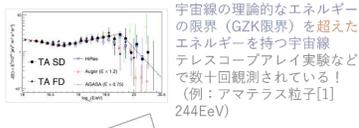


高校生による高エネルギー宇宙線探索

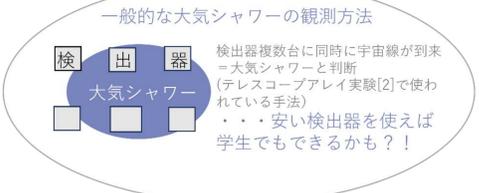
女子学院高等学校2年 松下 永田 中井

目的：最高エネルギー宇宙線を観測する = 数十km²に広がる大気シャワーを観測する



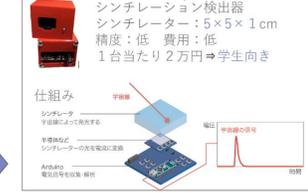
GZK限界はCMB (ビックバンの残光) が原因
通常の物体 : 影響なし
高速で、波長が短く見える粒子: 衝突
一定のエネルギーが失われるため、GZK限界を超える宇宙線は現在の理論上存在しない
もし最高エネルギー宇宙線の存在が証明されたら・・・
・未知の加速機構
・新物理の発見につながる!

宇宙線の理論的なエネルギーの限界 (GZK限界) を超えたエネルギーを持つ宇宙線テレスコープアレイ実験などで数十回観測されている! (例: アマテラス粒子[1] 244EeV)
・発生する大気シャワーの面積は1次宇宙線のエネルギーによって変化
・最高エネルギー宇宙線の場合、数十km²に広がる
・大気シャワーの到来頻度は元の宇宙線のエネルギーが高くなるほど減少する
現象: 連鎖的に発生、粒子生成
宇宙線が大気中の原子核と衝突し、新しい粒子を生成。
その粒子がさらに新しい粒子を生成することを繰り返す
= 大量の宇宙線が同時に地表に降り注ぐ

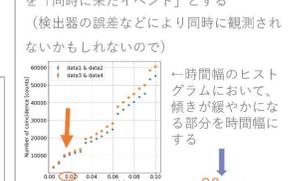
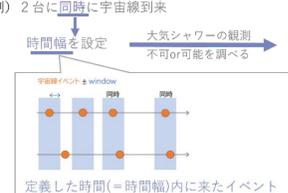


中高生でも可能な研究方法を考える

実験方法：Cosmic Watchを2台使用し、同時計数頻度の検出器間距離依存性を調べる



シンチレーション検出器
シンチレーター: 5×5×1 cm
精度: 低 費用: 低
1台あたり2万円⇒学生向き
仕組み
シンチレーターで発生する光子をシンチレーター内の光電管に検出
Arduinoで検出器の出力を制御

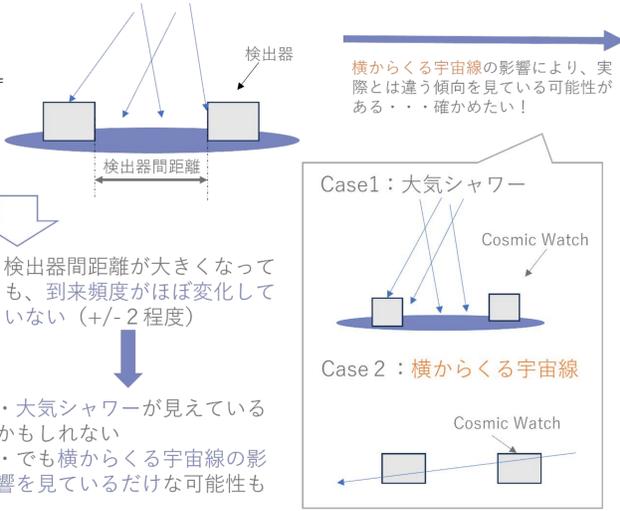


ノイズの有無を調査
・大気シャワー以外が見えている時 = 同時計数頻度が増える
・大気シャワーが見えている可能性がある時 = 同時計数頻度は変化しない (大気シャワーは数十m単位で到来頻度が変化)

