

「すざく」が見た白色矮星の新たな素顔

寺田 幸功

〈埼玉大学大学院理工学研究科 〒338-8570 さいたま市桜区下大久保 255〉

e-mail: terada@phy.saitama-u.ac.jp



白色矮星は質量が太陽程度の星の死骸であり、ゆっくりと冷えていずれば見えなくなる静かな天体だと考えられています。しかし、白色矮星の中には、 10^5 ガウス以上の磁場をもち、かつ、自転速度の速い天体も存在します。われわれは、こうした白色矮星なら、中性子パルサーのように荷電粒子を光速に近いスピードまで加速し、地球に降り注ぐ宇宙線の起源となっても不思議ではない、と考えました。この仮説を検証すべく、われわれは X 線衛星「すざく」を用い、みずがめ座 AE 星という白色矮星連星の高感度な X 線観測を行いました。結果、33 秒もの高速な自転と同期して、硬 X 線領域で、中性子星パルサーのように明滅する信号をとらえることに成功したのです。われわれは、X 線分光の結果と合わせ、このパルス状の信号は、白色矮星の近傍で加速された電子からくるものだと考えています。今回の発見によって、「すざく」は、宇宙物理 100 年来の謎ともいわれる宇宙線起源の問題に新たな可能性を提示したと言えるでしょう。

1. 宇宙物理 100 年来の謎、宇宙線の起源

宇宙からひじょうに高いエネルギーの粒子が飛んできている。これが、1912 年、はく検電器をもち、自ら気球に乗り込んで放射線の測定を行った Victor Franz Hess の大発見でした。この高エネルギー粒子は「宇宙線」と呼ばれ、彼はこの発見で 1936 年にノーベル物理学賞を受賞します。宇宙線のエネルギーはさまざまで、これまでの観測から、図 1 のように、エネルギーに対しべき型の分布をもつことが知られています¹⁾。地上の原子核・素粒子実験の研究者が建設している粒子加速器を用いると、 10^{12} 電子ボルト程度まで粒子を加速することができるようで、これはこれとんでもなく莫大なエネルギーなのですが、宇宙線の中には、これをはるかに超え、人類がいまだに到達しえないようなエネルギーをもつ粒子もいるのです。

高エネルギー粒子である宇宙線は、いったい宇

宙のどこでどのようにして作られてきたのか、発見から 100 年近く経った現在でも、いまだ永年の謎として残っています。図 1 をよく見ると、宇宙線のエネルギー分布は、 10^{15} 電子ボルト付近でいったんひざ (Knee) のようにわずかに折れ曲がり、 10^{18} 電子ボルト付近で再び足首 (Ankle) のような折れ曲がりを見せています¹⁾。この Knee よりも高いエネルギーの粒子は銀河系の外にある活動銀河核やガンマ線バーストなどの天体で作られると考えられ、昨年、超高エネルギー宇宙線の観測でこれを支持するような結果が出て話題になりました。また、Knee よりも低いエネルギーの宇宙線は、中性子星パルサーや超新星残骸といったわれわれの銀河系の中にある天体で作られるとされ、近年の X 線やガンマ線などでの観測技術の向上により、加速された粒子からの電磁波が詳しく観測されつつあります。しかし、定量的には、これらの活動的な天体の数は、すべての宇宙線粒子を説明できるほど多くないのです。つまり、まだわれわれの知らない加速源が存在しているか

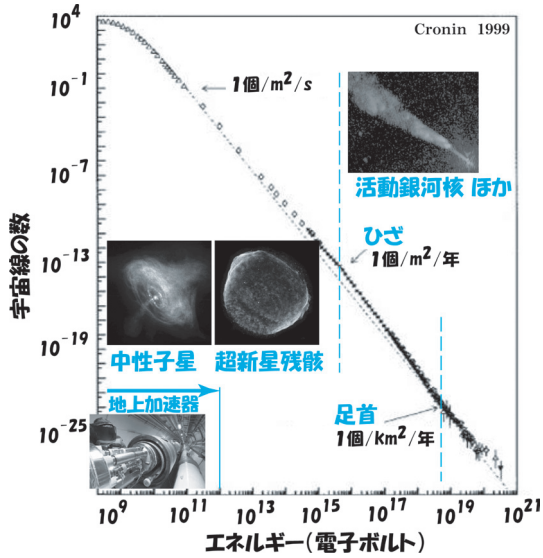


図1 宇宙線のエネルギー分布¹⁾.

