

地上ガンマ線観測の将来計画

吉越貴紀

東京大学宇宙線研究所
tyoshiko@icrr.u-tokyo.ac.jp

2005 年 12 月 5 日 @ CRC 将来計画シンポジウム

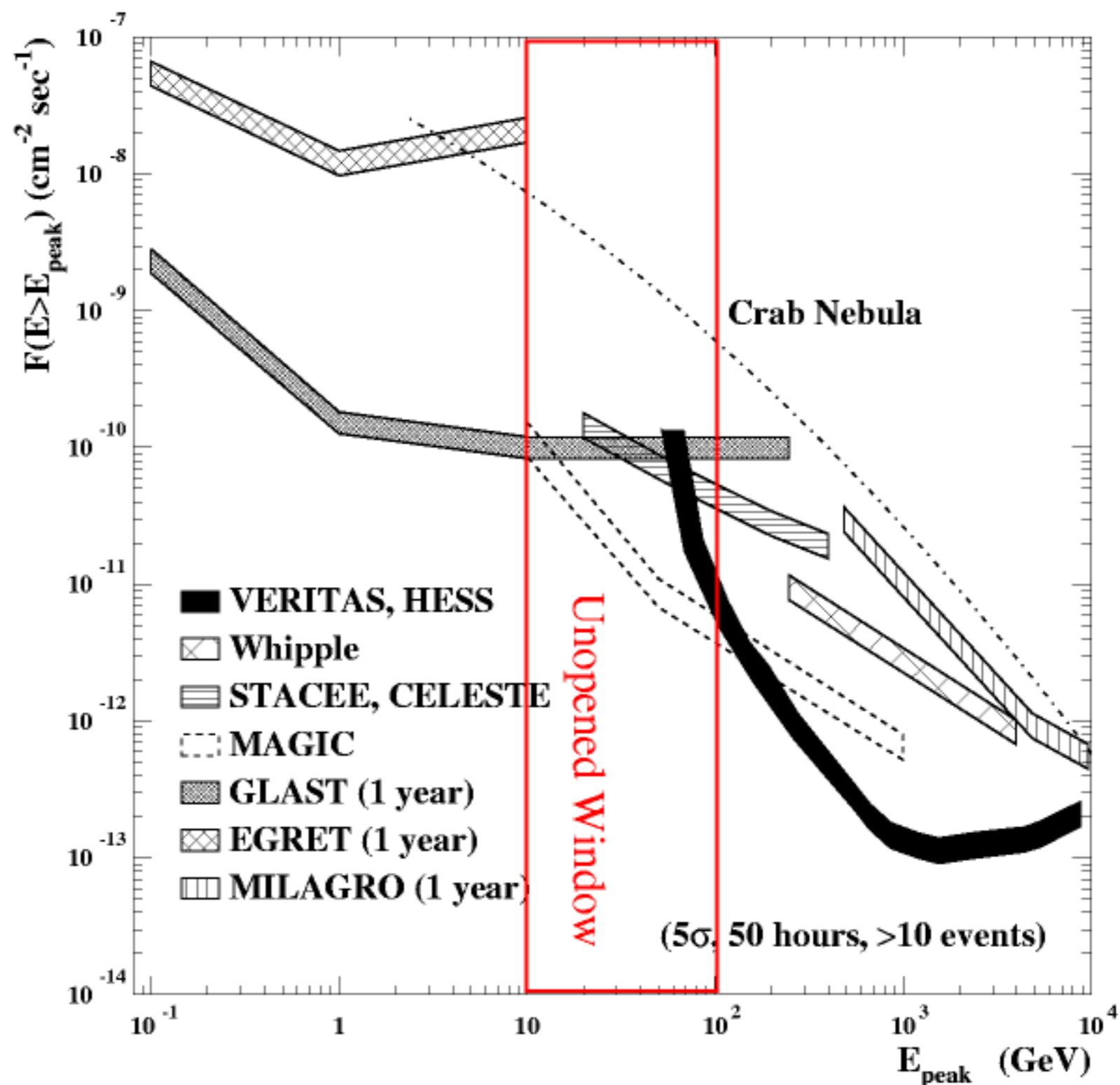
現在の状況 (Sensitivity for Gamma Rays)

■ % Crab レベルを達成

■ "Unopened window"

● 10 ~ 100 GeV

● Not opened still



将来の 4 つの方向性

■ 大口径／高地観測

- 低エネルギーへの拡張
- Unopened window

■ 大有効検出面積

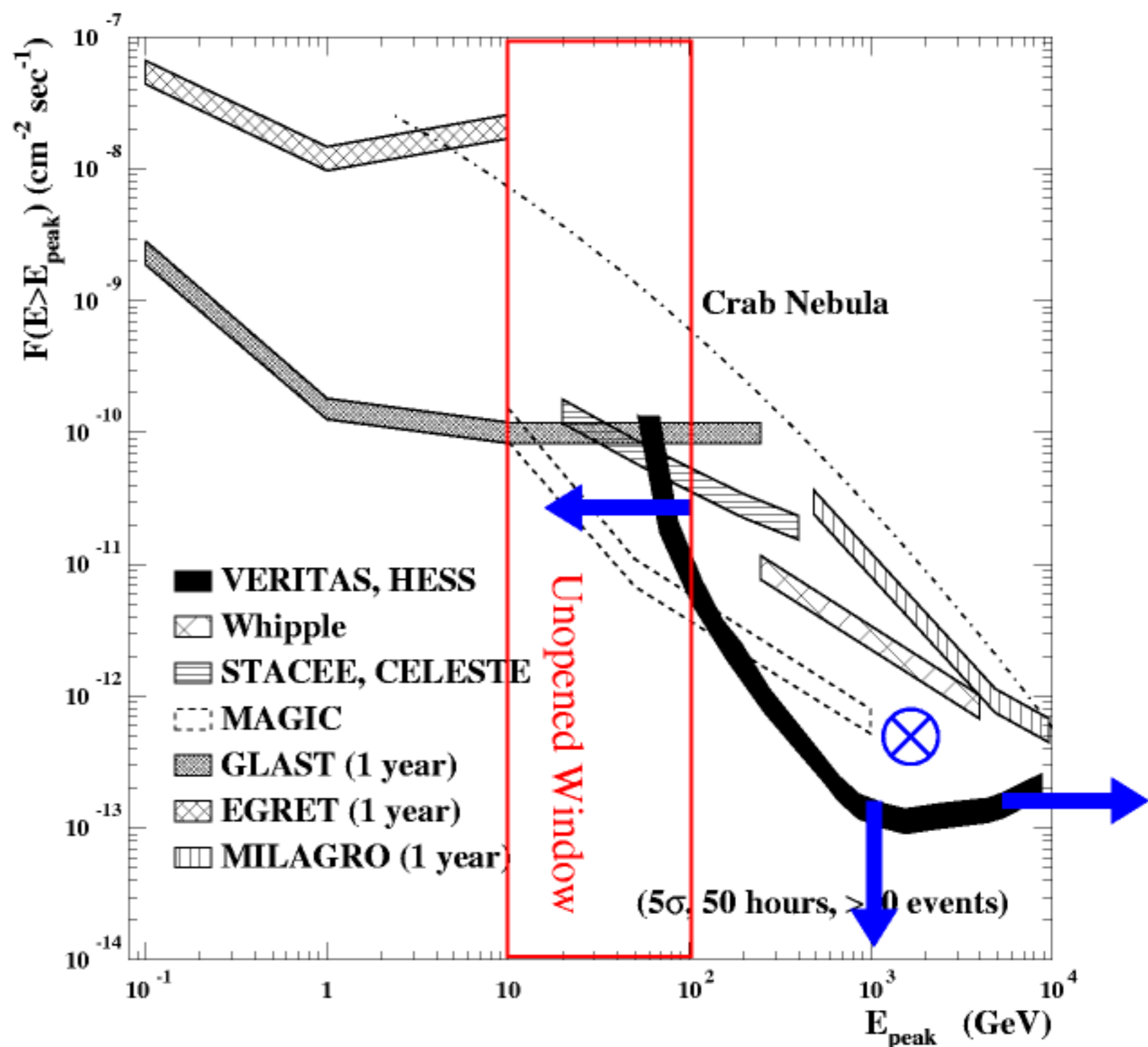
- 高感度
- 高エネルギーへの拡張

■ 広視野

- Transient sources
- Survey 能力

■ 高角分解能

- 形態学
- 高感度



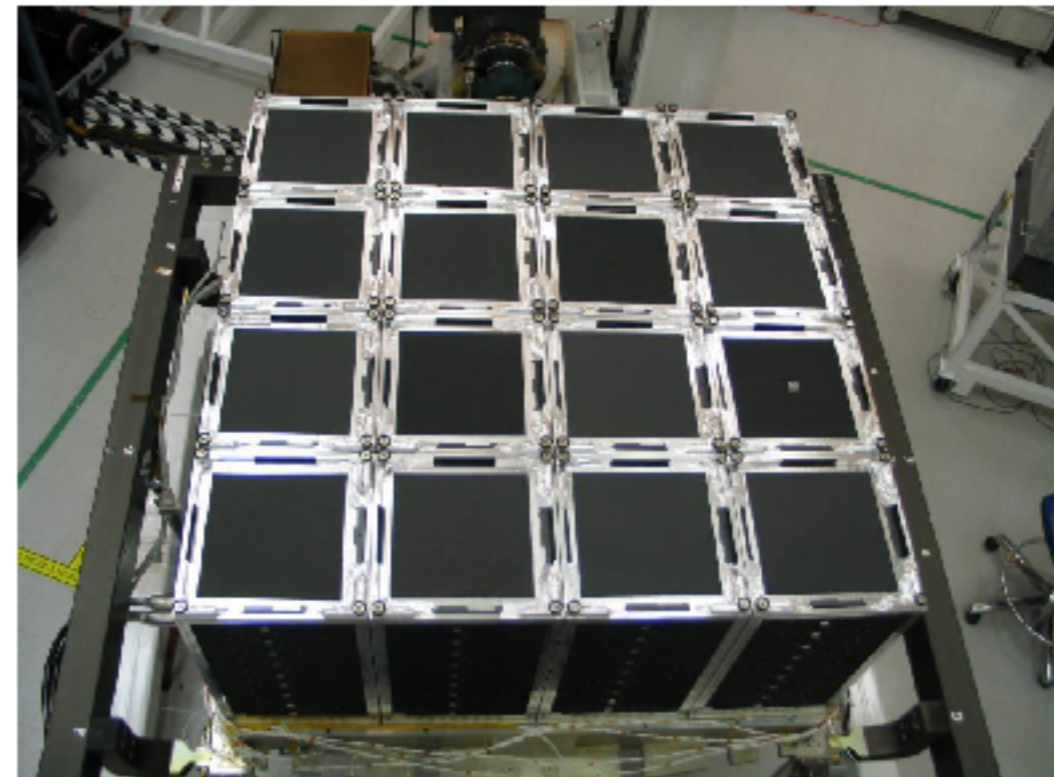
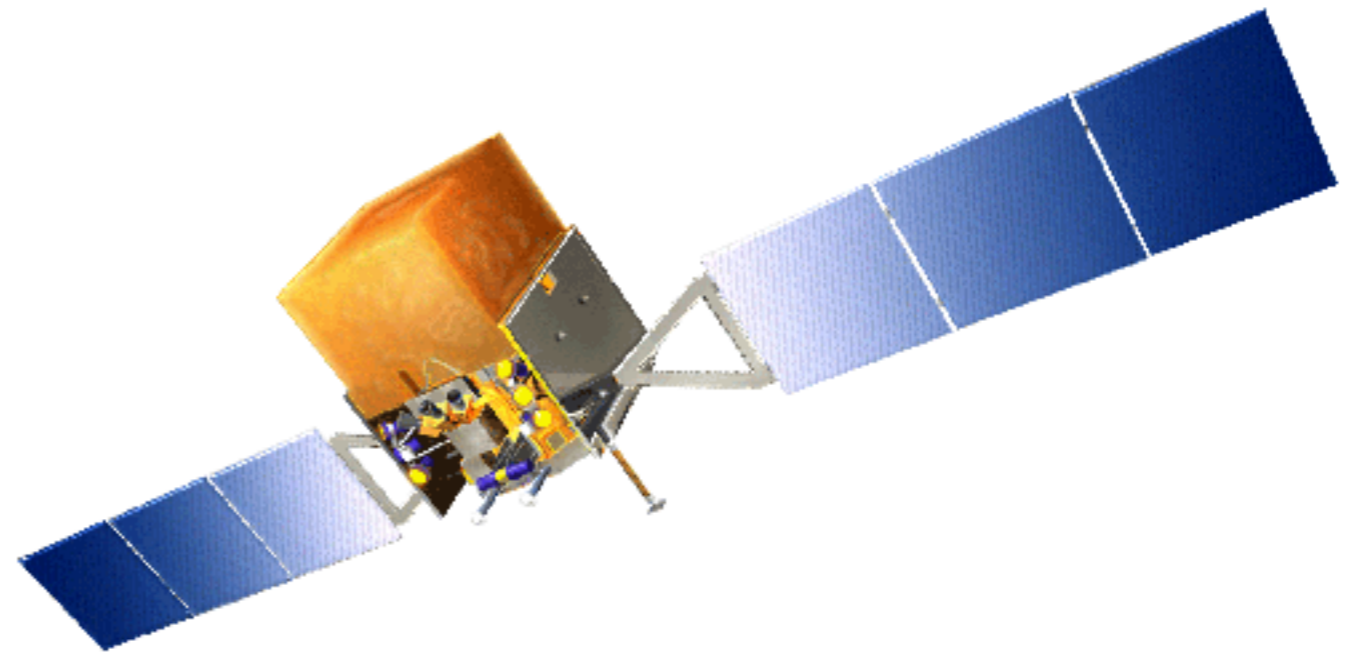
Science Targets

Source/Science	大口径/高地観測	大有効検出面積	広視野	高角分解能
AGN and EBL	○	○	○	○
パルサー	○			
EGRET Source	○			
Dark Matter	○	○		
宇宙線起源	○	○		○
GRB			○	
Unknown Source		○	○	○

