

ガンマ線バースト天体現象を使って アインシュタインの光速度不変原理を検証

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部

宇宙航空プロジェクト研究員 大野 雅功
教授 高橋 忠幸

東京工業大学・理工学研究科・教授 河合 誠之

問い合わせ先:

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部

高橋・国分研究室 大野 雅功 電話: 042-759-8642

e-mail: ohno@astro.isas.jaxa.jp

フェルミガンマ線宇宙望遠鏡は 2009年 5月10日に非常に明るいガンマ線バーストと呼ばれる天体現象を観測し、ガンマ線バーストとしては史上最高とも言える 310 億電子ボルトの高エネルギーガンマ線 (非常に波長の短い光)の検出に成功しました。

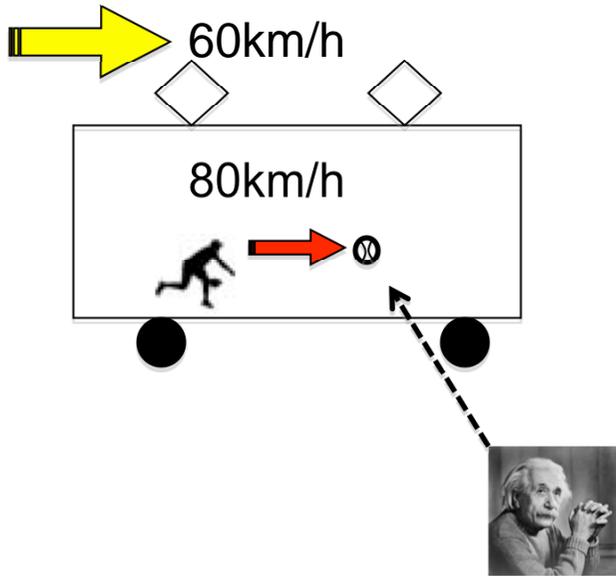
この最高エネルギーガンマ線の到達時間を他の低いエネルギーのガンマ線と比較することで、両者にほとんど時間差がないことを明らかにし、アインシュタインの相対性理論の基盤ともいえる「光速度不変の原理」を過去最高の精度で検証することに成功しました。

これにより、「光速度不変の原理」の破れを予言していた量子重力理論の枠組みに初めて観測から強い制限を付けることに成功しました。

※米国雑誌「ネイチャー」(オンライン版) 10.1038/nature08574 に掲載

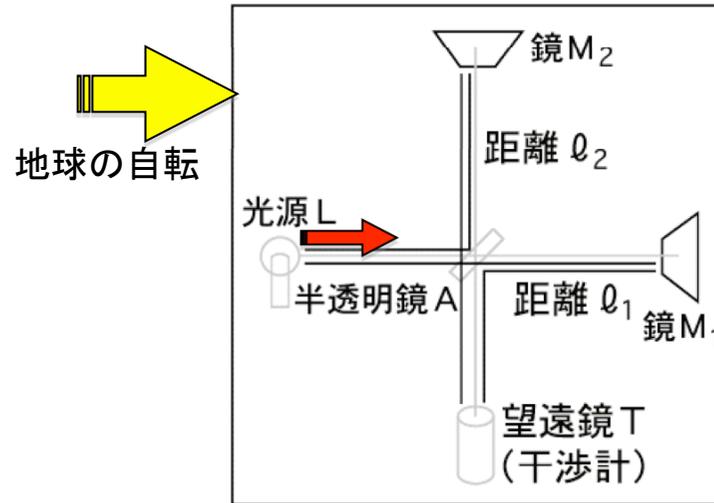
- 「光速度不変の原理」と量子重力理論
- ガンマ線バーストとは？
- フェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡
- ガンマ線バースト GRB 090510 の発見
- ガンマ線バーストで「光速度不変の原理」を検証

「光速度不変の原理」とは？



時速60km/hで走る電車内で
時速80km/hのボールを投げると
電車の外では60+80=140km/h
となって見える。

光(電磁波)でも同じことが起こるか？
(マイケルソンとモーレーの実験など)



