

GRBで 暗黒エネルギーを探る

高橋慶太郎

2009年5月21日

with

筒井・中村（京都大） 米徳・村上（金沢大）

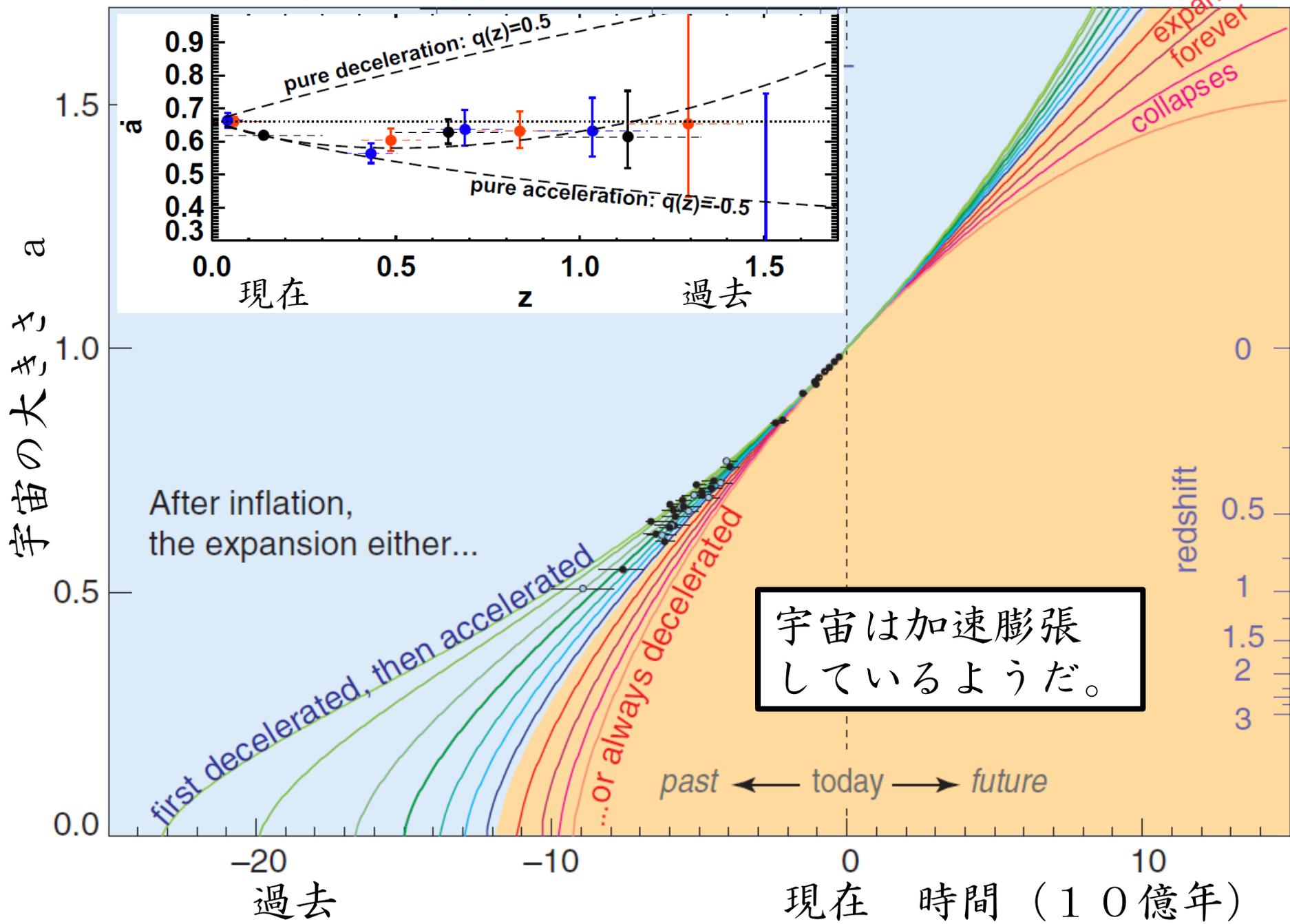
概要

GRBにはある「よい性質」があり、これを用いるとGRBを宇宙論研究の道具として使うことができる。特に暗黒エネルギーの進化についての情報が得られると期待される。

目次

- 1、暗黒エネルギーと
cosmic distance ladder
- 2、GRBで暗黒エネルギーを探る

1、暗黒エネルギーと cosmic distance ladder



暗黒エネルギー

加速膨張はどんなにおかしなことか？

$$\ddot{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3P)a$$

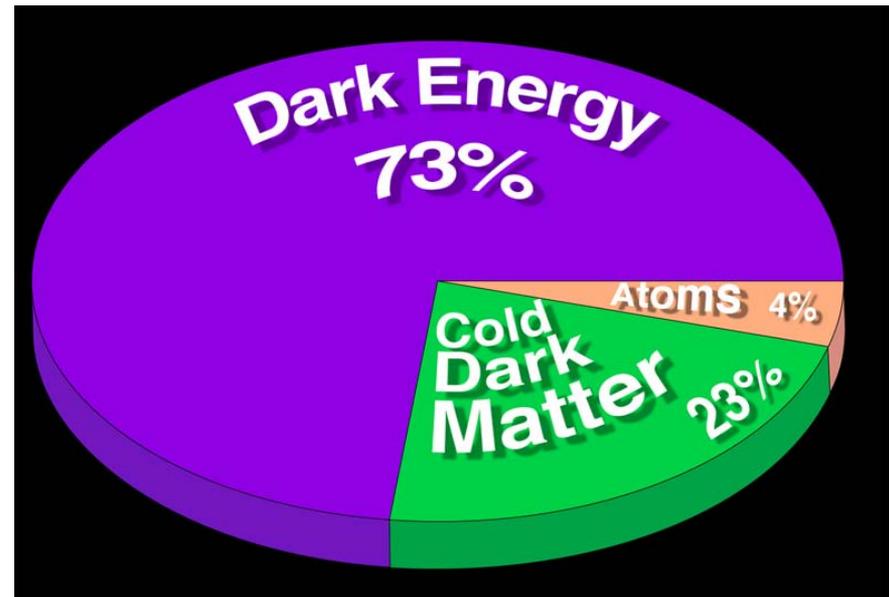
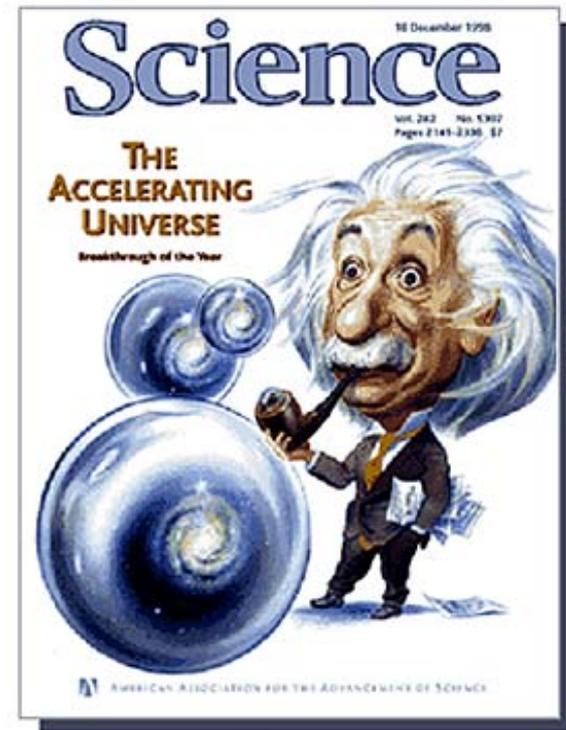
普通の物質ならエネルギーも圧力も正なので膨張は減速。

→ 万有引力

加速膨張するには負の圧力が必要になる。

→ 暗黒エネルギー

- ・ 宇宙定数
- ・ クインテッセンス
- ・ ブレーンワールド
- ・ 修正重力理論



宇宙膨張①

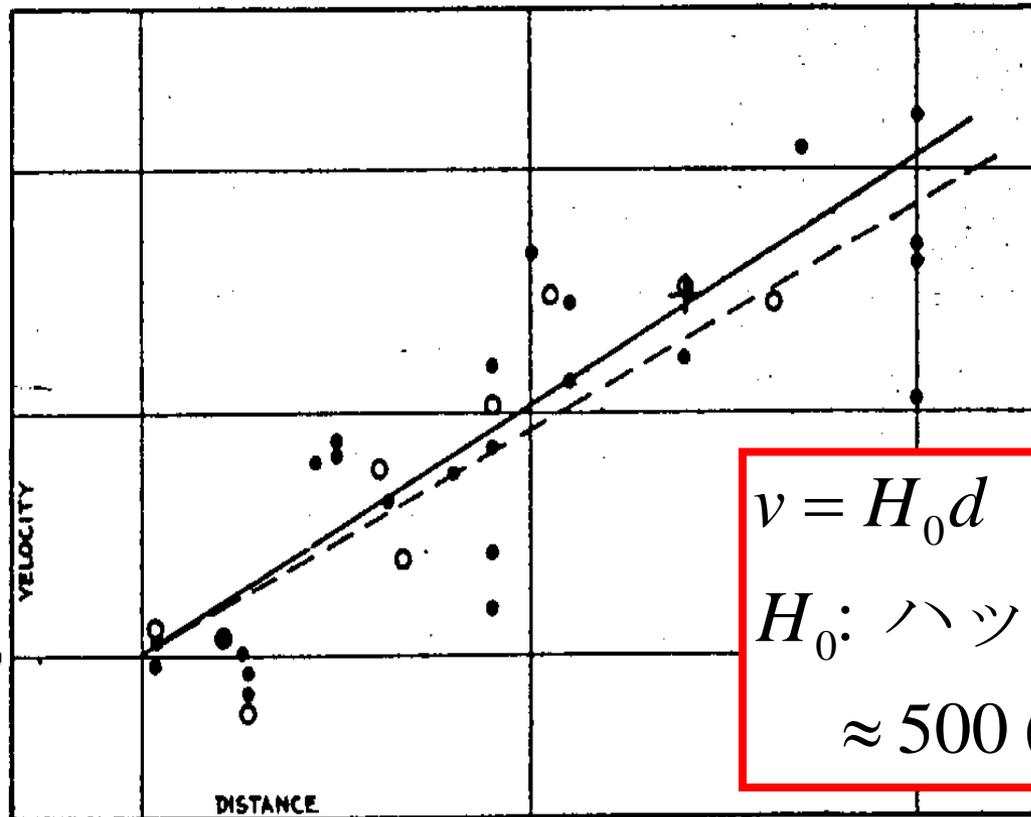
E. Hubble



Hubbleはセファイド変光星を用いて
遠方の銀河の距離を測定。
→ ハッブルの法則の発見

後退速度 v
1000km/s

500km/s



$$v = H_0 d$$

H_0 : ハッブル定数

$\approx 500 (km / s / Mpc)$

距離 d

0

1Mpc

2Mpc

宇宙膨張②

$$v = H_0 d$$

H_0 : ハッブル定数 ≈ 70 (km / s / Mpc)

後退速度

天体の輝線・吸収線の波長のずれからわかる。
光子が天体から地球に届くまでにどのくらい
宇宙膨張を経験したかを表す。

距離

一般に天体までの距離を測るのはとても難しい。
標準光源を使う。

標準光源 (standard candle)

