



П.С. Штернин

ФТИ им. А.Ф. Иоффе  
pshternin@gmail.com

## Сеть ядерных реакций в коре аккрецирующей нейтронной звезды

R.Lau, M. Beard, S.S. Gupta, H. Schatz, A.V. Afanasjev, E.F. Brown, A. Deibel, L.R. Gasques, G.W. Hitt, W.R. Hix, L. Keek, P. Möller, P.S. Shternin, A.W. Steiner, M. Wiescher, Y. Xu, *ApJ* 859, 62 (2018)

В аккрецирующих нейтронных звёздах (НЗ) вещество, переработанное приповерхностным горением (например, в процессе рентгеновских вспышек), сжимается под действием вновь аккрецированного вещества. В результате в коре НЗ происходят неравновесные ядерные реакции, изменяющие состав вещества и приводящие к нагреву (и, возможно, к охлаждению) коры. Сегодня остывание перегретой коры НЗ по окончании аккреции наблюдается в ряде источников. При теоретической интерпретации, как правило, используются упрощённые однокомпонентные модели (например Haensel, Zdunik, *A&A* 480, 459, 2008; HZ2008).

В нашей работе впервые рассмотрена полная многокомпонентная сеть реакций, продолжающаяся за плотность нейтронизации вещества  $\rho_{nd}$ , вплоть до плотностей  $\sim 2 \times 10^{12} \text{ г/см}^3$ .

Изучена эволюция вещества изначально однородного состава ( $^{56}\text{Fe}$ ), а также пепла рентгеновских вспышек (два варианта) и сверхвспышек. Два случая подробно детализированы справа.

Выделены основные типы реакций, прослежена эволюция ядерного состава и энерговыделения. Обсуждены отличия от однокомпонентных моделей. Температура при моделировании горения постоянна и равна 0.5ГК.

