

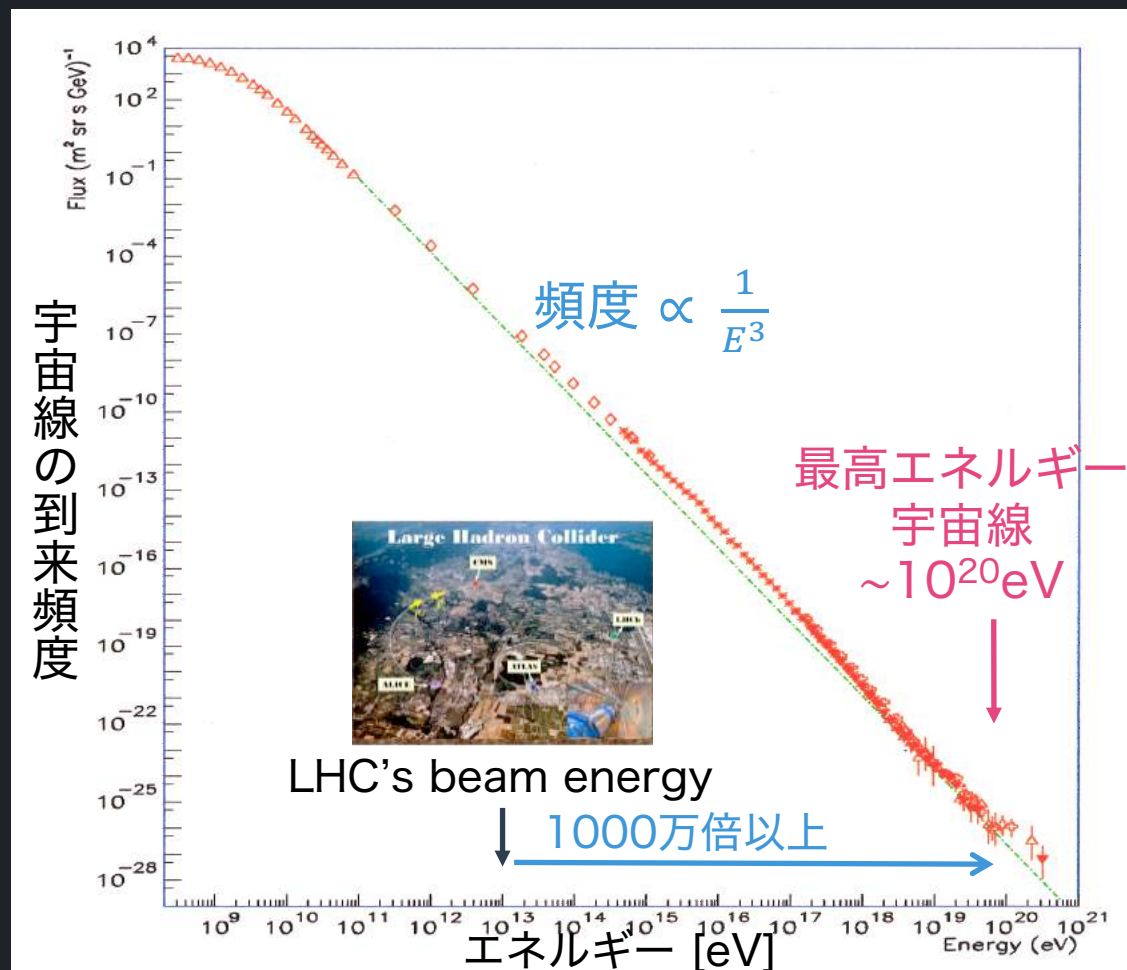
始まるよ！

最高エネルギー宇宙線 Extreme-Energy Cosmic Ray

Iona Kondo, Shota Taguchi, Shohei Takimoto,
Ryosuke Sugimoto, Ryota Kakuma

TA: Hiroyuki Sagawa, Daisuke Ikeda, Koki Saito, Ryuji Takeishi

宇宙線のエネルギー



宇宙線

- 宇宙空間を飛び交う高エネルギーの素粒子
- 主成分は陽子、その他原子核、電子
- 等方的に降って来る

最高エネルギー宇宙線

- $\sim 10^{20} \text{ eV}$ の圧倒的エネルギー
- 100km²に年1度来るかどうか

60 kg

×

$(1\text{m/s})^2$

=

60 J

=

$3.7 \times 10^{20} \text{ eV}$

鹿熊(人間) 1 人の
エネルギー

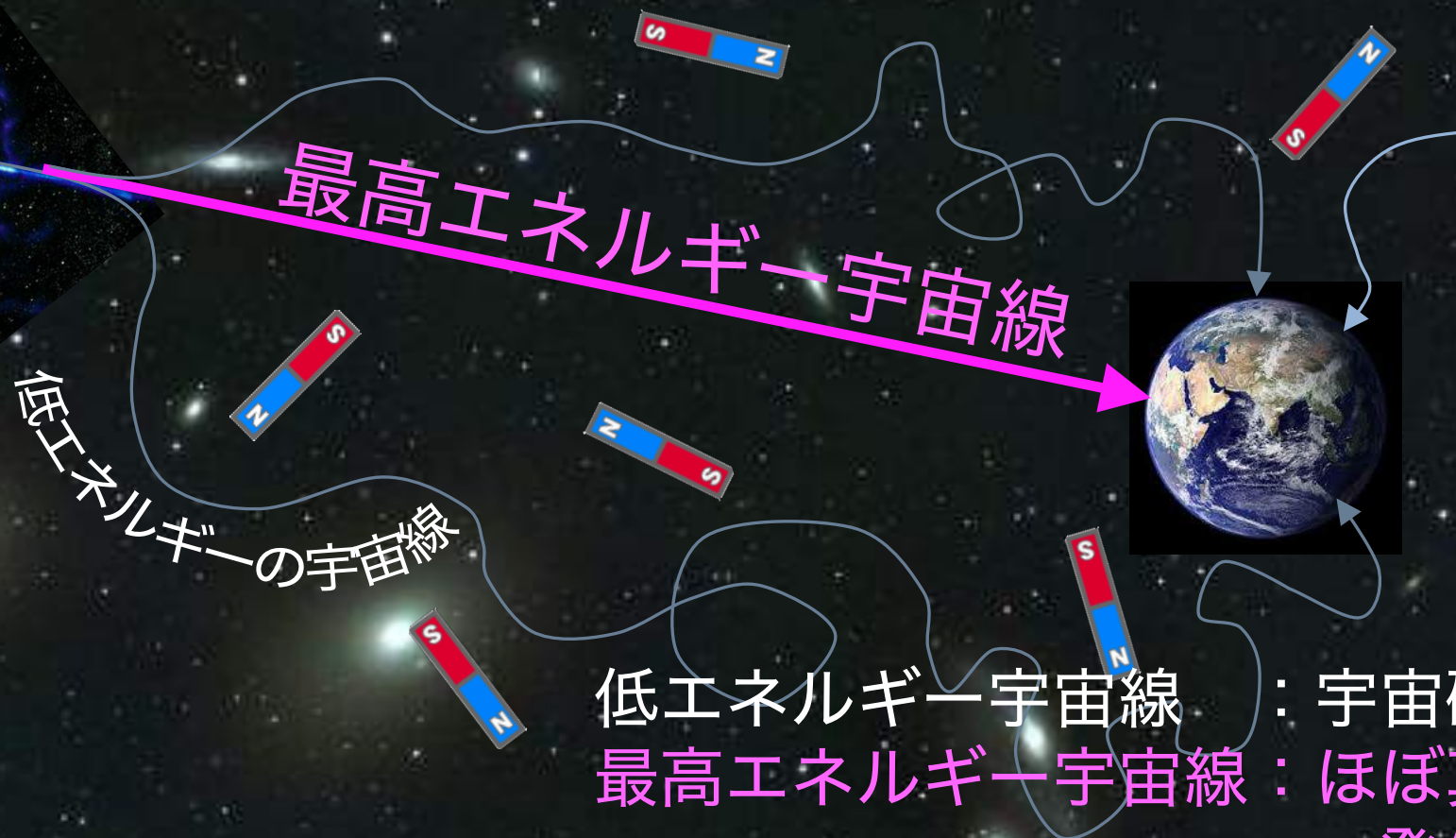
=

粒子1つの
エネルギー

Ultra-High-Energy Cosmic Ray

▶ あなたにまっしぐら

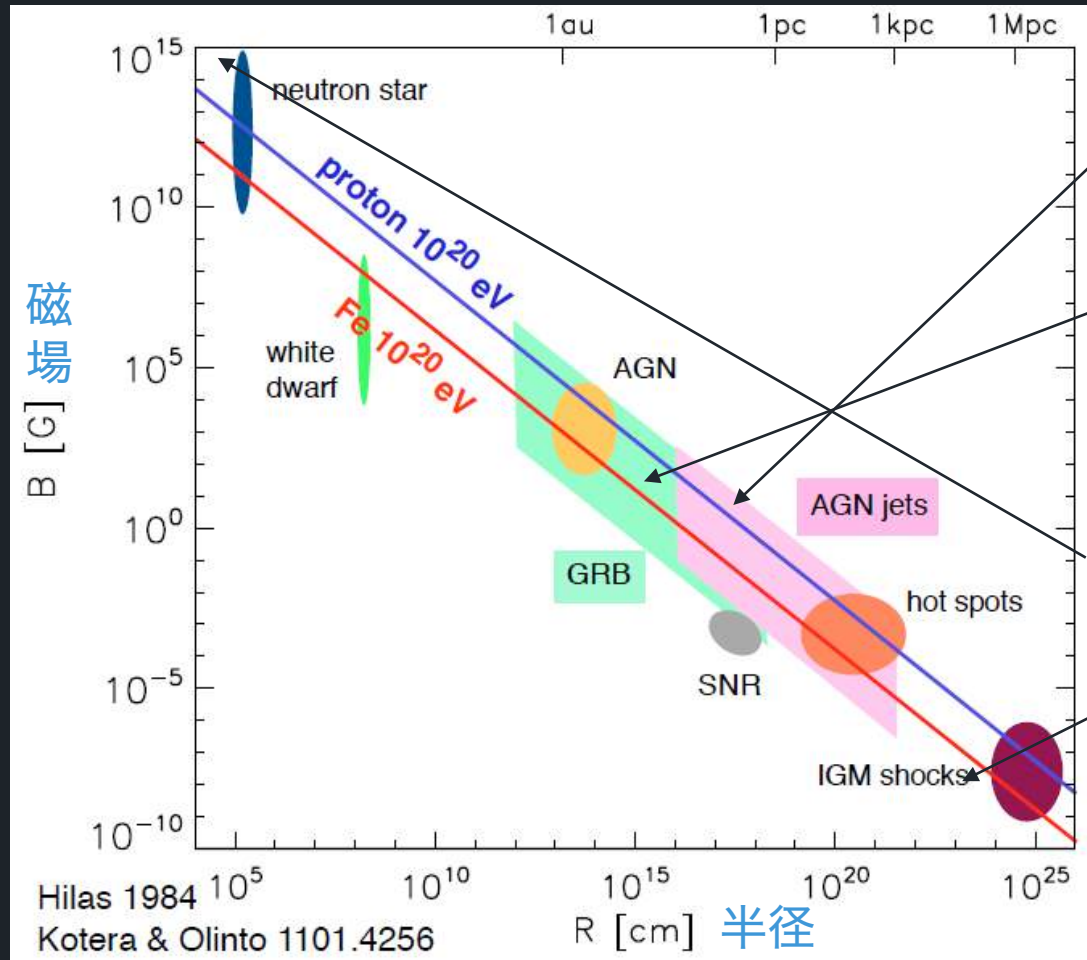
宇宙線の
発生源



低エネルギー宇宙線 : 宇宙磁場に曲げられる
最高エネルギー宇宙線 : ほぼ真っ直ぐ進む
⇒発生源特定の期待

Extreme-Energy Cosmic Ray

Where are you from?



