高エネルギーガンマ線で探る宇宙

2011年10月26日

茨城大学エイチバー祭

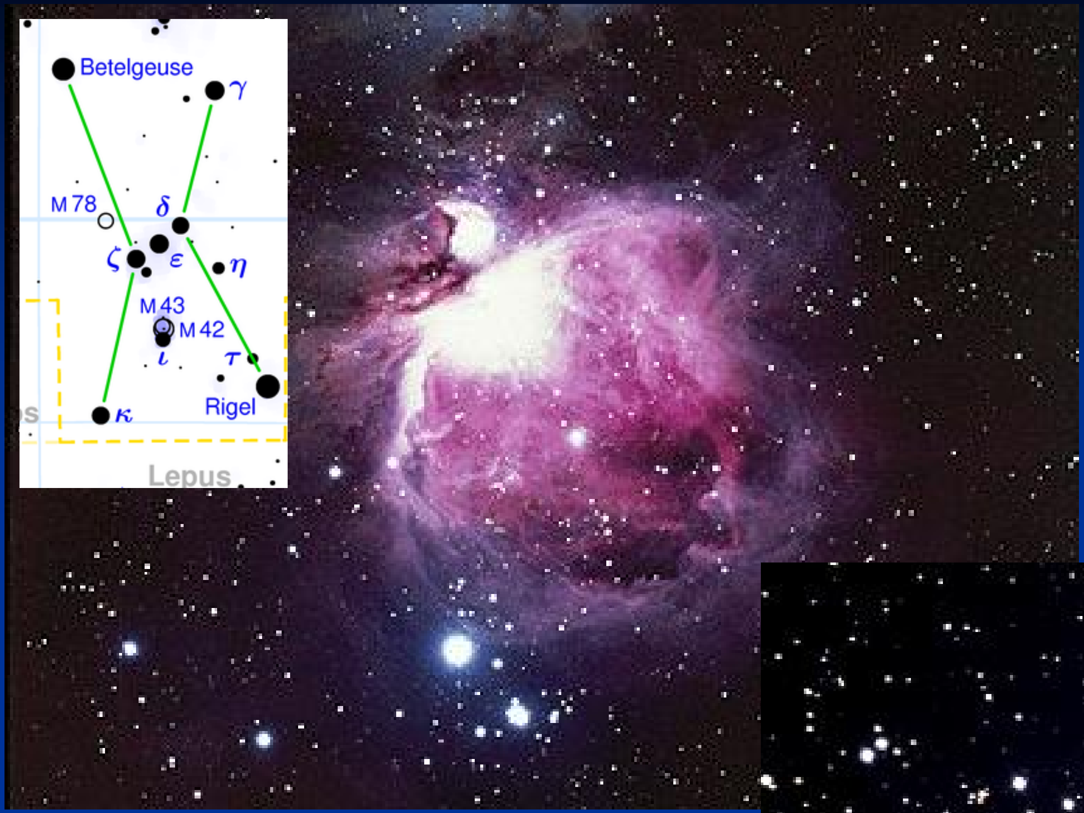
理学部/物理コース　片桐　秀明

内容

- 宇宙物理学と電磁波観測
- 高エネルギーガンマ線で分かること
- 高エネルギーガンマ線の観測手法
- フェルミ宇宙ガンマ線望遠鏡
- 次世代超高エネルギーガンマ線天文台**CTA**
- 茨城大学　高エネルギー宇宙物理グループ

宇宙物理学と電磁波観測

可視光で見た宇宙



M42　オリオン星雲
距離1500光年

M45 プレヤデス星団
（すばる）
距離400光年

～１００億光年先の銀河まで見通すことができるようになったが…
宇宙はとてつもなく広い
⇒ どうやって理解したら良いか

宇宙物理学とは？

宇宙は、どのように進化してきたか？

星や銀河は、どのようにしてできたか？

天体の構造・正体は？

宇宙を支配する法則は何か？

物理学の立場から、<u>客観的に研究</u>する

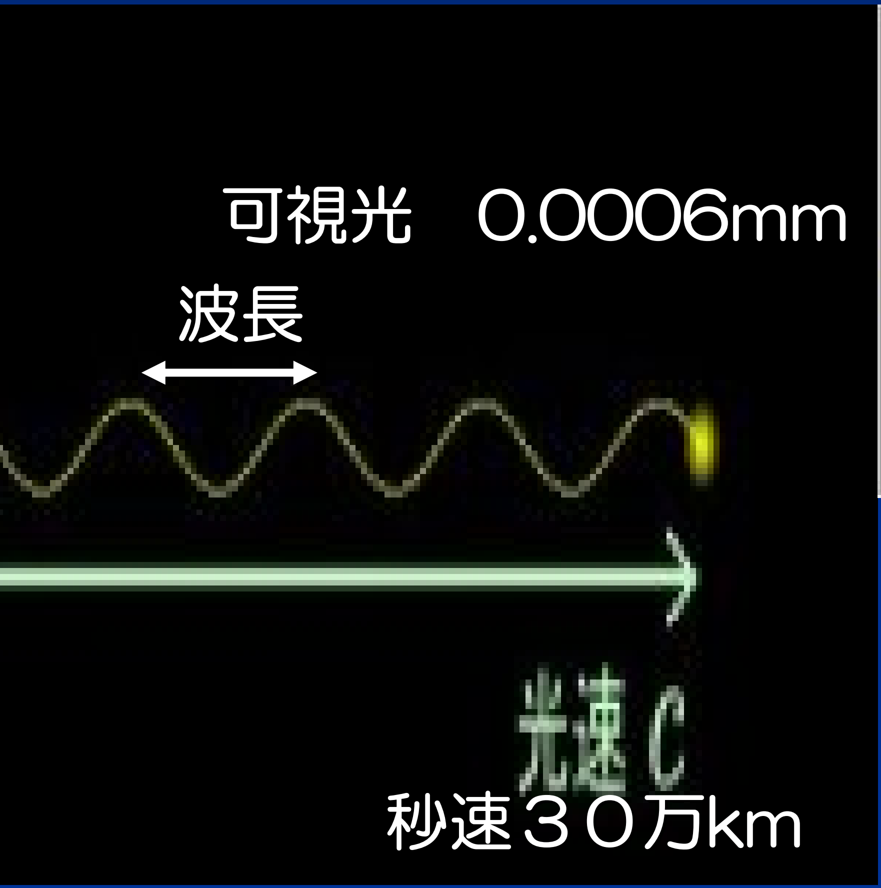
（地上で得られる）物理法則 ⇄ 宇宙観測

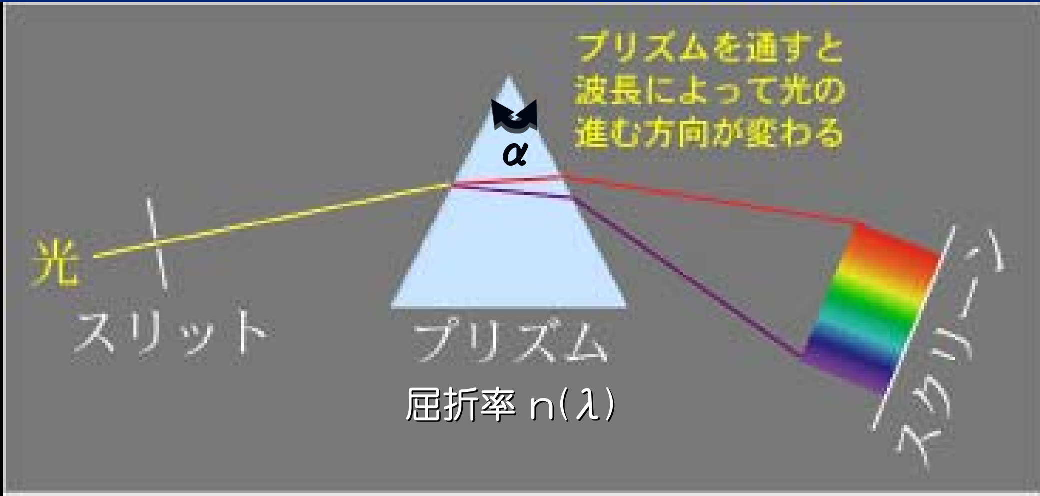
適用、確認 (→)

極限状態での検証 (←)

宇宙観測の手段～光（電磁波）

電磁波とは？　　電界（電場）と磁界（磁場）の横波





プリズムによる偏角　$\theta = (n(\lambda) - 1) \times \alpha$

色が違う

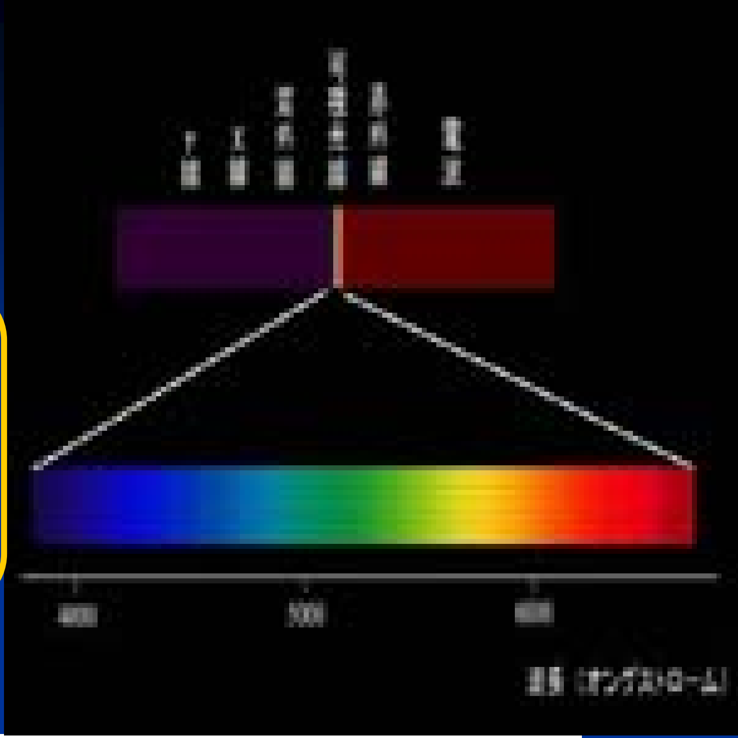
↓

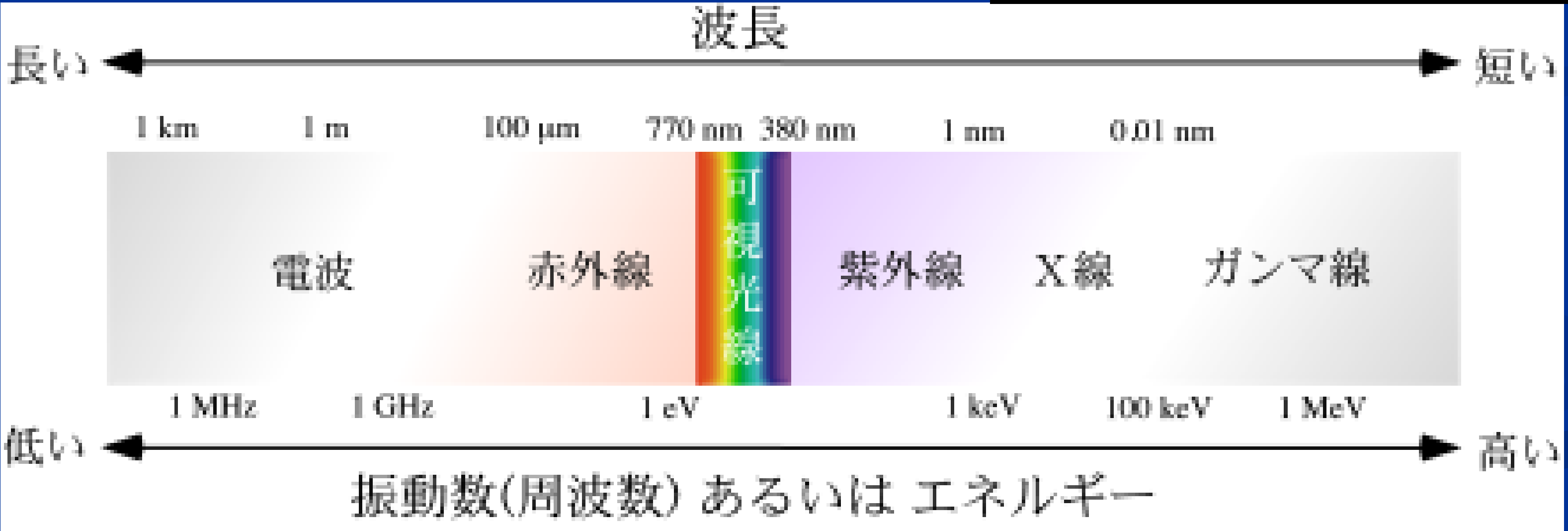
電磁波の波長が違う

いろいろな電磁波

電波
赤外線
可視光
紫外線
X線
ガンマ線

波長が全く違う
↓
人間に見えない色の光

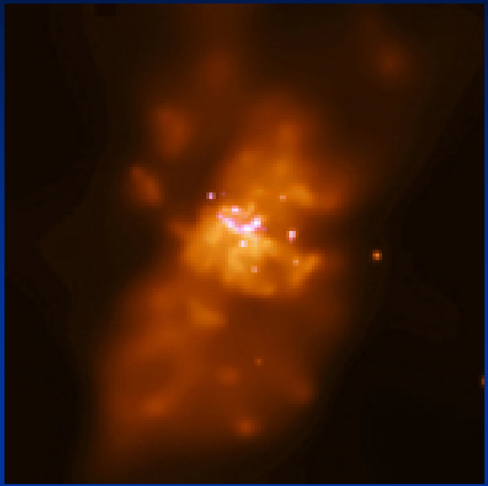




目に見える電磁波は、ほんの一部

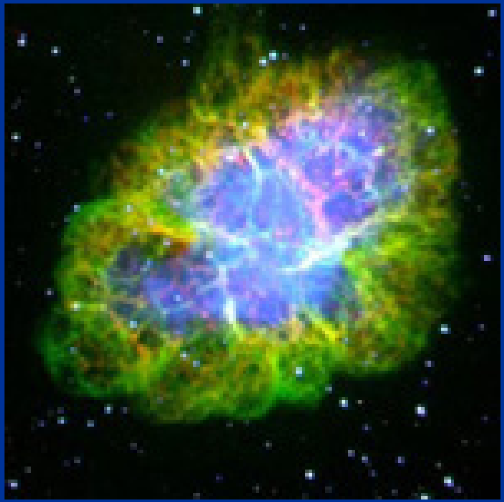
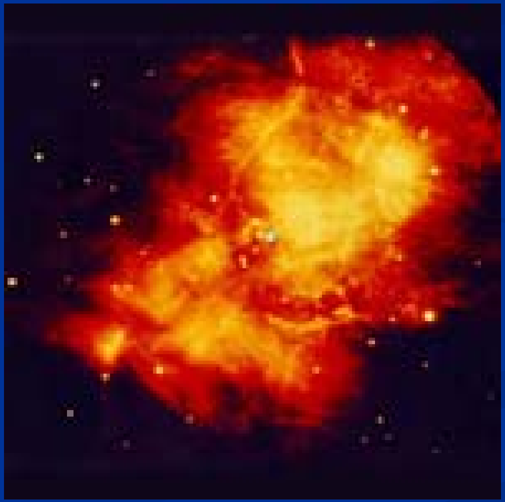
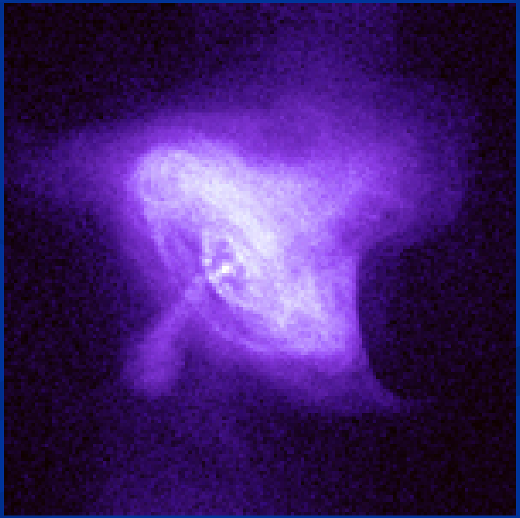
様々な電磁波で見た宇宙天体

