

Кривая роста. Химический состав звезд

Определение химического состава

1. Понятие «химический состав»
2. Классический метод кривых роста
3. Дифференциальный метод
4. Усовершенствованный метод кривых роста (по моделям)
5. Синтетический метод
6. Итоги определения химического состава

Понятие

«химический состав звезд»

- По весу: берется 1 грамм вещества

$$M_{\text{элемента}} / M_{\text{водорода}}$$

- По числу атомов: берется 1 кубический см

$$N_{\text{элемента}} / N_{\text{водорода}}$$

Обычно используют значение

$$\varepsilon = \log (N_{\text{элемента}} / N_{\text{водорода}}) + 12$$

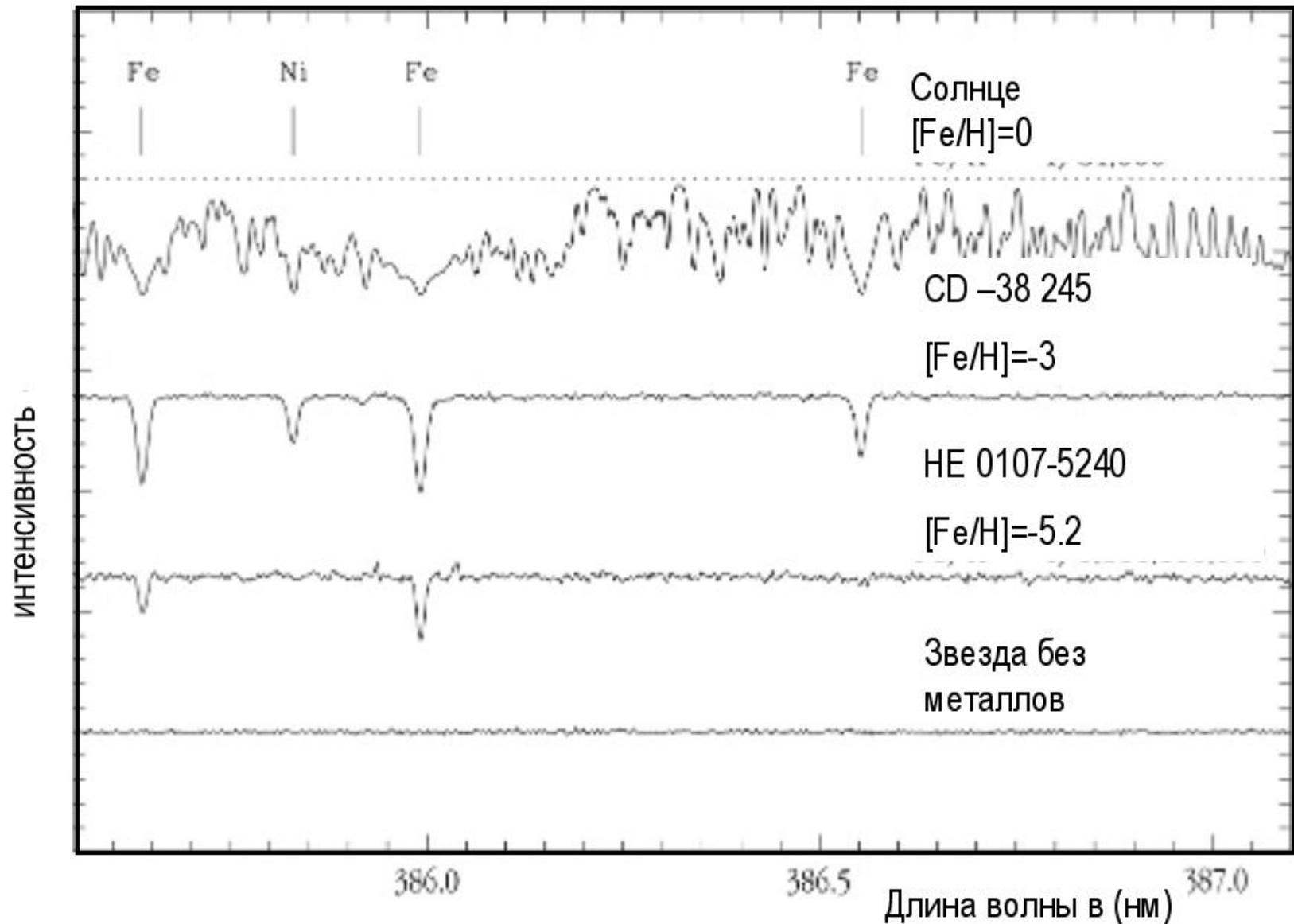
- «Металличность» звезды:

$$[\text{Fe}/\text{H}] = \log (N_{\text{Fe}} / N_{\text{H}})_{*} - \log (N_{\text{Fe}} / N_{\text{H}})_{\square}$$

$$[\text{Fe}/\text{H}] = \log N(\text{Fe})/N(\text{H})_* - \log N(\text{Fe})/N(\text{H})_{\square}$$

- $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.0$ означает 1/10 солнечного
- $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.0$ означает 1/100 солнечного
- $[\text{m}/\text{Fe}] = \log N(\text{m})/N(\text{Fe})_* - \log N(\text{m})/N(\text{Fe})_{\square}$
 - $[\text{Ca}/\text{Ba}] = +0.3$ означает в два раза большее содержание Ca по сравнению с Ba

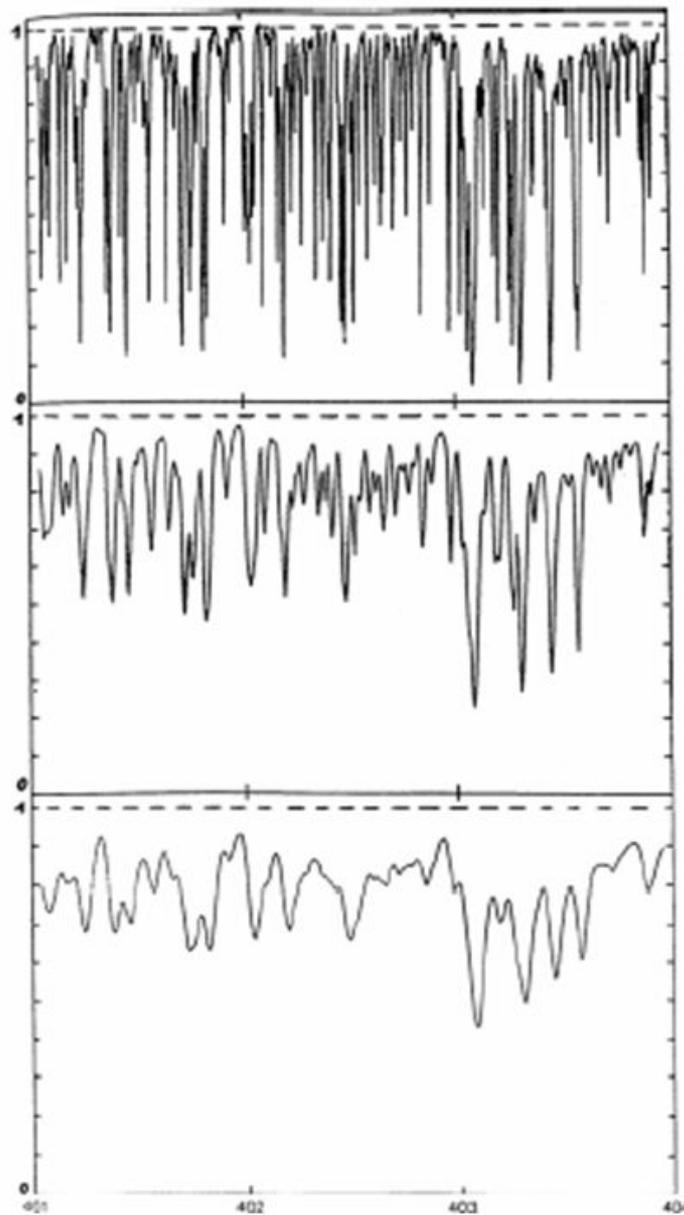
Пример: звезды разной металличности



$R=300000$

$R=23000$

$R=8000$



$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$$

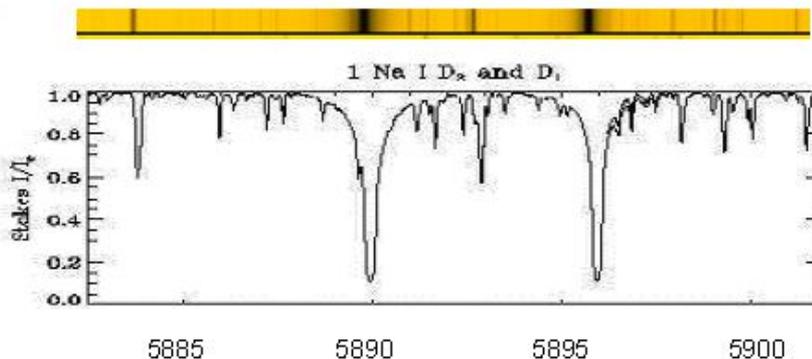
Методы определения химического состава (1)

Выбор метода прежде всего определяется качеством полученного наблюдательного материала.

1. Если имеются спектры высокого разрешения, то по сравнению **наблюденных профилей** и **профилей, теоретически вычисленных** по моделям атмосфер для отдельно выбранных линий **конкретного** химического элемента. Такие спектры можно получить лишь для ярких звезд.

Пример: спектр Солнца

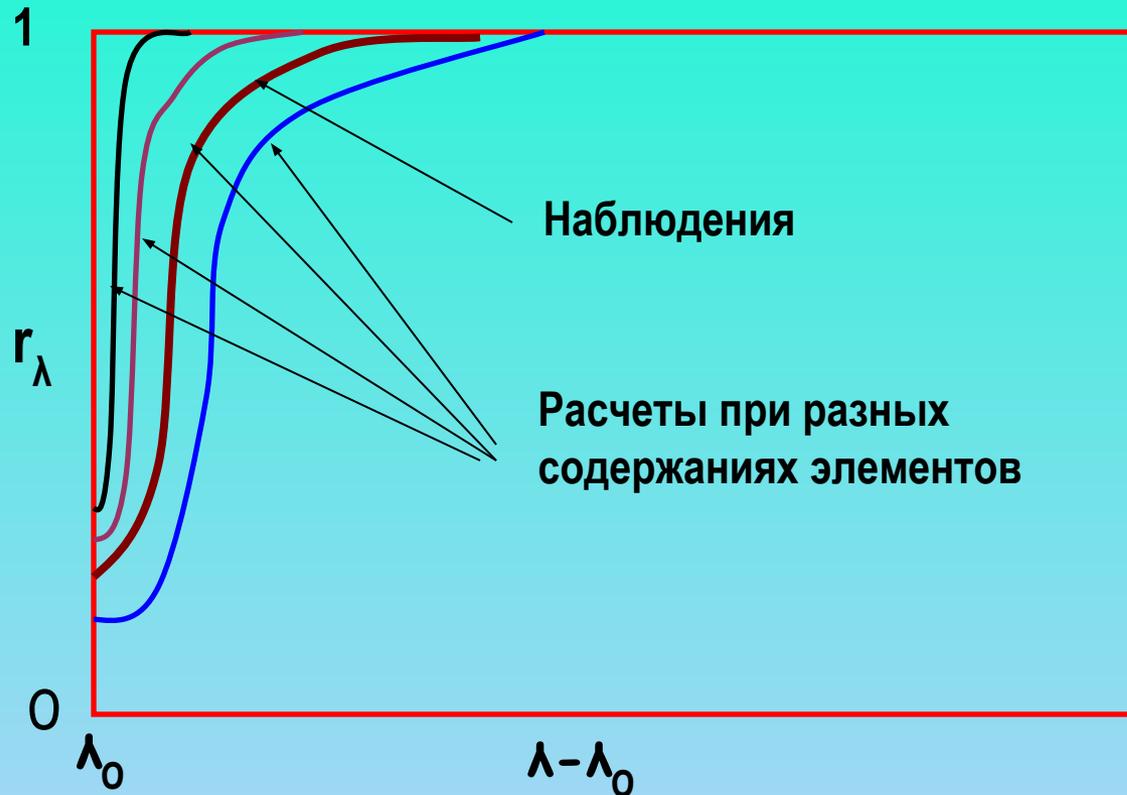
λ	Элемент	$W(\text{\AA})$	Название
4920.51	Fe I	0.43	
4957.61	Fe I	0.45	
5167.33	Mg I	0.65	b_4
5172.70	Mg I	1.26	b_2
5183.62	Mg I	1.58	b_1
5232.95	Fe I	0.35	
5269.55	Fe I	0.41	
5324.19	Fe I	0.32	
5238.05	Fe I	0.38	
5528.42	Mg I	0.29	
5889.97	Na I	0.63	D_2
5895.94	Na I	0.56	D_1
6122.23	Ca I	0.22	
6162.18	Ca I	0.22	
6562.81	H $_{\alpha}$	4.02	C
6867.19	O $_2$	tell	B
7593.70	O $_2$	tell	A
8194.84	Na I	0.30	
8498.06	Ca II	1.46	
8542.14	Ca II	3.67	
8662.17	Ca II	2.60	
8688.64	Fe I	0.27	
8736.04	Mg I	0.29	



Сильные линии в солнечном спектре имеют ширину примерно в 1 Å как, например, линии натрия Na I D. В спектрах других звезд они могут достигать значений W_{λ_j} до ста ангстрем.

Для таких линий можно точно определить профиль, т.е. величину r_{λ} . Такие линии и являются предметом исследований этим точным методом.

