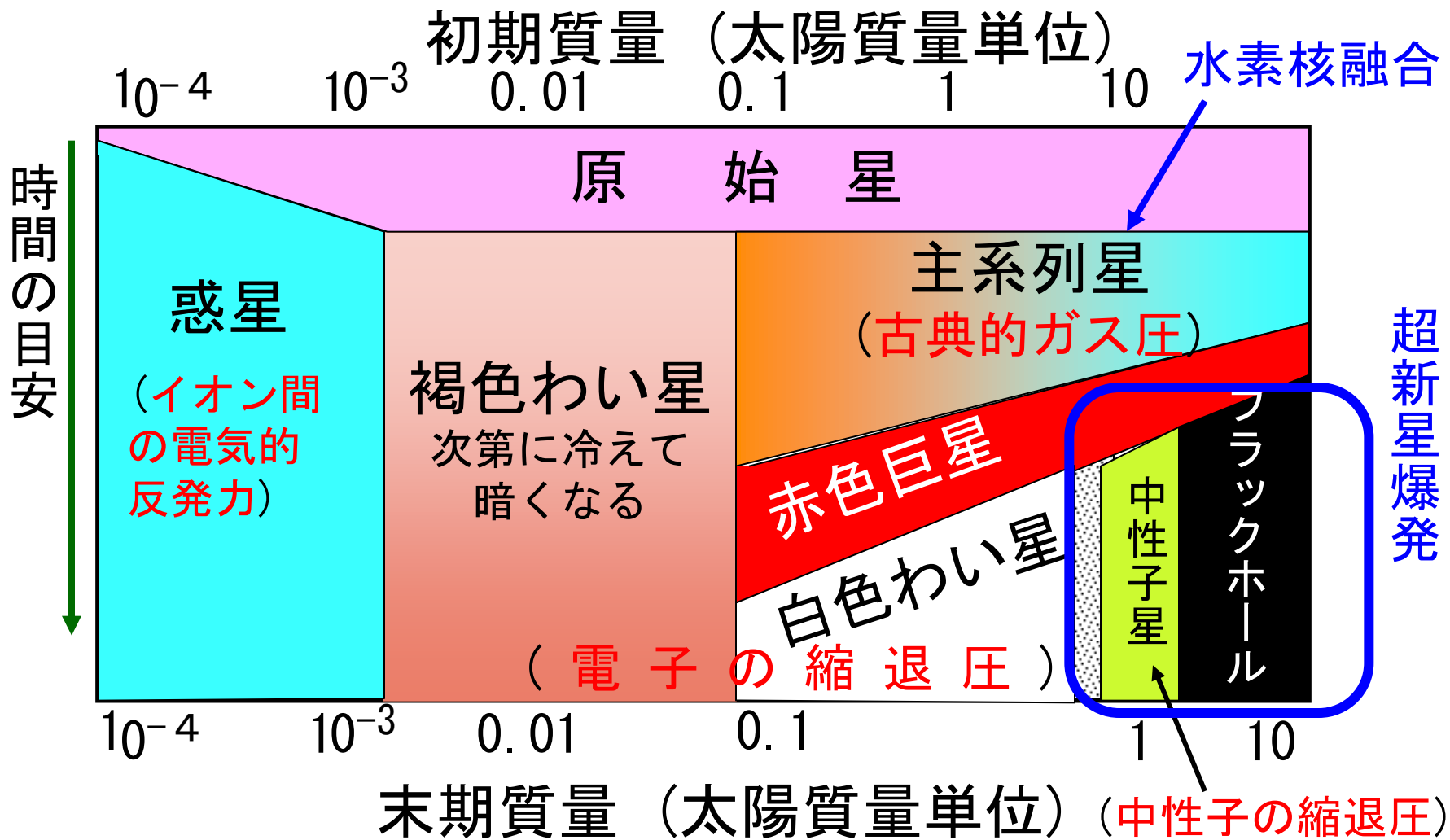


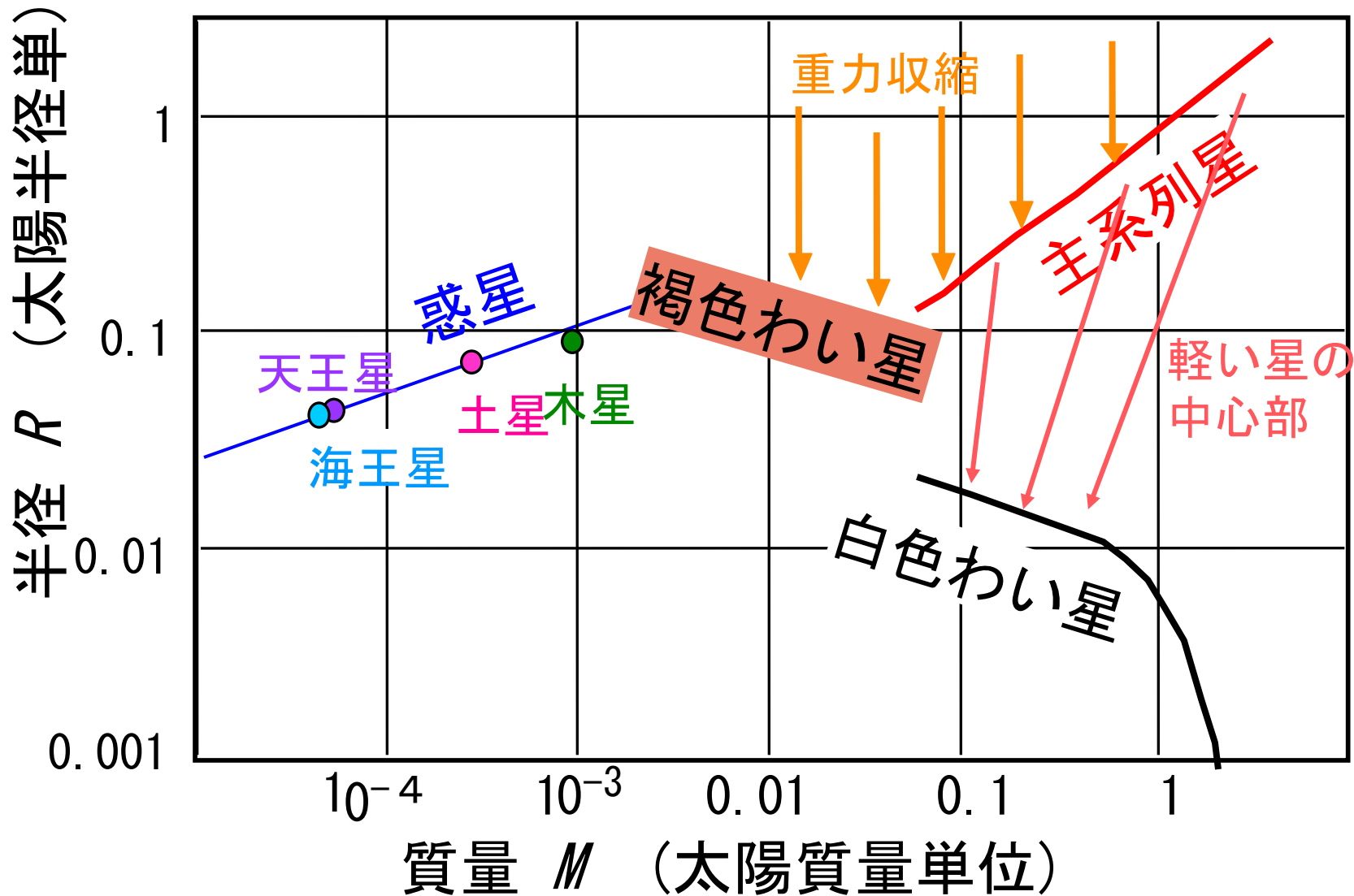
# X線で探るコンパクト天体 ～「すざく」から*ASTRO-H*へ～

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)

