高エネルギーガンマ線天文学グループ

メンバー: 愛敬公太、井ノロ侑斗、高田和輝、野原祥吾、森山慶子



左:LST



前提知識

・イントロ ダクション: 高エネルギーガンマ線天文学とは

・チェレンコフ望遠鏡の原理

・ミューオンリングを使った望遠鏡の較正

実習

・SiPMの特性とPZC回路

·ミューオンリング探索&望遠鏡の較正

・ミューオンリング探索&シミュレーションと実際の頻度の比較

イントロ:高エネルギーガンマ線天文学とは 扱う対象:超新星爆発、パルサー、活動銀河核など





なぜ超高エネルギーガンマ線?

・光なので天体からまっすぐ来る
→線源がある方向が分かる

・多波長域にわたる観測

→高エネルギー天体現象の詳しい理解

・超高エネルギーガンマ線 > 100GeV



Cherenkov望遠鏡の仕組み



Cherenkov望遠鏡のアイデア



γ線は大気のせいで地上に 届いてくれない…

➡ 大気自体を望遠鏡の"目"にしてしまおう!





大気の出す"シグナル" — Cherenkov光





発生条件 …
$$\beta$$
n >1 (n:屈折率)
Cherenkov角 … cos $\theta = \frac{1}{\beta}$ n





これが典型的なγ線事象のシグナル





単純化すると細い楕円となる

何がカメラでみえているのか



こうなるように鏡を設計

高い + 長い → 細い







本日の主役 — ミューオン



・ハドロンの空気シャワーに由来

- ・寿命が長い&質量が大きい →ちゃんと地上に届く
- ⁻ 膨大な事象数 →較正に使うときに便利

ミューオンのシグナル(ミューオンリング)



丸い輪っかになる

低い + 短い → 丸い





これだけ覚えて先に進もう





(・複数台で検出すればシャワーの軸もわかる)

ミューオンリングを使った 望遠鏡の較正



望遠鏡による観測では何がしたいか? →取れたデータ(観測値)から、元のγ線(実際の値)を再現する →再現する際に発生した誤差を減らす必要がある





ミューオンを観測する理由



望遠鏡で捉える対象→チェレンコフ光 なぜµ-ringを捉えるのか?

- 寿命が長い(制動放射が起こりにくい)
 - 地上に届く→望遠鏡で観測できる
 - イメージがリング状→集光率が導出できる
- µ粒子は宇宙線由来
 - データ量が膨大→γ線観測の精度が上がる

ミューオンリングによる集光率の較正



鏡の反射率、光のセンサーの検出性能



リングの半径 ⇄ 鏡の反射率、光のセンサーの検出性能



レーザーによるPMTの増幅率の較正

PMT:(光=光電子) → データ

レーザーの光量から増幅率が測定できる しかし、"屋外"の望遠鏡では外的要因で、レーザー入射光量が分からない。 分からないので、仮定をおく 仮定:短時間ではレーザーの光量は一定 統計的に増幅率を導出 正規分布を適用し、測定する

較正するPMTの増幅率の導出

出力電荷の分布の平均 μ_{PMT} と σ_{PMT} を用いて、PMTの増幅率 G_{PMT} を導出する

測定: μ_{PMT} , σ_{PMT} $\mu_{MPT} = G_{PMT}\mu, \sigma_{PMT} = G_{PMT}\sigma$ $\mu = \sigma^2$ (正規分布) 入射光子数 $\mu = \frac{\mu_{PMT}^2}{\sigma_{PMT}^2}$ 増幅率 $G_{PMT} = \frac{\sigma_{PMT}^2}{\mu_{PMT}}$

望遠鏡の較正(まとめ)

