

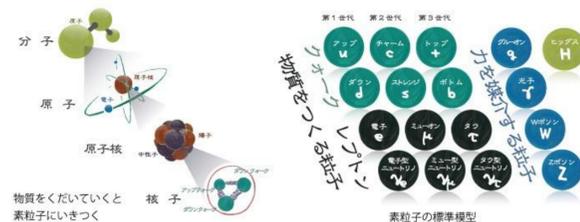
格子QCD計算によるクォーク質量の精密決定

H P C I 戦略プログラム 分野

5

研究概要

陽子や中性子などハドロンスケール ($1\text{fm}=10^{-15}\text{m}$) の物理は、量子色力学 (QCD) で記述される。QCDの基本パラメータは、物質を形作るクォークの質量と結合定数である。クォーク質量が正確にわかると、ハドロン物理はQCDにより予言可能となる。本研究では、格子QCD計算を用いて、QCDの基本パラメータであるクォーク質量の精密な決定を行った。



東京大学宇宙線研究所ホームページより

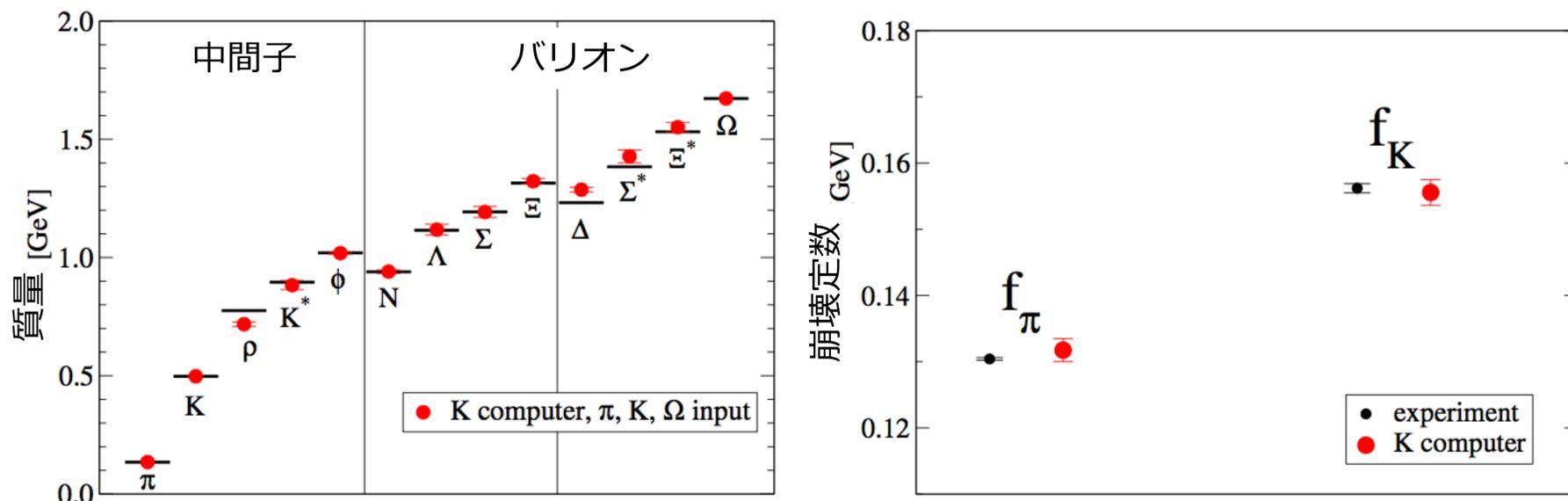
「京」で得られた成果

「京」以前は、物理体積 (2.9fm)³ で時空格子点数 64×32^3 を用いた格子QCD計算が限界であった。これは、特にn中間子にとって十分大きな体積ではなく、クォーク質量を正確に決定できなかった。

「京」では、世界最大級の物理体積 (8.2fm)³ で時空格子点数 96×96^3 、計算規模は「京」以前の40倍の格子QCD計算により、クォーク質量 (m_{ud}, m_s) の精密決定に成功した。

$$m_{ud} = 3.135(52) \text{ MeV}, \quad m_s = 88.60(1.40) \text{ MeV}.$$

QCDの安定ハドロン (N, Λ , Σ , Ξ) の質量の予言値 (左下図赤丸) が実験値 (黒線) を完全に再現していることにより、決定したクォーク質量の正確さを示している。また、崩壊定数 (f_π, f_K) の予言値 (右下図赤丸) が実験値 (黒丸) と矛盾がなく、実験値に迫る誤差で評価できた。大きな物理体積を使用できる「京」なくして実現できなかった成果である。



