

## 論文の内容の要旨

### Evolution of Kinematic Properties of Early-Type Galaxies

#### Investigated by Surface Photometry

#### (表面測光で探る早期型銀河の運動学的性質の進化)

満田 和真

銀河の形成と進化について理解することは現代の天文学の最も重要な課題のひとつである。銀河の理解されるべき特徴の一つにその多様な形態がある。なかでも、楕円銀河、S0銀河といった早期型銀河は重要な種族である。銀河の形態は角運動量の喪失と関係しており、早期型銀河は星の速度分散が卓越しているため、角運動量を失ってきた系であると考えられており、銀河の角運動量喪失メカニズムについて情報を内包していると考えられている。

本論文の第1章では、最新の観測およびシミュレーションから早期型銀河の運動学についての最新の研究結果をまとめた。ごく最近に登場した面分光観測により、近傍の早期型銀河は運動学的性質(= 回転の卓越度合い)によって Fast Rotator と Slow Rotator に分類できるという見方が確立された。一方、遠方宇宙の観測からは、赤方偏移 $z \sim 2$ から現在までの間に銀河の典型的なサイズ(有効半径)が急激に増加していることがわかってきた。宇宙論的シミュレーションによれば、早期型銀河のこのような性質は二相形成シナリオによって説明できることが示唆されている。

ところが、銀河形成・進化の過程は非常に複雑であり、実際にどのような過程が有効に働いているのかをシミュレーションだけで確定することは難しい。そこで、遠方の早期型銀河についての運動学的性質から進化についての制限を得ることが不可欠である。その重要性にもかかわらず、遠方早期型銀河に対して吸収線の面分光観測を行うことは現在の望遠鏡では非常に困難である。そこで、より実現性の高い表面測光によって運動学的性質を間接的に探る手法が重要である。

本研究では、遠方の早期型銀河の運動学的性質を観測的に探った。そのために、まず早期型銀河の運動学的性質の間接的な指標となる表面測光パラメータを探った。次に、遠方の早期型銀河についてそのパラメータを測定し、回転の卓越度合いについての観測的な制限を得た。

第2章では、166個の近傍早期型銀河サンプルを用い、面輝度分布と運動学的性質の関係を調べた。この銀河サンプルについては、近年の大規模な面分光掃天観測ATLAS3Dによって運動学的性質が調べられている。そこで我々は、Sloan Digital Sky Survey (SDSS) の rバンドの画像から面輝度分布を測定した。銀河の外側部分において、Slow Rotator は Fast Rotator よりも面輝度が高い性質(Extended)があることがわかった。そこで我々は面輝度分布の内側と外側の勾配から  $\Delta\text{Slope}$  パラメータを定義し、外側での輝度分布の違いを定量化した。 $\Delta\text{Slope}$  が負であるとSersic則に比べてExtendedになっており、正であるとTruncated(=外側で面輝度が落ちる傾向)であることを意味する。結果、ほぼ全ての Slow Rotator の $\Delta\text{Slope}$ が負であるに対し、Fast Rotatorでは正または0に近い値であった(Figure 2.7, 2.8. 番号は論文内と同じ)。さらに、Spearmanのrank correlation testによって、 $\Delta\text{Slope}$ と回転パラメータ $\lambda$ の間には統計的に有意な相関があることが示された(Figure 2.9)。 $\Delta\text{Slope}$ が小さいほど $\lambda$ も小さい(=回転が弱い)。この関係は楕円率の小さな銀河でも見られるが、この傾向はSersic indexなど他のパラメータでは見られない。また、 $\Delta\text{Slope}$ は銀河の星質量にも依存し、重い銀河ほど $\Delta\text{Slope}$ が小さい傾向があるが、同じ星質量でも $\lambda$ が小さいほど $\Delta\text{Slope}$ が小さい傾向がある(Figure 2.11, 2.12)。

