

平成24年 5月20日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究 (S)

研究期間：2006～2010

課題番号：18104003

研究課題名 (和文) 宇宙黎明期の恒星研究と宇宙開闢史の解明

研究課題名 (英文) A Study of the Stars and the Structure Formation  
History in the Early Universe

研究代表者

藤本 正行 (Fujimoto Masayuki)

北海道大学・大学院理学研究院・教授

研究者番号：00111708

## 研究成果の概要(和文):

近年、銀河系ハローの大規模な探査と8m級の大型望遠鏡による観測によって炭素以上の重元素の含有量が太陽の1000分の1にも満たない、ビッグ・バン直後の宇宙初期に形成された星の生き残りと考えられる恒星が多数発見された。本研究は、これらの超金属欠乏星の特性を、恒星の進化と核種合成の理論、組成の分光観測の両面から明らかにし、我々の宇宙最初の星とそれに続く世代の星がどのようなものであったかを探るとともに、これらの恒星の探査指針として、初期宇宙の進化、天の川銀河の形成過程の解明を進め、新たな知見を得た。

## 研究成果の概要(英文):

Recent presence of stars with heavier elements other than hydrogen and helium less than a thousandth of the solar abundances is revealed thanks to large-scale surveys and high dispersion spectroscopy studies with large telescope of diameter 8m for the Galactic halo. These stars are the low-mass survivors of the stars formed in early Universe just after the Big Bang. In this study, we investigate the characteristics of these extremely metal-poor stars theoretically and observationally to explore what are the first stars born first and in early stage in our Universe. In addition, with these stars as probe, we study and derive a new picture on the early evolution of Universe and the formation process of our Milky Way galaxy.

## 交付決定額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	11,200,000	3,360,000	14,560,000
2007年度	22,900,000	6,870,000	29,770,000
2008年度	18,500,000	5,550,000	24,050,000
2009年度	12,300,000	3,690,000	15,990,000
2010年度	13,900,000	4,170,000	18,070,000
総計	78,800,000	23,640,000	102,440,000

研究分野: 数物系科学

科研費の分科・細目: 天文学

キーワード: 恒星進化、元素合成、恒星大気、宇宙塵、銀河系形成

## 1. 研究開始当初の背景

我々の宇宙の天体は、ビッグ・バン後、膨張とともに冷えた暗黒の中から星が誕生し、その輝きとともに始まった。このとき生まれた宇宙最初の星とそれに続く黎明期の恒星

がどのようなものであったかを明らかにすることは、観測的にも理論的にも、現在の天文学の中心的な課題の一つである。

ビッグ・バン直後の原始ガスは水素、ヘリウムと僅かのリチウムからなり、炭素以上の

重元素は星で創られる。宇宙最初の星うち、大質量星は生まれてすぐ超新星爆発を起し、宇宙最初の重元素を星間空間に撒き散らす。一方、太陽の0.8倍以下の低質量星が生まれるとそれらの恒星は長寿命のため、今でも輝いているはずである。これらの恒星は銀河形成に先行する宇宙黎明期の唯一の情報源と考えられる。

1990年代の大規模な探査で、銀河系ハローに重元素の含有量が太陽の1/1000にも満たない超金属欠乏星(EMP)が多く見出され、とりわけ、2002年に $[\text{Fe}/\text{H}]=-5.3$ (鉄の組成が太陽の20万分の1)の極金属欠乏星(UMP) HE0107-5240が発見された。この発見を契機に本研究の参加者たちは、宇宙最初の星の生き残りの探索と宇宙黎明期の超および極金属欠乏星の特性を理論および分光観測から総合的に解明するために基盤研究(A)を立ち上げ、この分野の発展をリードしてきた。

その中で、2005年にすばる望遠鏡による観測で、今まで知られているうちで最も鉄元素の含有量が小さい $[\text{Fe}/\text{H}]=-5.6$ のUMP星 HE1327-2326 (Frebel, Aoki et al. Nature 2005)を発見した。この恒星がHE0107-5240と同様の炭素過多の特異な組成分布を示したことから、宇宙黎明期の恒星の進化について、AGB段階での物質混合と元素合成および超新星爆発の特異な側面が明らかにされ、また、金属欠乏下での星形成、誕生後の環境との相互作用についての理解が大きく前進した。とりわけ、これらの極金属欠乏星の起源を説明する2つのシナリオ、①連星系でのAGB星からの質量交換と星間のガス降着で表面汚染された種族III(Suda et al. ApJ 2004)と②種族IIIの特異な超新星爆発による第二世代星(Umeda & Nomoto, ApJ 2003, Iwamoto et al. Science 2005)を提起した。