「京」の活用

数値計算の主要部分である10億×10億次元のクォーク演算子行列の逆行列計算では、「京」に特化したコード開発を行った。ノード内の8コア並列に適した領域分割を行い、単精度前処理 (ルッシャーのSAP前処理とSSOR前処理) を用いたBiCGStabソルバーで、16~4096ノードを使用した計算で、25%以上の実行効率を達成した。

将来の展望

本研究では、比較的軽いu, d, sクォークの動的効果のみを考えて、重いc, b, tクォークの効果を見逃した。さらに、uとdクォーク間のアイソスピン対称性の破れの効果を見逃した近似計算であった。ポスト「京」以降は、これらの効果を順次取り入れ、より現実的な格子QCD計算を実行する。実験と相補的な物理量の精密測定を行い、素粒子標準模型の検証およびそれを越えた物理の解明を目指す。

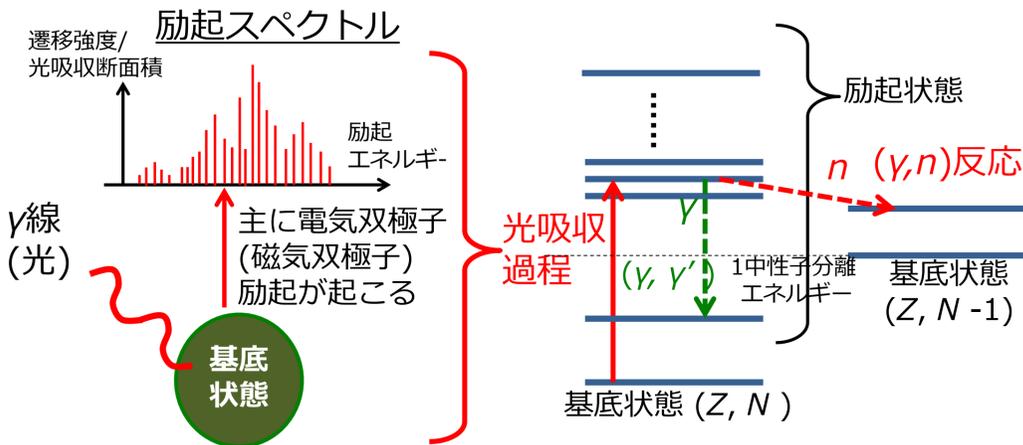
モンテカルロ殻模型による核変換に向けた原子核構造の基礎研究

H P C I 戦略プログラム 分野

5

研究概要

原子炉内の核分裂反応によって生じる人工的な核種のうち、寿命（半減期）が数10年～数100万年と長いものは**長寿命核分裂生成物**と呼ばれる。これらの核種は長期的に放射線を出し続けることになるため、短寿命の核種に変える核変換の可能性が議論されている。本研究では、大規模量子多体計算により原子核の構造を精密に調べることで、核変換に関連する基礎的な物理量を得ることを目標としている。

