

宇宙一の爆発現象 — ガンマ線バースト —

青山学院大学 理工学部

山崎 了

宇宙物理学とはどのような学問？

例えば…

- ① 宇宙は、どのように生まれ進化してきたか？
- ② 星や銀河や地球はどうやってできたか？
- ③ 様々な天体现象の発生メカニズムは？

このような問題の答えを求めるために、
これまでに得られている物理学の知識を総
動員して、理論的に計算したり、天体観測を
行いながら、手のとどかないところで起こる
未解明の天体现象を明らかにする学問。

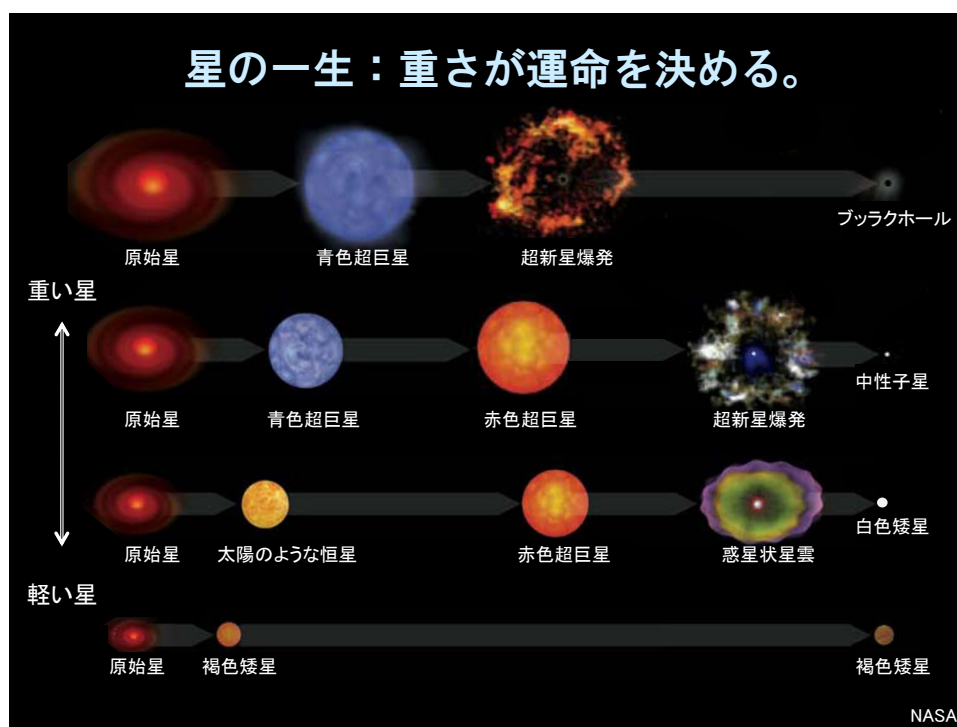
「未解決の天文学—宇宙13の疑問—」より(「Newton」誌)

1. 太陽の活動の変化は、地球にどのような影響を与えるか？
2. 太陽系はどこまで広がっているか？
3. 太陽系の惑星はどうやってできたのか？
4. 太陽系はどれくらい普通なのか？
5. 超新星爆発はなぜおきるのか？
6. 銀河はどんな一生をたどるか？
7. ガンマ線バーストとは何か？
8. 宇宙線はどこからくるのか？
9. 最初の天体はいかに生まれたか？
10. ダークマターの正体は何か？
11. ダークエネルギーとは何か？
12. 宇宙は何次元か？
13. 宇宙は一つだけか？



