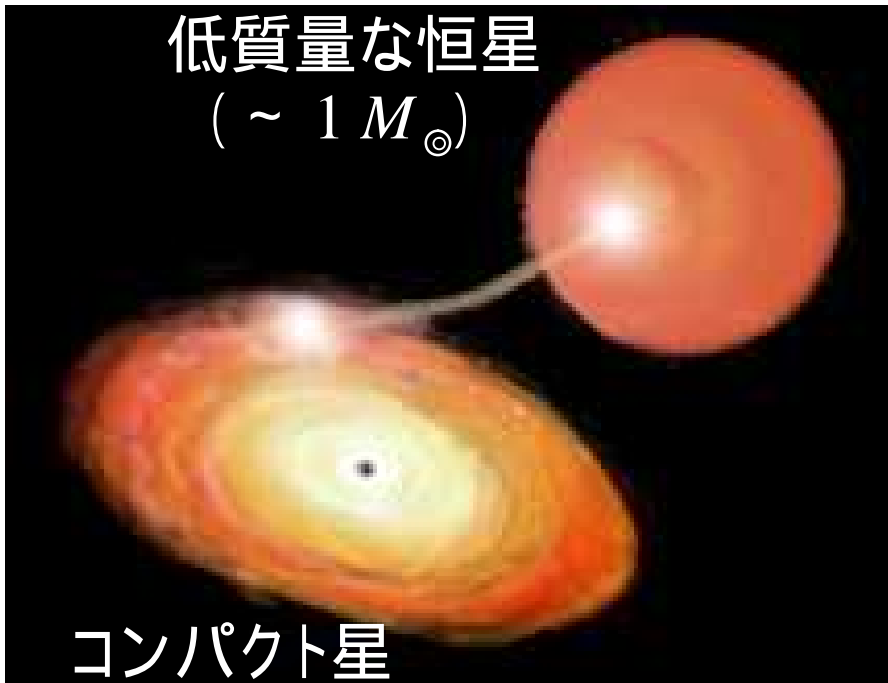




「すざく」で観測したエディントン限界に近い 低質量X線連星系の質量降着流

低質量X線連星系 (Low-Mass X-ray Binary: LMXB)



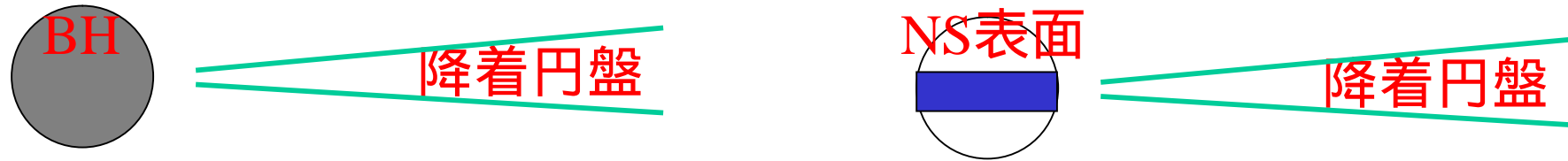
- ・コンパクト星:
 - ブラックホール(BH)
 - 弱磁場($< 10^9$ G) 中性子星(NS)

磁場の影響を受けることなく、
コンパクト星へ物質が降着している

本講演は **NS 連星系** について

高橋弘充、白井裕久、永江修、深沢泰司(広大理)、
北口貴雄(東大理)、牧島一夫(東大理、理研)

