

Geant4を用いた橢円銀河中心における 共鳴散乱の影響の評価

寺前拓人、深沢泰司、宮岡敬太(広島大学)

1.Introduction

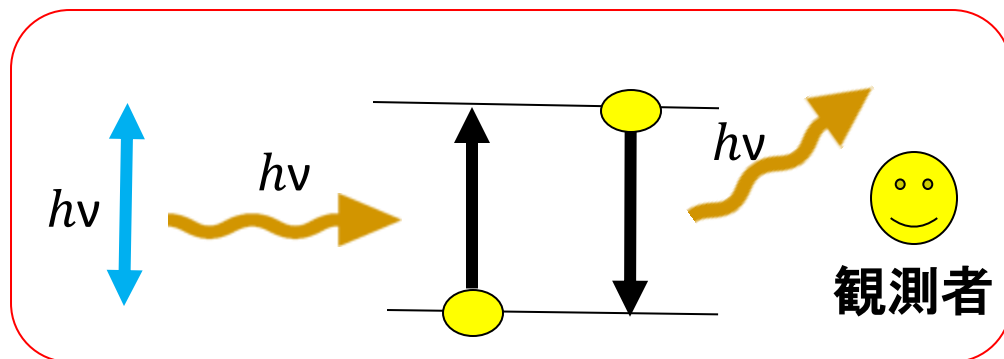
・楕円銀河



- ・ 温度: $0.5 \sim 1.0 \text{ keV}$
- ・ 中心にX線で明るい高温ガス(ISM)

ISM中心から Fe^{16+} (0.826keV)の
共鳴散乱が観測される場合がある。

・共鳴散乱



共鳴散乱断面積

$$\sigma_{RS} = \frac{\pi e^2}{m_e v_0} f_{12} \sqrt{\frac{m_i}{2\pi\Delta E}} \exp\left[-\frac{m_i c^2 (\nu - \nu_0)^2}{2\Delta E \nu_0^2}\right] [\text{cm}^2]$$

イオン	エネルギーE	振動子強度f	共鳴散乱
Fe^{16+}	0.727keV	0.12	起きにくい
	0.826keV	2.73	起きやすい

強度比から
共鳴散乱の規模が分かる

共鳴散乱から分かること

$$\sigma_{RS} = \frac{\pi e^2}{m_e v_0} f_{12} \sqrt{\frac{m_i}{2\pi\Delta E}} \exp\left[-\frac{m_i c^2 (\nu - \nu_0)^2}{2\Delta E \nu_0^2}\right] [\text{cm}^2]$$

ドップラーシフトの項

ν : 入射光子の振動数 ν_0 : 輝線固有の振動数

ISM内の乱流により
ドップラーシフトが起きていると考えられる

ISM乱流はISMと銀河内ジェットとの
衝突が要因の一つと予想

$$\Delta E \approx E_0 \left[\frac{k_B T}{m_i c^2} \left(1 + 1.4 \frac{m_i}{m_p} M^2 \right) \right]^{1/2}$$

共鳴散乱の観測から
ISMの乱流の情報を得られると
期待される

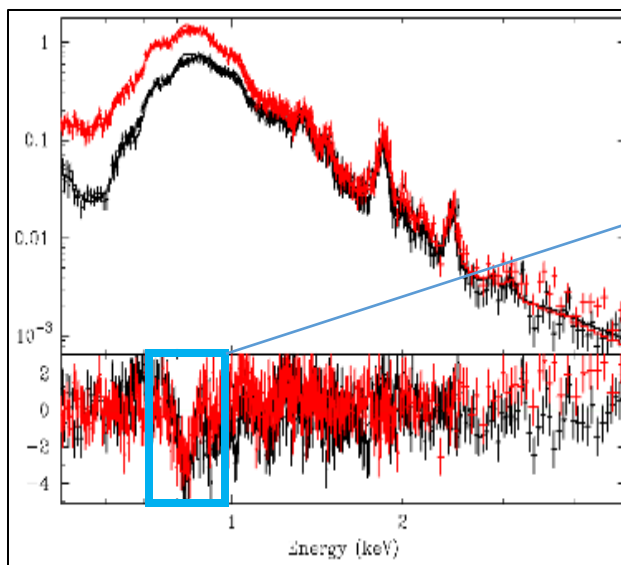
2015/9 秋季年会(甲南大学)

12の楕円銀河に対し、「すざく」XIS、「XMM-Newton」RGSの解析結果を発表

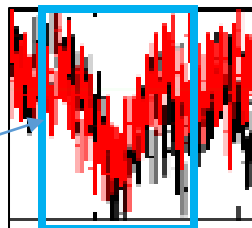
→9つの楕円銀河から共鳴散乱らしき兆候を確認

共鳴散乱のデータ解析手法

NGC4636(XIS)



Model:wabs(vapec+bremss+apec+apec)



