



Ashra実験： 測定器開発の現状

2004. 4. 22 @宇宙線研セミナー

Ashra-1 Collaboration

東大・宇宙線研・浅岡陽一

内容

1. Ashra検出器
 - Ashra実験概要
 - 検出器概略
2. プロトタイプ
 - 16"UVII
 - 2/3スケール望遠鏡
3. 実機製作
 - 24"UVII + 望遠鏡
 - 光電撮像パイプライン/トリガーセンサー/CMOSセンサー
 - サイト
4. 性能評価
 - TeV γ 線観測
5. まとめ

UV用大口径イメージ
インテンシファイア
=UVII

内容: Ashra検出器

- Ashra実験概要
 - Ashra実験
 - 計画
- Ashra検出器
 - 望遠鏡
 - 光電撮像系
 - トリガー/CMOSセンサー

Ashra実験

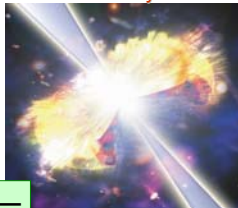
Ashra : チェレンコフ、大気蛍光の観測を行う新しい検出器

特徴:

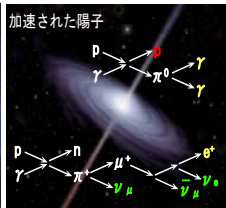
- 全天監視 $\Rightarrow 2\pi$ sr
- 高分解能 $\Rightarrow 1$ 分角
- 同時観測
 - TeV γ
 - EHE p/γ
 - VHE ν

空気シャワー
の撮像

Gamma Ray Burst



Active Galactic Nuclei



Ashra ステーション:

- 12 望遠鏡 / ステーション
- 全天 (2π sr) / 80Mピクセル
- 光学系と光電撮像パイプライン

実験サイト: ハワイ島

フアラライ山 (2521m)

Ashra
ステーション

マウナロア山
(4206m)



Ashra Project Plan

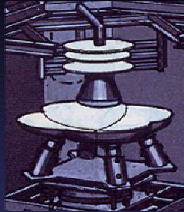
Ashra研究代表者
佐々木真人

2002 2003 2004 2005 2006 2007

phase 0

R&D

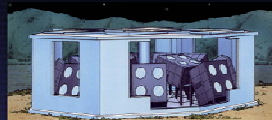
sub-telescope



prototype in labo.

phase 1
Pioneering

1 + 1/3 stations



2 Mt.s on the Hawaii Is.

phase 2

High Statistics

complete 3 stations

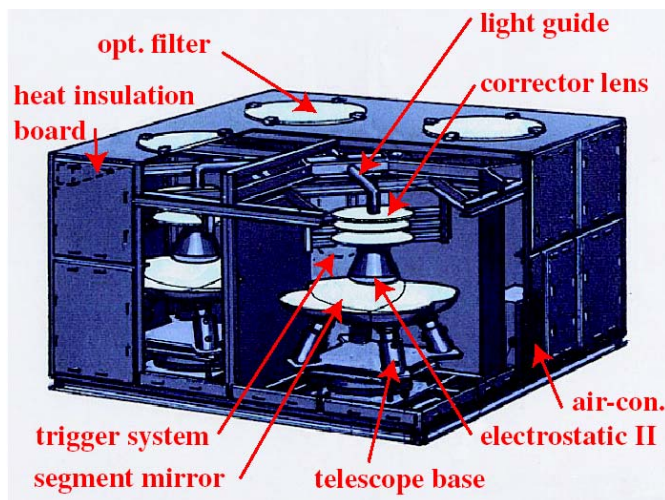


3 Mt.s on the Hawaii Is.

Ashra-1

Ashra検出器：望遠鏡

望遠鏡



望遠鏡:

- i) 4台の副望遠鏡
- ii) 光電撮像系

4台の副望遠鏡は、高いコスト効率でより大きな集光力を得るため、同じ視野を向いている。

Ashra検出器：望遠鏡

望遠鏡



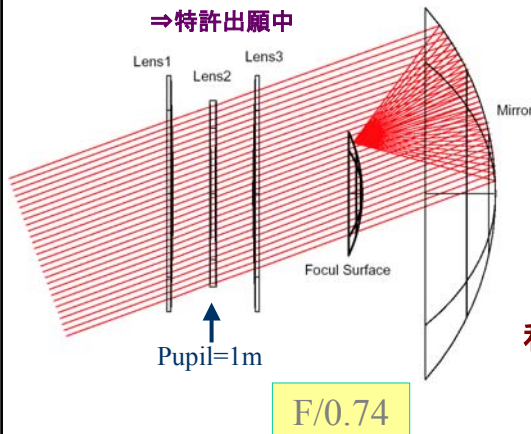
望遠鏡：

- i) 4台の副望遠鏡
- ii) 光電撮像系

4台の副望遠鏡は、高いコスト効率でより大きな集光力を得るため、同じ視野を向いている。

Ashra検出器：光学系設計

修正Baker-Nunn



- シュミット型光学系
- 球面鏡（分割鏡）
- 球面焦点面
- 補正レンズ系

利点： レンズ形状最適化の自由度が大きく、収差を消すことが可能

- 1. 球面収差
- 2. 色収差

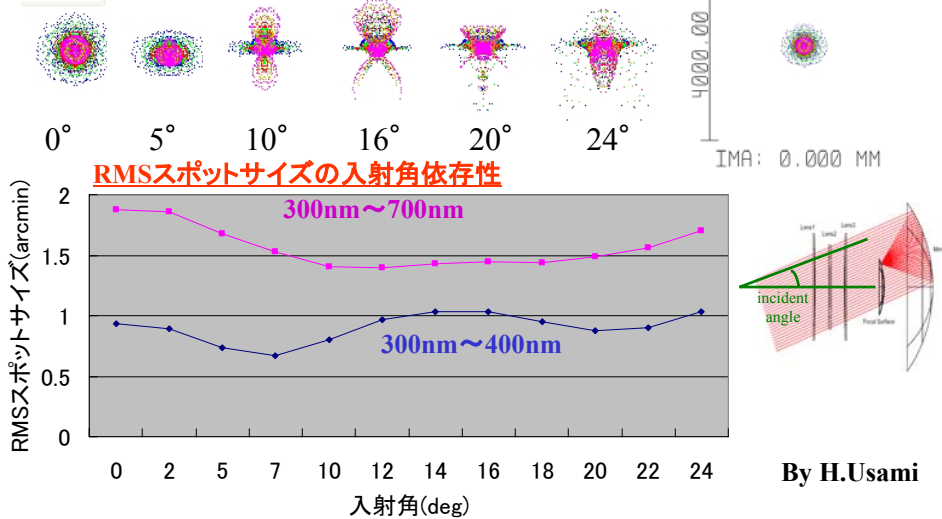
詳細：

M.Sasaki et al, NIM A492 (2002) 49

Ashra検出器：光学系性能

レンズ有効径: $\phi 1180\text{mm}-\phi 1000\text{mm}-\phi 1180\text{mm}$

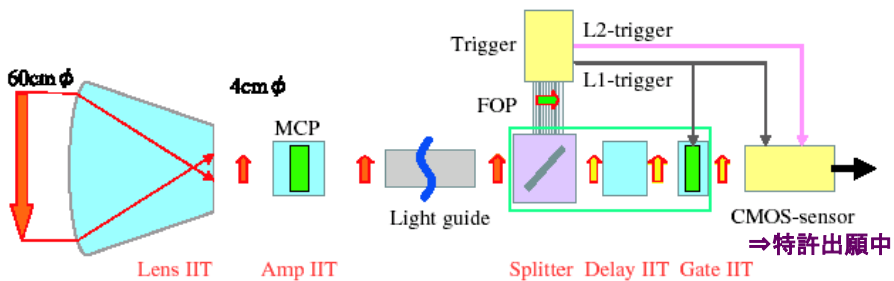
最適化後のスポットダイアグラム



Ashra検出器：光電撮像系

光電撮像系

⇒特許出願中



高精度・高S/N・自己トリガー可能なイメージパイプライン

1. パイプライン化されたI.I.による輝度増幅
2. 光分配と蛍光面での光遅延を用いた自己トリガー
 - 信号の時間スケールは ns $\sim$ μ s
 - 高S/Nを確保するには露光時間制御が必須
3. CMOSセンサーによる精細画像取得

