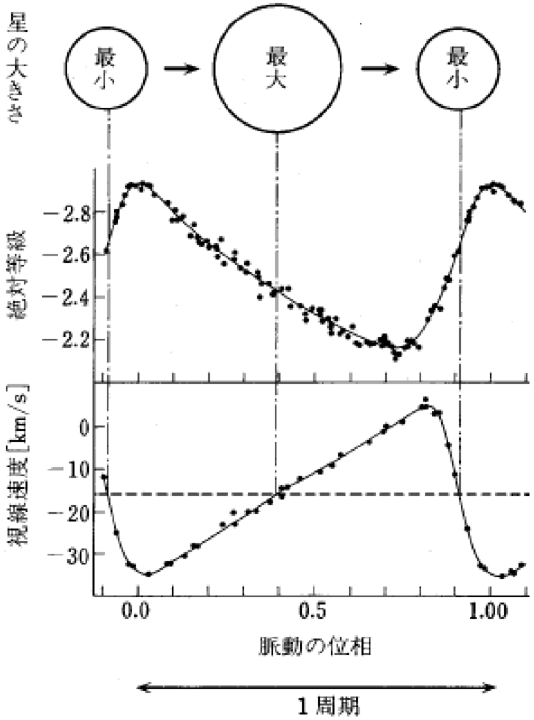
ガンマ線バーストを用いた観測的宇宙論

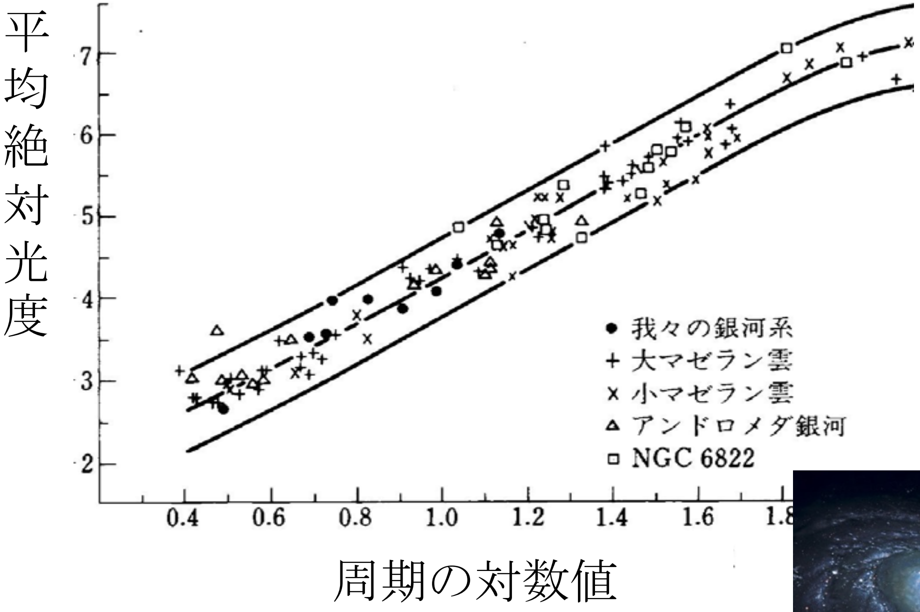
京都大学　D1　筒井亮
共同研究者
中村卓史　高橋慶太郎（京都大学）
米徳大輔　村上敏夫　児玉芳樹（金沢大学）

