

# はじめに

牧島一夫（東京大学理学系物理、理研基幹研）

## 《CANGAROOに関して》

- 科研費審査員のコメントや、戸谷講演に賛成。学会会議でも牧島は同様な発言。
- 総括・反省がひじょうに遅れたが、本日の試みは良い。
- 「総括を終えてから、CTA」は、きわめて当然。

## 《多波長観測の四天王》

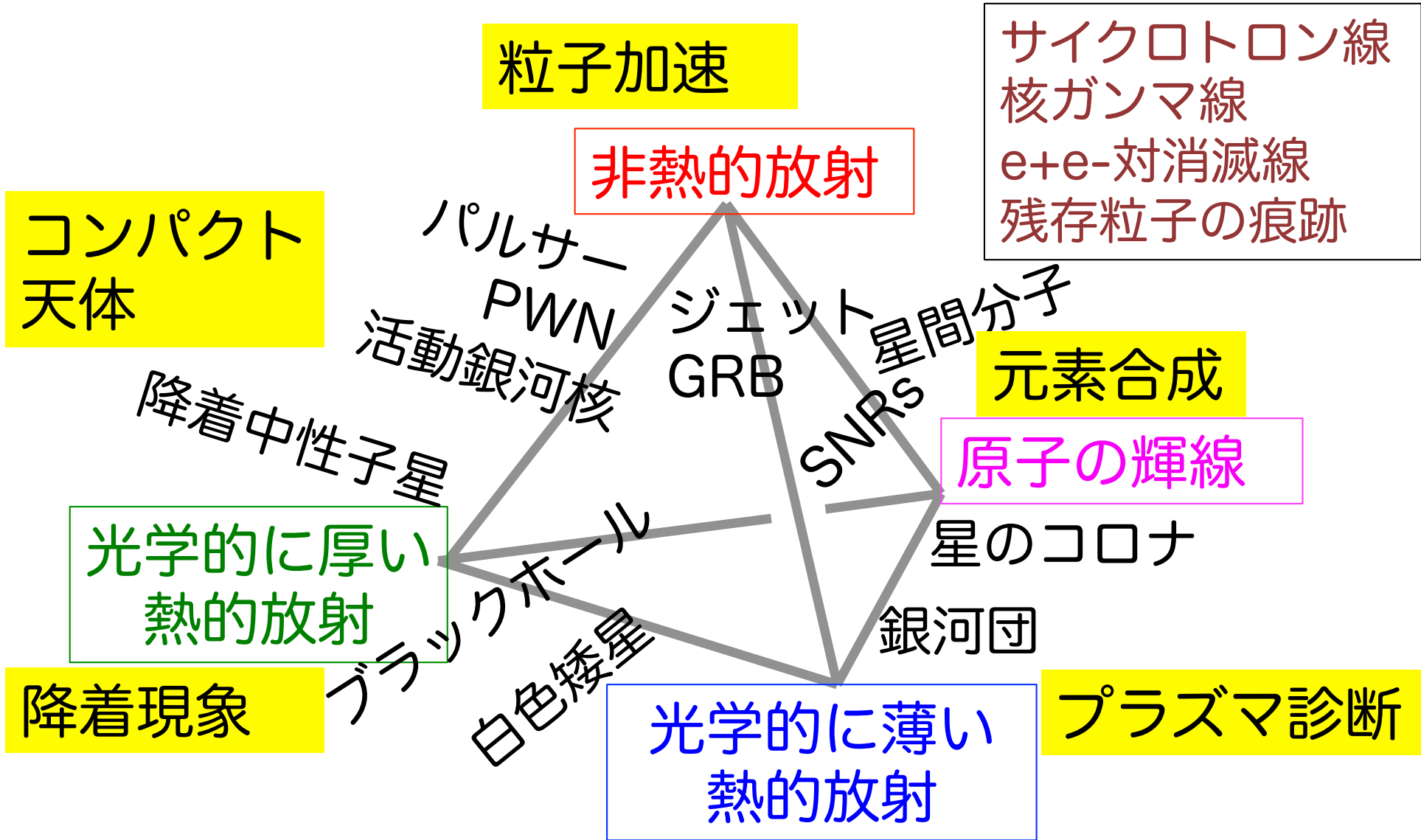
- シェル型超新星残骸 (RXJ 1713-394, Vela Jr.,...)
- Pulsar Wind Nebulae (Crab, Vela, MSH 15-52, ..)
- ジェットをもつAGN (さまざまなBlazars)
- ガンマ線バースト

