

核ガンマ線を用いた 銀河系内中性子星連星合体残骸の探査

寺田幸功 (埼玉大/JAXA),

共同研究者:

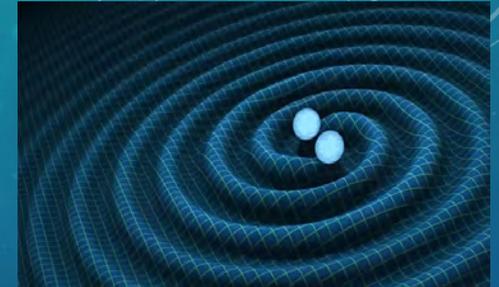
三輪祐也 (埼玉大), 大住隼人(埼玉大), 藤本信一郎 (熊本高専),

勝田哲 (埼玉大), 馬場彩 (東大), 山崎了 (青山学院大)

1. 中性子星合体における r-process 重元素合成

□ 中性子星合体 (NSM) = 重力波天体 & r-process 重元素合成天体

- ✓ 重力崩壊型SN よりも有力な重元素合成の現場
 - より中性子過剰な環境 (i.e., lower Y_e)
(Wanajo+11, Lattimer&Schramm 74; Metzger+10)
 - 低発生率ながら高収率が特徴 (Wallner+14, Hotokezaka+15)
- ✓ Kilonova / r-process nova からの観測的証拠
 - Short GRB 130603B (Tanvir+13)
 - GW170817 (Villar+17 etc)

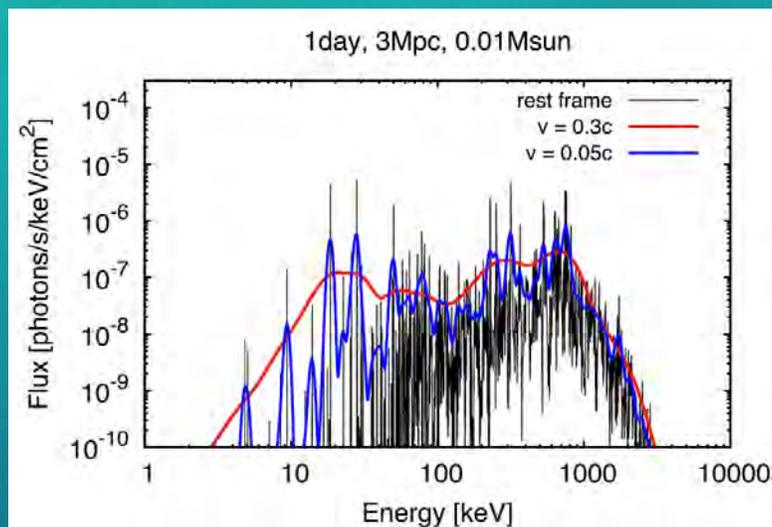


→ ランタノイド ($A > 180$) より重い重元素合成の観測的証拠は少ない

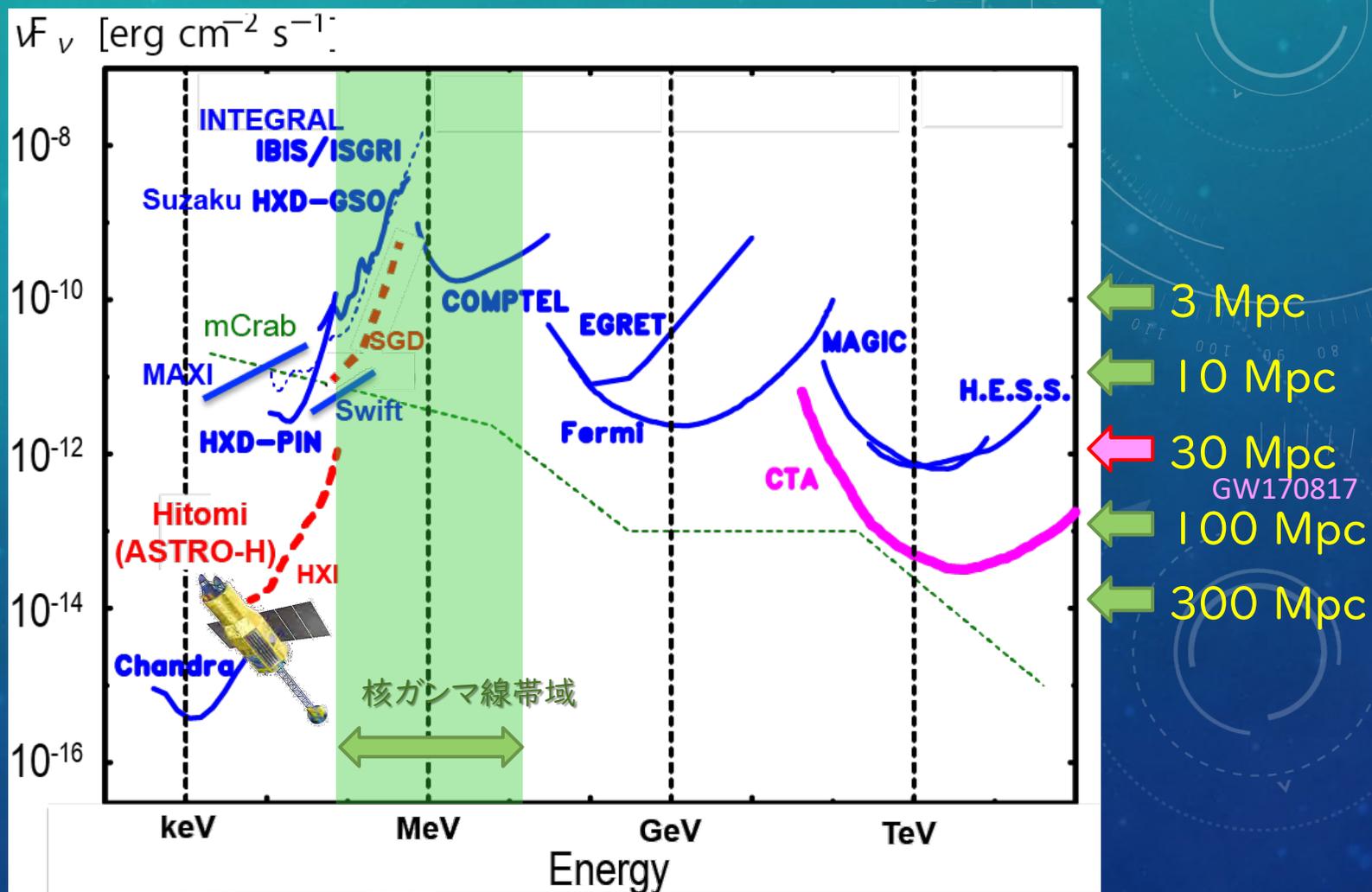
→ 核ガンマ線で直接の証拠をつかむのが確実

1. 中性子星合体における r-process 重元素合成

□ NSMからの核ガンマ線放射光度



- ✓ 光度推定 (Hotokezaka+16)
- 現行/近未来の軟ガンマ線装置の感度では厳しい



NSM発生直後のフォローアップ観測 (ToO観測) では感度ギリギリ/検出出来ない

1. 中性子星合体における r-process 重元素合成

□ アイディア: Non-ToO 探査 (Wu+19)

- ✓ ToO 観測 → 残骸観測 (年齢: 日～月 → k ~ M year)
- ✓ 銀河系外 → 銀河系内 (距離: 10 Mpc → kpc)

すなわち、「銀河系内NSM残骸」の探査

要求感度: $< 10^{-7}$ ph/s/keV/cm² ToO観測と同等,

観測時間: ToO観測より長時間を投入し感度を上げられる可能性がある

■ 本講演

1. NSM残骸をターゲットにした核ガンマ線スペクトル推定
2. INTEGRAL衛星を用いた観測的探査

2. NSM残骸からの核ガンマ線推定

2.1 方法

□ Step-1. NSM で合成された r-process 核の生成量分布推定

✓ Input = 元素合成計算 (Freiburghau et al. 1999), Y_e 分布推定 (Wanajo 2014)

□ Step-2. 核崩壊計算 & 光子放射推定

✓ Input = 核崩壊データベース (JENDL DDF-2015), (α decay, β^- decay, β^+ decay, electron capture, isomer transition)