「地球の自転方向と同じ向きと垂直な
向きにはなった光の速度差は単純な
速度の加算で表せられないほど小さい。」

光速度不変の原理

「真空中の光速は観測者の運動によらず常に一定」

...アインシュタインの相対性理論の基礎

光速が波長によって変わる？

光速度不変の原理(相対性理論)はマクロな視点では正しい。
では、微小な世界でも成り立つのか？

微小な(ミクロ)な世界を記述する理論 = 量子力学

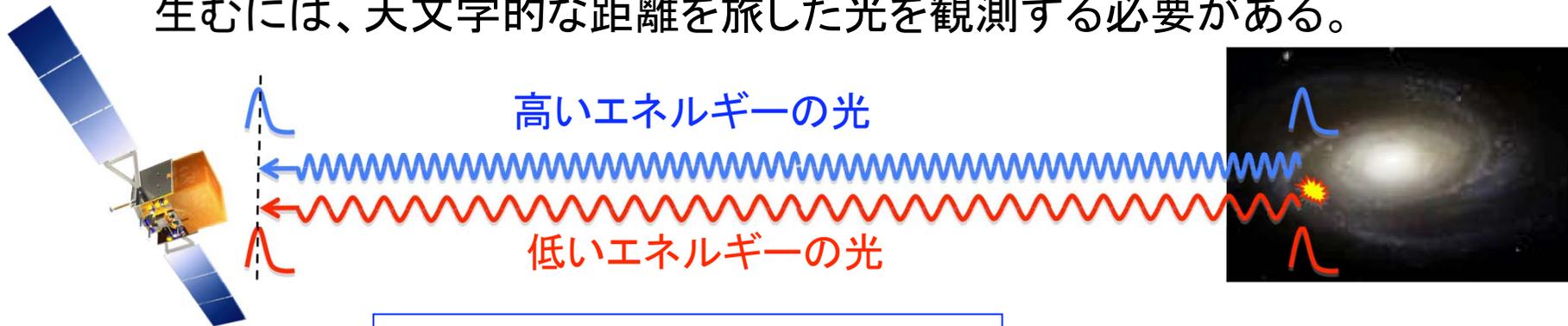
ミクロな世界の相対性理論を記述する理論 = **量子重力理論**
(超ひも理論、ループ量子重力理論。。など)
実証が非常に困難!

量子重力理論の枠組みの中には
ミクロなスケールで
「光速が電磁波の波長(エネルギー)にわずかではあるが依存する」
(光速度不変の原理の破れ)と主張するものが存在する。

