

重元素の起源の解明に向けた 原子データの構築と中性子星合体の観測

田中 雅臣 (東北大学)

*原子物理 *宇宙物理

加藤 太治 坂上 裕之 村上 泉 (核融合科学研究所) 中村 信行 (電気通信大学)

田沼 肇 (東京都立大学) Gediminas Gaigalas (リトアニアVilnius大学)

和南城 伸也 (AEI) 関口 雄一郎 (東邦大学)

(C) NASA

- **元素の起源と中性子星合体**
- **原子物理・宇宙物理の連携研究：原子データの構築**

元素の起源を解明したい

速い中性子捕獲反応
(rプロセス)が必要

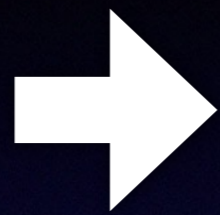
??

1 H	Big bang															2 He	
3 Li	4 Be	Platinum Gold										5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg	Stars and supernovae										13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57~71 La-Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89~103 Ac-Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu			
89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr			

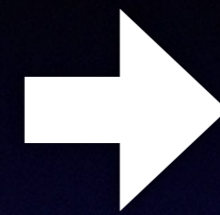
重力波天文学

電磁波天文学

中性子星
合体



元素合成
(rプロセス)



放射性崩壊
=> 「キロノバ」

重力波放射

質量放出 ($M \sim 0.01 M_{\text{sun}}$)

$\sim < 100 \text{ ms}$

$< 1 \text{ sec}$

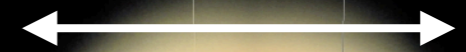
$\sim > \text{days}$

10 km (10^6 cm)



<http://www.aei.mpg.de/comp-rel-astro>

10^{15} cm

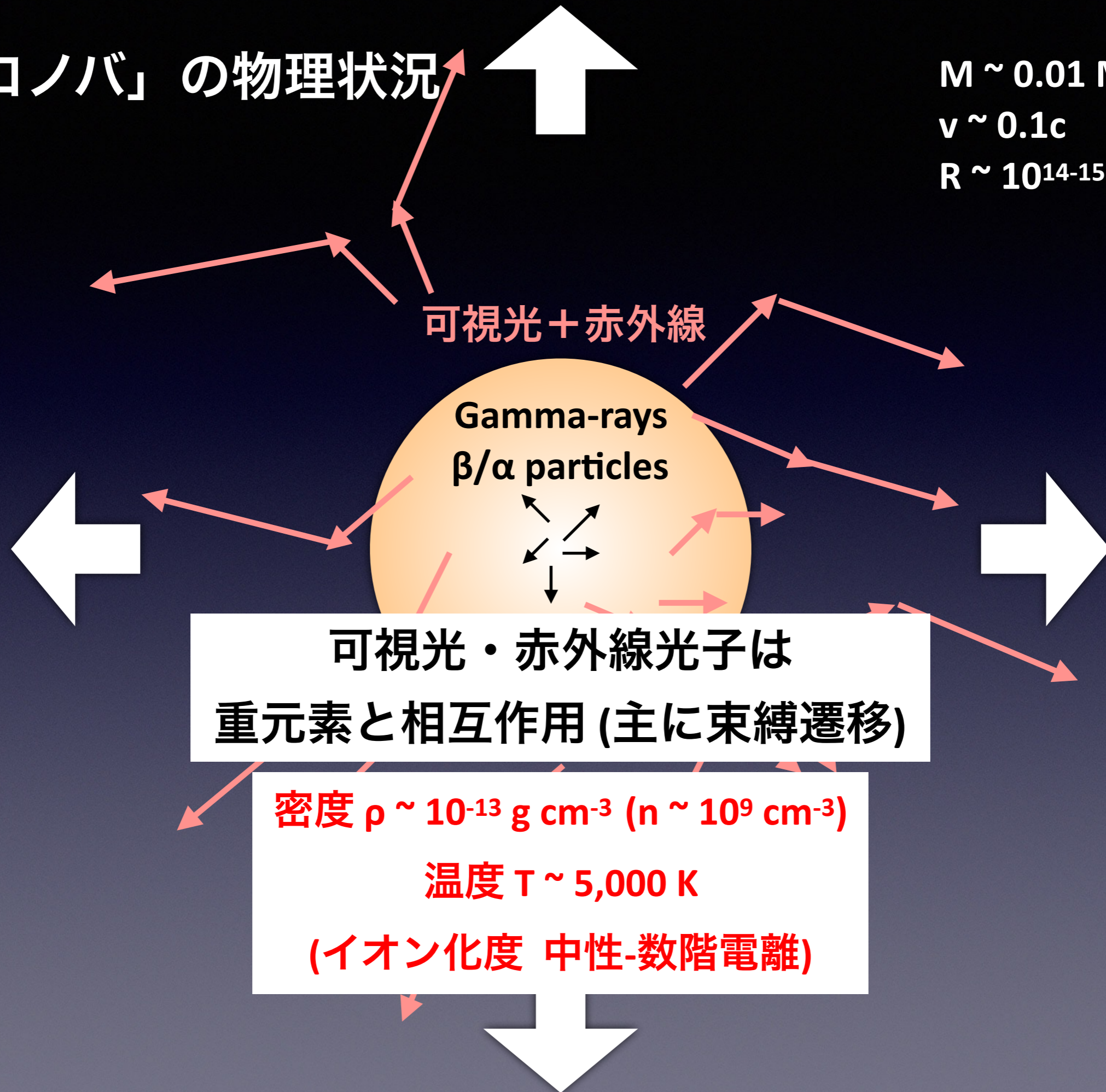


Time = 1.4 days

MT & Hotoke 13

「キロノバ」の物理状況

$M \sim 0.01 M_{\text{sun}}$
 $v \sim 0.1c$
 $R \sim 10^{14-15} \text{ cm}$



可視光 + 赤外線

Gamma-rays
β/α particles

可視光・赤外線光子は
重元素と相互作用 (主に束縛遷移)

