

ガンマ線バーストで探る初期宇宙

米徳大輔 (金沢大学)

共同研究者: 村上敏夫 (金沢大学)

中村卓史 (京都大学)

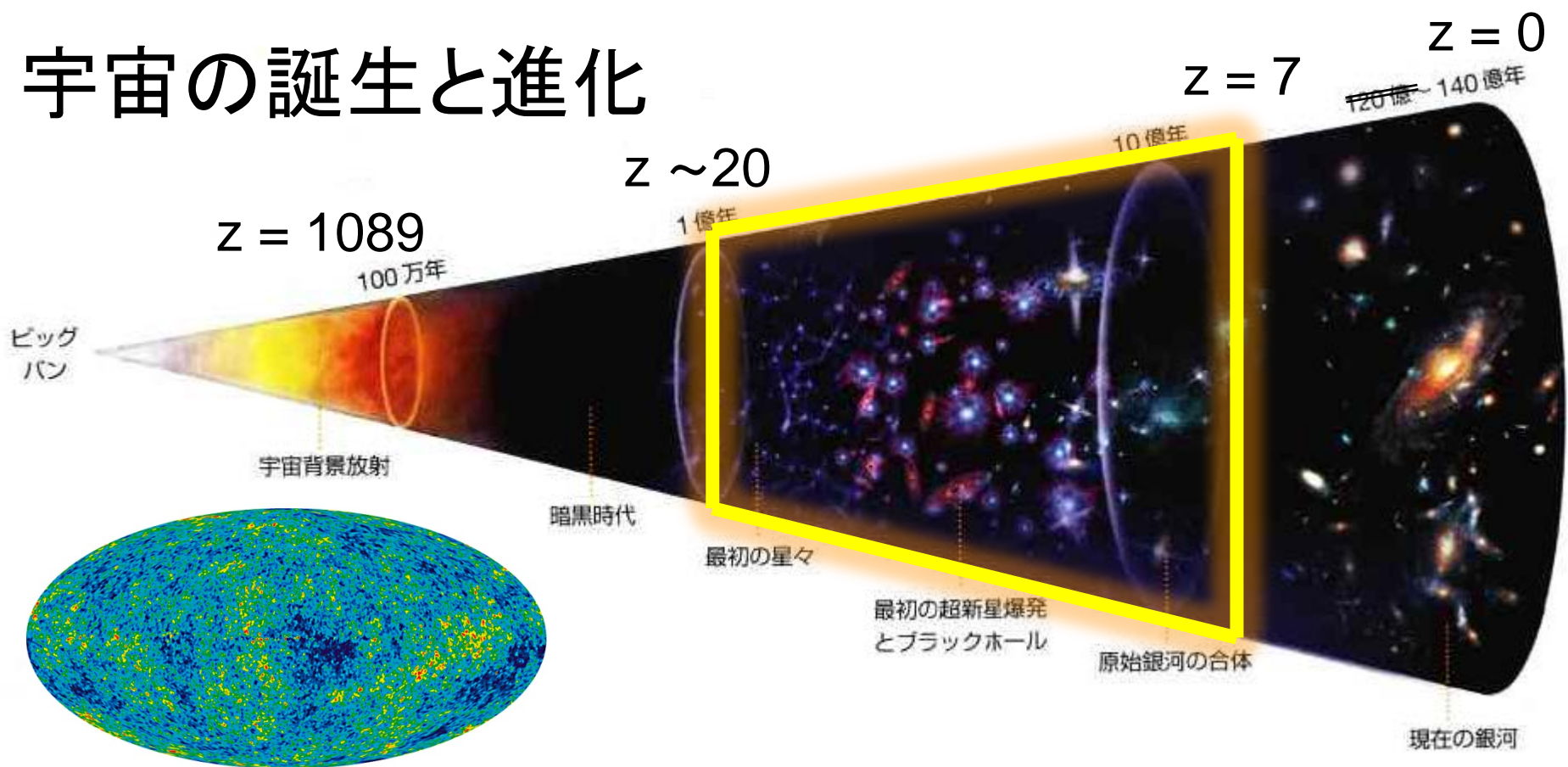
筒井亮 (東京大学)

高橋慶太郎 (熊本大学)

1. ガンマ線バースト (GRB)
2. 高赤方偏移 GRB の観測
3. GRB を用いた宇宙論研究 1 & 2
4. HiZ-GUNDAM プロジェクト

yonetoku@astro.s.kanazawa-u.ac.jp

宇宙の誕生と進化

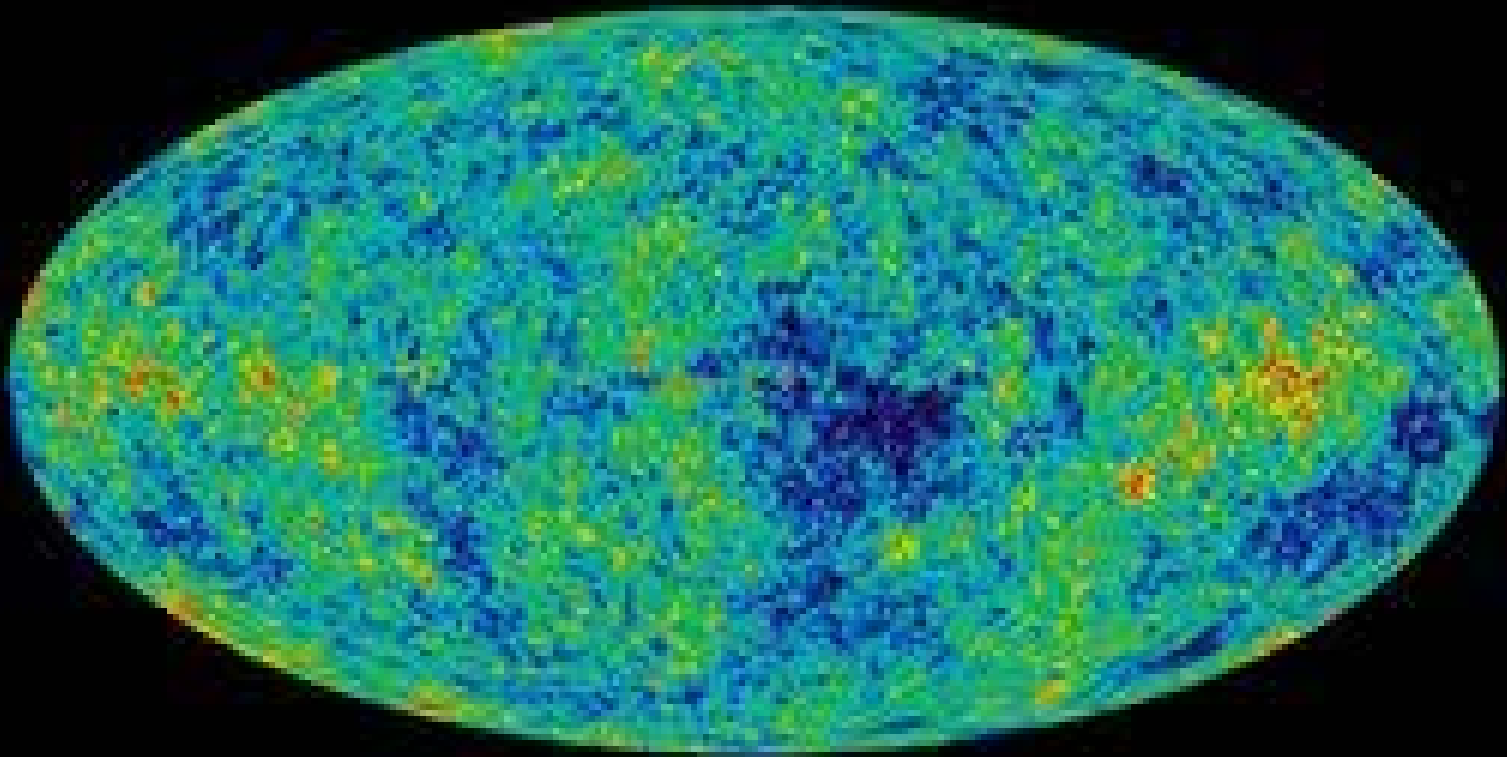


天文学全体にわたって、
宇宙で最初の星が生まれた頃の初期宇宙を探索し、
宇宙進化を解き明かす事が大きな目標となっている。

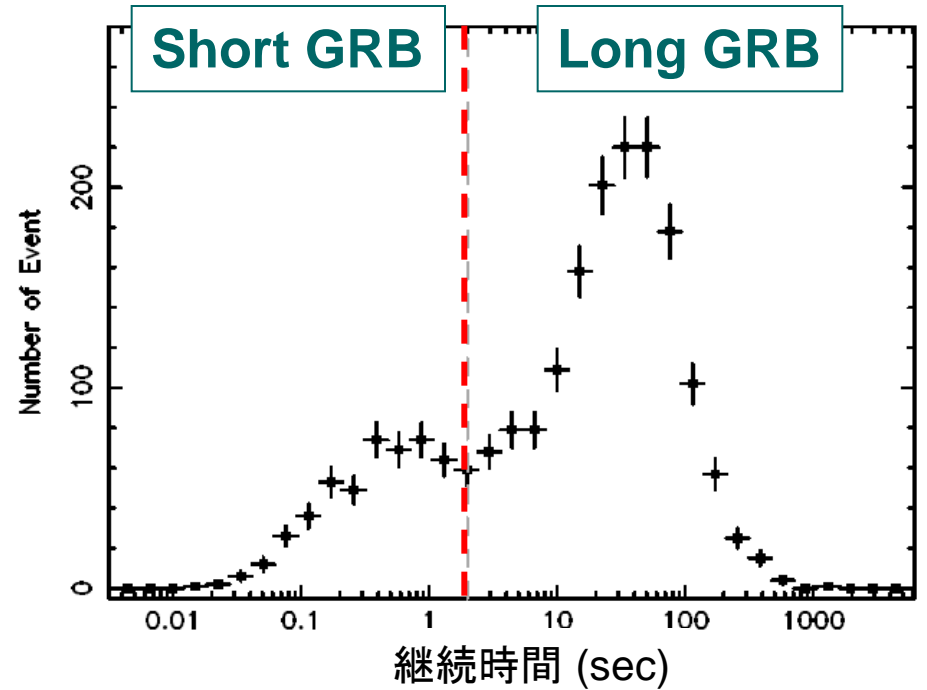
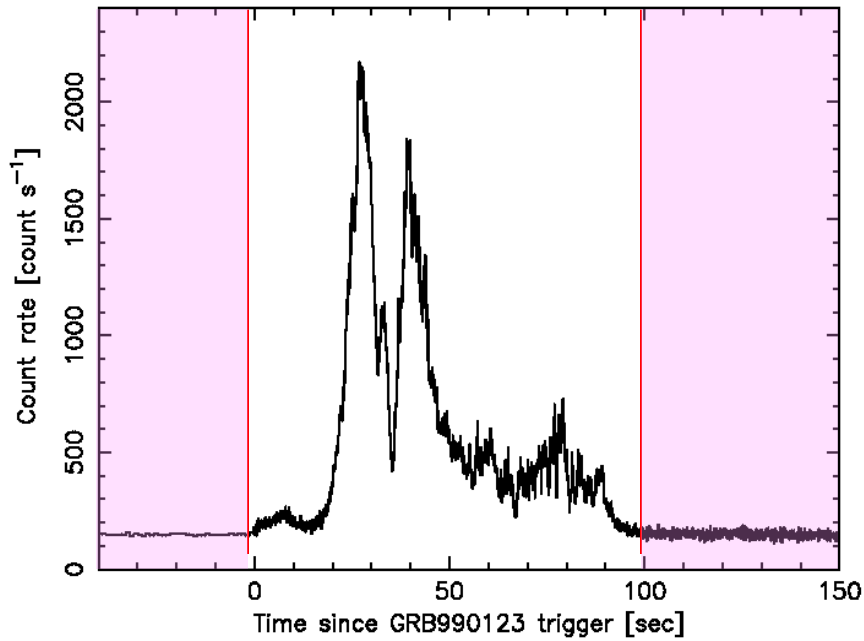
特に $z > 7$ の頃は、第一世代星の誕生、宇宙再電離、重元素合成、
宇宙最初のブラックホールの誕生など重要課題が多い

- 第一世代星の形成は、宇宙の(大規模)構造形成の原点
- 宇宙再電離はいつ、誰が、どのように発生させたのか？
- 水素・ヘリウムばかりだった宇宙に重元素を追加

宇宙の進化を決定づける要因



ガンマ線バースト (GRB)



- ① **Cosmological (初期宇宙で発生)** (z=8.3 ; Tanvir et al. 2009)
- ② **Massive star (大質量星の崩壊)** (GRB030329/SN2003dh)
- ③ **Bright (極めて明るい)** (10⁵⁴ erg/sec にも達する)

初期宇宙を見渡すプローブとして利用できる。

ガンマ線スペクトル

Band et al. 1993

$$N(E) = \begin{cases} A \left(\frac{E}{100 \text{ keV}} \right)^\alpha \exp\left(-\frac{E}{E_0}\right) & \text{for } E \leq (\alpha - \beta)E_0, \\ A \left(\frac{E}{100 \text{ keV}} \right)^\beta \left(\frac{(\alpha - \beta)E_0}{100 \text{ keV}} \right)^{\alpha - \beta} \exp(\beta - \alpha) & \text{for } E \geq (\alpha - \beta)E_0. \end{cases}$$

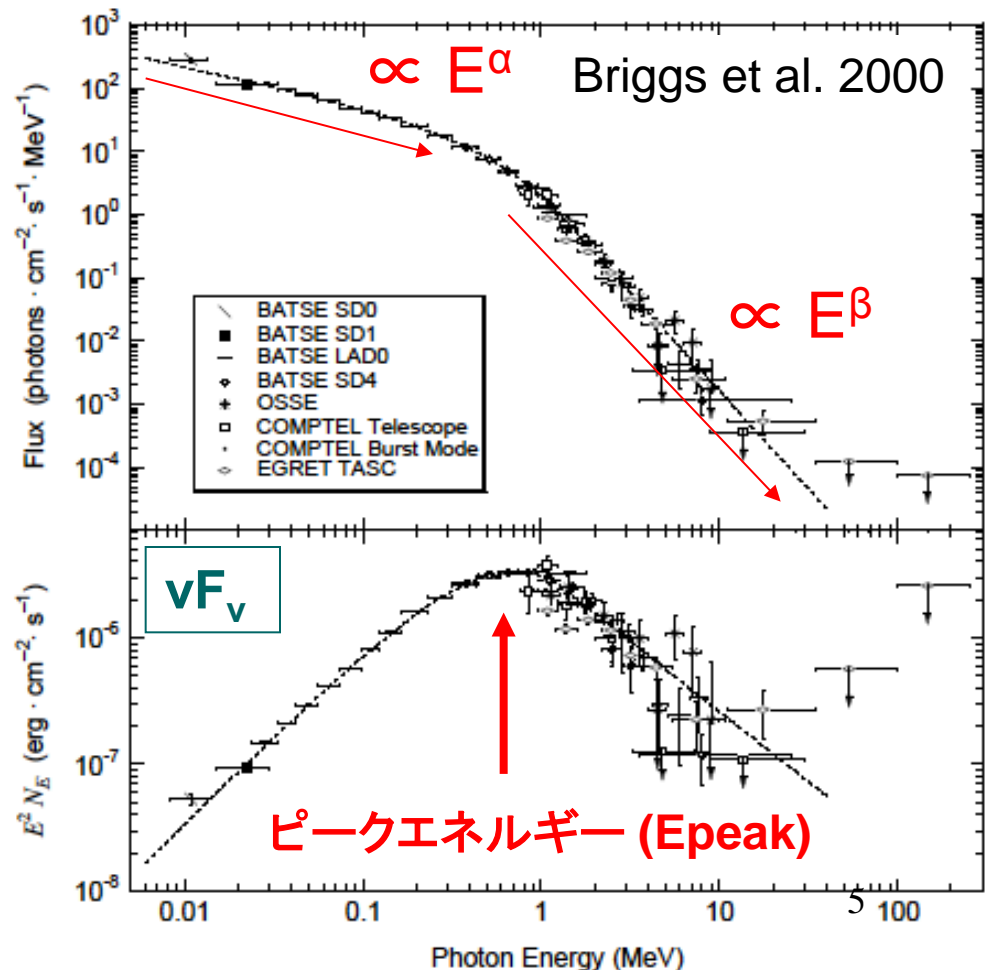
α : 低エネルギー側 index
 β : 高エネルギー側 index
 E_0 : 折れ曲がりのエネルギー

スペクトルは非熱的放射

加速された高エネルギー電子による
 シンクロトロン放射だろう...

νF_ν スペクトルに極値が存在する。

ピークエネルギー (E_p)



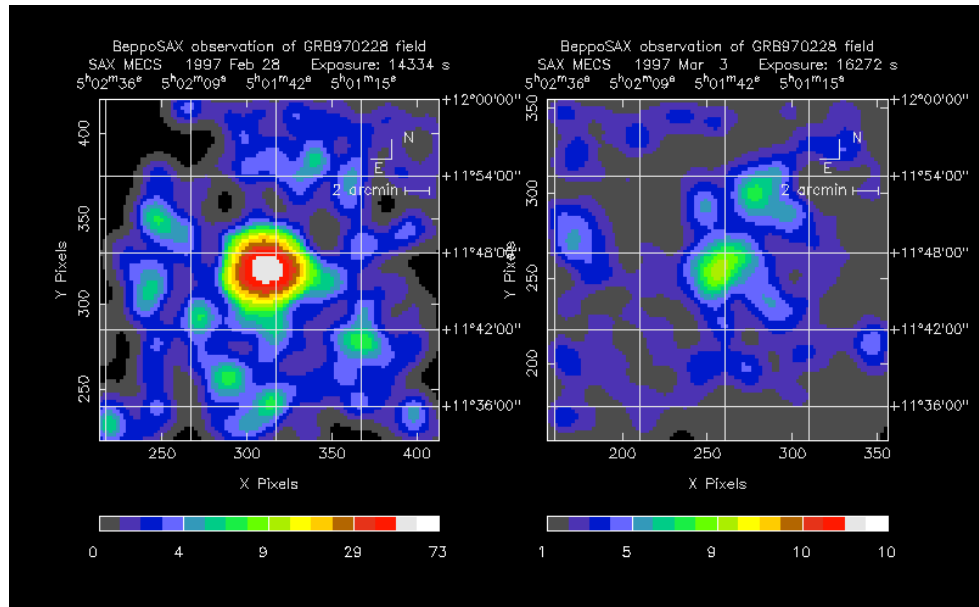
残光 (afterglow)

BeppoSAX 衛星によって初の残光検出 — GRB970228

残光: プロンプト放射に引き続いて起きる、時間とともに減光する残り火

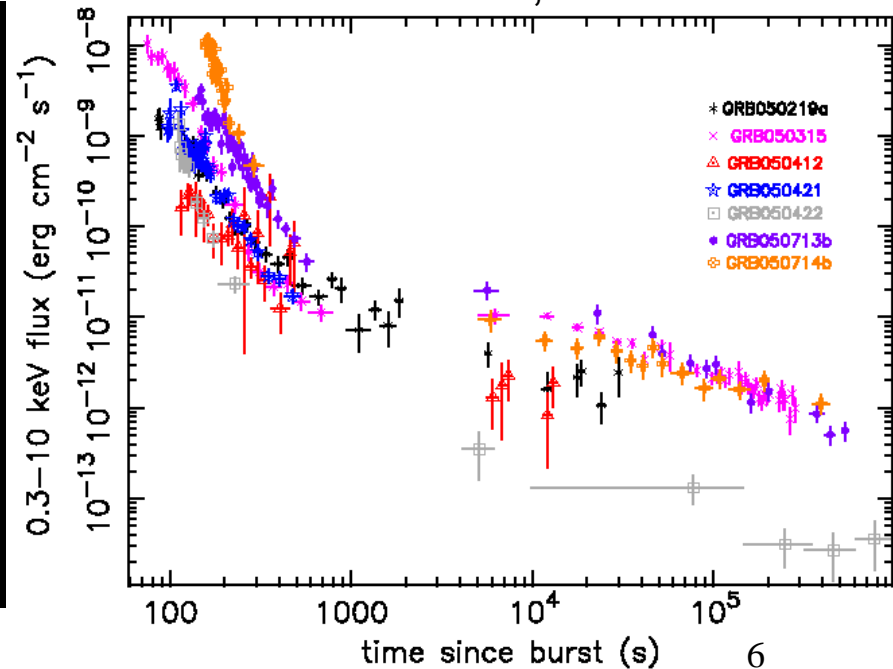
残光検出によってGRBの正確な発生方向がわかるため、地上の望遠鏡によって多波長追観測が行えるようになった。

