

ついに地上からガンマ線で 見えたガンマ線バースト

野田浩司 (のだ こうじ)

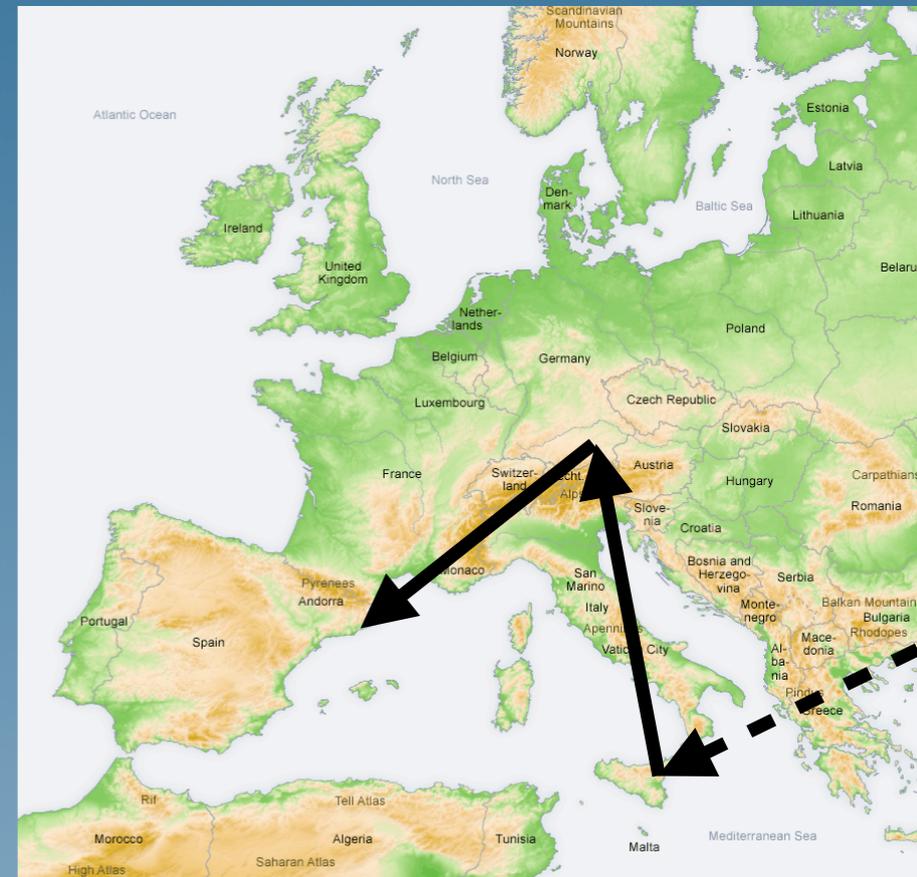
東京大学 宇宙線研究所 准教授

2020年8月8日

宇宙線研究所×カブリIPMU 合同一般講演会

自己紹介

- 1981年 横浜市生まれ (38歳)
 - 2000年 東京大学 理学部物理学科
 - 2004年 東京大学大学院 理学系研究科 物理学専攻
 - 東京大学 宇宙線研究所にて研究、博士号取得 (2010年)
 - 2010年 イタリア・国立核物理研究所 (シチリア島) 研究員
 - 2012年 ドイツ・マックスプランク物理学研究所 (ミュンヘン) 研究員 (-2016年)
 - 2017年 スペイン・高エネルギー物理学研究所 (バルセロナ) Marie-Curie研究員
 - 2018年 現職、宇宙線研究所 准教授
- スペイン・カナリア諸島に頻繁に出張



ここらへん



なぜ？

- なぜ、わざわざスペインに？
そこに望遠鏡があるから
- 他の望遠鏡じゃダメ？
ダメ。特殊な望遠鏡だから
- どう「特殊」？
「ガンマ線」の望遠鏡で
宇宙の「極限現象」を知りたい
- なぜ？
自分でも、よくわかりません（笑）

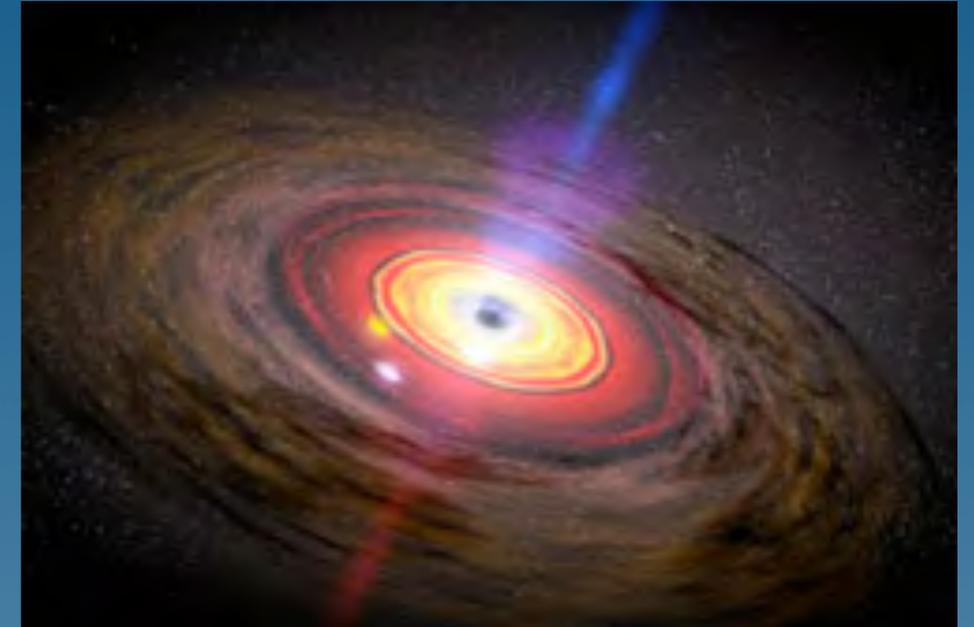


Wikipedia「天文学」より

極限現象 例1: 活動銀河核

- 太陽の1億倍以上にもなる超大質量ブラックホールを中心に持つ銀河

– 高温・高密度・高磁場



(Niels Bohr Institute)

- 2方向に粒子の流れ（ジェット）を持つものが多い。偶然ジェットが地球を向いている場合、「ガンマ線」を使って様々な「なぜ」に迫れる

– ジェットやその周辺の構造は？ どうやってできたのか？

– 粒子の種類は？ どのように加速しているのか？

– なぜ、たまに短時間だけ輝くのか？（フレア）

例2: 暗黒物質 (ダークマター)

- 宇宙にあると考えられている、
電磁波で直接観測できない**未知の物質**
 - あると考えた方が「矛盾が少ない」
 - という存在自体がもはや**極限**
- 理論的に候補とされる粒子にはいくつか種類がある
- ダークマター同士がぶつかりると消滅して「ガンマ線」を出す
これが観測できれば「間接的な証拠」になる

**「ガンマ線」で宇宙を見れば、今まで見つかっていなかった
極限現象が、他にも見えてくるかもしれない！**

極限現象 例3:

ガンマ線バースト (GRB)



© ICRR U Tokyo /
Naho Wakabayashi

- 宇宙で最も激しい爆発現象。大きな星の死（超新星爆発）や中性子星・ブラックホールの合体に関係すると考えられる
- **いつどこで起こるかわからない**。しかも、数分間といった短い時間だけ輝き（即時放射）、すぐに暗くなる（残光）

ガンマ線バースト歴史・由来



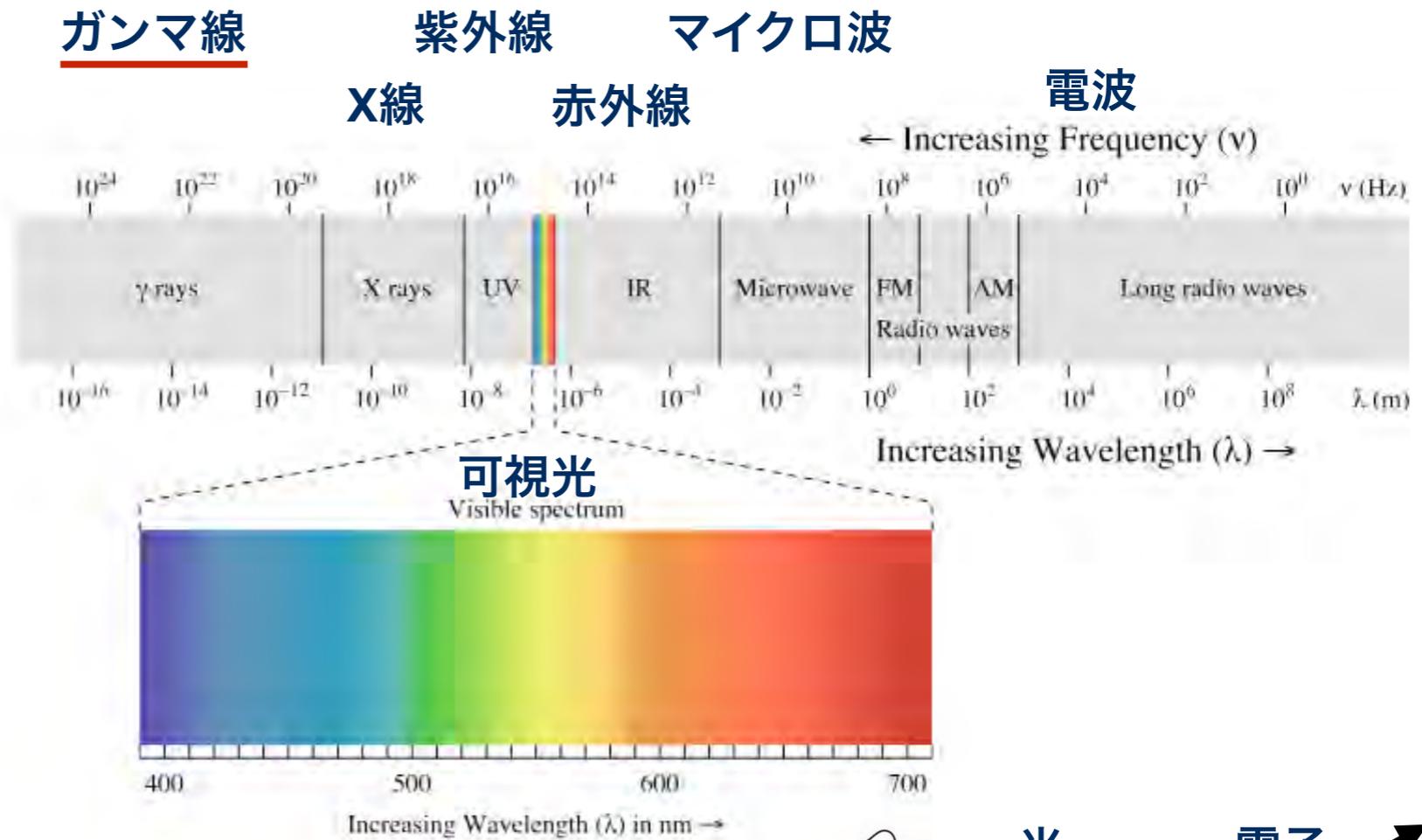
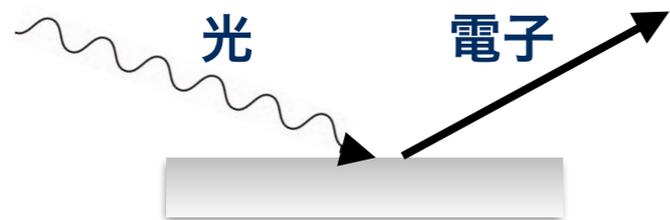
- 1960年代：核実験監視用の人工衛星によって発見
- 1990年代：天の川の外で起きていると判明。残光の発見
- 2000年代：超新星爆発との（部分的な）関係が確定
一方で、予想と異なる多様なバーストの発見