牧島は過去5

## §1. X線で見える宇宙

っている

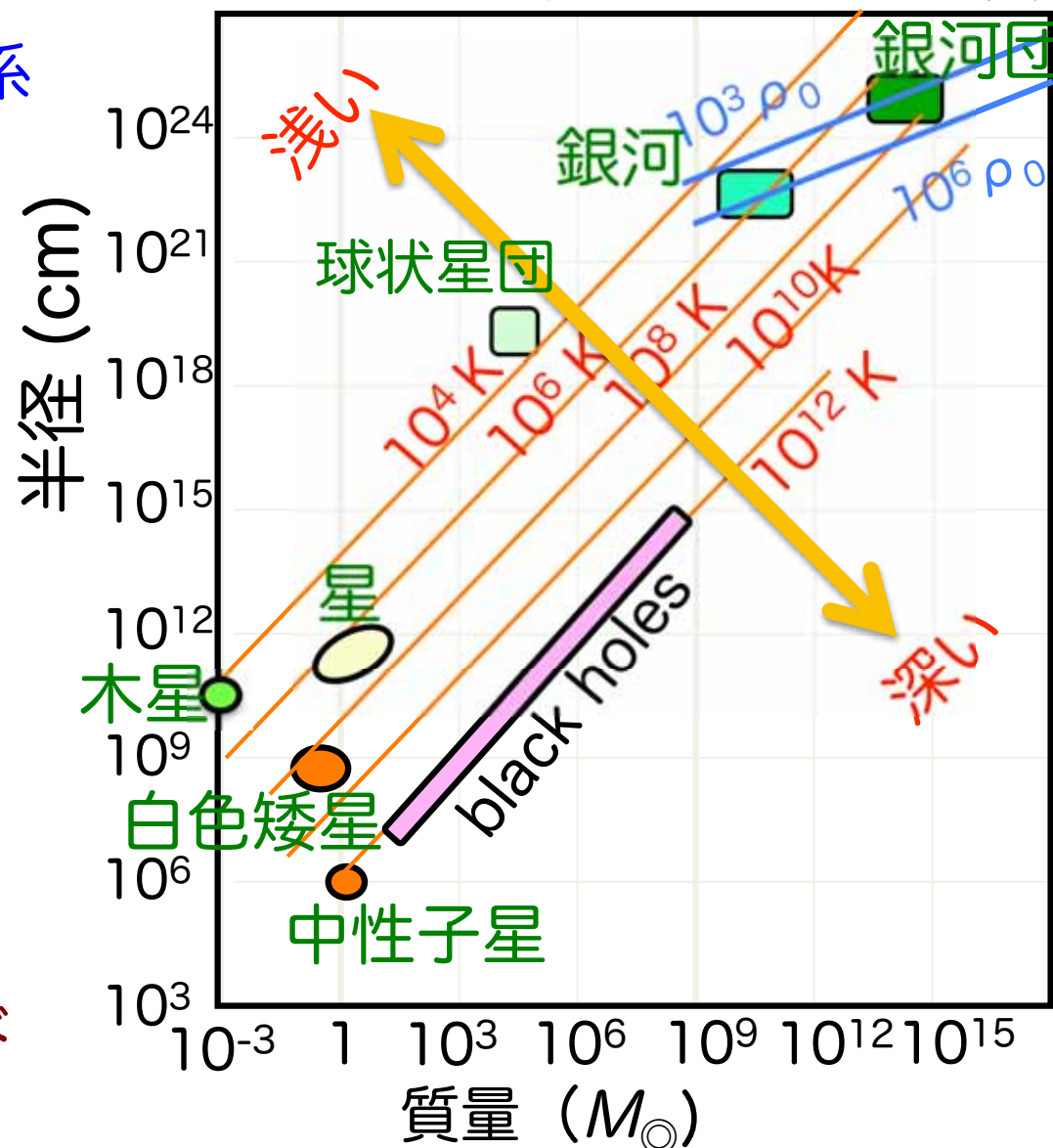
# (1-1) X線放射の分類と関連する現象



# (1-2) X線のメリット

- (1) X線光子の $h\nu$  ~ 自己重力系のビリアル温度
- (2) 宇宙で最も卓越する既知のバリオン成分は、X線でのみ検出可能
- (3) 化合状態によらない元素組成分析が可能
- (4) X線では超高エネルギーの電子まで検出可能で、親粒子より圧倒的に多数
- (5) 高い物質透過力をもつ
- (6) 低い環境バックグラウンド

自己重力系のビリアル温度



# (1-3) X線は大気を貫けない

あすか (1993)

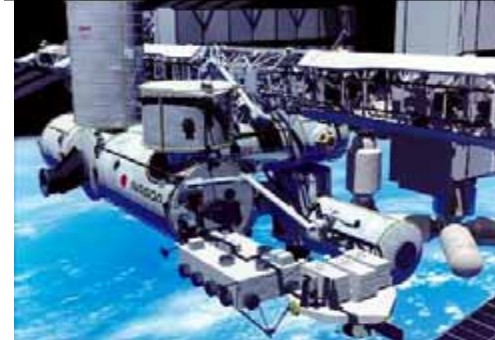


すざく (2005)



ASTRO-H  
(2014)

MAXI (2009)



てんま (1983)



ぎんが (1987)



はくちょう (1979)



## §2. 光子で探る宇宙線加速現象

### (2-1) 光子を用いる利点と欠点

荷電粒子の直接検出に比べ、X線・ $\gamma$ 線は---

Merits:

- 直進でき撮像が容易  
→加速源の位置や形状→天文学的同定
- 2次粒子としてキャリア数が多い→情報の増幅

Demerits:

- 2次粒子なので、親となる宇宙線の情報が間接的。
- 感度が、ハドロンより電子（陽電子）に偏る。

## (2-2) 謎解きのステップ

### 加速天体に関する高エネルギー光子情報

位置、広がり、光子強度、光子スペクトル、変動の有無

被加速粒子の特定

光子放射機構の特定

Leptonic (SR, IC, Bremss) or Hadronic ( $\pi^0$ , 陽子SR)

粒子スペクトルと粒子 $E_{\max}$ の推定

$$\begin{aligned} E_{\max} &> E_{\text{knee}}? \\ E_{\max} &> E_{\text{GZK}}? \end{aligned}$$