銀河
（M８２）



可視光　赤外線　X線

かに星雲
（M１）

電磁波が教えてくれること

温度　　kT～hν=hc/λ（波長）

（原子１つあたりの運動エネルギー＝光子のエネルギー）

電波　　～1K(-270度）（宇宙空間）

赤外線　　数10～数100K （地球、人間）

可視光　　数千～数万度（恒星、太陽）

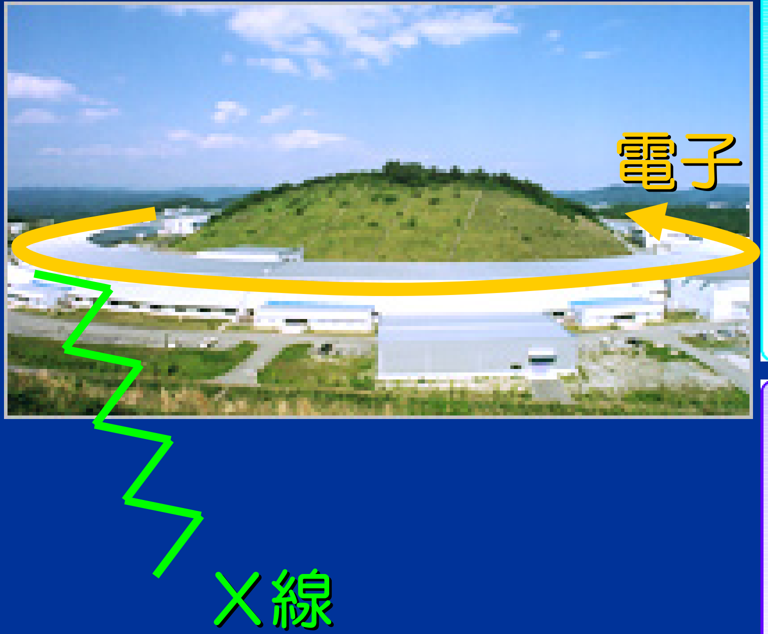
X線　　数百～数千万度（ブラックホール）

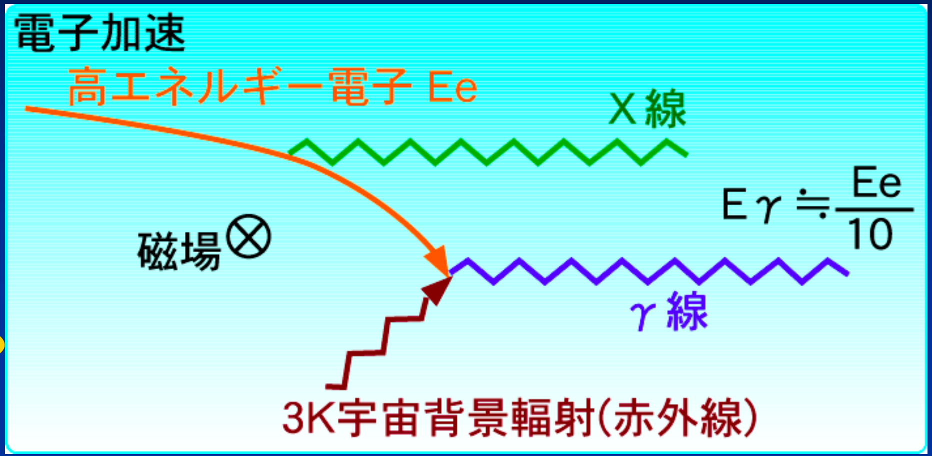
ガンマ線　　数100億度以上？？？

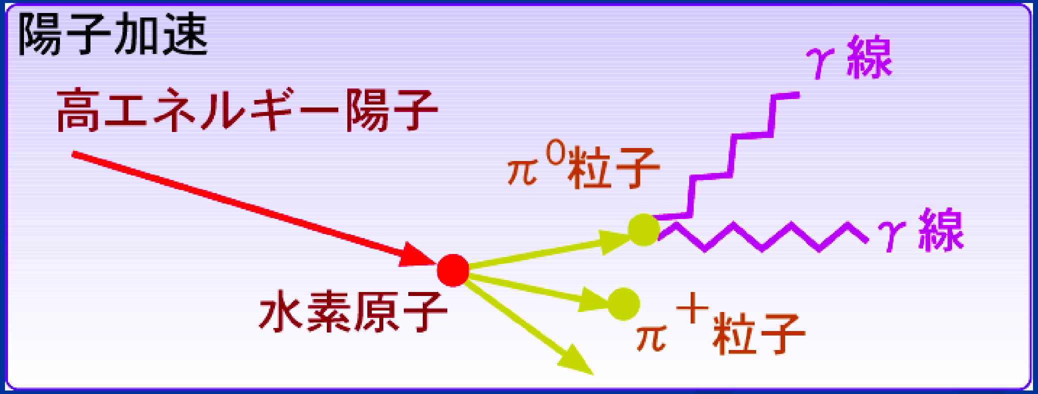
高エネルギーガンマ線で分かること

ガンマ線の発生メカニズム

放射光施設　Spring 8

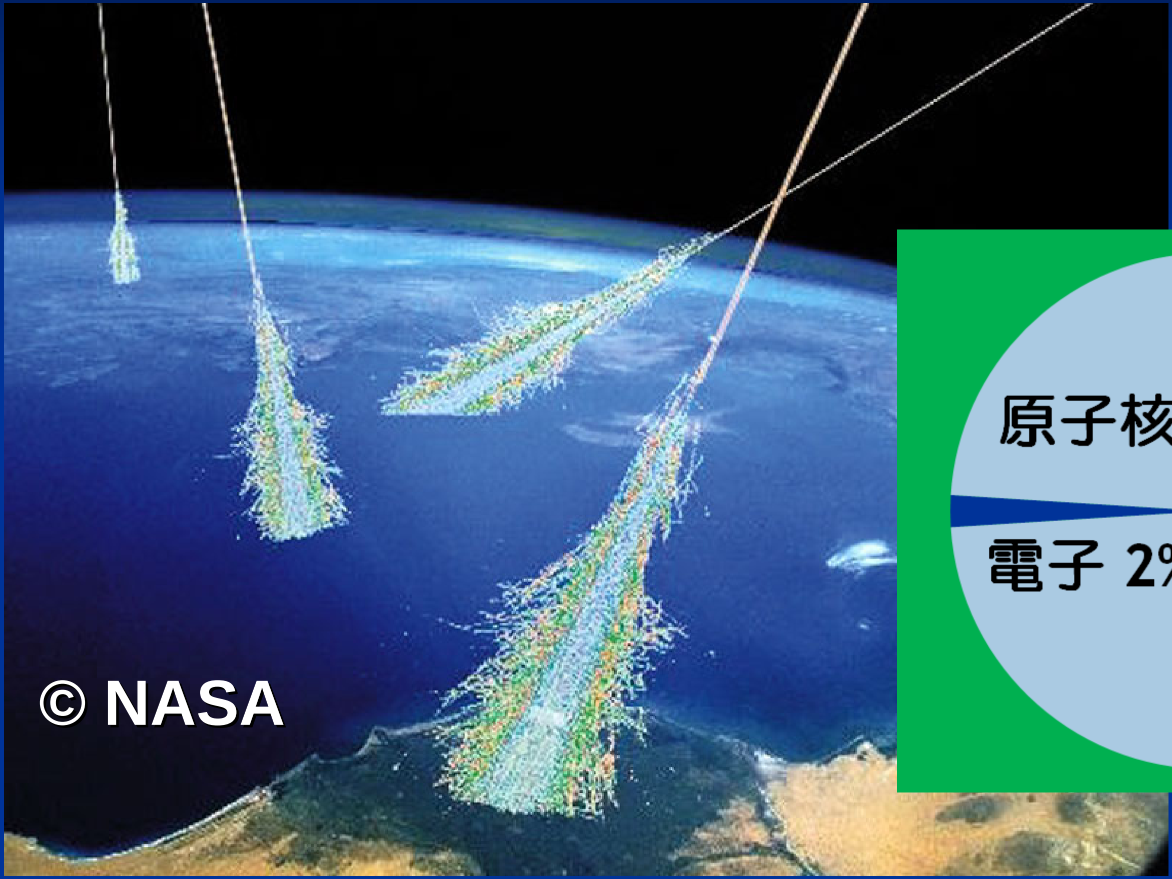


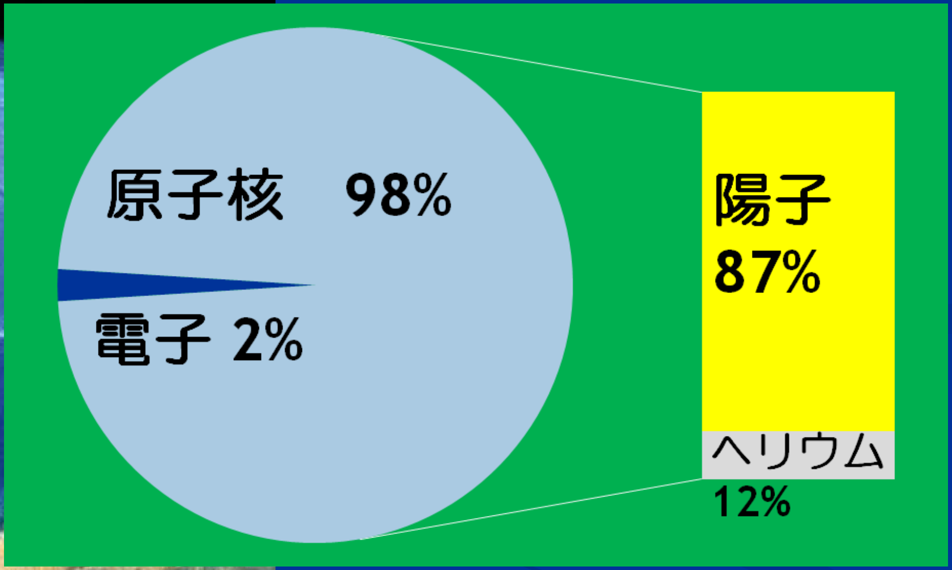




- ガンマ線は高エネルギー粒子（宇宙線）が存在することを示す直接的な証拠

宇宙線とは





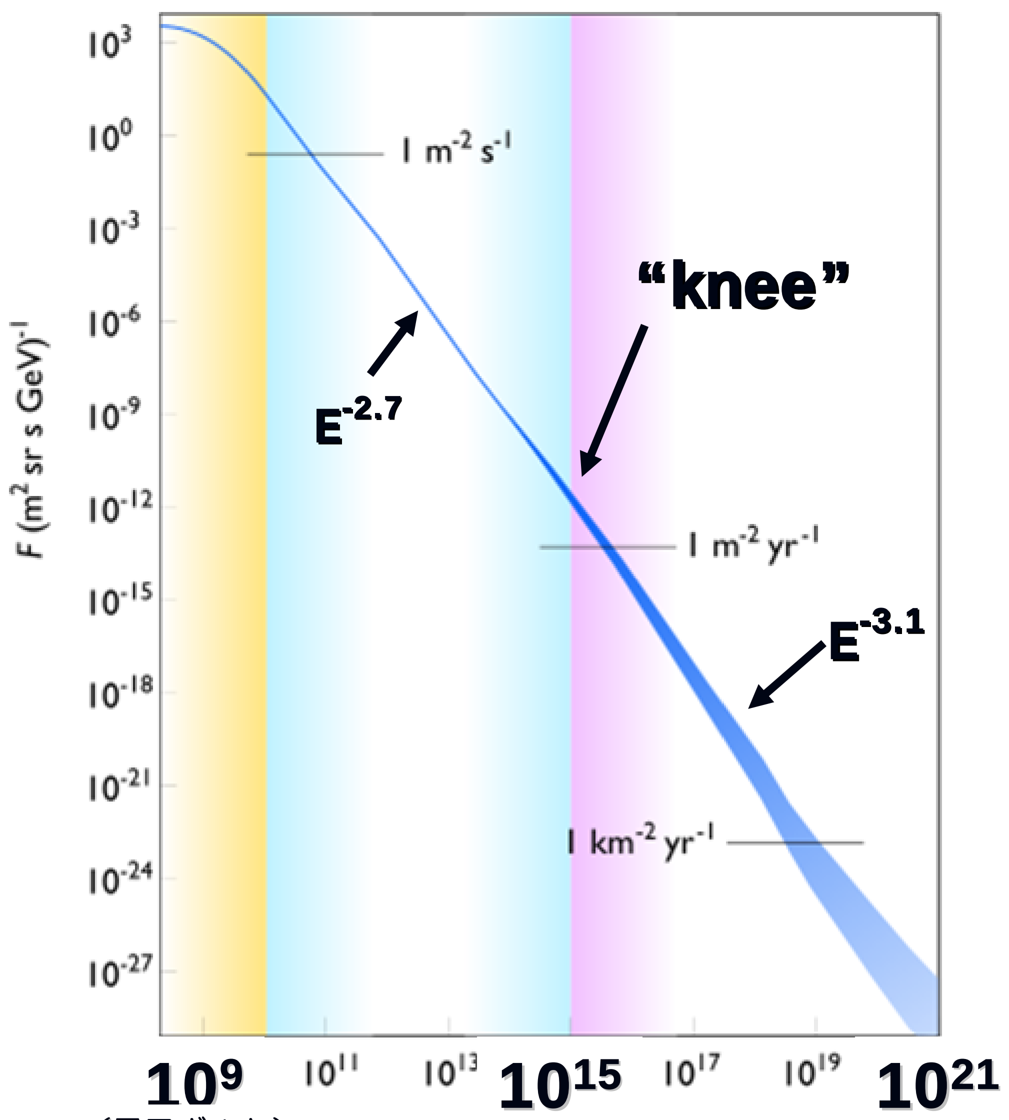
- 地球に降り注ぐ、高エネルギーの陽子、ヘリウムなどの原子核（＋電子）

宇宙線研究の意義

- 「宇宙線は天啓である」（有馬元文部大臣）
  - 有馬先生が、ニュートリノ観測のカミオカグループに送った言葉
  - 物質の根源のミクロの問題から宇宙のマクロの問題までの情報が詰まっている