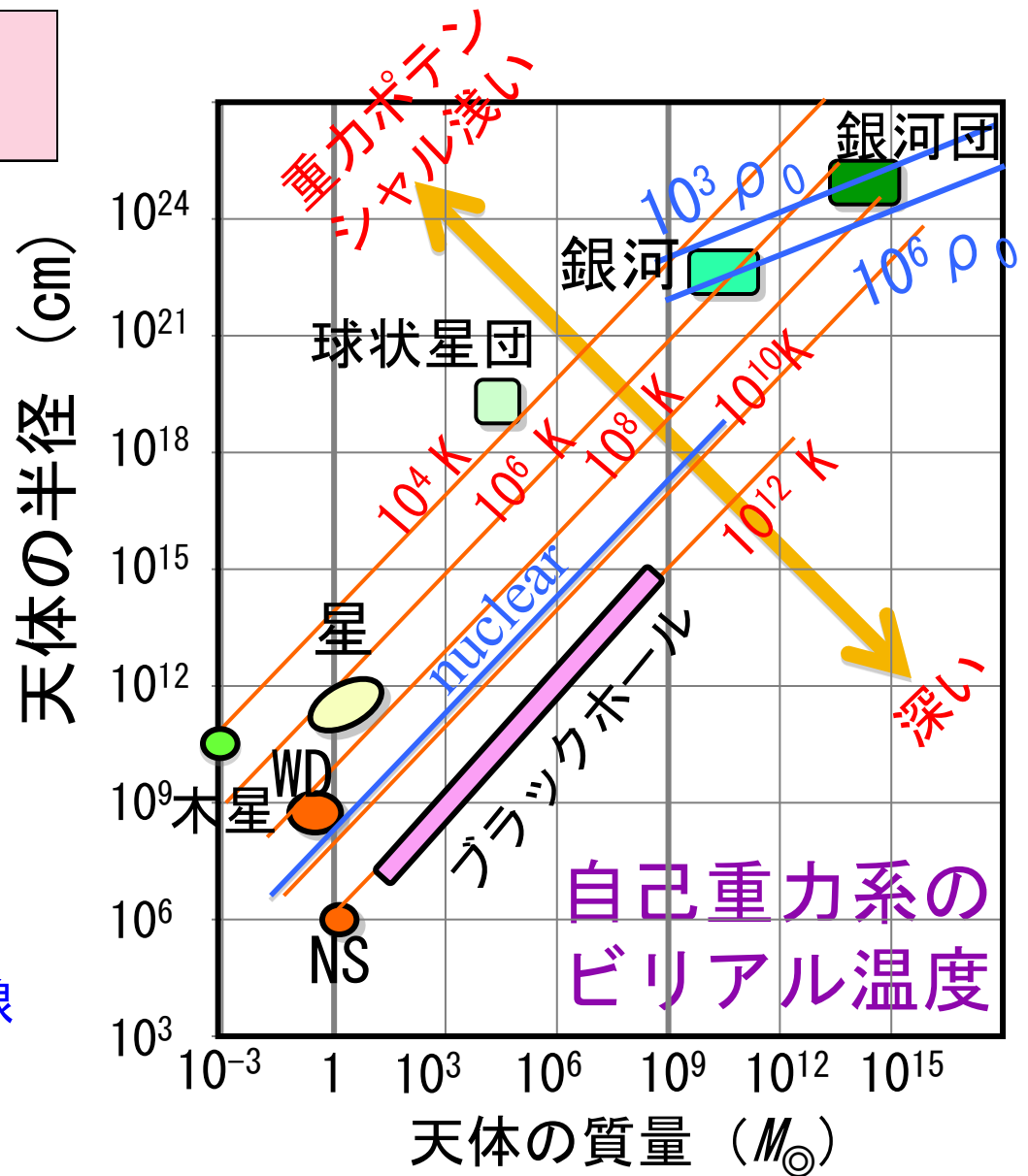


# 星のM-R関係

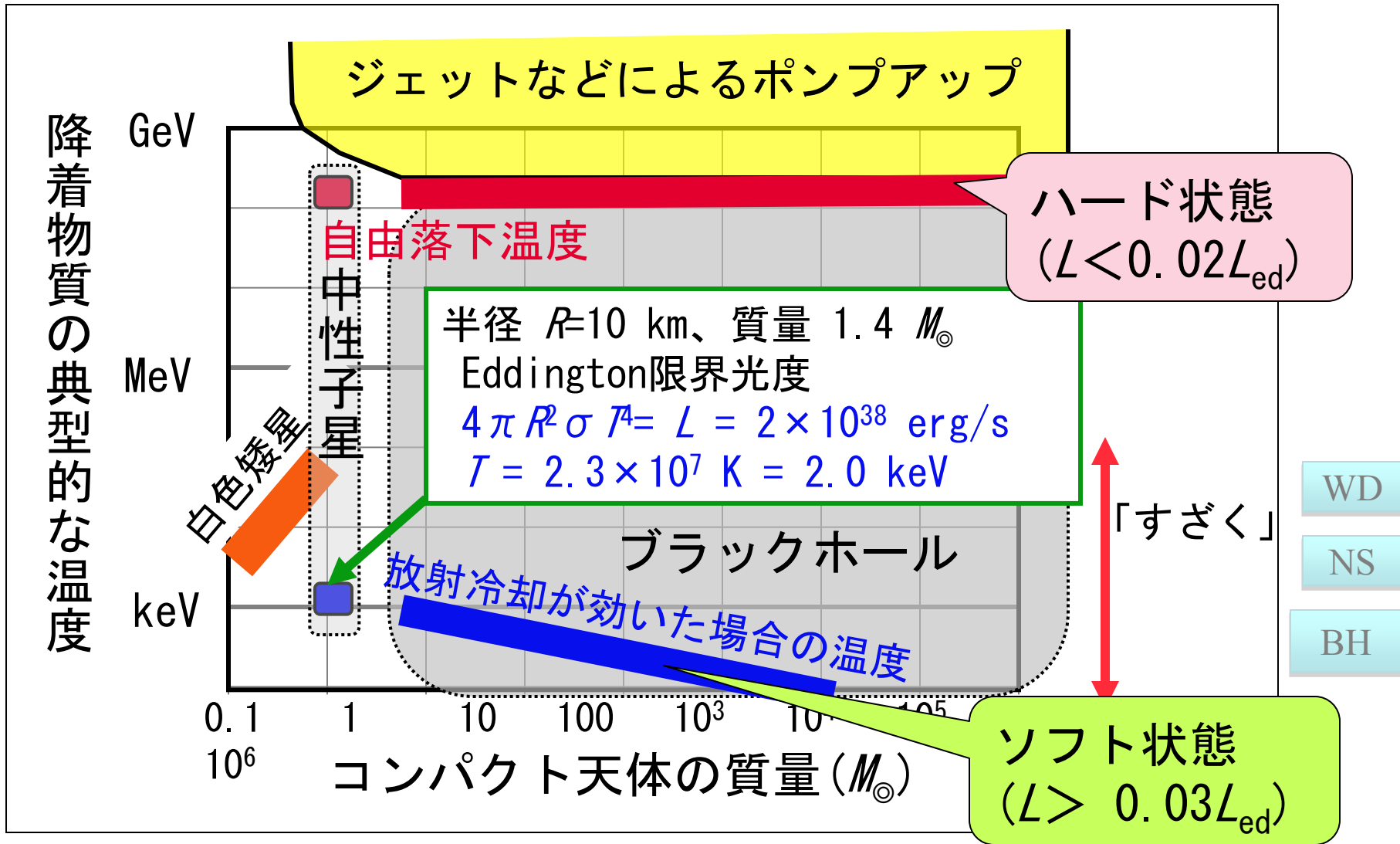


# なぜX線か

- (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

回転駆動パルサー

GRB

Crab型SNR

電波ローブ

jet優勢AGN

シェル型SNR

disk優勢AGN

惑星状星雲

BH連星

SS433

星のフレア

XRパルサー

銀河中心

銀河団・銀河群

ULX

楕円銀河

LMXB

白色矮星

星のコロナ

変動する

広がっている

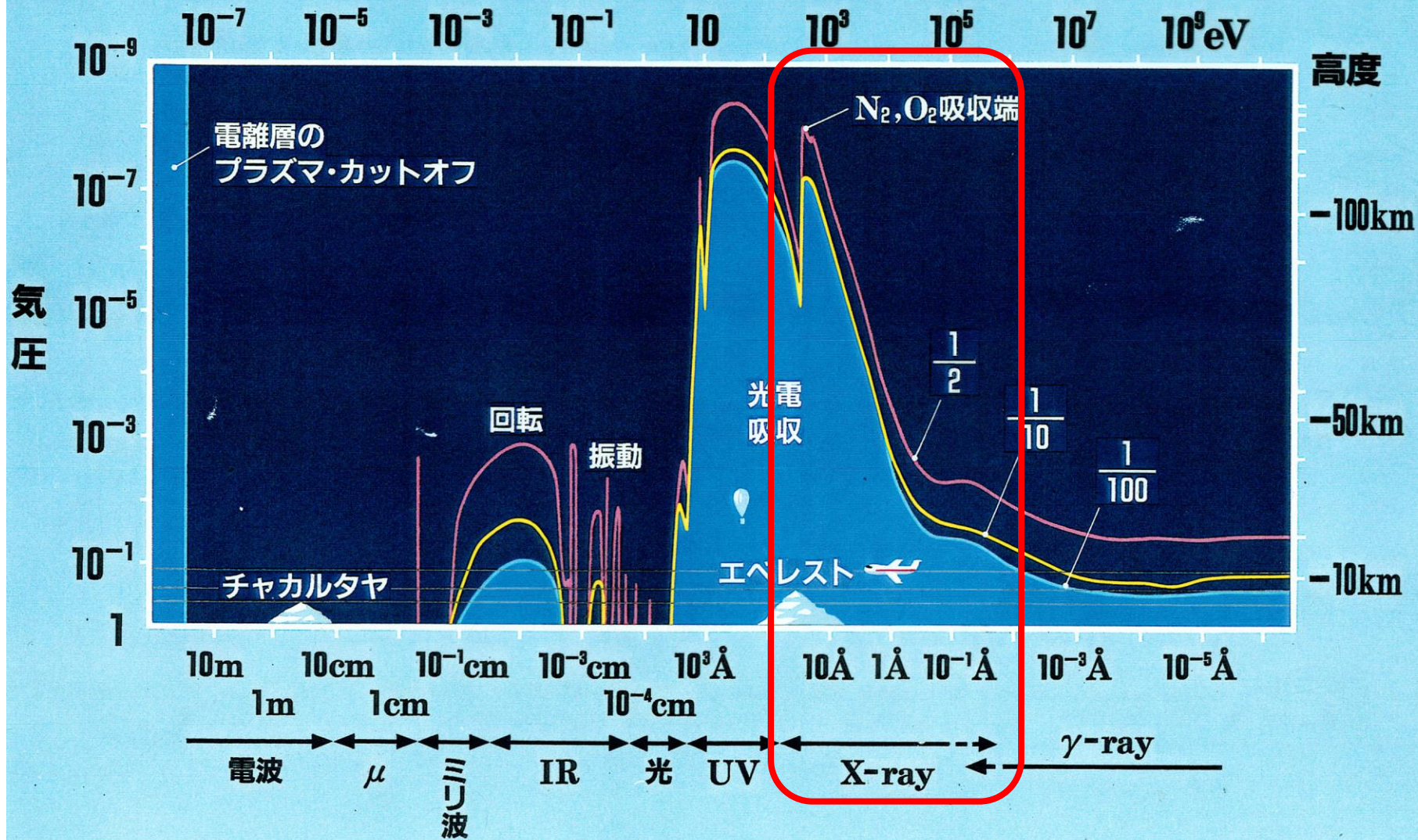
光学的に厚い熱的放射

# 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 $\rho$ 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、 $\rho$  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)

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