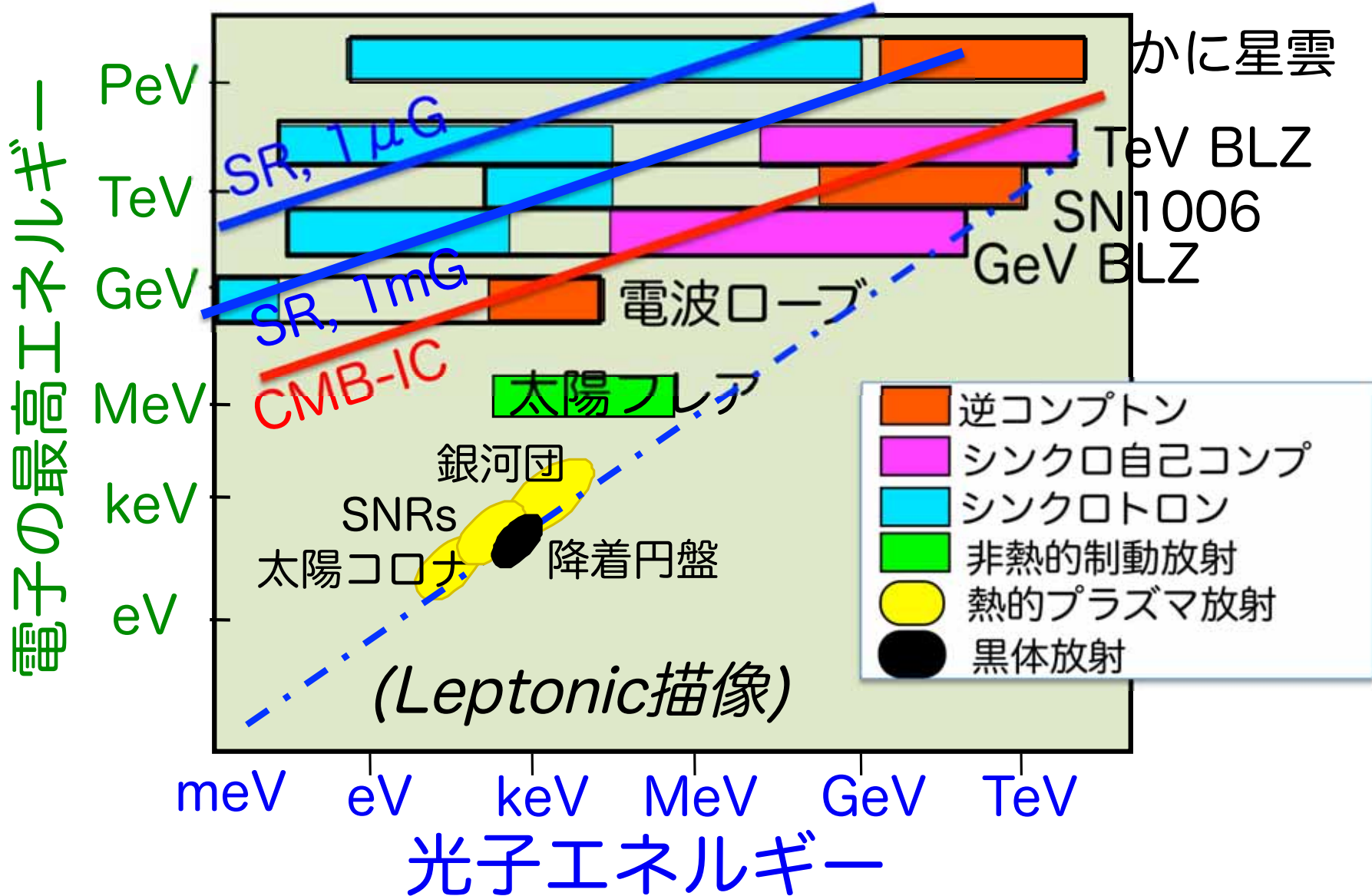
加速機構の特定とそのenergeticsの理解

予期せぬ/exotic  
な現象を捉える  
センス

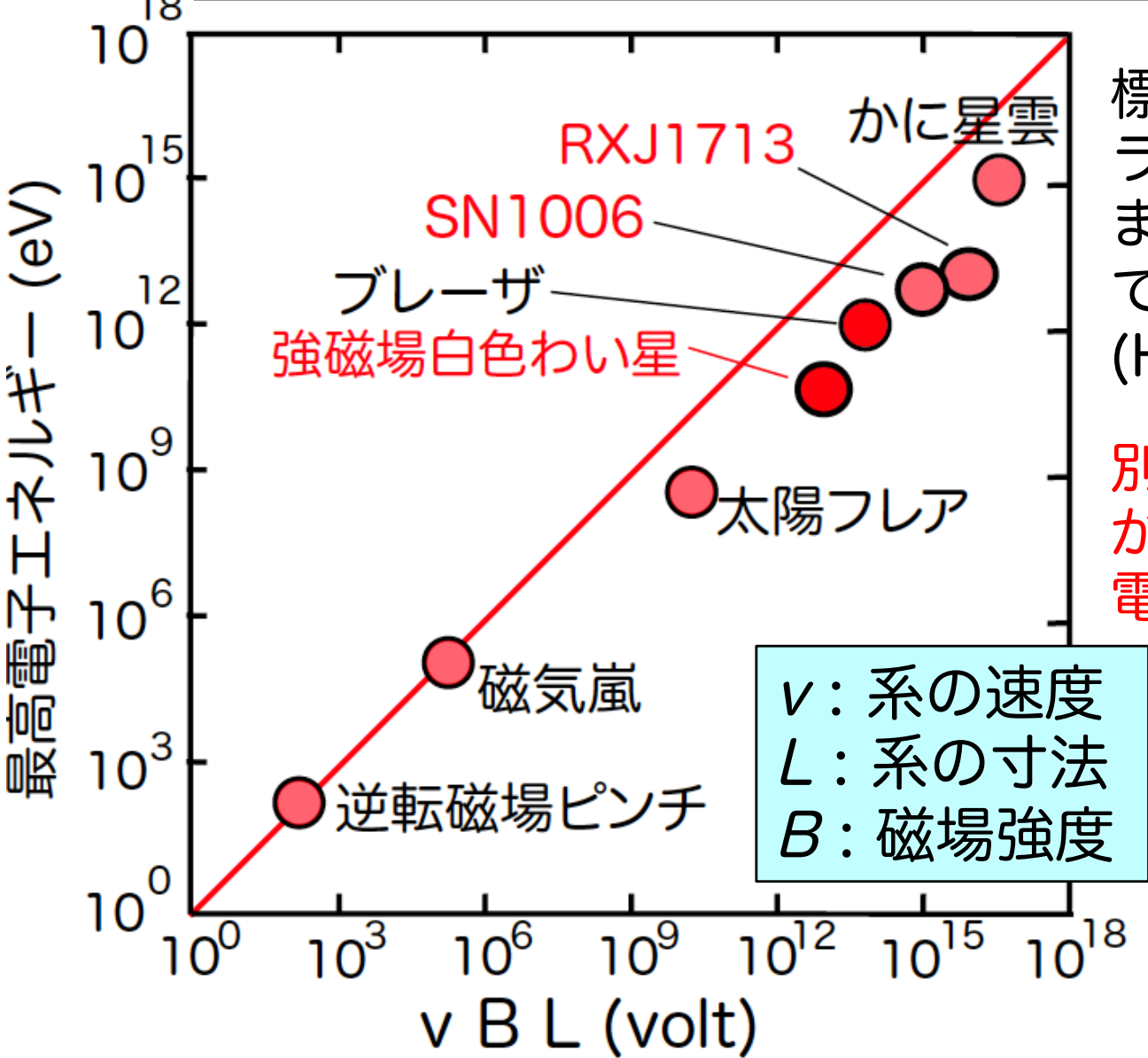
物理的な一般論の構築

- 電子と陽子の加速の違い
- スケーリング則
- エネルギー非等分配の法則

# (2-3) 1次電子と2次光子のエネルギー



# (2-4) 加速現象のスケーリング則