比較的新しい天体。ガンマ線のバースト（爆発）だから
「ガンマ線バースト」。よくわからないので、そのまま命名

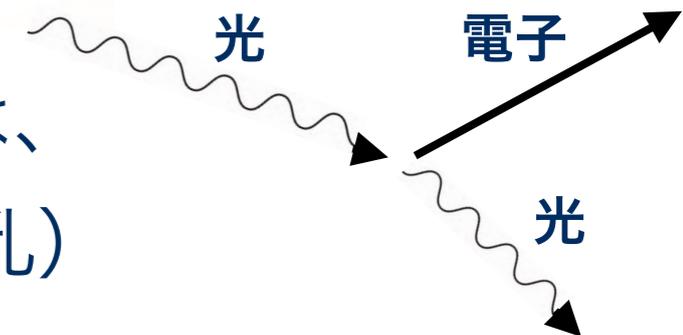
「ガンマ線で見えたガンマ線バースト」って、当然では？

ガンマ線？

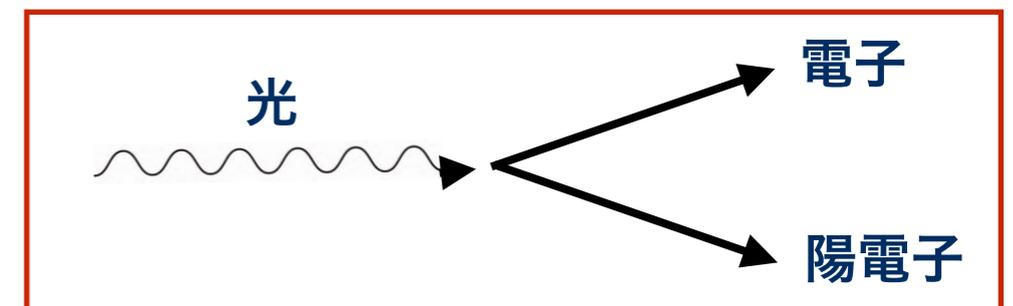
- 光・電磁波の一種
- 目では見えない
- 可視光～X線は物質に当たると電子を弾き出す（光電効果）



- それ以上強い（エネルギーの高い）X～ガンマ線は、電子を弾くだけでなく自分も飛ぶ（コンプトン散乱）



- さらに高いエネルギーのガンマ線は、新たに(陽)電子を作り出す！（対生成）



つまり

- 「ガンマ線」と一口に言っても波長、つまりエネルギーが4桁以上も異なる



- ガンマ線バーストの名前の由来になった「ガンマ線」はX線に近いエネルギーが低い、コンプトン散乱の領域
- 同じガンマ線でも「対生成」の領域で観測した場合
 - 見えるとは限らない
 - 見えたとしても、明るさ・時間変化などいろいろ違う
- 観測法も違う。別の検出器・望遠鏡が必要

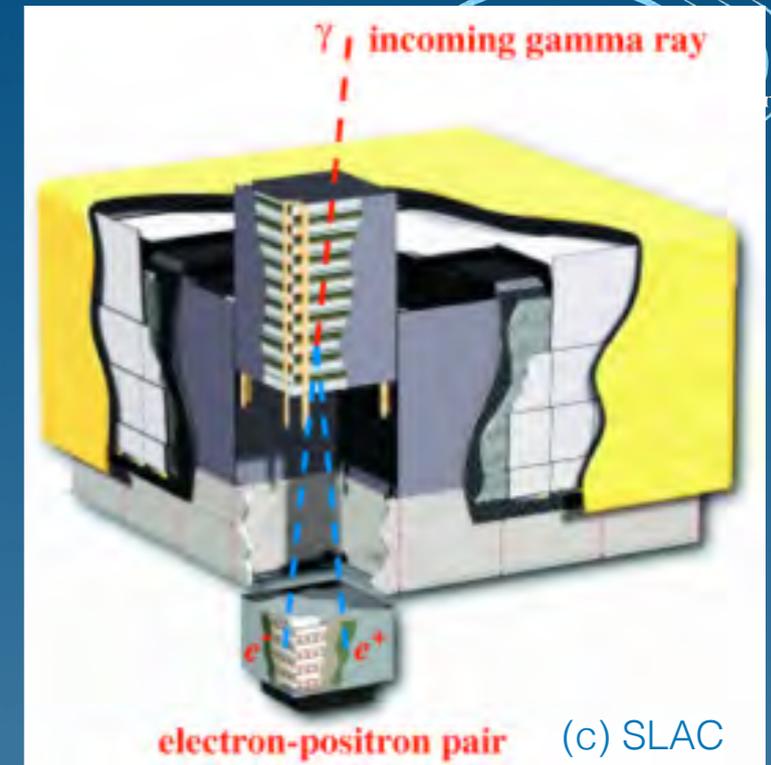
対生成でのガンマ線観測

- 宇宙からのガンマ線は地球の大気と「反応してしまう」ので、人工衛星での観測が「ほぼ」必須
- 1990年代：CGRO衛星EGRET検出器
数えるほどしか観測されなかった
- 2008年～：Fermi衛星LAT検出器
10億電子ボルト (GeV) 以上のガンマ線
を10年間で約200のバーストから検出
- 1電子ボルト (eV) = 可視光くらい
GeV：ギガエレクトロンボルト、ジェブ
MeV (100万eV、メブ) TeV (1兆eV、テブ)



GeVガンマ線で 何がわかったのか

- すべてのガンマ線バーストが本体のMeVガンマ線の3~4桁上のGeVでもガンマ線を放射しているわけではない
- GeVガンマ線を出す一部のバーストでは、GeVガンマ線がバースト本体のMeV放射に比べ数分ほど遅れてくる



