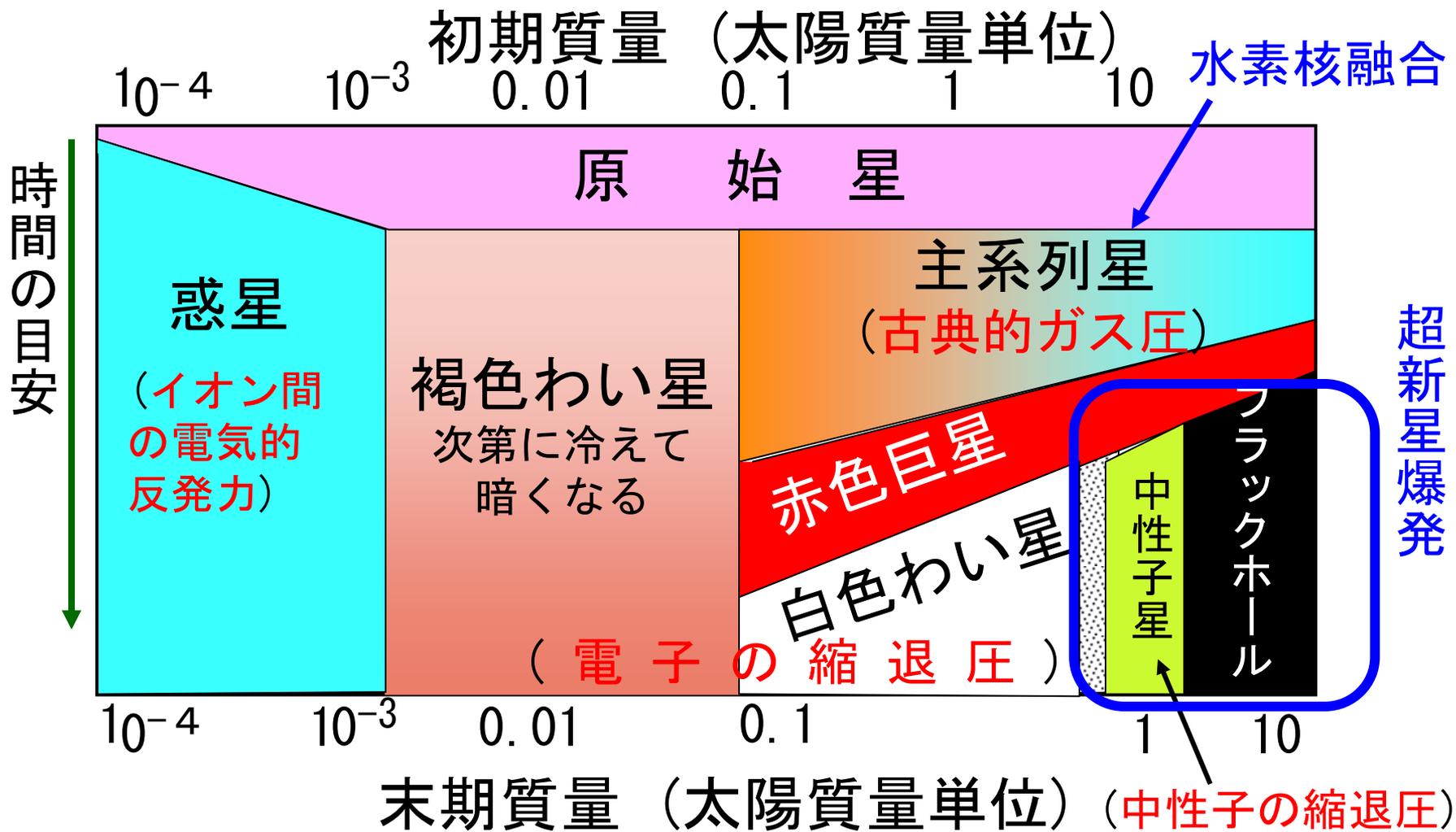


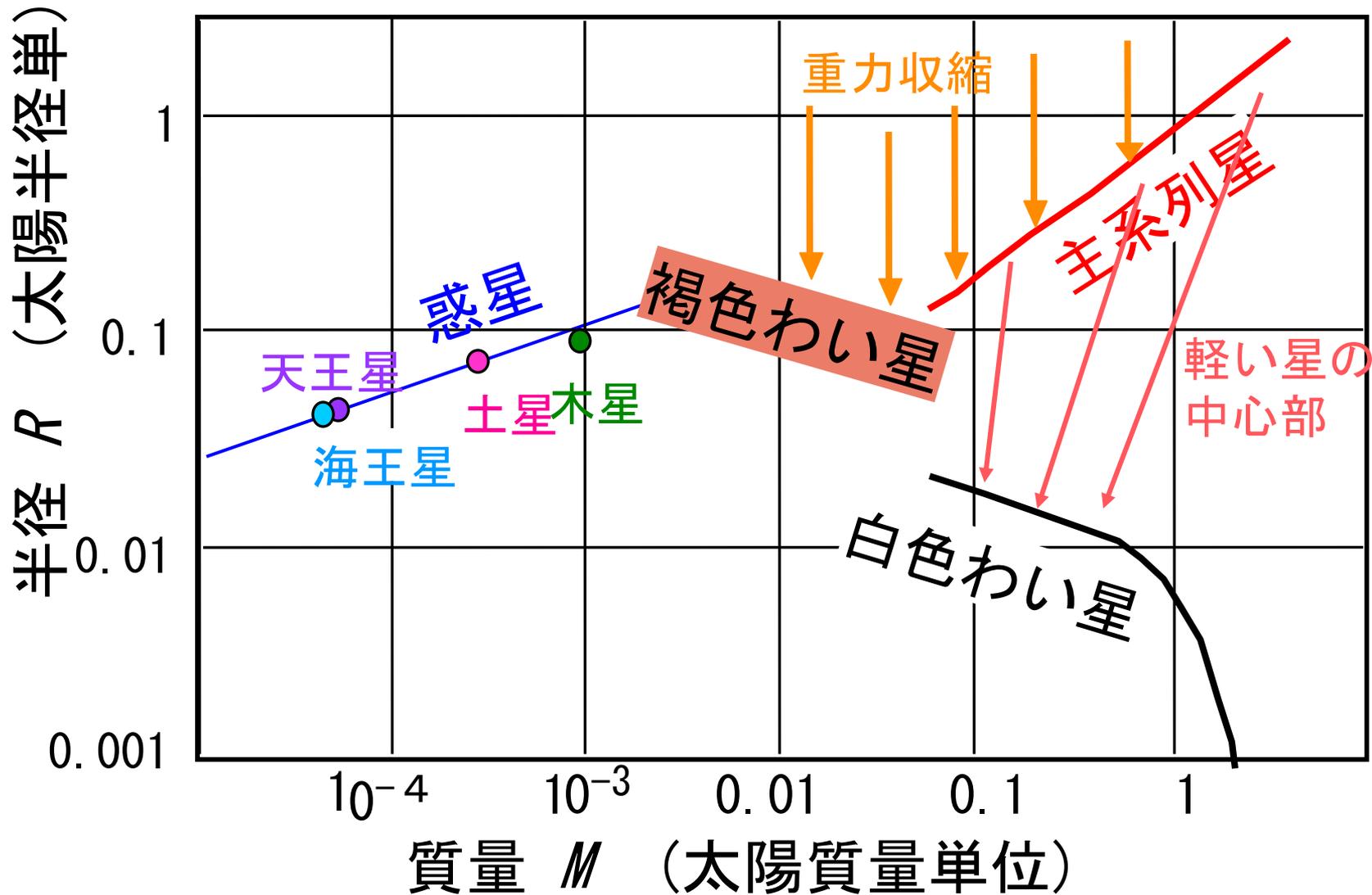
X線で探るコンパクト天体 ～「すざく」から*ASTRO-H*へ～

東京大学 理学系研究科 物理学専攻
および
理化学研究所 宇宙観測実験連携研究G
牧島一夫

星の誕生と進化 (カッコ内は圧力)