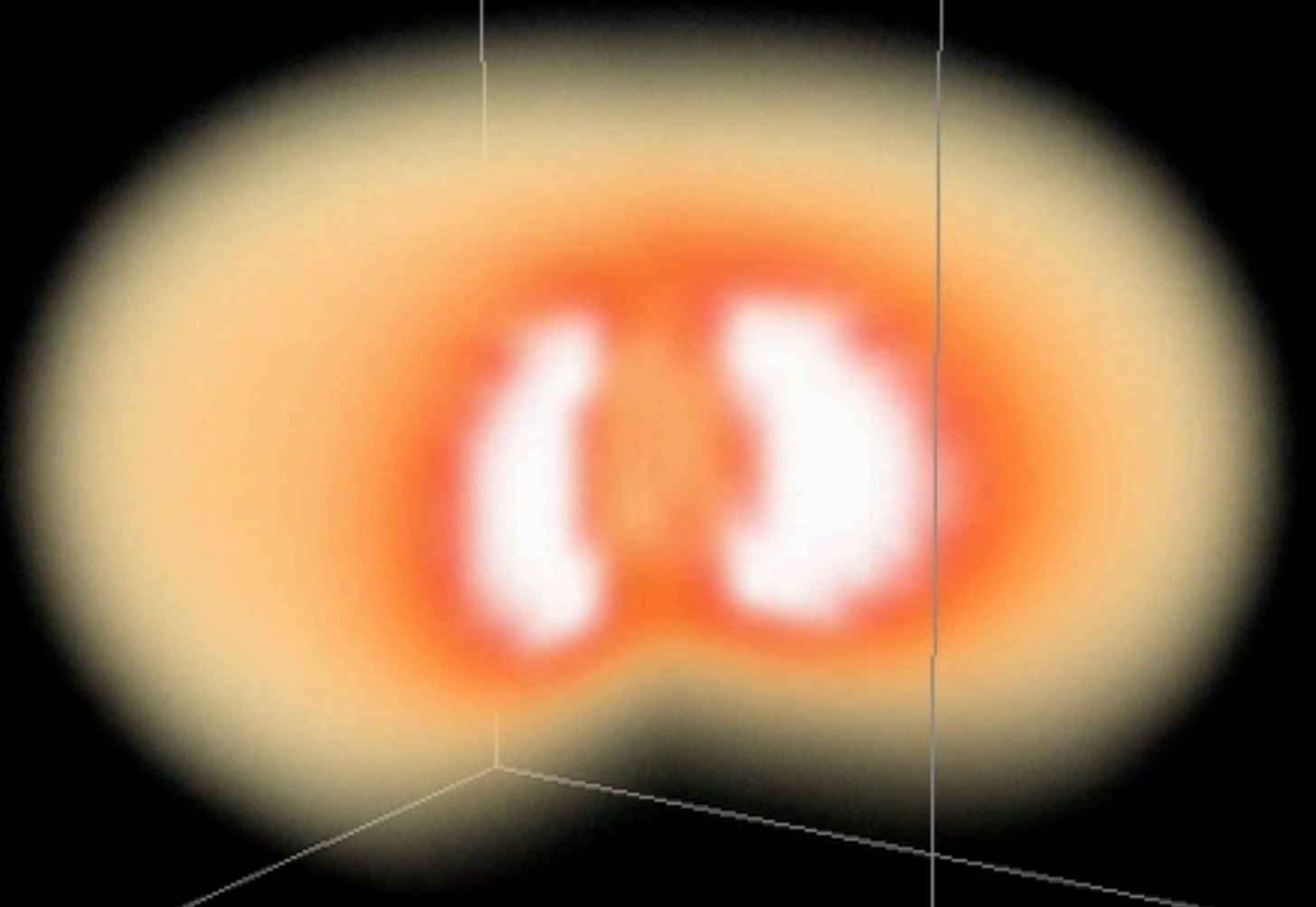
密度 $\rho \sim 10^{-13} \text{ g cm}^{-3}$ ($n \sim 10^9 \text{ cm}^{-3}$)

温度 $T \sim 5,000 \text{ K}$

(イオン化度 中性-数階電離)

「キロノバ」の輻射輸送シミュレーション

Tanaka & Hotokezaka 2013



網羅的な重元素のデータが必要
(天文ではこれまでニーズがなかった)

Time = 1.1 days

- 元素の起源と中性子星合体
- 原子物理・宇宙物理の連携研究：原子データの構築

経緯とこれまでの研究

- 2016/3: セミナー@電通大 (中村信行さん研究室)

- とにかく何か始めてみよう

MT, Kato+18
ApJ, 852, 109

- FY 2016-2017: 自然科学研究機構

- 「若手研究者による分野間連携プロジェクト」

MT+17,
PASJ, 69, 102

- 原子構造計算と分光実験を開始

- FY 2018-2019: JSPS 二国間共同研究 (リトアニア)

Gaigalas+20,
ApJS, 248, 13

- 高精度原子構造計算との比較

Ladziute+20
ApJS, 248, 17

- FY 2019-2022: JSPS 基盤研究A

MT, Kato+20,
MNRAS, 496, 1369

- 網羅的な原子構造計算

- 実験による検証

Banerjee, MT+20
ApJ, 901, 29

原子物理と宇宙物理の連携で

重力波天体の同定・重元素の起源解明のための基本データを構築

関口 (東邦大)

和南城 (上智大 => AEI)

