



最高エネルギー 宇宙線グループ

大川拓哉、窪田雅弓、佐藤真奈美
森塚章恵、吉田風吾

2019/3/9

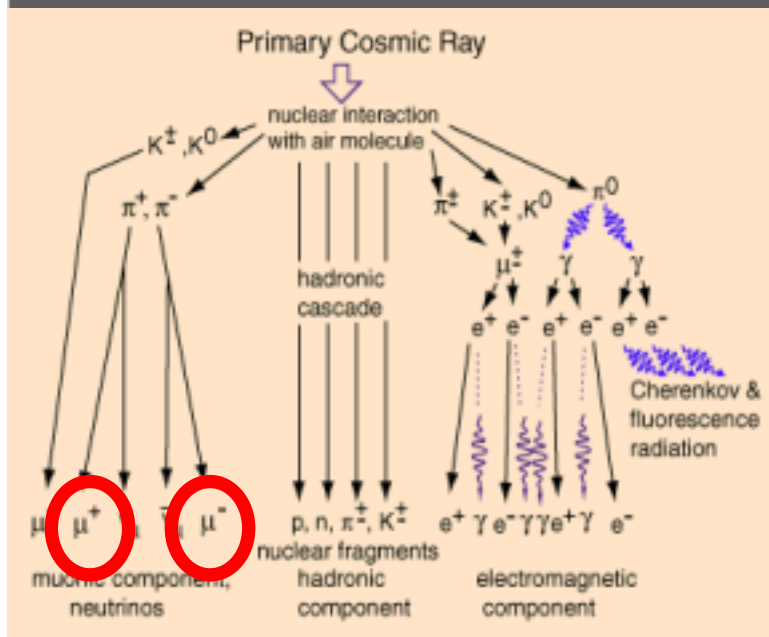
スプリングスクール2019 プロジェクト研究

目的

Mini TA SD を製作して μ 粒子を捕まえる

背景

宇宙線空気シャワーについて



高エネルギーの1次宇宙線が入射

大気

大気中の粒子(窒素、酸素)と相互作用し2次宇宙線を発生させる

粒子生成を次々に繰り返す

地上に大量の粒子群が降り注ぐ (空気シャワー)

背景

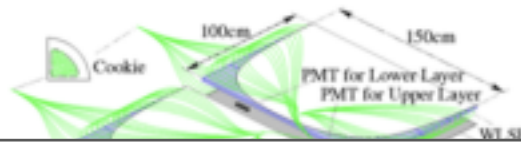
テレスコープアレイ (TA) 実験



日米韓露ベルギーの国際共同実験

宇宙線観測実験

地表粒子検出器



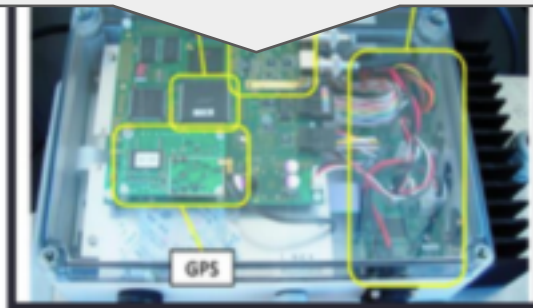
Mini TA SD を製作し
 μ 粒子を捕まえたい

ユタ州西部の砂漠地

気蛍光望遠鏡と地表粒

出器を設置して空気シ
ワー現象を観測

大気蛍光望遠鏡 (F)



- 波長変換ファイバーでPMTへ
- エレクトロニクス
 - ✓ FADC (50MHz)
 - ✓ FPGA
 - ✓ チャージコントローラー
 - ✓ GPS
 - ✓ 無線LANカード

装置

大気蛍光望遠鏡 (FD)

3ステーションで構成

粒子検出器



背景

宇宙線観測に使われる原理

- 荷電粒子と物質の反応（相互作用）

電離：物質内の電子を反跳・励起しながらエネルギーを失う。

最小電離損失粒子 = **Minimum Ionizing Particle (MIP)**

粒子の損失エネルギー（注：粒子のエネルギーではない）

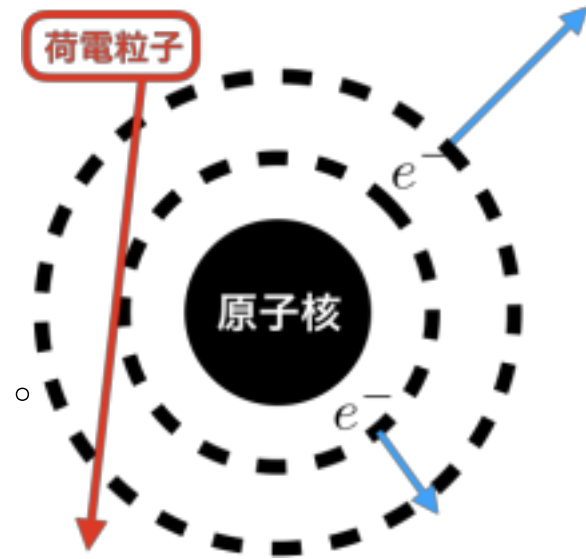
$\propto$ シンチレーション光量 $\propto$ 光電子増倍管（PMT）出力電荷

- 損失するエネルギーはベーテの式から電荷の2乗に従う

ベーテの式

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2}{m_0 v^2} N B$$

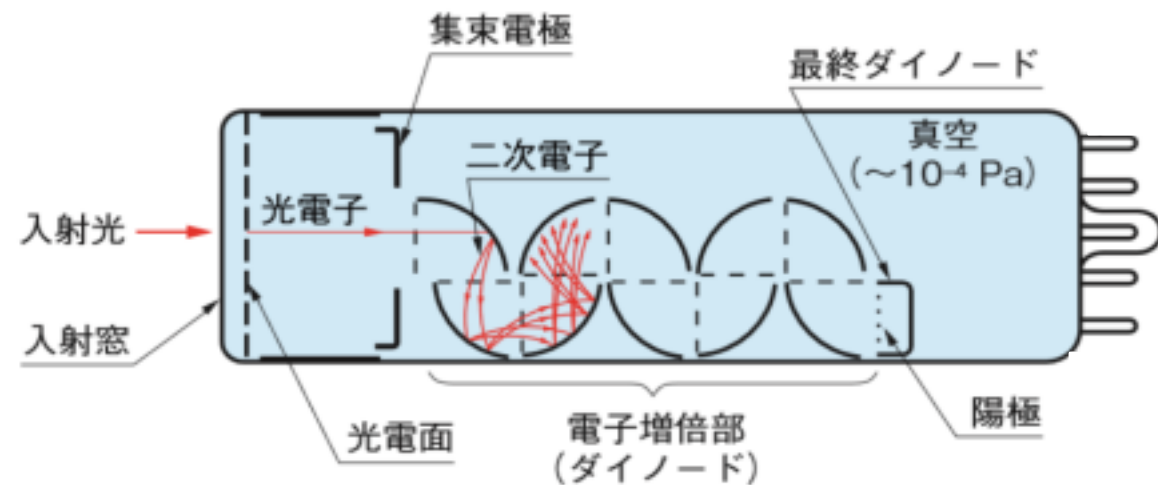
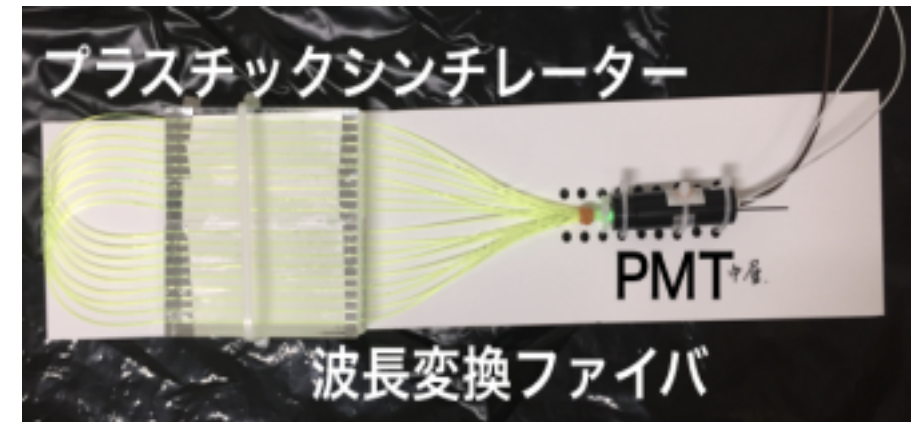
z:入射粒子の電荷



実験方法

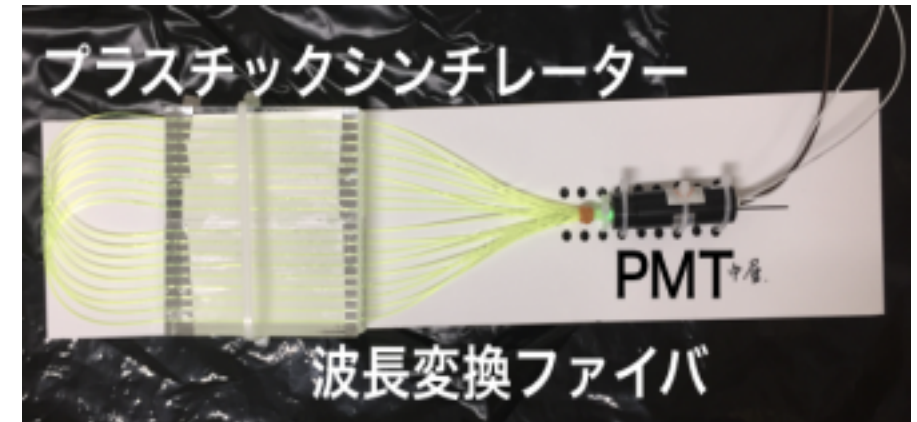
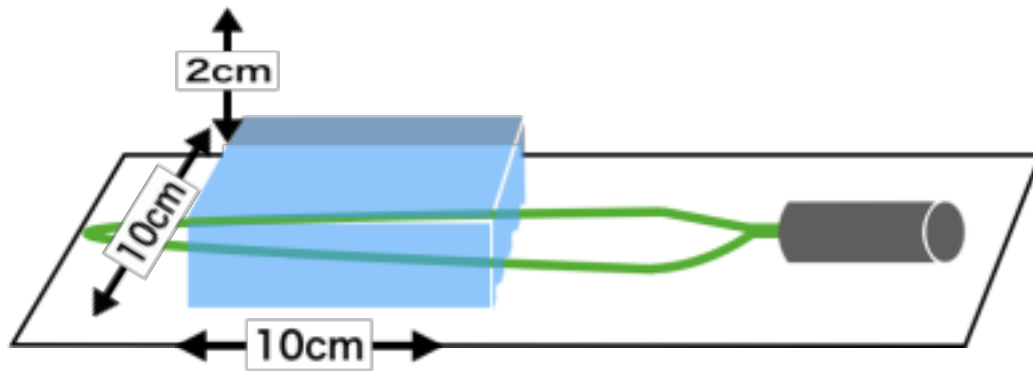
放射線検出器の原理

- プラスチックシンチレータ
荷電粒子が電離で失ったエネルギー $\propto$ 発光
- 波長変換ファイバ
シンチレーション光を吸収
(発光位置に依存しない一様な光収集を実現)
- PMT(光電子増倍管)
光子を光電効果で光電子に変換
複数の電極間で電子を加速・増幅
(1光子が約 10^6 電子に)



実験方法

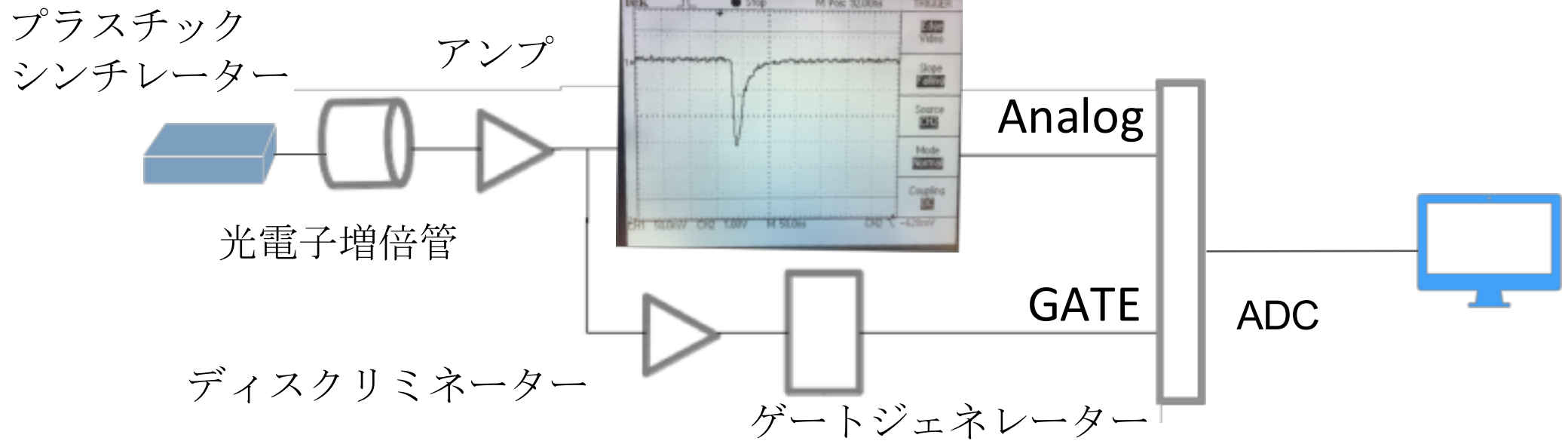
装置の作成について



- ファイバーの片端が光電子増倍管に繋がっていない時、集光効率が低下する
→ファイバーの両端を光電子増倍管に向ける
- 空気層や凹凸面により集光効率が低下する
→ジェル（グリース）つける、断面にヤスリがけをする