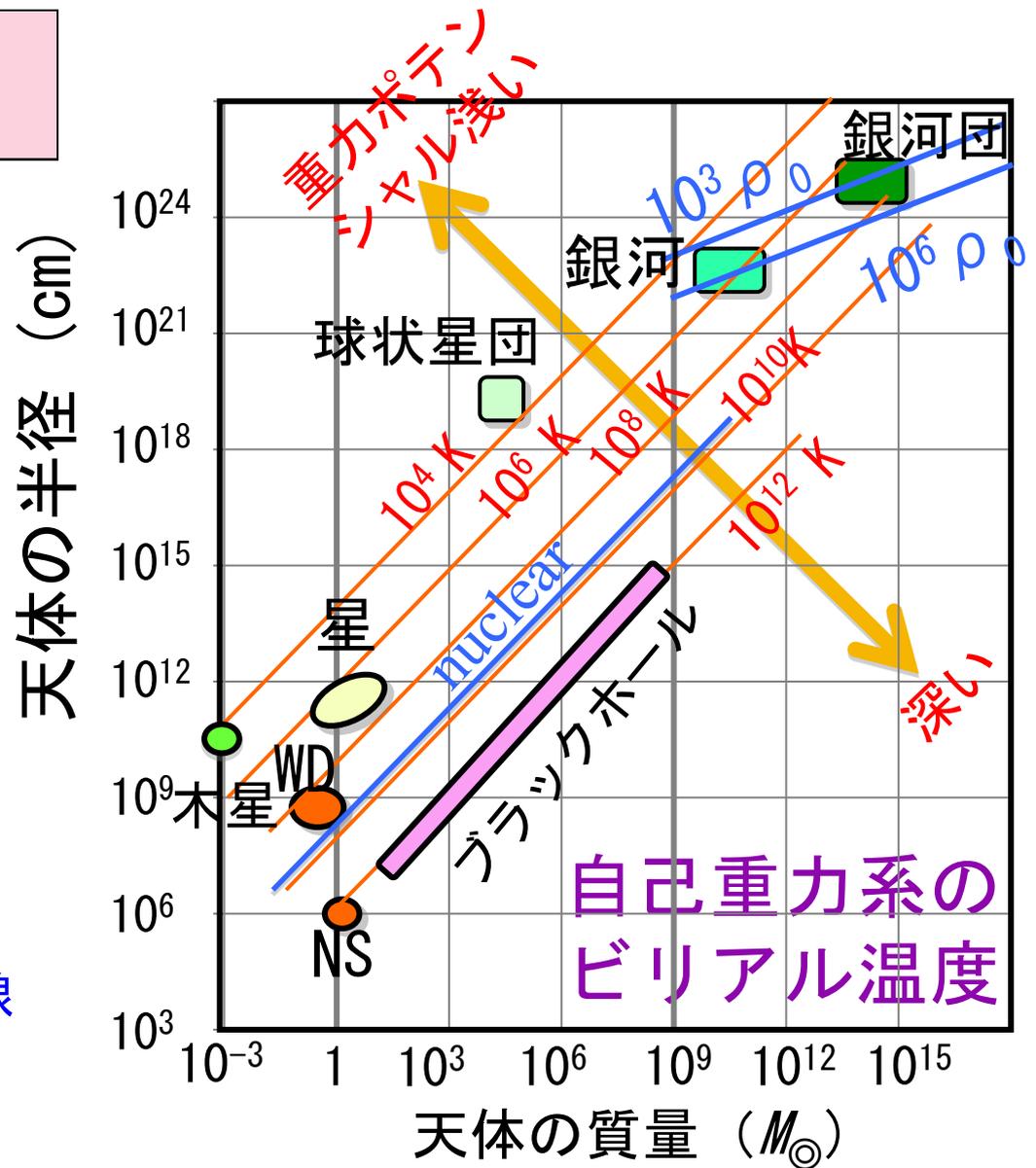


星のM-R関係

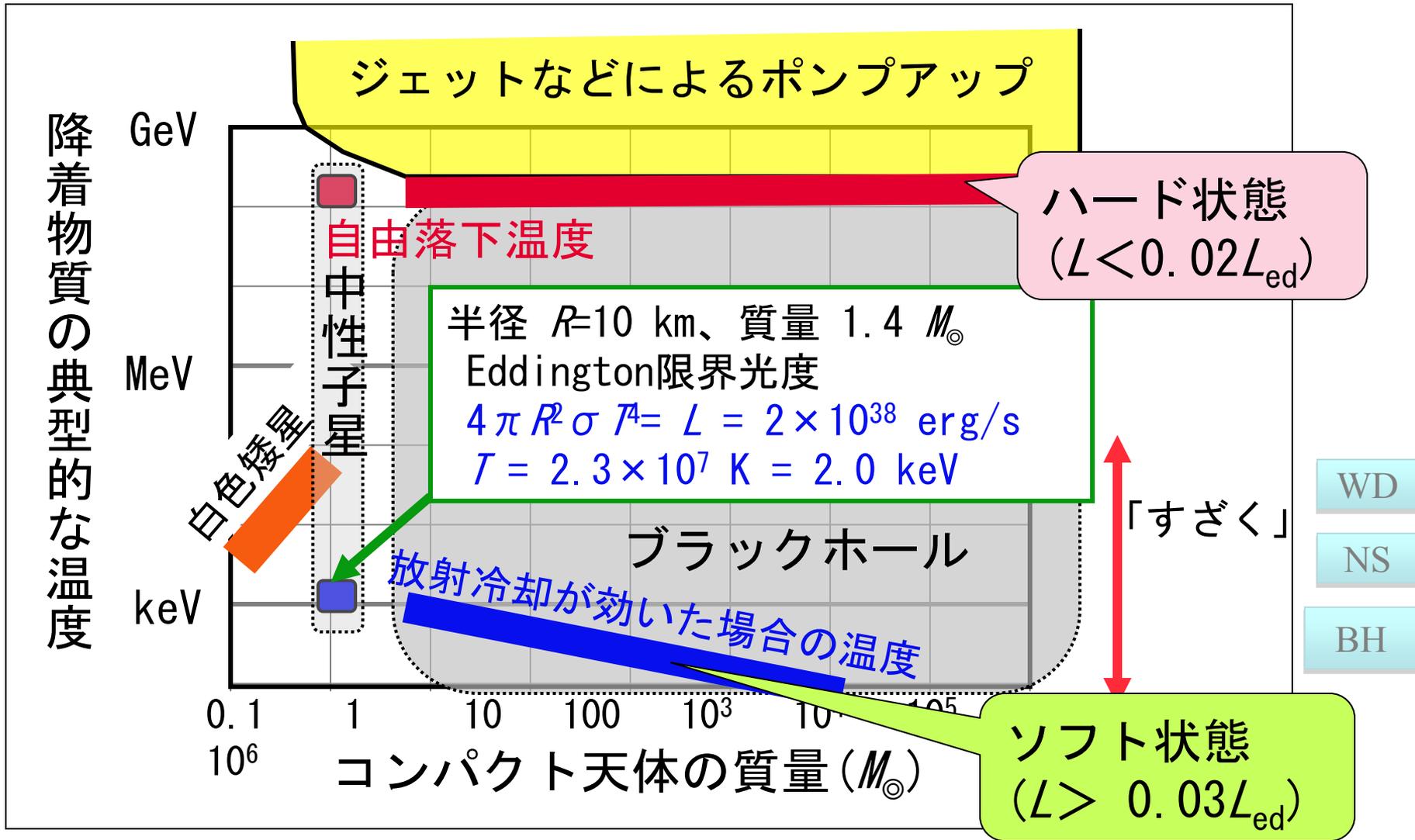


なぜX線か

- (1) X線の $h\nu$ は様々な自己重力系で、重力場が熱化した場合の温度に近い(右図)。
- (2) 加速された電子から高い確率で放射される。
- (3) 化合物の状態によらず元素組成を計測できる。
- (4) ガスやダストに対し透過力が高い。
- (5) 赤外線、可視光、ガンマ線などに比べ環境バックグラウンドが低い。

