

2017年2月27日

第1回MeVガンマ線天文学研究会@京都大学

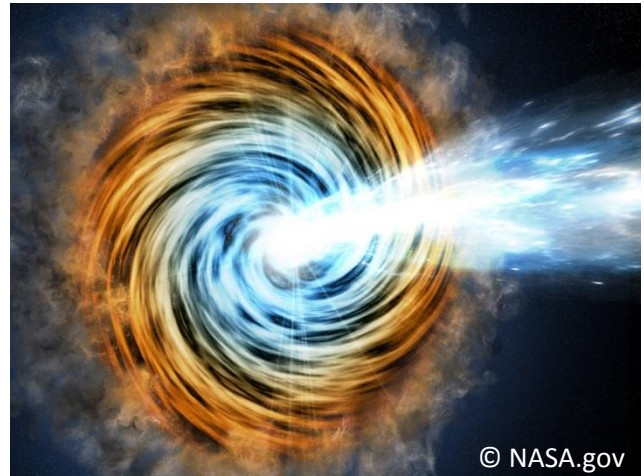
# Swift衛星の硬X線サーベイデータに基づく、 ブレーザーの宇宙論的進化と 宇宙MeVガンマ線背景放射への寄与

戸田 皓陽（広島大学 M1）

井上 芳幸 (ISAS/JAXA), 田中 康之 (広島大学),  
深澤 泰司 (広島大学)

# ブレイザー

- 活動銀河核のうち、ジェットが視線方向を向いているもの
- 電波からγ線まで明るく輝く



## 観測から2つの分類

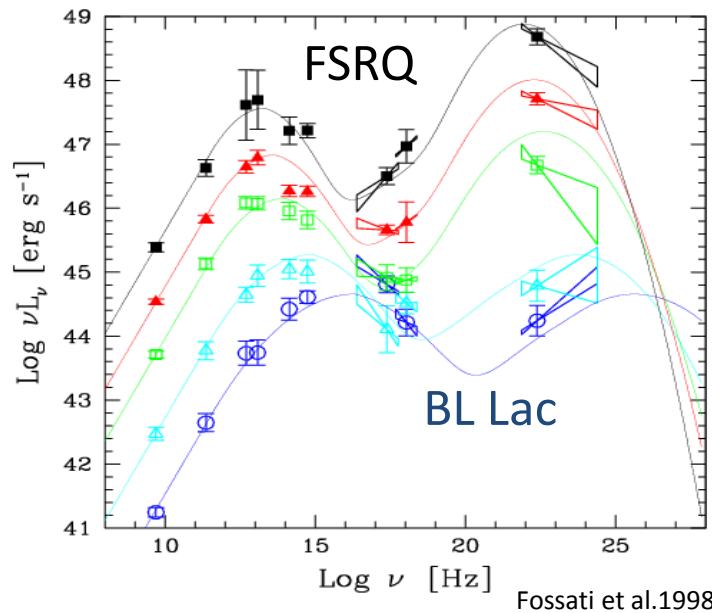
### FSRQ

- 可視光域の全ての輝線の等価幅が5 Å以上
- 明るく、遠方に多い

### BL Lac

- 可視光域のいくつかの等価幅が5 Å以下
- 暗く、近傍に多い

ブレイザーは宇宙初期にどのように進化したのか？



# FSRQの宇宙論的進化

Swift衛星 (X線) のデータを使用  
(Ajello et al, 2009)

Ajello et al. 2009, apj, 699, 603

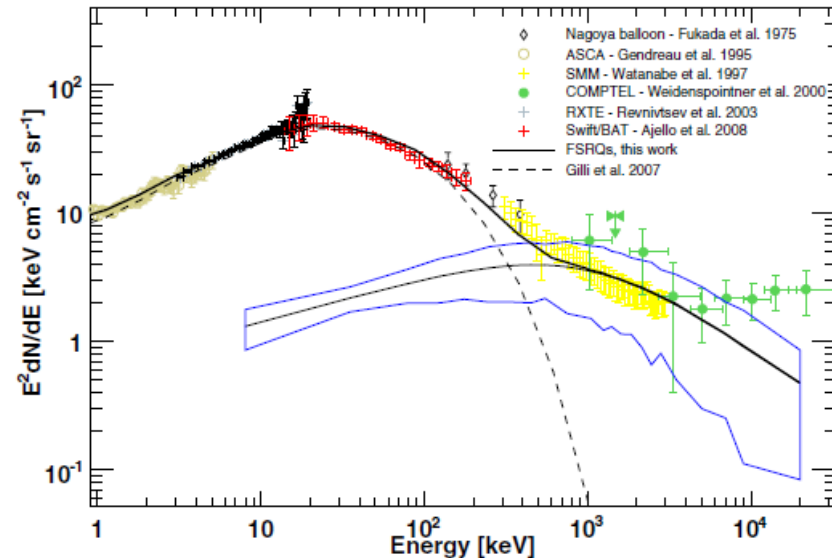
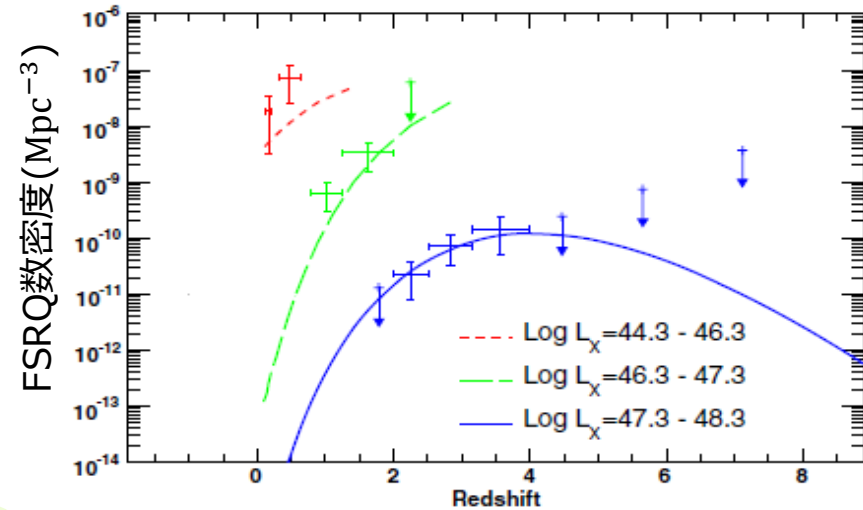
Swiftの22ヵ月間の観測で得られた**26個**のFSRQをサンプルとして使用し、X線光度関数(XLF)を構築

## 光度関数

単位赤方偏移・単位光度あたりの天体数



- FSRQは  $z=4$  のあたりに多く存在
- FSRQが1MeV付近の宇宙MeVガンマ線背景放射を約100%説明

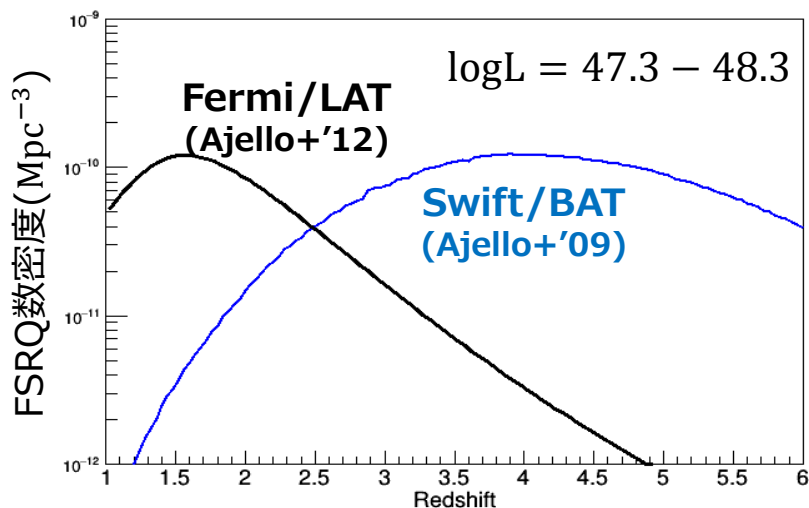
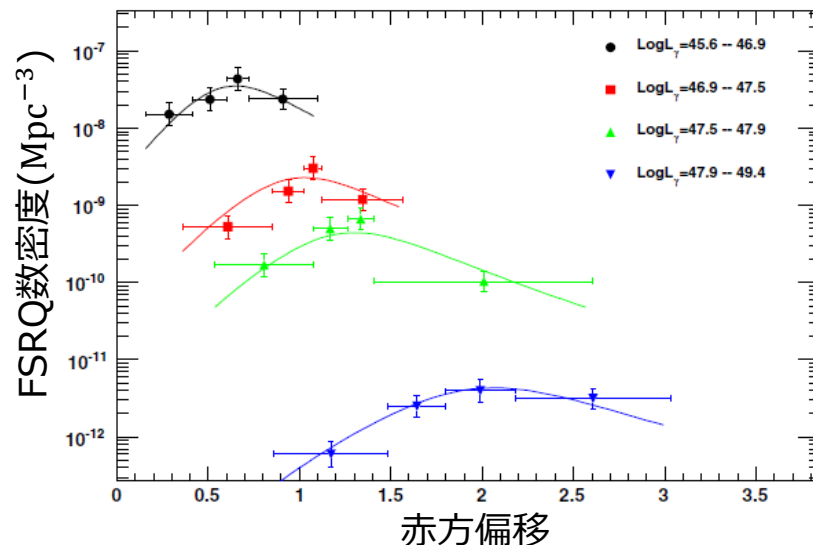


