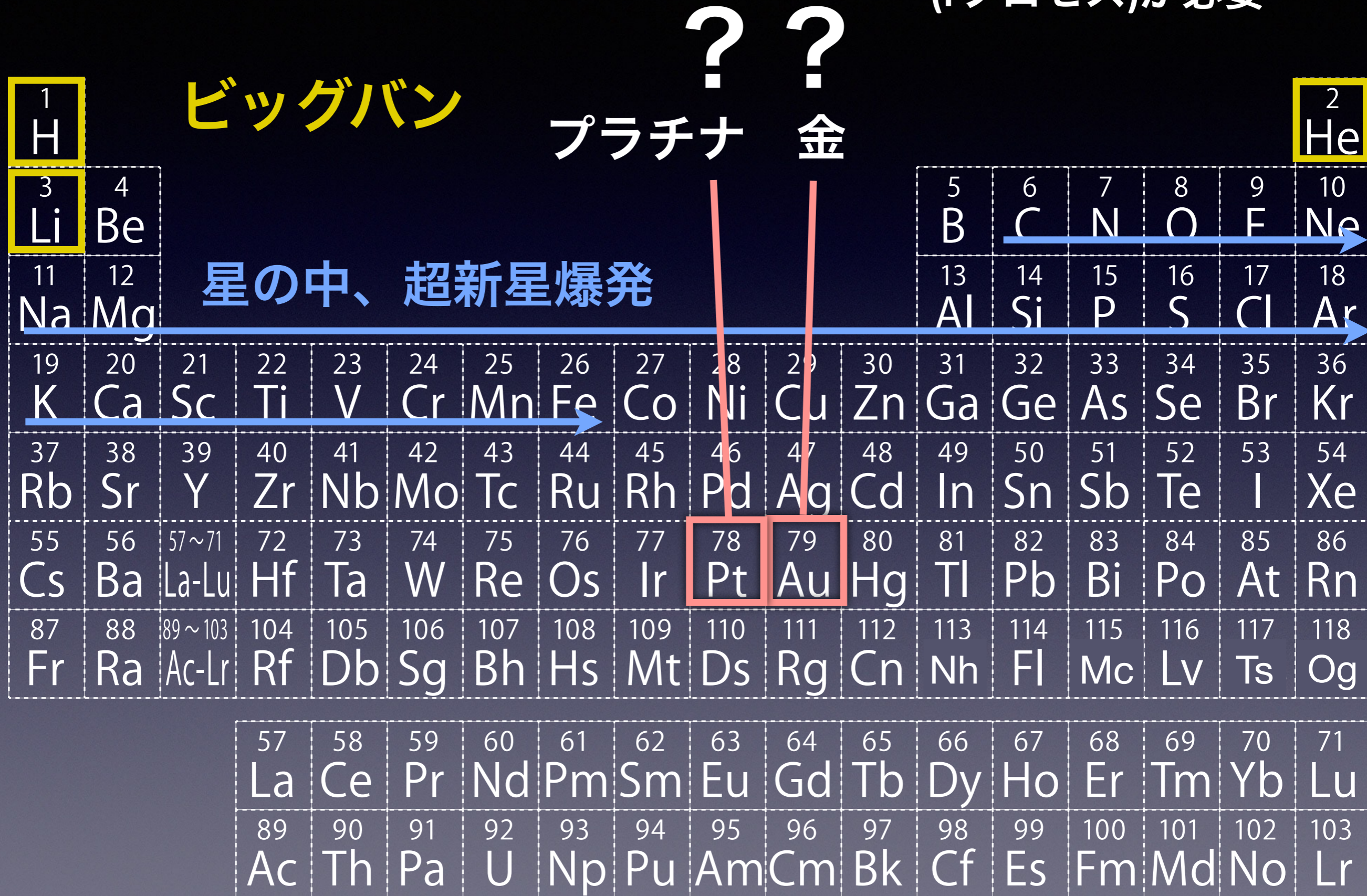


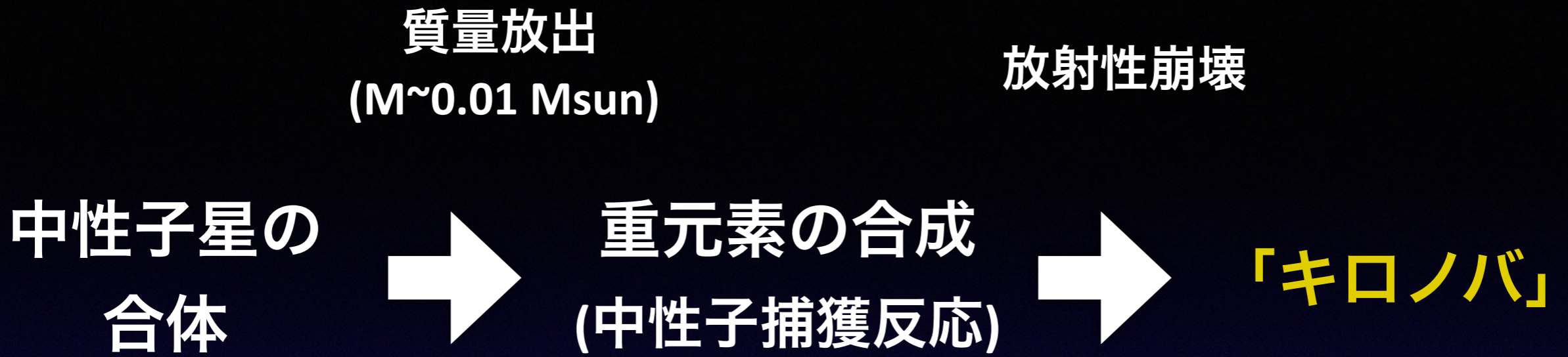
宇宙の重元素の起源の解明に向けた  
重元素原子データの構築と非平衡プラズマの研究

田中 雅臣 (東北大学 理学研究科 天文学専攻)

