

星の年齢速度分散関係の解釈 —天の川銀河進化史の制限に向けて



熊本 淳

(東京大学大学院理学系研究科天文学専攻 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1)

e-mail: kumamoto@astron.s.u-tokyo.ac.jp

太陽近傍の星々の観測により、星の年齢と速度分散の間には正の相関があることが知られている。この関係は年齢速度分散関係と呼ばれる。この関係の起源を調べるため、われわれは孤立系にある銀河円盤のシミュレーションを行った。その結果、シミュレーション内の年齢速度分散関係は従来の解釈とは異なり単純な速度分散の増加と一致していないことを発見した。異なる時代に生まれた星の速度分散の進化は星間ガスの物理状態の進化に依存する。さらに、われわれはガス降着の効果を加えたシミュレーションを行い、最終的な年齢速度分散関係がガス降着史に依存することを発見した。本稿では、これらの一連の研究において現在までに得られた結果の概要を紹介する。

1. 年齢速度分散関係

天の川銀河円盤に属する星々は銀河円盤に沿って銀河中心の周りを回転しているが、きれいな円運動をしているわけではない。銀河円盤内で周天円軌道を描いたり、円盤に対して垂直な方向に振動していたりする。その結果、天の川銀河内の狭い領域内のみならず、星はさまざまな方向に運動しており、速度の向きや大きさはばらばらである。そのばらつき具合を速度分散として観測することができる。

図1は太陽近傍で観測される星々の年齢と速度分散の関係を示す¹⁾。星の年齢は個々の星の色、明るさ、金属量から見積もられる。年齢を見積もった星々を年齢ごとに分類し、速度分散を計算すると図1のような関係が得られる。この図のように、太陽近傍の星々について星の年齢と速度分散の間には正の相関があることが知られている²⁾。すなわち、若い星々の多くは銀河中心に対して比較的円運動に近い運動を行い似たような速度成分をもつ。一方で、古い星々は円運動からずれた速

度成分が大きくなり速度成分のばらつき具合が大きくなる。このような関係は一般に年齢速度分散関係と呼ばれている。

このような関係が得られるのは、星の材料となる冷たいガスから生まれた星々は初めのうちは円軌道に近い軌道を描くが、銀河の内部構造（巨大分子雲や渦状腕など）による重力散乱、あるいは銀河同士の相互作用などの外的摂動により、星の軌道が変化し速度分散が増加するためであると考えられる。古い星ほど長い期間に渡りこれらの影響を受けることで、星の速度分散は年齢速度分散関係に沿って大きくなるであろうという解釈である。このような描像が年齢速度分散関係の起源と考えられてきた。

これは、『年齢速度分散関係には過去にどのような重力散乱を経験したか（＝どのような内部構造を形成していたか）、どのような銀河相互作用を経験したか等の情報が含まれている』ということを示唆している。

しかしながら、具体的に何が効果的に年齢速度分散関係を形成するのか（重力散乱源として何が

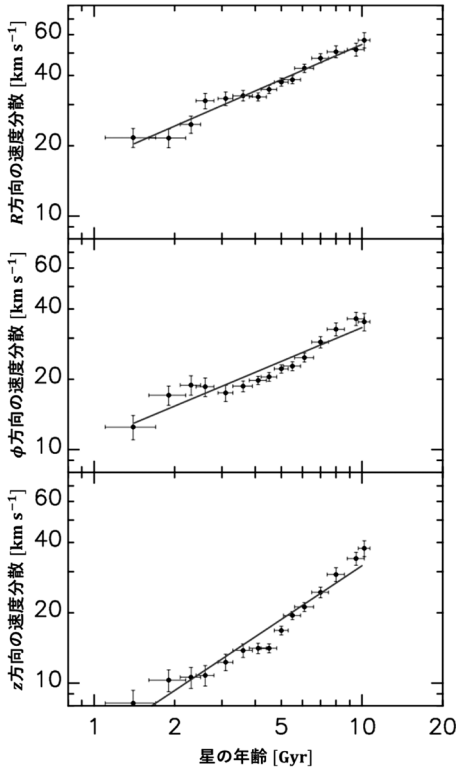


図1 太陽近傍で観測される星の年齢速度分散関係¹⁾. 上から順に動径方向 (R方向), 方位角方向 (ϕ 方向), 円盤に対して垂直方向 (z 方向) の速度分散と星の年齢の関係を表す. それぞれのグラフ中の実線は速度分散を年齢のべき関数として近似したもの.