# FSRQの宇宙論的進化

Fermi衛星 ( $\gamma$ 線) のデータを使用  
(Ajello et al, 2012)

Ajello et al. 2012, apj, 751, 108

- FSRQ **168個** をサンプルとして使用し、ガンマ線光度関数を構築
- FSRQは  $z=1-2$  のあたりに多く存在
- FSRQが10-100MeV付近の宇宙MeVガンマ線背景放射を約50%程度説明



ガンマ線とX線で宇宙論的進化が異なる



X線の結果はサンプル数が少ない

Swift/BAT  
**24**サンプル

Fermi/LAT  
**186**サンプル

# 研究の目的

Swift衛星の最新の天体カタログを使用し、ブレーザーの宇宙論的進化を解明する

Swift BAT 70month Hard X-ray Survey カタログを使用



**FSRQ: 41天体**

※Ajello+'09では26天体

**BL Lac: 27天体**

※Ajello+'09では12天体

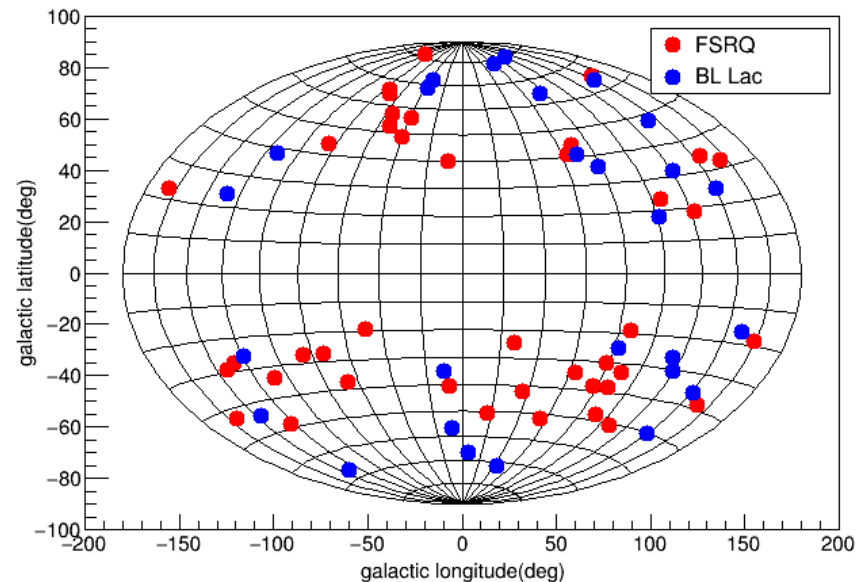
先行研究

22ヵ月間  
観測

今回

70ヵ月間  
観測

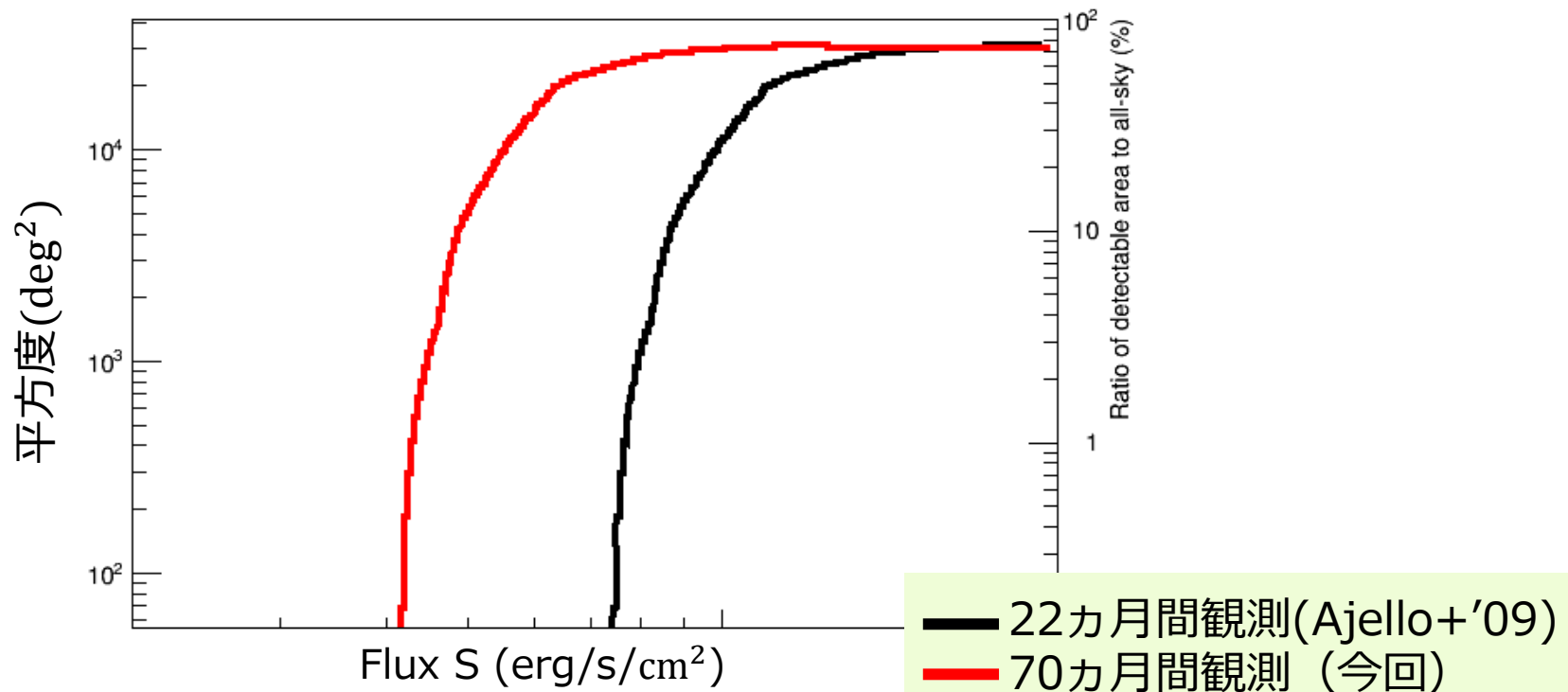
3倍の観測時間  
2.5倍の天体数



# Detection Efficiency (Sky Coverage)

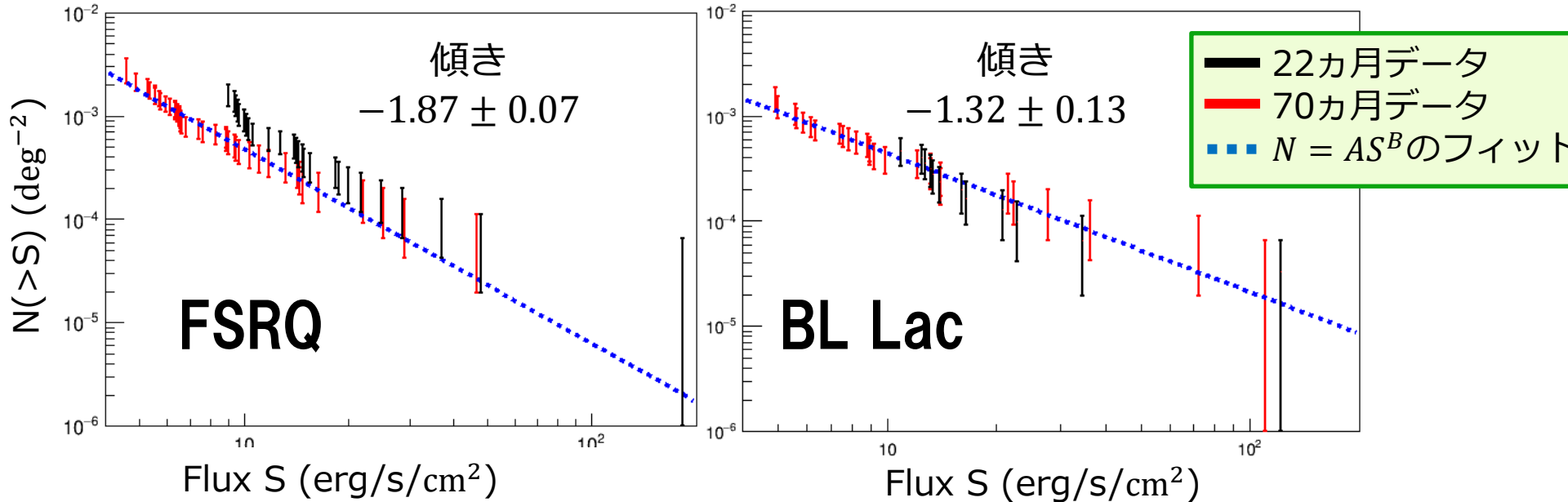
あるフラックスの天体を検出できる観測領域の大きさ

Swift/BAT で 22ヵ月間・70ヵ月間 観測したとき



# logN-logS 分布

あるフラックス  $S$  以上の天体の個数分布  $N(> S)$



## ➤ 22カ月間のデータ (Ajello+'09)

FSRQの傾き:  $-2.08 \pm 0.27$ ,

BL Lacの傾き:  $-1.69 \pm 0.32$

## ➤ 70カ月間のデータ (今回の研究)

FSRQの傾き:  $-1.87 \pm 0.07$ ,

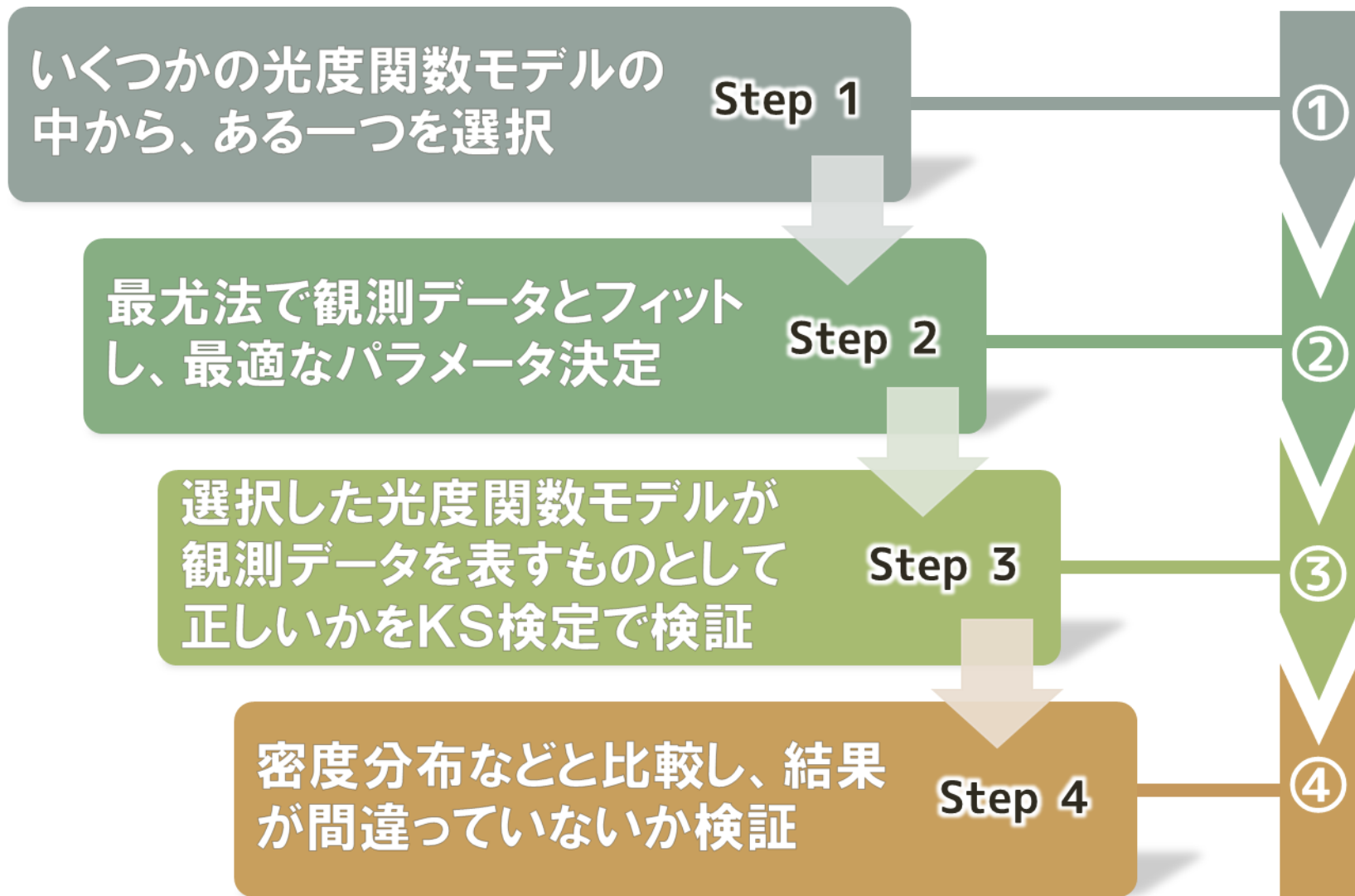
BL Lacの傾き:  $-1.32 \pm 0.13$



