

国立天文台 天文学データ解析計算センター  
成果報告書 (平成17年度)

提出期限：平成18年3月20日(月)17:00 必着

応募カテゴリ（いずれかを選択） B  
システム（いずれかを選択） GRAPE

プロジェクト ID:

研究代表者（現在のユーザ ID : ibkymaak）

|                      |                         |  |
|----------------------|-------------------------|--|
| 氏名                   | 伊吹山秋彦                   |  |
| 所属機関名                | 理化学研究所                  |  |
| 連絡先住所                | 〒 351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1 |  |
| 電話番号                 |                         |  |
| E-mail               | aibukiya@riken.jp       |  |
| 職または学年               | 基礎科学特別研究員               |  |
| 研究代表者が学生の場合には指導教官の氏名 |                         |  |

研究課題名

|      |                                                                  |
|------|------------------------------------------------------------------|
| (和文) | 銀河内輻射輸送を考慮した銀河の化学力学進化                                            |
| (英文) | The Chemodynamical Evolution of Galaxies with Radiative Transfer |

研究分担者

[illegible]

## 成果に関連して出版、もしくは印刷、投稿中の論文リスト

(1) このプロジェクト（同様の過去のプロジェクトも含む）での成果

(2) これまでのプロジェクトの今年度中の成果

2005 年 天文学会 春季年会ダストで覆われた高赤方偏移にある星形成銀河の化学力学進化伊吹山秋彦 (東大理/国立天文台)、有本信雄 (国立天文台)

## 成果の概要

近年、遠方銀河の観測が進み、遠方には近傍の銀河とは異なる銀河種族が存在することが明らかとなってきた。これらの銀河はその観測的な特徴から、極赤天体 (ERO)、BzK 銀河 (BzK)、遠方赤色銀河 (DRG)、サブミリ銀河、ライマンブレイク銀河 (LBG) などに分類されている。こういった銀河の一部は合体衝突をへて成長する途上にあると考えられている。そのため、非常に不規則な形状をもち、また強いダストによる吸収をうけることがある。このような銀河種族に対しては、既存のダストを考慮しないモデル、あるいはダストの吸収を考慮したもののダストの空間分布に対称性を仮定したモデルでは、観測結果を理論的に解釈することは困難である。したがって遠方の銀河種族間はお互いにどのような関係にあるのか、またそれぞれの遠方銀河種族は近傍のどのような銀河へ進化するのかという点は未解明である。

また銀河形成理論においては宇宙の初期ゆらぎが重力による合体成長を経て銀河へ成長するという概要こそ明らかであるものの、実際の化学力学進化をモデル化して数値実験をおこなうと、以下の 2 点において観測事実を再現できない。第一に、銀河の周辺の構造について、モデルからは典型的な銀河の周辺に 1000 個程度の小規模な衛星銀河が存在することが予言される。しかし銀河系の周囲には矮小銀河は 40 個程度しか発見されておらず、大きな矛盾をきたしている。これはミッシングドワーフ問題と呼ばれている。また、既存のモデルでは銀河内星間ガスの冷却が急速に進むため、超新星爆発によって放出されたガスから新たな世代の星が効率的に形成され、早期型銀河でも星形成が現在まで継続することが予言される。そのために既存のモデルは観測される早期型銀河の色等級図を再現できず、これはオーヴァークーリング問題と呼ばれている。このような問題を解決する方法として近年提唱されているのがこれまで無視されてきた紫外線の効果を銀河モデルにとり入れることにより、銀河内のガスが光電離によって加熱される過程をモデル化しようという考え方である。現在のところ、紫外線を扱ったモデルによりミッシングドワーフ問題が解決される可能性が示唆されているが、これは一様な紫外線を仮定しなおかつダストの吸収を無視するというあまり現実的とはいえない仮定を置いている。