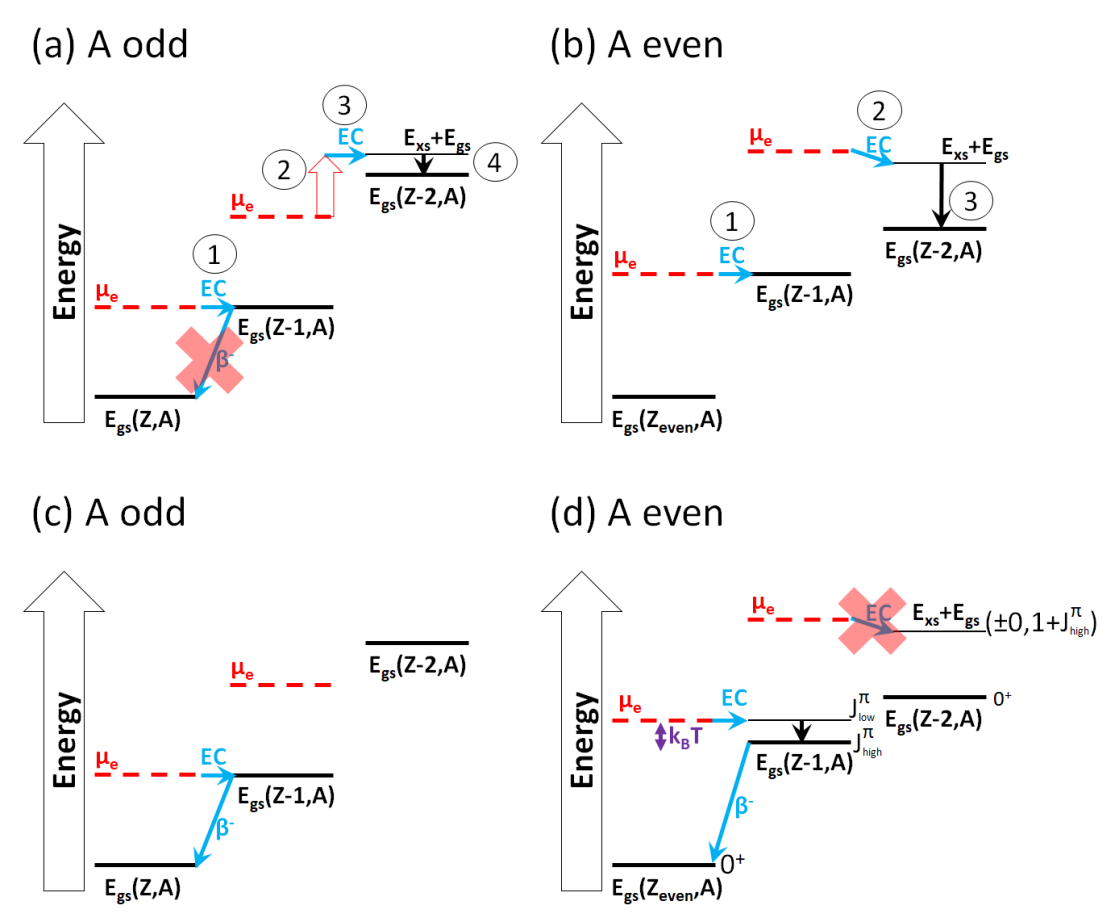
### Основные типы реакций

С ростом плотности (с ростом  $\mu_e$ ) происходят реакции электронного захвата. Как правило они проходят по двухступенчатой схеме (b) и сопровождаются выделением тепла (шаг 3).

В случае (a) вторая реакция происходит не сразу, однако если скорость бета-распада меньше темпа аккреции, она происходит на большей глубине, но практически без выделения тепла.

Случаи (c) и (d) отвечают нейтринному охлаждению в Урка-процессах (Schatz et al., *Nature* 505, 62, 2014), которое возможно в достаточно горячем веществе, когда скорость бета-распада выше темпа аккреции. Для чётно-чётных ядер (d) Урка-процессы теоретически возможны, но не обнаруживаются в моделировании

Схема реакций электронного захвата. рис. из Meisel et al. *J. Phys. G* 45, 093001 (2018)



Основные Урка-циклы для пепла рентгеновской вспышки

Urca Pair	$\rho$ (g cm $^{-3}$ )	Relative Flow <sup>a</sup>
$^{24}\text{Mg}-^{24}\text{Na}$	$8.60 \times 10^{10}$	1.00
$^{27}\text{Al}-^{27}\text{Si}$	$5.62 \times 10^{10}$	0.47
$^{32}\text{S}-^{32}\text{P}$	$3.75 \times 10^{10}$	0.14
$^{36}\text{Ar}-^{36}\text{Cl}$	$2.59 \times 10^{10}$	0.11
$^{39}\text{K}-^{39}\text{Ca}$	$2.42 \times 10^{10}$	0.09
$^{40}\text{Ca}-^{40}\text{K}$	$5.32 \times 10^{10}$	0.07
$^{42}\text{Ca}-^{42}\text{Sc}$	$1.36 \times 10^{10}$	0.05
$^{44}\text{Ca}-^{44}\text{Ti}$	$2.62 \times 10^{10}$	0.04
$^{46}\text{Ca}-^{46}\text{Sc}$	$1.61 \times 10^{10}$	0.04
$^{48}\text{Ca}-^{48}\text{Ti}$	$1.08 \times 10^{10}$	0.03
$^{50}\text{Ti}-^{50}\text{V}$	$4.56 \times 10^{10}$	0.03
$^{52}\text{Cr}-^{52}\text{Mn}$	$5.27 \times 10^{10}$	0.03
$^{54}\text{Fe}-^{54}\text{Mn}$	$1.21 \times 10^{10}$	0.02
$^{56}\text{Fe}-^{56}\text{Co}$	$3.39 \times 10^{10}$	0.02
$^{58}\text{Ni}-^{58}\text{Co}$	$9.09 \times 10^{10}$	0.02
$^{60}\text{Ni}-^{60}\text{Co}$	$3.48 \times 10^{10}$	0.01
$^{62}\text{Ni}-^{62}\text{Co}$	$5.78 \times 10^{10}$	0.01
$^{64}\text{Ni}-^{64}\text{Ni}$	$9.90 \times 10^9$	0.01

Note: <sup>a</sup> Time-integrated reaction flow relative to strongest Urca pair.