効果的なのか)は未解明である. そのため, 現状では観測の年齢速度分散関係から銀河の進化史の情報をひも解くには至っていない. そこでわれわれは高分解能シミュレーションを用いた銀河進化の枠組みの中で年齢速度分散関係の起源を調査した. 「過去にどのようなイベント (内部構造形成や銀河相互作用など) を経験すれば, 現在どのような年齢速度分散関係が観測されるか」を系統的に調査し, 観測の年齢速度分散関係から銀河の進化史に制限を与えることを最終目標として研究を行っている. 本稿では, これらの一連の研究において現在までに得られた結果の概要を紹介する.

2. 孤立系における年齢速度分散関係

第一段階として孤立系にある天の川銀河シミュレーションの結果を紹介する³⁾. われわれは星 (重力 N 体) と星間ガス (流体) による銀河形成シミュレーションコード ASURA^{4),5)} を用いて現在の天の川銀河を想定したモデルでシミュレーションを行った.

同様に数値計算やシミュレーションを用いて年齢速度分散関係の起源を調べた研究は過去にも行われているが, それらの研究では巨大分子雲^{6),7)} や渦状腕⁸⁾ などを定常外場として扱っており, 時々刻々と変化するガスの物理状態をシミュレーションに反映できていない. また, 観測されている年齢速度分散関係の傾きを再現するには至っていない. 近年の宇宙論シミュレーションではガスの運動を扱って年齢速度分散関係を調査している^{9),10)} が, 分解能が十分ではなく巨大分子雲や銀河円盤の厚みなどの構造をうまく再現するには至っていない. 本研究では時々刻々と変化するガスの物理状態を現実的に扱い, 高分解能なシミュレーション (空間分解能 10 pc) を用いて年齢速度分散関係の起源を調査した.

この孤立系のシミュレーションではダークマターハロー, 初期恒星円盤を定常外場として扱う. また星間ガスを現実的に扱うためにガスの自己重力や放射冷却を考慮する. 自己重力によって集まり, 冷却関数¹¹⁾ に従って冷えたガスは高密度で低温なガスの塊を形成する. これらの高密度なガスは重力散乱源として働き, 周囲を通過する星の軌道を曲げて星々の速度分散を増加させる役割を担う. また, ある一定値以上高密度 ($>100 \text{ cm}^{-3}$) かつ低温 ($<100 \text{ K}$) の条件を満たすと, 流体として扱っていた星間ガスの一部を重力にのみ従って運動する星粒子に変化させる. このときの新しく生まれた星の速度は元となったガスの速度を引き継ぐ. 現実にはさまざまな質量の星が同時に生まれるが, 今回のシミュレーションではこれらの

同時に生まれる星々の集団を近似的に一つの粒子として表現する (simple stellar population 近似). また, 形成された星の一部は超新星爆発を起こし周りのガスにエネルギーを与える.

2.1 シミュレーション内の年齢速度分散関係

われわれは現在の天の川銀河を想定したモデルで, 3 Gyr (30 億年) 程度のシミュレーションを行った. 図1に示した星の年齢に比べると短いシミュレーションではあるが, 図2に示すように観測と同様に星の年齢と速度分散の間に正の相関を

確認することができた. 図2はシミュレーション内の各時刻, $t=1, 2, 3$ Gyrにおける星の年齢速度分散関係を示している. 現実には現在の年齢速度分散関係しか観測できないが, シミュレーションでは各時刻について遡って調べることができ, その進化を知ることができる. その結果, 年齢速度分散関係は時間とともに図中の左から右へ移動していることがわかる.

先に述べたように従来の解釈では, 星の速度分散は年齢速度分散関係に沿って大きくなると考えられてきた. その場合, 各時刻の年齢速度分散関係は互いに重なり合うはずである (図4の上段を参照). しかしながら, 本シミュレーションの結果は従来の解釈とは大きく異なる結果を示した.

年齢速度分散関係がこのように振る舞う原因を調べるために, 速度分散の時間進化と年齢速度分散関係の関連を調べる. 図3は各時刻に生まれた星々の速度分散の時間進化を示す. 各実線はシミュレーション内で各時刻 (上から順に0.5から1.5 Gyrまで0.1 Gyr間隔) に生まれた星々について, 星の年齢とともに銀河円盤に垂直な方向の速