これらの恒星の起源に決着をつけることが、種族III星、宇宙黎明期の恒星を理解する上で鍵となる。それとともに、銀河ハロー星の金属量分布や個々の恒星の表面組成に残された誕生当時の宇宙の状態の痕跡を手がかりとして、宇宙黎明期の構造形成史を探る銀河系考古学、あるいは、近傍宇宙論(near-field cosmology)が現実的な課題となった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、これらの発展を受けて恒星物理の解明を重点に研究体制を整備し、理論と観測を有機的に結合して、宇宙最初に重元素を全く含まない物質から生まれた種族III星とそれに続く超金属欠乏星が宇宙の曙光に果たした役割の全体像を明らかにし、それを基礎として、宇宙初期の構造形成、銀河系の形成過程の解明に迫ることである。

銀河系ハローで観測された超金属欠乏星の中には特異な表面組成分布を示すものも多い。超金属欠乏星の進化、核種合成を理論的に明らかにし、観測された表面組成の特性の解析を通して、これら宇宙黎明期の星の素性、起源を明らかにする。これらの結果に基

づいて、宇宙最初および黎明期に誕生した恒星の質量分布と形成率などの恒星の形成史を探る。さらに、これらの成果を踏まえて、近年の宇宙背景放射の観測(WMAP)で検証された階層的構造形成( $\Lambda$ CDM)シナリオの枠組みの中で、星形成過程、銀河の形成・進化、化学進化の物理過程を跡付ける。

## 3. 研究の方法

超金属欠乏星の組成は先行する超新星爆発で放出された重元素の特性を反映する。加えて、誕生後、後続の超新星爆発の放出した重元素で汚染された星間物質の降着、あるいは連星系で主星から放出された物質の流入によって表面組成の変成を蒙っている可能性がある。したがって、種族III星、超金属欠乏星について、現在まで生き残っている低質量星から宇宙初期の元素生成に寄与した大質量星に亘って、物質混合と元素合成の過程、質量放出、超新星爆発等で放出される物質の元素組成と誕生後の変成過程を含めた進化を理解することが本研究の基礎となる。

加えて、すばる等の大型望遠鏡等を用いて超金属欠乏星の探査と表面組成の精密観測を進め、それらの恒星の観測的な特性を解明する。それとともに、これまでの高分散分光観測で得られている組成等についての情報を収集するデータベースを構築する。

これらの観測データと理論研究の成果との照合を通して、宇宙黎明期に誕生した星の特性を明らかにし、銀河系ハローの形成過程を跡付け、その歴史を解読する。さらに、われわれの研究から導かれる超金属欠乏星の特性、銀河系ハローの形成史を踏まえて、原始星雲の進化、宇宙初期の星形成過程、銀河系の形成・進化について、WMAP等で検証された階層的な銀河形成理論との関連を考慮しつつ、星形成、物質循環過程などの考察を通して新しい描像を導く。

本研究は、これらの課題を4つのプロジェクトに整理・統合し、北大と東大の理論研究グループと国立天文台中心とする観測研究グループが連携し、研究を分担し、有機的・組織的に推進してきた。

## 4. 研究成果

本研究がスタートして、下記の4つのプロジェクトに基づいて研究は順調に展開、所期の成果、新たな知見を得てきた。宇宙初期に生れた恒星の研究の基礎となる金属欠乏星の進化・核種合成の統一的な描像を完成した。それとともに、すばる望遠鏡による観測、データ・ベースの構築によって、これらの恒星の観測的特性の理解を進化させ、元素合成、初期質量関数に対する制限を導出した。これらの研究で得られた新しい知見、ダストを取り入れた物質循環の効果等との整合性を考慮して検討を進め、宇宙黎明期の構造形成、宇宙開闢史の新たな描像を提起した。以下に、主たるものを要約し、各プロジェクトについて到達点について概説する。

### P1. 第一世代恒星、および、超金属欠乏星の特性の進化と元素合成の理論的研究

理論研究は、北大グループと東大グループが担当、低中質量の初代星、超金属欠乏星の誕生後の元素合成等による表面組成の変成過程、および、金属欠乏の大質量星、超新星爆発の核種合成過程の特性について、統一的な描像を導出した。