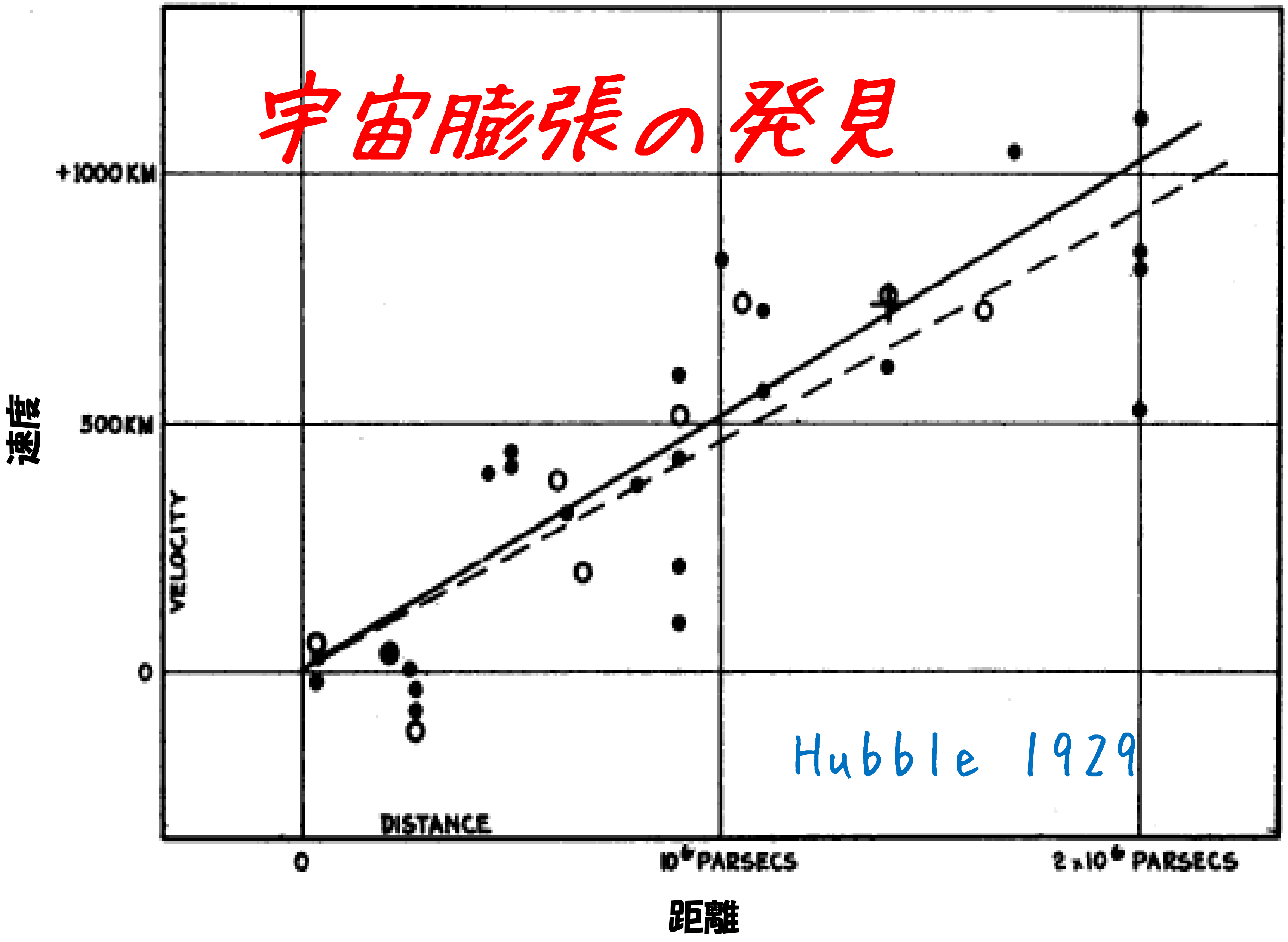
2008年8月31日　RESCEU夏の学校

The highlight of Observational cosmology

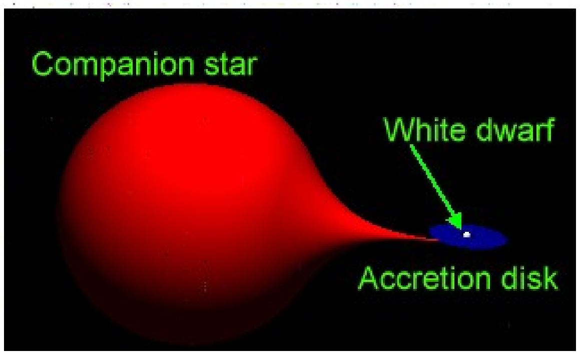
セファイド変光星；
規則的に明るくなったり暗くなったりを繰り返す星
周期と光度の間に強い正の相関がある。
関係式から距離がわからなくても絶対光度がわかる。
周期が50日のものは太陽の1万倍もの明るさと非常に明るい
→　我々の銀河系の外まで距離測定を可能に






宇宙膨張の発見
+1000 KM
500 KM
0
VELOCITY
速度
DISTANCE
0
10^6 PARSECS
2×10^6 PARSECS
距離
Hubble 1929

Highlight of Observational cosmology 2



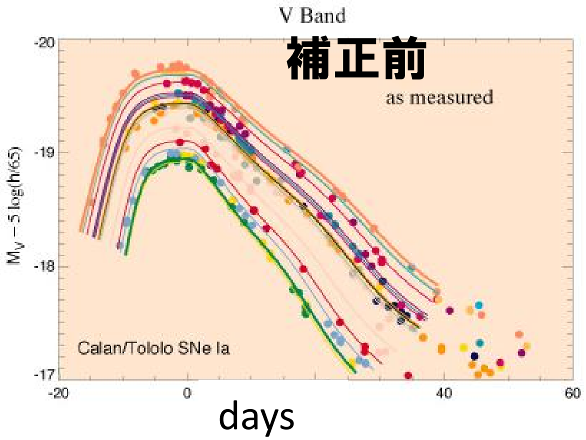
Ia型超新星；

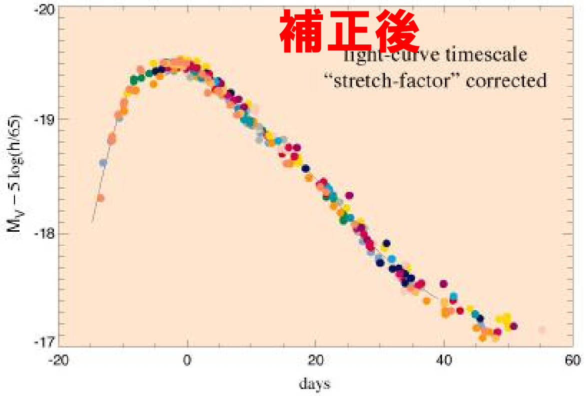
・白色矮星が伴星からの質量降着により質量の増加し臨界質量（チャンドラセカール質量）を超えた時に暴走的に核反応を起こし爆発する。