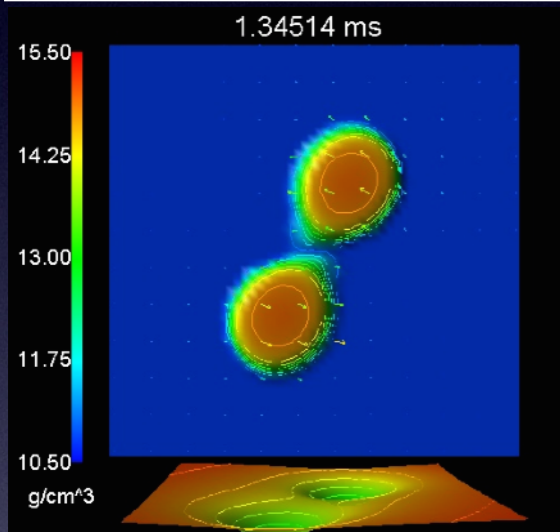
加藤・村上 (核融合研)

Gaigalas (Vilnius大)

坂上 (核融合研)・中村 (電通大)

田沼 (都立大)

中性子星合体計算



原子構造計算

モデル提供

エネルギー準位
遷移確率

イオン分光実験

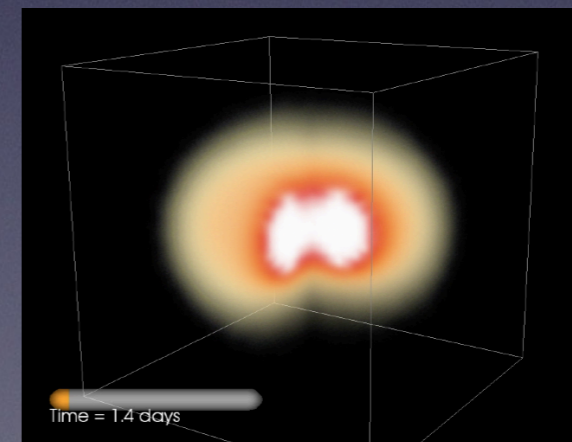


検証

輻射輸送計算

電磁波放射の性質

田中 (国立天文台 => 東北大)



