

活動銀河核クランピートーラスの X線スペクトルモデル



谷本 敦

〈東京大学大学院理学系研究科 〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1〉

e-mail: atsushi.tanimoto@phys.s.u-tokyo.ac.jp

超巨大ブラックホール（SMBH）と銀河共進化メカニズムの解明は、天文学における最重要課題の1つである。この課題を解決する鍵が、SMBHと母銀河を繋ぐ活動銀河核（AGN）トーラスである。しかしながら、トーラスの直接撮像は困難であり、その構造は未だに解明されていない。この構造を調べるには、X線スペクトル観測が最適である。何故なら、X線スペクトルのコンプトン散乱成分や鉄蛍光X線から、トーラス構造を調べられるためである。ただし、X線スペクトルからトーラスの構造を推定するには、トーラスからの輻射輸送計算が必要不可欠となる。そこで筆者は、モンテカルロ輻射輸送計算コードMONACOを用いて、クランピートーラスからのX線スペクトルモデル（XClumpy）を作成した。

1. 巨大ブラックホールと銀河の共進化

超巨大ブラックホール（SMBH: Supermassive Black Hole）成長の歴史を解明することは、天文学における最重要課題の1つである。近年の観測結果は、銀河中心に、 10^6 - 10^{10} 太陽質量のSMBHが普遍的に存在することを示している[1]。例えば、私たちが住む、天の川銀河の場合、約400万太陽質量のSMBHが存在すると考えられている。この天の川銀河におけるSMBHの発見に対し、2020年にはノーベル物理学賞が与えられている[2, 3]。

驚くべきことに、SMBH質量と銀河質量には、非常に強い相関関係がある[4]。この観測事実は、SMBHと銀河が互いに影響を及ぼしながら、共進化してきたことを示唆する[5]。しかしながら、10桁もスケールが異なる、銀河中心のSMBH（サイズ： 10^{-6} 光年）と母銀河（サイズ： 10^4 光年）が、どのように影響を与え合いながら、共進化してきたのかは謎に包まれたままである。

2. 活動銀河核

この謎を解決する鍵が、活動銀河核（AGN: Active Galactic Nucleus）である。AGNとは、銀河中心の狭い領域から銀河全体を凌駕するような強い電磁波を放射する現象である。そのエネルギー源は、SMBHへの質量降着により解放された、重力エネルギーであると考えられている。言い換えれば、AGNとはSMBHが質量を飲み込む、成長過程である。すなわち、AGNの観測により、SMBHの成長を調べることが可能となる。

AGNは、その様々な観測的性質により、セイファート銀河・クエーサー・電波銀河・赤外線銀河等に分類される。本稿では、特にセイファート銀河及びその分類について紹介する。

セイファート銀河は、近傍宇宙において、最も普遍的なAGNである。1943年、カール・セイファートは6つの銀河から通常の銀河では発見されない、高階電離の輝線を検出した[6]。このような高階電離の輝線が検出される銀河を、セイ

ファート銀河と分類する。さらに1970年代、Edward Khachikianらは、より多くのセイファート銀河の可視光スペクトルを観測した [7]。その結果、その可視光スペクトルは、2種類に分けられると考えた。現在では、セイファート銀河は、セイファート1型銀河とセイファート2型銀河に分類されることが知られている。

図1は、セイファート1型銀河及びセイファート2型銀河の可視光スペクトルを示している [8]。可視光スペクトルが幅の狭い輝線 (100-500 km/s) と幅の広い輝線 (1,000-10,000 km/s) を持つ場合、セイファート1型銀河と分類される。一方、可視光スペクトルが幅の狭い輝線のみを持つ場合、セイファート2型銀河に分類される。しかしながら、当時、この可視光スペクトルの違いが何によるものなのかは、明らかではなかった。

以上のようなAGNの多様性を、少数のパラメータで説明したものが、AGNの統一モデルである。図2は、AGN統一モデルを示している。AGNの構造は、ガス・ダストから構成されるトーラスが、SMBHと降着円盤を取り囲んでいると考えられた [9]。この場合、中心天体は同じであり、観測する角度のみにより、AGNの分類が決定される。例えば、降着円盤を真上から観測した場合、狭輝線領域と広輝線領域が見えるので、セイファート1型銀河のように観測される。一方、降着円盤を真横から観測した場合、トーラスが視線方向をブロックし、狭輝線領域のみしか見えないので、セイファート2型銀河のように観測される。

ここで、様々な観測事実は、トーラスの存在を裏付けている。例えば、AGNの統一モデルが正しいと仮定すると、広輝線領域自体は存在しなければならない。この場合、可視偏光スペクトルであれば、セイファート2型銀河からも広輝線が観測できるはずである。実際、セイファート2型銀河NGC 1068の可視偏光スペクトル観測が行われ、幅の広い輝線が検出されている [10]。