- 他に拡散ガンマ線、microquasar、銀河団、...
- 10 年後どれだけ生き残っているか?
 - GLAST 打ち上げ 2007 年

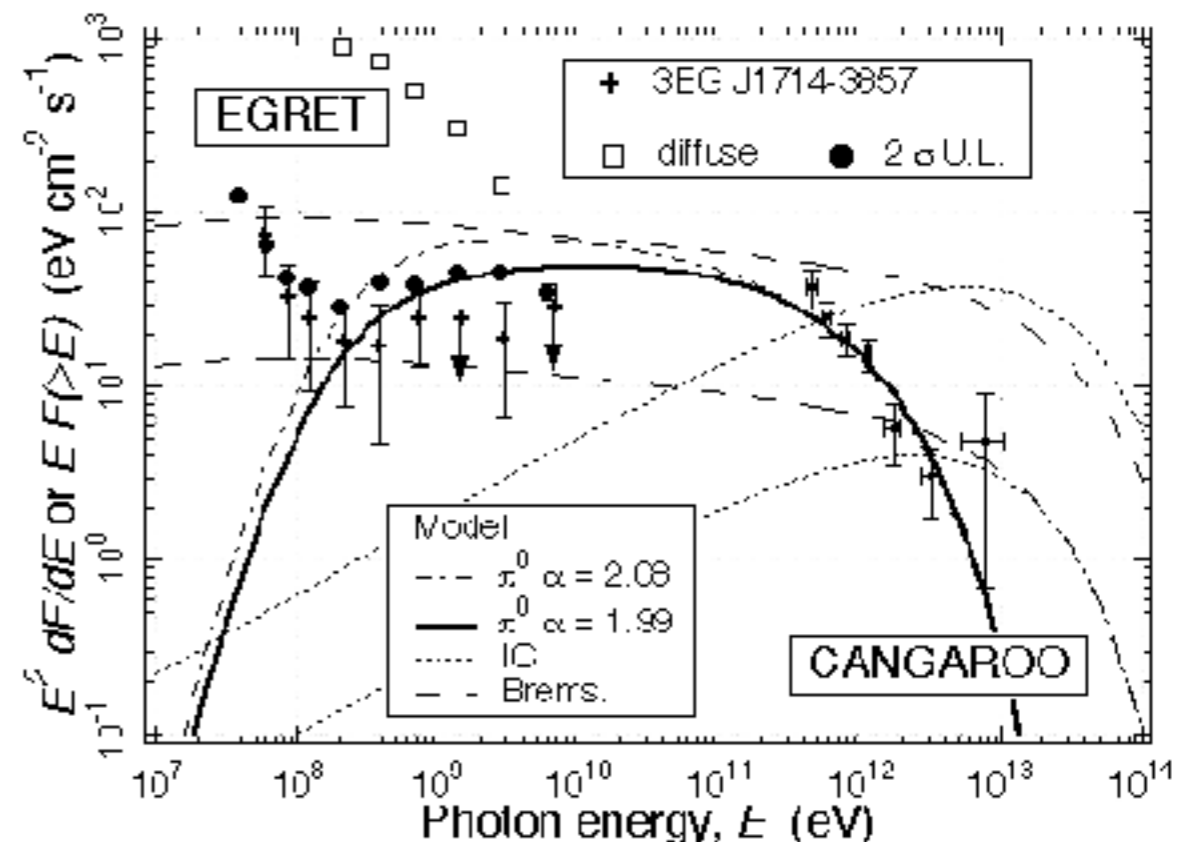
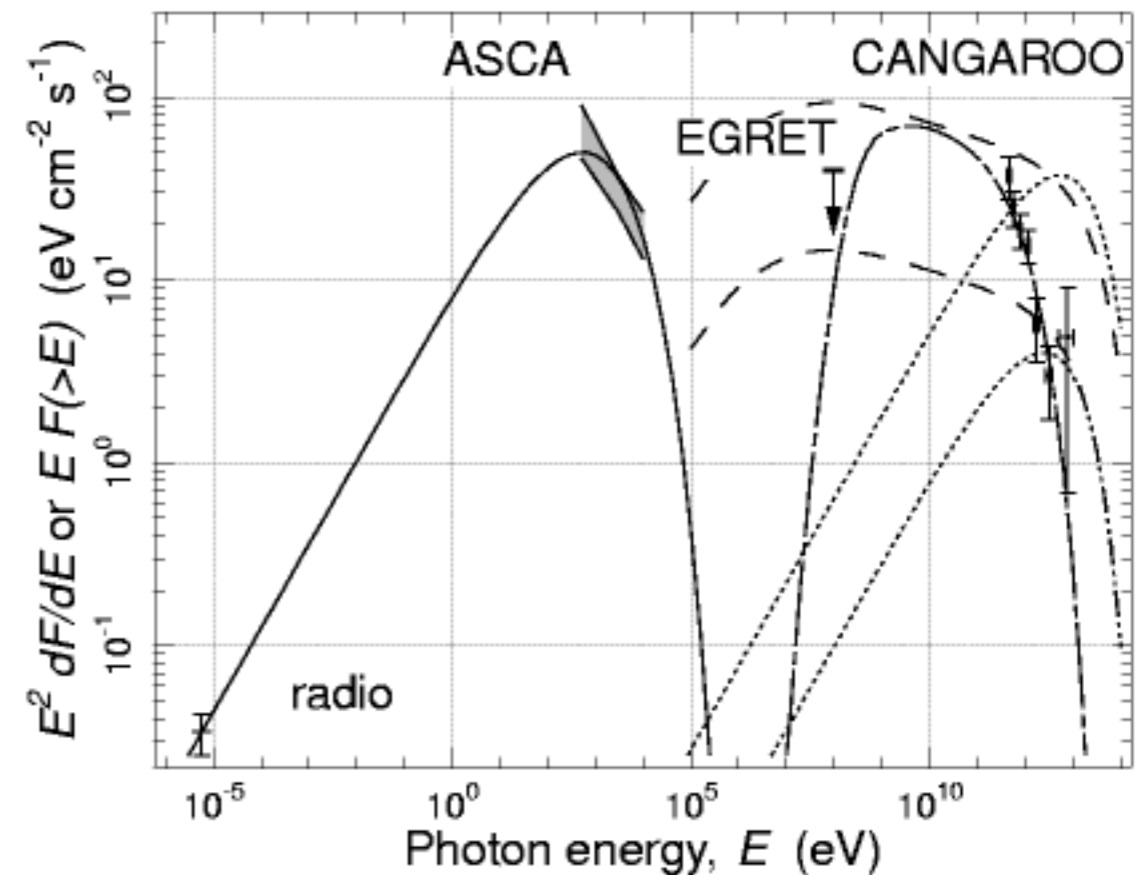
GLAST

- 2007 年 9 月打ち上げ
 - Lifetime: 5 年 (目標 10 年)
- 2 つの観測機器
 - Large Area Telescope (LAT)
 - ▶ 20 MeV ~ 300 GeV
 - GLAST Burst Monitor (GBM)
 - ▶ 10 keV ~ 25 MeV
- 1000 ~ 10000 sources
 - 10 ~ 20 天体についてモニターデータを公開 (preliminary)



銀河系内宇宙線の起源

- 長年の謎の解明は近い!
 - RX J1713.7-3946 の観測結果
- e/p separation
 - GeV ~ TeV の連続スペクトルの測定が鍵
 - 低エネルギーへの拡張が必要
 - GLAST の結果も重要
- Knee まで説明可能か?
 - 低エネルギーへの拡張では×



RX J1713.7-3946 (H.E.S.S.)

■ 詳細なスペクトル

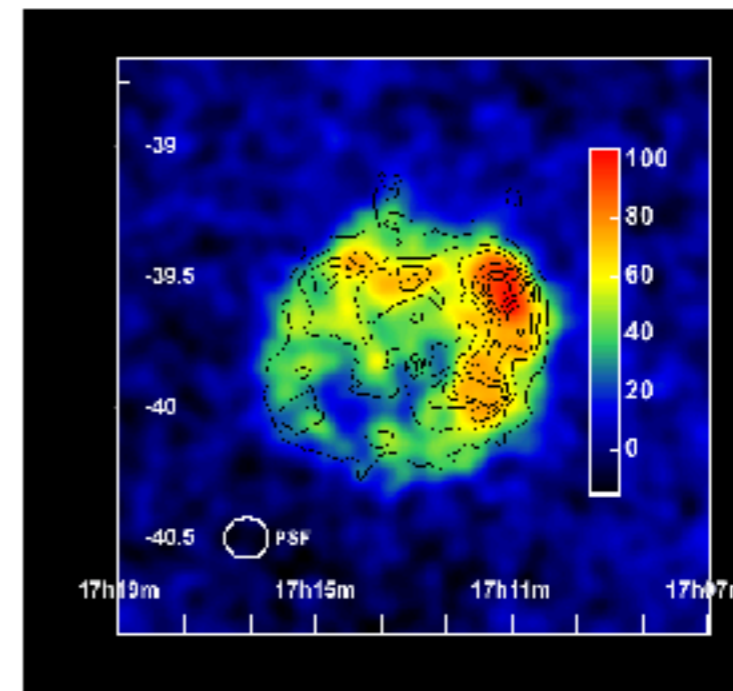
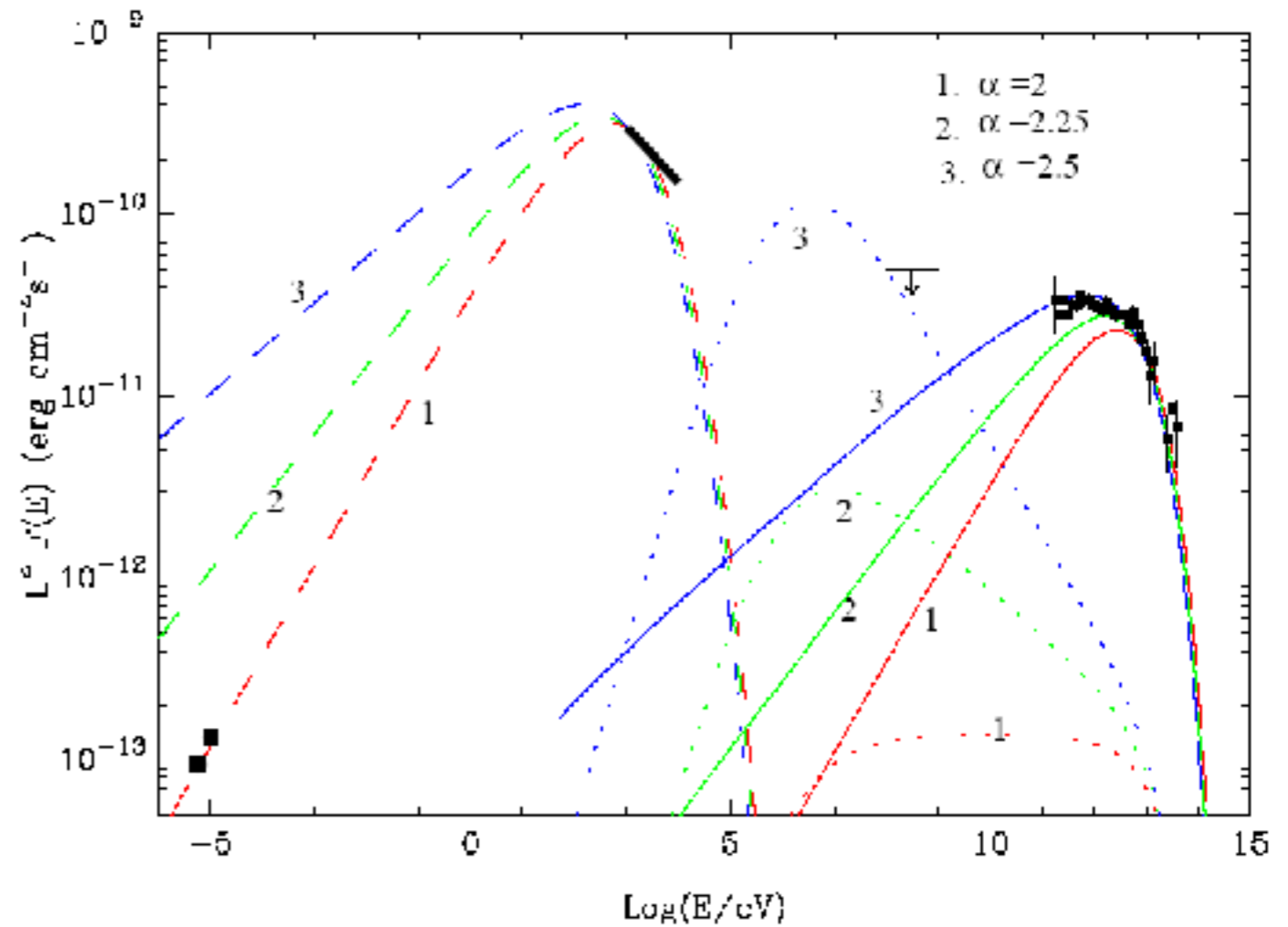
- 単純な電子モデルでは説明不可
- 陽子起源?

■ Morphology

- X線の分布と酷似
- 電子起源?
- 高角分解能が必要

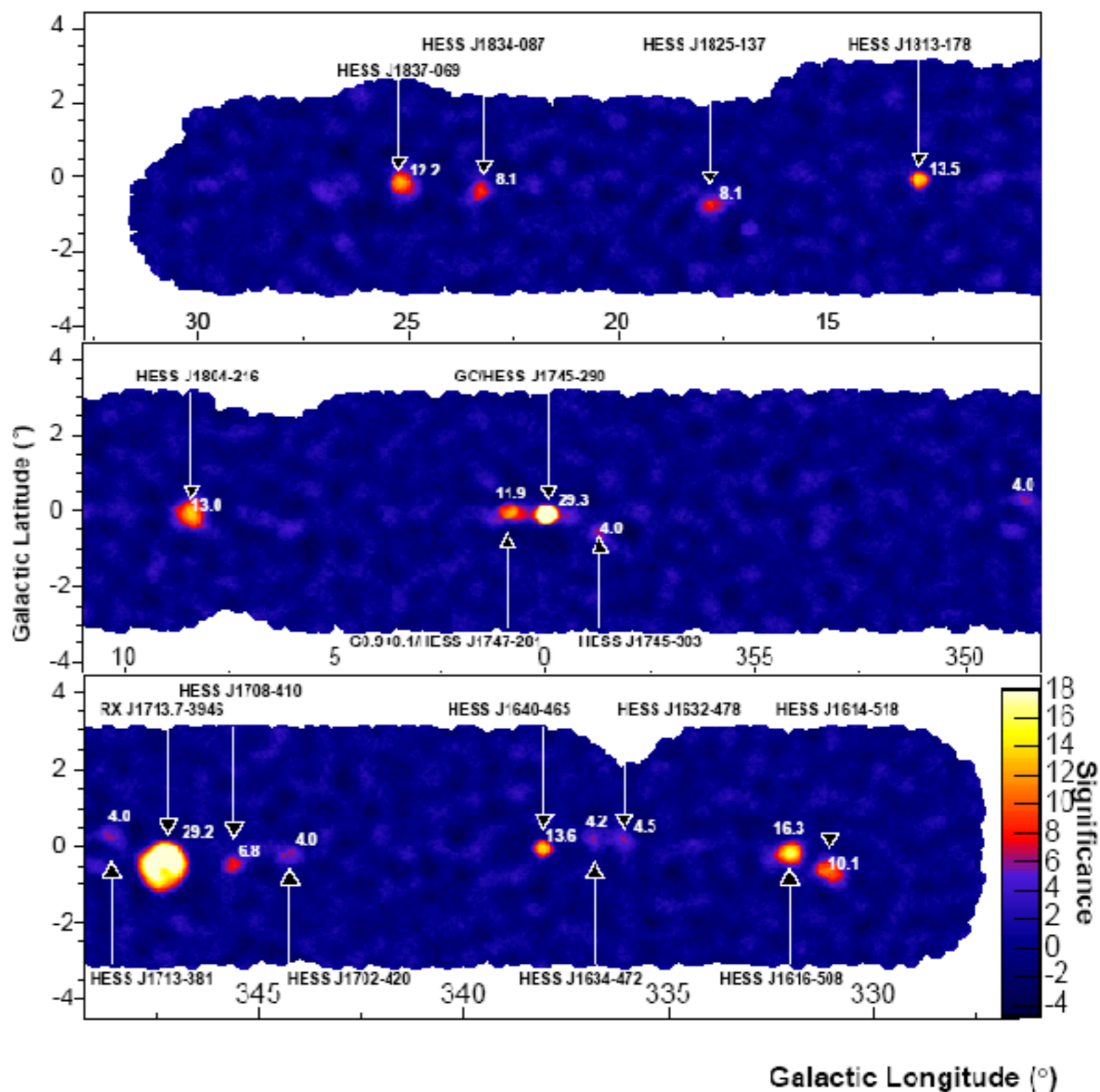
■ Cutoff ~ 10 TeV

- Knee までは説明出来ない
- 高エネルギーへの拡張が必要



Galactic Plane Survey (H.E.S.S.)