スーパーカミオカンデ

光検出器（光電子増倍管）



エネルギー (eV)

© S. Lafebre

eV（電子ボルト）
＝　電子が、１Vの電位差で加速されたときに受け取るエネルギー
ミクロな粒子のエネルギーを示す単位

宇宙線の起源問題

- ベキ型～“非熱的”

↕

熱的 ～温度平衡状態（Maxwell-Boltzman分布）

- 超高エネルギー（～10^{20}eV >> 加速器）

⇓

超巨大で特殊な加速器が必要

どこでどのように
　加速されたか？
～なぜ我々の宇宙は粒子
　を加速しなければならないのか？

円形加速器

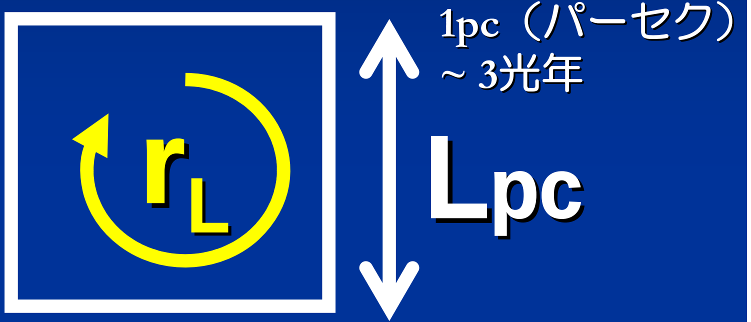
電場で加速するが、直線だと直ぐに外へ飛び出してしまう

- 磁場によって、粒子を閉じ込める必要あり

最大加速エネルギー

磁場中の回転半径

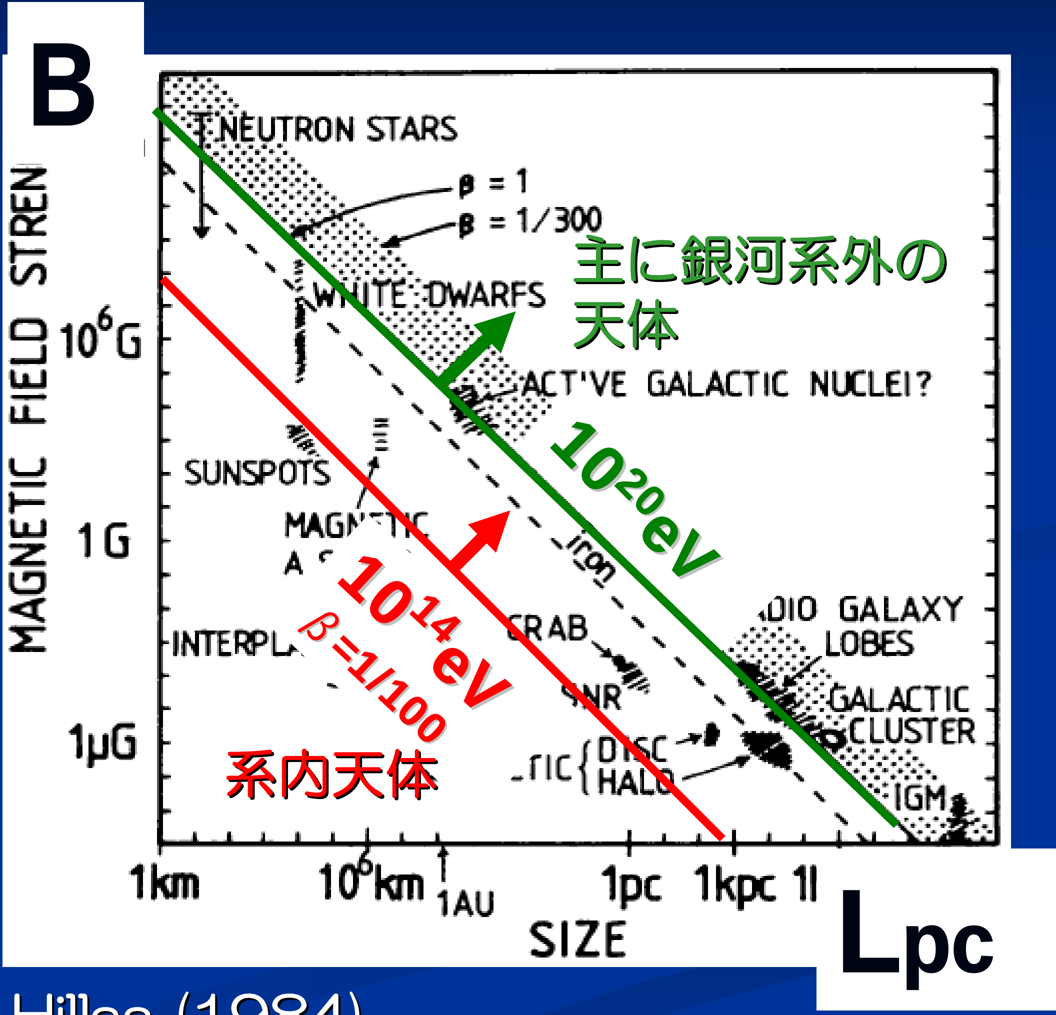
$$r_L = 1.08\, E_{15}/ZB_{\mu G}\ \mathrm{pc},$$



Lpc > rL

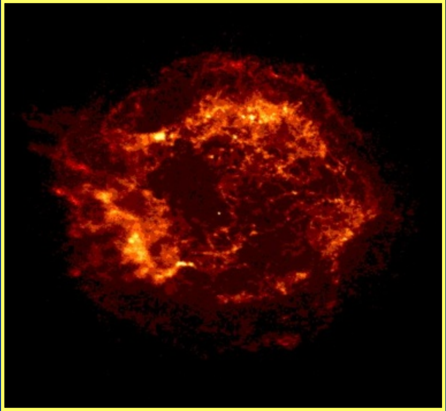
$$E_{max} \sim 10^{15} Z \left(\frac{u}{c}\right) B_{\mu G} L_{pc} (eV)$$

エネルギーに応じて、
対象となる天体が異なる

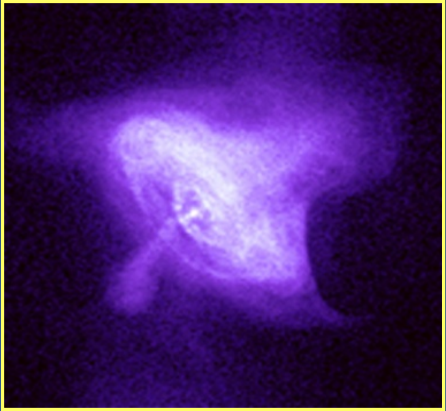


Hillas (1984)