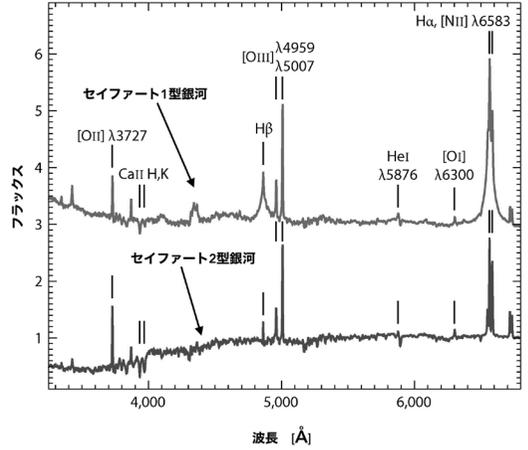


図1 セイファート1型銀河とセイファート2型銀河の可視光スペクトル [8]。セイファート1型銀河の可視光スペクトルは、幅の狭い輝線 ([OII] や [OIII] 等) と幅の広い輝線 (Hβや Hα等) を示している。一方、セイファート2型銀河の可視光スペクトルは、幅の狭い輝線のみを示す。

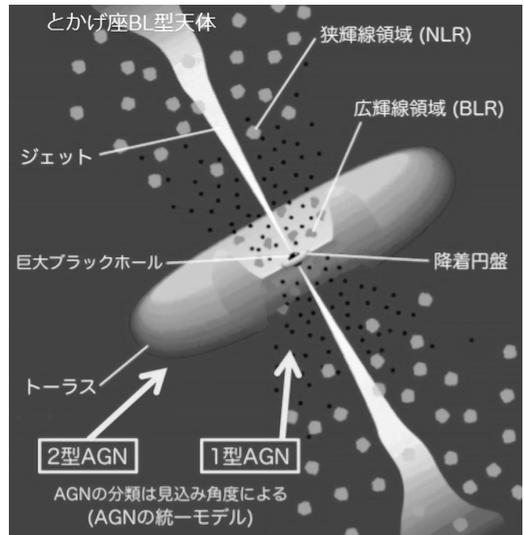


図2 AGNの(古典的な)統一モデル [9]。ガスやダストから構成されるトーラスが、SMBHと降着円盤を取り囲んでいる。観測者の傾斜角により、AGNの分類が決定される(天文学辞典より引用)。

3. AGN トーラスと多波長観測

3.1 トーラス構造と多波長観測

トーラス構造の解明は、SMBHと銀河の共進化を理解する上で、必要不可欠である。何故なら、AGNトーラス（サイズ： 10^0 光年）は、AGNの分類を決定するのみならず、SMBHと母銀河の間に存在し、母銀河からSMBHへの質量供給の役割を担うと考えられているためである。しかしながら、トーラスの直接撮像は困難であり、その性質（トーラスの水素柱密度やトーラスの立体角）は未だに解明されていない。

AGNトーラスの性質を調べるには、多波長観測が重要である。この理由は、AGNは電波からガンマ線にわたる、幅広いエネルギー領域で電磁波を放射するためである。図3は、AGNの多波長スペクトルを示す。電波は主にジェットからのシンクロトロン放射で、赤外線はダストトーラスからの熱的放射で、可視光は主に降着円盤からの熱的放射で説明できる。X線は、コロナによる逆コンプトン散乱やトーラスによるコンプトン散乱で説明できる。すなわち、トーラスの性質を調べるには、X線観測が最適な手段の1つである。

3.2 AGNのX線スペクトルモデル

まずAGNのX線スペクトルモデルについて解説する。図4は、セイファート2型銀河の典型的なX線スペクトルモデルを示す。このX線スペクトルモデルは、コロナからの逆コンプトン散乱がトーラスにより光電吸収される成分（透過成分）、トーラスによるコンプトン散乱成分（反射成分）、トーラスからの蛍光X線成分（輝線成分）の3成分から構成される。

X線スペクトルモデルの3成分は、トーラスの水素柱密度や立体角を決定する上で、重要な情報を持っている。例えば、10 keV以下の透過成分の形状は、トーラスの光学的厚みに強く依存するので、視線方向の水素柱密度を反映する。また、30 keV付近のコンプトン散乱によるこぶの形状

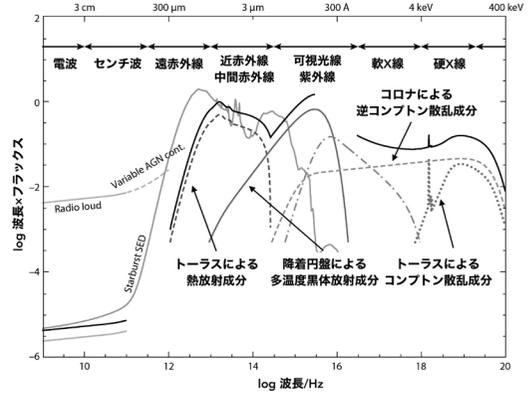


図3 AGNの多波長スペクトルモデル [8].