標準的解釈：粒子は、ラーマー半径～系の寸法まで、フェルミ過程などで統計的に加速される (Hillas 1984)。

別解釈：ローレンツ力が粒子を電場加速する。電子と陽子は同様に加速。

$v$  : 系の速度  
 $L$  : 系の寸法  
 $B$  : 磁場強度

Makishima (1999)  
 牧島、物理学会誌  
 2008年8月号

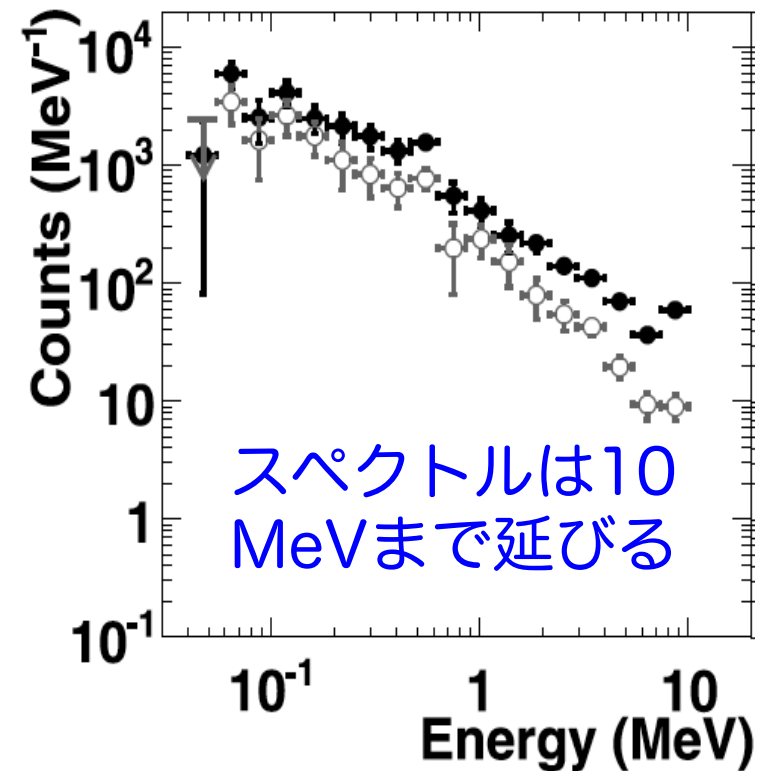
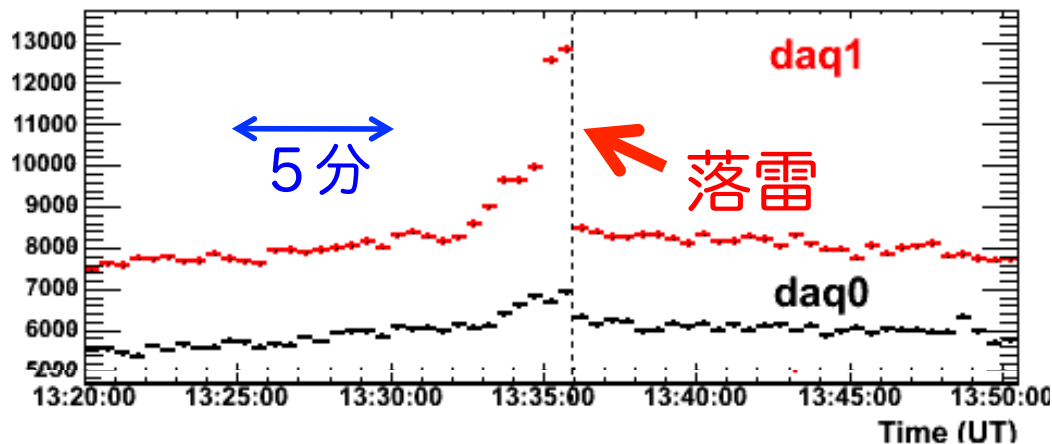