Пример для линии



После нескольких попыток можно угадать содержание химических элементов, удовлетворяющее наблюдения (красная линия)

Методы определения химического состава (2)

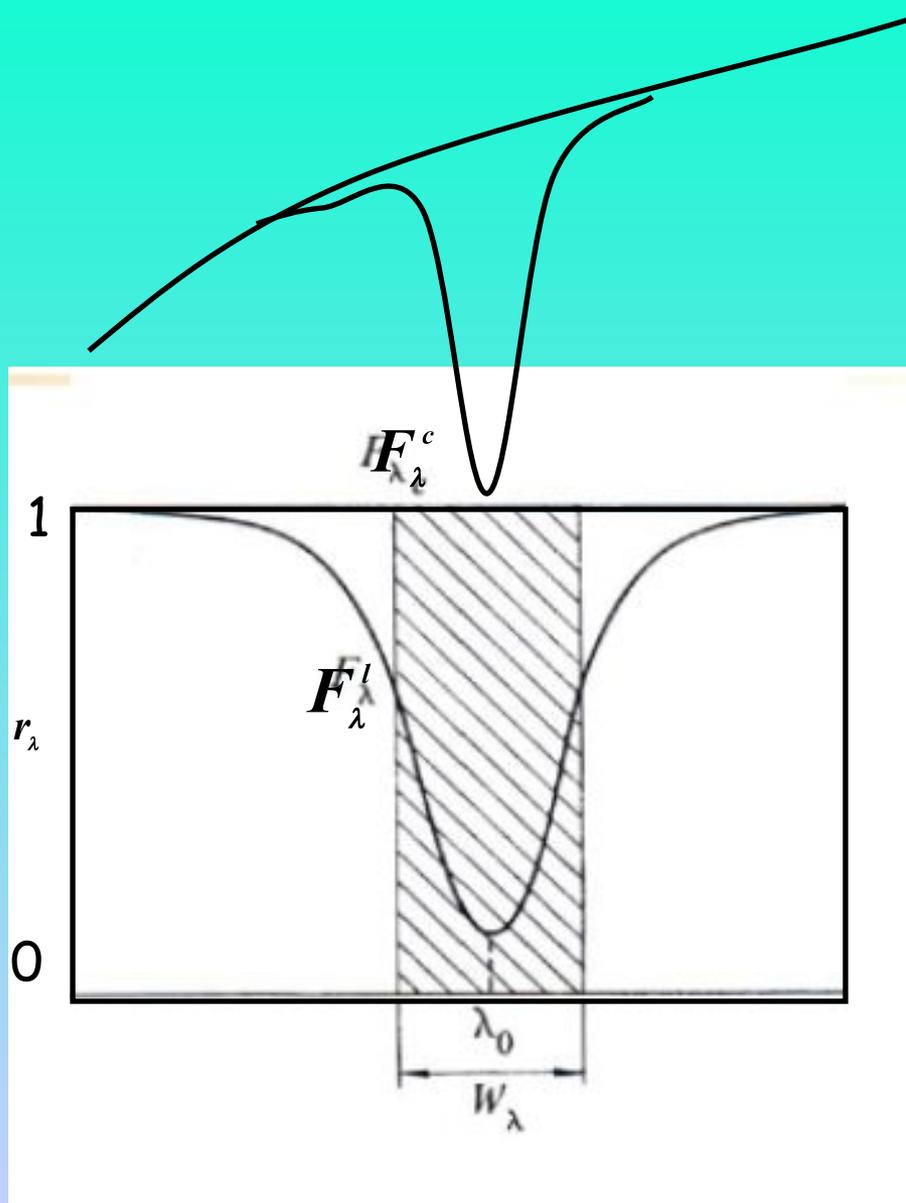
2. Подобный метод можно использовать и для большого набора линий **различных** элементов. Такой метод называется синтетическим.

Методы определения химического состава (3)

3. В тех случаях, когда качество наблюдательного материала не позволяет точно определить профили линий, то определяются эквивалентные ширины линий. Использование этих данных осуществляется в **методе кривых роста**.

Кривая роста это математическая (и графическая) зависимость между химическим содержанием элементов в атмосфере звезды и эквивалентной шириной спектральной линии.

Эквивалентная ширина линии



F_λ^c - поток в континиуме, он постоянен в пределах линии

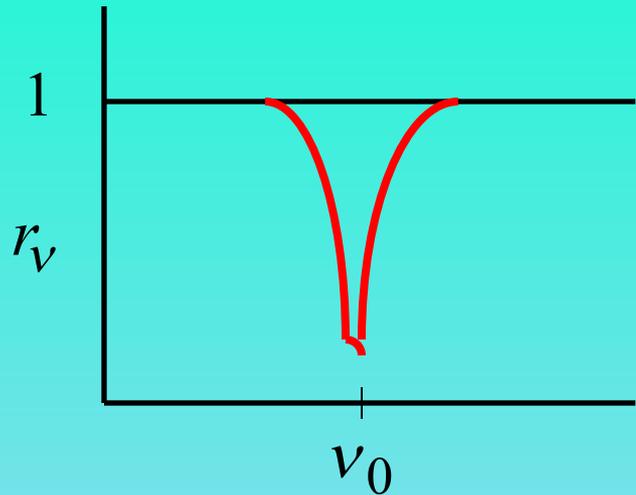
F_λ^l - поток в частотах линии

$$r_\lambda = \frac{F_\lambda^l}{F_\lambda^c} - \text{остаточная интенсивность}$$

$$W_\lambda = \int_0^\infty (1 - r_\lambda) d\lambda -$$

эквивалентная ширина линии

Формулы для кривой роста для Ш-Ш модели



$$\begin{aligned}
 W_\nu &= \int_0^\infty (1 - r_\nu) d\nu = \int_0^\infty \left(1 - \frac{1}{1 + \alpha_\nu N_{abs}}\right) d\nu = \\
 &= 2 \int_{\nu_0}^\infty \frac{\alpha_\nu N_{abs}}{1 + \alpha_\nu N_{abs}} d\nu. \quad (1)
 \end{aligned}$$

1. N_{abs} - мало, действует только эффект Доплера

$$a_\nu = a_{\nu_0} e^{-\left(\frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu_D}\right)^2}$$

ν_0

$$a_v = a_{v_0} e^{-\left(\frac{v-v_0}{\Delta v_D}\right)^2}$$

$$u = \frac{v-v_0}{\Delta v_D}$$

$$W_v = \int_0^{\infty} \frac{N_{abs} a_{v_0} e^{-\left(\frac{v-v_0}{\Delta v_D}\right)^2}}{1 + N_{abs} a_{v_0} e^{-\left(\frac{v-v_0}{\Delta v_D}\right)^2}} dv = 2 \int_{v_0}^{\infty} \frac{N_{abs} a_{v_0} e^{-\left(\frac{v-v_0}{\Delta v_D}\right)^2}}{1 + N_{abs} a_{v_0} e^{-\left(\frac{v-v_0}{\Delta v_D}\right)^2}} dv =$$

$$= 2 \int_0^{\infty} X_0 \Delta v_D \frac{e^{-u^2}}{1 + X_0 e^{-u^2}} du = 2 X_0 \Delta v_D \int_0^{\infty} (e^{u^2} + X_0)^{-1} du \approx$$

$$\approx 2 X_0 \Delta v_D \frac{\sqrt{\pi}}{2} = \sqrt{\pi} X_0 \Delta v_D$$

X_0 - мало

$$W_v \approx \sqrt{\pi} X_0 \Delta v_D$$

2. N_{abs} -возросло. Введем обозначения:

$$X_0 = \exp(b), \quad \ln X_0 = b, \quad u^2 = \left(\frac{v - v_0}{\Delta v_D} \right)^2 = x,$$

$$2u du = dx, \quad du = \frac{dx}{2\sqrt{x}}$$

$$W_v = 2 \int_0^{\infty} X_0 \Delta v_D \frac{1}{1 + X_0 e^{-u^2}} du = 2 X_0 \Delta v_D \int_0^{\infty} \frac{e^{-x}}{2\sqrt{x}(1 + e^{b-x})} dx =$$

$$X_0 \Delta v_D \int_0^{\infty} \frac{x^{-1/2}}{e^x + e^b} dx = = \frac{X_0 \Delta v_D}{e^b} \int_0^{\infty} \frac{x^{-1/2}}{1 + e^{x-b}} dx = \Delta v_D \int_0^{\infty} \frac{x^{-1/2}}{1 + e^{x-b}} dx \approx$$

$$\approx \Delta v_D \left[2\sqrt{b} \left(1 - \frac{\pi}{24b^2} - \frac{7\pi^4}{384b^4} + \dots \right) \right] \approx 2\Delta v_D \sqrt{\ln X_0}$$

$$\frac{\pi}{24b^2} \sim 0.01$$

$$b \sim 3.6$$

$$X_0 \sim 40$$

3. N_{abs} - велико. Тогда действует естественное затухание и тогда

$$a_\nu = a_{\nu_0} \frac{a}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{u^2}, \quad u = \frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu_D}$$

$$W_\nu = 2 \int_{\nu_0}^{\infty} \frac{a_{\nu_0} N_{abs}}{1 + a_{\nu_0} N_{abs}} d\nu = 2\Delta\nu_D \int_0^{\infty} \frac{a_{\nu_0} N_{abs} \frac{a}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{u^2}}{1 + a_{\nu_0} N_{abs} \frac{a}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{u^2}} du =$$

$$= \frac{2}{\sqrt{\pi}} X_0 a \Delta\nu_D \int_0^{\infty} \frac{du}{u^2 \left(1 + X_0 \frac{a}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{u^2}\right)} = \frac{2aX_0\Delta\nu_D}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} \frac{du}{u^2 + X_0 \frac{a}{\sqrt{\pi}}} =$$

$$= 2\Delta\nu_D \sqrt{X_0 \frac{a}{\sqrt{\pi}}} \operatorname{arctg} \frac{u}{\sqrt{X_0 \frac{a}{\sqrt{\pi}}}} = \Delta\nu_D \pi^{3/4} \sqrt{aX_0}$$

$$W_\nu \approx \Delta\nu_D \pi^{3/4} \sqrt{aX_0}$$

Итого:

$$W_\nu \approx \sqrt{\pi} X_0 \Delta\nu_D, \quad X_0 = \alpha_{\nu_0} N_{abs} \text{ мало}$$

$$W_\nu \approx 2\Delta\nu_D \sqrt{\ln X_0}, \quad (X_0 > 40)$$

$$W_\nu \approx \Delta\nu_D \pi^{\frac{3}{4}} \sqrt{aX_0}, \quad X_0 \text{ очень велико}$$

Части теоретической кривой роста

Кривая роста имеет три участка

• Линейная часть:

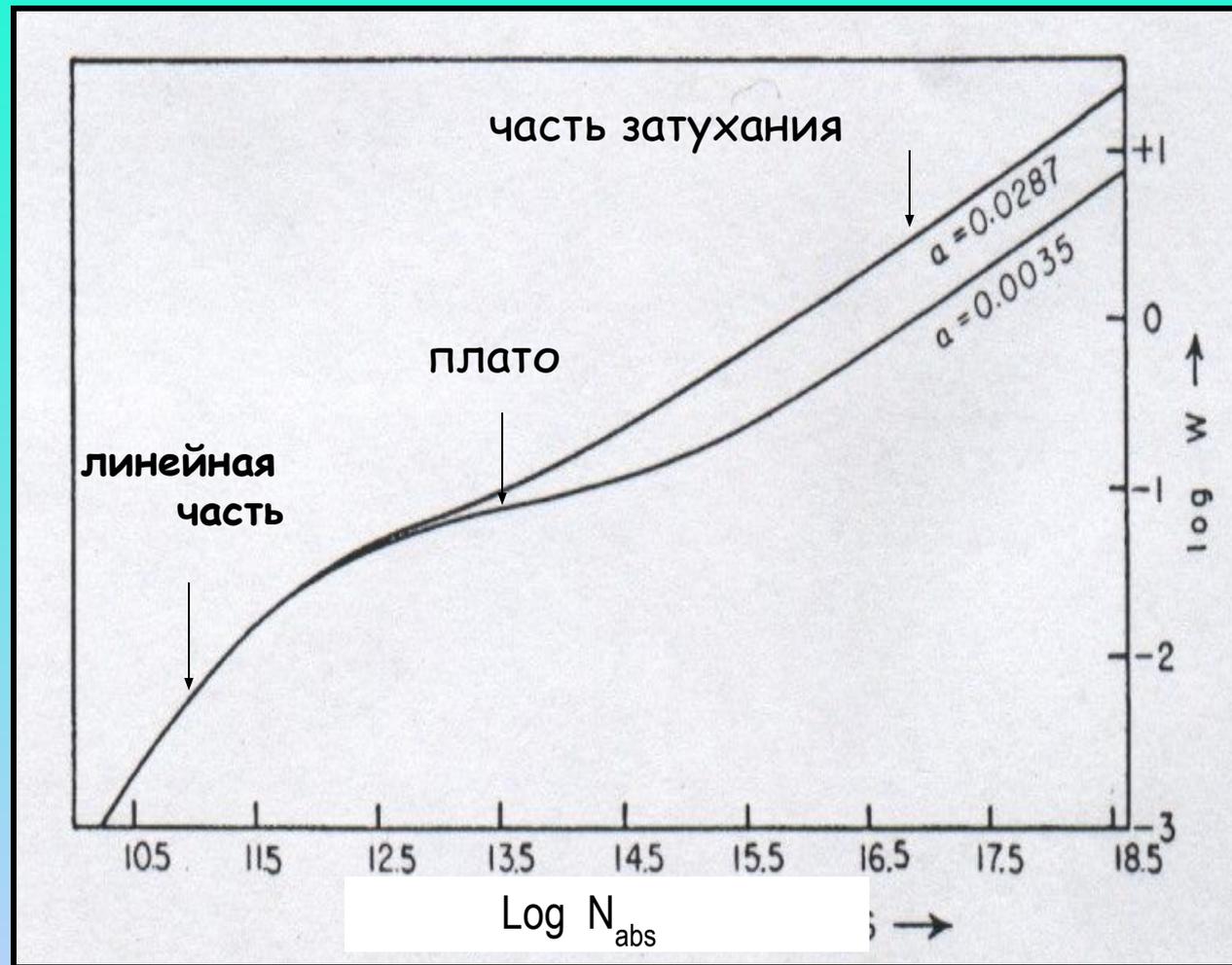
- W определяется тепловым уширением
- W пропорциональна числу атомов химическому содержанию)

• Часть «плато»