超金属欠乏の低・中質量星は、漸近巨星分枝 (AGB) 段階で発生するヘリウム燃焼の対流層への水素混入と  $^{13}\text{C}$  を中性子源とする核種合成で特徴付けられる。この水素混合の起きる条件とそれに伴う中性子捕獲反応による元素合成を系統的に調べ、表面組成の変成過程を解明した (Nishimura et al. 2009, Suda & Fujimoto 2010)。これによって、炭素過剰星について AGB 起源と超新星爆発起源に切り分けられることを示した。3 個の極金属欠乏星についても、連星系の主星からの星風、星間ガスの降着によって表面が汚染された種族 III 星であるという連星シナリオの立場から、共通点と相違点を闡明し、連星の主星の質量依存性を含めたシナリオを完成した。それとともに、炭素星に s-過程元素過多の有無の 2 種類があることから、連星シナリオに基づく統計から、EMP 星の初期質量関数 (IMF) を導き、近傍の低質量の Salpeter の IMF とは異なり、太陽の 5-10 の大質量星であることを示した (Komiya et al. 2007, 2009)。

大質量星の超新星爆発に関しては、超金属欠乏星で観測される元素組成の違いが初期の質量と爆発エネルギーの違いで説明できることを示すとともに、これらの違いは超新星に付随するガンマ線バーストの性質の多様性とも関わっているという新モデルを提唱した (Tominaga et al. 2007)。この重力崩壊型超新星の爆発について、近傍の多数の Ibc 型超新星の後期のスペクトルの形状についてのすばる望遠鏡での観測からその殆どが非球対称であることを見出し、爆発的元素合成にその影響が顕著に現れ、超金属欠乏星の鉄族元素などの化学組成の特徴の理解に繋がることを示した (Maeda et al. 2008, Mazzali et al. 2007, ApJ, 670, 592)。一方、宇宙最初に形成される種族 III 星の形成については、質量降着による成長過程を重力崩壊の段階まで計算、宇宙論的シミュレーションから推定される質量降着率を適用すると、太陽質量の約 1000 倍まで成長し、中間質量ブラックホールを形成することを示した。これは、巨大質量ブラックホールの種として興味深い。これに対して、先行する種族 III 星の feedback によって質量降着が阻害される場合は、太陽質量の 50-100 倍程度の通常の重力崩壊に至り、EMP 星に観測されるような、元素合成を行なうことを示した。

## P2. 種族 III 星の探査および超金属欠乏星の観測的研究

超金属欠乏星の特徴は、3つの HMP 星にも見られるようにその多くが炭素の過剰 (鉄に比して) を示すことであり、観測研究の目標のひとつは、その特性を明らかにし、その起源を解明することである。すばる望遠鏡による高分散分光観測で、多数の炭素過剰星の組

成を調べ、(1)大部分は s-過程元素過剰を伴う星であり、炭素の起源は AGB 星に求められること、(2)それ以外の s-過程元素過剰を伴わない星の多くは著しく金属量が低いこと、を明らかにした。後者は極金属欠乏星の 3 天体との関連を示唆するものである (Aoki et al. 2007)。さらに、炭素過剰星のなかでも、表面組成変化が小さいと期待される主系列あるいは準巨星段階の星を集中的に調べるために、SDSS で開始された金属欠乏星探査プロジェクトと共同し、その候補天体のすばる望遠鏡による観測を実施、AGB 星からの炭素過剰な物質降着について観測的制限をつけた (Aoki et al. 2008)。

2008 年からは、SDSS による金属欠乏星探査とより緊密に連携し、すばる望遠鏡による大規模な分光観測を開始した。特に、2008 年から 2009 年には「集約プログラム」が採択・実施され、 $[\text{Fe}/\text{H}] < -3.0$  の超金属欠乏星 70 天体を新たに検出するなど、統計的な議論を可能にするサンプルを得ることに成功した。観測結果のまとめは論文として投稿済みであり (Aoki et al. submitted)。このサンプルにもとづく金属量分布や連星の割合などの議論は取りまとめ中である。

