

鉄輝線を用いた活動銀河核トラスの見込み角の推定

広島大学 理学部 物理科学科
高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室
B075257
林 数馬

2011年2月10日

概要

我々の住む宇宙には活動銀河核 (AGN) と呼ばれる天体がある。AGN はとても明るく輝いており、様々な観測から中心に巨大なブラックホール、降着円盤、トーラスなどの構造があると考えられている。トーラスとは降着円盤のまわりを覆っているドーナツ状のとても厚い吸収体のことである。AGN の構造に制限を与えるものとして X 線鉄輝線のコンプトンショルダーがある。コンプトンショルダーとは輝線の低エネルギー側に伸びる構造のことで、輝線の一部がコンプトン散乱した結果生じる。X 線連星では発見されており、AGN にも同じ構造があると考えられるがまだ見つからない。現在トーラスをどの角度から見ているのかは分かっていない。しかしコンプトンショルダーの形は見ている角度によりその形状が変わるため、その形状が分かればトーラスを見込む角度を決定し、AGN の構造に制限を与えることができる。

本研究では Geant4 によるモンテカルロシミュレーションを用いることで AGN の X 線スペクトルを再現し、その反射成分の角度依存性について調べた。また実際に観測されたスペクトルと比較をすることで、その観測可能性を調べた。

目次

图 目 次

第1章 活動銀河核

我々の住むこの宇宙には様々な天体が無数に存在する。それらの天体は、電波、赤外線、可視光、紫外線、X線、 γ 線などの幅広い波長で観測されている。本研究で扱うX線では、中性子星やブラックホール、超新星残骸などの宇宙の高エネルギー天体を観測することができる。

そのような高エネルギー天体の中に活動銀河核 (AGN) と呼ばれるものがある。AGNは銀河の中心部のとても狭い領域で、通常の銀河全体と同じかそれ以上のエネルギーを電磁放射している天体である。AGNの放射は電波～X線、場合によっては γ 線にいたる幅広い波長域で観測される。このAGNの強烈な光は中心にある巨大なブラックホールのまわりの降着円盤の重力エネルギーの解放によって発生していると考えられている。

1.1 AGNの分類

AGNには歴史的経緯により現象論的に分類されているが、ここではその中でも Seyfert 銀河、電波銀河、ブレーザー、クエーサーについて述べる。

・ Seyfert 銀河

Seyfert 銀河は AGN を持つ銀河として 1943 年に Carl Seyfert によって通常の銀河よりも明るい中心核を持つ銀河として発見され、発見者の名前に因んで Seyfert 銀河と名付けられた。Seyfert 銀河は電波では暗く、 $z < 0.1$ の比較的近い場所に存在する。Seyfert 銀河には I 型と II 型がある。これは輝線の幅の広さで分類されており、I 型は半値幅が数 1000 km/s 以上の幅の広い輝線と数 100 km/s の狭い輝線の両方存在し、II 型は狭い輝線しか存在しない。この輝線の幅の違いは見ている放射領域の違いであると考えられている。輝線の幅が広がる理由は物質が運動することによるドップラー効果が原因である。幅の広い輝線は非常に速く動いている物質によるもので、AGN の近くにあると考えられてこの領域を広輝線領域 (BLR) という。幅の狭い輝線は遅く動いている物質によるものでこの領域を狭輝線領域 (NLR) という。BLR は NLR よりも速く運動しているため、BLR の方が NLR よりも中心に近い位置にあると考えられている。

・ 電波銀河

電波銀河は Seyfert 銀河に比べて電波領域での放射が強い AGN である。その他の波長では Seyfert 銀河とほぼ同じであるが、電波ジェットや電波ローブと呼ばれる構造を持つという特徴がある。電波が強い理由はジェットと電波ローブからのシンクロトロン放射によるものだと考えられている。電波銀河も Seyfert 銀河と同じように I 型と II 型に分けることができる。

・ブレイザー

上のように AGN にはジェットを持つものがある。ジェットとはほぼ光速で中心から対方向に放出されるプラズマの噴流である。ブレイザーはそのジェットを真正面から見ていると考えられている。ブレイザーのスペクトルは相対論的効果によってジェットの放射が卓越しているため輝線などはほとんど見えない。

・クエーサー

クエーサーは AGN の中で最も光度が大きい天体である。最初は分解できない恒星状の電波源として発見されたので、quasar(Quasi-Stellar Radio Source) と呼ばれる。クエーサーの特徴は輝線が非常に大きな赤方偏移を持つことで、非常に遠方にあることである。しかしその光度は非常に明るいため、AGN が母銀河を卓越して点源のように見える。

以上のように AGN には様々な種類があるが、後述するようにその構造は似ていると考えられている。

1.2 AGN の物理描像と統一モデル

前述したように AGN はとても明るく輝いている。大きなエネルギーで輝いていると光の圧力によってまわりの物質が吹き飛ばされるが、天体はその光度を保つには重力で物質を留めておかないといけない。よって天体の光度には上限値が存在し、その光度をエディントン限界光度という。もし中心天体がエディントン限界光度 L_{Edd} で輝いているとするとそのまわりにある物質が受ける放射圧 F_L は

$$F_L = \frac{L_{Edd}}{4\pi r^2 c} \sigma_T \quad (1.1)$$

ここで $\sigma_T = 6.65 \times 10^{-25} \text{cm}^2$ はトムソン散乱断面積である。この力と重力がつりあっていると

$$\frac{L_{Edd}}{4\pi r^2 c} \sigma_T = \frac{GMm}{r^2} \quad (1.2)$$

左辺は放射圧、右辺は重力である。これを L_{Edd} について解くと

$$L_{Edd} = \frac{4\pi c GM m_H}{\sigma_T} = \frac{4\pi c GM_\odot m_H}{\sigma_T} \left(\frac{M}{M_\odot} \right) \approx 1.2 \times 10^{38} \left(\frac{M}{M_\odot} \right) \text{ erg/s} \quad (1.3)$$

となり、中心天体の質量にのみ依存する。AGN の場合 $L \sim 10^{44} \sim 10^{48} \text{erg/s}$ であるので、中心天体は $10^6 \sim 10^8 M_\odot$ を必要とする。放射領域の大きさは時間変動のタイムスケールから制限を与えることができる。これは情報の伝わる速さは光速が上限であるので、放射領域の大きさは大きくても光速に変動の時間をかけたもの以下になるはずである。AGN の変動の時間は $1 \times 10^4 \text{ sec}$ ほどであるので放射領域の大きさは 20 AU 程度となる。よって放射領域の大きさは太陽系程度だと考えられている。この狭い領域に $10^6 \sim 10^8 M_\odot$ の質量を入れるにはブラックホールしかない。このことから AGN の中心には巨大なブラックホールがあり、周辺の物質がブラックホールに落ちるときその重力エネルギーを解放して光っていると考えられている。今まで述べてきた AGN の現象の違いは同じような構造の AGN を違う角度から見ているという統一モデルがある。統一モデルではブラックホールのまわりには降着円盤、その降着円盤のまわりには高温プラズマからなるコロナ、トーラス、BLR(広輝線領域)、NLR(狭輝線領域) などの構造があると考えられている。BLR と NLR の位置関係は 1.1 節で述べたが、BLR の見えない Seyfert II 型でも偏光観測すると幅の広

い輝線が見ることがある。これは BLR から出た光が電子などの散乱体に散乱されて観測されるものだが、これは Seyfert II 型にも BLR は存在し何らかの吸収体によってさえぎられていることを示しており、この吸収体がトーラスであると考えられている。また AGN は強い赤外線の放射もしている。これはダストが中心付近から放射された紫外・X 線を吸収し、赤外線として放射しているためでありこれもトーラスの存在を示唆している。さらに可視・近赤外線による観測ではトーラスの内縁半径は中心核の光度と関係があることがわかっている [?]

考えられている AGN の統一モデルは図??のようなものである。このようにブラックホール・

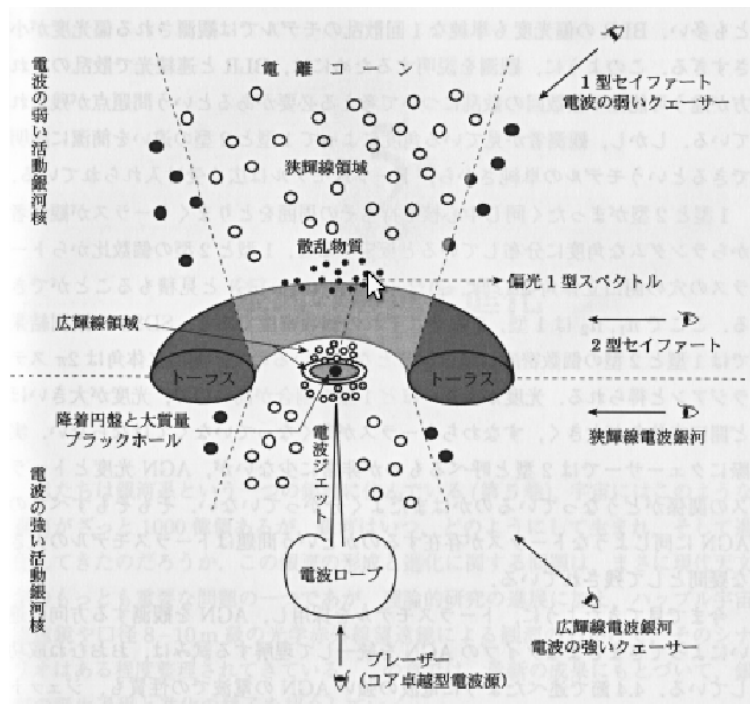


図 1.1: AGN の統一モデルの図 [?]

降着円盤をトーラスが囲んでいるようなモデルが現在考えられている AGN の統一モデルである。このモデルであれば Seyfert 銀河の I 型と II 型についての説明をすることが可能である。つまり図??のように I 型は BLR と NLR を全て見ることが出来るような角度で AGN を見ている、II 型は NLR しか見ることのできない角度から見ているということである。ブレイザーはジェットを真正面から見ている AGN となる。しかしこのモデルでは電波の強弱はなぜ出来るのかという問題には解答できていない。完全な統一モデルの構築にはまだ時間がかかるだろう。

1.3 AGNのX線スペクトル

AGNのX線スペクトルは様々な情報を我々にもたらす。AGNのスペクトルの輝線や反射成分はブラックホールのまわりの環境を理解する手がかりになり、さらに超巨大ブラックホールの進化を理解することになる。ここではその代表的な三つの成分について述べる。

1.3.1 連続成分

AGNのX線の連続成分はスペクトルの全体にわたって光子のエネルギーのべき型の関数で次のように近似される。

$$A(E) = KE^{-\Gamma} \quad (1.4)$$

この時 Γ は光子指数と呼ばれる無次元量で、 K は規格化定数であり、 $[\text{ph/s/cm}^2/\text{keV}@1\text{keV}]$ がよく使われる。連続成分は降着円盤から出た光子が中心近くの温度100 keV程度の高温のコロナの電子に衝突して逆コンプトン散乱されることにより生じていると考えられている。よって電子のエネルギー以上にはなることはできず、スペクトルは数100 keVでカットオフを示すと言われている。

1.3.2 吸収構造と反射成分

AGNのまわりにはトーラスという光学的に厚い物質がある。AGNの中心部から出たX線もトーラスに入ると吸収を受ける。吸収の素過程は光電吸収であり、その効果は

$$\exp(-N_H\sigma(E)) \quad (1.5)$$

で表され、 N_H は柱密度である。 $\sigma(E)$ はさらに $\sigma = \sum_i f_i \sigma_i(E)$ と書くことができ f_i は構成物質の重元素組成比、 σ_i はその物質の吸収断面積でほぼ $\sigma_i \propto Z^{4.5} E^{-3}$ となり、 Z (原子番号)が大きいほど、また低エネルギー側ほど大きくなるという依存性がある。よって低エネルギー側ほど吸収をより受ける。図??は様々な N_H での連続成分の形である。

またトーラスに入っても散乱される場合があり、これを反射成分と呼ぶ。低エネルギーほど吸収されやすいので、散乱の前後で吸収されずに外に出てくるのは高エネルギー側ほど多い。散乱の素過程はコンプトン散乱である。吸収と散乱のどちらが支配的になるかはそのエネルギーでの吸収・散乱断面積の値によって変わる。図??のように10 keV以下であれば光電吸収、20 keV以上であればコンプトン散乱が支配的になる。反射成分もAGNの構造に関する情報を我々に与えてくれる。先行研究ではトーラスの柱密度が変化すると反射成分の形が変わることが示されている[?]。反射成分の中でも特に鉄輝線の成分は目立っているがそれについては次で述べる。

