

# 銀河考古学の開拓と今後の展望

千葉 柁 司

〈東北大学大学院理学研究科天文学専攻 〒980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉〉

e-mail: chiba@astr.tohoku.ac.jp



銀河考古学の分野は、ヒッパルコス衛星やガイア衛星による精密なアストロメトリ、さらにはスローン・デジタル・スカイ・サーベイやすばる望遠鏡などを用いた大規模な観測サーベイにより、近年大きく進展してきました。本稿では、私が携わってきたこの分野の初期から現在に至るまでの展開、さらにはこれからの展望について述べます。

## 1. 星の界

この度は2021年度日本天文学会林忠四郎賞を授与いただき、関係各位すべての皆様に感謝申し上げます。ここで受賞記念記事を執筆する機会をいただきましたので、私が携わってきた受賞対象研究分野の背景や研究するに至った経緯を紹介します。

まず、最近あった感慨深いエピソードから始めます。私の祖母の弟にあたる方で、小田桐孫一という思想家・教育家がいて、地元では弘前高校校長なども務めて有名な方でした\*1。私がまだ小学生だったある日、突然祖母から「孫一からお前に」と便箋をもらいました。その中には手書きで「星の界(よ)」(詞: 杉谷代水。明治の文部省唱歌)が入っていました(図1)。私が宇宙に興味あることを祖母から伝え聞いたからのようですが、幼かった私には意味がぴんとこなくて一度見た後にすぐ忘れてしまいました。ただ何となく大事にしていた、これまで失くさずに研究室机の引き出しに再読することなく何十年もお守りのよ

うにしまっていました。そして、最近改めて封を開いて歌詞を読む機会があり愕然としました。

月なきみ空に、きらめく光、  
鳴呼その星影、希望のすがた。  
人智は果てなし、無窮の遠(おち)に、  
いざ其の星影、きわめも行かん。

雲なきみ空に、横とう光、  
ああ洋々たる、銀河の流れ。  
仰ぎて眺むる、万里のあなた、  
いざ棹させよや、窮理の船に。

「無窮」とは果てしないこと、無限、永遠。「きわめも行かん」とは、深く研究して明らかにしよう、究めよう、という意味。「あなた」とは「彼方」、つまり離れた場所や方向。「窮理」とは、物事の道理・法則を明らかにすること。

まさに、これまで私が目指してきたことがこの詞に表現されていて、震えてしまいました。

\*1 津軽の貧しい農村で生まれ育ち、苦勞しながら東京大学文学部にて学び、その後にシベリア抑留などの壮絶な体験を経て津軽に戻りました。教壇に立つ独特の風貌と名物校長として心に残る講話がよく知られていてその録音記録が卒業生によって大切に残されています。

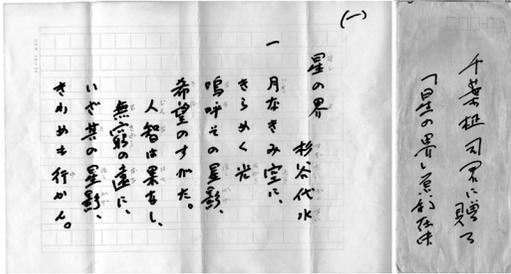


図1 星の界（詞：杉谷代水）小田桐孫一氏自筆。

## 2. 銀河考古学とは

「銀河考古学」とは、まさしく銀河をその骨格である星すなわち恒星に分離し、個々の恒星の性質に基づいて銀河の形成進化を研究する学問体系です。特にハローに存在しているような古い年齢の恒星では、その空間分布・空間運動そして恒星が持つ化学組成が銀河の過去を知るための重要な化石情報となります。これらの情報は恒星がいつどの恒星集団（矮小銀河などの銀河を作る元となった恒星系）起源で生まれてきたのか、そのルーツを辿るためのDNAのようなものです。また、このような古い年齢の恒星系は一般に銀河の重力場全体に広がっているので、恒星系の動力学構造を与える背景重力源の質量分布、特にダークマターの空間分布の重要なトレーサーになります。