目次

1. 星の進化、ブラックホール
2. 宇宙に見られる爆発現象
3. ガンマ線バースト
4. 青山学院大学でのガンマ線バースト研究の紹介



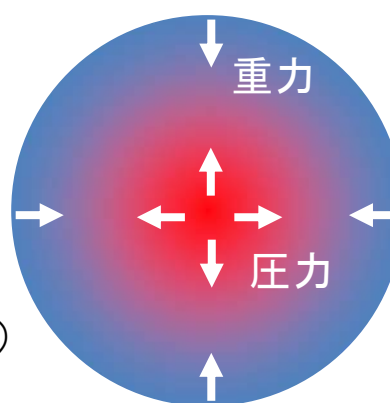
星の構造： 重力と圧力のつり合いで決まる

主系列星(太陽)の段階：
核融合反応によってガス圧を発生させて重力に対抗。

核燃料が燃え尽きると・・・

軽い星の場合：
白色矮星となる。
電子の縮退圧(量子力学的な力)で重力に対抗できる。

チャンドラセカール限界質量(太陽質量の1.4倍)
より重い場合はどうなるか？



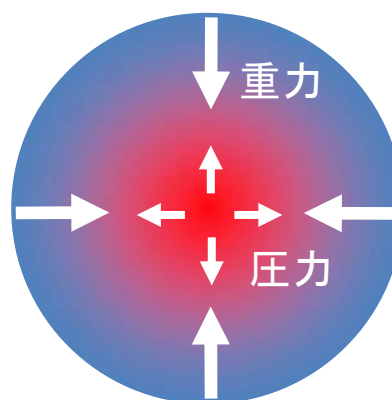
重い星の最期：重力崩壊

中程度に重い星：

電子の縮退圧で支えられなくなり、星全体が中心にむかって崩壊(重力崩壊)。

中心部が高密度になり、**中性子星**が誕生。
中性子星表面は固く、さらにふりつもるガスを逆に外側にむけて跳ね返す
⇒ **超新星爆発**

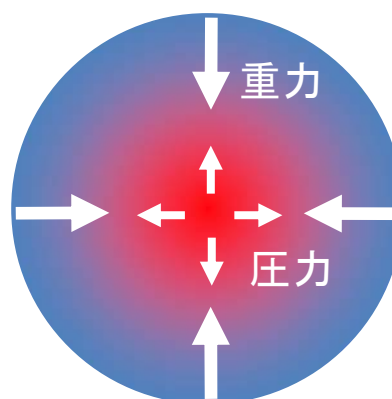
中性子星は中性子の縮退圧で重力に対抗している。



重い星の最期：重力崩壊

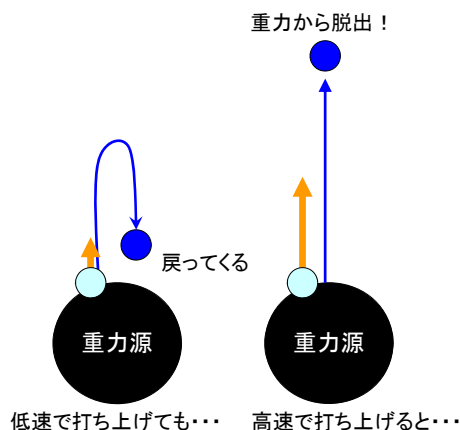
さらに重い星：

中性子の縮退圧でも支えられない。
もはや重力に対抗できる圧力を生み出せない。
中心にむかって崩壊
⇒ **ブラックホール**誕生。



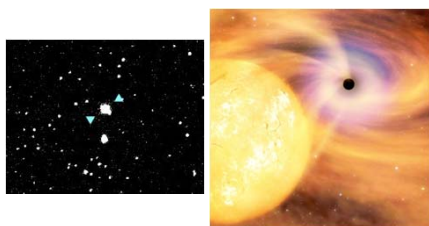
ブラックホールとは？

- 1795年 ラプラスの議論
脱出速度が光速を超えると
どうなるのだろうか？
光もでてこれない天体がある？
真っ黒？
- 1915年 アインシュタインの
一般相対性理論
重力場や光の運動の正しい
取り扱いが可能に。
- 1916年 シュバルツシルトの
厳密解
ブラックホールの存在を予言。



©植村

ブラックホール、発見！



- はくちょう座X-1
- (Webstar&Murdin 1972;
Bolton 1972)
- 「重くて暗い星」の質量
が中性子星の限界質量
を超えていた！

S TO NATURE

SCIENCES

Spectroscopic Binary Companion?

trum, colours and interstellar which is coincident with the radio star³, were those of a made measurements of the August 1971 to October 1971 ple, whose changes of velocity ay flux.

Photograph	Dispersion	Phase
photographic	184 Å/mm	0.000
photographic	184 Å/mm	0.345
photographic	184 Å/mm	0.348
photographic	62 Å/mm	0.864
photographic	62 Å/mm	0.286
photographic	62 Å/mm	0.639
photographic	62 Å/mm	0.817
photographic	62 Å/mm	0.819
photographic	62 Å/mm	0.992
age tube	75 Å/mm	0.004
photographic	62 Å/mm	0.899
photographic	62 Å/mm	0.943
photographic	62 Å/mm	0.074
age tube	75 Å/mm	0.501
age tube	75 Å/mm	0.504
age tube	75 Å/mm	0.530
photographic	62 Å/mm	0.349

by Drs K. Nandy and T. Lloyd

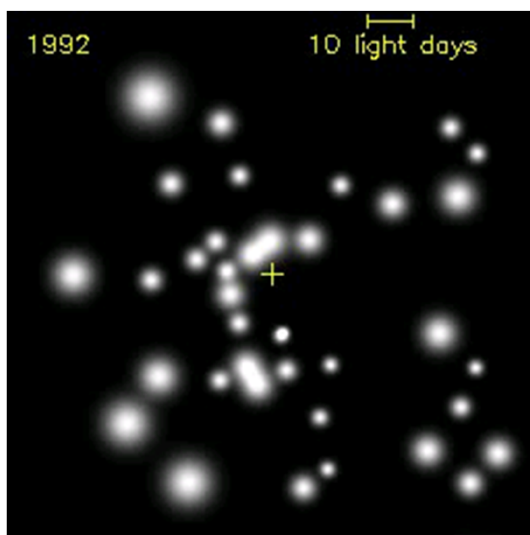
the spectroscopic evidence alone, the system is similar to, but on the short period fringe of, other spectroscopic binaries containing blue supergiants¹. In nearly all these systems—and especially the short period ones—the supergiant shows emission lines; emission lines are not seen in our spectra of HD 226868 (we have not examined H α). We do not see a second spectrum or even variations in the widths of the absorption lines, and would not if the companion were a normal BOV or B8I star, or fainter.

Fig. 1 The radial velocity of HD 226868 plotted against phase in a 5.60 day period. Zero phase is defined to occur at Julian Day 2441163.597. ●, Measurements on photographic spectra at 62 Å/mm; ×, photographic spectra at 184 Å/mm; +, image tube spectra at 75 Å/mm.