## (2-5) 雷雲からのガンマ線：静電場加速

GROWTH (Gamma-Ray Observations from Winter Thunder clouds)プロジェクト：理研+東大+柏崎刈羽原発

日本海沿岸の冬雷雲から、5季で14例も、ガンマ線シャワーの検出に成功。うち5例は継続時間<1秒で、落雷に同期。

残る9例では、ガンマ線は数分間も続き、落雷に同期せず、むしろ落雷で停止！

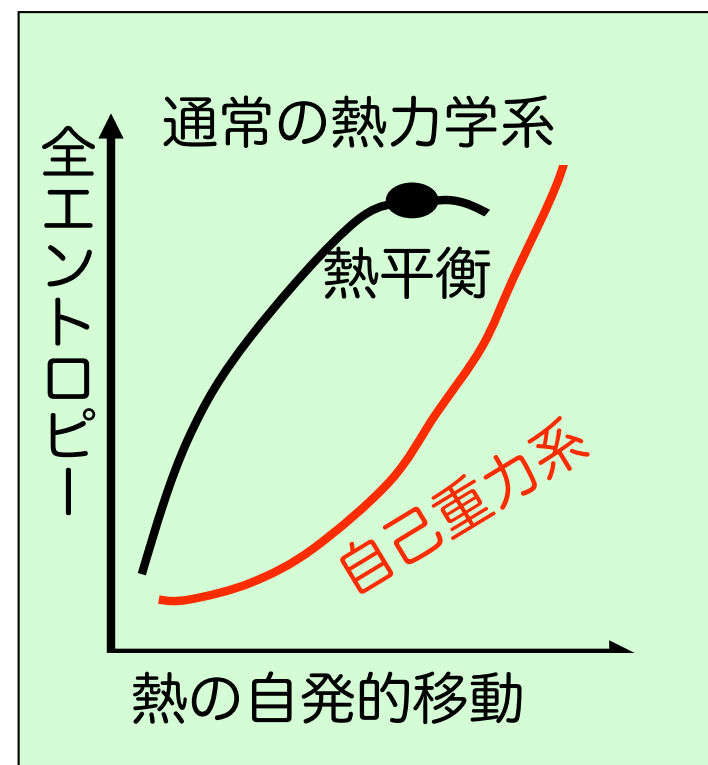


Tsuchiya, Enoto + 2011: *J.Geog.Res.* 116, D015161  
Tsuchiya, Enoto, Torii + 2009, *PhysRev.Lett.* 102, iDD255003  
榎戸輝揚、土屋晴文：天文月報、2008年11月号  
Tsuchiya, Enoto + 2007: *PhysRev.Lett.* 99, iD165002

## (2-6) 加速現象の背後にあるもの： エネルギー非等分配の法則性

星、球状星団、銀河、銀河団など、自己重力系のもつ特異な性質

- ・ 系が収縮し2単位の重力エネルギーを解放  
⇒ 1単位を外界に放出、残り1単位を内部エネルギーとして蓄積 (ビリアル定理)。
- ・ 系の比熱は負。外界に放射を出すと、系は収縮し高温に⇒ますます放射しやすい。
- ・ 正のf.b.= 重力熱力学カタストロフィ。
- ・ 系のエントロピーは自発的に減少。外界まで含めるとエントロピーは増大するが、極値は存在しない。
- ・ 内部にエントロピー供給があれば、カタストロフィは一時停止。星はこの状態。



宇宙、星、生命などの「進化」の原動力⇒ 21世紀の課題の1つ

# §3. X線の将来

## (3-1)ラインナップ

Chandra, XMM-Newton, **すざく**



INTEGRAL, Swift, **MAXI**

稼働中、**赤は日本**

上：狭視野 望遠鏡型

下：広視野 探査型

2012	13	14	2015	16	17	18	19	2020	21	22
------	----	----	------	----	----	----	----	------	----	----