このように、既存のモデルは近傍の銀河の観測を再現できず、また遠方にしばしばみられるような不規則な形状をもちダストの吸収を受けた銀河の観測を解釈できないという限界を抱えている。これを克服するためわれわれは新たに銀河内輻射輸送を考慮した化学力学進化モデルを構築した。本モデルは銀河の形成、進化において基礎となる物理過程である星形成、構造形成および銀河内輻射輸送を全て整合的にモデル化したものである。われわれのモデルは N 体 SPH 法により宇宙論的な枠組内での構造形成を計算する。N 体 SPH 法による計算については、Springel et al. (2000) によって開発された GADGET というコードを用いた。本モデルでは銀河内でガスが冷却、収縮しジーンズ不安定になると、ガ

ス密度の 1.5 乗に比例するような形で星が形成される。このようにして形成された星は、銀河内で進化し、恒星風あるいは超新星爆発の形で星間空間にガス、エネルギーおよび重元素を再放出する。さらにわれわれは銀河内輻射輸送をモデル化することにより、OB 型星による星間ガスの加熱効果を考慮した。OB 型星から放射される輻射のスペクトルを恒星種族合成モデルから導いた上で、その輻射と周囲の星間物質の相互作用として、中性水素の紫外線による電離、電離された水素の再結合、ダストによる紫外線の吸収という 3 つの物理過程をモデル化した。輻射輸送の解法としては Bekki & Shioya (2000) と同様にモンテカルロ法を用いている。実際に全ての星粒子からすべてのガスへの相互作用を解く場合、

$$N_{\text{total}} = N_{\text{star}} \times N_{\text{beam}} \times N_{\text{gasinsidebeam}} \times N_{\lambda} \quad (1)$$

を全てのタイムステップについて解くことになり、これは現実的でない。しかし、ダストによる再放射は系のみための SED には多大な影響を及ぼすが、系が遠赤外線にたいして透明であるため系の物理状態にはまったく影響しない。したがって各タイムステップでは紫外線の吸収、光電離のみを考えればよく、そのために  $N_{\lambda}$  を減少させることができる。また光源としても強い紫外光を発するのは若い星粒子だけであるのでそのみを考慮することとすれば  $N_{\text{star}}$  を減少させることができる。一方で各スナップショットではすべての星からの光の輻射輸送をすべての波長域で解くこととした。このことによって輻射輸送をとくのに必要な計算時間を SPH 計算と同程度まで抑えることに成功した。ガスの電離状態については、紫外線の輻射にさらされていないガスは衝突電離平衡を仮定した。紫外線の輻射場中にあるガスについては、ストレムグレン球の計算で適用されるように定常状態を仮定した。すなわち光電離と再結合のつりあいと冷却と加熱のつりあいによってガスの温度、電離度を決定した。OB 型星の放射する紫外線は中性ガスを光電離するため、ガスの冷却は妨げられる。さらに銀河内の輻射輸送をモデル化したことから、銀河内が合体衝突の仮定にあり、不規則な形をしているときでもダストによる吸収を正確に計算して銀河のスペクトルエネルギー分布を導出することが可能となる。ただし本モデルでは散乱を無視している。特に系が平たい場合、散乱の効果が大きく影響する可能性があるが、散乱をとく場合、計算量がさらに膨大になるため、現実的な解像度での計算は困難である。ダストは常にガスに付随していてダスト量はガスの金属量に比例することを仮定した。

構造形成、星形成、輻射輸送をすべて整合的に扱うことによってはじめ、遠方銀河の進化に対してモデルを観測と比較し、その進化経路を詳細に議論することが可能となった。我々のモデルはダストの吸収を考えたのちの SED を予言でき、さまざまなバンドでのモデル銀河の光度を算出できるため、これまでのモデルとは異り観測とモデルを直接比較できる。

