



Ia型超新星 SN2014Jの 「すざく」 sub MeV 観測レビューと 将来 MeV観測

Yukikatsu Terada (Saitama Univ)

with helps by

Keiich Maeda (Kyoto Univ, Japan), Yasushi Fukazawa (Hiroshima University),

Aya Bamba (U. Tokyo), Yoshihiro Ueda (Kyoto University),

Satoru Katsuda (Chou U.), Teruaki Enoto (Kyoto Univ.),

Tadayuki Takahashi (ISAS/JAXA), Toru Tamagawa (RIKEN),

Friedrich Ropke (Heidelberg Institute for Theoretical Studies, Germany),

Alexander Summa (Max-Planck-Institut für Astrophysik, Germany),

Roland Diehl (Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik, Germany)



2

MeVガンマ線で見える宇宙放射性同位体

MeV帯域は核準位が見える帯域

Isotope	Life time	Decay chain	Line energy (keV)
${}^7\text{Be}$	76 d	${}^7\text{Be} \rightarrow {}^7\text{Li}^*$	478
${}^{56}\text{Ni}$	8.8 d / 111d	${}^{56}\text{Ni} \rightarrow {}^{56}\text{Co}^* \rightarrow {}^{56}\text{Fe} + e^+$	158, 812; 847, 1238
${}^{57}\text{Ni}$	390d	${}^{57}\text{Co} \rightarrow {}^{57}\text{Fe}^*$	122
${}^{22}\text{Na}$	3.8 yr	${}^{22}\text{Na} \rightarrow {}^{22}\text{Ne}^* + e^+$	1275
${}^{44}\text{Ti}$	87 yr	${}^{44}\text{Ti} \rightarrow {}^{44}\text{Sc}^* \rightarrow {}^{44}\text{Ca} + e^+$	78, 68, 1157
${}^{26}\text{Al}$	1.0×10^6 yr	${}^{26}\text{Al} \rightarrow {}^{26}\text{Mg}^* + e^+$	1809
${}^{60}\text{Fe}$	3.8×10^6 yr	${}^{60}\text{Fe} \rightarrow {}^{60}\text{Co}^* \rightarrow {}^{60}\text{Ni}^*$	59, 1173, 1332
e^+	$\sim 10^5$ yr	$e^+ + e^- \rightarrow \text{Ps} \rightarrow \gamma\gamma$	511, <511

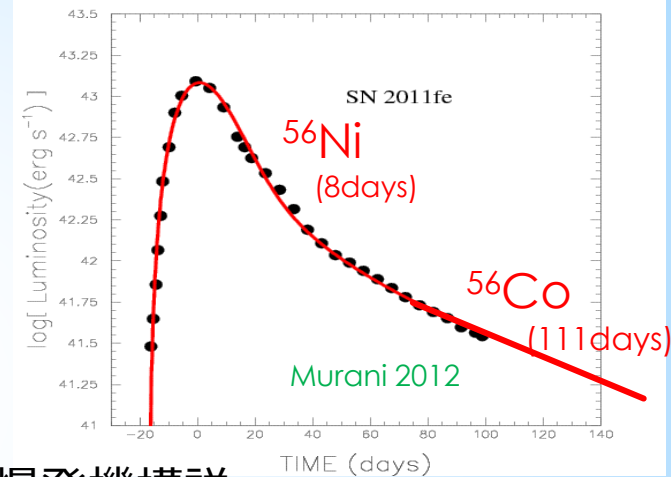
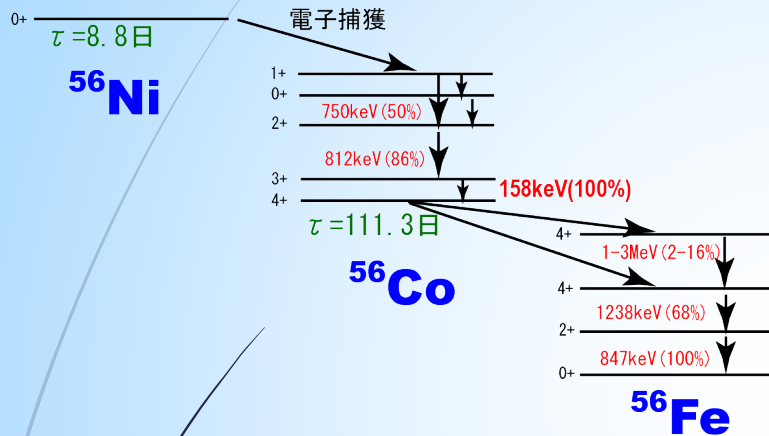
✓ ほとんどが超新星爆発起源

3

標準光源としての Ia 型超新星

Ia型超新星で生成される不安定核

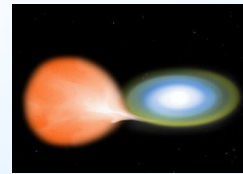
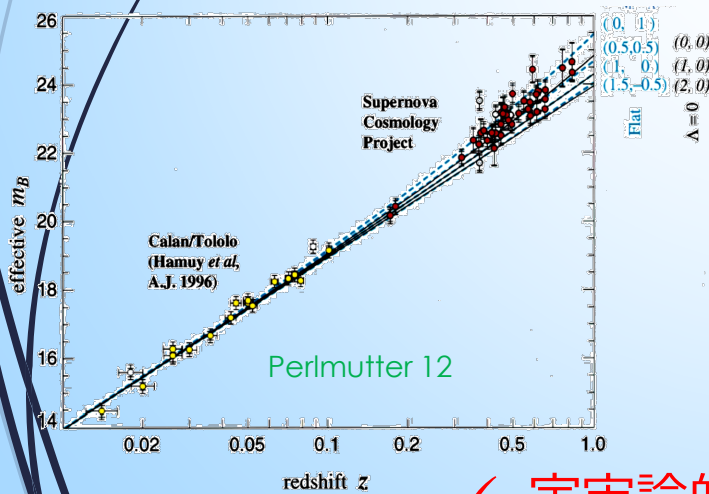
可視減光は ^{56}Ni や ^{56}Co がドライブ



最大B等級が標準光源に (Baade 38)

2種の爆発機構説

(白色矮星チャンドラセカール限界に関連)



Single degenerate (SD) ?
(Whelan&Iban 73, Nomoto 82, Hillebrandt&Niemeyer 00, etc)

or

Double degenerate (DD) ?
(Iban&Tutukov 84, Webbink 84 etc)

