



# HEX-P衛星を用いた 中性子星連星合体残骸の同定と r-process核輝線検出の推定

**本上 侑吾 (埼玉大学, [y.motogami.738@ms.saitama-u.ac.jp](mailto:y.motogami.738@ms.saitama-u.ac.jp))**

寺田幸功 [1][2], 勝田哲 [1], 大住隼人 [1], 藤本信一郎 [3], 馬場彩 [4], 山崎了 [5], Kaya Mori [6]

([1] 埼玉大学, [2] ISAS/JAXA, [3] 熊本高専, [4] 東京大学, [5] 青山学院大学, [6] Columbia Univ.)

# Introduction

## 課題

宇宙におけるr-process合成の進行現場はどこか??

**最も有力な候補天体：中性子星連星合体(NSM)**

中性子星同士の連星が合体



中性子過剰環境を形成



r-processが進行し重元素を合成

r-process

- 中性子捕獲が優位に起こる元素合成過程
- $^{209}\text{Bi}$ 以上の元素を合成できる唯一の過程
- 中性子過剰環境で進行

NSMにおいてr-processで生成された不安定核の  
核準位の遷移による放射(核ガンマ線)を観測



**r-process進行現場の証拠に！**

# 研究の動機 ～電磁波を用いた探査の検討～

NSMからの放射は**非常に微弱**→発生直後ではなく系内の**残骸**に着目(MeV帯域)  
メリット：観測時間を長く取ることによって感度が向上する。

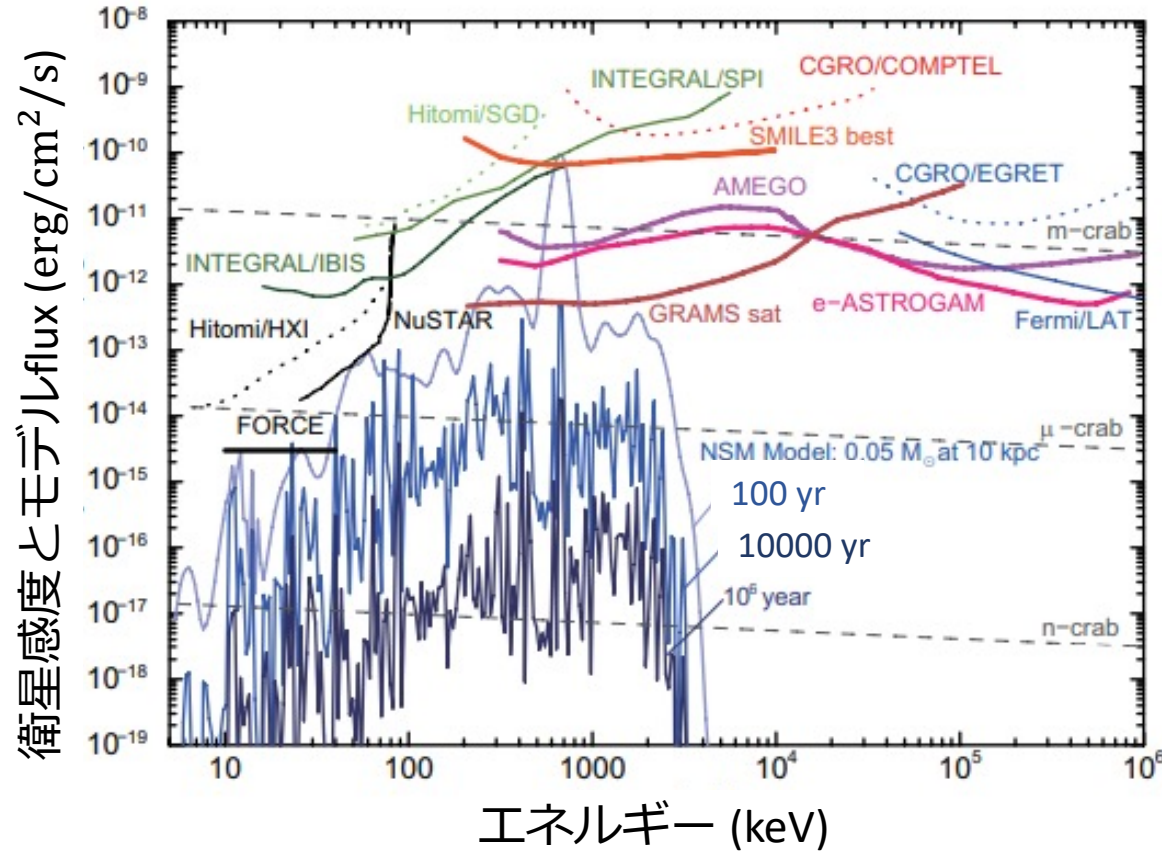


図1：衛星の感度曲線とモデルflux  
Terada et al., 2022 Figure 14.