重力波天体の同定
重元素の起源

2016年9月 - 2017年8月：重元素の原子構造計算 => 吸収係数

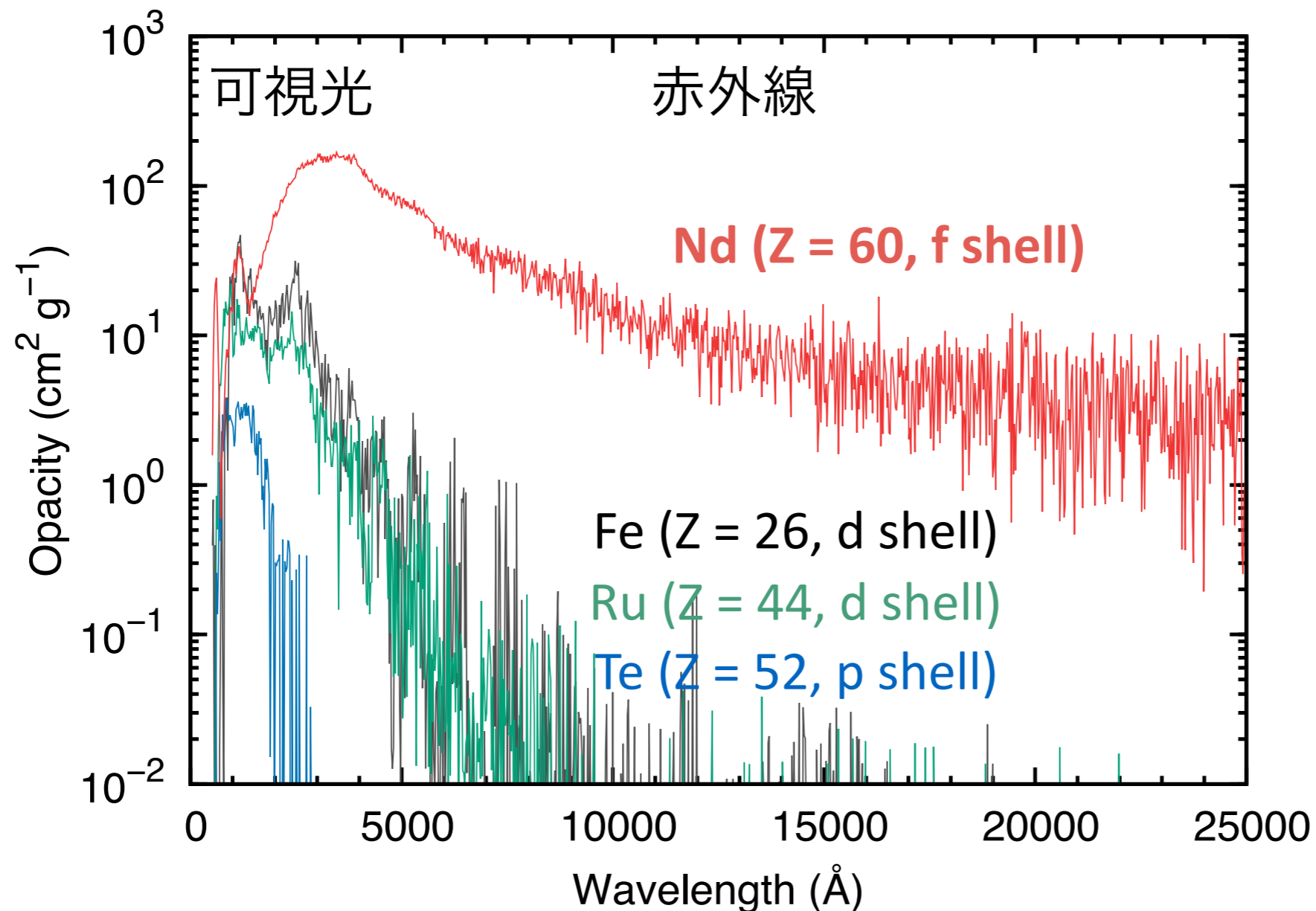
原子のエネルギー準位とE1遷移を

二つの異なる手法で計算

ランタノイドの吸収係数：とくに赤外線で大きい

加藤 太治さん

Gediminas Gaigalasさん



MT, Kato, Gaigalas et al.
2018, ApJ, 852, 109

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E}$$

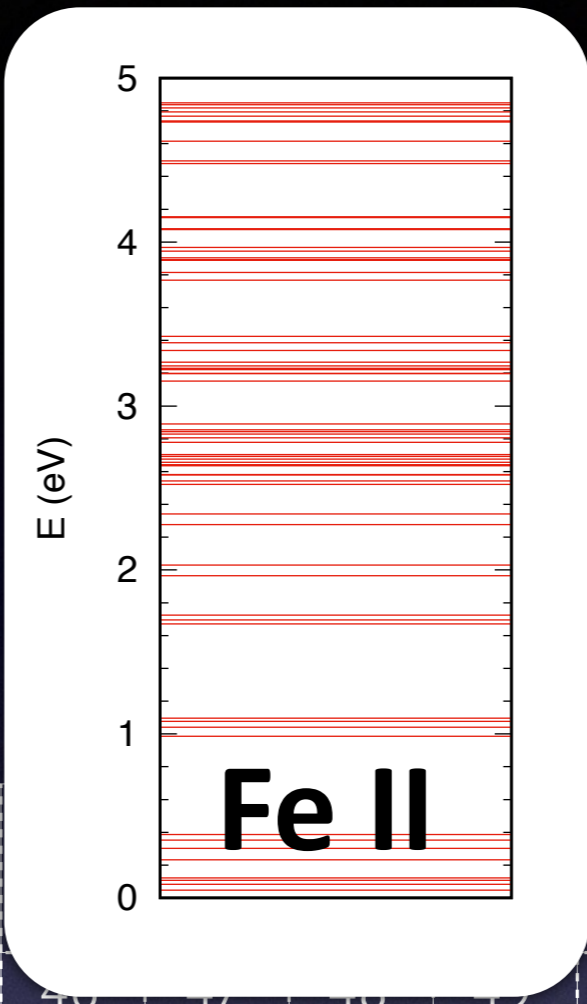
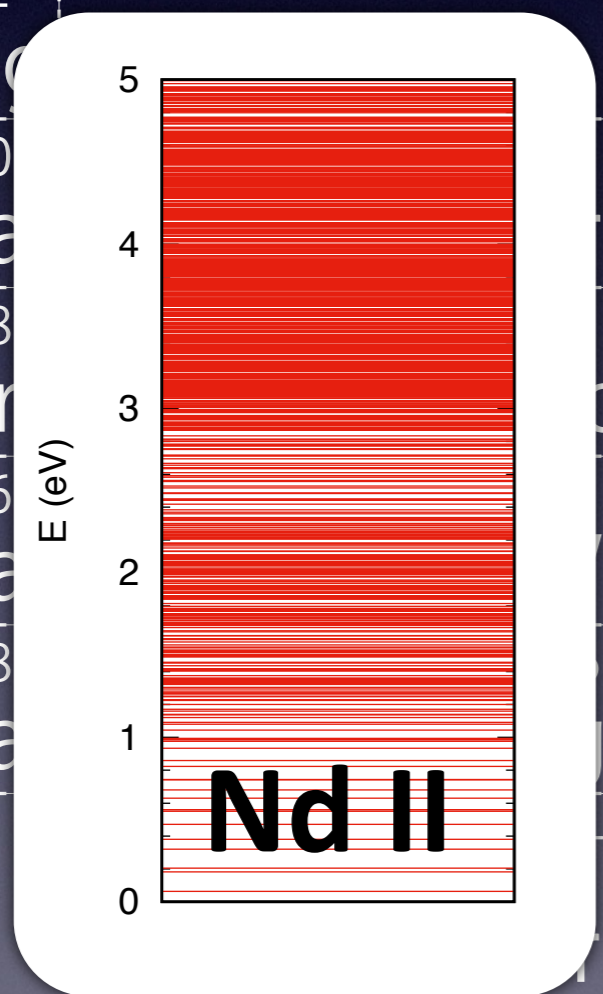
open s shell

1	H		
3	Li	4	Be
11	Na	12	Mg
19	K	20	Ca
37	Rb	38	Sr
55	Cs	56	Ba
87	Fr	88	Ra

「キロノバ」は
赤外線で強く輝くはず

open d-shell

25	Mn	26	Fe	27	Co																								
43	Tc	44	Ru	45	Rh	46	Pd	47	Ag	48	Cd	49	In	50	Sn	51	Sb	52	Te	53	I	54	Xe						
75	Re	76	Os	77	Ir	78	Pt	79	Au	80	Hg	81	Tl	82	Pb	83	Bi	84	Po	85	At	86	Rn						
107	Bh	108	Hs	109	Mt	110	Ds	111	Rg	112	Cn	113	Nh	114	Fl	115	Mc	116	Lv	117	Ts	118	Og						
60	Nd	61	Pm	62	Sm	63	Eu	64	Gd	65	Tb	66	Dy	67	Ho	68	Er	69	Tm	70	Yb	71	Lu						
89	Ac	90	Th	91	Pa	92	U	93	Np	94	Pu	95	Am	96	Cm	97	Bk	98	Cf	99	Es	100	Fm	101	Md	102	No	103	Lr



open p-shell

6	C	7	N	8	O	9	F	10	Ne
14	Si	15	P	16	S	17	Cl	18	Ar
32	Ge	33	As	34	Se	35	Br	36	Kr
50	Sn	51	Sb	52	Te	53	I	54	Xe
82	Pb	83	Bi	84	Po	85	At	86	Rn