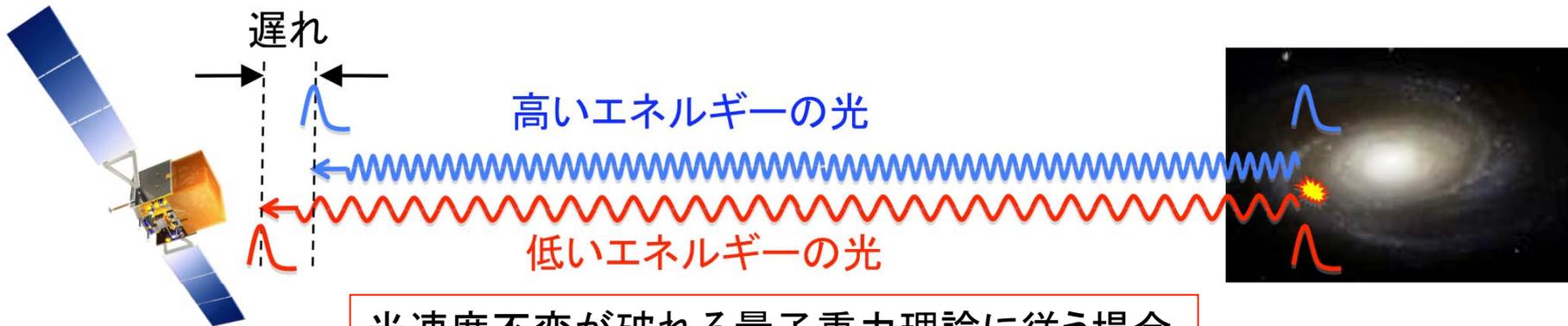
光速の“ずれ”を実験的に測定=量子重力理論の検証

光速の“ずれ”を”測定”できるか？

量子重力理論が预言する光速の“ずれ”はごく僅か。測定可能な”ずれ”を生むには、天文学的な距離を旅した光を観測する必要がある。



光速度不変が成り立っている場合



光速度不変が破れる量子重力理論に従う場合

できるだけ遠い天体から瞬間的に発生する
できるだけ高いエネルギーの光の観測が必須