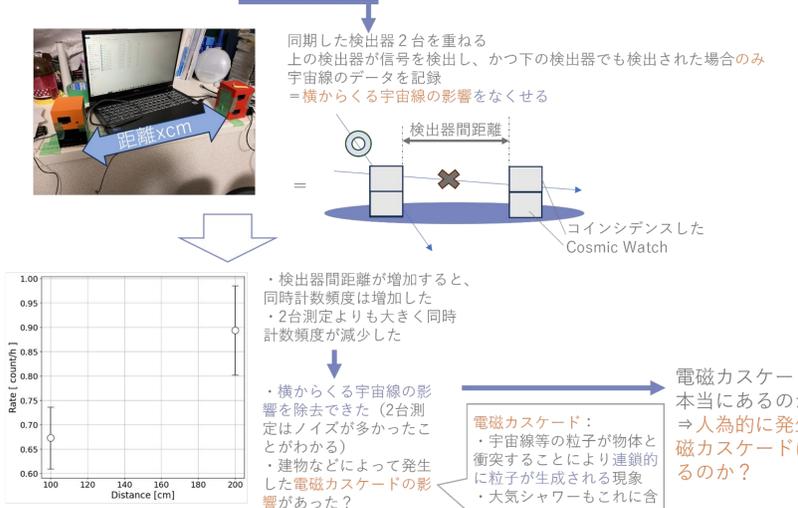
これを利用し測定系を改良していく

1. ノイズの少ない測定系を見つける

2台測定：検出器を2台並べて、同時計数頻度を調べる



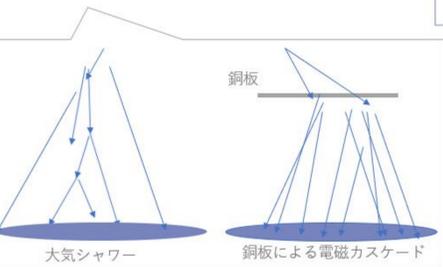
4台測定：検出器を上下にコインシデンス⇒それを2セット用意し同時計数頻度を調べる



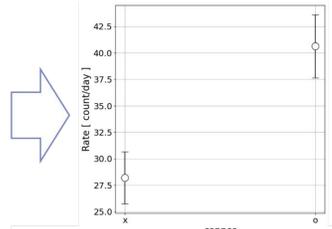
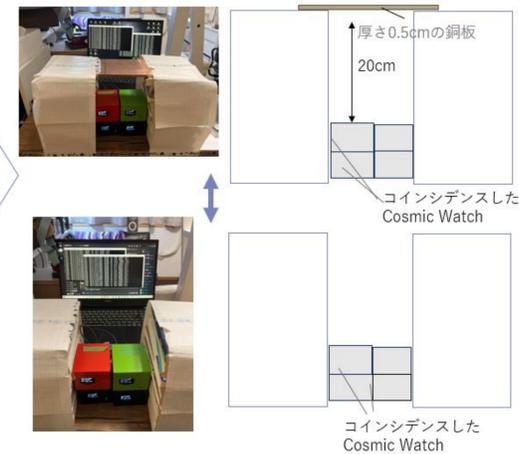
2. この測定系で電磁カスケードが見えるか調べる

銅板実験：銅板により発生する電磁カスケードは観測できる?

・宇宙線等の粒子が物体と衝突することにより連鎖的に粒子が生成される現象
・大気シャワーもこれに含まれる
・重い物体との衝突によって光子や電子が発生しやすくなる



銅板を置いた場合と置かなかった場合の同時計数頻度を比較



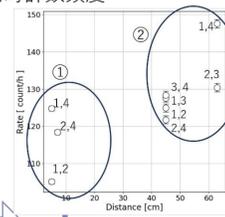
銅板による電磁カスケードが観測できたので、同種の大気シャワーも検出できるはず!