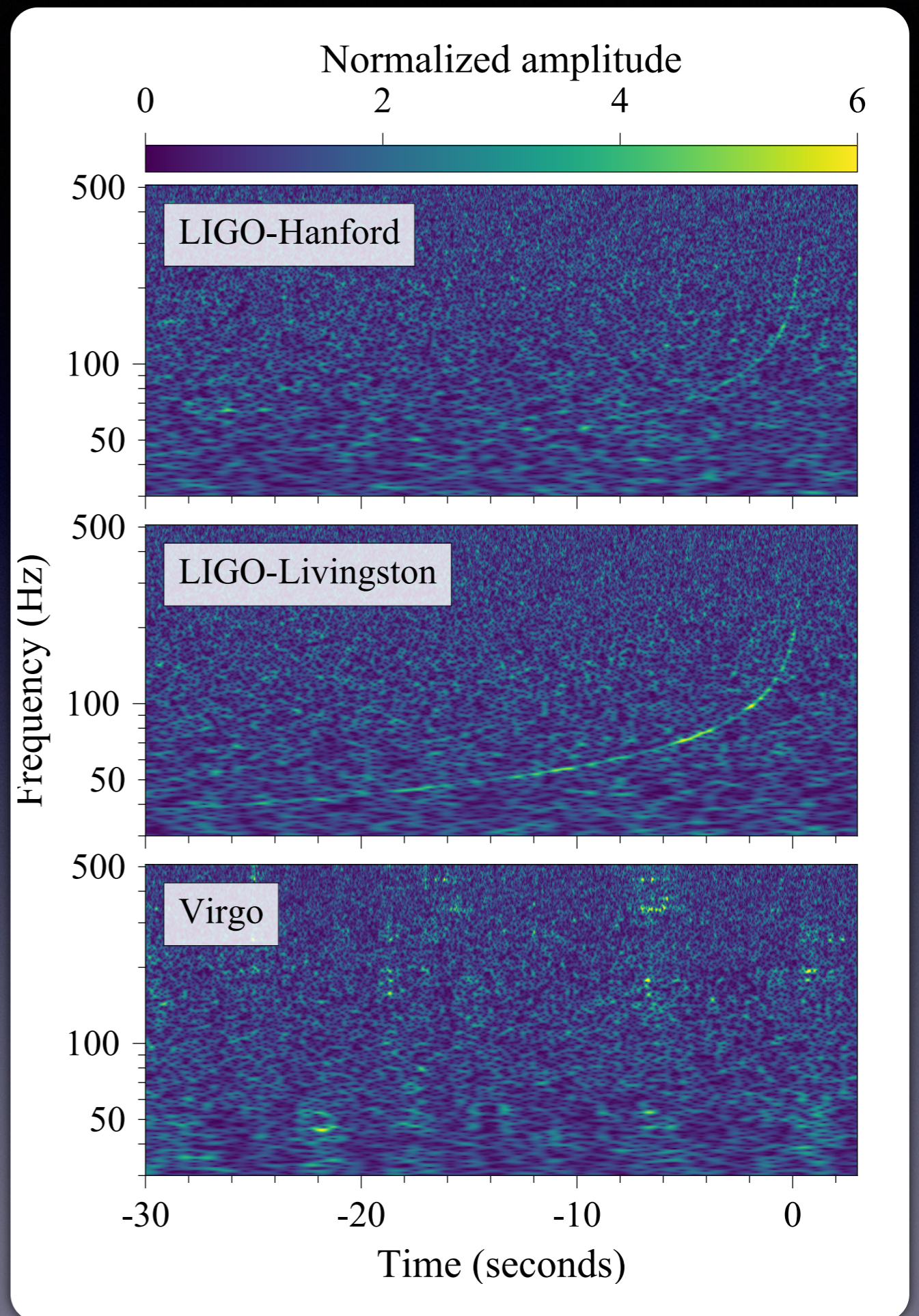
open f shell

2017年8月17日

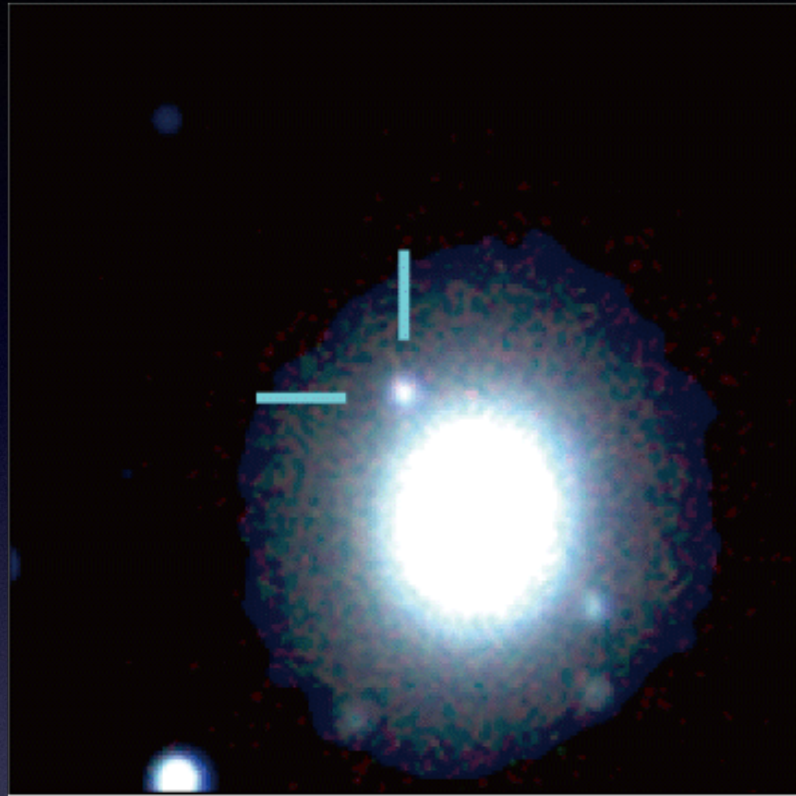
GW170817