Fermi衛星LAT検出器

何か特別なことが起きている可能性が高いが
それが何なのかわからなかった

「もっと光（ガンマ線）を！」（ゲーテ）

対生成でのガンマ線観測

- 宇宙からのガンマ線は地球の大気と「反応してしまう」ので、人工衛星での観測が「ほぼ」必須

とさっき書きましたが、

もう少しだけ高いエネルギーならば

大気との「反応」を逆に利用することで

人工衛星を使わずに観測が可能

大気チェレンコフ望遠鏡



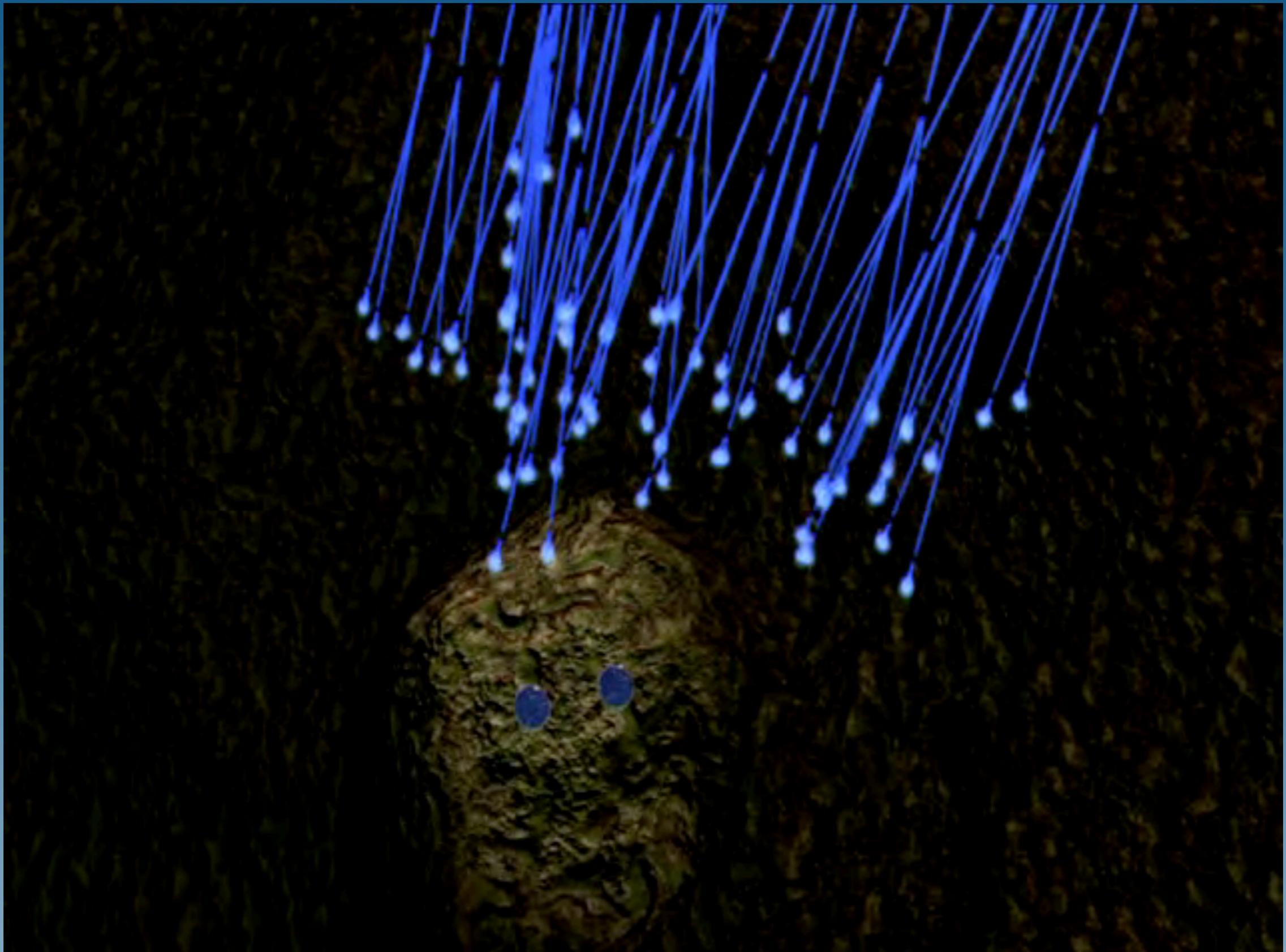
(c) NASA

MAGIC望遠鏡

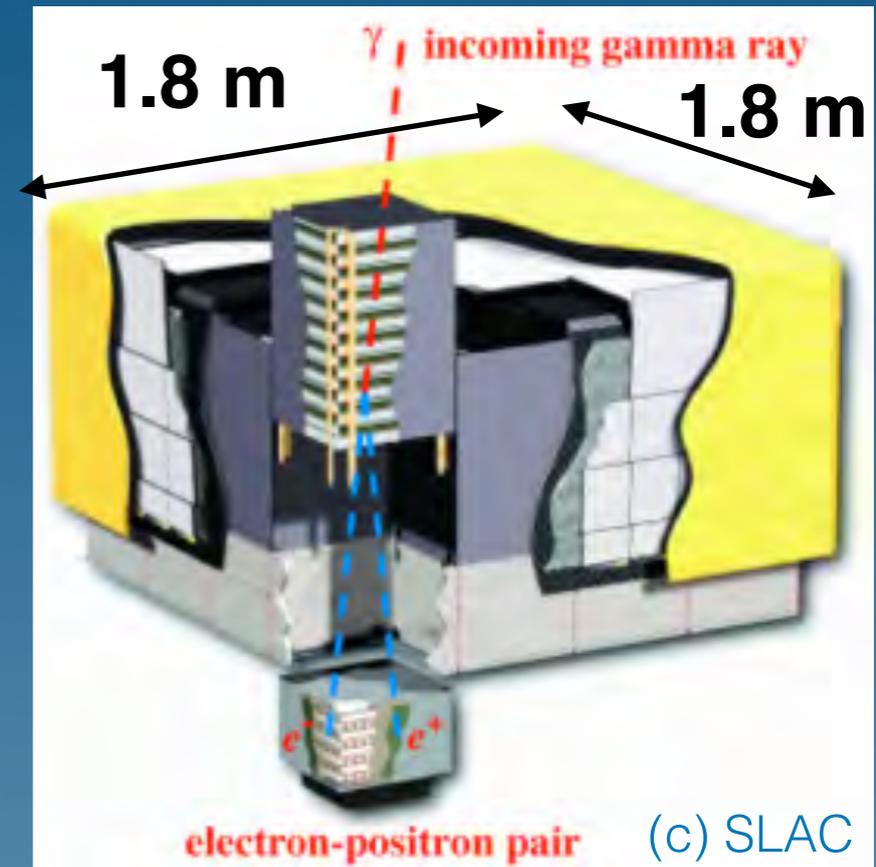
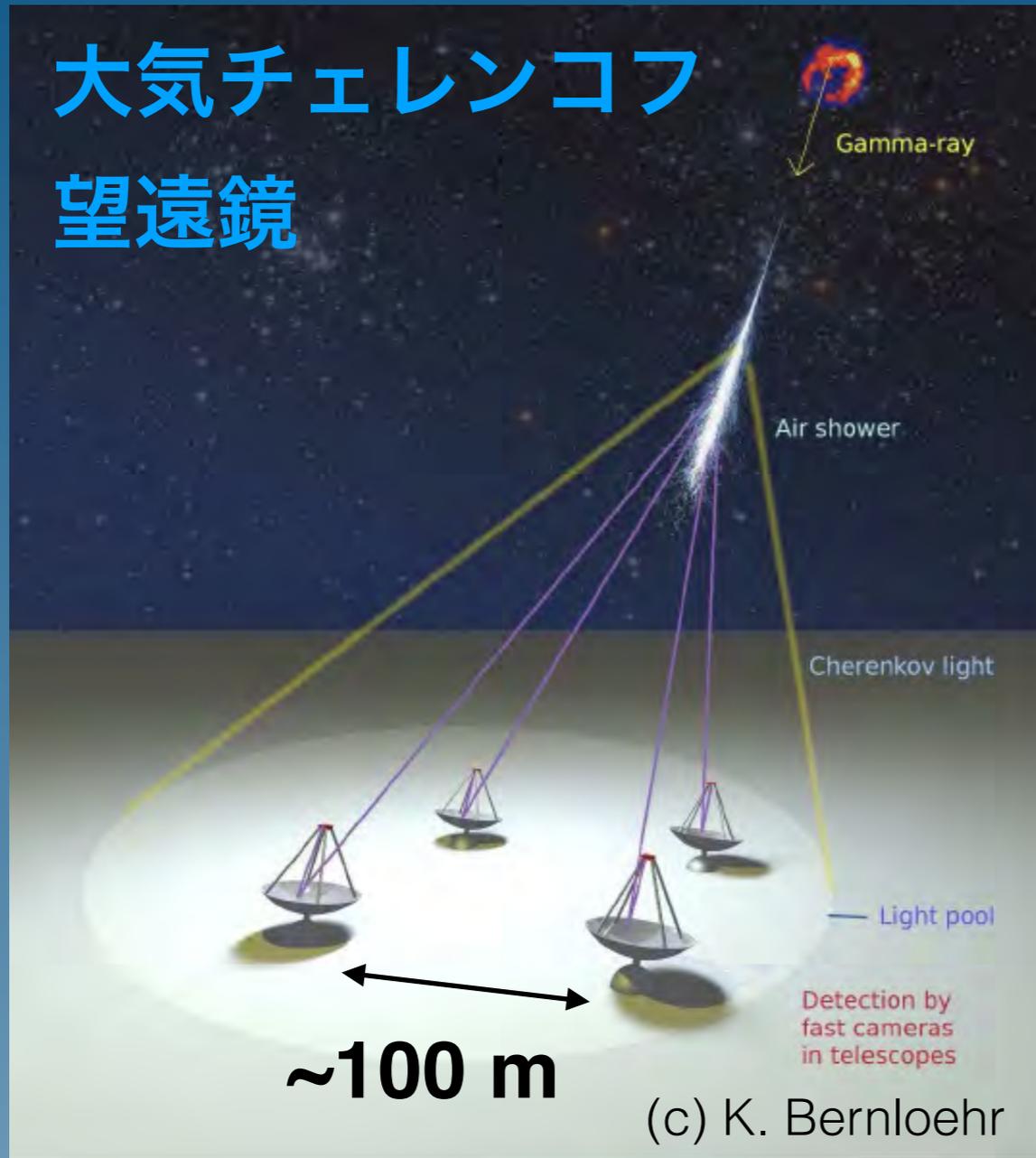


- スペイン・カナリア・ラパルマ島の標高2200m、2台の17m望遠鏡
50GeV~50TeVガンマ線を地上で観測する大気チェレンコフ望遠鏡
- 90年代に計画開始、2004年1台目運転開始。2009年から2台。
CGRO衛星の観測を受け、早くからガンマ線バースト観測を重要視
- 12カ国・280人以上の国際共同実験。日本からは30人以上
(東京大学宇宙線研究所のほか、京都大、東海大、理研、山形大など)

