

Влияние надтепловых (α, p)-процессов на солнечный CNO-цикл

В.Т. Ворончев (НИИЯФ МГУ)

в сотрудничестве с

Я. Накао и Ю. Ватанабэ (Университет Кюсю)

Comparative roles of pp chain reactions as a trigger for suprathreshold processes in the solar core

Victor T. Voronchev,^{1,*} Yasuyuki Nakao,^{2,†} and Yukinobu Watanabe^{3,‡}

¹*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*

²*Green Asia Education Center, Kyushu University, 6-1 Kasuga-koen, Kasuga, Fukuoka 816-8580, Japan*

³*Department of Advanced Energy Engineering Science, Kyushu University, 6-1 Kasuga-koen, Kasuga, Fukuoka 816-8580, Japan*

IOP Publishing

Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics

J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 44 (2017) 045202 (21pp)

<https://doi.org/10.1088/1361-6471/aa5f30>

Analysis of suprathreshold nuclear processes in the solar core plasma

Victor T Voronchev^{1,4}, Yasuyuki Nakao² and Yukinobu Watanabe³

Nonthermal nuclear reactions induced by fast α particles in the solar core

Victor T. Voronchev^{*}

Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ И ПОЛЯ

О НЕТЕПЛОВЫХ ЯДЕРНЫХ ПРОЦЕССАХ В ЦЕНТРЕ СОЛНЦА

© 2015 г. В. Т. Ворончев^{*}

*Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Россия*

МОТИВАЦИЯ

Ядерная кинетика

Стандартный подход к описанию кинетики реакций в (квази)равновесной плазменной среде

-- сетка тепловых реакций между максвелловскими частицами.

Реальные условия

-- возможное искажение стандартной картины за счет ряда эффектов, влияющих на протекание реакций в горячей плазме.

Классические эффекты

-- надтепловые процессы с **быстрыми частицами**, образующимися в среде естественным образом.



а) первичный механизм

генерация в экзотермических ядерных реакциях

б) вторичный механизм

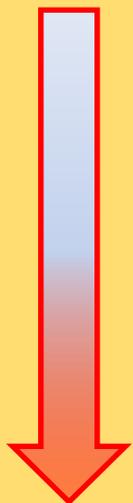
близкие соударения нетермализованных продуктов реакций с тепловыми частицами среды

Влияние быстрых частиц на скорости реакций

Фактор “ + ”: сечения реакций обычно растут с увеличением энергии частиц

Фактор “ — ”: количество быстрых частиц мало

Фактор “ + & — ”



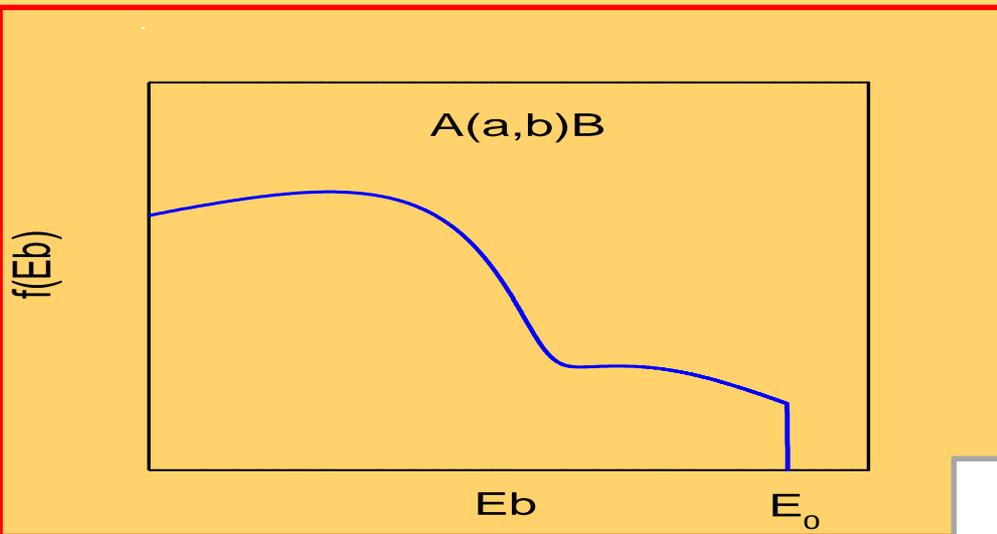
низкоэнергетические
резонансы

прямые реакции

высокоэнергетические
резонансы

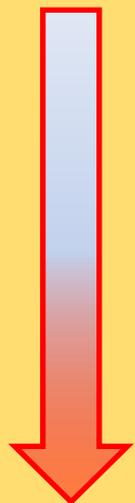
пороговые реакции
(обратные процессы !)

Влияние быстрых частиц на скорости реакций

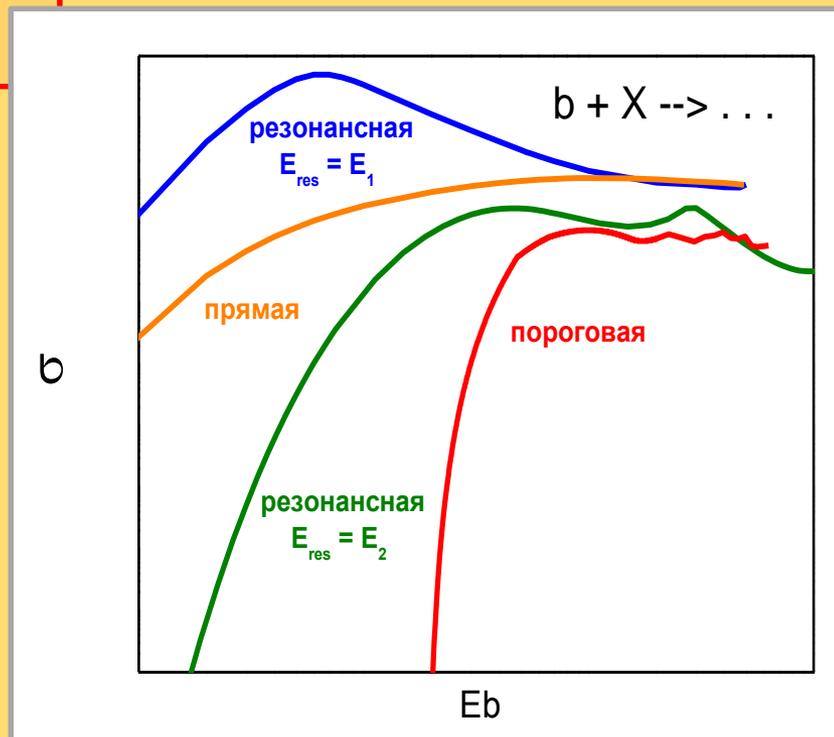


напр., Nakamura et al., PLA 2006

Фактор “+ & -”



- низкоэнергетические резонансы
- прямые реакции
- высокоэнергетические резонансы
- пороговые реакции (обратные процессы !)



Обнаруженные ранее эффекты

1) Лабораторная плазма (напр., DT/⁶Li)

вторичный механизм быстрых частиц – соударения ионов топлива с МэВными продуктами реакций синтеза)

реакции для гамма-лучевой диагностики плазмы $A(a,b)V^* \rightarrow \gamma + V$

Nakamura et al., PLA 2006; J.Phys.Soc.Jpn2006; NIMA2007

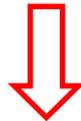
2) Горячая Вселенная (эпоха первичного нуклеосинтеза)

первичный механизм быстрых частиц – продукты d+d, d+t, d+³He реакций

реакции развала слабосвязанных ядер d, ⁷Li, ⁷Be

Voronchev et al., PRD2012; ApJ2010; JCAP2009; JCAP2008

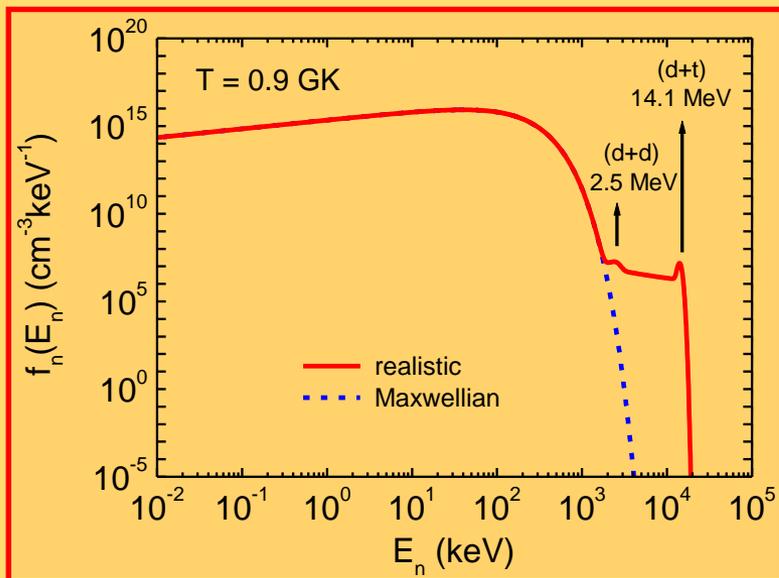
Nakao et al., PRD2011



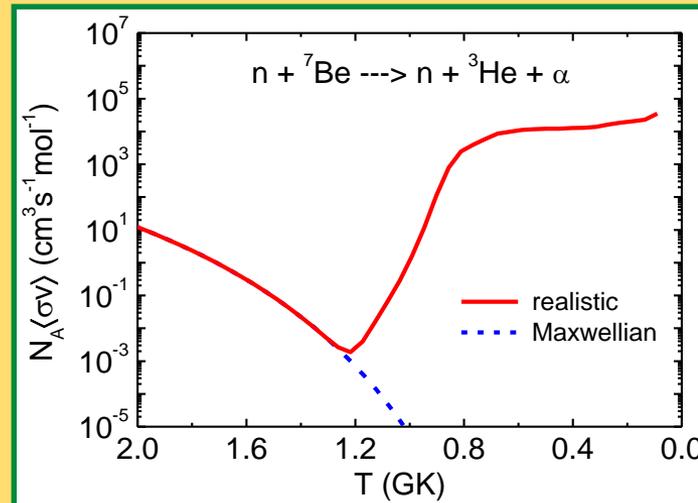
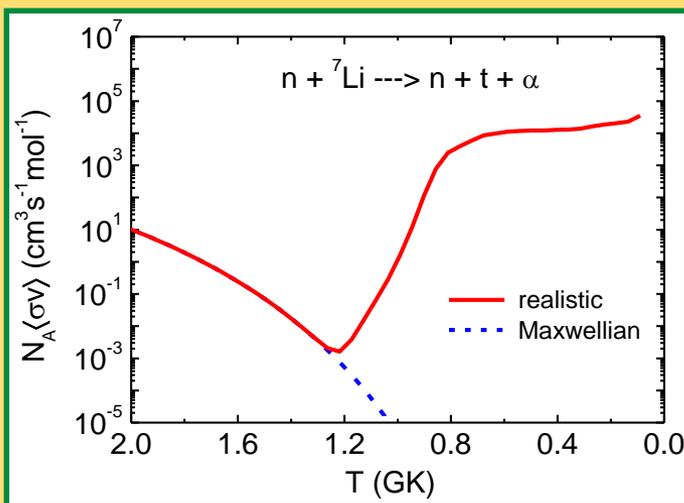
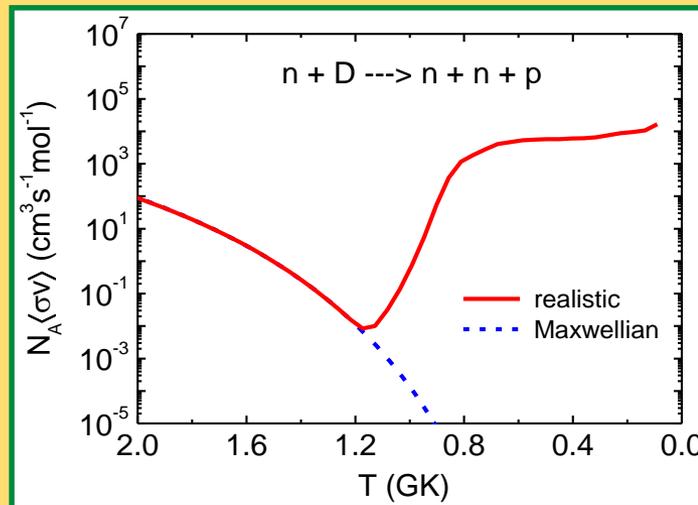
• **Сильное влияние на скорости индивидуальных реакций !**

Обнаруженные раннее эффекты

Пример: реакции $d(n,p)n$, ${}^7\text{Li}(n,t)\alpha$, ${}^7\text{Be}(n,{}^3\text{He})\alpha$ в горячей Вселенной



Nakao et al., PRD2011



Модель надтепловых процессов

Модельное описание надтепловых процессов в солнечном ядре

- ✓ Генерация быстрых частиц
- ✓ Ядерные реакции “на лету”
- ✓ Энергетические потери частиц в солнечном ядре
- ✓ Термализация быстрых частиц
- ✓ Эффективная температура и концентрация немаксвелловских частиц
- ✓ Скорость надтепловых реакций
- ✓ Особенности процессов в плотной плазменной среде
 - вырождение электронов
 - электронная экранировка

Скорость генерации быстрых частиц k в реакции $i + j \rightarrow k + \dots$

$$R_{k,ij} = N_k \times R_{ij},$$

$$R_{ij} = (1 + \delta_{ij})^{-1} n_i n_j \langle \sigma v \rangle_{ij},$$

$$\langle \sigma v \rangle_{ij} = (n_i n_j)^{-1} \int \int f_i(\mathbf{v}_i) f_j(\mathbf{v}_j) \sigma(|\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j|) |\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j| d\mathbf{v}_i d\mathbf{v}_j.$$

Описание надтепловых процессов: формализм реакций “на лету” k (быстр.) + l (тепл.)