ブレーザーは  
より近傍に分布？

# 光度関数決定手法

今回はFSRQの光度関数を構築する





# 光度関数モデル

今回は先行研究(Ajello+' 09)と同じ光度関数モデルを使用

**Broken Power-law**

$$\Phi(L_X, z = 0) = \frac{A}{\ln(10) L_X} \left[ \left( \frac{L_X}{L_*} \right)^{\gamma_1} + \left( \frac{L_X}{L_*} \right)^{\gamma_2} \right]^{-1}$$



**2種類の進化のシナリオを仮定**

①

②

③

④

# 光度関数モデル

## Pure Luminosity Evolution (PLE)

天体の典型的な**光度**が、赤方偏移とともに変化する進化モデル

$$\Phi(L_X, z) = \Phi\left(\frac{L_X}{e(z)}, z = 0\right)$$

## Pure Density Evolution (PDE)

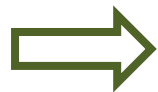
天体の典型的な**密度**が、赤方偏移とともに変化する進化モデル

$$\Phi(L_X, z) = \Phi(L_X, z = 0) \times e(z)$$

ここで、evolution factor  $e(z)$ は、

$$e(z) = (1 + z)^{k+\gamma z}$$

$\gamma$ が0なら $e(z)$ は一般的なpower-lawの形式だが、 $\gamma$ が負のときは $e(z)$ はpower-lawの形に赤方偏移カットオフがかかった式になる。



今回は  $\gamma = 0$ に固定したモデルを PLE (またはPDE)と呼び、 $\gamma$ を0に固定しないモデルを MPLE(またはMPDE)と区別する。

①

②

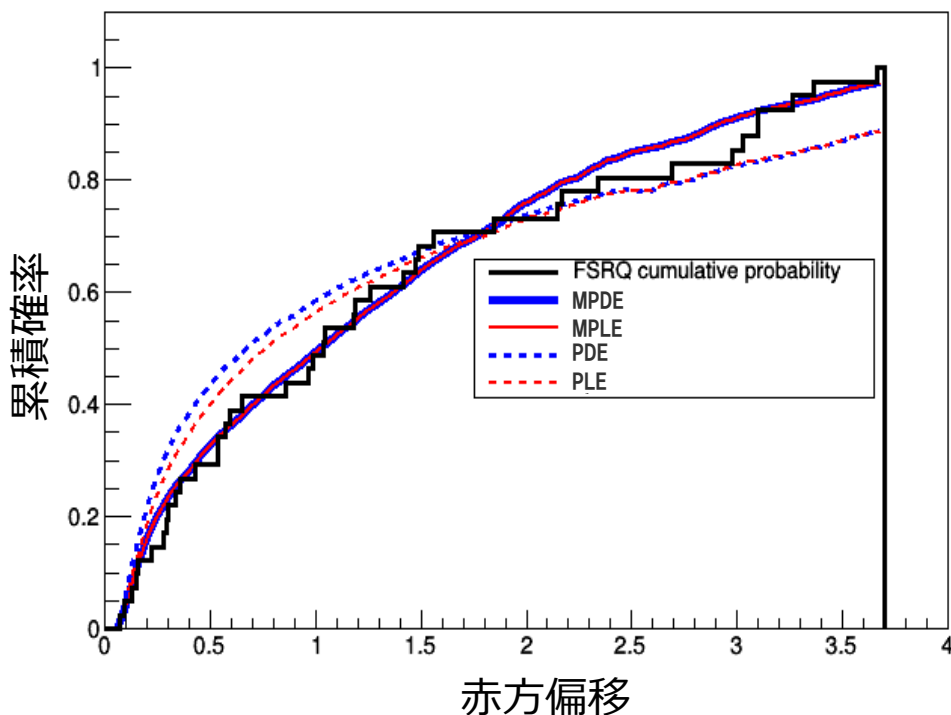
③

④

# KS検定

実データとフィットした結果の間にどれほどの有意差があるかどうかを検定する

cumulative probability distribution (FSRQ)



