

I ask you to look both ways.

For the road to a knowledge of the stars leads through the atom; and important knowledge of the atom has been reached through the stars

Sir Arthur Eddington

(1882-1944)

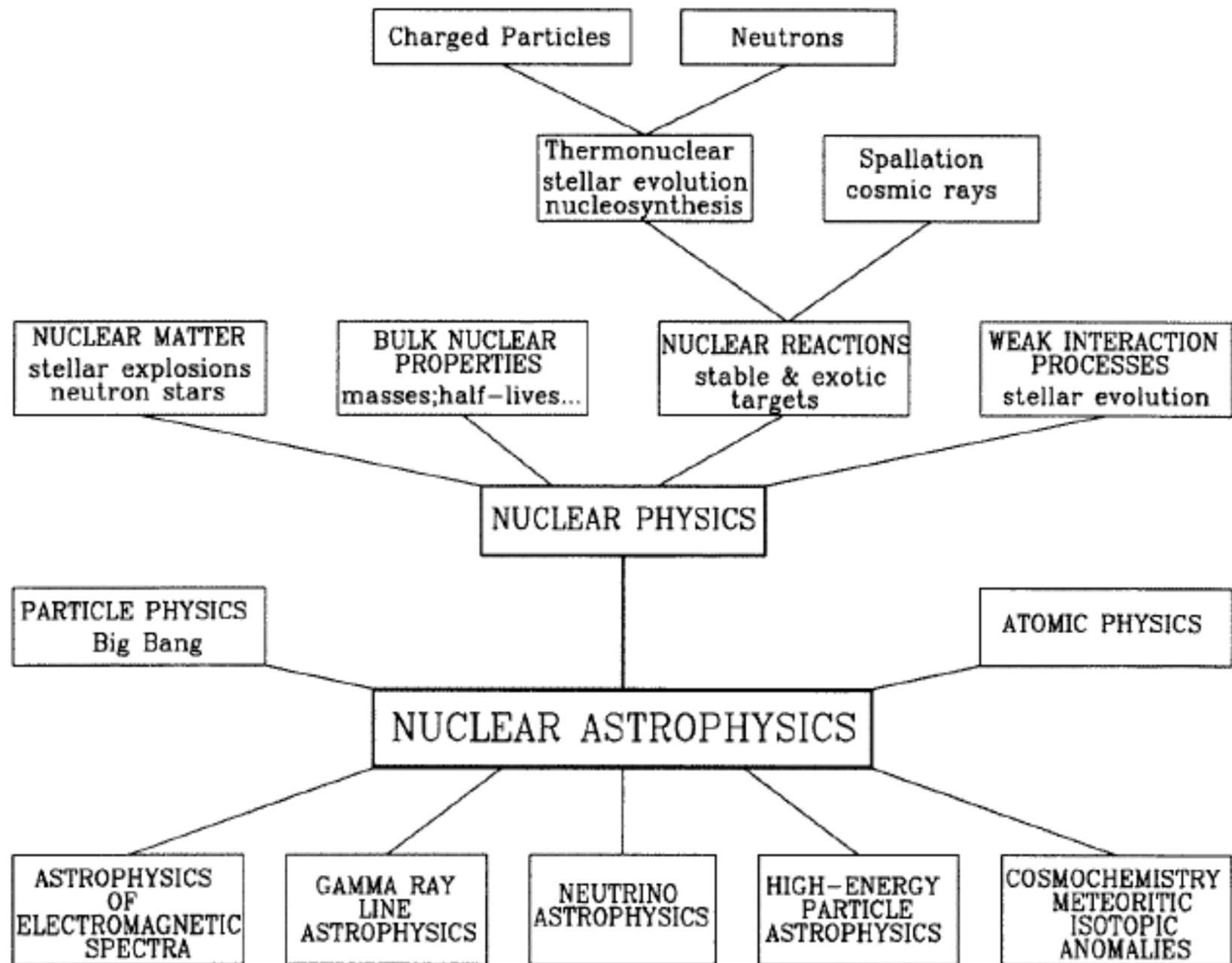
Образование химических элементов в природе и ядерные реакции в звездах.

“Нуклеосинтез химических элементов”

1. Ядерная астрофизика
2. Карта ядер
3. Определения и классификация процессов нуклеосинтеза
4. Распространенность элементов
5. Солнце и источник энергии звезд
6. Нуклеосинтез в звездах
7. Нуклеосинтез под действием нейтронов

1. Ядерная астрофизика

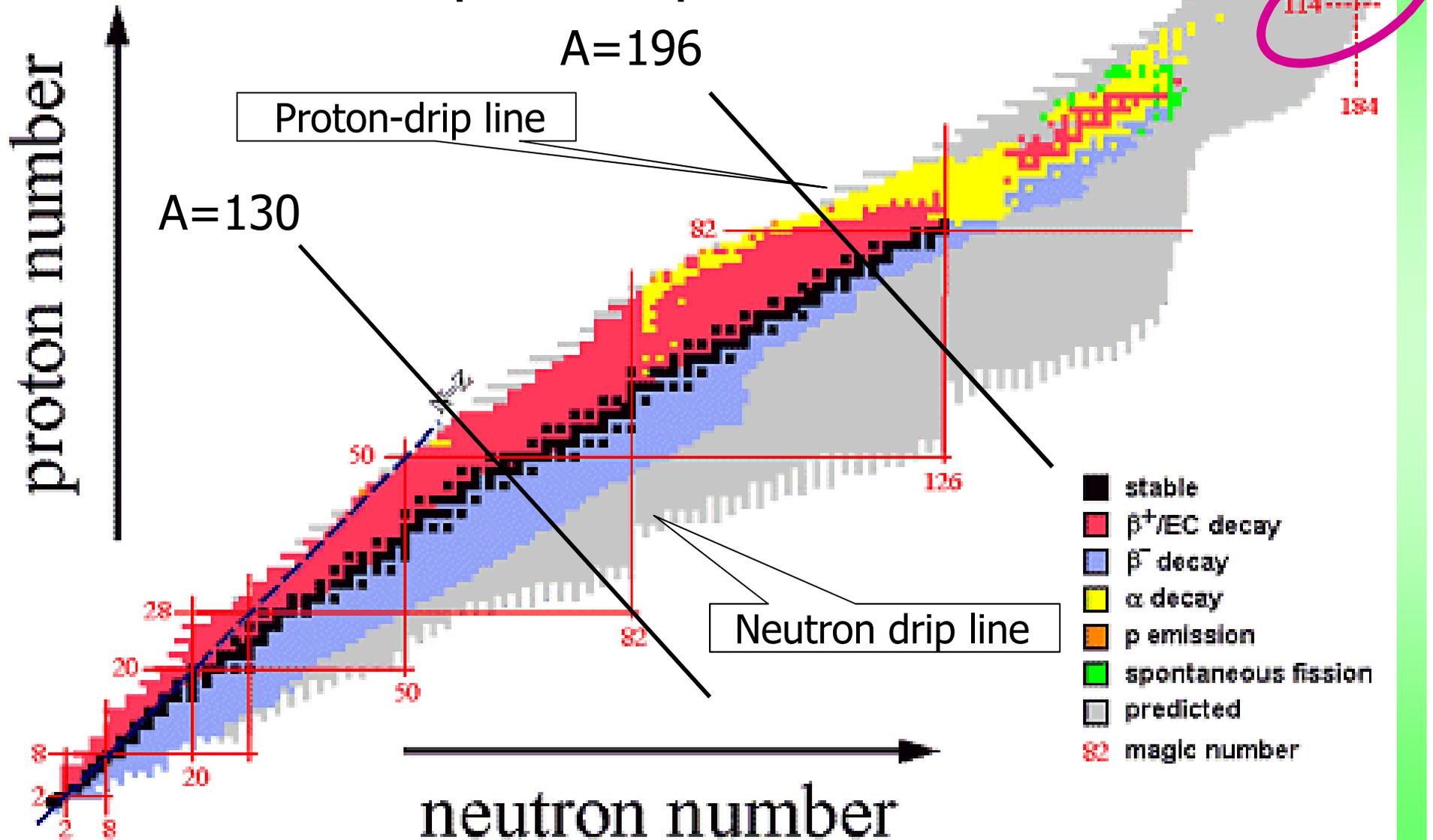
Я.А. изучает роль процессов микромира в космических явлениях
Предметом Я.а. явл. ядерные процессы в звездах и др. космич. объектах,
в т.ч. Термоядерные реакции и радиоактивный распад;
- процессы испускания и поглощения нейтрино
нейтринная астрофизика и астрофизика космических лучей
Я.а. показывает тесную взаимосвязь физики микро- и макромира
Основа Я.А. – экспериментальное изучение ядерных процессов, структуры
ядра, элементарных частиц и их взаимодействиях
с другой стороны – проверка я.ф. теорий в процессе моделирования
астро-физических явлений
Реакции с заряженными частицами и нейтронами
Скорости термоядерных реакций, реакции синтеза и распада
Применение достижений ядерной физики к изучению космич. явлений
позволило построить качественно согласующиеся с наблюдениями
теорию образования, строения и эволюции звезд