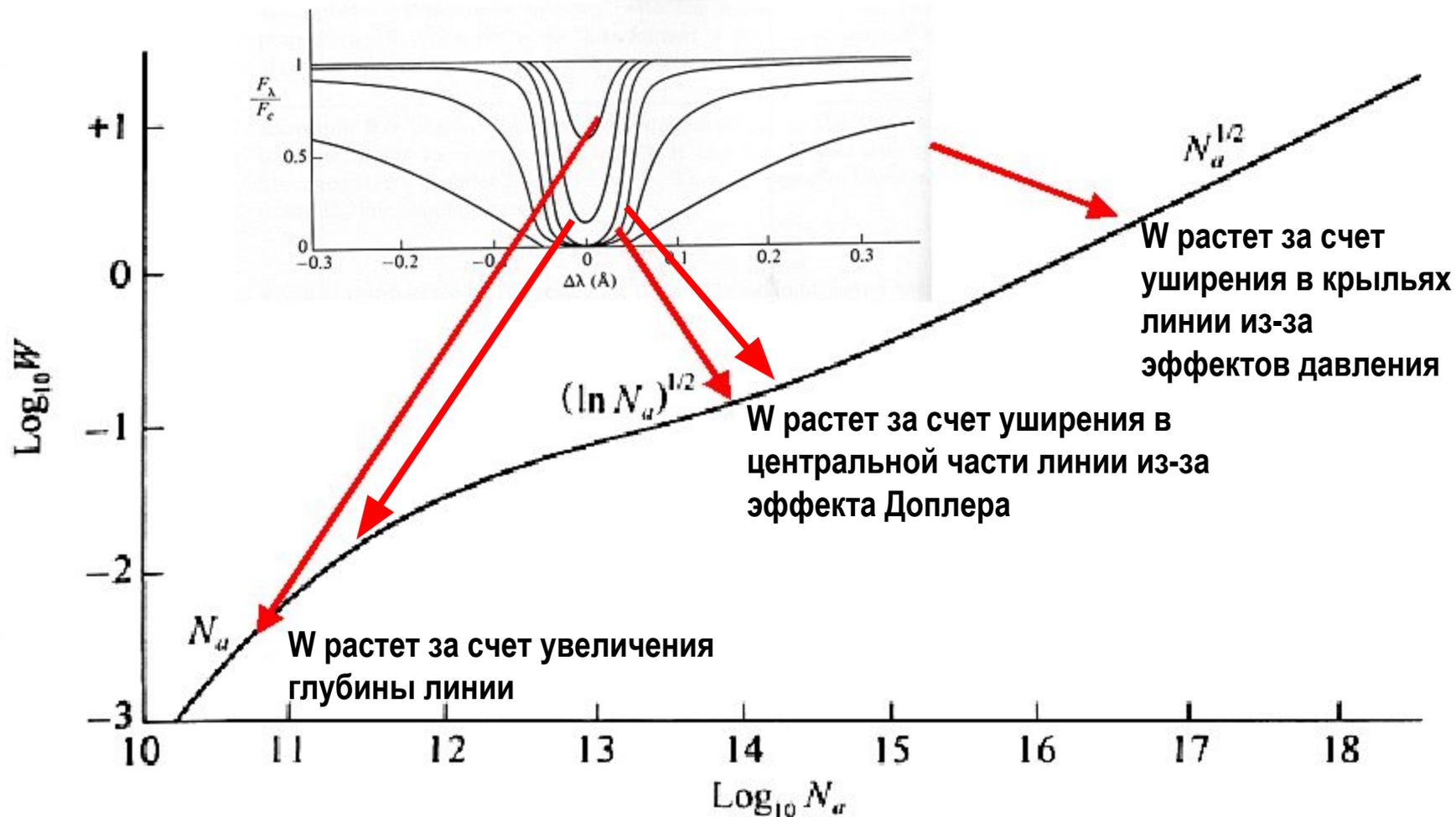
- Центральная глубина приближается к своему насыщению
- W растет асимптотически к постоянной величине

• Часть «затухания»:

- W зависит от параметра a



Положение линий разной интенсивности на кривой роста



Виды кривых роста

$$W_v \approx \sqrt{\pi} \Delta v_D X_0$$

$$W_v \approx 2 \Delta v_D \sqrt{\ln X_0} \quad \Delta v_D = \frac{V}{c} v_0$$

$$W_v \approx \pi^{3/4} \Delta v_D \sqrt{aX_0}$$

$$\frac{W_v}{v_0} \approx \sqrt{\pi} \frac{V}{c} X_0$$

$$\frac{W_v}{v_0} \approx 2 \frac{V}{c} \sqrt{\ln X_0}$$

$$\frac{W_v}{v_0} \approx \pi^{3/4} \frac{V}{c} \sqrt{aX_0}$$

$$\frac{W_\lambda}{\lambda_0} \approx \sqrt{\pi} \frac{V}{c} X_0$$

$$\frac{W_\lambda}{\lambda_0} \approx 2 \frac{V}{c} \sqrt{\ln X_0}$$

$$\frac{W_\lambda}{\lambda_0} \approx \pi^{3/4} \frac{V}{c} \sqrt{aX_0}$$

$$\frac{W_\lambda}{\lambda_0} \frac{c}{V} \approx \sqrt{\pi} X_0$$

$$\frac{W_\lambda}{\lambda_0} \frac{c}{V} \approx 2 \sqrt{\ln X_0}$$

$$\frac{W_\lambda}{\lambda_0} \frac{c}{V} \approx \pi^{3/4} \sqrt{aX_0}$$

Построение кривой роста по наблюдениям (основная идея)

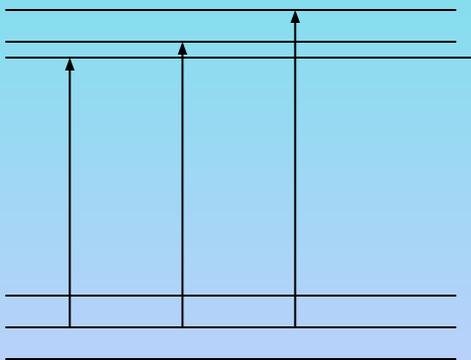
Обратим внимание на ось X : $\log X_0 = \log a_{\lambda_0} + \log N_{abs}$

$$a_{\lambda} = \frac{\sqrt{\pi} e^2}{mc^2} \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda_D} f H(a, u) = \frac{\sqrt{\pi} e^2}{mc} \frac{\lambda_0}{V} f H(a, u), \quad \Delta\lambda_D = \frac{\lambda_0}{c} \sqrt{\frac{2kT}{M}}, = \lambda_0 \frac{V}{c}$$

$$a_{\lambda_0} = \frac{\sqrt{\pi} e^2}{mc} \frac{\lambda_0}{V} f$$

$$\log X_{\lambda_0} = \log a_{\lambda_0} + \log N_{abs} = \log \frac{\sqrt{\pi} e^2}{mc} \frac{\lambda_0}{V} + \log f + \log N_{abs} = \tag{a}$$

$$\underline{-1.8225 + \log \lambda_0 - \log V} + \log f + \log N_{abs} = A + \log N_{abs} + \log f$$



Как сделать первых два члена (A и N_{abs}) постоянными?

- обычно V считается постоянной для всех линий
- если выбрать линии мультиплетов, то и λ_0, N_{abs} будут постоянными

Определение N_{abs} (I вариант)

1. По спектру звезды с отождествленными линиями отбираем линии разных мультиплетов, определяем их эквивалентные ширины W_λ и по справочникам находим силы осцилляторов f
2. Строим график зависимости для каждой линии мультиплета

$$\log \frac{W_\lambda}{\lambda_0} \leftrightarrow \log f,$$

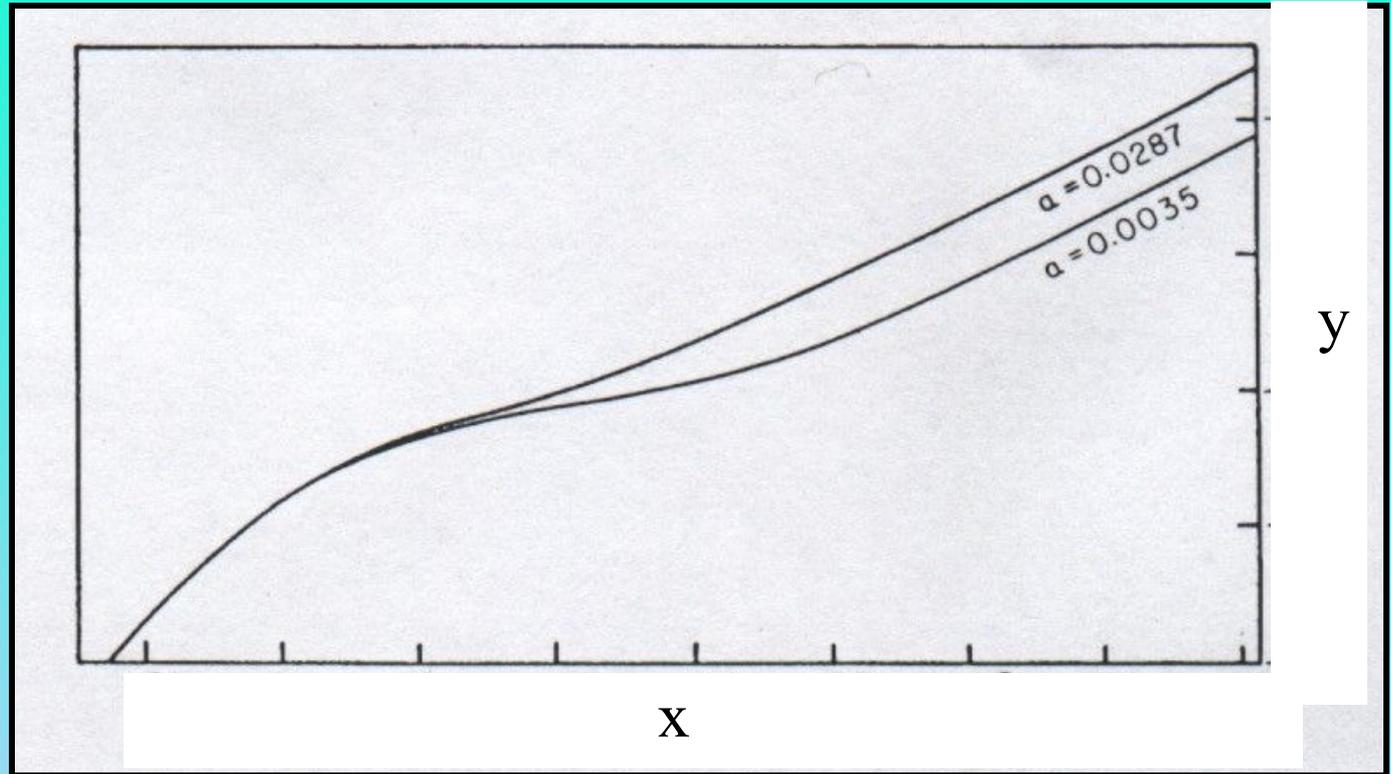
и через эти точки проводим отрезок. Делаем тоже самое и для других мультиплетов. Эту кривую назовем «кривая **H1**»

3. Горизонтальным перемещением все отрезки по мультиплетам сводим в одну кривую.
4. Горизонтальным перемещением эту кривую совмещаем с теоретической кривой роста, которая построена в координатах

$$\log \frac{W_\lambda}{\lambda_0} \frac{c}{V} \leftrightarrow \log X_0$$

Вид теоретической кривой роста для использования (кривая Т1)

$$y = \log \frac{W_\lambda c}{\lambda V}$$



$$x = \log X_0 = \log \tau_{\lambda_0} = \log a_{\lambda_0} N_{abs}, \quad a_{\lambda_0} = \frac{\sqrt{\pi} e^2}{mc^2} \frac{\lambda_0^2}{\Delta \lambda_D} f$$

5. В некоторых случаях возникает необходимость перемещать наблюдаемую кривую роста и по оси UX
6. Отрезок ΔX , равный расстоянию между первоначальным положением отрезка мультиплета и его положением на теоретической кривой роста равен

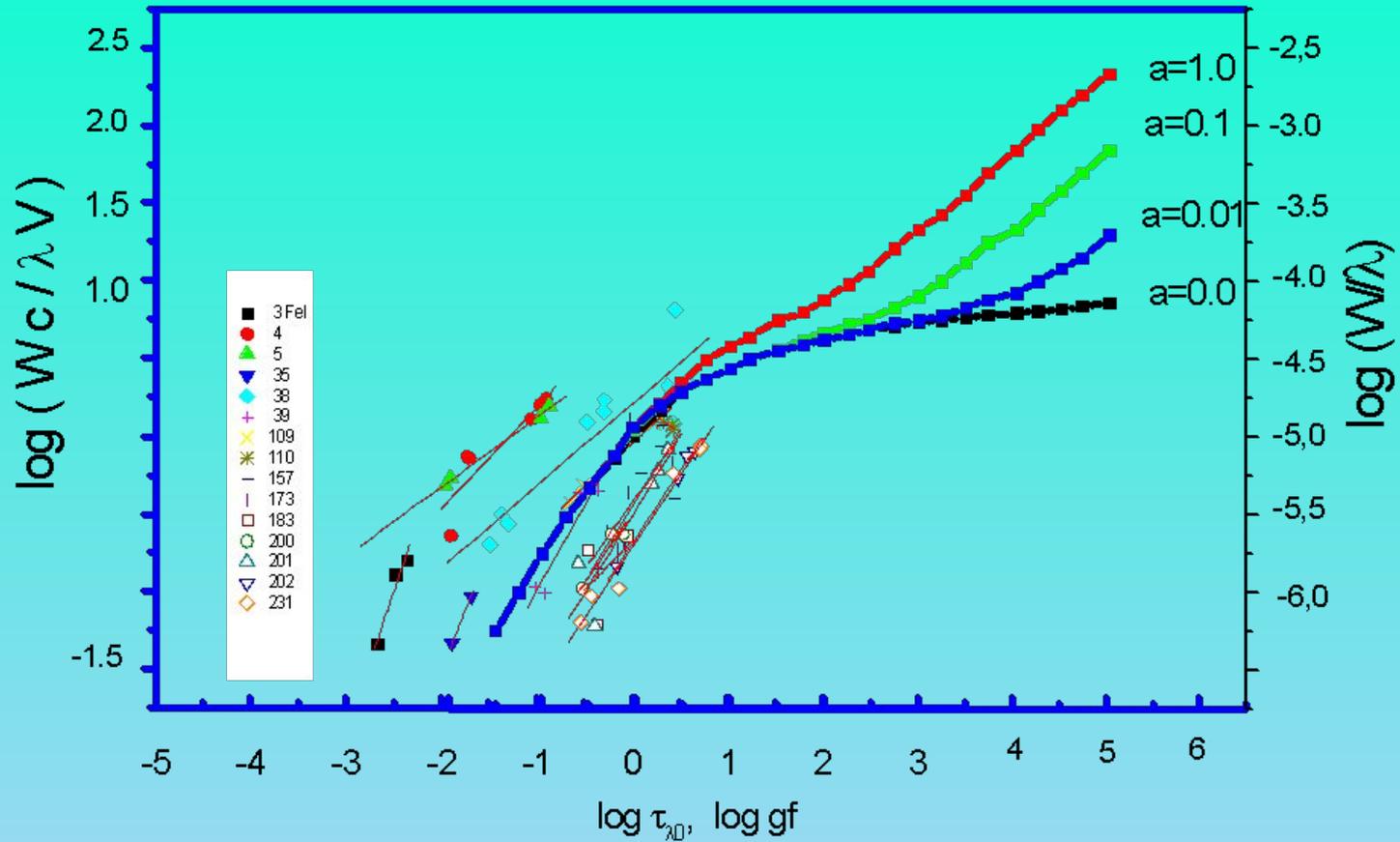
$$\Delta X = -1.8225 + \log \lambda_0 - \log V + \log N_{abs}$$

Отсюда находим $\log N_{abs}$.