A blue supergiant rotating synchronously in a binary system

©植村

天の川銀河の中心には、太陽質量の100万倍の質量をもつ巨大ブラックホールがある。



天の川銀河の中心にあるブラックホールのまわりをまわる星たち

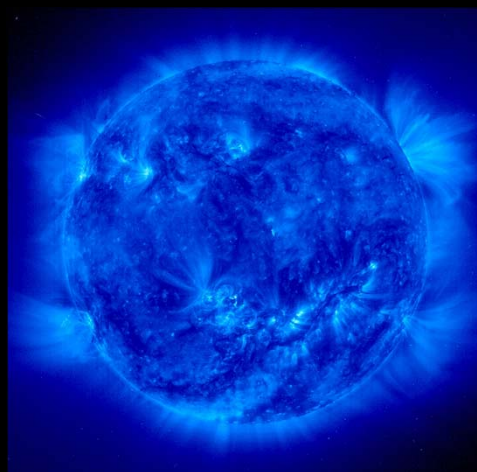
- 「はくちょう座X-1」のようなブラックホールは銀河系の中で20個程見つかっている。
- 銀河の中心にも巨大なブラックホールがある。
⇒ブラックホールの存在自体は間違いない。
- 相対性理論の実験上として・・・
 - ブラックホールはどのようにして生まれるのか？
 - ブラックホールが生まれる時、どのような現象がおこるのか？
- ⇒ **ガンマ線バーストの研究がそのヒントになる。**

宇宙で見られる 爆発現象

可視光で見た太陽

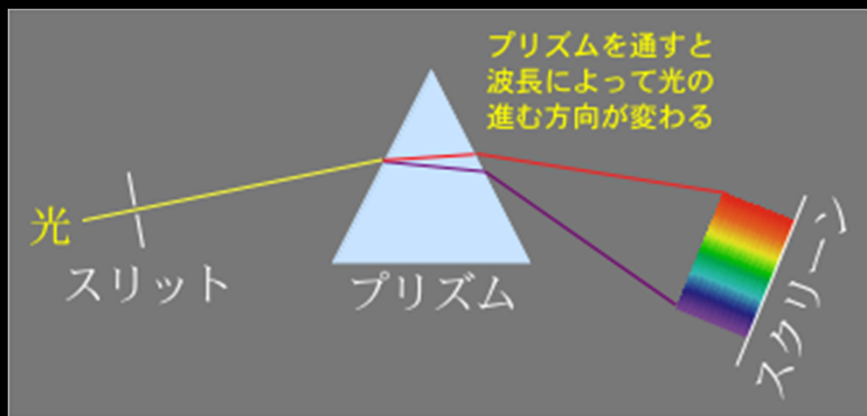


紫外線で見た太陽



宇宙観測の手段～光（電磁波）

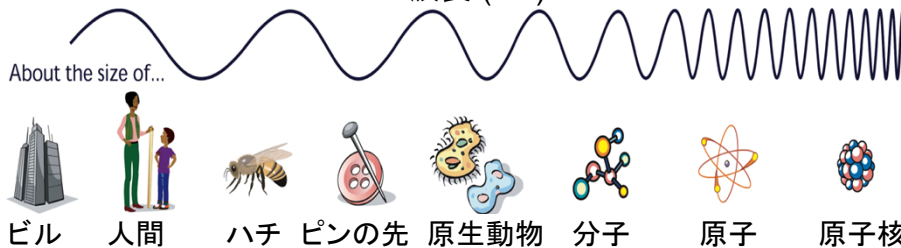
電磁波とは？ 秒速30万キロメートルで進む、
電界（電場）と磁界（磁場）の横波



「色」が違う → 電磁波の波長が違う

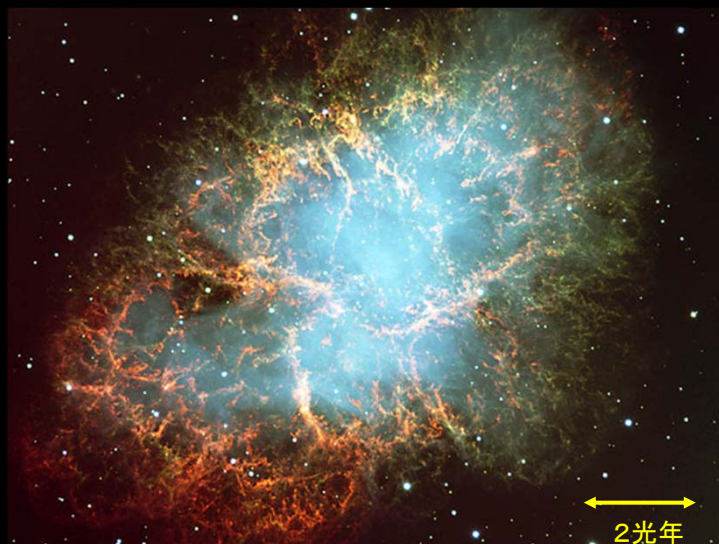
宇宙観測の手段～光（電磁波）

電波	マイクロ波	赤外線	可視光	紫外線	X線	ガンマ線
10^2	10^{-1}	10^{-5}	5×10^{-7}	10^{-8}	10^{-10}	10^{-12}
波長 (m)						

