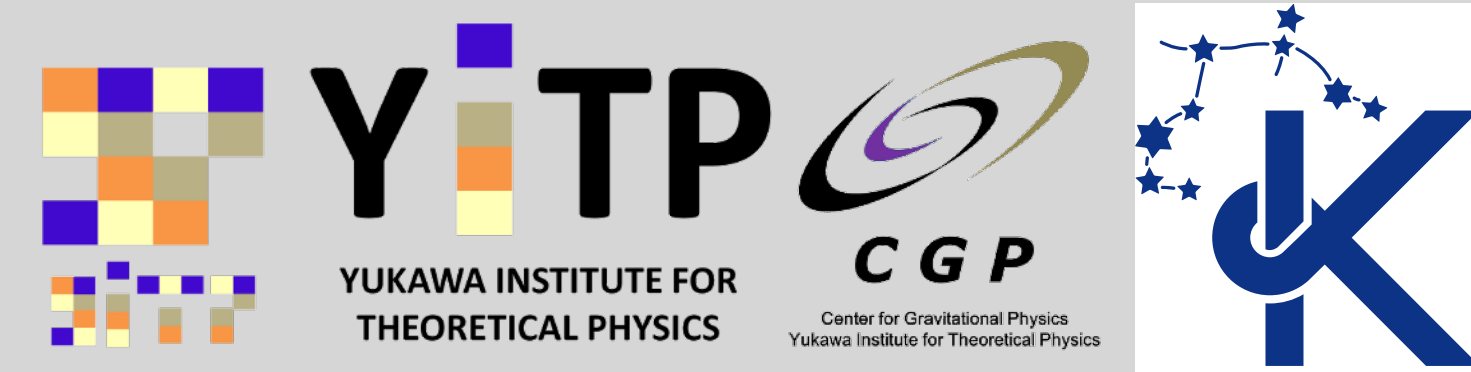


平成30年度～令和4年度 新学術領域研究

新しい星形成理論によるパラダイムシフト
銀河系におけるハビタブル惑星開拓史の解明



超新星爆発による元素合成

諏訪雄大

(京産大 & 京大基研)

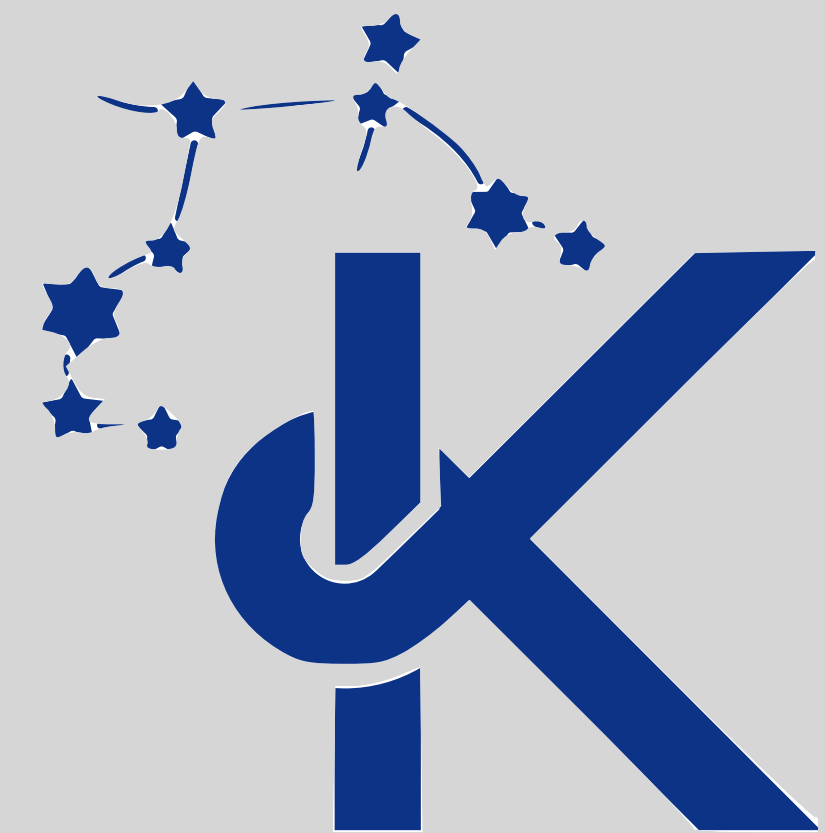
京都産業大学



京都産業大学

京都大学
基礎物理学研究所

京都駅

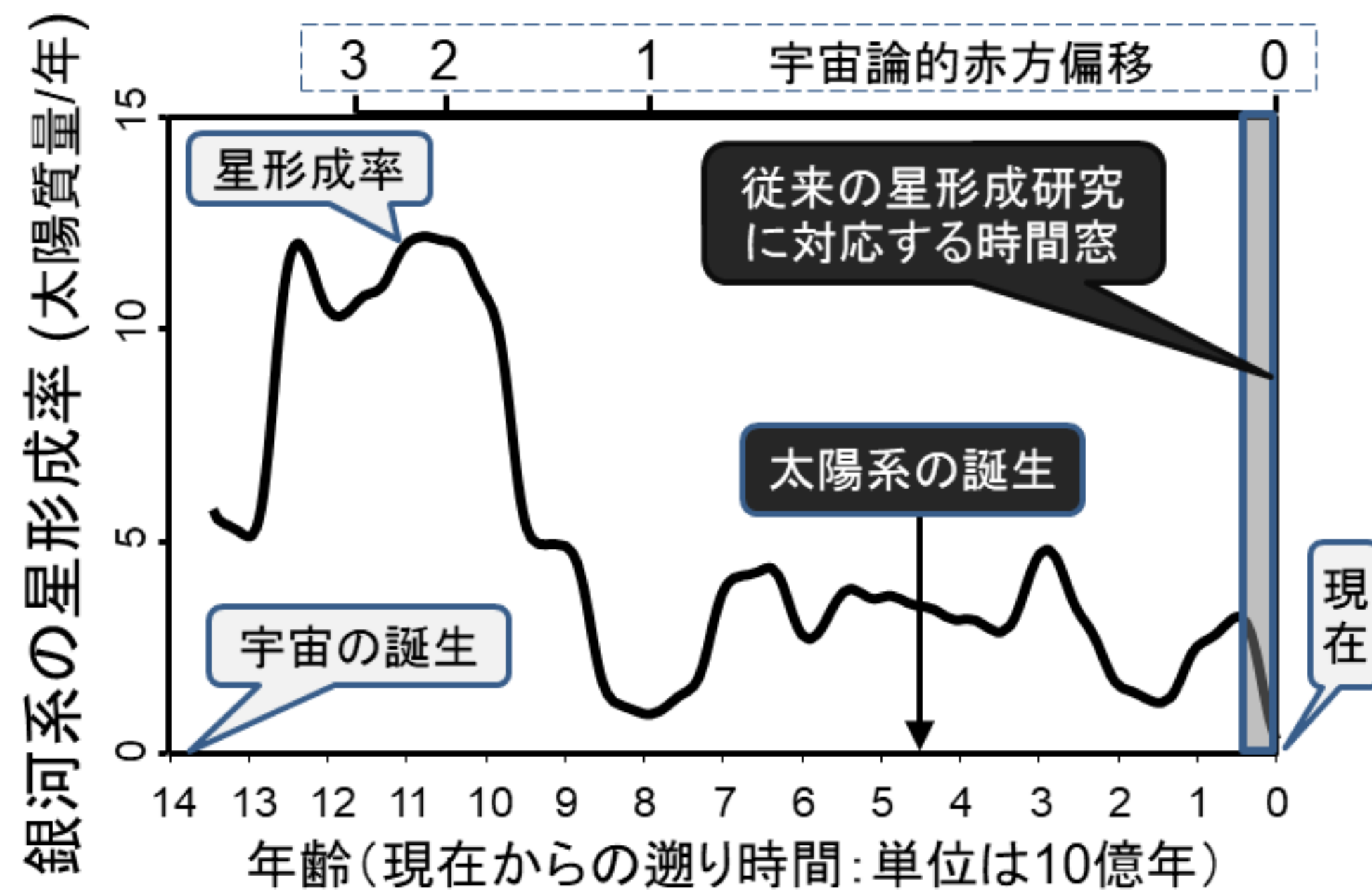


今日の内容

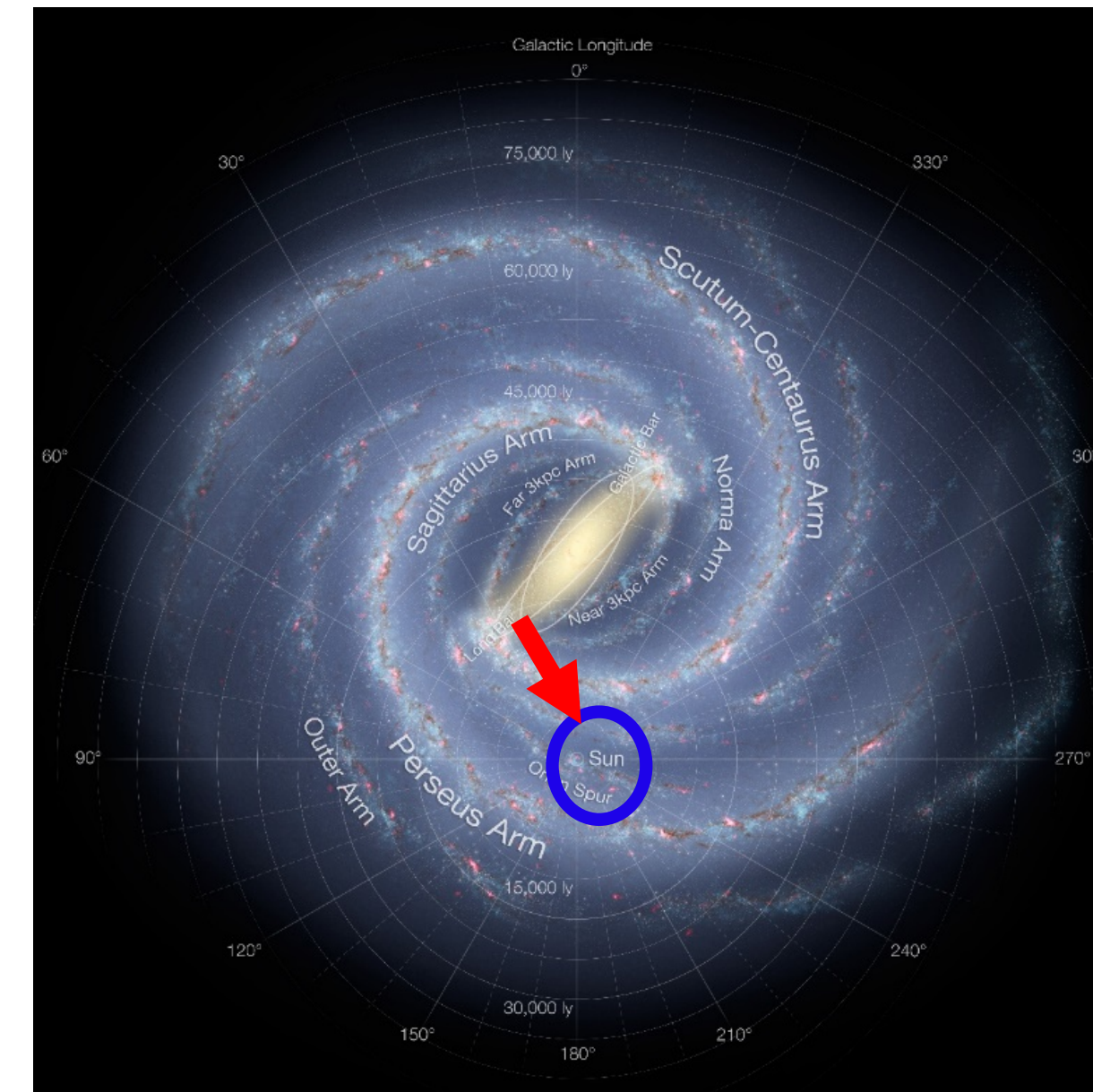
- * 銀河進化における超新星フィードバック
- * 星の進化における元素合成
- * 超新星からの同位体（特に ^{26}Al と ^{60}Fe ）

領域の妥当性・重要性・発展性

多様な系外惑星系と太陽系の起源を解明するには？



Our Conjecture



現在の銀河系



約46億年前の銀河系

太陽系は46億年前にどこで生まれたのか？
銀河の化学進化 ⇨ 重元素 (H, He以外の元素) の増加
単独星 & 高い重元素量 & 短寿命元素の含有量
→ 銀河系内側領域の星団の超新星残骸の中か？