NS連星系 と BH連星系

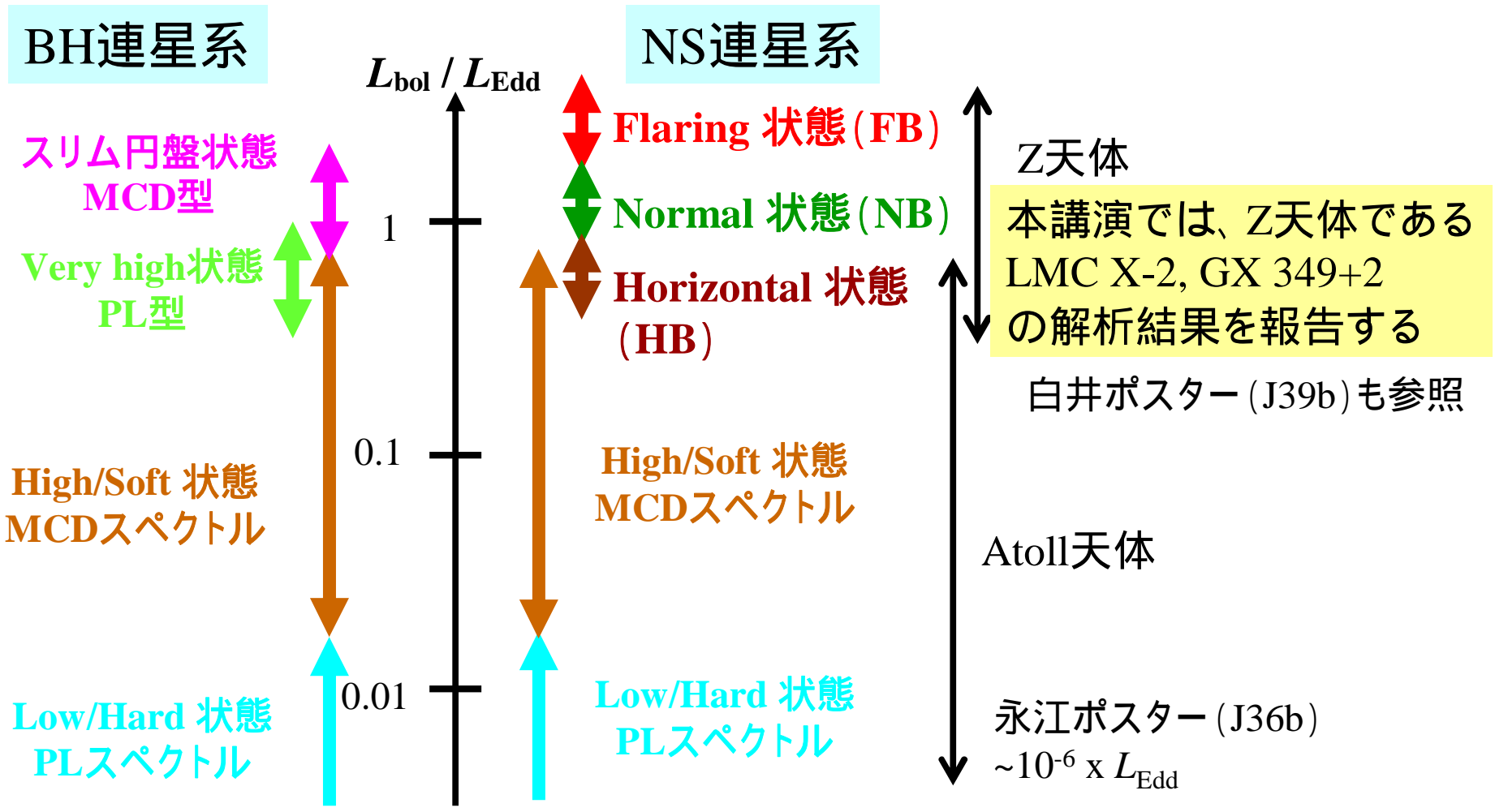


- NS連星系のデータから、BH連星系とは相補的に、質量降着流の物理を研究

- どちらも、解放された莫大な重力エネルギーにより、X線で明るく輝く。
- 唯一の違いは、NSの固い表面に対し、ブラックホールは事象の地平線。NS連星系では、物質は全エネルギーを解放してから、NS表面に降着。
 - ・NS表面からの放射を考える必要があって、複雑。
 - ・**全エネルギーの収支**を調べることができる。
- NS 連星系は、銀河系内に ~200天体 (BH連星系~20天体) もある。
 - ・**多様な物理状態**の観測チャンスに恵まれている。

