

中性子星強磁場が作り出す X線輝線構造の発見

岩 切 渉

〈理研仁科センター玉川高エネルギー宇宙物理研究室 〒351-0198 埼玉県和光市広沢2-1〉

e-mail: iwakiri@crab.riken.jp



中性子星と恒星の連星系である降着駆動型パルサーをX線で観測すると、その硬X線スペクトル中には中性子星の磁場強度に対応したサイクロトロン共鳴散乱による構造がしばしば確認されることが知られている。この構造は現在17天体から吸収線として観測されている。われわれは、日本の第5代X線天文衛星すざくを用いて中性子星のパルス位相によってこの吸収構造が輝線構造に変わる現象を世界で初めて発見した。本稿ではここからわかる新たな降着駆動型パルサーの描像について紹介する。

1. 宇宙に浮かぶ強磁場実験室

われわれが住む地球を飛び出して宇宙を見渡してみると、そこには地球上では考えられないような温度、重力などの極限環境がそこかしこに存在している。そのため、天文学という学問は宇宙を観測することによって地上では作り出すことが難しい状況での物理学の検証、極限環境物理の実験という側面ももっている。例えば、強大な重力ポテンシャルをもつブラックホール近傍のプラズマの振る舞いを観測することは、一般相対論の検証につながる。今回は極限環境の磁場、1億テスラ（ 10^8 テスラ）に及ぶ磁場強度（太陽黒点の磁場強度が ~ 0.1 テスラ）をもつ中性子星の磁極に降り積もるプラズマの話をしたと思う。

中性子星は重力崩壊型の超新星爆発によって生まれ、自己の重力を中性子の縮退圧（簡単には中性子同士の反発力）で支えることによって形を保っている、半径が太陽の約10万分の1の10 km程度しかないとてもとても小さな星である。どのくらい小さいかを示すときに日本では山手線ぐらいという表現がよく使われており、アメリカでは

ニューヨークのブルックリンぐらいいだと言われていようである。自転周期は数十ミリ秒～数十秒ととても速く、遊園地のコーヒーカップが苦手な私は中性子星の上には立ってられそうにない。

そんな太陽よりはるかに小さい星なのに、太陽と同程度の質量をもっているため、表面重力は地球表面に比べて1,000億倍もの大きさになる。そして星の磁場はというと、0.01テスラ程度の磁場をもつ恒星が表面を貫く磁束の数が保存されたまま中性子星のサイズに収束したと考えると、中性子星の表面磁場は1億テスラにもものぼる。現在、地球上で作り出せる定常的な磁場の大きさはアメリカの国立磁場研究所の45テスラが最大である。つまり、中性子星のもっているであろう磁場は現在の人類が作り出せる定常的な最高磁場の約200万倍になるわけで、いかに中性子星のもつ磁場が強大であるかわかりいただけると思う。そして、後に述べるようにこの単純な見積もりから予想される中性子星の強大な磁場強度は直接的に観測されることとなる。

