

Dwarf galaxy formation with H₂-regulated star formation

Kuhlen, Krumholz, Madau,
Smith, & Wise 2011
(astro-ph 1105.2376 to be submitted to Apj)

藤本裕輔
(北海道大学 M1)

今回の発表では論文紹介を行いました。

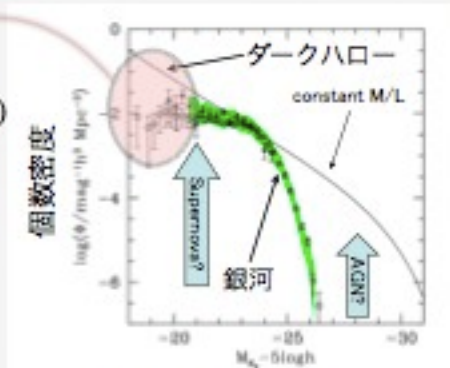
この論文は、cosmologicalなシミュレーションを行うなかで、水素原子HIと水素分子H₂の二つの要素を考慮すると、SFがどう影響するのかを調べた論文です。

1

1) Introduction

There are several **dwarf galaxy problems**.
For example,

SF (star formation)
is suppressed



T. Okamoto (Physics Seminar at

What elements reduces the SF in low mass halos?

今現在、dwarf galaxy にはいくつか問題があります。その一つとして、以下の問題があげられます。

この図は横軸が絶対光度、縦軸が個数密度、棒線がdark haloのmass function、丸印が銀河のluminosity functionを表しています。

要するに、棒線がシミュレーションの結果、丸印が観測結果です。

high massの所と、low massの所において、理論と観測の結果に大きなずれが生じています。

そして、今回注目するのは、low massの部分です。

luminosity functionがmass functionよりも低くなっているということは、何かの原因でSFが抑制されている、抑えられている、ということです。

では、SFを抑制している要因は何なのか？これが問題になっています。

2

Stellar feedback!!

Standard

Stellar feedback is implemented
in many previous cosmological simulations.

However

- Stellar feedback remains **subgrid physics**.
- The results depend sensitively on
the details of the feedback implementations.
In addition, these are often based on **ad-hoc assumptions**.

3

その要因の一つとしてまず、考えられているのが、stellar feedbackです。
最近のcosmological simulationではstellar feedbackがよく入れられています。
しかしながら、これにはいくつかの欠点があります。

一つ目はresolutionが足りないため、subgrid physicsを入れる必要があること。
二つ目はどのようにstellar feedbackをいれるかによって結果が大きく変わってくる
こと。そしてそのfeedbackがad-hocな仮定をベースにしている、ということ
です。

さて、SFを下げている要因はstellar feedbackだけなのか？ けっしてそんなことは
なく、他の可能性も考えられています

H₂ physics!!

Observation

The SF correlates more tightly with
the molecular gas density than the total gas density.
(e.g. Kennicutt et al. 2007)



This paper

They implement an **H₂-regulated SF prescription**
in cosmological simulations.

4

それはH₂ physicsです。

ある観測事実があります。

それは、SFはtotal gas densityよりもmolecular gas densityに強く相関している、
という事実です

そこで、この事実から、従来はtotal gas で求めていたSFを、今回はmolecular
hydrogen, H₂で求め、Cosmological simulationを行っています。

H₂のdensityからSFを求める方法を、H₂ regulated SF prescriptionと呼んでいま
す。

2) Simulations

- cosmological galaxy formation simulation
- AMR(adaptive mesh refinement code) : Enzo

+ star formation prescription

1) Standard SFR

$$\dot{\rho}_{SFR} = \epsilon \frac{\rho_{total}}{t_{ff}(\rho_{total})}$$

• density threshold
below which SF is suppressed to occur

2) H₂ regulated SFR

$$\dot{\rho}_{SFR} = \epsilon \frac{\rho_{H_2}}{t_{ff}(\rho_{total})}$$

• No density threshold

$$\epsilon = 0.01$$

5

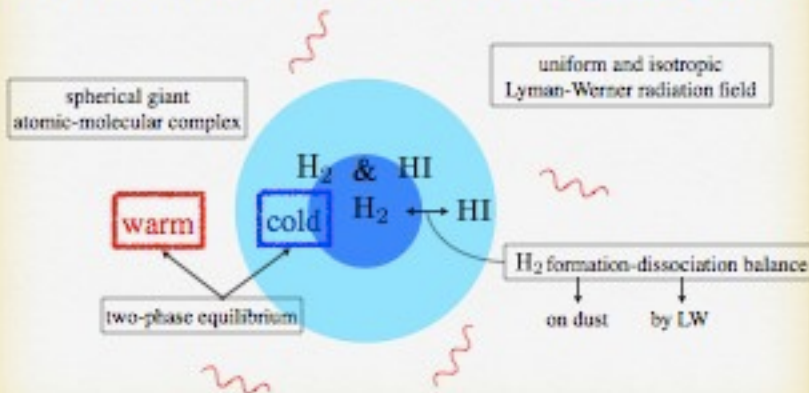
ここでは、cosmologicalな銀河形成シミュレーションをしています。使っているコードはAMRのEnzoですこのEnzoに、以下のSFを組み込んでいます。比較のため、彼らは二つのSF prescriptionを用意しました。