中性子星合体からの
重力波初検出

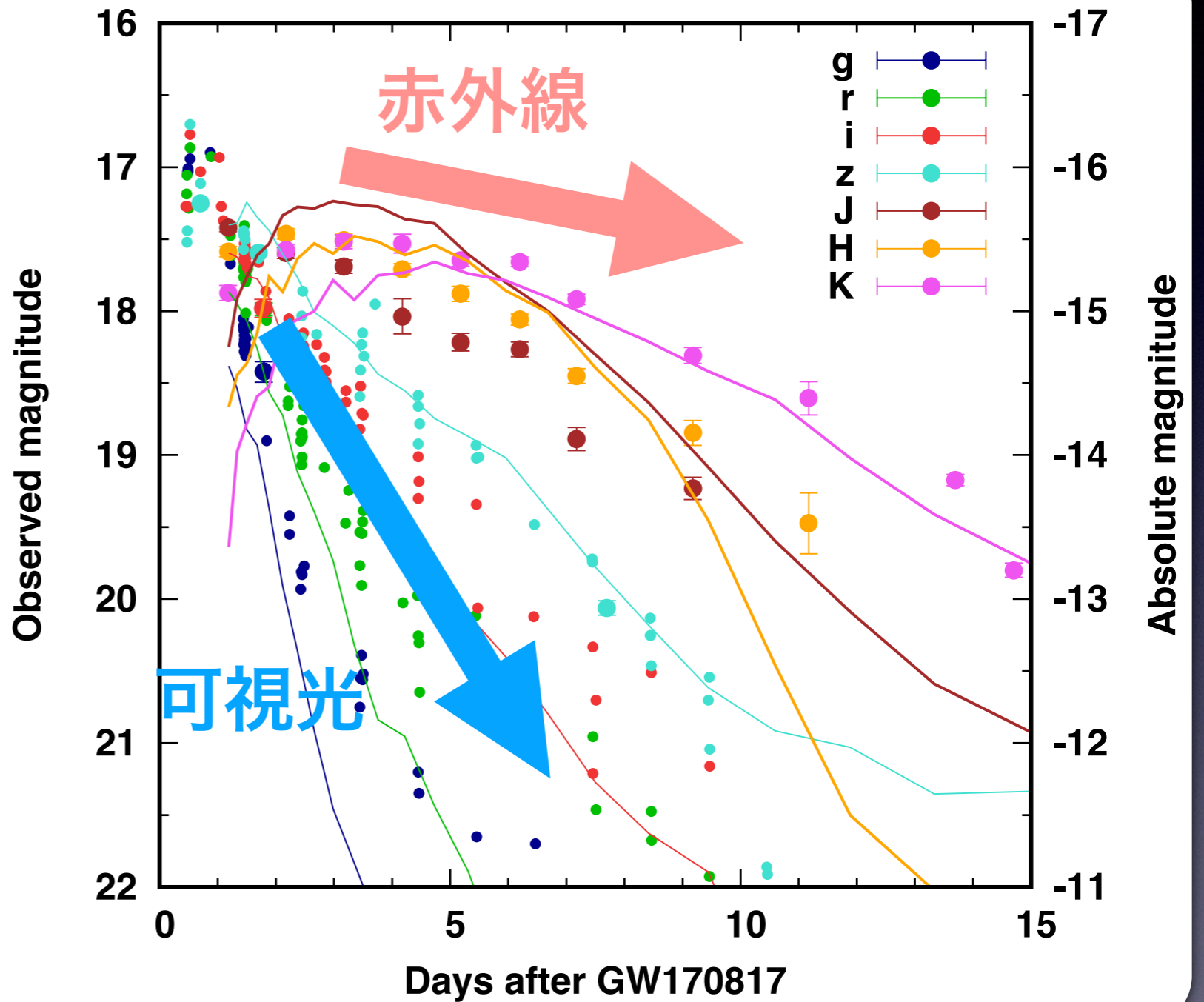
LIGO Scientific Collaboration
and Virgo Collaboration, 2017, PRL