「すざく」でX線連星系を観測する利点

- sub keV から数百 keV を同時に
- ~1 Crab の明るい天体も CCD のエネルギー分解能で観測できる

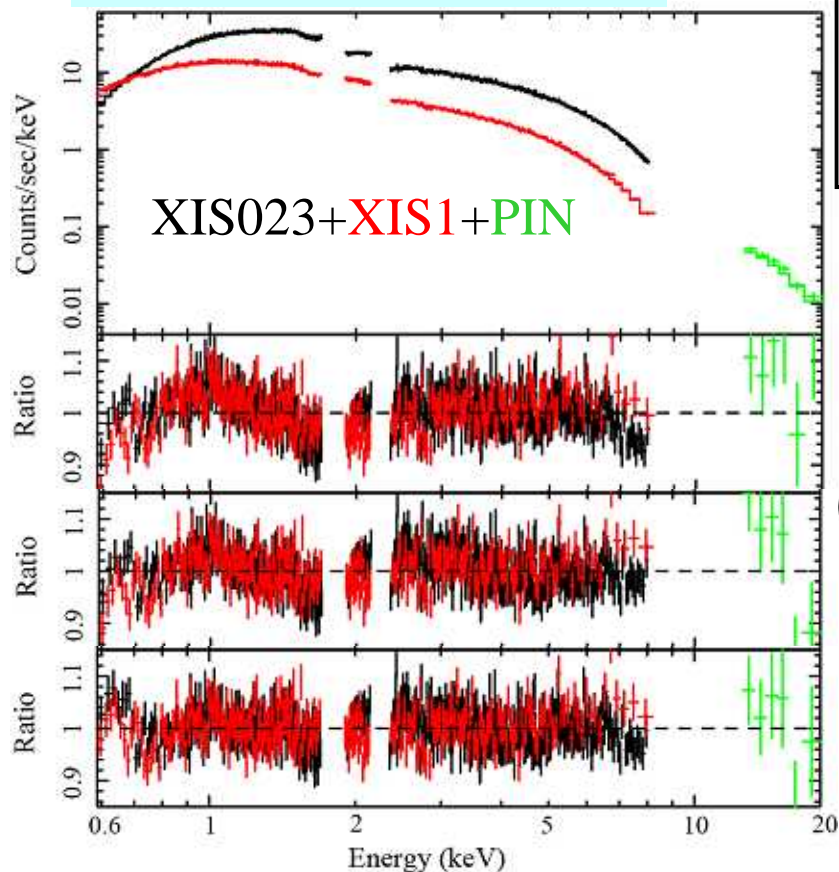


スリム円盤状態？ ガスと放射の相互作用 (アウトフロー)？

スリム円盤状態の検証: LMC X-2

系外天体なので、星間吸収が弱く、
3 keV 以下まで検出できる。

NBのスペクトル解析



- 標準円盤 (MCD)

温度の半径依存性: $T \propto r^{-0.75}$

- スリム円盤 (渡会 et al. 2000 など)

エディントン限界に近づくと、温度勾配が緩やかになる (低温のフラックスが相対的に増加する)

$T \propto r^{-p}$ (p-free disk), $0.5 < p < 0.75$

ディスクからの放射

NS表面からの放射: BB ($T \sim 2.2$ keV)

	χ^2/dof	T_{in} (keV)	r_{in} (km)
MCD+BB	1.76	1.2	15

星間吸収が銀河系の吸収よりも小さくなってしまふ

(p-free disk)+BB	1.55	1.8	7
------------------	------	-----	---

明らかに0.75 より小さい値 ($p=0.65 \pm 0.01$)

MCD+BB+BB	1.31	1.4	13
-----------	------	-----	----

($T_{\text{BB}} \sim 0.2$ keV, $r_{\text{BB}} \sim 18$ km)

