

令和元年9月10日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2018

課題番号：26707007

研究課題名（和文）銀河形態の多様性の起源の研究

研究課題名（英文）Numerical Study on Diversity of Galaxies

研究代表者

齋藤 貴之 (Saitoh, Takayuki)

神戸大学・理学研究科・准教授

研究者番号：40399291

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 7,100,000円

研究成果の概要（和文）：従来の問題点を解決した新しい流体スキーム(DISPH法)、効果的なフィードバックモデル、そして最新の化学進化モデルを導入した銀河形成シミュレーション研究をおこなった。DISPH法を宇宙論的銀河団形成シミュレーションに適用して、従来のスキームの問題点を明らかにし、また、DISPH法が最新の他のスキームとも同等の結果を得られることを明らかにした。化学進化に関して、恒星進化の研究成果をスムーズに銀河形成に取り込むために、ソフトウェアライブラリCELlibを開発して公開した。このライブラリを用いて化学進化モデルが銀河構造に与える影響や、多様な元素の起源天体の研究をおこなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では銀河形成シミュレーションの精緻化をおこなった。特に化学進化について、将来の拡張性を持った形で精緻化した。多様な元素がどのように宇宙空間に広がってきたかの研究は銀河形成だけではなく、生命の起源などの研究にもつながる広範な応用が見込まれる。また、最新のモデルに基づく銀河形成シミュレーションの映像を作った。直感的に現在の最新の銀河形成過程を理解してもらえる素材になっていると考える。

研究成果の概要（英文）：I carried out galaxy formation simulations using a DISPH method, a efficient feedback models, and chemical evolution models. First, I studied the capability of DISPH for cosmological simulations, I applied DISPH to simulations of clusters of galaxies. DISPH can provide a reasonable result which is almost the same as those with other state-of-the-art numerical schemes. In order to integrate the latest results of stellar evolution to galaxy formation smoothly, I, then, developed an open-source software library, CELlib, which handles everything regarding chemical evolution. Using CELlib, I studied the impacts of chemical evolution model on galaxy formation and origin of elements.

研究分野：銀河形成

キーワード：銀河形成 数値シミュレーション 化学進化

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

銀河の形成と進化は現代天文学の主要なテーマの一つである。銀河の形成そのものを理解することが重要であると同時に、銀河は宇宙の基本的要素であるため我々の宇宙の成り立ちを知るためにも重要である。また、銀河は星の形成と進化を通じて元素を供給する場であるため、生命の起源など広範な分野にも密接に関係している。

現在の標準的な銀河形成モデルでは、宇宙初期に埋め込まれた量子的な揺らぎが重力的に収縮し、天体を形成する。密度ゆらぎの統計的性質から、銀河より小さい天体が最初に形成されてそれらが合体することで銀河が形成される階層的構造形成宇宙になっている。密度ゆらぎの成長が早くから始まる暗黒物質が最初の重力的に崩壊してそこにガスが落ち込み、さらにエネルギーを放射で失うことで密度が上がり、やがて星を形成し、原始銀河を作る。初期にはこれらが激しく合体成長し、やがて角運動量の大きなガスが降着することで円盤が成長する。実際の宇宙に見られる銀河の多様性は、これらのバランスによるものと考えられる。

銀河形成は、重力流体力学、放射冷却、星形成、超新星などが複雑に絡まった非線形過程であるため、シミュレーション研究が盛んにおこなわれてきた。最初期の三次元シミュレーションは、1991年のKatz & Gunn と Navarro & Benz である。このときからすでに銀河形成シミュレーションでは立派な円盤を持つ銀河を作れないことが指摘されてきた。超新星爆発などのフィードバック機構が十分な効果を果たさず低温高密度クランプが形成され、それが力学的摩擦によって中心に落ち込むことが原因である。

超新星爆発のエネルギーが有効にならないのは、現状の銀河形成固有の問題といえる。銀河形成シミュレーションでは、一つ一つの恒星を分解できないため、同時期に生まれた同金属量を持つ恒星集団、Simple stellar population (SSP) 粒子 (=星粒子) を用いる。この状況で、超新星によって発生するエネルギーを周囲の同程度の重さを持つガスに割り振るとその温度はたかだか $\sim 10^6$ K にしかならず、星形成領域では放射冷却により一気に冷えてしまう(図1)。実際の超新星残骸では高温低密度のガスが一万年程度輝く。SSP 粒子の元では単純な扱いは現実に対応しない。適切なモデル化が肝要である。