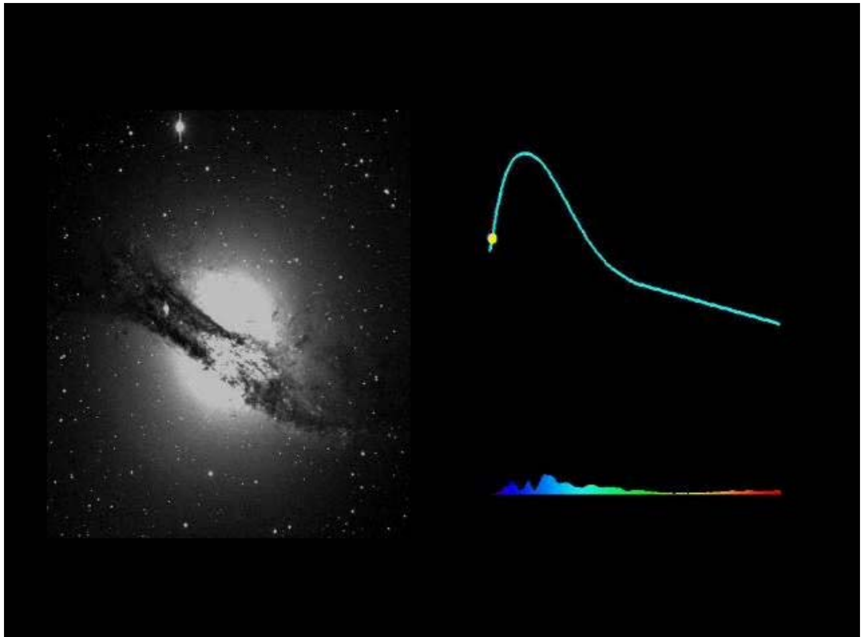
・銀河に匹敵する明るさをもつ

・減光の割合と最大時の光度の関係式から補正を行うと明るさのバラつきが１０％になる。

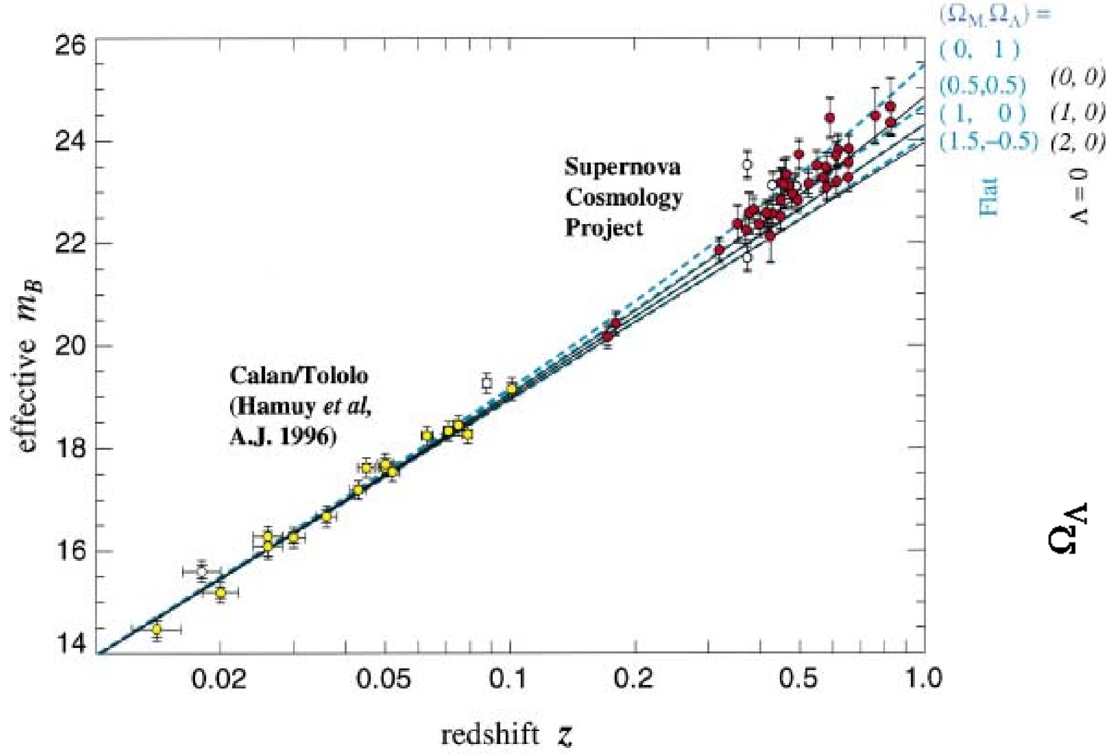
　　遠方の銀河までの距離測定を可能に

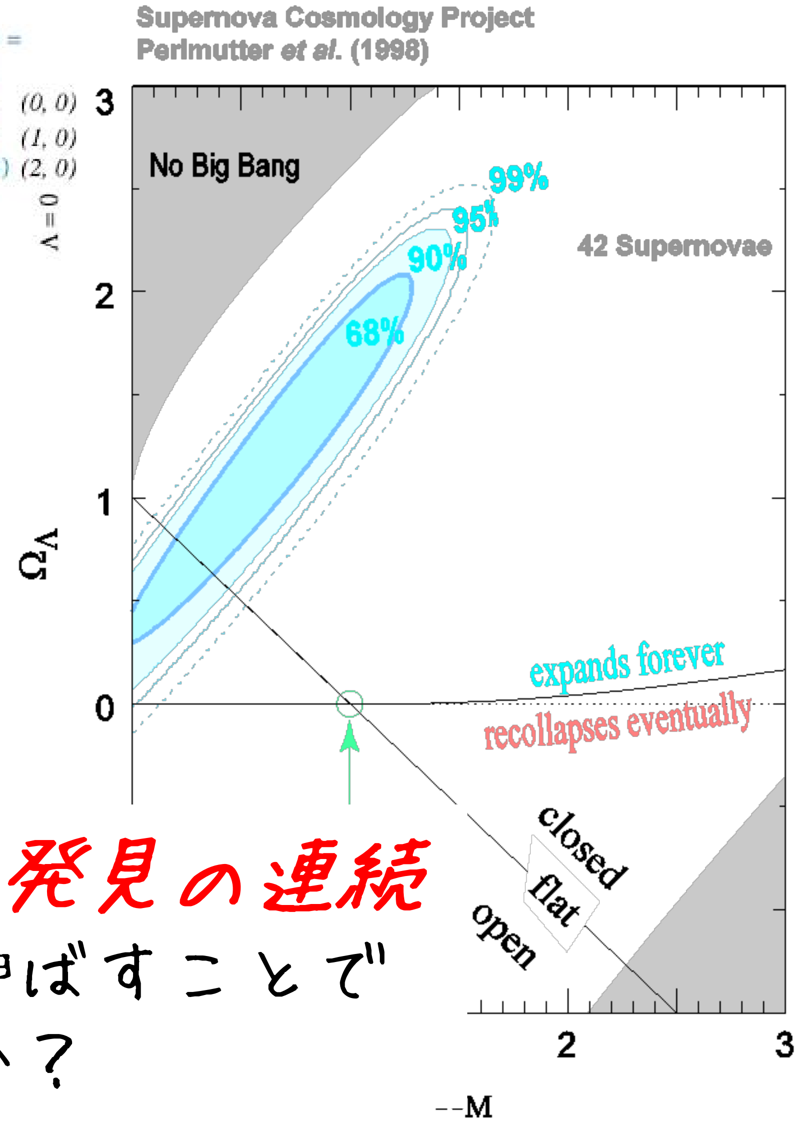






加速膨張の発見





歴史は遠くの宇宙の観測→発見の連続

さらに遠くの宇宙まで梯子を伸ばすことで
ダークエネルギーに迫れないか？

もっと遠くの宇宙への梯子

明るいもので

$L_{iso} \sim 10^{54}$ erg/sにもなる

宇宙で最も明るい現象

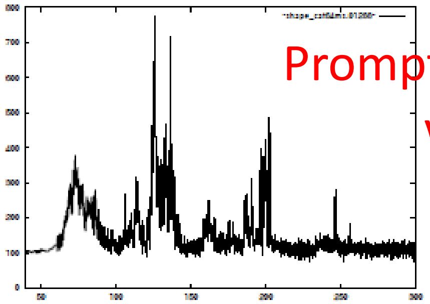
(ce 初期宇宙への架け橋

time (hours)

