

ポスト「京」重点課題解説

宇宙とスパコン

138億年前に誕生した宇宙。その進化の過程で起こったイベントを理解するために、観測や理論とともにシミュレーションが使われています。宇宙の研究の発展に、スパコンはどのように関係してきたのでしょうか。

関連する課題：

重点課題(9) 宇宙の基本法則と進化の解明

萌芽的課題(3) 太陽系外惑星(第二の地球)の誕生と太陽系内惑星環境変動の解明

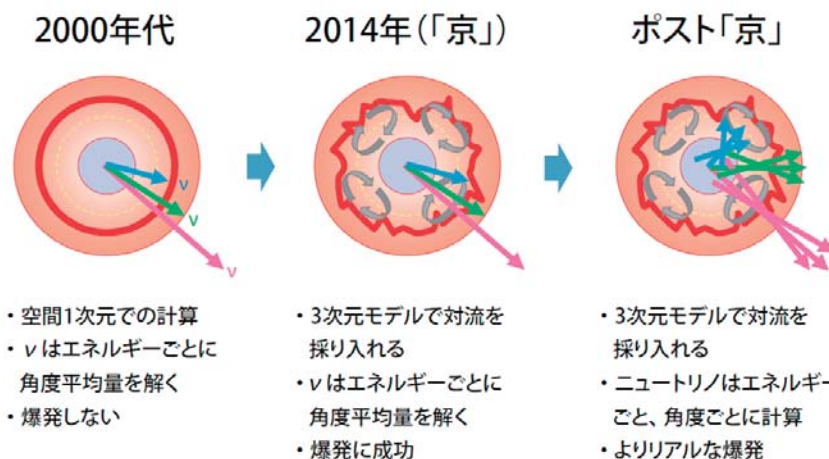
星の構造と超新星爆発

宇宙の研究は、科学の中では真っ先にコンピュータが採り入れられた分野の一つです。コンピュータの誕生からまもない1950年代には、すでに星(恒星)の内部構造のシミュレーションがアメリカのシュワルツシルトによって行われました。星が完全な球で、核融合で生じた熱が中心から外に等方的に伝わると仮定して(1次元球対称モデル)、星の構造の方程式を立て、数値計算を行って赤色巨星ができるしくみを研究したのです。日本を含む世界各国の研究者たちがこの研究を発展させ、現在では、星の進化の理論は定性的には確立されています。

しかし、太陽の8倍以上の質量の星が一生の最後に起こす超新星爆発のシミュレーションは、まだ研究が進んでいる段階です。爆発のメカニズムとして有力視されている「ニュートリノ加熱説」では、終末期の星の中心で生じるエネルギーをニュートリノが外側へと運ぶことで、爆発が起こるとされています。このメカニズムの詳細なシ

ミュレーションは、2000年代になって高性能のスパコンが登場してから可能になりました。しかし、1次元球対称モデルでは爆発は起こらず、2次元モデル(回転楕円体)での計算では対流を正しく取り扱うことができませんでした。

そこで、日本のグループは「京」を使って3次元モデルでのシミュレーションに取り組み、2014年、爆発に成功しました。ただし、爆発のエネルギーは観測よりもずっと小さいものでした。その理由は、ニュートリノがさまざまなエネルギーをもつことは計算に



超新星爆発のシミュレーション(提供：国立天文台滝脇知也助教)

2000年代になってから詳細に計算できるようになったが、「京」で3次元モデルの計算を行うことで、初めて爆発の再現に成功した。1次元での計算と「京」での計算では、ニュートリノ(v)が平均した方向に進むとしている(図の3本の矢印)が、ポスト「京」ではあらゆる方向に進むニュートリノを採り入れることで、より現実に近い爆発の再現をめざす。



入っているが、さまざまな向きに進むことまでは入っていないためだと考えられています。そこで、ポスト「京」では、100通りほどの角度について計算を行い、より現実に近い超新星爆発を起こすことをめざしています。

惑星の起源の解明

太陽系の惑星がどのようにしてできたのかも、シミュレーションの重要なテーマの一つです。現在、惑星形成の理論として標準的なのは、1980年代に提唱された「京都モデル」です。これは、ガスとダストからなる原始太陽系円盤の形成→ダストの集合による微惑星の形成→微惑星の衝突合体による原始惑星の形成と進み、原始惑星どうしが衝突して地球型惑星、原始惑星がガスをまわって木星型と海王星型の惑星ができたというものです。

しかし、この理論では、木星ができるのに太陽系の年齢よりも長い時間がかかってしまいます。これは、微惑星がみな同じ大きさで、同じように成長すると仮定しているからです。そこで、より現実的な条件でのシミュレーションがめざされてきました。重力計算の専用機として東京大学で開発されたGRAPEを用いて、日本の研究者は1990年代にこの分野の研究で世界をリードしました。

