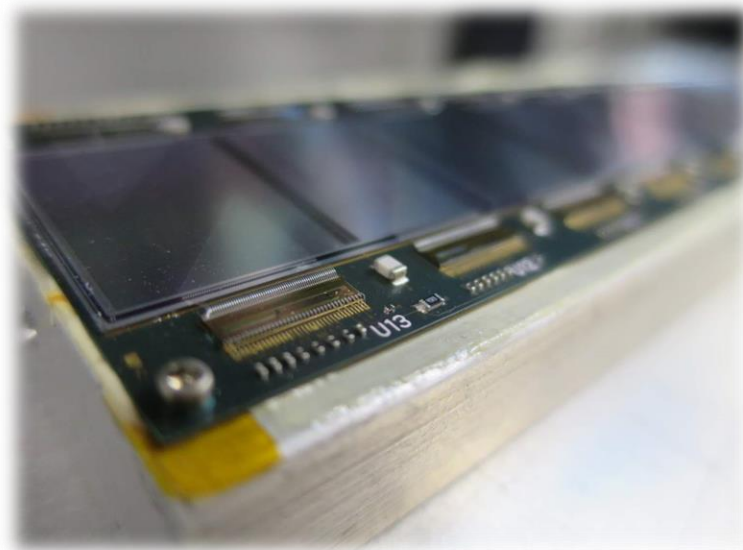


RHIC-sPHENIX実験における中間飛跡検出器 INTT用シリコンセンサーによる宇宙線測定

奈良女子大学 理学部 数物科学科 物理学コース B4 柴田 実香

卒業研究発表会 2020年2月21日



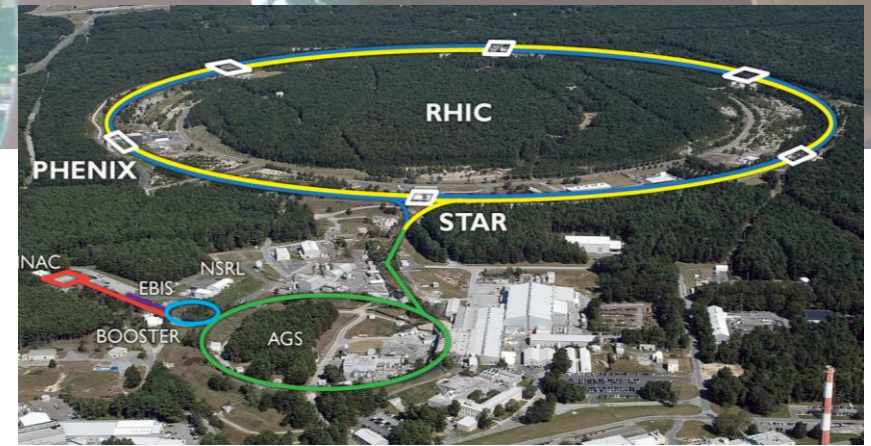
目次

- 研究背景
- 目的
- 宇宙線測定の設定アップと方法
- 宇宙線測定のカラスタ解析方法
- シミュレーションによる宇宙線測定
- 結果
- まとめ

研究背景

RHIC-sPHENIX実験

- アメリカブルックヘブン国立研究所
RHIC(Relativistic Heavy Ion Collider)加速器での実験
- 稼働予定期間
2023年~
- 目的
衝突で生じるJet現象やUpsilon粒子を測定し、QGPの性質を決定する
- 衝突エネルギーと粒子種
200GeV, 金原子核対

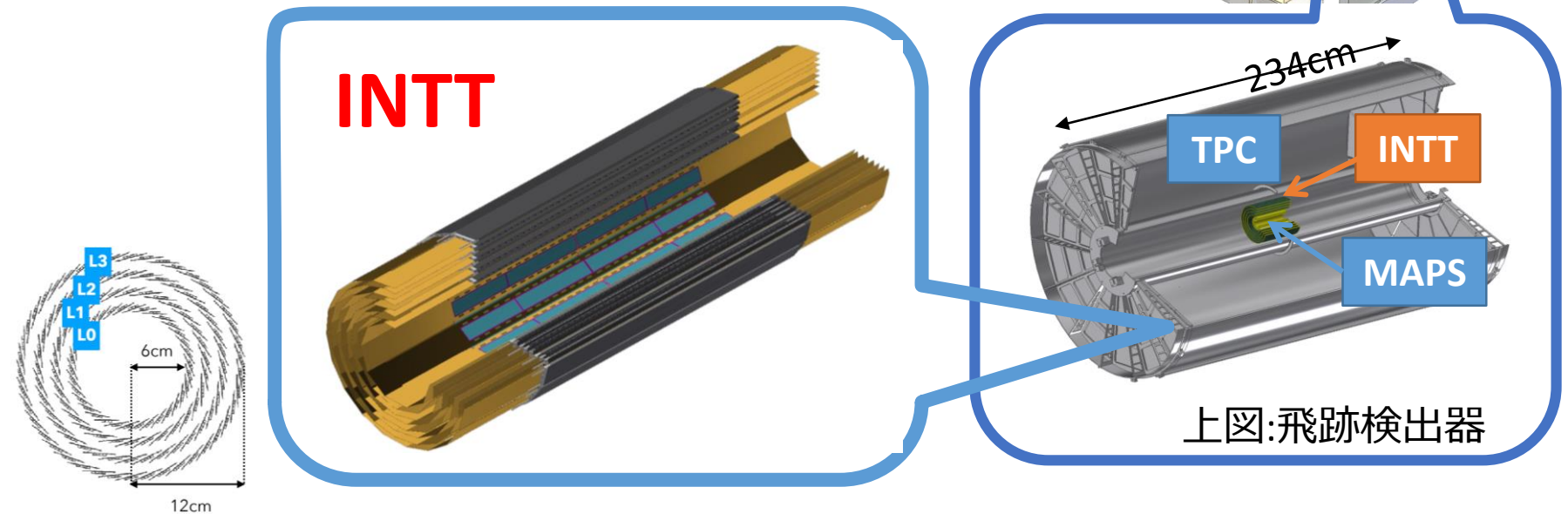
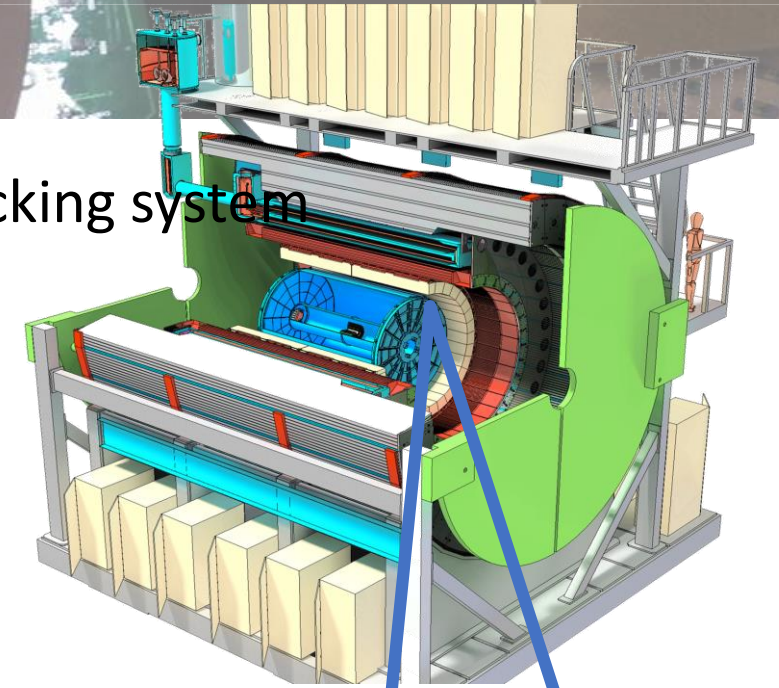


QGP(Quark-Gluon Plasma)

高温、高密度でハドロンの閉じ込めからクォークとグルーオンが解放されたプラズマ相
ビッグバンから約 10^{-5} [s]後に実現していたとされる。

中間飛跡検出器INTT

- INTT: **I**ntermediate Silicon Strip **T**rack detector of the **T**racking system
- sPHENIX実験の3つの飛跡検出器のうちの1つ
- 樽状の4層構造のストリップセンサー
- ビームパイプから6cm~12cmに位置
- 時間分解能が高く、飛跡再構成において重要な役割を担う

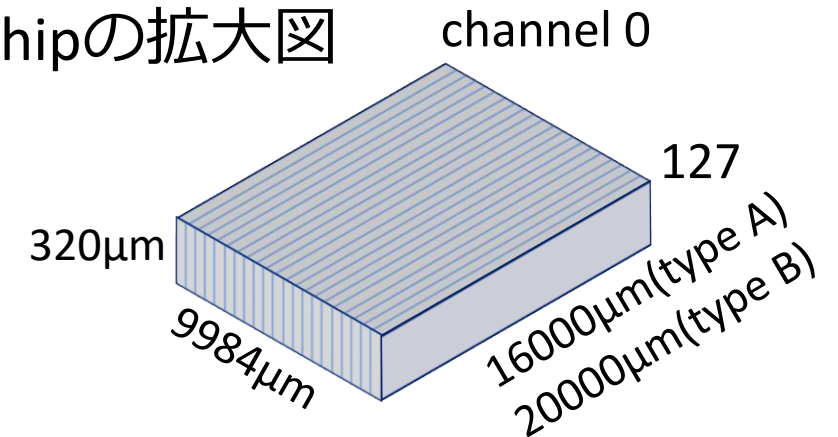


上図:飛跡検出器

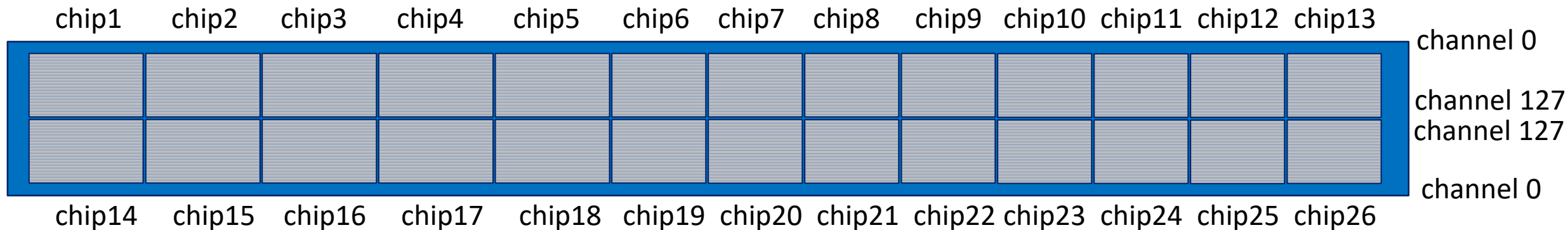
INTT用シリコンセンサー

- シリコンストリップセンサー(chip)
- 78 μm ピッチ、320 μm 厚のストリップ128個で構成(channel)

1chipの拡大図



- sPHENIX実験で使用されるINTT用シリコンセンサーは、2 \times 13個のストリップセンサーで構成されている。
- 2 \times 13個の読み出しチップ(FPHX)



シリコンセンサー読み出しチップ(FPHX)

- 1つのFPHXチップが128ch分(1chip分)の信号をになう
- 1chあたり3bitのADCをもつ。

宇宙線

- μ 粒子は1分毎に1個/cm²地上に来る。

- 実際のsPHENIX実験における、衝突時の重心系エネルギーと放出される崩壊粒子が持つ運動エネルギーの条件に近づける
 - 測定する荷電粒子は光速に近い速度をもつため、大きな運動量を持つMIP(電離損失が最小となるエネルギーを持つ粒子)である。衝突時の重心系エネルギーは200GeV以上であり、崩壊粒子の運動エネルギーも膨大。
 - 宇宙線は、地上付近で再現できる最大のエネルギー(0.4eV)を持つ粒子(MIP)である

予想エネルギー損失とFPHXチップ増幅値

- 320 μm におけるシリコンのエネルギー損失: 約 $1.15\text{MeV} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{cm}^2$
- シリコンの密度: $2.33\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
- シリコン内で電子-正孔対を生成するエネルギー: 3.67eV $23000\text{electrons} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 10^{15} \approx 3.7\text{fC}$
- FPFXチップのゲイン値: 約 $100\text{mV}/\text{fC}$

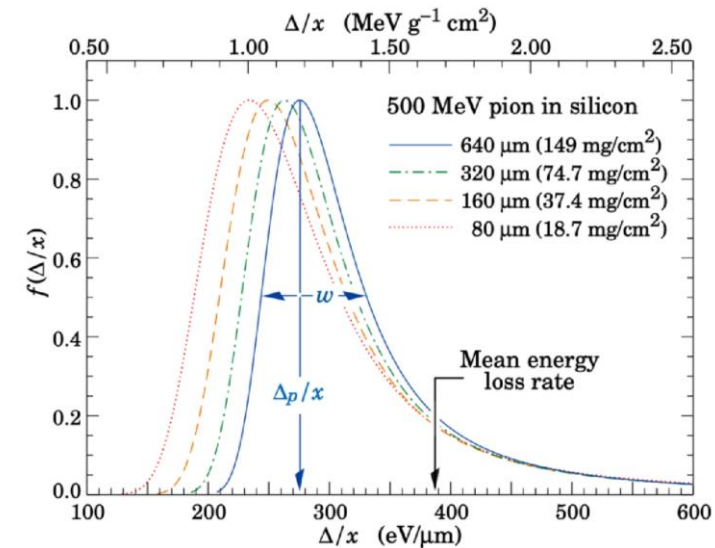
$$\frac{1.15\text{MeV} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{cm}^2 \times 2.33\text{g} \cdot \text{cm}^{-3} \times 0.032\text{cm} \times 10^6}{3.67\text{eV}} \approx \mathbf{23000\text{electrons}}$$

センサー内で発生する総電子数

$$23000\text{electrons} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 10^{15} \approx 3.7\text{fC}$$

$$3.7\text{fC} \times 100\text{mV}/\text{fC} \times 10^{-3} \approx \mathbf{1100\text{mV}}$$

FPFX内のADCに入力される信号



卒業研究目的

- INTT用シリコンセンサーを用いて宇宙線を測定する。
- シリコンセンサーからの信号の読み出しテストによる性能評価の確認
キャリブレーションテストにより、FPHXチップからデータを読み出す回路の性能評価を行うことができるが、シリコンセンサーからの信号の読み出しを確認することはできない。
- 宇宙線測定をした場合のINTT用シリコンセンサーのデータ出力性能を評価する。