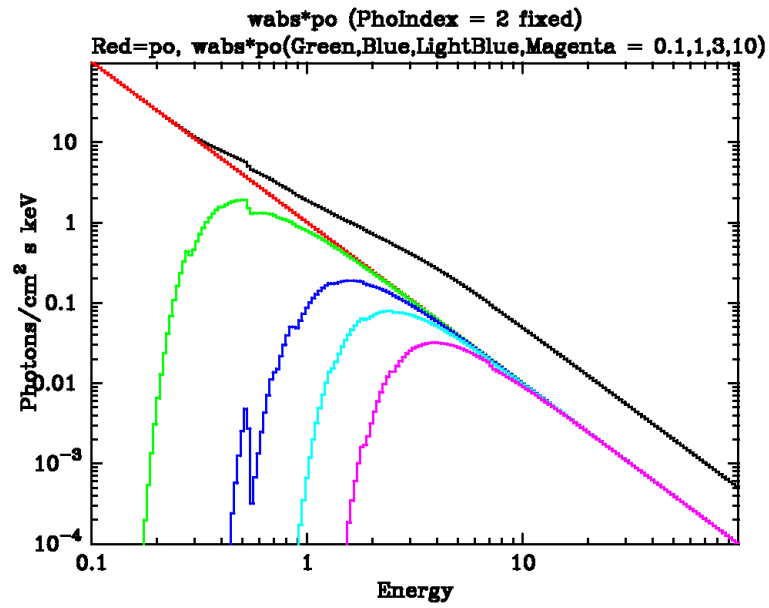


図 1.2: 吸収を含む連続成分のシミュレート図。それぞれ赤色:power-law のみ、緑色: $1 \times 10^{21} \text{cm}^{-2}$ 、青色: $1 \times 10^{22} \text{cm}^{-2}$ 、空色: $3 \times 10^{22} \text{cm}^{-2}$ 、桃色: $1 \times 10^{23} \text{cm}^{-2}$ である [?]

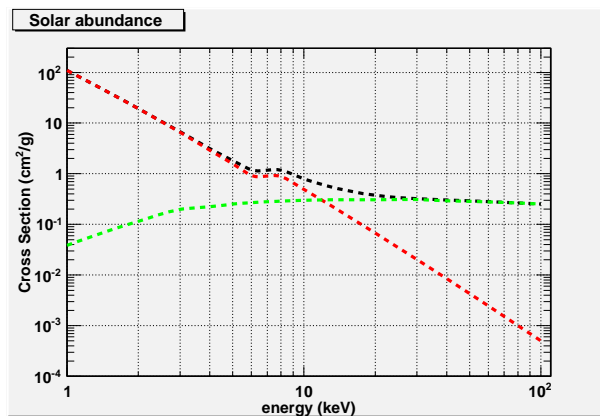


図 1.3: 太陽組成比の吸収・散乱断面積 [?]

1.3.3 鉄輝線成分とコンプトンショルダー

鉄輝線は AGN のスペクトルの中でも特に目立つ成分である。その理由は一つは恒星の進化によって作られる鉄の量が他の重元素に比べて多いためである。もうひとつは鉄は原子番号が大きいので蛍光分岐比が大きいことである。蛍光分岐比とは K 殻の電子が光電効果などではじき出されたときオージェ電子ではなく蛍光 X 線が出る確率のことである。鉄輝線はその多くが $\text{Fe} - \text{K}_{\alpha 1}$: 6.404 KeV と $\text{Fe} - \text{K}_{\alpha 2}$: 6.391 KeV である。鉄にはもう一つ $\text{Fe} - \text{K}_{\beta}$: 7.058 KeV のラインがあるが、 K_{α} に比べて起こりにくく 10 % 程度の強度しかない。 $\text{Fe} - \text{K}_{\alpha}$ はともに電子が 2p 軌道から 1s 軌道に遷移したものであるが、2p 軌道はスピン軌道相互作用により二つに分裂しており、そのうち 2p 電子の全角運動量 $j=3/2$ の場合が $\text{Fe} - \text{K}_{\alpha 1}$ 、 $j=1/2$ の場合が $\text{Fe} - \text{K}_{\alpha 2}$ である。 $\text{Fe} - \text{K}_{\beta}$ は電子が 3p 軌道から 1s 軌道に遷移したものである。蛍光 X 線の発生過程を図 1.4 を示す。鉄輝線

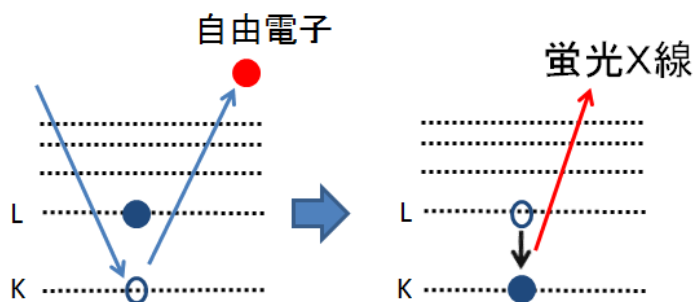


図 1.4: 鉄輝線発生過程

のエネルギーや強度からは吸収量や AGN を見込む立体角を決定することができる。

また輝線が出た後にまわりの物質によってコンプトン散乱されるとにコンプトンショルダーと呼ばれる構造が出るのが分かっている。図 1.5 のようにコンプトン散乱された後の光子のエネルギーは

$$E'_{\gamma} = \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{E_{\gamma}}{m_e c^2} (1 - \cos\theta)} \quad (1.6)$$

で表され、 E_{γ} が鉄輝線のエネルギーである 6.4 keV だとすると、 $(\theta = 180^\circ)$ で E'_{γ} は最小となり 6.24 keV までのびる肩のようなテールが観測される。

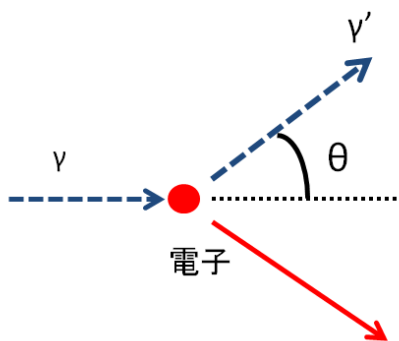


図 1.5: コンプトン散乱

現在コンプトンショルダーは AGN ではまだ観測されていないが明るい X 線連星ではすでに確認されている。図 1.6 は X 線衛星 Chandra/HETGS で観測された X 線連星 GX301-2 のコンプトンショルダーである。HETGS(High Energy Transmission Grating Spectrometer) は 6.4 KeV で分解能が約 33eV という高い分解能を持つ回折格子である。

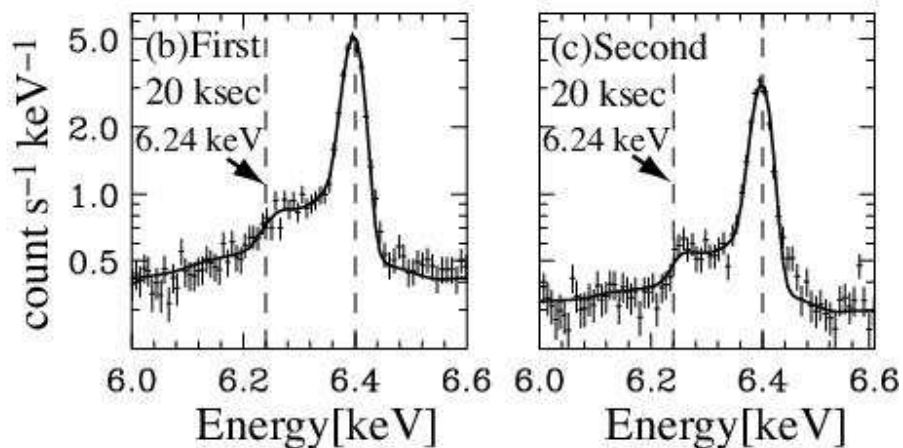


図 1.6: X 線連星 GX301-2 で観測されたコンプトンショルダー [?]

HETGS では必要な光子数を集めるのに AGN の場合一週間以上かかるため観測は難しいが、次期 X 線天文衛星 ASTRO-H の分光器 SXS は、分解能約 4 eV で一日で観測が可能であると期待されている。コンプトンショルダーは見ている角度によってその形が違うので、コンプトンショルダーの形が分れば AGN を見込む角度を制限することができると期待される [?]

1.4 本研究の目的

これまでの観測から、吸収量、鉄輝線の強度などを用いることで、トーラスの柱密度、AGN を見込む立体角を決定することができている。これに加えて AGN を見込む角度を決定することができれば、トーラス形状の制限や降着円盤の角度を決定することができる。よって現在の観測に加えて、反射成分のスペクトル形状やコンプトンショルダーの形を観測出来るようになれば、AGN のジオメトリにかなりの制限を与えることができる。本研究では、モンテカルロシミュレーションを用いて AGN のジオメトリを再現し、その X 線スペクトルを再現し、AGN のスペクトルの角度依存性について調べた。また ASTRO-H での観測は 3 年後になるが、現状の観測装置でトーラスの角度の制限を行うことができるかを調べるため、X 線天文衛星すざくで得られた AGN の X 線スペクトルとシミュレーションを比較した。

第2章 Geant4について

2.1 Geant4とは

Geant4とは、光子・陽子・電子などの粒子と物質の間の様々な相互作用をシミュレーションするソフトウェアである。元々は素粒子・原子核実験の検出器を設計するときの様子をシミュレートする目的で開発された。現在では宇宙開発や医学の分野にも応用されている。Geant4ではユーザーは様々なジオメトリ、粒子、エネルギーを選んでシミュレーションを行うことができる。本研究ではAGNのジオメトリを組むことで、AGNのスペクトルを再現した。用いたGeant4のバージョンはGeant4 version9.2 patch-04を用いた。低エネルギー電磁相互作用のデータファイルはG4EMLOW6.2を用いた。

2.2 FeによるGeant4のセットアップの検証

AGNのシミュレーションを行う前にGeant4のセットアップが正しいかを検証するシミュレーションを行った。そのために図??のように置いてある鉄のプレートに光子を打ち込んで、プレートで散乱された光子をまわりに囲んである鉛で検出するジオメトリを組んだ。このジオメトリを用いて鉄輝線が正しく出ているかを確認した。

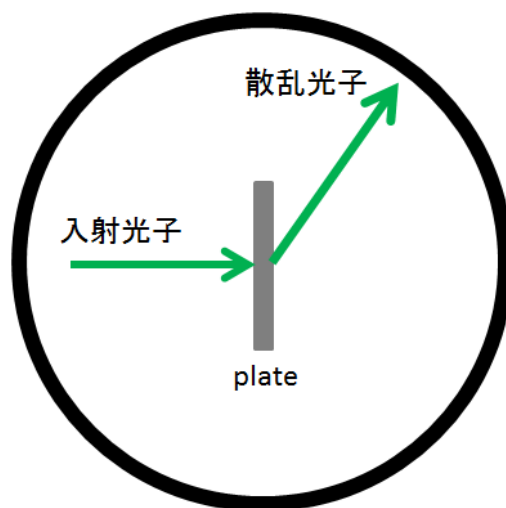


図 2.1: セットアップの検証のために組んだジオメトリ

放出される鉄輝線は計算からも求めることができる。放出される鉄輝線の強度は、

$$\frac{\int d\Omega \int_{\epsilon_{th}} d\epsilon I(\epsilon) Y_Z^K (1 - e^{-\tau_{th}})}{4\pi} \quad (2.1)$$

で表すことができる。この時 $d\Omega$ は立体角、 ϵ_{th} は電子を叩き出すのに必要な最低エネルギー、 $I(\epsilon)$ は入射光子の強度、 Y_Z^K は蛍光分岐比、 τ_{th} は optical depth である。optical depth τ は $\tau = \kappa\rho d$ と定義される無次元量で、 $\kappa(\text{cm}^2/\text{g})$ は質量吸収係数、 $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$ は物質の密度、 $d(\text{cm})$ は厚さである。今回の場合、 $d\Omega = 4\pi$ 、 $\epsilon_{th}=7.112 \text{ keV}$ 、 $I(\epsilon)=60000(\text{count}/\text{keV})$ 、 $Y_Z^K=0.2898$ 、6 keV での τ は約 0.1($\rho = 7.874 \text{ g}/\text{cm}^3$ 、 $d=0.00016 \text{ cm}$)、その他の項は数値積分により計算した。入射光子は 4~20 keV で乱数を振って入射した。