# 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





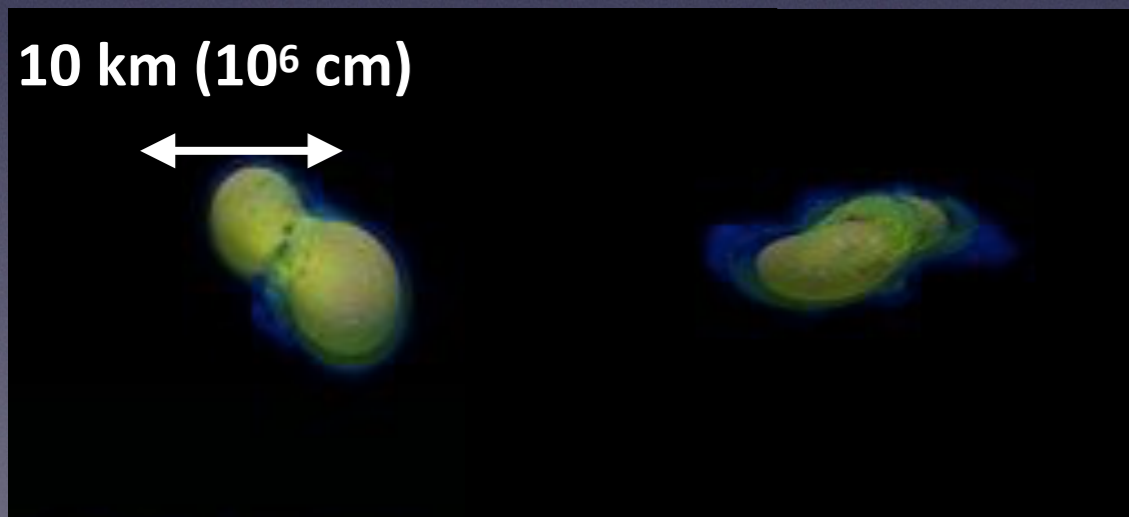
重力波放射

電磁波放射

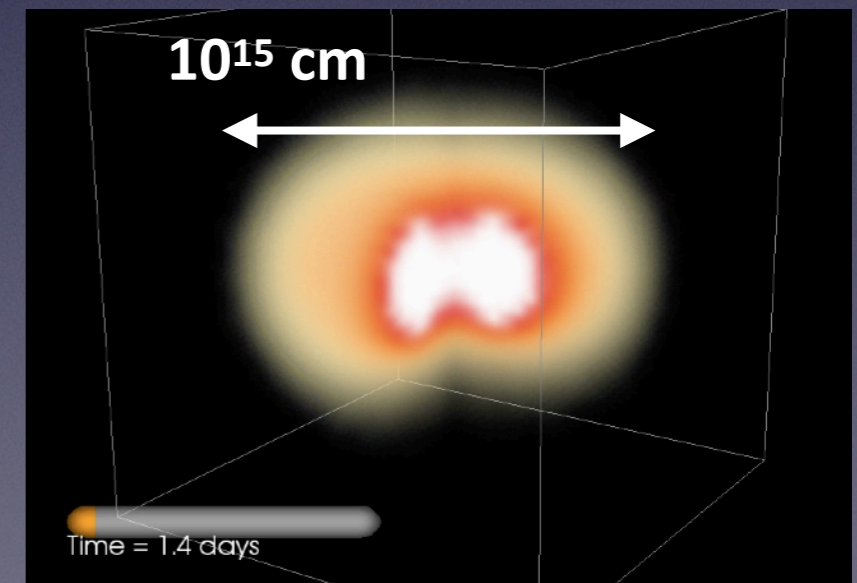
$\sim < 0.1$  秒

$< 1$  秒

$\sim > 1$  日



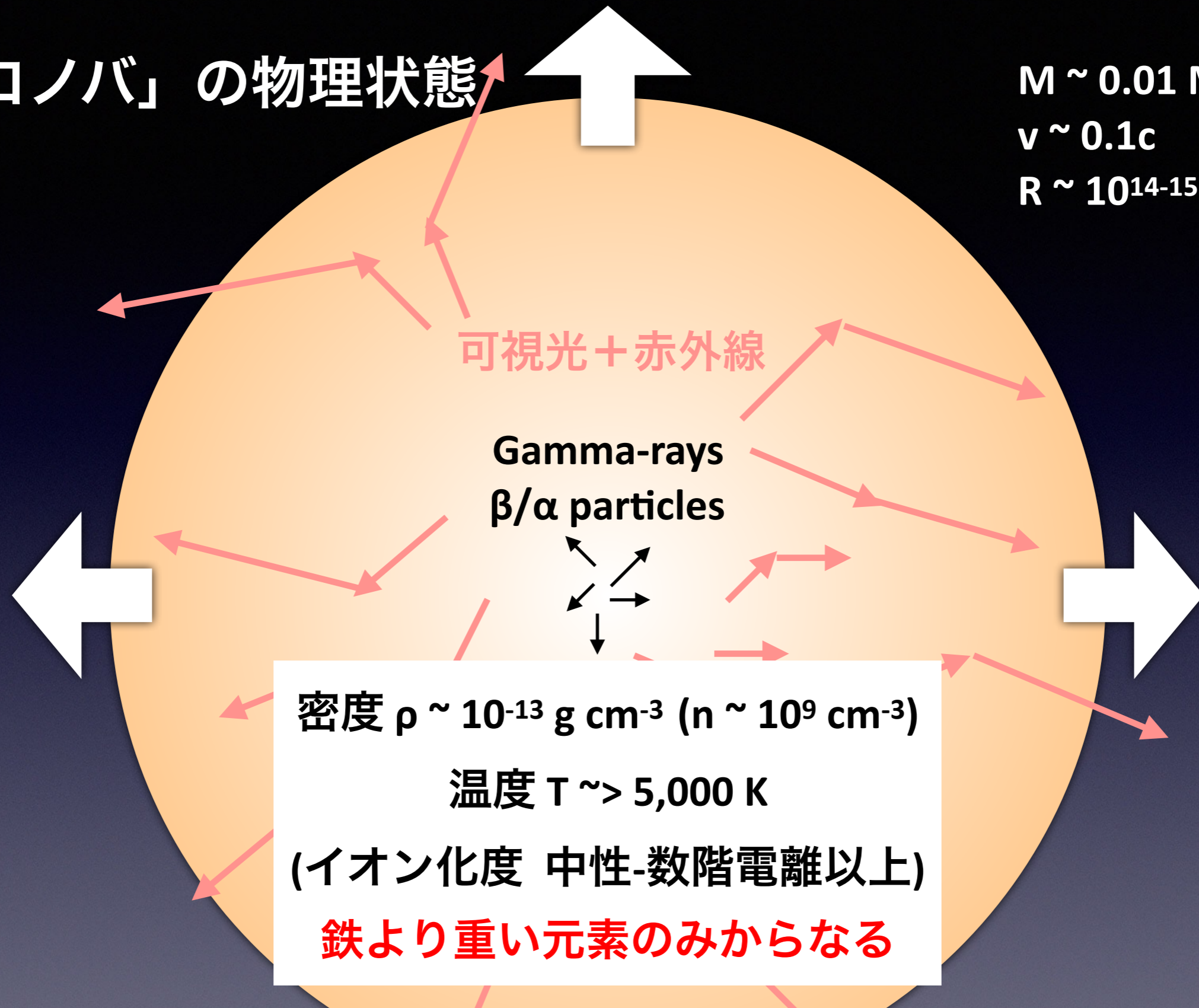
<http://www.aei.mpg.de/comp-rel-astro>



MT & Hotokezaka 13

# 「キロノバ」の物理状態

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



可視光 + 赤外線

Gamma-rays  
β/α particles

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-数階電離以上)