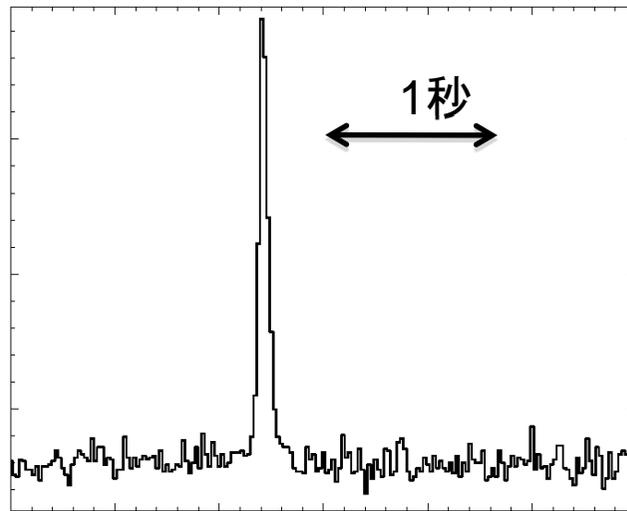


ガンマ線バースト

ガンマ線バーストとは？

宇宙のどこかで一日に一回程度、ガンマ線
(非常に波長の短い=エネルギーの高い光)
で0.1秒から10数秒程度明るく輝く現象
(詳しい正体についてはまだ不明)

ガンマ線のカウンタ数



時間(秒)



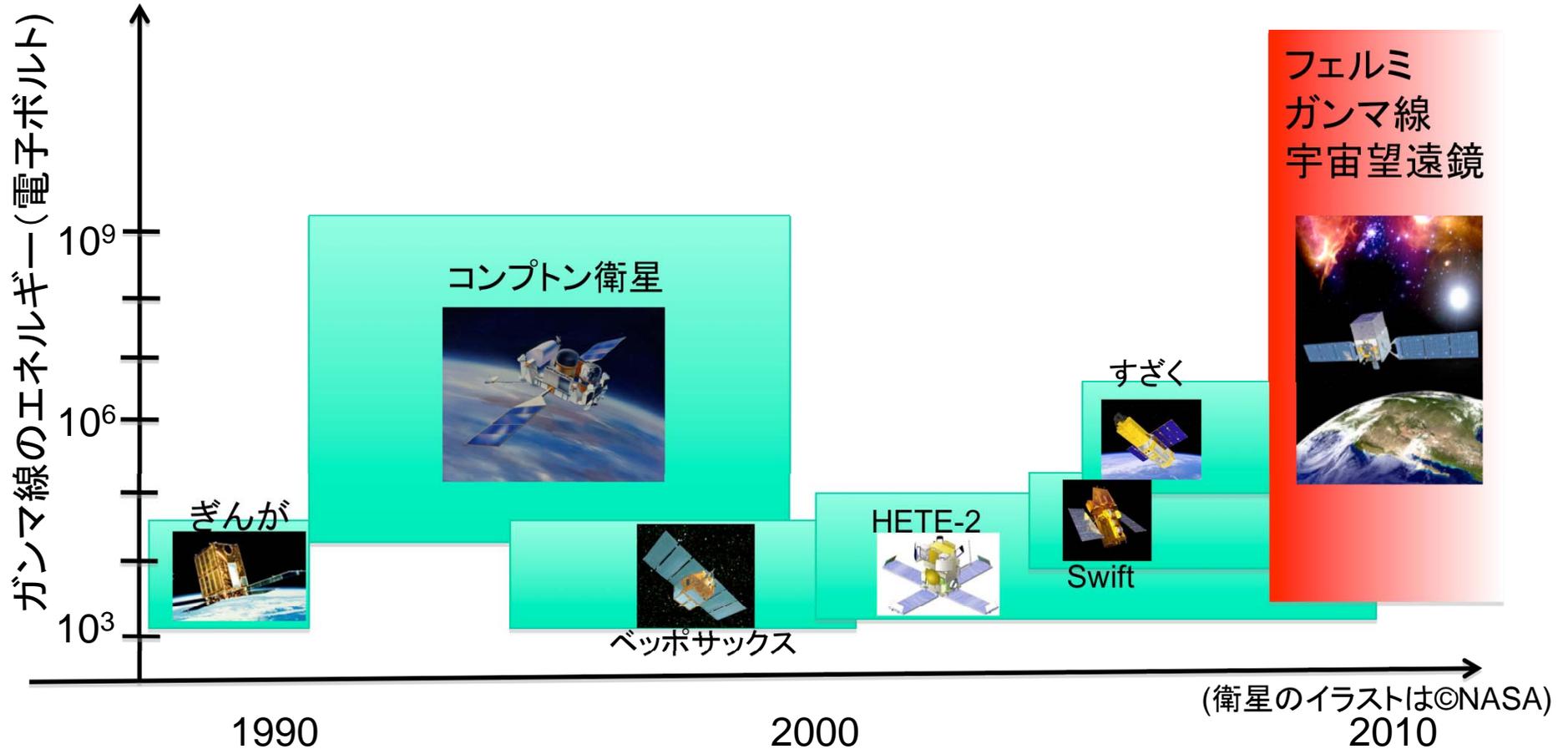
(©NASA)