図 2.2 は入射光子のスペクトル、図 2.3 は鉄板によって散乱、または吸収されて再放出されたスペクトルである。

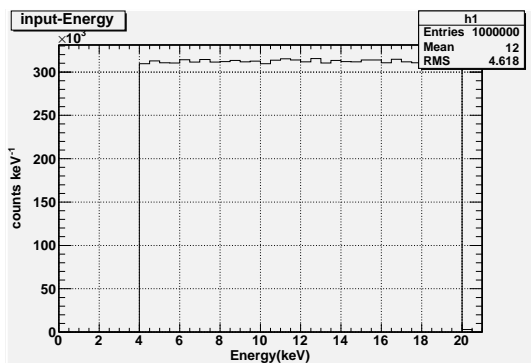


図 2.2: 入射光子の強度スペクトル

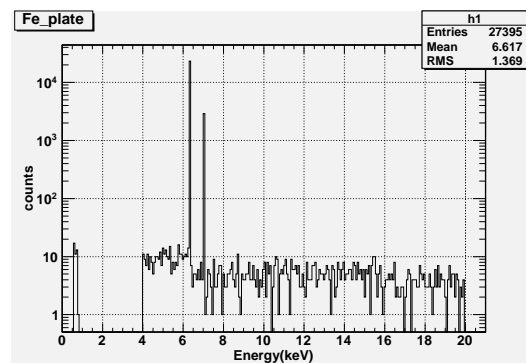


図 2.3: 散乱・再放出されたスペクトル

図 2.3 からまず Fe の K_α が 6.4 keV 付近、 K_β が 7.0 keV 付近にしっかりと見えていることがわかる。また 0.5 keV 付近には Fe の L 線の輝線も見えているが、今後はこの輝線についてはコメントしない。図 2.3 のスペクトルから鉄輝線の量は 26086 count であった。式 2.1 から求められた鉄輝線の量は 28489 count となり約 10% の差があることがわかった。この差は計算では発生した鉄ラインの一部がすぐに鉄板中で吸収されるのをを無視しているためであると考えられる。このシミュレーションからセットアップがある程度正しいことがわかった。また鉄輝線のエネルギーは本来 6.4 keV と 7.09 keV であるが、シミュレーションでは 6.36 keV と 7.01 keV にラインが見えている。調べた結果これは Geant4 のデータファイルの電子の束縛エネルギーの値が間違っていることが原因であることがわかった。

2.3 太陽組成比での鉄の蛍光 X 線の振舞い

次に前の鉄板を AGN のシミュレーションで用いる元素組成比に変えて同様のシミュレーションを行った。用いた元素の組成比は宇宙の物質の組成を代表していると考えられる太陽光球での組成比であり表??の通りである。この時 6 keV で $\tau=2.65 \times 10^{-24} N_H(\text{cm}^{-2})$ となる。

水素を 1 とした時の重元素の原子数の比			
H	1.00	Al	2.95×10^{-6}
He	9.77×10^{-2}	Si	3.55×10^{-5}
C	3.63×10^{-4}	S	1.62×10^{-5}
N	1.12×10^{-4}	Ar	3.63×10^{-6}
O	8.51×10^{-4}	Ca	2.29×10^{-6}
Ne	1.23×10^{-4}	Cr	4.84×10^{-7}
Na	2.14×10^{-6}	Fe	4.68×10^{-5}
Mg	3.80×10^{-5}	Ni	1.78×10^{-6}

表 2.1: 仮定した重元素の太陽組成比 [?]

2.3.1 Optical depth の変化による鉄輝線の強度変化

前述の設定で Optical depth(τ) を変化させながらシミュレーションを行い、鉄輝線を強度変化について調べた。この時の τ の値は全て 6 keV での値であるが、前節の τ とは違い全物質の合計の τ となっている。図??は鉄輝線の強度変化である。これを見ると鉄ラインの強度は $\tau < 1$ の時

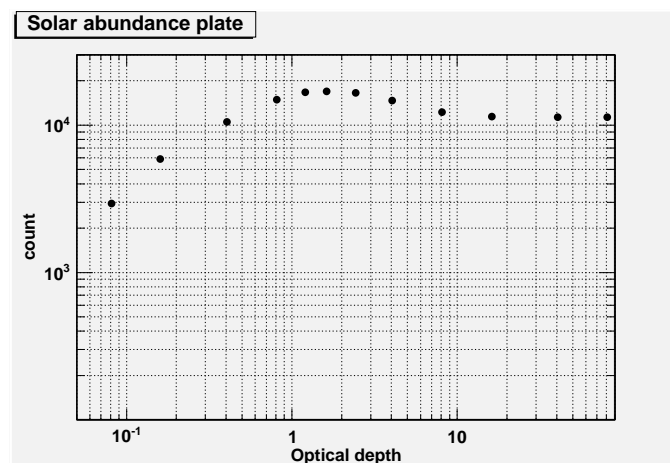


図 2.4: Optical depth に対する鉄輝線の強度変化

τ に比例して強度が大きくなっている。これは物質中の鉄の量が増加しているためであり、それに伴って強度が増加している。逆に $\tau > 1$ では強度は一定となっている。これは鉄輝線が発生しても前方に抜けていくことができず吸収されてしまうため、入射方向とは逆に向かったものしか検出されないためである。 $\tau \sim 1$ では発生して、ある程度は抜けていく光子も多いため強度が最大となっている。

2.3.2 Optical depth の変化による角度分布の変化

次に Optical depth によって鉄ラインの角度分布がどうなるのかを調べる。下の図は様々な τ の場合の鉄ラインの角度分布である。 θ は図??のようにとってある。

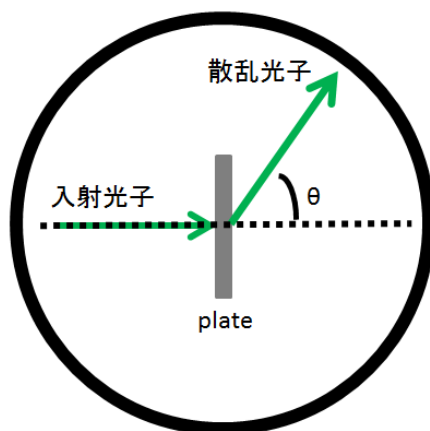


図 2.5: 定義した θ の方向

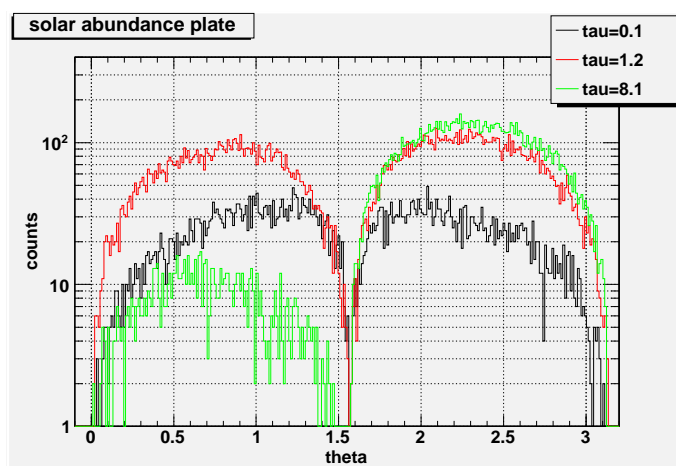


図 2.6: 鉄ラインの角度分布 単位は radian

これを見ると τ が小さい場合は十分に反応しないためどの方向も鉄ラインの量が少なくなっていることが分かる。また τ 大きい場合には $\theta=0 \sim 1.57(0 \sim \pi/2)$ rad で弱いことから、入射方向に抜けていく量がほとんどないことがわかる。

2.4 コンプトンショルダー

ここではコンプトンショルダーができることを確認するために、前節と同じジオメトリで鉄の K_{α} のエネルギー 6.4 keV の光子だけを入射させてシミュレーションを行った。見ている角度によりコンプトンショルダーの形がどう変化するかを調べた。この時 $\tau = 1$ とした。

図??の形を見てみると、角度によってその形が変化していることが分かる。散乱角が $150 \sim 180^{\circ}$ の場合の後方散乱は 6.24 keV に大きなピークが見えており、コンプトンショルダーが最も顕著になる。散乱角が小さくなるにつれてピークのエネルギーも高くなっていくことが分かる。5.4 keV

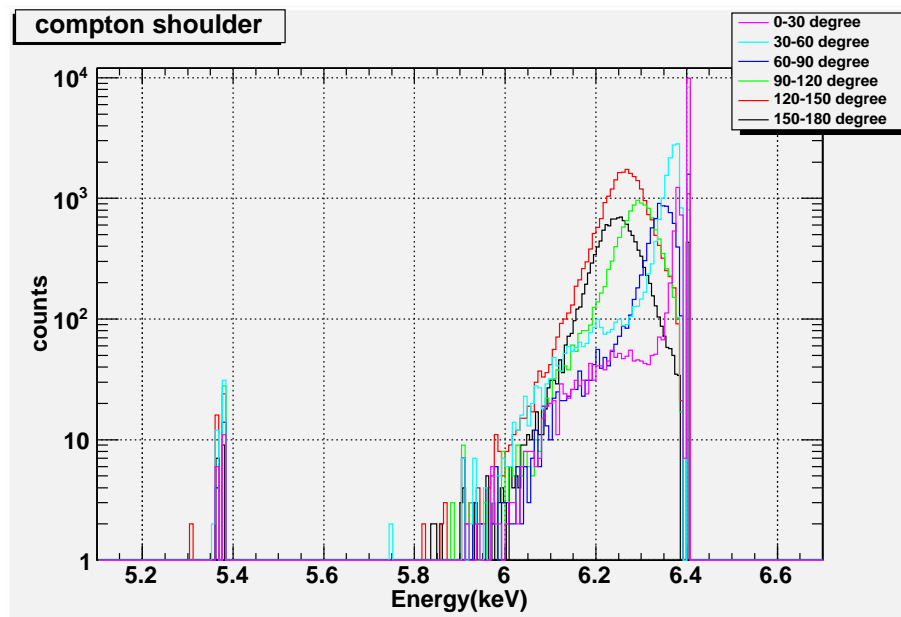


図 2.7: コンプトンショルダーの角度依存性

付近にラインが見えるがこれは Cr の蛍光 X 線である。すべての散乱角で 6.4 keV のラインが見えるのは元々の 6.4 keV がレイリー散乱してエネルギーが変わらなかったためと考えられる。このシミュレーションによってコンプトン散乱が起きて、コンプトンショルダーを形成することが確認できた。

2.5 反射成分のスペクトルの形

AGN のシミュレーションを行う前に AGN のジオメトリが組めているかどうかを確認する。図 ?? は先行研究である Ikeda et al(2009) で用いられたジオメトリであり、今回はこれを用いた。図

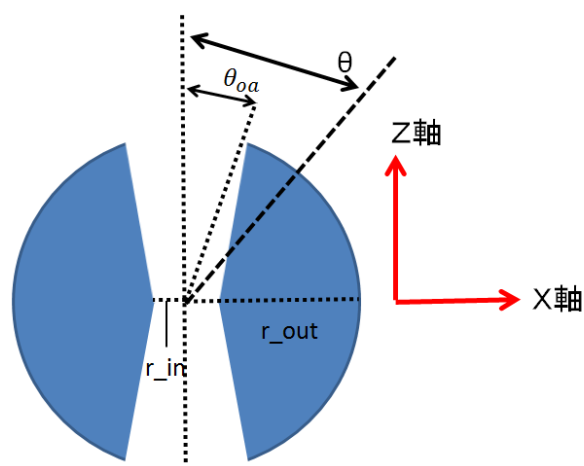


図 2.8: AGN のシミュレーションのジオメトリ

??で r_{in} 、 r_{out} はトーラスの内径、外径を表しており r_{in}/r_{out} が 0.01 となるように設定した。また θ_{0a} はトーラスの開口径の角度で 40° とした。 θ は検出角度で今回の研究ではこの角度を変えるこ

とでスペクトルの角度依存性を調べた。トーラスの物質には表 2.1 の物質を用いた。入射光子は E^{-2} に比例し、最小値が 1.5 keV、最大値が 100 keV の光子である。この時 $\tau=0.5$ とした。

図 2.9 のようなトーラスの X 軸方向に向けて光子を入射した。この時の τ は約 0.5 であった。図 2.9 は反射成分のスペクトルの角度依存性を示している。

