

国立天文台ニュース

National Astronomical Observatory of Japan

2017年10月1日 No.291

特集

CfCA・天文シミュレーションプロジェクト ～理論の望遠鏡が観る宇宙～



- 天文シミュレーションプロジェクト：基本の「き」
- 計算機の中の宇宙
- 天文シミュレーション画像Gallery
- 「理論の望遠鏡」は多彩な分野で大活躍！
- スーパーコンピュータと共に進化するシミュレーション
- 対談「理論の望遠鏡の作り方」

10
2017

- 表紙
- 国立天文台カレンダー

03

特集 CfCA (Center for Computational Astrophysics) 天文シミュレーションプロジェクト～理論の望遠鏡が観る宇宙～

04

- 天文シミュレーションプロジェクト：基本の「き」
インタビュー：ダルマくん／小久保英一郎 (CfCAプロジェクト長)

12

- 計算機の中の宇宙
 - 01 ダークマターハローの形成・進化 (大規模構造の形成)
 - 02 微惑星の形成
 - 03 土星リングの力学 (プロペラ構造)
 - 04 中性子星合体からの電磁波放射
 - 05 銀河衝突 (斜め衝突の場合)
 - 06 小惑星カリクローを取り巻くさざ波の環
 - 07 天の川銀河紀行

20

- 天文シミュレーション画像 Gallery

22

- 「理論の望遠鏡」は多彩な分野で大活躍！
 - アテルイで解き明かす大質量星の形成現場 井上剛志 (名古屋大学)
 - アテルイとTMTのコラボレーション 白田知史、楠本 弘 (TMT推進室)
 - 子ども達に押し出された巨人～太陽系外惑星系における謎の解明～ 萩原正博 (理論研究部)
 - アテルイが謎の超高光度X線バルサーの正体をあばく 川島朋尚 (理論研究部)
 - 磁気リコネクションにおける新しい軌道要素の発見 銭谷誠司 (京都大学)
 - ブラックホールを観る！アテルイの中の降着円盤 高橋博之 (CfCA)
 - アテルイで探る超新星からの重力波とニュートリノ 滝脇知也 (理論研究部／CfCA)
 - 銀河構造と星形成をつなぐ 馬場淳一 (JASMINE 検討室)
 - GRAPE-DRで土星リングの起源に迫る 兵頭龍樹 (東京工業大学／Institut de Physique du Globe de Paris)
 - 星団の多様性の起源を探る 藤井通子 (東京大学)
 - 高分解能な望遠鏡時代の高分解能なシミュレーション 松本倫明 (法政大学)
 - 計算サーバで迫る、かに星雲の正体 守屋 亮 (理論研究部)
 - シミュレーション天文学で探る小惑星イトカワの昔の姿 脇田 茂 (CfCA)
 - A Pathfinder for Coronal Heating
～Combining IRIS／Hinode observations and ATERUI modelling～
Patrick Antolin (University of St Andrews)
- スーパーコンピュータと共に進化するシミュレーション
 - N体シミュレーションの発展 石山智明 (千葉大学)
 - 格子シミュレーションの発展：抽象モデルから精密観測との比較へ
滝脇知也 (理論研究部／CfCA)
- 対談「理論の望遠鏡の作り方」
観山正見 (広島大学／前国立天文台長) × 小久保英一郎 (CfCAプロジェクト長)

30

おしらせ

- 国立天文台に東京消防庁三鷹消防署長より感謝状贈呈 小野智子 (天文情報センター)
- 人事異動／編集後記／次号予告

32

39

39

40

シリーズ「アルマ望遠鏡観測ファイル」19

秋の空に浮かぶフォーマルハウトの環

平松正顕 (チリ観測所) / 日下部展彦 (アストロバイオロジーセンター)



表紙画像

スーパーコンピュータ「アテルイ」が描き出した宇宙の大規模構造と、それを眺めるCfCAのマスコットキャラクター・アテルイくんとダルマくん (クレジット：大規模構造／石山智明、中山弘敬、4D2U Project, NAOJ, アテルイくんとダルマくん／木村優子)。

背景星図 (千葉市立郷土博物館)
渦巻銀河 M81 画像 (すばる望遠鏡)

特別附録！

CfCA スペシャル・ポスターを同封します！

今月号の特集「CfCA・天文シミュレーションプロジェクト～理論の望遠鏡が観る宇宙～」のスペシャル・ポスターをお届けします (※台外発送のみ)。



国立天文台カレンダー

2017年9月

- 1日 (金) 先端技術専門委員会
- 2日 (土) 4D2Uシアター公開 (三鷹)
- 7日 (木) 幹事会議 (於岡山観測所)
- 8日 (金) 幹事会議 (於岡山観測所) / 4D2Uシアター公開&観望会 (三鷹)
- 9日 (土) 4D2Uシアター公開 (三鷹)
- 15日 (金) プロジェクト会議
- 16日 (土) 4D2Uシアター公開 (三鷹)
- 22日 (金) 幹事会議
- 23日 (土) 観望会 (三鷹)
- 26日 (火) 光赤外専門委員会

2017年10月

- 5日 (木) 幹事会議
- 7日 (土) 4D2Uシアター公開 (三鷹)
- 13日 (金) 三鷹・星と宇宙の日 (特別公開)
- 14日 (土) 三鷹・星と宇宙の日 (特別公開)
- 18日 (水) プロジェクト会議
- 21日 (土) 4D2Uシアター公開 (三鷹)
- 23日 (月) 防災訓練 (三鷹)
- 25日 (水) 幹事会議 / 天文データ専門委員会
- 26日 (木) 研究交流委員会
- 28日 (土) 観望会 (三鷹)

2017年11月

- 4日 (土) 4D2Uシアター公開 (三鷹)
- 6日 (月) 運営会議
- 8日 (水) 幹事会議
- 10日 (金) 4D2Uシアター公開&観望会 (三鷹)
- 11日 (土)・18日 (土) 4D2Uシアター公開 (三鷹)
- 20日 (月) 太陽天体プラズマ専門委員会
- 25日 (土) 観望会 (三鷹)
- 29日 (水) 幹事会議
- 30日 (木) プロジェクト会議

特集



天文シミュレーションプロジェクト

「観測」「理論」と並んで、計算機の中で天体現象を「実験」するシミュレーション天文学は、計算機能力の飛躍的な向上にともなって、いまや天文学に欠かせない分野となっています。ここでは、天文シミュレーションプロジェクト (CfCA) の研究を紹介しながら、「理論の望遠鏡」が切り拓く宇宙の姿を、CfCAのマスコットキャラクター、アテルイクンとダルマくんがご紹介します。

- 制作協力
天文シミュレーションプロジェクト (CfCA)

アテルイクンとは？

CfCAのマスコットキャラクター。水沢キャンパスのスーパーコンピュータ室で日夜宇宙の計算をし続けている働き者。人の言葉は話せないが、ダルマくんとは意思疎通ができる。

ダルマくんとは？

アテルイクンのお守り役であり通訳。CfCAの研究者によって三鷹キャンパス近くのお寺から連れてこられた。いつもアテルイクンの「安定運用」を願っている。

理論の望遠鏡が
観る宇宙



天文シミュレーションプロジェクト：基本の「き」

なんだか難しそうだな、と思われがちな「シミュレーション天文学」。望遠鏡の運用のお話は聞いたことがあるけれど、スーパーコンピュータの運用って何をするの？ スーパーコンピュータで宇宙を観るってどういうこと？ アテルイクんの相棒であるダルマくんが、小久保英一郎プロジェクト長に CfCA の基本の「き」から質問します。

たくさん質問してもいいですか？



はい、何でも聞いてください。

Q1 小久保さんやCfCAのお仕事って？

ダルマ (以下「ダ」)：小久保プロジェクト長、今日はよろしくお願ひします。アテルイクんは人間の言葉がわからない設定なので、かわりに僕が色々質問しますね。まずは、小久保さんはCfCAでどんなお仕事をしているのか教えてください。

小久保 (以下「小」)：僕は、天文シミュレーションプロジェクトのプロジェクト長、責任者を務めています。プロジェクトの皆をまとめて、仕事が円滑にできるようにしています。

ダ：CfCAには、小久保さんの他に、どんなお仕事をしている人たちがいるんですか？

小：CfCAではスーパーコンピュータの運用をしています。CfCAのスタッフには、そのスーパーコンピュータを動かしている人たちが、それを使ってシミュレーションで研究をしている人がいます。

ダ：スーパーコンピュータを「動かす」っ

て、どういう仕事なんでしょう？

小：国立天文台にあるスーパーコンピュータは、日本中、世界中のたくさんの天文学者が使っています。そのため、みんなが使いたい仕組みが必要です。その仕組みを作ったり、その仕組みがうまく動いているかどうかを日々確認したりしています。これがコンピュータを動かす、つまり運用する仕事です。このような仕事を、コンピュータのメーカーの方と協力して行っています。

ダ：どれくらいの人たちが、アテルイクんたちCfCAのコンピュータシステムの運用やサポートをしているんですか？

小：CfCAの運用スタッフは15人です。ほとんどの人が三鷹にいますけれど、水沢にもいます（2017年10月時点では、CfCAの水沢スタッフは1名）。メーカーの方は4、5人ぐらいが担当しています。

ダ：メーカーの方々は、どんなお仕事をされているんでしょうか？

小：メーカーのスタッフは、皆さんエンジニアの方々です。アテルイクんのお世話、健康管理などを行っています。基本的に健康管理は、ネットワーク越しにアテルイクんの調子が悪くないかどうかをずっと見ていますが、月に一度は現地（水沢）に行って、アテルイクんが元気になっているかどうかチェックをしています。

ダ：アテルイクんは、水沢で一人黙々と計算をしています。もし故障してしまった場合はどうするのでしょうか？ すぐに対応ができるんでしょうか？

小：故障の種類によりますが、アテルイクんの中には計算するコア（★）がいっぱい入っていて、どこかおかしい！ となったら、まずはネットワーク越しに故障した部分を使わないように設定して、予備のコアに切り替えます。それでも足りないぐらいに多くのコアが壊れたら、故障した部分を切り離します。故障をしても計算をするコアはたくさんあるので、計算を続けることができます。ですが、どうしてもダメなときは、直接水沢に行って、基板を取り替えたりします。でも最近はハードウェアが

壊れるということはあまりないです。毎日健康管理していますから。絶えずアテルイくんを見守って、健康にしています。

★CPUの中で実際に計算を行う部分で、コンピュータの頭脳にあたります。1つのCPUに複数のコアをもつ「マルチコアCPU」が最近では多く用いられており、アテルイで使われているCPUは1つあたり12個のコアを有しています。

ダ：CfCAに所属するスタッフのみなさんは、コンピュータ関連の分野を専門とした方々なんですか？

小：いいえ、CfCAのスタッフたちは、大学でコンピュータの勉強をしたという人たちではなく、みんな基本的には天文学の勉強をしていた人たちです。専門は天文学でも、コンピュータが好きな人や得意とする人がCfCAのスタッフには多いですね。CfCAに来てからコンピュータが得意になった人もいます。

ダ：天文学者がコンピュータの運用をする、どんないいことがあるんですか？

小：やっぱり、自分たちが使う側でもあるので、天文学者にとって本当に使いやすいものを作れることだと思います。それから、天文台の職員が運用すると、コストパフォーマンスもよいし、メンテナンスもしやすい。だから、何かあったときにすぐに対応できるところがよいですね。

ダ：じゃあ、悪いところってありますか？

小：悪いところは、人を選ぶ仕事だということです。コンピュータの仕事に向いている人でなければできません。幸いなことに、これまではみんなコンピュータに関する仕事が好きな人や得意とする人が、ずっとスタッフとして働いてきていたのでやってこられました。それから、自分たちで運用の作業を行うということは、そのぶん自由な研究の時間がとられるということです。ただ、観測をする天文学者は、望遠鏡や装置を自分たちで作るわけです。だから、シミュレーションをする人がコンピュータを自分で作ったり世話をしたりするのは、天文学の学問としては、そんなに変なことではなくて、むしろ普通かもしれない。

ダ：小久保さんも、これまでにコンピュータを作ってこられたんですか？

小：僕はそういうコンピュータを作る研究

室で育ちました。実際に修士課程では天文学用のコンピュータを作るというのが僕の修士論文でした。当時先生は、**天文学者は望遠鏡を作るんだから理論の研究をやる天文学者がコンピュータを作ったって当たり前だろう、って言ってました。**だから、僕は天文学者がコンピュータを作ったり運用したりすることに対して嫌だなあとは思わないし、当然じゃないかなと思ってきました(06ページ参照)。

Q2 どうしてスパコンが水沢に？

小：何で水沢にあるか聞かないの？

ダ：あ、じゃあ聞きます。ええっと、なんでアテルイくんは水沢にいるんですか？

小：アテルイくんは、食べた電気をほとんどみんな計算に使っています。皆さんも頭をつかうと頭が熱くなったりすると思いますが、アテルイくんも同じように計算をしていると熱くなってきます。食べた電気を計算に使うことで熱に変えるんです。熱くなると答えを間違えたり、壊れてしまったりするので冷まさないといけない。最近の大きいコンピュータはみんな水冷式です。**冷たい水を通したパイプでCPUの周りの空気を冷やしたり、熱伝導を使うことでCPUの熱を逃して冷やしているんです。**つまり、アテルイくんの周りが寒いほうが冷やしやすいわけです。アテルイくんの前のスーパーコンピュータまでは東京に置か

れていましたが、より冷やしやすいいちところが良いだろうということで、アテルイくんの代から水沢に行くことになりました。

ダ：たくさん計算しているアテルイくんは、たくさん食費(電気代)もかかるんですよね……？

小：だいたい、月600万円ぐらい食費がかかっています。タダじゃないですね。その電気のほとんどがCPUにかかる電気と、水冷にかかる部分で使われています。アテルイくんのいる部屋の空調にも電気代はかかりますが、アテルイくん自身にかかる電気代と比較するとそんなにかかっていません。

ダ：実はアテルイくんの食費については特別公開で、とってもよく質問されるんですよね。600万円ですかー、よく食べますねえ、アテルイくん……。

ダ：ところで、「アテルイ」という不思議な名前も、水沢に関係が深い名前なんですよ。

小：水沢キャンパスがある奥州市の付近には、平安時代の頃、大和朝廷に対抗していた地元勢力があったんです。その蝦夷(えみし)と言われていた人たちのリーダーの名前が「アテルイ」といいます。とても少ない人数で、朝廷を相手に戦ったわけです。しかも、対抗し続けて何十年も持ちこたえました。地元の地形を熟知して、知恵を使って対抗した「アテルイ」は水沢の英雄なんです。僕は水沢にスーパーコンピュータを置くことが前の台長(★)の英



アテルイで実際に使われているブレード。1つのブレードには8個のCPUが搭載され、1つの筐体あたり48枚のブレードが差し込まれている、アテルイくんの「内臓」である。

計算サーバの組み立て作業

CfCAで運用している計算機の中で、「GRAPE」や「計算サーバ」、また計算したデータをためておく「ファイルサーバ」や解析のための可視化などを行う「解析サーバ」は、CfCAのスタッフの手によって組み立てられます。ここでは2017年春に行われた計算サーバ組み立て作業の様相をご紹介します。



計算サーバのノードの組立作業中。計算サーバのノードひとつひとつは、一般的なパソコンと変わりません。マザーボードやCPU、メモリなど、それぞれ都合の良いものを買って揃え、CfCAのメンバーで組み立てます。この写真は流れ作業で組み立てているところです。



出来上がったノードは、メタルラックに並べられます。通気性をよくするため、ノードはPCケースに入れずにむき出しの状態です。扇風機や空調を使って風をあてることで、計算によって発生する熱を取り除きます。



並べ終わったら、電源の設置とケーブルの配線作業。ネットワークケーブルや電源ケーブル、モニタと接続するためのVGAケーブルなど、誰が何を配線するか役割分担して作業しますが、計画的に配線を行わないとこんがらがってしまうので気をつけなければなりません。配線は、今後のメンテナンスの効率にも影響する大切な作業です。



配線は、作業する人によってその見目が大きく変わります。上は美しく整った青いLANケーブルの流れ（研究支援員Hさん作）、下はLANケーブルを使った現代芸術（研究支援員Tさん作）です。



このようにして出来上がったものがこちら。真ん中に見えるラック1台分、32ノードがこの春に組み立てられました。毎年少しずつ組み立ててノード数を増やしていき、2017年春の組み立てを終えた時点で、224ノードの計算システムとなりました。



稼働する計算サーバ。計算を行うことでCPUから発生する熱を除去するために、このようにいくつもの扇風機で機材に風をあてます。さらに強力な空調を使って計算機室の温度をいつも一定に保っています。計算機室はいつも計算機のファンや扇風機、空調の風と音で満たされています。

断で決まったときから、もうこれは名前をアテルイにしよう、とずっと思っていて。アテルイの勇気とか行動力にあやかって、宇宙のすごい謎に挑んでほしい、という意味をこめて「アテルイ」と名付けました。

★観山正見 現・広島大学特任教授、p.32「『理論の望遠鏡』の作り方」参照。

ダ: アテルイっていう名前をもっと知ってもらいたいです。岩手の人たちには馴染み深い名前だけど、他の地方では聞いたことがない人たちが多岐みたいで。間違われることも多くて……。

小: 僕も東北人なので、アテルイに対しては思い入れがあるんです。

Q3 シミュレーション天文学ってどんな学問？

ダ: どうして国立天文台にはスパコンがあって、天文学にはスーパーコンピュータが必要なんですか？

小: あれ、アテルイくんとダルマくんは知らないの？

ダ: 宇宙のことを計算しているのは知っているけれど、どうして国立天文台に呼ばれたのかまでは……。教えてください。

小: 天文学は、宇宙のことを調べる学問で、望遠鏡を使って宇宙を観るとするのが基本にあります。でも、望遠鏡では見えないもの、わからないものもあります。例えば、46億年前に太陽が生まれて地球ができたときのことは昔のことだから、望遠鏡では見ることができないですね。他にも、星が爆発する瞬間に、その星の中では何が起きているのかとか、ブラックホールってどんな天体なのかとか……。そういう望遠鏡で見ることができない天体を調べるには、僕らの知っている物理法則が役に立ちます。この物理法則は数式で書かれているものです。この式をコンピュータを使って解く。そうすると、物理の法則によって宇宙でどんなことが起きるのかわかります。こうして宇宙の謎を解くために、国立天文台にスーパーコンピュータが必要なんです。このような手法の天文学を「シミュレーション天文学」と呼んでいます。

ダ: 「理論天文学」っていう言葉もありますが、シミュレーション天文学とは違うんですか？

小: 兄弟みたいなもので、理論天文学も同じように望遠鏡を使うのではなくて、物理を使って宇宙で起きていることを考えたり調べたりします。よく「紙と鉛筆」って言いますが、人の手で解ける計算をして調べるのが理論天文学と言われるものです。だけど、紙と鉛筆ではできない計算もあります。そのような計算の中にはコンピュータを使えば解けるものがあり、それがシミュレーション天文学と呼ばれている部分です。理論天文学のある部分が発展して規模が大きくなり、シミュレーション天文学と呼ばれるようになったということですかね。

ダ: 目で見ることができなくて、手で計算もできないところに踏み込んでいった天文学が「シミュレーション天文学」なんですね！

小: あと、わかりやすく言っているのが「実験」。科学では実験が大切です。天文学では望遠鏡を使って観測をしますが、実験もできたらいいですね。学校の理科室でやるような実験がしたくても、宇宙はあまりにもスケールが大きい。時間も質量も空間もエネルギーも、とても大きく理科室では再現できません。そこで、実際の「物」を使って実験するのではなく、コンピュータの中で物理の法則を使って計算することで実験する。これが「シミュレーション」なんです。

ダ: シミュレーション天文学は、どんな謎を解くのが得意なんですか？

小: 例えば、望遠鏡では「今の宇宙」を見ることになるわけです。だけど、計算をすることで、天体がどうやって生まれてどう進化していくかという「時間進化」を扱うことができます。観測は、ひとつの天体が進化する様子を観察することはできませんが、様々な時代の天体を見て、その種類の天体の一生がどうなっているのかが見ることが出来ます。一方、コンピュータを使って実験をすれば、ひとつの天体が生まれてから死ぬまでの進化を追っていくことができるわけです。

ダ: じゃあ逆に、シミュレーション天文学の苦手なことは何ですか？

小: 苦手というか問題なのは、あくまでもシミュレーションの設定は人が行うということです。だから、実は何か設定を忘れていたりもしない。僕らは今わかっている

物理の法則を使って計算をしています、もしかしたら、その法則が当てはまらないようなこともあるかもしれない。なので、人が実験装置を準備するということでも、いかようにも間違えます。