- (1) 現在測定できる、最も遠方(およそ100億光年)の宇宙で発生
- (2) ガンマ線(高いエネルギーの光)で一瞬(数10秒)だけ輝く



光速度不変の原理(=量子重力理論)を検証できる唯一の観測手段!

これまでのガンマ線バースト観測



- 本格的な宇宙観測は 1990年代より発展
- 低いエネルギーのガンマ線はすでに千を超える検出例
- 高エネルギーガンマ線の検出は**わずか数例**(コンプトン衛星)

フェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡 (以下フェルミ衛星)



(©NASA)



(©NASA)

- 日・米・欧の国際協力ミッション。2008年6月に打ち上げ
- 日本の貢献により過去の衛星を数十倍上回る性能
- 6桁にも及ぶエネルギー範囲でガンマ線バーストを観測

これまでとは比べ物にならないほど多くの
ガンマ線バーストから 高エネルギーガンマ線を捉える!

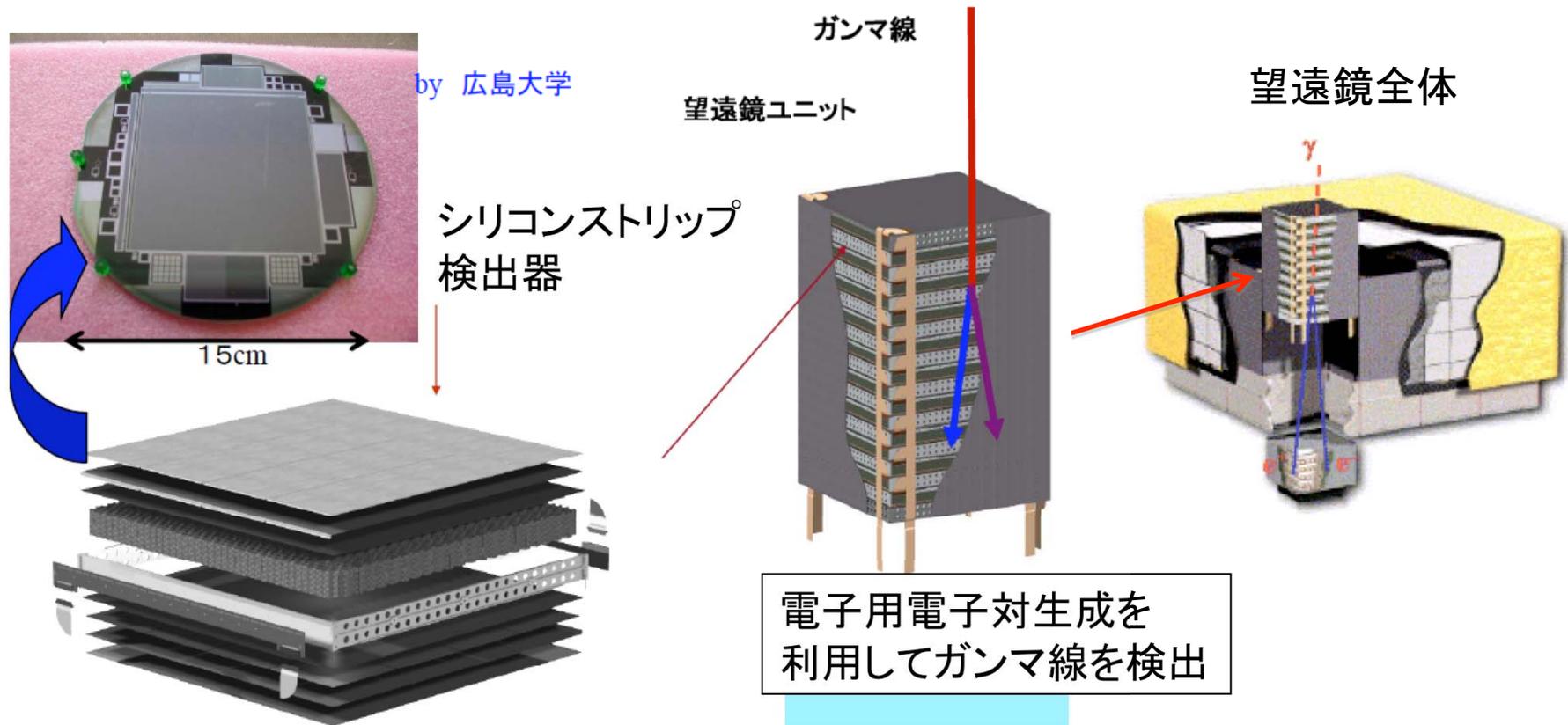
●日本側メンバー

- 広島大学: 大杉 節(代表), 深澤 泰司, 水野 恒史, 片桐 秀明, 高橋 弘充, 山崎 了, 安田 創, 上原 岳士, 西野 翔, 花畑 義隆, 林 克洋, 伊藤 亮介, 佐田 貴幸
- JAXA/ISAS: 高橋 忠幸, 尾崎 正伸, 大野 雅功, 佐藤 理江, 田中 康之, 牛尾 雅佳, 勝田 隼一郎, 石川 真之介, 小高 裕和, 杉本 宗一郎
- 東京工業大学: 河合 誠之, 浅野 勝晃, 谷津 洋一, 中森 健之, 森井 幹夫
金井 義和, 森 由希, 中島 英也
- 早稲田大学: 片岡 淳
- 東京大学: 牧島 一夫, 奥村 暁, 湯浅 孝之
- 名古屋大学: 福井 康雄, 山本 宏昭

●支援・資金

- (1) 高エネルギー加速器研究機構・日米科学技術協力事業
(高エネルギー分野)、課題: GLAST宇宙ガンマ線望遠鏡
代表: 大杉節(広島大学宇宙科学センター特任教授・センター長)
- (2) 文部科学省科学研究費補助金(特定領域「ブラックホール天文学の新展開」)
代表: 深澤泰司(広島大学教授)