"ミューオンリング"による集光率の較正

- 鏡の反射率、光のセンサーの検出性能→リングの半径
- 結像性能→リングの幅

"レーザー"によるPMTの増幅率の較正

• 増幅率→PMTで検出される電荷分布

→本実験では、上記の量を測定・解析したい

SiPMの特性とPZC回路



- ガンマ線からのチェレンコフ光とノイズとなるハドロンからのチェレンコフ光の弁別効率をあげたい(望遠鏡の感度向上につながる)
 - 深層学習で弁別効率が上がる可能性
 - →ピクセルが細かい方がありがたい

→SiPMを採用(PMT:1000V SiPM:40V)



Hillasパラメーター



Proposal of LST camera with SiPMs







ガイガーモードアバランシェホトダイ オード(GAPD)



- SiPM(約6400セルのGAPDの集合体)
- ガイガーモード
 - 光子を検出したかしていないかを0か1で判定 0
- PZCを挟まない→パルス幅が長くなる
 - テイルで夜光由来の信号を引っ掛ける
 - チェレンコフ光のパルス幅が3ns(パルス幅は長くする必要は 0 ない)
 - 正確な光子数が見積もれなくなる 0

検出光子数 = 積分電荷 / (光検出器のゲイン×素電荷)



講義スライドより



出力信号と電荷分布



PZCを挟むことによってパルス幅が短くなった

 $\mathsf{GAPD} {\rightarrow}$

- 電荷分布の考察(1) G_all = Q1 / e
- G_sipm = G_all / G_amp.
- (G_amp. = 27)
- Q1:1光子あたりの出力電荷
- e: 素電荷



電荷分布の考察(1)



C1 [pF]	R1 [kΩ]	R2 [Ω]	t1 [ns]	t2 [ns]	q1 [pc]
5	82	680	410	3.4	0.015
7	68	510	476	3.57	0.059
10	33	360	330	3.6	0.038
22	20	150	440	3.3	0.063
33	12	110	396	3.63	0.097

電荷分布の考察

ー見Poisson分布に従っているように見えるが、、?



→Poisson分布には従わない 数%~10数%の確率で起こりうるが、ガンマ線のエネルギーを測る上で大問題では ない

ミューオンリング探索

目的:望遠鏡の光子-光電子の変換効率を知りたい

手段:欠けてないミューオンリングを見つける

①なぜミューオンリング?

・半径が分かれば、チェレンコフ角がわかり、ミューオンの速 度(β)が分かる

cosθ=1/βn



$$\begin{split} \frac{dN(\omega)}{dxd\omega}d\omega &= \frac{1}{\hbar\omega}\frac{dI(\omega)}{d\omega dx}d\omega = \frac{\alpha}{c}\left[1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right]d\omega \\ &= \frac{2\pi\alpha}{\lambda^2}\left[1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right]d\lambda \end{split}$$

上の式から入射光子数が分かる。
これと、実際の出力光電子数を比較

⇒光子から光電子への変換効率が分かる。

多数の撮像画像からミューオンリングの絞り込み



Hilas parameter:

size(光電子の数)、width(短軸)、length(長軸)、

skewness(歪み)、、、

ミューオンリングは円形なので、、、

0.8<width/length<1.2、skewness<0.5などと設定。

大量の画像から、カメラに円が収まったミューオンリングを選び出す。



検出器の校正

望遠鏡の反射率を70%、80%、90%、100%と変えた場合のリング半径と光電子数をシ ミュレーションしてプロット



縦軸:入射光子数 N 横軸:リング半径 R

観測データと比較して、最も合うパ ラメータの値を特定。

左図より、望遠鏡の鏡の反射率は 70%~80%の間と分かる。

ミューオンリングの面積S=2πRΔR

入射光子数 N ∝ S

 \Rightarrow N \propto RAR

観測日ごと反射率を求めた結果



左図の横軸:観測した日 縦軸:鏡の反射率

2022年2月あたりで、反射率が 減っている。

⇒鏡に何か起きた?