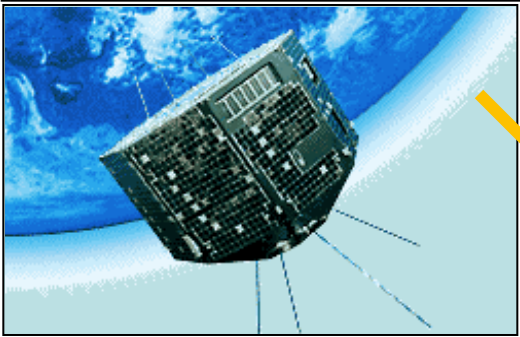
燃料が燃え尽きた後は、自由飛行・自由落下。おもに、新しい装置や新しい観測手法の実証試験に用いる。(香

郡)

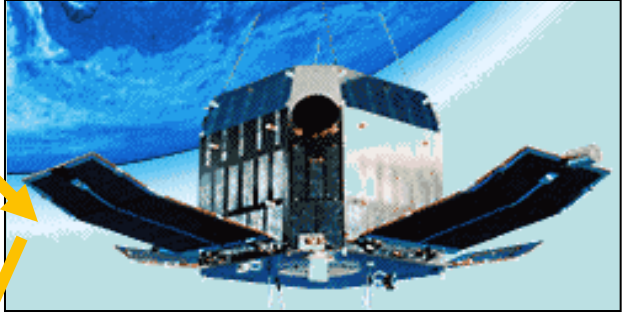


# 手段(3) : 科学衛星

はくちょう (1979)



てんま (1983)

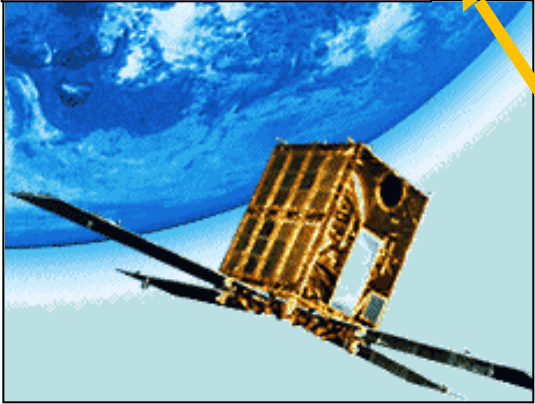


ガス蛍光比例計数管 (SPC)

すぎく (Astro-E2; 2005年7月) ▪



ぎんが (1987)



大面積比例計数管 (LAC)

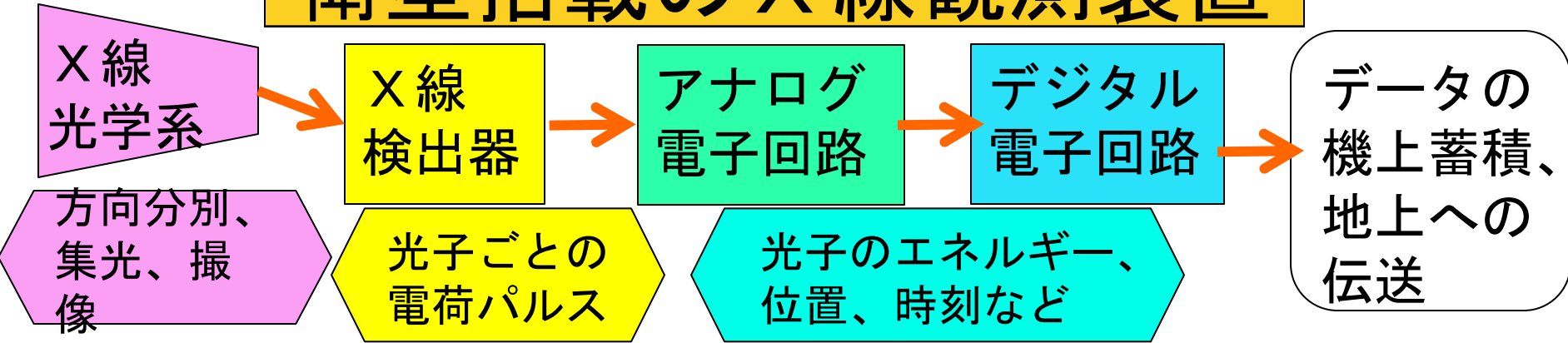
あすか (1993)



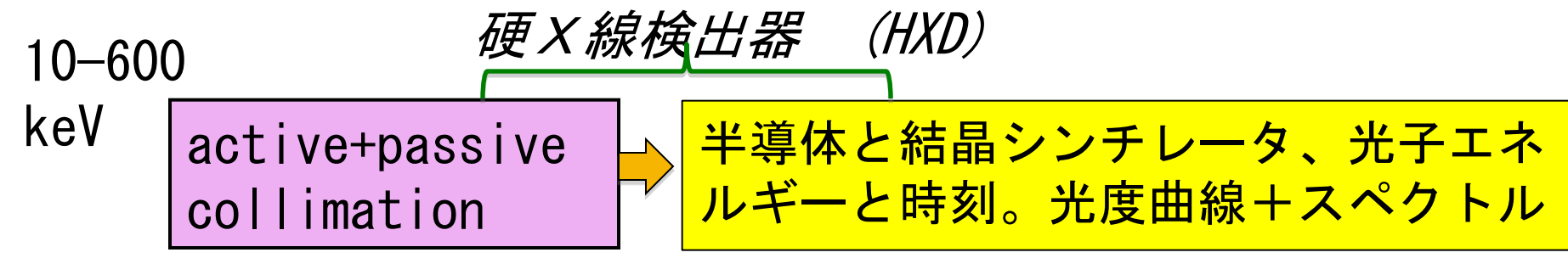
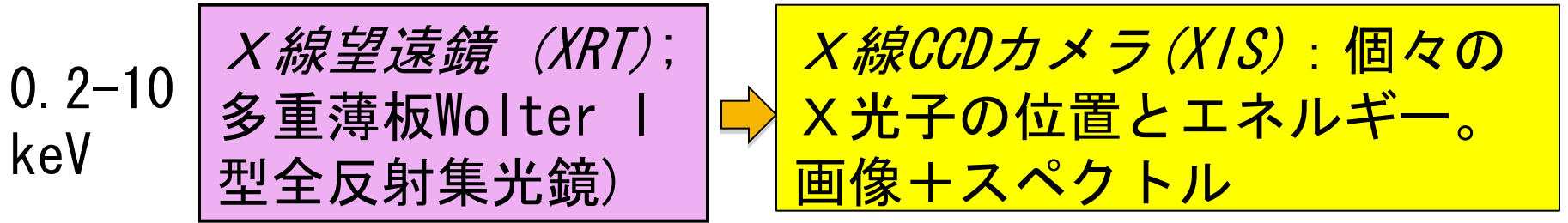
撮像型ガス蛍光比例計数管 (GIS)