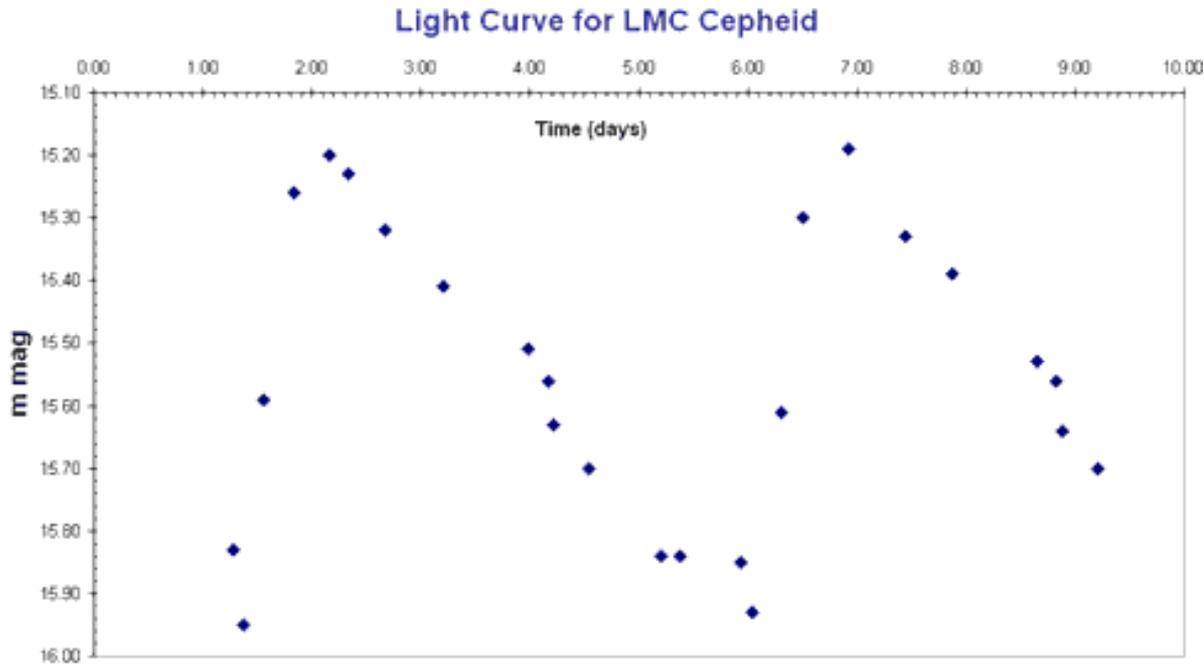


天体の明るさがあらかじめわかっていれば、見かけの明るさから距離がわかる。

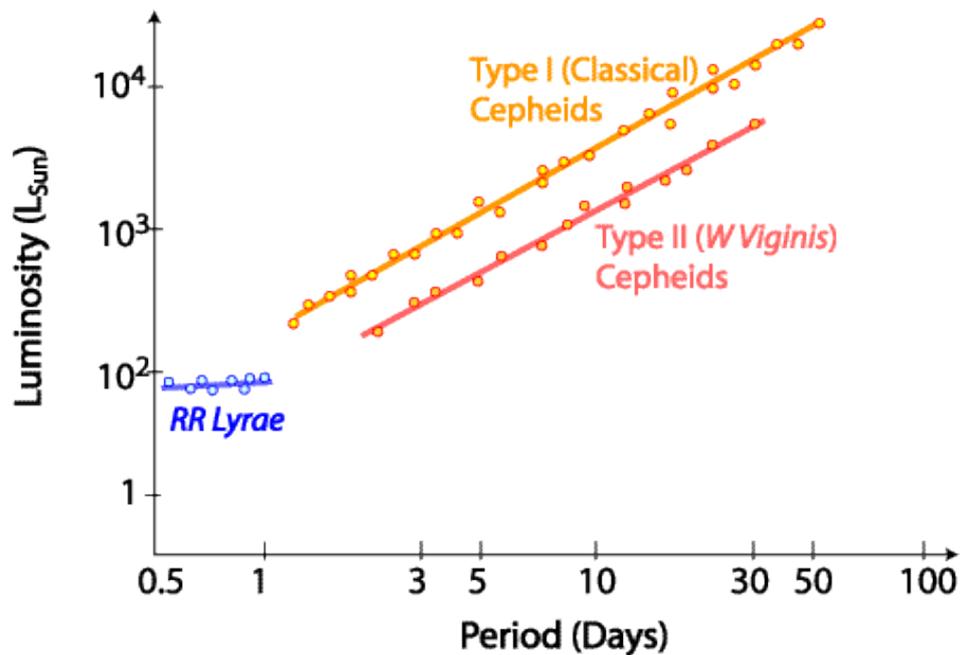
しかし宇宙はそんなに甘くない。

セファイド変光星

- 星の膨張収縮で変光
- 周期 1 ~ 100 日
- 光度 $\sim 10^6 L_{\text{sun}}$



PERIOD - LUMINOSITY RELATIONSHIP



変動の周期と絶対光度により相関がある。

$$L \propto T^{0.9}$$

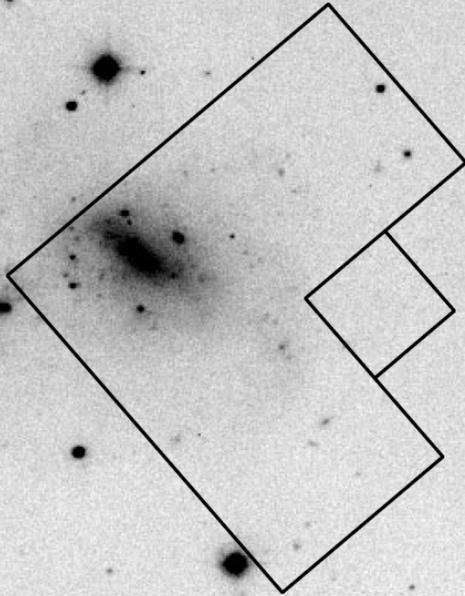
なので周期と見かけの明るさから天体までの距離がわかる。

→ 標準光源

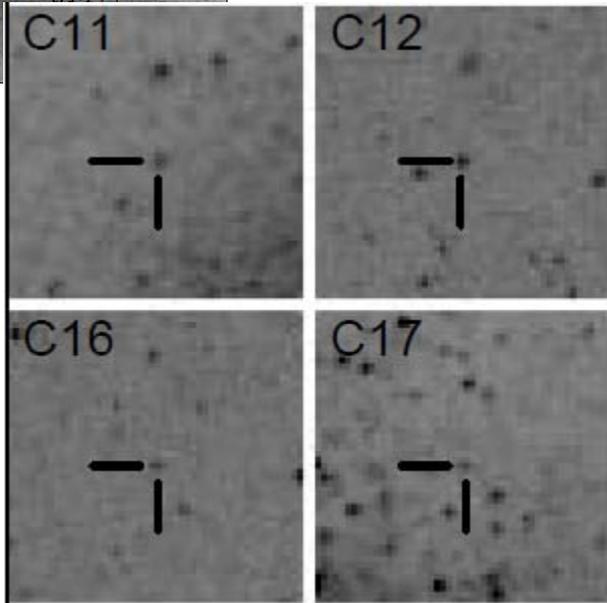
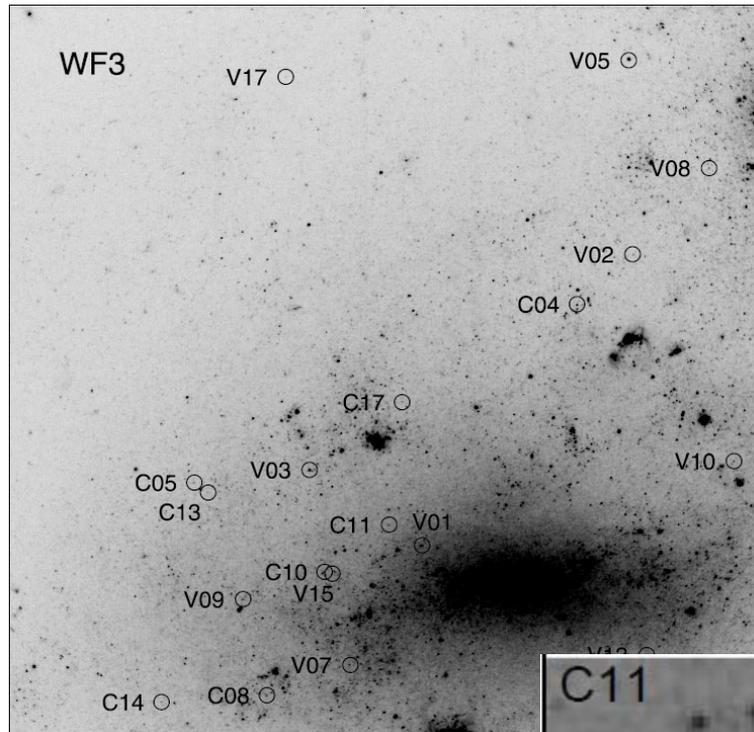
$$f = \frac{L}{4\pi d^2}$$