GRB970228



Costa et al. 1997, BeppoSAX

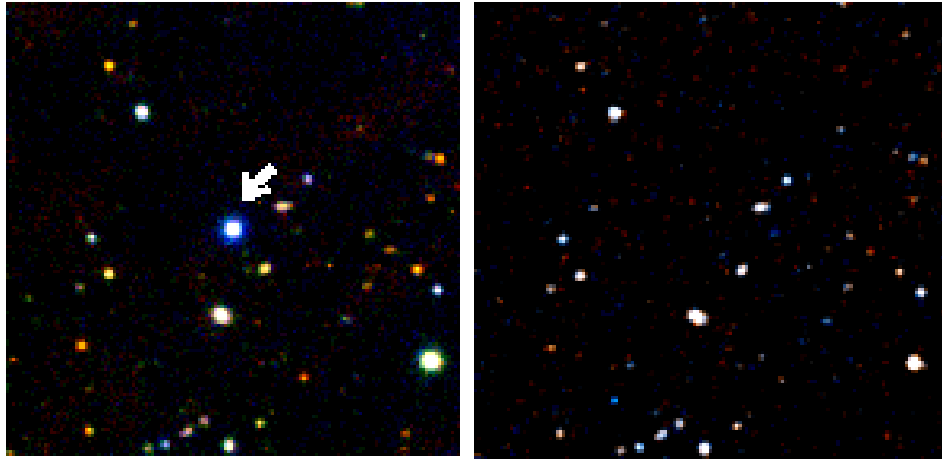
Nousek et al. 2005, Swift



GRB030329/SN2003dh

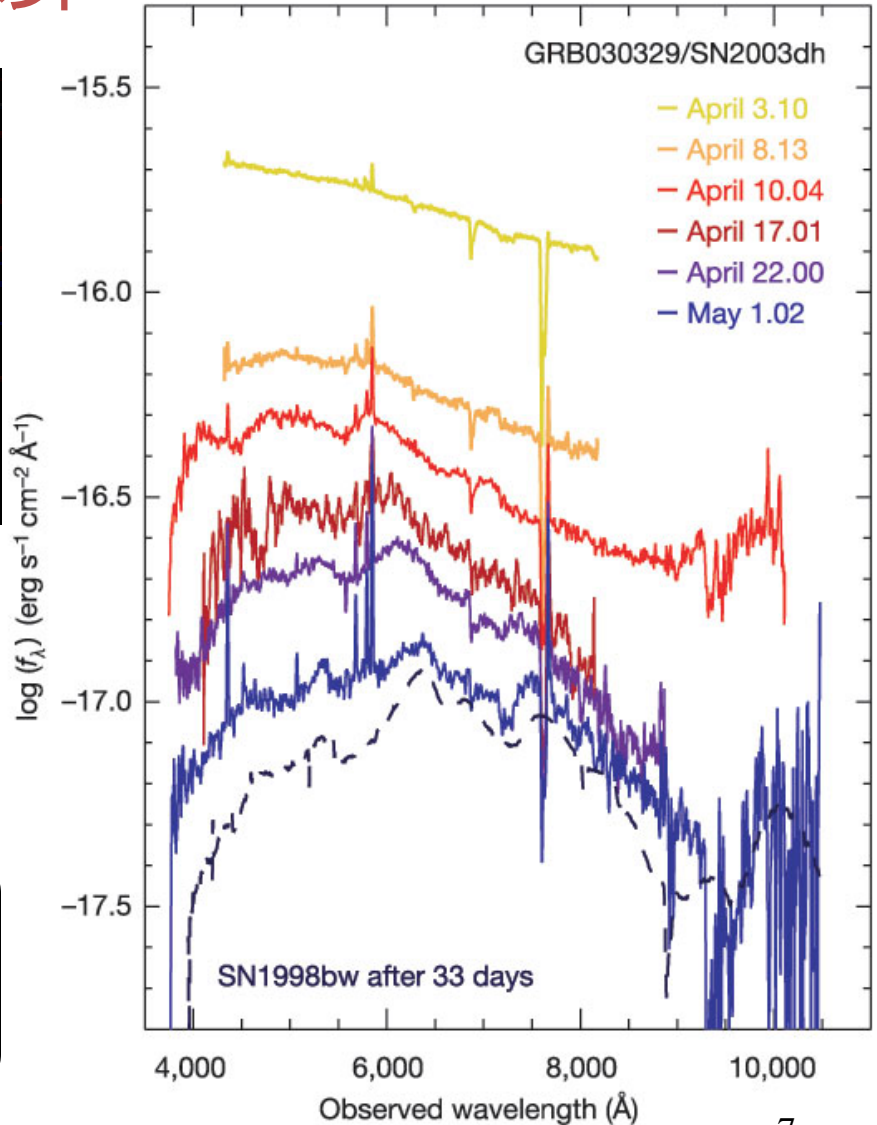
HETE-2 が検出した中で最も明るいイベント

Hjorth et al. 2003



HETE-2 衛星が発見したGRB030329の残光の中から、超新星爆発の証拠が見つかった。

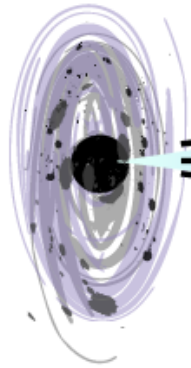
1998年に GRB980425/SN1998bw の関連性が話題となったが、距離が異常に近い ($z=0.0085$) こともあって確定的ではなかった。



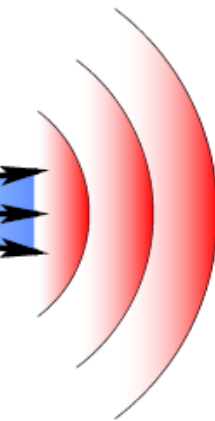
相対論的火の玉モデル

Rees & Meszaros 1992
Piran review 1997

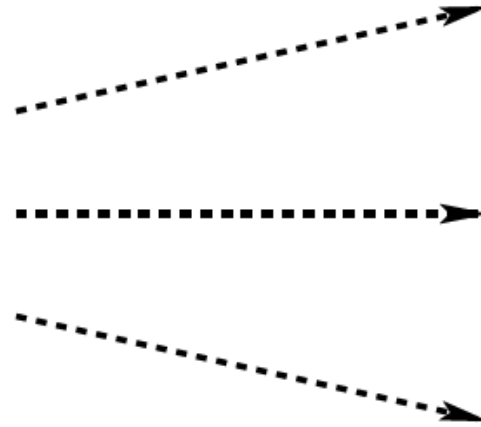
$$M \sim 10^{-5} M_{\text{sun}}$$



中心天体
ブラックホール？



内部衝撃波
(GRB)



外部衝撃波
(残光)

星間ガス

$$\Gamma \sim \text{a few}$$

世の中の大半は
Black Hole だと思
っている。

$$\Gamma > 100$$

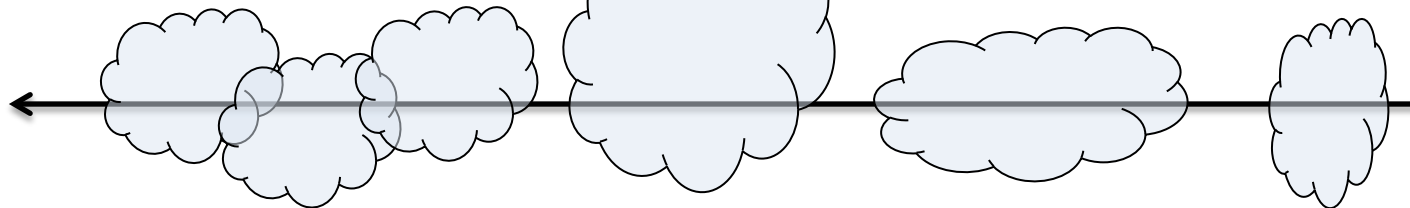


衝撃波で加速された電子が、equipartition 磁場と相互作用することで シンクロトロン放射として輝く。

高赤方偏移GRBの観測

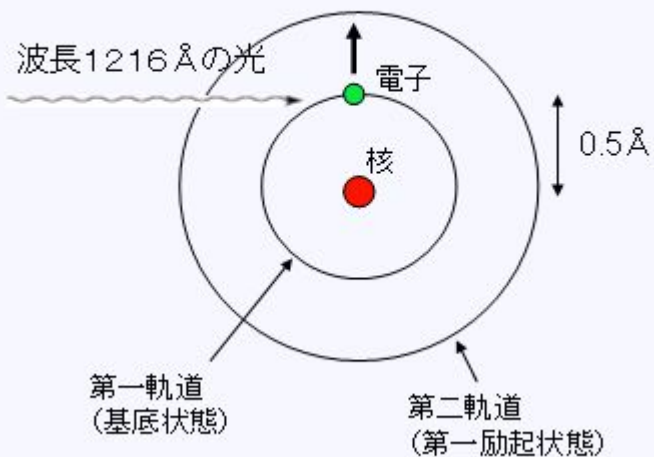
水素のライマンα吸収

中性水素を含んだ
銀河間空間のガス雲



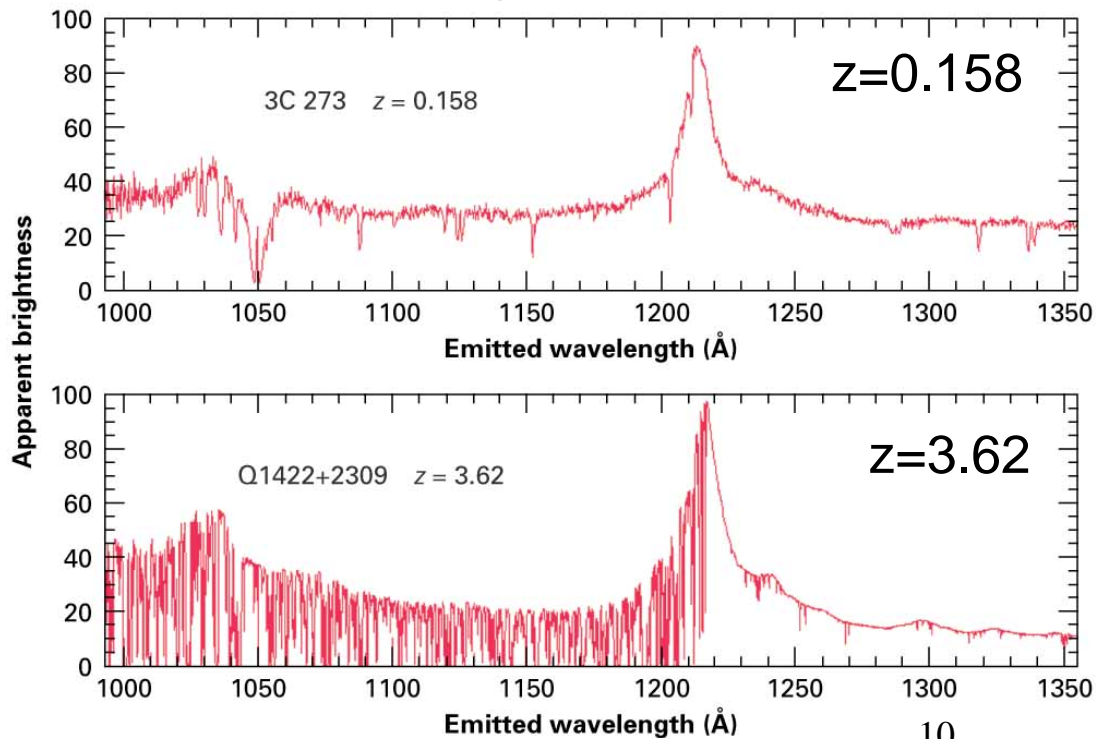
それぞれのガス雲の位置(赤方偏移)において、 1216\AA の光が吸収される

水素原子の構造とライマンα吸収線



$1\text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$

QSOのスペクトル例



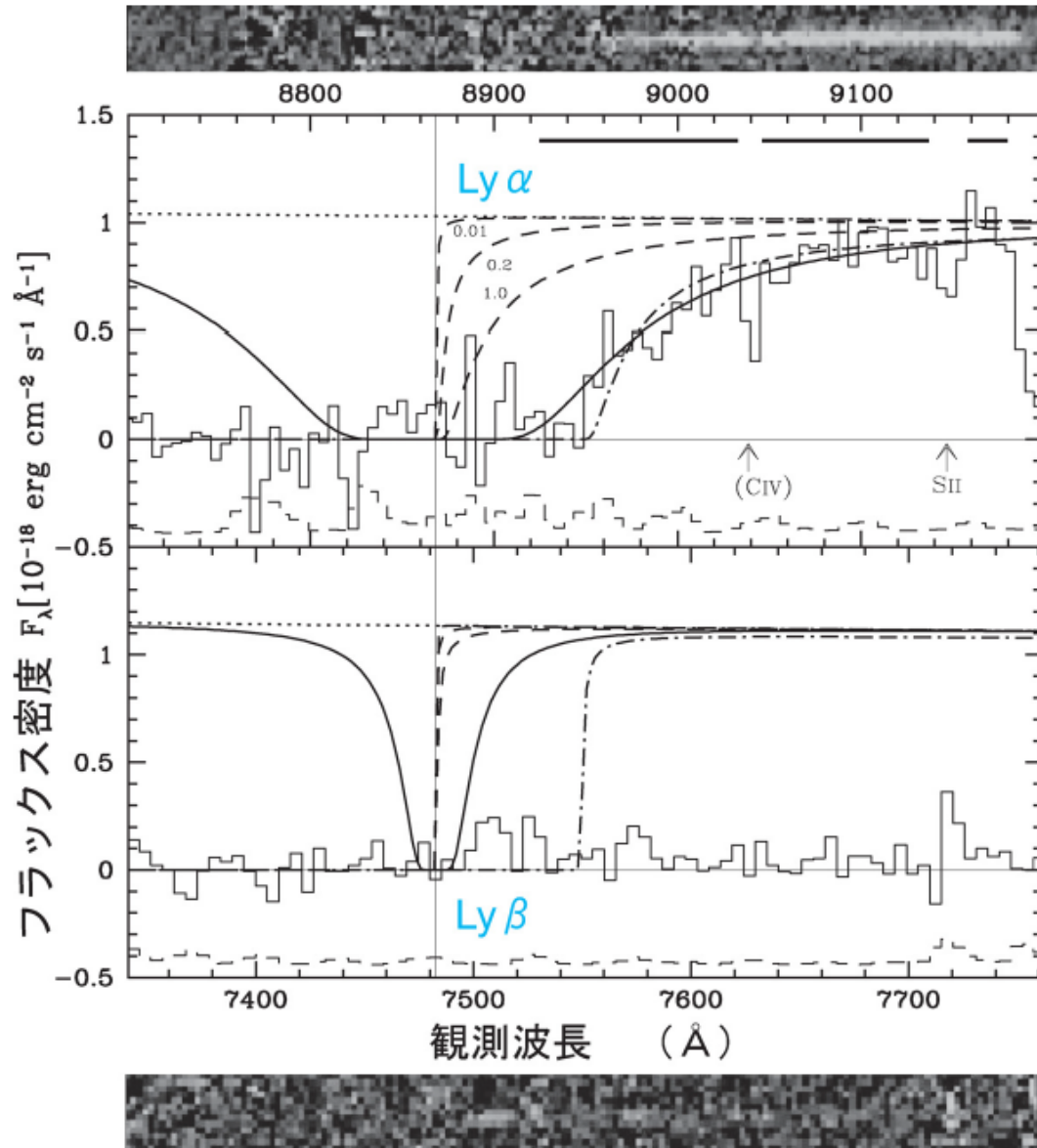
GRB050904

水素のLy α 吸収による
Damping wing構造

$z=6.295$

Kawai et al. (2005)

Totani et al. (2005)



実線

母銀河の中性水素による
DLAによる吸収モデル
@ $z=6.295$

$\log(N_{\text{HI}}) = 21.62 \text{ cm}^{-2}$

(※DLA: $\log(N_{\text{HI}}) > 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ の
吸収線系)

一点鎖線

銀河間空間の中性水素による
吸収モデル @ $z=6.36$

$x_{\text{HI}} \sim 1.0$

破線

銀河間空間の中性水素による
吸収モデル @ $z=6.295$

$x_{\text{HI}} = 0.01, 0.2, 1.0$

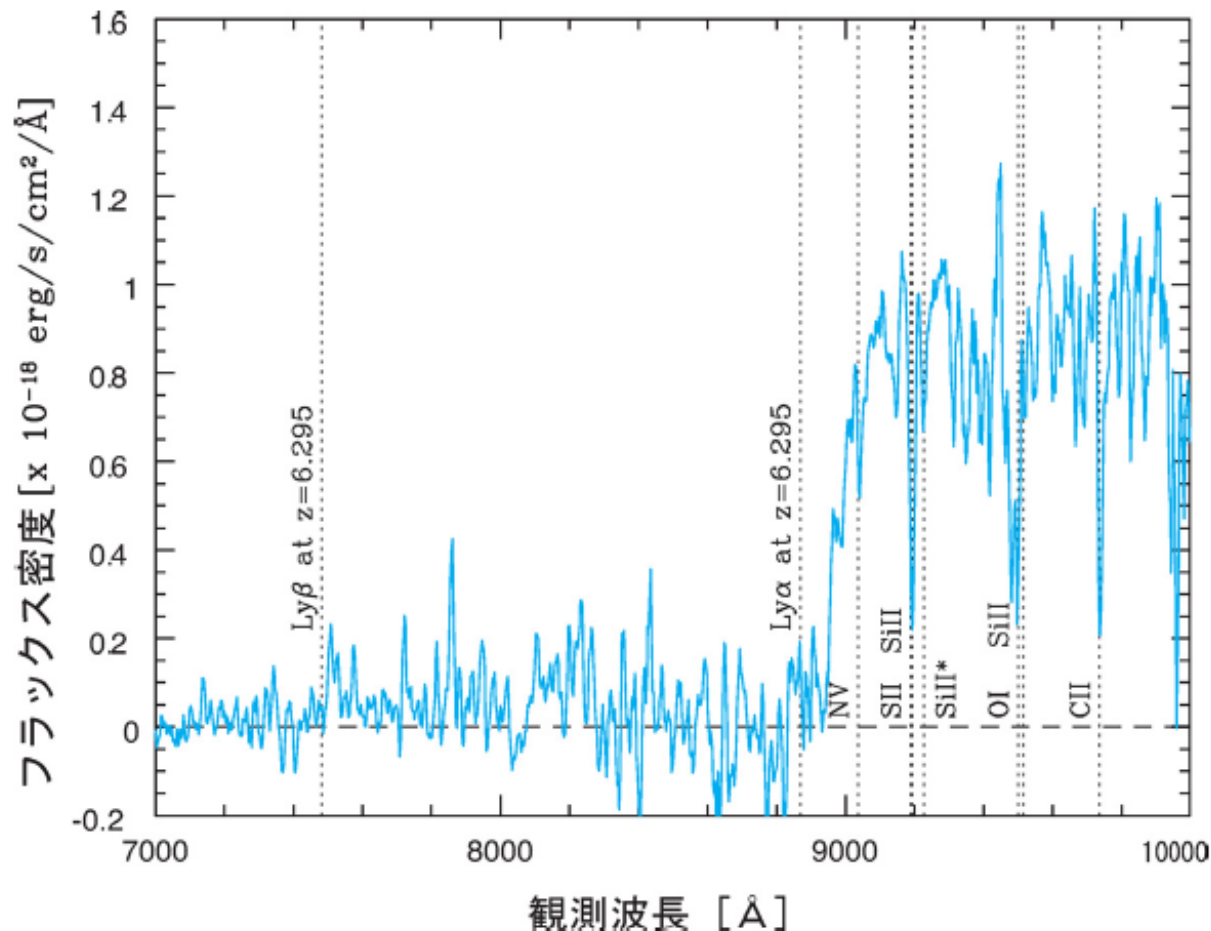
中性水素の割合は

$x_{\text{HI}} < 0.17$ (1σ),
< 0.6 (95%)

すでに電離している

GRB050904

Kawai et al. (2005)
Totani et al. (2005)

