

# 大学生のための物理教材

「ぎんが」衛星のデータを用いて

中性子星の質量と半径を求めよう

立教大学理学部物理学科4年

北本研究室

05cb004b 岩本ひとみ

05cb026y 沢田紗衣子

## 1. はじめに

1. 1. Introduction
1. 2. この教材の目的
1. 3. 教材について

## 2. 中性子星について

2. 1. 高密度天体
  2. 1. 1. 恒星の進化
  2. 1. 2. 白色矮星
  2. 1. 3. 中性子星
  2. 1. 4. ブラックホール
2. 2. 中性子星
  2. 2. 1. 中性子星の構造
  2. 2. 2. 中性子星におけるX線発生の仕組み

## 3. ぎんが衛星

3. 1. 「ぎんが」衛星
3. 2. 機体データ
  3. 2. 1. 大面積計数管(LAC)
  3. 2. 2. ガンマ線バースト検出器(GBD)
  3. 2. 3. 全天 X 線モニター(ASM)
3. 3. 「ぎんが」が残した成果

## 4. ぎんがのデータを使ってみよう

4. 1. 中性子星の質量を求めよう
  4. 1. 1. エディントン限界光度と質量の求め方
  4. 1. 2. ぎんが衛星のデータを見よう
  4. 1. 3. スペクトルを作成しよう
  4. 1. 4. 光度を求めよう
  4. 1. 5. 中性子星の質量を求めよう
4. 2. 中性子星の半径の求め方
  4. 2. 1. 序章
  4. 2. 2. 光度曲線
  4. 2. 3. 色光度図
  4. 2. 4. 黒体放射
  4. 2. 5. 中性子星の半径を求めよう

## 1. はじめに

### 1. 1. Introduction

JAXA の研究成果や研究内容を、専門家や宇宙物理学を専攻している学生だけでなく、多くの人に理解してもらい、また観測データに触れるきっかけを与えることは科学者の責任のひとつです。

この教材は、JAXA 名誉教授の長瀬文昭氏が中心となり行われているプロジェクトの1つです。

### 1. 2. この教材の目的

JAXA の宇宙科学研究本部において打ち上げられた科学衛星により取得されたデータは同本部の宇宙科学情報解析センターの管理システム(DARTS データベース)により公開されています。この貴重なデータを研究用としてだけでなく、大学における宇宙科学教育の教材をしても容易に活用できるシステムを構築し、若者の宇宙への関心、宇宙の理解を深める教育資源を社会に提供したいと考えています。

本研究で達成しようとしている研究課題は、

- 1.本システムでは出来上がった天体画像とその解説のみを提供するのではなく、利用者が自ら DARTS データベースにアクセスし、元の観測データを手順に従って処理・解析することにより、研究者が行った解析の道筋を辿り、そこで行われた創造と発見の喜びを疑似体験できるようにデータ処理と解析の手順をガイドするシステムを構築します。

このシステムの開発に、実際にDARTS データベースを利用して卒業論文を作成しようとしている我々が参加することで、このシステムを利用しようとしている学生と同じ目線から見て利用しやすいシステムを構築できるはずです。

- 2.システムの開発と平行して、データ処理の基本手順、代表的な天体の解析手順例、抽出されるはずの結果の天体物理的意義の解説、発展的応用問題を網羅した利用手引きを作成し、各大学天文学・宇宙物理学関係者に配布します。

これにより、適切な指導者のいない地方大学の学生、宇宙観測データを教材として使用したい教官はもとより、宇宙に強い関心を持つ高校生や時には他分野の研究者などにも活用できると期待できます。配布の媒体として CD-ROM を使用することにより経費削減を図ります。

### 1. 3. 教材について

この教材は、大まかに3部に分かれています。

#### ○第一部 予備知識

- ・中性子星について
- ・「ぎんが」衛星について

第一部では、第二部で使用したデータの観測器とその観測器を搭載した衛星についてのお話です。読み飛ばしても構いませんが、予備知識として目を通しておくと、第二部・第三部で、より理解が深まるでしょう。

#### ○第二部 データの扱い方

- ・中性子星の質量の求め方
- ・中性子星の半径の求め方

すぐにデータを扱いたい人は、第二部から入って下さい。

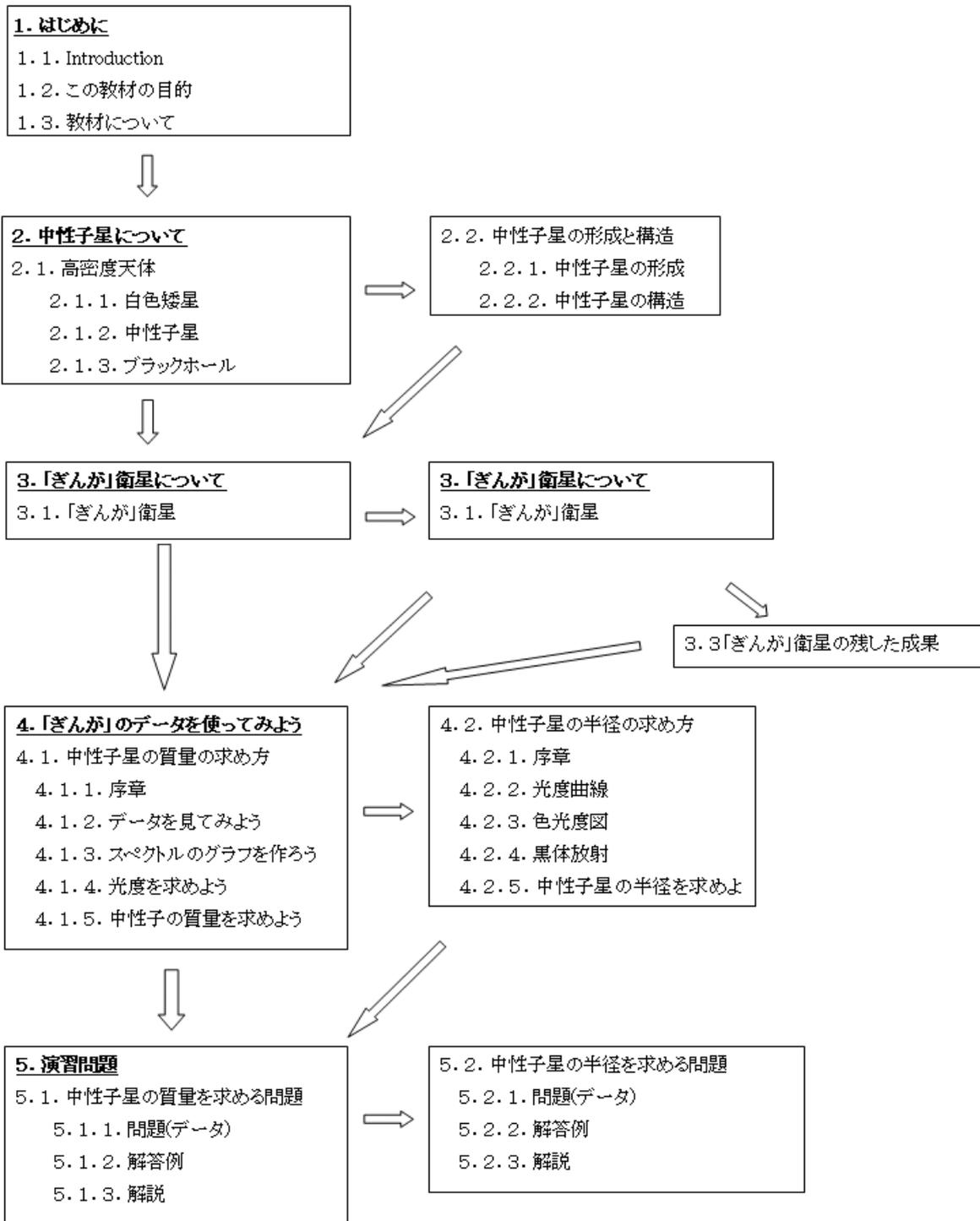
内容としては、中性子星の質量の求め方と中性子星の半径の求め方の2種類がありますが、質量の求めの方が難易度が低く、半径の求めの方が複雑で難しくできています。

基本的に、興味のある内容から始めて良いのですが、PC に詳しくない人や、Excel をあまり使ったことがない人は、質量の求め方から始めることをお勧めします。初めから難しいものに挑戦したい人、Excel を使いこなす自信がある人は、半径の求め方から始めても構いません。

#### ○ 第三部 演習問題

第二部を読んで理解したら、違う天体の質量や半径を求めてみましょう。データは Excel で保存しているので、作業の進め方は、第二部と同じ流れになります。

次頁に、この教材の構成を記載します。作業を進めていくうえで、参考にしてみてください。



## 2. 中性子星について

### 2. 1. 高密度天体

この章は小山勝二・嶺重慎、2007年、『ブラックホールと高エネルギー現象』を参考にまとめたものです。

#### 2. 1. 1. 恒星の進化

恒星が進化の跡にどのような高密度天体を残すかは、恒星の質量によって決まります。簡単な星の進化の様子を右の図に示します。

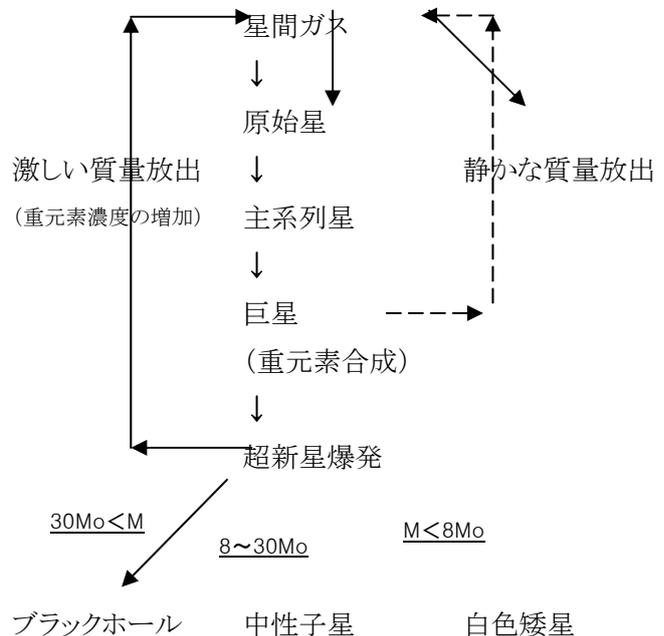
太陽質量の約0.46倍までの恒星は赤色矮星とも呼ばれ、温度が低いためヘリウムには点火せず、水素を使い尽くした後はそのままヘリウム型の白色矮星になります。

太陽質量の約0.46倍から約8倍までの恒星では、中心で水素を使い果たした後でヘリウムに点火し炭素・酸素・窒素が作られるが、それ以上の反応は進まず、赤色巨星の段階を経て白色矮星となります。

太陽質量の8~10倍の質量を持つ恒星では炭素・酸素からなる中心核でさらに核融合反応が起こり、酸素やネオン・マグネシウムからなる核が作られます。この段階で核は縮退するため、電子の縮退圧で重力を支えるようになり、この核の周囲の球殻状の部分で炭素燃焼が進むという構造になります。核を取り巻く部分で起こる核反応の「灰」によって次第に核の質量が増えていきますが、やがて中心核を構成する原子内で、陽子が電子を捕獲して中性子に変わった方がエネルギー的に安定になるようになります。これによって中心核は中性子が過剰な原子核で埋め尽くされるようになります。一方で電子捕獲によって電子の縮退圧が弱まるため、重力を支えられなくなって星全体が急激な収縮を始めます<sup>1</sup>。中心核の収縮は、密度が十分大きくなって中性子の縮退圧で重力を支えるようになると停止します。これより上の層は核によって激しく跳ね返されて衝撃波が発生し、一気に吹き飛ばされます。この段階を超新星爆発と呼ぶ。爆発の後には中性子からなる高密度の核が残り、これが中性子星となります。

太陽質量の10倍以上の大質量星では、次々に重い元素に点火してはさらに重い元素が作られ、最終的に鉄の中心核が作られる段階まで核反応が進みます。鉄原子は原子核の結合エネルギーが最も大きいためこれ以上の核融合は起こらず、中心の熱源がなくなるために鉄の中心核は重力収縮しながら温度を上げていきます。温度が約100億度に達すると鉄が光子を吸収してヘリウムに分解する鉄の光分解という吸熱反応が起きて急激に圧力を失います。これによって重力を支えられなくなり、星全体が重力崩壊で潰れて超新星爆発を起こします。

爆発の後には爆縮された芯が残ります。残った芯の質量が太陽の2-3倍程度なら中性子星として残りますが、それ以上ならば重力崩壊が止まることなくブラックホールになります。超新星爆発の前段階でこういった条件ならばどのくらいの芯の質量が残り、その結果中性子星になるか、あるいはブラックホールになるかといった精密な条件は現在ではあまりはっきりしていませんが、太陽質量の30倍以上の恒星はほぼブラックホールになると考えられています。



<sup>1</sup> これを重力崩壊といいます。

## 2. 1. 2. 白色矮星

白色矮星は太陽質量の4倍以下の星がエネルギー源である水素を消費して、星の重力を支えるガス圧を失い収縮したものです。星の重力を支える力は電子の縮退圧で、星の大きさは1万km程です。

連星系を構成する白色矮星で伴星から質量降着がある場合は、白色矮星の周囲に降着円盤が構成されています。この降着円盤や白色矮星表面で可視光や紫外線で光ります。降着物質の量が増えると変光星として観測されることになります。

白色矮星の中には、 $10^2 \sim 10^5 \text{T}$  の強い磁場を持つものがあり、降着流は磁極へ落下します。このとき磁極で衝撃波が発生して、X線を放出する高温のガスが生成されます。X線の強度は中性子星やブラックホールに比べて小さいものです。

## 2. 1. 3. 中性子星

中性子星とは、質量の大きな恒星の一生の最後である超新星爆発によって生まれる、主として中性子が非常に密に集まってできている星のことです。中性子星は質量が太陽程度、半径は10km程度、大気の厚さは1m程度で、密度は太陽の密度の $10^{14}$ 倍以上もあります。中性子星は大質量の恒星の超新星爆発によってその中心核が形成されますが、中性子星として存在できる質量には上限があり、それを超えるとブラックホールになります。上限の質量は太陽質量の1.5倍から2.5倍の範囲にあります。重力とつりあっているのは、恒星の場合のガス圧ではなく、中性子の縮退圧という量子力学的つりあいです。

X線を放射する中性子星のほとんどは、中性子と恒星の連星系です。恒星が放出するガスの一部は恒星の重力圏を越えて、中性子星の重力圏に流れ込みます。このガスは連星系の回転により、渦巻状に回転しながら中性子星へ落下します<sup>2</sup>。ガスは中性子星に近づく程速度が速くなり、温度も上がって、ガス同士が衝突して高温ガスとなります。このガスからX線が放射されます。

## 2. 1. 4. ブラックホール

ブラックホールの定義は、内部で発生した光が外部へ達することが出来ない特殊な空間のことで、アインシュタインの重力方程式の解として存在します。ブラックホールを観測する直接的な方法はありませんが、現在連星周期からケプラーの法則を用いて推定されるX線星の質量が太陽質量の3倍より大きい天体をブラックホール候補星と呼んでいます。

ブラックホールも連星系の場合には、伴星からの降着で周囲に高温の降着円盤を構成し、これがX線を放射します。スペクトルは中性子星と同じように黒体放射型のものや、べき関数型のものがあります。

---

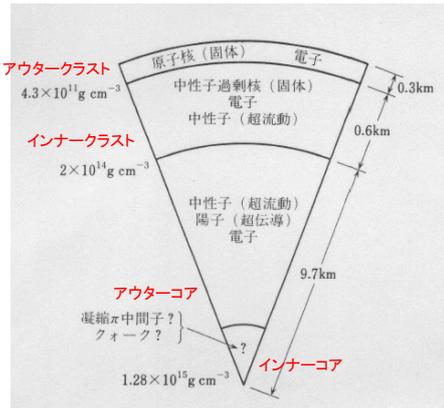
<sup>2</sup> これを質量降着といいます。

## 2. 2. 中性子星

この章は、柴崎徳明、1993年、『中性子星とパルサー』を参考にまとめたものです。

### 2. 2. 1. 中性子星の構造

以下の図に示す中性子星のいくつかの特徴的な層を、外側から説明します。各層はおおよそ密度によって分けられています。



中性子星の断面模式図

『中性子星とパルサー』柴崎徳明 培風館

#### 表面層

表面層は密度が  $10^9 \text{kgm}^{-3}$  以下の領域で、温度や磁場によって固体または液体状態となっています。

#### アウタークラスト

表面層の下にある層で、およそ数百mの厚さがあります。密度は  $10^9 \sim 4.3 \times 10^{14} \text{gm}^{-3}$  です。この領域では鉄やニッケルなどの原子核が格子状に並び、個体となっています。規則的に並んだ原子核は、縮退した電子の海の中に浸っています。密度が  $10^{10} \text{gm}^{-3}$  を超えると、電子のフェルミエネルギーは 1MeV 以上となります。すると原子核中の陽子は電子を捕獲し、中性子に変わります。密度が高くなるにつれて電子捕獲がより進み、中性子過剰の原子核ができます。さらに密度が高くなるにつれて、表面エネルギーが少なくてすむ格子の多い原子核が安定になります。このような原子核は地球上では非常に短時間で崩壊してしまいますが、中性子星内部では非常に圧力が高いために安定して存在できます。