7. Зная N_{abs} – число атомов данного элемента на нижнем уровне данного мультиплета, теперь пользуясь соотношениями Больцмана – Саха, можно определить полное число атомов N :

$$\log N = \Delta X + 1.8825 - \log \lambda_0 (cm) + \log V (cm / сек) - \log Z_{rn}.$$

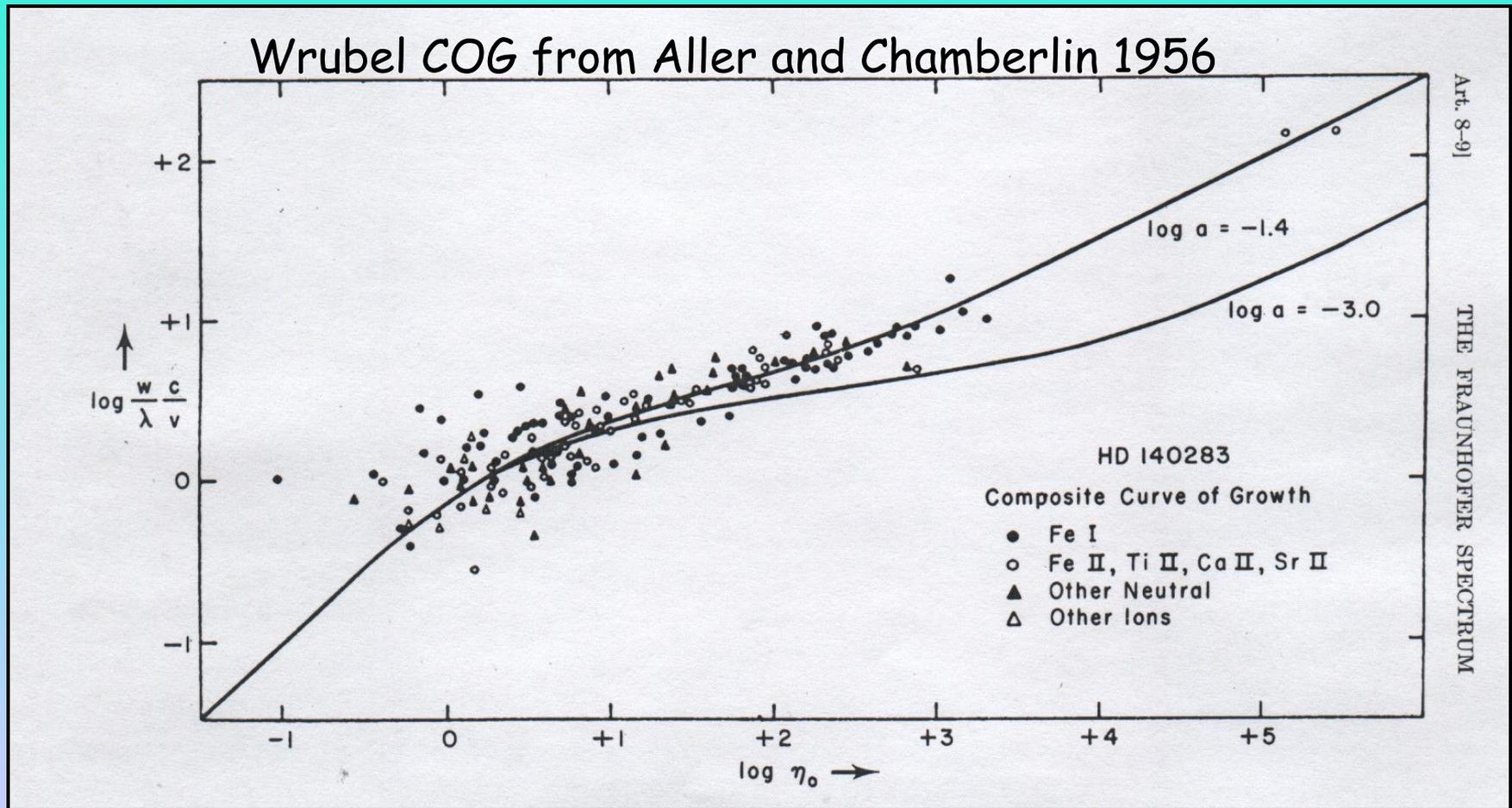
8. Отрезок ΔY дает величину $\log \frac{c}{V}$, или V .



Пример: построение наблюдаемой кривой роста по линиям Fe I и Ti I

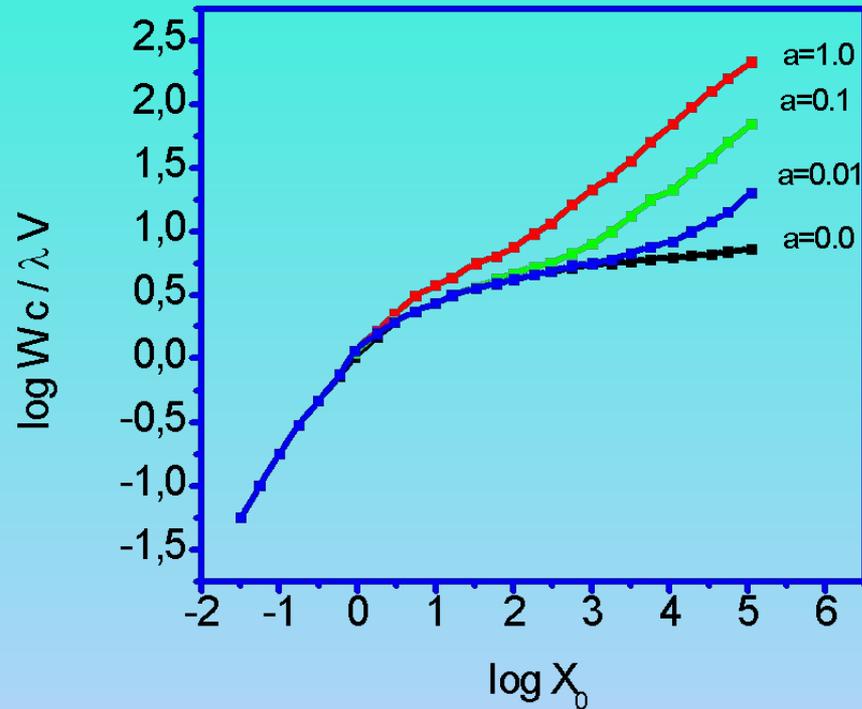
Наблюдения, наложенные на теоретическую кривую роста

- Обратить внимание, что на кривой роста по оси Y отложена $\log \frac{W_\lambda c}{\lambda V}$. Почему?



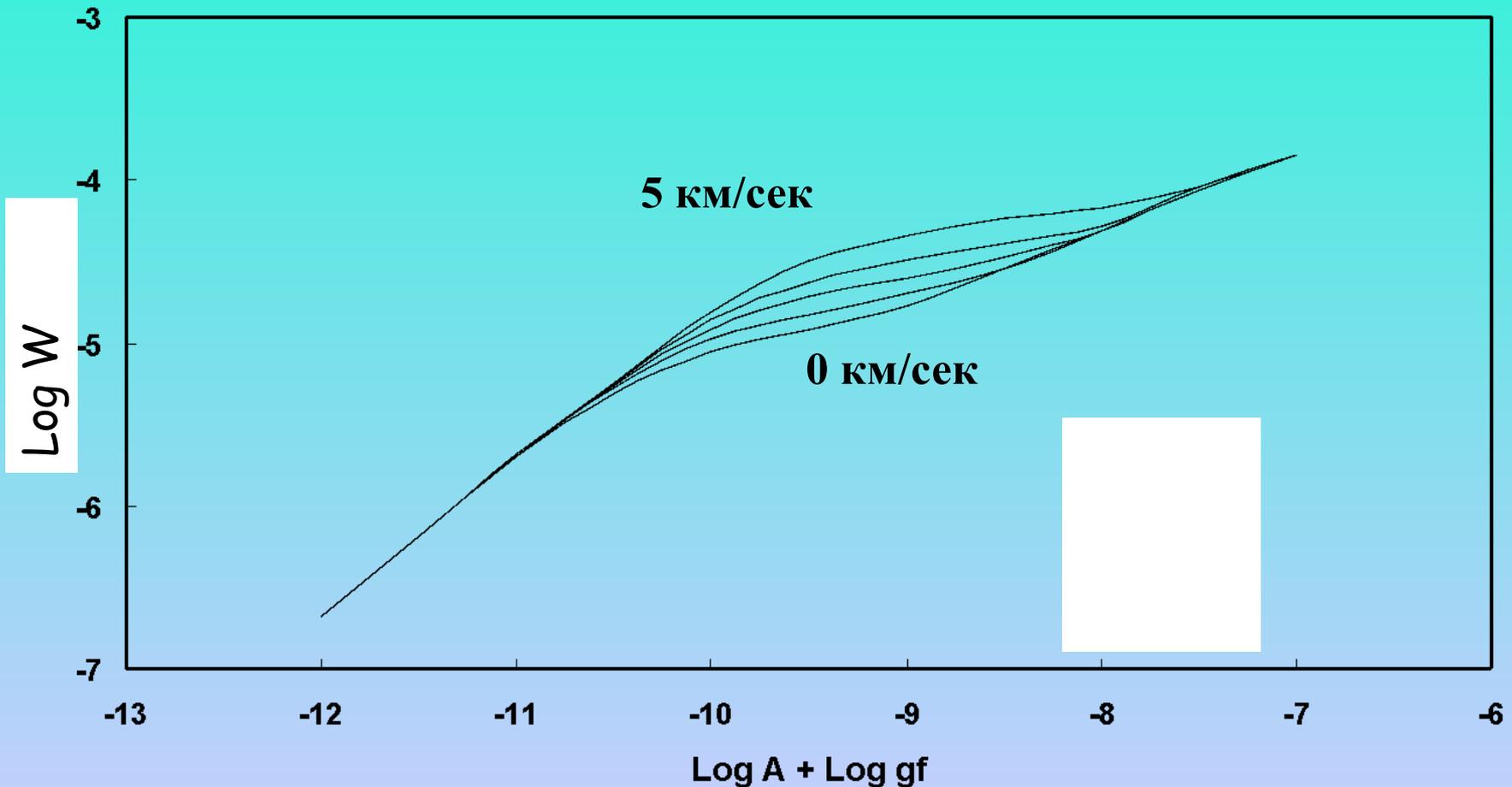
Влияние давления на кривую роста

- При больших значениях поглощающих атомов кривая роста начинает зависеть и от параметра затухания a : чем больше a , тем более сильная линия дает тот же химический состав

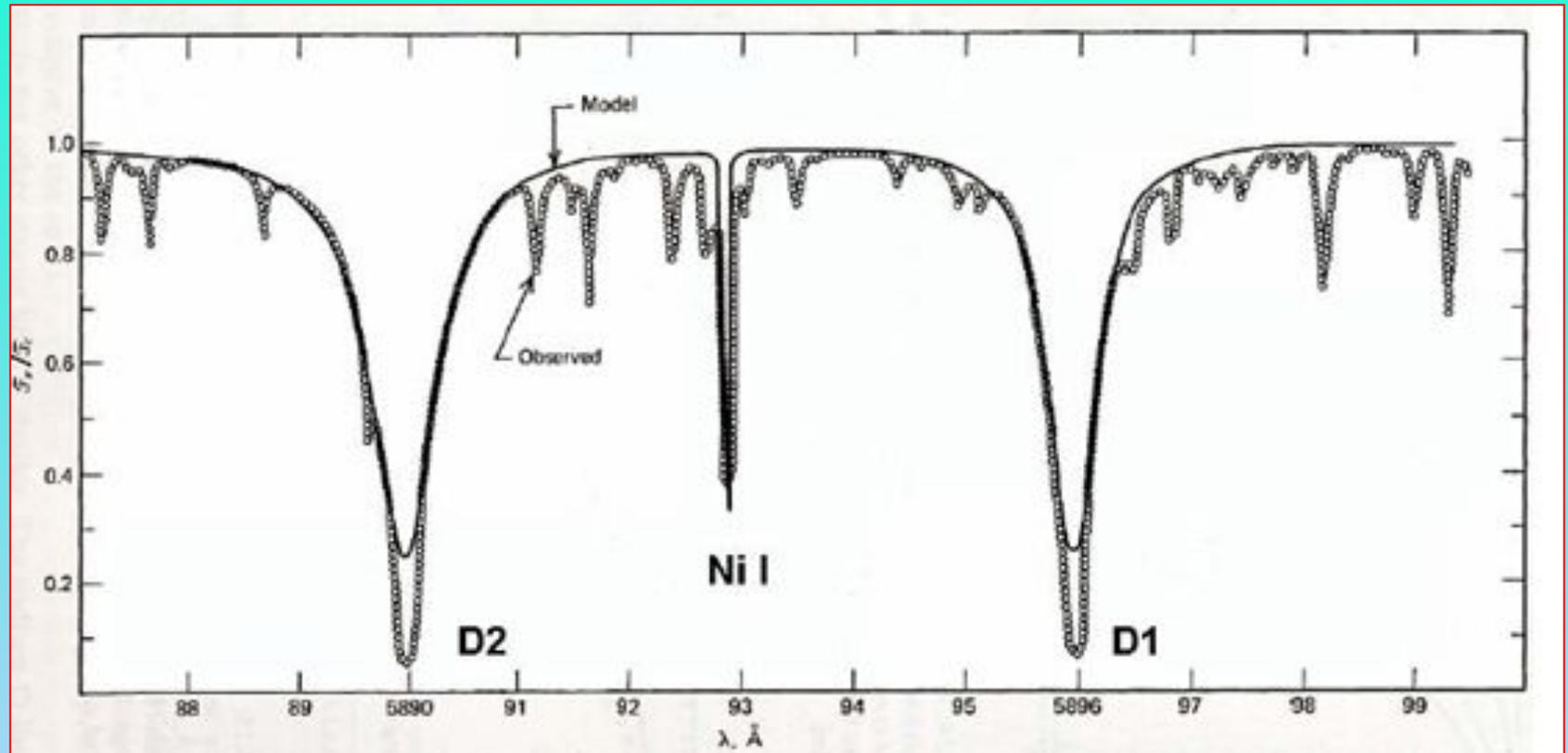


Влияние микротурбуленции на кривую роста

В области плато W_λ растет за счет увеличения роли Доплер эффекта в ядре линии. Поэтому в этой части кривой роста будет иметь место зависимость W_λ от турбулентных скоростей.