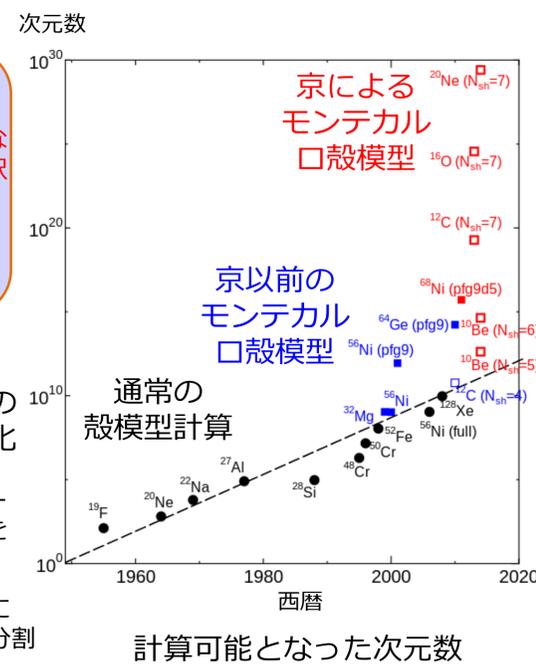
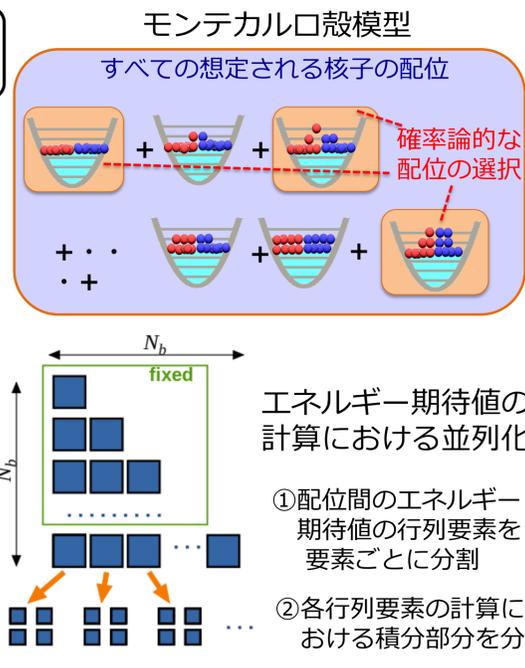


核変換の反応の1つとして (γ, n) 反応がある。原子核が γ 線（光）を吸収して励起する過程で中性子1つを放出し、別の原子核に移行するものである。このときの光吸収の起こりやすさ（**光吸収断面積**）は (γ, n) 反応の重要な物理量である。本研究では**モンテカルロ殻模型**によって核構造研究の立場から励起スペクトルを求めることで、光吸収断面積を計算する。

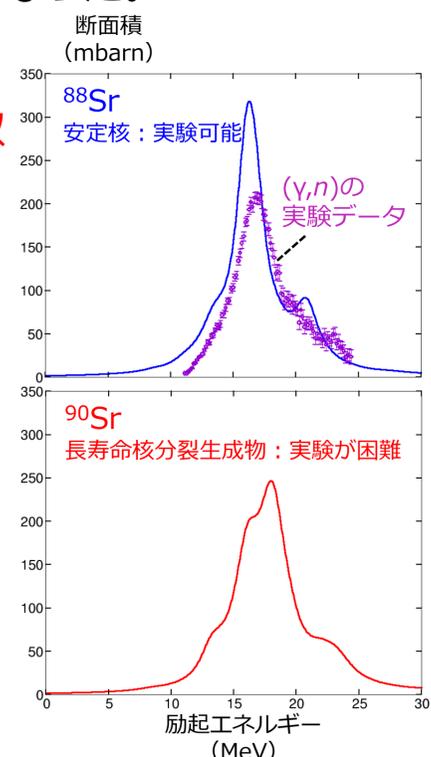
$$\left[\text{光吸収断面積} : \sigma_{abs}(E) = \sigma(\gamma, \gamma') + \sigma(\gamma, n) + \sigma(\gamma, 2n) + \sigma(\gamma, p) \dots \right]$$

「京」の活用と得られた成果

原子核における精密な量子多体計算の1つとして殻模型計算が知られている。これは平均場内の軌道に核子を詰めていった配位を考え、その配位混合計算を行うものである。**モンテカルロ殻模型**では、確率論を用いて重要な配位を100～1000程度選び出す。さらにエネルギー期待値について、「京」の1000～10000ノードの大規模並列計算を行うことで、通常の殻模型計算では 10^{30} 次元（配位数）の行列対角化に相当する計算が可能となった。

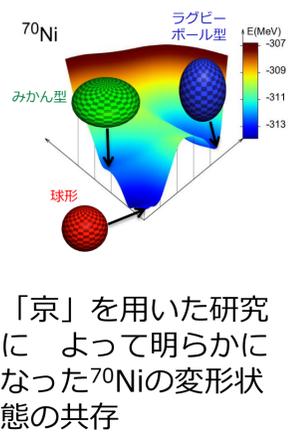


直接実験が困難な長寿命核分裂生成物 ^{90}Sr の**光吸収断面積**を計算した結果。通常の殻模型計算では 10^{36} 次元の行列対角化の計算に相当し、「京」を用いたモンテカルロ殻模型によって初めて計算可能になった。核変換に関連する基礎的な物理量を、核構造研究の立場から求められるようになった。



