

計算で宇宙を描く ——天文シミュレーション プロジェクトの挑戦



小久保 英一郎

〈国立天文台天文シミュレーションプロジェクト 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1〉

e-mail: kokubo@th.nao.ac.jp

観測では見ることで見えない宇宙を計算によって描き出すシミュレーション天文学は、現代天文学において必要不可欠な方法となっている。国立天文台天文シミュレーションプロジェクトでは、世界に類のない天文学専用のスーパーコンピュータシステムを運用している。ここでは天文シミュレーションプロジェクトとそのスーパーコンピュータシステムを紹介する。

1. 第3の方法—シミュレーション 天文学

現代天文学の研究目的は、「宇宙を支配する物理法則を解明する」ことと「万物の往古来今を宇宙観として描く」ことといわれる。そのために現在、研究者はおもに3種類の方法で宇宙の研究に取り組んでいる。

研究の基礎となるのは宇宙を観ること、つまり、観測天文学であることは言を待たない。そして観測される宇宙の背景にある物理を考える理論天文学がある。20世紀後半までは、観測天文学と理論天文学が車の両輪となって宇宙の理解が進められてきた。ところが20世紀後半になると、コンピュータの性能が向上し、天文学でもコンピュータを使って実験的に研究を行うことが可能になった。それがシミュレーション天文学である。

天文学で扱う質量、空間、時間、エネルギーなどの規模は莫大なため、実験室で再現することは難しい。そこでコンピュータの中に宇宙を再現し、計算による模擬実験（シミュレーション）を



図1 天文学の方法。

行うのだ。現在、シミュレーションは観測、理論と並ぶ第3の方法として、現代天文学に不可欠なものとなっている。これらの3種類の方法は、互いに補完し合いながら刺激し合い、現代天文学の発展を支えている。

ここではシミュレーション天文学の簡単な説明と、国立天文台天文シミュレーションプロジェクトの紹介をさせていただく。興味のある方は併せて国立天文台ニュースの特集もご覧いただきたい¹⁾。

2. コンピュータの中の宇宙

シミュレーションとはどういうものかもう少し詳しく見てみよう。シミュレーションの原理となるのは物理法則である。基本的な物理法則の多くは、常微分方程式や偏微分方程式という物理量の変化を記述する数式として表現されている。初期条件や境界条件を与えて、物理法則の式を数値的に解くことで、天体（現象）の構造や時間進化を調べることができる。ここで必要となるのが、数値解を求めるためのプログラムとそれを実行するためのスーパーコンピュータだ。スーパーコンピュータは一般のパーソナルコンピュータの1,000-10,000倍以上の計算能力を有する。物理法則を十分な時間空間精度で計算するには莫大な計算能力が必要となるのだ。コンピュータに宇宙を再現する、ということは、物理法則をプログラムし実行する、ということになる。

天文学で行われる大規模なシミュレーションには大きく分けて、多体計算、流体計算、輻射輸送計算の3種類がある。それぞれに簡単に説明しよう。

多くの天体は多体（粒子）系かガス（流体）とみなすことができる。例えば、恒星はガスで、それが集まっている星団や銀河は多体系になる。重力で引き合う多数の粒子の振る舞いを調べるのが重力多体計算。N体シミュレーションとも呼ばれる。銀河団、銀河、星団、惑星系などのシミュレーションがこれにあたる。計算する物理法則は、運動方程式と万有引力（重力）の式だ。

流体計算はガスの振る舞いを調べるもので、星間雲、恒星、降着円盤などの研究で使われる。ガスにはプラズマも含まれる。ここでは流体力学の基礎方程式と、プラズマの場合はさらに電磁気学の基礎方程式を解くことになる。

そして輻射輸送計算は光（エネルギー）の伝わり方を調べる。これは輻射輸送方程式として記述される。流体計算と組み合わせて行われることが

多く、原始銀河雲、星間雲、恒星、降着円盤などで用いられる。また、銀河形成などこれらの3種類を組み合わせたシミュレーションも行われている。

シミュレーションで扱う空間スケールは小は惑星から大は宇宙全体まで、時間スケールは1秒以下から宇宙年齢（138億年）にまで及ぶ。つまり、宇宙におけるあらゆる現象を対象にしている。望遠鏡では直接観ることができない天体現象を、物理法則を基に計算によって描き出すスーパーコンピュータは、理論の「望遠鏡」ということができるだろう。