GW170817: 電磁波対応天体



MT et al. 2017, PASJ, 69, 102



「キロノバ」が見えた = 重元素合成の証拠
赤外線で強い <= ランタノイド元素の性質

原子構造計算の進展

MT, Kato, Gaigalas, Kawaguchi 2020, MNRAS, 496, 1369

open s shell

Kasen+13: Sn II, Ce II-III, Nd I-IV, Os II

Fontes+17: Ce I-IV, Nd I-IV, Sm I-IV, U I-IV

Wollaeger+17: Se, Br, Zr, Pd, Te

MT+18: Se I-III, Ru I-III, Te I-III, Nd I-III, Er I-III

Kasen+17: Lanthanides

MT+20: all the heavy elements

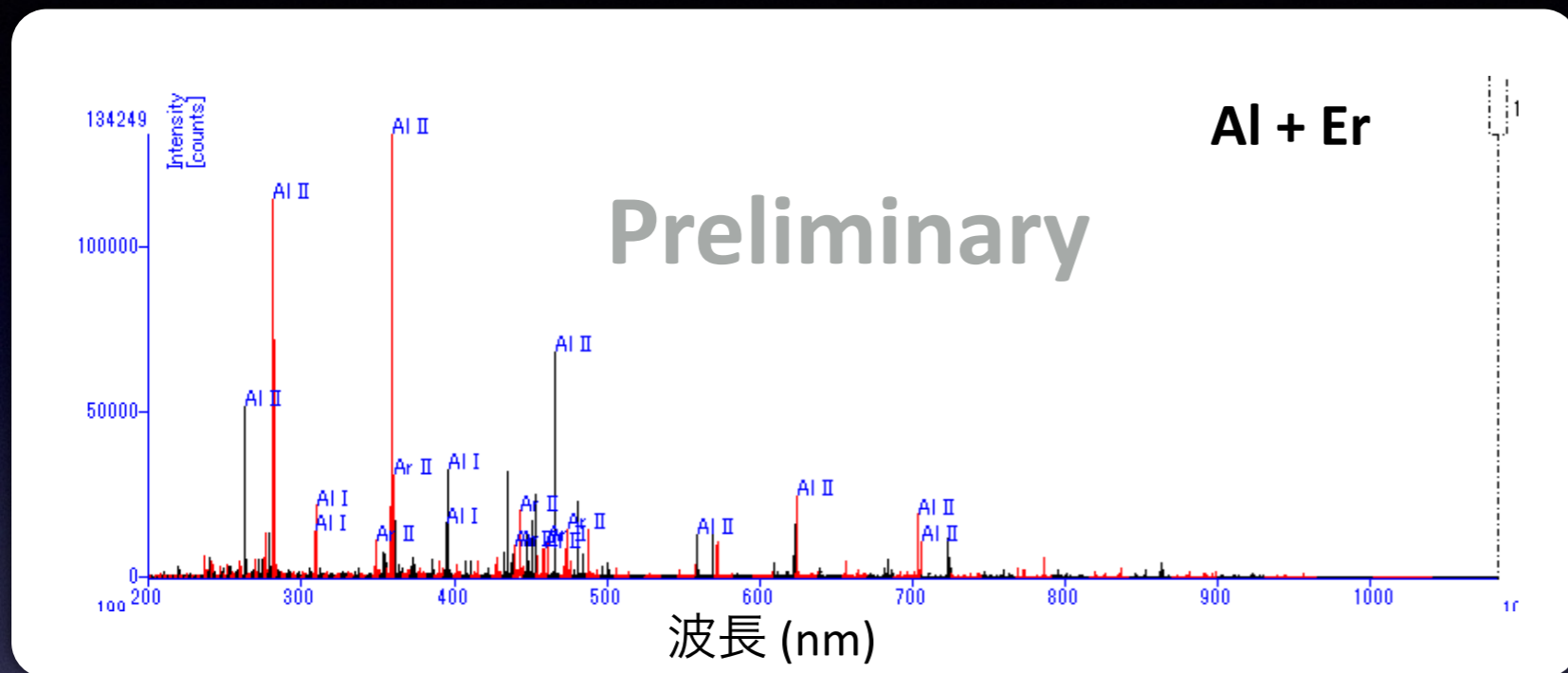
open p-shell

open d-shell

1 H																2 He					
3 Li	4 Be															5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg															13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr				
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe				
55 Cs	56 Ba	57~71 La-Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn				
87 Fr	88 Ra	89~103 Ac-Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo				
			57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu				
open f shell			89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr				