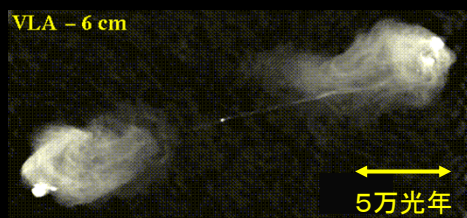
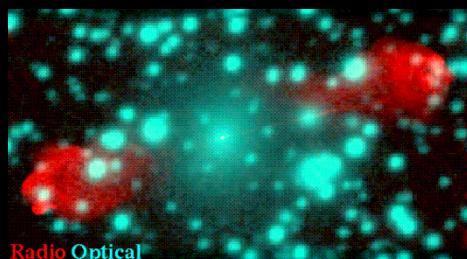


同じ天体を見たとしても、波長が違えば、
見た目の形状や見える現象が異なる。

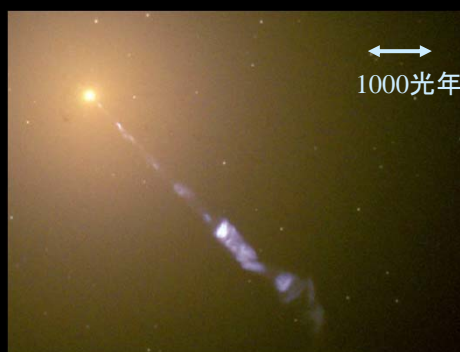
星の死（超新星爆発）の残骸：カニ星雲



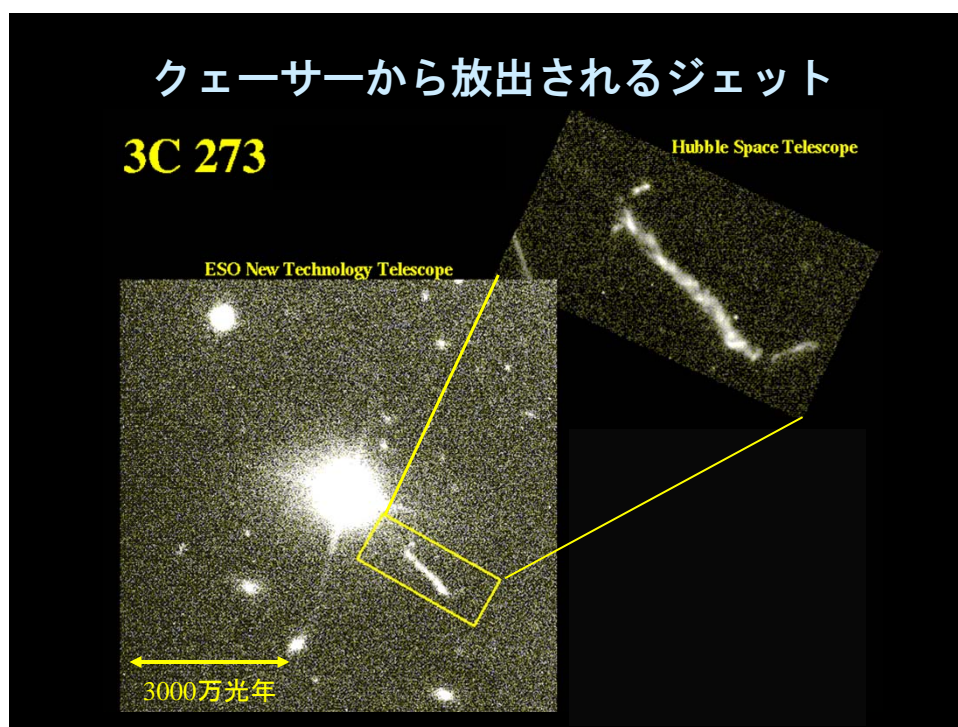
銀河の中心から放出されるジェット



Cygnus A (700 万光年)



M87 (5000 万光年)