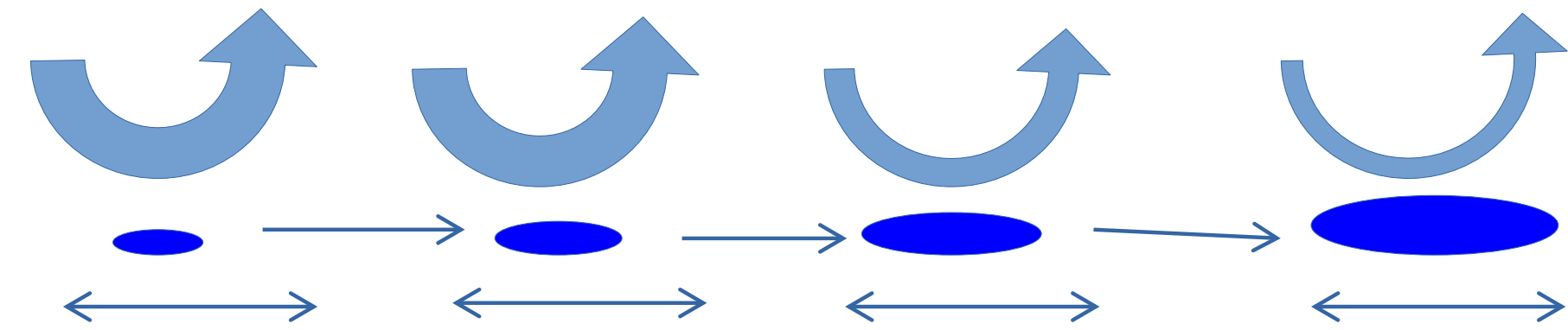
銀河進化と超新星フィードバック

犬塚さんスライド@3/27シンポジウムより

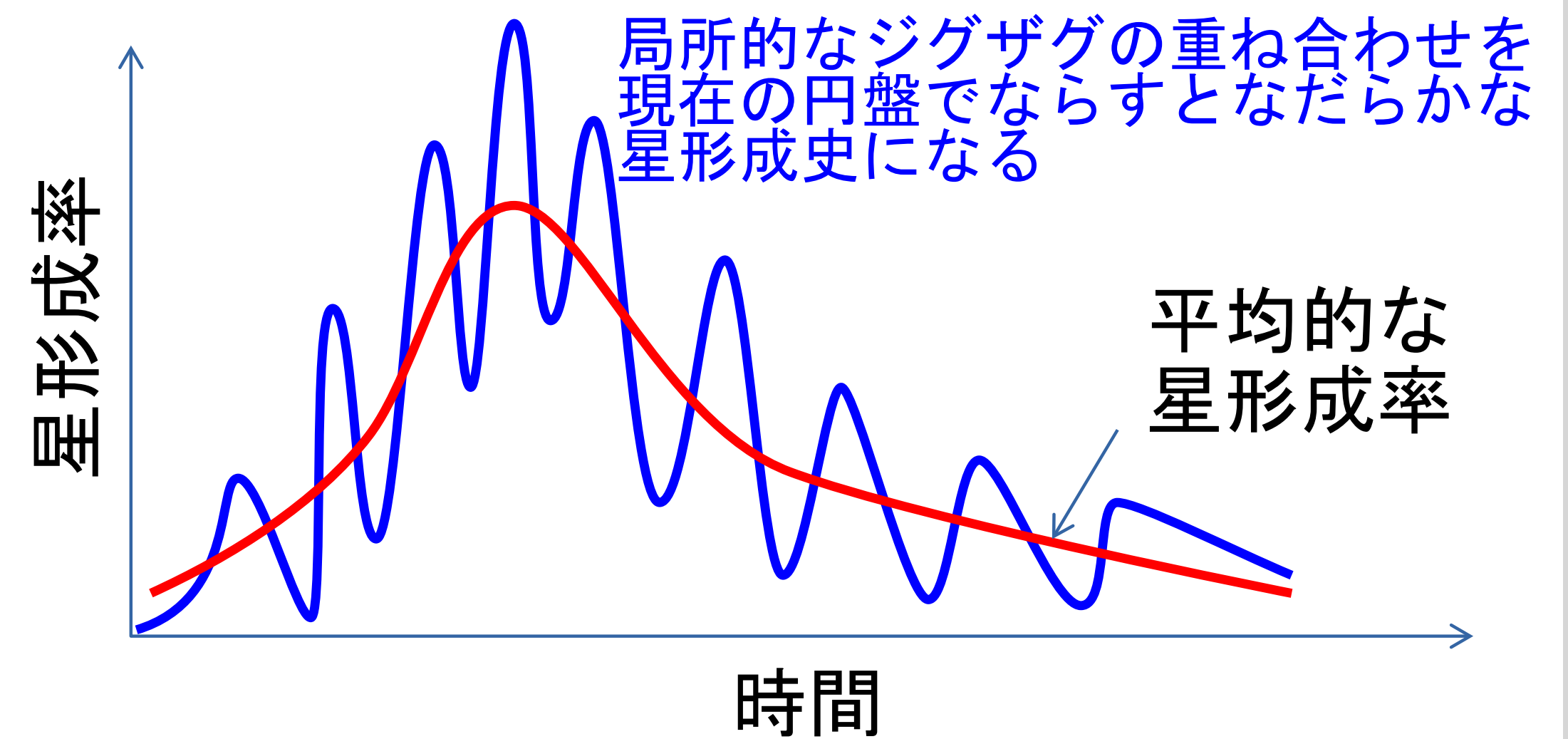
長島【銀河の形成モデルの構築】

- ・CDM宇宙論に基づく銀河形成モデルを改良し、銀河・AGNの諸観測を再現するモデルを構築済
- ・このモデルから銀河系的銀河(回転速度220km/s)の銀河は、**星形成タイムスケールは約140Myr**、星から再放出されたり超新星により銀河円盤外に放出されるプロセスを含めたガス消費タイムスケールは**220Myr程度**と推測される

ガスの流入(冷却)・消失(星形成)・流出(超新星)

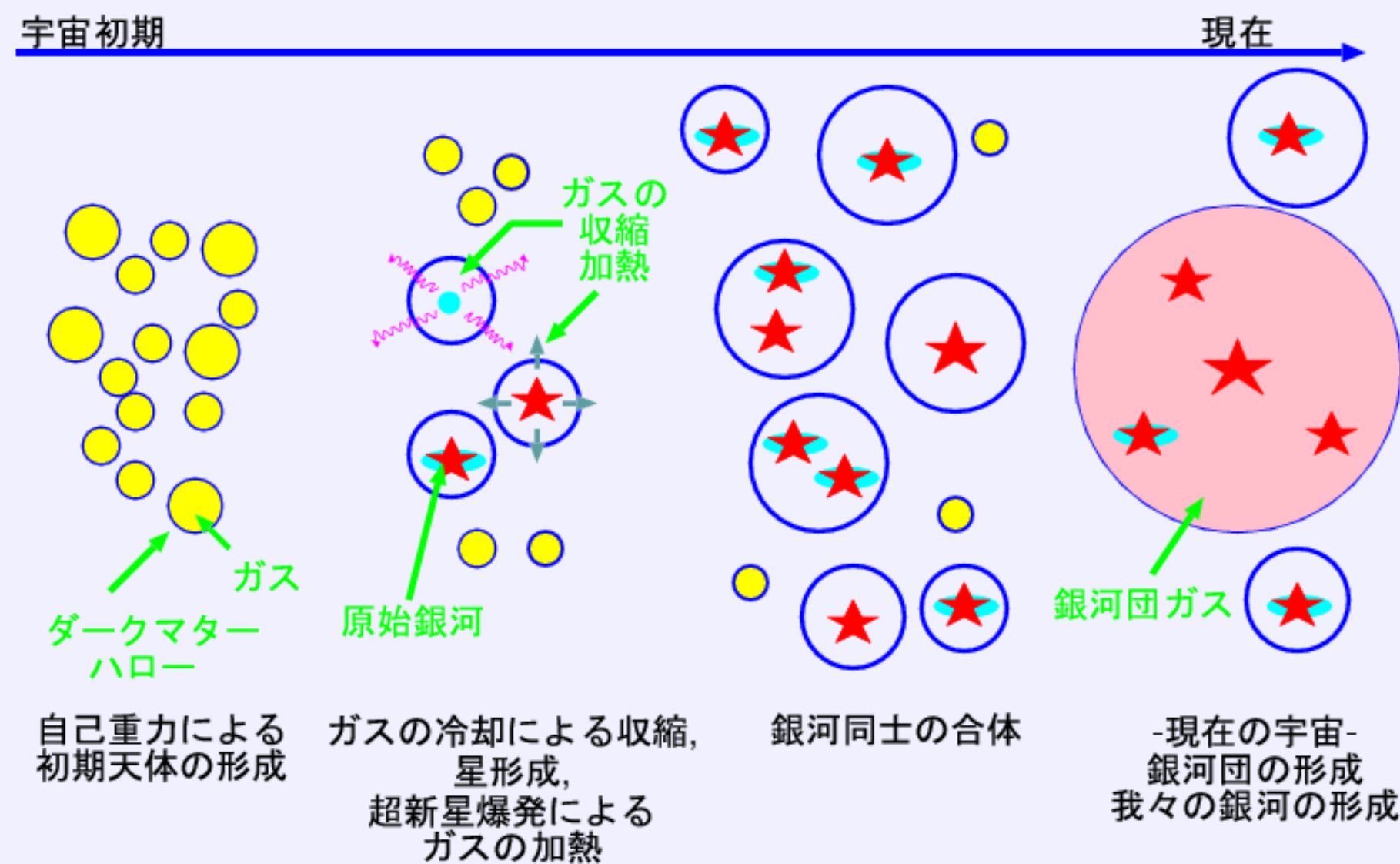


1サイクルが高々0.2Gyr程度



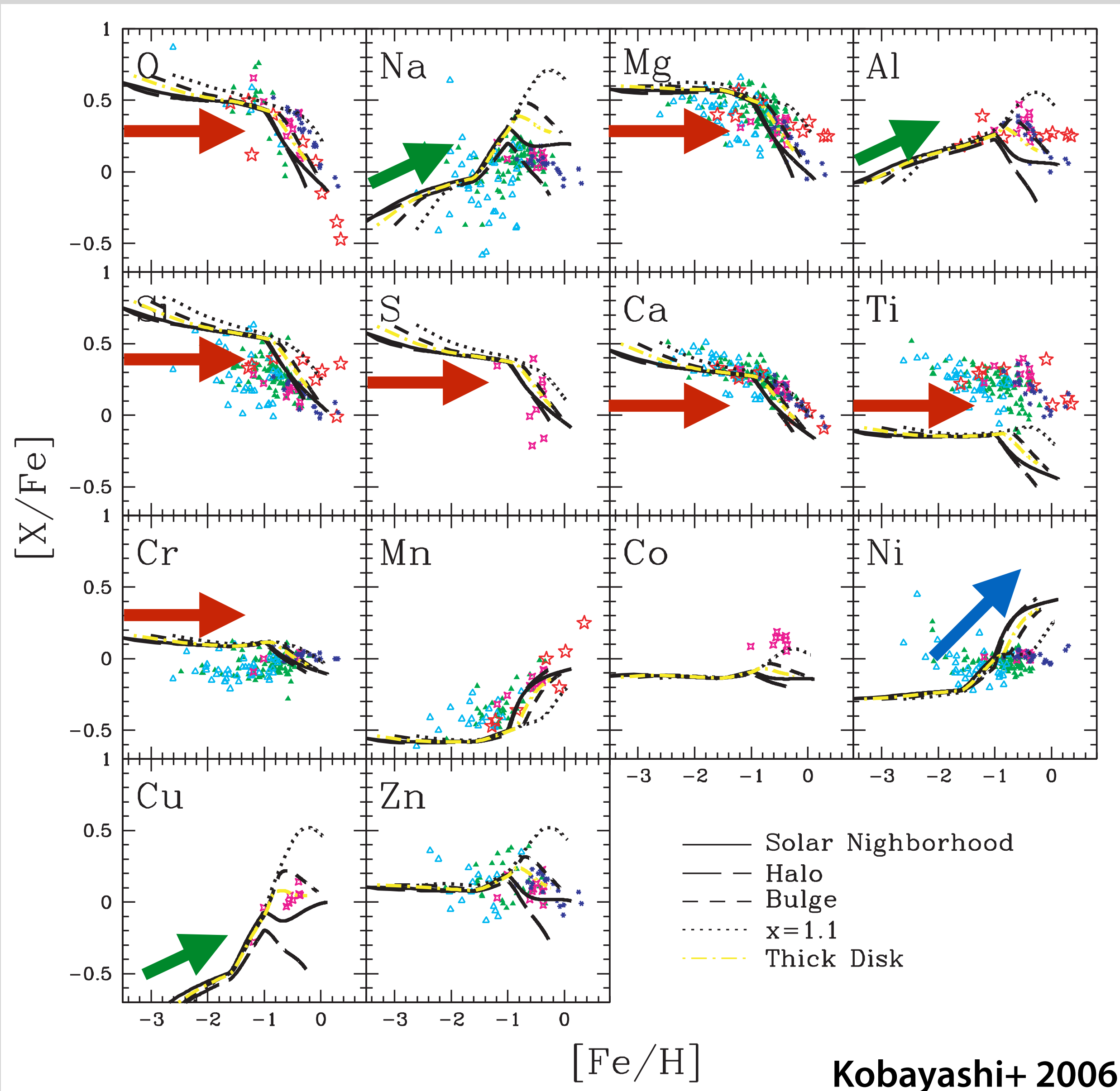
・いづれくらいハローができるのか、即ち冷却によって円盤に持ち込まれるガスの量は、ダークマター構造形成によって決まる