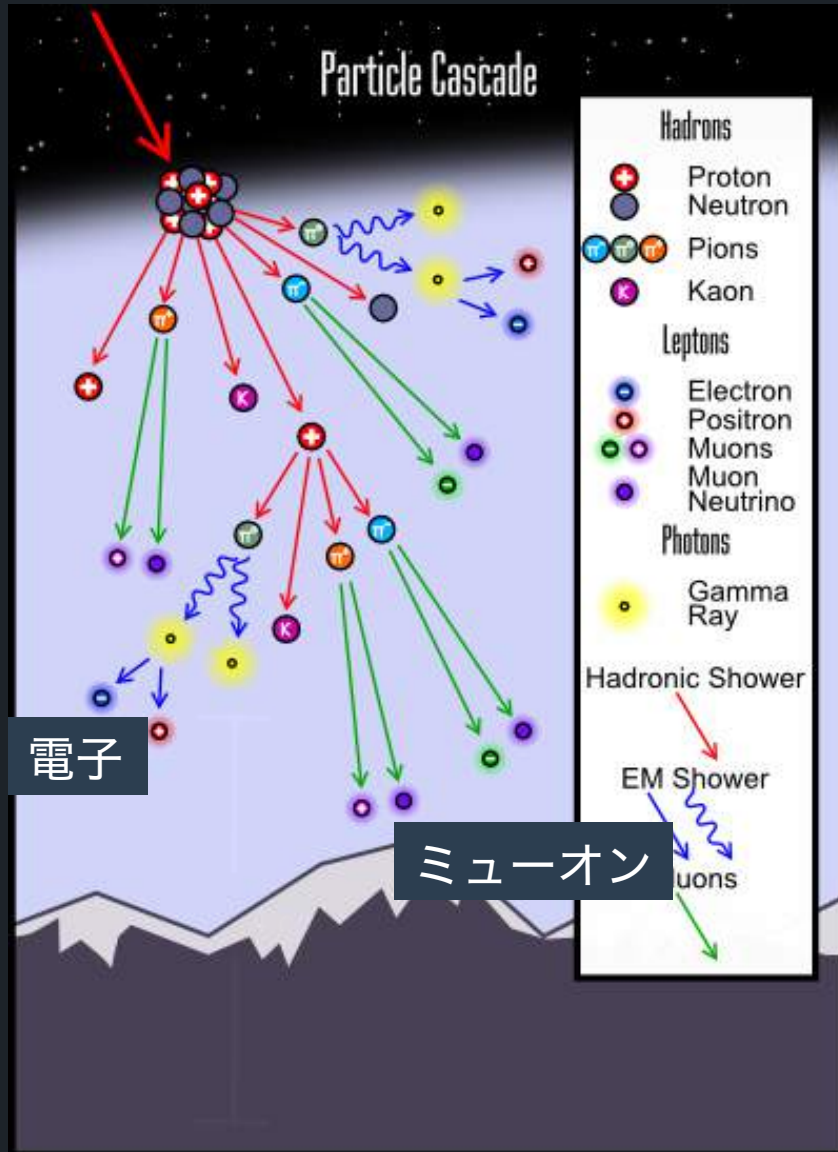
宇宙最大BH
 $M_{\text{BH}} \sim 10^{6-9} M_{\text{sun}}$