近代科学の出発点は1609年にガリレオが自作の望遠鏡を天の川に向けてからとよく言われますが、銀河考古学のはじまりは恐らくヤン・オルトが1920年に太陽近傍星の動力学解析から銀河系円盤に属さない高速で運動する星（ハロー星）の発見を発表してからでしょう [1]。オルトはさらに1932年の論文で、やはり太陽近傍星の運動解析から暗くて見えない重力源「Dark Matter」の存在をはじめて示唆しています [2]。その後、銀河系形成の具体的な描像が1962年のオリン・エゲン、ドナルド・リンデンベル、アラン・サンデージによって展開され、それも太陽近傍星わずか221個の空間運動と金属量解析に基づくものでした（図

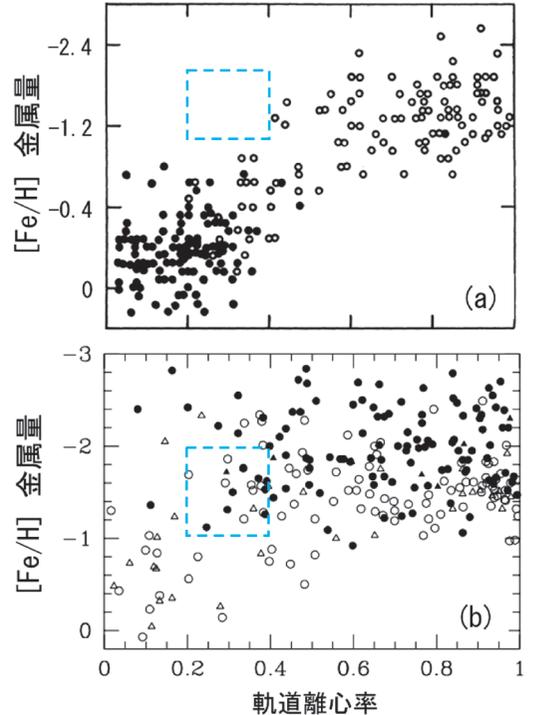


図2 (a) ELSによる太陽近傍星221個の軌道離心率と金属量  $[Fe/H]$ （元論文 [3] にある紫外超過から変換した量）の線型関係。ハロー星（白丸）のすべては円盤星（黒丸）と異なり軌道離心率が大であることから、自由落下説が提案された。(b) ヒッパルコスを用いた赤色巨星（黒）とRR Lyr（白）に対する結果 [5]。(a)と異なって線型関係はなく、軌道離心率小で金属量が少ないハロー星が多くある（青色破線四角は分布の比較のため挿入）。

2a) [3]。著者の頭文字を取ってELSと呼ばれるこの論文では、金属量が少ない（すなわち古い年齢の）ハロー星には動径方向に伸びた軌道の星（軌道離心率が大の星）しかないことから銀河系は原始銀河雲から自由落下の速い時間でハローから円盤部が形成されたという描像を発表し、その後の銀河形成研究に多大な影響を与えました。

## 3. ヒッパルコス衛星

このような研究で重要なのは、恒星までの正確な距離と空間運動、さらに個々の恒星の化学組成

について、できるだけ多くのサンプルで調べることです。前者に関しては、1989年に打ち上げられ1993年まで運用された世界初の位置天文衛星ヒッパルコスによって、約12等級までの恒星12万個に対して三角視差と固有運動が決定されました。測定誤差は約1ミリ秒角で地上観測による精度より大きく向上しました。この衛星によるカタログは1997年に公開され多大な進展をもたらしました [4]。

この前年に私は国立天文台位置天文天体力学系に赴任したばかりでした。ヒッパルコスカタログの一般公開の数ヵ月前に、宮本昌典さん、吉井譲さんらが前もって提案し採択されていた金属欠乏の赤色巨星122個とRR Lyr変光星124個のデータが彼らに優先して届き、これらを解析するチャンスがいただきました。そして、これが私自身の研究ばかりでなく、その後の当該分野を大きく動かすきっかけとなりました。それまで私は別の研究に携わっていましたが、この恒星を軸にした銀河系形成研究については前から興味を持っていたのと、天文台に異動したばかりで新しい研究に挑戦しようとギラギラ燃えていました (!)。