(квази)монохроматические частицы

$$W_{kl}(E_{k,0} \rightarrow E_{th}) = 1 - \exp \left[\int_{E_{th}}^{E_{k,0}} \left(\frac{2E_k}{m_k} \right)^{1/2} \frac{n_l \sigma(E_k)}{(dE_k/dt)} dE_k \right].$$

частицы с непрерывным энергетическим спектром ($E_1 \leq E_k \leq E_2$)

$$W_{kl} = \frac{\int_{\max[E_1, E_{th}]}^{E_2} W_{kl}(E'_k \rightarrow E_{th}) S(E'_k) dE'_k}{\int_{E_1}^{E_2} S(E'_k) dE'_k}$$

Скорость потери энергии быстрой частицы

$$\left(\frac{dE_k}{dt}\right) = \left(\frac{dE_k}{dt}\right)_{\text{Coul}} + \left(\frac{dE_k}{dt}\right)_{\text{NES}}.$$

Models for $(dE_k/dt)_{\text{Coul}}$

- 1. A standard binary-collision model with a Debye cutoff.**
Sivukhin Rev.Plasma Phys1966 [SIV66]
- 2. A model based on the Fokker-Planck collision theory.**
Kamelander1986 [KAM86]
- 3. A reduced model which conveniently interpolates between limiting cases for energy loss based on classical and quantum kinetic equations.**
Edie et al., EPJ Web Conf.2013 [EVRG13]
- 4. A model considering that a charged particle passing through a plasma induces an electric field which acts back on this particle and ultimately decreases its kinetic energy.**
Skupsky, PRA1977 [SKUP77]

Скорость потери энергии быстрой частицы

$$\left(\frac{dE_k}{dt}\right) = \left(\frac{dE_k}{dt}\right)_{\text{Coul}} + \left(\frac{dE_k}{dt}\right)_{\text{NES}}$$

Models for $(dE_k/dt)_{\text{Coul}}$

1. **A standard binary-collision model with a Debye cutoff.**

Sivukhin Rev.Plasma Phys1966 [SIV66]

2. **A model based on the Fokker-Planck collision theory.**

Kamelander1986 [KAM86]

3. **A reduced model which considers energy loss based on collisional energy transfer.**

Edie et al., EPJ Web Conf.2013

Model for $(dE_k/dt)_{\text{NES}}$

Nakao et al., NF1981;

Perkins&Cullen, NSE1981; Devaney&Stein,NSE1971;

4. **A model considering that a particle induces an electric field which decreases its kinetic energy.**

Skupsky, PRA1977 [SKUP77]

$$\left(\frac{dE_k}{dt}\right)_{\text{NES}} = - \sum_i \left(\frac{2E_k}{m_k}\right)^{1/2} n_i E_k \left(1 - \frac{3T}{2E_k}\right) \times \frac{4\pi m_k m_i}{(m_k + m_i)^2} \int_{b(-1,0)}^1 \sigma(E_k, \mu)(1 - \mu) d\mu,$$

Кулоновские потери

$$\left(\frac{dE_k}{dt}\right)_{\text{Coul}} = \left(\frac{dE_k}{dt}\right)_e + \sum_i \left(\frac{dE_k}{dt}\right)_i,$$

1. [SIV66]

$$\left(\frac{dE_k}{dt}\right)_j = -\frac{4\pi(Z_k Z_j)^2 e^4}{(2m_j T_j)^{1/2}} n_j \ln \Lambda_{kj} \frac{\Psi(x_j)}{x_j},$$
$$\Psi(x_j) = \text{erf}(x_j) - \frac{2}{\pi^{1/2}} \left(1 + \frac{m_j}{m_k}\right) x_j \exp(-x_j^2),$$
$$x_j = \left(\frac{m_j E_k}{m_k T_j}\right)^{1/2}.$$

Кулоновские потери

$$\left(\frac{dE_k}{dt}\right)_{\text{Coul}} = \left(\frac{dE_k}{dt}\right)_e + \sum_i \left(\frac{dE_k}{dt}\right)_i,$$

2. [KAM86]

$$\left(\frac{dE_k}{dt}\right)_j = -\frac{8\pi^2(Z_k Z_j)^2 e^4 (2m_k)^{1/2}}{m_j E_k^{1/2}} \ln \Lambda_{kj} \times G_j(v_k).$$

$$G_j(v_k) = J_{j,2} \left[1 - \frac{m_j (J_{j,4} + J_{j,1} v_k^3)}{3E_k J_{j,2}} \right]$$

$$f_e(v_e) = \frac{1}{4\pi^3} \left(\frac{m_e}{\hbar}\right)^3 \left[\exp\left(\frac{m_e v_e^2}{2T_e} - \eta\right) + 1 \right]^{-1}.$$

$$J_{j,1}(v_k) = \int_{v_k}^{\infty} v_j f_j(v_j) dv_j,$$

$$J_{j,2}(v_k) = \int_0^{v_k} v_j^2 f_j(v_j) dv_j,$$

$$J_{j,4}(v_k) = \int_0^{v_k} v_j^4 f_j(v_j) dv_j,$$

Кулоновские потери

$$\left(\frac{dE_k}{dt}\right)_{\text{Coul}} = \left(\frac{dE_k}{dt}\right)_e + \sum_i \left(\frac{dE_k}{dt}\right)_i,$$

3. [EVRG13]

$$\left(\frac{dE_k}{dt}\right)_e = -\frac{4\pi Z_k^2 e^4}{m_e v_k} n_e \ln \Lambda \times \Psi(x_0),$$

$$x_0 = \left(\frac{m_e E_k}{m_k T_e}\right)^{1/2} \left[\frac{\sqrt{\pi}}{2F_{1/2}(\eta)(1+e^{-\eta})}\right]^{1/3}.$$

$$\ln \Lambda = \frac{2m_e v_e^2}{\hbar\omega_e} \frac{0.321 + 0.259x_0^2 + 0.0707x_0^4 + 0.05x_0^6}{1 + 0.13x_0^2 + 0.05x_0^4},$$

Кулоновские потери

$$\left(\frac{dE_k}{dt}\right)_{\text{Coul}} = \left(\frac{dE_k}{dt}\right)_e + \sum_i \left(\frac{dE_k}{dt}\right)_i,$$

4. [SKUP77] V_k меньше $\langle V_e \rangle$

$$\left(\frac{dE_k}{dt}\right)_e = -E_k n_e \frac{Z_k^2 e^4 (2m_e)^{1/2}}{T_e^{3/2}} \frac{4}{m_k} \left[\frac{\pi}{F_{1/2}(\eta)} \frac{1}{e^{-\eta} + 1} \right] \ln \Lambda_{\text{RPA}},$$

$$F_{1/2}(\eta) = \int_0^\infty \frac{x^{1/2} dx}{e^{x-\eta} + 1}.$$

$$\ln \Lambda_{\text{RPA}} = (1 + e^{-\eta}) \int_0^\infty \frac{k^3}{(k^2 + k_0^2)^2} \left[\exp\left(\frac{\hbar^2 k^2}{8m_e T_e} - \eta\right) + 1 \right]^{-1} dk,$$

$$k_0^2 = k_D^2 F'_{1/2}(\eta) / F_{1/2}(\eta) \text{ and } k_D^2 = 4\pi n_e e^2 / T_e.$$

Параметры термализации быстрых частиц

$$l_{k,\text{th}}(E_{k,0} \rightarrow E_{\text{th}}) = \int_{E_{\text{th}}}^{E_{k,0}} \frac{(2E_k/m_k)^{1/2} dE_k}{(dE_k/dt)},$$

$$\tau_{k,\text{th}}(E_{k,0} \rightarrow E_{\text{th}}) = \int_{E_{\text{th}}}^{E_{k,0}} \frac{dE_k}{(dE_k/dt)}.$$

Эффективная концентрация быстрых частиц

$$n_{k,\text{sprth}} = R_{k,ij} \times \tau_{k,\text{th}},$$

Эффективная температура быстрых частиц

Метод максвелловской аппроксимации давления частиц,
или их средней энергии

$$\left\langle \frac{m_k v_k^2}{2} \right\rangle_{\text{FP}} \simeq \left\langle \frac{m_k v_k^2}{2} \right\rangle_{\text{M}} = \frac{3}{2} T_{k,\text{eff}}$$



$$T_{k,\text{eff}} = \frac{2I_4(v_c/v_{k,0})}{3I_2(v_c/v_{k,0})} E_{k,0}, \quad I_n(a) \equiv \int_0^1 \frac{x^n}{a^3 + x^3} dx,$$

Estrada-Mila et al., PP2006

Скорость надтепловой реакции “на лету”

е-вырождение



е-экранировка

$$R_{kl,\text{sprth}} = W_{kl} \times R_{k,ij},$$

$$R_{kl,\text{sprth}} = n_{k,\text{sprth}} n_l \langle \sigma v \rangle_{kl,\text{sprth}},$$

$$\langle \sigma v \rangle_{kl,\text{sprth}} = \frac{W_{kl} R_{k,ij}}{n_{k,\text{sprth}} n_l} = \frac{W_{kl}}{\tau_{k,\text{th}} n_l}.$$

Электронная экранировка тепловых реакций

Salpeter, AJP1954; Gruzinov&Bahcall, ApJ1998

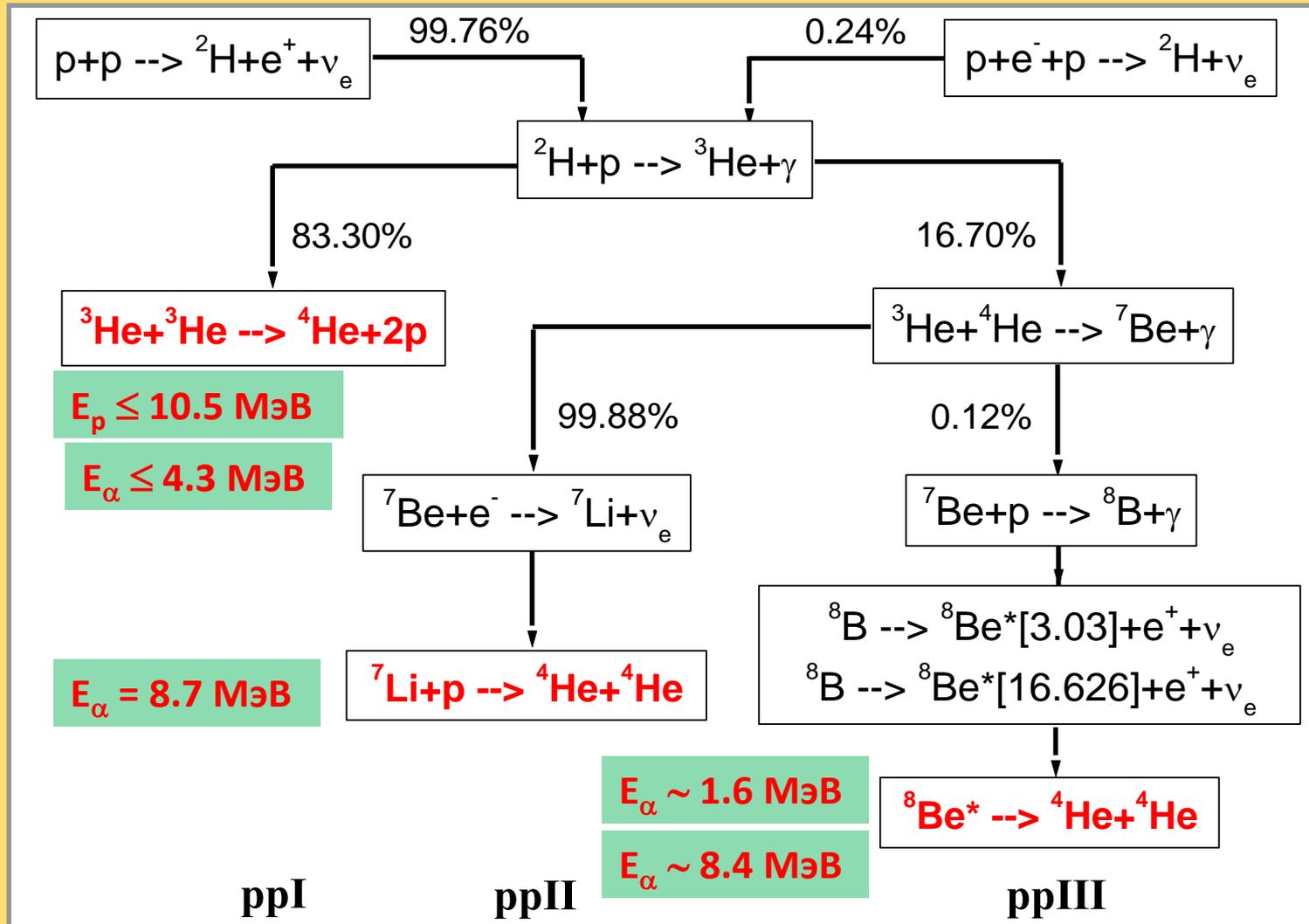
$$f_{ab} = \sigma / \sigma_{\text{bare}}$$

$$f_{ab} = \exp\left(\frac{Z_a Z_b e^2}{T \lambda'_D}\right),$$

$$\frac{1}{\lambda_D'^2} = \sum_i \frac{4\pi Z_i^2 e^2 n_i}{T} + \frac{4\pi e^2 n_e}{T} \left(\frac{f'}{f}\right).$$

Постановка задачи: pp + CNO

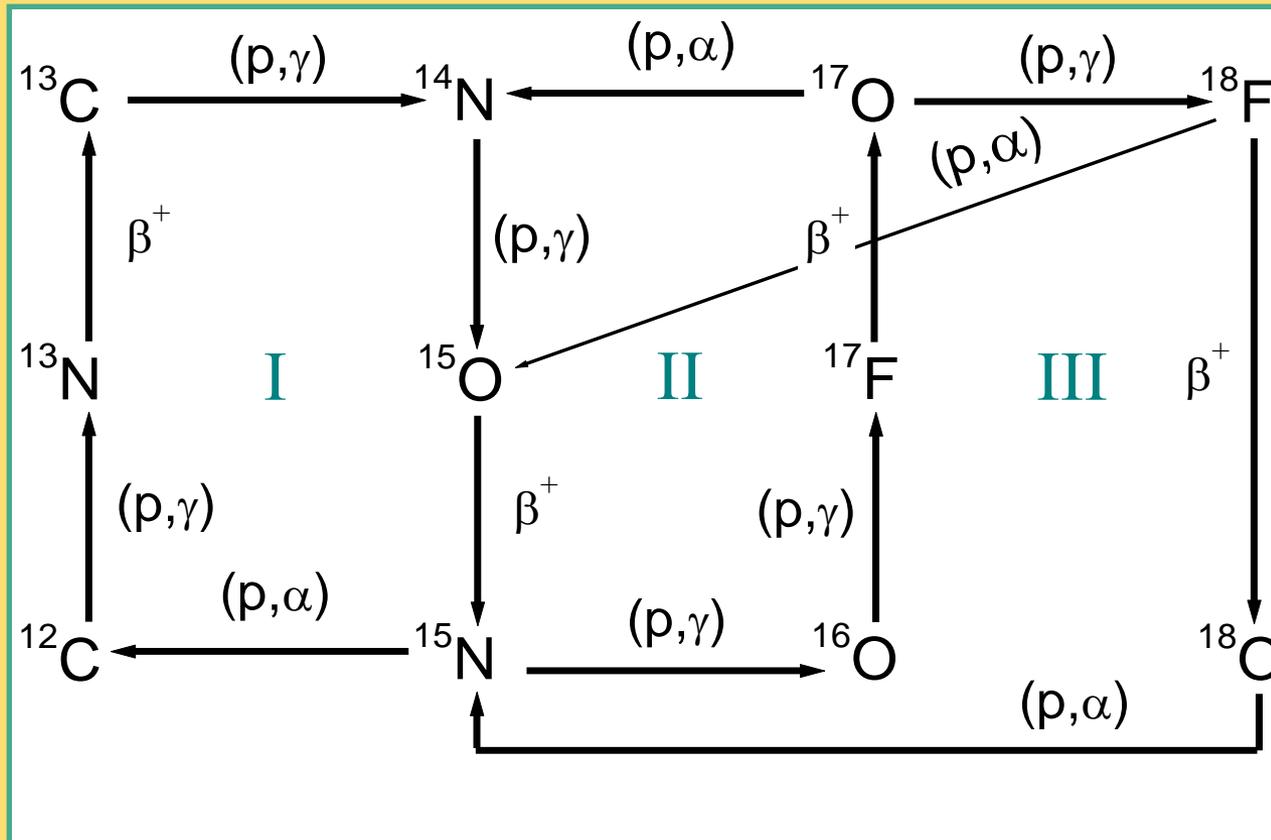
pp-цепочка как источник МэВных протонов и α-частиц