- 銀経 $330^\circ \sim 30^\circ$
- 15 個の新 TeV 天体
 - 未同定天体が 3 つ



TeV 未同定天体

■ HESS J1813-178

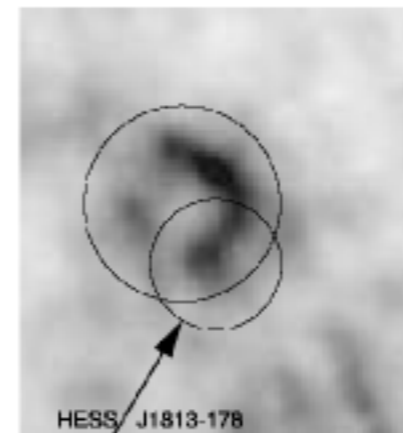
- 電波の追観測で同定

■ 残る 2 つは今だ未同定

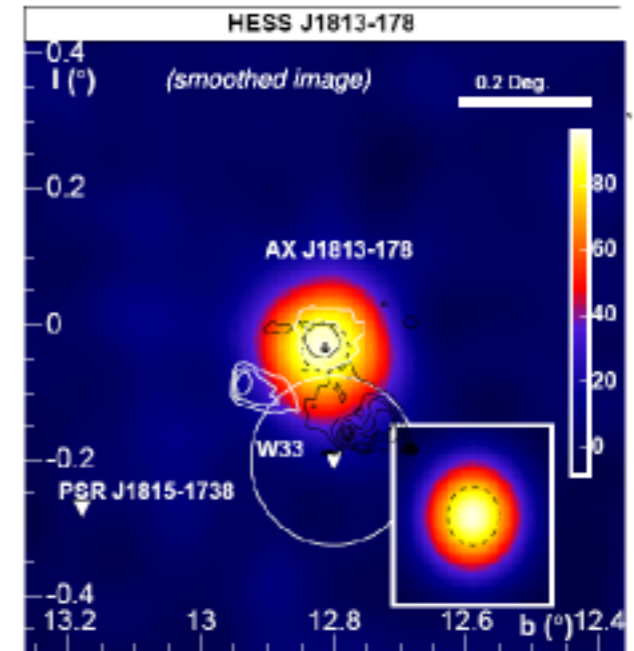
■ 新天体の発見

- 高感度観測が必要

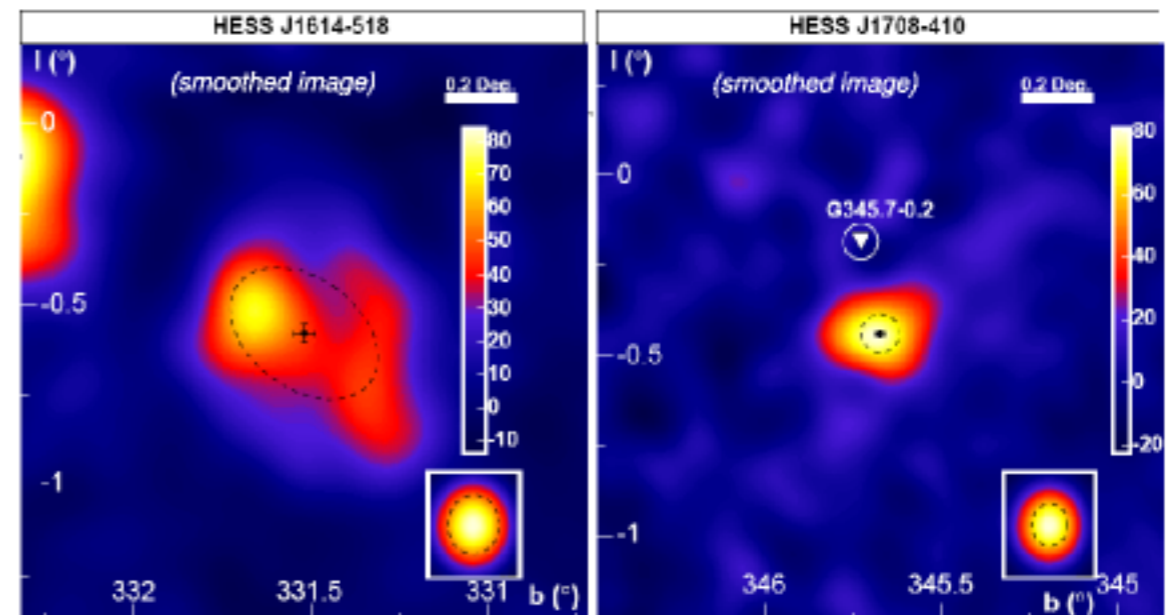
HESS J1813-178: now identified



White et al. 2005
Brogan et al. 2005
20 cm VLA
Ubertini et al., 2005
Integral

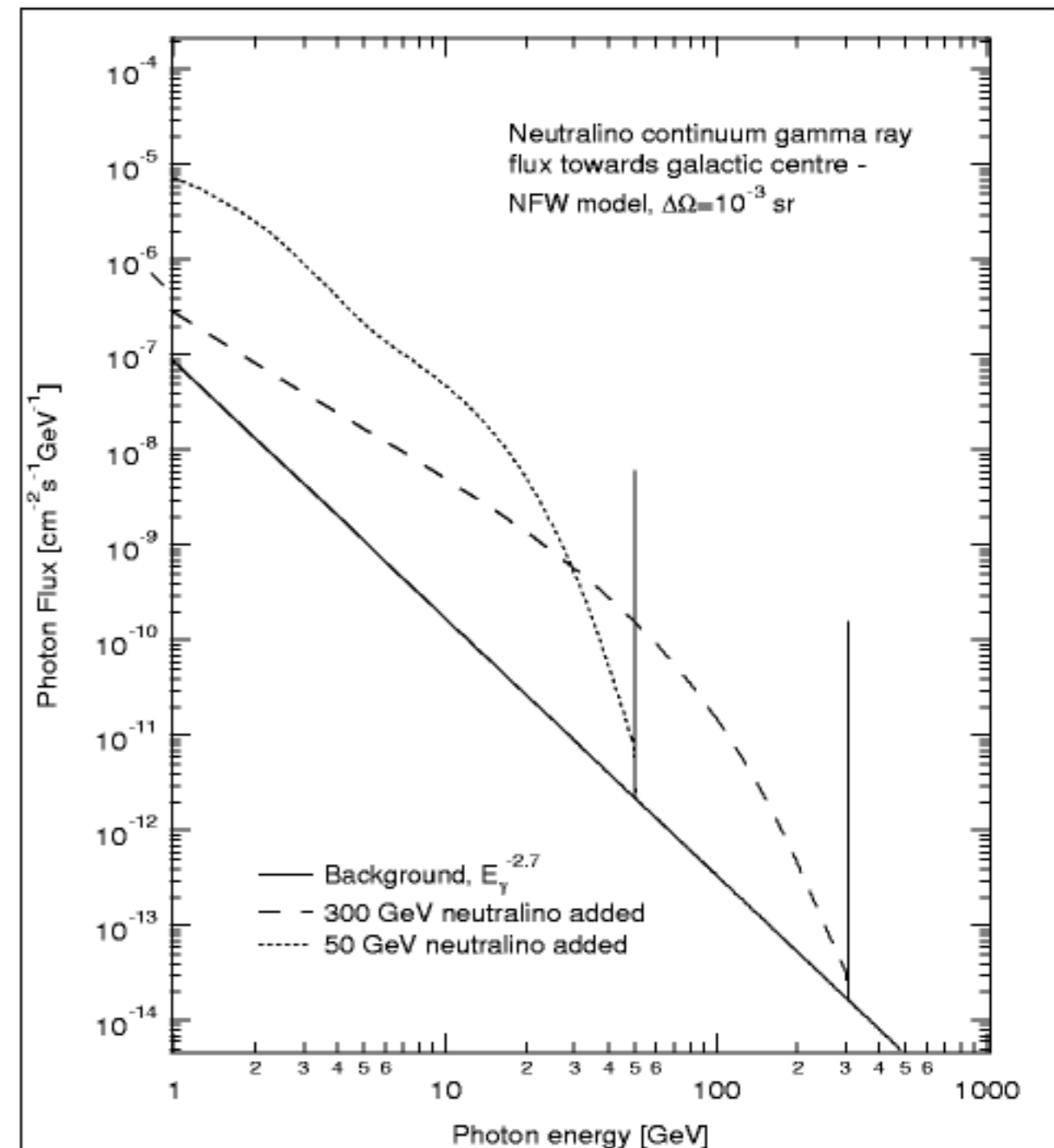


HESS J1614-518, J1708-410: no counterpart (yet)



Cold Dark Matter

- Neutralino annihilation
 - Line emission
 - ▶ $\gamma\gamma$ or $Z\gamma$
 - Continuum
 - ▶ WW or $ZZ \rightarrow q$ ジェット $\rightarrow \pi^0$
- 質量: 40 ~ 500 GeV
- 高感度観測が必要
- 高エネルギー分解能も必要



大口径望遠鏡

- 問題点: 巨大なコスト

- コストパラダイム

- Traditional cost scaling law: $\text{Cost} \propto D^{2.7}$ (D: 直径)
- See: <http://www.aura-nio.noao.edu/book/>
 - ▶ Enabling a Giant Segmented Mirror Telescope for the Astronomical Community