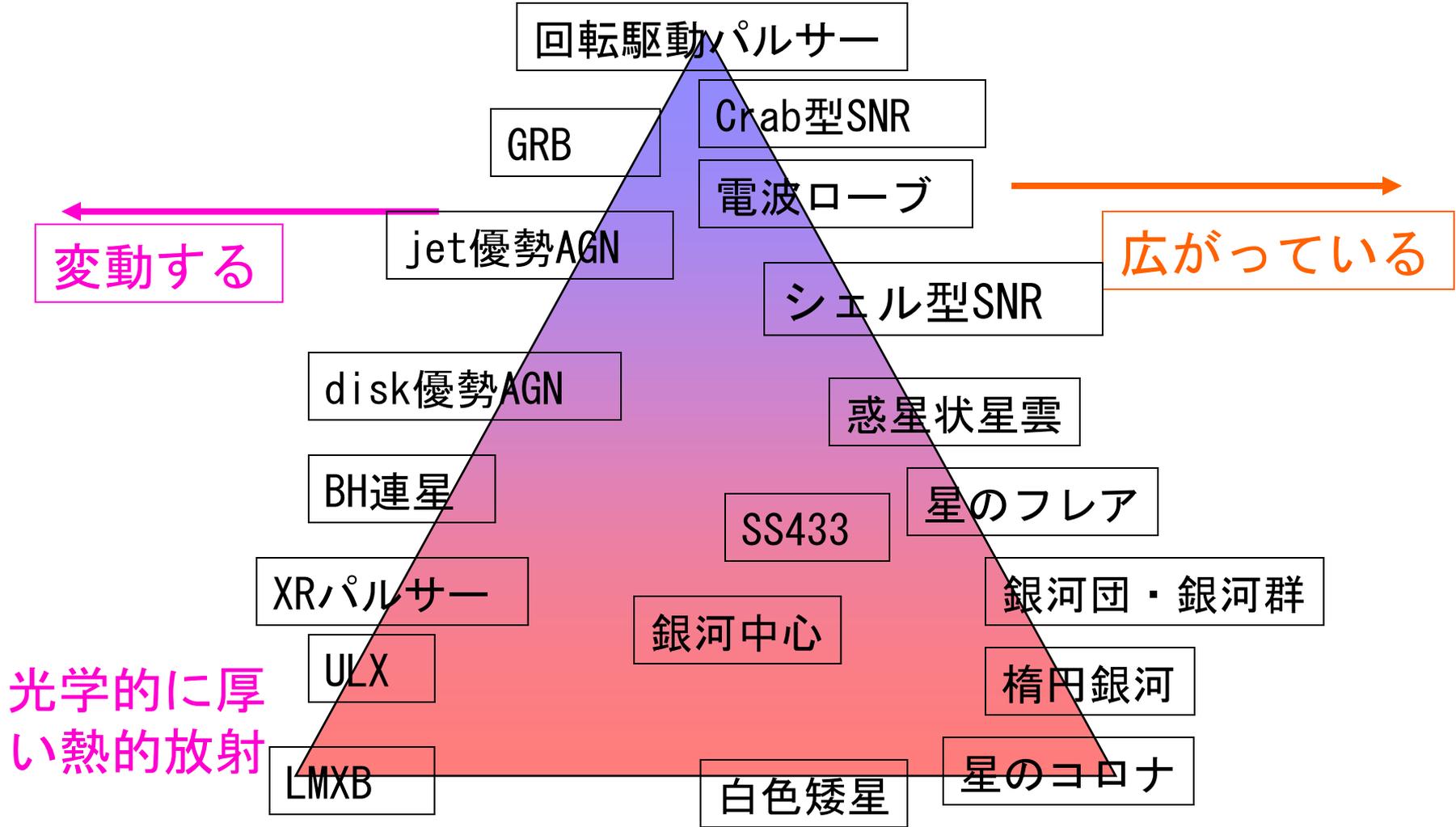


コンパクト天体への質量降着



X線を放射する天体

非熱的放射

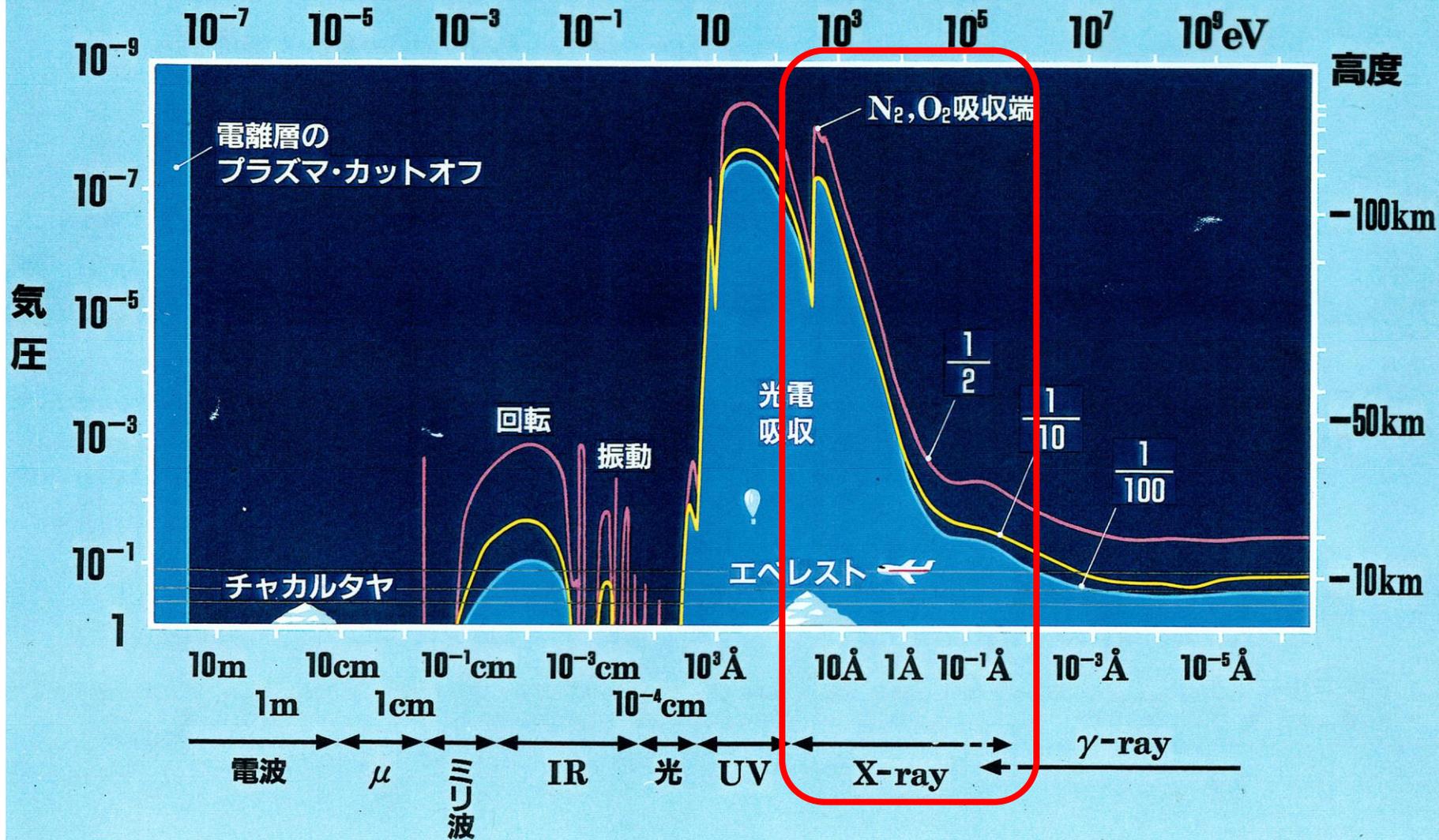


メッセージ 1

良い研究の陰に、良いグラフあり

- いろいろなグラフを描きまくれ！
- 軸に何を取るか。新しい変数の導入。
- 縦のものを横に、横のものを斜めに、

電磁波と大気の透過率



手段(1) : 大気球

浮力を得るのに大気が必要。気球容積を V 、積荷(気球自身も含む)の質量 M 、大気密度を ρ とすると、ヘリウムと空気の分子量の差から、

$$Mg = (1 - 4/30) V\rho \Rightarrow \rho =$$

$$Mg/0.87V$$

$M \sim 1 \text{ ton}$, $V = 10^6 \text{ m}^3$ では、 ρ は地上大気密度の $\sim 1/300$ 、高度 35-50 km に到達可能。重い装置を用いた赤外線、宇宙線、硬X線、ガンマ線などの長時間観測に適する。

手段(2) : 観測ロケット

単段or 2段式。50~150 kgの観測装置を搭載して打ち上げ、3~4分後に、地上高度 $H = 100-1000 \text{ km}$ に到達。

$$t = [2H / (\alpha - 1) g]^{1/2} \quad (\alpha g \text{ が上向き加速$$

度)

$$= 3.4 [(H/200\text{km}) / (\alpha - 1)]^{1/2} \text{ min}$$

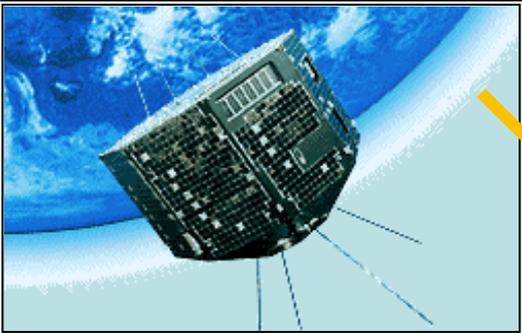
燃料が燃え尽きた後は、自由飛行・自由落下。おもに、新しい装置や新しい観測手法の実証試験に用いる。(香

郡)

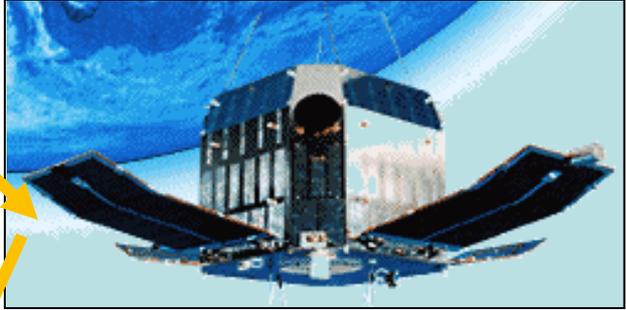


手段(3) : 科学衛星

はくちょう (1979)



てんま (1983)

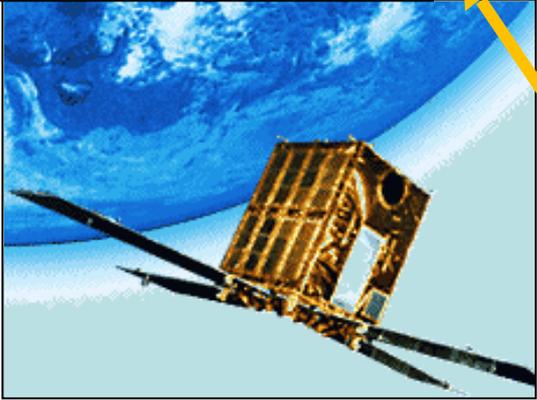


ガス蛍光比例計数管 (SPC)

すぎく (Astro-E2; 2005年7月) ▪



ぎんが (1987)



大面積比例計数管 (LAC)

あすか (1993)



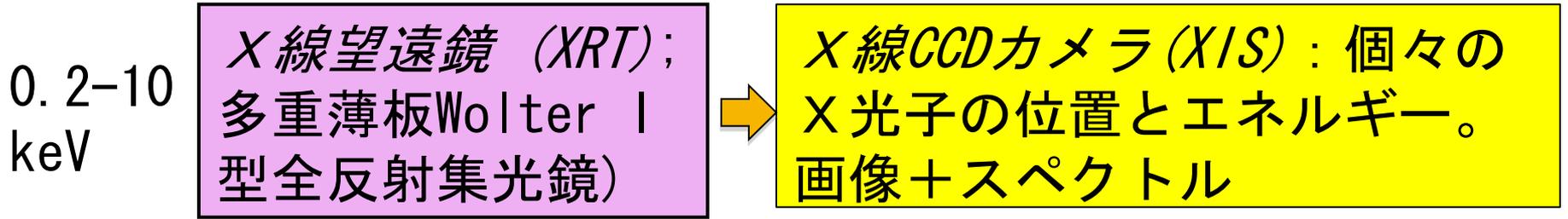
撮像型ガス蛍光比例計数管 (GIS)

硬X線検出器 (HXD)