将来の展望

長寿命核分裂生成物として他に ^{79}Se 、 ^{93}Zr 、 ^{107}Pd 、 $^{135,137}\text{Cs}$ などが知られており、ポスト「京」に向けてこれらの核種の研究が進められる。核力が持つ性質により原子核の状態が励起エネルギーで容易に変わり得ることがこれまでの研究で明らかになり（右図）、核力の性質を考慮し理論計算を精査することで明らかになる核構造の探求が進められる。



「京」を用いた研究によって明らかになった ^{70}Ni の変形状態の共存

「京」でブラックホールを創る

京都大学基礎物理学研究所 木内建太
理研・久徳浩太郎、東邦大・関口雄一郎、京大基研・柴田大

HPCI戦略プログラム 分野 5

研究概要

重力波と連星中性子星合体

重力波は、一般相対性理論の帰結として得られる時空のさざなみ
非常に微弱な信号： $h_c \sim 10^{-22} \sim$ **水素原子/地球と太陽の距離**

Q.観測は出来るのか？

A.実現間近。Advanced LIGO（米）は昨年観測開始、KAGRA（日）は2018年頃に観測開始

Q.どんな天体から重力波が伝搬するのか？

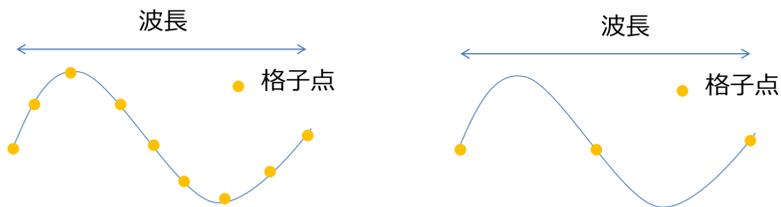
A.中性子星やブラックホールからなる二重連星の合体。中性子星は、太陽程度の質量で半径が10km程度しかない宇宙に実在する極限天体である。中性子星-中性子星連星は、現在までに6個観測されている。ハルズとテイラーによるPSR B1913+16の軌道周期の減衰の発見⇒重力波の間接的存在証明（1993年ノーベル物理学賞）

Q.重力波が観測されると人類は何を知り得るのか？

A.①一般相対性理論の強い重力場中における正しさ。②中性子星の内部状態（真の核密度状態方程式）。③鉄より重い元素（金やウランなど）の起源。④ショートガンマ線バーストという爆発的天体現象の解明。

「京」で得られた成果

連星合体における中性子星磁場の増幅を解明した。中性子星は宇宙最大の磁石である。 $10^{11} \sim 10^{15}$ Gauss（太陽の黒点は数1,000 Gauss）。しかし、合体過程における磁場増幅は良く理解されていなかった。磁場増幅過程を正しく追跡するには、超高解像度の計算が必要不可欠だったからである。



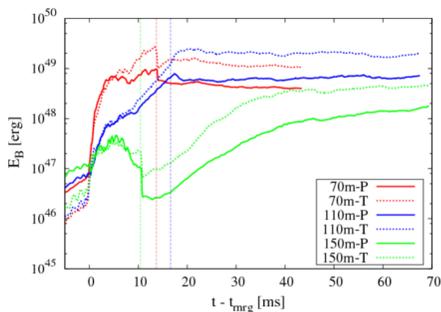
磁場増幅機構である不安定モードの波長と格子点の概略図。格子点が不足して、波が正しく解像できなかったのが「京」以前（右）。十分な数の格子点で波を解像した「京」の結果（左）。

「京」以前と「京」の解像度と格子点数の比較

| | 解像度 | 格子点総数 (Nx×Ny×Nz) |
|-------|------|------------------|
| 「京」以前 | 180m | 240×240×120 |
| 「京」 | 70m | 1,024×1,024×512 |