#### インナークラスト

およそ1kmの厚さで、 $\rho_0 = 2.8 \times 10^5 \text{kgm}^{-3}$  を標準原子核密度とすると、密度は  $0.5 \rho_0$  より小さいです。電子と自由中性子、中性子過剰な原子核が縮退した電子の海の中に格子状に並んで存在しています。また、この領域では中性子を原子核の中に束縛しておくことができず、中性子の一部が原子核からもれ出てきます<sup>3</sup>。もれ出た中性子は超流動状態、つまり粘り気がなくなり、さらさらと流れる超流体をなっています。この領域には原子核と自由電子と自由中性子が存在します。

<sup>3</sup> これを中性子ドリップという。

## アウターコア

密度はおよそ  $0.5 \sim 2\rho_0$  であり、数 km の厚さです。原子核はすべて溶けてしまい、そこは超流動状態にある自由な中性子で占められています。数パーセントの電子・ミューオンなどの荷電粒子と、超伝導状態の陽子も含まれています。これらは強く縮退しています。

## インナーコア

数 km 程度の厚さで、構成するものに対してはそれぞれの仮説により異なります。

ハイペロン

パイオン縮退

K中間子縮退

クォーク物質への相転移

密度は  $2\rho_0$  より大きく、中心部の密度は極めて高く、 $10 \sim 15\rho_0$  にも達します。

## 2. 2. 2. 中性子星におけるX線発生の仕組み

我々の銀河系にはX線を多量に放射する天体(X線星)が数百個ほど存在します。X線を放射する中性子星のほとんどは、中性子と恒星の連星系です。相手の星から中性子星に質量が降着すると重力エネルギーを開放してX線を放射する。したがってX線連星系ともいいます。

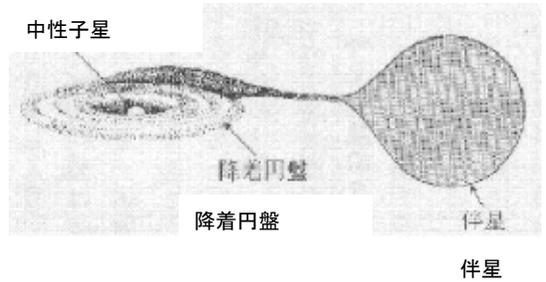
X線発生の仕組みを、中性子星の連星系の場合を例に説明します。

中性子星の相手の星(伴星)が進化し膨張すると、その星の外層はその重力圏から溢れ、その一部は、中性子星の重力圏に流れ込みます。流れ込んだ物質は角運動量を持っているので、中性子星の周りに降着円盤と呼ばれるガスの円盤を作ります。

この降着円盤の中では、内部の物質ほど速い角速度で運動しているので、内側と外側の物質の間に摩擦力が働きます。この摩擦で角運動量を失いながら、物質はらせん状に中性子星に向かって落ちていきます<sup>4</sup>。

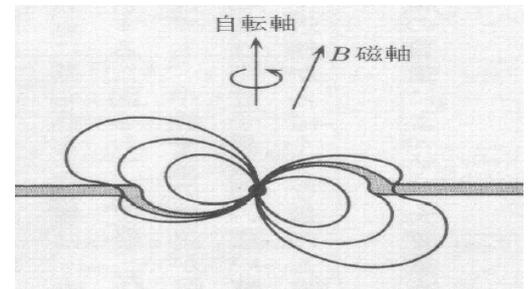
中性子星の磁場が強いときは、プラズマである降着円盤のガスは磁場によってせき止められ、その後磁力線に沿って流れ、磁極付近に集められます。磁極付近に落ち込んだ物質は、中性子星の表面近くで莫大なエネルギーを解放し、X線を放出します。2つの磁極を結ぶ線が自転軸と一致していない場合、中性子星が高速で自転していれば、X線が放出する方向を変えながら放たれるので、放射は中性子星の自転に伴って、観測者からは両極のプラズマの柱が交互に見えることになり、X線パルサーとして観測されることとなります。

中性子星の磁場が弱いときは、降着円盤は中性子星の表面近くまで侵入します。物質は中性子星の表面の広い範囲に落ち込みます。中性子星の表面に蓄積した降着物質は、密度温度が核融合の条件を満たす状態になると爆発的な核融合を起こし、高温ガスを生成してX線を放射することがあります。また、摩擦で高温になった降着円盤からもX線が放出されます。降着円盤は中性子星の近くで膨れ、熱いプラズマ雲ができます。



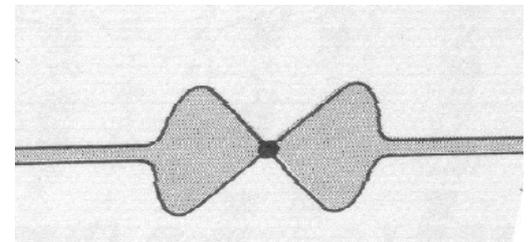
降着円盤形成の様子

『中性子星とパルサー』 柴崎徳明 培風館



磁場が強い場合の物質移動

『中性子星とパルサー』 柴崎徳明 培風館



磁場が弱い場合の物質移動

『中性子星とパルサー』 柴崎徳明 培風館

<sup>4</sup> この過程を質量降着という。

### 3. ぎんが衛星



#### 3. 1. 「ぎんが」衛星

この教材において使用するデータは、全て「ぎんが」衛星(ASTRO-C)によって観測されたものです。この衛星を使用した理由は、3-2-1で説明するLACが観測するX線のエネルギー帯域が、中性子星の質量・半径を求めるのに、調度良いからです。

1987年、「ぎんが」衛星打ち上げ当初、ほぼ唯一のX線天文衛星として、世界中の注目を集めました。この衛星は、電源系・データ処理系・姿勢系および姿勢制御系・通信系・観測系の各機器で構成されています。

「ぎんが」の目的は

活動銀河X線の時間変化を系統的かつ長時間にわたって観測すること

われわれの銀河内のX線星の微小な、また短時間の変動を観測すること

の2つでした。

### 3. 2. 機体データ

下の表に「ぎんが」衛星の機体データを示します。

機体データ		
名称(打上げ前)		ぎんが(ASTRO-C)
国際標識番号		1987-012A
開発の目的と役割		ブラックホール・中性子星・超新星・活動銀河核・ガンマ線バーストなどの宇宙 X 線源の観測
打上げ	日時	1987年2月5日 15時30分
	場所	鹿児島宇宙空間観測所(内之浦)
	打ち上げロケット	M-3S II ロケット 3号機
	質量	420kg
構造	形状	1m×1m×1.5mの直方体 4枚の太陽電池パドルを備える
軌道	高度	近地点 530km 遠地点 595km
	傾斜角	31度
	種類	略円軌道
	周期	96分
主要ミッション機器		大面積比例計数管(LAC)、全天モニター(ASM) ガンマ線バースト検出器(GBD) (LACは英国レスター大学、GBDは米国ロスアラモス研究所との国際協力により開発)
運用停止日		1991年11月1日

#### 機体データ

<http://www.isas.jaxa.jp/j/enterp/missions/ginga.shtml>

### 3. 2. 1. 大面積計数管(LAC)



大面積計数管(LAC)

<http://www.isas.jaxa.jp/j/isasnews/backnumber/1992/ISASnews130.pdf>

大面積計数管(以下、LAC)は、「ぎんが」衛星の主観測装置です。写真は、LAC の外観です。遠方にある活動銀河等の微弱な X 線を捉えるには大きな受光面積

- ① 受光面積を増すと同時に増える宇宙線やガンマ線によるバックグラウンドを除去する工夫
  - ② 宇宙から等方的にやってくる強い X 線バックグラウンドを抑えるために視野を絞る
- という工夫が必要です。このことを下に設計された LAC の主要性能は下の表のようになります。

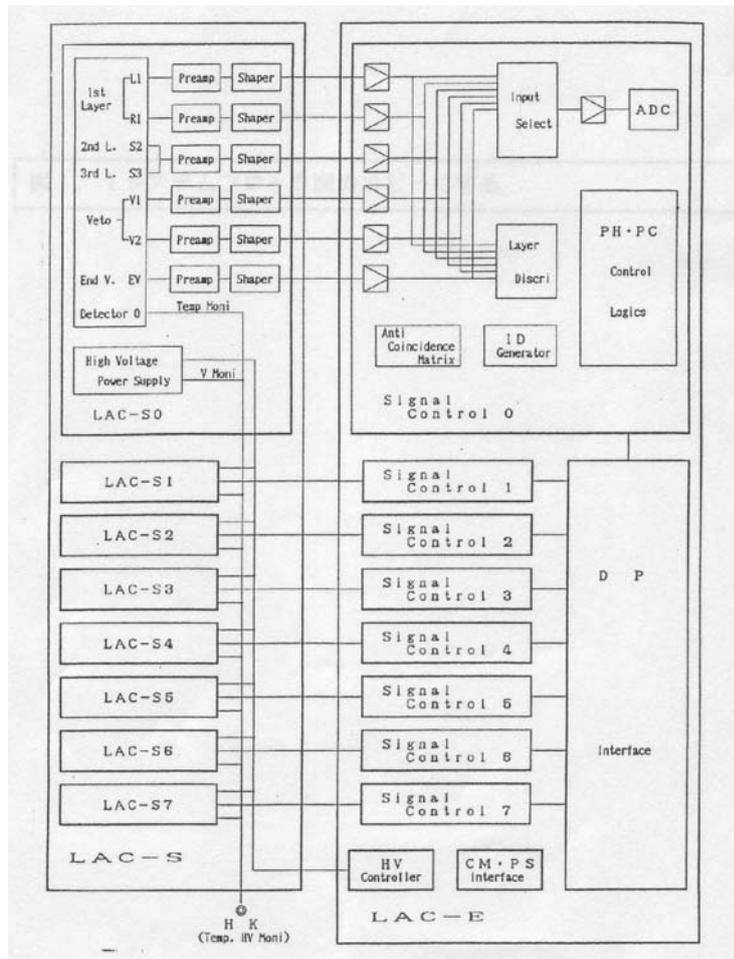
検出器有効面積(8 台統計)	~4360cm <sup>2</sup>
エネルギー帯域(標準)	2~35keV
エネルギー分解能	6keV で~20%
バックグラウンド(diffuse を除く)	~3×10 <sup>-4</sup> c / s / cm <sup>2</sup> / keV
視野(FWHM)	0.8° × 1.7°

LAC の主要性能

また、システム構成は、大きく分けると、8 本の比例計数管より成る LAC 検出部(LAC-S)と信号処理部(LAC-E)の2つに分かれます。

この教材で使用するデータは、LAC 検出部で検出されたものです。各検出器には、それぞれ1台ずつ、高圧電源と前置増幅器(FEE ; Front-End Electronics)が付随し、また、8台の検出器は、LAC-0 から LAC-3 までを LAC-A、LAC-4 から LAC-7 までを LAC-B と呼びます。

次の図は、LAC のシステムブロック図です。



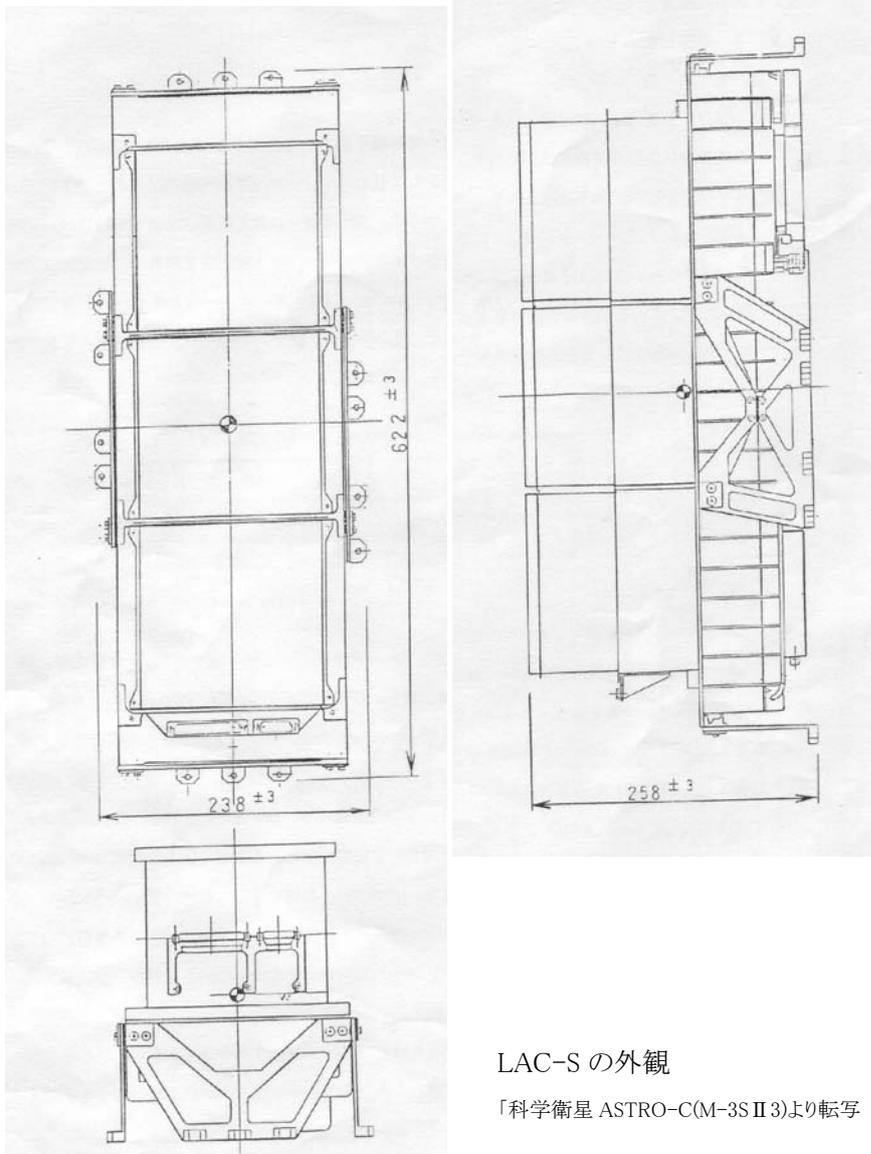
LAC システムブロック図

「科学衛星 ASTRO-C(M-3SII3)より転写

## LAC 検出器部(LAC-S)

それでは、LAC 検出器部(LAC-S)について、詳しく見ていきましょう。この部分の内容は、専門用語が多く、理解しにくいと思いますので、図などを見て、「LAC 検出器部の構造は、こんな感じなんだあ」と大まかに理解できれば大丈夫です。

以下の図に、LAC 検出器部(LAC-S) の外観を示します。

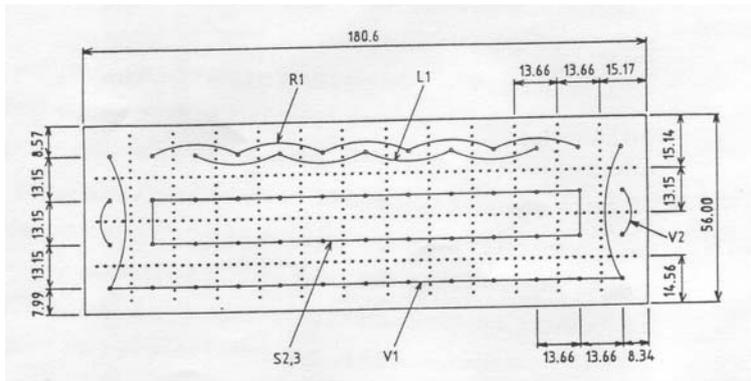


LAC-S は、厚さ 0.7mm のステンレス製のガス室・コリメータ、それらにある X 線入射用のベリリウム窓などから構成されています。さらに、高圧電源・前置増幅器・キャリブレーション機構・各種コネクタ・HK センサ・検出器周りの計装配線などが取り付けられています。また、コリメータ側壁の一部には diffuse X 線シールドするためのスズ箔が貼られています。これら全てを合計すると、総重量は  $10.1 \pm 0.3$  kg であり、重心の高さ(Y 方向)は、 $107 \pm 3$  mm になります。