未解決問題

- ✓ 宇宙論的距離はしごの標準光源であるIa型超新星
- ✓ ^{56}Ni 崩壊の核ガンマ線が期待できる

4

SN Iaからの核ガンマ線放射の予想

Maeda+ 12 他

SN Ia理論モデル

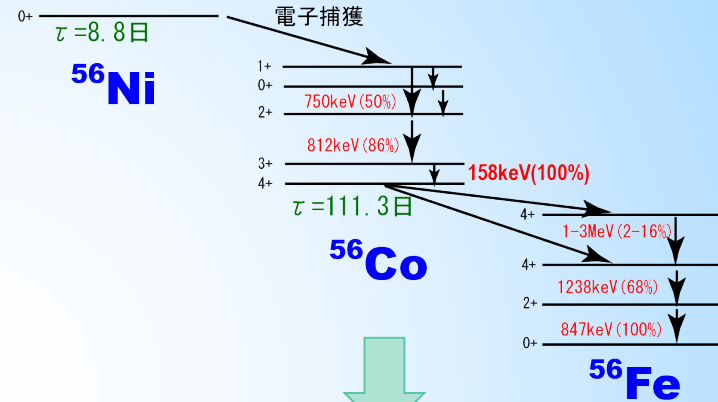
Lih-Shin 14

Type Ia Explosion Model Characteristics

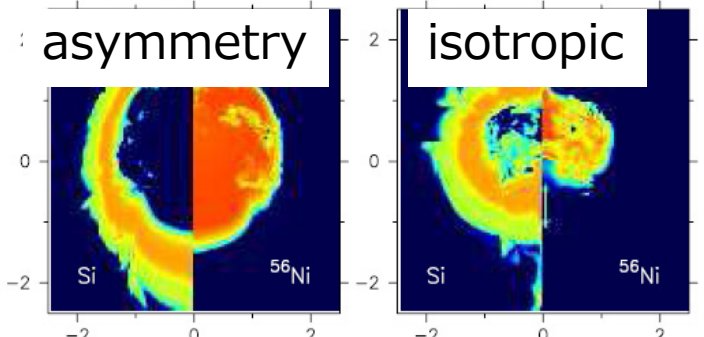
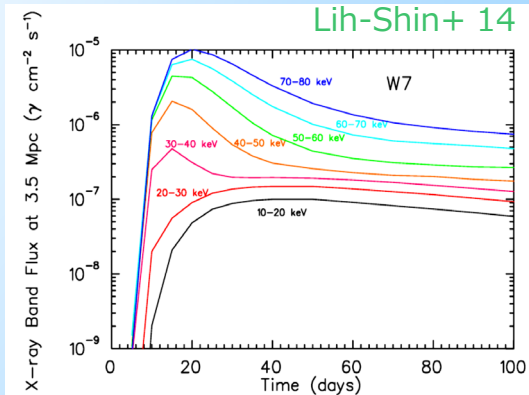
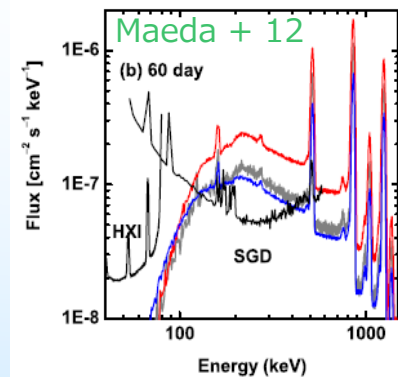
Model	Total Mass (M_{\odot})	^{56}Ni Mass (M_{\odot})	Explosion Energy (10^{51} erg)	Reference
W7	1.38	0.58	1.3	1
W7E	1.38	0.58	1.3	1
W7A	1.38	0.58	1.3	1
dd4	1.39	0.61	1.24	2
w7dn	1.37	0.62	1.6	3
w7dt	1.37	0.76	1.61	3
m36	1.39	0.59	1.51	4
dd202c	1.4	0.72	1.27	5
pdd54	1.38	0.17	1.02	6
det2	1.2	0.62	1.54	7
det2e2	1.4	0.63	1.44	7
det2e6	1.8	0.63	1.43	7
hed6	0.77	0.26	0.72	7
hed8	0.96	0.51	1.03	7
hecd	1.07	0.72	1.3	7

References. (1) Nomoto et al. (1984); (2) Woosley & Weaver (1991); (3) Yamaoka et al. (1992); (4) Höflich (1995); (5) Höflich et al. (1998b); (6) Höflich et al. (1995); (7) Höflich et al. (1996).

^{56}Ni & ^{56}Co 核ガンマ線放射・伝搬推定



エネルギースペクトル・ライトカーブ

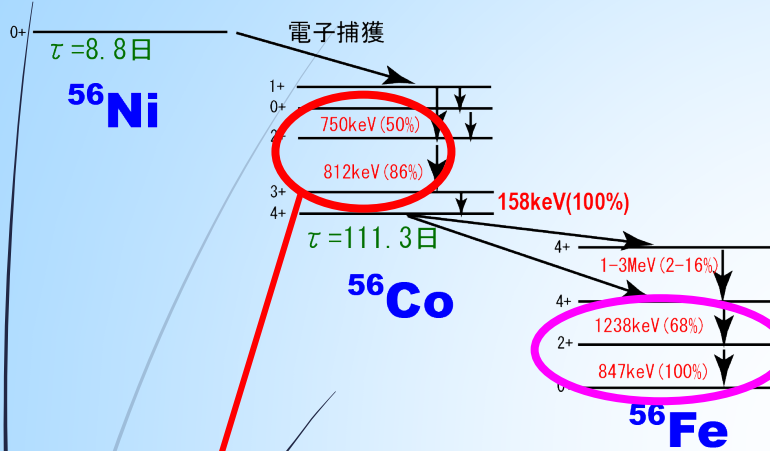


Kasen 09

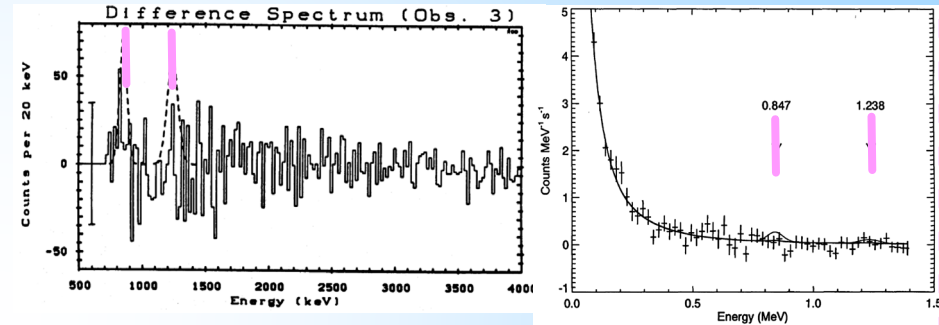
- ✓ 硬X線では難しく、軟ガンマ線観測が必須
- ✓ $10^{-7} - 10^{-6}$ ph/cm²/s @ 3.5Mpc 挑戦的!
- ✓ ToOはゆっくり(20-40 日後が狙い目)



5

これまでのSN Ia ^{56}Co ガンマ線観測

SN1991T @13.5Mpc with CGRO

COMPTTEL $< 3 \text{ e-}5 \text{ ph/cm}^2/\text{s}$ (Lichti 1994)OSSE $< 6.6 \text{ e-}5 \text{ ph/cm}^2/\text{s}$ (Leising 1995)

SN1993J (Ib? @3.5Mpc) with COMPTTEL

(Lichti 1996)

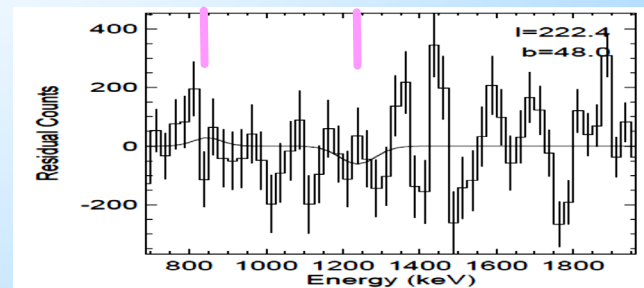
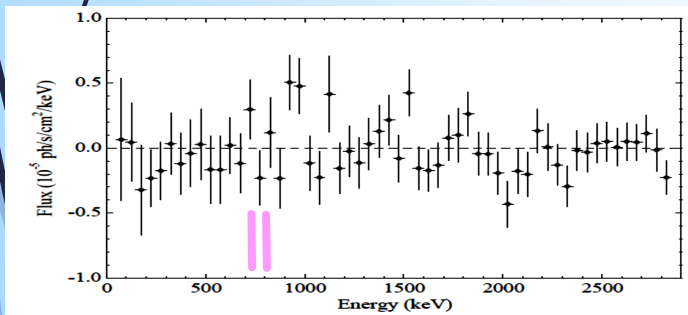
 $< 6.2 \text{ e-}5 \text{ ph/cm}^2/\text{s}$ for 847 keV $< 2.9 \text{ e-}5 \text{ ph/cm}^2/\text{s}$ for 1238 keV

SN1998bu @11.3Mpc with COMPTTEL

 $< 2.3 \text{ e-}5 \text{ ph/cm}^2/\text{s}$ (Georgii 2002)

SN2011fe @11.3Mpc with INTEGRAL

(Isern 2014)