セファイドによる距離決定

NGC 1326A



WF3



- ・セファイドで銀河までの距離を測る
 - ・銀河のスペクトルで後退速度を測る
- Hubble diagramに点を打てる

HST key project

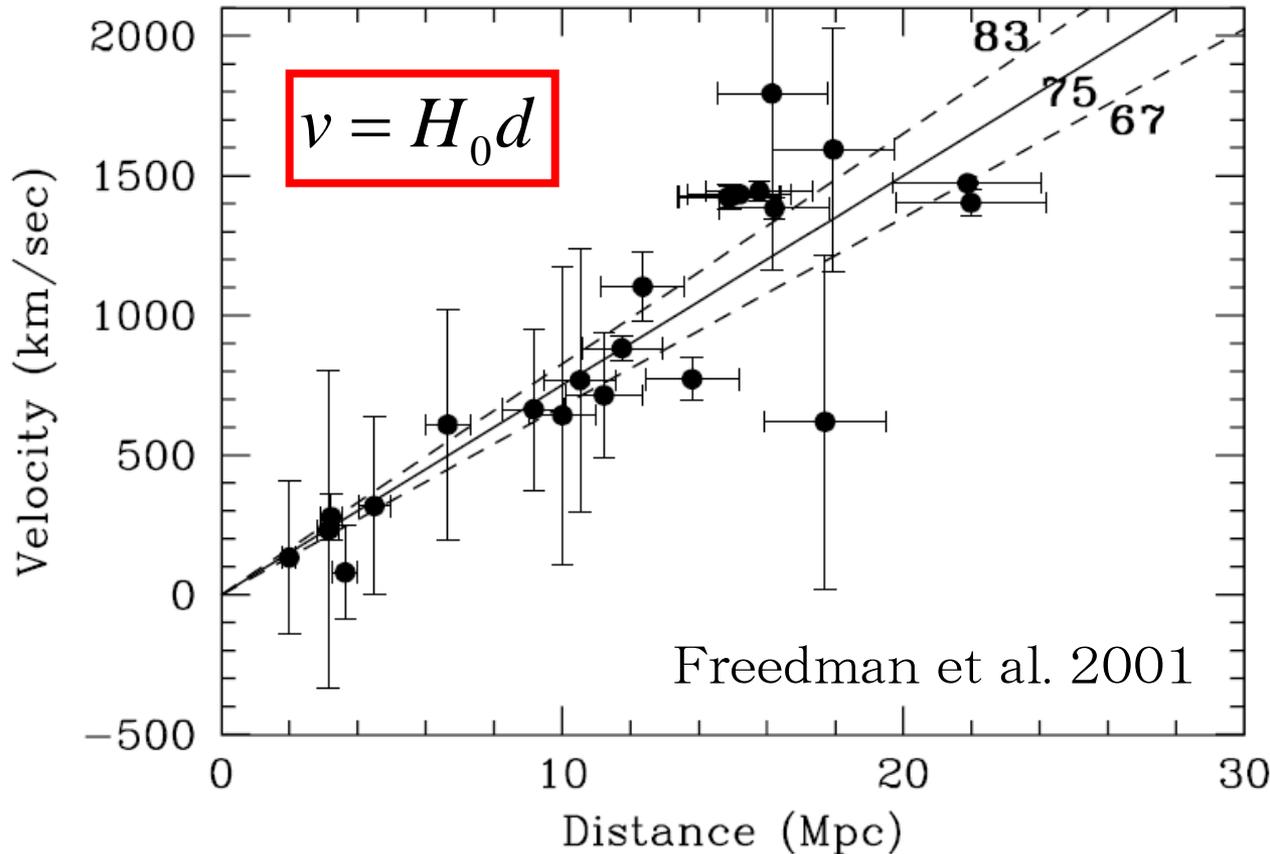
HSTを使ってセファイド
による銀河の距離決定を
系統的に行った



W. Freedman



HST

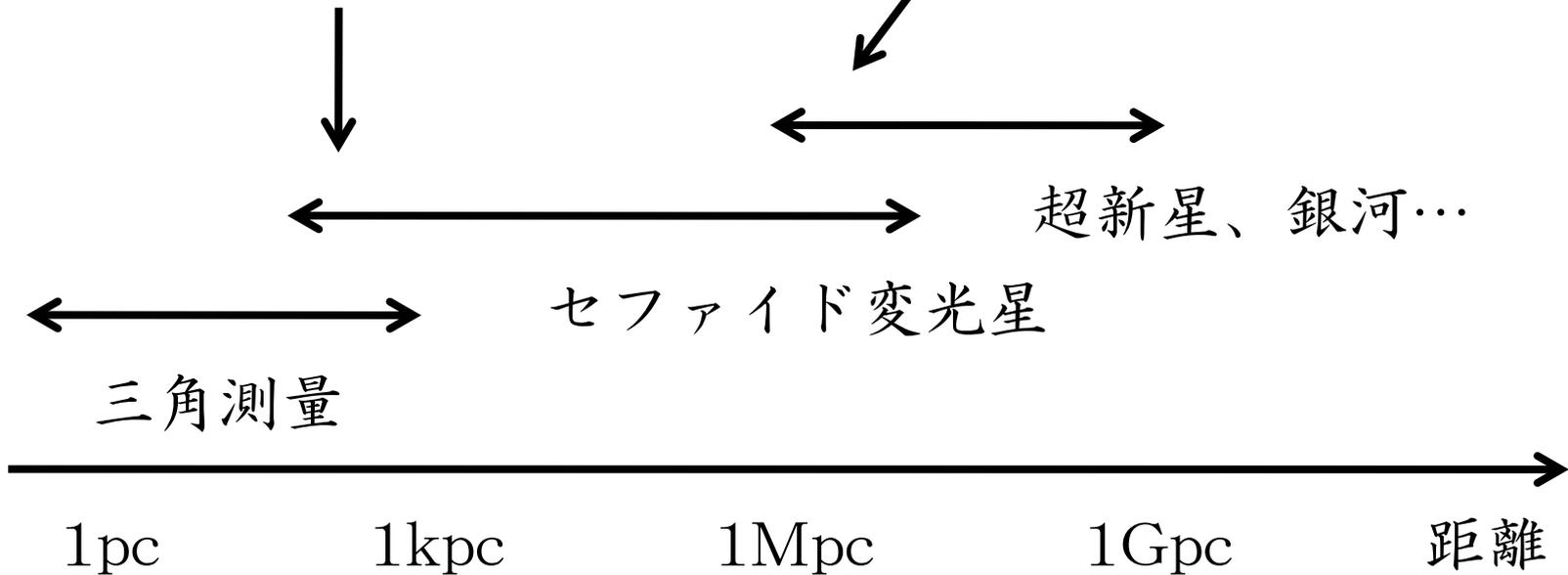


20Mpcまで
Hubble diagramを
伸ばしたが、これ
だけではあまり
ハッブル定数は決
まらない。

cosmic distance ladder

三角測量で距離がわかっている
セファイドで関係式を出し、
遠くのセファイドに適用する

セファイドで距離が
わかっている銀河
(にある超新星)で
何か関係式を作って
遠方にも適用する

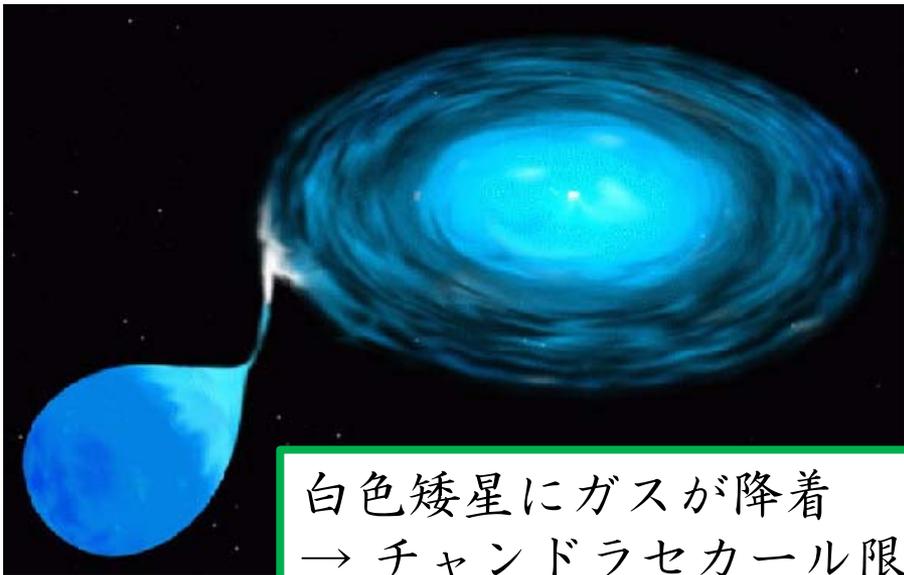


セファイドを使って銀河・超新星などを標準光源として calibration する。

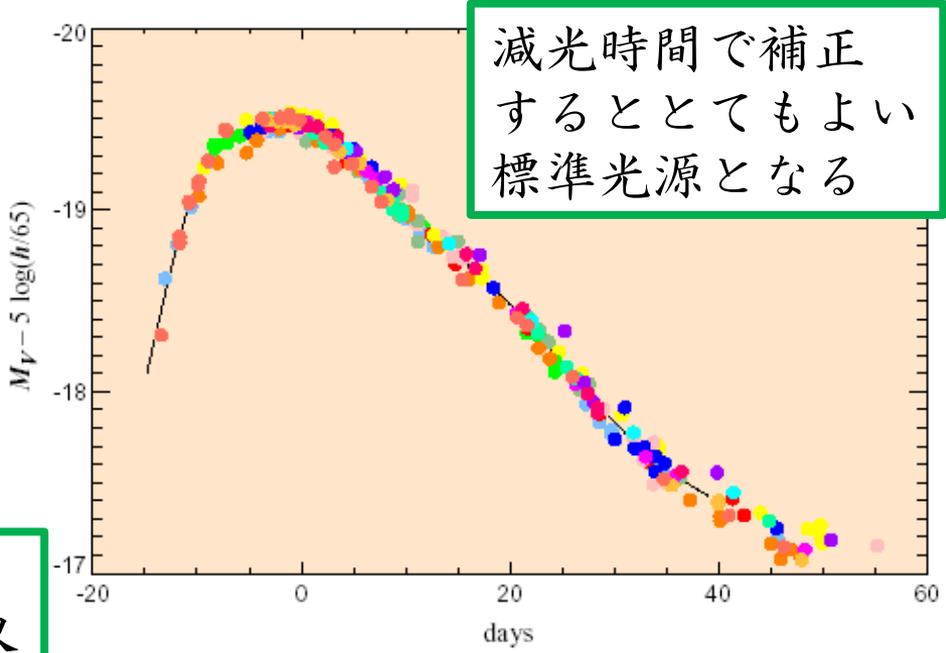
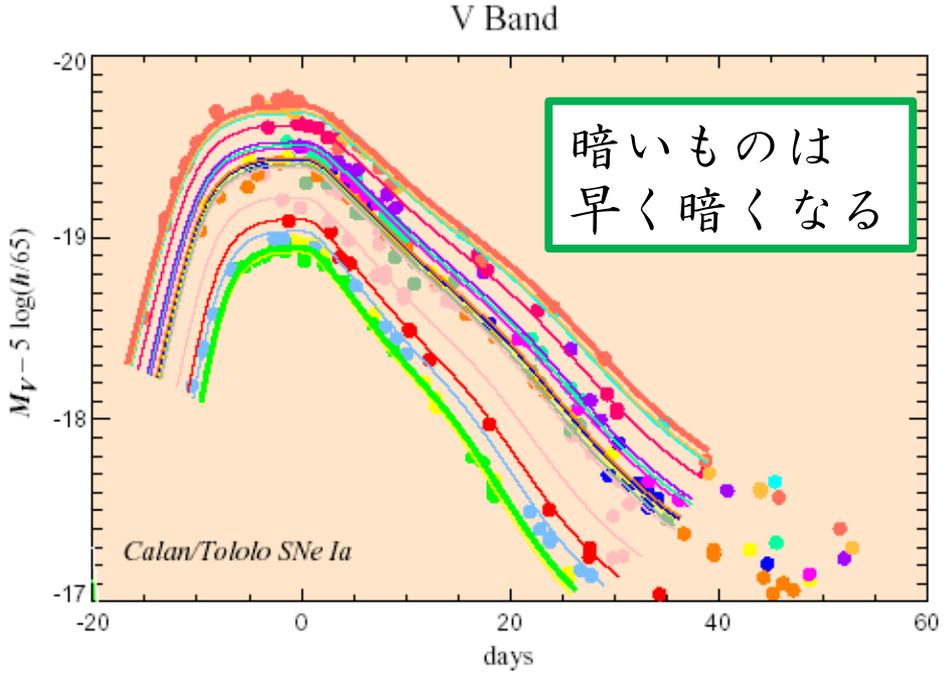
Ia型超新星



銀河1つ分の明るさ！



白色矮星にガスが降着
→ チャンドラセカル限界

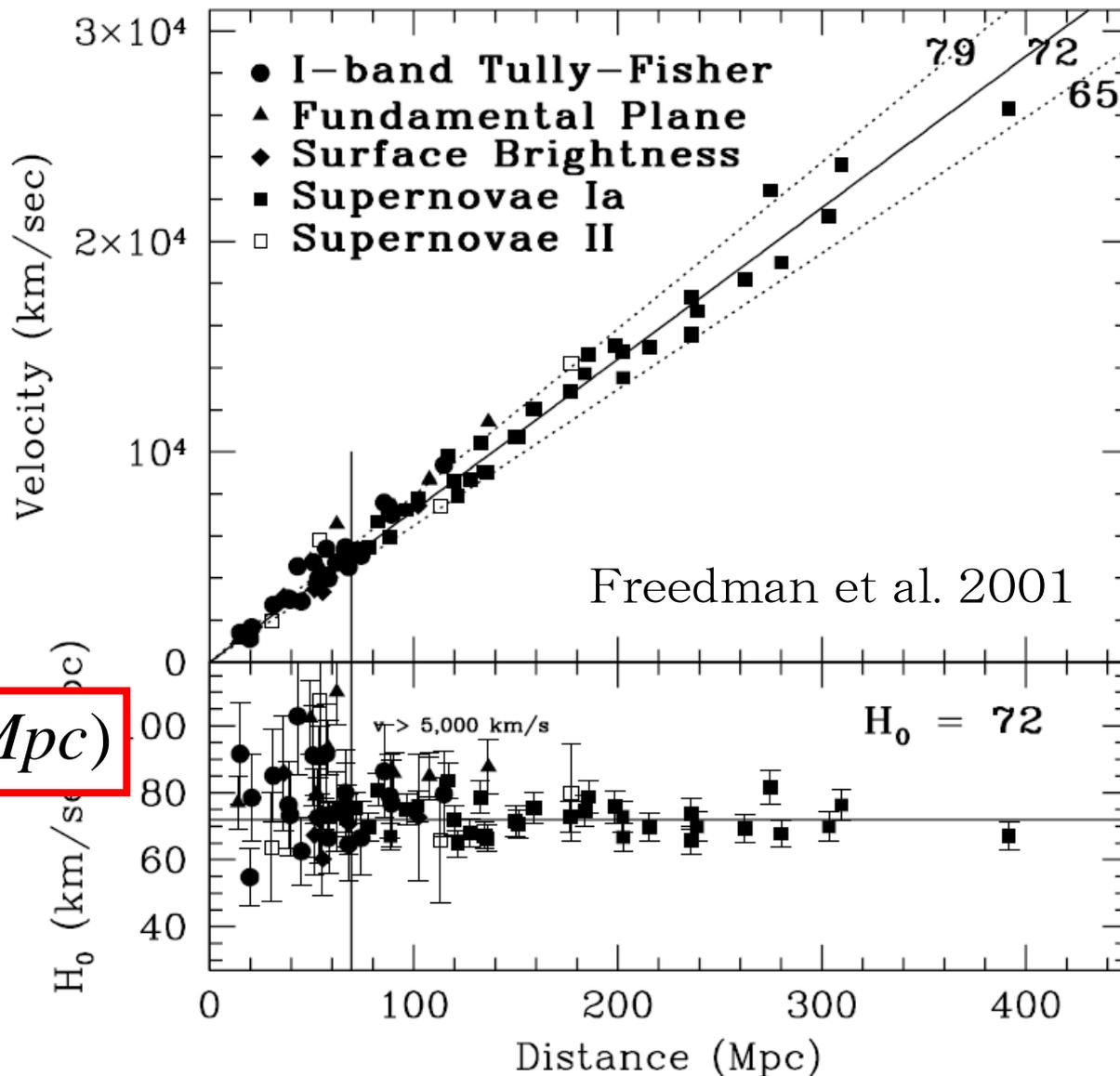


2次的距離指標

セファイドから決めた2次的な距離指標からさらに遠方の天体の距離を決定

→ 400Mpcまでの Hubble diagram

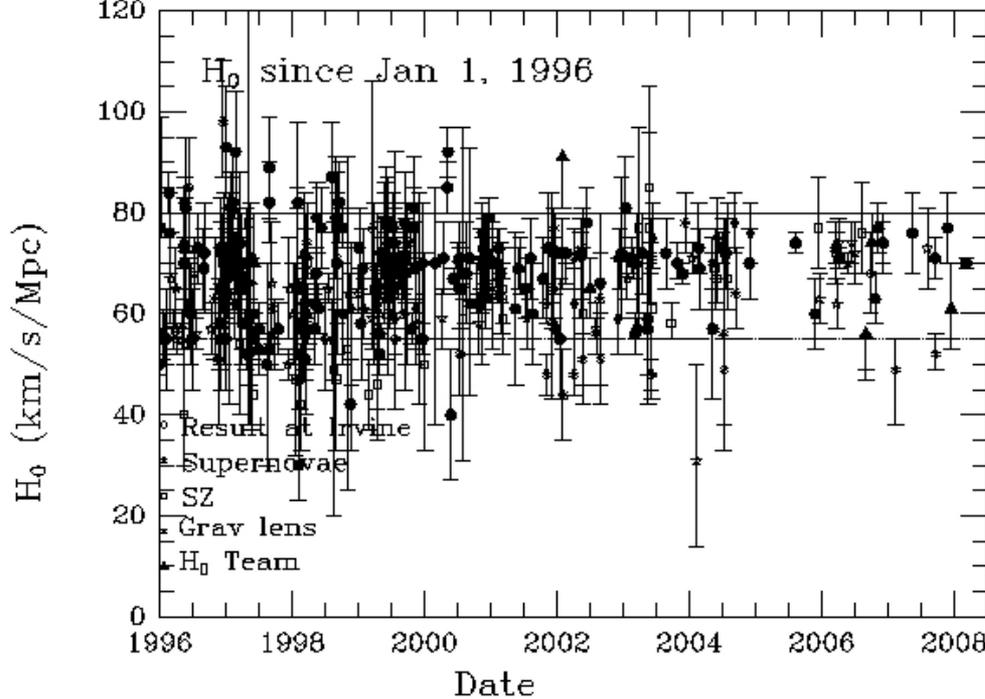
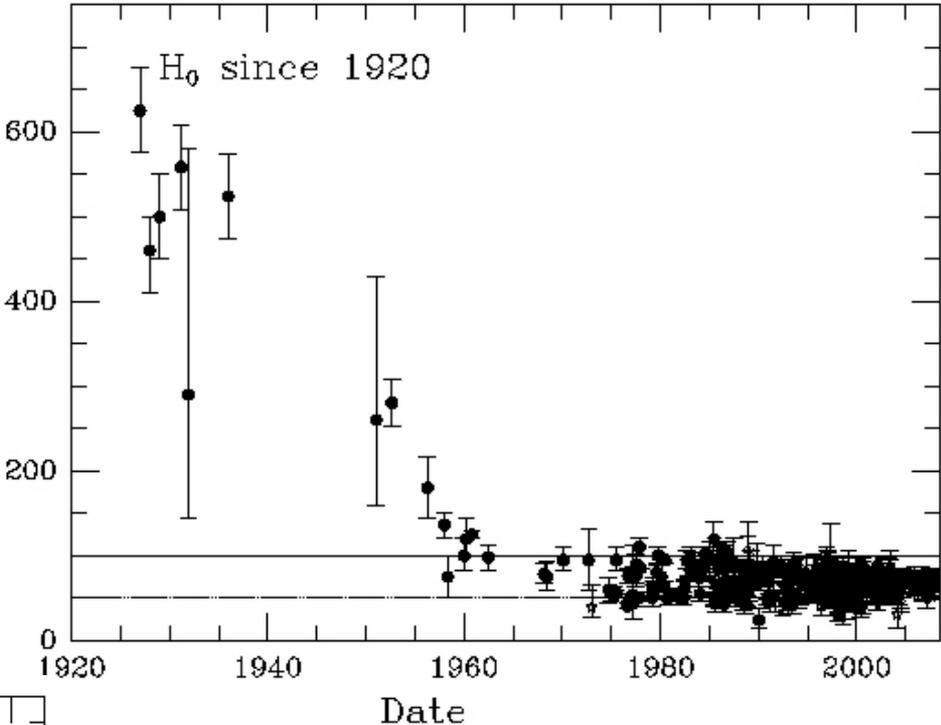
$$H_0 = 72 \pm 8 \text{ (km/s/Mpc)}$$



ハッブル定数決定の歴史

初期の頃はセファイドに2種類あることを知らなかったなので間違った値を出していた。

H_0 (km/s/Mpc)