Afterglow
X線～電波

赤方偏移の決定

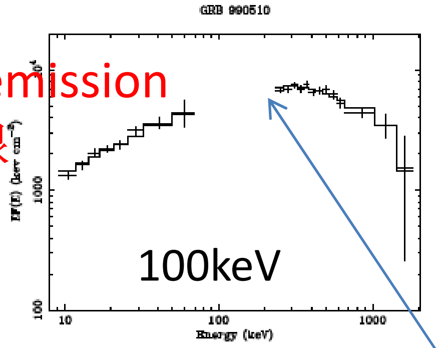
Massive star



200秒

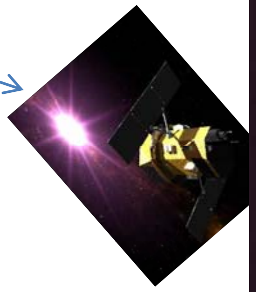
Light curve

Prompt emission
γ線

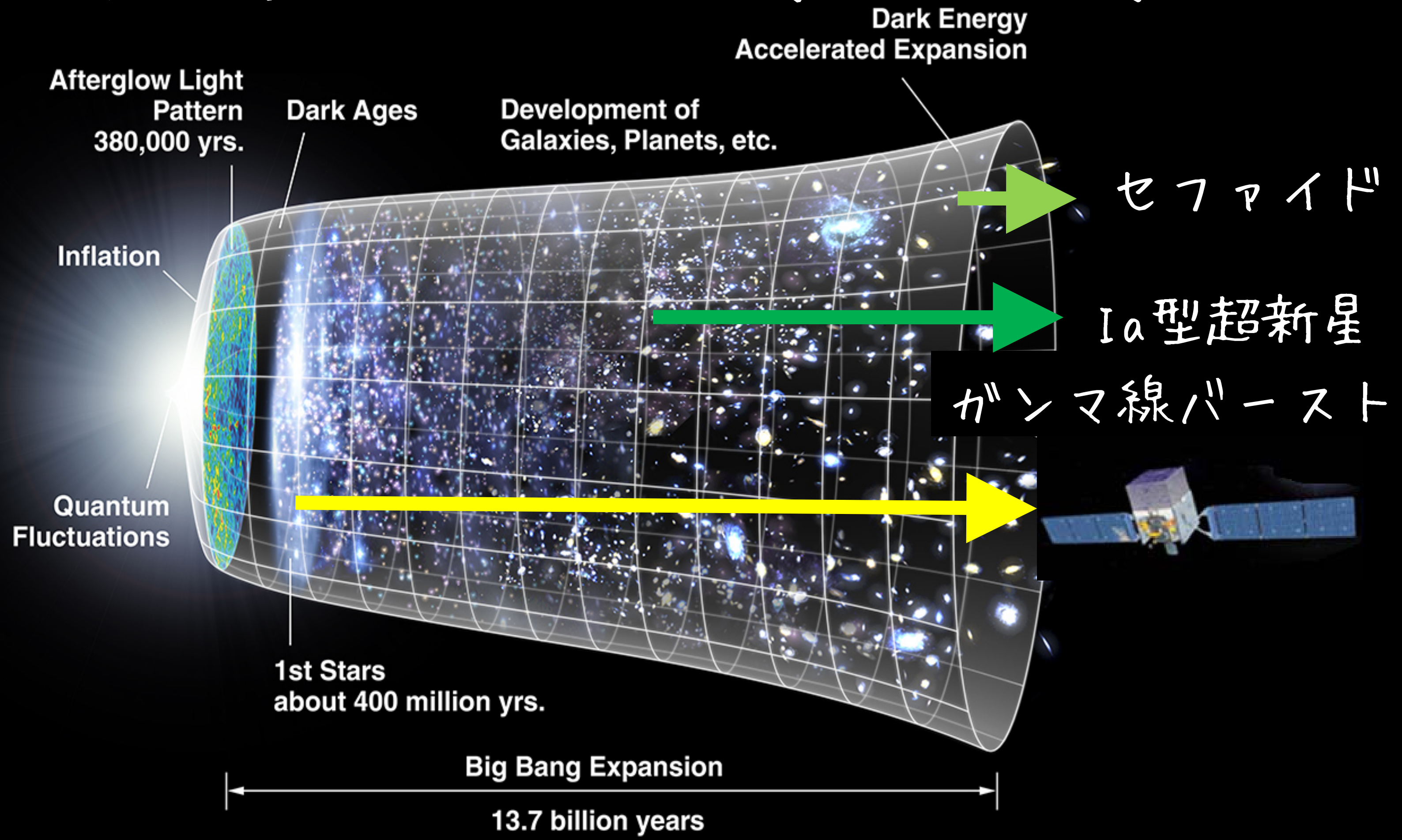


spectrum

スペクトルピークエネルギー（Ep）



ガンマ線バーストで見える宇宙



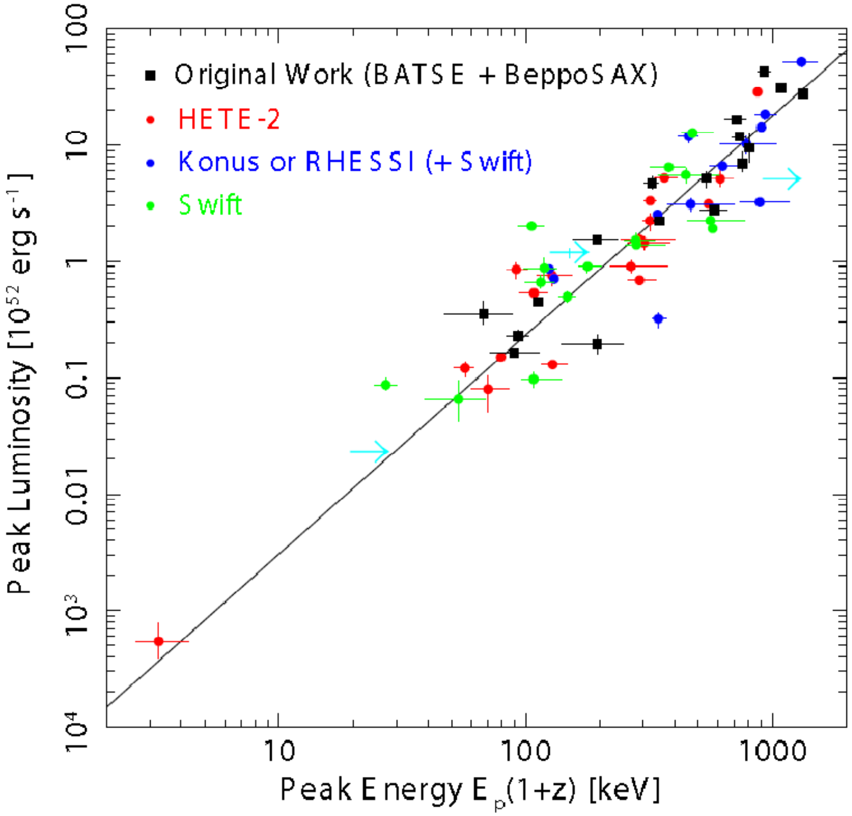
GRBなら宇宙最初の星形成期まで観測が可能

＊ただし赤方偏移を決めるのは難しい

NASA/WMAP Science Team

ガンマ線バーストと距離指標

・ガンマ線バーストにもセファイド変光星における周期-光度関係のような関係式がいくつか見つかっている。
・ここではYonetoku et al. 2004によって提唱されたspectrum peak energy (Ep) - peak luminosity (Lp) relationを用いてIa型超新星の見つかっていないz>1.8の宇宙まで距離梯子を伸ばしてやる。
・オリジナルの論文では宇宙論を仮定してGRBまでの光度距離を求めているのでそのままでは宇宙論パラメータの制限には使えない。
・Ia型超新星の見つかっているz<1.755までのGRBだけで宇宙論を仮定せずに関係式を較正する必要がある。



