

磁場が変わる強磁場中性子星

中 島 基 樹

〈日本大学理工学部物理学科学宇宙物理学研究室 〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14〉
e-mail: mnakajima@phys.cst.nihon-u.ac.jp



強磁場中性子星の表面磁場強度を精度よく求める方法の一つに、X線スペクトル中に現れるサイクロトロン共鳴線を用いた方法がある。1990年代に日本のX線天文衛星「ぎんが」により系統的な観測が行われた際、観測される磁場の強さが変わる奇妙な天体が発見された。われわれはこの磁場の変化が見かけ上のものであると考え、複数の中性子星でX線光度が連続的に変化しているときの観測データを詳細に解析し、X線光度の変化と観測される磁場の変化にある関係があることを明らかにした。本稿では、これらの話について紹介する。

1. 研究の発端

地球に磁場があることは、方位磁針が北を指すことから知ることができます。太陽など恒星にも磁場が存在することはこれまでの研究から明らかにされています。これらと同様に、中性子星と呼ばれる、ブラックホールと並んで極限状態にある天体にも磁場が存在することが、これまでの観測から明らかにされています。その中性子星表面での磁場の強さは、驚くことに地球上の1兆倍、1億テスラほどにもなります。このひじょうに強い磁場が、ある時期に約1.5倍も変化しているという信じられない観測結果が、日本の3番目のX線観測衛星「ぎんが」により明らかにされました¹⁾。なぜ磁場の強さが変わってしまったのか？われわれはこの問題を解決するため、研究を始めました。

2. 中性子星のこれまでの観測

2.1 パルサーの発見

中性子星とはその名前のとおり、原子核を構成する中性子が星の大部分を占めているような天体で、太陽の数倍から30倍くらいの重さの恒星が

超新星爆発を起こした際に誕生すると考えられています。20世紀前半は理論上の天体であると考えられていましたが、1967年にケンブリッジ大学のヒューイッシュとベルらによる高速で自転している電波パルサーの発見により²⁾、現実世界に中性子星が存在することが明らかにされました。その後の研究により、この中性子星の典型的な大きさは直径20キロメートル、重さが太陽質量の1.4倍とひじょうに高密度な天体であることがわかりました。

2.2 中性子星からのX線放射

1970年代に入ると、X線による中性子星(X線パルサー)の観測も行われるようになりました。電波パルサーのほとんどは単独で存在していますが、X線で明るく輝いているX線パルサーのほとんどは、太陽質量の数倍から十数倍の高質量星と近接連星系をなしています。このことから、X線連星パルサーとも呼ばれています。ではどうして多量のX線を放つことができるのでしょうか？