ダ: シミュレーション天文学の研究者の方々は、どうやってその問題をクリアしようとしているんでしょう？

小: そこはすごく難しいところです。もちろん、わかっている法則を全部入れて、なるべく現実に近い計算をするのが一番いいんですけど、今一番速いスーパーコンピュータをしても、それはまだ無理です。

ダ: つまり、アテルイくんでも無理なんですね。

小: そう、アテルイくんでもできない。じゃあどうするかというと、その天体の見たい現象でいちばん重要だと考えられる部分を取り出してきてその効果を調べる、ということをしています。残念ながら、解く問題のある程度簡単にして、コンピュータが計算できるぐらいにしてあげないといけない。この一番重要な本質の部分の取り出し方が大事で、それは研究者の経験やセンスで決まります。腕の見せどころです。

Q4 スーパーコンピュータって、どうやって計算をするの？

ダ: CfCAの計算機を使ってシミュレーションをするにはどうしたらいいんでしょう？

小: 国立天文台にはいろいろな望遠鏡があります。これらの望遠鏡を使うときにはどうしているかということ、こういう観測をしてこういう研究がしたい、この観測は天文学にこんなふうに大事なので時間をください、という観測提案書を出します。そして採択されたものが観測されます。CfCAの計算機で計算するときも同じことをします。こういう計算をしたい、この計算は天文学に大事なんですよ、という申請が必要です。これが審査を受けて認められると、CfCAのコンピュータをタダで使えるようになります。

ダ: タダで！ 太っ腹ですね！

小: 他の研究機関のコンピュータには、お

金を払って使えるところもありますが、我々 CfCA はタダです！

ダ: 選ばれる計算テーマは年間どれぐらいなんですか？

小: 毎年ざっと150ぐらいですね (★)。

★2017年度は、アテルイの利用だけでのべ196の計算課題が採択されました。GRAPE、計算サーバも合わせると全部で253の計算課題が採択されました。

ダ: どういう基準で選んでいるんですか？

小: 天文学的な意義もありますし、アテルイで計算する意味があるのか、アテルイに向いている計算なのか、ということも考慮して計算テーマを選んでいきます。

ダ: アテルイに向いているとは、どういうことなのでしょう？

小: アテルイくんは、並列計算機という種類のスーパーコンピュータなのですが、アテルイくんが得意な計算というのは、同じような計算をたくさん並行して行う計算です。そういう計算ならアテルイくんは休まず計算できます。そうでないものは、他の計算機がやるべき計算です。だから、ちゃんと申請を審査して、アテルイくんでやる意味があるものを選ぶようにしています。

ダ: 申請をするときには、そういう計算の計画も細かく審査されると。

小: はい。他にも自分はこれぐらい計算の準備をしています、という準備状況や、自分のプログラムはこんなに効率がよくてアテルイくんをサボらせないようにしていますよ、ということをしっかり書いてもらわないと、アテルイくんを使えません。

ダ: 100人もの利用者たちが一気にアテルイくんに計算をさせると、アテルイくんはパンクしてしまわないのですか？

小: アテルイくんの中には、コアと呼ばれる計算を行う部分が2万5440個入っています。それを全部一人で使うということはほとんどなくて、何人かで分けて使うんです。僕は1000個使う、この人は2000個使う、というふうに使っています (★)。それでも100人が一度に使うわけではなくて、さらにみんな「列」を作って待っています。どういう意味かと

いうと、次に僕はアテルイくんにこういう計算をさせたい、という自分の計算プログラムを待機列に並べておけるんです。これを「キュー」と呼んでいます。このキューに並べておくと、ひとつの計算が終わると自動的に次の人の計算が始まります。アテルイくんをサボらせないように、どこかのコアが空いたらサッと使うという、アテルイくんをなるべく働かせるちょっと過酷な仕組みができています。なのでアテルイくんのごことは一切休ませない。アテルイくんは多分働いているときは幸せなはずなので、なるべく彼を極限まで幸せにしようとしています。計算はアテルイくんの栄養になっているんじゃないかな。

★計算機の利用申請が採択される際に、申請課題は計算規模によって「カテゴリ」にわけられます。大きな計算を必要とするものはXC-A、中位の規模の計算はXC-B、小規模な計算などはXC-Trialとされます。それぞれのカテゴリによって使用できる最大コア数に上限があり、Largeキューと呼ばれる計算の場合の最大利用可能コア数はXC-Aで12000コア、XC-Bで1296コア、XC-Trialで144コアとなっています。その他、全てのコアを使用して計算をするXC-Sというカテゴリもあり、年に1、2度このカテゴリの計算が行われています。

ダ: なかなか前の人の計算が終わらない、ということもあるのでしょうか？

小: それはですね、ちゃんと時間を決めていきます。例えば半日とか1日とか一定期間やったら次の人の計算が始まるよう、公平になるような仕組みにしています (★)。

★計算の継続時間もカテゴリごとに決まっています。XC-AやXC-Bが8時間、XC-Trialが4時間となっています。

ダ: そういう仕組みを CfCA の人たちと、スーパーコンピュータのメーカーの人たちで作ってるんですね。

小: そうですね。あとはアテルイくんを使っている人たちの意見も聞いて仕組みを作っています。

ダ: それが大事な仕事のひとつなんですね。ところで、そうやって計算した結果って、どういう形になって出てくるんですか？

小: 基本は数字ですね。計算して導かれる答えはみんな数字で、パワー-----と出てくるんです。

ダ: その数字からどうやって天体や宇宙のことを知っていくのでしょうか？

小: 一番簡単にはまず、たぶん皆さんもやったことがあると思いますが、その数字から図やグラフを作ります。縦軸・横軸に計算結果から何かしらの量をとって、2次元や3次元でデータを表示させてみるんです。さらに、簡単なCGみたいなものを作ることもあります。例えば、天体がどのように変化していくのかという計算をしているのであれば、アニメーションを作ってみて、変化していく様子を見る人もいます。

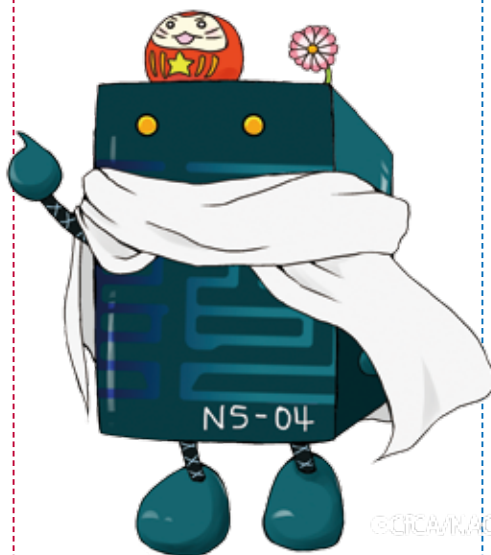
ダ: 数字のデータが出てきてから天体現象を知るまでに、さらにいくつかのプロセスが必要なんですね。

小: そうですね。データは数値だけなので、それをさらに解析して、データをわかりやすくしなければなりません。普通はさらにプログラムを使ったり、すでにある解析ツールを使ってきれいなグラフや絵を作ります。そうすることでシミュレーションで何が起きているか、自分の計算結果がどうなっているか、目で見てわかる形にします。

ダ: 計算して、すぐに4D2Uみたいな映像 (★) が出てくるわけじゃないんですね。

★p.12~18「計算機の中の宇宙」参照。

小: ないです。結果は本当に膨大な数字の羅列で、人が見てもわかるものではありません。ユーザーによっては、データをもう一回スーパーコンピュータで処理してわかりやすくしてから、結果を見る場合もあります。今、どんどんコンピュータが速くなって、大きな計算をたくさん行っているのだから、膨大なデータが出てきます。それを解析して計算結果がわかるようにするのも一苦労。データが大きいから時間もかかります。



ダ: その大きなデータをためておくことができるんですか？

小: はい。この数字の羅列がいっぱい書かれた巨大なファイルをためておくために、大きなハードディスクが必要です。今、CfCAでは**6Pbyte (6000兆byte)**の、ハードディスクのおぼけみたいなものを運用しています。半分手作りで、いろいろ部品を買ってきてはどんどん付け足して大きくなってきたものなんです。このデータストレージを「**ファイルサーバ**」と呼んでいます。アテルイくんが頑張っただけで計算したものは、このファイルサーバにためておきます。さらにそのデータを処理するための、スーパーコンピュータとまではいかないけれども速いサーバがあります（「**解析サーバ**」と呼んでおり、メモリは256GB）。アテルイくんが計算した結果をためて、解析してわかりやすくするところまで、**全部CfCAのシステム**でできるように仕組みができています。

Q5 「天文学専用スーパーコンピュータ」って、どういうこと？

ダ: アテルイは天文学専用のスーパーコンピュータって言われていますが、どういうところが特別なんですか？

小: アテルイくんの生まれ故郷はアメリカなんです。アメリカのクレイという会社で生まれて、日本にきました。アテルイくんの兄弟は世界中にいて、実は同じスーパーコンピュータが世界の様々な機関で運用されています。僕らがアテルイくんを天文学専用と言っているのは、**アテルイくんが行うのは天文学の計算だけ、と僕らが決めているから**なんです。他のスーパーコンピュータで天文学のためだけに運用されているものはあまりありません。**天文学専用のスーパーコンピュータとしては、アテルイくんは世界一速い男**なんです。アテルイくんは、みんなも知ってる京コンピュータ(★)と比べると10分の1の性能です。京コンピュータは宇宙の計算もしますが、工学や化学など、様々な分野のシミュレーションも一緒に行っています。だけど、アテルイくんは天文学専用。だから、天文学では絶大な力をアテルイくんは持っているんです。

★理化学研究所計算科学研究機構が運用するスーパーコンピュータ。理論演算性能は10Pflops。

ダ: アテルイくんは、年間約150テーマを

計算して、これまでの5年間で、のべ750テーマぐらいの計算をしているんですよね？アテルイくんは、どんなすごい発見をしましたか？これはすごいな、という結果はありましたか？

小: うーん……、もう少し、なんだよね。

ダ: あれ？もう少し？

小: たとえば、超新星爆発が起こるためにはどういう物理が必要なのか、というのがわかっては来たけど、まだ現実の超新星爆発のエネルギーには足りていないんです。天の川の構造も現実まではまだもう少し。天の川銀河の星って数千億個あるわけですけど、それを一個一個の星についてちゃんと運動を計算するというのは、**アテルイくんの次のアテルイくんでは……**。

ダ: (えっ、アテルイくんの次のアテルイくん!?)

小: そこまで行きたいな、と思っています。

ダ: じゃあ、シミュレーション天文学が現実をちゃんと再現するには、あともう一歩、という感じなんですね。

小: もちろん扱う問題にもよっていて、天文学者が喜ぶような成果をアテルイくんはたくさん出しています。でも、天文学者以外の方々も喜ぶような、「これがわかった!」と言えるものは、もうちょっとかも

しれないですね。次の世代のスーパーコンピュータが必要です。

Q6 アテルイくんの未来、シミュレーション天文学の未来やいかに？

ダ: アテルイくんは、5年間のお勤めの約束で、2018年の3月で5年目が終わります。5年目が終わっちゃったら、アテルイくんはどうなるんだろう？って気になることところです。

小: 僕らの希望は、もちろんアテルイくんをさらにパワーアップして、もっと大きい「**新アテルイ**」くんを迎える予定です。

ダ: アテルイくんがやってきた頃の、今から4年前と今とでは、スーパーコンピュータは進歩したんでしょうか？

小: そこは難しいところですね。今は、昔ほど年とともに計算速度が速くなるという感じではないんです。最近ちょっと速くなり方が鈍ってしまって。実はアテルイくんはこの4年間の途中で成長して(★)、アテルイから**アテルイ改**になったんですけど……。

★2014年11月プレスリリース「天文学専用スーパーコンピュータ「アテルイ」、さらに2倍の計算速度へ」
<http://www.cfca.nao.ac.jp/pr/20141113>。

ダ: (その名前、小久保さんしか使っていないですよ。)



アテルイのCPU同士をつなぐインターコネクト(高速回線)のケーブル。このケーブルを通してCPU同士が通信を行い、並列計算が可能となる。スーパーコンピュータの「神経」にあたる。

01

ダークマターハローの 形成・進化 (大規模構造の形成)

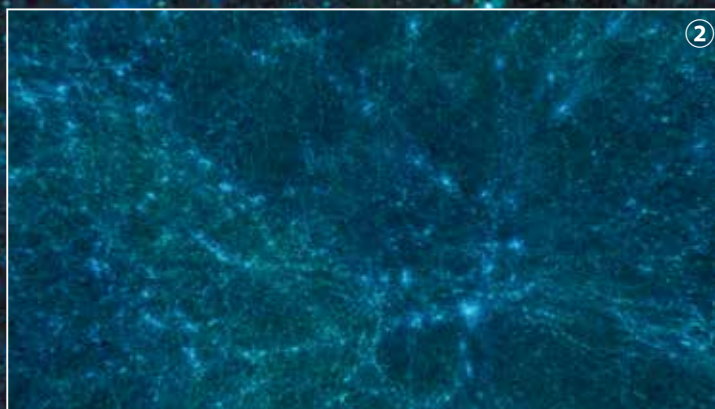
現在の宇宙で最も大きな構造は、銀河どうしの集まりである銀河団が網の目のように繋がった、「宇宙の大規模構造」と呼ばれるものです。この構造のもととなったのは、重力は働くがその正体は未だ不明な「ダークマター」と考えられています。このシミュレーションは、宇宙初期のダークマター密度ゆらぎを約86億の粒子で表現し、重力相互作用による現在までの進化をスーパーコンピュータ「アテルイ」で計算したものです。宇宙初期から現在に至るまでの宇宙の構造形成をダークマターの分布の進化を見てみましょう。

① 宇宙初期にはほとんど一様にダークマターが存在していましたが、わずかな密度のゆらぎがありました。周囲よりも少しでも濃いところは重力が強いために、周りからダークマターをひきつけてますます濃くなり、塊（ハロー）を形成します。初期のダークマターの分布はプランク宇宙望遠鏡によってもたらされた、最新の観測結果に基づいています。

② 小さなダークマターハローがいくつも形成されています。ハローは繰り返し合体、成長していきます。この計算はダークマターの進化のみを計算したものです。実際の宇宙では、大きく成長したハローの中でその重力によって、水素やヘリウムといった星の材料になる物質も濃く集まり、初代星や銀河が生まれます。

③ 現在の宇宙まで成長した様子です。無数の銀河や銀河団ほどの大きさのハロー、そしてハローの集団どうしを結ぶ網目状の構造が見えます。これを「宇宙の大規模構造」と呼びます。

④ 真ん中に見えるダークマターハローは、このシミュレーションでできた最大のハローです。太陽の500兆倍ほどの重さに成長したもので、銀河団に相当します。ハローの周りに漂うより小さいダークマターの塊はサブハローと呼ばれ、銀河団を構成する銀河を宿していると考えられています。



● 数値計算の詳細

計算目的: 標準的宇宙論モデルにおける、ダークマター、銀河、活動銀河核の分布、進化、統計的性質の解明

計算モデル: LCDM

計算に使用した粒子数: 2048³ (約86億) 粒子

使用した計算機: Cray XC30 「アテルイ」

現象の時間スケール: ~138億年

現象の空間スケール: 約210 Mpc

数値計算を行った人: 石山智明 (千葉大学、計算実行時は筑波大学)

○映像クレジット シミュレーション: 石山智明/可視化: 中山弘敬/国立天文台4次元デジタル宇宙プロジェクト (以下4D2U)

★シミュレーションムービー

http://4d2u.nao.ac.jp/t/var/download/DarkMatterHalo2_v2.html

☆プレスリリース

「スーパーコンピュータによる、宇宙初期から現在にいたる世界最大規模のダークマターシミュレーション」

<http://www.cfca.nao.ac.jp/pr/20150501>

02 微惑星の形成

星が誕生する時、星とともにそれを取り巻く原始惑星系円盤とよばれるガス円盤が誕生します。原始惑星系円盤には数ミクロン程度のサイズの固体微粒子（ダスト）が含まれており、ダストの集積を経て惑星が形成されます。その過程でできる、惑星になる途上の数キロメートル程度の天体を「微惑星」とよびます。ダストからどのように微惑星が形成されたかについては、ダスト同士に働く重力の影響によるものとする「重力不安定」説があります。ここでは、重力不安定説に基づいた微惑星形成過程の数値シミュレーションをご紹介します。

- ① このシミュレーションでは、微惑星形成中の細かな構造を調べるために、円盤全体から小さな領域を取り出して計算を行いました。「周期境界条件」とよばれる計算手法を用いています。
- ② ここでは、ダストの塊を白いふわふわの粒で描き表しています。1つの粒は数センチメートルよりも大きなダストの塊に対応します。中心星の重力やダスト間の衝突、ガスとダストの摩擦の影響で、ダストが徐々に円盤の赤道面に集まり、薄いダスト層ができます。ダスト層が薄くなるほどダストが密集し、ダスト同士の重力の影響が強まってきます。
- ③ 淡い縞模様のような構造が見えてきました。ダスト層が非常に薄くなると、ダスト間の重力により濃い部分がより周囲のダストを引き付けようとし、そのため、このような縞模様が形成されます。この現象を「重力不安定」とよびます。
- ④ ③から約1年後の様子です。この頃になると、縞模様の濃い部分の中に、さらに高密度の部分ができます。その1つに近づいて見てみましょう。
- ⑤ 近づくとダストが集まってできた天体であることがわかります。これが「微惑星」です。縞模様の濃い部分ではダスト同士の衝突が激しく重力も強いいため、ダストの集積が一層速まります。こうして微惑星が形成されるのです。
- ⑥ ⑤からさらに1年ほどたつと、微惑星に周囲のダストが集積したために縞模様が消え、微惑星も大きくなります。
- ⑦ 多数の微惑星が形成されたため、微惑星同士の衝突が発生しやすくなります。衝突した微惑星は合体し、1つのより大きな微惑星となります。誕生した微惑星はおよそ1キロメートルから10キロメートル程度です。その後も微惑星同士の衝突は続き、やがて原始惑星へと成長していきます。

● 数値計算の詳細

計算目的：重力不安定による微惑星形成過程の研究

計算モデル：粒子間衝突を考慮した重力多体シミュレーション

計算に使用した粒子数：約15万粒子

使用した計算機：GRAPE-DR

現象の時間スケール：全体で約5年程度

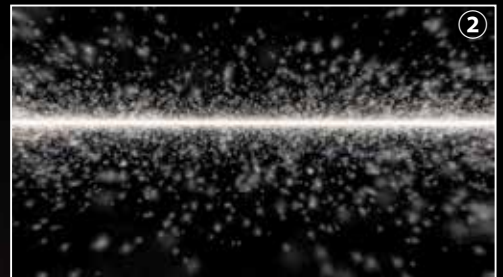
現象の空間スケール：約1万km

数値計算を行った人：道越秀吾（筑波大学、計算実行時は同志社大学、国立天文台）

○映像クレジット シミュレーション：道越秀吾、小久保英一郎／可視化：中山弘敬、榎崎弥生／4D2U

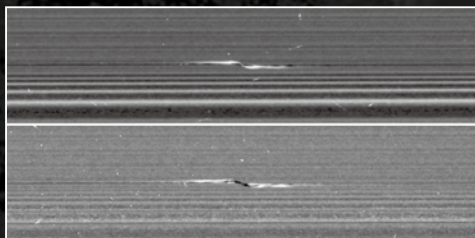
★シミュレーションムービー

<http://4d2u.nao.ac.jp/t/var/download/Planetesimals.html>

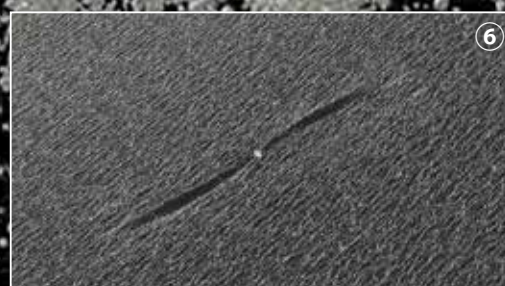
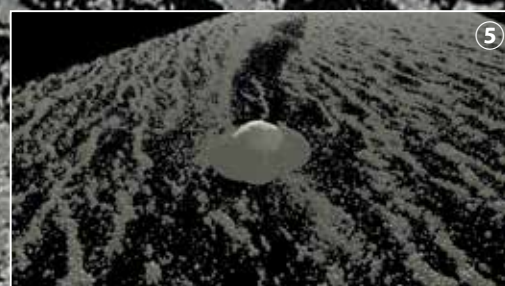
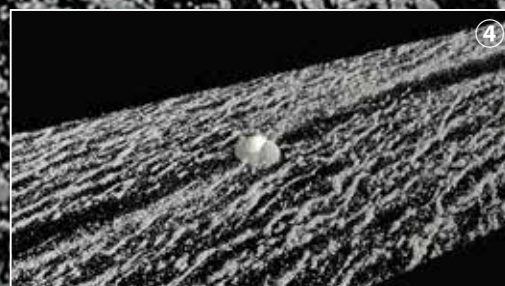
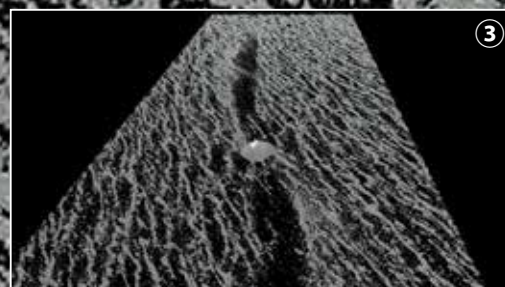
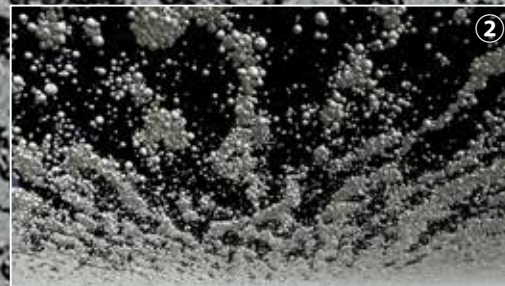