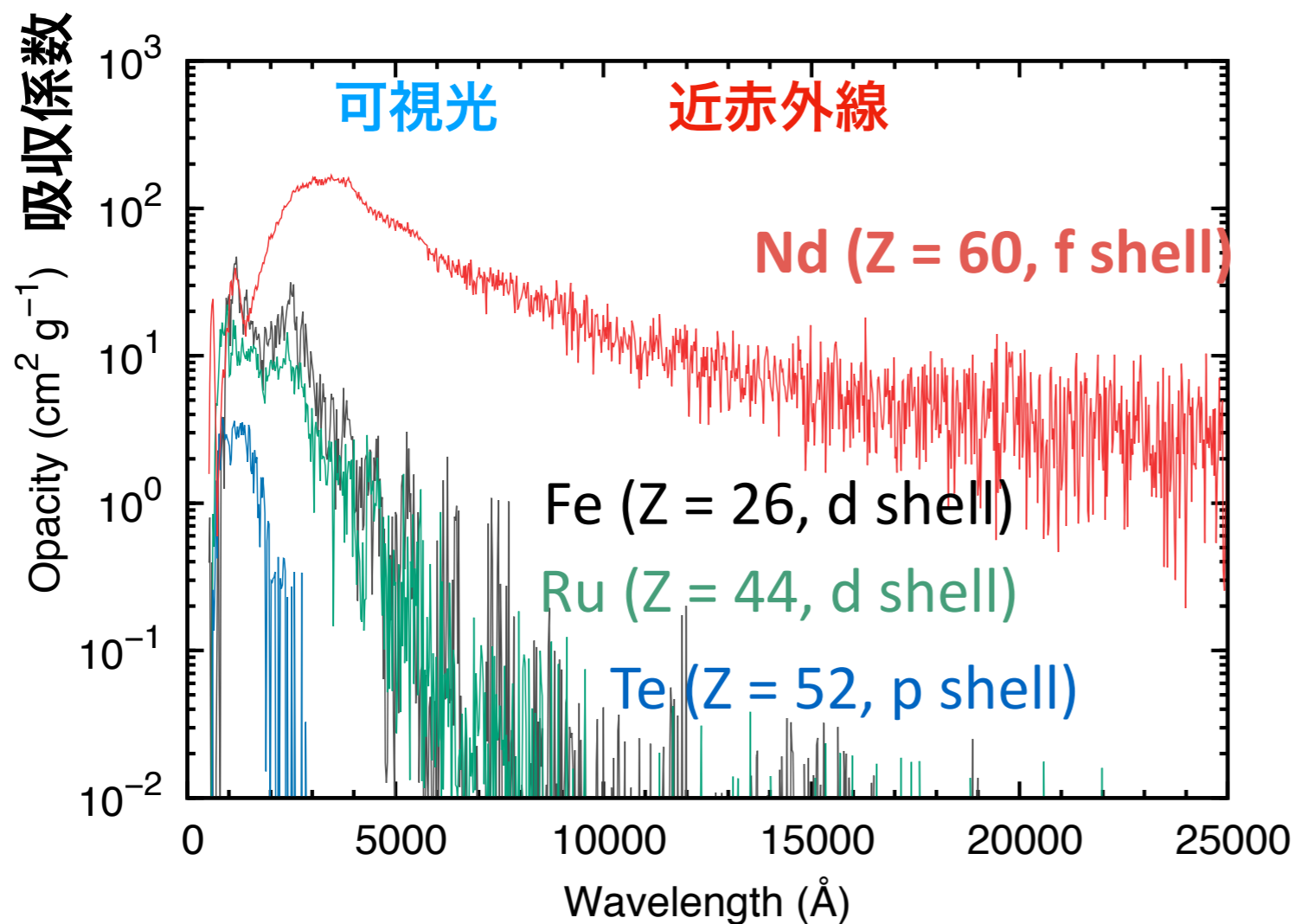
鉄より重い元素のみからなる

可視光・赤外線光子は  
重元素と相互作用 (主に束縛遷移)

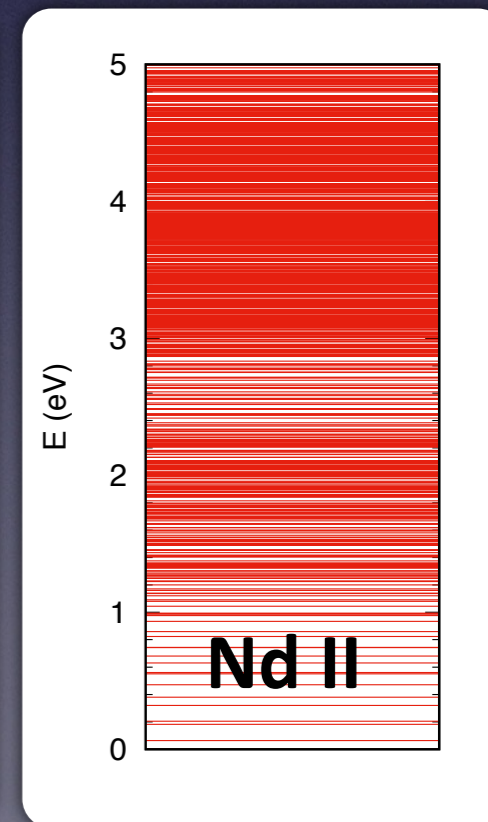
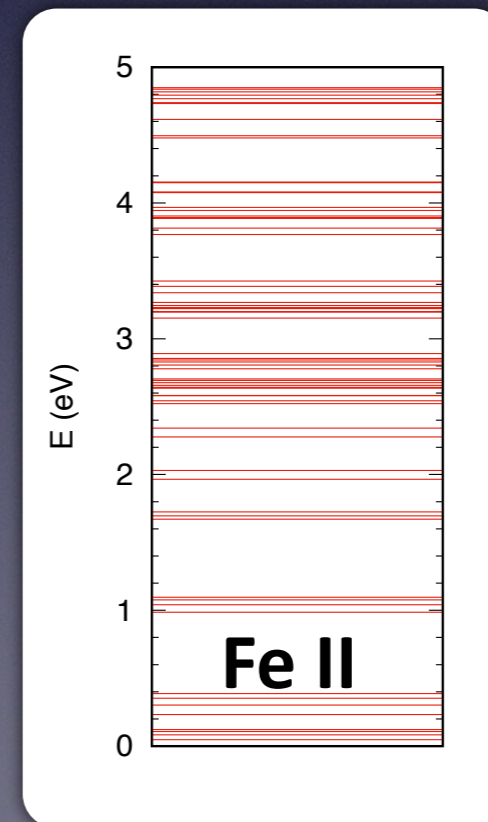
# 重元素の原子構造計算 => 吸収係数