衛星搭載のX線観測装置



「すざく」の場合

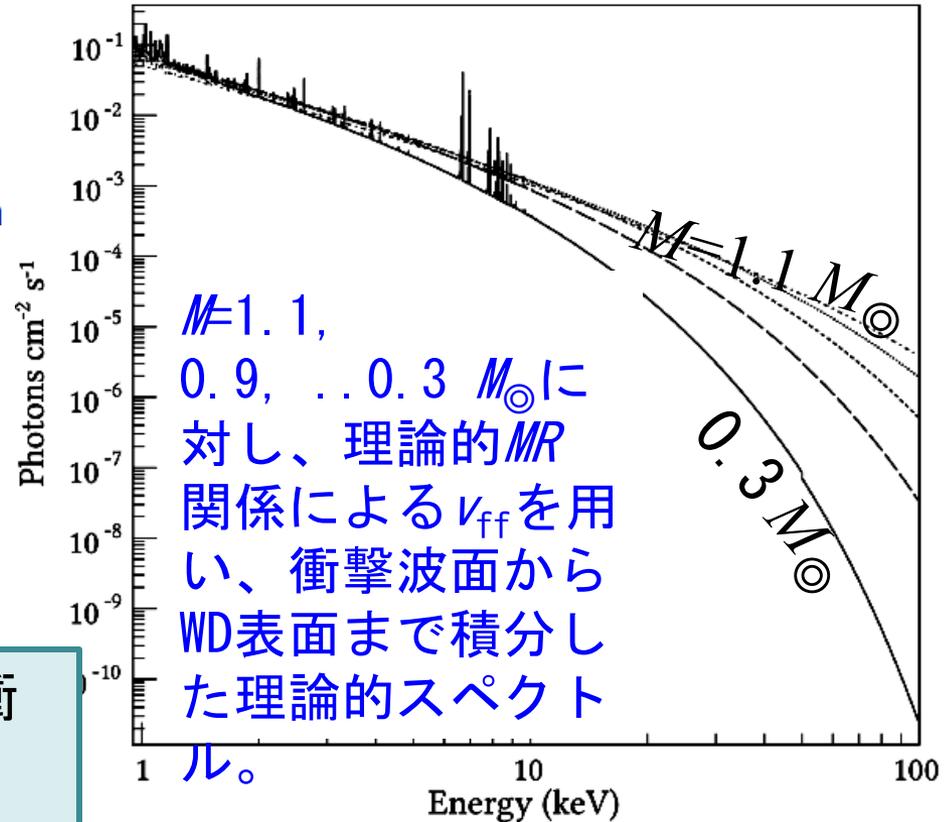
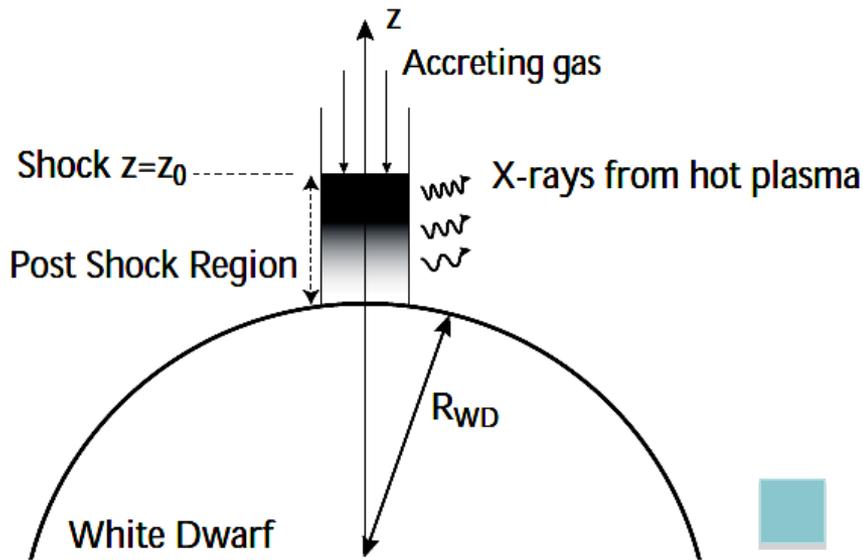


メッセージ2

革新的な発見は、革新的な装置から生まれる。
つねに装置開発の努力を怠るなかれ。

強磁場激変星からのX線

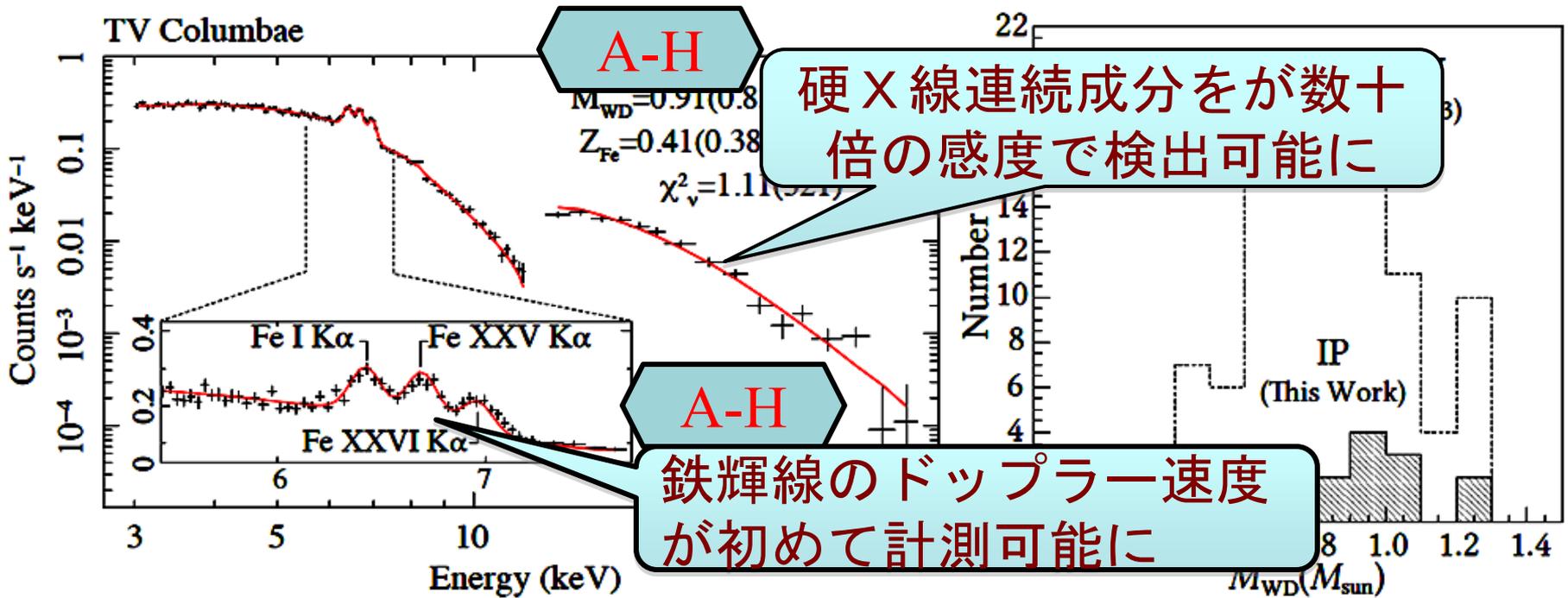
湯浅D論 (2011)



- 降着物質は自由落下、WD磁極で衝撃波遷移、高温プラズマを形成。
- 衝撃波下面のプラズマ温度
 $kT \propto v_{ff}^2 \propto M/R$
- プラズマはX線放射で冷えつつ降着円筒を降下、WD表面に軟着陸。

- 制動放射連続成分 (> 10 keV) と鉄輝線構造が、 v_{ff} を反映。
- 「すぎく」の広帯域を用いることが本質的に重要。

強磁場激変星のスペクトルと質量



A-H

硬 X 線連続成分をが数十倍の感度で検出可能に

A-H

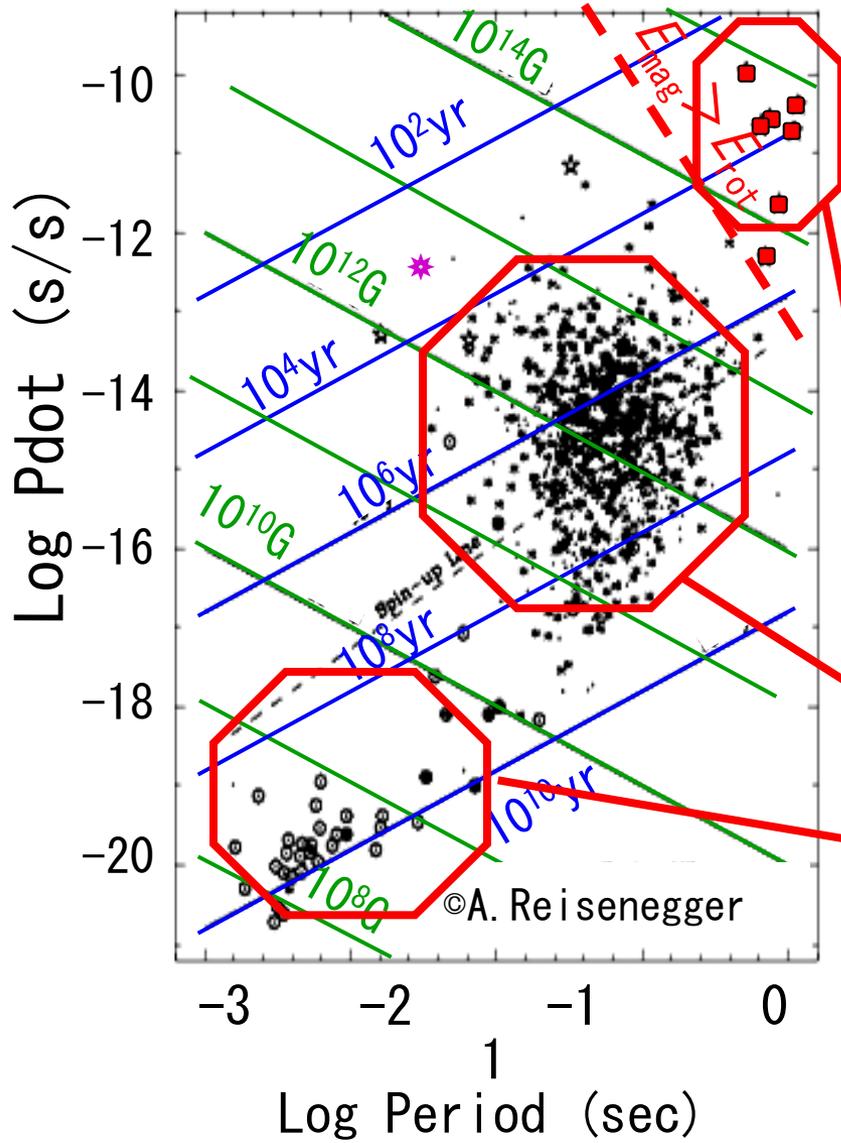
鉄輝線のドップラー速度が初めて計測可能に

- ・ TV Columbaeの「すぎく」広帯域スペクトルを理論モデルでフィット。 $M = 0.91 \pm 0.08 M_{\odot}$ (湯浅+11)。
- ・ 銀河面 X 線放射 (の > 5 keV 領域) も、こうした天体の総和で説明可能。