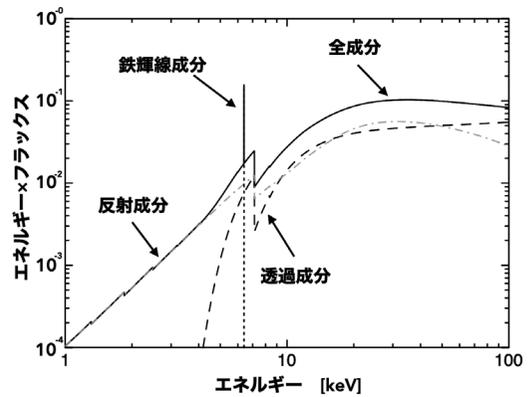


図4 セイファート2型銀河のX線スペクトルモデル。X線スペクトルモデルは、トーラスにより吸収される成分（透過成分）、トーラスによるコンプトン散乱成分（反射成分）、トーラスによる蛍光X線成分（輝線成分）の3成分から構成される。

から、トーラスの立体角を調べることができる。ただし、X線スペクトルからトーラスの性質を推定するには、トーラスからの放射輸送計算が必要不可欠である。特に、トーラスの光学的厚みが1付近である場合、コンプトン多重散乱が頻繁に発生してしまう。この場合、コンプトン多重散乱の効果を考慮した放射輸送計算を行う必要がある。

X線スペクトル観測からトーラスの性質を調べるため、トーラスからのX線スペクトルモデルが作成されている [11-13]。以下では、トーラスか

らのX線スペクトルモデルの歴史を紹介する。

まず1995年, Pawel Magdziarzらは, pexravモデルを作成した [11]. このモデルは, トーラスを無限平板で近似し, そこからのコンプトン散乱を計算したものである. 本モデルは, 現在でも近似的によく用いられている. ただし, あくまで近似的なモデルであり, より現実的な幾何構造を考慮するには, モンテカルロ光線追跡シミュレーションが必要不可欠となる.

2009年, モンテカルロ光線追跡シミュレーションを用いて, Kendrah D. Murphyらは, MYTorusモデルを作成した [12]. 同年, 愛媛大学の池田真也らは, 愛媛トーラスモデルを作成した [13]. これらのモデルは, 密度一様なトーラス (スムーズトーラス) を仮定している. 図5は, 愛媛トーラスモデルの断面図を示している. このモデルは, トーラスの水素柱密度, トーラスの開口角, 観測者の傾斜角の3つがパラメータとなっている. すなわち, 愛媛トーラスモデルの適用により, トーラスの水素柱密度や開口角を調べられる. 実際, このモデルは, 多くのセイファート2型銀河のX線スペクトルに適用されている [15-20].

3.3 スムーストーラスからクランピートーラスへ

しかしながら, 近年の観測結果は, ガス密度が一様なスムーズトーラスよりもむしろ, 多くのガスの塊 (クランプ) から構成されるトーラス (ク

ランピートーラス) を示唆している. 本稿では, 特に2つの観測的根拠について解説する.

まず, スムーストーラスは, $9.7\ \mu\text{m}$ のケイ酸塩の輝線を説明出来ない. Edward Pierらは, スムーストーラスからの赤外線スペクトルを作成した [21, 22]. 彼らは, セイファート2型銀河の場合, $9.7\ \mu\text{m}$ のケイ酸塩ラインは, 常に吸収線として観測されると予測した. しかしながら, いくつかのセイファート2型銀河からケイ酸塩の輝線が発見されている [23, 24].

また, スムーストーラスは, セイファート2型銀河のX線スペクトルを自然に説明出来ない. 筆者らは, 12天体のセイファート2型銀河のX線スペクトルに, 愛媛トーラスモデルを適用した. 図6は, トーラスの開口角と観測者の傾斜角の関係を示す. このように, 本来独立のパラメータが, 非常に強く縮退してしまう. 何故なら, スムーストーラスの場合, 角度方向の密度変化が極端なので, 反射成分が強く吸収されてしまうためである.

以上の問題を解決したのが, クランピートーラスである. クランピートーラスとは, 多くのガス・ダストの塊から構成されたトーラスである.