計算規模にして約70倍。「京」にのみ実行可能な課題

データ解析

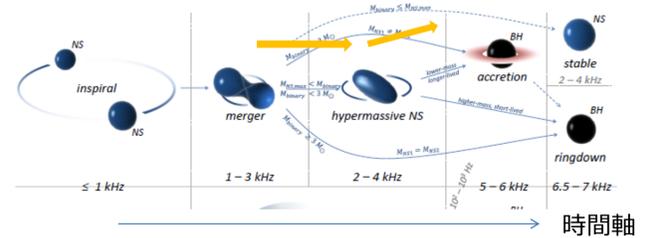


P：回転方向に垂直成分
T：回転方向成分

磁場エネルギーの時間発展。時間0が合体時刻。縦の点線はブラックホール形成時刻。赤線は「京」の結果、緑線は「京」以前の結果。

- ・合体時（時間0）の磁場増幅は「京」以前の結果に比べて顕著。約100倍増加。増幅機構はケルビン-ヘルムホルツ不安定性の短波長モード。「京」以前では正しく解像できていなかった。
- ・過渡的に形成される重い中性子星内部でも磁場は増幅（時間0～10-15ミリ秒）。増幅機構は磁気回転不安定性の最大成長モード。やはり「京」以前では正しく解像できず。
- ・ブラックホール崩壊後の降着円盤中では磁場は増幅せず（時間10-15ミリ秒以降）。「京」以前では顕著に増幅。定性的に誤った結果。

連星中性子星合体



進化の過程は連星質量と中性子星の最大質量で決まる。連星質量の観測値は2.6～2.8太陽質量、中性子星の最大質量は2太陽質量以上。合体後に高速回転中性子星が過渡的に形成され、ブラックホールへ重力崩壊するのが進化のおおまかな道筋。

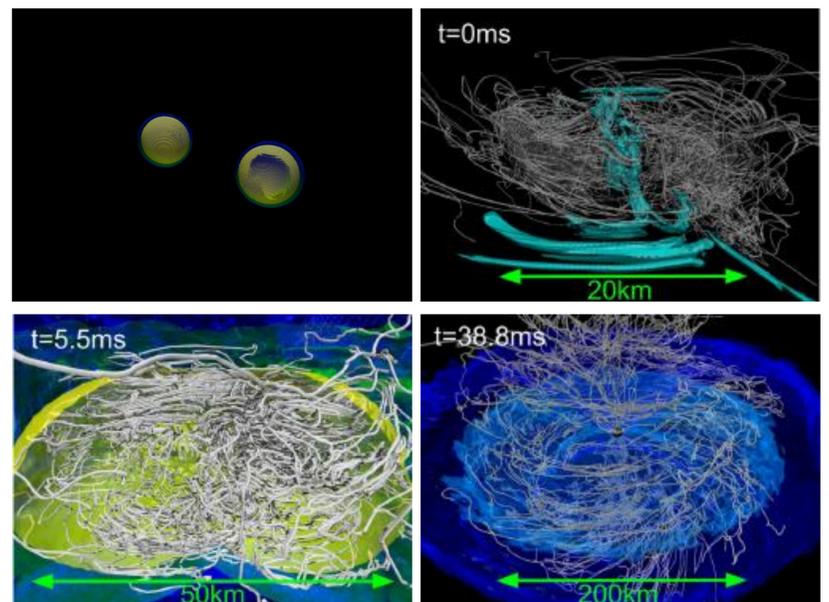
合体過程の現実的な描像を確立することが急務！

数値相対論と呼ばれる理論的な枠組みで、京を用いた大規模数値シミュレーションを実行することで、合体の詳細な過程の解明する。

数値相対論とは、アインシュタイン方程式、磁気流体力学方程式、ニュートリノ放射場を連立させてスーパーコンピュータ上で解くことである。

ブラックホール形成の第一原理計算＝ブラックホールを“創る”

シミュレーションの可視化



左上：合体前の密度場の等値面。右上：合体の磁力線（白）と磁場強度（水色）。
左下：合体後の高速回転中性子星の密度場の等値面（黄、青）と磁力線（白）。
右下：ブラックホール崩壊後の密度場の等値面（青、薄青）と磁力線（白）。

まとめ

- ・重力波源の有望な候補である連星中性子星合体の現実的な描像により迫った。合体時における磁場増幅は不可避免的に起き、**合体後には強磁場中性子星が必ず形成される**。これは、磁場を限定的に扱ってきた既存のモデリングからのパラダイムシフトである。
- ・先行研究は定性的に誤った描像を導き出していた可能性を指摘した。
- ・数値相対論シミュレーションとしてはこれまでにない規模で行ったシミュレーションであり、今後数年間に渡り、当該分野におけるマイルストーンと位置付けられる研究である。