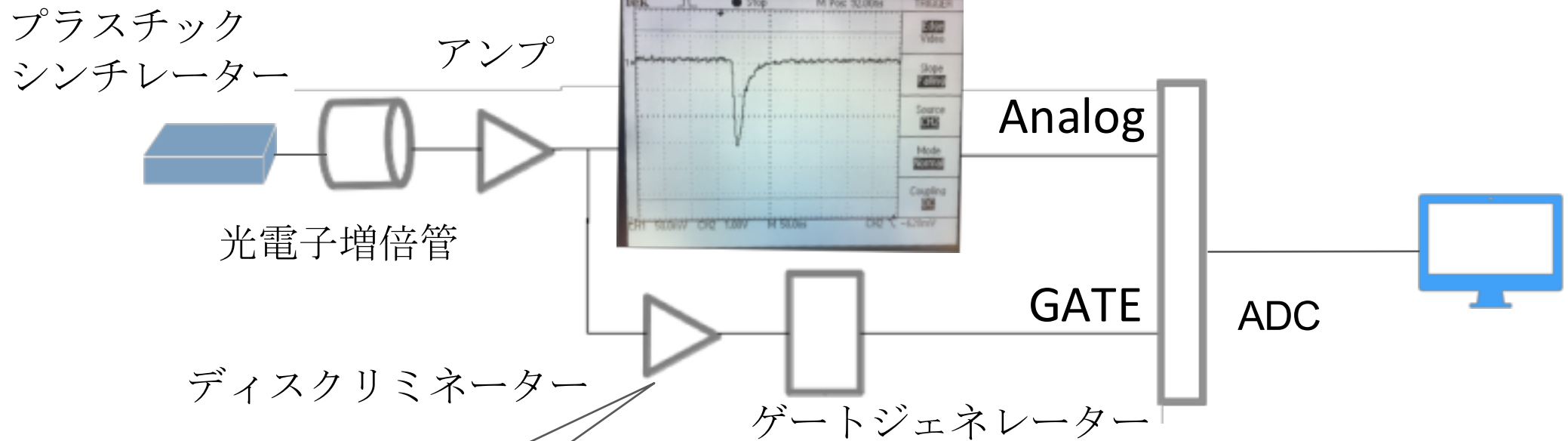
実験方法

セットアップについて



実験方法

セットアップについて



一定の値より大きな
信号を読み取った時
(トリガー)矩形波を出
力する

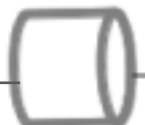


実験方法

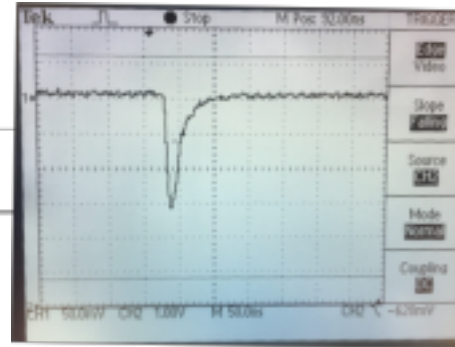
セットアップについて

プラスチック
シンチレーター

アンプ



光電子増倍管



Analog

ディスクリミネーター



ゲートジェネレーター

GATE

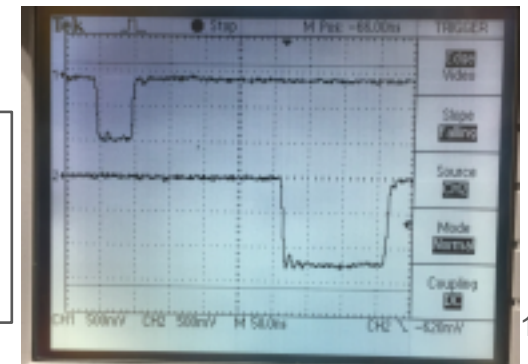
ADC



一定の値より大きな
信号を読み取った時
(トリガー)矩形波を出
力する



矩形波の幅を調
節する(ゲート)



実験方法

セットアップについて

プラスチック
シンチレーター

アンプ

光電子増倍管

ディスクリミネーター

ゲートジェネレーター

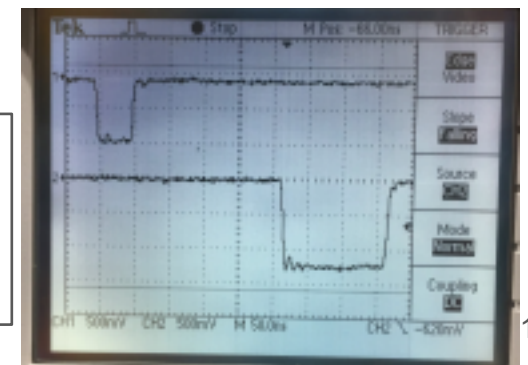
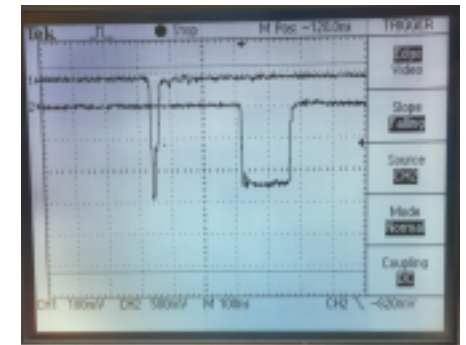
Analog

GATE

ADC

一定の値より大きな
信号を読み取った時
(トリガー)矩形波を出
力する

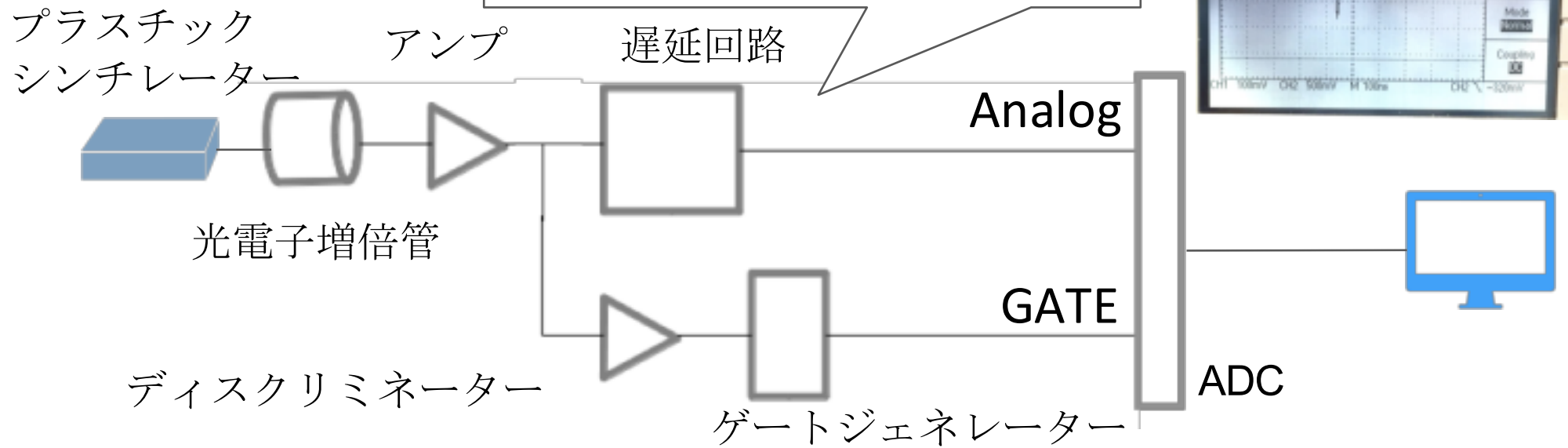
矩形波の幅を調
節する(ゲート)



実験方法

セットアップについて

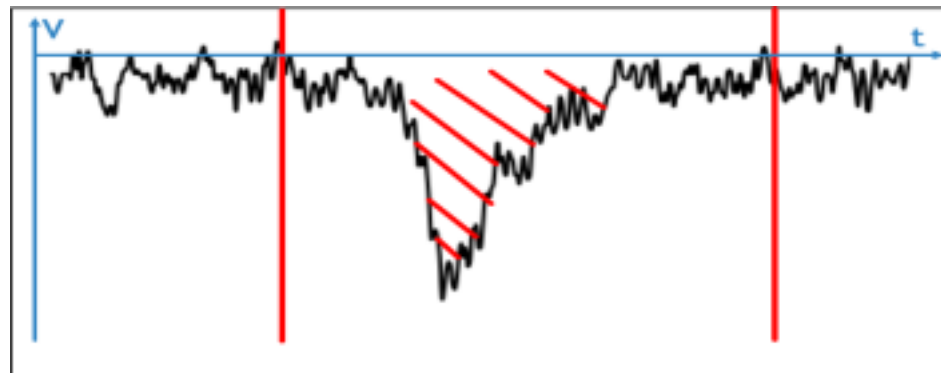
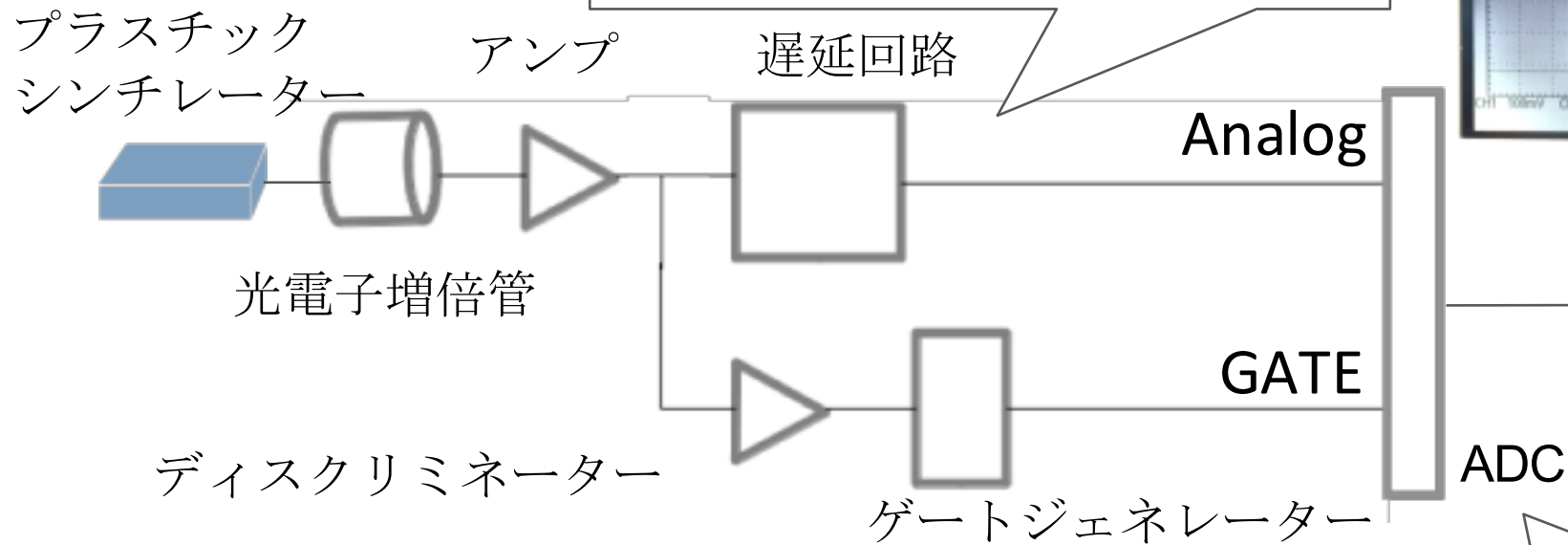
信号とゲートのタイミングを
合わせるために信号を遅らせる



実験方法

セットアップについて

信号とゲートのタイミングを合わせるために信号を遅らせる



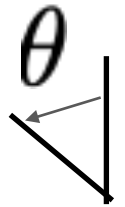
矩形波(ゲート)の幅に入っている信号の電荷をADC値として出力する

実験方法

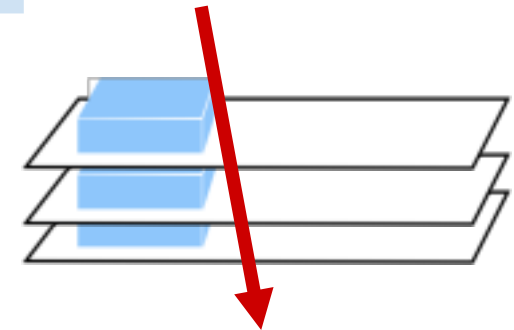
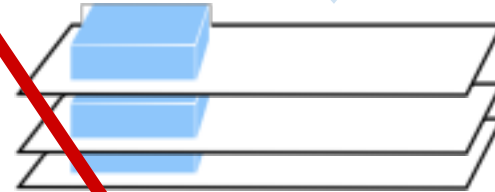
3層構造とトリガー

