



# Ia型超新星の弱い重力レンズ 効果を用いた精密宇宙論

東京大学 宇宙理論研究室

修士1年 須藤 大地

DAICHI SUTO

# CONTENTS

**Ia型超新星の光度距離測定の系統誤差として扱われてきた弱い重力レンズ効果を新しい情報として扱う**

**本研究では**

- ・ この効果のS/N比の見積もり**
- ・ 宇宙論パラメータをどの程度まで制限できるかの評価**

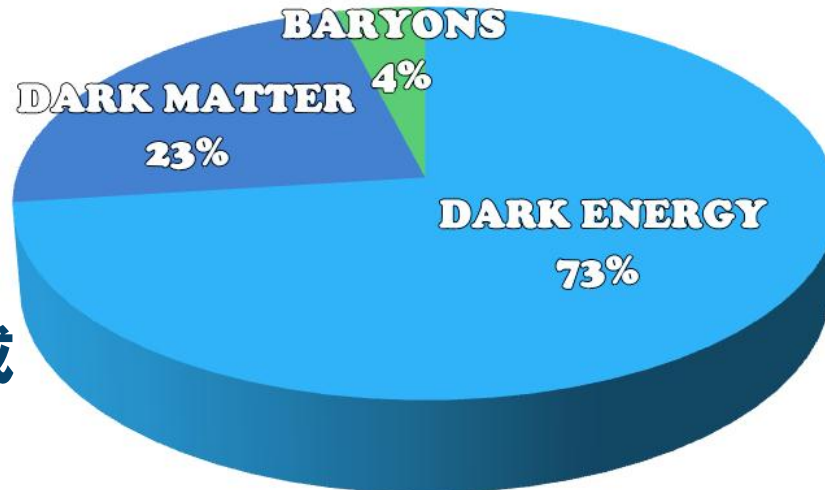
**を行った**



# MOTIVATION -1

これまでの観測でダークエネルギーが宇宙のエネルギー組成の大半を占めることがわかった

今後は精密観測によってその性質を探りたい



宇宙のエネルギー組成



# MOTIVATION -2

ダークエネルギー＝宇宙項 $\Lambda$ ？

ダークエネルギーの状態方程式：

$$p = w\rho$$

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

(  $w_0 = -1, w_a = 0$  **ならば宇宙項** )

$w_0, w_a$  に対する制限  
について考える

密度パラメータの $z$ 依存性：

$$\Omega_{\text{DE}} \propto (1+z)^{1+w_0+w_a} e^{-3w_a(1+z)}$$



# TYPE Ia SUPERNOVAE -1

↓ダークエネルギーの効果が現れ始める時期

比較的最近( $z < 1$ )の宇宙が観測対象であるためダークエネルギーの性質を調べるのに適している

最大絶対等級が精度よく( $\sim 10\%$ )わかっている(標準光源)