得られた20個の強磁場激変星のWD質量分布(黒)。白は可視光で計測された激変星のWD質量。

湯浅D論 (2011)

中性子星 (I) : P - \dot{P} dot タイプグラフ



“回転エネルギー減少率-
 $d(I\omega^2/2)/dt$ が磁気双極子放射の光度に等しい”

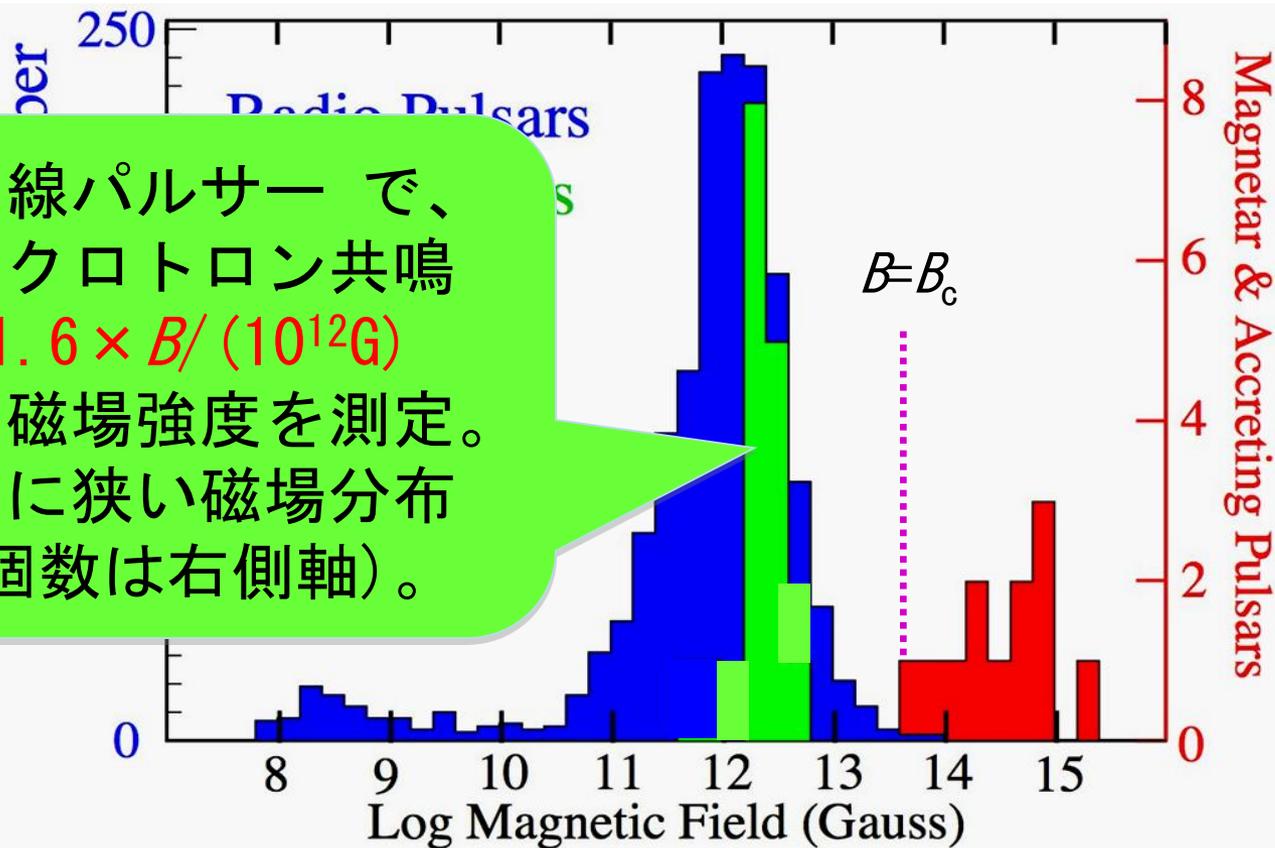
$$I\omega\dot{\omega} \propto (B \sin \theta)^2 \omega^4 R^2$$

→ $B \sin \theta \propto \sqrt{P\dot{P}}$

- マグネター ($10^{14-15}G$)
- 通常の電波パルサー ($10^{11-13}G$)
- ミリ秒パルサー ($10^{8-9}G$)

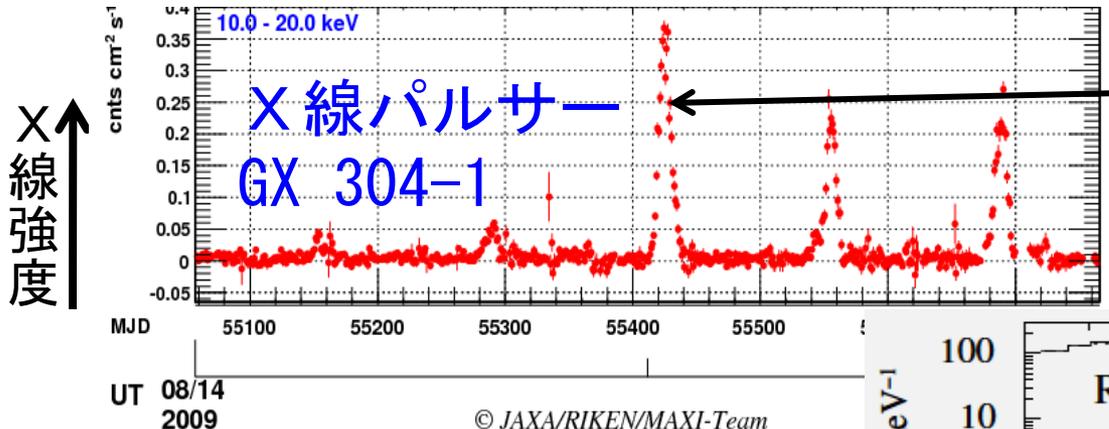
中性子星(2)：磁場の強度分布

連星型X線パルサーで、
電子サイクロトロン共鳴
 $E_c = 11.6 \times B / (10^{12} \text{G})$
を用いて磁場強度を測定。
ひじょうに狭い磁場分布
を示す(個数は右側軸)。



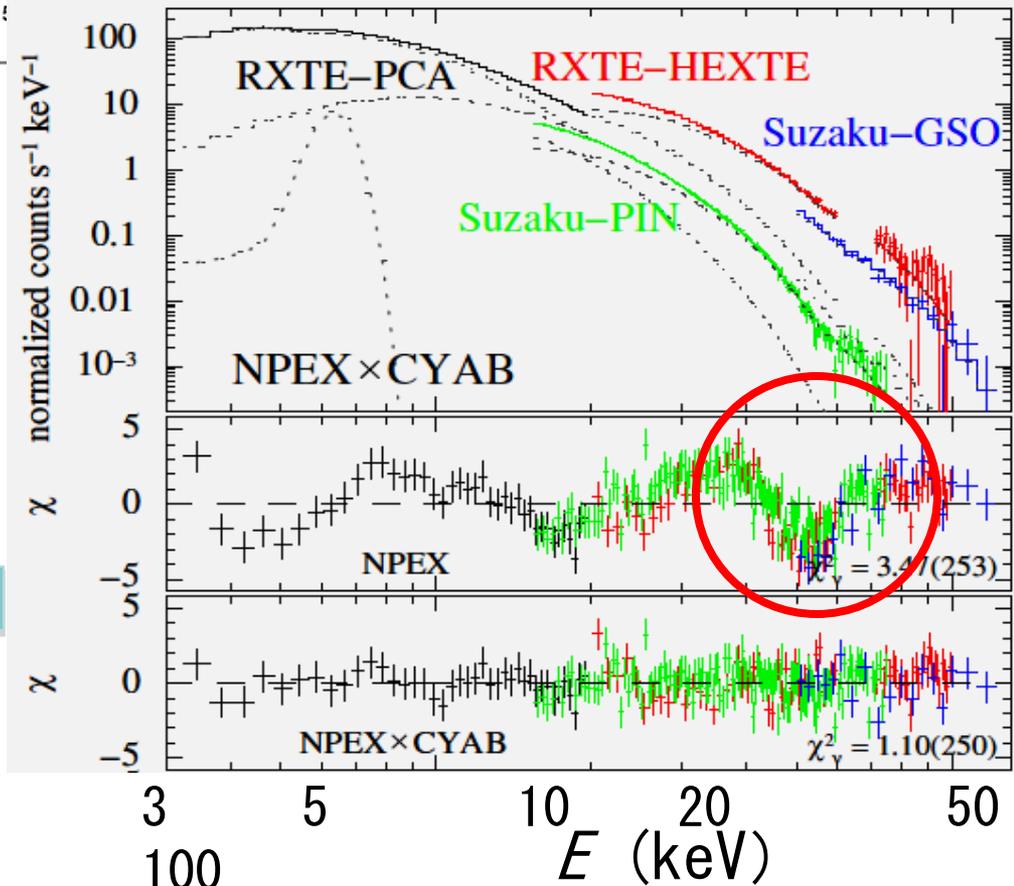
牧島の予想：中性子星の磁性は、中性子の核スピン整列による、強磁性の発現ではないか (牧島+99)?