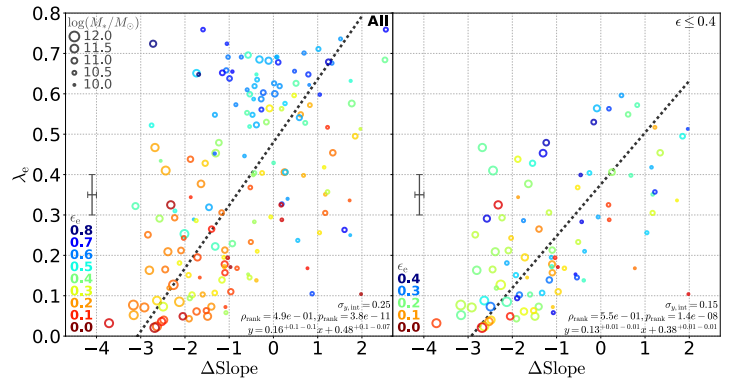
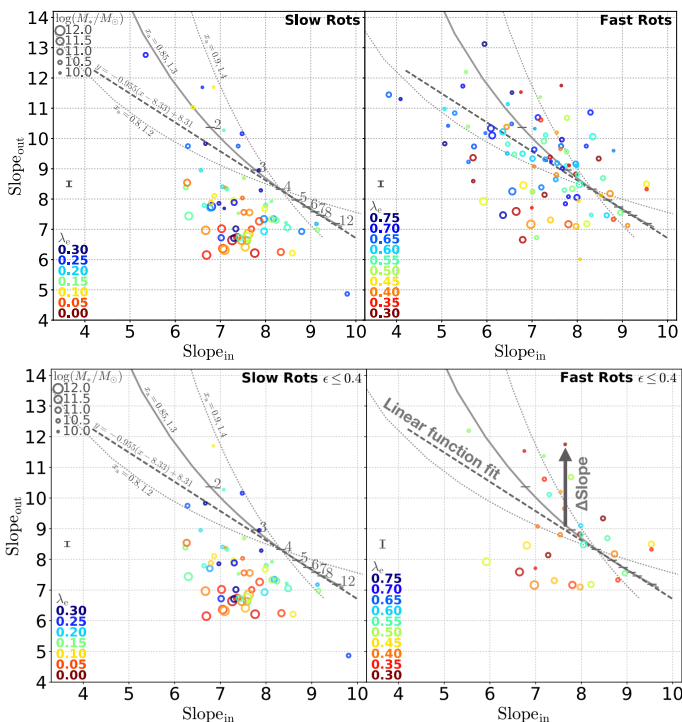
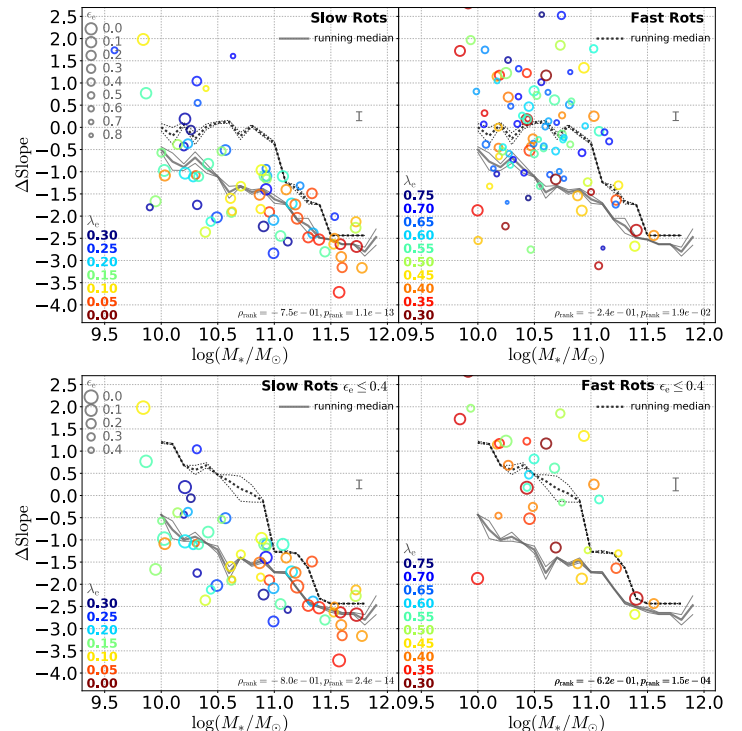


Figure 2.9.  $\Delta\text{Slope}$ と回転パラメータ $\lambda$ を第2章の近傍早期型銀河サンプルで全銀河(左)と楕円率の低いもの(右)について示したもの。点線は直線フィットの結果。Spearman's rank correlation testのp値は左が $4 \times 10^{-11}$ 、右が $1.4 \times 10^{-8}$ である。