ヒッパルコスのアストロメトリ<sup>\*2</sup>データと他論文から集約した個々の恒星の視線速度と金属量を組み合わせて、ハロー星の3次元速度分布や軌道分布などを計算し、1998年の論文 [5] で発表しました (図2b)。ELS論文では、 $[\text{Fe}/\text{H}] < -1$  (太陽金属量の10分の1より少) のような金属欠乏星では直線運動的な軌道しかなくそれが単一原始銀河雲の自由落下による銀河系形成シナリオに至ったわけですが、図2bからは軌道離心率が小さいハロー星も多く存在していることがわかります。つまり、単純な自由落下説では説明できないことがわかりました。注意すべきこととして、このような改訂に至ったのは、正確なアストロメトリだけでなく精度が十分な恒星分光データ、そし

てバイアスのないサンプリングにあり、私達のサンプルは数が少ないもののこれらをすべて満たした優れたデータセットでした。

#### 4. 新たな銀河形成描像の展開

その頃には銀河形成の一般的描像に関しては、サイモン・ホワイトらがリードしてきた冷たい暗黒物質 (CDM) モデルによる階層的合体説、すなわち小さなものが重力的に集まって合体を繰り返しながら大きなものが形成されるという説が次第に普及しつつありました。そこで、戸次賢治さんと共に数値シミュレーションを実行し、この説に基づいてヒッパルコスを用いたハロー星の軌道離心率分布を自然に理解できることをはじめて導きました [6, 7]。ELS論文から40年近く経てようやく決着が着いた結果になりました。

一方、思いがけない展開もありました。その頃マックスプランク研究所での研究会に参加したところ、ホワイトの学生だったアミナ・ヘルミさんが話しかけてきて、私たちの仕事に大変興味がありそのサンプルを別の視点でいろいろ調べているとのことでした。ホワイトの講演でも私たちの仕事を取り上げられて気分が高揚していたところでしたが、しばらくして彼らは後に有名となるNature論文を1999年に発表しました [8]。その論文では、私たちのサンプルを角運動量空間で調べ、一定のサブ構造らしきものが一つあり、それは銀河系の形成過程における過去の矮小銀河の合体履歴の証拠では、という議論を展開していました。正直言えばサブ構造も微妙で少々強引な感じだったものの、私たちはそのような視点を調べていなかったこともあり、悔しすぎてしばらく眠れない日々でした。そのサブ構造は後年ヘルミストリームと呼ばれ、銀河系で階層的合体の直接証拠が初めて見つかったという点で当該分野では重要なマイルストーンになりました。なお、このサブ

\*2 天体の天球面上での位置を計測することにより、天体までの年周視差 (距離) や固有運動の研究を行う学問体系。

構造はヒッパルコス衛星の後継機として2013年に打ち上げられたガイア衛星データでも確認されていて、新しいサブ構造もたくさん見つかってきています [9].

さらに、1997年に京都で開かれた国際天文学連合の研究会にて、この研究(論文 [5])を口頭発表した機にティモシー・ピアーズさんと会い共同研究に発展しました。地上望遠鏡でそれまで蓄積されていた金属欠乏星とその固有運動情報などをひとつひとつ手作業で集約して、頑張っただけで1,200個以上のサンプルを作り上げ、やろうと思った解析をすべてやり遂げて2000年の論文に発表しました [10]。気が遠くなるような作業と解析でしたが、もっと先んじた結果を絶対に出すぞという大きな気概がありました。サンプル星の全エネルギーと角運動量を用いた位相空間にはいくつもの重要な特徴があり(図3)、近年の研究展開につながる結果になりました。