もしれないのです。未知の加速源は一体何なのか？「宇宙線の起源」という宇宙物理学 100 年来の謎を解明する鍵はどこにあるのか？本稿ではこうした問いかけに一つの可能性を提示した、「すざく」による X 線観測の結果をまとめます²⁾。

2. われわれの発想：白色矮星もパルサーでは？

宇宙線の起源を議論するときによく用いられる図として、図2のような Hillas ダイアグラム³⁾があります。粒子を加速し宇宙線を生成する候補天体は数多くありますが、それぞれの天体の磁場強度 B と系のサイズ L 、系のもつ速度 v を見たときに、その天体で加速できる最大エネルギーは、ざっと $evBL$ で表されると考えるのが妥当です。Hillas ダイアグラムでは、 $B-L$ の空間に複数の天体をプロットし、宇宙線起源としての候補天体についての議論が展開されています。個々の天体の個性にとらわれず、何桁も物理量が違う天体を横通しにして眺め、ある現象を記述する物理過程は何かを探る鳥瞰図のようなプロットは、宇宙で物理学を研究するうえでたいへん貴重です。宇宙線

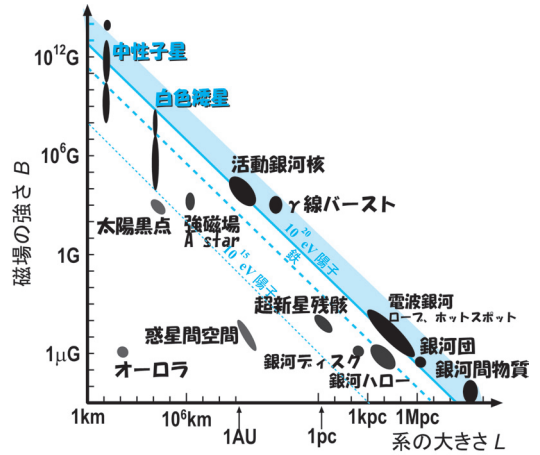


図2 宇宙線加速の現場の候補と到達エネルギー。Hillas ダイアグラム³⁾。

起源に対する同様の議論としては、最近では、東大/理研 牧島一夫教授による物理学会誌の解説記事⁴⁾にも見ることができます。

改めて Hillas ダイアグラム (図2) を見ると、初めて提示された 1984 年の時点ですでに、中性子星パルサー、超新星残骸、活動銀河核、電波銀河のローブなど激しい現象を示す天体に加え、銀河面や銀河団などといった一見静かな星間空間もプロットされています。一見静かな天体といえば、白色矮星もそうです。白色矮星は、太陽程度の質量の軽い星が最期にガスを放出して惑星状星雲となるときに中心に残された星の死骸で、太陽程度の質量をもちつつ地球程度のサイズしかない星のカスのような天体です。できたての頃は、元の星で行われていた核融合反応の余熱で高温なのですが、その熱を支える核融合反応が完全に停止した電子の縮退星なので、数十億年かけてゆっくりと冷えていき、最期は冷え切って見えなくなる運命にあります。われわれは、この白色矮星に注目し、とくに磁場の強い天体は、中性子星パルサーと同様に、粒子を加速して宇宙線の起源になるのではないかと考えました。白色矮星は、星3個あれば1個あると言われ、そこら中にうようよあるので、もし白色矮星が宇宙線加速に一役かっている

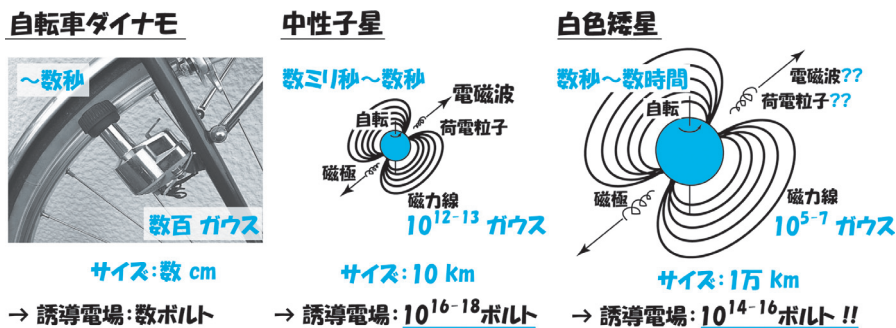


図3 回転磁石による誘導起電力. 自転車のダイナモ, 中性子星, 強磁場白色矮星の例.