でも・・・
現在の測定系では
大気シャワー以外の電磁カスケードの粒子数 > 大気シャワーの粒子数

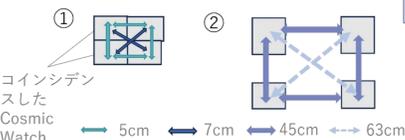
銅板ありの方がなしより到来頻度が大きい
⇒銅板による電磁カスケードが見えた
⇒先ほどの測定では電磁カスケードの影響があった
⇒他の粒子数の多い電磁カスケードに大気シャワーのデータが埋もれないような測定系を考える

3. 大気シャワーのデータが埋もれない測定系を探す

i 4台平面測定：平面に置いた4台の検出器の同時計数頻度を調べる (検出可能な面積を増やす)

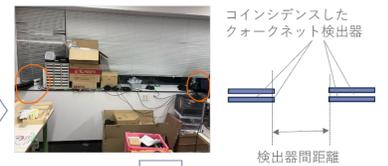


・4台の同時計数頻度は調べられなかった (イベント数の不足)
・2台ごとの同時計数頻度では検出器ごとの個体差が見えた
↓
・個体差を無視する方法が分かればこの方法が有用かわかるかも
・Cosmic Watchでこの方法を用いるのはイベント数の観点からダメ



個体差を無視する方法を見つけて、大きな検出器を使ってやってみる!

ii コアネットワーク検出器を用いた測定：4台測定と同じ測定系でより高性能の検出器を使用した検出をする



検出器間距離を大きくすると到来頻度が減少した
⇒大気シャワーとは違うものが見えている
⇒原因を現在検討中

まとめ ・4台測定は工夫次第で大気シャワーを検出可能

・今後は異なる検出器や測定系を用い、大気シャワーのイベントが埋もれない測定系を探す予定

[1] R. U. Abbasi, et al. (Telescope Array Collaboration), "An extremely energetic cosmic ray observed by a surface detector array", Science, Vol. 382, No. 6673, p. 903-907 (2023)
[2] 東京大学宇宙線研究所, "テレスコープアレイ(TA)実験", 5/15, www.ta.icrr.u-tokyo.ac.jp, (5/17)

高校生による高エネルギー宇宙線探索

女子学院高等学校 松下 中井 永田

目的：最高エネルギー宇宙線を観測する = 数十kmに広がる大気シャワーを観測する

宇宙線の理論的なエネルギーの限界 (GZK限界) を超えたエネルギーを持つ宇宙線テレスコープアレイ実験などで数十回観測されている！ (例：アマテラス粒子 244EeV)

GZK限界はCMB (ビッグバンの残光) が原因
通常の物体：影響なし
高速で、波長が短く見える粒子：衝突
一定のエネルギーが失われるため、GZK限界を超える宇宙線は現在の理論上存在しない

もし最高エネルギー宇宙線の存在が証明されたら・・・
・未知の加速機構
・新物理
の発見につながる！

現象：連続的に発生、粒子生成、宇宙線が大気中の原子核と衝突し、新しい粒子を生成。その粒子がさらに新しい粒子を生成することを繰り返す。大量の宇宙線が同時に地表に降り注ぐ。

発生する大気シャワーの面積は1次宇宙線のエネルギーによって変化。最高エネルギー宇宙線の場合、数十kmに広がる。大気シャワーの到来頻度は元の宇宙線のエネルギーが高くなるほど減少する (反比例の関係)。

一般的な大気シャワーの観測方法

検出器複数台に同時に宇宙線が到来 → 大気シャワーと判断 (テレスコープアレイ実験、チベットAS_γ実験などで使われている手法) ... 安い検出器を使えば学生でもできるかも？！