При электронном захвате на возбужденные уровни (схема (b)), свободные нейтроны могут испаряться возбужденными дочерними ядрами и при  $\rho < \rho_{nd}$ . Это приводит к появлению ( $n, \gamma$ ) реакций и ветвлению сети реакций. В результате состав становится многокомпонентным даже для исходно однородного вещества, см. диаграмму (1).

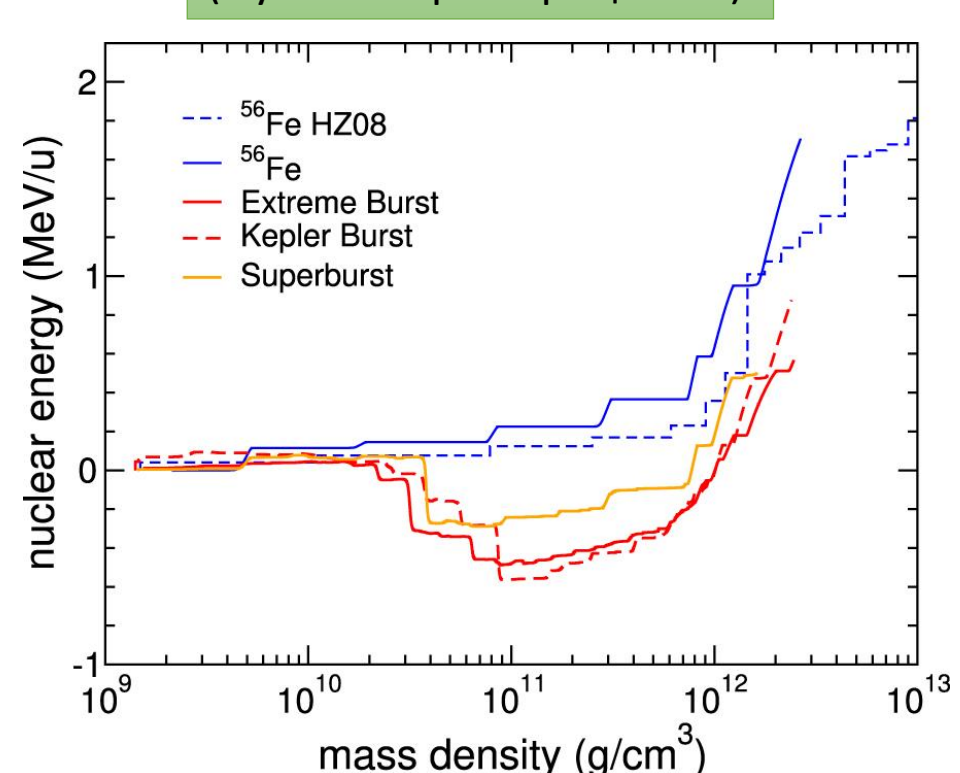
При  $\rho > \rho_{nd}$  (EC,n) реакции проходят быстрыми каскадами (superthreshold electron capture cascades или SEC, Gupta et al., *PRL* 101, 231101, 2008), утилизируя многие тяжелые ядра (диаграммы 3-5; K2).

Пикноядерные реакции для многокомпонентного состава могут начинаться при низких плотностях за счёт наличия лёгких ядер. Например  $^{20}\text{C} + ^{20}\text{O}$ . См. диаг. K1.

При  $\rho > \rho_{nd}$  продукты пикноядерных реакций утилизируются SEC-каскадами, эффективно приводя к fusion-SEC циклам вида  $^{40}\text{Mg} + ^{40}\text{Mg} \rightarrow ^{80}\text{Cr} \rightarrow ^{20}\text{Mg} + ^{40}\text{Ni}$ . Диаграммы 4,5,K2.