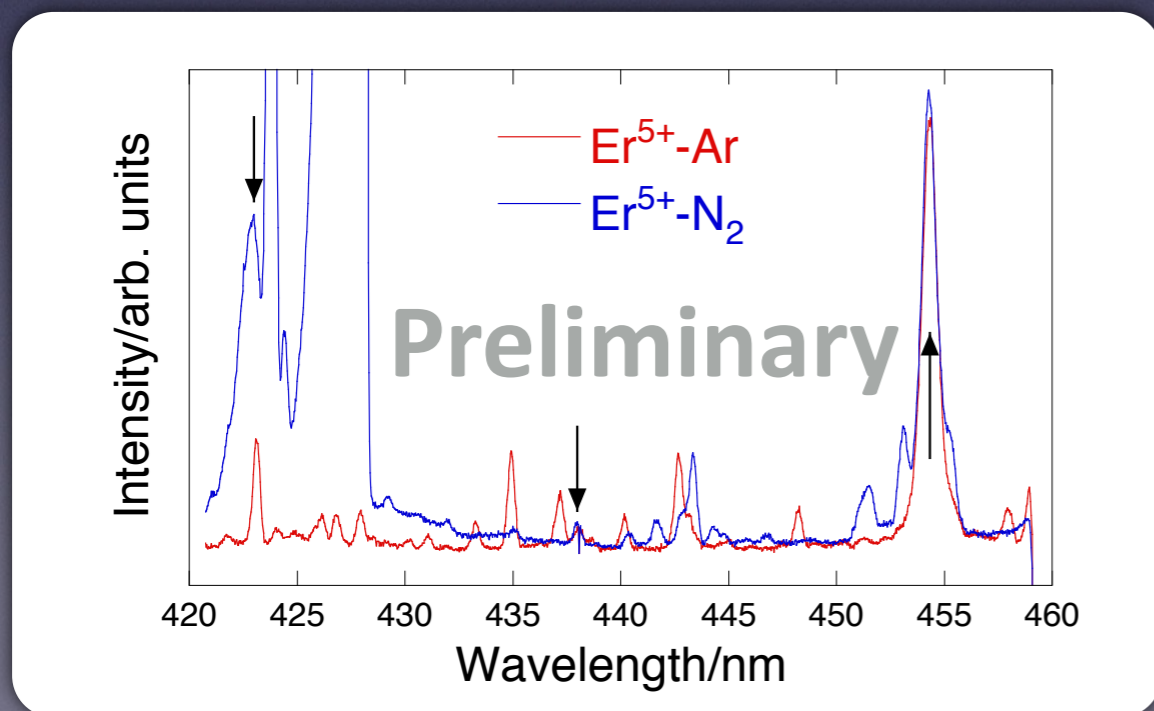
実験による原子データの検証

レーザー誘起ブレークダウン分光@電通大



(c) 中村信行さん

電荷交換反応 <= 電子サイクロトロン共鳴型イオン源 @都立大



(c) 田沼肇さん

加藤太治さん
坂上裕之さん

+ LHD @核融合研

+ 電子ビームトラップ @電通大

相補的な実験データの取得

=> 多角的な原子データの検証へ

未解決の問題

- 中性子星合体でどの元素が、どれぐらいできたのか？
- 本当に中性子星合体が重元素の起源か？
発生率 \times 合成量は足りる？

=> 今後の重力波 + 電磁波観測で検証 (2022-)

今後の展開

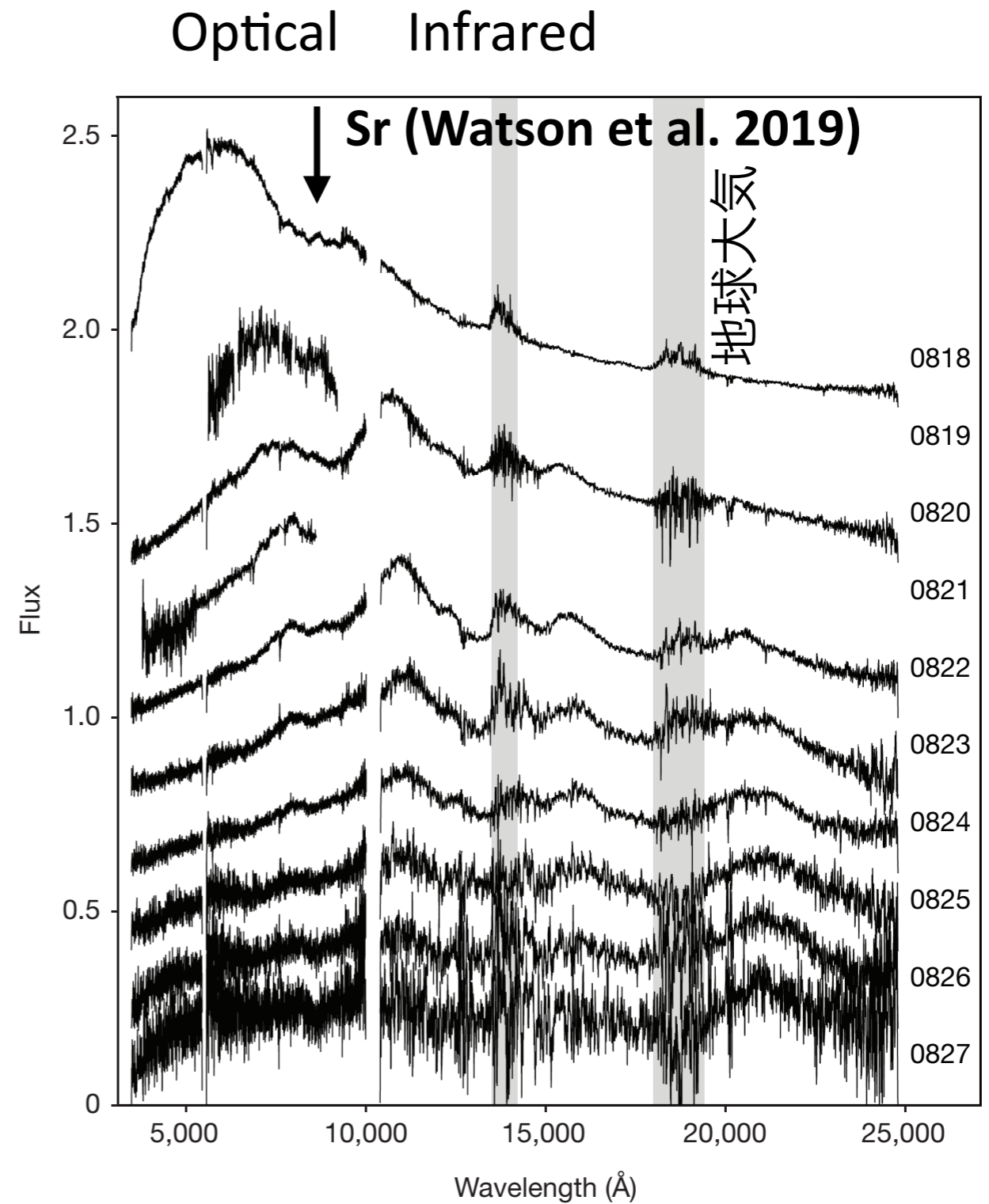
- 正確で網羅的な原子データの構築
=> 電磁波シグナルから元素の量や種類を推定する基礎
- より現実的な輻射輸送モデルへ (非平衡プラズマ)
=> 衝突確率なども重要に

まとめ

- **原子物理+宇宙物理の連携で重元素原子データを構築**
 - 複数の計算手法・分光実験による検証
 - 重力波+電磁波観測で重元素の起源の理解へ
- **分野融合研究：個人的感想**
 - とにかく面白い (宇宙しか考えてこなかったから?)
 - 物理の理解が深まる、視野が広がる (学生さんも)
 - 「もともとは一つの分野だった」ことを痛感

Appendix

キロノバのスペクトル



Pian et al. 2017

何かしらの特徴はあるけど元素は不明