Calibration of Ep-Lp relation

Davis et al. 2007の192個のIa型超新星から赤方偏移0.17<z<1.755までの光度距離を

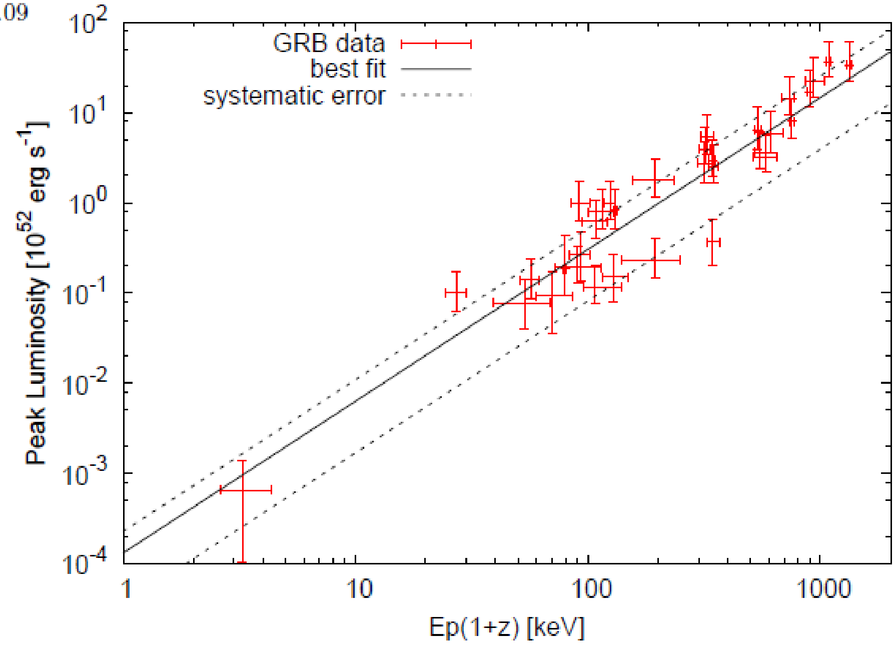
$$\frac{d_L}{10^{27}\mathrm{cm}} = (6.96\pm4.45)\times z^{1.79\pm0.45} + (14.79\pm4.48)\times z^{1.02\pm0.07}$$

とFittingした。この式をz<1.755の33個のGRBに用いて宇宙論によらないEp-Lp relationを求めた。

$$\left(\frac{L_p}{10^{52}\mathrm{erg\ s^{-1}}}\right) = (1.31\pm0.67)\times10^{-4}\left(\frac{E_p}{1\mathrm{keV}}\right)^{1.68\pm0.09}$$

さらにこの直線の周りの分散をSystematic errorとして9.57×10^{-5}入れた（右図点線）。

この式を用いて観測されたEp, peak flux, zから宇宙論を仮定することなしにz>1.755でのdLを求めた。



Extended Hubble diagram

$1.8<z<5.6$の30個のGRBについて
較正されたEp-Lp relationを用いて
伸ばされたHubble diagram。
これと理論から得られる光度距離を
比べて宇宙論パラメータを決める。