一つ目はStandard SFRです。SFRはtotal gas densityを使い、このように定義しています。このt_{ff}はfree-fall timeで、total densityの関数になっています。また、density threshold、密度の閾値を導入しています。この閾値よりも低いところではSFが起らないようになっています。二つ目はH₂-regulated SFRです。SFRをH₂のdensityを使い、このように定義しています。t_{ff}は上と同様にfree-fall timeです。また、密度の閾値は導入していません。total densityはsimulationの結果から、直接求まります。また、εは今、0.01としています。

残るは、H₂のdensityです。H₂の densityをどのように決めているかを次のスライドで紹介します。

$$f_{H_2} = \rho_{H_2} / \rho_{total}$$

analytical model developed in Krumholz et al (2008, 2009)



6

H₂のfractionを求めてあげれば、H₂のdensityは求まります。

そこで、このH₂のfractionの求めるにあたって、Krumholz et al 2008, 2009で提案された、analytical modelを使っています。

これは、まず、一様等方なLyman-Werner radiation fieldを考えます。そしてHIとH₂でできたクラウドを仮定します。

そして、hydrogenのdust上での生成と、LWによる乖離のバランスとクラウドの内部と外部での平衡を仮定します。

すると、内側がH₂、外側がHIのクラウドになります。このようなモデルとなっています。

Krumholzはこのモデルを解析的に解きました。それが次の式です。

$$f_{\text{H}_2} \simeq 1 - \frac{3}{4} \frac{s}{1 + 0.25s}$$

$$s = \frac{\ln(1 + 0.6\chi + 0.01\chi^2)}{0.6\tau_c}$$

$$\chi = 2.3 \left(\frac{\sigma_{d,-21}}{\mathcal{R}_{-16.5}} \right) \frac{1 + 3.1 (Z/Z_{\text{SN}})^{0.365}}{\phi_{\text{CNM}}}$$

$$\tau_c = \Sigma / \mu_H \sigma_d \simeq 0.067 \left(\frac{Z}{Z_{\text{SN}}} \right) \left(\frac{\rho \Delta r_7}{1 M_{\odot} \text{pc}^{-2}} \right)$$

The H₂ fraction is determined entirely by the **density** and **metallicity** of gas!

H₂のfractionはこの式で求めることができます。ここでは詳細は省きます。

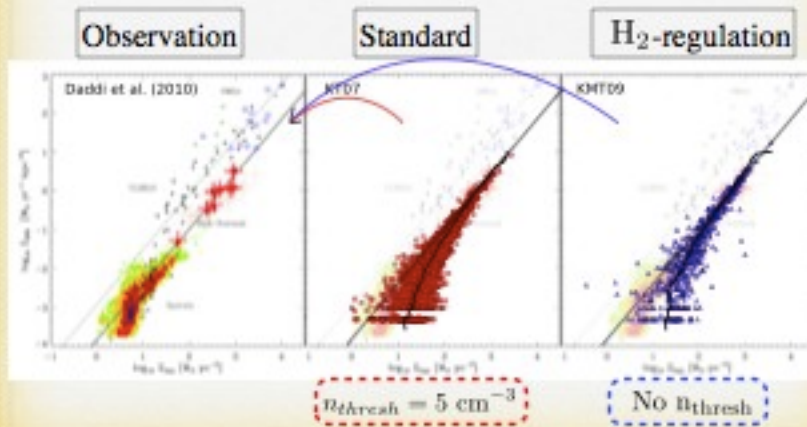
これにいくつかの単純化をします。

ここで重要なことはH₂のfractionが、gasのdensityとmetallicityの二つの量だけで求めることができる、ということです。これがkrumholtzの解析モデルのすばらしいところです。

7

3) Results

Kennicutt-Schmidt relation



まずはKennicutt Schmidt relationとの比較です。

この図はそれぞれ、横軸がガスの面密度、縦軸がSFR 面密度を表しており、一番左は観測結果を、真ん中がstandard version、右端がH₂ regulation versionの結果を表しています。

Standardも、H₂ regulationも観測結果とよく一致しています。

ただ、standardはdensity thresholdを調整し、観測結果と合わせているのに対し、H₂ regulationは何も調節することなく、観測結果を再現することができています。

