

## サイエンスピックアップ

## ハイパー原子核分光と強い力

平成 22 年 物理学専攻 (博前) 修了 ストレンジネス核物理研究室 助教 後神 利志



私たちの身の周りに満ちている物質の根源的な材料とそれらの間に働く力の探究は基礎物理研究の大きな題材です。私の大好物の柏屋の薄皮饅頭(福島銘菓)も素となる粒子、いわば「素粒子」がたくさん集まり、何かしらの「力」によって饅頭としての形を成していると言えます。それは、私たち人間や動物の身体、母なる大地である地球、夜空に煌めく星等に対しても平等に同じ事情にあります。薄皮饅頭のレシピはさておき、これらの「もの」の形成には物質間に働く力が重要な役割を担います。これまで、私たちが認識している基本的な力は以下の4つです：(1) 重力、(2) 弱い力、(3) 電磁力、(4) 強い力。本記事では、私の研究対象である「強い力」に関する話題を紹介したいと思います。

核子間に働く力を核力と呼びます。核力を担っているのは主に強い力です。地球上に自然に存在する核子は陽子と中性子です。これらは、u(アップ)、d(ダウン)クォークを3つ組み合わせて(このような種類の粒子を重粒子と呼びます。また、クォーク・反クォークのペアで構成される粒子を中間子と呼びます。)構成されることが知られています。陽子はuud、中性子はuddで成っています。これらの核子が集まり原子核となり、原子核と電子が原子をつくり、原子が分子を構成します。これらの分子の集合が私たちの身体を含む「もの」を構成するのです。核子同士に働く強い力は、フェムトメートル( $10^{-15}$  m)オーダーの非常に近い距離に近づいた際に大きな引力的な力を及ぼしあいます。一方で、それ以上近づくと大きな斥力が働くため、原子核が自身の引力で潰れてしまわずに済むのです。これまで核子間に働く相互作用は核子同士を散乱させる散乱実験により詳細に調べられてきました。

さて、地球上に自然に存在する陽子、中性子以外の重粒子に対してはどのような力が働くのでしょうか。私たちは加速器を用いてエネルギーを与えた粒子を標的原子核と反応させる事によって人工的に核子とは別種の重粒子を作り出す事が出来ます。原子核反応で生成しやすいのはより軽い粒子であり、重粒子の中でも核子の次に軽いのはラムダ粒子(uds; sはストレンジクォーク)です。そのため、核子間からより一般化した重粒子間の相互作用研究のための第一ステップとして、ラムダ-核子間相互作用研究が精力的に展開されています。

しかし、核子間相互作用研究の事情とは異なり、

ラムダの短寿命性( $\tau=263$ ピコ秒)から技術的にラムダ-核子散乱実験は容易ではありません。そのため、ラムダ-核子間相互作用の研究はラムダを原子核に束縛させた系・ラムダハイパー核の分光実験により研究が進められています。現在、ハイパー核研究は日本・大強度陽子加速器施設、スイス・欧州原子核研究機構、米国・ブルックヘブン国立研究所、ドイツ・マインツ大学、ドイツ・重イオン研究所、米国・ジェファーソン研究所(JLab)においてそれぞれの実験手法・反応の特徴を活かして相補的に行われています。私はJLabにおいて電子ビームを用いたラムダハイパー核の分光実験研究を行っています。このJLabにおける実験の強みは他の実験よりも高い精度でのエネルギー絶対値測定で、他の実験施設では難しい高精度の研究が可能です。

その一つがラムダ-核子間相互作用研究で着目されている「荷電対称性の破れ( $\Lambda N$ -CSB)」の解明への実験的アプローチです。核子間の場合、荷電対称性が成り立っている事が知られています。つまり、陽子、中性子間に働く力は電荷の違いによる効果を取り除けば同じです。しかし、ラムダ-陽子、ラムダ-中性子間の強い力の強さがどうも同じでないと言う実験的な証拠が確実なものになっています<sup>[1]</sup>。私たち東北大学を中心とする国際研究チームは、JLabにおける高精度実験により $\Lambda N$ -CSB解明に重要とされる軽いハイパー核の系統的測定に近年成功し、新たな知見を導きました<sup>[2]</sup>。しかし、理解の深化のためには、様々なハイパー核に対するより精度の高いデータが必要です。40年以上ミステリーとされていた $\Lambda N$ -CSBの起源の理解のため、私たちはJLabにおいて新しい実験を行う予定です。

ハイパー核分光実験は基本的な力の一つである強い力の探究のための強力なツールです。今後もこの世界を作る基本的な「材料」とそれらに働く「力」を追求していきたいと薄皮饅頭を頬張りながら思う今日この頃です。

参考文献：

- [1] T.O. Yamamoto *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **115**, 222501 (2015); A. Esser *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **114**, 232501 (2015).
- [2] S.N. Nakamura *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **110**, 012502 (2013); L. Tang *et al.*, *Phys. Rev. C* **90**, 034320 (2014); T. Gogami *et al.*, *Phys. Rev. C* **93**, 034314 (2016); T. Gogami *et al.*, *Phys. Rev. C* **94**, 021302 (R) (2016).

## サイエンストピックス

## 太古の星の元素組成から読み解く初代星からのメッセージ

平成22年天文学専攻(博後)修了 東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構 特任研究員 石垣 美歩



我々の住む天の川銀河に含まれる数千億個以上もの恒星のうちごくわずか(1%以下)は、重元素の組成が太陽の10分の1以下の「金属欠乏星」と呼ばれる星々です。重元素は宇宙が始まって以来、星の進化と超新星爆発を通して作られるので、金

属欠乏星は宇宙の中でまだ重元素が少ない時代にできた非常に古い星々と考えられます。金属欠乏星を手掛かりとして宇宙の成り立ち・構造形成を理解しようとする試みはしばしば「銀河考古学」と呼ばれ、近年大変注目されています。というのも、ここ10数年の間、スローンデジタルスカイサーベイに代表される銀河系の大規模調査が一挙に進み、これまでにない数の金属欠乏星の素性が分かってきたからです。金属欠乏星の6次元位相空間情報(3次元位置と3次元速度)と元素組成の情報を組み合わせることで、銀河系の形成過程を再構築することも現実味を帯びてきています。金属欠乏星の観測のうち、より過去の情報をもたらしてくれるのが恒星表面大気元素組成です。金属欠乏星の元素組成は、その星の材料となったガスの組成をほぼ保存していると考えられ、宇宙初期の様子を今に伝える貴重な化石情報として注目されています。今回受賞の対象となった二つの研究は、この金属欠乏星の元素組成を用いて、天文学上の大きな謎である宇宙初期の星・銀河系形成過程について観測的なヒントを得ることを目指すものです。以下ではそのうちの一つである「初代星」についての話題を紹介します。

宇宙で最初に生まれた星々「初代星」がどのような姿をしていたのか、それを明らかにすることは現在も天文学上で大きな課題の一つです。初代星は宇宙初期においてその後の星・銀河形成の初期状態を左右するという意味で非常に重要な役割を果たしたと考えられています。初代星形成以前は、宇宙は中性水素ガスで満たされた光を放つ天体がまったくない真っ暗な状態でした。また、ビッグバン元素合成で作られた水素、ヘリウム、ごく微量のリチウム等の軽元素を除いて、重元素は存在しませんでした。初代星の誕生によって初めて電離光子が供給され、宇宙再電離が始まったと考えられています。また初代星の進化の途上で炭素、酸素、鉄などの重元素が合成され、超新星爆発を通して星間空間に放出されます。これにより、星間空間に初めて重元素が供給されるのですが、それによってその後の星形成の道筋が劇的に変わることがわかっています。というの

もこれらの重元素が存在することでガスの冷却効率が格段に上がるため、低質量で長寿命の星がたくさん作られるようになり、宇宙で最初の銀河ができる条件をクリアできるのです。初代星が宇宙初期の環境に与えたインパクトは、その質量によって大きく異なると予想されます。ですから初代星が典型的にどのような質量をもっていたのか、またどのような質量の初代星がそれぞれどのくらいの割合で存在したのか、すなわち初期質量関数を明らかにすることは、宇宙再電離の時期、初代銀河の形成を理解する上で必要不可欠なのです。