中性子星(3) : X線パルサー



2010/8/13 「すざく」で緊急観測を実施、54 keVにサイクロトロン共鳴吸収線を発見 ($B = 5 \times 10^{12}$ G; 山本+10)。

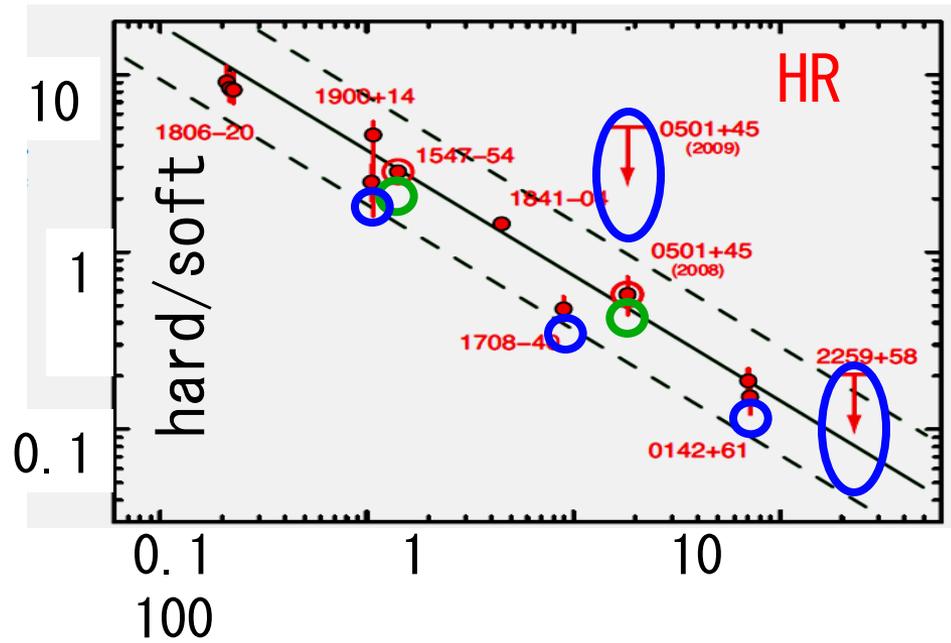
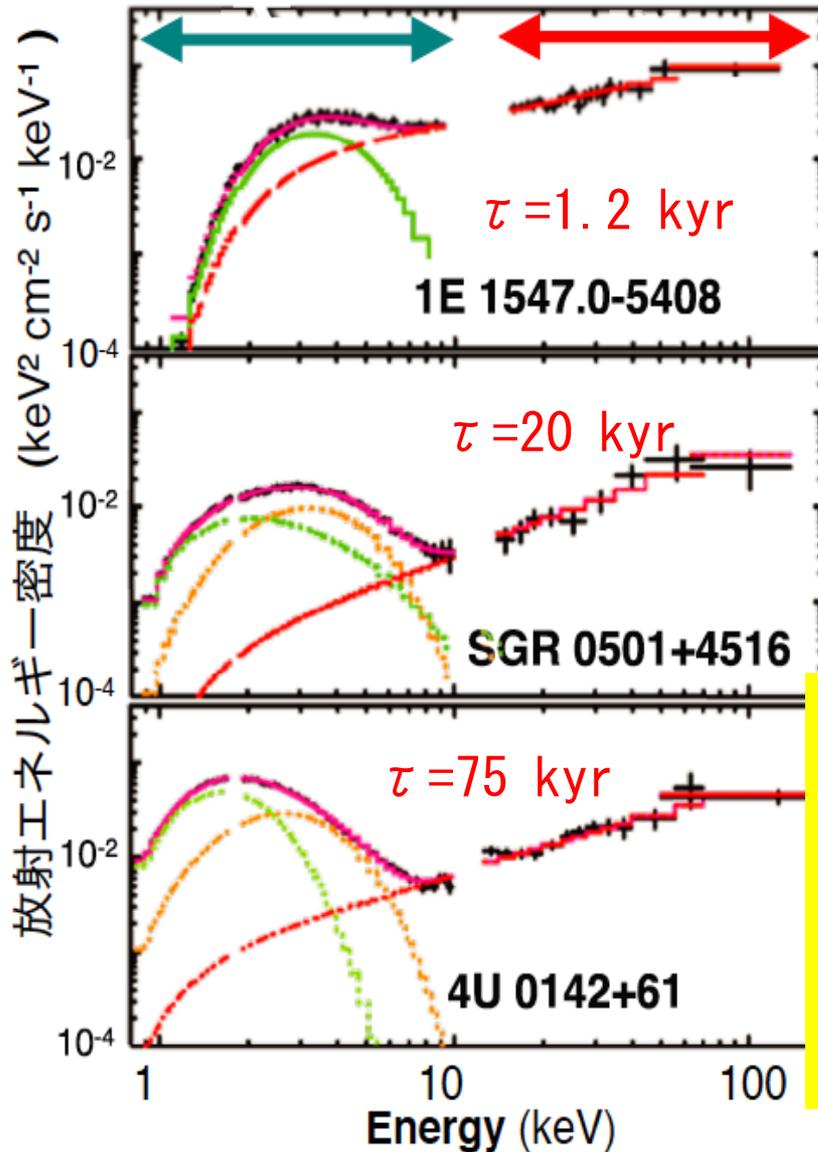
国際宇宙ステーション日本実験棟「きぼう」に搭載された、MAXI (Monitor of All Sky X-ray Image) の観測結果。中性子星がBe型星の回りを135日で公転、近星点でX線が強くなる。1980年代の半ばからX線が出なくなっていたが、最近になって復活。



中性子星(4) : マグネ

ター

榎戸D論 (2010)



磁場 10^{14-15} GをもつとされるNS。回転駆動でも重力駆動でもなく、たぶん**磁気駆動**。どれも異常に硬いハード成分をもつことが判明。X線パルサーとは、明確に異質。老齢なほどハード成分の相対光度は減るが、ハード成分は硬くなる。

中性子星(5)：課題、展望、仮説

- ・ 超新星爆発で生まれた直後のNSは、どんな磁場強度の分布をもつか？ $\sim 10^{15}\text{G}$ 、 $\sim 10^{12}\text{G}$ 、 $\sim 10^9\text{G}$ ？
- ・ 爆発機構の何が違うか、付随するSNRは区別できるか？
- ・ NSの磁場は減衰するか？ $\sim 10^{15}\text{G}$ から $\sim 10^{13}\text{G}$ まではマグネターとして減衰、 $\sim 10^{12}\text{G}$ 以下は減衰しない？
- ・ $B \geq 10^{13}\text{G}$ の連星NSはあるか？ 長周期 ($> 10^3 \text{ s}$) パルサー、ガンマ線連星、Supergiant Fast X-ray Transients？ **A-H**
- ・ 古くなったマグネターは、どうやって探査できる？ **A-H**
- ・ マグネターの硬X線放射の生成機構は？ 磁気圏で e^+e^- 生成、星表面で 511 keV光子生成、それが強磁場中で「2光子分裂」を繰り返して硬X線成分に (榎戸+10)？ **A-H**
- ・ NSの磁性は、陽子超流体の渦糸が担うか、中性子の核スピン整列による強磁性 (max 10^{16}G まで)か？

メッセージ 3

通説はまず疑ってかかれ。頼るべきものは、

- 心血注いだ自分の装置の出して来るデータ。
- 基礎物理学の深い理解。
- 想像力と科学的直観。

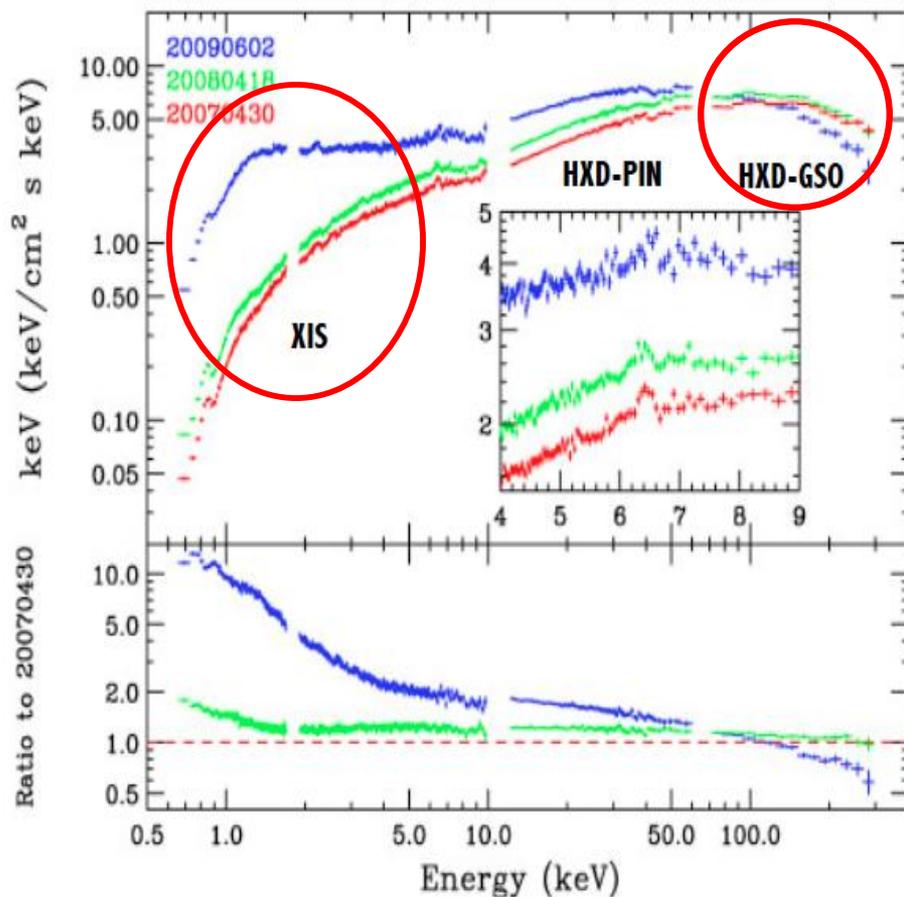
ブラックホール連星 (BHB) と AGN

- BHBの主要な2状態のうち、ソフト状態は、標準降着円盤からの軟X線放射（+謎のハードテール）として、かなり理解できた。しかし、ハード状態の理解は、大幅に遅れている。 ■
- セイファート銀河などAGNの中心核は、BHBのハード状態に対応すると考えられているが、十分な統一的理解は得られていない。
- BHBでもAGNでも、1次連続成分の理解なしに、「鉄輝線の極端な広がり⇒Kerr BH」があたかも既成事実のごとく論じられているのは、大問題。