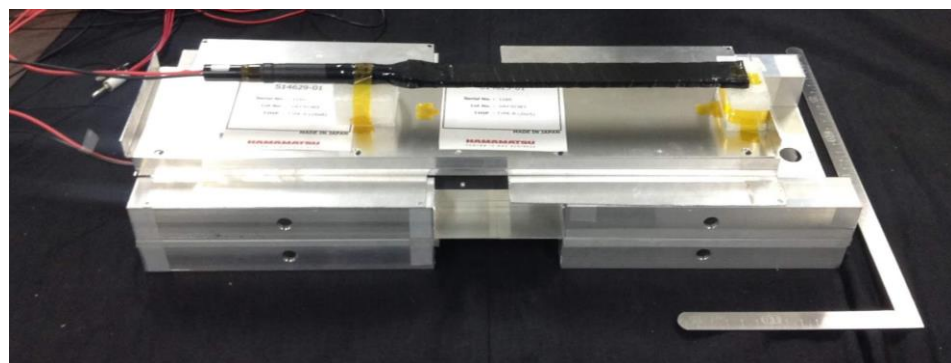
宇宙線測定 セットアップ

- 地上で観測される μ 粒子のエネルギーは十分に大きいため、荷電粒子の空気中とシンチレーションカウンターでのエネルギー損失は考えない。

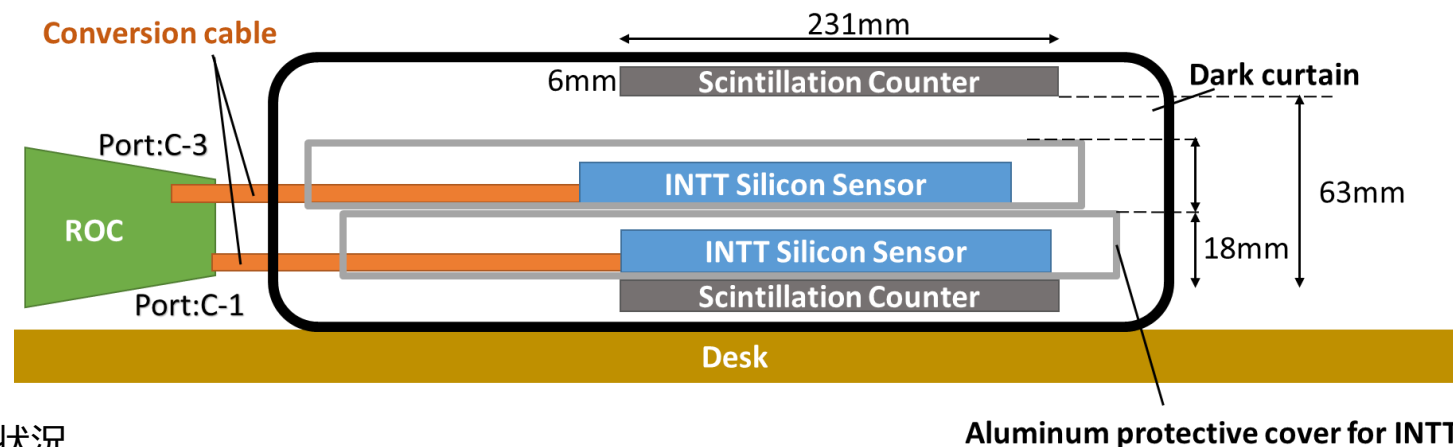
- コインシデンスに使うシンチレーションカウンター

1. 231mm×24mm×6mmのシンチレーションカウンター 2つ

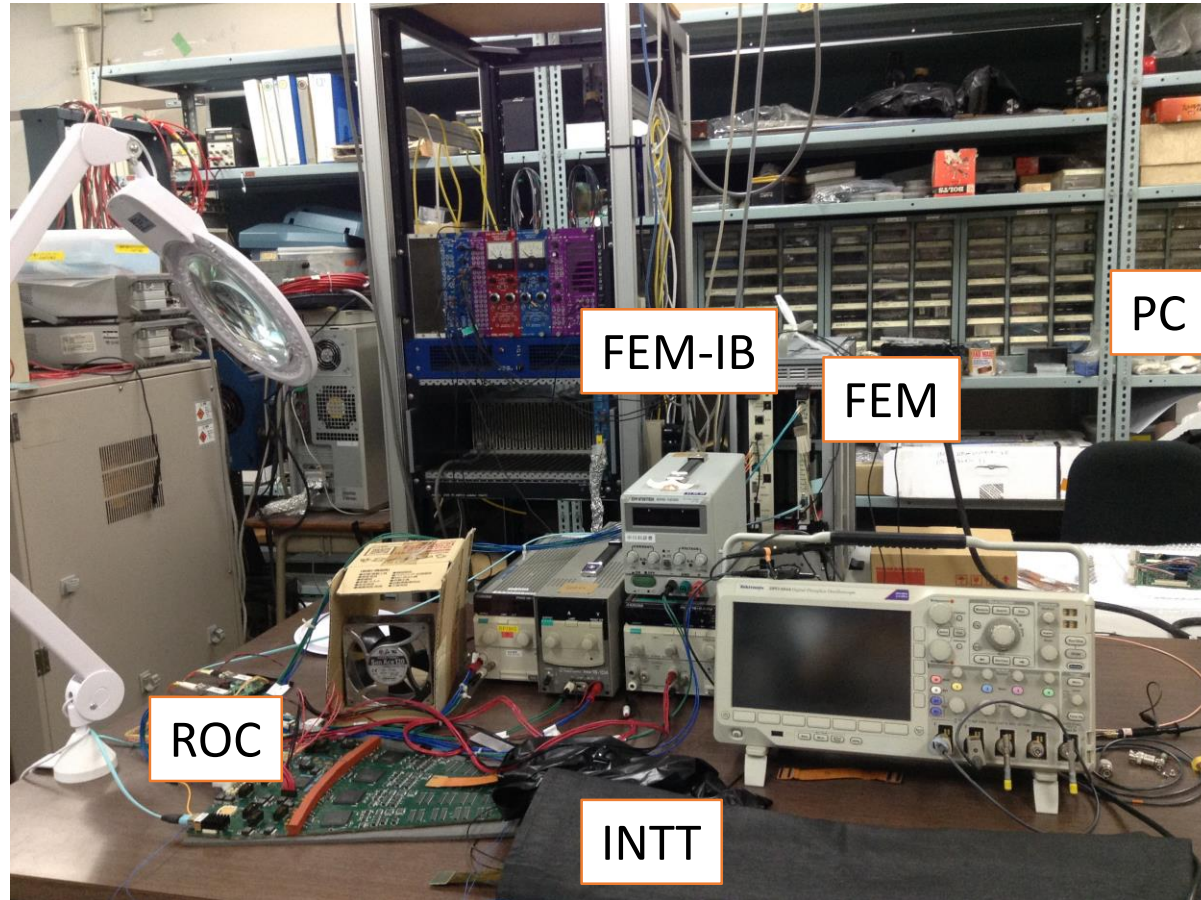
下：使用したシンチレーションカウンター



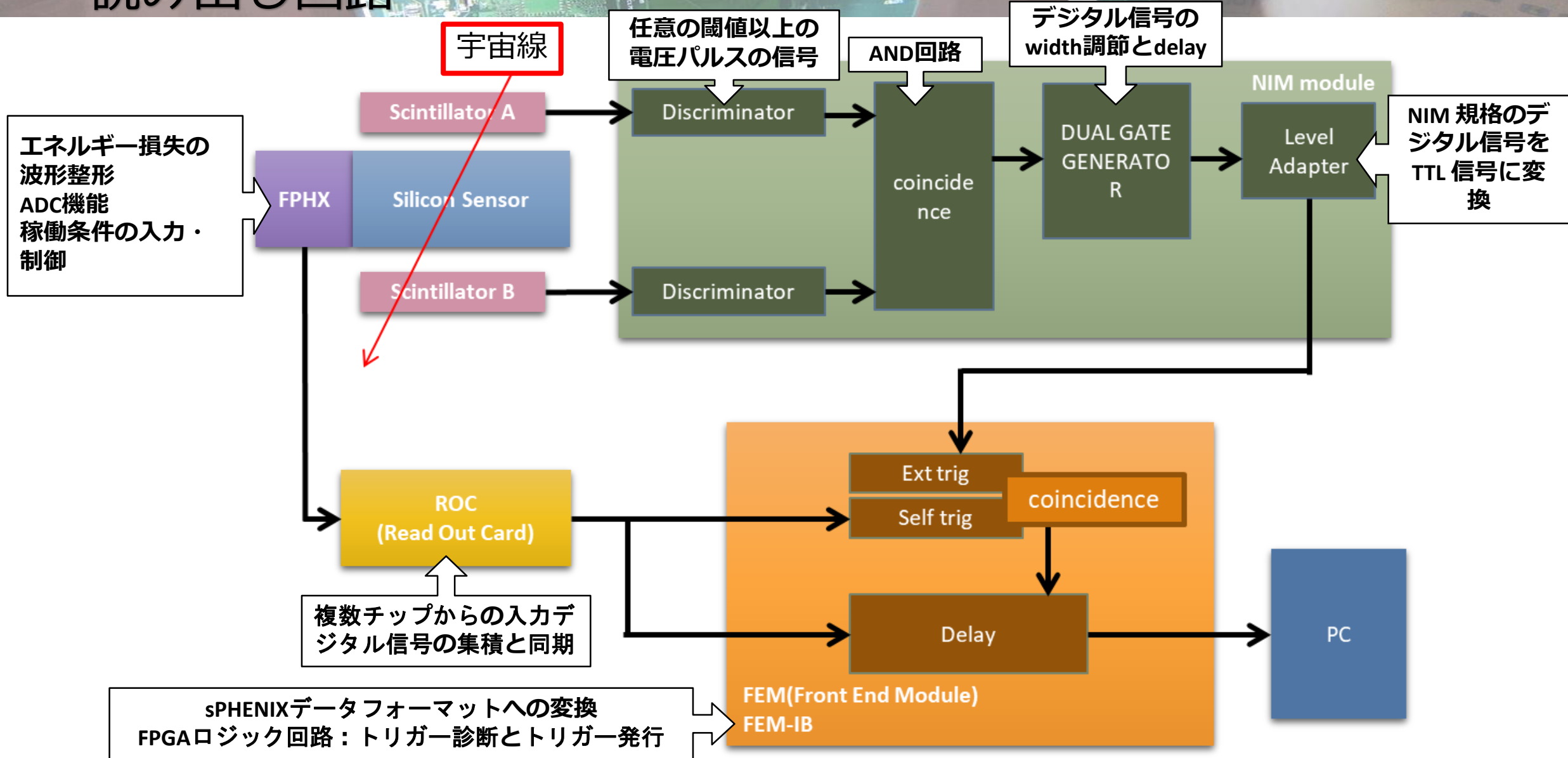
上：シンチレーションカウンターとシリコンセンサーの設置状況



宇宙線測定条件 セットアップ



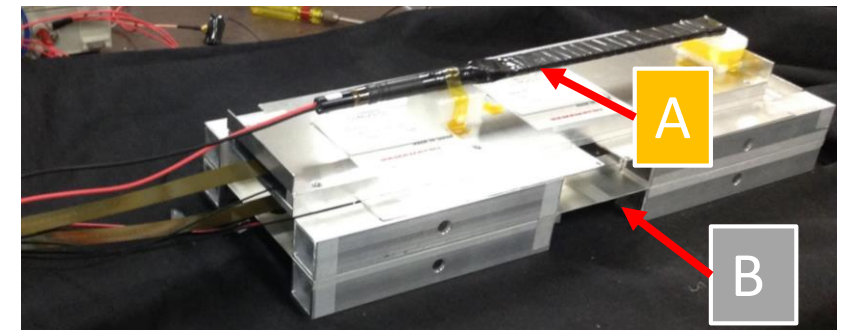
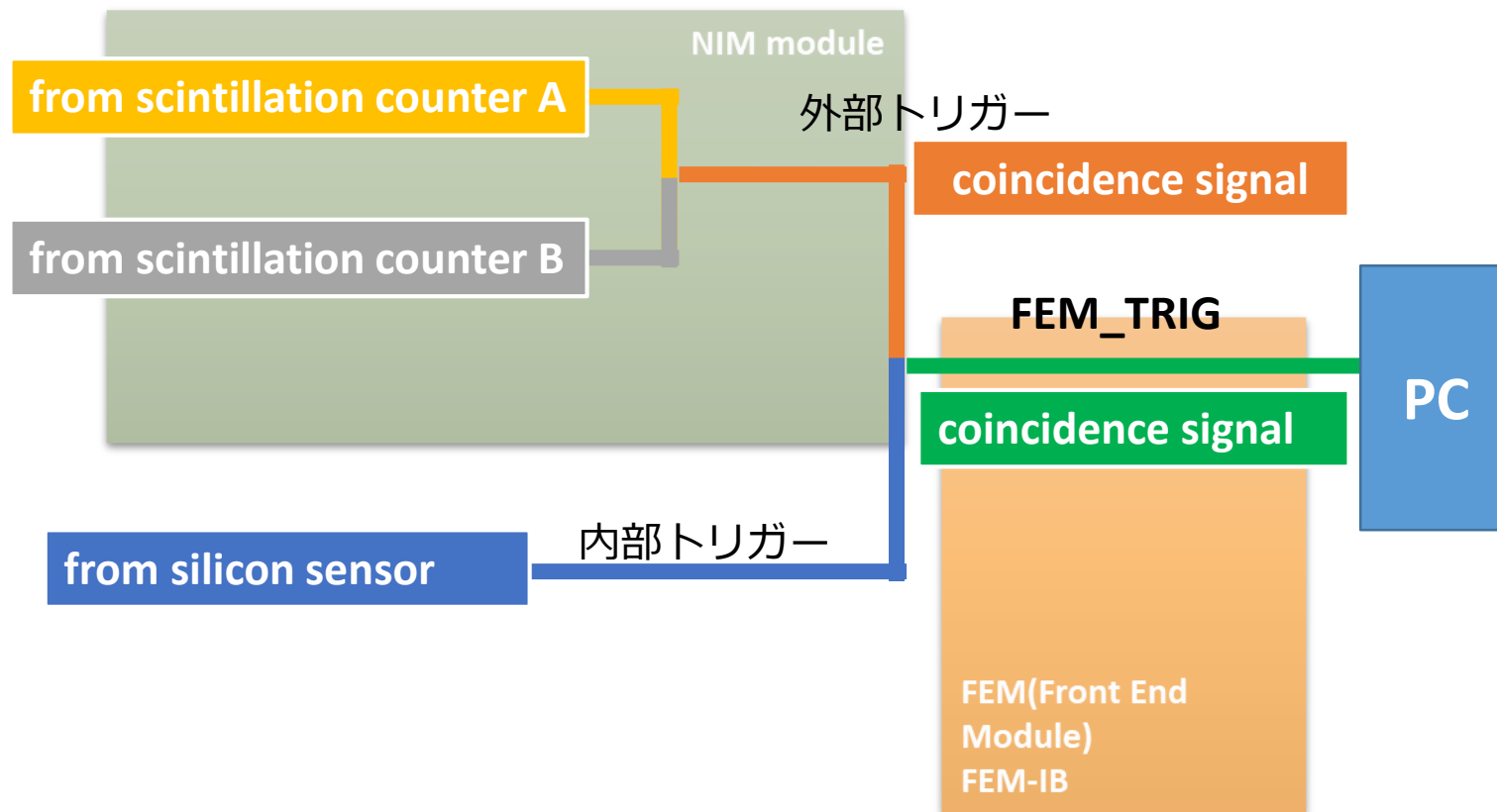
宇宙線測定 読み出し回路