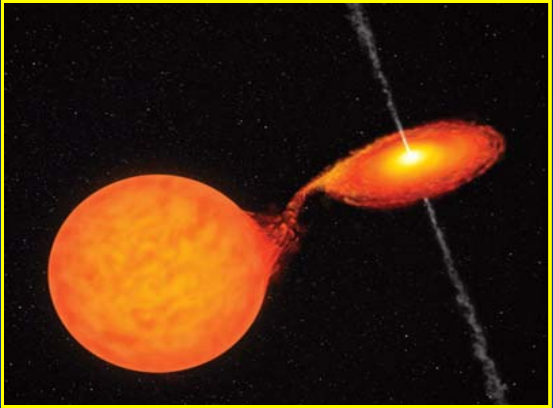
銀河系内・外の様々な宇宙線加速候補天体



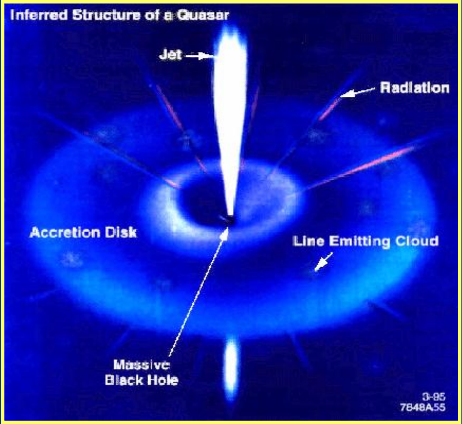
超新星残骸



パルサー、
パルサー星雲



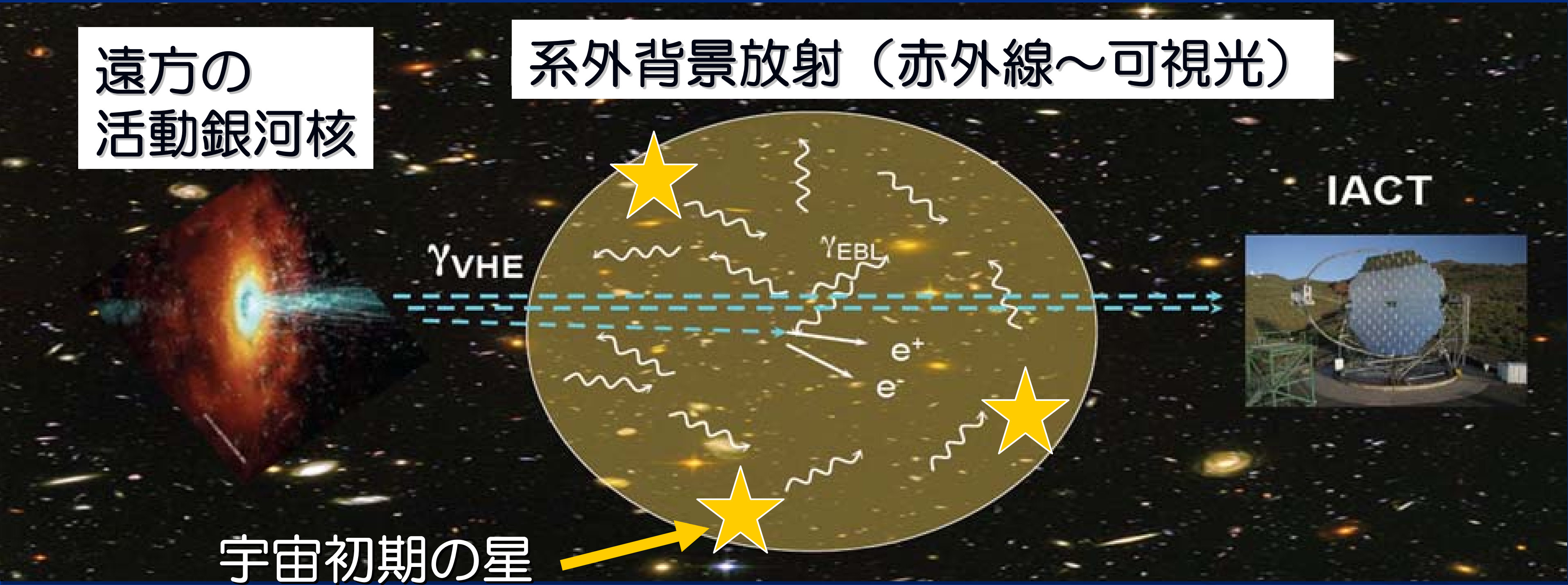
マイクロクエーサー、
X線連星



巨大ブラックホール
（活動銀河核）

ガンマ線バースト

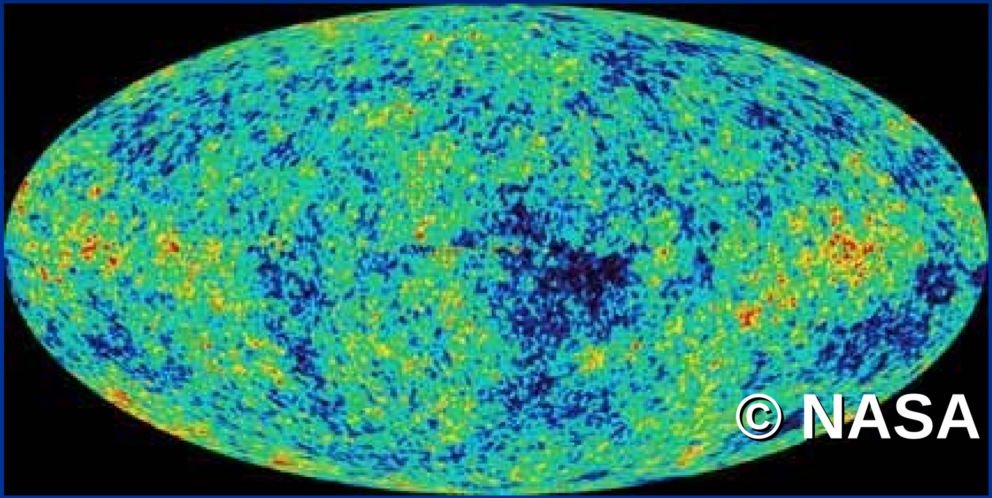
宇宙論（宇宙の星形成史）

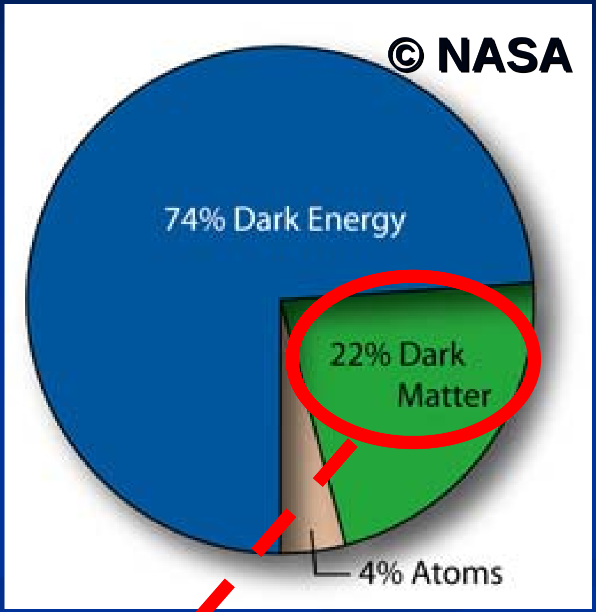


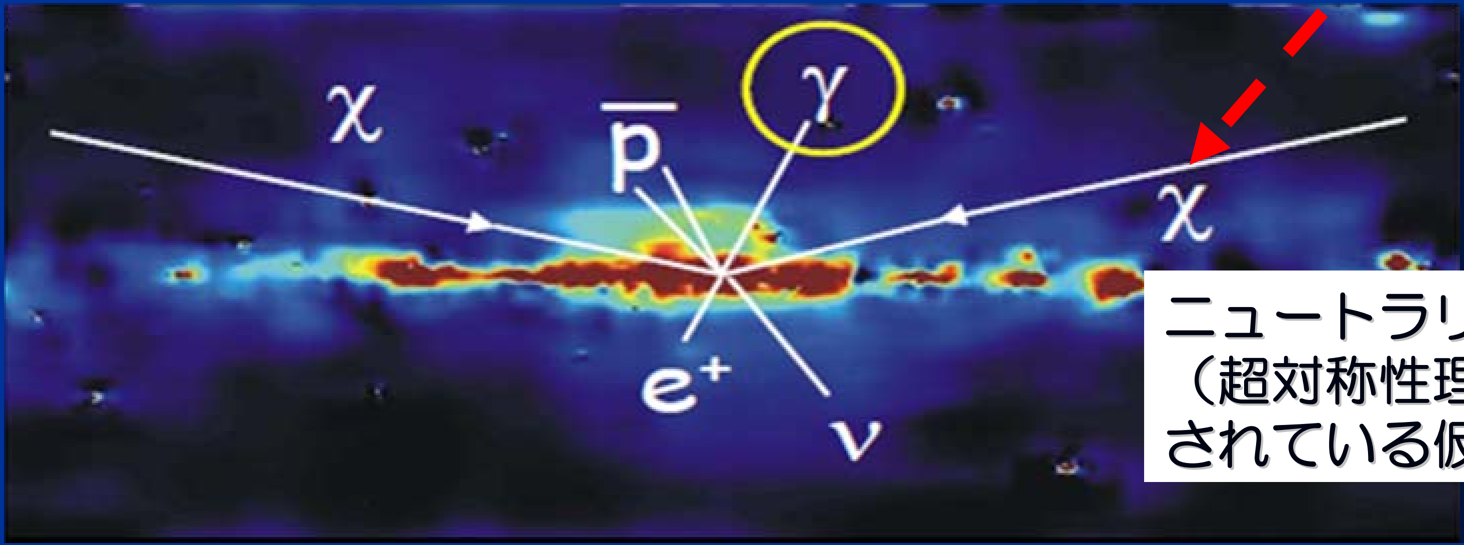
- ガンマ線の吸収の度合いにより、伝播途中の放射場を測定

暗黒物質の探査

WMAP衛星の観測した
宇宙マイクロ波背景放射





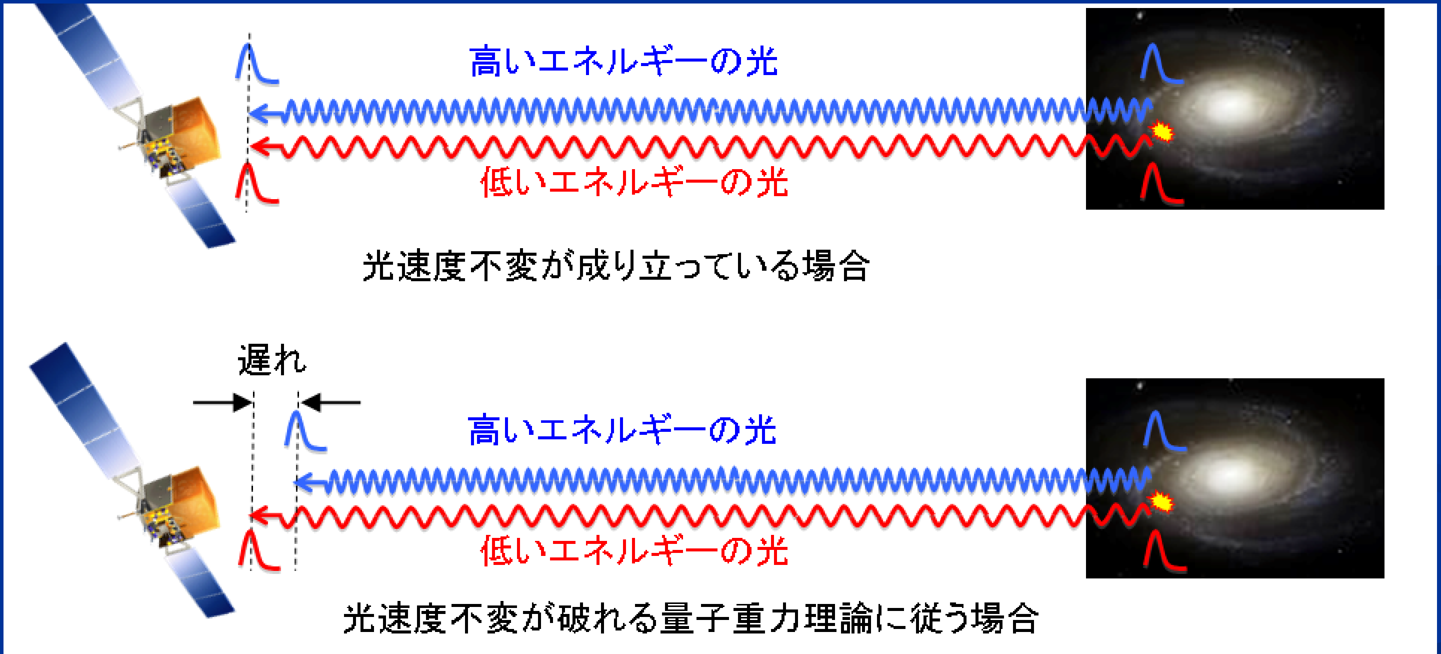


ニュートラリーノ？
（超対称性理論で予言されている仮想粒子）

相対論の検証

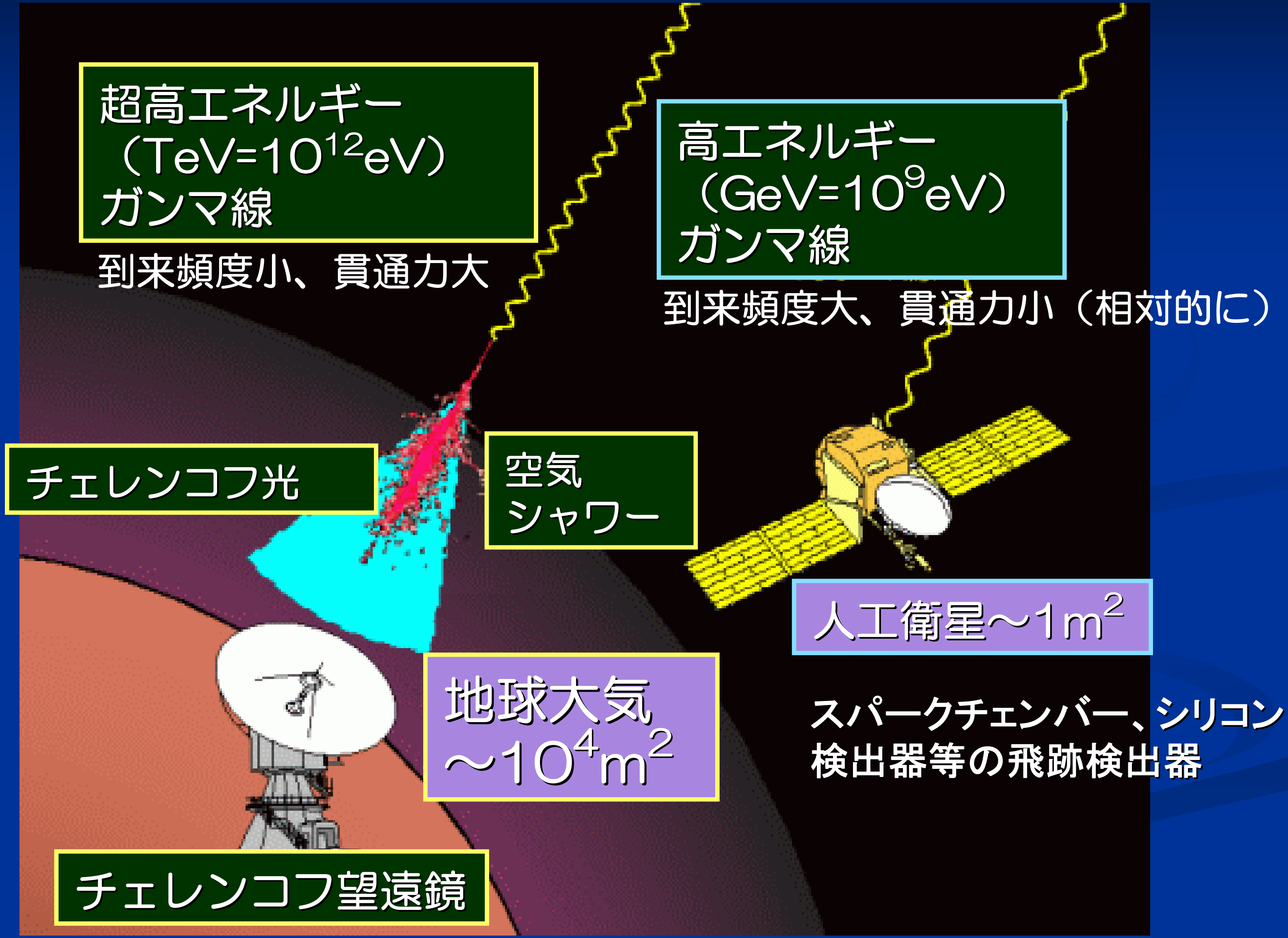
- 量子重力理論では、
  電磁波はエネルギーに比例して、伝搬速度が遅くなることを予言

$$v = \frac{\partial E}{\partial p} \approx c\left(1 - \xi \frac{E}{E_{QG}}\right)$$