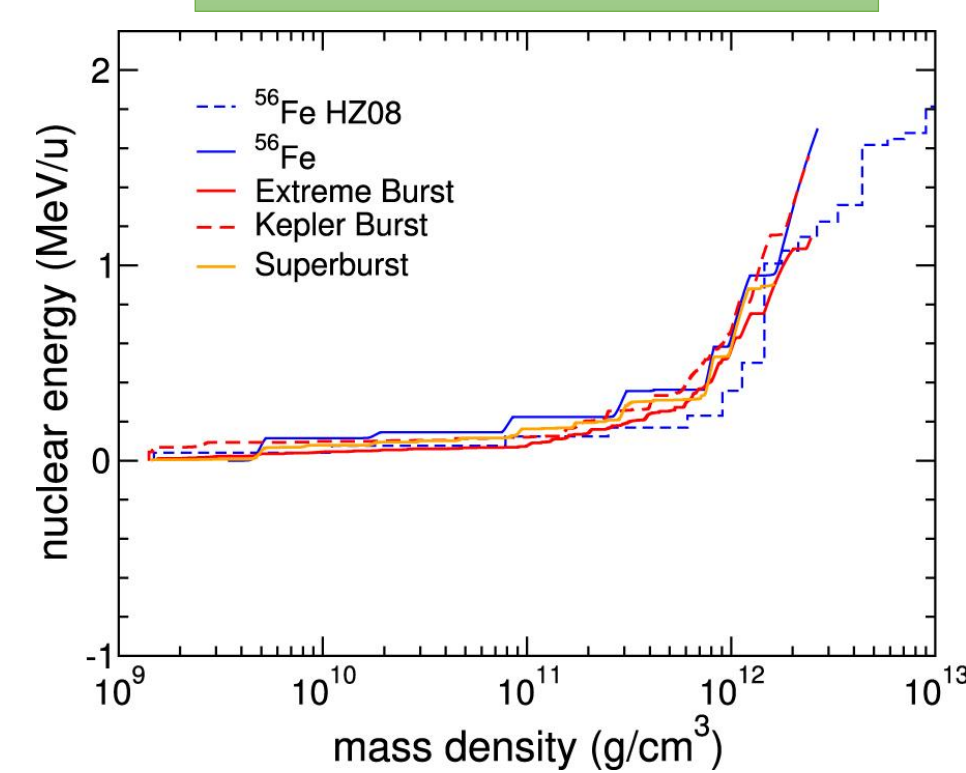
### Нагрев и охлаждение

Полное энерговыделение (с учётом Урка-процессов)



Остывание за счёт Урка-процессов при  $T=0.5 \text{ GK}$  существенно для всех рассмотренных начальных составов, отвечающих пеплу вспышек. Это должно приводить к более холодной коре при расчётах в самосогласованных моделях.

Энерговыделение без учёта слоев с охлаждением



Полный нагрев в целом слабо зависит от начального состава и аналогичен результатам однокомпонентных моделей (HZ08). Однако распределение источников существенно меняется (сдвигается в меньшие глубины).

