

## 目的および進め方

C01 班では X 線天文衛星による観測から中性子星半径の精密決定に挑む事を目的とする。2015 年度に打ち上げ予定の次期 X 線衛星 ASTRO-H に搭載される次世代型の観測装置を中性子星観測においても十分な性能が得られるように整備すると共に、ASTRO-H と相補的な能力を持つ将来ミッションの実現をはかる。

X 線を用いた中性子星半径の距離の不定性によらない観測には

(1) X 線バースト中に存在が示唆される（鉄等の重元素による）吸収構造（吸収線や吸収端）の検出。中性子星大気からの細い吸収線その他、降着円盤内縁（中性子星半径の上限値）からの広がった鉄輝線を用いた重力赤方偏移の測定

(2) 中性子星表面の黒体放射スペクトルを分離決定し、X 線光度と温度から半径を決定、

(3) 磁場をほとんど持たない中性子星を含む連星系での、1.2 kHz を超える準周期的な X 線強度変動の検出などがある。

本計画研究では、ASTRO-H 衛星を用い、中性子星表面での核融合反応の暴走で生じ、X 線光度が数十秒間桁違いに上昇する X 線バースト現象中の観測の実現をはかる。ASTRO-H 衛星には、5-7 eV (FWHM) という極めて高いエネルギー分解能を持つ軟 X 線分光装置(マイクロカロリメータ)が搭載される。中性子星表面からの X 線バースト中に予想される吸収線の重力赤方偏移をはかる事が出来れば、距離によらない半径 ( $R_g$  に規格化された) の観測が可能である。また、軟 X 線 (0.3 keV) から軟ガンマ線 (600 keV) と 3 桁にも及ぶ広帯域観測により、X 線の黒体放射スペクトルの測定から半径を求める方法の精度の格段の向上がみこまれる。

研究期間の前半では、これらの装置を中性子星観測、特に、X 線バースト中の高いフラックスの下でも最大限その性能を発揮できるように各観測装置に改良を施し、十分な試験やキャリブレーションを実施することを目標とする。並行して「すざく」等の既存の衛星を用いた観測を進め、その観測結果をもとに、ASTRO-H 打ち上げ後に実施される初期フェーズにおいて観測することをめざして、適切な候補天体を選定する。並行して、理論予測に基づき、観測天体選定や解析に必要なソフトウェアを整備する。さらに、上述の (3) に対しては、X 線領域において大面積の望遠鏡あるい

は検出器を有するミッションが最終的には必要となる。そのため、国内外の新しいミッション提案に積極的に参加し、その実現をはかる。

## **2012 年度の主な活動**

### **1. マイクロカロリメータのデジタル波形処理機器 (PSP) の耐高計数率化**

デジタル波形処理機器は、精密軟 X 線分光装置において、衛星上で入射光子のエネルギーを精密測定する装置の心臓部の一つであり、その高速化が本研究の鍵をにぎる。耐高計数率化を可能とする回路方式の検討を行った。従来のソフトウェア制御による収集方式に代替可能なハードウェアとして、SpaceWire インターフェースによるデータ収集の高速化を行った。従来の回路構成では、CPU の負荷が高く、大量のデータ送信において DMA 転送が効率的ではなかった。SpaceWire のルーティングの最適化と同時に RMAP と呼ばれるアクセスにおいて、ブロック転送を行うなどの工夫を回路として実装し、試験を行い、効率的な大量のデータ送信が可能となった事を確認した。

### **2. 軟 X 線望遠鏡の焦点面検出器 (X 線 CCD) のキャリブレーション**

0.5 keV から 12 keV のエネルギー範囲で観測を行う X 線 CCD カメラの較正実験の準備を行い、実験を開始した。特に軟 X 線帯での性能に着目し、通常の観測モードのみならず、明るい天体用の特殊観測モードでも較正用のデータを取得した。