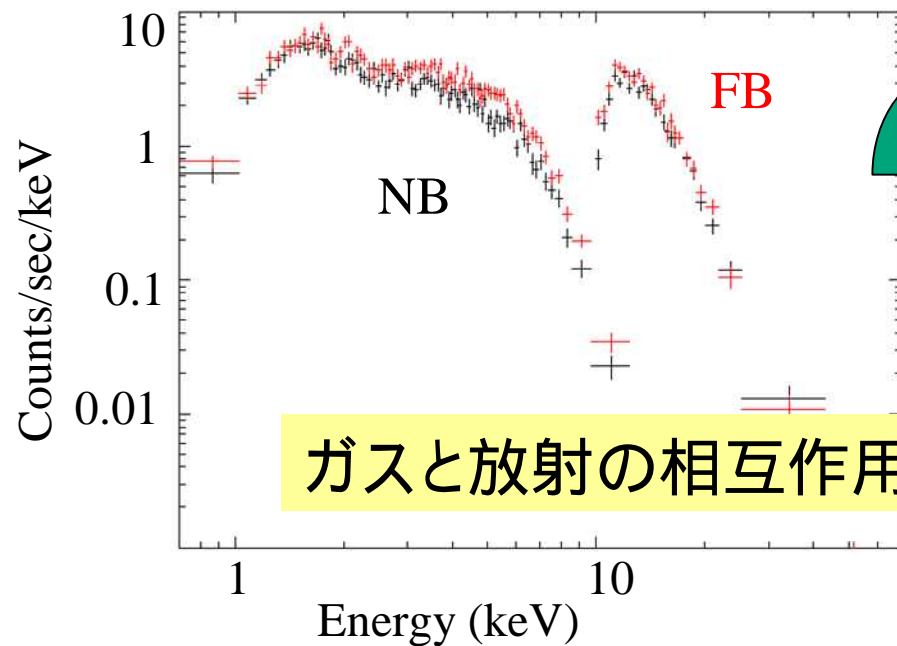
- 2 keV 以下に、標準円盤モデルよりも有意な盛り上がりがある。

- この盛り上がりは、p-free disk よりも、BBでよく再現される (一部がスリム状態?)。

エディントン限界付近でのスペクトル変化: GX 349+2

FB (エディントン光度を超えた状態) にいる確率が高い天体

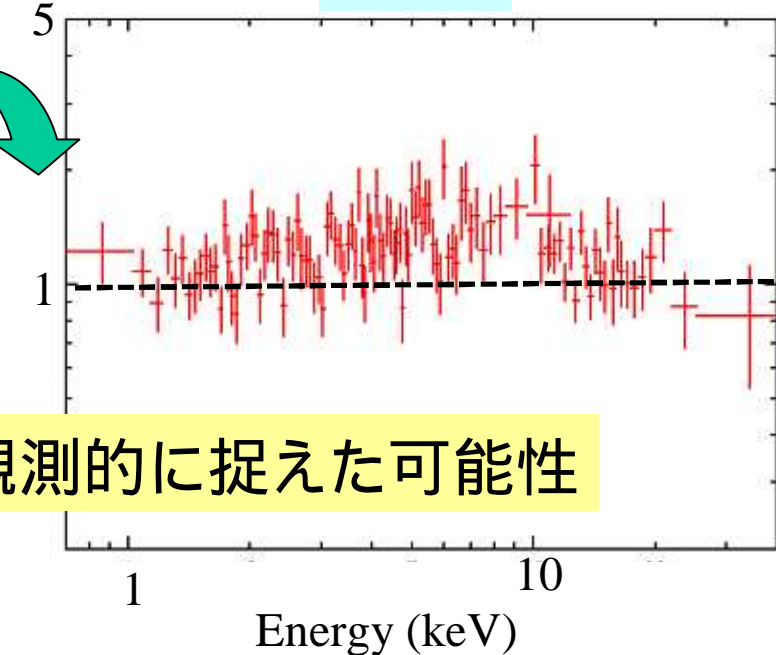
NBとFBのスペクトルの比較



比

FB/NB

Ratio



ガスと放射の相互作用を観測的に捉えた可能性

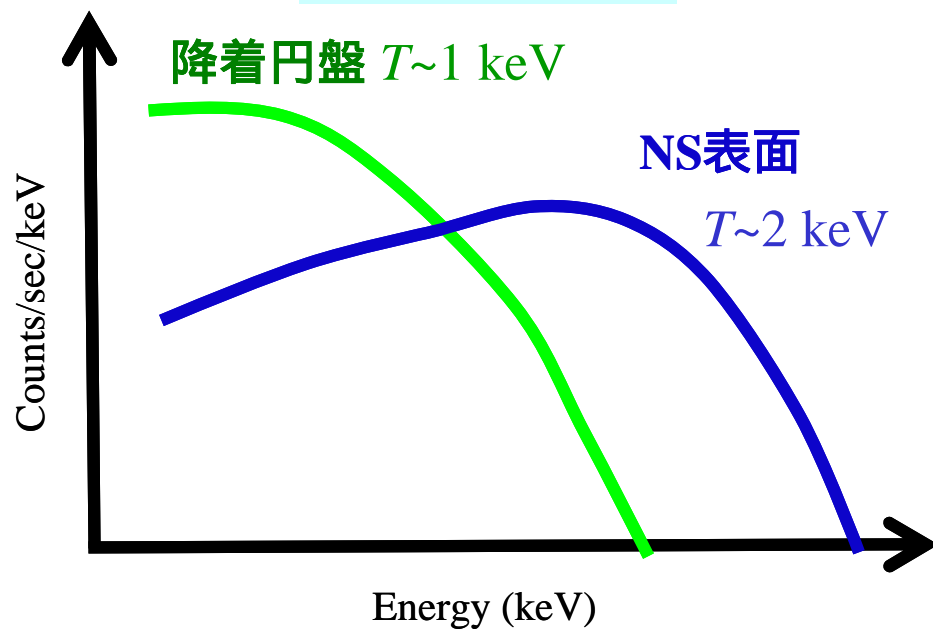
- NBに比べFBでは、4-10 keV の中間エネルギー帯域のみが増加し、MCD (降着円盤) と BB (NS表面) では再現できない。
- この構造はエネルギー分解能の優れた「すざく」でも広がっており、中温度のBB ($T_{BB} \sim 1.5$ keV) で再現できる。