本年は研究代表者が理化学研究所に異動し、理化学研究所で開発された FPGA ボード、biolar-3 を使用することが可能となったため、おもに biolar-3 を用いて研究を行った。biolar-3 の場合、扱える数値の範囲がかなりしも GRAPE-5 と同じでないが、さまざまなケースで計算を行った結果、現在の解像度の範囲では GRAPE5 と同じ結果を得られた。本年は GRAPE5 と biolar-3 の両方もちいて昨年より高解像度の計算を行った。昨年は初期粒子数が 10000 の計算は 2 つしかおこなえず、初期粒子数 5000 で計算したものでおもに議論していたが、本年は初期粒子数 10000 での計算を 8 例行い、20000 での計算を 1 例行った。計算のスナップショットは図 1 のとおりである。どの計算でも、紫外線を考慮すると

$z < 1$ での星形成が抑制される (図 2) とともに  $2 > z > 1$ でガスの流出が見られる (図 3)

紫外線の効果が  $z < 1$ で顕著になるのは high- $z$ では各星形成領域が孤立していて自己遮蔽が強く影響する一方で low- $z$ では星形成が銀河中心でしか生起せず、自己遮蔽がきかなくなつて紫外線が影響することが理由と考えられるが、ガスの物理状態にたいしてさらに解析が必要である。

このようにして得たモデル銀河の SED を観測の多色図と比較して、モデル銀河がどのような観測的分類に当てはまるかを議論した。その結果ライマンブレイク銀河が BzK 銀河をへて最終的に楕円銀河になるという描像は初期条件によらないことが明らかになった。途中経路については DRG のフェイズを経験する場合と経験しない場合があり、これはおもに星形成率よりはダストの減光が各リャリゼーションによって異なるためである。また、われわれのモデルはすべて星形成率が最大で  $70 - 100 M_{\odot}/\text{yr}$  であり Submm 銀河や星形成の活発な BzK 銀河のような  $200 - 1000 M_{\odot}/\text{yr}$  の星形成率を示す天体は再現できない。これはわれわれのモデルが孤立した初期条件で孤立した進化をする銀河を数値実験している一方で、実際の Submm 銀河などは銀河団として進化するような領域に存在するからではないかと考えられる。われわれのモデルの進化経路のいくつかを図 4 に示す。

また、本年は以下の 2 点についてコードを改良中である。まず輻射輸送については特に紫外線による光電離を扱う際に波長分解能が過剰にとっており計算時間を浪費している可能性があった。これは恒星の種族合成のモデルをそのままコード内で用いており、その波長分解能で計算していたためである。この点を改良するため波長を任意にビンングできるようにして波長分解能がどれくらいが最適であるかを議論した。その結果、現在の分解能の半分程度であっても結果 (ガスの電離度、温度) は変化しないことがあきらかになった。一方で、銀河の色を求める際には、波長分解能は現在の値が必要であり、これよりも低くすると、スペクトルの傾きが急なところで色が正しくなることもあきらかになった。またダストの吸収再放射とダスト温度であるが、これまでのコードでは熱平衡にあるダストのみを考慮してきたが PAH について Takagi et al. と同様の方法で非平衡温度を求め、その輻射を求めるコードを開発中である。