図1は、X線連星パルサーの周囲の想像図です。伴星表面からあふれ出た物質はパルサーのもつ強い重力の影響を受けて、パルサーに向かって

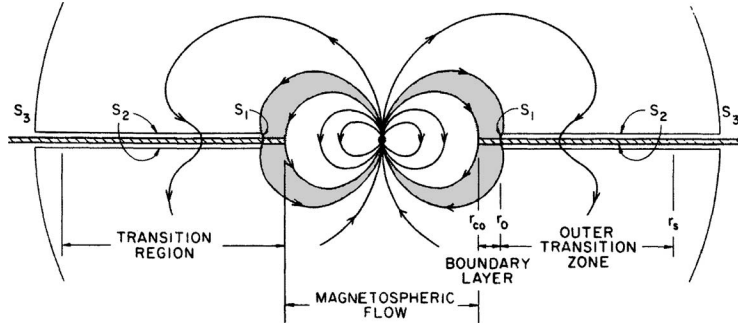


図1 中性子星とその周囲に形成された降着円盤の想像図³⁾。

流れ込んでいくのですが、その際に図1で示すような降着円盤がパルサーの周囲に形成されると考えられています。主に水素からなる降着物質は、降着円盤内での摩擦で生じる熱や、パルサー表面からのX線放射の影響により、電離されてしまいます。降着円盤の最内縁付近では、完全電離した降着物質はパルサーのもつ強磁場の影響をまともに受け、磁力線に沿ってパルサーの磁極へと落ち込んでいきます。その際に、降着物質はパルサーの強い重力で光速の10%（秒速30万キロメートル）まで加速され、ひじょうに大きな運動エネルギーをもつようになります。パルサー表面付近まで達した降着物質は、その膨大な運動エネルギーを熱エネルギーに変換し、パルサー磁極に高温のプラズマ柱を形成すると考えられています。X線連星パルサーからの多量のX線放射は、主にこのプラズマ柱から出てくるものと考えられています。

2.3 パルサーの強磁場

伴星から降り積もってくる降着物質は、パルサーの強烈な磁場の影響により、磁極に集中的に降着すると述べてきましたが、ではどれぐらいパルサーの磁場が強烈か比較してみましょう。例えば太陽のような恒星の表面での磁場強度は約0.1-1テスラぐらい、地磁気の磁場強度は赤道付近で10万分の1テスラほどと非常に微弱です。また人工的に地上の実験室で瞬間的に作り出すことができ

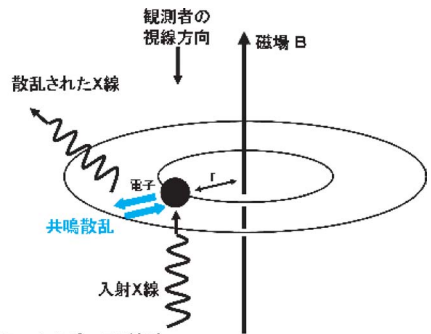
る最高磁場でも約10万テスラほどです。これらの値とパルサー磁極での典型的な磁場強度（1億テスラほど）を比較すると、パルサーがいかに強い磁場をもっているか実感できると思います。

このパルサーがもつ強磁場の起源が何であるのか、時間の経過とともにどのように進化していくのか、多くの謎が残っています。

2.4 観測による表面磁場の見つもり

これまでの観測から典型的なパルサーの表面磁場強度が1億テスラほどであると述べてきましたが、実際にどのようにして磁場を測定しているのでしょうか？

電波パルサーの場合、電波の放射機構として磁



ある特定のエネルギーのX線が電子により散乱される

図2 サイクロトロン共鳴散乱の様子。特定のエネルギーをもつX線のみ、電子により共鳴散乱されるため、観測者方向に伝播しにくくなる。

気双極子放射が考えられています。この磁気双極子放射によりパルサーの自転にブレーキがかかり、自転周期（パルス周期）が遅くなります。すなわち、表面磁場強度 B は、観測されるパルス周期 P とその遅れ量 \dot{P} から、 $B \propto P/\dot{P}^{1/2}$ として見積もることができます。しかし X 線連星パルサーの場合、降着物質のもつ角運動量が磁力線を介してパルサーに伝わることにより、自転周期が早くなったり遅くなったりするため前述の方法を適用することができません。そこで X 線連星パルサーの表面磁場強度を求めるために、パルサーの磁極付近で生じているサイクロトロン共鳴散乱現象が用いられます。

サイクロトロン共鳴散乱現象とは、磁場中での電子と光の相互作用のことを指します。図 2 に示してあるのは、サイクロトロン共鳴散乱現象の様子を表した図です。磁極に降り積もってくる物質（電子）は、パルサーの強い磁場のため、磁力線垂直方向の運動エネルギーは量子化され、とびとびの値、ランダウ準位をとります。この電子に準位間と等しいエネルギーの X 線が吸収されると、電子は一つ上の準位に励起されますが、すぐに基底準位に戻ります。このとき、吸収したエネルギーと同じ分のエネルギーの X 線を入射方向とは関係ない方向に放出するため、ある特定のエネルギーの X 線は観測者（X 線衛星）まで届きません。そのため、観測される X 線連星パルサーの連続 X 線エネルギースペクトル中に、図 3 で示すようなとびとびのサイクロトロン共鳴吸収線が観測されます。この観測されたとびとびの吸収線で、一番エネルギーが低い共鳴吸収線のことを基本波と呼び、それよりも高い 2 次、3 次の共鳴吸収線のことを高調波と呼びます。基本波の共鳴吸収エネルギー E_a はランダウ準位間のエネルギーと等しいので、 E_a と磁場強度 B の間に成り立つ $E_a = 11.6 (B/10^8 \text{ テスラ})$ キロ電子ボルト（エネルギーの単位）の関係を用いることにより、観測された共鳴吸収線のエネルギー情報のみから、X 線