大気チェレンコフ望遠鏡の原理



チェレンコフ望遠鏡と人工衛星



Fermi衛星LAT検出器

最大の違いは「検出器」
の面積（～4桁大きい）

魚を捕る網が1万倍大きいのと一緒

1万倍の量のガンマ線を観測可能

ただし

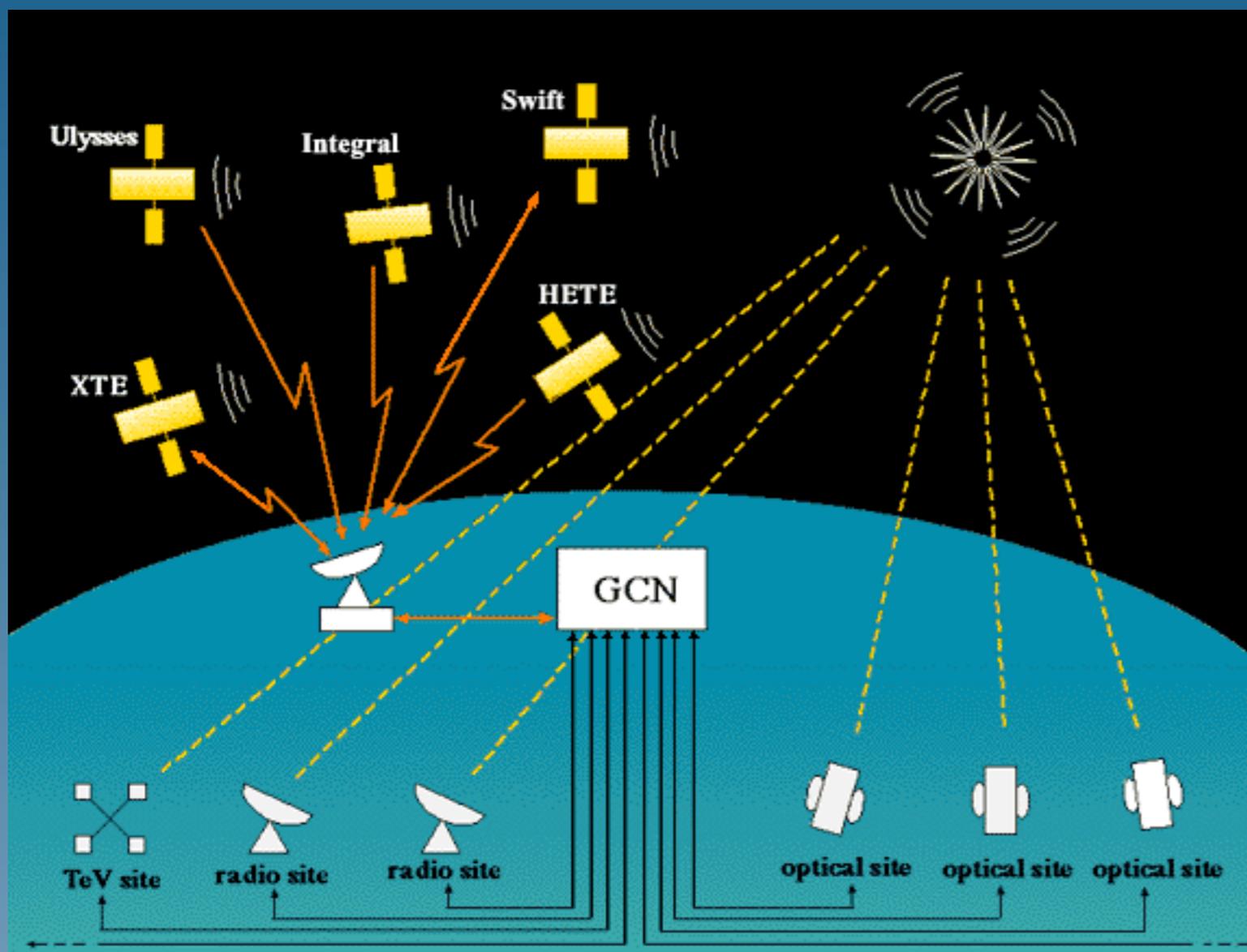
- 視野が狭い：MAGICの視野直径は約4度 → ●
- Fermi衛星LAT検出器：直径約100度 →
- ガンマ線バースト衛星SwiftのBAT検出器：直径約80度相当

なので

- 「いつどこで起きるかわからない」「すぐに暗くなる」
ガンマ線バーストを見つけるには視野の大きい人工衛星
- バースト発生を衛星に教えてもらい（アラート）、すぐに
観測、より多くのガンマ線でより詳しく調べるのがベスト！

速報（アラート）の仕組み

GCN: Gamma-ray Coordinates Network



(c) NASA

<https://gcn.gsfc.nasa.gov/>

- 人工衛星がガンマ線バーストを検出
- 位置を特定、地上に通信し自動的に流す
- 世界中の望遠鏡が、即座に追尾観測する

いつどこで起こるかわからない天体の観測は「チーム戦」
地上の望遠鏡は、できるだけ早く天体に向けたい

MAGIC望遠鏡の高速回転



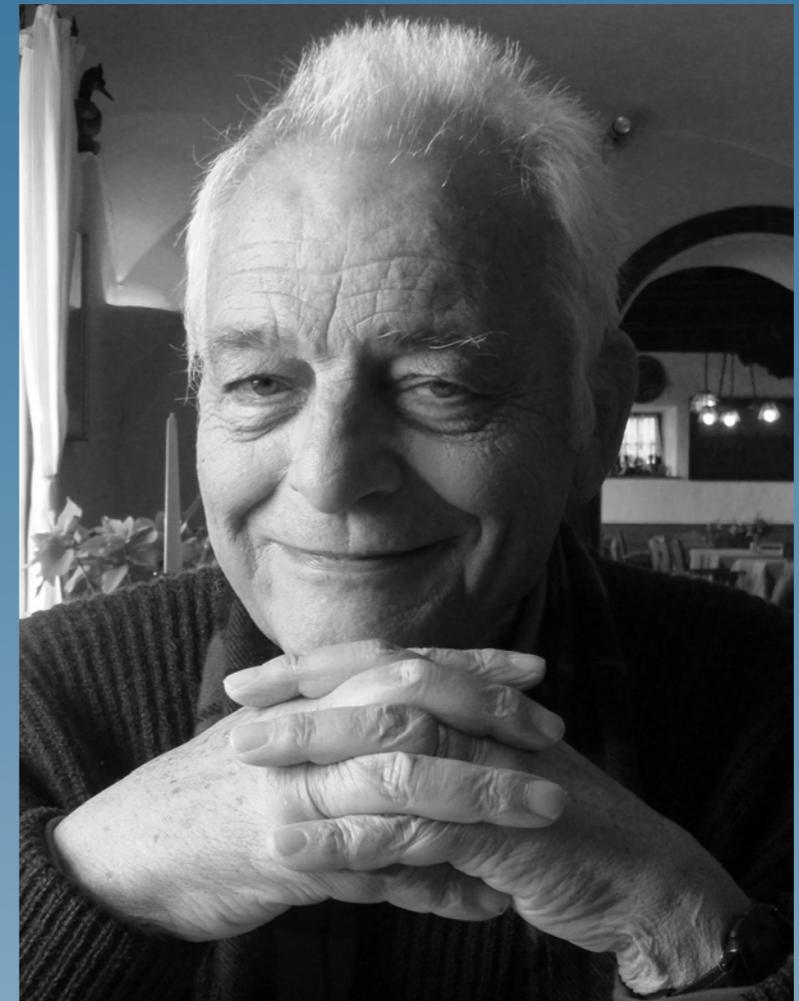
- 秒速7度、全方向に30秒以内（すばる望遠鏡：秒速0.5度）
- 望遠鏡の軽量化が必須 70トン（すばる望遠鏡：555トン）

設計時から観測戦略を見据えた完璧なコンセプト

しかし,,,

- MAGICでは、2005年から2019年の**15年で100以上ものガンマ線バーストを観測**。いくつか兆候らしきものは見えたものの、**確実な発見には至らなかった**。
- 2014年には、MAGIC望遠鏡、特に高速回転と軽量デザインのいわば「父」である研究者が亡くなってしまった...

Dr. Eckart Lorenz
(1938-2014)



2019年1月14日 3番目の
ガンマ線バースト
(Gamma-Ray Burst)
GRB 190114C

2019年1月14日観測体制



観測地ラパルマ島

観測担当シフト
高橋光成 研究員
(東大宇宙線研)
他4名

標準時 +0時間

1月14日
20時57分03秒



日本

GRB観測時の
ヘルプ電話シフト
野田
(東大宇宙線研)

標準時 +9時間

1月15日
5時57分03秒

ガンマ線バースト 190114C
発生時刻

チャットの履歴 (意識)



