

N体シミュレーション晩夏の学校

小久保 英一郎

〈国立天文台理論天文学研究系・天文学データ解析計算センター 〒181-8588 三鷹市大沢 2-21-1〉

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

2001年8月末、国立天文台三鷹キャンパスでN体シミュレーション晩夏の学校が開催された。学校では銀河や星団などの重力多体系のダイナミクスを調べるのに有効な手法であるN体シミュレーションの实地指導を行なった。学校の概要をここに報告する。

1. はじめに

「来年は多体シミュレーションの学校をやったらどうだろうか」数値天体物理学夏の学校事務局の一人の富阪幸治氏から言われたのは2000年の晩秋のことだった。数値天体物理学夏の学校は流体シミュレーションについての学校で、2000年夏秋に開催され多くの参加者を集めていた¹⁾。「そうですね、来年は天文台にGRAPEが導入されるからいい機会ですね」当時、天文学データ解析計算センターで重力多体問題専用計算機GRAPE導入の準備をしていた著者は答えた。ここから多体つまりN体シミュレーションの学校の企画は始まった。

そしてその約1年後、N体シミュレーション晩夏の学校は国立天文台データ解析計算センター主催で国立天文台三鷹キャンパスで開催された。本稿ではN体シミュレーション晩夏の学校とはどのようなものだったのか紹介させていただく。次回参加したいと考えている方は参考にいただきたい。

2. 開校の目的

スーパーコンピュータなどを駆使して行なわれるシミュレーション（数値実験）天文学は観測天文学、理論天文学に続く第3の天文学として現代天文学では欠かせない分野になっている。シミュレーション天文学の2大分野は流体シミュレーションと多体（N体）シミュレーションである。簡単に言

えば、流体シミュレーションはガスのシミュレーション、N体シミュレーションは粒子系（恒星系）のシミュレーションである。これらのシミュレーションでは問題とする系の基礎方程式（連続の式や運動方程式など）である偏微分方程式や常微分方程式を数値的に解くことによって系のふるまいを調べる。

現在の大学（院）の天文学の教程では時間的・人材的制約から実際のシミュレーション手法まで教えることは不可能に近い。そこで数値天体物理学夏の学校事務局はシミュレーション天文学の分野での若手の育成を目的に、数値天体物理学夏の学校（2000年、2001年）を開催した¹⁾。そこでは流体シミュレーションの手法を学ぶ機会を提供した。

N体シミュレーション晩夏の学校はN体シミュレーションの基礎を学ぶための学校である。その趣旨は1stサーキュラーに端的に表現されている。すなわち「銀河団、銀河、星団、微惑星系、惑星リングなどは重力多体系と考えられます。これらの系の構造や進化を調べるのには、構成粒子の運動方程式を数値的に積分して系の時間発展を調べるN体シミュレーションが強力な武器となります。国立天文台天文学データ解析計算センターでは今年1月から重力多体問題専用計算機GRAPEシステム（愛称MUV）の共同利用を開始しました。GRAPEはN体シミュレーションの中でもっとも計算量の大きい重力相互作用の部分を超高速で計算するハードウェアです。GRAPEを使えばこれまで不可能だ

った大規模な N 体シミュレーションが可能になります。 N 体シミュレーションのおもしろさ知ってもらい、MUV のさらなる有効活用を促進するために今回、 N 体シミュレーション晩夏の学校を企画しました。学校では重力多体系の基礎物理、 N 体シミュレーションの基礎を講義し、

GRAPE を用いた N 体シミュレーションの実地指導を行なう予定です。今回は入門篇で初学者が対象となります。」である。

2. MUV (国立天文台 GRAPE システム)

学校の内容の紹介の前に簡単に MUV の紹介をさせていただく。国立天文台では 2001 年 1 月のスーパーコンピュータシステムのリプレイスのさいに GRAPE (GRAvity PipE) システムを導入した。学校の趣旨に書いてあるように GRAPE は N 体シミュレーションの加速装置で、粒子の質量と位置から重力相互作用を超高速で計算することができる²⁾。天文台 GRAPE システムは三鷹キャンパス本館地下に配置され、MUV (Mitaka Underground Vineyard) と呼ばれユーザに親しまれている。現在の MUV システムは高速ネットワーク Myrinet2000 で継れた 16 台の Alpha ワークステーションと GRAPE-5 (ピーク演算性能 40Gflops) から構成されている (2002 年早春にはさらに 8 台の GRAPE-6 が導入される予定)。このシステムは世界でも類を見ない、そして最高性能の N 体シミュレーション支援システムである (詳しくは