赤外線領域では, 多くのクランピートーラスからの赤外線スペクトルモデルが作成されている [25-28]. 例えば, Maia Nenkovaらは, クラ

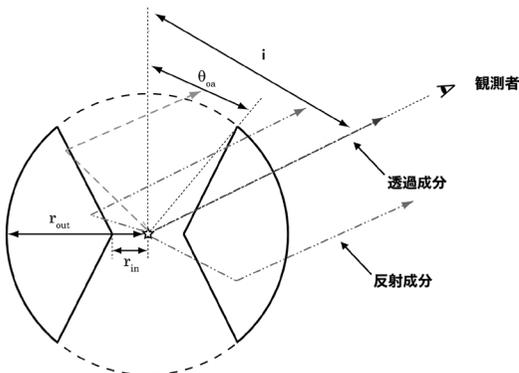


図5 愛媛トーラスモデルの断面図 [14]. θ_{oo} はトーラスの開口角, i は観測者の傾斜角を示す.

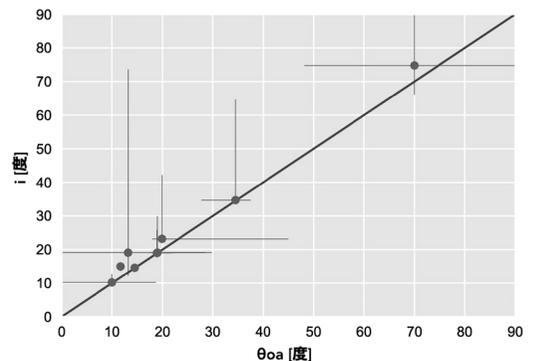


図6 トーラスの開口角 (θ_{oo}) と観測者の傾斜角 (i) の関係 [20].

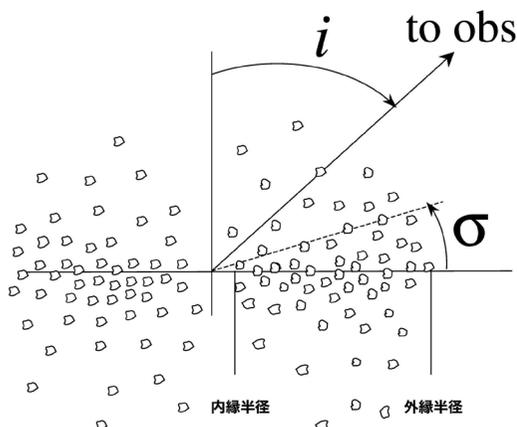


図7 CLUMPYモデルにおけるクランプの分布[25].
 クランプの分布は、動径方向にべき分布、角度方向に正規分布を仮定している。σは正規分布の標準偏差、iは観測者の傾斜角を示す。

ンピートーラスからの赤外線スペクトルモデル (CLUMPY) を作成した [25, 26]. クランプの分布は、動径方向にべき分布、角度方向に正規分布を仮定している (図7). また、CLUMPYモデルは、セイファート2型銀河においても、9.7 μmのケイ酸塩輝線の再現に成功している. このモデルは、多くのAGNの赤外線スペクトルに適用されている [29-33].

しかしながら、クランプトーラスからのX線スペクトルモデルは、ほぼ作成されてこなかった. クランプトーラスの場合、光子がトーラスを抜けやすいので、反射成分の形状が劇的に変化する. 実際、広島大学の古井俊也らの計算結果では、10 keV以下のフラックスが増加する [34]. その結果、スムーストーラスでは自然に説明出来なかったX線スペクトルを、上手く再現できる可能性がある.

4. クランプトーラスからのX線スペクトルモデル作成

そこで筆者らは、クランプトーラスからのX

線スペクトルモデル (XClumpy) 作成に取り組んだ. このモデルは、世界で最も使用されている、X線スペクトル解析ソフトXSPEC[35]で直接読み込み可能である. XClumpyモデルは、筆者のgithub上で公開されており*1, 多くの研究で使用され始めている [36-41].

4.1 クランプの分布

トーラス構造を調べる上で、X線スペクトルと赤外線スペクトルとの比較は必要不可欠である. そこで筆者らは、クランプトーラスからの赤外線スペクトルモデル (CLUMPY) [25, 26]と同じクランプの分布を仮定した. すなわち、クランプの分布は、動径方向にべき分布、角度方向に正規分布を仮定した. 図8は、XClumpyモデルにおけるクランプの分布例を示している. 筆者は、以上の分布に従い、クランプを配置するコードを作成した.

表1は、XClumpyモデルのパラメーター一覧である. 全てをフリーパラメータにするのは、非現実的なので、特に重要な(06)トーラスの角度方向の厚み(σ)、(07)トーラスの赤道方向における水素柱密度(N^{Eq})、(08)観測者の傾斜角(i)の3つをフリーパラメータとした. それ以外のパラメータは、赤外線スペクトル観測の結果を採用した. 例えば、(01)トーラスの内線半径、(02)トーラスの外線半径、(04)赤道方向のクランプ数、(05)動径方向のクランプ分布のべきは、近傍AGNの赤外線スペクトルへCLUMPYモデルを適用した結果の平均値を採用した [33]. また、(03)クランプの半径は、重力不安定性により、本来は半径に依存する. 今回、簡単のため、0.05-1.00 pcにおけるクランプ半径の対数平均値を採用した [43, 44].

4.2 モンテカルロ輻射輸送計算

本研究では、モンテカルロ輻射輸送計算コード (MONACO: Monte Carlo Simulation for Astro-

*1 <https://github.com/AtsushiTanimoto/XClumpy>

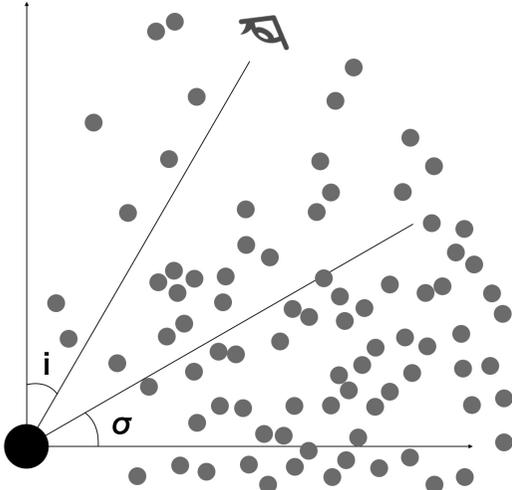


図8 XClumpyモデルにおけるクランプの分布例 [42]. クランプの分布は、赤外線のCLUMPYモデルと同じ分布を仮定した.

表1 XClumpyモデルのパラメータ.

	パラメータ	範囲	単位
(01)	r_{inn}	0.05	pc
(02)	r_{out}	1.00	pc
(03)	R_{clump}	0.002	pc
(04)	N_{clump}^{Equ}	10.0	...
(05)	q	0.50	...
(06)	σ	10.0-90.0	degree
(07)	$\log N_{H}^{Equ}/\text{cm}^{-2}$	23.0-25.0	...
(08)	i	18.2-87.1	degree
(09)	Γ	1.50-2.50	...
(10)	E_{cut}	370 keV	...

(01): トーラスの内縁半径. (02): トーラスの外縁半径. (03): クランプの半径. (04): 赤道方向のクランプ数. (05): 動径方向のクランプ分布のべき. (06): トーラスの角度方向の厚み. (07): トーラスの赤道方向における水素柱密度. (08): 観測者の傾斜角. (09): 光子分布のべき. (10): 光子分布のカットオフエネルギー.

physics and Cosmology) を利用した. このコードは、東京大学の小高裕和らにより開発された、3次元のモンテカルロ輻射輸送計算コードである [45]. MONACOは、AGN トーラスのような中性物質からのコンプトン散乱のみならず、中性子星降着流の熱コンプトン散乱 [46, 47] や、AGNの超高速アウトフローによる吸収線 [48-51] 等の幅広い

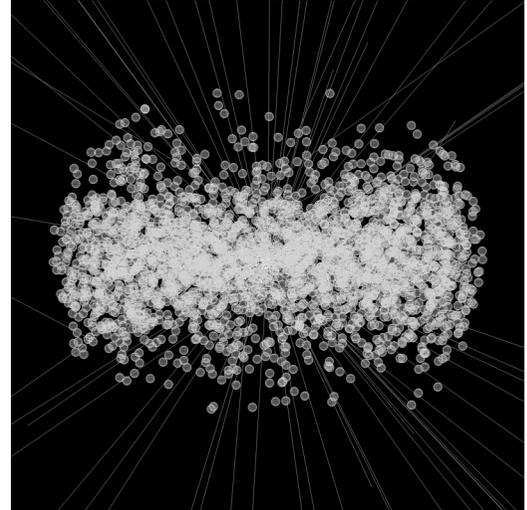


図9 XClumpyモデルのモンテカルロシミュレーションの様子. 球はクランプを示し、線は光子を表している. なお、図を見やすくするため、クランプ数を1/100にし、クランプ半径を10倍にしてある.

現象に適用されている.

XSPECで読み込み可能な表モデルを作成するため、約100パラメータセットの計算を行った. 原点から発射された光子は、クランプにより光電吸収・コンプトン散乱・蛍光X線等を引き起こす (図9). 各パラメータセットに対して、10億光子のモンテカルロ輻射輸送計算を行った. 本計算では、国立天文台のスーパーコンピュータCray XC50を利用した. 以上により、筆者らはクランピートーラスからのX線スペクトルモデル (XClumpy) の作成に成功した.

5. 結果と議論

5.1 X線スペクトルモデルの比較

まずXClumpyモデルと従来のX線スペクトルモデルを比較した. 図10は、XClumpyモデルとスムーストーラスモデルのX線スペクトルモデルのコンプトン散乱成分を示している. この比較において、どちらのモデルもほぼ同じ条件を仮定している. 例えば、スムーストーラスモデルでは、

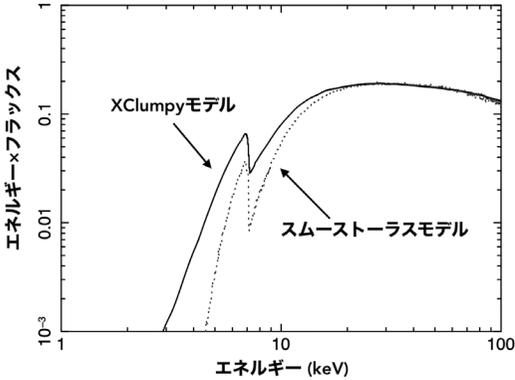


図10 XClumpyモデルとスムーストラスモデルのX線スペクトルの比較 [42]. 比較しやすくするため、コンプトン散乱成分のみを表示している。なおXClumpyモデルは、原子番号1-30の元素による蛍光X線についても計算を行っている。

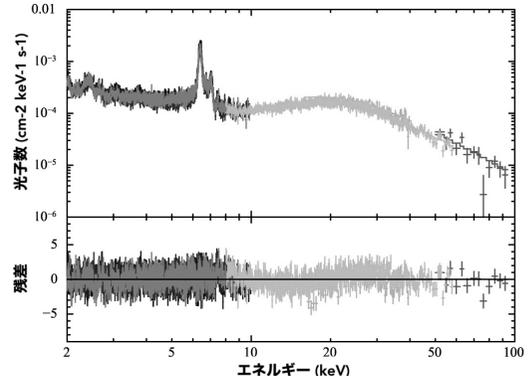


図11 コンパス座銀河のX線スペクトル解析結果 [42]. X線天文衛星XMM-Newton, Suzaku, NuSTARの観測データを用いた。下図は、観測データとモデルの残差を示している。

$\log N_{\text{H}}^{\text{Eq}}/\text{cm}^{-2}=24$, $\theta_{\text{oa}}=60$ 度, $i=87$ 度を仮定し, XClumpyモデルでは, $\log N_{\text{H}}^{\text{Eq}}/\text{cm}^{-2}=24$, $\sigma=30$ 度, $i=87$ 度を仮定した。図10を見ると, エネルギーが30 keV以上のフラックスは, どちらのモデルもほぼ同じであることがわかる。これは, エネルギーが十分高い光子の場合, ほとんど光電吸収されないためである。一方, エネルギーが10 keV以下のフラックスは, XClumpyモデルの方が大きいことがわかる。何故なら, XClumpyモデルの場合, エネルギーの低い光子でも, クランプの合間を縫って, トーラスをすり抜けられるためである。

5.2 コンパス座銀河への適用

次に筆者らは, コンパス座銀河のX線スペクトル観測データにXClumpyモデルを適用した。コンパス座銀河は, 天の川銀河から最も近いセイファート2型銀河(距離: 1300万光年)である。またセイファート2型銀河の中でも, 特に水素柱密度の大きな ($24 \leq \log N_{\text{H}}^{\text{OS}}/\text{cm}^{-2}$), 隠されたAGNであることが知られている。この場合, トーラスがコンプトン散乱に対して光学的に厚いので, 直接成分は光電効果により強く吸収され,

コンプトン散乱による反射成分が卓越する。すなわち, コンパス座銀河は, トーラスモデルの検証やトーラス構造を調べるのに最適な天体である。

そこで筆者らは, X線天文衛星XMM-Newton, Suzaku, NuSTARにより観測された, コンパス座銀河のX線スペクトルを解析した。その結果, XClumpyモデルを用いて, 観測されたX線スペクトルを上手く再現することに成功した(図11)。このX線スペクトル解析により, コンパス座銀河のトーラスは, 光学的に非常に厚く ($\log N_{\text{H}}^{\text{Eq}}/\text{cm}^{-2} \approx 25$), 幾何学的には薄い ($\sigma \approx 15$ 度) ことがわかった。

5.3 トーラス構造のガス・ダスト分布の比較

最後に筆者らは, X線から得られるトーラス構造と赤外線から得られるトーラス構造を比較した [52]。トーラスは, ガスやダストから構成されると考えられている。しかしながら, トーラス中のガスの分布とダストの分布が同じなのかどうかは明らかになっていなかった。

そこで筆者らは, 12天体のX線スペクトルにXClumpyモデルを適用した。これらの天体は, 東北大学の市川幸平らにより, 赤外線スペクトルデータにCLUMPYモデルが適用されており, すでにダストの分布が調べられている [33]。

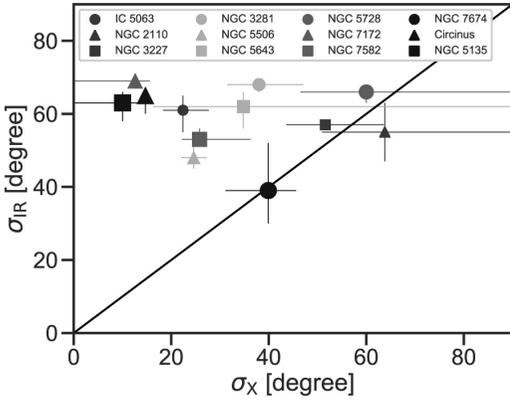


図12 X線から得られたトーラスの厚み (σ_X) と赤外線から得られたトーラスの厚み (σ_{IR}) の比較 [52].

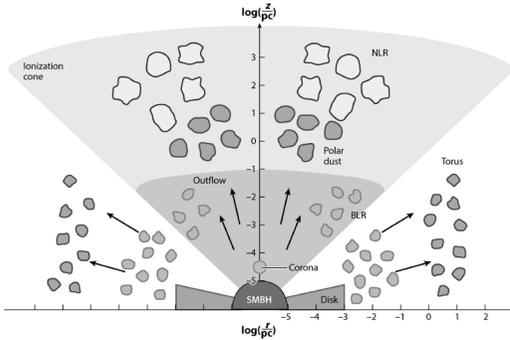


図13 現在のトーラスの描像 [8].

XClumpy モデルは、CLUMPY モデルと同じ幾何構造を仮定している。すなわち、このX線スペクトル解析により、ガスの分布とダストの分布の比較が可能となる。解析の結果、全ての天体の観測されたX線スペクトルの再現に成功した。

図12は、X線から得られたトーラスの幾何学的厚みと赤外線から得られたトーラスの幾何学厚みの比較結果を示す。ほぼ全ての天体において、赤外線から得られたトーラスの幾何学的厚みの方が大きいことがわかる。実際、近年の観測結果は、ガスとダストの分布は異なり、特にダストの方が極方向に広がっていることを示唆している [53].

6. まとめと今後の課題

1990年代にAGN統一モデルが提唱され、約30年が経過した。2020年代の現在、AGNトーラスの描像は、大きく変わってきた(図13)。スムーズトーラスの解釈は、クランピトーラスによる解釈へと変化した。また、ガスの分布とダストの分布は異なり、極方向にはポーラダストが存在すると考えられるようになった。

しかしながら、まだわかっていないことも多い。例えば、どのようにトーラス内の物質をSMBHまで落とすのか、トーラスの内縁半径はどこまで延びているのかは良くわかっていない。また、降着円盤からの放射により、中心付近の物質は光電離されるはずである。この光電離した物質が、どの程度存在するのかは理解されていない。

これらの問題を解決するのが、2022年度打ち上げ予定のX線分光撮像衛星XRISMである。XRISM衛星は、鉄蛍光X線(6.4 keV)において、従来に比べて約30倍高いエネルギー分解能を持つ。この場合、鉄輝線のプロファイルから、トーラスの内縁半径を調べられる。また、電離物質による吸収線の等価幅や標準偏差から、電離物質の水素柱密度や速度構造を決定できると期待される。今後組まれるはずのXRISM特集号において、これらの未解決問題に答えられれば幸いである。

謝辞

本稿は筆者の博士論文をもとにしたものです。まず、指導教官の上田佳宏氏、共同研究者の小高裕和氏、深沢泰司氏、川口俊宏氏、市川幸平氏、川室太希氏、山田智史氏、小川翔司氏、瀬戸口健太氏、植松亮祐氏に感謝申し上げます。また、本稿に対して、多くの有益なコメントをくださった馬場彩氏、丹波翼氏にも感謝いたします。さらに、本稿を執筆する上で、天文月報編集委員の西塚直人氏には大変お世話になりました。なお、本

研究のシミュレーションでは、国立天文台のスーパーコンピュータXC50を利用しました。

参考文献

- [1] Event Horizon Telescope Collaboration, et al., 2019, ApJ, 875, L1
- [2] Eckart, A., & Genzel, R., 1997, MNRAS, 284, 576
- [3] Ghez, A. M., et al., 1998, ApJ, 509, 678
- [4] Magorrian, J., et al., 1998, AJ, 115, 2285
- [5] Kormendy, J., & Ho, L. C., 2013, ARA&A, 51, 511
- [6] Seyfert, C. K., 1943, ApJ, 97, 28
- [7] Khachikian, E. Y., & Weedman, D. W., 1974, ApJ, 192, 581
- [8] Hickox, R. C., & Alexander, D. M., 2018, ARA&A, 56, 625
- [9] Antonucci, R., 1993, ARA&A, 31, 473
- [10] Antonucci, R. R. J., & Miller, J. S., 1985, ApJ, 297, 621
- [11] Magdziarz, P., & Zdziarski, A. A., 1995, MNRAS, 273, 837
- [12] Murphy, K. D., & Yaqoob, T., 2009, MNRAS, 397, 1549
- [13] Ikeda, S., et al., 2009, ApJ, 692, 608
- [14] Eguchi, S., et al., 2011, ApJ, 729, 31
- [15] Tazaki, F., et al., 2011, ApJ, 738, 70
- [16] Tazaki, F., et al., 2013, ApJ, 772, 38
- [17] Kawamuro, T., et al., 2013, ApJ, 770, 157
- [18] Kawamuro, T., et al., 2016, ApJ, 831, 37
- [19] Tanimoto, A., et al., 2016, PASJ, 68, S26
- [20] Tanimoto, A., et al., 2018, ApJ, 853, 146
- [21] Pier, E. A., & Krolik, J. H., 1992, ApJ, 401, 99
- [22] Pier, E. A., & Krolik, J. H., 1993, ApJ, 418, 673
- [23] Mason, R. E., et al., 2009, ApJ, 693, L136
- [24] Nikutta, R., et al., 2009, ApJ, 707, 1550
- [25] Nenkova, M., et al., 2008a, ApJ, 685, 147
- [26] Nenkova, M., et al., 2008b, ApJ, 685, 160
- [27] Hönig, S. F., et al., 2010, A&A, 515, A23
- [28] Hönig, S. F., & Kishimoto, M., 2010, A&A, 523, A27
- [29] Ramos Almeida, C., et al., 2009, ApJ, 702, 1127
- [30] Ramos Almeida, C., et al., 2011, ApJ, 731, 92
- [31] Alonso-Herrero, A., et al., 2011, ApJ, 736, 82
- [32] Alonso-Herrero, A., et al., 2012, ApJ, 744, 2
- [33] Ichikawa, K., et al., 2015, ApJ, 803, 57
- [34] Furui, S., et al., 2016, ApJ, 818, 164
- [35] Arnaud, K. A., 1996, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 101, 17
- [36] Miyaji, T., et al., 2019, ApJ, 884, L10
- [37] Ogawa, S., et al., 2019, ApJ, 875, 115
- [38] Ogawa, S., et al., 2021, ApJ, 906, 84
- [39] Toba, Y., et al., 2020, ApJ, 888, 8
- [40] Yamada, S., et al., 2020, ApJ, 897, 107
- [41] Uematsu, R., et al., 2021, ApJ, 913, 17
- [42] Tanimoto, A., et al., 2019, ApJ, 877, 95
- [43] Kawaguchi, T., & Mori, M., 2010, ApJ, 724, L183
- [44] Kawaguchi, T., & Mori, M., 2011, ApJ, 737, 105
- [45] Odaka, H., et al., 2011, ApJ, 740, 103
- [46] Odaka, H., et al., 2013, ApJ, 767, 70
- [47] Odaka, H., et al., 2014, ApJ, 780, 38
- [48] Hagino, K., et al., 2015, MNRAS, 446, 663
- [49] Hagino, K., et al., 2016, MNRAS, 461, 3954
- [50] Mizumoto, M., et al., 2019, MNRAS, 482, 5316
- [51] Mizumoto, M., et al., 2021, MNRAS, 503, 1442
- [52] Tanimoto, A., et al., 2020, ApJ, 897, 2
- [53] Tristram, K. R. W., et al., 2014, A&A, 563, A82

X-Ray Spectral Model from Clumpy Tori of Active Galactic Nuclei

Atsushi TANIMOTO

Graduate School of Science, The University of Tokyo, 7-3-1Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

Abstract: The tori of active galactic nuclei (AGN) are the key objects to understand the coevolution between the supermassive black holes (SMBH) and their host galaxies. However, direct imaging of an AGN torus is difficult, and its structure is still unclear. X-ray spectroscopy provides us with one of the best ways to understand this structure. To estimate the torus structure from X-ray spectra, we have developed an X-ray spectral model from clumpy tori, XClumpy, using the Monte Carlo radiation transfer code MONACO. We review the basic picture of the AGN tori and present the latest results from our analysis.