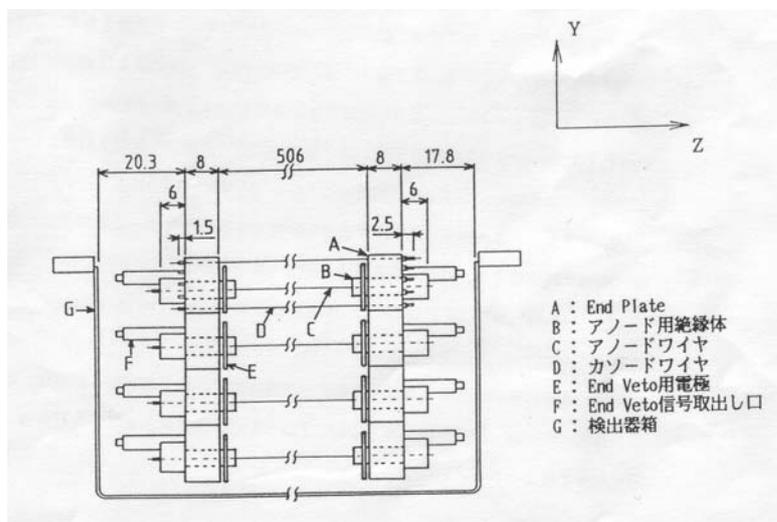
また、LAC 検出器部は、図のように、4層×13列のマルチセル構造を持ちます。即ち 52 本のアノードがあり、各アノード間にはアースワイヤが張られているのです。4つの層は同一の構造を持っており、アノード及びアースワイヤは1層ごとに両端で end plate と呼ばれるアルミニウム板に取り付けられています。4層の end plate は縦に組み立てられたうえ検出器の箱の中に固定されます。ワイヤと end plate をひっくるめて Multi Wire Array(MWA)と呼びます。

図にはまた、アノードの信号のまとめ方とその信号の名称も記載しました。このうち、L1・R1・S2,3 は通常ソース信号の測定に用いられ、3者の間に相互反同時計数を設けてバックグラウンドを減らします。V1 と V2 は、通常ガードセルと

して用いられ、ソース信号に禁止をかける働きをします。EV も同様です。V2 はソース X 線の入射が無く、また 5-sided-guard になっているため、検出器の intrinsic バックグラウンドの良いモニタになると考えられます。

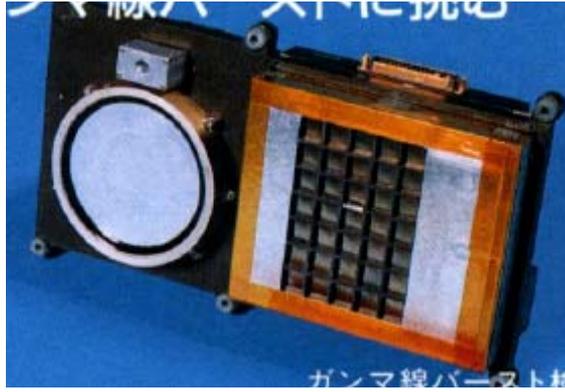


LAC MWA の断面図 「科学衛星 ASTRO-C(M-3S II 3)より転写



LAC MWA の側面図 「科学衛星 ASTRO-C(M-3S II 3)より転写

### 3. 2. 2. ガンマ線バースト検出器(GBD)



ガンマ線バースト検出器(GBD)

<http://www.isas.jaxa.jp/j/isasnews/backnumber/1992/ISASnews130.pdf>

ガンマ線バースト検出器は、文字通りガンマ線バーストを検出するものです。上の写真は、ガンマ線バースト検出器の外観です。宇宙空間でガンマ線検出器を働かせると、前触れもなくガンマ線の明るさが増加する現象を検出します。このガンマ線の突然の増加(バースト)をガンマ線バーストと呼びます。

「ぎんが」では、従来あるといわれながら確定していない 50keV 付近の吸収線の存在(磁場)や、数 keV 領域のフラックスとガンマ線との時間差(放出メカニズムがわかる)を確立したいと考えられていました。「ぎんが」のように数 keV から 0.5MeV までを一度にカバーする測定は初めてであり、得られるスペクトルからバースト発生のメカニズムが解明できると期待されていました。

結果、4年9ヶ月の観測の中で、「ぎんが」のガンマ線バースト検出器は約 100 個のガンマ線バーストを観測しました。

また、GBD は、LAC や次に記述する ASM 等の比例計数管を放射線帯から保護するために、放射線帯検出警報機能(RBM)を半導体検出器で行っています。

### 3. 2. 3. 全天 X 線モニター(ASM)



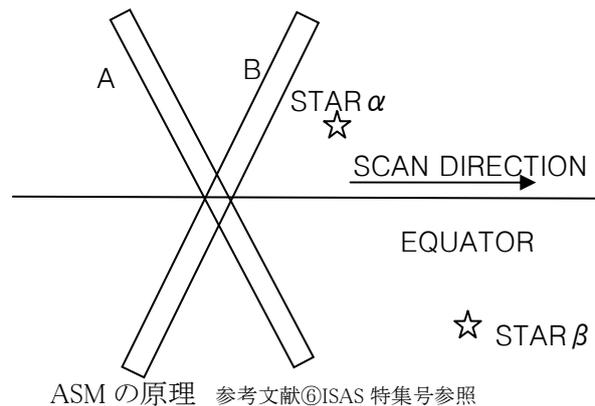
全天 X 線モニター(ASM) <http://www.isas.jaxa.jp/j/isasnews/backnumber/1992/ISASnews130.pdf>

全天 X 線モニターは、衛星を回転させることにより、広い天空(衛星座標で仰角 $\pm 45$ 度)を観測することができます。上の写真は、その全天 X 線モニターの外観です。衛星を定期的に回転させて ASM による観測を行えば、広い天空の沢山の X 線源のその時の強度、スペクトル等の状態を知ることができます。そのデータから、多くの X 線源が示す長期変動や周期性、さらに X 線新星等の研究を行います。

また、ASM は2台の比例計数管からなり、それぞれ ASM-Y1、ASM-Y2 と呼びます。これら二組の検出器部は全く同じもので、上部にコリメータ、中間部に比例計数管、下部にプリアンプ部が装備されています。

ASM は広い天空の多くの X 線源を観測するという目的のために、クリスクロスの視野を持ちます。クリスクロスの視野とは、互いに傾いた細長い視野のことです。そのような視野を持つ検出器で、天空をスキャンすると、それぞれの X 線源の位置を知ることができます。

例えば、右図のように、視野 A と B の2つの視野を持つ検出器で、矢印の方向に天空をスキャンします。すると、X 線源  $\alpha$



は視野 B に入り、少し遅れて視野 A に入ります。X 線源  $\beta$  は、視野 A に入ってから視野 B に入ります。このように、X 線源の位置により2つの視野への入る時間が異なるので、それぞれの視野の傾きとスキャン方向、各時刻での視野の中心の向いている方向がわかれば、各 X 線源の天空上での位置を知ることができるのです。

### 3.3. 「ぎんが」が残した成果

「ぎんが」の観測機は当時、それまでの X 線天文衛星で最も感度が高く、多くの X 線源を観測しました。特に LAC の感度は非常に高く、全世界の貴重な共有財産として、国内外からの観測の申し込みが殺到しました。

そのような観測機を使用したことで、「ぎんが」は多くの素晴らしい成果を残しました。その中でも、主な成果は以下の通りです。

- ① 超新星 SN1987A からの X 線の検出
- ② 新しい X 線パルサーの発見
- ③ 明るい X 線新星の発見
- ④ ガンマ線バーストのスペクトル構造の解明

特に注目されたのが、超新星 SN1987A からの X 線の検出です。

「ぎんが」打ち上げの翌日 2 月 6 日から3週間かけて動作確認も終わりに近づいた 2 月 23 日、何百年に一度という幸運に恵まれ、4 世紀ぶりに大マゼラン雲に超新星(SN1987A)が出現し、急遽、観測機器は観測態勢に入り、8 月にこの超新星が出す宇宙 X 線の検出に成功しました。下の写真は、その大マゼラン雲に超新星(SN1987A)を撮影したものです。

私たちの銀河系のすぐ近くの銀河における超新星の出現は、1604 年以來のことで、打上げ直後の出現は幸運な出来事でした。標準的 X 線源であるカニ星雲による較正と並行して観測が行われ始めましたが、較正試験の方は3月中に正常に終了。3月 25 日から稼働を始めた ASM が2個の X 線新星を発見、GBD も最初のバーストを3月4日に観測して、順調な滑り出しを見せました。週に1度くらいの割合で大マゼラン雲の超新星の監視を続けるうちに、9月に入ってそれまでに取得した LAC のデータを厳密に整理・検討した結果、超新星からと思われる X 線を確認しました。この超新星からのニュートリノを検出したことが、2002 年の小柴昌俊先生のノーベル賞受賞につながりました。



大マゼラン雲中の超新星 1987A (1987/2/27、オーストラリア・サイディングスプリング天文台撮影)

以前に撮影されたもの(左)と、同じ視野にはっきりと見える超新星。

<http://www.isas.jaxa.jp/ISASnews/No.283/mspace.html>

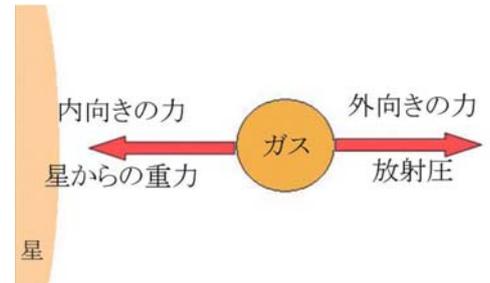
## 4. ぎんがのデータを使ってみよう

### 4. 1. 中性子星の質量を求めよう

#### 4. 1. 1. エディントン限界光度と質量の求め方

星はガスのかたまりであり、星のガスは重力(内向きの力)で束縛されています。しかし、星は光を出すので、ガスには吹き飛ばそうとする力(放射圧;外向きの力)が働きます。この重力と光により吹き飛ばそうとする力が釣りあうときの星の明るさをエディントンの限界光度といいます。

重力と放射圧の釣りあう場合、 $G \frac{Mm_p}{r^2} = \frac{L_E}{4\pi^2 c} \sigma_T$ という関係が成り立ちます。



ここで、 $G, c, \sigma, T$  は重力定数、光速、トムソン散乱断面積、 $M, m_p, r, L_E$  は星の質量、陽子の質量、星からガスまでの距離、中性子星の光度です。

このときの星は安定的に放射できる最大限の大きさになっています。

この関係を逆に用いると、光度が分かれば中性子星の質量の下限が求められるということになります。

もし仮にエディントン限界光度まで光っているときの光度を得ることが出来れば、中性子星の実際の質量が求められます。

しかし実際の観測では、星が限界までエネルギーを放出している(光っている)状態を偶然捉えることはほぼ不可能です。X線バーストを起こしているときなどの光度はエディントンの限界光度に近い場合もありますが、一般に光度を用いて求めた中性子星の質量は、実際の中性子星の質量よりは小さくなります。

さて、中性子星とは何か、エディントンの限界光度とは何か、どのように中性子星の質量を求めるか、よく理解できたでしょうか。

これ以後は、質量を求める方法が理解できたという前提で、データ解析の方法を説明します。質量を求める方法がいまいちよく分からないという方は、もう一度解説部分を熟読して、しっかりと質量を求める方法が理解できてから解析にのぞんでください。

さあ、いよいよぎんが衛星が得たデータをもとに、中性子星の質量を求めてみましょう。ここでは、エディントンの限界光度を利用した方法で中性子星の質量を求めます。

まずはデータから質量を求めるまでの具体的な流れを確認します。

ぎんが衛星のデータが何を表しているかを理解しましょう。

データからスペクトルのグラフを作成しましょう。

スペクトルから、光度を計算してみましょう。

光度がエディントンの限界光度より小さいということを使って中性子星の質量を求めましょう。

#### 4. 1. 2. ぎんが衛星のデータを見てみよう

ぎんが衛星から得られるデータは以下のようなものです。

	A	B	C
1	0	1	2
2	0.00E+00	3.25E+01	1.27E-01
3	2.30E+00	1.68E+02	2.73E-01
4	4.60E+00	9.22E+01	2.07E-01
5	6.91E+00	4.40E+01	1.46E-01
6	9.21E+00	2.39E+01	1.10E-01
7	1.15E+01	1.35E+01	8.64E-02
8	1.38E+01	7.33E+00	6.83E-02
9	1.61E+01	4.56E+00	5.81E-02
10	1.84E+01	4.67E+00	7.49E-02
11	2.30E+01	1.70E+00	6.14E-02
12	2.76E+01	9.00E-01	5.69E-02
13	3.22E+01	7.15E-01	5.51E-02
14	3.68E+01		
15			

A,B,C 列には、それぞれ 0,1,2 という番号がついたデータが並んでいます。数字の後ろについている「E+00」や「E+01」は、それぞれ $\times 10^0$ 、 $\times 10^1$ を表しています。

データ0 はエネルギーの区切りを表しています。単位は[keV]です。この値をxの値とします。

データ1 は1ビン当たり1秒あたりに、検出器が検出した光子の数の平均値([count/bin/sec])を表しています。これをyの値とします。

データ2 はデータ1 の誤差を表しています。つまり、yの値の誤差を表しています。

ここで注意すべきなのは、赤い枠で囲まれた部分に示すように、xの数値の数が、yとyの誤差の数値の数より1つ多いということです。これは、xの値を

**0.00E+00～2.30E+00[keV]のエネルギー範囲**

と読むためです。例えばxとyの一番上の行の数値は、

**「0.00～2.30[keV]のエネルギー範囲の光子は、1秒間に平均 32.5 個検出された」**

と読みます。

なぜ検出された光子の個数が小数なのか疑問に思う方もいるかもしれません。なぜ検出された光子の数が小数になっているかというと、1秒間あたりに検出された光子の数に直しているからです。

例えば4秒間に30個の光子が検出されたとして、それを1秒間あたりに直すと7.5個検出されたこととなります。観測時間=ビン幅が異なるデータもたくさんあるので、このように1秒ごとの検出数に統一することで、データを見やすくしているのです。

また、ここで示しているデータは12chのデータですが、他に48chのデータも存在します。

12chのデータは時間分解能が高いが細かいスペクトルを見ることができず、逆に48chのデータは細かいスペクトル

ルを見ることができる代わりに時間分解能が低くなります。

12ch、48ch それぞれに長所短所があり、研究者たちは自分たちの研究でどのようなデータを必要としているかによってチャンネルを使い分けています。

この章で確認したことをもとに、データを見やすく編集する方法を説明します。

## データを見やすく編集しよう

前節ではそれぞれの数値が何の値を表しているかを確認しました。

では、どの数値が何の値を表しているのかがよく分かるように、Excelの表に物理量と単位を書き込んで編集してみましょう。以下にその例を示します。赤い点線で囲まれた部分が、挿入した行と列です。

この先xとyの値を操作していくつかのグラフを書く都合上、例ではx、yの値をそれぞれ「x ①」、「y ①」としています。「x ①」、「y ①」はグラフ①で使用する、という意味です。

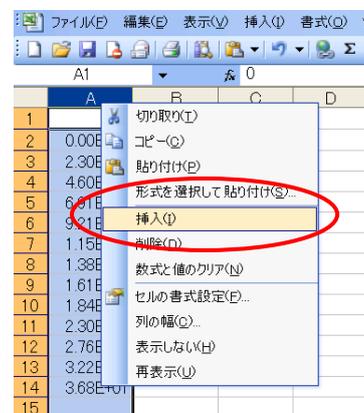
	A	B	C	D
1	データ番号	0	1	2
2	グラフ上での意味	x ①	y ①	yの誤差
3	単位	keV	count/bin/sec	count/bin/sec
4	観測値	0.00E+00	3.25E+01	1.27E-01
5		2.30E+00	1.68E+02	2.73E-01
6		4.60E+00	9.22E+01	2.07E-01
7		6.91E+00	4.40E+01	1.46E-01
8		9.21E+00	2.39E+01	1.10E-01
9		1.15E+01	1.35E+01	8.64E-02
10		1.38E+01	7.33E+00	6.83E-02
11		1.61E+01	4.56E+00	5.81E-02
12		1.84E+01	4.67E+00	7.49E-02
13		2.30E+01	1.70E+00	6.14E-02
14		2.76E+01	9.06E-01	5.69E-02
15		3.22E+01	7.15E-01	5.51E-02
16		3.68E+01		