- ・共鳴散乱の影響が大きい輝線はphotonの数が減り、VAPECモデルに対し負の残差が生じる

イオン	エネルギーE	振動子強度f	共鳴散乱
Fe^{16+}	0.727keV	0.12	起きにくい
	0.826keV	2.73	起きやすい

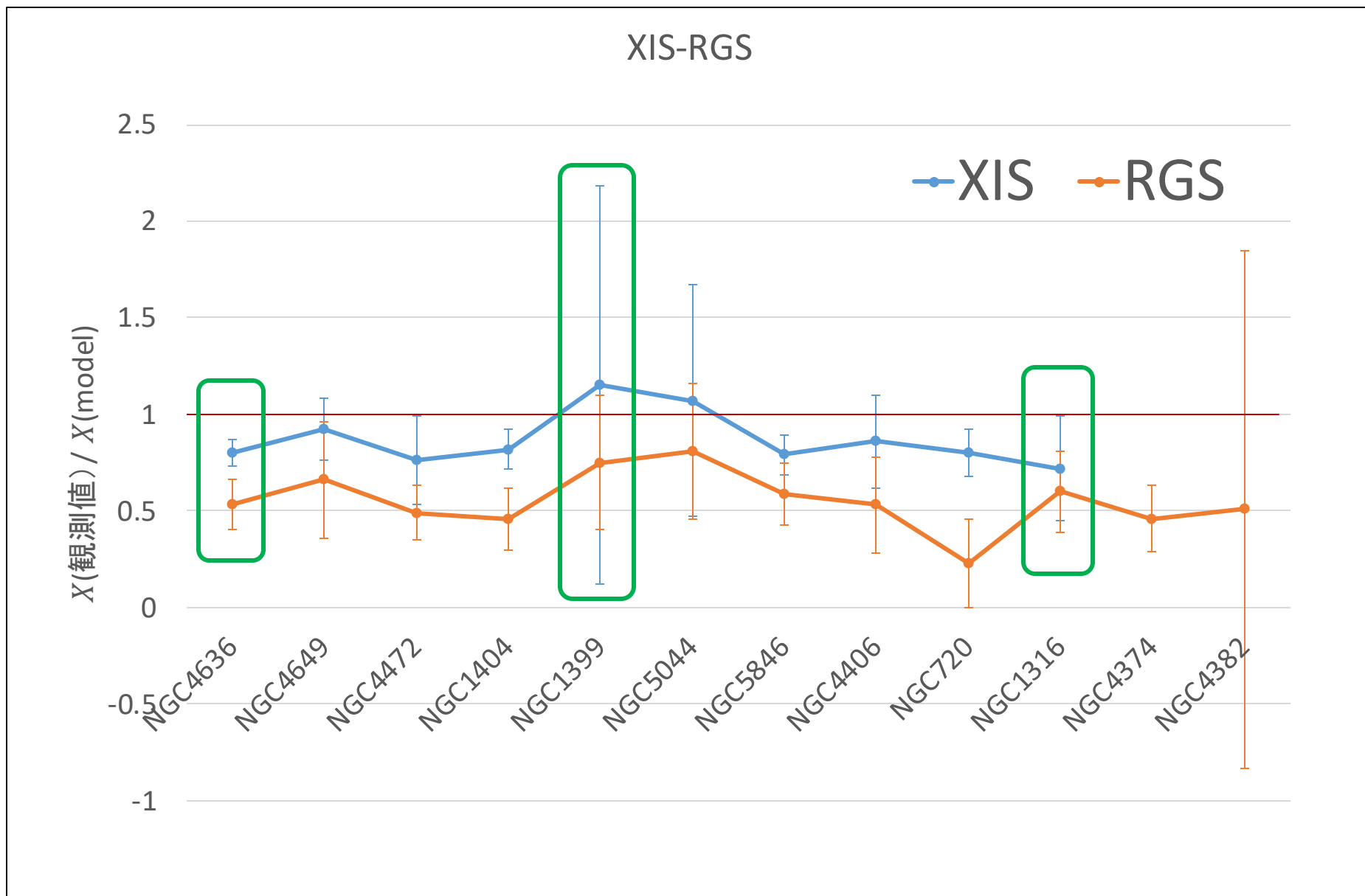
$X = I_{0.82keV} / I_{0.73keV}$ を共鳴散乱の度合いの基準とする

→ $X(\text{観測値}) / X(\text{fake model})$ が1より小さくなるほど共鳴散乱の度合いが大きい

➡ Gaussian modelで強度比を評価

観測データの解析結果

解析天体、手法



本研究のMotivation

Geant4による解析から、共鳴散乱に関して観測データへの考察を行い、また乱流の影響を定量的に評価すること

- 1.XMM-Newton(mos,pn)の観測データを用いて楕円銀河のガス密度を導出
- 2.得られたパラメータからGeant4を用いて仮想の楕円銀河を作成、シミュレーションを行う



共鳴散乱の影響を観測データと比較、また共鳴散乱の度合いから乱流(M)の値を評価した。

2. 解析天体、手法

▪ X線解析天体

- NGC4636
- NGC4649
- NGC4472
- NGC1404
- NGC1399
- NGC5846
- NGC5044
- NGC4406
- NGC720
- NGC1316
- NGC4374
- NGC4382

・シミュレーション
評価天体

- NGC4636
- NGC1316
- NGC1399

選定理由

- ・先行研究が多いNGC4636が基盤、
温度以外の条件に近いNGC1399、
光度以外の条件に近いNGC1316、
を各々選定

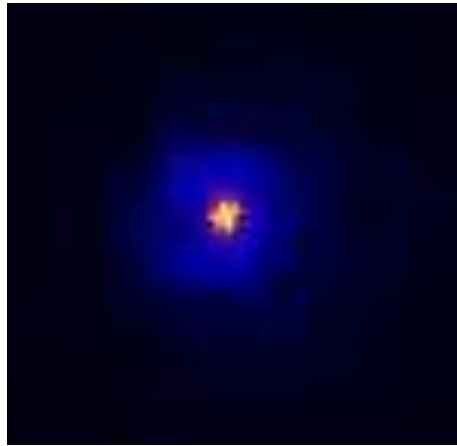
天体	kT(keV)	$L_{X_{soft}} (ergs^{-1})$	D(Mpc)
NGC4636	0.67	2.3×10^{41}	15.9
NGC1316	0.60	3.9×10^{40}	18.1
NGC1399	1.17	2.7×10^{41}	18.1

kT, $L_{X_{soft}}$, D : Fukazawa et al, 2006

ガス密度導出

- Geant4に入力する楕円銀河のガス密度導出

NGC4636(mos1)



イメージから表面輝度分布を抽出
-> $S_x(\text{ergs}^{-1})$ - $r(\text{arcmin})$ に対しダブル β モデルでフィッティング
(過去論文と比較)



Geant4に導出値を入力

使用モデル

$$n_{ion} = \sqrt{n_{ion1}^2 + n_{ion2}^2} \quad \text{ダブル}\beta\text{モデル}$$

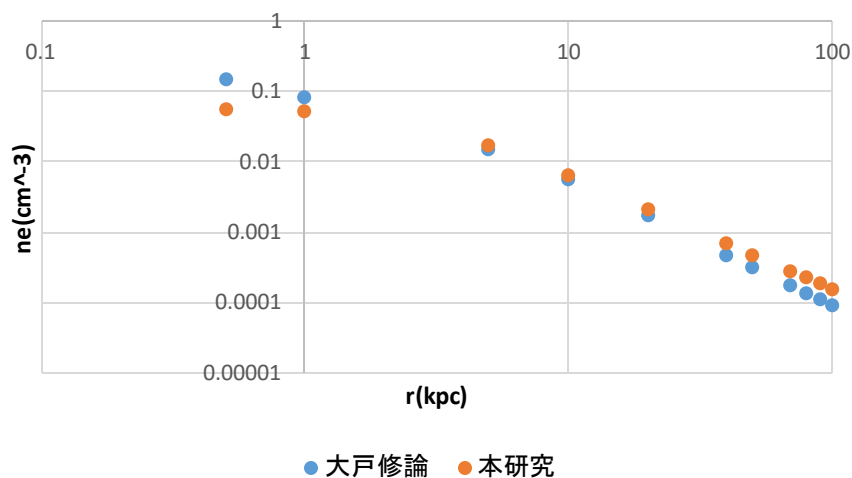
$$n_{ion(1,2)}(r) = n_c \left[1 + \left(\frac{r}{r_c} \right)^2 \right]^{-\frac{3}{2}\beta}$$

比較論文: Shigeyama et al.1997
大戸彰三 修士論文
(広島大学 2003)

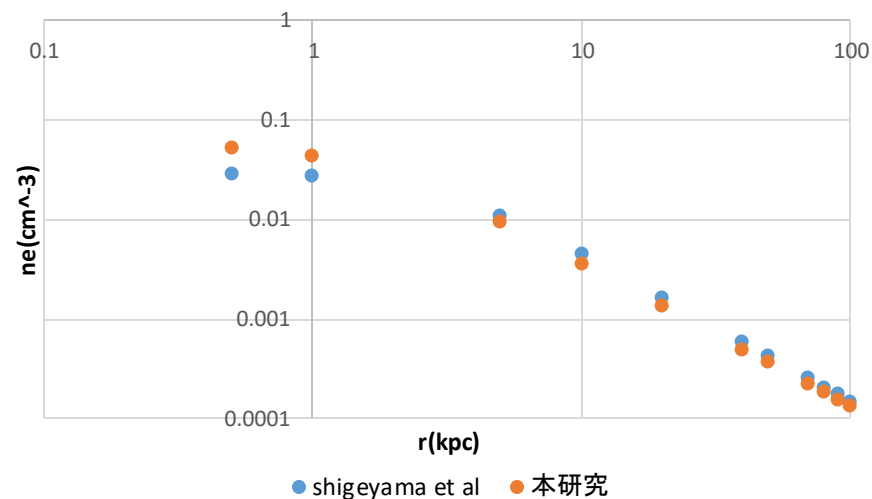
ガス密度導出結果

・質量導出

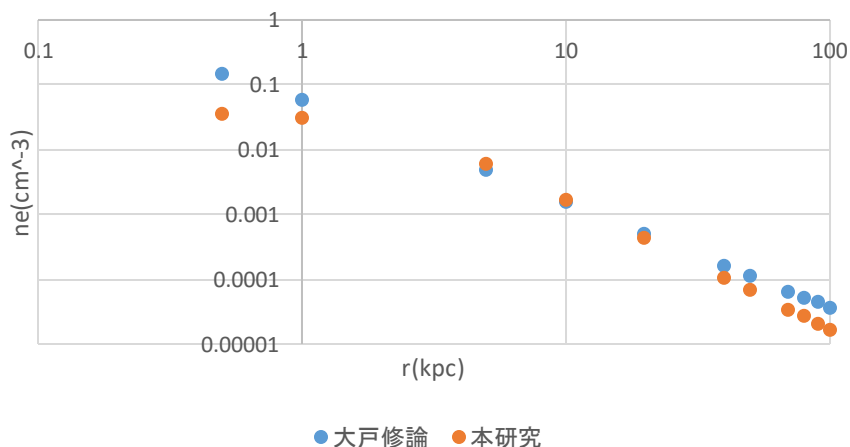
NGC4636



NGC1399



NGC1316



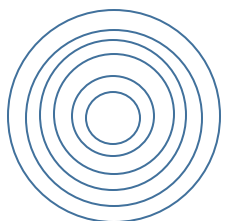
- 本研究
- 比較論文の結果

- ・大戸修論、Shigeyama et al.に比較的近い値
 - ・本研究：XMM-Newton
 - ・大戸修論：Chandra
 - ・Shigeyama et al.: ROSAT, ASCA
- 中心付近の値には多少の差異が生まれた

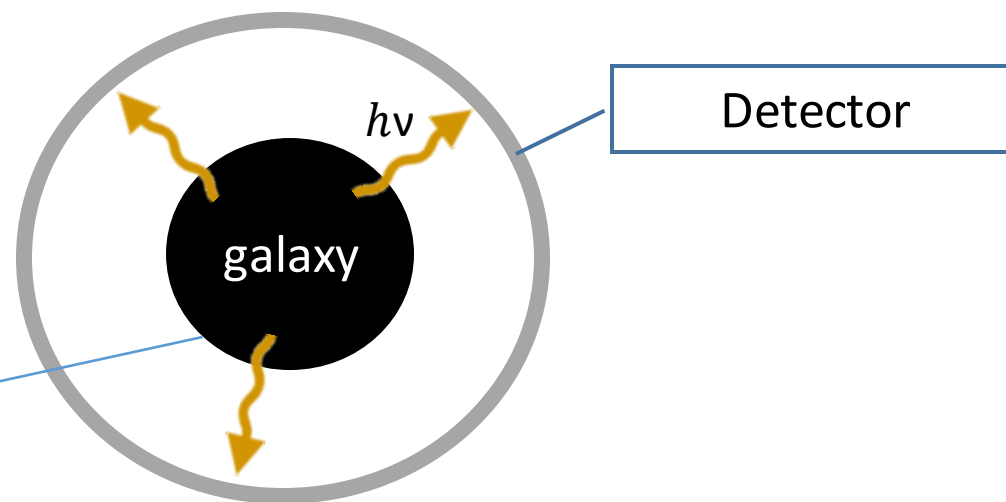
Geant4による解析

右図のような状況を構築

銀河は簡易的な玉ねぎ型で構築



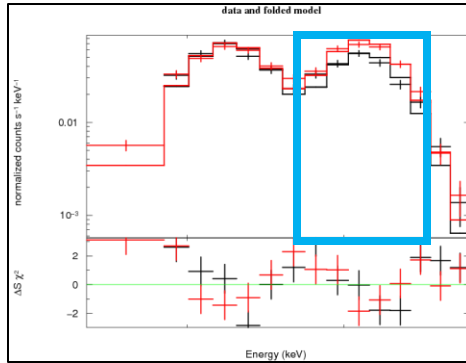
←各殻に密度を設定



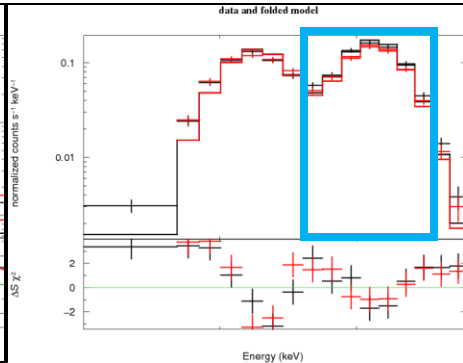
- 発射する輝線: Fe^{16+} : 0.728keV, 0.737keV, 0.826keV (参考: Werner et al.2009)
- 検出器半径: 天体と地球の距離 (D(Mpc))
- 半径ごとの温度: Fukazawa et al.
- Abundance: 大戸修論
- 打ち込む光子数: 250000発
- 乱流M: (0, 0.5, 1.0)
- 補足: 光子の減少を防ぐため光電吸収の作用は除外 (Detectorは光子の通過で感知)

Geant4での解析結果

M0r1



M0r2-4



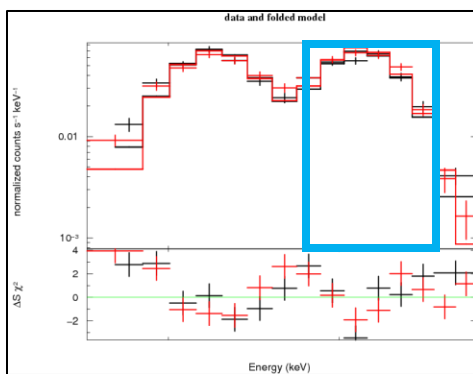
NGC1399の結果

Response:XIS

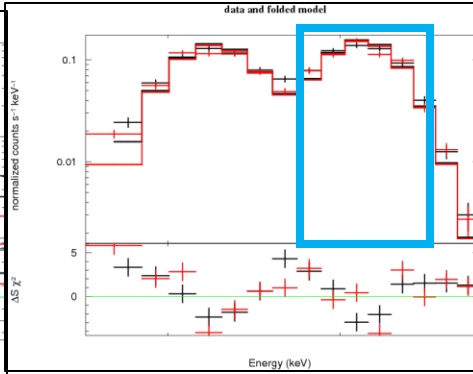
黒: 振動子強度が実際の値

赤: 振動子強度≈0での値

M0.5r1

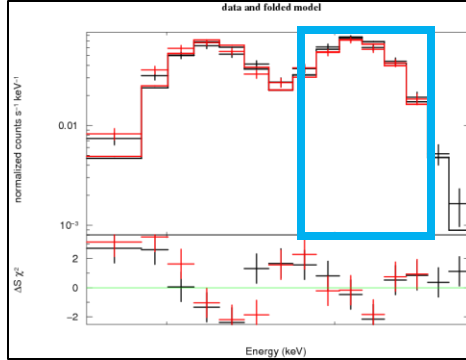


M0.5r2-4

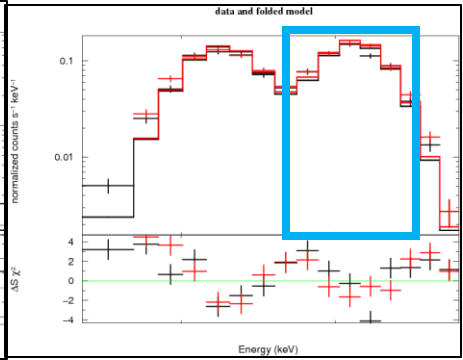


$$X = I_{0.82\text{keV}} / I_{0.73\text{keV}}$$

M1.0r1



M1.0r2-4



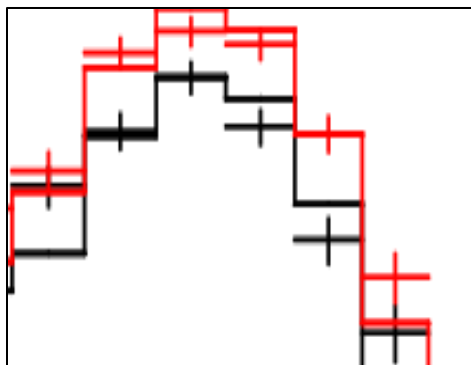
	X(共鳴散乱あり)/X(共鳴散乱なし)		
M,r(arcmin)	NGC4636	NGC1316	NGC1399
M0 r0-1	0.72±0.09	0.93±0.10	0.73±0.10
M0.5 r0-1	0.85±0.10	0.96±0.10	0.89±0.12
M1.0 r0-1	0.89±0.11	0.98±0.11	1.11±0.14
M0 r2-4	1.15±0.11	1.19±0.13	1.12±0.10
M0.5 r2-4	1.12±0.11	1.10±0.12	1.00±0.09
M1.0 r2-4	1.16±0.11	1.01±0.11	0.95±0.09

青: 誤差込みで<1

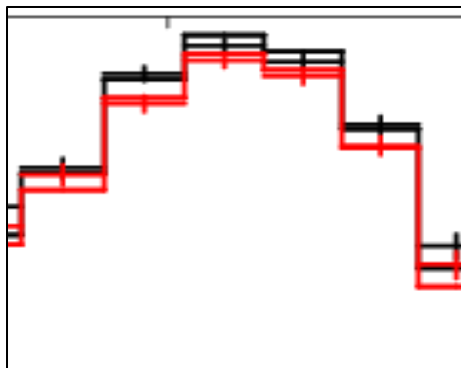
赤: 誤差込みで>1

Geant4での解析結果

M0r1



M0r2-4



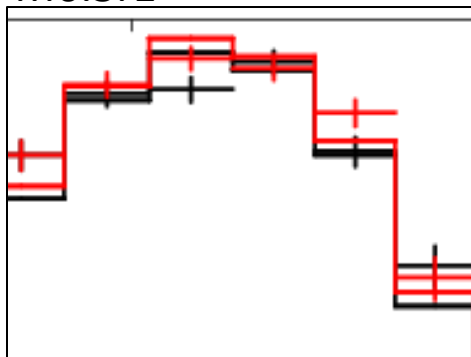
NGC1399の結果

Response:XIS

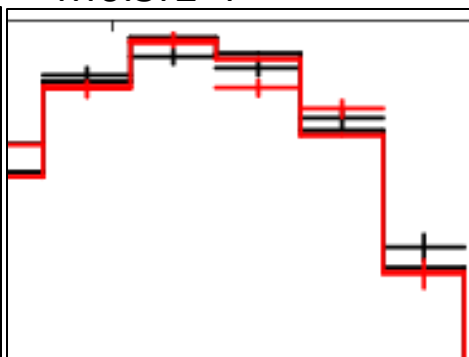
黒：振動子強度が実際の値

赤：振動子強度 ≈ 0 での値

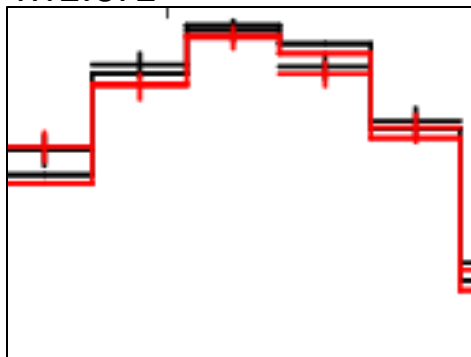
M0.5r1



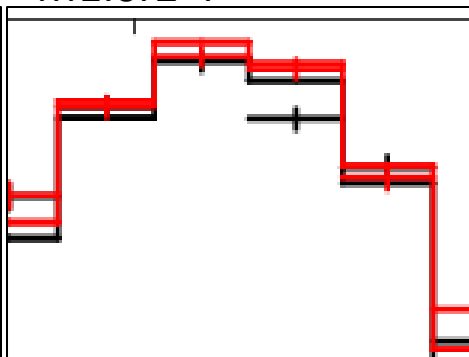
M0.5r2-4



M1.0r1



M1.0r2-4



$$X = I_{0.82\text{keV}} / I_{0.73\text{keV}}$$

	X(共鳴散乱あり)/X(共鳴散乱なし)		
M,r(arcmin)	NGC4636	NGC1316	NGC1399
M0 r0-1	0.72 \pm 0.09	0.93 \pm 0.10	0.73 \pm 0.10
M0.5 r0-1	0.85 \pm 0.10	0.96 \pm 0.10	0.89 \pm 0.12
M1.0 r0-1	0.89 \pm 0.11	0.98 \pm 0.11	1.11 \pm 0.14
M0 r2-4	1.15 \pm 0.11	1.19 \pm 0.13	1.12 \pm 0.10
M0.5 r2-4	1.12 \pm 0.11	1.10 \pm 0.12	1.00 \pm 0.09
M1.0 r2-4	1.16 \pm 0.11	1.01 \pm 0.11	0.95 \pm 0.09

青：誤差込みで < 1

赤：誤差込みで > 1

昨年度との比較、考察

観測結果(XIS)

天体	X(観測値)/(model)	
天体	XIS	RGS
NGC4636	0.80 ± 0.07	0.53 ± 0.13
NGC1399	1.15 ± 1.03	0.75 ± 0.35
NGC1316	0.72 ± 0.27	0.60 ± 0.21

シミュレーション結果(Geant4)

	X(共鳴散乱あり)/X(共鳴散乱無し)		
M,r(arcmin)	NGC4636	NGC1316	NGC1399
M0 r0-1	0.72 ± 0.09	0.93 ± 0.10	0.73 ± 0.10
M0.5 r0-1	0.85 ± 0.10	0.96 ± 0.10	0.89 ± 0.12
M1.0 r0-1	0.89 ± 0.11	0.98 ± 0.11	1.11 ± 0.14
M0 r2-4	1.15 ± 0.11	1.14 ± 0.12	1.12 ± 0.10
M0.5 r2-4	1.12 ± 0.11	1.09 ± 0.11	0.98 ± 0.09
M1.0 r2-4	1.16 ± 0.11	1.02 ± 0.11	0.98 ± 0.09

- ・NGC4636に関してはM~0.5、NGC1399に関してはM=1.0付近の強い乱流が起こっている？
 - ・NGC1316はエラー内で一致はしているものの、想定した見積もりよりも共鳴散乱の値が小さい結果が得られた。
- >密度の見積もりが甘い、あるいはGeant4で考慮できていない別の物理現象の存在を軽視している？

Optical depth

$$\tau(r) = \int_0^r A_i \sigma_{RS} n_{ion}(x) dx$$

・共鳴散乱の度合いと相関を持つ

$$A_i(\text{Fe abundance}) = 4.68 \times 10^{-5}$$

$$n_i(r) = n_c [1 + (r/r_c)^2]^{-\frac{3}{2}\beta} [\text{cm}^3]$$

$$\sigma_{RS} = \frac{\pi e^2}{m_e v_0} f_{12} \sqrt{\frac{m_i}{2\pi kT}} \exp\left[-\frac{m_i c^2 (v - v_0)^2}{2kT v_0^2}\right] [\text{cm}^2]$$

M(マツハ)により
変動する項

M	Optical depth		
	NGC4636	NGC1399	NGC1316
0.1	2.01E+01	1.16E+01	1.25E+01
0.2	1.14E+01	6.61E+00	7.08E+00
0.3	6.51E+00	3.78E+00	4.05E+00
0.4	3.77E+00	2.19E+00	2.34E+00
0.5	2.20E+00	1.28E+00	1.37E+00
0.6	1.29E+00	7.47E-01	8.00E-01
0.7	7.56E-01	4.39E-01	4.70E-01
0.8	4.45E-01	2.58E-01	2.76E-01
0.9	2.62E-01	1.52E-01	1.63E-01
1	1.55E-01	8.97E-02	9.60E-02

想定した値を用いるとまだ不自然な値が得られる

まとめ

- 3つの楕円銀河に対し質量導出を行ったところ、高い精度で過去論文と値が一致した。
- Geant4にて共鳴散乱の影響の考察を行い、観測データとの照合から、乱流の程度に大雑把な見当を付けることができた。
- Optical depthへの考察から、乱流の値を正確に得れば適切な値を導出できると考えることができる。

以下予備トラペ

目次

1. Introduction
2. 解析天体、手法
3. 結果・考察
4. まとめ

2. 解析天体、手法

▪ 昨年度解析天体

- NGC4636
- NGC4649
- NGC4472
- NGC1404
- NGC1399
- NGC5846
- NGC5044
- NGC4406
- NGC720
- NGC1316
- NGC4374
- NGC4382

RGS, XISデータから共鳴散乱が確認される
(Xu et al, 2002, Hayashi et al, 2008)

$$L_{X_{soft}} \approx 10^{41} \text{ ergs}^{-1}, D \approx 15 - 20 \text{ Mpc}$$

• RGSによる先行研究あり(Werner et al, 2009)

- NGC4636に似た光度、距離 ($L_{X_{soft}} \approx 10^{41} \text{ ergs}^{-1}, D \approx 15 - 20 \text{ Mpc}$)

$$L_{X_{soft}} \approx 10^{41} \text{ ergs}^{-1}, D \approx 15 - 20 \text{ Mpc}$$

$$L_{X_{soft}} \approx 10^{42} \text{ ergs}^{-1}, D \approx 30 \text{ Mpc}$$

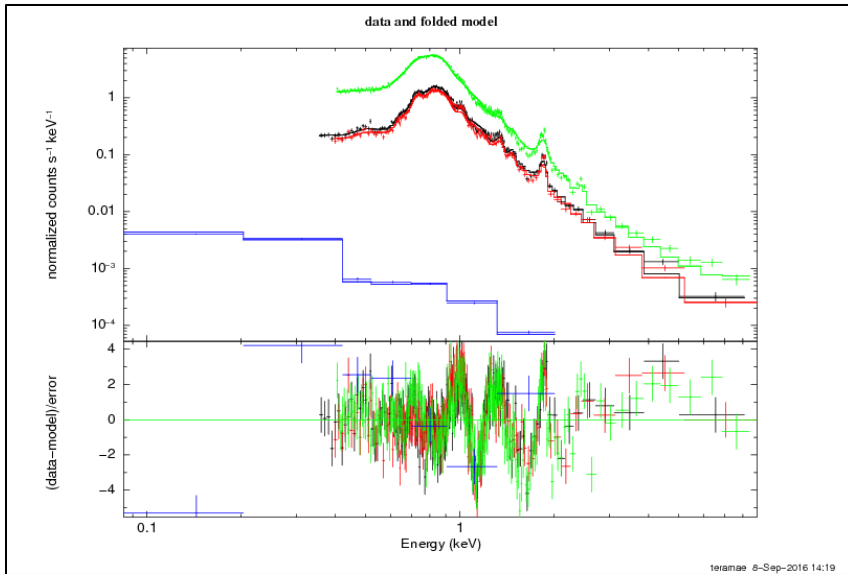
$$L_{X_{soft}} \approx 10^{40} \text{ ergs}^{-1}, D \approx 15 - 20 \text{ Mpc}$$

昨年度天文学会にて全天体解析結果発表

解析手法(1)

- Geant4に入力する楕円銀河のガス密度導出

NGC4636:mos,pn



Apec modelのnorm、形状から

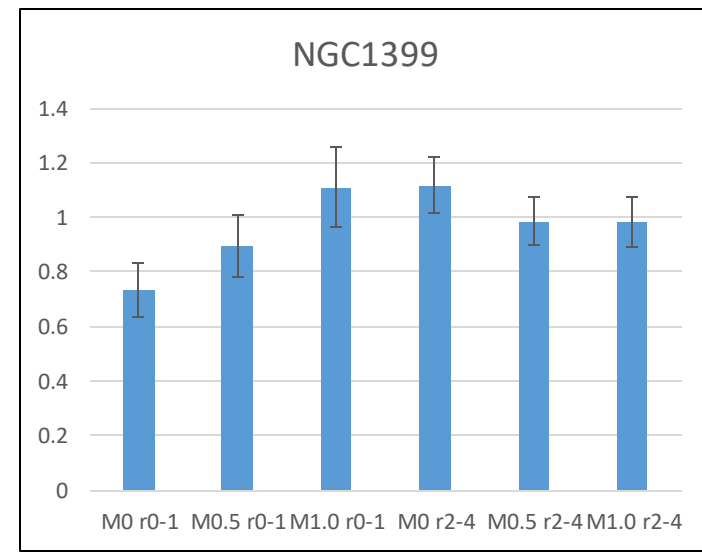
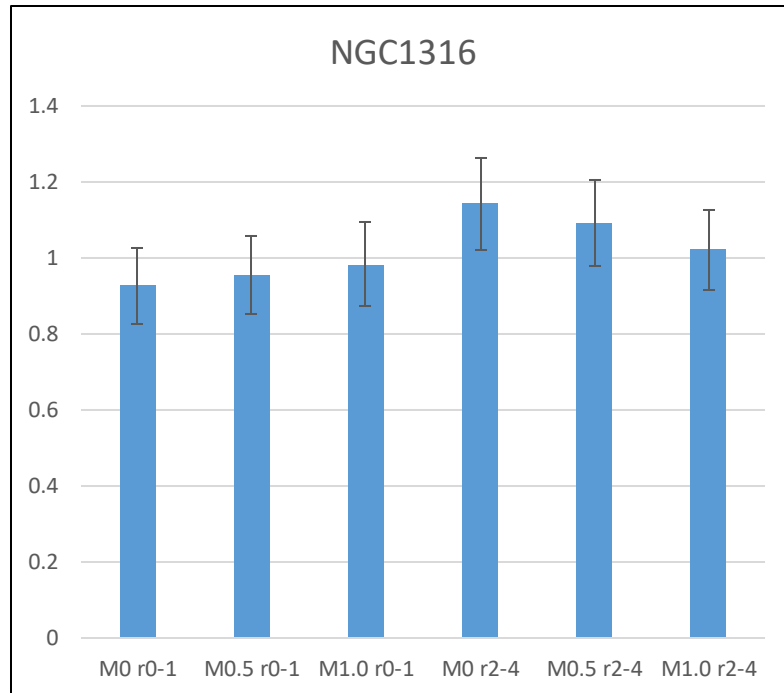
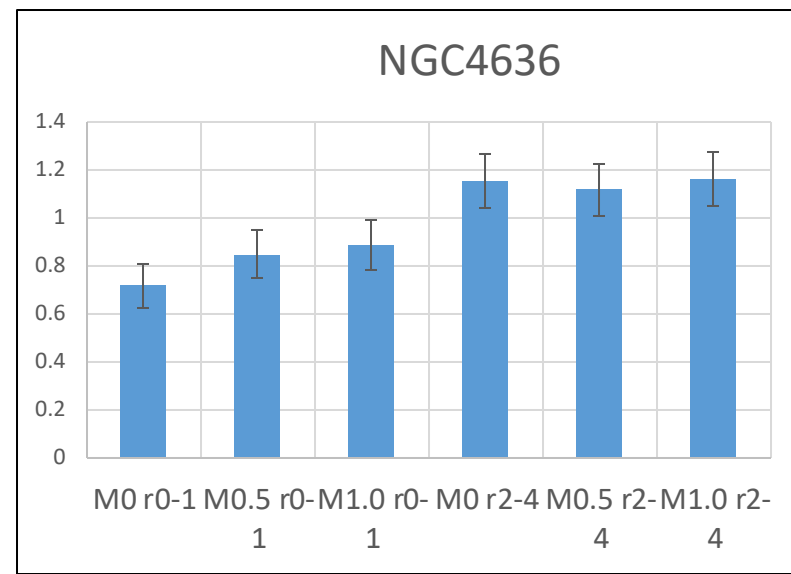
黒、赤、緑->mos1,mos2,pn
青->バックグラウンド

$$\int_{\Theta_1}^{\Theta_2} \frac{Sx(\Theta_{min})}{3600 * A} = \frac{10^{-14}}{4\pi d^2 (1+z)^2} \iint_{\Theta_1}^{\Theta_2} ne * np dld\Theta^2 \left(\frac{1}{60}\right)^2 \left(\frac{\pi}{180}\right)^2$$

$$n_{ion(1,2)}(r) = n_c \left[1 + \left(\frac{r}{r_c}\right)^2\right]^{-\frac{3}{2}\beta} \quad \beta\text{モデル}$$

$$n_{ion} = \sqrt{n_{ion1}^2 + n_{ion2}^2} \quad \text{ダブル}\beta\text{モデル}$$

乱流、半径による違い



Resonance scatteringが Fe^{16+} :0.826 keVの輝線において起こっていると想定している

Optical depth

$$\tau(r) = \int_0^r A_i \sigma_{RS} n_{ion}(x) dx$$



- ・係数 A_i :典型的に $= 4.68 \times 10^{-5}$ とおく
- ・ n_{ion} :次ページ



$$\sigma_{RS} = \frac{\pi e^2}{m_e v_0} f_{12} \sqrt{\frac{m_i}{2\pi\Delta E}} \exp\left[-\frac{m_i c^2 (v - v_0)^2}{2\Delta E v_0^2}\right] [cm^2]$$

- $e[esu] = e[C] \times c[cm/s] \times 10^{-1} \cong 1.6 \times 10^{-19} \times 3 \times 10^{10} \times 10^{-1} = 4.80 \times 10^{-10} [esu]$
- $m_e[g] \cong 9.11 \times 10^{-28} [g]$
- $v_0[1/s] \cong 0.826 keV/h(\text{プランク定数}) \cong 1.312 \times 10^{-9} / 6.63 \times 10^{-27} = 1.98 \times 10^{17} [1/s]$
- $f_{12} = 2.73(0.826 keV \text{の輝線における値})$
- $m_i[g] \cong 9.27 \times 10^{-23} [g]$
- $\Delta E[g \cdot cm^2 s^{-2}] \cong \text{天体の} kT(keV) \times 1.6 \times 10^{-9}$

Ex. NGC4636($kT \cong 0.633 keV$)の時の $\sigma_{RS} \cong 1.31 \times 10^{-15} [cm^2]$

Optical depth

$$\tau(r) = \int_0^r A_i \sigma_{RS} n_{ion}(x) dx$$

・共鳴散乱の度合いと相関を持つ

$$A_i(\text{Fe abundance}) = 4.68 \times 10^{-5}$$

$$\sigma_{RS} = \frac{\pi e^2}{m_e v_0} f_{12} \sqrt{\frac{m_i}{2\pi\Delta E}} \exp\left[-\frac{m_i c^2 (\nu - \nu_0)^2}{2\Delta E \nu_0^2}\right] [\text{cm}^2]$$

$$n_i(r) = n_c [1 + (r/r_c)^2]^{-\frac{3}{2}\beta} [\text{cm}^3]$$

※今回の計算では σ_{RS} 内のexp項は=1で計算

天体	散乱断面積(cm ²)	n_i (cm ⁻²)	Optical depth
NGC4636	1.17E-15	5.16E+20	28.4
NGC1399	1.02E-15	3.44E+20	16.5
NGC1316	1.22E-15	3.09E+20	17.6



σ_{RS} 式内のドップラー効果を加味することで適切な値を得ることができる予想