宇宙線測定 外部トリガーとのコインシデンス信号の読み出し回路

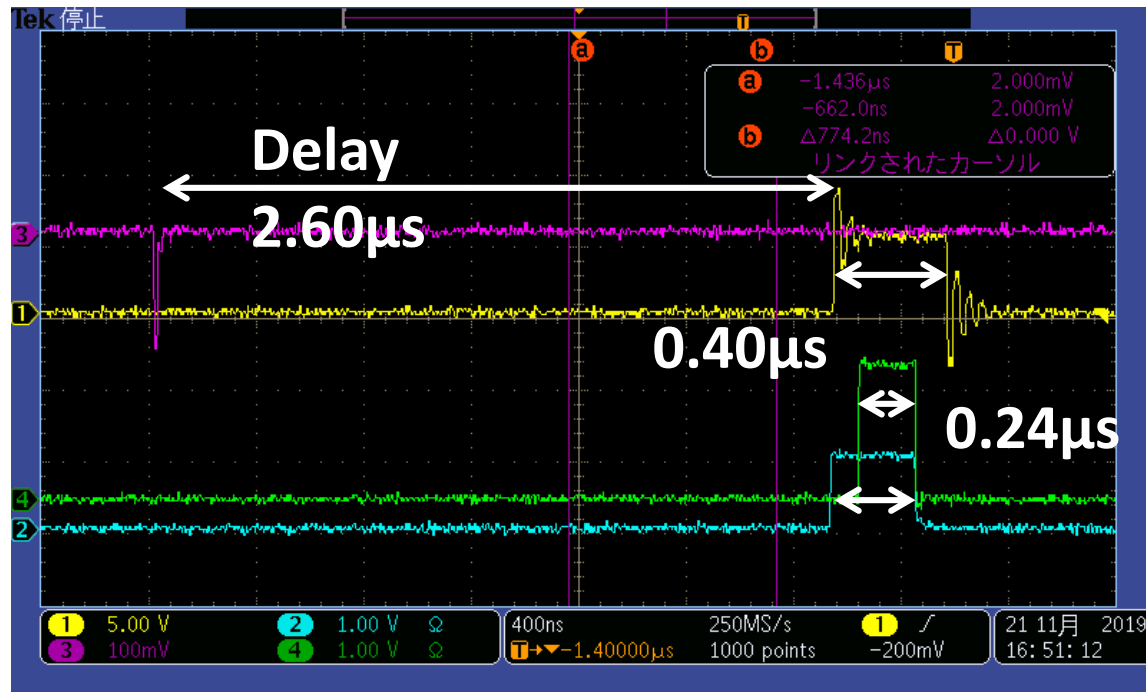
- 宇宙線測定データはシンチレーションカウンター2つからの外部トリガー信号とシリコンセンサーからの内部トリガー信号コインシデンス信号を用いる。

上：シンチレーションカウンターとシリコンセンサーの設置状況
シリコンセンサー上に設置：シンチレーションカウンターA
シリコンセンサー下に設置：シンチレーションカウンターB



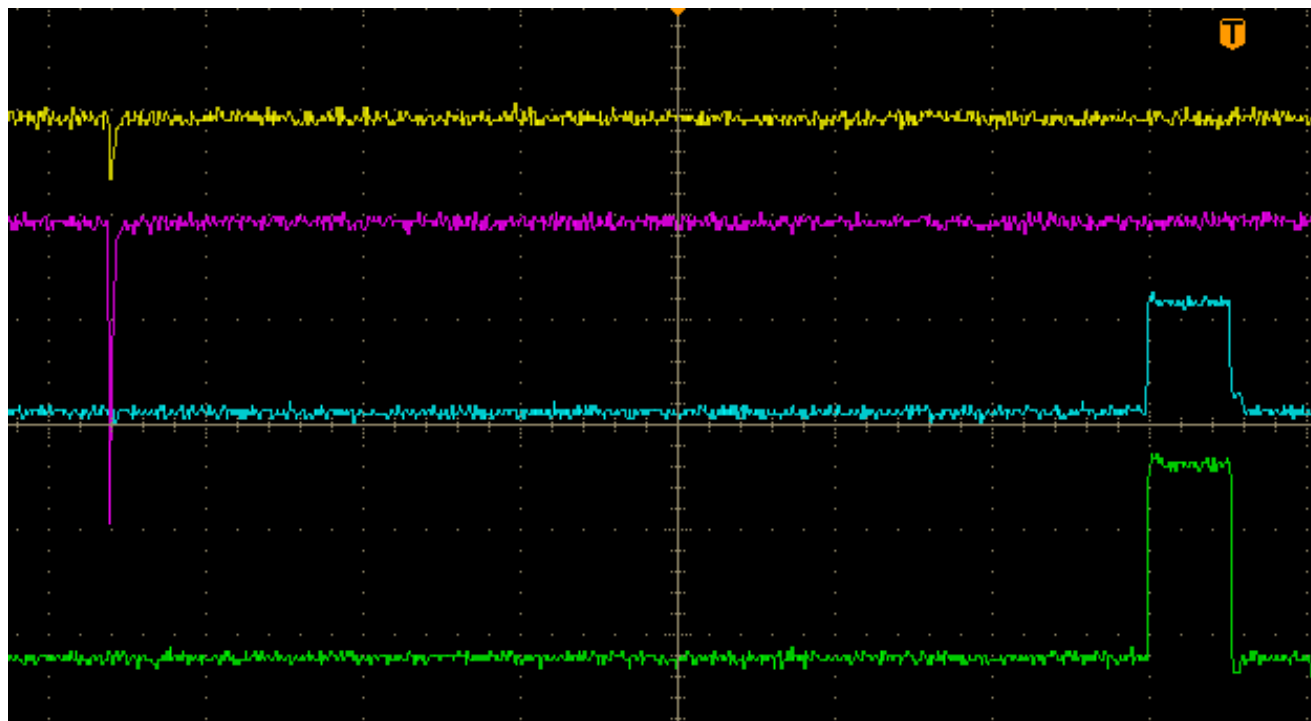
宇宙線測定 トリガーの設定

- FEMへの入力信号TRIG_INが宇宙線トリガーとAND処理後のトリガーの波形の幅よりも大きくなるように設定する。



- ① シンチレーションカウンタからの宇宙線アナログ信号
- ② 宇宙線アナログ信号が NIM 規格を通過後TTL信号に変換された出力(FEMへの入力信号TRIG_IN)
- ③ シリコンの宇宙線トリガー信号 (LVL1_ACCEPT_SELF_TRIG)
- ④ 信号②と信号③のコインシデンスをとったトリガー信号(FEM_TRIG)

宇宙線測定 外部トリガーとのコインシデンス信号

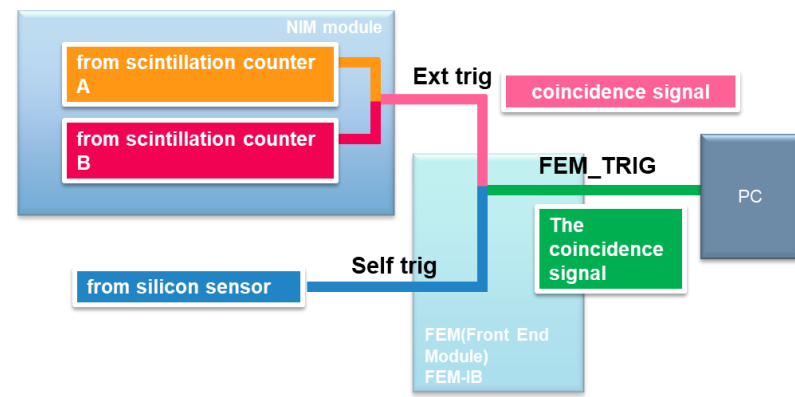


scintillation counter A

scintillation counter B

from silicon sensor

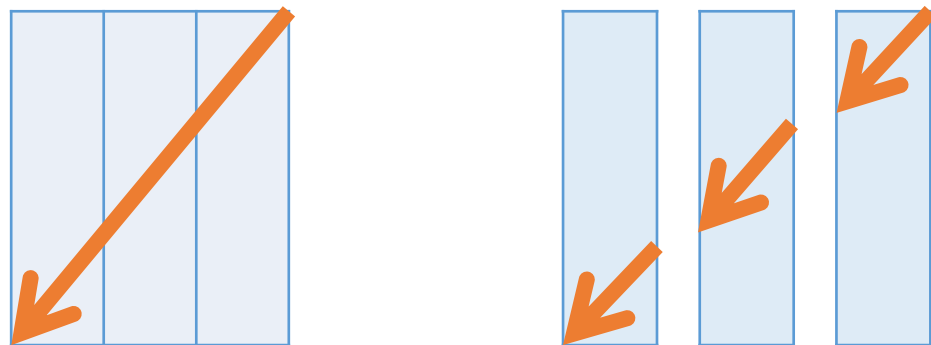
coincidence signal



宇宙線解析プログラム クラスター化プログラム

・クラスター化

- ・INTT用シリコンセンサーはストリップセンサー
- ・多くの宇宙線はセンサーを垂直に通過するが、斜めに通過した場合、連続した複数のストリップでエネルギーを損失する。
- ・解析前のデータでは、この1ヒットによる複数ストリップのデータが別々の複数ヒットとして記録されている。
- ・センサーで宇宙線測定を確認するためには、この複数ストリップの損失エネルギーを足し合わせて1クラスターと処理しなければならない。



DAC設定値	チップ増幅値mV
15	270
23	300
60	450
98	600
135	750
173	900
210	1050
248	1200

上：DAC閾値設定

	1hit	2hits	3hits
Sum Max	384mV	416mV	463mV
Sum min	374mV	384mV	384mV

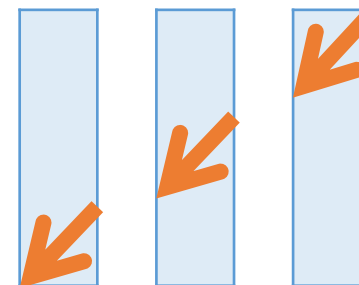
上：通過ストリップ数ごとの予想エネルギー損失（1イベントの1ストリップ内）

宇宙線解析プログラム 連続ヒットデータのクラスター化

クラスター化前

clk	bco=51	bco_full=58163	data: chip_id=7	chan_id=53	abc=2
clk	bco=51	bco_full=58163	data: chip_id=7	chan_id=31	abc=1
clk	bco=51	bco_full=58163	data: chip_id=7	chan_id=32	abc=1
clk	bco=51	bco_full=58163	data: chip_id=7	chan_id=54	abc=2
clk	bco=51	bco_full=58163	data: chip_id=7	chan_id=55	abc=1

1クラスター
1クラスター
1クラスター
1クラスター
1クラスター

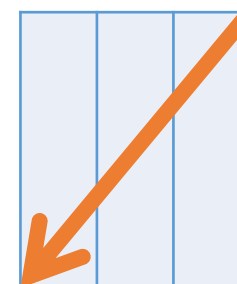


クラスター化前の1クラスター数=5

クラスター化後

clk	bco=51	bco_full=58163	data: chip_id=7	chan_id=31	abc=1
clk	bco=51	bco_full=58163	data: chip_id=7	chan_id=32	abc=1
clk	bco=51	bco_full=58163	data: chip_id=7	chan_id=53	abc=2
clk	bco=51	bco_full=58163	data: chip_id=7	chan_id=54	abc=2
clk	bco=51	bco_full=58163	data: chip_id=7	chan_id=55	abc=1

クラスター化後のクラスター数(Ncls)=2



※Bco_full≈6ms
Bco≈800μs

宇宙線解析プログラム

DAC設定値からチップ増幅値への変換

得られるadcの値とそのDAC設定値とチップ増幅値の関係

DAC設定値*4+210=チップ増幅値[mV]

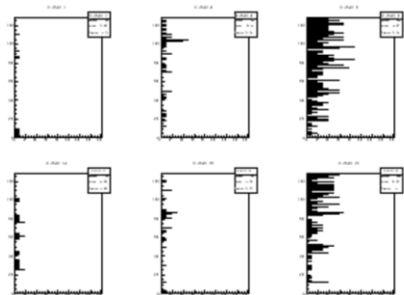
DAC設定値	チップ増幅値	adc	チップ増幅値[mV]	平均値[mV]
20	290	0	290~300	290±5
23	300	1	300~450	370±75
60	450	2	450~600	520±75
98	600	3	600~750	670±75
135	750	4	750~900	820±75
173	900	5	900~1050	970±75
210	1050	6	1050~1200	1120±75
248	1200	7	1200~1234	1212±17