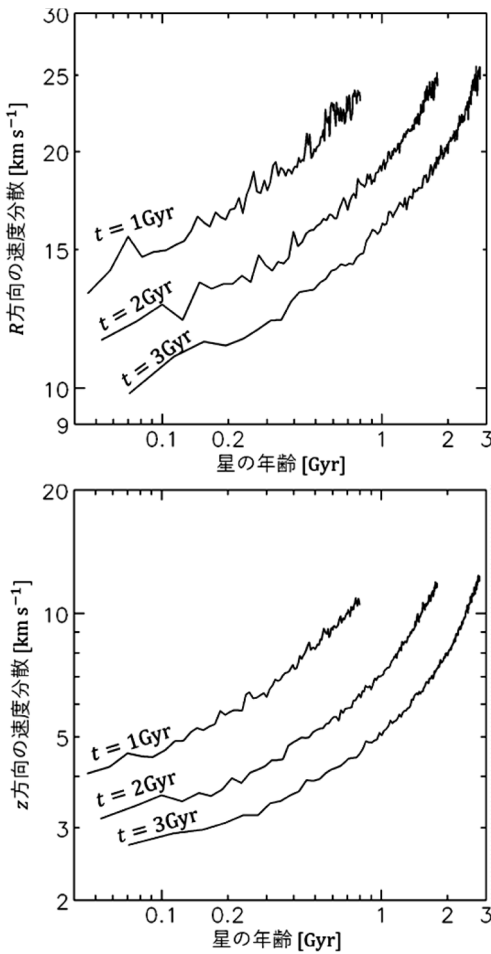


図2 われわれのシミュレーションから得られた $t=1, 2, 3$ Gyrにおける R 方向 (動径方向) と z 方向 (銀河円盤に対して垂直な方向) の星の年齢速度分散関係.

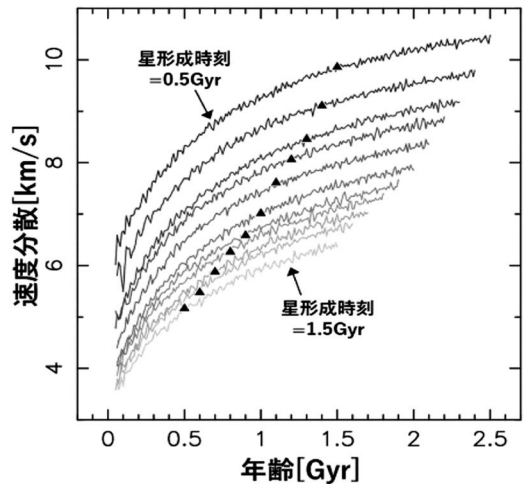


図3 各時刻に生まれた星々の時間進化. 各実線はシミュレーション内で各時刻 (0.5から1.5 Gyr) に生まれた星々の z 方向の速度分散の時間進化を示す. 黒三角形の点はシミュレーション内の時刻 2 Gyr に観測される年齢速度分散関係を示す.

度分散が進化する様子を表している。この結果は星の速度分散が年齢とともに増加していることを確かに示している。一方で、この図に示した年齢-速度分散空間において星形成時刻ごとに（各実線ごとに）進化経路が異なることが明らかである。さまざまな進化経路上を進化する星についてシミュレーション内での時刻2 Gyrにおける点（例：0.5 Gyr に形成された星は年齢が1.5 Gyr における点）を黒三角形の点で表示した。この黒三角形の集合が任意の時刻（ここでは2 Gyr）に観測される年齢速度分散関係となる。このように、任意の時刻に観測される年齢速度分散関係は星の速度分散の進化経路と異なることを発見した。

2.2 年齢速度分散関係の解釈

次に、各時刻に生まれた星の進化経路が異なる原因について解析を行った。本研究では進化経路の多様性について、

- (1) 星形成時の速度分散（すなわち進化経路のスタート位置）
- (2) 速度分散の増加率（すなわち進化経路の傾き）

に着目した。

(1) について、星形成時の速度分散は星の材料となるガスの速度分散に依存することを発見した。星形成条件を満たしているような高密なガスの運動を解析すると、シミュレーション初期は速度分散が大きく、時間とともに小さくなることがわかった。シミュレーション初期はガス量も多く星形成活動が活発であり、それに伴う超新星爆発の影響によりガスの速度分散が大きくなっていると考えられる。また星形成が進みガスを消費していくと、星形成活動が徐々に弱まりガスの速度分散が小さくなる。この結果、ガスから形成された星の速度分散も後期ほど小さくなり、図3に見られるように各進化経路のスタート位置が下方に下がる。

(2) について、われわれは速度分散の増加率は散乱源となる高密度ガスの塊の総量に依存する

ことを発見した。本シミュレーションにおいて星の速度分散を増加させる重力散乱源は巨大分子雲に相当する高密度なガスの塊である。このようなガスの塊もガス量の減少に伴い減少する。この結果、重力散乱の強さも時間とともに減少し、図3に見られるように進化経路の傾きが時間とともに緩やかになる。

