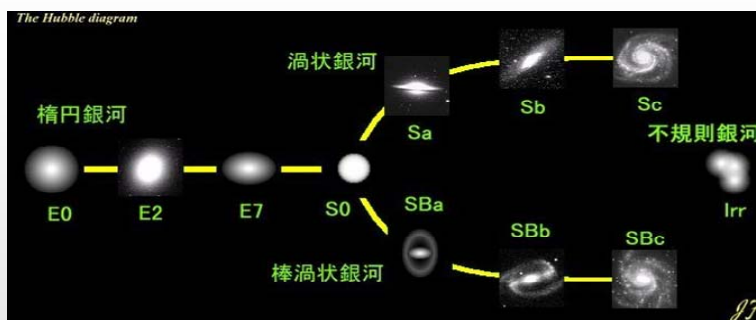


# THE BARYONIC TULLY-FISHER RELATION (McGaugh 2000)

名古屋大学理学研究科 Ω研 石川 寛

速報論文 Baryonic Tully-Fisher relation(McGaugh 2000)の review を行う。その前に、銀河についての基本的な知識について確認しておく。

## 銀河の多様性



銀河の分類(ハッブル分類)

- 渦巻銀河 ...渦巻状の腕、中心にバルジ
- 楕円銀河 ...見かけ楕円に見える銀河
- 不規則銀河 ...規則的な構造をもたないもの

我々の住む宇宙には、様々な形の銀河が存在する。大まかにそれらは3つに大別することができ、天の川銀河のような回転円盤を持つ渦巻銀河であったり、見かけ上楕円形に見

える楕円銀河、さらに規則的な構造を持たない不規則銀河が存在する。上の図は最も一般的な銀河の分類法であり、ハッブル分類と呼ばれる。一般に図の左側を早期型銀河、右側を晩期型銀河と呼ぶが、これらはあくまで慣習的な呼び方であり、決して銀河の時間変化を表しているわけではないことに注意しておきたい。

## まず大切なこと 銀河は進化する。

ダークハローの中で銀河がどのように形成され進化するか

→我々の最大の関心

銀河は、バリオン(星、ガス)とダークマターがそれぞれ相互作用しながら進化していく非常に複雑なシステムである。



バリオンとダークマターの時間発展は切り離して考えることはできない！

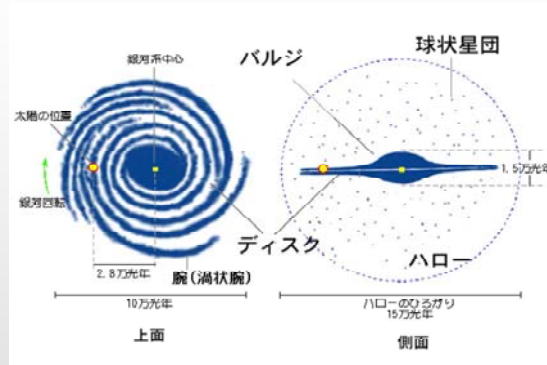
**Tully-Fisher relation (以下TF relation) は渦巻銀河のバリオンの性質と力学質量の関係を示す**

銀河の物理を勉強する上で、我々は銀河は時間とともに変化をする系であることを理解しておかなければいけない。ダークハローのポテンシャルの中で銀河がどのように形成され進化するか、これが我々の最大の関心事である。銀河にはバリオンとダークマターがそれぞれ存在していて、それらはお互いに相互作用しながら進化を続けていく。銀河系は極めて物理的に複雑な系と言えよう。そのような中で、今回紹介する **Tully-Fisher relation**(以下 **TF relation**)は渦巻銀河のバリオンの性質と力学質量の関係を示す式なのである。

TF Relationは、渦巻銀河におけるスケーリング則である。

### ● 渦巻銀河の構造

- ・円盤部(回転支持)  
→渦状腕、暗黒星雲
- ・バルジ  
→中心の球状構造
- ・ハロー  
→円盤を取り囲む球状領域

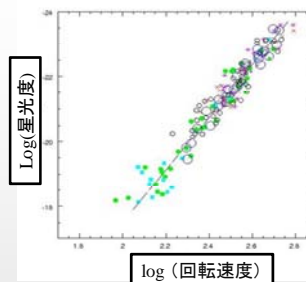


TF relationは渦巻銀河の回転速度と星の光度の関係式

TF relation は渦巻銀河におけるスケーリング則である。渦巻銀河の構造について簡単に説明しておく。渦巻銀河の構造は大きく3つに分けることができる。まず我々の太陽系が存在している渦状の円盤部がある。この円盤は回転によって支持されていて、様々な星や暗黒星雲などが広がっている。その他には中心に球状の構造をしたバルジ、円盤全体を取り囲む薄い球状の領域であるハローといった部分に分類できる。