中性子星は1967年に英国のA. HewishとJ. Bellによって発見されて以来これまでに1,500個以上

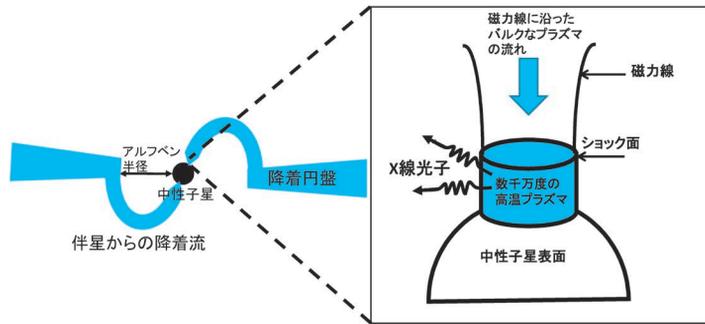


図1 (左) 降着駆動型パルサーの全体の模式図。(右) 中性子星磁極における降着円筒の模式図。

が観測されている。中性子星の極限環境の特徴をまとめてみると大きく分けて三つあり、

1. 星の内部が超高密度
2. 強い重力ポテンシャルと磁場強度
3. 速い自転速度

その中でも今回は2.が特に重要となる中性子星と恒星の連星系である降着駆動型パルサーについて話をしていきたい。

磁場強度が1億テスラ程度の中性子星と恒星の連星系では、恒星の大気が星風、もしくは直接中性子星の重力ポテンシャルにつかまる。すると、恒星の大気がケプラー運動をしたまま中性子星側に落ちていくために中性子星の周りには図1左のような降着円盤と呼ばれるプラズマの円盤が形成される。この降着円盤の内縁はどこまで中性子星に近づくかという、内側に向かうガスの圧力と外側に向かう中性子星の磁気圧が釣り合うところでせき止められる。この中性子星からせき止められた降着円盤内縁までの距離をアルフベン半径と呼ぶ。アルフベン半径より内側では、磁場の力が優勢なのでプラズマは磁力線に沿って、中性子星の磁極へと自由落下していく。このときの落下速度は中性子星の大きな重力ポテンシャルのため、光速の数%にも達する。そして、中性子星表面近くでショック面を境にプラズマのバルクな運動はランダムな運動へと変わり重力エネルギーが熱エネルギーへと変換される。この熱エネルギーが放射で失うエネルギーとバランスした結果、中性

子星の磁極、つまり1億テスラの磁場下に数千万度に達する高温のプラズマの柱—降着円筒が形成される(図1右)。このプラズマの柱はX線で輝いており、中性子星の自転によって見え方が変わるため、X線帯域で強い周期的なパルスが観測される。このような天体は、降着による静止質量エネルギーを解放して光っていることから、自身の回転エネルギーを解放して光る単独中性子星の回転駆動型パルサーと区別して「降着駆動型パルサー」と呼ばれている。

2. 降着駆動型パルサーのX線スペクトル

それでは、この降着円筒のような極限的な磁場下における高温プラズマからのX線スペクトルがどのようなものになるのか考えてみよう。

2.1 サイクロトロン共鳴散乱

まず強磁場中で電子がどのように振る舞うかについて考えてみる。磁場中での電子の運動は磁場に垂直な方向にローレンツ力を受けるため、サイクロトロン運動をする。このときのサイクロトロン運動の半径(ラーマー半径)は、磁場強度に反比例する。磁場強度が大きくなりラーマー半径が電子のド・ブロイ波長程度に小さくなると量子力学的な扱いが必要になる。その結果、磁場に垂直な方向の運動量が量子化され電子は原子核の周りの電子同様、飛び飛びのエネルギー準位をもつことになる。原子との違いは、このエネルギー準位

が整数倍となることであり、これをランダウ準位と呼ぶ。この準位を式で表すと、

$$E_n = 11.6n (B/10^8 \text{ テスラ}) \text{ keV} \quad (n=1, 2, \dots) \quad (1)$$

となる。光子が磁場に束縛されたプラズマを伝播する際、この準位と同じエネルギーをもつ光子が吸収されると、電子は一つ上の準位に励起される。励起された電子はすぐに先ほど吸収したエネルギーの分だけの光子を放出して基底準位に戻る。この再放射される光子は最初に入射してきた光子の進行方向とは関係ない方向に放射されるため、結果として光子がランダウ準位の電子によって蹴散らされることになる。これをサイクロtron共鳴散乱という(図2)。そのため降着駆動型パルサーからのX線放射は、磁場強度に対応したエネルギーのスペクトル帯域に構造が現れることが予想される。

1976年にドイツのJ. Trümper氏らが、NaIシンチレーターを搭載した気球によって、北天で降着駆動型パルサーとしては最も定常的に明るいヘラクレス座X-1の硬X線観測を行った¹⁾。その結果得られた硬X線スペクトルが図3である。予想どおり40 keV付近に大きな構造が存在するではないか。この構造は原子や原子核のラインとしてはその強度からも説明することは難しく、電子のサイクロtron共鳴による構造であると結論づけられた。これこそが、中性子星という星が1億テスラという強大な磁場強度をもつという動かぬ証拠