実験方法：Cosmic Watchを2台使用し、同時計数頻度の検出器間距離依存性を調べる

シンチレーション検出器
シンチレーター：5x5x1 cm
精度：低 費用：低
1台あたり2万円 → 学生向き

仕組み
シンチレーター
シンチレーターが電離放射線と相互作用し、蛍光物質が発光する。この光を光電子増倍管で検出し、電圧増幅器で増幅してパルス信号を出力する。

従来の検出器 精度：高 費用：高
例) テレスコープアレイ実験
検出器：507台
(1台あたり数百万円)
⇒ 学生に不向き

例) 2台同時に宇宙線到来

時間幅を設定 → 大気シャワーの観測不可or可能を調べる

定義した時間 (= 時間幅) 内に来たイベントを「同時に来たイベント」とする (同一大気シャワー由来であっても同時に地上に降り注ぐとは限らない)

← 時間幅のヒストグラムにおいて、傾きが緩やかになる部分を時間幅にする
20ms

ノイズの有無を調査
・大気シャワー以外が見えている時
= 同時計数頻度が変化
・大気シャワーが見えている時
= 同時計数頻度は変化しない (大気シャワーは数十m単位で到来頻度が変化)

これを利用して測定系を改良していく

1. ノイズの少ない測定系を見つける

2台測定：検出器を2台並べて、同時計数頻度を調べる

距離xcm

検出器間距離

横からくる宇宙線の影響により、実際とは違う傾向を見ている可能性があるため、確かめたい

Case 1: 大気シャワー
Cosmic Watch

Case 2: 横からくる宇宙線
Cosmic Watch

Rate [count/hour]

Distance [cm]

検出器間距離が大きくなっても、到来頻度がほぼ変化していない (+/- 2程度)

・大気シャワーが見えているかもしれない可能性
・横からくる宇宙線の影響を見ているだけな可能性

4台測定：検出器を上下にコインシデンス⇒それを2セット用意し同時計数頻度を調べる

同期した検出器2台を重ねる
上の検出器が信号を検出した時、下の検出器でも検出された場合のみ宇宙線のデータが記録
= 横からくる宇宙線の影響をなくせる

場所を変えて2回測定した
1回目：50cm, 100cm (@家)
2回目：100cm, 200cm (@学校)

○・・・1回目の測定
☆・・・2回目の測定

検出器間距離が変化しても (同じ回の測定において) 到来頻度は変化しなかった ⇒ 横からくる宇宙線 (ノイズ) の除去に成功した

Rate [counts]

Distance [cm]

しかしこの測定系で大気シャワーを測定できるかの確認は得られず (建物により発生した電磁カスケードが見えている可能性も)

この測定系で大気シャワーを検出できるという **確認を得たい!**

2. この測定系で大気シャワーが見えているか調べる

銅板実験：銅板により発生する電磁カスケードは観測できる？

銅板を置いた場合と置かなかった場合の同時計数頻度を比較

銅板由来の電磁カスケードがこの測定系で観測できる
→ この測定系で電磁カスケードが観測可能
→ 電磁カスケードの一種である大気シャワーも観測可能 (但し粒子数の多い他の電磁カスケードに大気シャワーのデータが埋もれないようにする必要がある)

銅板

大気シャワー

銅板による電磁カスケード

厚さ0.5cmの銅板

20cm

コインシデンスした Cosmic Watch

コインシデンスした Cosmic Watch

Rate [count/day]

copper

銅板ありの方がなしより到来頻度が大きい
⇒ 銅板による電磁カスケードが見えた

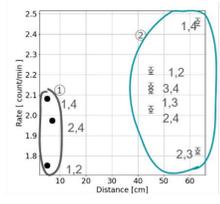
銅板による電磁カスケードが観測できたので、同種の大気シャワーも検出できるはず!