上: Figure 2.7. 下: Figure 2.8に加筆。面輝度分布の内側と外側の勾配( $\text{Slope}_{\text{in}}$ ,  $\text{Slope}_{\text{out}}$ )を第2章の近傍早期型銀河サンプルで全体(上)と楕円率の低いもの(下)について示したもの。左がSlow Rotatorで右がFast Rotator。灰色の実線の曲線はSersic profileで予想される位置、破線の直線はこの曲線にSersic index  $4 < n < 8$ の範囲でフィットしたもの。この直線からの $\text{Slope}_{\text{out}}$ 方向のズレを $\Delta\text{Slope}$ として定義する(図中の矢印)。



上: Figure 2.11, 下: Figure 2.12.  $\Delta\text{Slope}$ の星質量依存性を第2章の近傍早期型銀河サンプルで全銀河(上)と楕円率の低いもの(下)について示したもの。左がSlow Rotatorで右がFast Rotator。黒の点線がFast Rotatorについてのrunning median, 灰色の実線がSlow Rotatorについてのrunning median。

分散は大きいものの、我々は $\Delta\text{Slope}$ と $\lambda$ ,  $V/\sigma$  ( $\lambda$ と同じく回転の指標となるパラメータ)について1次で近似した関係を得た。

第3章では、進化を調べるため、 $z\sim 1$  (平均:  $z = 1.2$ )と  $0$  (平均:  $z = 0.03$ ) の銀河団に属する早期型銀河の面輝度分布を分析し、 $\Delta\text{Slope}$ を測定した。我々は色-等級図と定量的な形態分類によって、それぞれの赤方偏移において約600の早期型銀河サンプルを構築した。

データについては、 $z\sim 1$ のサンプルでは、ハッブル宇宙望遠鏡(HST)銀河団超新星探査によって取得した高品質の画像と、地上望遠鏡追観測で得られた分光カタログを用いた。この画像はマルチエポックで撮像された画像を丁寧に足しあげたもので、実効的な積分時間は1万秒以上と非常に深い。 $z\sim 0$ の比較サンプルでは、SDSSの画像および分光データを用いた。 $z\sim 0$ の銀河団の選択では、 $z\sim 1$ の銀河団が $z\sim 0$ まで進化した場合に予想されるハロー質量と同程度の質量の銀河団を選択した。これにより、 $z\sim 0$ の早期型銀河サンプル自体についても、 $z\sim 1$ の早期型銀河が受動的に進化した際に予想される色-等級関係を用いて選択した。また、 $z\sim 0$ のサンプルの赤方偏移レンジ( $0.02 < z < 0.05$ )は空間分解能が $z\sim 1$ のサンプルと揃うように設定した。

静止系可視( $\sim g$ バンド)の面輝度分布を測定した。ここで、第2章で用いた近傍早期型銀河サンプルを用いたシミュレーションを行うことで、空間分解の若干の違いによる面輝度の勾配への影響を導出した。この効果を補正した上で、 $\Delta\text{Slope}$ を測定した(参考: Figure 3.21)。

得られた結果は以下である。 $z\sim 1$ の早期型銀河の方が $z\sim 0$ よりも $\Delta\text{Slope}$ が有意に大きい(Figure 3.22)。面輝度分布の勾配から、 $\Delta\text{Slope}$ の違いは外側の面輝度分布の違いに由来している。スタックした面輝度分布から、 $z\sim 1$ の早期型銀河の面輝度分布が $z\sim 0$ よりもTruncatedな傾向がある。 $\Delta\text{Slope}$ の質量依存性は $z\sim 1$ でも0でも見られ、大質量ほど $\Delta\text{Slope}$ が小さい(Figure 3.22)。 $z\sim 1$ と0での $\Delta\text{Slope}$ の違いは実際の銀河の変化を反映しており、空間分解能の補正の違いやサンプル選択のバイアスによるものではないと見られる。

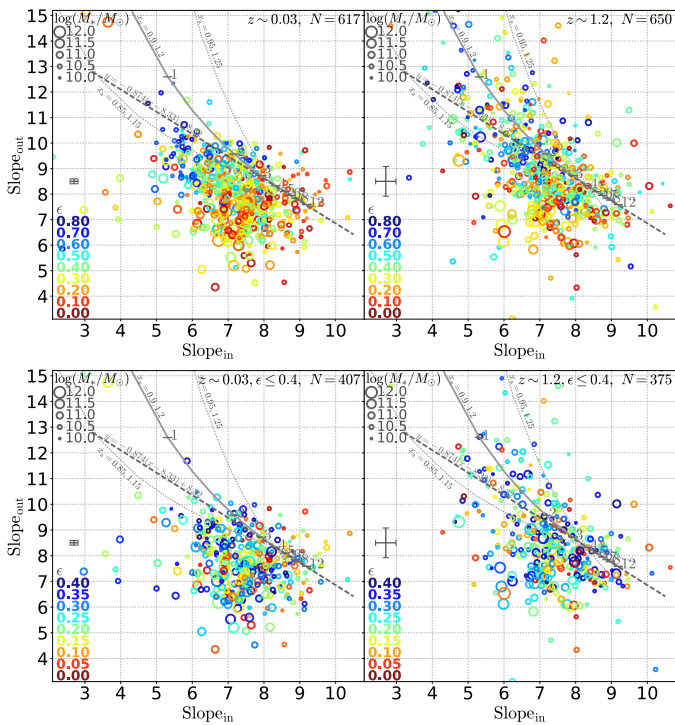


Figure 3.21. 面輝度分布の内側と外側の勾配( $\text{Slope}_{\text{in}}$ ,  $\text{Slope}_{\text{out}}$ )を第3章の $z\sim 1$ (右)および $z\sim 0$ (左)の早期型銀河サンプルで全体(上)と楕円率の低いもの(下)について示した。灰色の実線の曲線、破線の直線はFigure 2.7, 2.8と同様。

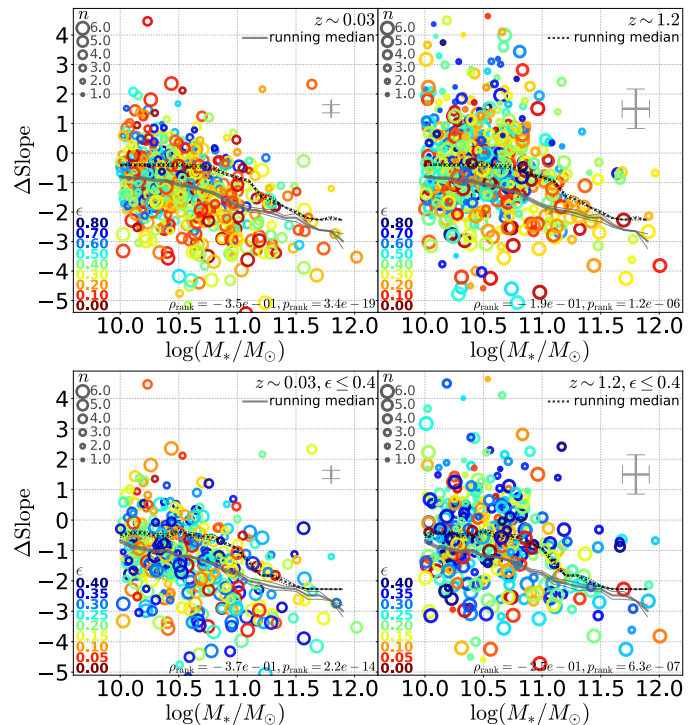


Figure 3.22.  $\Delta\text{Slope}$ の星質量依存性を第3章の $z\sim 1$ (右)および $z\sim 0$ (左)の早期型銀河サンプルで全体(上)と楕円率の低いもの(下)について示した。黒の点線が $z\sim 1$ のサンプルでのrunning median, 灰色の実線が $z\sim 0$ のサンプルでのrunning median.