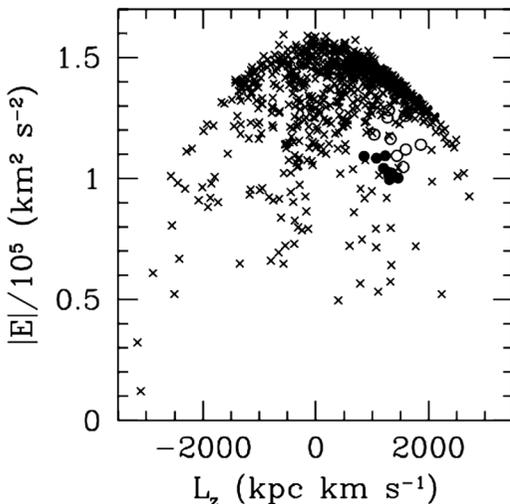


図3 太陽近傍星の全エネルギー(の絶対値)  $|E|$  と銀河回転軸方向の角運動量  $L_z$  との関係 [10]。黒丸はヘルミストリームに所属する星。  $L_z$  が0付近に伸びる構造は、後にガイア衛星で判明したガイア・エンセラドスの一部だった。

## 5. 冷たい暗黒物質の危機

やはりちょうどその頃、それまでに銀河形成の標準理論と思われはじめていたCDMモデルに対して、ターニングポイントとなる事態が起きました。アナトリ・クリピンらがそれまでになく高分解能のN体シミュレーションを実施し、銀河系サイズのハローに何百もの小さなサブハローが束縛されていることを1999年の論文で発表しました [11]。同年にベン・ムーアらも同様の結果を発表し [12]、その頃までに知られていた銀河系衛星銀河11個に比べて圧倒的にサブハロー数が多いことから、ミッシングサテライト問題と呼ばれCDMモデルの重大危機とされてきました。この頃私は天文台理論部のセミナーによくお邪魔していましたが、印刷したムーアらの論文の図を近くにいた誰かに(記憶では戸谷友則さんに)見せながら「これすごいなあ」と会話していた記憶があります。

研究者は「…問題」、「…テンション」などは大好物なので、このCDMモデルが危機となるテーマには多くの研究者がこれまで関わって(群がって)きており、私もそのひとりです。

もしこのような多くのCDMサブハローが存在するならば、光で見えるものの天体現象に何らかのシグナルが現れないか、と考えていました。その一つに、遠方のクエーサーなどの光源に対する重力レンズ現象が多数のサブハローの存在によって影響を受ける可能性があります。ちょうどその頃、クエーサーの4重像レンズにおいて、レンズ像間のフラックス比(明るさの比)が標準のレンズモデルでは説明できないもの(フラックス比異常)がいくつか報告されていました(図4)。私はこれこそまさに多数のサブハローの影響ではないかと考え、CDMモデルで予言されるサブハローの存在確率から観測されるフラックス比異常の頻度が十分に説明可能という論文を2002年に出版しました [13]。同様の考察をした論文もい

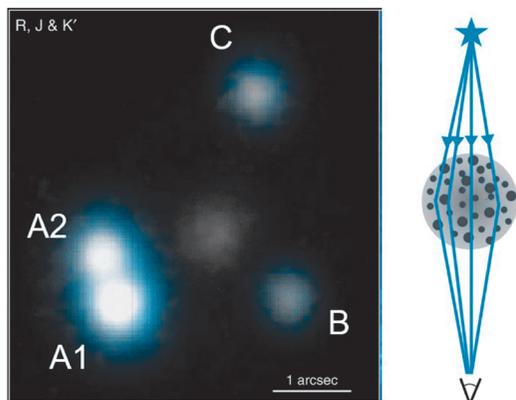


図4 左: すばる望遠鏡CISCOによる4重像レンズPG1115+080(すばるホームページ) [15]. 遠方にあるクェーサーからの光が銀河レンズによって4つの像(A1, A2, B, C)に分裂している. フラックス比A2/A1が1でない異常比を示す. 右: 多くのサブハロー(小さな黒丸)を持つ銀河ハローによる重力レンズ現象の概念図. サブハローがレンズ像のフラックスに影響を与える.

くつか同時期に出され, その後のこの分野すなわち重力レンズによる暗黒物質サブ構造の研究が発展する起爆剤になったと思います [14].