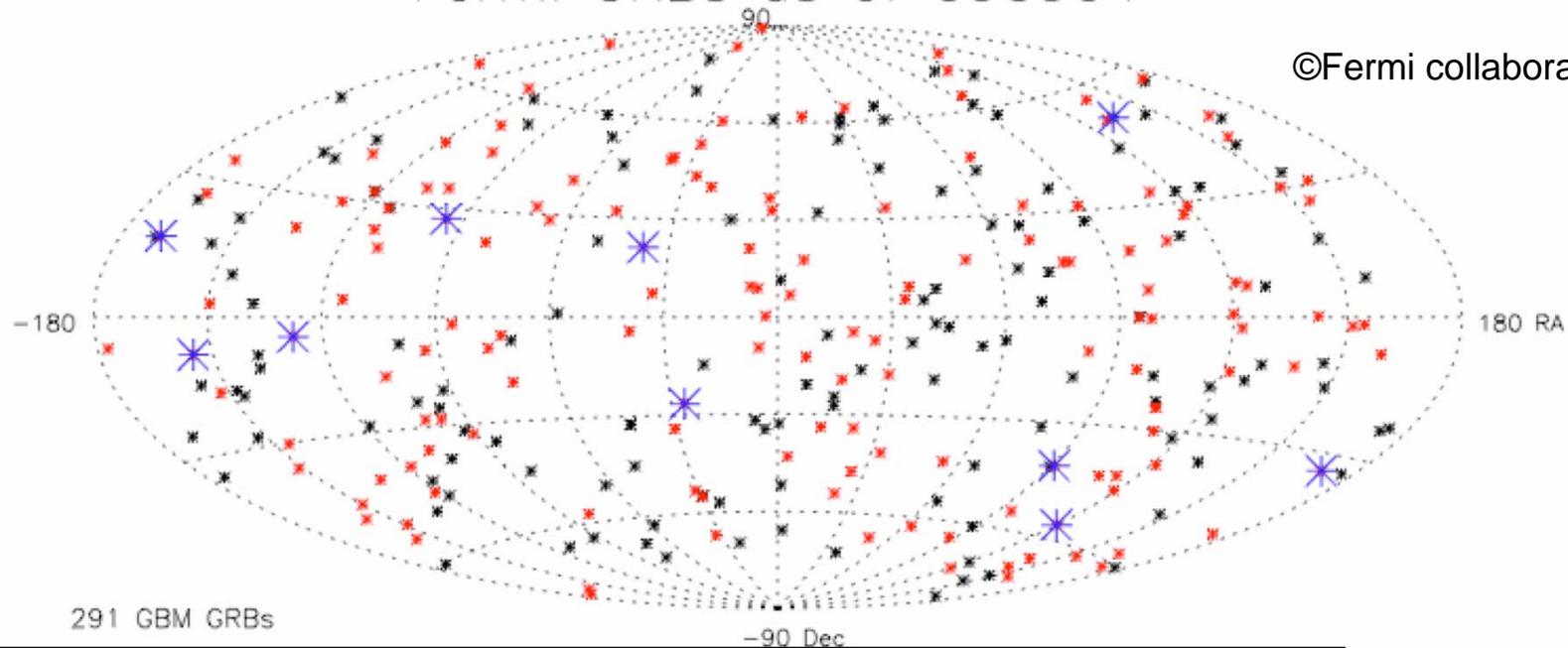
その他、東京工業大学、広島大学、東京大学、JAXA/ISAS,理化学研究所の支援も受けました。ご支援いただいた期間に、この場を借りまして厚く御礼申し上げます



- ◆主検出部(半導体検出器 10,000枚)の開発, 性能評価 [広島大学]
- ◆衛星運用、キャリブレーション、データ解析、観測当番[全機関]