3. 天文シミュレーションプロジェクト

国立天文台は1996年に初めて天文学専用のスーパーコンピュータを導入し、共同利用を始めている。現在、国立天文台でシミュレーション天文学の中心になっているのが、天文シミュレーションプロジェクト（Center for Computational Astrophysics; CfCA）である。

CfCAは、2006年4月に国立天文台天文学データ解析計算センターが「天文データセンター」と「天文シミュレーションプロジェクト」に分割・改組され発足したものだ。天文学データ解析計算センターの中で「大規模シミュレーション運用グループ」と呼ばれていた、理論シミュレーション用スーパーコンピュータと重力多体問題専用計算機GRAPEの共同利用を行ってきたグループが母体となっている。

CfCAの目的は、ハードウェアとソフトウェアの両面から新しいシミュレーション方法を研究開発し、それをを用いてこれまで実現不可能だったシミュレーションを行い、天文学を進めることにある。そして、その成果を活かしながら、日本のシミュレーション天文学コミュニティと協力し、天文学専用のスーパーコンピュータの共同利用を行う。



国立天文台 天文シミュレーションプロジェクト
共同利用計算機システム 全体構成図
(2014年10月1日現在)

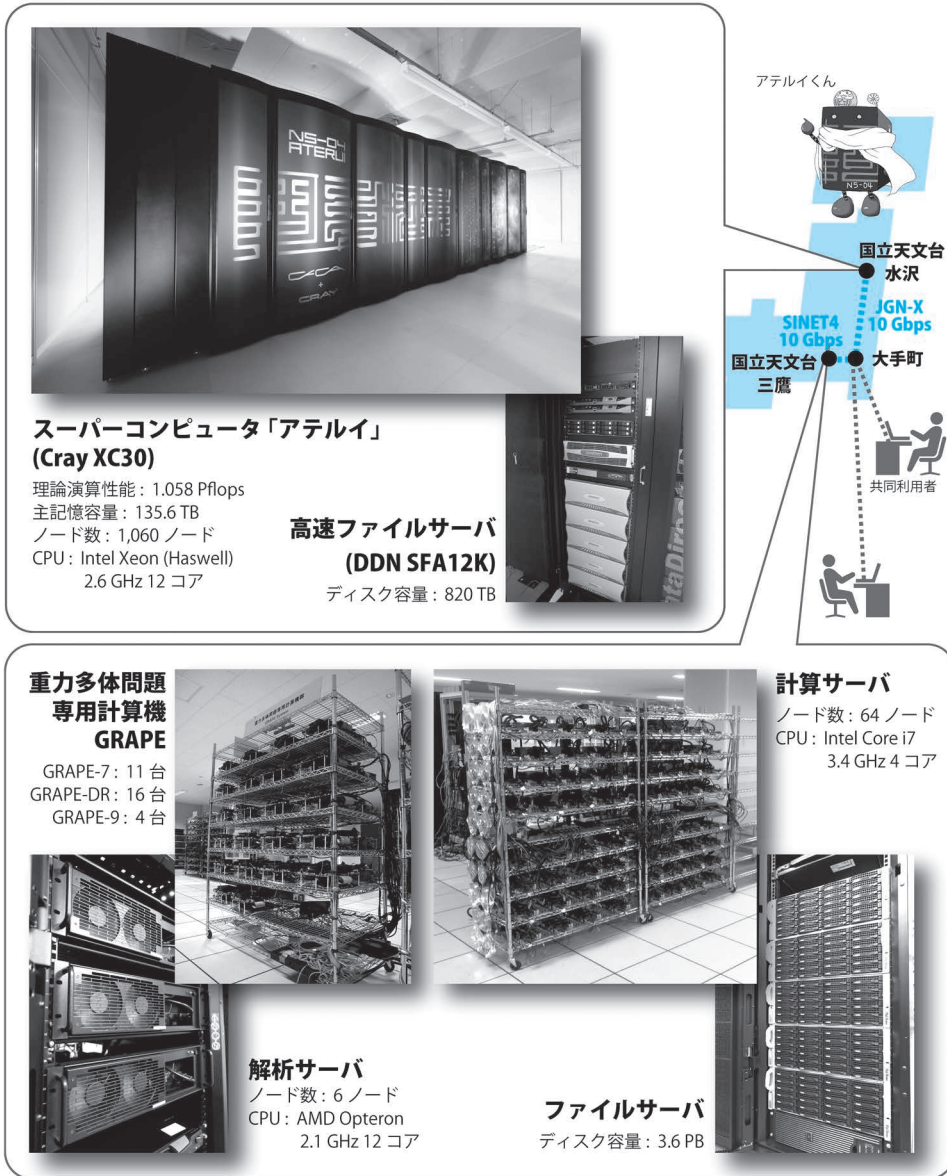


図2 CfCA 共同利用計算機システム概念図。

4. CfCA 共同利用計算機システム

CfCAの共同利用計算機システムは、日本の研究機関に所属する研究者もしくは日本で学位を取得して海外の研究機関に所属する研究者に門戸を

開いている。望遠鏡の観測時間獲得と同じように、利用申請書を提出し、審査を経てその科学的価値が認められて初めて使用可能になる。使用料は不要だ。共同利用計算機システムの詳細や利用申請について詳しくはCfCAのWEB (<http://www.>

表1 アテルイ諸元 (2014年10月現在).

理論演算性能	1.058 Pflops
総主記憶容量	135.6 TB
CPU	Intel® Xeon® プロセッサ E5-2690 v3 (2.6GHz)
1CPUあたりのコア数	12
1ノードあたりのCPU数	2
ノード理論演算性能	998 Gflops
ノード主記憶容量	128 GB
ノード数	1060 (2120 CPU)
筐体数	6
全コア数	25440