CNO-цикл: реакции $p + X \leftrightarrow \alpha + Y$

No.	Reaction	Q_{for} (MeV)	$E_{\alpha, \text{thr}}$ (MeV)
1	$p + {}^{15}\text{N} \rightleftharpoons \alpha + {}^{12}\text{C}$	4.966	6.621
2	$p + {}^{17}\text{O} \rightleftharpoons \alpha + {}^{14}\text{N}$	1.191	1.531
3	$p + {}^{18}\text{O} \rightleftharpoons \alpha + {}^{15}\text{N}$	3.980	5.041
4	$p + {}^{18}\text{F} \rightleftharpoons \alpha + {}^{15}\text{O}$	2.882	3.650

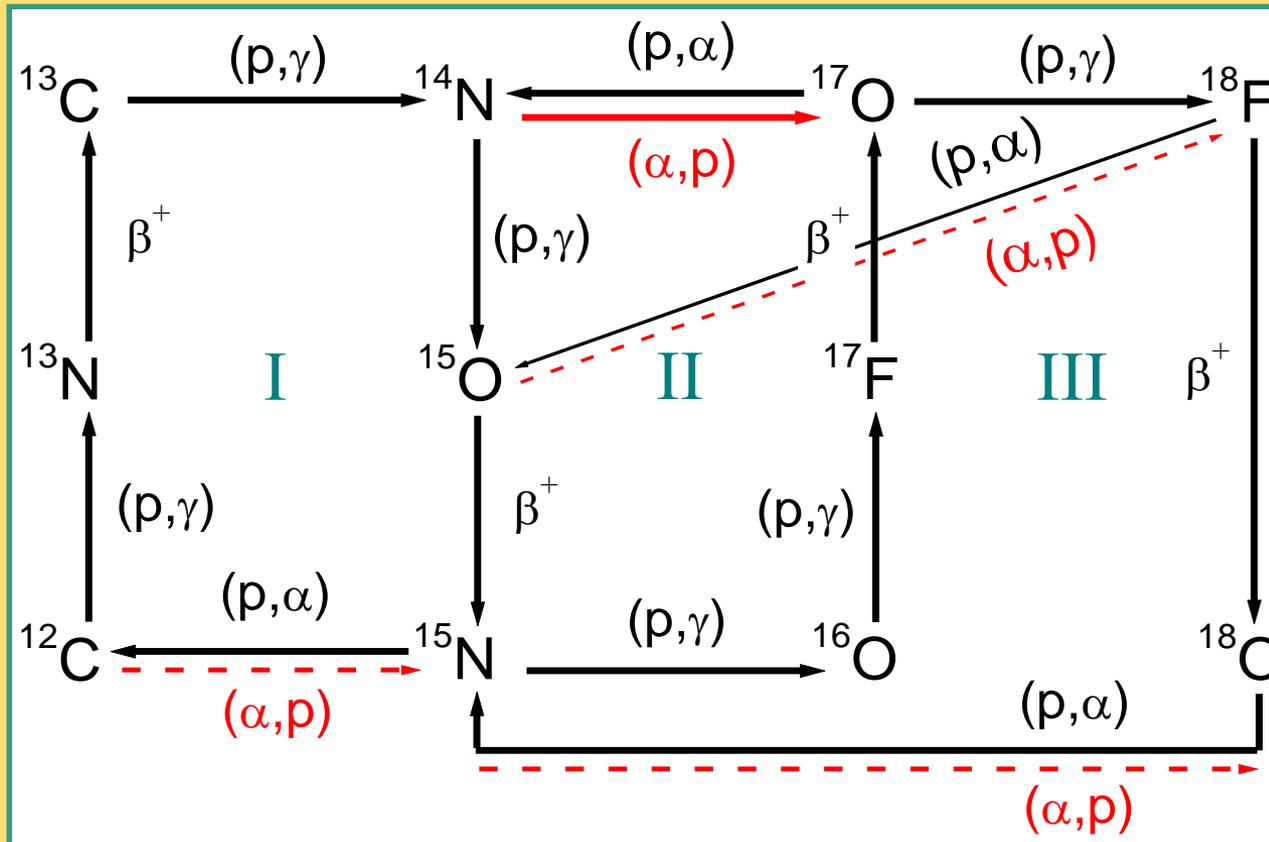
$E_{\alpha}(pp) \leq 8.7\text{МэВ}$



CNO-цикл: реакции $p + X \leftrightarrow \alpha + Y$

No.	Reaction	Q_{for} (MeV)	$E_{\alpha, \text{thr}}$ (MeV)
1	$p + {}^{15}\text{N} \rightleftharpoons \alpha + {}^{12}\text{C}$	4.966	6.621
2	$p + {}^{17}\text{O} \rightleftharpoons \alpha + {}^{14}\text{N}$	1.191	1.531
3	$p + {}^{18}\text{O} \rightleftharpoons \alpha + {}^{15}\text{N}$	3.980	5.041
4	$p + {}^{18}\text{F} \rightleftharpoons \alpha + {}^{15}\text{O}$	2.882	3.650

$E_{\alpha}(pp) \leq 8.7\text{МэВ}$



CNO-цикл: реакции $p + X \leftrightarrow \alpha + Y$

No.	Reaction	Q_{for} (MeV)	$E_{\alpha,\text{thr}}$ (MeV)
1	$p + {}^{15}\text{N} \rightleftharpoons \alpha + {}^{12}\text{C}$	4.966	6.621
2	$p + {}^{17}\text{O} \rightleftharpoons \alpha + {}^{14}\text{N}$	1.191	1.531
3	$p + {}^{18}\text{O} \rightleftharpoons \alpha + {}^{15}\text{N}$	3.980	5.041
4	$p + {}^{18}\text{F} \rightleftharpoons \alpha + {}^{15}\text{O}$	2.882	3.650

Прямая и обратная реактивности для максвелловских частиц

$$\frac{\langle \sigma v \rangle_{\alpha Y \rightarrow p X}}{\langle \sigma v \rangle_{p X \rightarrow \alpha Y}} = \frac{(1 + \delta_{\alpha Y})}{(1 + \delta_{p X})} \left(\frac{G_p G_X}{G_\alpha G_Y} \right) \left(\frac{A_p A_X}{A_\alpha A_Y} \right)^{3/2} \exp(-Q/T)$$

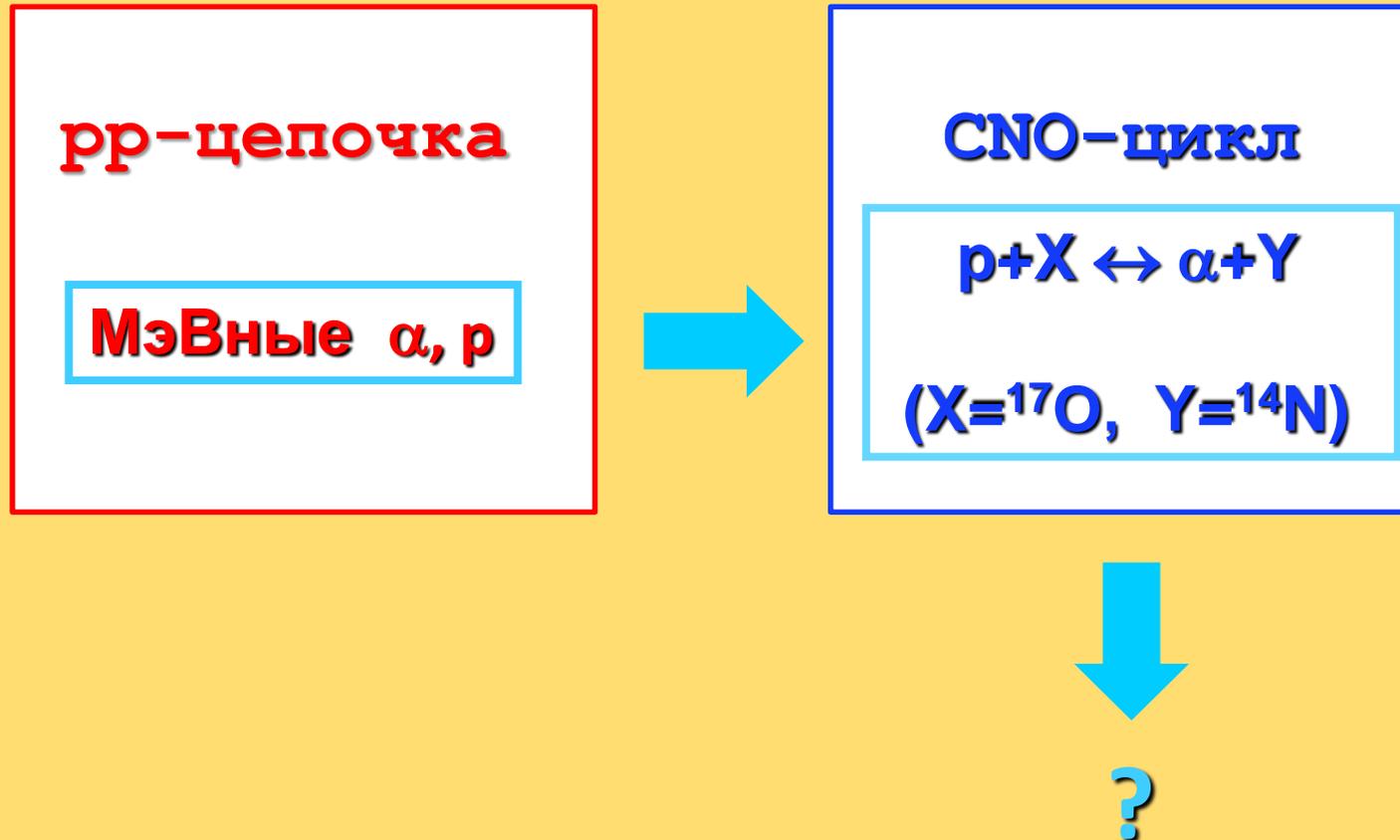
напр., Fowler et al., Ann.Rev.Astron.Astrophys.1967

Солнечное ядро: $Q \approx 1\text{--}5$ МэВ, $T \leq 1.3$ кэВ



$${}^{14}\text{N}(\alpha, p){}^{17}\text{O} / {}^{17}\text{O}(p, \alpha){}^{14}\text{N} \leq \exp(-916) \approx 0$$

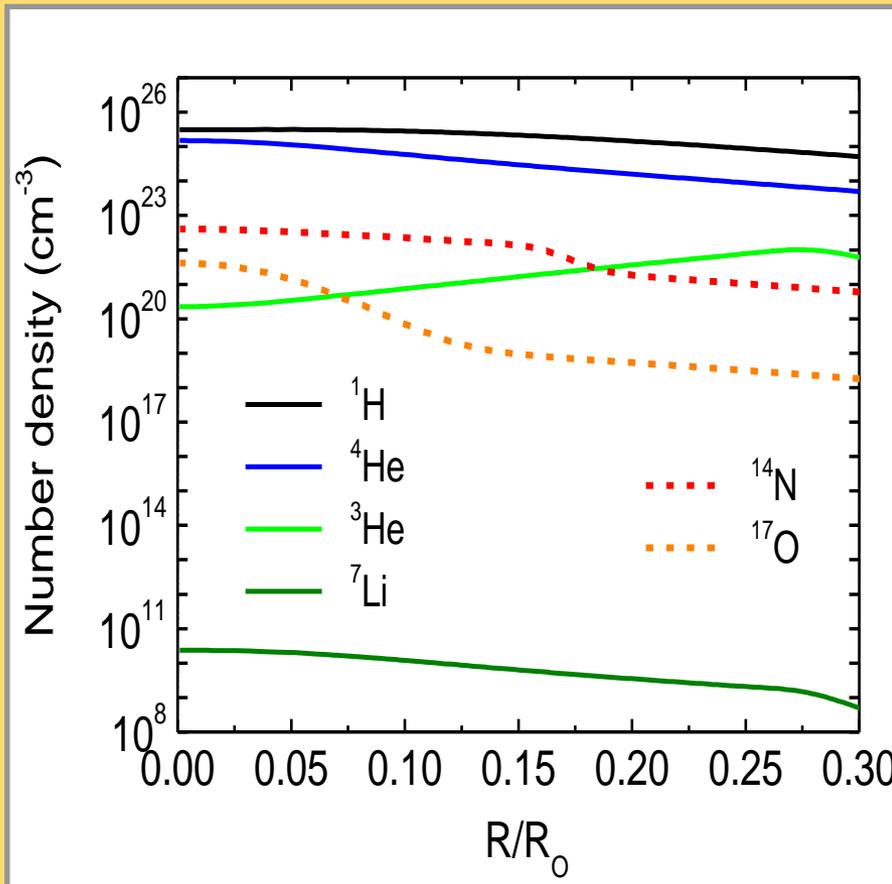
Каков результат бомбардировки CNO-цикла быстрыми продуктами pp-цепочки ?