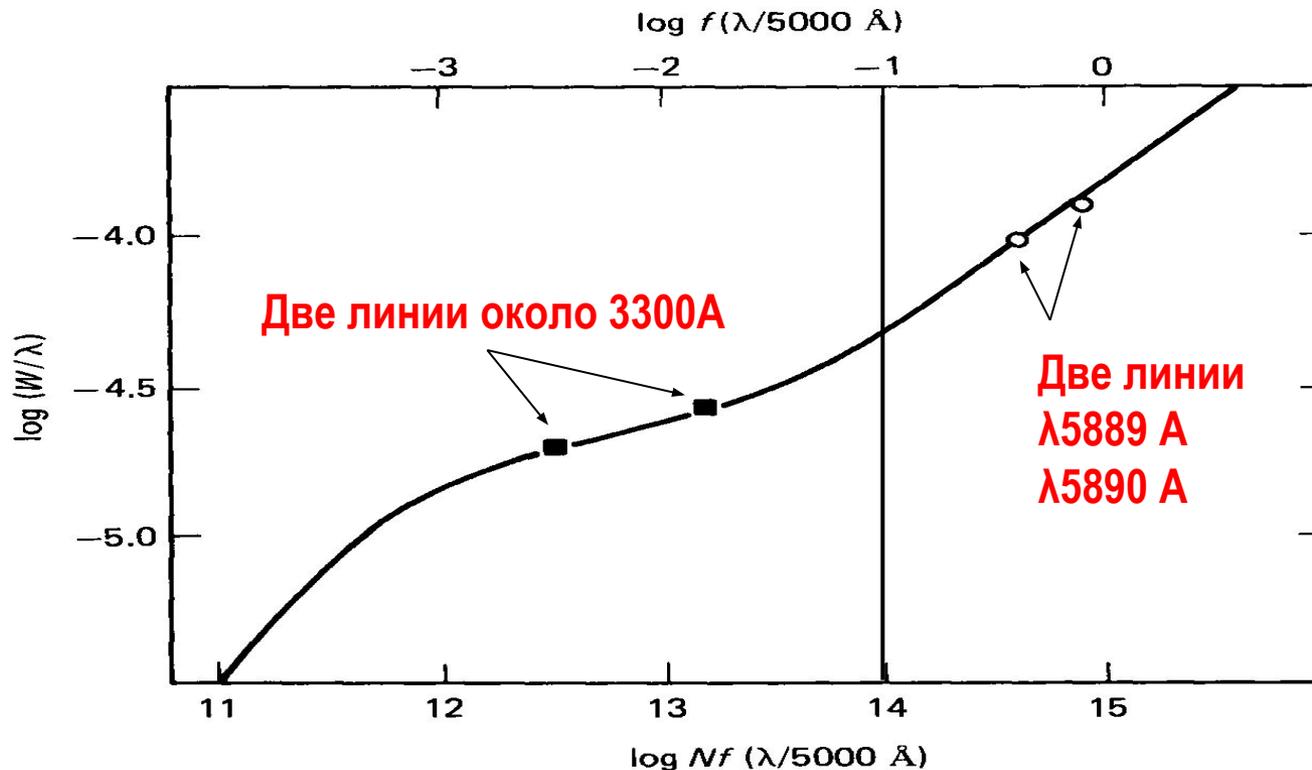


Пример: Определение содержания натрия в солнечной атмосфере (1)



В спектре Солнца наблюдаются несколько линии натрия NaI. Обенно сильны две резонансные D1 и D2 линии около 5890 А.

Пример: Определение содержания натрия в солнечной атмосфере (2)



Сплошная кривая это теоретическая кривая роста. Сверху приведена горизонтальная шкала наблюдаемой кривой роста. Нижняя шкала соответствует теоретической кривой роста. 4 точки, соответствующие 4 линиям NaI, оказались на теоретической кривой роста после горизонтального смещения на величину 14.98.

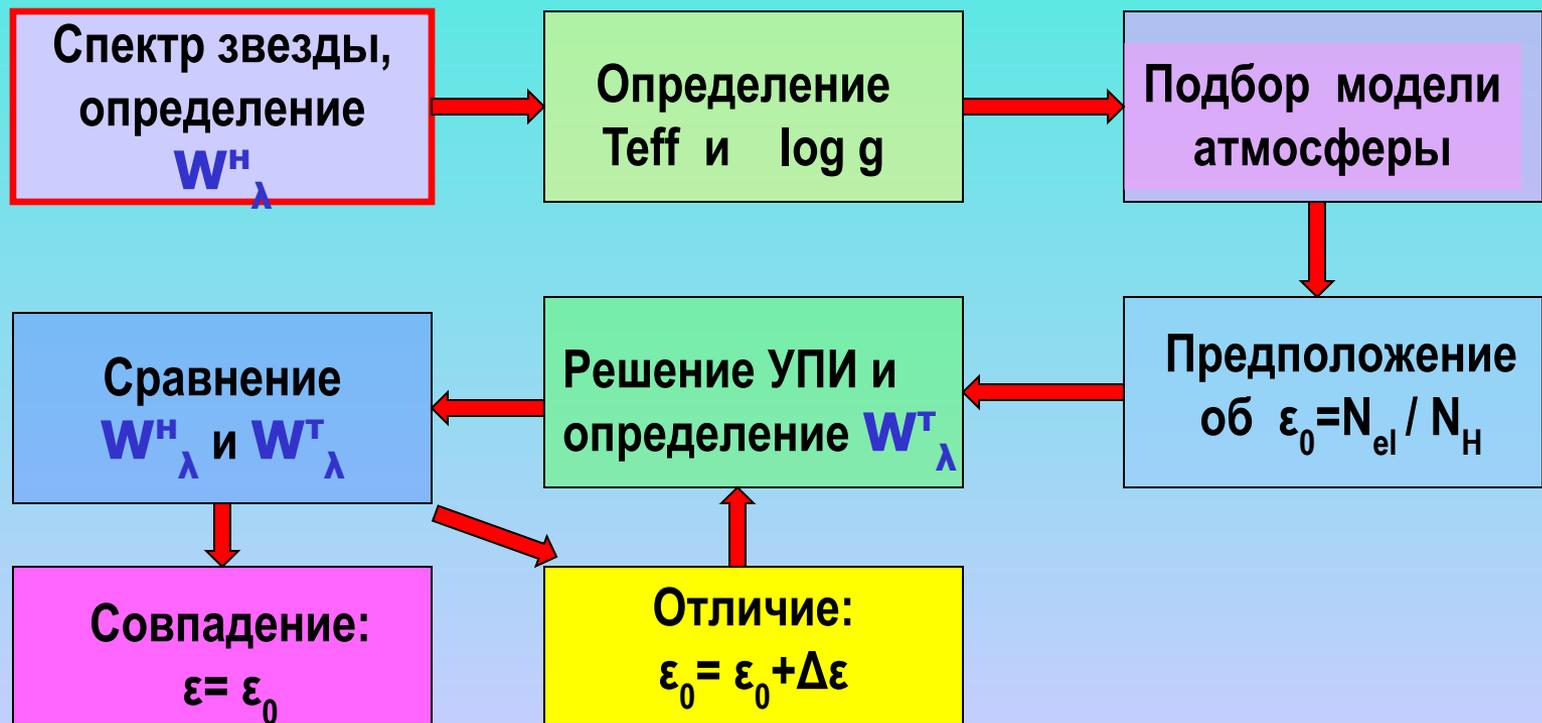
Пример: Определение содержания натрия в солнечной атмосфере (3)

1. Смещение в **14.98** означает, что $\log N_{\text{abs}} = 14.98$, т.е.
 $N_{\text{abs}} = 1 \cdot 10^{15}$
2. Но это число есть число атомов нейтрального атома на нижнем уровне, с которого образуются линии.
3. Если для Солнца взять типичные значения **$T = 5700 \text{ K}$** , **$P_e = 10 \text{ бар}$** , то по формулам Больцмана и Саха можно получить, что
$$N(\text{NaI}) / N(\text{Na полн}) = 4.1 \cdot 10^{-4}$$
4. Тогда полное число атомов натрия в столбце равно
$$N(\text{Na полн}) = 2.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$$
4. Масса атома натрия равна $3.8 \cdot 10^{-23} \text{ г}$. Тогда полная масса натрия составит величину в $10^{-4} \text{ г см}^{-2}$

Численный метод построения кривых роста

Идея численного метода кривых роста

1. В классическом методе кривых роста используется **аналитический** подход, основанный на приближенных формулах. В этом методе используется возможность получения зависимости W_λ от химического содержания **численно**. Эта зависимость ищется через решение уравнения переноса излучения для модели атмосферы с параметрами, соответствующими параметрам исследуемой звезды.



Резюме: что можно определить по кривой роста

1. Определить химическое содержание химических элементов, например, величину $N(\text{элемент1}) / N(\text{элемент2})$.
2. Определить ионизационную температуру по формуле Саха, сравнивая содержания одного и того же элемента, но полученного по линиям соседней стадии ионизации. Например, FeI и $FeII$.
3. Определить температуру возбуждения по формуле Больцмана, сравнивая населенности двух уровней одного и того же элемента.
4. Определить параметр затухания a , который зависит от электронного давления. Это позволяет определить и среднее давление в атмосфере.
5. Определить микротурбулентную скорость.
6.

Как образуются химические элементы во Вселенной?

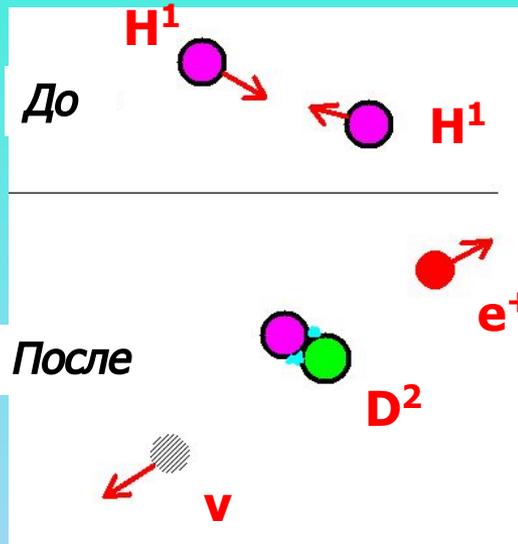
Ядерные реакции в звездах: В результате таких реакция образуются легкие элементы - H, He, C, Ne, O, Si и элементы CNO цикла.

Протон-протонный (P-P) цикл

Основная реакция

$4 \text{H}^1 + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{He}^4 + 2 \text{нейтрино} + 6 \text{фотонов}$
осуществляется в четыре этапа:

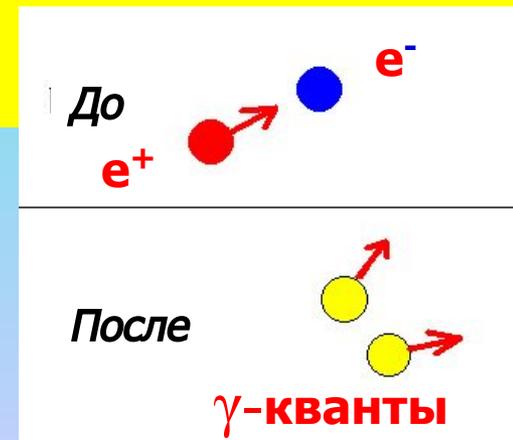
1. $\text{H}^1 + \text{H}^1 \rightarrow \text{D}^2 + \text{позитрон} (\text{e}^+) + \text{нейтрино} (\nu)$



D^2 - дейтерий-тяжелый изотоп водорода, его ядро состоит из протона (H^1) и нейтрона (n).

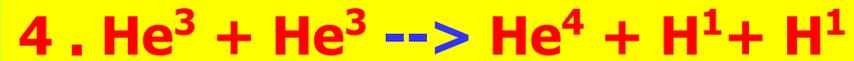
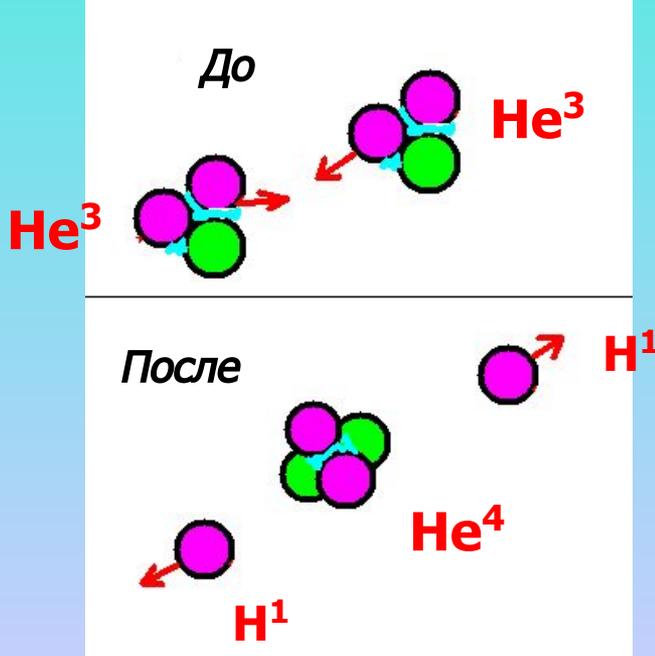
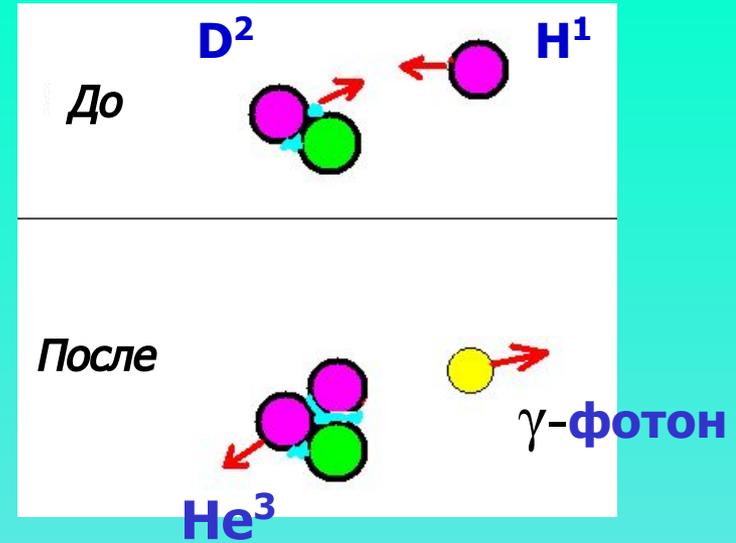
2. электрон (e^-)+позитрон (e^+) \rightarrow два фотона

Это реакция аннигиляции.