結果 コインシデンス信号を利用した宇宙線

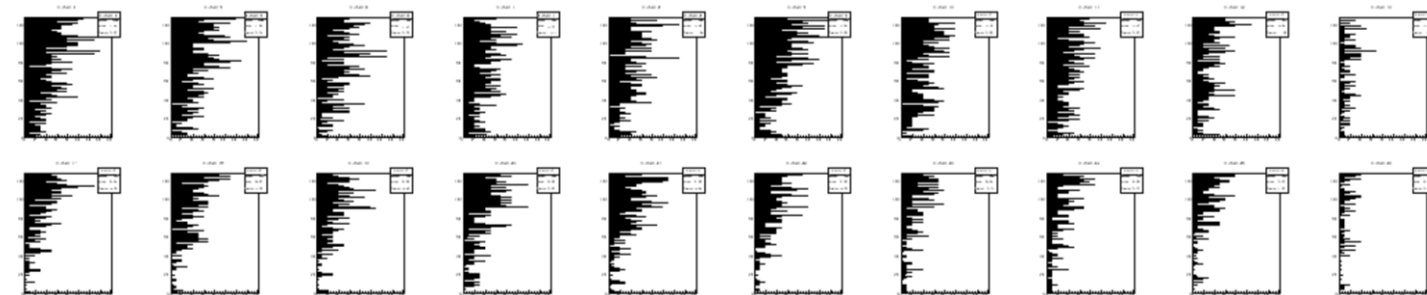
- 2つのシリコンセンサーで宇宙線のヒットを確認。
- セットアップの関係上ヒットチップ分布がずれている。

シリコンセンサーⅡ



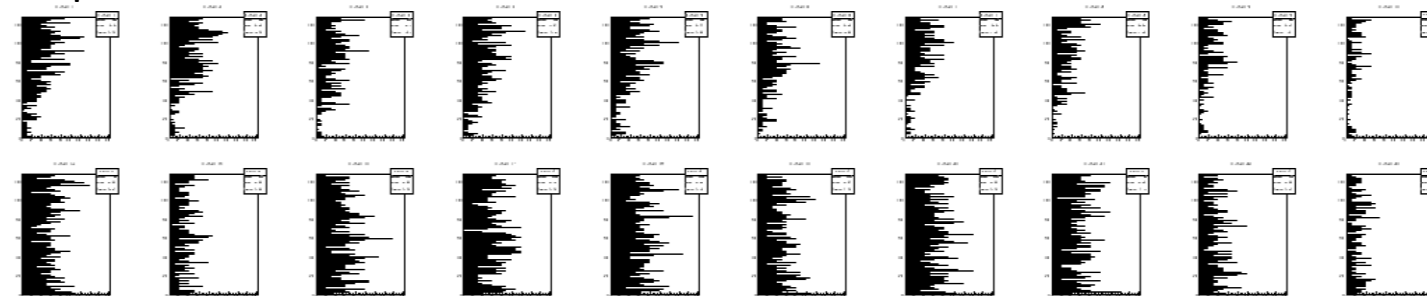
シリコンセンサーⅠ

chip=4

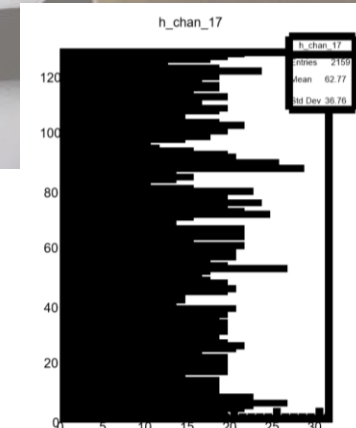


chip=13

chip=1



chip=10



上：各チップごとの宇宙線
ヒットのチャンネル分布
縦軸：チャンネル番号
横軸：ヒット数

上：各チップごとの宇宙線ヒットのチャンネル分布
上26個：シリコンセンサーⅡ
下26個：シリコンセンサーⅠ

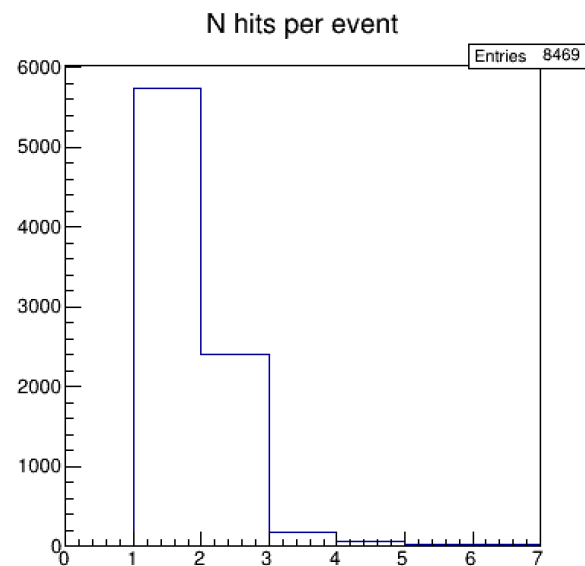
結果 クラスター化前

□クラスター化前の宇宙線のエネルギー損失分布

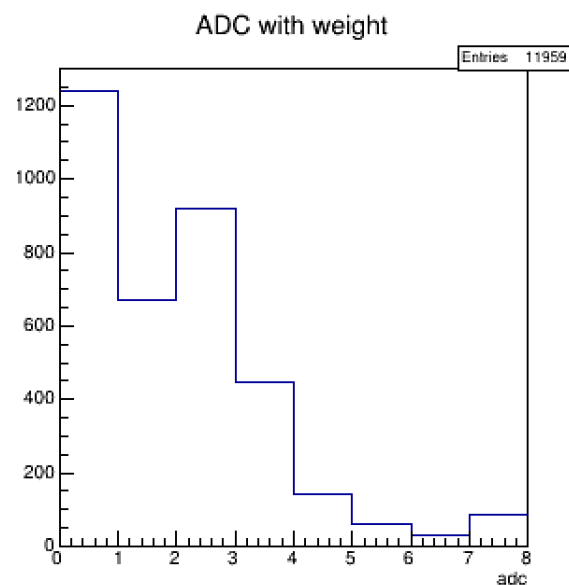
- 270~302mV、450~602mVのエネルギーを損失しているヒットが多い。