- 宇宙論的距離 & 高エネルギーの電磁波では、測定可能な時間差になりうる　=> 遠方のガンマ線バースト、活動銀河核のガンマ線観測

高エネルギーガンマ線の観測手法



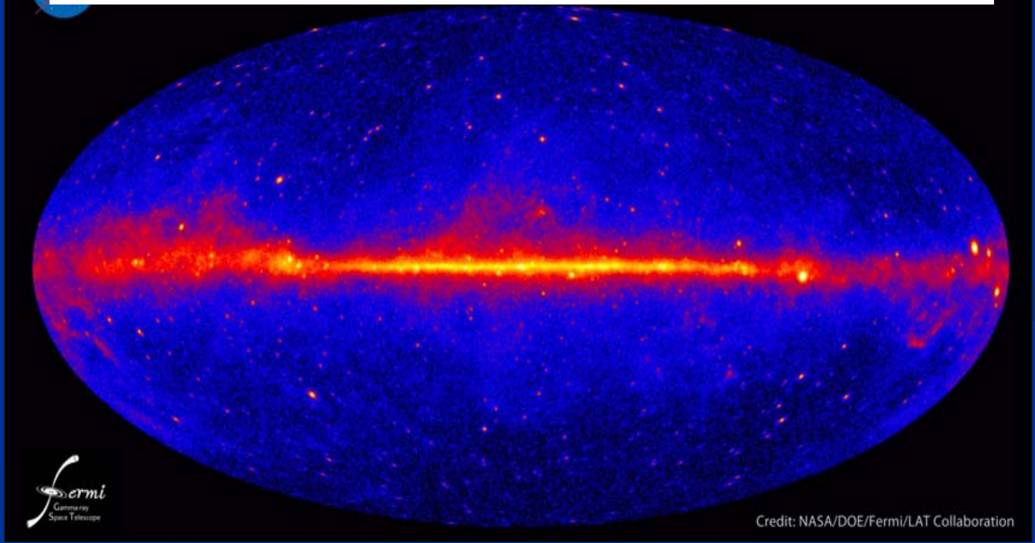
フェルミ宇宙ガンマ線望遠鏡

- 最新の高エネルギーガンマ線観測衛星
- 日米欧の国際共同実験

アメリカ・フロリダ州
ケープカナベラル基地

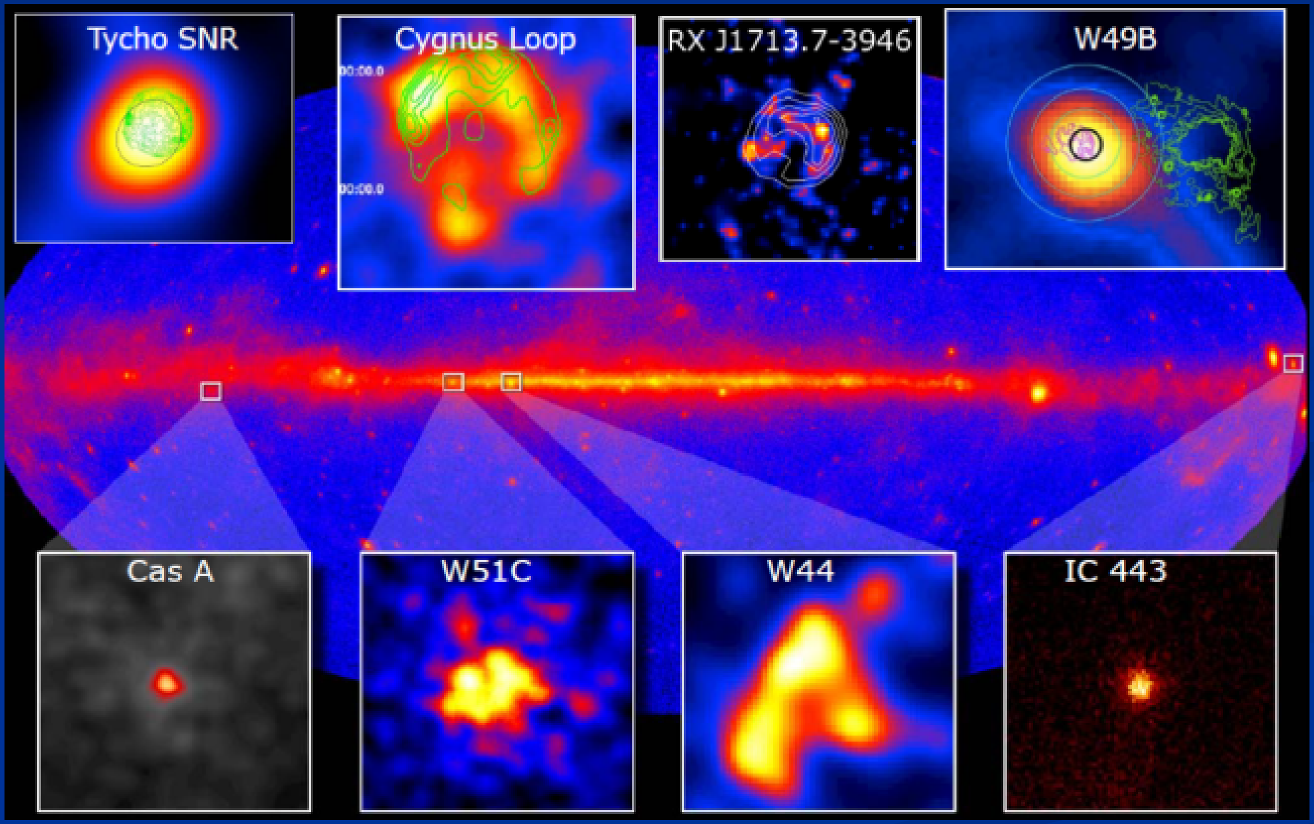
約3年間の
全天サーベイ中

2年間のデータによるガンマ線全天マップ



超新星残骸

- 銀河系内宇宙線（<10^{14}eV）起源の最有力候補

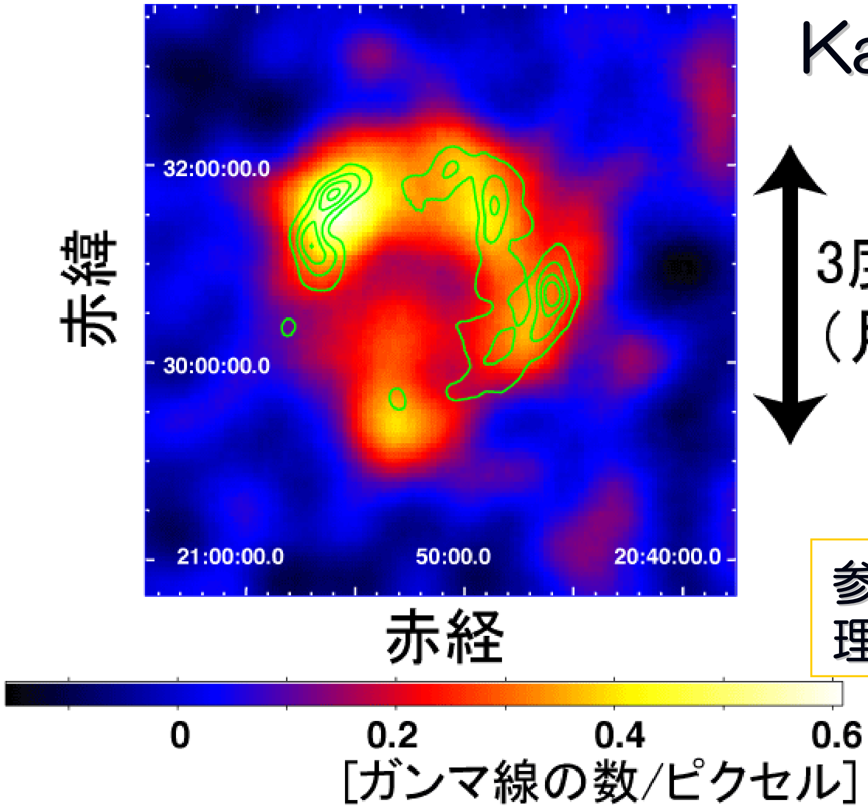


- 宇宙線加速源として、確証が得られつつある。

巨大な超新星残骸

「はくちょう座」ループ・超新星残骸のガンマ線撮像イメージ

Katagiri et al. (2011)