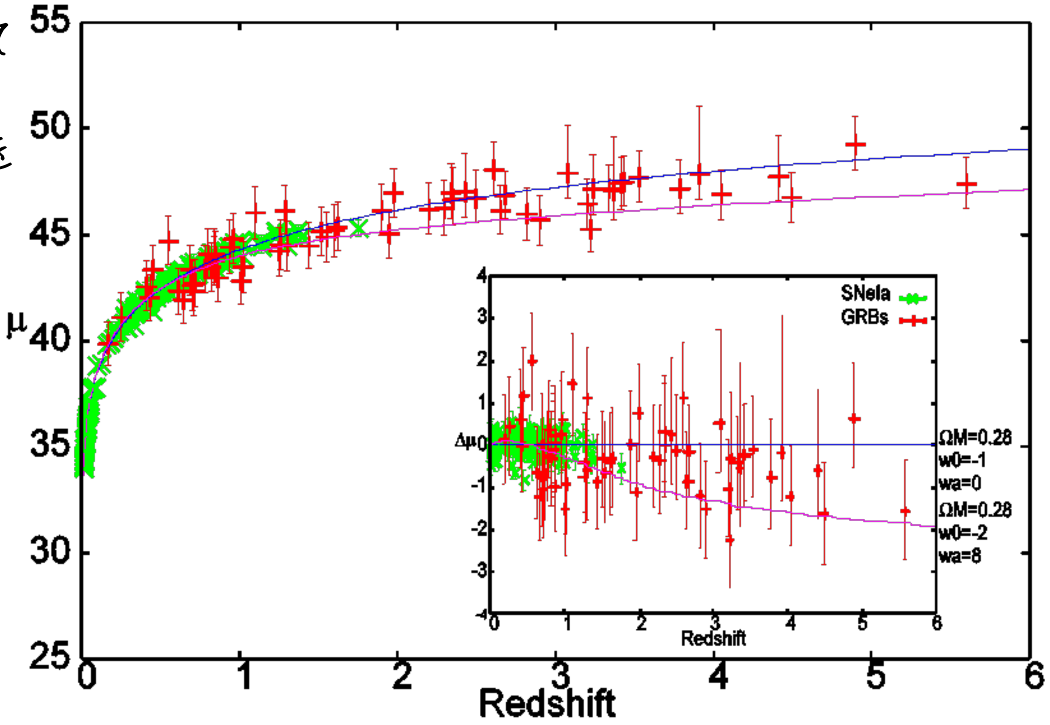
$$d_L^{\rm th}(z,\Omega_m,\Omega_X,w) = \begin{cases} \frac{c}{H_0\sqrt{\Omega_k}}\sin(\sqrt{\Omega_k}F(z)) & \text{if } \Omega_k>0 \\ \frac{c}{H_0\sqrt{-\Omega_k}}\sinh(\sqrt{-\Omega_k}F(z)) & \text{if } \Omega_k<0 \\ \frac{c}{H_0}F(z) & \text{if } \Omega_k=0 \end{cases}$$

with

$$F(z) = \int_0^z dz' \Big[\Omega_m(1+z')^3 - \Omega_k(1+z')^2 + \Omega_X e^{3\int_0^{\ln(1+z')} d\ln(1+z'')[1+w(z'')]}\Big]^{-1/2}.$$

$$\Delta\chi^2 = \sum_i \left\{ \frac{\mu_0(z_i) - \mu^{\rm th}(z_i,\Omega_m,\Omega_X,w)}{\sigma_{\mu_{0,z_i}}} \right\}^2 - \chi^2_{\rm best}$$

$$\mu^{\rm th}(z_i,\Omega_m,\Omega_X,w) = 5\log(d_L^{\rm th}/{\rm Mpc}) + 25$$

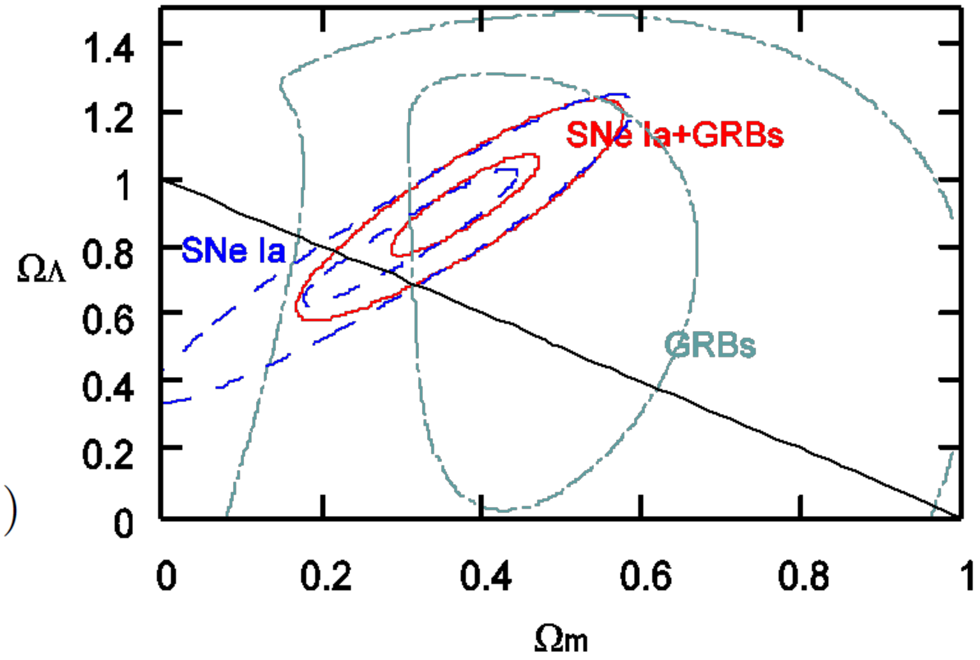


ΛCDM model

$$w_0 = -1 \text{ and } w_a = 0$$

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

$$(\Omega_m, \Omega_\Lambda) \; = \; (0.38^{+0.09}_{-0.09}, 0.93^{+0.14}_{-0.15})$$