- неравновесные ядерные процессы в (квази)равновесной плазме

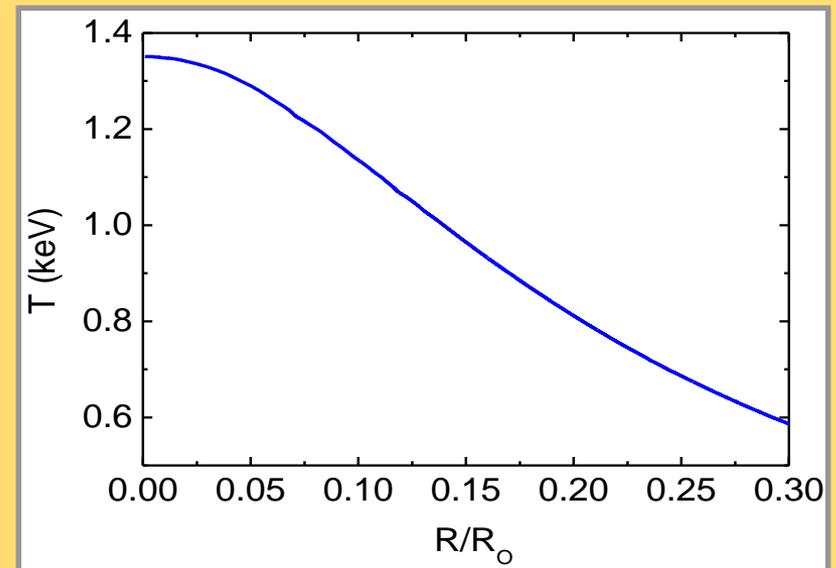
Характеристики быстрых частиц

Радиальные профили концентрации элементов и температуры в солнечном ядре

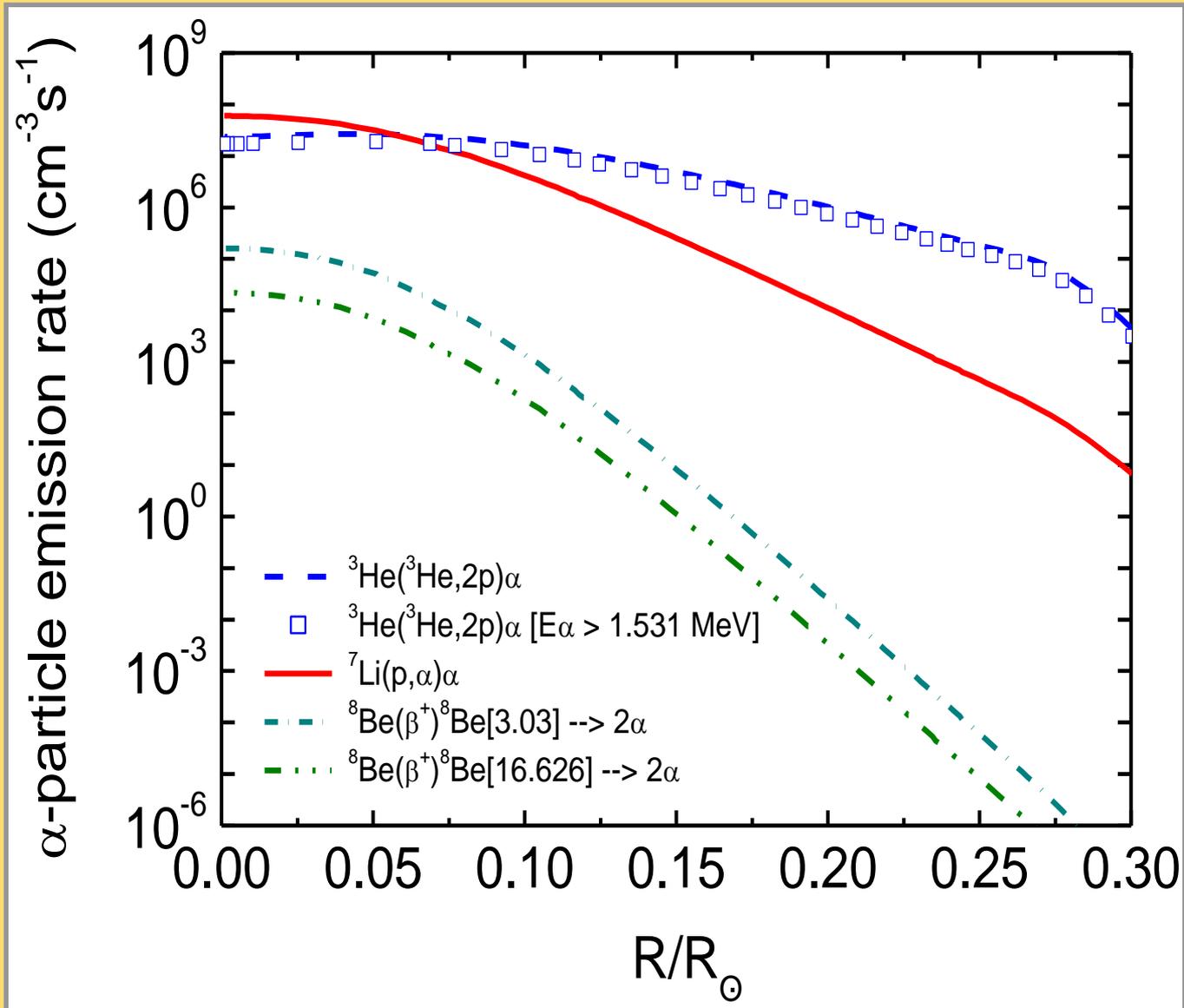


MESA v.2011

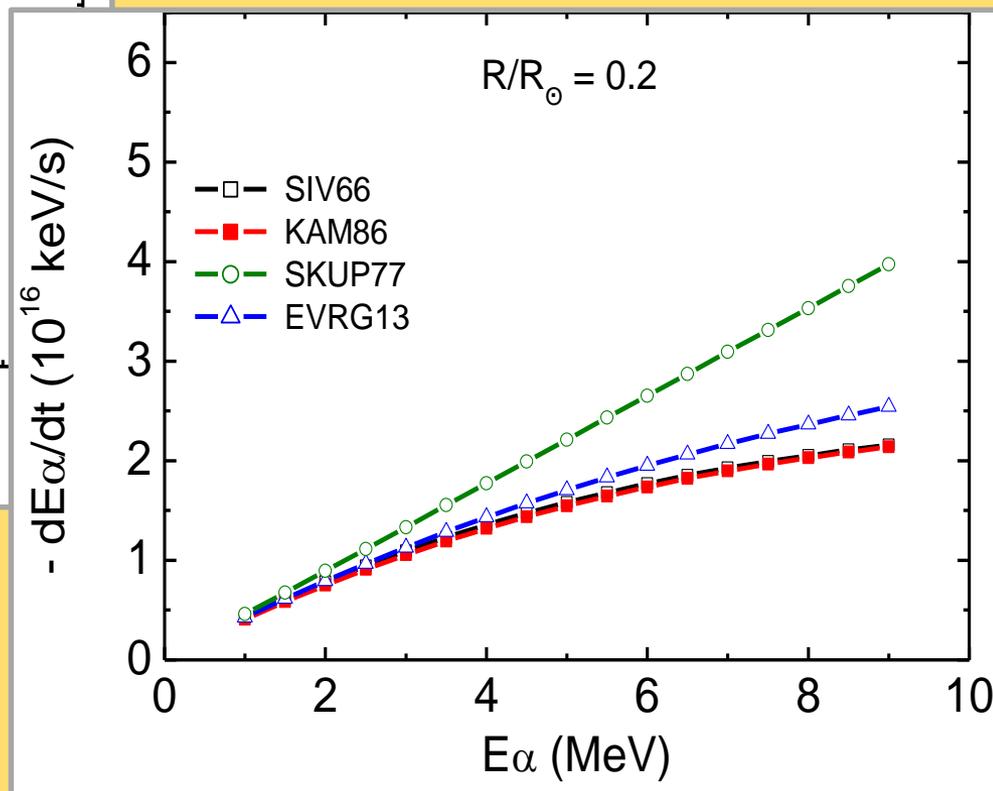
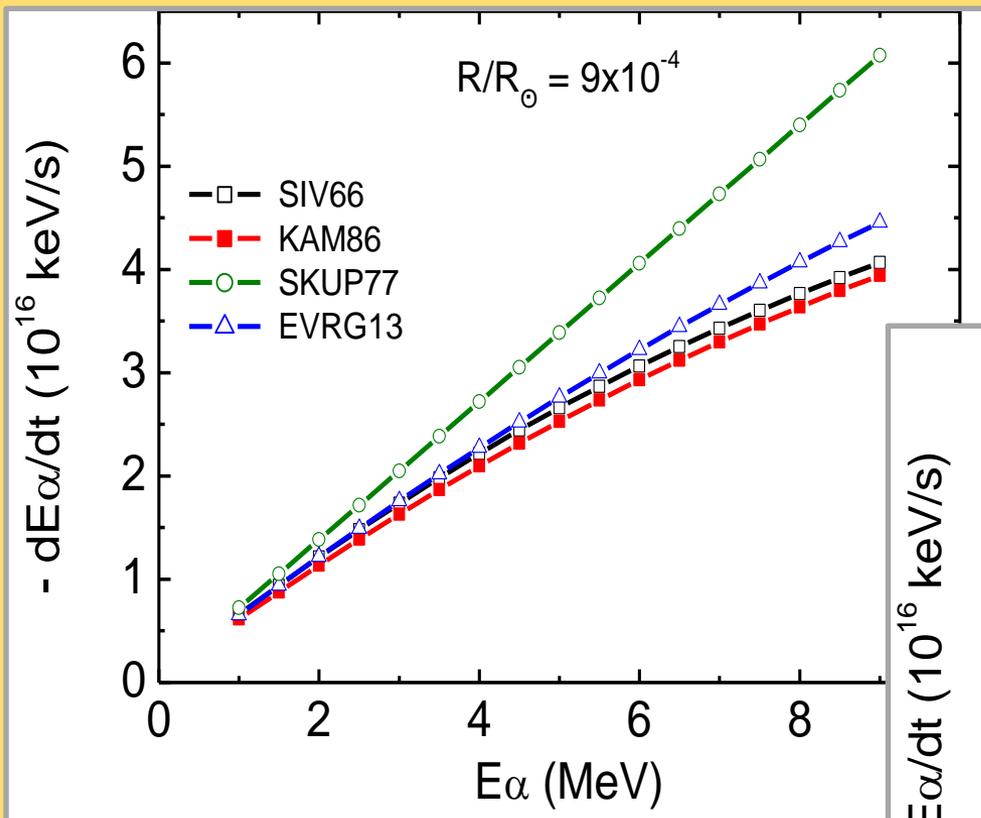
<http://mesa.sourceforge.net/>



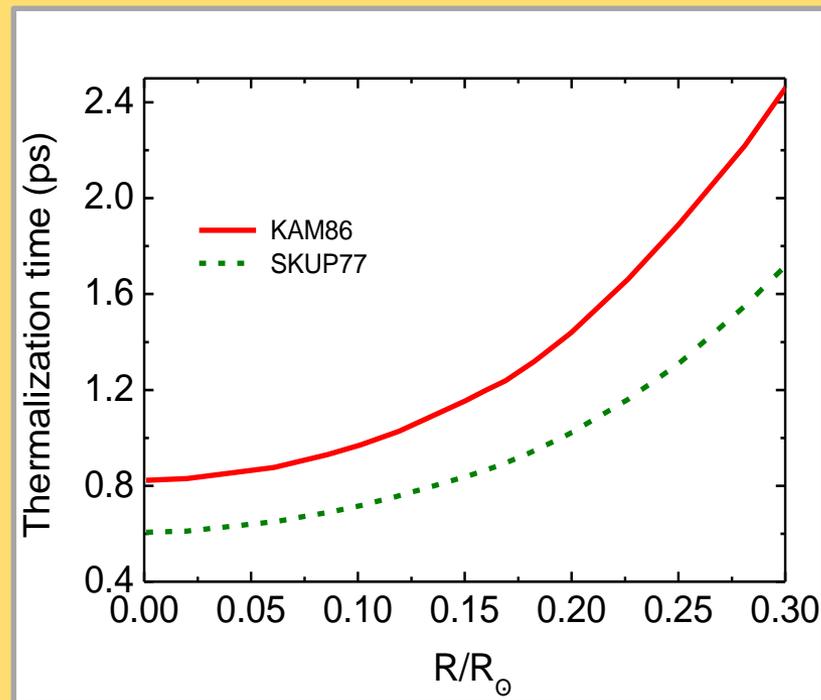
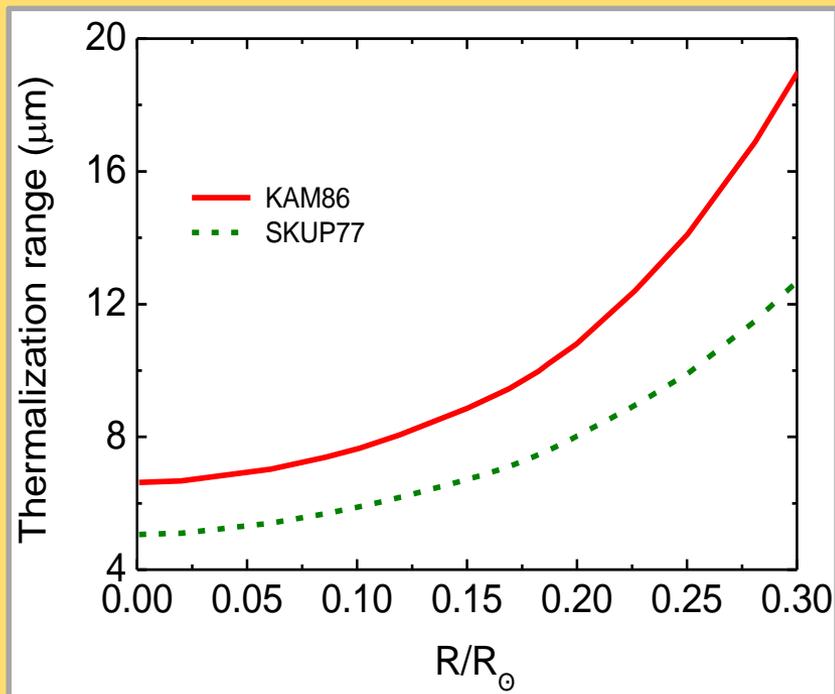
Скорость генерации МэВных частиц



