

INTRODUCTION: 相互作用銀河で<u>の星形成</u>

Introduction

-SF in IGs

- 1. Systematic approach
- 2. Case study approach

Summary

銀河 大きな固有速度を持つこともあり、 恒星とは異なり頻繁に相互作用を起こす タイムスケール: ~10⁹ yrs (c.f., 銀河のライフタイム: ~10¹⁰yrs)



ULIRGs(L_{FIR} >10¹² L_{sun}), LIRGs(L_{FIR} >10¹¹ L_{sun}) …銀河全体で活発に星形成をしている →その90%近くに銀河間重力相互作用の兆候

1. Systematic approach

Introduction

-SF in IGs

2. Case study approach

Summary

典型的相互作用銀河の例 Arp 240

最近傍ULIRG Arp 220

- ・ULIRGs(*L*_{FIR}>10¹²*L*_{sun}), LIRGs(*L*_{FIR}>10¹¹*L*_{sun}) …z~1-2の時代では宇宙の星形成の主体 (Goto et al. 2011)
- 相互作用銀河
 merger rate ∝ (1+z)^m m=3-4
 (e.g., Abraham 1999; Bluck et al. 2009)
 ・ディスクの(再)形成 (Ueda et al. 2014)
- ⇒ その影響は銀河形成・進化史にとっても重要 どのようなメカニズム?
- →十分な理解には至っていない.
- ・<u>U/LIRGsになる前</u>の相互作用銀河初期~中期 ・<u>星形成の材料である</u>分子ガスの物理状態
- の理解が重要

- Introduction
- -SF in IGs
- 1. Systematic approach
- 2. Case study approach

星形成と分子ガス

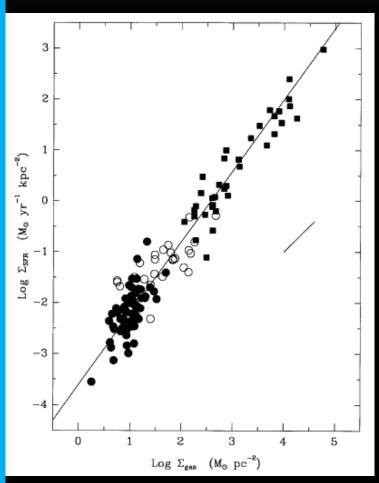
Introduction

-SF in IGs

1. Systematic approach

2. Case study approach

Summary



系外銀河での基礎関係
Kennicutt-Schmidt則 $\log \Sigma_{SFR} = \alpha \log \Sigma_{gas} + \beta$ $(\alpha = 1~2)$ 「ガスがあれば星ができる」

銀河スケール(~10kpc) 銀河内部スケール(~kpc) どちらも大体この関係に乗る

孤立銀河の場合
¹²CO(*J* = 1-0): α~1.4

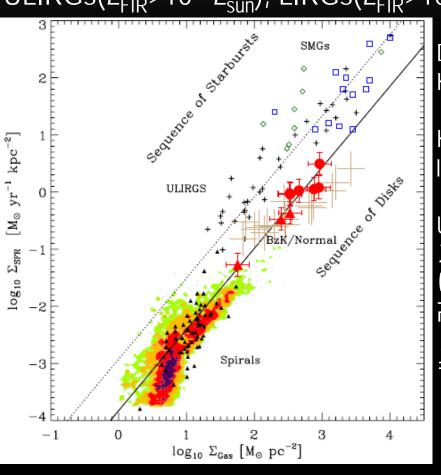
Kennicutt(1998)

ULIRGs($L_{FIR} > 10^{12} L_{sun}$), LIRGs($L_{FIR} > 10^{11} L_{sun}$)

Introduction -SF in IGs

- 1. Systematic approach
- 2. Case study approach

Summary



Daddi et al. 2010 Komugi et al. 2005

Kennicutt-Schmidt則 $\log \Sigma_{SFR} = \alpha \log \Sigma_{gas} + \beta$

ULIRGのような スターバーストグループ は普通の渦巻銀河とは 高星形成率SFRだけでなく β =星形成効率(SFR/ M_{gas}) も違う

Introduction

-SF in IGs

- 1. Systematic approach
- 2. Case study approach

Summary

問題解明への2つのアプローチ

- ・系統的な手法
 - 一衝突の進行段階
 - 一銀河自身と相互作用のトルクの向き
 - 一母銀河の質量比
- →それぞれの特徴で進化の違いの有無
 - ・ケーススタディー的手法
 - 一特徴的な性質をもつもの