現在の測定系では
電磁カスケードの粒子数 > 大気シャワーの粒子数

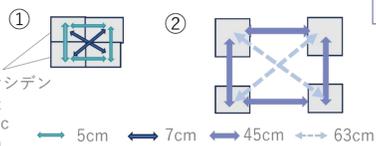
⇒ 他の粒子数の多い電磁カスケードに大気シャワーのデータが埋もれないような測定系を考える

3. 精度を上げて、大気シャワーが見える測定系を探す

4台平面測定：平面に置いた4台の検出器の同時計数頻度を調べる (検出可能な面積を増やす)



・4台の同時計数頻度は調べられなかった (イベント数の不足)
・2台ごとの同時計数頻度では検出器ごとの個体差が見えた
↓
・個体差を無視する方法が分かればこの方法が有用かわかるかも
・Cosmic Watchでこの方法を用いるのはイベント数の観点からダメ



個体差を無視する方法を見つけて、大きな検出器を使ってやってみる!

ii) コーネット検出器を用いた測定：4台測定と同じ測定系より高性能の検出器を使用した検出をする

シンチレーター大きさ：27x30x3 (cm)

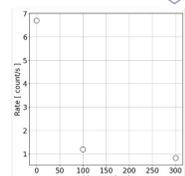
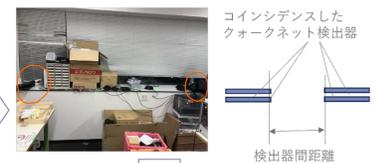
シンチレーター大きさ：5x5x1 (cm)

信号の例

↑ 仕組み

人工衛星の電離放射線検出器と同様に、PCで観測装置の制御を行う。

シンチレーターが電離放射線と相互作用し、蛍光物質が発光する。この光を光電子増倍管で検出し、電圧増幅器で増幅してパルス信号を出力する。



まとめ

4台コインシデンス測定で大気シャワーは検出可能
イベント数の確保が課題現在の実験: 4台の平面測定 (課題: 検出器の個体差を取り除く) quarknetでの測定

シミュレーションとも連携していく予定

高校生による高エネルギー宇宙線探索

女子学院高等学校 松下 中井 永田

目的：最高エネルギー宇宙線を観測する = 数十kmに広がる大気シャワーを観測する

宇宙線の理論的なエネルギーの限界 (GZK限界) を超えたエネルギーを持つ宇宙線テレスコープアレイ実験などで数十回観測されている！ (例：アマテラス粒子 244EeV)

GZK限界はCMB (ビックバンの残光) が原因
通常の物体：影響なし
高速で、波長が短く見える粒子：衝突
一定のエネルギーが失われるため、GZK限界を超える宇宙線は現在の理論上存在しない

もし最高エネルギー宇宙線の存在が証明されたら・・・
・未知の加速機構
・新物理
の発見につながる！

現象：連続的に発生、粒子生成宇宙線が大気中の原子核と衝突し新しい粒子を生成。その粒子がさらに新しい粒子を生成することを繰り返す
= 大量の宇宙線が同時に地表に降り注ぐ

発生する大気シャワーの面積は1次宇宙線のエネルギーによって変化
・最高エネルギー宇宙線の場合、数十kmに広がる
・大気シャワーの到来頻度は元の宇宙線のエネルギーが高くなるほど減少する (反比例の関係)

一般的な大気シャワーの観測方法

検出器複数台に同時に宇宙線が到来
= 大気シャワーと判断 (テレスコープアレイ実験、チベットAS_γ実験などで使われている手法)
・・・安い検出器を使えば学生でもできるかも？！

実験方法：Cosmic Watchを使用し、少ない台数で同時計数頻度の検出器間距離依存性を調べる

シンチレーション検出器
サイズ：5×5×1 (cm)
精度：低 費用：低
1台あたり2万円
⇒学生が使いやすい

仕組み
シンチレーター
宇宙線によって発生するシンチレーション光を電圧に変換
Arduino
電圧信号を収集・解析

従来の検出器 特徴：精度/高 費用/高
例) テレスコープアレイ実験
検出器：507台 (1台あたり数百万円)
⇒学生が使いにくい

例) 2台に同時に宇宙線が来る
この測定系で本当に大気シャワーが見えるか？

大気シャワー以外のノイズがどれだけ見えているかを調べる
・・・大気シャワーが見えていながら (大気シャワーは数十メートルスパンで到来頻度が変化するので) 到来頻度は変化しないはず
= 同時計数頻度が変化していたら大気シャワー以外が見えている！