大量に生じたアウトフローが光学的に厚くなって放射を出している？

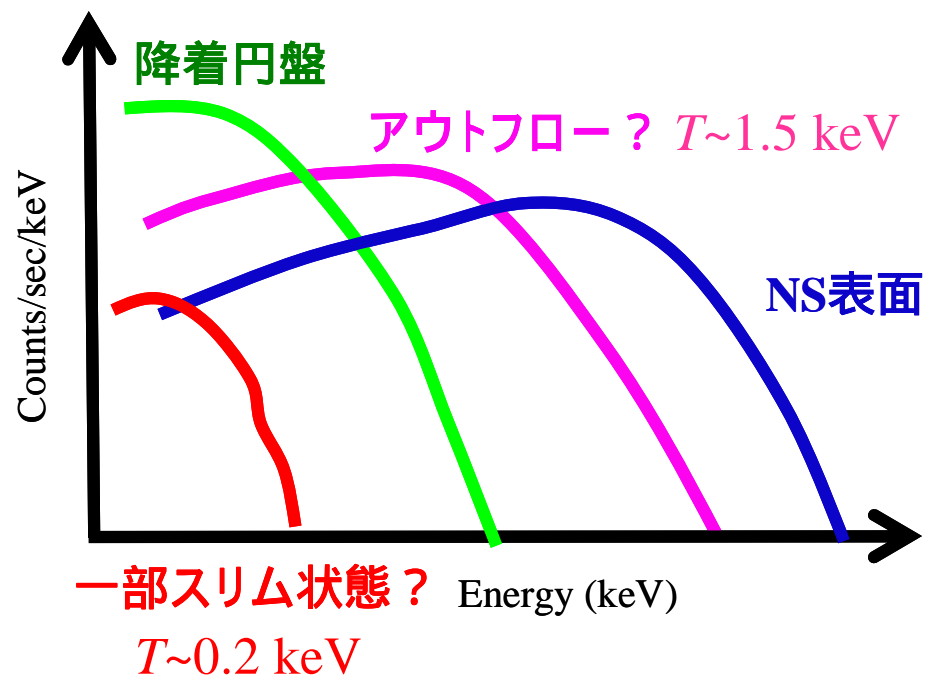
NS連星系のエネルギースペクトル

- LMC X-2 : 2 keV 以下で、標準円盤モデルよりも盛り上がる。
- GX 349+2 : 4-10 keV の中間エネルギー帯域のみが増加する。
- Cyg X-2 から両方の現象が検出されている (白井ポスター)