サブハローが多数あると, 光に対する影響である重力レンズだけでなく, 恒星系にも一定の動力学的な影響を与えることが期待されます. その対象のひとつに, 銀河系の中にある恒星ストリームというものがあり, 銀河系の潮汐場によって矮小銀河や球状星団などが細長く伸ばされてできます. これらの近くをサブハローが通ると恒星ストリームに目に見える影響が出るであろうという計算が, キャサリン・ジョンストン, デービッド・スパーゲルらによって2002年に発表されました [16]. この論文はやはりその後の恒星ストリームを用いたサブハロー探査の研究の起爆剤となり現在に至っています. 私たちのグループでは, 多数のサブハローが銀河円盤の力学進化に重要な影響を与

え, 特に「厚い円盤」と呼ばれる銀河円盤成分の形成と関係があるという論文を2006年に発表しました [17].

## 6. ビッグデータの時代へ: SDSS, すばる, そしてガイア

これまで述べてきたように, この分野は2000年前後が大きな転回時期でした. そして, 様々な未解決問題を明らかにするために, より大きくかつ正確な観測データセットを求めて系統的な大観測サーベイが行われるようになりました. その中でも最も重要な観測プロジェクトはスローン・デジタル・スカイ・サーベイ (SDSS) であると言っても過言ではありません. デジタイズされた大量の天体データがカタログ化され, 誰でも瞬時にダウンロードして研究に使えるようになりました. それまでは, 主に研究者の個別の目的に準じた観測データをひとつひとつ集約しながら進めてきましたので, まさに革命的な転換点となりました. ビッグデータはすでにあるのでそれから何か新しいことを引き出す, そんな研究スタイルがSDSSを機に確立してきたと思います\*3.

SDSSカタログからは, ケンブリッジ大のヴァズィリイ・ペロクロフらのグループがたくさんの暗い銀河系衛星銀河を発見しました [18]. 新しい恒星ストリームも見つかり, 銀河考古学が一気に進みました. 私たちのグループでもSDSSカタログからハローと厚い円盤成分に属する多数の恒星を抜き出し, 恒星系ハローが内側の少し潰れた形の inner halo と外側に広がった outer halo の2成分になっていることを2007, 2010年の論文で発表しました [19, 20]. こうした複雑な恒星系ハロー, すなわち大局的には2成分の動力学構造, 局所的にはサブ構造を多く含む特徴から, 銀河系が過去にどのような合体・降着史を経て現在の構

\*3 SDSSリーダーのジム・ガンさんが2019年京都賞を受賞された折の記念講演会に出席したとき, 参加者の方々とジムの貢献はノーベル賞3つ, 4つくらいに値すると話しました. 本当にそう思います.

造に至ったのか、さらにはアンドロメダ銀河など他銀河との形成史の違いは何かを明らかにすることが目標となってきます。

すばる望遠鏡でも新たな時代になってきました。戦略枠（SSP）という観測プログラムが設定され、新装置が立ち上がるタイミングでそれをういた大きなサーベイ観測ができるようになりました。そこでHyper Suprime-Cam（HSC）の登場です。マルチ波長バンドでWide, Deep, UltraDeepの3つのプログラムが実行され、まさに次世代に残る天体カタログを作り上げました [21]。

私たちのグループではこのいわゆるHSC-SSPカタログから銀河系ハローの情報を引き出すことによって、銀河系形成に関わるいくつかの重要な成果を得ることができました [22]。

まず、Wideのデータから、SDSSで行われたように銀河系ハローにありしかもSDSSでは見つからないようなハロー遠方にある暗い衛星（サテライト）銀河を探索し、いくつかの候補天体を発見しました [23]。当時の大学院修士学生だった本間大輔さんの努力のおかげです。そして、HSC-SSPで観測された領域の体積と領域内のサテライト数の統計をCDMモデルによる予言と比較した結果、ミッシングサテライト問題が解決される方向にあることがわかりました。ポイントとしては、HSC-SSPによってこれまで知られていなかったハローの外側にあるサテライトを発見したことにあります。探せばもっとありそうです。