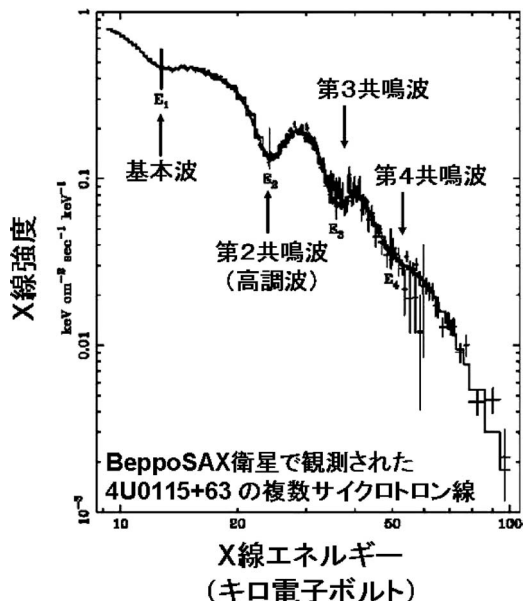


図3 中性子星 4U 0115+63 の五つのサイクロトロン共鳴吸収線⁴⁾。

連星パルサーの表面磁場強度を測ることができます。典型的なパルサー磁場の強さは約 1 億テスラなので、基本波のサイクロトロン共鳴吸収線のエネルギーはちょうど X 線のエネルギー帯域にすることから、X 線での観測が向いていると言えます。

3. 中性子星の磁場が変化した！

X 線観測による X 線連星パルサーの最初の系統的な磁場測定は、1990 年代に牧島一夫氏⁵⁾、三原建弘氏⁶⁾らを中心に X 線衛星「ぎんが」を用いて行われ、十数個の X 線連星パルサーの磁場を精密に測定するのに成功しました。そのときの観測対象の一つ、4U 0115+63 と呼ばれる X 線連星パルサーは 1990 年と 1991 年の 2 回、X 線光度が異なる時期に観測が行われたのですが、2 回の観測から得られた磁場強度の指標となるサイクロトロン共鳴吸収線エネルギーの値が、驚くべきことに異なっていました。図 4 はそのときに観測された X 線スペクトルです。

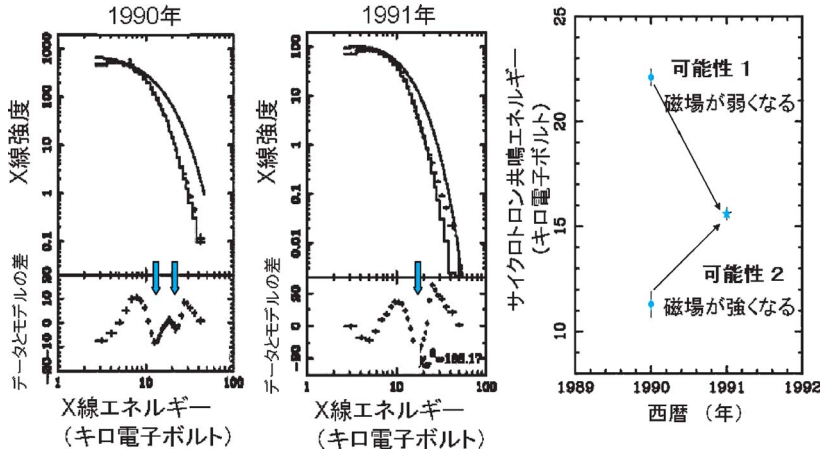


図4 (左) 上段は「ぎんが」衛星により1990, 1991年に観測された4U 0115+63のX線スペクトル。下段は観測データとX線放射の連続成分のモデルの差を表している⁶⁾。(右) 観測されたサイクロトロン共鳴線エネルギーの変化を表した図。