03 土星リングの力学 (プロペラ構造)

美しい土星の環。その正体は無数の数センチメートルから数メートルほどの大きさの無数の氷の粒子です。2017年9月にミッションを終了した土星探査機「カッシーニ」は、土星の環に存在する多様な構造を捉えた画像を送ってきました。その1つに「プロペラ構造」があります。これは、対称な長いしずくのような2つの模様からなる構造で、飛行機やヘリコプターのプロペラのような形をしており、現在までに数多く発見されています。この構造は、環に埋もれた直径数100メートル程度の小さな衛星の作用で作られできていると考えられています。このシミュレーションでは、土星の環を形作る氷粒子と衛星の重力相互作用によって、プロペラ模様が形作られる様子を計算しました。



●土星探査機カッシーニによって観測されたプロペラ構造。回転方向に伸びる2つの小さなしずくのような模様を合わせた構造をしている。大きさは典型的には数100メートルから数千メートル。(クレジット：NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute)



- ① 土星の環は、莫大な数の氷の粒でできていると考えられており、遠くから見ると一様で薄い円盤に見えます。
- ② 近づくと複雑な構造が見えてきます。氷の粒が重力の作用で集まって集団を形成することにより、このような模様ができます。これは「自己重力ウェイク構造」とよばれ、土星の環の広い領域に存在する基本的な構造です。土星の環を作り出している氷粒子のサイズは、数センチから数メートルと考えられています。
- ③ プロペラ構造ができるメカニズムを調べるために、コンピュータシミュレーションを行いました。環の中のごく一部の数千メートルの範囲を抜き出して計算をしています。
- ④ 計算領域の中心には直径100メートル程度の小さな衛星があります。衛星の周囲には自己重力ウェイク構造がみられます。衛星からのびる構造がプロペラです。
- ⑤ 衛星の重力の作用が強いため、周囲の氷の粒が引き寄せられて、衛星の表面に降り積もっているのが見えます。表面に降り積もらない氷の粒も衛星の重力によって動きが乱されます。その影響で衛星からのびる小さな穴ができます。
- ⑥ 環では内側ほど速く、外側ほど遅く回転します。この回転速度の違いにより、衛星の作った穴が、内側では衛星の進行方向前方、外側では後方に引き伸ばされます。これがプロペラのような特徴的な模様を作ります。

●数値計算の詳細

計算目的：土星の環におけるプロペラ形成過程とその条件

計算モデル・計算手法：粒子間衝突を考慮した重力多体シミュレーション

計算に使用した粒子数：約75万粒子

使用した計算機：GRAPE-DR

現象の時間スケール：数日

現象の空間スケール：約10 km

数値計算を行った人：道越秀吾、小久保英一郎（国立天文台）

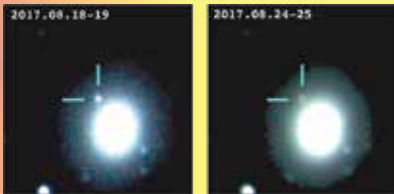
○映像クレジット シミュレーション：道越秀吾、小久保英一郎／可視化：武田隆顕／4D2U

★シミュレーションムービー

<http://4d2u.nao.ac.jp/t/var/download/SaturnRingPropeller.html>

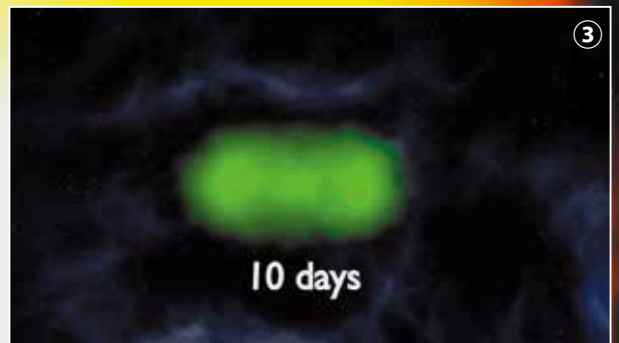
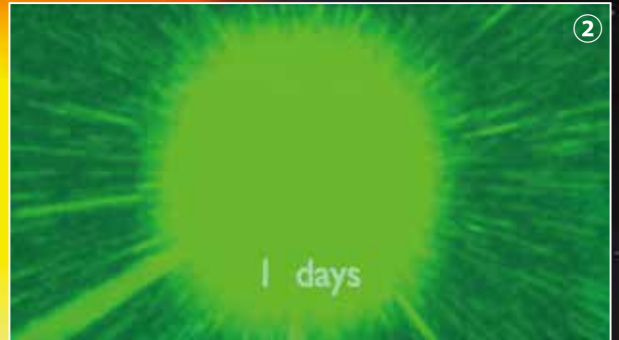
04 中性子星合体 からの 電磁波放射

「中性子星」は極限天体の1つで、太陽の1.4倍の質量をもちながら半径は約10kmしかなく、密度は1cm³あたり1兆kgにも達します。さらに、宇宙では2つの中性子星が合体することもあります。この中性子星が合体する時、重力波が発生します。重力波天体を詳細に調べるためには、重力波だけではなく、電磁波による観測を行うことが重要です。このシミュレーションは、中性子星合体からX線や可視光、電波などの電磁波がどのように放出されるのかを明らかにするために行われました。その結果から、重力波と電磁波の観測を合わせた「マルチメッセンジャー天文学」への道を開くことができたのです。



●2017年8月17日に検出された重力波源 GW170817は、その信号から中性子星合体であることが示唆され、検出直後から行われた電磁波観測によって、対応する天体が発見されました。人類は初めて重力波源の姿を捉えることができたのです。画像は、ハワイのすばる望遠鏡と南アフリカのIRSF望遠鏡によって観測されたGW170817の姿です（三色合成、青：zバンド、緑：Hバンド、赤：K_sバンド）。時間とともに暗くなり、近赤外線では明るく光る（赤く見える）様子がうかがえます。この光の変化の仕方は、まさにアテルイが予測していたものに一致し、大量の重元素が形成されていることが強く示唆されました。（観測画像クレジット：国立天文台/名古屋大学）

- ① 2つの中性子星が重力波を放出しながら、じわじわと距離を縮めていき、最後に合体します。このとき中性子星合体からは重力波が発生し、さらに電磁波が放射されます。
- ② 2つの中性子星が合体すると、星を構成していた物質の一部が宇宙空間に放出されます。放出された物質内で新たな元素の合成が進みます。その中には放射性元素が含まれているため、中性子星合体はその崩壊エネルギーによって明るく輝きます。ここでは放出される光の強さを表しています（放射状に描いているものは、放出される光子のイメージです）。
- ③ 放出された物質は光速の10～20%もの超高速度で膨張していきます。時間とともに密度が小さくなるため、だんだんと放出物質のより内側が見えてきます。合体から15日程度で物質はすかすかになり、光を出さなくなります。
- ④ これは爆発して約3日後の放出された物質が放つ光の色を表しています。この色は、放出された物質の温度によって変わります。中性子星合体で放出される物質から期待される電磁波は可視光線から近赤外線の波長をもち、私たちの目には「赤く」見えるでしょう。
- ⑤ 中性子星合体は非常に非対称な現象で、消えてしまう直前は連星の軌道面から光が出ます。



●数値計算の詳細

計算目的：中性子星合体からの電磁波放射の解明

使用した計算機：Cray XC30「アテルイ」

現象の時間スケール：15日間

現象の空間スケール：およそ10¹⁵cmから10¹⁶cmへ時間とともに膨張

数値計算を行った人：田中雅臣（国立天文台）

○映像クレジット シミュレーション：田中雅臣、仏坂健太／可視化：4D2U

★シミュレーションムービー

<http://4d2u.nao.ac.jp/t/var/download/NSMerger.html>

☆プレスリリース 重力波源からの光のメッセージを読み解く—重元素の誕生現場、中性子星合体—

<http://www.cfca.nao.ac.jp/pr/20171016>

05

銀河衝突 (斜め衝突の場合)

数十億年という時間の間には、銀河どうしの衝突や合体が起きることもあります。ここでは、2つの渦巻銀河が斜めに衝突した時にどのようなことが起こるのか、スーパーコンピュータCray XT-4（2008.4～2013.3運用）によって高解像度のシミュレーションを行った結果をご紹介します。衝突によって星間ガスが圧縮されることで大きな質量の星団が形成され、最終的には1つの大きな銀河になるようすを見て取ることができます。星を白色で、星間ガスを赤色～青色で描き表しており、青色ほど温度が高いことを表しています。

① このシミュレーションでは、2つの渦巻銀河が銀河軌道面に対して70度の角度で衝突する様子を計算しています。2つの銀河は、一度の衝突で合体せずすれ違い、その後も互いの重力に束縛されて何度か衝突を繰り返して合体します

② 2度目の衝突をズームアップして見た様子です。銀河がお互いに斜めにすれ違う過程でガスが圧縮され、帯状に濃いガスの塊が生まれました。

③ この帯状のガス雲の中で星が生まれ、それらが集まって巨大な星団が形成されます。この星団のいくつかを引き連れて、銀河はさらに衝突を繰り返します。

④ 銀河は互いの重力に引かれて、やがて再び衝突を起こし、また星団を形成していきます。銀河の周りには、これまで考えられていたよりも遥かに大きい質量の星団が形成されています。

⑤ 最終的に、銀河どうしが合体して1つの大きな銀河になりました。合体した銀河の周囲には衝突で形成された大きな星団があります。

● 数値計算の詳細

計算目的：銀河衝突によるスターバーストと星団形成過程の解明

計算モデル・計算手法：重力計算（TREE-GRAPE法）／ガス相互作用（SPH法）
／放射冷却、星形成、超新星爆発

計算に使用した粒子数：ダークマター 2.8×10^7 粒子、バリオン 2.3×10^6 粒子（そのうちガスが51万粒子）

使用した計算機：Cray XT-4

現象の時間スケール：～10億年

現象の空間スケール：～50万光年

数値計算を行った人：松井秀徳（国立天文台）

○映像クレジット シミュレーション：松井秀徳／可視化：武田隆顕／4D2U

★シミュレーションムービー

<http://4d2u.nao.ac.jp/t/var/download/GalacticMergerII.html>



06 小惑星カリクロー を取り巻く さざ波の環

小惑星カリクローは、土星と天王星の間に位置している小天体で、ケンタウルス族と呼ばれる種類の天体の中で最大のもです。2014年、背景の星を隠す現象を観察する掩蔽観測によってカリクローの周囲に2本の環が発見されました。カリクローの環も土星の環と同様に、氷や岩石の粒子で形作られていると考えられています。このシミュレーションは天体の環全体を、実際に考えられるサイズの粒子で計算した結果です。このような計算は土星などの環では行われておらず、世界初の試みとなりました。コンピュータが描き出したカリクローの環の姿は、まるでさざ波が立つ川面のようなものでした。

- ① 小惑星カリクローと、それを取り巻く2重の環の全体像です。カリクロー本体の大きさは平均半径でおよそ125 km程度、それに対し2重環の半径は平均半径約400 kmと考えられています。実際のカリクローは、球形ではなく楕円体の形をしていることが観測からわかっていますが、このシミュレーションでは球体を仮定してシミュレーションしました。
- ② 2本の環に近づいて見たところ。掩蔽観測から、外側の環(左)は粒子がまばらに存在し、内側の環(右)は粒子がより密に分布することが示唆されています。このシミュレーションでは、粒子の大きさを先行研究から推定されている数メートル程度の大きさとして仮定しました。
- ③ 内側のリングへのクローズアップです。粒子が一様に分布するのではなく、環が伸びる方向に対して斜めの波のような複雑な模様ができていることがわかります。これが「自己重力ウェイク構造」です。この構造は、土星の環にも存在していると考えられています。
- ④ 環の粒子がよりまばらに存在していると考えられている外側の環では、内側の環ほど顕著なウェイク構造が見られません。所々に粒子がお互いの重力で集まっている部分を見て取ることができます。
- ⑤ このシミュレーション結果から、環にはウェイク構造が発生している可能性が高いことがわかりましたが、ウェイク構造があることで環はすぐに壊れてしまうことも明らかとなりました。環が存在し続けるには、環の粒子サイズが推測されているよりも小さいか、未発見の衛星が存在している必要があると研究者らは考えています。

● 数値計算の詳細

計算目的: 小惑星カリクローの環の構造の解明

計算モデル・計算手法: 粒子間衝突を考慮した重力多体シミュレーション

計算に使用した粒子数: 最大約3億4500万粒子

使用した計算機: Cray XC30「アテルイ」

現象の時間スケール: 数時間～数日

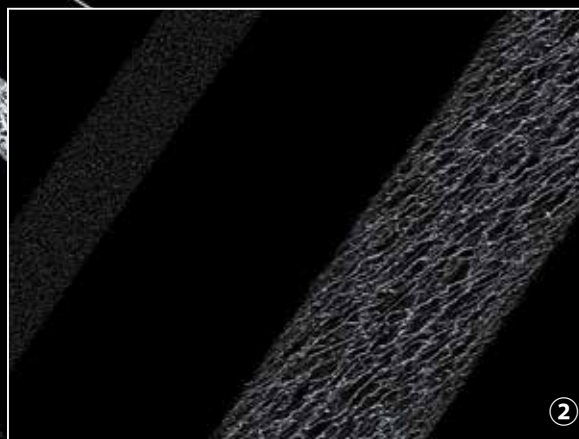
現象の空間スケール: 数百メートル～数百キロメートル

数値計算を行った人: 道越秀吾(筑波大学)、小久保英一郎(国立天文台)

○映像クレジット シミュレーション: 道越秀吾・小久保英一郎/可視化: 中山弘敬/4D2U

☆プレスリリース 小惑星カリクローを取り巻くさざ波の環—実スケールシミュレーションがはじめて描き出す小惑星の環の姿—
<http://www.cfca.nao.ac.jp/pr/20170428>

☆関連記事
国立天文台ニュースNo.286 2017年5月号「研究トピックス:小惑星カリクローを取り巻くさざ波の環」
https://www.nao.ac.jp/contents/nao-news/data/nao_news_0286.pdf



07 天の川 銀河紀行

天の川銀河は、宇宙にありふれた「棒渦巻銀河」であり、「我々の太陽系が属する銀河」でもあります。そのため、天の川銀河の構造や進化の歴史を明らかにすることは、他の銀河がどのように形成され進化したのかを知る上でも重要であり、さらに太陽系の起源の理解にも繋がると考えられます。ですが、われわれが天の川銀河の内側にいるため全体像がわからず、その構造や進化過程は観測データだけから明らかにするのは困難です。ここでは、銀河進化の基本的な物理過程である星・ガスの重力相互作用、星間ガスの運動や進化、星の形成とその周囲への影響を考慮したシミュレーションを行った結果を可視化し、天の川銀河の多様な構造を描いた様子をご紹介します。

- ① シミュレーションで描きだした「天の川」です。夜空を横切る天の川は、ガリレオ・ガリレイが望遠鏡を使って観測することで、無数の星の集団であることを突き止めました。天の川の中には、無数の星以外に「散光星雲」と呼ばれる赤い雲状の天体もあります。また、「暗黒帯」と呼ばれる天の川を分断するように広がる黒い帯状の構造も見られます。
- ② 天の川に近づいてみましょう。暗黒帯として見えていた部分は、「暗黒星雲」と呼ばれる雲状の天体の集まりであることがわかります。暗黒星雲は、ガスの密度が大きく、そこに含まれる塵が背景の星の光を遮断するため、黒く見えています。暗黒星雲の中には、ほとんどの水素や炭素、酸素などが分子の状態で存在しています。そのため、「分子雲」と呼ばれます。この分子雲の中で星や星団が生まれます。
- ③ 次に、天の川から抜け出してみます。天の川を構成していた星やガスが円盤状に分布していることがわかります。また、中心には棒状に星が集まった構造があり、その両端から円盤全体に伸びる渦巻き腕が見えます。これが「天の川」の正体である「天の川銀河」の姿です。
- ④ ここからは時間を早送りして、天の川銀河の天体がどのように運動しているのか見てみましょう。星は天の川銀河の中心の周りを回転運動しています。それと同時に、まるでイルカが海面をジャンプして泳ぐように、円盤面に対して上下運動をしていることがわかつています。太陽系もこのような運動をしていると考えられています。
- ⑤ 再び円盤の中に戻ります。分子雲の中で形成された星団からの紫外線が周囲のガスを電離し、赤く輝くH II（エイチツー）領域が作り出されます。このH II領域が膨張することで、分子雲は破壊されます。
- ⑥ 無数の星からなる夜空に見える「天の川」の中には、このように棒状構造や渦巻構造といった様々な銀河構造に加え、分子雲の中で星団が形成され、そしてそれから放射されるエネルギーで周囲のガスを輝かせたり、散逸させたりということを繰り返しているのです。



● 数値計算の詳細

計算目的：天の川銀河の様々な構造におけるガスや星の運動、分子雲進化の違いを明らかにすること

計算モデル・計算手法：ASURAコードを利用／重力計算（TREE-GRAPE法）／ガス相互作用（SPH法）／放射冷却、超新星爆発・H II領域・星間紫外線による加熱、分子生成、星形成