ならば、微弱でも数で稼ぐ宇宙線起源として重要な意味をもちます。

宇宙線の現場と考えられる中性子星パルサーは、自転車についているダイナモ発電機のような回転磁石となって強い電場を作り、粒子を加速していると考えられています。図3に示したとおり、中性子星は、サイズが山手線（10キロメートル）程度もあり、磁場強度が10¹²から10¹³ Gaussと自転車のダイナモよりも10桁以上も強いので、誘導される電場の強さも10¹⁶から10¹⁸ ボルトに及びます。粒子を加速し電磁波を出す過程の詳細には諸説ありますが、要は、この強力な電場からエネルギーを得た粒子が、磁場との相互作用でシンクロトロン放射を出し、電波やX線で光っていると考えられています。われわれが目にする強磁場の白色矮星も同様な系になっているはずで、白色矮星は宇宙線加速の現場としてはほとんど議論されてきませんでした。図3で物理パラメーターを比較したとおり、白色矮星でも磁場が10⁵ Gauss以上ある天体は、十分に粒子を加速するだけの誘導電場をもっていることがわかります。

図3の白色矮星の図には、荷電粒子？ 電磁波？ とクエスチョンマークをつけてあります。白色矮星が粒子を加速している証拠となる電磁波を探す試みは、これまで、電波領域とテラ電子ボルトガンマ線の領域とで行われてきました。PavelinらやBondらによる電波での系統的探

査^{5),6)}により、ヘラクレス座AM星、みずがめ座AE星、ヘラクレス座DQ星など、六つの白色矮星から微弱なシンクロトロン放射とおぼしき電波信号が検出されています。また、そのうち二つの天体からは、可視光での増光に同期して、テラ電子ボルトのガンマ線が検出された、という報告もあります⁷⁻⁹⁾。ただし、これらの結果は撮像を行わない古いチェレンコフ望遠鏡によるもので、最近のCANGAROOやH.E.S.S., MAGIC, VERITASなどといった望遠鏡で本当に白色矮星の位置からガンマ線がきているのか、追試する必要のある観測結果と言えるでしょう。ともあれ、これら電波やテラ電子ボルトガンマ線の結果を信じるならば、白色矮星にも高エネルギーな電子があることがうかがえ、硬X線も放射しているに違いありません。そこでわれわれは「すざく」衛星を用いて、白色矮星からの加速粒子由来の硬X線信号を検出しようと試みたわけです。

3. 「すざく」によるみずがめ座AE星の観測

「すざく」衛星は日本第五のX線観測衛星で、2005年の夏7月10日に打ち上げられました¹⁰⁾。この日はX線観測の研究者グループにとっては念願の日となりました。軌道に投入されるまではAstro-E2というコード名で呼ばれ、JAXAの宇宙科学研究本部を中心とした日本のX線観測の研究者らと米国NASA Goddard Space Flight Cen-

ter のメンバーらによって開発された衛星です。
Astro-E2 は、名前に2が入っていることから推察されるとおり、2000年の2月10日に軌道投入に失敗した *Astro-E* 衛星の再チャレンジミッションです。筆者らのグループも *Astro-E* 衛星の時代から実に10年以上、この衛星の開発にかかわってきました。*Astro-E* から *Astro-E2* の再挑戦に際しては、衛星打ち上げ時期の再考など、太陽観測衛星のメンバーや赤外観測のメンバーをはじめ各方面の方々にたいへんな支援をいただきました。ありがとうございます。

現在、「すざく」衛星は2種類の光学系が稼動しています。一つは10キロ電子ボルト以下の軟X線を撮像・分光するX線望遠鏡+X線CCDカメラ(X-ray Imaging Spectrometer; XIS)のシステムで、0.3キロ電子ボルトという低エネルギー領域まで正確に分光できる能力と、「あすか」と同じくひじょうに安定したバックグラウンド環境での天体観測をウリとしています。もう一つは、10キロ電子ボルト以上の硬X線領域を分光する硬X線検出器(Hard X-ray Detector; HXD)で、撮像はできないものの、バックグラウンドを徹底的に除去する機能を備えており、過去最高の感度での分光能力がウリです。こうした「すざく」の高い分光能力と感度とを最大限に利用して、われわれは、白色矮星から放射されるであろう非熱的な硬X線信号を探索しようと計画しました。

「すざく」で観測すべき白色矮星としては、磁場

が強く自転速度の速いものが適しています。われわれは、まずは、X線でもよく測定されている強磁場激変星(Magnetic Cataclysmic Variables; MCV)と呼ばれる天体から候補を絞りました。MCVは、図4に示すような、磁場の強い白色矮星と晩期星との連星系です。白色矮星は典型的に 10^5 ガウス以上の磁場をもち、伴星の重力圏(ロッシュローブ)からあふれ出たガスが、白色矮星の磁極付近に降り積もっていると考えられています。白色矮星の表面の重力ポテンシャルエネルギーはちょうどX線の領域(数十キロ電子ボルト)くらいにあるため、磁極に降り積もったガスはその重力ポテンシャルを解放して数億度もの熱いプラズマとなりX線を放射しています。われわれは、こうした「熱的な軟X線」の中から、加速粒子が出すであろう「非熱的な硬X線」を探し出さないとはいけません。