以前までの初代星形成数値シミュレーションからは、これらの初代星の多くは太陽の数倍以上という、現在の典型的な大質量星には見られないような超巨大な質量を持っていたと予測していました。これは、初代星の材料となる金属を含まないガスでは、ガス冷却の効率が金属を含むガスに比べて悪く、ガスが十分に重くならないと重力がガス圧に打ち勝って星形成に進むことができないためです。いっぽうでより最近の数値シミュレーションで原始星からのフィードバックなどより詳しい物理過程を考慮した場合、太陽質量の数倍以下の星もある程度作られると予測しています。このようにより高度な数値シミュレーションによる初代星の質量の理論予測が進むなか、理論予測を何らかの観測的な情報で検証することがますます重要になってきています。

理論予測を観測的に検証することのできる貴重な天体が、鉄元素の組成が太陽の数千分の1以下と非常に低い超金属欠乏星の元素組成です。超金属欠乏星は初代星の超新星爆発で放出された元素を含むガスから生まれた第二世代の星々と考えられています。したがってそれらの表面大気元素組成は、その星の材料となった初代星でどのような元素合成が起こったか、すなわちその質量について大きな手がかりになることが期待されます。例えば、もし初代星が100太陽質量を超えるような超巨大質量の星ばかりだったとすれば、そのような初代星が最期の爆発で残す特殊な元素組成を持つ星が、現在の天の川銀河にある程度見つかってもおかしくありません。しかし今の所そのような超巨大質量の初代星の確固とした痕跡は見つかっていません。いっぽうでもし初代星のなかに太陽質量程度のものが存在した場合、低質量の星は寿命が非常に長いので、天の川銀河のどこかで現在まで生き残っており、金属元素を全く含まない星として見つかるはずですが、ところがそのような星もまだ見つかっていません。このように初代星の質量についての理論予測を直接検証する観測

証拠はまだなく、未解決問題として残されています。

2014年、初代星の質量について観測的なヒントを得る上で最適の金属欠乏星がオーストラリアのスカイマッパー望遠鏡によって発見されました。分光観測による詳細な組成解析から、この天体 SMSS 0313-6708 は鉄の組成が太陽の1000万分の1以下であり、これまでに見つかった中で最も鉄の組成が低い星であることが判りました。興味深いことに、この天体は非常に大きな炭素過剰を示すことも分かりました。炭素過剰は、以前から金属欠乏星の中でも特に鉄組成の低い星で頻繁に見られることが知られており、初代星の特異な性質と関わりがあるかどうかの問題となっていました。SMSS 0313-6708 のような最も鉄の組成が低い星で最も極端な炭素過剰が見つかったことは、炭素過剰と初代星の性質との深い関わりを示唆しています。

我々のグループでは、この星の組成が初代星で作られる元素の組成で説明できるかどうか、初代星超新星爆発の理論モデルと比較することで検証しました。そのために初代星超新星爆発で放出される元素の組成、「超新星イールド」を爆発の非対称性を含む様々な場合について計算し、観測を再現するモデルを徹底的に調査しました。図1に示したのが観測と理論モデルの比較の結果です。解析の結果、この星の炭素、マグネシウム、カルシウム組成は、25あるいは40太陽質量の初代星が非球対称な爆発を起こした場合に期待される超新星イールドでよく再現されることが分かりました。非対称な爆発を示す鍵は、鉄、カルシウムに対する極端な炭素過剰です。鉄、カルシウムは超新星爆発に伴う爆発的要素合成で作られるため、温度の高い親星の内部に分布しています。一方で炭素は爆発以前の核融合反応で作られ、外側に位置しています。観測が再現できるのは、カルシウム

ウムは中心部に降着してほとんど外に放出されない一方で、外側の炭素はほぼ全て星間空間に放出される場合に限られます。また観測されたカルシウム組成を説明するには、大規模な物質混合が起こることごとくわずかにカルシウムが放出される必要があります。このような中心部への降着と大規模な物質混合が同時に発生するケースは、爆発が非球対称な場合でのみ起こるのです。

残念ながらこの星についての組成データはどの質量の初代星が最も観測をよく再現できるかの決め手になるほど十分ではなく、初代星の質量について最終的な結論は出ていません。他の可能性として、60太陽質量の初代星の外層でわずかにカルシウムが作られる場合、あるいは初代星が自転をもっていた場合に起こる元素合成で、観測される組成をよく説明できることが示唆されています。異なる初代星質量を区別するためには、測定できていなかった他の元素、特に鉄、ニッケル組成の精密測定が不可欠です。

将来口径10-30メートル級の巨大望遠鏡に高分散分光器を搭載することで、弱い元素の吸収線の検出精度が劇的に向上することが期待されています。また一度にたくさんの恒星について分光観測することができる観測装置を使った銀河系の探査もすでに始まっているほか、新たに日本のすばる望遠鏡に搭載する計画も進んでいます。こうした次世代観測装置により、初代星そのものの生き残りが見つかるかもしれません。あるいは初代星の痕跡をとどめた多くの超金属欠乏星について、その元素組成から初代星の初期質量関数が高い統計精度で検証できるようになることが期待されます。太古の星々のもたらしてくれる宇宙初期の化石情報から今後も目が離せません。

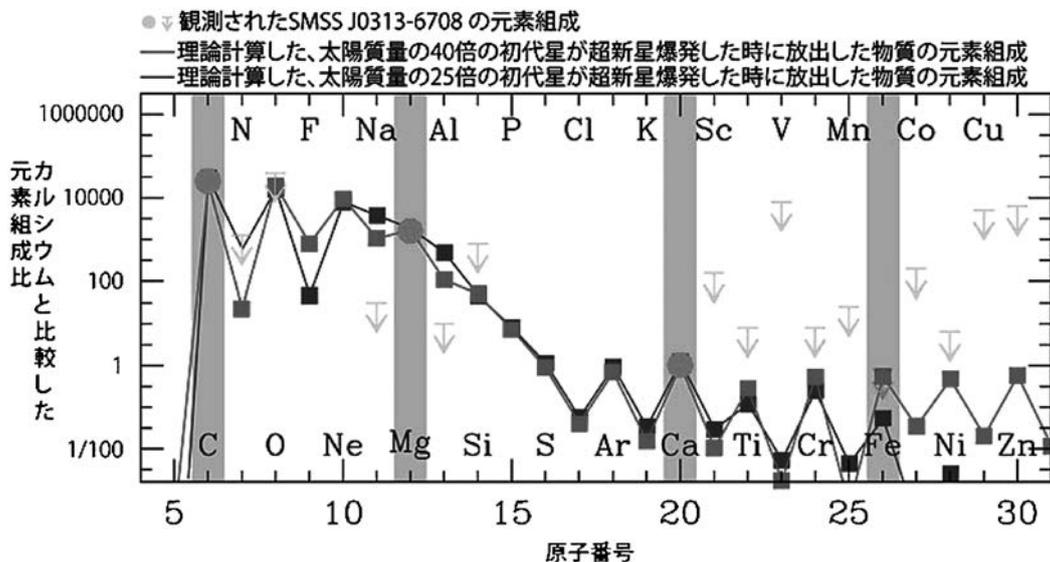


図1. 観測された金属欠乏星の元素組成と初代星元素合成の理論計算で得られた超新星イールドの比較 (Kavli IPMU プレスリリース/Aya Tsuboi)

## サイエンスピックアップ

## 小繰り返し地震とプレート境界の非地震性すべり

平成11年宇宙地球物理学科(地物)卒 東北大学 地震・噴火予知研究観測センター 准教授 内田 直希



地球上を覆うプレートの境界ではその相対運動によるひずみを解消するため、多くの地震が起きています。しかし、プレート間のひずみは、地震による速いすべりだけでなく、非地震性すべりと呼ばれるゆっくりとしたすべりによっても解消されて

おり、全地球的にみれば、プレート境界でのひずみ解消の主役は、地震よりもむしろ非地震的なものと言ってもよいかもしれません。共にひずみを解消する過程である地震と非地震性すべりはお互いに影響を及ぼしあっており、地震の発生過程の理解には、地震そのものだけでなく、非地震性すべりの理解が重要です。

人間が感じる事が無い数日から年単位、あるいは、定常的に続く非地震性すべりは、スロー地震あるいはクリープとも呼ばれ、通常地震にくらべ検知が格段に難しく、その発生状況は、近年になってようやく詳しくわかってきました。その際、主に貢献したのは、GPSをはじめとする測地観測です。これにより、大地震の後に続くゆっくりとした非地震性すべりの存在や、プレート境界上の非地震性すべりのおおまかな分布が明らかになってきました。ただ、沈み込み帯では、プレート境界で地震が発生する場所は主に観測点から離れた海の下で、非地震性すべりの発生状況およびそれと地震との関係の把握が比較的難しい状況にありました。

このような状況の中、東北大学のグループは、2000年代のはじめに本研究で用いた小繰り返し地震と呼ばれる特徴的な地震を沈み込み帯では世界で初めて発見しました。小繰り返し地震は、図1aに示すように非常によく似た地震波形を持つ地震であり、図1bで示すような、プレート境界の小さな固着域(パッチ)が周りの非地震性すべりに伴い、繰り返しすべることにより生じていると考えられます。したがってこの地震は、プレート境界での非地震性すべりの発生を直接示すものです。この発見を受け私は、小繰り返し地震と非地震性すべりの関係を生かしたプレート境界の非地震性すべりの時空間分布の推定を行ってきました。この方法は、特に沖合において前述のGPSデータなど陸上の測地学的データを用いたものよりも、詳細かつ長期のすべりの過程を捉えることができる新しい手法です。その結果、例えば、マグニチュード6程度の、それまで知られていたものよりも小さな地震でも、地震の後に続くゆっくりとしたすべりを伴っていることや、プレート境界で周

期的なゆっくりすべりが広い範囲で起きていることを発見しました。また、上下に重なるプレートのうち、上のプレートの性質によりプレート間の固着の強さが決められている事例も明らかにしました。

また、繰り返し地震そのものの性質についても研究を進め、精度の高い震源決定により、地震のすべり域が階層構造を成す(大きな地震のすべり域内に小さな地震が起こりうる)ことも示しました。このような階層性は、2011年東北地方太平洋沖地震でも確認されましたが、この研究は、そのような性質を緻密な解析により、この地震前に指摘したものです。東北地方太平洋沖地震と関連しても、小繰り返し地震による非地震性すべり推定は威力を発揮し、この大地震の発生前の数年間の期間にプレート境界の固着が緩んでいたことを示すことができました。このほか、フィリピン海プレートの厚さと形状および北限の推定、沈み込むプレートの上に存在する特徴的地震活動、繰り返し地震を用いた微小な地殻構造変化の抽出など、繰り返し地震により広範な地震学に関係する情報が得られるようになりました。

過去数十年間の地震波形データを扱った本研究には、諸先輩方を含む多くの方々による長年の観測・研究の積み重ねが重要でした。本研究による泉萩会森田記念賞の受賞に際し、観測網の構築・維持に関わられた皆様、共同研究者の皆様並びに泉萩会関係者の皆様方にこの場を借りて御礼申し上げます。

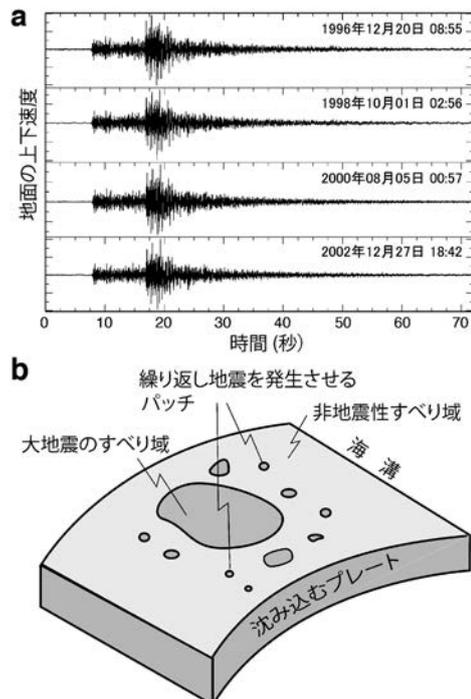


図1. 東北大学遠野地震観測所で得られた小繰り返し地震の波形例(a)とその発生モデル(b)。