

2011年8月8日  
北軽井沢駿台天文講座

# 第3回 銀河系内外で進化を続ける物質

# 第3回

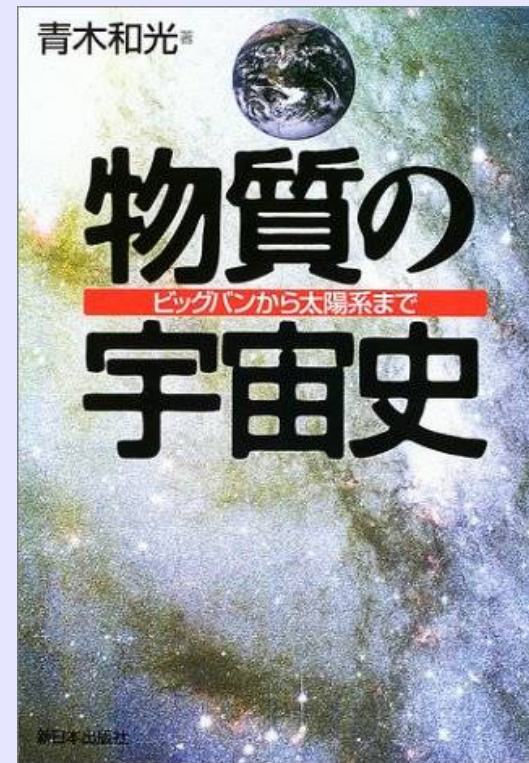
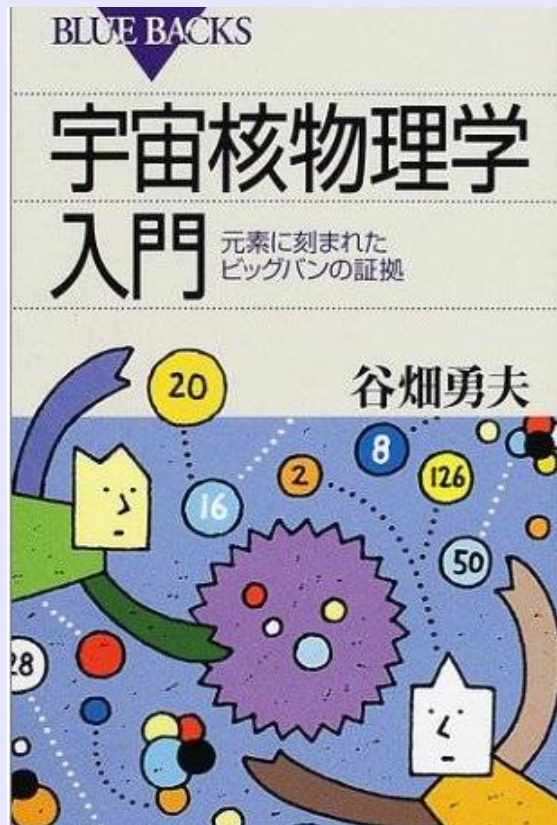
## 銀河系内外で進化を続ける物質

- 物質の歴史における初代星
- 星の組成をどう測るか
- 鉄より重い元素はいかにつくられたか

参考文献:

谷畑勇夫「宇宙核物理学入門」(ブルーバックス・講談社)

青木和光「物質の宇宙史」(新日本出版社)

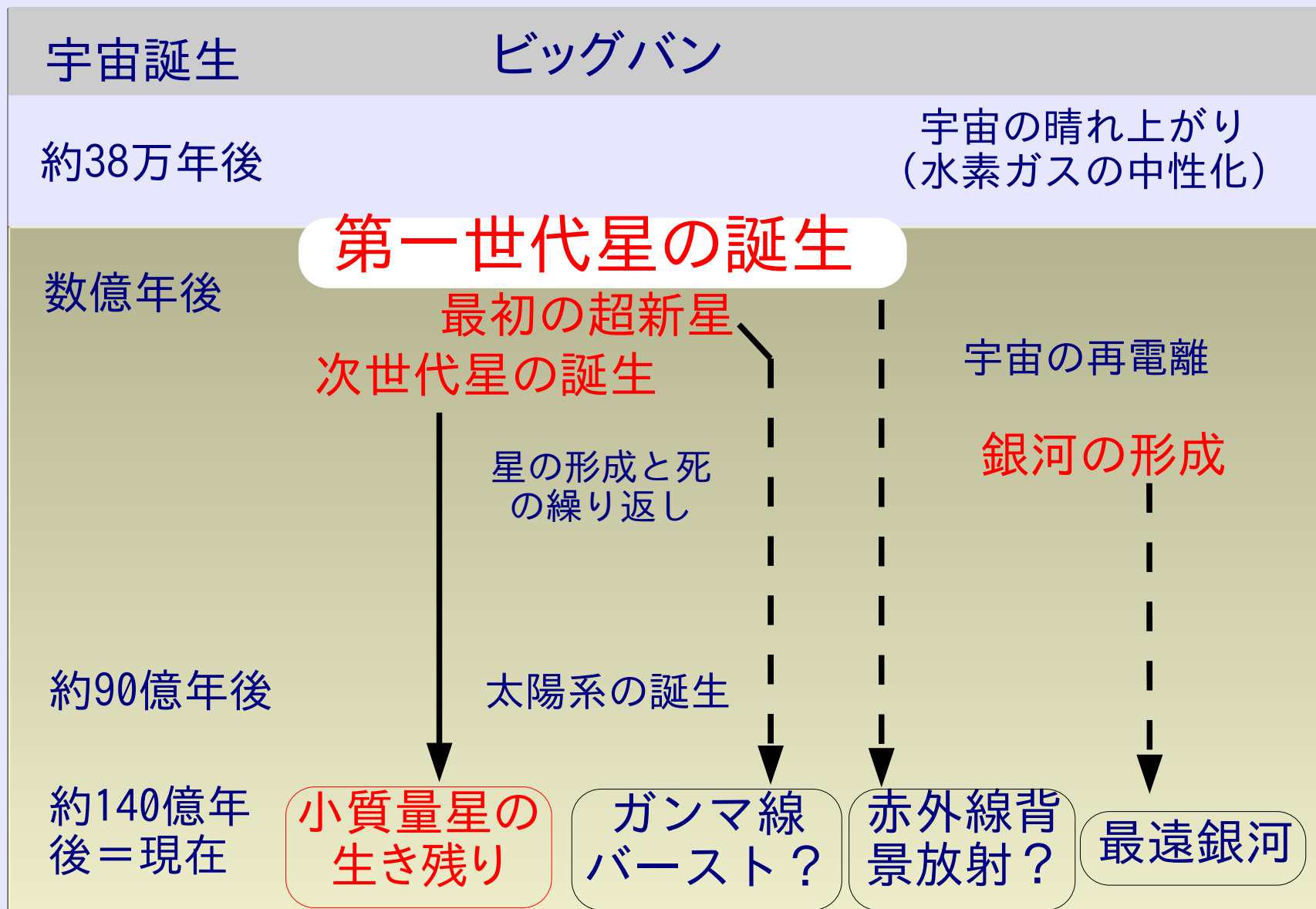


# 宇宙史 I. 構造形成の歴史

|       |                                      |
|-------|--------------------------------------|
| 0     | ビッグバン                                |
| 38万年  | 「宇宙の晴れ上がり」<br>(宇宙空間の水素ガスが中性・透明になる)   |
|       | 「宇宙の暗黒時代」(輝く天体が存在しない)                |
| 数億年   | 最初の星の誕生<br>銀河形成の開始<br>銀河団・大規模構造の骨格形成 |
| 10億年? | 銀河系ハローの形成                            |
| 90億年  | 太陽系の形成                               |
| 140億年 | 現在                                   |