これを利用してノイズの少ない測定系を見つけよう！

ある時間 (= 時間幅) を決め、その時間以内にきたイベントを「同時に来たイベント」とする
⇒同一大気シャワー由来なのにずれて見えるイベントを「同時に来た」と認識可能
⇒今回の実験ではすべて4msに設定

1. ノイズの少ない測定系を見つける

2台測定：検出器を2台並べて、同時計数頻度を調べる

距離xcm

検出器

検出器間距離

大気シャワーではなく、横からくる宇宙線の影響が見えていたのでは・・・？
⇒横からくる宇宙線の影響を消したい

検出器間距離が大きくなるにつれて宇宙線到来頻度が減少している
⇒到来頻度が変化しているのは、大気シャワー以外の物が見えている

Case1: 大気シャワー

Case2: 横からくる宇宙線

4台測定：検出器を上下にコインシデンス⇒それを2セット用意し同時計数頻度を調べる

同期した検出器2台を重ねる
上の検出器が信号を検出した時、下の検出器でも検出された場合のみ宇宙線のデータが記録
= 横からくる宇宙線の影響をなくせる

場所を変えて2回測定した
1回目：50cm、100cm (@家)
2回目：100cm、200cm (@学校)

○・・・1回目の測定
☆・・・2回目の測定

検出器間距離が変化しても (同じ回の測定において) 到来頻度は変化しなかった
⇒横からくる宇宙線 (ノイズ) の除去に成功した

しかしこの測定系で大気シャワーを測定できるかの確証は得られず (建物により発生した電磁カスケードが見えている可能性も)

この測定系で大気シャワーを検出できるという確証を得たい！

2. この測定系で大気シャワーが見えているか調べる

銅板実験：銅板により発生する電磁カスケードは観測できる？

- 宇宙線等の粒子が物体と衝突することにより連続的に粒子が生成される現象
- 大気シャワーもこれに含まれる
- 衝突によって光子や電子が発生しやすくなる

銅板由来の電磁カスケードがこの測定系で観測できる
→この測定系で電磁カスケードが観測可能
→電磁カスケードの一種である大気シャワーも観測可能 (但し粒子数の多い他の電磁カスケードに大気シャワーのデータが埋もれないようにする必要がある)

厚さ0.5cmの銅板

20cm

コインシデンスした Cosmic Watch

銅板による電磁カスケードが観測できたので、同種の大気シャワーも検出できるはず！

現在の測定系では電磁カスケードの粒子数 > 大気シャワーの粒子数

⇒他の粒子数の多い電磁カスケードに大気シャワーのデータが埋もれないような測定系を考える

銅板ありの方がなしより到来頻度が大きい
⇒銅板による電磁カスケードが見えた

3. 精度を上げて、大気シャワーが見える測定系を探す

4台平面測定：平面に置いた4台の検出器の同時計数頻度を調べる (検出可能な面積を増やす)

① ②

コインシデンスした Cosmic Watch

5cm 7cm 45cm 63cm

・4台の同時計数頻度は調べられなかった (イベント数の不足)
・2台ごとの同時計数頻度では検出器ごとの個体差が見えた
↓
・個体差を無視する方法が分かればこの方法が有用かわかるかも
・Cosmic Watchでこの方法を用いるのはイベント数の観点からダメ

個体差を無視する方法を見つけ、大きな検出器を使ってやってみる！

ii コーキングネット検出器を用いた測定：4台測定と同じ測定系より高性能の検出器を使用した検出をする

シンチレーター大きさ：27×30×3 (cm)

シンチレーター大きさ：5×5×1 (cm)

検出器間距離を大きくすると到来頻度が減少した
⇒大気シャワーとは違うものが見えている
⇒原因を現在検討中

まとめ

高校生による高エネルギー宇宙線探索

女子学院高等学校 松下 中井 永田

目的：最高エネルギー宇宙線を観測すること

宇宙線の理論的なエネルギーの限界（GZK限界）を超えるエネルギーを持つ宇宙線のこと
 テレスコプアレイ実験などで数十回観測されている！（例：オーマイゴット粒子 244EeV）