□ Step-3. NSMからの核ガンマ線スペクトル推定

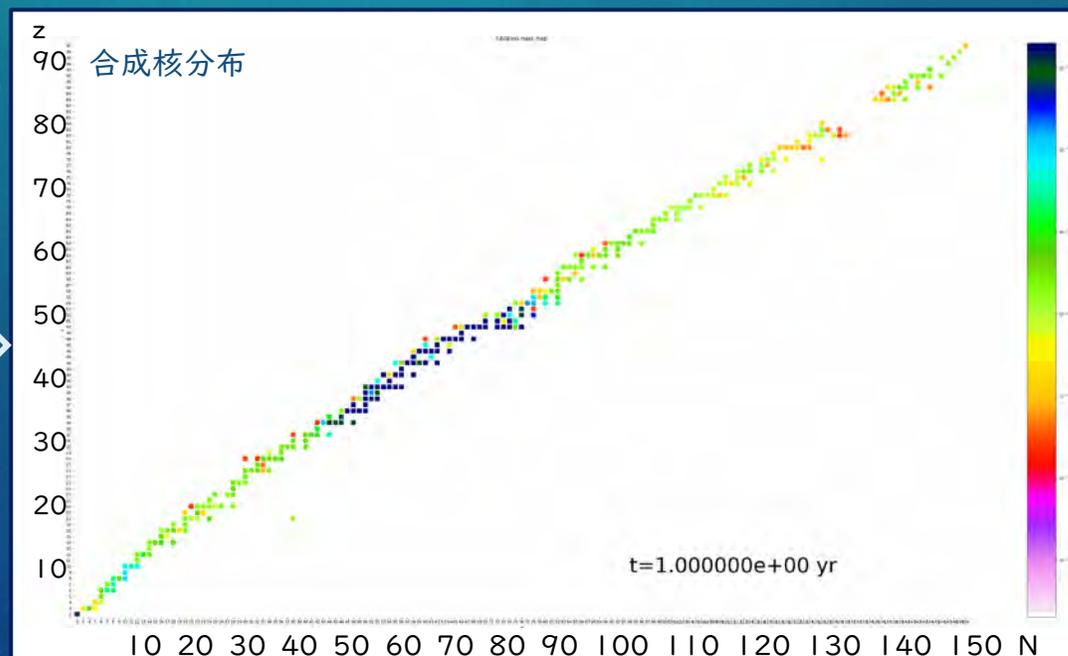
✓ Doppler Broadening のみ考慮 (初期の放射伝播は無視)

元素合成計算
($Y_e = 0.10 - 0.45$)
(Freiburghau et al. 1999)

X

Step-1

Y_e 分布 (NSM)
(Wanajo 2014)



核崩壊データベース
(JENDL DDF-2015)

Step-2

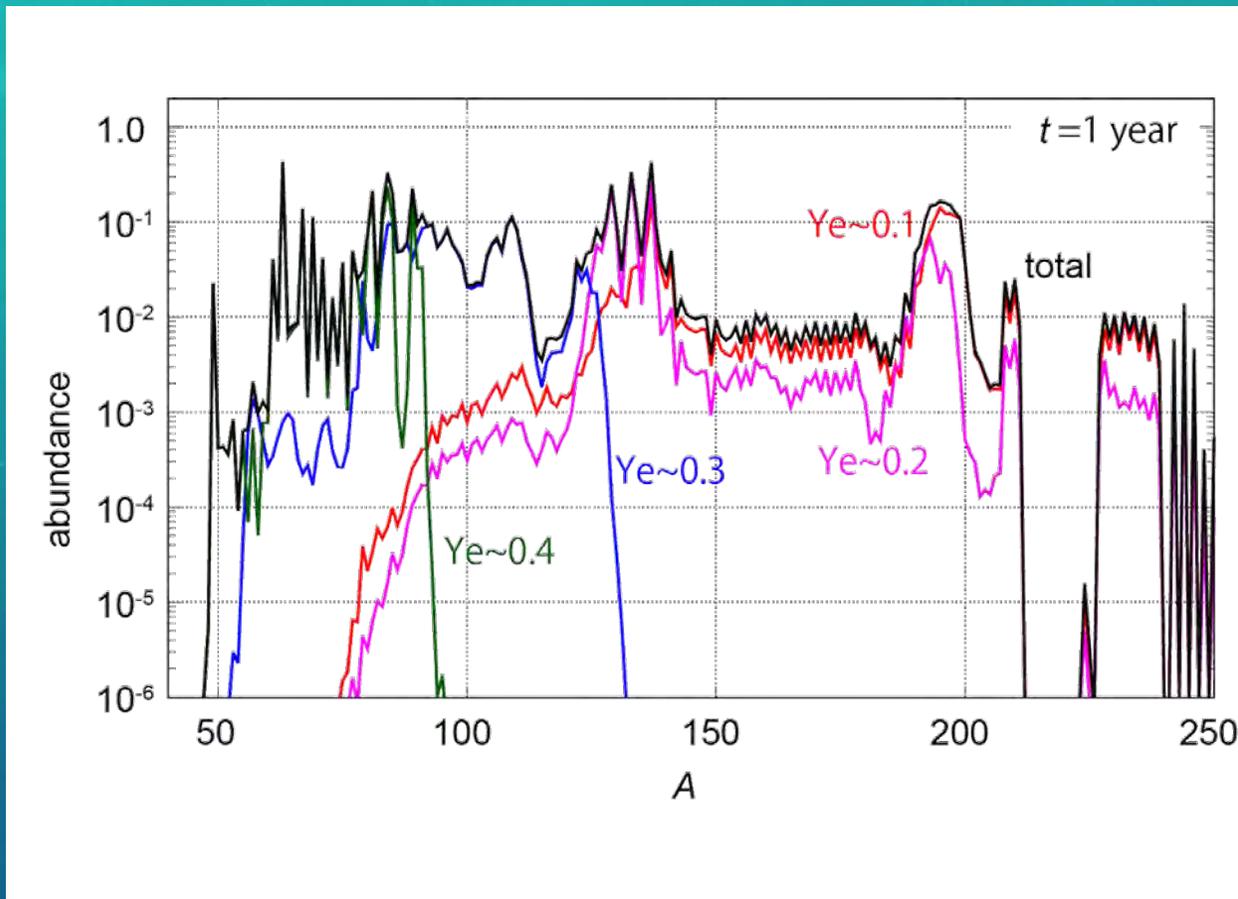
Step-3

Doppler
Broadening
(Li-Xin 2019)