⇒光度距離測定により宇宙論パラメータの制限に用いられてきた

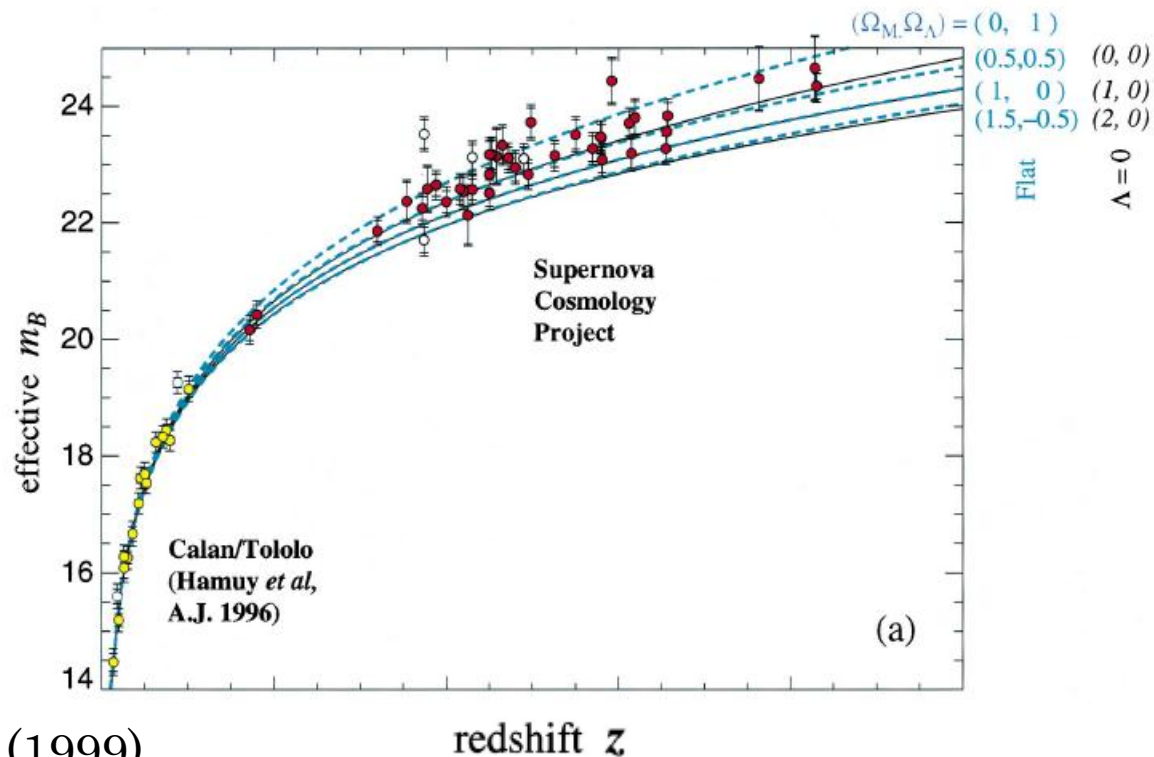


# TYPE Ia SUPERNOVAE -2

光度距離 (flat universe) :

様々な宇宙論パラメータに依存!

$$d_L = \frac{c}{H_0} \int \frac{dz}{\sqrt{\Omega_r(z) + \Omega_m(z) + \Omega_{DE}(z)}}$$



# WEAK LENSING -1

超新星の光度は弱い重力レンズ効果を受けていることが知られている

Cosmic magnification :

光源と観測者の間にある物質(主にダークマター)によって光源の光度が増減する効果

従来は光度距離測定の実験誤差として扱われてきたが、この効果を新しい情報源として扱う



# WEAK LENSING -2

ダークマター分布の非等方性により、  
超新星の光度に方向依存性が生じる

$$\text{観測される光度} \rightarrow L(z, \boldsymbol{n}) = \mu(z, \boldsymbol{n}) \bar{L}(z) \leftarrow \text{本来の光度}$$

方向ベクトル↑            ↑ **Magnification**

普通、光源の本来の光度が不明なため、  
Magnificationを知ることはできないが、  
標準光源である超新星ならば可能！





# WEAK LENSING -3

## 各方向で $\mu$ が決まったら

$$\langle \mu_{lm}^* \mu_{l'm'} \rangle = C_l^{\mu-\mu} \delta_{ll'} \delta_{mm'}$$

MagnificationのFourier成分↑

↑Angular power spectrum (これを測定する)

$$C_l^{\mu-\mu} = \int dr \frac{W^2(r)}{d_A^2} P_{\text{dm}} \left( k = \frac{\ell}{d_A}, r \right), \leftarrow \text{Dark matterの Power spectrum}$$

$$W(r) = 3 \int dr' n(r') \Omega_m \frac{H_0^2}{c^2 a(r)} \frac{d_A(r) d_A(r' - r)}{d_A(r')}$$

超新星の分布↑

$P_{\text{dm}}$  は密度ゆらぎの成長の仕方、つまり  
ダークエネルギーの性質に依存する



# CHARACTERISTICS-1

超新星のサンプル数が少ない

DEMERIT

⇒統計的エラーが大きい

(例えば、Cosmic Shearの観測に用いられる銀河の数はこれより100倍以上多い)

他の観測とは独立な情報を扱う

MERIT

⇒他の観測とのcross checkに利用可



# CHARACTERISTICS-2

ダークエネルギーの影響

MERIT

1. 背景宇宙の膨張の仕方

↑光度距離測定で調べられる

2. ダークマターゆらぎの成長の仕方

↑レンズ効果で調べられる

⇒同じサンプルで双方を調べられる！



# SIMULATION

Cooray et al. (2006) に基づいて

LSST(Large Synoptic Survey Telescope)を想定

超新星の数 :  $500,000/20,000 \text{ deg}^2$

超新星の分布 :  $0.1 < z < 1.7$  で一様

光度の不確かさ : 10%

1. この効果を観測できるか

⇒ Signal-To-Noise Ratio の評価

2. パラメータをどの程度制限できるか

⇒ Parameter Forecast



# SIGNAL-TO-NOISE RATIO

Cooray et al. (2006) に基づいて

## signal-to-noise ratioの評価

$$\left(\frac{S}{N}\right)^2 = \sum_l \left(\frac{C_l^{\mu-\mu}}{\Delta C_l^{\mu-\mu}}\right)^2$$

$$\Delta C_l^{\mu-\mu} = \sqrt{\frac{2}{(2l+1)f_{\text{sky}}\Delta\ell} \left( C_l^{\mu-\mu} + \frac{\sigma_\mu^2}{N_{\text{SN}}} \right)}$$