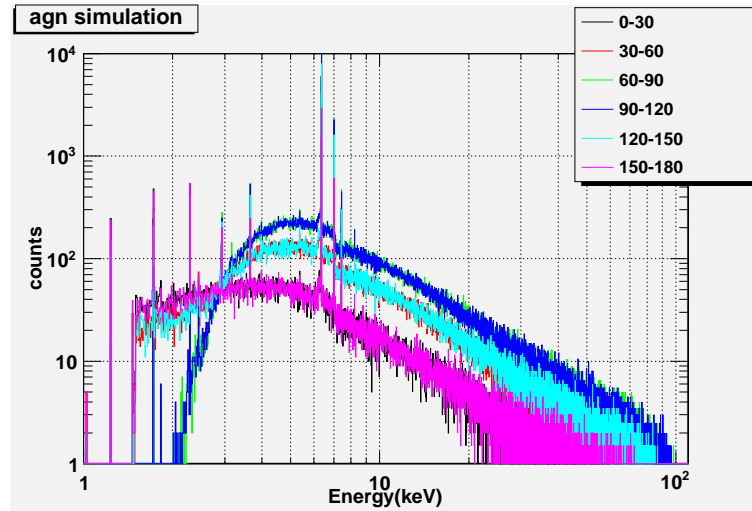


図 2.9: 反射成分の角度依存性

図 2.9 を見るとまず、0~30 °と 150~180 °、30~60 °と 120~150 °、60~90 °と 90~120 °は対称性からほぼ同じスペクトルであることがわかる。60~90 °では低エネルギー側が吸収を受けているが、0~30 °ではあまり吸収を受けていない。これは 0~30 °は開口部にあたるので物質が存在せず、一度散乱したものが吸収を受けないためと考えられる。逆に 60~90 °は物質が多く存在するため、低エネルギー側ほど吸収を受けている。30~60 °は前の二つのスペクトルを合わせた形をしている。これは開口部の角度が 40 °なので物質がある角度とない角度が両方存在しているためだと考えられる。さらに様々なラインが見えていることがわかる。見えているラインのエネルギーとその元素をまとめたのが表 2.2 である。どのエネルギーも実際のエネルギーよりずれて

エネルギー (keV)	ライン	元素	実際のエネルギー (keV)
1.24	K_{α}	Mg	1.254
1.72	K_{α}	Si	1.740
2.28	K_{α}	S	2.308
2.93	K_{α}	Ar	1.957
3.66	K_{α}	Ca	3.692
6.36	K_{α}	Fe	6.404
7.02	K_{β}	Fe	7.058
7.44	K_{α}	Ni	7.478
8.21	K_{β}	Ni	8.265

表 2.2: スペクトル中の輝線のエネルギーと元素

いるが、これは 2.2 節でも述べたようにデータファイルの間違いである。

図 2.9 と図 2.10 は 1~4 keV と 5~10 keV、Fe-K ラインの角度分布である。図 2.9 ではどれも $\theta = \frac{\pi}{2}$ にピークがある。これは光子を (1,0,0) 方向に打ち込んでいるためである。1~4 keV の角度分布で

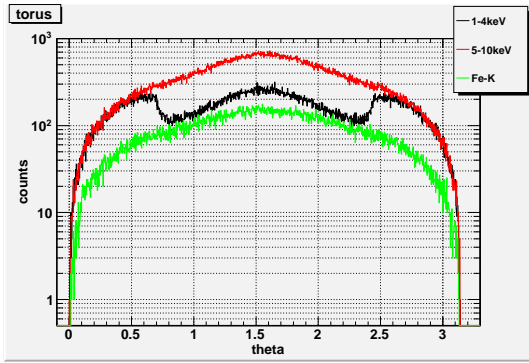


図 2.10: θ 方向の分布

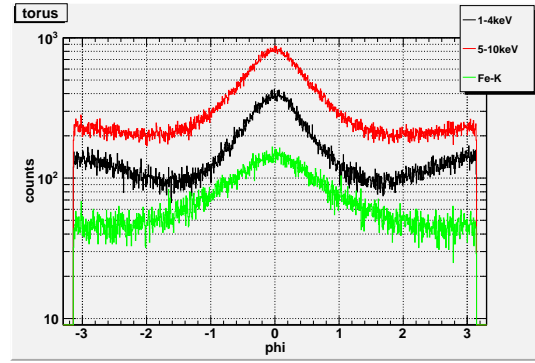


図 2.11: ϕ 方向の分布

$\theta=0.7$ rad と 2.5 rad 付近にある段差はちょうどトーラスの開口部の角度である 40° にあたり、その間にはトーラスがあるのでカウント数が少なくなっている。図??では $\phi=0$ にピークがありこれは $(1,0,0)$ 方向に打ち込んでいることと一致している。

第3章 AGNのX線反射成分のシミュレーション

ここでは実際にAGNのスペクトルをシミュレーションする。用いたジオメトリは2.5節のものと同じであるが、入射粒子の方向を等方的にした。

3.1 反射成分のシミュレーション

3.1.1 連続スペクトル形の角度依存性

ここでは τ 、 θ_{oa} とトーラスの形を変化させて直接成分と反射成分の角度依存性を調べた。図??～図??は直接成分の角度依存性を表している。

図??の全てのスペクトルから、トーラスの開口部の角度が 40° であるため $0\sim 30^\circ$ の場合は低エネルギー側でほとんど吸収を受けておらず、物質の存在する $60\sim 90^\circ$ では低エネルギー側で大きく吸収を受けていることがわかる。また図??で τ が大きくなるにつれて $60\sim 90^\circ$ のスペクトルの吸収量が大きくなっている。図??でトーラスの形を変えた場合でもそのスペクトル形状はほとんど変化していないことがわかる。図??で $\theta_{oa}=10^\circ$ の場合は開口部の角度が小さくなっているため $30\sim 60^\circ$ の場合でも吸収を受けている。逆に図??で $\theta_{oa}=80^\circ$ の時は $30\sim 60^\circ$ でも吸収を受けていないことがわかる。 $\theta=60\sim 90^\circ$ のスペクトルはほぼ同じである。

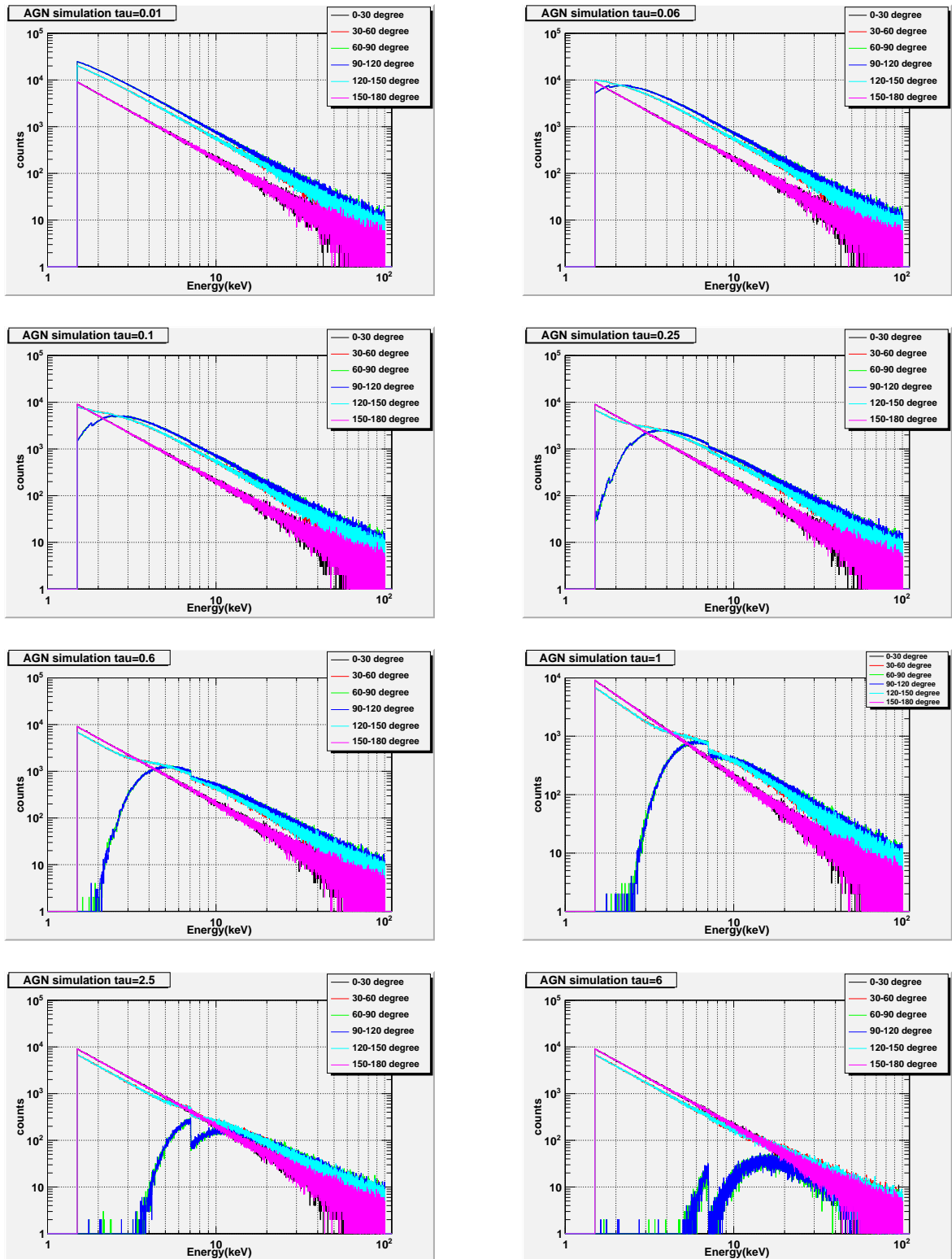


図 3.1: τ による直接成分のスペクトルの変化と角度依存性 左上: $\tau=0.01$ 右上: $\tau=0.06$ 中段左上: $\tau=0.1$ 中段右上: $\tau=0.25$ 中段左下: $\tau=0.6$ 中段右下: $\tau=1$ 左下: $\tau=2.5$ 右下: $\tau=6$

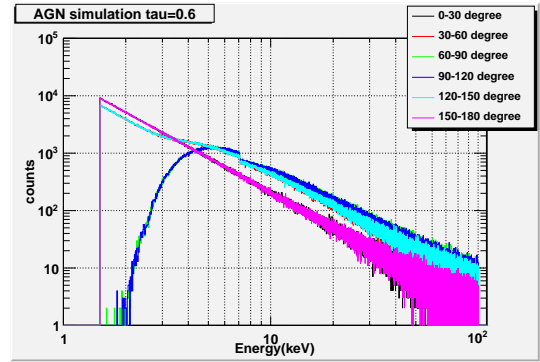
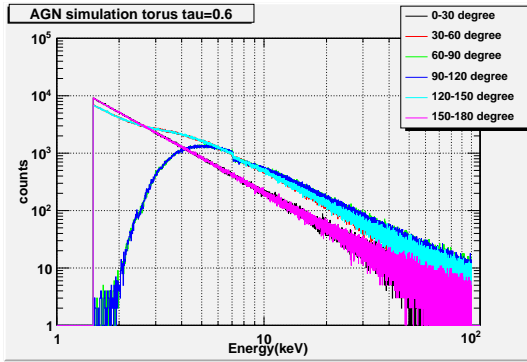


図 3.2: ジオメトリの違いによる直接成分の変化 左がトーラス状のジオメトリのスペクトルで右は同じ τ である $\tau=0.6$ のスペクトル

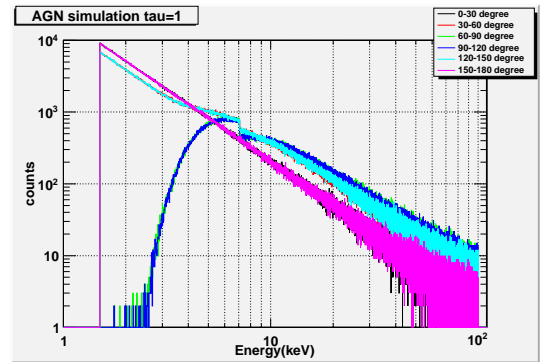
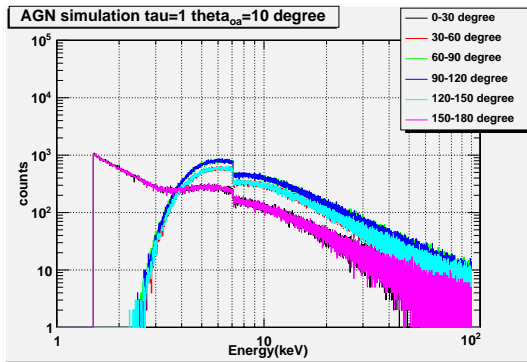