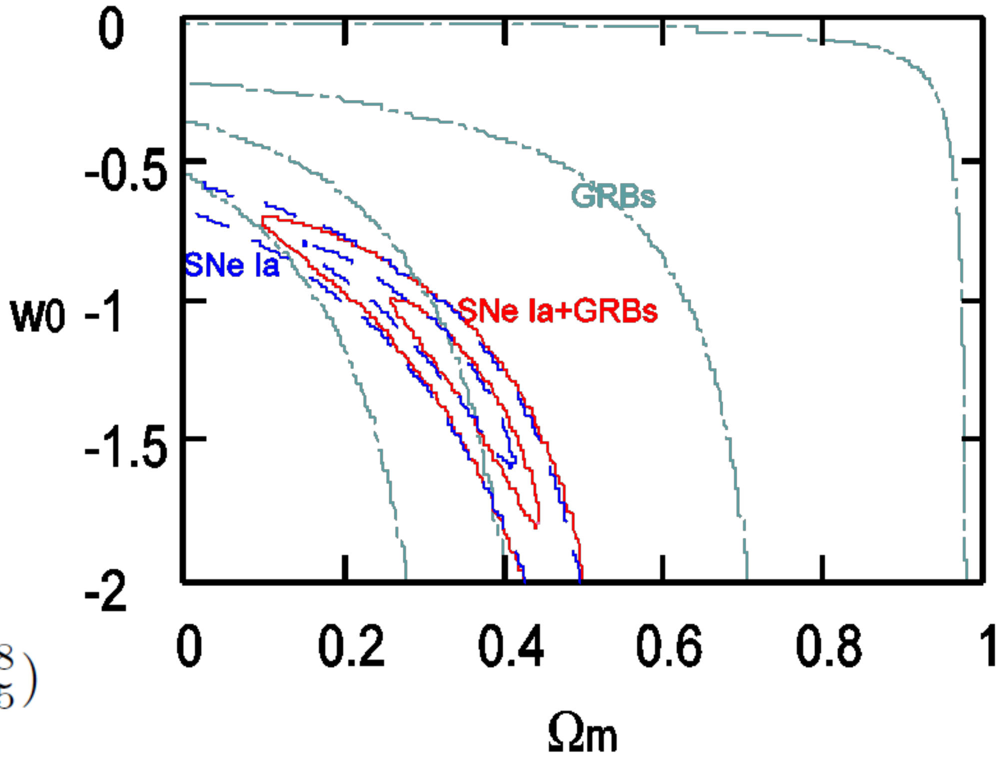
Ia型超新星よりも垂直に近いコントア

Constant equation of state

Flat（Ωk=0）は仮定

$$F(z) = \int_0^z \frac{dz}{\sqrt{\Omega_m(1+z)^3 + (1-\Omega_m)(1+z)^{3(1+w_0)}}}$$

$$(\Omega_m, w_0) = (0.36^{+0.08}_{-0.11}, -1.33^{+0.48}_{-0.15})$$



Dynamical equation of state

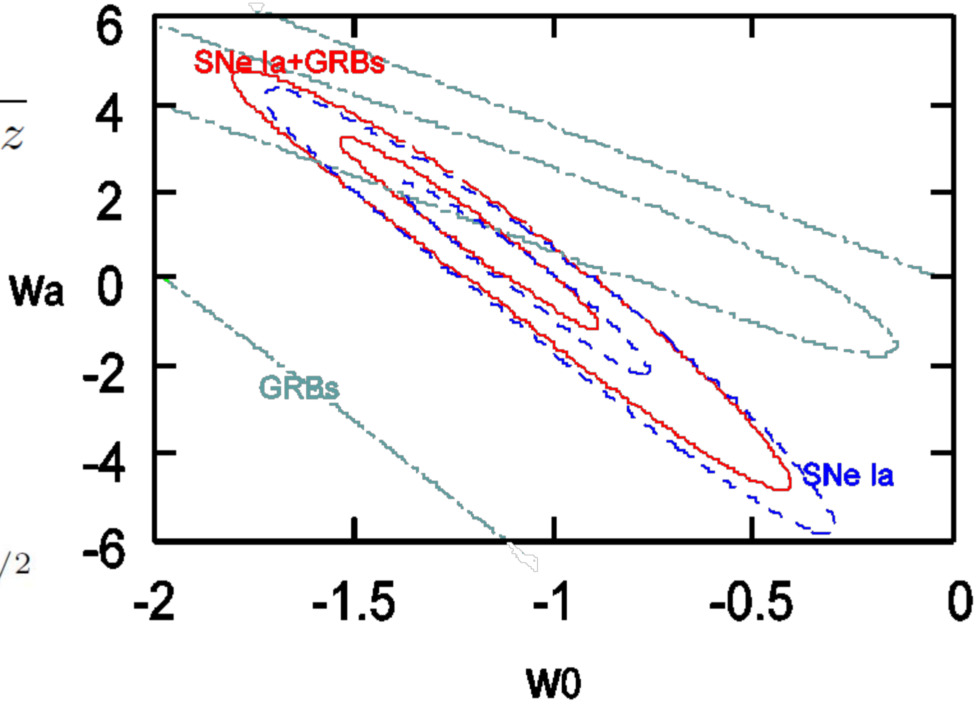
ダークエネルギーの状態方程式は

$$w(z) = w_0 + w_a(1-a) = w_0 + w_a \frac{z}{1+z}$$

さらにΩm=0.28を仮定。

$$F(z) = \int_0^z dz \left[\Omega_m (1+z)^3 \right.$$
$$\left. (1-\Omega_m)(1+z)^{3(1+w_0+w_a)} e^{-3w_a \frac{z}{1+z}} \right]^{-1/2}$$