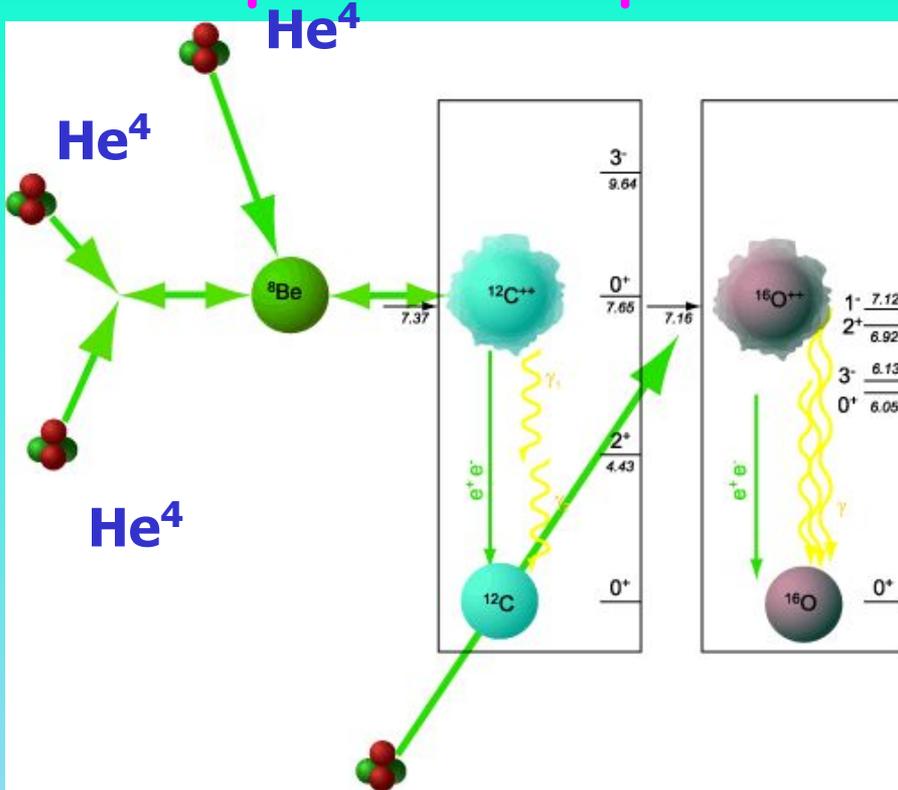
He^3 – изотоп гелия, ядро которого состоит из двух протонов и одного нейтрона.



He^4 – обычный атом гелия, ядро которого состоит из 2 протонов и двух нейтронов.

Реакция горения гелия:

тройной α -процесс



По мере сгорания водорода ядро звезды сжимается и температура может достигнуть значения $1.2 \cdot 10^8$ К, когда может загореться гелий:



Видно, что образовавшийся в результате соединения 2 атомов He^4 атом Be^8 далее захватывает третий атом He^4 и образует атом C^{12} . Этот атом далее опять реагирует с He^4 с образованием O^{16} :

$$\text{C}^{12} + \text{He}^4 \rightarrow \text{O}^{16}.$$

Продолжение реакций приводит к образованию неона Ne^{20}



Все эти реакции образуют элементы с массовым числом, кратным 4, вплоть до Ca^{40} .

CNO - цикл

Эти реакции проходят при температурах в центре звезды $>16 \cdot 10^6$ К. Здесь углерод C^{12} , ядро которого состоит из 6 протонов и 6 нейтронов, является катализатором.



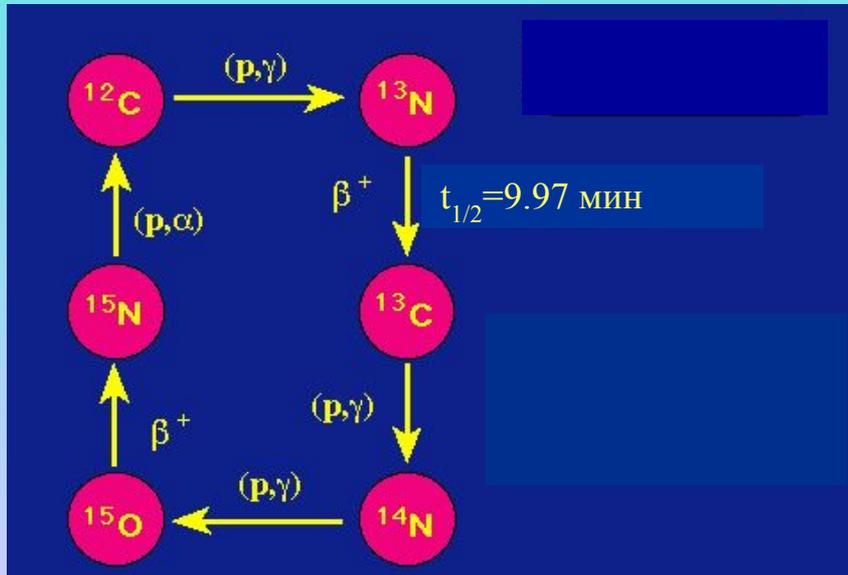
$$N^{13} = (7 p + 6 n)$$

$$C^{13} = (6 p + 7 n)$$

$$N^{14} = (7 p + 7 n)$$

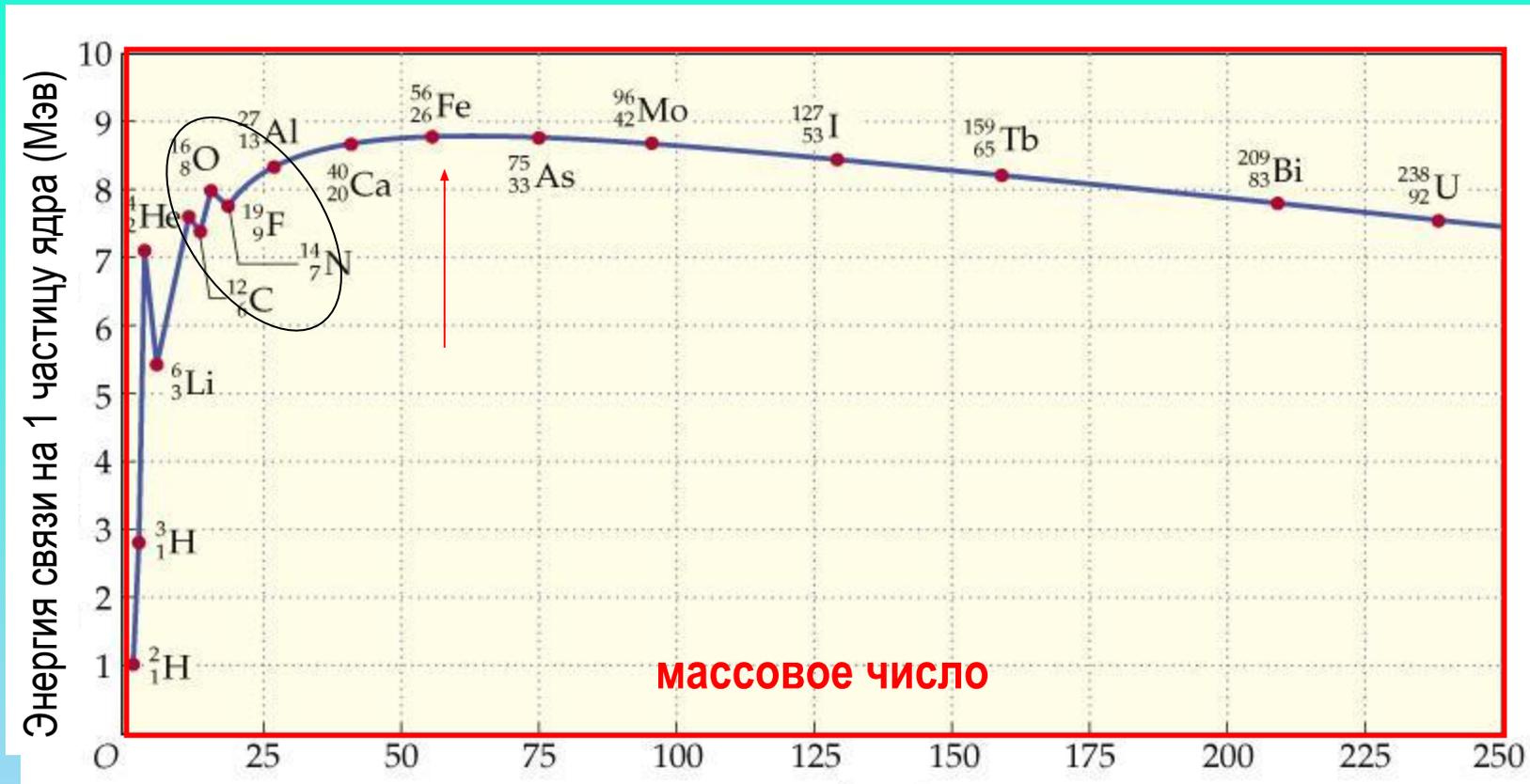
$$O^{15} = (8 p + 7 n)$$

$$N^{15} = (7 p + 8 n)$$



В результате этого цикла из 4 протонов также образовался атом гелия.

До какого элемента идут ядерные реакции?



Из графика ясно, что железо имеет самую высокую энергию связи между частицами ядра. Это означает, что превращение железа в другие более тяжелые частицы потребуют дополнительной энергии (эндотермическая реакция). Но в звезде нет этой дополнительной энергии, поэтому после образования железа термоядерные реакции прекращаются. Более тяжелые, чем железо, элементы образуются за счет других процессов (см. далее).

Как образуются химические элементы во Вселенной?

Большой взрыв: Наблюдаемое содержание H, He и Li а находятся в хорошем согласии с предсказанием теории Большого взрыва

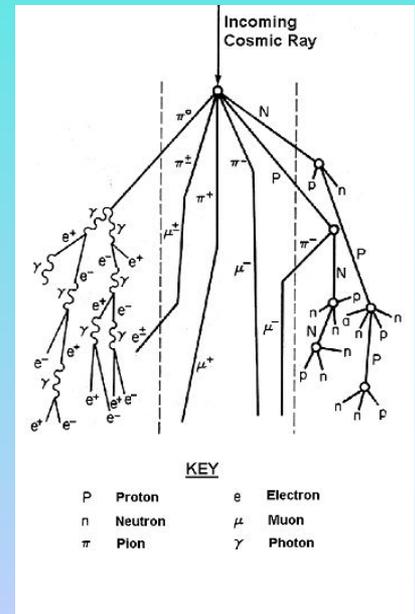
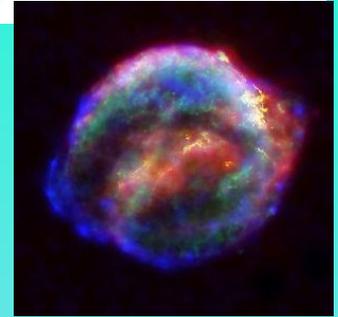
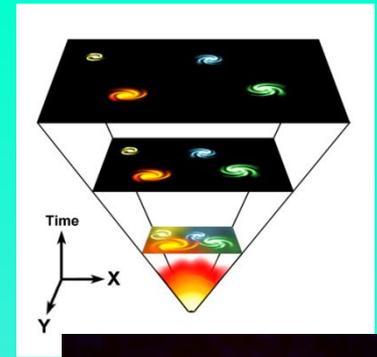
% по массе: 75% H, 24% He, 0.01% Li

Ядерные реакции при взрывах Сверхновых:

Производятся элементы тяжелее Fe.

Реакции скалывания космическими частицами:

Производятся легкие элементы ${}^3\text{He}$, Li, Be и B



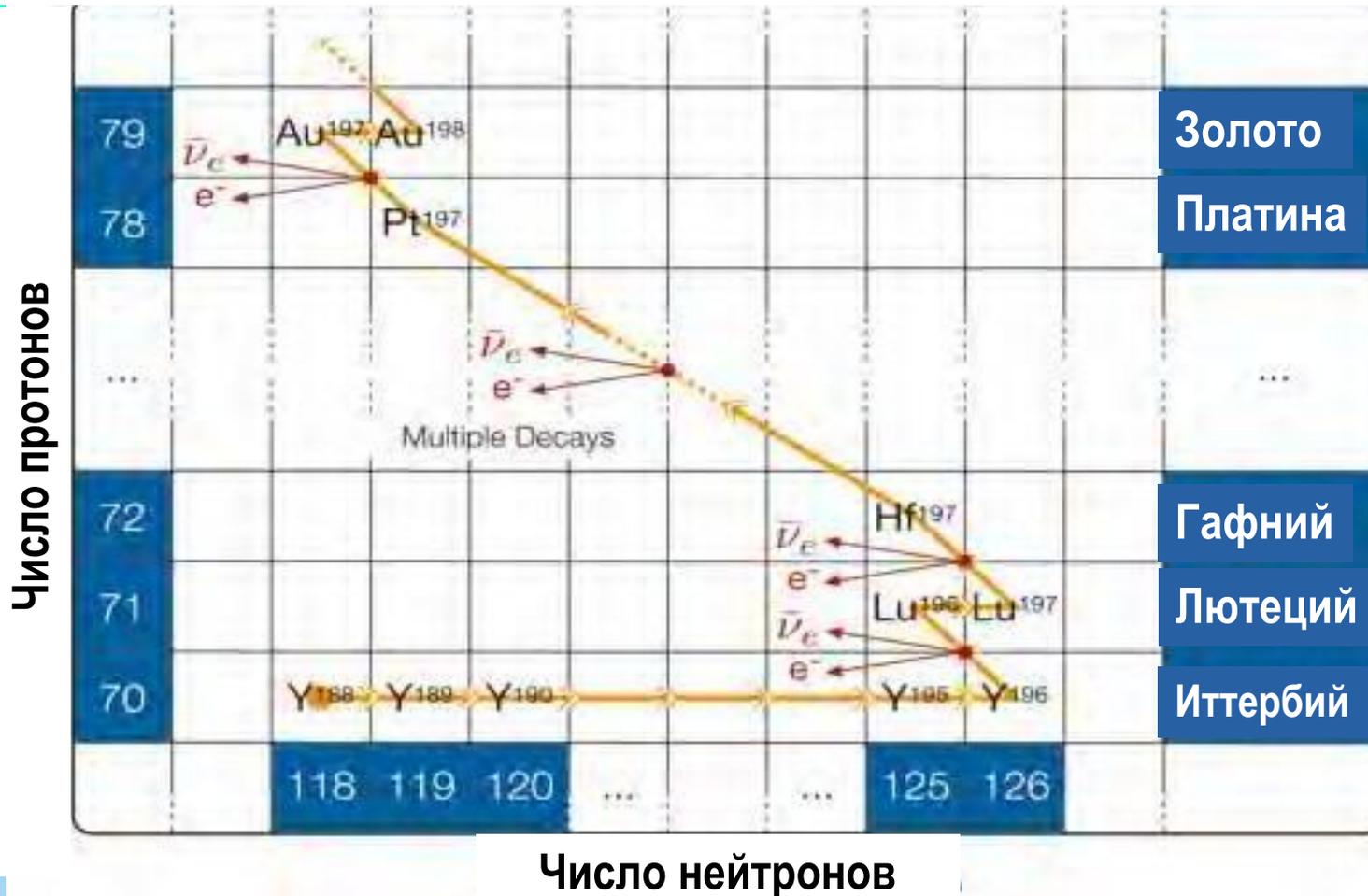
Общая схема образования тяжелых элементов при s-процессе