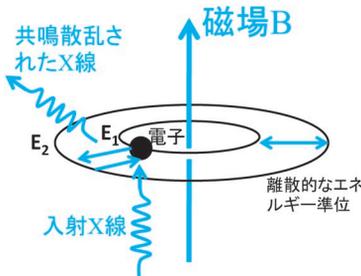


図2 強磁場中の電子のランダウ準位とサイクロtron共鳴散乱の模式図。

となった。学生の時分に筆者は、このスペクトルを初めて見たときの感動はいかほどであろうかと推し量っていたところ、エジプトで行われた国際会議の会場に向かうバスの車内で偶然この気球実験を主導したTrümper先生が自分の隣の席に腰掛け、これまた偶然私が先生の論文をちょうどもっていたので、このときのことを教えてください、と話しかけたところ、「君はなんて古い論文をもっているんだ」とおっしゃって、テキサスでの気球実験の話やデータを見たときの興奮を語ってくれたことは筆者にとって幸運であった。

しかし、この観測結果だけでは共鳴散乱によって作り出されるスペクトルの構造が輝線か吸収線であるかの見分けは難しかった。この偉大な発見の後、強磁場中での輻射輸送に関する理論研究が盛んに行われ、W. Nagel氏らは共鳴散乱による構造は降着円筒の密度に強く依存することなどを導き、観測されたヘラクレス座X-1の放射率などからX線構造は吸収線であると考えてるのが自然であると述べた²⁾。

1988年に日本の第3代X線天文衛星「ぎんが」が打ち上がると、三原建弘氏、牧島一夫氏らが中

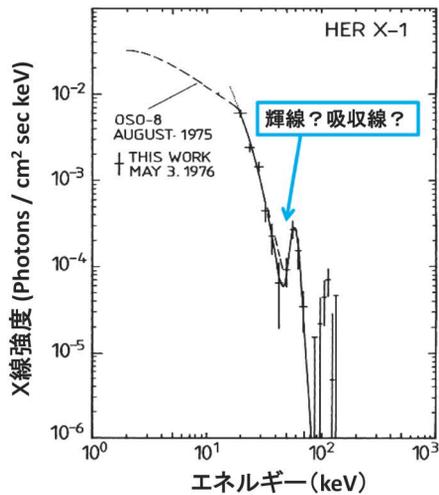


図3 1976年の気球実験によって得られたヘラクレス座X-1の硬X線スペクトル。~40 keV付近に構造が見られる¹⁾。

心となってヘラクレス座X-1の高感度硬X線観測が行われた。このとき得られた硬X線スペクトルの詳細な解析から、構造は～35 keVの吸収構造であると結論づけられ、式(1)よりヘラクレス座X-1の表面磁場は～3億テスラであることが突き止められた³⁾(図4)。その後「ぎんが」は八つの天体から同様のサイクロトロン共鳴による吸収構造を発見する偉業を成し遂げた⁴⁾。2013年現在ではさらに観測が進み、17天体からサイクロトロン共鳴による構造が発見されている。

さて、先ほども少し述べたが、ランダウ準位の特徴は再度式(1)を見直していただくとおわかりになるように、飛び飛びのエネルギー準位の間隔が $n=1, 2, 3, \dots$ と整数倍に存在することである。つまり、図3, 4で示したようなサイクロトロン共鳴による吸収構造の中心エネルギーの整数倍のところにもまた吸収構造ができてはいるはずなのである。このようなサイクロトロン共鳴の高調波成分による構造も実はいくつかの天体からしっかり

と観測されている。図5に示すのは現在の高調波検出世界記録となっているイタリアのBeppoSAX衛星によって得られた4U 0115+63からの硬X線スペクトルである。～10 keVに見えるのが式(1)で $n=1$ の基本波であり、 $n=1, 2, 3, 4$ と第4共鳴まで整数倍に並んだ吸収構造がしっかりと確認されている⁵⁾。これらの結果は、中性子星が極限的な磁場をもつことを証明するだけでなく、数千光年離れたとても小さな星における地上では実現できない強磁場中でも、しっかりと先人たちが紡ぎ出してきた物理学が成り立っているという感動を誘起するものであろう。