2030年代の**MeV帯域**観測  
(**e-ASTROGAM**、**AMEGO**、**GRAMS**)  
約 $10^{-13} - 10^{-10}$  erg/cm<sup>2</sup>/s の感度を達成  
↓  
NSMは距離  $d = 10$  kpc, 残骸年齢  $t = < 1000$  yr  
まで到達可能  
MeV帯域の観測は高い検出器感度を要求  
&  
硬X線帯域(100 keV以下)はMeV帯域に比べ  
検出器の感度が高い

**本研究の目的：**  
**硬X線帯域の観測でNSM残骸を発見できないか**

# 硬X線帯域における放射モデル

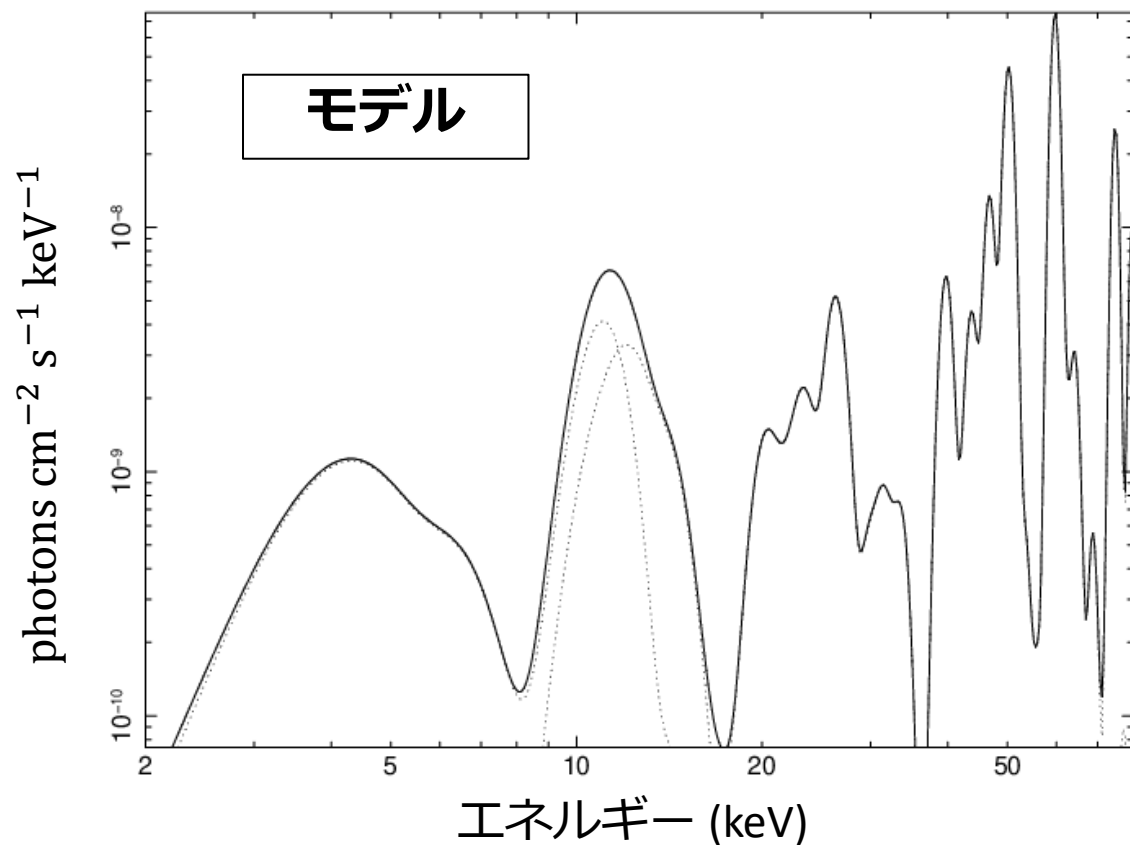


図2：NSMモデルのエネルギースペクトル

Terada et al., 2022  
核ガンマ線モデル  
主にMeV帯域の放射モデル



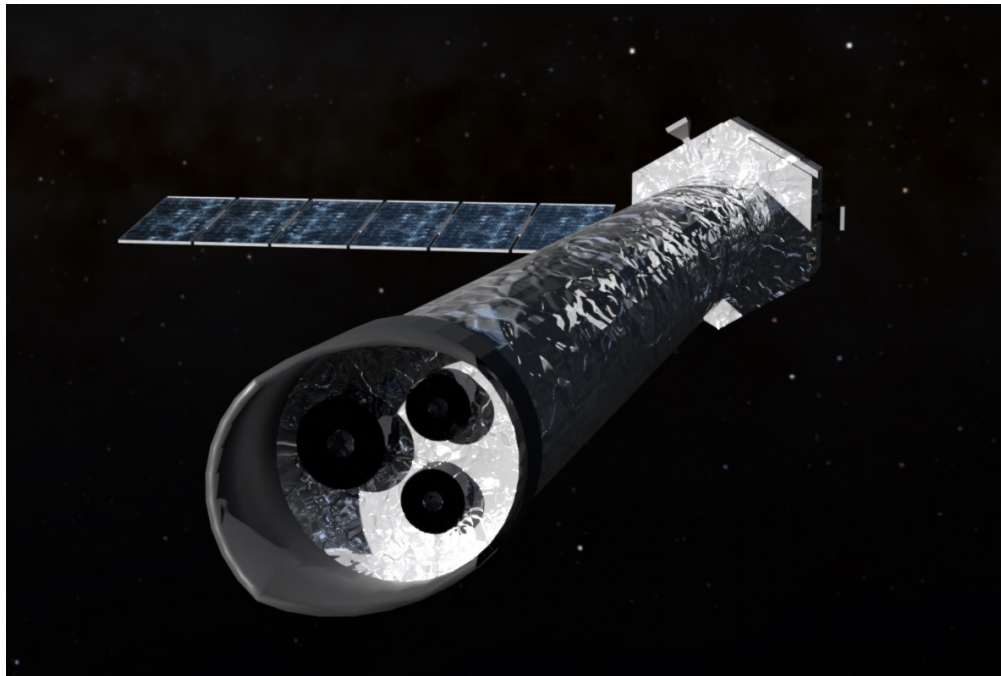
核ガンマ線モデルで  
無視した  
内部転換過程を考慮

今回のモデル  
硬X線帯域における  
放射モデル

# 将来硬X線衛星計画 HEX-P

HEX-P : 米国で計画がされている次世代硬X線衛星

性能 (2023.8時点)



項目	値
エネルギー帯域	2-80 keV
有効面積 (LET+HET)	4400 cm <sup>2</sup> @6 keV
角度分解能 (FWHM)	2.5-4''
エネルギー分解能 (FWHM)	200 eV @ 6 keV 0.8 keV @ 60 keV
視野	13.4' × 13.4'

図3 : HEX-P衛星の想像図  
HEX-P ホームページ  
(<https://hexp.org>)