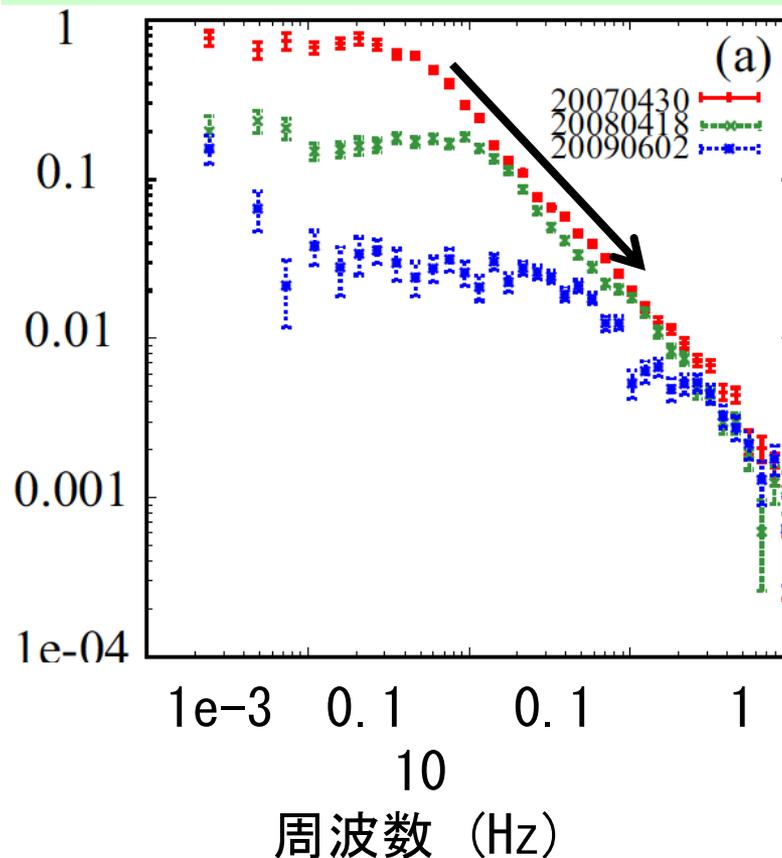
Cyg X-1: 20回の観測 (months~years)

すべてハード状態だが、軟X線強度 ($\propto \dot{M}$) は2~3倍の変動。
スペクトルも短時間変動もそれに強く相関 (山田D論11, 鳥井+11)。

Wide-band vF_v spectra of Cyg X-1

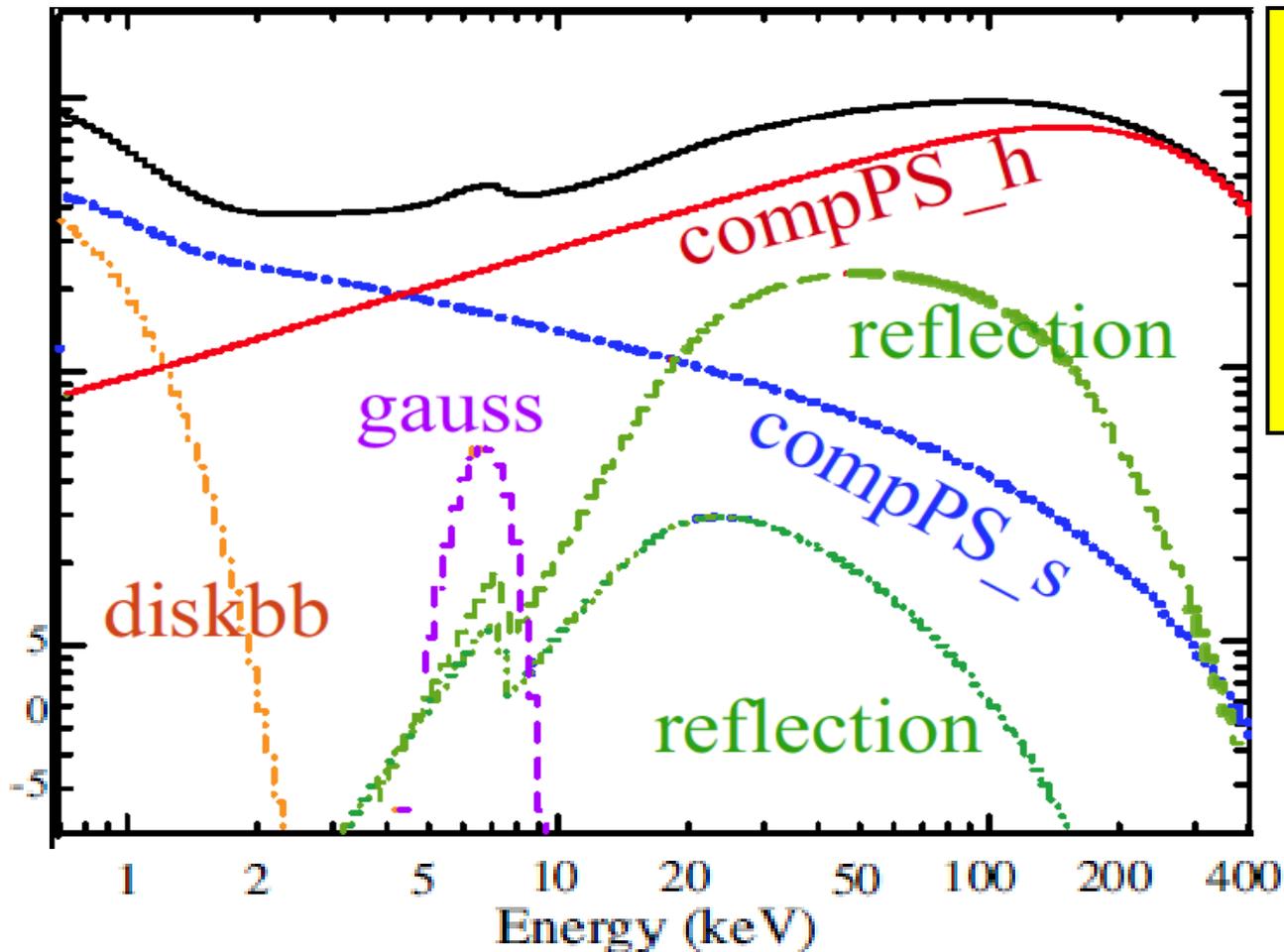


短時間変動のパワースペクトル



Cyg X-1 広帯域スペクトル

- ・ある1回の観測のスペクトル分解
- ・星間吸収も取り除いて νF_ν 表示 (牧島+08)



- ・コロナはマルチゾーン
- ・連続成分は、単一PLでは表現できない

得られた「円盤-コロナ」描像

「円盤-コロナ」描像を大幅強化、始めて詳細な幾何配置を決定し、 \dot{M} -依存性を明らかにした(牧島+08、山田D論11、鳥井+11)。

(1) 円盤は薄くコロナは分厚い

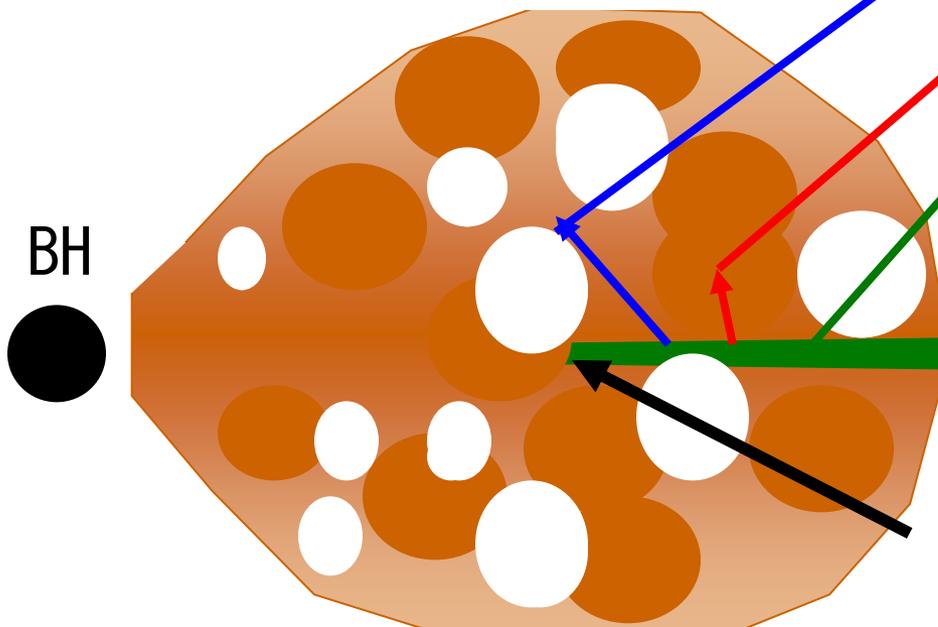
(2) コロナは $T_e \sim 100$ keV
で極めて非一様； $\tau = 0$,
 $\tau \sim 0.4$, $\tau \sim 1.5$ が必