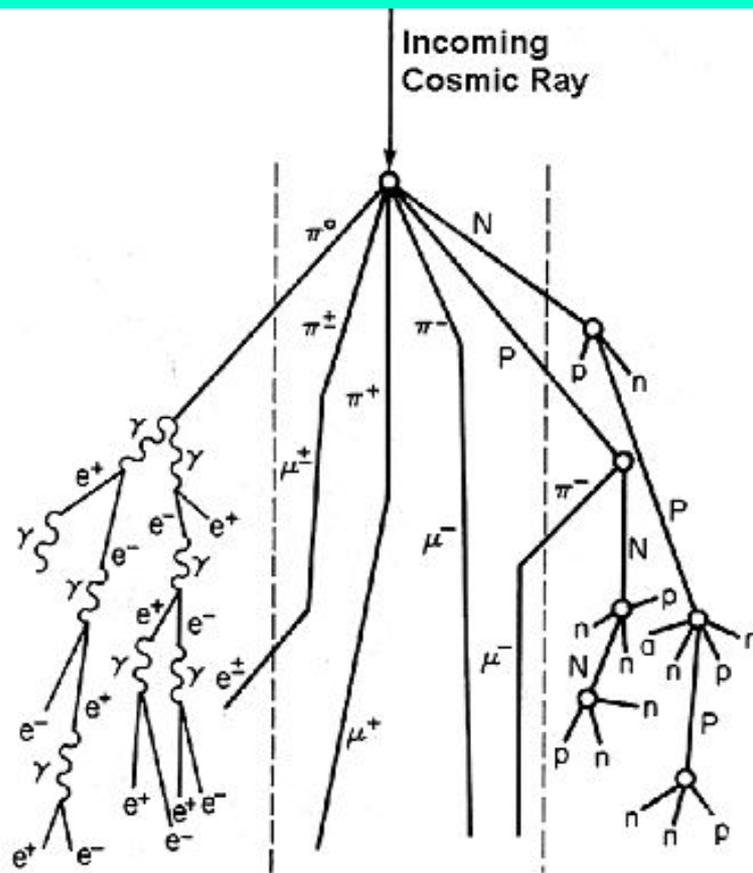
Элементы тяжелее железа имеют малую энергию связи, поэтому для образования энергии должен работать другой механизм – **нейтронный захват**. В массивных звездах с массой больше 10 масс Солнца при термоядерных реакциях образуются элементы до железа. Но на конечной стадии эти звезды взрываются как Сверхновые. При этом образуется большой поток нейтронов. Они захватываются тяжелыми элементами, образуя еще более тяжелые элементы. Есть два варианта такого захвата:

- 1) **Медленный s-процесс**: захват нейтрона, затем распад протона, затем опять захват нейтрона. При этом образуются элементы железной группы (около $Z=26$)
- 2) **Быстрый r-процесс**: быстрый захват нейтрона прежде чем, произойдет распад протона в нейтрон

Общая схема образования тяжелых элементов при r-процессе



Реакции скалывания



KEY

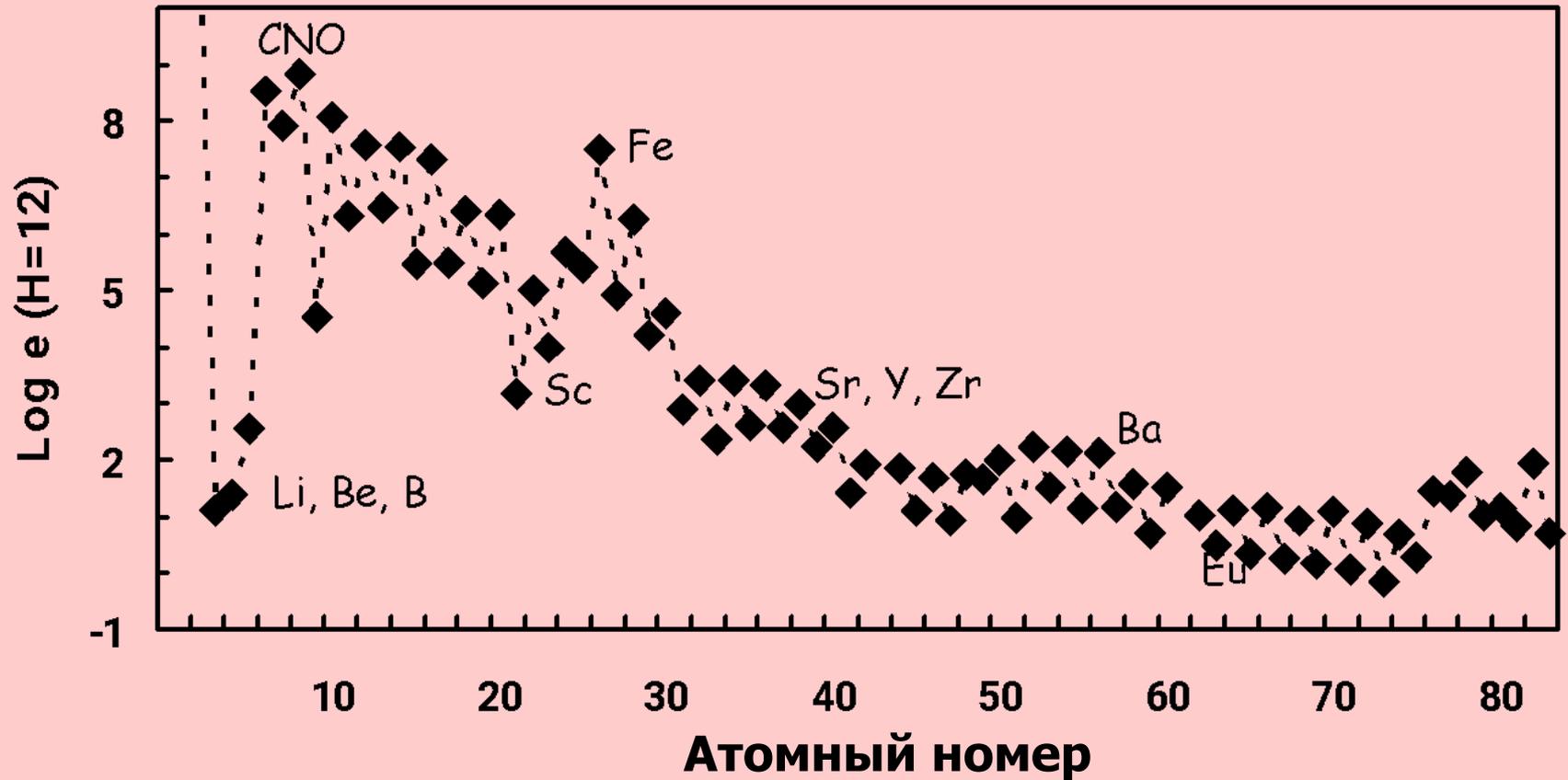
P	Proton	e	Electron
n	Neutron	μ	Muon
π	Pion	γ	Photon

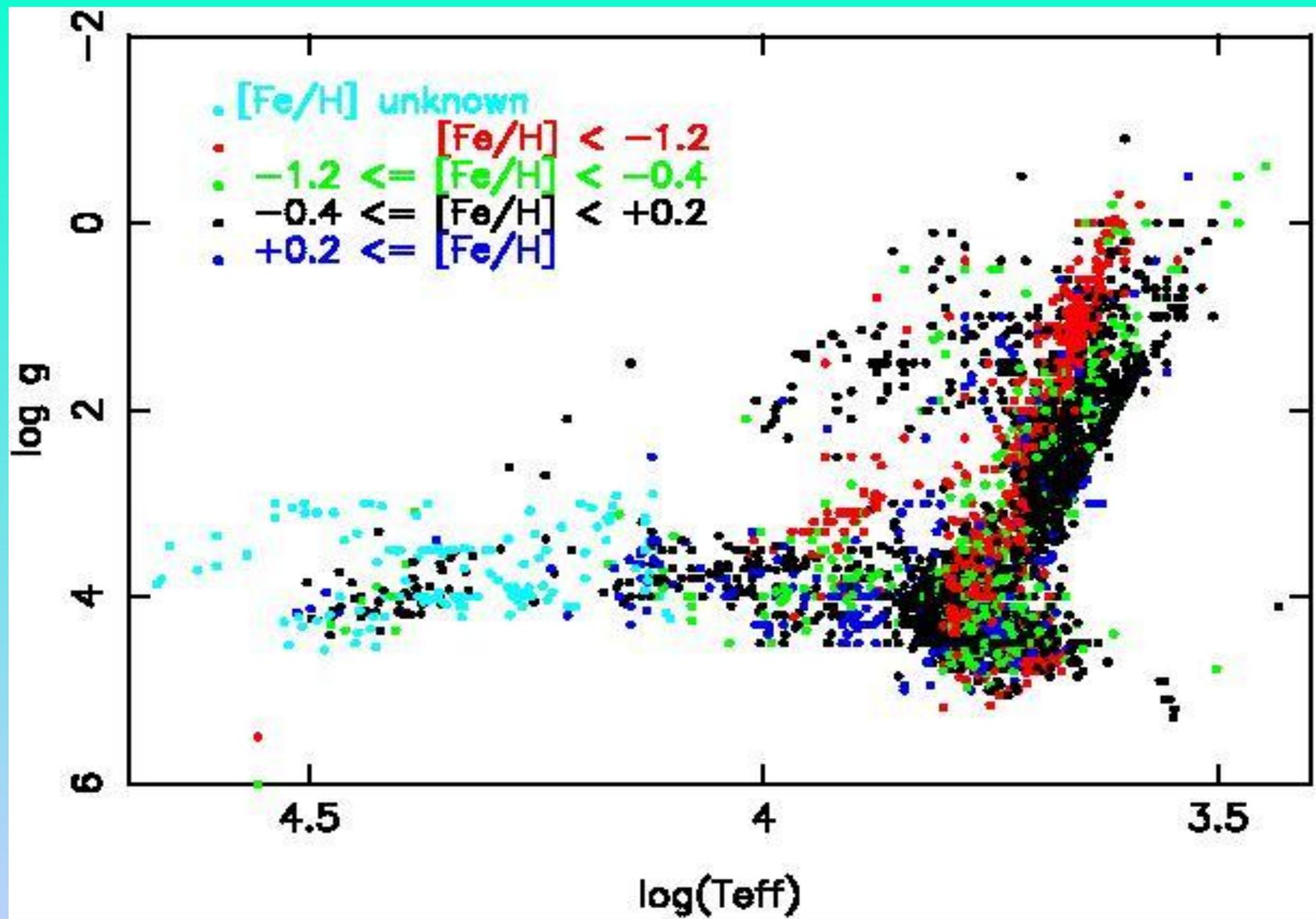
Итоги:

Солнечный химический состав

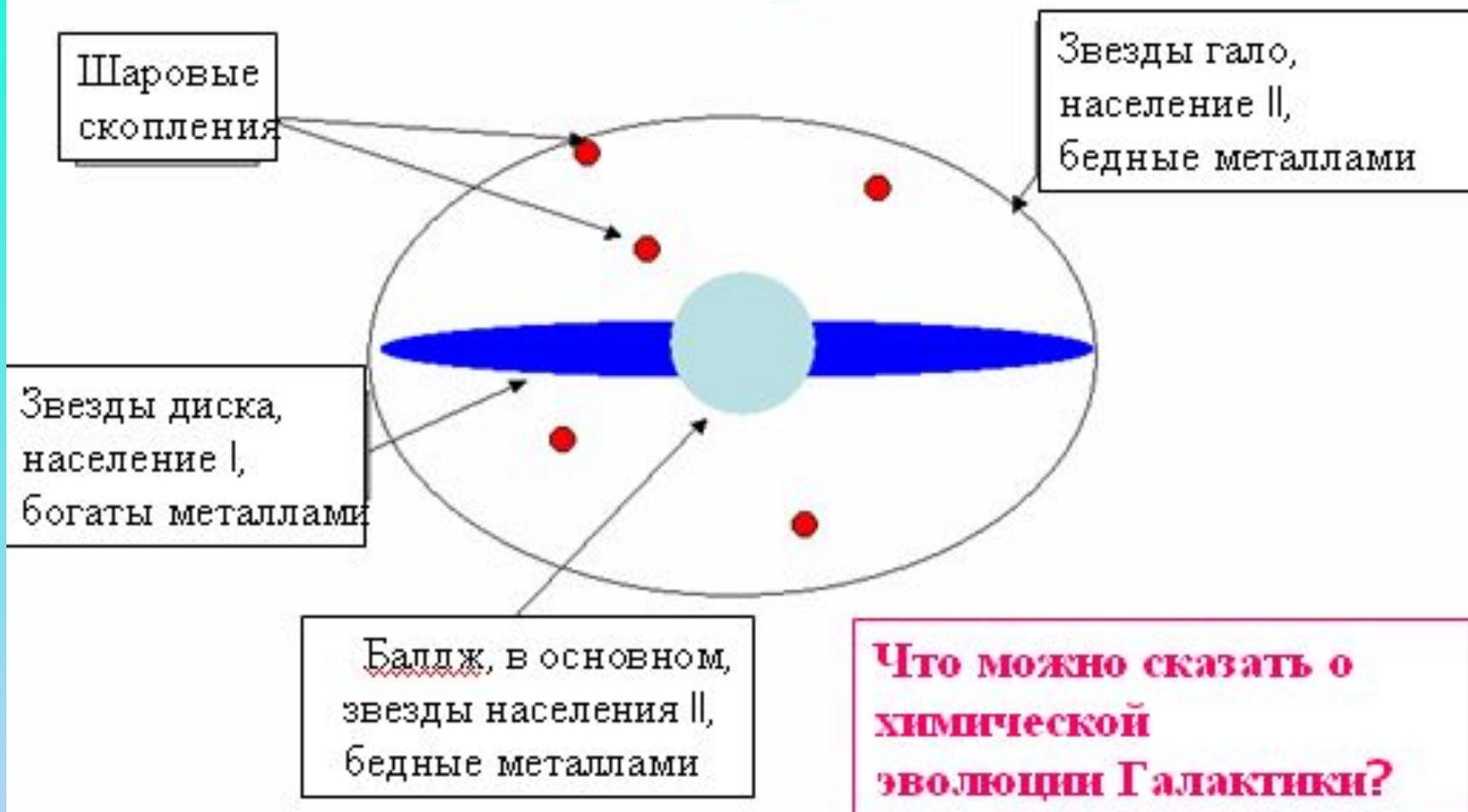
Элемент	% по числу	% по массе
Hydrogen	92.0	73.4
Helium	7.8	25.0
Oxygen	0.06	0.8
Carbon	0.02	0.20
Neon	0.01	0.16
Nitrogen	0.008	0.09
Silicon	0.004	0.09
Iron	0.003	0.14