宇宙最強爆発
 $E_{\text{GRB}} \sim 10^{51} \text{ ergs}$

宇宙最強磁場
 $B \sim 10^{15} \text{ G}$

宇宙最大重力束縛天体
 $r_{\text{vir}} \sim \text{a few Mpc}$

どのようにして 10^{20} 電子ボルトの
エネルギーが得られるかはいまだ謎



宇宙線が地球大気に突入し、非常に多くの粒子を作る

✓ 空気シャワー

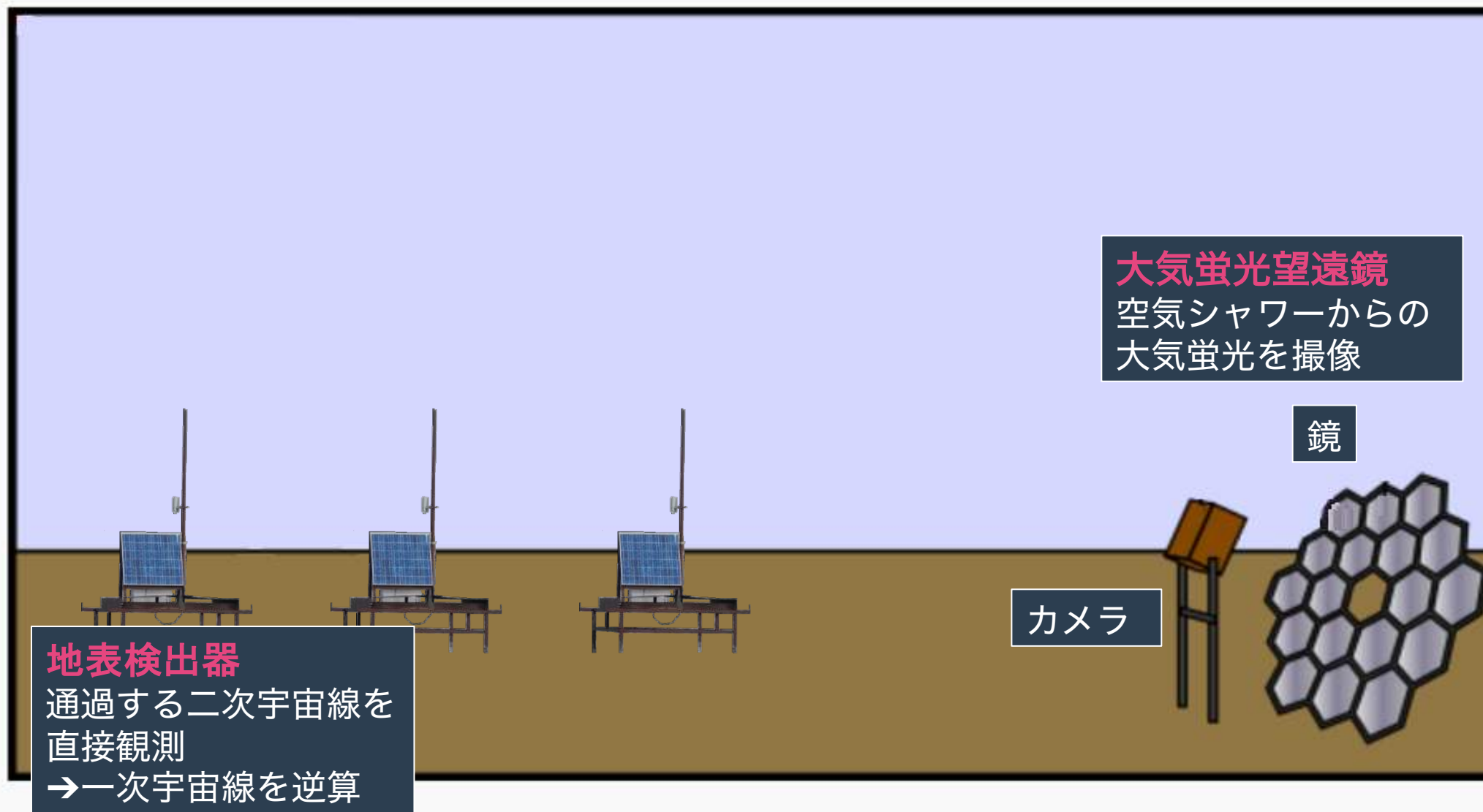
大気中で生成された多くの粒子(2次宇宙線)が地表に降り注いでいる

➤ 大体 1秒間に手の平を1回貫通

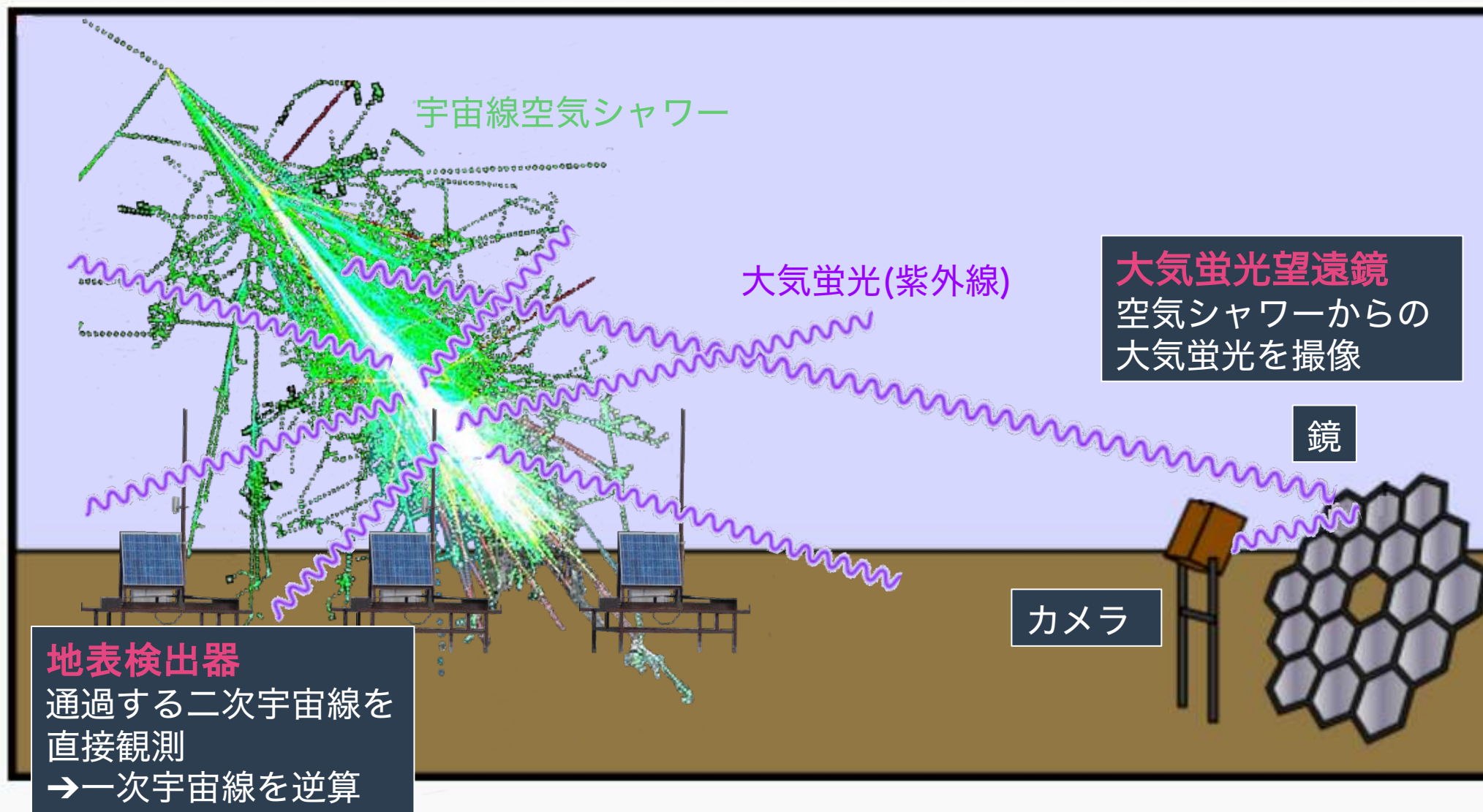
ミューオン(μ)、電子(e)などが生成される

©TELESCOPE ARRAY PROJECT

Telescope Array (TA)



Telescope Array (TA)



Telescope Array (TA)