階層的構造形成説に基づく銀河形成シナリオ



詳しくは長島さんの講演

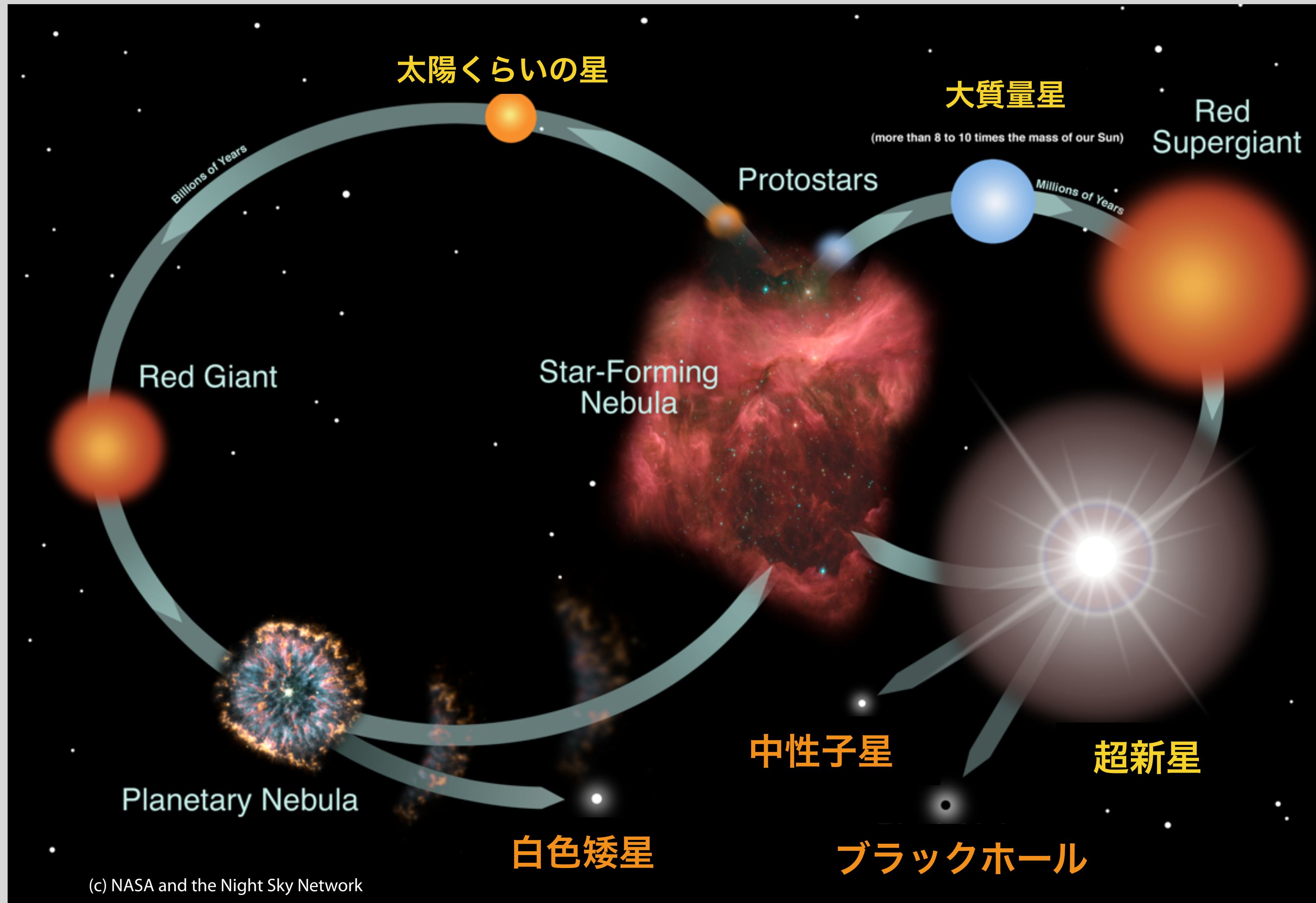
銀河の化学進化



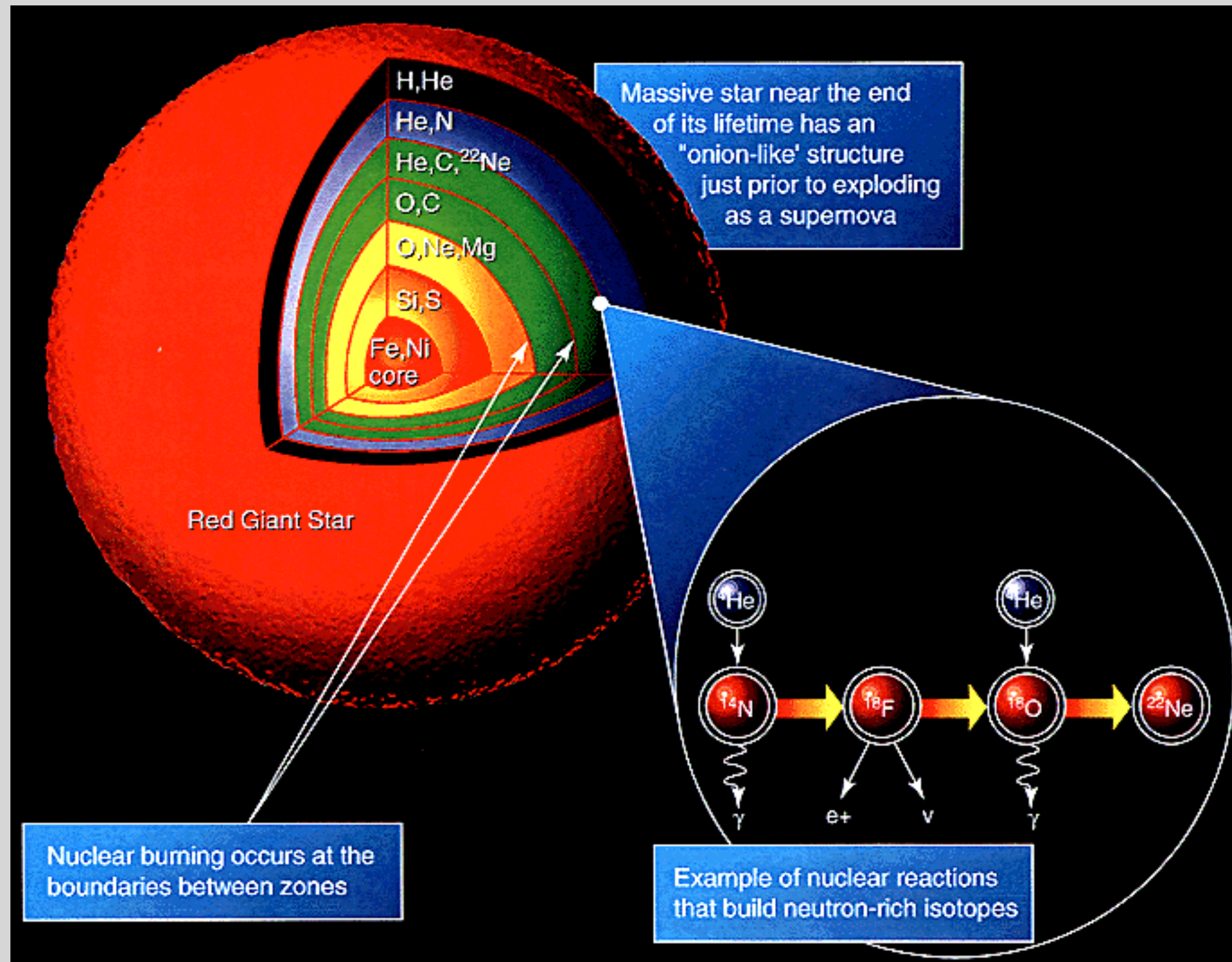
- * 星形成とともに銀河の金属増加
- * ヘリウム(α)燃焼で作られる元素：
大質量星が起源
(低金属で平坦。O, Mg, Si, S, Ca, Tiなど)
- * Ni：Ia型超新星が起源
(WD形成と軌道進化の遅延)
- * 奇核元素：増加まで時間がかかる
(CNOサイクルが必要。Na, Al, Cuなど)

詳しくは林さん、小林さんの講演

宇宙におけるガスの輪廻



星の進化と元素合成



https://en.wikipedia.org/wiki/Stellar_nucleosynthesis

元素の起源

THE ELEMENTS

Radioactive elements

Photographs show samples of the pure or nearly pure element except as follows: Ac, Rn, Fr, Ac, Pa, and Np show radioactive minerals containing minute traces of the element. Po, Pb, Bi, At, and Am show artificial objects containing invisible amounts of the element. Technetium shows a Tc-99 bone scan. Hydrogen shows a Hubble Space Telescope image of the Eagle Nebula, which is mostly hydrogen. 96-111 show the person or place after which the element is named. 112-118 had not been named yet in 2009.

Poster and photography by Theodore W. Gray and Nick Mann.

All images Copyright © 2009 Theodore W. Gray except as follows: H courtesy NASA; Li, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 221, 222, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 239, 240, 241, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 250, 251, 252, 253, 254, 255, 256, 257, 258, 259, 260, 261, 262, 263, 264, 265, 266, 267, 268, 269, 270, 271, 272, 273, 274, 275, 276, 277, 278, 279, 280, 281, 282, 283, 284, 285, 286, 287, 288, 289, 290, 291, 292, 293, 294, 295, 296, 297, 298, 299, 300, 301, 302, 303, 304, 305, 306, 307, 308, 309, 310, 311, 312, 313, 314, 315, 316, 317, 318, 319, 320, 321, 322, 323, 324, 325, 326, 327, 328, 329, 330, 331, 332, 333, 334, 335, 336, 337, 338, 339, 340, 341, 342, 343, 344, 345, 346, 347, 348, 349, 350, 351, 352, 353, 354, 355, 356, 357, 358, 359, 360, 361, 362, 363, 364, 365, 366, 367, 368, 369, 370, 371, 372, 373, 374, 375, 376, 377, 378, 379, 380, 381, 382, 383, 384, 385, 386, 387, 388, 389, 390, 391, 392, 393, 394, 395, 396, 397, 398, 399, 400, 401, 402, 403, 404, 405, 406, 407, 408, 409, 410, 411, 412, 413, 414, 415, 416, 417, 418, 419, 420, 421, 422, 423, 424, 425, 426, 427, 428, 429, 430, 431, 432, 433, 434, 435, 436, 437, 438, 439, 440, 441, 442, 443, 444, 445, 446, 447, 448, 449, 450, 451, 452, 453, 454, 455, 456, 457, 458, 459, 460, 461, 462, 463, 464, 465, 466, 467, 468, 469, 470, 471, 472, 473, 474, 475, 476, 477, 478, 479, 480, 481, 482, 483, 484, 485, 486, 487, 488, 489, 490, 491, 492, 493, 494, 495, 496, 497, 498, 499, 500, 501, 502, 503, 504, 505, 506, 507, 508, 509, 510, 511, 512, 513, 514, 515, 516, 517, 518, 519, 520, 521, 522, 523, 524, 525, 526, 527, 528, 529, 530, 531, 532, 533, 534, 535, 536, 537, 538, 539, 540, 541, 542, 543, 544, 545, 546, 547, 548, 549, 550, 551, 552, 553, 554, 555, 556, 557, 558, 559, 560, 561, 562, 563, 564, 565, 566, 567, 568, 569, 570, 571, 572, 573, 574, 575, 576, 577, 578, 579, 580, 581, 582, 583, 584, 585, 586, 587, 588, 589, 590, 591, 592, 593, 594, 595, 596, 597, 598, 599, 600, 601, 602, 603, 604, 605, 606, 607, 608, 609, 610, 611, 612, 613, 614, 615, 616, 617, 618, 619, 620, 621, 622, 623, 624, 625, 626, 627, 628, 629, 630, 631, 632, 633, 634, 635, 636, 637, 638, 639, 640, 641, 642, 643, 644, 645, 646, 647, 648, 649, 650, 651, 652, 653, 654, 655, 656, 657, 658, 659, 660, 661, 662, 663, 664, 665, 666, 667, 668, 669, 670, 671, 672, 673, 674, 675, 676, 677, 678, 679, 680, 681, 682, 683, 684, 685, 686, 687, 688, 689, 690, 691, 692, 693, 694, 695, 696, 697, 698, 699, 700, 701, 702, 703, 704, 705, 706, 707, 708, 709, 710, 711, 712, 713, 714, 715, 716, 717, 718, 719, 720, 721, 722, 723, 724, 725, 726, 727, 728, 729, 730, 731, 732, 733, 734, 735, 736, 737, 738, 739, 740, 741, 742, 743, 744, 745, 746, 747, 748, 749, 750, 751, 752, 753, 754, 755, 756, 757, 758, 759, 760, 761, 762, 763, 764, 765, 766, 767, 768, 769, 770, 771, 772, 773, 774, 775, 776, 777, 778, 779, 780, 781, 782, 783, 784, 785, 786, 787, 788, 789, 790, 791, 792, 793, 794, 795, 796, 797, 798, 799, 800, 801, 802, 803, 804, 805, 806, 807, 808, 809, 810, 811, 812, 813, 814, 815, 816, 817, 818, 819, 820, 821, 822, 823, 824, 825, 826, 827, 828, 829, 830, 831, 832, 833, 834, 835, 836, 837, 838, 839, 840, 841, 842, 843, 844, 845, 846, 847, 848, 849, 850, 851, 852, 853, 854, 855, 856, 857, 858, 859, 860, 861, 862, 863, 864, 865, 866, 867, 868, 869, 870, 871, 872, 873, 874, 875, 876, 877, 878, 879, 880, 881, 882, 883, 884, 885, 886, 887, 888, 889, 890, 891, 892, 893, 894, 895, 896, 897, 898, 899, 900, 901, 902, 903, 904, 905, 906, 907, 908, 909, 910, 911, 912, 913, 914, 915, 916, 917, 918, 919, 920, 921, 922, 923, 924, 925, 926, 927, 928, 929, 930, 931, 932, 933, 934, 935, 936, 937, 938, 939, 940, 941, 942, 943, 944, 945, 946, 947, 948, 949, 950, 951, 952, 953, 954, 955, 956, 957, 958, 959, 960, 961, 962, 963, 964, 965, 966, 967, 968, 969, 970, 971, 972, 973, 974, 975, 976, 977, 978, 979, 980, 981, 982, 983, 984, 985, 986, 987, 988, 989, 990, 991, 992, 993, 994, 995, 996, 997, 998, 999, 1000.

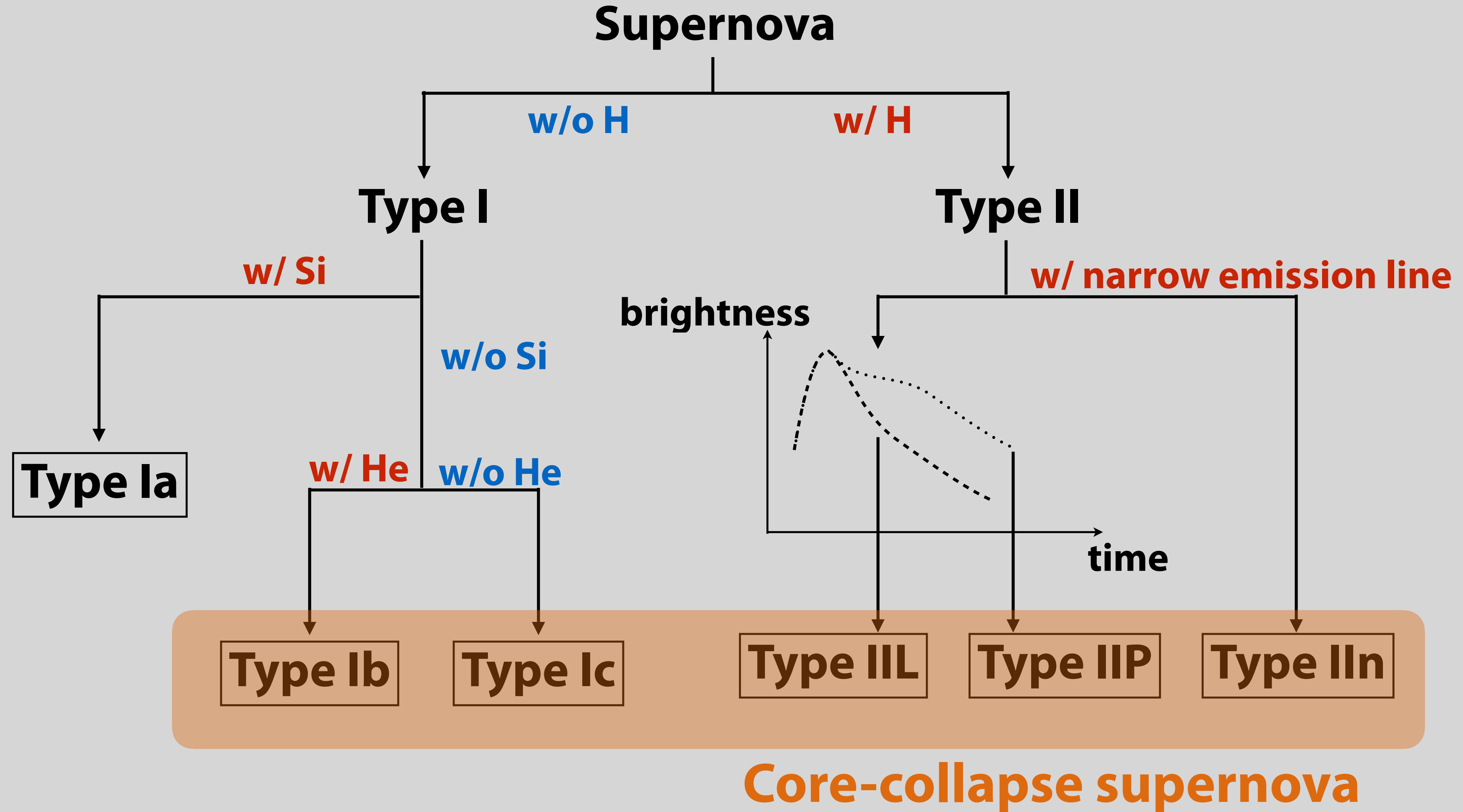
Other sizes of this poster: periodictable.com
Real samples like these: element-collection.com

On the other side of this poster you will find a version with smaller pictures but with detailed technical data on each of the elements, plus trend plots.