8

Stellar mass fraction vs total halo mass

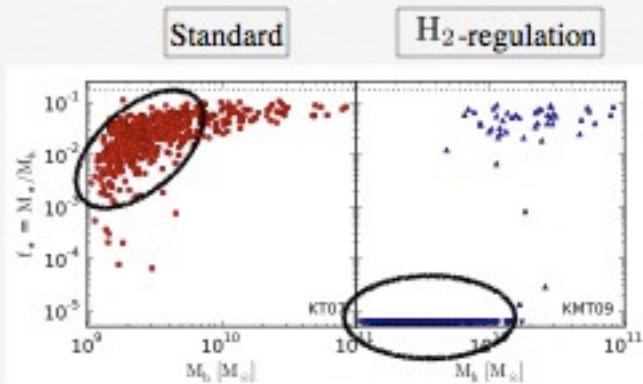
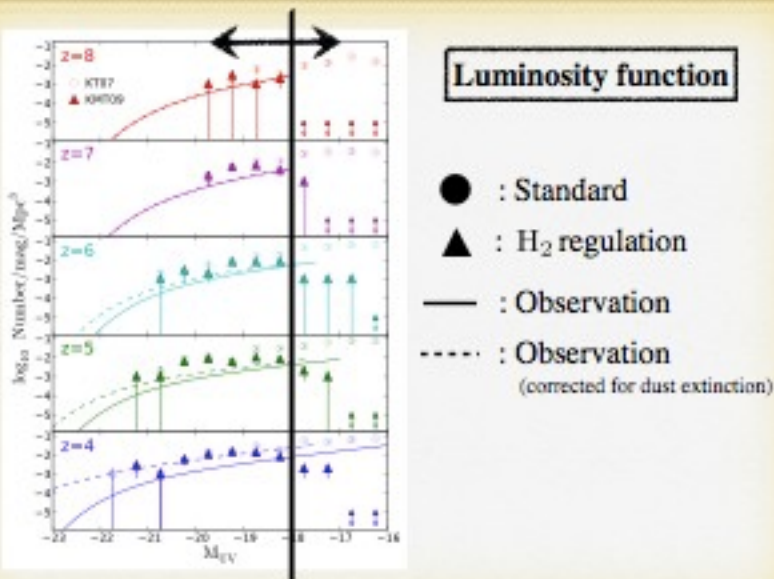


Figure 7. Stellar mass fraction f_* vs. total halo mass in the KT09 (left) and KMT09 (right) simulations at $z=5$. The dotted horizontal line indicates an f_* equal to the cosmic baryon fraction Ω_b/Ω_m , i.e. a 100% gas to star conversion efficiency.

この図は、halo massごとのstellar mass fractionを表しています。横軸はtotal halo mass、縦軸はstellar mass fractionです。左の図はstandard version、H2_regulation versionです。standardでは、low mass haloでも多くの星が作られているのに対し、H2_regulationでは、low mass haloでSFが抑えられていることが見て取れます。

9

Luminosity function



- : Standard
- ▲ : H₂ regulation
- : Observation
- - - : Observation (corrected for dust extinction)

この図は、異なる赤方偏移ごとのluminosity function です。横軸は絶対光度、縦軸は個数密度です。丸印がstandard、三角がH₂ regulation、棒線と破線は観測結果で、破線はdustのextinctionの影響を考慮した観測結果です。high mass haloではstandardも、H₂regulationも観測結果とよく一致していますが、low mass haloでは、H₂regulationが大きく下がっています。下がりすぎているのは、今後の課題ですが、確かにSFを抑えることができています。

10

4) Summary and Discussion

- H₂ regulation are able to reproduce the Kennicutt-Schmidt relation
 - H₂ regulation suppress SF in low mass halos, reducing the need for stellar feed back.
- ➡ H₂ regulation can **alleviate** the dwarf galaxy problem
- ➡ The **atomic-molecular gas transition** may play an **important role** in regulating SF in low mass halos.

Future research

It is necessary to elucidate how the **interplay of molecular chemistry and supernova feedback** shapes SF in dwarf galaxies.

結果は、

H₂ regulationでは、density thresholdを使わずとも、Kennicutt-Schmidt則を再現することができました

また、low mass halo でSFを抑制することができました

要するに、H₂ regulation はdwarf galaxy problem を軽減することができています。

このことから、おそらく、atomic gasとmolecular gas の間のtransitionはlow mass haloでのSF抑制に重要な役割をはたしているのではないのでしょうか。

そして、今後の課題は、SFにおいて、molecular chemistryとsupernova feedback がどのように相互作用するのかを調べる必要があります。