硬X線検出器 (HXD)

# 衛星搭載のX線観測装置



## 「すざく」の場合

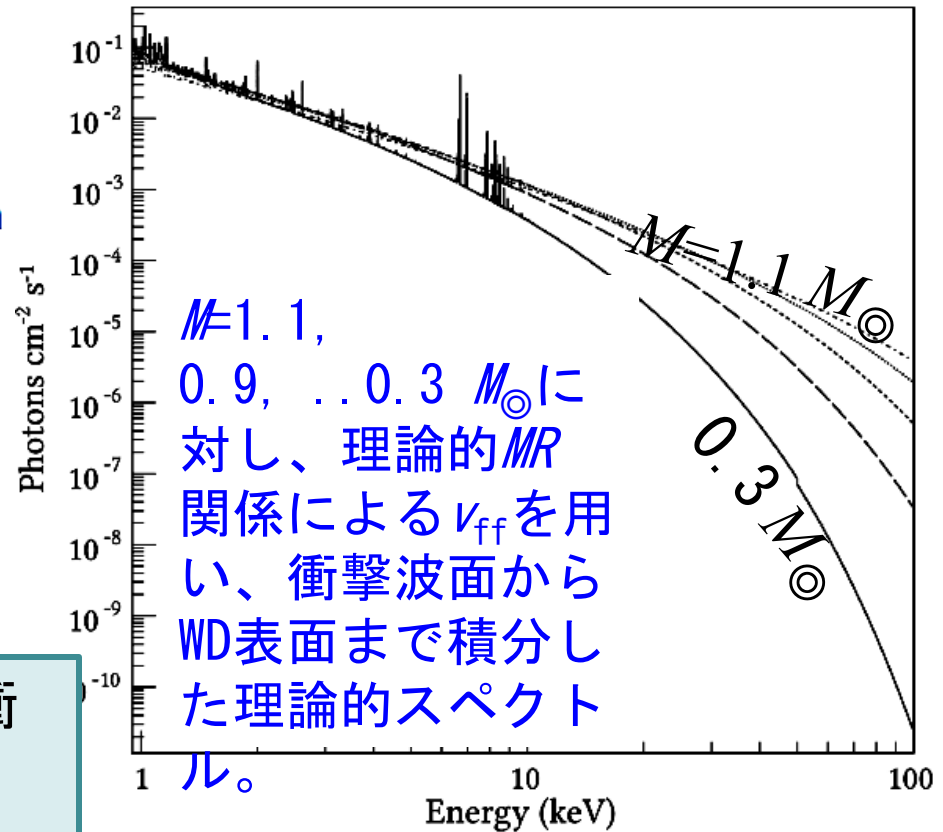
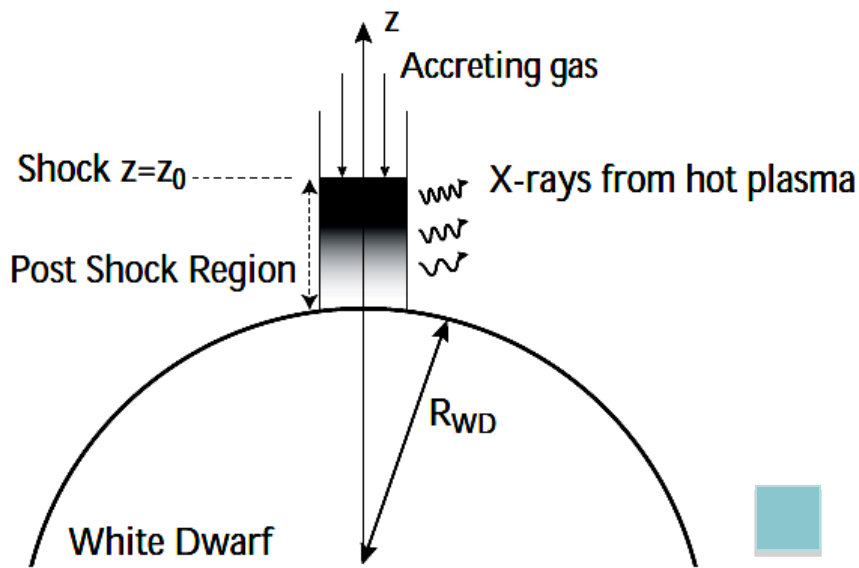


# メッセージ2

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)

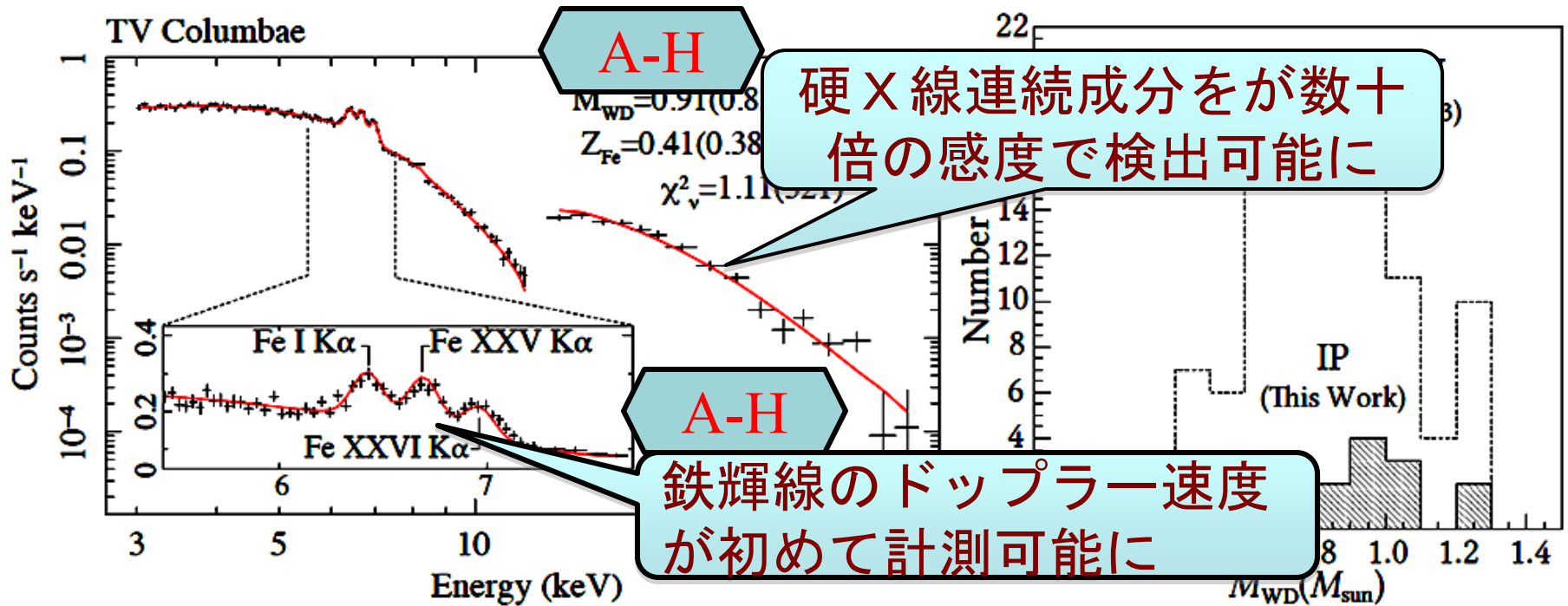


$M=1.1, 0.9, \dots 0.3 M_{\odot}$  に対し、理論的  $MR$  関係による  $v_{ff}$  を用い、衝撃波面からWD表面まで積分した理論的スペクトル。