表1 : HEX-Pの性能  
HEX-P white paper, ホームページ

# 結果①：I. 他天体との識別

①Terada et al., 2022 でのcolor-color diagramを用いたNSM診断方法をHEX-Pの2-80 keVで再計算

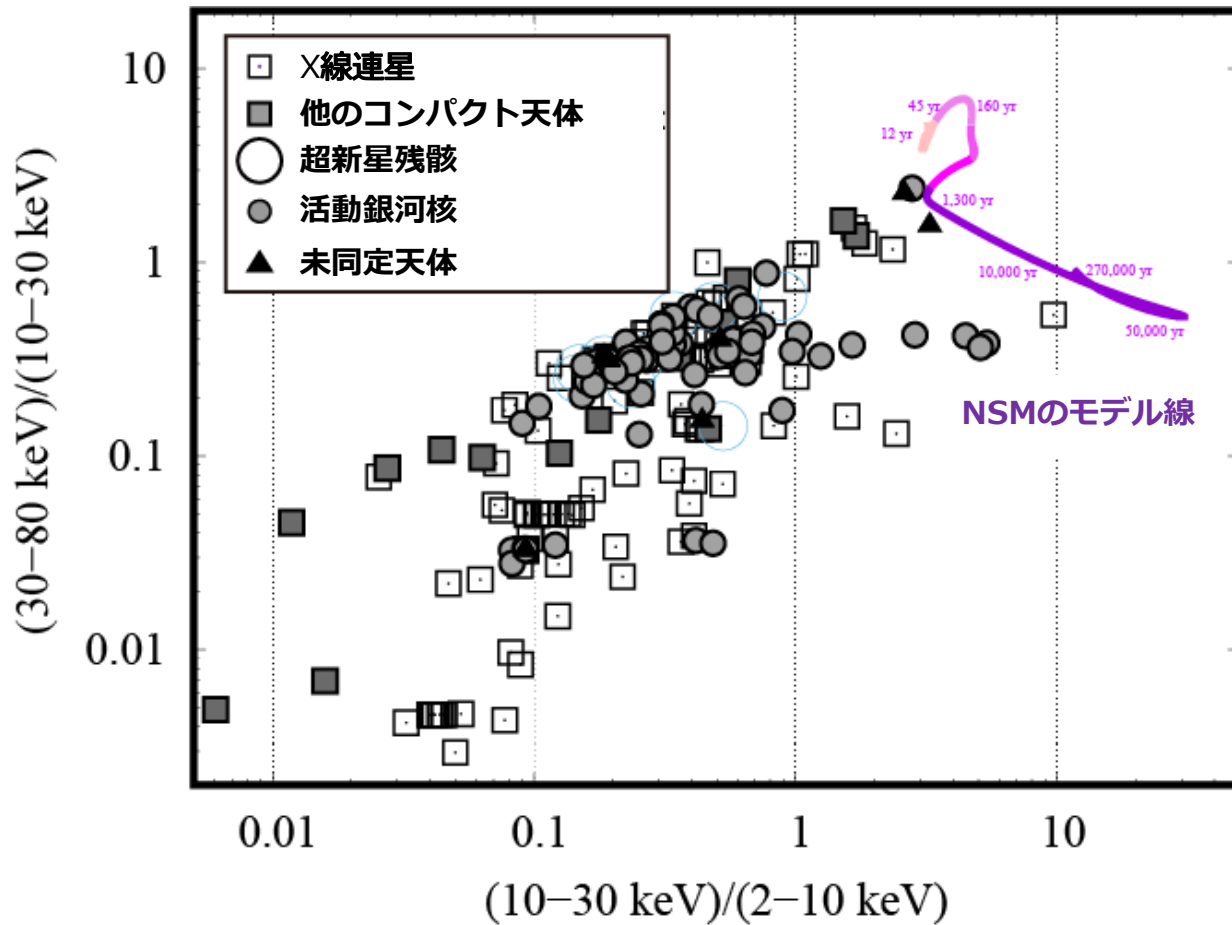


図5：硬X線帯域のみでのNSM同定

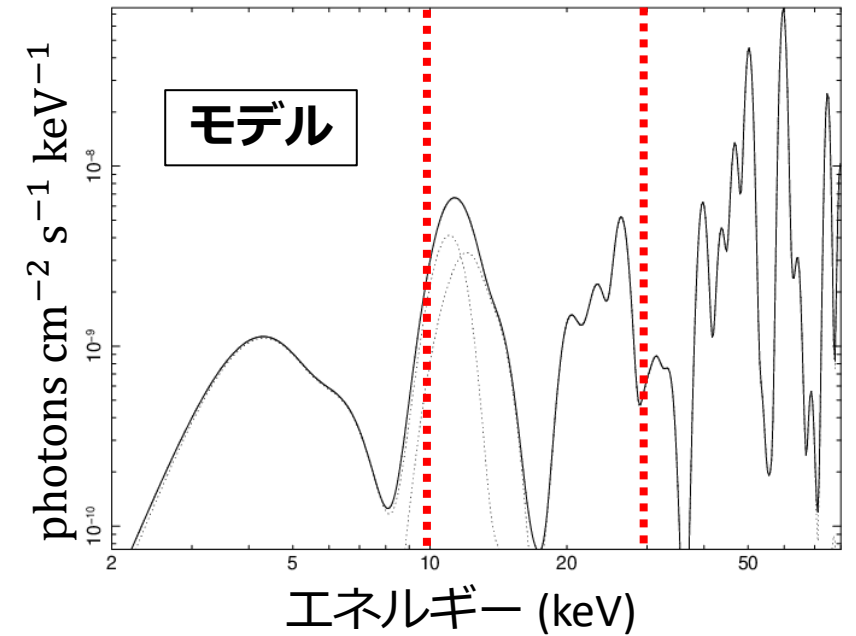
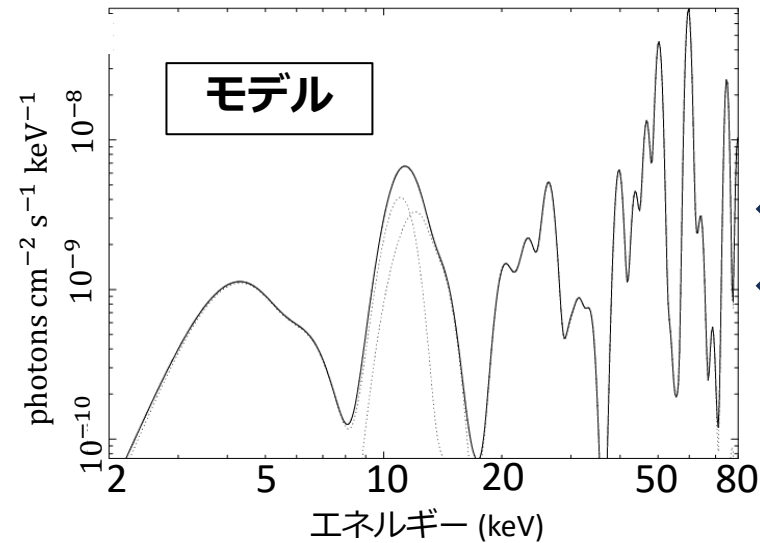