### **3. ASTRO-H の観測ターゲット選定に向けた検討作業**

検出器の有効面積や、エネルギーの応答関数、さらに望遠鏡の有効面積や Point Spread Functionなどを考慮して、初期観測中に適切なターゲットを探した。中性子星の回転が早いと、吸収線の幅が広がってしまう。また、X 線バーストが適切なタイミング、適切な頻度で発生するという条件も重要である。様々なシミュレーションや検討の結果、球状星団 Terzan 5 中の IGR17480-2446 という 11Hz という低い周期で回転する天体を候補として選定することができた。現在、その他のターゲットについても選定作業が続行中である。

ASTRO-H に搭載される X 線 CCD や硬 X 線検出器による広帯域観測を実現するための観測装置の試験を遂行した。またキャリブレーションの手

法の検討を行い，Geant4を用いた軌道上シミュレーションコードの開発を行った。

## 2013 年度の主な活動

### 1. マイクロカロリメータのデジタル波形処理機器 (PSP) の試験

耐高計数率化をはかったマイクロカロリメータのデジタル波形処理機器 (PSP) の試験を行った。エンジニアリングモデルの Dewar とそれにインストールした EM マイクロカロリメータなどと組み合わせ，衛星搭載の環境にできるだけあわせた試験を行い，7 eV 以下のエネルギー分解能を得ることができた。



Figure 1: 本研究で耐高計数率化をはかった PSP のエンジニアリングモデルを用い，全体を組み合わせて性能確認試験を行う様子

### 2. 硬 X 線望遠鏡の焦点面検出器（硬 X 線イメージング検出器 (HXI)）の改良と最適化

5 keV から 80 keV の範囲では硬 X 線望遠鏡の焦点面検出器として Si と CdTe のイメージング素子を複数層に重ねたハイブリッド型検出器を用いる。明るい天体を考慮し，読み出し用の多チャンネル低雑音 ASIC の動作条件の最適化を行った。検出器の応答が複雑であるため，X 線 CCD と組み合わせて広い範囲で正確なスペクトルを保証するためには，打ち上げ前に素子毎のキャリブレーションを行い，応答関数を構築することが必要である。そのために，本研究において，地上試験用の装置の組み上げを行い，それを完成させた。