このなかで重要な結果のひとつは、この金属量領域では炭素過剰天体が約 3 割を占め、その半数以上が、極金属欠乏星 HE1327-2326 と同様にバリウムなどの重元素の過剰を示さない星であることが明確になったことである。これら炭素過剰天体の起源については、このプログラムの副産物として得られた明るい炭素過剰天体 (BD+44 493) の詳細な組成研究から重要な示唆が得られた。この天体の組成は大質量星からの質量放出や AGB 星からの質量供給では説明できず、鉄をあまり放出しない暗い超新星からの予測にほぼ一致することが明らかになり、炭素過剰天体の少なくとも一部は特異な超新星起源であると結論された。

SDSS サンプルのうち最も金属量の低い天体については、すばる望遠鏡をもちいてさらに詳細な観測が行われ、金属量の最も低い領域 ( $[\text{Fe}/\text{H}] < -3.5$ ) でのリチウム組成の決定が行われた。この金属量領域ではリチウム組成に分散がみられ、対流層が極めて薄いはずの比較的高温の主系列星においてもリチウムの減少が起こっていることが示唆された。これはビッグ・バン元素合成から期待されるリチウム組成と金属欠乏星で観測される量との食い違いの理解に重要な指針を与える結果である。

## P3. 超金属欠乏星の素性の研究:

超金属欠乏星の恒星表面の元素組成等の観測データを採録したデータベース (The Stellar Abundances for Galactic Archaeology [SAGA] database) を作成、公開した (Suda et al. 2008)。採録の対象は、理論との比較に利用可能な観測量、物理量で、2000 年に降出版された高分散分光の論文うち  $[\text{Fe}/\text{H}] < -2.5$  の星を含むものを全て網羅した。採録済みの論文は 150 編、天体数は延べ数で約 3000 (重複を

除けば約1400)で、銀河系ハローの金属欠乏星を対象としたデータベースとしては最大であり、本格的・系統的に構築されたものとしては唯一のものである。

2008年6月にWeb上で公開して以来、このデータベースは、超金属欠乏星の元素分布を研究する上での有効な手段として、国内外の観測的、理論的研究者の両方から多くの利用者を獲得している。

本研究でも、このデータ・ベースの整備・改良とともに、これを利用して、超金属欠乏星の元素組成の解析を進めてきた。特に、炭素星の統計から、初期宇宙の大質量の IMF が、金属量が  $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -2.2$  に増加するまで持続することを示した (Suda et al. 2011)。さらに、金属増加の特性の解析から、上記に加えて、 $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -3.3, -1.8$  で区切られる初期質量関数、星形成率の異なる4つの種族あるいはエポックが刻まれていることを見出した。

#### P4. 原始星雲での星形成、物質循環の研究:

宇宙初期の星形成時において、ダストは、熱輻射によるガスの冷却を通して低質量星の形成に決定的な役割を果たすと考えられている。宇宙初期の星間空間に存在するダストの種類、質量、サイズ分布を解明するために、ダストの主要な供給源である様々なタイプの超新星でのダスト形成とその後の進化の研究を行い、関連する観測結果と比較することにより、ダストが天体形成や物質循環過程に果たす機構・役割を解明する際に必要な理論的基盤を確立した。

種族 III 超新星残骸中でのダストの進化過程について、放出物中でのダスト形成、ガスの密度・温度の時間変化、ダストの運動とスパッタリングによる侵食・破壊を総合的に取り扱い、超新星爆発のエネルギーおよび星間ガス密度のダスト進化過程への依存性を系統的に明らかにした。

重力崩壊型の超新星爆発時では超新星のタイプに関わらず、ほぼ 0.1-1.0 太陽質量のダストが形成されるが、超新星残骸での後退衝撃波により加熱された高温ガス中でのスパッタリングにより、サイズの小さいダストが選択的に破壊される (Nozawa et al. 2007)。生き残ったダストのうち超新星残骸進化の最終段階に形成される低温高密度ガス殻にトラップされたダストの元素組成で HMP 星で観測される炭素以外の O, Mg, Si 等の組成を再現できる (Nozawa et al. 2008)。また、Ia 型超新星でのダスト形成・進化計算を行い、Ia 型超新星はダストの主要な供給源でない事を明らかにした (Nozawa et al. 2011)。

本研究で明らかにされた新たな知見と構築された研究手法は、宇宙初期から現在に至る物質進化や天体形成史の理論的観測的な解明に適用できる。超新星でのダスト形成、残骸中および星間空間での破壊を考慮して計算されたダストによる減光曲線は、 $z \sim 6$  の QSO で観測された減光曲線と整合的である事を示した (Hirashita et al. 2008)。この結果は、高赤方偏移でのダスト供給源は超新星である事を支持する。高赤方偏移のクエ