高橋

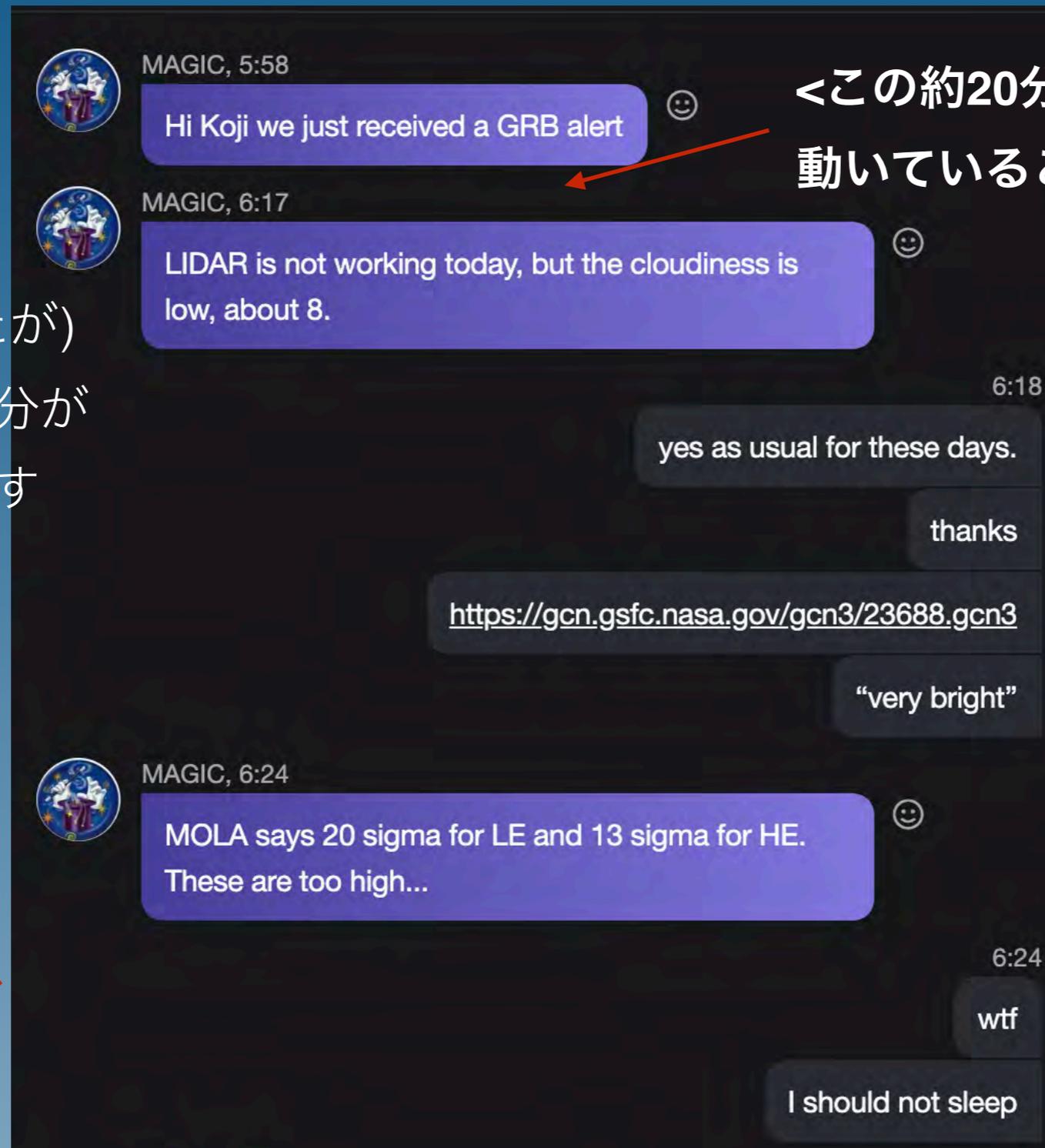
GRB速報来ました

高橋

(電話で言い忘れましたが)
他に少し動いてない部分があり
ますが、大丈夫です

高橋

とんでもないものが見えて
るんですが、、、
これ、本当ですかね？



<この約20分の間、望遠鏡が無事動いていることを電話で確認>



野田

了解、どうも

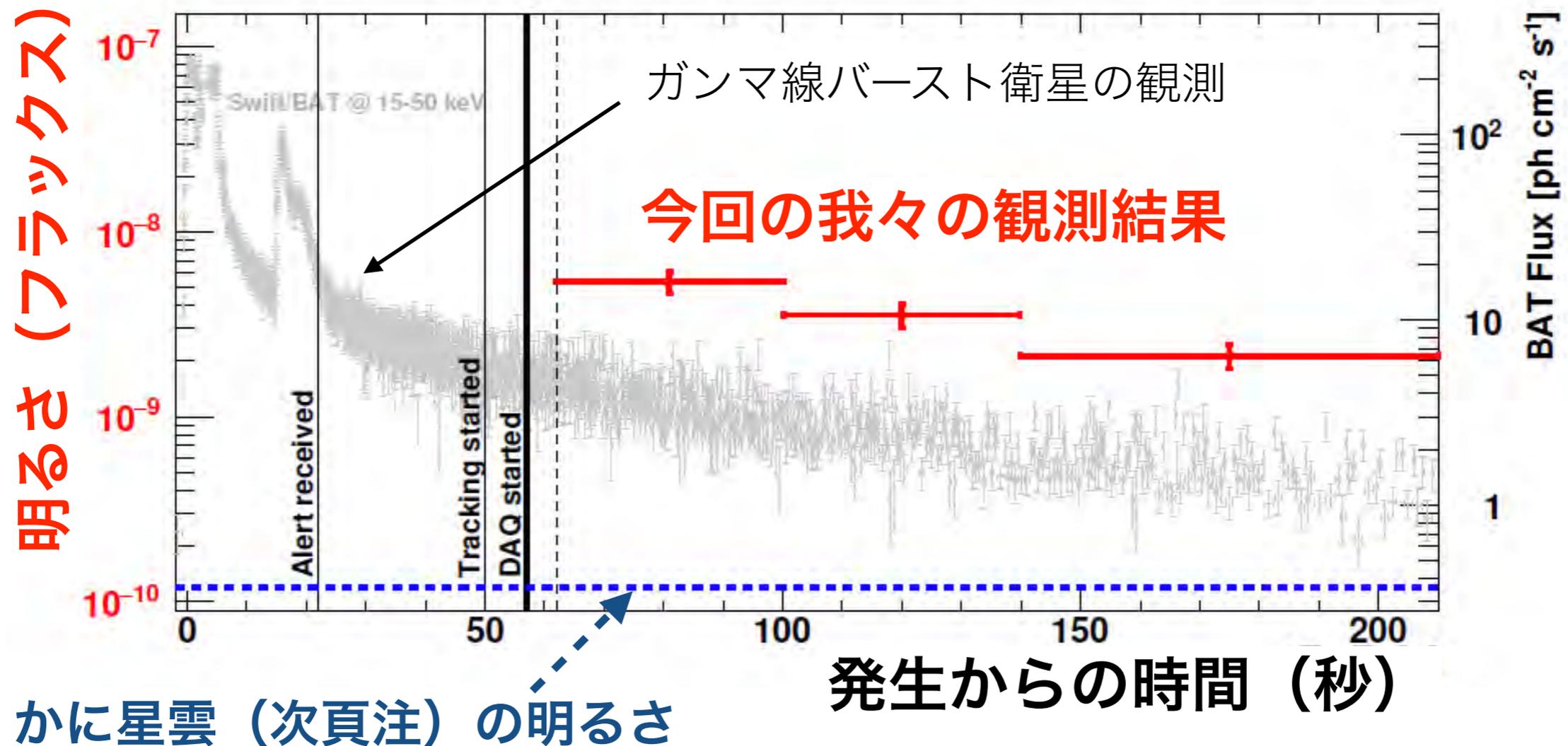
明るいGRBらしいよ
(まだ眠いなあ。。。)

野田

なんてこった
こりゃ寝れないな

最初の数分間

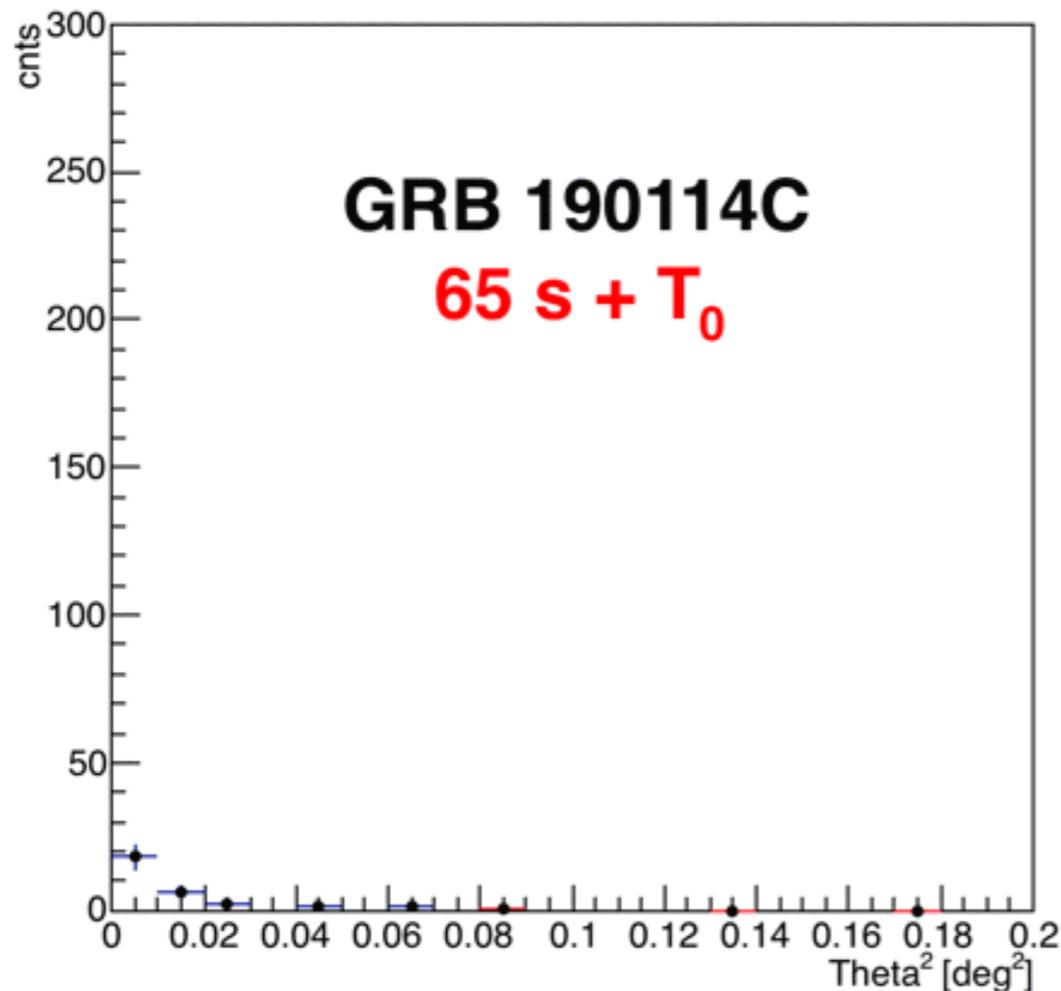
- アラートはGRBの22秒後に全世界に配信。MAGICでは受信後28秒で追尾を開始。その12秒後から解析可能なデータの取得を開始。
- システムは完璧に動作。望遠鏡追尾と取得データは非常に安定。



かに星雲の約100倍！

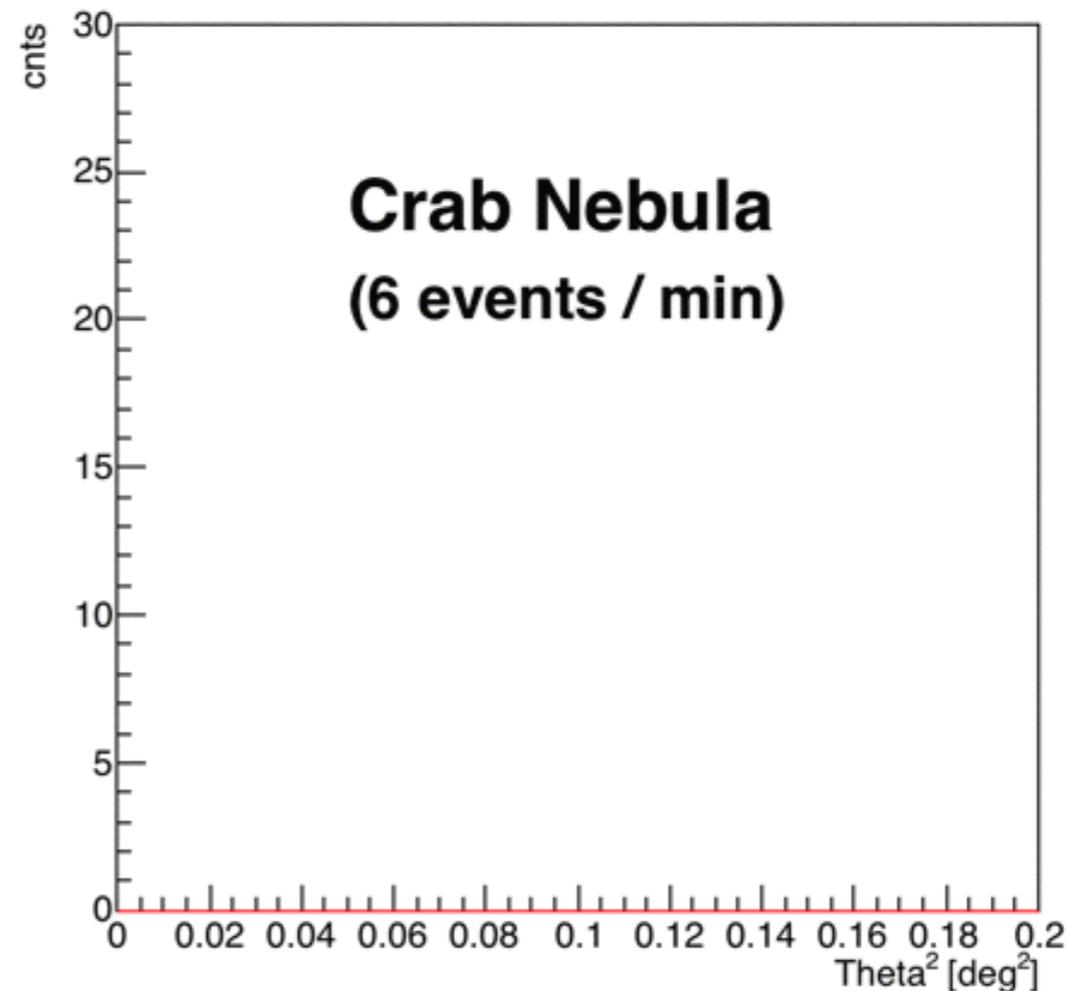
- 最初の明るさが「かに星雲」の100倍近くに達していたと判明
 (注) かに星雲：**ガンマ線で一定の明るさで輝き続ける星の中で最も明るい**ことで知られており、標準光源として使われる
- ガンマ線量の推移 (3.3倍速) 左：GRB、右：かに星雲を**10倍拡大**