最近の研究はよく収束しているが、宇宙の研究には思いも寄らぬ systematic error があるということをお肝に銘ずるべきである。

さらに遠くを見ると

宇宙の膨張速度は時間変化する。

Freedman方程式

$$H^2(z) = H_0^2 \left[\Omega_m (1+z)^3 + \Omega_\Lambda \right]$$

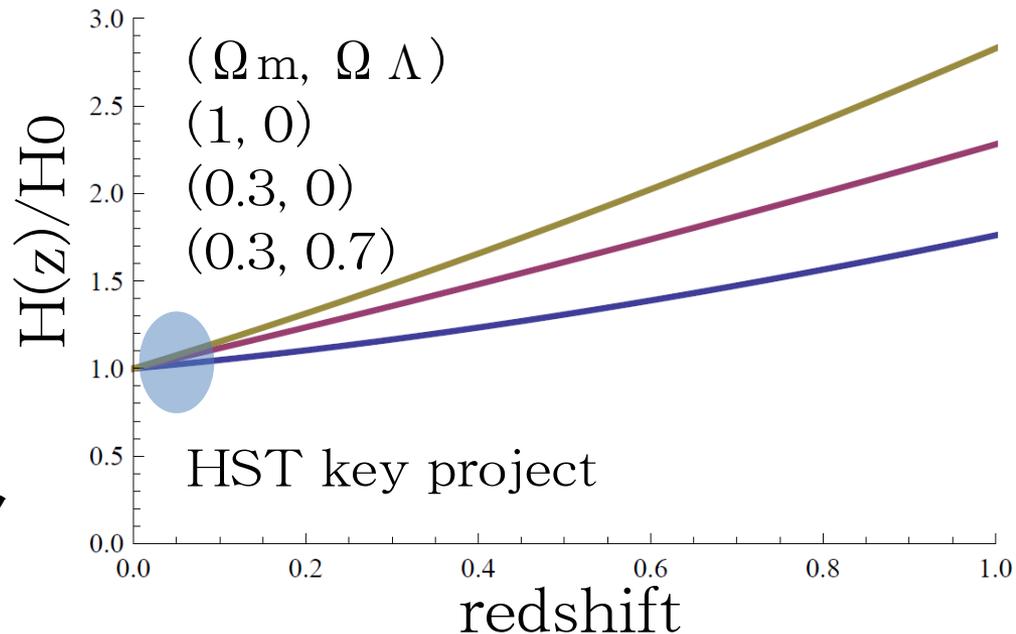
↑
↑
↑
ハッブル定数

↑
暗黒エネルギーの密度パラメータ

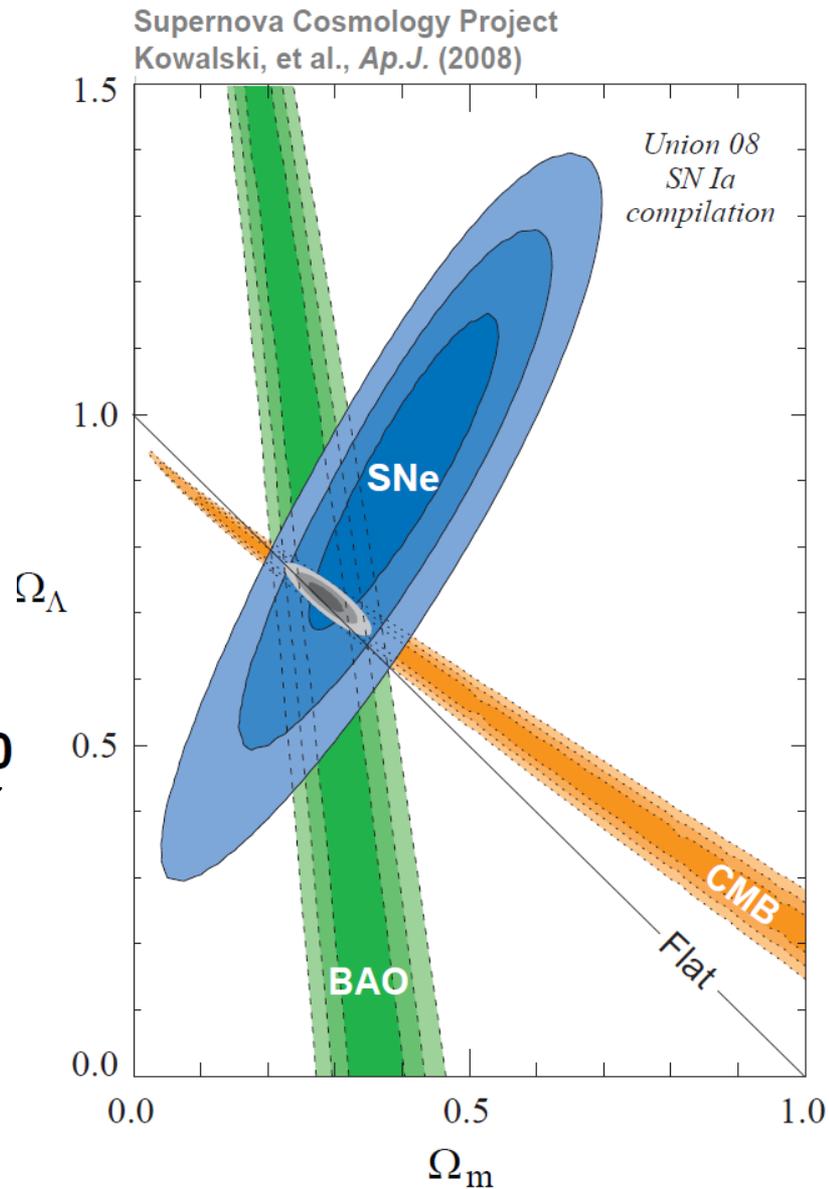
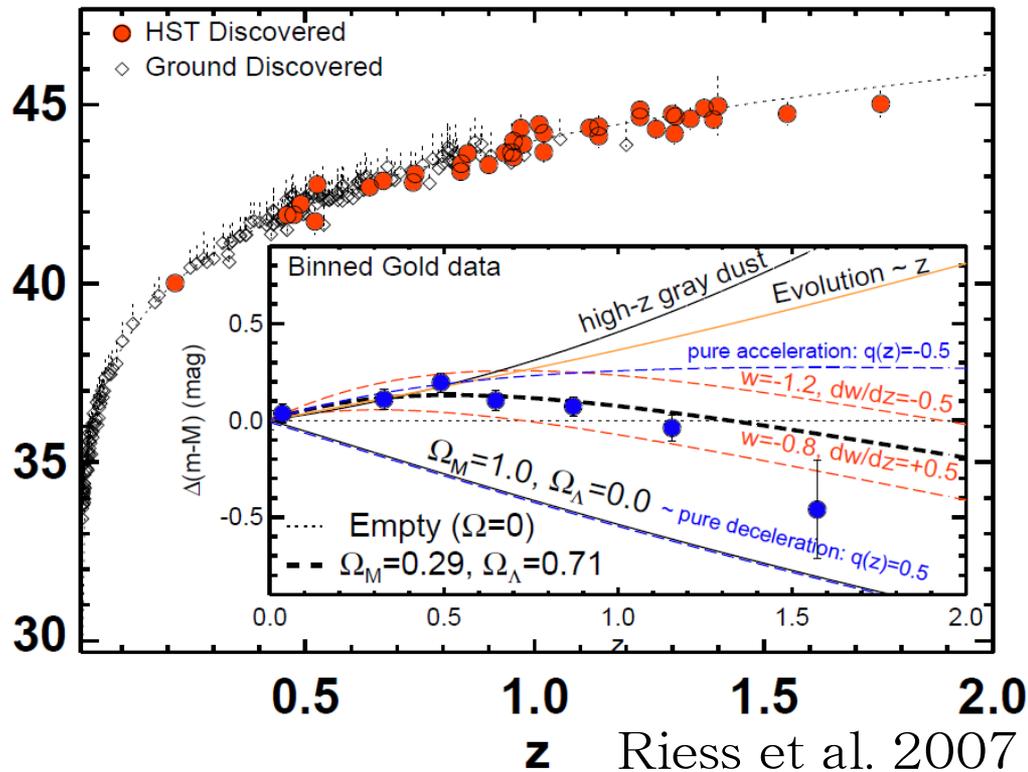
物質の密度パラメータ

近傍の天体 ($z \sim 0$) では
ハッブル定数だけが重要。

もっと遠くの天体までの
距離を測ると密度パラメータ
に関する情報が得られる。



遠方SNIaの観測

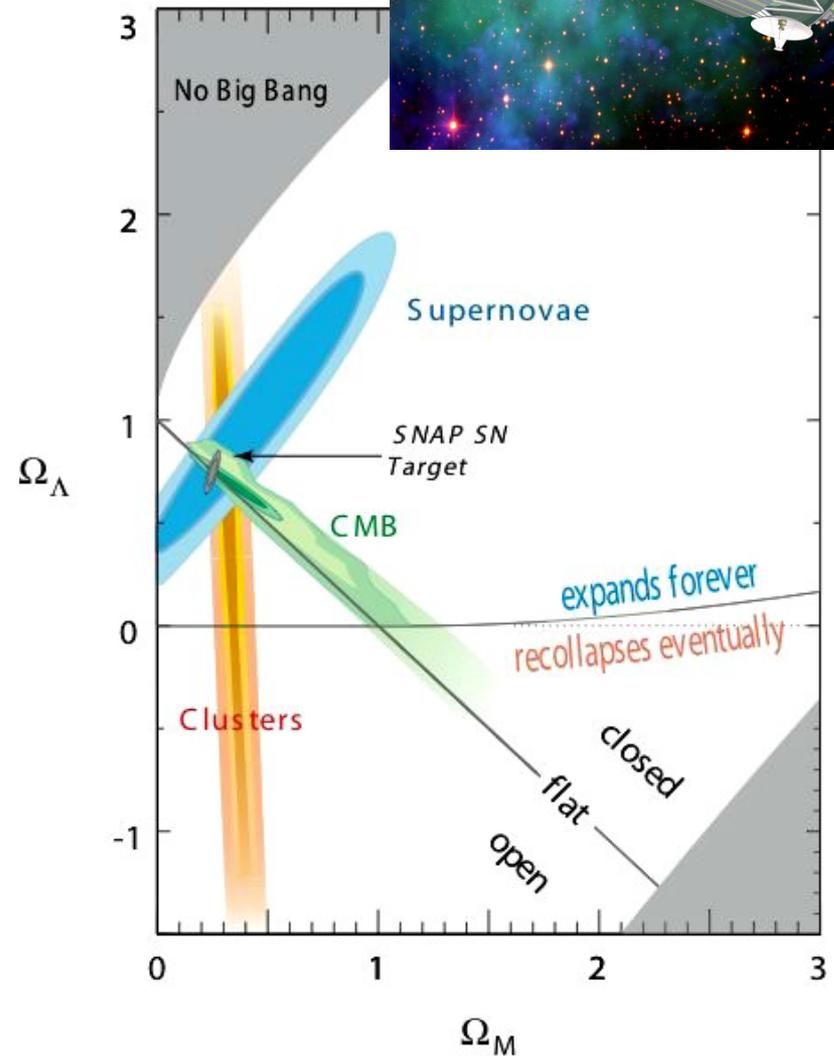
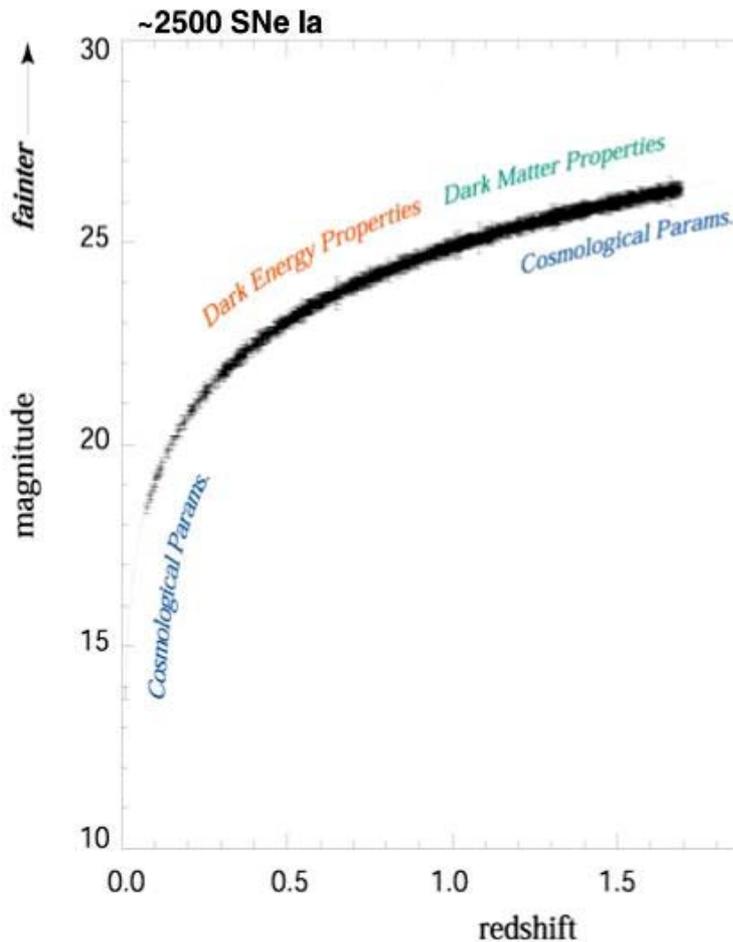
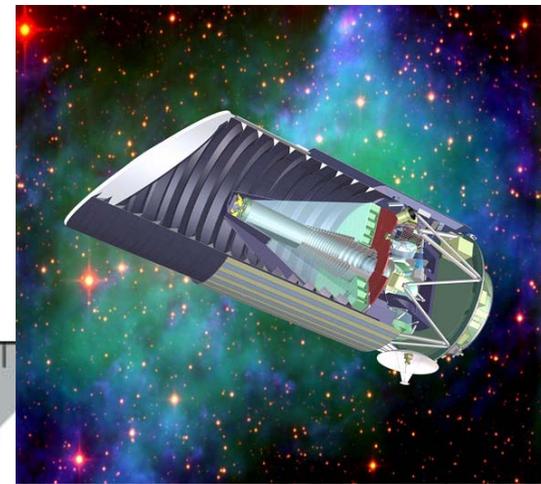