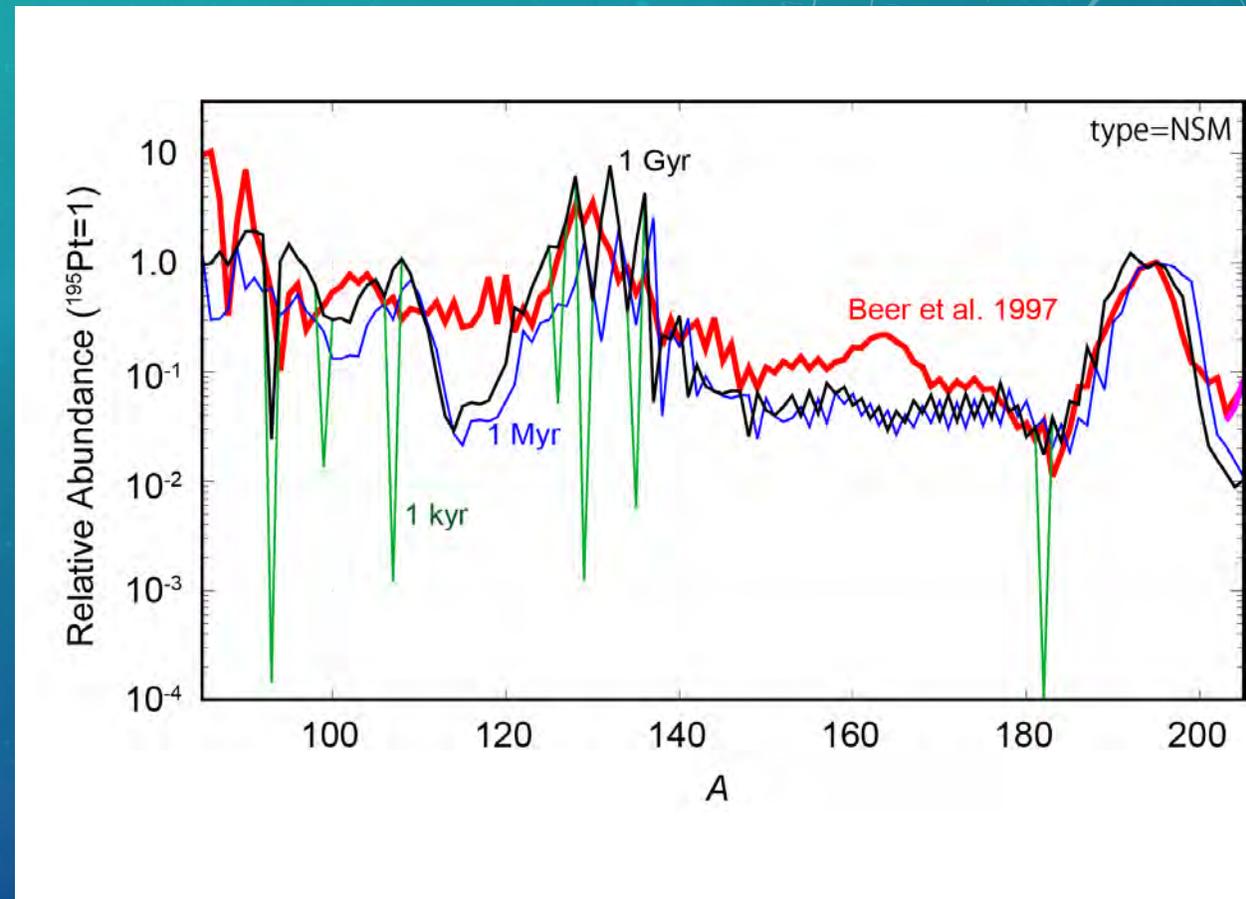
各年齢の
ガンマ線ス
ペクトル

合成核全ての崩壊を追った点の特徴

□ Step 1 確認: 核の初期生成量(Y_e 毎)



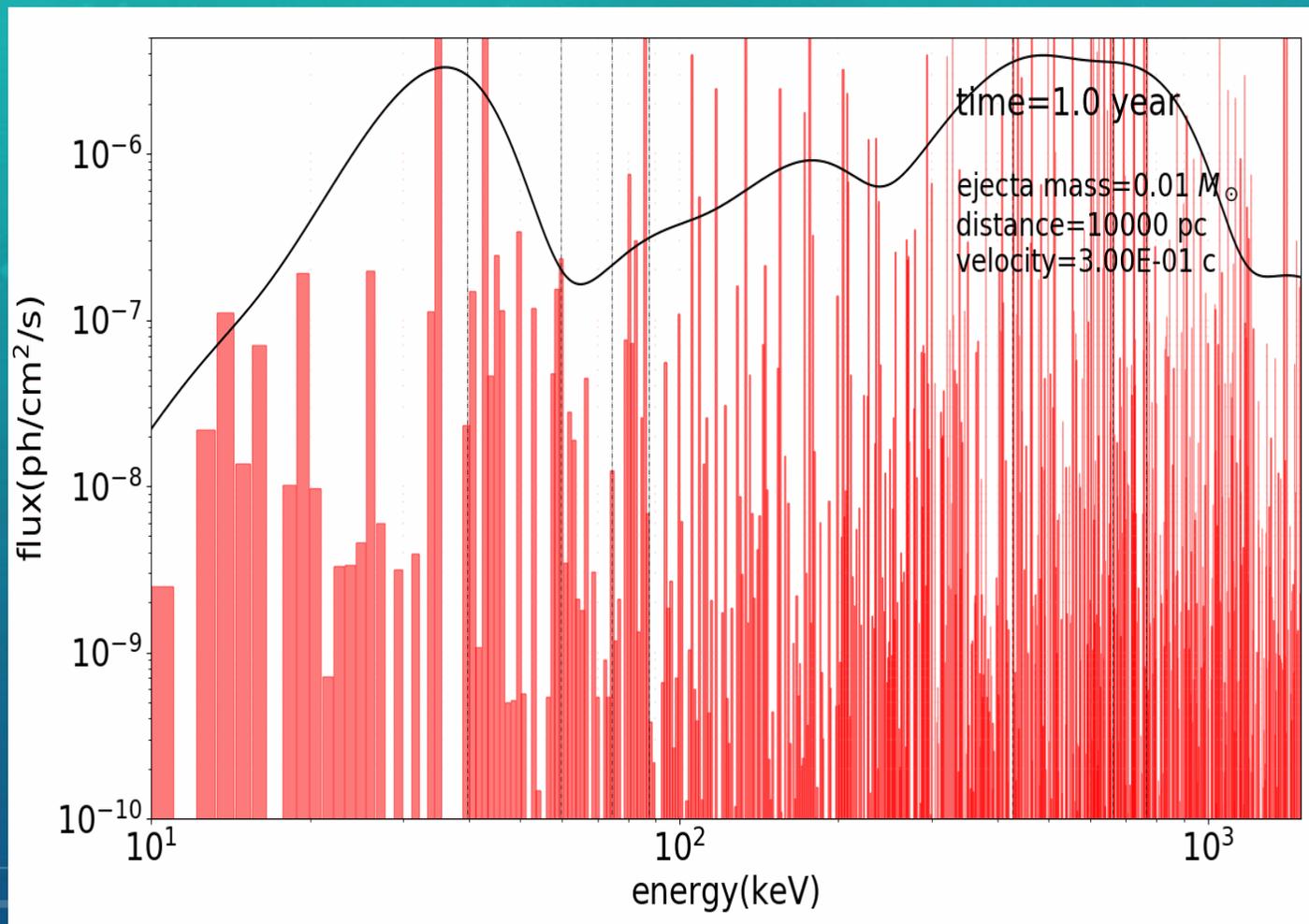
□ Step 2 確認: 崩壊による変化



- ✓ 低い Y_e (中性子過剰環境) ほど重い元素の合成に寄与している
- ✓ 充分時間が経つと、魔法数が埋まり、
r-process アバundance 文献値 (Beer+97) に近づく
大間違いはしていなさそうである