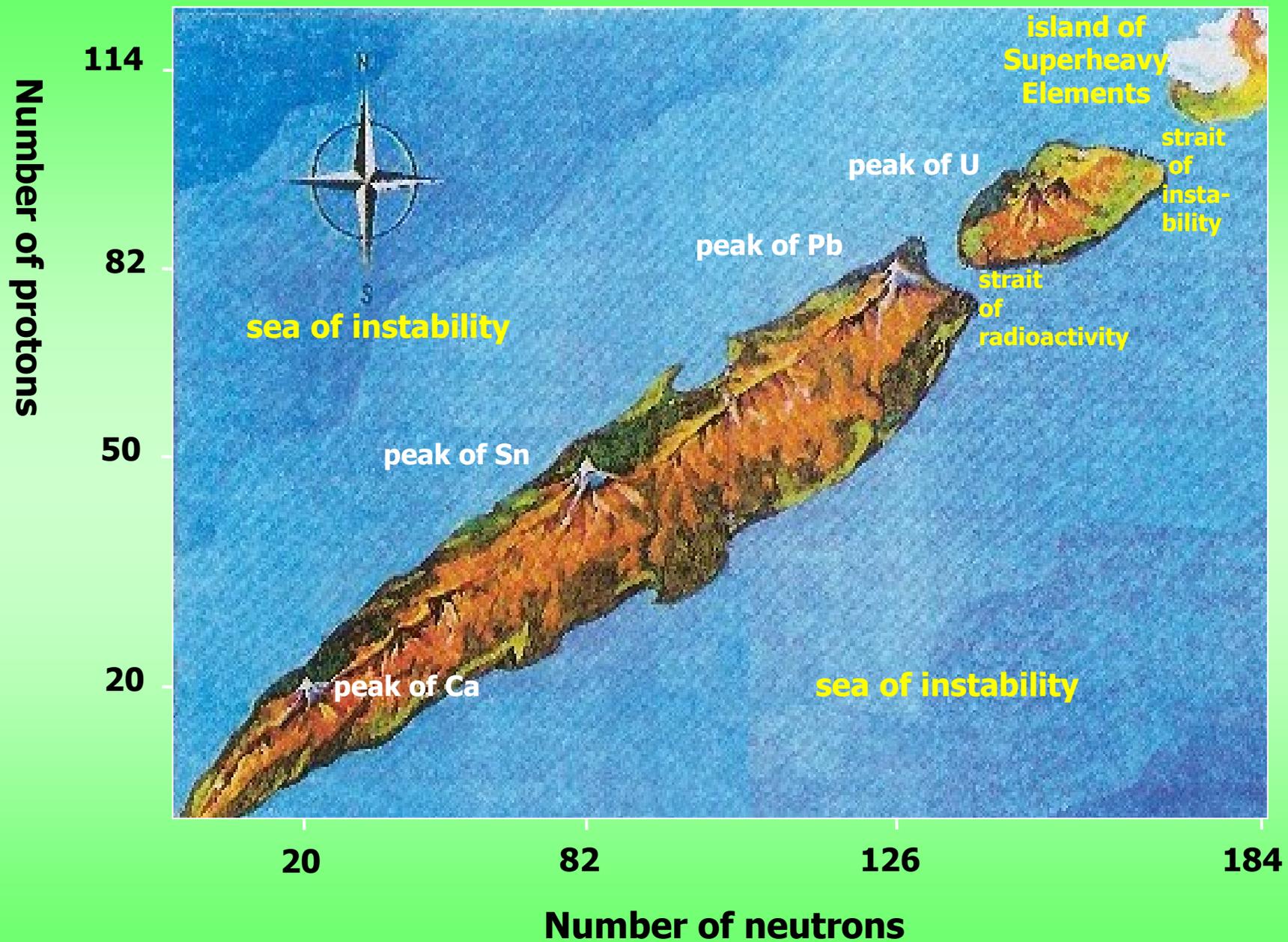


M.Arnould, K.Takahashi, Nuclear astrophysics

2. Карта ядер

$A=196$





G.N. Flerov, A.S. Ilyinov (1982)

3. определения

Карта ядер: нуклиды, Изотопы (Z),
Изотоны (N) Изобары (A)

Границы нейтронной и протонной стабильности

Энергия связи ядер и дефект масс

$$\Delta W_{\text{я}} = [Zm_p + (A-Z)m_n - M_{\text{я}}]$$

Энергии связи нейтронов

и протонов S_n S_p

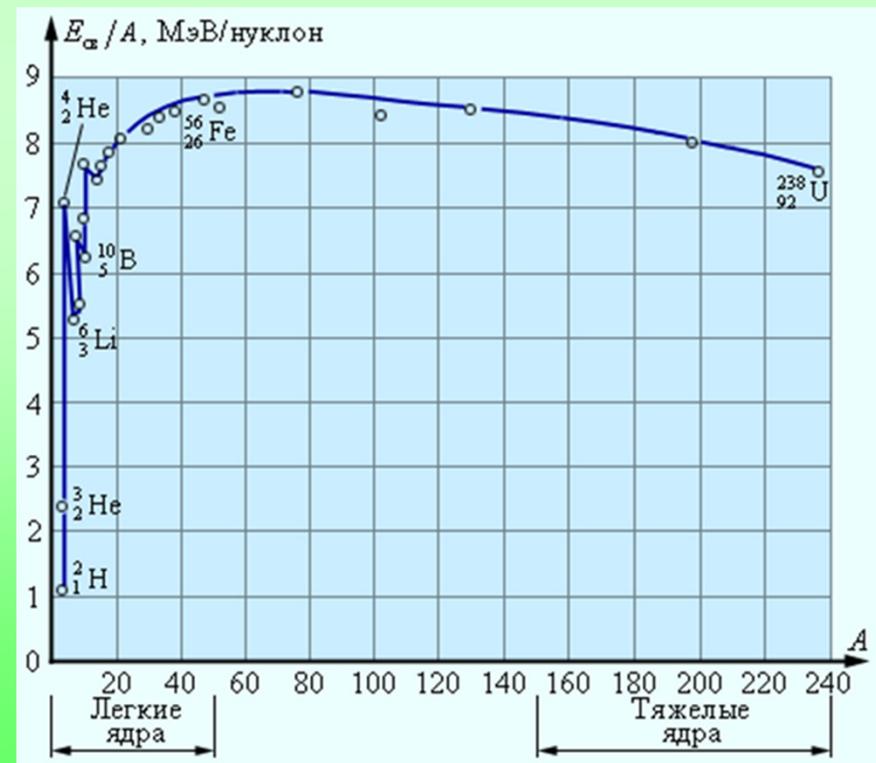
Характеристики ядер:

Время жизни, P_{ik}

Сечение взаимодействия,

Структура уровней;

распространенность



Сечения реакций при низких энергиях

$$\sigma(E) = \pi\lambda^2 \times P \times S,$$

$P(E) \sim \exp(-(E_G/E)^{0.5})$; проницаемость Гамова

λ — длина волны де Бройля/ 2π ,

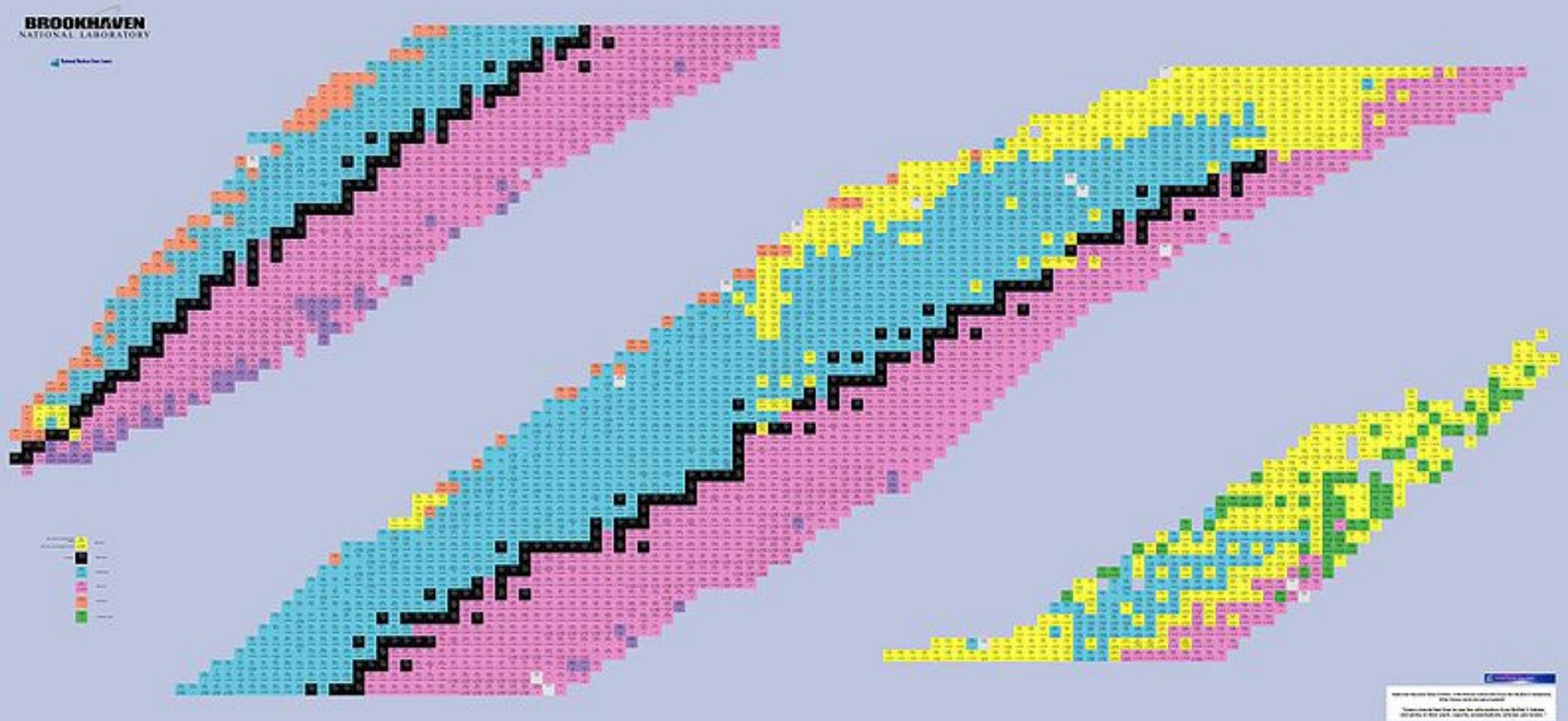
энергия Гамова $E_G \sim Z_0^2/Z_1^2 A$ (МэВ);