- 307個のSNIaによる制限
- 暗黒エネルギーの存在を示唆
- CMB・BAOと合わせるとかなりパラメータが決まる

将来計画：SNAP

SuperNova Acceleration Probe

- ・ 2013打ち上げ？
- ・ 2000個のSNIaを観測



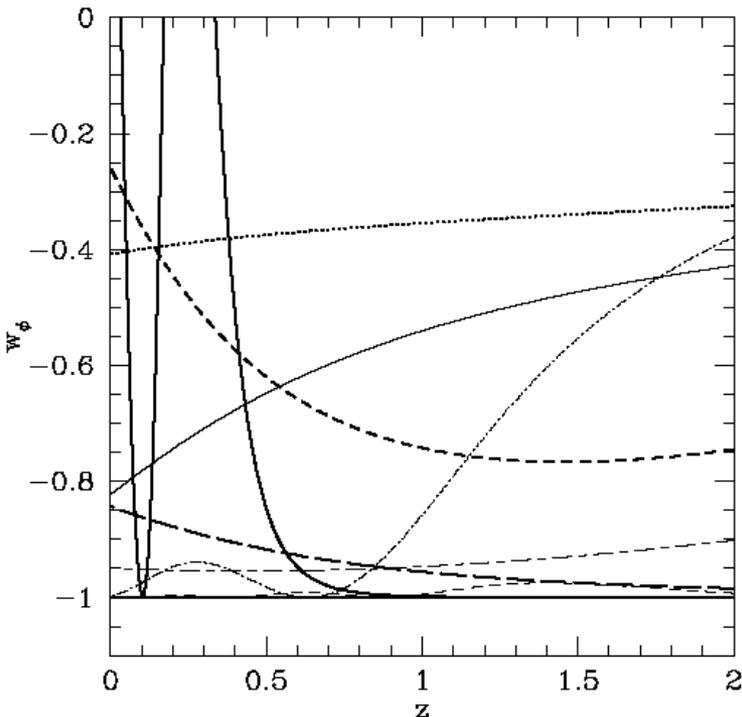
さらにさらに遠くへ

暗黒エネルギーの発見はすごいこと。

しかしその正体を考えようとするとも情報が少なすぎる。

$$H^2(z) = H_0^2 \left[\Omega_m (1+z)^3 + \Omega_\Lambda(z) \right]$$

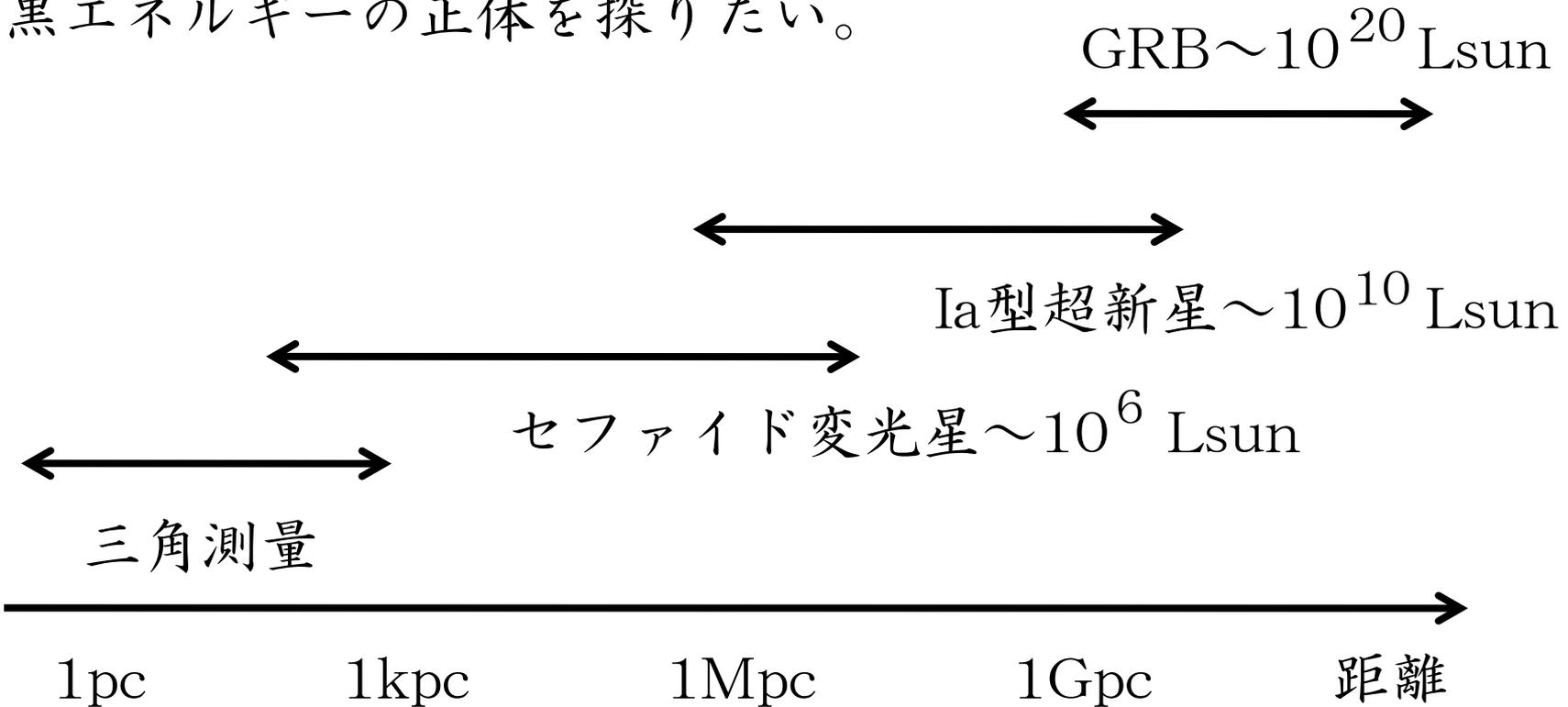
今のところ定数で観測と矛盾しない。
しかしそれは比較的小さなzでの話。



Quintessence Potential	Reference
$V_0 \exp(-\lambda\phi)$	Ratra & Peebles (1988), Wetterich (1988), Ferreira & Joyce (1998)
$m^2\phi^2, \lambda\phi^4$	Frieman et al (1995)
$V_0/\phi^\alpha, \alpha > 0$	Ratra & Peebles (1988)
$V_0 \exp(\lambda\phi^2)/\phi^\alpha, \alpha > 0$	Brax & Martin (1999,2000)
$V_0(\cosh \lambda\phi - 1)^p,$	Sahni & Wang (2000)
$V_0 \sinh^{-\alpha}(\lambda\phi),$	Sahni & Starobinsky (2000), Ureña-López & Matos (2000)
$V_0(e^{\alpha\kappa\phi} + e^{\beta\kappa\phi})$	Barreiro, Copeland & Nunes (2000)
$V_0(\exp M_p/\phi - 1),$	Zlatev, Wang & Steinhardt (1999)
$V_0[(\phi - B)^\alpha + A]e^{-\lambda\phi},$	Albrecht & Skordis (2000)

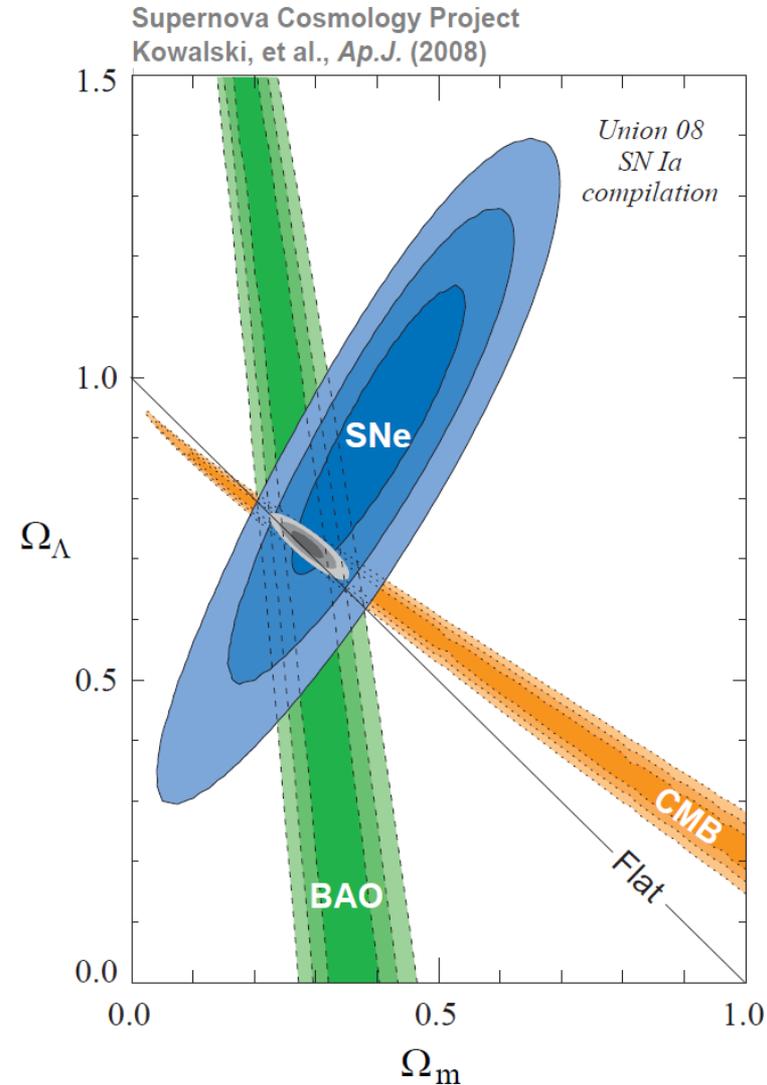
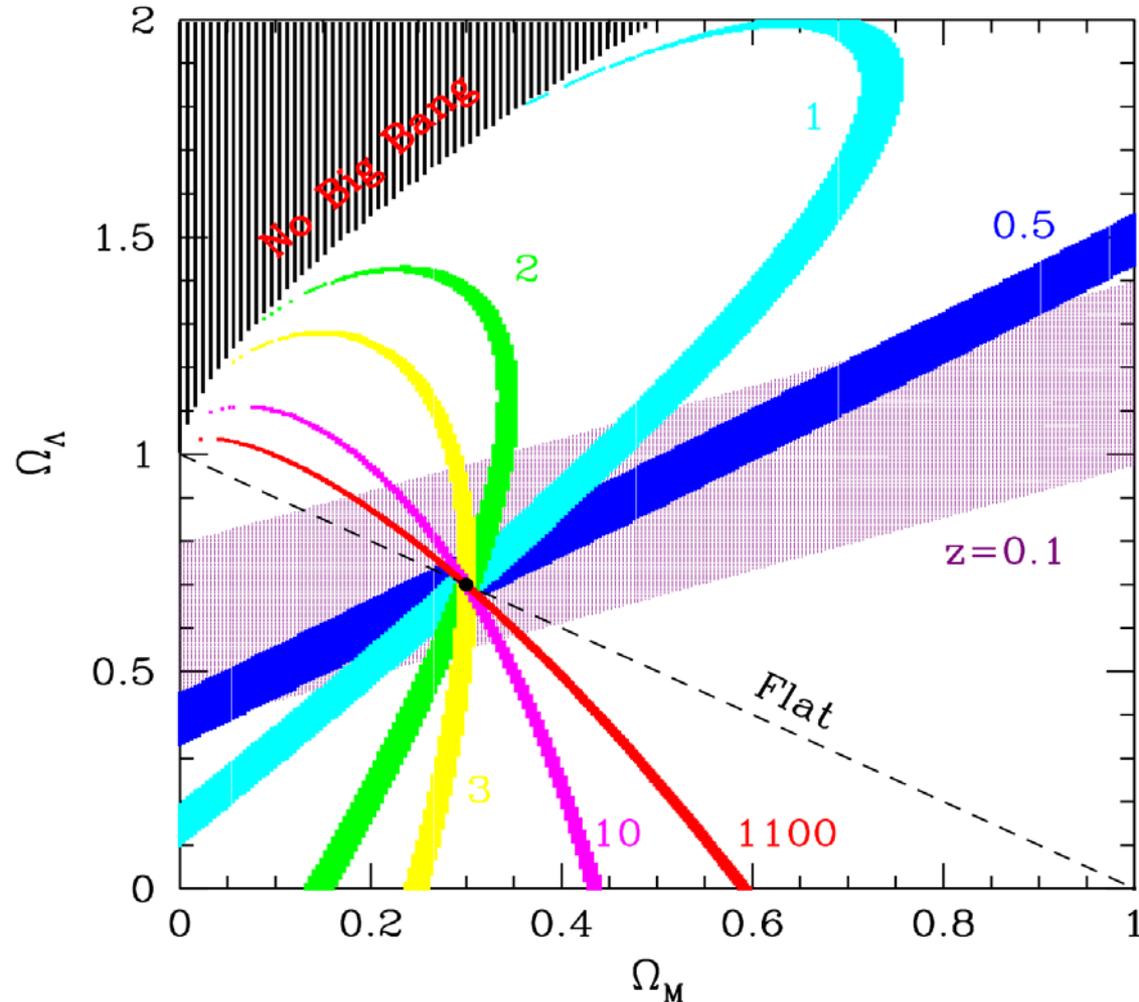
cosmic distance ladderを伸ばす