今後の進展

- ・ニュートリノ放射場と磁気流体効果を結合させ、連星合体過程のより現実的な描像を解明する方向へ進むと予想される（ニュートリノ放射場の効果のみを解明した研究も本課題の一部として遂行。P Iは関口雄一郎）。
- ・重力波直接観測のニュースが近い将来届くと予想されるため、重力波天文学の開闢と共に、世界的競争はさらに熾烈になると予想される。
- ・研究者のみで構成される現状の研究体制は限界がある。最適化や可視化についての専門家を含めたグループで研究体制を構築すべき（ポスト京の課題）。

ダークマターシミュレーション

H P C I 戦略プログラム 分野

5

研究概要

「京」などを用いた世界最大規模の宇宙の構造形成シミュレーションを行い、宇宙初期から現在にいたる約138億年のダークマターの構造形成、進化過程を従来よりも格段に良い精度で明らかにした (Ishiyama et al., 2015, PASJ, 67, 61)。

研究背景

宇宙では、重力でのみ相互作用するダークマターと呼ばれる物質が、構造形成、進化の主要な役割を果たしている。ダークマターは自己重力で集まり、ハローとよばれる構造をつくる。その中で星や銀河などの天体が形成していったと考えられている。

ハローの空間分布をシミュレーションから明らかにすることで、銀河や銀河団の空間分布も推定することができる。しかし、これまで世界中で行われてきたシミュレーションでは、用いる粒子数が不足していて、1つのシミュレーション粒子の質量が銀河に匹敵するほど大きくなってしまい、ハローの構造を理解するには不十分であった。