cfca.nao.ac.jp) をご覧いただきたい。2014年度の全ユーザ数は延べ177名である。

現行の共同利用計算機システムは第4世代で、大規模並列スカラ計算機「アテルイ」を主力機として、ほかにも重力多体問題専用計算機GRAPE、計算サーバ、解析サーバ、そしてファイルサーバがある(図2)。アテルイは国立天文台水沢キャンパスに、そしてアテルイを除く計算機はすべて三鷹キャンパスに設置されており、水沢-大手町間はJGN-X、大手町-三鷹間はSINET4という高速回線でつながれている。三鷹にある計算機はCfCAで自作したものである。自作することによって、限られた予算での最大限のコストパフォーマンスと迅速な保守管理を可能にしている。以下にシステムの概要を紹介しよう。

4.1 大規模並列スカラ計算機「アテルイ」

アテルイ(NS-04 ATERUI)は2013年4月1日から運用が開始された第4世代共同利用計算機システムの主力機である。Cray社の大規模並列計算機Cray XC30システムで、汎用の並列スカラ型スーパーコンピュータである。理論演算性能は導入時に502 Tflopsで、2014年9月に更新を行い、現在は1 Pflopsに達している(Pflops: 1秒間に1,000兆回の計算)(表1)。メモリは136 TB。



図3 計算機を自作している作業風景.

現在のCPUはIntel® Xeon® (Haswell) 2.6 GHz 12コアで、総コア数は25,440になる。2014年11月時点で世界63位(国内6位)の演算性能を誇っている。また、天文学専用のスーパーコンピュータとしては世界最速になる。

アテルイ(阿弋流為)とは奈良時代終わりから平安時代始め(約1200年前)に現在の水沢付近に暮らしていた蝦夷の首長の名前だ。朝廷の大規模な軍事遠征に対して、少数の蝦夷をまとめ勇敢に戦った英雄で、地元で知らない人はいない。水沢に設置される新しいスーパーコンピュータも、その計算能力を活かして果敢に宇宙の謎に挑んで欲しいという思いを込めてアテルイという愛称をつけた。NS-04という型番のNSは国立天文台(NAOJ)のスーパーコンピュータ(Supercomputer), 04はその第4世代であることを意味する。筐体左に描かれているアテルイのロゴは篆書の阿弋流為を電子回路のようにデザインしたもの(デザインは小阪淳)。合わせて、親しみやすい(?)スーパーコンピュータを目指しキャラクター「アテルイクン」も作り出した(デザインは木村優子)。

