Fluorine abundances in CEMP stars at the lowest metallicity: Hints on the nature of the first stars

Aldo Mura-Guzmán, David Yong, Chiaki Kobayashi, Nozomu Tominaga et al. (2025) arXiv：https://arxiv.org/abs/2504.05999

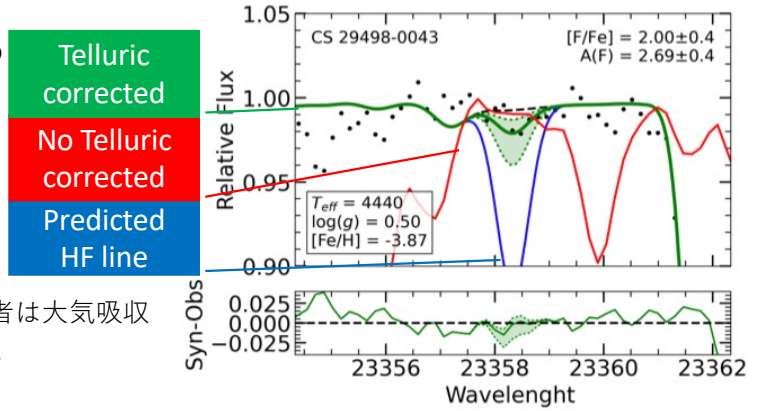
GAゼミ@2025/05/20 佐藤恭輔

【アブスト】

ここ10年で観測が可能になってきたFluorine(フッ素)の元素量を、炭素過剰金属欠乏星(CEMP; [Fe/H]<-2.0, [C/Fe]>0.7)の星で観測した。特にCEMPでのFの元素量は初代星の超新星爆発メカニズムの理解に重要であるが、これまでの観測データは金属量が高い星に偏っていた。そこでGemini South/IGRING(R～45000, 1.45～2.45 μm)を用いて7つのCEMP-s, -no, -r/sを観測し、そのうち2つの天体でフッ素量を2σの信頼度で検出し、その他は上限値を導出するに至った。特筆すべき点はCEMP-no starのCS29498-0043 ([Fe/H]=-3.87,[C/Fe]=+3.06)でF過剰([F/Fe]=+2.0±0.4)を検出した点である。 CS29498-0043の祖先となる初代星は、「CNOサイクルによって供給される Nitrogenを伴うHe燃焼と関連したWolf-Rayet星」、「Hyper novaの間の水素燃焼」の2パターンが示唆されており、そのうち後者と整合性があることが今回の観測からわかった。

【オリジナリティ】：CEMPに対してフッ素元素量を求めた　【ゴール】：CEMPの祖先となる初代星の超新星爆発のメカニズムに制限をかける。

【観測と方法】HF(1-0) R9吸収線(χ=0.227eV, log gf=-3.962)@23358.329Å：HF分子の振動回転遷移の分子吸収線を分光観測。スペクトルフィッティングによって元素量を求めるが、COの無視できない混入がHFの青い側にあるのでCの元素量から考慮。Stellar parametersはAbate+2015とTominaga+2014を使用。大気吸収の補正も当然行うが、補正に起因するノイズは数%におよび、弱いHF lineに対しては大きなコンタミとなる可能性がある。大気吸収の影響回避のためCS29498-0043 , HE1305+0007(CEMP-r/s, [Fe/H]=-2.28, [C/Fe]=+1.90)に関して、地球の公転を利用して視線速度シフトさせ大気吸収からHF lineを外して観測した。



【結果とディスカッション】

→Table 4. Fig.2の連続光の標準偏差とHF lineの深さ

Object	HF central depth	σ Telluric Regions a	b	c	avg.	σ Telluric-free Regions 1	2	3	avg.
CS 29498-0043	0.019	0.010	0.007	0.011	0.009	0.009	0.006	0.007	0.007
HE 1305+0007	0.012	0.007	0.005	0.005	0.006	0.008	0.007	—	0.007

Fig.1：Synthetic Spectrum fittingの結果。

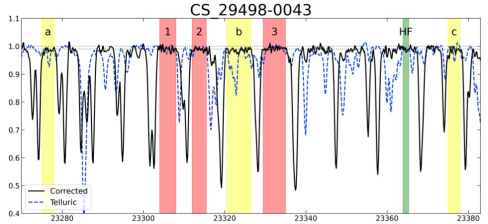
Fig.2：HF line検出の有意性の検証。(1,2,3),(a,b,c)は連続光領域であり、前者は元々大気吸収が入らない領域。後者は大気吸収を補正した領域。連続光の平均σに対してHF lineが2σ分有意だと結論。結果的にCS29498-0043で[F/Fe]=+2.69±0.4, HE1305+0007で[F/Fe]=+0.90±0.3,

Discussion

CEMP-s, -r/sの起源：HE1305+0007のフッ素元素量はs過程、r過程元素を同時再現しようとするモデル計算と合わない。このようなモデルでは軽元素を過剰に見積もる傾向がある(Abate+2015)。一方で、中性子密度がr-, s-過程の中間である、i-過程のモデルではフッ素元素量や、C、r/s元素をうまく再現できている(Hampel+2016,2019, Choplin+2021)。i-過程はAGB starsのはじめの頃に、thermal pulseを起こしてヘリウムの対流層が外側の水素層に侵入することで、水素のプロトンを取り込み中性子過剰になる。

CEMP-noの起源：Faint Supernovae (SN)はCEMP-noの元素組成を説明するシナリオの一つであり、一回の初代星のSNでCEMP-noの組成を再現できる。他のモデルでCEMP-noの素性を再現しようとすると短時間に複数のSNが必要になる。Hartwig+2023によると[Fe/H]<-3.5の星の30%が単一汚染であり、さらに低金属量でこの割合は増加する。単一汚染のほとんどがCEMP-noであり、 CS29498-0043が単一汚染である可能性は92±5%とされている。

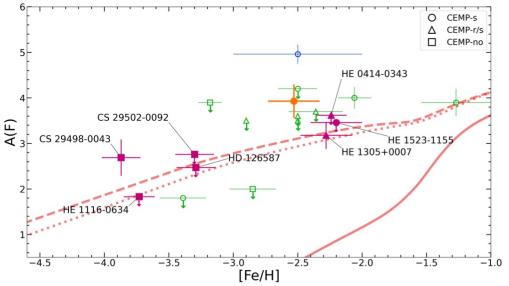
単一汚染を仮定したFaint SNのモデルは、mixing効率の違いでフッ素元素量の見積が変わる(Table3)。混合率が高いモデルでは、[F/Fe]が低くなる。初代星の回転が混合率に影響すると考えられているため、CS29498-0043のprogenitorは高速回転するFaint hypernovae(E_{51} = 20)だった可能性がある。ただし、 E_{51} = 20のモデルだと[F/Fe]が過剰になるが、 E_{51} = 10のモデルだと[F/Fe]=+2.28で観測値とよく一致する。SNのモデル計算においてmixingとfallbackのパラメータは恣意的に決まってきたが、フッ素元素量がわかると、観測的にパラメータを制限できる。



→Table 3

Star ID	Type	A(F)	[F/Fe]	$[F/Fe]_{Model}$	Model ref.*
CS 29498-0043	no	+2.69 ± 0.4	+2.00 ± 0.4	−0.25	T14, Model A
				+3.02	T14, Model B
				+2.28	Model B2
HE 1305+0007	r/s	+3.18 ± 0.3	+0.90 ± 0.3	+2.28	A15b
HE 1523-1155	s	<+3.46	<+1.10	+2.24	A15b
CS 29502-0092	no	<+2.76	<+1.50	—	—
HD 126587	no	<+2.47	<+1.00	—	—
HE 0414-0343	r/s	<+3.00	<+1.30	—	—
HE 1116-0634	no	<+1.83	<+1.00	—	—

Wolf-Rayet 星(Fig.3)：CS 29498-0043以外、3つのCEMP-noに関しても[F/Fe]の上限値を決定した。Fig.3上で実線で描かれているのは太陽近傍の銀河化学進化モデル(Kobayashi+2020),破線はrotating massive starを組み込んだモデル、点線はWolf-Ryet windsを組み込んだモデル。[Fe/H]<-3.0に分布しているCEMP-no starsのA(F)はモデルと整合性がある。ただし、 CS29498-0043のように爆発エネルギーや回転速度に制約を与えるには不十分なので、A(F)の直接決定が重要である。



【コメント】ZERO survey (CERO?)の発展系として良いサイエンスケース(IRDでは赤すぎて観測できない)。IRで多天体高分散ができると面白そう。中分散(Ultimate/NINJA R~5500? /MOIRCS 0".5 slitでR~2500 ?)でどのくらいの精度で測定できるだろうか。