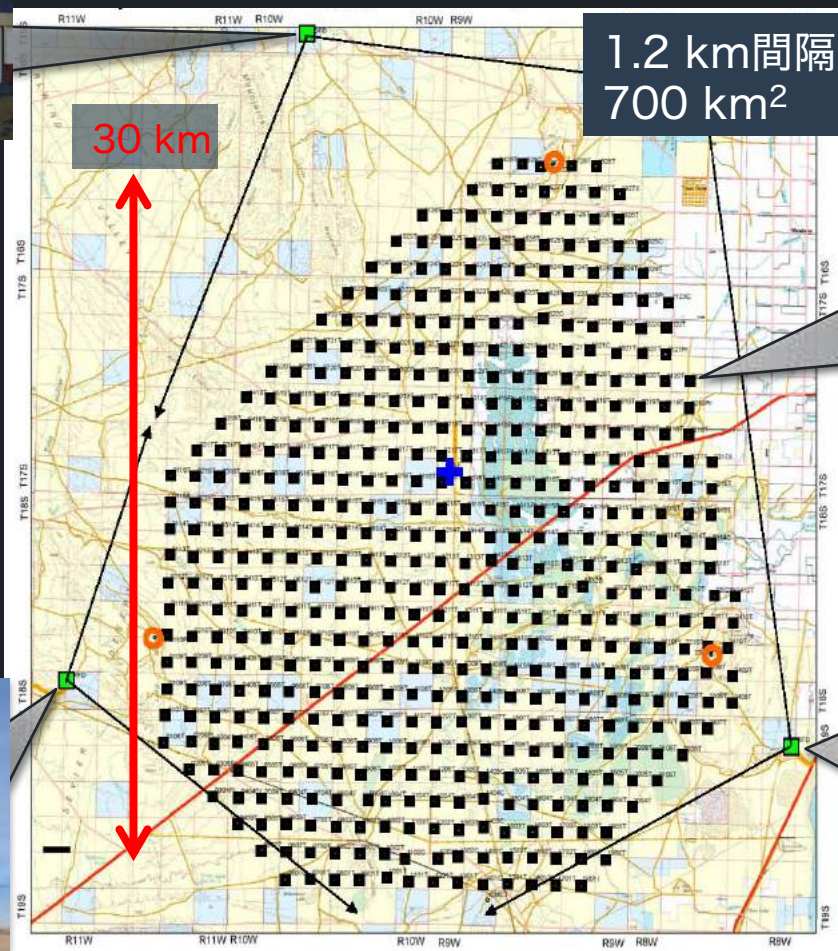
大気蛍光望遠鏡



大気蛍光望遠鏡



2017/3/09



米国ユタ州 標高1400m

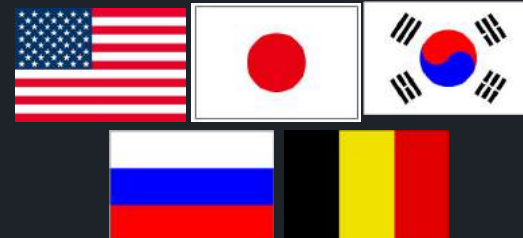
2008年5月よりハイブリッド観測開始

地表検出器

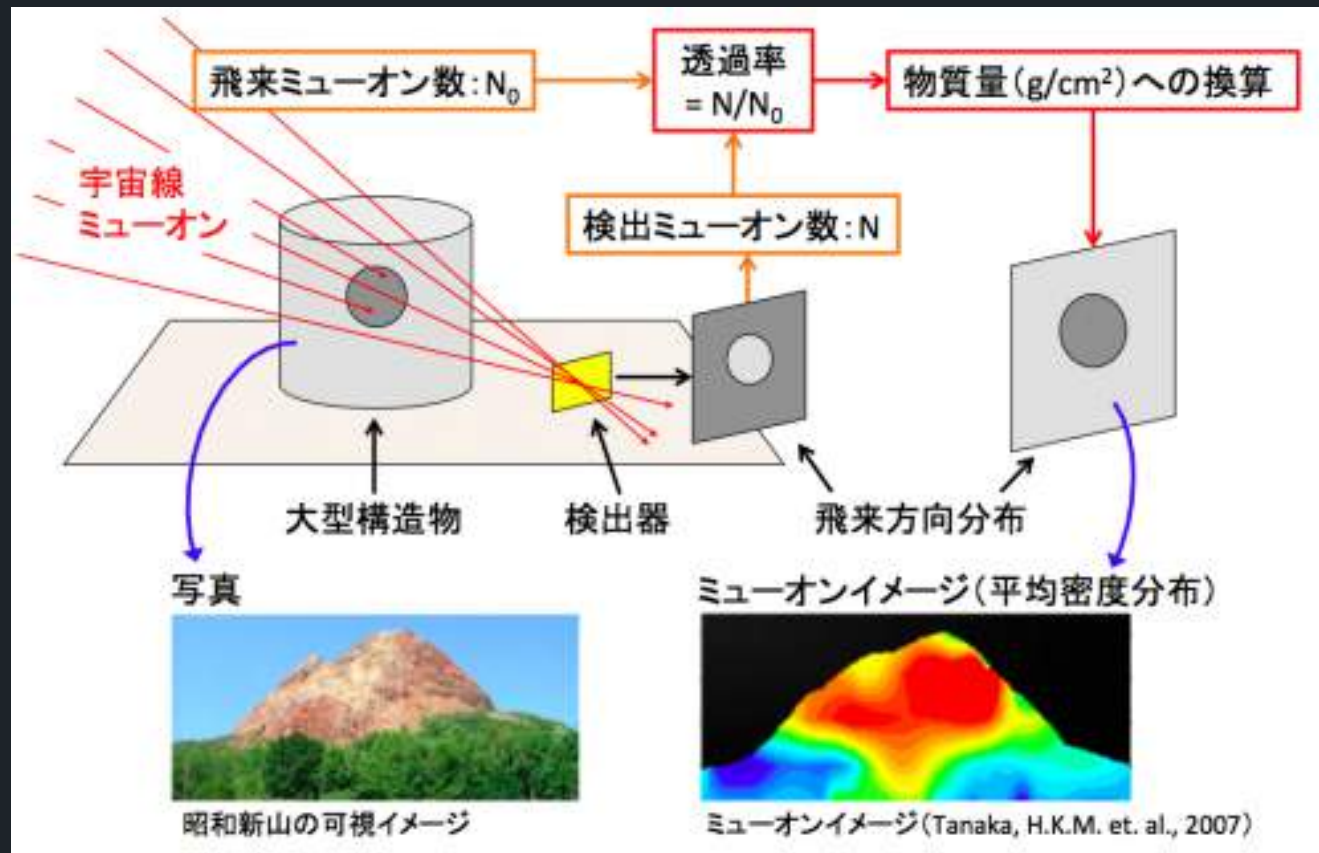


3平方メートル
プラスチック
シンチレータ

大気蛍光望遠鏡



➤ ミューオンによるレントゲン撮影！



©名古屋大学 F研 基本粒子研究室

- ミューオンの高い透過率
- X線では見る事が出来ない火山やピラミッド、原子炉などの“厚い”対象物の内部を非破壊でイメージング

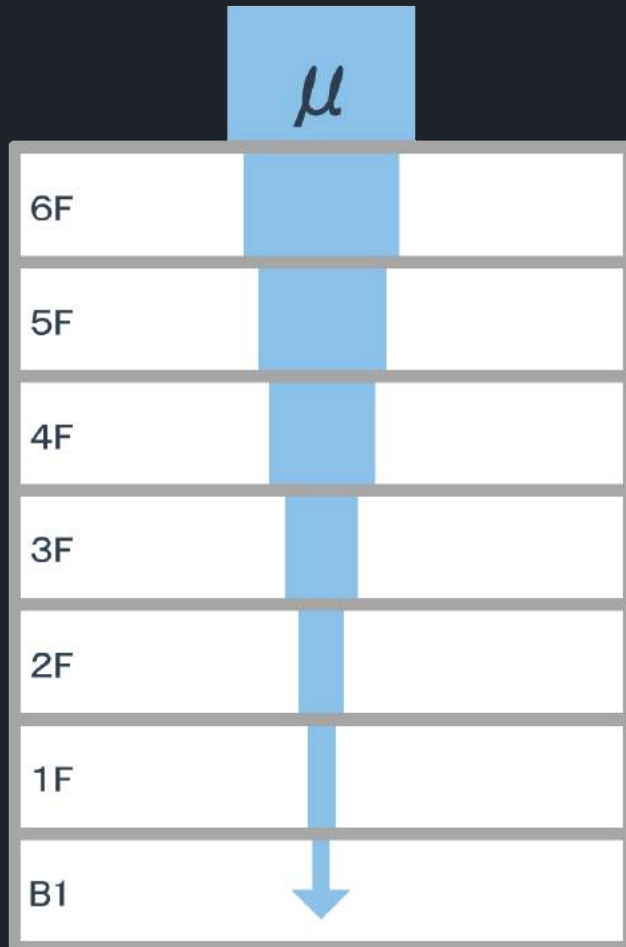
Muon Radiography

➤ こんなこともできるんじゃない？



©静山社

宇宙線研のミュオグラフィ

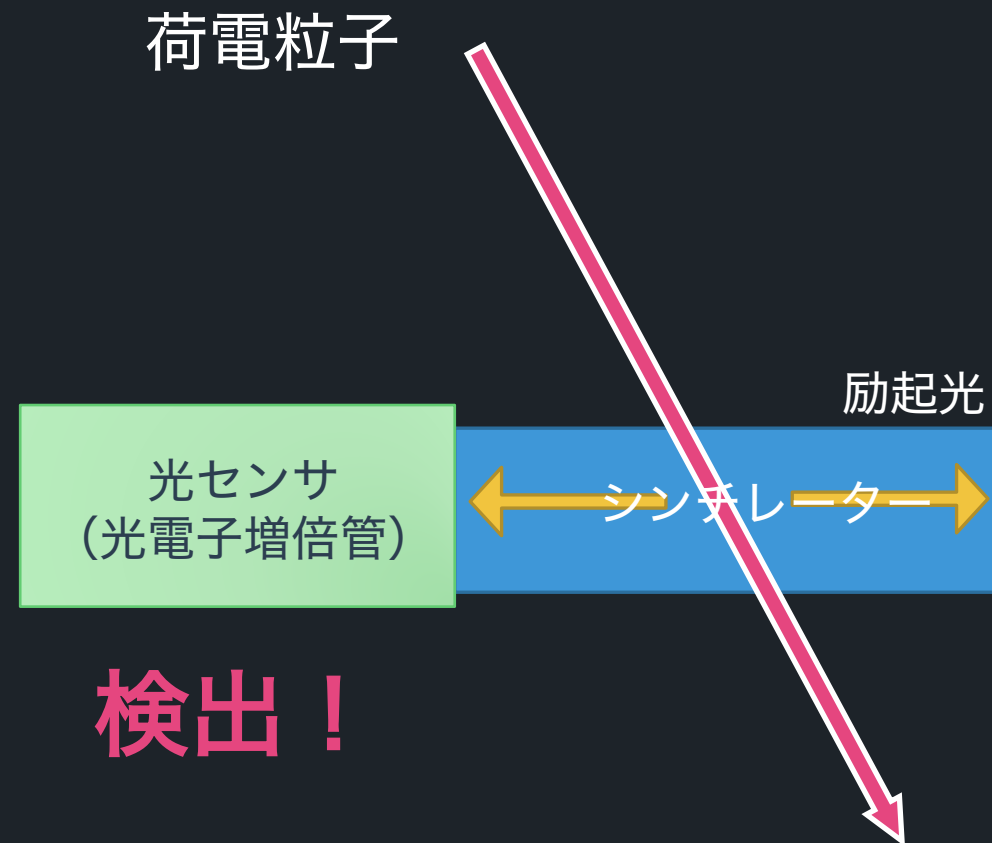


- | 自作装置により各階のミューオンをカウント
- | シミュレーションにより、ミューオンのコンクリート通過確率を計算
 - 各階の床の厚さを測定

秘密の部屋が見つかるかも！！

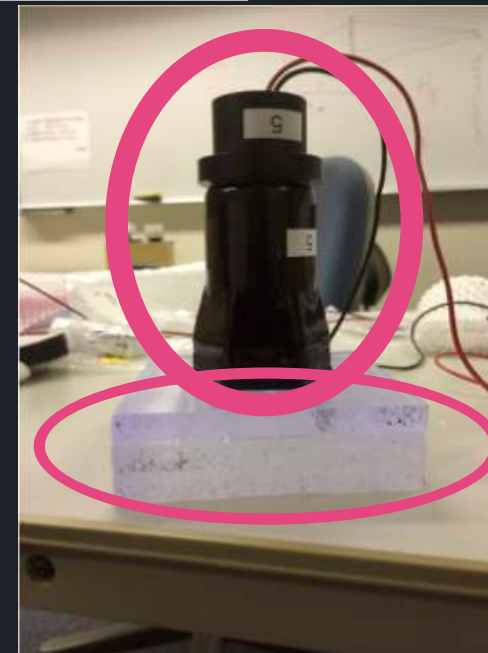
シンチレーター
と
光電子増倍管
を組み合わせる!

- i. シンチレーターに荷電粒子が透過すると励起光が発生
- ii. 励起光を増倍管で検出



| シンチレーター

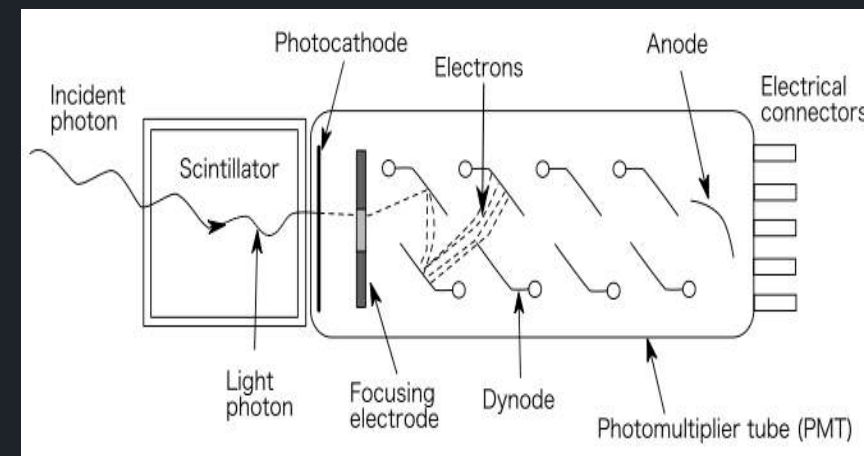
- 荷電粒子の透過により励起光を発生
- 環境放射線等でも発光
- 発光は宇宙線由来とは限らない・・・