加藤 太治さん、村上泉さん、坂上裕之さん (NIFS)、 Gediminas Gaigalasさん (Vilnius U.)、  
中村信行さん (電通大)、田沼肇さん (都立大)らとの共同研究  
(MT, Kato, Gaigalas et al. 2018, ApJ, 852, 109; 2020, MNRAS, 496, 1369)

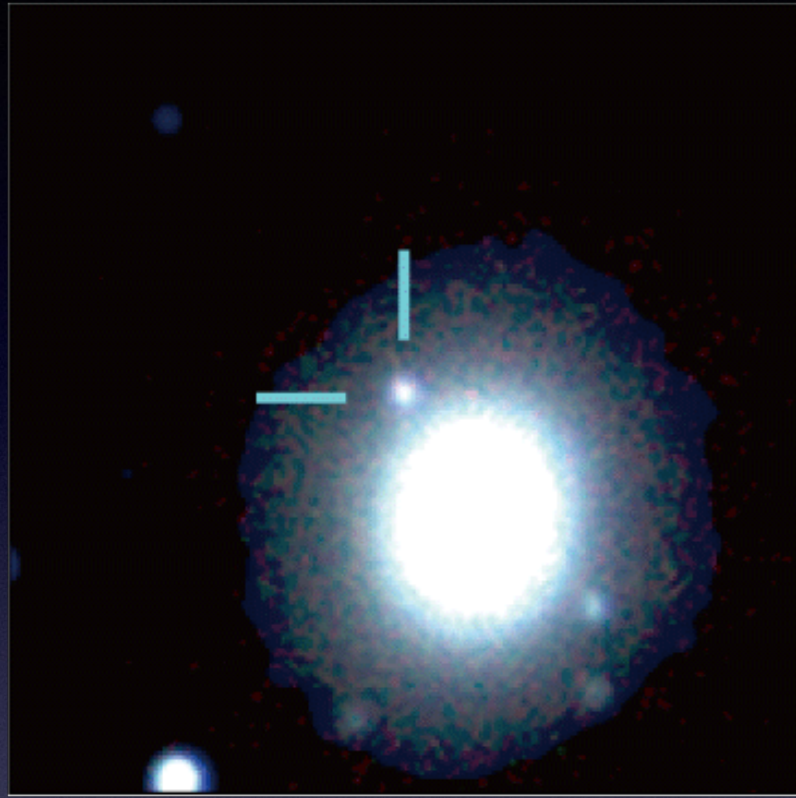
ランタノイド元素の吸収係数：とくに赤外線で大きい  
=> 「キロノバ」は赤外線で強く輝くはず



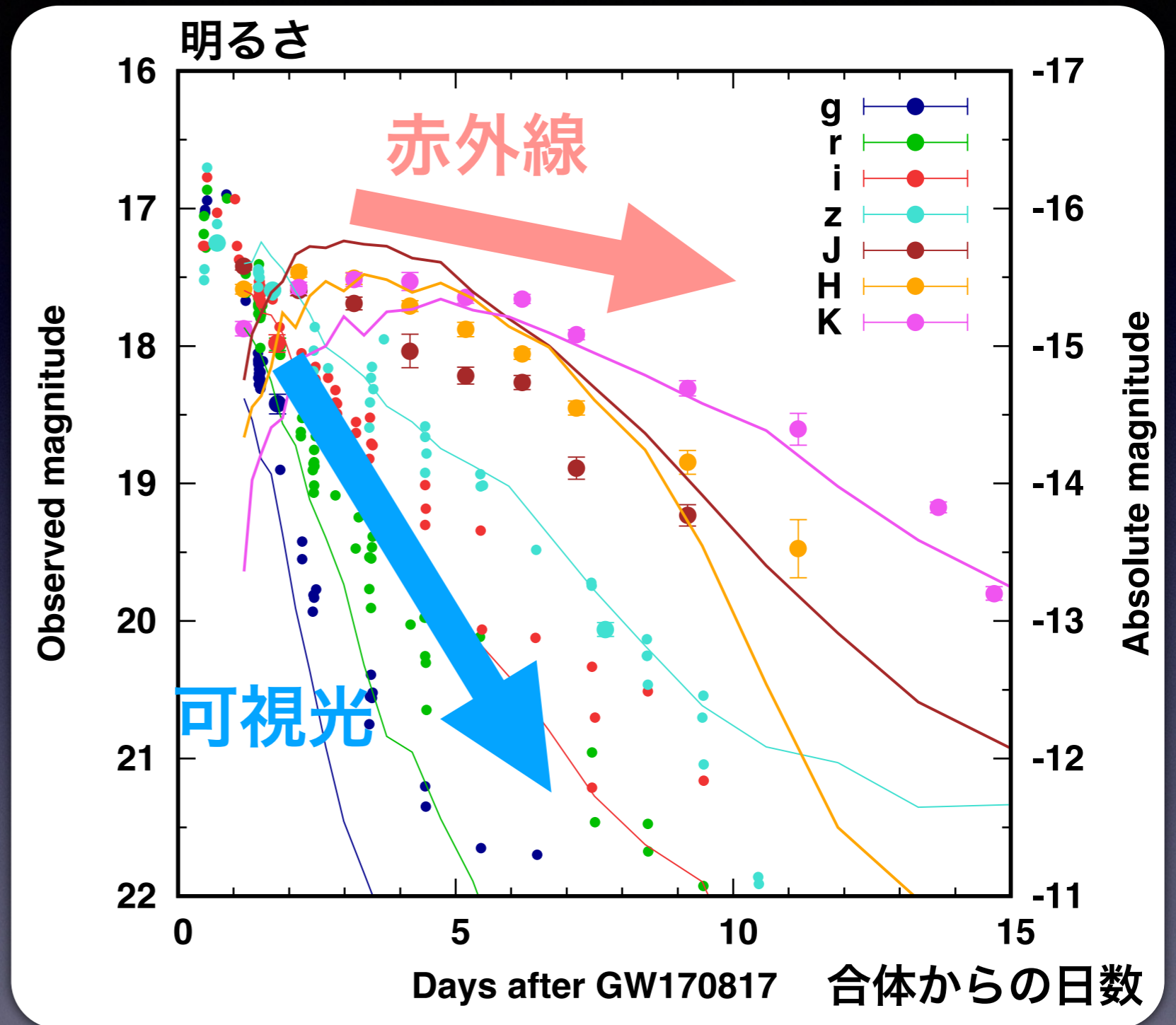
$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E}$$