2.2 ガンマ線スペクトル結果

□系内NSM残骸からのガンマ線スペクトル（ドップラー効果あり/なし）



→ XSPEC modelにしました

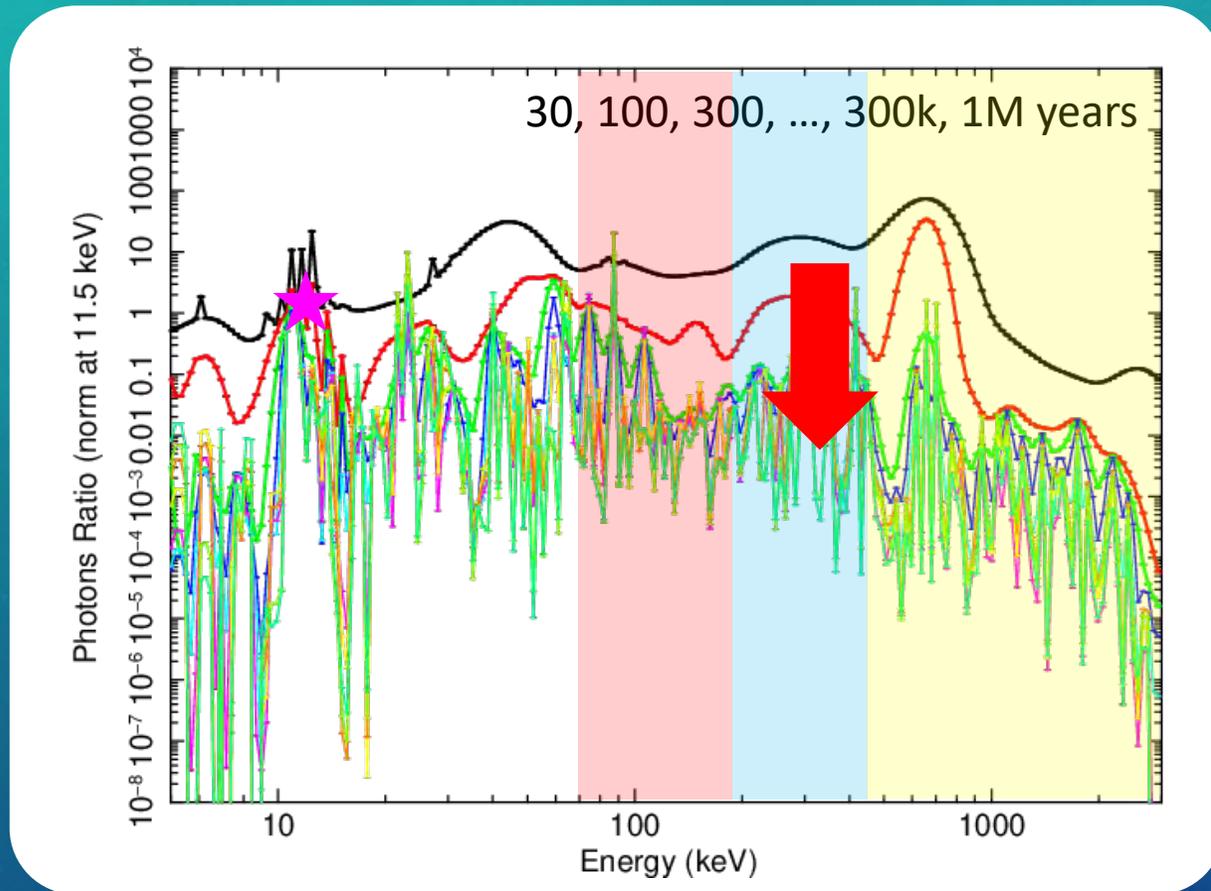
```

=====
Model gsmooth<1>*atable{model/rprogamma.mod}<2> Source No.: 1
Active/Off
Model Model Component Parameter Unit Value
par comp
 1 1 gsmooth Sig_6keV keV 0.850000 +/- 0.0
 2 1 gsmooth Index 0.0 frozen
 3 2 rprogamma time year 100.000 +/- 0.0
 4 2 rprogamma Ye10 Msun 4.54000E-02 +/- 0.0
 5 2 rprogamma Ye15 Msun 4.85000E-02 +/- 0.0
 6 2 rprogamma Ye20 Msun 0.146000 +/- 0.0
 7 2 rprogamma Ye25 Msun 0.297000 +/- 0.0
 8 2 rprogamma Ye30 Msun 0.103000 +/- 0.0
 9 2 rprogamma Ye35 Msun 0.251000 +/- 0.0
10 2 rprogamma Ye40 Msun 0.105000 +/- 0.0
11 2 rprogamma Ye45 Msun 3.26000E-03 +/- 0.0
12 2 rprogamma z 0.0 frozen
13 2 rprogamma norm 1.00000 +/- 0.0
  
```

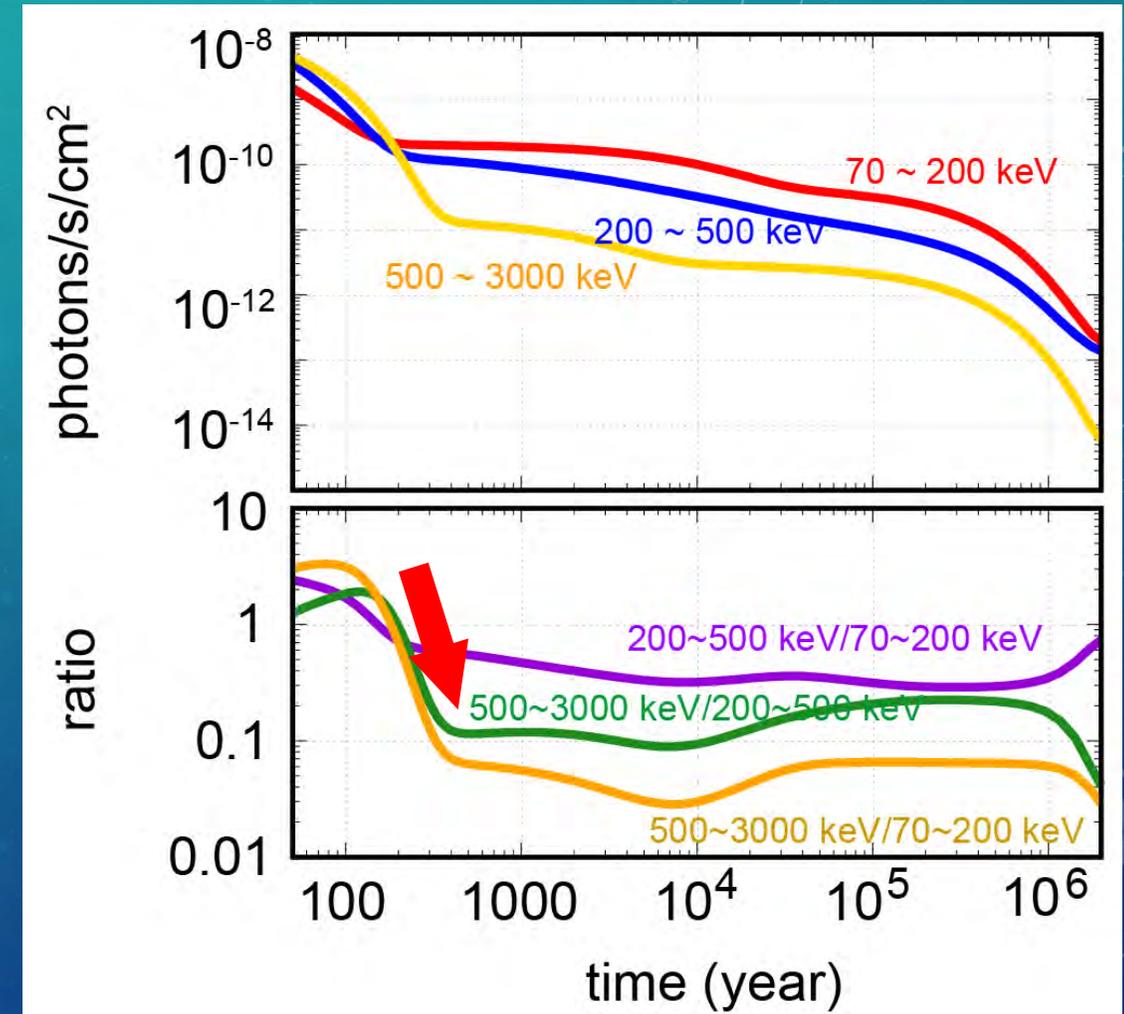
公開はもう少し待ってください

2.3 ガンマ線スペクトルの時間発展

□ スペクトル形状の変化 (10keV normalize)



Softeningが見られる (Sargent' law)



