

祝・日本学術振興会賞・日本学士院学術奨励賞 受賞

## 初代星は明るく輝いたのか

吉田直紀

〈東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

e-mail: naoki.yoshida@ipmu.jp



いくつか理由が重なって、私が共同研究者と一緒にやってきた研究について記事を書く機会をいただいた。初代星形成に関する研究について解説したい。標準宇宙モデルに基づいた宇宙論的流体シミュレーションによって、初代星の形成過程について多くのことがわかってきた。また、遠方宇宙にある天体や銀河系内の古い星々の観測によって、宇宙初期での星形成について直接的あるいは間接的な情報を得られるようになってきている。最近の進展が著しい初代星に関する研究について、2000年以降の宇宙論や遠方宇宙の天体探索の話題も併せて紹介する。

### 1. はじめに

20世紀にビッグバン宇宙論が確立されてからは、ものごとには何でも始まりがある、ということが宇宙そのものにもあてはまることがわかり、有限の過去をもつ宇宙が考えられるようになった。そうすると星や銀河など、すべての天体は宇宙進化のどこかで誕生したことになり、宇宙の年齢や星の世代という概念も生まれた。こうして「宇宙の始まりの頃の星々」は素朴な疑問の対象であるとともに、天文学の重要な研究テーマの一つにもなり、現在まで多くの天文学者の興味をかきたてている。特に最近では、遠方宇宙の探索が進み、文字どおり宇宙の果てにある銀河やブラックホールが次々と発見され、初代の天体に対する興味は以前よりも増しているように感じられる。

時折、「種族III星（初代星）はまだ発見されてもいないので、さほど一生懸命研究しなくてもよい」といった趣旨の批判を受けることもある。数年前なら「重力波もまだ発見されていないが非常に多くの研究者がいる（そして膨大な金が投資されている）」と平然としていた（つもりであった）

のだが、重力波の方は2015年に実際に検出されたので、この論法は使えなくなってしまった。しかし、宇宙に始まりがあったのなら初代の星も必ず存在したはずである。初代星は宇宙再電離や重元素の起源といった重要な問題でも必要不可欠の要素であり、発見が待ち望まれる。

星の特徴や進化を決定づけるのはその質量である。したがって初代星がどのようなものだったか、宇宙進化の中でどのような役割を果たしたのかを理解するためには、初代星の質量を知ればよいことになる。初代星の探索や理論研究の究極的な目標もやはり初代星の質量（分布）を求めることであろう。初代星は軽かったのか重かったのか。宇宙初期に明るく輝いていたのか。大きさに述べるならその「聖杯」を求めるような研究がこれまでに繰り返されてきた。

これらの研究の展開を個人的な視点で紹介します。なお、以下の本文中では、私と共同研究者の方々とのやり取りを述べる部分ではなるべく普段どおりの呼び方を使わせていただきます。

## 2. 星が生まれるまで

### 2.1 Cosmology×Star Formation

初代星の形成は二つの側面をもつ。その第一段階では標準宇宙モデルに基づく構造形成とダークマターハローの形成が主な要素であるため、銀河形成の質量（長さ）スケールをうんと小さくしたものが初代星の形成に相当する。つまり宇宙の構造形成の特別な場合と考えることができる。一方で、水素とヘリウムを組成とする始原ガスがダークマターに取り込まれてからの第二段階では、分子ガス雲の形成や原始星の形成と成長など、現在の宇宙での星形成と共通の物理過程も多くなる。星形成の特別な場合とも言えるだろう。したがって、研究分類上は初代星の形成は宇宙論的構造形成と星形成の境界領域に位置する。2000年以前の初代星の研究は基本的にゼロ金属量のガスからの「星形成」過程についてであり、Palla先生（Francesco Palla）らは1980年代にはゼロ金属量の原始星形成と進化の先駆的な研究を行っていた<sup>1)</sup>。

1990年代後半から2000年にかけて、冷たい暗黒物質（Cold Dark Matter; CDM）を基本要素とした標準宇宙モデルが確立され、宇宙の構造形成の大筋がかたまった。2002年になってイリノイ大グループが分子ガス雲形成の宇宙論的シミュレーションを行い、構造形成と始原ガス雲形成が初めて結びついた<sup>2)</sup>。ここから初代星形成が宇宙の構造形成の1トピックとして進展することになる。もっともMartin Reesは1980年代にすでにCDMモデルに基づいた初代天体の形成を論じている<sup>3)</sup>。

以前に寄稿した月報記事<sup>4)</sup>でも少し述べたが、私はもともと初代星の形成にさほど関心があったわけではなく、宇宙の大規模構造や銀河形成に大きな興味があった。博士論文も大規模構造形成やダークマターの性質、そして数値計算的手法の研究などで構成したものになっている<sup>5)</sup>。2001年に大学院を修了した後、やや中途半端な理由でハー

バード大学天文学科（Center for Astrophysics; CfA）のポスドクになった私は、大規模構造形成から少し離れて新たなテーマにとりかかることにした。中途半端とは、さほど期待されてCfAに来たわけではないが、お客さんのように思われるほどでもない、というくらいだろうか。東京の猛暑にも匹敵する蒸し暑さが続く8月のボストンに引越したのだが、住み始めて3週間ほどで9.11のテロが起こった。あの日アメリカ本土にいた人は誰でもそうだと思うが、2001.9.11に自分がどこで何をしていたかは鮮明に覚えている。

テロが起こってからはボストンでも多くの混乱があったが、意外にも研究所は1週間ほど通常の活動に戻った。直接の被害が大きかったニューヨークとは状況も不安の度合いも全く異なっていたのだろう。しかし、たまたま9.11に東海岸に滞在していただけのゲスト研究者らは空港の閉鎖などのために帰国の航空便がしばらく手配できなかったため、結局長期滞在になる人もおり、ゲスト研究者とむしろゆっくり議論できた。そんななか、私自身はいろいろ勉強しながら、階層的構造形成が実現されるCDMモデルに基づく、銀河形成の最初期の段階に初代星が形成されるという（あまりに当たり前の）ことに気づき、銀河形成の前に「とりあえず」初代星の研究を始めることにした。

今でもあまり変わっていないが、ハーバードCfAは若手研究者が落ち着いて過ごせるような場所ではない。これは、学科全体が家族的な感じのプリンストン大宇宙科学科とは対照的で興味深い側面だと思う。しかしながら私は在籍中にはあまり雰囲気はわかっておらず、ポスドクはどんどん論文を書き続けなくてはならないものだと理解していなかった。CfAに異動する際に、大学院での指導教員から“You must publish continuously.”と最後の単語にアクセントをつけてアドバイスをもらっていたのに、全くその意味がわかっていなかった。今思えば当時のポスドク同期にはJosh

Winn, James Bullock, Stuart Wyithe, Volker Bromm らがいて、皆それぞれ大活躍していた。そして、全員今も活躍している。彼らとともに私が在籍した2001-2003年の間、私が書いた論文は分子ガス雲形成に関するもの一つだけで、これは論文数からいえば最下位だろう<sup>6)</sup>。この間、2年以上も並列計算コード開発を行い、水素-ヘリウムガスの非平衡化学や放射冷却を3次元計算に取り入れて宇宙論的流体シミュレーションを行うための準備を進めていたからではあるが、今から思えばいささかのんびりし過ぎたと思っている。幸い、ボスであった Lars Hernquist 教授はのんびりとした方で、特に成果や論文を求めてくることはなかった。当時大学院生であった Brant Robertson や Aaron Sokasian らと一緒に PC クラスターのメンテをしたり、並列計算や研究の面倒をみつづ、楽しくやっていたので、論文を書かなければ次の職がないという実感が私にはまるでなかった。