…理論(シミュレーション)、観測の双方から 行う必要がある

- ・理論(シミュレーション)
- …これまでは理論・シミュレーションが先行

- Introduction
- -SF in IGs
- 1. Systematic approach
- 2. Case study approach

- ・衝突の進行段階
- ・銀河自身と相互作用のトルクの向き
- ・ 母銀河の質量比

- ・理論(シミュレーション)
- …これまでは理論・シミュレーションが先行

- Introduction
- -SF in IGs
- 1. Systematic approach
- 2. Case study approach

- ・衝突の進行段階
- ・銀河自身と相互作用のトルクの向き
- ・ 母銀河の質量比

Theory and observation: Systematic approach

Introduction
-SF in IGs

初期段階

後期段階



- ・理論(シミュレーション)
- …これまでは理論・シミュレーションが先行

- Introduction
- -SF in IGs
- 1. Systematic approach
- 2. Case study approach
- Summary

- ・衝突の進行段階
- ・銀河自身と相互作用のトルクの向き
- ・ 母銀河の質量比

・理論(シミュレーション)

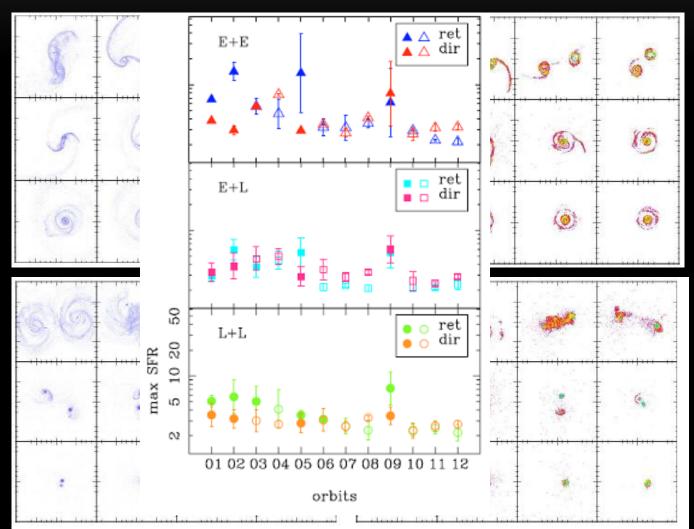
Introduction

-SF in IGs

1. Systematic approach

2. Case study approach

Summary



Matteo et al. 2007

- ・理論(シミュレーション)
- …これまでは理論・シミュレーションが先行

- Introduction
- -SF in IGs
- 1. Systematic approach
- 2. Case study approach

- ・衝突の進行段階
- ・銀河自身と相互作用のトルクの向き
- ・母銀河の質量比

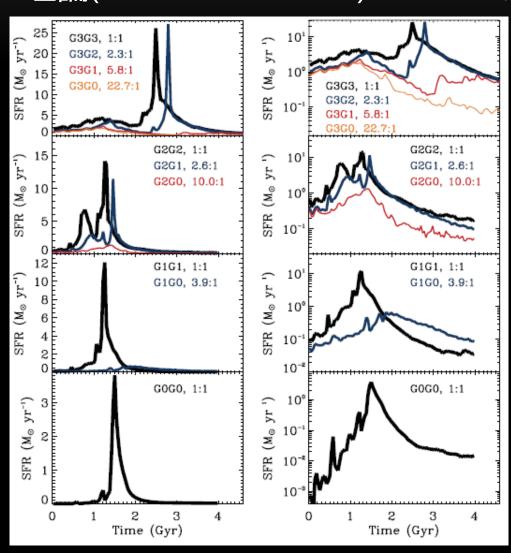
・理論(シミュレーション)アプローチ

Introduction

-SF in IGs

1. Systematic approach

2. Case study approach



一方、観測側は…

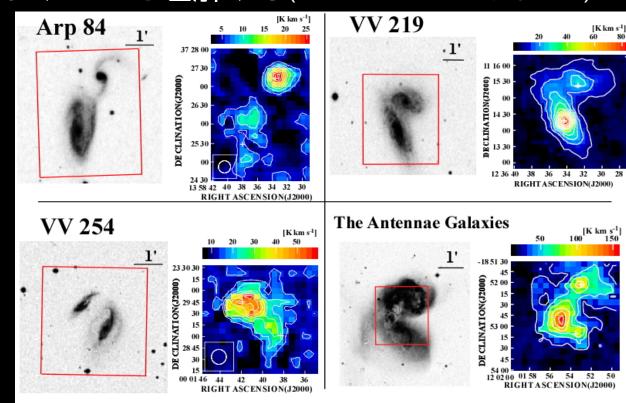
相互作用銀河のガスマッピングは殆どされていない

- …比較的遠方(>10 Mpc)で期待される強度が弱い
 - →ガス分布・性質が分かっていない
 - ⇒ まずここを理解する(Kaneko et al. 2013 etc.)