GRBは宇宙の果てで起こっても見える。
GRBでHubble diagramを拡張して
暗黒エネルギーの正体を探りたい。



クロスチェック

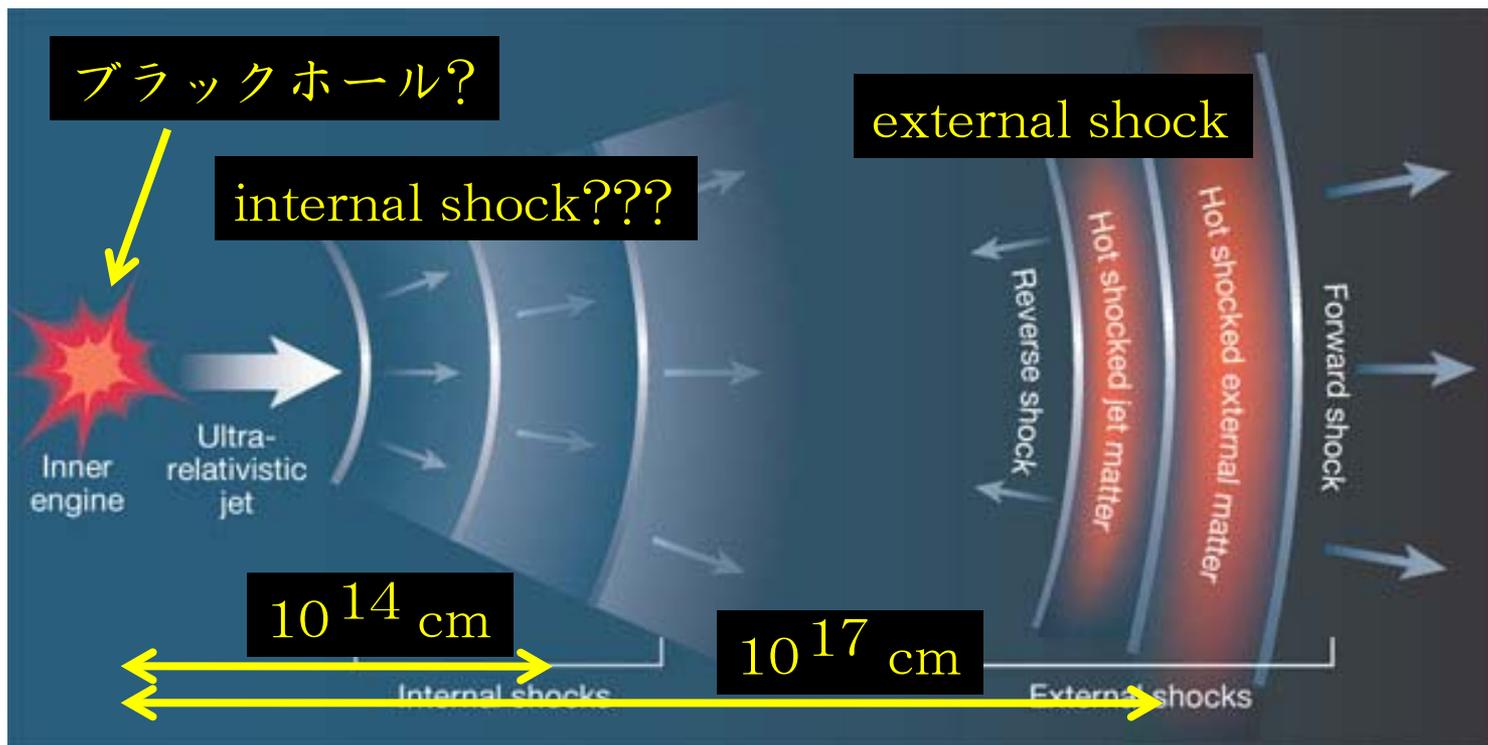
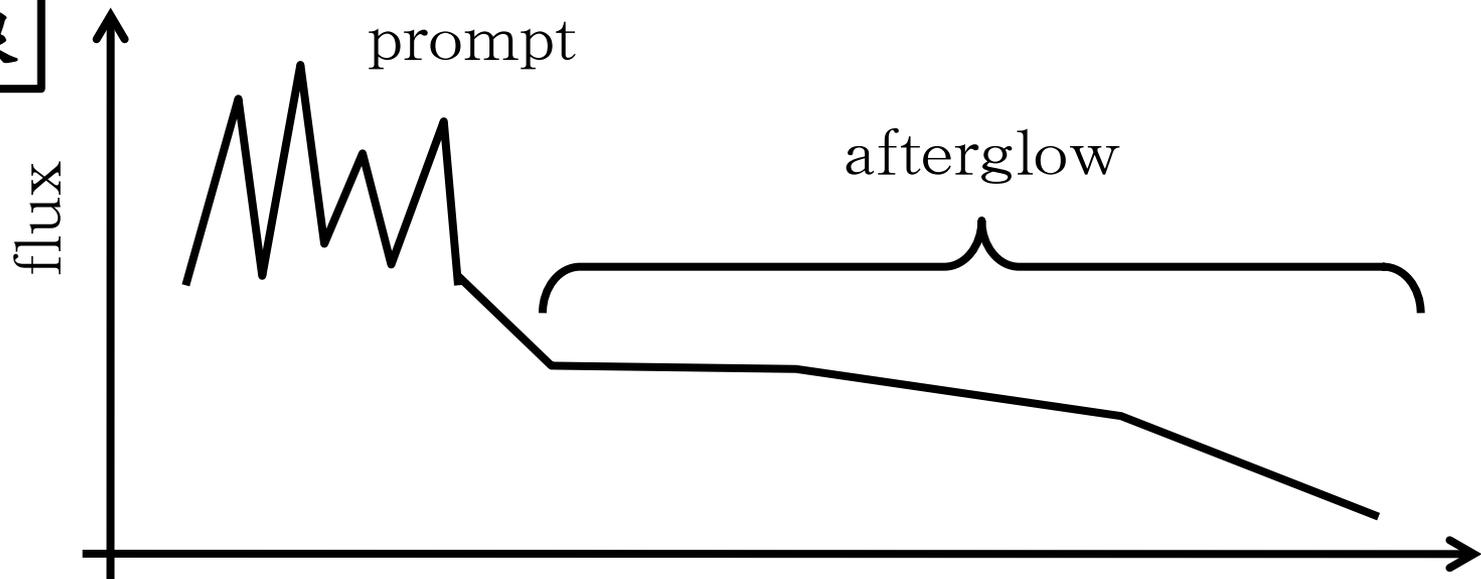
distance ladderだけでパラメータを決めたい



宇宙論はなるべく多くの方法でチェックされるべき

2、GRBで暗黒エネルギーを探る

光度曲線

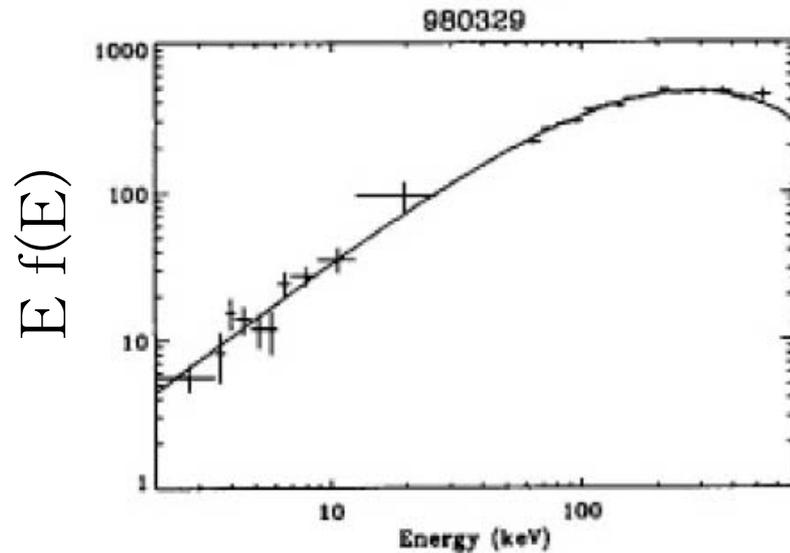
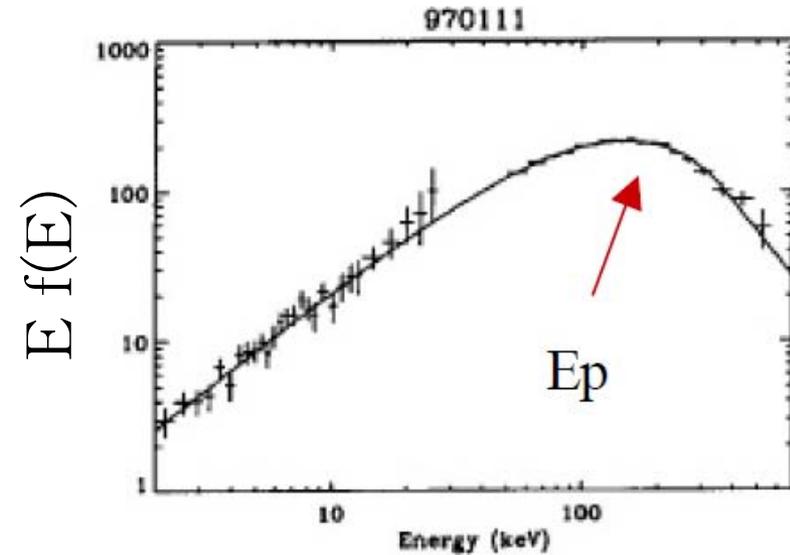