- 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

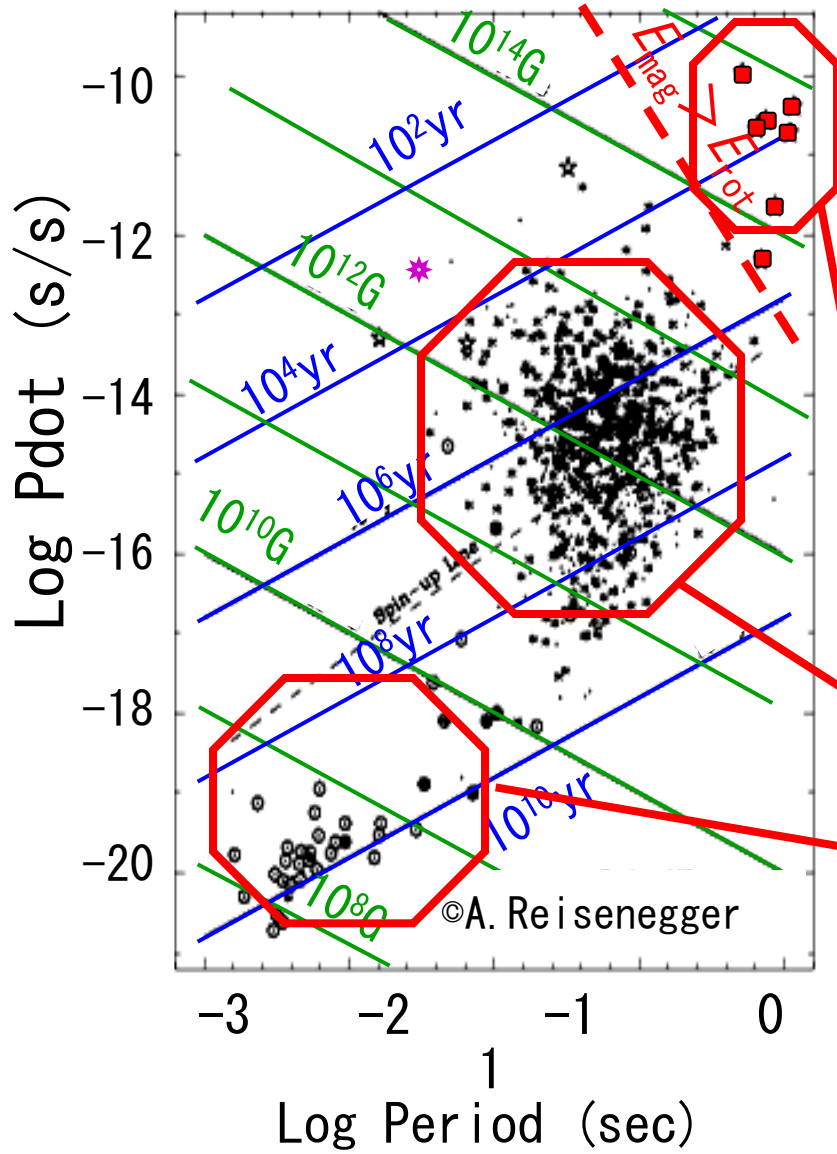


- ・ TV Columbaeの「すぎく」広帯域スペクトルを理論モデルでフィット。 $M = 0.91 \pm 0.08 M_{\odot}$  (湯浅+11)。
- ・ 銀河面 X 線放射 (の > 5 keV 領域) も、こうした天体の総和で説明可能。

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”

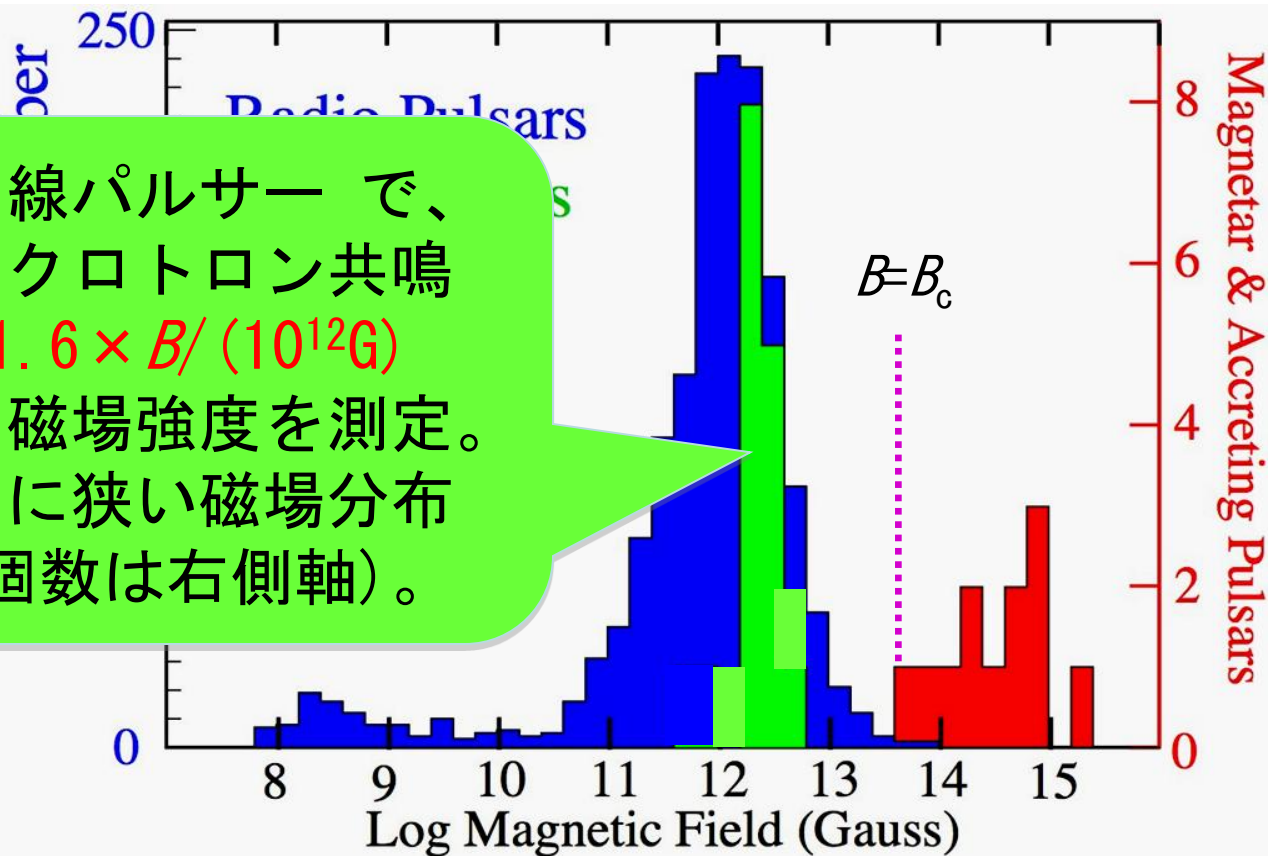
$$I\omega\dot{\omega} \propto (B\sin\theta)^2 \omega^4 R^2$$

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

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

# 中性子星(2)：磁場の強度分布

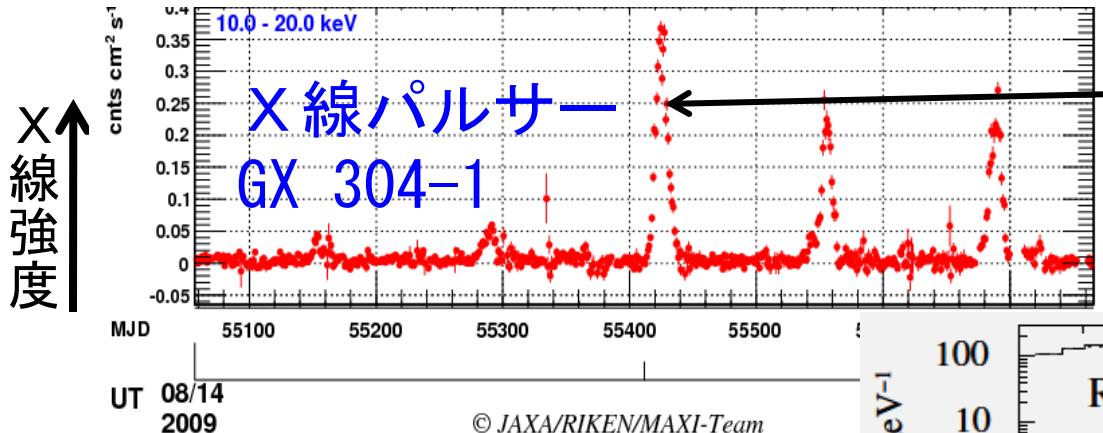
連星型X線パルサーで、  
電子サイクロトロン共鳴  
 $E_c = 11.6 \times B / (10^{12} \text{G})$   
を用いて磁場強度を測定。  
ひじょうに狭い磁場分布  
を示す(個数は右側軸)。



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)?

