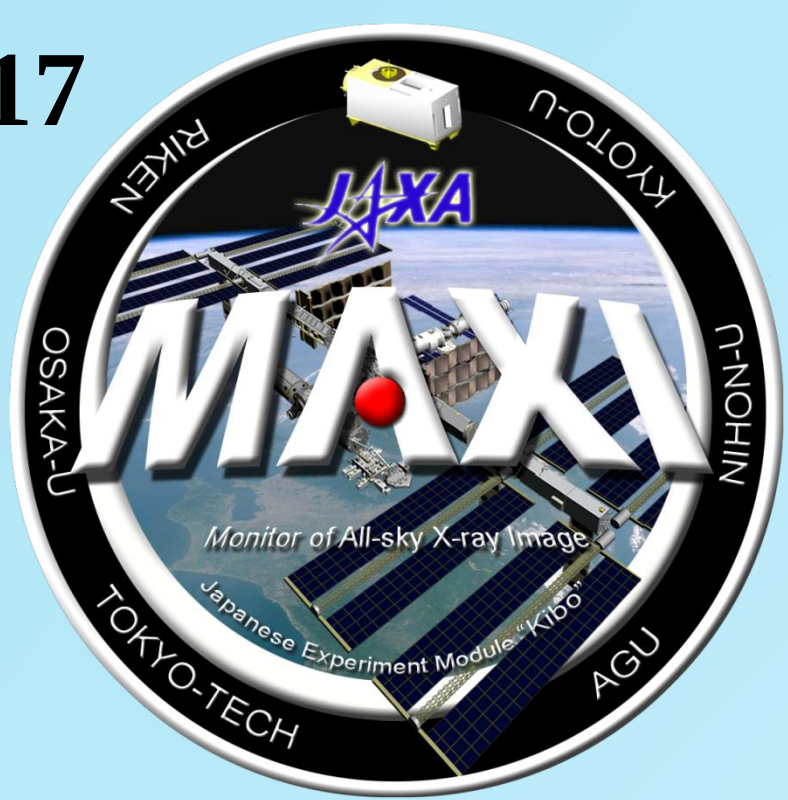




MAXIによる 低質量X線連星系の光度曲線にみるプロペラ効果と統一解釈

浅井和美, 松岡勝, 三原建弘, 杉崎睦, 芹野素子(理研), 中平聡志(JAXA), 根来均(日大), 上田佳宏(京大), 山岡和貴(ISAS), 他 MAXIチーム

<http://maxi.riken.jp/>

4U 1608-52とAql X-1は中性子星を含む低質量X線連星(NS-LMXB)で、soft X-ray transient としても知られている。これらのアウトバーストに関してMAXI/GSCと、モニター観測を行っているSwift/BATをあわせて解析したところ、soft-to-hard遷移後に、急激な光度減少が検出できた。Matsuoka & Asai (2013)で提唱されたNS-LMXBの統一解釈では、アウトバーストのピーク後、質量降着率が減少し、まず、降着円盤が光学的に厚い円盤から薄い円盤に遷移(soft-to-hard遷移)し、降着物質は中性子星表面全体に降着する状態(hard-high状態)になる。さらに質量降着率が減少するとプロペラ効果が起こり中性子星への降着が妨げられ(hard-low状態)、光度が急激に減少する。この統一解釈に基づき、これらの急激な光度減少をプロペラ効果の効き始めとしたところ、4U 1608-52とAql X-1の中性子星の表面磁場は $\sim 10^8$ Gとなった。この値は、これまで予想されてきた磁場の値と矛盾しない結果である。

1. Introduction (NS-LMXBの統一解釈)

NS-LMXBは、明るい時($\sim 1 \times 10^{37}$ erg/s以上)、熱的な成分(黒体輻射成分)が顕著な「ソフト状態」にあり、降着円盤は光学的に厚い円盤になっている。アウトバーストのdecay部分のように、質量降着率が減少すると、降着円盤は光学的に薄い円盤に遷移を起こし、非熱的な成分(コンプトン成分)が顕著な「ハード状態」になる。これは、「disk遷移」として知られている。一方、降着率が減少すると、中性子星の磁気圧が降着物質のガス圧を上回る状況になり、回転する中性子星は、降着物質をプロペラのように吹き飛ばす「プロペラ効果」が働く。この場合、中性子星への質量降着が妨げられるので光度が減少し、中性子星表面からの熱的な輻射成分の減少で、スペクトルはハードになる。

