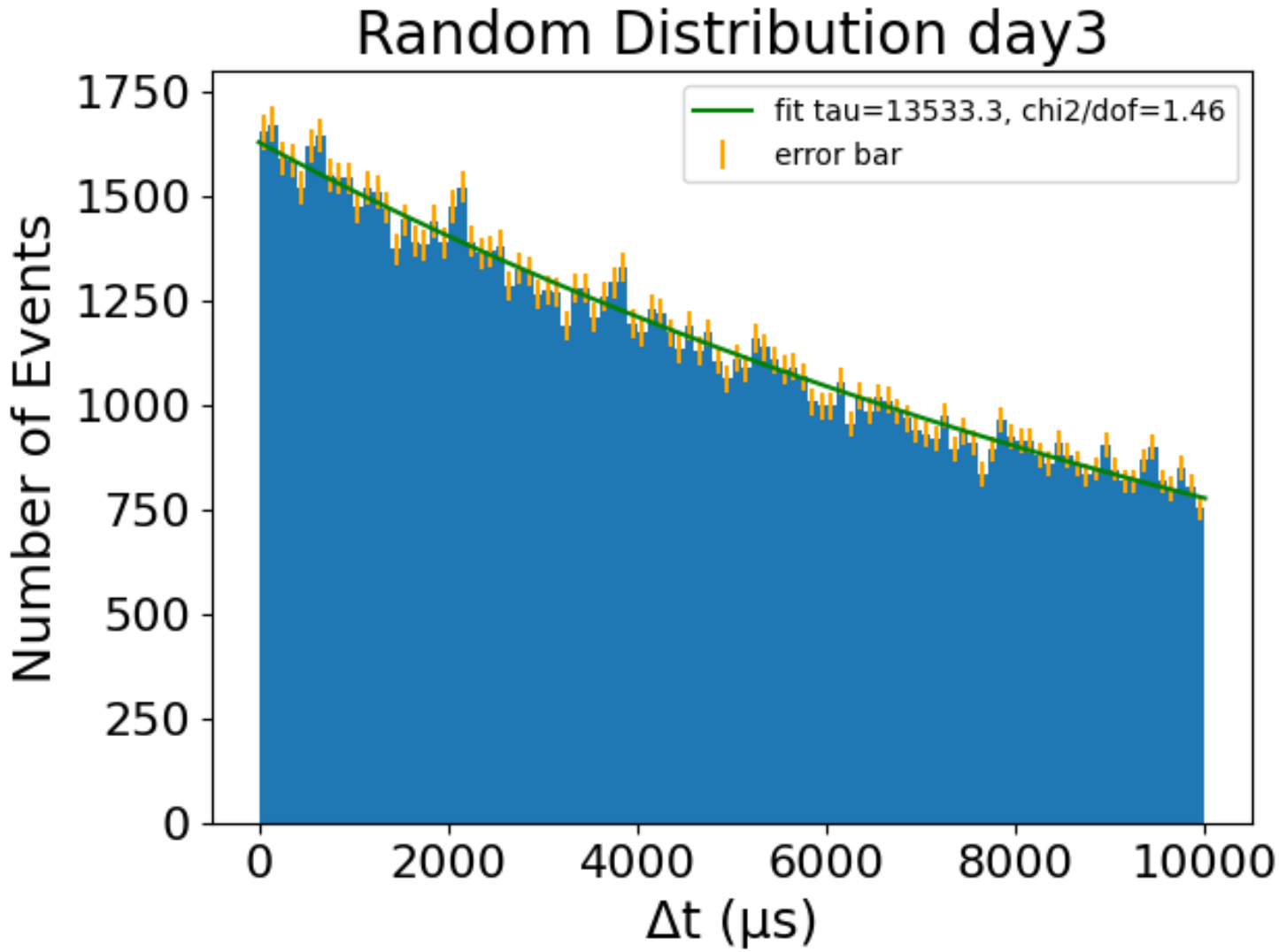
スターリンクについて(P7~P8)：
https://www.ntt.com/business/lp/starlink.html
https://biz.kddi.com/content/column/smartwork/what-is-starlink/