### 【Excel の操作】

#### ◎行や列の挿入

データのみが書かれているシートを見やすく編集する際、データ0の左に列を挿入しました。データ0の左に列を挿入する方法は、A列上で右クリックをし、「挿入」をクリックします。するとデータ0の列(A列)の左隣に新しい列が挿入され、新しい列がA列、データ0の列がB列となります。

同様に行を挿入する際は、1行上で右クリックをし、「挿入」をクリックします。例では行は2行挿入しています。

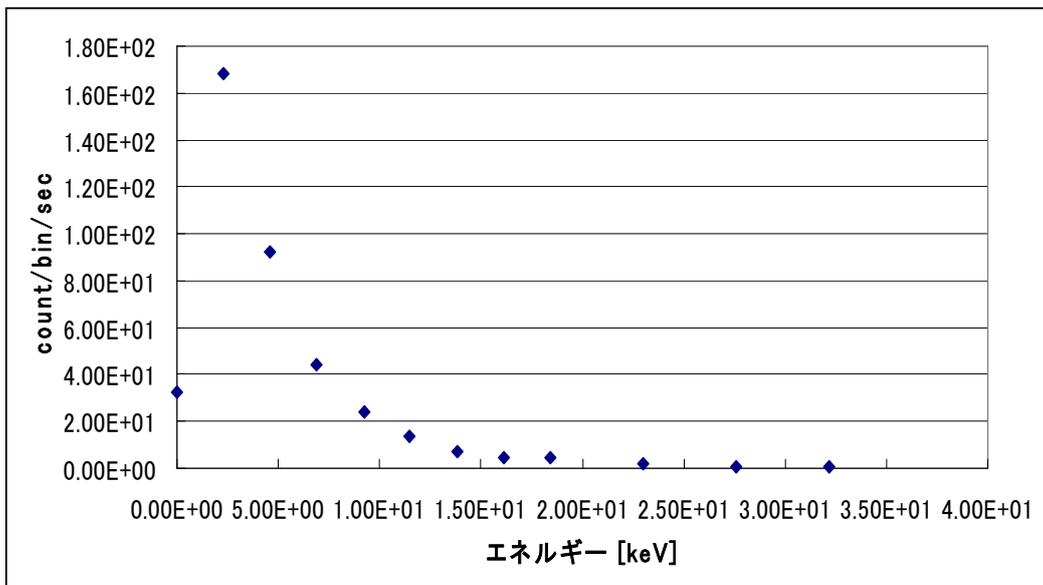


### 4. 1. 3. スペクトルを作成しよう

まずはデータをいじらずに、そのままグラフ化してみよう

1では、ぎんが衛星のデータが示す値について確認しました。では、データをグラフにしてみましょう。

データ0をxの値、データ1をyの値として、「**散布図**」を作りましょう。以下のようなグラフができるはずですが、yの誤差の値はyの値に比べて大変小さいので、この段階ではグラフには反映させていません(yの誤差は後に**ズラックス**の誤差を計算する際に用います)。



このグラフで一番左にある点は、

「0.00E+00[keV]のエネルギーの光子は、1秒間に平均 3.25E+01 個検出された」

という意味になり、

「0.00E+00～2.30E+00[keV]のエネルギー範囲の光子は、1秒間に平均 3.25E+01 個検出された」

というデータを正確に反映していません。

データを正確に反映させたグラフの作成方法を説明します。

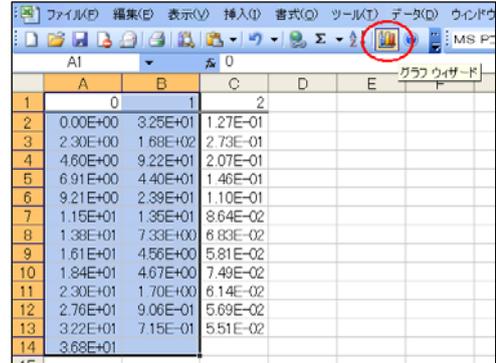
## 【Excel の操作】

### ◎散布図の作成

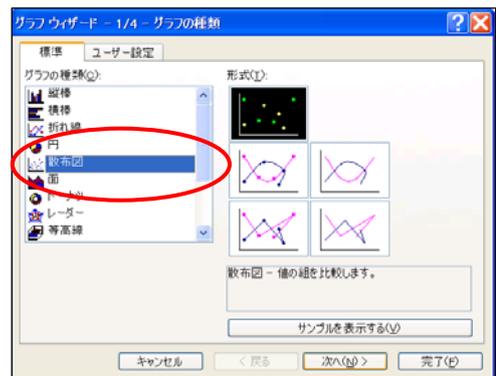
与えられたデータから散布図を作る方法を説明します。

まずは散布図にしたいデータを指定します。

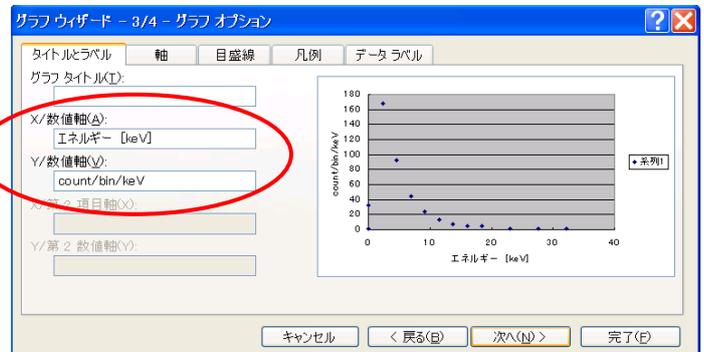
そしてグラフウィザードをクリックします。



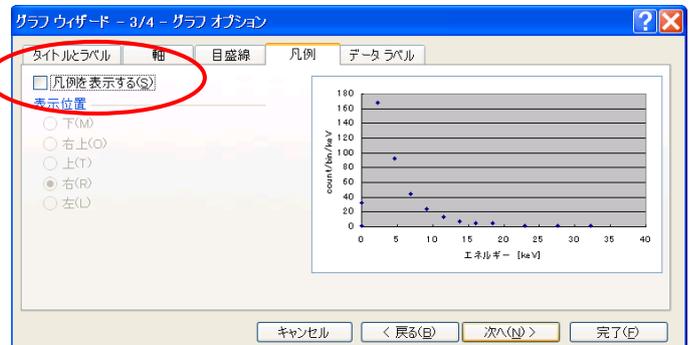
グラフウィザードが開いたら、「散布図」をクリックし、「次へ」をクリックする。



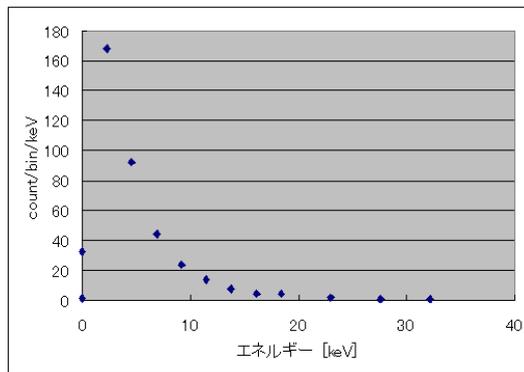
「次へ」を2回クリックすると、グラフのタイトルや軸の設定ができる画面になるので、軸の名前を設定してみましょう。



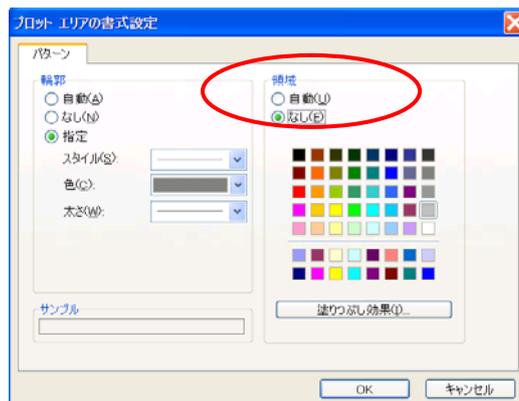
「凡例」のタブをクリックすると、凡例の設定画面になるので、凡例の有無を選択したり、凡例を表示する位置を指定しましょう。ここでは凡例のないグラフを作成するので、「凡例を表示する」のチェックを外します。



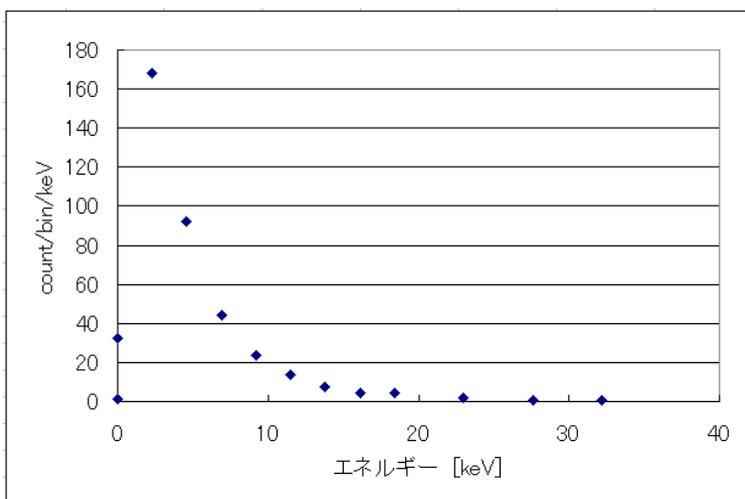
「次へ」を2回クリックし、「完了」をクリックすると右のようなグラフが完成するはずですが。



グラフ上のプロットや軸のない、背景だけの部分でダブルクリックをするとプロットエリアの書式設定画面が出てきます。



「領域」-「なし」を選択し、「OK」をクリックすると、先ほどのグラフの背景の色がなくなり、グラフが見やすくなります。



x軸、y軸それぞれの目盛りの上で右クリックをすると、「軸の書式」画面が表示されるので、軸の表示設定(最大値・最小値・表示形式など)を変えてみるのも良いでしょう。

この教材では、x軸、y軸ともに目盛りを指数表示にしています。

## データを正しく反映させたグラフを作成しよう

先ほどデータを加工せずを使ってグラフを作成しましたが、データを正確に反映したものではありませんでした。

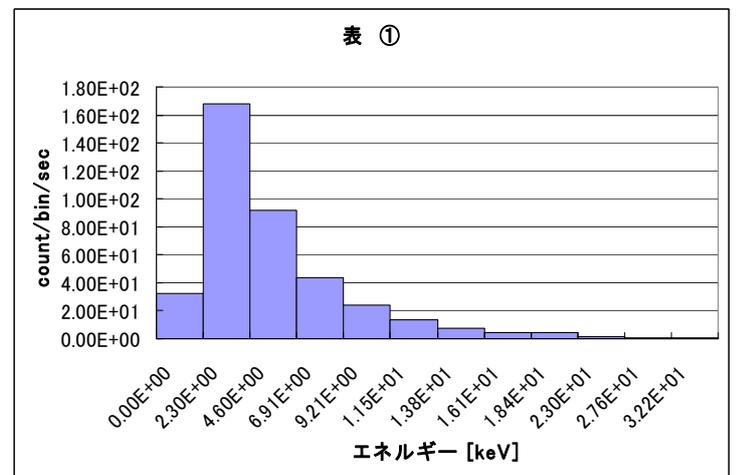
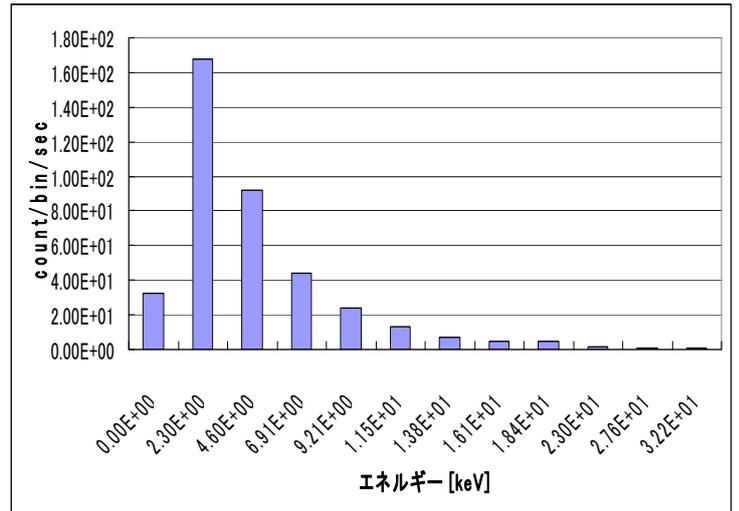
データを正確に反映したグラフを作成するために、まずは先ほど作成した散布図を棒グラフにして見ましょう。

先ほど作成したグラフ上で右クリックし、グラフの種類で「**縦棒**」を選択してみてください。右のようなグラフに変わるはずです。

このグラフでは、それぞれのビンの間に間隔がありますが、この間隔は余計なものなので消しましょう。

グラフのビンの上で右クリックをし、「データ系列の書式設定」-「オプション」と開き、「棒の間隔」を0にしましょう。右のようなグラフに変わるはずです。

この例では、表の題名、x 軸・y軸の物理量と単位もそれぞれ書き込んでみました。



今作成したグラフで一番左のビンは、

「0.00E+00～2.30E+00[keV]のエネルギー範囲の光子は、1秒間に平均 3.25E+01 個検出された」というデータを正確に反映しています。このように棒グラフにすると、データ 0 はそれぞれのビンの両端の値、データ 1 はyの値というように、データが表す物理量がよく分かりますね。

しかし、これからの解析の都合上、棒グラフより点でのプロットの方が便利です。他にも、解析をするにあたってグラフを編集する必要があります。

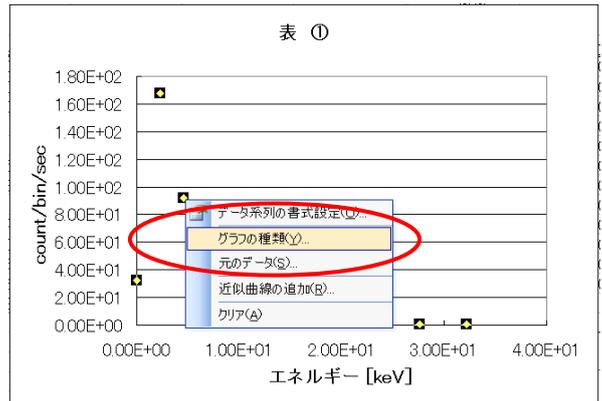
見やすく解析しやすいグラフを作成する方法を説明します。

【Excel の操作】

◎棒グラフへの変更

作成した散布図を棒グラフに変更してみましょう。

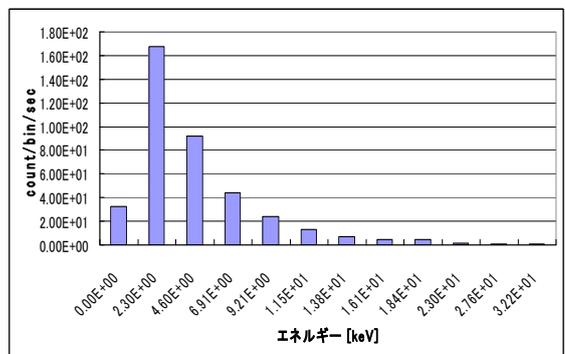
先ほど作成した散布図のどこか一つのプロット上で右クリックをします。



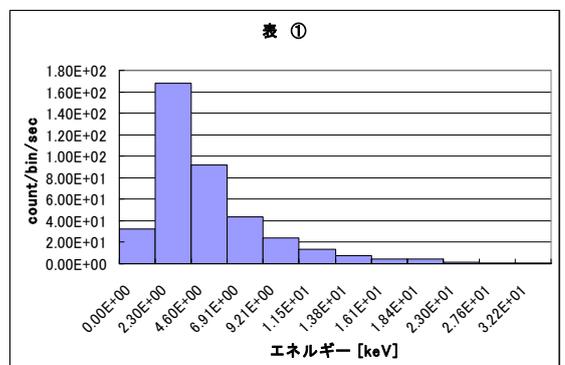
「グラフの種類」をクリックすると、グラフの種類が選択できますので、「縦棒」を選択しましょう。



右のようなグラフができるはずですが。



ビン同士の間隔を消すために、グラフのビンの上で右クリックをし、「データ系列の書式設定」-「オプション」と開き、「棒の間隔」を 0 にしましょう。右のようなグラフに変わるはずですが。



## 見やすく解析しやすいグラフを作成しよう

今データを正確に反映した棒グラフを作成しましたが、解析の都合上、点のプロットのグラフに変更しましょう。

ここで注意すべきことは、単純にグラフの種類を散布図にすればいいというわけではない、ということです。そのような作業を行っても、以前作成したような、データを正確に反映していないグラフに戻ってしまうだけです。ではどうしたらよいのでしょうか。

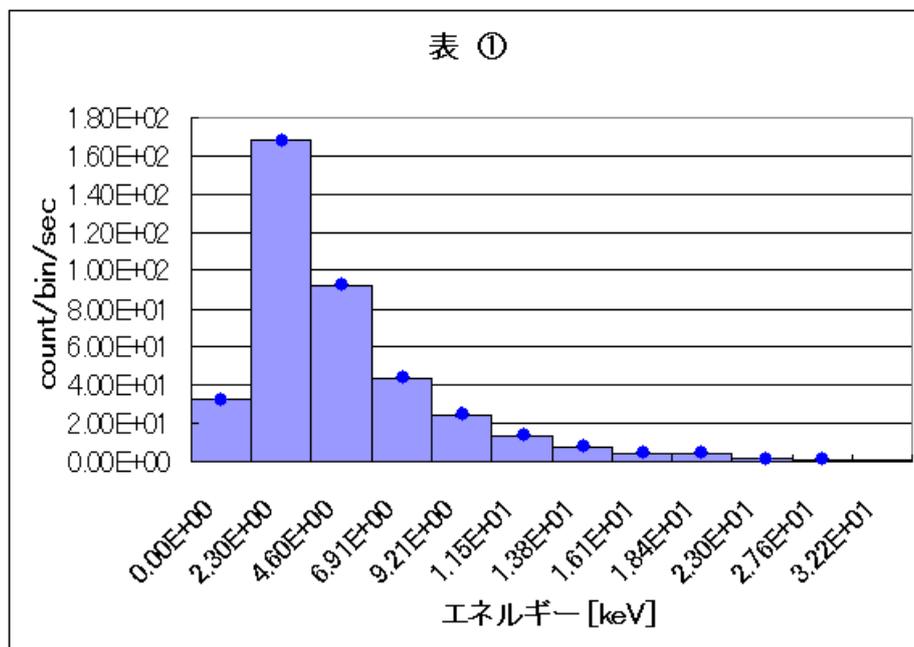
この問題を解決するために、少々大雑把なことをしてしまいましょう。例えば一番左のビンは、

**「0.00E+00～2.30E+00[keV]のエネルギー範囲の光子は、1秒間に平均 3.25E+01 個検出された」**

ということを表していますが、このビンのエネルギー範囲の平均値 1.15E+00[keV]をこのビンの代表値として、

**「1.15E+00 [keV]のエネルギーの光子は、1秒間に平均 3.25E+01 個検出された」**

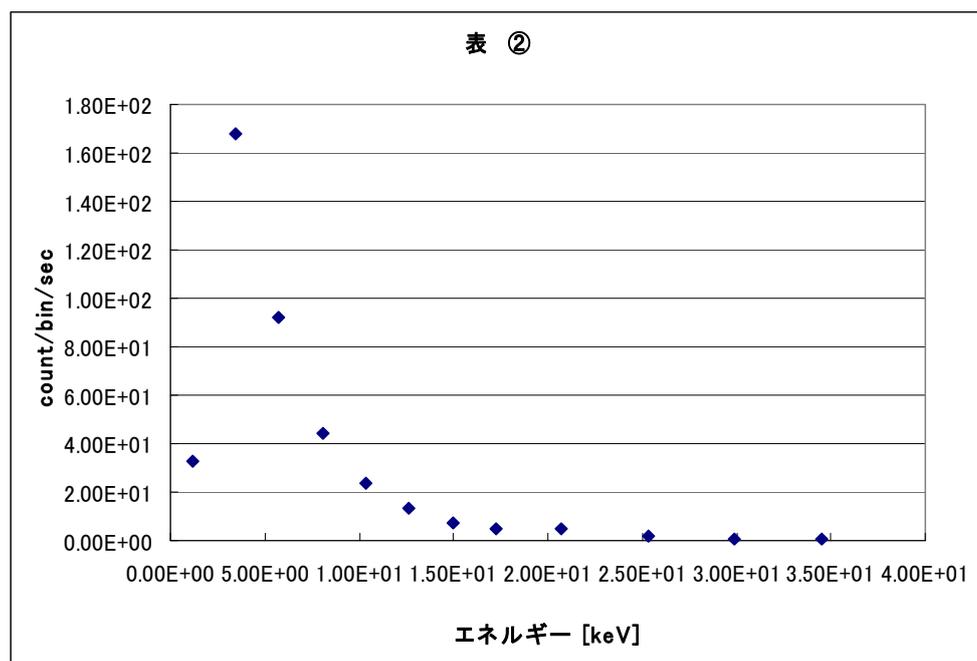
と読み替えてしまいましょう。ほかのビンについても同様に、それぞれのビンのエネルギー範囲の平均値をビンの代表としてみると、以下のグラフの、●のようなプロットができます。



具体的にこのようなグラフを作成するために、xの値をそれぞれのビンの中心値にしてみましょう。

0'	1
x ② = xのビンの中心値	y ②
keV	count/bin/sec
1.15E+00	3.25E+01
3.45E+00	1.68E+02
5.76E+00	9.22E+01
8.06E+00	4.40E+01
1.04E+01	2.39E+01
1.27E+01	1.35E+01
1.50E+01	7.33E+00
1.73E+01	4.56E+00
2.07E+01	4.67E+00
2.53E+01	1.70E+00
2.99E+01	9.06E-01
3.45E+01	7.15E-01

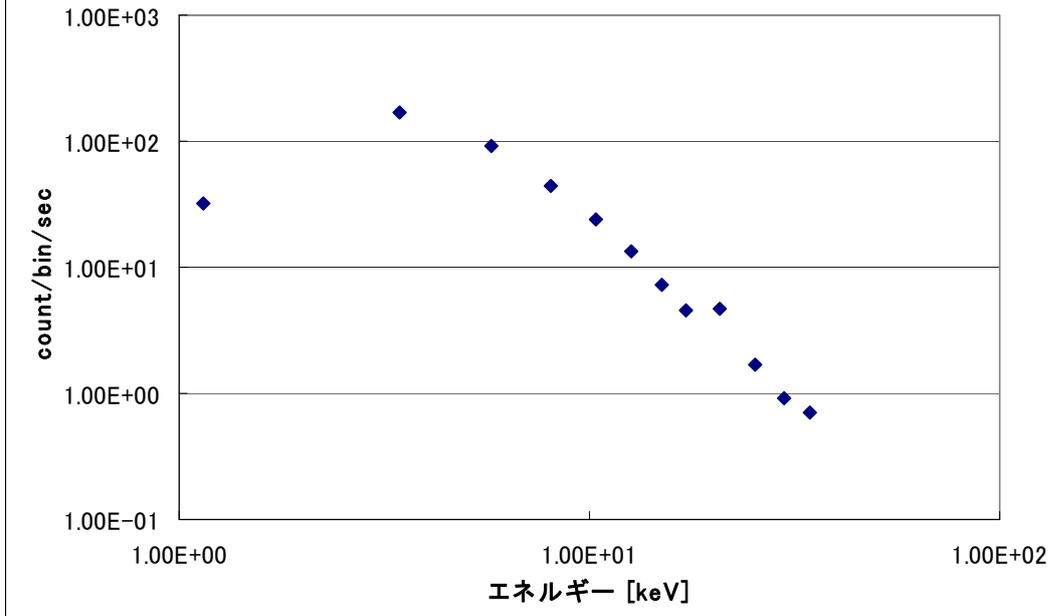
これを新たなxの値として、(yの値はそのまま) 散布図を作成してみましょう。以下のようなグラフができるはずで  
す。



棒グラフを点のプロットにすることはできましたが、yの値(つまり各エネルギー範囲での1秒間当たりの光子の検出数)が、xの値(つまりエネルギー範囲)によって桁も違うことから、このグラフではエネルギー範囲の大きなところでyの値が分かりにくくなっています。

そこで全ての観測値をすっきりと見通すことができるように、x軸、y軸共に**対数目盛り**にしてみましょう。以下のようなグラフができるはずで  
す。

表 ②



## 【Excel の操作】

### ◎xのビンの中心値の計算方法

xのビンの中心値を計算するために、yの誤差の列の右隣に列を挿入しましょう。

右の例のように、列の意味や単位も書いておくと分かりやすいでしょう。

今挿入した列の一番上のセルに、「 $= (B4+B5)/2$ 」と打ち込みましょう。この式はB4のセルの数値とB5のセルの数値を足して2で割るという意味です。セルの番号を打ち込む代わりに、セルをクリックすることでも同じ計算が可能です。B4はグラフ上では一番左のビンの左端の値、B5は一番左のビンの右端の値ですから、その和を2で割ったものは、グラフの一番左のビンの中心値を求めていることになります。**Enter** キーを押すとセルに計算結果が表示されます。

	A	B	C	D	E	G
1	データ番号	0		1	2	0'
2	グラフ上での意味	x ①	1つのビンの幅	y ①	yの誤差	x ②③ =xのビンの中心値
3	単位	keV	keV/bin	count/bin/sec	count/bin/sec	keV
4	観測値	0.00E+00	2.30E+00	3.25E+01	1.27E-01	$= (B4+B5)/2$
5		2.30E+00	2.30E+00	1.68E+02	2.73E-01	
6		4.60E+00	2.31E+00	9.22E+01	2.07E-01	
7		6.91E+00	2.30E+00	4.40E+01	1.46E-01	
8		9.21E+00	2.29E+00	2.39E+01	1.10E-01	
9		1.15E+01	2.30E+00	1.35E+01	8.64E-02	
10		1.38E+01	2.30E+00	7.33E+00	6.83E-02	
11		1.61E+01	2.30E+00	4.56E+00	5.81E-02	
12		1.84E+01	4.60E+00	4.67E+00	7.49E-02	
13		2.30E+01	4.60E+00	1.70E+00	6.14E-02	
14		2.76E+01	4.60E+00	9.06E-01	5.69E-02	
15		3.22E+01	4.60E+00	7.15E-01	5.51E-02	
16	3.68E+01					

同様に、他のビンの中心値も「 $= (B5+B6)/2$ 」、「 $= (B6+B7)/2$ 」と打ち込むことで計算することができます。

しかし、Excelには大変便利な機能があって、同じ計算を繰り返し打ち込まなくても自動的に計算してくれる機能があります。

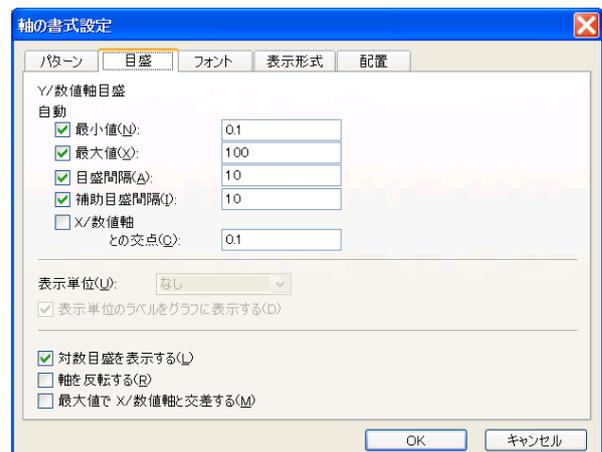
先ほど計算したセルをクリックします。セルの右下にマウスポインタを合わせて、計算を続けたいセルまでドラッグ&ドロップします。すると、ドロップしたセルまで、先ほどと同じ計算が自動的に行われます。

	A	B	C	D	E	G
1	データ番号	0		1	2	0'
2	グラフ上での意味	x ①	1つのビンの幅	y ①	yの誤差	x ②③ =xのビンの中心値
3	単位	keV	keV/bin	count/bin/sec	count/bin/sec	keV
4	観測値	0.00E+00	2.30E+00	3.25E+01	1.27E-01	1.15E+00
5		2.30E+00	2.30E+00	1.68E+02	2.73E-01	3.45E+00
6		4.60E+00	2.31E+00	9.22E+01	2.07E-01	5.76E+00
7		6.91E+00	2.30E+00	4.40E+01	1.46E-01	8.06E+00
8		9.21E+00	2.29E+00	2.39E+01	1.10E-01	1.04E+01
9		1.15E+01	2.30E+00	1.35E+01	8.64E-02	1.27E+01
10		1.38E+01	2.30E+00	7.33E+00	6.83E-02	1.50E+01
11		1.61E+01	2.30E+00	4.56E+00	5.81E-02	1.73E+01
12		1.84E+01	4.60E+00	4.67E+00	7.49E-02	2.07E+01
13		2.30E+01	4.60E+00	1.70E+00	6.14E-02	2.53E+01
14		2.76E+01	4.60E+00	9.06E-01	5.69E-02	2.99E+01
15		3.22E+01	4.60E+00	7.15E-01	5.51E-02	3.45E+01
16	3.68E+01					

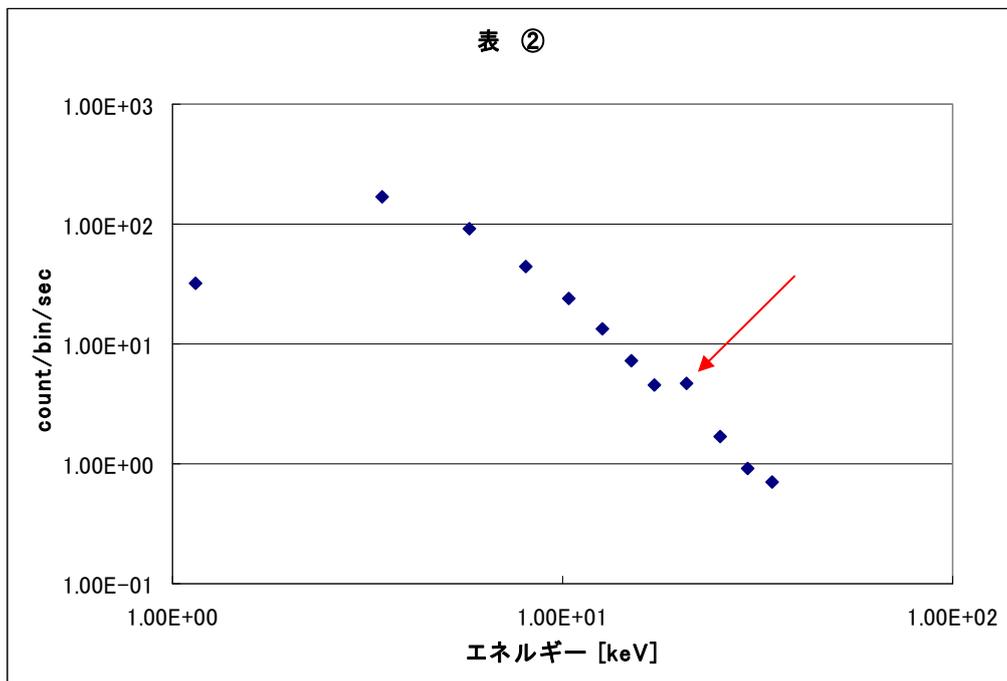
### ◎対数目盛りへの変更

目盛りを対数表示にしたい場合は、対数目盛りにしたい軸の目盛りの数字の上で右クリックをします。

「軸の書式設定」-「目盛り」で、「対数表示にする」にチェックを入れます。



データを正確に反映した、対数目盛りのグラフを作成しましたが、グラフを見て何かおかしいと思うことはありませんか。グラフをよく見てみると、右から4つ目の点だけ飛び出しているように見えますね。



これはこのエネルギー範囲だけ偶然多くの光子が検出された、というわけではありません。

実はグラフがこのようになるのは、左から8つ目までの点と、左から9つ目以降の点では、x軸の1つのビンが示すエネルギー範囲(つまり1ビンの幅)が変わっているためです。

ビン幅を変えている理由は主に二つあります。

一つは、高いエネルギーの光子の観測数が少なくなるため、1つのビンのエネルギー範囲を大きくして観測される光子の数を稼いでいるためです。

もう一つの理由は、このようにエネルギー範囲の高い観測範囲でビン幅を大きくすることで、比例計数管の性能を十分に発揮するためです。

ビン幅がエネルギー分解能より小さいとき、比例計数管の性能を十分に生かすことができます。比例計数管のエネルギー分解能はエネルギー  $E$  に対して  $\sqrt{E}$  の割合で大きくなります(つまりエネルギー分解能は、エネルギー範囲が高いほど悪くなります)。ですから、エネルギー範囲によってビン幅を変えることによって、常にビン幅がエネルギー分解能より小さくなるように保っているのです。

具体的にエネルギー範囲の幅を計算してみるとすぐに分かることですが、xの値の前後で引き算してみると、8個目

データ番号	0	
グラフ上での意味	x ①	1つのビンの幅
単位	keV	keV/bin
観測値	0.00E+00	2.30E+00
	2.30E+00	2.30E+00
	4.60E+00	2.31E+00
	6.91E+00	2.30E+00
	9.21E+00	2.29E+00
	1.15E+01	2.30E+00
	1.38E+01	2.30E+00
	1.61E+01	2.30E+00
	1.84E+01	4.60E+00
	2.30E+01	4.60E+00
	2.76E+01	4.60E+00
	3.22E+01	4.60E+00
3.68E+01		

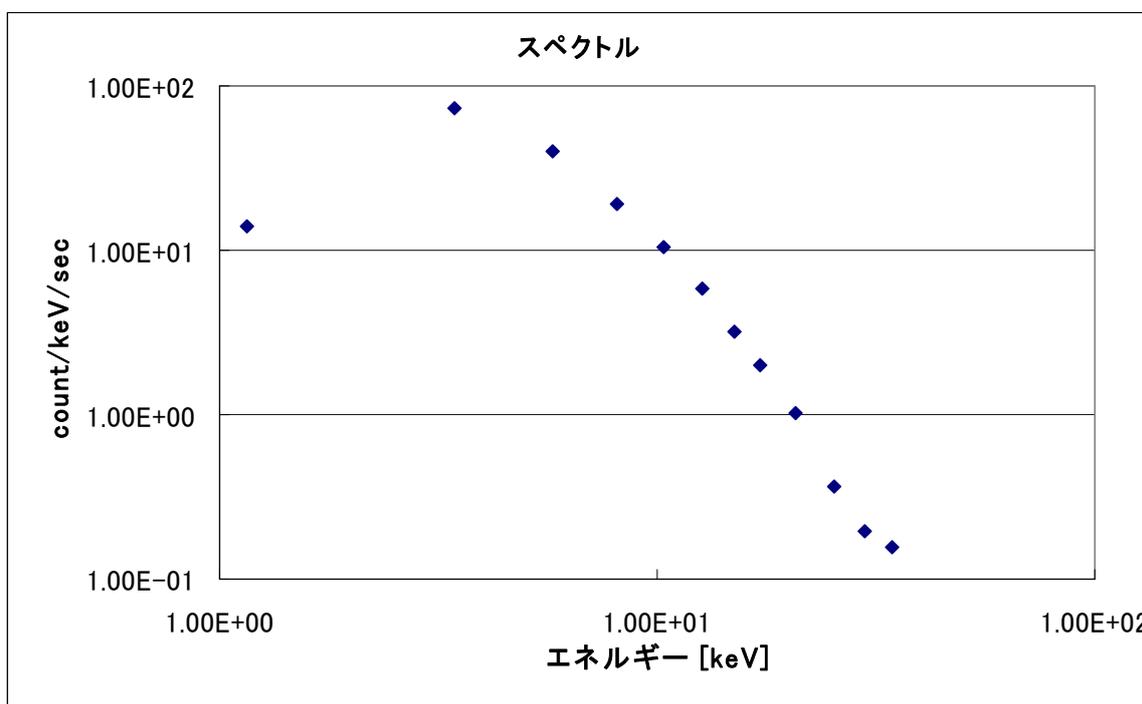
までのビンの幅はおよそ  $2.30\text{E}+00[\text{keV}]$ であるのに対し、9個目以降は  $4.60\text{E}+00[\text{keV}]$ と、それまでの2倍になっています。

例のように、Excel でデータ 0 の隣に 1 列挿入して、データ 0 の各数値間隔を計算してみるとよく分かります。

このビン幅の違いを消すために、y軸の値(1 ビン当たり 1 秒あたりの光子のカウント数[ $\text{count}/\text{bin}/\text{sec}$ ])をビン幅 [ $\text{keV}/\text{bin}$ ]で割ってみましょう。すると、y軸は

**1keV 当たり 1 秒あたりに検出する光子の平均の数[ $\text{count}/\text{keV}/\text{sec}$ ]**

となります。この数値をy軸③として、(x軸は②のグラフで使った値をそのまま使い)グラフを作成したものを以下に示します。



先ほどの不自然な飛び出しが修正されています。

今作成したグラフは

**各エネルギー範囲における、1keV 当たり 1 秒あたりに通過する平均の光子の数 ([ $\text{count}/\text{keV}/\text{sec}$ ])**

のグラフです。このグラフができたことによって、エネルギースペクトルをビン幅等によらない一般的な形に表現できたこととなります。

#### 4. 1. 4. 光度を求めよう

##### フラックスを求めよう

さて、別の章で、光度を用いて中性子星の質量を求めるためには、まずフラックスを求めることが必要であることを述べましたが、スペクトルのグラフからどのようにしてフラックスを求めるのでしょうか。

以前に述べたようにフラックスの単位は、 $[\text{keV}/\text{sec}/\text{m}^2]$  でしたね。つまり、

**フラックスとは観測装置  $1 \text{ m}^2$  当たり 1 秒間に通過する光子のエネルギー**

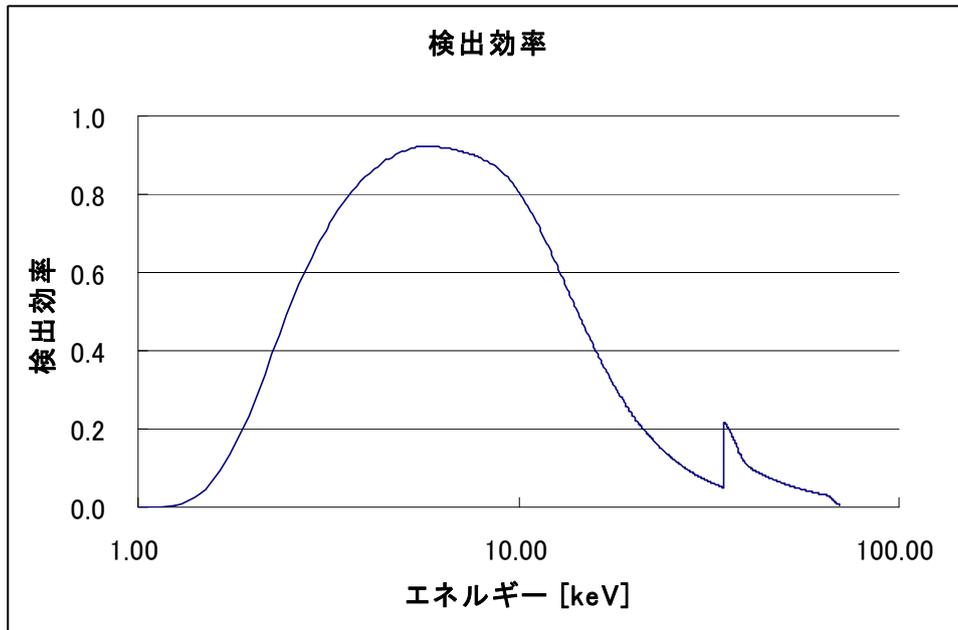
のことです。

そこでまず、 $1\text{keV}$  当たり 1 秒あたりに通過する光子の数 ( $[\text{count}/\text{keV}/\text{sec}]$ ) とした y 軸の値 (J 列) に、それぞれのビンの幅の中心値、つまりその観測区間における平均の光子のエネルギーをかけてみましょう。この値 (L 列) が意味するのは、「あるエネルギー範囲において 1 秒あたりに通過する光子」のエネルギーを合計したもの ( $\text{keV}/\text{sec}$ ) です。

## レスポンスを作用させよう

次に今得られた値(「あるエネルギー範囲において1秒あたりに通過する光子」のエネルギーを合計したものを)観測器の有効面積で割ってみましょう。観測器の面積は  $4000 \text{ [cm}^2\text{]}=0.4\text{[m}^2\text{]}$  です。

しかし、単純に観測器の面積で割ってはいけません。なぜなら観測するエネルギー範囲によって観測器の検出効率が異なるからです。以下のグラフを見てください。



このグラフは観測器の検出効率を表しています。例えばエネルギーが  $2\text{[keV]}$  付近の観測範囲では、検出効率は約  $0.4$  となっています。この値は、観測器の有効面積  $1\text{[cm}^2\text{]}$  を通過した光子のうち、約  $40\%$  の光子のみが検出されるということを意味しています(つまり検出器を通過しても検出されない光子が  $60\%$  もあるということです)。  $5\sim 7\text{[keV]}$  付近で最も効率が良くなり、検出器を通過した光子の約  $90\%$  が検出されます。

エネルギー範囲によって検出効率が異なることを考慮して、有効面積を計算してみましょう。

このエネルギー範囲によって異なる有効面積で、3. 1で求めたエネルギーを割ってみましょう。

この値(M列)を足しあげたものが フラックス  $\text{[keV/sec/cm}^2\text{]}$  です。ただし、  $1\text{[keV]}$  以下の観測範囲では検出効率が非常に悪いため、また  $20\text{[keV]}$  より大きな観測範囲では観測値に対する誤差が大きいため、  $2\sim 20\text{[keV]}$  の範囲の値を足し上げましょう。

以下の表が3. 1、3. 2で行った計算の例です。

1秒当たり通過する フォトン合計エネルギー	検出効率	有効面積		
keV/sec		m <sup>2</sup>	keV/sec/m <sup>2</sup>	
1.63E+01	0.00	0.00	3.06E+04	
2.52E+02	0.78	0.31	8.12E+02	
2.30E+02	0.92	0.37	6.22E+02	
1.54E+02	0.89	0.36	4.33E+02	
1.08E+02	0.77	0.31	3.51E+02	
7.43E+01	0.65	0.26	2.88E+02	
4.76E+01	0.45	0.18	2.64E+02	
3.42E+01	0.33	0.13	2.57E+02	
2.10E+01	0.21	0.09	2.45E+02	
9.35E+00	0.12	0.05	1.88E+02	
5.89E+00	0.08	0.03	1.93E+02	
5.36E+00	0.08	0.03	1.60E+02	
		flux	3.27E+03	[keV/sec/m <sup>2</sup> ]
		観測器の有効面積	0.4	[m <sup>2</sup> ]

MXB1608-52 のフラックスを、 $3.27 \times 10^3$  [keV/sec/m<sup>2</sup>]と求めることができました。

求めたフラックスから中性子星の光度を求めてみましょう。

さて、求めた**フラックス**から中性子星の光度を求めてみましょう。

光度の単位は[keV/sec]です。つまり、中性子星が1秒間あたりに放出するエネルギーのことです。またフラックス $f$ と光度 $L$ の関係は $L = 4\pi d^2 f$ でしたね。

ここで衛星とMXB1608-52の距離 $d$ を**銀河中心までの距離**(8[kpc])と仮定します。MXB1608-52までの距離は現在までに分かっていませんが、銀河中心方向に多くのX線源があり、MXB1608-52も銀河中心方向にあるので、距離もだいたい銀河中心までの距離としておこう、というおおざっぱな考え方です。

先ほど3.2で求めたMXB1608-52のフラックス $f$ は

$$f = 3.27 \times 10^3 [\text{keV/sec/m}^2]$$

でした。1[pc] =  $3.08568 \times 10^{16}$ [m]ですから、MXB1608-52の光度 $L$ は

$$\begin{aligned} L &= 4 \times \pi \times (8 \times 1000 \times 3.08568 \times 10^{16})^2 \times 3.27 \times 10^3 \\ &= 2.51 \times 10^{45} [\text{keV/sec}] \end{aligned}$$

と求めることができます。

この方法で中性子星の質量を求めるためには、考慮しなければならない点があります。

まず、この解析で求められた光度は、エディントンリミット(限界光度)よりは低いので、そこから求められた中性子星の質量も、実際の質量よりは必ず小さな値になるということです。

次に、本来であればエネルギー範囲を無限大まで考慮すべきであるから、エネルギー範囲を1~30[keV]に限って解析したこともまた、中性子星の質量を小さく求めることの原因になります。

そして、星間吸収を考慮していない点も中性子星の質量を小さく求めることの要因となります。中性子星から放出された光子は、検出器にたどり着くまでに星間吸収され、検出器にたどり着くときの光子のエネルギーは放出されたときの光子のエネルギーより小さくなっているはずだからです。

つまり、

- ◇ エディントンリミット(限界光度)の近くまで光度が大きくなっているときのデータを用いること
- ◇ エネルギーを無限大まで考慮すること
- ◇ 星間吸収を考慮すること

で、より大きな質量の下限值が求められるということです。

#### 4. 1. 5. 中性子星の質量を求めよう

さて、光度を求めることができたなら、あとは計算をするだけで**中性子星**の質量が求まります。

重力と**放射圧**のつりあう場合、 $G\frac{Mm_p}{r^2} = \frac{L_E}{4\pi r^2 c} \sigma_T$  となることは別の章で説明しました。そこから、**エディントンの限界光度**を  $L_E = \frac{4\pi GcMm_p}{\sigma_T}$  と表すことができることも確認しました。この関係を変形すれば、中性子星の質量 M は

$$M = \frac{L_E \sigma_T}{4\pi Gc m_p}$$

となり、計算だけで求めることができます。

4. 3で求めた光度は、**エディントンの限界光度**よりは低い光度であるはずなので、この計算で求められる中性子星の質量は実際の中性子星の質量より小さくなるはずで、つまり中性子星の質量の下限値が求められることとなります。

では実際に **MXB1608-52** の質量を求めてみましょう。計算に必要な定数を以下の表に示します。

物理量	文字	値	単位
光速	c	$3.00 \times 10^8$	m/s
万有引力定数	G	$6.67 \times 10^{-11}$	$\text{m}^3/\text{s}^2/\text{kg}$
プロトンの質量	$m_p$	$1.67 \times 10^{-27}$	kg
<b>トムソン散乱の断面積</b>	$\sigma$	$6.65 \times 10^{-29}$	$\text{m}^2$

以上の定数を式に当てはめて計算した結果、MXB1608-52 の質量の下限値を  $6.35 \times 10^{29}$  [kg]と求めることができました。

中性子星の質量は**太陽質量**程度であることから、太陽質量との比較をしてみましょう。太陽質量  $M_o$  は  $M_o = 1.99 \times 10^{30}$  [kg]

です。先ほど求めた MXB1608-52 の質量の下限値をこの太陽質量で割ってみると、

$$\frac{M}{M_o} = \frac{6.35 \times 10^{29}}{1.99 \times 10^{30}} = 0.32$$

となりますから、MXB1608-52 の質量の下限値は  $0.32M_o$  ということになります。

## 4. 2. 中性子星の半径の求め方

### 4. 2. 1. 序章

#### ①X線バーストとは

次は、中性子星の半径です。ここでは、X線バーストという現象を使います。

X線バーストは、磁石の性質を示さない(あるいは強くない)中性子星と考えられているX線星(強いX線を放射している天体)が、適当な条件を備えた場合に起こす現象です。中性子星の表面に他の星からの物質(主に水素とヘリウム)が降り積もり溜まってくると、どんどん圧縮され温度が上がります。やがて爆発的に核融合反応を起こし、熱くなって出てきたエネルギーをX線として放射します。この放射がX線バーストです。

#### ②光の色

次に、光の色の話をしましょう。

たとえば、身近な現象として炭火を考えてみましょう。炭火の輝きは、あまり熱くない時は赤く、たいして眩しくありませんが、温度が上がると熱くなると黄色っぽくなり輝きを増します。その中に鉄釘を入れてみると、しばらくすると鉄釘も同じような光を放ちます。では、なぜ、全く違う物質が同じ色の光を放つのでしょうか？答えは、温度の違いです。

光の色は、強さによって変化します。同じ色の光であれば、その光の強さは光を放っている物質によって変化することはありません。つまり、光輝く色と明るさは、その物質の温度だけで決まっているのです。ここで注意したいのは、炎のように向こうが透けて見えるものは別です。それらは、どのくらい透明かで明るさが変化し、また色によってどのくらい透明であるかが違うので、温度とは関係ない色を示すからです。ここで話題にしているのは、鉄釘や墨のような向こう側が透けて見えない物質のことで

これらは、色を見れば温度がわかり、単位面積あたりの明るさが決まっていますから、全明るさを測定すれば、光っている面積を逆算することができます。

#### ③半径の求め方

②で話した光の色の話は、X線です。温度を推定するために使う光の色というのは、光の波長分布(エネルギースペクトル)によって決まっていますが、X線の波長分布(エネルギースペクトル)を調べれば、X線を出しているものの温度が分かります。もし、それが「X線」で、透けて見えないようなものなら、単位面積あたりに出てくるX線の明るさは、その温度によって決っています。

中性子星も、向こう側が透けて見えるとは考えにくく、X線バーストのほとんどは中性子星の表面全体で起こると考えられているので、X線バーストの時の表面温度(X線のエネルギースペクトル)と、全体の明るさを決めてあげれば、半径を求めることができます。

この教材では、色光度図と黒体放射のモデルのグラフを用いて半径を求めます。X線天体は黒体放射していると仮定すると、半径と温度の関数で光度図上の点が決まります。両者を比較することで、半径を求めましょう。

それでは、実際にデータに触れながら、解析方法を説明していきましょう。半径を求めるまでの大まかな流れは、以下のようになっています。

1. 光度曲線を作成しよう。
2. 色光度図を作成しよう。
3. プランクの式を用いて、黒体放射モデルを作成しよう。
4. 色光度図と黒体放射モデルを用いて、中性子星の半径を求めましょう。
5. 結果を考察しよう。

## 4. 2. 2. 光度曲線

### ①ぎんが衛星のデータを見てみよう

光度曲線とは、決められた時間間隔に観測された光子の個数を時系列で表したグラフです。光度曲線を作成するためのデータは、図1のように保存されています。

まずは、このデータが何を表されているか理解しましょう。

	A	B	C	D	E
1	TIME	COUNTS-1	COUNTS-2	COUNTS-3	COUNTS-4
2	sec	count	count	count	count
3	0.00E+00	31	104	127	18
4	1.00E+00	29	95	112	23
5	2.00E+00	32	103	94	25
6	3.00E+00	22	90	118	18
7	4.00E+00	40	116	101	22
8	5.00E+00	34	114	101	20
9	6.00E+00	23	109	115	21

図1 Excel1

A 列は、A3を原点とした観測経過時間を表しています。これを光度曲線の X 軸とします。

また、B～E 列は、1秒あたりに検出器が検出した光子の数[count/sec]を表しています。これが、光度曲線の Y 軸になります。B～E 列のデータの違いは、エネルギー範囲の違いです。この4種類のエネルギー範囲は、表1の通りです。

COUNTS-1	0.75～2.85 [keV]
COUNTS-2	2.85～9.00 [keV]
COUNTS-3	0.75～7.90 [keV]
COUNTS-4	7.90～12.2 [keV]

表1 エネルギー範囲

例えば、B 列の6行目は、観測を始めてから3秒後～4秒後の間に検出器が検出した、エネルギー0.75～2.85[keV]を持った光子の数[count/sec]は 22 個であったと読み取ることができます。

今回は、COUNT-3 と COUNT-4のデータを用います。

### ②データを見やすく編集しよう

まず、見やすくする為に、使用しない COUNT-1 と COUNT-2 のデータを削除しましょう。また、エネルギー範囲が一目で分かるように、図2のように、エネルギー範囲も書き込みましょう。

	A	B	C
1	TIME	COUNTS-3	COUNTS-4
2		(0.75-7.9)keV	(7.9-12.2)keV
3	sec	count	count
4	0.00E+00	127	18
5	1.00E+00	112	23
6	2.00E+00	94	25
7	3.00E+00	118	18
8	4.00E+00	101	22

図2 Excel2

③光度曲線のグラフを作成しよう

図2で作成した表からグラフを作成してみましょう。

A 列を X 軸、B 列 C 列を Y 軸としたグラフを作成すると、図3のようなグラフができるはずです。

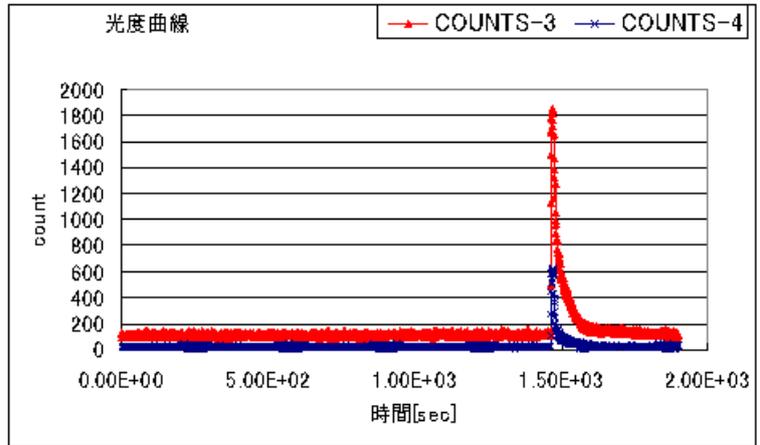


図3 光度曲線1

このグラフから、 $1.50 \times 10^3$  [sec]付近で観測された光子の数が急増していることがわかります。この部分が X 線バーストです。中性子星の半径を求めるには、このバースト部分のデータが必要になります。

さて、このグラフ、よく見るとバースト部分以外でも、光子が検出されていることが分かります。ここでは、X 線バーストの成分だけを調べましょう。色光度図を作成する際に、バースト以外のデータは必要ないので削除しましょう。

ここでは、バックグラウンドは各エネルギー範囲でのバースト以外の平均値と設定します。

今回使用したデータのバースト以外の平均値を引いた後のデータは、以下のように変化します。

	A	B	C	D	E
1	TIME	COUNTS-3	COUNTS-4	BGDを引いた3	BGDを引いた4
2		(0.75-7.9)keV	(7.9-12.2)keV	(0.75-7.9)keV	(7.9-12.2)keV
3	sec	count/sec	count/sec	count/sec	count/sec
4	0.00E+00	127	18	4.2693	-7.25778
5	1.00E+00	112	23	-10.7307	-2.25778
6	2.00E+00	94	25	-28.7307	-0.25778
7	3.00E+00	118	18	-4.7307	-7.25778
8	4.00E+00	101	22	-21.7307	-3.25778
9	5.00E+00	101	20	-21.7307	-5.25778
10	6.00E+00	115	21	-7.7307	-4.25778
11	7.00E+00	100	17	-22.7307	-8.25778
12	8.00E+00	110	22	-12.7307	-3.25778

図4 Excel3

今度は、A列をX軸、D列E列をY軸としたグラフを作成してみましょう。

すると、図5のようなグラフができあがるはずです。

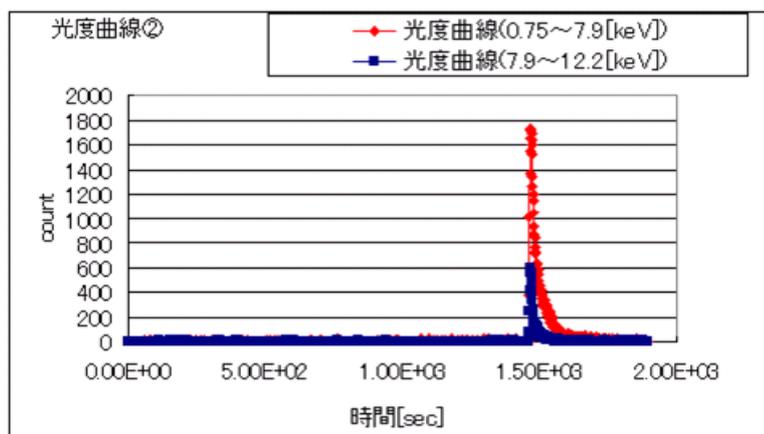


図5 光度曲線2

次のページでは、この光度曲線のデータを用いて、色光度図を作成します。

### 4. 2. 3. 色光度図

#### ①色光度図とは

色光度図は、光度曲線の低エネルギー範囲(0.75～7.9keV)と高エネルギー範囲(7.9～12.2keV)でのカウント数の比率を2次元で表す方法です。

今回は、全エネルギー範囲のカウント数の合計に対する比率をグラフ化します。

#### ②色光度図の X 軸と Y 軸の値を計算しよう

①で説明したように、色光度図の X 軸は全エネルギー範囲のカウント数の合計、Y 軸は、低エネルギー範囲(0.75～7.9keV)と高エネルギー範囲(7.9～12.2keV)でのカウント数の比率とします。計算した値のエクセルシートを図6に示します。

F 列が X 軸の値、G 列が Y 軸となります。

	A	B	C	D	E	F	G
1	TIME	COUNTS-3	COUNTS-4	BGDを引いた3	BGDを引いた4	count3+count4	count4/count3
2		(0.75-7.9)keV	(7.9-12.2)keV	(0.75-7.9)keV	(7.9-12.2)keV	(0.75-12.2)keV	(0.75-12.2)keV
3	sec	count/sec	count/sec	count/sec	count/sec	count/sec	
4	0.00E+00	127	18	4.2693	-7.25778	-2.98848	-1.699992973
5	1.00E+00	112	23	-10.7307	-2.25778	-12.98848	0.210403795
6	2.00E+00	94	25	-28.7307	-0.25778	-28.98848	0.008972284
7	3.00E+00	118	18	-4.7307	-7.25778	-11.98848	1.53418733
8	4.00E+00	101	22	-21.7307	-3.25778	-24.98848	0.149916017
9	5.00E+00	101	20	-21.7307	-5.25778	-26.98848	0.241951709
10	6.00E+00	115	21	-7.7307	-4.25778	-11.98848	0.550762544
11	7.00E+00	100	17	-22.7307	-8.25778	-30.98848	0.363287536
12	8.00E+00	110	22	-12.7307	-3.25778	-15.98848	0.255899518
13	9.00E+00	101	20	-21.7307	-5.25778	-26.98848	0.241951709
14	1.00E+01	104	19	-18.7307	-6.25778	-24.98848	0.334092159

図6 Excel4

計算した値をグラフ化すると、図7のグラフが出来上がります。

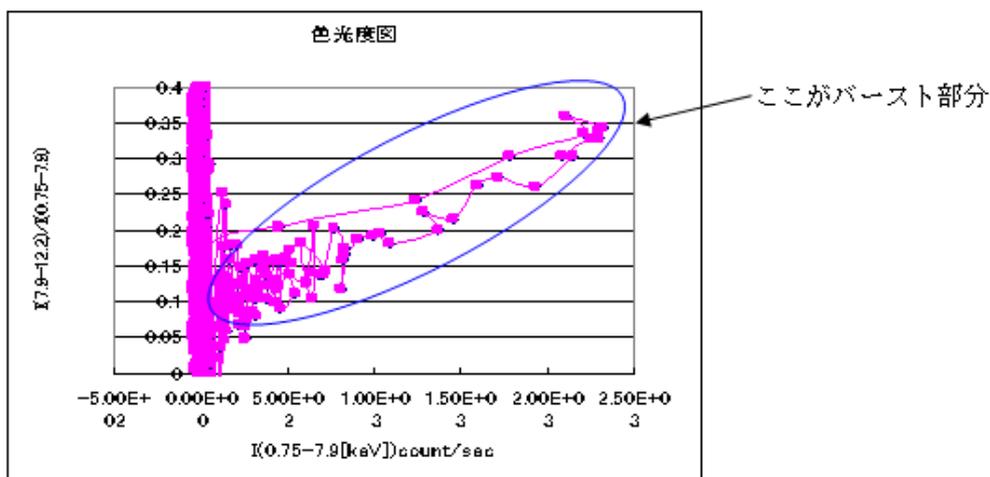


図7 色光度図

#### 4. 2. 4. 黒体放射

つぎに、黒体放射のモデルとなるグラフを作成します。

##### ①黒体放射

一般に、物体はその温度に応じて熱輻射と呼ばれる電磁波を放出しています。理想的な熱放射物体を黒体と呼びます。この黒体が出す電磁波は黒体放射と呼ばれる連続スペクトルを示します。スペクトルの形は温度によって一意的に決まり、温度  $T$  において、波長  $\lambda$  の電磁波の黒体放射強度  $B(\lambda, T)$  は

$$B(\lambda, T)d\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right) - 1} d\lambda \quad \dots\dots\dots ① \quad \begin{array}{l} \lambda : \text{波長} \quad T : \text{温度} \\ h : \text{プランク定数} \quad c : \text{光速} \end{array}$$

で表され、これをプランク分布と言います。

放射する全エネルギー  $E$  は、①を積分して、

Stefan-Boltzman の法則  $E = \sigma T^4 \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \dots\dots\dots ②$

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2} = 5.6704 \times 10^{-8} \quad [\text{w} \cdot \text{m}^{-2} \text{k}^{-4}] \quad \dots\dots\dots ③$$

です。

①の式に対して、変数を  $(\lambda, T)$  から  $(E, T)$  に変えると、

プランクの式は  $B(E, T)dE = \frac{2E^3}{h^3 c^2} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{E}{kT}\right) - 1} dE \quad \dots\dots\dots ①'$

①' は、単位面積あたりの photon の分布です。ここで、 $1[\text{cm}^2]$  あたり、 $1[\text{keV}]$  あたり、 $1[\text{s}]$  あたりの photon の分布にするため、①' 式を全エネルギー  $E$  で割ります。

すると、最終的に用いるプランクの式は、立体角も考慮に入れ計算すると、

$$B(E, T)dE = \frac{2E^2}{h^3 c^2} \cdot \frac{\pi}{\exp\left(\frac{E}{kT}\right) - 1} dE \quad \dots\dots\dots ①''$$

です。観測地での単位面積あたりを通る photon の数  $F$  は、

$$\begin{aligned} F(E, T)dE &= B(E, T) \times 4\pi r^2 \times \frac{1}{4\pi d^2} dE && r : \text{中性子星の半径} \\ &= B(E, T) \frac{r^2}{d^2} dE && d : \text{中性子までの距離} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots ④$$

です。

ゆえに、エネルギー範囲が  $E_1 \sim E_2$  で抽出される光子のカウント数は、次のように計算できます。

$$I_{E_1-E_2} = \int_{E_1}^{E_2} A(E) \times B(E, T) \times \frac{r^2}{d^2} dE \quad \dots\dots\dots ⑤$$

ここで、応答関数の有効面積を  $A(E)$  とします。

### ③黒体放射モデルの作成

それでは、1つひとつ計算していきましょう。

黒体放射のデータは、以下のように保存されています。

まず、このデータの中身を理解しましょう。

3種類のデータが保存されています。

A 列 B 列は、エネルギーの平均値と幅を示します。  
C 列以降のデータは、 $A \pm B[\text{keV}]$  のエネルギー範囲のデータです。

また、C 列は大面積計数管の検出効率を示します。

例えば、エネルギー範囲が

$0.0001(= A6 - B6) \sim 0.1(= A6 + B6)[\text{keV}]$  の光子の検出効率は  $0(= C6)$  であると読み取ります。

	A	B	C
1			
2	READ	SERR	1.00E+00
3	@eff.pco		
4			
5	KeV	bin/2	eff
6	0.05005	0.04995	0.00E+00
7	0.15	0.05	0.00E+00
8	0.25	0.05	0.00E+00
9	0.35	0.05	0.00E+00
10	0.45	0.05	0.00E+00
11	0.55	0.05	0.00E+00
12	0.65	0.05	0.00E+00
13	0.75	0.05	0.00E+00
14	0.85	0.05	0.00E+00

図8 Excel5

ここで、A 列を X 軸、C 列を Y 軸としたグラフを作成すると、図9のようなグラフが出来上がります。このグラフは、検出器のエネルギーと検出効率の関係を表しています。

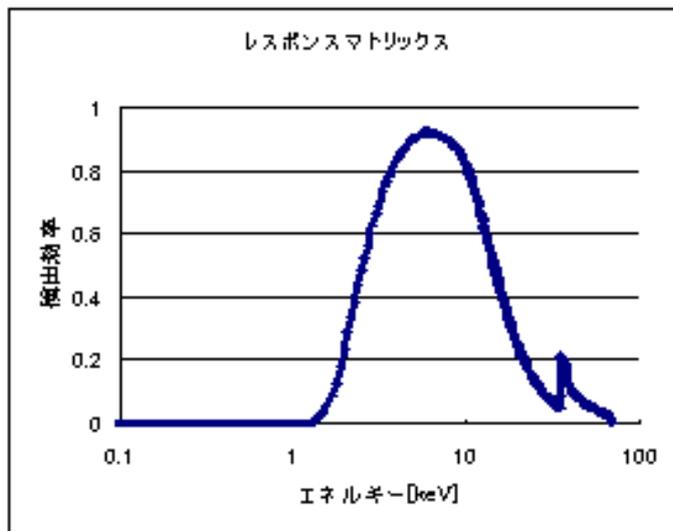


図9 検出効率

グラフから分かるように、この検出器は、エネルギー2～20[keV]付近の光子を効率よく検出します。

次に、分光輝度・黒体放射モデルの値を計算する準備をしましょう。

	A	B	C	D	E	F	G
1	READ	SERR	1.00E+00	h[keVs]=	4.13608E-18	c=	3.00E+10
2	@eff.pcc			8kpc^2[cm^2]=	6.08379E+44		
3					↓d行×4360		
4					有効面積A		
5	KeV	bin/2	bin	eff	(cm^2)		
6	0.05005	0.04995	0.0999	0.00E+00	0.00E+00		
7	0.15	0.05	0.1	0.00E+00	0.00E+00		
8	0.25	0.05	0.1	0.00E+00	0.00E+00		
9	0.35	0.05	0.1	0.00E+00	0.00E+00		
10	0.45	0.05	0.1	0.00E+00	0.00E+00		
11	0.55	0.05	0.1	0.00E+00	0.00E+00		
12	0.65	0.05	0.1	0.00E+00	0.00E+00		
13	0.75	0.05	0.1	0.00E+00	0.00E+00		
14	0.85	0.05	0.1	0.00E+00	0.00E+00		
15	0.95	0.05	0.1	1.02E-05	2.23E-02		
16	1.05	0.05	0.1	1.88E-04	4.09E-01		
17	1.15	0.05	0.1	1.32E-03	2.88E+00		
18	1.25	0.05	0.1	5.42E-03	1.18E+01		
19	1.35	0.05	0.1	1.54E-02	3.36E+01		
20	1.45	0.05	0.1	3.38E-02	7.37E+01		

① × 2
② × 4360

図 10 Excel6

- ① X 軸の幅を計算しよう
- ② 有効面積を計算しよう

有効面積は、

$$\text{有効面積} = \text{検出器の有効面積} \times \text{検出効率}$$

です。ここで、4360 を掛けたのは、LAC の検出器有効面積(8台統計)が ~ 4360cm<sup>2</sup> だからです。

- ③ 分光輝度・黒体放射モデルの値を計算する時に必要なプランク定数h・光速度c・中性子星までの距離dを、単位を揃えましょう。

プランク定数h

プランク定数は、一般的に  $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ [J}\cdot\text{s]}$  と知られていますが、ここでは、他の値と単位を揃えるために、[keV・s]に直します。

1J = 6.242 × 10<sup>15</sup> [keV]なので、

$$\begin{aligned}
 h &= 6.626 \times 10^{-34} \times (6.242 \times 10^{15}) \\
 &= 4.13608 \times 10^{-18} \quad \text{[keV}\cdot\text{s]}
 \end{aligned}$$

となります。

光速度c

光の速さは、3.0 × 10<sup>8</sup> [m/s]と知られています。これを[cm/s]に直します。単に 1m=100cm という式を用いるだけなので、光の速さは、3.0 × 10<sup>10</sup> [cm/s]となります。

### 中性子星までの距離d

今回は、線源までの距離を 8[kpc]とした。これは、今回利用した天体が銀河中心の近くにあると仮定したからです。

$$\begin{aligned} 1[\text{pc}] &= 3 \times 10^4 \times 10^{12} [\text{m}] \\ &= 3.0857 \times 10^{16} [\text{m}] \\ &= 3.0857 \times 10^{18} [\text{cm}] \end{aligned}$$

なので、

$$\begin{aligned} 8[\text{kpc}] &= 8 \times 10^3 \times 3.0857 \times 10^{18} [\text{cm}] \\ &= 2.4686 \times 10^{22} [\text{cm}] \end{aligned}$$

となります。

後に、エネルギーバンドでの抽出されるカウント数を求める際に、 $d^2$  の値が必要なので、先に計算しておきましょう。すると、

$$\begin{aligned} (8[\text{kpc}])^2 &= (2.4686 \times 10^{22})^2 [\text{cm}^2] \\ &= 6.094 \times 10^{44} [\text{cm}^2] \end{aligned}$$

となります。

これで、黒体放射モデルを作成する準備ができました。

それでは、

$$I_{E_1-E_2} = \int_{E_1}^{E_2} A(E) \times B(E, T) \times \frac{r^2}{d^2} dE$$

の値を計算していきましょう。

まず、 $r = 10\text{km}$ ,  $kT = 1.0$ の時の  $B(E, T)dE = \frac{2E^2}{h^3c^2} \cdot \frac{\pi}{\exp(E/kT) - 1} dE$

の値を計算します。

Excel での計算式は下の図のようになります。

1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1						h[keVs]=	4.136E-18		c=	3.00E+10
2	READ	SERR		1.00E+00		8kpc^2[cm^2]=	6.094E+44			
3	@eff.poo									
4										
5										
6						10km				
7					↓df行×4360	kT[keV]=	1.00E+00			
8	KeV	bin/2	bin	eff	有効面積A (cm^2)	R^2=	1E+12			
9	0.05005	0.04995	0.0999	0.00E+00	0.00E+00					
10	0.15	0.05	0.01	0.00E+00	0.00E+00					
11	0.25	0.05	0.01	0.00E+00	0.00E+00					
12	0.35	0.05	0.01	0.00E+00	0.00E+00					
13	0.45	0.05	0.01	0.00E+00	0.00E+00					
14	0.55	0.05	0.01	0.00E+00	0.00E+00					
15	0.65	0.05	0.01	0.00E+00	0.00E+00					
16	0.75	0.05	0.01	0.00E+00	0.00E+00					

図 11 Excel7

この計算をすべてのエネルギー範囲で行いましょう。

では、次に  $I = A(E) \times B(E, T) \times \frac{r^2}{d^2} dE$  の値を計算しましょう。

1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1						h[keVs]=	4.1361E-18		c=	3.00E+10
2	READ	SERR		1.00E+00		8kpc^2[cm^2]=	6.0938E+44			
3	@eff.poo									
4										
5										
6						10km				
7					↓df行×4360	kT[keV]=	1.00E+00			
8	KeV	bin/2	bin	eff	有効面積A (cm^2)	R^2=	1E+12			
9	0.05005	0.04995	0.0999	0.00E+00	0.00E+00					
10	0.15	0.05	0.01	0.00E+00	0.00E+00					
11	0.25	0.05	0.01	0.00E+00	0.00E+00					
12	0.35	0.05	0.01	0.00E+00	0.00E+00					
13	0.45	0.05	0.01	0.00E+00	0.00E+00					
14	0.55	0.05	0.01	0.00E+00	0.00E+00					
15	0.65	0.05	0.01	0.00E+00	0.00E+00					
16	0.75	0.05	0.01	0.00E+00	0.00E+00					

図 12 Excel8

この計算を  $r[\text{km}] = 5, 10, 15, 20$   $kT[\text{keV}] = 1.0, 1.5, 2.0, 2.5$  と変化させ計算します。

黒体放射モデルにおいても、色光度図を作成するため、

X 軸: 全エネルギー範囲のカウント数の合計

Y 軸: 低エネルギー範囲(0.75-7.9keV)と高エネルギー範囲(7.9-12.2keV)でのカウント数の比率を計算します。

まず、2つの各エネルギー範囲でのカウント数は、エネルギー範囲内の

$$I = A(E) \times B(E, T) \times \frac{r^2}{d^2} dE$$

となります。

これが、3-1 で説明した  $I_{E_1-E_2} = \int_{E_1}^{E_2} A(E) \times B(E, T) \times \frac{r^2}{d^2} dE$  の値です。

各エネルギー範囲での各温度での計算結果は、以下の表のようになります。

	5km			
	1.00E+00	1.50E+00	2.00E+00	2.50E+00
0.75-7.9[keV]	89.067873	380.08759	884.09464	1549.433
7.9-12.2[keV]	2.1674873	45.618849	221.03146	585.4432
sum	91.23536	425.70644	1105.1261	2134.876
高エネルギー/低エネルギー	0.0243352	0.1200219	0.2500088	0.377843
	10km			
0.75-7.9[keV]	356.27149	1520.3504	3536.3786	6197.733
7.9-12.2[keV]	8.6699492	182.4754	884.12585	2341.773
sum	364.94144	1702.8257	4420.5044	8539.506
高エネルギー/低エネルギー	0.0243352	0.1200219	0.2500088	0.377843
	15km			
0.75-7.9[keV]	801.61085	3420.7883	7956.8518	
7.9-12.2[keV]	19.507386	410.56964	1989.2832	
sum	821.11824	3831.3579	9946.1349	
高エネルギー/低エネルギー	0.0243352	0.1200219	0.2500088	
	20km			
0.75-7.9[keV]	1425.086	6081.4014		
7.9-12.2[keV]	34.679797	729.90158		
sum	1459.7658	6811.303		
高エネルギー/低エネルギー	0.0243352	0.1200219		

表2 計算結果

これをグラフ化すると、図 13 のようなグラフが出来上がります。

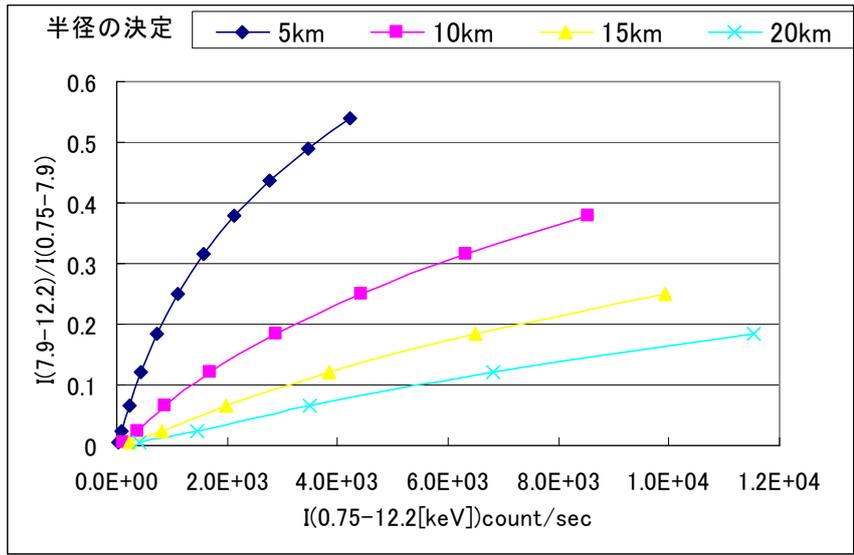


図 13 黒体放射モデルの色光度図

これが、黒体放射モデルの色光度図になります。

#### 4. 2. 5. 中性子星の半径を求めよう

①2つのグラフを重ねてみよう

4-2-3で作成した色光度図のグラフと4-2-4で作成した黒体放射モデルのグラフを重ねてみましょう。  
この2つを重ねると、図14のようなグラフになります。

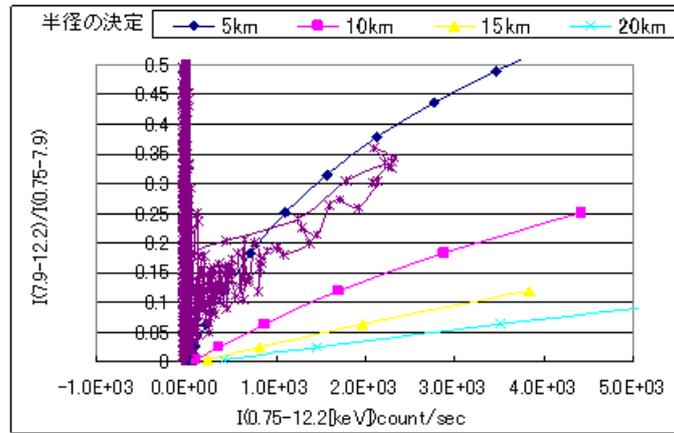


図14 半径の決定1

Y軸が0.5以上のデータはバーストではない所のデータなので、図14では、0.0~0.5の部分拡大してみました。  
温度の線も結び、見やすいように色を統一すると、図15のグラフになります。

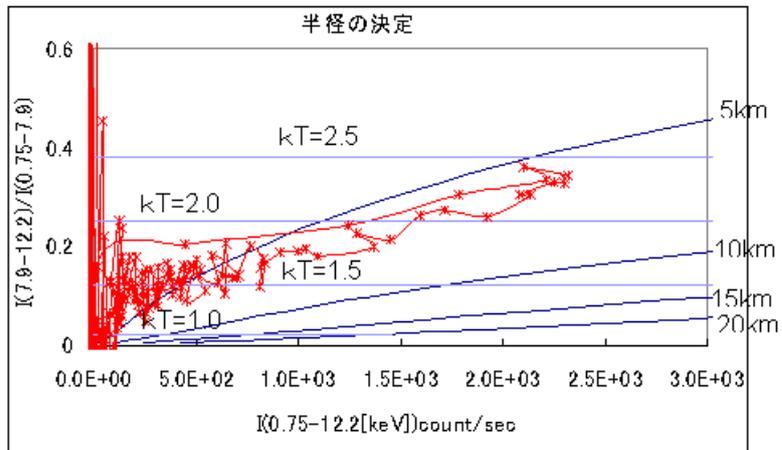


図15 半径の決定2

この図から何が分かるのか、次の4. 2. 6で考えてみましょう。

②結果から半径を求めよう

もう1度、図 15 を表示します。

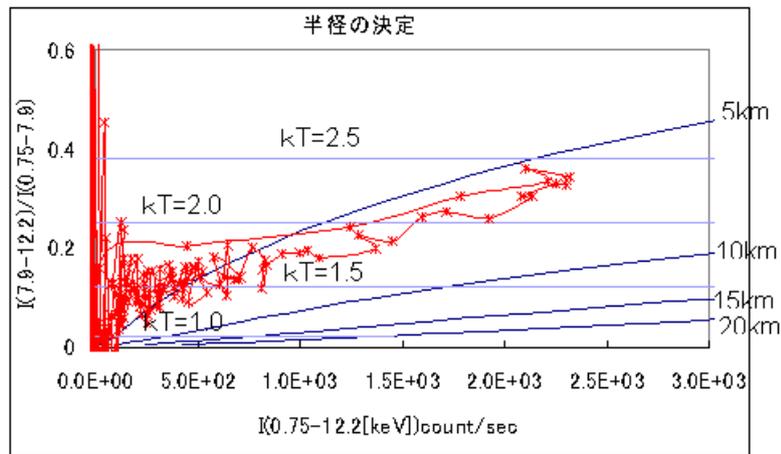


図 15 半径の決定②

図 15 より、バーストのデータは、 $r = 7km$  近くに、データが散布しています。バースト中は中性子星表面全体が黒体放射していると考えると、mx1608-52 の半径  $r$  は、 $r \approx 7km$  であることが分かります。

また、このグラフから線源の温度変化をも見ることができます。バーストが起きた時直後は高温で、半径が7km 付近だが、温度が下がると共に半径が大きくなり、やがて、また半径7km 付近に落ち着くことが分かります。



## 参考文献

『ABC Guide to the Ginga Data Analysis The ISAS Ginga Archive Team』

『ISASぎんが特集号』

<http://www.isas.jaxa.jp/j/isasnews/backnumber/1992/ISASnews130.pdf>

『科学衛星 ASTRO-C(M-3S II-3)計画書』

第2次飛翔実験 宇宙科学研究所 昭和 61 年 10 月

『知恵蔵 2007』

[http://www.shokabo.co.jp/sample/star/xbs/disk-xbs/xbs\\_.htm](http://www.shokabo.co.jp/sample/star/xbs/disk-xbs/xbs_.htm) (株)朝日新聞出版発行

『岩波基礎物理シリーズ 9 相対性理論』

佐藤勝彦著 岩波書店

『中性子星とパルサー』

柴崎徳明著 株式会社 培風館 1993 年 6 月 5 日発行

『ポピュラーサイエンス「X 線でさぐるブラックホール—X 線天文学入門—」』

北本俊二著 株式会社 裳華房 1998 年 5 月 25 日発行

『ブラックホールと高エネルギー現象』

小山勝二・嶺重慎 2007 年