$$L_{\text{bol}} / L_{\text{Edd}} < 1$$



$$L_{\text{bol}} / L_{\text{Edd}} > 1$$

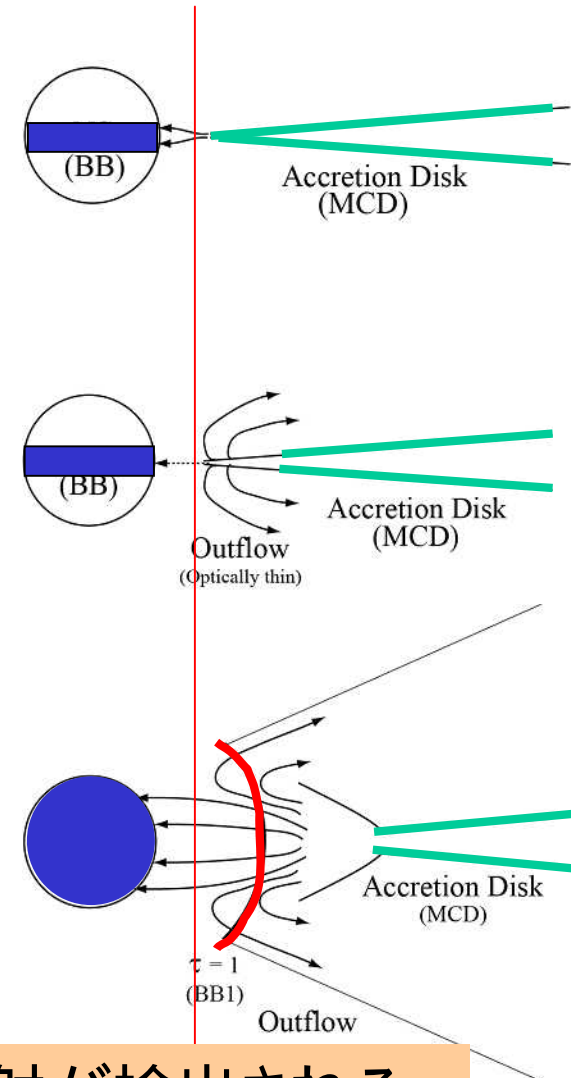


エディントン限界付近でのNS連星系の描像

(高橋 2005, 高橋 et al. 2006)

質量降着率 [\dot{M}/\dot{M}_E]

分類	降着円盤	アウトフロー
標準	標準	ほとんどない
NB	一部が スリム	少量で 光学的に薄い
FB	一部が スリム	大量に生じ、 光学的に厚い



アウトフローが生じてても、NS表面からのBB放射が検出される。
物質の一部はNS表面に降着しつつづけていると考えられる。

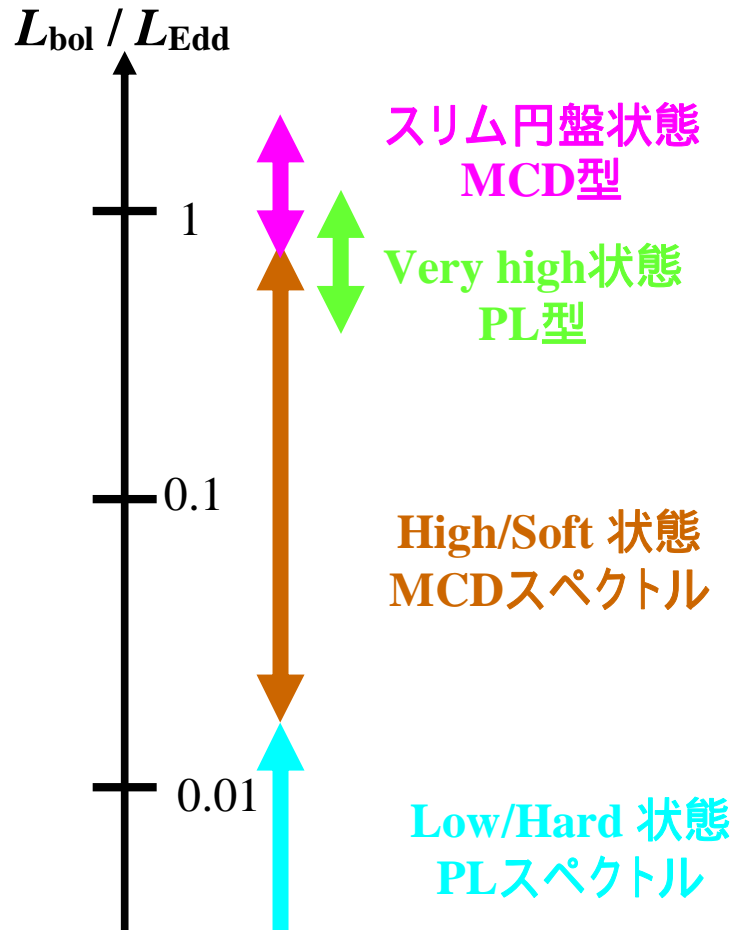
まとめ

- 「すざく」は、X線連星系を
 - ・sub keV から数百 keV を同時に
 - ・~1 Crab の明るい天体も CCD のエネルギー分解能で観測できる唯一の衛星である。
- 星間吸収の弱いZ天体 LMC X-2 の解析
 - ・2 keV 以下に有意な盛り上がりを検出した。
 - ・この構造は、スリム円盤モデルよりも、黒体放射 ($kT \sim 0.2$ keV) でさらによく再現された。
 - ・円盤の一部のみがスリム状態になっている可能性がある。
- エディントン限界を超えた状態にいる確率の高いGX 349+2 の解析
 - ・NB に比べ、FB では 4-10 keV に新たな放射成分を検出した。
 - ・この成分は、放射圧によって生じているアウトフローが光学的に厚くなって放射していると考えられる。

