

論文の内容の要旨

論文題目 Fe/Mg Abundance in the Broad Line Region of Quasars
(クエーサーの広輝線領域における Fe/Mg 組成比)

氏名 続 唯美彦

第1章 イントロダクション

クエーサーから放射される鉄とマグネシウムの輝線強度比 Fe II/Mg II はクエーサー母銀河の年齢や母銀河での最初の星形成の時期をはかる時計として注目されている。母銀河において鉄のほとんどは Ia 型超新星で生成され、マグネシウムは II 型超新星で生成されることが標準的な星の進化論から予見されており、このような生成メカニズムの違いからマグネシウムに対する鉄の増加には遅れがある。 Fe II/Mg II を観測し、クエーサーの鉄とマグネシウムの組成比 Fe/Mg が II 型超新星起源の Fe/Mg を越えていれば、少なくともそのクエーサー母銀河は鉄の遅延時間より長く存在していると言える。

1996 年に赤方偏移 3.6 のクエーサーの Fe II/Mg II が宇宙時計の目的で観測されて以来、クエーサーの Fe II/Mg II 測定は現在も続いている。国内外数グループによって Fe II/Mg II を赤方偏移の関数として求める試みがなされているが、予想に反して Fe II/Mg II の赤方偏移依存性は見つかっていない。その理由のひとつは Fe II/Mg II の測定方法に起因している可能性がある。もうひとつは、 Fe II/Mg II が Fe/Mg だけに依存しているのではなく、 Fe/Mg 以外の要素、例えばクエーサー放射場の性質や放射領域のガス密度、ガスの乱流といった要素に依存している可能性がある。

本論文は 2 つの章から成り立つ。第 2 章では低赤方偏移クエーサーについて Fe II/Mg II を正確に測定し、その X 線光子指数 Γ やクエーサー光度に対する依存性を調べる。第 3 章ではクエーサーの広輝線領域のモデルを光電離コードを用いてシミュレーションし、 Fe II/Mg II の放射場やガス密度、乱流に対する依存性を調べる。また Fe II/Mg II から Fe/Mg を求める変換則を求めクエーサーの Fe/Mg を得る。

第2章 クエーサーの Fe II 輝線強度の測定

Fe II 輝線や Mg II 輝線といったクエーサーの広輝線を調べるために、波長 1200Å から 6200Å をカバーし、Signal to Noise Ratio(SNR) が 20 以上の良質のスペクトルをハッブル宇宙望遠鏡 (Hubble Space Telescope) のアーカイブで検索した。条件を満たすクエーサーは 3 天体存在した。10 天体については紫外

スペクトルのみが存在したため、うち7天体については米国立キットピーク天文台 (Kitt Peak National Observatory) で可視分光観測を行った。残りの3天体については文献の可視スペクトルをデジタル化した。また赤方偏移0.6のクエーサーについては、近赤外分光観測をすばる望遠鏡で行った。以上の紫外、可視、赤外スペクトルを合わせ、SNRが20以上で1200–6200Åの波長を持つスペクトルを得た。

クエーサーのFe II輝線はMg II輝線など他の輝線と混合している。それらの強度を正確に測定するために、Fe II輝線の強度が強く、輝線幅が狭い狭輝線セイファート1銀河、I Zw 1のスペクトルからFe II輝線テンプレートを作成した。Fe II輝線テンプレート作成は以下手順をふんだ。紫外スペクトルはHSTのアーカイブデータから取得し、それより長波長のデータについてはKPNOでLaorらによって得られたスペクトルと、Issac Newtonグループのアーカイブからスペクトルを取得し、各波長域のスペクトルをつなげ波長1100–6700 Åを持つスペクトルを得た。次に得られたスペクトルから巾乗連続光の差引きを行った。巾乗連続光の強度は巾乗連続光の窓と呼ばれる巾乗光以外の成分の寄与が少ない波長帯、具体的には紫外域にある1280–1290Åと1430–1460Å、可視域にある5600–5800Åと5970–6200Å、H α λ 6563の長波長側で正確に決定した。さらに220のバルマー連続光テンプレートを計算し、1430–1460Åで強度が無くなるテンプレートを選択し、バルマー連続光以外の成分の寄与が比較的少ない3625Å付近で強度を決定し差し引いた。巾乗連続光、バルマー連続光を引いたスペクトルからさらにFe II輝線以外の輝線を除去し、その残りのFe II輝線を数百のガウシアンプロファイルでフィットした。ガウシアンプロファイルの中心波長は約5Å間隔で与え、幅はMg II輝線の値で固定し、強度をフリーパラメータとした。

得られたFe II輝線テンプレートをクエーサースペクトルに適用する前に、それぞれのクエーサーについて巾乗連続光の差引きを行った。このスペクトルに対し、バルマー連続光テンプレート、Fe II輝線テンプレート、Mg II輝線ガウシアンプロファイルをフィットしてFe II輝線とMg II輝線の強度を測定した。この際、Fe II輝線テンプレートは6つの波長域、1800–2200Å、2200–2660Å、2660–3000Å、3000–3500Å、4200–5100、5100–5600Åに分割され、それぞれの波長域ではガウシアンプロファイルの相対強度がI Zw 1のスペクトルから得られた値で固定したが、各波長域間での相対強度は変動可とした。