- コスト低減が重要



複数次反射型望遠鏡？

■ 望遠鏡を短く出来る

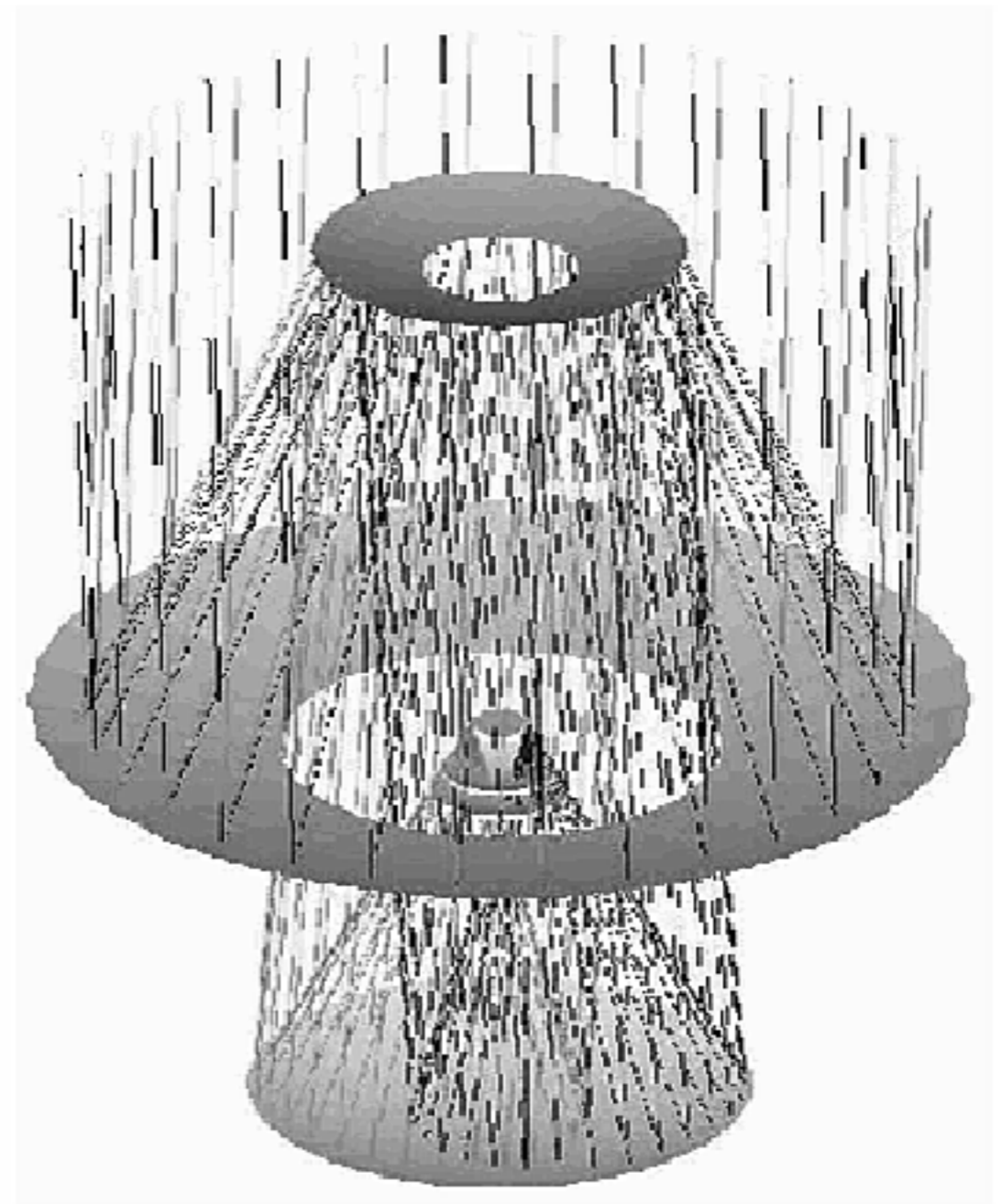
- トルク軽減 → 軽量化 → コスト減

■ 光量の Loss

- 集光率 $\propto (\text{反射率})^n$ (n: 反射回数)
- 広い dead space

■ 複合鏡で可能か？

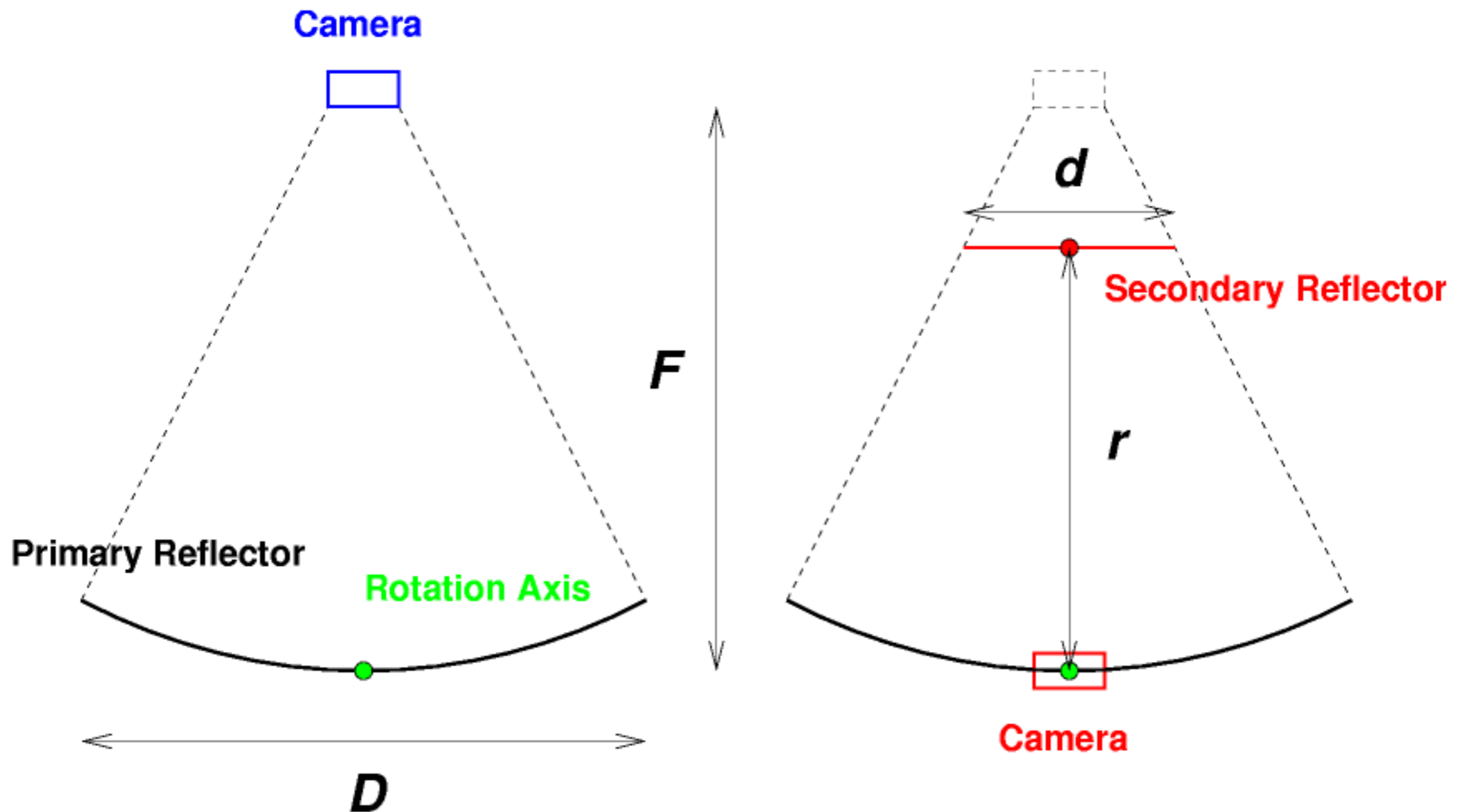
- 集光性能を維持出来るか？



本当にトルクを減らせるか？

■ 簡単なモデル（カセグレン望遠鏡）

- 主鏡の質量: M
- カメラの質量: m



望遠鏡の全慣性モーメント

■ 仮定: $f = 1$

■ 慣性モーメント

● $I(\text{primary reflector})$

$$\sim \frac{1}{8}MD^2$$

● $I(\text{camera at the focus})$

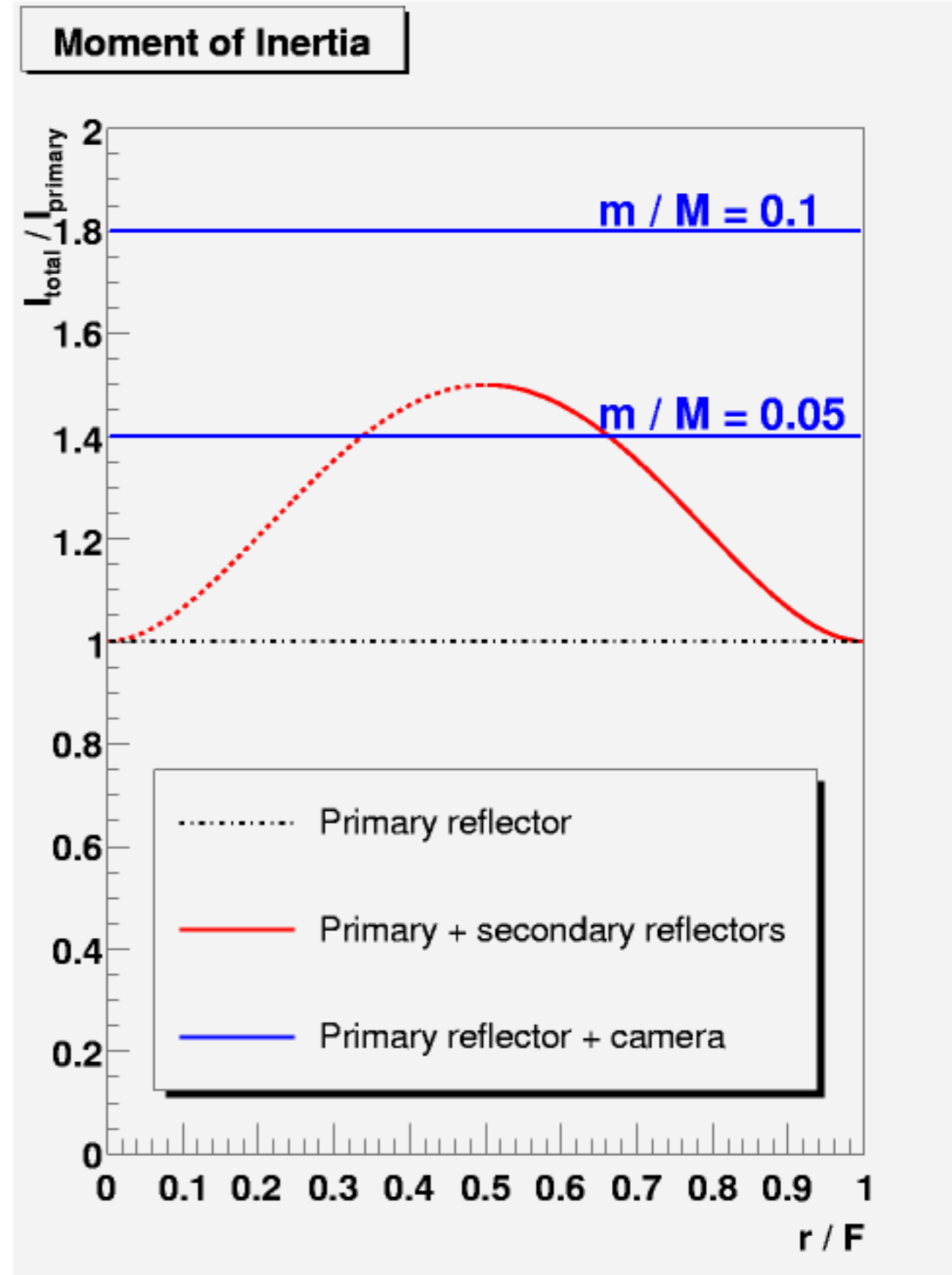
$$\sim mD^2$$

● $I(\text{secondary reflector})$

$$\sim MD^2t^2(1-t)^2 \quad (t = \frac{r}{F})$$

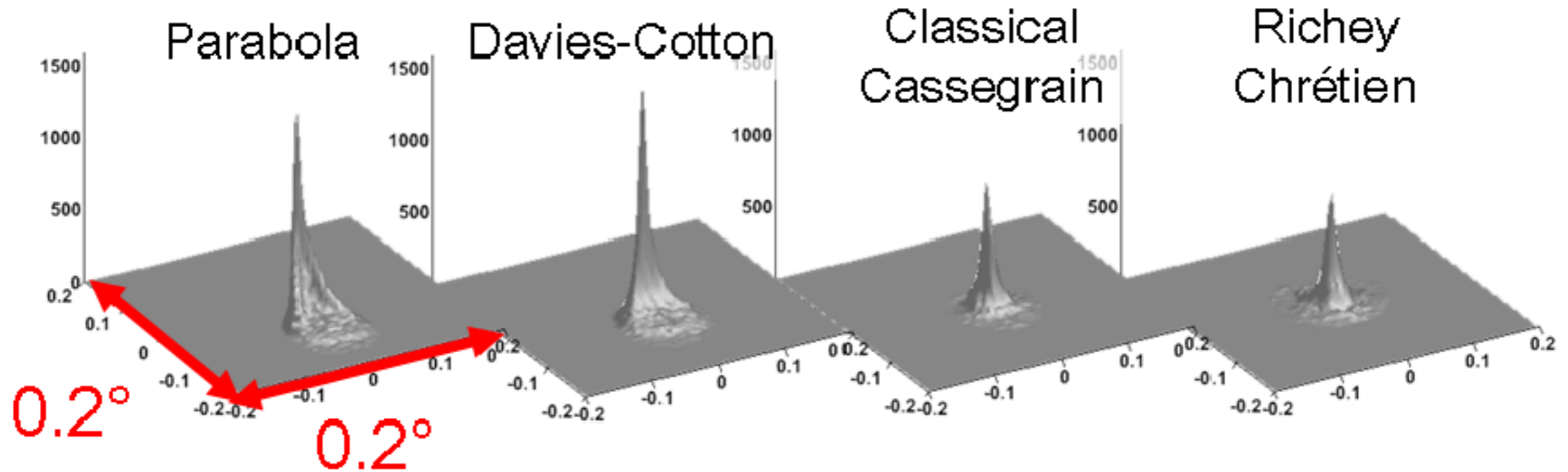
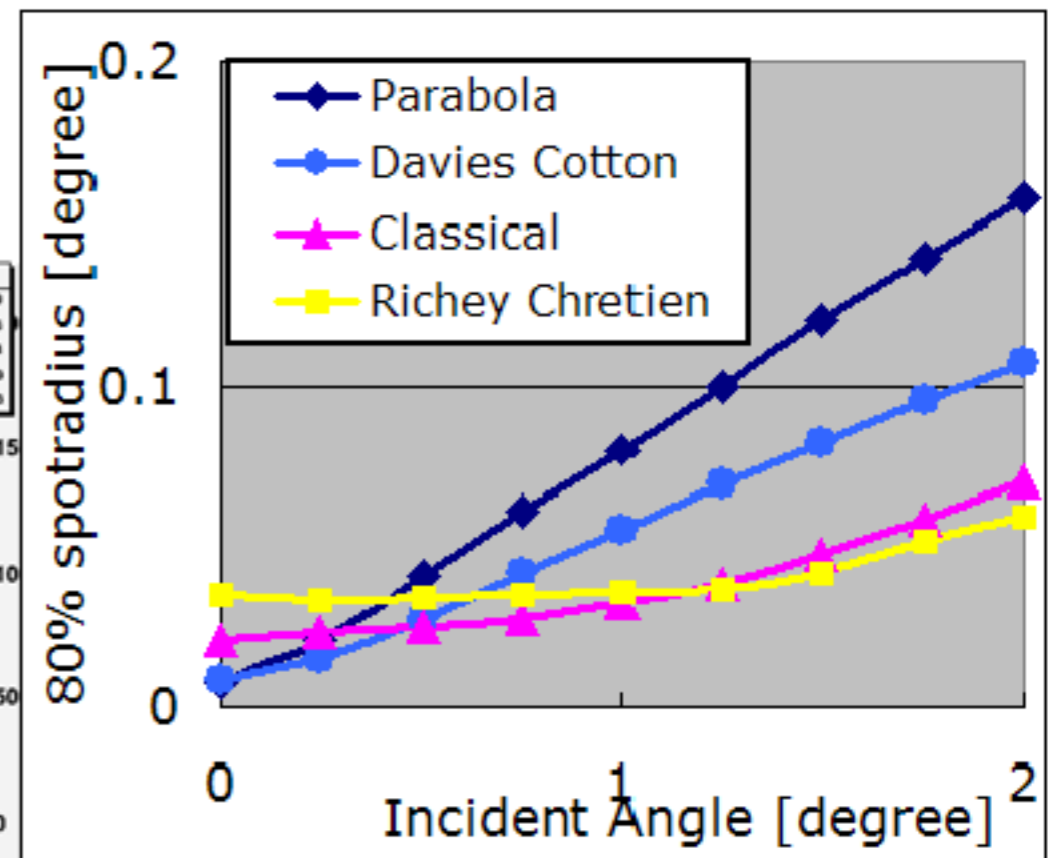
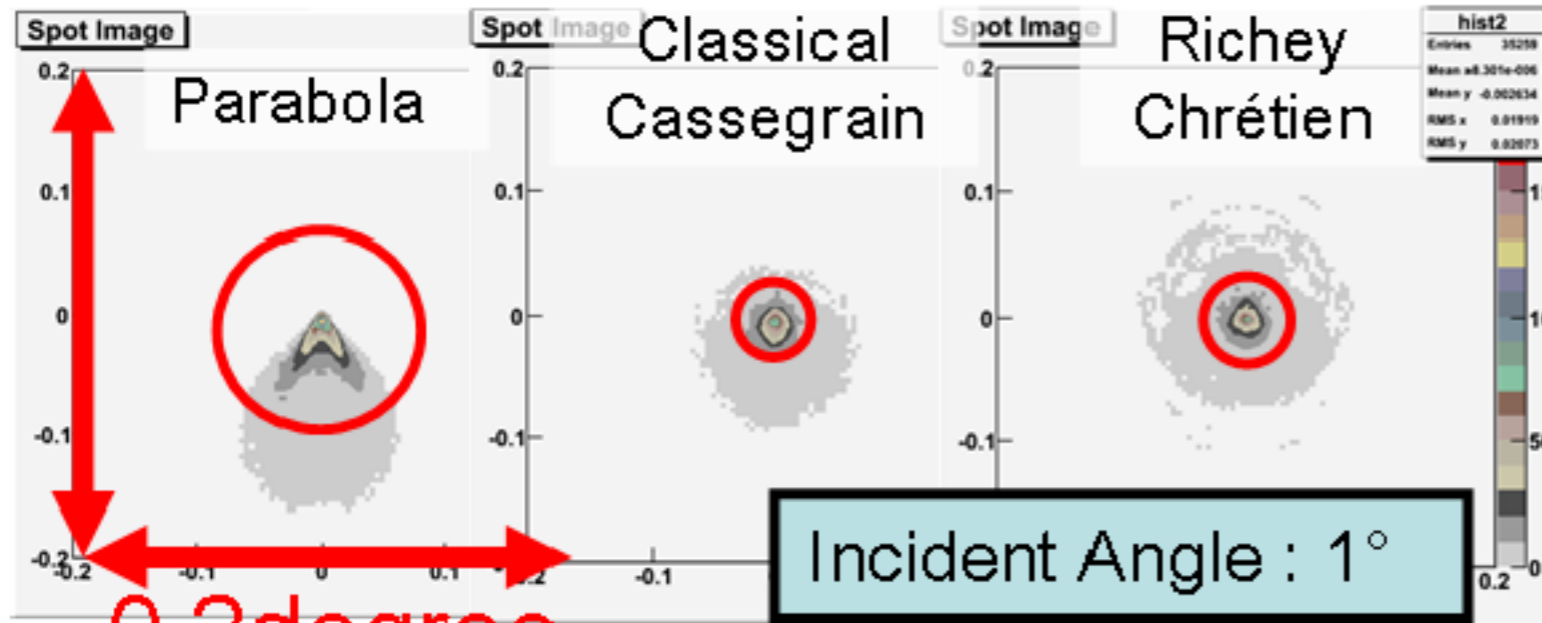
■ Better solution exists if:

● $I(\text{secondary}) < I(\text{camera})$



複合鏡のスポットサイズ

spot radius :=
80% of total intensity



大有効検出面積望遠鏡システム

■ 望遠鏡をたくさん並べる

- 高感度 → ステレオ観測は必要

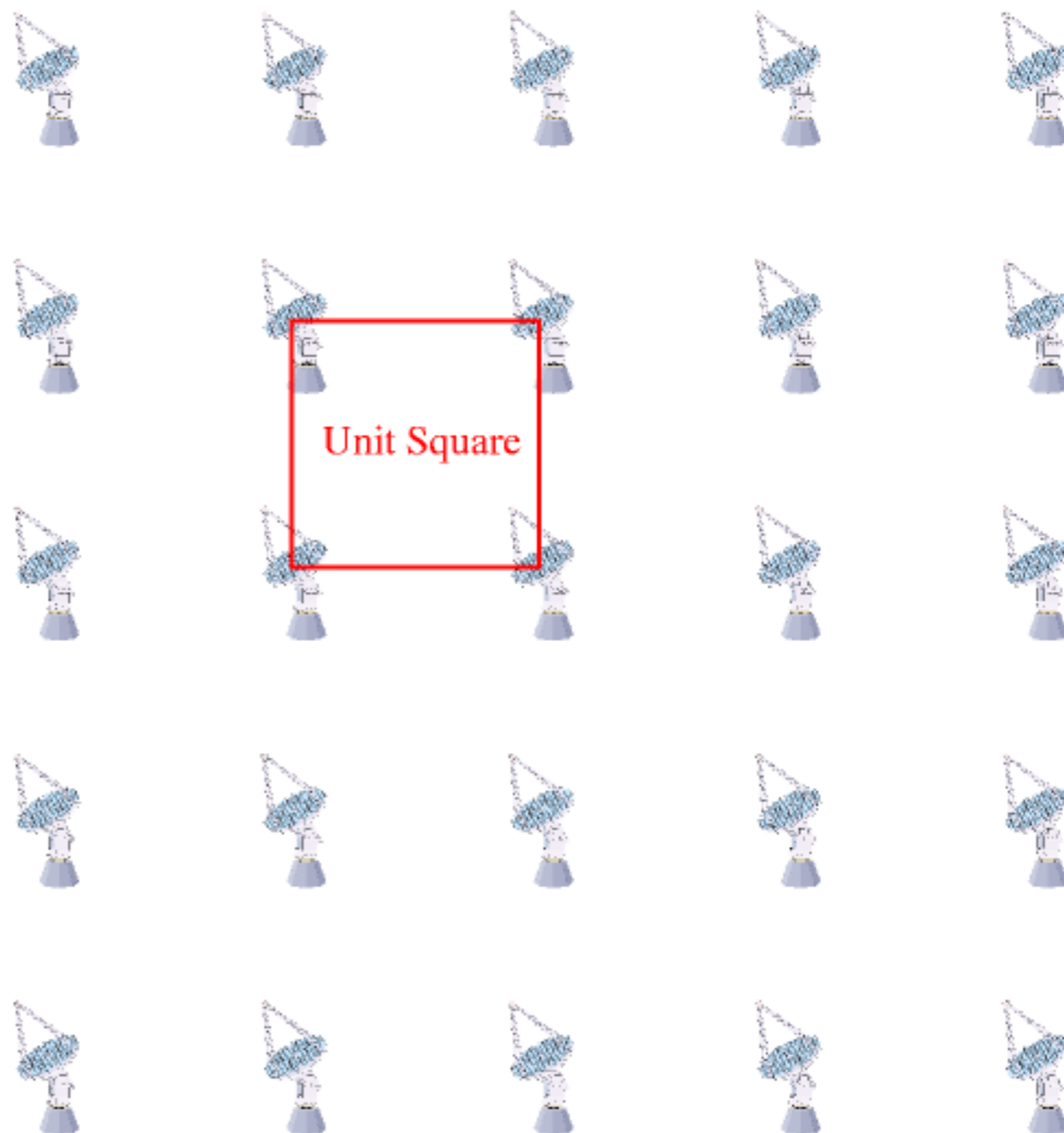
■ コストパフォーマンス

- なるべく安く、なるべく広く
- 最良の配置間隔?
- 最良の口径?