GZK限界・・・CMBが原因
 CMB=ビッグバンの残光で、通常の物体にとってマイクロ波（影響なし！）
 宇宙線にとって⇒ガンマ線など波長の短い光（衝突する！）
 ⇒衝突によって一定のエネルギーが失われるため、GZK限界を超える宇宙線は（現在の理論が正しいとすると）存在しないはず！
 ⇒もし最高エネルギー宇宙線の存在が証明されたら・・・
 ・未知の加速機構
 ・新物理
 の発見につながる！

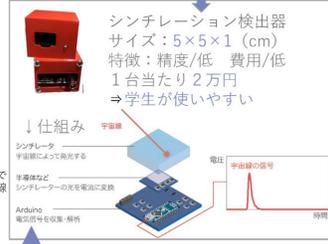
数十km²に広がる大気シャワーを観測すること

宇宙線が大気中の原子核と衝突することで新しい粒子が生成され、その粒子によりさらに新しい粒子が生成される・・・というように連鎖的に発生する
 ⇒大量の宇宙線が同時に地表に降り注ぐ

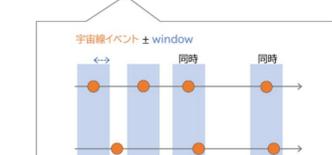
一般的な大気シャワーの観測方法



実験方法：Cosmic Watchを使用し、少ない台数で同時計数頻度の検出器間距離依存性を調べる



例) 2台に同時に宇宙線が来る
 時間幅を設定する



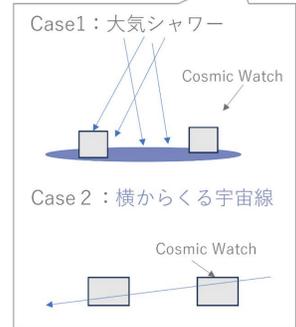
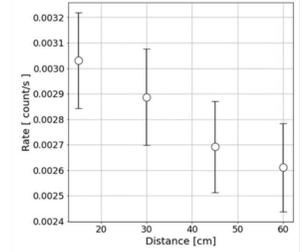
ある時間（=時間幅）を決め、その時間以内にきたイベントを「同時にきたイベント」とする
 ⇒検出器が信号を伝達する速度の個体差を考慮できる（同時にきたのものも関わらず検出器によりずれて見えたイベントを「同時にきた」と認識可能）
 ⇒今回の実験ではすべて4msに設定

大気シャワー以外のノイズがどれだけ見えているかを調べる
 ・大気シャワーが見えているなら（大気シャワーは数十メートルスパンで到来頻度が変化するので）到来頻度は変化しないはず
 ⇒同時計数頻度が変わっていたら大気シャワー以外が見えている！

これを利用してノイズの少ない測定系を見つけよう！

1. ノイズの少ない測定系を見つける

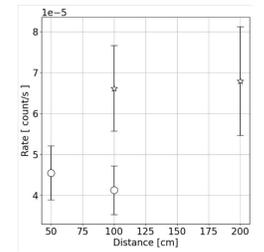
2台測定：検出器を2台並べて、同時計数頻度を調べる



4台測定：検出器を上下にコインシデンス⇒それを2セット用意し同時計数頻度を調べる



場所を変えて2回測定した
 1回目：50cm、100cm (@家)
 2回目：100cm、200cm (@学校)