光度関数	$KS_Z(\%)$	$KS_L(\%)$
PDE	25.33	12.43
PLE	53.86	36.93
MPDE	95.35	86.52
MPLE	95.35	86.48



優位確率の低いPDE, PLE  
モデルは棄却

①

②

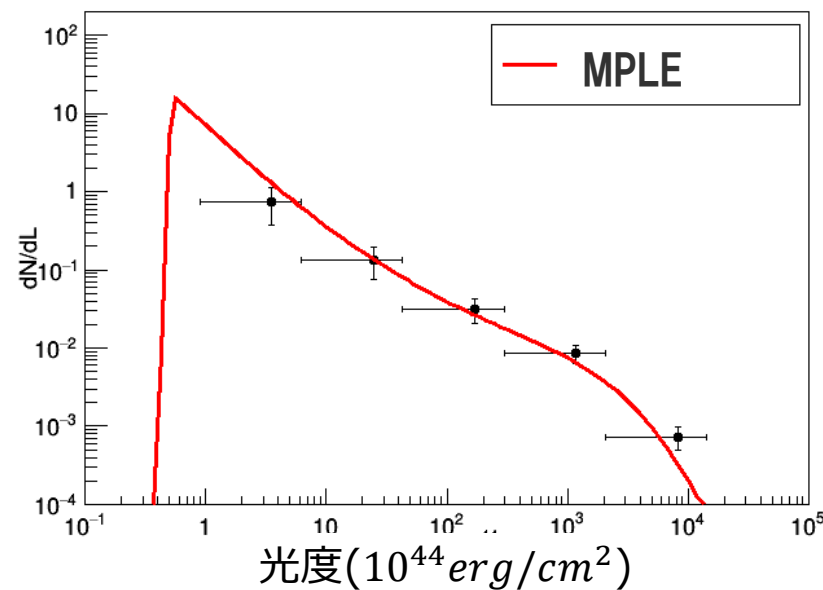
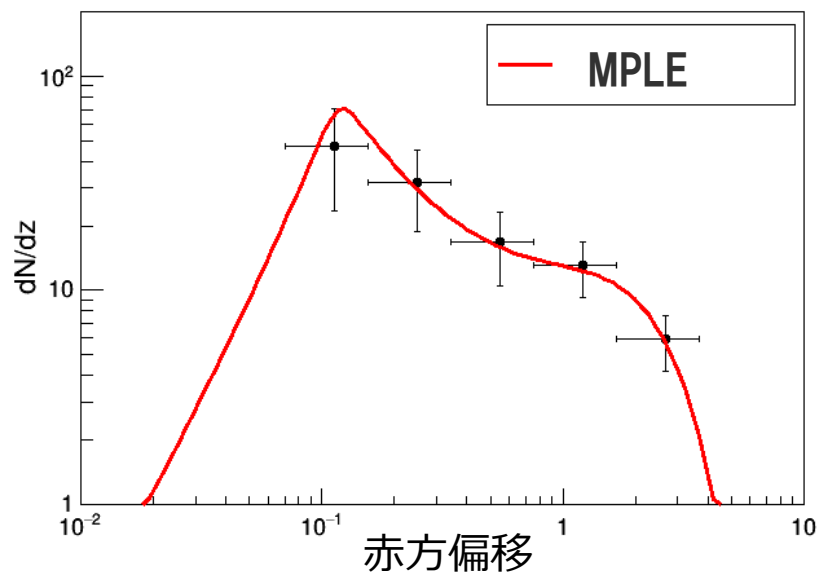
③

④

# 赤方偏移・光度分布

全天に存在するFSRQのうち、ある赤方偏移範囲(またはある光度範囲内)に存在するものの数を示したもの

(例) MPLEモデルの場合



プロット点：実データ  
赤線：光度関数からの予想曲線

①

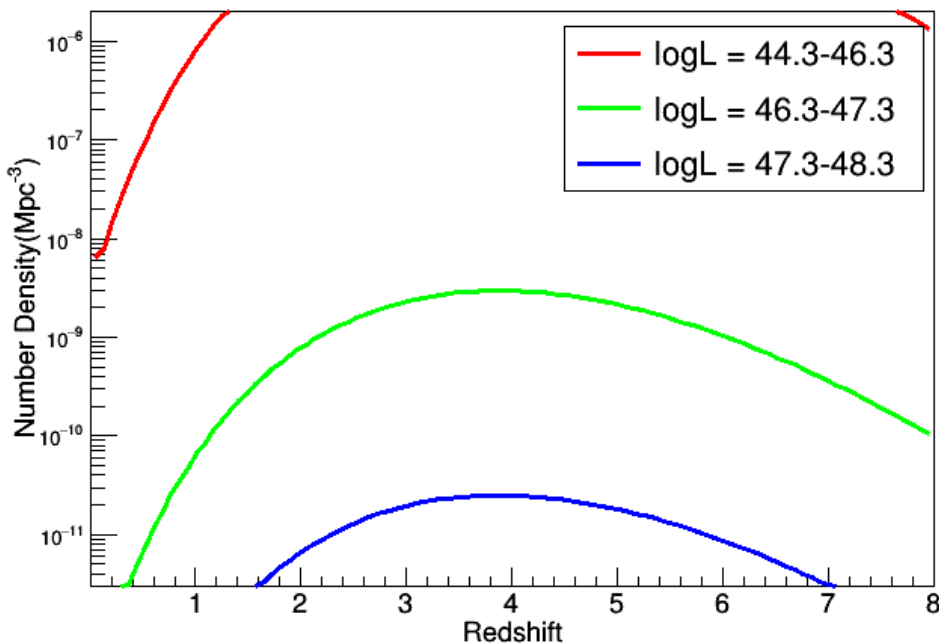
②

③

④

## 3, Results

## FSRQの数密度分布

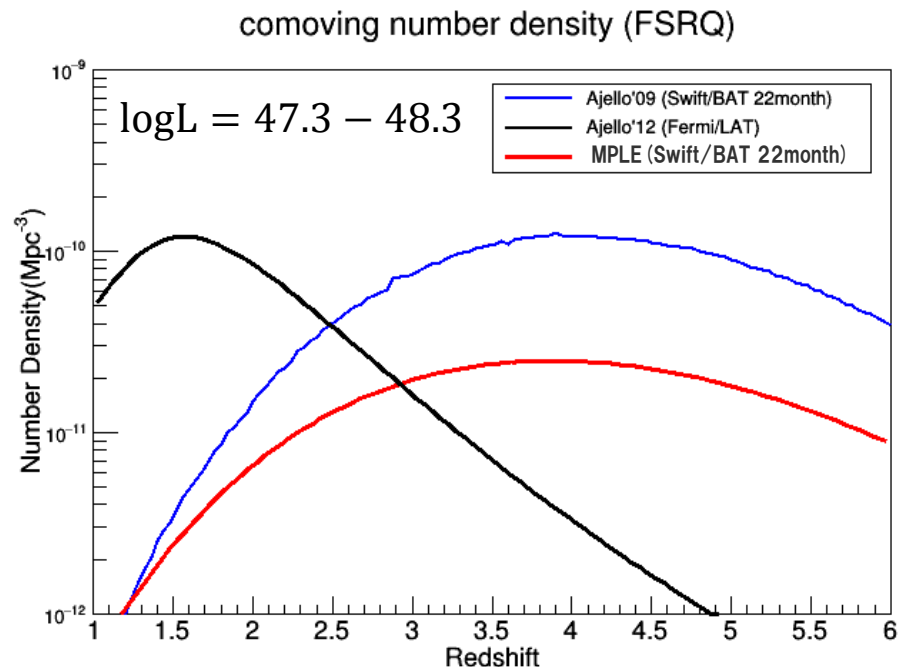


## Ajelloモデルとの比較

- (黒線: Ajello+'12のGLFモデル)
- (青線: Ajello+'09のXLFモデル)
- (赤線: 自分のMPLEモデル)

FSRQの数密度分布はAjello+'09  
とほぼ同じところにピークを持つ

MPLEモデルでの数密度分布  
(点線: LFモデルからの予想曲線)  
(エラーバー: 観測点)



## まとめ

- 最新の Swift/BAT 天体カタログを用いて、ブレーザーの宇宙論的進化過程を決定
- FSRQサンプルから光度関数を構築
  - FSRQの数密度分布のピークは Ajello+'09 の結果と大きくは異なる
  - X線とガンマ線で別の種族のFSRQを見ているのか？  
今回のFSRQサンプルのうち、Fermi衛星で検出されていないのが約3分の1存在

## 今後

- 得られた光度関数から、ブレーザーの宇宙X線・MeVガンマ線背景放射への寄与を解明する
- 各FSRQのSEDなどから、X線FSRQサンプルとガンマ線FSRQサンプルに違いがあるか調査する