しかし、京都モデルでは、原始惑星が月ぐらいの大きさまで成長すると、太陽に向かって落ちてしまうという問題もあります。これも、理想的な条件を仮定しているためだと考えられています。そこで、「京」では、原始惑星が周囲の微惑星と衝突しながら公転するというモデルでシミュレーションが行われ、太陽に向かって落ちないケースもあることが確かめられました。さらに、ポスト「京」では、ガスの分布なども採り入れ、よりリアルなシミュレーションに挑む予定です。

宇宙の大規模構造を描き出す

宇宙の銀河の分布には偏りがあり、立体的な網目のような「大規模構造」をつくっています。大規模構造のものは、宇宙が誕生

したころにあった物質(おもにダークマター)の密度のわずかなゆらぎだと考えられています。周囲よりも少し密度が高いところに周りの物質が引き寄せられ、密度の高い部分はどんどん密度が高くなっていくと同時に、宇宙は膨張を続け、138億年かけて現在のような大規模構造ができたというわけです。

シミュレーションで大規模構造を再現する試みは、1970年代から始まりました。当初は、ダークマターの密度ではなく、一つひとつの銀河を粒子で表し、粒子どうしの中に重力が働くとして時間変化を計算しました。扱える銀河の数は数百個でした。1980年代になると、ダークマターの密度を粒子の集まり具合で表して、同様の計算が行われるようになりました(宇宙論的N体シミュレーション)。

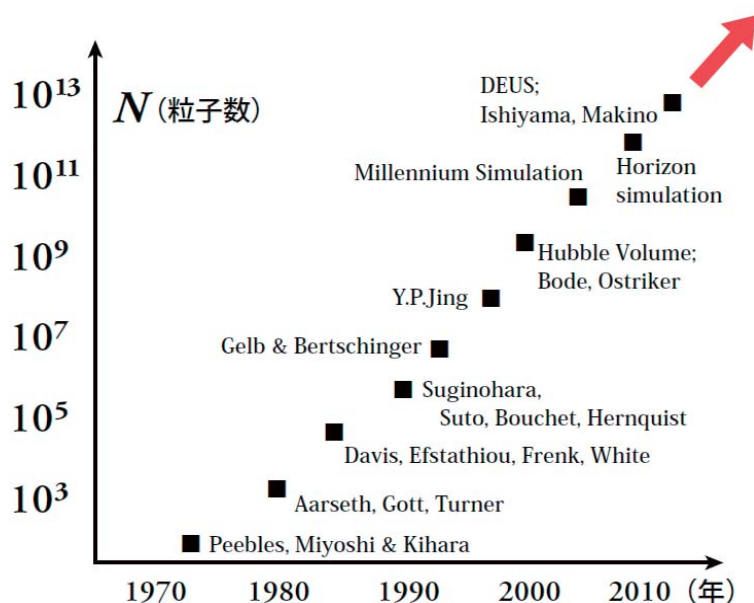
その後、コンピュータの進歩と計算法の進歩があいまって、計算できる粒子の数は指数関数的に増え、40年間で10億倍になりました。2012年には、「京」を使って2兆個のダークマター粒子のシミュレーションが行われ、これまでにない細かさで、宇宙の構造ができていくようすが描き出されました。

宇宙との対話は続く

ポスト「京」では、未発見のダークマターの発見につながると期待される銀河系のダークマター分布の非常に詳細なシミュレーションのほか、ダークマターのかたまり(ハロー)にバリオン(普通の物質)のガスが引き寄せられて、星や銀河が形成される過程のシミュレーションが計画されています。宇宙の広い空間の中で、ダークマター粒子が重力で集まっていくのに合わせて、ガスの振り舞い、化学反応、エネルギー収支を計算するので、膨大な計算が必要となります。

また、今後10年の間に、世界中で広域宇宙探査計画が進む予定であることから、これらによる観測ビッグデータとシミュレーションを組み合わせることで、宇宙の進化と天体形成の解明をめざします。

宇宙の研究では、シミュレーション、理論、観測の三者が密接な関係をもちながら、理解が進んでいきます。研究者は、理論に基づいたシミュレーションの結果を宇宙に投げかけ、観測との一致具合という形で返事をもらう「対話」をこれからも続け、宇宙の理解を進めていくのです。



宇宙論的N体シミュレーションの進化(提供：東京大学吉田直紀教授)

シミュレーションで計算できる粒子の数(N)は年代とともに指数関数的に増えてきた。■の脇には計算を行った研究者またはプロジェクト名を記してある。宇宙論的N体シミュレーションの進化には、黎明期から多くの日本人研究者が貢献してきた。いちばん右上が、「京」で行われた2兆個の粒子のシミュレーション。