MCVの中から「すざく」での探索に最適だとして選んだ天体が、みずがめ座AE星です。この天体は、電波やテラ電子ボルトガンマ線が検出された天体の一つで(第2章)、33秒で一回転するほど高速な自転周期をもっています¹¹⁾。これは、MCVの中で最も速い値です。しかも、この自転周期は徐々に間延び(スピンドウン)しており、20年以上もの間一定の率でスピンドウンしています。普通、MCVでは、ガスが降り積もることで白色矮星に角運動量を与えますから、自転周期はあまり安定せず、スピニアップしたりスピンドウンしたりと個性的ですが、みずがめ座AE星は安定して自転のエネルギーを周囲に放出しているのです。しかもそのスピンドウンエネルギーが巨大で、 10^{26} ワットにも達しています¹²⁾。「あすか」やヨーロッパのXMM-Newton衛星といった過去のX線観測によると、「熱的な軟X線」の示すプラズマ温度は、白色矮星の重力ポテンシャルに比べてずっと低温で、伴星から降り積もるガスが白色矮星に落ちきっていないことが示唆されています¹³⁾。この事実から、高速回転する強い磁場が、

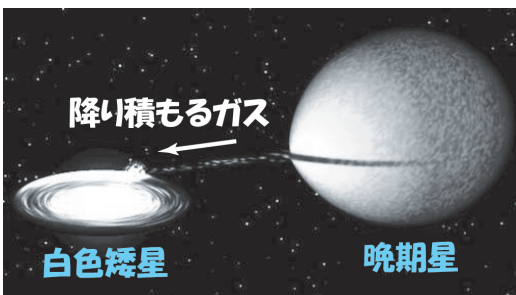


図4 強磁場激変星の想像図。強い磁場をもつ白色矮星と晩期星との連星。

おそらくプロペラのように物質を振り回し吹き飛ばしているに違いない、と考えられています。プロペラ効果で吹き飛ばす物質は、宇宙線ほど高いエネルギーにはなりません、スピンドウのエネルギーの一部が粒子加速に使われて、中性子星パルサーのような「非熱的な硬 X 線」が出て不思議ではない、と考えたくなる天体だと思いませんか？ というわけで、2005 年 10 月と 2006 年の 10 月の二度、「すざく」でみずがめ座 AE 星の観測を行いました。次の章からは、いよいよ、「すざく」観測の結果を示していきます。

4. 硬 X 線信号の根気強い探査

硬 X 線に感度をもつ HXD は、同時に、宇宙を行き来する大量の宇宙線にも感度をもちます。言い換えると、硬 X 線を受け止める検出器は、嫌でも高エネルギー荷電粒子にも反応してしまうのです。これが HXD では数千キロヘルツにもなります。一方、みずがめ座 AE 星に限らず、硬 X 線バンドになると、天体の信号はたいへん微弱になります。つまり、HXD は、ごまんとある砂粒（検出信号；イベント）の中から一粒の宝石（天体からの信号）を抽出することが要求されるのです。さて、高感度な硬 X 線観測で非熱的信号を見つける、という目的で観測をしたものの、HXD で信号は検出されたのでしょうか？ 打ち上げ後、初の HXD 光軸の優先姿勢での観測を無事に終了し、衛星からの観測データを入手したわれわれが真っ先に行ったチェックがこれです。軟 X 線領域をカバーする CCD では 1 秒に 0.3 カウント程度の信号が検出されましたが、硬 X 線領域では、HXD の感度をもってしてもなかなか厳しく、毎秒 0.20 カウントまで削減されたバックグラウンドの中に、毎秒 0.02 カウントでいどの信号が埋もれているようなデータでした。しかも、この 0.02 カウントの検出信号には、目標とする天体からの X 線以外に、HXD の視野に入ってくる宇宙 X 線背景放射の信号も混ざりこみます。そして、

毎秒 0.02 カウントという値はほとんど宇宙 X 線背景放射の信号レベルと同程度で、そこから目標天体の X 線の信号だけを抽出するのはたいへん骨が折れます。作業としては、検出器チームをあげて HXD の非 X 線バックグラウンドのレベルを推定し、天体のエネルギースペクトルを描くことから始まります。その精度は、バックグラウンドの推定精度からくる系統誤差と検出イベントの統計誤差とが支配しており、その上で、軟 X 線の熱的放射と硬 X 線の非熱的放射とを分離しないとイケないわけです。この議論はもう少しあとで述べるとして、まずは HXD で信号が検出できたか、にスポットをあてお話ししましょう。