宇宙のさまざまな構造には最初の  
10億年くらいが重要な時期だった

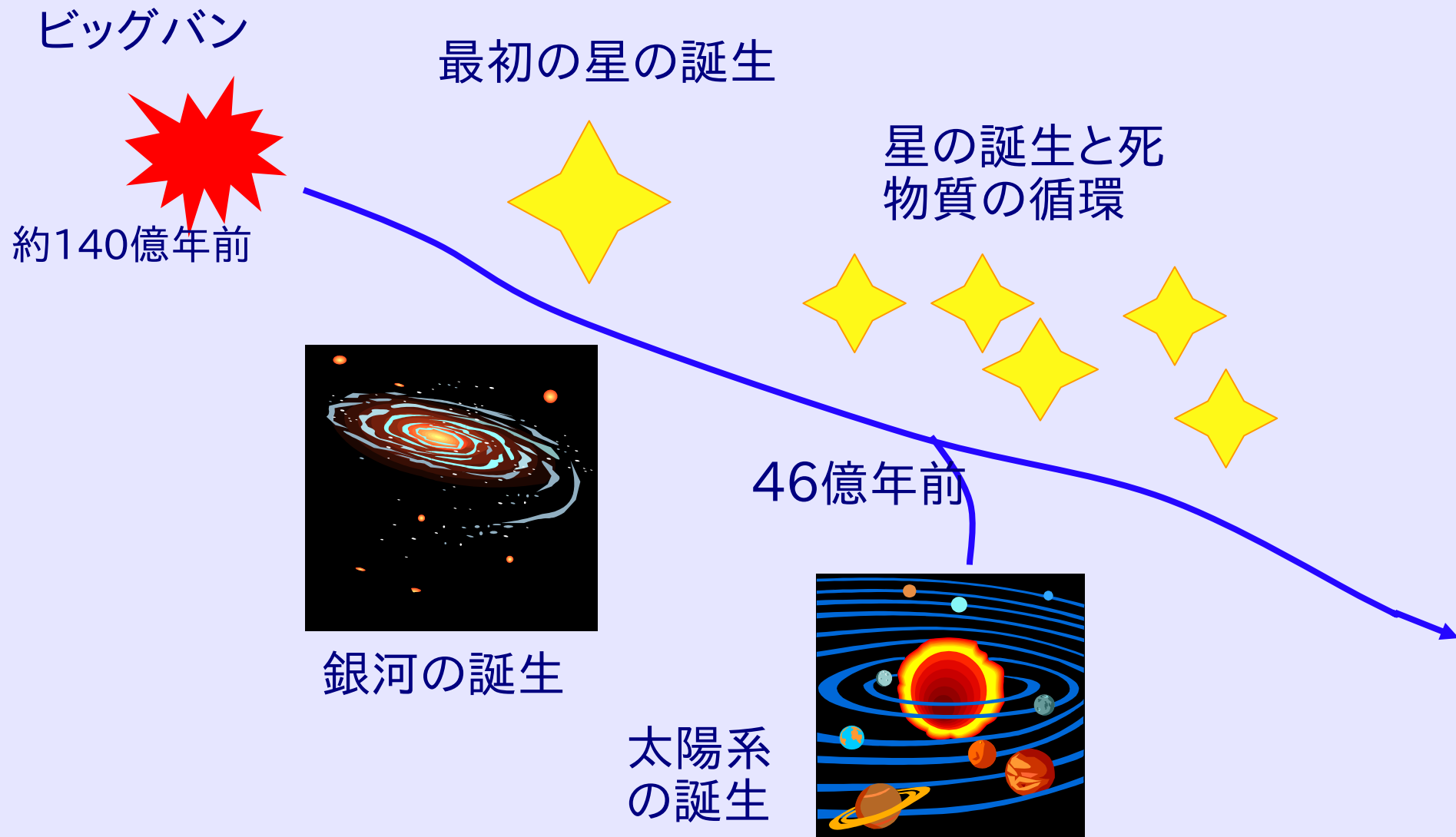
# 宇宙の暗黒時代に迫る ～初代星をいかに調べるか？



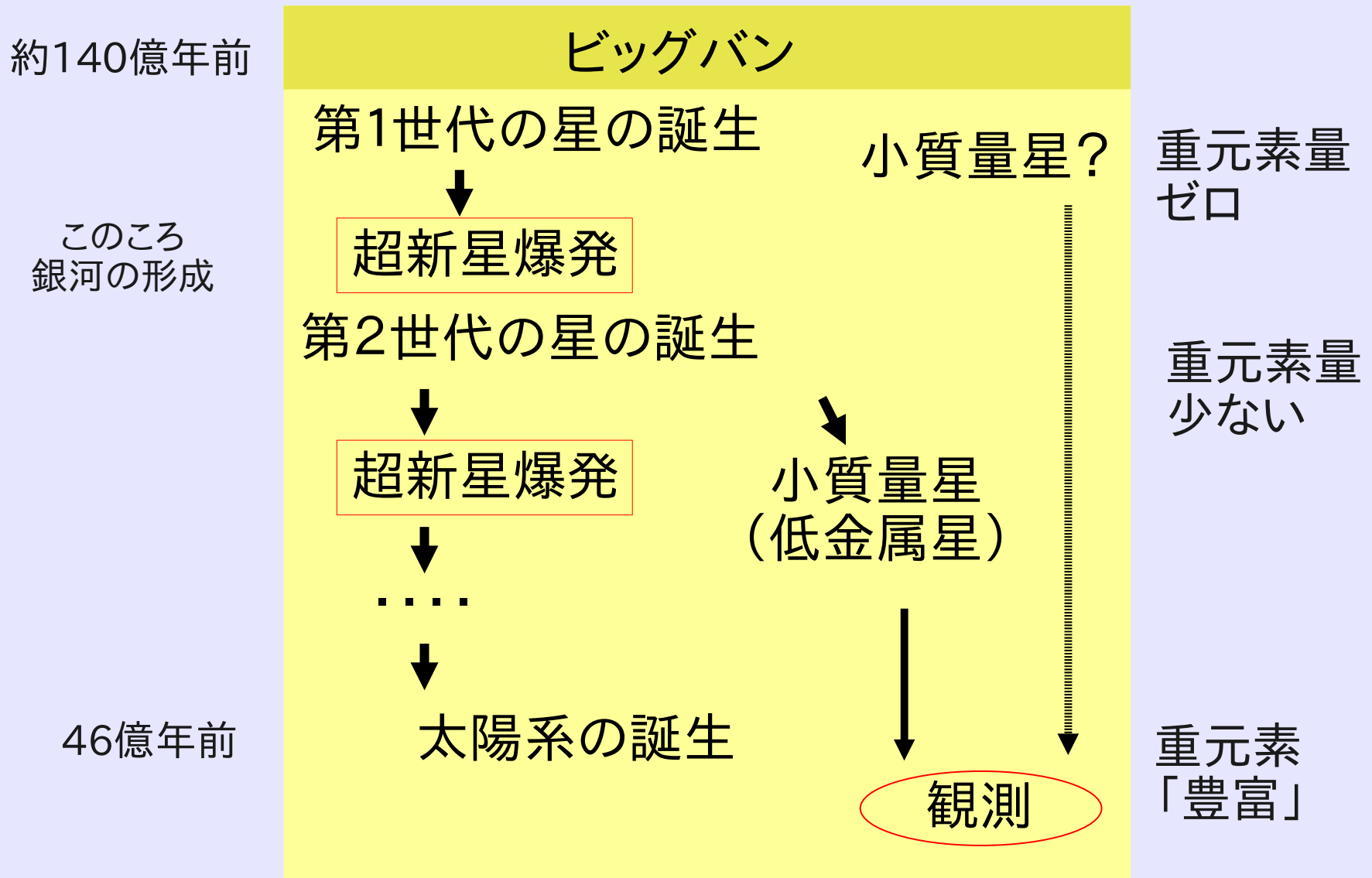
## 宇宙史 II. 物質の歴史

- 現在の宇宙には多様な物質が存在する。
- 物質の歴史もビッグバンから始まった。
- 多くの物質(元素)が星によってつくられ、宇宙全体で蓄積されてきた。
- 宇宙で最初の星には、重い元素が極めて少ないはず。

# 宇宙の歴史～ ビッグバンから太陽系まで



# 宇宙初期の元素合成と低金属星





# 元素合成の「化石」の調査

現在生きている生物



化石: 過去の生物の遺物

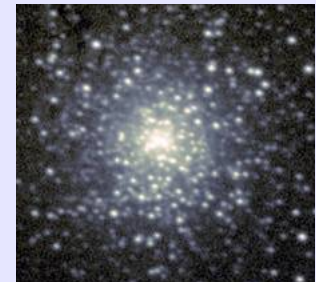


年代: 深い地層ほど古い

元素合成の結果を放出している天体  
(超新星など)



生まれた当初の元素組成を保持している星(太陽など)