2.2 連続成分

降着駆動型パルサーの連続スペクトルについても紹介をしておきたい。数千万度をもつ高温プラズマからのX線放射の連続成分の形は、放射しているプラズマの光学的厚みという値に大きく依存している。光学的厚みとは、

$$\tau = n\sigma l \tag{2}$$

で表される無次元の指標で、 n はプラズマの密度、 σ は光子とプラズマの散乱断面積(光子とプラズマが相互作用する確率)、 l は光子がプラズマ中を通過してくる距離である。この光学的厚み τ が1より十分大きい状況は「光学的に厚い」と表

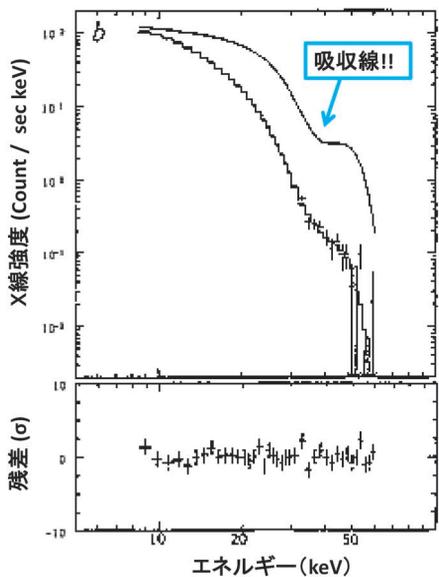


図4 1990年にぎんが衛星によって得られたヘラクレス座X-1のパルス位相の山の硬X線スペクトル。実線は検出器の感度、分解能を補正したベストフィットモデル³⁾。

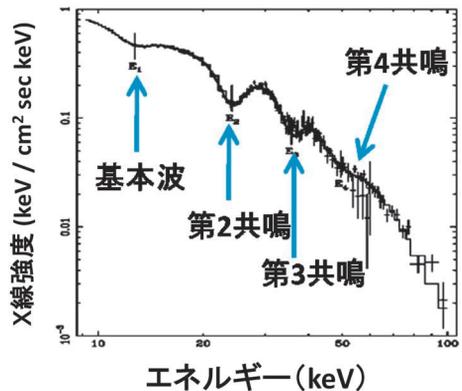


図5 BeppoSAX衛星によって観測された4U 0115+63の硬X線スペクトル。第4共鳴まで有意に観測されている⁵⁾。

現され、連続成分の形はプラズマの温度（電子温度）の約3倍のエネルギーにピークをもって急激に折れ曲がる黒体放射の形になる。一方、 τ が1より十分小さい場合は「光学的に薄い」と呼ばれ、べき型の連続スペクトルがプラズマの温度に対応したエネルギーで滑らかに折れ曲がる制動放射のスペクトルとなる。

ところが、降着駆動型パルサーの連続スペクトルは制動放射や黒体放射の単純なモデルでは表すことができなく、ちょうどそれらの中間のようなスペクトルになっている。その特徴を具体的に書くと、数keVから～20 keV付近までは硬いべき型をなして、20 keV付近で黒体放射に見られるようなピークと急激な折れ曲がりが見られる。この連続成分は、いったん制動放射により放出された光子が、熱的な速度分布をもつ電子の逆コンプトン散乱によって叩き上げられる Thermal Comptonization という過程が関係していると考えられていたが、この物理的なモデルでは低エネルギー側のべき成分を再現することができなく、長らく物理背景のない経験的なモデルで再現できるという理解にとどまっていた^{4), 6), 7)}。近年、P. Becker & M. Wolffによってこの降着駆動型パルサーに見られる連続成分は、降着円筒中のプラズマのバルク運動によって発生する密度勾配まで考慮した解析解で再現できることがわかった⁸⁾。また、宇宙航空研究開発機構の小高裕和氏はこの粒子のバルクな運動を取り入れたモデルのモンテカルロシミュレーションを行って、観測される連続成分を再現することに成功しており⁹⁾、P. Becker & M. Wolffによるこの Thermal & Bulk Comptonization モデルが近年注目されている。

3. 吸収構造が輝線に変わる？「すぎく」衛星による降着駆動型パルサー 4U 1626-67 の観測

ここまでの、中性子星磁極のサイクロトロン共鳴による硬X線帯域での構造の発見、輝線ではなく

吸収線ととらえるのが自然であり、数多くの天体から同様の吸収構造が確認されていることを紹介してきた。また、連続成分の形状も含めてX線帯域で見られる降着駆動型パルサーのスペクトルについて述べてきた。今回われわれは、この吸収構造を中性子星の自転位相ごとのスペクトルに分けて詳細に解析した結果、ある位相では吸収構造がむしろ輝線構造に変化することを発見した。