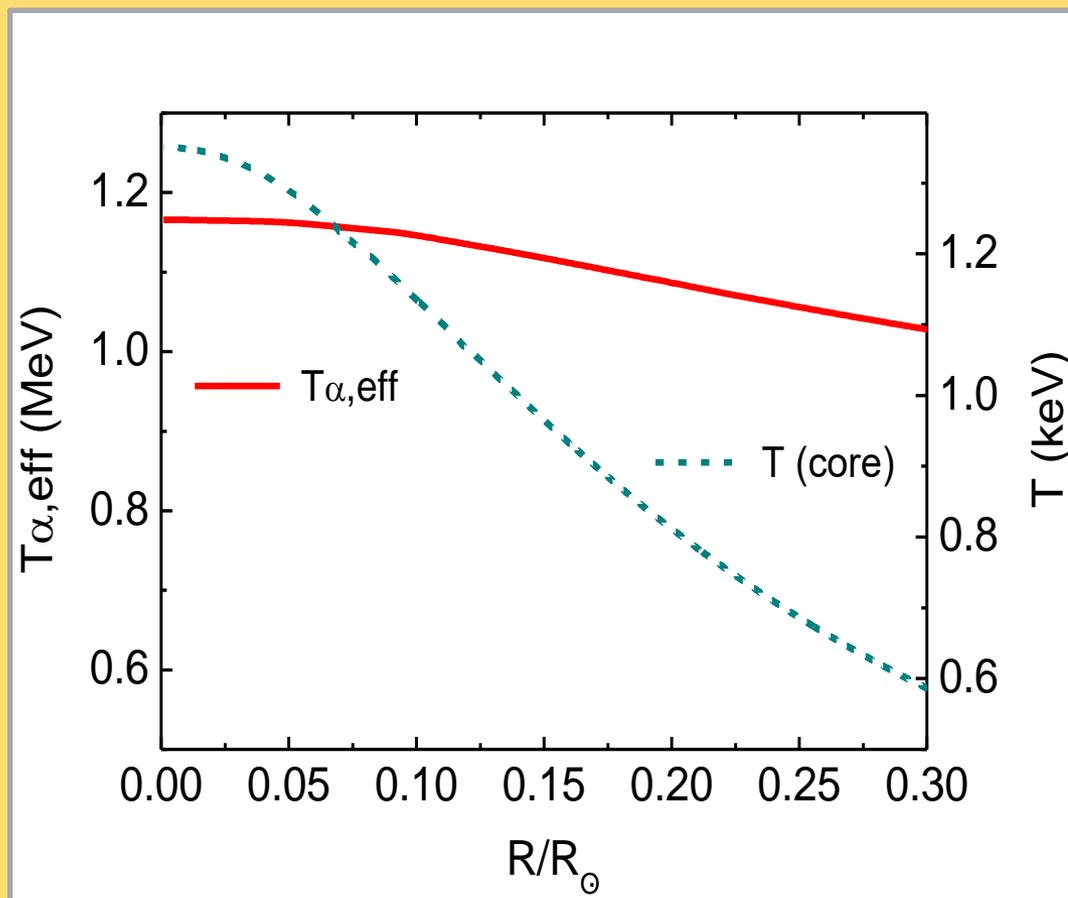
Скорость потери энергии α -частиц в ядре



Параметры термализации $p+{}^7\text{Li}$ α -частиц



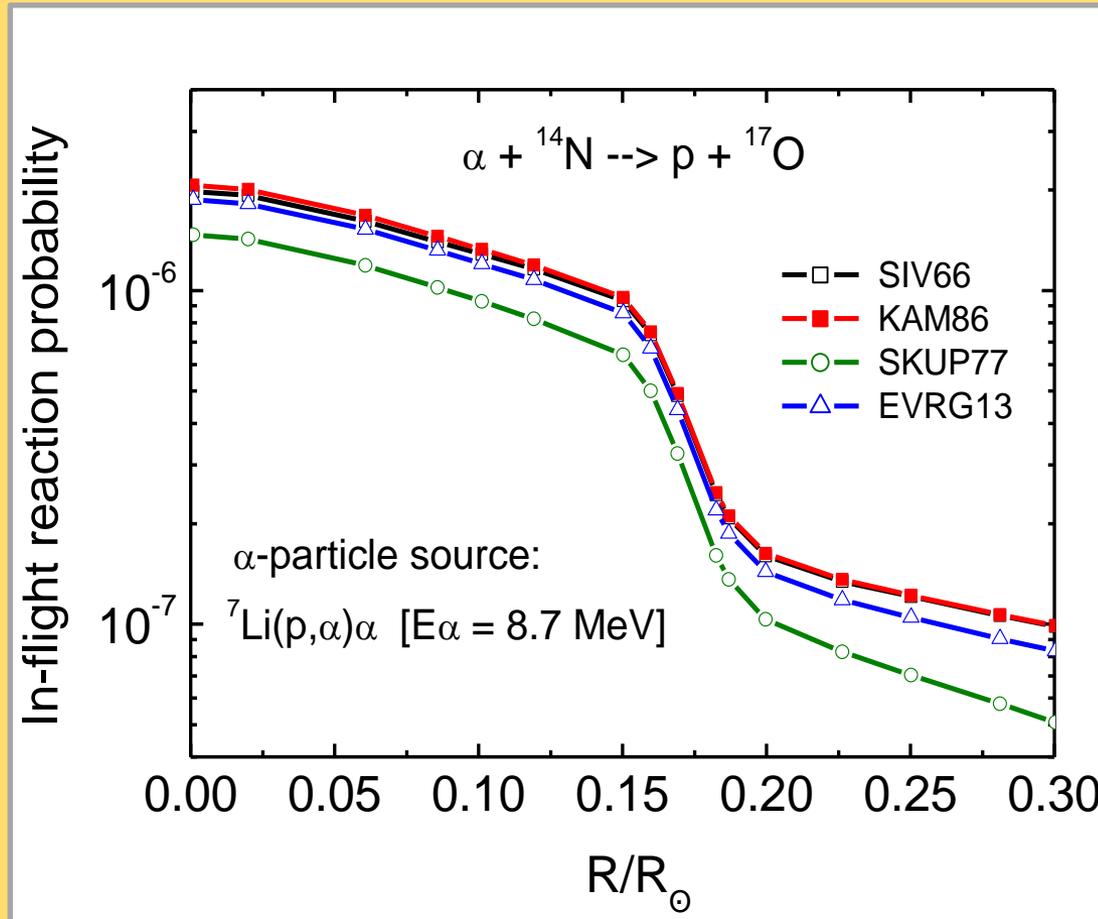
Эффективная температура $p+{}^7\text{Li}$ α -частиц



$$T_{\alpha, \text{eff}} / T(\text{core}) \sim 10^3$$

Характеристики надтепловой реакции $\alpha + {}^{14}\text{N} \rightarrow \text{p} + {}^{17}\text{O}$

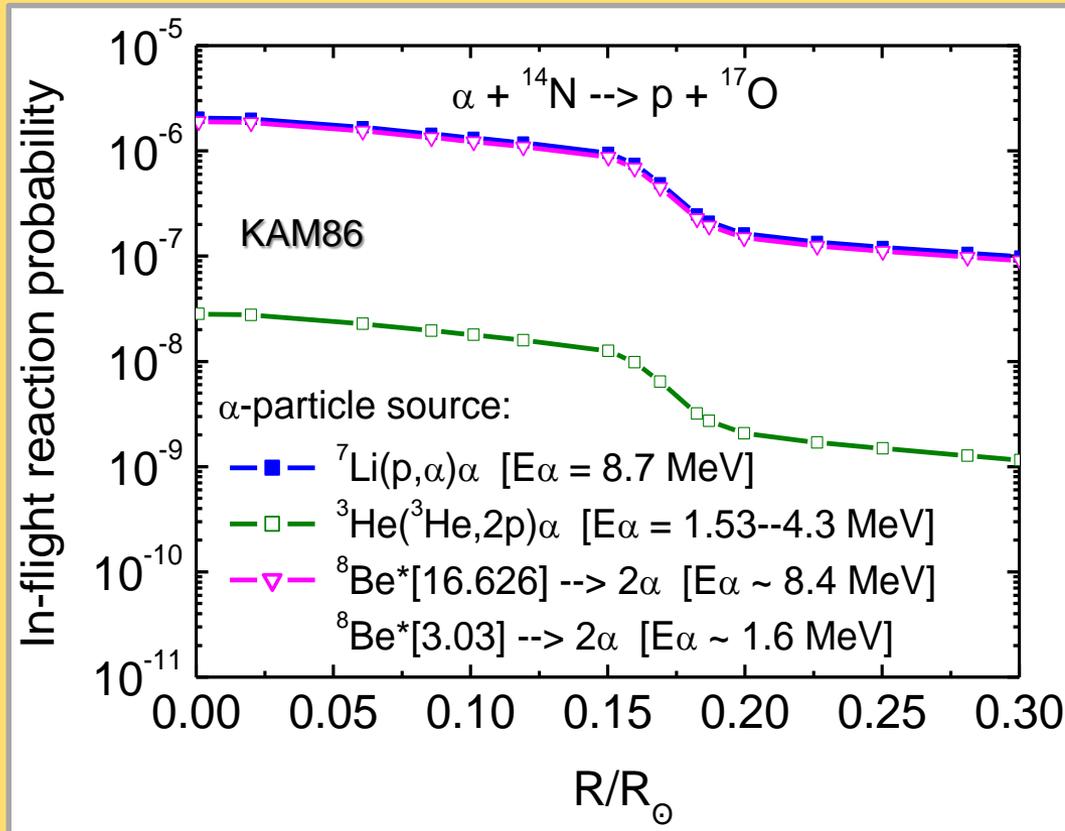
Вероятность надтепловой (α, p)-реакции



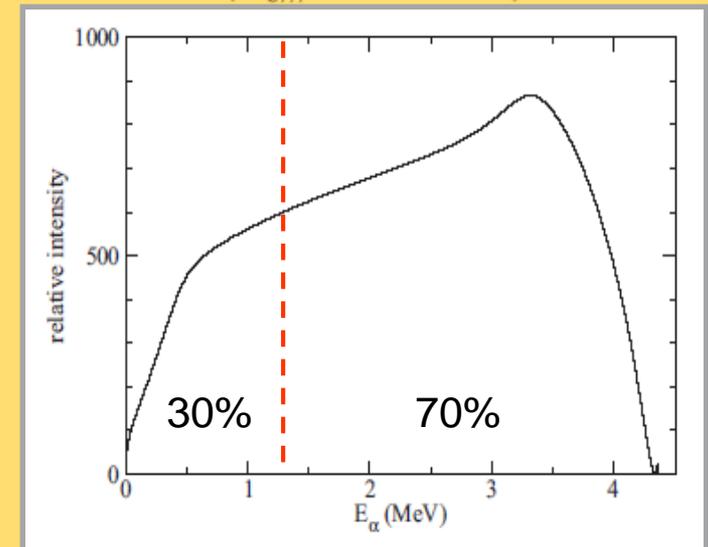
Радиальная
зависимость W

$$\int \left[\frac{n_{14N}(R)}{dE_{\alpha}/dt} \right] \dots$$

Вероятность надтепловой (α, p)-реакции



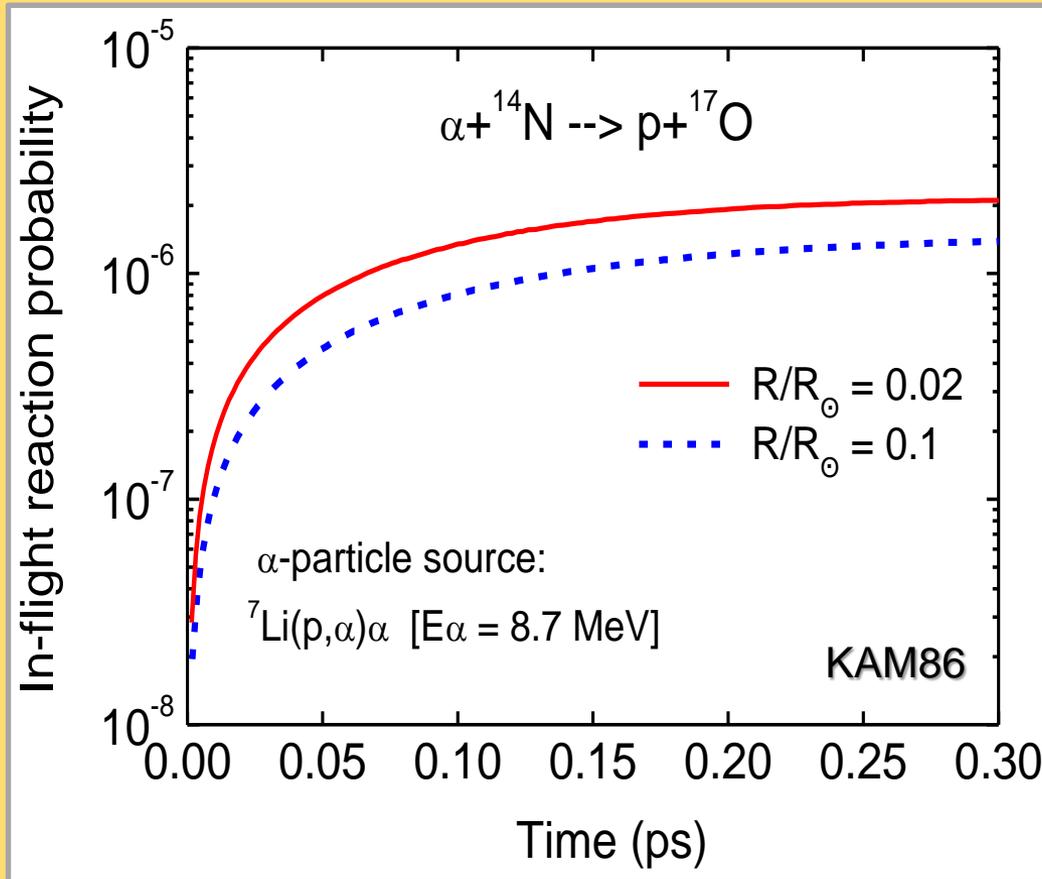
${}^3\text{He}+{}^3\text{He}$ α -particle spectrum
($E_{\text{cm}} = 165$ keV)



Brune et al., PRC2015

Вероятность надтепловой (α, p)-реакции

-- динамика --



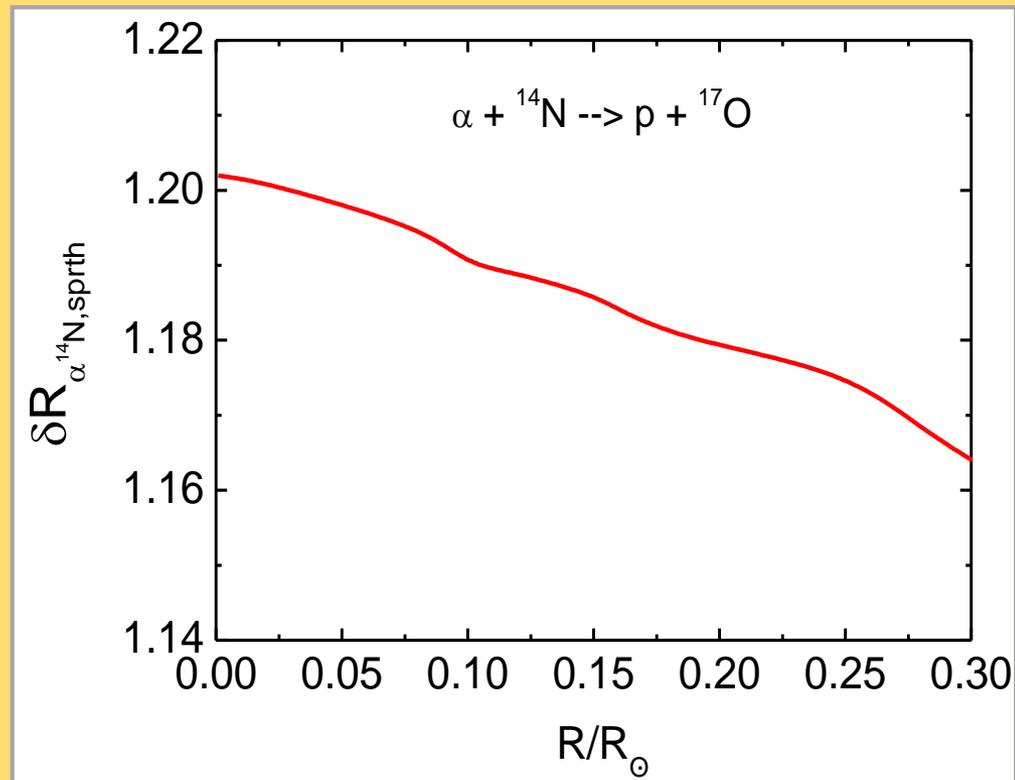
Влияние электронной экранировки и электронного вырождения на скорость надтепловой реакции