## 2.2 WMAP 1<sup>st</sup> year

私が CfA に在籍していた当時、George Field 先生はまだ頻繁に来られていて、さいわい私が始原ガスと化学反応に関するセミナー講演をしたときには2回とも来てくれた。2回目のセミナーで始原ガス雲の進化について話したあと、当時の理論グループの習慣で、近くの中華料理屋で一緒にお昼ご飯を食べた。そこで Field 先生と、ガス雲中に乱流がある場合、密度摂動が増幅されて分裂し小質量星ができる可能性について議論した。その科学的な内容についてはもう詳しくは覚えていないが、Field 先生が私に言った一言だけはよく覚えている。私が、「収縮する始原ガス雲の化学進化と分裂はまだ誰も詳しく計算していないのでわかりません。」というようなことを言うと、Field 先生は少し驚いたような、あるいは驚かすような感じで、「それなら君が計算するしかないじゃないか。」とおっしゃられた。後述するように、結局5年かけて Field 先生からの宿題を解くことになった。また、「わかっていないことは自分が計

算するしかない」との言葉（そして事実）は、今では私の研究上の指針になっている。

私がこうしてのんびり過ごしていた2000年代始めは、赤方偏移6以上のクエーサーに Gunn-Peterson トラフが見つかったり<sup>7)</sup>、金属量が太陽の10万分の1ほどの極超低金属星が見つかったりと<sup>8)</sup>、遠方宇宙あるいは初期宇宙での天体形成についての関心は高まっていた。そんななか、2003年の初頭にちょっとした出来事があった。私が（数が少ないという意味で）珠玉の論文を投稿して1週間後、WMAP 衛星による宇宙マイクロ波背景放射の観測1年目のデータ解析結果が発表され、トムソン散乱の光学的厚みが0.17もあると報告された<sup>9)</sup>。自然に解釈すると、赤方偏移17-20（宇宙年齢2億年の頃）までにはかなり星形成が進んでおり、電離紫外光が多量に放出されていたことになる。観測結果に不定性はあるものの、どうやら初代星のベビーブーム的なことが早期に起こっていたらしい。NASA が開催した WMAP 初期データ解析に関する記者会見は中継され、その中で David Spergel と John Bahcall が、「宇宙初期の水素分子が重要な役割を果たしたのだろう」と述べていた。私はこの中継を CfA で聞いていて、自分のやっている理論研究（というかシミュレーション）が意外にも役立つのかもしれないなどとぼんやりと思った。ところがボスであった Hernquist 先生は俄然興味をもち、それまでのポストドク放任主義から方針が180度変わってしまった。その日から私は毎日議論に呼び出され、その頃博士論文のために輻射輸送の計算をしていた Sokasian と組んでせっせと論文を書くことになった（図1）。実は、NASA の発表の前の週に Hernquist 先生はプリンストンで彼自身の宇宙論的銀河形成モデルに関する講演を行ったのだが、その場で Uros Seljak に「光学的厚みが0.1以上にならないモデルは完全に間違っている」などと手酷く批判されたらしく、それに対する憤慨もあったようだ。

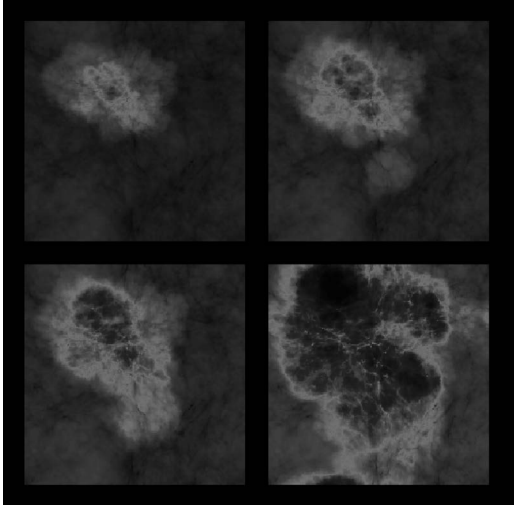


図1 初代星による宇宙再電離の3次元輻射輸送シミュレーション<sup>10)</sup>。宇宙年齢3億年の頃に初代星が誕生し、銀河間ガスを電離する様子を表す。左上パネルから順に時間が進み、右下の段階ではかなりの領域が電離されている。

かくして宇宙論的初代星形成はそれなりにホットな研究テーマとして（少なくとも一時的には）格上げされた。2003年当時は初代星形成のシミュレーションは世界でも2, 3の研究グループしかできないものだったので、星形成そのものについての研究は業界の中でもあまり進んでいなかった。当時のコンピューターではまだ計算技術的な制限もあったため、小さなダークマターハローの中で分子ガス雲が凝縮する様子を追うことができる程度であった。そのため、WMAPの初期成果の後1年ほどは早期再電離を再現するようなモデルの探索が続き、ミニクエーサーからダークマター崩壊まで、ありとあらゆる電離源を持ち出した理論モデル論文が連日のようにarxivに現れた。最近でも何らかの素粒子・宇宙関係の実験データが出るたびにさまざまな理論モデルの論文がワンサカ発表されるのを見ると、このときのことを思い出す。

ちょうどその頃に学振研究員に採択されたので、2003年春に国立天文台に異動することに

なった。天文台で杉山さん（杉山直 現・名古屋大教授）とともに、宇宙の再結合期と再電離期の間の宇宙進化について研究を進めようと思っていたのだが、結局2003年はHernquist先生のテンションが上がったままだったので、何度かポストンに戻って計算をしたり論文を書いたりした。2003年には11本も論文を書いている。その中でも、“Cosmological Implications”と題したものは私の中でも特別な論文である<sup>10)</sup>。正直、特段素晴らしいものでもなく、引用度が高いわけでもないが、この論文で宇宙再電離から重元素汚染、X線背景放射強度まで複数の要素の進化を包括的に論じ、一つのストーリーを展開することができたので、少し自信がもてるようになった。「宇宙の研究」を、職業にしてもよいかなど思ったのもこの論文ができあがったときだ。（しかし悪く書けば、ストーリーをでっちあげる能力がついたのだろう。）もっとも、論文の内容そのものはWMAP1年目の結果に偏っており、今では計算の値などはほとんど役に立たない。

天文台理論部に異動してからは、杉山さんが計算した詳細な遷移関数を使った精密なシミュレーションの準備を始めた。この頃、杉山さんが専門としていた宇宙マイクロ波背景放射や密度揺らぎの理論と初代星の形成が結びつき出して、線形理論以上のことができそうだと思うとなんだかワクワクした。しかし計算をしてみると奇妙なことが起こることに気づいた。シミュレーションで再現されるバリオン密度場のパワースペクトルの進化とバリオン速度場のパワースペクトルの進化が整合しない。原因をいろいろ調べ、杉山さんとも随分議論した結果、計算は正しく行われており、そもそも物理的にも正しいことが起こっていることがわかった。どうやら初期条件が単純化されているためだとわかり、密度の進化も速度の進化も整合的に追えるような初期条件作成法を考案した<sup>12)</sup>。