■ $A_{\text{eff}}(\text{total})$

$$= A_{\text{eff}}(\text{unit square}) \times N$$

- N: 望遠鏡の基数

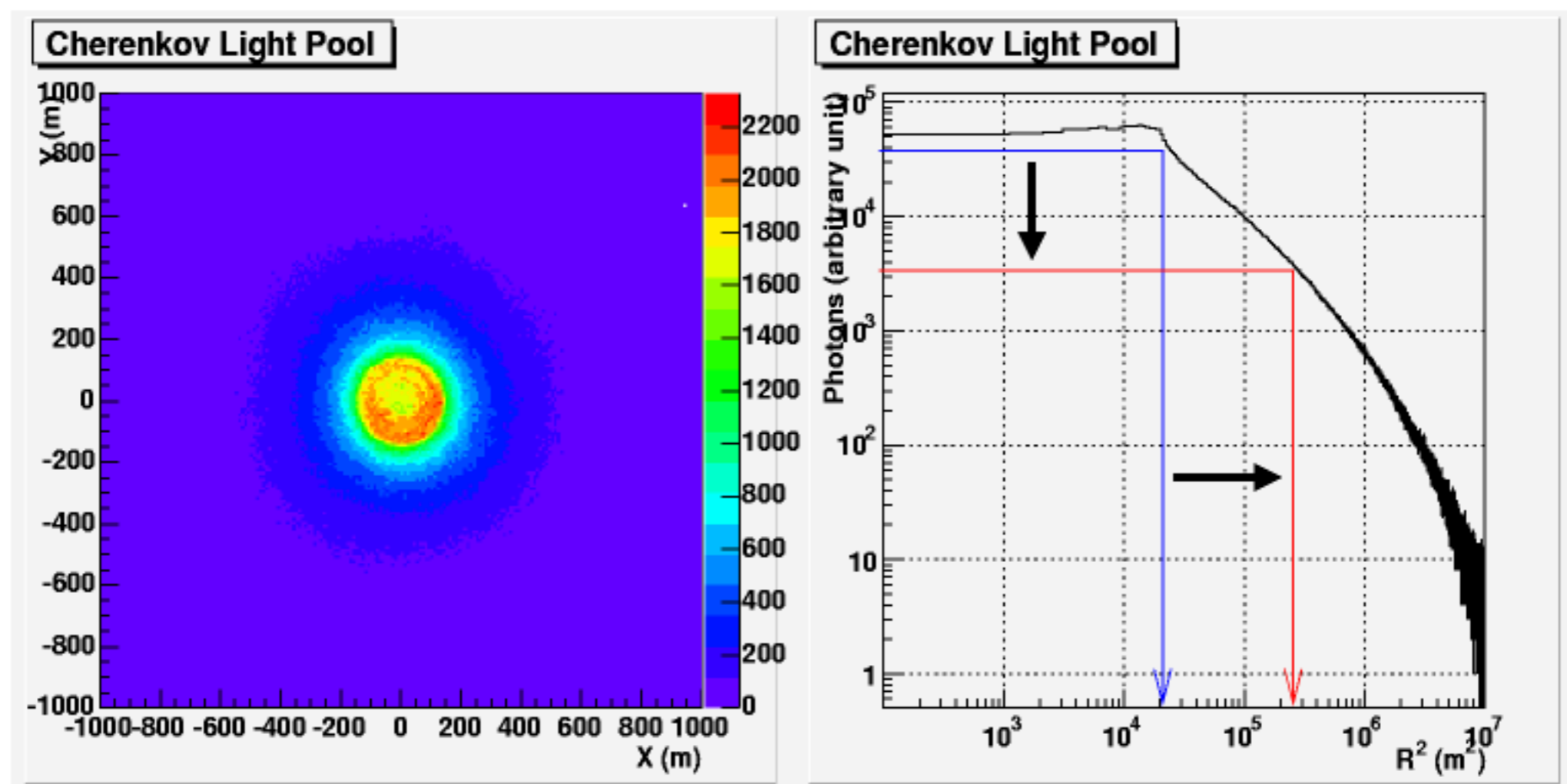


望遠鏡配置間隔は重要なパラメータ

■ チェレンコフ光の横方向分布

- Core distance ~ 150 m まで flat

■ 口径大 \rightarrow 分布の裾野を検出可 \rightarrow 有効検出面積大



シミュレーション

■ 有効検出面積 vs. 口径 / 配置間隔

■ 条件:

- CORSIKA 6.20
- Gamma rays from a vertical point source
- Geomagnetic field: $(25.4, -51.8) \mu\text{T}$ (Woomera)
- Altitude: 160 m (Woomera)
- Parabolic reflector ($f = 1$)
- No blurring
- No NSB
- Camera: hexagonal (pixel size = $0^\circ .17$)
- Trigger: 5 p.e. \times 3 adjacent pixels \times any 2 telescopes

■ 注意!

- 極めて理想的かつ単純
- 有効検出面積を overestimate

Unit Square の有効検出面積

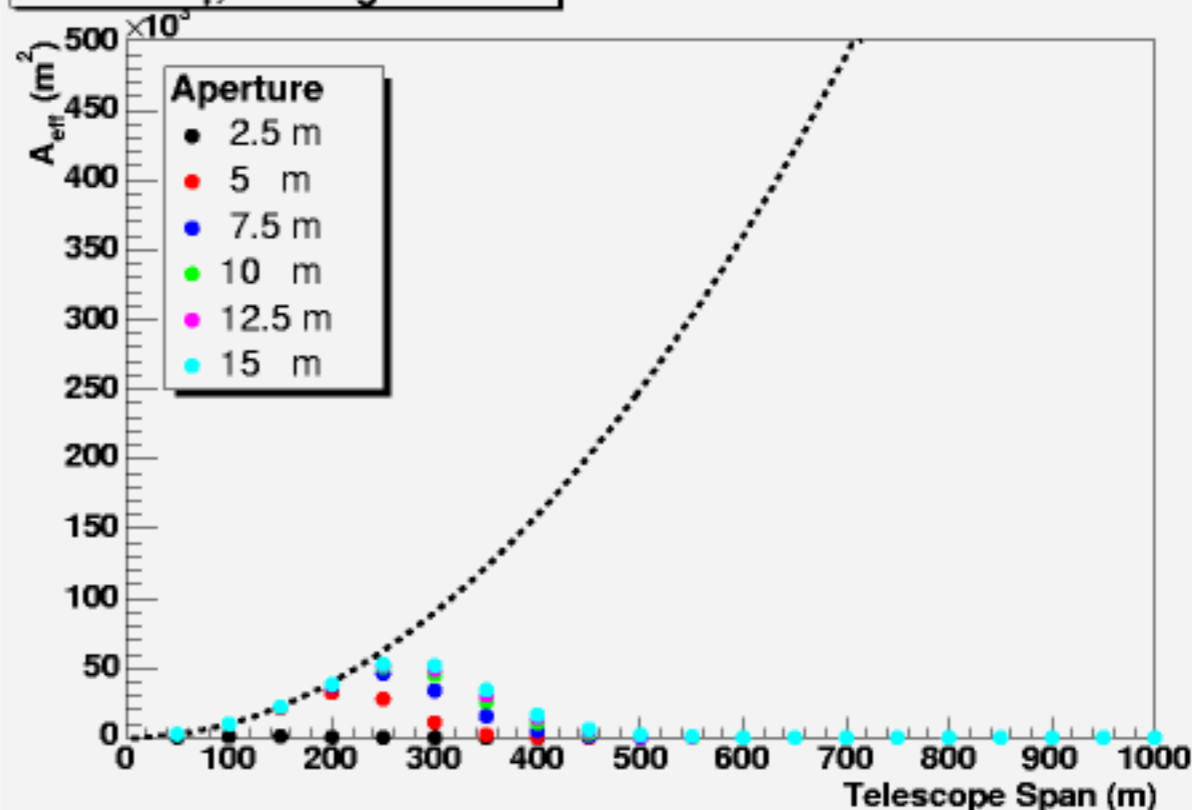
■ 20-ring カメラ

● FoV $\sim 6^\circ$

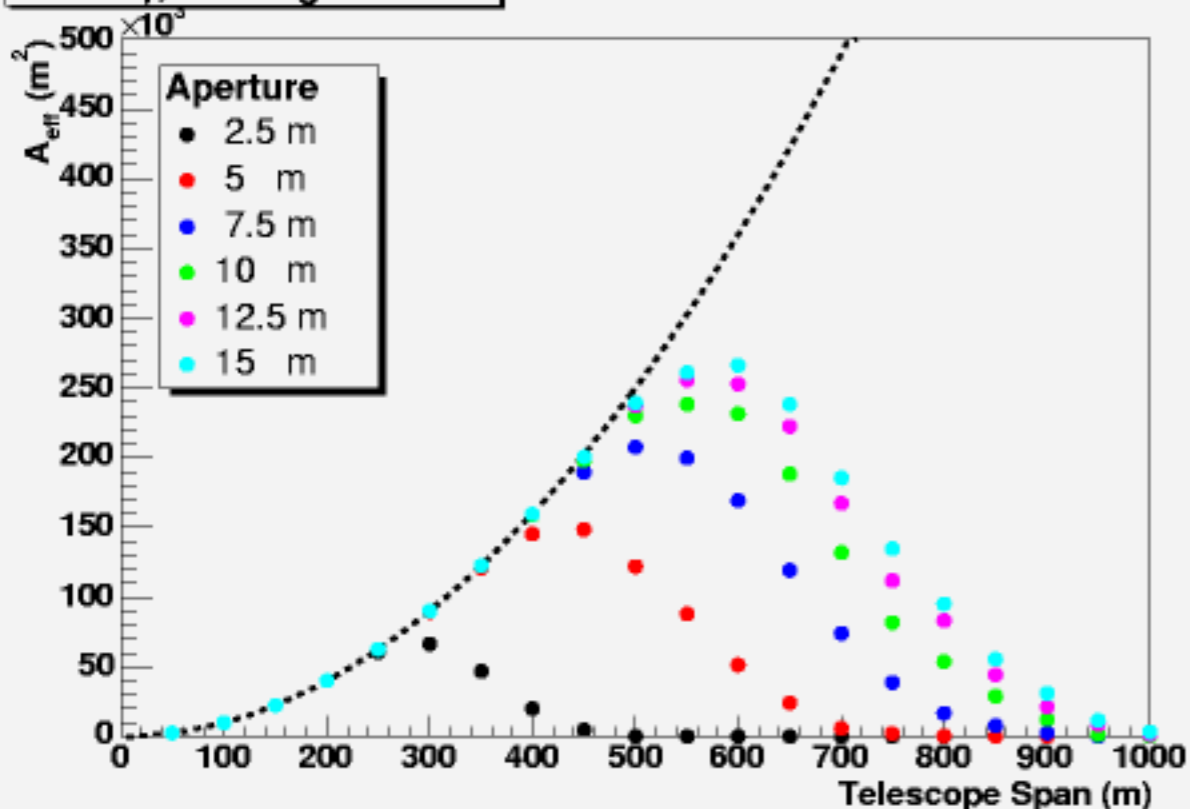
■ ガンマ線エネルギー:

● 100 GeV、1 TeV、10 TeV

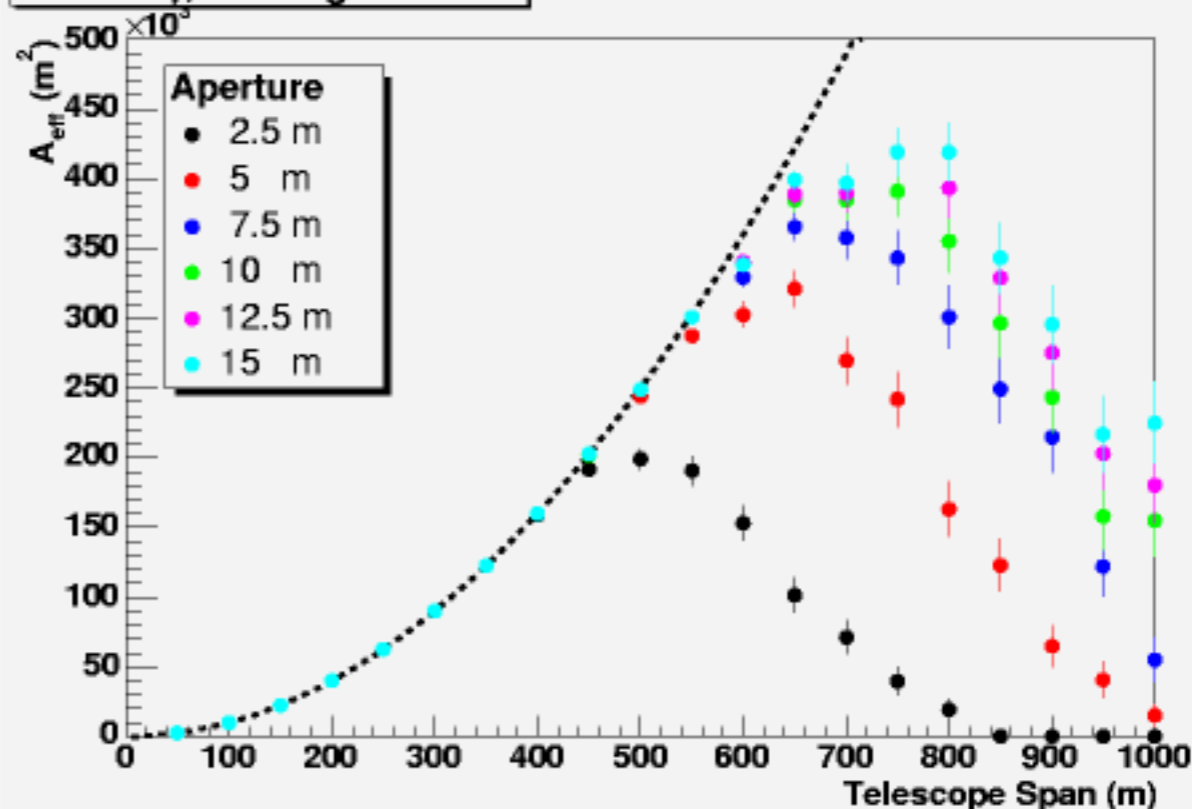
100 GeV γ , 20-Ring Camera



1 TeV γ , 20-Ring Camera



10 TeV γ , 20-Ring Camera



どのように最適化するか？

■ Traditional cost scaling law を仮定

- $\text{Cost} \propto D^{2.7}$

■ 一定コストで最大の有効検出面積は？

- $\text{Total cost} \propto D^{2.7} \times N$ (望遠鏡の基数)