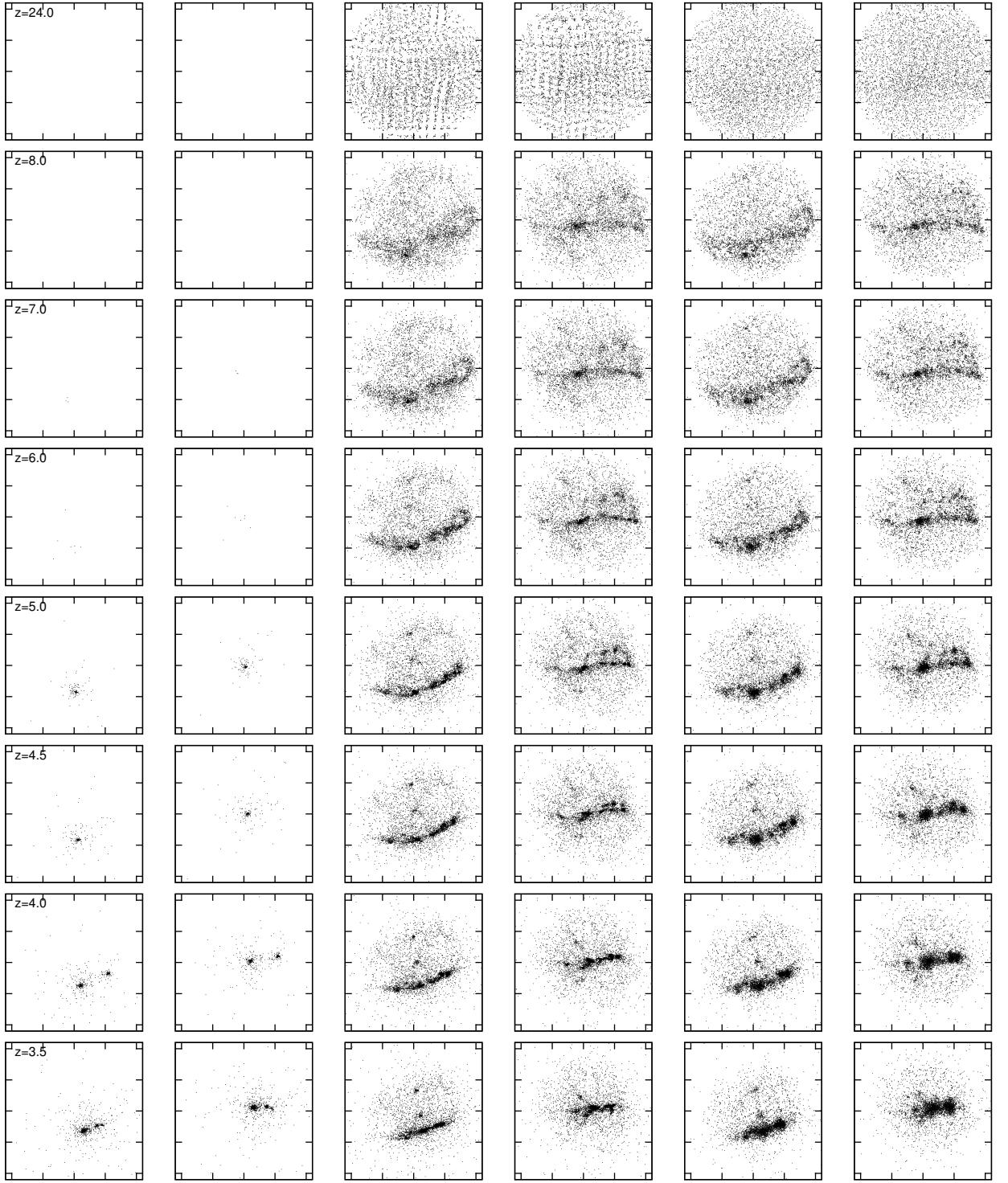


Fig 1: Dark mass, gas and star distribution from  $z=24$  to  $z=0$  in Model 1a. From left to right, each panel represents edge-on view of dark matter, face-on view of dark matter, these of gas, and these of stars, respectively. From Top to bottom, panels show evolution according to time.