バックアップスライド→

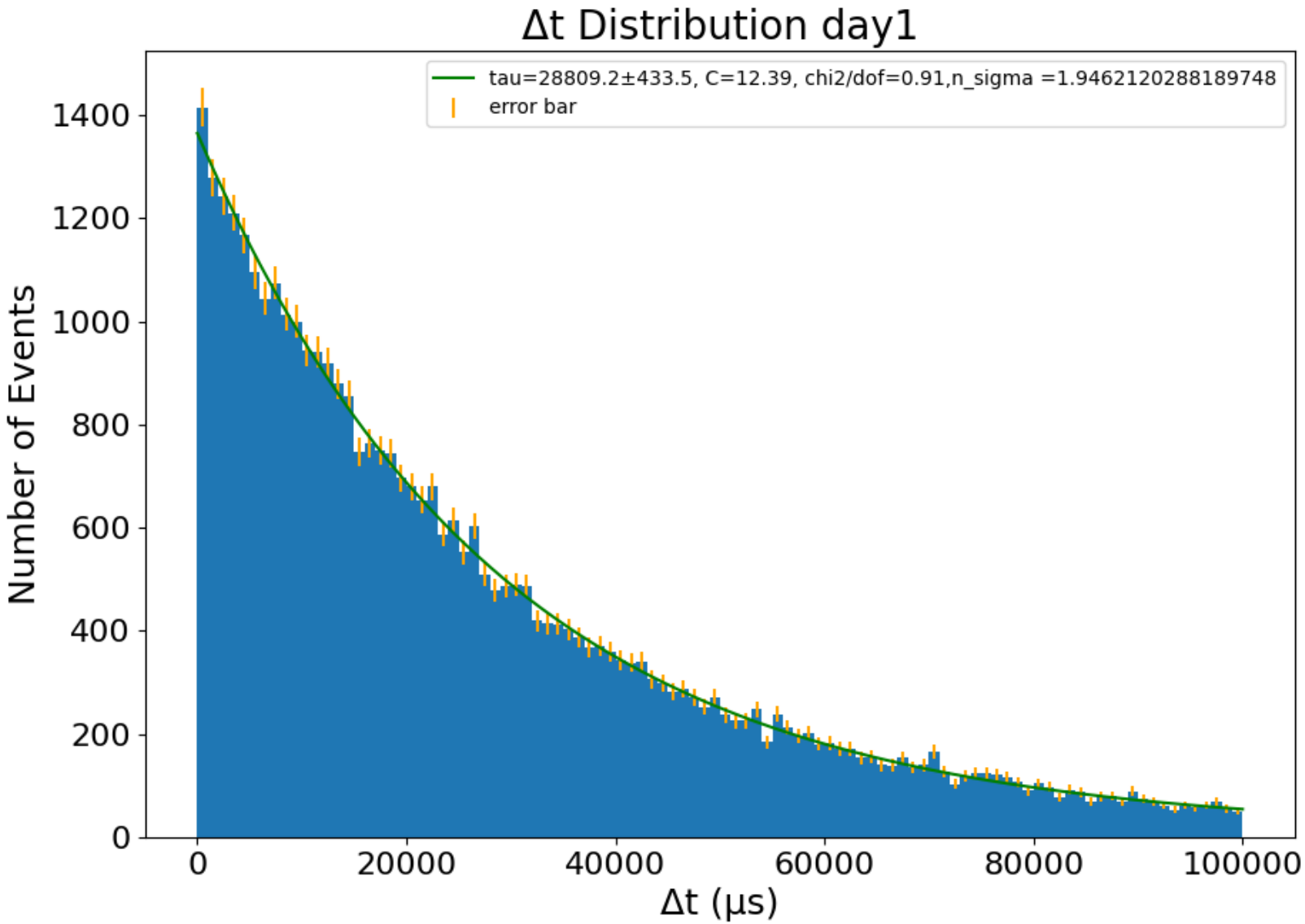
RANDOM DAY2

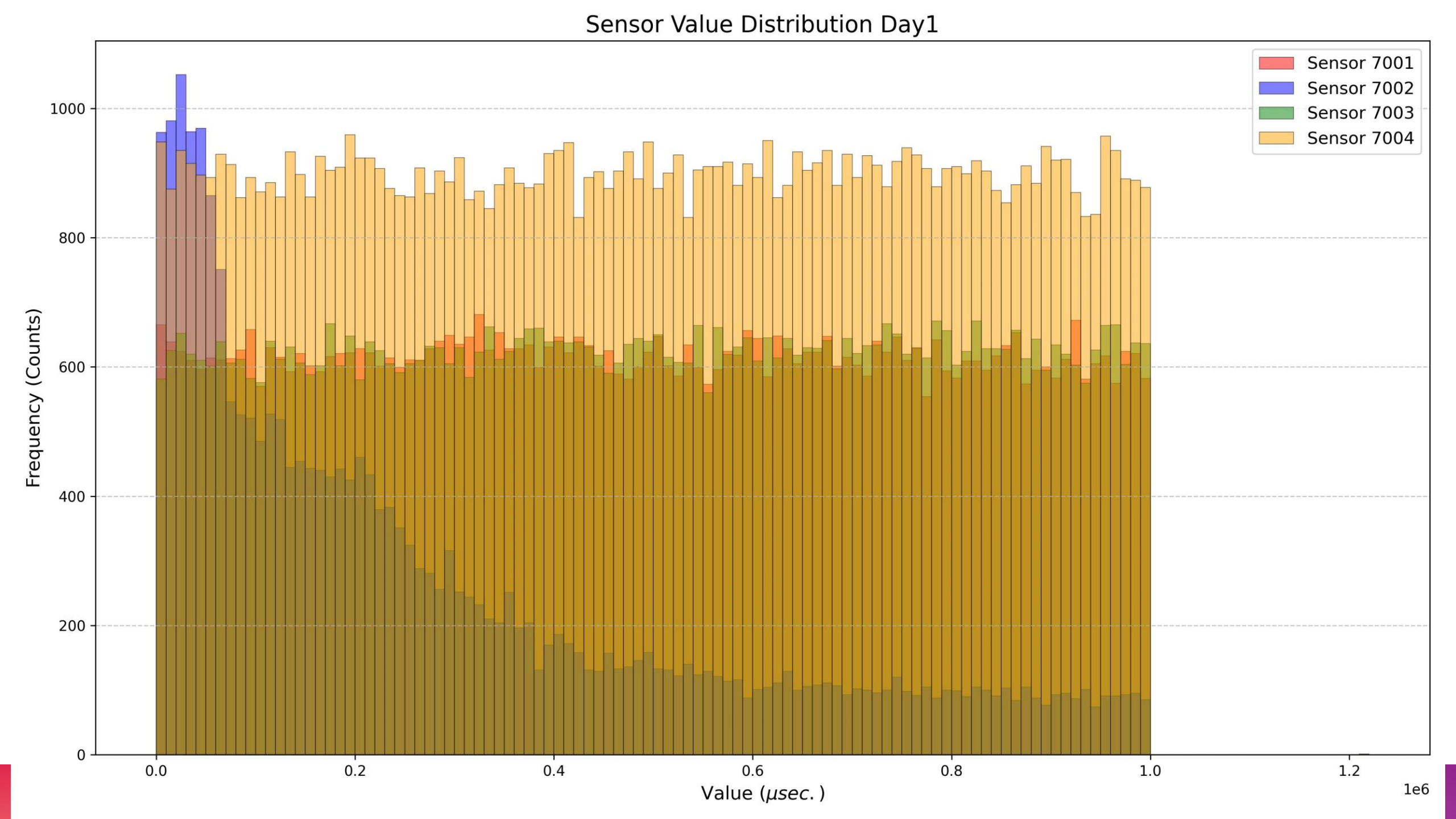

Random Distribution day2
fit tau=11265.5, chi2/dof=1.42
error bar
Number of Events
0
500
1000
1500
2000
2500
0
2000
4000
6000
8000
10000
Δt (μs)