重元素量の少ない星ほど古い

宇宙における物質の歴史はいろいろな年代の星の元素組成に刻まれている

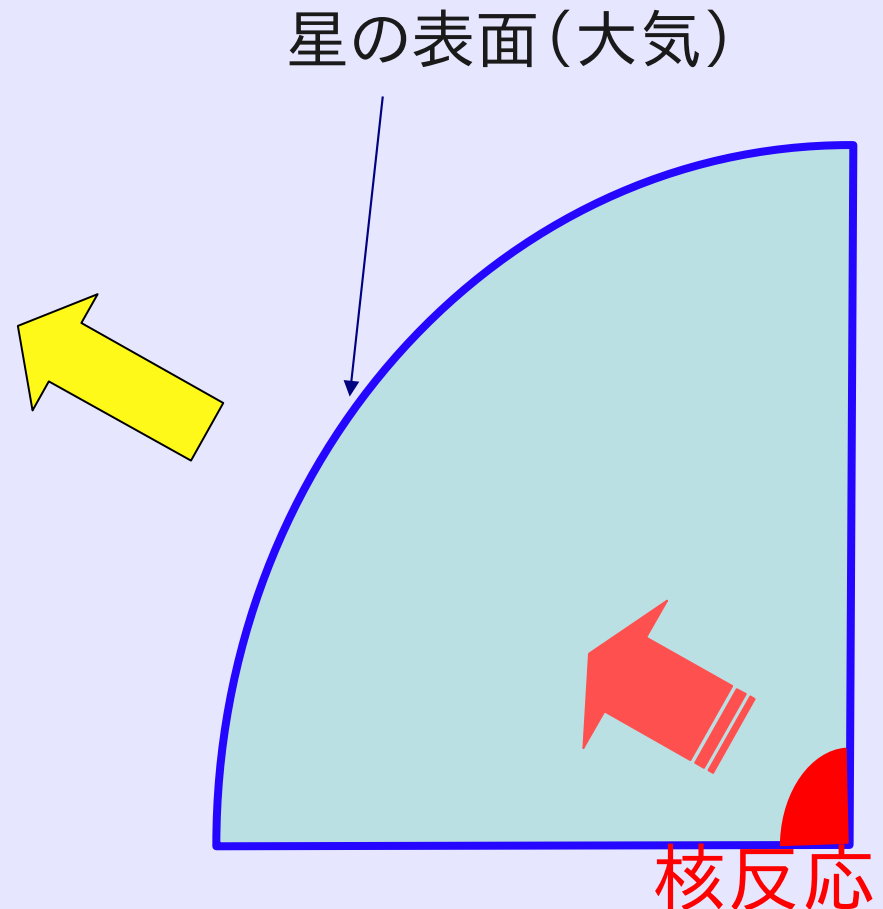
# 星の組成(重元素量)の調べ方

星の表面組成は、星から届く光の分光分析(スペクトル分析)によって調べることができる。

スペクトル:波長(色)ごとの  
光の強さの分布

# 星の元素組成を調べる

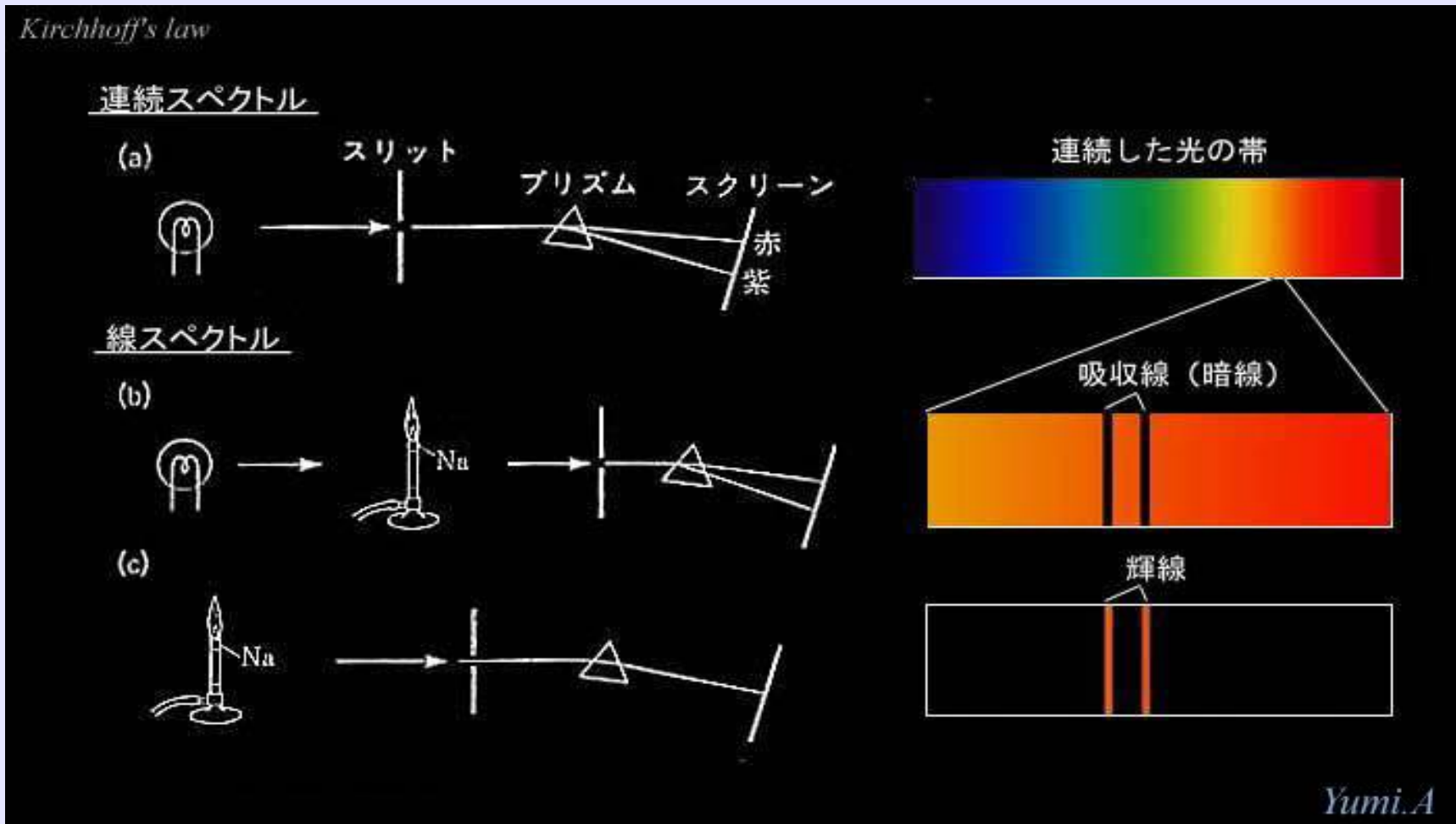
- 星の表面(大気)では、内部からの光が吸収される。  
～分光観測によって星の表面の組成を調べることができる。
- 星の表面(大気)には、星が生まれたころの元素組成が概ね保持されている。



# 光の放射と吸収

連続スペクトルと線スペクトル

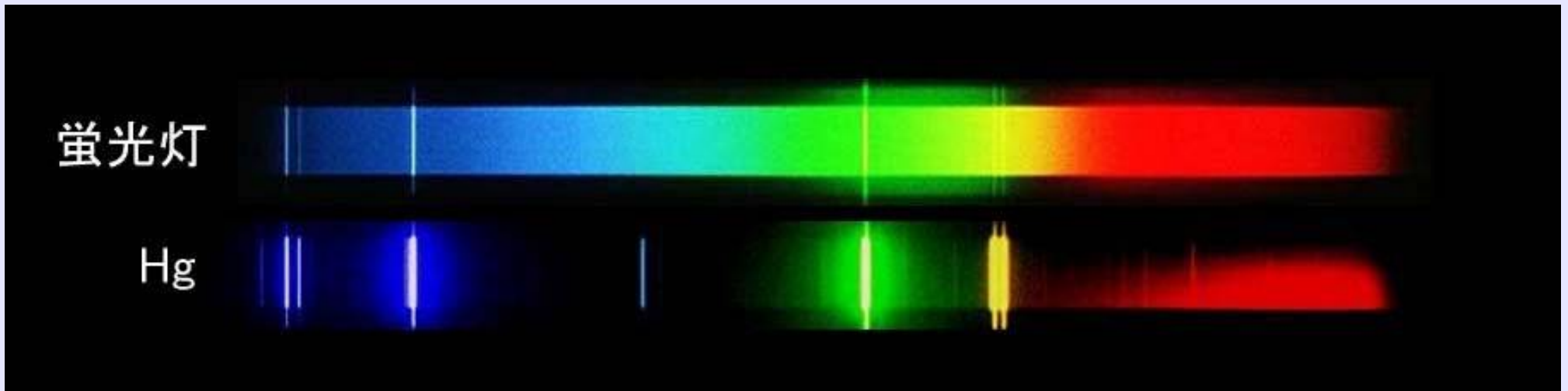
薄いガス雲からは輝線、濃いガス雲からは吸収線が観測される。



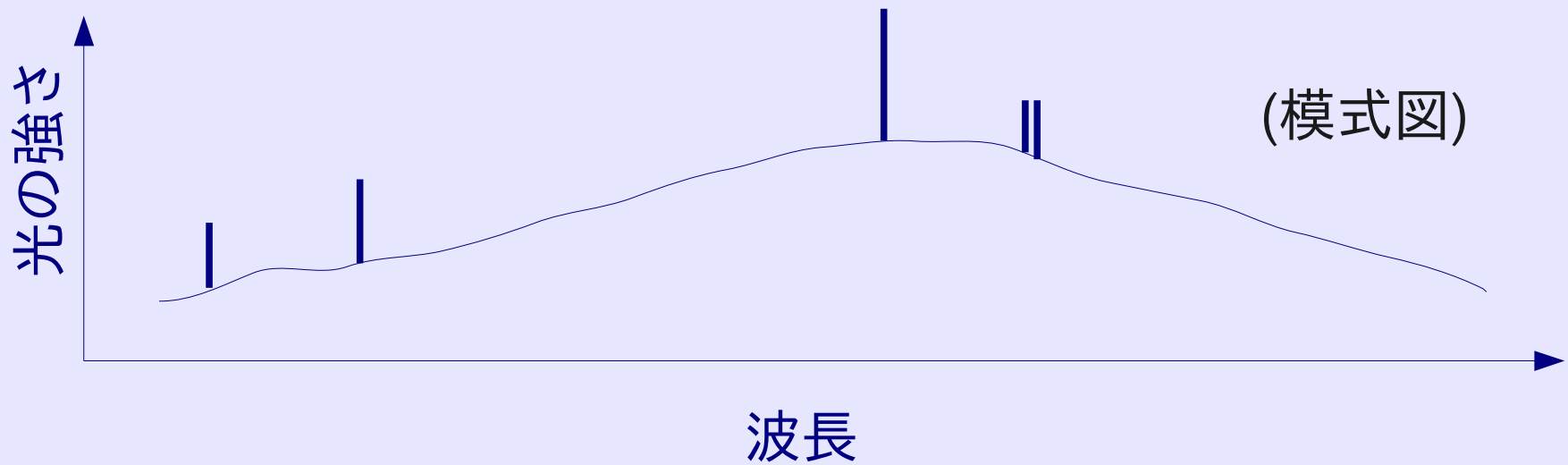
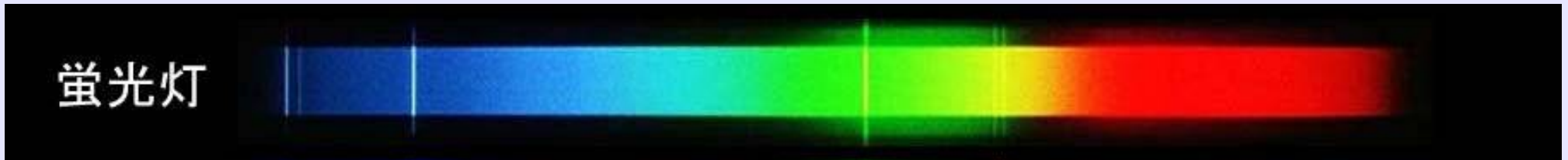
「宇宙スペクトル博物館(可視光編)」より

# 元素組成を調べる方法： スペクトル(分光)観測

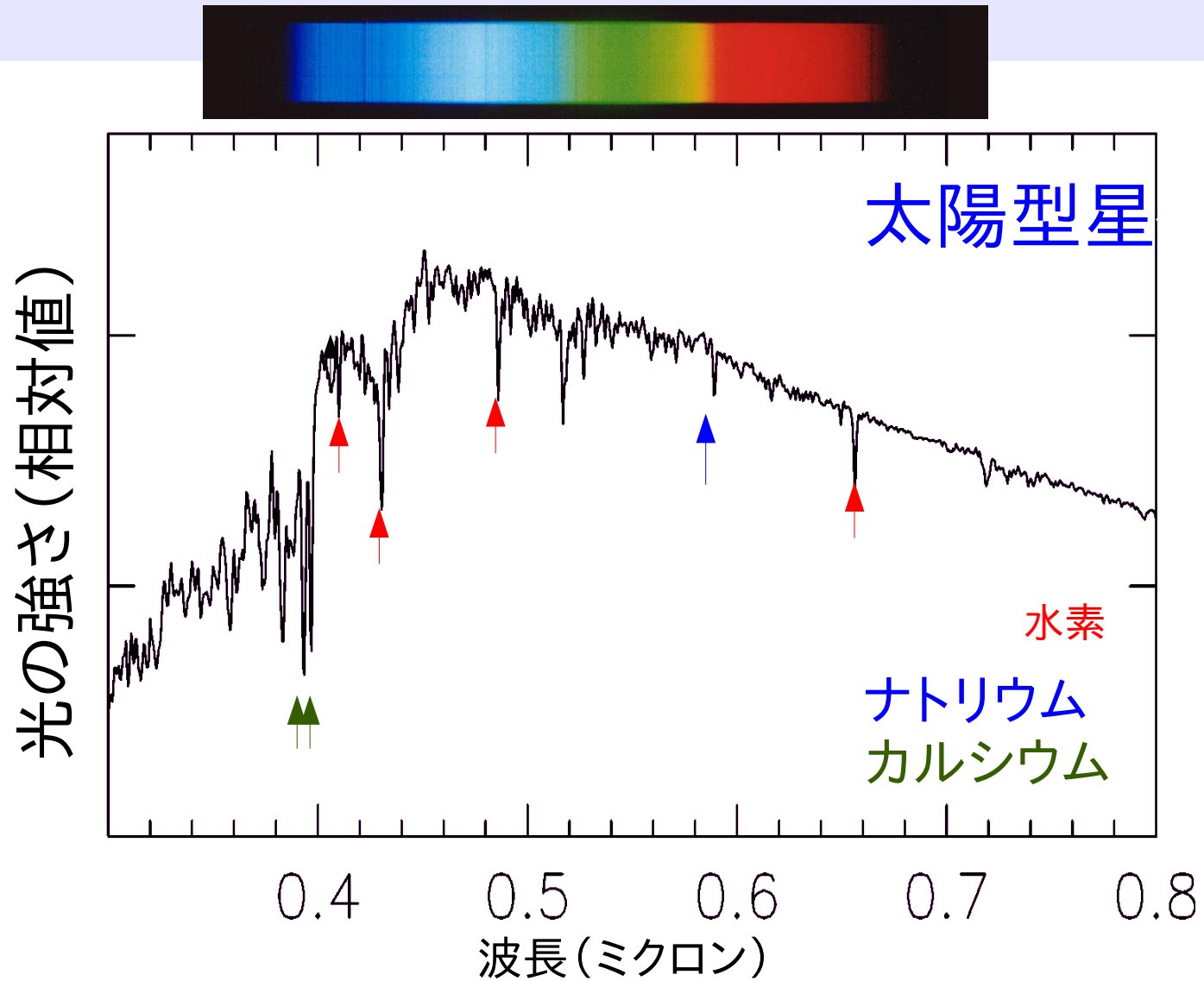
- 物質は、固有の色(波長)の光を吸収したり、放射したりする性質がある。
- 光を色にわけて観測すると、天体を構成している物質の量や状態がわかる。