| 光電子増倍管

- 熱電子や環境放射線など光電子以外も増幅してしまう

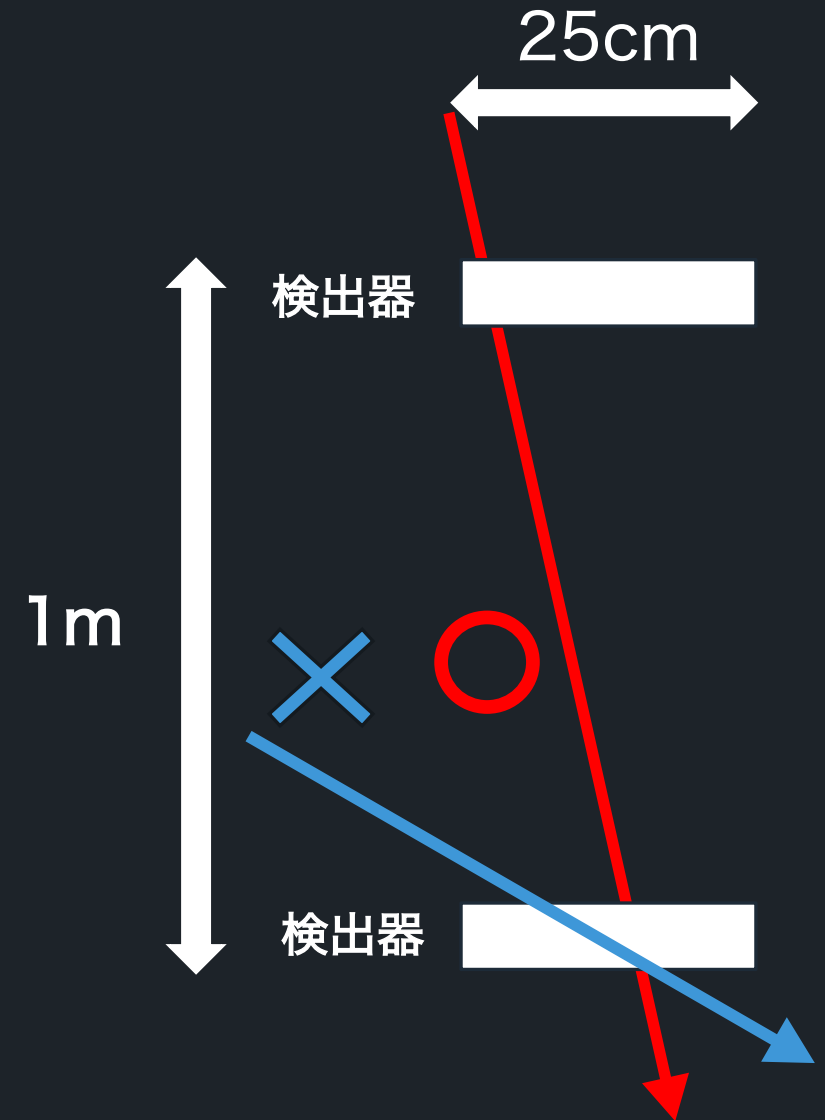
どうやって宇宙線由来の信号を取り出すか

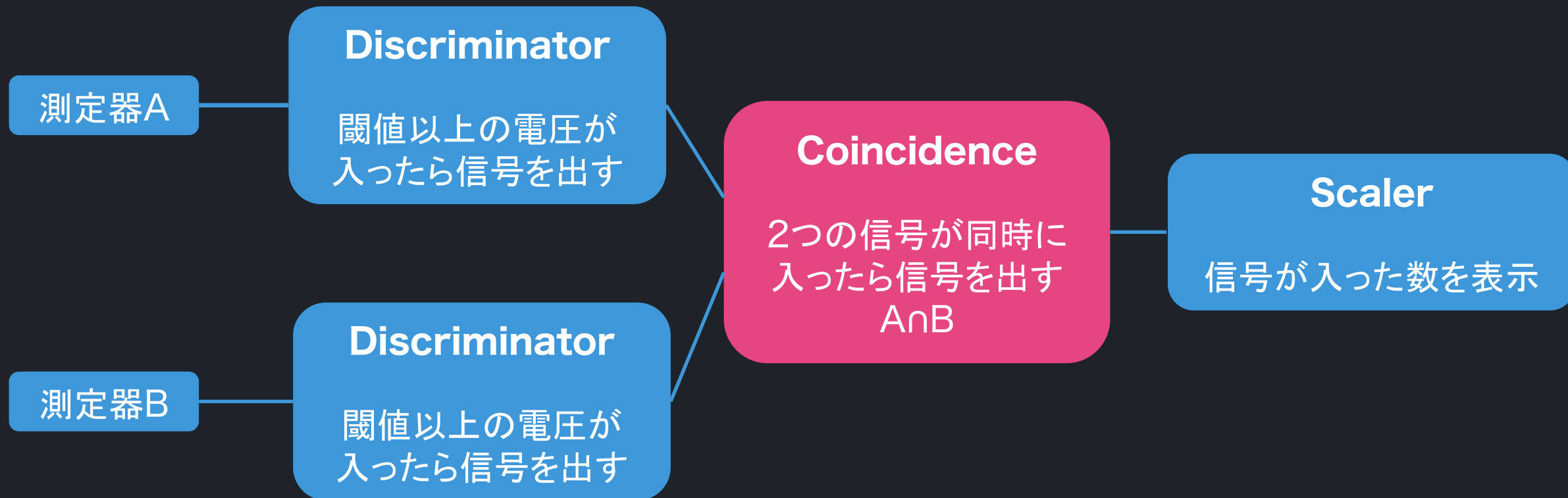


宇宙線の判定方法

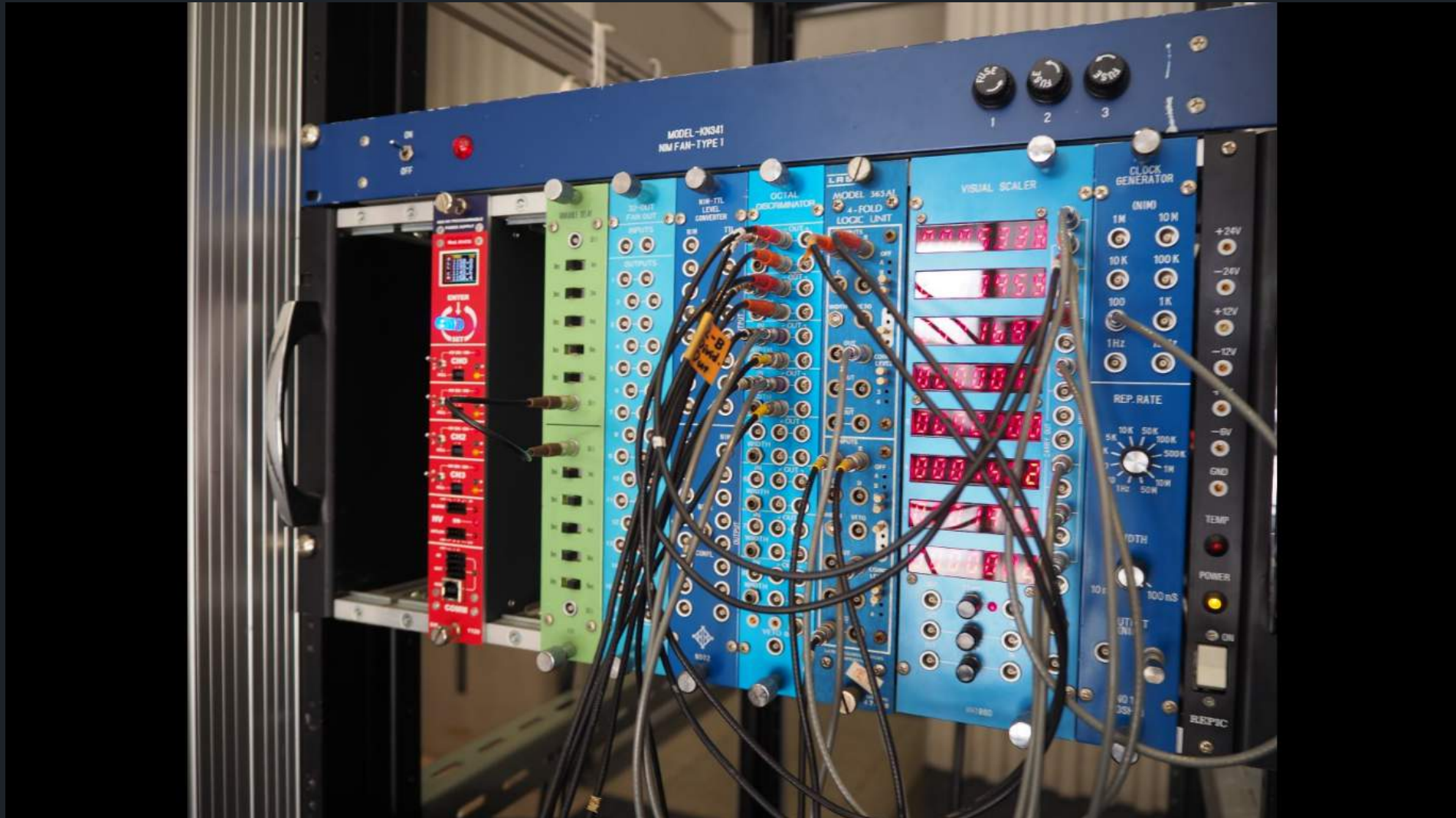
- 縦に離して二つの検出器を設置
 - 2つの検出器から同時に信号が出力された場合を宇宙線と判定
 - 片方のみの場合は、壁からの放射線などが考えられる

検出される宇宙線の天頂角は最大でも $\sim 14^\circ$





信号検出システム (NIM)

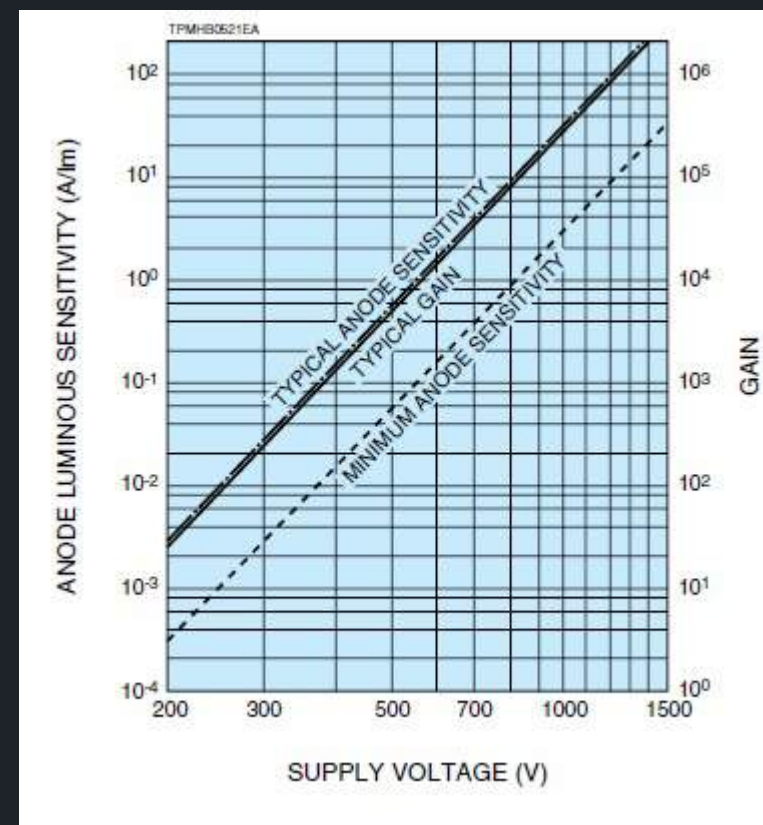


温度変化に対する考察

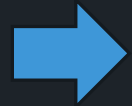
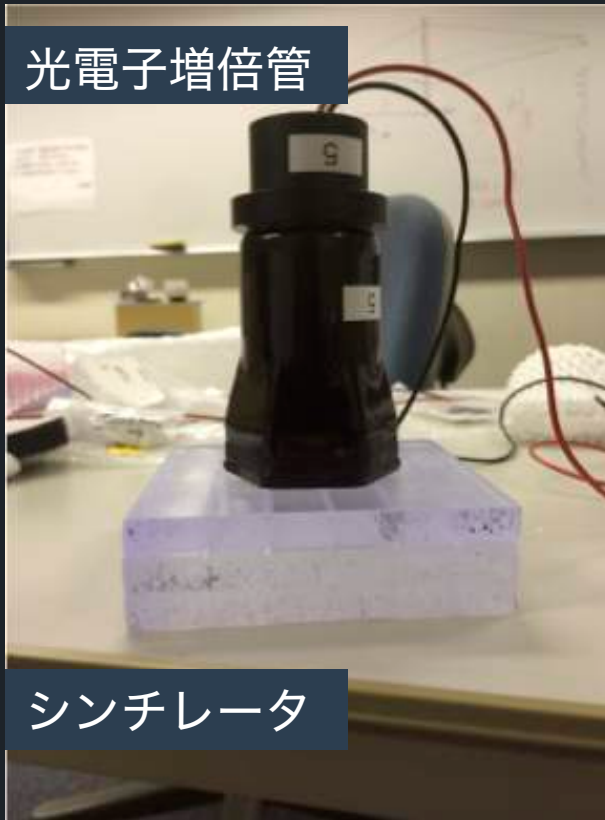
- | 光電子増倍管のゲインは温度、電源電圧で変動
- | 今回は初期電圧に加え、そこから電圧を50V上げた状態でカウント数を測定

電圧変化に対する時間当たりのカウント数の変動		
	初期電圧	初期電圧+50V
検出器A	11	15.06
検出器B	13.1	18.64
$A \cap B$	0.254	0.271
電圧上昇による検出値の増加割合		1.0669