前述のとおり、時間平均してしまうと、検出イベントから X 線信号を抽出するのはとても困難です。そこでわれわれが目にしたのが白色矮星の自転に伴った X 線変動です。HXD の非 X 線バックグラウンドは衛星の軌道に沿って変動しますが、白色矮星の自転とは関係のない変動です。もう一つのバックグラウンドである X 線背景放射も周期的な変動を示したりはしません。つまり、もし、白色矮星の自転に同期した信号が抽出できれば、それは明らかに天体からの X 線信号だということができます。そこでわれわれは、みずがめ座 AE 星の検出信号の中に自転に伴った周期的変動がないかの探査を始めたわけです。

観測でひじょうに統計のよいライトカーブが得られているならば、信号がある周期に沿って明滅しているかはすぐに目で見てわかるものでしょう。しかし、たいていは天体が暗く、データの統計エラーが大きいので、一見しても周期的に明滅しているかはわからないものです。そこで、周期（たとえば自転周期である 33 秒）ごとにライトカーブを分割し、それぞれを重ね合わせることで、一周期の明滅を示すライトカーブの統計をあげます。すなわち、観測最初の 33 秒のライトカーブと次の 33 秒のライトカーブ、その次の 33 秒のライトカーブ……を、それぞれ区切りの時刻原点

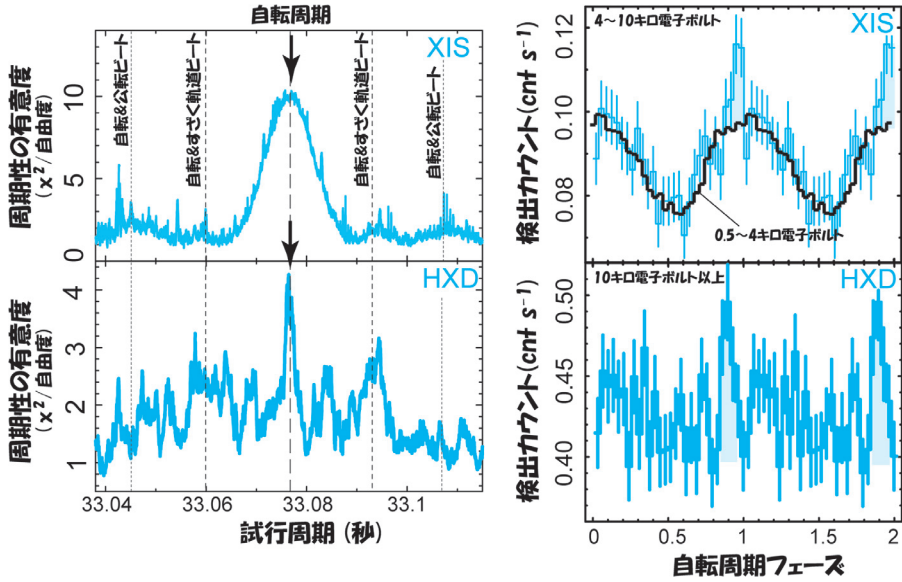


図5 (左) みずがめ座 AE 星からの検出信号の中にある周期的変動を探索するピリオドグラム。縦軸が大きいほど、その試行周期での変動が大きい。上が X 線 CCD カメラ, 下が硬 X 線検出器で検出した信号の解析結果。(右) 自転周期でたたみ込んだパルス波形。自転に伴う明滅を示しており、2 周期分がプロットされている。上が X 線 CCD での 2 バンド, 下が硬 X 線検出器の波形で、4 キロ電子ボルト以上で鋭いパルス信号 (ハッチした部分) が見える。

を 0 秒と読み替えて重ねていくのです。これがたたみ込み (folding) という手法です。こうやって得た、たたみ込みライトカーブが図 5 右です。周期は白色矮星の自転周期です。この図では、横軸は自転フェーズに換算されていますが、これはたたみ込んだ周期 33 秒に対する割合だと考えてください。つまり図では 2 周期分を描いてありますので、フェーズ 0 が時刻原点、フェーズ 1 がその 33 秒後、2 が 66 秒後となります。生のライトカーブでは 33 秒の変動が見えなくとも、たたみ込みライトカーブ (図 5 右の上) にすると、きちんと、白色矮星の自転とともに暗くなって明るくなる様子があぶりだされるのです。この図は、自転周期に伴う「波形」と言ったりもします。