# スペクトルの表現



# 星の光のスペクトル(例)





# 星の組成から宇宙の初代星に迫る

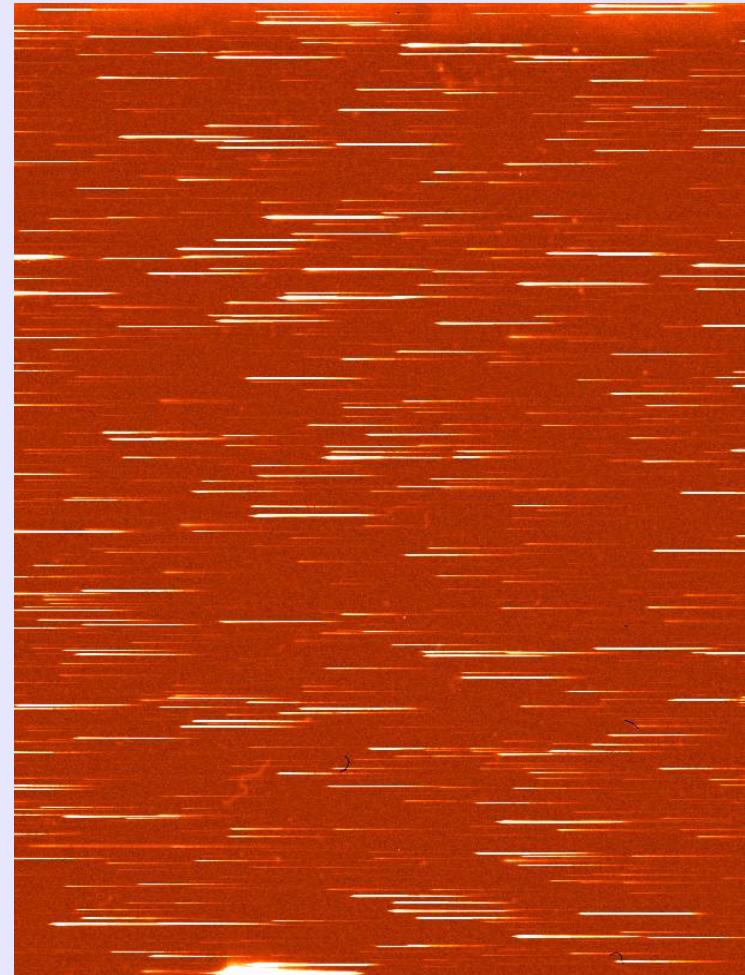
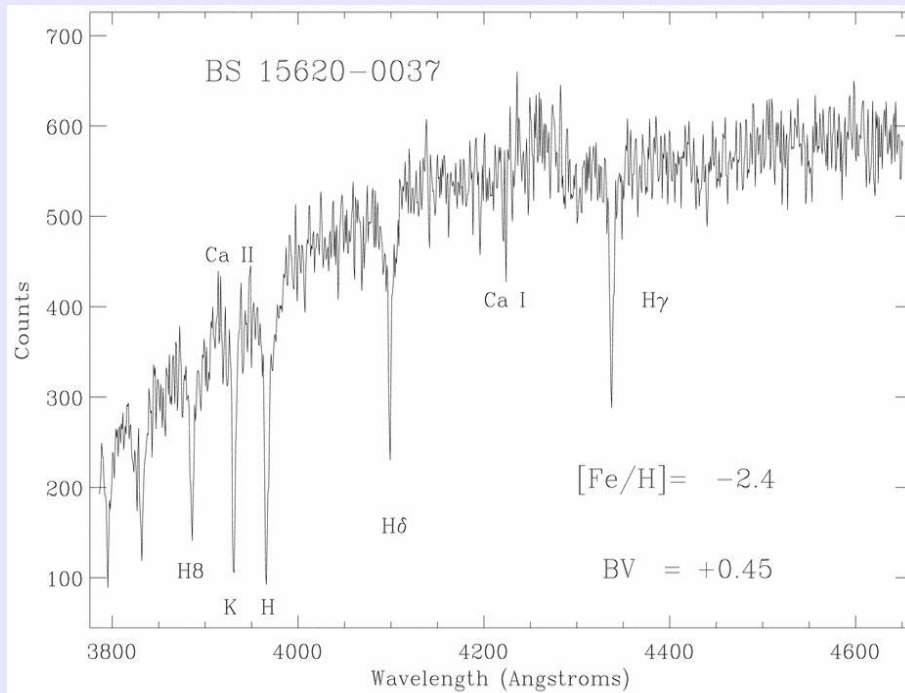
- 初代星には重元素が含まれていない。
- 初代星に近いほど重元素の含有量が少ない。

# 銀河系内に宇宙の第一世代星をさぐる

- 星の「種族」の発見(1944年):  
太陽系よりずっと重元素の少ない星が存在  
銀河ハローの星
- ビッグバンの提唱(1950年ころ)  
元素の起源についての考察開始
- 第一世代星(重元素ゼロの星)の本格探査(1980年ころ  
から)

# 低金属星の探査・組成解析(1)

- 1) 低分解能スペクトル
- 2) 中分解能スペクトル

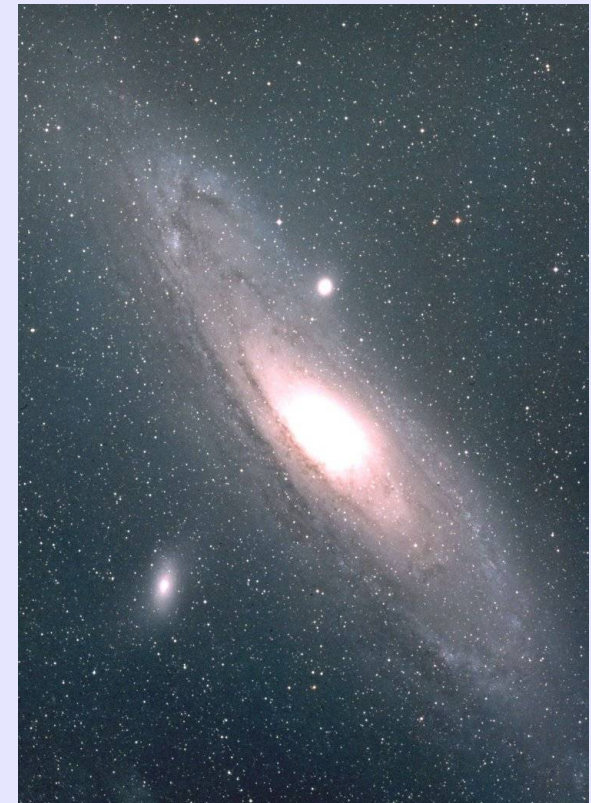
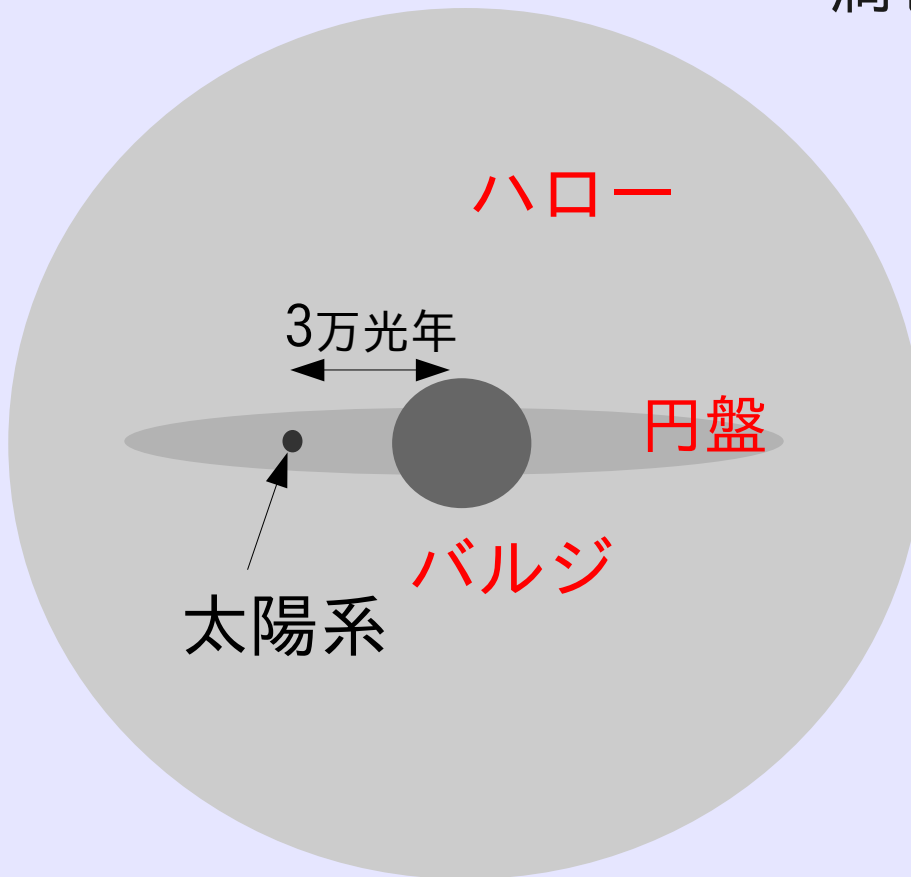