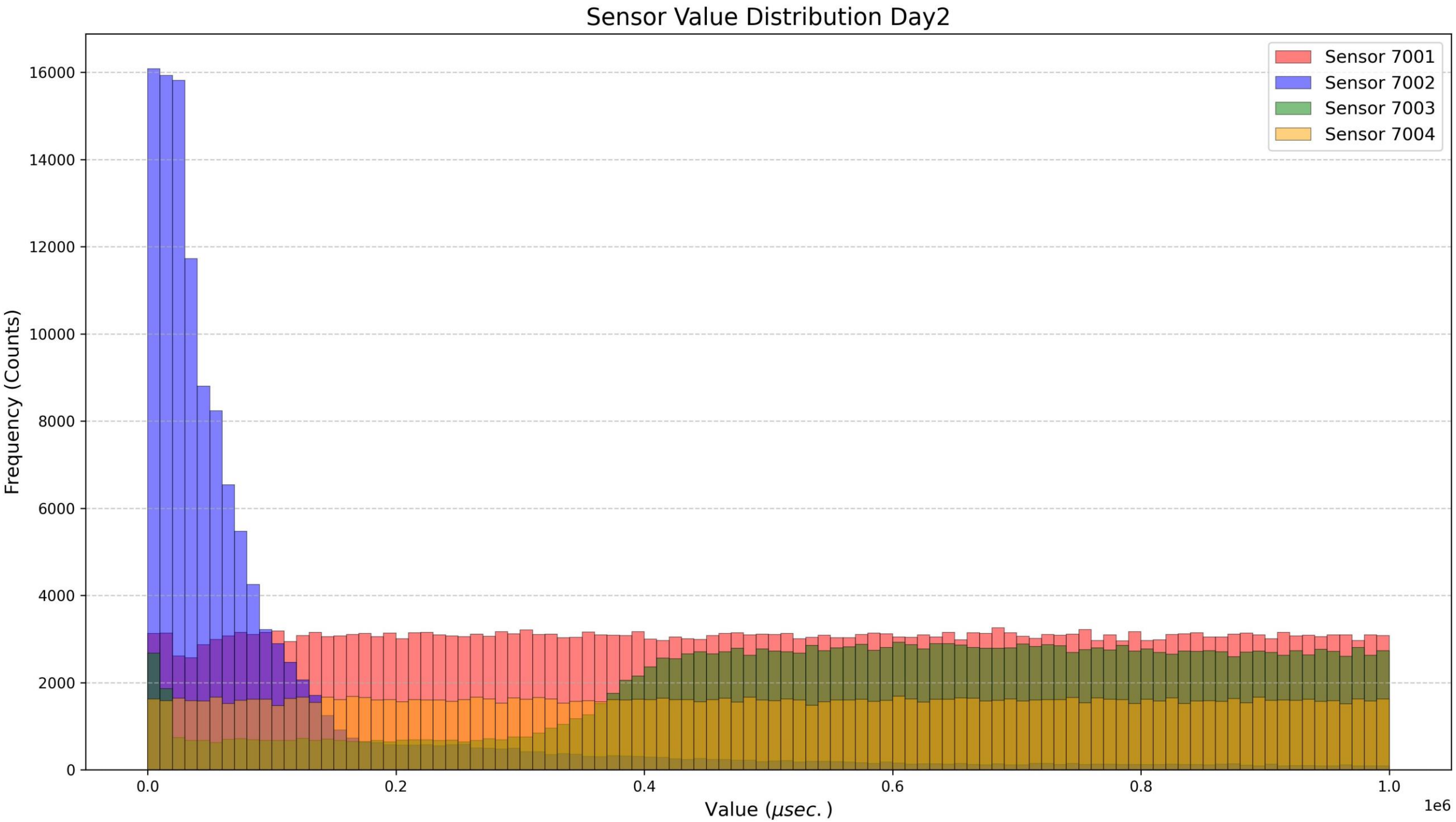
RANDOM DAY3

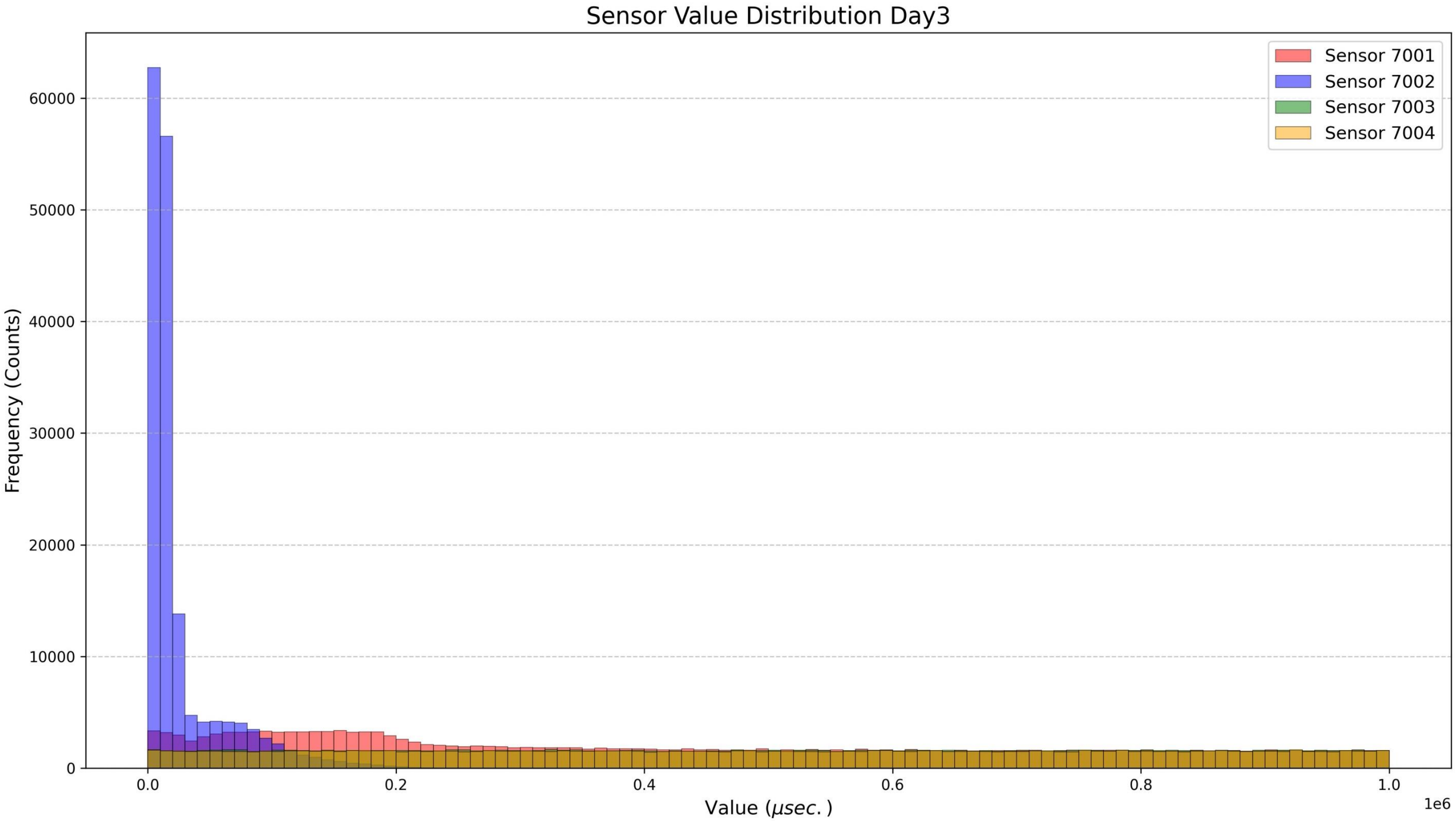

Random Distribution day3
fit tau=13533.3, chi2/dof=1.46
error bar
Number of Events
1750
1500
1250
1000
750
500
250
0
0
2000
4000
6000
8000
10000
Δt (μs)