а.м. $S(E) = E\sigma(E) \exp((E_G/E)^{0.5})$

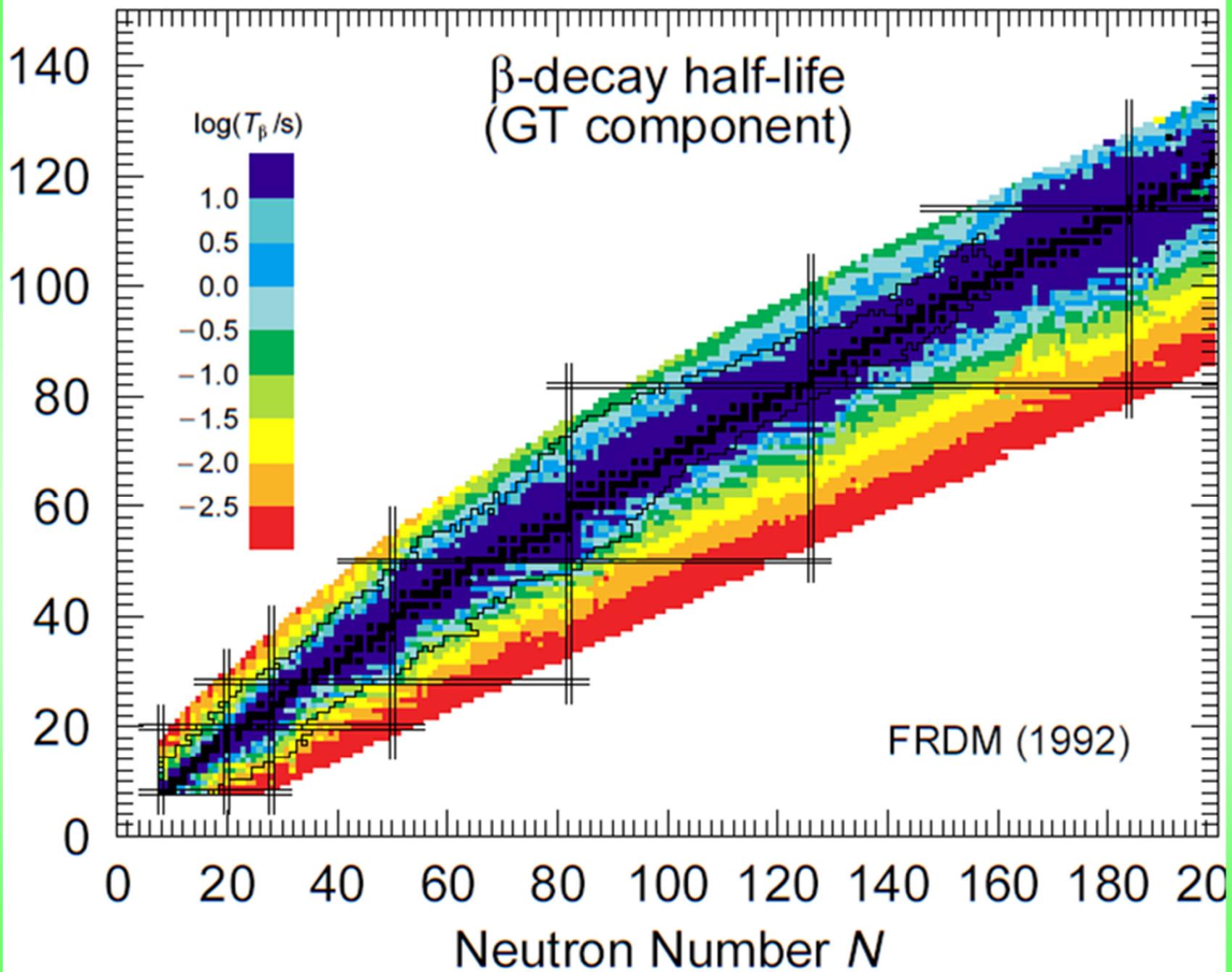
Скорость реакции $\sim N \langle \sigma v \rangle \sim \rho N_A Y \langle \sigma v \rangle$