е-вырождение

е-экранировка

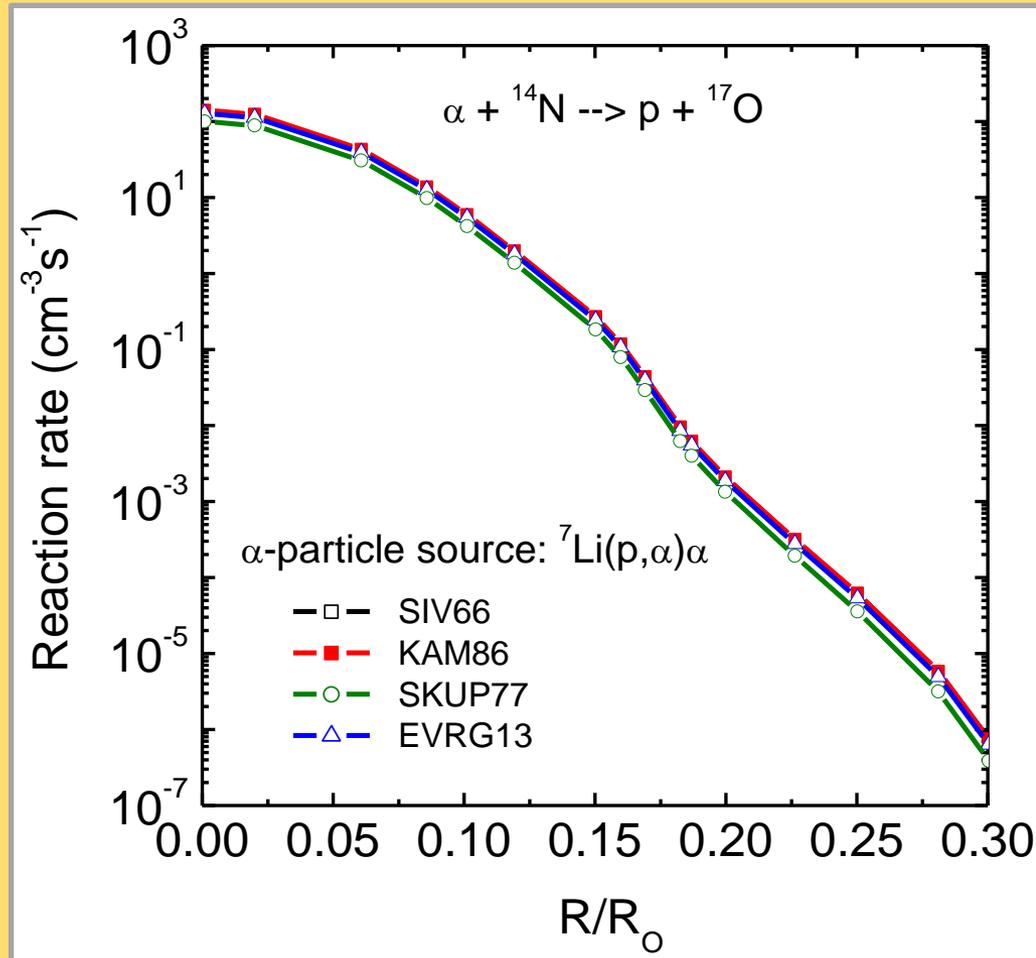
$$R_{\alpha^{14}\text{N},\text{sprth}} = W_{\alpha^{14}\text{N}} \times 2 n_p n_{\text{Li}} \langle \sigma v \rangle_{p^{7}\text{Li} \rightarrow 2\alpha}$$

Фактор усиления δR

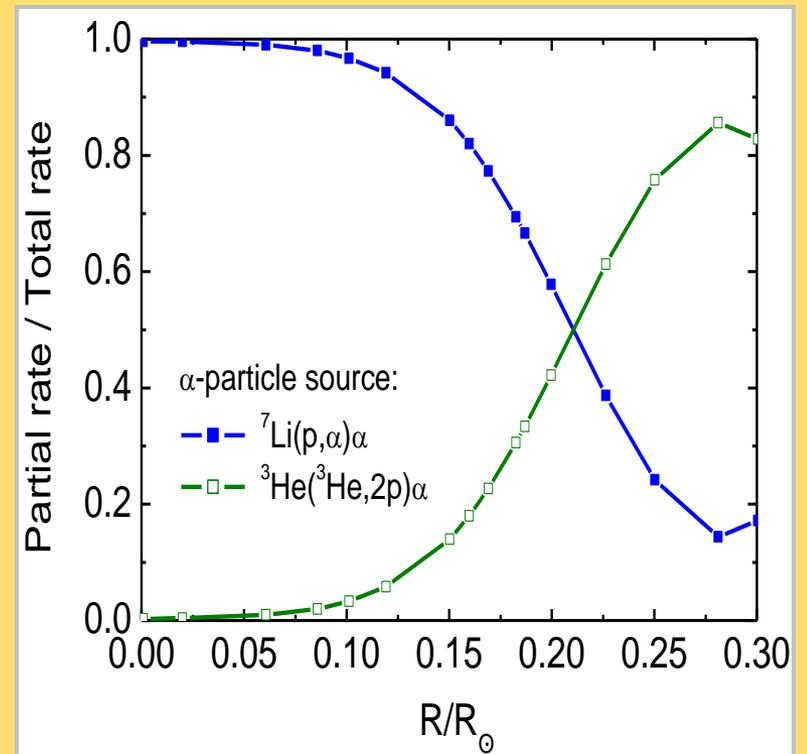
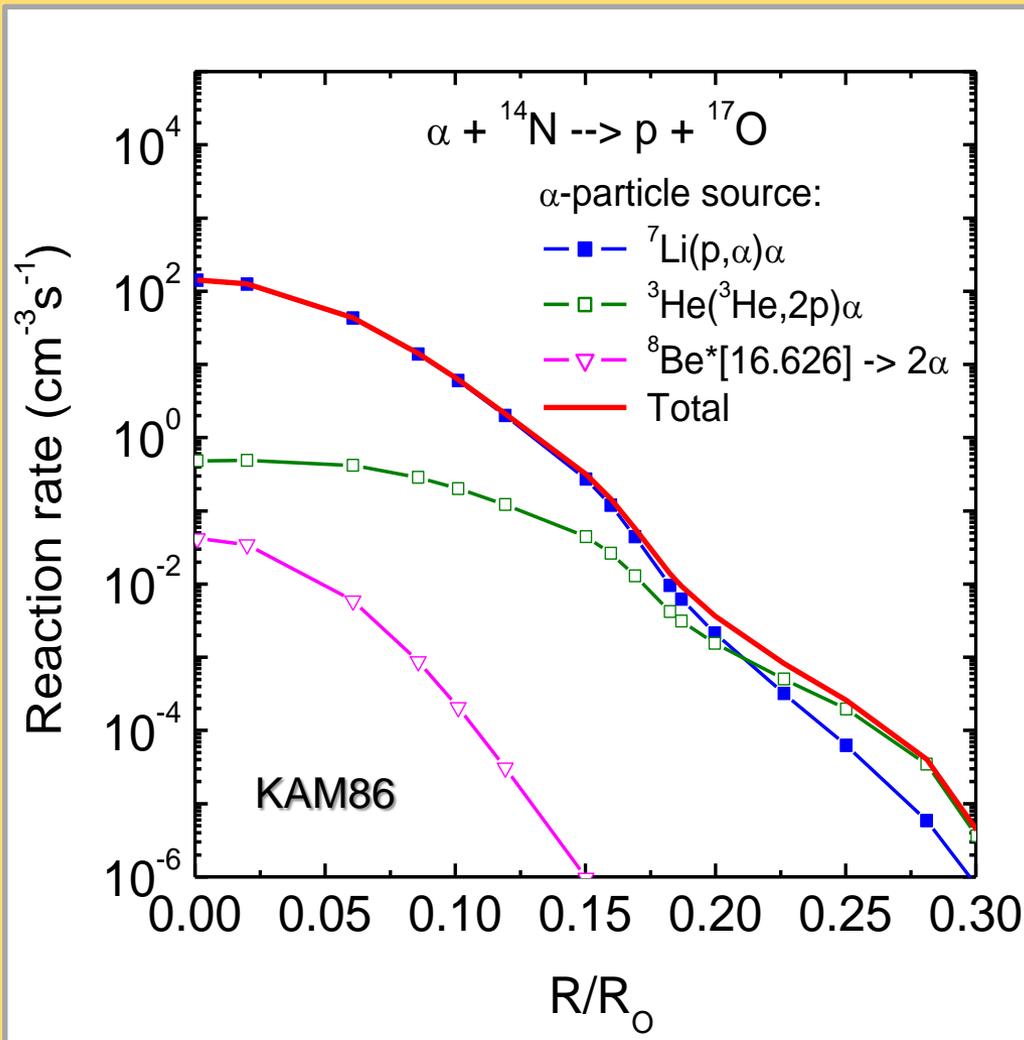


Скорость надтепловой реакции $^{14}\text{N}(\alpha, p)^{17}\text{O}$:

1) различные модели dE_α/dt

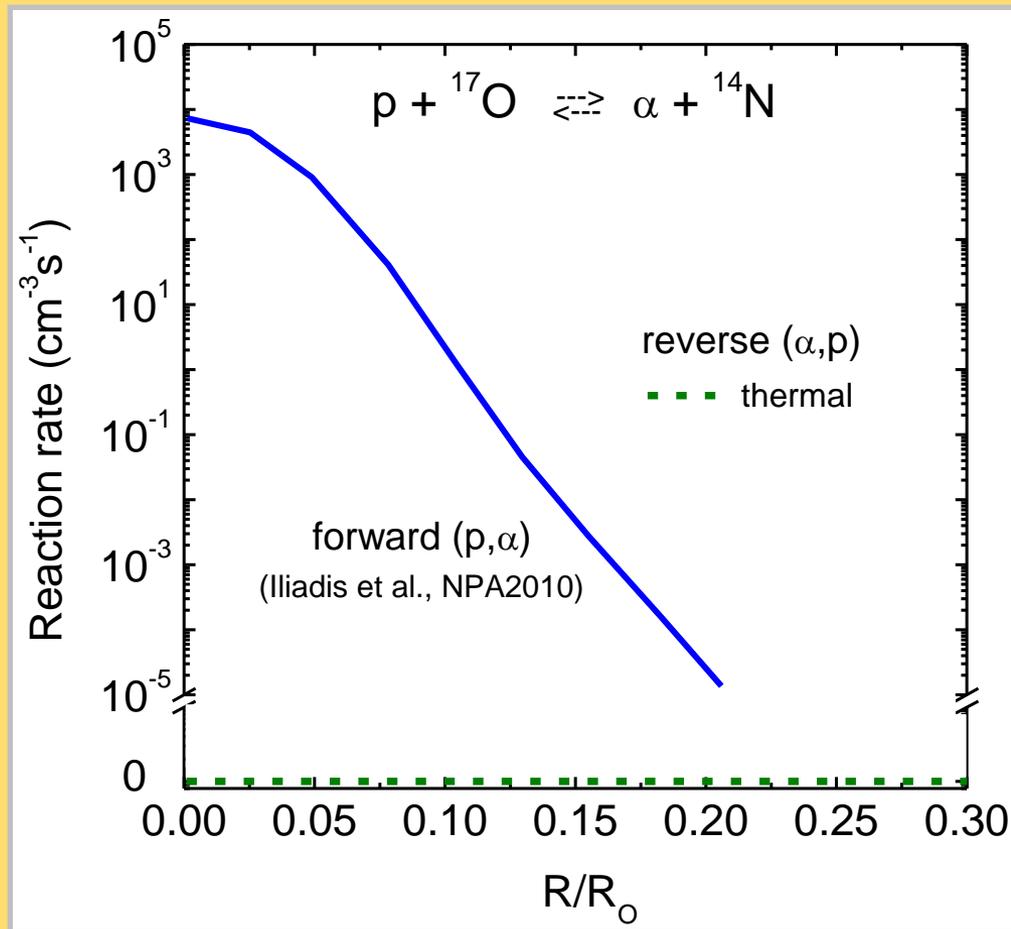


Скорость надтепловой реакции $^{14}\text{N}(\alpha, p)^{17}\text{O}$: 2) различные источники α -частиц

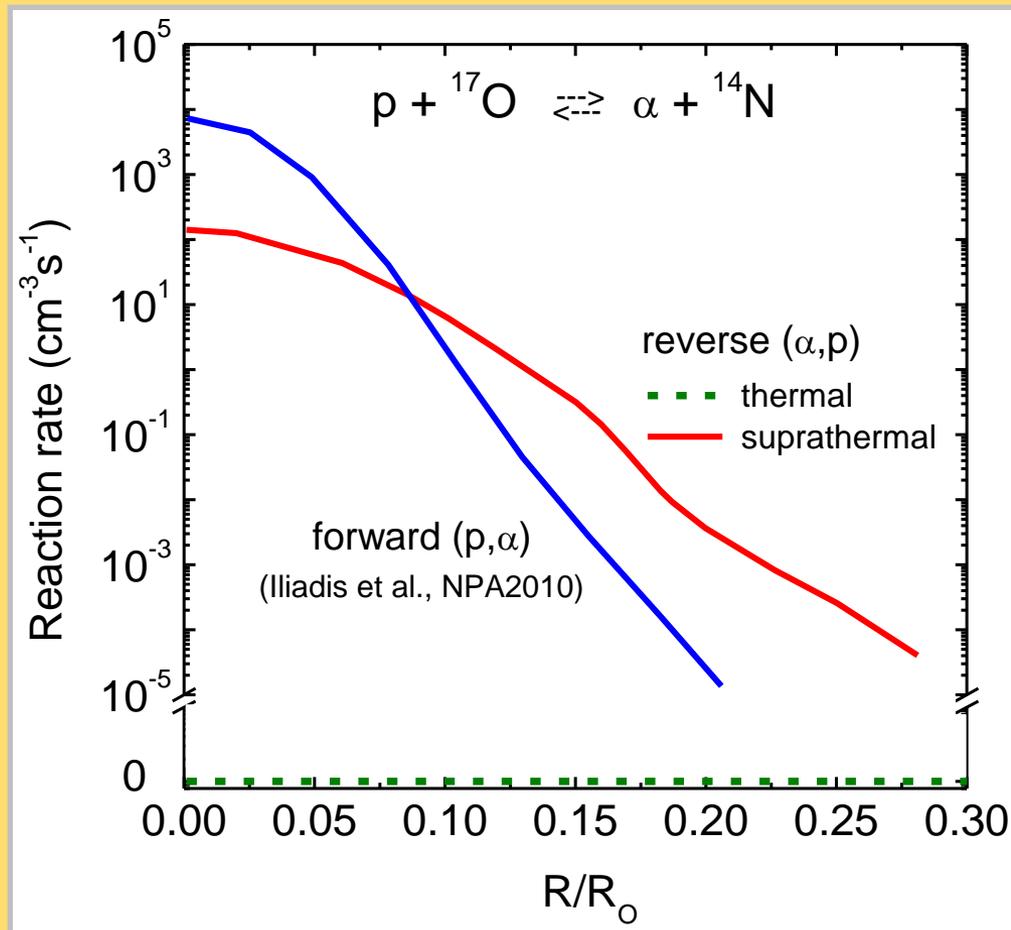


Соотношение прямой (p, α)- и обратной (α ,p)-реакций:

1) без учета быстрых α -частиц

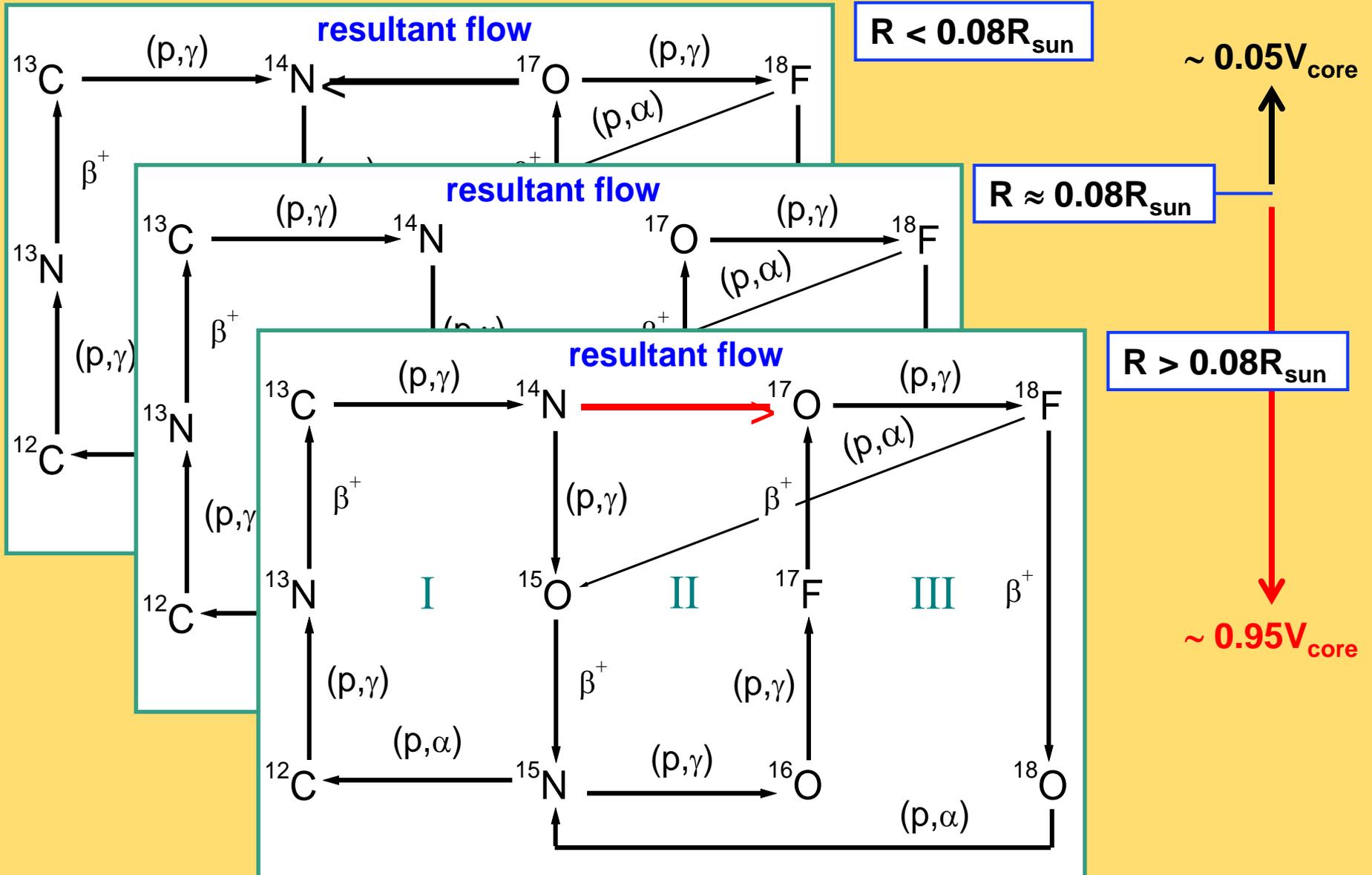


Соотношение прямой (p, α)- и обратной (α ,p)-реакций: 2) с учетом быстрых α -частиц



Некоторые следствия

2. Искажение СНО-цикла



1. Энергетика CNO-II

усиление эндотермической реакции $^{14}\text{N}(\alpha, p)$



уменьшение выделяемой энергии, приходящейся
на заряженные частицы

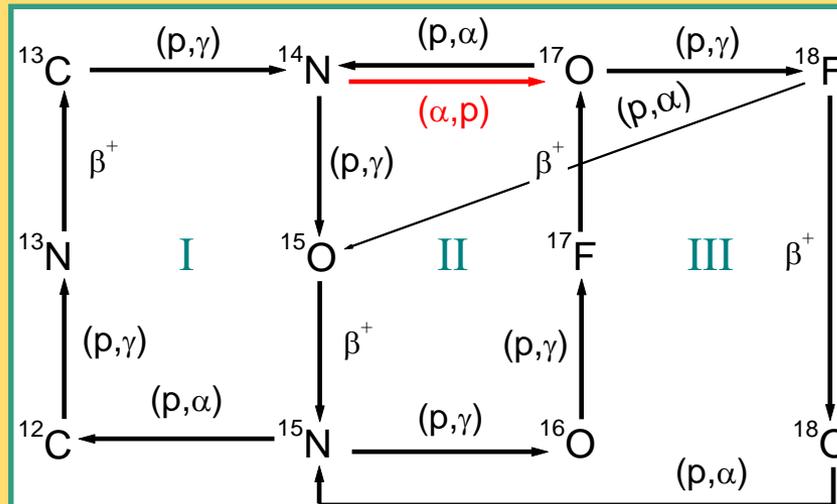
$$\delta_E = \frac{4\pi \int_0^{r_c} R_{(\alpha, p)} Q r^2 dr}{4\pi \int_0^{r_c} R_{(p, \alpha)} Q r^2 dr}$$

$$\delta_E = 10\% \rightarrow 17\% (?)$$

3. Влияние реакции $^{14}\text{N}(\alpha, p)$ на содержание ^{17}O и ^{18}O

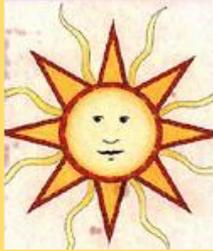
1) Скоростные уравнения, стационарный случай

- $$\frac{dn_{^{14}\text{N}}}{dt} = - n_p n_{^{14}\text{N}} \langle \sigma v \rangle_{p^{14}\text{N} \rightarrow \gamma^{15}\text{O}} + n_p n_{^{13}\text{C}} \langle \sigma v \rangle_{p^{13}\text{C} \rightarrow \gamma^{14}\text{N}} + n_p n_{^{17}\text{O}} \langle \sigma v \rangle_{p^{17}\text{O} \rightarrow \alpha^{14}\text{N}} - R_{\alpha^{14}\text{N}, \text{sprth}}$$
- $$\frac{dn_{^{17}\text{O}}}{dt} = - n_p n_{^{17}\text{O}} \langle \sigma v \rangle_{p^{17}\text{O} \rightarrow \alpha^{14}\text{N}} - n_p n_{^{17}\text{O}} \langle \sigma v \rangle_{p^{17}\text{O} \rightarrow \gamma^{18}\text{F}} + \frac{n_{^{17}\text{F}}}{\tau} + R_{\alpha^{14}\text{N}, \text{sprth}}$$
- $$\frac{dn_{^{18}\text{F}}}{dt} = n_p n_{^{17}\text{O}} \langle \sigma v \rangle_{p^{17}\text{O} \rightarrow \gamma^{18}\text{F}} - n_p n_{^{18}\text{F}} \langle \sigma v \rangle_{p^{18}\text{F} \rightarrow \alpha^{15}\text{O}} - \frac{n_{^{18}\text{F}}}{\tau'}$$
- $$\frac{dn_{^{18}\text{O}}}{dt} = \frac{n_{^{18}\text{F}}}{\tau'} - n_p n_{^{18}\text{O}} \langle \sigma v \rangle_{p^{18}\text{O} \rightarrow \alpha^{15}\text{N}}$$



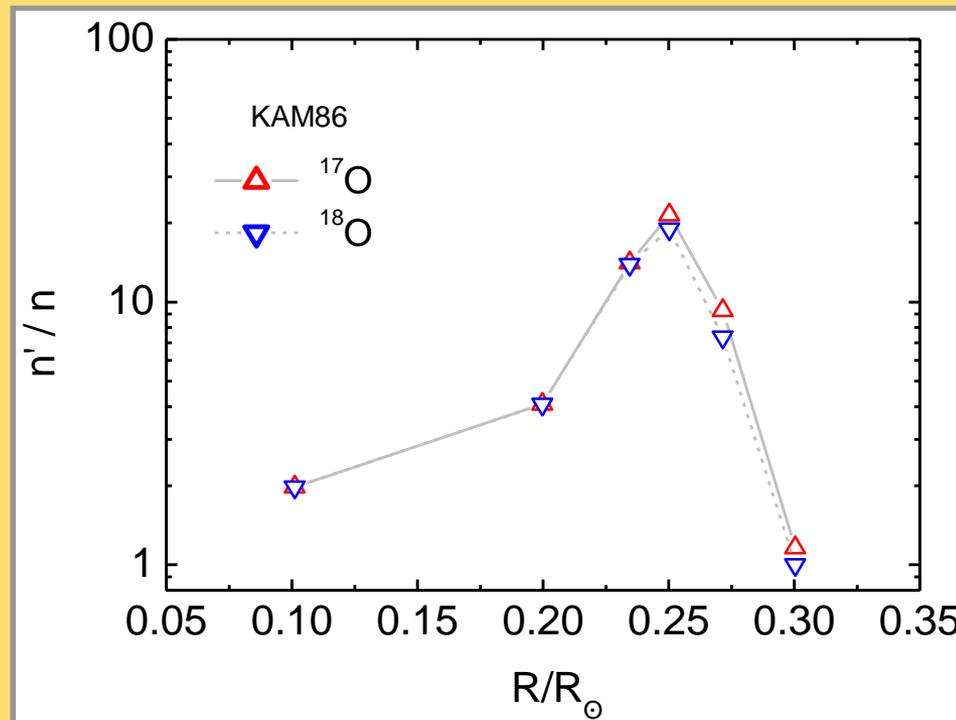
3. Влияние реакции $^{14}\text{N}(\alpha, p)$ на содержание ^{17}O и ^{18}O

2) Сетка реакций pp+CNO, источник:



Cococubed.com (Francis Timmes, ASU)

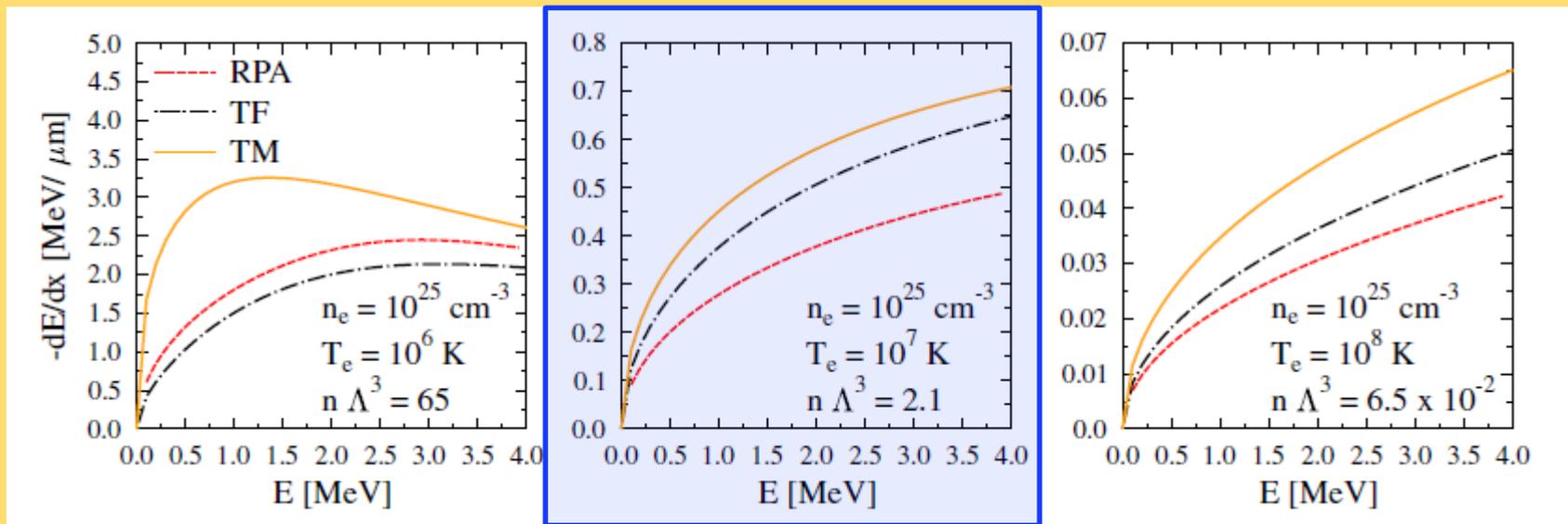
http://cococubed.asu.edu/code_pages/burn_hydrogen.shtml



“Резервы” для усиления надтепловых эффектов в СНО

1) потери энергии α -частиц

Торможение α -частиц в водородной плазме (УТС)