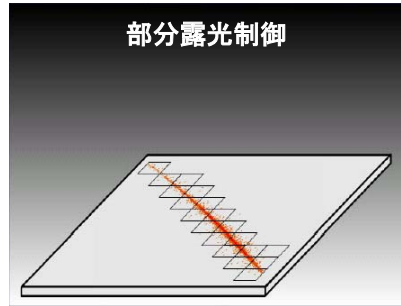
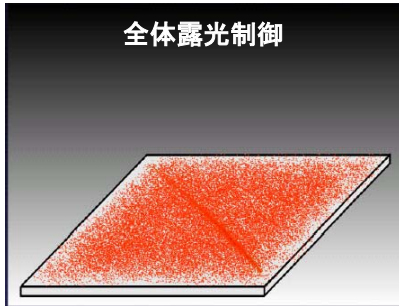
Ashra検出器:トリガー/CMOSセンサー

トリガーセンサー

1. MCPにより増幅した信号を 128×128 ピクセルでピクセルごとに波高弁別
2. X, Y 方向から、Wired OR された信号 (On/Off) をとりだす
3. $<30\text{ns}$ でCMOSセンサーへ出力を出す

CMOSセンサー

1. トリガーセンサーの信号をうけて、 128×128 のマクロセルで部分露光制御
2. 1kHz のトリガー頻度に対応するため、部分読出しを行う



内容:プロトタイプ

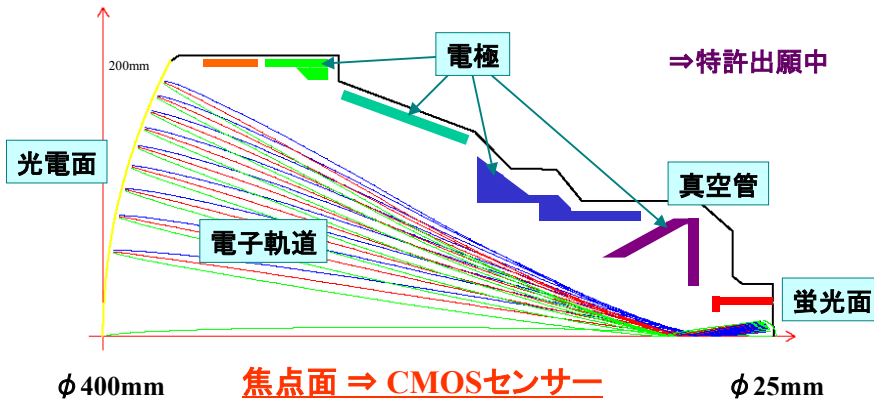
1. 16" UVII
 - 開発
 - 性能評価
2. 2/3スケール望遠鏡
 - 光学要素開発
 - 光学系調整
 - 恒星観測による性能評価

16" UVII機能

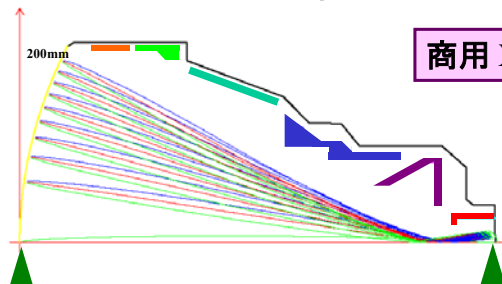
- UVIIの機能:**
1. 焦点面を形成
 2. 固体撮像素子のレベルまで像を収縮



PMTアレーを用いた他の競合実験と比べて、Ashra実験が抜群のピクセルコストを実現する要因

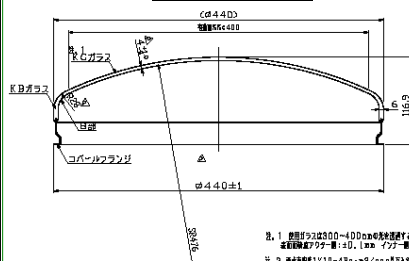


16" UVII設計



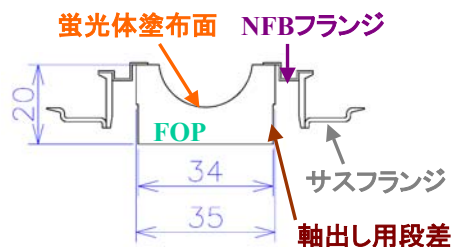
商用 X線 I.I.の改造

入力光電面



注. 1. 真空管は3000-4000nmの光を透過するものと、
真空管は3000-4000nmの光を透過するものと、
注. 2. 真空管は3000-4000nmの光を透過するものと、
注. 3. 3000nm (内面) 4000nm (外面) とする。

出力蛍光面



16" UVII 1号管

2004.1.14



16" UVII の試作に
初めて成功！

出力面イメージ

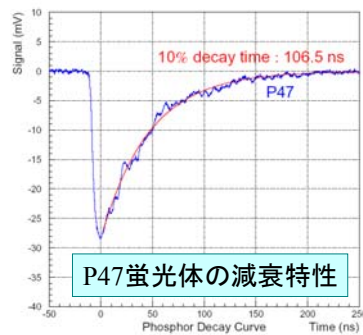
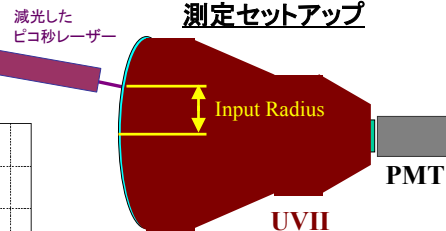
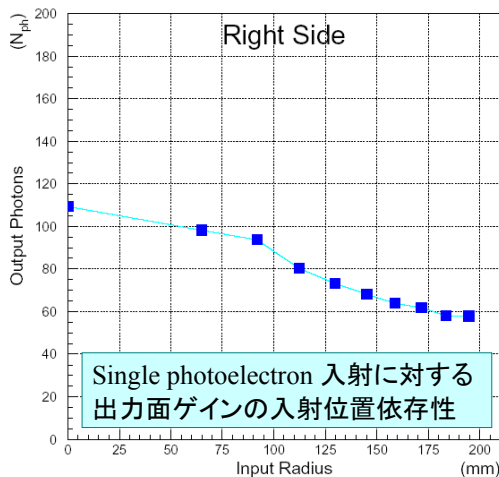