**以下、非表示スライド**

# 9種類の光度関数モデル

光度関数モデルとして、既に提唱されているものを用いる

	Single powerlaw (1pow)	Broken powerlaw (2pow)
<b>PLE</b> 光度進化	$\frac{A}{L_*} \left( \frac{L_X}{L_* (1+z)^k} \right)^{-\gamma_2}$	$\frac{A}{\ln(10) L_X} \left[ \left( \frac{L_X}{L_* (1+z)^k} \right)^{\gamma_1} + \left( \frac{L_X}{L_* (1+z)^k} \right)^{\gamma_2} \right]$
<b>PDE</b> 密度進化	$\frac{A}{L_*} \left( \frac{L_X}{L_*} \right)^{-\gamma_2} \times (1+z)^k$	$\frac{A}{\ln(10) L_X} \left[ \left( \frac{L_X}{L_*} \right)^{\gamma_1} + \left( \frac{L_X}{L_*} \right)^{\gamma_2} \right] \times (1+z)^k$
<b>MPL</b> ( $\gamma \neq 0$ )	$\frac{A}{L_*} \left( \frac{L_X}{L_* (1+z)^{k+\gamma z}} \right)^{-\gamma_2}$	$\frac{A}{\ln(10) L_X} \left[ \left( \frac{L_X}{L_* (1+z)^{k+\gamma z}} \right)^{\gamma_1} + \left( \frac{L_X}{L_* (1+z)^{k+\gamma z}} \right)^{\gamma_2} \right]$
<b>MPDE</b> ( $\gamma \neq 0$ )	$\frac{A}{L_*} \left( \frac{L_X}{L_*} \right)^{-\gamma_2} \times (1+z)^{k+\gamma z}$	$\frac{A}{\ln(10) L_X} \left[ \left( \frac{L_X}{L_*} \right)^{\gamma_1} + \left( \frac{L_X}{L_*} \right)^{\gamma_2} \right] \times (1+z)^{k+\gamma z}$
<b>LDDE</b> 密度光度進化	-----	$\frac{A}{\ln(10) L_X} \left[ \left( \frac{L_X}{L_*} \right)^{\gamma_1} + \left( \frac{L_X}{L_*} \right)^{\gamma_2} \right] \times \left[ \left( \frac{1+z}{1+z_c(L_X)} \right)^{p_1} + \left( \frac{1+z}{1+z_c(L_X)} \right)^{p_2} \right]^{-1}$

①

②

③

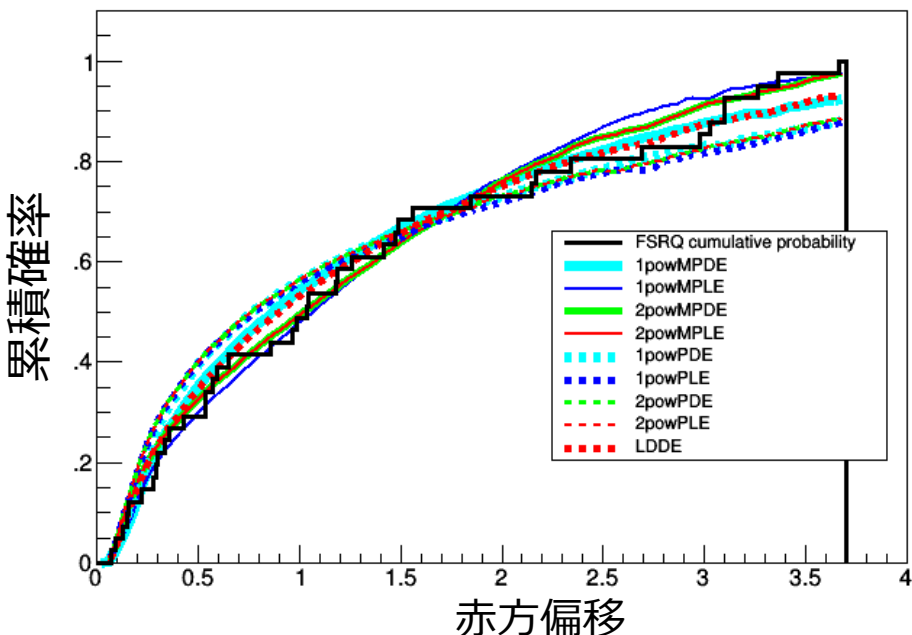
④



# KS検定

実データとフィットした結果の間にどれほどの有意差があるかどうかを検定する

cumulative probability distribution (FSRQ)



	$KS_z$	$KS_L$
1pow+PDE	0.5857	0.5709
1pow+PLE	0.5113	0.4533
1pow+MPDE	0.8732	0.9244
1pow+MPLE	0.8292	0.9123
2pow+PDE	0.2533	0.1243
2pow+PLE	0.5386	0.3693
2pow+MPDE	0.9535	0.8652
2pow+MPLE	0.9535	0.8648
LDDE	0.8717	0.8665