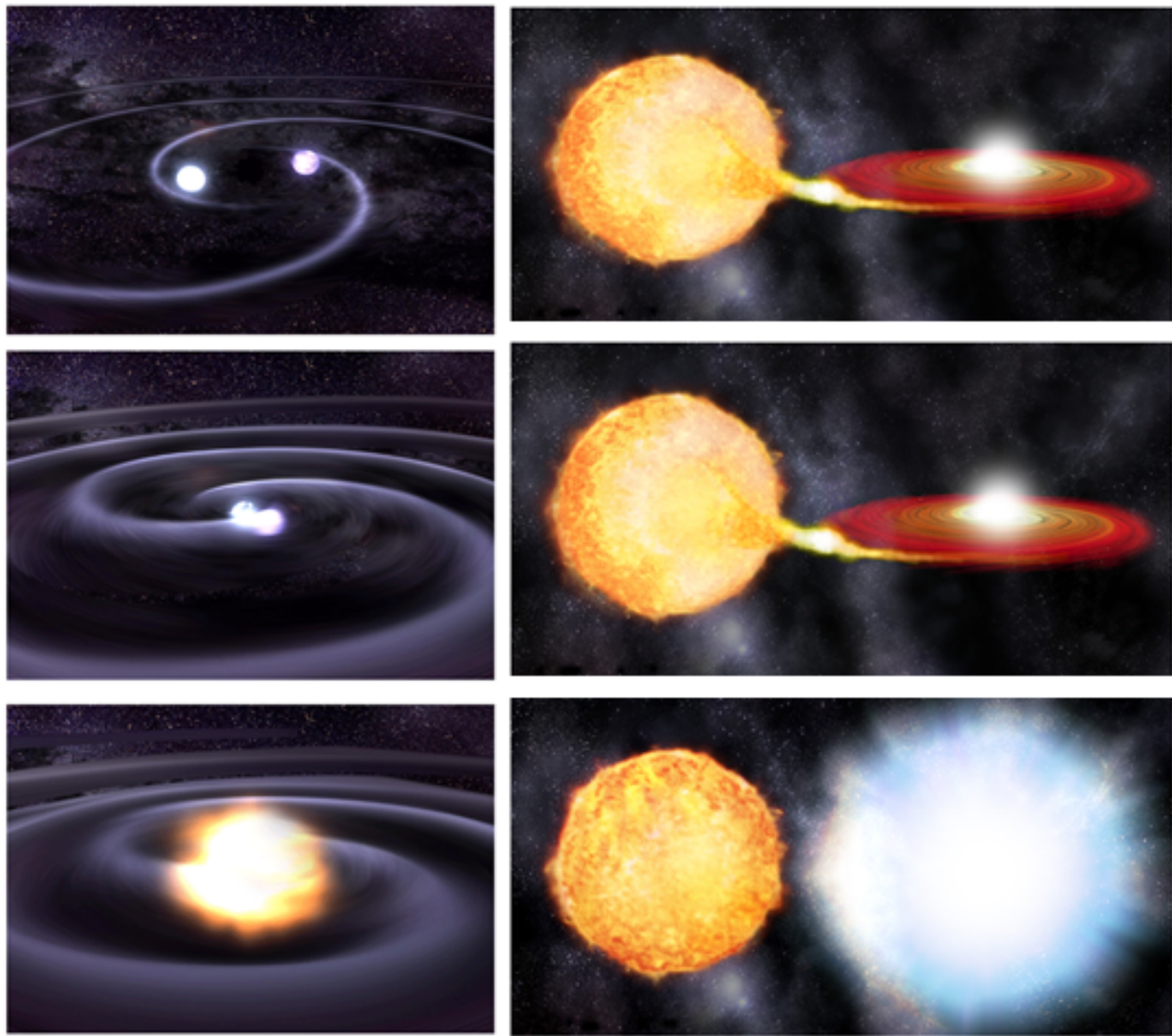
More images and complete technical data can be found at periodictable.com

PERIODICTABLE.COM

超新星の種族



Ia型超新星



- * 白色矮星の起こす爆発
- * α 元素合成
- * 鉄族元素の主起源
- * 標準光源としての役割
(暗黒エネルギー発見)
- * $E_{\text{kin}} \sim 10^{51}$ erg
- * $L_{\text{ph,peak}} \sim 10^{43}$ erg/s

<https://astrobit.es.org/2015/04/07/super-bright-supernovae-are-single-degenerate/>

重力崩壊型超新星



<https://www.physicscentral.com/explore/action/neutrino.cfm>

- * 大質量星 ($\geq 8M_{\odot}$) の最期
- * コンパクト天体の形成
- * ニュートリノ放射
- * $E_{\text{kin}} \sim 10^{51} \text{ erg}$
- * $L_{\text{ph,peak}} \sim 10^{42} \text{ erg/s}$
- * $L_{\nu, \text{peak}} \sim 10^{53} \text{ erg/s}$

超新星からのガンマ線

Isotope	Mean Lifetime	Decay Chain	γ -ray Energy (keV)
^{56}Ni	111 d	$^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co}^* \rightarrow ^{56}\text{Fe}^*$	847, 1238, 1771, 2598
^{57}Ni	390 d	$^{57}\text{Co} \rightarrow ^{57}\text{Fe}^*$	122, 136
^{44}Ti	89 y	$^{44}\text{Ti} \rightarrow ^{44}\text{Sc}^* \rightarrow ^{44}\text{Ca}^*$	68, 78, 1156
^{26}Al	1.04×10^6 y	$^{26}\text{Al} \rightarrow ^{26}\text{Mn}^*$	1809
^{60}Fe	3.8×10^6 y	$^{60}\text{Fe} \rightarrow ^{60}\text{Co}^* \rightarrow ^{60}\text{Ni}^*$	59, 1173, 1332

individual object/event

cumulative from many events

元素の起源

THE ELEMENTS

星の進化および超新星爆発

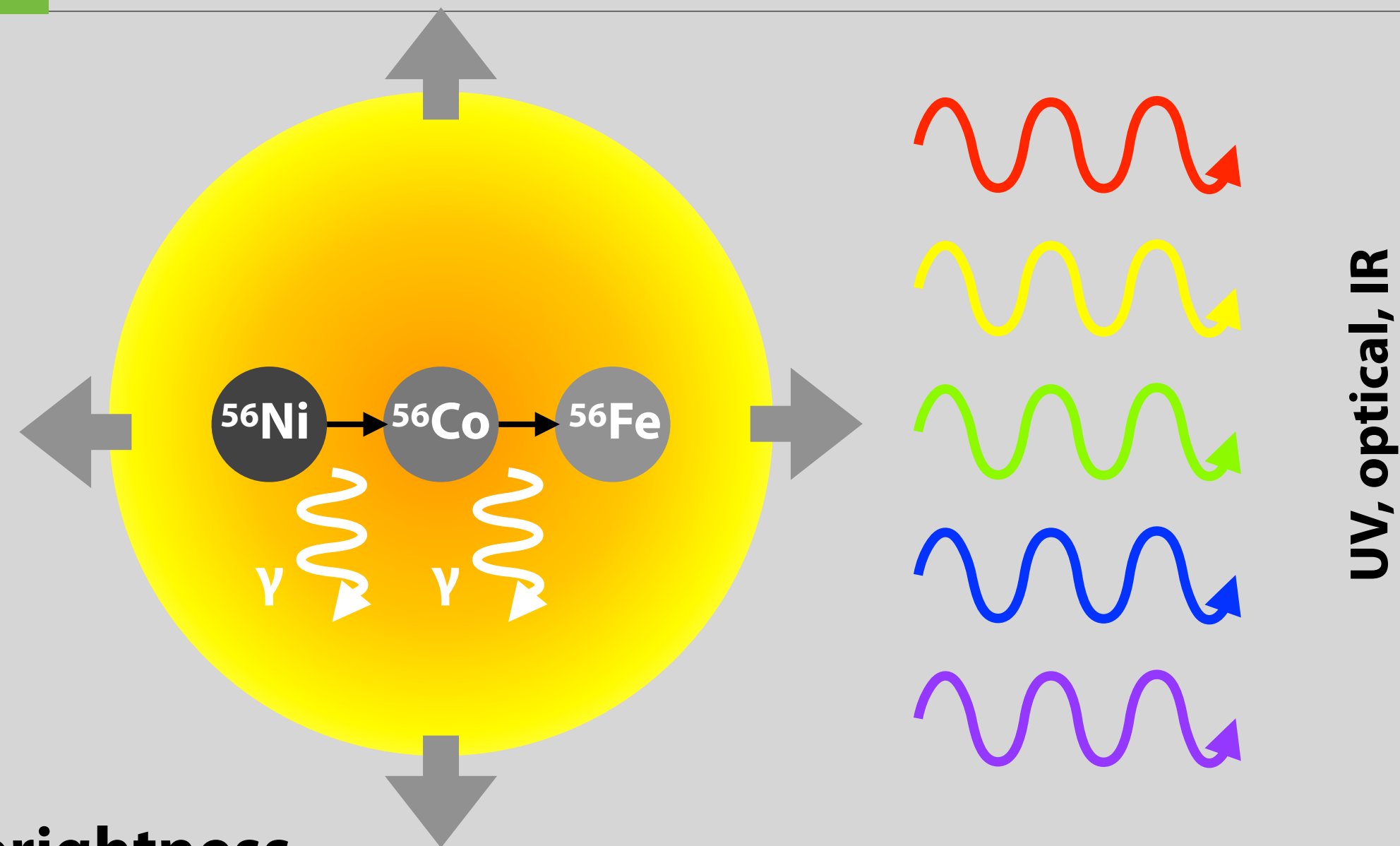
Radioactive elements

On the other side of this poster you will find a version with smaller pictures but with detailed technical data on each of the elements, plus trend plots.

More images and complete technical data can be found at periodictable.com

PERIODICTABLE.COM

^{56}Ni



UV, optical, IR

* $n_p = n_n$ ($Y_e = 0.5$) かつ $T \gtrsim 5 \times 10^9 \text{K}$ で爆発時に生成 (爆発的元素合成)