- $A_{\text{eff}}(\text{total}) = A_{\text{eff}}(\text{unit square}) \times N$

- $\rightarrow A_{\text{eff}}(\text{total}) \propto A_{\text{eff}}(\text{unit square}) / D^{2.7}$

一定コストでの有効検出面積

■ 20-ring カメラ

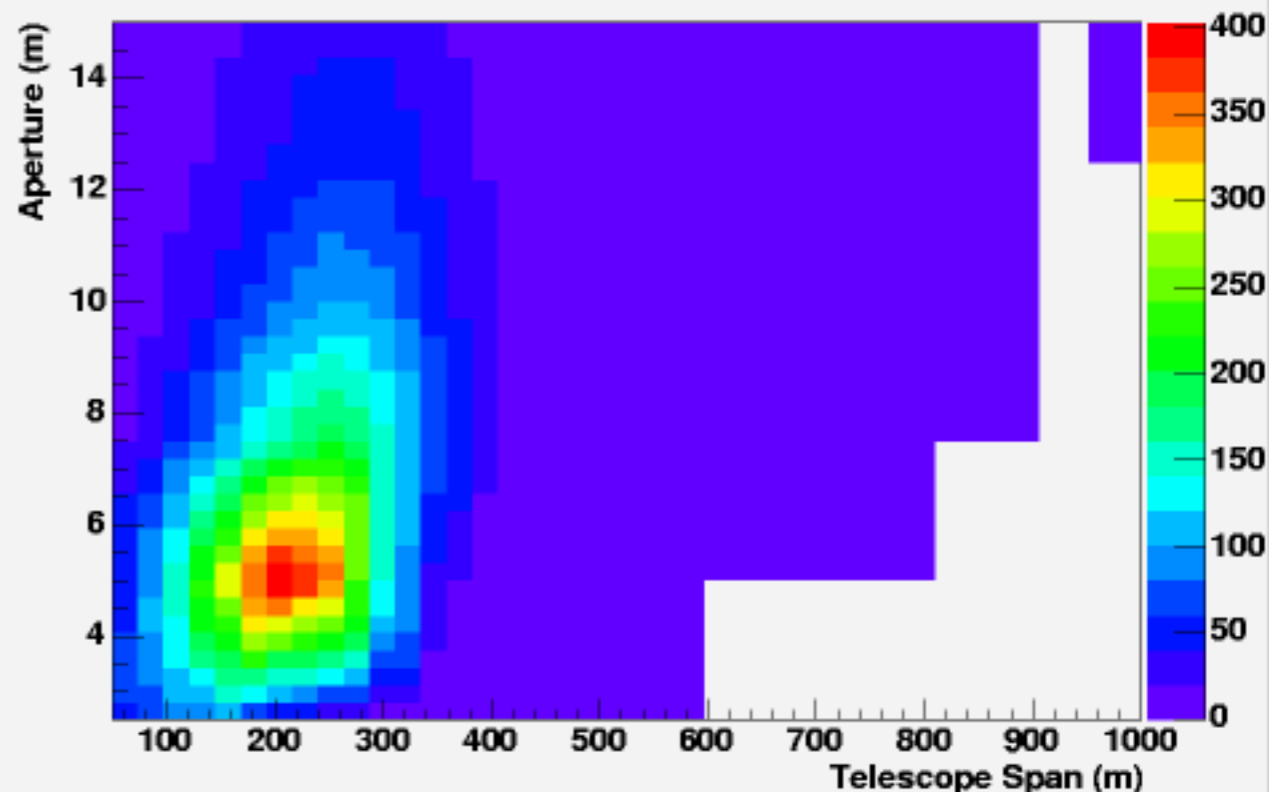
● FoV $\sim 6^\circ$

■ ガンマ線エネルギー:

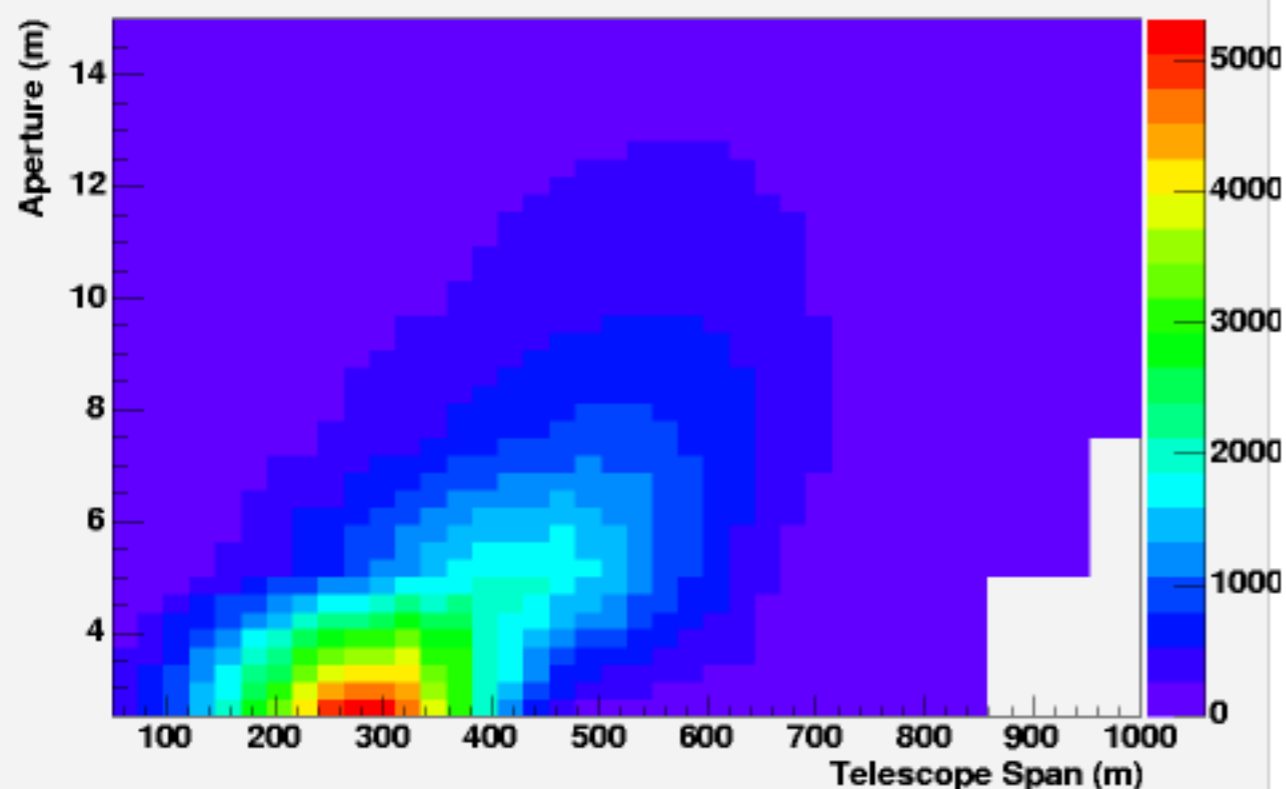
● 100 GeV、1 TeV、10 TeV

■ 大口径は必要ない

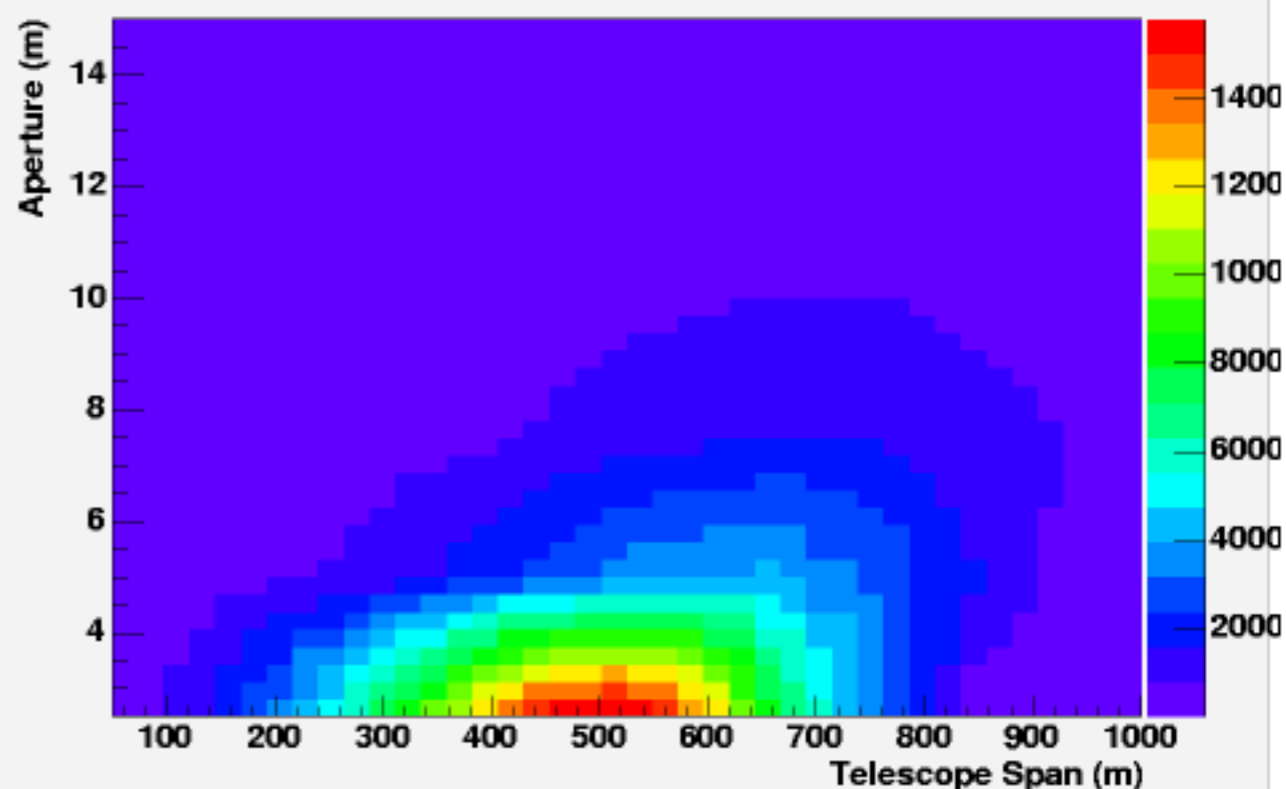
100 GeV γ , 20-Ring Camera



1 TeV γ , 20-Ring Camera



10 TeV γ , 20-Ring Camera



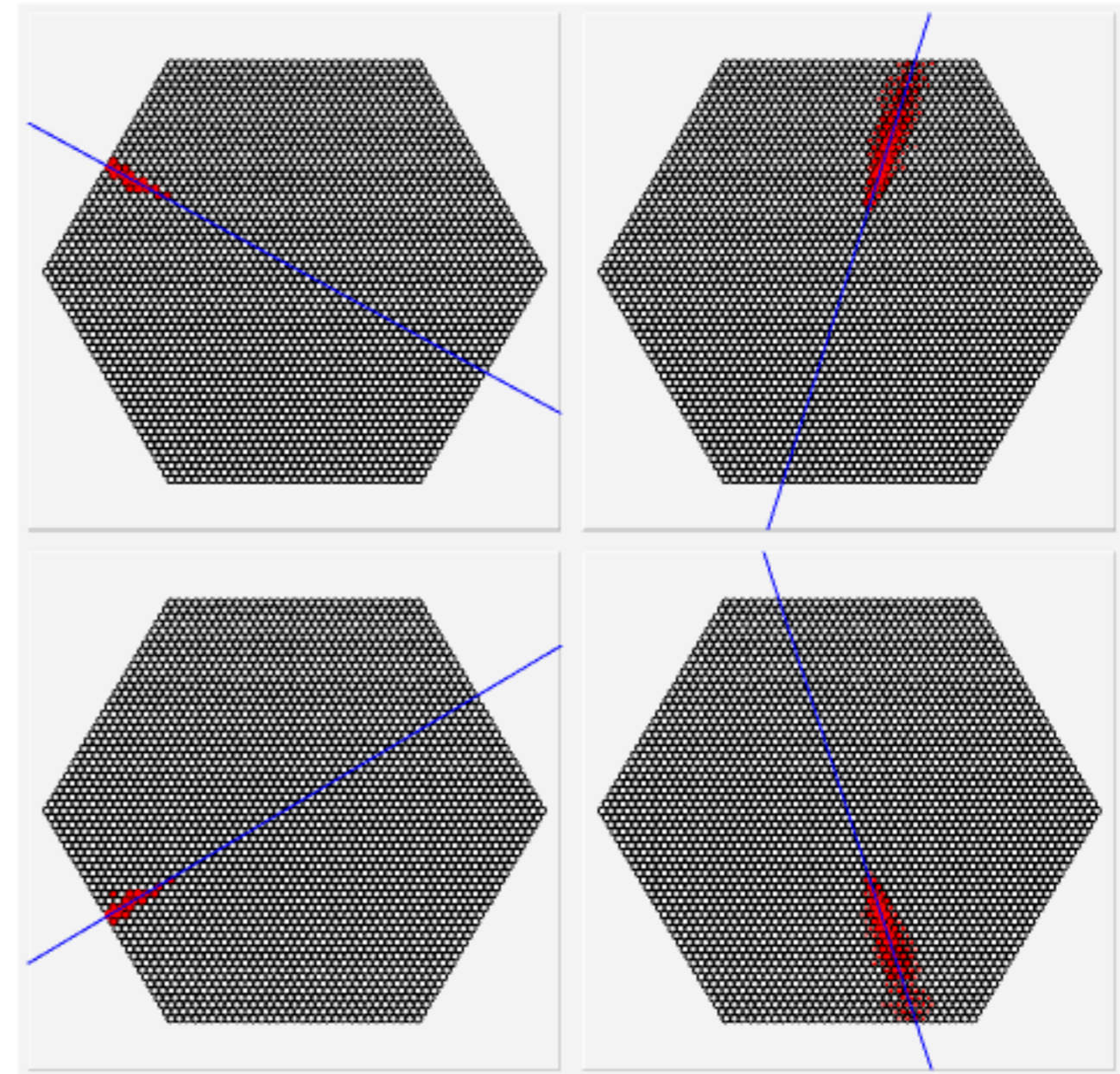
Cherenkov Image Quality at Large Core Distances

■ 角分解能が悪くなるはず

- 光量が少ない → fluctuation 大
- 散乱電子からのチェレンコフ光
- 視野内での image - source 間の距離大
- コマ収差

■ シミュレーション事象の例:

- 10 TeV ガンマ線
- 10 m 口径, 500 m span
- $\sim 10^\circ$ FoV

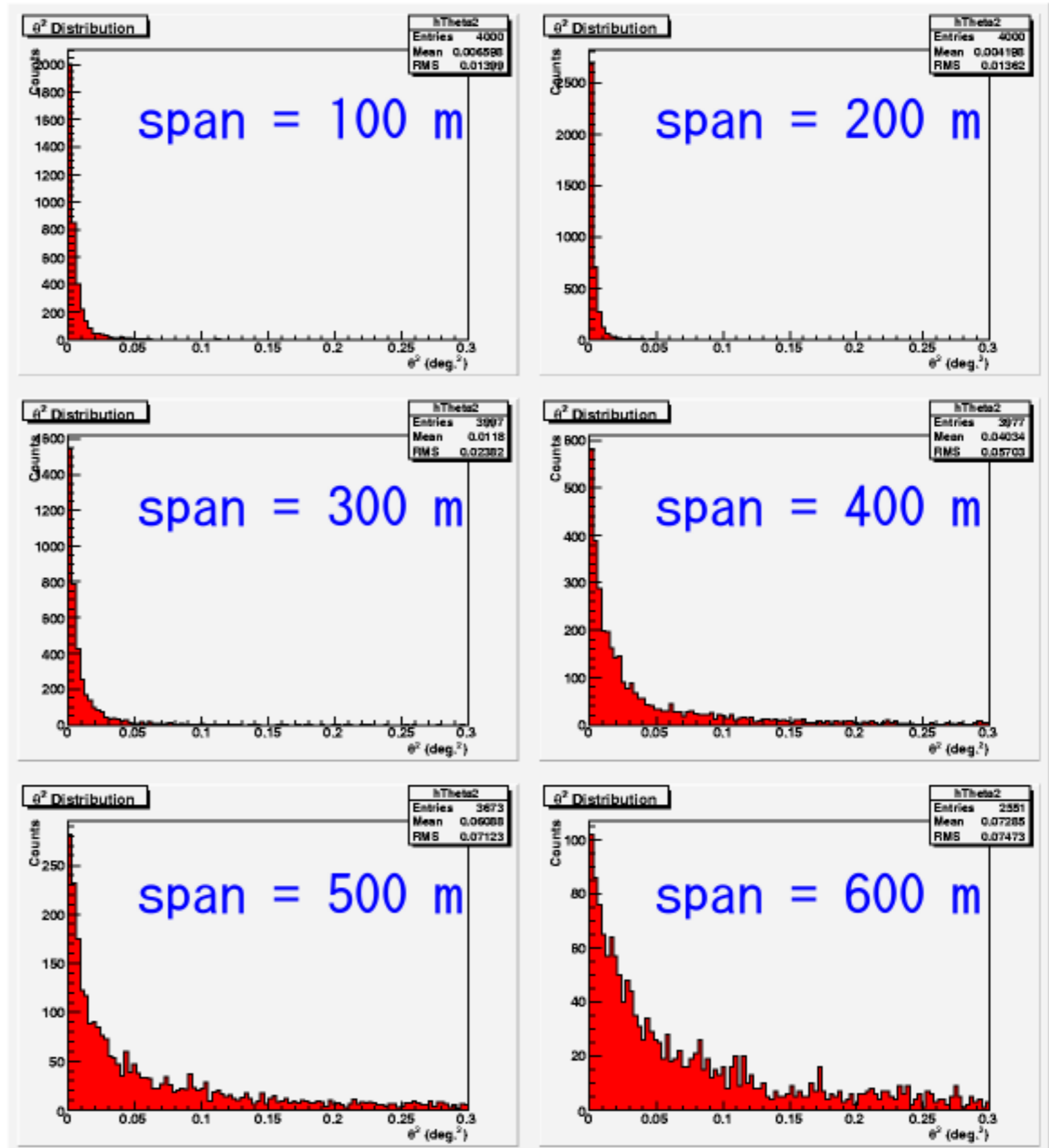


Theta² Plots as a Function of Telescope Span

■ シミュレーション結果の例:

- 1 TeV ガンマ線
- 10 m 口径
- FoV ~ 6°

■ 望遠鏡間隔は短い方がいい



コストの概算

- 前提：低エネルギー領域は狙わない
 - シミュレーション → 小口径、短配置間隔でよい
- 望遠鏡 1 基当りのコスト
 - 10 m 口径 1 基 ~ 3 億円 (CANGAROO-III)
 - 口径 5 m で十分 → 3 億円 $\times (5 \text{ m} / 10 \text{ m})^{2.7} \sim 5$ 千万円
- ガンマ線検出感度（有効検出面積）を一桁改善
 - 望遠鏡 ~ 100 基必要 → ~ 50 億円

広視野望遠鏡

■ フレネルレンズを利用

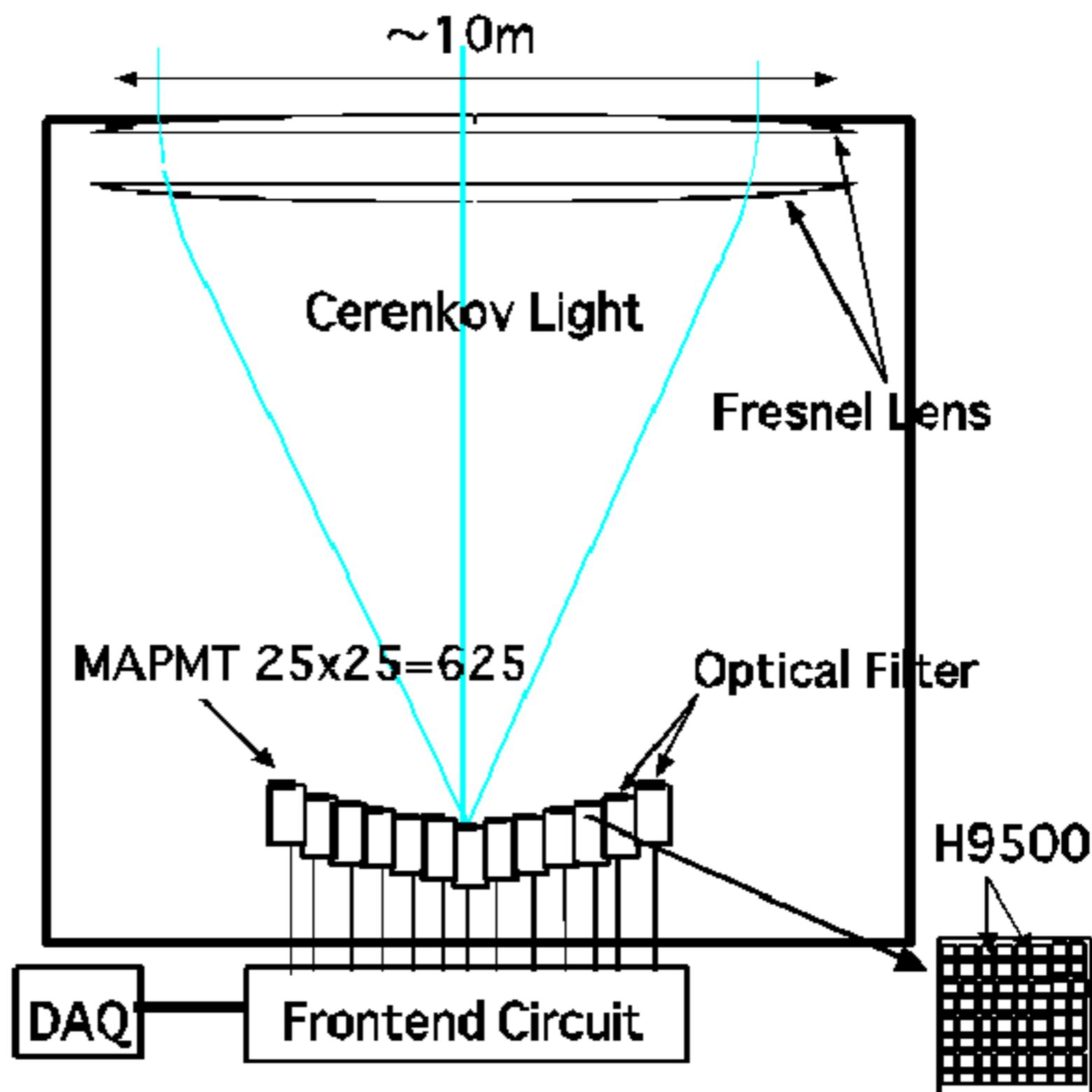
- EUSO をひっくり返す

■ 大量の光検出器が必要

- $\sim 100,000$ pixels
- FoV $\sim 60^\circ$

■ 開発要素

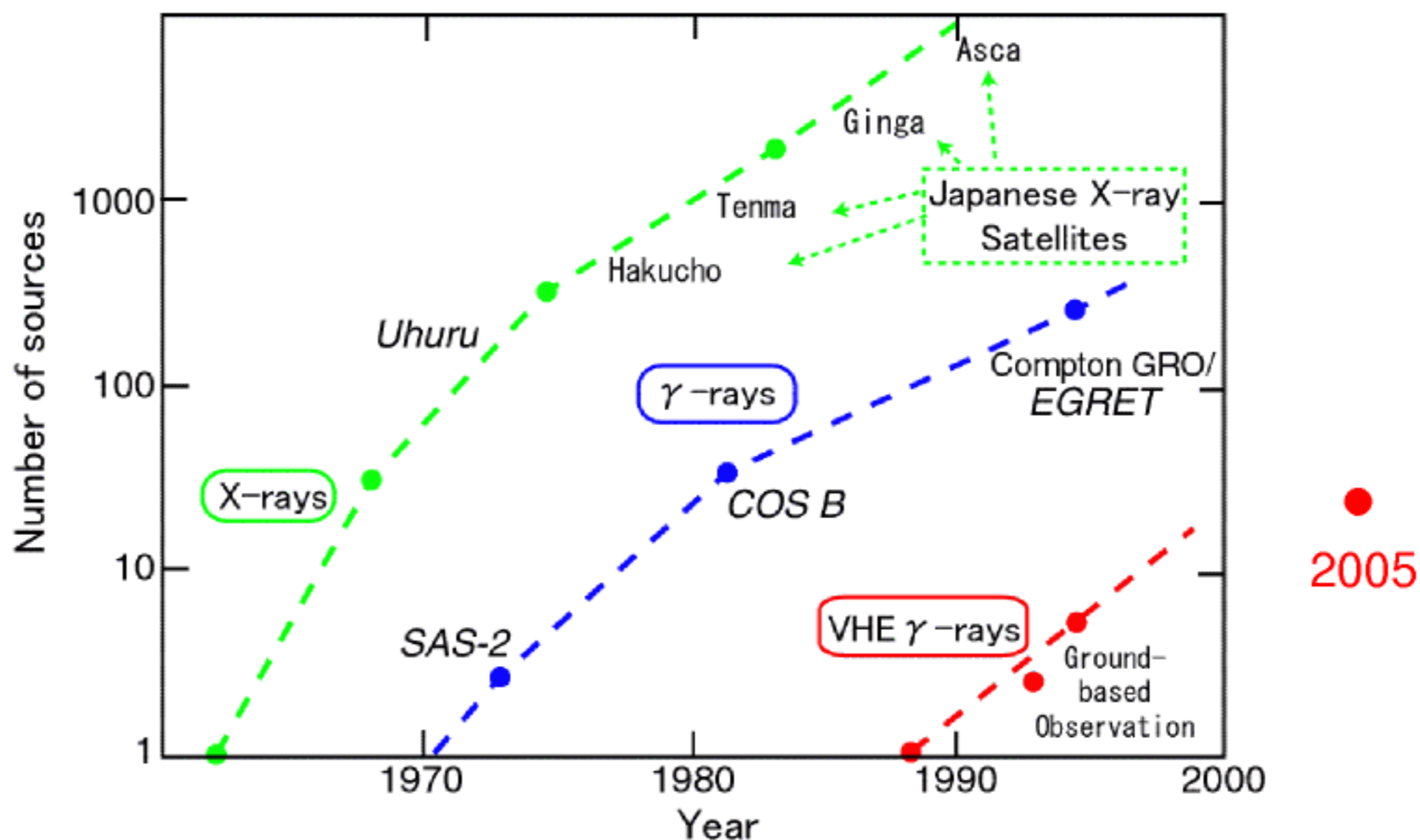
- 大型フレネルレンズ
- 高効率のトリガーシステム



天体数の推移

■ 10 ~ 20 年後は ~ 1000 sources の時代

- 広視野望遠鏡は source survey において有利



Survey 能力

■ Survey 能力 $\propto (A_{\text{eff}} \times \Omega)^{1/2}$

- Ω : FoV in 立体角
- 大有効検出面積も survey 能力あり

■ 広視野 vs. 大有効検出面積

- 全視野 in 立体角が同じなら survey 能力は同じ
- 望遠鏡の基数は大有効検出面積が N 倍多い
- $\text{Cost}(\text{広視野}) \ll \text{Cost}(\text{大有効検出面積})$
 - ▶ N 大で望遠鏡当りのコストが同等の場合

■ 両者は他の特徴が異なる

- 広視野: better time coverage
- 大有効検出面積: 高感度

高角分解能

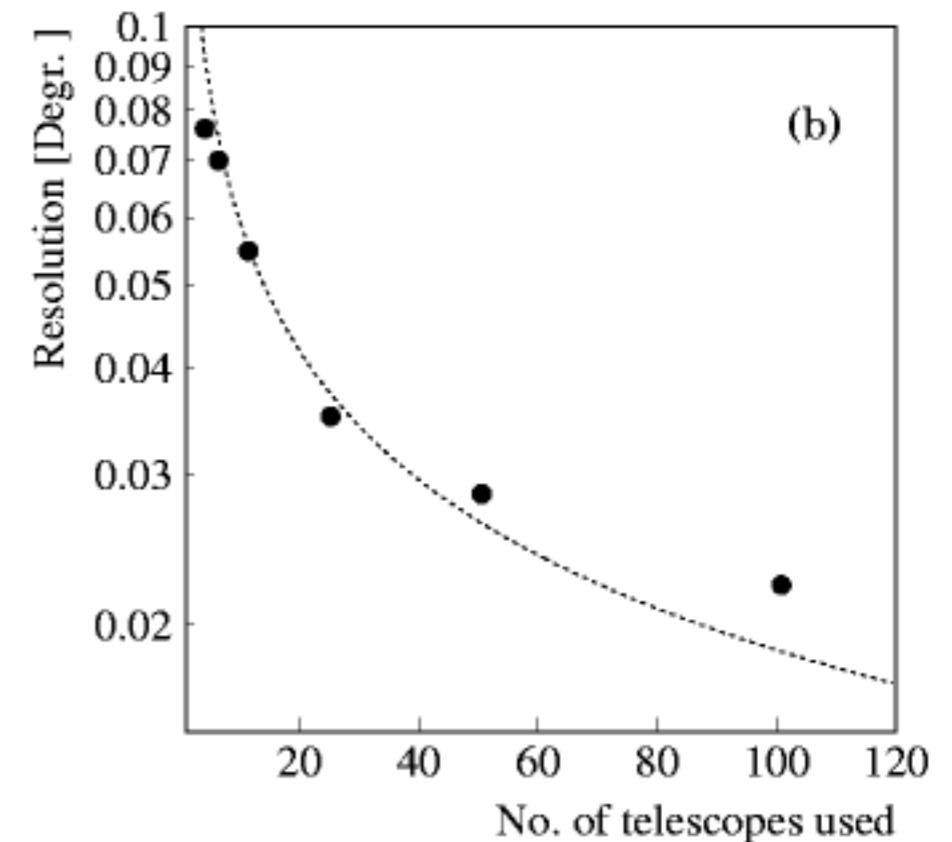
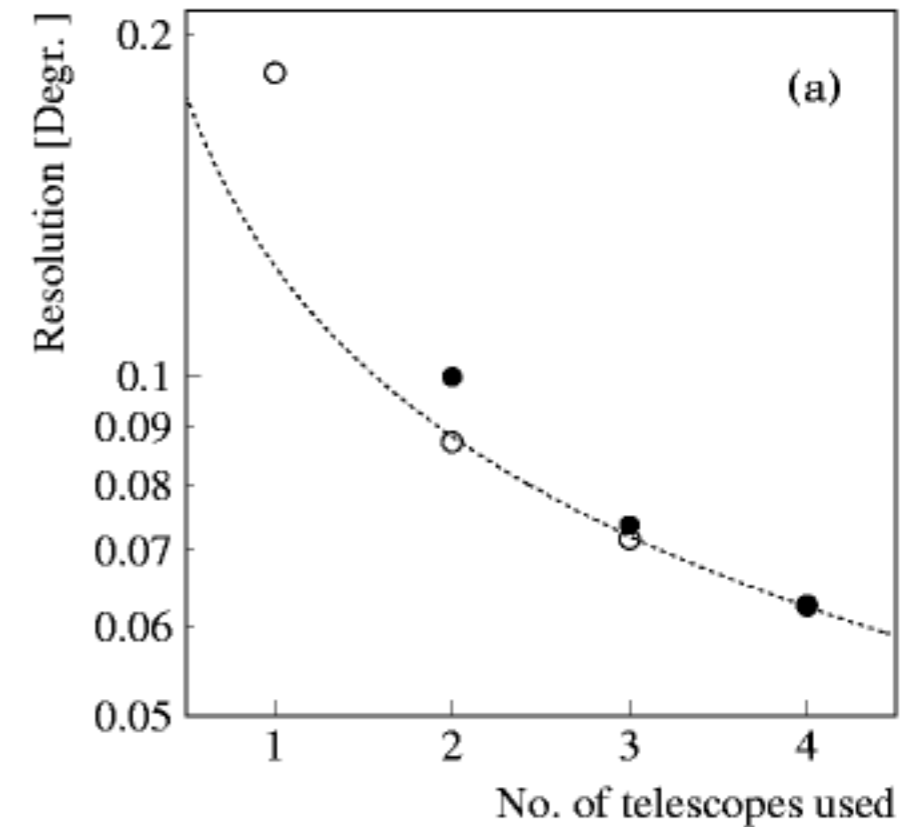
■ 実現方法:

- 望遠鏡を Cherenkov light pool 内に多数並べる
- High resolution camera

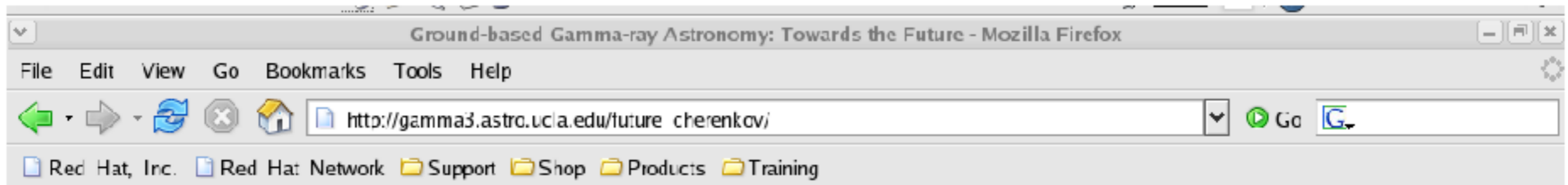
■ シミュレーション結果

- Hofmann et al. (1999)
- 角分解能 $\propto \sqrt{N}$ (N: 望遠鏡の基数)

■ エネルギー分解能も同時に改善



大規模な国際協力?