Broken Powerlaw の光度関数モデルの方が実データとの有意差が少ない

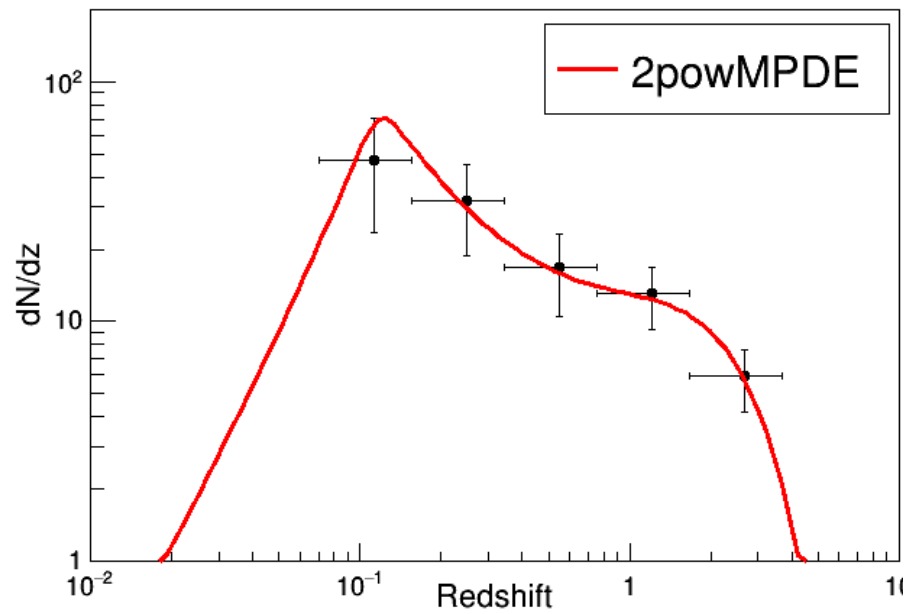
①

②

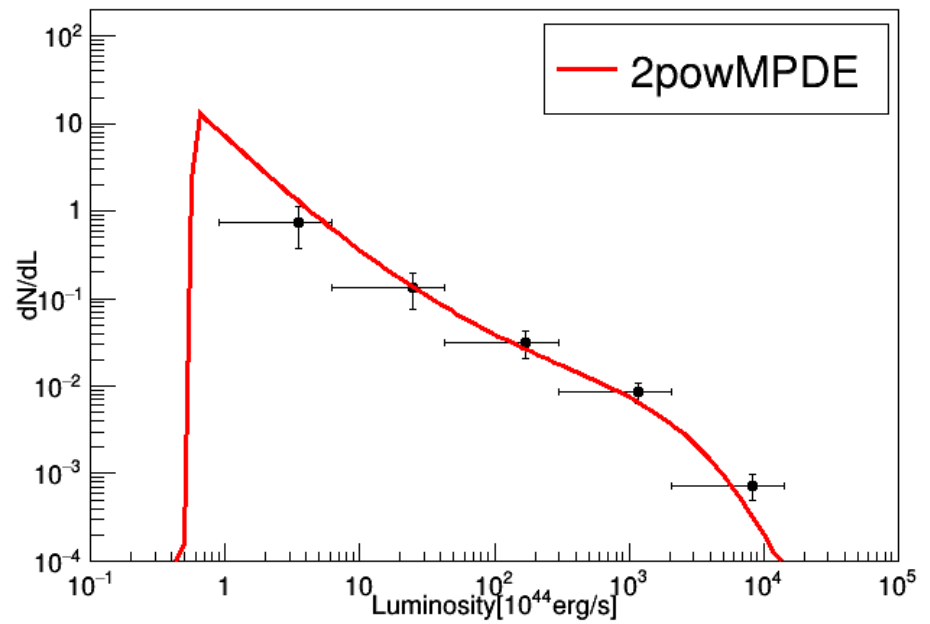
③

④

FSRQ\_redshift\_distribution



FSRQ\_luminosity\_distribution



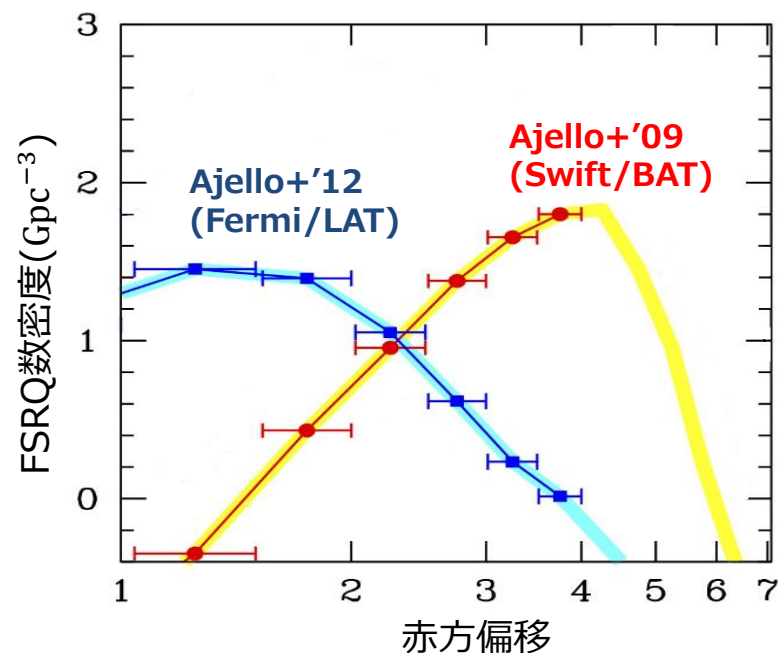
# FSRQの宇宙論的進化

Fermi衛星 ( $\gamma$ 線) のデータを使用  
(Ajello et al, 2012) <sup>1</sup>

- FSRQ 168個 をサンプルとして使用
- FSRQは  $z=1-2$  のあたりに多く存在

Swift衛星 (X線) のデータを使用  
(Ajello et al, 2009) <sup>2</sup>

- Swiftの22ヵ月間の観測で得られた26個のFSRQをサンプルとして使用
- FSRQは  $z=4$  のあたりに多く存在



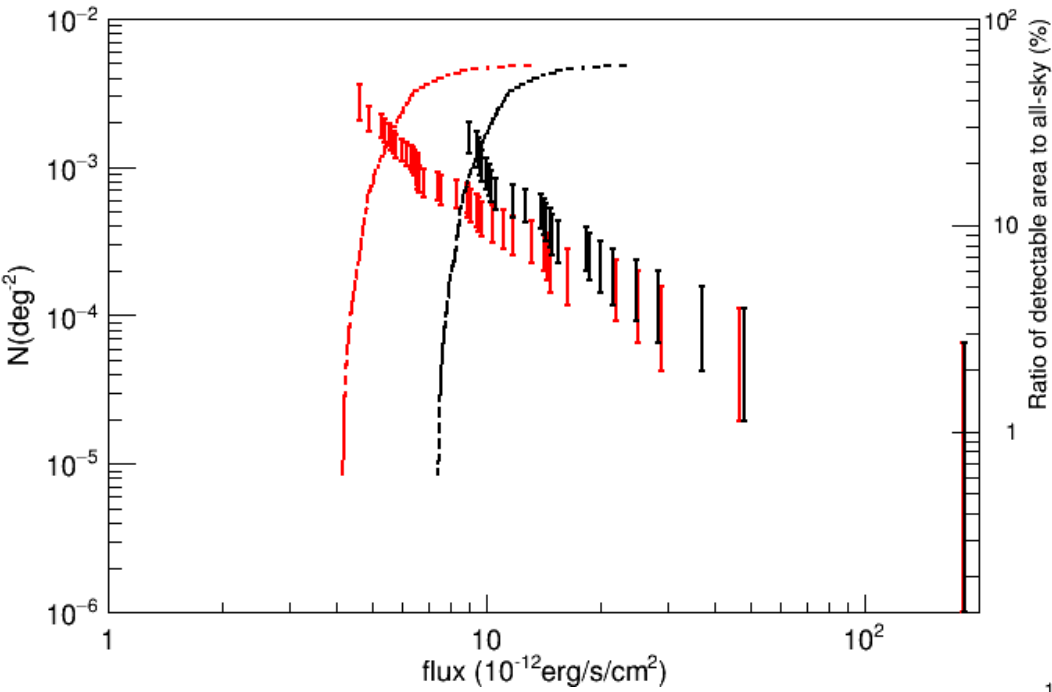
1. Ajello, M., Shaw, M. S., Romani, R. W., et al. 2012, *apj*, 751,108

2. Ajello, M., Constanante, L., Sambruna, R. M., et al. 2009, *apj*, 699,603

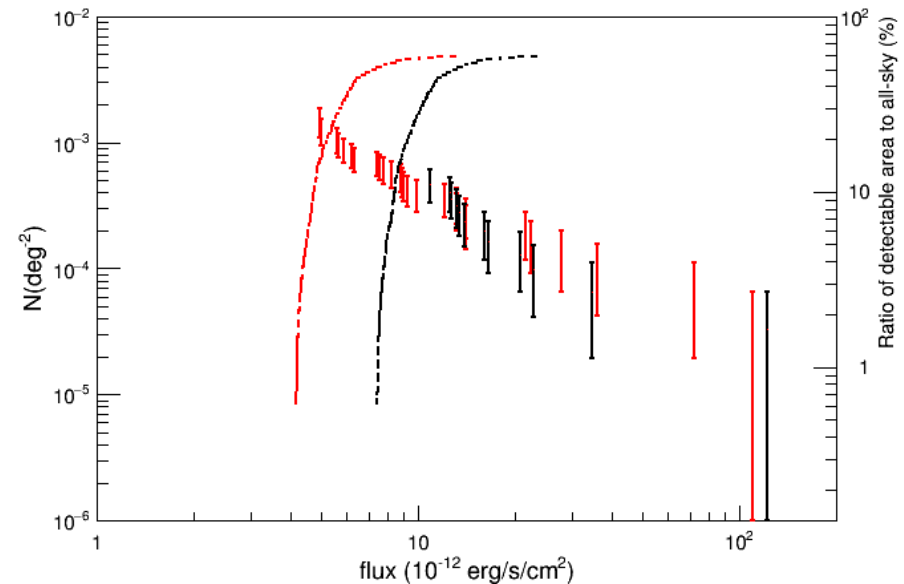
⇒ ガンマ線とX線で宇宙論的進化が異なる

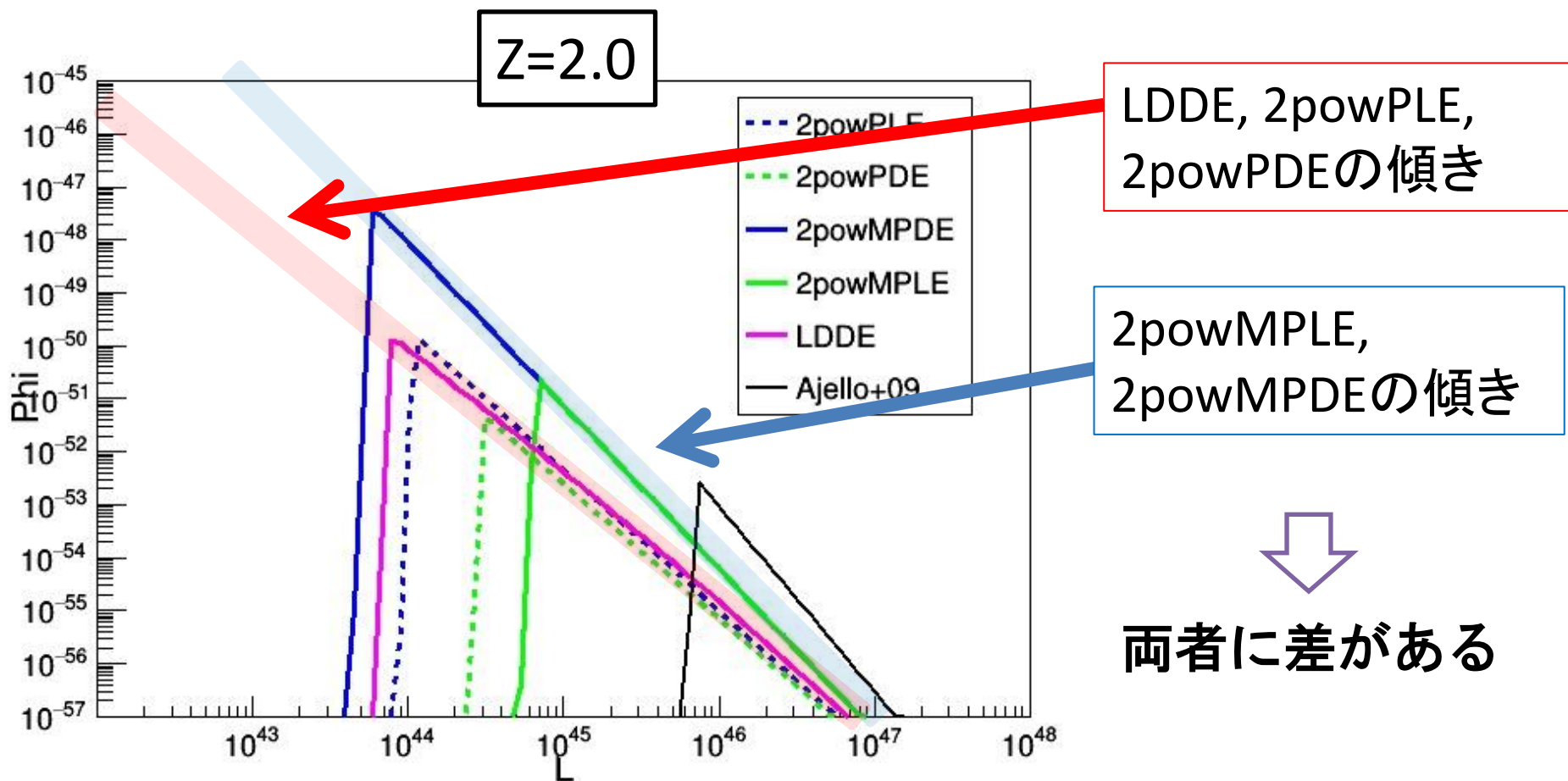
X線での研究結果にはサンプル数が少ないという問題を抱えている

FSRQ\_corrected\_logN-logS (red=70month, black=22month)



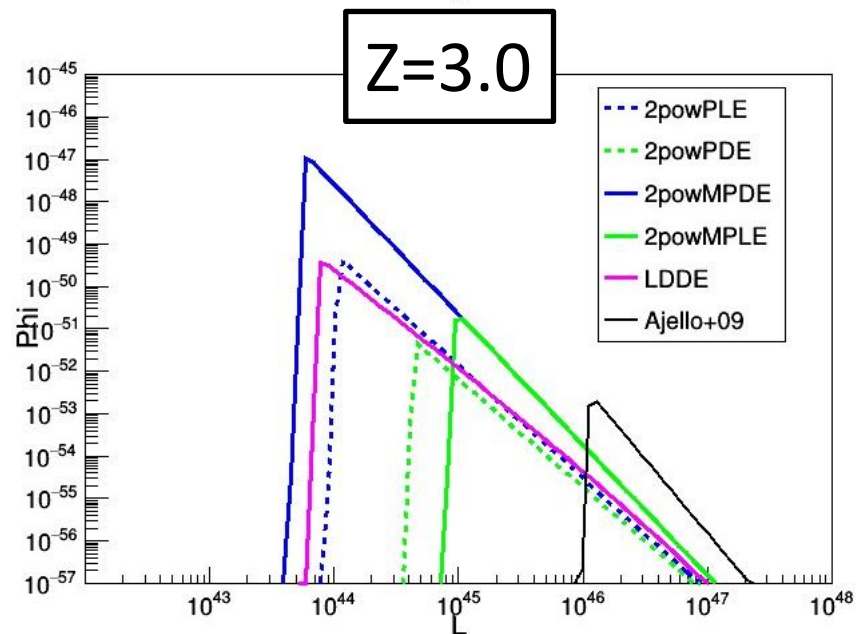
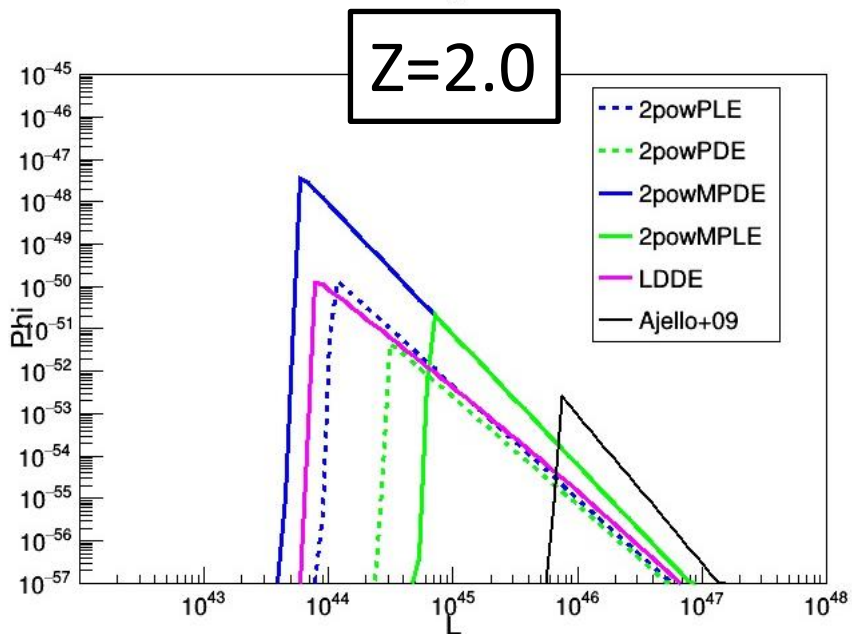
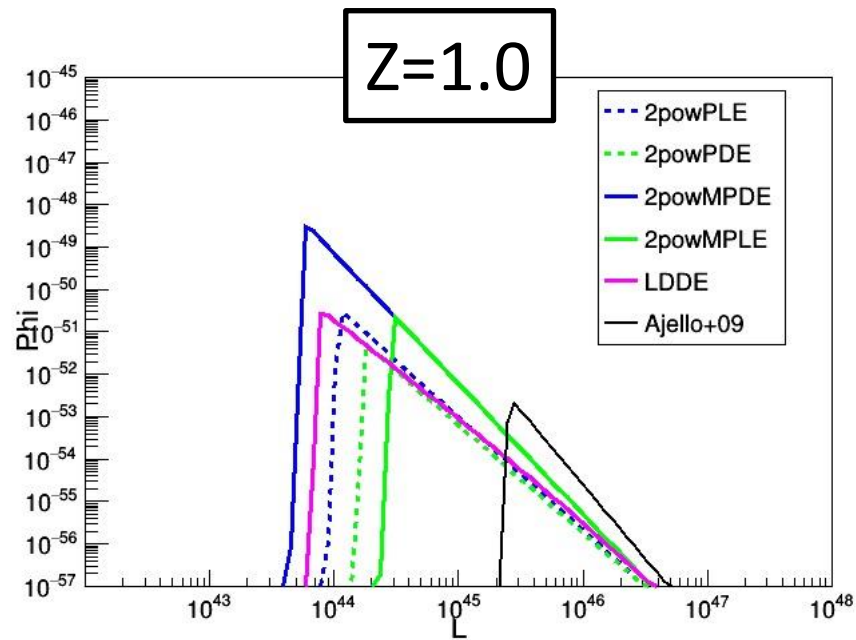
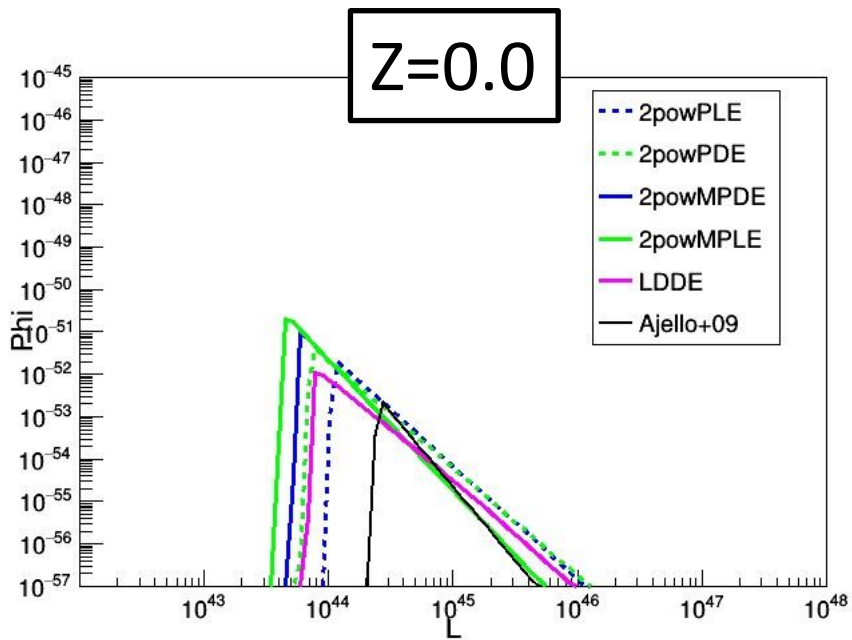
BL\_corrected\_logN-logS (black=observed, red=corrected)





各光度関数のベキ ( $\gamma_1$ の値)

	2powPDE	2powPLE	2powMPDE	2powMPLE	LDDE
$\gamma_1$	$1.65 \pm 0.15$	$1.54 \pm 0.16$	$2.07 \pm 0.35$	$2.07 \pm 0.35$	$1.22 \pm 0.02$