$$(w_0,\ w_a) = (-1.26^{+0.38}_{-0.32}, 1.4^{+1.8}_{-0.2})$$

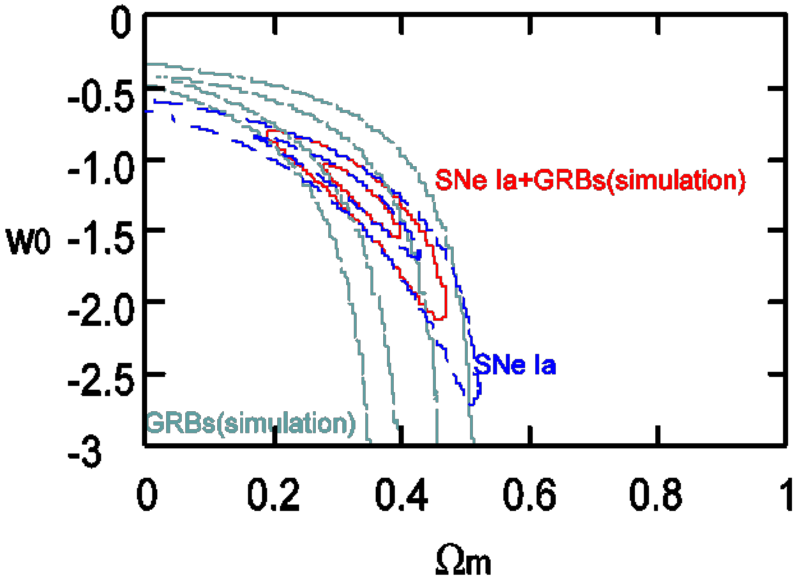


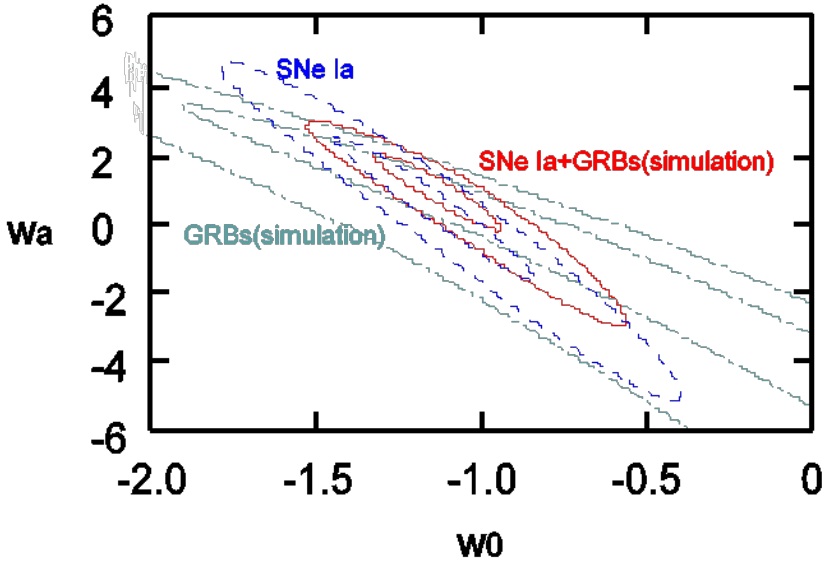
Ia型超新星より水平に近いコントア。
状態方程式の時間変化に厳しい制限。

シュミレーション

Ia型超新星と違う赤方偏移を見てるためにコントアの形もかなり違うことがわかった。数が増えれば重要なプローブとなりうる。

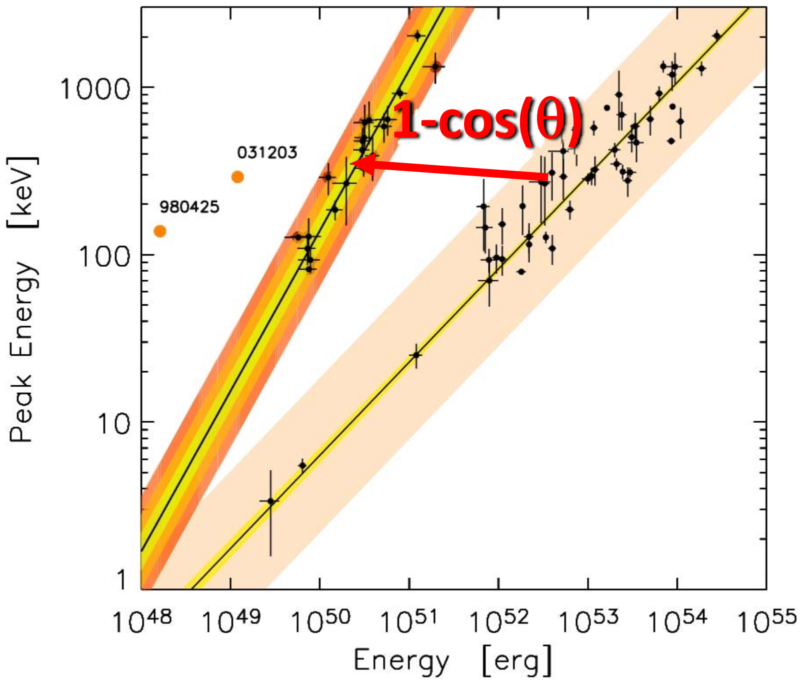
今後5年でGLAST、Swift衛星で見つかると予想される150個のGRBをモンテカルロで新たに作りどれくらいの制限ができるのかを予測。





将来研究

- Epとは別のパラメータを見つけることによってGRBの明るさを見積もる際の誤差を減らす。(銀河のfundamental planeに対応するもの)
- Jetの補正を加えればより正確になるが、残光からjet breakが見つかっているGRBは少ない。
- プロンプトから見つけるのが良い。



まとめ

- ガンマ線バーストで宇宙論を議論できるようになった。
- $z > 2$ の標準光源はガンマ線バーストだけ。
- エラーは大きいが、超新星より高赤方偏移を見ることになるために合わせて用いることで貴重なプローブとなりうる。
- まだまだできたての分野、これからの研究でさらに強力なものになる可能性も十分ありうる。