「すざく」でNS連星系を観測する利点

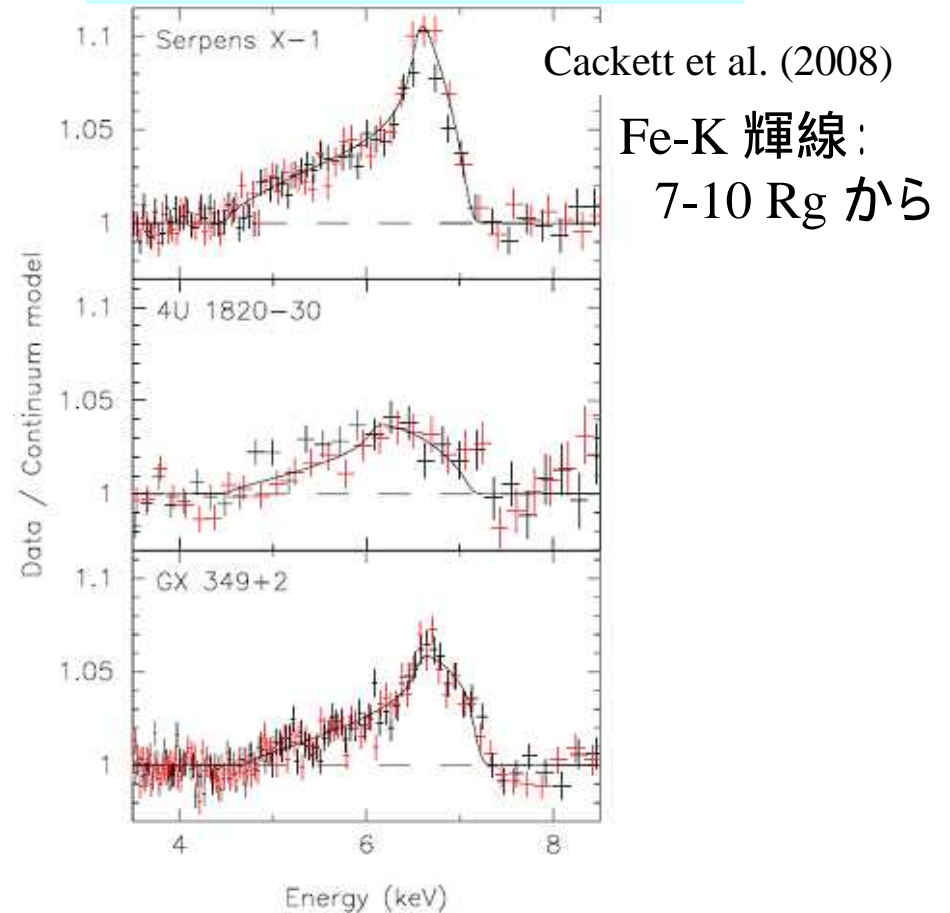
- sub keV から数百 keV を同時に
- ~1 Crab の明るい天体も CCD のエネルギー分解能で