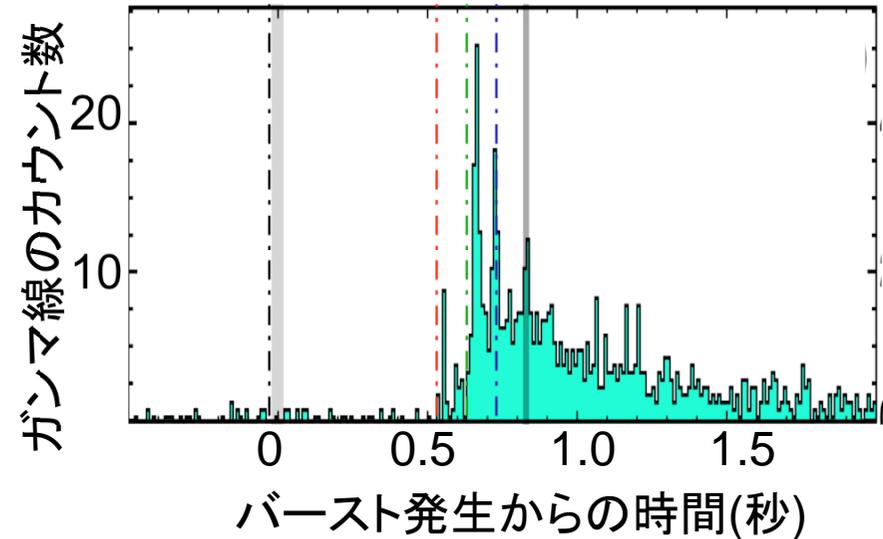
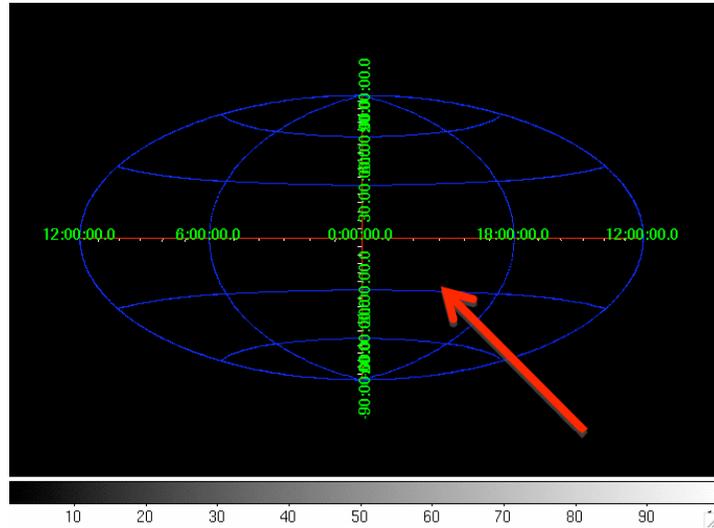
Fermi GRBs as of 090904

©Fermi collaboration



- * , * : フェルミ衛星で捉えたガンマ線バースト
- * : 高エネルギーガンマ線(1億電子ボルト以上)放射を捉えたもの

1年間で10個のガンマ線バーストから高エネルギーガンマ線を検出
過去の検出数をすでに上回る



(Nature論文より抜粋)