光電面を点光源を
用いて照射

入力面は未研磨品

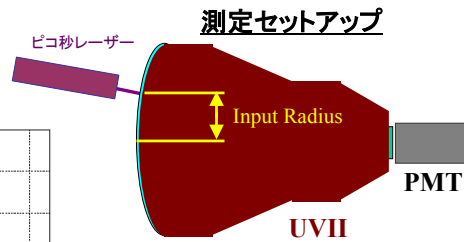
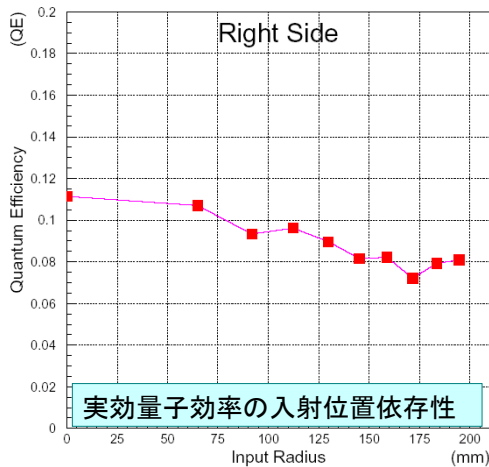
1号管 出力面性能評価

パルスレーザー(415nm)を用いて、
single photoelectron 入射に対する
ゲインを測定した。



1号管 光電感度評価

パルスレーザー(415nm)を用いて、
量子効率×収集効率の判明している
PMTとの相対的な感度から計算した



実効量子効率:

1. 入射ガラスの透過率
 2. 光電変換効率
 3. 収集効率
 4. 出力面のinefficiency
- を全て考慮した、
「実際に信号が得られる確率」

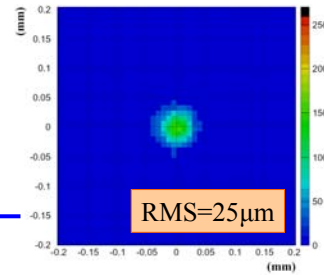
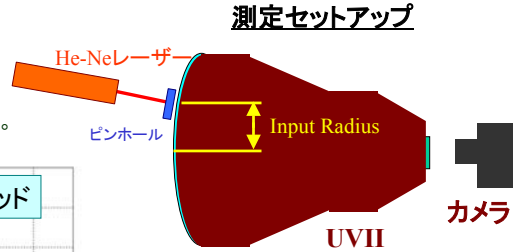
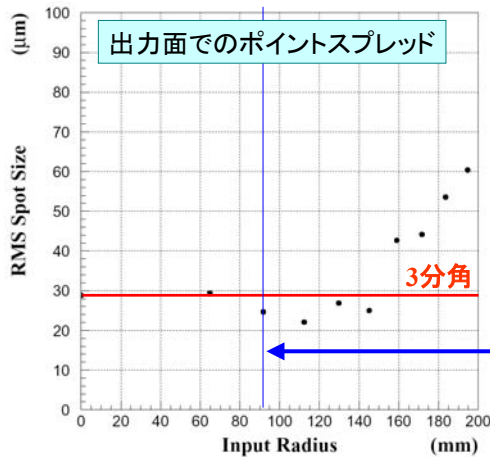
16" UVII 2号管



中心での解像度として、3Lp/mm を達成。
3Lp/mm はほぼ1分角の解像度に対応。

2号管 解像度評価

電極間での放電によって、本測定の際には1.6Lp/mmに性能が劣化していた。
⇒ 企業に送り返さないと性能を回復できない。



16"UVII 3号管 設計改良

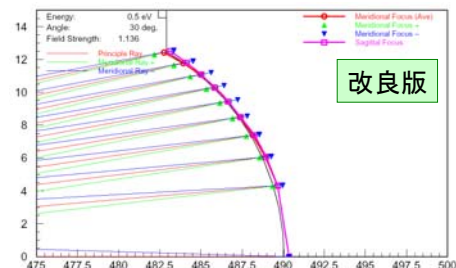
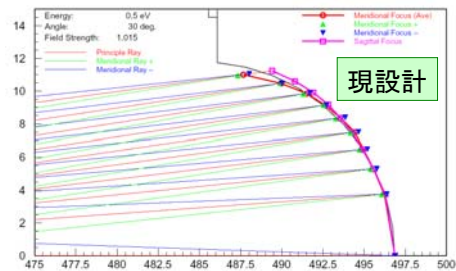
改良点:

- 電子レンズ系
 - 入力面の形状変更に伴い、電場が最適ではなくなっていた ⇒ **再最適化**
 - 特に周辺部の解像度を改善。
- 出力面形状
 - 利得の位置依存性を軽減するために、凹面を浅くする。
 - 蛍光体塗布の条件だし
- 製作プロセスの改良
- 4月製作予定



1分角の解像度
周辺部解像度
ゲインの入射位置依存性改善

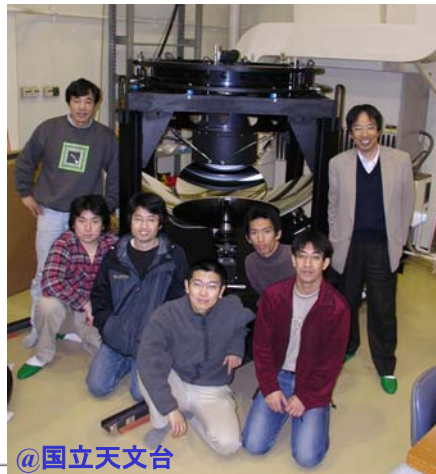
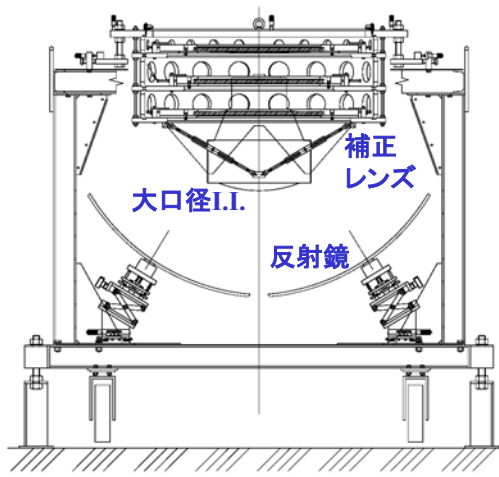
電子レンズフォーカス:出力FOP部



2/3スケール試作望遠鏡

光学系統合試験 ⇒ UVIIを用いた、超広角望遠鏡の実現

- 分解能1分角の達成
- 調整方法の確立

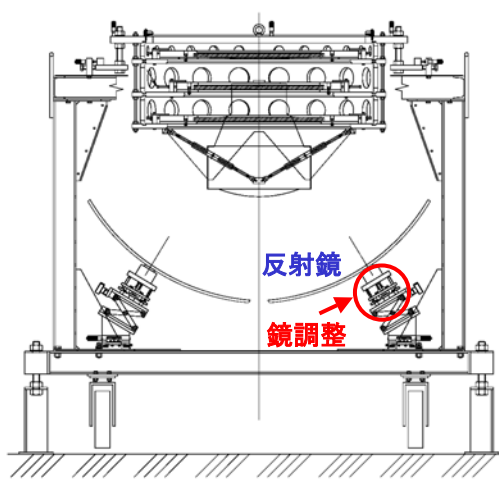


反射鏡試作

テンパックスガラス、鑄造・研磨、4枚の分割鏡

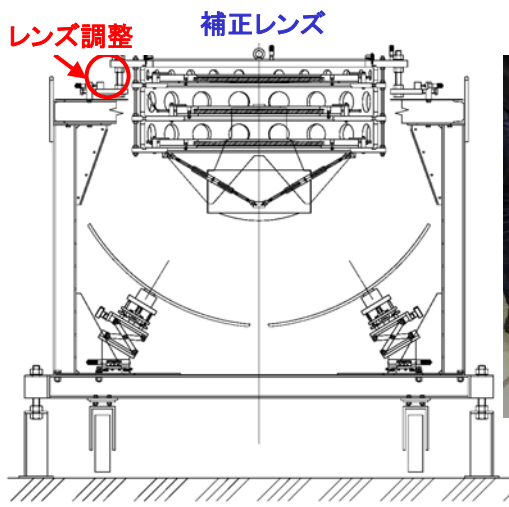
要求精度(表面粗度 < 20nm、スポットサイズ < 0.1mm、曲率半径 $\pm 0.1\%$)