以上の結果から年齢速度分散関係の起源について図4に示した模式図のようにまとめることができる。従来の解釈では星の速度分散は年齢速度分散関係に沿って大きくなると考えられており、どの時代に生まれた星々も同じような速度分散を持って生まれ、その後の増加率も同様と考えられていた。一方、ここで紹介したわれわれの結果によると、比較的初期の銀河内においては星の材料となるガスの速度分散も大きく、重力散乱源となる高密度ガスの塊が多く存在する。そのため比較的早い時代に形成された星の集団 (A) は初期速度分散が大きく、形成後も強い重力散乱を受け速度分散がより大きくなる。一方、後期の銀河ではガスの速度分散も小さく、高密度ガスも少ない。

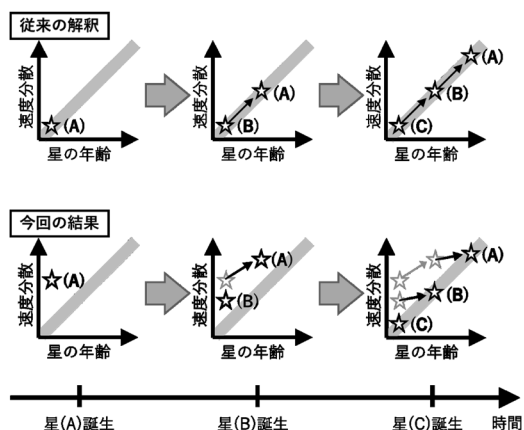


図4 今回の結果から得られる年齢速度分散関係の解釈と従来の解釈の違い。灰色の太帯のような年齢速度分散関係が観測されるとき、そこから予想される速度分散の時間進化をさまざまな時刻で誕生する星々 (A), (B), (C) について表す。

そのため、その後形成された星の集団 (B) は初期速度分散が (A) よりも小さく、形成後も強い重力散乱を受けず速度分散があまり大きくなりません。さらにその後生まれる星々 (C) の速度分散は最も小さい初期速度分散となる。このように、ガスの物理状態の時間進化に依存し、さまざまな速度分散進化を経験する星の集団をある任意の時刻に観測することで図4の灰色の太帯のような年齢速度分散関係が得られる。

また、図4の星の進化経路の傾きにも着目してもらいたい。従来の解釈のとおり星の速度分散が年齢速度分散関係に沿って進化しているとすれば、進化経路の傾きは比較的急でなければならない。これまではこの急な傾きを説明するような散乱源を見つけることが一つの難点であった。しかし、今回のわれわれの結果を用いれば、比較的緩やかな傾きの進化経路でも年齢速度分散関係を再現できる。そのため、複雑な重力散乱を考えなくても容易に年齢速度分散関係の傾きを説明することができる。

3. ガス降着史の影響

ここまでの結果は年齢速度分散関係の起源に焦点をあてた。その結果、ガスの物理状態の時間進化が重要であることを発見した。このことは円盤銀河のガス降着史 (いつ、どこに、どのくらいガスが降ってきたか) 次第で年齢速度分散関係が大きく左右されることを示唆する。それゆえ、天の川銀河の年齢速度分散関係はガス降着史に制限を与える良い指標になるはずである。ガス降着は銀河内の星形成や金属量分布に影響を与える¹²⁾。そのため、ガス降着史を知ることは銀河進化史を知るうえで重要である。そこでガス降着を加えたシミュレーションを行い、ガス降着史と最終的に観測される年齢速度分散関係について調査する。