Tully-Fisher relation

$$L \propto v^\alpha \quad \alpha = 3 \sim 4$$



- 距離に依らない回転速度という値から絶対光度を見積もる  
→これと見かけの明るさから距離を見積もることができる  
→距離を表す指標となることができる

しかし、本講演で注目するTF<sup>TTT</sup> relationの性質は  
単純なスケーリング則としての側面ではない。

TF relation とは渦巻銀河の円盤の回転速度と光度の間の経験的なスケーリング則であり、一般的に  $L \propto v^\alpha$  ( $\alpha \sim 3 - 4$ ) と表される。この関係により、距離に依らない回転速度という値から絶対光度を見積もることができる。さらにこれと見かけの明るさから距離を見積もることができるため、TF relation は銀河までの距離を表す指標になると言われている。しかし、今回注目する TF relation の性質は、こういった単純なスケーリング則としての側面ではない。

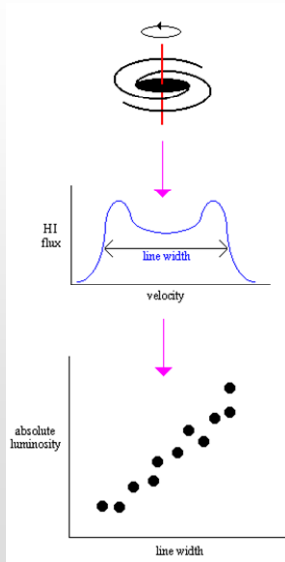
### TF relationは銀河の ダークマターとバリオンの関係を表した関係式といえる

- 渦巻銀河の回転速度
  - .....渦巻銀河の力学質量を表す  
(力学質量=バリオン質量+ダークマター質量)
- 渦巻銀河の光度
  - ⇔星の全光度
  - ⇔銀河内の全星質量

TF relationは、その中に銀河の形成、進化の情報を内包している

渦巻銀河の回転速度とは、それすなわち渦巻銀河の力学質量を表していると言えよう。ここでいう力学質量とは通常物質バリオンの質量に加え、ダークマターの質量も含まれている。それに対し TF relation における光度とは銀河内の星の全光度のことであるため、銀河内の全星質量を表していると言える。つまり、ここから TF relation が渦巻銀河のバリオンとダークマターの情報を内包した式であることが推測されよう。つまり、TF relation はその中に銀河の形成、進化の情報を内包しているといったことが言えるのである。

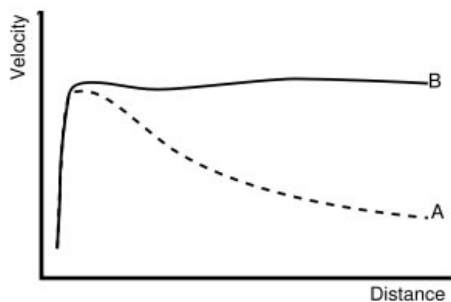
## 回転速度を求めるには



- HI21cm輝線を用いて測定するのが基本である
- 円盤の回転によるドップラーシフトにより、輝線が幅を持って測定される
- つまり、この輝線幅と回転速度の間の比例関係から、渦巻構造の回転速度を見積もることができる。

渦巻銀河の回転速度を求めるには HI21cm 輝線を用いるのが基本である。水素原子ガスは他のガスに比べて、円盤の外側まで広がって存在しているため、より広い円盤の範囲を見ることができる。円盤の回転運動によりドップラー効果が起こり、本来輝線で観測されるはずのものが幅をもって観測される。この横幅は円盤の回転速度に比例しているはずであり、つまりこの輝線幅から円盤の回転速度が測定できるのである。

また回転円盤の HI profile が上図のような双頭の対称な形になって表れる理由について説明しておく。銀河円盤の回転速度は素直な剛体回転をしているのではなく、中心のごく一部を除き、中心からの距離に依存せずほぼ一定の回転速度を持っているのである。そのため、上の図に示したように最高速度の Intensity が大きくなって表れているのである。