測定したクエーサーのFe II輝線強度と電波、X線の性質との関係を調べた。過去の観測からFe II輝線強度とX線光子指数 Γ （観測されるX線光子 P_E photons s^{-1} keV $^{-1}$ を $P_E = C \times E^{-\Gamma}$ でフィットしたときの中で、Cは銀河間吸収）との関係が示唆されてきた。本研究においても、Fe II(optical)/H β と Γ との間に95%の確かさで相関が見られた。またFe II(UV)/Mg IIと Γ の相関が報告されているが、本研究では確認されなかった。しかしながらこれは本研究のサンプルが $\Gamma=1.5-3.0$ と報告されているサンプルの $\Gamma=1.7-4.3$ に比べて範囲が狭いためであると考えられ、実際この Γ とFe II輝線との関係は次章のシミュレーションから明らかになった。さらにFe II/Mg IIと絶対等級との関係を調べた(図1の上)。サンプル全体では相関係数は0.30であるが、RQサンプルでは0.79となった。また12のクエーサーが存在する Γ の範囲(2から3)から1つだけ外れたクエーサー($\Gamma=1.5$)をサンプルから除外するとRLサンプルでは相関係数0.77、全体でも0.74となり95%以上の確かな相関となった。

第3章 モデルスペクトルとの比較

ここでは371のエネルギーレベルを持つFe $^{+}$ イオンモデルが組み込まれた光電離コードを用いて広輝線領域から出るスペクトルのシミュレーションを行い観測結果との比較を行った。このコードは広輝線領域におけるFe $^{+}$ の衝突、放射過程の扱いを可能とした最初のコードである。水素密度Hは $\log H=9$ 、10、11、イオン化パラメータUは $\log U=-3$ 、 -2 、 -1 、乱流速度は $v_{turb} = 0$ 、5、10 km s^{-1} 、柱密度

は 10^{23} cm^{-2} 、元素組成比は太陽値でシミュレーションを行った。その結果、バルマー連続光の中乗連続光からの超過に相当する量、バルマージャンプは水素密度に、また C IV/C III] はイオン化パラメータに敏感であることがわかった。これをもとに観測スペクトルからバルマージャンプ、C IV/C III] を測定し、各クエーサーの水素密度、イオン化パラメータを見積もった。モデルスペクトルと観測スペクトルを比較し、約 8 割の天体が $(\log H, \log U, v_{turb})=(10, -1, 5)$ であることがわかった。以上の結果をもとに、モデル $(\log H, \log U, v_{turb})=(10, -1, 5)$ の元素組成比を 2 倍、4 倍、8 倍、16 倍、32 倍の太陽値に変えて計算し、Fe II/Mg II 輝線強度比の Fe/Mg 組成比への変換則を得た。この変換則を用いてクエーサーの Fe/Mg 組成比を求める前に、観測で見つかった Fe II 輝線の X 線光子指数 Γ に対する依存性を調べた。モデル $(\log H, \log U, v_{turb})=(10, -1, 5)$ について Γ を 1.5 から 4.5 まで変えてシミュレーションを行った。この結果 Γ に対する Fe II 輝線の正の相関が明らかになった。これは大きな Γ を持つクエーサーでは、Fe⁺ イオンを壊す硬 X 線光子が減り、軟 X 線光子が相対的に増えることで Fe⁺ が存在する部分電離領域が拡大し Fe⁺ による冷却率が大きくなるためである。得られた Fe II/Mg II から Fe/Mg への変換則を用い、低赤方偏移クエーサーの Fe/Mg を求め、絶対等級との関係を調べた。95%以上の確かさで相関が見られた。また X 線光子指数 Γ 、イオン化パラメータ、水素密度、乱流速度の依存性を補正した Fe/Mg でも相関が 95%以上の確かさで見られ、光度と Fe/Mg の相関は確かめられた。この関係をさらに理解するために、クエーサー光度と H β の FWHM からクエーサーの中心質量を見積もった。図 1(中、下)に求めた質量と光度の関係、Fe II/Mg II と質量の関係を示す。いずれも 95%の確かさで相関があり、銀河の研究で見つかっている質量とメタリシティの関係に類する現象である。重い銀河では重力ポテンシャルが深いためメタリシティが高くなっても超新星によってガスは飛ばされないが、低質量銀河では高いメタリシティに達する前にガスが飛ばされると考えられている。

結論

低赤方偏移クエーサーの 1200Å から 6200Å という広い波長域をカバーしたスペクトルから Fe II/Mg II を測定した。得られた値はクエーサー光度、クエーサー中心質量と相関があった。これは銀河の研究において知られる質量とメタリシティの関係がクエーサーの観測から得られたものであり、本研究で行った Fe II/Mg II の測定方法の確かさが示された。さらにモデルシミュレーションから、強度比から組成比への変換則を得て、低赤方偏移クエーサーの Fe/Mg が $1.51^{+0.36}_{-0.31}$ 、組成比以外の要素効果を考慮した結果でも 2.06 ± 1.66 といずれにしても約 2 倍の太陽値であることを示した。