Introduction -SF in IGs

1. Systematic approach

2. Case study approach



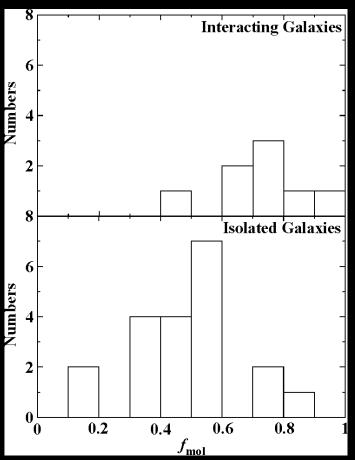
- ①高密度ガス生成→高星形成効率(Young et al. 1986) ②効率は変わらず単に分子ガス増加(Casasola et al. 2004)
- 分子ガスは増えているのか?

Introduction

-SF in IGs

- 1. Systematic approach
- 2. Case study approach

Summary



・全ガス質量M_{gas}/L_{Ks}

孤立銀河: 1.16± 0.50

相互作用銀河: 0.90± 0.29

- →大差なし
- f_{mol}=M_{mol}/(M_{mol}+M_{atomic}) 孤立銀河: 0.52± 0.18

相互作用銀河: 0.71± 0.15

- →優位にƒ歳は増加
- ⇒ 分子ガスへの高効率変換

高効率分子ガス変換の原因は? 観測点ごとの

 $\Sigma_{\rm gas}$ vs $f_{\rm mol}$

gus

1. Systematic approach

Introduction

-SF in IGs

2. Case study approach

Summary

孤立銀河:

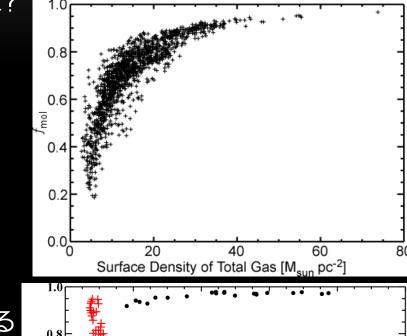
Σ_{gas}に対して単調増加

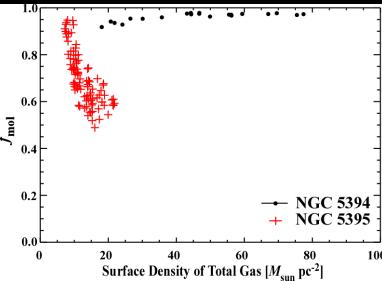
相互作用銀河:

・低Σ_{gas} でも高 f_{mol}

・ f_{mol}がΣ_{gas}に対し単調減少する ものも(過去、報告例無し)

何故…?





理論モデル(Elmegreen 1993)に基づくシミュレーション f_{mol} : 金属量(Z), 圧力(P), UV 輻射(U) に依存

金属量:周囲のUV輻射からの分子ガス雲の遮蔽、 原子ガス→分子ガスの場としての役割 (*f*_{mol}を上げる効果)

圧力:ガス自身の自己遮蔽効果、変換に寄与するガス量 (*f*molを上げる効果)

UV輻射:分子ガスを解離させる効果 (*f*_{mol}を下げる効果)

→圧力 $P \propto \Sigma_{gas}^2$ とすれば、圧力、UV輻射ともに各観測点ごとの観測量が使える…フリーパラメータは金属量(観測無し)のみ