このとき、早く3次元シミュレーションをしたいために簡単に実装できる現実的な策を考えた



のだが、結局自分がそれだけで満足してしまったことが悔やまれてならない。もう少し深く考えていけば、また、私に摂動論の知識と技術があれば、この密度場進化と速度場進化の違いが重要であることに気づき、初代星形成に及ぼす影響をもっと早く明らかにできたように思う。もっと早くとは、それから数年経った2010年になってChris Hirataがバリオン速度場の進化をきっちりと定式化し、初期宇宙での超音速流の存在を明らかにしたからだ<sup>12)</sup>。本稿の最後に記すように、この超音速流の物理的効果は2017年のブラックホール形成の論文で重要になった。

### 2.3 Dalgarno 1977

こうして分子ガス雲から初代星形成に至る研究を本格的に開始したのだが、私が重要人物である大向さん（大向一行 現・東北大学教授）とどのようにして共同研究をはじめたのか、あまりはっきりとは覚えていない。ただ、2006年に発表した共著論文のきっかけはよく覚えている。私が名古屋大に赴任してすぐの頃なので2004年の初夏だったと思うが、大向さんがやってきて、次のような会話をした：

「吉田くん、このAbelらの論文にガスの降着率が出てるんやけどな、ガス雲の中心付近で値が下がってるんや。何でやろ。」

「さあー、わかりません。」

「よく見たら温度も下がって何か変なんや。ここは密度が高いから輝線輸送を解かなあかんけど、多分吉田くんならできると思うわ。簡単やで。」

「はい、わかりました。」

という感じだった。大向さんの言う「簡単やで」は多くの場合難解なのだが、とにかく大向先生の言うことなのでやるしかないと思い、早速輝線輸送の計算プログラムを作り始めた。水素分子の200以上ある回転振動準位を求め、準位間遷移のインシュタイン係数をDalgarnoの論文から入力した<sup>14)</sup>。インシュタイン係数の入力のため

に、家では子どもが寝静まった夜中に論文の表の値を「 $J=1, v=1$ は4.29」などと妻に読み上げてもらってチェックしたことを覚えている。そういえばCfAでのんびりしていた頃、Dalgarno先生とお話する機会があり、彼が放電現象や隕石落下の際の発光など、およそ普通に人が見たことのある放射過程についてはすべて準位と遷移確率を計算したことがあると（さらりと述べるのを）聞いてかなり驚いたのだった。自分もDalgarno先生のような本物の学者になるための修行をしなくてはと言い聞かせた。

2004年の夏休みはこうしてほとんど化学反応や準位計算、分配関数の計算などに費やした。高温になると分配関数が正確に計算できないということをこの頃まで知らなかった。（本物の学者とはほど遠い。）今では全く考えられないが、当時は赴任して間もない助手であったため、夏休みはほぼ丸々研究にあてることができた。来る日も来る日も昼は上記のような計算をし、家に帰ってからは野球中継を見たり、近くのナゴヤドームに試合を見に行く（そして球場でビールを飲む）という楽しい生活を送っていた。ちなみに、当時は現在のような若手スタートアップ経費の制度も充実していなかったため、助手になって最初の年度は研究費がないのが当然で、研究会などに出かけることもできなかった。計算プログラム作成にはまとまった時間が必要なので、私にとって2004年の「研究費の空白時間」はとても貴重な時間だったと今ではありがたく思う。科研費なども何年かに1回は採択されないほうが、ある種のサバティカル期間になってよいのかもしれない。また、名古屋大にいた頃は同じ研究室の松原さん（松原隆彦 現・KEK教授）のかなり近くにいることができたので、折に触れて研究の厳しさや研究者としてのスピリットを随分と学ぶことができた。厳密な計算などはかなりの時間をかけて集中してとりかからないと進められないというのも松原さんから学んだ。そんな感じで2004年は地道な作業

を続けた。

2005年始めには輝線輸送のプログラムも完成し、低解像度の3次元宇宙論的シミュレーションを行うことができた。結果は上々で、過去の研究も含めていろいろなことが理解できた。分子ガス雲の収縮も追えるようになって、星形成はかなり面白い研究テーマだと思い始めたのはこの頃からだのように思う。そう思うと、自分がそれまでやってきた、ダークマターの大規模構造の形成の計算などは何だか随分と大雑把なものにも思えてきた。ちょうどこの頃に、研究室でPCクラスターを購入できることになった。当時は名古屋大物理学教室のA研は電波天文のグループと宇宙論のグループが学科の制度上一つのユニットとして存在していた。予算の詳細は一助手の私には全くわからなかったが、いずれにせよA研電波天文グループの福井康雄先生から、理論研究の基盤として、という有難い理由でPCクラスターを購入していただけることになった。このPCクラスターは名大の理学C館の1室に設置され、それから数年の間、宇宙論的シミュレーションなどで大活躍したのだが、あるときにZ研の佐藤修二さんが「こういうのは4畳半天文学と名づけたらいいなあ。」と言ってくれた。私のお気に入りの言葉だ。私が名古屋大を去ってから数年して市來淨興くんが申しわけなさそうに、「PCクラスターをそろそろ処分してもよろしいでしょうか」と訪ねてくれて、(設置したまま移管もせずに異動してしまった私の代わりに)さまざまな処理もしてくれた。

## 2.4 Five Orders of Magnitude

分子ガス雲収縮の計算の目処がたつと、私はどちらかというところ「星が生まれたあとにどのようなことが起こるのか知りたい」と思い、星から放出される電離光によってH II領域が広がる過程の輻射輸送計算や、最後に超新星爆発が起こった際の爆風の伝播計算などにとりかかりつつあった。2004年から北山さん(北山哲 東邦大教授)と

実にいろんな計算をして<sup>15)</sup>、初代星フィードバックの解析モデルを作ったりと随分楽しかったので、それを少し近似して、その代わり3次元で長時間進化を追いたかった。しかし不思議なことに、この頃に研究議論した先生方は全く同じことを私にアドバイスしてきた。そもそも、私が名古屋大に赴任したときに研究室の教授であった池内了さんからこんなことを言われた。「吉田くんは基礎物理過程を厳密に取り入れた計算をやればええんっちゃうかな。他のことは他の人もやるから。」2005年にダーラム大学を訪れた際もCarlos Frenkに「星形成は形成過程こそが面白い。」というようなことを言われた。その数週間前に東大で須藤(靖)さんに全く同じ言葉を(言語は異なるが)言われたので、変なデジャブかと思ったくらいだ。いろいろ発展版の研究を行って論文を書きたかったのでちょっと水を差されたような気もしたが、どうも偉い先生方はそう思っているようなので、とにかく原始星ができるまできっちりやることにした。