(銀河円盤の回転速度を表す。Bの曲線が実際の回転速度を表わしていて、中心からの距離に依存せずほぼ一定の値を持っていることが見て分かるであろう。)

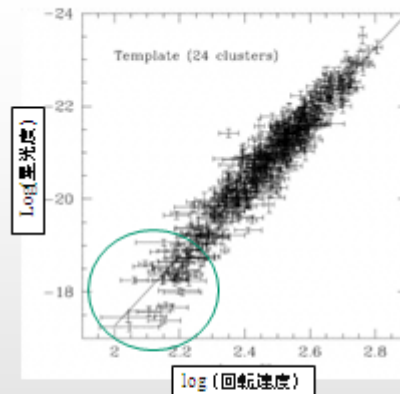
とは言うものの、  
この関係の物理的基礎  
は解明されていない。

TF relation(における諸問題

- 低質量側にbreakがある
- TF relationの分散が非常に小さい原因や、円盤部、ハロー、ダークマター間の相互作用の関係は解明されていない

ここで、低質量側のbreakについて言及しているのが

baryonic Tully-Fisher relation (McGaugh 2000)



先ほども述べたように、TF relation はあくまで経験的に理解されている関係であり、その理論的な基礎は未だ解決されていない。大きな問題が大まかに2つ存在している。①低質量（低回転速度）側にべき関数からの大きな落ち込みが存在する。②TF relation の分散が非常に小さい原因や、円盤部、ハロー、ダークマター間の相互作用の関係は解明されていない。ここで、一つ目の問題、低質量側の break について言及しているのが baryonic Tully-Fisher relation(McGaugh 2000)である。

## THE BARYONIC TULLY-FISHER RELATION

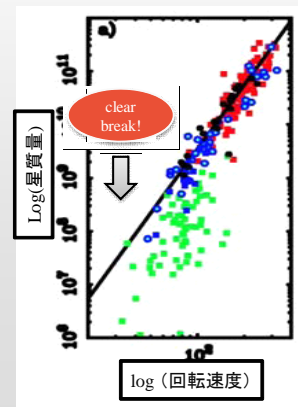
(McGaugh 2000)

- 回転速度  $30\text{km s}^{-1} < V_c < 300\text{km s}^{-1}$  の範囲において、星質量回転速度比を詳細に調べた。



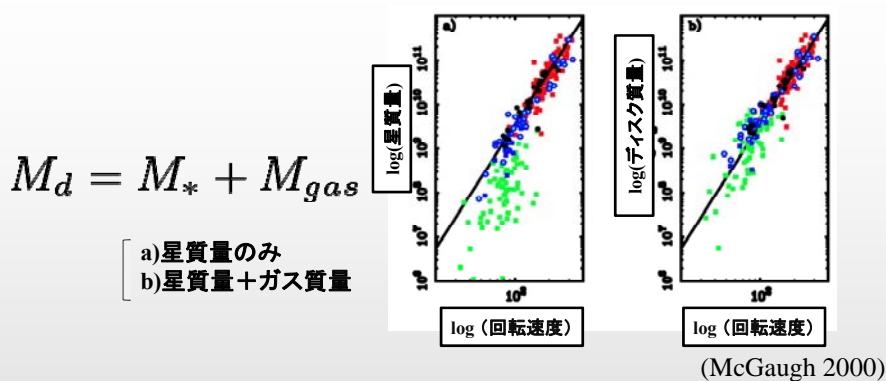
$V_c \leq 90\text{km s}^{-1}$  の範囲に  
急激な特徴的な落ち込みがみられた。

矮小銀河には星質量に対して  
ガスの質量が無視できないほどに存在。



McGaughはこの論文において、回転速度 $30\text{km s}^{-1} \leq v_c \leq 300\text{km s}^{-1}$ の範囲において、非常にたくさんのサンプルを用いて関係性を調べた。そしてその結果、回転速度 $v \leq 90\text{km s}^{-1}$ の範囲に急激な落ち込みがあることを発見した。しかしここで一つ重要な事実がある。一般に低質量銀河には、星質量に比べてガスの質量が無視できないくらいに存在しているのである。つまり、星の質量にガスの質量を加えなければ、十分に適切なバリオン質量が得られないのである。ここで、McGaughはこの値にさらにガス質量を加え補正することにより、単一のべき乗を回復することに成功したのだ。