カレンダー年

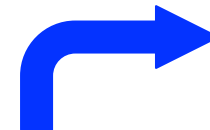
NuSTAR (米)、  
初の硬X線撮像



ASTRO-H



GEMS (米+**日**)、初の  
X線偏光ミッション



小型科学衛星として提案中

FFAST：硬X線全天サーベイ

DIOS：missingバリオン探査

Polaris：X線偏光ミッション

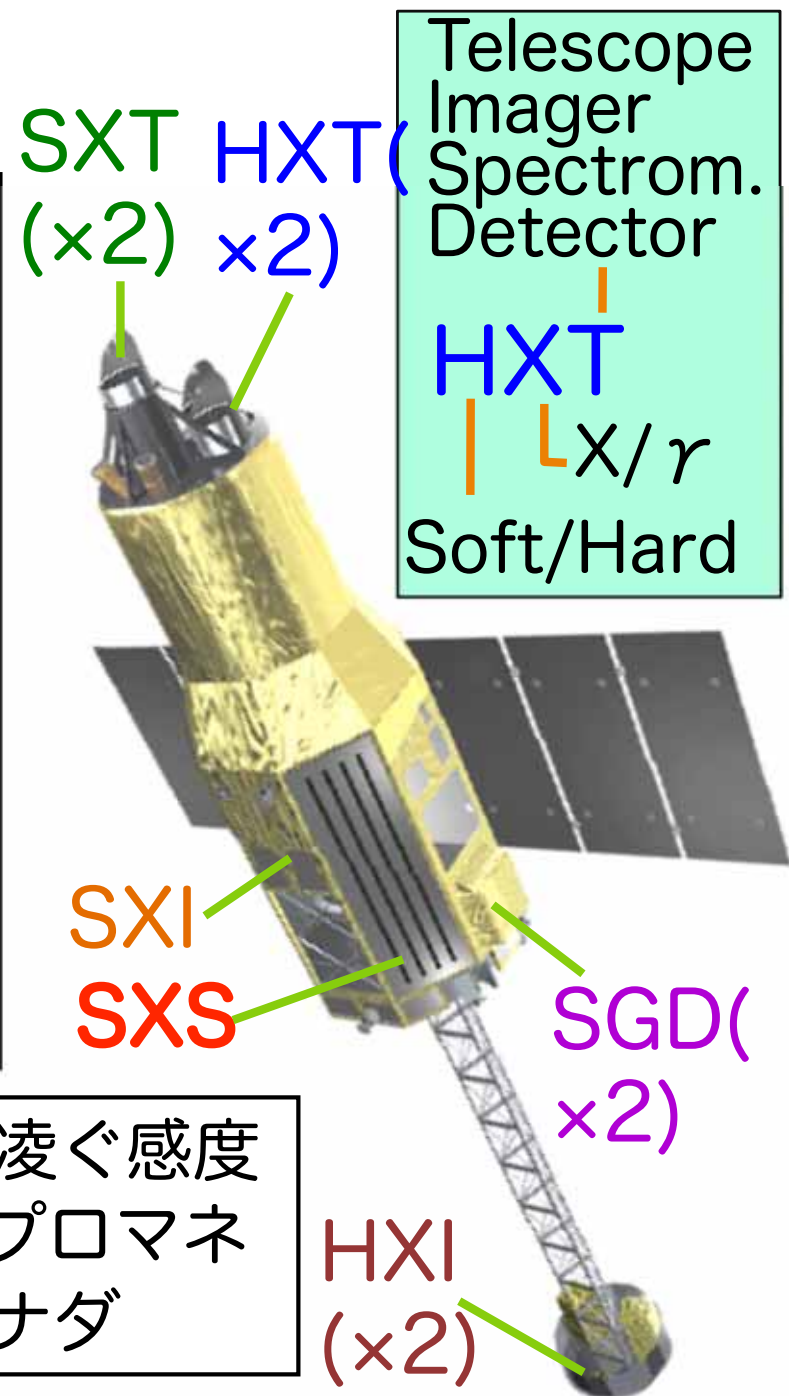
CAST：MeVガンマ線観測

ESA主導大型ミッ  
ション Athena (旧  
IXO、旧旧XEU)。  
日本も参加予定。  
今年中にESAで選定。

## (3-2) ASTRO-H

- ✧ SXS: 極低温マイクロカロリメータ、0.5-10 keV,  $\Delta E/E \sim 0.1\%$  (NASA, JAXA, 首都大、金沢大、理研ほか)
- ✧ HXT: 合成多層膜スーパーミラー、~80 keV まで反射結像 (名大, JAXAなど)
- ✧ HXI: 半導体硬X線イメージャー、5-80 keV。「すざく」HXDの発展版(JAXA, 東大, 名大, 埼玉, 広島, 早大, Stanfordなど)
- ✧ SGD: HXIと似るが、光学系を使わずCompton運動学を利用。60-600 keV。
- ✧ SXI: 初の国産CCDによるX線カメラ (阪大, 京大, 東大, MITなど)。