- | 50Vの上昇でゲインは約30%上昇
- | 気温が1℃下がるとゲインは約1%上がる
 - 仮に30℃の気温変動があってもカウント数の変動は7%以下



Our Detector



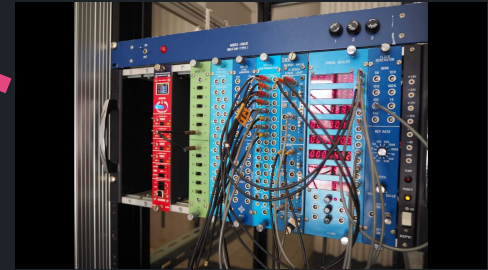
反射率の高いシートで覆い、さらに全体を遮光する

Our Detector

ミューちゃん



オンちゃん



宇宙線研究所の床（コンクリート）
の厚さを測る

各階の μ 粒子数を計測

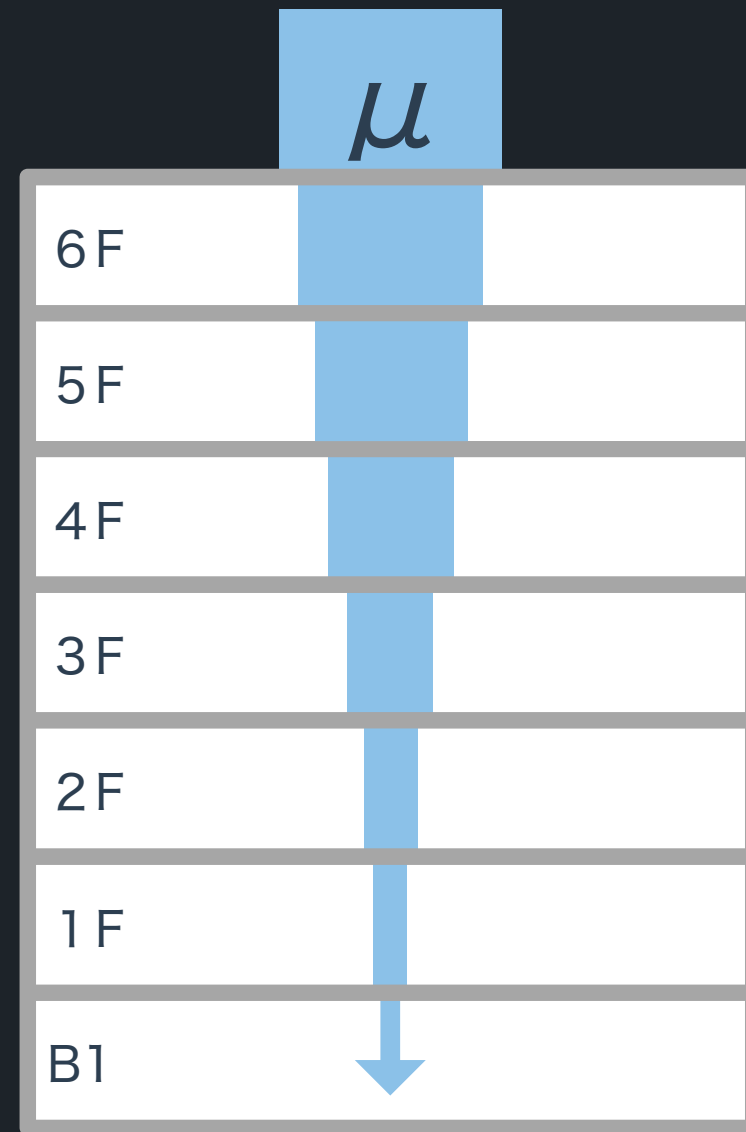


各階の μ 粒子頻度



比較

シミュレーションによる計算結果

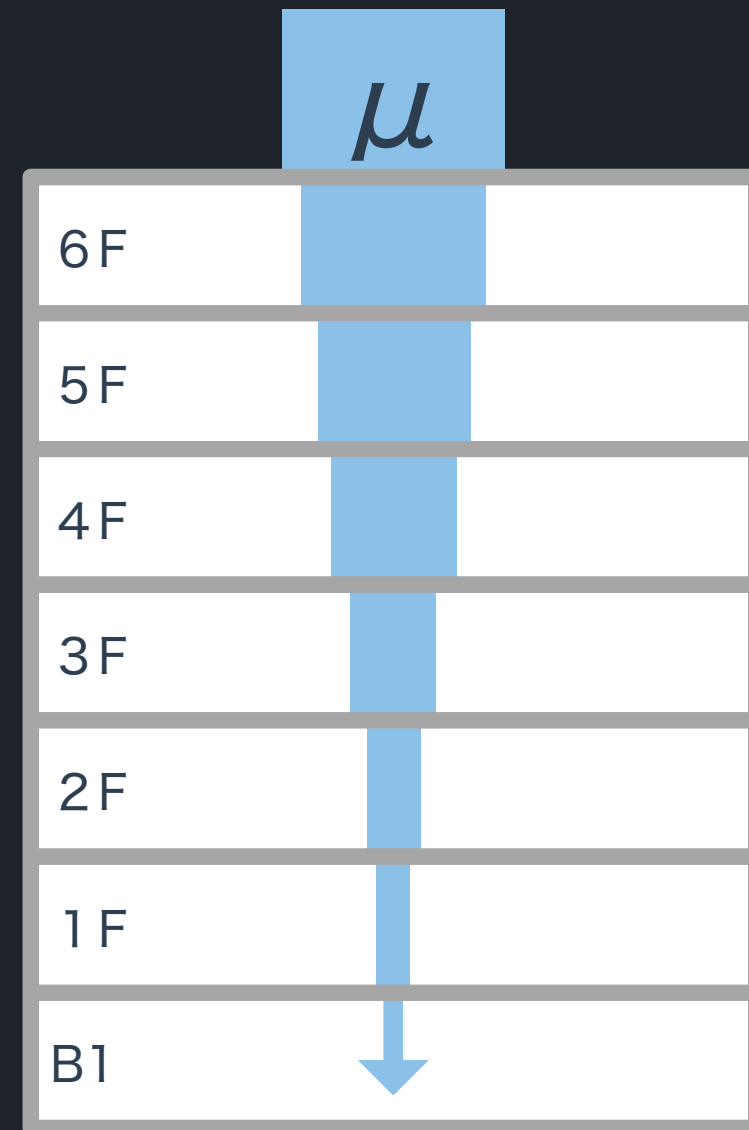


✓ 宇宙線研究所の床（コンクリート）の厚さを測る

予想

低階 → コンクリート厚み合計(大)
→ μ 粒子検出数(小)

i.e. 検出数：1F < 2F < 3F



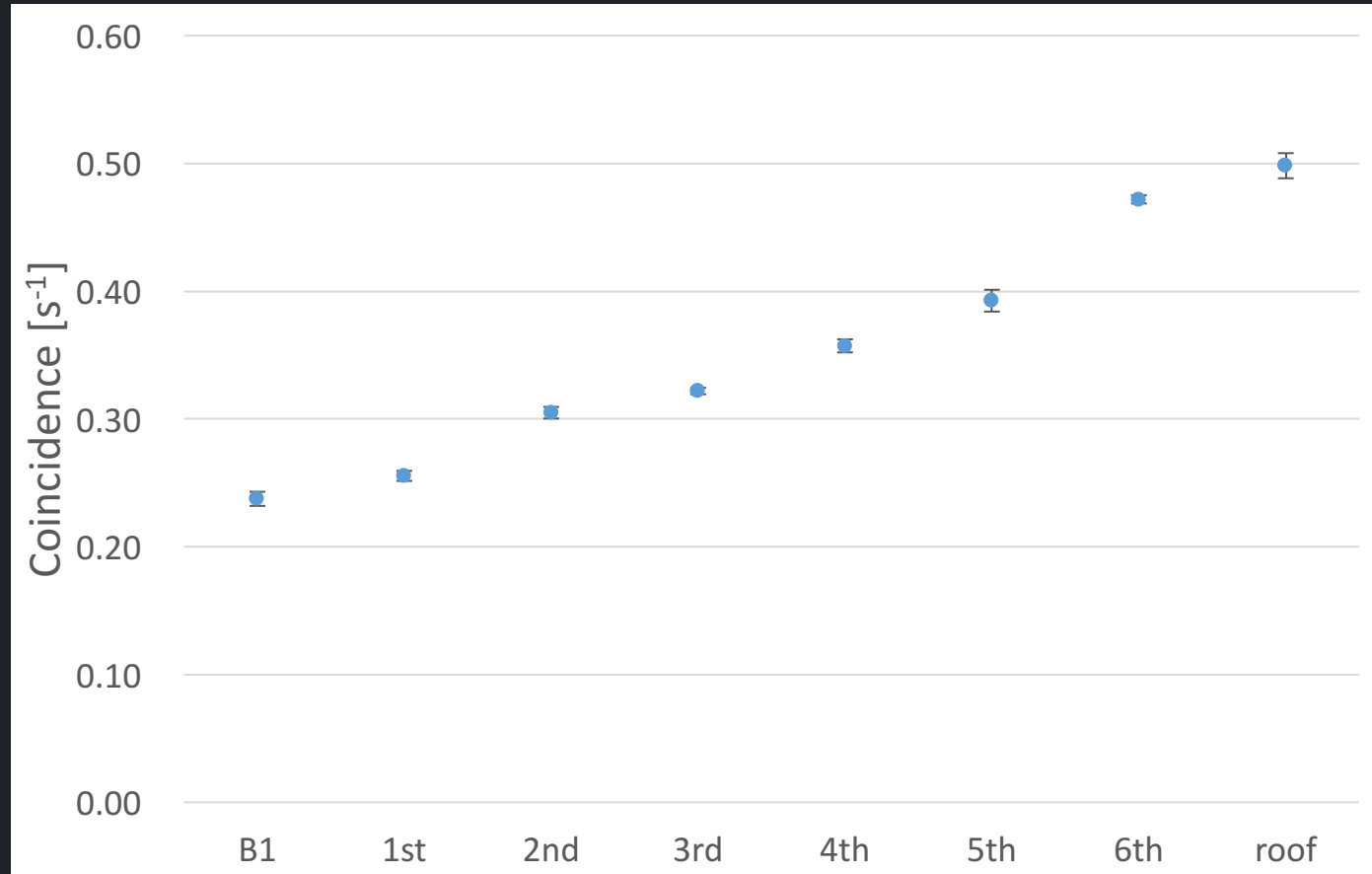
| 各階の μ 粒子数を計測

➤ 設置場所(各階エレベーター前)



➤ (測定時間) > 3600s 〈統計誤差~1%〉

Result



低階

→ コンクリート厚み合計(大)
→ μ 粒子検出数(小)