一方で、数値流体計算方法自体の不備も指摘されてきた。Agartz et al. 2007 は流体不安定性について、銀河形成でよく用いられる粒子法-SPH 法-とメッシュ法の比較をおこない、従来の SPH 法(以下標準 SPH 法)は流体不安定性をうまく扱えないことをしてきた。従来の定式化では接触不連続面に非物理的な表面張力が働くからである。私は、DISPH 法という SPH 法を開発した。DISPH 法では従来と異なり圧力を基準にして構成した体積要素を離散化に用いることで接触不連続面に非物理的な表面張力の働かず、流体不安定性を扱うことができるようになった(Saitoh & Makino 2013)。この他にも、別の SPH 法の改良(e.g., Price 2008)、ムービングメッシュ法が提案されていた(Springel 2010)。

以上の状況を踏まえると、流体スキームとフィードバックモデルの同時更新によって、銀河形成シミュレーションの困難を解決できる可能性があると考えられる。そこでその二つを更新し銀河形成研究を進めようというのが本研究提案時の状況であった。

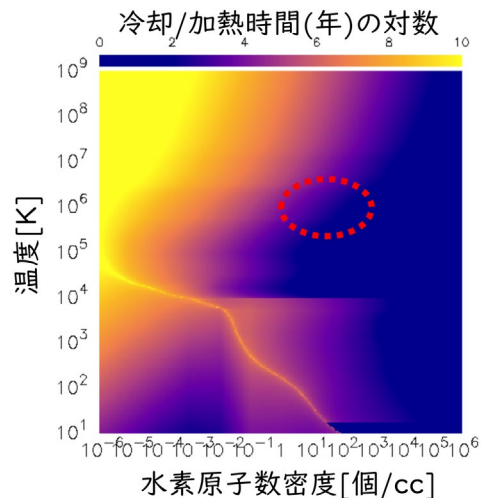


図1. 放射冷却・加熱時間の密度・温度空間上での分布。典型的な星形成領域に超新星爆発のエネルギーが入った場合赤点線で囲われた領域になる。ここでの冷却時間は100年程度である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、私が新しく開発した流体スキーム、DISPH 法と高温ガスを作るフィードバックモデルを用いた銀河形成シミュレーションに基づき銀河形成研究をおこなうというものである。

また、申請段階では意識していなかったが、実はもう一つ重要な要素として化学進化があげられる。ここで化学進化とは銀河の形成・進化過程で元素の割合が増えていくことを指す。銀河形成研究では個別の恒星の進化を直接扱うことはできない。そこで、恒星進化や超新星爆発の研究を利用する。それら研究で得られた放出される金属の種類や量、また放出されるエネルギーを、SSP 粒子内で平均してシミュレーションに取り込む。これら化学進化の元となる恒星進化の研究も現在活発に進歩している領域であり、その成果を取り込むことは銀河形成の理解に必須である。従来、最新の成果を取り込むことは簡単になっていなかった。その点を改善し、最新の化学進化モデルを導入する。本研究では前述の2本の柱に化学進化を合わせた三つの柱を用いて銀河形成研究に取り組んだ。



図2. 本研究の三つの柱。

3. 研究の方法

この研究の実行には私が開発してきた銀河形成シミュレーションコード ASURA を用いる。流体スキーム、化学進化モデル、フィードバックモデルの刷新をはかり、計算の簡便な孤立銀河モデルと計算が重たいがより現実的な宇宙論的銀河形成初期条件をもちいて銀河形成研究を推進する。

4. 研究成果

ここでは主要な研究成果について述べる。

(1) サンタバーバラクラスターテスト

サンタバーバラクラスターテストは、同一の初期条件を元に多数のコードで銀河団形成シミュレーションをおこない、コードによる影響を図るテストである (Frenk et al. 1999)。このテストから、当時あったシミュレーションコード間で概ね答えが一致していたが、エントロピープロファイルに計算方法による系統的な違いがあることが指摘された。メッシュ法ではエントロピーコアが形成されるが SPH 法では形成されないという違いである。原因は論文の中でははっきりと示されていなかった。なお、このとき用いられたのは標準 SPH 法である。