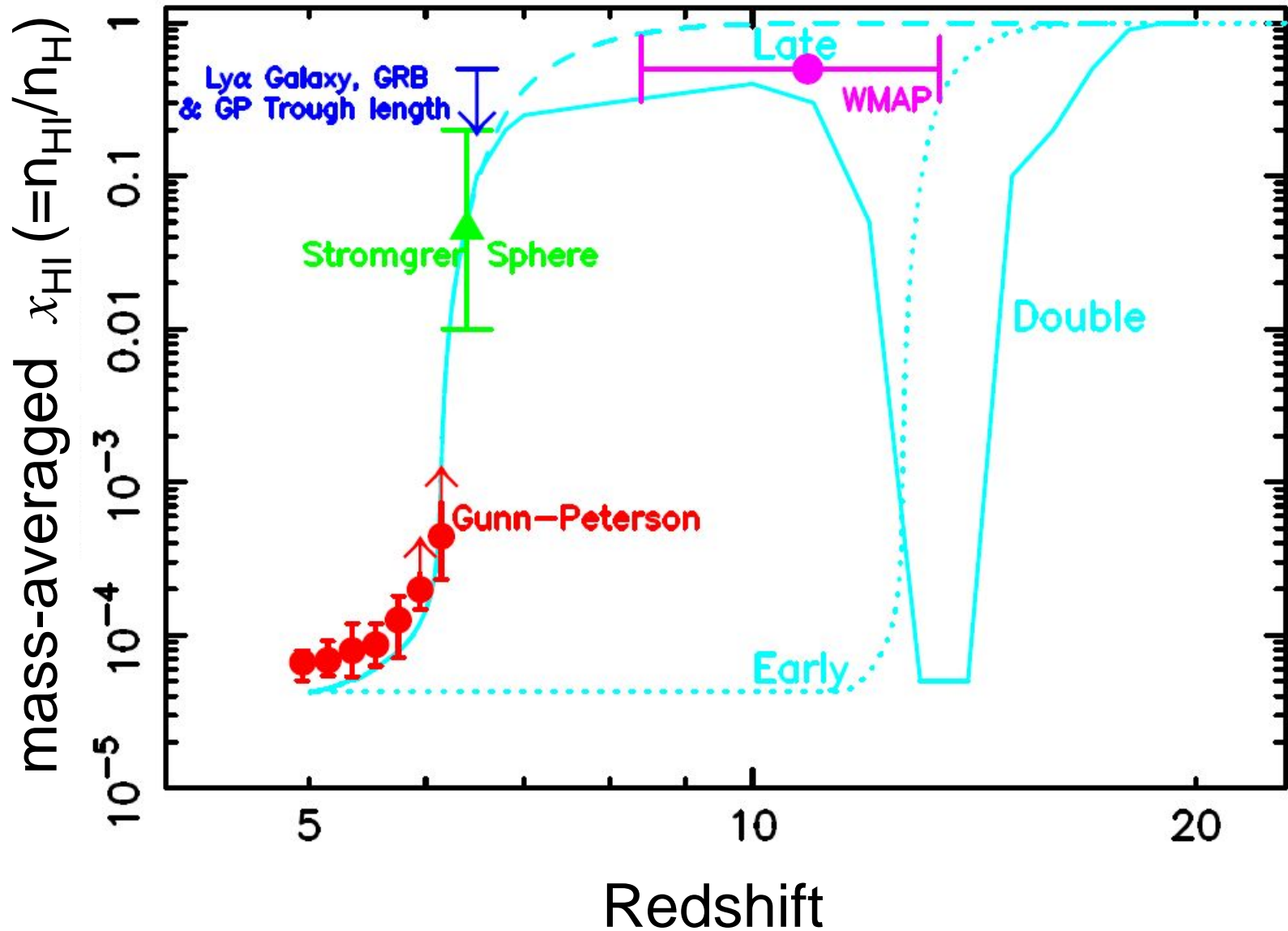


$z=6.295$

吸収線強度は太陽の1/10程度
吸収体の大きさは数パーセク程度
電子密度は数 100cm^{-3} 程度

分子雲ガス
または
爆発前の星風シェル

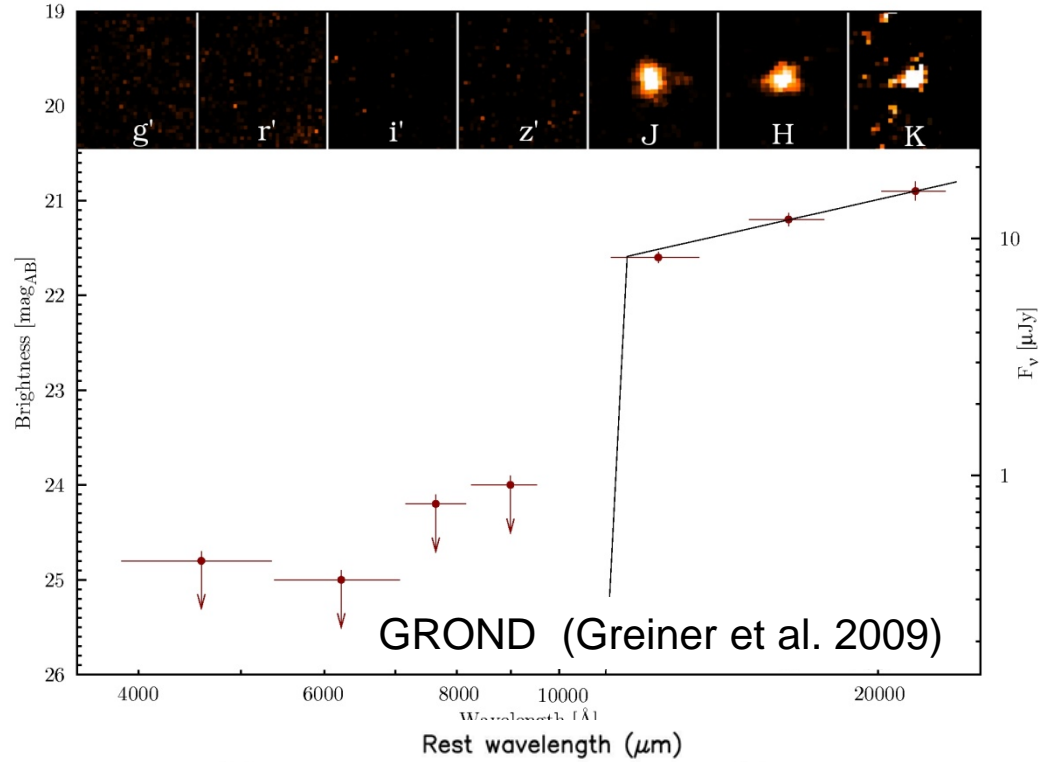
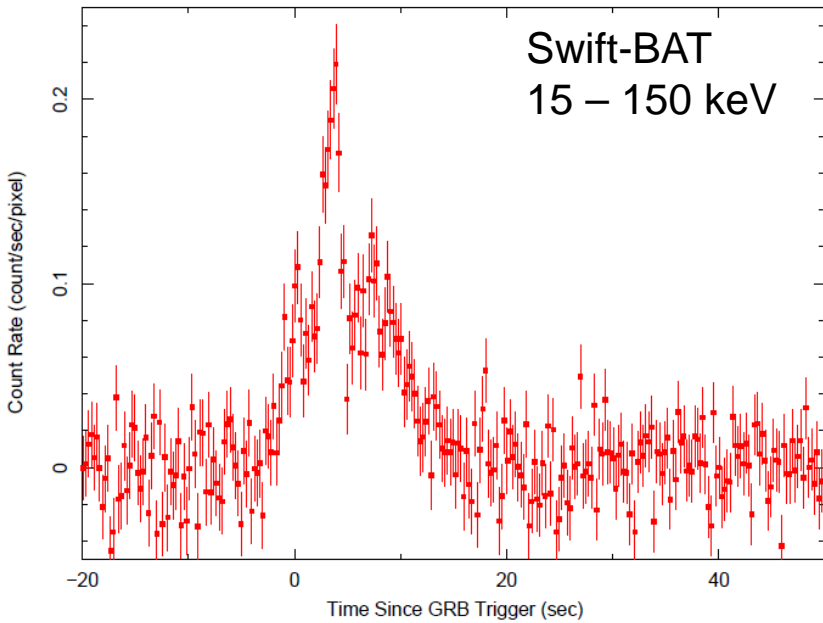
Fan et al. (2006)



他の観測と比較した利点

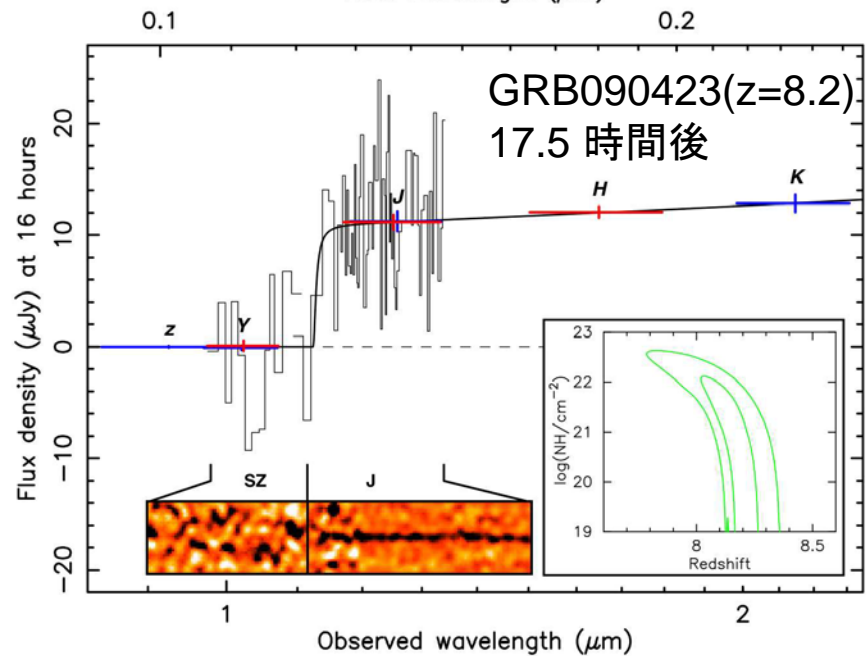
- WMAP による CMB の偏光観測では、視線方向を積分した情報となるので明確な再電離の時期を割り出せない ($6 < z < 12$ 程度?)
- GRB は、それぞれの赤方偏移における情報を取得できる
- $z \sim 6$ の QSO の観測からは、 $\tau_{\text{GP}} = 2.1 \times 10^4 (1+z)^{3/2} x_{\text{HI}}$
Gunn-Peterson rough (IGMにおける中性水素の吸収)により $x_{\text{HI}} > 10^{-3}$
- GRB は、ライマン α damping wing の観測から、 x_{HI} を直接測定できる
- QSO は(大規模)構造形成の進んだ特殊な領域
- GRB は星形成が行われていれば発生する
- QSO からの定常的な放射で周囲を電離してしまう
- GRB は突発天体現象なので、視線方向のIGM環境を壊さない
- 銀河サーベイの観測は、既に成長した大型の銀河しか検出できない
- GRB の母銀河は矮小であることが多く、無バイアスに調査できる
- GRB のスペクトルは単純なベキ関数で、モデル依存性が少ない

GRB090423 (z=8.2)



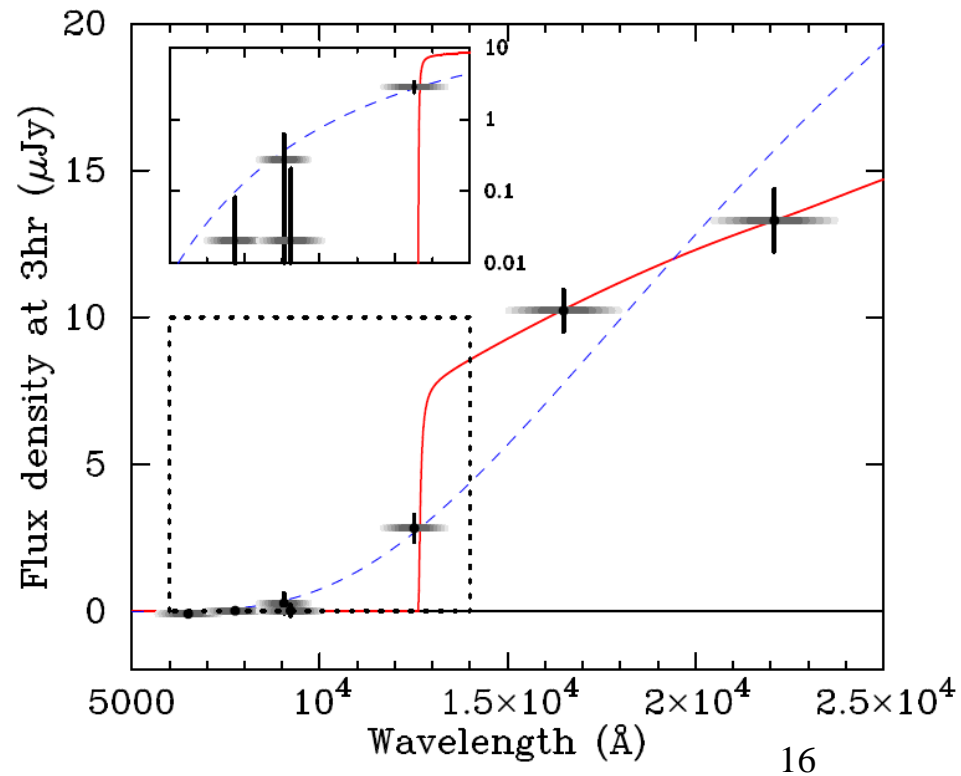
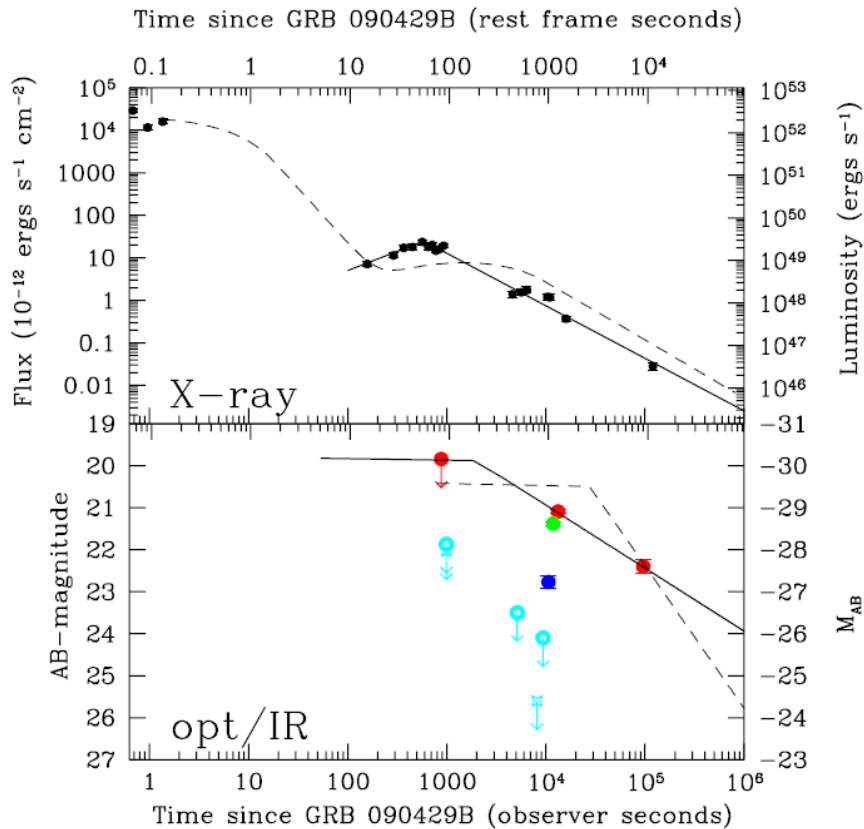
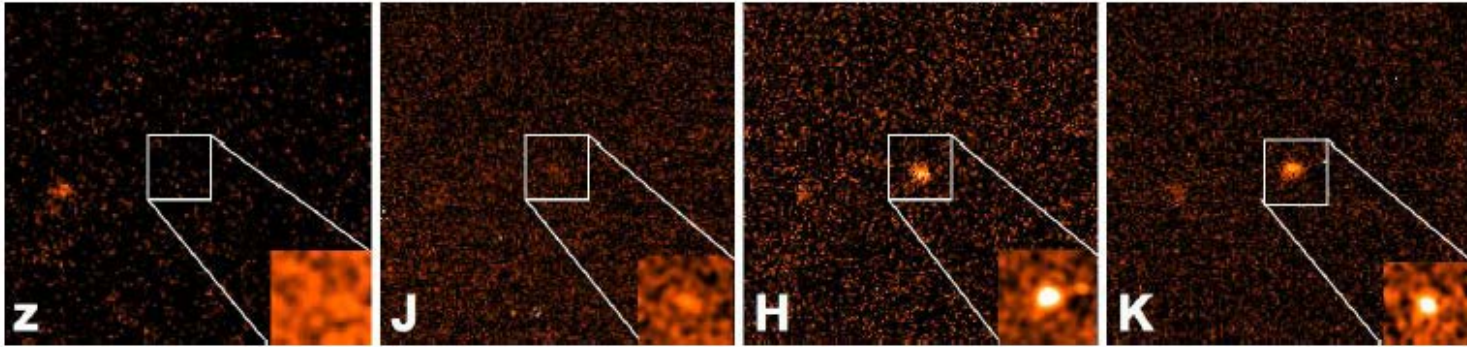
$T_{90} = 10.3 \pm 1.1 \text{ sec}$
 $E_p = 48.6 \pm 6.2 \text{ keV}$
 $F_p = 1.7 \pm 0.2 \text{ photon/cm}^2/\text{sec}$
 $\text{Fluence} = (5.9 \pm 0.4) \times 10^{-7} \text{ erg/cm}^2$

十分明るい (BAT 感度の10倍以上)
残光は通常の振舞いのようだ

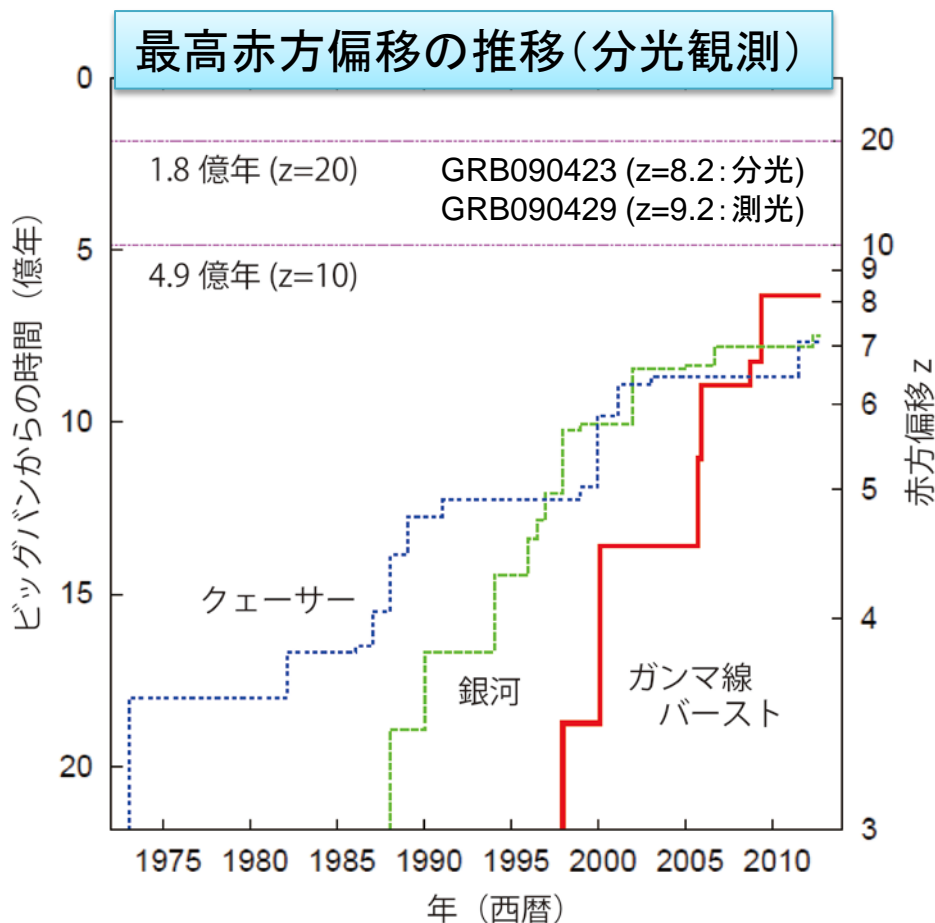


GRB090429B (z=9.4)

Cucchiara et al. 2011
Gemini-North, VLT



高赤方偏移 GRB の検出期待値 = 約 10 event/yr/str



Swift の観測から

$z > 6$ が ~ 1 event/yr/str (lower limit)

(1) LF からの見積り (Niino 2012)

$z > 7$ が $2.5 \sim 50$ event/yr/str

(2) Dark matter halo の進化 (Mao 2012)

$z > 7$ は 16 events/yr/str

(3) SFRから (Wanderman & Piran 2010)