さて、図 5 右のようなたたみ込みライトカーブを作成するとき、どうやって自転周期の値を得たのでしょうか？ 一つは過去の文献値ですが、本当にその周期で「ざく」のデータが明滅しているかはきちんと検証しないとイケませんし、「す

ざく」のデータ自身から自転周期が割り出せればそれを用いたいものです。周期の探索といっても、要は、いろいろな周期で前述の「たたみ込みライトカーブ」を作りまくってそれぞれ変動があるか検証すればよいわけです。図 5 の左図は周期的信号の探索によく用いられるピリオドグラムというもので、横軸に試行周期、縦軸はその周期でたたみ込んだときの波形を統計的に検証 (χ^2 検定) したときの値をプロットしています。縦軸は 1 ならば統計的に変動なし、1 より大きいほど変動が大きいことを意味します。図 5 左の上段を見ると、XIS のデータは自転周期の近傍で大きな変動が見られることがよく示されています。XIS のような X 線 CCD カメラは、何秒か天体を露光し、その間に検出された X 線イベントを抽出しますので、XIS の通常のモードだと時間分解能は 8 秒です。これではなかなか 33 秒の自転周期を見つけるのは難しそうですが、みずがめ座 AE 星の観測では、1 秒ごとに天体の周辺だけを読み出す

という観測モードを用いて時間分解能を上げています。おかげで、XISのデータから、文献値どおりの周期変動が検出できたのです。

われわれが確認したいのは、HXDのデータに自転周期に伴った周期変動があるかです。HXDの時間分解能は60マイクロ秒と十分高いのですが¹⁴⁾、データ自体が統計的にたいへん厳しく、なかなか困難な探査となりました。解析を始めた頃は、統計が厳しいので、たたみ込みライトカーブに用いたビン数はできるだけ少なく、1フェーズあたり7ビンなり13ビンなりといった値で探査していました。しかし、答えを知ってしまった今からみると、図5右下段にあるように求めていたパルスは鋭いので、このように少ないビン数ではうまい条件を見つけないと、いくら探しても鋭いパルスがビンまとめられてしまい、ゆるやかな波形しか出てこないのです。しかも統計的にギリギリな波形ばかり。はがゆい思いをしつつ、何とか探す努力が続きました。解析を始めて1年くらい経った頃、共同研究者のJAXA宇宙科学研究本部の石田 学教授らとの定例の解析ミーティングのなかで、ふと、「実はかに星雲みたいに鋭いツノな波形だったりして～」といった発言があました。まさか、と思い、私は会議中にもかかわらずその場でビン数を増やしてプロットを作ったのを覚えています。見事に鋭いパルスが見えたときの驚きと興奮は研究者冥利につきます。図5右ほどもビン数が多いと統計的エラーが大きく χ^2 の有意度が下がってしまうので、ビン数を少なめに解析していたのは正解だったのですが、時刻原点の選び方に工夫が足りませんでした。事実、時刻原点をわずかに数百ミリ秒くらいずらすと、統計的に有意度の高い変動が見られました。めでたし。おまけですが、よく調べてみると、解析初期から用いていた時刻原点（いわゆる解析ツールのデフォルト値）は最も変動を見つけにくい値だったようで、一年間「ババぬきでババをひき続けていた」のでした。なお図5左のピリオドグラムで

は、一つの点を打つために、いくつも時刻原点をずらしたたたみ込みライトカーブを作っています。

前述のような探査プロットからHXDで自転周期に同期したパルスが見えたね、よしよし、で終わりではありません。観測屋は、「ここまでは確証をもって観測的に正しい」という事実をきちんと正確に提示することがとても重要です。とにかく疑り深く「ほんとうに天体からの信号なの？」という検証を繰り返す、長くて厳しい過程の始まりです。白色矮星の自転周期と「すざく」衛星の自転周期のうなり（ビート）周期にもXIS/HXD共に変動があるようなので、信号は本物っぽいわけですが、これが、観測時間を限っても、HXDの解析方法を変えても、ライトカーブのへんな構造にひきずられていないか、などのチェックは欠かせ