本研究ではノイズを除去できるのでシンチレーターを3層構造にする。

3層通過できるものを選びたい。



取りたくない



2次宇宙線の大部分を占める μ 粒子の天頂角分布は実験的に

$$J(\theta) = J(0) \cos^2 \theta$$

と書けるので、2層目だけを通る宇宙線は少ない

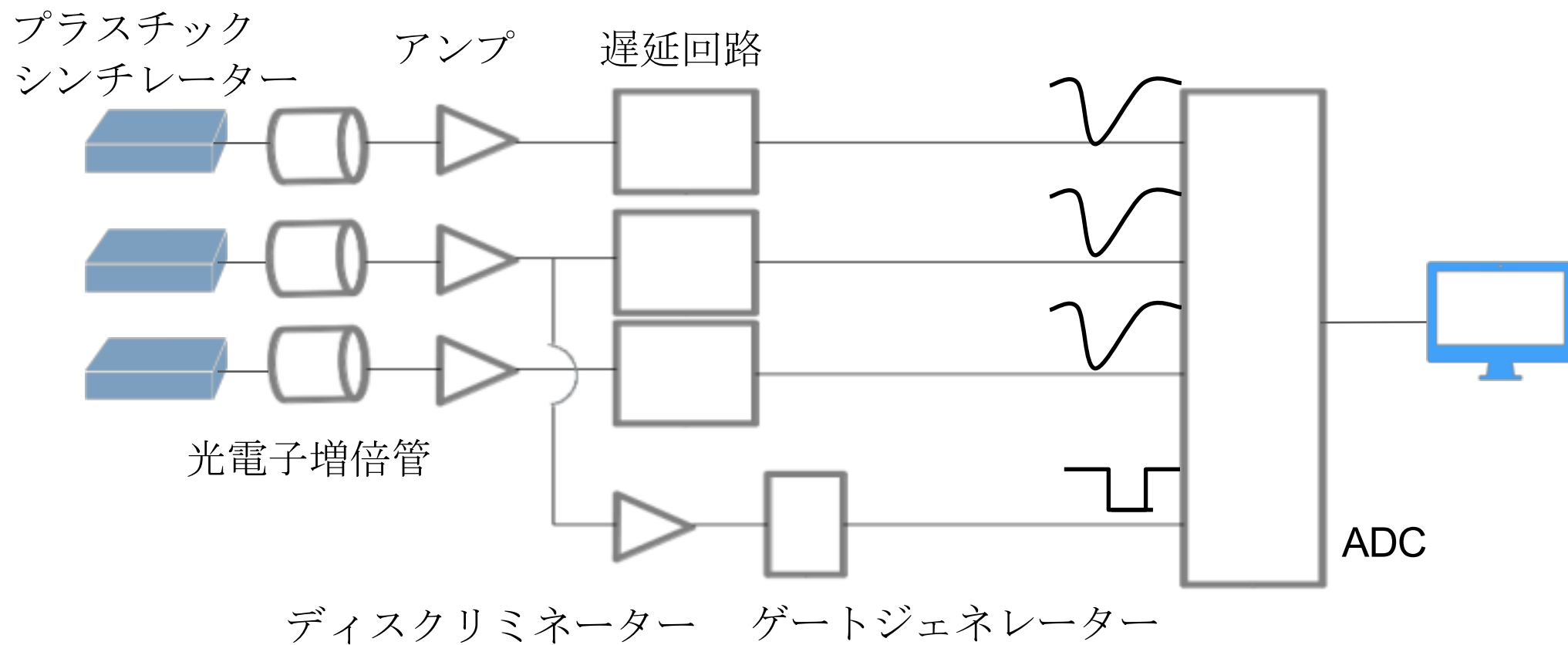
2層目にトリガーをかけると
3層通過している宇宙線を観測しやすい

取りたい



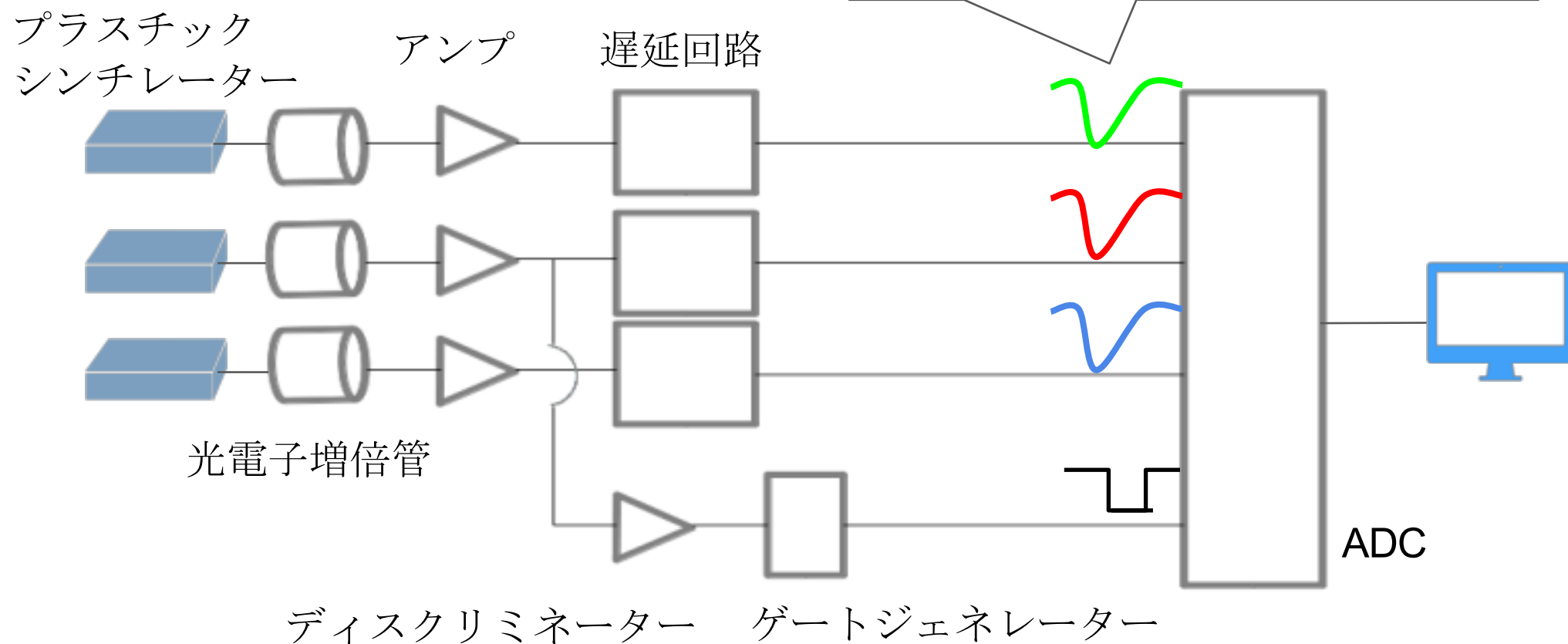
実験方法

セットアップについて

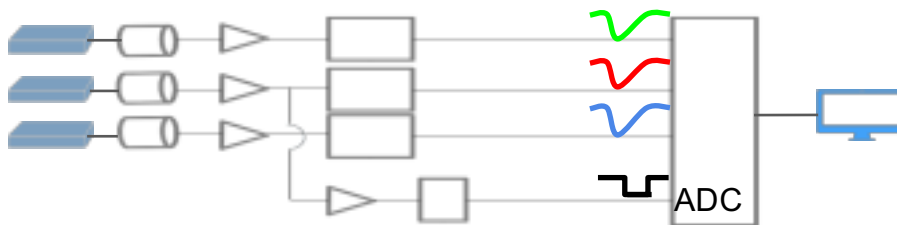
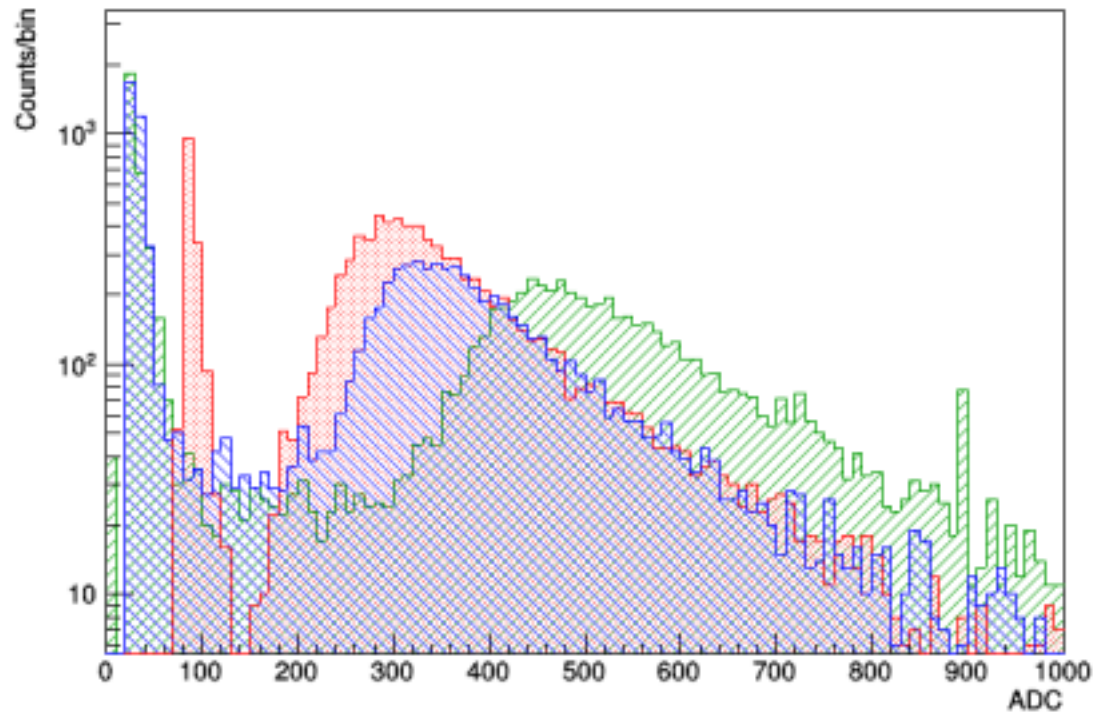