 $< 7.1 \text{ e-}5 \text{ ph/cm}^2/\text{s}$ for 158 keV $< 2.3 \text{ e-}5 \text{ ph/cm}^2/\text{s}$ for 812 keV

(2014年までは) 観測量はすべて上限値



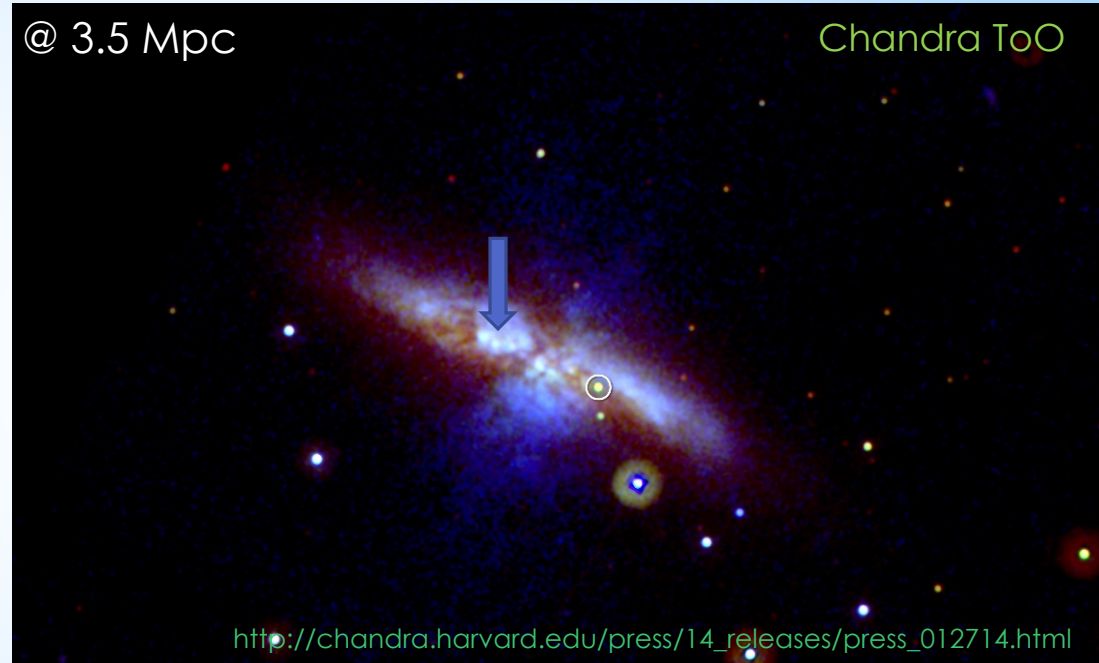
6

近傍 Ia型超新星 SN2014J

M82 に出現したIa型超新星 (21 Jan 2014; 1986年以来最も近い)
 [CBET#3792, ATEL #5786]

@ 3.5 Mpc

Chandra ToO



ToO observations with high energy instruments

Swift (18 ks) [ATEL #5809]

$< 4.2 \times 10^{-14} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (0.3-10 keV)

Chandra (47 ks) [ATEL #5851]

$< 1.4 \times 10^{-14} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (0.3-10 keV) = $2.1 \times 10^{37} \text{ erg s}^{-1}$

NuSTAR (1 Ms)

(*ULX contaminated*)

INTEGRAL (2+2 Ms ToO) [ATEL #5835, Churazov+14, Diehl+14]

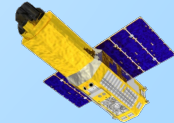
next slides

Suzaku (200 ks) [Terada+ 16]

our work

MAGIC (5 nights) [ATEL #5880]

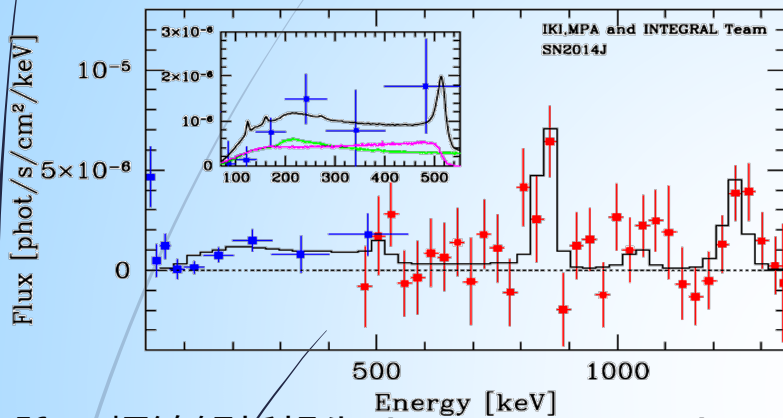
upper limit in TeV $< 1.6 \times 10^{-12} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ($> 300 \text{ GeV}$)



7

INTEGRALによる ^{56}Co 輝線 初検出!

^{56}Co 輝線の検出! (Churazov 14 Nature)


 $t = 50 - 100$ days

 847 keV at $(2.34 \pm 0.74) \times 10^{-4}$ ph/cm²/s

 1238 keV at $(2.78 \pm 0.74) \times 10^{-5}$ ph/cm²/s

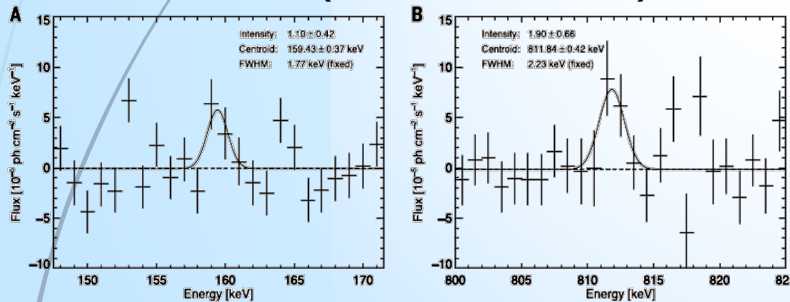
“Canonical” Model (SD) と無矛盾

ただし DD model も 排除しない

一方、Chandra観測では SD model は否定的

- No X-rays after explosion = 低密度環境 (Margutti 14)
- No Super-soft source before explosion (Nielsen 14)

^{56}Ni 輝線解析報告 (Diehl 14 Science)


 $t = 20$ days

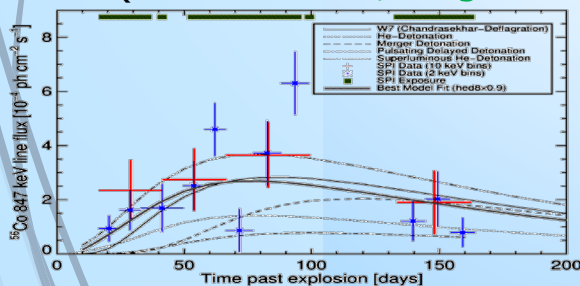
 152 keV at $(1.10 \pm 0.42) \times 10^{-4}$ ph/cm²/s

 812 keV at $(1.90 \pm 0.66) \times 10^{-5}$ ph/cm²/s

輝線幅は小さい

“unusual” explosion (DD?)