時間

スペクトル

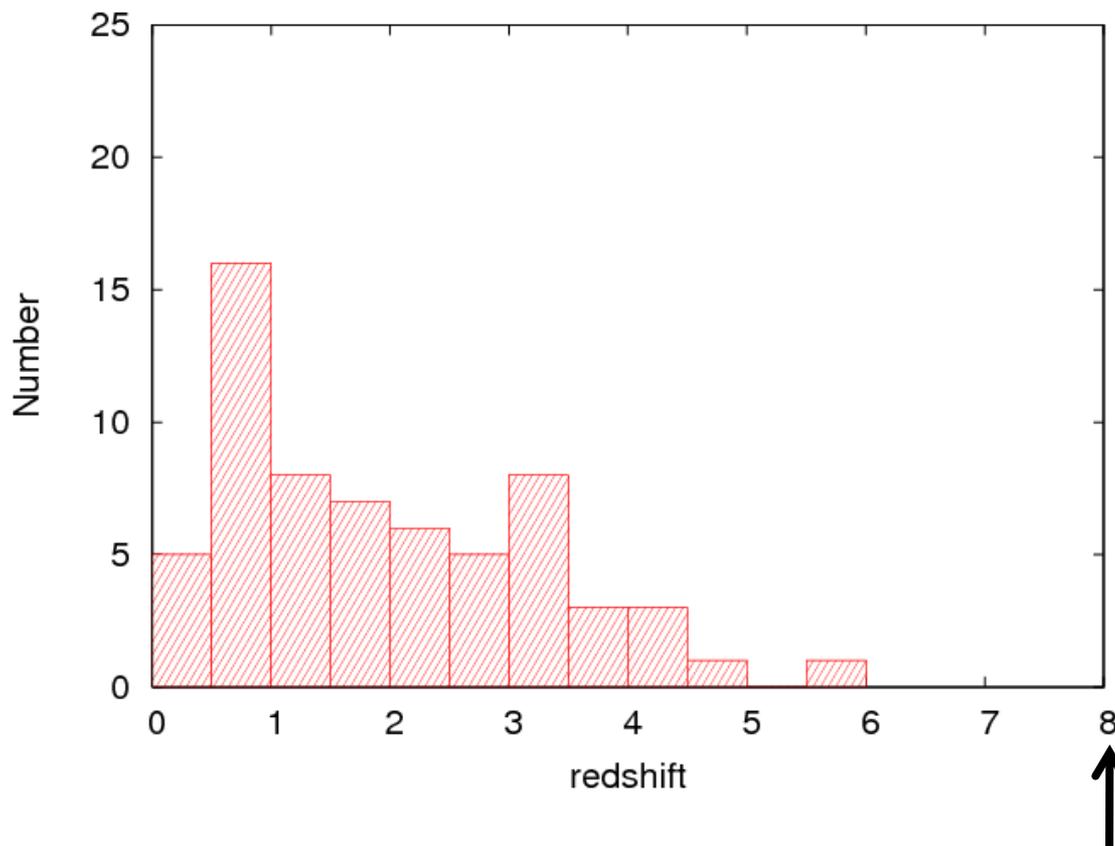
Band spectrum

- peak energy E_p
~ 100keV - 1MeV
- 2つのpower lawを
指数関数でつなぐ



redshift分布

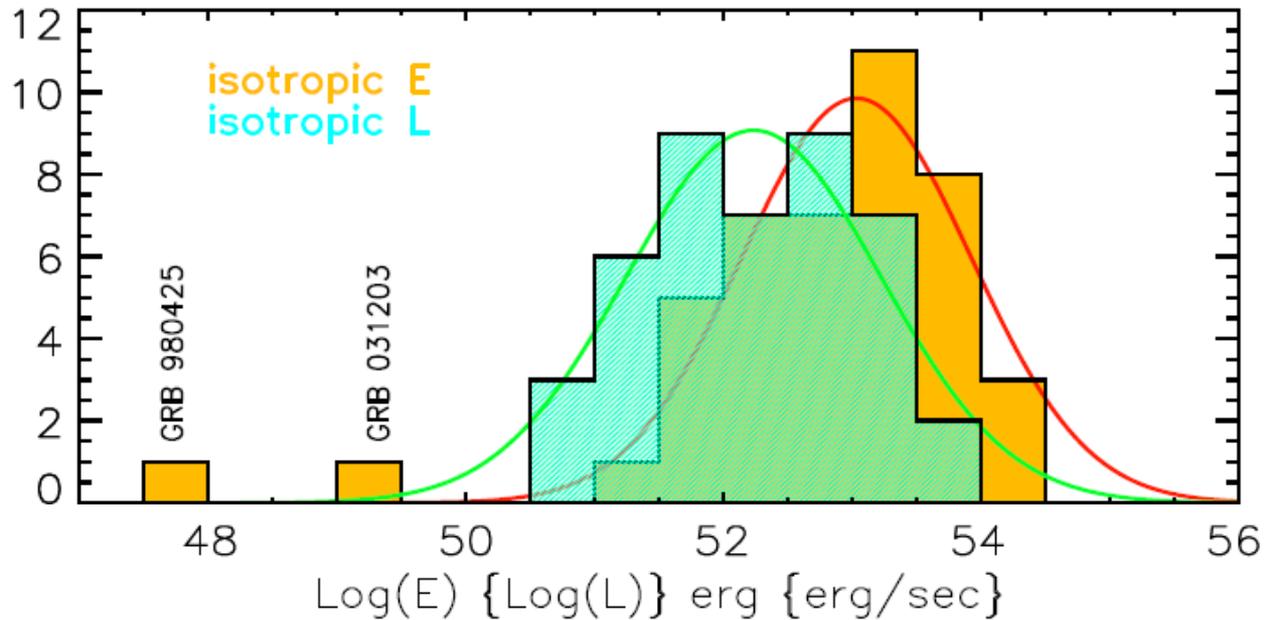
Ia型超新星に比べて遠いものがたくさん見つかったている。



最近この辺のが
見つかった？

明るさ分布

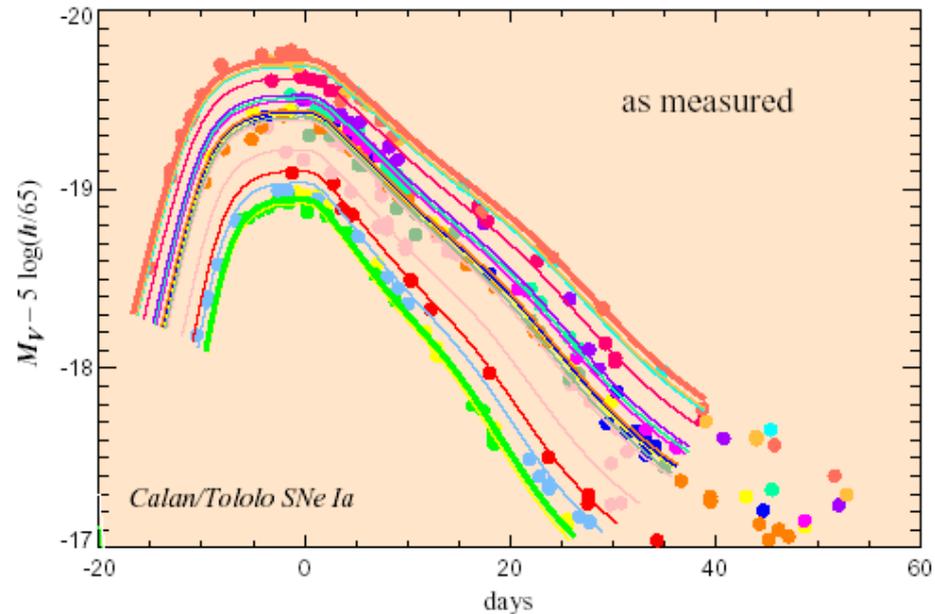
明るさにはかなりのバリエーションがある。
→ 標準光源にはなりそうにない？



標準光源

- ・セファイド
変光周期と明るさ
- ・Ia型超新星
減光時間と明るさ

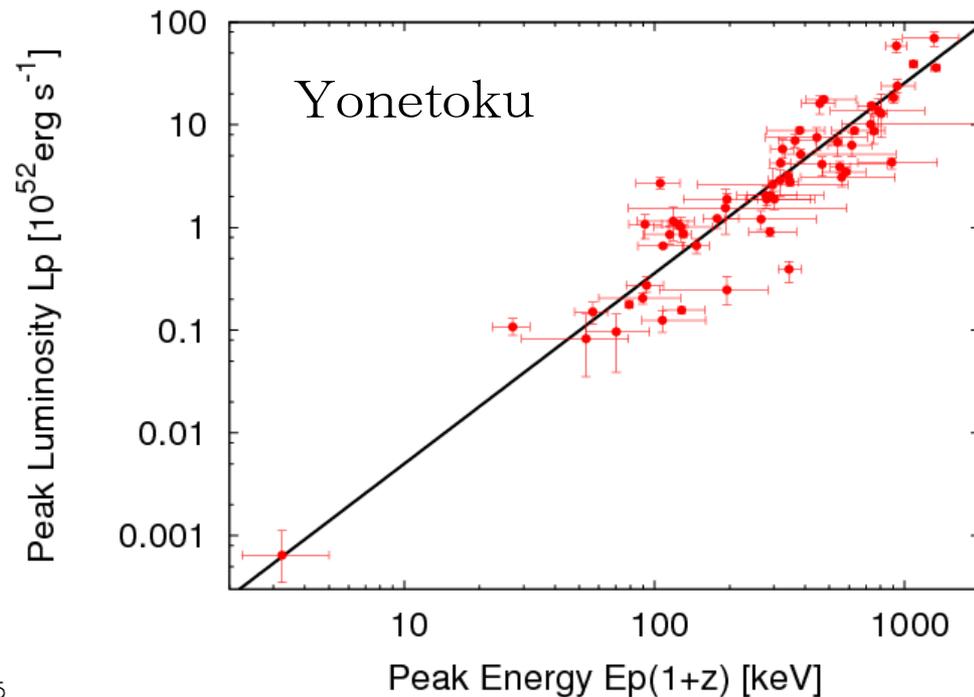
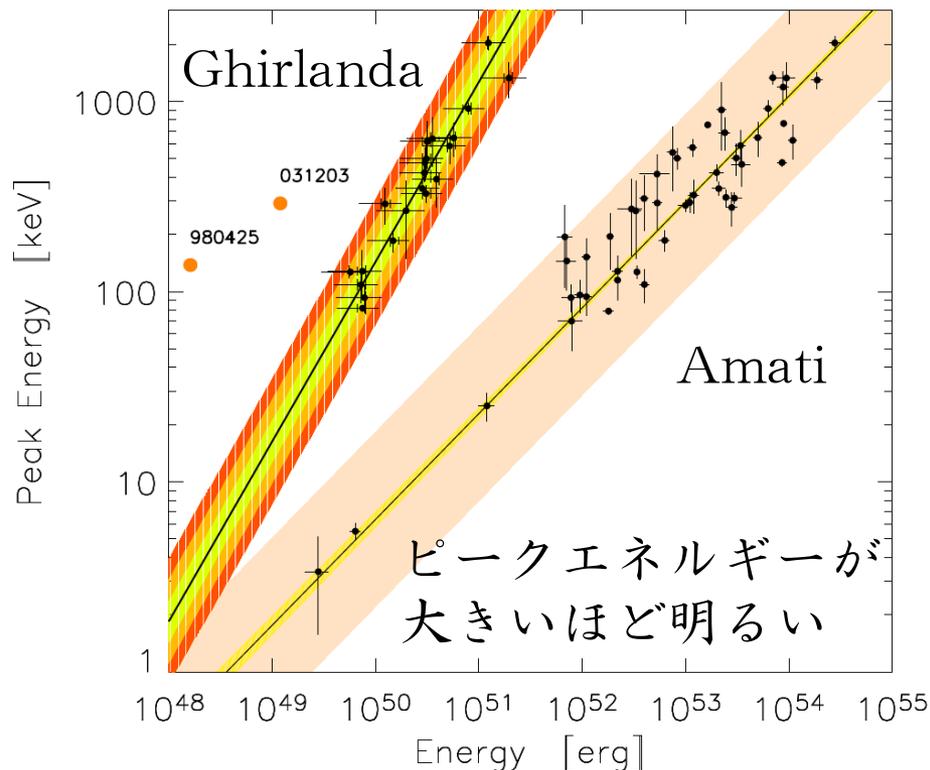
GRBにもこのような相関があるのか？



GRB sequence①

GRBの明るさと他の観測量を結びつける関係式がいくつか提唱されている。

- ピークエネルギー (Amati, Ghirlanda, Yonetoku)
 - variability
 - spectral lag
- } 現実的にはあまり使い物にならない



GRB sequence②

ピークエネルギーと「明るさ」の関係式

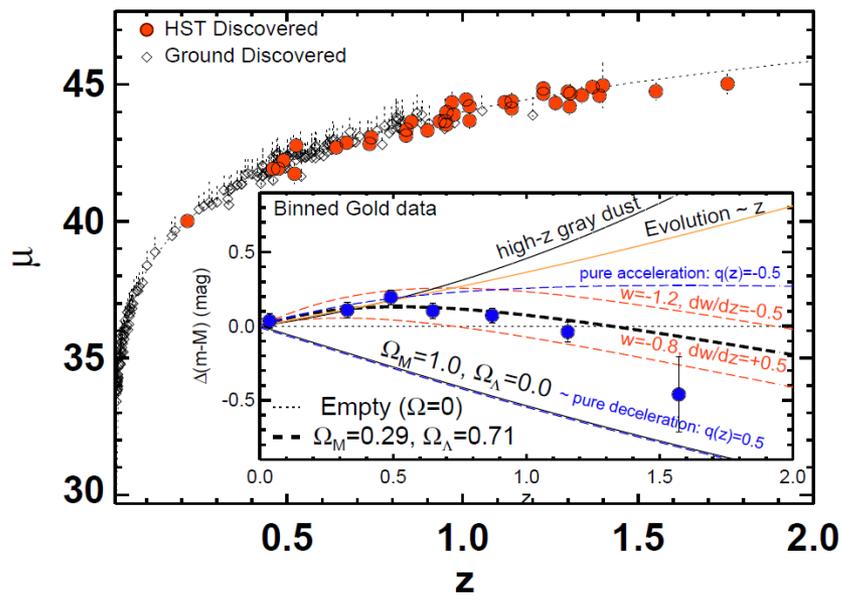
- Amati : $E_{\text{iso}} \propto E_{\text{p}}^2$
等方換算の総放出エネルギー
- Yonetoku : $L_{\text{p,iso}} \propto E_{\text{p}}^2$
ピーク光度 (1秒)
- Ghirlanda : $E_{\gamma} \propto E_{\text{p}}$
ジェットの開口角で補正した総放出エネルギー

どうしてこのような相関があるのかよくわかっていない

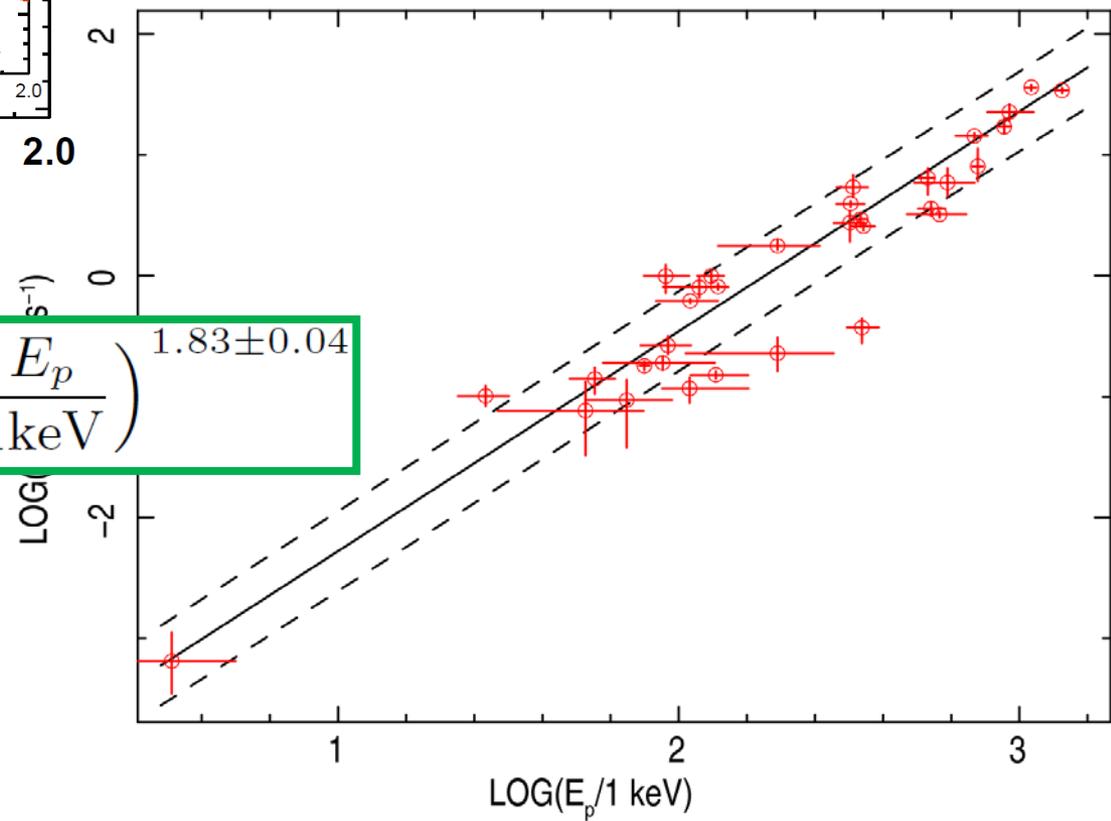
- ジェットを見込む角度の違い？
- 熱的成分が関与？

ただしこれらの関係式は宇宙論モデルを決めて得られたもの。これをそのまま使うことはできない。

関係式の確立



z < 1.5ではIa型超新星によって距離が測られている。そこでまずz < 1.5のGRBだけを使って相関を見てみる。



確かに相関はある。

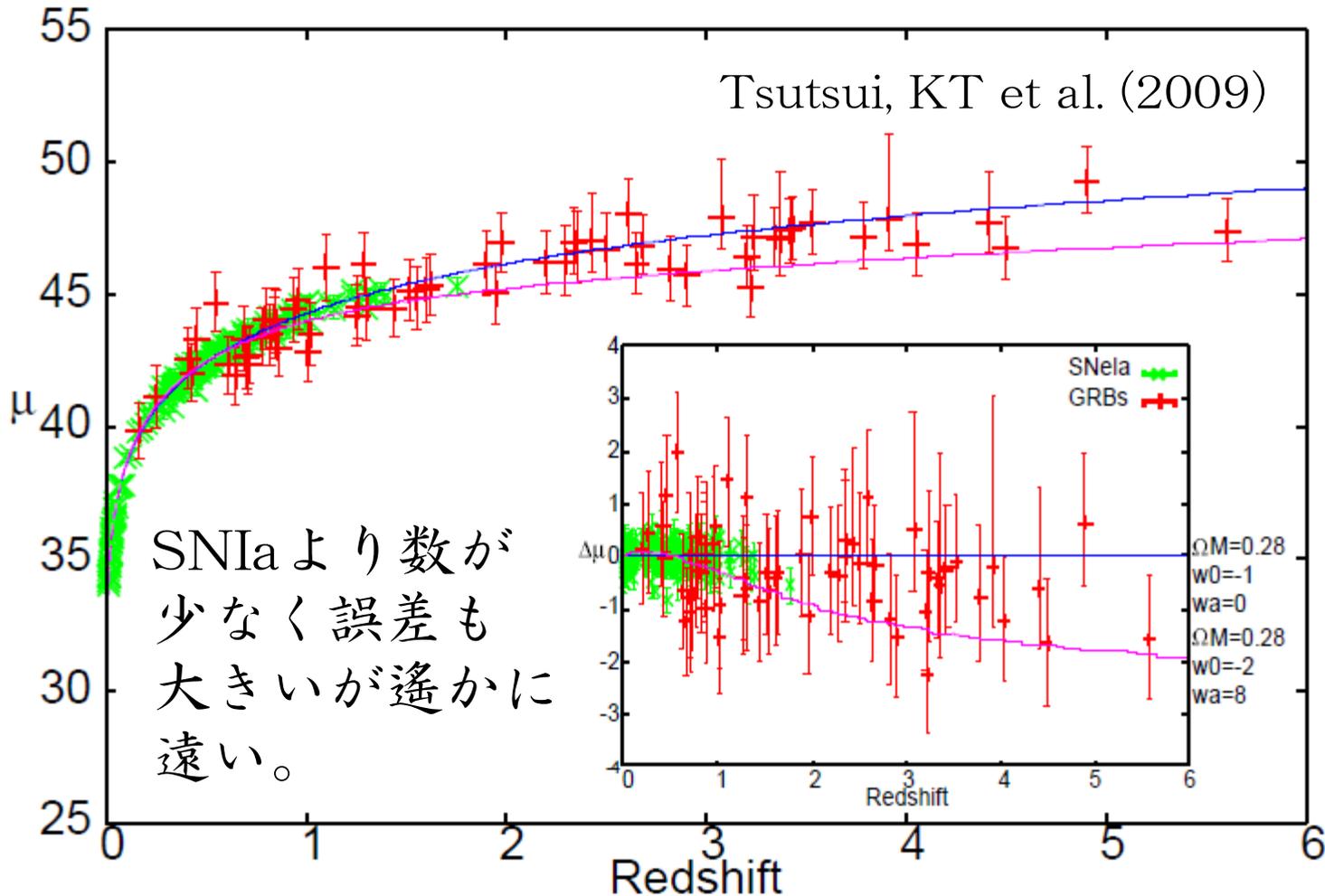
$$\frac{L_p}{10^{52} \text{ erg s}^{-1}} = 10^{-4.11 \pm 0.09} \left(\frac{E_p}{1 \text{ keV}} \right)^{1.83 \pm 0.04}$$