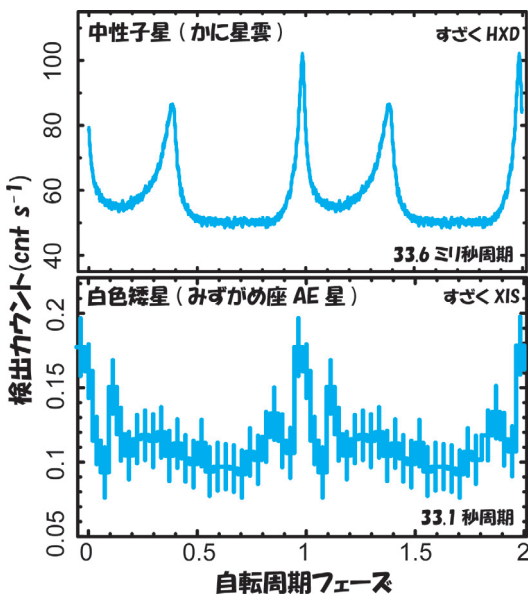


図6 中性子星パルサー（かに星雲）と、今回観測した白色矮星パルサー（みずがめ座AE星）のパルス波形の比較。いずれも「すざく」衛星の観測データで、かに星雲は33.6ミリ秒で、みずがめ座AE星は33.1秒でたたみ込んだ波形。みずがめ座AE星のデータは、軟X線でフレアした時期だけをピックアップしている。

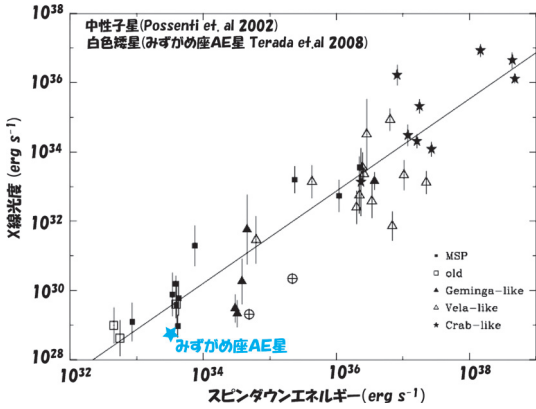


図7 自転にブレーキがかかるエネルギーとX線光度の関係。中性子星のデータ¹⁵⁾に、今回のみずがめ座AE星の硬X線成分のデータを重ねて表示している。

ません。また、解析は主にX線衛星で標準に用いられている時系列解析ツールで行ったわけですが、忙しい牧島教授の手を煩わせながら、これとは別のツールでも同様な結果がでるかのチェックも行っていただいたりもしました。こうしてわれわれは、パルスを発見してから約半年をかけて確証を得たわけです。

5. 硬X線パルスの発見!!

図5右を見ると、硬X線のパルスはとても鋭く、サイン関数的な変動を示す熱的な放射の明滅とは違って見えます。しかも面白いことに、HXDだけでなく、XISの高エネルギーバンドの波形にも同様な信号が見えています。この事実は、HXDでのパルス検出を裏づけるだけでなく、どうも熱的信号とは別の起源である可能性も示唆しているようです。熱的か非熱的かの区別は、X線スペクトルを詳細に調べないとわかりません。X線スペクトルの解析から、HXDで検出した信号を説明するためには、これまで言われてきた熱的な放射成分に加え、もう一つ別の成分が高エネルギーバンド（すなわち、パルスの見えるバンド）に必要であることまではわかりましたが、それが熱的か非熱的かの区別は統計的に決着がついていませ

ん。ただ、熱的成分を想定すると5億度の温度が要求されて白色矮星としては高すぎるので、非熱的成分だと解釈するほうが素直だろうと考えています。また、ひじょうに面白いことに、われわれのつけた鋭いパルスは、天体がたまに見せるフレア（増光）時に顕著になるようで、電波やテラ電子ボルトの観測で見られた非熱的な信号の性質（第2章）とひじょうに似ています。このことから、われわれの発見したパルスは非熱的放射である可能性が高い、と考えているわけです。

非熱的な放射という、第2章で解説したように、中性子星のパルサーと同じようなメカニズムが白色矮星にも起こっているのではないかと想像させられます。そういう目で見ると、われわれが得たパルス波形は、図6のように、かに星雲のような中性子星のパルサーとよく似ているではありませんか。では、パルスのX線光度はどうでしょうか。中性子星パルサーでは、自転エネルギーの減衰率であるスピンドウンエネルギーの大半は回転磁石の出す双極子放射によって消費され、0.1から0.01%程度がX線の放射にまわされています¹⁵⁾。みずがめ座AE星の硬X線パルスの光度をそのスピンドウンエネルギーと比較すると、図7のように中性子星の場合とよく似た傾向を示し、スピンドウンエネルギーの0.1%くらい