つまり、「disk遷移」も「プロペラ効果」も、X線光度の減少とスペクトルのハード化という類似の特徴を示す。これまで、「disk遷移」と「プロペラ効果」は、NS-LMXBでは起きるX線光度も上記の特徴も似ているため、どちらか一方の解釈で議論されてきた。Matsuoka & Asai (2013)は、中性子星への降着流の変化と中性子星の磁場を考慮して、disk遷移とプロペラ効果の両方を用いる「統一解釈」を提唱した。図1はX線光度曲線の各状態に対応する中性子星近傍の様子の模式図で、その説明が表1である。

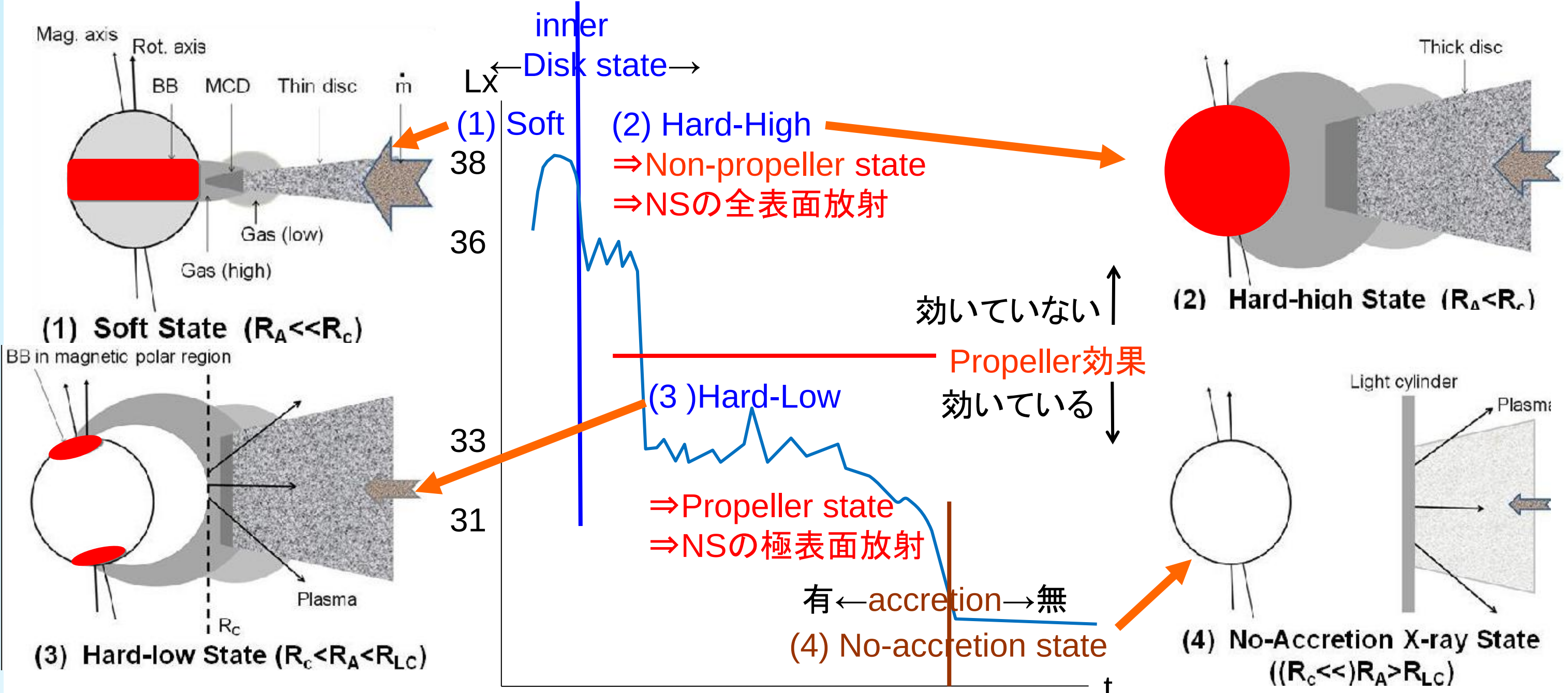


図1: 統一解釈における X線光度曲線の各状態に対応する中性子星近傍の様子の模式図[1]。

状態	条件	質量降着の特徴
(1) Soft	$R_A \ll R_C$	光学的に厚い降着円盤から中性子星表面の赤道近傍に降着
(2) Hard-high (HH)	$R_A < R_C$	光学的に薄い降着円盤から中性子星表面全面に降着
(3) Hard-low (HL)	$R_C < R_A < R_{LC}$	プロペラ効果により中性子星表面全体へ降着が妨げられ、極付近のみに降着
(4) No-accretion	$R_{LC} < R_A$	中性子星表面への降着が全くない状態

表1: 統一解釈の各状態。 R_A : Alfven半径、 R_C : Co-rotation半径、 R_{LC} : Light cylinderの半径。