これがもっと遠方のGRBにも成り立つと仮定する。

GRB Hubble diagram

Yonetoku relationを用いたHubble diagram

- $z < 1.5 \rightarrow 33$ 個
- $z > 1.5 \rightarrow 30$ 個

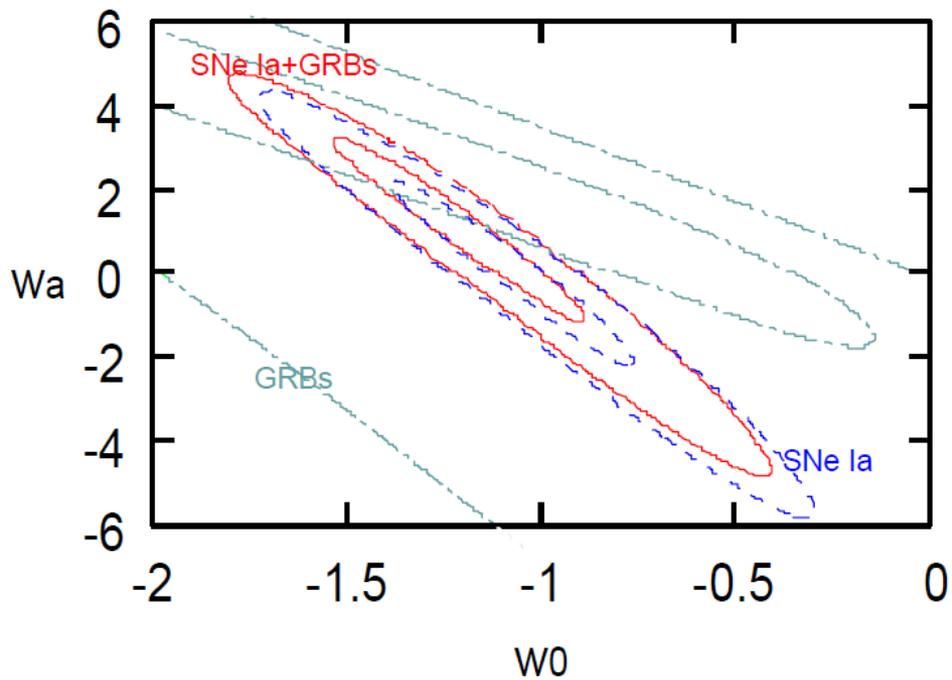
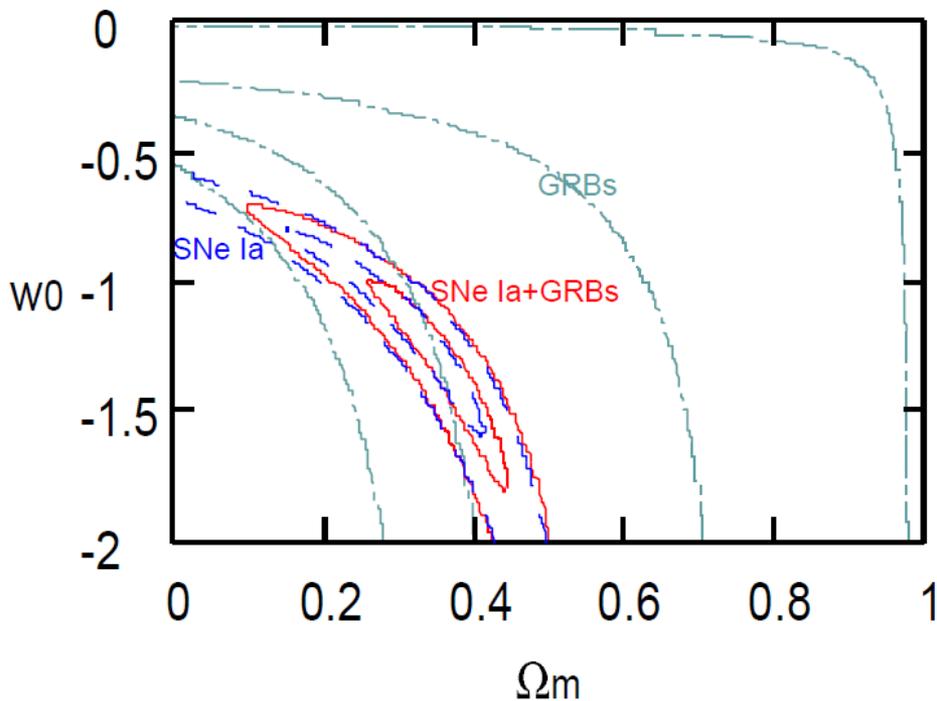
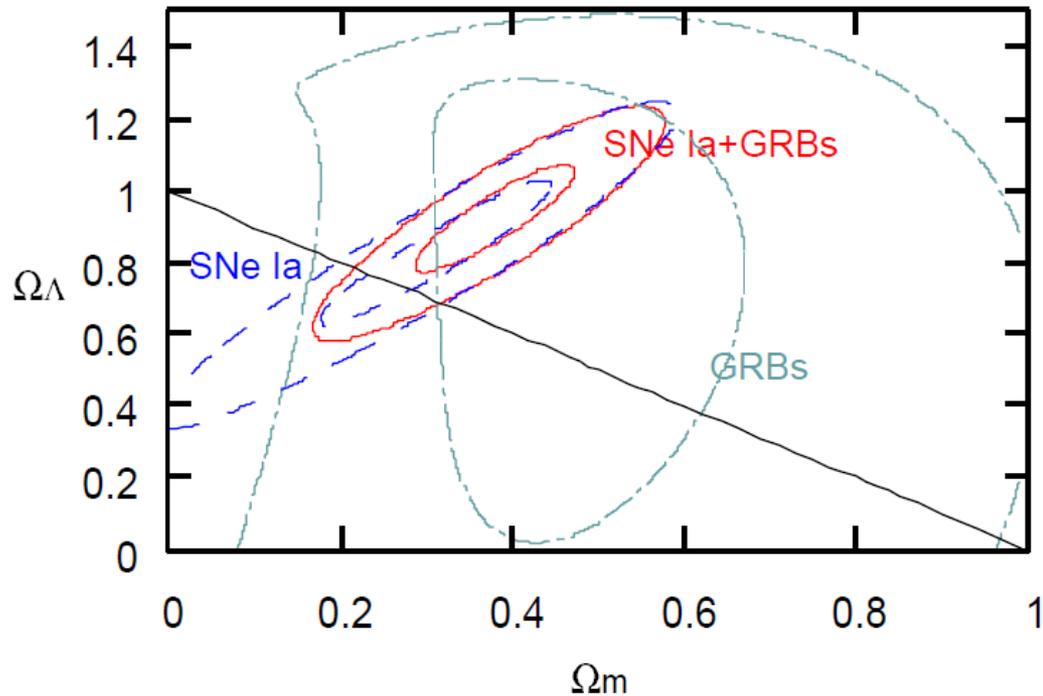


宇宙定数
時間変化する
暗黒エネルギー

SN Iaより数が
少なく誤差も
大きいのが遙かに
遠い。

GRBによる制限

contourの形がGRBとSNIaで異なる。重ねると制限が強くなる。まだGRBの数も少なく精度もよくないのであまり強い制限にはならない。が…。



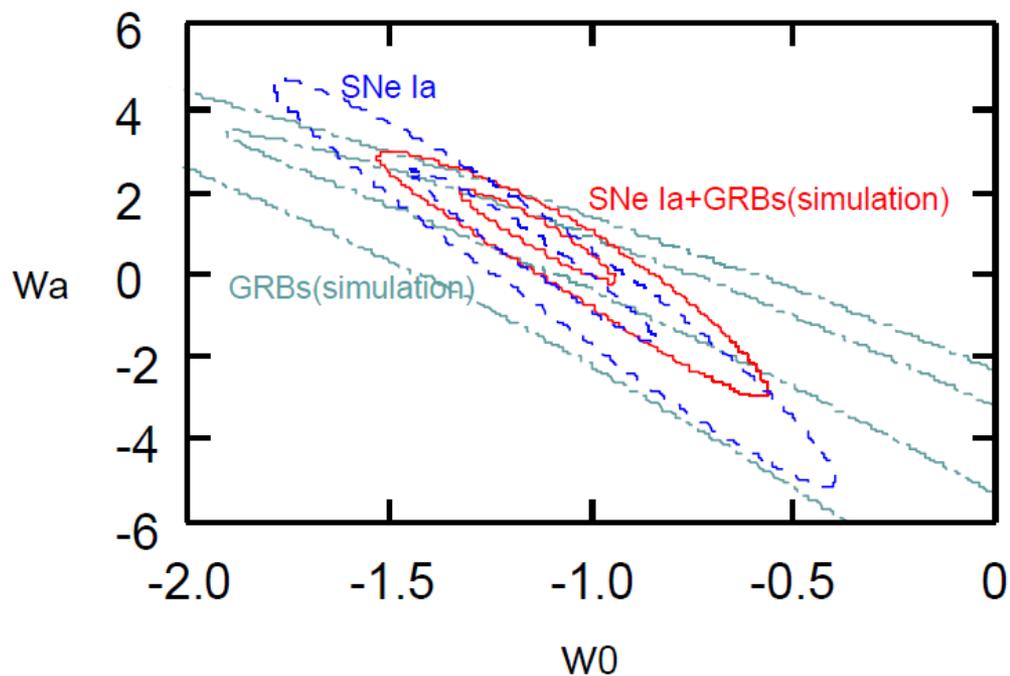
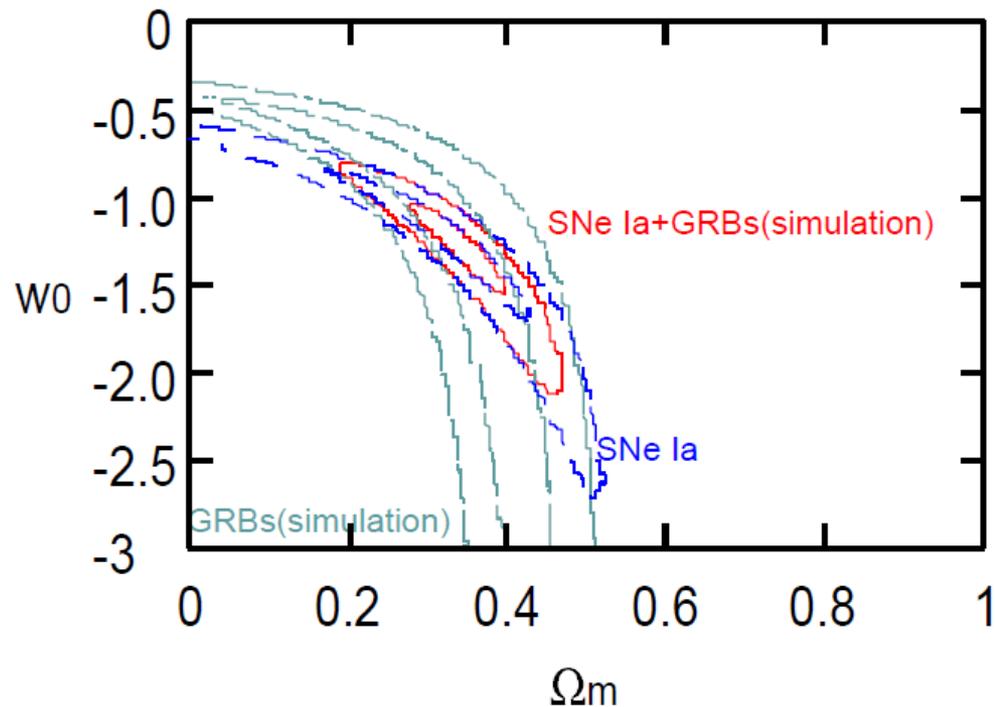
将来の予測

Swift・Fermi・Suzakuなど
によって将来GRBの数は
もっと増えるだろう。

redshift、 E_p がきちんと
決まったGRBが150個
あるとしたときに期待される
制限をシミュレーション
により求めた。

(Tsutsui, KT et al. 2009)

暗黒エネルギーの性質に
対してIa型超新星だけより
強い制限が得られるだろう。



まとめ

GRBで暗黒エネルギーを探る

- ・ ピークエネルギーと「明るさ」の相関
→ これによってGRBを標準光源として使用可能
- ・ cosmic distance ladderをもう1つ伸ばす
三角測量 → セファイド → Ia型超新星 → GRB
- ・ GRBによって暗黒エネルギーの時間変化を探ることができるようになる
→ 暗黒エネルギーの正体にせまる
- ・ distance ladderの方法だけで宇宙論パラメータを決める
→ CMB・BAOなどのクロスチェック
- ・ 今のところGRBの数が少ない
→ 将来は数がどんどん増えるだろう

終