ガンマ線量



中心からの角度の2乗

ガンマ線量



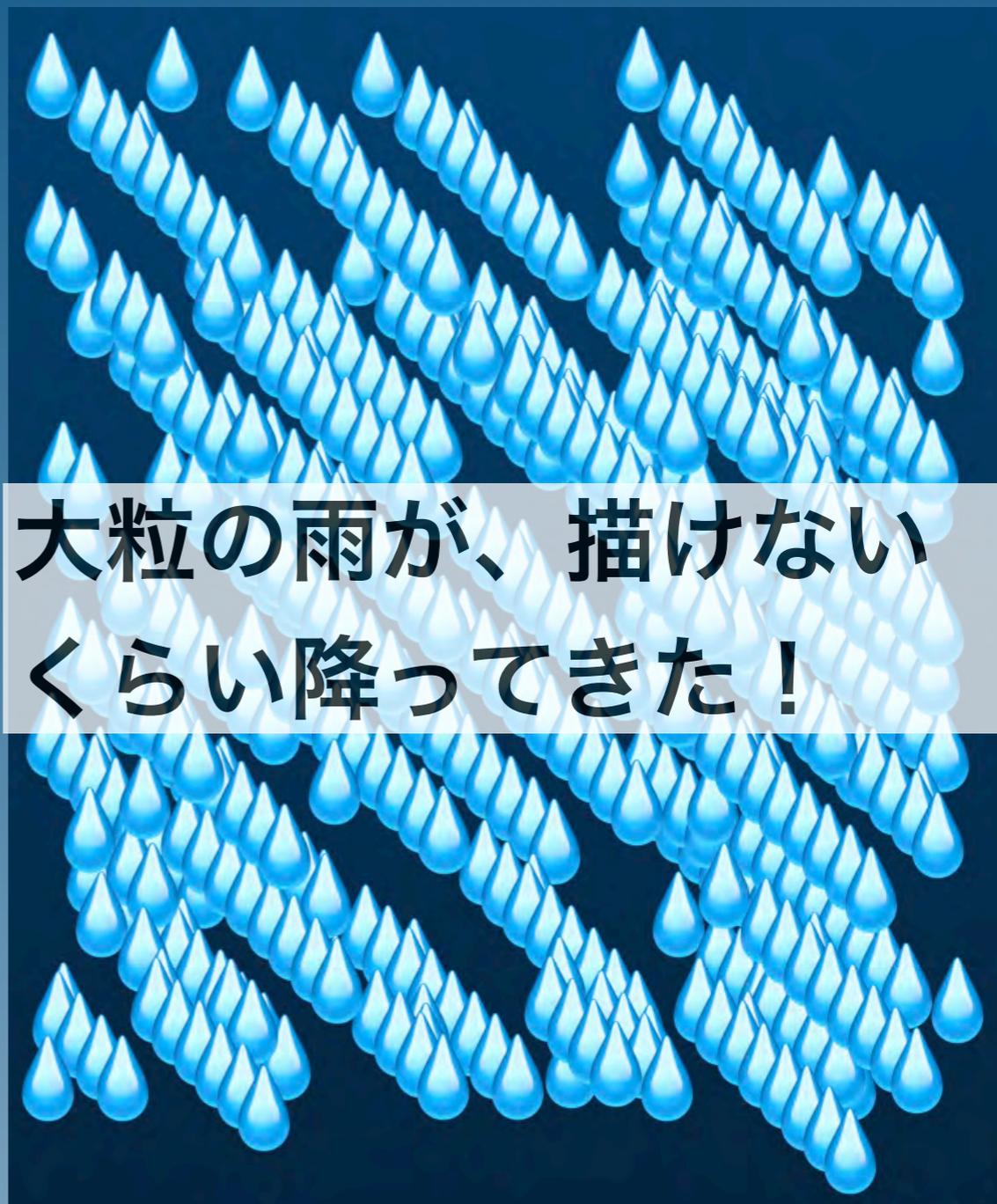
中心からの角度の2乗

ガンマ線の「豪雨」

ガンマ線でバーストをもっと調べたい。しかし、、、



大粒の雨が、描けないくらい降ってきた！



今まで、小粒の小雨ではなかなか難しかった。

全世界に速報メール配信



Astronomer's Telegram #12390, GCN Circular #23701

First time detection of a GRB at sub-TeV energies; MAGIC detects the GRB 190114C

ATel #12390; *Razmik Mirzoyan on behalf of the MAGIC Collaboration*
on 15 Jan 2019; 01:03 UT
Credential Certification: Razmik Mirzoyan (Razmik.Mirzoyan@mpp.mpg.de)

Subjects: Gamma Ray, >GeV, TeV, VHE, Request for Observations, Gamma-Ray Burst

Referred to by ATel #: 12395, 12475



The MAGIC telescopes performed a rapid follow-up observation of GRB 190114C (Gropp et al., GCN 23688; Tyurina et al., GCN 23690, de Ugarte Postigo et al., GCN 23692, Lipunov et al. GCN 23693, Selsing et al. GCN 23695). This observation was triggered by the Swift-BAT alert; we started observing at about 50s after Swift T0: 20:57:03.19. The MAGIC real-time analysis shows a significance >20 sigma in the first 20 min of observations (starting at T0+50s) for energies >300GeV. The relatively high detection threshold is due to the large zenith angle of observations (>60 degrees) and the presence of partial Moon. Given the brightness of the event, MAGIC will continue the observation of GRB 190114C until it is observable tonight and also in the next days. We strongly encourage follow-up observations by other instruments. The MAGIC contact persons for these observations are R. Mirzoyan (Razmik.Mirzoyan@mpp.mpg.de) and K. Noda (nodak@icrr.u-tokyo.ac.jp). MAGIC is a system of two 17m-diameter Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes located at the Observatory Roque de los Muchachos on the Canary island La Palma, Spain, and designed to perform gamma-ray astronomy in the energy range from 50 GeV to greater than 50 TeV.

TITLE: GCN CIRCULAR
NUMBER: 23701
SUBJECT: MAGIC detects the GRB 190114C in the TeV energy domain
DATE: 19/01/15 01:56:36 GMT
FROM: Razmik Mirzoyan at MPI/MAGIC <Razmik.Mirzoyan@mpp.mpg.de>

R. Mirzoyan (MPP Munich), K. Noda (ICRR University of Tokyo), E. Moretti (IFAE Barcelona), A. Berti (University and INFN Torino), C. Nigro (DESY Zeuthen), J. Hoang (UCM Madrid), S. Micanovic (University of Rijeka), M. Takahashi (ICRR University of Tokyo), Y. Chai (MPP Munich), A. Moralejo (IFAE Barcelona) and the MAGIC Collaboration report:

On January 14, 2019, the MAGIC telescopes located at the Observatorio Roque de los Muchachos on the Canary island of La Palma, detected very-high-energy gamma-ray emission from GRB 190114C (Gropp et al., GCN 23688; Tyurina et al., GCN 23690, de Ugarte Postigo et al., GCN 23692, Lipunov et al. GCN 23693, J. Selsing et al. GCN 23695). The observation was triggered by the Swift-BAT alert and it started about 50s after the Swift T0: 20:57:03.19. The GRB data of MAGIC shows a clear excess of gamma-ray events with the significance >20 sigma in the first 20 min (starting at T0+50s) for energies >300GeV. The relatively high detection threshold is due to the large zenith angle of observations (~60 deg.) and the presence of partial moon. After the first bright flash the source is quickly fading.