- ✧ 0.3-600 keV、「すざく」を大きく凌ぐ感度
- ✧ 日本は総力戦、~25機関、高橋忠幸プロマネ
- ✧ 広範な国際協力。NASA、ESA、カナダ



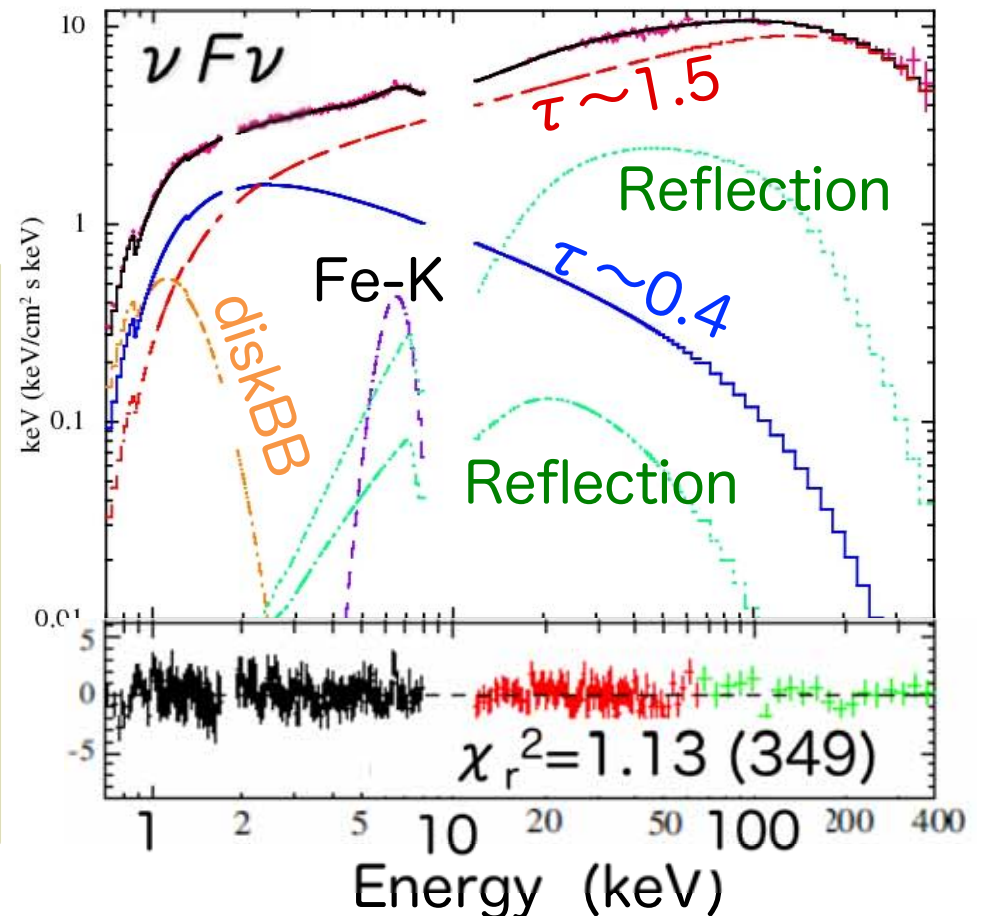
# §4. 「すざく」からASTRO-Hへ

## (4-1) ブラックホール(BH)

- 我々はBH連星 Cyg X-1 ハード状態の放射を、円盤( $R_{in} \sim 10R_s$ )-コロナ描像で説明に成功。
- ASTRO-H HXI**では硬X線感度が2桁アップするので...

- 他の多くの**BH連星**で同様なスペクトル分解⇒モデルを精密化。
- AGN**にこの手法を用い連続成分を正確に決定⇒鉄輝線の相対論的な広がり⇒BHスピンを推定。
- 近傍銀河に見られる**大光度X線天体 (ULX)** は、中質量BHか？

「すざく」による Cyg X-1 の広帯域スペクトル  
(Makishima, Yamada+08)



## (4-2) マグネター

[ $10^{14-15}$  G の超強磁場をもつ  
とされる特異な孤立中性子星]

「すざく」の成果：

- マグネターは軟X線成分に加え、異様に硬いハード成分をもつ。
- 年齢とともにハード成分は弱く、しかし硬くなる。

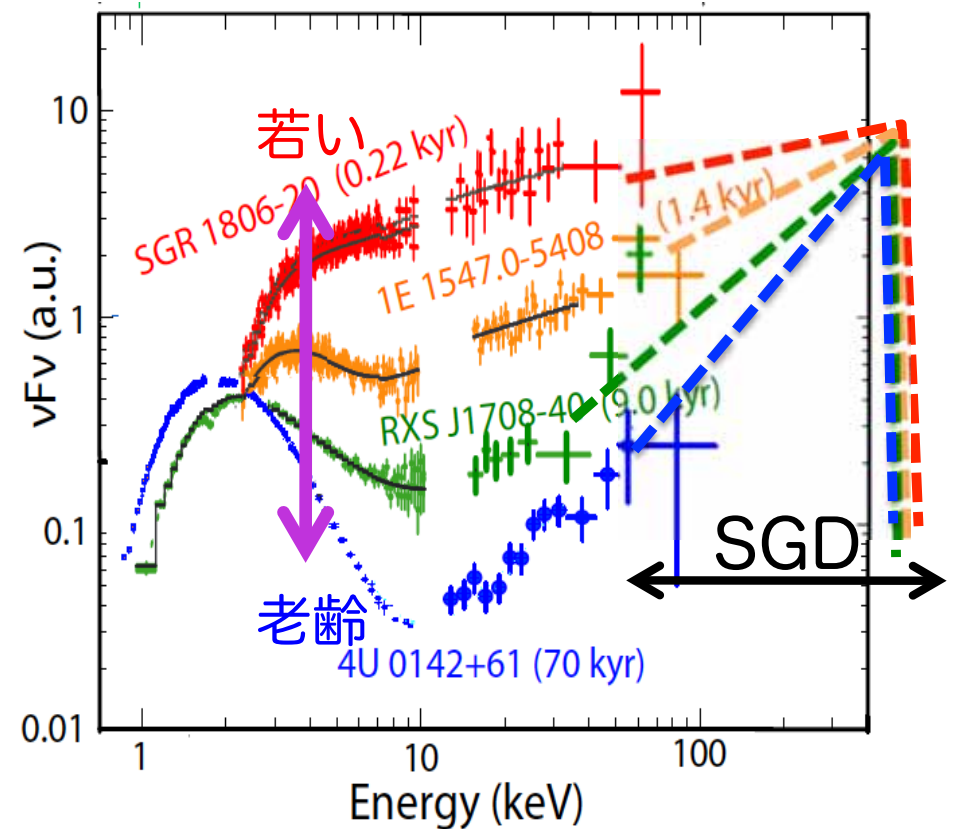
我々の仮説 (Enoto+10b)：

- マグネター磁気圏で $e^+e^-$ 対生成
- $e^+$ が星表面で対消滅 $\Rightarrow$ 511 keV
- この光子が超強磁場で2光子分裂を繰り返しハード成分を生成