まずは分子雲コア収縮時の熱化学不安定性の解析を行い、2006年の天文学会で結果を発表した。私としてはかなり満足のいく結果のつもりではあったが、銀河セッションで発表したためか全く場違いな感じであり、もちろん反応も薄かった。ただ、講演の後に須佐さん(須佐元 甲南大教授)が来て、「吉田くんあと5桁やなあ。」と言ってもらえたことをよく覚えている。私のシミュレーションの最高ガス密度が10の16乗(個/cc)ほどだったので、星の密度に達するまであと5桁という意味である(図2)。私自身は強く認識していなかったが、偉い先生たちから見れば、とにかく星、つまり原始星の誕生まで詳細に追うことが重要なのだとようやくわかった。2006年の計算では3体反応による水素分子生成が終了する時点までの収縮を追ったため、始原ガスが重力収縮をする際の熱化学不安定性についてははっきりと決着をつけることができた<sup>16)</sup>。論文をarxivに投稿

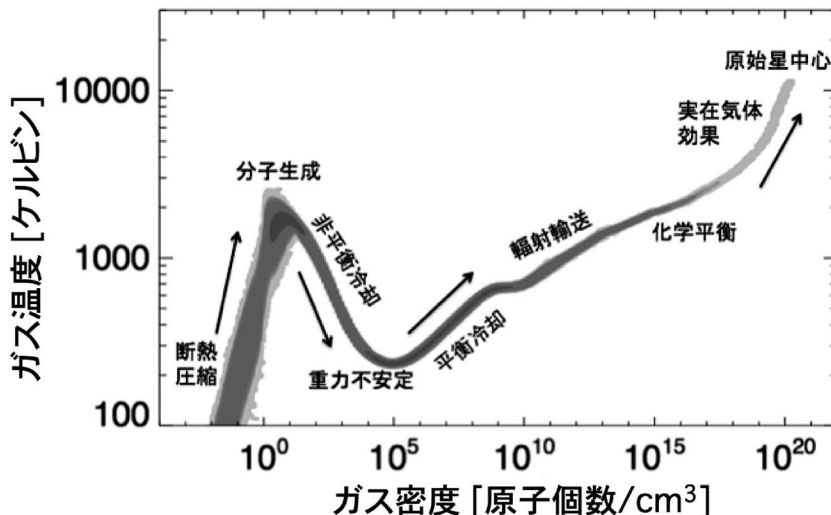


図2 水素ガスの熱化学進化を密度(横軸)-温度(縦軸)の相図の中で示す。灰色の帯は、収縮している始原ガス雲中のさまざまな部分がこの図の中で存在する領域を示している。薄く低温の状態(左下)から、重力により収縮して原始星(右上)になるまで矢印に沿って進化すると見ることが出来る。途中、本文で説明したさまざまな原子分子過程が起こり、ガスの温度進化を決める。

した際に George Field 先生にメールで報告すると、すぐに返事がきて、「安定性条件の符号が逆になっている。“不安定性条件”と改訂すれば式は直さなくてよいだろう」と有難いコメントをいただいた。ポストドクの頃に Field 先生に出された宿題を5年がかりで終わることができて肩の荷がおりた。

これらの結果をもってシアトルでの短期滞在プログラムに参加した。研究会以外では須佐さんらとマリナーズの試合を見に行ったり、独立記念日の花火を見たりで、夏のシアトルを満喫した。メインの研究会で最新の結果を発表すると、発表後に Jerry Ostriker 先生が席まで来てくれて、「すごいなあ。お前これめちゃめちゃ面白い結果やないか。この後は多分星周円盤ができて、渦状腕ができて角運動量輸送が起って原始星が成長するはずや。」と、もちろん言葉は英語だが、何だか大層褒めてくれた。Ostriker 先生の言葉は何故か私の頭の中では関西弁に翻訳される。私は厳密な計算ですこしずつ進めるつもりだったので星周円盤の進化までは頭になかったのだが、偉大な先生の

コメントはそれから2年後、われわれの2008年の論文で確かめられることとなった。

## 2.5 Aliens

この頃までは初代星の理論研究がすっきり理解できるものとして存在できた、古き良き時代であった。2007年になるとサンタフェで First Stars III 会議があり、また秋にはサンタバーバラで星形成を包括的に取り上げた研究滞在プログラムがあり、近傍の星形成領域の研究者が初代星研究にも参入してきた。これによって研究の裾野は少し広がったのだが、彼らはいわば外来種であり、sink particle など新しい手法などはもたらしたものの、それまでの厳密で着実な歩みとはまるで違った方向性を持ち込んだ。ある意味新鮮で、パワフルだった。同じ頃に素粒子物理学の研究者が dark star のトピックをもって会議や議論に参加してきた<sup>17)</sup>。彼らのアイデアはすこぶる面白かった。

私が大向さんで行ってきた研究は、基本的には素過程をできるだけ厳密に取り入れてシミュレーションを行い、確かな結果を導くというスタイル

で行ってきた。スタイルというよりルールあるいはスピリットとさえ言えるかもしれない。この「ルール」についてはTom AbelやVolker Brommなど、その頃までに活躍していた研究者も皆同じ思いだったと思う。しかしあまりにこだわったために、研究の歩み自体は遅かったのは確かである。ところが主に欧州にいた研究者が参入してからは、乱流初期条件やsink particleなどを取り入れた、複雑で一見現実的なシミュレーションが行われるようになり、正しい方向性がはっきりしない状態になった。途中で急に星ができたり、星団になったり、あるいはフィードバック過程が唐突に論じられたりと、なんでもありの研究が増えた。(そしてそれは現在まで続いている。)ある研究分野が進展する途上で不可避のことなのかもしれないが、私はなんとももどかしい気分だった。

Chris McKee先生は星形成研究の大家だが、その研究の厳密さは誰もが知るほどの偉い先生だったので、そのような状況を少し憂いてもいるようだった。そこでサンタバーバラでの滞在プログラムのときに、とにかく確実にわかっていることをまとめようと同意して、レビュー記事を書いた<sup>18)</sup>。このレビュー記事では、サンタフェ会議の際に参加者全員で議論して決めたPopIII.1, PopIII.2の定義や宇宙論やダークマターとのかわりまで解説し、しばらくは標準文献としての役割を果たしたと思う。もっとも2009年のものなので、すでに十年近くが経過した現在では理論、観測ともにアップデートが必要になっている。

## 2.6 An Equation's got to know its limitation

初代星形成の物理に話を戻そう。ガス雲密度が10の16乗(個/cc)に達して以降の進化を正確に追うためには、さらに次のような過程を取り入れる必要がある。水素分子が近接相互作用することで放出する赤外連続光の吸収を計算し、非平衡化学反応から平衡化学反応に切り替え、化学反応加熱と分子解離を計算し、最後に現実的状态方程式

を採用する(図2)。途中までは輻射に対する光学的厚みも考えず、分子率の計算にSahaの式を使ってもよいのだが、密度が10の18乗を超えると、Sahaの式が適用できなくなる。映画ダーティ・ハリーを真似るなら、「方程式は適用限界を知って使わなくてはならない。」事実、私たちの研究グループ以外はほとんどこのダーティ・ハリーのルールを忘れ、輻射輸送の効果など考えずに不適切に解像度を上げ、物理的には間違っただけの答えを得ている。挙句の果てに、適合格子法を使って解像度を上げたからnew physicsがわかった、などと平気で言っていた。言葉は悪いが、映画の中でダーティ・ハリーにやられてしまう連中と重なって見えた。連中のようないい加減な計算や解釈(言い張り)をしないのは、日本の計算天文業界のよい伝統だと思う。しかし一方で、厳密さだけに頼ると、真偽ぎりぎりのところでの議論に弱くなりがちなのは残念だ。私も含めて日本人研究者はいさぎよすぎてもったいない。