そこで、DISPH 法と標準 SPH 法をサンタバーバラクラスターテストに用い、エントロピープロファイル形成過程について調べた (Saitoh & Makino 2016)。DISPH 法を用いると、エントロピーコアが形成される。正しこのコアは、従来のメッシュ法で得られていたコアよりもずっと小さく、ムービングメッシュ法 (Springel 2010) や、メッシュフリー法 (Hoskins 2015) と同程度である。標準 SPH を用いた結果から、非物理的な表面張力に守られながら低エントロピークランプが降着してくることで中心部のエントロピーを下げることで、コア無しプロファイルが形成されることが分かった。メッシュ法で出来ていた大きなコアは、ガリレイ普遍性を回復したムービングメッシュの結果と比較すると、数値拡散の影響であろうと推察される。

DISPH 法は、最新の他の数値スキームと同等の結果を得ることが出来、銀河形成研究を遂行するのにふさわしいスキームの一つと言えるだろう。

(2) Chemical Evolution Library (CELib) の開発

ビッグバン直後の宇宙には水素ヘリウムとごく少量のリチウムまでしか存在しなかった。炭素以上の重たい元素は星の中で作られ、超新星爆発などで星間空間にばらまかれた。化学進化過程は銀河形成と密接に関係しているため、銀河形成の枠組みで取り組むことが重要である。

銀河形成シミュレーションでは個別の星の進化を扱うことは出来ない。そこで、恒星進化や超新星のシミュレーションの成果を応用する。それら研究では、様々な金属量質量の恒星が進化した結果として放出する金属量、対応する爆発エネルギーなどが表としてまとめられている。これをイールド表という。これを初期質量関数で積分したものを、SSP 粒子から回りのガスにばらまかれるとする。しかしこれは、手続きとしては簡単だが実際には骨が折れる作業である。特にイールド表については、恒星の質量、金属量が表ごとに異なること、また、次の関係式で表される放出金属量の関係

$$Y_i = y_i + Z^0_i m_{ej}$$

ここで Y_i は i 番目の金属種として放出される全量、 y_i は新たに合成された量、 Z^0_i は元々持っていた金属量、そして m_{ej} は放出される全質量、のうち Y と y のうちどちらが表にまとめられているか、などを注意する必要がある、おそらくそれ故にイールド表や初期質量関数を切り替えつつ比較することは一般にほとんどおこなわれていない。

そこで、化学進化計算に必要なものをまとめたライブラリ、CELib を開発した (Saitoh 2017; <https://bitbucket.org/tsaitoh/celib/>)。CELib は Chemical Evolution Library から取った。CELib には文献から集めた様々な質量関数、イールド表、恒星の年齢のデータが入っていて、13 元素 (H, He, C, N, O, Ne, Mg, Si, S, Ca, Fe, Ni, Eu) の進化を扱うことが出来る。CELib とシミュレーションコードは単純な Application Interface (API) を通じてデータのやりとりをし、超新星が起きたときに増える金属量、放出エネルギーなどを得ることが出来る (図3)。再分配はフィードバックモデルの詳細に関わるのでシミュレーションコード側で対応することとする。また、CELib には II 型/Ia 型超新星爆発、AGB、中性子星合体についての標準的なフィードバックモデルが実装されているため、ユーザはすぐに自身のシミュレーションコードで使うことが出来る。現在 CELib は ASURA の基幹ライブラリとして使われているだけでなく、一般公開しており、すでにいくつかの研究グループが利用している。

CELib を用いて、円盤銀河の形成シミュレーションをおこなった。イールド表を切り替えた場合、大質量星が出来ると考えられている初代星を模した初期質量関数を導入した場合、また金属のガス層での拡散を考慮した場合などについて比較した。一般にエネルギーが多く出るイールド表を採用した場合、円盤が大きくなる傾向がある。ただし初代星の効果を入れると、ガスが多く飛んで行き円盤そのものが小