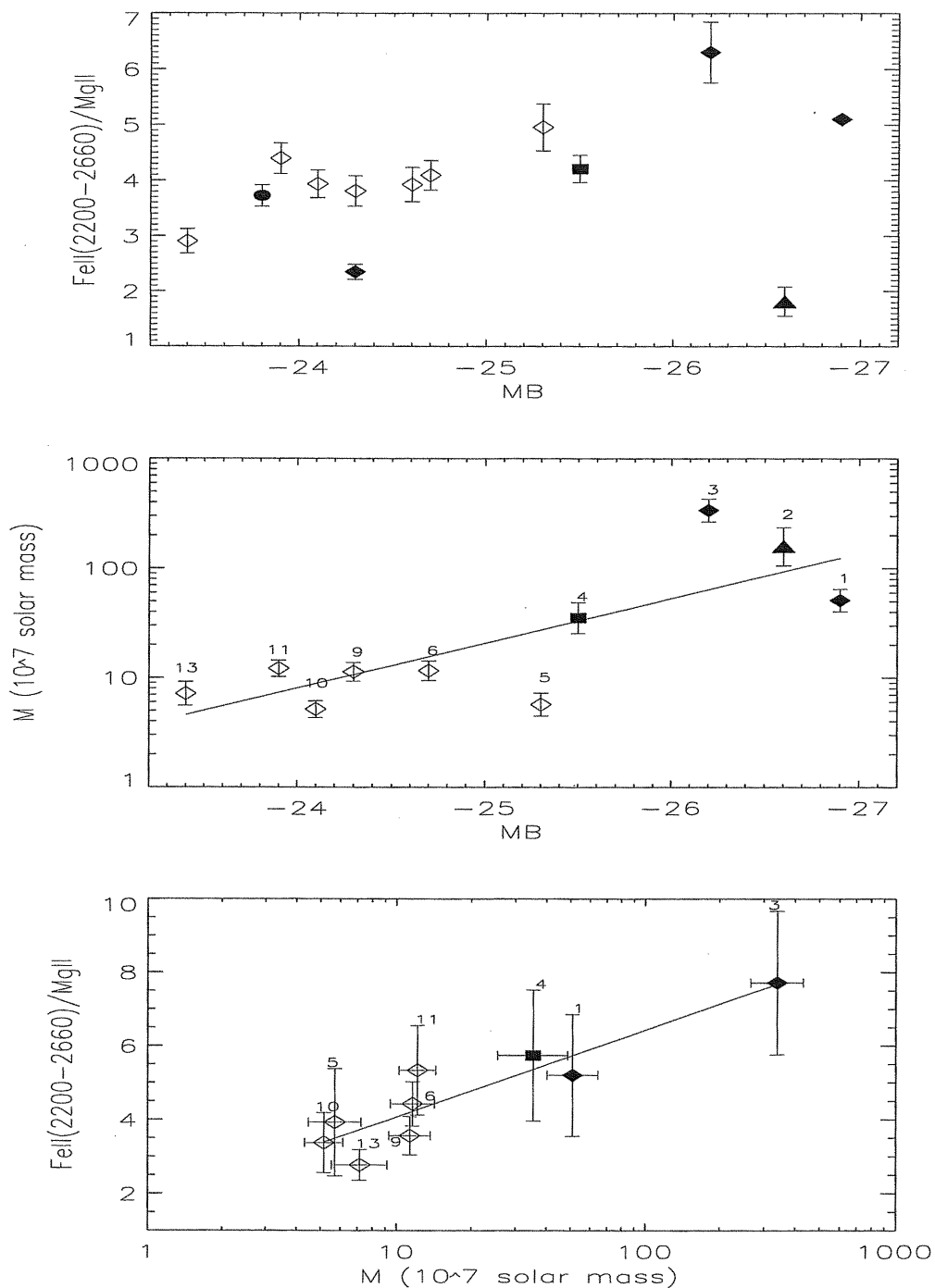


図 1: (上) Fe II(UV)/Mg II 輝線強度比と絶対等級の関係。白印は radio-quiet(RQ)、黒印は radio-loud(RL)。(中) クエーサー中心質量と絶対等級の関係。クエーサー中心質量は、 5100\AA の光度 $\lambda_{L\lambda}(5100\text{\AA})$) と $H\beta$ の FWHM からリバレーション測定で得られている関係式を用いて求めた。 $H\beta$ を広輝線成分のみでフィットできなかった3つのクエーサーはサンプルから除外している。相関係数は 0.58 で 95%以上の確かな相関を示す。(下) Fe II(UV)/Mg II 輝線強度比と中心質量の関係。Fe II(UV)/Mg II 輝線強度比はイオン化パラメータ、乱流速度、X 線光子指数 Γ による影響を考慮した値。相関係数は 0.73 で 95%以上の確かな相関を示す。