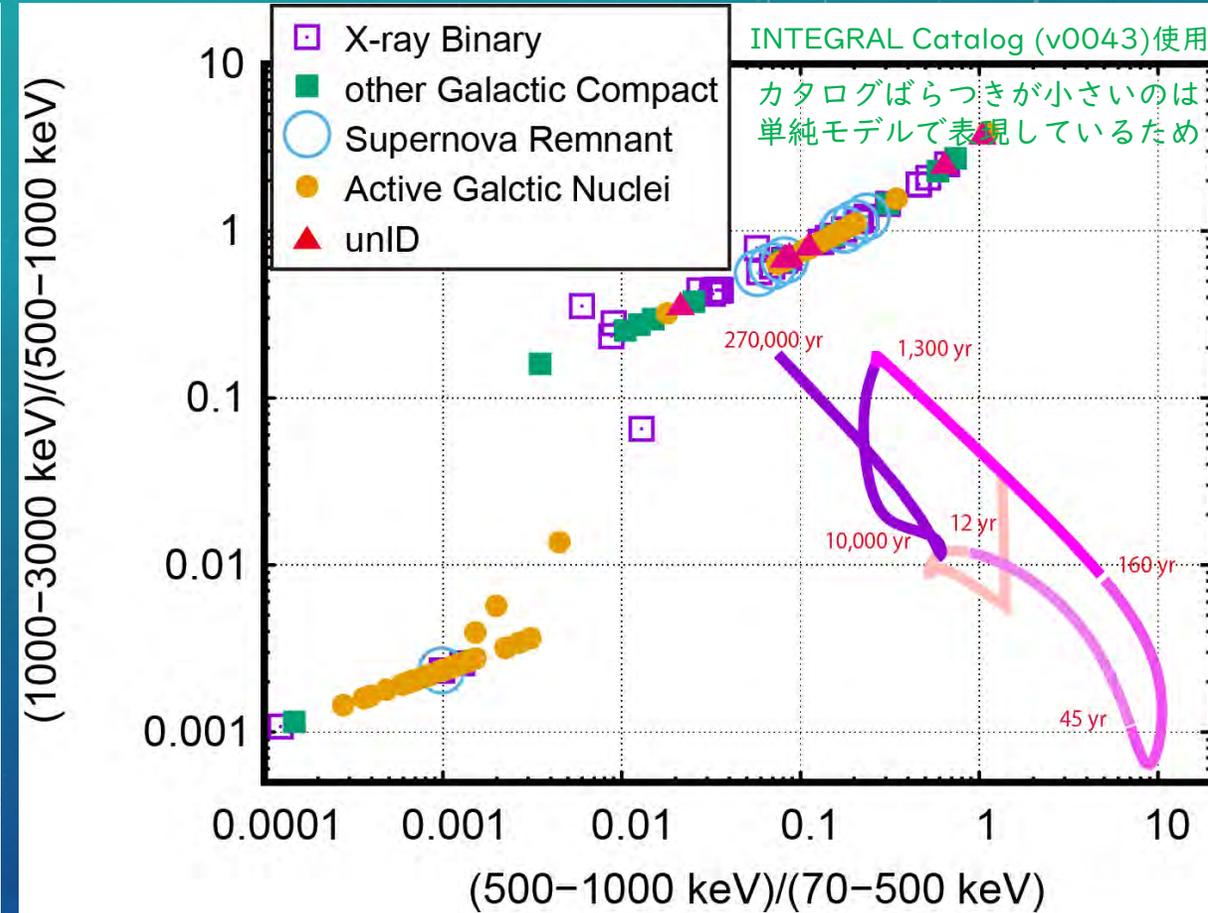
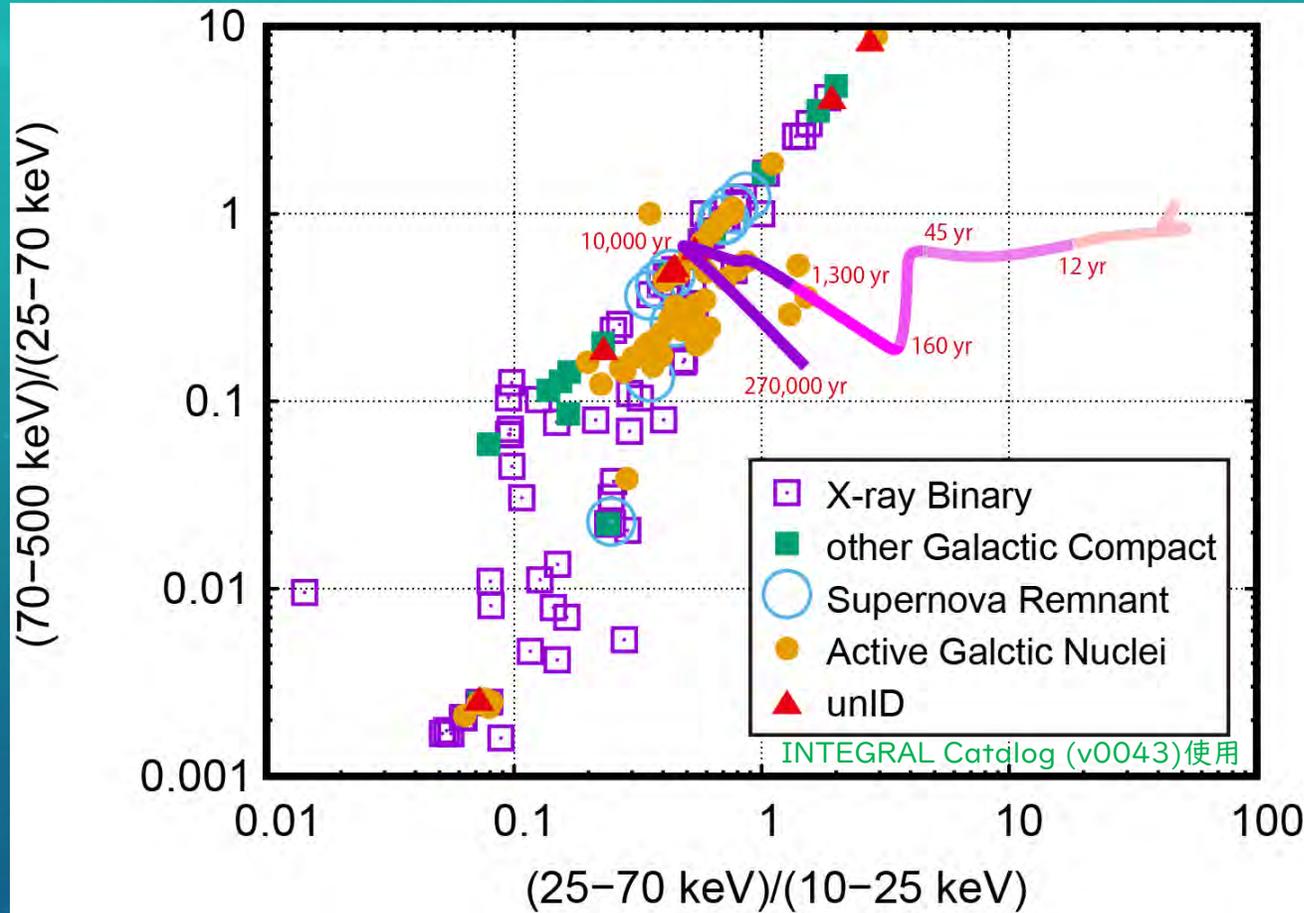
200 ~ 300 年前後で Hardness ratio が変化

スペクトルの Hardness : 若い年齢の指標になり得る

□ スペクトル Hardnessの変化と軟ガンマ線天体との比較

硬X線帯域 (25 ~ 500 keV)

軟ガンマ線帯域 (70 ~ 3000 keV)



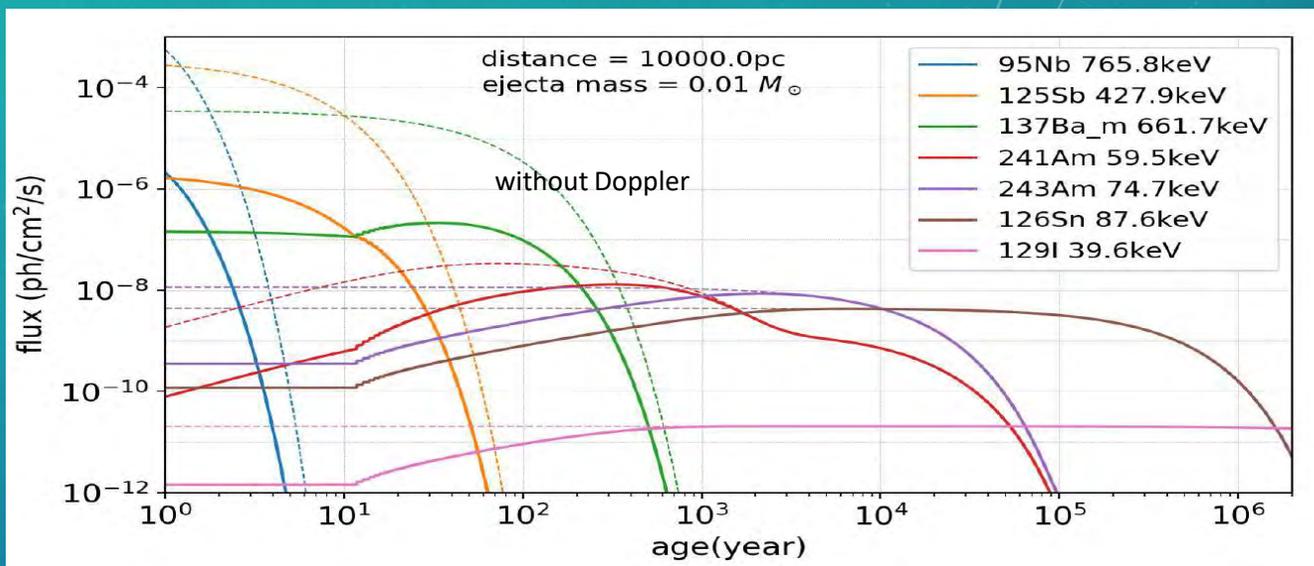
- ✓ 数百歳より若いNSM残骸は区別可
- ✓ 上限エネルギーをあげると分離度は良くなる