3.1 ガス降着モデル

前述の孤立系のシミュレーションでは現在の天の川銀河を想定したモデルでシミュレーションを

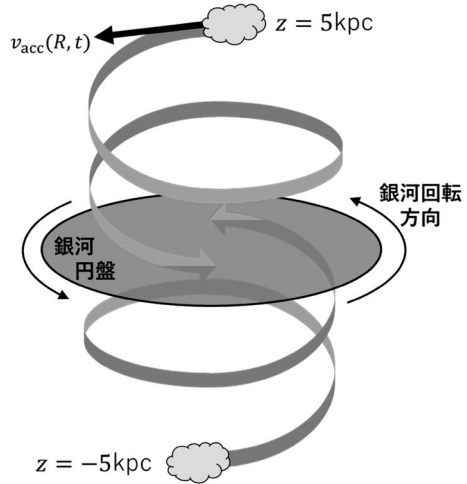


図5 われわれのシミュレーション内におけるガス降着方法のイメージ図。銀河円盤に対してその両面からガスを円盤に降着させる。

行っていた。ここでは、現在の天の川銀河円盤質量の10分の1程度からシミュレーションを開始し、10 Gyr かけてガスを降着させ最終的に現在の天の川銀河程度の質量になるようなモデルを用いる。図5はシミュレーション内のガス降着のイメージを表す。高さ $z=0$ 面に銀河円盤を設置し、その両面 $z=\pm 5$ kpc からガスを円盤に降着させていく。円盤内で形成される星々は銀河中心に対して回転しているため、ガスも降着させる半径、時間に応じた回転速度 (v_{acc}) を与えて降着させる。

ガス降着史の違いが年齢速度分散関係に与える影響を調べるため、ガス降着史の異なる三つのモデル (Model I, II, III) を用いる。図6は各モデルのガス降着率、円盤質量、円盤のスケール半径を示す。図6(a)のように Model Iはシミュレーション全体にわたって一定のガス降着率を維持し、Model IIはガス降着率が徐々に減少するモデルとなっている。Model IIIではシミュレーション前半でガス降着を行い、後半ではガス降着が止まるモデルとなっている。図6(b)はこれらのガス降着の結果として得られる円盤質量の進化を表

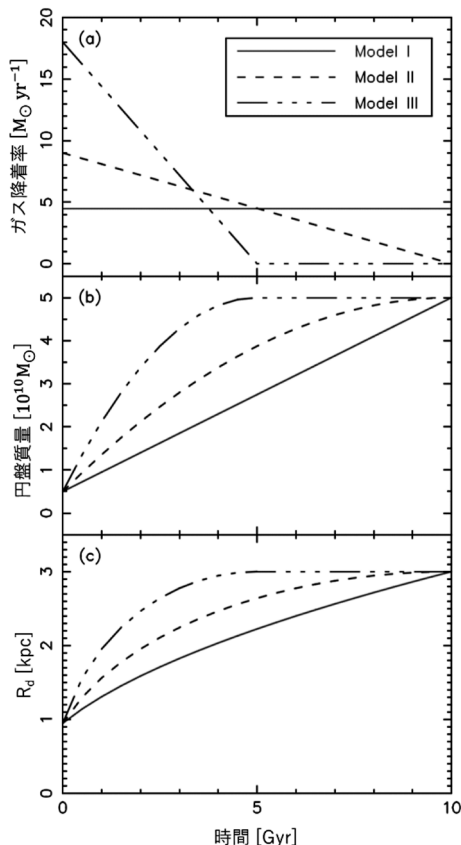


図6 各モデル (Model I, II, III) の (a) ガス降着率, (b) 円盤質量, (c) 円盤のスケール半径の時間進化.

す. ガス降着率に依存し, モデルによって円盤質量の増加速度は異なるが最終質量は一致するようにガス降着率を決定している.

また, 円盤の質量分布は指数分布を採用しており, 以下の式で表される.

$$\Sigma(R, t) = \Sigma_0 \exp\left(-\frac{R}{R_d(t)}\right), \quad (1)$$

ここで $\Sigma(R, t)$, Σ_0 , $R_d(t)$ はそれぞれ表面密度分布, 中心面密度, スケール半径である. 本シミュレーションでは先行研究¹³⁾を参考に中心密度 Σ_0 が一定の指数分布の形を保ったまま, スケール半径 R_d が時間とともに大きくなるようにガスを降着させる. この時のスケール半径の時間進化は図6(c) のようになる. 中心面密度および最終的な

スケール半径はおおよそ現在の天の川銀河の値を採用している.

これらの大きく異なるモデルで年齢速度分散関係の違いを調べ, ガス降着史の影響について議論する.

3.2 シミュレーション結果

各モデルのシミュレーションの結果から得られたスナップショットを図7に示す. ガス降着史が異なることで各銀河の進化の様子が異なることがわかる. Model Iでは終盤までゆっくりとガス降着が行われるため, 円盤は徐々に大きくなる. また, 終盤まで一定のガス降着が行われることにより星形成が最後まで活発に行われ, 比較的明るく構造もくっきりしていることがわかる. 一方で Model IIIでは, ガス降着が止まった後星形成率が徐々に減少するため, 終盤では古い星ばかりの暗い銀河になっている. Model IIも同様に徐々に暗くなっているが, Model IIIよりはゆっくりと進化しているように見える. これらの銀河進化の違いが各時刻での重力散乱の強さに影響を与え, 速度分散の進化に差が生じることが予想される.