図 3.3: θ_{0a} の違いによる直接成分の変化 左が $\theta_{0a}=10^\circ$ の場合で右が $\theta_{0a}=40^\circ$ の場合 どちらも $\tau=1$

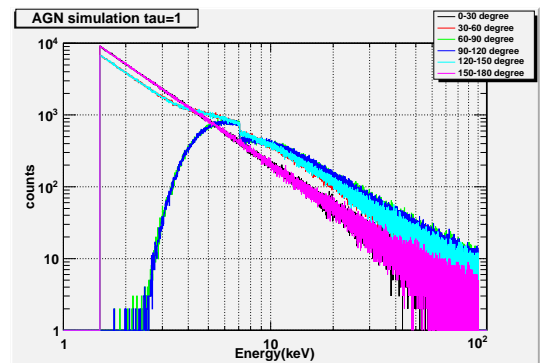
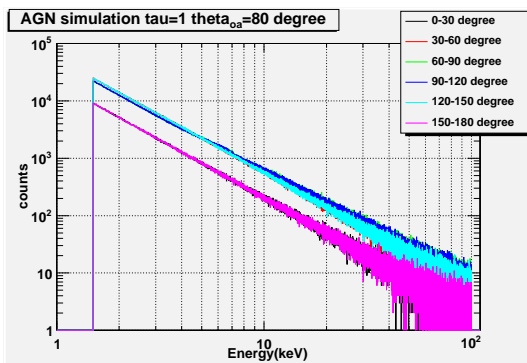


図 3.4: θ_{0a} の違いによる直接成分の変化 左が $\theta_{0a}=80^\circ$ の場合で右が $\theta_{0a}=40^\circ$ の場合 どちらも $\tau=1$

次の図??から図??は反射成分の角度依存性である。

反射成分は τ が小さすぎると反応を起こさないため、反射成分の量が少なくなることが図??の左からわかる。しかし τ が大きすぎても吸収されてしまうこともわかる。 τ が小さいときに見える反射成分はその多くがトーラスでコンプトン散乱された成分であると考えられる。 $\tau > 0.6$ で θ が小さいときにはスペクトルの形はほぼ同じで、通常解析で使われる反射成分のモデルである図??の右とよく一致している。しかし θ が 90° に近づくにつれて $\tau > 0.25$ ではモデルからずれていき、吸収を受けていることがわかる。形をトーラスにした場合でもその差はほとんどなかった。 θ_{oa} が 80° の場合は物質の存在領域が少ないため反射成分も少なくなっている。

鉄輝線については図??の左にあるように、 τ が小さいときは τ の増加に比例して鉄輝線の強度も強くなっている。その後は強度があまり変わらないことから2.3.1節の場合と一致している。角度依存性はほぼ全ての場合で θ が 90° に近づくほど鉄輝線の強度が強くなっている。ただし $\tau=6$ の場合のみ逆になっている。これは τ が大き過ぎるため抜けて行く前に吸収されてしまっていると考えられる。また図??の右は横軸に $\Omega = 4\pi(\cos(\theta))$ をとってあり、これは物質の存在領域の大きさを表している。この図から $\theta_{oa}=80^\circ$ は物質の存在領域が少ないため輝線の量自体が少なくなっていることがわかる。

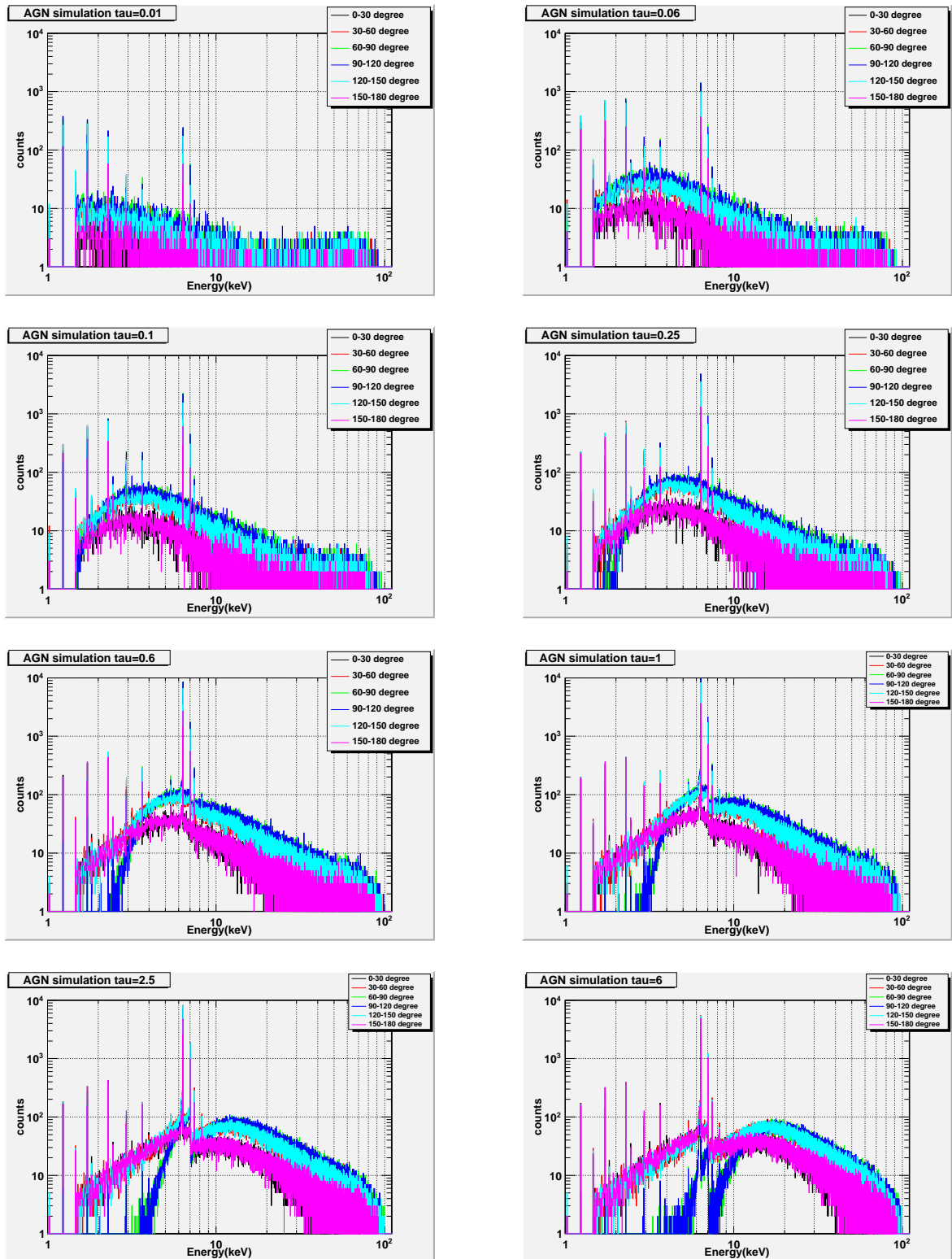


図 3.5: τ による反射成分のスペクトルの変化と角度依存性 左上: $\tau=0.01$ 右上: $\tau=0.06$ 中段左上: $\tau=0.1$ 中段右上: $\tau=0.25$ 中段左下: $\tau=0.6$ 中段右下: $\tau=1$ 左下: $\tau=2.5$ 右上 $\tau=6$

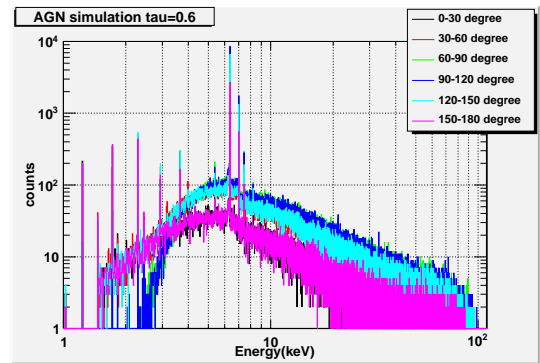
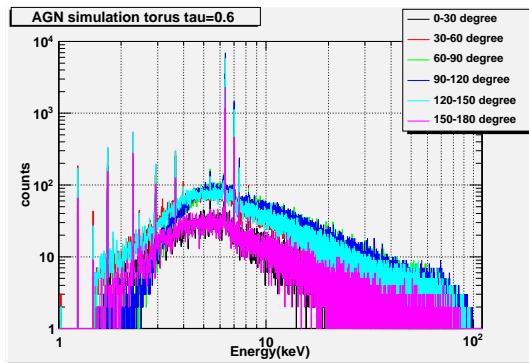


図 3.6: ジオメトリの違いによる反射成分の変化 左がトーラス状のジオメトリのスペクトルで右は同じ τ である $\tau=0.6$ のスペクトル

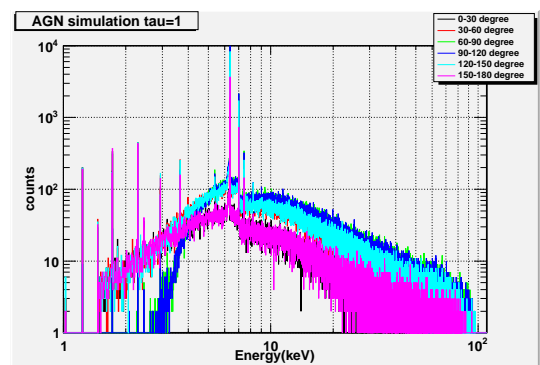
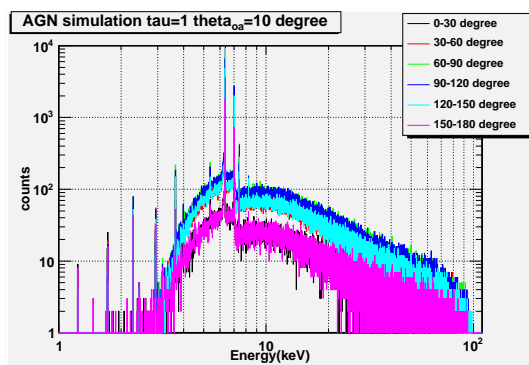


図 3.7: θ_{0a} の違いによる反射成分の変化 左が $\theta_{0a}=10^\circ$ の場合で右が $\theta_{0a}=40^\circ$ の場合 どちらも $\tau=1$

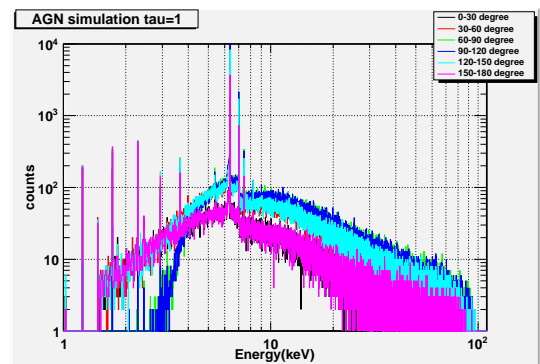
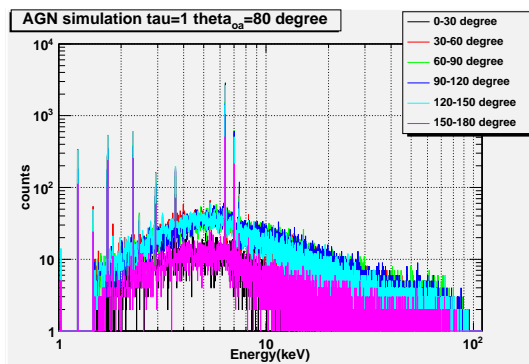


図 3.8: θ_{0a} の違いによる反射成分の変化 左が $\theta_{0a}=80^\circ$ の場合で右が $\theta_{0a}=40^\circ$ の場合 どちらも $\tau=1$

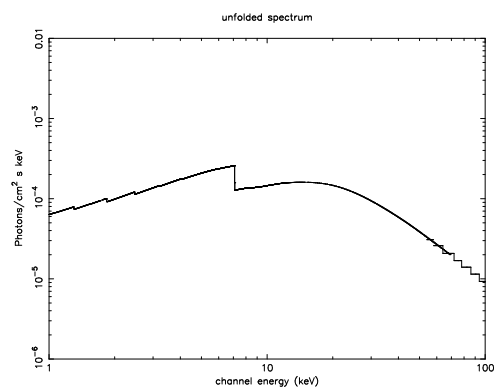
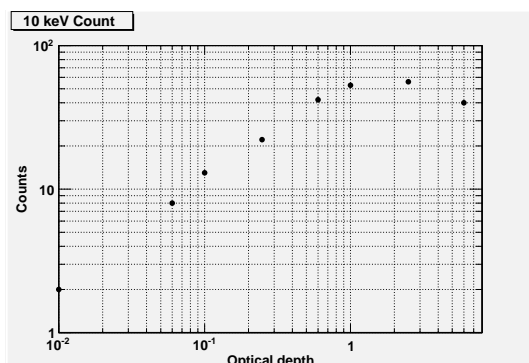