* 超新星光度曲線

- 初期：ガンマ線 → 可視光に下方散乱
- 後期：ガンマ線のまま抜けてくる

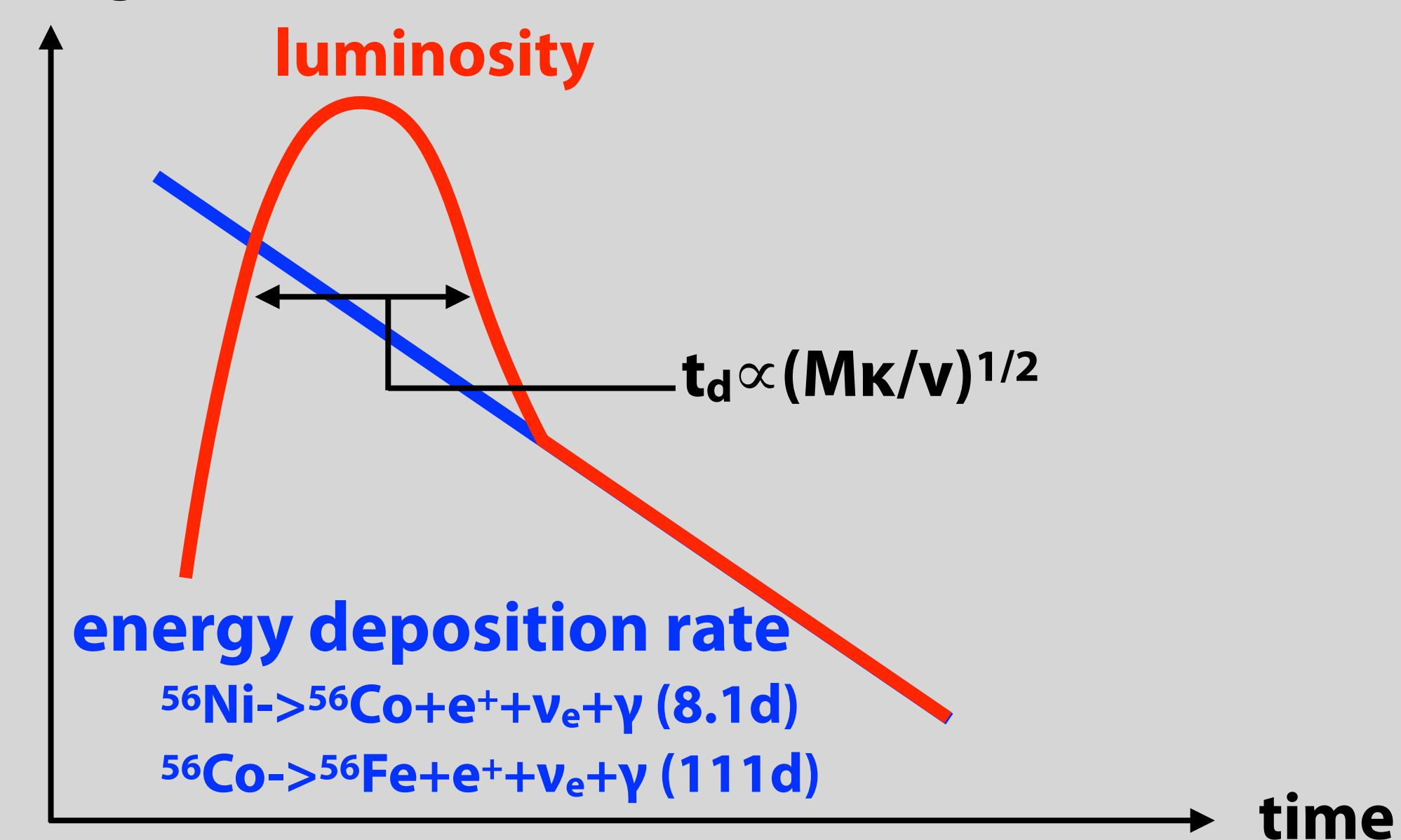
* ガンマ線直接検出例

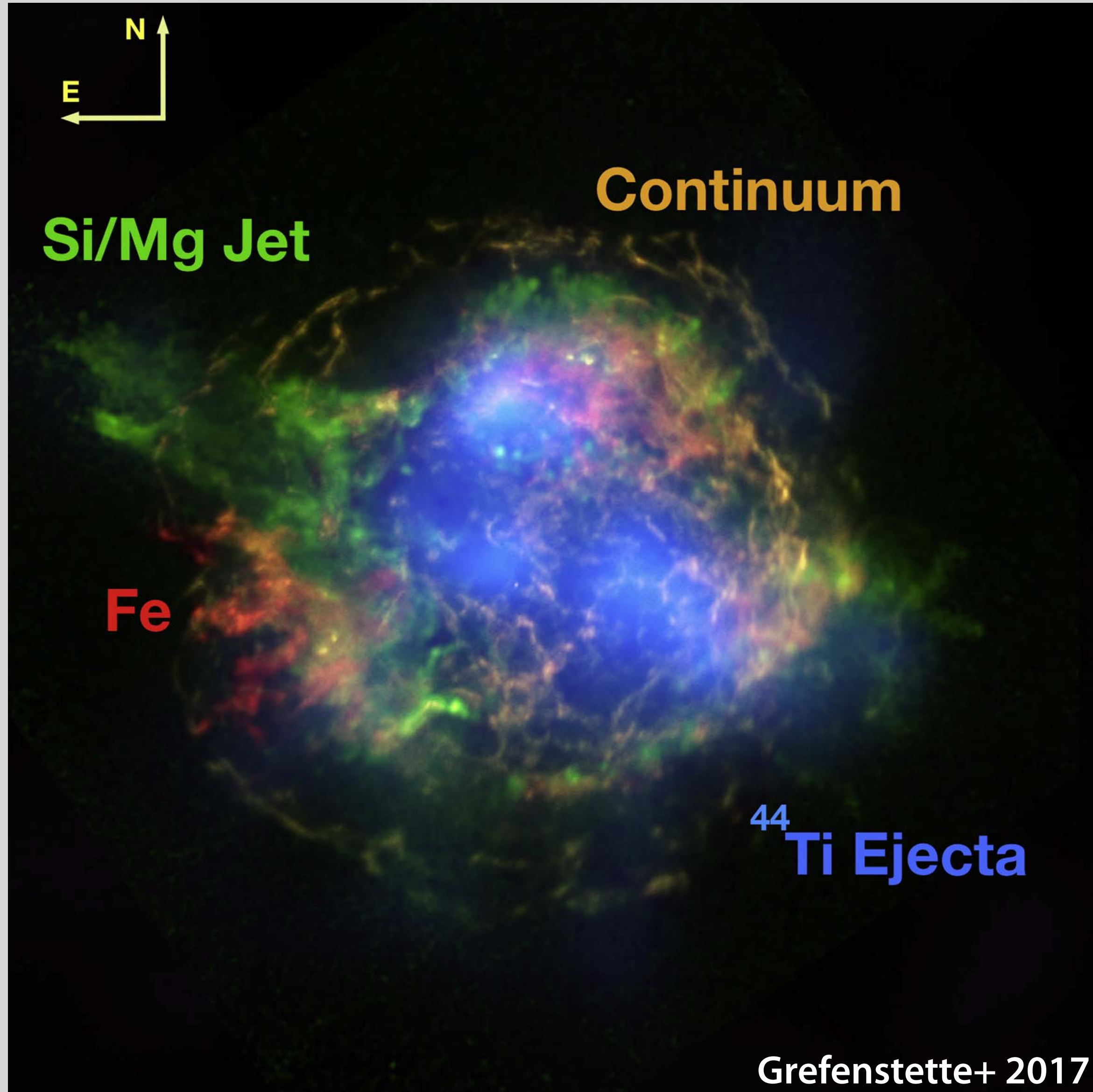
- SN 1987A (CC, 51.4 kpc) [Matz+ 1988]
- SN 2014J (Ia, 3.6 Mpc) [Churazov+ 2015]

* 爆発機構と相関？

[Suwa-Tominaga-Maeda 2019; Sawada-Maeda 2019]

brightness





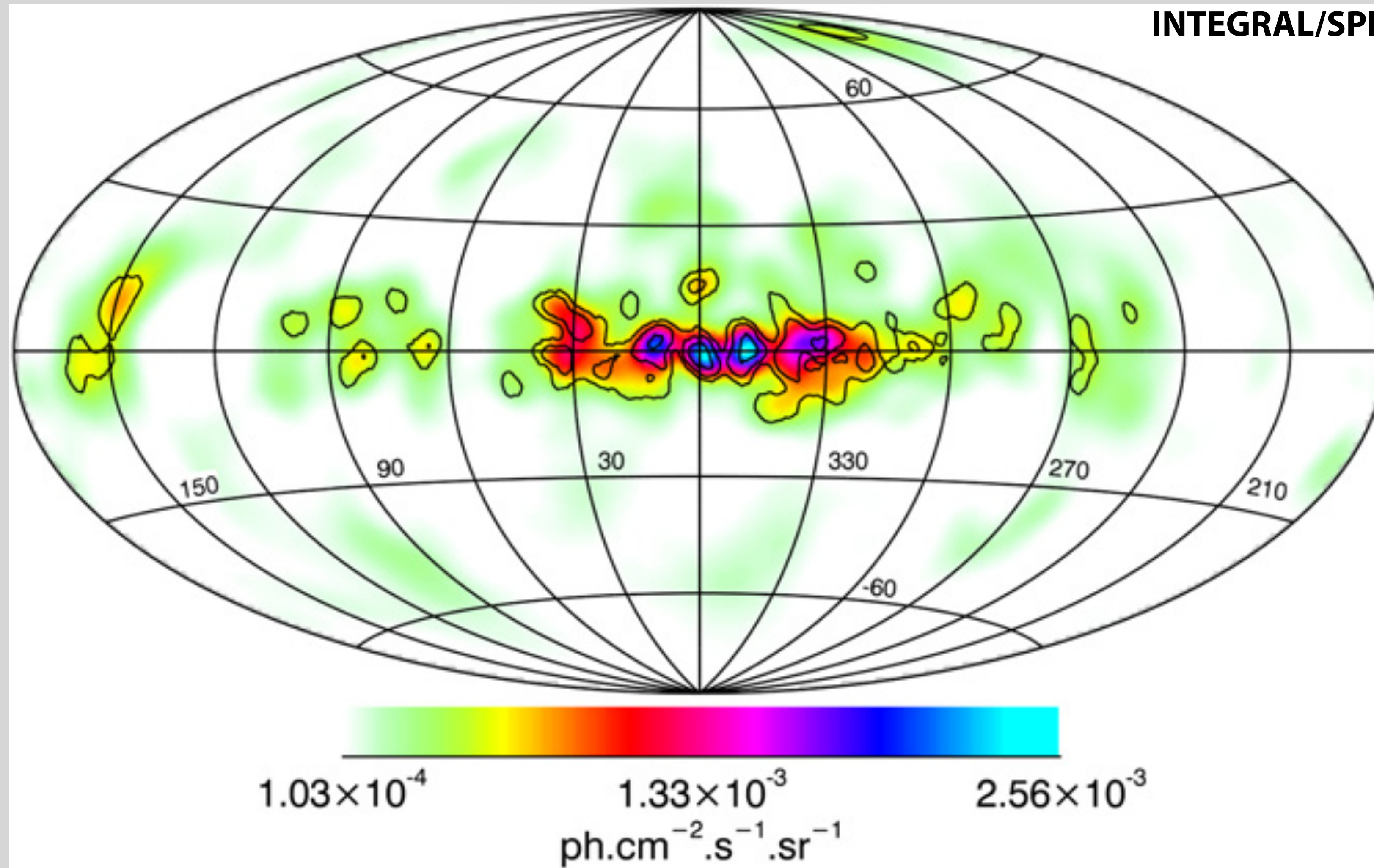
- * 爆発的元素合成
- * ガンマ線直接検出例
 - SN 1987A [Grebenev+ 2012]
 - Cas A (SN 16XX) [Iyudin+ 1994]
- * 衝撃波の非等方性
- * パルサーキックと相関？
[Wongwathanarat+ 2017]

超新星からのガンマ線

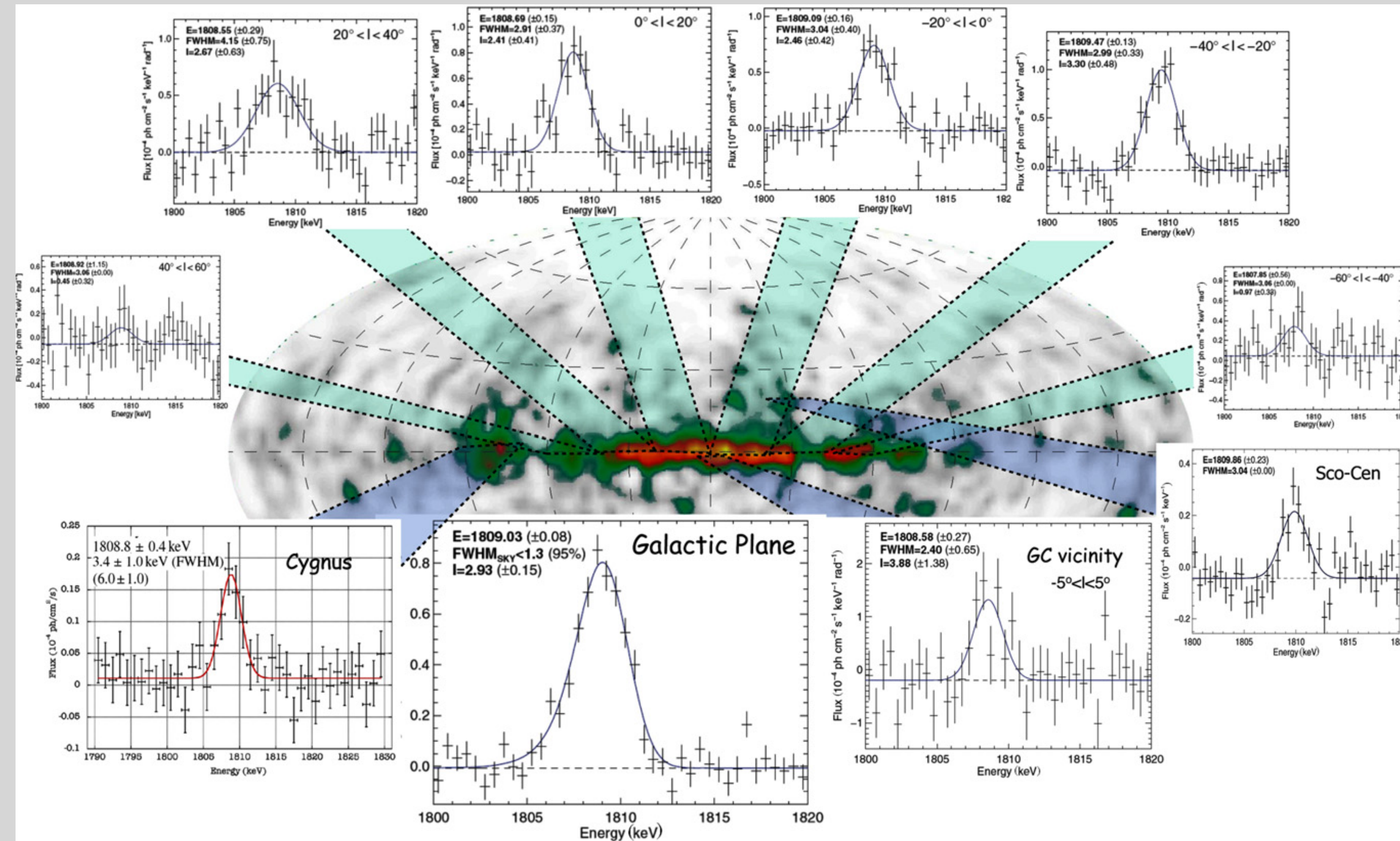
Isotope	Mean Lifetime	Decay Chain	γ -ray Energy (keV)
^{56}Ni	111 d	$^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co}^* \rightarrow ^{56}\text{Fe}^*$	847, 1238, 1771, 2598
^{57}Ni	390 d	$^{57}\text{Co} \rightarrow ^{57}\text{Fe}^*$	122, 136
^{44}Ti	89 y	$^{44}\text{Ti} \rightarrow ^{44}\text{Sc}^* \rightarrow ^{44}\text{Ca}^*$	68, 78, 1156
^{26}Al	1.04×10^6 y	$^{26}\text{Al} \rightarrow ^{26}\text{Mn}^*$	1809
^{60}Fe	3.8×10^6 y	$^{60}\text{Fe} \rightarrow ^{60}\text{Co}^* \rightarrow ^{60}\text{Ni}^*$	59, 1173, 1332