→達成



補正レンズ試作

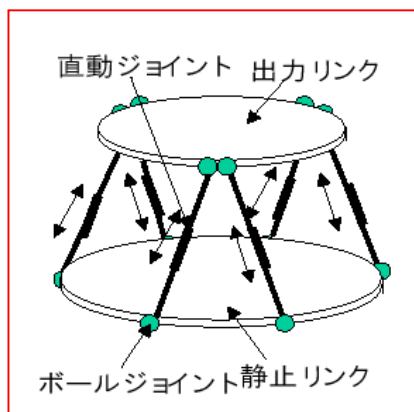
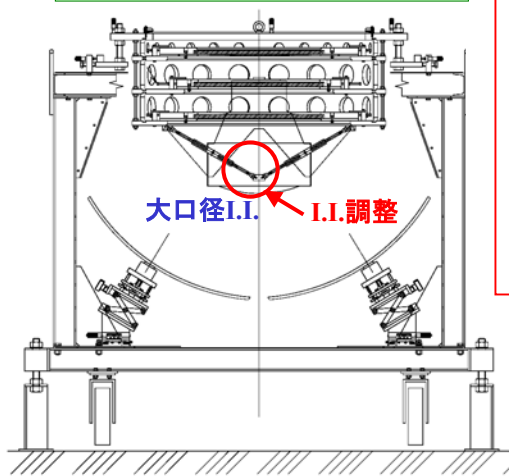
UV透過アクリル樹脂、直接切削(+研磨)



UVII調整機構

スチュワートプラットフォーム

焦点面 $(x, y, z, \theta, \phi, \rho) \Leftrightarrow$
棒の長さ $(L1, L2, L3, L4, L5, L6)$



すばる副鏡の支持に
使用されている方法

Suggested by Y.Kobayashi@NAOJ

光学系調整

1. 粗調整 人工光源

目標： 星の観測が可能なレベルまで人工光源で調整

(a) 反射鏡

F値が小さい＝焦点深度が浅い

(b) 補正レンズ系

(c) UVII 焦点面

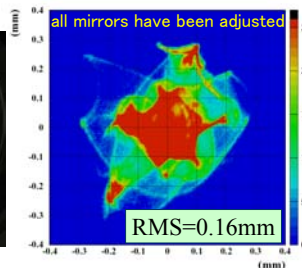
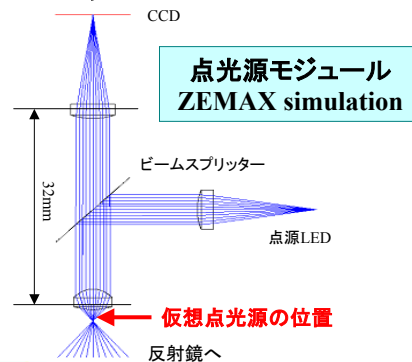
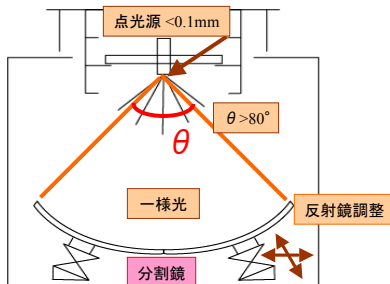
2. 微調整 星(理想的な平行光源)

目標： 全視野で1分角の分解能

一貫した調整法の確立

粗調整(a) 反射鏡調整

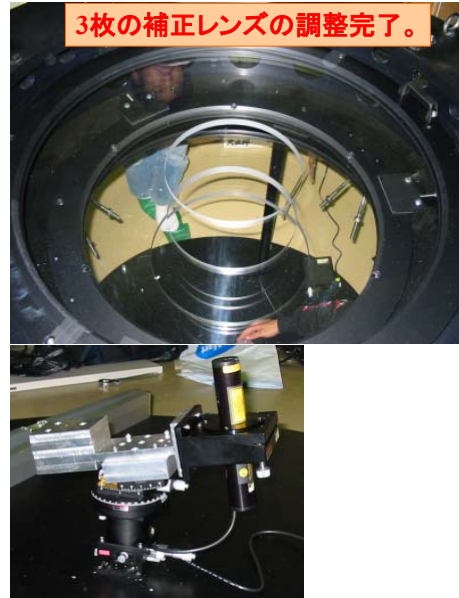
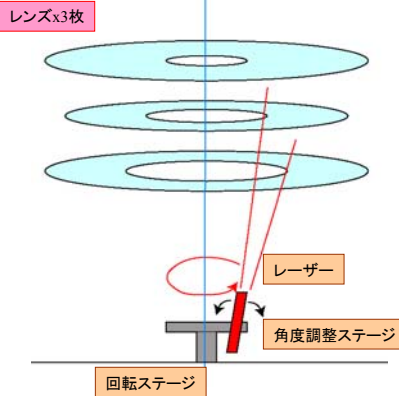
分割鏡の曲率中心を一致させる



4枚の分割鏡の調整完了。

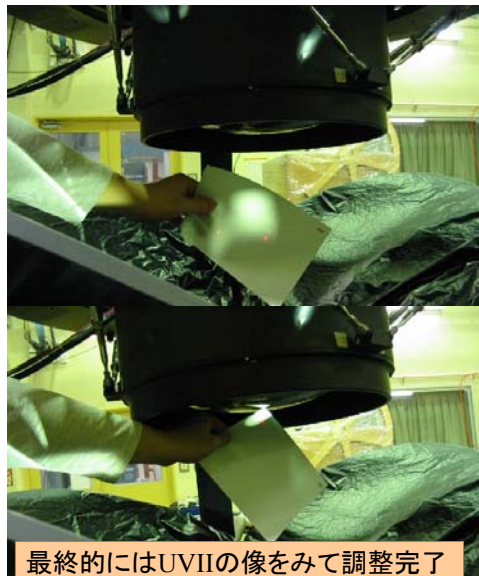
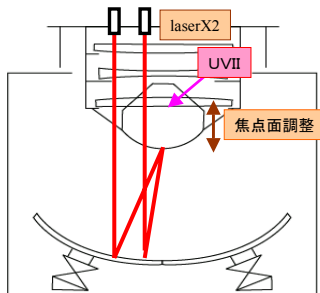
粗調整(b) 補正レンズ調整