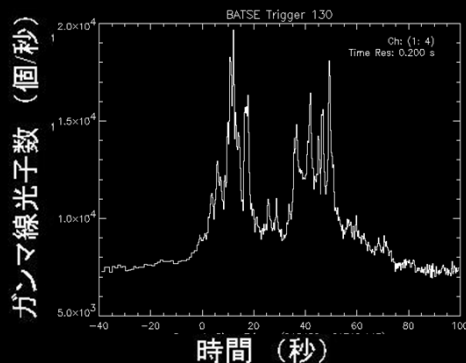


宇宙にはもっとすごい
爆発現象がある

謎の天体現象：ガンマ線バースト

ガンマ線バーストの発見 は意外なところから

1967年 Vela 衛星打ち上げ
(部分的核実験禁止条約)
核実験が行われていないか
監視する目的だったが、

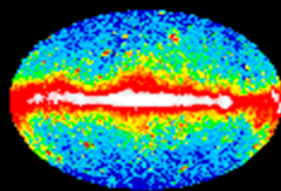


地球の外からやってく
るガンマ線を発見。

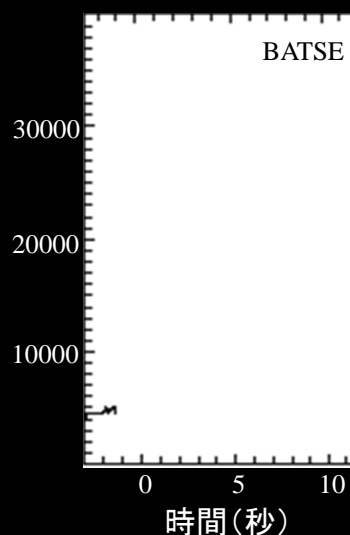
©NASA

ガンマ線バーストの時間変動は ほんの数10秒程度

天球面における
ガンマ線マップ



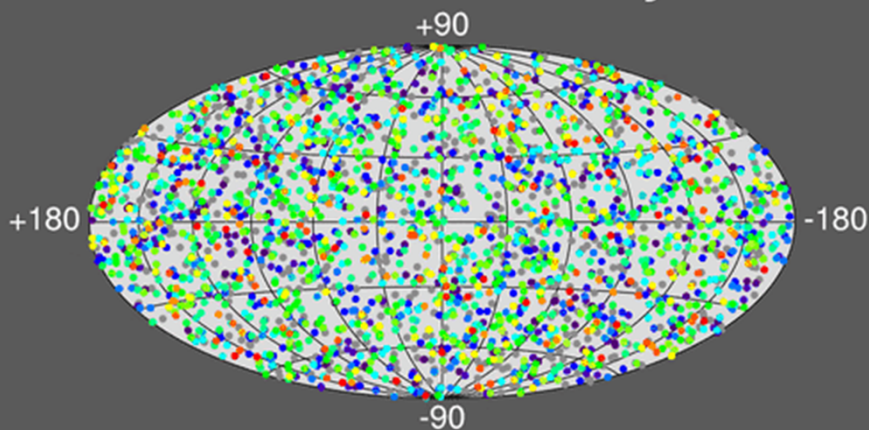
ガンマ線の明るさ(ガンマ線のカウント数)



1日に1回の割合で観測されている

いつ、どこから来るかわからない。

2704 BATSE Gamma-Ray Bursts



ガンマ線バーストは、地球からどのくらい離れた場所で起こるのか？

初期のガンマ線バースト研究(1997年まで)の大半は「ガンマ線バーストまでの距離」についてであった。

Ruderman (1975) : “more theories than bursts”

ガンマ線バーストの距離についての、
1990年代はじめの諸説と評価

説	距離	評価
太陽系のすぐ外	～ 3 光年	△
銀河円盤の太陽近傍説	～ 1000 光年	◎
我々の銀河の周辺 (ハロー)	～ 30 万光年	○
局所銀河団	～ 3000 万光年	△
宇宙論的距離	～ 100 億光年	×

「光度」と「みかけの明るさ」の関係式：

$$L = 4\pi D^2 F$$

光度＝(本当の)明るさ: L [W] = [J/sec]

単位時間あたりに放出されるエネルギーのこと。
正体を探るうえで、これを知りたい。

みかけの明るさ: F [W/m²] = [J/sec/m²]

観測者のところで、単位時間・単位面積あたりに
通過する放射エネルギーのこと。
実際に観測される量。

天体までの距離: D [m]

(天文学においては、天体までの距離を測るのは大変。)

**F は観測により測定できる。
Lを知るには Dを知る必要がある。**

例:「太陽 ($L = 10^{26}$ W)」と「電球 ($L = 100$ W)」

距離の
差は12桁
(1兆倍)

↑

- ・太陽が 1光年 (≒ 10^{13} km) 離れているとき、
 $F(= \text{見かけの明るさ}) \sim \frac{10^{26} \text{ W}}{4\pi (1\text{光年})^2} \sim 10^{-7} \text{ W/m}^2$
- ・電球が 10km 離れているとき、
 $F(= \text{見かけの明るさ}) \sim \frac{100 \text{ W}}{4\pi (10\text{km})^2} \sim 10^{-7} \text{ W/m}^2$

↓

ガンマ線バーストの距離の諸説:

距離の
差は11桁

↑

- 太陽系の端: $D \sim 0.3$ 光年
- 宇宙の果て: $D \sim$ 数100億光年

↓

**つまり、ガンマ線バーストの正体は、
「太陽か電球か区別がつかない」くらいに不明だった。**

1995年 D.Q. Lamb v.s. B. Paczynski
 == GRBまでの距離に関する論争の国際会議 ==

Publications of the Astronomical Society of the Pacific
 107: 1131–1132, 1995 December

**The 75th Anniversary Astronomical Debate on the Distance
 Scale to Gamma-Ray Bursts: An Introduction**

ROBERT J. NEMIROFF

George Mason University, CSI Institute, Fairfax, Virginia 22030
 and NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland 20771
 Received 1995 August 31; accepted 1995 September 22

ABSTRACT. Seventy-five years ago, in April 1920, two of the leading astronomers of the first half of the twentieth century argued over the Scale of the Universe. In April 1995, in the same auditorium, two of the leading astronomers of the second half of the twentieth century argued over the Distance Scale to Gamma Ray Bursts. The text of the presented lectures and arguments are recreated in the following papers. It is hoped that these papers will stand as educational tools for those wishing to know the logic behind the arguments of the great gamma-ray burst controversy. These papers may also provide a clue as to how scientists think.