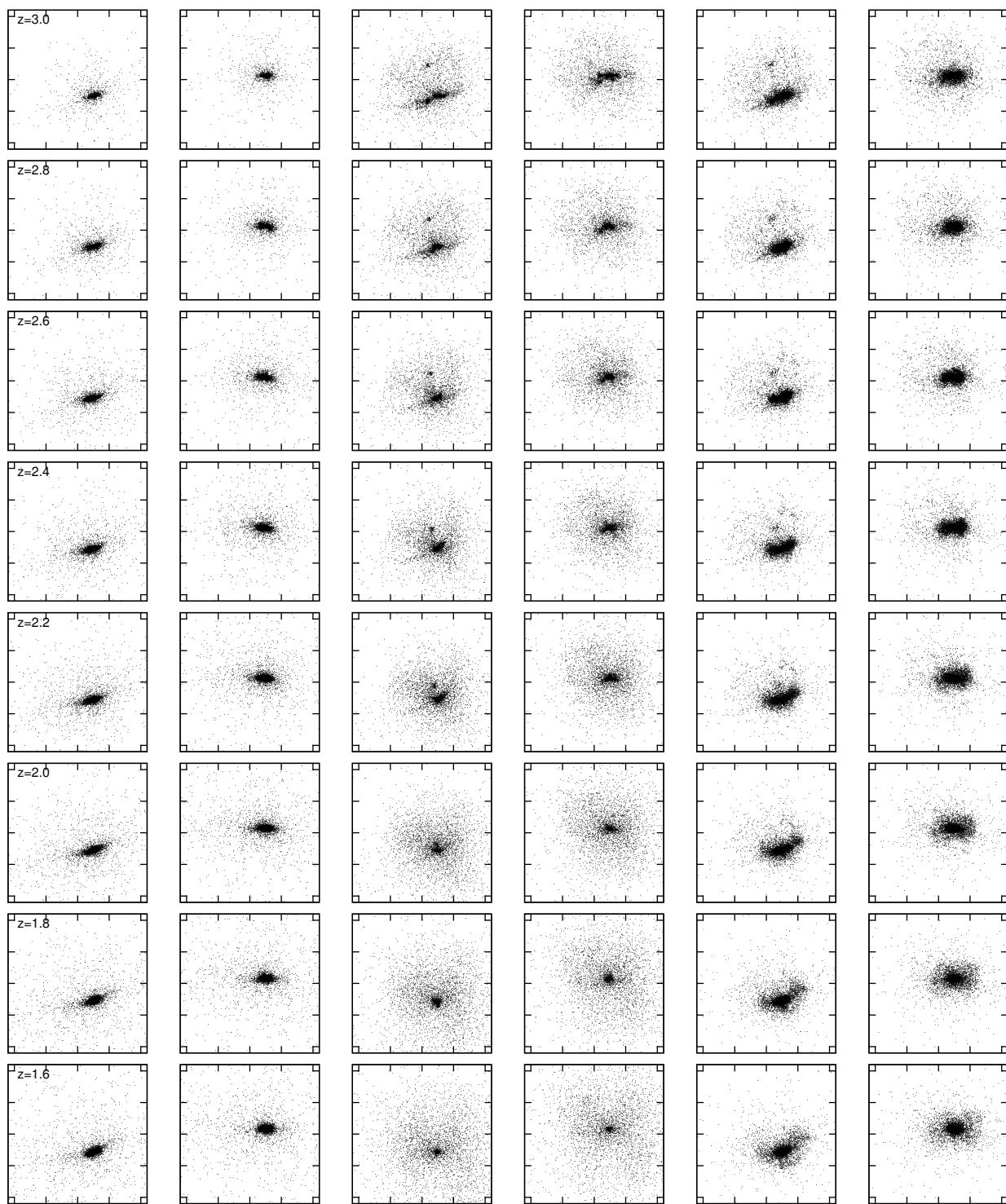


Fig 1: (continued)