$z > 10$ は 3 events/yr/str

$z > 7$ は ~ 10 events/yr/str

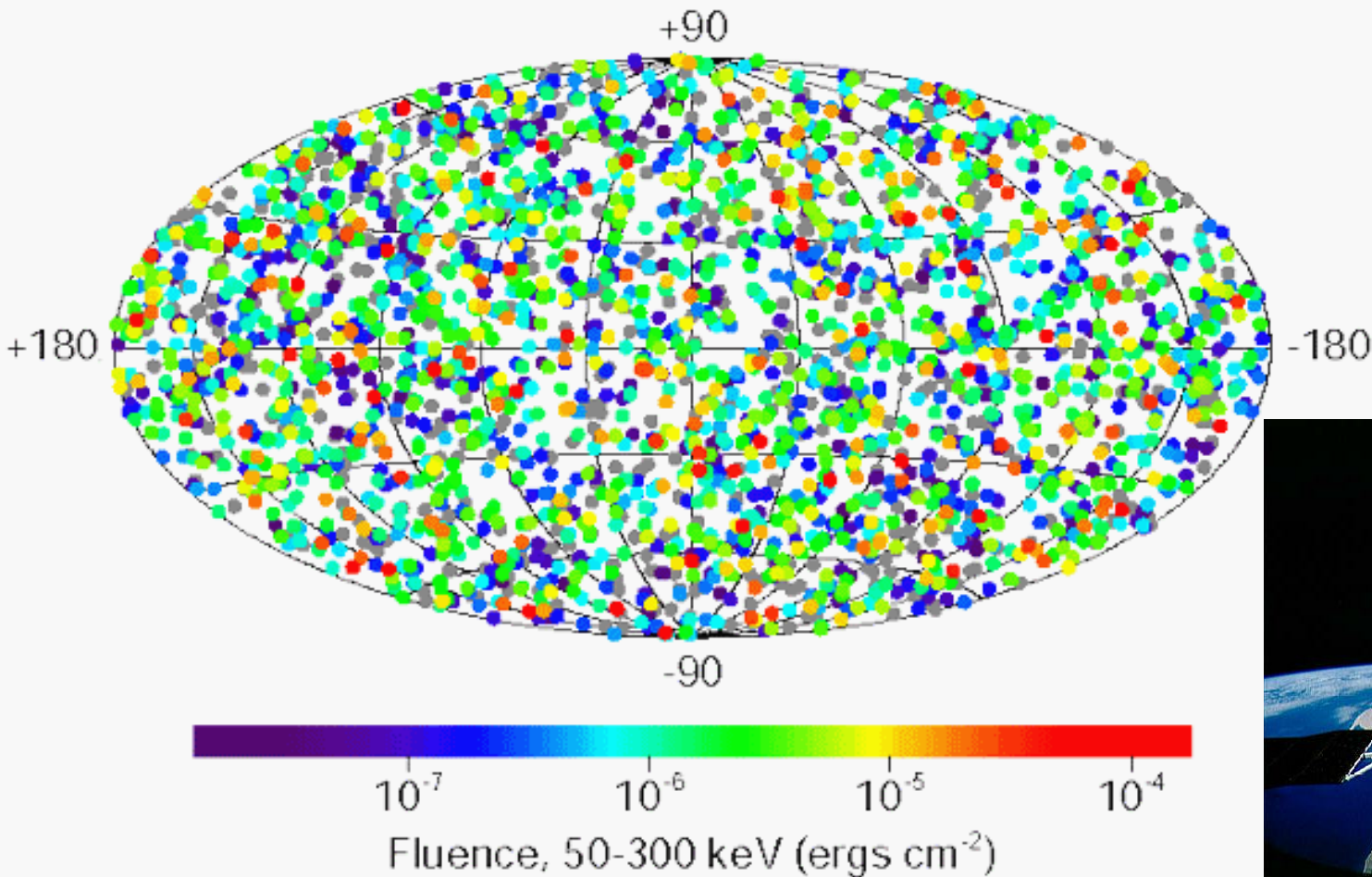
通常のlow- z GRBは ~ 100 events/yr/str

観測頻度も高いと予想でき、
地上・宇宙の大型望遠鏡に観測の機会を提供できる

GRBを用いた宇宙論研究 1

- GRBを用いた星生成率の測定
- 初代星は宇宙を再電離できるか？
- 銀河間空間に散らばる重元素の起源

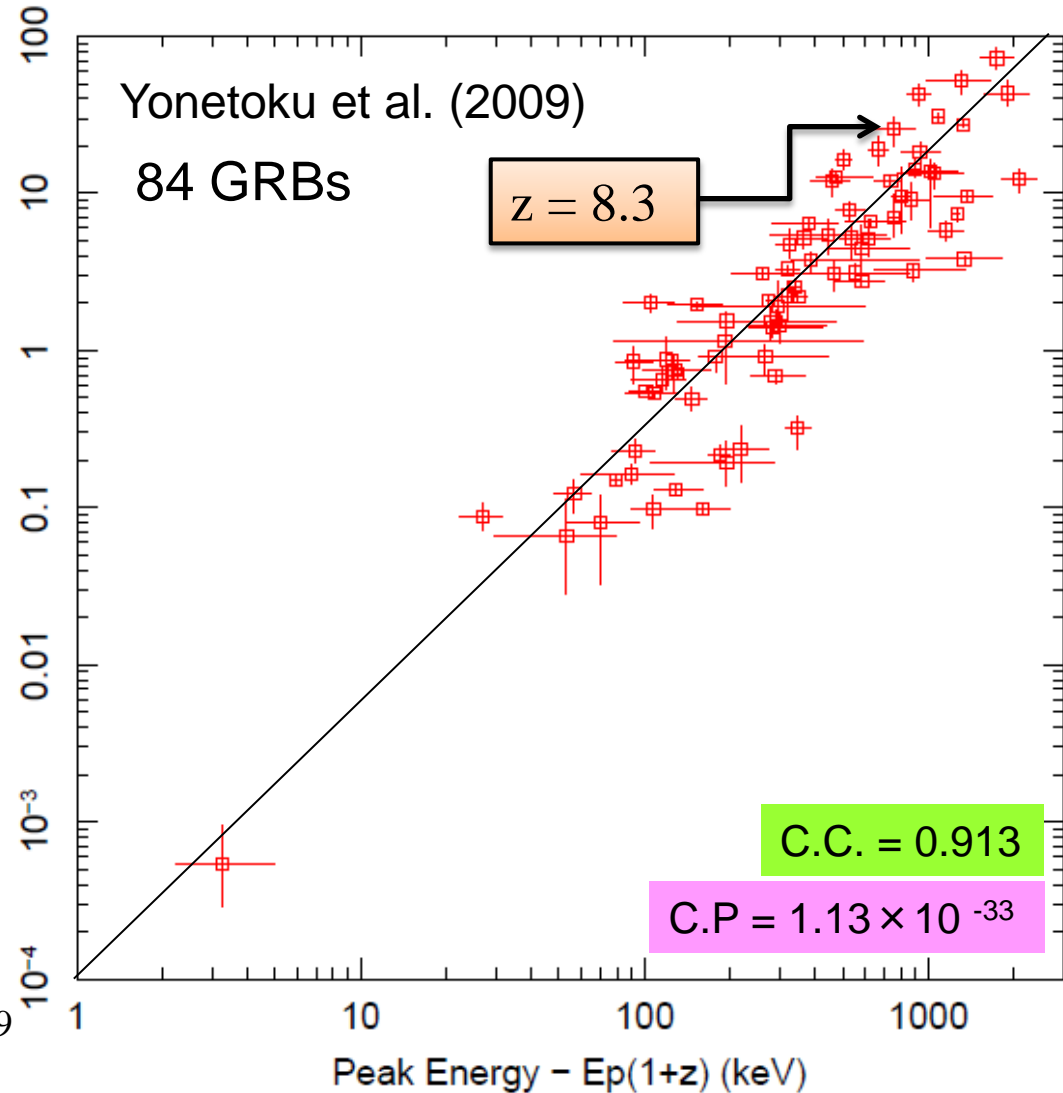
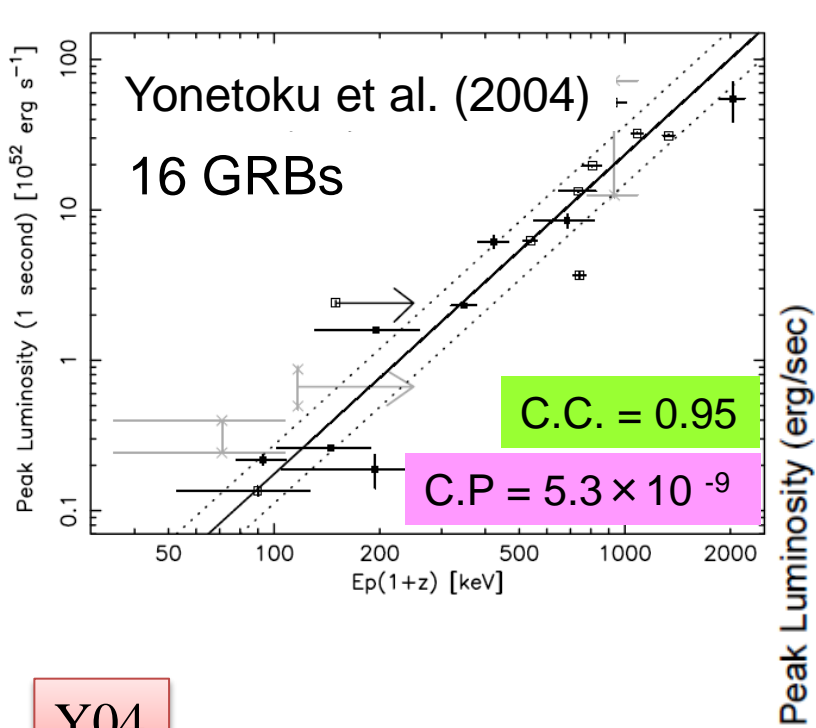
2704 BATSE Gamma-Ray Bursts



BATSE 検出器は2704例もの GRB を検出していたが、赤方偏移が同定されたのは 12 例のみ。

これらは何処から来るのか？

Ep – Luminosity 關係



Y04

$$L_p = 10^{52.5 \pm 0.3} \left[\frac{E_p (1+z)}{355 \text{keV}} \right]^{2.0 \pm 0.2}$$

Y09

$$L_p = 10^{52.43 \pm 0.04} \left[\frac{E_p (1+z)}{355 \text{keV}} \right]^{1.66 \pm 0.09}$$

GRBの赤方偏移分布

Ep - L 関係から距離の推定

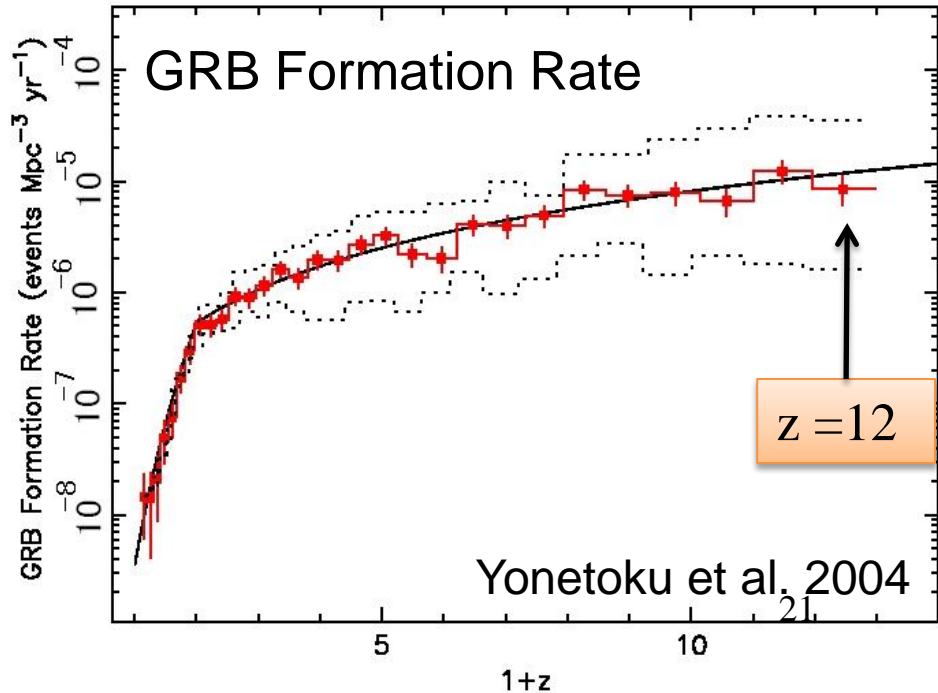
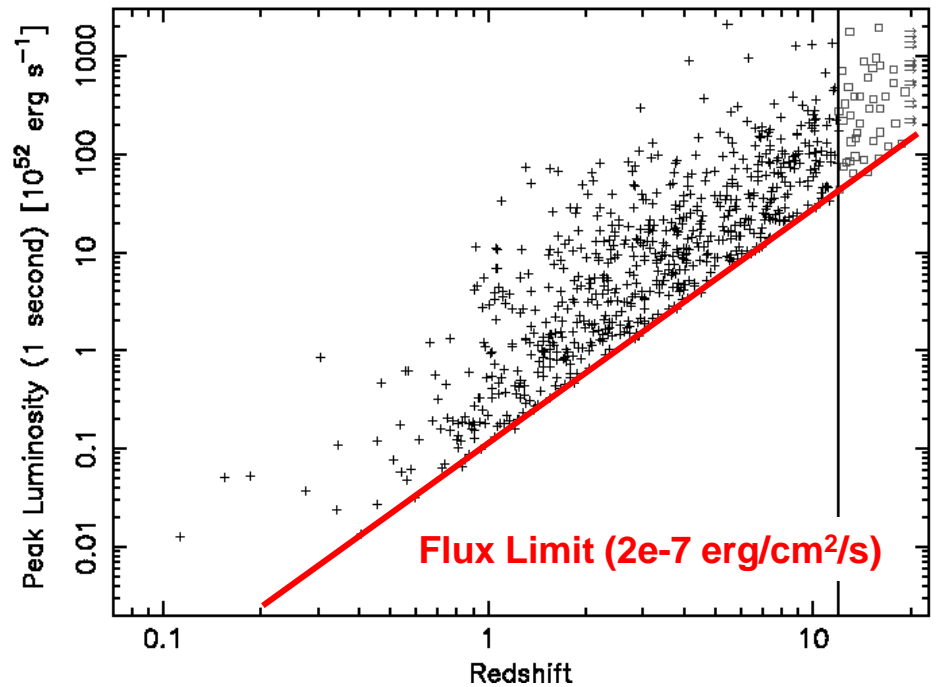
Y04

$$L_p = 10^{52.5 \pm 0.3} \left[\frac{E_p (1+z)}{355 \text{keV}} \right]^{2.0 \pm 0.2}$$

$$\frac{d_L^2}{(1+z)^2} = \frac{10^{52.5}}{4\pi F_p} \left[\frac{E_p}{355 \text{keV}} \right]^{2.0}$$

BATSE 検出器で捉えたイベントのうち、
 $F > 2 \times 10^{-7} \text{ erg/cm}^2/\text{s}$ のもの
 約700例のスペクトル解析

GRB Rate は
 $z = 1$ に向けて急激に増加、
 より遠方でもフラット or 緩やかに上昇



z = 12

Yonetoku et al, 2004

宇宙の相転移

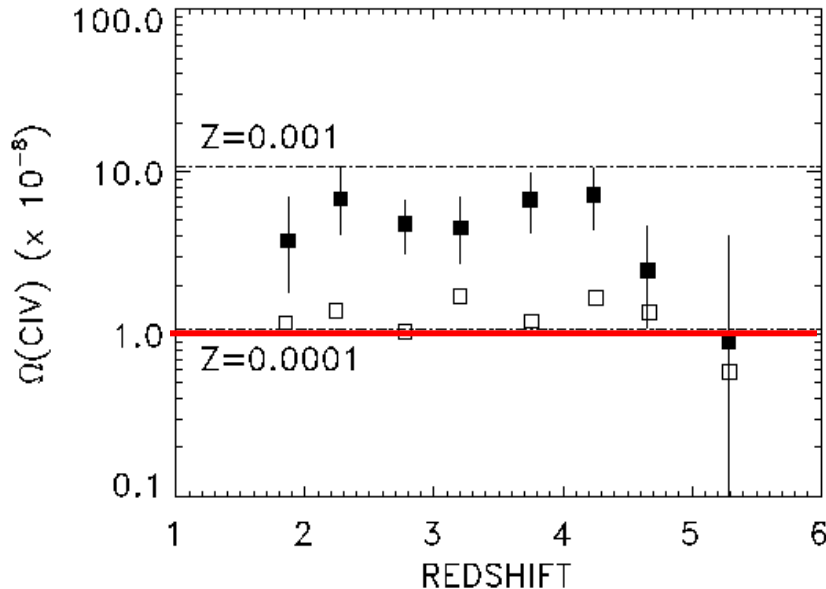
ビッグバンで作られる元素は水素とヘリウム (電離状態)

$z = 1089$: 宇宙の晴れ上がり (中性化: CMB)



$z = 0$ (現在): 電離状態

銀河間空間の金属量 (Songaila 2001)

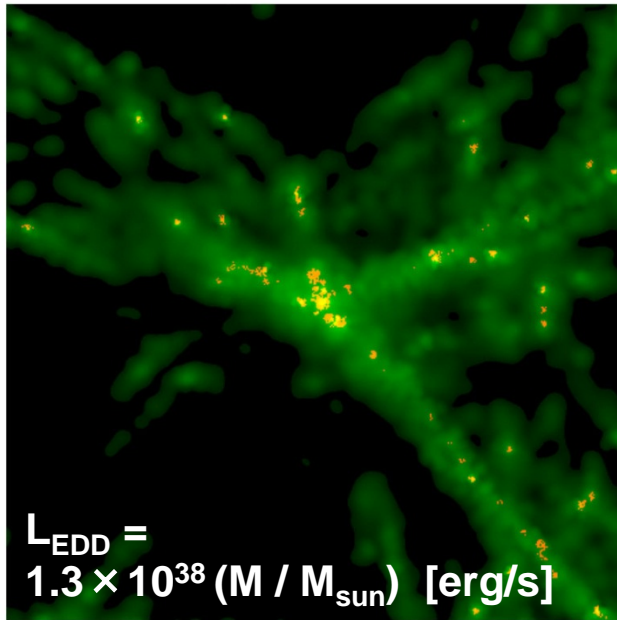


第一世代星の星生成率で宇宙の再電離を説明できるか？

銀河間空間に一様に分布する $10^{-4} Z_{\text{sun}}$ の金属元素は、いつ、誰が作ったのか？

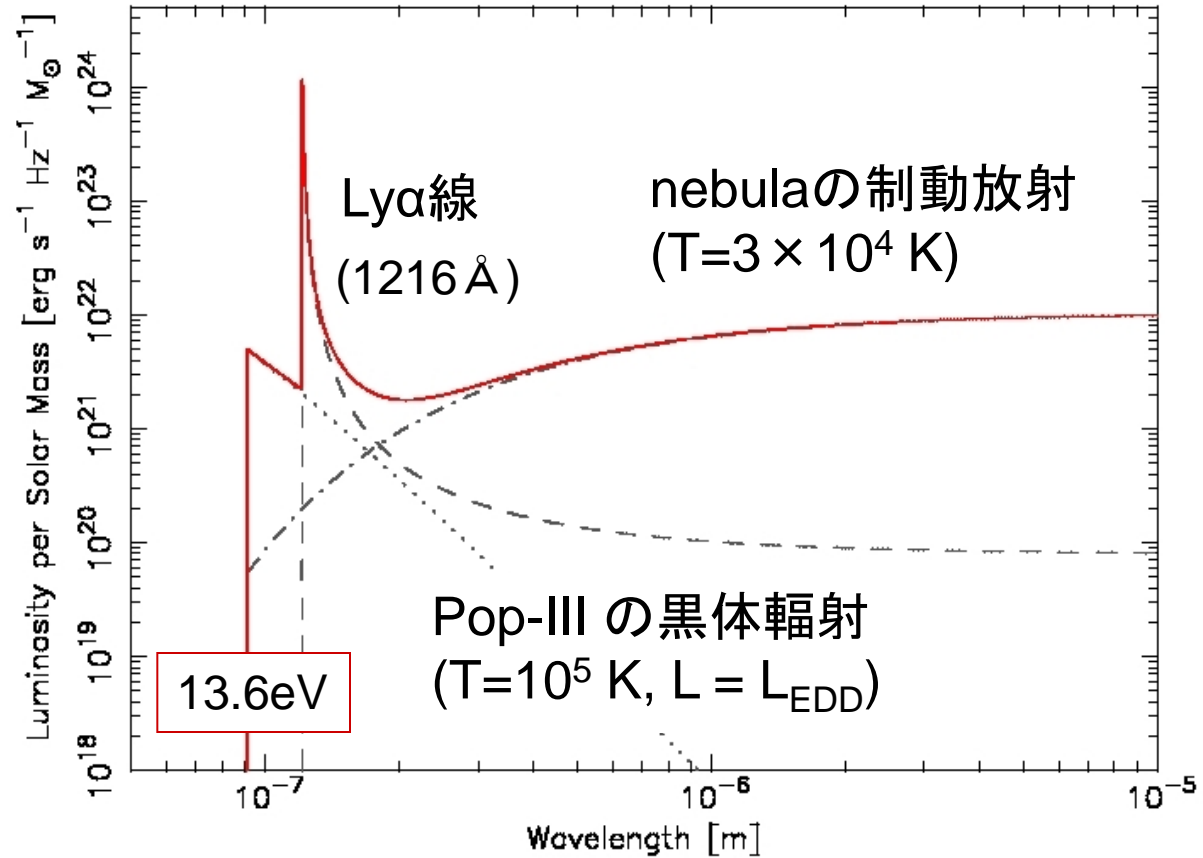
Pop-III 星による宇宙再電離

$f_{\text{esc}} = 0$ の場合



$L_{\text{EDD}} = 1.3 \times 10^{38} (M / M_{\text{sun}}) \text{ [erg/s]}$

(Barton et al. 2004)