individual object/event

cumulative from many events

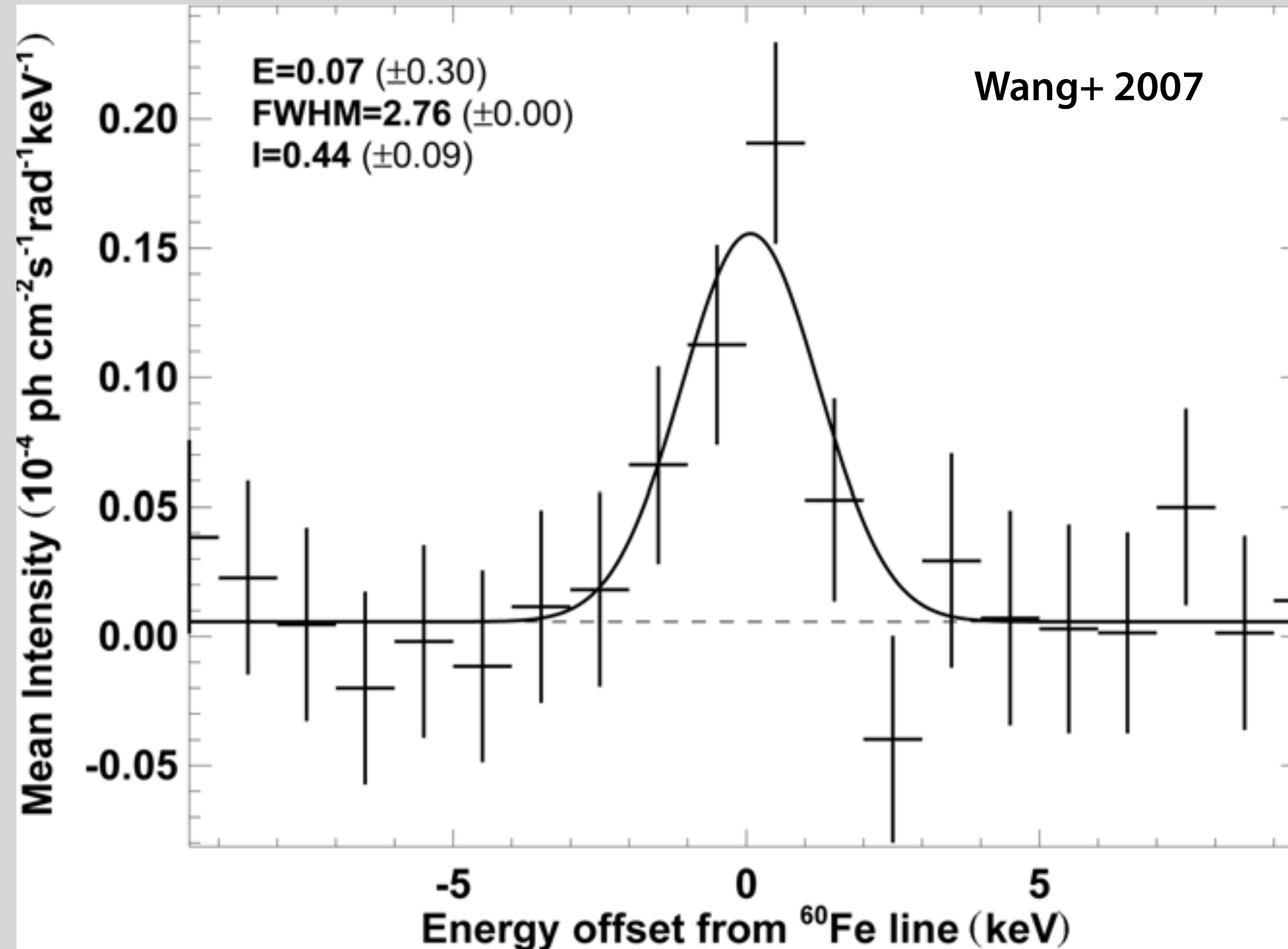


Bouchet+ 2015



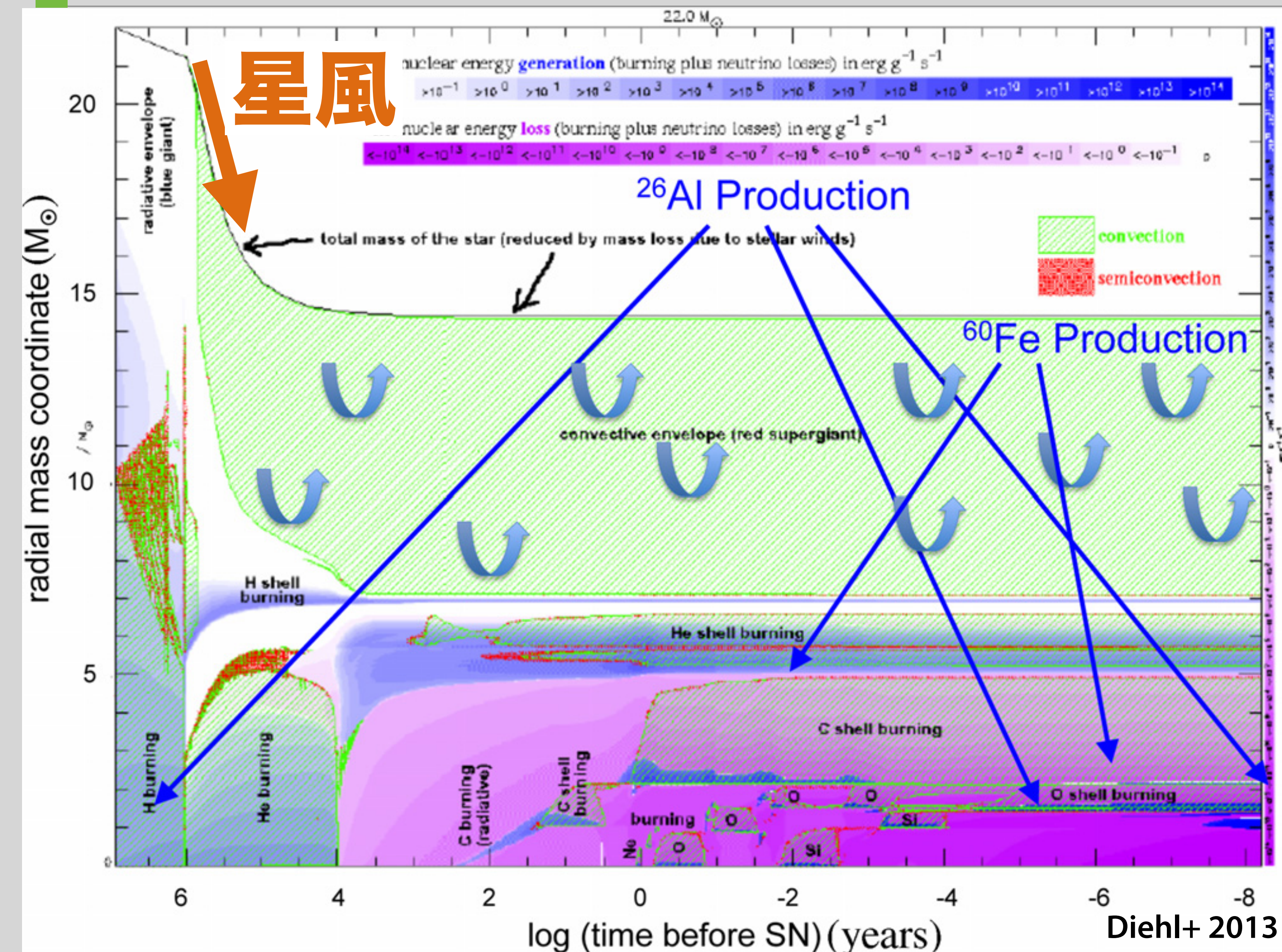
Diehl+ 2013

- * 非常に強いシグナル(28 σ)
- * 銀河面内の分布 [Wang+ 2009]
OB association
- * $M(^{26}\text{Al}) \sim 2M_{\odot}$
- * 銀河中心部からの放射は
回転によるドップラーシフトも検出
→ フィードバックに知見?



- * ^{26}Al より強度が低い(5σ)ため
空間分布は不定
- * flux: $F(^{60}\text{Fe})/F(^{26}\text{Al}) \sim 20\%$
[Wang+ 2020]
- * 2009年に半減期80%長く
[Rugel+ 2009]
(組成率の評価に影響?)

どこで作るのか？：星の準静的進化



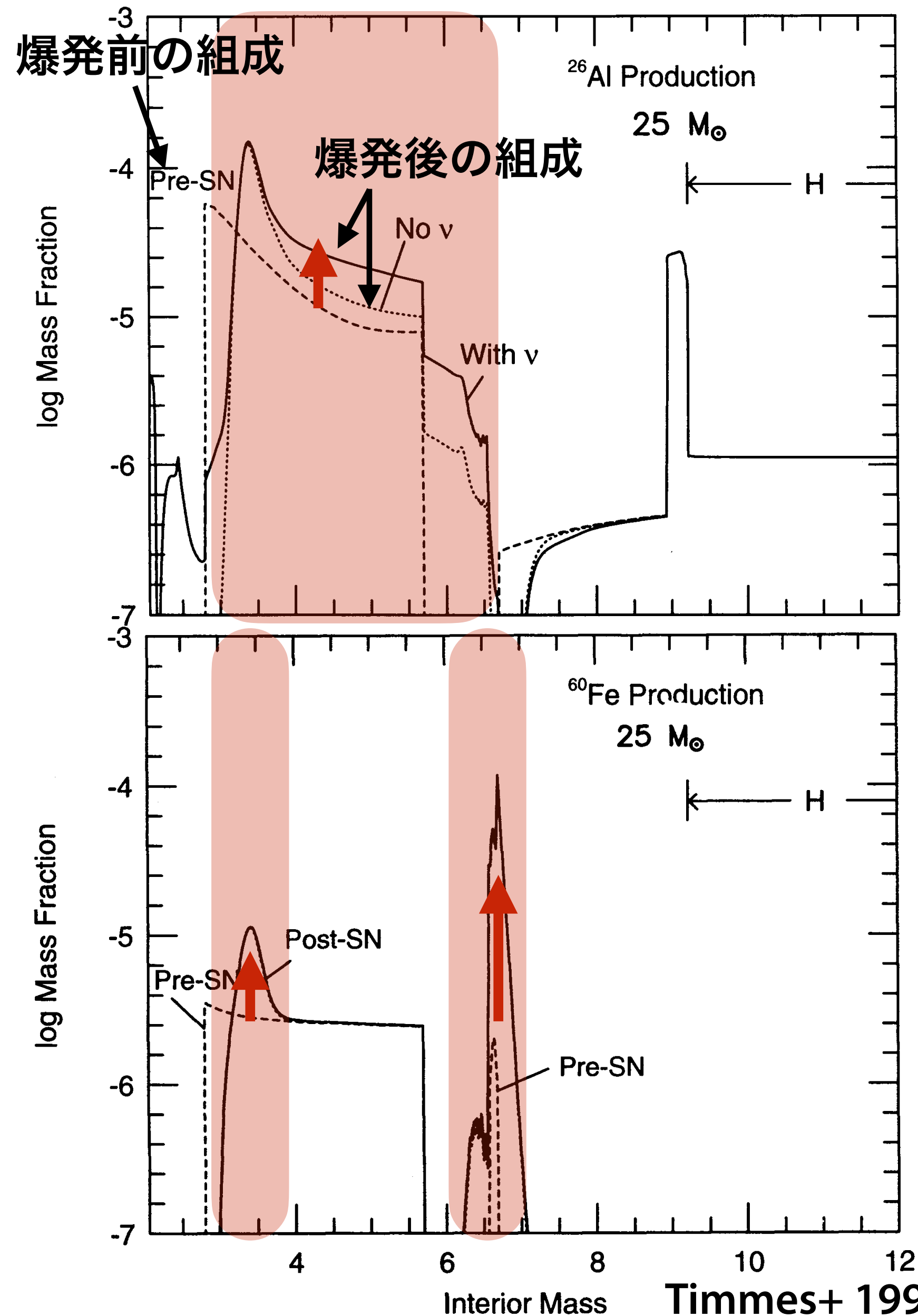
* ^{26}Al

- $^{25}\text{Mn} + \text{p} \rightarrow ^{26}\text{Al} + \gamma$
- 水素燃焼段階
- 炭素ネオン燃焼段階
- 星風と超新星で放出

* ^{60}Fe

- n-capture
- 進化後期の殻燃焼
- 超新星で放出

どこで作るのか？：超新星爆発



* ^{26}Al と ^{60}Fe は近い場所で作られる

■ Ne/C燃焼殻での爆発的元素合成

* ^{26}Al

■ ニュートリノによる組成変化も影響

(ニュートリノ破砕反応で自由陽子の数が変わる)