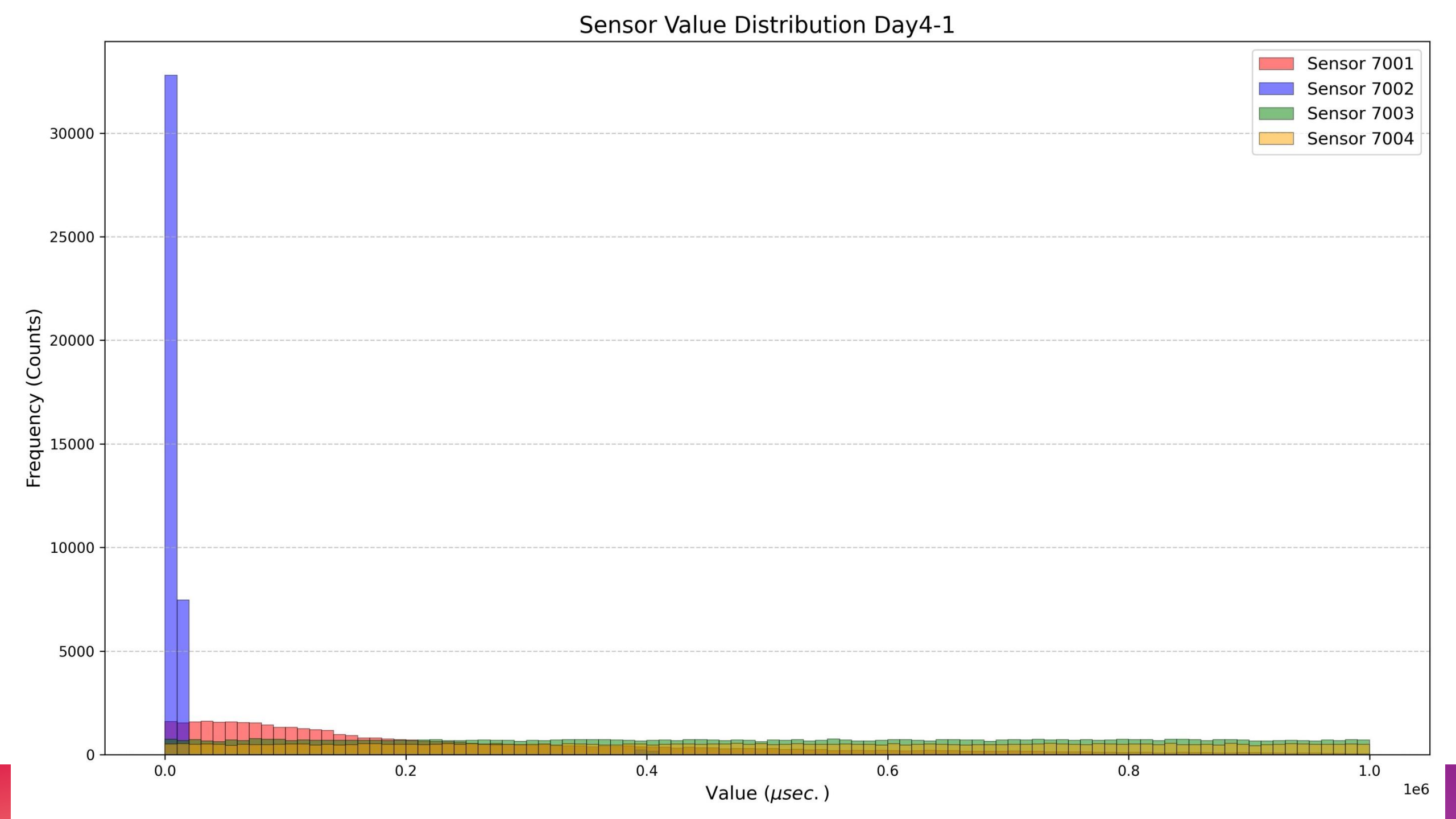
WIDE HIST DAY1

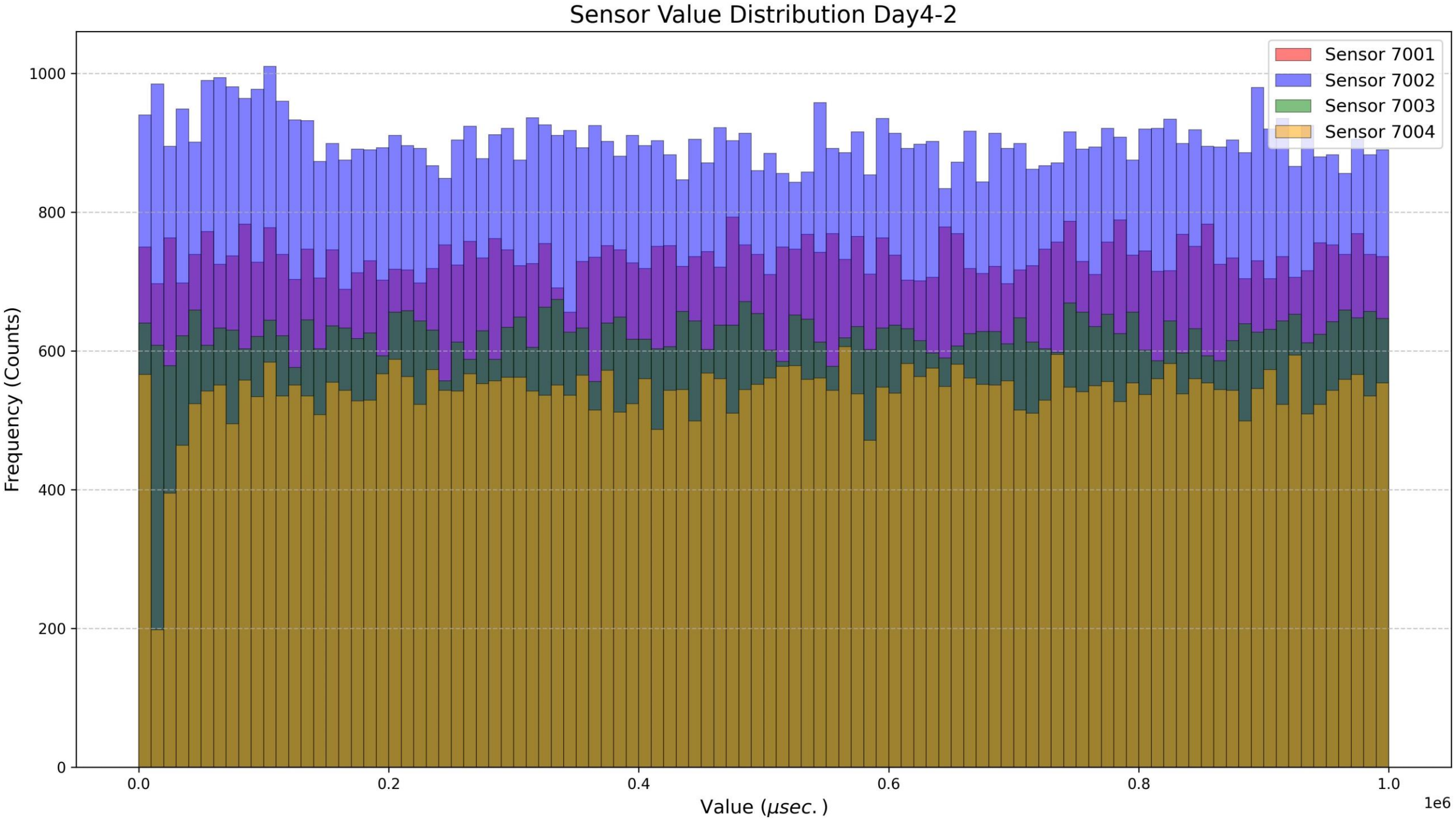


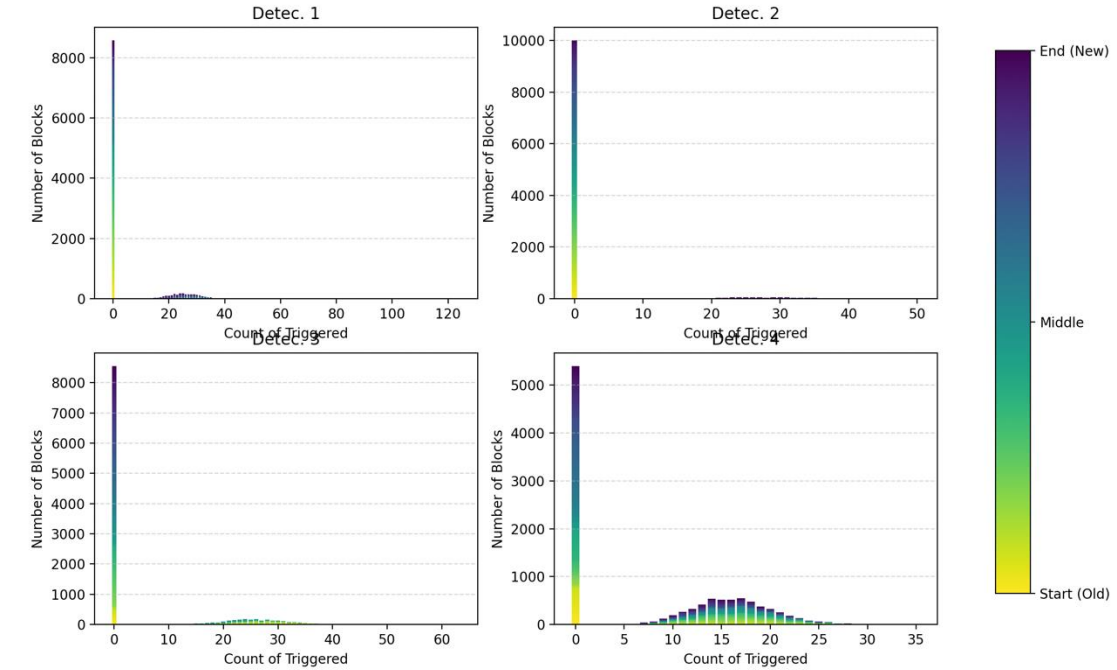

Sensor Value Distribution Day1
Sensor 7001
Sensor 7002
Sensor 7003
Sensor 7004
Frequency (Counts)
0
200
400
600
800
1000
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