• 1 イベントあたりに含まれるヒット数

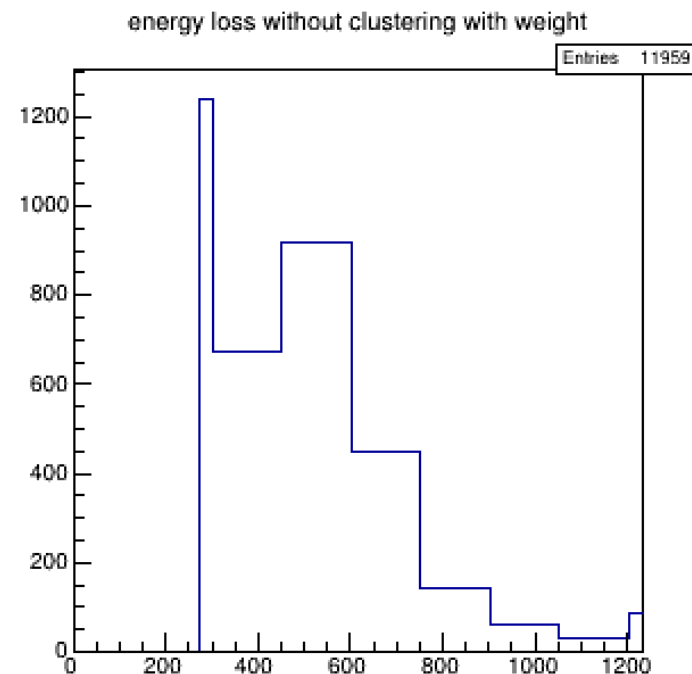
- 約7割：ヒット数1
- 約3割：ヒット数2



上：1 イベントあたりに含まれるヒット数



上：クラスター化前の宇宙線ADC分布



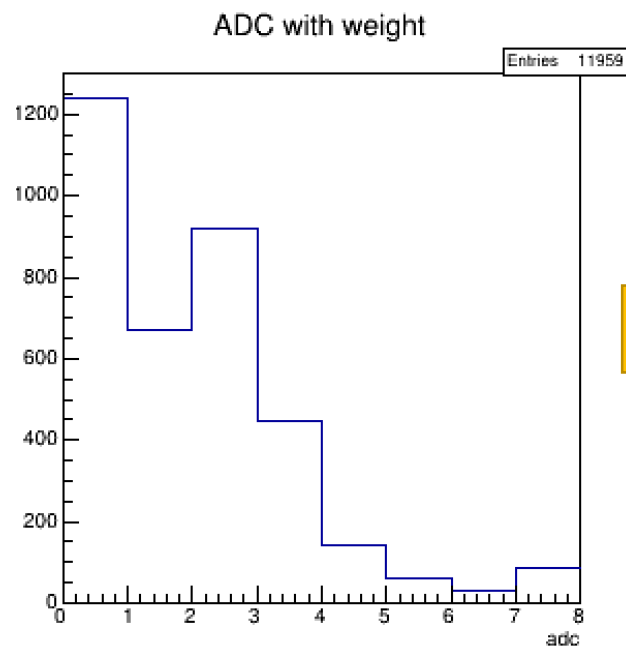
上：クラスター化前の宇宙線のエネルギー損失分布

結果 クラスター化後

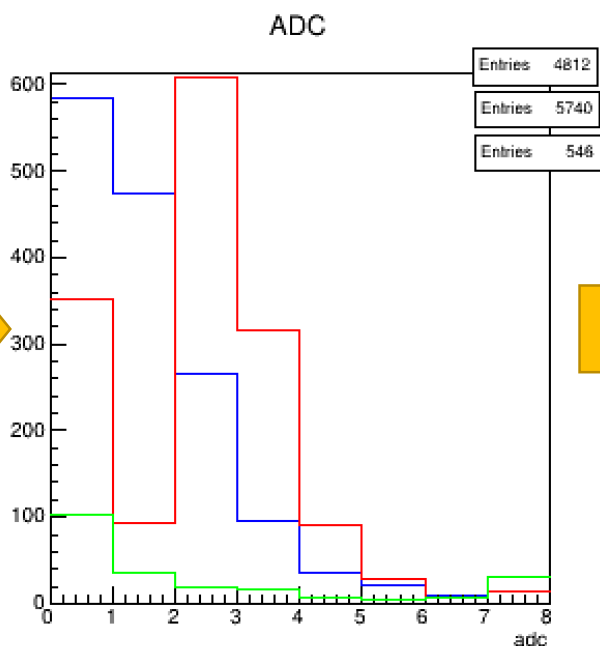
□損失エネルギー

- ・ 通過ストリップ数 = 1 のピーク : 450~600mV
- ・ 通過ストリップ数 = 2 のピーク : 750~900mV

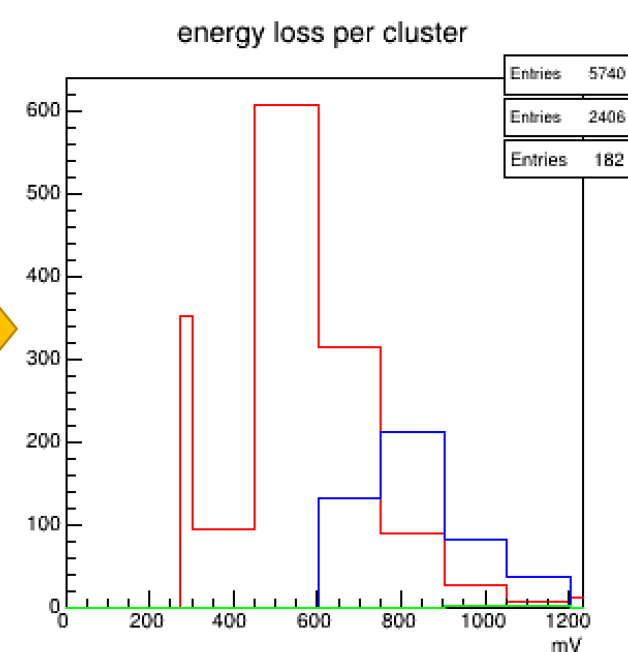
赤 : ヒット数 = 1
青 : ヒット数 = 2
緑 : ヒット数 = 3



上 : クラスター化前の宇宙線ADC分布



上 : 通過ストリップ数ごとのクラスター化前の宇宙線ADC分布



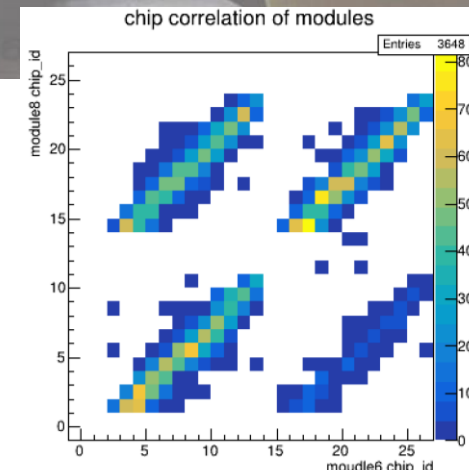
上 : 通過ストリップ数ごとのクラスター化後の宇宙線損失エネルギー分布

→通過ストリップ数によって損失エネルギーのピークが異なる。

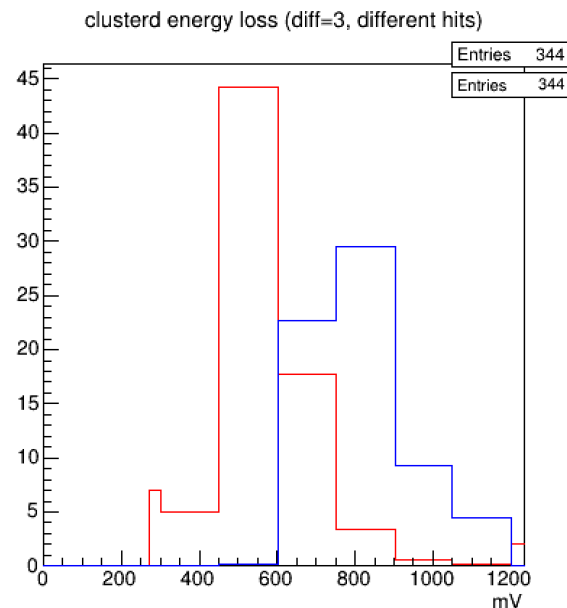
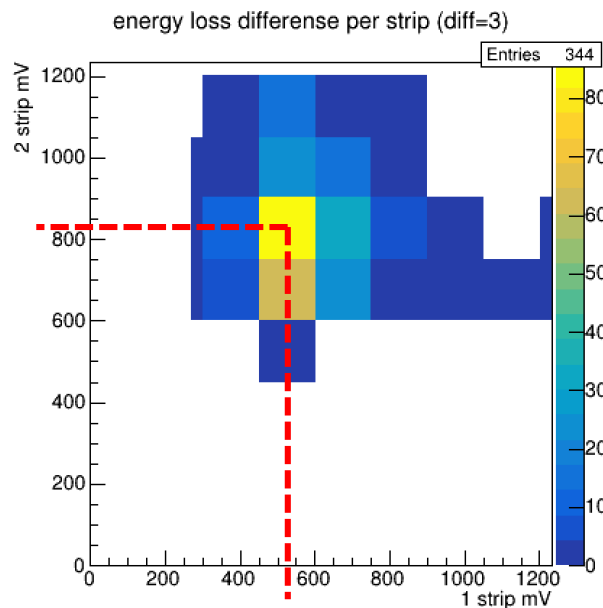
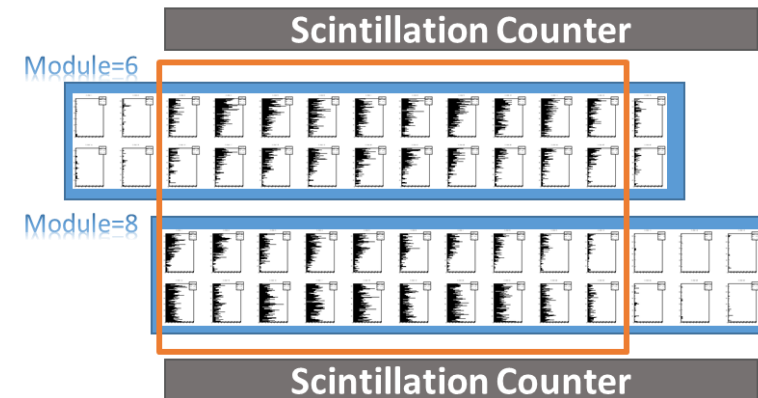
結果 通過ストリップ数によるエネルギー損失の違い

下：同時刻における2つのシリコンセンサーのヒットチップ相関

- 同じ宇宙線が2つのシリコンセンサーを異なるストリップ数通過したイベント
- 同じ宇宙線が垂直に位置するチップを通過したイベント



下：同時刻における2つのシリコンセンサーのチップごとのチャンネルヒット分布から分かるセットアップの模式図



...s (diff=3, different hits)
Entries 1044

- 同じ宇宙線が異なるストリップ数通過した場合、1ストリップでは450~600mV、2ストリップでは750~900mVのエネルギー損失をする組み合わせが最も多い。

シミュレーションによる宇宙線測定

- 宇宙線の入射座標(x, y, z)、角度(θ, ϕ)をMCで発生させる。

考察

- 宇宙線のエネルギー損失は距離に比例しているため、シリコンセンサー内の通過距離が長くなるにつれ多くのエネルギーを損失する。
- 測定時にDAC閾値設定により、小さなエネルギー損失は出力されない。
- そのため、実際に通過したストリップ数よりも少ないストリップ数でのエネルギー損失が出力されると考えられる。

まとめ





卒研の進行状況

柴田 実香

2020年2月13日

INTT 日本語MT

目次

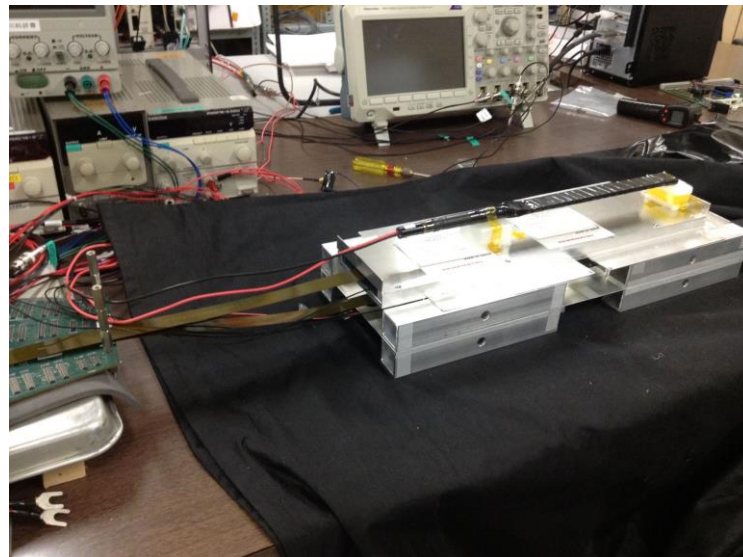
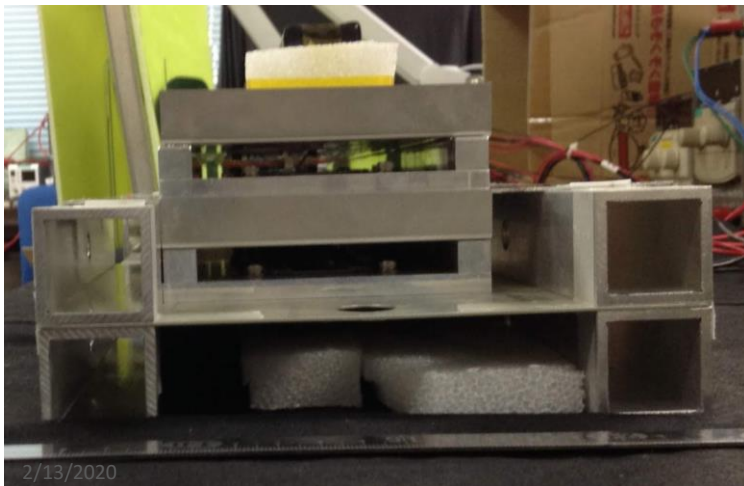
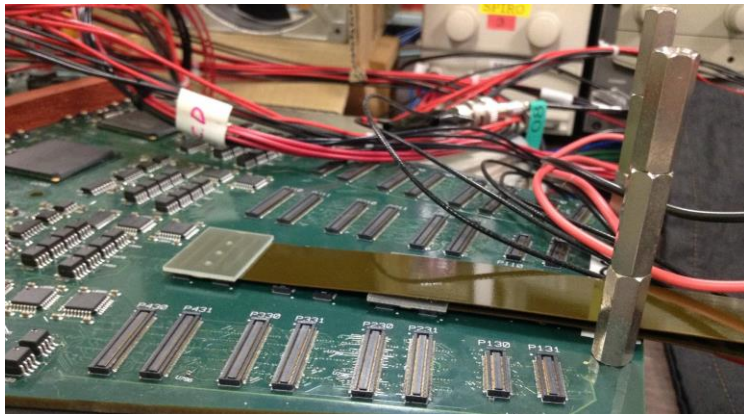
- 卒論の進行状況
- 2つのシリコンセンサーを用いた測定
- 2つのシリコンセンサーを用いた測定の解析結果
- 課題

卒論の進行状況

- スライド作成中
- 宇宙線を継続して測定しカウント数を増やす。
- シミュレーションの改善
- 卒業論文

2つのシリコンセンサーを用いた測定

- 1つのrootファイルに2つのシリコンセンサーのデータが含まれている。
- Rootファイル作成時にモジュール番号を指定するが、できるファイルは同じ。作成時に表示されるグラフは指定したモジュールのもの。



作成したLVケーブル

解析結果 問題点

- ・ 隣り合うBco_fullで同じchan_id, chip_idを持つヒットを含むイベント
- ・ ~~Chip_idは異なるが、chan_idは同じ。~~
→ 機械的なノイズ？ 解析しない

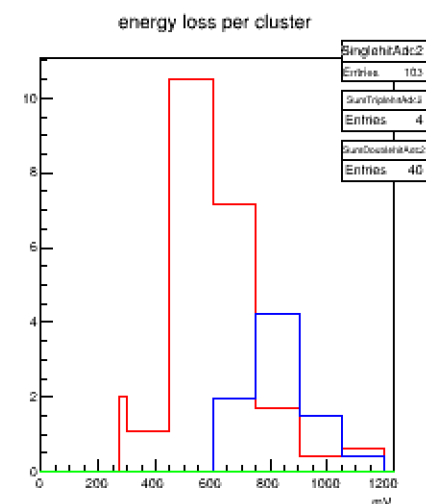
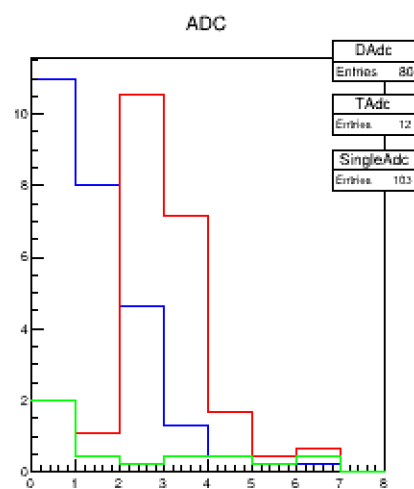
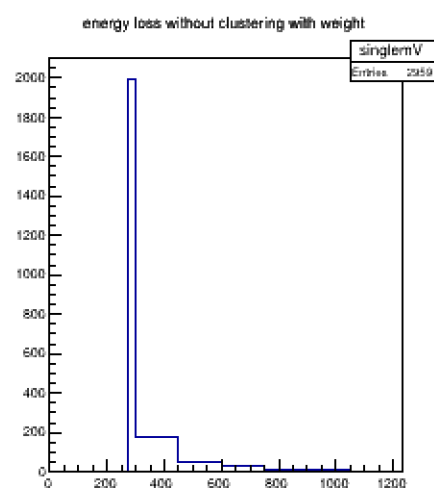
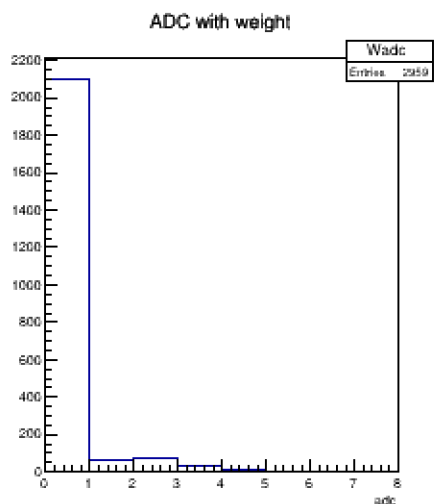
```
module==8 pre :chip=25  chan=40  adc=0  bco=126  bco_full=17022
             new :chip=25  chan=40  adc=0  bco=127  bco_full=17023
module==6 pre :chip=3   chan=84  adc=0  bco=126  bco_full=17022
             new :chip=3   chan=84  adc=0  bco=127  bco_full=17023
module==8 pre :chip=26  chan=3   adc=0  bco=93   bco_full=4317
             new :chip=26  chan=3   adc=0  bco=94   bco_full=4318
module==6 pre :chip=17  chan=87  adc=1  bco=93   bco_full=4317
             new :chip=17  chan=87  adc=1  bco=94   bco_full=4318
module==8 pre :chip=25  chan=60  adc=1  bco=20   bco_full=19988
             new :chip=25  chan=60  adc=1  bco=21   bco_full=19989
module==6 pre :chip=17  chan=105 adc=0  bco=20   bco_full=19988
             new :chip=17  chan=105 adc=0  bco=21   bco_full=19989
```

```
module==8 pre :chip=25 chan=40  adc=0 bco=126 bco_full=17022
             new :chip=25 chan=40  adc=0 bco=127 bco_full=17023
module==6 pre :chip=3  chan=84  adc=0 bco=126 bco_full=17022
             new :chip=3  chan=84  adc=0 bco=127 bco_full=17023
module==8 pre :chip=26 chan=3   adc=0 bco=93  bco_full=4317
             new :chip=26 chan=3   adc=0 bco=94  bco_full=4318
module==6 pre :chip=17 chan=87  adc=1 bco=93  bco_full=4317
             new :chip=17 chan=87  adc=1 bco=94  bco_full=4318
module==8 pre :chip=25 chan=60  adc=1 bco=20  bco_full=19988
             new :chip=25 chan=60  adc=1 bco=21  bco_full=19989
module==6 pre :chip=17 chan=105 adc=0 bco=20  bco_full=19988
             new :chip=17 chan=105 adc=0 bco=21  bco_full=19989
module==8 pre :chip=24 chan=9   adc=0 bco=9   bco_full=20233
             new :chip=24 chan=9   adc=0 bco=10  bco_full=20234
module==6 pre :chip=3  chan=118 adc=0 bco=9   bco_full=20233
             new :chip=3  chan=118 adc=0 bco=10  bco_full=20234
module==8 pre :chip=11 chan=57  adc=1 bco=120 bco_full=5752
             new :chip=11 chan=57  adc=1 bco=121 bco_full=5753
module==6 pre :chip=2  chan=50  adc=1 bco=120 bco_full=5752
             new :chip=2  chan=50  adc=1 bco=121 bco_full=5753
module==8 pre :chip=24 chan=126 adc=0 bco=94  bco_full=23134
             new :chip=24 chan=126 adc=0 bco=95  bco_full=23135
module==6 pre :chip=15 chan=107 adc=0 bco=94  bco_full=23134
             new :chip=15 chan=107 adc=0 bco=95  bco_full=23135
```