ーサーの母銀河に存在する大量のダスト、超新星爆発時に形成されるダストの質量および組成、星間塵の供給源としての超新星の役割等の解明は、観測的にも理論的にも重要な研究課題である。

また、超新星でのダスト形成・進化モデルで得た破壊効率・サイズ分布の変遷とダスト表面での水素分子形成を考慮した銀河形成進化の one-zone モデルを構築、ダストの量だけでなくダストのサイズ分布が星形成率および初期宇宙の銀河進化に多大な影響を与えることを示した (Yamasawa et al. 2011)。

これらの結果を踏まえて、宇宙の構造形成史の解読でも、新しい結果を得た。構造形成にとって重要なのは、形成される星の初期質量関数(IMF)であるが、上述の炭素星の統計から導いた制限を用い、現行の構造形成の Cold Dark Matter シナリオに基づいて、その帰結を議論した。WMAP による宇宙論パラメータを用いて、extended Press-Schechter の方法で、ミニハローの合体枝を計算し、それに従って、現在まで生き残っている低質量星の金属量分布を求めた (Komiya et al. 2009)。

超金属欠乏星は 90%以上連星系の低質量星として生まれることになるが、金属量分布の観測を再現できることを示した。特筆すべきは、勾配だけではなく、観測される超金属欠乏星の総数も一致することで、この点は、従来の Salpeter 型の低質量の IMF を仮定した場合との決定的な違いである。Salpeter IMF を仮定すると、観測よりも2桁以上過剰に低質量星が創られることになる。また、全く金属を含まないガスから生まれた初代星について、星の誕生後の星間ガスの降着による表面汚染の効果を取り入れると金属量分布の観測を極めてよく再現することができる。

これらの結果からは、極金属欠乏 (HMP) 星は、各ミニハローが自分自身の超新星爆発の金属で汚染される以前に生まれた全く重元素を含まない星に対応することになる。しかし、その数は、観測に比べて 10 倍くらい多くなっているため、初代星の IMF は、EMP 星とは異なり、より大質量であるか、あるいは、連星系での低質量星の効率が低かったことを意味する。これらは、従来の銀河系形成理論に面期をもたらすものである。

極金属欠乏星 (HMP) については、2011 年に4個目の SDSS J102915+172927 が発見された。この星は、炭素組成が小さい点で、他の3個の HMP 星と異なり、金属欠乏下での星形成に関して、新たな制約を課すことになった。これらの HMP 星の起源、種族 III 星の探査に関しては、さらに観測データを増やすとともに、理論的には、宇宙初期における星形成過程とその後の変遷を考慮したさらなる研究が必要である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 127(査読有)件)