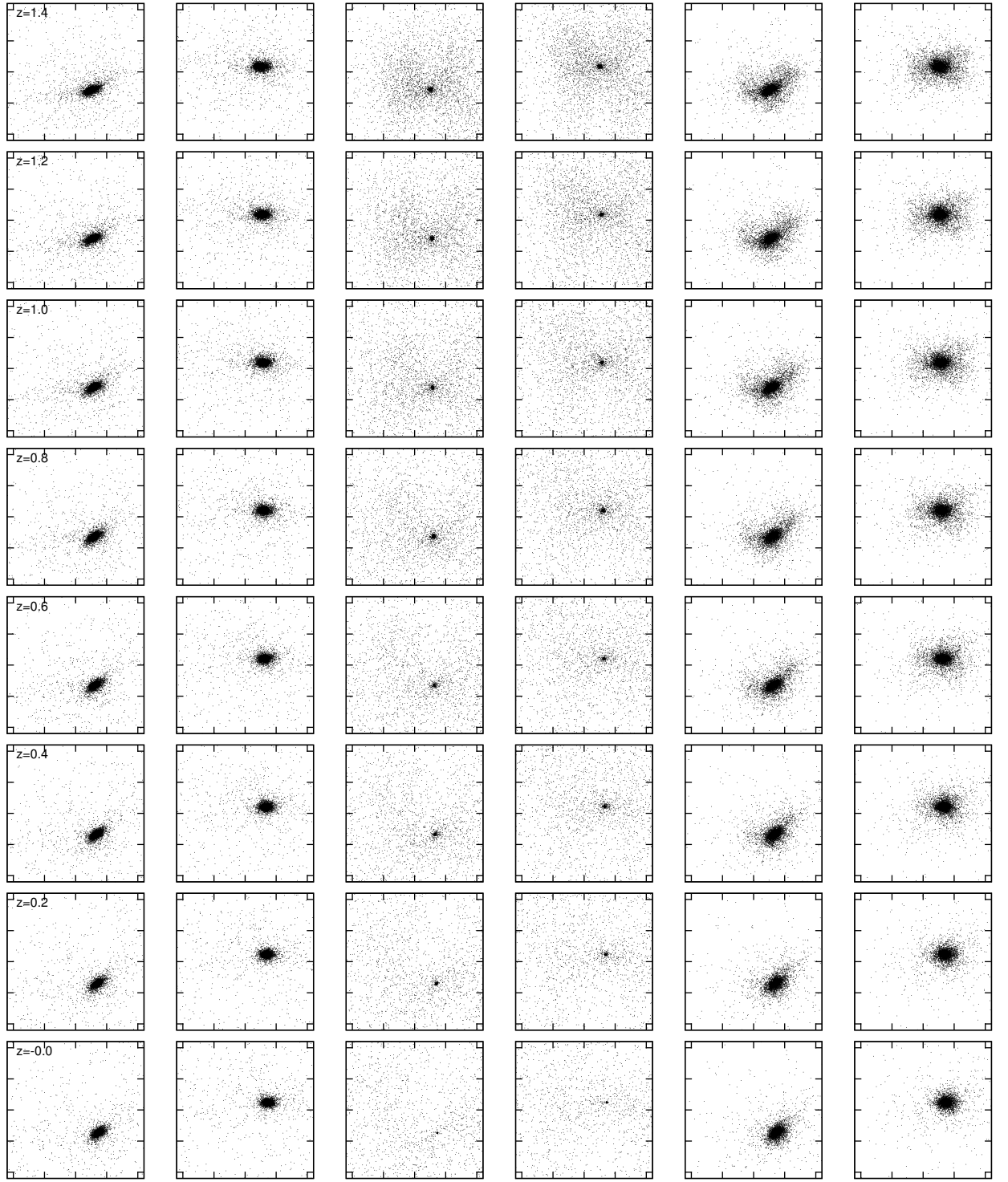


图 1: (continued)

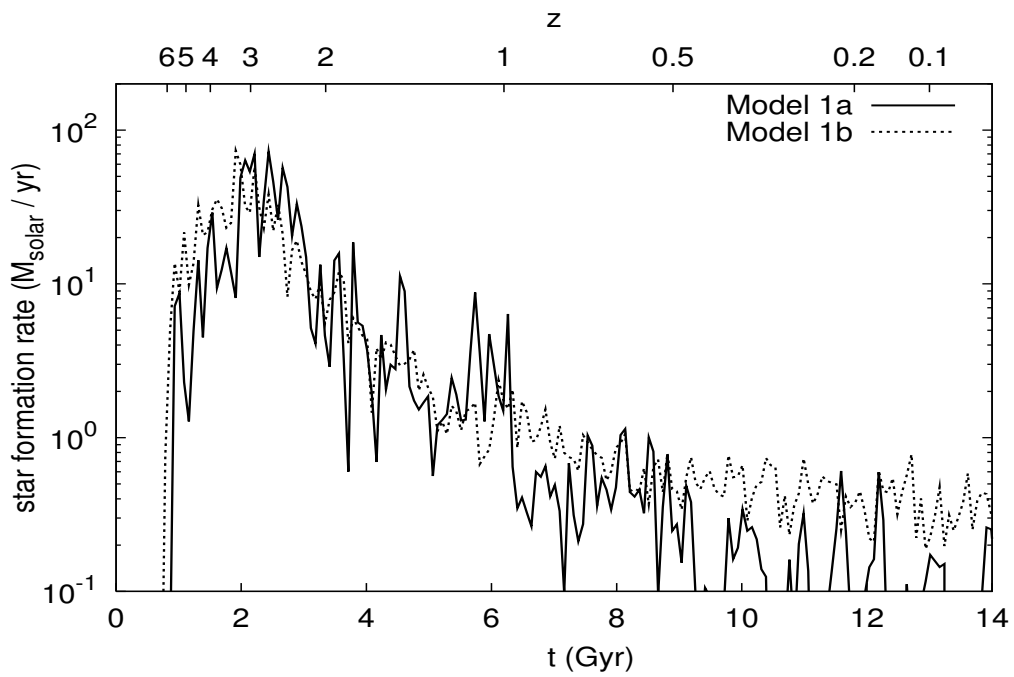


図 2: 星形成率。Model 1a は紫外線を考慮したもの。Model 1b は考慮しなかったもの。

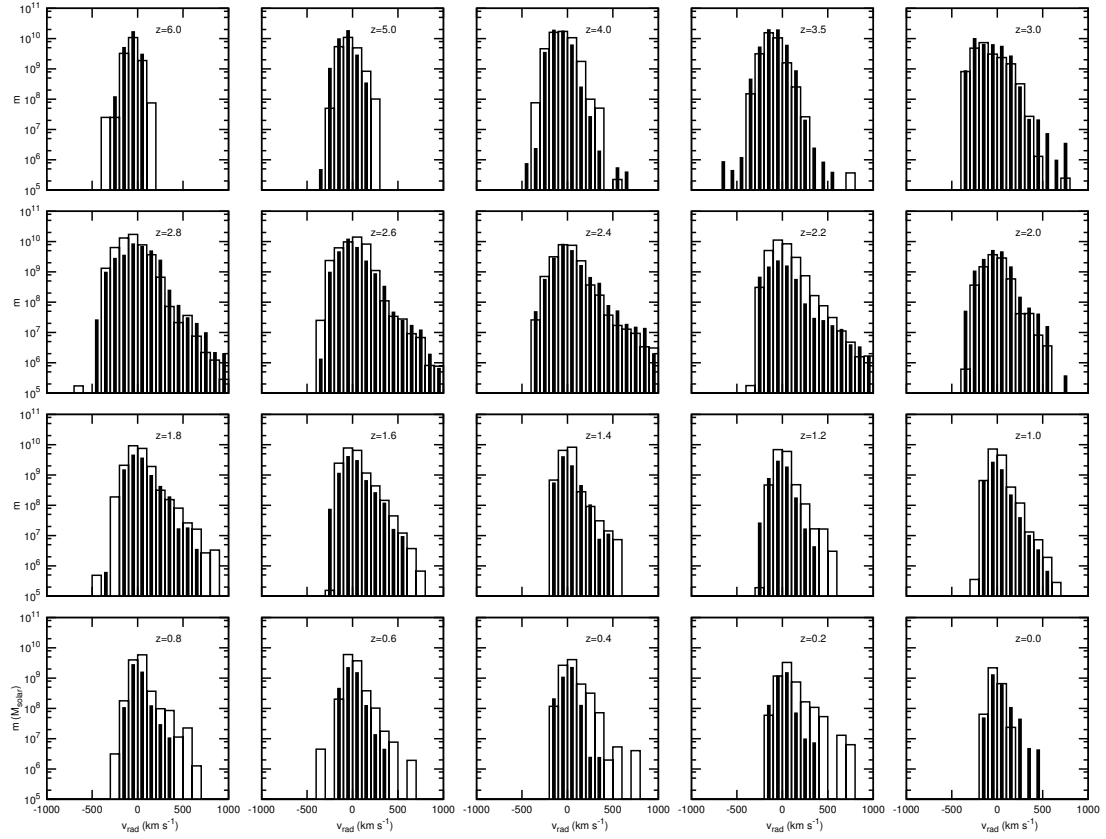


図 3: ガスの視線速度の分布。box は紫外線を考慮した場合、impulse は考慮しなかった場合

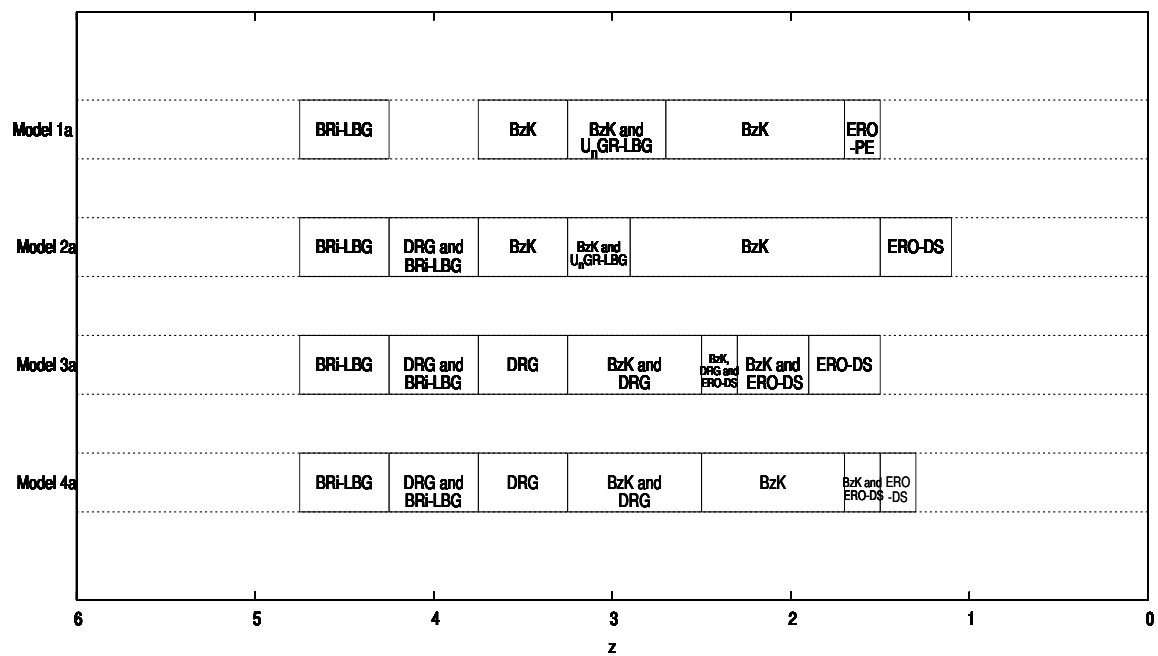


図 4: モデル銀河の進化経路