時間発展 (Diehl 14 A&A, Siegert & Diehl 15)


 $\rightarrow \text{Ni mass} \sim 0.5-0.6 M_{\odot}$

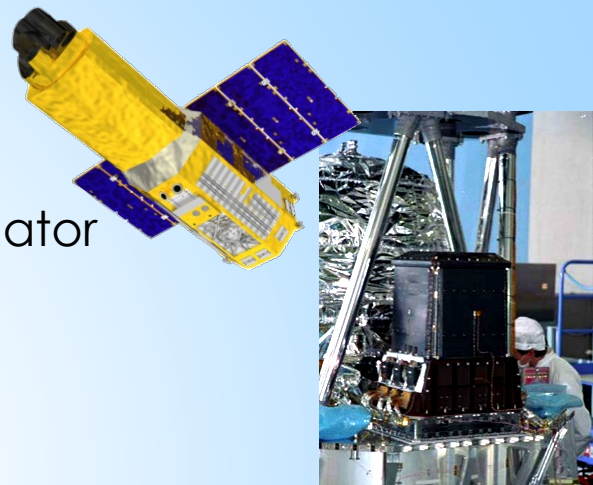
“Cannot discriminate models between SD and DD”

- ✓ MeVガンマ線観測として、重要な一歩。
- ✓ SD/DDを区別できるデータの質ではない

「すざく」HXDによる観測

「すざく」Hard X-ray Detector (HXD)

- 帯域: 10 – 600 keV
- PIN Si diode + GSO/BGO phos-witch scintillator (光電吸収体でエネルギー計測)



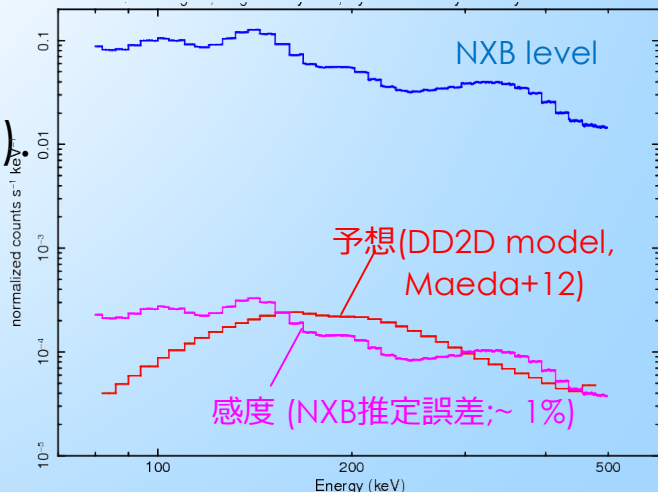
Sub MeV 連続成分の絶対光度測定がゴール

2014年1月出現 SN2014Jの ToO 観測

- 「すざく」での観測可能時期: 2014年3月 ~
- ガンマ線で晴れわたる時期 (爆発後 1-2ヶ月)
- 12:18 30 March 2014 ~ 17:23 03 April 2014 UT (200k sec)

予想光度

- 100 keV以下の硬X線は ULX混入 (NuSTAR)
- Maeda et al 12の予想は 200 keVピーク, 放射レベルは感度ギリギリ
- 過去4回のすざく M82観測は未検出 (あれば SN2014Jだろう)

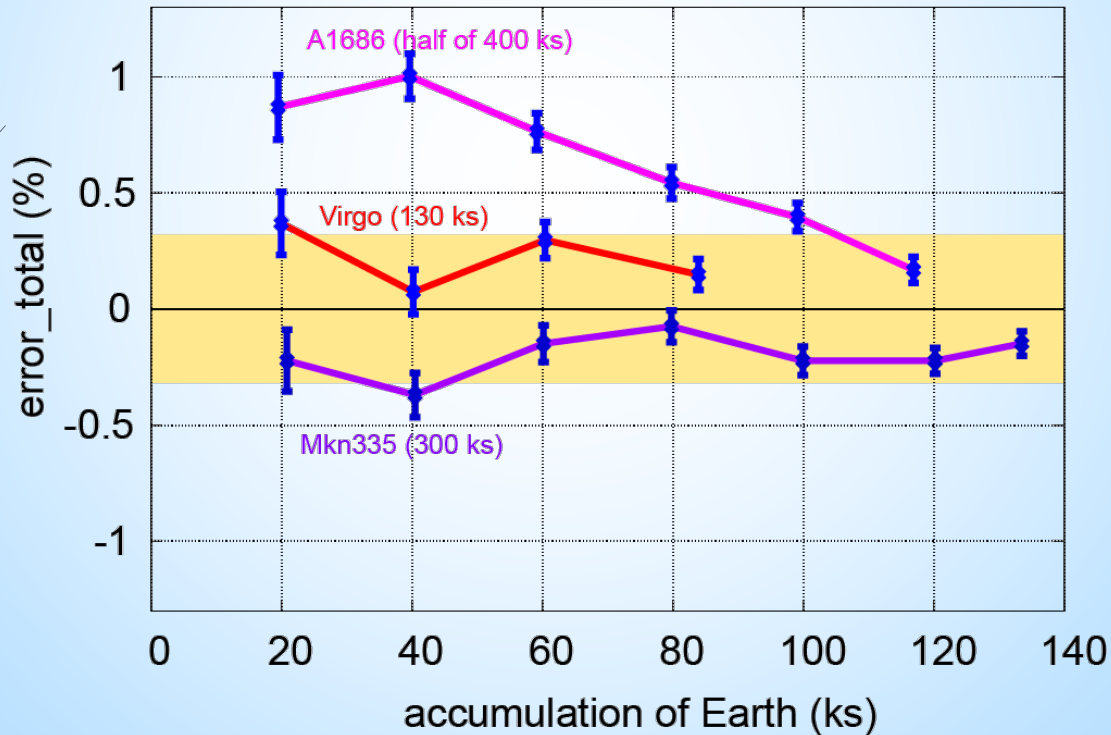


「すざく」HXDのNXB系統誤差

Key point: 変動するNon X-ray background(NXB) がどの精度で見積もれるか?

- ✓ 1) 地食中は1%をきるレベルで合わせ込まれている (Fukazawa et al 2009)
- ✓ 2) 地食で合わせ込んだNXBが、(地食外である)観測中もどれだけ有効か?

NXB reproducibility (100 – 300 keV)
Virgo Cluster, MKN355, A1686



- ✓ 地食を 100 k sec 以上確保できる観測時間を要求
- ✓ 200 ksec の観測時間が認められ、観測



10

「すざく」HXDのNXB系統誤差

10年分のHXD/GSO blank sky を用いて系統的に調査(Terada+16)

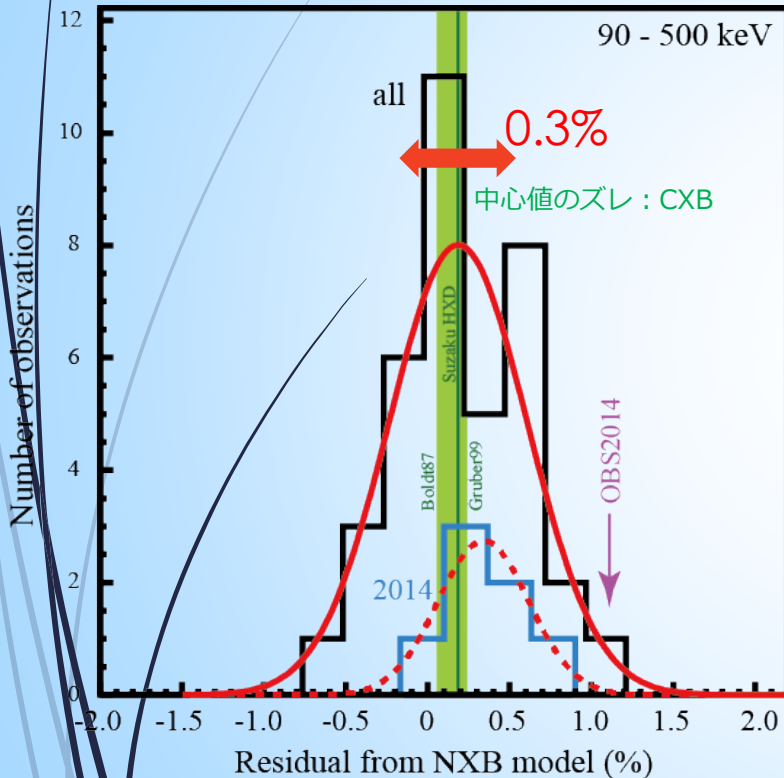
(120 ksec以上の**140**観測中、“PIN >50 keV countがNXB3.5%未満”等の条件で選出した**37** 観測 **4.5 Msec**)
(+ 2014年観測)