実験方法

セットアップについて



解析



それぞれのチャンネルによって

- ペDESTAL
- 増幅率

PMTへの入射粒子がない時の出力

が異なる

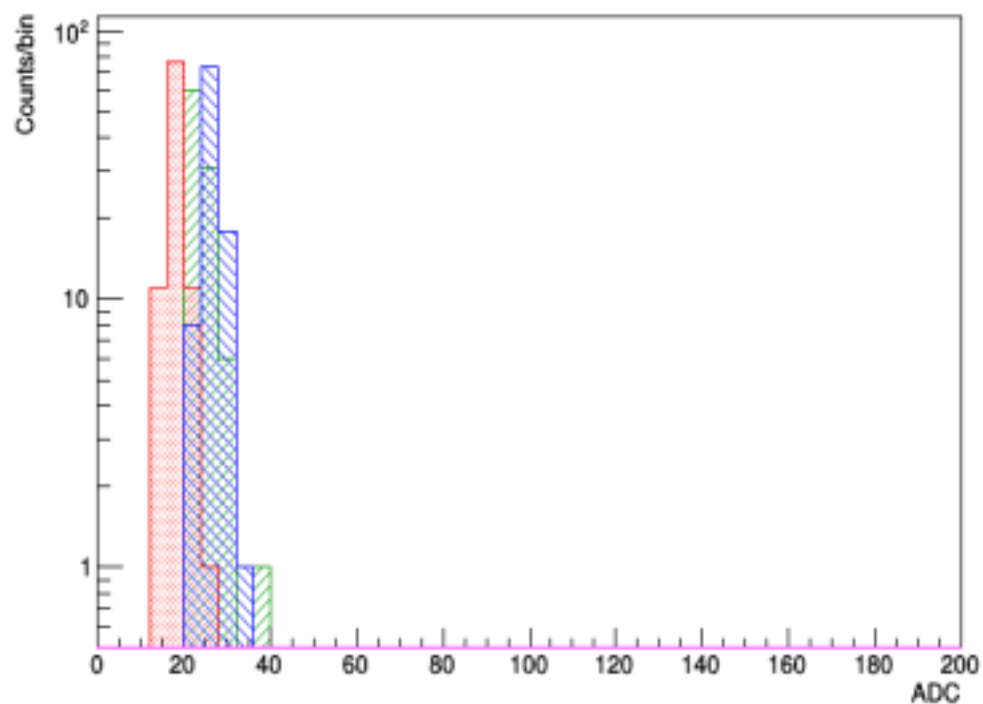


チャンネルごとに横軸の意味が違う

→ **ノーマライズ**したい

解析

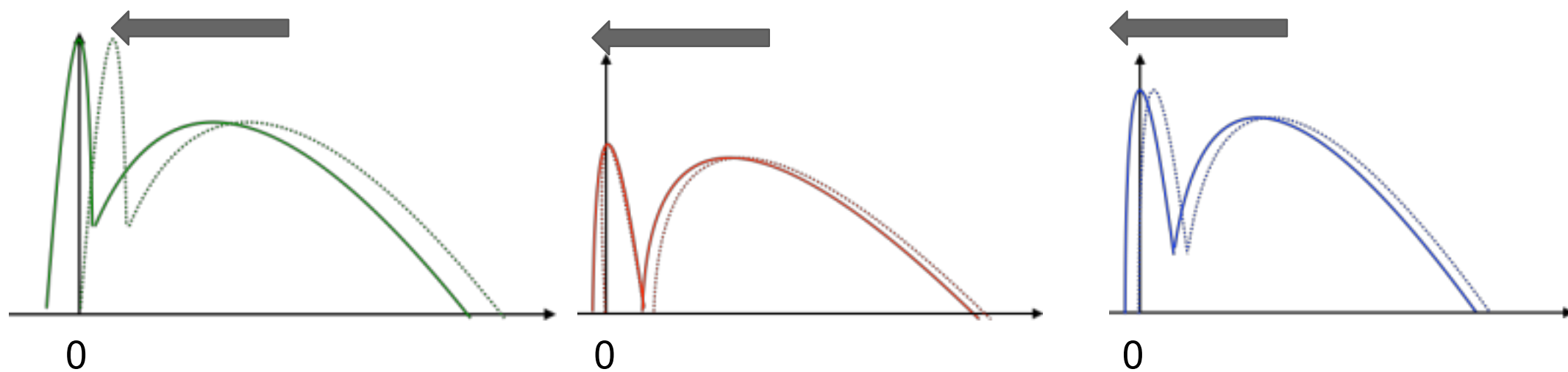
ノーマライズ過程



PMTに光が入っていない時の
出力
→ゼロ点合わせ

解析

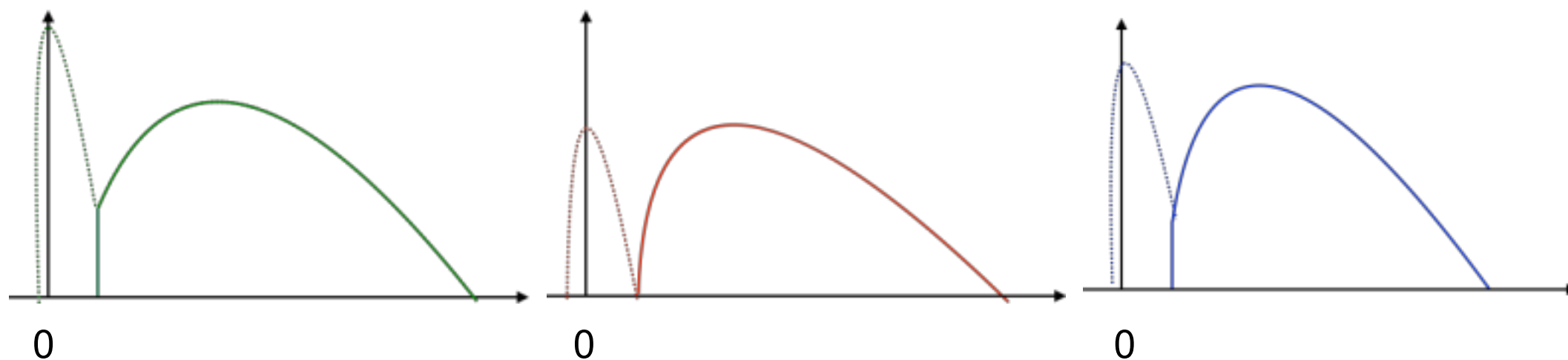
ノーマライズ過程



ペDESTルの分ずらす

解析

ノーマライズ過程

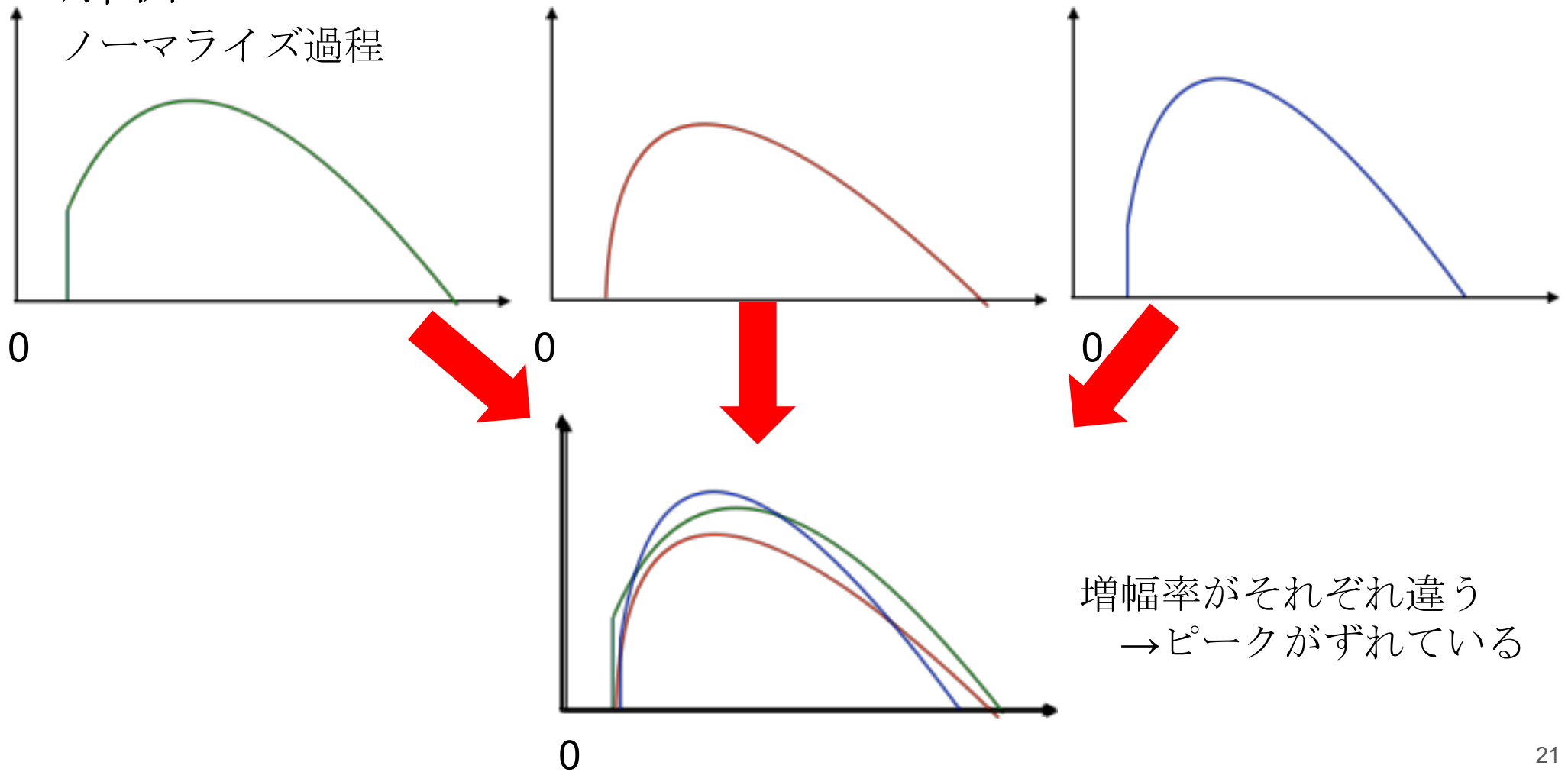


ノイズがのっていそうな部分をカットする

1光電子や雑音

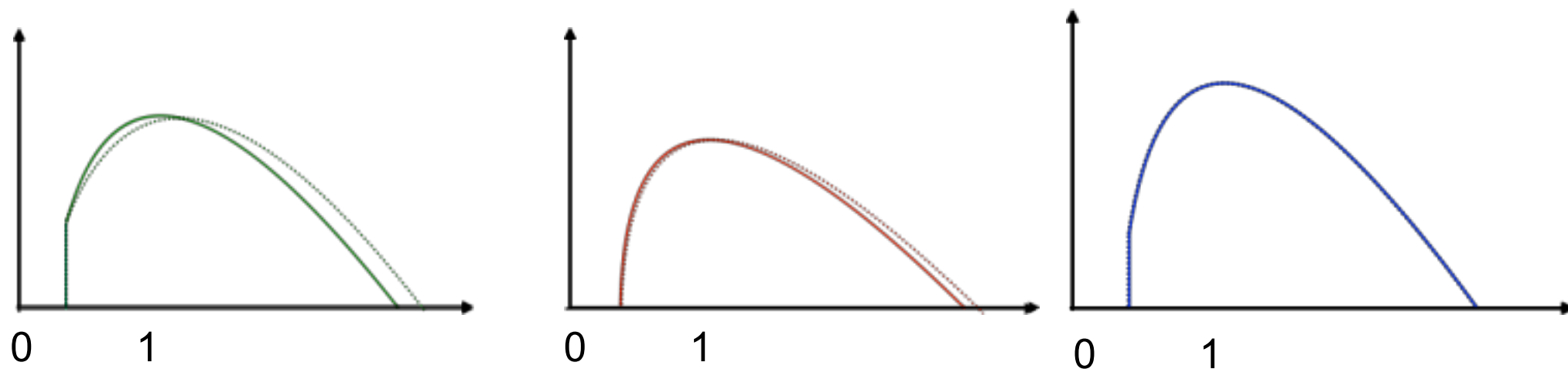
解析

ノーマライズ過程



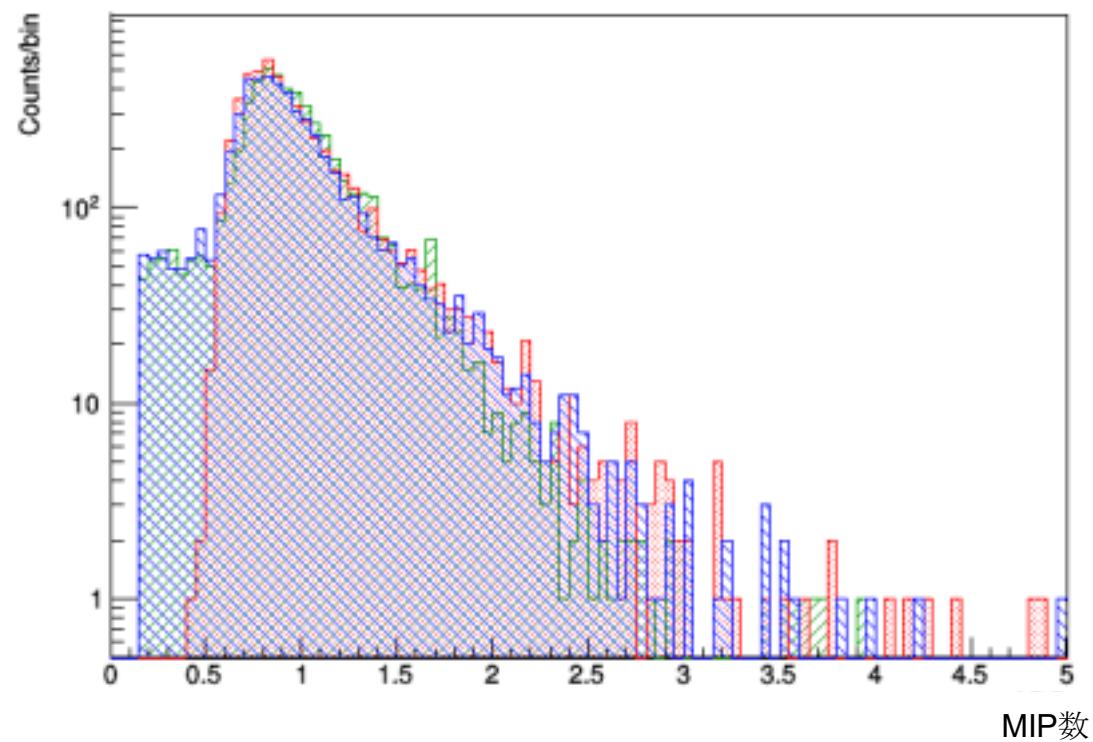
解析

ノーマライズ過程



ピークが揃うように規格化

解析



- 目で見てノイズをカット

1光電子や雑音

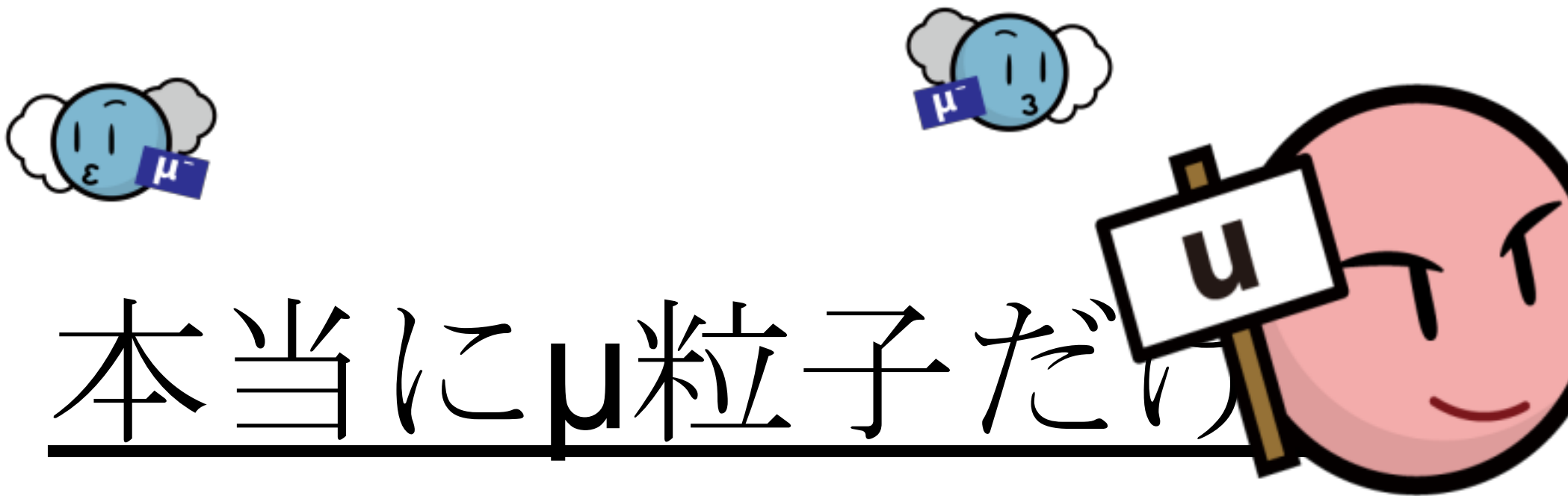
3つの分布が一致した
→綺麗な μ 粒子の分布が得られた！





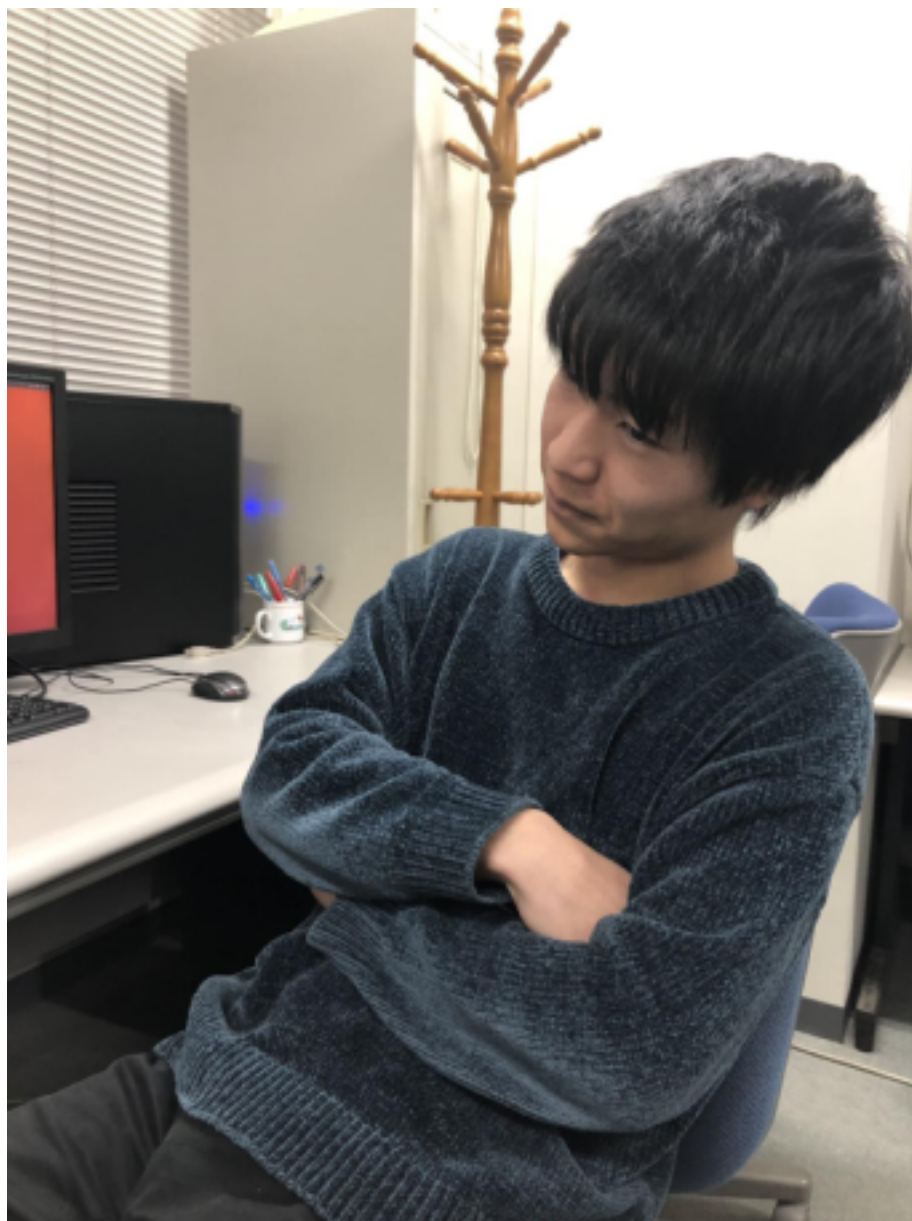
ご静聴ありがとうございました。





本当に μ 粒子だけ

電荷が1ではない粒子が紛れ込んでるかも?!



電荷が1じゃない粒子...