4.2 重力多体問題専用計算機 GRAPE

GRAPE (GRAVity PipE)は重力多体問題の専用計算機で、重力多体計算で最も計算量が多い重力相互作用を超高速で計算する。GRAPEはもともと東京大学の杉本大一郎研究室で開発されたも



図4 共同利用計算機システム運用メンバー。上段左から、大須賀 健、井上剛志[†]、富阪幸治[†]、石川利昭[‡]、清水上 誠[‡]。後列左から、工藤哲洋[†]、押野翔一、古澤 峻、長谷川幸彦、伊藤孝士、脇田 茂、松本侑士、田中雅臣[†]。前列左から、福土比奈子、木村優子、小久保英一郎、石津尚喜。(†: 理論研究部併任, ‡: 水沢 VLBI 観測所併任)。

ので、現在も理化学研究所の牧野淳一郎らによって開発が続けられている。国産のユニークな計算機だ。

国立天文台では2001年から、第2世代共同利用計算機システムの一部としてGRAPEの共同利用を始めている。現在は、高精度な計算が必要な衝突系（主に星団や惑星系）用にGRAPE-DR、比較的low精度でも計算可能な無衝突系（主に銀河など）用にGRAPE-7とGRAPE-9を運用している。

4.3 計算サーバ

計算サーバはアテルイやGRAPEには適さないような小規模計算を行うための汎用計算機である。現行の計算サーバのCPUはIntel[®] Core[™] i7 3.4 GHz 4コアで、総コア数は256である。

4.4 ファイルサーバ／解析サーバ

共同利用計算機による計算結果は大容量ファイルサーバに保存される。現在の容量は3.6 PBで、ユーザは最大200 TBまで使用することができる。解析サーバは大規模シミュレーションによって生

み出される膨大なデータを解析するための専用計算機である。このような計算機があって初めて効率的な結果解析が可能になる。

CfCAではこれらの計算機を有効活用してもらうために各種講習会を開催している。アテルイについてはCray社によるXC30講習会を、GRAPEについては初心者向けに重力多体系の物理の講義も含めたN体シミュレーションの学校を、さらにIDLやAVSなどの解析プログラムの講習会を開催している。参加費無料なのでぜひ活用して欲しい。また、CfCA内のプロジェクトである4次元デジタル宇宙プロジェクトでは、シミュレーション結果の可視化を行っている。興味のある方はWEB (<http://4d2u.nao.ac.jp>) をご覧いただきたい。

共同利用計算機の成果は、毎年70-80編の査読論文として発表されている。また、年1回のユーザーズミーティングが開かれ、最新の成果の報告と共同利用に関する議論が行われている。

5. おわりに

今回紹介した第4世代CfCA共同利用計算機システムはこれから3年半の間運用される。その間、アテルイを中心にかつてない大規模・高精度なシミュレーションが多数実行されることになるだろう。それによってさまざまな天体の形成や進化が次々と解き明かされていくことが期待される。すでに新システムならではの成果が多数発表されていることは嬉しい限りである。CfCAも天文学専用スーパーコンピュータを運用するシミュレーション天文学の拠点として、ますます使いやすく高性能なシミュレーション環境を提供できるように努力していきたいと考えている。

今回の特集はアテルイを中心とした第4世代CfCA共同利用計算機システムで現在行われているシミュレーション研究の紹介である。シミュレーション天文学の最前線の世界をお楽しみいただきたい。

参考文献

- 1) 国立天文台ニュース2013年8月号「理論の望遠鏡『アテルイ』が拓く宇宙」

Simulating the Universe by Computation —Challenge of Center for Computational Astrophysics Eiichiro KOKUBO

*Center for Computational Astrophysics, National
Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1
Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

Abstract: Computer simulation that allows us to explore the invisible universe by telescopes is now indispensable in modern astronomy. Center for Computational Astrophysics (CfCA) at National Astronomical Observatory of Japan runs a unique supercomputer system dedicated to astronomy. Here we introduce CfCA and its supercomputer system.