Introduction

-SF in IGs

1. Systematic

approach

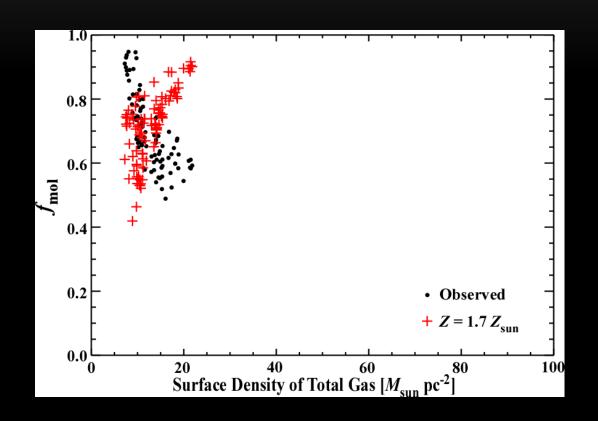
2. Case study approach

Introduction

-SF in IGs

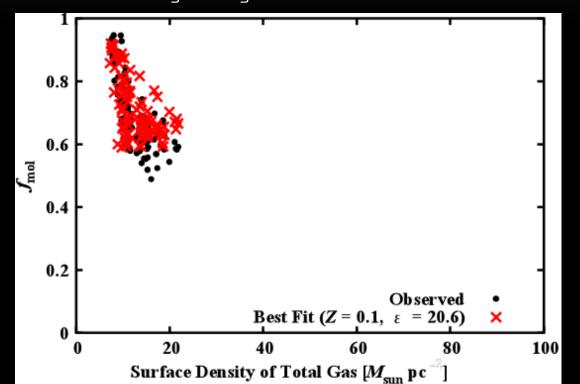
- 1. Systematic approach
- 2. Case study approach

Summary



基本的なモデル(赤)では 全く観測(黒)を再現できない

銀河の相互作用による効果:外圧項(銀河で共通値)を追加 $P/P_{sun}^{\infty}(\Sigma_{gas}/\Sigma_{gas sun})^2+\varepsilon$



→銀河全体にわたって外圧を加えたモデルで 特異な例も説明できる …相互作用によって外圧が発生し分子ガスを効率的に作る

Introduction

-SF in IGs

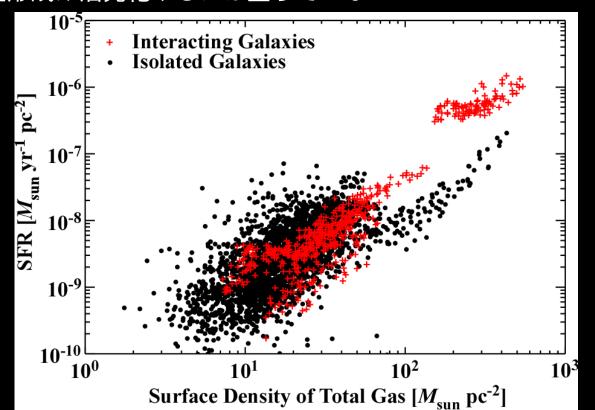
1. Systematic approach

2. Case study approach

THEORY AND OBSERVATION: SYSTEMATIC APPROACH - KENNICUTT-SCHIMIDT則-

- ・分子ガスの割合が高い
- →星形成と分子ガスの関係は変化している?
- …Kennicutt-Schmidt則によるアプローチ

孤立銀河との比較: kpcスケールでもベキ、星形成率ともに差はない →まだ星形成が活発化するには至っていない



Introduction

-SF in IGs

1. Systematic approach

2. Case study approach

THEORY AND OBSERVATION: CASE STUDY APPROACH

Introduction

-SF in IGs

- 1. Systematic approach
- 2. Case study approach

Summary

相互作用のごく初期の段階であっても 分子ガスには f_{mol} 増加など影響がみられる kpcスケールでは星形成はあまり顕著な変化はない

次のステップ

- ・様々な段階、状態の天体を調べる
- →多数の天体(>40システム)に対し統計的な研究
- ⇒ NRO 45近傍銀河レガシーCOMINGの一部として実行開始
 - ・よリメカニズムに迫れるターゲットを個別観測
- →ALMAで<100pcスケールで見られるように
- …シミュレーションとの直接比較可能になってきた

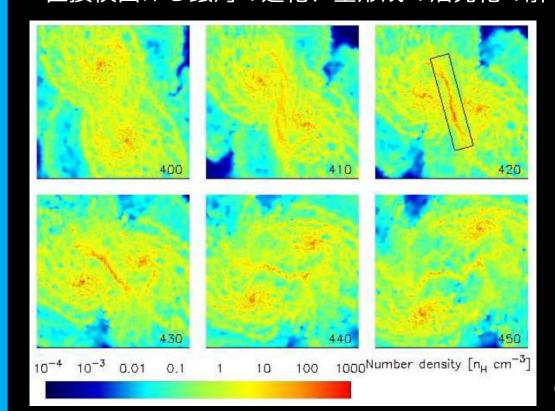
Introduction

- -SF in IGs
- 1. Systematic approach
- 2. Case study approach

Summary

THEORY AND OBSERVATION: CASE STUDY APPROACH -シミュレーション-

- 最近のシミュレーション(Saitoh et al. 2009, 2010)
 低温ガス(<10⁴ K)まで解けるようになり分解能が上昇
 衝突の初期に巨大(kpc x 10 kpc)・高密度・大質量(10⁸ M_{sun})で
 フィラメント状の分子雲複合体が形成される
 …これが千切れて大量の星団を生成
- →直接検出から銀河の進化、星形成の活発化の解明へ