図4：NSMモデルのエネルギースペクトル

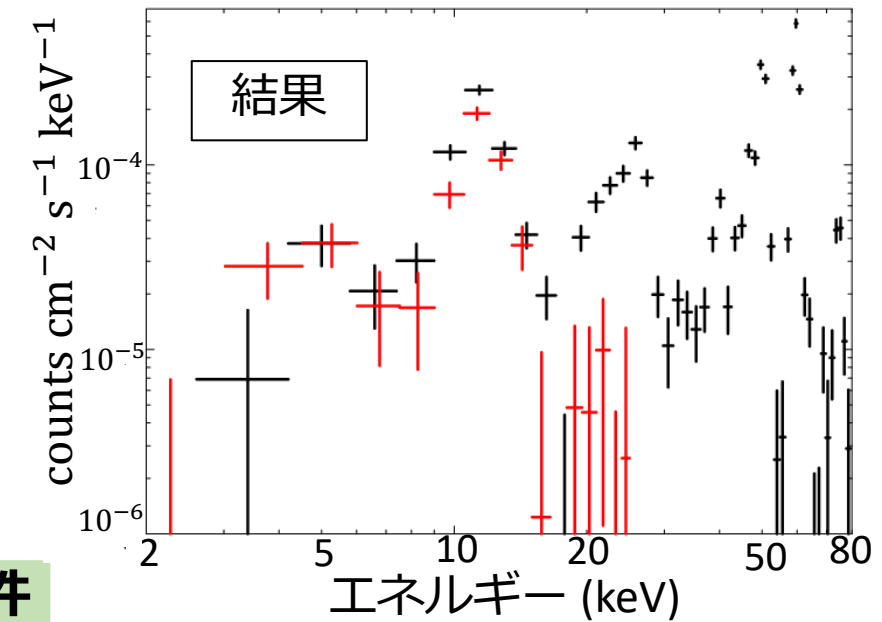
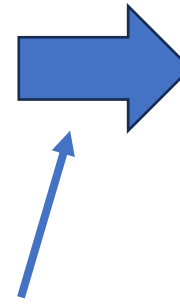
**硬X線だけでも  
1 kyrより古い残骸を区別可能**