- ✓ MeVまで使用することで区別可能になる
- ✓ 下限エネルギーは70 keV程度が妥当。
20keVに下げても変わらないが200 keVにあげると分離度が悪化

NSM残骸は、硬X軟ガンマ線では銀河系内天体とは異なる特徴的なスペクトル形状を持つ

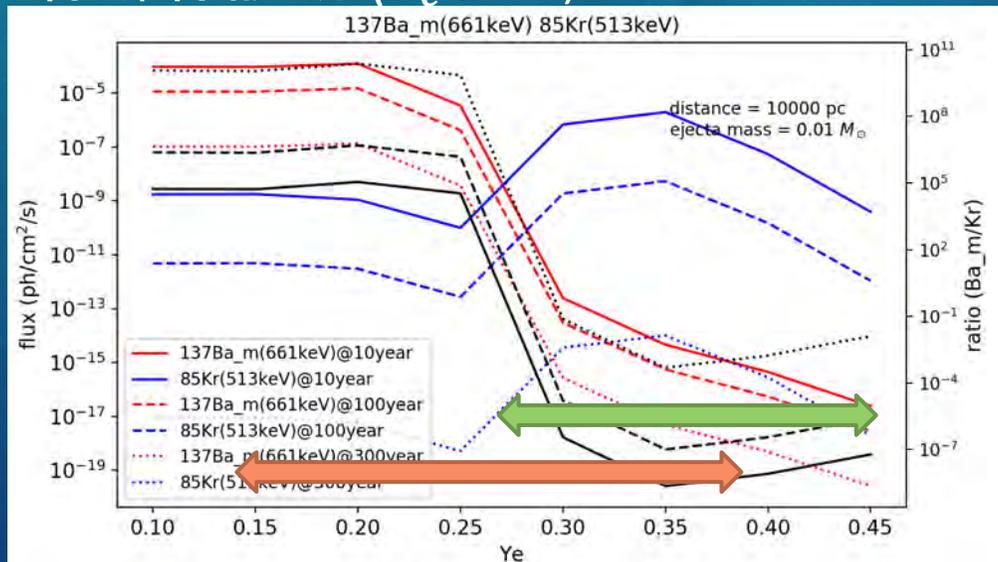
輝度の高い核ガンマ線輝線とその時間発展

Nuclei	Energy	Half life
⁹⁵ Nb	765.8 keV	35 days
¹²⁵ Sb	427.9 keV	2.8 year
^{137m} Ba	661.7 keV	~30 year
²⁴¹ Am	59.5 keV	~4.3 × 10 ² year ~8.4 × 10 ³ year
²⁴³ Am	74.7 keV	~7.4 × 10 ³ year
¹²⁶ Sn	87.6 keV	2.3 × 10 ⁵ year
¹²⁹ I	39.6 keV	1.6 × 10 ⁷ year



→ 1,000歳以上のNSM残骸は、²⁴¹Am, ²⁴³Am, ¹²⁶Sn, ¹²⁹I がよいマーカーとなる

核ガンマ線輝線診断 (Y_e 診断)



→ ^{138m}Ba / ⁸⁵Kr 比で SNR と NSM残骸の区別が付くかも知れない

3. INTEGRALを用いた系内NSM残骸探査

□ 系統探査データ

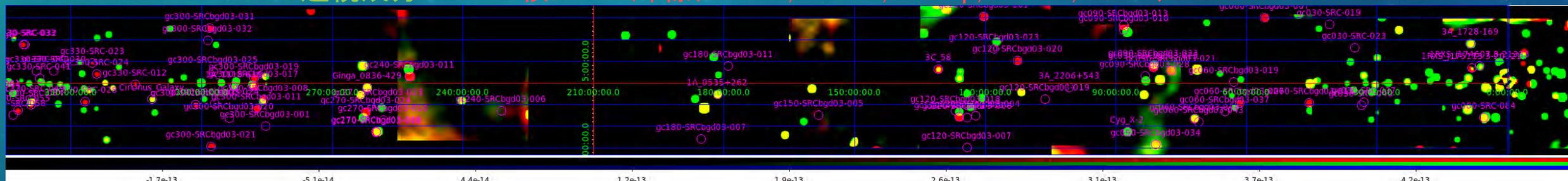
- ✓ INTEGRAL衛星 (2×10^{-5} ph/s/keV/cm² with 1 Msec exposure)
- ✓ Archive Data during Jan 2003 - July 2017 (14.5 years), 15TB
- ✓ 銀河面探査: $l = 0^\circ \sim 360^\circ$, $|b| < 15^\circ$
→ 71,972 観測, 108.5 Msec exposure.

□ イメージ解析

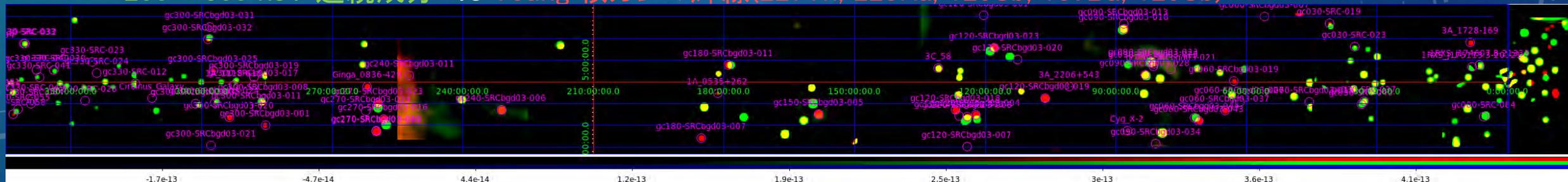
- ✓ 連続成分 (放射化BGD除外) vs. r-process 核輝線 (右表)
- ✓ 20 - 200 keV 連続成分 vs Old 核ガンマ輝線(243Am, 126Sn, 239Np, 214Pb, 214Bi)



Young (< 100 years)	
227Th	235.96 keV
223Ra	269.46
125Sb	427.87, 600.59, 635.95
137Ba	661.65
Old (>300 years)	
243Am	74.66 keV
126Sn	87.57, 414.5, 666.1
239Np	106.12
214Pb	351.93
214Bi	609.3



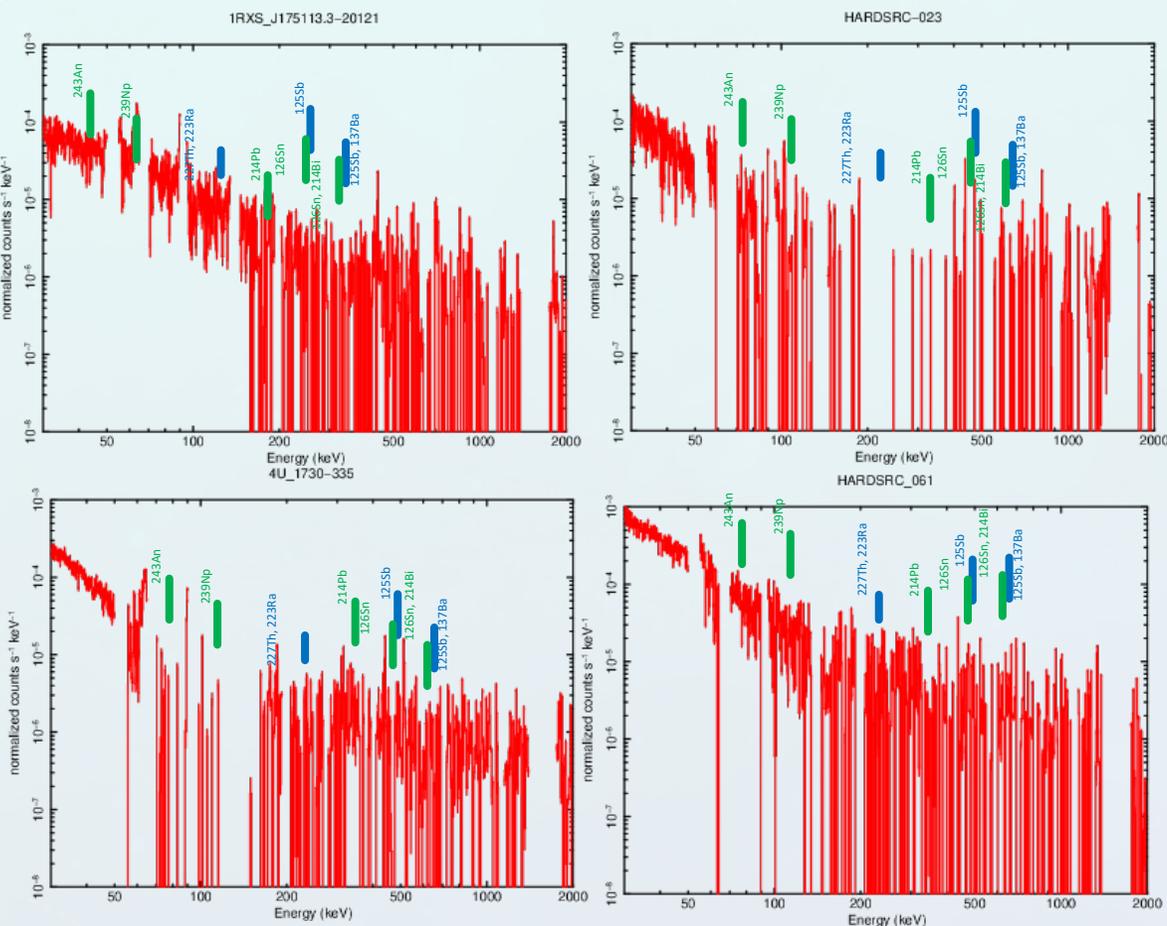
- ✓ 200 - 600 keV 連続成分 vs Young 核ガンマ輝線(227Th, 223Ra, 125Sb, 137Ba, 125Sb)