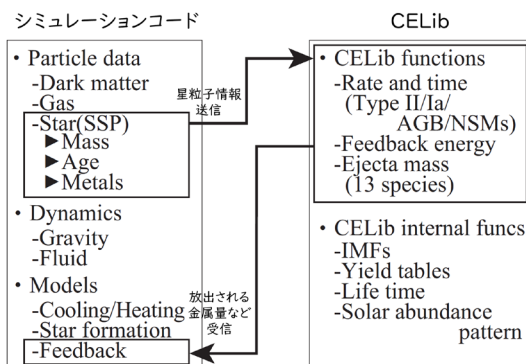


図3. シミュレーションコードと CELib の関係。

さくなる傾向がある。AGB による質量循環は円盤を大きくすることに寄与する。金属量の拡散を考慮すると、円盤の構造がなめらかになる、また、初代星の影響も穏やかになるということが分かった。化学進化モデルは銀河構造に大きな影響を与えるため、最新の知見を取り込むことは銀河形成研究をおこなう上で重要である。以上の結果は同じプログラムで、CELlib のパラメータを変更しただけで得られた。化学進化ライブラリというコンセプトの利点が最大限に発揮された。

現在までの銀河形成シミュレーションでは、SSP 近似を使わざるを得なかった。しかし、明らかに次のステップは恒星スケールの直接分解である。GAIA 衛星がもたらす恒星の六次元情報との直接比較できるようになり、また背景で述べたフィードバックの問題が自動的に解決する。次世代に備え、一つの恒星が超新星爆発を起こしたときにどのくらい金属を出すかを求める API を CELlib に用意した。これを元に恒星スケールを分解するシミュレーションの予備的な実験にも取り組んだ。

ASURA 及び CELlib を用いて、r プロセス元素の起源についての一連の研究をおこなった (Hirai Saitoh et al. 2015, 2017, Hirai & Saitoh 2017)。r プロセス元素は、ベータ崩壊より速いペースで中性子捕獲が進むことで出来る元素であり、古くは超新星爆発が起源だと考えられてきた。しかし近年の超新星爆発の研究から、超新星爆発は r プロセス元素合成に最適な環境ではないことが明らかになってきた。そこで注目されたのが中性子星合体である。この一連の研究を開始した段階では、中性子星合体の観測的証拠がなく (連星中性子星合体の直接的な証拠は重力波観測ができるようになって得られた GW170817 が初めてである)、また先行研究から中性子星合体から観測に相当する r プロセス元素分布を再現できないのではないかと指摘されていた。ASURA と CELlib を用い代表的 r プロセス元素 Eu の進化を考慮した化学動力学シミュレーションを行い、中性子星合体が観測的分布を再現できることを示した。中性子星合体の頻度は超新星爆発に比べ低く、特に非一様に分布するからである。

星間空間中の金属量の混合係数は未知である。金属量混合を考慮した矮小銀河形成シミュレーションから得られた r プロセス元素分布をもとに、乱流混合係数として 0.01 以上が望ましいことを明らかにした。この値は乱流理論と整合的である。超新星爆発から出る α 元素ではこのような違いを検出することは出来ない。r プロセス元素が金属量進化について理解するのに重要な役割を果たすことを示した。

CELlib は発表以来引き続き改良されている。初期質量関数の種類や、イールド表が増やされている。また、恒星の自転の効果や星風についても取り込む準備をしているところである。これまでほとんど銀河形成で扱われていない電子捕獲型超新星爆発も公開版に実装する予定である (Hirai Saitoh et al. 2018)。惑星形成や生命の起源にも化学進化は密接に関係している。より広範な応用を可能にするため CELlib の拡張を進めていく。

CELlib は発表以来引き続き改良されている。初期質量関数の種類や、イールド表が増やされている。また、恒星の自転の効果や星風についても取り込む準備をしているところである。これまでほとんど銀河形成で扱われていない電子捕獲型超新星爆発も公開版に実装する予定である (Hirai Saitoh et al. 2018)。惑星形成や生命の起源にも化学進化は密接に関係している。より広範な応用を可能にするため CELlib の拡張を進めていく。