レンズ系の軸調整 ⇒
回転ステージにのせたレーザーと
レンズ内側の穴のエッジを合せる

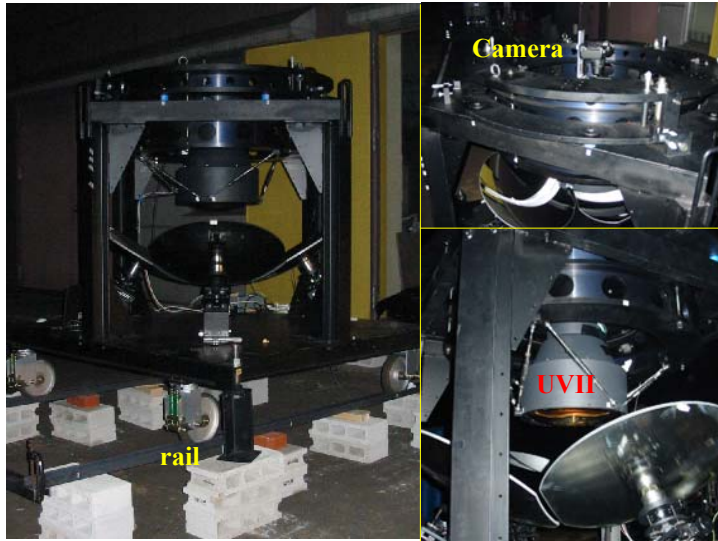


粗調整(c) UVII 焦点面調整

単純化したHaltmanテストを使用 ⇒ 焦点化の前後でも光束を追える。

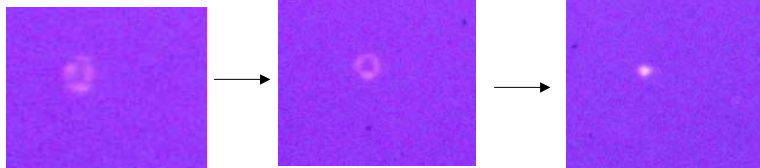


2. 光学系微調整



星の撮像に成功＝粗調整の目標を達成

星の撮像 微調整



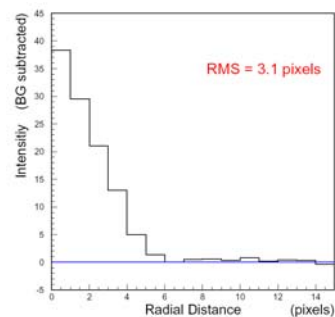
4枚の鏡からのスポットが非対称に。

鏡の調整が狂った
→鏡の再調整

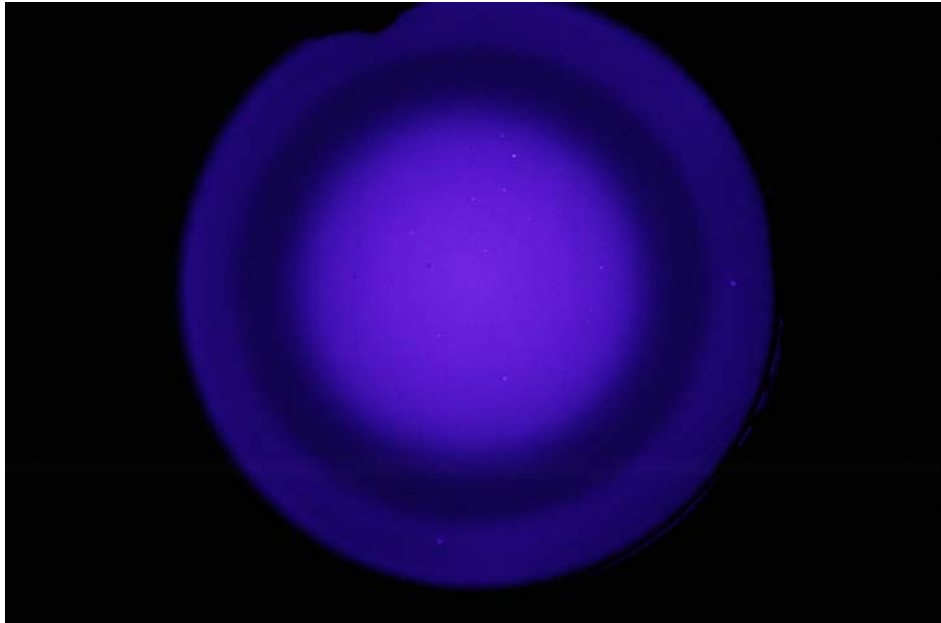
円形に並んだ。

I.I.焦点面が上下に変位。
→I.I.の調整

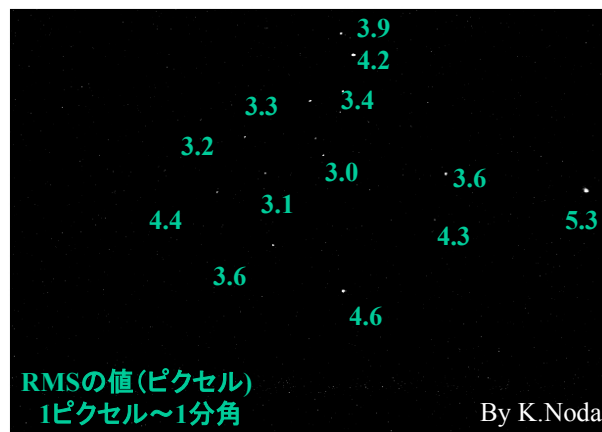
一致！！



星の撮像：生データ



星の撮像 微調整



イメージインテンシファイアを焦点面とした、
“超広角望遠鏡”というコンセプトが実現

プロトタイプ望遠鏡まとめ

1. 16インチ口径のUV & 可視光用イメージインテンシファイアの開発に世界で初めて成功
2. Ashraの重要コンセプトである、イメージインテンシファイアを焦点面とした、超広角望遠鏡を実現

内容: 実機製作

1. 望遠鏡
 - 24”UVII 開発
 - 望遠鏡製作
2. 光電撮像パイプライン
 1. 設計 ... lens/ZEMAX
 2. 製作
3. トリガーセンサー
4. CMOSセンサー
5. テストサイト

テストサイト

マウイ島ハレヤカラ山頂... マグナム望遠鏡のあるところ



ハワイ島の土地使用は交渉中であるが、テスト実験サイトとして確保しているハレヤカラ山頂も高度3000mで人口光がない、良いサイトである。

テストサイト

マウイ島ハレヤカラ山頂... マグナム望遠鏡のあるところ



ハワイ島の土地使用は交渉中であるが、テスト実験サイトとして確保しているハレヤカラ山頂も高度3000mで人口光がない、良いサイトである。

テストサイト

マウイ島ハレヤカラ山頂... マグナム望遠鏡のあるところ



ハワイ島の土地使用は交渉中であるが、テスト実験サイトとして確保しているハレヤカラ山頂も高度3000mで人口光がない、良いサイトである。

内容：性能評価

1. TeV γ 線観測の現状
 - 解像型チェレンコフ望遠鏡 ... Big 4
 - 地上アレー ... Tibet, Milagro
 2. MCシミュレーション
 1. 条件：サイト/集光力/トリガー
 2. イメージング
 3. 感度の比較
 1. Exposure
 2. 流束感度
- ⇒ Ashraの狙いどころは？