*横軸は正しい距離のスケールではない

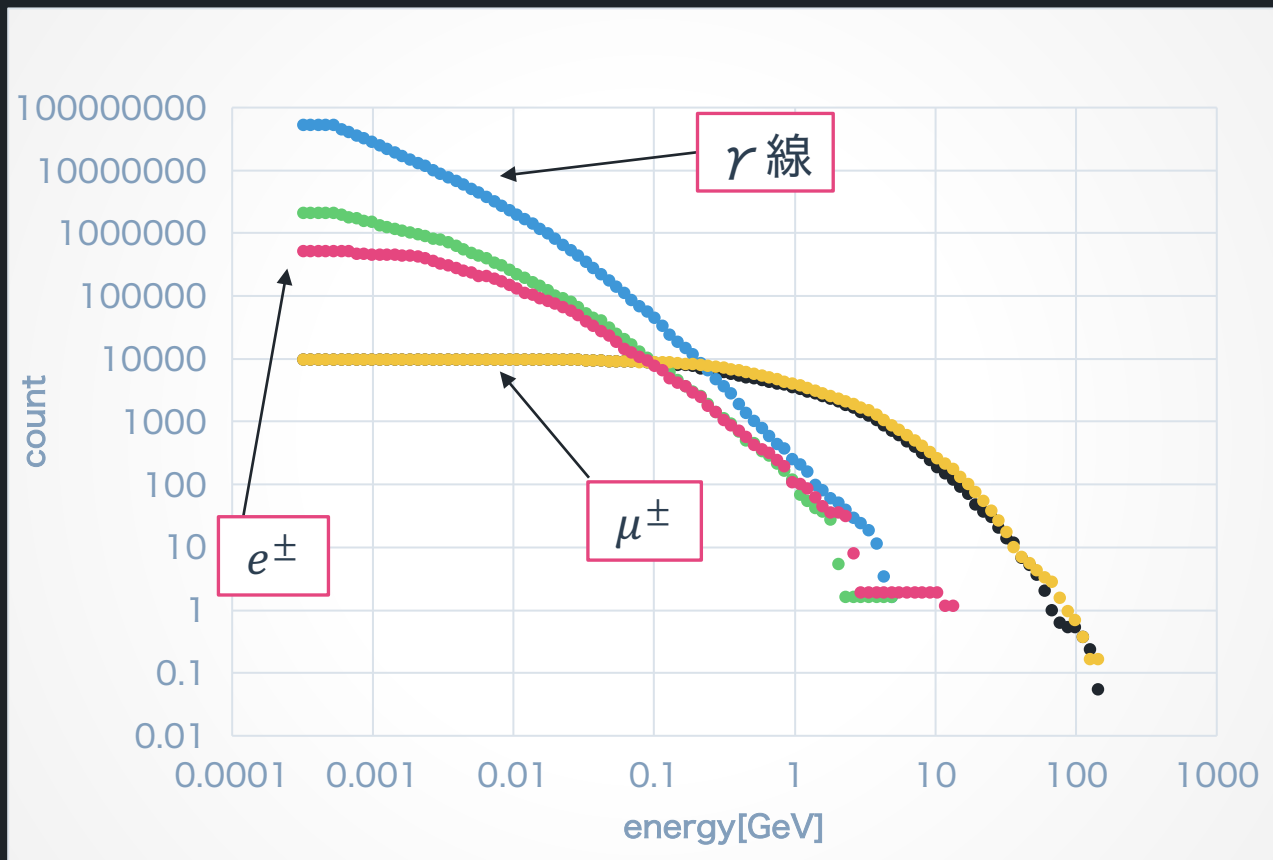
概要

- | 空気シャワーシミュレーション(CORSIKA)
- | ユタ州にあるTAにおいての、 γ 線、 $\mu^\pm$ 、 $e^\pm$ の観測される粒子数を得ることができる
- | 各エネルギーの粒子が到達できるコンクリートの深さを計算
 - ✓ このデータをもとに、ICRRの各階のコンクリートの厚みを求めるのが目的

粒子相互作用



Geocities.jp



シミュレーションにおける、各エネルギー以上での到達粒子数

Simulation手順

➤ CORSIKAによってTAでのエネルギーと粒子数を計算

✓ この横軸のエネルギーをコンクリートの深さに変換すれば良い

エネルギーの値をコンクリートの厚さに変換するための条件

- ミューオンが物質中で電離損失により失うエネルギー: $2\text{MeV}/(\text{g}/\text{cm}^2)$
 - ✓ 物質の相違にほぼよらない
- シミュレーション結果で得られたデータ: TA(標高1400m, 870hpa)におけるエネルギー
- これを地上(標高0m, 1000hpa)においてのエネルギーにして、シンチレーター(厚み1.2cm×3枚×上下2枚分)を通る時のエネルギー減少分を差し引く
- シンチレーターの密度: $1.04\text{g}/\text{cm}^3$ 、コンクリートの密度: $2.3\text{g}/\text{cm}^3$

地上のエネルギーに変換

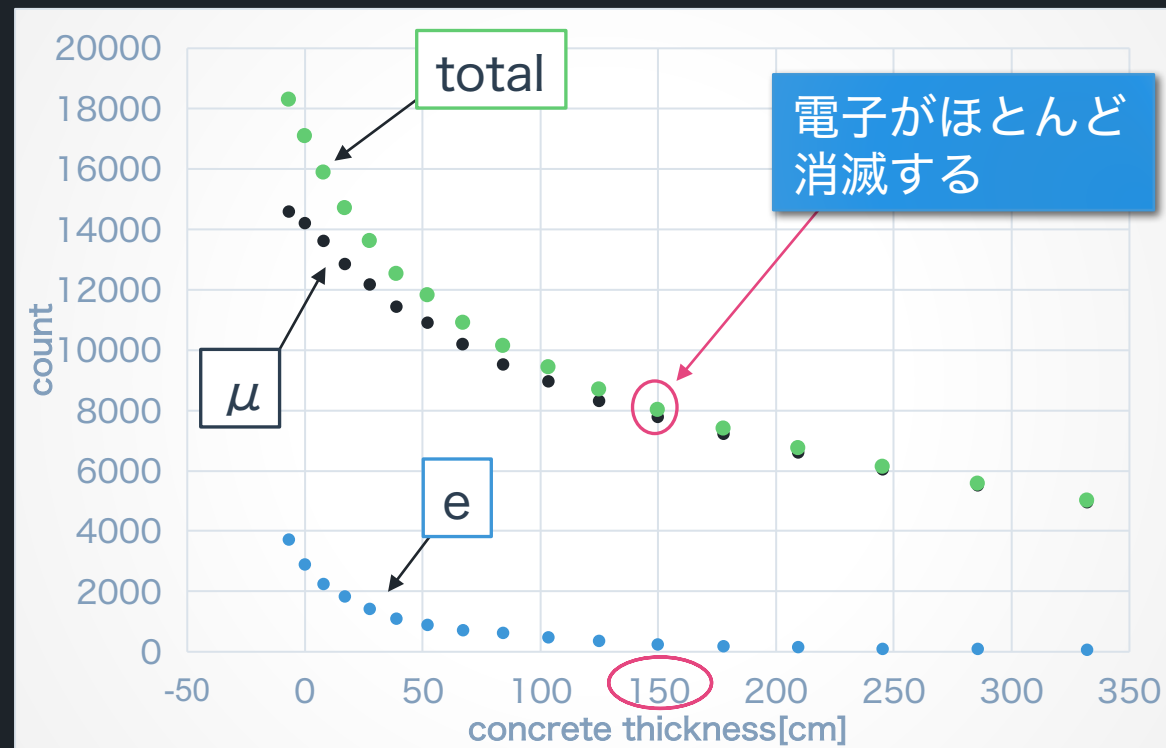
シンチレーター
によって減少す
るエネルギー

$$\text{到達できるコンクリートの深さ} = \frac{(\text{TAにおけるエネルギー}) - (1000\text{g} - 870\text{g}) \times 2\text{MeV} - (1.2\text{cm} \times 3 \times 2 \times 1.04)\text{g} \times 2\text{MeV}}{2.3\text{g}/\text{cm}^3 \times 2\text{MeV}}$$

コンクリート1cmでのエ
ネルギー減少率

シミュレーションデータを変換すると、、、

- コンクリートの厚さが約150cmよりも深くなると、電子はほとんど消滅してミュオンだけになる
- 深いところほど粒子の減少率は小さくなる
 - ✓ 実験結果と比較することで各階におけるコンクリートの厚さを計算できる