第4章では、早期型銀河の進化について議論する。4.1章では、Slow Rotator と Fast Rotator の形成・進化のメカニズムについて可能性のあるものを挙げ、第2章の結果に基づいて、面輝度分布と運動学的性質の両方を説明できるかどうか議論する。多くの Fast Rotator で 銀河の円盤成分の特徴である Truncation ( $\Delta\text{Slope} > 0$ ) が見られることから、そのような Fast Rotator では外側の円盤が破壊されずに残るような静かな過程が重要なかもしれない。一方、大質量( $\log(M_*/M_\odot) > 11$ )では Fast Rotator でも Extended ( $\Delta\text{Slope} < 0$ ) な傾向が見られ、これらについては Major merger (質量の等しい銀河同士の合体) が効いている可能性がある。Slow rotatorについては、ほとんどがExtendedであることから、回転を止めることと外側の面輝度分布の形を変える仕組みが共通のものである可能性が高い。今のところ、候補としては、major merger, ガスの少ない状態での minor mergers (質量の異なる銀河同士の合体)といった相互作用、銀河中心核の活動の影響(AGN feedback)などの内的な要因も考えられる。

4.2章では、銀河団環境下における $z \sim 1$ から0での早期型銀河の平均サイズ進化の原因について、第3章で得られた結果をもとに議論する。先行研究と同様に、今回我々が用いたサンプルでも有意なサイズ進化が観測された。外側の面輝度分布が $z \sim 1$ から0で増加していることに加え、Sersic indexの上昇と楕円率の低下から、早期型銀河の平均サイズの進化の原因は個々の銀河のサイズの増加に起因していると思われるが、 $z < 1$ で新たに星形成をやめた銀河の混入の影響(progenitor bias)も完全には否定できない。先行研究で示されている環境依存性や、今回のサンプルの銀河団が大質量で速度分散が大きいことなどを考えると、今回のサンプルの早期型銀河のサイズ進化の要因としては minor mergers が有力であると思われる。

最後に4.3章では、早期型銀河の運動学的性質の進化について議論する。第3章で得られた $z \sim 1$ の早期型銀河の $\Delta\text{Slope}$ から、第2章で得られた $\Delta\text{Slope}$ と $\lambda$ ,  $V/\sigma$ の関係を適用して、それぞれの回転のパラメータの値を導出した。ここで、 $\Delta\text{Slope}$ と $\lambda$ ,  $V/\sigma$ の関係は赤方偏移や環境によって変化しないことを仮定している。 $z \sim 1$ の早期型銀河サンプルでの平均値は $V/\sigma \sim 0.5$ であり、先行研究で $z \sim 1$ の25個の早期型銀河の $V/\sigma$ をスリット分光で直接得たものと矛盾のない値であった。また $z \sim 1$ から0で今回観測された平均的な $\lambda$ の進化量( $\sim 0.1$ )は、シミュレーションから示唆されるガスの少ない minor mergers によるスピンドウンの寄与と同程度である。また、 $z \sim 1$ においても大質量( $\log(M_*/M_\odot) > 11$ )の銀河はExtendedなものが多いことから、大質量の Slow Rotator の成因となる過程は $z > 1$ で働いていると考えられる。

以上のように、本研究では近傍宇宙で $\Delta\text{Slope}$ と回転パラメータ( $\lambda$ ,  $V/\sigma$ ) の関係を見出し(第2章)、 $z \sim 1$ と0の早期型銀河の $\Delta\text{Slope}$ を測定した(第3章)。結果、 $z \sim 1$ から0における $\Delta\text{Slope}$ の有意な変化を発見した。第2章で見出した関係を用いて、第3章で観測された $\Delta\text{Slope}$ から $\lambda$ ,  $V/\sigma$ を導出して早期型銀河の運動学的性質の進化について議論した。ただし、今回用いた手法は間接的なものであり、 $\Delta\text{Slope}$ の進化を運動学的性質の進化として解釈した部分には不定性がある。それを踏まえた上で、将来の研究として2つの方向性が重要だと考える。1つは現在はいまじりつつある次世代の大規模面分光観測(MaNGA, HECTORなど)による大サンプルを用いて、 $\Delta\text{Slope}$ と回転パラメータの関係が環境に依存するかどうかを調べることである。もうひとつは、JWST, GMT, ELT, TMTといった次世代の宇宙望遠鏡や30m級の地上望遠鏡をつかった遠方早期型銀河の運動学構造の直接的な調査である。4.3章で見たように、特に $1 < z < 2$ は早期型銀河が角運動量を著しく失った時代である可能性が高いため、この赤方偏移で調査することが重要であると考えられる。