シミュレーションに必要な物理過程はすべて取り入れたので、あとは密度とともに空間解像度を上げ、原始星誕生時にできるはずの降着衝撃波を捉えればよいはずであった(図3)。2007-2008年にかけての年末年始は、この衝撃波の計算に取り掛かって正月休みどころではなかった。年末には主要な計算結果は出ていたのだが、私は念を入れた解析を進めた。年越しに帰省していた実家のパソコンからsshでPCクラスターにつないで計算し、ガスの温度や電離率を確かめた。入念にチェックした理由は、おそらく後々に他の研究グループが計算を追試するだろうと思ったからである。私は研究テーマの選び方がランダムで、確固たる方針がないのだが、この原始星の計算に関しては、さまざまなアドバイスもあってその重要性をわかっていたし、大向さんもそうだと言うので、気合いを入れて確認した。実際に2012年になってドイツのグループが別のコードで同様の計算を行い、詳細にいたって一致することを確かめた<sup>19)</sup>。



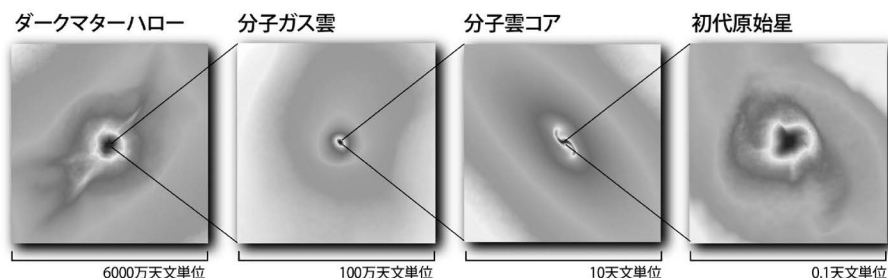


図3 初代星周辺のガス分布。左から右に中心部分をクローズアップ。左から順に巨大な暗黒物質の塊（ダークマターハロー）、その中央にできた分子ガス雲、その高密度中心部、そして一番右のパネルの中央部が生まれたばかりの原始星で、その質量はまだ太陽の100分の1でしかない。

自分の結果が出たときより、そのときのほうがほっとした。

年始から続けたチェックも一通り終わり、円盤形成や衝撃波生成も確かめられたので論文にまとめることにした<sup>20)</sup>。「原始星誕生」という論文を2008年7月に発表すると、ウォールストリートジャーナルから取材の依頼があった。Robert Lee Hotz氏が科学技術系の記事を担当しており、彼から名古屋の家に電話が掛かってきた。Hotz氏がピューリッツァー賞を受賞したこともある著名な記者であることは、後日作家の立花隆氏と対談したときに聞かされて改めておどろいた。自宅では、次男が生まれて間もない頃だったのでどの時間帯でも泣き声が響いていたが、何とか長時間電話インタビューを終えた。最後に、私のほうから「ウォールストリートジャーナルが天文学になぜ興味をもつのか。遠くの星の記事を読む読者は少ないのではないか。」と逆に質問してみた。するとHotz氏からはちょっとカッコいい答えが帰ってきた。「投資家は意外とめざといものだ。このような基礎科学の研究の発展の周辺には必ず技術開発がある。その技術の進展は必ず投資のタネに結びつくからさ。」

### 3. 星が生まれてから

#### 3.1 Protostellar Feedback

原始星形成の研究の後、落ち着く暇もなく研究

をさらに進める必要があった。欧州、アメリカ、南米、アジア、とあちこちの学会などで発表を行い、物理的にも落ち着く暇はなかった。研究発表の際には、同業の研究者の中には、「木星とあまり変わらない小さな質量のもの（原始星）ができればとできまいと、特に重要な結果ではない」などと軽い批判を加える者もいたが、私自身も、原始星ではいつまでたっても観測に結びつかないので、どうにか星の最終的な質量を求めなくてはならないと思っていた。そこで研究チームに細川隆史くんが加わることとなった。この経緯についても私はよく覚えていない。覚えているのは、細川くんが大学院生の頃にH II領域の詳細な計算をしていて<sup>21)</sup>、その結果を北山さんと一緒に詳細に議論したことと、その当時（2009年）はジェット推進研究所でHarold Yorke先生と原始星降着の多次元計算を本格的に始めようとしていたことくらいである。2009年頃の理論天文学懇談会シンポジウムかγ線バースト研究会だったと思うが、大向さんに連れられてきた細川くんに直接尋ねると、一定の降着率の場合には原始星進化と輻射フィードバックを両方同時に解けるといことだったので、宇宙論的シミュレーションで得られる降着率を入力して星の進化を計算してもらうことにした。大向さんからは「一応いろいろ教えていたから大丈夫や。」とのことだった。われわれの宇宙論的シミュレーションから得られるガス降

着率は自然に計算結果として出力されるので、まずはその結果を使えば、原始星成長と最終質量がおおよそわかりそうだと期待した。ちなみに当時は、私も大向さんも、そして研究業界的にも共通に、「初代星の典型的な質量」というものがあると思っていて、それが10太陽質量なのか、100太陽質量なのか、という点が中心的話題であった。後述するように現在では、初代星の典型的な質量というものはなく、質量分布には広がりがあるという考えが受け入れられている。

初代星の質量を決定づける原始星輻射フィードバックについては、2004年にすでにTan-McKeeの論文<sup>22)</sup>で解析的なモデルが示され、原始星からの光によって円盤があぶられることで円盤が蒸発し、星への降着が終了する（そして星の質量が確定する）という描像が得られていた。しかしいかんせん静的な解析モデルに頼っているために、降着ガスや星周円盤、星そのものの構造のダイナミックな進化は取り入れられていない。実際われわれが2011年に発表した論文では、同じ「輻射フィードバック」といってもその物理機構は異なるものである<sup>23)</sup>。Tan-McKeeが円盤の蒸発を主な原因と考えているのに対し、細川くんの輻射流体計算では、加熱されて高圧になったガスが周辺のガスを押し出す効果が卓越している。実際、宇宙論的初期条件から始めて途中で輻射流体計算に切り替え、10万年ほどの降着進化を追うと、最終的な星質量が40太陽質量ほどになった。面白いことに、当時いくつか発見されていた極超低金属量星の観測から示唆されていた初代星質量に整合する<sup>24)</sup>。数百太陽質量もの巨大星にはならず、対消滅不安定性超新星を起こさないとの結論も重要であった。

星の質量を決定づける新たな機構を発見したということで、計算結果を短い論文にまとめ、サイエンス誌に投稿したのだが、残念ながらこの論文は一度掲載拒否の憂き目にあった。しかしレフリーは改訂部とは関係のない部分を新たに批判す