ASTRO-Hを用いて：

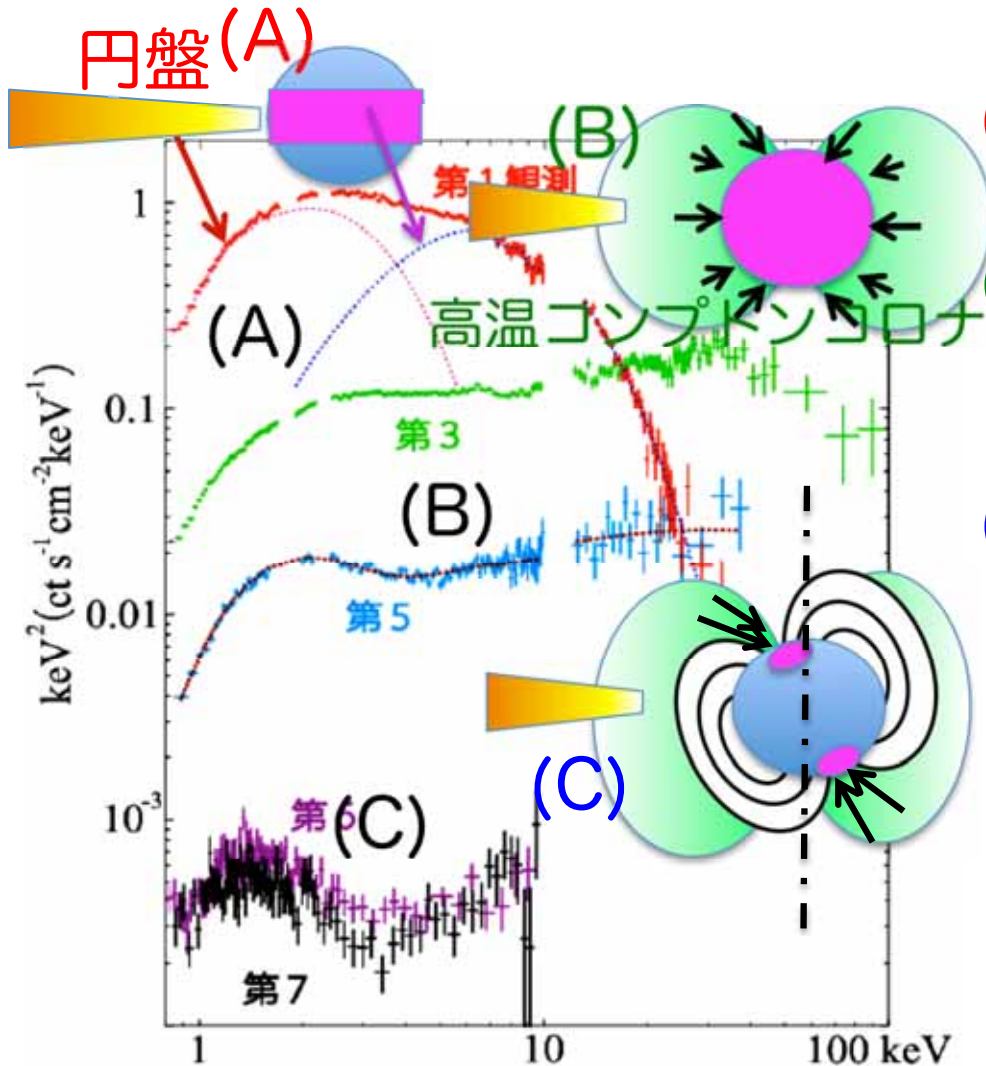
仮説が予言する $>511$  keVでの鋭いカットオフをSGDで探査

「すざく」によるマグネターの広帯域スペクトル (Enoto+10a, 10b, 11)



## (4-3) 弱磁場中性子星

「すざく」による Aql X-1  
の観測結果 (Sakurai+2012)



(A)赤道降着：大光度のとき。NS  
の赤道部分が光る。 $R_{bb} \sim 3$  km

(B)全面降着：球対称な高温コロナ  
が降着、NS全面からの黒体放射  
をコンプトン散乱し硬X線に。

(C)磁極降着(?)： $R_{bb}$ は再び減少。  
磁気圏がせり出しパルサー的に。

(C)をASTRO-Hで⇒パルス  
検出できそう。その軌道ドッ  
プラーからNS質量を推定⇒  
明るいときのバースト半径と  
合わせ**原子核EOSに制限**

## (4-4) 銀河団

- $z=0.1\sim 0.9$ の34個の銀河団で、プラズマの空間広がり(X線)と銀河の空間分布(可視光)を比較。
- 近傍の銀河団ほど、銀河がプラズマ中心に集中することを発見 (Xu, Inada, Makishima)。
- 銀河はプラズマの抵抗で宇宙年齢かけポテンシャル中心へ落下。Makishima+2001の予言を実証。
- 銀河が失った力学的エネルギー  
⇒プラズマ加熱と粒子加速

「すざく」：非熱的硬X線に厳しい上限。BeppoSAXによる「検出」を否定 (Nakazawa+09)

### ASTRO-H:

- 銀河がプラズマを引きずる現場をSXSでドップラー計測。
- 真の非熱的信号 (IC放射) をHXIを用いて深く探査。
- 構造形成終了後の宇宙最大のエネルギーフローを解明。
- 銀河団は最高エネルギー宇宙線の加速現場かも？