実際に各モデルについて年齢速度分散関係の時間進化を解析した. 図8はそれぞれのモデルについて, シミュレーション内の各時刻, $t=4, 6, 8, 10$ Gyrにおける星の年齢速度分散関係を示している. Model IIIは図2の孤立系シミュレーションの結果とよく似た振る舞いを示す. この Model IIIでは時刻5 Gyrでガス降着が終了し, その後は実質孤立系となるため図2と似た結果になるのは必然的である. 一方, Model Iでは異なった振る舞いを示す. 各時刻での年齢速度分散関係の傾きは比較的一致しており, 星の年齢に対する速度分散の大きさも一定に近い. 図7で見たように Model Iでは中盤から似たような構造が最後まで維持されている. そのため, 重力散乱の強さも大きく変化しないことが予想される. その結果として, 星形成ガスの速度分散は大きく変化せず, ほぼ一定の速度分散を持って星々は形成され, その

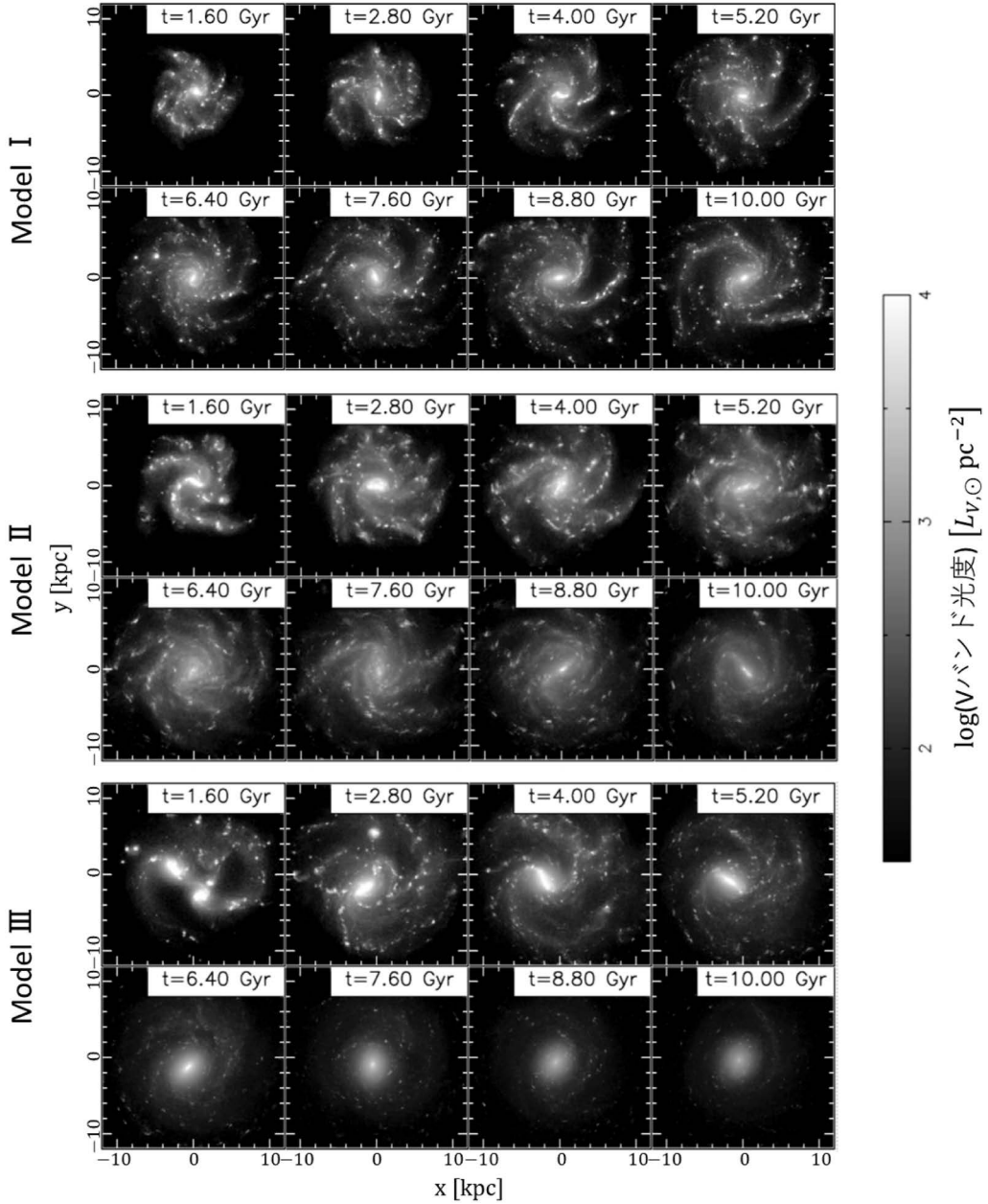


図7 シミュレーション内で形成される各時刻の銀河円盤をVバンドで疑似観測した結果. 上から順にModel I, II, IIIの時間進化の結果を表す.