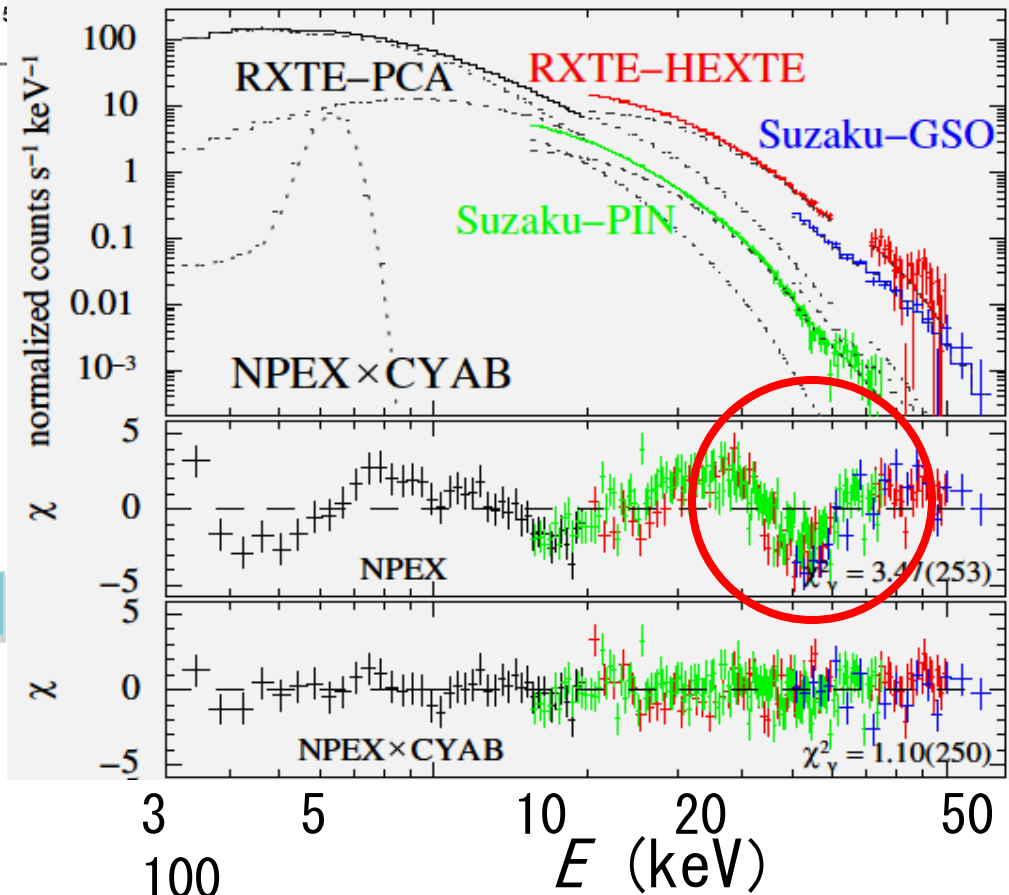


# 中性子星(3) : X線パルサー



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)。

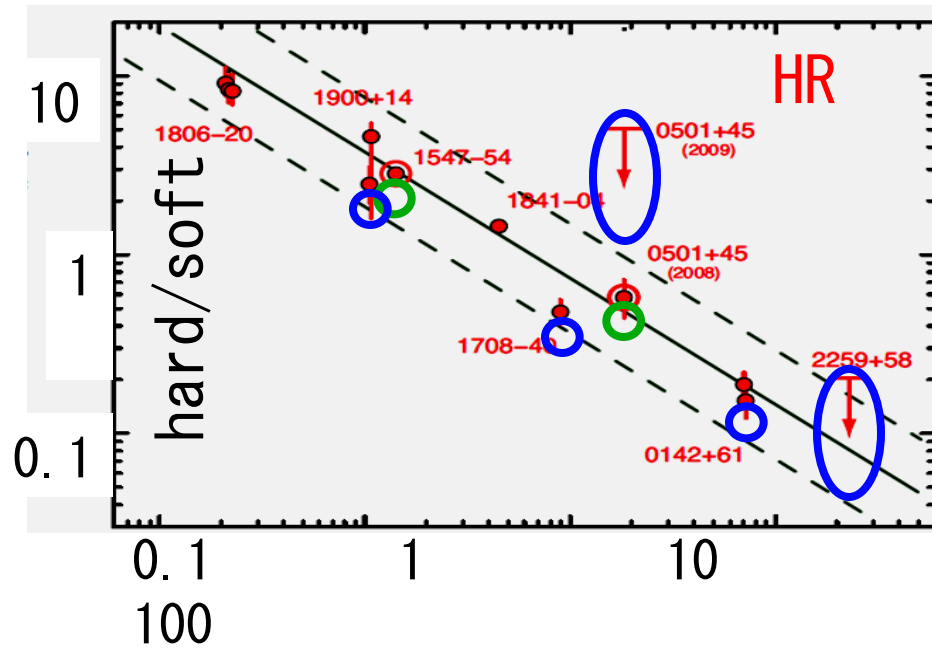
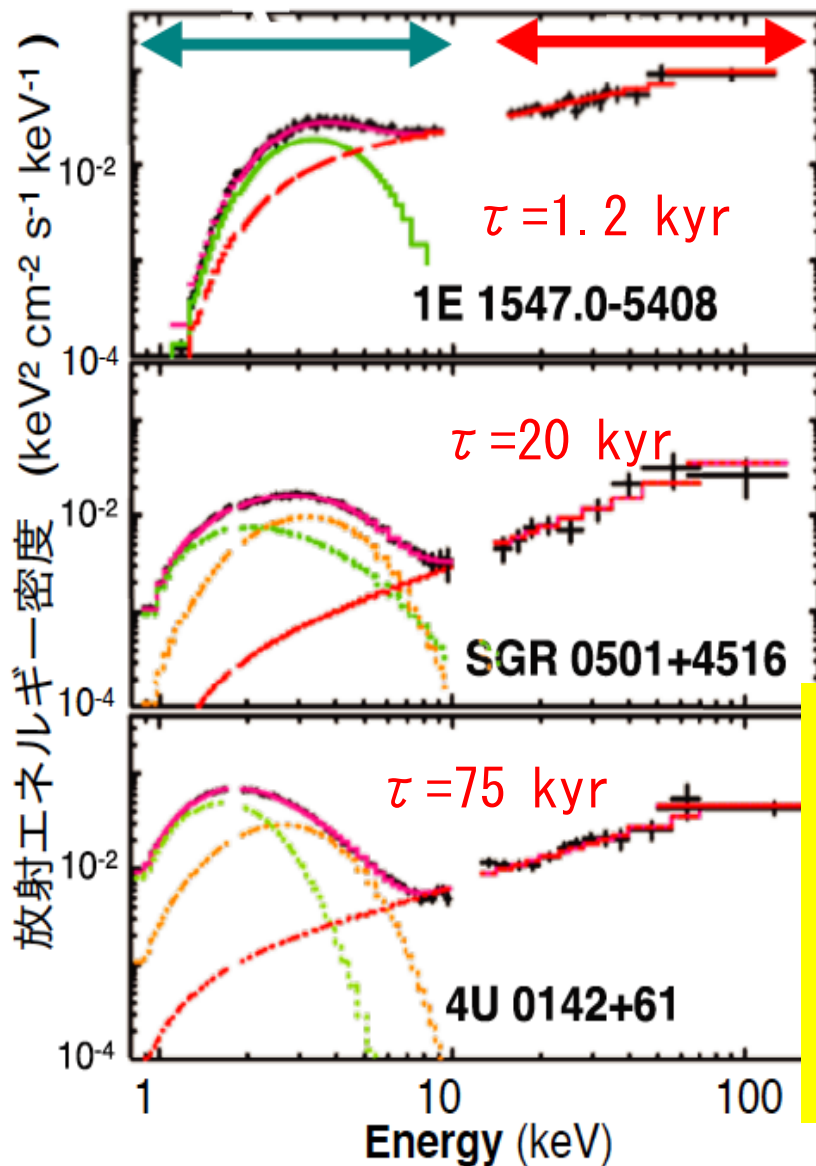
国際宇宙ステーション日本実験棟「きぼう」に搭載された、MAXI (Monitor of All Sky X-ray Image) の観測結果。中性子星がBe型星の回りを135日で公転、近星点でX線が強くなる。1980年代の半ばからX線が出なくなっていたが、最近になって復活。



# 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  $10^{16}\text{G}$ 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。