計算に使用した粒子数：バリオン約1000万～1億粒子・ダークマターハローは外場として導入

使用した計算機：Cray XC30「アテルイ」

現象の時間スケール：約1～10億年

現象の空間スケール：約50万光年

数値計算を行った人：馬場淳一（国立天文台；計算実行・解析時は東京工業大学、愛媛大学）

○映像クレジット シミュレーション：馬場淳一／可視化：中山弘敬／4D2U

★シミュレーションムービー

<http://4d2u.nao.ac.jp/t/var/download/MWJourney.html>

NS-D4
ATERLI



ACA

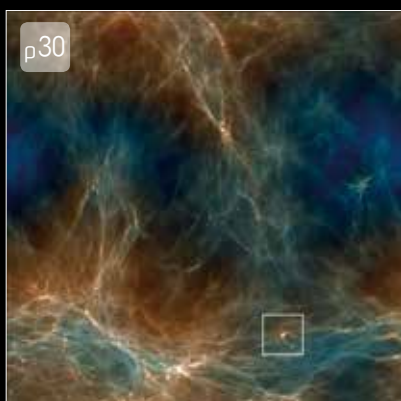
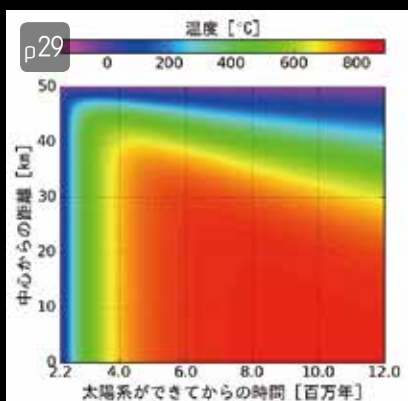
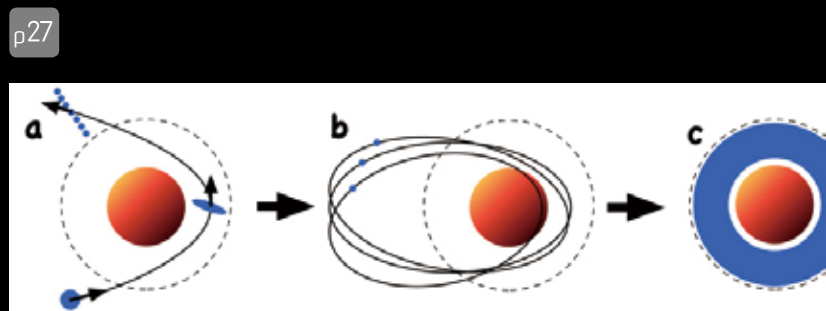
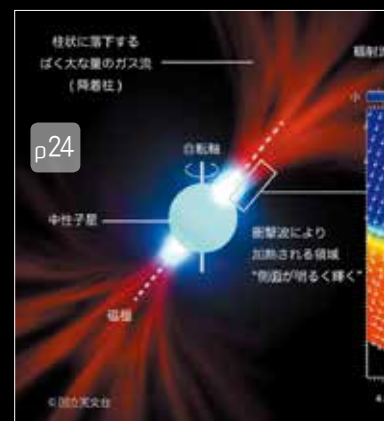
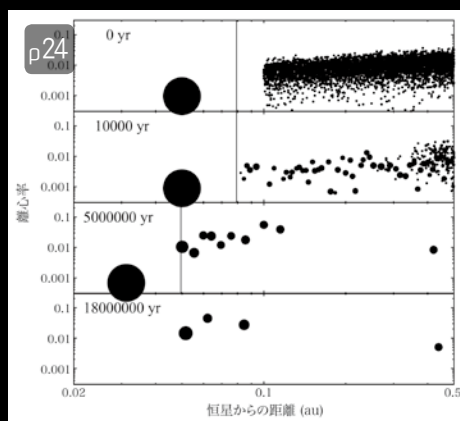
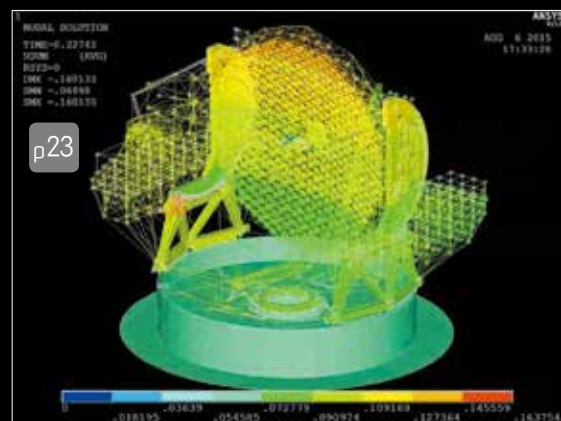
+

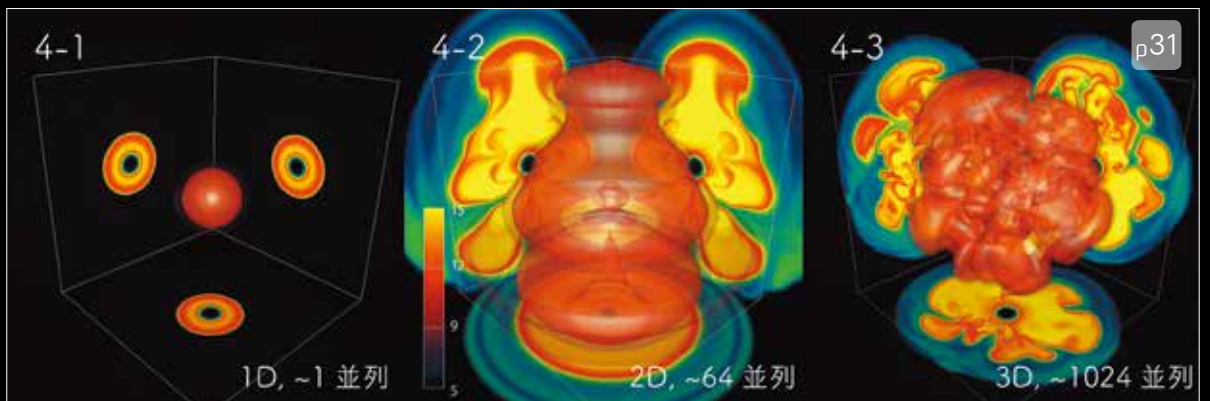
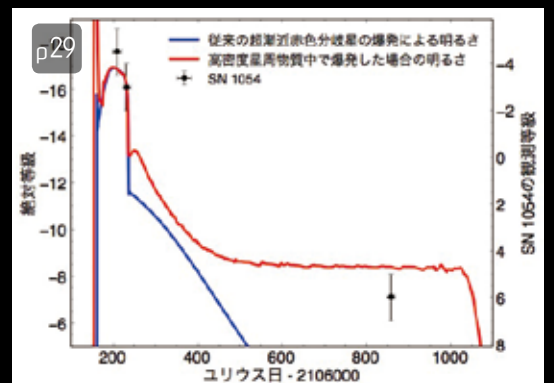
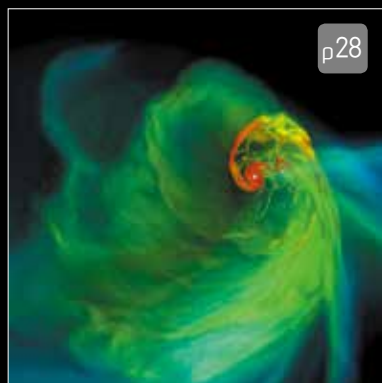
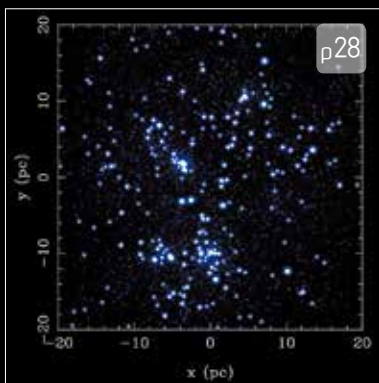
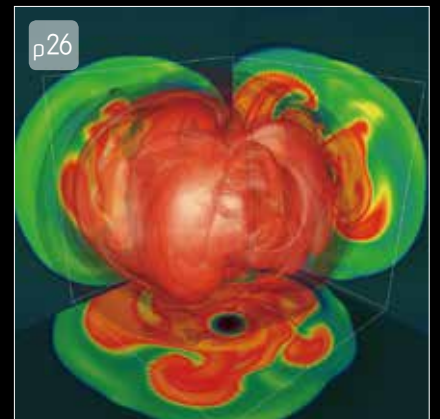
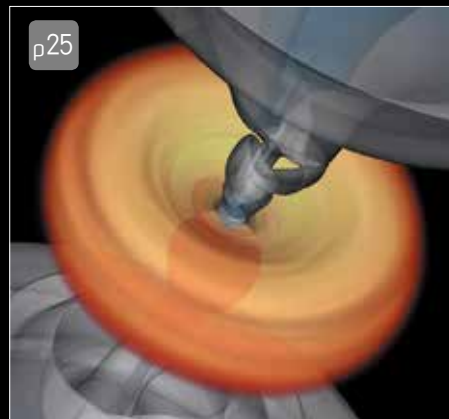
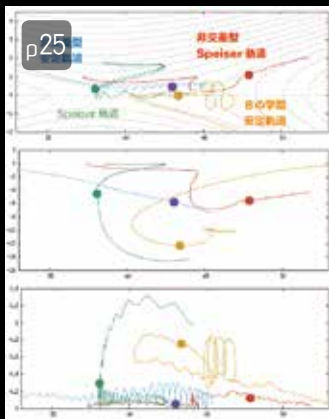
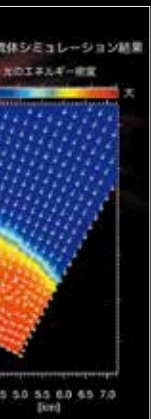
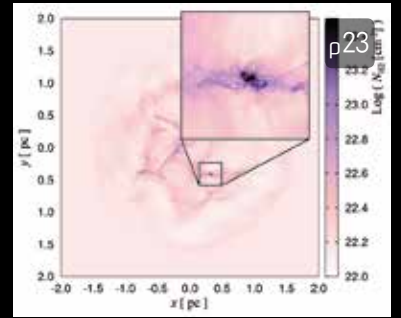
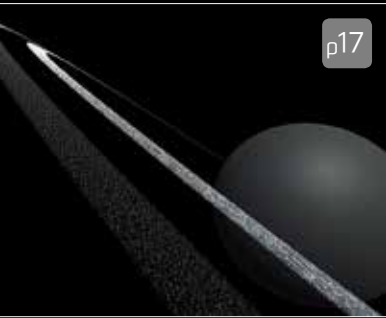
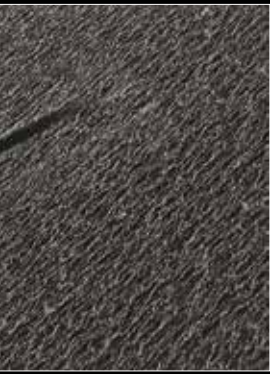
CRAY



天文シミュレーション画像 Gallery

特集で紹介しているおもな画像の一覧ギャラリーです。
それぞれ表示のページに解説がありますのでご覧ください。





NS-04
ATERUI



「理論の望遠鏡」は多彩な分野で大活躍！

宇宙のシミュレーションを行うCfCAの計算機たち。その計算は宇宙のあらゆる空間スケール、時間スケールの天体現象が対象です。また、ときには国立天文台の他のプロジェクトの仕事をお助けすることも。ここではアテルイをはじめ、GRAPE、計算サーバで行われているバラエティに富んだシミュレーション研究をご紹介します。

ボクの後姿には「安定運用」の金文字が。



アテルイで解き明かす大質量星の形成現場

井上剛志 (名古屋大学 理学研究科)



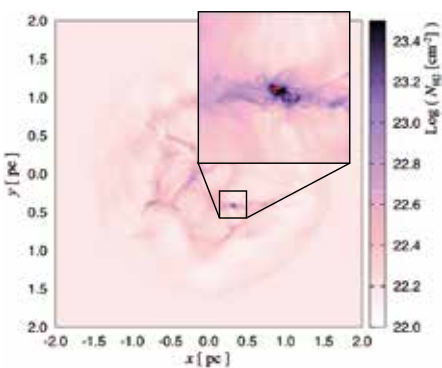
おおむね太陽の10倍以上の質量を持つ星は大質量星と呼ばれ、その寿命の最後に超新星爆発を引き起こし、さらに爆発後にブラックホールや中性子星といった天体に進化する天文学的に非常に重要な天体です。しかしながら、大質量星は太陽のような普通の星に比べて数が少ないレアな星であり、どこでどのように大質量星が作られるのかは大きな未解明問題になっています。

そこで、近年大質量星形成の引き金になっているのではないかと観測的に言われている分子雲の激しい衝突現象に注目し、天文学専用のスーパーコンピューターとしては世界最速のアテルイを用いて、そのような現象をシミュレーションしました。ここで、分子雲とは星の原材料となる主に水素分子から構成されるある種のプラズマで

あり、それらがマッハ10以上の超音速で衝突する様子を最先端の磁気自己重力流体適合格子法で計算機上に再現しています。その結果、激しい衝突によって生じる衝撃波が分子雲を強く圧縮し、それによって太陽の100倍程度の質量を持った大質量な分子ガスのコアが誕生することが明らかになりました。詳しいデータ解析の結果、この大質量コアのガスは中心に形成される原始星からの強烈な放射による圧力を乗り越えて原始星に降着し、大質量星へと進化し得るものであることが判明しています。

このようにアテルイの計算力は未解明な天体現象を再現し、何が起きているのかを理解する強力な手段になっています。昨年は主にアテルイを用いた著者の天体プラズマ現象の研究成果に対して、アジア太平洋物理学会連合のプラズマ部門から若手研究者賞を頂くことができました。優れた高速計算機を提供していただいている国立天文台に感謝いたします。

このシミュレーションのような分子雲が衝突している領域で星が生まれる様子が、実際にアルマ望遠鏡などで観測されてきているんだよ。



衝突で生じた衝撃波によって圧縮された分子雲のスナップショット。色はガスの柱密度を表す。ズームインした領域に太陽質量の100倍の大質量コアができています。(Inoue et al. 2018 PASJ accepted.)

アテルイとTMTのコラボレーション

白田知史、楠本 弘 (国立天文台TMT推進室)



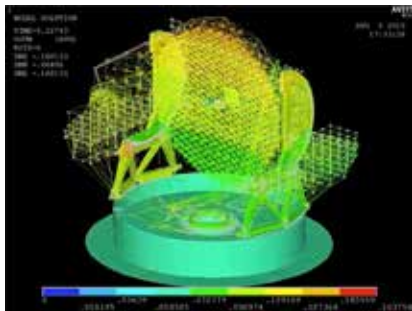
国立天文台では、米国・カナダ・中国・インドとの国際協力により、主鏡口径30mの超大型光学赤外線望遠鏡を建設するTMT (Thirty Meter Telescope) 計画を推進しています。TMTは集光力、解像力、感度で既存の大型望遠鏡を大きくしのぐ性能を有しています。日本の重要な貢献の一つとして、2014年度より望遠鏡本体の詳細設計を行っています。非常に難しい要求仕様の一つに「1000年に一度の規模の地震(震度7以上)が起きても壊れない」が挙げられます。TMTの主鏡は対角長が1.44mの六角形の鏡492枚からなり、鏡と鏡の間隔は

2.5mmしかありません。そのため、地震の揺れにより隣の鏡と衝突するようになると悲惨な大事故に成り得ます。

この技術的な困難を克服するため、望遠鏡としては世界で初めて、免震機構の導入を目指しています。設計結果が要求仕様を

満足しているか確認するために、7種類の地震波形を望遠鏡の構造モデルに入れ、さらに揺れの強度や望遠鏡の姿勢などを変えて計算する必要があります。しかし、総重量が2500トンを超えるTMTのような巨大システムの振動解析は膨大な計算量になります。さらに、これらの計算をできるだけ短時間でおこない、構造設計の最適化にフィードバックすることが重要です。

ここで、アテルイの速い計算速度が役に立ちます。アテルイではTMT望遠鏡本体構造を約30万の点にわけて、各点で0.005秒毎の位置のずれ・速度・加速度を計算する方法で振動解析をしました。この点の数が多いほど計算量が増えますが、アテルイを使う事により高速で計算することができました。この振動解析によって要求仕様を満たす設計に成功し、また効率良く設計を改善することに成功しました。日本の優れた技術を活かして世界最高性能の望遠鏡に仕上げたいと考えています。



アテルイを用いた望遠鏡本体の振動のシミュレーション画像。1000年に一度の規模まで増幅した1980年の米国Convict Creek地震の波形を入力している。最大約15cmしか変位していない様子(オレンジ色部分)が分かる。(クレジット:三菱電機株式会社/国立天文台)

アテルイはシミュレーション天文学のためのスーパーコンピュータだけど、国立天文台の他のプロジェクトの推進に必要な計算も行っており協力しているよ。



子ども達に押し出された巨人

～太陽系外惑星系における謎の解明～

荻原正博 (国立天文台 理論研究部)

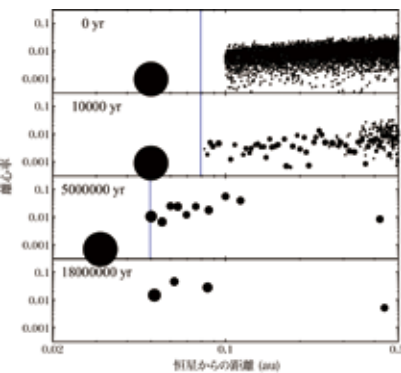


太陽系外惑星の発見数の増加に伴って様々な新しい観測事実が明らかになる一方で、新たな謎も生み出されてきています。その一つが「ホットジュピター近傍での惑星欠乏」です。1つの恒星の周りに複数個の惑星が存在する「多重惑星系」の発見数が増加していますが、ホットジュピター(短周期の巨大ガス惑星)の近傍には他の惑星がほとんど発見されないという観測的特徴が明らかになってきています。ところが、惑星形成理論ではこの特徴の起源を説明できていませんでした。

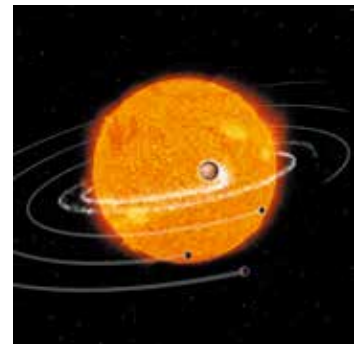
そこで我々は、惑星形成中にホットジュピター近傍に地球型惑星が形成する状況を仮定したシミュレーションを実行し、惑星形成過程を追いました。シミュレーションでは100～

5000体程度の微惑星・原始惑星の合体成長・軌道進化を数千万年程度追

シミュレーション結果の例。ホットジュピター(大きな円)の軌道が地球型惑星によって中心星方向へ追いやられる。青線はホットジュピターと2:1の平均運動共鳴の位置。この位置で相互作用が大きい。(クレジット:荻原正博)



うために計算サーバ及びGRAPE-DRを用いました。シミュレーションの結果、ホットジュピターはその軌道の外側に形成した地球型惑星によって軌道が恒星方向へと追いやられ、最終的には恒星と衝突して飲み込まれるというメカニズムを発見したのです。これは個々の質量はホットジュピターの数百分の一しかない地球型惑星(いわば子ども)がホットジュピター(巨人)を追いやるというものであり、興味深い現象です。この計算から、ホットジュピターと地球型惑星は共存ができないことがわかりました。火星ほどの小さな惑星であれば共存が可能ですが、小さな地球型惑星は観測が難しいため、ホットジュピターのみが観測されることになります。このように、子どもが巨人を押し出すメカニズムを惑星形成理論に導入すると、上記の「ホットジュピター近傍での惑星欠乏」を自然に説明することが可能であることを示しました。



地球型惑星との相互作用によりホットジュピターが恒星に落下していく様子のイメージ図。(クレジット:宮川アシタ、荻原正博)

アテルイが謎の超高光度X線パルサーの正体をあばく

川島 朋尚 (国立天文台 理論研究部)

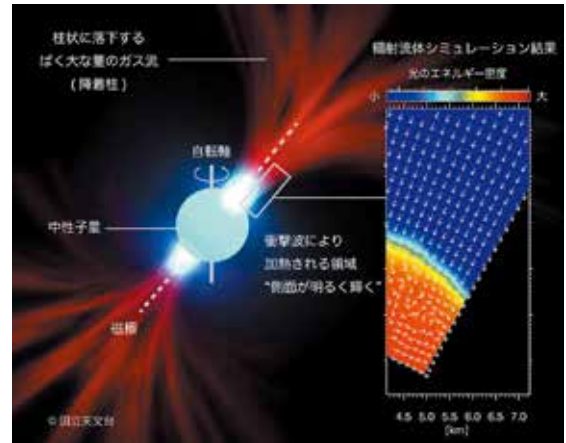


極めて明るいX線天体である超高光度X線源 (Ultra-Luminous X-ray source, 以下ULX) は、長い間ブラックホールだと考えられてきました。しかし近年、中性子星の特徴であるX線パルスを示すULXパルサーが発見されたことで、少なくとも一部のULXは中性子星である可能性が示唆されるようになりました。ULXがX線で明るく光るには、中性子星で古典的な限界とされる光度以上の光を発生させるガス降着である「超臨界降着」が起きているはずですが、またX線パルスが観測されていることから、中性子星の磁力線に沿って降着柱と呼ばれる柱状の降着ガス流が形成されていると考えられます。しかし、中性子星において、さらには降着柱において超臨界降着が可能なのかよくわかっていません。

そこで我々は、中性子星極冠への超臨界降着柱の放射流体シミュレーションをアテルイで実施しました。その結果、中性子星の表面近くで衝撃波が形成されて大量の光子が発生し、その光子が降着柱の側面から抜けることで光がガスを押し返す力が弱くなり、継続的な超臨界降着が可能となることが明らかになりました。さらにこの側面から抜ける光子は、ULXパルサーの明るいX線光度に匹敵する光度で放出されることが示されました。このようにULXパルサーの正体が中性子星であることを示すことができたのです。

しかし、課題も残されています。ULXパルサーでは強い磁気圏が形成されていると考えられており、強磁場による影響

を考慮した計算が必要となります。そのような効果を含めた計算には膨大な計算資源が必要であり、新しい計算コードの開発に注力しながら今後のアテルイのパワーアップにも期待したいと考えています。



ULXパルサー中心のイメージ図と放射流体シミュレーション結果 (右側枠内)。シミュレーション図の赤い部分は光のエネルギー密度が高いことを表しており、衝撃波により莫大な量の光子が生み出された結果を表している。シミュレーション図の矢印は光の流れる向きを表しており、衝撃波で発生した光子が降着柱の側面へと抜けていることがわかる。(クレジット: 国立天文台)