エディントン限界近くでの円盤構造



スリム状態、アウトフロー？

6 keV 付近の輝線構造



本当にNS近傍？

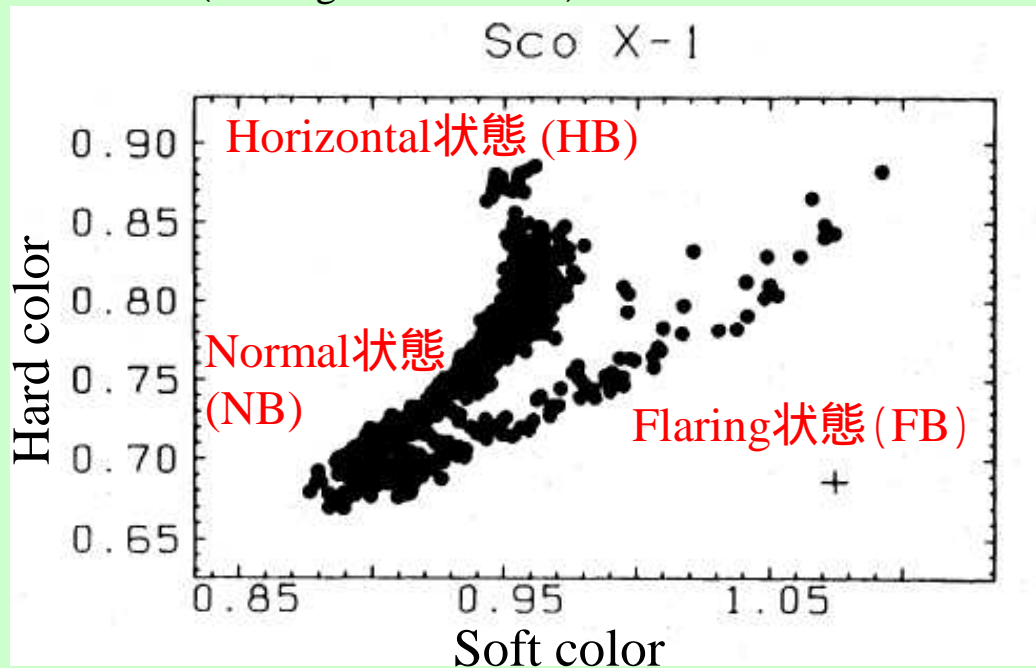
Z天体の3つの物理状態

- X線光度 $\sim 10^{38}$ erg/s \sim エディントン限界

- 銀河系内に8天体

(Sco X-1, Cyg X-2, GX 17+2, GX 349+2, GX 5-1, GX 340-0, Cir X-1, XTE J1701-462)
系外では1天体のみ(LMC X-2)

・ color-color 図 (CCD)
(Hasinger et al. 1989)



カラー: カウントレートの比

Hard color = (高帯域)/(中帯域)

Soft color = (中帯域)/(低帯域)

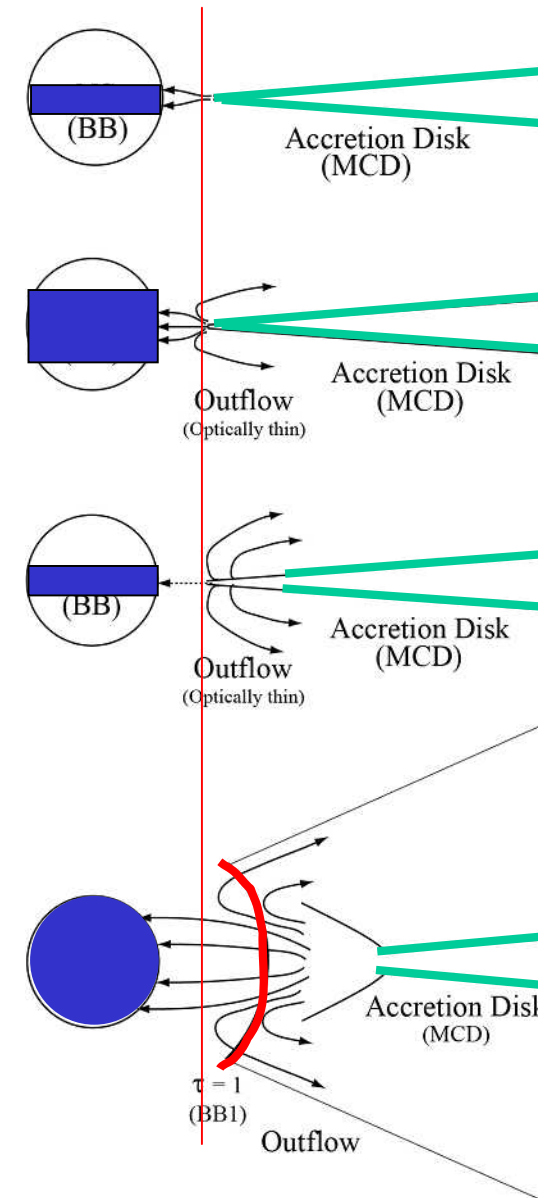
数時間のスケールで
「Z」(もしくは「 \hookrightarrow 」)の形に
そって状態遷移: Z天体

「質量降着率がどの向きに増加するのか」がまだ分かっていない
3 keV 以上の観測では、NB でもっともカウントレートが低くなる

統一的な描像

質量降着率 [\dot{M}/\dot{M}_E]

分類	降着円盤	NS表面	アウトフロー
UB	標準	細い帯	ほとんどなし (< 1)
HB	標準	太い帯	NS手前から
NB	標準?	細い帯	円盤から (~ 1)
FB	内側が膨れる	球対称	円盤から (> 1) (NS表面を隠す)



「質量降着率」と「天体の観測方向」の
2パラメータだけで
LMXBの物理状態が説明できる