1.2
1e6
Value (μsec.)

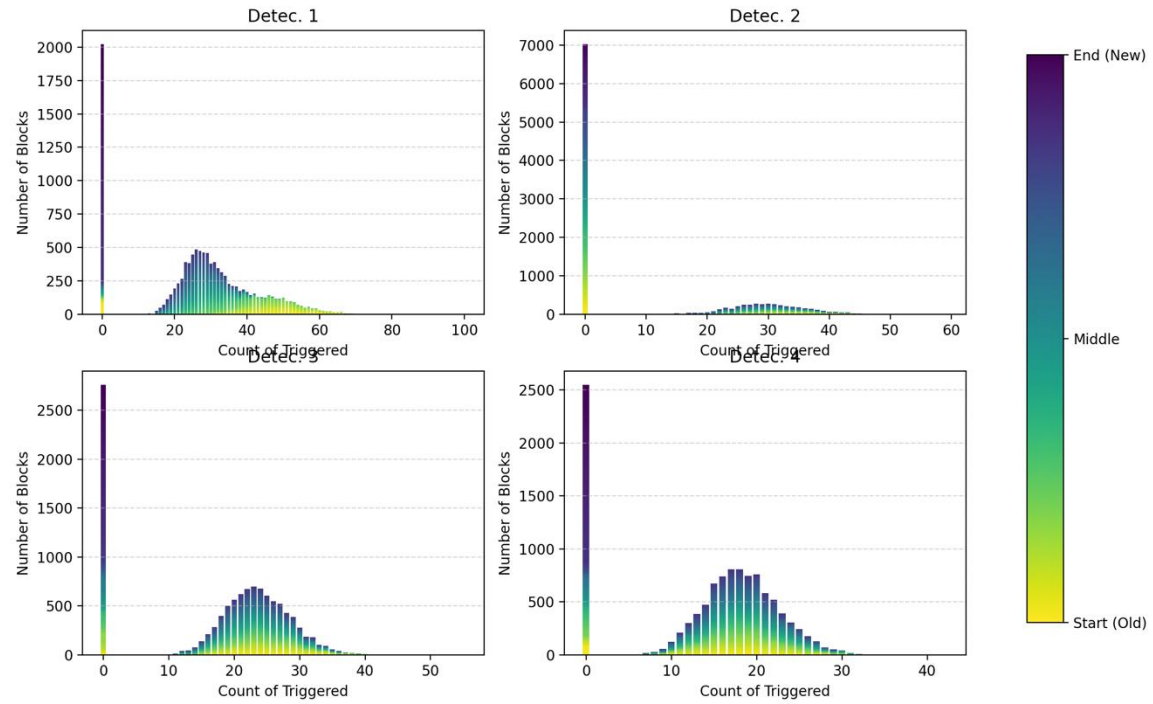

Sensor Value Distribution Day2
Sensor 7001
Sensor 7002
Sensor 7003
Sensor 7004
Frequency (Counts)
16000
14000
12000
10000
8000
6000
4000
2000
0
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
1e6
Value (μsec.)