図 3.9: 反射成分の 10 keV のカウント数 (左) と解析に用いられる反射モデル (右)

Figure 3-16-2011 16:17

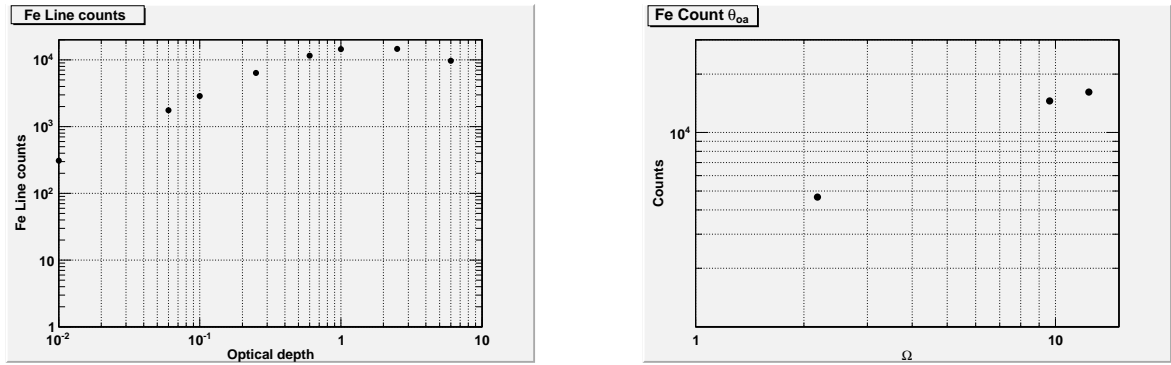


図 3.10: 鉄輝線強度の τ 依存性 (左) と θ_{oa} 依存性

3.1.2 コンプトンショルダーの反射角度依存性

AGN のコンプトンショルダーの角度依存性を調べるため、 $\theta_{oa}=40^\circ$ の場合に角度をさらに細かく分割した。0~90° を 10° ごとに 9 分割した。90~180° は対称のためここでは無視する。まず $\tau=0.6$ 、 $\tau=1$ としてシミュレーションを行った。図 3.11 はその結果である。

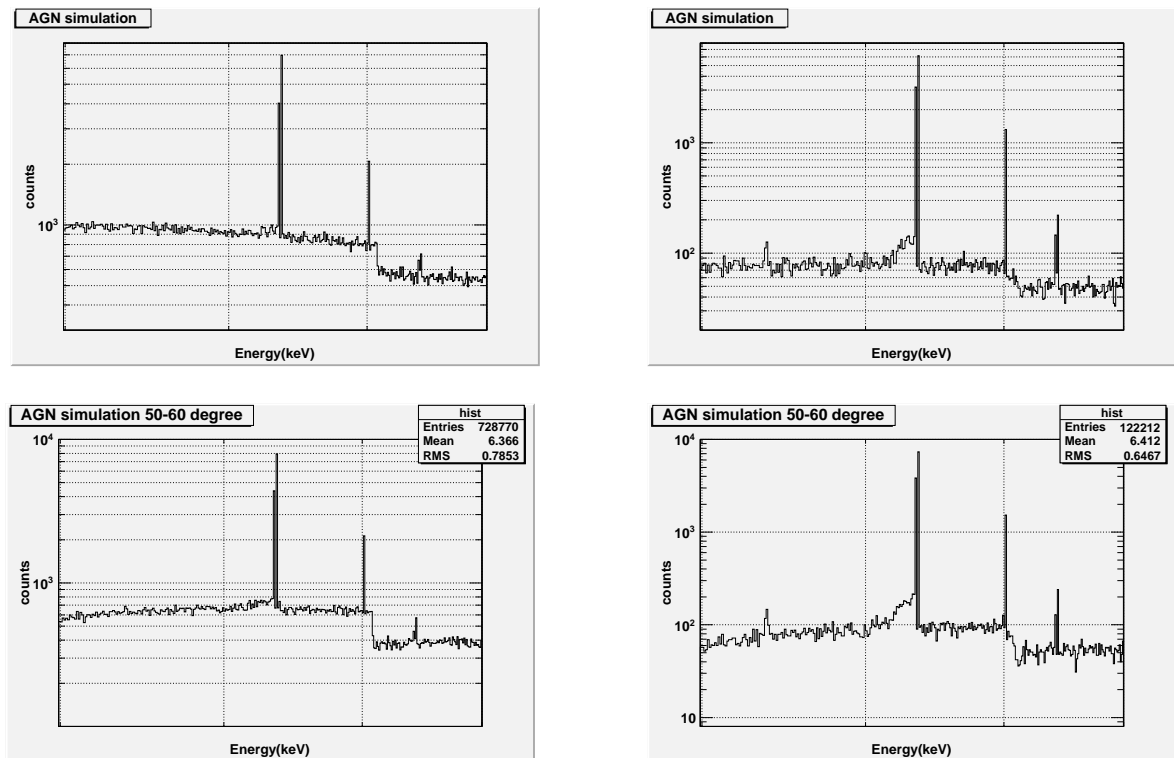


図 3.11: $\tau=0.6$ の場合のコンプトンショルダー (上) $\tau=1$ の場合のコンプトンショルダー (下) 角度は 50~60° 左が直接成分+反射成分のスペクトルで右は反射成分のみのスペクトル

反射成分だけを見ている場合にはコンプトンショルダーが作られていることがわかる。しかし直接成分を足してしまうと埋もれてしまいその形を見つけることは難しくなってしまう。一方 $\tau=1$ では $\tau=0.6$ よりもコンプトンショルダーがよく見えている。図 3.11 は $\tau=1$ の場合の角度ごとのコンプトンショルダーである。角度が 0~40° の場合は直接成分に埋まっいてしっかりと確認できないが 40~90° であれば構造を確認することができる。40~50° では 6.24 keV あたりまでコンプトンショルダーが続いているが、角度が大きくなるにつれて構造がなだらかになっていくことがわ

かる。図??は $\tau=6$ の場合のコンプトンショルダーである。 θ が $40 \sim 50^\circ$ の場合はコンプトンショルダーの構造をは $\tau=1$ の場合よりも顕著に見ることができる。 θ が大きくなると $\tau=1$ と同様に構造がなだらかになる。

表??には鉄輝線のカウントとコンプトンショルダーのカウントの比を示す。 θ は $50 \sim 60^\circ$ で統一している。

τ	θ_{oa}	コンプトンショルダー/ $Fe_{K\alpha}$ の比
0.6	40°	0.06
1	20°	0.12
1	40°	0.09
1	80°	0.05
6	40°	0.22

表 3.1: 鉄輝線のカウントとコンプトンショルダーのカウントの比

この表からトーラスの物質が多いほどコンプトンショルダーがよく見えることがわかる。これは物質が多くなることで鉄輝線と反応しやすくなるためだと考えられる。図??は $\tau=1$ 、図??は $\tau=6$ の場合の角度ごとのコンプトンショルダーである。

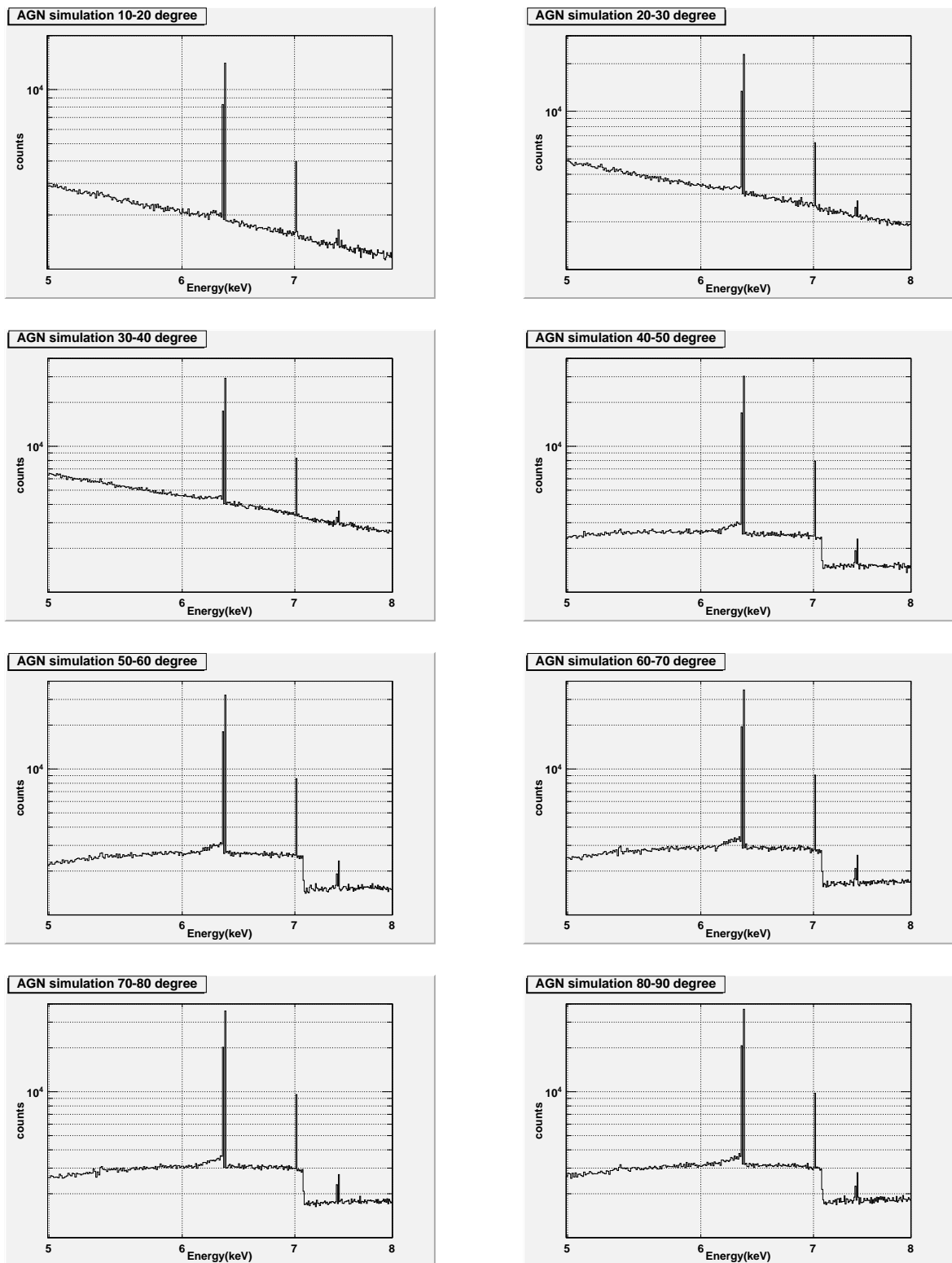


図 3.12: $\tau=1$ の場合のコンプトンショルダーの角度依存性 左上:10 ~ 20 ° 右上:20 ~ 30 ° 中段左上:30 ~ 40 ° 中段右上:40 ~ 50 ° 中段左下:50 ~ 60 ° 中段右下:60 ~ 70 ° 左下:70 ~ 80 ° 右下:80 ~ 90 °

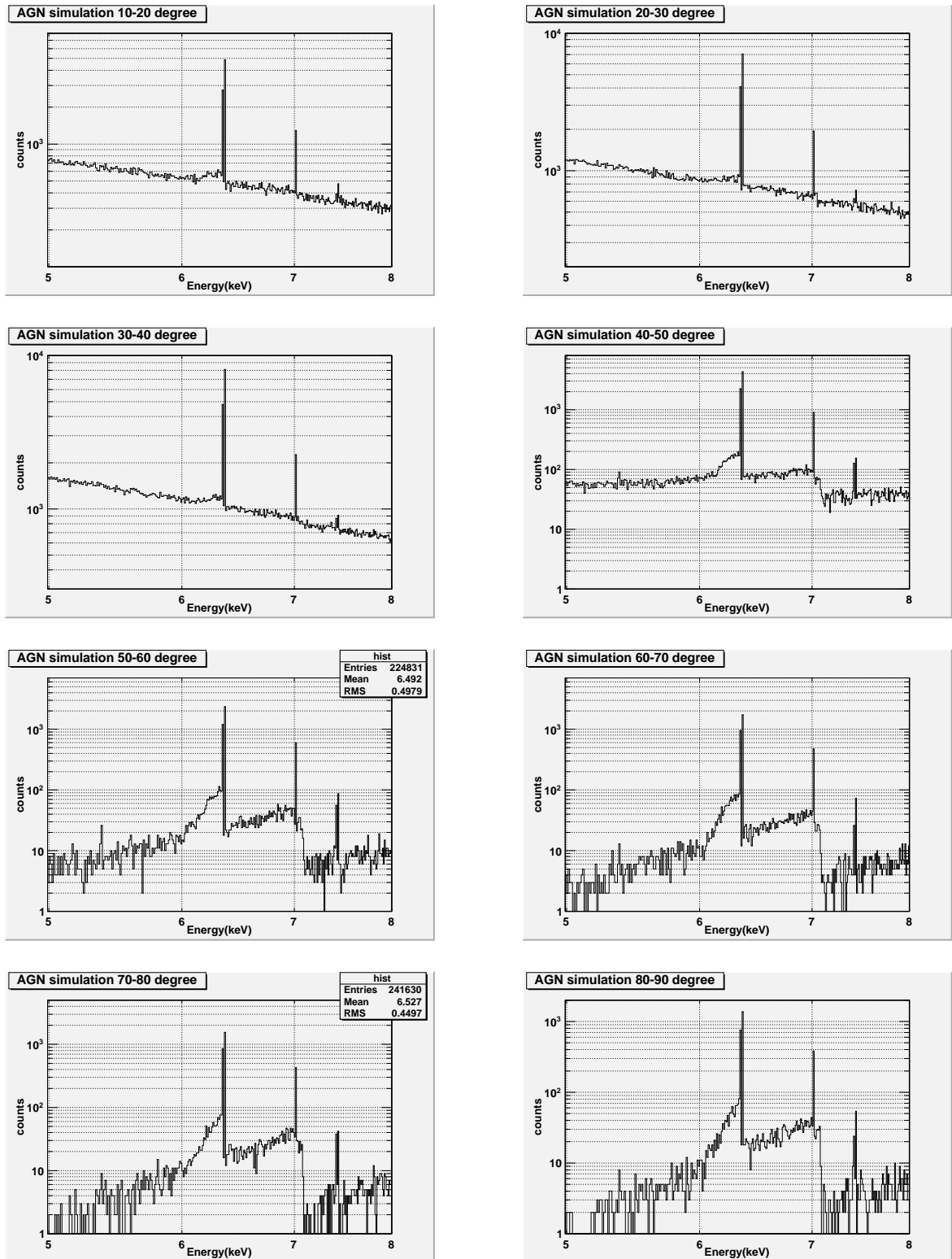


図 3.13: $\tau=6$ の場合のコンプトンショルダーの角度依存性 左上:10~20° 右上:20~30° 中段左上:30~40° 中段右上:40~50° 中段左下:50~60° 中段右下:60~70° 左下:70~80° 右下:80~90°

第4章 「すざく」によるAGNの観測

この章では実際に X 線天文衛星すざくで観測したときのようなスペクトルが得られるのかをシミュレートする。実際の観測では検出器のエネルギー分解能や光子数の制限による観測精度により前章のようなスペクトルは得られない。すざくであればエネルギー分解能は 6 keV で約 130 eV であるので輝線は広がって見えてしまう。また観測精度は天体の観測時間によって決まるので、統計の良いスペクトルを得るには長時間の観測が必要である。しかし観測時間は有限のためある程度の不定性が出てしまう。ここでは Geant4 で作ったスペクトルをすざくで見た場合どのように見えるかをシミュレーションする。また実際にすざくで観測されたスペクトルを解析しコンプトンショルダーが観測可能かどうかを調べる。

4.1 観測されるスペクトルのシミュレーション

ここでは前章で作ったスペクトルをすざくの検出器 XIS で観測した場合どのように見えるかをシミュレーションする。シミュレーションにはすざくの検出器 XIS で観測した場合のスペクトルをシミュレートすることのできる xissim というシミュレーターを用いる。このシミュレーターに観測されるスペクトルを入れることで XIS でどのように見えるかをシミュレーションできる。観測されるスペクトルには Geant4 で作ったスペクトルの反射成分と直接成分を合わせたスペクトルを用いた。図??は xissim で得られたスペクトルの例で $\tau=1$ 、 $\theta_{oa}=40^\circ$ 、 $\theta=50\sim 60^\circ$ である。仮定した観測時間は 1 (ksec)、flux は 1 ($\text{photons cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) (1.5 ~ 100 keV) である。これは最も明るい AGN を観測したときに得られる光子数とほぼ等しい精度となる。

図??の左では鉄のライン以外のラインは見えなくなっていることがわかる。また 1.7 keV 付近 Si の蛍光 X 線のラインが顕著に見えている。これは検出器 CCD の Si による蛍光 X 線が見えているためである。コンプトンショルダーを解析するために図??の右のように連続成分 (powerlaw) と輝線成分 (gaussian) でフィッティングし、さらにコンプトンショルダーをガウシアンでフィッティングした。そして輝線成分とコンプトンショルダーのガウシアンの規格化定数 (norm) の比をとり角度ごとに比べた。用いた連続成分とガウシアンの式は次の通りであるが、ガウシアンは入力スペクトルでは幅を 0 としたので 関数となる。

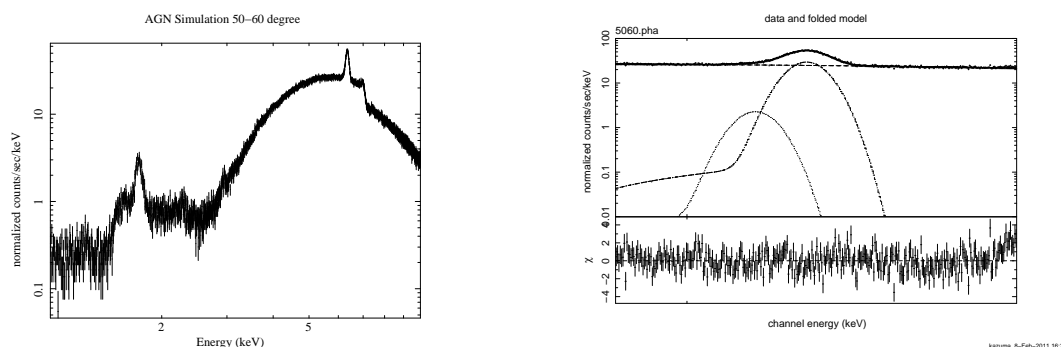


図 4.1: xissim で得られたスペクトルの例 1 ~ 10 keV のスペクトル (左) とフィッティングの例 (右)

$$A(E) = K_1 * \left(\frac{E}{1\text{keV}}\right)^{-a} \quad (4.1)$$

$$A(E) = \frac{K_2}{\sqrt{2\pi}} \delta(E - c) \quad (4.2)$$

この時 K_1 、 K_2 は規格化定数で、 a 、 c はパラメータである。鉄輝線の場合は $c=6.36$ keV、コンプトンショルダーの場合は $c=6.20$ keV として Geant4 のずれを考慮した。図??は前述した式で 6.4 keV 付近をフィッティングしたものである。表??は規格化定数の比をとったものである。

θ	コンプトンショルダー/ $\text{Fe}_{K\alpha}$ の比
0 ~ 10 °	0.07±0.04
10 ~ 20 °	0.05±0.04
20 ~ 30 °	0.03±0.04
30 ~ 40 °	0.04±0.04
40 ~ 50 °	0.06±0.01
50 ~ 60 °	0.06±0.01
60 ~ 70 °	0.06±0.01
70 ~ 80 °	0.05±0.01
80 ~ 90 °	0.05±0.01

表 4.1: 鉄輝線とコンプトンショルダーの規格化定数の比

図??ではコンプトンショルダーの構造はほとんど見えておらず角度によってその形を区別するのは困難である。また表??を見てもわかるように鉄輝線に対するコンプトンショルダーの割合は少なくショルダーが有意にあるとはいえない場合もある。

図??は ASTRO-H の検出器 SXS で観測した場合のスペクトルのシミュレーションである。用いたデータは Geant4 で作った、 $\tau=1$ 、 $\theta_{\text{oa}}=40$ °、 $\theta=50 \sim 60$ °のデータである 図??の左を見ると XIS の場合よりも分解能がかなり向上しており、コンプトンショルダーがはっきりとわかる。さらに XIS で見えていた検出器由来の Si の蛍光 X 線も見えなくなっている。図??の右では鉄輝線の $K_{\alpha 1}$ 、 $K_{\alpha 2}$ が分離して見えており、すざくの XIS に比べてその分解能の良さがよくわかる。

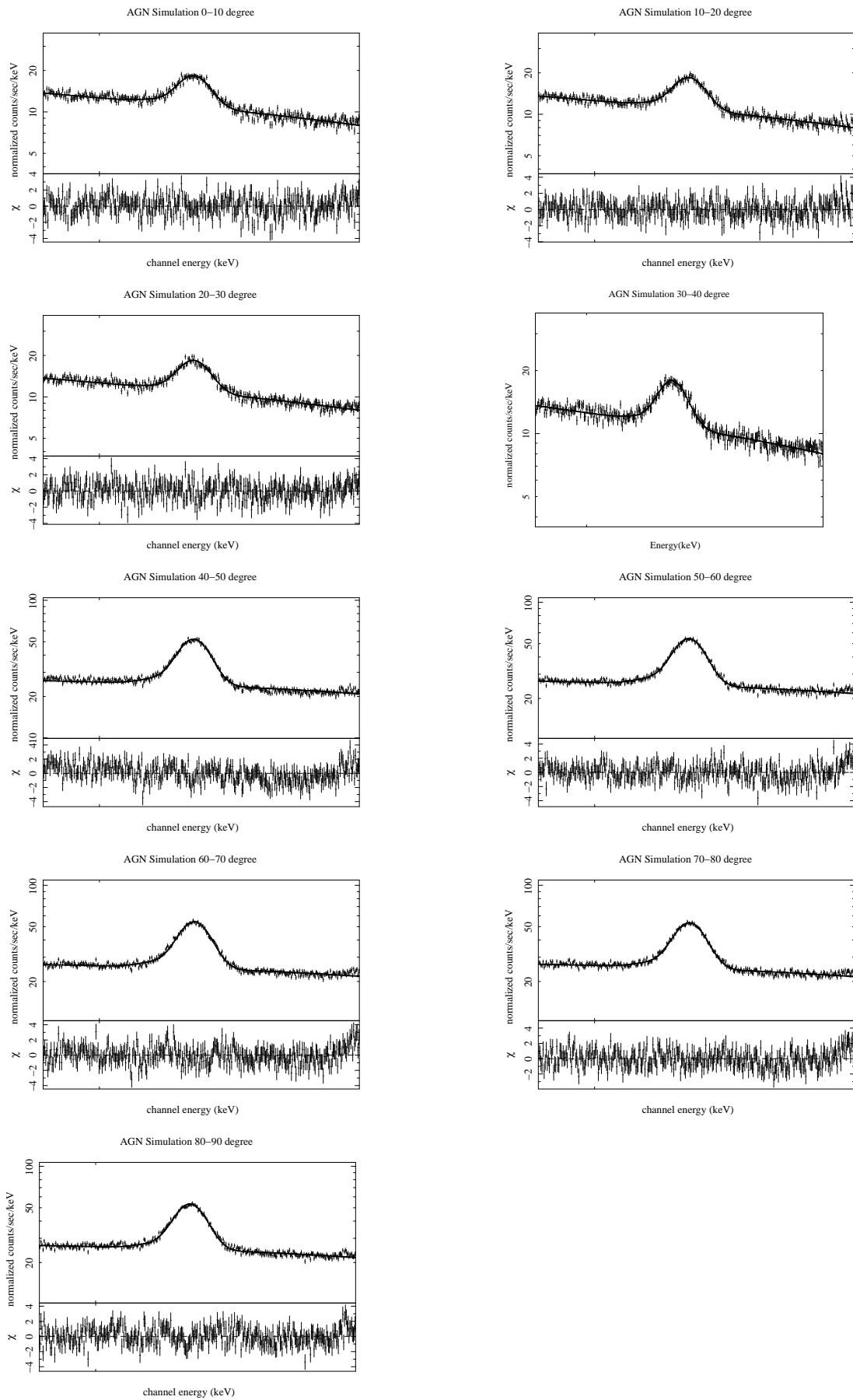


図 4.2: XIS で観測されるスペクトルのシミュレーションの角度依存性 左上:0 ~ 10 ° 右上:10 ~ 20 ° 中段左上:20 ~ 30 ° 中段右上:30 ~ 40 ° 中段左下:40 ~ 50 ° 中段右下:50 ~ 60 ° 左下:60 ~ 70 ° 右下:70 ~ 80 °