磁気リコネクションにおける新しい軌道要素の発見

銭谷 誠司 (京都大学 生存圏研究所)

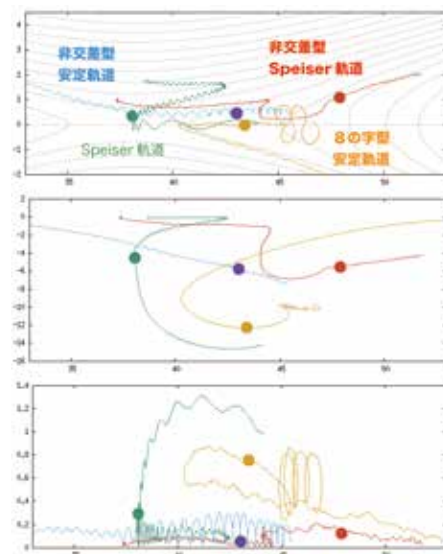


宇宙空間のプラズマの中では、一組の磁力線がつなぎ変わる「磁気リコネクション」が起きて、爆発的に磁気エネルギーを放出することが知られています。この現象は、太陽フレアや地球のオーロラを引き起こすメカニズムと考えられています。磁気リコネクションの振る舞いは、電磁場と、その中で動きまわる多くのプラズマ粒子が影響しあって決まる複雑なものです。こうした複雑な物理を理解するために、仮想粒子の運動を解く「プラズマ粒子シミュレーション」を使った研究が続けられています。

今回我々は、粒子シミュレーションを使って、リコネクション系の電子の軌道パターンをサーベイしました。シミュレーションの途中データを大量に出力し、2000万個の軌道データを生成して解析した結果、これまで知られていなかったタイプの電子軌道が次々と見つかりました。図は代表的な軌道の例です。このうち太字のものが今回新たに見つかった軌道です。驚くべきことに、電子の大多数はこの新タイプの軌道を通っていることがわかりました。系の最小要素である電子軌道がこれまでの理解と違っていただけですから、これからリコネクション物理の多くの問題を検討し直す必要があります。

実は、最近の粒子シミュレーション研究では、データが大きくなりすぎて、粒子の軌道そのものを見る機会が減っていました。今回は、CfCAの追加ディスクスペース (80TB) を活かして大量の軌道データを処理できたため、さまざまな軌

道を見落とさずに吟味でき、このような基礎的な発見につながりました。計算環境のみならず、計算結果を活かす環境を提供して下さる国立天文台 CfCA に感謝します。



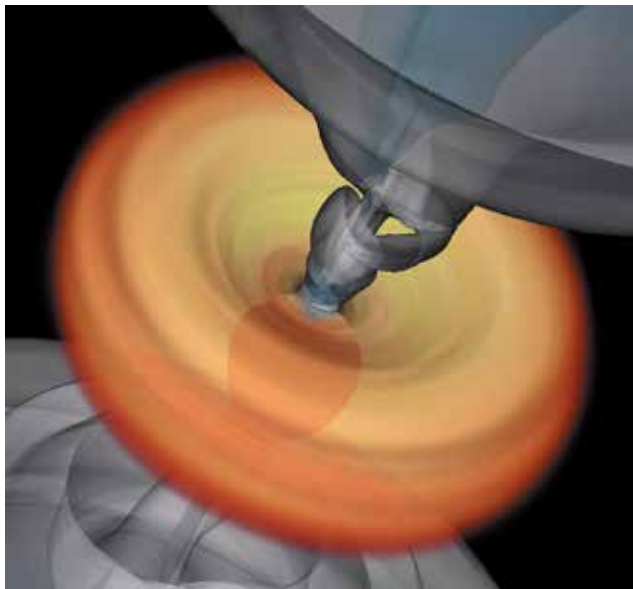
プラズマ粒子シミュレーションで計算した、磁力線 (灰色) の構造と代表的な電子軌道。(クレジット: 銭谷誠司)

ブラックホールを観る！アテルイの中の降着円盤

高橋博之 (国立天文台 CfCA)



ブラックホールはその非常に強い重力のために光すらも出てこられない、まさに「黒い星」という特異性から、今や誰もが知る存在です。しかし、実際にはブラックホール



ブラックホール降着円盤のシミュレーション。ブラックホールへと降着する円盤と共に上下方向に伸びるジェットが形成される。(クレジット:高橋博之)

は宇宙の中でも非常に明るく輝く天体であることが観測によって知られています。ブラックホールへとガスが落下するとその重力エネルギーが解放されて、一部は光のエネルギーへと転換されるため、ブラックホールの周囲が明るく輝きます。また、ほぼ光の速さで伝搬するジェットと呼ばれる噴出流も観測されます。このブラックホール降着円盤と呼ばれる天体現象の活動性を理解するためには、ガスの運動だけでなく電磁場や光、そして一般相対論効果や多次元効果といった様々な物理を考慮する必要があるため、観測で得られた情報から実際に起きている現象を紐解くことは困難です。

そこでシミュレーション研究が重要な役割を果たすことが期待されますが、シミュレーション技法の難しさや計算量の多さからブラックホール降着円盤の第一原理計算は長い間難しい問題でした。しかしこの数年の間にシミュレーション技術の進展とアテルイの登場がこの困難な状況を打破したのです。シミュレーションを用いてブラックホール降着円盤を再現することで、降着円盤から光によって駆動された強いジェットが形成されることがわかってきました。今後更に詳細な観測データとの比較を行うことで、ブラックホール降着円盤の活動性の謎を解き明かすことが出来ると期待しています。

アテルイで探る超新星からの重力波とニュートリノ

滝脇知也 (国立天文台 理論研究部/CfCA)



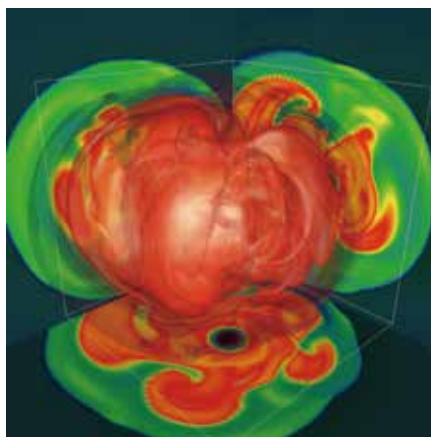
太陽のおよそ10倍より重く生まれた星は、超巨星まで進化した後に中心部が重力で潰れ、中性子星を作ります。この中性子星から放出されるニュートリノがその外側の物質を加熱し、引き起こす爆発が超新星爆発だと考えられています。しかし、このニュートリノ加熱の過程の詳細は明らかではなく、シミュレーションによる完全な再現には至っていません。

これまで行われた多くの研究は計算資源が足りず、爆発時の運動を1次元で計算していたため、渦のような対流の動きをとり入れることが困難でした。ここ5年、アテルイや理化学研究所の「京」などの計算資源が増えたことにより、空間3次元の計算でこの対流の効果を取り入れられるようになりました。驚くべきことに、この対流の存在は超新星爆発が起きるか否かを左右するほど、非常に重要な要素だと分かりました。ニュートリノによって熱せられた内側の物質が対流で外側の物質と混ぜられることで、エネルギーを外側に運ぶことができるためです。

星の自転を考慮するとさらに興味深いことが起こります(図)。自転によって中性子星が歪み、スクリューのように星の物質をかき混ぜ、対流よりも強くエネルギーを輸送するのです。赤道方向に起こる物質の激しいかき混ぜによってニュートリノによる熱が外側へ運ばれます。これが超新星爆発を引き起こすもとになるかもしれません。

対流や自転によるかき混ぜでは、重い物質が速く動くため

に重力波が放出されます。アメリカのLIGOグループの発見により、重力波の検出は夢物語ではなくなりました。将来、銀河系内で超新星爆発が起これば、重力波によって超新星がどうやって爆発するのかの情報が得られるかもしれません。対流や自転によるかき混ぜの運動はニュートリノの観測数の時間変動としても現れるため、重力波とニュートリノの同時観測が重要になります。従来の光学観測も含め、超新星の正体に迫るため、シミュレーションと観測技法の両輪を整備していきたいと考えています。



高速自転している星の超新星爆発の様子。中心1000km、中性子星ができてから234ミリ秒後のスナップショット。熱さの指標であるエントロピーを可視化したもので、熱い爆風の部分に赤い色を付けている。赤道部分で強く起こるかき混ぜの効果と自転による遠心力によって、赤道方向に膨らんだ爆発形状になっている。(クレジット:滝脇知也)

銀河構造と星形成をつなぐ

馬場淳一 (国立天文台 JASMINE 検討室)



天の川銀河のような銀河の進化は、渦巻き腕や棒状構造といった構造の動力学進化と、ガスから星への変換過程（星形成）が複雑に絡みあった現象です。そのため、恒星から銀河までの様々な空間スケールに対して、多様な物理過程を取り入れたシミュレーションが重要な研究手法となります。しかしながら、これまでの銀河進化のシミュレーションは、計算パワーの問題で、ガスを無視した恒星系力学のみのものや、星とガスの両成分を考慮しているが物理過程を単純化したものなど、現実的な理論モデルではありませんでした。



このような状況を改善したのがアテルイです。我々は、恒星系力学と星間ガスの自己重力、放射冷却や加熱過程、星形成とそれにつづく超新星爆発といった重要なプロセスを組み込んだ銀河円盤全体の高精度3次元重力多体/流体シミュレーションを、世界に先駆けて行うことに成功しました（図参照）。特筆すべきは、その高い解像度です。星間ガスにおける分子生成も考慮し、星形成の母体となる巨大分子雲スケールまで空間分解しました。これにより、銀河スケールの渦巻き腕や棒状構造といった様々な銀河構造における分子雲の形成進化の違いを調べることが可能となったのです。

以上のようにアテルイは、「銀河構造スケールと星形成を越す分子雲スケールをつなぐ」シミュレーションを可能とし、銀河進化の理解に重要な進展をもたらしました。次のステップは、約100億年にわたる小さな銀河の衝突・合体による銀河の成長も考慮した天の川銀河の「形成過程」のシミュレーションを行うことです。これにより銀河構造進化と分子雲スケールの進化をつなぎたいと考えています。

アテルイを用いた世界最高レベルの分解能の天の川銀河のシミュレーションの画像。分子雲の中で形成された星団からのエネルギー放出で周囲のガスが吹き飛ばす様子。(クレジット:馬場淳一、中山弘敬、国立天文台4次元デジタル宇宙プロジェクト)

GRAPE-DRで土星リングの起源に迫る

兵頭龍樹 (東京工業大学 地球生命研究所 / Institut de Physique du Globe de Paris)

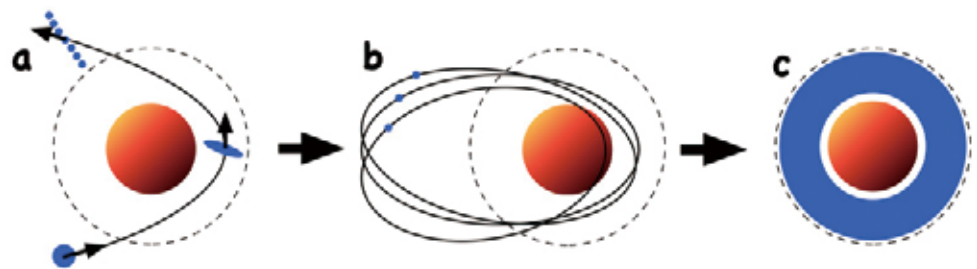


1610年にガリレオ・ガリレイによって発見された土星の環は、特徴の異なる複数の環から形成されています。環の幅は100キロから数万キロメートルと様々で、大きさがミクロンからメートルサイズの無数の氷の粒子から形成されています。しかし、どのように環が誕生したのかは謎に包まれています。

我々は、GRAPE-DR等を使った重力多体シミュレーションで新たな環の形成モデルの提案と検証を行いました。まず我々は、約40億年前に起こった「後期重爆撃期」と呼ばれる太陽系形成過程における大イベントに注目しました。この時期に、直径数キロメートルほどの微惑星と呼ばれる惑星の種が無数に太陽系全体を飛び交ったと考えられています。月のクレータのほとんどがこの時期に形成されたと言われていいます。さらに、最新の太陽系形成モデルから見積もったところ、この時期に巨大惑星は、冥王星サイズの巨大な微惑星と近接遭遇を少なくとも一度は経験することが分かりました。

そこでこのような近接遭遇の過程を、流体を多数の粒子と考えて計算するSPHシミュ

レーションによって詳細に調べました。すると、巨大惑星の十分近傍を通過した冥王星サイズの微惑星は巨大惑星の重力によって破壊され、破片の一部が巨大惑星まわりに捕獲されることがわかりました。しかし、捕獲直後の破片は観測される環の構成粒子に比べると遥かに大きいと考えられます。それゆえに我々は、捕獲破片の長期的な進化を調べる重力多体シミュレーションを行いました。すると、捕獲された破片は長期的な進化で互いに高速衝突を経験して、最終的には観測されるサイズの破片となり、環が形成されることを示しました。



リングの形成過程の概念図。点線は、巨大惑星の重力が強く働き潮汐破壊が起こる臨界距離。(a) 微惑星が巨大惑星に近接遭遇をする際に、巨大惑星の潮汐力によって破壊される。(b) 潮汐破壊によって破片の一部が巨大惑星まわりに捕獲される。(c) 破片同士の衝突によって捕獲された破片は破砕され、軌道も徐々に円軌道に近づき、現在のリングが形成される (Hyodo, Charnoz, Ohtsuki, Genda 2016, Icarus の図を一部改変)。

星団の多様性の起源を探る

藤井通子 (東京大学大学院 理学系研究科)



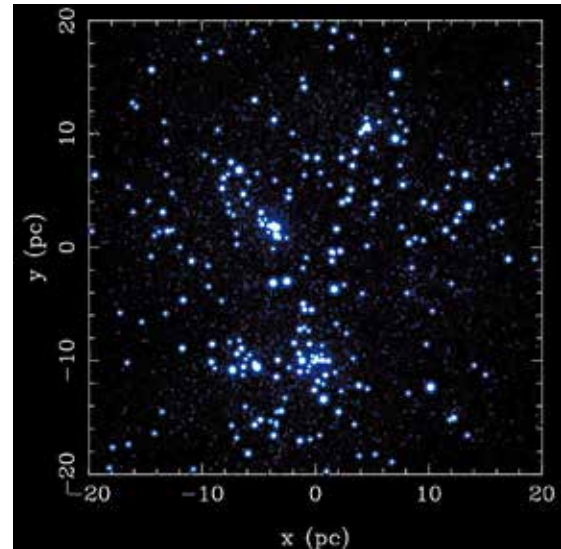
銀河内の星の多くは星の集まりである星団として生まれます。近年では、散開星団と球状星団という古典的な分類に当てはまらない星団も知られるようになってきました。星の集団という点で言えば、比較的広がった若い星の群れである「OBアソシエーション」もその仲間と言えます。この多様性はどこから来ているのでしょうか？

星団の形成過程を知るためには、星のゆりかごである分子雲から考える必要があります。星形成領域の観測も進み、星は分子雲のフィラメント構造に沿って生まれることがわかってきました。今回の計算では、星形成が終わり、分子雲が晴れた状態からの星の運動を計算し、フィラメント構造に沿って生まれた星々が星団に進化する過程を調べました。

星団の形成・進化過程を考える上で、星々の間に働く重力による力学的進化は非常に重要な要素です。それをシミュレーションで正確に扱うには、星同士の重力を愚直に計算する必要があります。しかし計算量は星の数 N の二乗で増加するため、星の数が10万個を超えるような大質量星団の形成シミュレーションは、アテルイのような大規模並列計算機なしでは実現できません。

今回の研究では、天の川銀河の典型的な分子雲からは散開星団やOBアソシエーションが、活発に星形成を行うスターバースト銀河の典型的な分子雲からは高密度かつ大質量の星団が生まれることがわかりました。しかし、天の川銀河内に

も高密度で大質量な星団が少ないながらも存在しています。今後は、銀河の動力学と関連づけた星団の形成過程の解明を目指しています。



星団形成シミュレーションのスナップショット。星が集まり星団を形成している。小さな星団同士が合体し、より大きな星団へと成長する。(クレジット: 藤井通子)

高分解能な望遠鏡時代の高分解能なシミュレーション

松本倫明 (法政大学 人間環境学部)

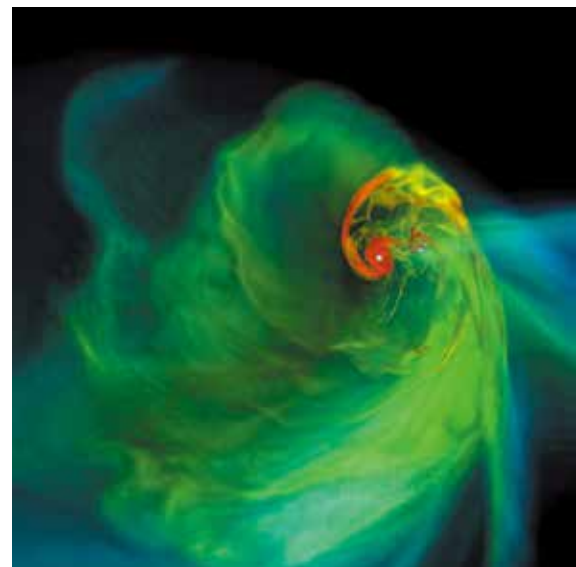


アルマ望遠鏡などの最近の望遠鏡は一昔前のものと比べて格段に高い空間分解能を持っています。これらの観測結果をシミュレーションと比較するとき、シミュレーションにも高い空間分解能が必要です。高い空間分解能を持ったシミュレーションを実現するためには、アテルイのような高性能なスーパーコンピュータを使います。さらに高い空間分解能を実現するためには、シミュレーション領域によって分解能を変える適合格子細分化法 (AMR法) のようなソフトウェア技術を使います。

今回、アルマ望遠鏡による分子雲コアMC27の観測結果を物理的に理解するために、AMR法を用いたシミュレーションを行いました。シミュレーションでは、分子雲が分裂して分子雲コアが形成し、分子雲コアが収縮して原始星が形成する過程を計算しました。AMR法を用いると、このような過程をひとつのシミュレーションで一貫して計算できます。

シミュレーションでは分子雲コアの中心部に弓状の構造が形成しました (図参照)。弓状の構造は原始星と周囲のガスがダイナミックに相互作用した結果です。このような弓状の構造は、アルマ望遠鏡によって分子雲コアMC27の中心部に発見されました。実際の分子雲コアMC27にもシミュレーションと同様のダイナミックな相互作用があると考えられます。星形成は従来考えられてきたシナリオよりもずっとダイナミックなようです。これは星形成の研究に一石を投じる結果です。

この結果は、観測とシミュレーションの両方が高い空間分解能を持つはじめてわかるのです。



AMR法によって再現された分子雲コアMC27の中心部。アルマ望遠鏡の観測結果とそっくりな弓状の構造が再現された。色はガスの濃度を示す。図の大きさは一辺2000天文単位、計算領域の大きさは一辺4.5光年である。(クレジット: 松本倫明)

計算サーバで迫る、かに星雲の正体

守屋 堯 (国立天文台 理論研究部)

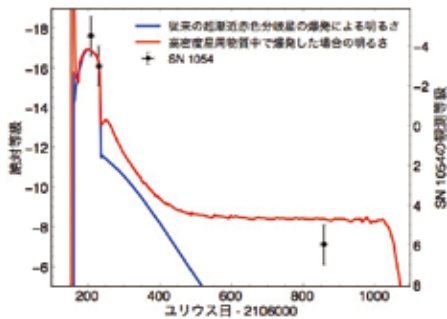


かに星雲は、1054年に起こった超新星爆発によって形成されたことが知られています。この超新星 (SN 1054) は、藤原定家による明月記や中国の宋史などに記録されています。これらの記録をもとにSN 1054の明るさを大雑把に推定すると、図のような明るさの変化をしたと考えられます。

一方で、かに星雲の観測からSN 1054は約8~10太陽質量の星が起こす電子捕獲型超新星であった可能性が高いことが指摘されています。太陽の約8~10倍の質量の星は、超漸近巨星分枝星と呼ばれる進化の最終段階に、主に酸素・ネオン・マグネシウムからなる中心核を形成します。電子捕獲型超新星とは、この中心核でマグネシウムの原子核が電子を捕獲することによって圧力が弱くなり、中心核の崩壊が引き起こされて爆発する重力崩壊型超新星爆発です。しか

し、超漸近巨星分枝星からの超新星では、SN 1054が1年半以上もの長い間明るく光っていたことが説明できませんでした。

超漸近巨星分枝星は、非常に多くの物質を星間空間に放出するという特徴があります。爆発する星の周辺に高密度な星周物質がある場合、超新星がその物質に衝突して衝撃波が発生するため、超新星がより長い間明るくなることが考えられます。そこで計算サーバを用いて、高密度な星周物質がある状態で超漸近巨星分枝星が爆発した場合の明るさの変化を調べました。すると、従来の星周物質がない場合よりも十分長い間超新星が明るくなることが明らかになり、SN 1054の記録ともよく一致しました。これにより、SN 1054は明るさの変化の観点からも電子捕獲型超新星である可能性がさらに高まりました。



古文書から推定されたSN 1054の明るさと、計算サーバによって得られた電子捕獲型超新星の明るさ。従来のモデルでは超漸近巨星分枝星の周りに存在する高密度星周物質の影響は考えられていなかった。(クレジット: 守屋 堯)

この研究では、たくさん的小規模なシミュレーションを行うことが必要だった。そんな計算には「計算サーバ」が便利!



シミュレーション天文学で探る小惑星イトカワの昔の姿

脇田 茂 (国立天文台 CfCA)

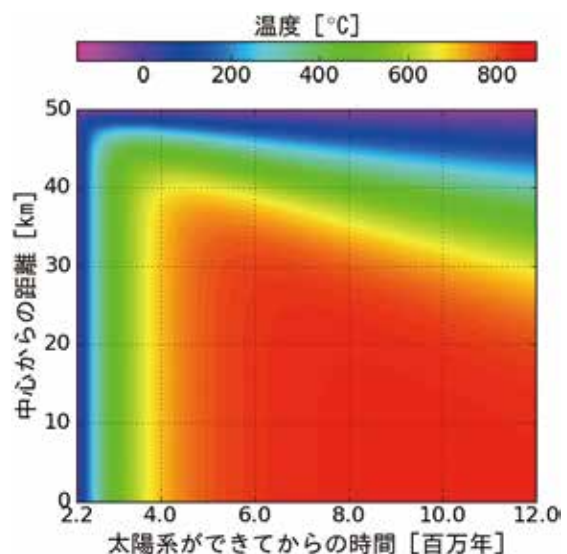


シミュレーション天文学と物質の分析から得られた結果を組み合わせることで、太陽系の昔の姿を知ることができます。ここでは、小惑星探査機「はやぶさ」が地球へ持ち帰った小惑星「イトカワ」の微粒子の分析と計算サーバを用いた研究で明らかになったイトカワの昔の姿を紹介します。

イトカワの微粒子はわずか100 μm (およそ髪の毛の太さ)ほどの大きさです。詳細な分析によって地球外物質である隕石と似た組成を持つこと、800 $^{\circ}\text{C}$ 以上を一度は経験したことなどが明らかになりました。しかし、現在の大きさが300m程度のイトカワの内部で800 $^{\circ}\text{C}$ まで温まることができたのでしょうか? この質問に答えるために数値計算を行いました。

太陽系の初期に存在した天体を温める熱源は、その天体に含まれる放射性元素が崩壊する時に出る熱だと考えられています。天体の大きさや形成時期などが変わると、熱源の量が変わることになります。イトカワの昔の姿を探るためには、もともとなった天体の大きさや形成した時期などの条件を変えた多数の計算が必要です。この目的にはアテルイのような大規模な計算機ではなく、小規模な計算をたくさん行える計算サーバが適しています。放射性元素を含んだ、隕石と似たような組成を持つ様々な天体の温度進化をシミュレーションした結果、微粒子の観察結果を満たすような天体は、現在のイトカワより大きい半径20 km以上の天体であること・太陽系ができてから約200万年後に形成されたことがわかりました。今

後も物質科学とシミュレーション天文学との融合で明らかになる太陽系の昔の姿にご期待下さい。



太陽系ができてから約200万年後に形成された半径50 kmの温度進化図。赤い部分が高い温度、青い部分が低い温度を示していて、右に行くほど時間が進み、下から上に行くほど天体中心から表面に近づいていく。(クレジット: 脇田茂)

A Pathfinder for Coronal Heating

～Combining IRIS / Hinode observations and ATERUI modelling～

太陽コロナ加熱の現場をついにとらえた

～IRIS / ひのひでの観測とアテルイによるシミュレーションの共演～

Patrick Antolin (University of St Andrews)



Mysteries abound in the universe. A major one is right there in our Sun's corona, the part of the solar atmosphere extending outwards like a crown. The corona is 200 times hotter than the solar surface, which is closer to the source. This remains a 70-year long mystery and the main driver of solar physics.

The key lies in the solar magnetic field. Alfvénic waves, discovered by Hannes Alfvén in 1947, are a major candidate to solve the heating puzzle. These waves travel along magnetic field lines and carry large amounts of energy. Similar to the up/down motion of a car's piston engine leading to the rotatory motion of the wheels, the motion of plasma produced by an Alfvénic wave changes during propagation: the initial up/down motion converts to azimuthal motion in a process known as "resonant absorption." This energy conversion also changes the spatial location of the wave, making their detection and dissipation into heat extremely difficult. Hypothesised for over 30 years, IRIS and Hinode were able to observe this process directly for the first time. Recently, a step closer to its solution has been possible thanks to the combination of the Japanese-lead Hinode mission, NASA's IRIS mission and state-of-the-art numerical simulations with the ATERUI supercomputer.

Hinode and IRIS are very different instruments. While Hinode works as a very high-resolution camera, capturing the motion of structure in the plane-of-the-sky, IRIS is a spectrograph and can capture structure moving away and towards us. Their combination, therefore, allows us to identify the 3D motion of plasma. On the 19th October 2013, Hinode and IRIS pointed together to a solar prominence. Such structures are suspended high above the surface by the magnetic field and are characterised by their thread-like morphology, tracing its shape. As shown

in the figure, Hinode detected the up/down oscillatory motion of a prominence thread in the plane-of-the-sky. At the same time, IRIS detected heating and an oscillatory velocity signal that is peculiarly out-of-phase. In order to understand the observations we conducted 3D numerical simulations at very high resolution of a prominence thread subject to an Alfvénic wave with ATERUI. This supercomputer ran 512 processors continuously for 4 days and produced half a terabyte of valuable information, which was subsequently analysed. The results showed that the observed peculiar motion and heating is the combination of two mechanisms: resonant absorption and an instability known as Kelvin-Helmholtz. Similar to strong winds over the ocean producing large waves, this instability can produce vortices that ultimately lead to turbulence and heat.

数多ある宇宙の謎。太陽を取り囲むコロナの存在もその1つです。不思議なことに、コロナは外側にあるにも関わらず、太陽表面の200倍も温度が高いのです。この問題は70年もの長い間、太陽物理学の大きな謎とされています。

この謎を解く鍵は磁場にあります。特に、磁場を伝播するアルヴェン波は、多くのエネルギーを運ぶことができる点で重要視されています。アルヴェン波は「共鳴吸収」と呼ばれる仕組みによりプラズマの運動に影響を及ぼし、それが波の動きそのものをも変えてしまうため、この仕組みや加熱の現場をとらえるのが極めて困難でした。しかし、IRISとひのひでの登場により、直接観測が可能となったのです。

2013年10月、ひのひとIRISは同時に太陽プロミネンスを観測しました。プロミネンスは磁場の支えによりコロナ中に浮かぶ筋状の構造です。図のように、ひのひでは高解像度カメラでプロミネンスの天球面上での動きを、IRISは分光装置で視線方向の速度をとらえました。この観測から、波動に伴いプロミネンスの温度が上昇する様子と、奇妙な振動パターンをとらえたのです。この観測結果を解釈するために、私たちはアテルイで、アルヴェン波を起こしているプロミネンスの高解像度の3次元数値シミュレーションをおこないました。その解析の結果、共鳴吸収とケルビン・ヘルムホルツ不安定と呼ばれる渦を作り出す現象の2つが原因となって、観測されたプロミネンスの特異な運動と加熱が引き起こされたことが明らかとなりました。日本のひのひと米国NASAのIRIS、そしてアテルイによる最先端の数値シミュレーションをあわせた研究によって、コロナ加熱問題の解決に一歩近づくことができました。

☆この研究成果は2015年8月にプレスリリースされました。

URL: <http://hinode.nao.ac.jp/news/results/iris/>



左は、ひのひでによって観測されたプロミネンスの画像。IRISは、白いラインにそって分光観測を行った。右は、アテルイがシミュレーションしたプロミネンスの断面図。流体の不安定性により、プロミネンスの表面に渦ができています。これがプロミネンスやコロナを加熱するもととなると考えられている。プロミネンスは、内側と外側で異なる方向に振動する。

Left: The image of the prominence observed by Hinode. IRIS observed it along the white lines and obtained spectroscopic data. Right: The cross-section of the simulated prominence calculated by ATERUI. Magnetohydrodynamic instability produces vortices in the prominence. Plasma gas oscillates in different directions inside and outside of this prominence. (Credit: JAXA/NAOJ/P. Antolin)

スーパーコンピュータと共に進化するシミュレーション

2006年に発足し、昨年10年を迎えた天文シミュレーションプロジェクト。これまでに、4台のシミュレーション専用のスーパーコンピュータを運用してきました（国立天文台はさらにその前の時代からスーパーコンピュータの運用を行っています。その歴史については国立天文台ニュース2013年8月号をご覧ください）。スーパーコンピュータが入れ替わるたびにその性能は向上しています（図1）。

天文学におけるシミュレーションは、大きく2つの種類に分けることができ

ます。ひとつが「粒子シミュレーション」です。天体を粒子の集まりと考え、一つ一つの粒子の運動に着目する計算方法です。銀河の星や土星の環の粒子の運動など、粒子（天体）同士の間で働く重力を計算するN体シミュレーションや、ガスのような流体を粒子の集まりとして計算するSPH法（Smoothed Particle Hydrodynamics）などがあります。もうひとつは「格子シミュレーション」です。これは、空間や天体を格子状に区切って、その中の物理状態がどのように

変化するかを各々の格子について計算する方法です。流体力学を基本とし、電磁気学や相対性理論を組み合わせた計算も多く行われています。星間物質の運動や星の内部の計算、ブラックホールを取り巻く降着円盤のシミュレーションなどにはこの方法が多く用いられています。

スーパーコンピュータの性能が向上するとともに、シミュレーションの規模や手法も変わっていきました。ここでは粒子・格子の2つの視点でシミュレーションの発展の様子を振り返ってみましょう（★）。

N体シミュレーションの発展

石山智明（千葉大学 統合情報センター）

宇宙には、われわれが直接見ている原子などの物質のほかに、質量でその5倍程度の、重力のみ作用するダークマターと呼ばれる物質が存在します。ダークマターは宇宙初期にはほとんど一様に分布していましたが、ごくわずかな密度の揺らぎが存在しました。この揺らぎが重力によって成長し、ダークマターハローとよばれる巨大な構造を形成します。ハローはまず小さいものが形成し、それらが合体を繰り返すことで大きく成長していきます。その過程で、ハロー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ます。

このようにダークマターは、宇宙の構造形成、進化の主要な役割を果たしてきました。ダークマターの分布の進化を計算する手法に、宇宙論的N体シミュレーションがあります。ダークマターのかたまりをコンピュータ上で仮想粒子として表現し、最新の観測データから推定された密度揺らぎを再現するように粒子を分布させ、粒子間の重力を計算し運動を追跡する手法です。

スーパーコンピュータの性能が向上すると、ダークマターの粒子数を増やすことができます。これには、①より広大な宇宙空間をシミュレーションできる（図2）、②仮想粒子の質量を小さくできる（図3）、という2つの大きな恩恵があります。宇宙初期はまだ構造が十分に発達しておらず、銀河を宿するような大きいハローは多くありません。このようなハローの進化を解明するためには、より広大な宇宙空間をシミュレーションする必要があります。一方、粒子数が少ないと、シミュレーション

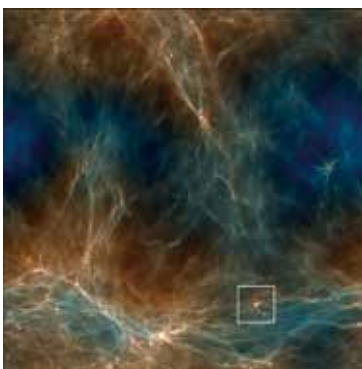


図2 アテルイ上で実行した、粒子数687億の宇宙論的N体シミュレーション。宇宙初期($z=32$)のダークマターの分布で、最小のハローとそれが合体してできるより大きいハローが無数に形成している。図中右下の白枠は、XT4で計算することができた領域である。アテルイにより、さらに大きい領域のシミュレーションが可能となり、大きいハローの中での最小ハローの分布などを調べられるようになった。（クレジット：石山智明）



図3 10年前（図3-1）と現在（図3-2）の銀河系サイズのハローのシミュレーションの比較。分解能が向上し、暗い矮小銀河や初代星が形成する小さなハローを分解でき、銀河系形成との関係が調べられるようになった。（クレジット：石山智明）

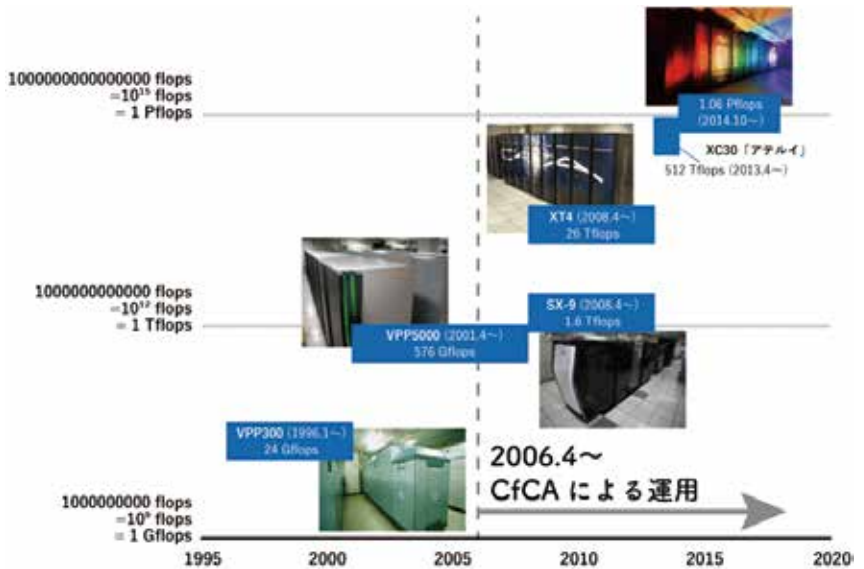
上の仮想粒子の質量が大き過ぎて、ハローの細かな構造を表現することができません。

CfCAにおけるここ10年のスーパーコンピュータの変遷は、この分野に大きな進展をもたらしました。アテルイの先代、Cray XT4が導入される以前は比較的小規模なPCクラスタ（100CPUコア程度）を用いて、最大数億粒子のシミュレーションをするのが限界でした。それがXT4時代には数十億粒子、アテルイ時代には約千億粒子にも到達しています。同時に銀河ハローの内部構造を正しく分解した上で扱える空間体積が、10年前と比べて100倍以上になり、すばる望遠鏡の超広視野主焦点カメラ Hyper Suprime-Cam (HSC) による大規模天体サーベイ観測のものに匹敵しています。銀河はハローの中に存在しているので、観測された銀河の分布とシミュレーション結果を比較することができます。

またダークマターのかたまりの質量を数百倍以上小さくできるようになり、物理的に最小のハロー（ダークマター素粒子の自由運動の大きさによって決まる）を分解した上で、より大きいハローの構造形成、進化過程を追うことが可能になりました。我々の銀河が住むハローの中での最小ハローの分布といったダークマター微細構造が明らかになり、ダークマター検出に向けた手がかりが得られています。

★宇宙空間のプラズマのシミュレーションには、粒子シミュレーションと格子シミュレーションを合わせたPIC (Particle-in-Cell) シミュレーションという方法が用いられることがあります。プラズマ粒子の運動を粒子シミュレーションで、プラズマによってできる電磁場を格子シミュレーションで計算します。

図1 国立天文台が運用するスーパーコンピュータの性能の変遷。2006年のCfCA発足当時運用していたスーパーコンピュータは富士通VPP5000 (576 Gflops, ベクトル型)。その後、2008年のCray XT4 (26 Tflops, スカラ型)とNEC SX-9 (1.6 Tflops, ベクトル型)の導入を経て、2013年からはCray XC30「アテルイ」(2014.9まで502 Tflops, 2014.10から1.058 Pflops)を運用している。この約10年の間に、スーパーコンピュータの性能は単純比較で約2000倍に向上した。



格子シミュレーションの発展：抽象モデルから精密観測との比較へ

滝脇知也 (国立天文台 理論研究部/CfCA)

格子シミュレーションを使った流体計算は天体現象を解明するために不可欠な手法です。多くのガスでできた天体は、重力によって物が落ちるときに生じるエネルギーを放射のエネルギーに変えて光っています。このエネルギーが天体の中のどこで生成され、それがどのように運ばれ、最終的に光として放出されるのか調べるには、物質の運動を移動する流体として表現して、その時間変化を追うことがもっとも直接的な方法です。その時間変化を記述する方程式は一般に極めて複雑であり、スーパーコンピュータなしには解くことができません。

星の内部のようなシステムでは、流体シミュレーションが多く用いられています。計算機の能力が上がると、運動の自由度を増やすことができます。筆者が大学院生のころには、重力崩壊型超新星爆発の研究はパソコン1台で行っていました。この程度の計算資源では、球対称1次元の運動を半径方向に限った計算しかできず、爆発を成功させることができませんでした(図4-1)。しかし、2008年からCfCAにCray XT4が導入されたことによって、コンピュータを並列的に用いた計算が可能になりました。64CPUコアの並列で、半径方向と経度方向の運動を見ることができる軸対称の2次元計算が可能となったのです(図4-2)。この2次元計算によって対流がニュートリノ加熱の効率を高め、

爆発に重要な寄与を果たすことが分かりました。ただし、2次元の計算では実際の自然と異なり、星の内部で発生する渦どうしが合体すると大きな渦になってしまうことも指摘されました。そして2013年からはアテルイが導入され、

1024CPUコアの並列で行う3次元計算が可能になり(図4-3)、ようやく定性的に現実と同じ設定で計算ができるようになったのです。

また、ブラックホールなどの降着円盤の研究にも、流体シミュレーションは多く用いられてきました。こちらでは計算機の能力に応じて入力物理が精密化されていきます。1980年代に始まった降着円盤のシミュレーションは、1990年代後半には磁場が取り入れられ、さらに2000年代には光の放射や伝搬を導入した研究が行われてきました。現在はそれらを全て取り入れ、一般相対論的な枠組みで計算が行われています(高橋&大須賀 2015, p25「ブラックホールを観る! アテルイの中の降着円盤」参照)。

このようにガスでできた天体の研究は、スーパーコンピュータの計算能力の進化と完全にリンクしています。今後さらに強力なスーパーコンピュータを使い、運動の自由度や入力物理が精密化されたモデルが研究に登場することでしょう。精度が上がった観測とモデルを比較するためにはこれらのモデルが不可欠です。

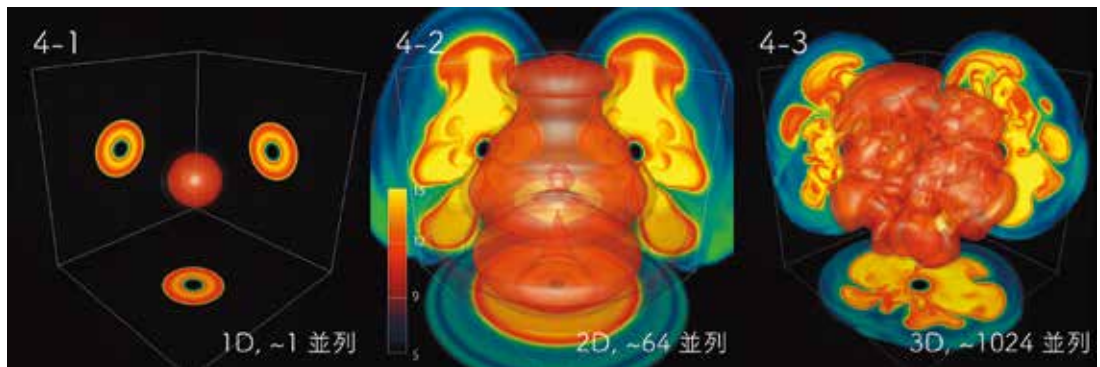



図4 超新星爆発の研究の進展。計算機資源が増大するにつれ1次元球対称(図4-1)から2次元軸対称(図4-2)、そして3次元(図4-3)へと現実的な条件のもとで計算できるようになった。色はエントロピーを書いたもので、中央の図に色の凡例が表示している。また白線で描いた壁に、それぞれの断面図を表示している。(クレジット: 滝脇知也)