答:La palma島の火山噴火の灰 が鏡面につもっていた。

目的:CTA-LST1望遠鏡シミュレーションと実データの比較

手段:ミューオンリングの頻度を計算

- 1. 衛星検出器のデータを用いて、望遠鏡シミュレーションの条件を決 定
- 2. 望遠鏡シミュレーションを用いて、ミューオンの到来頻度を計算
- 3. 実データを用いて、ミューオンの到来頻度を計算
- 4. 望遠鏡シミュレーションと実データを比較

衛星検出器で行うこと



シミュレーションデータの規 格化を衛星検出器の測定 データを用いて行う

衛星検出器

CALET



ASM-02



<u>The Detector | The Alpha Magnetic</u> <u>Spectrometer Experiment (ams02.space)</u>

CALET - カロリメータ型宇宙電子線望遠鏡

DAMPE (unige.ch)

各元素の到来頻度



衛星検出器の結果(1)

宇宙線の強度 $\frac{dN}{dE} = aE^{-b}$ [counts/cm²/sr/sec/TeV]

宇宙線の強度はべき乗でよく近似できている



衛星検出器の結果(1.5)



衛星検出器の結果(2)

$$\frac{dN}{dE} = aE^{-b}$$

[counts/cm²/sr/sec/TeV]

元素	a×10 ⁻⁶ [/cm ² /sr/sec/TeV]	b
陽子	8.87	-2.709119254
ヘリウム	7.27	-2.633219741
酸素	2.26	-2.658880495
ケイ素	1.00	-2.640079662
鉄	2.06	-2.591720885

シミュレーションの条件

	距離範囲	角度範囲	ベキ指数	エネルギー範囲	Nsim
陽子(p) ヘリウム (He)	1,000 m	半角 6 度	-2.6	0.01 - 100 TeV	3.98e9
酸素 (O) ケイ素 (Si) 鉄 (Fe)				0.1 - 100 TeV	1.00e8

今回のシミュレーションについて、
実効的な観測時間を計算する元素観測時間N =
$$a \int_{E_{min}}^{E_{Max}} E^{-b} dE \times S \times T \times \Delta \Omega$$
陽子418.7 $N = a \int_{E_{min}}^{E_{Max}} E^{-b} dE \times S \times T \times \Delta \Omega$ ヘリウム511.0 $[counts]$ 酸素1644.6 $S = \pi r^2 [cm^2]$ ケイ素3716.8 $\Delta \Omega = 2\pi (1 - \cos \theta) [sr]$ 鉄1804.3

シミュレーションの結果(2)

元素	リングの個数	観測時間 [sec]	リングの頻度 [Hz]	頻度誤差
陽子	1819	418.7	4.34	0.102
ヘリウム	623	511.0	1.22	0.0488
酸素	180	1644.6	0.109	0.00816
ケイ素	85	3716.8	0.0229	0.00248
鉄	61	1804.3	0.0338	0.00433
		合計	5.73	0.11

実データの結果

	リング数	観測時間 [sec]	リングの 頻度[Hz]		リング数	観測時間 [sec]	リングの 頻度[Hz]
1	64	7.612	8.408	6	46	7.706	5.969
2	69	7.672	8.994	7	52	7.617	6.827
3	61	7.636	7.988	8	51	7.679	6.641
4	60	7.67	7.823	9	53	7.59	6.983
5	52	7.586	6.855	10	57	7.652	7.449
				合計	565	76.42	7.39

実データとシミュレーションの比較

	リングの頻度[Hz]	頻度誤差
望遠鏡シミュレーショ ン	5.73	0.11
実データ	7.39	0.31

→1.24~2.08[Hz]の差が生じている

理由

シミュレーションの条件が限定的

ex)元素の種類、距離範囲、角度範囲など

Cherenkov望遠鏡の…

① 測定:光検出器とPZCによる光子数カウント

②較正: シミュレーションと比べて光学効率を推定

③活用: 衛星検出器データによるシミュレーション でミューオン頻度が予測より多いことを発見

Thank you for listening !