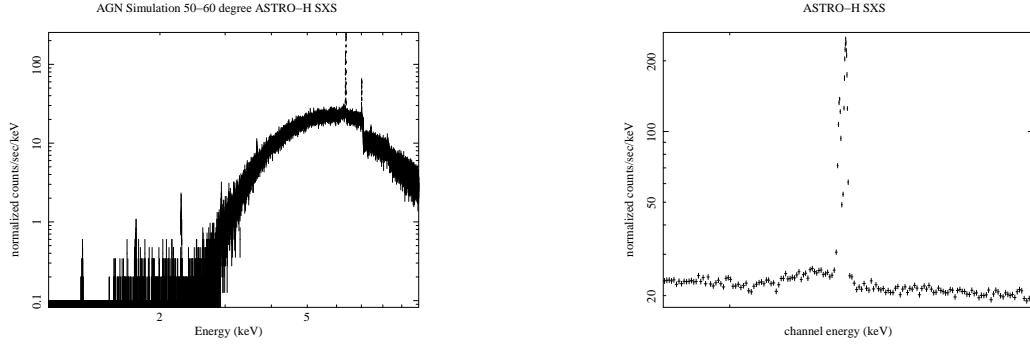


図 4.3: ASTRO-H SXS で観測されるスペクトルのシミュレーション 角度が $50 \sim 60^\circ$ の場合 $0.2 \sim 12.0$ keV のスペクトル (左) $5.8 \sim 7.0$ keV のスペクトル (右)

4.2 AGN の実観測データの解析

ここでは実際にすざく XIS で観測された AGN の解析を行う。解析する天体は次の 5 つの天体で鉄輝線の明るい天体を選んだ。表 4.2 は天体のデータである。これら 5 つの天体について前節と

天体名	z	N_H (cm^{-2})
Circinus Galaxy	0.001	1.0×10^{24}
Centaurus A	0.002	1.4×10^{23}
NGC4151	0.003	2.4×10^{23}
NGC4388	0.008	3.6×10^{23}
MRK3	0.013	7.5×10^{23}

表 4.2: 解析天体のデータ

同様に解析を行った。しかし実際の天体には 6.7 keV、 7.0 keV に電離した鉄輝線がありこれらにもガウシアンでフィッティングを行った。天体の輝線は赤方偏移により輝線のエネルギーがシフトするためこれを考慮にいれたガウシアンでフィッティングを行った。

図 4.4 は 4 天体のスペクトルである。この図 4.4 から NGC4151 の拡大図にコンプトンショルダーの構造を見ることができる。その他の天体に関しては図からコンプトンショルダーを見つけることはできない。表 4.3 は鉄輝線とコンプトンショルダーの比である。表 4.3 からやはりスペクトルで

天体	コンプトンショルダー/ $\text{Fe}_{K\alpha}$ の比	τ
Circinus Galaxy	0.05 ± 0.01	2.65
Centaurus A	0.07 ± 0.05	0.37
NGC4151	0.14 ± 0.03	0.64
NGC4388	0.07 ± 0.04	0.95
MRK3	0.02 ± 0.04	1.98

表 4.3: 天体の鉄輝線とコンプトンショルダーの規格化定数の比

構造が見えていた NGC4151 はコンプトンショルダーの割合が大きいことがわかる。割合が二番目に大きい Cen A では図をよく見ると、低エネルギー側でガウシアンの形がくずれているのがわかる。しかしその他の天体では割合はあまり大きくなくその構造を見つけるのは難しい。

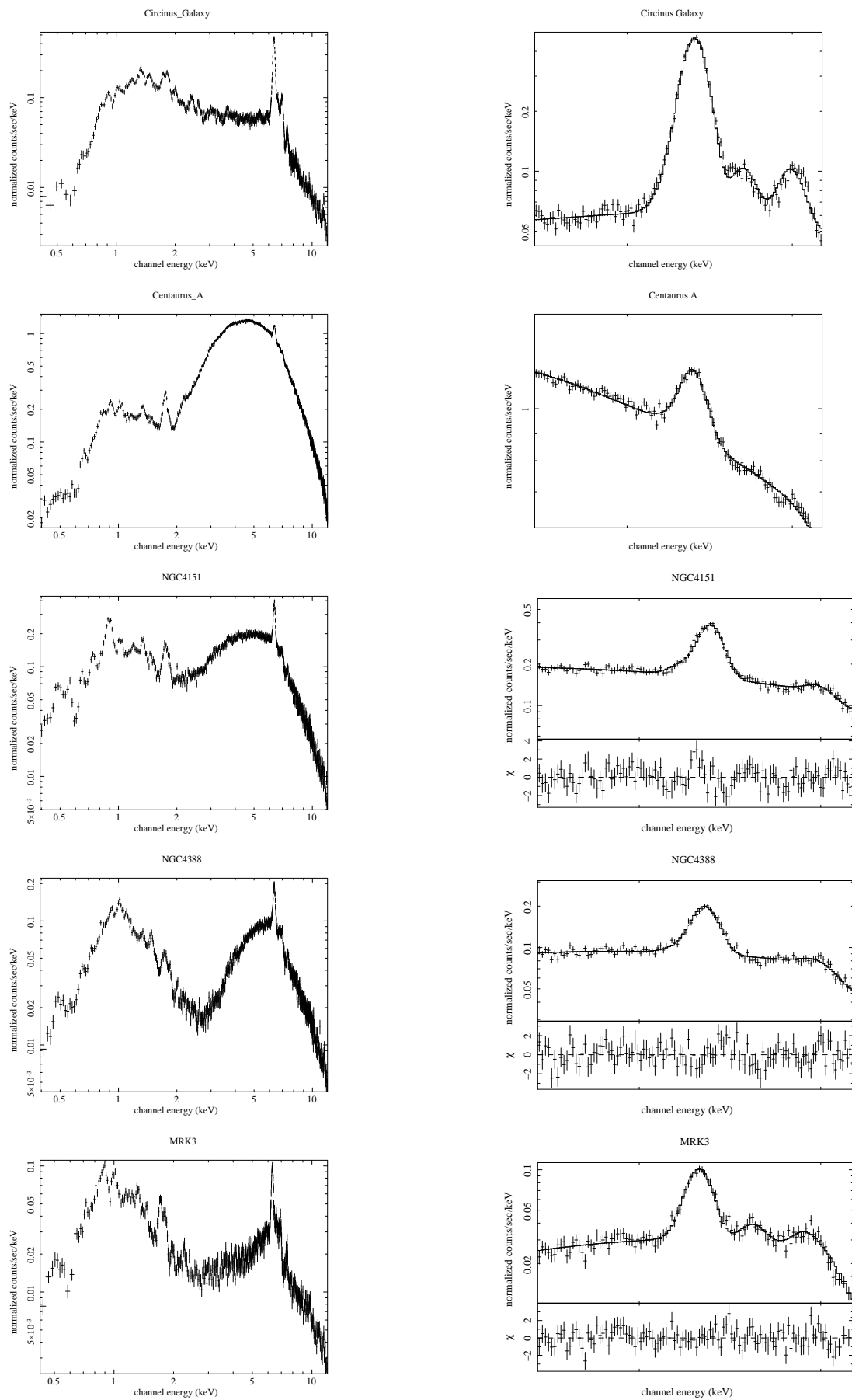


図 4.4: 解析天体のスペクトル 0.2 ~ 12.0 keV のスペクトル(左) と 6.4 keV 付近のスペクトルフィット
 一段目:Circinus Galaxy 二段目:Centaurus A 三段目:NGC4151 四段:NGC4388 五段目:MRK3

4.3 考察

各天体ごとに τ やコンプトンショルダーの割合から推測されることをまとめる。

・ Circinus Galaxy

τ が解析天体の中で一番大きいにも関わらず、コンプトンショルダーの割合が小さい。また鉄輝線の連続成分に対する割合はかなり大きい。これは開口部の角度 $\theta_{oa} > 40^\circ$ と大きくトーラスの領域が小さいということが考えられる。スペクトルから中心核は直接見ておらず、トーラスのあるぎりぎりの角度でみていると考えられる。

・ Centaurus A

τ は小さいが鉄輝線の形がくずれているため、コンプトンショルダーは小さいが確認できる。全体のスペクトルの形状を見てもシミュレーションの $\tau=0.25$ を θ が $60 \sim 90^\circ$ で見ている場合とよく似ている。よって $\theta_{oa} < 40^\circ$ である可能性が高い。分解能の良い観測がなされれば、さらにはっきりとした構造を見ることができると考えられる。

・ NGC4151

解析天体の中でコンプトンショルダーがよく見えていた天体であり、そのでっぱり具合から推測するとシミュレーションでの θ が $40 \sim 50^\circ$ 、 $50 \sim 60^\circ$ に対応していると推測できる。 θ_{oa} もシミュレーションとほぼ同じ 40° 程度であると考えられる。つまり直接は中心核を見てはいないが、トーラスがぎりぎりかかっている状態であると考えられる。この天体も Centaurus A と同様に精度のよい観測でさらにはっきりと構造が見えると考えられる。

・ NGC4388

τ が 0.95 であるのでほぼ同様の解析を行ったシミュレーションとほとんど同じであることを考えると、コンプトンショルダーが見えていないのはシミュレーションと同じである。よって $\theta > \theta_{oa}$ であると考えられる。しかしシミュレーションと同じであるならば、コンプトンショルダーは存在するはずなので分解能のよい観測であれば見える可能性はある。

・ MRK3

コンプトンショルダーの割合が一番小さく、吸収も受けている。また $\tau=1.98$ と解析天体の中では大きいことから、 $\theta_{oa} > 40^\circ$ で存在領域が少ないことが考えられる。しかし鉄輝線が見えていることから、トーラスをほぼ真横から見ているのではないかと考えられる。

第5章 まとめと今後

本研究では Geant4 を用いて AGN のトーラスを作り、そのスペクトルを再現することができた。またそのスペクトルからコンプトンショルダーが作られることを確認し、その角度依存性を調べることができた。観測を解析した結果 2 つの天体に対してコンプトンショルダーの構造の兆候が見つかり、シミュレーションとの比較からある程度のトーラスの見込み角の制限ができる可能性があることがわかった。今後より分解能の良い ASTRO-H が打ち上げ予定であるので、観測が始まればより多くの天体からコンプトンショルダーがはっきりと見つかることが期待される。

謝辞

本研究を行うにあたり協力していただいたすべての方に感謝します。深沢先生には4年生実験の時からお世話になり、卒業論文の指導では解析方法から書き方まで全て指導していただき本当に感謝しています。ありがとうございました。水野先生には夏に始めた実験から卒論ではGeant4の使い方まで教わりました。本当にありがとうございました。その他のスタッフの方々にもコロキウムなどで解析の方針など様々なことに関して貴重なアドバイスをいただきました。ありがとうございました。西野さんには解析ソフトの使い方、卒論の書き方など研究はもちろん様々なことを教えていただきました。研究室のみなさんもこの一年間本当にお世話になりました。またこれからもよろしくおねがいします。

参考文献

- [1] シリーズ現代の天文学 4 銀河 I-銀河と宇宙の階層構造
谷口 義明・岡村 定矩・祖父江 義明 日本評論社
- [2] Suganuma et al, 2006,ApJ 639, 46
- [3] 山崎 智紀 広島大学 修士論文 2008
- [4] NIST XCOM: Poton Cross Section Database
(<http://www.nist.gov/pml/data/xcom/index.cfm>)
- [5] Ikeda et al, 2009, ApJ 692, 608
- [6] Watanabe et al, 2003, ApJ 597, L37
- [7] Yaqoob et al,2011,MNRAS accepted (arXiv:1010.5262)
- [8] Anders and Grevesse (1989)
- [9] An Introduction to Galaxies and Cosmology
Mark H.Jones and Robert J.A.Lambourne CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS
- [10] Ishisaki et al, 2007,PASJ,59S,113S
- [11] 笹田 真人 広島大学 卒業論文 2007
- [12] Geant4 User's Guide for Application Developers
(<http://geant4.web.cern.ch/geant4/UserDocumentation/UsersGuides/ForApplicationDeveloper/html/index.html>)
- [13] 「すざく」ファーストステップガイド 第 4.0.3 版 ,2009, 「すざく」ヘルプデスク
- [14] Giorgio M., 2002,MNRAS 337,147
- [15] fukazawa et al,2011, ApJ 727, 19