また、これも当時の大学院修士学生だった福島徹也さんの仕事ですが、Wideのマルチバンドデータを用いてハローの遠方（中心から50 kpc以遠）にある青色水平分枝星を抽出しその空間分布を決めることができました [24]。これまではRR Lyrなどをトレーサーとしてハローの内側の空間分布は知られていましたので、一気にハローの外側まで届き、しかも恒星系ハローの端が見えてきました（図5）。すばる望遠鏡とHSCの組み合わせの威力です。興味深いことに、この解析が

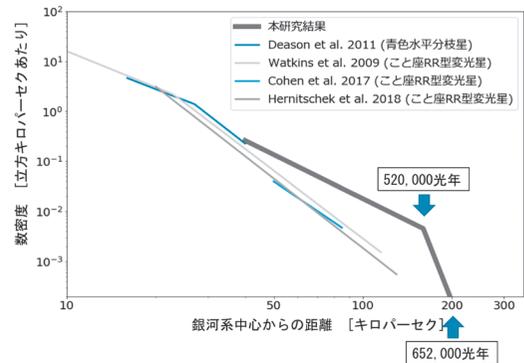


図5 HSC-SSPから得られた銀河系ハローの青色水平分枝星（太い実線）の数密度分布。銀河系中心から52万光年（約160 kpc）の場所で急激に減少。より内側の半径にある他の細い線は先行研究の結果で、ハロー外側部の太い実線よりも傾きが急になっている。

ら導かれたハローの外側の密度分布が内側のハローよりも傾きが緩やかになっていましたが、これは実は最新のCDMモデルに基づく銀河系ハローの形成シミュレーションとまさに合致した結果でした [25]。つまり、内側の恒星系ハローはもともとの母銀河ダークハローの中で形成されたもの、すなわちin situ haloと最近呼ばれているものに対して、外側の恒星系ハローは外から多くの小銀河の形で降着してきたex situ (accreted) haloでその密度分布の傾きが緩やかになる、というものです [25]。

そしてガイア衛星の登場です。2018年から精密で大量のアstrometryデータ、さらに同時に視線速度と化学組成情報が公開されています [26]。アstrometryの精度は（明るい星では）10マイクロ秒角のオーダーで星の数も10億個を超えています。まさにビッグデータを用いた精密銀河考古学ができます。誰でもいつでもガイア衛星のカタログ、ならびに他のSDSSも含む分光カタログをダウンロードし、様々な視点からデータサイエンス的に銀河系の様子を調べられる時代になってきました。また、これらの大量の恒星の動力学状態や軌道積分を簡単に計算できるアプリも

開発され、それも誰でもアクセスして使えるようになりました。20年以上前に1個1個の星に対して手作業で個別のデータを集め、さらに独自にコードを開発して恒星系の化学動力学を調べていたときからは本当に隔世の感があります。

## 7. 今後の展開

暗黒物質の正体に関しては、CDMモデルに代わるものが近年多く出されていてずばり混沌とした状態に陥っています。ポイントとしては、1 Mpcを超える大スケールではCDMと同様の振る舞いをし、問題となっている小スケールではCDMモデルの抱える問題（ミッシングサテライト問題、コア-カスプ問題など）を解決するような振る舞いをするものです。その例として、WDM, SIDMとよばれるものがあります。また暗黒物質粒子の質量が $10^{-22}$  eV程度ととても軽いものも提案されており、その振る舞いからファジー暗黒物質（FDM）とよばれていて最近大いに注目されています [27]。

銀河系の構造についても、ガイア衛星のデータから新しい謎が出てきました。そのひとつに大マゼラン雲（LMC）の質量があります。これまでは $2 \times 10^{10}$ 太陽質量で銀河系の衛星銀河として少なくとも数周回は軌道運動をしていると考えられてきました。ところが、ガイア衛星による恒星ストリームの運動解析から、これまでの評価より10倍もある $10^{11}$ 太陽質量の可能性が出てきました [28]。もし本当だとすると、LMCは今初めて銀河系にやってきて、さらに銀河系本体のダークハローや恒星系ハローなどに大きな摂動を与えている可能性があります。さあどうでしょうか。さらに、ガイア衛星のデータから銀河系円盤本体が大きく波打っていて、特に円盤の外側に向かって赤道面からずれている様子なども浮かび上がって