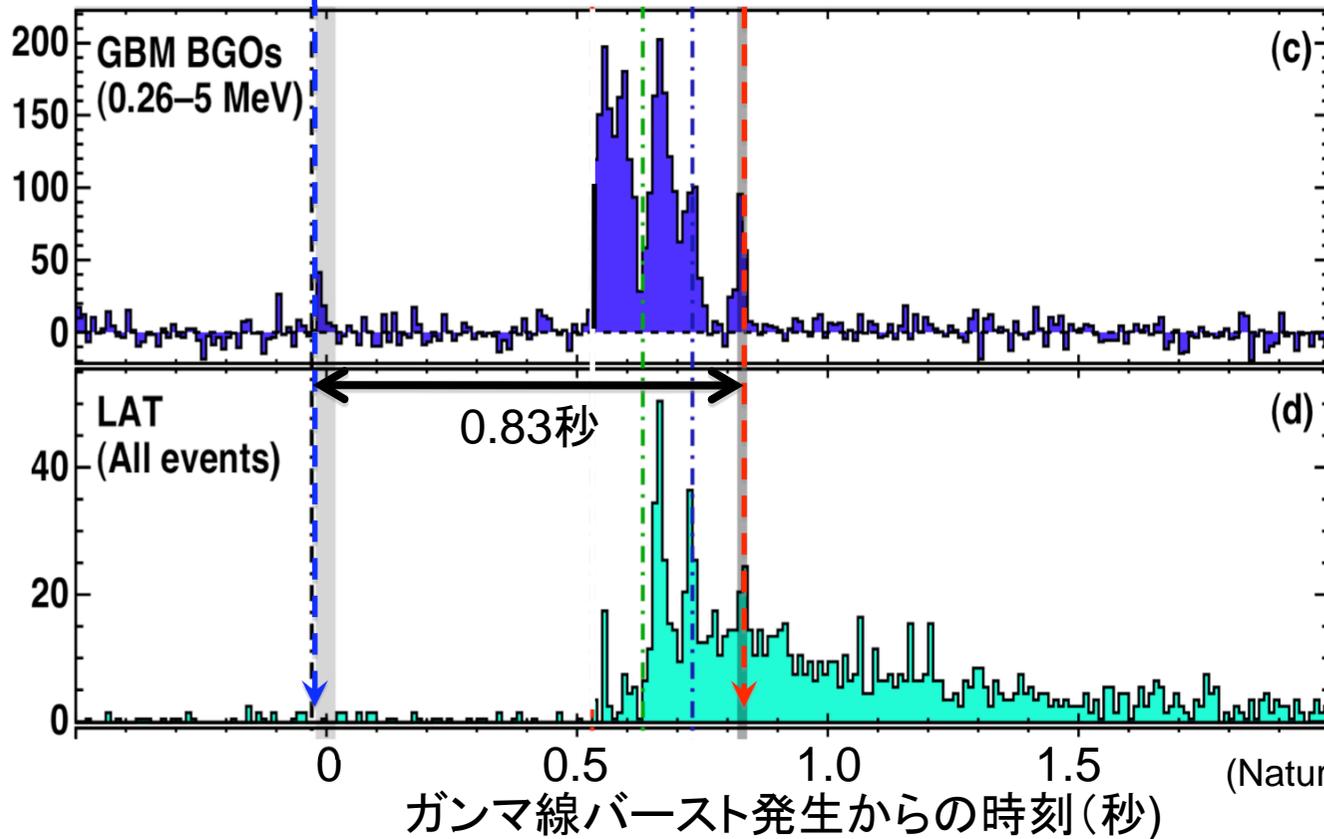
- 2009年5月10日に発生したガンマ線バースト
- 1000万電子ボルト以上の高エネルギーガンマ線でも明るく輝く
(フェルミ衛星で2例目の極めて明るいガンマ線バースト)
- 日本で迅速な初期解析を行い、世界に通報
 - 発生源までの距離が確定(73億光年)

最高エネルギーのガンマ線を発見

500万電子ボルト以下の電子
が検出され始めた時間

310億電子ボルトの
ガンマ線を検出した時間

ガンマ線のカウント数



500万電子
ボルト以下の
低エネルギー
ガンマ線

1000万電子
ボルト以上の
高エネルギー
ガンマ線

- 310億電子ボルトもの高エネルギーガンマ線を発見
(ガンマ線バーストとしては史上最高級エネルギー)
- 低エネルギー(500万電子ボルト以下)のガンマ線
から(最大でも)わずか0.83秒の遅れ

今回の観測で

非常に高いエネルギー(310億電子ボルト)のガンマ線と低いエネルギー(500万電子ボルト)のガンマ線の到達時間差が、73億光年という長い距離を経てもせいぜい0.83秒で光速度の差にしてわずか $4 \times 10^{-18}(\Delta c/c)$ 、ということが明らかとなった。

アインシュタインの光速度不変原理を過去最高の精度で検証

一方、光速がエネルギーに依存する(光速度不変の原理の破れ)ことを予言する量子重力理論の一部の枠組みではもっと大きな時間差を予言していた。

観測から量子重力理論の枠組みに強い制限

大きなスケールの極限とも言える宇宙観測を用いることで、微小スケールの極限ともいえる素粒子理論の理解と発展をもたらすことも可能。