The MAGIC point of contact for this burst is R. Mirzoyan (Razmik.Mirzoyan@mpp.mpg.de).
Burst Advocate for this burst is K. Noda (nodak@icrr.u-tokyo.ac.jp)

- 4時間後に速報メールを配信。「GRBからの数百GeVガンマ線を、高い信頼度で史上初めて観測」「他のGRBと同様、すぐに減光」
- 他の望遠鏡による距離測定 → 45億光年、つまり地球が誕生した頃に光ったと判明。MAGICによるGRB観測史上3番目に「近い」

しばらくは、内外からの祝福が多すぎてメール処理が不可能に 😊💧

データ解析も「国際チーム戦」



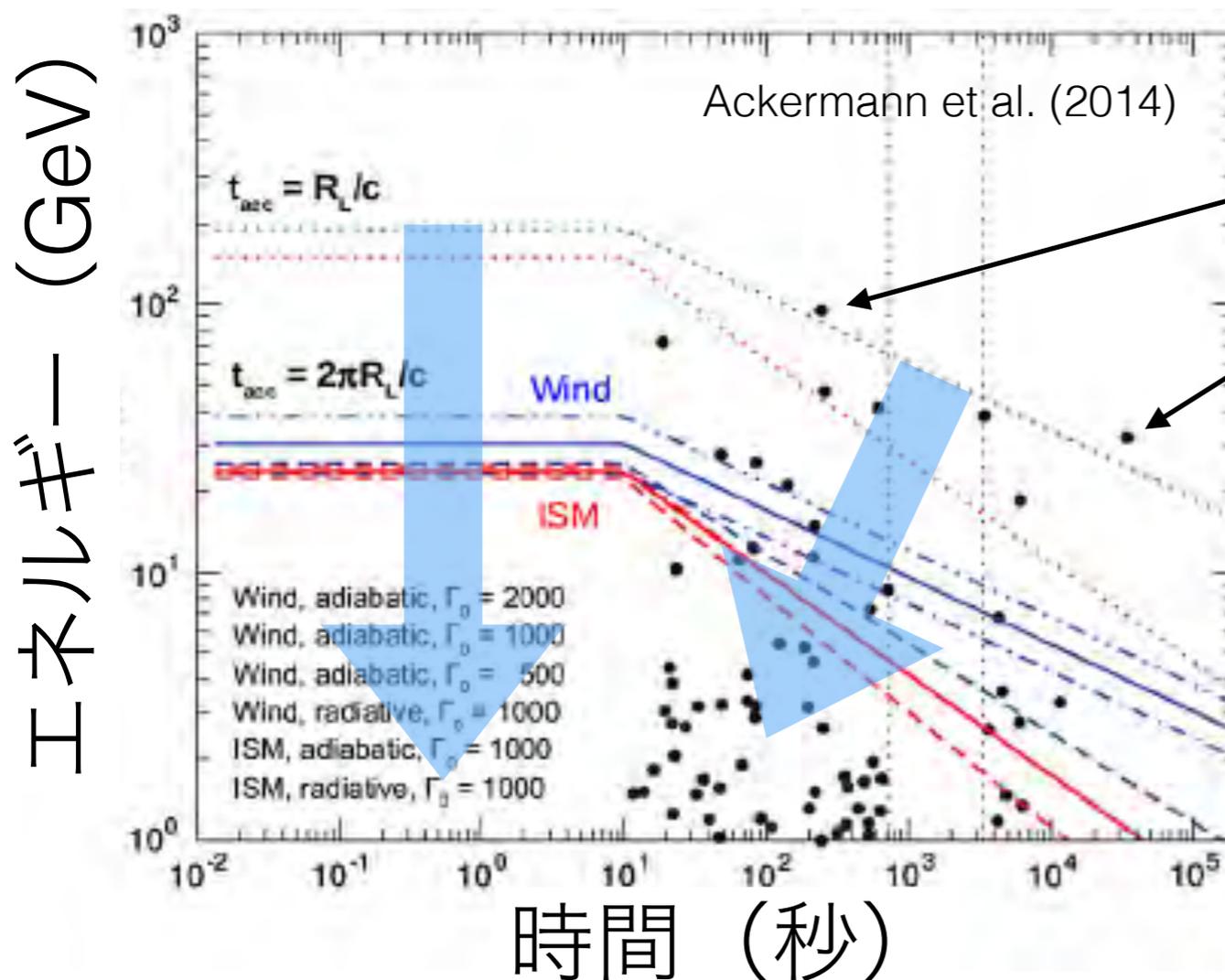
- これで終わりではなく、むしろ始まり
- 手を挙げたデータ解析者は日本、イタリア、スペイン、ドイツなどから10人（普段は多くて3人）。メンバーの経験と判断力から、チームを主導することに
- 標準的なデータ解析では不十分であり難しい解析
その他にも「初めて」が多く予定より長くかかった
- 最終的に2019年11月にNature誌に2本の論文が出版

何が新たにわかって
何が課題として残ったのか

ガンマ線バーストで観測されたガンマ線エネルギー

最高記録は**950億電子ボルト (95 GeV)**

(Fermi衛星LAT検出器の**GRB 130427A**の観測)



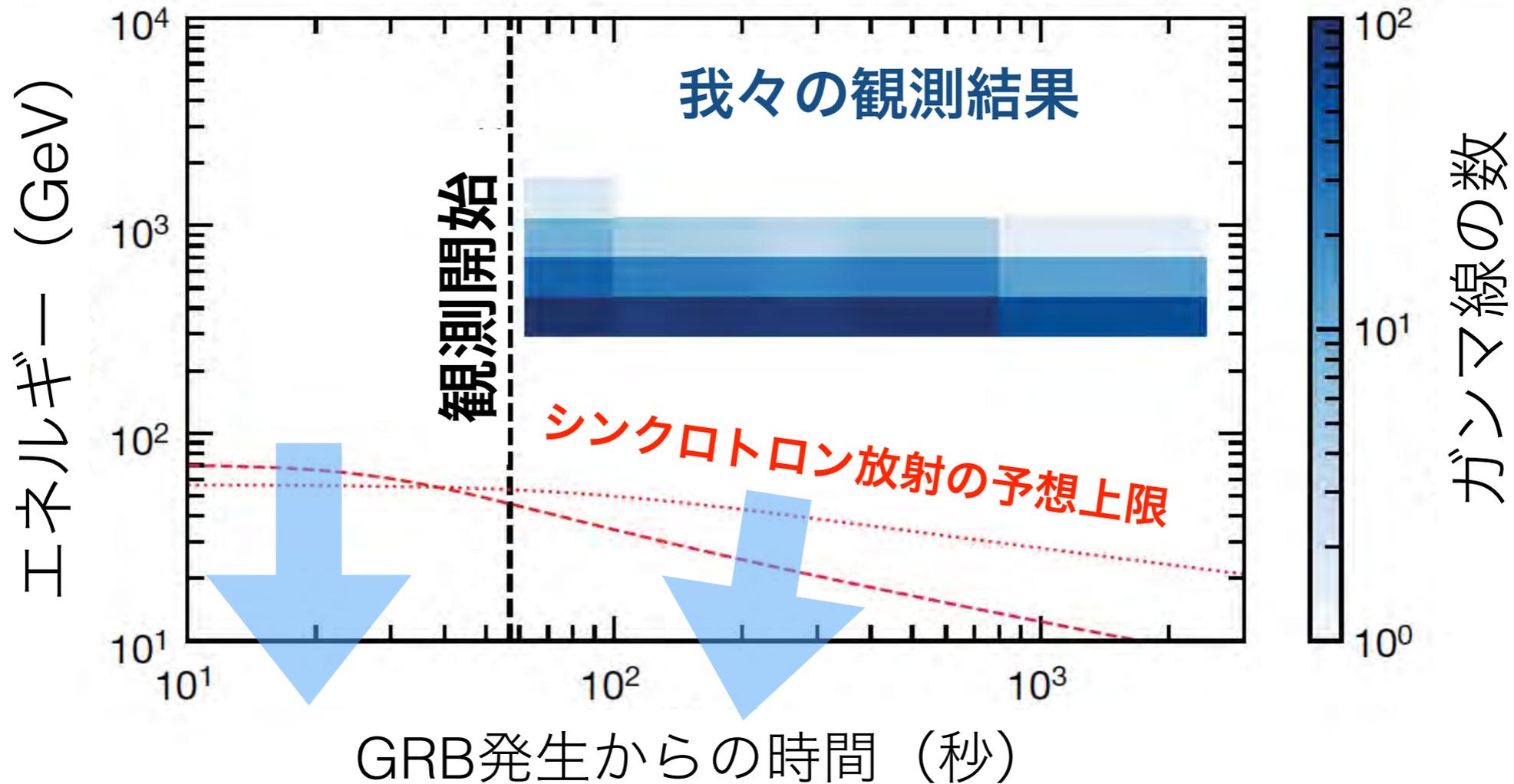
95 GeVガンマ線 (4分後)