1995年のD.Q.Lambの論文

「宇宙の果て」説 「銀河系内」説

TABLE 1

Comparison of Evidence for (✓) and against (–) the Cosmological and Galactic Hypotheses

Evidence	Cosmological	Galactic
Isotropy and brightness distribution	✓	✓
Similarities of SGRs & GRBs		✓
Famous 1979 March 5 event		✓
Cyclotron lines		✓
Repeating		✓
Time stretching	–	–
No bright optical counterparts		✓

この論争当時は、D.Q.Lambの論理のおかげで、ほとんど全ての研究者たちはガンマ線バーストは銀河系内で起こると信じていた。

ガンマ線バーストまでの距離は？

距離を知ることは、ガンマ線バーストのエネルギー（明るさ）、さらには、正体を知る上で本質的に重要。しかし、、、

発見当時から1997年までわからなかった。

- ・我々の銀河内で起こっているのか？
- ・100億光年の彼方で起こっているのか？

こちらが正解と判明(1997年)

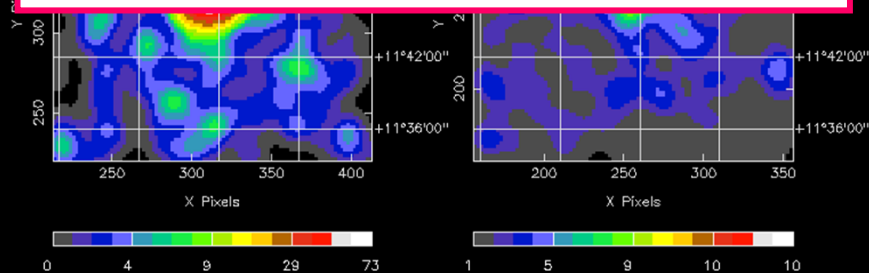
BeppoSAX衛星によるX線残光の発見

方向(天球面上の位置)が正確にわかった。

BeppoSAX observation of GRB970228 field
SAX MECS 1997 Feb 28 Exposure: 14334 s
5^h02^m36^s 5^h02^m09^s 5^h01^m42^s 5^h01^m15^s

BeppoSAX observation of GRB970228 field
SAX MECS 1997 Mar 3 Exposure: 16272 s
5^h02^m36^s 5^h02^m09^s 5^h01^m42^s 5^h01^m15^s

地上の光学望遠鏡でスペクトル解析により赤方偏移が測られ、ガンマ線バーストまでの距離が宇宙論的なものと判明した。



ガンマ線バーストは、宇宙の果てで起こる、ものすごく明るい天体現象。

地球上では、1日に約1回という頻度で観測されている。

光度距離；数十億～百億光年

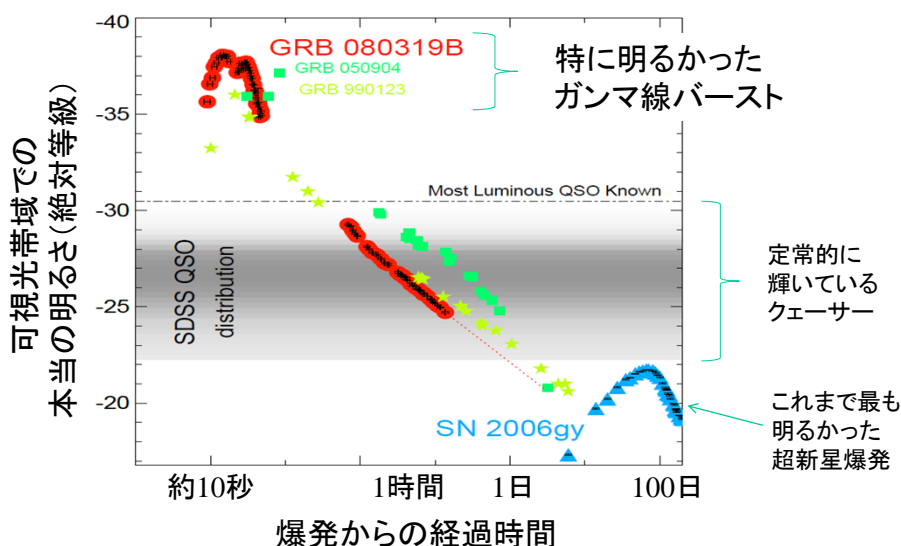
ガンマ線バーストの明るさ～ 10^{45} W^{ワット}

ちなみに

銀河の明るさ～ 10^{37} W

太陽の明るさ～ 10^{26} W

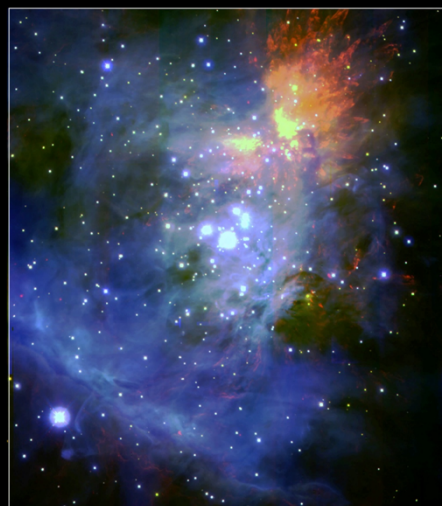
本当の明るさは他のどんな天体よりも明るい。
2008年3月19日に受かったガンマ線バースト(GRB080319B)は、地球上でみかけの明るさ5.7等級で観測された！