4U 1626-67は自転周期が約7秒の降着駆動型パルサーである。この天体の特徴は自転周期ごとに硬X線スペクトルを見てみると、スペクトルの連続成分が大きく変化することである。この特徴は70年代後半の観測からすでに知られていた¹⁰⁾。1998年にはBeppoSAX衛星によって～35 keVにサイクロトロン共鳴吸収構造が確認されている¹¹⁾。このような連続成分の自転位相変化に伴って、サイクロトロン共鳴吸収構造はどのように変化するかというのは興味深い問いであったのだが、これまでは検出器の感度が十分ではなかったため十分な検証ができていなかった。

そこでわれわれは2006年に当時硬X線帯域において世界最高感度をもつHard X-ray Detector (HXD) を擁する日本の第五代X線天文衛星「すぎく」を用いて4U 1626-67の長時間観測を行った。まず、得られた自転位相平均のエネルギースペクトルを検出器の応答関数の不定性を無視して評価できるように、X線帯域において標準光源としてよく用いられるべき型のスペクトルをもつかに星雲のスペクトルで割ったものを図6に示す。

このスペクトルは2章で見てきた典型的な降着駆動型パルサーの硬X線スペクトルを示しており、三つの成分で構成されていることがわかる。一つめは数keVから～20 keV付近までがべき型をなしていること。二つめに20 keV付近で急激に折れ曲がること。三つめはサイクロトロン共鳴散乱構造が見られることである（この天体の場合は～35 keVにはっきりと見られる）。

これらべき型、カットオフ、共鳴散乱の三つの

成分がそれぞれ卓越するエネルギー帯域に分けて自転周期に対してどのようにX線光度が変化するか、つまり成分ごとのパルスの形を描いたものが図7である。図7の横軸は自転の位相を示しており、 $\phi=0-1$ で自転1周期を表している。注目すべきは、ベキ型および折れ曲がりのエネルギー帯域でパルスの谷となっているところ ($\phi=0.2$ 付近)が、共鳴散乱構造が見られる帯域では小さな山になっていることである。これは図7の下段に示したように、折れ曲がりが見られる帯域と共鳴散乱構造が見られる帯域のパルスプロファイルの

比をとるとパルスの谷の部分でスペクトルが大きく変化していることがよくわかる。実際にパルスの位相ごとに分けてスペクトルを作成し、図6同様に星雲とのスペクトルの比をとったものが図8である。図中の数字は、図7の横軸に対応している。このスペクトルの形を上から二つめの $\phi\sim 0.2$ のスペクトルとほかのスペクトルを見比べてみると、不思議なことに共鳴散乱による吸収構造が $\phi\sim 0.2$ のパルスの谷においてはむしろ輝線構造に変わっているように見受けられる。また、20 keV付近に見られた急激な折れ曲がりも $\phi\sim 0.2$ のスペクトルには見られない。

われわれは定量的なスペクトル解析を行い、 $\phi\sim 0.2$ のスペクトル中のサイクロトロン共鳴エネルギー帯域に見られる構造は、吸収よりも輝線構造と捉えるほうが観測的には自然であることを示した。図9はパルスの山である $\phi\sim 0.7$ と谷の $\phi\sim 0.2$ スペクトルを比較した図であり、 $\phi\sim 0.7$ のスペクトルは20 keV付近に急激な折れ曲がり