るなど、対応が一貫して非合理的であったため、私も細川くんも不満もあった。このときは穏やかな細川くんも珍しく怒っていた。そこで私はサイエンス誌のエディターにメールを書くことにした。エディター宛の長いメールでは掲載拒否という結果に対して文句を言うのではなく、「非合理的な審査プロセスになってしまったが、われわれ著者とレフリー、エディターの全員で適切な審査プロセスをやり直そう。」と提案した。幸いわれわれのこの提案は受け入れられ、論文は再審査を経て無事受理、2011年11月に出版される運びとなった。なお、この際にいろいろ対応してくれたエディターは後日東京を訪れ、各地でサイエンス誌やピアレビューについての講演をしてくれた。

この細川論文は受理から電子出版まで1週間ほどと恐ろしいスケジュールで進み、細川くんは記者発表のため西海岸から弾丸ツアーで東京に戻ってきた。米国ではNASAがニュースリリースしてくれたこともあって、各種メディアに大きく取り上げられた。細川くんがテレビのニュースに出たりでちょっと有名人になったのが面白かった。

### 3.2 One Hundred First Stars

原始星フィードバックの研究が進んでいた頃、大学院生の平野信吾くんが修士課程を終えて博士課程に進学し、大規模かつ網羅的な計算を行う準備が整っていた。平野くんは、原始星成長の細川計算を多数のハローに対して行えば初代星の初期質量関数が計算できる、と大きな目標もっていた。例えば数十個から100個のサンプルを採れば何らかの統計がでてくるのではないかと、という期待があったのだろう。恥ずかしながら私自身は、この100 first stars (100 FS) のアイデアは、何年もかかってたいへんだな、などと思っただけだった。しかし、研究会で原始星成長の計算を発表するたびに参加者や座長から、ダークハローの形成など環境効果などもあるはずなので多くのサンプルで計算すべきだ、と何だかしつこく言われるので、なかば面倒に感じたのと、他の誰かがい

## 初代星質量 ← 第2世代星の情報から

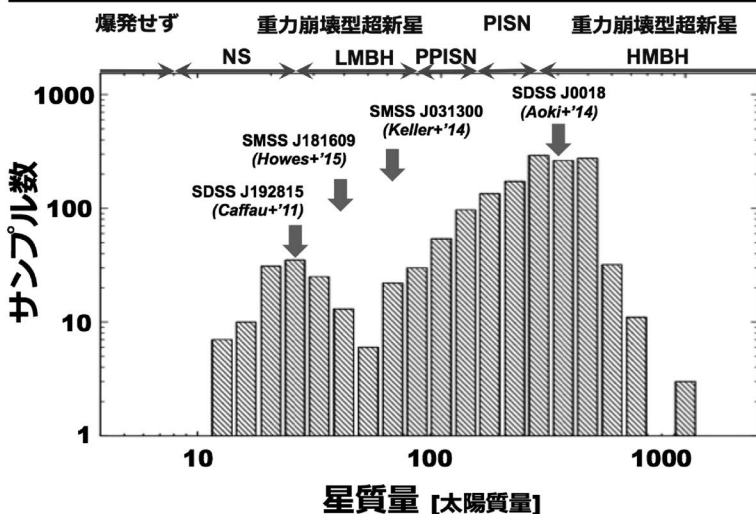


図4 100FSプロジェクトから導かれた初代星の質量分布. 図中矢印は、低金属量星の元素組成から推定された初代星の質量. まだ観測例は少ないが、質量分布の幅広さは理論、観測で整合している. 青木和光氏が初めてこのような比較を行ったので、通称“青木プロット”.

い加減な計算をするより自分たちがきっちりやるほうがよいか、との思いで平野くんに頑張ってもらうことにした. 先にも書いたが、私は多くの場合、その結果の重要性をよくは認識せずに何となく、あるいはしかたなく研究を始めてしまう癖がある. 幸いなことに、私の不明さとは関係なく平野くんの計算は大きな成果となった<sup>25)</sup>.

この論文ではまだサンプルを集めただけで、初期質量関数にはならないのだが、初代星の質量「分布」と、形成過程の多様性を示せた点で非常に重要な研究だと思っている (図4). 自分が最初に「まあいいか」などと思って始めたことが恥ずかしいくらいだ. 図4に示すように、極超低金属量星 (Extremely Metal Poor Stars; EMP) の観測から超新星爆発のモデルを介して推定される初代星の質量はかなりばらつきがあり、なおかつそれらがいずれも計算例の中に見つかることは興味深い. この1初代星超新星-1 EMPの対応がどれほど成り立つかは定かではないが、今後の観測でEMPの数が増えれば、初代星の質量分布について

て多くのことがわかるようになるだろう.

図4では10太陽質量以下の星は生まれないように見えるが、これは計算上の制限のためである. 平野論文では中心星の成長しか追っていないために、バイナリの場合のもう片方や、円盤分裂によりできる分裂片 (原始星) の進化は計算されない. 分裂片の中には小質量で終わる星もあるかもしれないので、今後は複数の星を含む系の進化を正しく追う計算が必要である. 最近の重力波検出とも関連して、連星系形成と進化の研究はますます重要になっている. 平野論文と同時期に行われていた研究では、米国、ドイツ、日本の研究グループのいずれもが円盤分裂の計算結果を示しており<sup>26), 27)</sup>、何か技術的なブレイクスルーがあれば連星系の形成ダイナミクスを追えるだろう. いずれにせよ、円盤分裂と小質量星形成、ましてや星団形成の間にはまだ大きな隔りがあり、さらなる研究の進展が期待される.

小質量星形成については最近興味深い進展があった. 長年の探索にもかかわらず、銀河系内で

金属量ゼロの星、すなわち種族III星が見つかっていない事実は重要な示唆を与えていると考えることもできる。初代星がすべて大質量星であったと考えるのはあまりに極端だが、小質量の種族III星、特に寿命が宇宙年齢程度になる0.8太陽質量以下の星がたくさん生まれた場合には現在の銀河系にも残存しているはずだ。実際に2015年にTilmanくん(Tilman Hartwig 現・東京大研究員)が行った研究では、分子ガス雲あたりに生成される小質量星の数は現在でも強く制限されることがわかる<sup>28)</sup>。2016年の石山智明くんや須佐さんの論文によると、すばる望遠鏡の次世代分光器PFSを用いたサーベイでさらに強い制限が得られると期待される<sup>29)</sup>。いつのことになるかはわからないが「種族III星の発見」は、初代星形成理論に大きなインパクトを与えるとともに、天文学史に残る事柄になるだろう。

2014年の平野論文で実感したことがもう一つある。この論文はみんなの主張を含んでいるために引用しやすいらしい。初代星の質量が太陽の10倍くらいか100倍くらいか、などと異なる主張をしている間は研究グループ間の競合が発生するが、「宇宙論的な計算を多数行くとみんなの主張を含めた結果が得られた」などとなると観測の研究者も含めて安心して引用できるのだろう。この研究業界の雰囲気がよく表れているように思う。

## 4. 残されるブラックホール

### 4.1 Supersonic Gas Streams

小質量星の形成も重要だが、私が何となく気になっていたのは超巨大ブラックホール(Supermassive Black Hole; SMBH)の起源である。Piero MadauとMartin Reesの論文<sup>30)</sup>では初代星を巨大BHの一つの起源として捉え、現在の宇宙までの進化や重力波放出まで論じている。初代星の中でも重いもの、特に300太陽質量を超えるものは進化の最後に重力崩壊によりBHになるので、たしかに初代星はSMBHの「種」として一役買っ