- ① The Stellar Abundances for Galactic Archaeology (SAGA) Database II -

- Implications for Mixing and Nucleosynthesis in Extremely Metal-Poor Stars and Chemical Enrichment of the Galaxy, T.Suda, S. Yamada, Y. Katsuta, Y. Komiya, C. Ishizuka, T. Nishimura, W. Aoki, M. Y. Fujimoto, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, Vol. 412, No.2, 2011, pp.843-874.
- ② Formation of Dust in the Ejecta of Type Ia Supernovae, Nozawa, T., Maeda, K., Kozasa, T., Tanaka, M., Nomoto, K., Umeda, H., Astrophysical Journal, 査読有, Vol. 736, No.1, 2011, pp.45-57
- ③ The Role of Dust in the Early Universe. I. Protogalaxy Evolution, Yamasawa, D., Habe, A., Kozasa, T., Nozawa, T., Hirashita, H., Umeda, H., Nomoto, K., Astrophysical Journal, 査読有, Vol. 735, No. 44, 2011, pp.44-57
- ④ Formation History of Metal-poor Halo Stars with the Hierarchical Model and the Effect of Interstellar Matter Accretion on the Most Metal-poor Stars, Komiya, Y., Habe, A., Suda, T., Fujimoto, M.Y., Astrophysical Journal, 査読有, vol.717, No.1, 2010, pp. 542-561
- ⑤ Evolution of low- and intermediate-mass stars with  $[Fe/H] \leq -2.5$ , Suda, T., Fujimoto, M. Y., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, Vol.405, No.1, 2010, pp.177-193
- ⑥ Oxygen and Light Element Synthesis by Neutron-Capture Reactions in Metal-Free and Extremely Metal-Poor AGB Stars, Takanori, Nishimura, Masayuki Aikawa, Takuma. Suda., Masayuki Y. Fujimoto, Publication of the Astronomical Society of Japan, 査読有, vol.61, No.5, 2009, pp.909-929
- ⑦ Hierarchical Formation of the Galactic Halo and the Origin of Hyper Metal-Poor Stars, Y. Komiya, A. Habe, T. Suda, M.Y. Fujimoto, Astrophysical Journal Letters, 査読有, vol. 696, No.1, 2009, pp. L79-L83
- ⑧ Early-Age Evolution of the Milky Way Related by Extremely Metal-Poor Stars, Y. Komiya, T. Suda, and M. Y. Fujimoto, Astrophysical Journal, 査読有, vol.694, No.1577-1594, 2009
- ⑨ Carbon-Enhanced Metal-Poor Stars. III. Main-Sequence Turnoff Stars from the SDSS SEGUE Sample, Aoki, W., Beers, T. C., Sivarani, T. Marsteller, B., Lee, Y.S., Honda, S., Norris, J. E., Ryan, S., Carollo, D. Astrophysical Journal, 査読有, Vol. 678, No. 2, 2008, pp.1351-1371
- ⑩ Asphericity in Supernova Explosions from Late-Time Spectroscopy, Maeda, K. Nomoto, K. (6 番目), 他 16 名, Science, 査読有, Vol. 319, No.5867, 2008, pp.1220-1223
- ⑪ Stellar Abundances for the Galactic Archeology (SAGA) Database - Compilation of the Characteristics of Known Extremely Metal- Poor Stars, T. Suda, Yutaka. Katsuta, Shimako. Yamada, Tamon. Suwa, Chieko. Ishizuka, Y. Komiya, Kazuo., Sorai, M. Aikawa, and M.Y. Fujimoto, Publication of the Astronomical Society of Japan, 査読有, vol. 60, No. 5, 2008, pp.1159-1171
- ⑫ Extinction curves flattened by reverse shocks in supernovae, H. Hirashita, T. Nozawa, T.T. Takeuchi, T. Kozasa, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, Vol. 384, No.2, 2008, pp. 1725-1732
- ⑬ Formation of Dust in the Ejecta of Type Ib SN 2006jc and Temperature and Mass of the Dust, Nozawa, T., Kozasa, T., Tominaga, N., Sakon, I., Tanaka, M., Suzuki, T., Nomoto, K., Maeda, K., Umeda, H., Limongi, M., Onaka, T., Astrophysical Journal, 査読有, Vol. 684, No.3, 2008, pp. 1343-1350
- ⑭ Carbon-enhanced Metal-poor Stars. I. Chemical Compositions of 26 Stars, W. Aoki, T. C. Beers, N. Christlieb, J.E. Norris, S.G. Ryan, S. Tsangarides, Astrophysical Journal, 査読有, vol. 655, No.1, 2007, pp.492-521
- ⑮ The Aspherical Properties of the Energetic Type Ic SN 2002ap as Inferred from Its Nebular Spectra, P. A. Mazzali, K. Nomoto (5 番目), 他 11 名, Astrophysical Journal, 査読有, vol. 670, No. 1, 2007, pp. 592-599
- ⑯ The Connection between Gamma-Ray Bursts and Extremely Metal-Poor Stars: Black-Hole Forming Supernovae with Relativistic Jets, N. Tominaga, K. Maeda, H. Umeda, K.Nomoto, M., N. Iwamoto, T. Suzuki, A. Mazzali, Astrophysical Journal, 査読有, vol. 657, 2007, No. 2, pp.L77-L80,
- ⑰ Evolution of Dust in Primordial Supernova Remnants: Can Dust Grains Formed in the Ejecta Survive and Be Injected into the Early Interstellar Medium?, T. Nozawa, T. Kozasa, A. Habe, E. Dwek, H. Umeda, N.Tominaga, K. Maeda, K. Nomoto, Astrophysical Journal, 査読有, Vol. 666, No.2, 2007, pp. 955-966
- ⑱ The Origin of Carbon-Enhancement and Initial Mass Function of Extremely Metal-Poor Stars in the Galactic Halo, Y. Komiya, T. Suda, H. Minaguchi, T. Shigeyama, W. Aoki, and M.Y. Fujimoto, Astrophysical Journal, 査読有, Vol.658, No.1, 2007, pp.367-390
- [学会発表](計 63 件)
- ① 10th internal Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG 10), LOC: M.Y. Fujimoto,(Char), T. Kozasa (Co-Chair), W. Aoki(Co-char), T. Suda(Co-Chair), K. Nomoto, 他13名, 4-7 Dec, 2007, Sapporo, Japan
- 招待講演 (31 件)
- ① Extremely Metal-Poor stars in the Milky Way Galaxy; Aoki, W., First Stars IV, 21-25 May, 2012, Kyoto University, Kyoto city, Japan
- ② Li abundances in very metal-poor, main-sequence turn-off stars, Aoki, W.,