紫外線光子 ($h\nu > 13.6\text{eV}$) = $8.75 \times 10^{68} \text{ [photon/Gpc}^3\text{/yr]}$

バリオン(水素)数密度 $\frac{\Omega_m \rho_c}{m_p} = 7.66 \times 10^{75} \text{ [Gpc}^{-3}\text{]}$

10⁷⁻⁸ 年の間に、Pop-III 星によって宇宙を再電離できる。

銀河間空間の金属汚染

質量レンジ毎の星生成率

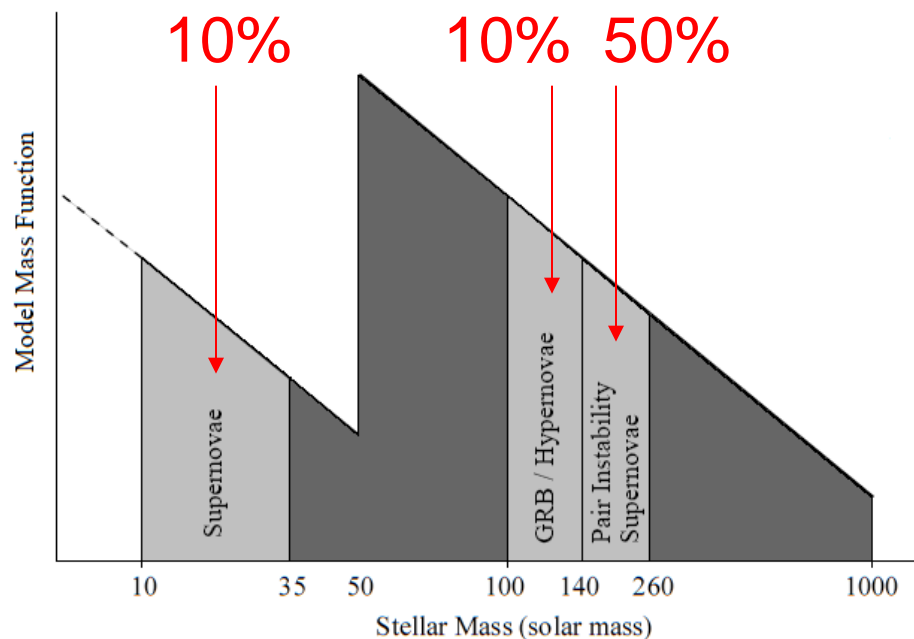
$$\dot{M}_{\text{SN}} = 7 \times 10^2 \quad (10 < m < 50)$$

$$\dot{M}_{\text{GRB}} = 2.3 \times 10^6 \quad (100 < m < 140)$$

$$\dot{M}_{\text{pair}} = 3.7 \times 10^6 \quad (140 < m < 260)$$

$$(M_{\text{sun}}/\text{Gpc}^{-3}/\text{yr})$$

金属元素の合成量 (Heger et al. 2002)

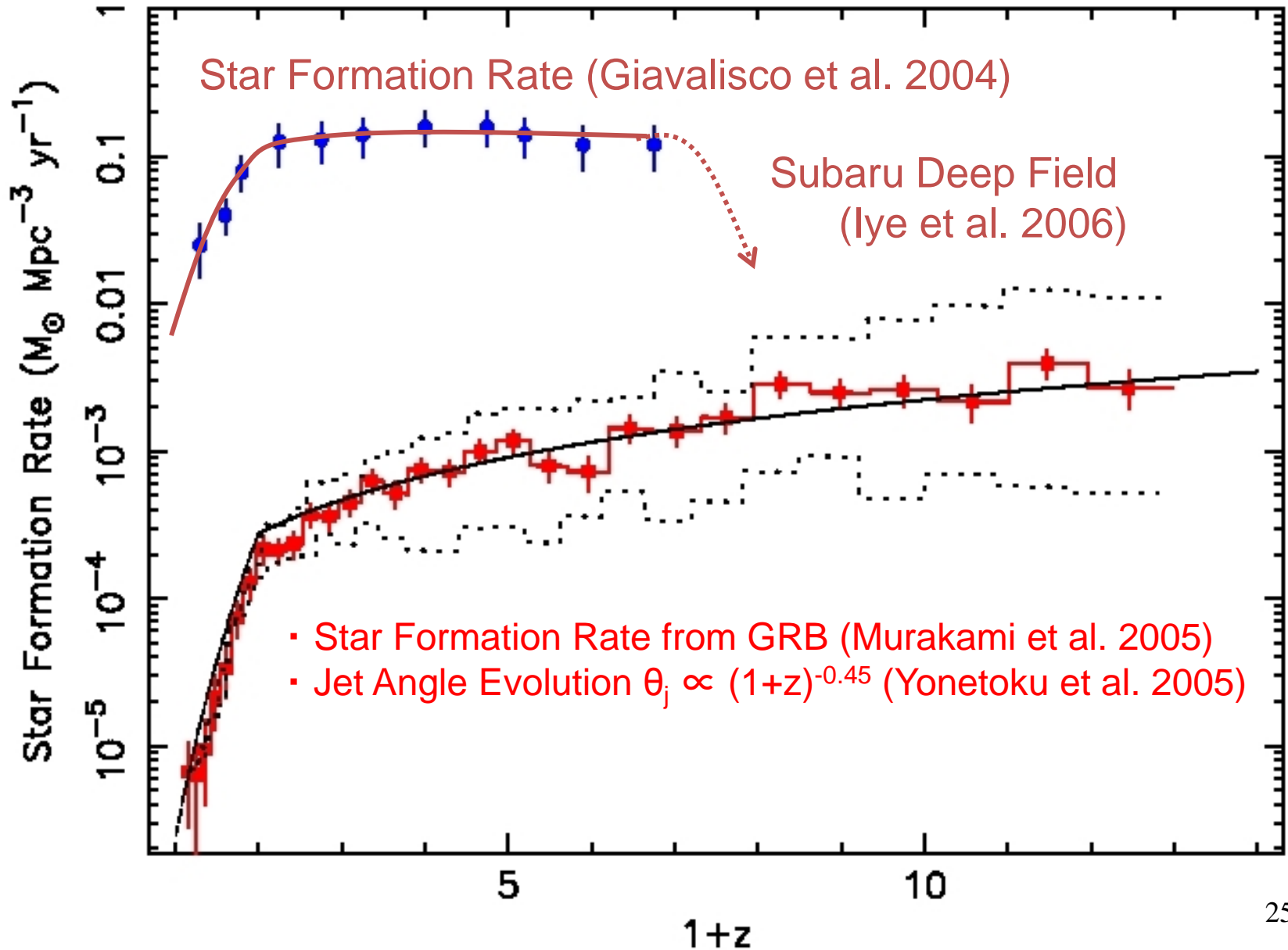


Pop-III 星の爆発によって撒き散らされる金属元素量は

$$\dot{M}_{\text{metal}} = 2 \times 10^6 (M_{\text{sun}}/\text{Gpc}^{-3}/\text{yr})$$

10⁷ 年以上、Pop-III 星が生存を続ければ、銀河間空間の金属量は $Z = 1.2 \times 10^{-4} Z_{\text{sun}}$ に達する。

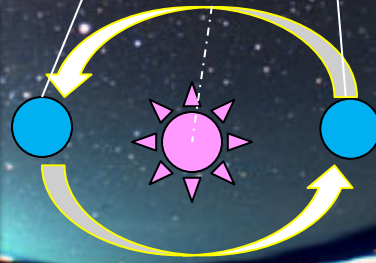
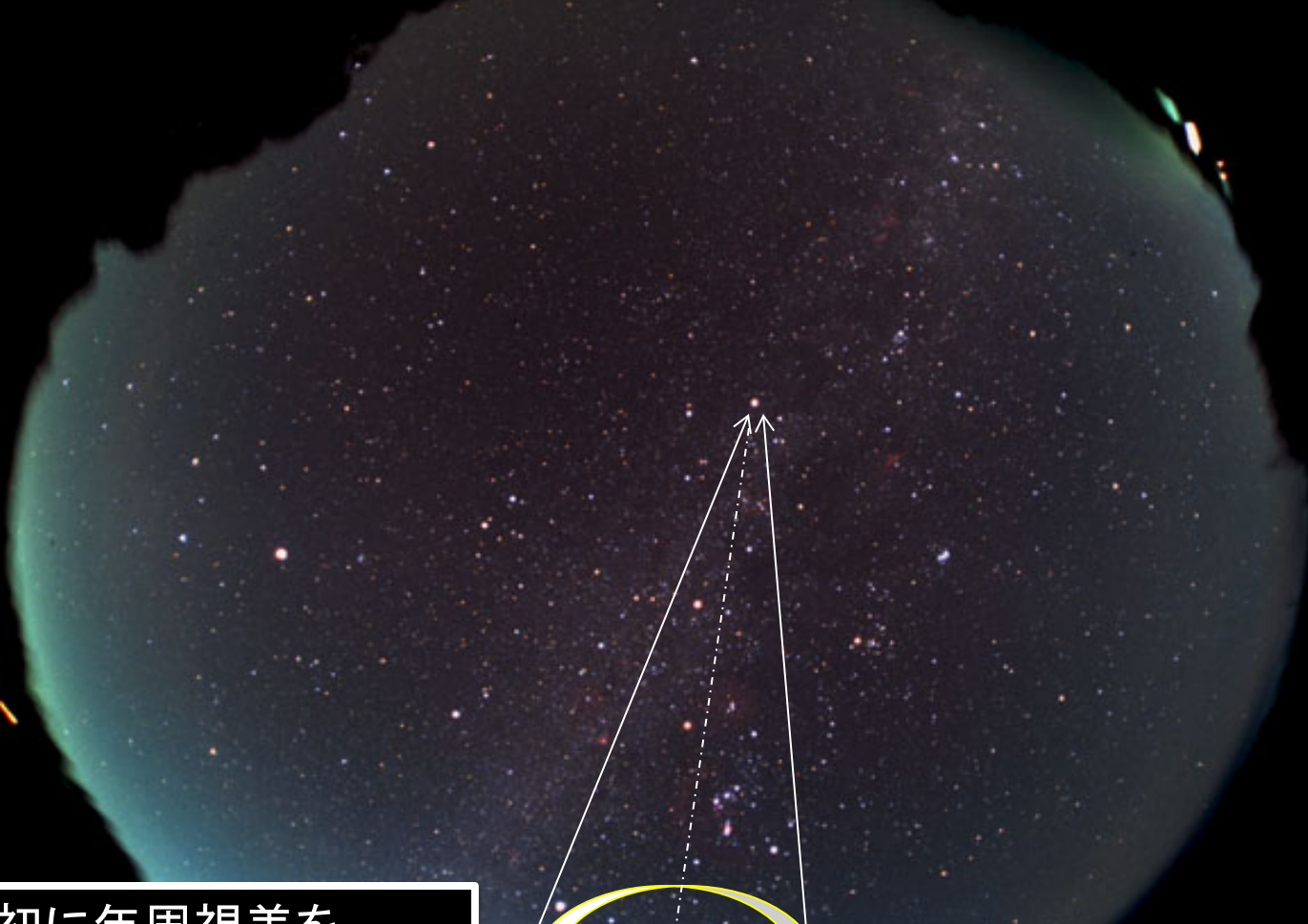
Star Formation Rate



GRBを用いた宇宙論研究2

- GRBを用いた距離梯子の拡張
- 初期宇宙における宇宙論パラメータの測定
- 暗黒物質・暗黒エネルギー量

天の川銀河の中でも、比較的「近い星」



1838年、最初に年周視差を測定したのはベッセルで、0.314秒角(1度の1/1000程度)を測定した。

ヒッパルコス衛星が3000光年(2.8×10^{19} m)の距離を測定している(1989年)

H-R 図

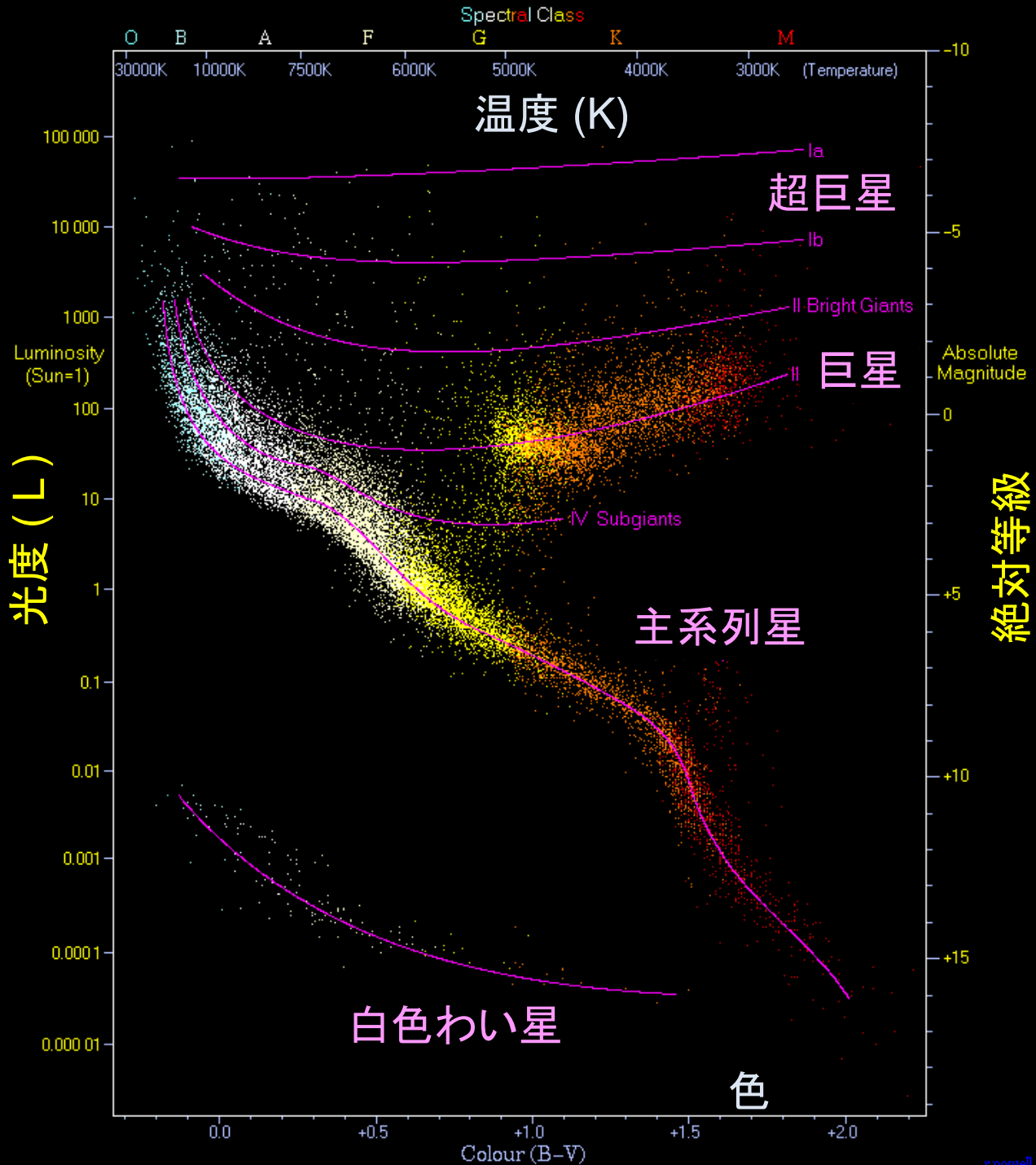
(1910 年)

星の温度を測定すれば
星の光度がわかる

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

L: 光度 (本来の明るさ)
F: 見かけの明るさ

約 3000 光年
= 2.8×10^{19} m
くらいまで測れる

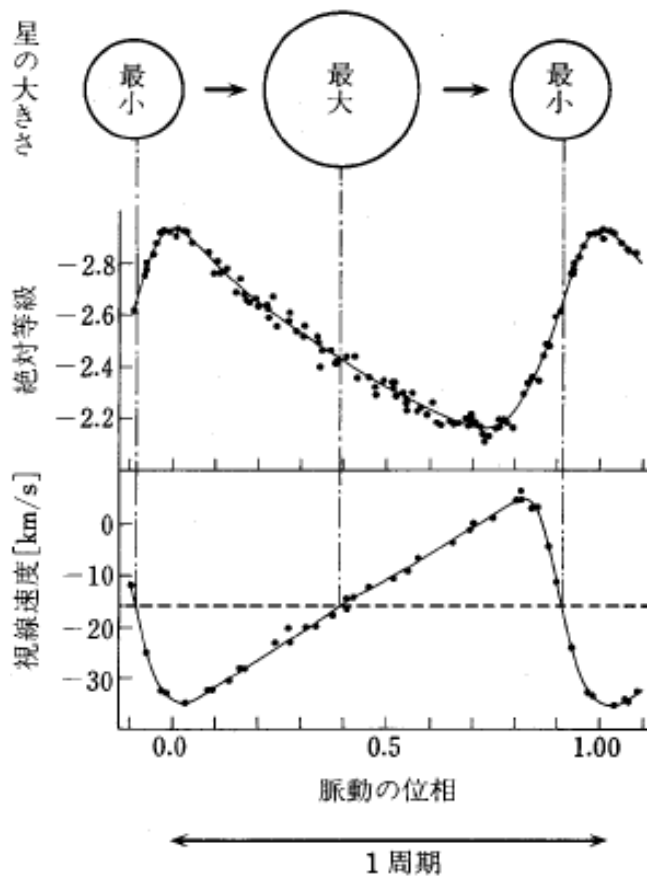


絶対等級

セファイド変光星

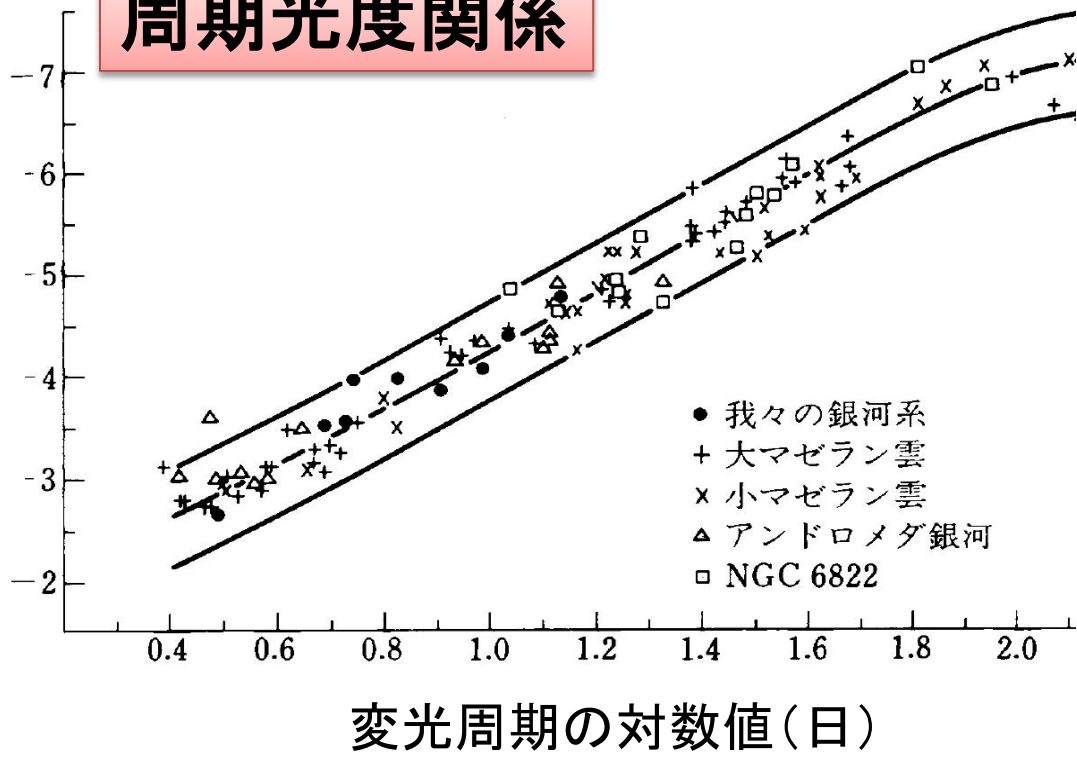
Leavitt (1908, 1912)