シミュレーションにおける、コンクリートの厚さによるそれぞれの粒子の到達粒子数

解析方法

① シミュレーションの値

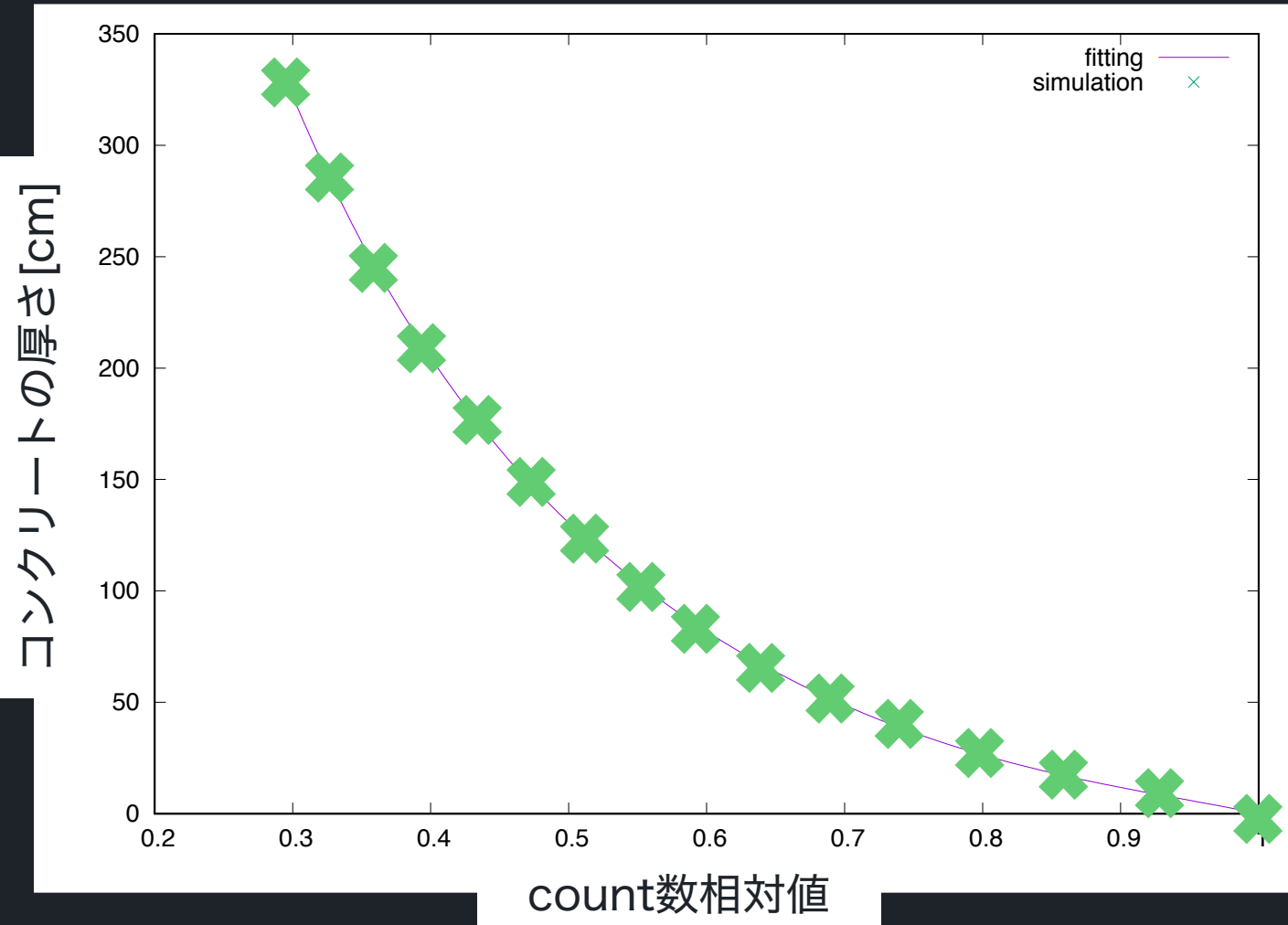
- コンクリートの厚さが 0 cm でのカウント数が 1 になるように規格化

② 測定結果

- 屋上（テラス）での coincidence/s が 1 になるように規格化

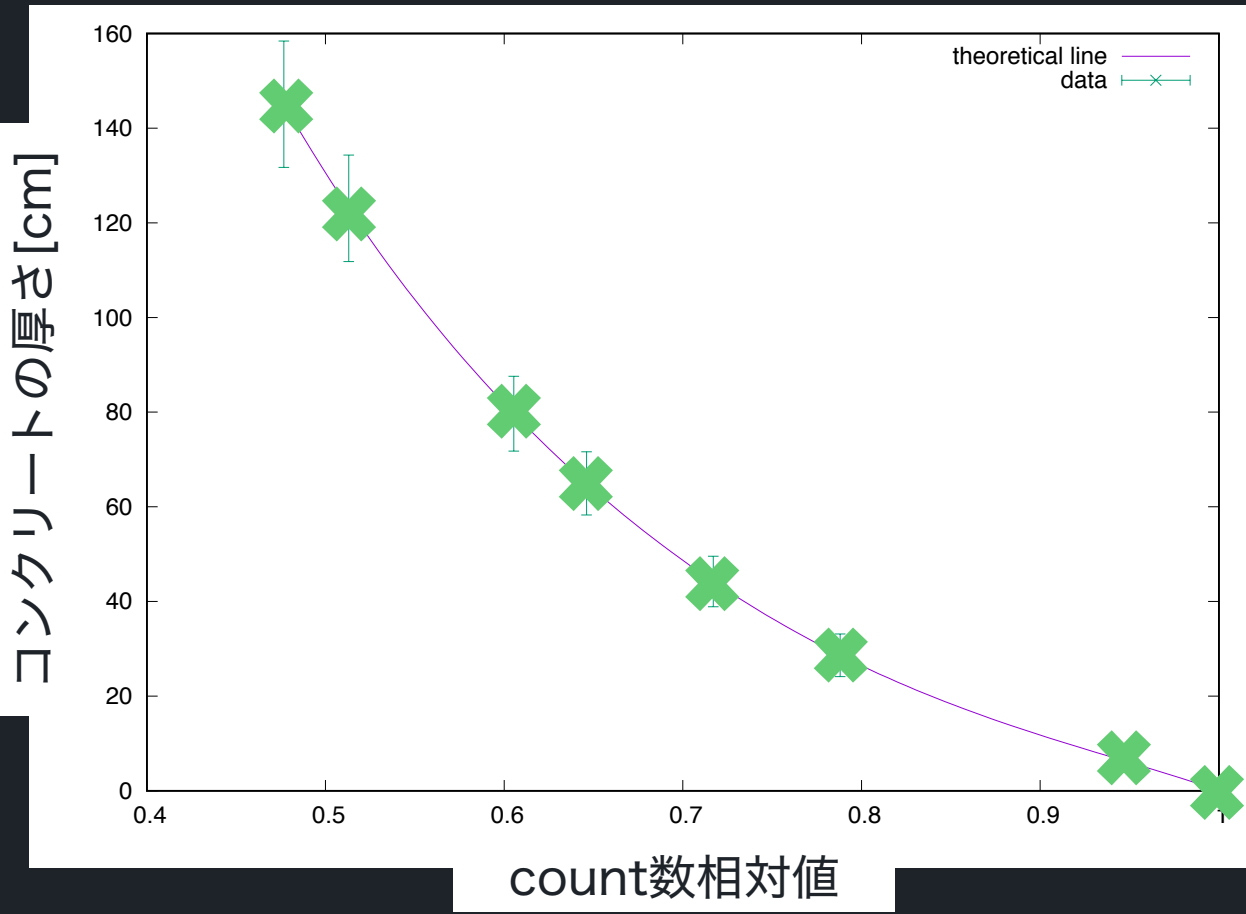
③ 上記 1, 2を比較して各階のコンクリートの厚みを求める

シミュレーション結果のフィッティング



5次関数でフィッティング

コンクリートの厚さ

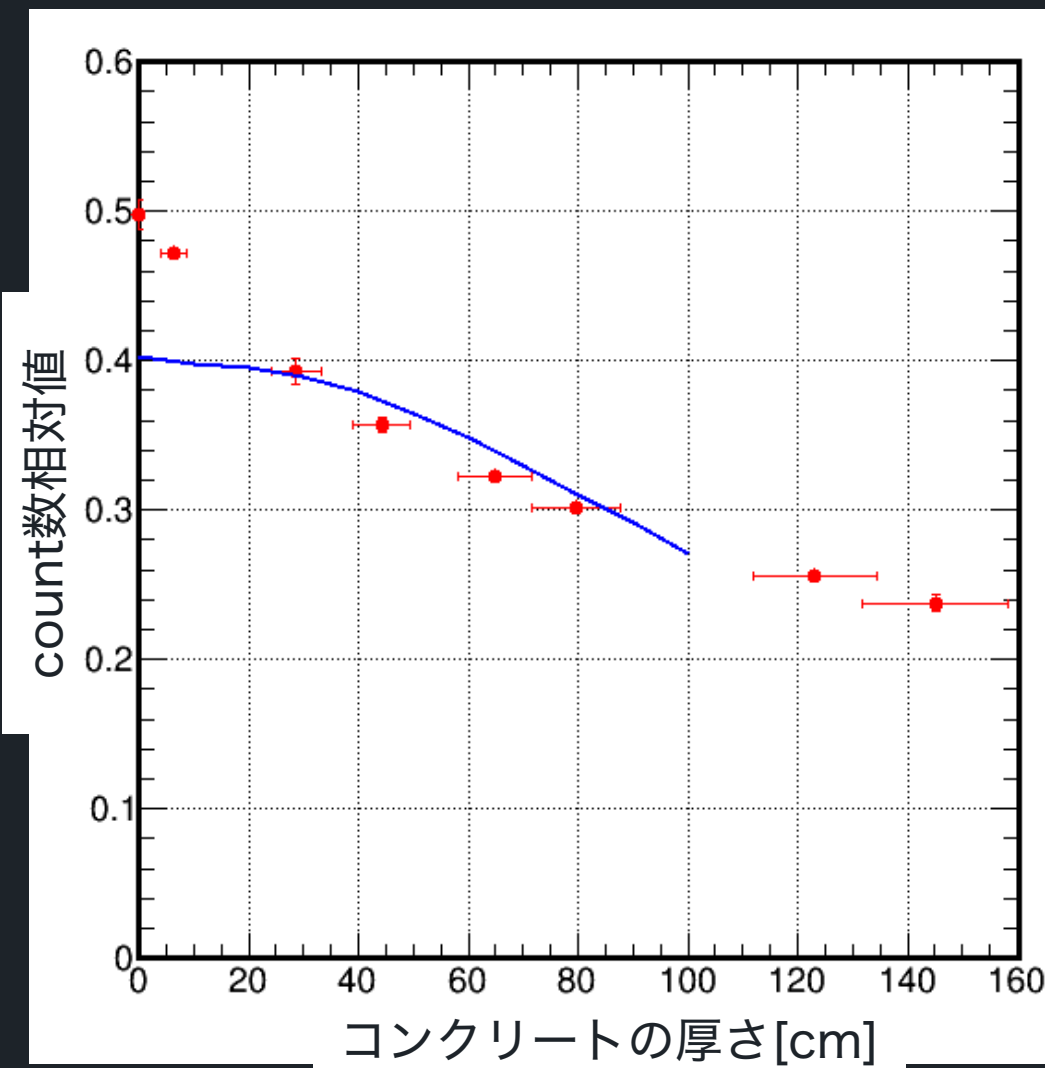


屋上	6.3 ± 2.3
六階	22.4 ± 5.1
五階	15.6 ± 7.0
四階	20.7 ± 8.5
三階	14.7 ± 10.4
二階	43.4 ± 13.8
一階	22.0 ± 17.5 [cm]

文献値と比較

E Aguyao et al. 2001

- カウント数の絶対値を比較
 - 青線が文献値（ミューオンの効果のみ）
 - シンチレータの大きさと立体角を考慮してスケール
 - 赤点が測定値
- ✓ コンクリートの薄い部分では、電子やガンマ線の寄与があると思われる



｜観測結果とシュミレーションの値を比較することで各階の床の厚さを推定し、現実的な値が得られた

｜精度向上のためには

- 測定：
 - 屋上（規格化に用いるデータ）の精度を上げる→測定時間（カウント数）を増やして統計誤差を小さくする
 - 測定装置を改良する（形状など）
- シミュレーション：
 - より詳細なシミュレーション（Geant4）を用いる
 - ex) Geant4 粒子の相互作用・電離損失の物質依存性を考慮

- | 10^{20} eVにも達する最高エネルギー宇宙線はTA実験などで空気シャワーを観測して検出されている
- | シンチレータと光電子増倍管を組み合わせで宇宙線を検出
- | ミューオンを用いたレントゲン観測〈ミュオグラフィ〉で宇宙線研を透視
- | 観測結果とシミュレーションの値を比較することで各階の床の厚さを測定
 - ✓ ミュオグラフィもとい宇宙線の可能性

Special Thanks to

Hiroyuki Sagawa
Daisuke Ikeda
Koki Saito
Ryuji Takeishi

Thank you for Listening

Appendix (Result Data)

Figure. 各階 μ 粒子数測定結果

roofは6階のテラスで測定

Date	3/10	3/10	3/9	3/8,9	3/9	3/8	3/9,10	3/9
Place	B1	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	roof
Start	13:25	8:42	16:47	18:32	8:40	16:55	20:00	14:09
End	15:35	13:17	19:54	8:32	12:27	18:25	8:36	15:34
Time [s]	7802.24	16499.61	14861.54	50360.86	13643.93	5392.49	45391.32	5172.63
Count 1	99105	314244	213130	803823	421538	97894	837842	138311
Count 2	135027	559998	285418	1015296	286236	122622	1103189	194374
Coincidence	1853	4215	4531	16211	4874	2117	21419	2577
Count 1 [s^{-1}]	12.70	19.05	14.34	15.96	30.90	18.15	18.46	26.74
Count 2 [s^{-1}]	17.31	33.94	19.21	20.16	20.98	22.74	24.30	37.58
Coincidence [s^{-1}]	0.24	0.26	0.30	0.32	0.36	0.39	0.47	0.50