たのかもしれない。

しかし、これまでに観測されているような明るいクエーサーの中心には質量が太陽の10億倍を超えるブラックホールがあり、宇宙創生から数億年という短い時間でこのようなモンスターブラックホールが形づくられたのかは大きな謎である。理論的には、種の形成過程か成長過程か、あるいはBHの頻繁な合体など、どこかで無理をしなくてはならない。種BHの成長については、宇宙初期の10億年ほどの間にほぼずっとエディントン降着率を保つか、途中で超臨界降着を起こすか、成長率では無理をしないがその代わり大きな種BHから始める、などいくつかの可能性が考えられている。BH降着については、宇宙論的な設定で降着円盤まで解像して時間積分するのは現実的ではないので、ガス供給条件を設定して降着計算を行うか、あるいは宇宙論的シミュレーションの中でBH成長をモデル化するしかない<sup>31)</sup>。どちらの場合でも仮定した条件やモデルに依存するので、「そういうことがあっても特段おかしくならないか」を検証するくらいしかできない。

SMBHの種については、1960年代にMartin ReesがまとめたRees Diagramというものがあり、現代的には次の三つの機構に分けられる：(1)初代星が進化の最後に星質量BHを残し、それが(何とか)成長する。(2)1万太陽質量以上のガスが(何とか)急速に収縮し、ほぼ同質量のBHとなる。(3)宇宙初期に星団が形成され、その中心で星々が暴走的に合体し、中間質量BHを作る。

最近の流行りは上記(2)のdirect-collapseモデルと呼ばれるものだ。モデルにいくつかの垂種はあるが、基本的には、10万太陽質量程度のガスを高温に保ったまま一気に収縮させて重力崩壊させる。アイデアとしてはやや漠然としているが、大向さんの2001年の論文<sup>32)</sup>にある1ゾーン計算の結果が一つの道筋を示した。紫外線背景放射がある場合に水素分子解離が続き、ガスが水素



原子冷却だけで冷えるために、おおむね8,000 K程度の温度を保ちながら等温進化する。2010年以降にはこのシナリオに基づく研究がたくさんでている。大向さんの論文はどうも影響力が大きすぎて、今でも、大きな星を作る←ガスを高温に保つ←解離光を浴びせ続ける「しかない」と考えられている。そのため最近の研究では、分子解離を保つためにはどれくらいの紫外光が必要か、あるいは収縮の途中で分裂しないかなど、やや詳細に立ち入った研究が行われてきた<sup>33)</sup>。

2016年に平野くんがテキサス大へと旅立つ前だったと思うが、超音速流入りの初期条件を作って計算すると、なぜか質量降着率が大きくなって、重い星ができそうだといくつかの結果を見せてくれた。平野くんは2010年にHirataらが提唱した例の超音速流の影響を調べていたらしい。後日聞いたのだが、私が2015年の初代星研究会で、Smadar NaozやNick Gnedinと共著で書いたガスフラクション低減の論文<sup>34)</sup>について話したときに考え始めたとのことだった。

私は、「たまたま」珍しいハローが見つかったのだろう、と思ったのだが、密度揺らぎの振幅を変えた計算やガス流の速度を変えた計算の結果を見せてもらうにつれて、だんだんと一般的な結果である気がしてきた。さらに、ガス雲進化の途中

で水素分子が生成され、ガスが冷えてもガス降着（星の成長）は続く、という結果が出ると、これは新しい機構になるとすこぶる興味がわいてきて、結果を簡潔な論文にまとめて夏休み明けにサイエンスに投稿した。さんざん待たされた挙句にいったんは掲載拒否の判断が下されたが、エディターからの通達には若干の猶予が残されていた。原始星への降着率が大きくなる物理的な理由を明確にできるなら、再審査を行うこともやぶさかではない、との趣旨で書かれてあり、こんなにあいまいな英語表現もあるのか、と思ったくらいだが、とりあえずエディターは論文の結論の価値は認めてくれているようであった。レフリーの一人は真面目すぎる人なのか、面倒なコメントを数多く返してきたが、一つひとつ丁寧に答えていった。結果的には改訂やそのための再計算を行う過程で重要な効果を見つけることができたので、真面目なレフリーに感謝するよりほかない。シミュレーション結果を再検討すると、超音速流から生まれる分子ガス雲には強い乱流が誘起され、対応するジーンズ質量とガス降着率が增大することがわかった。実際にガス降着率は紫外線照射による等温収縮モデルの場合よりも数倍大きくなり、BHの早期形成に適している（図5）。これで自信を深めたので、さまざまな角度から検証した計算

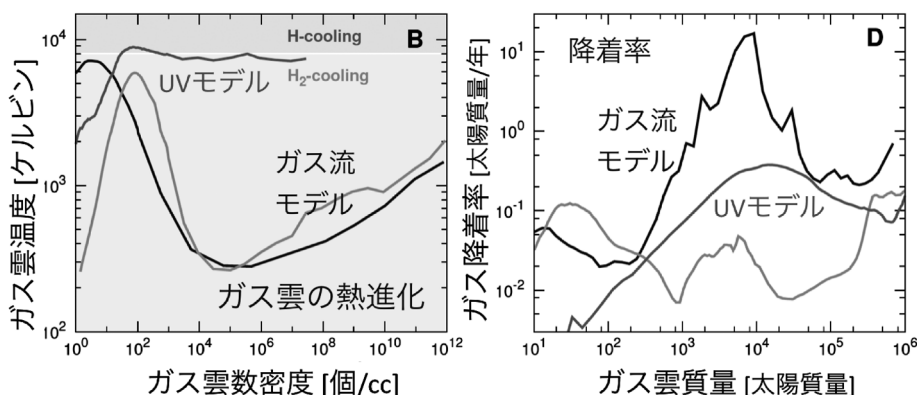


図5 初期宇宙での超音速ガス流から生まれるガス雲と紫外線照射モデルの比較。後者ではガスは高温を保ったまま進化するが、ガス降着率（右パネル中ほどの線）はむしろ低い。文献35より。

結果とともにエディターに丁寧なメールを書き、2017年3月に再投稿した。幸い今度はレフリー二人も結果の新しさを認めてくれた。丸1年かかったが、平野論文は2017年9月末に無事出版された<sup>35)</sup>。時期的に某国のミサイル問題などがあり、またその次の週はノーベル賞ウィークにあたるのでやきもきしたが、テレビ、新聞の各社に報道してもらえ、またもや平野くんが有名になったのが面白かった。ニュース配信の日には、平野くんの親戚から電話があったらしい。

この研究の重要な点は以下の3点である：

- (1) 超音速流のもとでは、ガス雲が最終的に収縮する際に乱流状態になるため、実効的ジーンズ質量が増大し、降着率も大きくなる。
- (2) この機構にモデル仮定はない。つまり、近傍に銀河（放射源）が存在したり、ダークハロー同士が高速で衝突する必要はない。
- (3) この機構が起こるハローの数は、おおよそ1ギガパーセク立方あたりに1個程度である。