2. Analysis and Results

2.1. 4U 1608-52とAql X-1の光度曲線

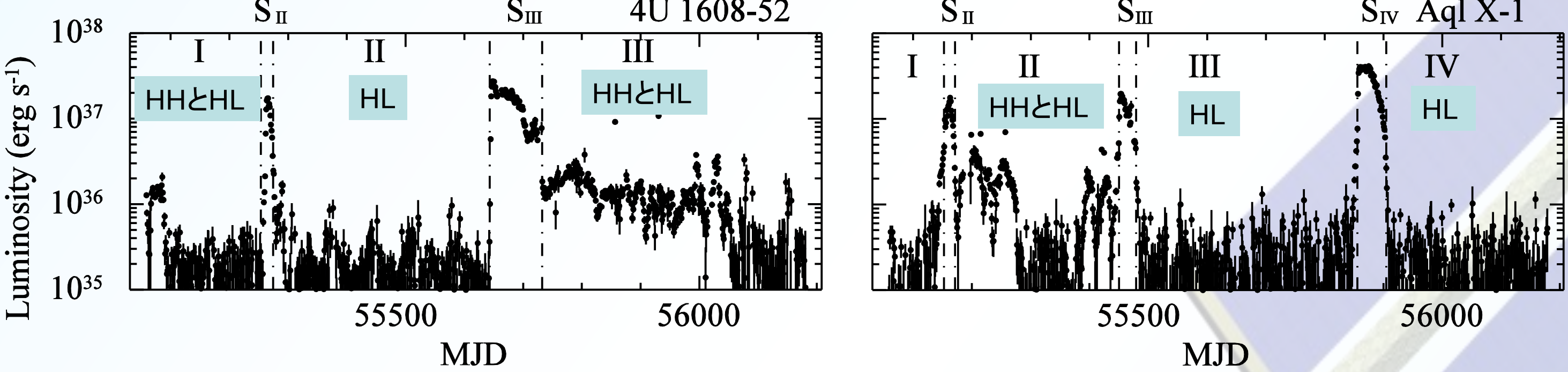


図2: MAXI/GSCによる4U 1608-52とAql X-1の2-10 keVの光度曲線。I~IVはハード状態、「S_{II}~S_{IV}」はソフト状態で、Swift/BAT (15-50 keV) との光度比から決めた[2]。4U 1608-52(III)、Aql X-1(II)で $\sim 10^{37}$ erg/sまでジャンプしている点は、I型X線バーストである。

●アウトバーストのdecay部分では、まず「disk遷移」が起こり図2のI~IVのハード状態になる。アウトバーストによる降着率の減少が急なときは、「hard-high状態」は非常に短く、すぐに「hard-low 状態」なる。これが、4U 1608-52(II)とAql X-1(III)と(IV)である。一方、降着率がさほど減少しないときは、「hard-high 状態」がある期間続き、その後プロペラ効果による急激な光度減少(「hard-low 状態」への遷移)が起こる(4U 1608-52(I)と(III)、Aql X-1(II))。ここでは、後者の3箇所注目して、急激な光度減少を起こし始める光度を「光度分布」から決定した(2.2)。

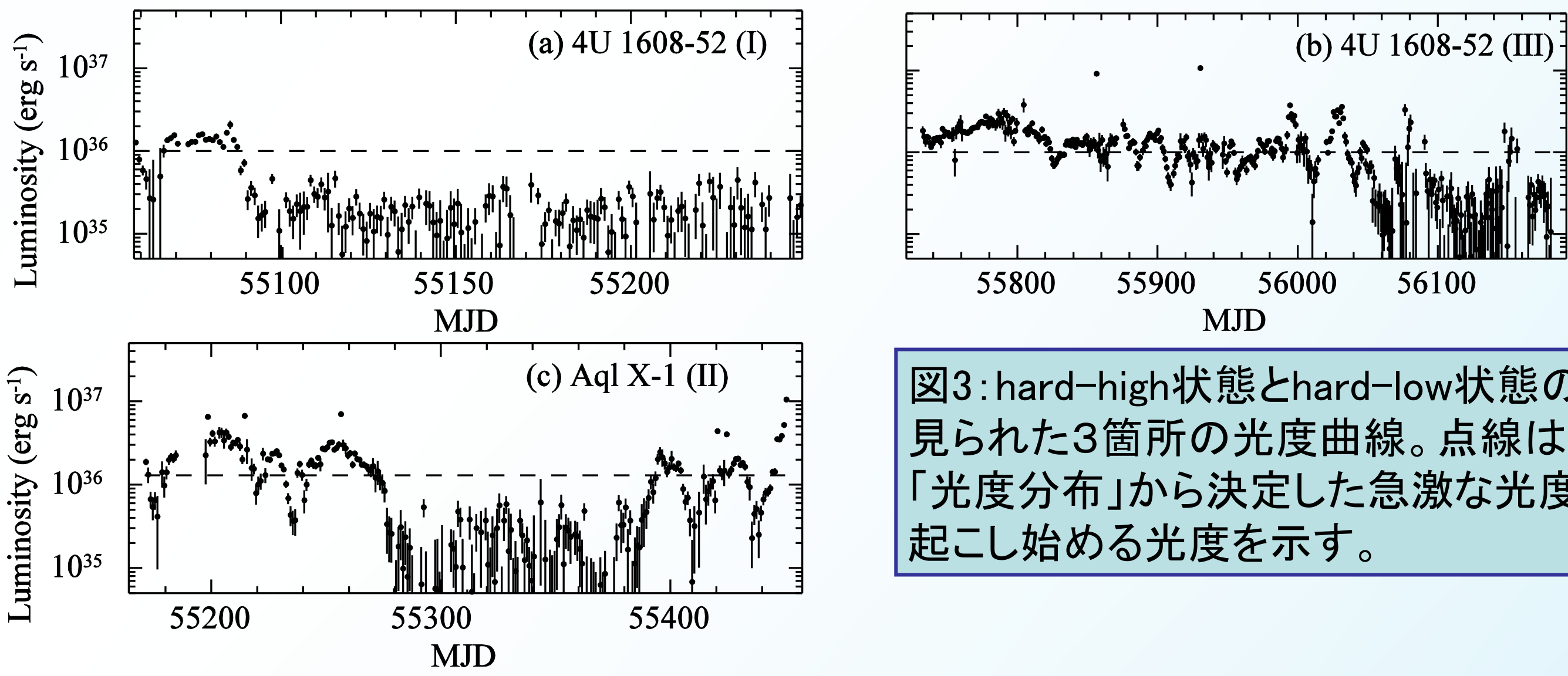


図3: hard-high状態とhard-low状態の両方が見られた3箇所の光度曲線。点線は、2.2で「光度分布」から決定した急激な光度減少を起こし始める光度を示す。

2.2. 光度分布とその解釈

ここでは、光度分布図を利用して、急激な光度減少を起こし始める光度を決定する。図5には、各種の光度曲線と光度分布の関係を模式的に示した。図4には、図3(a)~(c)の光度曲線に対応する光度分布図を示す。

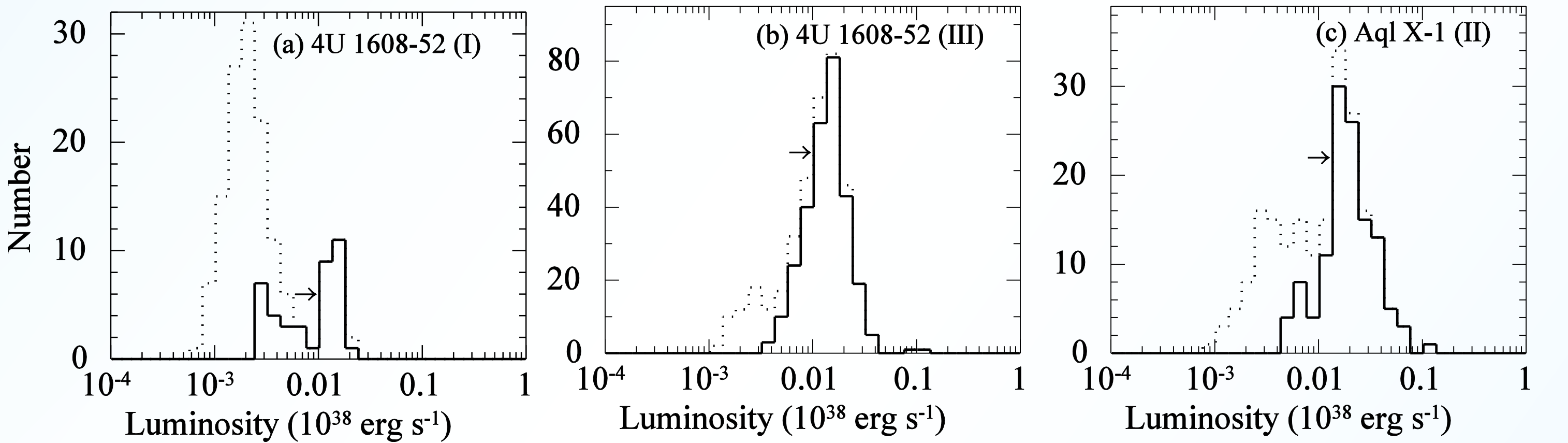


図4: (a)~(c)は、図3 (a)~(c)の光度曲線の光度分布図。点線のヒストグラムは、 1σ 以上のデータを用いて作成。実線のヒストグラムは、 4σ 以上のデータを用いて作成。矢印は、急激な光度減少を起こし始める光度を示している。

●4U 1608-52(I)では、MJD = 55965-55985で、光度がほぼ一定のhard-high 状態がある。その直後に、光度が急激に減少している。これが、図4(a)の矢印の部分である。

●Aql X-1(II)では、図4(c)で、急に頻度が減少しているところ(矢印)がある。これは、図3(c)からも明らかなように、MJD = 55280-55380でhard-low 状態になっていて、その前後での急激な光度減少と増加を示している。

●4U 1608-52(III)では、図4(b)からは、1つのある光度で急激な光度減少が起きているとは言えない。図3(b)を見ると、hard-high 状態で何度も光度減少が起きているため、光度分布ではある光度での急激な頻度の減少が表れていない。図4(b)の矢印は、この頻度が減少し始める光度である。

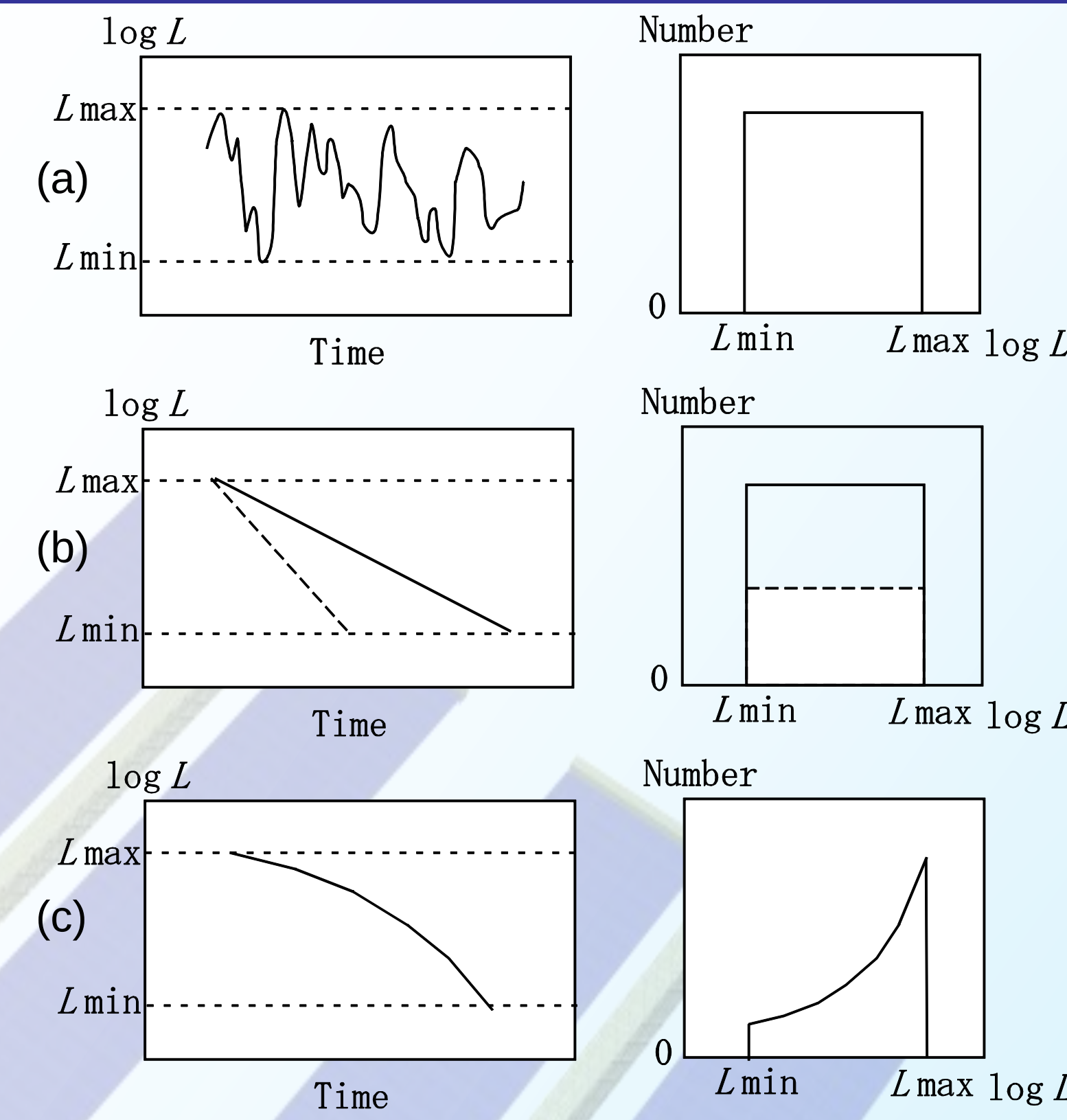


図5: 光度曲線と光度分布の模式図。(a) 対数空間でランダムな変動の場合。(b) 指数関数の場合(対数空間で傾きは一定)。(c) ガウス関数の場合(対数空間で傾きは変化)。

●光度分布から決定した急激な光度減少が起き始める光度は、4U 1608-52では 1.0×10^{36} erg/s (4.1kpc)、Aql X-1では 1.3×10^{36} erg/s (5.0kpc)となった。

2.3. 磁場の決定

●hard-high 状態からhard-low 状態への急激な光度変化を、プロペラ効果によるものとして、以下の式を使い、中性子星表面磁場を求めた。
● $B = 2.6 \times 10^7 \eta \gamma^{-7/4} (P/1\text{ms})^{7/6} (L/10^{36} \text{ erg/s})^{1/2} (M/1.4M_{\text{sun}})^{1/3} (R/10^6 \text{ cm})^{-5/2}$
ここで、P、M、R は、中性子星の自転周期、質量、半径である。Lは、プロペラ効果が起きる光度($R_C = R_A$)である。 η は、モデルに依存する値で、0.5~1であり、 $R_A = \eta R_{A0}$ で、 R_{A0} は、Ghosh & Lamb (1979)[3]の(27)式のAlfven半径 R_{A0} である。
●4U 1608-52は $B = (0.5-1.6) \times 10^8 \text{ G}$ 、Aql X-1は $B = (0.6-1.9) \times 10^8 \text{ G}$ となった。ここで、中性子星の自転周期は4U 1608-52が1.62 ms[4]、Aql X-1は1.82 ms[5]を用いた。

2.4. XTE J1701-462の応用

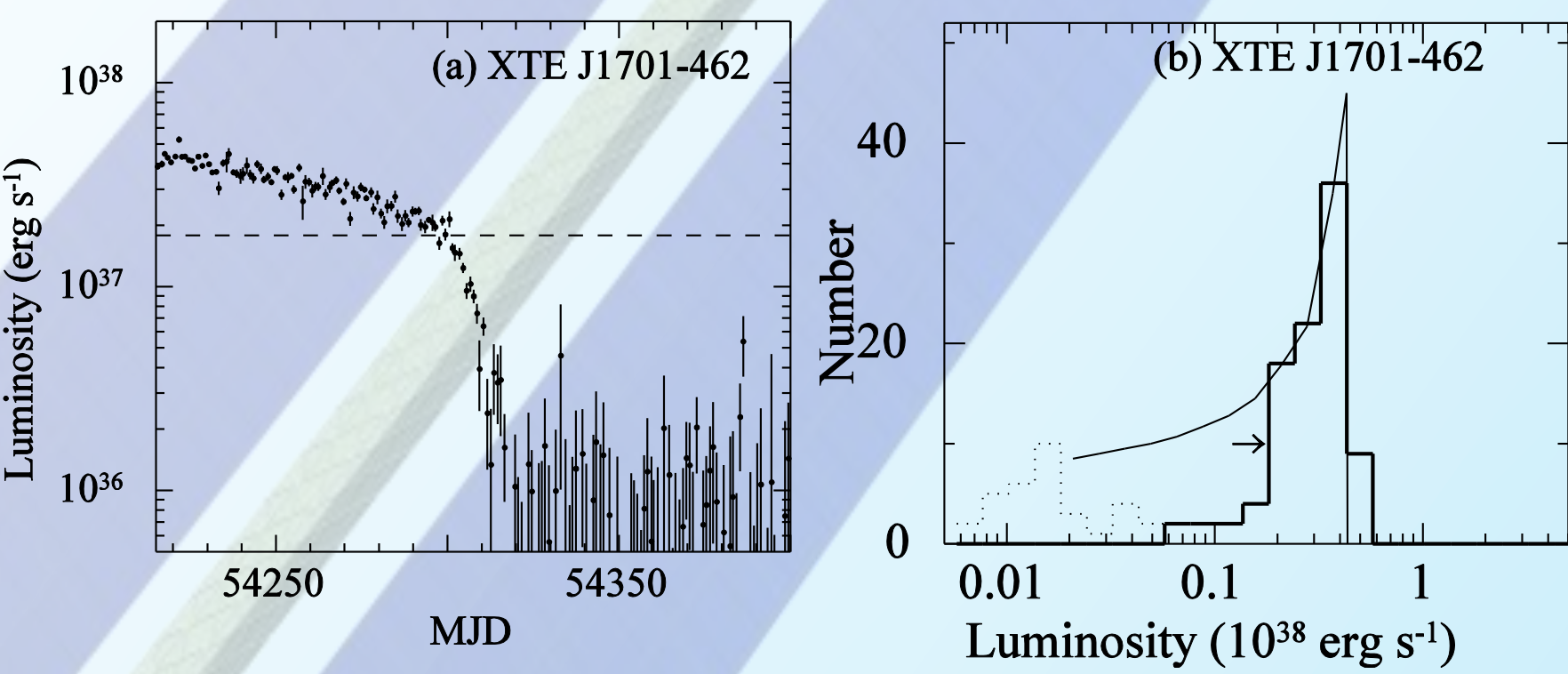


図6: XTE J1701-462の光度曲線(ASM)とその光度分布。(a)の点線は(b)の矢印の急激に光度減少が始まる光度。

3. まとめ

●NS-LMXBの「統一解釈」[1]をもとに、hard-high 状態からhard-low 状態への急激な光度変化をプロペラ効果によるものとして中性子星表面の磁場を求め、これまでの予想と矛盾のない結果を得た。これは統一解釈モデルを支持する観測結果の一つである。

References

[1] Matsuoka & Asai, 2013, PASJ, 65, in press [3] Ghosh & Lamb 1979, ApJ, 232, 295 [5] Zhang et al. 1998, 495, L9
[2] Asai et al. 2012, PASJ, 64, 128 [4] Hartman et al. 2003, AAS, 7, 1738 [6] Ding et al. 2011, AJ, 142, 34