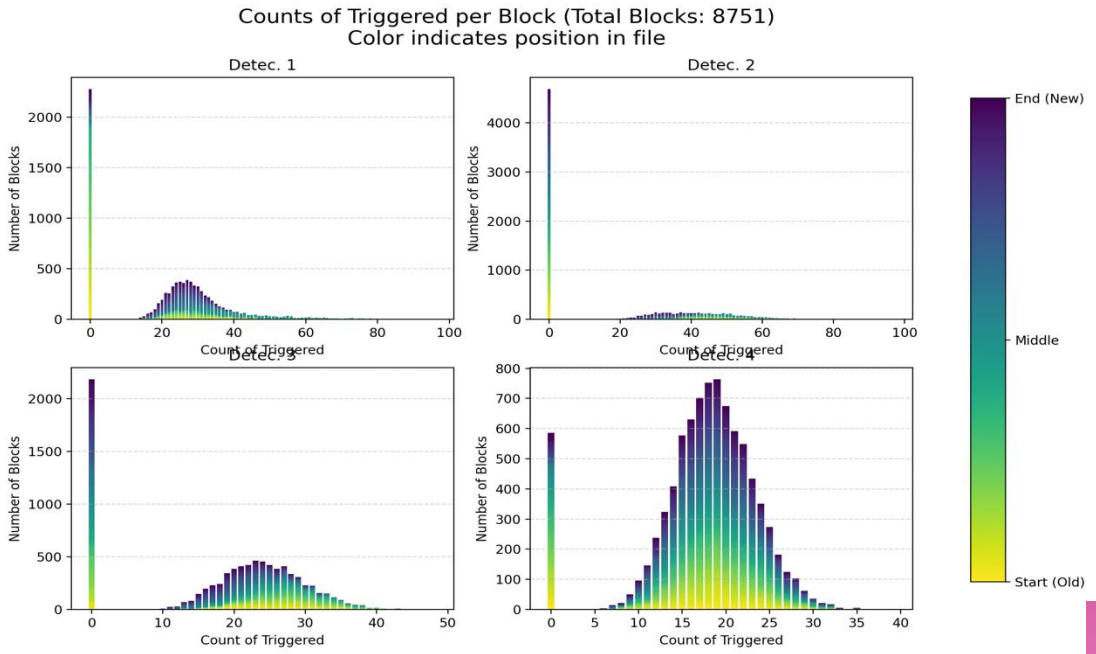

Sensor Value Distribution Day3
Sensor 7001
Sensor 7002
Sensor 7003
Sensor 7004
Frequency (Counts)
60000
50000
40000
30000
20000
10000
0
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
1e6
Value (μsec.)

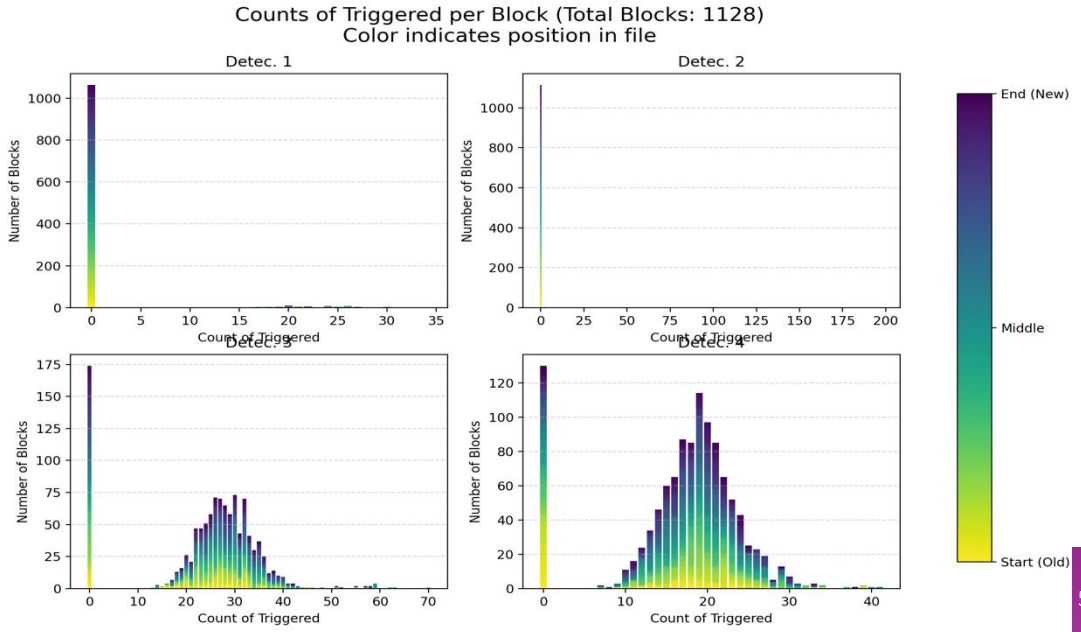

Sensor Value Distribution Day4-1
Sensor 7001
Sensor 7002
Sensor 7003
Sensor 7004
Frequency (Counts)
30000
25000
20000
15000
10000
5000
0
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
1e6
Value (μsec.)

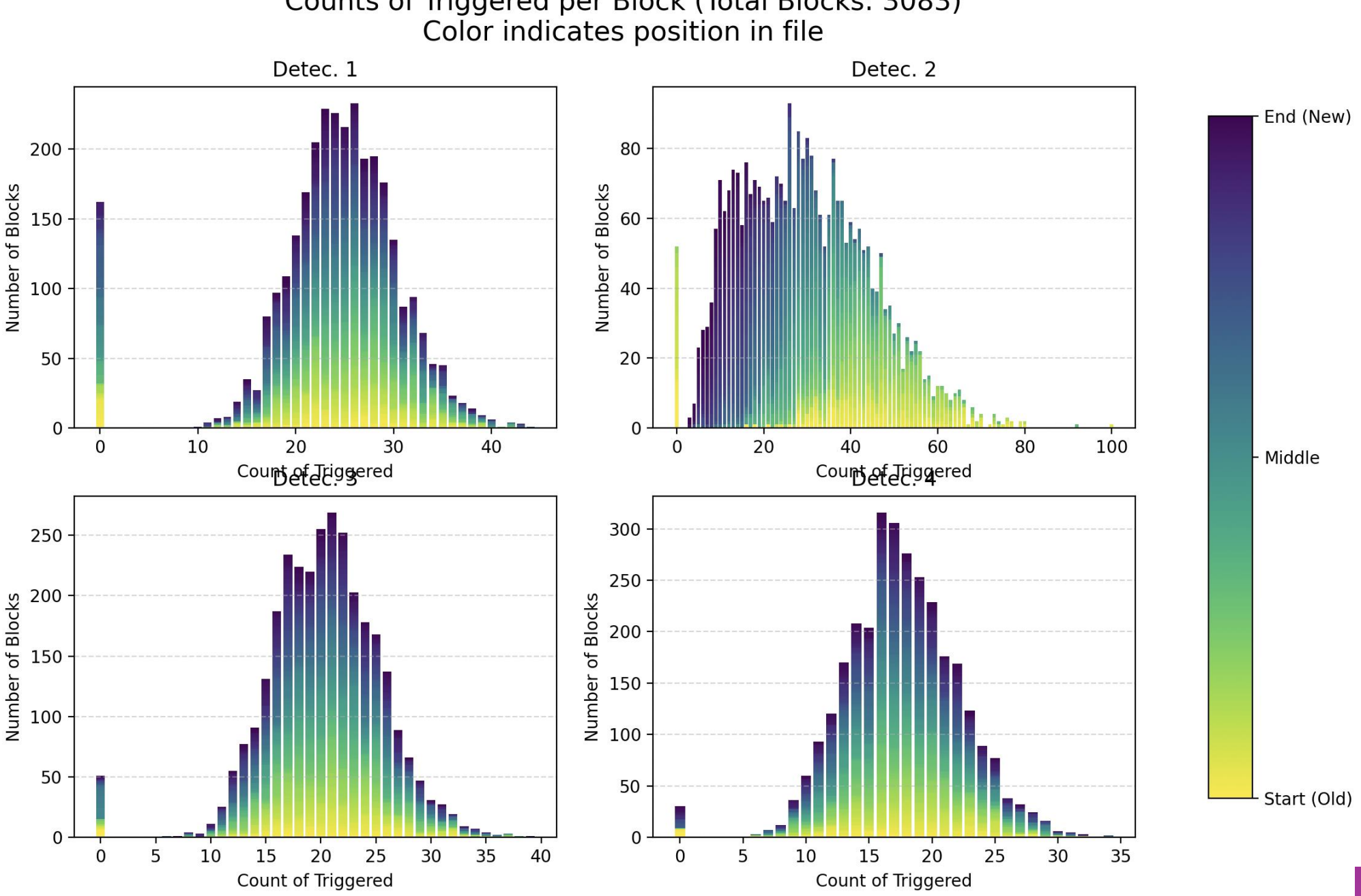

Sensor Value Distribution Day4-2
Sensor 7001
Sensor 7002
Sensor 7003
Sensor 7004
Frequency (Counts)
0
200
400
600
800
1000
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
1e6
Value (μsec.)


Counts of Triggered per Block (Total Blocks: 10939)
Color indicates position in file
Detec. 1
Detec. 2
Detec. 3
Detec. 4
Number of Blocks
Count of Triggered
End (New)
Middle
Start (Old)


Counts of Triggered per Block (Total Blocks: 11268)
Color indicates position in file
Detec. 1
Detec. 2
Detec. 3
Detec. 4
Number of Blocks
Count of Triggered
End (New)
Middle
Start (Old)


Counts of Triggered per Block (Total Blocks: 8751)
Color indicates position in file
Detec. 1
Detec. 2
Detec. 3
Detec. 4
Number of Blocks
Count of Triggered
End (New)
Middle
Start (Old)


Counts of Triggered per Block (Total Blocks: 1128)
Color indicates position in file
Detec. 1
Detec. 2
Detec. 3
Detec. 4
Number of Blocks
Count of Triggered
End (New)
Middle
Start (Old)


Counts of Triggered per Block (Total Blocks: 3083)
Color indicates position in file
Detec. 1
Detec. 2
Detec. 3
Detec. 4
Number of Blocks
Count of Triggered
End (New)
Middle
Start (Old)