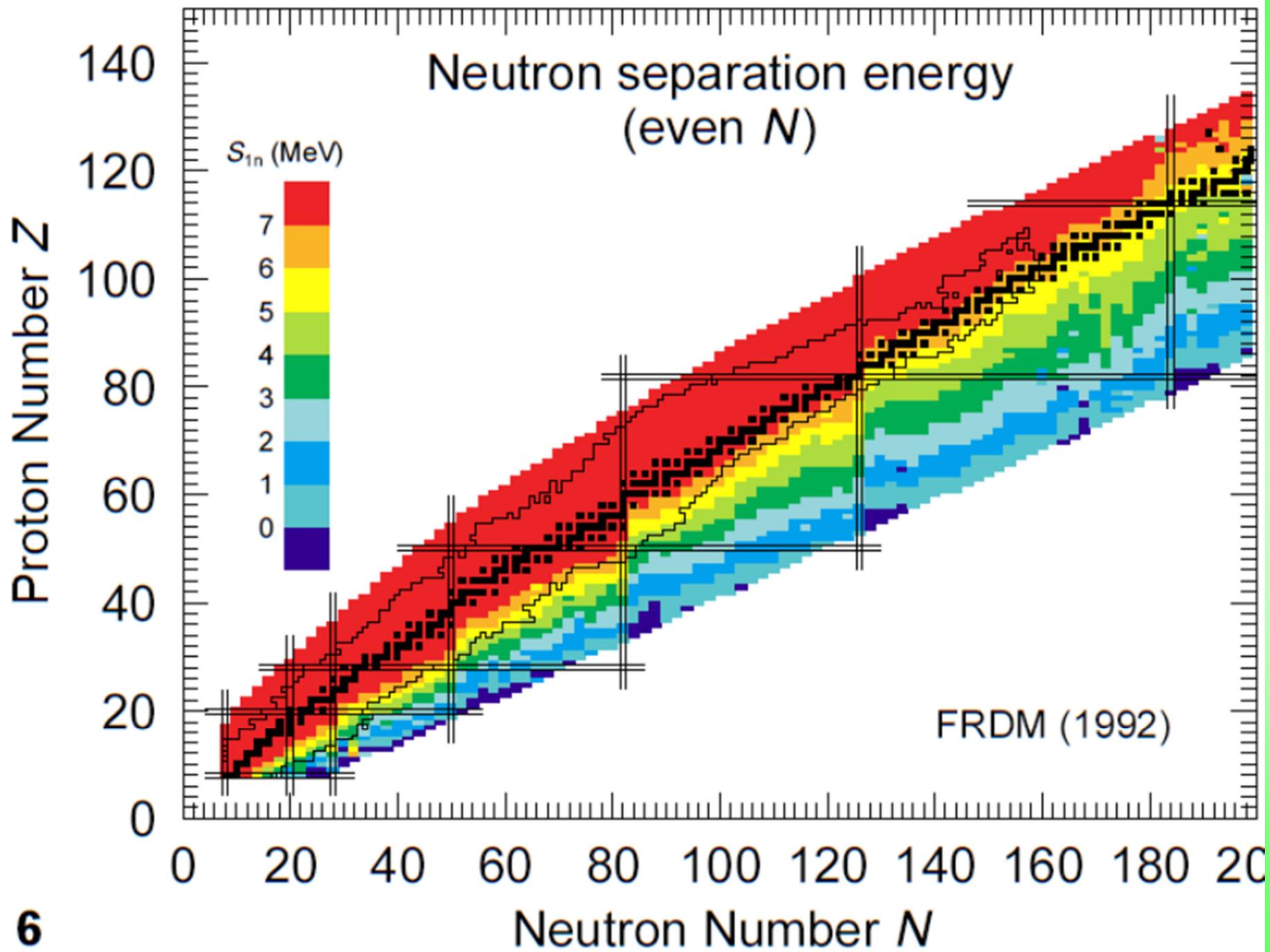
$$\sim N \int v \sigma f(v) dv$$

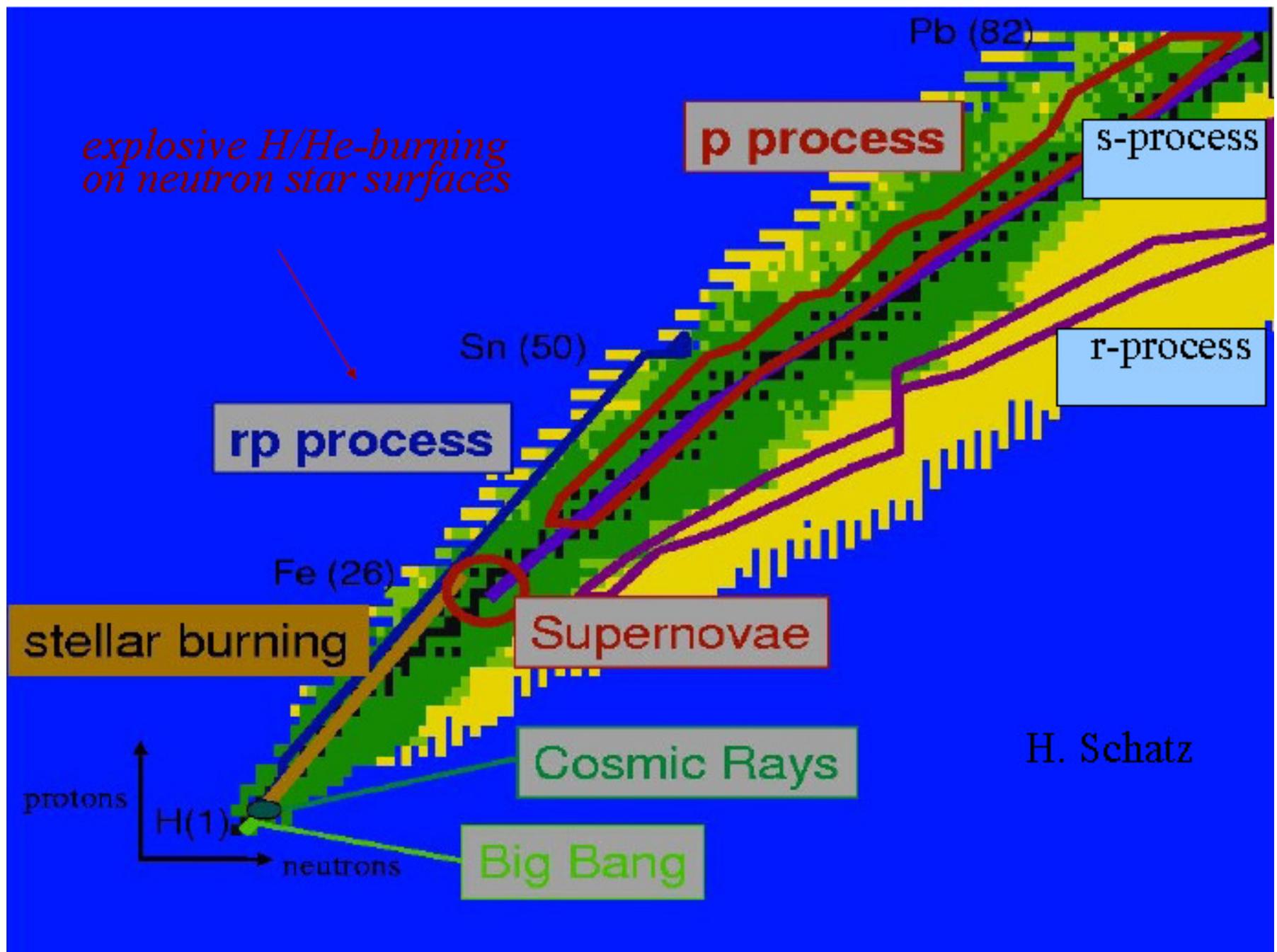
$$f_{\max}(E') = \frac{2\pi}{(\pi kT)^{3/2}} \sqrt{E'} e^{-E'/kT}$$

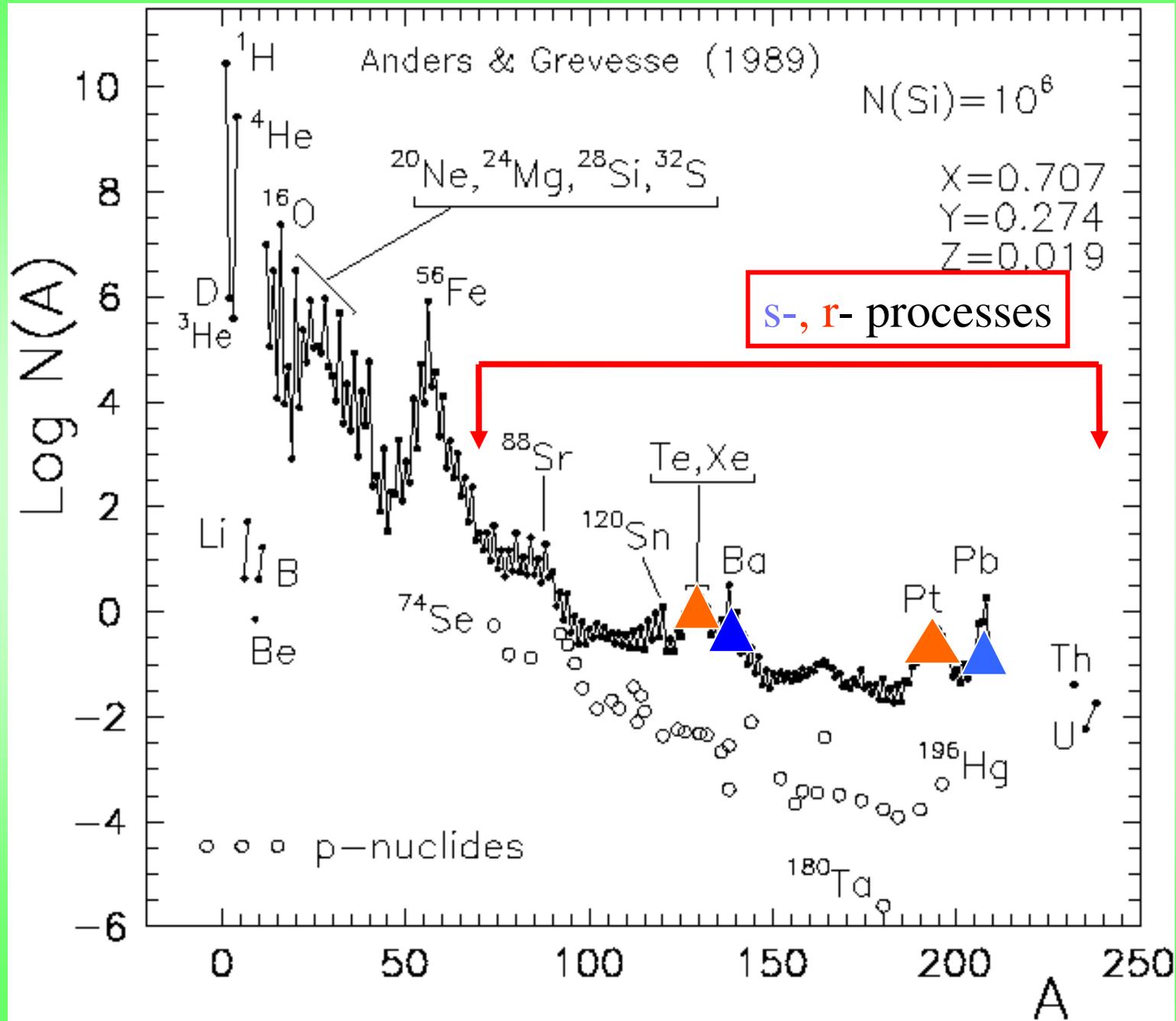


89 стабильных, 900 с $T_{1/2} > 1$ час
Более 300 экспериментально определено









4.

образование химических элементов от гелия до урана

Дозвездный нуклеосинтез

Звездный нуклеосинтез

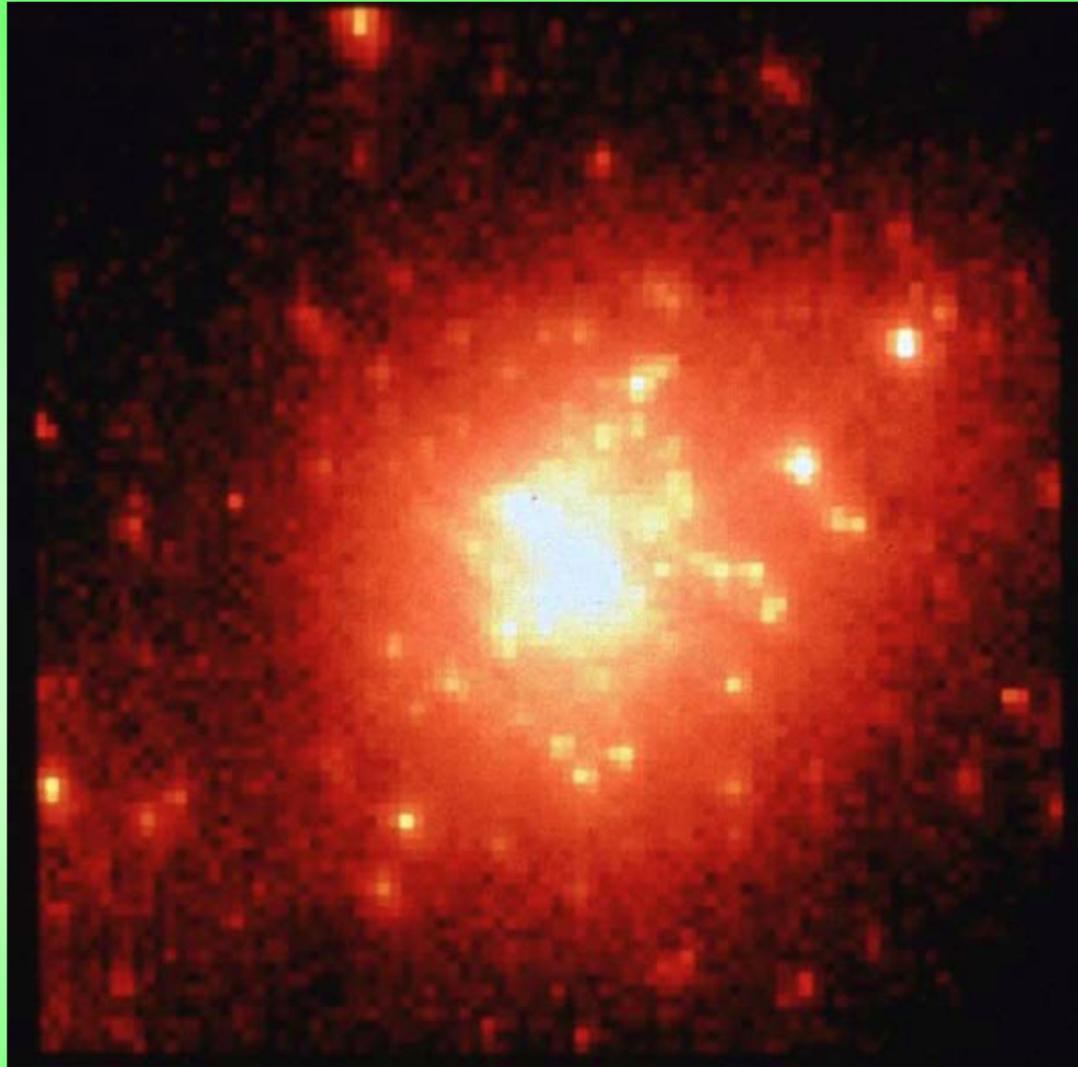
На Равновесных стадиях эволюции звезд -
образование элементов до "Fe":

p-процесс и CNO-цикл, горение C, O, Si

s-процесс

взрывной нуклеосинтез: "сверхновые"