解析結果 データ選択

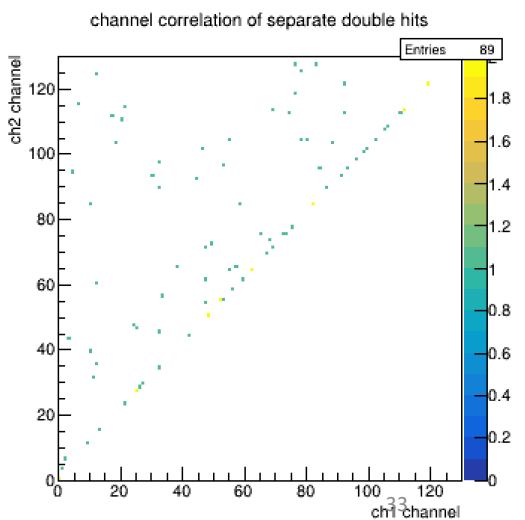
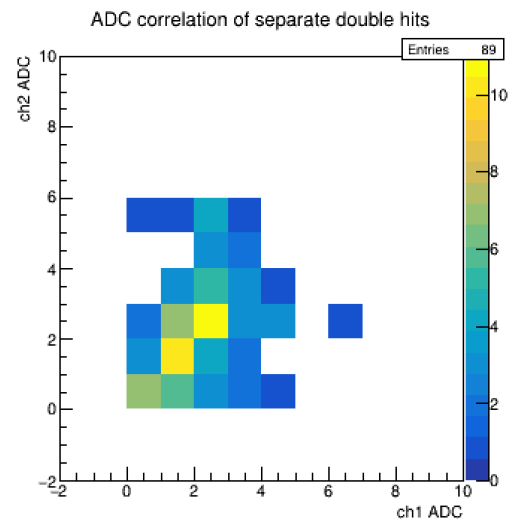
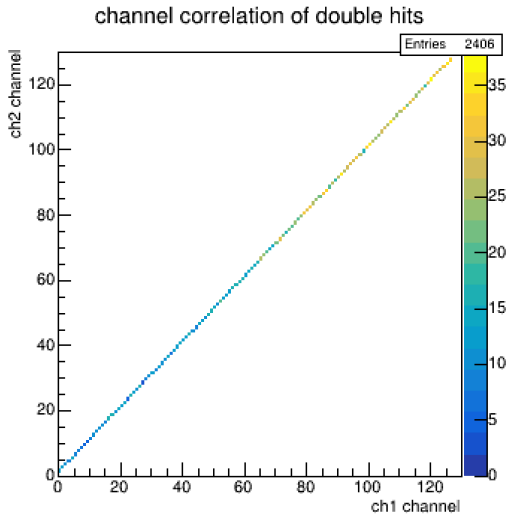
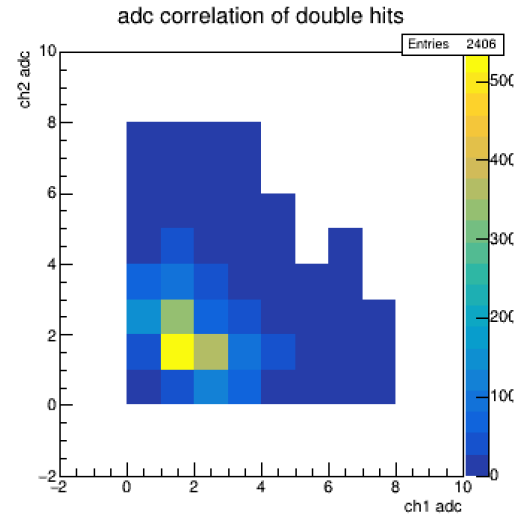
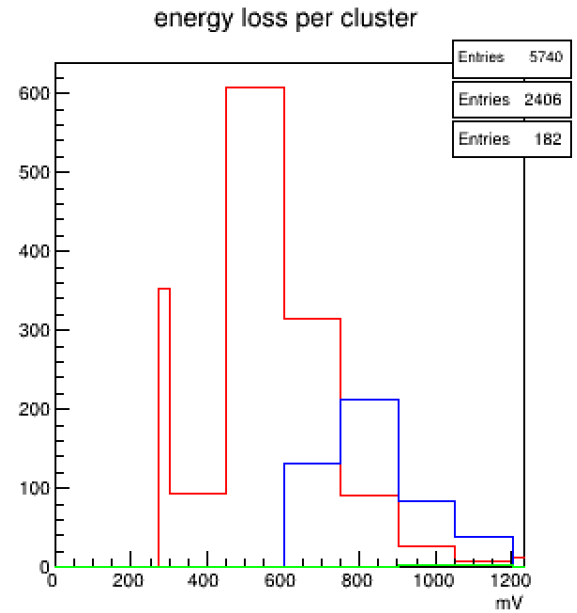
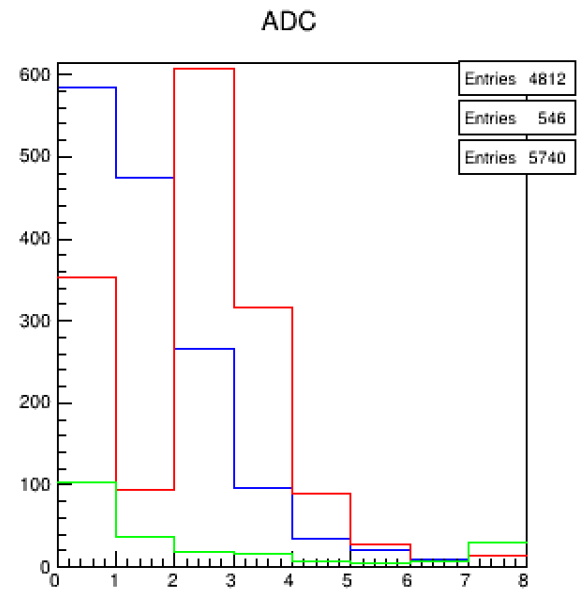
□解析から除いたデータ

- センサーが接続されていないROCのPort番号のデータ
- 存在しえない値を持つデータ(amplitude>0, chip1~26以外, chan0~127以外)
- 1つのセンサーにしかヒットしなかったイベント
- 隣り合うBco_fullで同じchan_id, chip_idを持つヒットを含むイベント



解析結果

Energy distribution per passed strip number

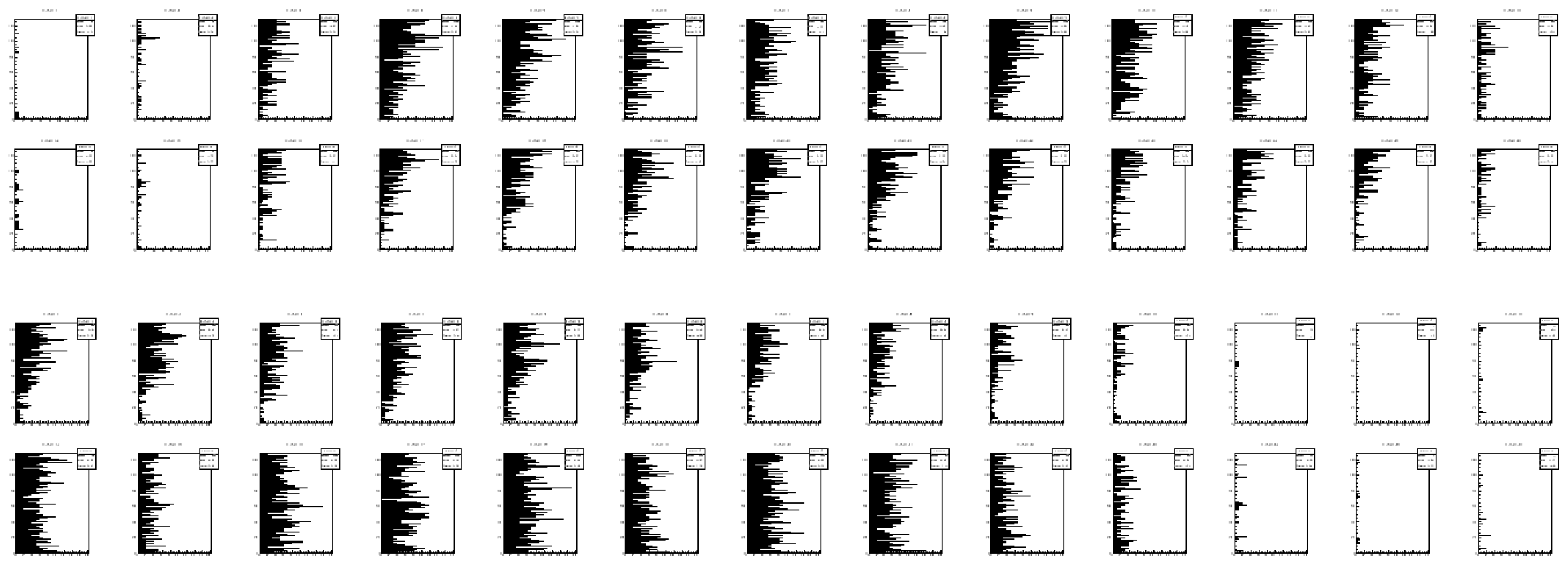


- エネルギー損失のピークに変化なし

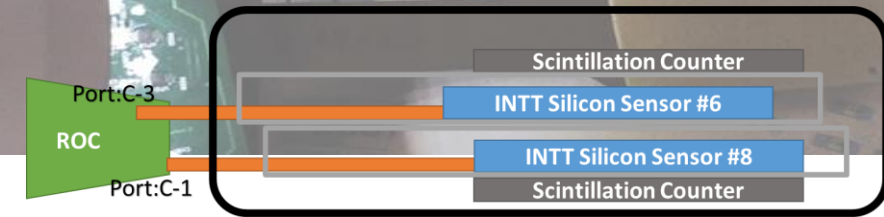
解析結果

Channel vs entry per chip

- Module=6(up)

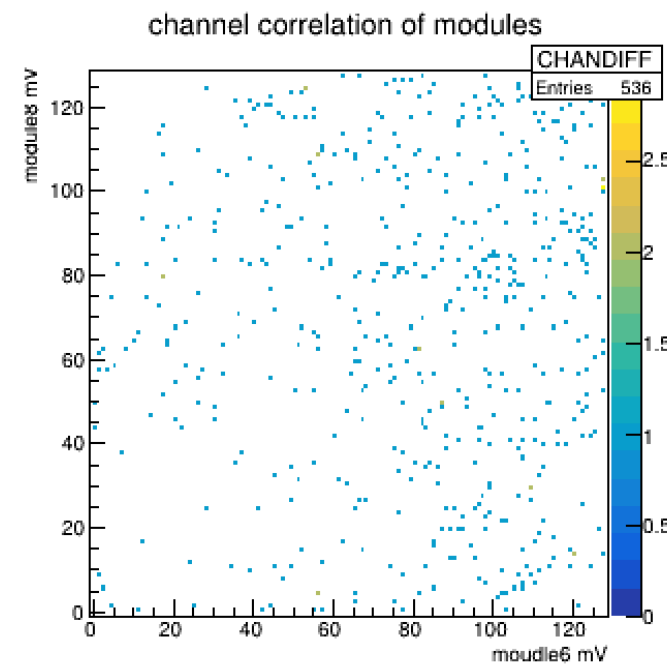
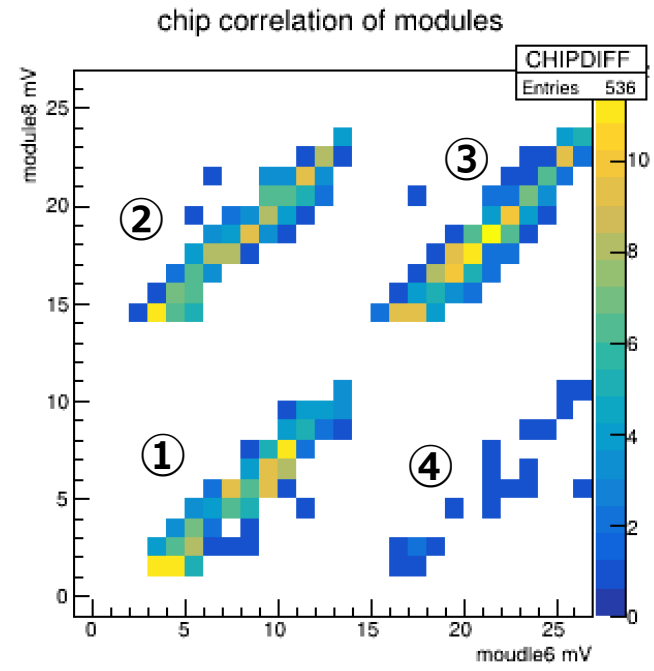
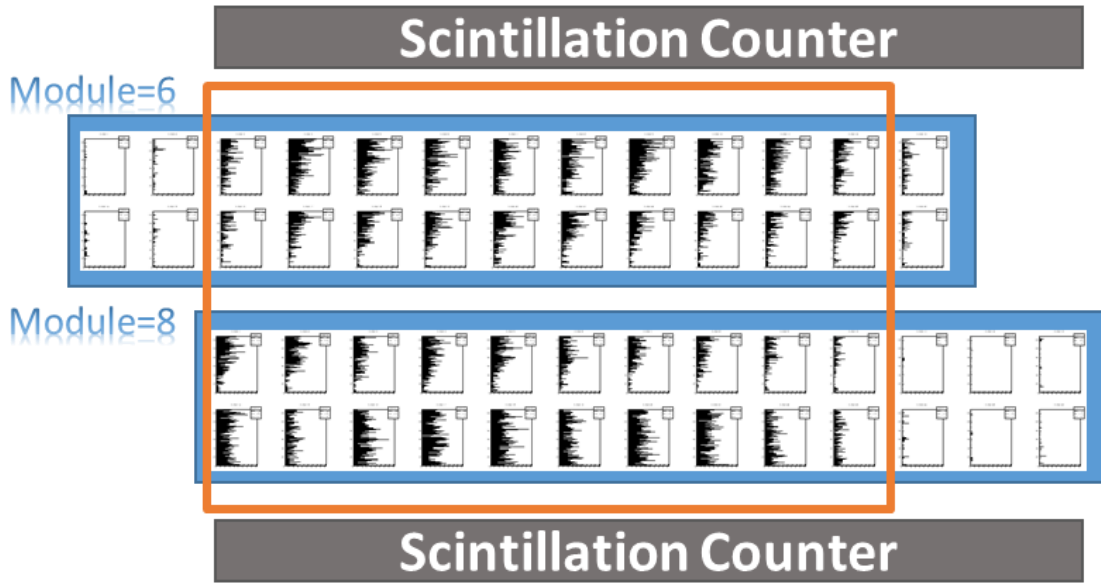


large Module6, 8のhit chip& channel (bco,bco_fullあたり)



- Channel: 一様分布
- Chip: 相関がみられる。
 - Module=8の方がヒット多い
→シンチレーションカウンターに挟まれる面積がmodule=6よりも広いため。

	Module	
	8	6
①	Chip 0~13	Chip0~13
②	Chip0~13	Chip14~26
③	Chip14~26	Chip14~26
④	Chip14~26	Chip0~13

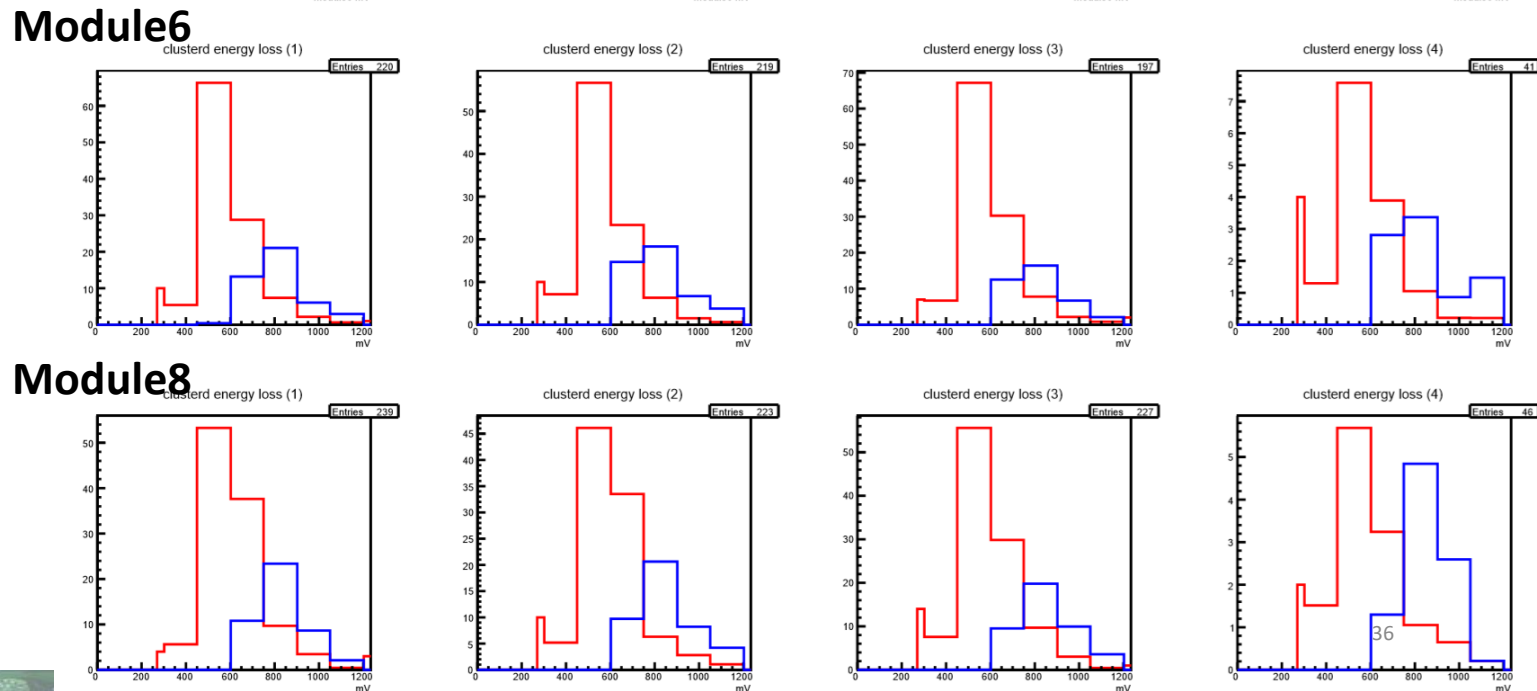
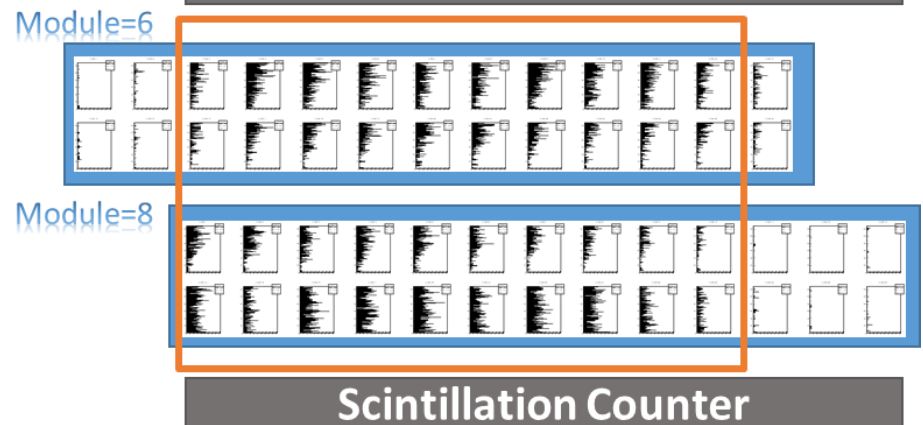
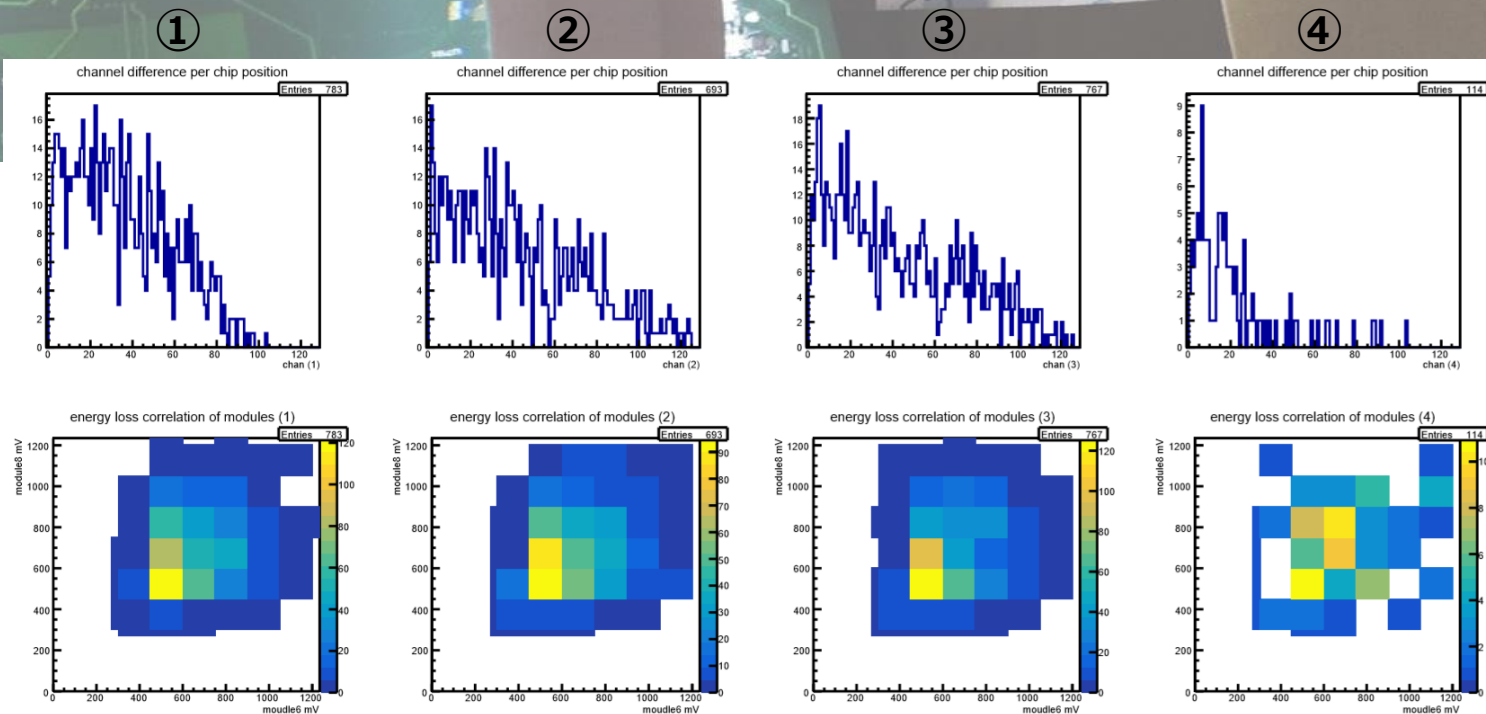
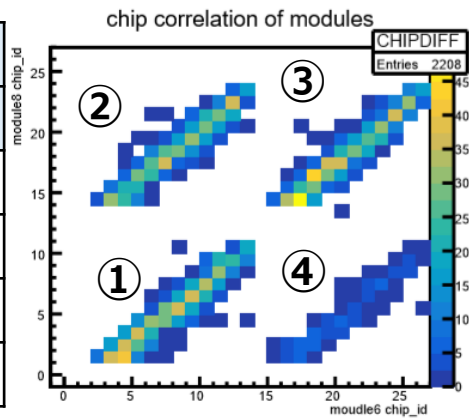


large

解析結果

モジュールによるエネルギー損失の違い

		Module	
		8	6
①	Chip 0~13	Chip0~13	
②	Chip0~13		Chip14~26
③	Chip14~26	Chip14~26	
④	Chip14~26		Chip0~13



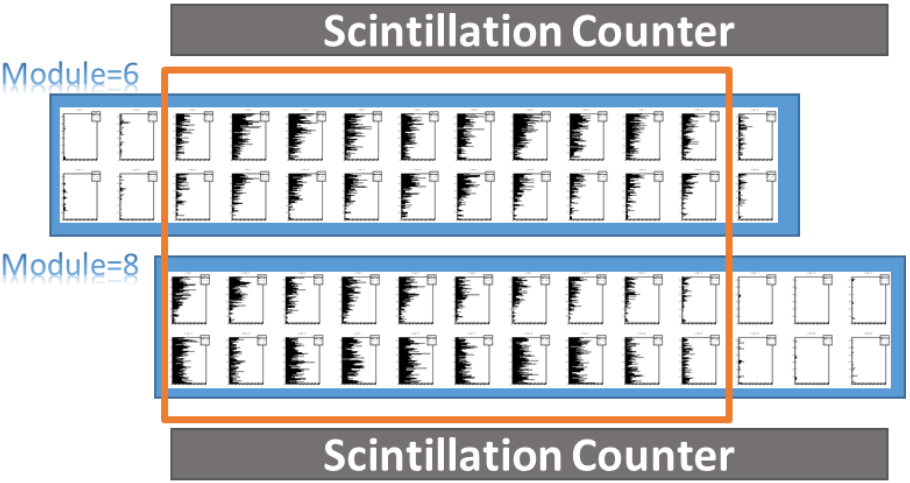
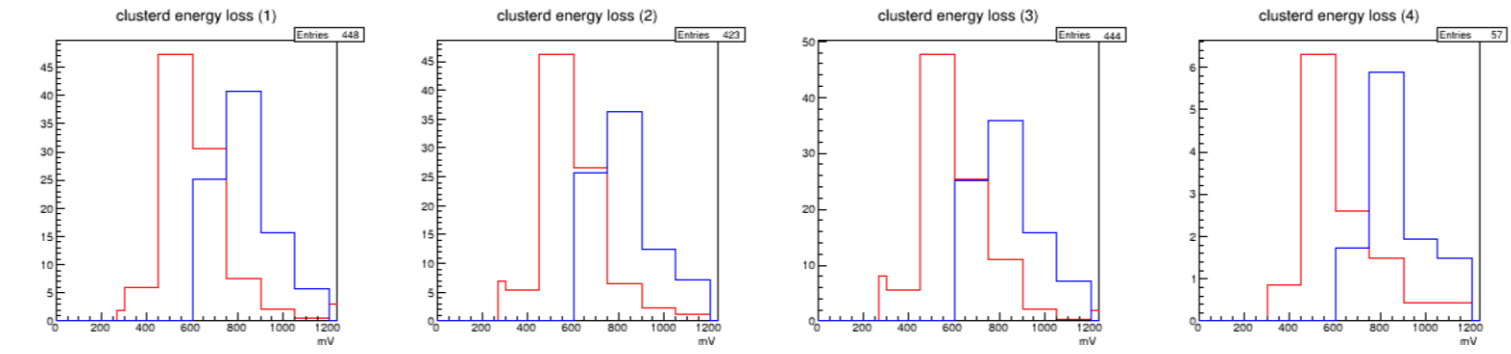
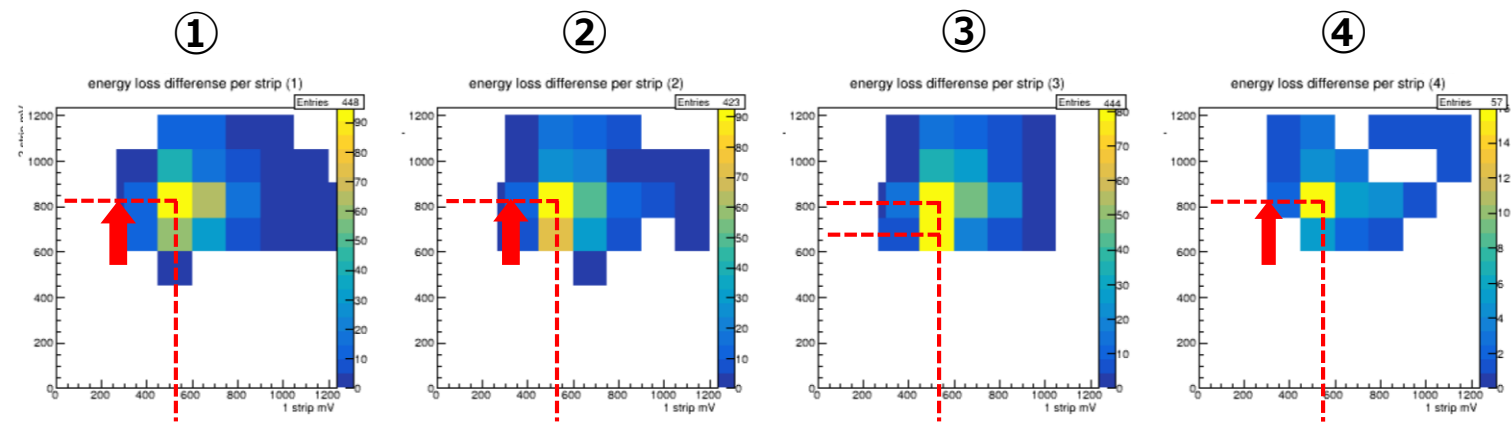
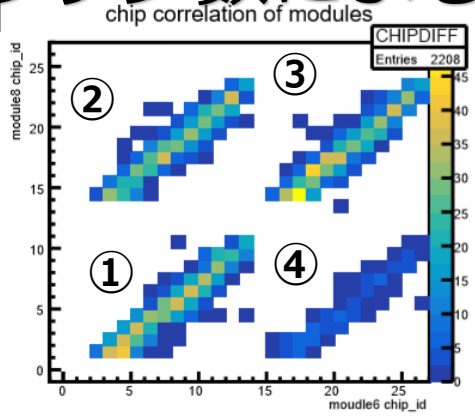
- 2つのモジュールに同時に入射したイベントを入射位置ごとに解析
- **モジュールによるエネルギー損失に変化なし**

2/13/2020

解析結果

通過ストリップ数によるエネルギー損失の違い

		Module	
		8	6
①	Chip 0~13	Chip0~13	
②	Chip0~13		Chip14~26
③	Chip14~26	Chip14~26	
④	Chip14~26		Chip0~13

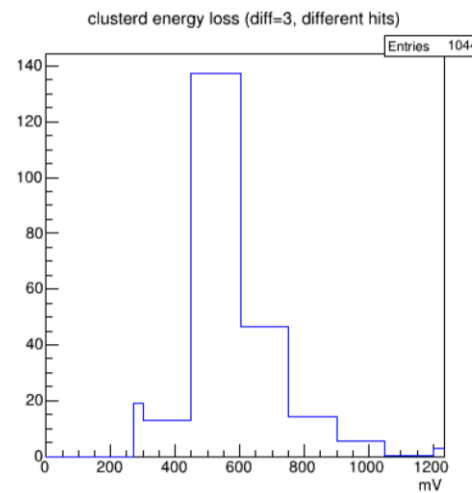
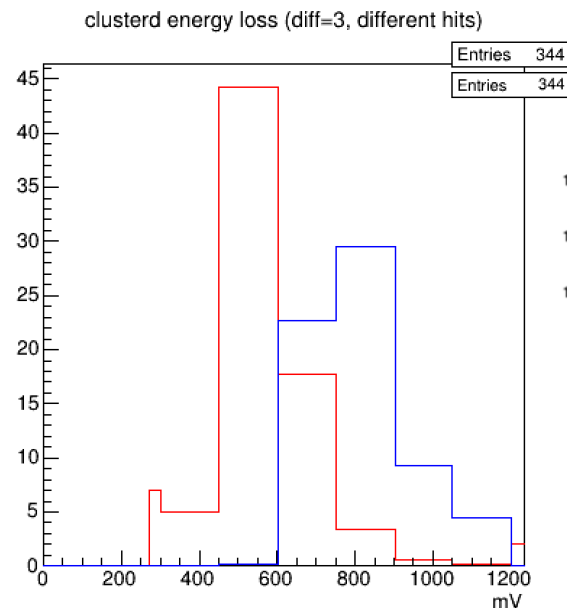
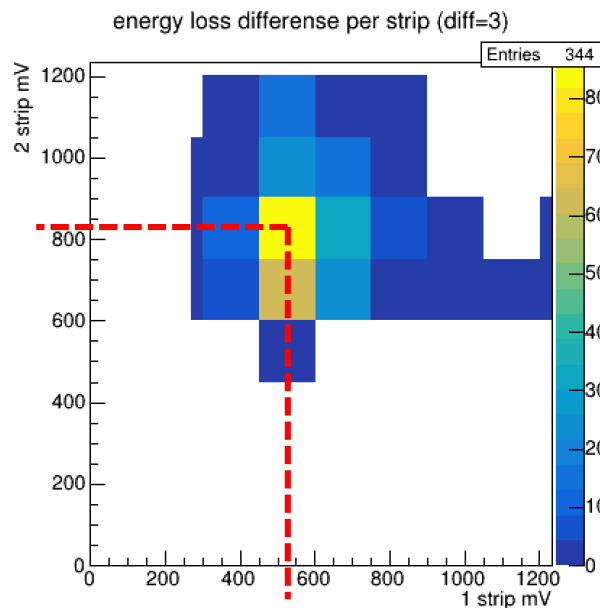
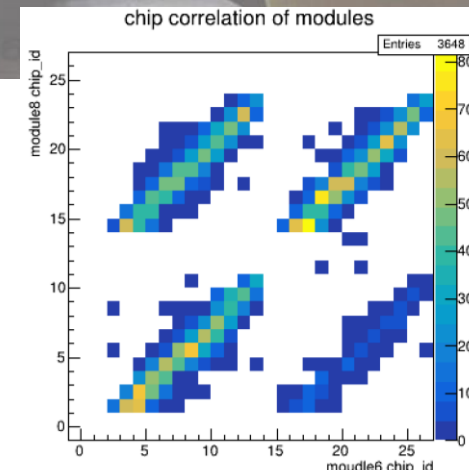


- ❑ 2つのモジュールに同時に入射したイベントを入射位置ごとに解析
- ❑ 2つのシリコンセンサーで通過ストリップ数が異なるとき、1ストリップと2ストリップが示すエネルギー損失の違い
 - 1ストリップ通過のエネルギー損失が450~600mV、2ストリップ通過のエネルギー損失は750~900mVのイベントが最も多い。→通過ストリップ数が増えるとクラスター化後のエネルギー損失が大きく計算される。
 - 通過ストリップ数が少ないものはDAC閾値以下のエネルギー損失が出力されていないため、小さいあたいをしめす。

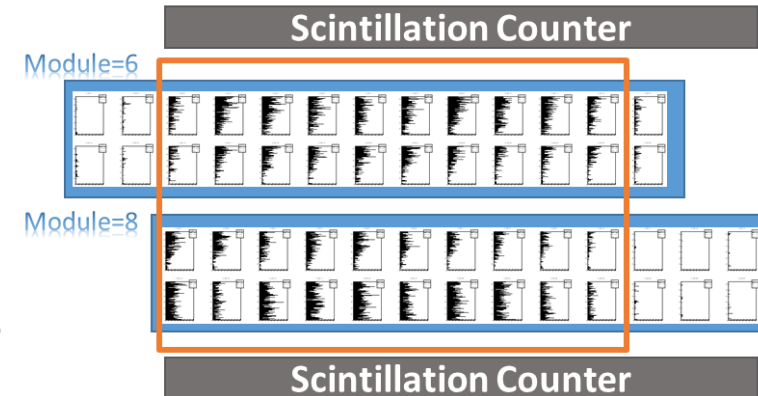
解析結果 通過ストリップ数によるエネルギー損失の違い

下：同時刻における2つのシリコンセンサーのヒットチップ相関

- 同じ宇宙線が2つのシリコンセンサーを異なるストリップ数通過したイベント
- 同じ宇宙線が垂直に位置するチップを通過したイベント



下：同時刻における2つのシリコンセンサーのチップごとのチャンネルヒット分布から分かるセットアップの模式図



- 同じ宇宙線が異なるストリップ数通過した場合、1ストリップでは450~600mV、2ストリップでは750~900mVのエネルギー損失をする組み合わせが最も多い。

解析結果

通過ストリップ数によるエネルギー損失の違い

- 宇宙線のエネルギー損失は距離に比例しているため、シリコンセンサー内の通過距離が長くなるにつれ多くのエネルギーを損失する。
- 測定時にDAC閾値設定により、小さなエネルギー損失は出力されない。
- そのため、実際に通過したストリップ数よりも少ないストリップ数でのエネルギー損失が出力されると考えられる。

まとめ

・シミュレーション

- ・ Chip情報をいれた
- ・ 宇宙線データと同じデータを作り、宇宙線解析プログラムをそのままシミュレーションに使えるようにした。
- ・ シリコン内の通過距離がうまく計算できていない可能性
→できるだけ改善を継続

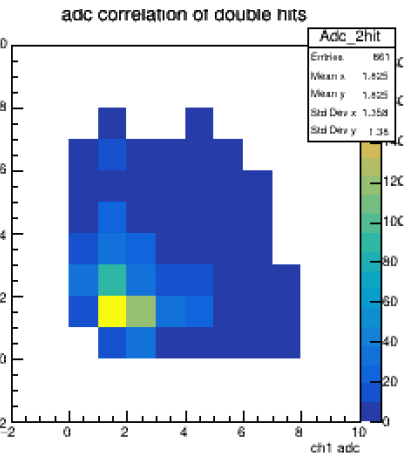
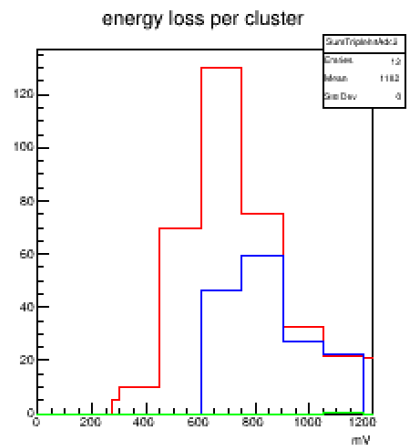
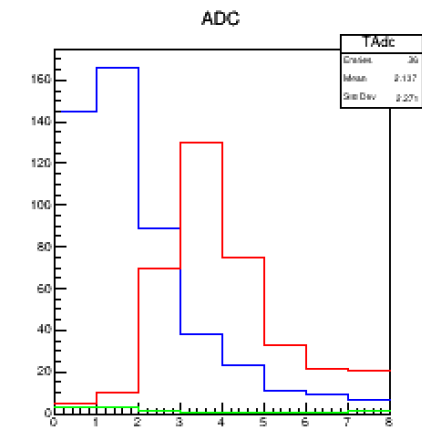
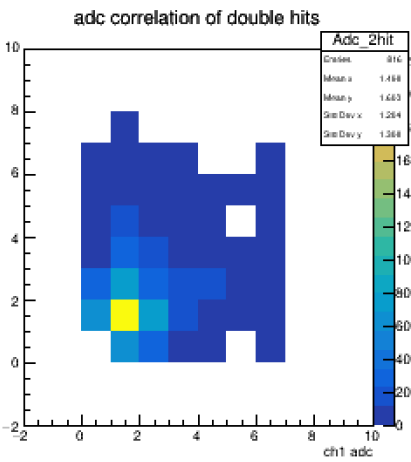
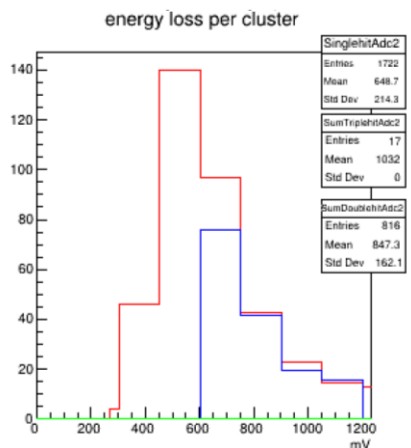
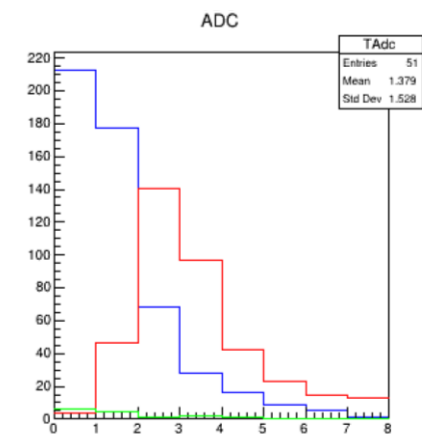
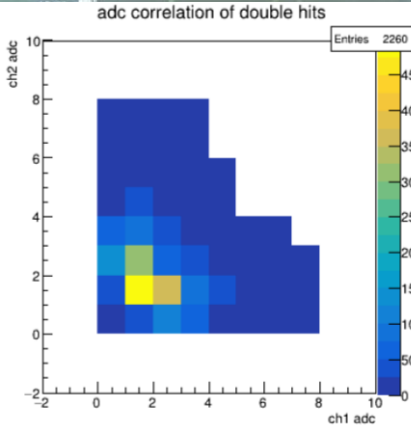
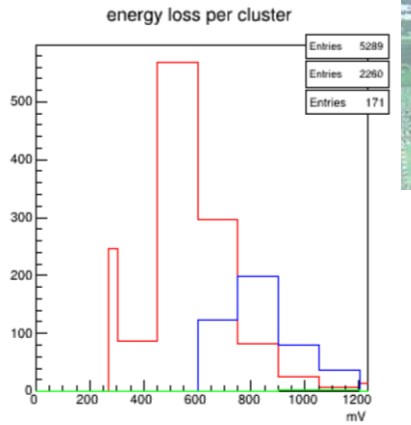
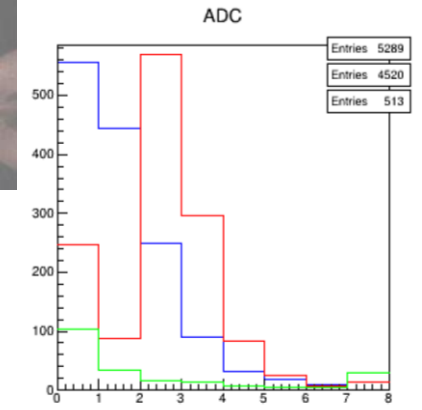
DAC設定値	チップ増幅値mV
15	270
23	300
60	450
98	600
135	750
173	900
210	1050
248	1200

・宇宙線測定

- ・ ストリップ数の違いでエネルギー損失の出力ピークが異なることがわかった。
 - ・ 機械的なノイズが存在することがわかった。
 - ・ 2つのシリコンセンサーを用いて測定できた。
- ・ ゲイン値の計算を変えた影響で、より小さなエネルギー損失のDAC設定の範囲を詳しく調べるべきだった。→DAC閾値を変えて一度測定してみたい



	1hit	2hits	3hits
Sum Max	384mV	416mV	463mV
Sum min	374mV	384mV	384mV



解析結果 クラスター化後のエネルギー損失の違い

- Module8と6に同じイベントと考えられるヒットがあった場合、それぞれでクラスター化した時のエネルギー損失値の違い
- ほぼ同じ値を示している。

- 2つのシリコンセンサーで通過ストリップ数が異なるとき、1ストリップと2ストリップが示すエネルギー損失の違い
- 1ストリップ通過のエネルギー損失が450~600 mV、2ストリップ通過のエネルギー損失は750~900mVのイベントが最も多い。→通過ストリップ数が増えるとクラスター化後のエネルギー損失が大きく計算される。