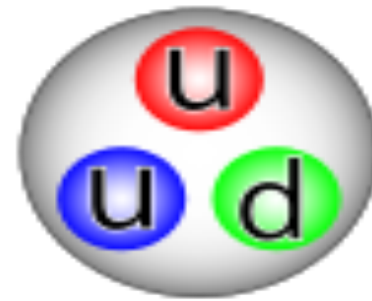


あ、クオーク!!!

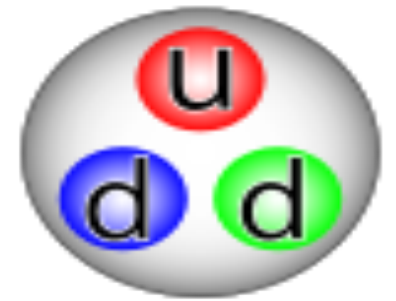


背景

クォークについて



陽子 (proton)



中性子 (neutron)

➤ クォークの電荷は $\pm 1/3, \pm 2/3$

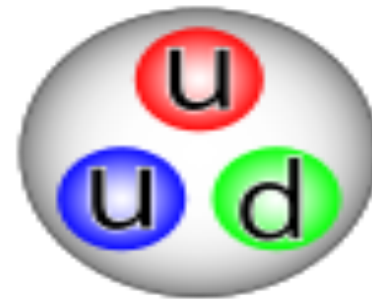
➤ クォークは全体として「無色」となるような

色荷の組み合わせでしか存在できない (ハドロン)

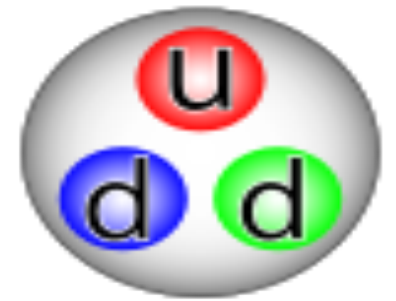
→ クォーク **単独では存在できない**とされている

背景

クォークについて



陽子 (proton)



中性子 (neutron)

- クォークの電荷は $\pm 1/3, \pm 2/3$
- クォークは全体として「無色」となるような色荷の組み合わせでしか存在できない (ハドロン)

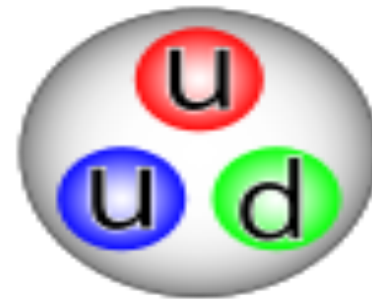
単独での観測は未だできていない



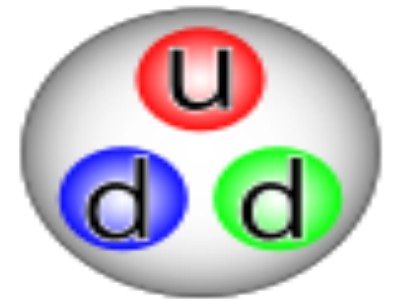
我々で見つけよう！

背景

クォークについて

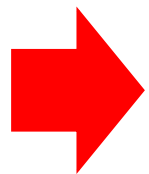


陽子 (proton)



中性子 (neutron)

- クォークの電荷は $\pm 1/3, \pm 2/3$
 - クォークは全体として「無色」となるような色荷の組み合わせでしか存在できない（ハドロン）
- 単独での観測は未だできていない



我々で見つけよう！

電荷 $2/3$ の
クォーク

背景

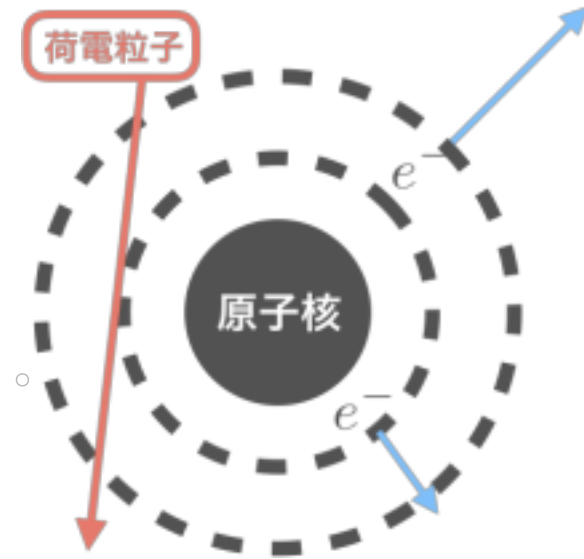
宇宙線観測に使われる原理

- 荷電粒子と物質の反応（相互作用）
電離：物質内の電子を反跳・励起しながらエネルギーを失う。
最小電離損失粒子 = **Minimum Ionizing Particle (MIP)**

粒子の損失エネルギー（注：粒子のエネルギーではない）
 $\propto$ シンチレーション光量 $\propto$ PMT出力電荷

- 損失するエネルギーはベーテの式から
電荷の2乗に従う
ミューオンが損失するエネルギー = 1

電荷2/3のクォークの失うエネルギー = 4/9

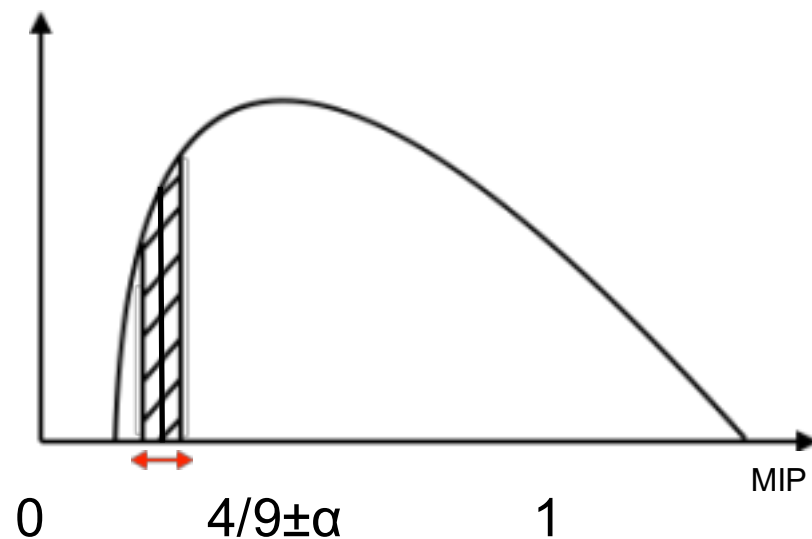


ベーテの式

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2}{m_0 v^2} N B$$

z: 入射粒子の電荷

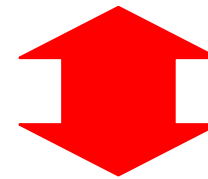
解析



3層全てでここにデータが入った時を考える



ミューオンの揺らぎで $4/9$ 周辺 ($4/9 \pm \alpha$) の領域に入る数



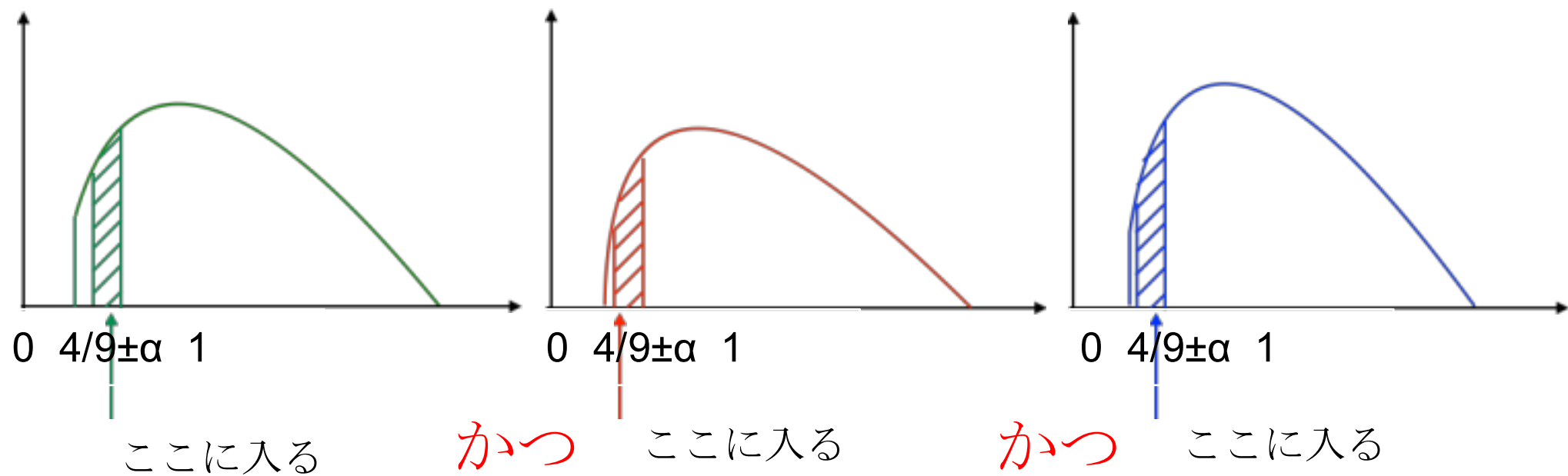
比較！

実際に実験で $4/9$ 周辺 ($4/9 \pm \alpha$) の領域に入る数



$\alpha = 0.138$ (測定2の場合)

解析



結果

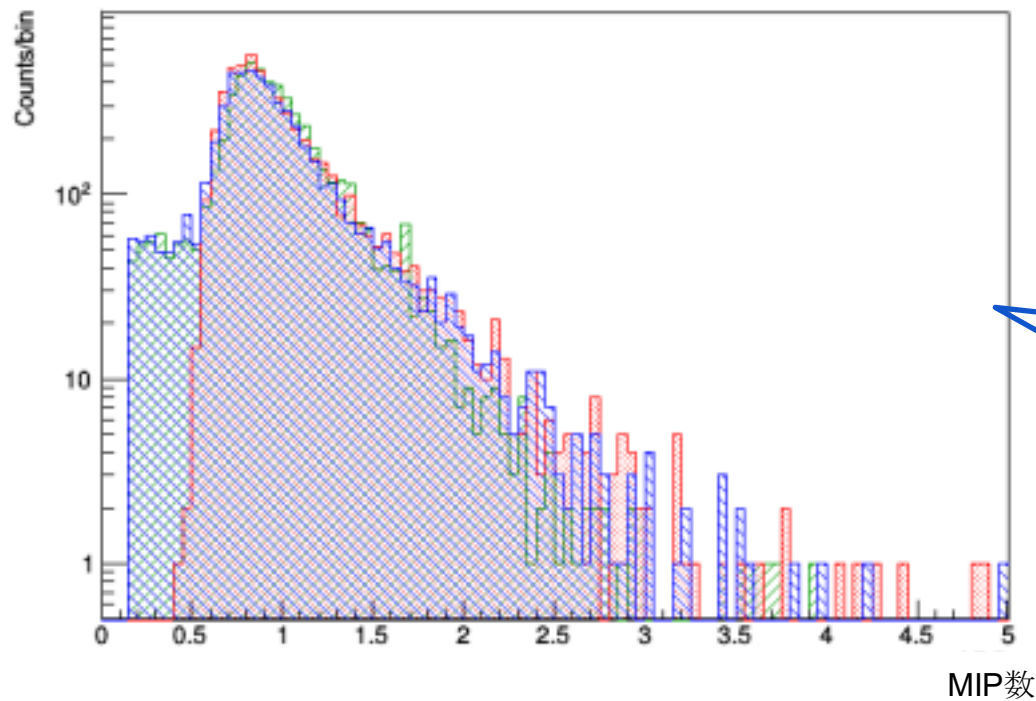
測定1: 8042秒の間データを測定、10000個のデータ

測定2: 54001秒の間データを測定、56875個のデータ

結果

測定1: 8042秒の間データを測定、10000個のデータ

測定2: 54001秒の間データを測定、56875個のデータ



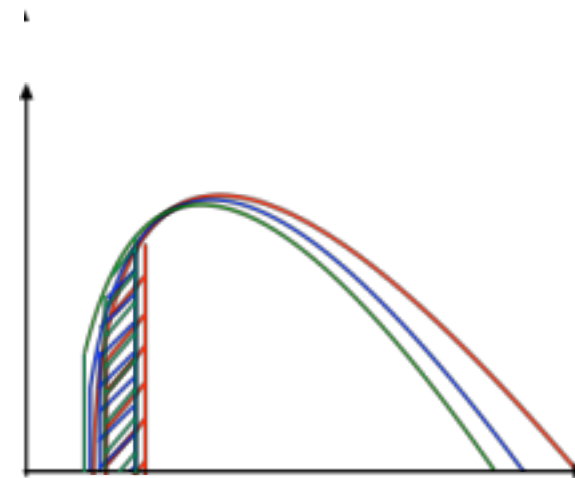
ほとんどが μ 粒子の信号と考えて、この分布を μ 粒子の信号の確率密度と仮定する

結果

測定1: 8042秒の間データを測定、10000個のデータ

測定2: 54001秒の間データを測定、56875個のデータ

μ 粒子が入ってきても4/9付近に信号が現れる可能性がある



	バックグラウンドの期待値	実際の事象数
測定1	1.82	
測定2	11.9	

3層すべての信号が $4/9 \pm \alpha$
に現れるようなもの

結果

測定1: 8042秒の間データを測定、10000個のデータ

測定2: 54001秒の間データを測定、56875個のデータ

	バックグラウンドの期待値	実際の事象数
測定1	1.82	0
測定2	11.9	2

3層すべての信号が $4/9 \pm \alpha$
に現れるようなもの

結果

測定1: 8042秒の間データを測定、10000個のデータ

測定2: 54001秒の間データを測定、56875個のデータ

測定3: 46805秒の間データを測定、48415個のデータ

	バックグラウンドの期待値	実際の事象数
測定1	1.82	0
測定2	11.9	2
測定3		

3層すべての信号が $4/9 \pm \alpha$
に現れるようなもの

結果

測定1: 8042秒の間データを測定、10000個のデータ

測定2: 54001秒の間データを測定、56875個のデータ

測定3: 46805秒の間データを測定、48415個のデータ

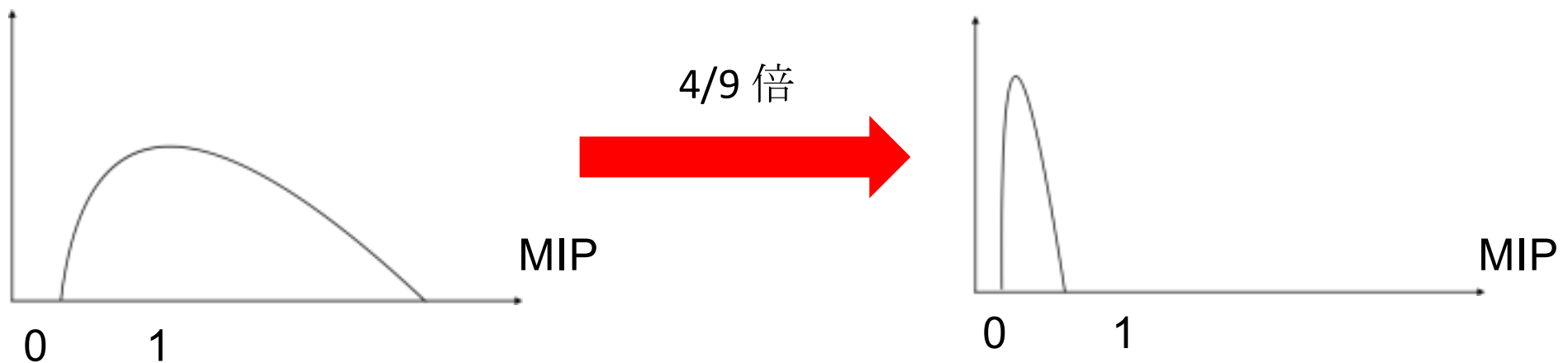
	バックグラウンドの期待値	実際の事象数
測定1	1.82	0
測定2	11.9	2
測定3	11.0	0