OBSID	Target Name	Position ^a (R.A., Decl.)	Obs. Date ^b	Exp. ^c (ks)	Res. ^d (%)
101012010	PERSEUS CLUSTER	(49.9436, 41.5175)	2006 Aug 29	133.2	-0.044
402015010	LS 5039	(276.5633, -14.9109)	2007 Sep 09	167.7	0.429
402033010	SIGMA GEM	(115.843, 28.9438)	2007 Oct 21	116.2	0.000
404001010	AE AQUARI	(310.0451, -0.9346)	2009 Oct 16	126.9	-0.036
408019020	V1223 SGR	(283.7576, -31.1629)	2014 Apr 10 ^f	137.3	0.464
408024030	V2301 OPH	(270.1437, 8.1764)	2014 Apr 05 ^e	53.2	0.103
408029010	V1159 ORI	(82.2495, -3.563)	2014 Mar 16 ^e	177.9	0.157
500010010	RXJ 0852-4622 NW	(132.2926, -45.6157)	2005 Dec 19	214.8	-0.299
502046010	SN1006	(225.7268, -41.9424)	2008 Feb 25	171.4	0.347
502048010	47 TUCANAE	(6.2112, -71.9961)	2007 Jun 10	104.8	0.161
502049010	HESS J1702-420	(255.6874, -42.0709)	2008 Mar 25	131.4	-0.076
503085010	TYCHO SNR	(6.3139, 64.1469)	2008 Aug 04	269.6	0.923
503094010	SNR 0049-73.6	(12.7817, -73.3677)	2008 Jun 12	100.7	0.077
506052010	G352.7-0.1	(261.9227, -35.1119)	2012 Mar 02	159.7	-0.680
507015030	IC 443	(94.3026, 22.7461)	2013 Mar 31	106.3	0.700
508003020	W44 SOUTH	(284.0546, 1.2208)	2014 Apr 09 ^e	27.7	-0.103
508006010	W28 SOUTH	(270.2522, -23.558)	2014 Mar 22 ^e	33.5	0.690
508017010	RX J1713.7-3946 NE	(258.6449, -39.4419)	2014 Feb 26 ^e	97.8	0.601
508072010	0509-67.5	(77.4163, -67.5163)	2013 Apr 11	154.2	1.006
701003010	IRAS13224-3809	(201.327, -38.416)	2007 Jan 26	158.5	-0.212
701031010	MARKARIAN 335	(1.5539, 20.2624)	2006 Jun 21	131.7	0.138
701047010	MRK 1	(19.06, 33.0289)	2007 Jan 11	117.8	0.041
701056010	PDS 456	(262.0807, -14.2604)	2007 Feb 24	164.3	-0.413
702059010	3C 33	(17.2445, 13.2796)	2007 Dec 26	99.2	0.690
703048010	PKS 0528+134	(82.7307, 13.5905)	2008 Sep 27	126.4	0.607
703049010	3C279	(194.0685, -5.7338)	2009 Jan 19	77.5	0.657
704009010	NGC 454	(18.511, -55.3853)	2009 Apr 29	106.0	0.491
704062010	NGC3516	(166.8656, 72.6213)	2009 Oct 28	178.2	0.578
707035020	PDS 456	(262.0805, -14.2617)	2013 Mar 03	138.1	0.090
708016010	MKN 335	(1.5767, 20.2085)	2013 Jun 11	116.6	0.140
800011010	A3376 WEST RELIC	(90.0415, -39.9946)	2005 Nov 07	105.1	-0.104
801064010	NGC 4472	(187.4441, 8.005)	2006 Dec 03	96.4	0.253
802060010	ABELL 2029	(227.4644, 6.0238)	2008 Jan 08	139.2	0.349
803053010	ABELL S753 RELIC	(211.0241, -34.0331)	2009 Jan 07	92.3	0.874
808043010	FORNAX A EAST LOBE	(51.0149, -37.2799)	2013 Aug 02	125.7	0.094
808063010	ESO318-021	(163.2697, -40.3328)	2013 Dec 13	125.2	-0.496
809119010	ABELL2345EAST	(321.8675, -12.1557)	2014 Apr 30 ^f	83.0	0.161

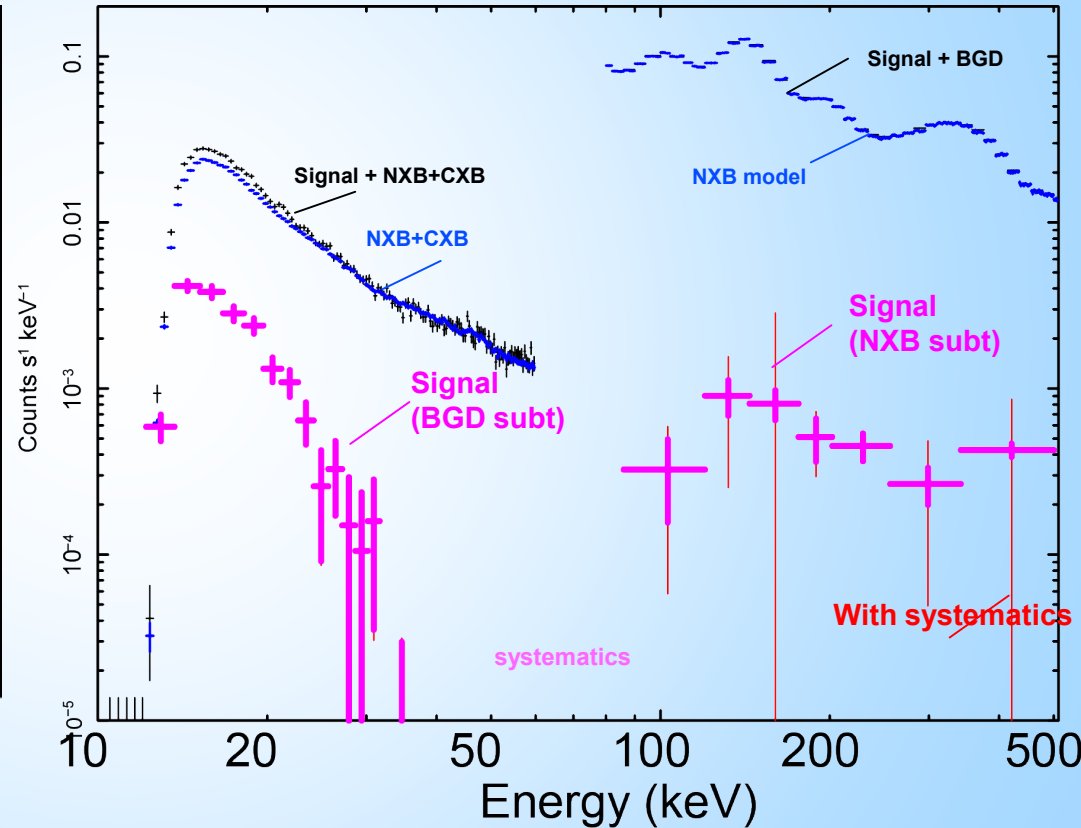
SN2014J の「すざく」観測結果

Terada+16

NXB 再現性結果 (37観測)