*e.g., Beers et al. 1992*

# 低金属星は何処に？

主に銀河系ハロー構造や衛星銀河に検出されている

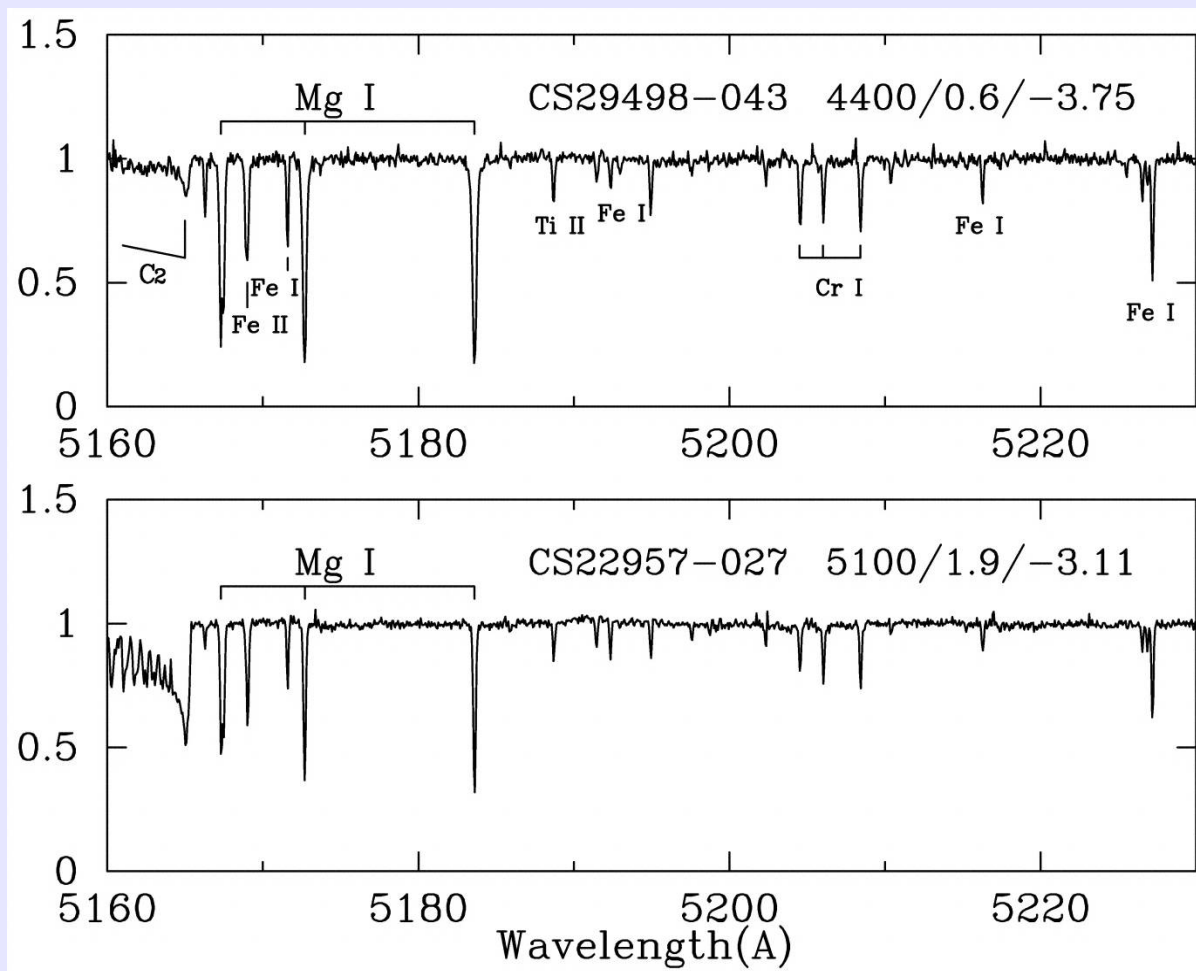
渦巻銀河の例：アンドロメダ銀河



東大木曾観測所シュミット望遠鏡による画像

# 低金属星の探査・組成解析(2)

## 3)高分解能スペクトル → 個々の原子・分子線に分離



# すばる望遠鏡・高分散分光器(HDS)



すばる望遠鏡(マウナケア山)



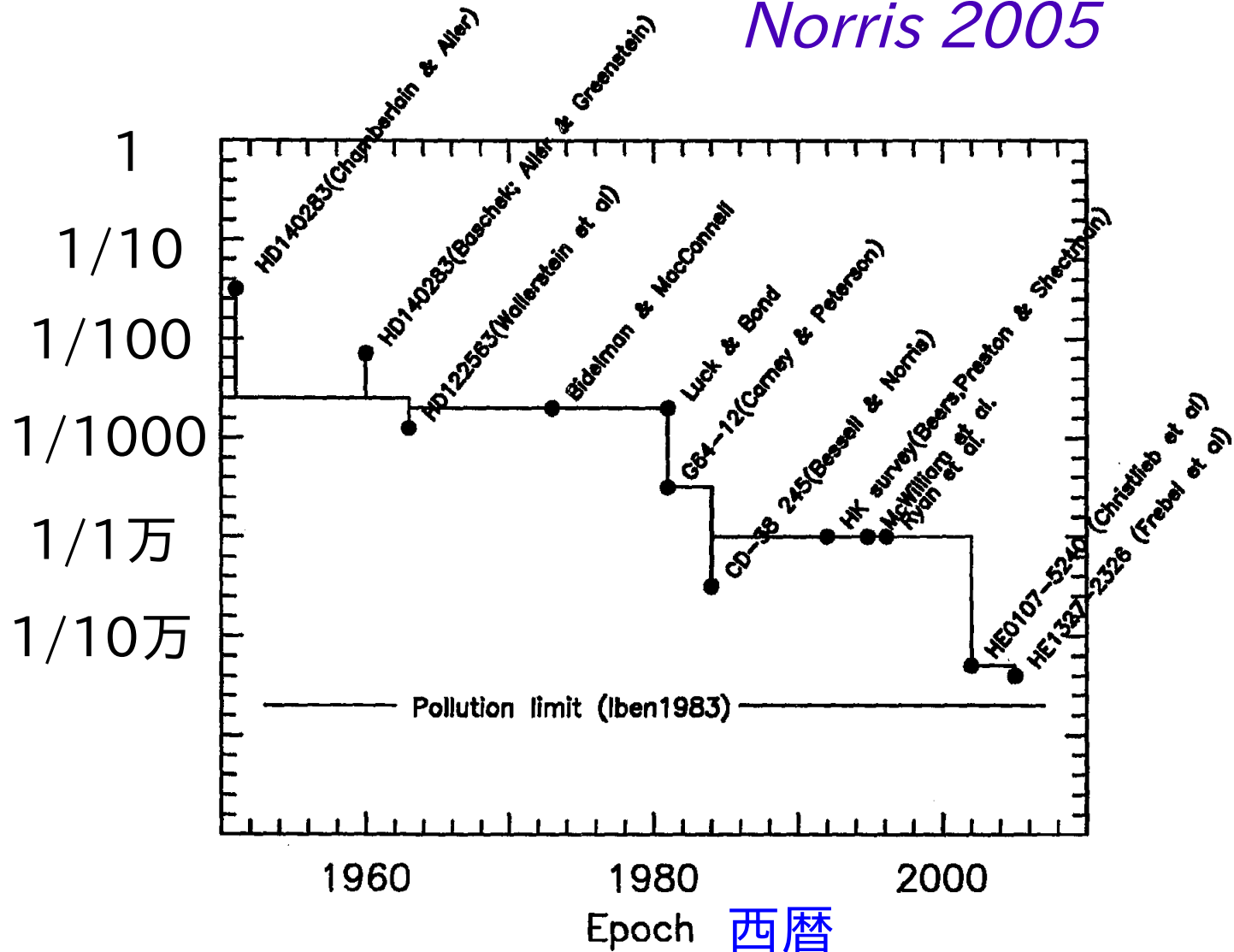
高分散分光器(HDS)

星は明るい、重元素が少ないためスペクトル線(吸収線)が非常に弱く、精度の高い観測が必要  
→すばる望遠鏡の大集光力が威力を発揮

# 重元素の少ない星の探査の歴史

鉄組成(太陽との相対値)

Norris 2005



# これまでに知られているなかで 最も重元素の含有量の少ない星

すばる望遠鏡によって発見される(組成が測定される)