3層すべての信号が $4/9 \pm \alpha$
に現れるようなもの

考察

クォークのフラックスの上限値を求める

・ ベーテの式 $\rightarrow$ 失ったエネルギー $\propto$ 電荷の 2 乗

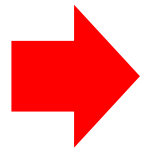


これをクォークの信号の
確率密度と仮定する

考察

クォークのフラックスの上限値を求める

	α の値	検出効率($4/9 \pm \alpha$ の範囲に信号が現れる確率)
測定1	0.133	0.684
測定2	0.138	0.734
測定3	0.138	0.725



95%の信頼度でフラックスの上限値は $1.41 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$

考察

クォークのフラックスの上限値を求める

	α の値	検出効率($4/9 \pm \alpha$ の範囲に信号が現れる確率)
測定1	0.133	0.684
測定2	0.138	0.734
測定3	0.138	0.725



95%の信頼度でフラックスの上限値は $1.41 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$

- ・ カミオカンデと比較

→ 有意な結果は得られなかった。

フラックスの上限値は90%信頼度で $2.3 \times 10^{-15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$

考察

クオ

PHYSICAL REVIEW D

VOLUME 43, NUMBER 9

1 MAY 1991

Search for fractionally charged particles in Kamiokande II

M. Mori, Y. Oyama, A. Suzuki, K. Takahashi, and M. Yamada
National Laboratory for High Energy Physics (KEK), Ibaraki 305, Japan

K. Miyano, H. Miyata, and H. Takei
Department of Physics, Niigata University, Niigata 950-21, Japan

K. S. Hirata, T. Kajita, K. Kihara, M. Nakahata, K. Nakamura, S. Ohara,
N. Sato, Y. Suzuki, Y. Totsuka, and Y. Yaginuma
Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, Tokyo 188, Japan

M. Koshihara
Tokai University, Tokyo 151, Japan

T. Suda and T. Tajima
Department of Physics, Faculty of Science, Kobe University, Hyogo 657, Japan

Y. Fukuda, Y. Nagashima, and M. Takita
Department of Physics, Osaka University, Osaka 560, Japan

K. Kaneyuki and T. Tanimori
Department of Physics, Tokyo Institute of Technology, Tokyo 152, Japan

E. W. Beier, E. D. Frank, W. Frati, S. B. Kim,* A. K. Mann, F. M. Newcomer,
R. Van Berg, and W. Zhang†
Department of Physics, University of Pennsylvania, Philadelphia, Pennsylvania 19104
(Received 20 November 1990)

A search has been made for fractionally charged particles with $|Q| = \frac{1}{2}$ and $|Q| = \frac{2}{3}$ which might have passed through the Kamiokande II detector. No positive evidence for such particles is observed in 1009 days of observation. The 90%-C.L. upper limits obtained on the fluxes of fractionally charged particles are $2.1 \times 10^{-15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ for $|Q| = \frac{1}{2}$ and $2.3 \times 10^{-15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ for $|Q| = \frac{2}{3}$, improving the existing limits by two orders of magnitude.

確率

95%の信頼度でフラックスの上限値は $1.41 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$

・ カミオカンデと比較

→ 有意な結果は得られなかった。

フラックスの上限値は90%信頼度で $2.3 \times 10^{-15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$

考察

改善案

- ・シンチレータの面積、数を増やす
- ・測定時間を長くする
- ・宇宙線がやってくる方向を制限する



$$(\text{フラックスの上限}) = \frac{\mu / (4/9 \pm \alpha \text{ の間に3層すべてで信号が現れる確率})}{(\text{測定時間}) \times (\text{有効立体角}) \times (\text{シンチレータの面積})}$$

まとめ

- 宇宙線観測装置で空気シャワー中の μ 粒子を観測した
- Mini TA SDを用いた μ 粒子の観測結果を使用してクォークの探索をした
- クォークが単体で存在するという有意な結果は得られなかった。フラックスの上限値は $1.41 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$
- TA、HKで長期間のクォーク検出の実験を！

Special Thanks to

Takashi Sako

Masahiro Takeda

Hiroyuki Sagawa

ご静聴ありがとうございました。

この先

- 目的1
- イン트로（背景） 3
 - 宇宙線観測について、空気シャワーについて
 - 宇宙線(天然の加速器)研究は新粒子発見の宝庫(梶田さんに媚びる)
 - クォークについて(閉じ込め)
- 方法(装置 6 ・ 解析 4)
 - シンチレーター、光電子増倍管、ファイバー
 - 装置の作成について
 - 配線（オシロで見た写真）、トリガー、面積を用いています
 - 何も加工を加えていない図（ペDESTAL、増幅率が異なる、横軸の意味が違う）
 - 横軸が 1 粒子相当の図
 - 確率分布の説明、 α は最適値をとりました
- 結果1
 - クォークのピークは何シグマ？
- 考察(→まとめ)2
 - フラックスの計算、カミオカンデと比較、
 - 改善案→ノイズを減らす、
 - 通ると期待して実験を行った先行研究(媚びれる？)と比較して
- (謝辞・参考文献)

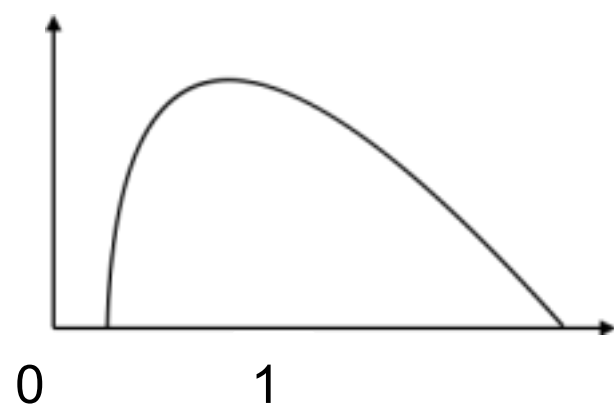
予備スライド

α はどうやって取ったのか、クオークがきたらできると予想される図

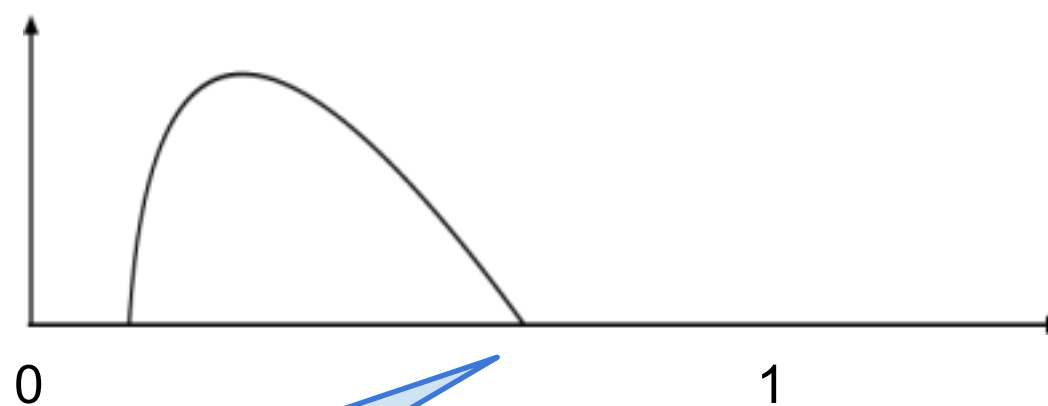
- ベーテの式 $\rightarrow$ 失ったエネルギー $\propto$ 電荷の 2 乗

確率密度

確率密度

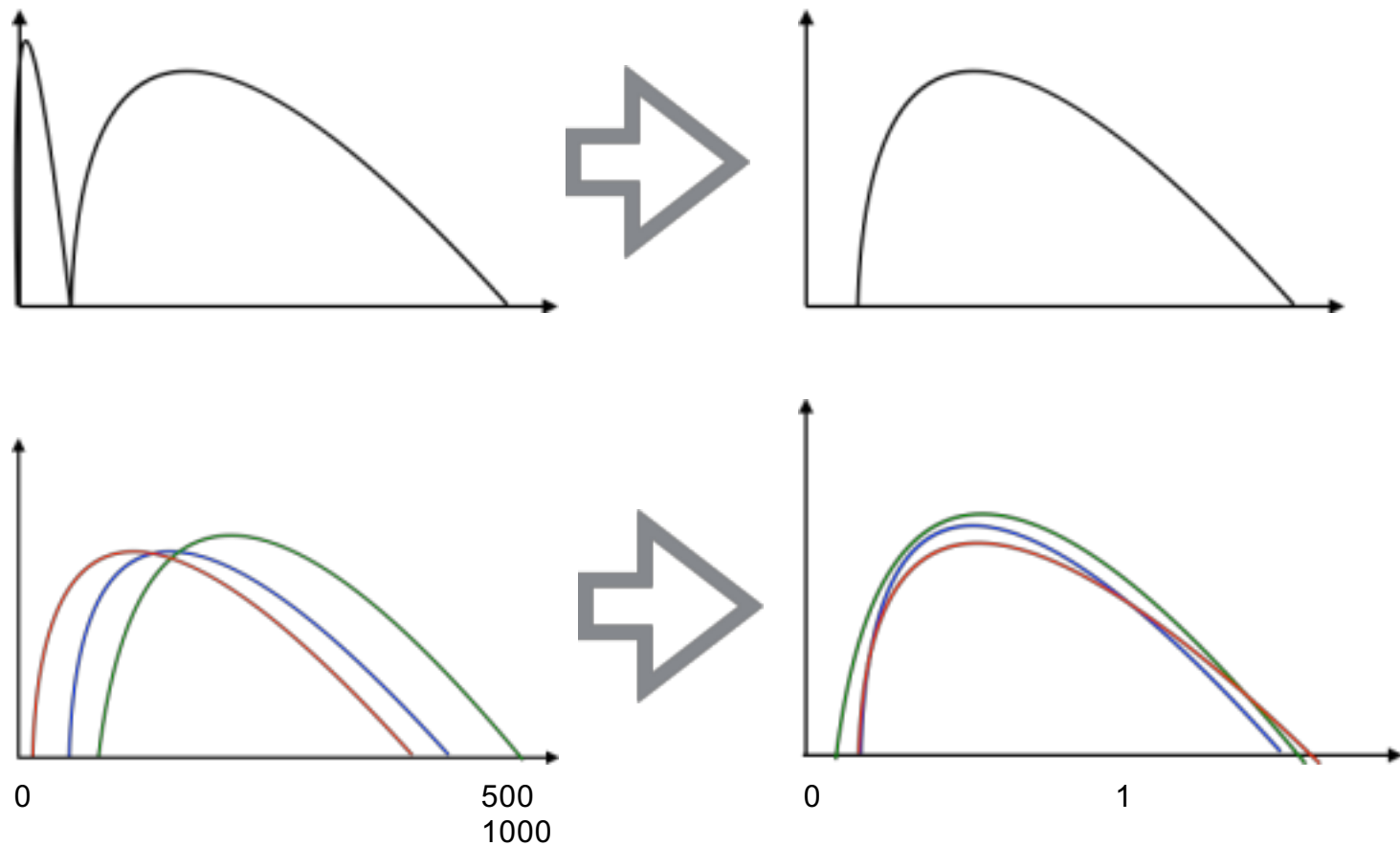


4/9 倍

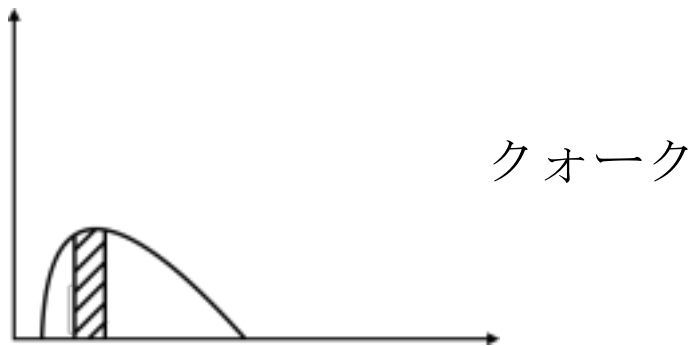
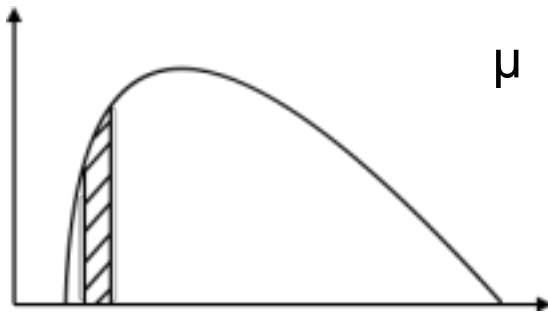