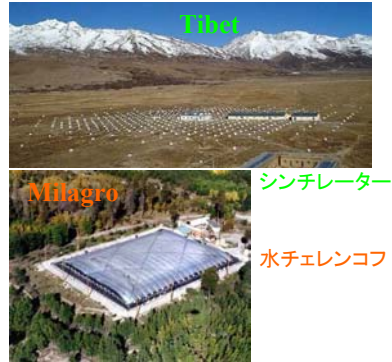
世界のTeV γ 線検出器

解像型チェレンコフ望遠鏡 Big 4



1. 狭視野($\leq \phi 4^\circ$) & duty 10%
 2. 有効面積大
 3. 角度分解能 excellent w/ stereo 観測
 4. P/ γ 弁別 by mean scale width
- ⇒ cCrab の流束感度(50hr)

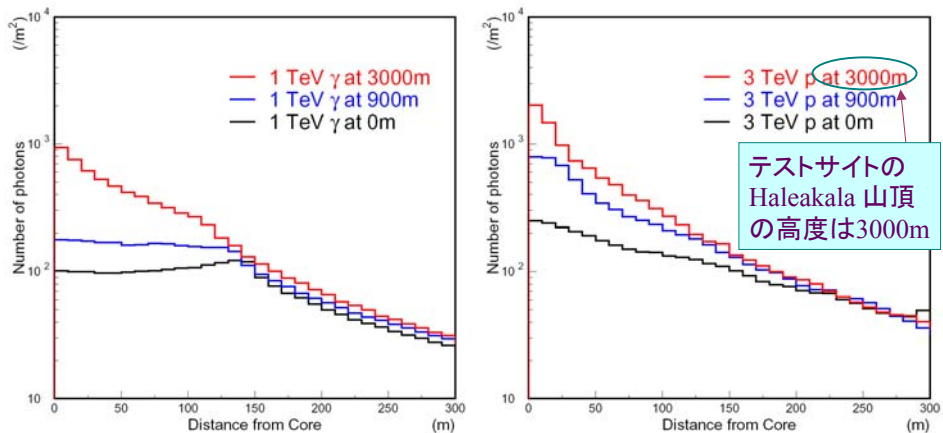
地上アレー



1. 全天($\theta < 45^\circ$) & duty 100%
 2. 有効面積小
 3. 角度分解能有
 4. シャワー形状でのp/ γ 弁別
- ⇒ 全天のマッピング ~ Crab流束

チェレンコフ光の light pool

Light Poolの高度依存性を CORSIKA を用いて調査



By A.Okumura

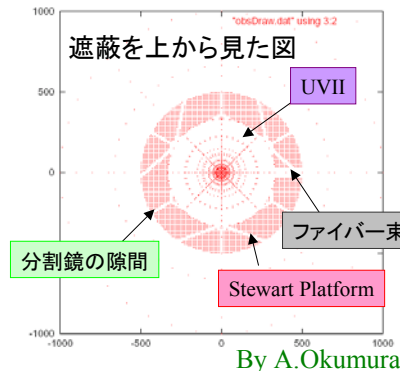
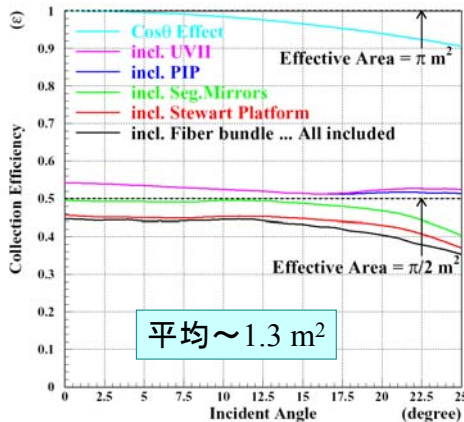
Coreからの距離120m以下で、地表に比べて3倍の光量 ⇒ Haleakala の優位性

望遠鏡の集光能力(1): 遮蔽

Pupil = 1m, 副望遠鏡4台が同視野を有す

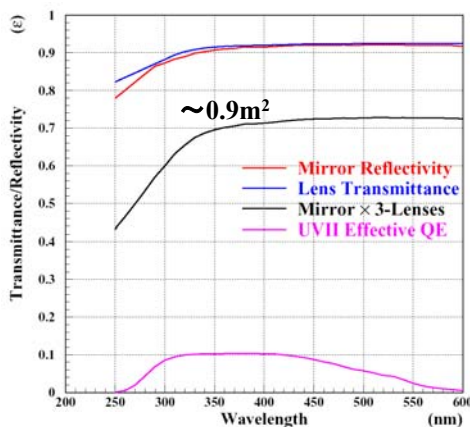
$$\Rightarrow \text{Light Collection Area} = 0.5^2\pi \times 4 = \pi \text{ [m}^2\text{]}$$

広角望遠鏡なので、遮蔽が大きくなる $\Rightarrow$ レイトレースによって正確に評価



... 全て現状の値。少しずつ「改善」を計る。

望遠鏡の集光能力(2): 透過率



光学要素:

1. 反射鏡
 - アルミコーティング
 $\Rightarrow$ 増反射の可能性?
2. アクリル補正レンズ
 - 現状で最も透過率に優れた 8mm厚のもの
 $\Rightarrow$ ARコーティングの可能性
3. UVII
 - QE: 実測値@415nm (含む: 収集効率等)
 $\Rightarrow$ 高感度化: 目標20%

... まだまだ改善の余地あり!

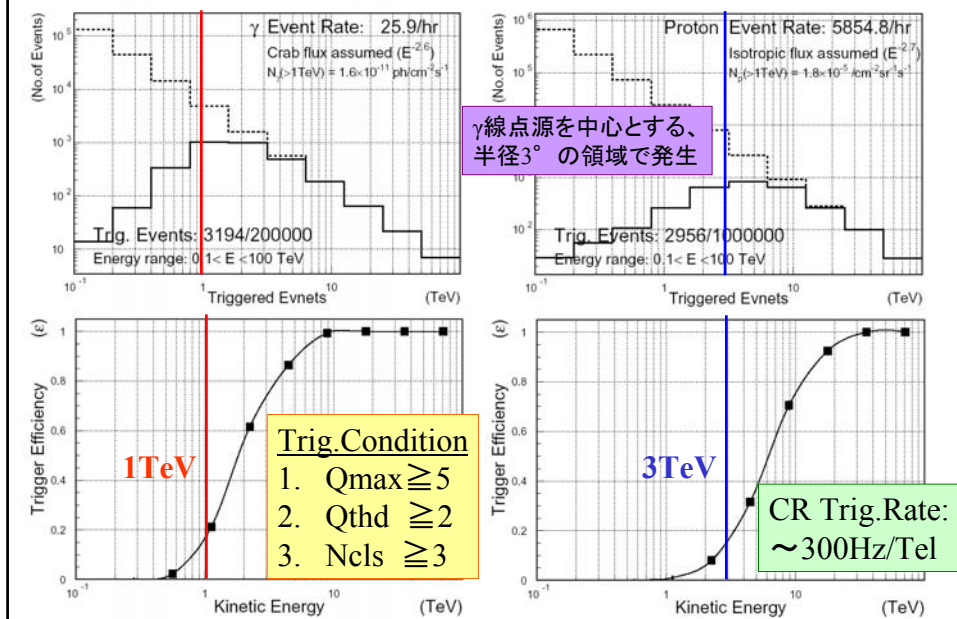
注) 確かに集光能力がAshra望遠鏡の課題である。
しかしUVIIを使用しているので、“**dead space**”ゼロ!