8 月 29 日

09:30-09:45	開校の辞
09:45-12:00	[講義 1] N 体シミュレーションの基礎 (牧野)
12:00-13:00	昼食
13:00-16:30	[実習 1] N 体シミュレーションプログラムの実装 (小久保)
17:00-18:00	[特別講義] 理論天文学の考え方 (杉本)
18:00-18:30	[見学] 天文台 GRAPE (MUV) システム
19:00-	懇親会
8 月 30 日	
09:30-11:00	[講義 2] 重力多体系の物理の基礎 (牧野)
11:00-12:00	[講義 3] 重力多体問題専用計算機 GRAPE (川井)
12:00-13:00	昼食
13:00-17:00	[実習 2] GRAPE を用いた N 体シミュレーション (福重)
17:30-18:30	[講義 4] 高度な N 体シミュレーション法, 他 (牧野/福重/小久保)

<http://www.cc.nao.ac.jp/muv/>を見ていただきたい)。MUV は共同利用に供されている。つまり、研究プロポーザルを通せば誰でも使うことが可能である。

3. 時間割

晩夏の学校は 2001 年 8 月 29・30 日の 2 日間に渡って開催された。学校では N 体シミュレーションに関する講義と実習が行なわれた。講義、実習では東京大学 GRAPE 開発チームの全面的協力を得た。学校の時間割は上のようなものだった。() 内は担当者名。

時間割は基本的に午前は講義、午後は実習という構成であった。講義は 5 コマ、実習は 2 コマあった。それぞれの内容を簡単に紹介しよう。講義 1 では N 体シミュレーションの中核である常微分方程式の数値積分の基礎を講義した。簡単な例を使って積分公式の次数やその誤差について取り上げている。講義 2 は重力多体系の進化を記述するボルツマン方程式に始まり、力学平衡や 2 体緩和などの重力多体系の基礎物理を取り上げた。講義 3 は本学校のユニークなもので GRAPE ハードウェアの仕組みと使い方についてである。そして今回の

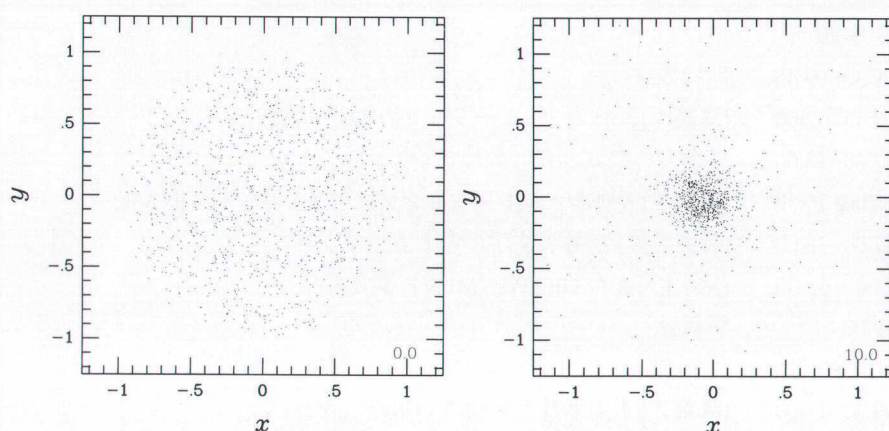


図1
cold collapse の N 体シミュレーションの例。初期状態（左）と自己重力によってつぶれた後の状態（右）のスナップショット。生徒はこのようなシミュレーションが可能になる。

実習では取り上げなかったより高度な N 体シミュレーションの手法について講義4で紹介している。高次の積分公式、時間刻みの工夫、ツリー法などの高速な相互重力の計算法などについてである。また、特別講義ではより高い見地から理論・シミュレーション天文学はどのように進めるべきかについて重力多体系の研究を例にして解説した。

実習1では cold collapse 問題を例として N 体シミュレーションの流れを体験した（図1）。

cold collapse 問題とは、速度分散の小さな恒星系が自己重力によってつぶれてどのような分布になるかを調べる問題である。まず、シミュレーションの初期条件を作り、数値積分法を実装し、シミュレーション結果を可視化して解析した。数値積分法としては2次精度の leap-frog 法を使った。実習2では実習1で書いたプログラムを GRAPE-5 を使うように改良し、大粒子数を使い銀河どうしの衝突実験を行なった。実習でのプログラミングにはC言語を使ってみた。この学校で初めてC言語を使うという生徒も何人かいたが、これが意外に好評であった。

なお、晩夏の学校のテキストは上記 MUV ホームページにおいてあるので、興味のある方は見ていただきたい。実習1に関しては手元のパーソナルコンピュータを使って行なうことが可能である。