これをクォークの確率分布と仮定する

解析バックアップ ノーマライズの方法



解析バックアップ α (幅) の決め方



$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2}{m_0 v^2} N B$$

$$\frac{dE}{dx}$$

*m*₀

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2}{m_0 v^2} N B$$

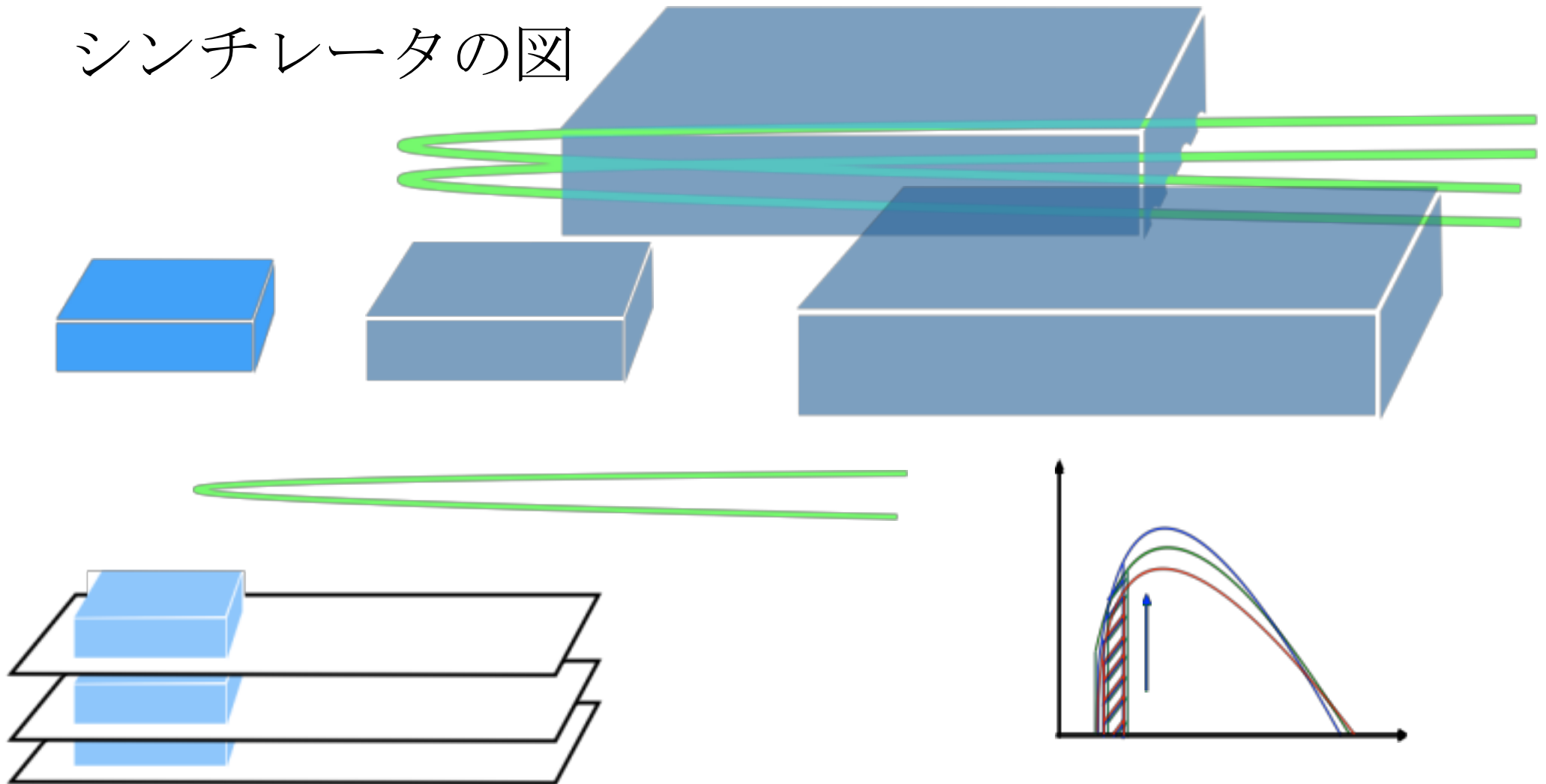
物質を構成する最小単位

クォークの電荷は $\frac{1}{3}, \frac{2}{3}$

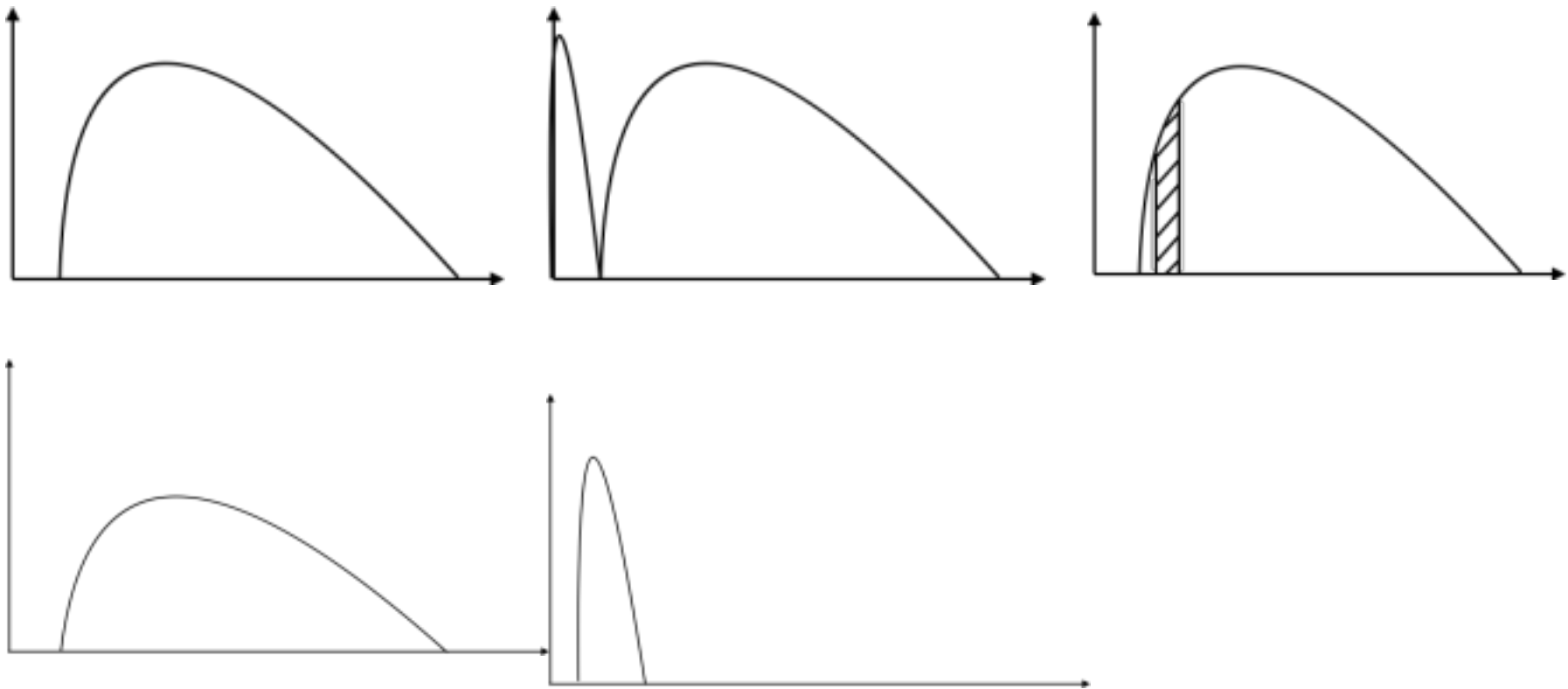
損失するエネルギーはベーテの式から電荷の2乗に従う

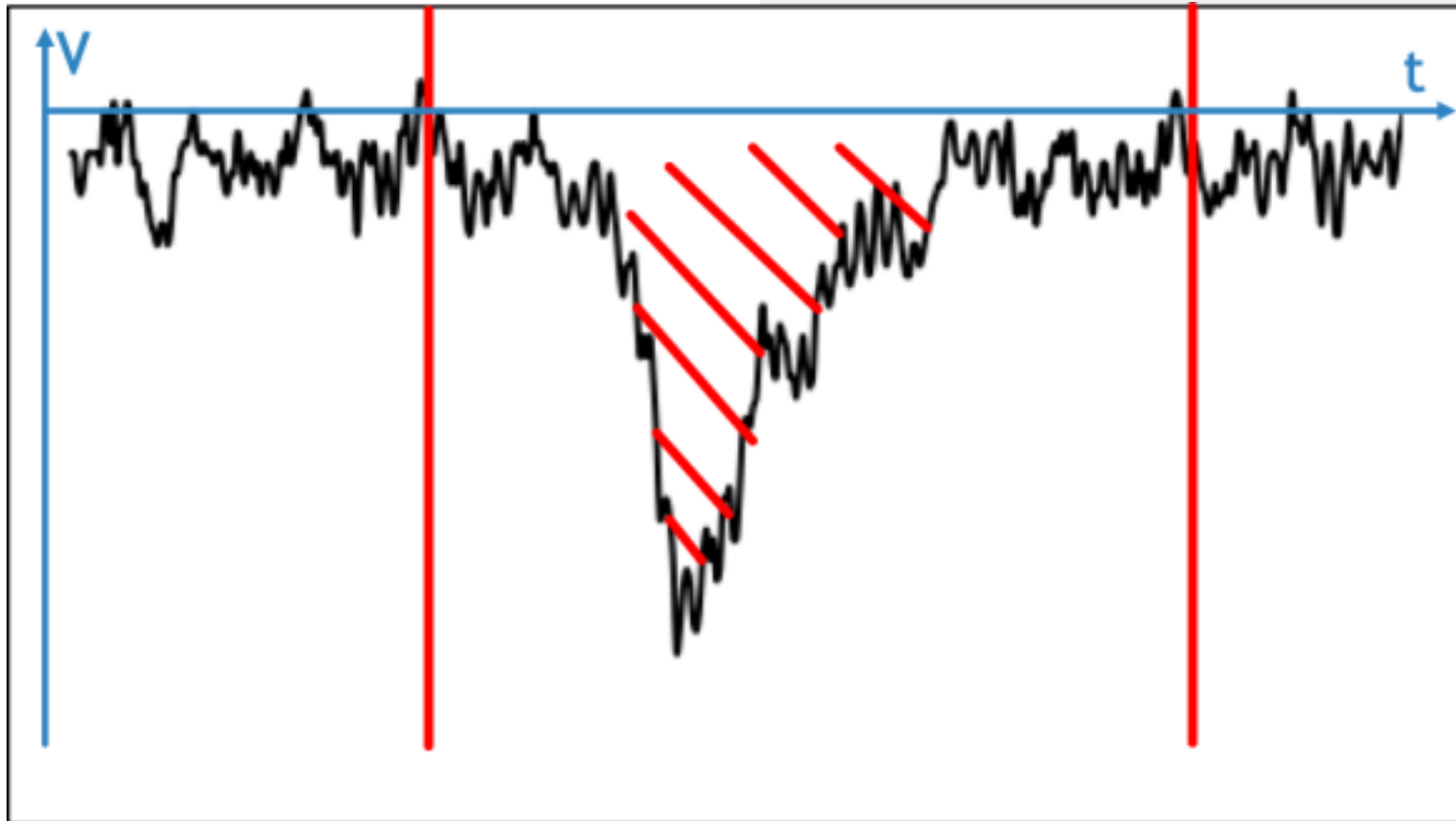
ミューオンが損失するエネルギーを1とした時クォークの失うエネルギーは $\frac{1}{9}, \frac{4}{9}$ となる

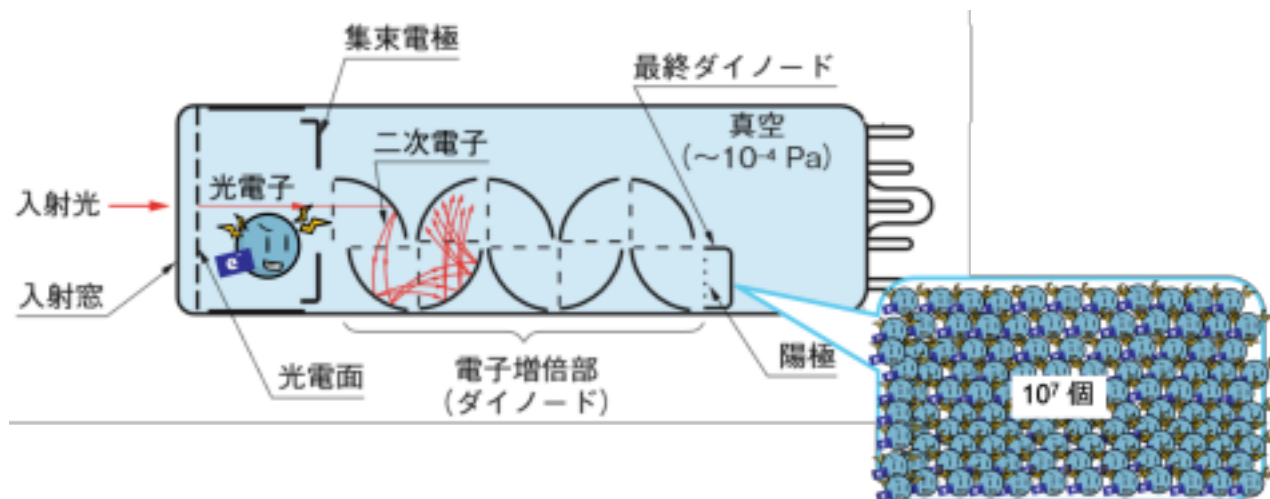
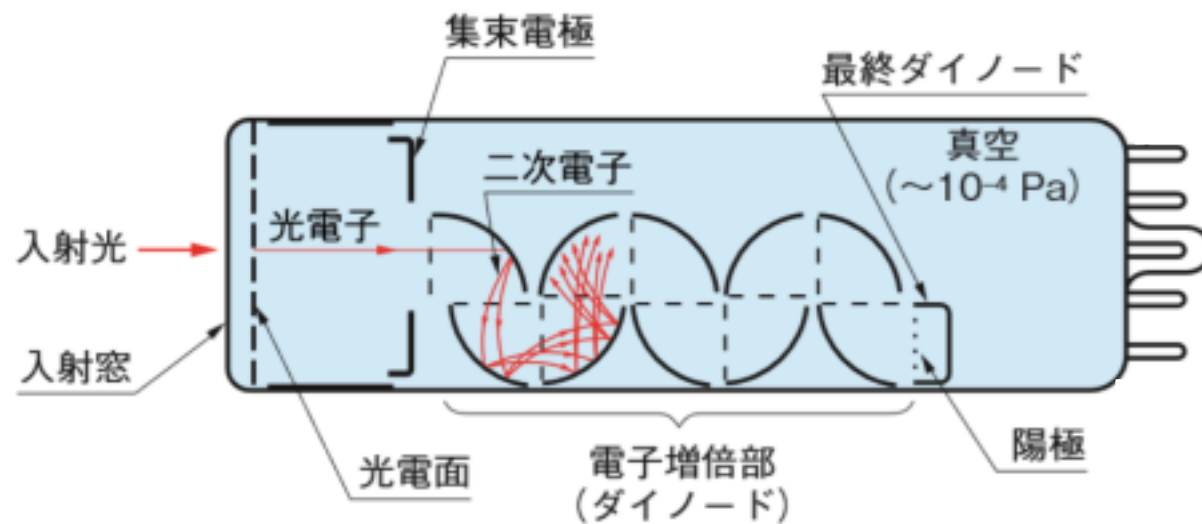
シンチレータの図



解析イラスト

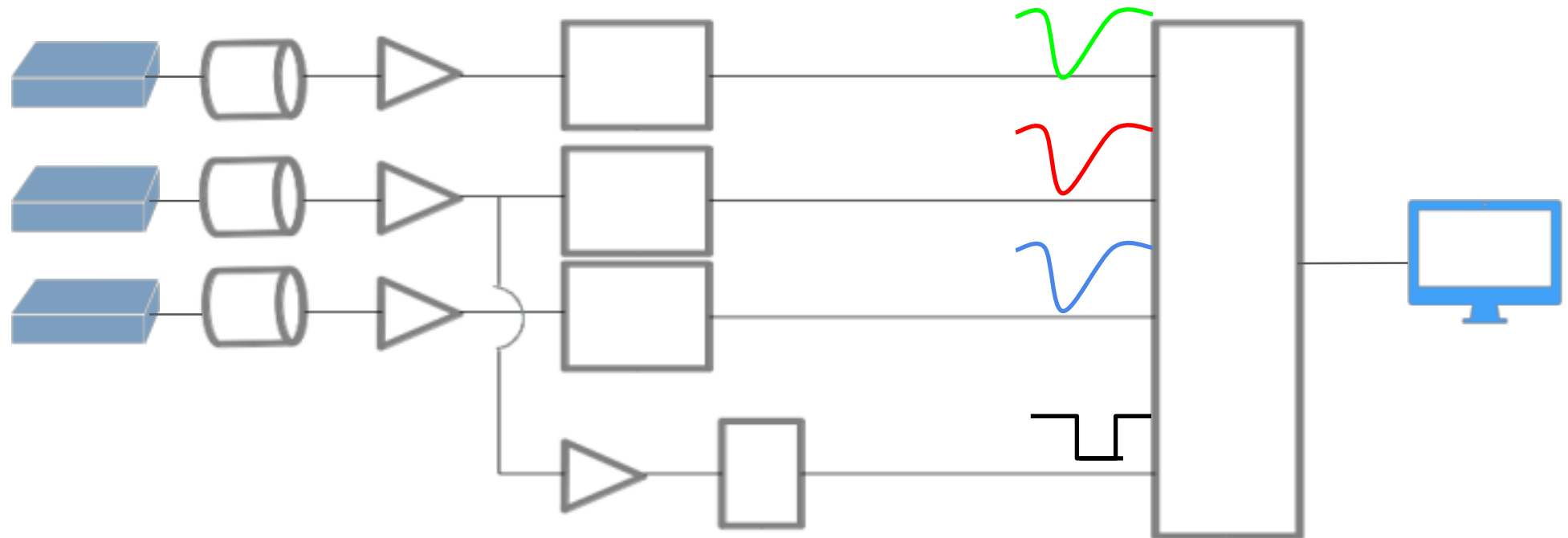




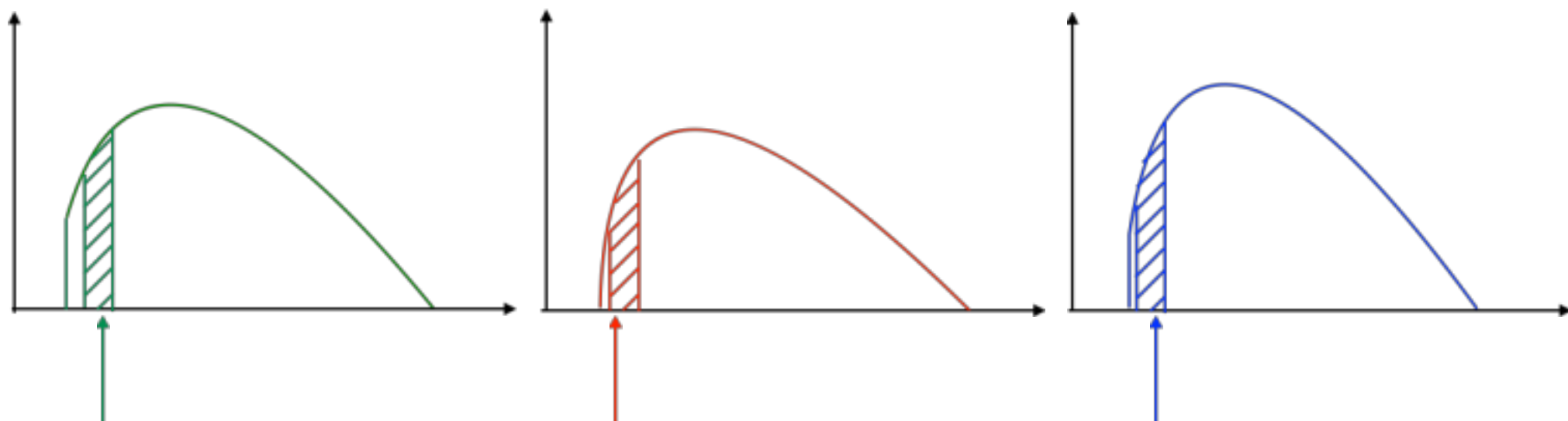


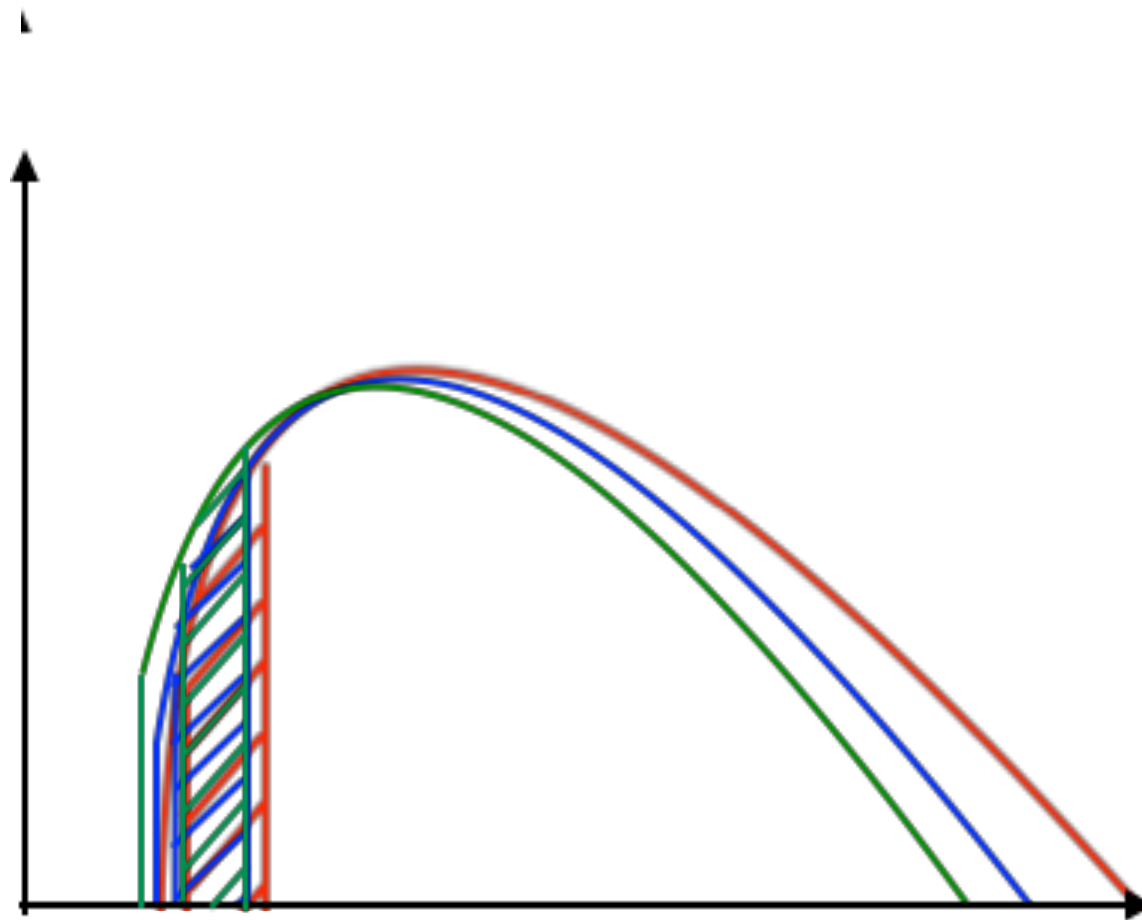
実験方法

測定機器について

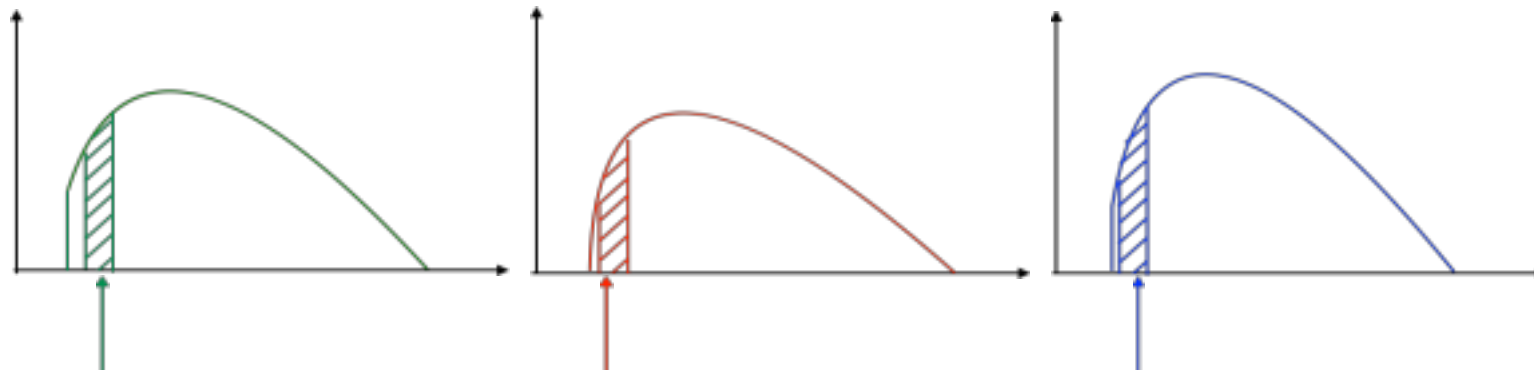


解析





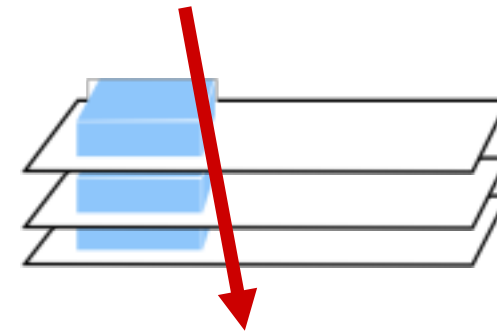
μ 粒子が3層を通過した場合



この部分のデータが3層同時に得られるのは
右の図のように μ 粒子が通過したとき

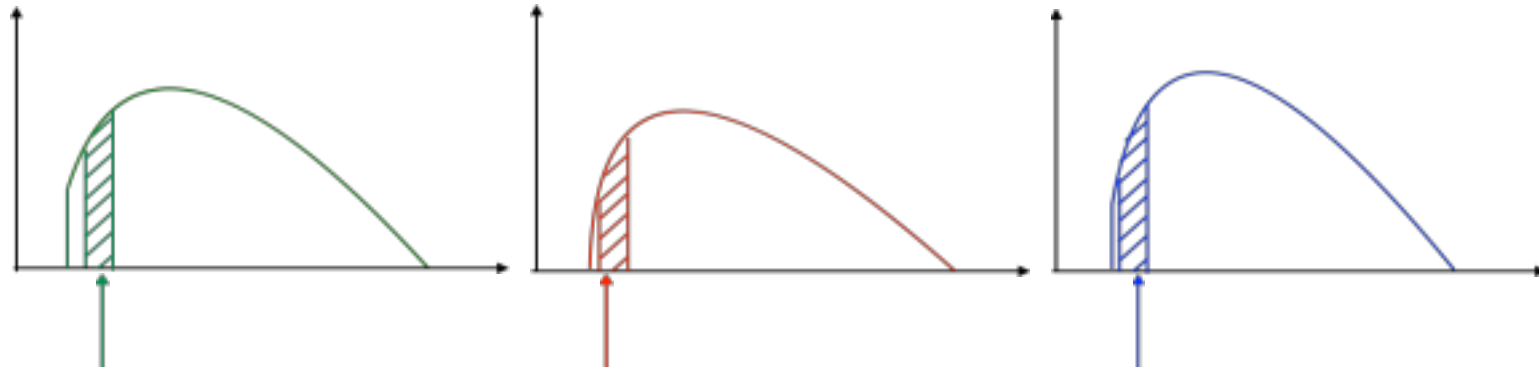


装置の形状からして実際に3層すべてで
このように通過をすることはない



バックグラウンドの期待値を計算するときは、それぞれの層が独立
であるとして計算した → 過大評価をしている

最適な α の決め方



いろいろな α に対して

- 電荷 $\frac{2}{3}e$ の粒子が入ってきたとき
3層すべてで $4/9 \pm \alpha$ に入るデータを得る確率 $\rightarrow N_1$
- μ 粒子が入ってきたとき
3層すべてで $4/9 \pm \alpha$ に入るデータを得る確率 $\rightarrow N_2$

$$\frac{N_{SIG}}{\sqrt{N_{BG}}} \propto \frac{N_1}{\sqrt{N_2}}$$

が最大になる α をもとめる

考察

クォークのフラックスの上限値を求める

- ・クォークの到来数はポアソン分布に従うと考える
- ・バックグラウンドに埋もれない確率が95%となるようなクォークの到来数の平均値を μ とする

$$(\text{フラックス}) = \frac{\mu / (4/9 \pm \alpha \text{ の間に3層すべてで信号が現れる確率})}{(\text{測定時間}) \times (\text{有効立体角}) \times (\text{シンチレータの面積})}$$

確率 : 0.7

時間 : 108848 s

立体角 : π

面積 : 100 cm²