もしも GRB080319B
がオリオン星雲
(距離1500光年) の中で
起こったら、、、

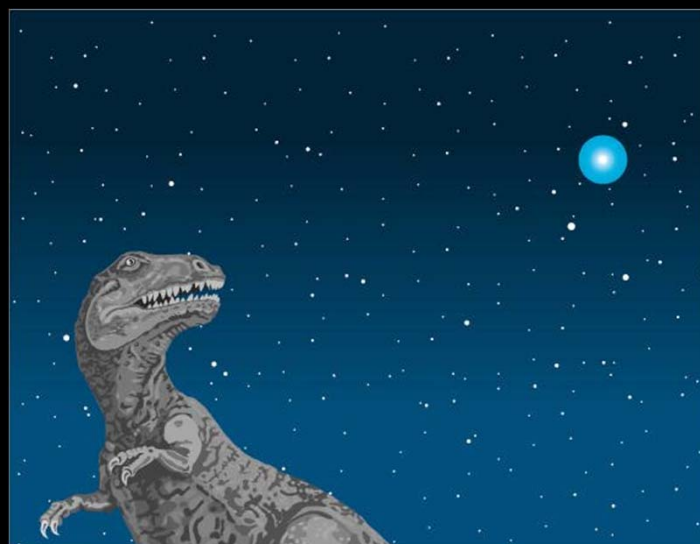
見かけの明るさは
-30 等級 (可視光) !!!

太陽： -27 等級
満月： -13 等級



 **Orion Nebula** CISCO (J, K' & Hz (v=1-0 S(1)))
Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan January 28, 1999

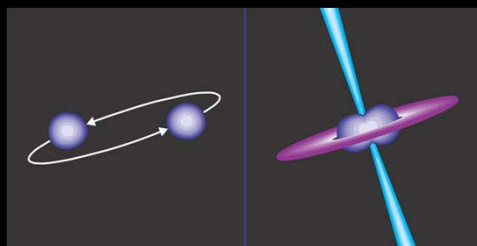
ガンマ線バーストで生命絶滅？
(発生頻度は一つの銀河当たり約100万年に1回程度？)



ガンマ線バーストの正体は？



特別な超新星爆発？



連星中性子星の合体？

宇宙物理学における未説明の大問題 !!!

重い星の爆発説



NASA

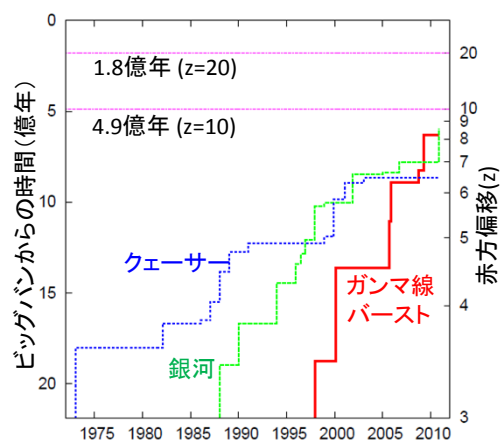
宇宙で最初にできた天体の爆発＝ガンマ線バースト？

宇宙で初めてできた天体は重い星で、それは宇宙誕生から1～2億年後くらいにできるのではないかと考えられている。

一般に、重い星の寿命は短く、太陽の100倍重い星の寿命は100万年程度。

宇宙で初めてできた天体はできてすぐに寿命を迎え、ガンマ線バーストを起こしたのではないかと？

遠くのガンマ線バーストをみることで宇宙で最初にできた天体を探ることにつながる！



3つの異なる天体である、ガンマ線バースト、銀河、クエーサーの観測による、最遠方(最古)天体記録更新の歴史。横軸は西暦。

連星中性子星の合体シナリオ



NASA

— 重力波 —

一般相対性理論にもとづいてアインシュタインが予言した
重力場(時空の歪み)のさざ波

連星中性子星や連星ブラックホールの合体は
重力波の強力な源
重力波を検出すればノーベル賞！



NASA



いずれにしても、ブラックホール+降着円盤
から放出される超高速のジェットがガンマ線
等を放射していると考えられている。

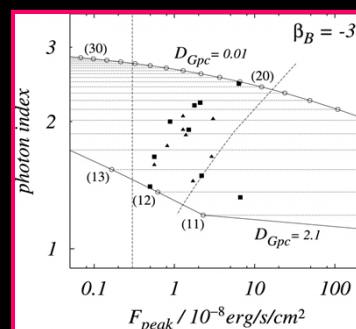
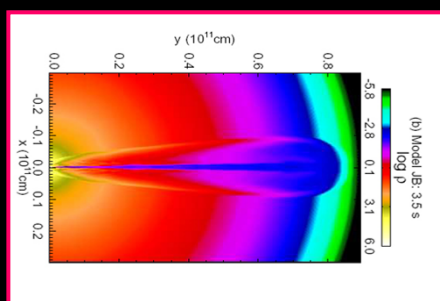
まとめ

「ガンマ線バースト」とは、
宇宙の果てで起こる、
ブラックホール誕生の瞬間に伴う、
宇宙でもっとも激しい爆発現象である。

ガンマ線バーストの未解決問題あれこれ：

何がどうやってジェットを出すか？
どうやってガンマ線が放射されるか？
我々の銀河内でガンマ線バーストが起こるか？
ガンマ線バーストの瞬間の重力波の波形？

上記などの未解決問題を明らかにするために
世界中で様々な研究がおこなわれている。



青山学院大学 理工学部 物理・数理学科

での高エネルギー天文学の研究

青山学院大学 山崎 了

何が「高エネルギー」なのか？

- ・可視光よりも波長が短い電磁波：X線、ガンマ線など
- ・電磁波を出す粒子（電子や陽子）が「高エネルギー（ほぼ光速）」
- ・ブラックホール、ジェット、様々な「爆発現象」に関連。