規則的に明るくなったり暗くなったりを繰り返す星で
周期が50日のものは**太陽の1万倍も明るい**



平均絶対光度

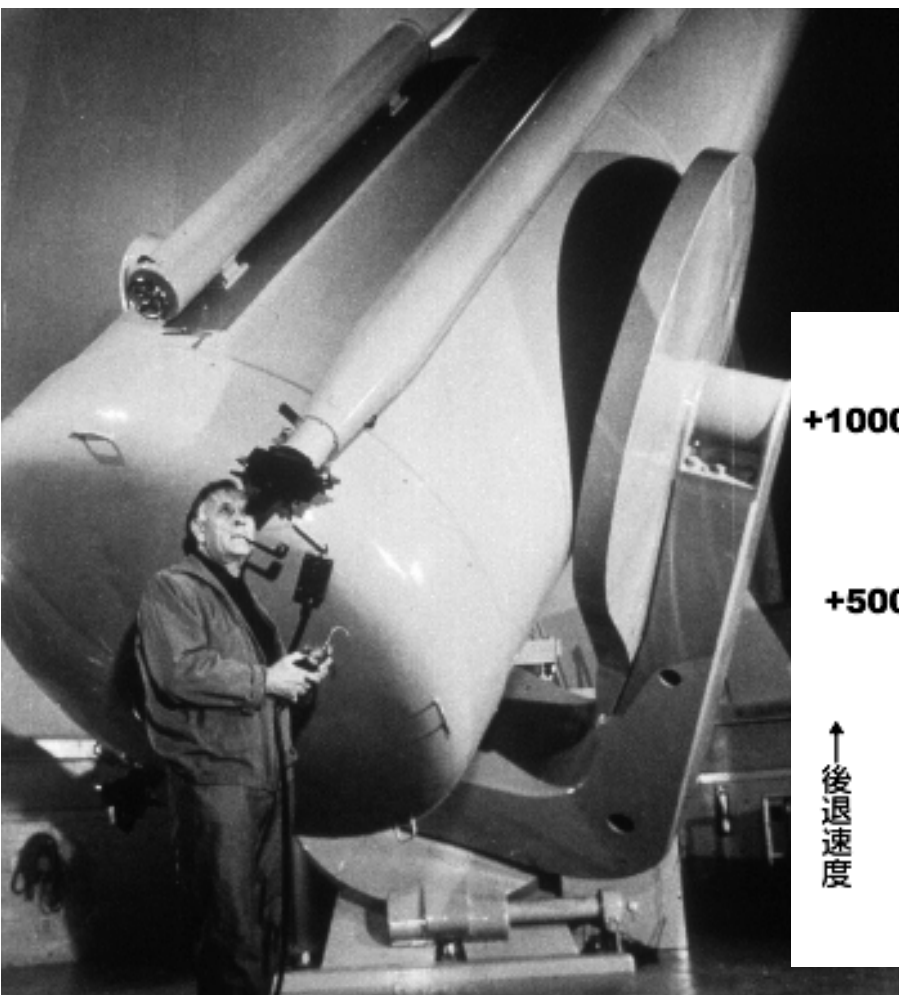
周期光度関係



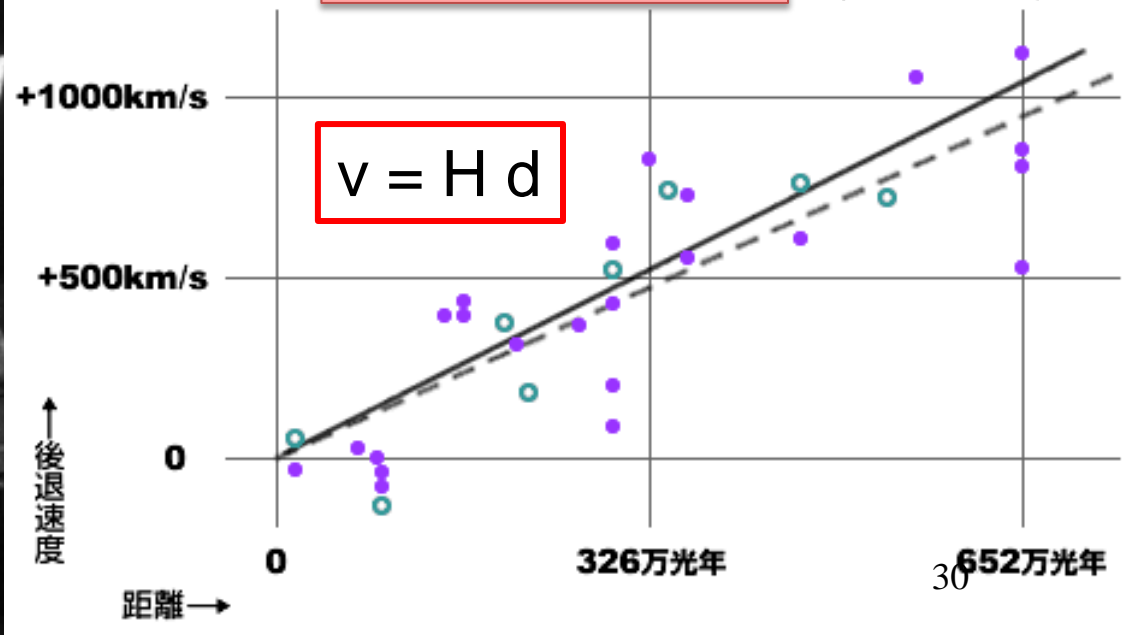
初めて**銀河系外**まで距離測定が可能となった

1923年、ハッブルは
アンドロメダ大星雲の中にある
セファイド変光星を使って距離を測定した。
距離は 230 万光年 = 2.2×10^{22} m

セファイド変光星では
 6×10^{23} m くらいまで測定できる



ハッブルの法則 (1929 年)

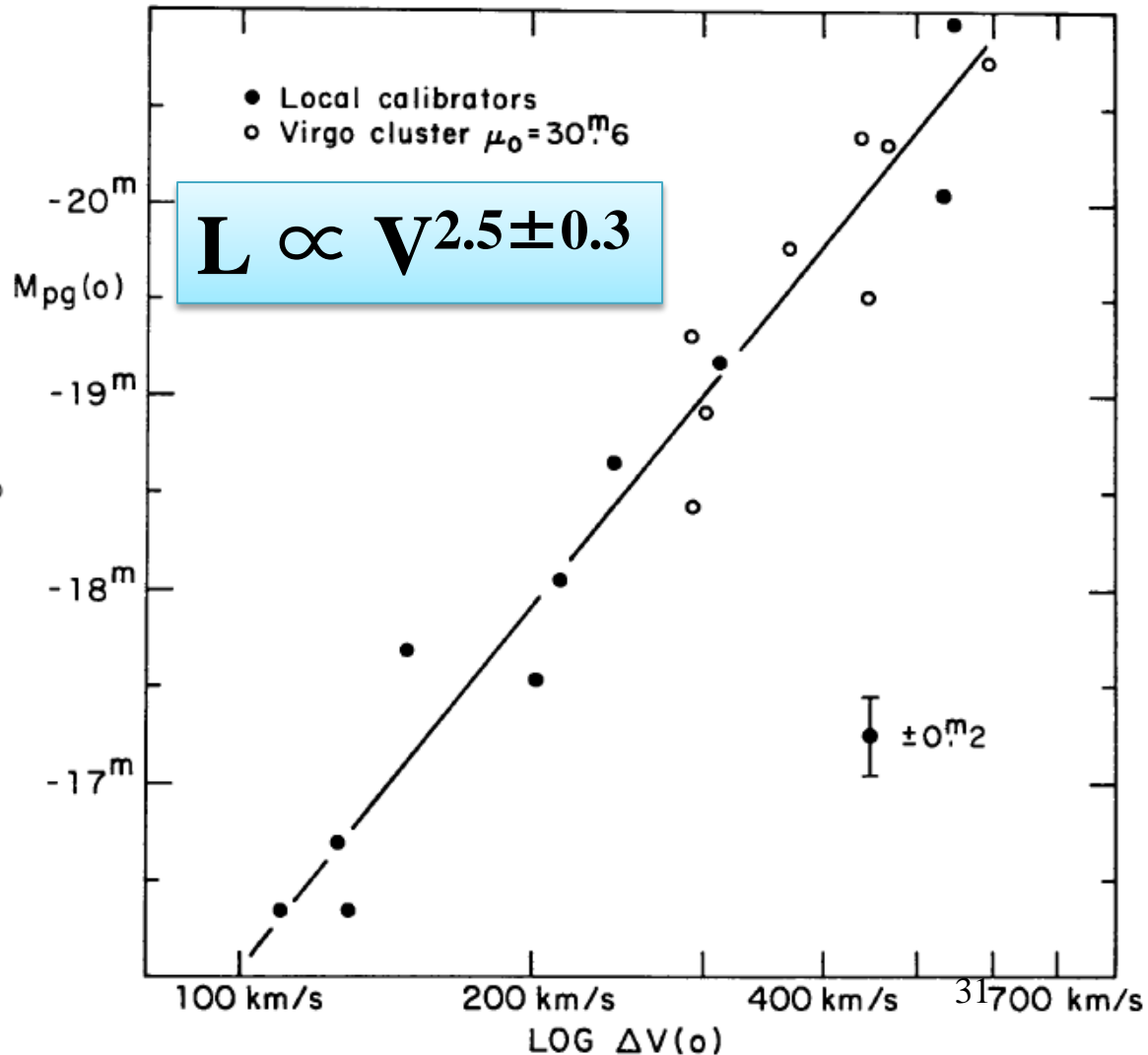
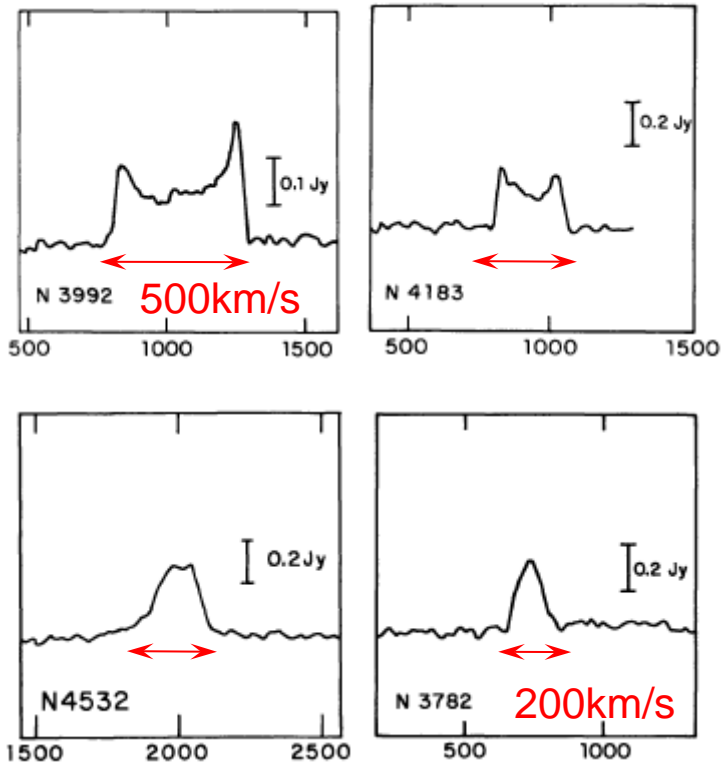


渦巻銀河の回転速度—光度関係

A New Method of Determining Distances to Galaxies

R. Brent Tully^{1*} and J. Richard Fisher² (1977)

H_I 輝線の形

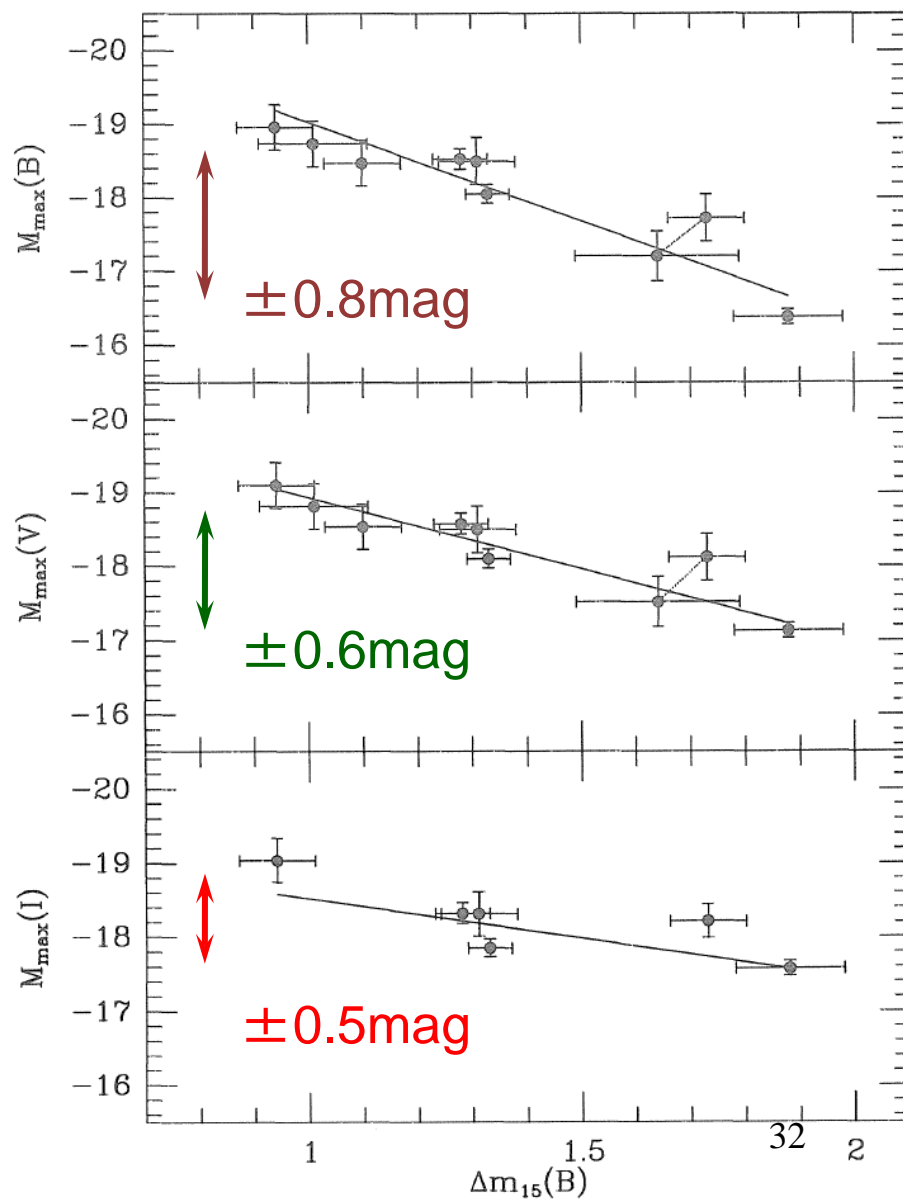
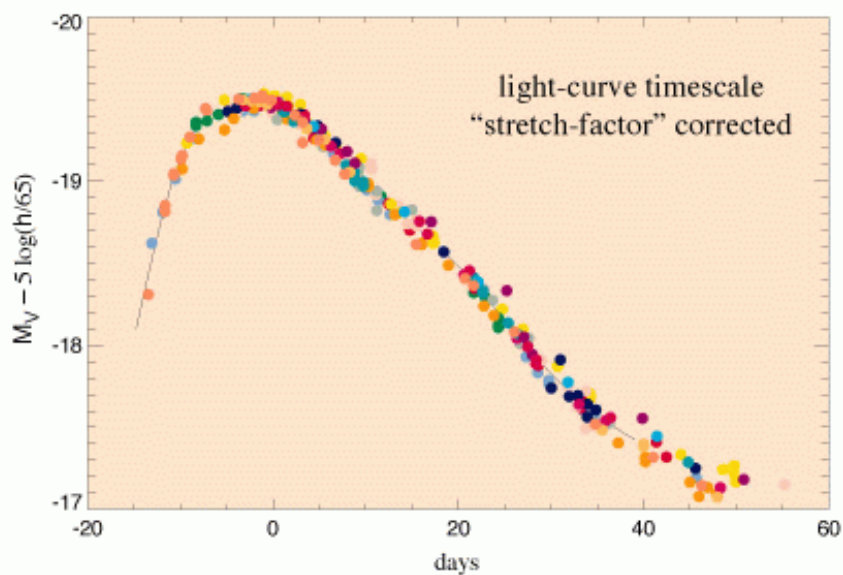
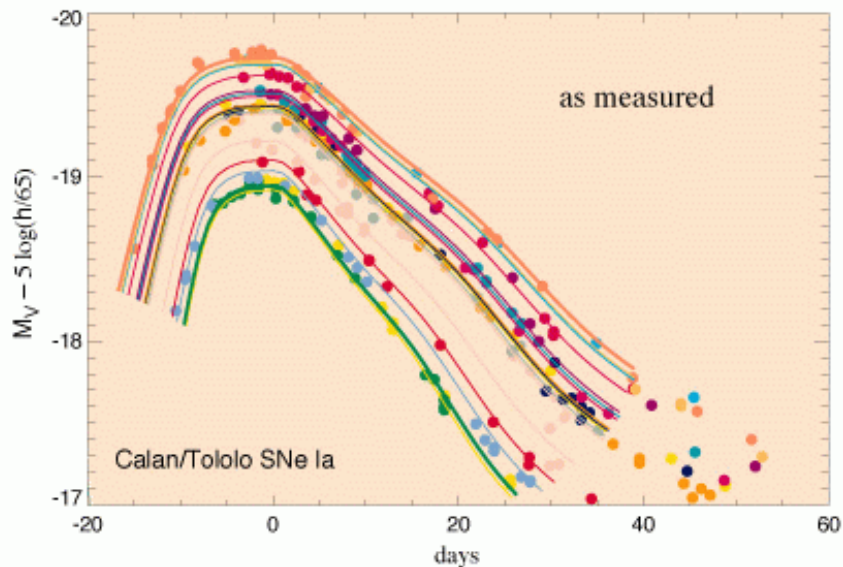


Ia 型超新星

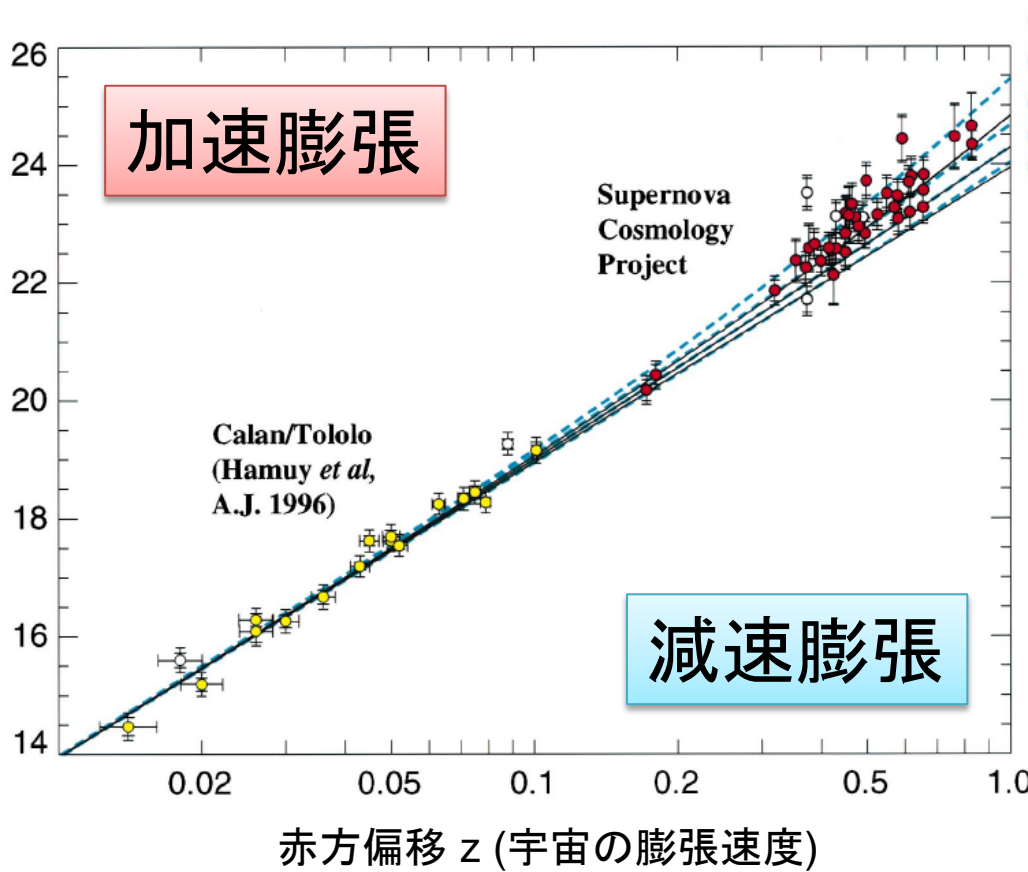
THE ABSOLUTE MAGNITUDES OF TYPE Ia SUPERNOVAE

M. M. PHILLIPS (1993)

V Band



超新星までの距離を示す量



$(\Omega_M, \Omega_\Lambda) =$
 (0, 1) Flat
 (0.5, 0.5) $\Lambda = 0$
 (1, 0) $\Lambda = 0$
 (1.5, -0.5) $\Lambda = 0$

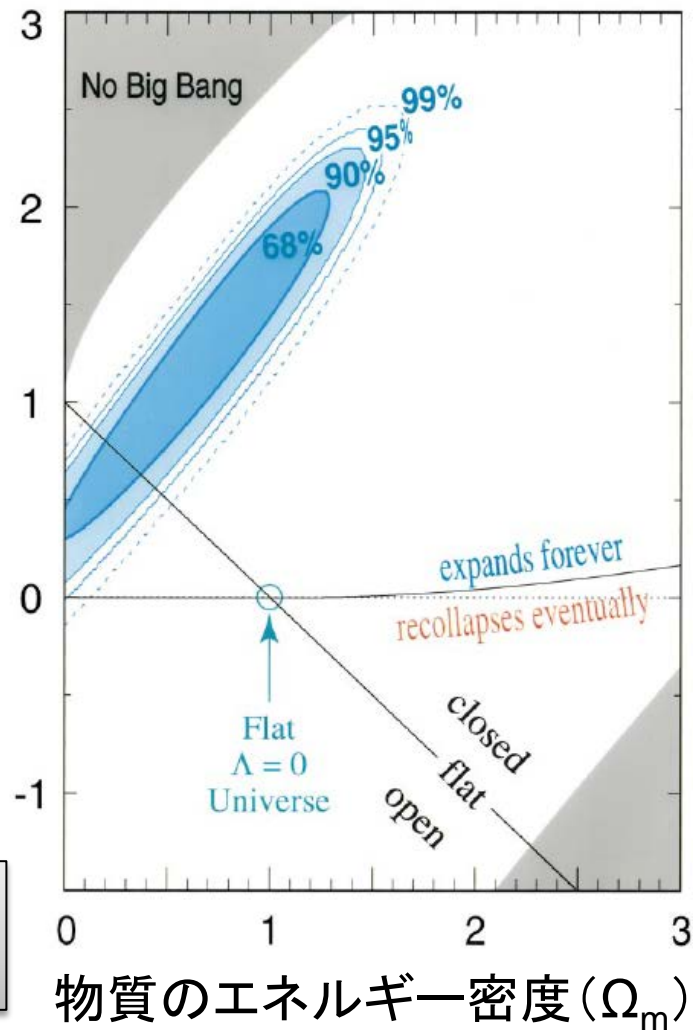
Perlmutter et al. (1999)

ノーベル賞
受賞対象論文から

Ia型超新星の観測から、
宇宙には物質だけではなく、
加速膨張させる斥力がある

ダークエネルギーの存在

加速膨張させるエネルギー密度 (Ω_Λ)

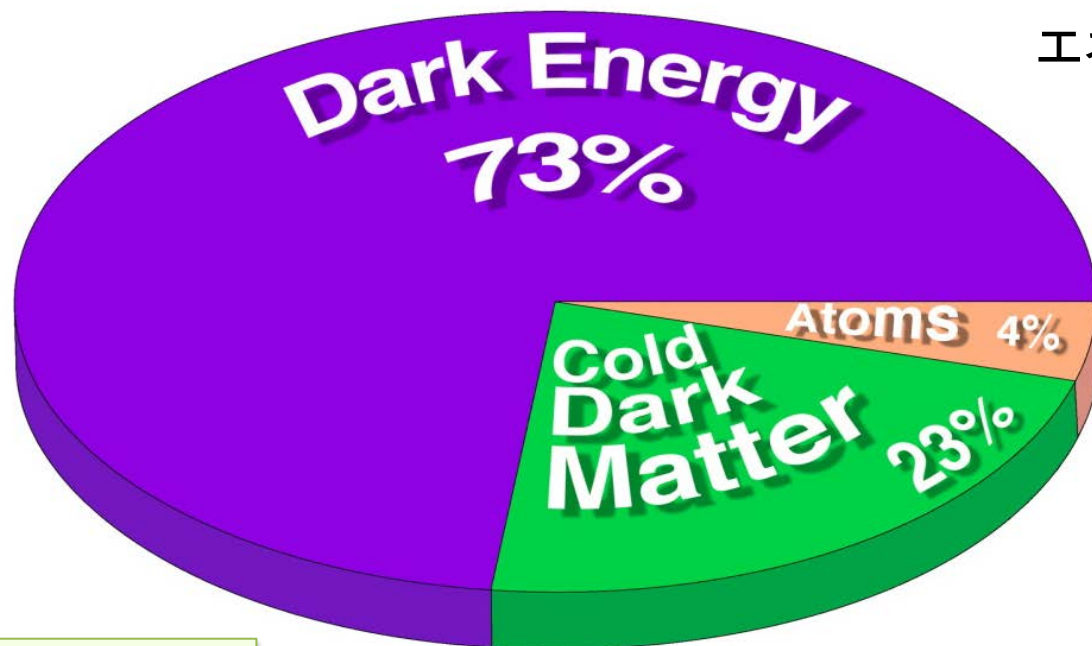


物質のエネルギー密度 (Ω_m)

宇宙の構成要素

$$E = mc^2$$

エネルギーと質量の
等価性



宇宙論パラメータ

$$\Omega_m = 0.27$$

(重力で宇宙膨張を減速させる)

$$\Omega_\Lambda = 0.73$$

(何だかわからないが
宇宙を加速膨張させる)

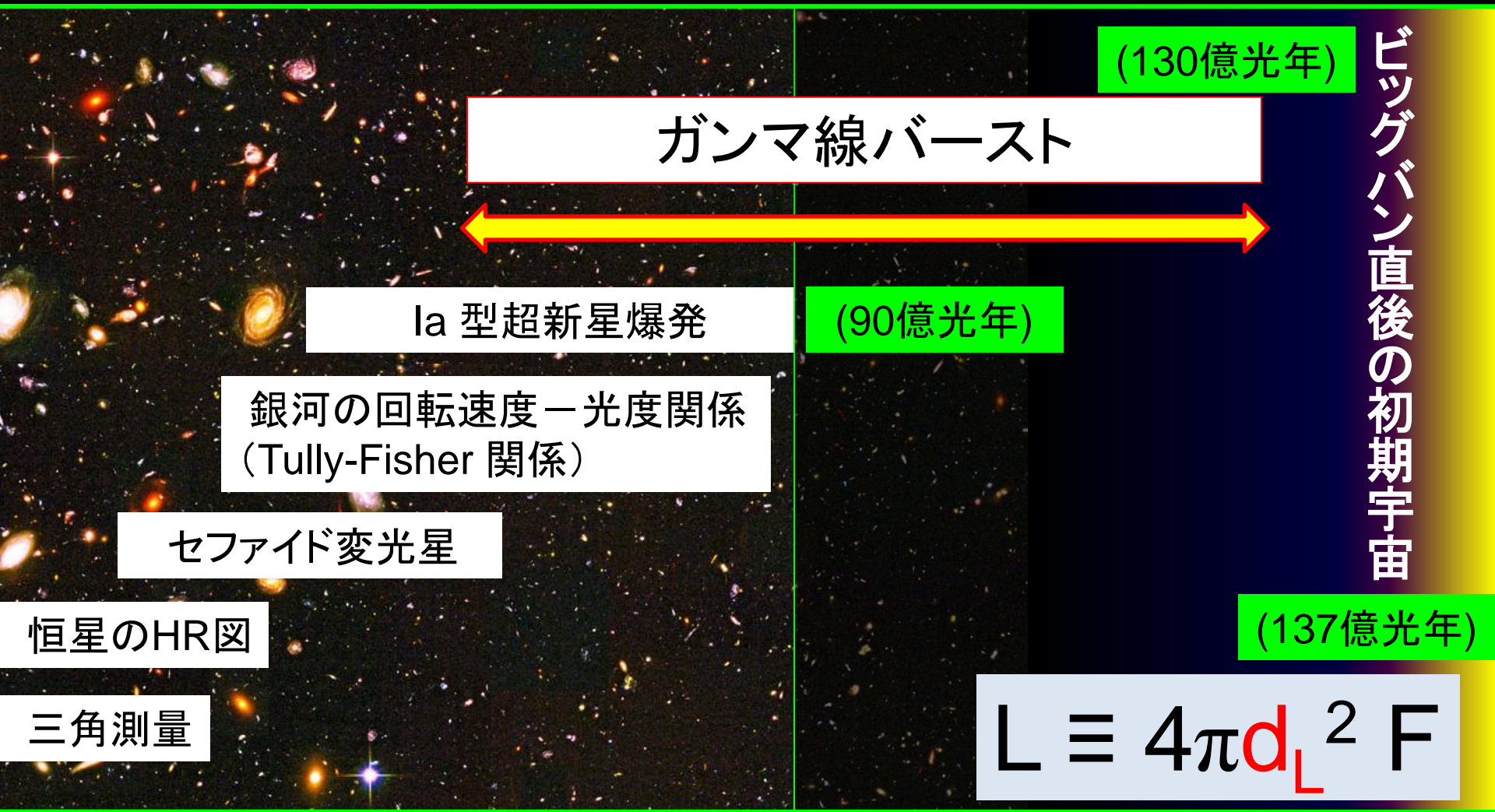
我々が知っている原子(物質)は
宇宙の全エネルギーのたった4%

23% は暗黒物質

73% は暗黒エネルギー

宇宙の96%は正体不明のもの

「赤方偏移」と「天体までの距離」の関係は 宇宙の膨張の歴史を物語る



Ia型超新星による光度距離の較正

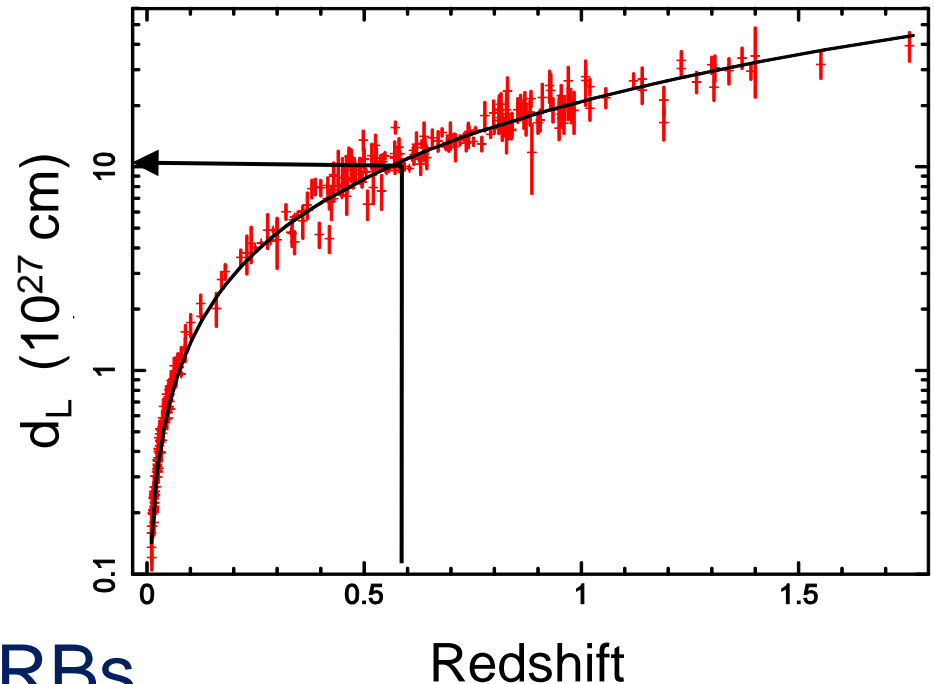
サンプル

■ $z < 1.755$ の 44 GRBs

Type Ia SNeから d_L を測定し、
いっさい宇宙論は仮定せずに
Ep-L関係を再構築する。

$$\frac{d_L}{10^{27} \text{ cm}} = 11.77 \times z^{1.540} + 8.893 z^{0.9214}$$

SN Ia の Hubble 図

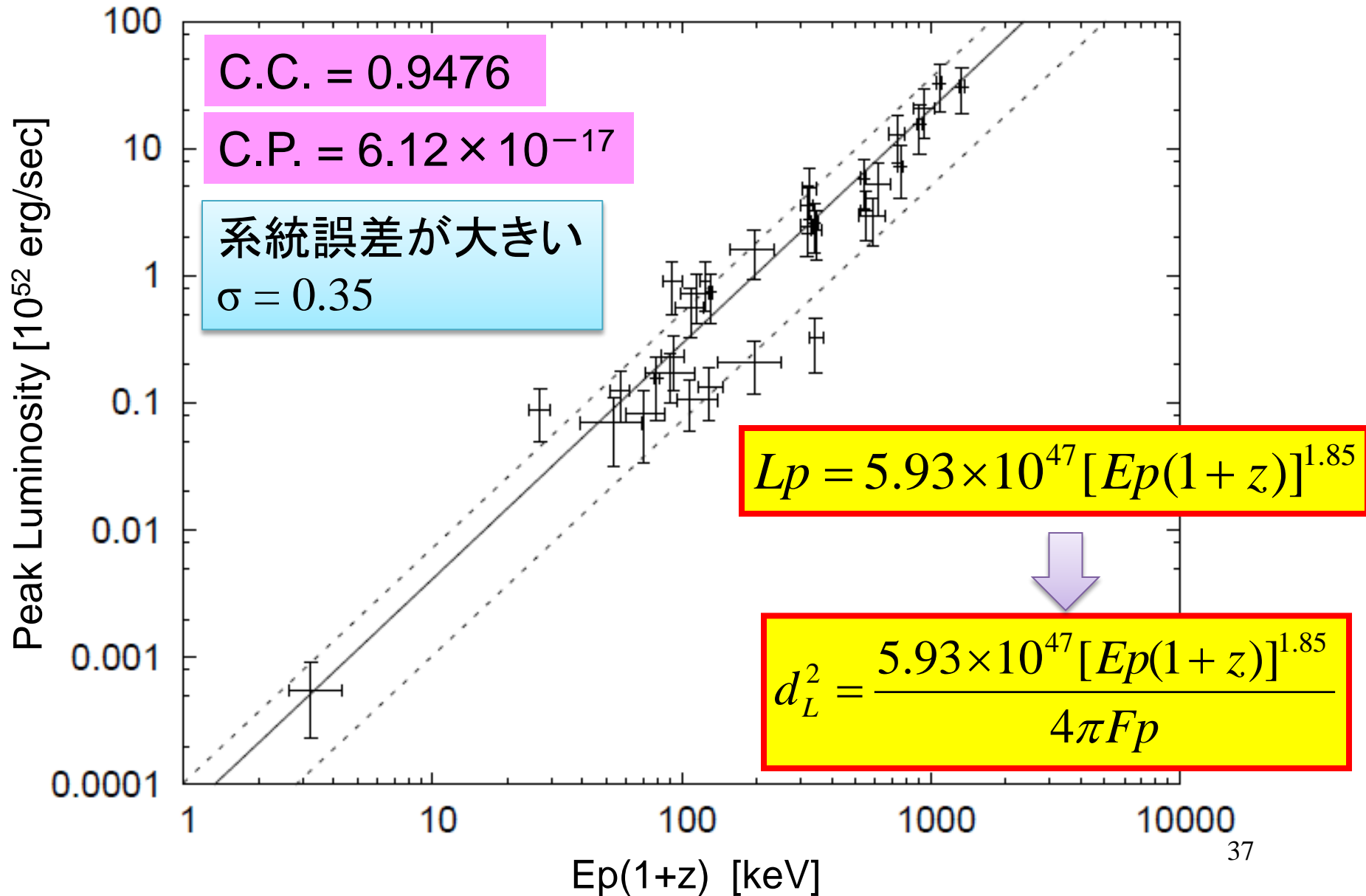


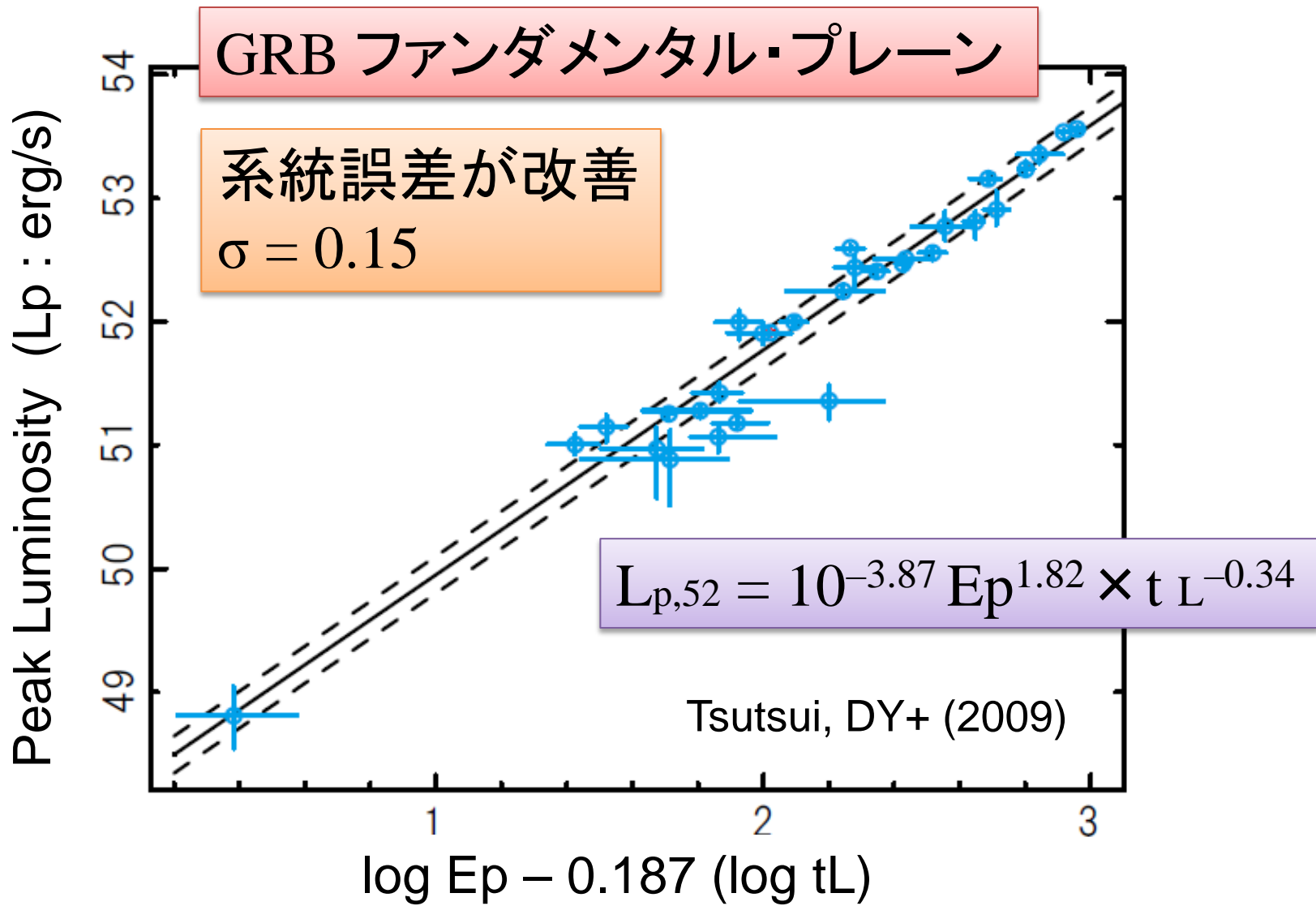
■ $1.755 < z < 8.3$ の 40 GRBs

まだ未知の領域の宇宙論パラメータを測定する。

赤方偏移が同定されているGRBは200例以上あるが、
(当時は) E_p が測定されているものは84イベント

Type Ia SN で較正したEp-L関係式





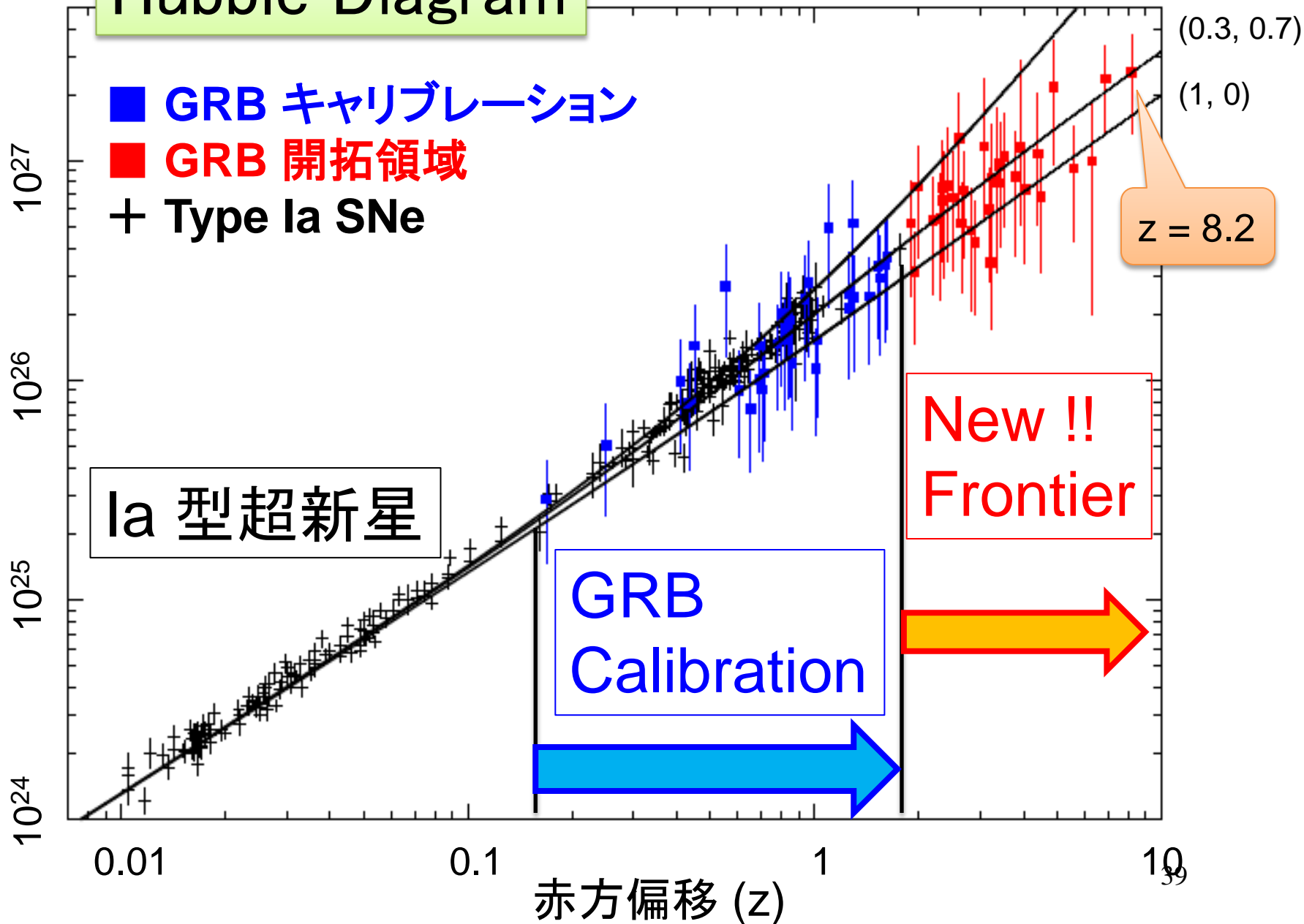
$$t_L \equiv \frac{\text{全エネルギー-Eiso (erg)}}{\text{最大光度 } L_p \text{ (erg/s)}} = \frac{\text{Fluence (erg/cm}^2\text{)}}{(1+z) \times \text{Peak Flux (erg/cm}^2\text{/s)}} \quad 38$$

Hubble Diagram

$(\Omega_m, \Omega_\Lambda) = (0, 1)$

- GRB キャリブレーション
- GRB 開拓領域
- + Type Ia SNe

光度距離 (m)



Ia 型超新星

GRB
Calibration

New !!
Frontier

$z = 8.2$

観測と理論の比較

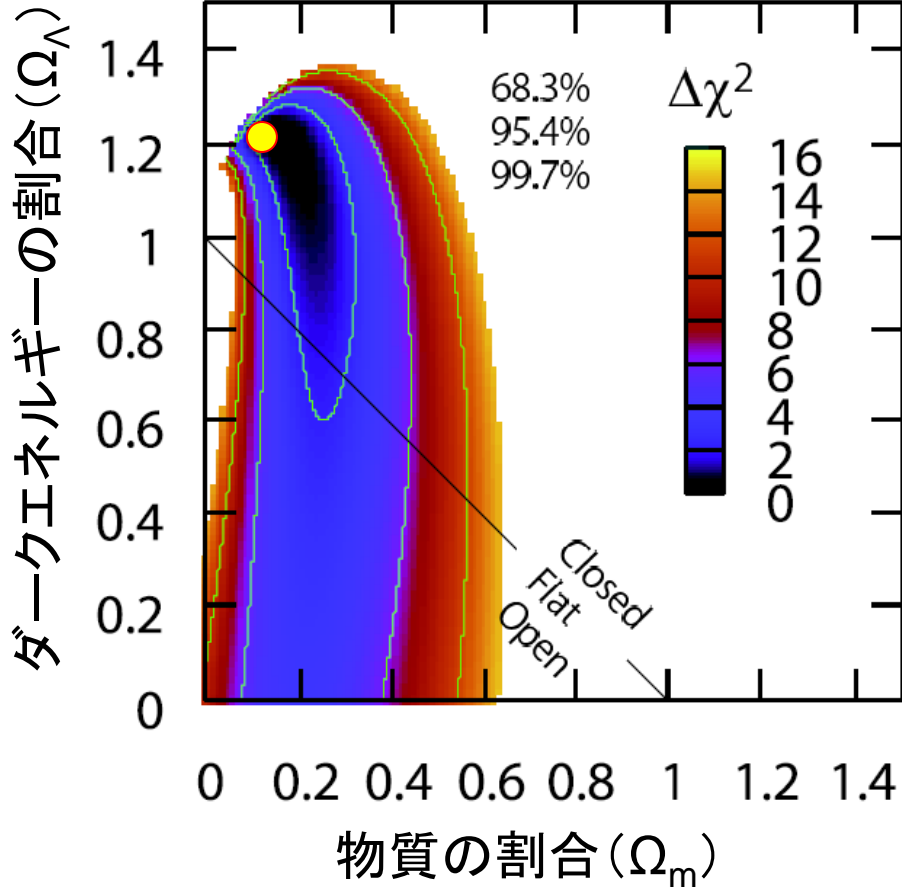
$$d_L^{th}(z, \Omega_m, \Omega_\Lambda) = \begin{cases} \frac{c}{H_0 \sqrt{\Omega_k}} \sin(\sqrt{\Omega_k} F(z)) & \text{if } \Omega_k > 0 \\ \frac{c}{H_0 \sqrt{-\Omega_k}} \sinh(\sqrt{-\Omega_k} F(z)) & \text{if } \Omega_k < 0 \\ \frac{c}{H_0} F(z) & \text{if } \Omega_k = 0 \end{cases}$$

$$\text{where } F(z) = \int_0^z \frac{dz}{\sqrt{\Omega_m(1+z)^3 + \Omega_\Lambda - \Omega_k(1+z)^2}}.$$



High- z の GRBからは、 Ω_m に対して
厳しい制限が得られるだろう

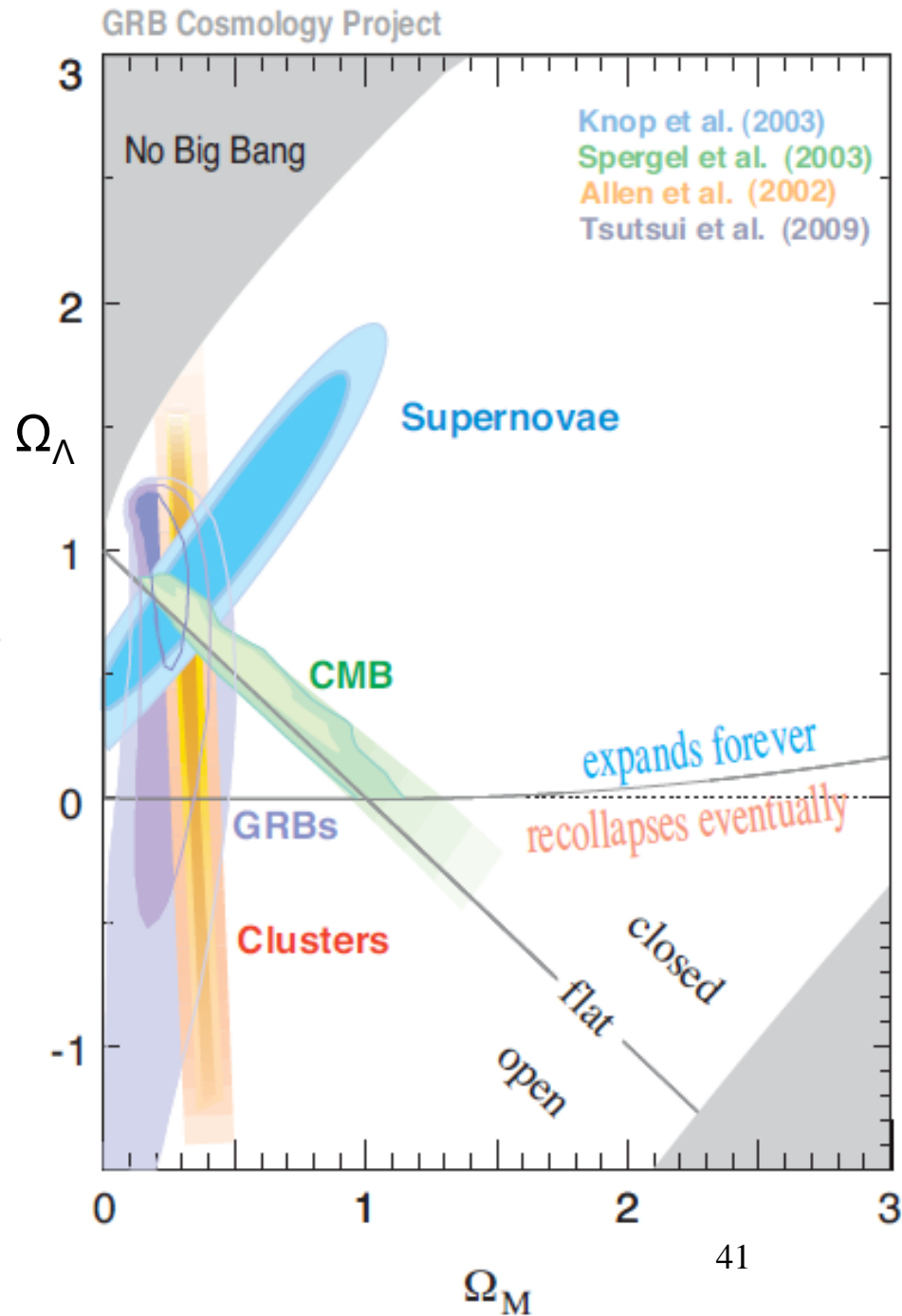
GRB によるダークエネルギーの測定



$(\Omega_m, \Omega_\Lambda) = (0.24 \pm 0.10, 0.76 \pm 0.10)$

Tsutsui, DY + (2009) [flat universe]

世界で初めて $z > 2$ における
ダークエネルギー量を測定



これからのGRB観測計画

ガンマ線バーストを用いた 初期宇宙探査計画 HiZ-GUNDAM

High-z Gamma-ray bursts for Unraveling the Dark Ages Mission

HiZ-GUNDAM WG メンバー

代表：米徳大輔（金沢大学）

2012年4月5日に小型科学衛星WGとして発足

■ X線・ガンマ線検出器

河合誠之(東工大)、黒澤俊介(東北大)、郡司修一(山形大)、坂本貴紀(青山学院大)、
芹野素子(理研)、谷森達(京都大)、三原建弘(理研)、村上敏夫(金沢大)、
谷津陽一(東工大)、山岡和貴(青山学院大)、吉田篤正(青山学院大)、米徳大輔(金沢大)

■ 赤外線望遠鏡

松浦周二、白籬麻衣、津村耕司(ISAS/JAXA)、松本敏雄(台湾中央研究院)、
柳澤顕史(国立天文台)、川端弘治(広島大)、沖田博文(東北大)
アドバイザー: 金田英宏(名古屋大)、和田武彦(ISAS/JAXA)

■ 理論検討

浅野勝晃(宇宙線研)、井岡邦仁(高エネ研)、井上進(宇宙線研)、川中宣太(ヘブライ大学)、
諏訪雄大(京都大)、高橋慶太郎(熊本大)、筒井亮(東京大)、當真賢二(大阪大)、
戸谷友則(東京大)、長倉洋樹(京都大／早稲田大)、長滝重博(理研)、
中村卓史(京都大)、新納悠(国立天文台)、水田晃(理研)、山崎了(青山学院大)、
横山順一(東京大)

■ 衛星システム検討

坂井真一郎(ISAS/JAXA)

38名／19機関

最近および将来の大型計画と戦略（宇宙進化）



TMT

初代銀河 ($z > 10$)
(pop-III星で構成)
遠方銀河の分光
宇宙再電離 ($z \sim 10$)
ガンマ線バースト

$z=1000$

$z=12$

$z=7$

$z=0.5$

$z=0$

ガンマ線バースト

光・赤外線・サブミリ波観測

高エネルギー天文学

Time since the Big Bang (years)

The Big Bang/Inflation

Universe filled with ionized gas: fully opaque

Universe becomes neutral and transparent

Epoch of Reionization

Galaxies and Quasars begin to form - starting reionization.

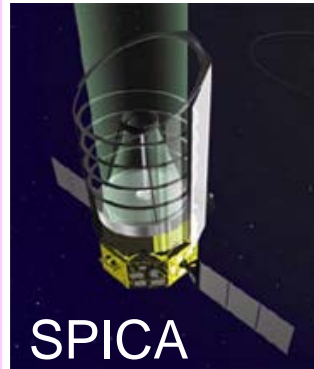
Reionization complete ~ 10% opacity

Galaxies evolve

Dark Energy begins to accelerate the expansion of space

Our Solar System today

Today: Astronomers look back and understand



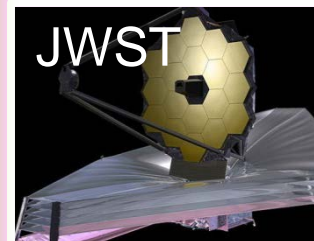
SPICA

Pop-III 星:
水素分子輝線 ($z < 7$)
水素回転励起 ($z \sim 20$)
隠れたAGN ($z < 1$)
物質進化 (氷、 SiO_2)



ALMA

初代銀河形成 ($z \sim 10$)
原始QSOダスト
大質量BH進化 ($2 < z < 10$)
物質進化 (有機分子)



JWST



すばる

遠方銀河の発見 ($z \sim 7$)
GRB050904 ($z=6.3$)



Astro-H

近傍銀河団 ($z \sim 0.3$)
隠れたAGN ($z < 1$)
大規模構造, CXB

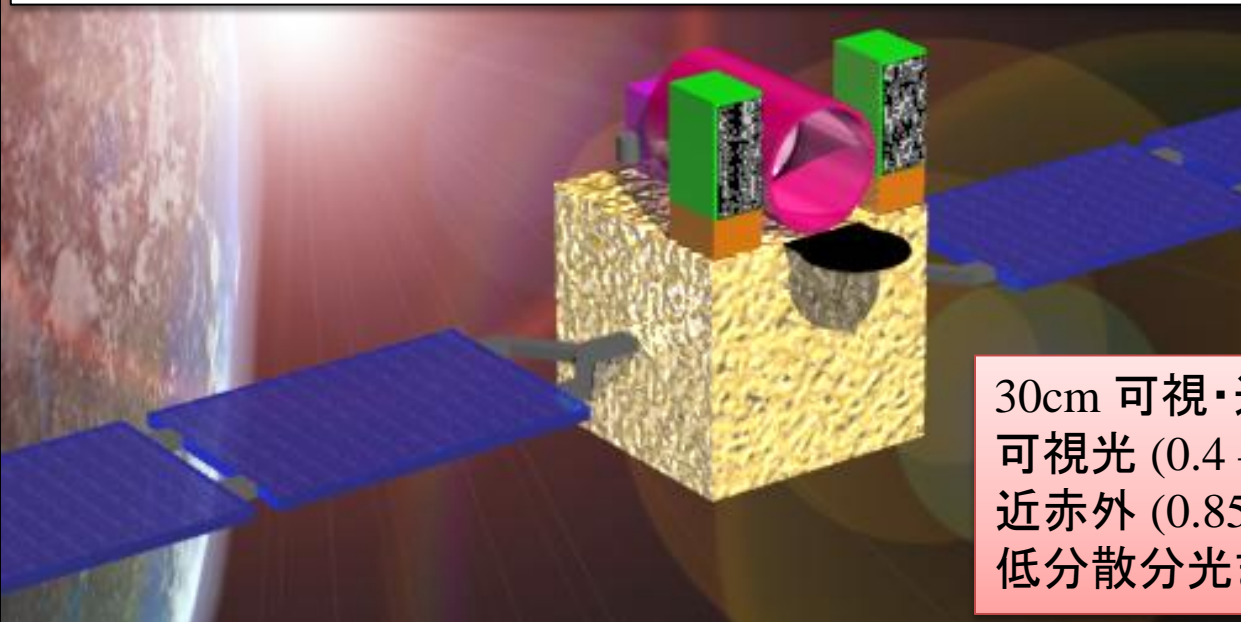
小型科学衛星 HiZ-GUNDAM の観測の流れ

- (1) X線帯によるGRB 検出と、発生情報の通報
- (2) 自律制御で姿勢を変え、**約1分後**から近赤外線で追観測を開始
- (3) 「詳細な方向 (1秒角)」と「赤方偏移(high-zであること)」を通報

ここまでがミッションの範囲。その後、

- (4) 大型望遠鏡と協力して $z > 7$ の高分散スペクトルを取得

高赤方偏移に対応するため、X線と近赤外線の融合が特徴



X線イメージング検出器

視野1ステラジアン

角度分解能5~10分角

Si (+CdTe) + コーデッドマスク
(1 – 20 keV, 10 – 100 keV)

30cm 可視・近赤外線望遠鏡 (**視野17分角**)

可視光 (0.4 – 0.85 μ m) 測光

近赤外 (0.85 – 1.7 μ m) 分光・測光

低分散分光またはバンド測光

まとめ

GRBの高分散分光観測は、初期宇宙の物理状態を探查する有力な手法である。

GRBの $E_p - L_p$ 関係などを用いてGRB宇宙論を展開している。

- ・ 距離推定による星生成率の計算
(第一世代星による宇宙再電離、金属汚染)
- ・ 宇宙はしごの延長(SN Ia による校正)
- ・ $z > 2$ における宇宙論パラメータの測定

数年後、 $z > 7$ の GRB を検出して、大型望遠鏡と協力して初期宇宙を解明する人工衛星 HiZ-GUNDAM を検討しています。

ビッグバン直後の初期宇宙

ガンマ線バースト



(130億光年, $z \sim 8.2$)

Ia型超新星 標準光源

(100億光年, $z \sim 1.8$)

渦巻き銀河
回転速度 - 光度関係
(Tully-Fisher 関係)

(60億光年, $z \sim 0.5$)

セファイド型変光星
周期 - 光度関係

(6000万光年)

主系列星のHR図 (10万光年)

三角測量 (3000光年)