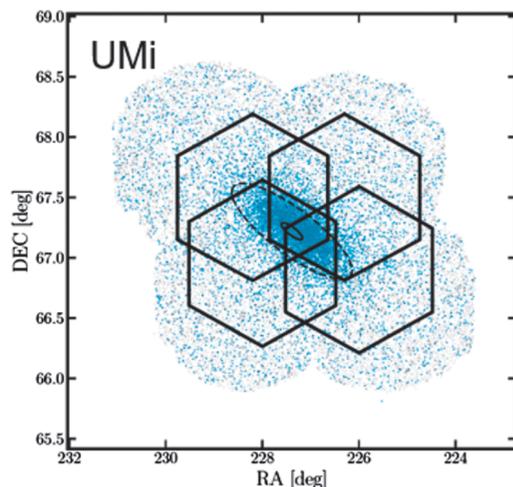


図6 こぐま座矮小楕円体銀河のHSC測光画像とPFSのポインティング（六角形）のプラン。破線の楕円は潮汐半径の目安であるが、これを超えてメンバー星が大きく広がっている（林航平氏による）。

きました。このことから最近では銀河系振動学（Galactic seismology）とよばれ [29]\*<sup>4</sup>その原因について多視点から考察されています。

これらの新しい重要問題に対して正に答えを出すものとして、現在準備中ですばるに搭載される主焦点多天体分光器Prime Focus Spectrograph（PFS）が期待されます。ターゲットとしてはまず暗黒物質のかたまりと言っていい銀河系の矮小楕円体銀河です。わずか数ポインティングで各銀河をカバーし、何千もの星に対して視線速度と化学組成を同時に測定できます（図6）。これらの星の動力学解析に基づいて背景の重力場すなわち暗黒物質の分布がわかり、この情報に基づいてどの暗黒物質候補がベストか決まります。また、この観測では同時に前景のハロー星もターゲットになるので、ハロー星のダイナミクス、特にLMCによって影響があるかどうか手がかりが得られます。PFSを用いてさらに銀河系円盤外側の振動状

\*<sup>4</sup> 'galactoseismology'ともよばれています [30]。なお、'galactic seismology'という言葉を最初に用いたのは、[29]の文献によると家正則さんの1985年のIAU集録論文です [31]。

態, そしてアンドロメダ銀河とM33のハロー・円盤星の化学動力学構造についても多数の分光観測から解析する計画を立てています. このような銀河考古学データは, ほかでは実現できない大変貴重なものになります.

HSCを使ったサイエンスも続いています. 高田昌広さんを中心とするグループではHSC-SSPのデータから恒星の固有運動解析を進めており, 銀河系ハローの新しい構造が見えてきました[32]. 私たちの方は新しい狭帯域フィルター(NB395, NB430)を作製し, 超金属欠乏星探査を始めています.

日本ではさらにJASMINE衛星が銀河系中心域の恒星系動力学を明らかにするとともに, TMT, WFIRST衛星により近傍銀河の最深部が探求され, 銀河考古学の新しい展開が起るでしょう.

「いざ其の星影, きわめも行かん。」

## 8. 終わりに

まさに10年はひと昔. ヒッパルコス衛星からSDSS, すばる, そしてガイア衛星といった新しい観測装置とそれによる大量データが大体10年ごとに実現するタイミングで, 銀河系の化学動力学構造の描像も大きく進化してきました. 20年以上前まではたかだか数百個程度の恒星を使って研究を進めていた状況から, 今や普通に万や億単位の恒星数を用いたデータサイエンスの時代になりました. 人の目では判断できないような恒星系の統計的性質の解析, たとえば位相空間上のクラスターリングを緻密に解析できるようなデータ数と精度が保証される状況になりました.