- Lithium in the Cosmos, 27-29 February 2012, Paris
- ③ Extremely Metal-Poor Stars in the Milky Way Halo, Aoki, W., Galactic Archaeology: Near-Field Cosmology and the Formation of the Milky Way, 1-4, November, 2011, Shuzenji, Kyoto city, Japan
  - ④ Neutron-Capture Elements in Extremely Metal-Poor Stars, Aoki, W., Origin of Matter and Evolution of Galaxies, November 14-17, 2011, Riken, Wako city, Japan
  - ⑤ The metallicity distribution of Sr-enhanced metal-poor stars, Aoki, W., The Light Element Primary Process & the Origin of Lighter Heavy Elements, 10-12, October, 2011, GSI, Darmstadt
  - ⑥ Extremely metal-poor stars in dwarf galaxies around the Milky Way, Aoki, W., Origin of Matter and Evolution of Galaxies, 8-10 March, 2010, Osaka Kyoiku University, Kashiwabara city, Japan
  - ⑦ Carbon-Enhanced Metal-Poor (CEMP) stars, Aoki, W., IAU Symp. 265, Chemical Abundances in the Universe: Connecting First Stars to Planets, 10-14, Aug, 2009, Rio de Janeiro, Brazil
  - ⑧ The Cosmic Explosions: The Violent Supernovae; K. Nomoto., The Opening Ceremony of the International Year of Astronomy by United Nations Organization, UNESCO & IAU 15-16, Jan. 2009, UNESCO, Paris, France
  - ⑨ Nucleosynthesis of the Elements in Faint Supernovae and Hypernovae, K. Nomoto., Chemical Abundances in the Universe: Connecting First Stars to Planets, IAU Symp. 265, 10-14 August, Rio de Janeiro, Brazil
  - ⑩ The First Stars - Type Ib Supernovae Connection; K. Nomoto, Low-Metallicity Star Formation: From the First Stars to Dwarf Galaxies, IAU Symp. No.255, 16-20 Jun, 2008, Rapallo, Genova, Italy
  - ⑪ Dust in Supernovae: Formation and Evolution; Kozasa. T., Nozawa, T., Tominaga, N., Umeda, H., Maeda, K., Nomoto, K., Cosmic Dust -Near and Far, 8-12 Sept. 2008, Heidelberg, Germany
  - ⑫ Chemical Yields from Supernovae and Hypernovae, K. Nomoto, The Galaxy Disk in Cosmological Context, IAU Symp. No. 254, 9-13 June, 2008, Copenhagen, Denmark
  - ⑬ The Connection between Gamma-Ray Bursts and Extremely Metal-Poor Stars as Nucleosynthetic Probes of the Early Universe, K. Nomoto, Massive Stars as Cosmic Engines, IAU Symp. 250, 9-14 Dec, 2007, Kauai Island, Hawaii, USA

[その他]

## ホームページ等

SAGA (銀河考古学のための星の組成) データベース

(The Stellar Abundances for Galactic Archaeology Database)

URL: <http://saga.sci.hokudai.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

藤本 正行 (Fujimoto Maayuki)

北海道大学・大学院理学研究院・教授

研究者番号：00111708

### (2) 研究分担者

野本 憲一 (Nomoto Ken'ichi)

東京大学・数物連携宇宙研究機構・特任教授

授

研究者番号：90110676

小笹 隆司 (Kozasa Takashi)

北海道大学・大学院理学研究院・教授

研究者番号：90263368

青木 和光 (Aoki Wako)

国立天文台・光赤外研究部・助教

研究者番号：20321581

須田 拓馬 (Suda Takuma)

国立天文台・光赤外研究部・博士研究員

研究者番号：90374735

辻 隆 (Tsuji Takashi)

東京大学・名誉教授

研究者番号：20011546