## 推定した光度関数

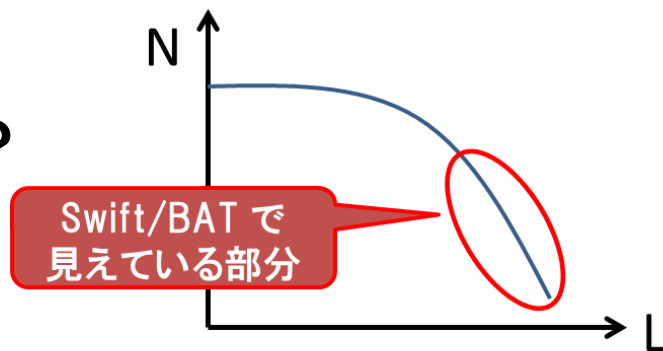
最尤法を用いて、光度関数の各パラメータを決定



光度関数モデルの2つのべきがほぼ同じ値に収束

これは Swift/BAT が比較的明るい  
ブレーザーしか観測できていないから？

今のままだと暗いFSRQの数が無限大  
になってしまう



⇒ 観測されたFSRQの最小光度より暗い側にFSRQは存在  
しないという条件を追加する

①

②

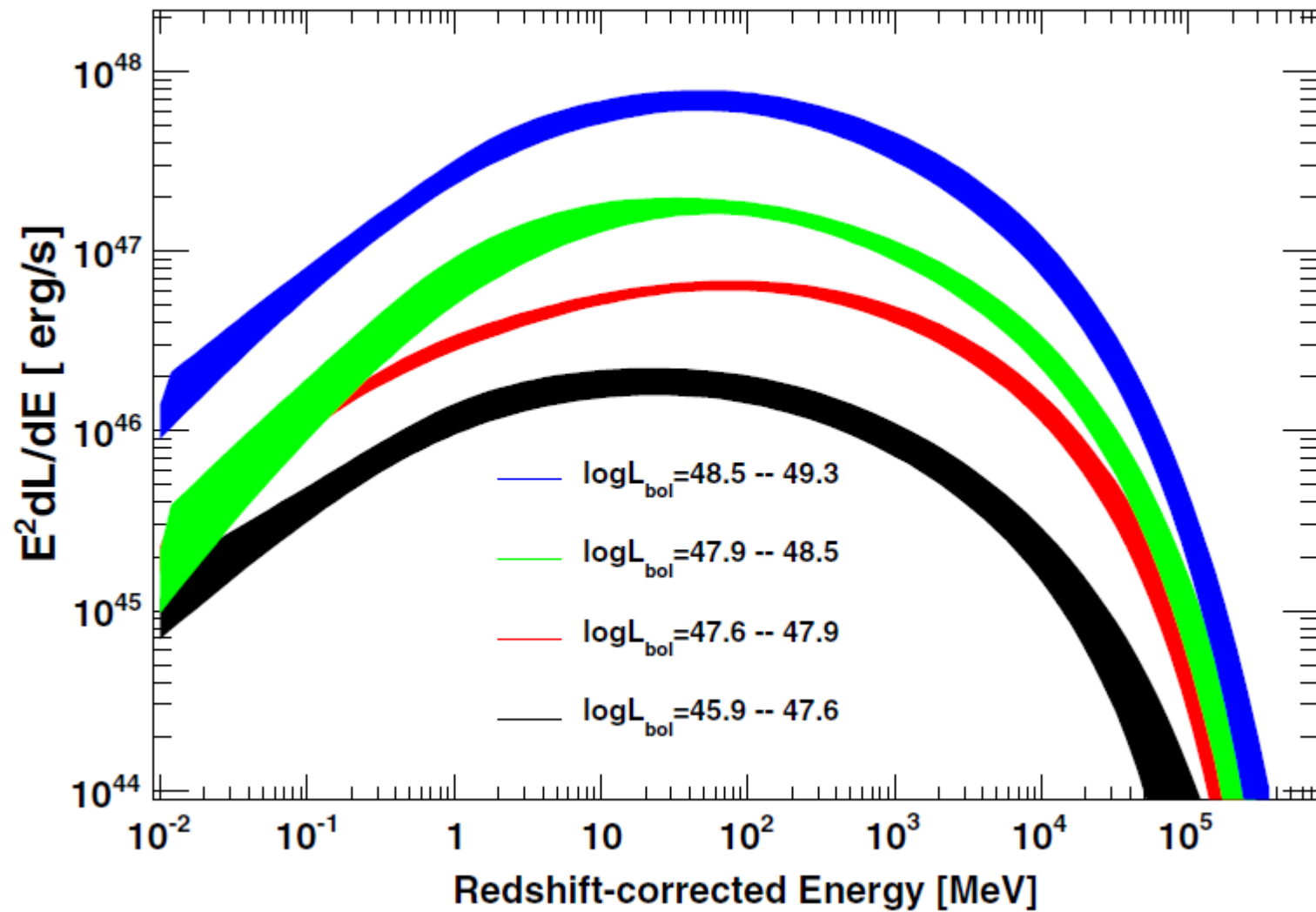
③

④

関数モデル	$A \times 10^{-7}$	$L_* \times 10^{44}$	$k$	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma$
2powPDE	$0.76 \pm 2.91$	$0.77 \pm 1.95$	$3.35 \pm 0.80$	-70.0	$1.54 \pm 0.16$	0.0
2powPLE	$0.85 \pm 3.24$	$0.70 \pm 1.73$	$1.32 \pm 0.24$	-70.0	$1.54 \pm 0.16$	0.0
2powMPDE	$1.56 \pm 2.62$	$0.58 \pm 0.47$	$9.12 \pm 1.33$	-70.0	$2.07 \pm 0.17$	$-0.79 \pm 0.2$
2powMPLE	$2.75 \pm 4.63$	$0.44 \pm 0.36$	$2.97 \pm 0.38$	-70.0	$2.07 \pm 0.22$	$-0.26 \pm 0.07$

関数モデル	$A \times 10^{-7}$	$L_* \times 10^{44}$	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$p1$	$p2$	$zc^*$	$\alpha$	$\mu$	$\sigma$
LDDE	$2.87 \pm 0.16$	$0.76 \pm 0.03$	-70.0	$1.22 \pm 0.025$	$-7.72 \pm 1.63$	$-3.61 \pm 1.30$	$0.12 \pm 0.03$	$0.39 \pm 0.03$	$2.53 \pm 0.0002$	$0.09 \pm 0.005$

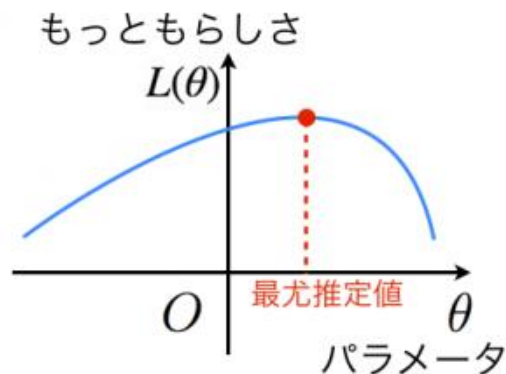




**最尤法** を用いて、光度関数の各パラメータを決定する

## 最尤法

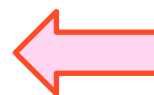
パラメータ  $\theta$  が  $\theta_0$  のときに、実際に観測した事象が起きる確率が  $L(\theta_0)$  なら、 $L(\theta_0)$  が最大となる  $\theta_0$  がもっともらしい最適なパラメータ



実測データが  $A$  のとき、

$$L(\theta_1) \rightarrow 0.09 \quad L(\theta_2) \rightarrow 0.98 \quad L(\theta_3) \rightarrow 0.4$$

- $\theta = \theta_1$  のとき実測値が  $A$  になる確率は 9%
- $\theta = \theta_2$  のとき実測値が  $A$  になる確率は 98%
- $\theta = \theta_3$  のとき実測値が  $A$  になる確率は 40%



## 最小二乗法

測定データとモデル関数の残差の2乗和が最少となるようなパラメータが最適な値

モデルと測定データのとの誤差が正規分布に従うときのみ使える

今回の「天体数の分布」ではポアソン分布に従う

➡ 最小二乗法が使えない！！

今回は最尤法を用いて、最適なパラメータを決定する

(最尤法に正規分布を仮定したのを入れると、最小二乗法に帰着する)

測定データ  $y$  はモデル関数  $f(x)$  と誤差  $\varepsilon$  の和で

$$y = f(x) + \varepsilon$$

とあらわされる。

今回の天体数の分布を上式に当てはめると、

(観測した天体数) =

(光度関数から求めた天体数) + (天体数の誤差)

だが、天体数は必ず離散的分布をする (天体数は必ず正の整数)  
そのため誤差も離散的分布になる

ポアソン分布

ポアソン分布を仮定すると、天体数の確率分布は

$$P = \frac{e^{-\mu} \mu^x}{x!}$$

$x$  : 見つかった天体数  
 $\mu$  : 実際に存在する天体数

微小な $dL, dz$ を仮定すると、 $\mu$ は

$$\mu = \frac{dN^2}{dLdz} \Delta L \Delta z$$

$\Delta L, \Delta z$ の範囲内で二個以上天体が見つからないほど $dL, dz$ が微小なら天体数確率分布は以下の2通りしか存在しない

$$\begin{cases} P_0 = e^{-\mu} & (\text{天体が1つも見つからない}) \\ P_1 = \mu e^{-\mu} & (\text{天体が一つだけ見つかる}) \end{cases}$$

よって尤度関数は

$$L = \prod_i^{N_{obs}} P_1(L_i, z_i) \prod_j P_0(L_j, z_j)$$

$S = \log L$  を考え、 $\Delta L, \Delta z \rightarrow 0$  まで極限とると

$$S = \sum_i^{N_{obs}} \log \frac{dN^2}{dL_i dz_i} - \int dz \int dL \frac{dN^2}{dL dz}$$

定義的に

$$\Phi(L, z) = \frac{dN^2}{dL dz}$$

なので、上式から

$$S = \sum_i^{N_{obs}} \log(\Phi) - N_{exp}$$

ただし、検出数の期待値にはSwift衛星の検出効率 $\Omega$ を考慮する必要があるので、

$$N_{exp} = \int_{z_{min}}^{z_{max}} dz \frac{dV}{dz} \int_{L_{min}}^{L_{max}} dL \Phi(L, z) \Omega(F_{(L,z)})$$