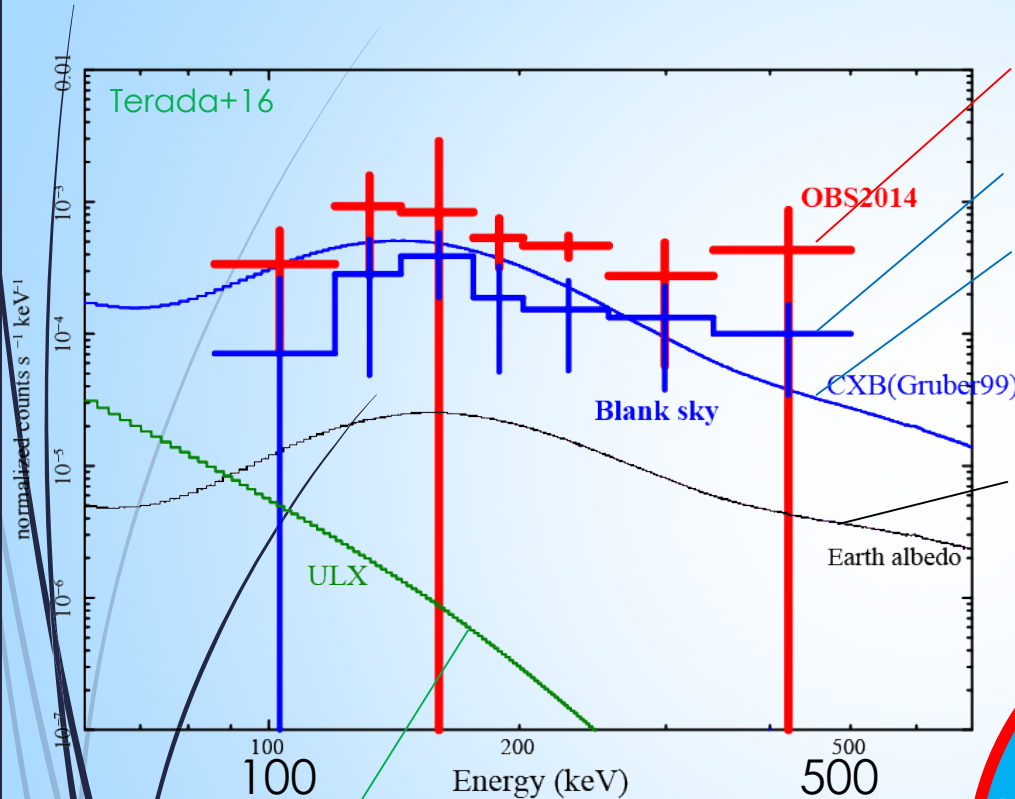
すざくHXDによるSN2014Jのスペクトル



- NXB 系統誤差: $1\sigma \sim 0.3\%$.
- 検出信号は NXB の $\sim 1.0\%$ レベル(予想通り)
 - ✓ HXD GSO で $2\sim 3\sigma$ 程度のマージナルな軟ガンマ線放射を検出

12

NXB以外の混入 background



ULX (1%)
 すぐく HXD PIN 実測から外挿

GSO 生シグナル

4.5Ms blank sky (49%)

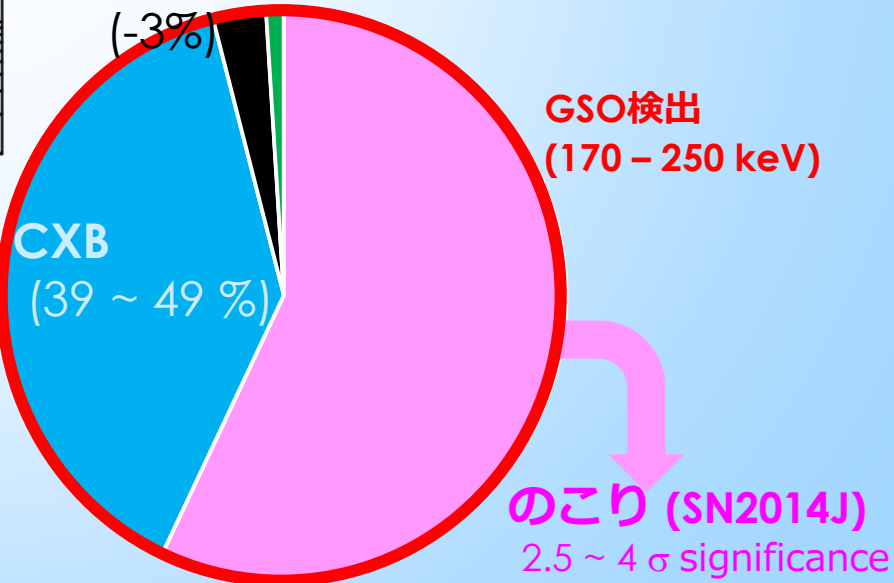
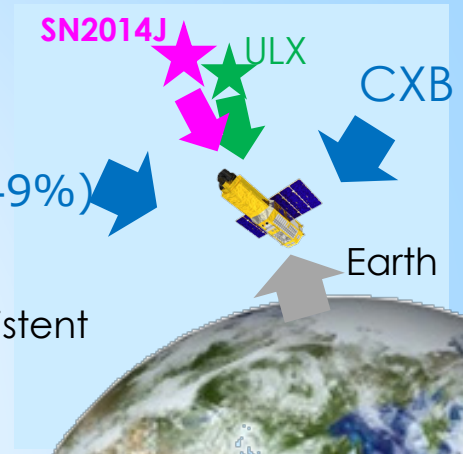
CXB model (39%)

両者 consistent

地球アルベドがNXB推定時に混入(-3%)

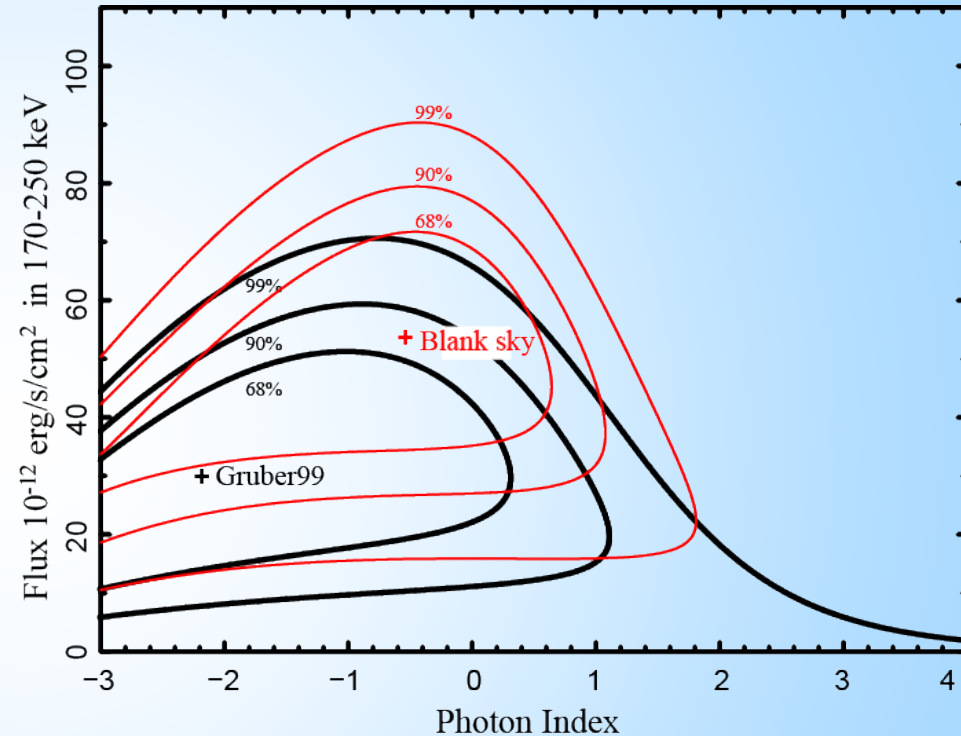
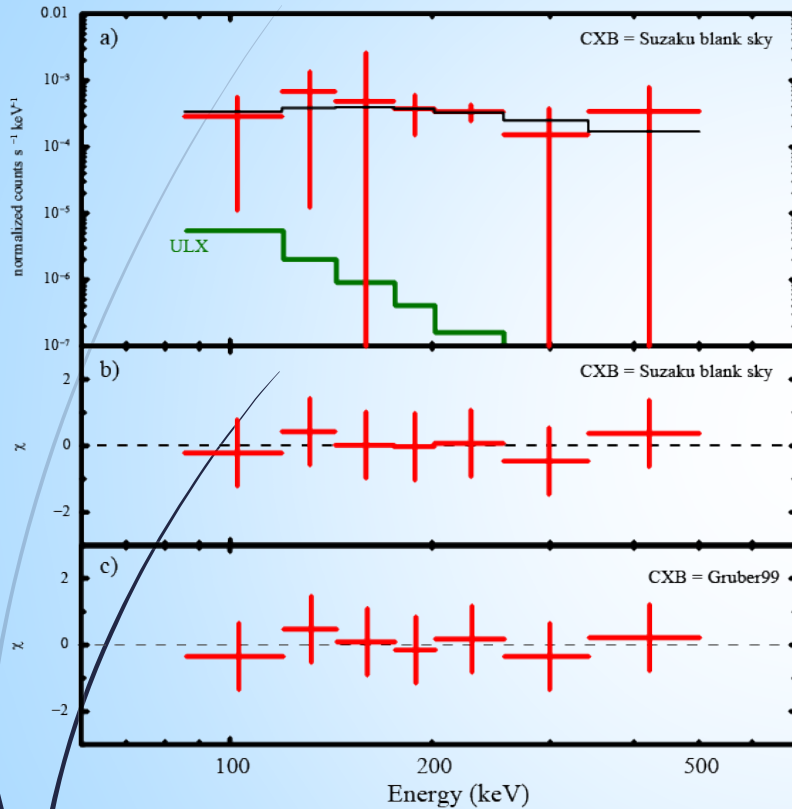
Albedo ULX (1%)