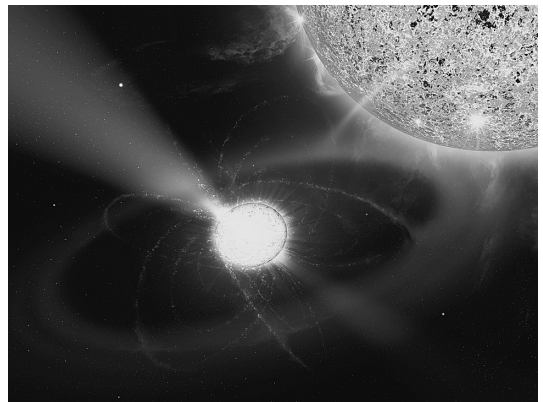


図8 NASA プレスリリースや報道公開で用いたみずがめ座AE星の想像図 (credit Casey Reed, NASA). 表紙絵参照。

が X 線光度です。白色矮星連星では、中性子星パルサーに比べてコンパクト天体の周辺にガスが多いので、粒子加速の効率を議論するうえで同じ環境にはなく、単純には比較できないのですが、0.1% という数値自体は興味深い値といえるでしょう。みずがめ座 AE 星のどの場所で粒子が加速され、どういう物理素過程で硬 X 線を放射しているかの詳細は、まだまだこれからの研究課題として残されていますが、とにかく、もし、われわれの発見した硬 X 線パルスが中性子星パルサーのような非熱的信号だとすれば、ごまんとある白色矮星でも粒子を加速できることになり、宇宙線起源の謎にもインパクトが大きい、重大な発見となるわけです。

6. さいごに

本稿に解説した研究成果は、「すざく」による白色矮星パルサーの発見！ということで、平成20年の正月に NASA のミッションニュースとしてプレスリリースされました。NASA Goddard Space Flight Center のサイエンスライターが執筆した記事が WWW page に掲載され¹⁶⁾、米国の雑誌に投げ込まれました。その際に、みずがめ座 AE 星の想像図(図 8)を作成していただいたわけですが、これが埼玉大学からの記者発表の際にたいへん役に立ちました。日本で行ったプレスリリースは、事前資料で記者の皆さんに勉強していただいた成果もあり、難しい内容ながら、かなり正確な内容で、NHK はじめ 2 社の TV 報道ニュースと全国 24 紙の新聞に掲載していただけました¹⁷⁾。「小学生からおじいちゃん、おばあちゃんまでわかる内容にしなきゃいけないんだ」という言葉が残ります。

謝 辞

本研究は、ISAS/JAXA の石田教授、東大・理研の牧島教授、NASA/GSFC の向井浩二氏、首都大学東京の林 多佳由氏、ISAS/JAXA の堂谷

忠靖教授、馬場 彩氏、岡田俊策氏、中村良子氏、インド Sachindra Naik 氏らと進めたものです。ここに感謝の意を述べるとともに、今後ともよろしく願います。

参 考 文 献

- 1) Cronin J. W., 1999, Rev. Mod. Phys. 71, S165
- 2) Terada Y., et al., 2008, PASJ 60, 387
- 3) Hillas A. M., 1984, ARA&A 22, 425
- 4) 牧島一夫, 2008, 日本物理学会誌 in press
- 5) Pavelin P. E., Spencer R. E., Davis R. J., 1994, MNRAS 269, 779
- 6) Bond H. E., et al., 2002, PASP 114, 1359
- 7) Meintjes P. J., et al., 1994, ApJ 434, 292
- 8) Meintjes P. J., et al., 1992, ApJ 401, 325
- 9) Bhat C., et al., 1991, ApJ 369, 475
- 10) Mitsuda K., et al., 2007, PASJ 59, S1
- 11) Patterson J., 1979, ApJ 234, 978
- 12) de Jager O. C., 1994, ApJS 90, 775
- 13) Itoh K., et al., 2006, ApJ 639, 397
- 14) Terada Y., et al., 2008, PASJ 60, S25
- 15) Possenti A., et al., 2002, A&A 387, 993
- 16) http://www.nasa.gov/centers/goddard/news/topstory/2007/whitedwarf_pulsar.html
- 17) http://www.heal.phy.saitama-u.ac.jp/~terada/01work/press_release2008/index_j.html

White Dwarf Equivalent of Pulsars, Discovered with Suzaku

Yukikatsu TERADA
Saitama University

Abstract: Strongly magnetized white dwarfs have the potential to be a new particle acceleration site of a cosmic-ray origin. Since white dwarfs are common objects, they should become quiet but numerous accelerators giving important contributions to low-energy cosmic-rays. Suzaku observed one of the most promising objects as accelerators, AE Aquarii, which has magnetic field of 10^5 gauss and a rapid spin period of 33 seconds. We discovered spiky pulsations like neutron star pulsars in the hard X-ray band of over 4 keV band, in addition to the well-known thermal modulation in the softer band. From the timing features, spectral shapes and fluxes, we conclude that AE Aquarii is a white dwarf equivalent of neutron star pulsars.