Образование звезд



5. Солнце, основные характеристики и Источник энергии

Возраст $4.5 \cdot 10^9$ лет

Масса $M_c = 2 \cdot 10^{33}$ г

Радиус $R_c = 7 \cdot 10^{10}$ см

Светимость $L_c = 4 \cdot 10^{33}$ эрг/с

Температура $E_{\text{пов}} = 6000\text{K}$

$T_c = 1.3 \cdot 10^7\text{K}$

Средняя плотность $\rho = 1.5$ г/см³

плотность в центре $\rho_c = 1.5$ г/см³

удельное энерговыделение $q_c = L_c/M_c = 2$ эрг/с·г

$G = 6.67 \cdot 10^{-8}$ см³/гс²

Источник энергии

5. Солнце. Источник энергии

История:

Мейер – падение метеоритов

Гельмгольц и Кельвин: гравитационное сжатие

$$E_{\text{гр}} = GM_c/R_c \sim 2 \cdot 10^{15} \text{ эрг/г}$$

$$\Rightarrow t = E_{\text{гр}}/q_c \sim 3 \cdot 10^7 \text{ лет} \quad \dots$$

но важно для первичного разогрева

Теорема вириала: $2E_{\text{кин}} + E_{\text{пот}} = 0 \quad \dots \quad \dots$

Эддингтон - аннигиляция

$$E_{\text{ан}} = M_c c^2 / M_c \sim 9 \cdot 10^{20} \text{ эрг/г}; t = E_{\text{ан}}/q = \underline{1.5 \cdot 10^{15} \text{ лет}}$$

Джинс – альфа-распад - роль ничтожна

Аткинсон, Гамов, Вейцзеккер, Бете – термояд.р.

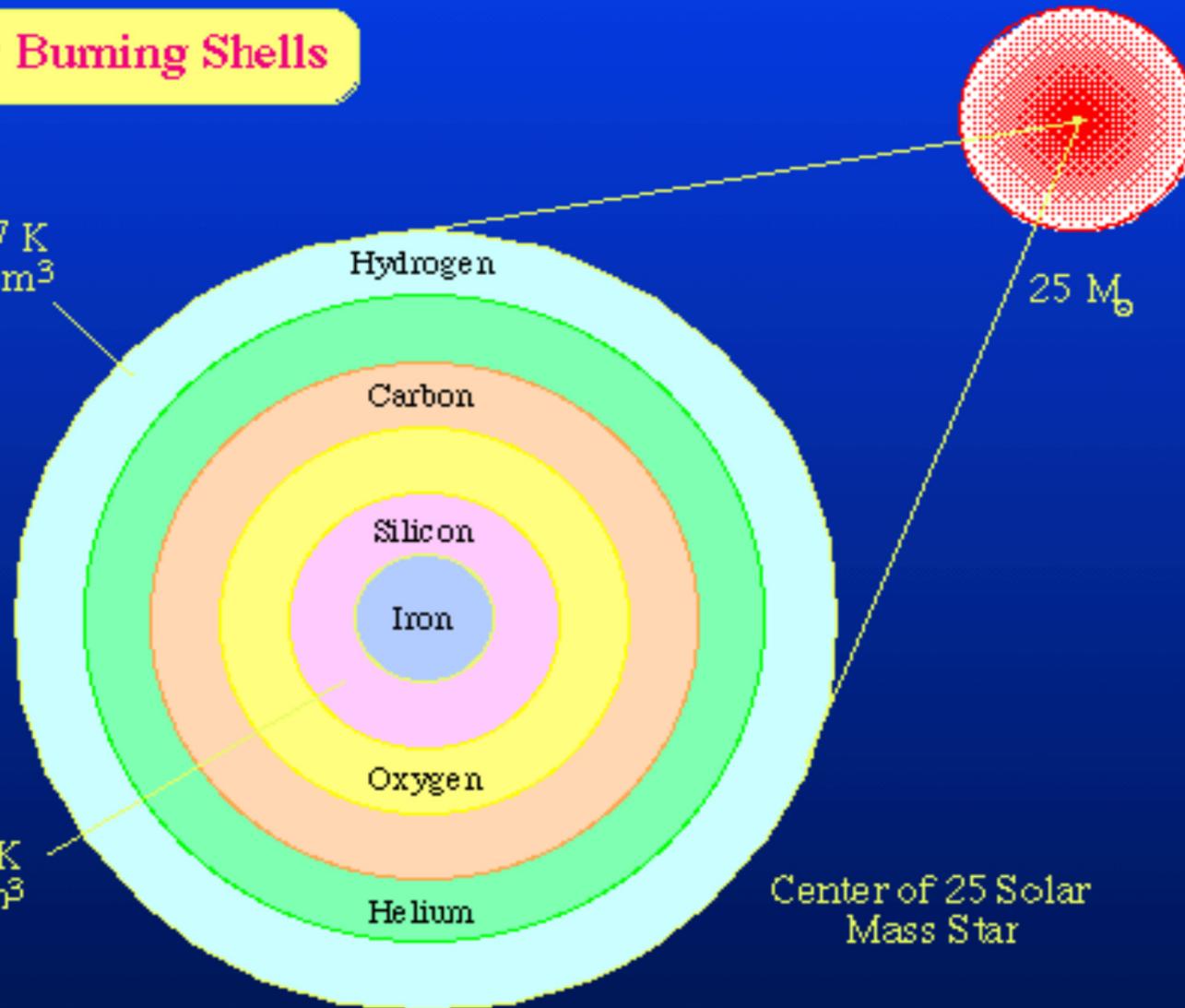
$$t \sim 10^{11} \text{ лет}$$

6. Равновесный и взрывной нуклеосинтез

Stellar Burning Shells

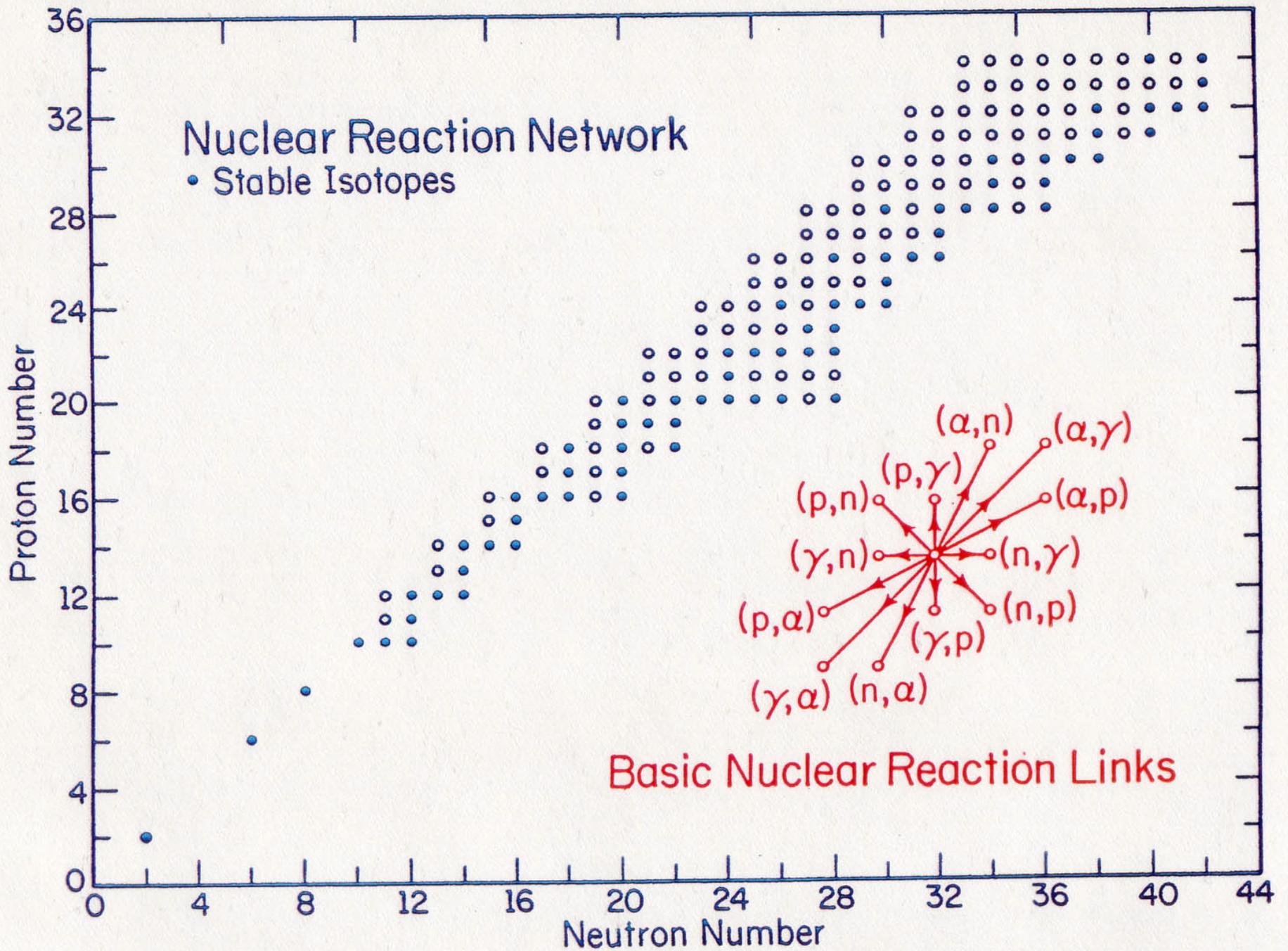
$$T = 2 \times 10^7 \text{ K}$$
$$\rho = 10^2 \text{ g/cm}^3$$