# 結果②： I. 他天体との識別 (100 pc)

②HEX-P衛星のエネルギー応答関数を用いてシミュレーションし、結果をプロット



HEX-P  
エネルギー  
応答関数



## シミュレーションの条件

観測時間	1 Msec
ejecta質量	0.05 M <sub>⊙</sub>
距離	100 pc



## 結果②：Ⅰ. 他天体との識別 (100 pc)

②HEX-P衛星のエネルギー応答関数を用いてシミュレーションし、結果をプロット

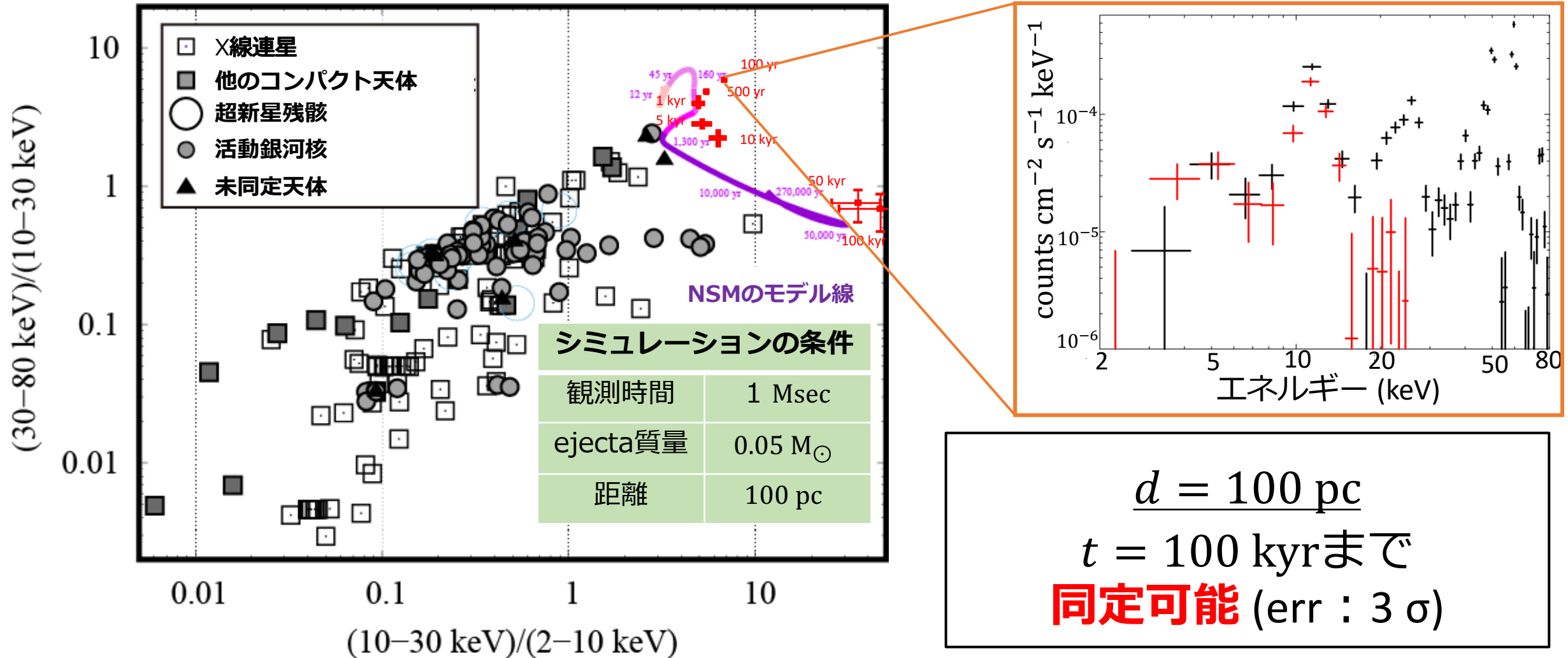
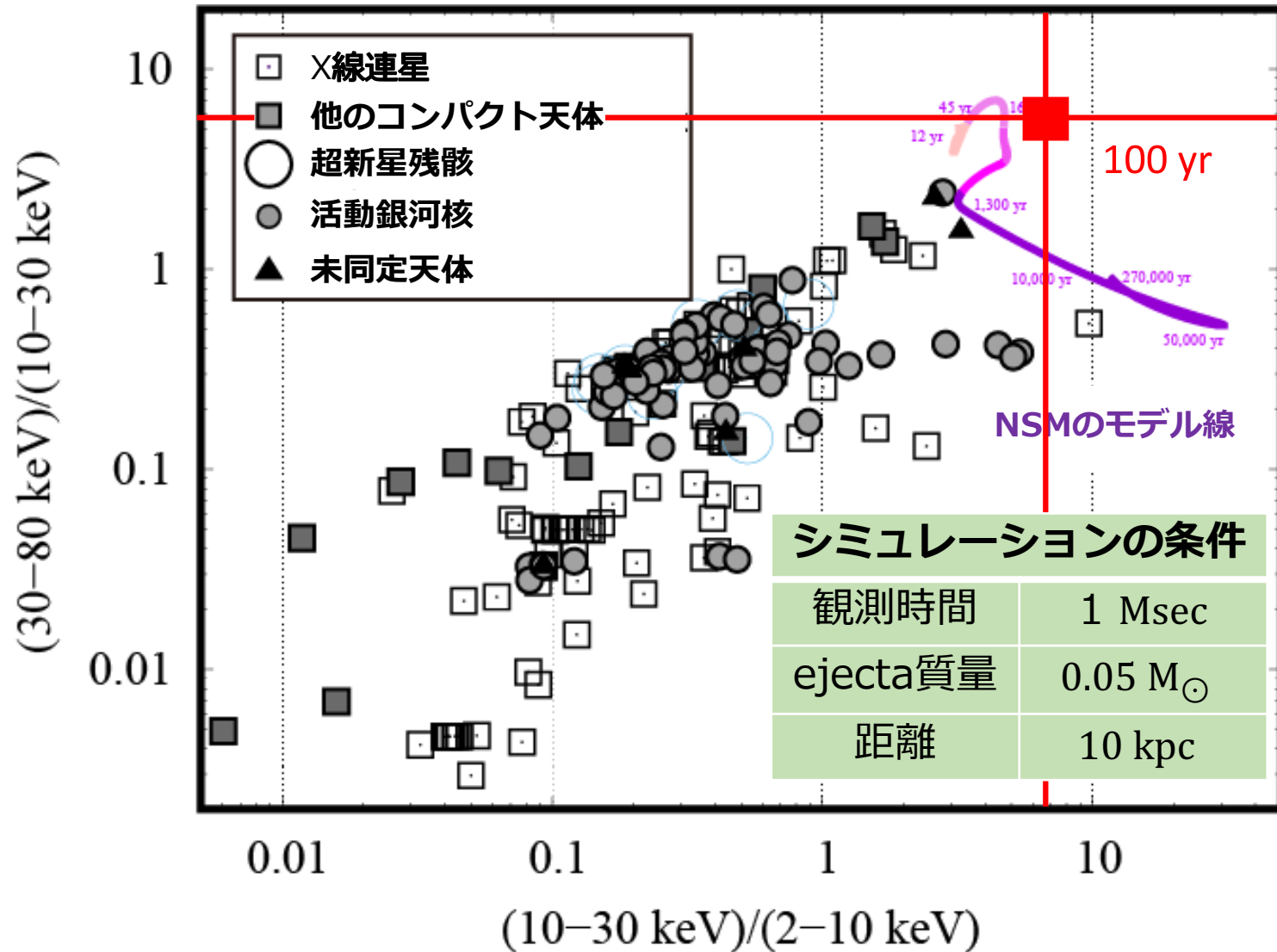


図6：HEX-Pを用いたNSMの同定 @10 kpc



## 結果②： I . 他天体との識別 (10 kpc)



NSM残骸は  
銀河中心付近に多く分布



$d = 10 \text{ kpc}$   
 $t = 100 \text{ yr}$ でも  
fluxが低い→errが大きい  
**同定不可**

図7：HEX-Pを用いたNSMの同定 @100 pc

# 方法：Ⅱ. 輝線検出

輝線セレクト

r-process核の娘核からの放射についての推定データから、  
各残骸年齢において最も強い輝線を抽出(特性x線,核ガンマ)

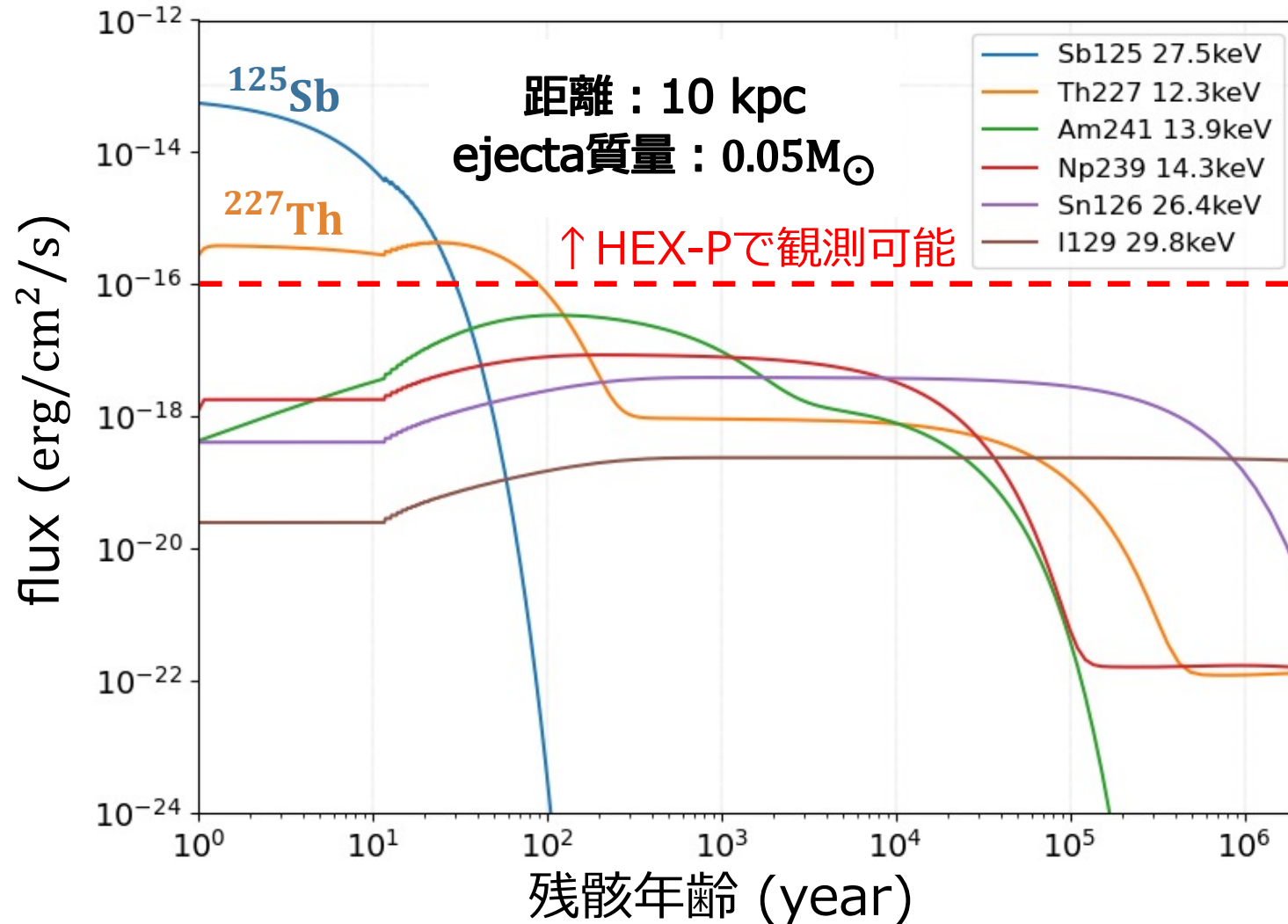
計算

選んだ輝線の各残骸年齢における、  
Flux(ドップラーブロードニング考慮)を計算

プロット

距離を仮定し、年齢-flux でプロット  
(今回は銀河中心付近を想定して距離 10 kpc と仮定)