例) CangarooIII では、焦点面の有効面積~33% (Ref: C.Itoh D論)

チェレンコフトリガー

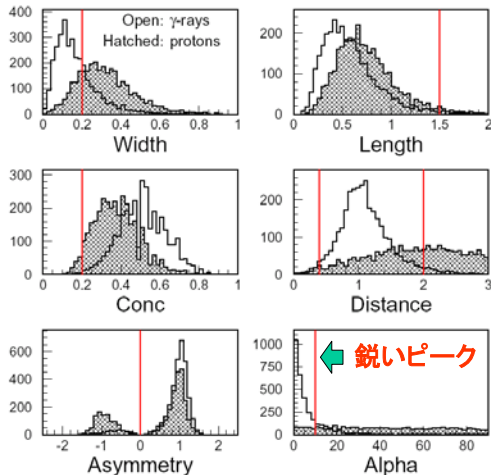
- トリガーピクセルのサイズ = 0.4°
 - チェレンコフイメージのトリガーには大きい
 - たくさんのピクセルはヒットしない(特に γ)
- $\Rightarrow$ トリガー条件候補
 - $Q_{\max} \geq 5 \text{ p.e.}$
 - $N_{\text{cls}} \geq 3$
 - $Q_{\text{cls}} \geq 2$
- NSB + CR のトリガー頻度 $< 1\text{kHz}$
 - Charge分解能が鍵 $\Rightarrow$ ダブルMCPの使用
 - 上記トリガー条件は、charge分解能が十分であれば、頻度条件を満たす。

トリガー効率



p/γ 弁別能力

イメージパラメータによる p/γ 弁別



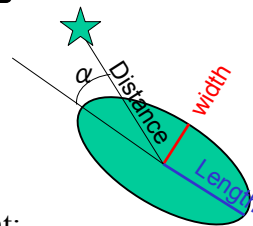
検出効率: $\varepsilon(\gamma) = 0.52$
 $\varepsilon(\text{CR}) = 0.003$



Comment:

1. Distance, Asymmetry, Alpha は全て到来方向に関するカット
2. ファインピクセル・高精度光学系により、 α 分布のピークがシャープになっている⇒likelihood等のAshra用解析を開発する事により、大きく改善する可能性あり。

Width カット⇒CR1/3より、角度関係のカットでのCR rejectionは100倍。元々半径 3° の範囲にCRを発生させているので、事象毎の角度精度は $\phi 0.3^\circ$ に相当する。



事象頻度

- γ : Crab流束を仮定 [Ref: HEGRA ApJ 539 (2000) 317]
 – Int. Flux = $1.6 \times 10^{-11} (E/1\text{TeV})^{-1.6} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- CR:
 – Int. Flux = $1.8 \times 10^{-5} (E/1\text{TeV})^{-1.76} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$

HEGRAとの比較 by D.Horns @ The Universe viewed in gamma rays

	Ang. resol.	Energy resol.	Thresh. ^a	γ -rate(Crab) ^b	CR-rate ^b	Signal/ $\sqrt{\text{hr}}$ ^c
	[$^\circ$]	$\Delta E/E$	[GeV]	[1/hr]	[1/hr]	[$\sigma/\sqrt{\text{hr}}$]
CTSystem	$<0.1^\circ$	$>10\%$	500-600	36	3.3	10
CT1	$\approx 0.2^\circ$	$>25\%$	700-900	28	23.3	3.3
Ashra	$\sim 0.3^\circ$		1~2[TeV]	13	26	2.5

^aIn zenith

^bAfter cuts at z.a. $<30^\circ$

^cCalculated using Li&Ma Log-Likelihood

注) 視野は150倍/Tel

十分なオフソースの統計量



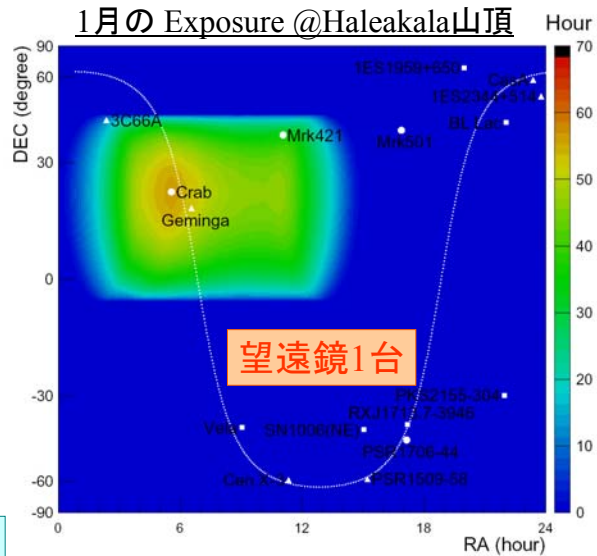
約4時間で 5σ 検出が可能

Exposure(1)

□ 観測時間の定義:

1. 太陽が水平線下 18° より下にある。
2. 月が水平線下にあるか、輝いている面積10%以下である。
3. 惑星からの距離は考慮に入っていない。
4. 天候は考慮に入っていない。
5. 天体の見える高度は考慮に入っていない

Crabが天頂に見える！
⇒測定器の性能評価に最適

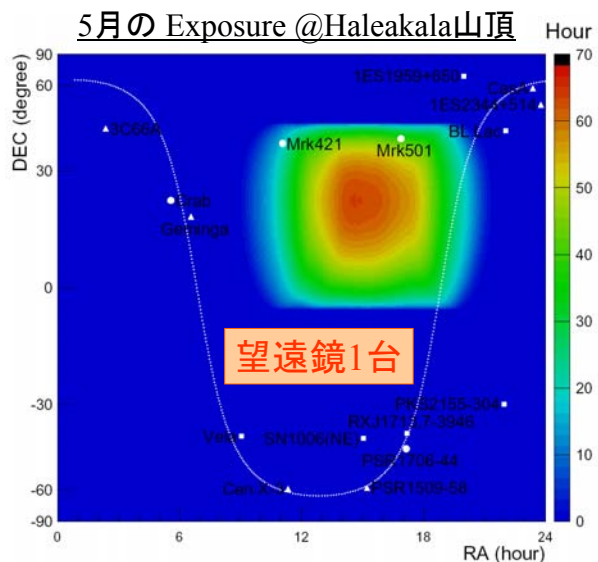


By N. Manago

Exposure(2)

3月から7月には、Mrk421、Mrk501が視野に入る。

⇒ 突発的なフレアに対する感度の評価・証明



Exposure (2)

3月から7月には、Mrk421, Mrk501が視野に入る。

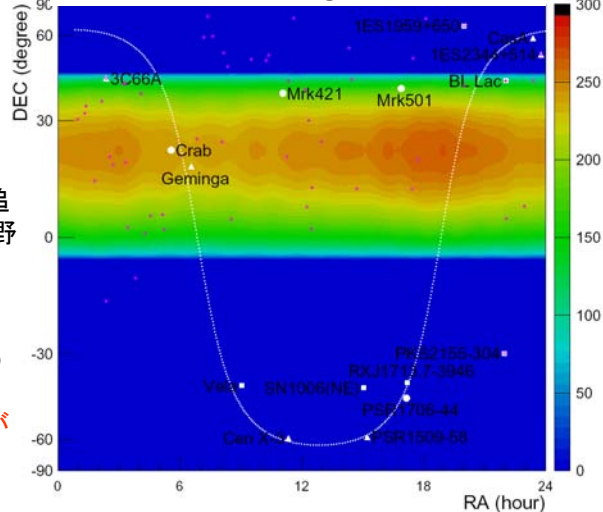
⇒ 突発的なフレアに対する感度の評価・証明

1. 1年を通して、HEGRAが追尾した、近傍のAGNを視野に捉えることができる。
⇒ 突発天体モニター
2. Crab等のexposureとして、100時間取れる(天候等のineff. 50%を仮定する)。
⇒ 0.3Crab程度のソースがあれば“発見”できる。