$$T = 4 \times 10^9 \text{ K}$$
$$\rho = 10^7 \text{ g/cm}^3$$

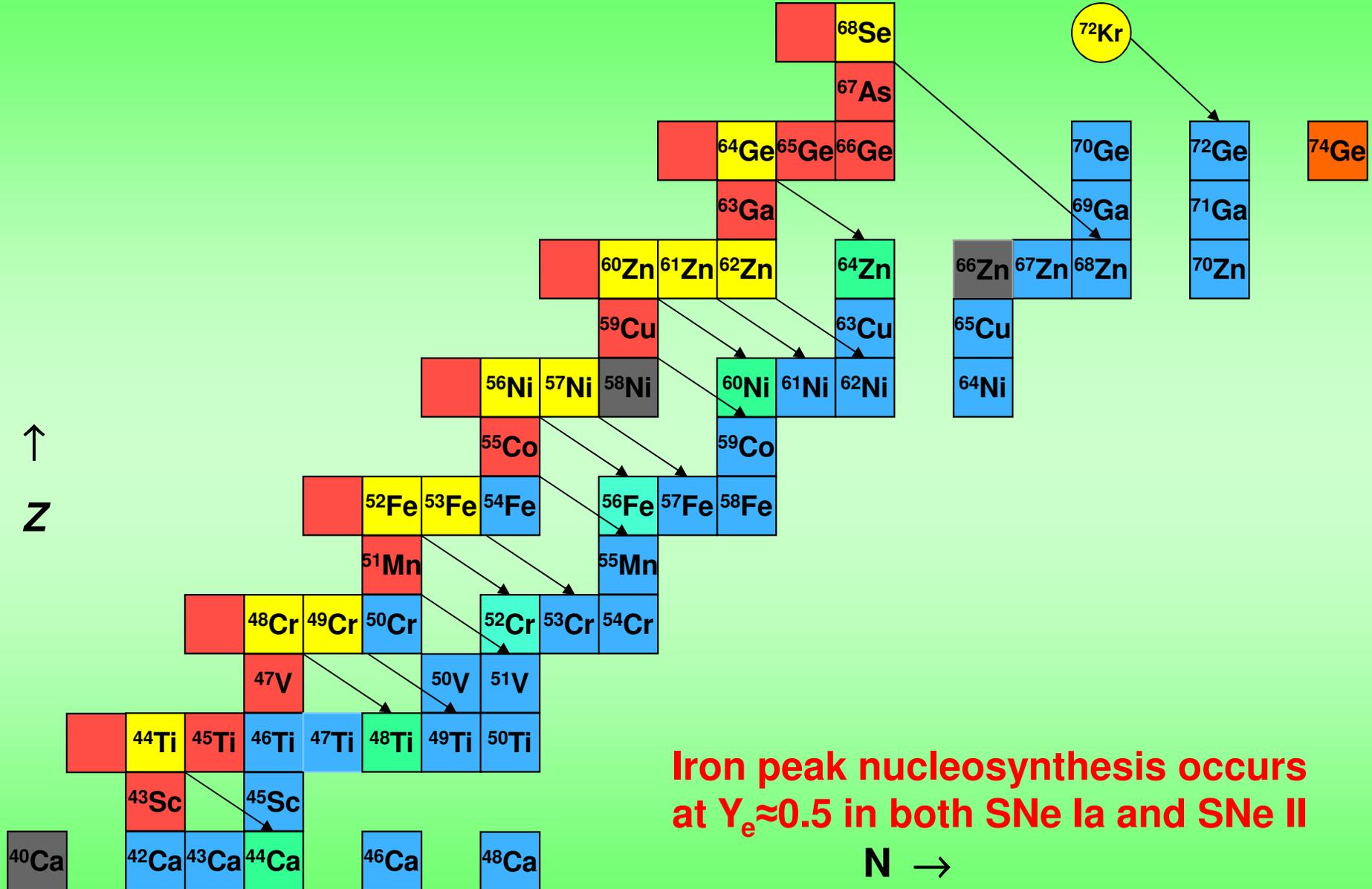


crab



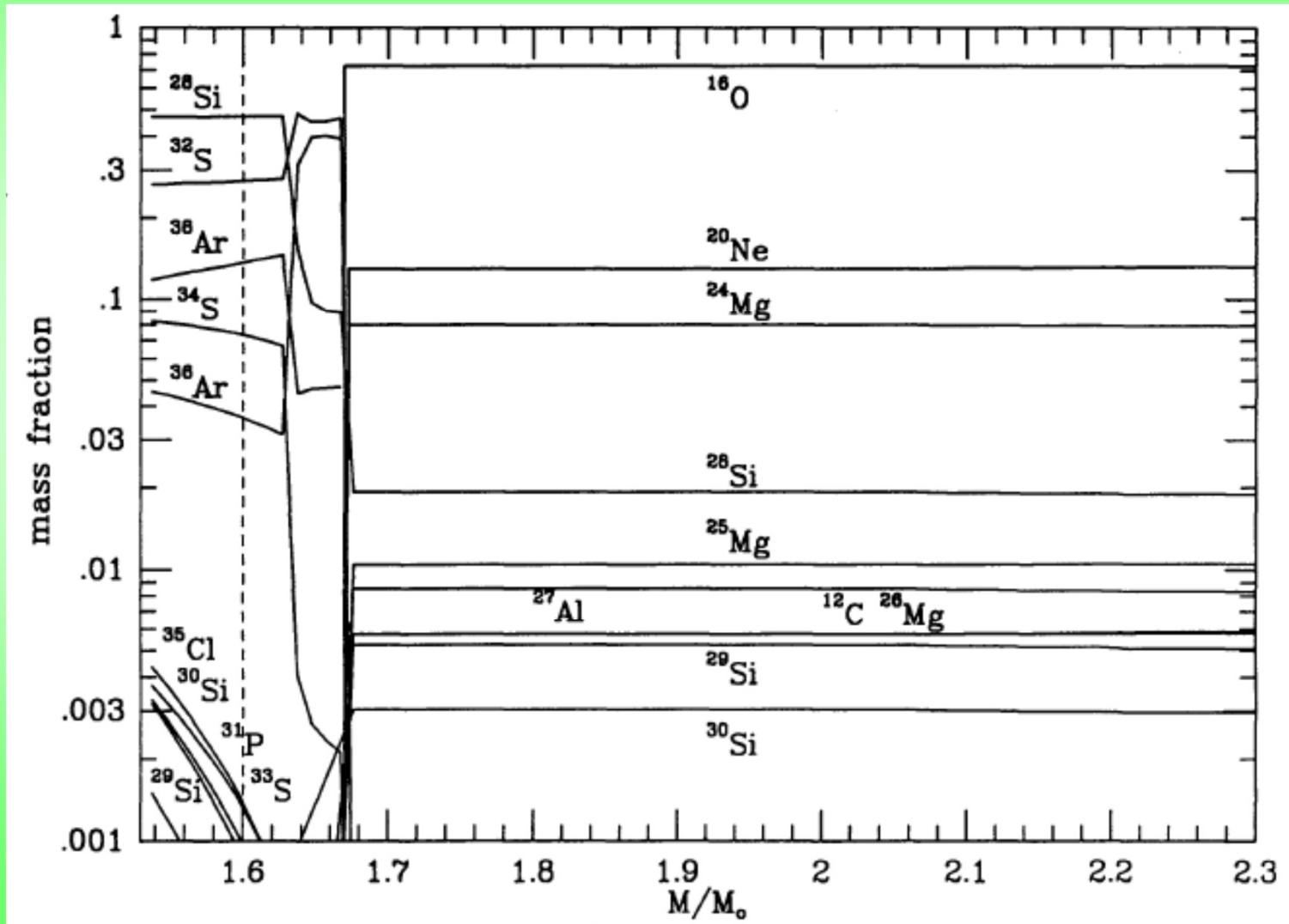


Explosive Nucleosynthesis of Fe-Peak Nuclei

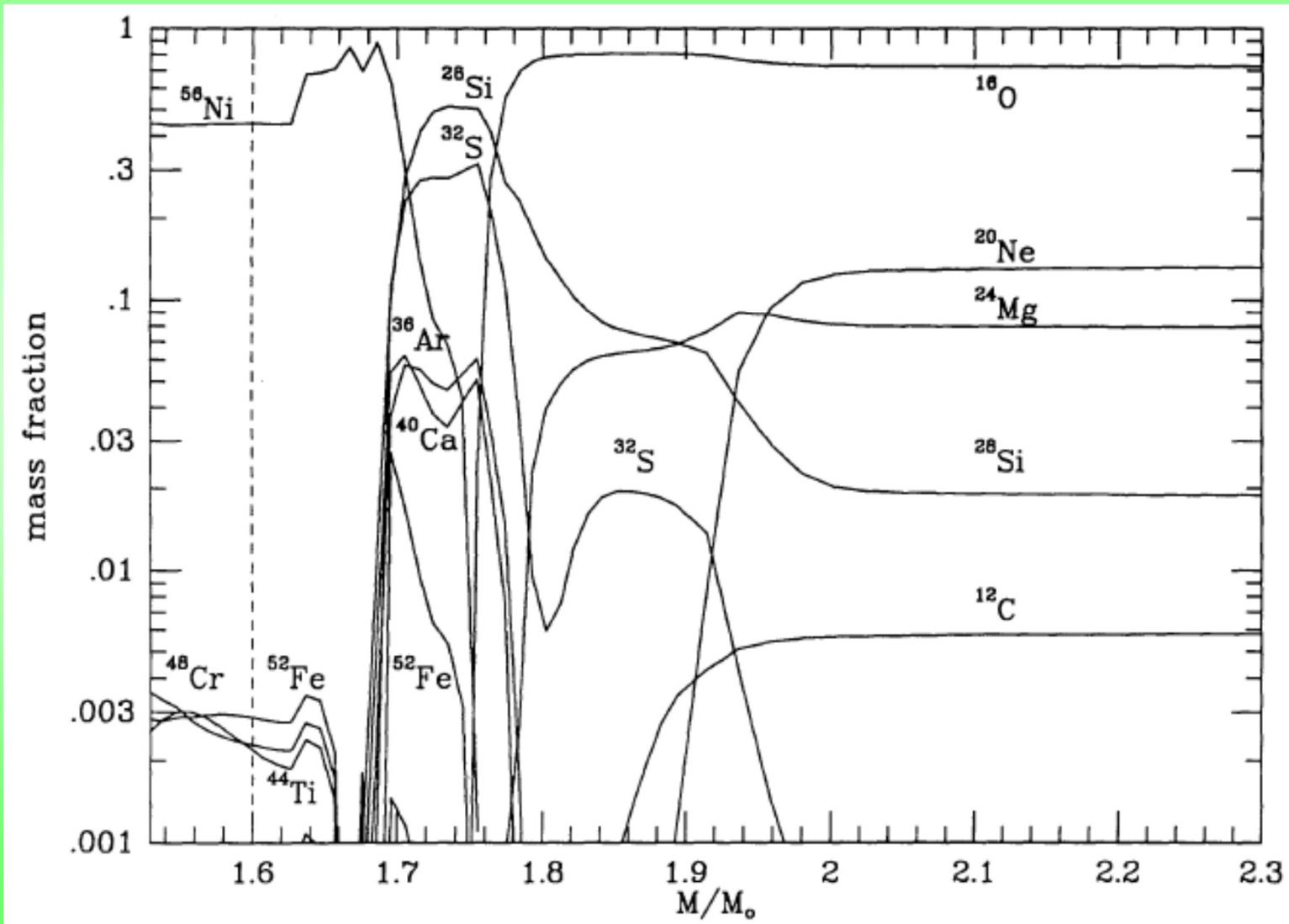