(3) フィードバックモデル

SSP 近似の元では超新星爆発からのフィードバックは有効ではない。温度が十分上がらず、結果として放射冷却によってすぐさまエネルギーが失われるからである。当初、高温ガスを生み出すために、超新星爆発による加熱で必ず $T_{SN} = 10^{7.5} K$ になるというモデルを用いた。イベントが起きる確率を調整してエネルギーを合わせる。しかしこのモデルでは、およそ 100 回に 1 回超新星爆発がはいることになり、この頻度では空間非一様性が強すぎ、銀河形成シミュレーションに適用した場合、全体の星形成を抑えることが困難であった。一粒子の中に高温低密度成分と低温高密度成分を持つ多相星間ガスモデルなどを試したが、最終的に FIRE プロジェクトで用いられている運動量で入れるタイプのフィードバックモデルを採用することにした (Hopkins et al. 2018)。このフィードバックモデルに対応するべく CELlib に必要な改造を施した。これにより観測的に知られているハロー質量-星質量関係に近い結果を得ることが出来るようになった。

図 4 は天の川銀河程度の質量 (10^{12} 太陽質量) を持つ銀河形成シミュレーションを可視化したものである。シミュレーション効率化のために、ガス粒子は銀河の出来る領域だけに配置する。潮汐場による角運動量獲得を再現するために、より広い空間を暗黒物質だけとして解く (パネル 1)。初期に暗黒

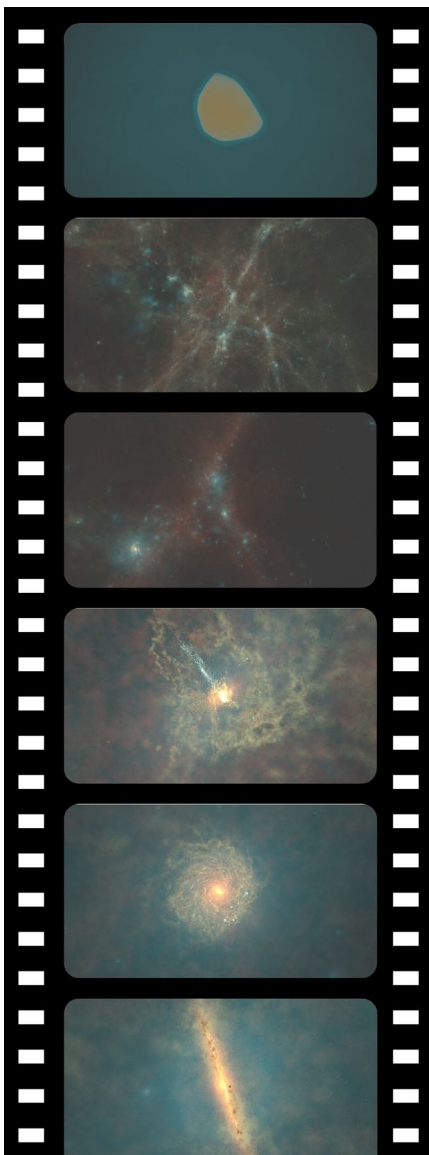


図4. 銀河形成シミュレーションの可視化。上から順に 6 枚のパネルがあり、時間進化を表している。正し最後の二つはほぼ同じ時期を見る角度を変えたもの。青く広がっているのが暗黒物質の分布、赤く広がっているのが高温ガスで黄色く広がっているのが低温ガス。点で表現されているのが星粒子。動画配信 URL:

<https://www.youtube.com/watch?v=Rdd9KAUcvGQ>

物質が重力的に集まり、さらにそこにガスが落ち込む。それら合体し原始銀河を作る(パネル2, 3)。時折激しく星を作りその反動で一気にガスを吹き飛ばす(パネル4)。後半、潮汐場から角運動量を獲得したガスが降着し、ガス円盤を形成する。ガス円盤中で星形成が進み恒星円盤を作る(パネル5, 6)。このモデルをリファレンスに CELib を用いて、イールド表、初期質量関数、初代星モデルの寄与などを網羅的に調べている。やはりイールド表と紐付いたエネルギー放出は銀河構造に大きな影響を与える。超新星爆発の他に、特に低質量銀河で星形成を抑えるために、遠紫外線フィードバックの実装及びテストをおこなった(2017年日本天文学会発表)。低質量銀河で星形成抑制に一定の影響があるという結果を得たが、一方で遠紫外線がどこまで影響を及ぼすかは柱密度の評価に強く依存する。分解能によらない一般化が課題として残った。