# 2017年: 初の中性子星合体 重力波 + 電磁波観測



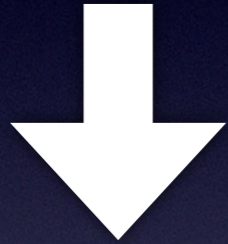
MT et al. 2017, PASJ, 69, 102



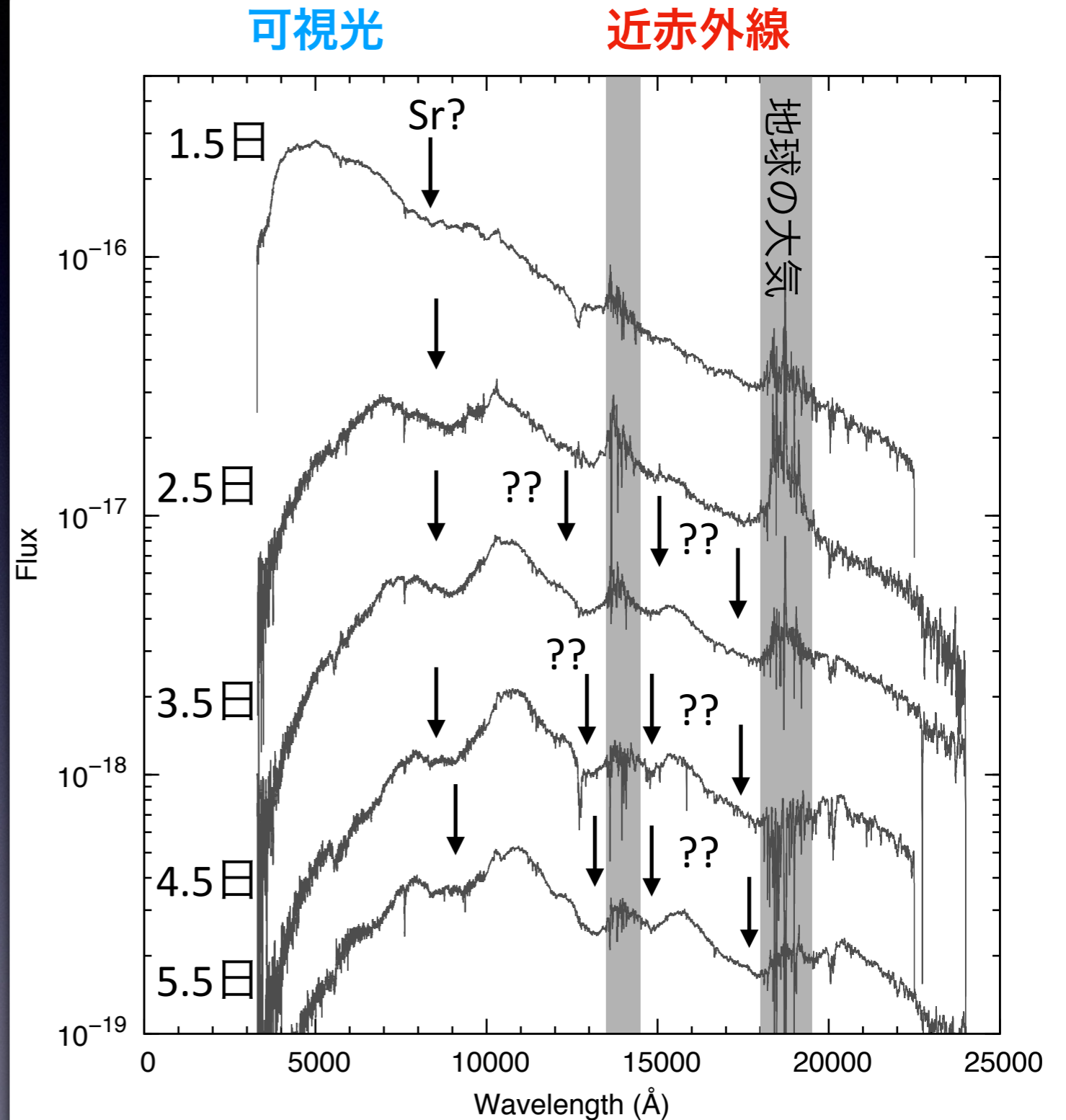
「キロノバ」が見えた = 重元素合成の証拠  
赤外線で強い = ランタノイド元素が放出された

# 「キロノバ」のスペクトル

検証は次のステップへ  
どの元素がどれぐらい  
放出されているのか??