4. 授業風景

生徒は18名で、大学院生から大学教授まで広い研究者層からの参加があった。この生徒の定員は GRAPE の台数による制限である。この制限のために今回は参加を諦めてもらった参加希望者は10人を越えた。大変申し訳なく思っている。講義については定員はなく、誰でも聴講可能とした。講義だけの聴講者も含めると参加者は50人以上になる。この種の学校の需要が大きいということを感じさせられた。講義にはコスモス会館会議室を、実習には共同利用計算機室を使用した（図2, 3, 4）。

生徒は N 体シミュレーションの初心者ばかりであった。皆とても熱心で、実習（バグとり）は放課後も続き深夜（早朝!）にまで及んだ。最終的には、一部こちらの用意したサンプルプログラムを使ってもらうなどして強引ながらも、生徒全員が GRAPE を用いた銀河衝突実験まで到達することができた。生徒の皆さんそしてTAの皆さんお疲れさまでした。

5. おわりに

学校スタッフもこのような試みは初めてでいろいろ不手際なことはあった。一番の反省点は学校の内容が盛りだくさんの割に期間が短かったことである。生徒のアンケート調査でも、「学校をもっと少し長くして欲しい」という意見が多かった。こ

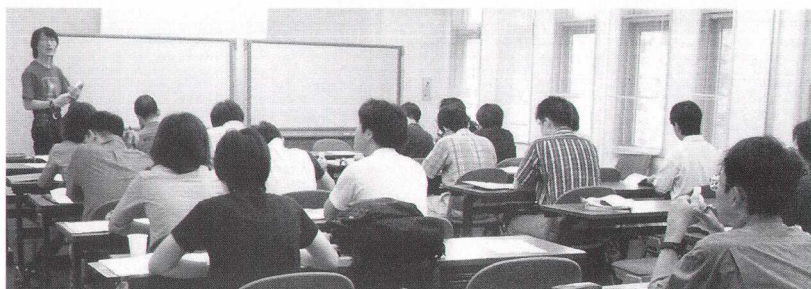


図2 講義風景 「そもそも2体緩和とはね」

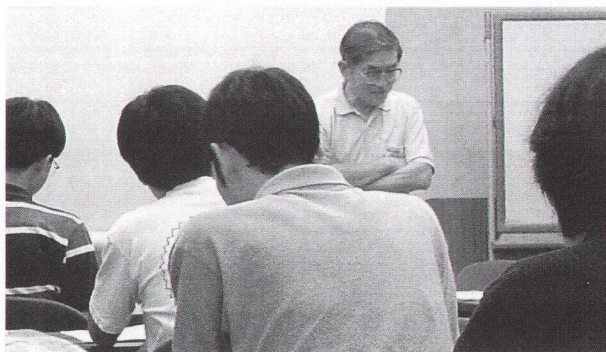


図3 講義風景 「計算しました、というだけではねえ」



図4 実習風景 「グローバル変数は使わないようにしましょう」

れは次回に活かしたいと思う。また、講義4の高度な N 体シミュレーション法にもっと時間をさいて欲しいという声が多かった。これは初級者ではなく中級者対象の学校でじっくり取り上げていきたいと思っている。天文学データ解析計算センターでは来年度も N 体シミュレーションの学校の開催を予定している。御期待いただきたい。

この学校の企画・開催にあったては、数値天体物理学夏の学校事務局に貴重なアドバイスと激励

をいただいた。ここに感謝させていただく。また、この学校の費用の一部は国立天文台の共同利用予算から補助を受けている。

最後にアンケートの一部を紹介させてもらう。このような声を聞けるのは学校スタッフ

として何よりもうれしいことだ。この学校の卒業生が将来この学校で学んだことを活かしてすばらしい研究をしてくれることを祈りつつ報告を終る。

「実際に講義していただいたことでいつもより何倍も知識が身についた気がしますし、これからこの分野への研究意欲が湧いてきました」

「意外に簡単に動くことに驚きました。GRAPEのファンになりそうです」

〈 N 体シミュレーション晩夏の学校スタッフ〉

名誉校長	杉本 大一郎 (放送大学)
教頭	牧野 淳一郎 (東京大学)
教諭	福重 俊幸 (東京大学)
教諭	小久保 英一郎 (国立天文台)
教諭	川井 敦 (理化学研究所)

参 考 文 献

- 1) 大原 謙一, 富阪 幸治, 花輪 知幸, 2001, 「天文月報」 94, 28
- 2) 例えば, 杉本 大一郎 編「専用計算機によるシミュレーション」, 1994, 朝倉書店

Late Summer School on N -Body Simulation Eiichiro KOKUBO

National Astronomical Observatory

Abstract: Astronomical Data Analysis Center of NAO organized a summer school on N -body simulation in the end of August 2001. In the school, students learn basic physics of many-body systems and practice the technique of N -body simulation. I report the outline of the school.