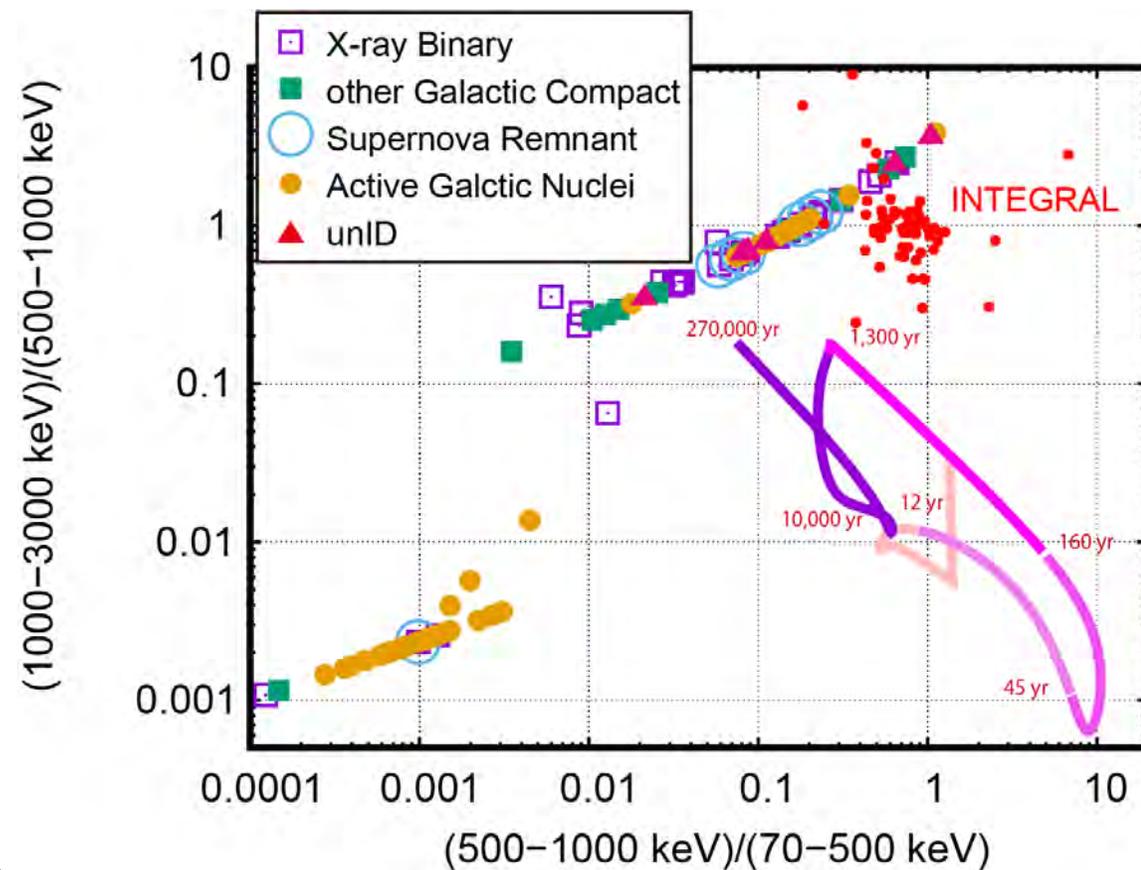
→ 輝線帯域の強そうな天体は88天体、うち12天体は既知：76候補

□ スペクトル解析

- ✓ 76 NSM残骸候補のエネルギースペクトルを確認
- ✓ 下記がエネルギースペクトルの例



Hardness Ratio (NSM予想との比較)

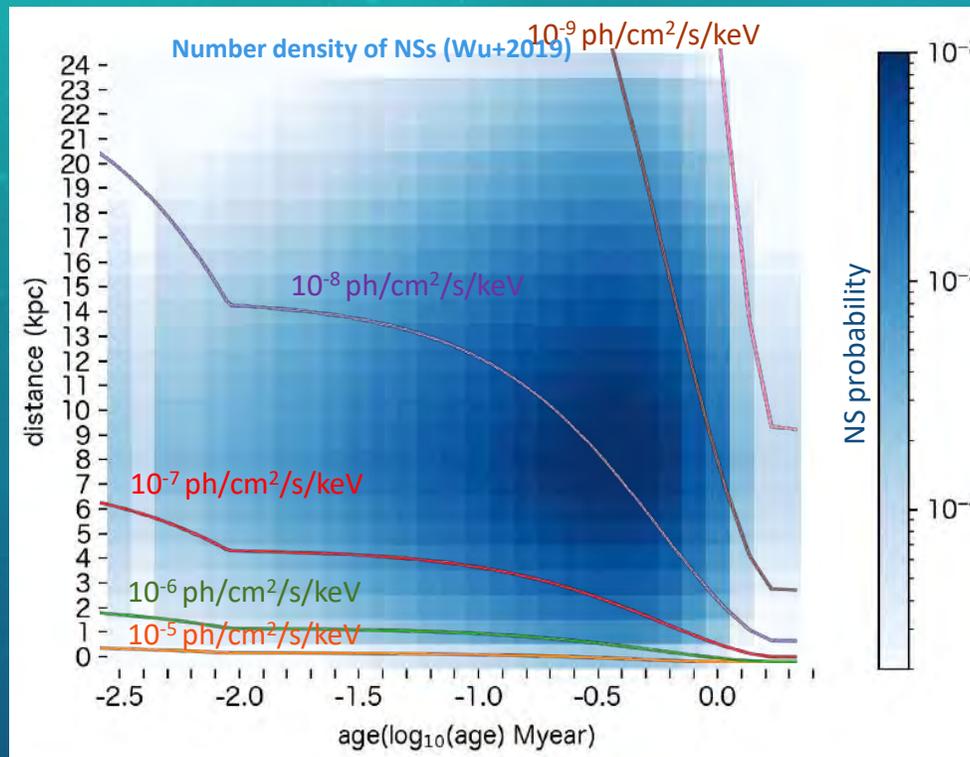


いくつか ^{125}Sb , ^{239}Np , ^{85}Kr , and ^{106}Rh 放射の兆候あり スペクトル形状はNSM残骸と少し異なる
 → 統計的に有意な検出にはならなかった。