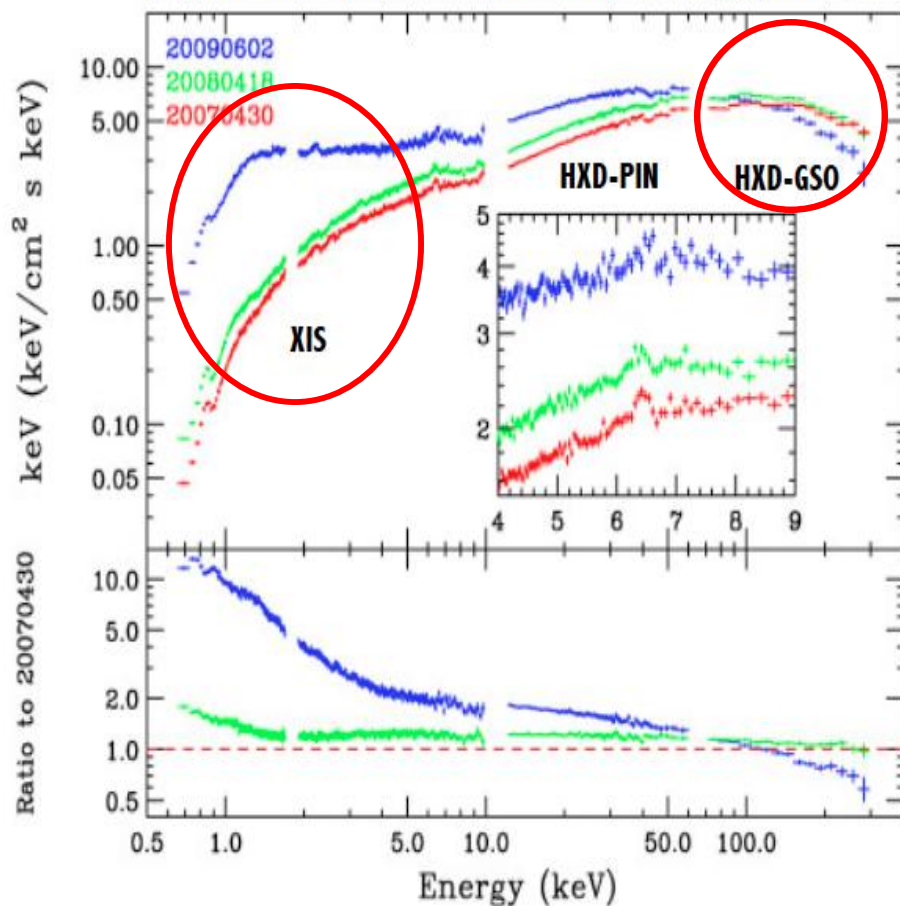
# ブラックホール連星 (BHB) と AGN

- 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。

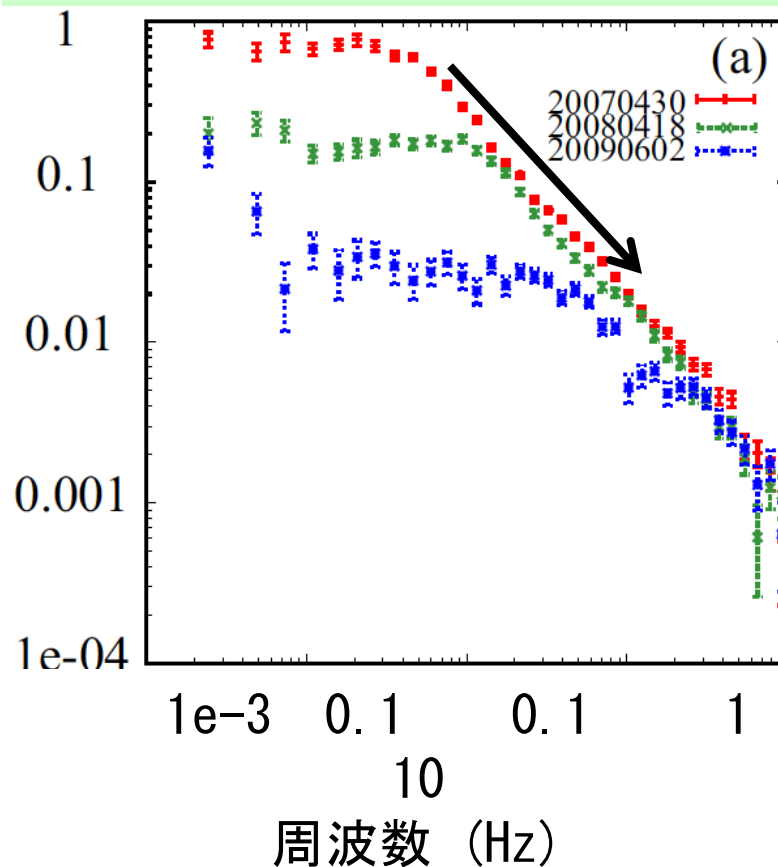
# Cyg X-1: 20回の観測 (months~years)

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

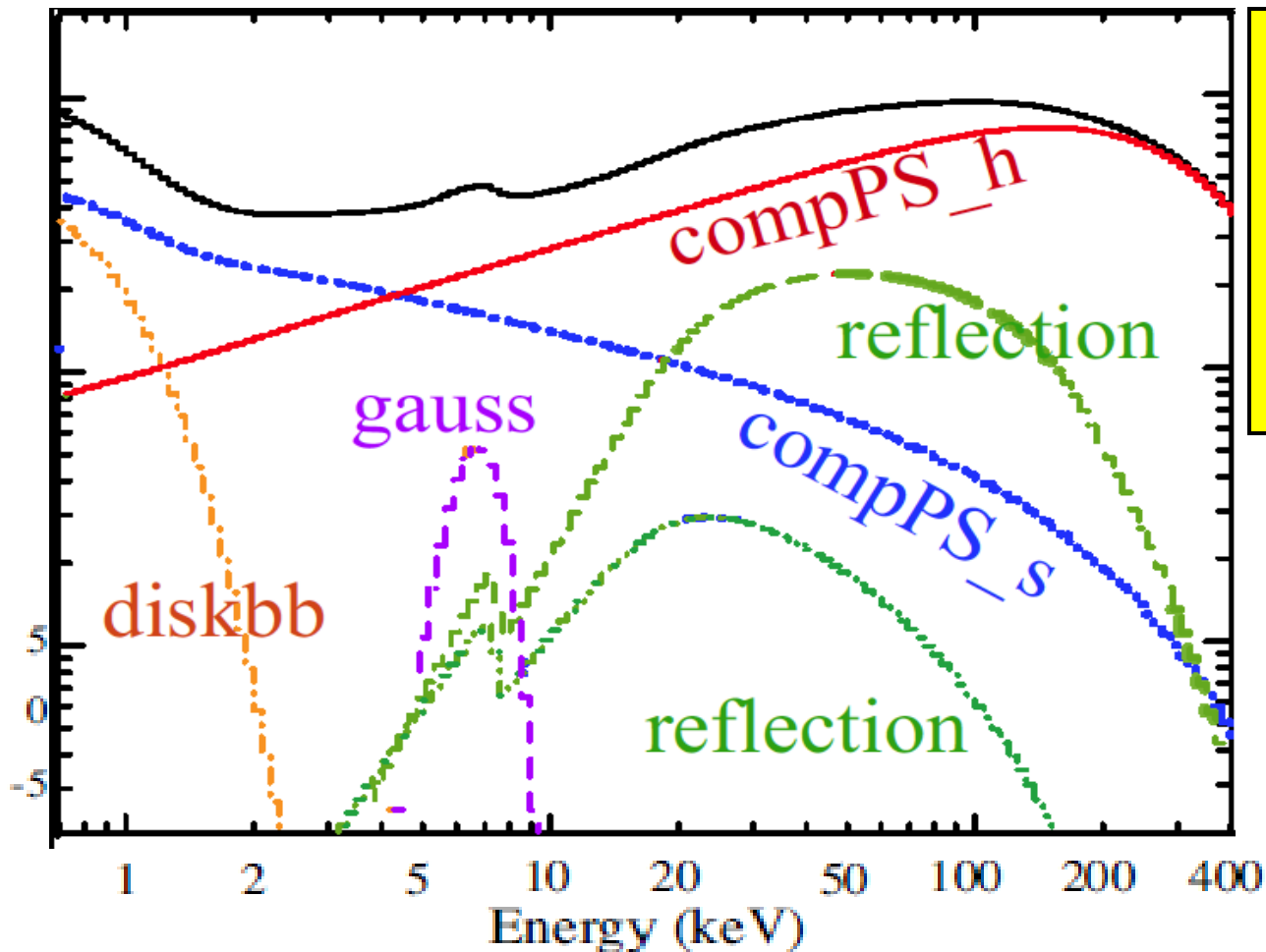


## 短時間変動のパワースペクトル



# 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  $\nu F_\nu$  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