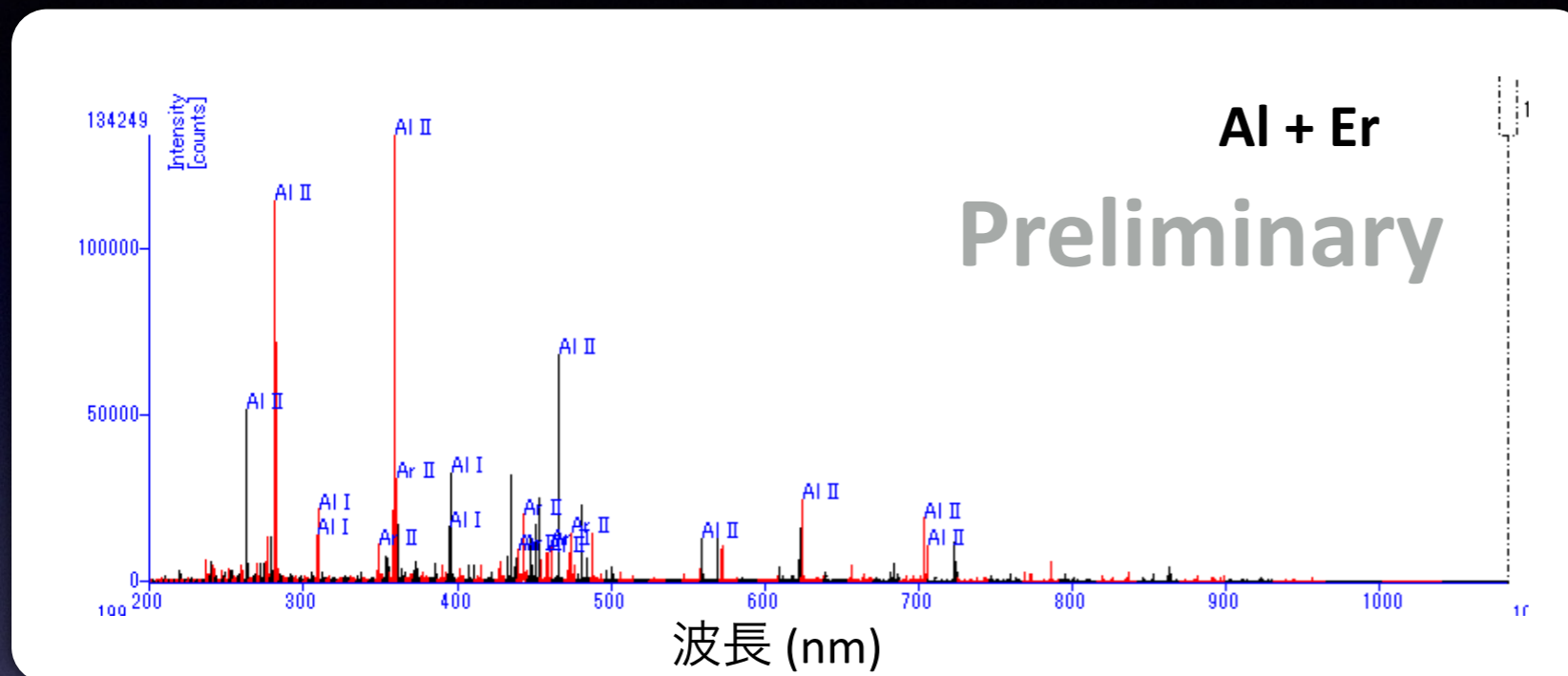


- (1) 網羅的かつ正確な  
重元素の原子データ
  - (2) 非平衡プラズマの  
モデリング
- が必要不可欠



# (1) 重元素の原子データ：原子構造計算の検証

- レーザー誘起ブレイクダウン分光 (1-2階電離) @電通大



(c) 中村信行さん (電通大)

- LHD (重元素のペレット溶発雲分光、3階電離以上) @NIFS

- イオンビームスパッタリング装置 @NIFS

- CoBIT @NIFS

- 電子ビームトラップ @電通大

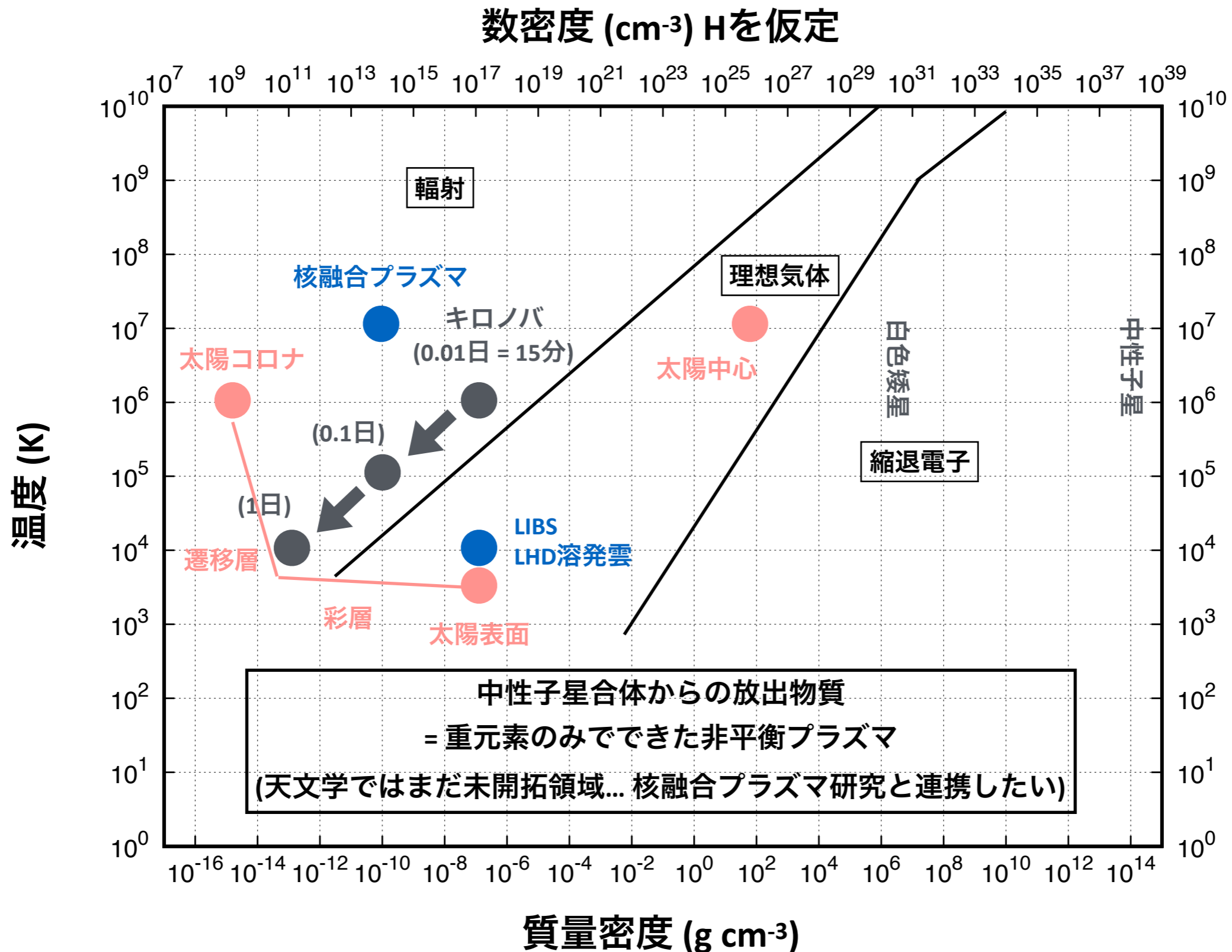
加藤太治さん、  
坂上裕之さん (NIFS)