3度
（月の約6倍）

緑の等高線：
超新星爆発の衝撃波がガス中を通過する際に放射される光（Hα輝線）

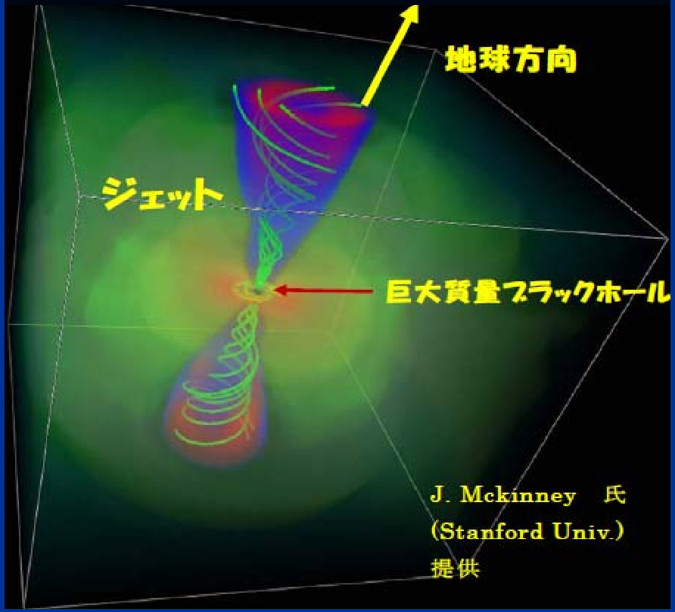
参照：茨城大学理学部ホームページ
理学部ページ＞理学部案内＞研究トピックス

- ガンマ線は、衝撃波の形状に対応
- フェルミ衛星により高エネルギーガンマ線の撮像が可能になってきた

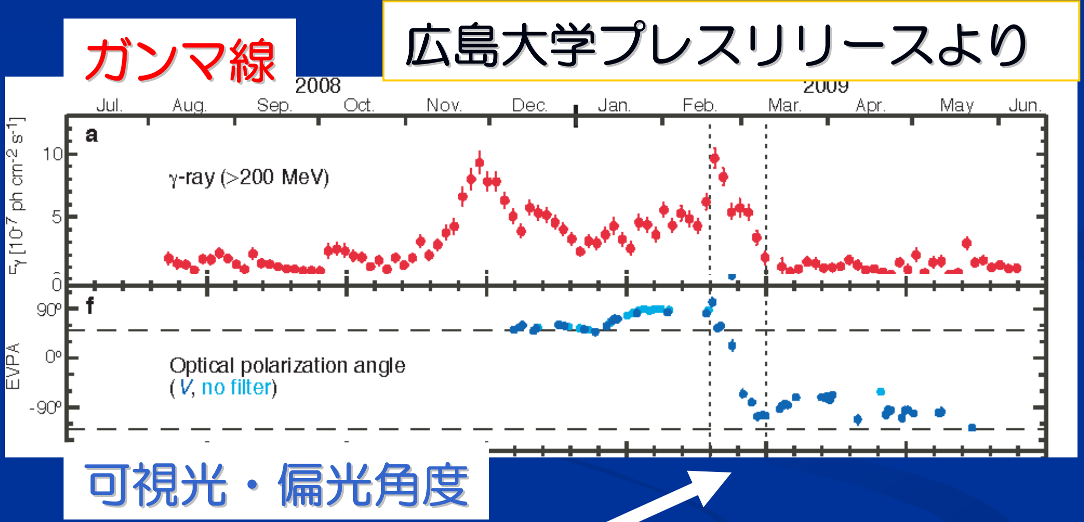
超巨大ブラックホールから噴き出るジェットの構造

- 超巨大ブラックホール（活動銀河核）　最高エネルギー宇宙線の候補
- 宇宙ジェット　光速に近い速度のプラズマ流

活動銀河核の
宇宙ジェットシミュレーション



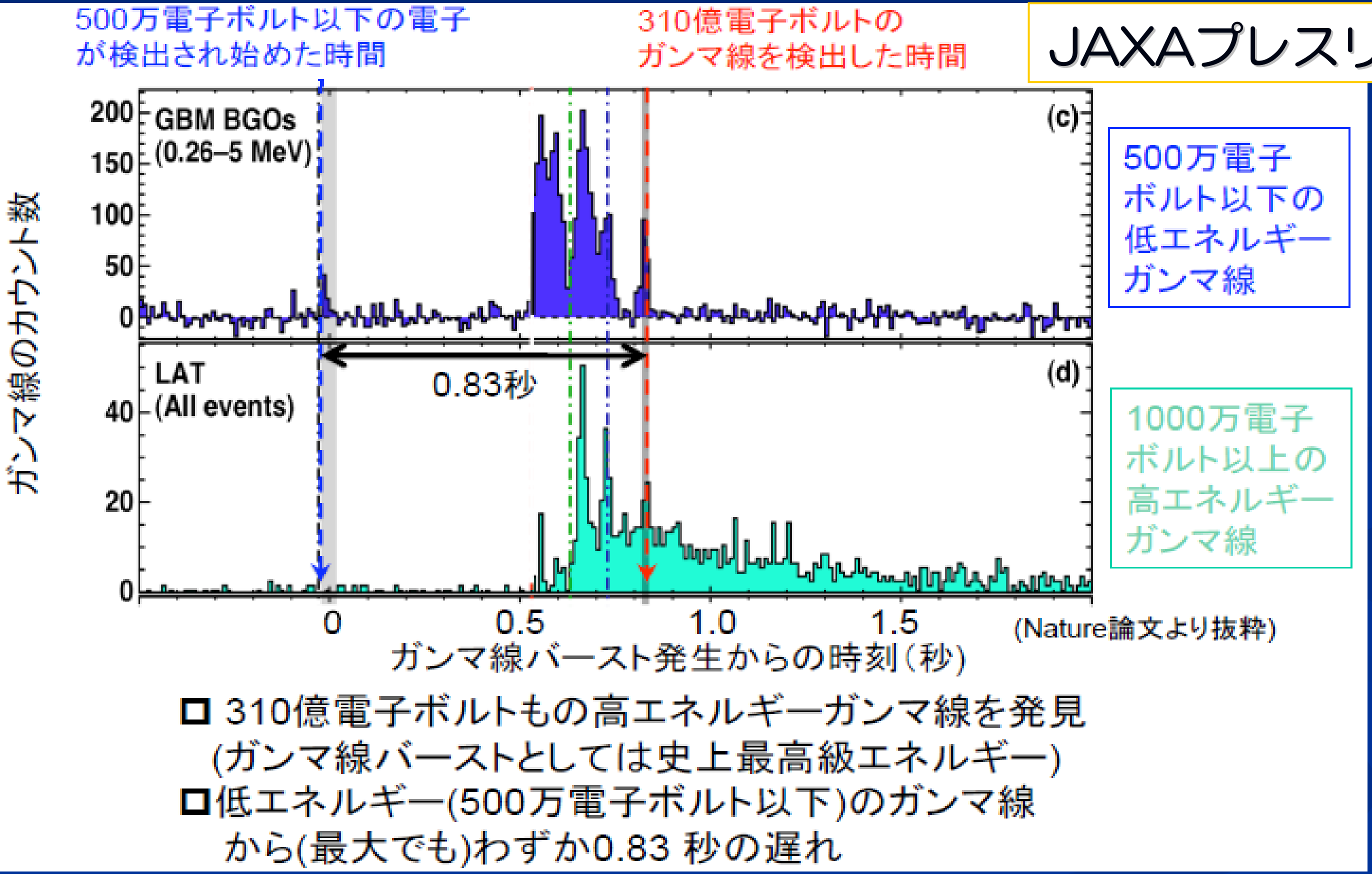
活動銀河核3C279の電磁波の時間変動



- 偏光方向の回転が、ガンマ線の増光と対応
  => 　磁場を伴った宇宙ジェットが緩やかに連続的に曲がっている

ガンマ線バーストからの最高エネルギーのガンマ線を発見

JAXAプレスリリースより



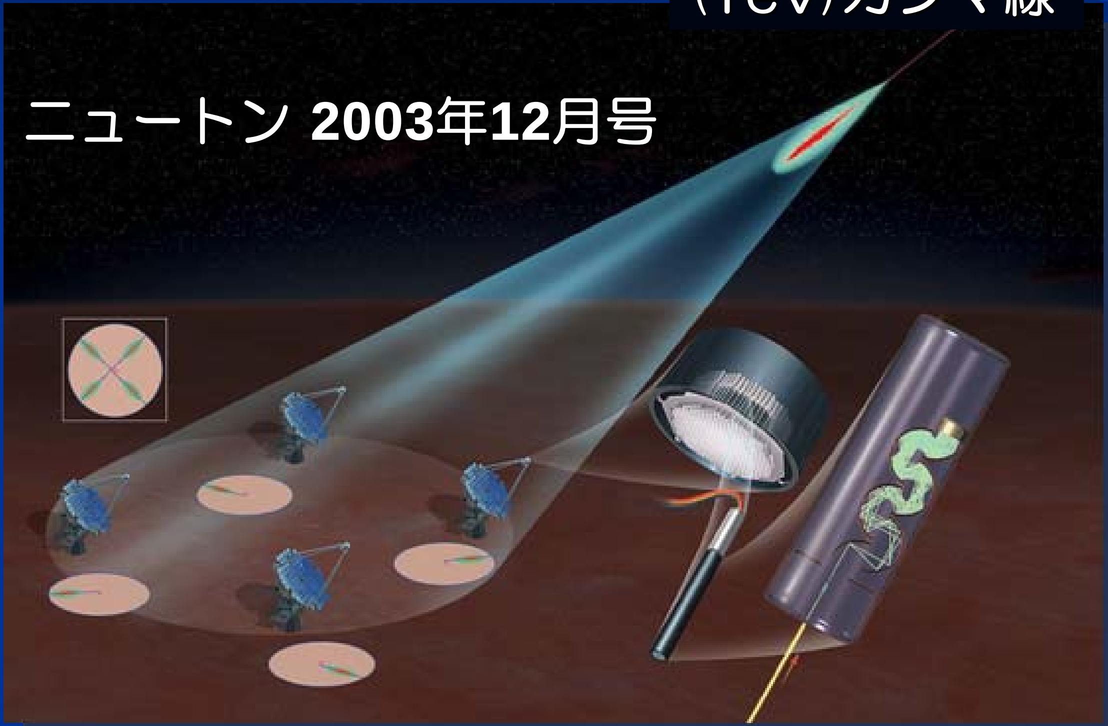
- 光速度不変の原理を過去最高の精度で検証
- 量子重力理論の枠組みに強い制限

次世代
超高エネルギーガンマ線天文台
CTA

ステレオ型チェレンコフ望遠鏡

検出原理

超高エネルギー
(TeV)ガンマ線



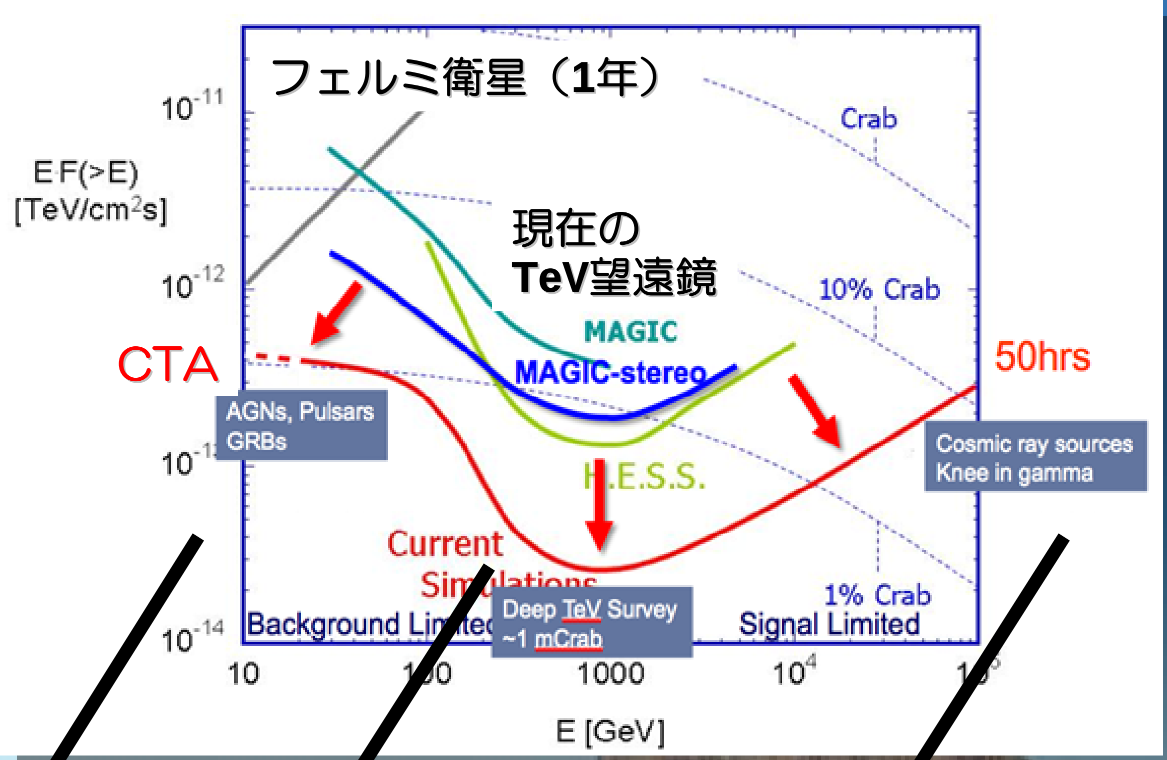
ニュートン 2003年12月号

CANGAROO-III（10m x 4台）
@ オーストラリア（実験終了）

日経サイエンス
2001年7月

- TeVガンマ線の空気シャワーを多角的に捉える
- 現在、H.E.S.S., MAGIC, VERITASが稼働中

CTA



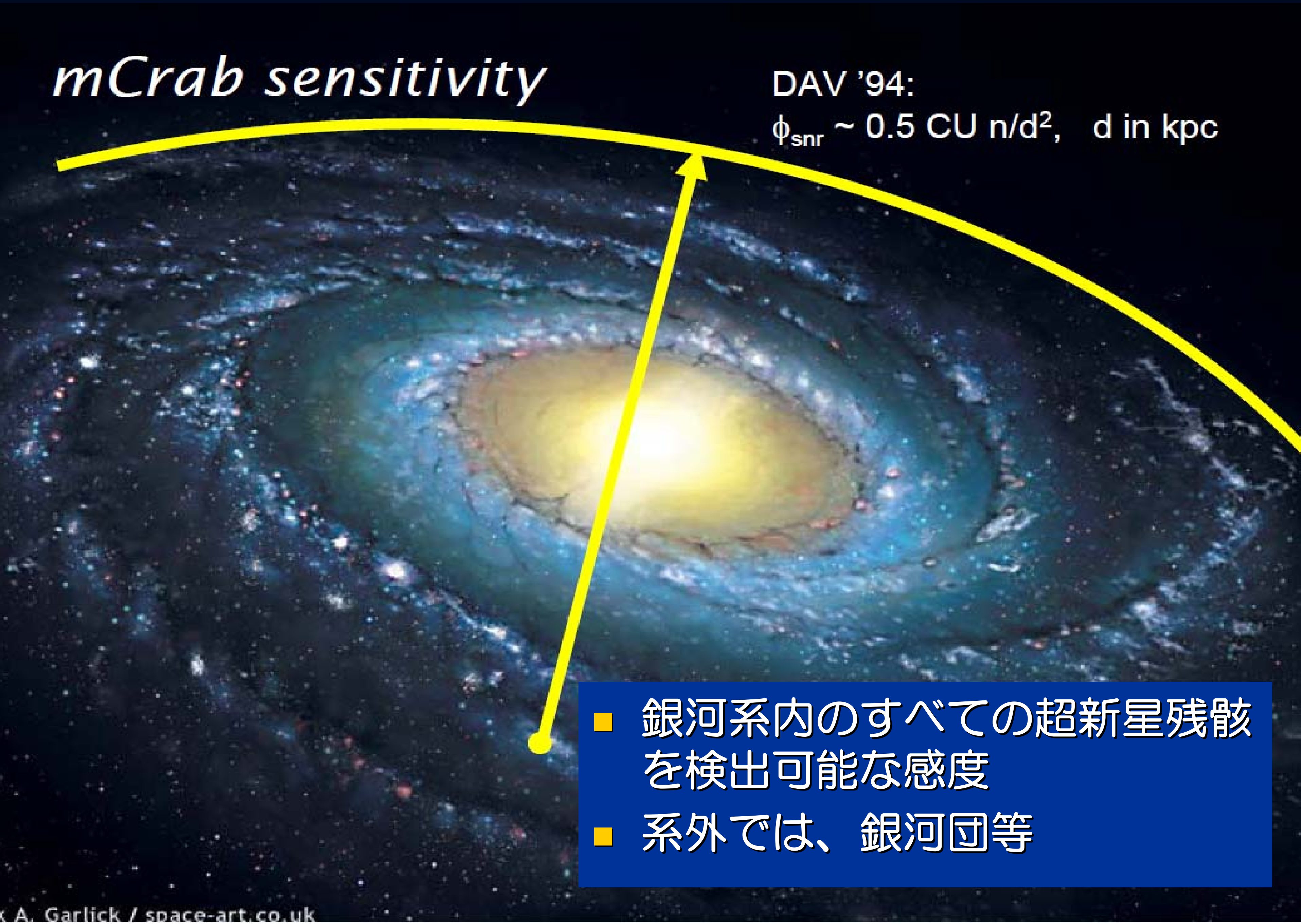
- 現在のTeVの感度を１桁向上　　=>　> 1000個のTeVガンマ線源
- 観測可能なエネルギーの拡大　10GeV~100TeV

高エネルギーガンマ線天文学を飛躍的に発展させることが目標の
日米欧・国際協力実験（～1GeV付近はフェルミ衛星が必要）

mCrab sensitivity

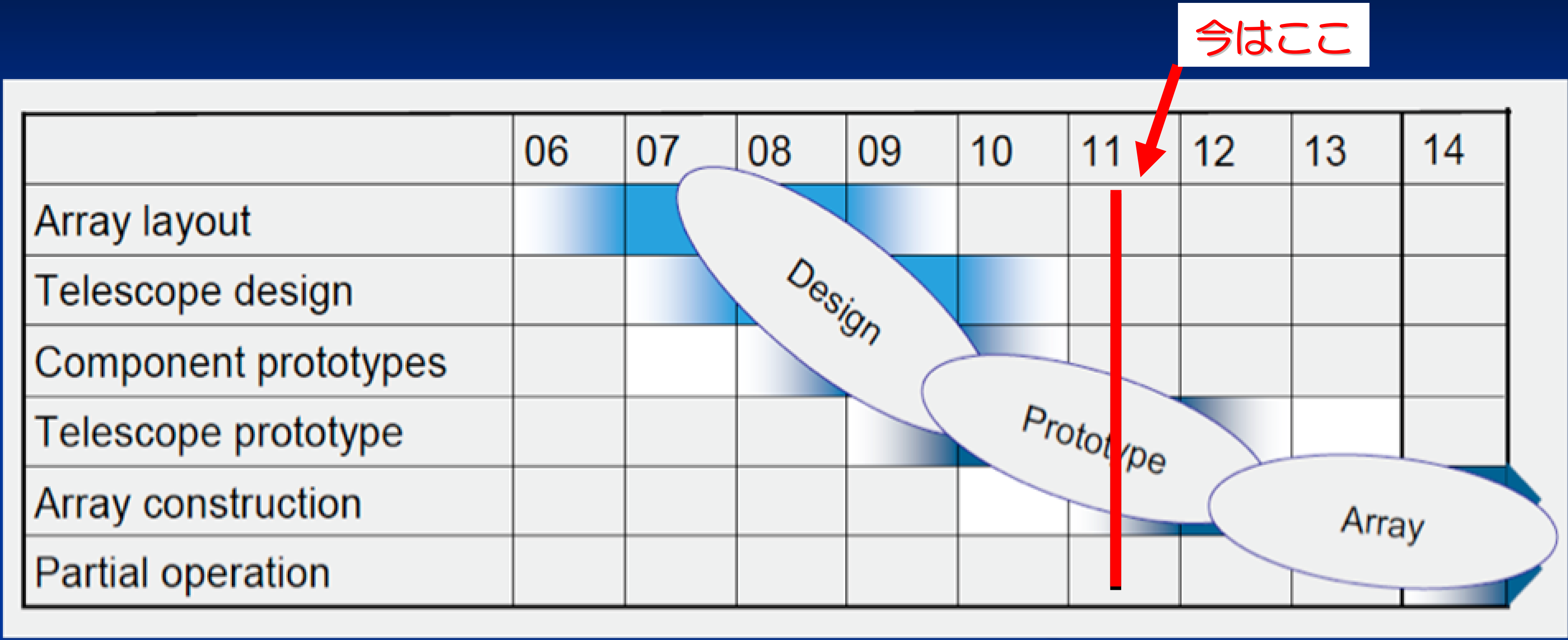
DAV '94:

$\phi_{snr} \sim 0.5$ CU n/d^2,   d in kpc



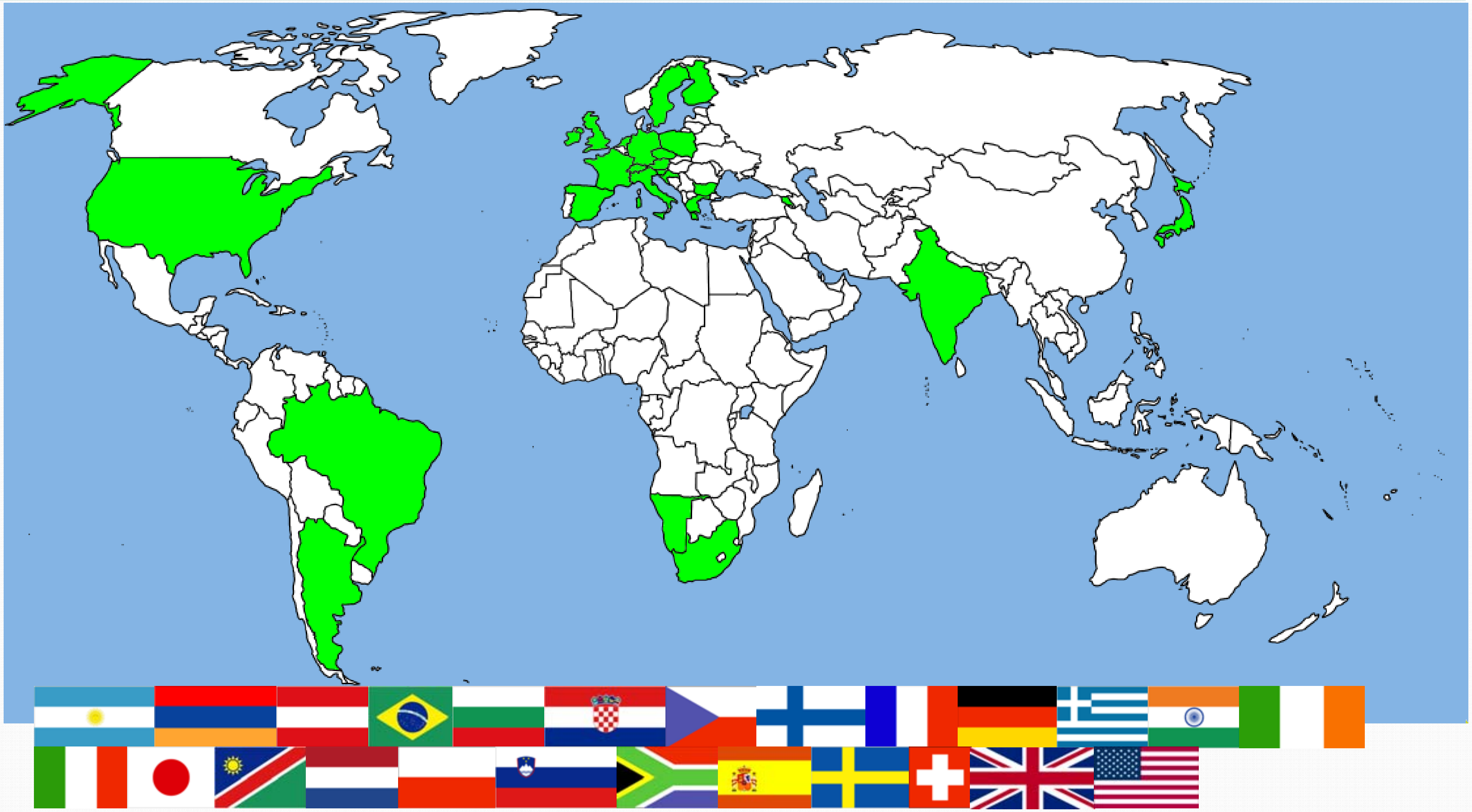
- 銀河系内のすべての超新星残骸を検出可能な感度
- 系外では、銀河団等

タイムスケジュール



- 現在、プロトタイプ望遠鏡の設計、開発に奮闘中
- 2015年頃から建設開始、2020年頃フル観測スタート、2040年まで運用予定
- 今、開発しているものが実際の望遠鏡に搭載されるかも！？