検出器間距離が変化しても（同じ回の測定において）到来頻度は変化しなかった
 ⇒横からくる宇宙線（ノイズ）の除去に成功した

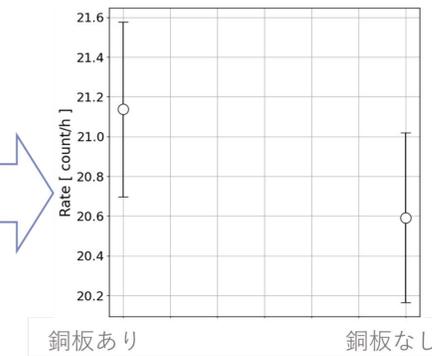
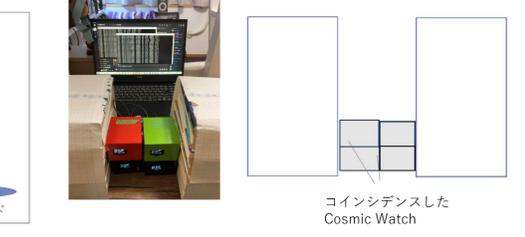
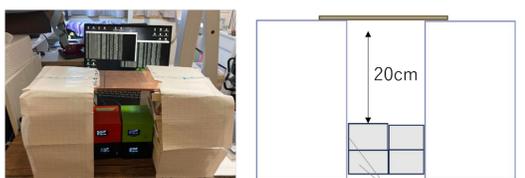
しかしこの測定系で大気シャワーを測定できるかの確証は得られていない（建物により発生した電磁カスケードが見えている可能性も）
 ⇒この測定系で大気シャワーを検出しているという確証を得たい！

2. この測定系で大気シャワーが見えているか調べる

銅板実験：銅板により発生する電磁カスケードは観測される？

宇宙線等の粒子が物体と衝突することにより連鎖的に粒子が生成される現象
 ・大気シャワーもこれに含まれる
 ・衝突する対象の原子番号が大きいほど生成される粒子は多くなる
 ⇒例えば銅板により発生する大気シャワーがこの測定系で観測可能ならば、
 ・現時点では大気シャワー以外の電磁カスケードが見えている（粒子数が多いため影響が大きい）
 ・工夫次第では大気シャワーも見えてくる（大気シャワーも電磁カスケードの一種なので、ほかの電磁カスケードの影響がなければ見えるはず）

銅板を置いた場合と置かなかった場合の同時計数頻度を比較

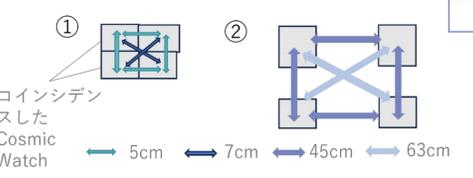
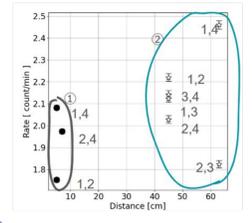


銅板による電磁カスケードが観測できないようなら、大気シャワーも検出できないはず！
 ⇒先ほどの実験では銅板より重い物体の電磁カスケードのみを見ていた

この測定系で大気シャワーは見えていないので、検出の精度を上げて大気シャワーを検出できる測定系を探す

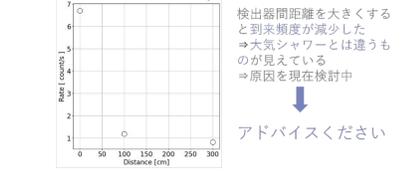
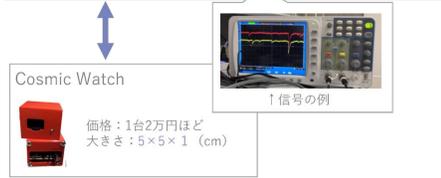
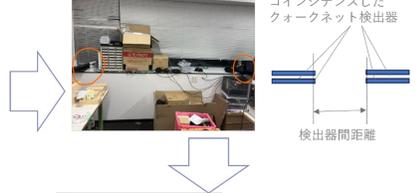
3. 精度を上げて、大気シャワーが見える測定系を探す

i 4台平面測定：平面に置いた4台の検出器の同時計数頻度を調べる（検出可能な面積を増やす）



個体差を無視する方法を見つけて、大きな検出器を使ってやってみる！

ii クォークネット検出器を用いた測定：4台測定と同じ測定系でより高性能の検出器を使用した検出をする



まとめ