32 GeVガンマ線 (9時間後)

水色矢印より下は、標準的な理論で何とか説明できるが、
 おそらく別の説明が必要なの
 では？とはっきりしなかった

GRBからのガンマ線エネルギー最高記録を**1桁以上更新**

1兆電子ボルト (1000 GeV = 1 TeV) 以上！！

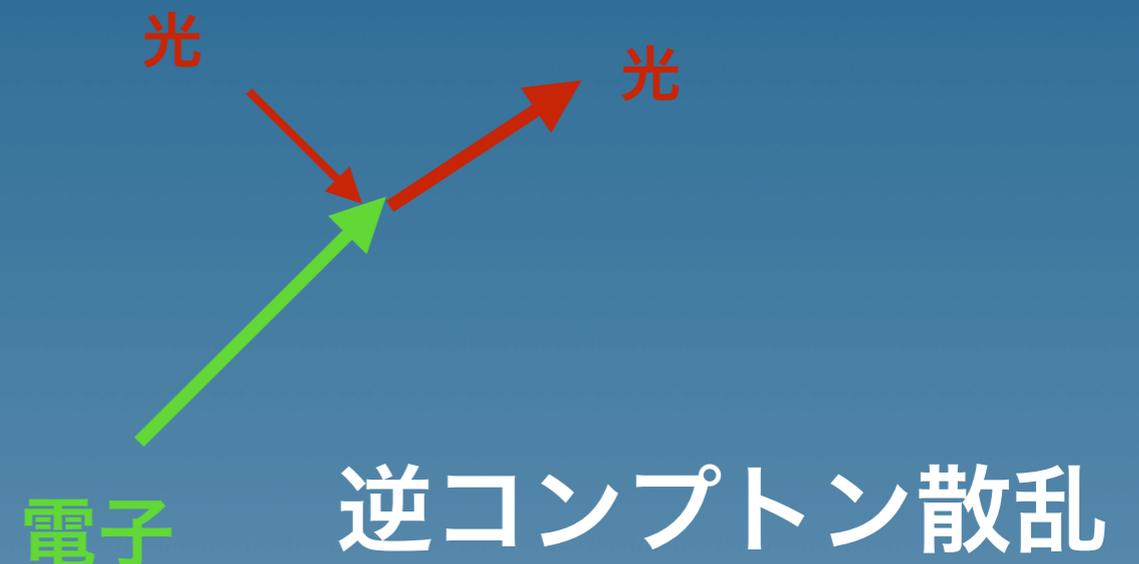
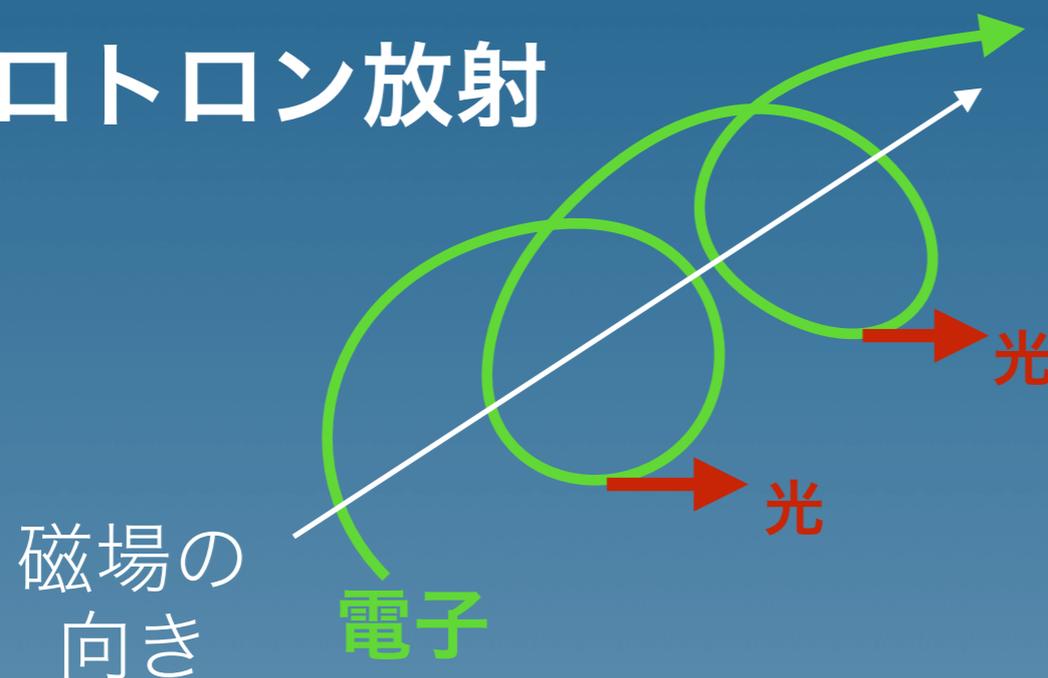


- 標準的な理論=シンクロトロン放射では明らかに説明できない
- 以上がNature誌の1本目。著者約230人、主著者9人のうち3人が日本

シンクロトロン放射と「別の説明」

先程：光・電磁波が宇宙を飛んで物質に届いた時にどう捕らえるか
今回：そもそも光・電磁波（ガンマ線）が天体でどう作られるのか

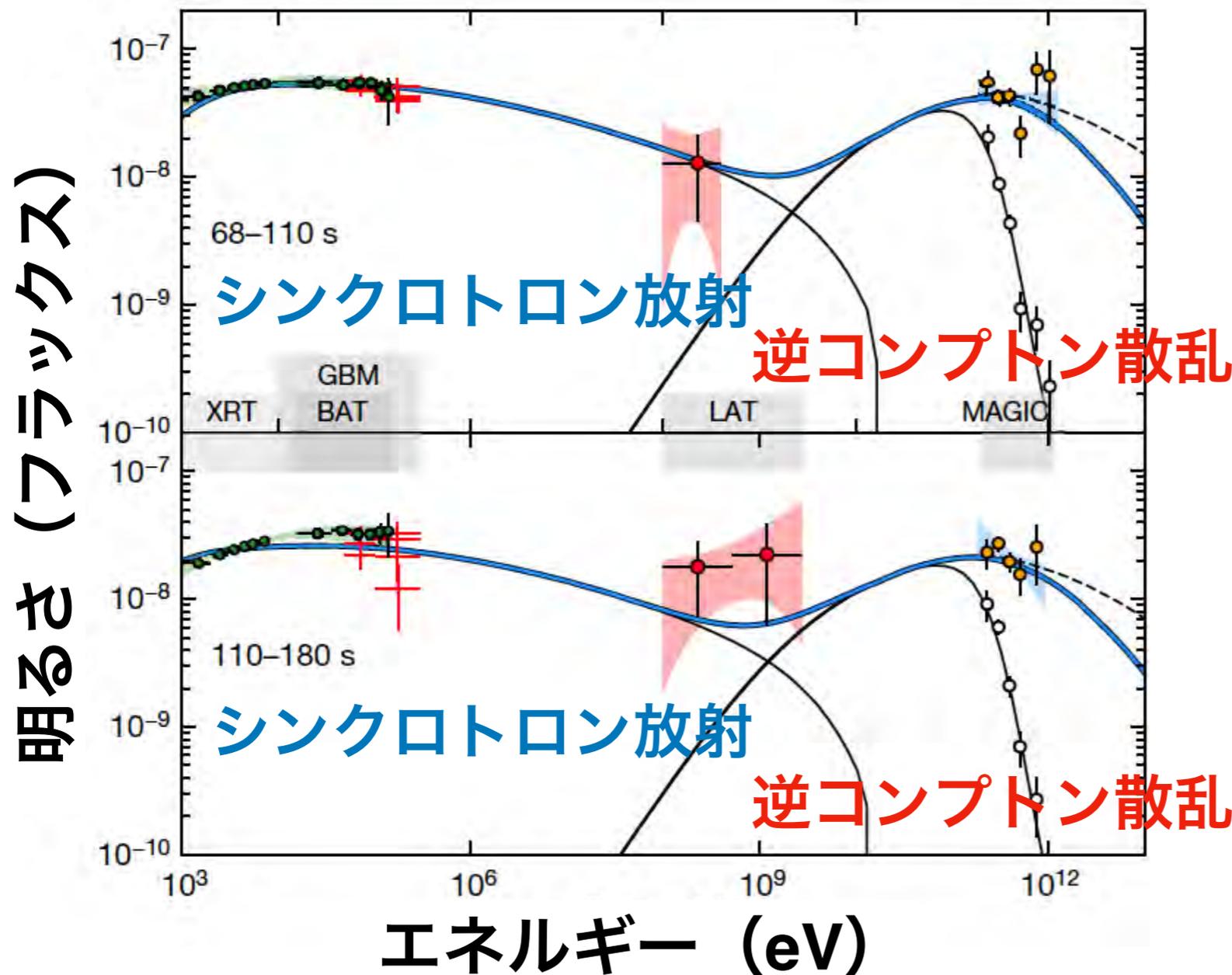
シンクロトロン放射



逆コンプトン散乱

- GRB減光は電波からMeVガンマ線で観測され、シンクロトロン放射が標準的説明だが、GeVガンマ線も同じ説明でよいかは不明
- 今回のTeVに及ぶガンマ線放射は、電子による逆コンプトン散乱の可能性が高く、他の原因、例えば陽子由来ではなさそう。

「多波長観測」 multi-wavelength



- TeVガンマ線だけでなくGeVガンマ線、X線、可視光、電波を総動員
- シンクロトロン放射ではTeVガンマ線が不足
逆コンプトン散乱がないと説明できない
- GeVで今まではっきりしなかったのは2成分が混ざっているため

- Nature誌の2本目。著者はMAGIC以外も含め約400人

これで終わり？いいえ。

- まだ1つの話。同様の観測を今後も続け、多くのGRBをTeVガンマ線で調べれば、残光の詳細、爆発周辺環境がわかる
- GRB本体の即時放射はより爆発中心に近い情報を持つ。
早い時間のTeVガンマ線を捉えれば、爆発の本質、ブラックホール生成の瞬間が明らかに。もっと早く観測を始めたい
- 相対性理論の検証：GRB 190114Cの残光でも行われたが、他のGRBの即時放射で検証すればより高精度になる

「もっと光（ガンマ線）を！」（ゲーテ）

遂に双子に跡継ぎができました



大口径望遠鏡 (Large Sized Telescope)



Cherenkov Telescope Array



CTAプロジェクト



cherenkov
telescope
array



- 世界31カ国から1500人以上の研究者・技術者が集まった史上最大の大気チェレンコフ望遠鏡群の計画
- 南北半球に1つずつの観測地 北：MAGICと同じラパルマ島
大口径望遠鏡（口径23m）4台、中口径望遠鏡（12m）15台
- 大口径望遠鏡：MAGICの10倍よく見える。全方向に20秒以内
1台目は既に観測中。2023年までに残り3台を建設予定



CTA北サイト完成予想図

今後の展望：新時代の到来

多粒子 "マルチメッセンジャー"

- **重力波**とガンマ線バースト

2017年8月、**重力波**とガンマ線の初の同時観測（チェレンコフ望遠鏡はまだ）



- 継続時間が短いGRBは**中性子星・ブラックホールの合体**に関係、その最初の例。今後も同様の例が待たれる

- **高エネルギーニュートリノ**とガンマ線

2017年9月、**ニュートリノ**（IceCube実験）と数百GeVガンマ線（MAGIC望遠鏡）がある活動銀河核から同時に観測された



- こちらもまだ次の例がなく、何が起きたのか不明

まとめ

- 宇宙の極限現象「ガンマ線バースト」(GRB)は最近20年でようやく理解が進んだ巨大な天体爆発
- そこから来るガンマ線のうち、より高エネルギーのGeVガンマ線はあまり理解されておらず、地上の大気チェレンコフ望遠鏡での検出が長らく待たれていた
- 15年の努力の末、2019年1月にMAGIC望遠鏡が初めて検出に成功。TeVに及ぶガンマ線は従来の理論では説明できず、新しい放射機構の発見となった

まとめ

- 天文・宇宙物理学も時代は「グローバル」「総力戦」より大きい国際共同研究プロジェクトCTAが開始
- 今後は光の多波長観測だけでなく「多粒子」観測でGRBや活動銀河核のブラックホールの本質に迫る

ご清聴ありがとうございました



Backup

GRBの標準的な理解