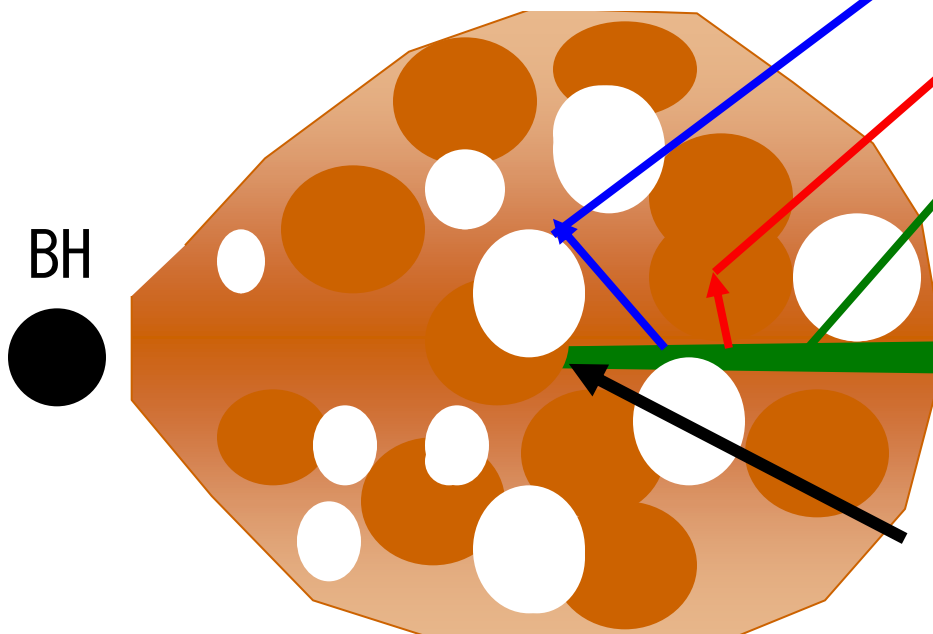
(2) コロナは  $T_e \sim 100$  keV  
で極めて非一様；  $\tau = 0$ 、  
 $\tau \sim 0.4$ 、 $\tau \sim 1.5$  が必

(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



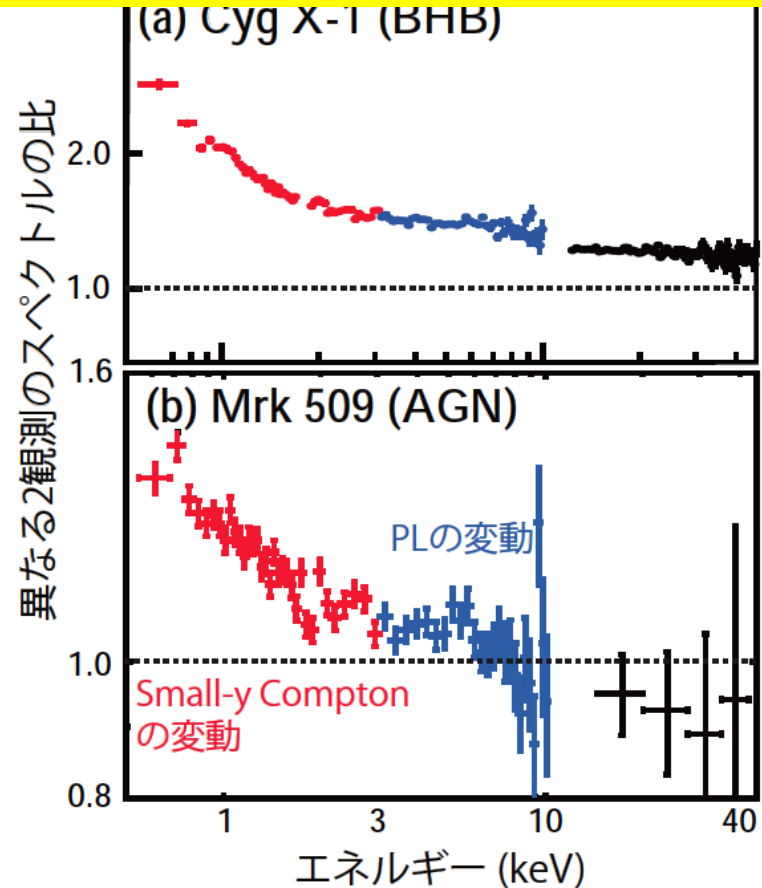
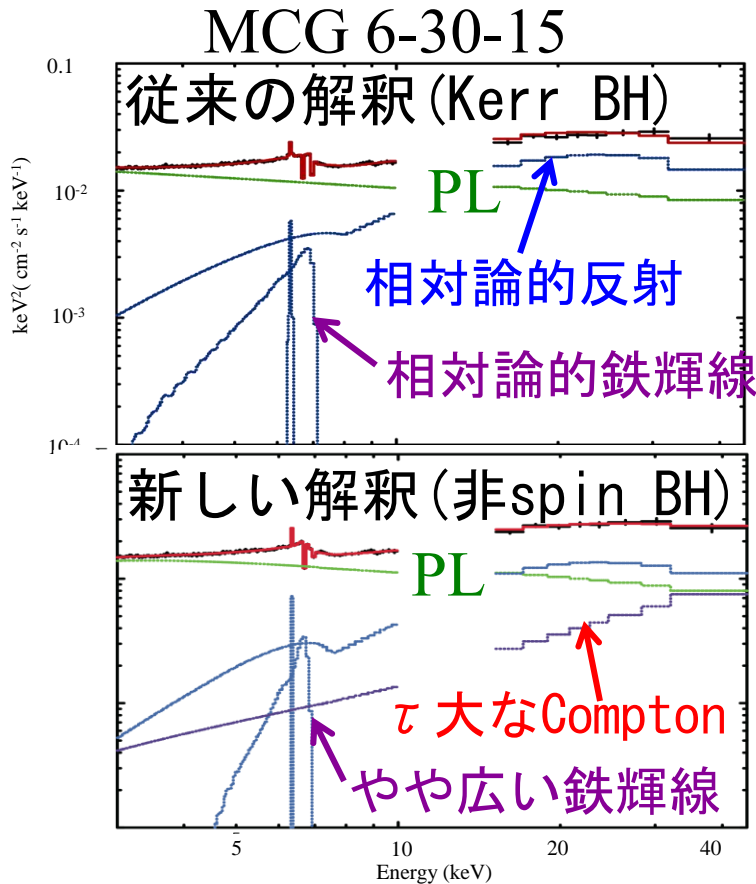


# AGNのX線連続成分

(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

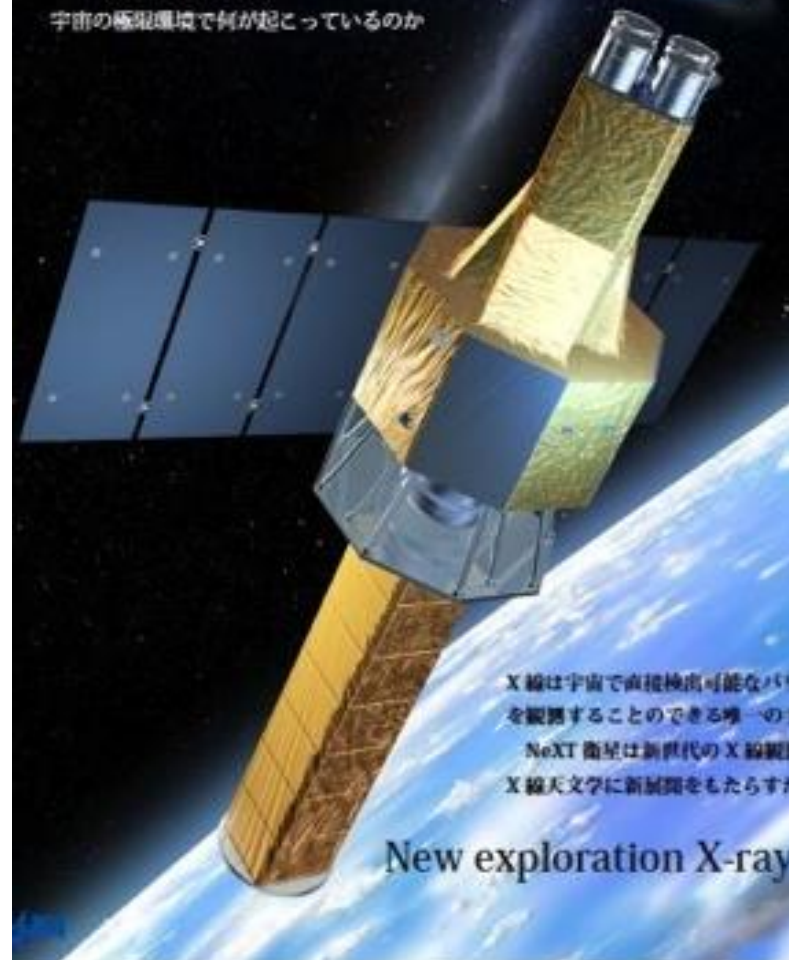
- スーパーミラーと硬 X 線撮像装置

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ルスを観測することのできる唯一の手段  
NeXT 衛星は新世代の X 線観測衛星  
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
- $^{44}\text{Ti}$  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。