高エネルギー天体現象の代表格 「ガンマ線バースト」

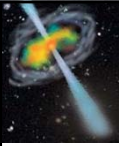
- ・宇宙の果てで起こる、ブラックホール誕生の瞬間に伴う、宇宙でもっとも激しい爆発現象。
- ・一瞬のうちに大量のガンマ線やX線、宇宙線を放出。
- ・青学ではガンマ線バーストの解明を目指した研究を行っています。



特別な超新星爆発とガンマ線バースト




2個の中性子星の衝突とガンマ線バースト



X・ガンマ線を用いた、 ブラックホールとガンマ線バースト観測

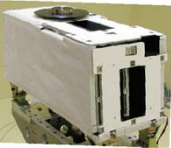
青山学院大学 吉田研究室

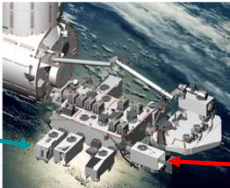
君も国際宇宙ステーションや人工衛星に自分が開発した観測装置を
搭載して、新しいブラックホールやガンマ線バーストを発見しよう！



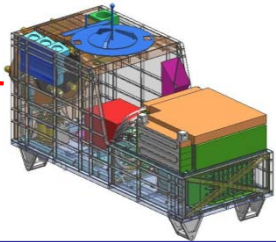
青山学院大学
Aoyama Gakuin University

全天X線監視装置(MAXI)
2009年7月~






カロリメータ型電子・ガンマ線観測装置(CALET) 2013年7月予定



MAXIで得られた全天X線画像



すでに新しいブラック
ホールを発見！

©NASA/RIKEN, s.nakahara

これまで搭載してきた検出装置
Ginga/GBD、HETE2/WXM、Suzaku/HXD、
MAXI/GSCなど
将来 CALET-GBM、Astro-H(2014年冬)、MAXI2

次々と稼働する 次世代高エネルギー天文学天文台

**青学で世界最先端の装置と
データを使える!**



青山学院大学
Aoyama Gakuin University

CTA

日米欧で開発中の
ガンマ線望遠鏡
2018年稼働予定!





ASTRO-H


日本が中心になって
開発中のX線観測衛星
2014年打ち上げ予定!

EUSO

日米欧で開発中の
宇宙線観測実験
2015年打ち上げ予定!



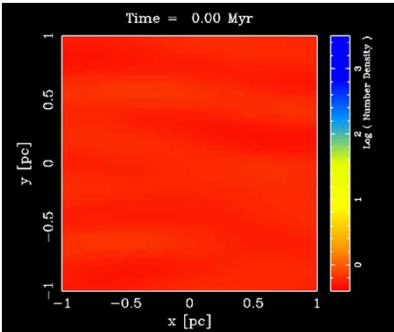
青山学院大学 柴田研究室
=> 2011年度より馬場研究室


青山学院大学
 Aoyama Gakuin University

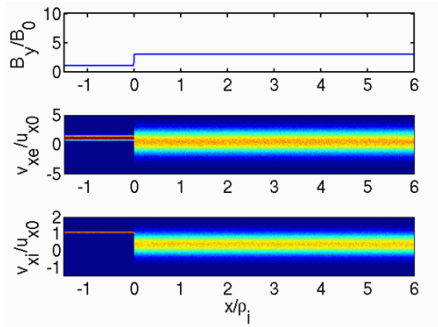
ガンマ線バースト の解明を目指した理論研究

青山学院大学 山崎研究室


- 今年できた新しい研究室です。
- 研究室の行く末は君たちの肩にかかっている！
- ガンマ線バーストに関連する理論研究をいろいろやっています。



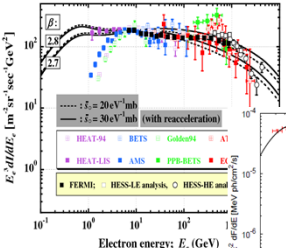
衝撃波衝突と星の卵の形成のシミュレーション



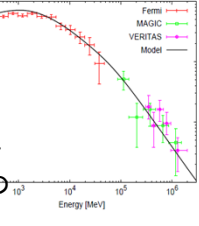
衝撃波生成のシミュレーション


青山学院大学
 Aoyama Gakuin University


最近の主な研究成果



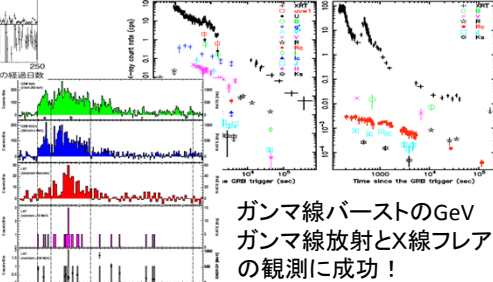
宇宙線伝播モデルを用いて
フェルミ衛星の最新データの
理論的説明に成功！




新しい宇宙線加速
モデルを提唱！



MAXIによって新種の
草食系ブラックホール
を発見！



ガンマ線バーストのGeV
ガンマ線放射とX線フレア
の観測に成功！



青山学院大学
Aoyama Gakuin University

青学では、
本格的な可視光・X線・ガンマ線観測、宇宙線観測実験と
それに密接に関連する理論研究を
一か所で容易に行うことができます。
様々な天体現象の謎を君たちの手で解明しませんか！