(3) コロナ外縁端は $\sim 50 R_g$ 、
 \dot{M} 上昇 \Rightarrow コロナ縮小

(4) 円盤の内縁半径 $\sim 15 R_g$ 、
 \dot{M} 上昇につれ円盤は、
より深くコロナに侵入

(5) 「非常に広い鉄輝線」 (\Leftrightarrow
極端Kerr BH) の論拠は不十分。

(6) コロナの穴の開口率が
下がると硬X線の強度が上
昇

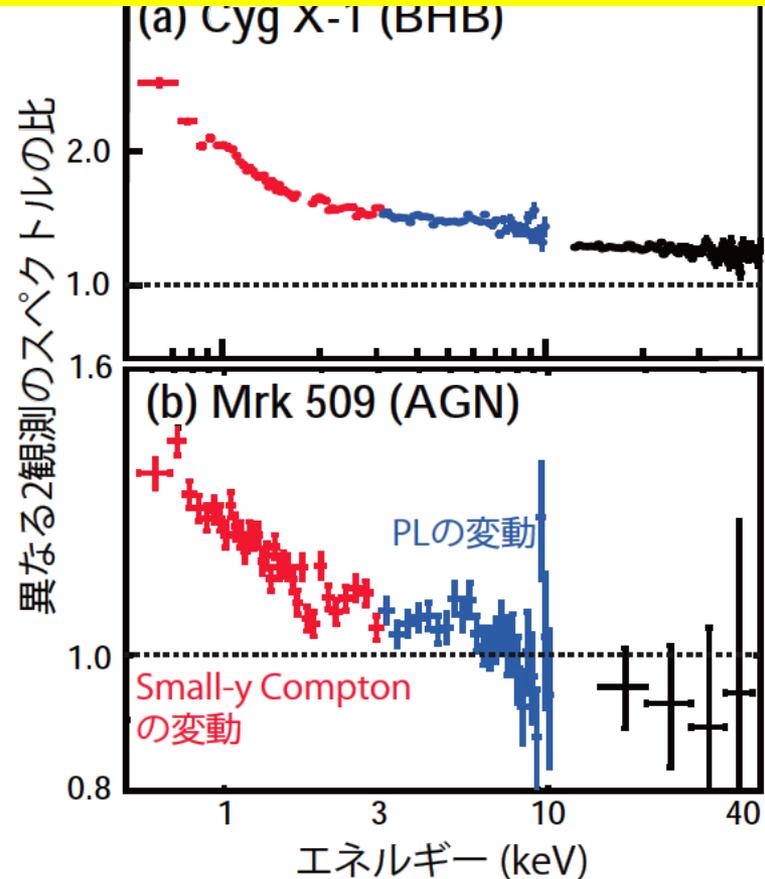
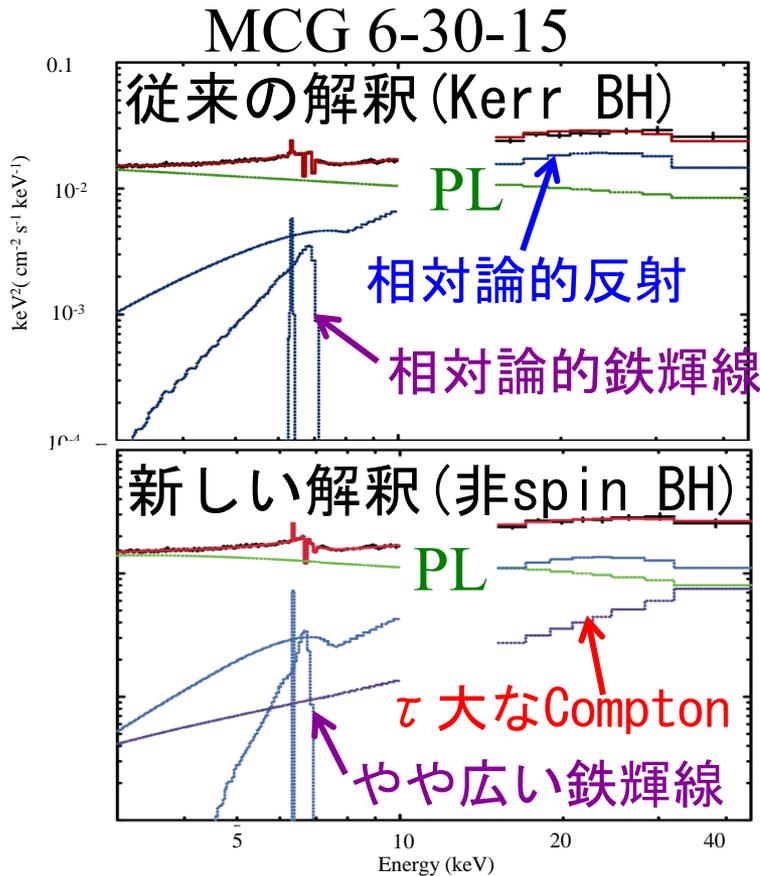


AGNのX線連続成分

(野田+10, 11)

《AGN》 dusty torus, NRL, 鉄輝線、... *etc.* 周辺物質や肝心の1次放射は？ 「〜1

軟X線で明るい時と暗い時のスペクトル比は両天体で似た挙動⇒Mkn 509のコロナも非一様、1次放射はPLではない。いわゆるsoft excess現象の一部は、こうした効果によるかもしれない。



メッセージ4

つねに対象の本丸を攻めるべし。

- 外堀を埋めても本丸に手が届くとは限らない。
- 本丸は、外から見えにくい場合もあるし、皆が群がる場所に本丸があるとは限らない。

次期 X 線衛星 *ASTRO-H*

日本 6 機目の宇宙 X 線衛星、
2014年に「すざく」後継機として
打ち上げ予定。日本国内+欧
米との広範なコラボ。

- 世界初のマイクロカロリメータ
($\Delta E/E \sim 0.05\%$) \Rightarrow 世界で初めて、
重イオン輝線の熱的広がりや、
ビリアル速度のドップラー計測。

- 標準装備としての CCD カメラ

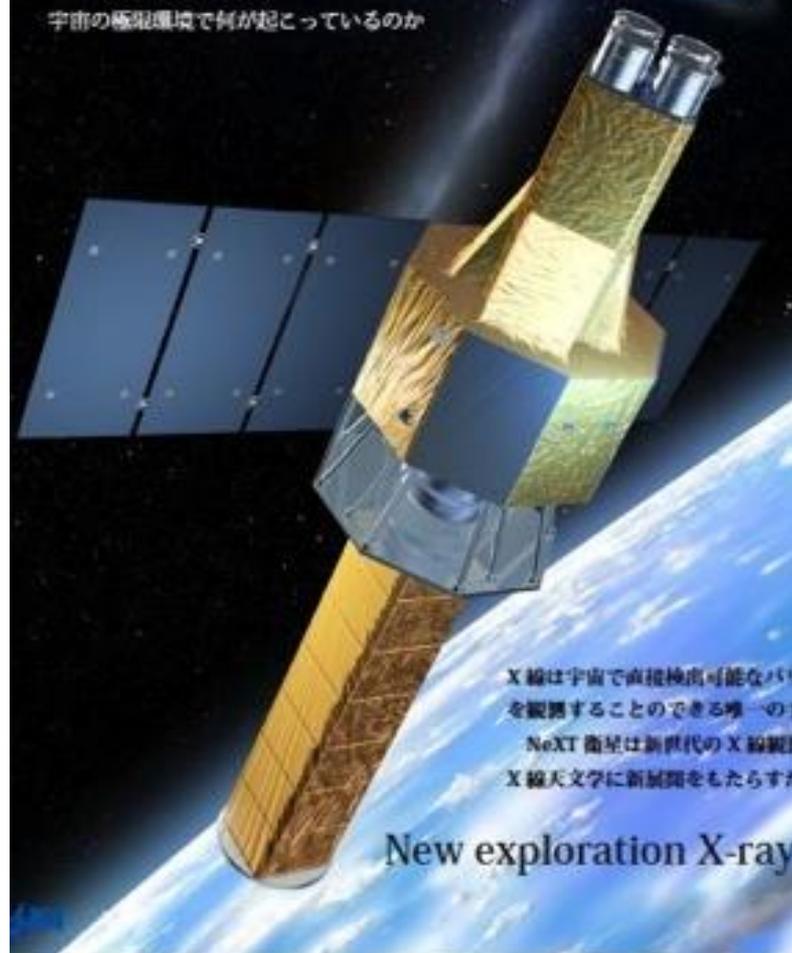
- スーパーミラーと硬 X 線撮像装
置

による硬 X 線の撮像 (5~80
keV) \Rightarrow 「すざく」より 2 桁も高感
度！

- 軟ガンマ線 (511 keV 含む) を
狙うコンプトンカメラ

2013 打ち上げ予定 (H2A ロケット)

宇宙はどのように進化したのか
宇宙はどのような物質、エネルギー形態で
構成されているのか
宇宙の極限環境で何が起きているのか



X 線は宇宙で直接検出可能なパ
を観測することのできる唯一の
NeXT 衛星は新時代の X 線観
X 線天文学に新展開をもたらす

New exploration X-ray

ASTRO-H で狙うサイエンス

- 隠れたバリオンWHIMの探査
- SNRでの微量元素の探査、詳細プラズマ素過程
- 銀河団の合体成長過程のドップラー計測
- ブラックホールの相対論的効果⇒スピン計測
- 銀河団の超高温成分の正体解明
- さまざまな宇宙線加速源の探査
- 中性子星の質量と半径の同時測定⇒原子核EOS
- ガスに隠れた遠方巨大BH探査
- マグネター硬X線の詳細観測⇒NSの磁性の起源
- ^{44}Ti からのガンマ線探査⇒超新星での元素合成
- BH連星などでの e^+e^- 対消滅線
- 暗黒物質からの対消滅線の探査

メッセージをまとめて…

1. 良い研究の陰に、良いグラフあり。
2. 装置開発の努力なしに、革新的な発見はありえない。
3. 通説はまず疑うべし。頼るべきものは、自分の装置データ、基礎物理学、想像力と直観。
4. 本丸を攻めるべし。皆が群がっているあたりに本丸は無いかも。外堀を埋めてもダメかも。