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  
最終的にはデータベース化して世界に提供したい

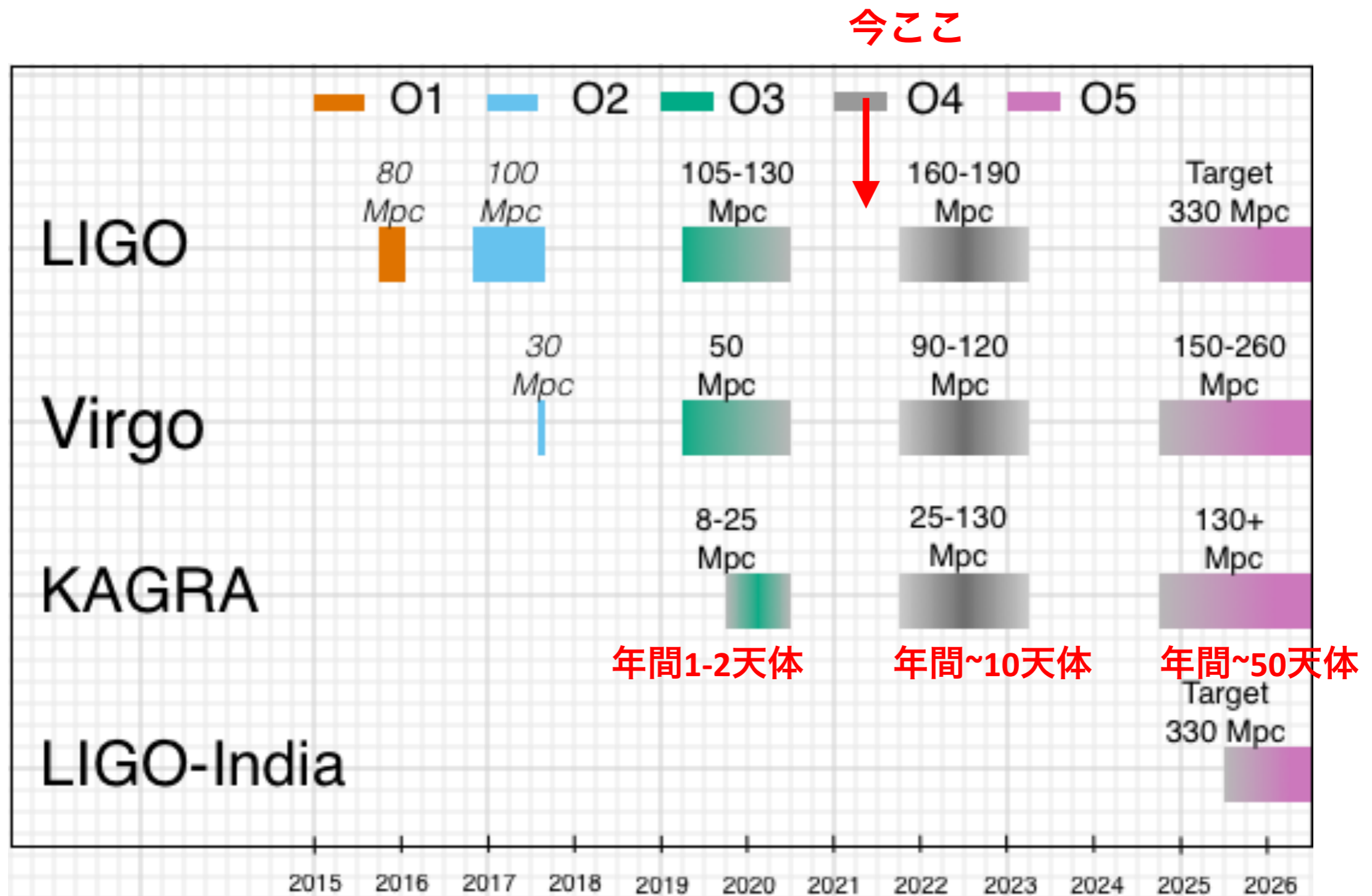


## (2) 非平衡プラズマのモデリング

これまでの天文学の重元素プラズマの計算 = LTEを仮定



# 今後の重力波＋電磁波観測



<https://www.ligo.org/scientists/GWEMalerts.php>

# まとめ

- **宇宙における重元素の起源**

- 中性子星合体の重力波＋電磁波観測で検証可能な時代に
- 原子物理＋宇宙物理の連携が鍵
- 現状ではスペクトルを読み解くことができていない
- 今後5年で、より多くの観測データが得られる