Iron peak nucleosynthesis occurs at $Y_e \approx 0.5$ in both SNe Ia and SNe II

До ударной волны



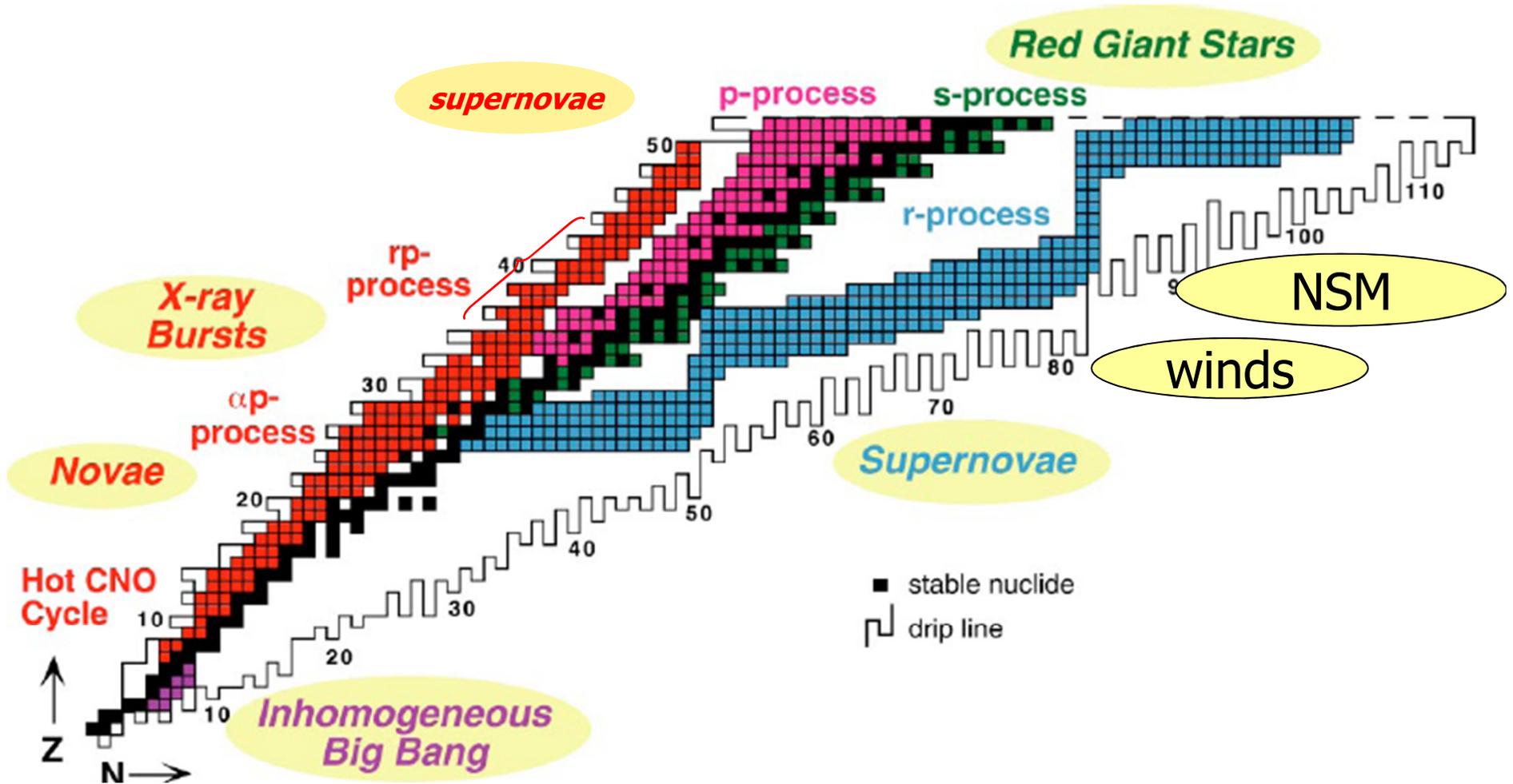
После ударной волны

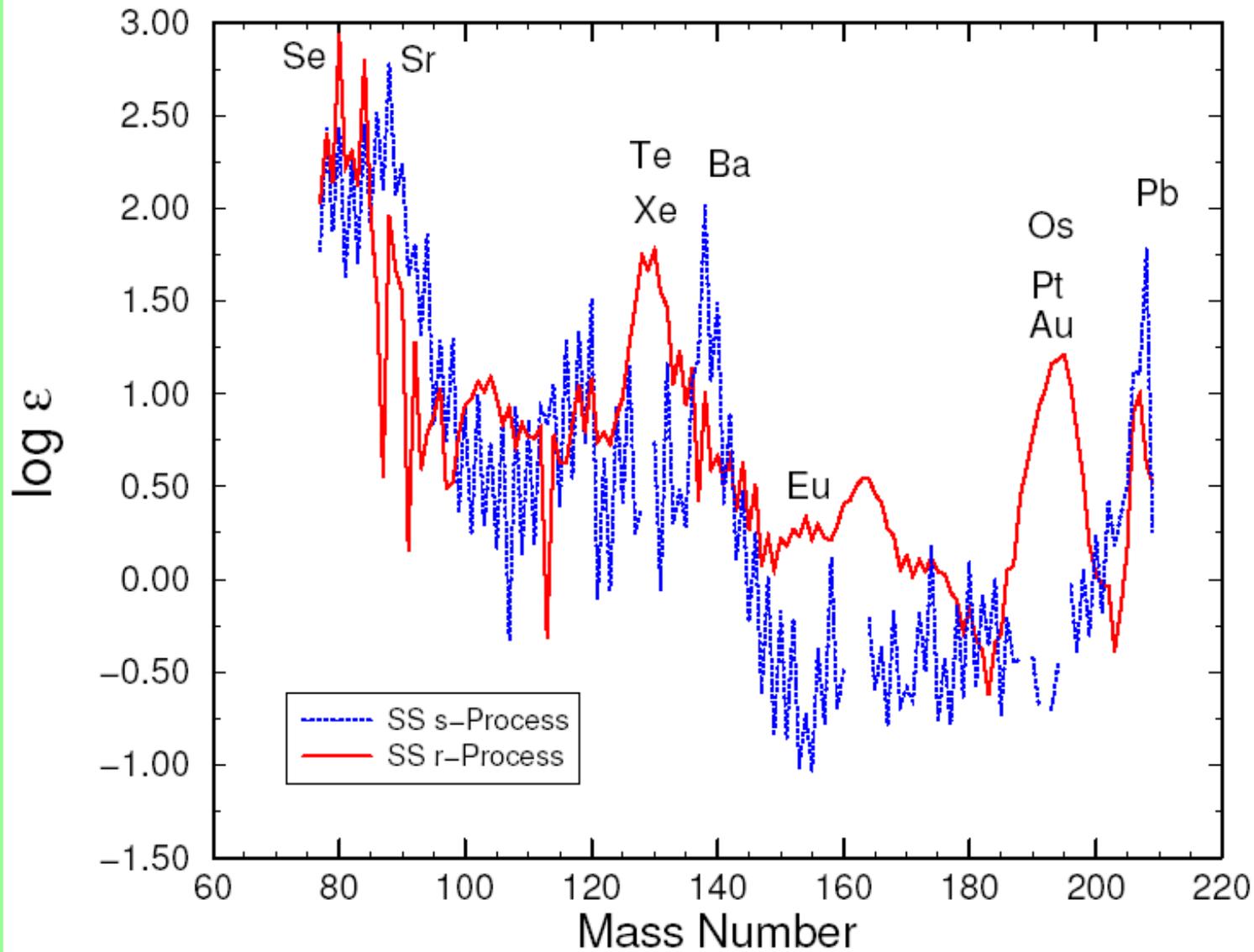


7. “Нуклеосинтез тяжелых элементов” под действием нейтронов: s- и r-процессы;