(4) ユニークインデックス生成アルゴリズム PowderSnow の開発

銀河形成シミュレーションでは星形成によって粒子が増える。また、粒子分割法を実装している場合もやはり粒子が増える。このようなシミュレーションでユニークに粒子を区別できるインデックスを付与できるとデータ解析の時に役に立つ。一般に並列計算では、インデックス重複を起こさないように、通信するなどのケアが必要になる。あるいは、並列プロセスごとに固有のインデックス系列を生成している場合は通信の必要はないが、途中でプロセス数が変更されたときに特別なケアが必要になる。

そこで、並列計算でも労なくユニークインデックスを取得できるようにユニークインデックス生成アルゴリズム PowderSnow を開発しライブラリとして公開した。PowderSnow のアルゴリズムは、SNS サービス、インスタグラムおよびツイッターのユニークインデックス生成アルゴリズムを超並列計算用に修整したものである。

PowderSnow は64bitで一つのインデックスを構成し、およそ四年間、最大524288プロセス/スレッドで、1ミリ秒間に256の独立なインデックス生成することが出来る。現在 PowderSnow は ASURA の基幹部に組み込まれている。今後の超並列計算で粒子の増減が生じる場合でも特段の不都合がなくなった。また、独立のライブラリとして次の URL で公開している:

<https://bitbucket.org/saitoh/powersnow>

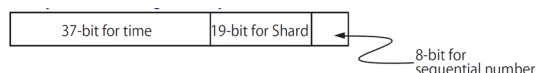


図5. PowderSnow の基本的な構造。64bit を三つに分けて一つのインデックスを構成する。

(5) DISPH 法の応用・他

DISPH 法の適用範囲は広い。月形成巨大衝突シミュレーションや、マントル対流シミュレーションへの応用をした(Hosono, Saitoh et al. 2016; Takeyama, Saitoh & Makino 2017)。また、円盤の長時間積分に適した人工粘性モデルの研究をおこなった(Hosono, Saitoh & Makino 2016)。将来、銀河スケールから惑星スケールまでシームレスなシミュレーションが達成される日が来るだろうが、そのときにも粒子法が重要な役割を果たすだろう。

この他 DISPH のプログラムを公開し、講習会などで利用した:

<https://bitbucket.org/saitoh/nanoasura/>

(6) まとめ

従来の問題点を解決した新しい流体スキーム、フィードバックモデル、化学進化の三本の柱を元に銀河形成研究をおこなった。特に化学進化ライブラリの構築とそれを用いた研究は、他の研究グループと一線を画す新しい研究といえる。化学進化ライブラリの進化を進めることで、銀河形成そのものからより広い分野に波及する基本的な研究が展開できると期待される。

DISPH 法はある種の計算では他の新しいスキームと遜色がないとはいえ精度は低い。近年、任意空間精度を実現可能な Consistent Particle Hydrodynamics in Strong Form (CPHSF)が提案された(Yamamoto & Makino 2017; 2019)。より高精度な銀河形成シミュレーションを達成するために、今後 CPHSF を実装する予定である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計13件)すべて査読あり

1. Hirai, Y., Saitoh, T. R., Ishimaru, Y., and Wanajo, S., "Enrichment of Zinc in Galactic Chemodynamical Evolution Models", ApJ, 855, 63-(2018)
DOI:10.3847/1538-4357/aaaabc
2. Kumamoto, J., Baba, J., and Saitoh, T. R., "Imprints of Zero-Age Velocity Dispersions and Dynamical Heating on the Age-Velocity Dispersion Relation", PASJ, 69, 32-(2017) DOI:10.1093/pasj/psx005
3. Hirai, Y. and Saitoh, T. R., "Efficiency of metal mixing in dwarf galaxies", ApJ, 838, L23-(2017) DOI:10.3847/2041-8213/aa6799
4. Shin, J., Kim, S. S., Baba, J., Saitoh, T. R., Hwang, J.-S., Chun, K., and Hozumi, S., "Hydrodynamic Simulations of the Central Molecular Zone with a Realistic Galactic Potential", ApJ, 841, 74-(2017) DOI:10.3847/1538-4357/aa7061
5. Saitoh, T. R., "Chemical Evolution Library for Galaxy Formation Simulation", AJ,