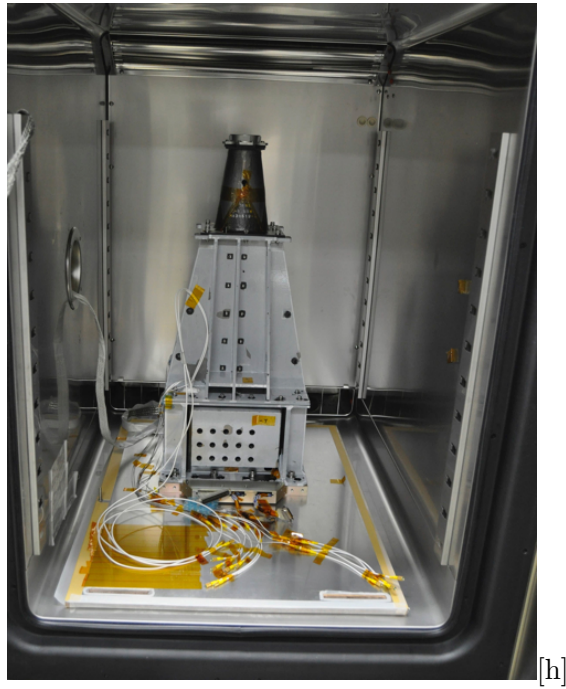


Figure 2: 本研究で組み上げを行った HXI の地上試験用装置

### 3. 物理シミュレーションコードの開発と中性子星からのX線放射研究への応用

すごく、チャンドラ衛星などの新世代のX線観測衛星やASTRO-Hによる次世代の高精度観測に向けて、従来よりも精密なX線放射モデルが必要となっている。天体の非対称な形状や光子の複数回反応を考慮したモンテカルロシミュレーションにより天体からのX線放射を計算するフレームワークMONACOの開発を行った。このコードを用いて降着中性子星からのX線放射を計算し、すごく衛星の観測結果を解釈するモデルを構築した。強磁場を持つ降着中性子星からのX線放射は理解が進んでおらず、激しい時間変動の原因も未解明である。この放射の物理モデルを構築するために、1) すごく衛星のデータを用いて最も明るい星風降着型中性子星 Vela X-1 の短い時間スケール (2ks) のスペクトルの変動を取得し、2) 降着プラズマからの逆コンプトン散乱をMONACOを用い、モンテカルロ法により計算することで観測と比較した。降着柱の物理状態を議論し、スペクトルの形成には熱電子による散乱が重要な役割をになうこと、質量降着率と降着プラズマの光学的厚さに自然な正の相関があることを明らかにした。また、降着柱の基本的なパラメータを得ることができた。

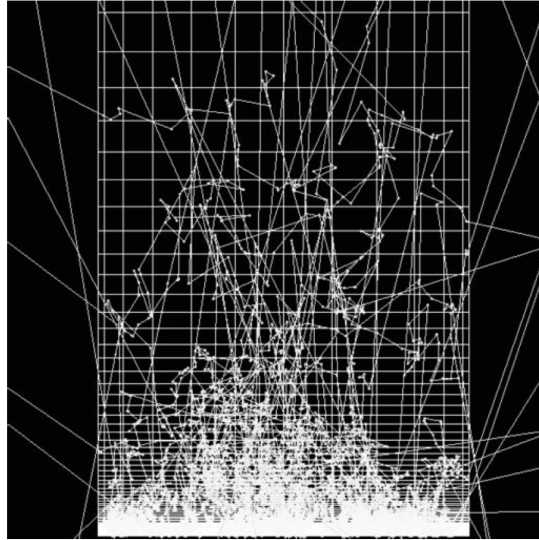


Figure 3: モンテカルロ計算の可視化. 半径数百メートルの円柱状の降着流を真横から見ている。複数の光子の飛跡を描いてあり、ランダムに散乱している様子がわかる。光子が底部に集中しているのは、底部はプラズマの密度が高く、放射が強いため（小高「中性子星降着流からの X 線放射 — モンテカルロ計算による放射モデル」(天文月報掲載予定) から）

#### 4. X 線偏光計の高度化

中性子星からの X 線偏光は、その磁場構造と強くカップルしており、回転位相毎の偏光の変化を見ることができれば、磁軸、回転軸と視線方向の配位に制限を与えることができる。中性子星核物質の EOS を観測する上で相補的な情報を提供してくれる。我々は NASA の X 線偏光観測衛星 GEMS (Gravity and Extreme Magnetism Small Explorer) に搭載するために、マイクロパターンガス検出器を応用した偏光計を製作してきた。その高度化として、コアデバイスであるガス電子増幅フォイルの絶縁体材質を、世界で初めてテフロンに替えることに成功した。テフロンは炭素とフッ素が強く結合しているので、高電圧による放電が生じた際でも、原理的にスガが発生せず、電極間の短絡故障が生じない。実際に放電の加速実験をおこなったところ、どのような過酷な条件でも、ガス電子増幅フォイルを壊すことができなかった。製作プロセスについては精度向上等の見直しが必要であるが、今後は衛星プロジェクトのみならず、素粒子、原子核等、様々な分野での応用が見込める。

#### 5. X 線衛星のデータを用いた中性子星研究

「すぎく」アーカイブデータを用いて、降着駆動型中性子星連星ヘラクレス座 X-1 の 0.4-100 keV 広帯域スペクトル解析をおこない、6.5 keV 付近に

中心を持ち、5-9 keV に広がるハンプ状の構造を発見した。その起源について考察し、中性子星表面に落ち込む鉄の輝線がドップラー偏移で広がったものか、降着円盤上のブロッブ状の物質で鉄の輝線がコンプトン散乱されたもので説明できることがわかった。もし前者であれば、中性子星表面に近いところを探る新たな手段を手に入れたことになる。ASTRO-H の高い分光能力による観測で、その起源を明らかにすることが期待される。