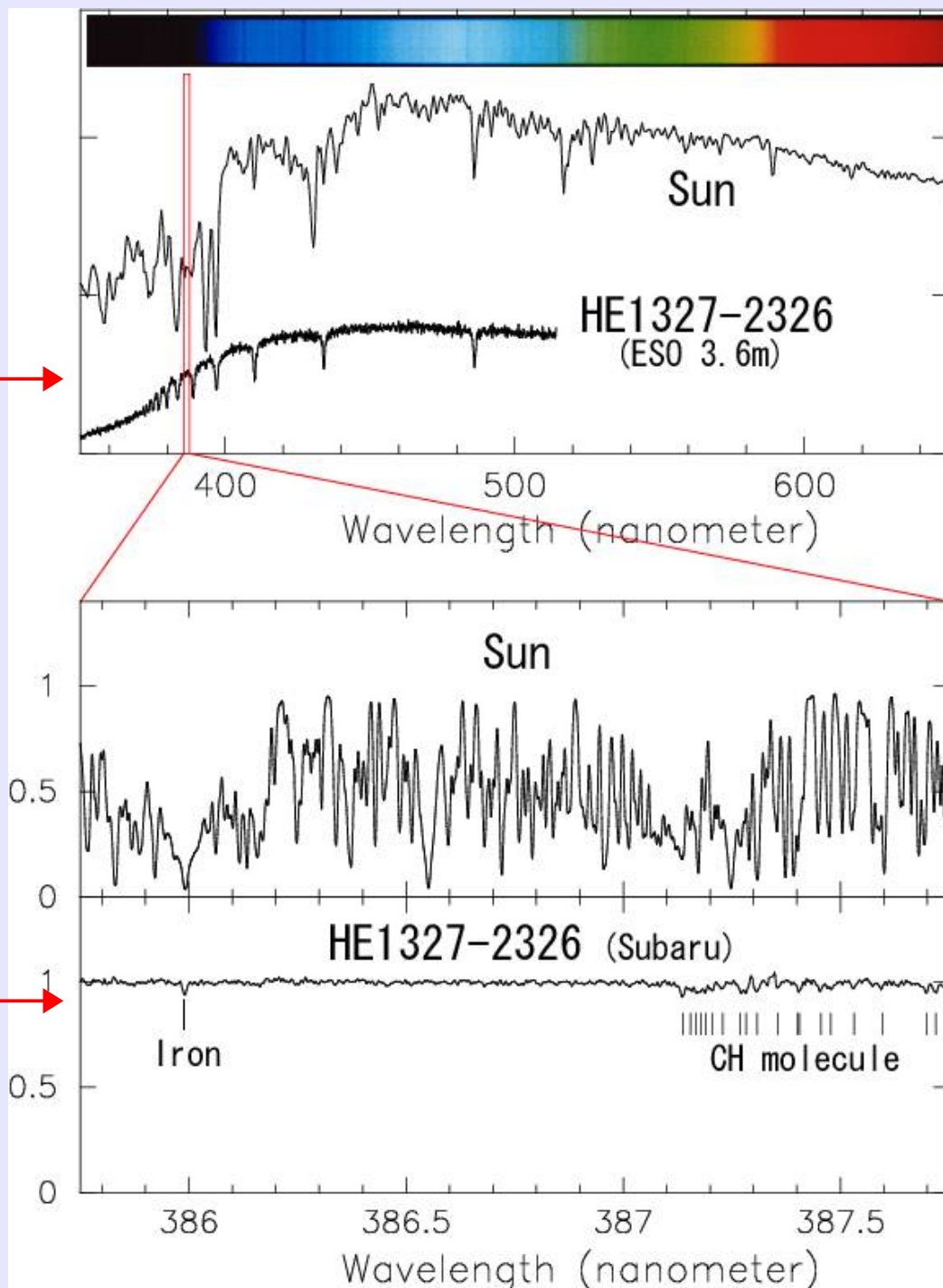


HE1327-2326 (距離約4000光年)  
太陽と似たような質量と温度をもつ



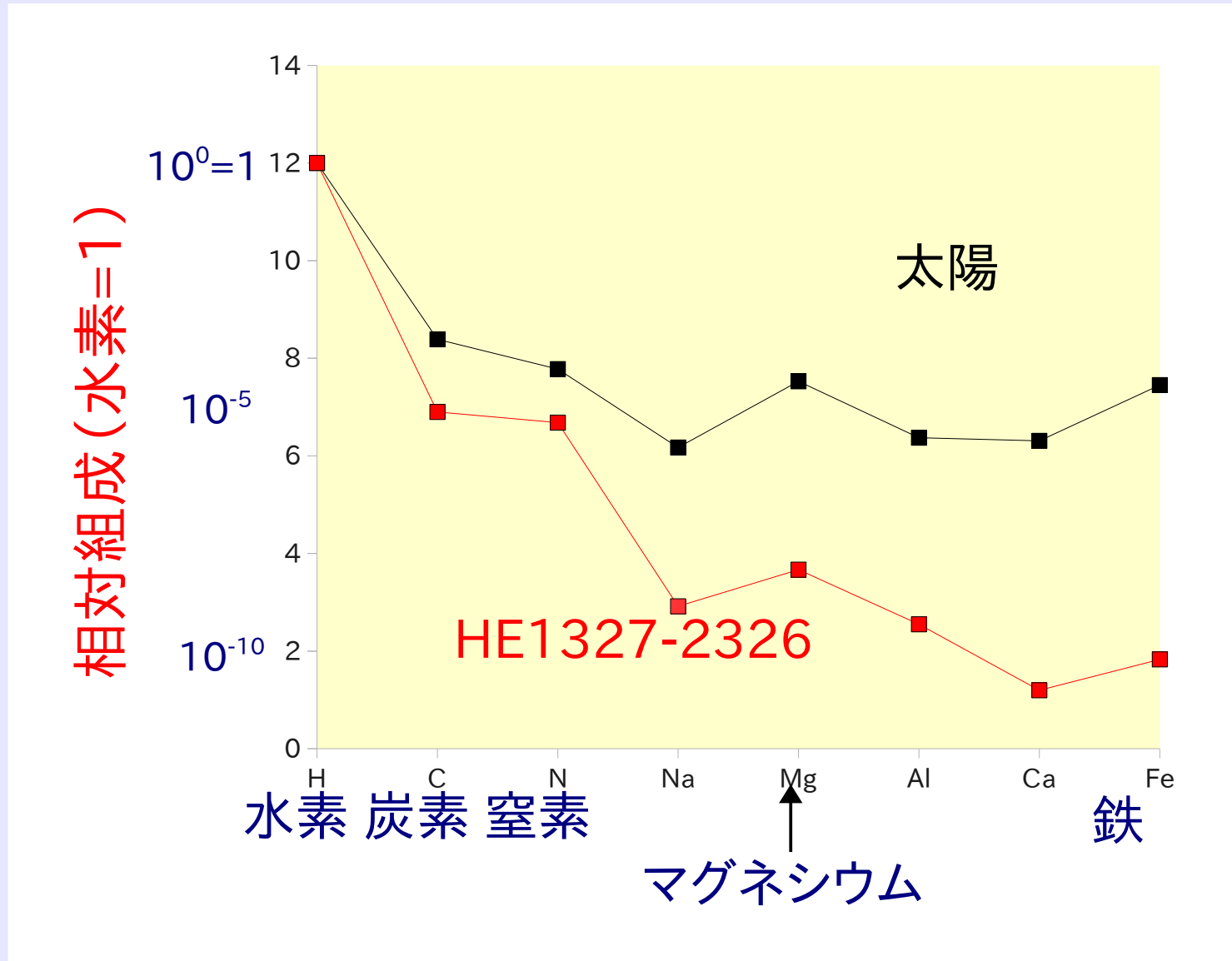
# HE1327-2326の スペクトルデータ

ESO3.6m 望遠鏡に  
よるスペクトル



すばる/HDSに  
よるスペクトル

# 最も重元素量の少ない星がもつ特異な組成 (水素を基準にした個数比)



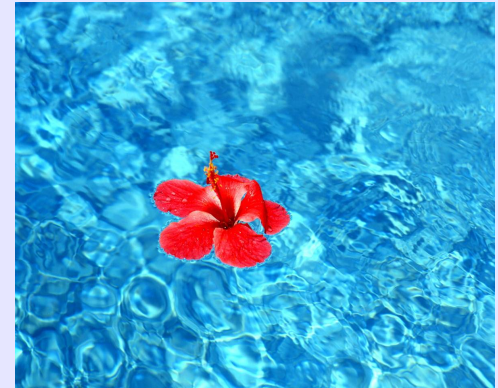
# 最も重元素の少ない星の組成から わかってきたこと

- 宇宙のごく初期に生まれた星(第2世代?)が銀河系に生き残っている
- 初代の大質量星には、現在みられる超新星とはだいぶ違う爆発を起こしたものがあつたらしい(←第2世代星が特異な組成をもつ)
- 初代星の多くは大質量であつたらしい(←重元素ゼロの小質量星がみつかっていない)。超大質量星の証拠はいまのところみつかっていない。

初代星以来、さまざまな元素が星や  
超新星によってつくられ、宇宙に蓄  
積されてきた

# 身近な元素の起源 I

- 水素:ビッグバン以来、すべての元素合成の出発点。
- 酸素:重い星で合成され、超新星爆発で放出される。  
(ケイ素やカルシウムも同様)
- 炭素:様々な重さの星で合成される。軽い星の役割も重要。
- 鉄:重い星で最後に合成され、超新星爆発で放出される。  
連星で起こる超新星爆発(Ia型超新星)によっても大量に供給される。



# 元素の周期表

|   | 1A               | 2A               | 3A               | 4A               | 5A               | 6A               | 7A               | 8                | 1B               | 2B               | 3B               | 4B                | 5B                | 6B                | 7B                | 0                 |                  |                  |
|---|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|
| 1 | <sup>1</sup> H   |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |                   | <sup>2</sup> He   |                  |                  |
| 2 | <sup>3</sup> Li  | <sup>4</sup> Be  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  | <sup>5</sup> B   | <sup>6</sup> C    | <sup>7</sup> N    | <sup>8</sup> O    | <sup>9</sup> F    | <sup>10</sup> Ne  |                  |                  |
| 3 | <sup>11</sup> Na | <sup>12</sup> Mg |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  | <sup>13</sup> Al | <sup>14</sup> Si  | <sup>15</sup> P   | <sup>16</sup> S   | <sup>17</sup> Cl  | <sup>18</sup> Ar  |                  |                  |
| 4 | <sup>19</sup> K  | <sup>20</sup> Ca | <sup>21</sup> Sc | <sup>22</sup> Ti | <sup>23</sup> V  | <sup>24</sup> Cr | <sup>25</sup> Mn | <sup>26</sup> Fe | <sup>27</sup> Co | <sup>28</sup> Ni | <sup>29</sup> Cu | <sup>30</sup> Zn  | <sup>31</sup> Ga  | <sup>32</sup> Ge  | <sup>33</sup> As  | <sup>34</sup> Se  | <sup>35</sup> Br | <sup>36</sup> Kr |
| 5 | <sup>37</sup> Rb | <sup>38</sup> Sr | <sup>39</sup> Y  | <sup>40</sup> Zr | <sup>41</sup> Nb | <sup>42</sup> Mo | <sup>43</sup> Tc | <sup>44</sup> Ru | <sup>45</sup> Rh | <sup>46</sup> Pd | <sup>47</sup> Ag | <sup>48</sup> Cd  | <sup>49</sup> In  | <sup>50</sup> Sn  | <sup>51</sup> Sb  | <sup>52</sup> Te  | <sup>53</sup> I  | <sup>54</sup> Xe |
| 6 | <sup>55</sup> Cs | <sup>56</sup> Ba | <sup>57</sup> L  | <sup>72</sup> Hf | <sup>73</sup> Ta | <sup>74</sup> W  | <sup>75</sup> Re | <sup>76</sup> Os | <sup>77</sup> Ir | <sup>78</sup> Pt | <sup>79</sup> Au | <sup>80</sup> Hg  | <sup>81</sup> Tl  | <sup>82</sup> Pb  | <sup>83</sup> Bi  | <sup>84</sup> Po  | <sup>85</sup> At | <sup>86</sup> Rn |
| 7 | <sup>87</sup> Fr | <sup>88</sup> Ra | <sup>89</sup> A  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |                   |                   |                  |                  |
|   | <sup>57</sup> L  | <sup>58</sup> La | <sup>59</sup> Ce | <sup>60</sup> Pr | <sup>61</sup> Nd | <sup>62</sup> Pm | <sup>63</sup> Sm | <sup>64</sup> Eu | <sup>65</sup> Gd | <sup>66</sup> Tb | <sup>67</sup> Dy | <sup>68</sup> Ho  | <sup>69</sup> Er  | <sup>70</sup> Tm  | <sup>71</sup> Yb  | <sup>72</sup> Lu  |                  |                  |
|   | <sup>89</sup> A  | <sup>90</sup> Ac | <sup>91</sup> Th | <sup>92</sup> Pa | <sup>93</sup> U  | <sup>94</sup> Np | <sup>95</sup> Pu | <sup>96</sup> Am | <sup>97</sup> Cm | <sup>98</sup> Bk | <sup>99</sup> Cf | <sup>100</sup> Es | <sup>101</sup> Fm | <sup>102</sup> Md | <sup>103</sup> No | <sup>104</sup> Lr |                  |                  |