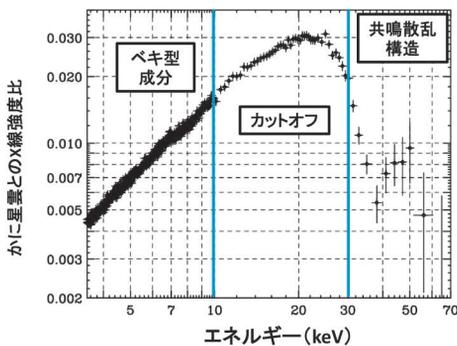


図6 すざく衛星によって得られた4U 1626-67の位相平均のスペクトルをかに星雲のスペクトルで割ったもの。

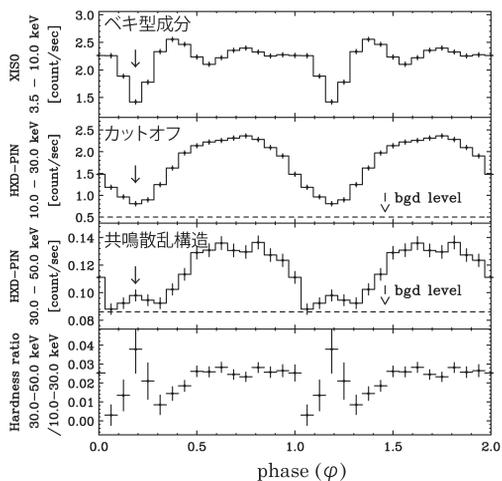


図7 4U 1626-67のエネルギーごとに分けたパルスプロファイルとハードネス比。

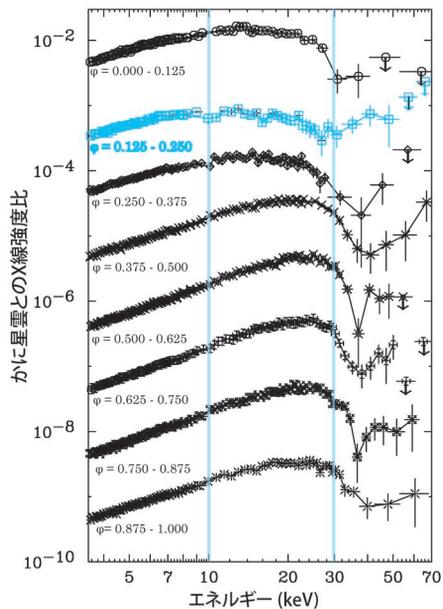


図8 4U 1626-67の自転位相ごとに分けたスペクトルとかに星雲のスペクトルとの比。縦軸はスペクトルごとに0.1倍のオフセットがかかっている。図中の数字は図7の横軸に対応。

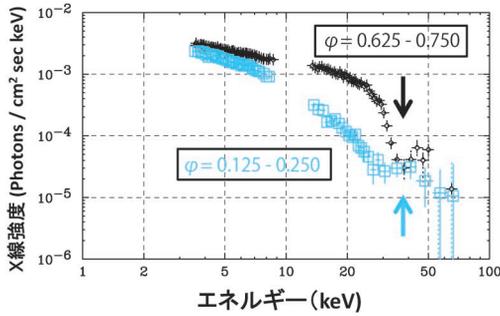


図9 4U 1626-67の $\phi \sim 0.2$ と $\phi \sim 0.7$ のスペクトル。

をもち、サイクロトロン共鳴による吸収構造が見られる降着駆動型パルサーの典型的なスペクトルを示しているのに対し、 $\phi \sim 0.2$ のスペクトルは 20 keV の急激な折れ曲がり存在せず、6 keV 付近からなだらかに折れ曲がる連続成分と、サイクロトロン共鳴による吸収が見られたエネルギー帯域において輝線構造をもつことが明らかとなった¹²⁾。

4. 考 察

なぜこのように、中性子星のパルス位相に依存して連続成分の形が変わり、吸収構造が輝線構造に変わってしまうのか。

降着駆動型パルサーのパルスが発生する理由は、星の自転に伴って、降着円筒を見る角度が変わることに起因している。円筒を見る角度が変わるといことは、見ている磁場の向きが変わっているということになる。これが、謎を解くカギになるとわれわれは考えている。

まず連続成分の変化から検証していく。 $\phi \sim 0.2$ の谷のスペクトルで 20 keV のピークが消えているという事実は、スペクトルの形は光学的に薄いプラズマから観測される制動放射の形に近づいていることを示していると考えられる。降着円筒を見る角度、それは磁場と視線のなす角であり、つまり磁場と光子の進行方向によって式(2)の光学的厚みが変わっているということが予想される。では、式(2)をながめてみて、密度、散乱断面積、距離の三つのパラメーターのうちどれ