後の速度分散の増加率もおおよそ一様になり、図8のような進化になると考えられる。また、最終的な（時刻10 Gyrでの）年齢速度分散関係に着目すると、Model I, II, IIIの順に徐々に傾きが急

になっていくことがわかる。

3.3 年齢速度分散関係に対するガス降着史の影響

これらの結果からガス降着史と年齢速度分散関係について図9のようにまとめることができる。

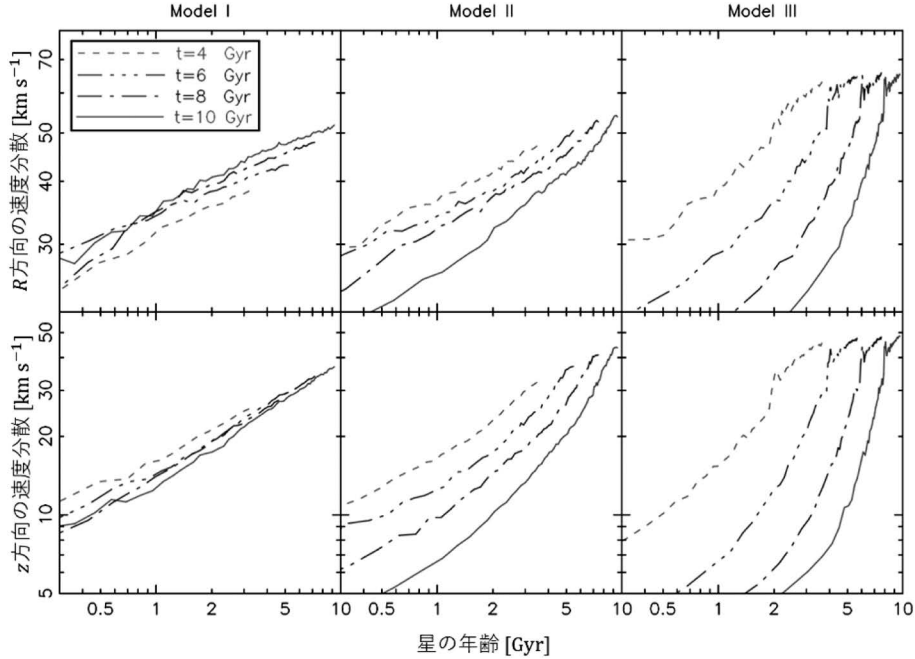


図8 Model I, II, IIIにおける年齢速度分散関係の時間進化. 上段と下段はそれぞれR方向とz方向の速度分散を表す. 各線は $t=4, 6, 8, 10$ Gyrにおける星の年齢速度分散関係を示している.

ガス降着率が一定なガス降着史では常にある程度のガスを保持し、長い時間にわたって似たような構造を形成し続けることができる。そのため、重力散乱はある程度一定の割合で起こり、星の速度分散の増加率や生まれたときの速度分散は同程度を保つことができる。それらの結果として年齢速度分散関係は比較的緩やかな傾きをもつ。一方でガス降着率が緩やかに減少するモデルではガス供給が徐々に減少する。そのため、銀河内のガスは次第に少なくなり散乱源となるような高密度なガスが形成されなくなる。その結果、星の速度分散の増加率や生まれた時の速度分散も時間とともに減少する。このとき、孤立系のシミュレーション結果で見たように、比較的小さい速度分散増加率の割りに年齢速度分散関係は急な傾きを示す。

図7でも見たように、最終的な年齢速度分散関係はModel I, II, IIIの順に傾きが急になっていた。これらのことからガス降着率の減少のタイムスケールが短いほど最終的な年齢速度分散関係は傾

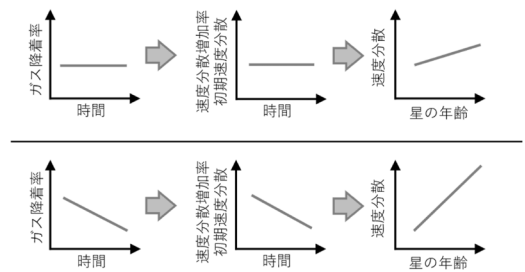


図9 最終的な年齢速度分散関係とガス降着史の関連.