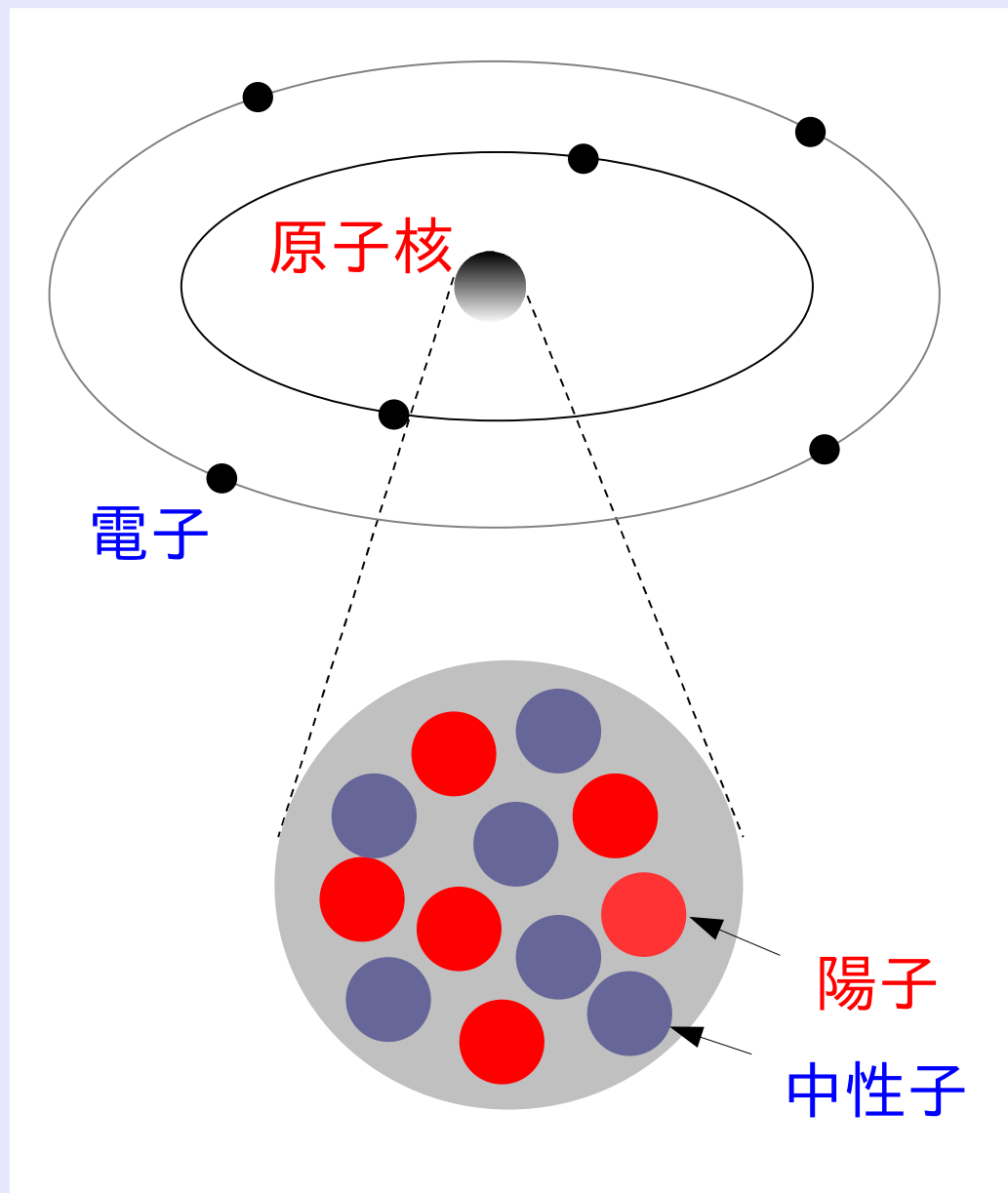
# 鉄より重い元素をつくるには？

- 原子核どうしの反応でつくられるのは鉄族元素まで。それ以上は電気的な反発力で融合できない。
- しかし、原子核と中性子なら容易に融合できる
- 中性子は不安定な粒子(→放っておくと陽子・電子に分解)  
→中性子が大量につくられる特殊な環境でのみ、鉄より重い元素が合成される(「中性子捕獲反応」)

# 原子と原子核

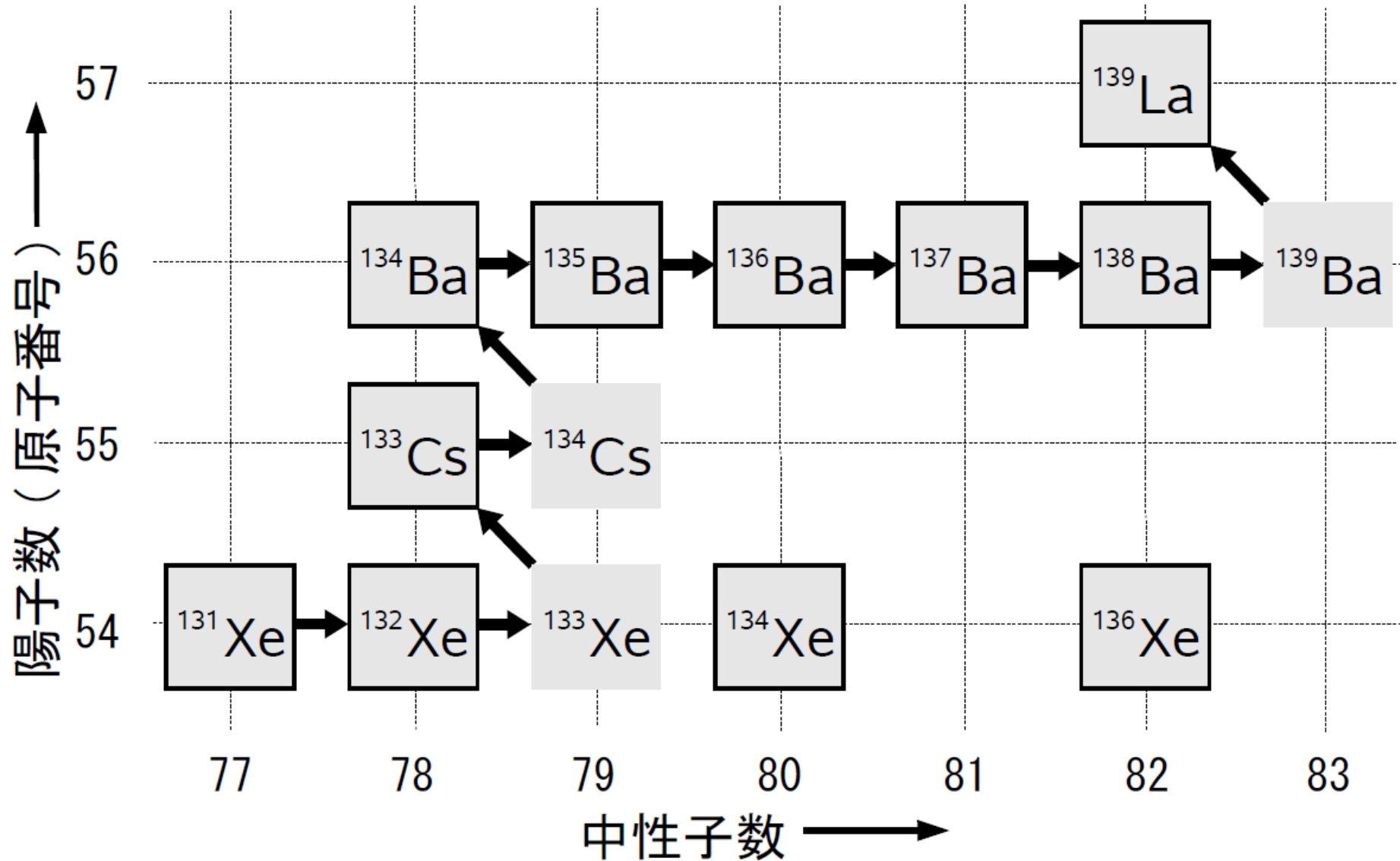
- 原子にも構造がある  
中心に小さな核(原子核)  
まわりを電子がとりまく  
電子の状態が変化するのが  
化学反応