### ガスの質量も計算に加え、二つの関係に補正を加える



円盤部のバリオン質量と回転速度の関係を明確にした

### Baryonic Tully-Fisher relation

その結果得られた図が上の b)の図である。星質量にガス質量を加えたディスク質量が図の縦軸になっており、回転速度との綺麗な相関が見られることが明らかであろう。この、円盤部のバリオン質量と回転速度の間の関係を表すものを baryonic Tully-Fisher relation という。

## 精確に<sup>TIT1</sup>二つの関係を調べるために

- 銀河円盤の軌道傾斜角が  $i \geq 45^\circ$  のもののみを採用  
→それ以上急だと回転速度の測定誤差<sup>TIT2</sup>が大きくなる
- 各波長帯ごとに質量-光度比を設定する。  
 $\Upsilon_*^B = 1.4, \Upsilon_*^I = 1.7, \Upsilon^H = 1.0, \Upsilon_*^{k'} = 0.8M_\odot/L_\odot$   
(de Jong 1996)
- なるべく星質量を正確にトレースする、より赤い波長帯のデータを用いる  
→青い色のデータは最近生まれた若くて明るい星の影響を受けやすい。
- ダストによる減光(散乱、吸収)の影響に対しても補正を加える  
(星形成が活発なより大きな銀河では、より強く減光の影響を受ける)  
(Bothun et al. 1985; Verheijen 1997)

$$M_d = AV_c^b \quad \log A = 1.57 \pm 0.25$$
$$b = 3.98 \pm 0.12$$

精確に二つの関係を調べるための工夫が以下のように成されている。

1. 視線方向に対して円盤の回転軸が平行に近くなってしまうと円盤の回転の様子を測定しづらくなってしまう。銀河円盤の軌道傾斜角が  $i \geq 45^\circ$  のもののみを採用し、回転速度の測定誤差を小さくした。
2. 各波長帯ごとにそれぞれ異なる質量-光度比を設定してやり、より正確に星質量と光度を結びつけてやった。
3. 青い色のデータは最近生れた若くて明るい星の影響を受けやすいため、なるべく赤い波長帯のデータを用いることに努めた。
4. ダストの減光に対しても補正を加えてやらなければならない。星形成が活発なより大きな銀河はそれゆえにダストも多く存在し、より強く減光の影響を受けてしまうためである。

このような工夫のもと、得られた精確な値が上に示した値である。



## IMPLICATION

- バリオン質量と回転速度には普遍的な関係性がある  
→より早期型の渦巻銀河にも適用可能  
(バルジに対する考察、また異なった質量-光度比、他のバリオン...を加える)
- 光度-輝線幅の分散が非常に小さい→星質量-光度比は uniform  
(e.g.,  $K'$ -band での分散は、星形成史の多様性で消費される  
→IMFの多様性、質量-回転速度比の分散の考察の入り込む余地はない)  
(Verheijen 1997)

この研究により、以下のようなことが明らかになった。

1. バリオン質量と回転速度には普遍的な関係性があり、これはより早期型のバルジ成分の寄与が大きい渦巻銀河にも適用可能である。
2. 光度-輝線幅の分散が非常に小さいことから、星質量-光度比が **uniform** であることがうかがえる。たとえば  $K'$ バンドでの分散は星形成史の多様性で消費されてしまい、IMF (Initial Mass Function, 初期質量関数) の多様性、質量-回転速度比の分散の考察が入り込む余地がないところが不自然である。

\*\*\* CORPORATION

## まとめ

- 銀河とは星とガスとダークマターがそれぞれ相互作用しながら進化を続ける、非常に複雑なシステムである。
- TF relation  $L \propto v^\alpha$  は、渦巻銀河のバリオンの性質と力学質量の関係を表す。
- 従来のTF relationにおける問題点  
→低質量側のbreak、非常に小さい散乱など
- TF relationにガス質量を加え、バリオン質量と回転速度の間の関係を明確にしたのがbaryonic Tully-Fisher relation
- TF relation固有の小さい分散については、未だに銀河形成の理論と結びついていない
- 今後の課題は正確なTF relationの構築と、それによる銀河進化の理論の発展を目指すことである