一方で, データの量・質の向上とともに私たちの銀河系形成に関する理論的理解の質が向上しているとはあまり言いがたいです. 星形成や超新星爆発とフィードバック, 化学元素のミキシングといった複雑な物理過程の理解はまだまだだと思います. また, 銀河系形成における階層的合体の過去を実際にどこまで追跡できるのか, どの程度現在

の化学動力学情報に残存しているのか, などの理論的理解は未だに不明確なところがあります. ビッグデータの時代にあっても, 本質を見極める力, 物理的な洞察力はもっと重要になっていて, これからもっと窮めていきたいと思います.

「いざ棹させよや, 窮理の船に。」航海は続きます.

## 謝辞

この度は大きな賞をいただいて本当に驚き恐縮しておりますが, 偉大な研究成果を達成している先輩方にもっと近づけるようさらに精進するとともに, 本受賞が当該分野に携わる若手研究者や学生のみなさんの励みになれば幸いです. これまで一緒に共同研究をしてくださった方々, 研究の刺激を与えてくださった先輩の方々, そして, 孫一人さんをはじめこれまで応援してくれた天国にいる家族のみんなに感謝したいと思います.

## 参考文献

- [1] Oort, J. H., 1922, BAN, 1, 133
- [2] Oort, J. H., 1932, BAN, 6, 249
- [3] Eggen, O. J., et al., 1962, ApJ, 136, 748
- [4] ESA ed. 1997, ESA SP-1200: The HIPPARCOS and TYCHO Catalogues ESA, Noordwijk
- [5] Chiba, M., & Yoshii, Y., 1998, AJ, 115, 168
- [6] Bekki, K., & Chiba, M., 2000, ApJ, 534, L89
- [7] Bekki, K., & Chiba, M., 2001, ApJ, 558, 666
- [8] Helmi, A., et al., 1999, Nature, 402, 53
- [9] Helmi, A., 2020, ARAA, 58, 205
- [10] Chiba, M., & Beers, T. C., 2000, AJ, 119, 2843
- [11] Klypin, A., et al., 1999, ApJ, 522, 82
- [12] Moore, B., et al., 1999, ApJ, 524, L19
- [13] Chiba, M., 2002, ApJ, 565, 17
- [14] 千葉証司, 2005, 天文月報, 98, 783
- [15] <https://subarutelescope.org/en/gallery/>
- [16] Johnston, K. V., et al., 2002, ApJ, 570, 656
- [17] Hayashi, H., & Chiba, M., 2006, PASJ, 58, 835
- [18] Belokurov, V., et al., 2006, ApJ, 647, L111
- [19] Carollo, D., et al., 2007, Nature, 450, 7172
- [20] Carollo, D., et al., 2010, ApJ, 712, 692
- [21] 高田昌広, 2019, 天文月報, 112, 89
- [22] 千葉証司, 2019, 天文月報, 112, 220
- [23] Homma, D., et al., 2019, PASJ, 71, 94
- [24] Fukushima, T., et al., 2019, PASJ, 71, 72
- [25] Rodriguez-Gomez, V., et al., 2016, MNRAS, 458,

2371

- [26] <https://gea.esac.esa.int/archive/>
- [27] Chan, H. Y. J., et al., 2022, MNRAS, 511, 943
- [28] Erkal, D., et al., 2019, MNRAS, 487, 2685
- [29] Bland-Hawthorn, J., & Tepper-García, T., 2018, MNRAS, 504, 3168
- [30] Widrow, L. M., et al., 2012, ApJ, 750, L41
- [31] Iye, M., 1985, Proc. IAU 106, 835
- [32] Qiu, T., et al., 2021, MNRAS, 501, 5149

## **Pioneering Galactic Archaeology and Future Prospects**

**Masashi CHIBA**

*Astronomical Institute, Tohoku University, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8578, Japan*

Abstract: Galactic Archaeology has advanced significantly over the past decades, owing to the advent of precise space astrometry achieved by Hipparcos and Gaia satellites, and further to the large observational programs made by SDSS and Subaru telescope. Here, we introduce our contributions to this research field from its early stage to the present and show the future prospects.