最適なサイト

1年間の Exposure @Haleakala山頂 Hour



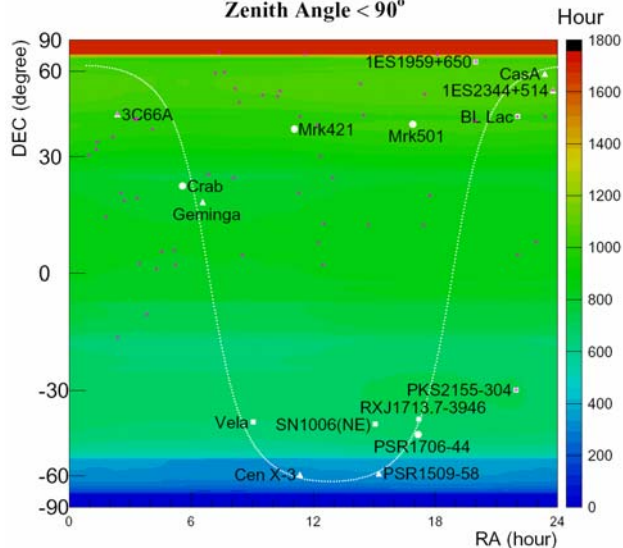
紫の点: 近傍のAGN...HEGRAによって観測されたもの

Exposure (3)

All-sky Survey (=12 station) での観測 (1年):

1. 全視野を表示すると、南極付近以外はかなりのexposureで見えることになる。
2. Cherenkovの場合は大角度は厳しい
⇒ 天頂角で、45° 未満のみを表示する。

Zenith Angle < 90°



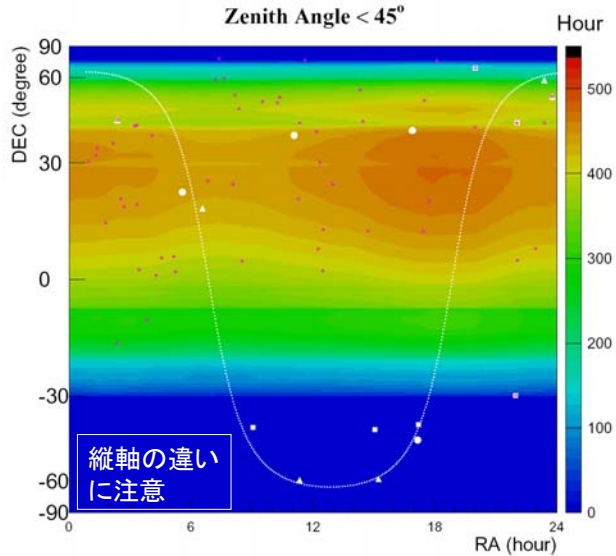
Exposure(3)

All-sky Survey (=12 station) での観測 (1年):

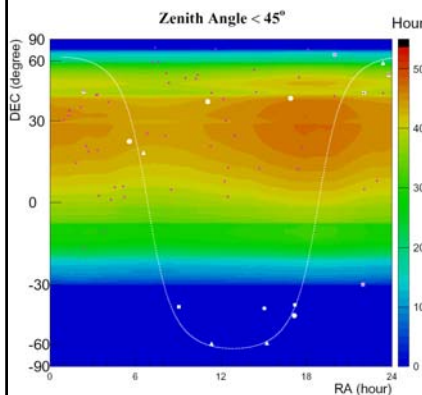
1. 全視野を表示すると、南極付近以外はかなりのexposureで見えることになる。
2. Cherenkovの場合は大角度は厳しい
⇒ 天頂角で、 45° 未満のみを表示する。

天頂角 45° 未満
の場合のExposure:

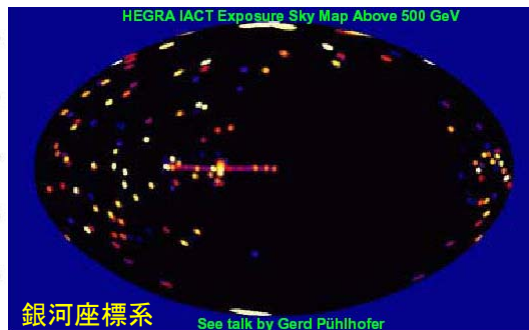
HEGRAが探索した近傍
のAGNはよく観測できる



HEGRA Exposure との比較



Ashra exposure (1年)



Ref: D.Horns @ The Universe viewed in Gamma Rays

HEGRA exposure (total)

解像型の望遠鏡として、広視野を有し(4°) survey観測を積極的に行っていたHEGRA実験の exposure との比較からも、Ashra望遠鏡が、圧倒的に広視野を監視できることが明快に示される。

地上アレーとの比較

Tibet [Ref: ApJ 525 (1999) L93], Milagro [Ref: ApJ 595 (2003) 803]

	Ang. resol.	Det. Area	Thresh. ^a	γ -rate(Crab) ^b	CR-rate ^b	Signal/ $\sqrt{\text{hr}}$ ^c
	[$^{\circ}$]	[m ²]	[GeV]	[1/hr]	[1/hr]	[$\sigma/\sqrt{\text{hr}}$]
Tibet	0.8 $^{\circ}$	<5175	~ 3	0.17	10	0.050
Milagro	0.8 $^{\circ}$	<4800	~ 3	0.44	96	0.043
Ashra	<u>$\sim 0.3^{\circ}$</u>	70000	1 $\sim$ 2	13	26	<u>2.5</u>

* event by event 相当

注) duty 10% (= exposureの図は、20%相当)、望遠鏡1台での観測と比較するために、FOV ϕ 50 $^{\circ}$ を仮定すると、実時間での Signal/ $\sqrt{\text{hr}}$ は、 $\sqrt{(10 \times (45/25)^2)} = 5.7$ 倍小さくなる (2.5 $\Rightarrow$ 0.44)。

Ashra の狙いどころ:



1. 解像型の利点は大きい(=高角度分解能・大面積)
+高精度光学系・ファインピクセル $\Rightarrow$ p/ γ 弁別性能の向上
2. 角度分解能をもっと向上させたい ... ステレオ?
3. 観測時に視野内で transient現象が起きれば特に高感度

まとめ

- 16"UVIIの製作に成功
- UVIIを焦点面とする超広角望遠鏡を実現
- 実機の開発が進んでいる
- CMOSセンサーの仕様策定完了
 $\Rightarrow$ Ashraの重要なコンセプトが形になってきた
- AshraによるTeV γ 線全天監視は面白い
 - 3000mの高度が小口径をカバー
 - ファインピクセルに対応した新たな解析が必要
 $\Rightarrow$ 大幅なp/ γ 弁別性能向上の可能性
 - 地上アレーよりずっとずっと高感度になりうる
 - 新たなソースの発見・突発事象の監視