4. 議論&結論

□ 銀河系内NSM残骸の検出予想

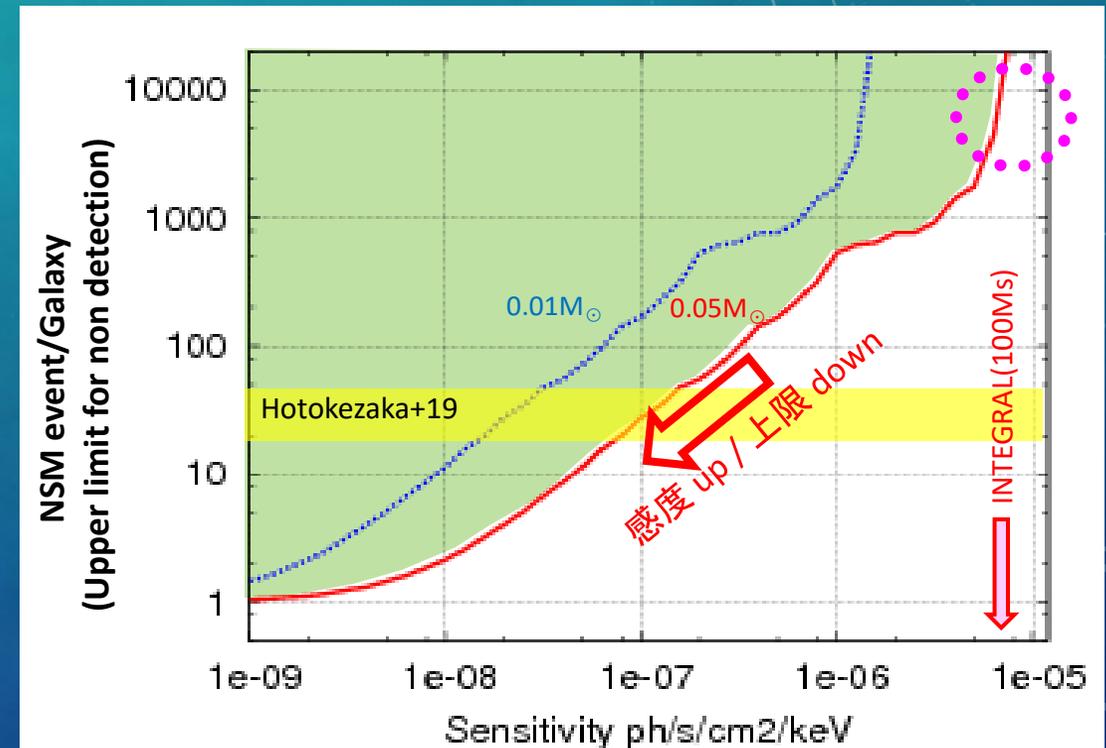
- ✓ 理論的予想から
- ✓ 年齢-距離空間での要求感度を計算



→ 銀河系内NSM残骸すべてに到達するには
 10^{-9} ph/cm²/s/keVの感度が必要

□ NSM発生率へのフィードバック

- ✓ 観測的探査から
- ✓ 左記を換算：NSM rate < 6,000 ev./Myear/gal.



→ NSM発生率 6×10^4 events/year/Gpc³ に相当
 (0.01 galaxy/Mpc³を仮定して)

10^{-7} ph/cm²/s/keV 感度の将来ガンマ線検出器なら、
 NSM rate < 30 events/Myear/galaxy の制限が課せる

まとめ

- 中性子星合体は r-process 元素合成の重要な候補天体である。
- 銀河系内の中性子星合体残骸からの核ガンマ線放射スペクトルを推定し、下記の結果を得た。いずれもガンマ線帯域の観測が重要であると示した。
 1. 硬X線～軟ガンマ線のhardness ratioから、他の銀河系内天体と区別可能であり、それが200～300歳前後の年齢の指標となる事
 2. ^{241}Am , ^{243}Am , ^{126}Sn , ^{129}I が1000歳の中性子星合体残骸の指標となる事
 3. $^{138\text{m}}\text{Ba}$ / ^{85}Kr のガンマ線輝線で Y_e を診断し、超新星残骸と区別出来る事
- INTEGRAL衛星の銀河面データを用いて銀河系内の中性子星合体残骸を探查し、76の輝線候補天体を抽出したが、有意な検出は得られなかった。
- 上記の2つの結果から、INTEGRAL衛星の上限値は、
NSM発生率 6×10^4 events/year/Gpc³
に相当することが分かった。
これは緩い制限だが、将来、 10^{-7} ph/cm²/s/keV 感度の将来ガンマ線検出器が稼働すれば、多波長と同程度の制限が課せられるようになるだろう。

Appendix : NSM エネルギースペクトル推定

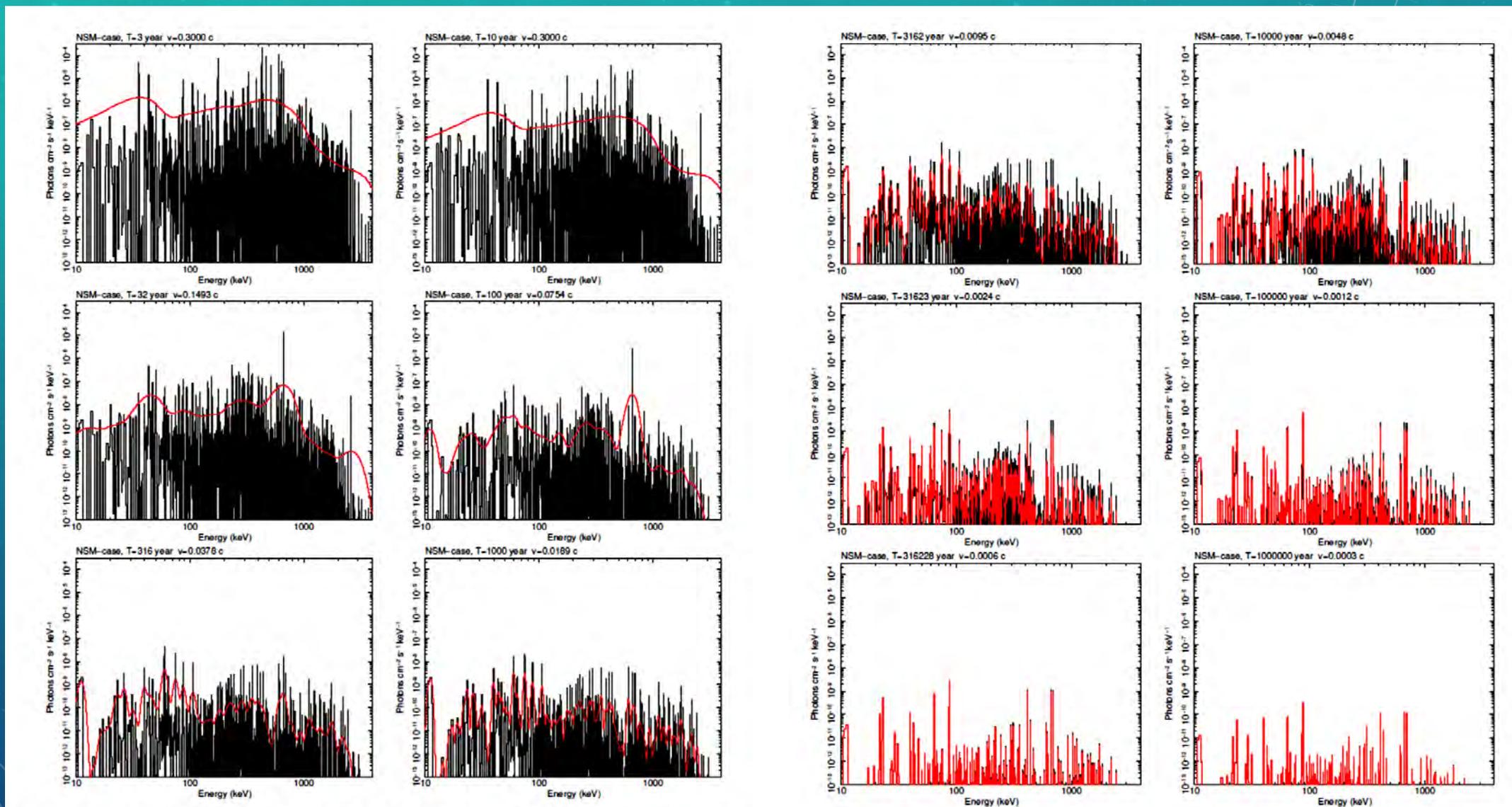


Figure 4. Gamma-ray spectra simulated for the NSM case at $t = 3 - 1,000$ years. The black and red plots represent the spectra without and with the Doppler broadening effect, respectively. The time since the merging event and the velocities are shown in each top label.

Figure 5. Same figures as Figure 4, but at $t = 3,162 - 1,000,000$ years.