Saitoh et al. (2009)

THEORY AND OBSERVATION: CASE STUDY APPROACH -理想的ターゲット-

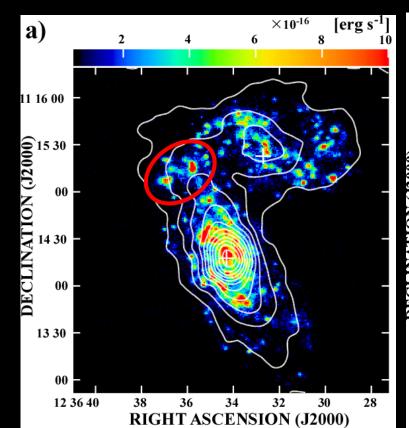
VV219(NGC 4567/4568ペア)@16 Mpc

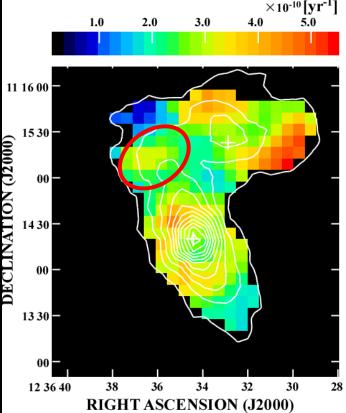
- ・比較的近傍でシミュレーションとも似た配置
- · H α などで衝突領域に大きな星形成領域が見られる
- ・星形成効率が該当領域で高い
- ・分子ガス分布にわずかながら偏り

-SF in IGs

Introduction

- 1. Systematic approach
- 2. Case study approach





Introduction

-SF in IGs

- 1. Systematic approach
- 2. Case study approach

Summary

THEORY AND OBSERVATION: CASE STUDY APPROACH - ALMA-

¹²CO(*J* = 1-0) ACA 7m(広がった成分)データ

- ・1kpcほどの極めて大きくフィラメント状の分子雲
- →同サイズの分子雲はアンテナ銀河で見つかっているのみ 12mアレイ(コンパクトな成分のみに感度)データ
- ・未検出
- →300pc以上の大きな構造を持つ分子雲複合体

ACA 7m: 12."85 x 8."73 (996 pc x 677pc)

12m アレイ: 2."00 x 2."00

(155 pc x 155pc)

THEORY AND OBSERVATION: CASE STUDY APPROACH -星形成-

ACA7m 積分強度図(コントア)+ $H\alpha$ (カラー)

- ・検出した巨大分子雲複合体の端:
- 衝突領域で最も大きな星形成領域が付随

Introduction
-SF in IGs

- 1. Systematic approach
- 2. Case study approach

Introduction

- -SF in IGs
- 1. Systematic approach
- 2. Case study approach

Summary

THEORY AND OBSERVATION: CASE STUDY APPROACH -速度分散-

moment 2:速度分散

- ・速度分散が大きい所にちょうど大きな星形成領域
- ・速度分散大の領域とフィラメントの向きが直交
- →銀河が今まさに衝突している領域 衝突の影響で星形成中

THEORY AND OBSERVATION: CASE STUDY APPROACH –位置速度図-

Introduction

-SF in IGs

- 1. Systematic approach
- 2. Case study approach

Summary

位置速度図: 明らかにガス雲の端で大きなトビ →ショックによる巨大分子雲複合体形成の可能性 …非常に大きなスケールでのcloud-cloud collision? (GMA-GMA collision??)

Introduction -SF in IGs 1. Systematic approach 2. Case study approach Summary

SUMMARY

- ・銀河進化の理解:
- ~星とガスの関係の理解
- …相互作用銀河というより長時間スケールでの影響
- ・相互作用銀河:
- …極端な環境にある
- →分子ガスも特殊な性質を持つ
- ・これまでは理論が大幅に先行 単一鏡:受信機性能の向上
- …他天体の観測可
 - ALMA:空間分解能が向上
- …個別天体を詳細に観測可
- →観測もようやく追い付いてきた

理論・観測でより密接に研究を進めることが必須