Installation at A.E.R.F., Harwell 1962.

Workshop: "Ground-based Gamma-ray Astronomy: Towards the Future"

University of California, Los Angeles

Thursday & Friday, October 20-21 2005 ([Mays' Landing](#))

Saturday, October 22nd 2005 ([UCLA: PAB](#))

Sponsored by:
[the Division of Physical Science, College of Letters and Science,](#)
and [Department of Physics and Astronomy, UCLA.](#)

Organizing committee:

[Vladimir Vassiliev](#) (UCLA)

[Stephen Fegan](#) (UCLA)

[Rene Ong](#) (UCLA)

[Simon Swordy](#) (U. of Chicago)

Next meeting organizing committee:

Goals of the workshop

- 1) to discuss the scientific motivations which will be addressed by the future ground-based gamma ray observatories after the completion of the HESS, VERITAS, MAGIC, CANGAROO, and GLAST projects;
- 2) to determine the technical parameters required to pursue these scientific motivations and identify possible implementations of future instruments;
- 3) to form the US core of a potential international collaboration to further research and development of the next ground based gamma-ray project.



広視野望遠鏡アレイ (UCLA グループ)

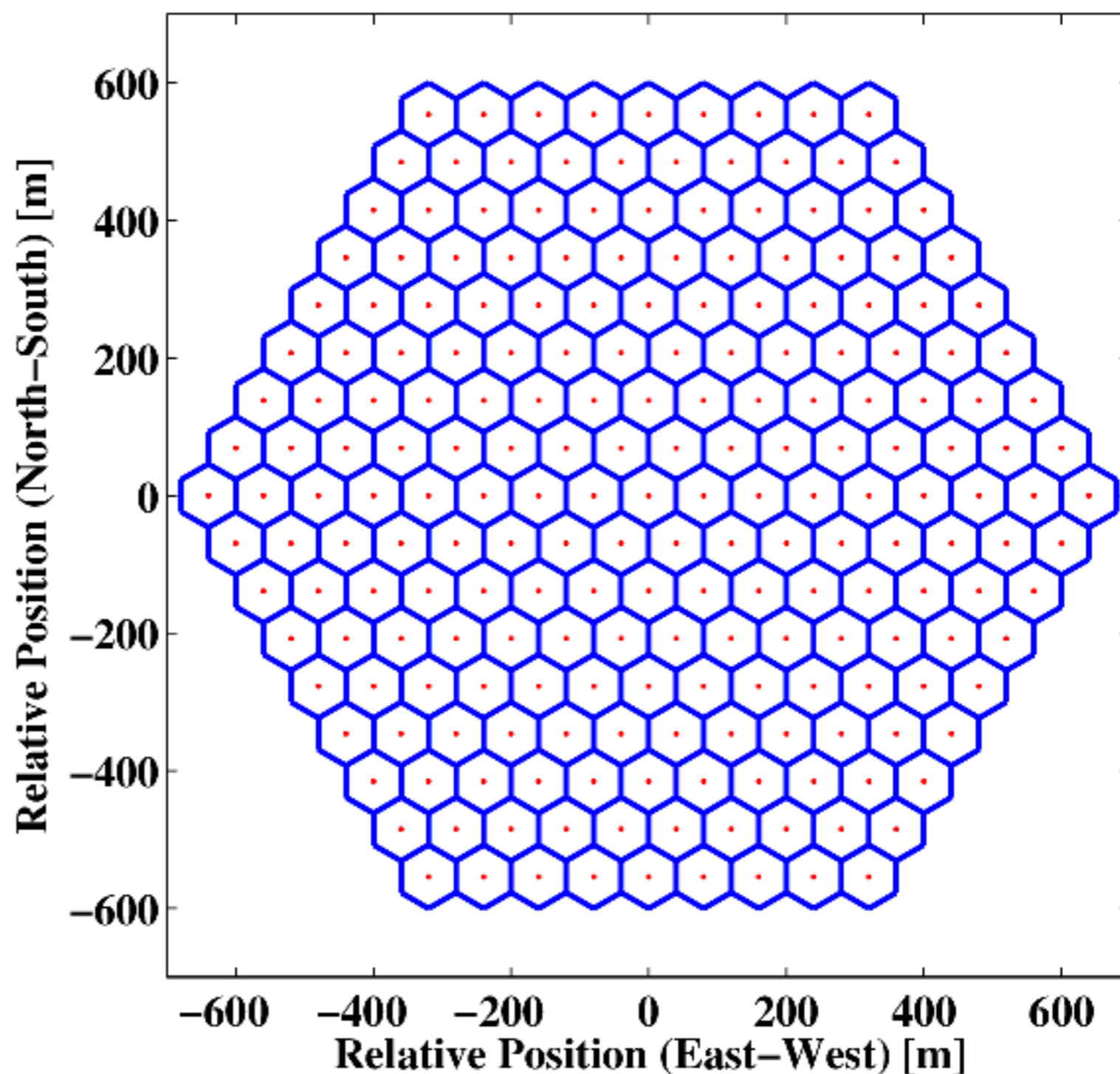
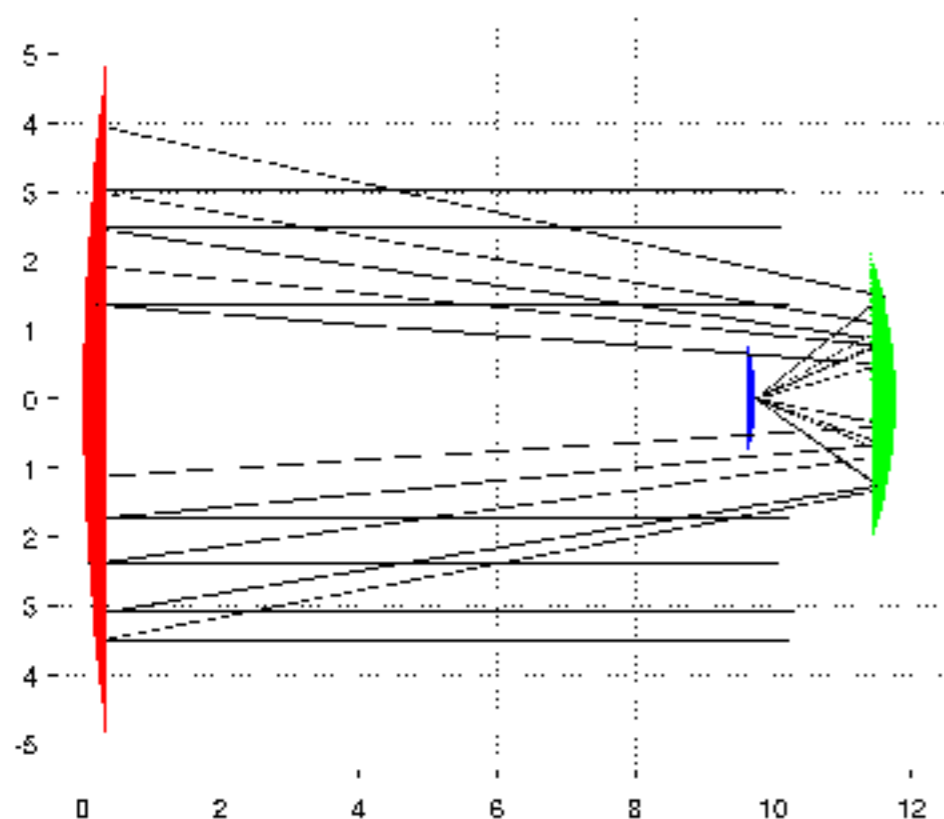
■ 大有効検出面積 & 広視野

● 10 m 級望遠鏡 × 217 基

● 視野 $15^\circ \phi$ / 望遠鏡

▶ Ritchey-Chretien

■ 100 GeV 前後を狙う



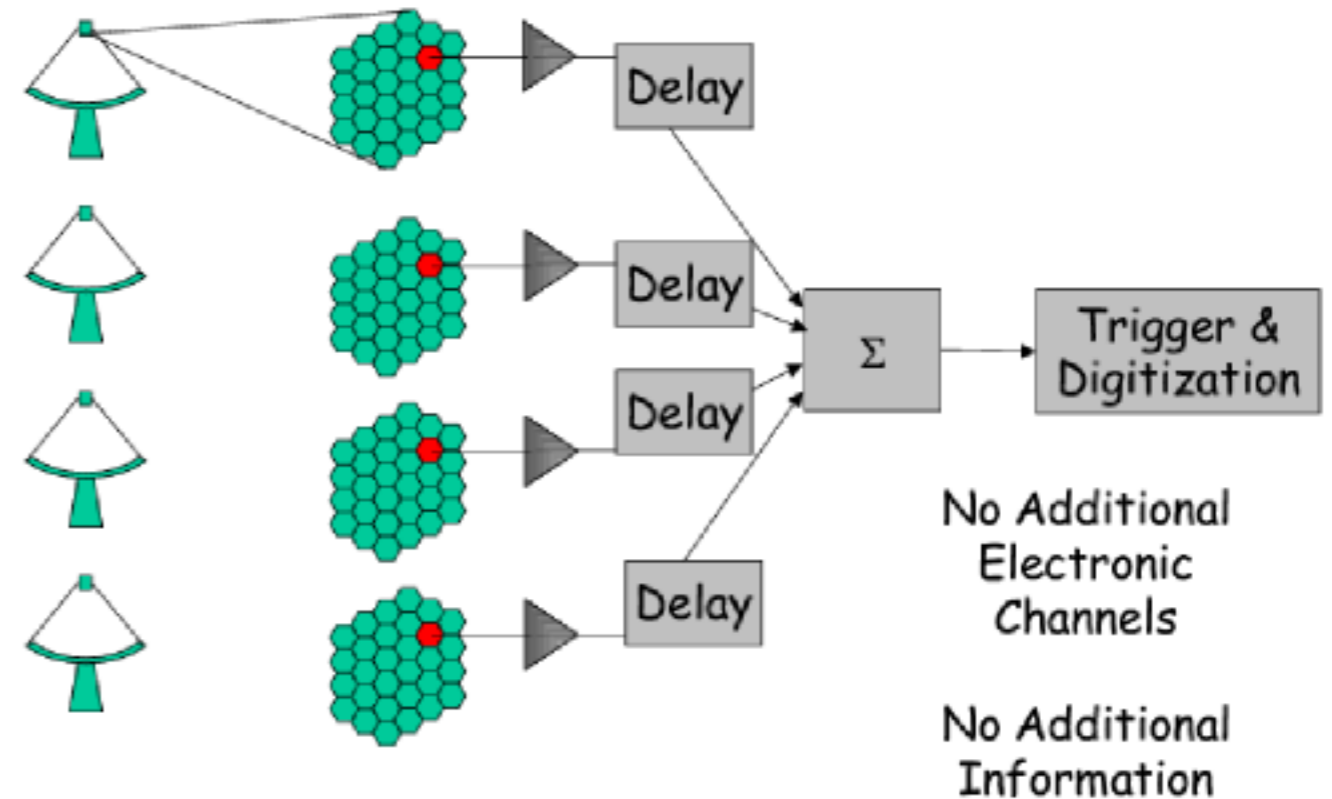
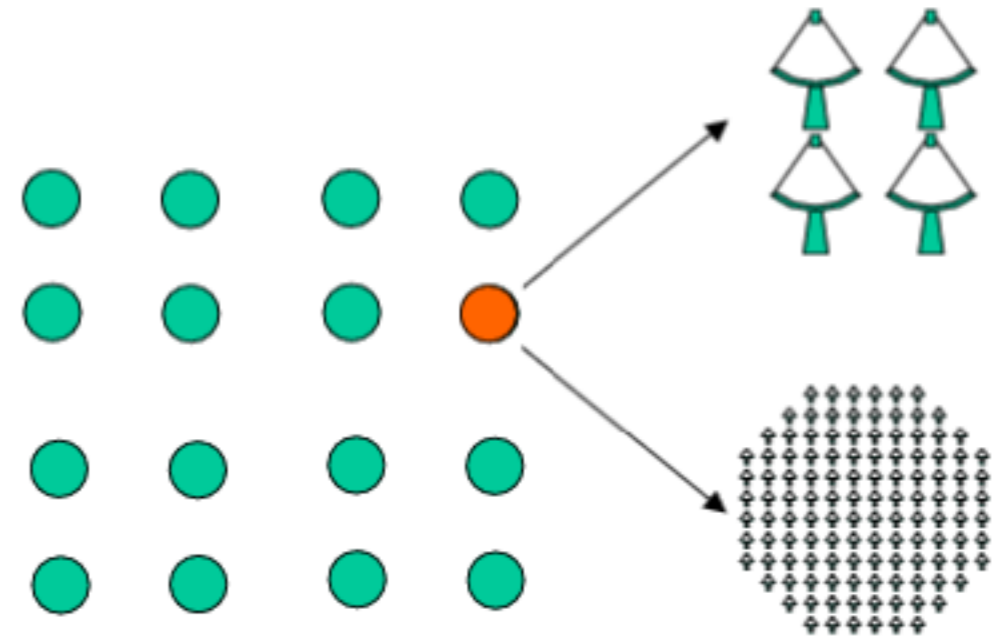
STAR (Washington U. グループ)

■ Small Telescope Arrays

■ 小口径望遠鏡を密に配置

- 信号の和 → 大口径
- High resolution camera → photon counting

■ 大口径相当を安く実現



まとめ

- 地上ガンマ線観測の将来計画を検討中
 - 大口径 / 高地観測
 - 大有効検出面積
 - 広視野
 - 高角分解能
- Imaging atmospheric Cherenkov technique には様々な応用の可能性
 - TeV ガンマ線天文学は breakthrough からまだ 15 年
- 実験の大型化は避けられない
 - 大規模な国際協力の模索