## 結果③：Ⅱ. 輝線検出 (10 kpc)



HEX-Pの 1 Ms, 1 sigma 感度  
(10-30 keV)  
約 $10^{-16}$  erg/cm<sup>2</sup>/s

**観測可能な輝線@10 kpc**

$^{125}\text{Sb} : t \leq 100 \text{ yr}$

$^{227}\text{Th} : t \leq 100 \text{ yr}$

図 8 : NSMからの輝線flux @10 kpc

## 結果③：Ⅱ. 輝線検出 (1 kpc)

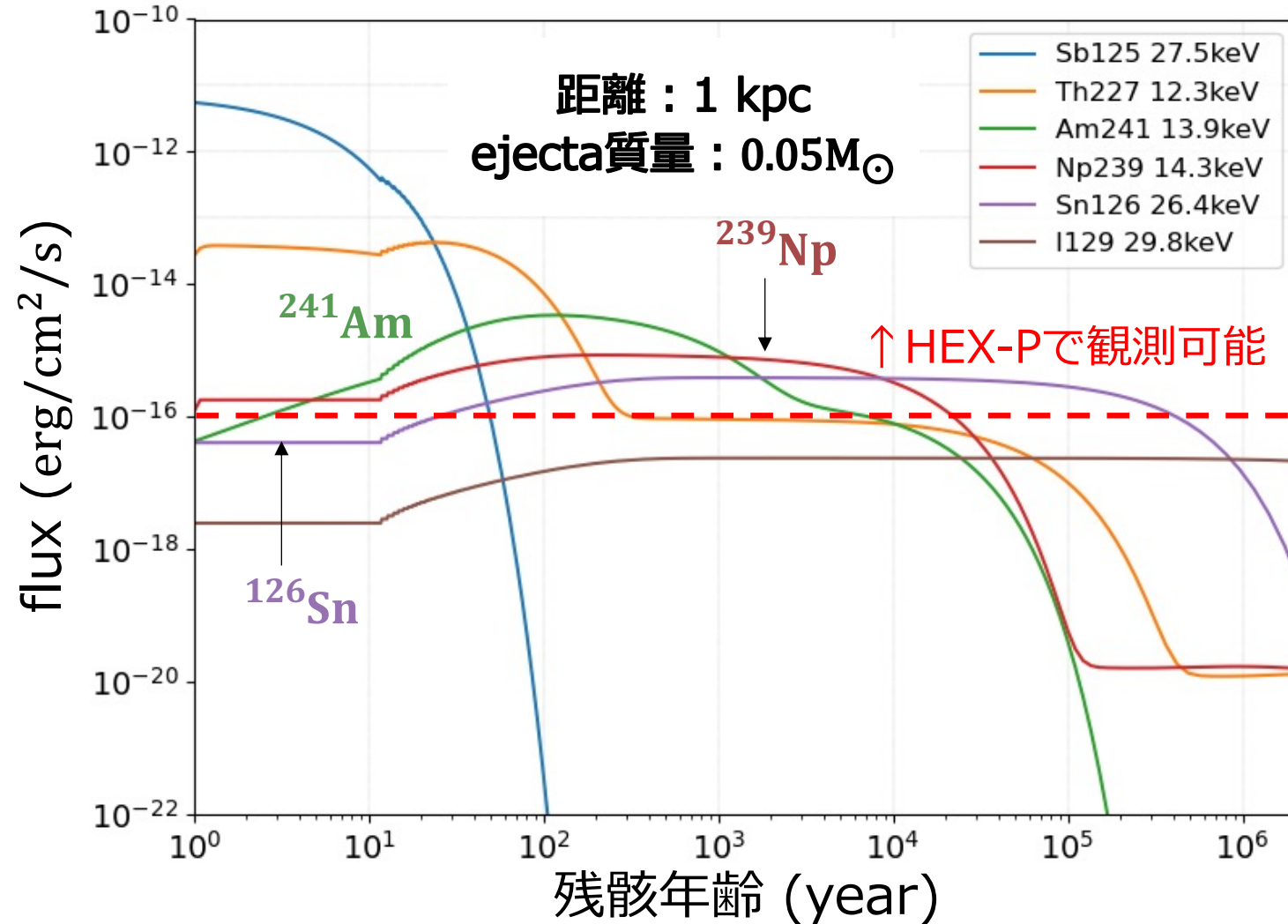


図9：NSMからの輝線flux @1 kpc

新たに観測可能な輝線  
@1 kpc

$^{241}\text{Am} : t \leq 10 \text{ kyr}$

$^{239}\text{Np} : t \leq 10 \text{ kyr}$

$^{126}\text{Sn} : t \leq 500 \text{ kyr}$

$^{239}\text{Np}$ は $10^2 - 10^4 \text{ yr}$ で一定



標準光源として  
距離の測定に使える

# まとめ・考察

r-process核の娘核からの特性X線も考慮した、次世代硬X線衛星HEX-Pでの観測推定

- 硬X線帯域までの観測でもスペクトル形状(color-color)でNSMを同定可能。  
ただし、HEX-Pでは $d = 10$  kpcで同定不可。  
100 pcまで近くなると100 kyrまで同定可能  
→100 pcは非常に近い距離であるため現実的ではない。
- 輝線に着目すると、距離10 kpcにおいて $^{125}\text{Sb}$ ,  $^{227}\text{Th}$ は  
 $t = \text{約}100$  yrまで観測可能  
1 kpcまで近くなれば、新たに $^{241}\text{Am}$ ,  $^{239}\text{Np}$ ,  $^{126}\text{Sn}$  が  
それぞれ $t = 10, 10, 500$  kyrまで観測可能になる。



**2030年代には、限定的だが、NSM残骸の輝線放射に手が届き始める**