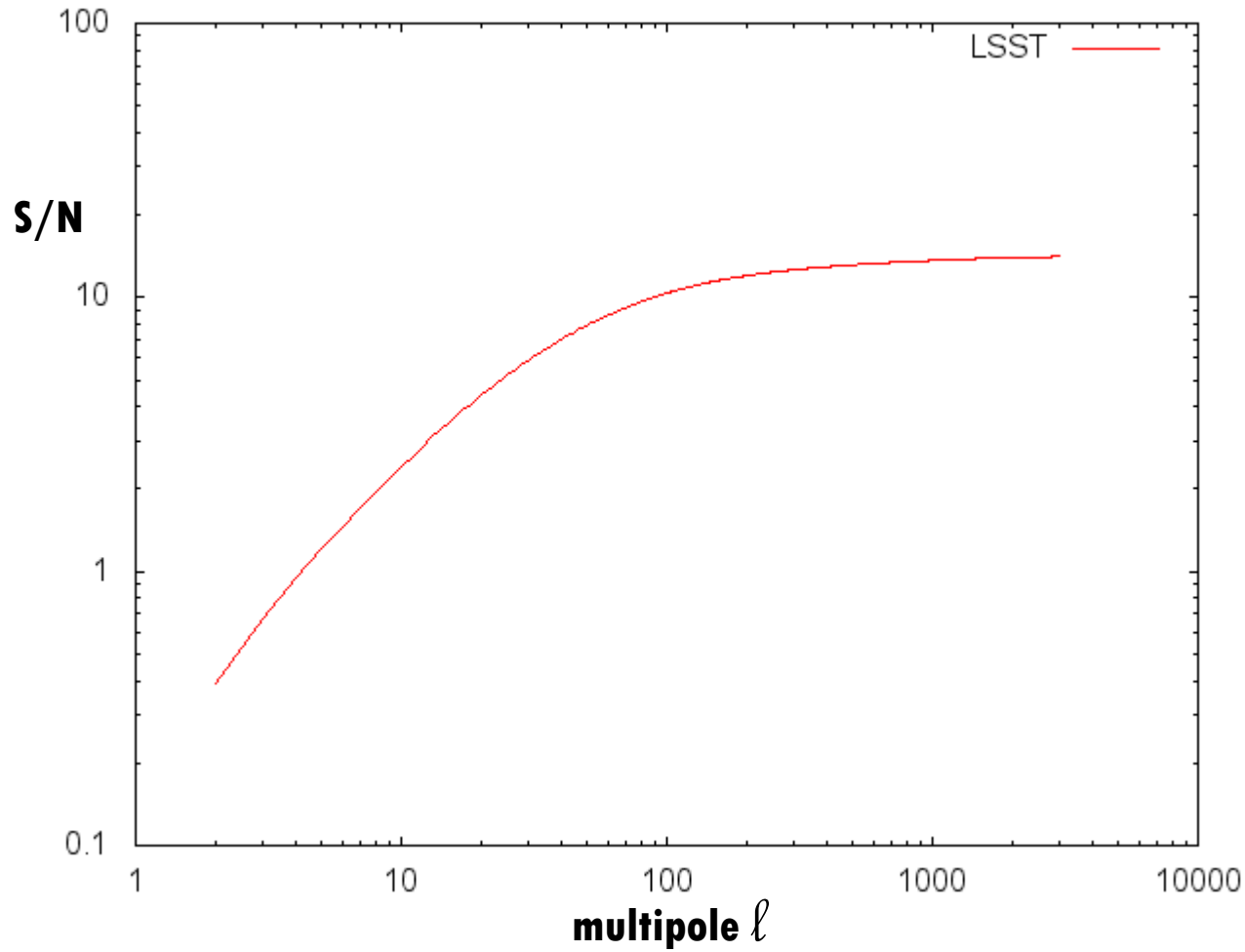
↓ 超新星光度の不確かさ  
↑ 超新星の面密度

$f_{\text{sky}}$  : 全天に対するサーベイ領域の割合

$\Delta\ell$  :  $\ell$  をビン分けしたときのビンの幅



# SIGNAL-TO-NOISE RATIO



# PARAMETER FORECAST

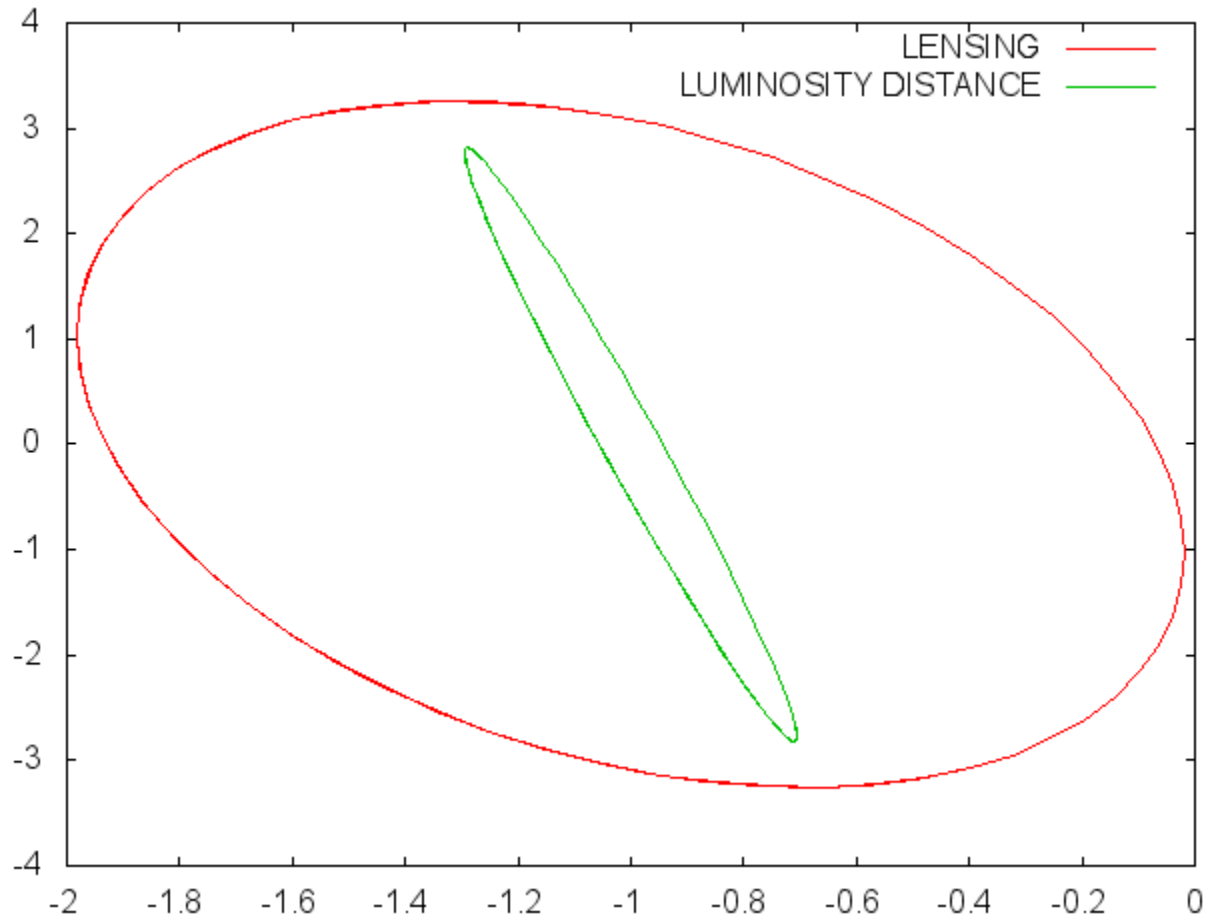
ある基準の値(今は $w_0=-1, w_a=0$ )をとり、その周りでのパラメータ制限の精度を評価

⇒ Fisher解析：

Likelihoodの形がGauss分布であると仮定して(例えば) $1\sigma$ 領域を求める



# PARAMETER FORECAST





# CONCLUSION

今回のセッティングではパラメータ制限は弱い

光度距離測定による制限と縮退の方向(楕円の向き)が異なるため、レンズ効果による制限が強くなれば光度距離測定と併せてパラメータ制限に貢献できると思われる



# PROSPECTS

制限を強めるためには？

- 3点(以上)相関⇒ノイズに埋もれて観測できない (Cooray et al. 2006)

- **Redshiftの情報を入れる(Tomography)**  
⇒サンプルをいくつかの $z$ のビンに分ける

- 大量の超新星の $z$ を決めるには？

分光：時間がかかる

測光：精度よく決められない

↑LSSTはこっち



# FIN.

ありがとうございました

## References:

Cooray, A., et al. 2006, ApJ, 637, L77

Munshi, D., et al. 2003, Phys. Rep., 462, 67

LSST SCIENCE BOOK version 2.0

Tang, J., et al. 2008, arXiv:0807.3140v1 [astro-ph] 20 Jul 2008

Albrecht, A., 2006, REPORT OF THE DARK ENERGY FORCE

Perlmutter, S., et al. 1999, ApJ, 517: 565-586