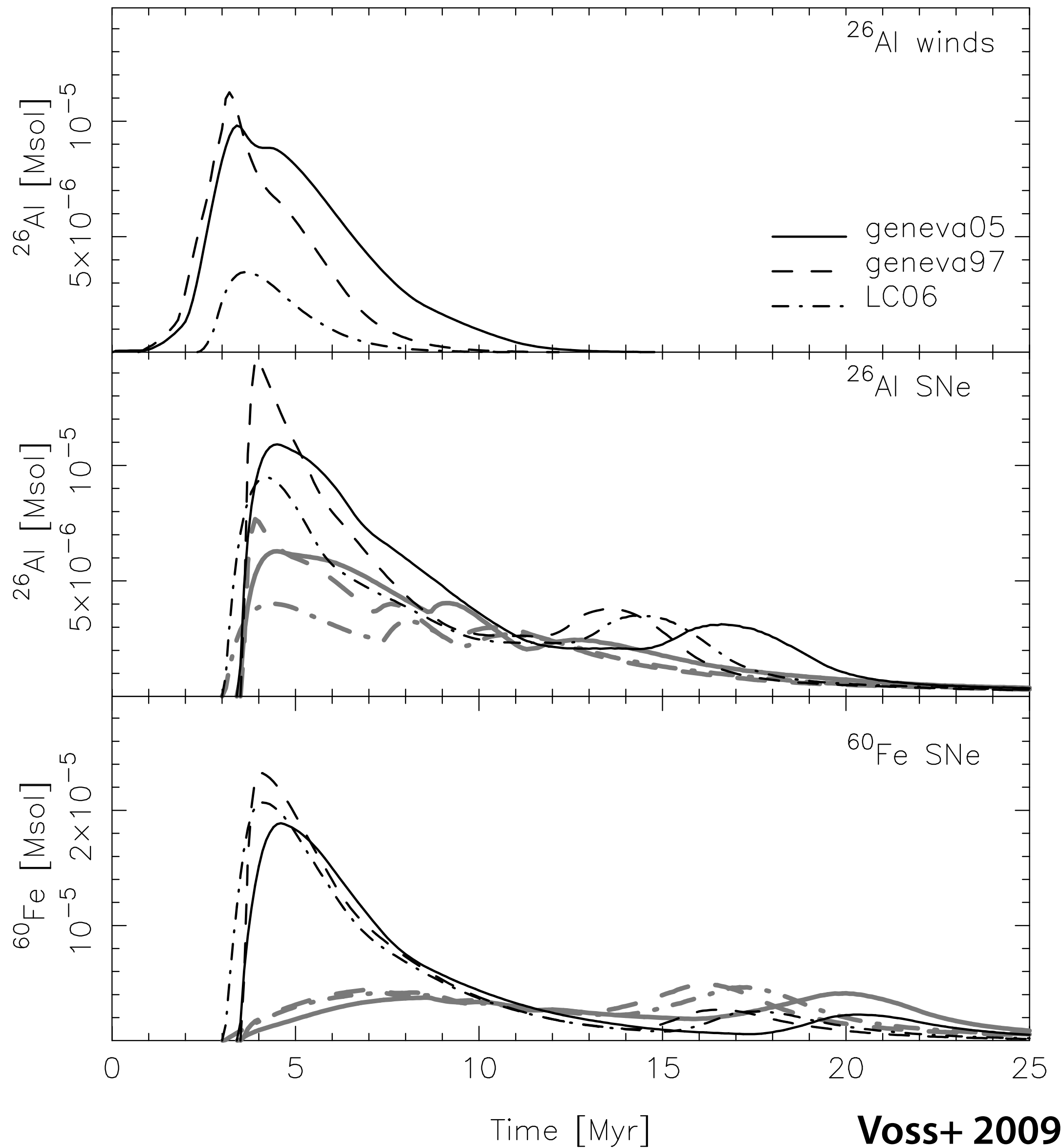
■ 水素層にあるのは、水素燃焼期（主系列）に作られたものが対流で運ばれた

* ^{60}Fe

■ ニュートリノの影響はない

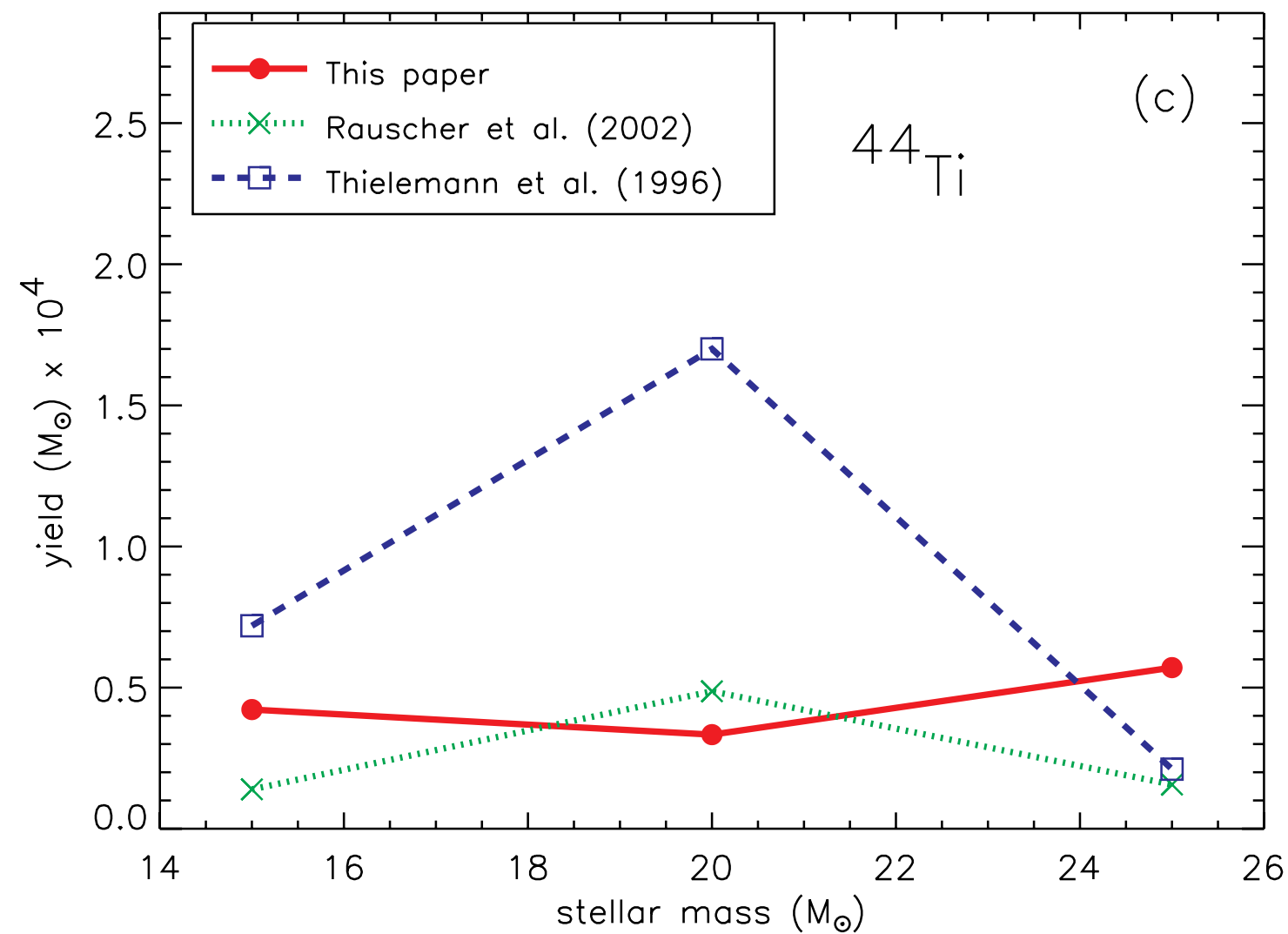
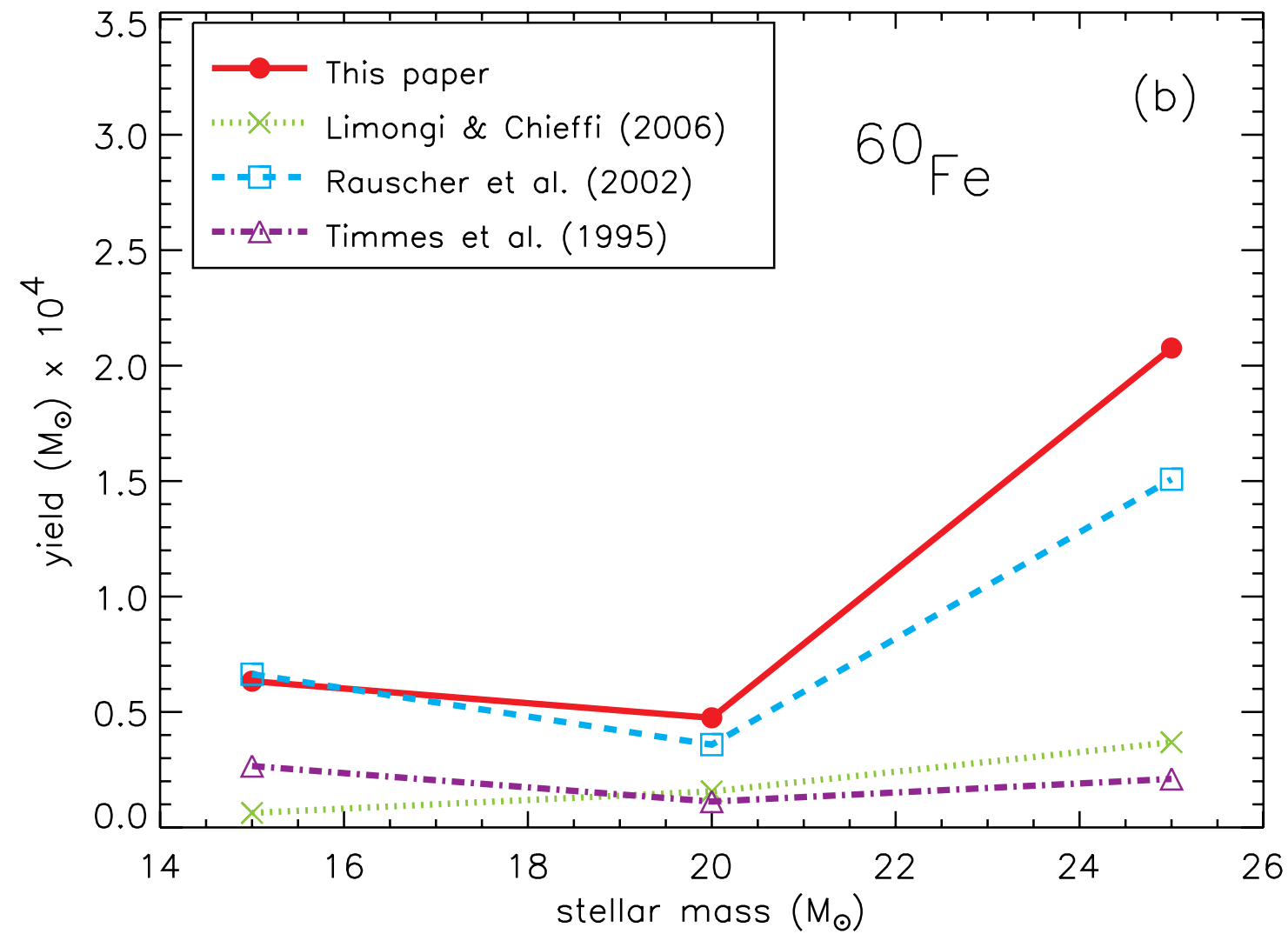
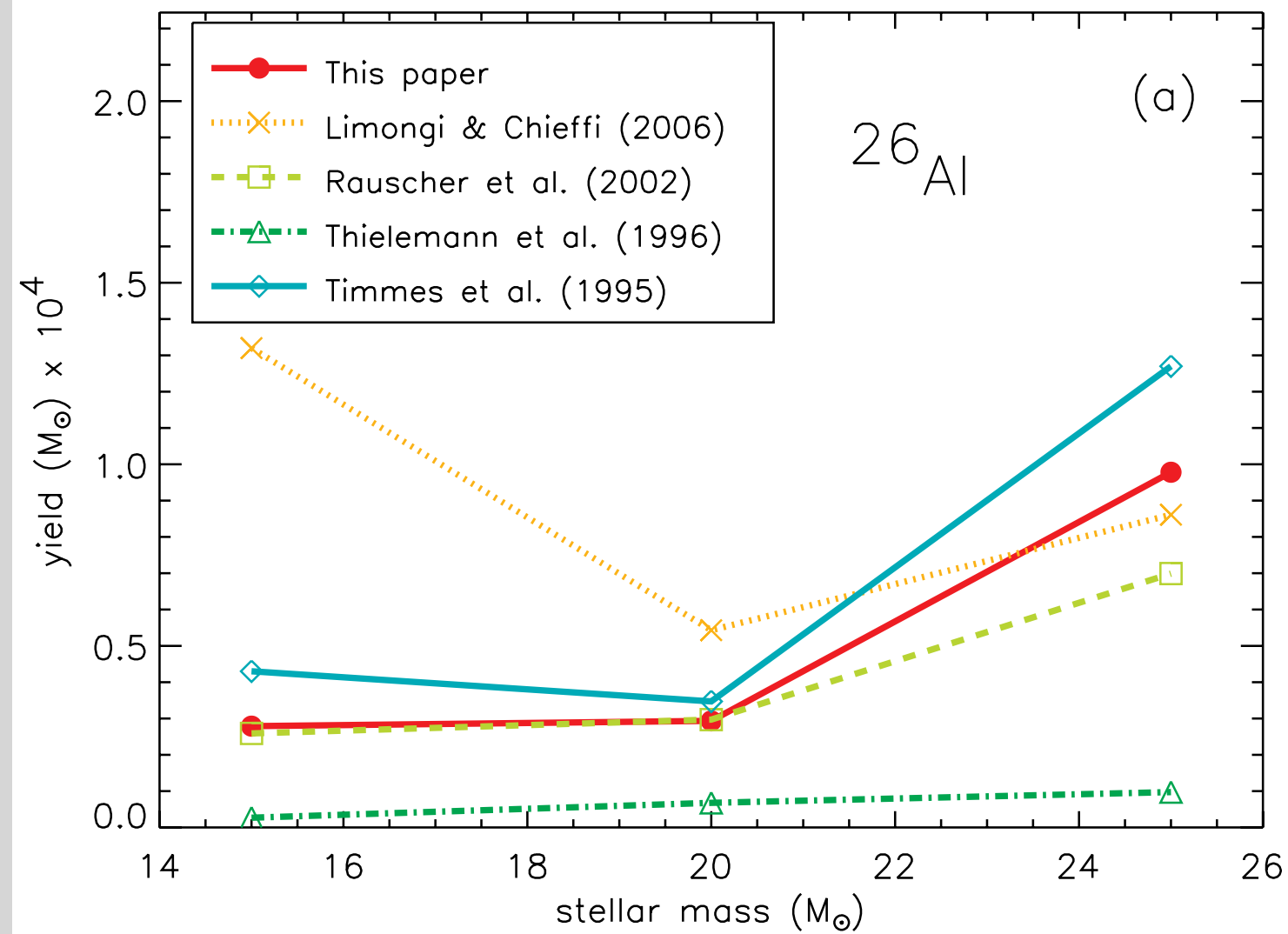
(反応に必要な中性子は核反応から作られる)

どれくらい作るのか？



- * 典型的には $O(10^{-5})M_{\odot}/\text{star}$
- * 同位体の寿命が Myr
→ ある領域から観測できる時間スケール
- * 銀河系内の量がわかれば、超新星発生率が評価できる
 - 2.6 ± 2.0 SN/century [Timmes+ 1997]
 - 1.54 ± 0.89 SN/century [Deihl+ 2013]