「理論の望遠鏡」の作り方

対談

観山正見×小久保英一郎

(前国立天文台長)

(天文シミュレーションプロジェクト長)

シミュレーション天文学にとって不可欠な「理論の望遠鏡」は、どのように作られ、動かされているのでしょうか。その黎明期を牽引し大きく育て上げた観山正見さんと、CfCA プロジェクト長の小久保英一郎さんの対談をお送りします。

写真：飯島 裕

編集部 (以下「編」)：まずは観山さんに、計算機を用いて数値解析の研究を始めた経緯について伺います。

観山 (以下「観」)：大学院生のとき、とにかく他人がやっていない、新しいことをやろうと心に決めました。

そのころ、研究室には佐藤文隆さんや富松彰さんといった、すごく数学ができて、本当に理論に強い人たちがたくさんいましたが、相対性理論を数値計算で解いてやろうという人はいなかった。で、すぐに「これだ」と。当時は、理論というと紙とエンピツとひらめきの純粋理論の世界。佐藤さんなんかは、シミュレーションでこの高邁なアインシュタインの理論を解くつもりなの？ というような感じ。だから、敢えてそういうプロジェクトを院生4人（中村卓史さん、前田恵一さん、佐々木節さんと私）で始めました。そのころは普通の偏微分方程式だから初期値の問題にして、例えば、中性子星の合体や、星が重力収縮してブラックホールになる過程を解く。私がやっていたのは、重力波で純粋な時空の歪みだけを解くような数値計算をやっていて、D論はそれです。

小久保 (以下「小」)：天邪鬼というか、新しいもの好きなんですね。

観：研究は、人のやってない新しいことに取り組むのが、面白いのですよ。それに、こちらも若いしね。当時は中国の4人組になぞらえられたりして。

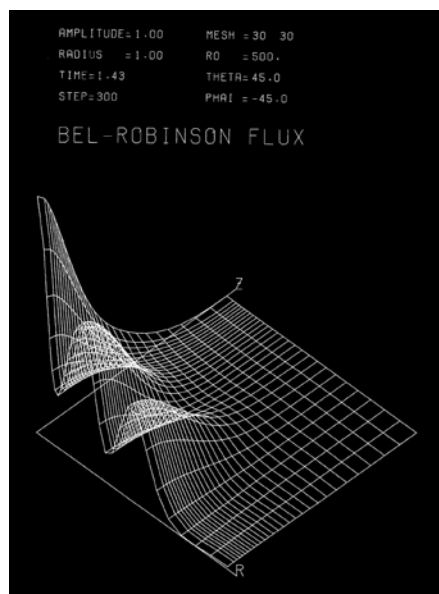


図01 重力波による時空歪みのシミュレーション画像の一コマ。

小：計算機はどんなものですか。

観：大型のものがようやくぼちぼちと大学や研究所に入り始めたころで、いろいろなところにマシンタイムを借りにきましたね。で、その結果を動画にもしました。8ミリとか16ミリで (図01)。

小：え、もう動画に？

観：そういう装置が京大の計算センターにあったね。これが、一抱えもあるようなブラウン管のお化けみたいな装置で、画面に描写というか絵を描いてくれて、それを専用の16ミリカメラで、1画面ごとに、かしゃっ、かしゃっ、自動的にコマ撮りしてくれるのです。で、これを東洋現像所 (現IMAGICA) にもって行って現像してもらうわけ。

小：おお、もう本物の映画だ。

観：で、でき上がってきたフィルム見ると、あ、うっかり失敗…撮り直し、とかね (笑)。

小：それは、何分くらいのものなのですか。

観：長いもので1本が数分です。でも、コマ数にしたら1秒30コマだから結構たいへん。上下逆さに撮ってしまったり、露出がうまくなかったりと、いろいろ試行錯誤してね…。映画の撮り方も研究して、けっこう腕を上げましたよ。

小：最初から、動画にしようと思ったのはなぜですか。

観：時間変動を追う問題なので、動画にしないとよくわからないからです。そこは、後の4D2Uにもつながっていくのだけでも…。つまり、三次元のもの三次元に見せなければいけないし、時間変動があるものは動画にしないとわからない、というのが基本的なスタンス。

小：原点は、ずっとぶれてない。

観：ちょうどそのころ、イタリアのトリエステで国際会議があって、このムービーで世界を沸かしてやろうと思って乗り込んだら、アメリカのラリー・スマーというライバルも、やっぱりムービーをもってきていて、ちょっとあっちの方が、絵が綺麗だったかな (笑)。評判はとてもよかったですね。その後、林忠四郎先生と一緒に研究をす

るようになって、星形成の問題に取り組むことになります。もう、三次元でないダメだね、ということで、メッシュという空間を分割してシミュレーションを行う手法で解いていくわけです。初めは単純に、球対称で丸いものが丸いまま落ちるようです。次に軸対称といって、軸の周りに対称な構造を動かしてみる。でも、実際に生まれる星は、ほとんどが二重星とか三重星で、単一星はとても少ないので、星ができるときに分裂の問題を扱わなければいけない。一方、星が中心にどんどん収縮していくのを追いかけていく場合、格子状のメッシュを張って計算しようと思ったら、あるところから丸いものを丸く表現できなくなるわけです。ガタガタ、つまりジャギーになるわけですね。そこで、何かうまい方法はないかなと「新しがり屋」の血が騒ぎ、日本で最初にSPH (Smoothed Particle Hydrodynamics)、いわゆる「粒子法」という手法を取り入れてみたのです。流体を粒子に分けて、重力はもちろん、流体は圧力があるから圧力も表現できるような新しいシミュレーションの手法ですね。

小：新しがり屋という観山さんのキーワードが出ました。

観：で、それにすぐ飛びついて、いろいろな分裂現象をやり始めたのが林先生。

編：弟子が弟子なら、お師匠さんも…みたいな (笑)。SPHは一般の計算科学の分野で開発された手法なのですか。

観：プラズマ科学が発祥ですね。それを本当に流体に使ってみるというアイデアで…。今やSPHは常識ですけど、そのころはオーストラリアに1グループあって、それから我々がやって…、もう本当にわずかでしたね。

小：観山さんが天文台に移ってきて (1989年)、新任は、すぐ講義を受け持たされるのですが、観山さんがマスター向けの講義をしたのです。私はそれをとって、そのときに観山さんが見せてくれたのが星形成の動画でした。

観：そうなんだ。

小：ええ。VHSか何かのテープで持ってきていて、ディスプレイをかしゃかしゃとコマ取りで撮って、それを動画にしたのだと言って見せてもらいました。星ができると

きに収縮でぐしゃっと潰れるようすです。観山さんの有名な仕事でアルファ、ベータというのがありますが、そこでパラメータを変えると、どのように潰れ方が変わっていくのか、その違いがよくわかりました。うまくシミュレーションを映像化していて、これは面白いな！と思ったのを、今もよく覚えています。

編：シミュレーションの映像化との出会いはそのときが初めて…。

小：観山さんの話を聞いたのはその講義が



観山正見 (みやま・しょうけん)

広島大学特任教授／前国立天文台長
京都大学・林 忠四郎研究室で学ぶ。

多分初めてです。そのときの講義ノートをまだ持っていますよ (図02)。そのころは、私も杉本大一郎先生の研究室にいて、そこではN体計算をワークステーションを使ってぱらぱら漫画的に可視化をするみたいなことは始めていたのです。そこで、動画の説得力と理解のしやすさ、そして楽しさにとっても興味を持ちました。とくに強く魅かれたのは、全部自分で作って、それが手元で見られるところ。それが一番楽しい。とすると、ぱらぱらでなくて滑らかに動いてほしいので、杉本先生には、無駄にきれいに可視化しているよと言われてたりすることもありましたが、それは今では、あえて皆

さんに見てもらうためにやっているところもあるけれど、やっぱり、動画から得られる理解というのは、ぱらぱらと見ていくとは違う、圧倒的な情報量の差があって、とても有効だと思うのです。

観：シミュレーション結果をプリンターで出して、データで見てもわからないよね。

小：それを動画にしてみると、あれ、これはおかしいなとか、なんでこんなふうになるのかな、とちょっとした発見があって、それをきっかけにその現象が起こる理屈を

考えたいくなるわけです。だから、ぱらぱらと動画とでは、イメージを喚起する力といったものが、断然違う。

観：だよな。

なにしろ、新しがり屋だから…

小：で、先ほどもいいましたが、観山さんのときは計算センターなどに向いて16ミリとかフィルムを使って、現像して…と苦勞をされていたのですが、私が院生のころになると、それを自分でワークステーションを使ってUNIX上で全部作れるという時代が来ていたのです。なので、それを私は自分でやり始めた。この手作り感が楽しい。例えば惑星が大きくなっていく姿とか月がで

き上がっていく姿を、実際にモニターで目の当たりにできるので、それはもう本当に楽しく研究ができる。

観：うらやましい (笑)。

小：それが今や一番最先端の人たち、私の知っている研究者の中にはiPhone上で全部やる人もいますよ。

観：隔世の感ですね。

■「理論の望遠鏡」誕生

編：国立天文台に「理論の望遠鏡」ができたいきさつを簡単におしえてください。

小：旧東京天文台を含む国立天文台の歴代コンピュータの導入の経緯や性能についての具体的な解説は、「アテルイ」も含めて2013年8月号に詳しいのでそちらを読んでいただくといいますが、そもそも「理論の望遠鏡」という、キャッチフレーズが生まれたあたりの事情は、生みの親の観山さんに聞いてみたいところですね。

観：ちょうどわたしが天文台に来たころ、理論研究者の集まりとして「理論天文学懇談会 (理論懇)」ができました (現在の「理論天文学宇宙物理学懇談会」)。で、当時、天文業界には、すでに光学赤外線天文連絡会 (光天連) や宇宙電波懇談会 (宇電懇) が

あって、すばる望遠鏡や野辺山観測所、アルマ望遠鏡といった最先端の装置をどんどん作ったり、作ろうとしていたりする。当然、理論懇でも天文シミュレーション専用のスパコンほしいよね、ということになるわけです。天文学は実験ができない分野の代名詞といったところがあるけど、高度で精密なシミュレーションができるようになれば、たとえば、ブラックホールをつくる実験をシミュレーション上で実現できる。もともと、シミュレーションには模擬実験の和訳を与えることもありますからね。こちらの気持ちとしては、観測、理論に加えて、もうひとつ「シミュレーション天文学」を旗揚げしての3極で天文学を進めるのだという意気込みです。で、それなら、計算機は比喩的に「理論の望遠鏡」に見立てると一般の人もイメージしやすいし、カッコいい! (笑)、というふうになんか決まった感じですね。

そして、実際に、たとえばこのころの重力波の発見 (編集部注: 2017年度ノーベル物理学賞受賞) は、シミュレーションによる研究結果があってこそ、観測の解析ができたわけで、これはとても画期的なこと。ひとつ夢がかないましたね。

小：観山さん含めて、当時、理論懇でスパコンを「理論の望遠鏡」として導入しようと力を尽くした人たちの先見の明は、すぐ

かったと思いますよ。今、外国の研究者から言われるのは、無料で、しかも天文学専用でここまで高性能のスーパーコンピューターを使える環境って普通はないよ、と…。それを日本がずっと持ち続けていて、おそらくシミュレーション関係の論文を書いている日本人の半数以上に我々のCfCAは協力しています。そういった基盤的なサポート体制をずっとコンスタントに続けられたことで日本のシミュレーション天文学のレベルというのは常に高水準に保たれていて世界と伍していけるような力を維持し続けていけるのだと思うのです。

編：小久保さんはスパコンとは別に重力専用計算機「GRAPE」の開発にずっと関わってきていますが、そのあたりの話をお願いします。

小：これはやはり杉本さんの教えなのですが、望遠鏡は天文学者がつくるのだから、理論の望遠鏡たるコンピューターも自分たちで作ってみてよいのではないか。問題を限定して1つの計算に特化すれば、それこそ手づくりで、経費も数百万円レベルでも、当時のスパコン並みの演算能力を

引き受けて、これは楽しかったですね。

観：自分で作ると原理も仕組みもすべて理解できるしね。

小：ですね。PCがどうやって動いているかという原理から勉強をはじめて、共通のバスがあって、そこにメモリがあり、CPUがあり、IOがあり、そこでどういう信号のやりとりをして動くのかを理解してから、その中で加速装置の部分だけつくって、そのバスにつないで、それをCPUでどうやってコントロールするかというのを全部自分で書くのですけれども、すごく今にも役に立っているというか…。そもそも計算機はどう動いているかというのがわかっていないと、どうやって速く動かすかというも手がつけれないので。私は修士でそういう計算機を作って、博士ではそれを使って惑星を作るということをやりました。

その手作り専用機を使っていろいろシミュ

観：あれは感激したね。

編：有名な月誕生のシミュレーションムービーですね。あれは小久保さん、どうして作ろうと思ったのですか。

小：戎崎俊一さんや高幣俊之さんたちが、すでにそういう試みのひとつとして、銀河の衝突のシミュレーションなどを作っていて、いいな、ああいうのをやりたいなと思って、ポストドクになったときくらいに、月の計算を始めて、それをムービーにしてみたのです。自分で見ていても、感動した



小久保英一郎 (こくぼ・えいいちろう)
国立天文台 天文シミュレーションプロジェクト (CfCA) 長
東京大学・杉本大一郎研究室で学ぶ。

自分で作ると、よく見えてきて…

持つものがつくれるはず。だったら、それを作ってみようよ、というもので、近田義広さんのアイデアを実際に形にするというGRAPEプロジェクトに参加したのです。

で、さっき、手作り感がイチバン楽しいといいましたが、わたしはもともと、手を動かして物を作るのが大好きで、物理や天文も興味あるけど、ハードウェアを作りたいというのもずっとあって、修士では重力の時間微分まで計算するスパコンの制作を

レーションを試みると、みんながうらやましがって、何でこんなすごいのをそんな規模で計算できるの？ みたいな。で、こっちも、出すもの出すもの自分でびっくりというか(笑)、とにかく、新しい世界を最初に見ることができるといのは、めっちゃ楽しかったですね。

編：そこは、新しいもの好きの共通点がありそうですね。

■「月形成シミュレーション」誕生

小：そうやって、いろいろなシミュレーションをやりながら、卓上のデスクトップでムービーを作っていたわけです。で、あるとき、月形成のシミュレーションのきれいなものをコンピューターグラフィックスにして整えてみたんです (図03・p36)。

というか格好よかったので、これはすごいぞと思って、当時、私の隣の机に、今は武蔵野美大にいる三浦均さんがポストドクで来ていて、三浦さん、これはすごくないですかと言って見てもらうと、やっぱり「すごいなー」と。で、たまたま『日経サイエンス』が可視化コンテストをやっていて、1回目を高幣さんたちが銀河の衝突で受賞していて、これをやってみましょうかと三浦さんと相談し、さらに当時芸大の院生だった友達の作曲家に声をかけて音楽をつけてもらったのです。

観：最後の場面の月にぱっと変わるところ

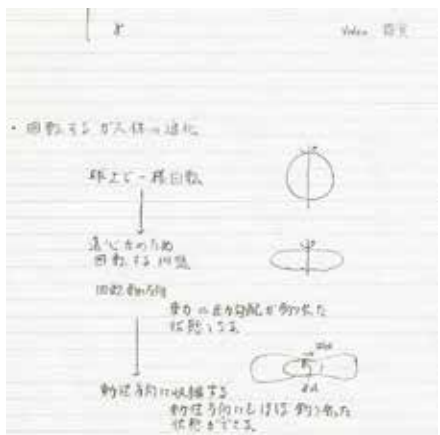


図02 観山さんの講義を聴講した当時の小久保さんのノート(右上に「Video鑑賞」のメモ書きあり)。

とか、おおっと思って。

編：もうサイエンスというよりは芸術的なレベルで見る人の心に響くというか…。

小：私が描いた元のコンテにはそこまでなかったのですが、それは三浦さんのセンスと、作曲家の音合わせの完成度のおかげです。で、こちらもびっくりするほどの反響で、本来サイエンス目的で作ったシミュレーション画像でも、芸術的に見せる工夫を施すことで、アウトリーチの面でも、とても効果的なコンテンツとして社会に受け入れてもらえるものなのだとことを発見できて、これは新鮮でした。

観：ストーリー的な感じがあって、我々が普通作るようなシミュレーションの動画とは全然違ってました。

編：日ごろコンテンツ作っている立場からすると、普通の人が見てもおもしろがって、そこからサイエンスのシミュレーションって、こういう世界なのかと自然に理解の入り口に立てる記念碑的な作品だったと思うのです。今でも、小久保さんの研究のイメージという、まず最初に、あの月のムービーを挙げる人が多いと思います。

小：確かに、今でもアメリカの大学などで講義で使っていますというメールが来たりします。もっとも4D2Uの新しいバージョンがあるので、そちらを見てくださいますかというのですけどね。

観：でも、あの最初の月の感動が一番強いよね。後のものは、もちろん計算機的には正しくなっているかもしれないけれども、

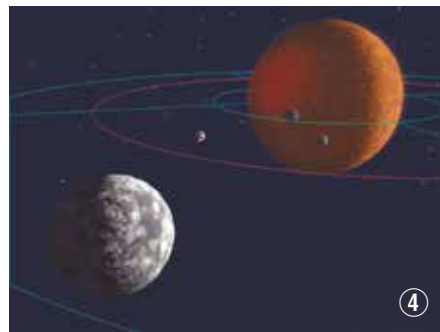
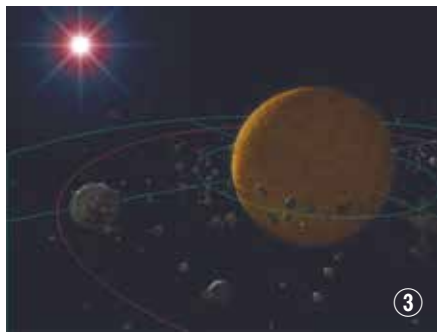
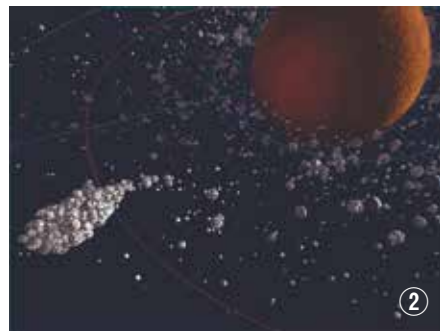
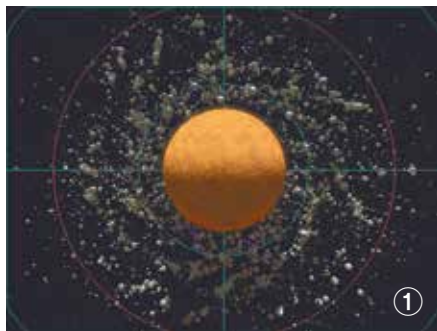


図03 月形成シミュレーションムービーの代表的なシーン(①～④へと推移)。

クレジット：三浦 均・小久保英一郎

最初ほど感動は大きくない。

編：やはり、あそこで全く違う何か新しい要素が組み合わさったものが誕生したという感じはしますね。その意味で、のちに発展していく4D2Uプロジェクトの原点に位置する作品だとも思えますね。

■ IP「133.40」誕生

観：ひとつ自慢させてもらっていい？

編：どうぞ(笑)。

観：CfCAからは離れるけど、今、天文台のみなさんがとくに意識せず使っている天文台のIPアドレスの「133.40」というの、あれは私がとったのです。

小+編：おおっ(パチパチ)。

観：133.1～133.254のBクラス(編集部注：Bクラスのアドレスをとれば、多数の自所アドレスを確保できる)は、大学や研究所、大企業に割り振られているけど、この割り振りのころは、インターネット黎明期で、一部の専門家をのぞいて、まだ海のものとも山のものともわからない時代。で、わたしはかなり初期から、村井純さんたちからいろいろ話を聞いていて、IPの重要性はわかっていたんですけど、天文台に来てみるとだれも知らない。そこで、さっそくIP委員会に申請するわけですが、天文台はたくさん観測所があるので、将来的

にBクラスを絶対とっておかないといけないぞ、とそれ最優先に手続きを進めて、決まっただけから環境が落ち着くまでは、私が管理者をしていましたね。今いる広島大学は、133.41なので、私の後にとったのだな(笑)。