- 原子核にも構造がある  
陽子と中性子で構成  
原子核の構成が変わるのが  
原子核反応





# 「中性子捕獲」による重元素合成



# 「中性子捕獲」による重元素合成

(1) ゆっくりと中性子を捕獲し、安定な原子核をたどって合成

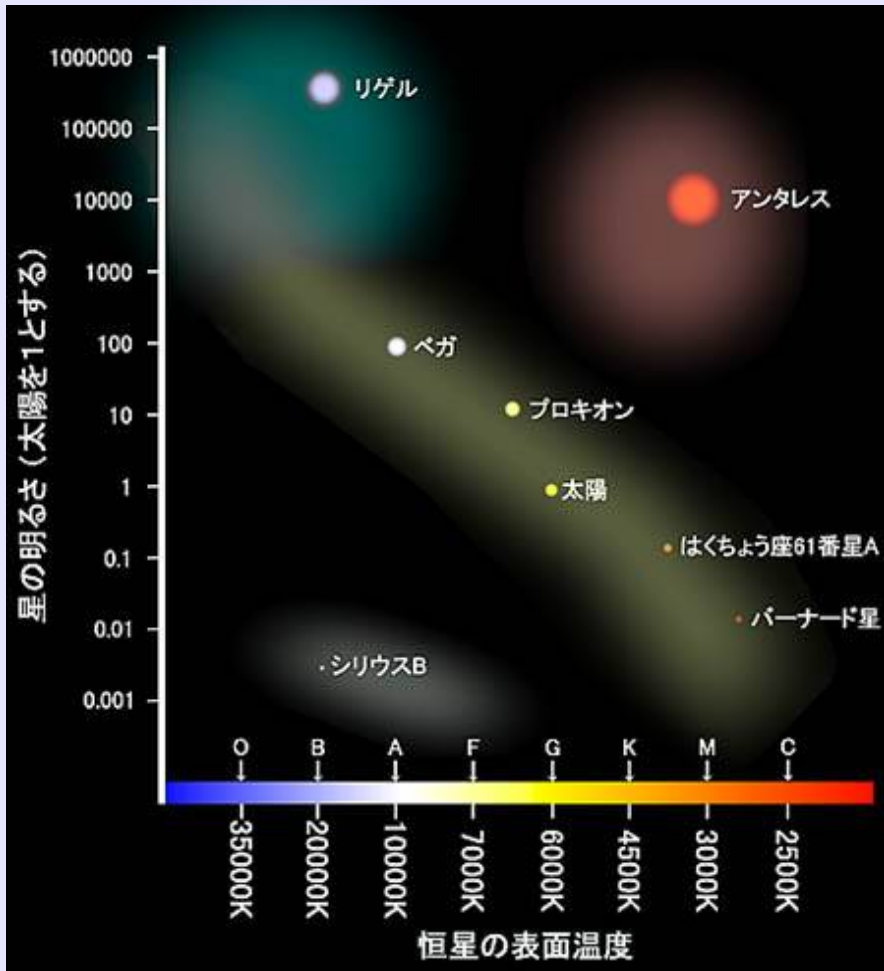
→ 進化の進んだ中質量星 (太陽より少し重い赤色巨星)  
この反応の「種」は、星が元々持っていた鉄など

(2) 短時間に大量の中性子を捕獲し、不安定原子核を合成。  
そのあとに安定原子核に変化

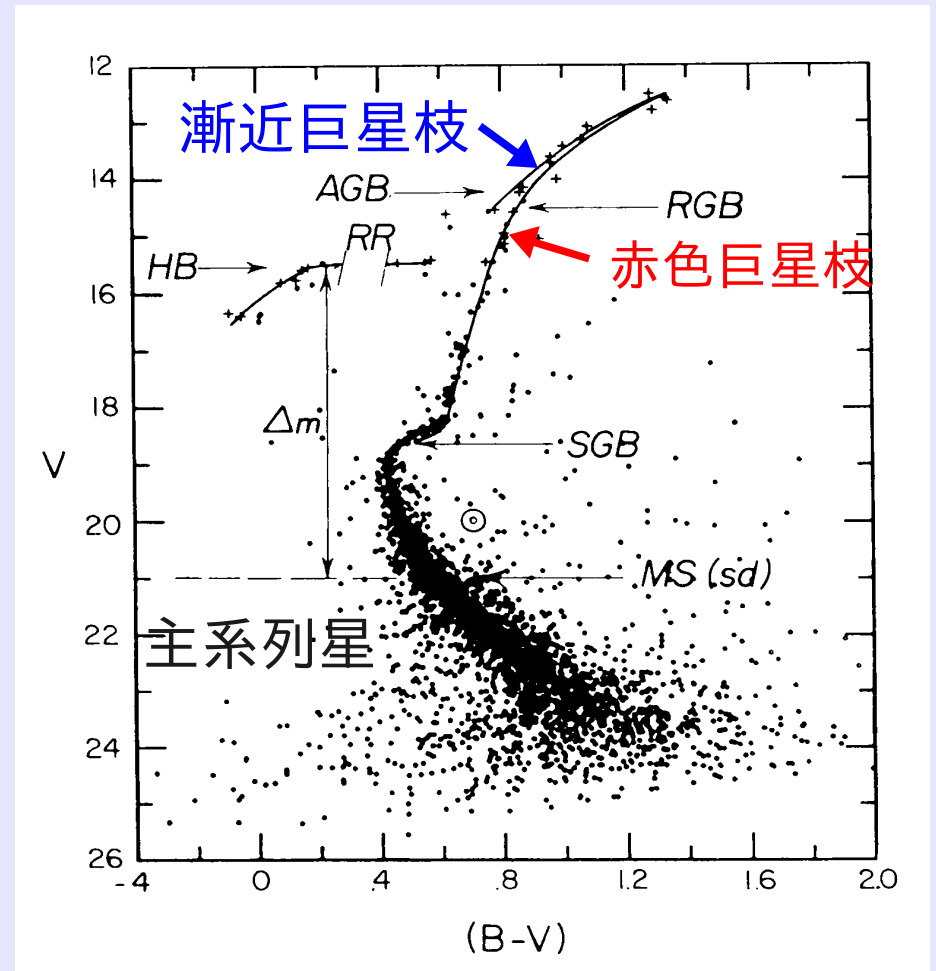
→ たぶん超新星爆発に関連して起こる

# 太陽のような軽い星の末路～ 「漸近巨星枝星」:2度目の膨張

星の温度・明るさの相関(HR図)

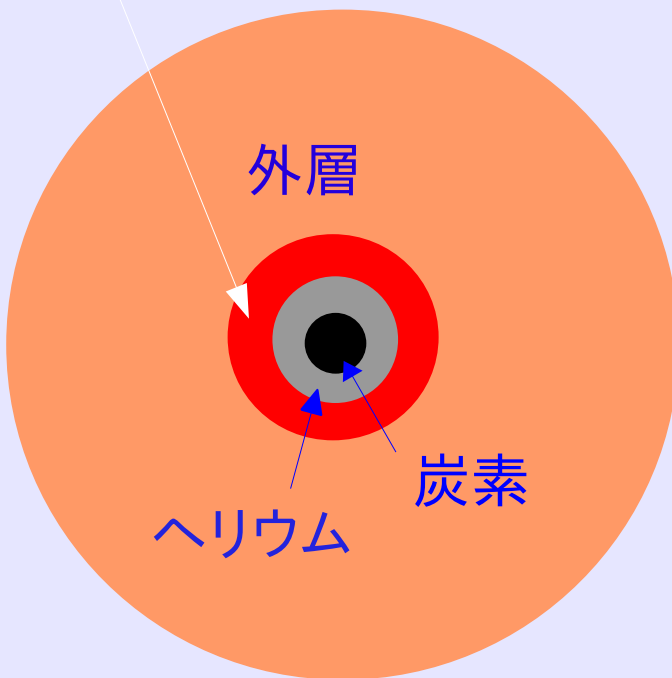


球状星団の星のHR図



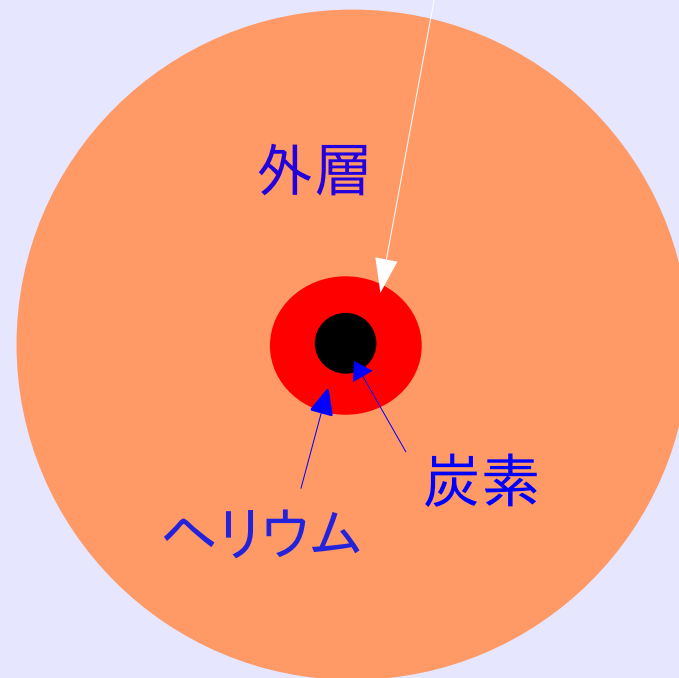
# 漸近巨星枝星 (AGB星) の内部構造

水素の殻での反応  
(ヘリウムの合成)



継続時間: 数万年

ヘリウムの殻での反応  
(炭素の合成)



継続時間: 数十年?

↔  
繰り返す

## 重い元素の起源 II

- 金、白金(プラチナ): 超新星爆発の際に瞬時に合成されたものがほとんど。
- ウラン: すべて超新星爆発の際に瞬時に合成されたもの。
- バリウム: 多くが軽い星のなかで合成されたもの。
- 鉛: 多くが軽い星のなかで合成されたとみられるが、依然不明。



# 第3回

## 銀河系内外で進化を続ける物質

- 星を分光(スペクトル)観測すれば、その(表面)組成を知ることができる。
- 物質の歴史においても、初代星の超新星爆発は重要な節目だった。
- 銀河系に生き残る古い星を分光観測することにより、初代の超新星の特徴がわかりつつある。
- 鉄より重い元素は「中性子捕獲」という反応で合成される。超新星のような爆発現象と、進化の進んだ赤色巨星でこの反応が起こると考えられている。