論文が出たあとは、「BH形成の新たな機構」という趣旨で紹介されることも多かったが、平野くんも私も新説を提唱したかったわけではない。宇宙論的初期条件から「自然に起こる」ということに意味があると思っている（上記2項目）。

ただし、その数密度を正確に求めることは難しい。実は、投稿時には私がやや安易な計算をして、答えはよいものの途中の計算は間違っていたのだが、出版後にドイツの研究者に指摘されて慌てて修正を入れるはめになった。おかげで最終的に数値に幅をもたせて記述することができたのだが、早期のダークハロー数密度は宇宙論パラメータや密度揺らぎのパワースペクトル詳細に大きく依存するので不定性が残るのはやむを得ない。

なお、この論文では内容以外にもう一つ新しい点があった。サイエンス誌は新たな規律を定め、

出版される結果は第三者によってすべて再現されるものでなくてはならないとして、シミュレーションに用いた計算コードや初期条件など、必要な材料の全公開を要求してきた。少なくとも宇宙天文関係でこのルールが適用されたのはわれわれの論文が初めてではなかろうか。最近のさまざまな研究不正に悩まされた雑誌側の思い切った対応だが、この厳密ルールは副作用も引き起こすと思う。数年かけて開発したコードを最初の成果発表の際に公開しなくてはならないとなれば、コード開発のインセンティブも下がり、成果発表に遅れをきたす事態も考えられるだろう。今後の計算天文業界のあり方も含めて考えていきたい。

#### 4.2 Hunting for the First Stars

これまでの研究で、宇宙初期の密度揺らぎから原始星が生まれ、大質量星となって超新星爆発を起こし、あるいは巨大原始星を経てブラックホールになる過程を3次元シミュレーションで克明に追うことができた。さまざまな帰結も示すことができたので、これから進めたい研究がいくつもある。なかでも低金属量星の形成は観測にも直接つながるもので、最重要だと考えている。

小質量星は、宇宙再電離や重元素汚染を通した銀河間物質の進化に対してはあまり重要ではないが、質量が太陽の0.8倍以下の種族III星がもし誕生したならば、それらの星は現在まで生き残っているはずである。2020年から始まる、すばるPrime Focus Spectrographを使った観測で網羅的に探索できれば素晴らしい。低金属量星の観測から初代星の質量を推定する研究は統計を増やす段階にある（図4および文献36）。

私が初代星の研究を開始した2000年代初頭には、論文で「NGSTで観測すれば…」などと枕詞のように書かれていた。Next Generation Space Telescopeとは、当時まだ正式名称のなかったハッブル望遠鏡の後継機、すなわちJames Webb Space Telescope (JWST) のことである。来年(2019年)には打ち上げ予定であり、すでに初期

観測の計画が公表されている。

JWSTやThirty Meter Telescopeといえども個々の初代星が誕生する様子を直接見ることはできないが<sup>37)</sup>、その死、すなわち超新星爆発なら捉えることができる。すでにすばるを用いた超光度超新星の探索は進んでいて、田中雅臣くんや守屋堯くんらと言い出した、赤方偏移6以上の超新星探索が将来の広域サーベイで実現されることを願っている<sup>38)</sup>。

2015年に発見された巨大遠方銀河CR7のように(結局結論そのものは変わったが)、思わぬ形で初代星あるいは初代ブラックホールの痕跡が見つかる可能性も大きい<sup>39)</sup>。最近では連星大質量BHの合体による重力波が次々と検出され、大質量連星進化も重要な話題となっている。何とか3次元の宇宙論的シミュレーションで形成過程を明らかにしたい。

## 謝 辞

このたび、第13回日本学術振興会賞ならびに第13回日本学士院学術奨励賞を賜りました。ご推薦いただいた日本天文学会に感謝いたします。また、ここで記したように、初代星に関する研究は多くの先生や共同研究者、大学院生らとともに発展させてきたものです。すべての共同研究者の方に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) Palla, F., et al., 1983, ApJ, 271, 632
- 2) Abel, T., et al., 2002, Science, 295, 93
- 3) Couchman, H. M. P., & Rees, M. J., 1986, MNRAS, 221, 53
- 4) 吉田直紀, 2006, 天文月報, 99, 452
- 5) Yoshida, N., 2002, Ph.D. Thesis, Ludwig-Maximilians-Universitaet Muenchen
- 6) Yoshida, N., et al., 2003, ApJ, 592, 645
- 7) Fan, X., et al., 2001, AJ, 1222, 2833
- 8) Christlieb, N., et al., 2002, Nature, 419, 904
- 9) Spergel, D. N., et al., 2003, ApJS, 148, 175
- 10) Sokasian, A., et al., 2004, MNRAS, 350, 47

- 11) Yoshida, N., et al., 2004, ApJ, 605, L579
- 12) Yoshida, N., et al., 2003, MNRAS, 344, 481
- 13) Tselikhovich, D., & Hirata, C., 2010, PRD, 82, 083520
- 14) Turner, J., et al., 1977, ApJS, 35, 281
- 15) Kitayama, T., et al., 2004, ApJ, 613, 631
- 16) Yoshida, N., et al., 2006, ApJ, 652, 6
- 17) Spolyar, D., et al., 2008, PRL, 100, 1101
- 18) Bromm, V., et al., 2009, Nature, 459, 49
- 19) Greif, T., et al., 2012, MNRAS, 424, 399
- 20) Yoshida, N., et al., 2008, Science, 321, 669
- 21) Hosokawa, T., & Inutsuka, S., 2005, ApJ, 623, 917
- 22) Tan, J., & McKee, C. S., 2004, ApJ, 603, 383
- 23) Hosokawa, T., et al., 2011, Science, 334, 1250
- 24) Iwamoto, N., et al., 2005, Science, 309, 451
- 25) Hirano, S., et al., 2014, ApJ, 781, 60
- 26) Clark, P., et al., 2011, Science, 331, 1040
- 27) Susa, H., 2013, ApJ, 773, 185
- 28) Hartwig, T., et al., 2015, MNRAS, 447, 3892
- 29) Ishiyama, T., et al., 2016, ApJ, 826, 9
- 30) Madau, P., & Rees, M. J., 2001, ApJ, 551, L27
- 31) Li, Y., et al., 2007, ApJ, 665, 187
- 32) Omukai, K., 2001, ApJ, 546, 635
- 33) Regan, J., et al., 2017, Nature Astronomy, 1, 75
- 34) Naoz, S., et al., 2013, ApJ, 763, 27
- 35) Hirano, S., et al., 2017, Science, 357, 1375
- 36) Ishigaki, M. N., et al., 2014, ApJ, 792, L32
- 37) 谷口義明, 2017, 天文月報, 110, 598
- 38) Tanaka, M., et al., 2013, MNRAS, 435, 2483
- 39) Sobral, D., et al., 2015, ApJ, 808, 139

## How Big Were the First Stars ?

Naoki YOSHIDA

*Department of Physics, The University of Tokyo,  
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033,  
Japan*

Abstract: The formation of the first generation of stars transformed the universe from its initial simple state to one with complex but rich structures. I review recent progress in the study of the formation of the first stars and blackholes. I will also describe the recent development of observations of astronomical objects in the early universe.