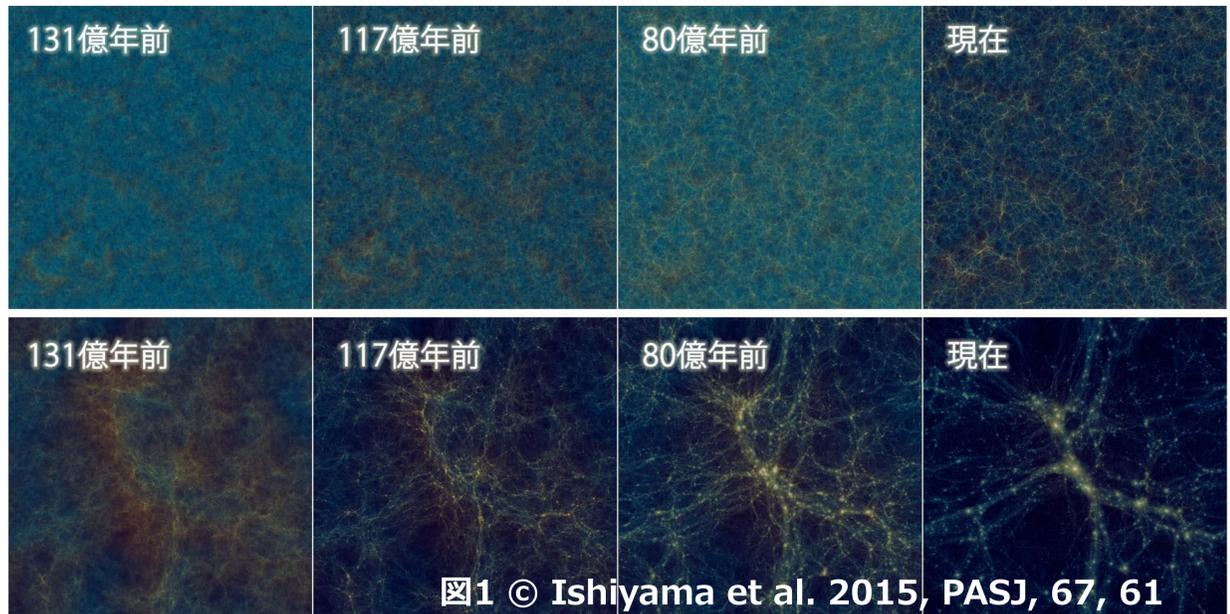


図1 © Ishiyama et al. 2015, PASJ, 67, 61

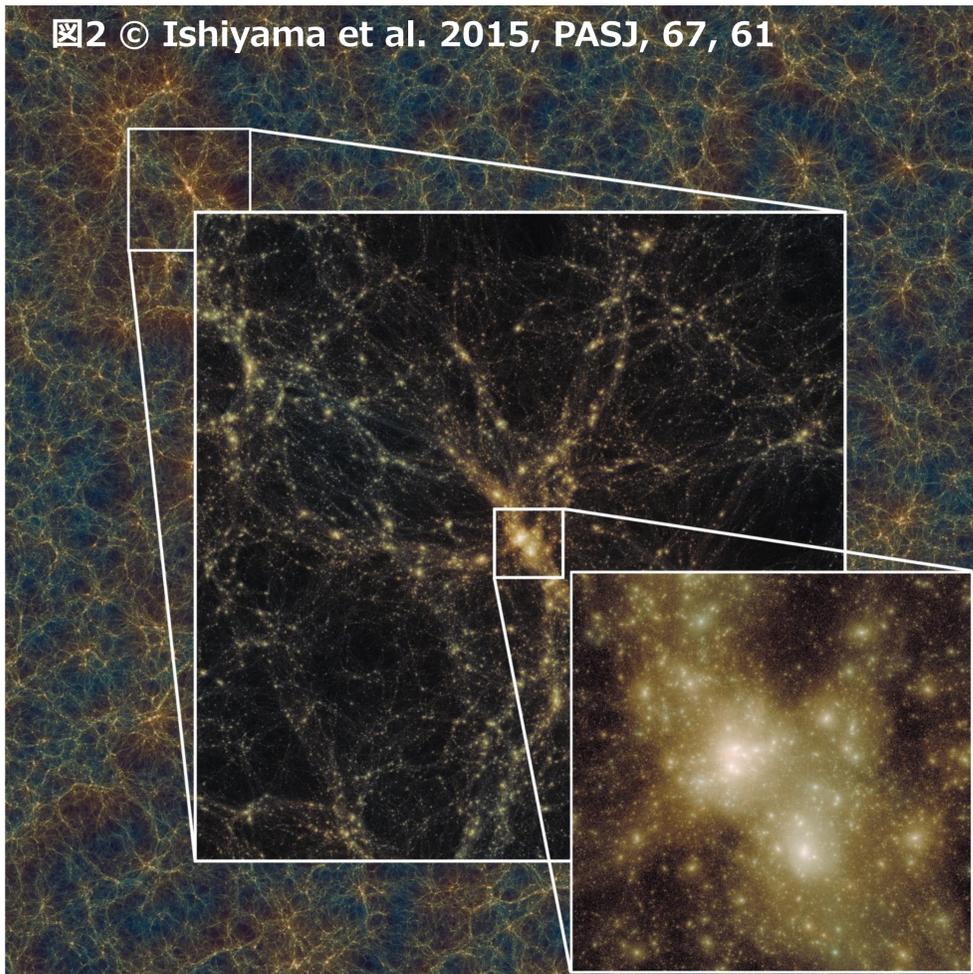
「京」で得られた成果

宇宙初期から現在にいたる約5500億個ものダークマター粒子の重力進化を計算した(「京」以前は100億程度が限界)。計算した空間サイズは、最大で一辺がおよそ54億光年にもおよぶ広大なものである(図1上)。これほど大きな空間でのシミュレーションとしては世界最高の分解能であり、銀河スケールのハローの階層的形成を追うシミュレーションとしては世界最大。質量スケールに換算しておよそ8桁にもおよぶ範囲でのハローの構造形成史をモデル化することが可能となった(図2)。初期宇宙から現在にわたって、矮小銀河から銀河団におよぶ多種多様な天体の形成、進化過程、そして空間分布を探ることができるようになった。

「京」の活用

我々が開発した重力多体シミュレーションコード、GreeMは、計算時間に基づく動的領域分割、階層的な全対通信などの新しい並列化手法を実装することで、「京」の全系を用いても50%以上の実効効率を達成した。そして、ハイ・パフォーマンス・コンピューティングに関する国際会議SC12(2012年、米国・ソルトレイクシティ開催)で、ゴードン・ベル賞を受賞した(Ishiyama et al. 2012, SC12)。

図2 © Ishiyama et al. 2015, PASJ, 67, 61



将来の展望

シミュレーションではダークマター分布の重力的な進化のみ解き、ハローの階層的構造形成史をモデル化した。現在、シミュレーションから得られたハローの進化史の上で、準解析的銀河形成モデルという手法を用いてバリオンの進化を解いている(Makiya et al., 2016, PASJ; Shirakata et al., 2015, MNRAS; Oogi et al., 2016, MNRAS)。そして我々が目にする銀河や活動銀河核などの大規模天体サーベイ観測と直接比較可能な、様々な天体の疑似カタログを整備し、公開していく。