きが急になることがわかる。すなわち、観測される年齢速度分散関係の傾きから天の川銀河のガス降着史に制限を与えられる可能性を示唆している。

また、近年の観測では、天の川銀河のみならずアンドロメダ銀河や近傍の矮小銀河の年齢速度分散関係も観測されている^{14),15)}。これらの観測によると、銀河ごとに年齢速度分散関係が異なっているという報告がなされている。われわれの結果

を用いれば、銀河ごとの年齢速度分散関係の違いはガス降着史の違いとして解釈することができるかもしれない。

本稿の編集を担当して下さった小宮山裕氏と中村航氏からも原稿についての貴重な助言をいただいた。厚くお礼を申し上げる。

4. 今後の展望

今回はわれわれの研究の現状として、現在観測される年齢速度分散関係の起源、およびガス降着史との関連について紹介した。特に年齢速度分散関係が過去のガス降着史に影響していることの発見と天の川銀河のガス降着史に制限を与えられる可能性について言及した。しかしながら、今回のモデルは極めて単純なガス降着モデルを用いている。今後はさらにより詳細な複数モデルを用いてガス降着史の効果を調べていく予定である。

また、観測から得られる年齢速度分散関係の詳細化も期待される。現在運用中の位置天文衛星 GAIA¹⁶⁾ により、銀河面の広域の多くの星々について速度情報が得られており、さまざまな領域ごとの速度分散が得られるであろう。星の年齢についても、星震学を用いることで今まで以上に精度よく求まるとい見積もりがなされている¹⁷⁾。GAIAで観測される星々について、K2¹⁸⁾ や PLATO¹⁹⁾ といった観測計画から星震学を用いるために必要なデータの取得が期待されている。今後得られるであろうこれらの観測結果にわれわれのシミュレーションから得られる成果を適用することで、天の川銀河進化史への理解の進展が期待される。

謝 辞

本研究のシミュレーションには国立天文台天文シミュレーションプロジェクトのスカラ超並列計算機 Cray XC30 を使用した。本稿で紹介した内容は馬場淳一氏および斎藤貴之氏との共同研究の結果から抜粋したものである。本研究においては筆者の大学院時代の指導教員である野口正史氏からも数多くの有益なコメントをいただいた。また、

参考文献

- 1) Yu, J., Liu, C., 2018, MNRAS, 475, 1093
- 2) Wielen, R., 1977, A&A, 60, 263
- 3) Kumamoto, J., et al., 2017, PASJ, 69, 32
- 4) Saitoh, T. R., et al., 2008, PASJ, 60, 667
- 5) Saitoh, T. R., et al., 2009, PASJ, 61, 481
- 6) Kokubo, E., Ida, S., 1992, PASJ, 44, 601
- 7) Hanninen, J., Flynn, C., 2002, MNRAS, 337, 731
- 8) De Simone, R., et al., 2004, MNRAS, 350, 627
- 9) Bird, J. C., et al., 2013, ApJ, 773, 19
- 10) Martig, M., et al., 2014, MNRAS, 443, 2452
- 11) Wada, K., et al., 2009, ApJ, 702, 63
- 12) Larson, R. B., 1972, Nature Physical Science, 236, 7
- 13) Naab, T., Ostriker, J. P., 2006, MNRAS, 366, 899
- 14) Dorman, C. E., et al., 2015, ApJ, 803, 24
- 15) Leaman, R., et al., 2017, MNRAS, 472, 1879
- 16) Perryman, M. A. C., et al., 2001, A&A, 369, 339
- 17) Anders, F., et al., 2017, A&A, 597, 30
- 18) Howell, S. B., et al., 2014, PASP, 126, 398
- 19) Rauer, H., et al., 2014, Experimental Astronomy, 38, 249

Interpretations on the Age-Velocity Dispersion Relation for the Purpose of Constraints on the History of Our Galaxy Jun KUMAMOTO

Department of Astronomy, Graduate School of Science, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

Abstract: Observations of stars in the solar vicinity show a clear tendency for older stars to have larger velocity dispersions. This relation is called the age-velocity dispersion relation (AVR). To investigate the origin of the AVR, we performed simulations of the gas disks as an isolated system. We discovered that the AVR is not a simple consequence of dynamical heating. We, then, performed disk galaxy simulations including gas accretion. We found that the AVR depends on the gas accretion history.