Солнечное содержание (Grevesse & Sauval)

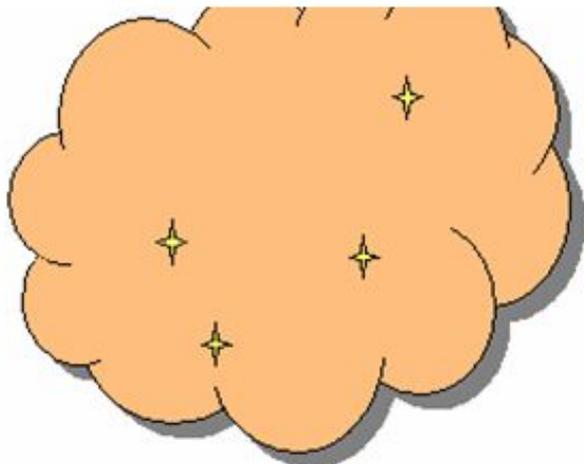




Химическое содержание: галактические вариации

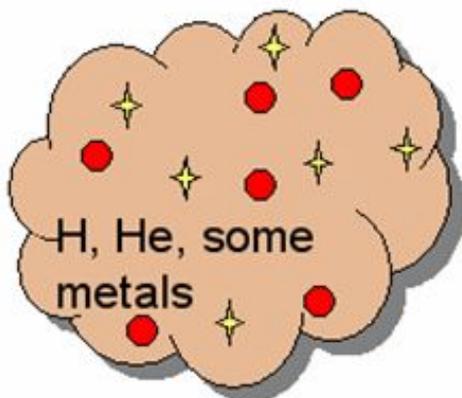


Химическое содержание: галактические вариации



$t=t_0$

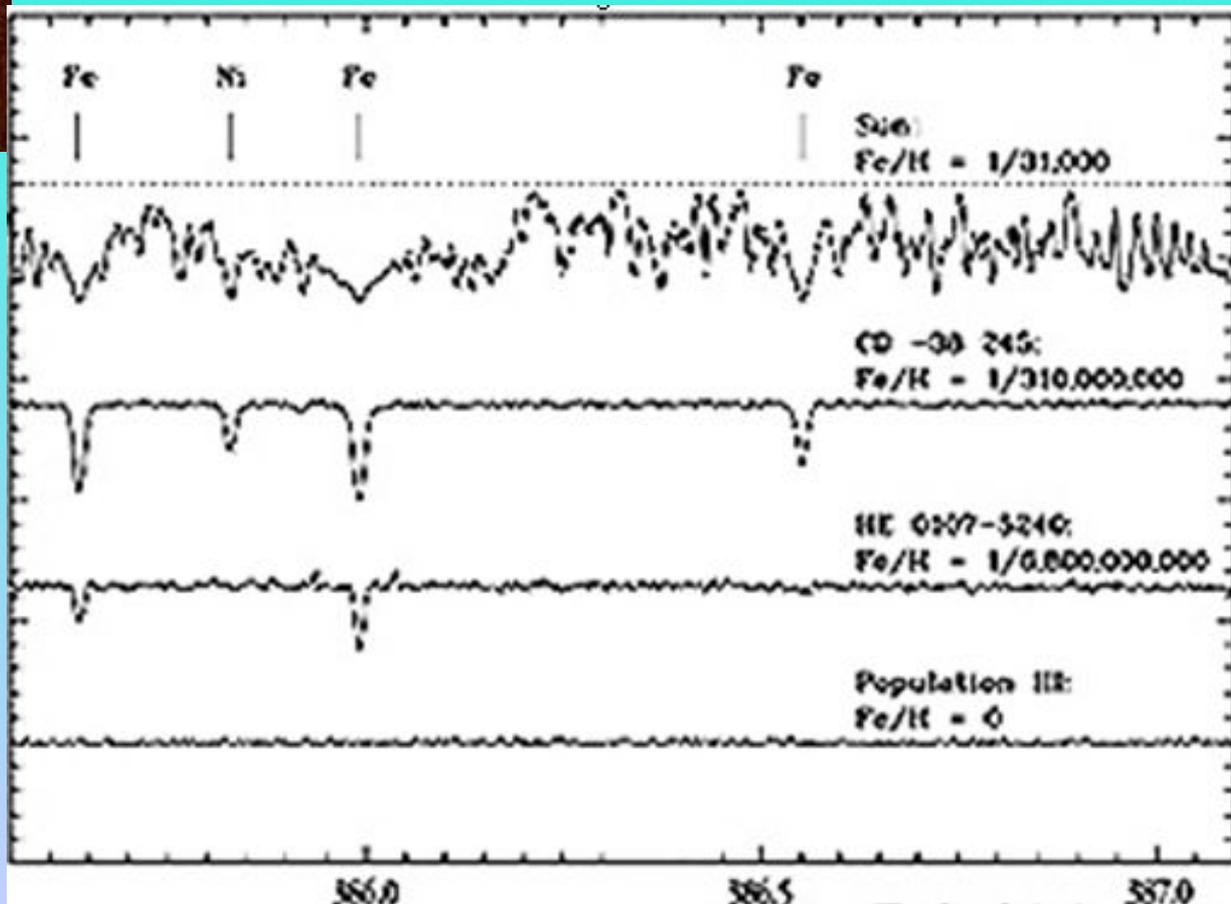
Звезды населения III на начальной стадии развития Галактики ($t=t_0$) состояли из водорода и гелия.



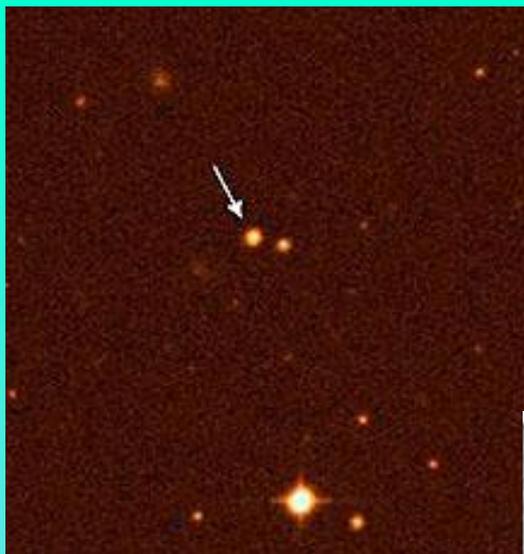
$t=t_1$

Позднее после эволюции массивных звезд за счет вспышек Сверхновых произошло незначительное обогащение межзвездной среды тяжелыми элементами. Теперь образуются звезды населения II и шаровые скопления.

Звезда HE0107-5240, имеет очень малое содержание тяжелых элементов. Соответственно ее возраст оценивается в 12 млрд лет: это самая старая



Спектры звезд
разной
металличности.



Stellar Composition

Population	Metals
I	1.6% more
II	0.1% less

Причины аномального химического состава звезд

- 1. Звезды Ар** имеют аномальное содержание редкоземельных элементов (например, европий имеет содержание в 10 000 раз большее), чем обычные звезды.
- 2. Имеются гипотезы:**
 - аккреция планетозималей,
 - внутренние ядерные реакции с перемешиванием по звезде,
 - ядерные реакции на поверхности звезды,
 - магнитная аккреция.
- 3. Но наиболее приемлимая гипотеза – это диффузия.**

Теория диффузии

1. А звезды имеют достаточно высокую эффективную температуру.
2. А звезды имеют внешнюю конвективную оболочку.
3. Если элемент имеет много спектральных линий в области максимум излучения звезды, то световое давление будет «выдавливает» этот элемент к поверхности. В результате этот элемент будет показывать избыток в содержании.
4. Если элемент не имеет спектральных линий в области максимум излучения звезды, то этот элемент будет опускаться вглубь под влиянием своего веса. В результате этот элемент будет показывать дефицит в содержании.

$$\partial \log A / \partial \log g$$

T_{eff}	Ca I	Ca II	Cr I	Cr II	Fe I	Fe II
7200	0.02	-0.33	0.02	-0.33	0.01	-0.33
5040	0.00	-0.39	0.00	-0.40	-0.11	-0.45
3870	-0.06	-0.43	-0.26	-0.53	-0.35	-0.60

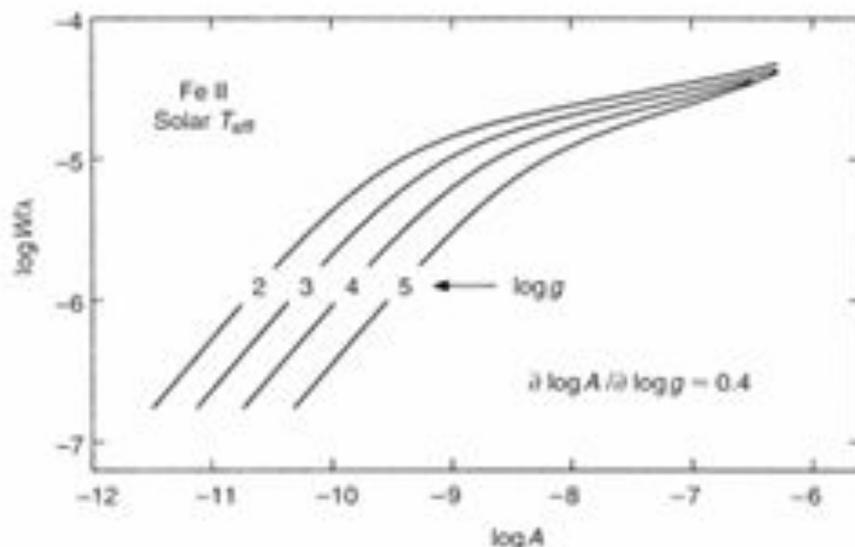


Fig. 16.3. Curves of growth for ions like Fe II are surface-gravity dependent in cool stars.

As long as an element is mostly ionized, lines neutral species are insensitive to gravity.

The equivalent width of ionized lines vary as $g^{-1/2}$

As long as the element is mostly ionized, lines of neutral species are insensitive to gravity changes. Lines of ions are sensitive to gravity roughly as $g^{-1/2}$

A separate and independent analysis can be done for the ions and neutrals of the same element. Both should have the same abundance, A . Gravity is a free parameter and you vary it until you force both ions and neutrals to give the same abundance.

Try to avoid strong lines in abundance analyses because of errors due to saturation

Дополнение

Задача 1:

- В спектре звезды «а» в рассеянном скоплении эквивалентная ширина линии перехода FeI с уровня с энергией 2.5 eV равна $W_\lambda = 25 \text{ mÅ}$. Температура звезды равна 5200 K.
- В спектре другой звезды «в» этого же скопления эта же линия имеет $W_\lambda = 35 \text{ mÅ}$.
- Какова температура звезды «в»? Предполагается, что химический состав обеих звезд одинаков.
- Допустим, что температуры обеих звезд одинаковы. Каковы будут различия в содержании железа у этих двух звезд?

Эффект силы тяжести на кривую роста для слабых линий

- Ионизационное равновесие и непрозрачность зависят от $\log g$
- Для нейтральных (например, Fe I в спектре Солнца) эти эффекты уничтожаются, так что кривая роста не зависит от $\log g$
- Для линий ионизованных атомов (например, Fe II в спектре Солнца), кривая роста смещается вправо с ростом $\log g$ по закону примерно $g^{1/3}$

Влияние микротурбуленции на кривую роста

- Наблюдаемые W для насыщенных линий больше, чем предсказывает теория кривых роста с учетом только теплового движения, естественного затухания и роли ударов.
- Микротурбуленция обычно считается изотропной с гауссовым распределением скоростей.
- V_{turb} есть свободный ad hoc параметр при анализе с типичным значением 0.5 - 5 км/сек
- Более низкосветимые звезды имеют более низкие значения микротурбулентной скорости.
- Микротурбуленция обычно определяется как параметр, который делает определение химического содержания независимым от силы линий.

Зачем важен химсостав

Assumptions: 1 solar mass, zero age, initial homogenous chemical composition.

Equations: Laws of mass, momentum and energy conservation + energy transport and nuclear reactions.

Run time: Model is allowed to evolve to current solar age.

Crucial: Results need to match observed solar luminosity, radius and mass.
The model should reproduce the observed surface composition.*

Abundances: Observed surface values assumed to be the initial solar chemical composition.

Excepting - H, Li, Be & B -- affected by nuclear burning and diffusion
He which is a free parameter and is not observed in photosphere.

Astrophysics Importance:

Stellar evolutionary calculations are calibrated with respect to the SSM.

What are the current dilemmas in solar abundance research

Helium: Not present in photospheric spectrum and is largely lost by meteorites. Values must be inferred from the corona or the solar wind, but these have large uncertainties (lines formed in non-LTE). Best to use models to get He abundance.

Lithium, Beryllium & Boron: Can all be burned by nuclear processes. Li at $\sim 2.5 \times 10^6$ K. Be at 3×10^6 K. Li is depleted by 160 whereas Be and B are not depleted. Evidence of the depth of the convection zone! It appears the the solar convection cell has reached deep enough to burn Li, but not Be and B.

Neon, Argon: Not present in photospheric spectrum and lost by meteorites so there is uncertainty in the values.

Carbon, Nitrogen, Oxygen: These elements are lost by meteorites but are found in the photosphere. Their abundances are dependent upon the treatment of the atmospheric conditions - LTE or non-LTE. Oxygen is also a reference line for Ne and Ar, so if it's abundance is changed then the abundances of Ne and Ar also scale up or down.