(-3%)

GSO検出
(170 - 250 keV)CXB
(39 ~ 49%)のこり (SN2014J)
2.5 ~ 4σ significance

軟ガンマ線フラックスの推定

Terada+16



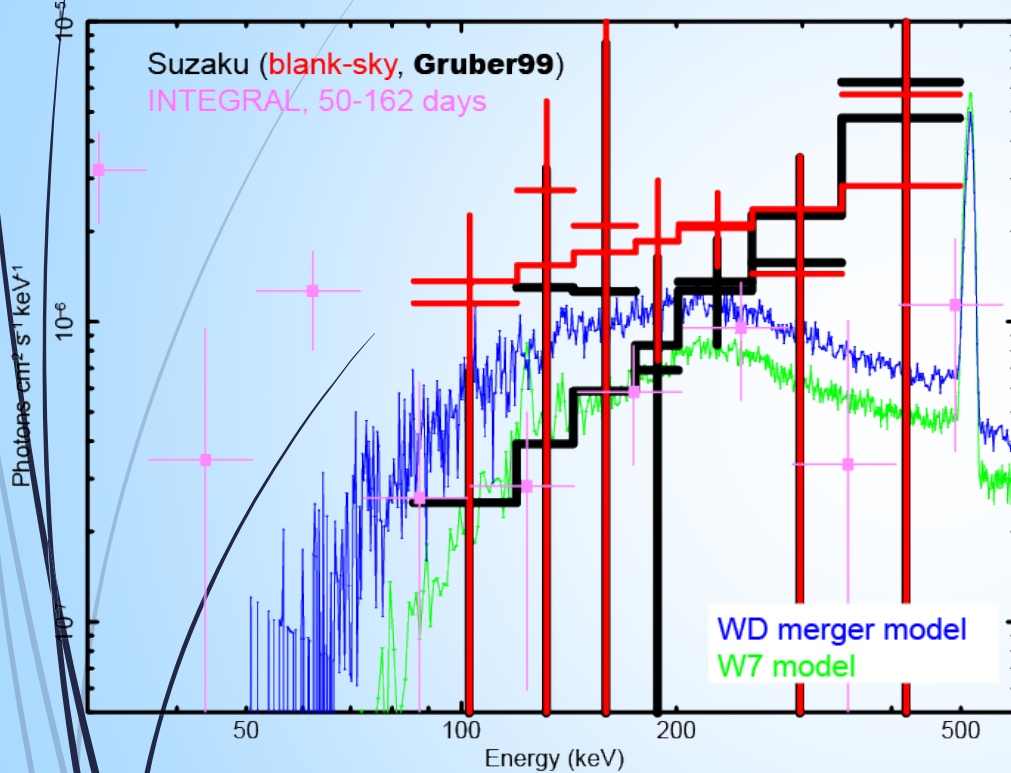
- NXB, CXB, 地球アルベド推定の各系統誤差込み
- CXB モデルは Gruber et al 1999 / blank sky の 2 種テスト.
 $0.9_{-0.3}^{+0.4} \times 10^{-4}$ or $1.6_{-0.4}^{+0.4} \times 10^{-4} \text{ ph s}^{-1} \text{ cm}^{-2} @170\text{-}250 \text{ keV}$

結論: 3σ upper limit @ $2.2 \times 10^{-4} \text{ ph s}^{-1} \text{ cm}^{-2} @170\text{-}250 \text{ keV}$

14

SN Iaモデルへの制限

「すざく」, INTEGRAL, モデルの比較

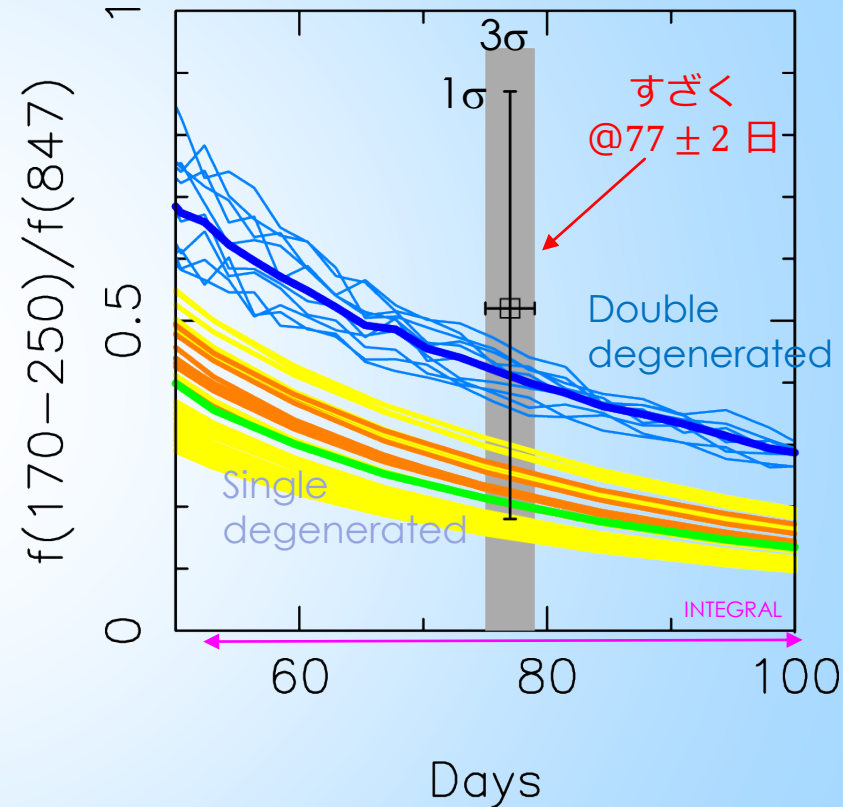


三者無矛盾

- 「すざく」 best fit model
- INTEGRAL (Churazov+14)
- SD and DD models

「すざく」による制限

Terada+16



- ✓ 密度が濃い環境のDDの方が輝線等価幅は小さ目
- ✓ 観測点はSD/DDを区別するに至らず。ただし 1 σ レベルを信じれば、 ^{56}Ni 質量 $1 M_{\text{sun}}$ を超すモデルを排除。(Snap shot の重要性)

SN2014J wide-band spectrum

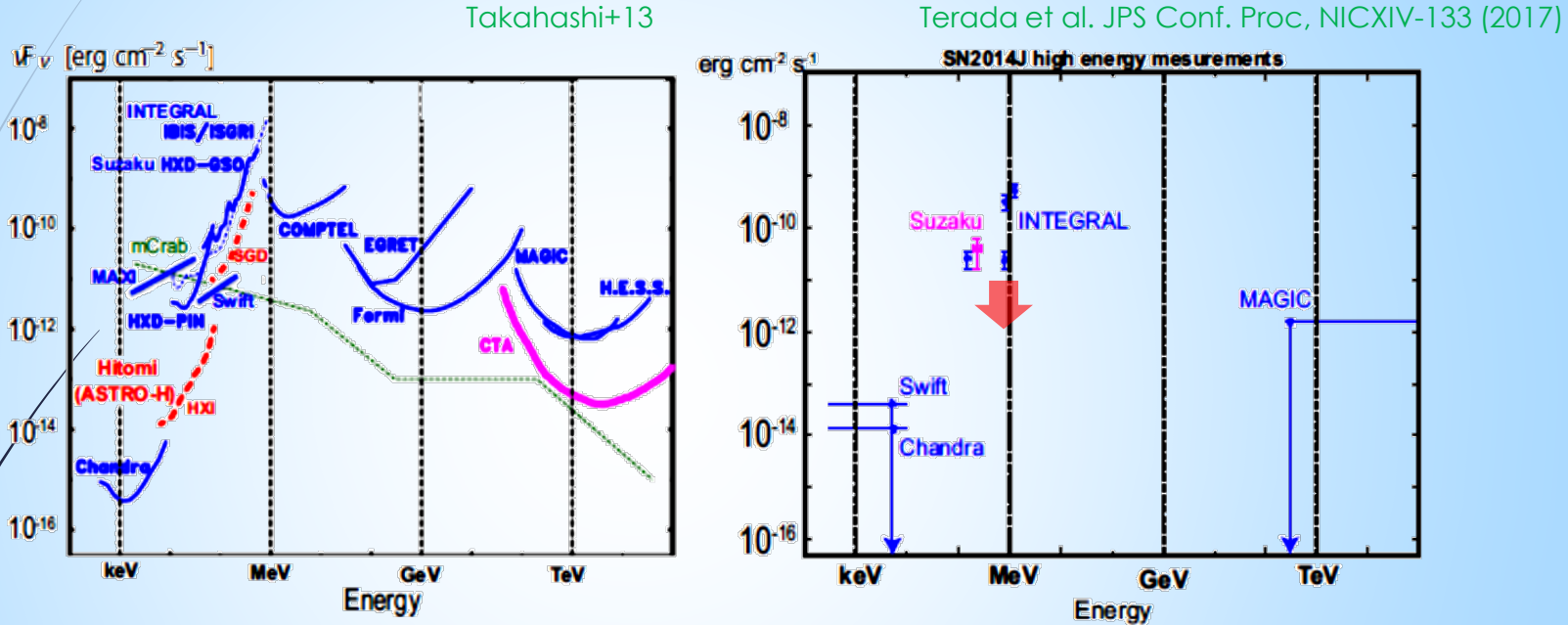


Fig. 1. (left) Sensitivities in high energy bands above keV of the current and future observatories are shown in blue and magenta (thick), respectively. Those by the *Astro-H* (*Hitomi*) mission are also shown in red (thick dotted line). For reference, the flux level of 1/1,000 of Crab nebula is shown in green (or thin dotted line). (right) Summary of measurements of high energy emissions from SN2014J [1, 3–5, 10, 12, 14].

sub-MeV 感度よ、もう一桁~二桁!

将来高感度MeV検出器にむけたLessons

1. 短時間観測感度が重要！

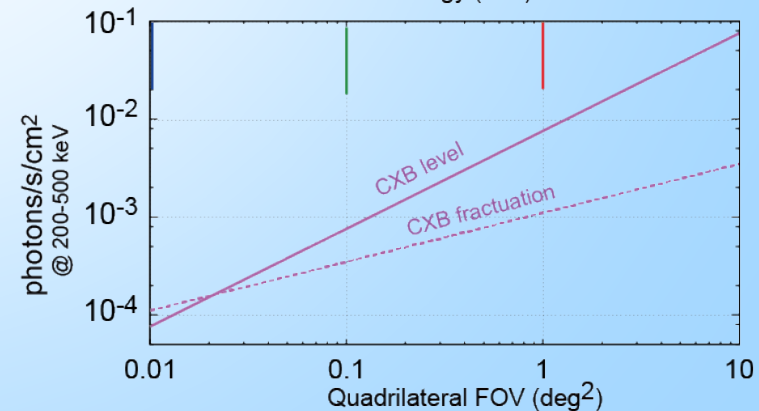
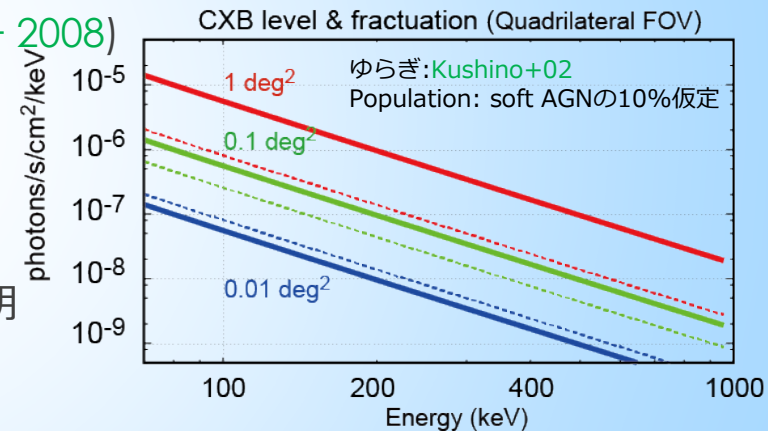
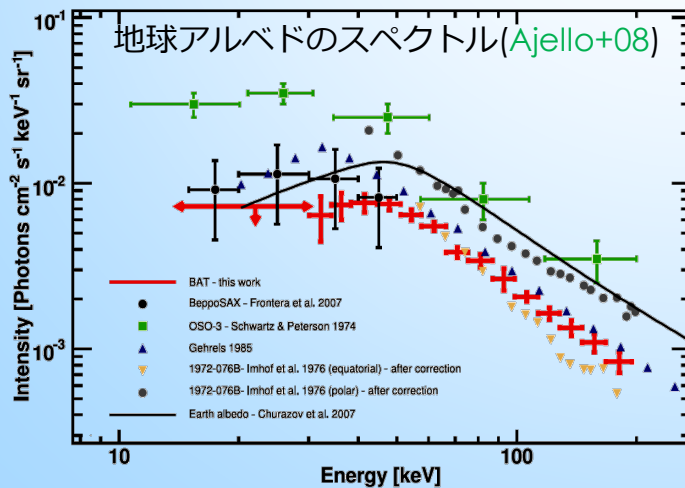
- ✓ 輝線/連続成分比による爆発環境の密度の違いの区別が可能。
- ✓ 時間変動する。Snap shotの有意な点が取れる事が大事。

2. 変動するNXBの推定精度を上げる重要性は周知のこと。

- ✓ 地食 NXB を用いた推定に混入する地球アルベド放射の精度も大事。
- ✓ 狭視野だと分離は不可能 (Swift BAT; Ajello+ 2008)
- ✓ 地球緯度依存性あり、不定性の原因

3. CXBの系統誤差も減らせ！

- ✓ 視野を絞りすぎてもダメ
- ✓ 硬X線に寄与する AGN の population 不明





まとめ

- ▶ MeV帯域では核ガンマ線の放射が観測できる
- ▶ 宇宙論的距離測定に標準光源として用いられるIa型超新星の起源は Single / Double degenerated stars の2流派ある。超新星爆発時に生成される ^{56}Ni からの核ガンマ線の輝線等価幅を用いれば区別できるかもしれない
- ▶ INTEGRAL, 「すざく」による SN2014Jの観測は、MeV観測の重要なステップとなったが、両モデルを区別する質には達しておらず、さらなる高感度化が望まれる。
- ▶ 「すざく」SN2014J観測から、将来の高感度 MeV 観測機的设计に向けた Lessons を示した。