- **元素の起源の解明に向けた課題**

- 網羅的かつ正確な重元素データの構築  
=> データベース化 (NIFS 原子分子データベース)
- 重元素のみで構成された非平衡プラズマのモデリング

# Appendix

# 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

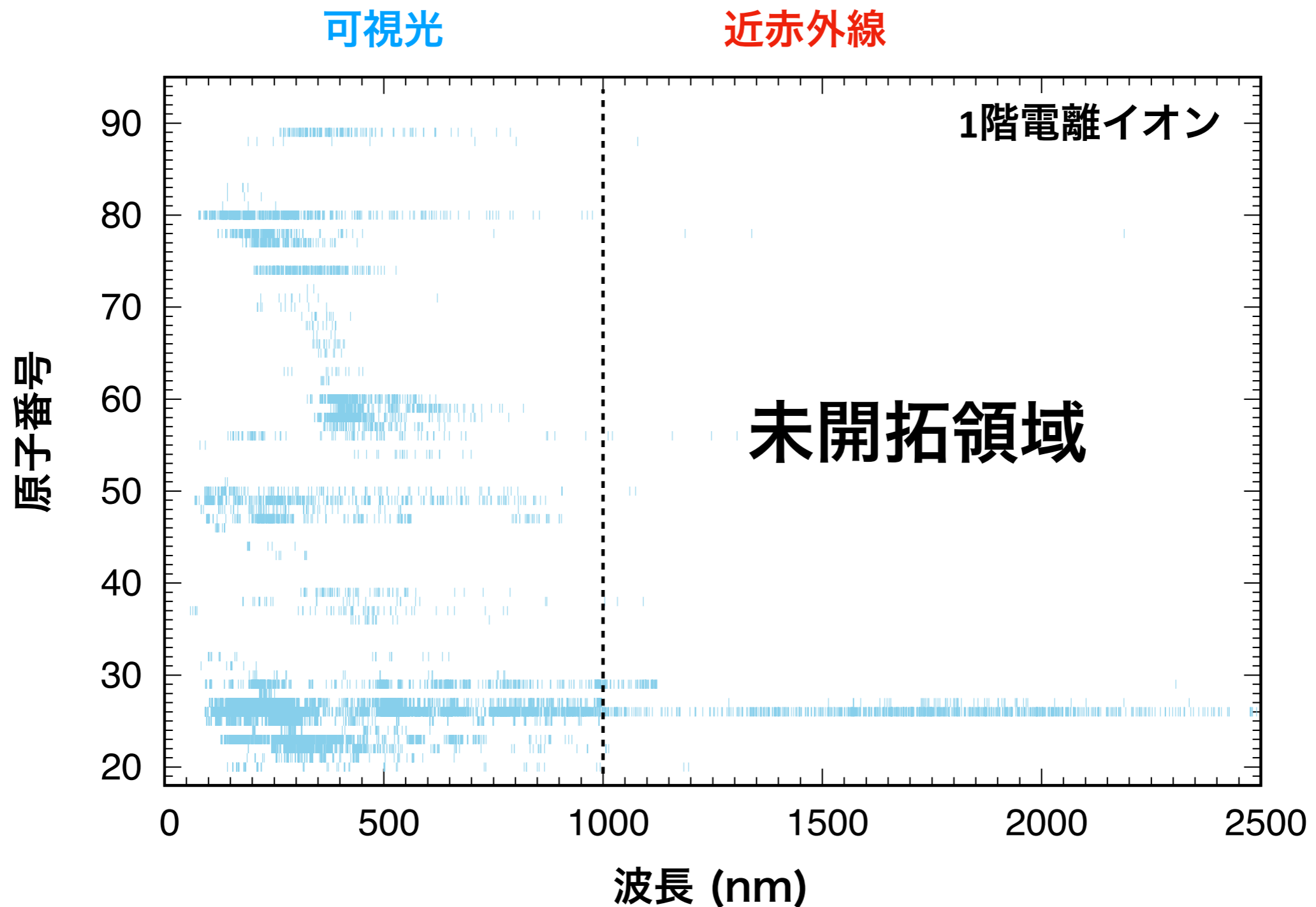
open p-shell

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				



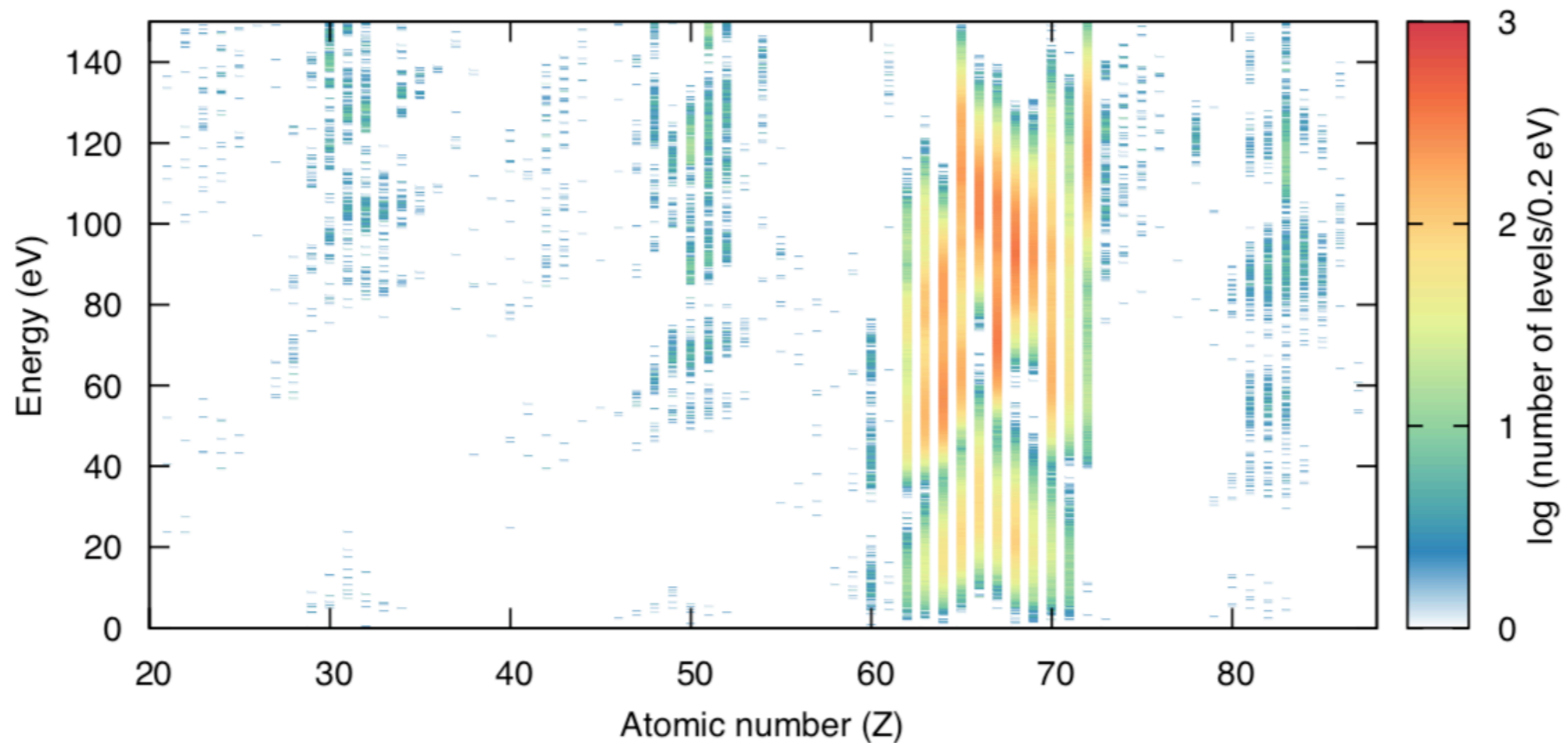
# 重元素データ 未開拓領域：赤外線遷移



# 高階電離イオンの理論計算

Banerjee, MT, Kawaguchi, Kato, Gaigalas 2020, ApJ, 901, 29; Banerjee et al. in prep.

## 8階電離イオン



あまりに複雑な原子構造 => 膨大なデータ (~100 GB/1イオン)



# キロノバ vs 実験室プラズマ

	キロノバ@1日	LIBSプラズマ LHDペレット溶発雲
温度	$\sim 10^4$ K (1eV)	$\sim 10^4$ K (1eV)
電子密度	$\sim 10^9$ cm <sup>-3</sup>	$\sim 10^{17}$ cm <sup>-3</sup>
サイズ	$\sim 10^{15}$ cm	$\sim 1$ cm
光学的厚さ ( $\kappa \sim 1$ cm <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> )	$\sim 10^2$	$\sim 10^{-5}$

キロノバ  $\rho \sim A m_p n \sim 10^{-13}$  g cm<sup>-3</sup>

$\tau \sim \kappa \rho R \sim \kappa (A m_p n) R \sim \sigma n R$  ( $\sigma \sim \kappa A m_p \sim 10^{-22}$  cm<sup>2</sup>)