この観測結果から二つの可能性が考えられました。一つは、1990年には22キロ電子ボルトに観測されていたサイクロトロン共鳴線高調波が、15キロ電子ボルトまで低くなる、つまり観測される磁場が弱くなる可能性、もう一つは、1990年に11キロ電子ボルトに観測されていた基本波のサイクロトロン共鳴線が、15キロ電子ボルトまで上昇してしまった、つまり磁場が強くなる可能性です(図4右)。われわれは最初に磁場強度の変化の振舞いについて調べました。

じょうに暗く、パルサーからのX線放射を検出するのが困難ですが、数年間隔で図5に示すようなX線アウトバーストと呼ばれるX線での大きな光度変動を起こします。このようなX線連星パルサーはほかにもよく知られており、その中のいくつかのX線連星パルサーのX線スペクトル中からもサイクロトロン共鳴吸収線が発見されて

4. 磁場強度変動の原因について

4.1 謎を解く手がかり

サイクロトロン共鳴吸収線が発見されている他のX線連星パルサーでは、観測時期が異なっても測定される磁場強度に大きな変化は見当たりませんでした。ではどうして、4U 0115+63で観測された磁場が大きく変化してしまったのでしょうか？ 4U 0115+63は特異なX線連星パルサーなののでしょうか？

4U 0115+63の特徴としてまず挙げられるのが、突発型のX線連星パルサーであることです。このタイプのX線連星パルサーは、普段はひ

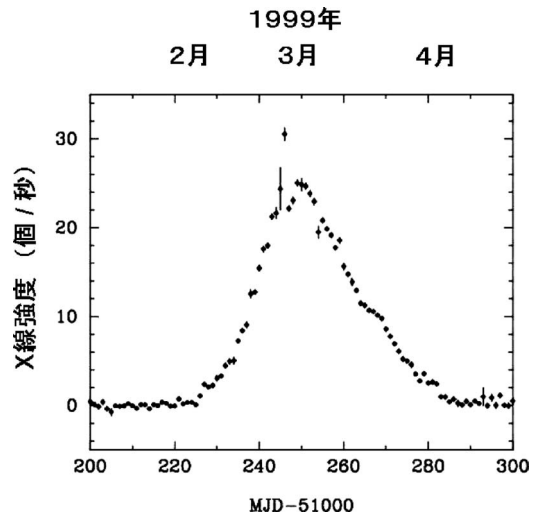


図5 1999年に観測された4U 0115+63のX線の光度曲線。RXTE衛星による観測。

います。共鳴吸収線のエネルギーが変化すること以外は、4U 0115+63 と他の X 線連星パルサーでは大きな違いは見当たりません。そこで、観測されたときの天体の状態について注目してみました。

「ぎんが」による観測は、2 回の X 線アウトバースト中の光度が高いときに行われていました。しかし片方の観測（1991 年）は通常の X 線アウトバーストよりも規模が小さい、つまり通常観測されているときよりもずっと暗い状態で行われていました。このことから、X 線光度が、観測された磁場の変化に大きな影響を与えていると推測しました。そこでわれわれは 4U 0115+63 やその他の X 線連星パルサーで、X 線光度が大きく変動しているときに行われた連続観測の X 線データ解析を行い、観測される磁場強度、サイクロtron共鳴吸収線のエネルギーがどのように変化しているかについて調べました。

4.2 X 線光度変化に注目したデータ解析

X 線光度の変化とともに、X 線エネルギースペクトル中に現れるサイクロtron共鳴吸収線のエネルギーがどのように変化したかを調べるため、われわれは米国の RXTE 衛星により観測されたデータを利用しました。この衛星は、モニター観測を頻繁に行っており、X 線変動天体のさまざまな状態を常時観測していることで知られています。われわれはこの衛星により 1999 年に観測された 4U 0115+63 の X 線アウトバースト中のデータに注目し、それぞれの X 線エネルギースペクトルを調べました。

解析の結果、4U 0115+63 は X 線光度が明るいとき (7×10^{30} ワット以上) では、観測される磁場強度、つまりサイクロtron共鳴線エネルギーの変化は見られないが、 7×10^{30} ワット以下では観測されるサイクロtron共鳴エネルギー（磁場強度）が ~ 10 キロ電子ボルト（約 9 千万テスラ）から ~ 16 キロ電子ボルト（1.4 億テスラ）まで変化していることを明らかにしました。図 6 はそのと

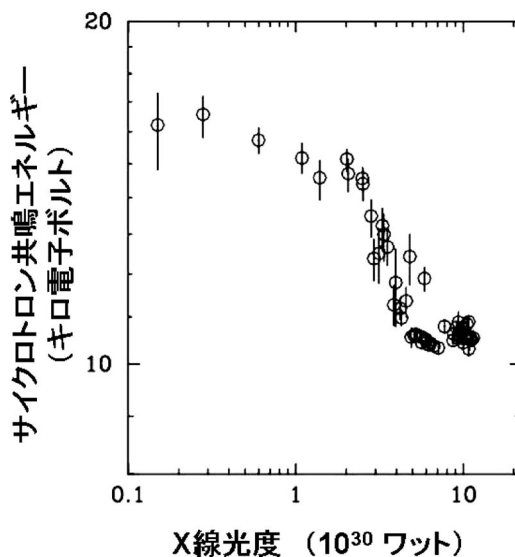


図 6 4U 0115+63 の X 線光度と観測されたサイクロtron共鳴エネルギーの関係⁷⁾。

きの解析結果、X 線光度と観測されたサイクロtron共鳴エネルギーをまとめたものです。図より、X 線光度が大きいときは低い共鳴エネルギー（弱い磁場）が観測され、暗いときは高い共鳴エネルギー（強い磁場）が観測される傾向にあることが判明しました。また共鳴エネルギーは、 $2 \sim 7 \times 10^{30}$ ワットで連続的に変化していることを明らかにしました。このような連続的な変化の様子を解析により明らかにしたのは初めてのことで^{7),8)}。

4.3 X 線光度に依存した磁場変動は一般的な現象か？

4U 0115+63 の解析で興味深い磁場変化の様子を明らかにすることができましたが、果たしてこの現象が X 線連星パルサーの一般的な現象であるのかが気になります。そこで 4U 0115+63 と同じタイプである突発型の X 線連星パルサー、X0331+53 についても同様の解析を行ってみました。

さて結果はどうでしょう？ 図 7 に示すように、X0331+53 も 4U 0115+63 と同じく X 線光度に

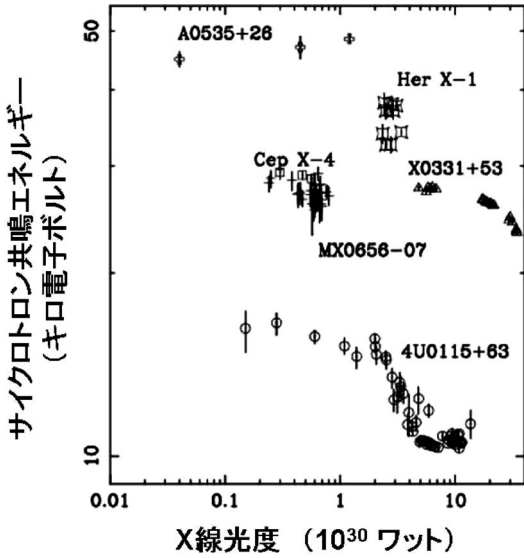


図7 代表的な X 線パルサーの X 線光度と観測されたサイクロトロン共鳴エネルギーの関係⁸⁾.

依存して観測される磁場強度，サイクロトロン共鳴線エネルギーが変化していました。しかも変化の傾向は 4U 0115+63 と同じく，X 線光度が明るいときは弱い磁場が観測され，暗くなると強い磁場が観測されるというものでした。他の代表的な X 線連星パルサーについても同様の解析を行ったところ，図7に示すような結果が得られました。この解析により，X 線光度の変化によらず一定の磁場強度を示す天体の存在と，ある X 線光度を超えると観測される磁場に变化が生じる天体があることがわかりました。

5. 磁場強度が変わる原因

X 線光度に依存して観測される磁場強度が変化する天体の存在を明らかにできました。ではどうして，X 線光度に依存して，観測される磁場強度，サイクロトロン共鳴線エネルギーが変化してしまうのでしょうか？ X 線光度は降り積もる物の量に依存していること，また磁場はパルサー内部で生成されたものであると考えると，X 線光度に依存してパルサーの磁場強度そのものが変化す

パルサー磁極と降着柱の想像図

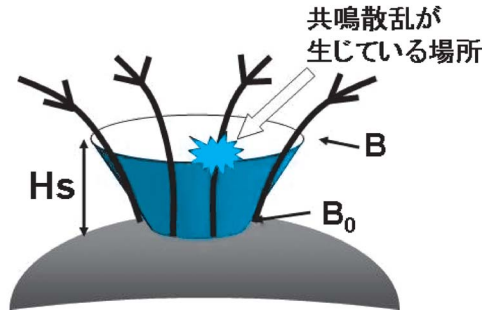


図8 プラズマ降着柱のモデル図。

るとは考えにくいです。そこで X 線光度に応じて，サイクロトロン共鳴で磁場を測定している場所が変化して，見かけ上，観測される磁場が変動しているのではないかと考えました。

サイクロトロン共鳴散乱はパルサーの磁極近傍で生じていると考えられていますが，ここでは，その共鳴散乱の生じている場所が X 線光度に依存して，水平方向に変化した場合と，高さ方向に変化した場合の二つの可能性について考えてみました。水平方向の変化は X 線光度に依存して降着物質（電子）が到達する緯度が変化することを意味します。しかし，観測された 1.5 倍もの磁場の变化を説明するには，ある理論モデルに従うと，X 線光度が明るいときには降着物質がパルサーのかなりの低緯度まで達しなければなりません。また X 線光度の変化量とその理論モデルから予想される磁場強度の変化量と，観測結果の間に大きな違いがあることから，X 線光度に依存して共鳴散乱が生じる場所がパルサーの低緯度にずれる説では説明できないことがわかりました。

次に，X 線光度に依存してサイクロトロン共鳴散乱が生じている高度が変化する可能性について考えてみました。パルサー磁極付近は図8に示すように光学的に厚いプラズマ降着柱が形成されていると考えられています。パルサーが双極子磁場をもつとすると，パルサー中心からの距離

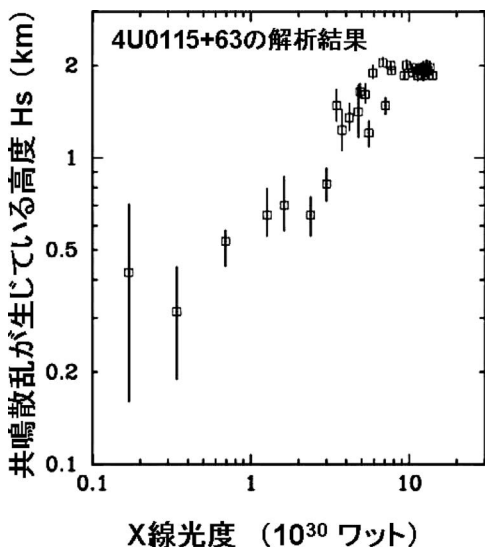


図9 4U 0115+63 の共鳴散乱が生じている高度と X線光度の関係図.

r での磁極付近の磁場 $B(r)$ は $B \propto r^{-3}$ と書けます。共鳴散乱が生じているパルサー表面からの高度を H_s 、パルサーの半径を R_{NS} 、パルサー表面での磁場強度を B_0 とおくと、 $B/B_0 = \{(R_{NS} + H_s)/R_{NS}\}^{-3}$ となり、この式を H_s について解くと、 $H_s = \{(B/B_0)^{-1/3} - 1\} R_{NS}$ となることがわかります。つまり、 B_0 を図6、図7のX線光度が暗くなったときの根元の磁場強度、4U 0115+63の場合、サイクロトロン共鳴エネルギーは ~ 17 キロ電子ボルトで磁場強度に直すと約1.4億テスラとすると、サイクロトロン共鳴散乱が生じている高度 H_s を求めることができます。図9は、この式で計算した共鳴散乱が生じている高度と観測されたX線光度の関係を表したものです。得られた数kmという値は、中性子星の磁極で考えられている降着プラズマとして矛盾のない値となっています。

いっけん、中性子星の磁場が変化するという大事件が起こったのかと思われたのだが、明るさに応じて、見かけ上、測定される磁場のポイントが変わっただけという解釈で謎が解決しました。

逆にいうと、この現象を用いて、中性子星近傍の磁場の構造に迫る研究が開けるはずですよ。

6. まとめと今後

今回の解析により、強磁場中性子星であるX線連星パルサーの観測される磁場強度が、X線光度に依存して見かけ上明るいときは弱くなり、暗いときは強くなることを初めて明らかにしました。観測される磁場が変動する原因として、サイクロトロン共鳴散乱が生じている中性子星表面からの高度が、X線光度に応じて変動するためと考えました。これにより、本当の中性子星表面の磁場強度は、暗いときに観測される値であると考えることができます。

中性子星の磁場起源を調べるうえで重要になってくるのが、多くの中性子星表面の磁場を正確に測定することです。今回の研究で、真の表面磁場強度を測るためには、X線光度が暗いときを狙うしかないということが明らかになったので、天体が暗い状態の情報の方がより重要となると考えられます。すなわち、高感度かつ広エネルギー帯域の検出器を搭載したX線衛星「すざく」は、まさに最適な観測手段と言えます。また、X線光度が大きく変動する天体の探査も重要となりますが、それには2008年度打ち上げ予定の全天X線監視装置MAXIが大きな役割を果たしてくれると期待されます。今後、「すざく」衛星とMAXIを併せた観測を行うことにより、さらなる中性子星磁場の研究が進められていくと期待されます。

謝辞

この研究を行ううえで、多くの指導をいただいた牧島一夫教授(東大/理研)や三原建弘研究員(理研)に心から感謝します。またこの原稿の執筆に際し、的確な助言をいただいた寺田幸功研究員(理研)に厚く感謝いたします。

参考文献

- 1) Mihara T., et al., 2004, ApJ 610, 390
- 2) Hewish A., Bell S. J., et al., 1968, Nature 217, 709
- 3) Ghosh P., Lamb, F. K., 1979, ApJ 234, 296
- 4) Santangelo A., et al., 1999, ApJ 523, L85
- 5) Makishima K., et al., 1999, ApJ 525, 978
- 6) Mihara T., Ph.D. thesis in University of Tokyo 1995
- 7) Nakajima M., et al., 2006, ApJ 646, 1125
- 8) Nakajima M., 2006, Ph.D. thesis in Nihon University

Changes of Magnetic Fields on Highly Magnetized Neutron Stars

Motoki NAKAJIMA

Nihon University

Abstract: One of the method to accurately determine the magnetic fields strength of highly magnetized neutron stars is to observe cyclotron resonant features emerging in X-ray spectra. In 1990s, the peculiar object which exhibited the changes of the observed magnetic field was discovered by the *Ginga* observation. Assuming that the observed changes of the magnetic fields strength is appearance, we investigated the data at various luminosity states. As a result of the analyses, we revealed that the relation between the observed magnetic-fields strength and the X-ray luminosities.