CTA world map



- 25 Countries
- 132 Institutes
- >830 Members (220 FTEs)

研究総時間に占める割合をかける

CTA-Japan (2009年11月MoU締結)

- 30 Institutes
- 75 Members (15 FTEs) CTA全体の1割

望遠鏡開発・サイエンス検討で貢献

CTA-Japanメンバー

計75名(うち学生17名)30研究グループ

青学大理工　馬場彩、榊直人、柴田徹、山岡和貴、山崎了、吉田篤正
茨城大理　片桐秀明、梅原克典、加賀谷美佳、黒田和典、佐々木美佳、柳田昭平、吉田龍生

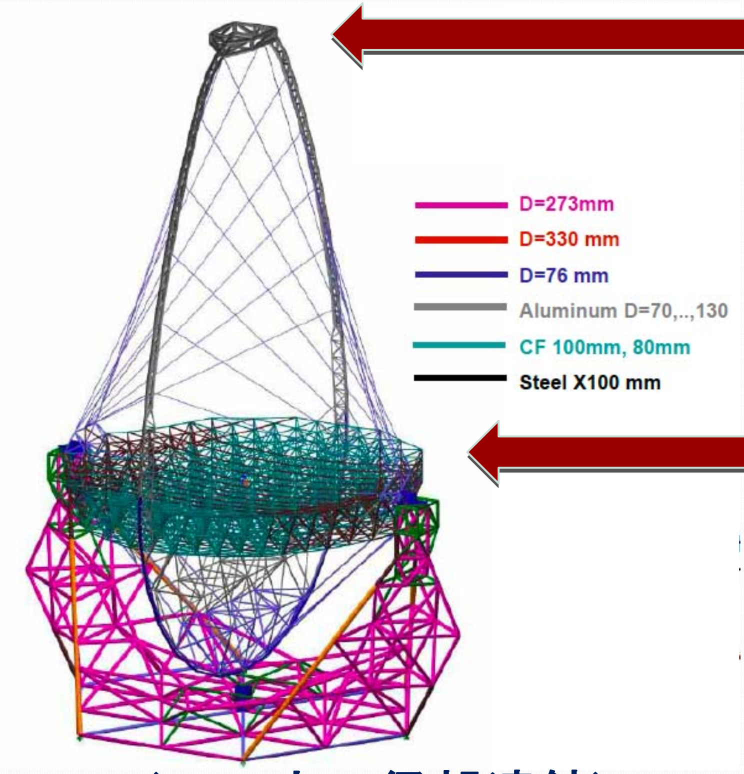
宇宙研　奥村曉
阪大理　藤田裕、當真賢二
北里大医療衛生　村石浩
京大基研　長滝重博
京大宇物　戸谷友則、井上芳幸、林田将明
京大物理　窪秀利、青野正裕、粟根悠介、今野裕介、谷森達
近畿大理　千川道幸、周小渓
熊本大理　高橋慶太郎
KEK素核研　井岡邦仁、大平豊、川中宣太、郡和範、田中真伸
甲南大理工　山本常夏
埼玉大理　寺田幸功、小山志勇
東海大医　株木重人
東海大理　西嶋恭司、櫛田淳子、小谷一仁
東大宇宙線研　手嶋政廣(Max-Planck-Inst. fuer Phys.)、井上進、榎本良治、大石理子、大岡秀行、木舟正、吉越貴紀

東大理　中山和則
東工大理　浅野勝晃
東理大理工　千葉順成
徳島大総科　折戸玲子、菅原隆希
名大KMI　松本浩典
名大理　福井康雄、奥田武志、鳥居和史、早川貴敬、山本宏昭
名大STE研　田島宏康、渋谷明伸、日高直哉
広大理　水野恒史、深沢泰司、米谷光生、格和純
広大宇セ　高橋弘充
宮崎大工　森浩二
山形大理　郡司修一、門叶冬樹、萩原亮太
山梨学大　内藤統也、原敏
早大理工　中森健之
オハイオ州大　村瀬孔大

ガンマ線、X線、超高エネルギー宇宙線、電波、理論

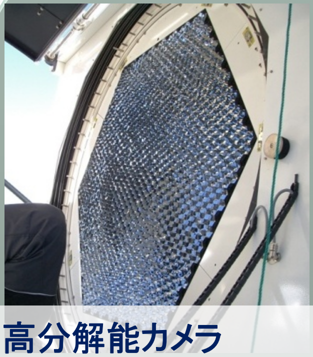
CTA-Japanによる大口径望遠鏡プロトタイピング

✓日本は主にCTA-LST大口径望遠鏡に貢献
✓最終的には全体の20% の貢献をめざす
- 大口径望遠鏡カメラ
- 超高速データ読み出し回路
- 高精度分割鏡
- Dual Mirror 望遠鏡読み出し回路
- ソフト：物理、シミュレーション、データ解析



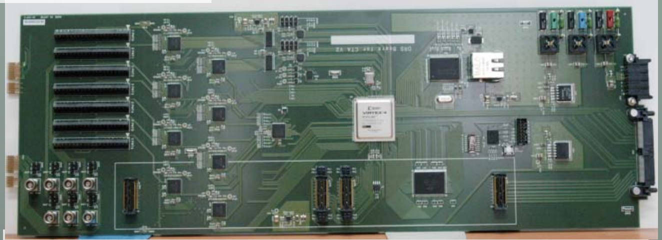
CTA LST(23m 大口径望遠鏡)

日本グループによる技術開発・技術貢献



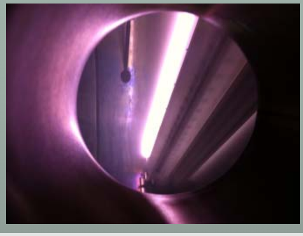
高分解能カメラ
(MAGIC)

PMT、高圧、アンプ、スロー制御、読み出し回路



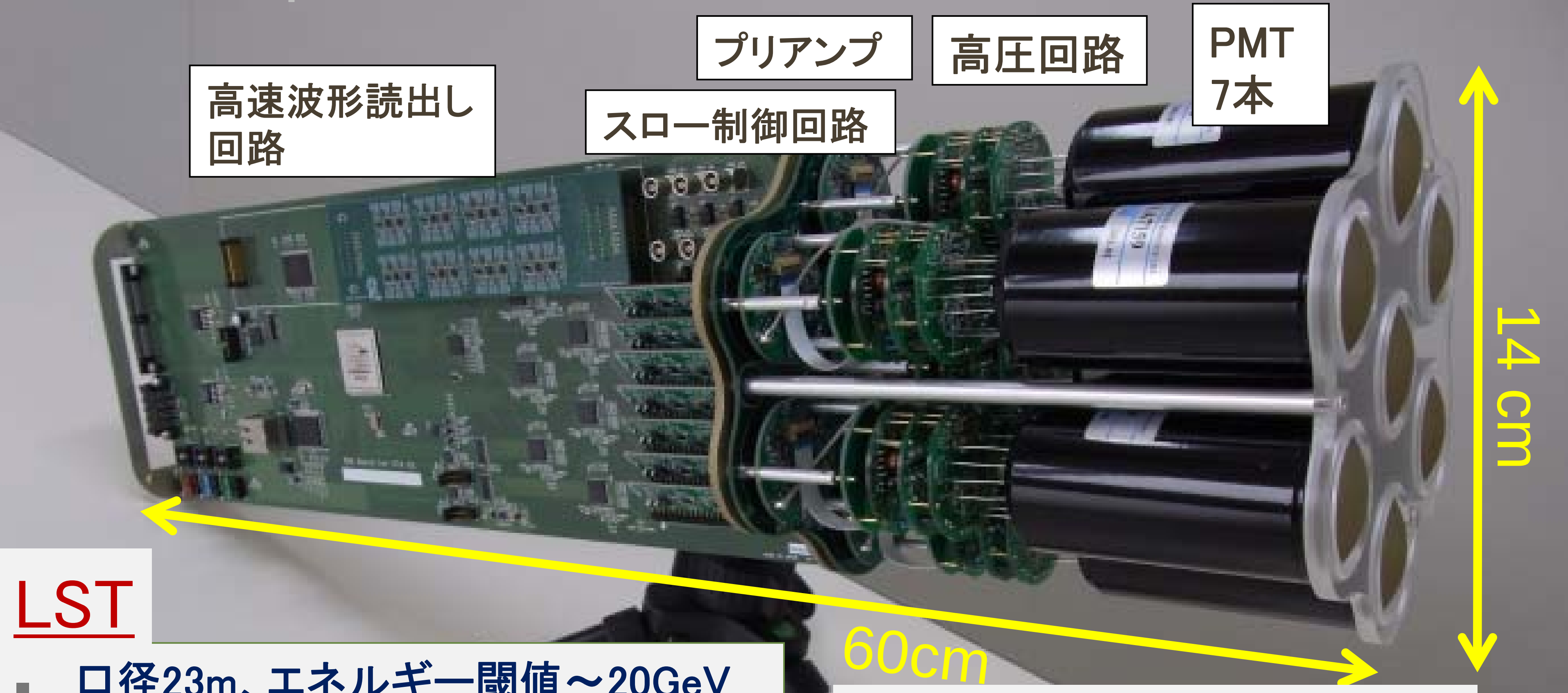
7ch 1GHz 超高速波形読み出し回路

1.5m サイズ
高精度分割鏡



大型スパッタリングチェンバー
Cr + Al + SiO2 + HfO2 による
マルチコート(長寿命、増反射)

CTA-Japanが開発したカメラクラスタ ver. 2



LST

- 口径23m、エネルギー閾値～20GeV
- カメラ視野4.5度(0.1度/pixel)
- 光検出器チャンネル数 ～2500/台
- カメラ直径 ～2.5m(光検出器面のみ)
  cf. MAGIC 1.1m
- カメラ内に読み出しエレクトロニクス
- シール、温度コントロール

メンテナンス、インストールを考慮し
7本を1クラスター。
PMT間隔48mm, 前面にライトガイド。

省電力、軽量、コンパクト化要求
ver.2の実測値
✓**電力（トリガ構成依存）13-15 W**
✓**重量（PMT7本込）1.3 kg**

茨城大学・
高エネルギー宇宙物理グループ

特色

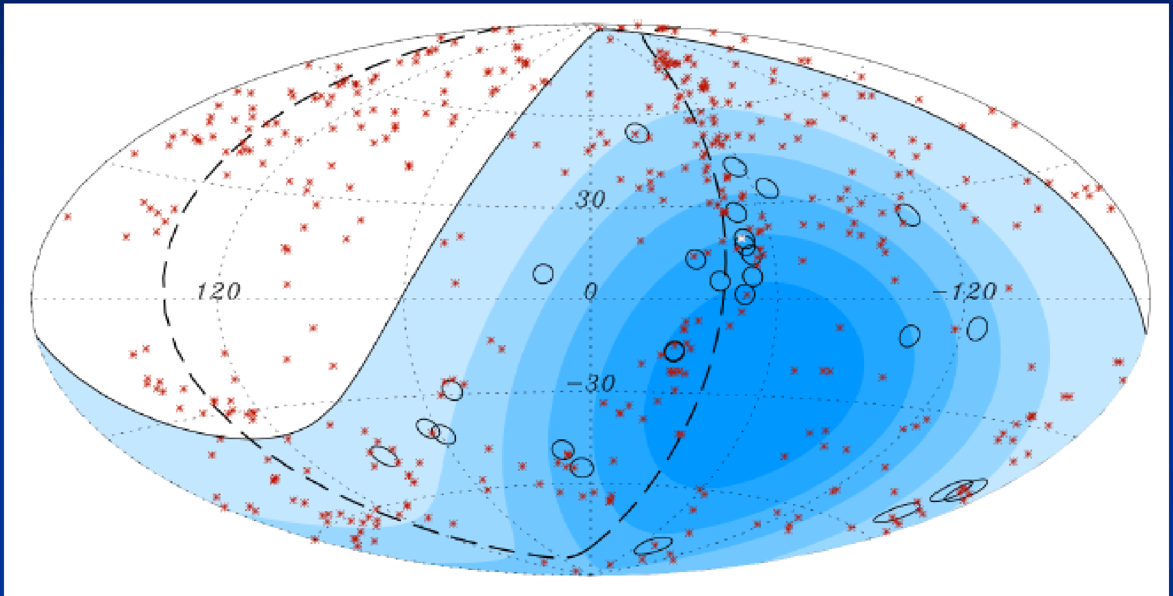
- GeVとTeVのワイドバンドで研究する日本で唯一の大学グループとして2011年新設
  - 茨城大のTeVの経験、片桐のフェルミ衛星での実績
  - メンバー　片桐、吉田、柳田、横沢、＋大学院生
  - 宇宙線が大きなテーマの1つ
    粒子種・加速機構にはGeV，最大加速エネルギー付近ではTeV
  - 連携　電波・赤外線　百瀬、（岡本）

主力
メンバー！

Google 茨城＋高エネルギー宇宙

大学院生の進行中の研究
（詳しくはポスター発表で）

最高エネルギー宇宙線とガンマ線源の相関



黒丸： 宇宙線
赤： 近傍AGN

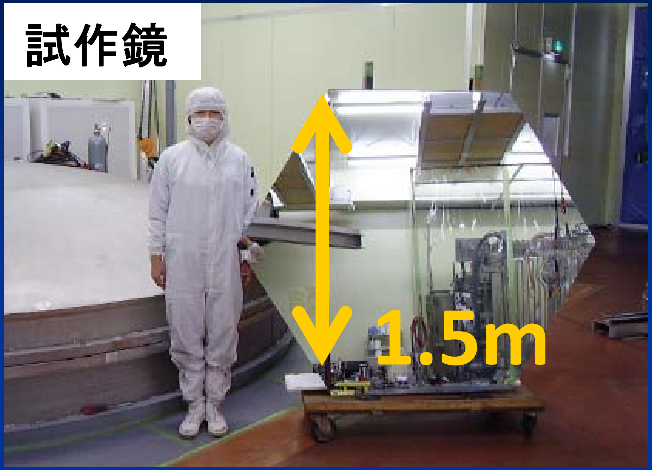
AUGER Collaboration 2007

- フェルミ衛星のガンマ線ソースカタログと比較し、5つの候補天体を発見
- 野辺山45m電波望遠鏡による、観測プロポーザル申請、採択された

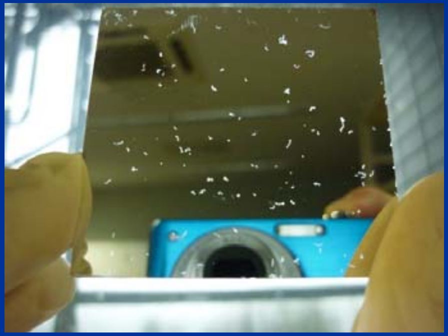
大型望遠鏡用・分割鏡の性能評価

分割鏡要求仕様の一部

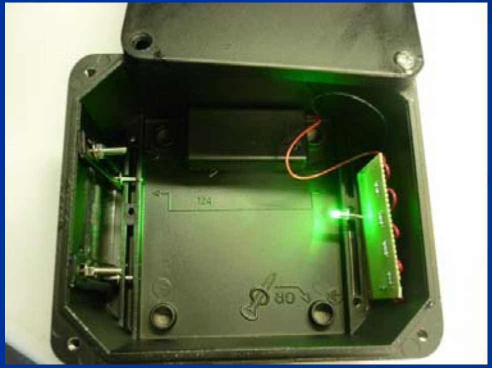
- 分割鏡１枚あたりのサイズ：1.5m
- 反射率：>90%（at 400nm）
- 反射率経年変化　<1%/年（10年の耐久性）

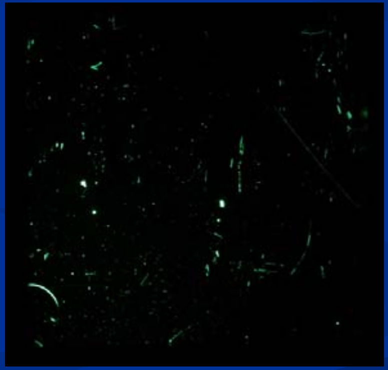


塩水等に鏡を浸して劣化を試験



腐食面積を図るための装置と撮影した画像





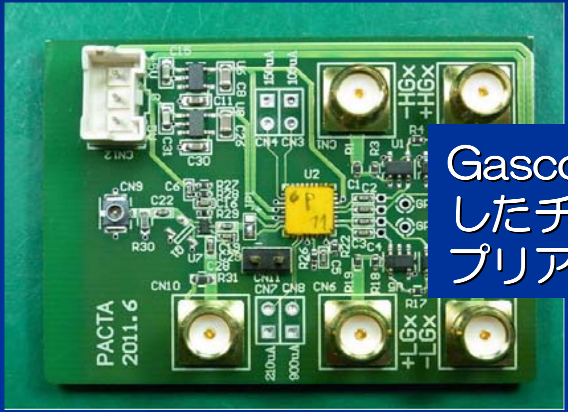
- 性能を評価し、製造工程にフィードバックをかける

光検出器の評価・エレクトロニクス開発

CTAカメラに使用する有力候補の高量子効率の光電子増倍管R11920-100

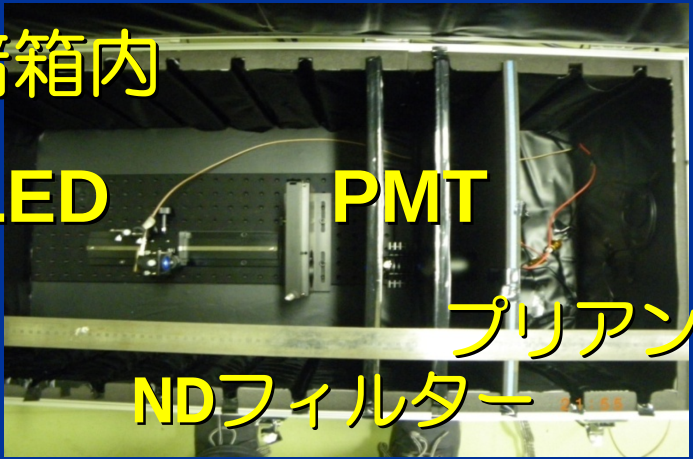
浜松ホトニクス、徳島大学、東大宇宙線研と共同開発

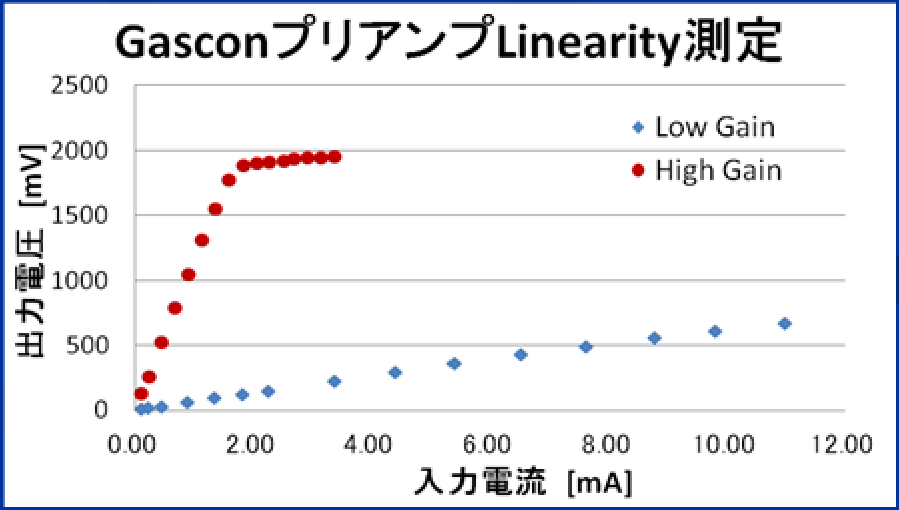
低消費電力プリアンプの評価



Gascon氏が開発したチップ搭載のプリアンプ

光電子増倍管の特性評価のセットアップ



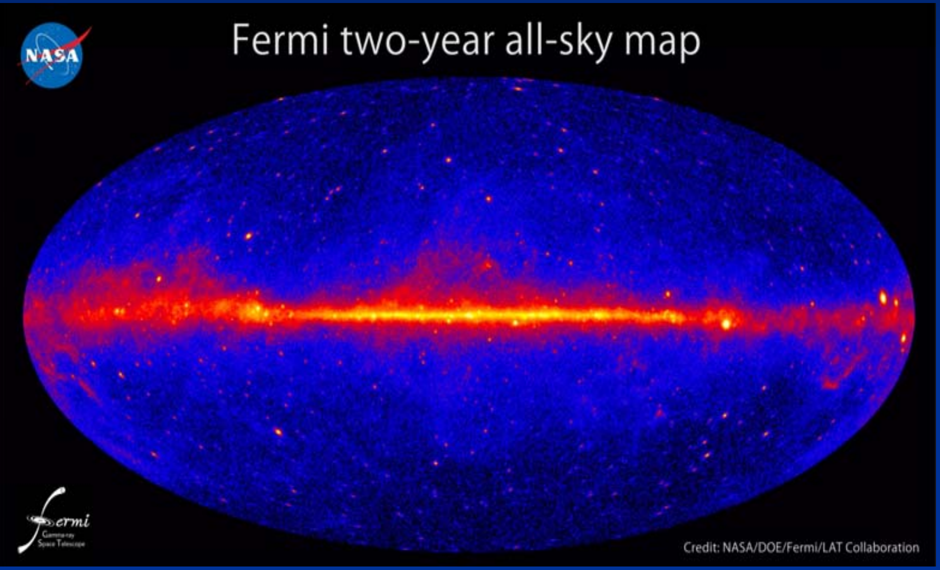


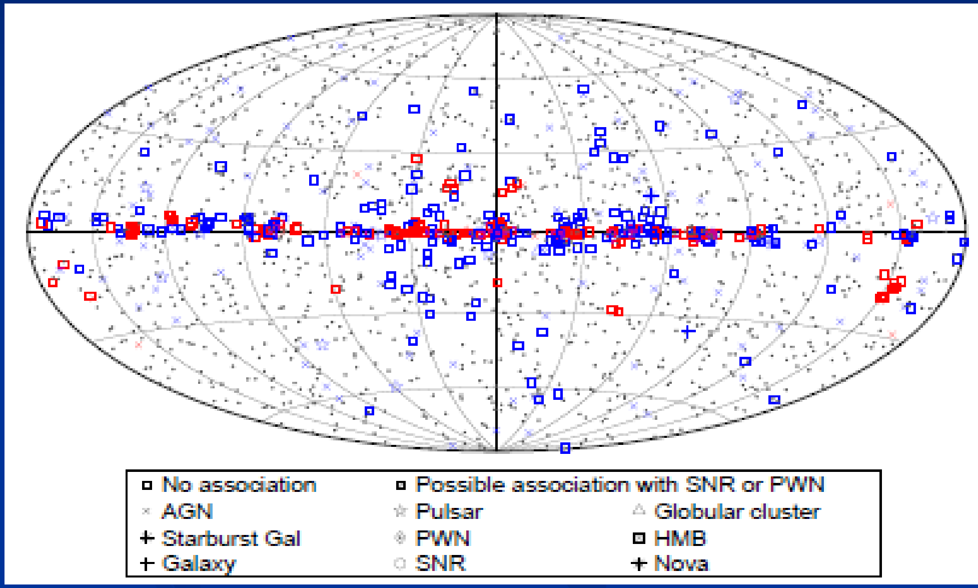
最後に
～　今後の研究　～

フェルミ衛星による今後の進展

- 現時点では、GeVガンマ線観測のいわば「決定版」の衛星
- 運用期間～10年
  - さらに深い観測により系統的な研究へ
- 宇宙線研究にとって「宝の山」
  - 外国人と熾烈な競争
- キーワードは「連携」＋「アイデア」
=> 独自性のある研究（例：最高エネルギー宇宙線）

フェルミ2年目カタログ





- 空間相関から思いがけないもの、アイデアが見つかるかも・・・
- 若い力に期待！

CTA実験の展望

- 2015年から本格稼働の究極のGeV-TeV天文台（ただし、1GeV付近はフェルミ衛星が必要）
- 銀河系内のすべての超新星残骸が射程圏内、系外の信号が微弱な天体も（銀河団等）
- 日本チームは基礎開発が進行中
  - 現時点での開発が、プロトタイプ望遠鏡や、本観測で使われるかも！？
- さらに、本格的な稼働の初期の段階からサイエンスに絡んでいきたい

最後に

時事ドットコム

数学、物理得意だと高所得＝「国語」と180万円差－大卒就業者1万人調査

文系、理系を合わせた大卒就業者約1万人（平均年齢43歳）の得意科目と平均所得（年収）の関係を調べると、数学が得意な人の所得が約620万円と最も高く、2番目は理科が得意な人の約608万円だったと、同志社大や京都大などの研究グループが20日発表した。数学が得意な人と国語が得意な人とでは、約183万円の差があった。

理系の就業者約3200人では、理科4科目の中で物理が得意な人の所得が約681万円で最も高く、生物が得意な人が約549万円で最低だった。こうした傾向は世代を通じて共通していたが、学習指導要領が変わり、「ゆとり」や「個性」が強調されて学習内容が減るにつれ、理数が得意な人が減っていた。

同志社大経済学部の八木匡教授らによると、数学や物理が得意な人の所得が高いのは、論理的な思考能力が仕事の役に立っているだけでなく、理数が得意な人が減少傾向にある中、労働市場での評価が相対的に高まっている可能性がある。（2011/10/20-21:23）

- 別に、所得のためだけに研究するわけではないですが、、、
- 個人的経験では、卒研、修士、さらには博士課程でも研究活動を「ちゃんと」やっている人は、就職もうまくいっています。

ご清聴
ありがとうございました。

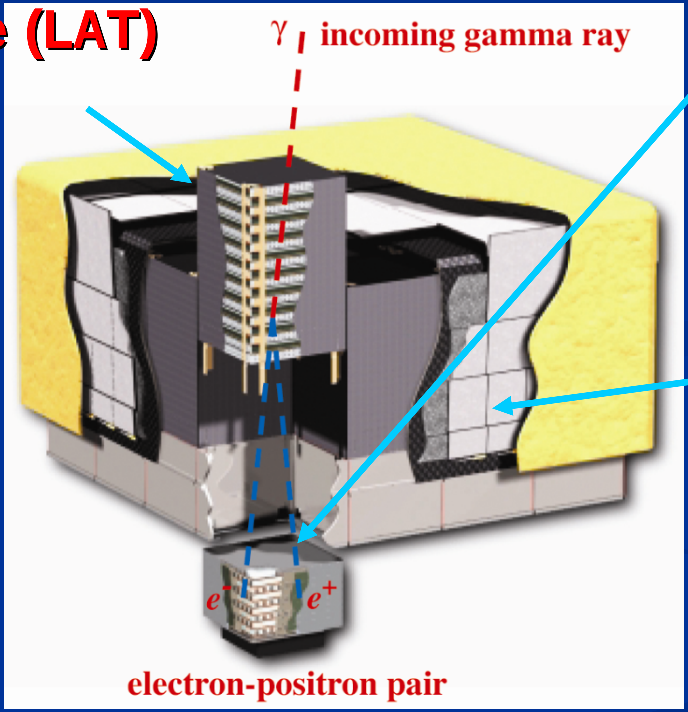
Backup slides

フェルミ宇宙ガンマ線望遠鏡

- 日米欧の国際協力実験
- 2008年6月に打ち上げ　（データは現在公開）
- 2つの検出器：　LAT　と GBM

Large Area Telescope (LAT)

Tracker (16 towers):
- Pair conversion telescope
→ Tungsten conversion foils
- Measures e⁻/e⁺ track with Si-strip detectors



Calorimeter:
-1536 CsI crystals
-Measures photon energy

Anti-coincidence detector:
- Segmented
- Vetos CR background

- 角度分解能の向上 **(~0.6°@1GeV)**
- 大有効面積 & 視野（**2.4 sr** ）
- **~20 MeV < E < ~300 GeV**

⇒

- ソースの同定、広がり
- 放射機構