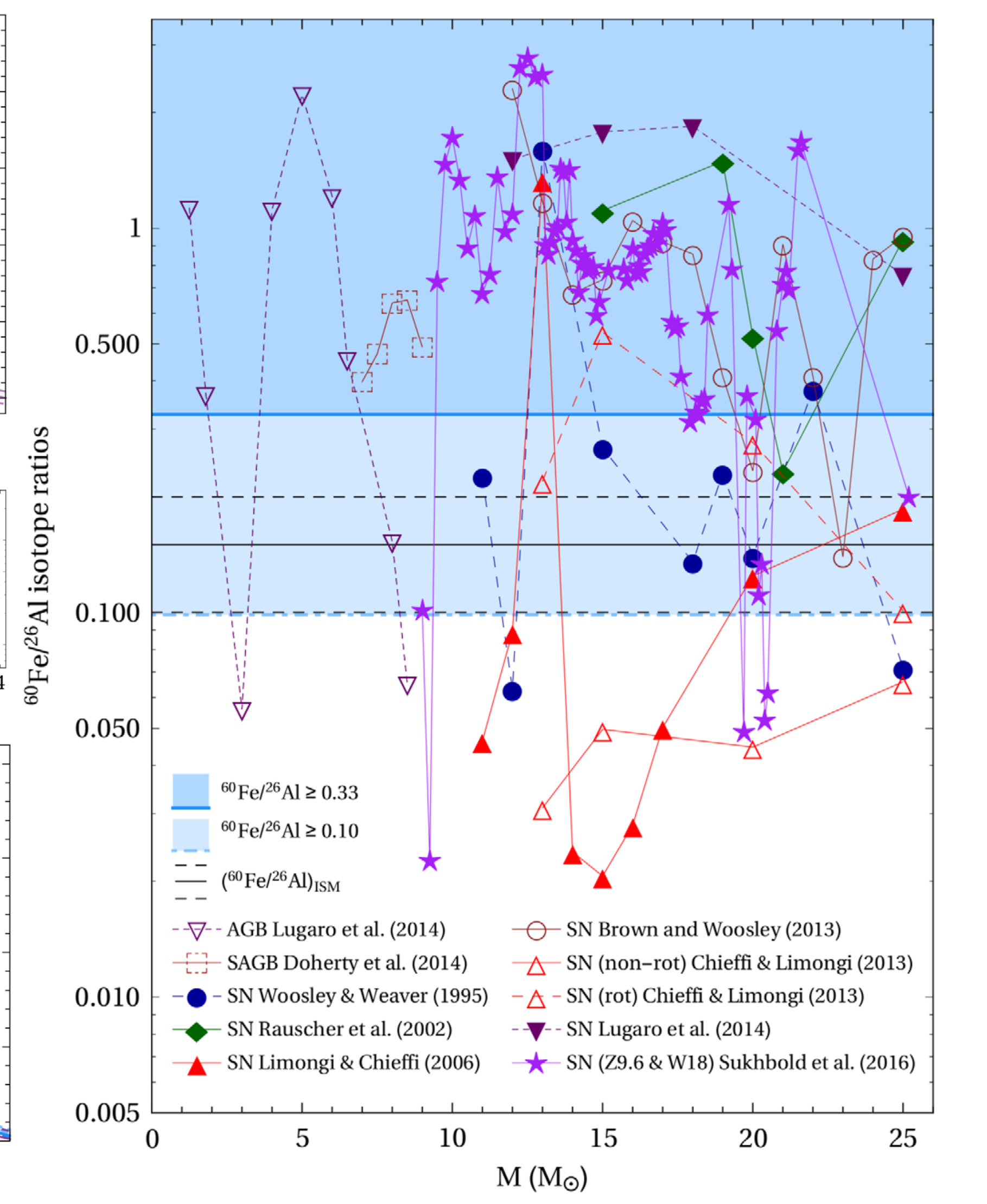
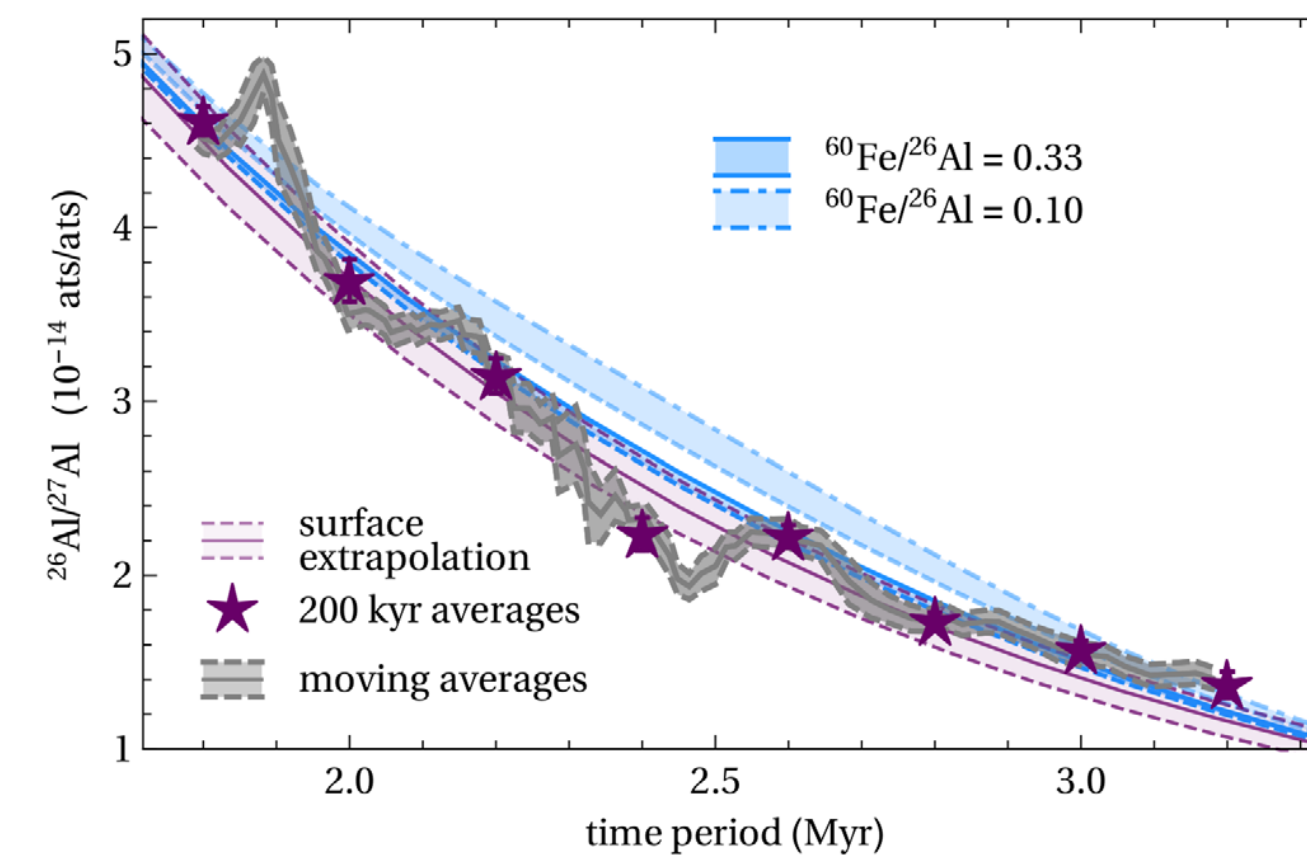
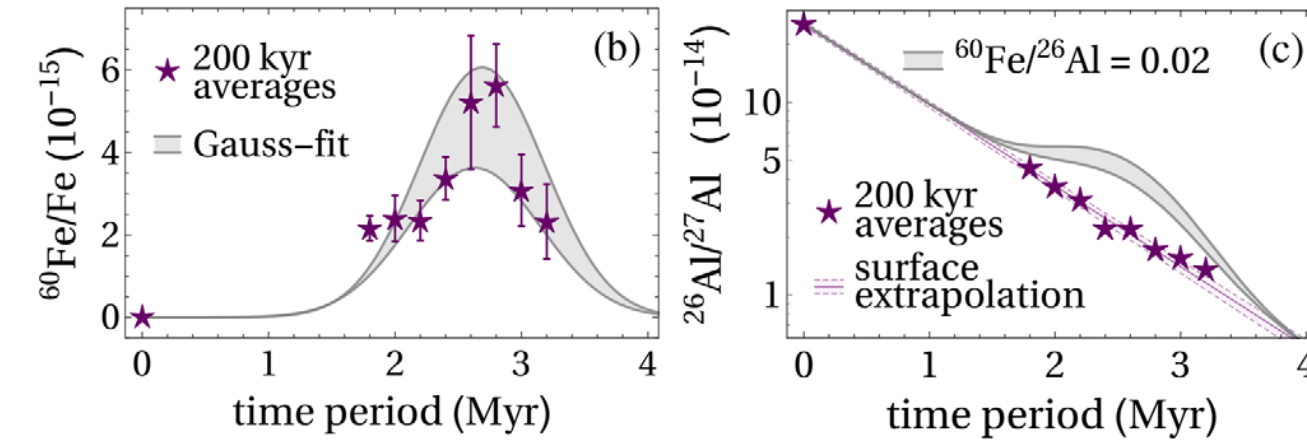
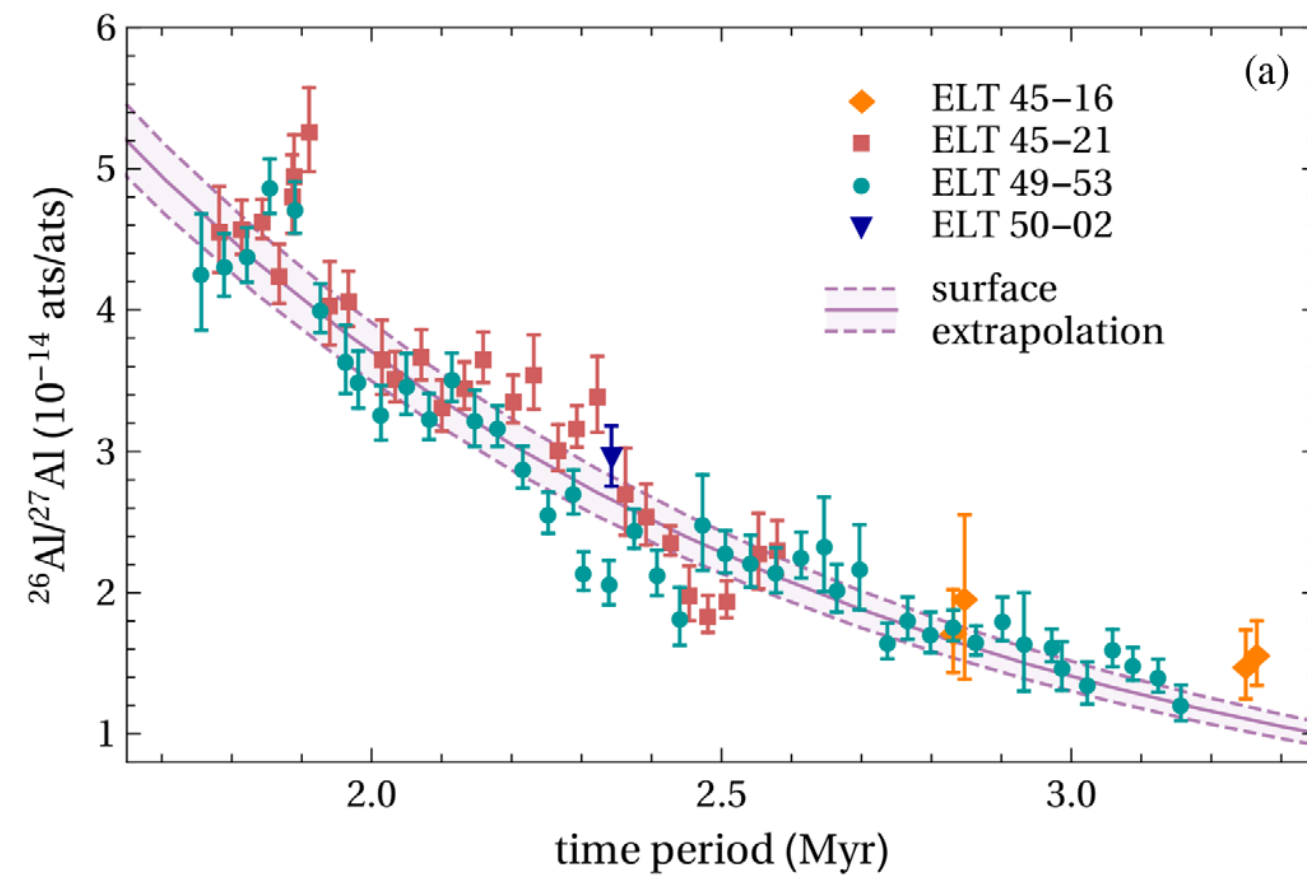
理論モデルの不定性



Tur+ 2010

- * 10^{-5} - $10^{-4}M_{\odot}$
- * 一つの天体からの元素放出量は不定性が大きい
- * 元素合成
 - triple-alpha ($3\alpha \rightarrow ^{12}\text{C}$)
 - $^{12}\text{C} + \alpha \rightarrow ^{16}\text{O} + \gamma$
- * 対流の強さ
 - 生成されて壊れる前に外に運ばれるかどうか

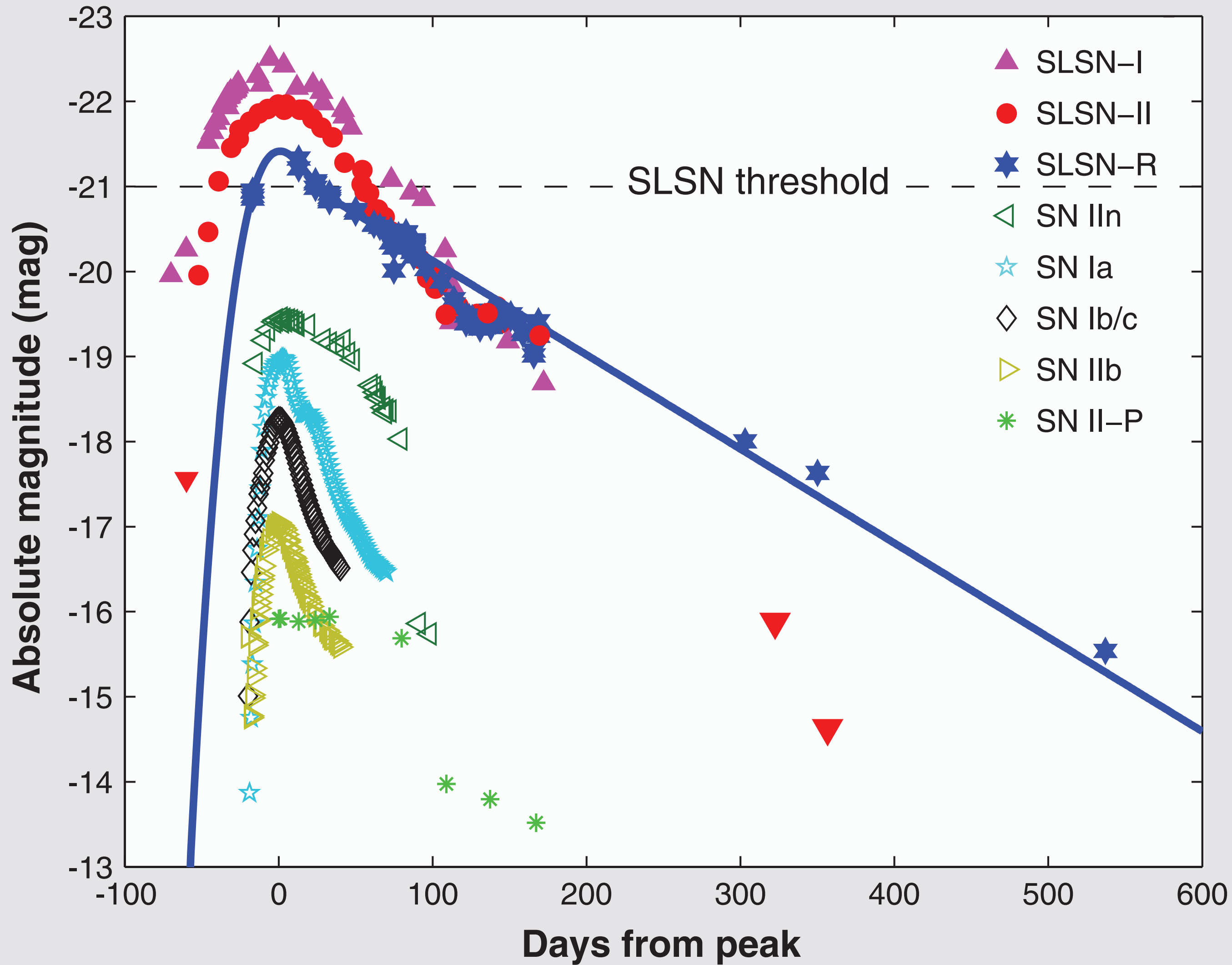
地上での測定



Feige+ 2018

- * 深海堆積物の同位体測定
- * ^{60}Fe は1.7-3.2Myrに超過
- * ^{26}Al は超過なし
- * $^{60}\text{Fe}/^{26}\text{Al}$ の下限は $0.18^{+0.15}_{-0.08}$
- * ガンマ線観測と無矛盾

超新星の多様性



Gal-Yam 2012

* 超新星の様々な種族

- 明るい人々
 - ▶ Super-luminous SN
 - ▶ hypernova/broad-line Ic
- 暗い/早い人々
 - ▶ faint SN
 - ▶ rapidly-evolving SN
- 普通の超新星も広い分布
 - ▶ 爆発エネルギー、Ni量

* 起源は？

- 質量、星風、回転、金属量、連星、星周物質、etc.

まとめ

* 銀河進化における超新星フィードバック

- エネルギー、運動量注入
- 化学進化

* ガンマ線で観測できる同位体

- ^{56}Ni 、 ^{44}Ti 、 ^{26}Al 、 ^{60}Fe
- 特に、 ^{26}Al と ^{60}Fe

* 理論モデル

- どこでつくるのか？どれくらい作るのか？

* これらの情報をふまえて、超新星シミュレーションと銀河形成進化をどうつなげるか？