編：新しがり屋の本領発揮。

小：そして、当然、計算機の世界はいずれネットワークとつながってこそ、さらなる威力を発揮すると…。

観：まあ、さすがに当時は、今のようにシミュレーションをネットを通して各大学でやりとりして絵をばんばん出すといった、ケタ違いなネットワークの時代が来るとは思ってはいませんでしたかね。

■ 「理論の望遠鏡」の動かし方

編：さて、どれだけ計算機の処理能力が向上し、ネットワークの容量が拡大しても、それを動かし活用するプログラムを作るのは、結局人間…ということで、優れたシミュレーションを行うためのプログラムの作り方についてお伺いします。

小：よく言われるのは、いくらスーパーコンピュータといっても、すべての現象を取り込めるわけではないということ。やはり近似が入ったりします。でも、だからこそ、我々計算機を走らせる側にとっての勝負どころは、そのシミュレーションの目的の本質を失わない

ように、いかに大事な部分を筋よく取り出せているか、ということになります。さらに、それをちゃんと動くプログラムにできているかというのも大切な点ですね。よく杉本さんに言われていたのは、何でも効果を入れればいいというものではない、ということです。キッチン・イン・ザ・シンクモデルというのですけれども、ぐちゃぐちゃに何でも入っている状況は、きちっと本質を取り出せていないので、例えそれでシミュレートしても、その結果がそもそも何を意味するのかがわからない。そうではなくて、一番大事なものが何であるかを吟味し、それをちゃんと取り出して、そこで何が起きるのかということを理解する…、そうやって大事なものを押さえていきなさい、との教えですね。

それと、この手の話で「優れたプログラムは美しい」というのがよく出てきて、ある時、わたしも「ちゃんとしたコードは美しいはずだ」と言ったら、「違う。動くコードが美しい」。集合的には別にかぶっていないわけではないけれど、何だかよくわからない迫力で、「動いているのが美しいのだ」と戎崎さんにいわれて、あ、面白いなと思ったことがあります。

観: 美しさを別の面から評価しているのかもしれないね。

小: ええ、まあ、本職の観山さん相手に、禅問答をやってもかなわないので深入りは避けるとして、「美しく書かれているものは動きやすい」というのは確実にあると思います。

これは、わたしがまだ院生のころの話で、ある日、うんうんいいながらプログラムを書いていると、牧野淳一郎さんや泰地真弘人さんが、生意気な院生を指導してやろうとやってきて、後ろから「何書いてんの?」「N体を改良しているのですけれど」「んー、どれどれ見せてみなよ」と乗り出してきて、いきなり「うわっ、目が腐る」「何だこれは」「こんな書いてちゃダメだよ」とか言われて、「ええっ」となっちゃうんですけど、「例えばこれを見てもいいよ」と、ぐちゃぐちゃと美しいプログラムの比較例を見せてもらい、「あー、なるほど」と思って、自分を見直すと、確かに「目が腐る」(笑)。そんな感じで、結構早い時期に美しいプログラムとは何かを上級者からたたき込まれて、だから「美しいのがよい」は確実にアリだと思います。しかも、そういう美しいプログラムはバグも入りにくいのですよね。

ところが、そういった美しさがいつも優先なのかというと、じつはそうでもなくて、たとえば、さらにプログラムをチューニングして速くしたいときには、その美しさを壊す必要

があるのです。もう途中全部、C言語だったのをアセンブラに書き直すとか、ループをアンロールしてばらすとかですね。だから、私のプログラムは今、美しく書かれているバージョンとそれをチューニングしてぐちゃぐちゃになっているものと両方を持っています。で、N体学校のような学生さん対象の講習では、美しいものを教えます。でも、これを本当に速くしたいのなら、ここは実はこう変えて、実際に私が研究で動かしているプログラムではここはこうなって「美しい」といったことを学生には話します。

編: おお、何かプログラミングの本質に迫る示唆に富んだお話のような気がしますね。観山さんは、いかがですか。

観: 私はもっぱら“ぐちゃぐちゃ”派(笑)。当時、随分書きましたけどね。

小: 観山さんのSPHはFORTRANだったのですか。

観: FORTRANです。スーパーコンピュータもそのころはFORTRAN専用だったから。

編: 観山哲学みたいなものはありますか、プログラムを書くときの。

観: よくたたき込まれたのは、上からつくれということ。部品からつくってはダメ。

小: 演繹的につくれという話ですね。「美しさ」にも、どこか通じるところが…。



観: でも、後から振り返ると、結局下から作っていることが多いのですけどね。ただ、大切な物理過程を入れるところを含めて上からつくるという心構えしていると、全体の把握や、先に話に出ていた“本質”の取り出しとその理解といったものが、階層的な切り分けや体系的意識しながらのプログラミング作業を強いられる中で、自ずと見えやすくなってくる、というのはあるのだと思います。でも、それはハウツー的にわかるものではないので、何度も場数を積んで少しずつわかってくるものなのかな……だから、学生には、教えてもなかなかそうはうまくいかない。

それと、理論の人はシミュレーションのプログラムを自分で書くのはとてもいいけれど、ほとんど自分で全部書いていた過去の経験からすると、一方で、それは我流になっているところもあって、もちろん達成感もあるし、オ



リジナリティを發揮できる面もあるけれど、ここまで計算機科学が進むと、自己完結するにはすごい努力と労力が必要なので、若い人が簡単に大きな計算には入ってこれなくなっているのではないかとこの危惧もあります。その点、外国では昔から汎用的なコードが広く共有されていて、昔は、あんなものを使ってと私にはちょっと反感もあったけど、多くの分野はそういう基本的なコードを使ってやっている実態があって、それはそれで効率化に一役買っていると思うのです。だから日本でも、やはりもうそろそろ評価を得たプログラムを公表して、きちっとした運用制度とともにそれを広く共有し活用していくような時期にきているのかなと。そのへんは、私はもう現場を離れてしまっているから、よくわからないのですが、どうなのでしょう。

小: ご指摘の通りです。今、日本は結構不思議というか、外国の人から見ると変わっていると思われていて、それはユーザーが個々に自分で書いたものを使っているという現状です。つまり、たとえば CfCA だったら、ユーザーの数だけコードが違うものが動いている。一方、外国は結構大型計算だと定番で公開されているコードみたいなものがあって、それを使うというのが普通になっています。

先ほど観山さんが言われたように、学生がD論でも修論でも何か新しいことをやるためにコードをスクラッチから書きはじめてゴールまで到達できるか、という今は難しく、つまり、簡単なことは先人たちがみなやっちゃってしまっていて、さらにそこに何か新しく足す必要があるわけです。具体的には、まず、いろいろな複雑な物理過程を正しく入れるという難しさと、今のスーパーコンピュータは並列計算機なので、そこで効率を出すという職人技も要るのです。その2つ、つまり、ちゃんと物理過程のプログラミングを正しく作り、並列マシンできちっと動かすというのを1人で、例えばドクター3年間でやりなさいという、やはり難しい…。だから、最近は日本でも、国産、もしくは国際協力でみんなで使えるコードを作ろうよ、といった動きになってきて、CfCAにも公開可能なみんなで使えるコードを作ってほしいという要望も来ています。この動きは、今後どんどん加速していくはずですが、だから、近い将来には、学生はまずとても基本的なところは自分で書いてみて原理を学ぶ。その次は公開コードでスーパーコンピュータで動くものを使ってみて、必要に応じて少し改変

して使う、といったスタイルが主流になっていくのではないかと思います。

観: なるほど。とすると、CfCAは今、学生向けのトレーニングなどもやっているけれど、それを発展させて、ハードだけでなく、そろそろそういうソフト面の提供も共同利用、共同研究としてやっていくことを考えないと…。おじさん、おばさんばかりがシミュレーションをやっている状況になっても困りますね。一方、若い人たちの現状は、たとえば、私がいたころの林研などは3年間でドクターをとるなどというのはおこがましい、といった時代だったけれど、今は早い時期に成果を出して、早くドクターをとってもらわないと、その後がなかなか厳しい時代なので、その点でもソフト面の支援は重要だと思います。これは、ことシミュレーションの世界に限らないことですけどね。

編: 原理のところはちゃんと自分で汗をかってきちんと学び、あとはいい意味で手を抜いいところは抜いて、本当に新しく創造的なところはちゃんとその部分で仕事をするというような形ですね。

観: ただ、シミュレーションで怖いのは、計算はできちゃうのだけれど、これは絶対使ってはいけないよという物理のレンジで使ったりする人がいるわけです。カメラでいうとありえない絞りとか、感度で写真を撮ってしまうといったミス。で、写真だったら被写体があって、それがちゃんと写っていなかったら、失敗だとわかるけれど、シミュレーションというのは、いわば被写体そのものを作るわけだから、大きなミスをしていてもそれなりの形で出てきちゃうと、それはウソかマコトかわからぬレベルで、えいっと発表しちゃう人もでてくる恐れを常にはらんではいれるのです。

小: 特に観山さんが始めたSPH。普通のメッシュによるシミュレーションだと途中で計算ができなくなって誤りに気づけるのですが、SPHは答えが出

てしまうのです。その点、間違っている点も答えが出てくるので相当怖い。

観: 使い手側がしっかり吟味して使わないと、とんでもないものを出してしまうおそれがある。

小: ただ、そういったことも考えると、良し悪しはわからないのですが、私の感想としては、すべて1人でやれた時代は、さぞ楽しかったのではないかと…。

観: それは何でもそうですね。

小: そして、多分、そういう人は、これからも出てくると思うのです。図抜けたハッカーで物理もわかるような人たちは、いつの時代にもいるので。とはいえ、全体としては、たとえば、コードをつくる人、高速化する人、使う人というふうに、分業が進んでいくのも必然なのかなと。京でも基本的にはそういう感じで使っていきたいというやり方になってきていますね。

編: 何事も黎明期にいた人が、きっと一番幸せなのでしょうね。

観: その分、苦労や失敗も多いけどね。でも、それも含めて、若い人には、やはり新しいことを始めてほしいですね。そうすれば、そこは常に黎明期となる可能性を秘めているので…。

編: 本日はありがとうございました。



国立天文台に東京消防庁三鷹消防署長より感謝状贈呈

小野智子 (天文情報センター)

去る9月8日、東京消防庁三鷹消防署にて、平成29年度 救急業務協力者表彰式が執り行われました。国立天文台は、三鷹地区の職員および学生を対象とした普通救命講習会を毎年開催しています。その長年にわたる救急業務への取り組みと救急行政への協力が認められ、このたび三鷹消防署長より救急業務協力者感謝状が贈呈されました。表彰式には、国立天文台を代表して高橋施設課長が出席しました。

当日は、感謝状の贈呈が行われた後、三鷹消防署長からの挨拶、三鷹市長からの祝辞に続き、三鷹消防署員による救急活動の演技披露がありました。救命処置や搬送の演技は真に迫り日頃の訓練の大切さを物語っていました。国立天文台は今後も、救命講習会の開催等を通じ救急業務への協力を続けてまいります。



前列左から秋葉洋一三鷹消防署長、高橋和久国立天文台施設課長、清原慶子三鷹市長。

人事異動

● 事務職員

発令年月日	氏名	異動種目	異動後の所属・職名等	異動前の所属・職名等
2017/7/31	飯島 国男	退職	(信州大学医学部主任(財務・研究支援グループ:会計係))	野辺山宇宙電波観測所事務室会計係主任 勤務地:野辺山
2017/8/1	高橋 優	採用	野辺山宇宙電波観測所事務室会計係主任 勤務地:野辺山	(信州大学医学部附属病院経営管理課(契約係))
2017/8/1	菅原 諭	昇任	ハワイ観測所事務部会計係長 勤務地:ヒロ	ハワイ観測所事務部会計係主任 勤務地:ヒロ

● 年俸制職員

発令年月日	氏名	異動種目	異動後の所属・職名等	異動前の所属・職名等
2017/7/30	デリデュマン セムシナン	退職		理論研究部特任教授(客員教授)
2017/7/30	デリデュマン ヤマツチ	退職		理論研究部特任教授(客員教授)
2017/8/1	大倉 悠貴	採用	ハワイ観測所特任専門員 勤務地:三鷹	
2017/8/1	樋口有理可	採用	RISE 月惑星探査検討室特任研究員(プロジェクト研究員) 勤務地:水沢	

編集後記

久々の週末に思い立って日帰りで八幡平へ。ノーブランだったがすばらしい紅葉が見られました。(は)

ASTEにオランダから持ち込まれた観測装置DESHIMAを搭載。ファーストライトがうまくいきますように。(I)

中性子星連星合体による重力波と電磁波の検出の記者発表を離れたところから見守った。残念ながらアルマでの電波の検出はなかったけれど、世紀の大発見(の発表)はとても刺激的。(h)

青空へまっすぐに上昇していく飛行機を見ていたらなんだか感動してしまいました。飛行機を見るのは飽きません。(e)

今年の特別公開は初めて子どもを連れて参加させてもらいました。他の部署の展示も回らせてもらい、子どもはとても楽しんでいたので、親としても大変うれしかったです。(K)

10月初旬にサンマを焼いてもらう機会があったのですが、炭火焼きのサンマは油の落ち具合や身のふっくら焼け具合などまさに絶品。旬の味(10月では少し遅い?)をやっといただけ今年の秋でした。(κ)

秋の気配が急に感じられるようになって、家の冬支度が間に合わない。。。。(W)

●訂正: 2017年9月号の表紙と裏表紙の通巻表示が誤って「No.230」となっていました。正しくは「No.290」です。また、15ページの記事中で「伝統的七夕とは旧暦の7月7日のこと」という記述がありましたが、正確には「伝統的七夕とは、太陽太陽暦(いわゆる旧暦)の7月7日にちなんだ決められた七夕の日のこと。」です。国立天文台では、現在、使用されていない暦に基づくものではなく、新たな基準で伝統的七夕の日を発表しており、必ずしも太陽太陽暦の七夕の日と一致するとは限りません。不正確な表現があったことをお詫びして訂正いたします(係)。

国立天文台ニュース

NAOJ NEWS

No.291 2017.10

ISSN 0915-8863

© 2017 NAOJ

(本誌記事の無断転載・放送を禁じます)

国立天文台ニュース編集委員会

●編集委員: 渡部潤一(委員長・副台長) / 小宮山 裕(ハワイ観測所) / 秦 和弘(水沢VLBI観測所) / 勝川行雄(SOLAR-C準備室) / 平松正顕(チリ観測所) / 小久保英一郎(理論研究部/天文シミュレーションプロジェクト) / 伊藤哲也(先端技術センター)

●編集: 天文情報センター出版室(高田裕行/ランドック・ラムゼイ) ●デザイン: 久保麻紀(天文情報センター)

★国立天文台ニュースに関するお問い合わせは、上記の電話あるいはFAXでお願いいたします。
なお、国立天文台ニュースは、<https://www.nao.ac.jp/naoj-news/>でもご覧いただけます。

発行日 / 2017年10月1日

発行 / 大学共同利用機関法人 自然科学研究機構

国立天文台ニュース編集委員会

〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1

TEL 0422-34-3958 (出版室)

FAX 0422-34-3952 (出版室)

国立天文台代表 TEL 0422-34-3600

質問電話 TEL 0422-34-3688

11月号は、4月号
の続編として、特集
「TMT計画を進める
人々」Vol.03をお送り
します。どうぞ、お
楽しみに!

ふしらせ



アルマ望遠鏡 観測ファイル19

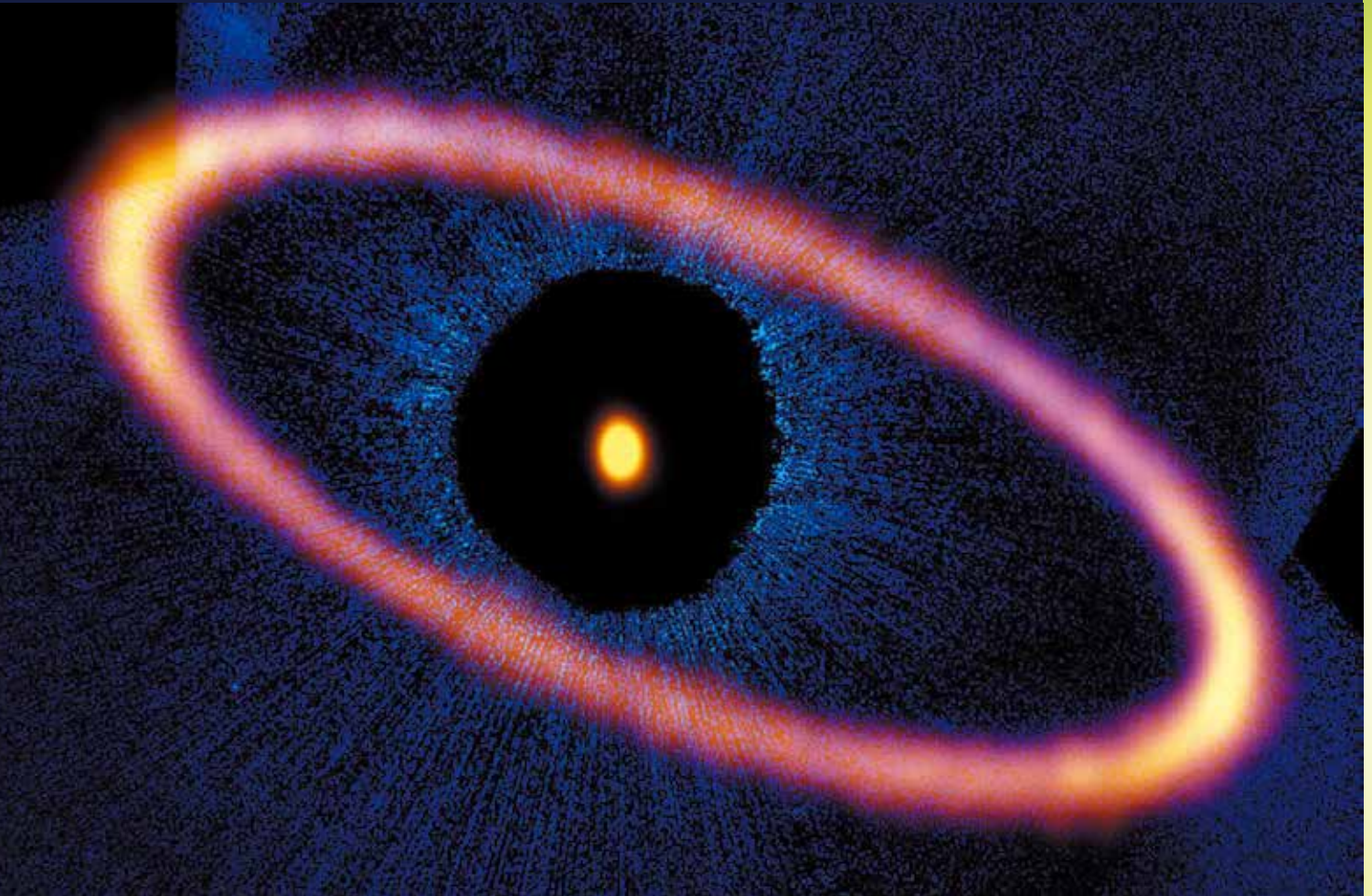
秋の空に浮かぶフォーマルハウトの環

Navigator

平松正顕 (チリ観測所)

みなみのうお座のフォーマルハウトは、秋の夜空に輝くたったひとつの一等星として知られています。ハッフル宇宙望遠鏡はこの星の光を散乱する塵の環を写し出していましたが、アルマ望遠鏡は塵が放つ電波をとらえることで、その環の姿をよりくっきりと描き出しました。画像はハッフル宇宙望遠鏡の画像を青色、アル

マ望遠鏡の画像をオレンジ色で合成したものです。可視光を観測するハッフル宇宙望遠鏡では「コロナグラフ」を使って星の光を遮る必要がありますが、アルマ望遠鏡はその必要がないため、光のノイズに邪魔されないクリアな画像が得られました。環の半径は約200億km、太陽系で言えば冥王星軌道の約3倍の大きさです。



Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), M. MacGregor; NASA/ESA Hubble, P. Kalas; B. Saxton (NRAO/AUI/NSF)

研究者の声

日下部展彦 (アストロバイオロジーセンター)

数年前に発表されたアルマ望遠鏡のフォーマルハウトのデータで、半分だけのリングの画像を見たときのことを思い出しました。その時は、ハッフル望遠鏡で見ることのできる範囲をほぼ同じ解像度で見ることができるようになったと驚いたのと同時に、電波で円盤が見えるようになれば、そこにある分子の情報から、より詳細な惑星

形成の環境情報がわかるようになるのだろうと期待していました。今回、完全にリング状に観測されたダストリングの成分が、太陽系の彗星と似ているという点も興味深く、主星(恒星)の温度が違って、惑星形成としては同じプロセスが存在するかもしれないということは惑星形成において重要な示唆になると思います。