- 153, 85-(2017) DOI: 10.3847/1538-3881/153/2/85
6. Hirai, Y., Ishimaru, Y., Saitoh, T. R., Fujii, M. S., Hidaka, J., and Kajino, T., “Early chemo-dynamical evolution of dwarf galaxies deduced from enrichment of r-process elements”, MNRAS, 466, 2474-2487 (2017) DOI: 10.1093/mnras/stw3342
 7. Baba, J., Morokuma-Matsui, K., and Saitoh, T. R., “Eventful evolution of giant molecular clouds in dynamically evolving spiral arms”, MNRAS, 464, 246-263 (2017) DOI: 10.1093/mnras/stw2378
 8. Takeyama, K., Saitoh, T. R., and Makino, J., “Variable inertia method: A novel numerical method for mantle convection simulation”, NewA, 50, 82-103 (2017) DOI: 10.1016/j.newast.2016.07.002
 9. Hosono, N., Saitoh, T. R., and Makino, J., “A Comparison of SPH Artificial Viscosities and Their Impact on the Keplerian Disk”, ApJS, 224, 32- (2016) DOI: 10.3847/0067-0049/224/2/32
 10. Hosono, N., Saitoh, T. R., Makino, J., Genda, H., and Ida, S., “The giant impact simulations with density independent smoothed particle hydrodynamics”, Icar, 271, 131-157 (2016) DOI: 10.1016/j.icarus.2016.01.036
 11. Saitoh, T. R. and Makino, J., “Santa Barbara Cluster Comparison Test with DISPH”, ApJ, 823, 144- (2016) DOI: 10.3847/0004-637X/823/2/144
 12. Hirai, Y., Ishimaru, Y., Saitoh, T. R., Fujii, M. S., Hidaka, J., and Kajino, T., “Enrichment of r-process Elements in Dwarf Spheroidal Galaxies in Chemo-dynamical Evolution Model”, ApJ, 814, 41-(2015) DOI: 10.1088/0004-637X/814/1/41
 13. Yamamoto, S., Saitoh, T. R., and Makino, J., “Smoothed particle hydrodynamics with smoothed pseudo-density”, PASJ, 67, 37-(2015) DOI: 10.1093/pasj/psv006

[学会発表] (計 14 件)

1. 斎藤貴之, “ASURA による三次元化学動力学シミュレーション”, 宇核連研究会, 招待講演 (2019)
2. 斎藤貴之, “Chemical Evolution in the Universe”, 7th ELSI シンポジウム, 招待講演 (2019)
3. 斎藤貴之, “Far UV フィードバックの銀河の形成と進化への影響”, 日本天文学会 (2017)
4. 斎藤貴之, “銀河形成シミュレーションの次の一歩”, 理論懇シンポジウム, 招待講演 (2016)
5. 斎藤貴之, “DISPH 法による銀河形成シミュレーション”, 銀河進化研究会 (2016)
6. 斎藤貴之, “化学進化シミュレーション用ライブラリ CELib の開発 II”, 日本天文学会 (2016)
7. 斎藤貴之, “化学進化シミュレーション用ライブラリ CELib の開発”, 日本天文学会 (2015)
8. 斎藤貴之, “銀河形成と銀河磁場”, 日本 SKA サイエンス会議「銀河磁場」, 招待講演 (2015)
9. 斎藤貴之, “DISPH 法によるサンタバーバラクラスターのエンタロピーコア形成”, 日本天文学会 (2014)

他 5 件

[その他]

CELlib 配布ページ: <https://bitbucket.org/tsaitoh/celib/>

PowderSnow 配布ページ: <https://bitbucket.org/tsaitoh/powdersnow>

DISPH トレーニングプログラム nanoASURA 配布ページ: <https://bitbucket.org/tsaitoh/nanoasura/>

銀河形成シミュレーション動画配信ページ: <https://www.youtube.com/watch?v=Rdd9KAUcvgQ>
<https://www.youtube.com/watch?v=MU7nU5gE0Bo>

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。