1. Карта ядер: область протекания нуклеосинтеза
2. образование новых элементов в реакциях с нейтронами;
3. S- и r- процессы
4. Бета-распад
5. Точка равновесия (WPA)
6. 2 предельных случая - различие
7. точное решение
8. Моделирование WPA, steady flow, network
9. Астрофизические объекты

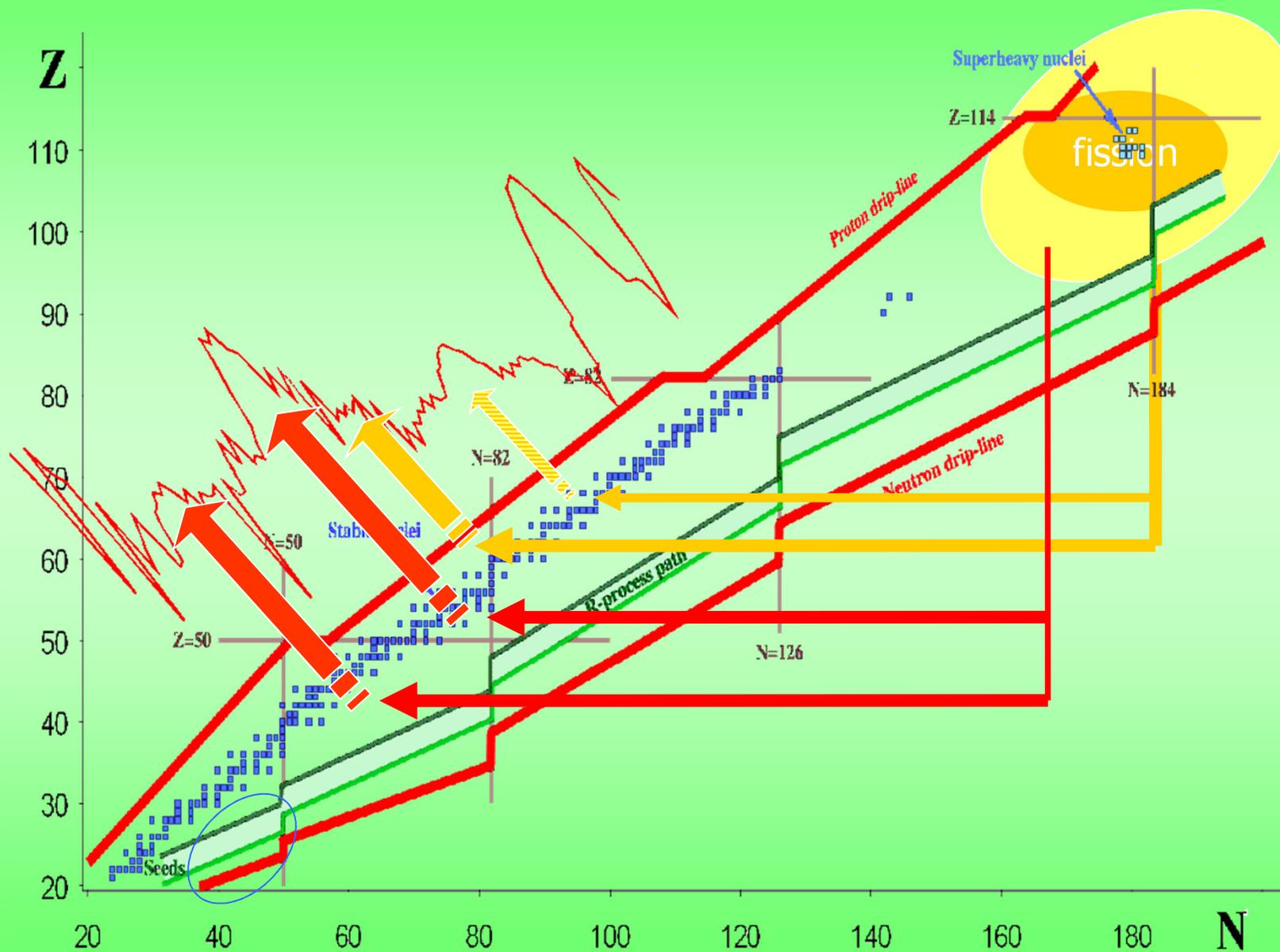
Nucleosynthesis in stars



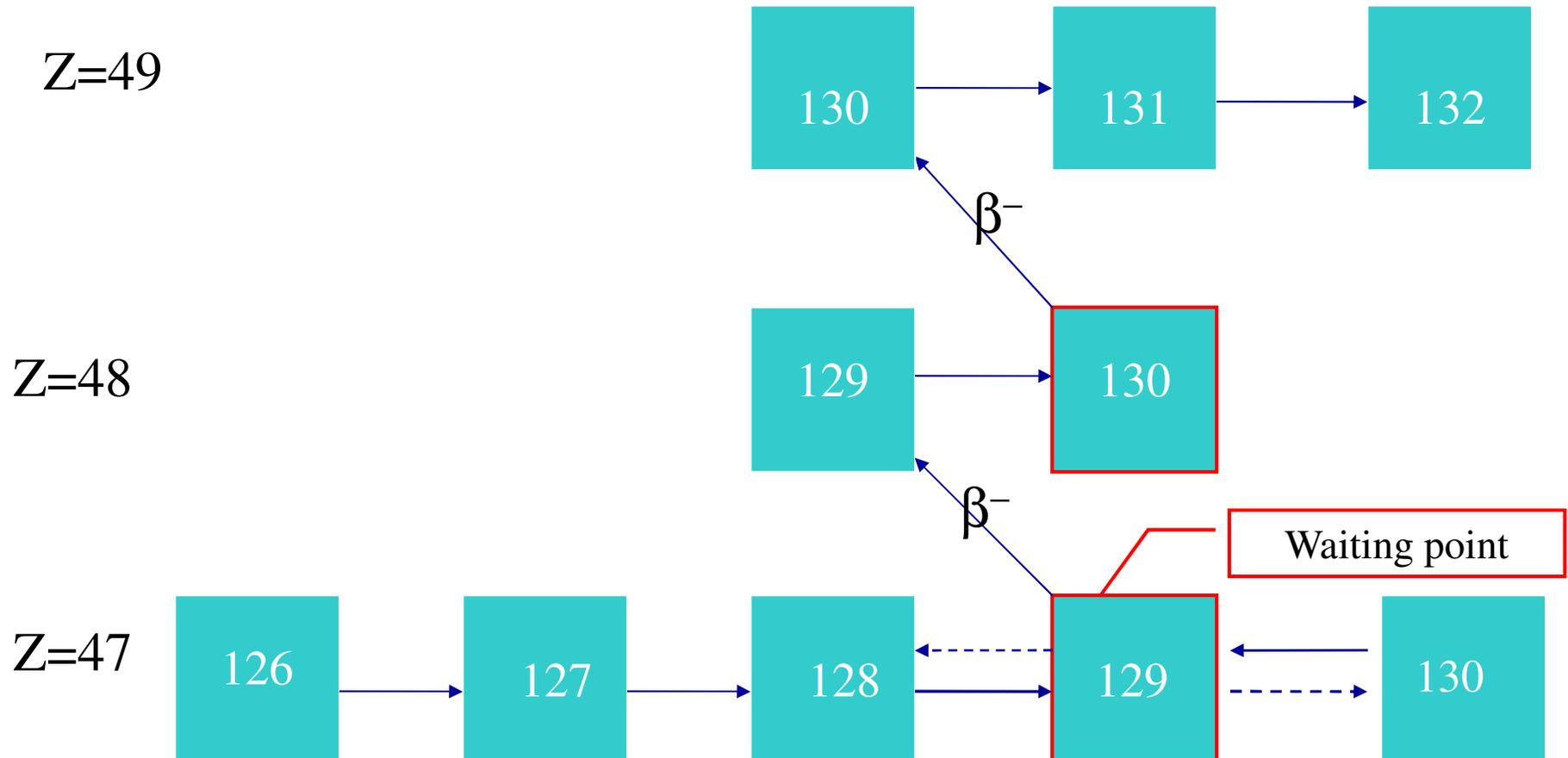


Käppeler, F. 1999, Prog. Part. Nucl. Phys. 43, 419

R-процесс: начальный состав; источник нейтронов; окончание?



нуклеосинтез в реакциях с нейтронами ($T_9 < 2$):



r-процесс: $\lambda_{n\gamma} \gg \lambda_{\beta}$
 $n_n > 10^{22}$

s-процесс: $\lambda_{n\gamma} \ll \lambda_{\beta}$
 $n_n < 10^{12}$

Продолжение 03.04.2013:

Юдин Андрей Викторович

- 1 Фаулер, УФН - 1985, т. 145
- 2 Имшенник, Надёжин. УФН - 1988 т. 156
- 3 Гинзбург В.Л. УФН. 1996 г. Том 166, № 2. С. 169-183.
- 4 Крамаровский, Чечев УФН - 199х
- 5 Ленг. Астрофизические формулы. Мир, 1978
- 6 Лучков, Юдин - ядерная астрофизика, МИФИ:1980
- 7 Чечев, Крамаровский. 1987 Синтез элементов во вселенной
- 8 Вайнберг, 1981, М.Мир. - 3'
- 9 Ядерная астрофизика. – сб. статей под ред. Барнса
10. Ишханов Б.С., Капитонов И.М., Тутынь И.А.. Нуклеосинтез во Вселенной. - М., МГУ, 1999.
11. Сивухин Д.В. Т. V. Ат. и ядерная физика. - М.: 2002.
12. Широков Ю.М., Юдин Н.П. Ядерная физика. – М.1980 г.,