Edie et al., EPJ Web of Conf.2013

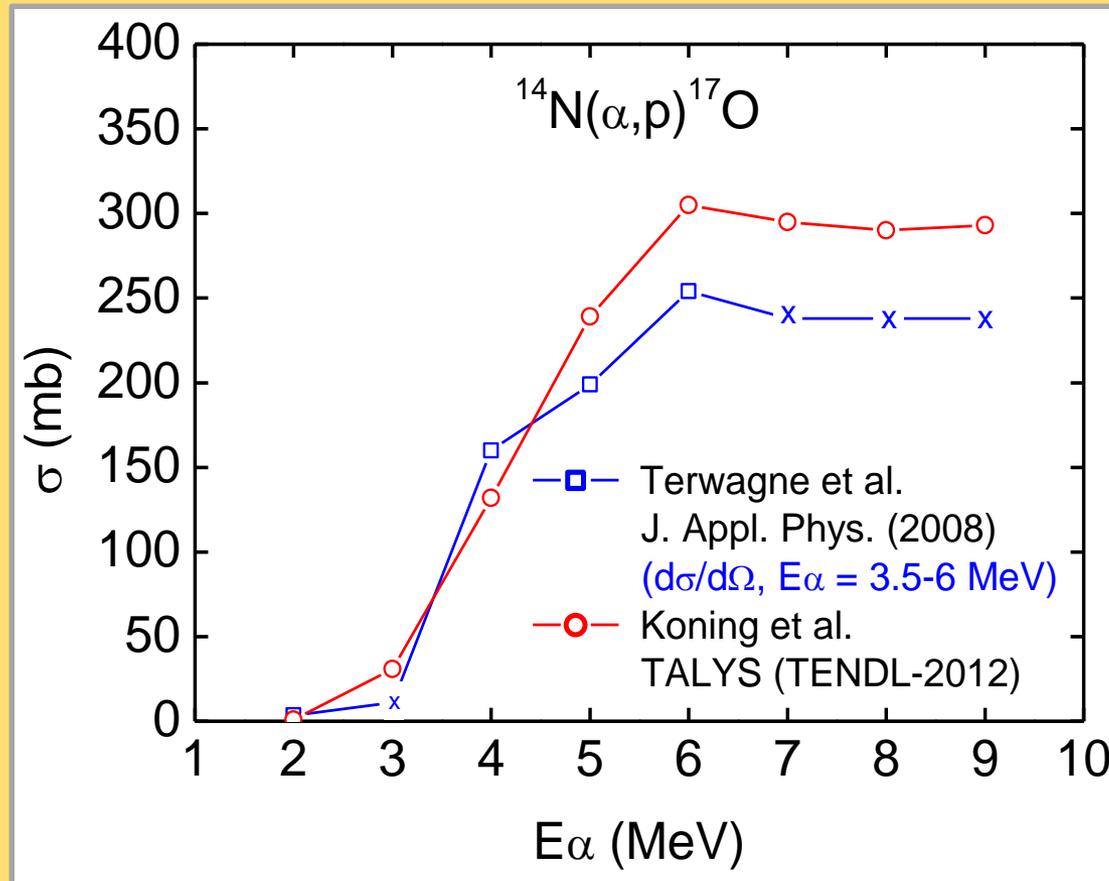
RPA – based on the quantum Lenard-Balescu kinetic equation

TF – the reduced model [EVRG13]

TM – binary collision via a statically screened Coulomb potential

“Резервы” для усиления надтепловых эффектов в СНО

2) сечение $^{14}\text{N}(\alpha,p)$ -реакции

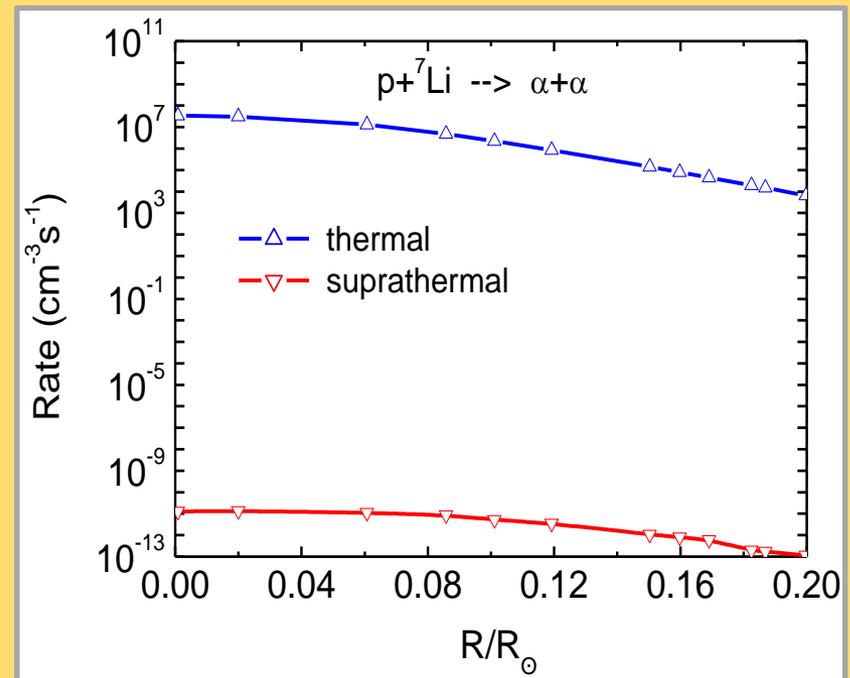
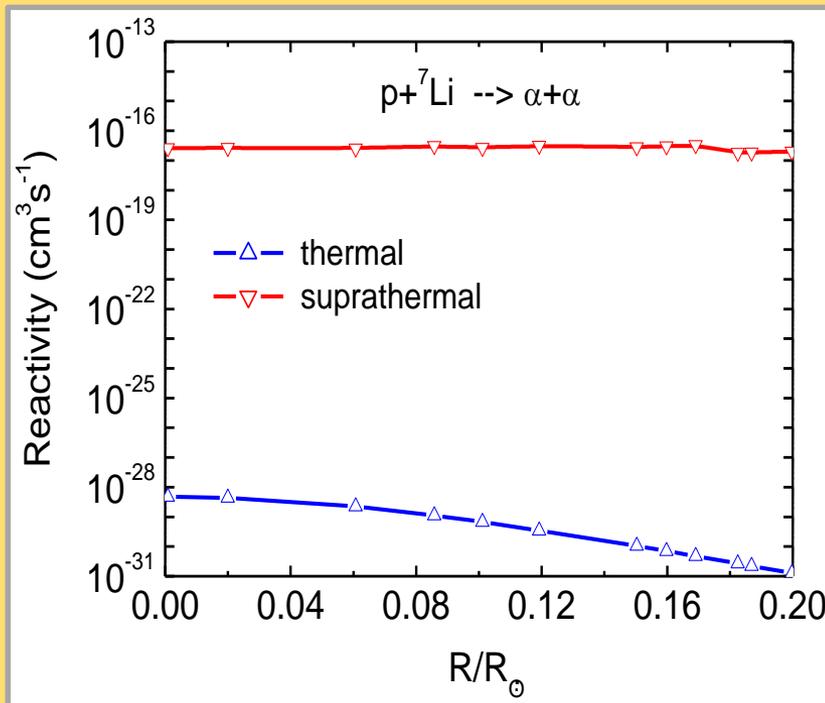


“Резервы” для усиления надтепловых эффектов в СНО

3) генерация $p+{}^7\text{Li}$ α -частиц с учетом вклада ${}^3\text{He}+{}^3\text{He}$ протонов

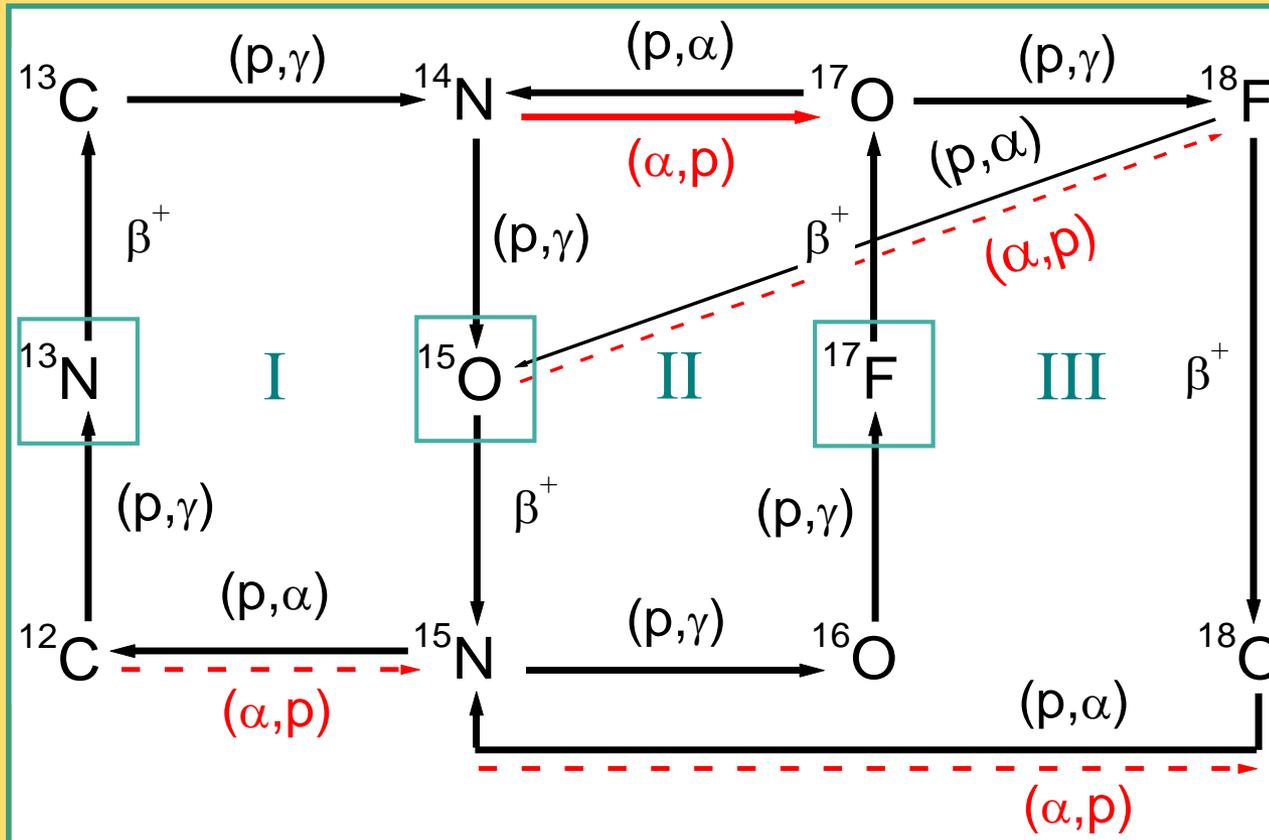


$$E_p = 0\text{--}10.5 \text{ МэВ}$$



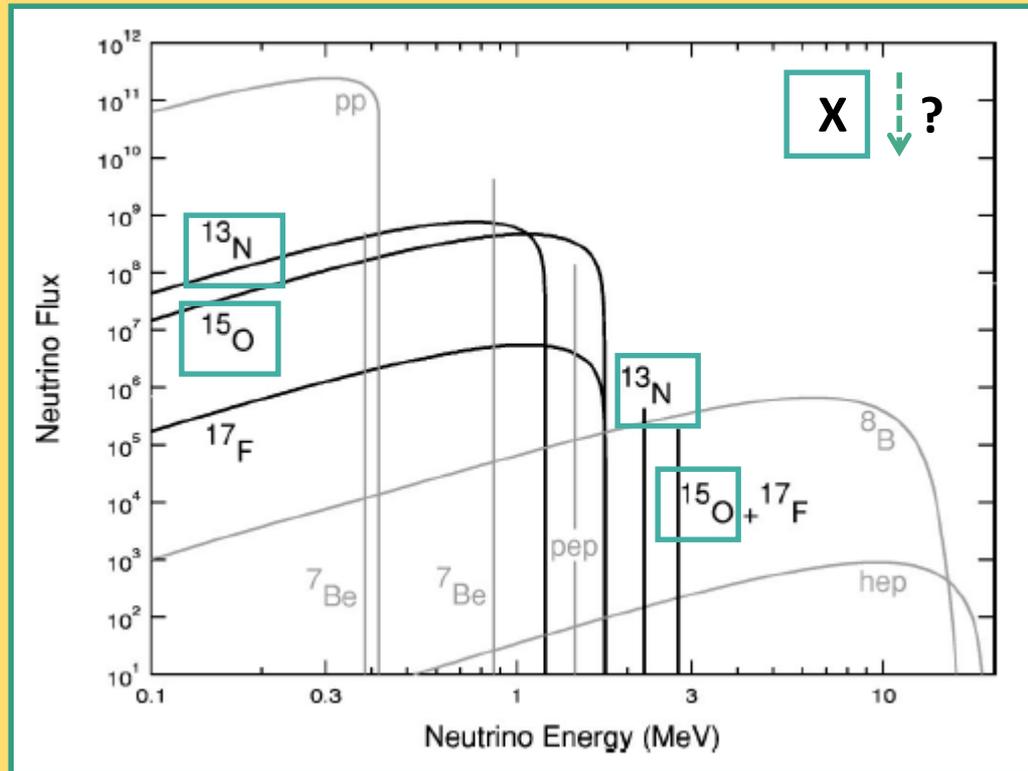
“Резервы” для усиления надтепловых эффектов в СНО

4) Дополнительные реакции $\Upsilon(\alpha,p)X$ и нейтрино



❖ Ослабление потоков ^{13}N - и ^{15}O -нейтрино ?

Нейтрино

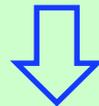


Stonehill et al., PRC2004

Solar neutrino flux at 1 a.u., including electron capture in the CNO cycle. The pp chain is shown in gray and the CNO cycle is shown in black. Line fluxes are in $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ and spectral fluxes are in $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{MeV}^{-1}$

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Обнаружено влияние некоторых надтепловых реакций с быстрыми α -частицами – продуктами pp-цепочки – на солнечный цикл CNO.
2. Эффективная температура этих частиц в $\sim 10^3$ раз превышает температуру солнечного ядра, а инициируемые ими $^{14}\text{N}(\alpha, p)$ -реакции изменяют условия протекания CNO-цикла, блокируя стандартный процесс $^{17}\text{O}(p, \alpha)$ [закрывающий вторую ветвь CNO] и перераспределяя направление ядерного потока при $R > 0.8R_{\text{sun}}$.
3. Надтепловая реакция $^{14}\text{N}(\alpha, p)$ способна уменьшать на 10–17% энергетический “бюджет” заряженных частиц в CNO-II, а также увеличивать содержание ^{17}O и ^{18}O во внешней области ядра.
4. Высказано предположение о том, что нестандартный ядерной (α, p) -поток может ослабить генерацию ^{13}N - и ^{15}O -нейтрино.



Аргументы для включения надтепловых процессов в сетку реакций для астрофизических приложений.

БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ !