宇宙における重元素の起源: 天文学・原子物理学・プラズマ物理学の連携研究

田中 雅臣 (東北大学 大学院理学研究科 天文学専攻) 共同研究者 加藤太治、村上泉、坂上裕之、木村直樹 (NIFS)、Gediminas Gaigalas, Laima Kitovienė, Pavel Rynkun (Vilnius U.)、中村 信行、Supriya Kodangil (電気通信大)、田沼 肇 (東京都立大)、 Salma Rahmouni、千葉公哉 (東北大)、土本菜々恵、仏坂健太 (東京大)、 Smaranika Banerjee (Stockholm大)

宇宙における重元素の起源



宇宙物理学・天文学の長年の未解決問題

速い中性子捕獲反応が必要 (Burbidge+1957)



最有力候補:「中性子星」の合体



質量 0.01 太陽質量の物質が速度 0.1c程度で放出 => 速い中性子捕獲によって重元素の合成 => 放射性崩壊によって電磁波で輝く 「キロノバ」

Sekiguchi+15, 16

Tanaka & Hotokezaka 13





天文観測による検証 (2017年)





(C) NAOJ/Nagoya U.

2017年8月

重力波と電磁波による中性子星合体の 「マルチメッセンジャー」観測 重元素合成の証拠



中性子星合体は本当に宇宙の元素の起源か?

放射スペクトルを解読できない!

困難:重元素の原子データの不足

実験的に得られているデータ



放射を読み解くのに必要な原子データ

共同研究 (2016-)

天文応用 田中 雅臣 (東北大) 仏坂 健太 (東京大) Smaranika Banerjee (Stockholm大) 土本 菜々恵 (東京大) Salma Rahmouni (東北大) 千葉 公哉 (東北大)

分光実験

田沼肇(都立大) 中村信行(電通大) 木村 直樹(NIFS) 坂上裕之(NIFS) Supriya Kodangil(電通大) 原子物理

原子構造計算

加藤 太治 (NIFS)

Gediminas Gaigalas Pavel Rynkun, Laima Kitoviene (Vi

天文・宇宙物理

プラズマ物理

プラズマ非平衡モデル

村上泉 (NIFS)

	2016-2017 NINS 分野間連携研究プロジェクト (NAO
	2018-2019 JSPS 二国間共同研究 (リトアニア)
	2019-2022 JSPS 基盤研究 (A)
S,	2022, 2023 NIFS 一般共同研究
_	2023-2024 JSPS 二国間共同研究 (リトアニア)
ilnius)	2023-2026 JSPS 基盤研究 (A)
	2024, 2025 NIFS 一般共同研究

(1)「完全」な原子データの構築(これまで)

系統的な原子構造計算

中性子星合体からの放射を理解するための基本データ

核融合研でデータベースを公開 (Kato, Murakami, Tanaka+) http://dpc.nifs.ac.jp/DB/Opacity-Database/

Tanaka, Kato, Gaigalas, Kawaguchi 20, MNRAS

原子番号

正確な系統的計算が可能に => 正確かつ完全なデータへ

(1)「完全」な原子データの構築(2024年度)

原子物理学への展開

エネルギー準位の分布

Kato, Tanaka+25, submitted

遷移強度の分布

Sm II (HULLAC)

重元素を含んだプラズマの量子プロセスの基盤的理解へ

「正確」 な原子データの構築(これまで)

吸収強度

スペクトルに特徴を作り得る元素の同定 (1) 低いエネルギー準位 (2) 比較的単純な原子構造 = 高い遷移確率

重要な元素に関して、 実験データを用いて 理論計算結果を校正

「正確」な原子データの構築 (2024年度)

Domoto, Tanaka, Kato+22, ApJ

セリウム (Z=58) Ce IIIの遷移確率

・恒星を用いた測定

Domoto, Lee, Tanaka+23, ApJ

・第一原理計算

Gaigalas, Rynkun, Domoto, Tanaka, Kato+24, MNRAS

ランタノイドの分光的同定に成功

12

「正確」な原子データの構築(2024年度)

中性子星合体で合成される最も重い元素は?

トリウム (Z=90)の検出可能性を初めて提案

104	H					
10 ³	Li Be	⁵ B	°C	7 N	8 0	9 F
	Na Mg	13 Al	¹⁴ Si	15 P	16 S	CI
	$ \begin{bmatrix} 19 \\ K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 20 \\ Ca \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 21 \\ Sc \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 22 \\ Ti \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 23 \\ V \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 24 \\ Cr \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 25 \\ Mn \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 26 \\ Fe \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 27 \\ Co \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 28 \\ Ni \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 29 \\ Cu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 30 \\ Zn \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2n $	Ga	³² Ge	33 As	³⁴ Se	³⁵ Br
	$ \begin{bmatrix} 37 \\ Rb \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 38 \\ Sr \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 39 \\ Y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 40 \\ Zr \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 41 \\ Nb \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 42 \\ Mo \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 43 \\ Tc \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 44 \\ Ru \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 45 \\ Rh \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 46 \\ Pd \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 47 \\ Ag \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 48 \\ Cd \end{bmatrix} \\ Cd \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 48 \\ Cd \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 48 \\ Cd$	49 In	50 Sn	⁵¹ Sb	⁵² Te	53
10 ¹ 0	$ \begin{bmatrix} 55 \\ Cs \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 56 \\ Ba \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 72 \\ Hf \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 73 \\ Ta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 74 \\ W \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 75 \\ Re \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 76 \\ Os \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 77 \\ Ir \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 78 \\ Pt \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 79 \\ Au \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 80 \\ Hg \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 80 \\ Hg \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 71 \\ Re \end{bmatrix} \begin{bmatrix} $	81 TI	⁸² Pb	83 Bi	⁸⁴ Po	⁸⁵ At
ev o	$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts
10 ⁰ - 000	$ \begin{bmatrix} 57 \\ La \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 58 \\ Ce \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 59 \\ Nd \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 60 \\ Pm \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 61 \\ Sm \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 62 \\ Eu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 63 \\ Gd \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 64 \\ Tb \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 65 \\ Tb \end{bmatrix} $	Dy I	67 HO	68 Er	Tm	70 Yb
S	89 90 91 92 93 94 95 96 97 Ac Th Pa U Np Pu Am Cm Bk	98 Cf	99 Es	\mathbf{Fm}^{100}	$\overset{101}{Md}$	102 No
10 ⁻¹	Domoto, Wanajo, Tanaka+25, ApJ (実	験に	- 7	、る	,推:	定

Kitoviene, Gaigalas, Rynkun+25, MNRAS (第一原理計算)

さらなる元素種の同定へ

宇宙における重元素の起源:中性子星合体のシグナルの解読

- ・ 天文学 x 原子物理学 x プラズマ物理学の連携が重要
- ・系統的な原子データの構築 (1) 完全なデータ:放射特性の理解 (2) 正確なデータ:元素の分光同定
- ・原子物理学への展開も
- ・これから
 - さらなる元素種の同定:JWSTで観測可能な中間赤外線の原子データ
 - 元素量の定量化:非熱的電子の効果を加味したプラズマモデル

Japan-Lithuania Opacity Database for Kilonova (Kato, Murakami, Tanaka+) http://dpc.nifs.ac.jp/DB/Opacity-Database/

15