が磁場と光子の進行方向に依存しているのか。結論から言うと、三つすべてのパラメーターが依存していることになる。

一つずつ見ていくと、まず密度に関しては位相平均の連続成分が典型的な降着駆動型パルサーに見られる形であることから前述の Thermal & Bulk Comptonization の解釈を用いると、バルクな効果のために円筒の磁場に平行な方向の密度には勾配ができるため、円筒上部にいくほど密度は薄くなる。

次に散乱断面積について考察する。磁場が弱い場合、電子と光子の散乱断面積は、光子が磁場に平行な方向にいかが、垂直な方向にいかが変わらない。ところが、中性子星磁極のような強磁場中では、磁場に平行な方向へは電子は自由に動けるが、磁場に垂直な方向の運動はランダウ準位で制限されている。その結果、散乱断面積の異方向性ができ、光子は磁場に平行な方向に抜けるほうが電子に散乱されにくくなる¹³⁾。

最後に光子がプラズマを通ってくる距離については、円筒のショック面までの高さや半径によって依存性をもつことになる。ショック面の高さはプラズマの輻射圧が優勢か、ガス圧が優勢かで見積もり方が変わるが、いずれのケースにせよ 4U 1626-67 の場合その X 線光度から円筒の高さが半径よりも小さいコイン型の円筒をなしていると考えられる。そのため、光子がプラズマ中を抜けてくる距離も磁場に平行な方向のほうが短い。

まとめると、結果として図 10 に示したように磁場に平行な方向に抜けてくる光子は垂直な方向に抜けてくる光子と比べて、光学的に薄いプラズマを通ってくることになると考えられる。この予測と今回の観測結果を照らし合わせると、図 9 の $\phi \sim 0.7$ のパルスのスペクトルは磁場に垂直方向、つまり降着円筒を横から見ており、 $\phi \sim 0.2$ でのスペクトルは磁場に平行な方向、つまり円筒を上から見ていることに対応していると解釈できる。

ではなぜ円筒を上からみるとサイクロトロン共鳴による吸収構造が輝線構造に見えるのか。われ

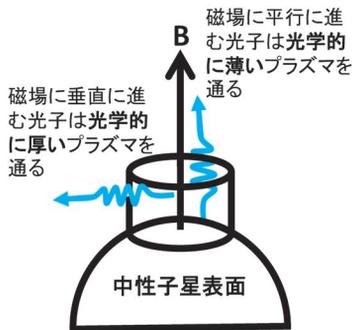


図10 降着円筒中の磁場と光子の進行方向に対する連続成分の光学的厚みの依存性.

われの解釈としては、円筒の磁場勾配が効いているのではないかと考えている。

磁場が一様な場合を考えてみると、共鳴エネルギーをもった光子は、すぐに共鳴散乱されてしまうためなかなか出てくることができない。ところが、磁場勾配を考えると少し話が変わってくる。星表面、円筒の底面に近いほうが磁場強度が強くなり、上空に行くほど磁場が弱くなるような磁場勾配を考えた場合、磁場強度の強い円筒底面で共鳴散乱された光子は、上空の磁場が弱い方向には共鳴散乱されずに抜けてくることが出来る。また共鳴エネルギーをもつ光子は、電子とのインコヒーレントな散乱を介してエネルギーが変化すると、共鳴散乱せずに抜け出すことができる。そのため、吸収線の両端には emission wing 構造ができることが予想される。これらの効果を合わせると、エネルギーの高い側の wing 構造が強まるのが理論シミュレーションから示唆されている¹⁴⁾。さらに連続成分の強度が強い角度依存性をもつ場合、強度の弱い磁場に平行な方向から強度の強い垂直方向への散乱が弱くなる。その結果、磁場に垂直な方向では emission wing が形成されず、磁場に平行な方向でのみ emission wing が形成されることになる。そのため、円筒を上から見た場合高エネルギー側の emission wing が輝線構造として観測されているのではないかと考えている。

これまで磁場勾配の効果に関してはあまり論じ

られていなかったが、共鳴散乱の散乱断面積は、連続成分のそれに比べて5桁ほど大きいので、円筒のショック面より上の密度の低い領域でも共鳴散乱は効いてくることが考えられる。そのため、磁場勾配が影響することも十分予想される。この解釈が正しければ、降着円筒における輻射輸送過程において、磁場勾配の重要性を示唆していることになる。現在、定量的な解釈に向けてさらなる観測、理論シミュレーションを進めている。

5. まとめと今後

今回のすざく衛星の観測によって、降着駆動型パルサーに見られるサイクロトロン共鳴吸収構造が、中性子星の自転の位相ごとに分けて詳細に解析すると、輝線構造に変化する現象を世界で初めて発見した。この結果は、理論計算にフィードバックをかけることによって地上では作り出すことが難しい極限磁場環境におけるプラズマの振る舞いを理解することの手助けとなる。今後、すざく衛星よりも硬X線帯域においてさらに高感度の検出器を搭載した米のNuSTAR衛星や、2015年度打ち上げ予定の日本の次期X線天文衛星Astro-Hに搭載されるHXI、SGD検出器によってさらに詳細な共鳴構造の観測が可能となり、理論から予測される emission wing のような微細構造を検出できることが期待されている。また、いまだ達成されていない降着駆動型パルサーのX線偏光を観測することができれば、量子電磁気学の立場から予想される真空偏極の効果も直接検証することが可能になるかもしれない¹⁵⁾。

謝辞

この研究を行ううえで、右も左もわからない状態の頃から多くの指導をしていただいた田代信教授、寺田幸功准教授（埼玉大学）、三原建弘専任研究員、榎戸輝揚研究員、山田真也研究員（理研）や Lorella Angelini 研究員（NASA/GSFC）に心から感謝します。また、急な訪問依頼をいつも快諾

していただいた西村 治教授（長野高専）、小高裕和研究員（宇宙航空研究開発機構）との放射機構の議論に御礼申し上げます。本稿執筆の機会を与えていただき、的確な助言をいただいた馬場 彩准教授（青山学院大学）、少し違う角度からのコメントをしていただいた勝田 哲研究員（理研）にも感謝しております。なお、本研究は日本学術振興会の援助を受けて行われました。

参考文献

- 1) Trümper J., Pietsch W., Reppin C., et al., 1978, ApJ 219, L105
- 2) Nagel W., 1981, ApJ 251, 288
- 3) Mihara T., Makishima K., Ohashi T., Sakao T., Tashiro M., 1990, Nature 346, 250
- 4) Mihara T., 1995, Ph.D. thesis, Univ. of Tokyo
- 5) Santangelo A., Segreto A., Giarrusso S., et al., 1999, ApJ 523, L85
- 6) White N., Swank J., Holt S. S., 1983, ApJ 270, 711
- 7) Tanaka Y., 1986, in IAU Colloq. 89 Radiation Hydrodynamics in Stars and Compact Objects, Vol. 255, ed. D. Mihalas & K.-H. A. Winkler (Berlin: Springer), 198
- 8) Becker P. A., Wolff M. T., 2007, ApJ 654, 435
- 9) Odaka H., 2011, Ph.D. thesis, Dept. of Physics, Univ. of Tokyo
- 10) Pravdo S. H., White N. E., Boldt E. A., et al., 1979, ApJ 231, 912
- 11) Orlandini M., Fiume D. D., Frontera F., et al., 1998, ApJ 500, L163

- 12) Iwakiri W. B., Terada Y., Mihara T., et al., 2012, ApJ 751, 35
- 13) Herold H., 1979, Phys. Rev. D 19, 2868
- 14) Nishimura O., 2005, PASJ 57, 769
- 15) Meszaros P., Novick R., Szentgyorgyi A., et al., 1988, ApJ 324, 1056

Possible Detection of an Emission Feature Caused by Strong Magnetic Field Effects from an Accretion-Powered Pulsar

Wataru IWAKIRI

RIKEN, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan

Accretion-powered pulsars are an ideal laboratory for studying the fundamental physics of radiative transfer of X-ray photons under strong (of the order of 10^{12} G) magnetic fields. A quite evident manifestation of such transfers is cyclotron resonance scattering features observed in the spectra of 17 sources. In order to gain information on the physical processes taking place, we present analysis of 4U 1626–67 observed by Suzaku and have possibly detected an emission line feature at the cyclotron resonance energy in the dim phase.