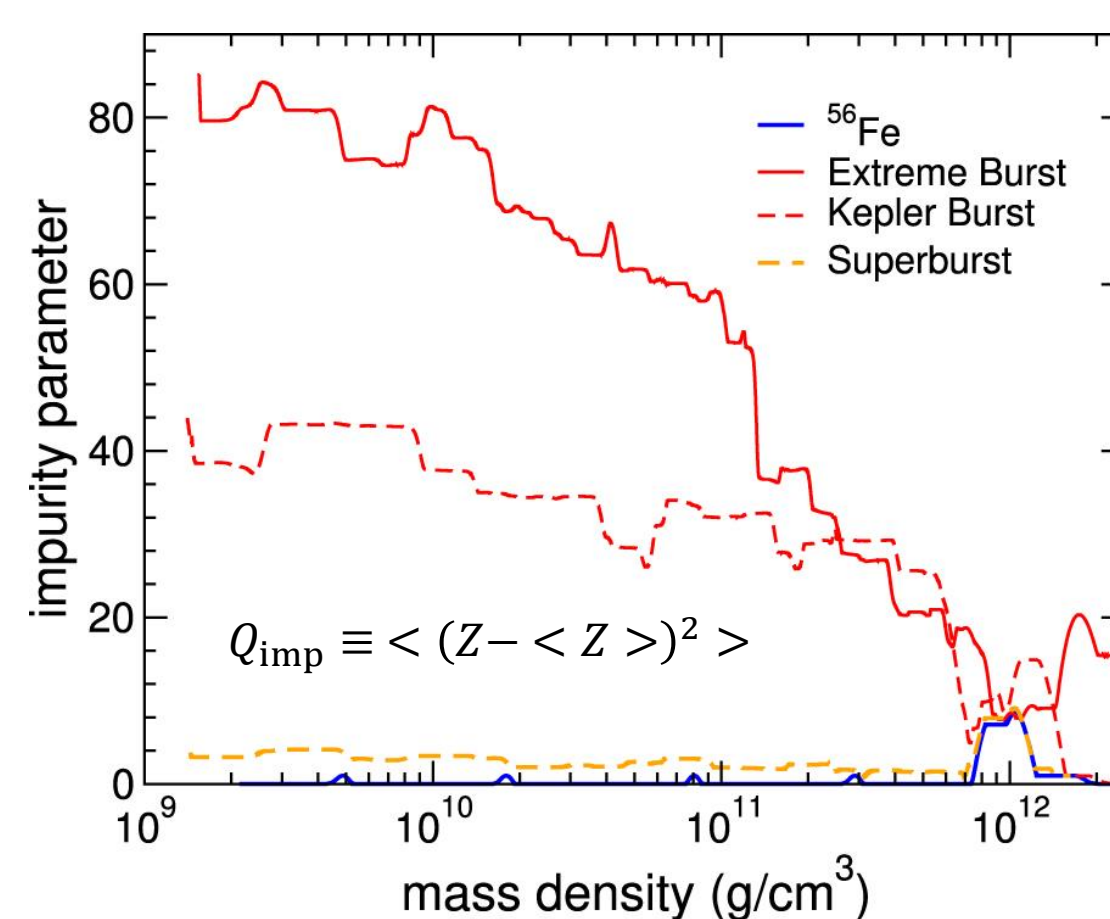
### Эволюция состава

Содержание примесей, как правило, уменьшается, приводя к  $Q_{\text{imp}} = 0$  для  $\rho > 2 \times 10^{12} \text{ г/см}^3$  кроме случая, помеченного Extreme Burst. Это связано с наличием в исходном составе ядер с  $A > 101$ .

При этом большие  $Q_{\text{imp}}$  во внутренней коре НЗ, по-видимому, не согласуются с наблюдениями.

Независимо от исходного состава, расчёты предсказывают слой с  $Q_{\text{imp}} = 7-11$  при  $\rho \approx (8 \div 13) \times 10^{11} \text{ г/см}^3$ . Такой слой появляется и для однородного начального состава. В этом слое в основном присутствуют магические или близкие ядра ( $N=28, 32, 50, 80$ ).

Эволюция содержания примесей (параметра  $Q_{\text{imp}}$ )



### Выводы

Расчёты полной сети ядерных реакций обнаруживают заметное отличие от однокомпонентных моделей.

Существенно отличается ядерный состав, распределение источников нагрева. Вместе с тем интегральный нагрев слабо зависит от состояния вещества.

Многокомпонентные модели позволяют идентифицировать источники Урка-охлаждения, потенциально ограничивающие возможность перегрева коры НЗ.

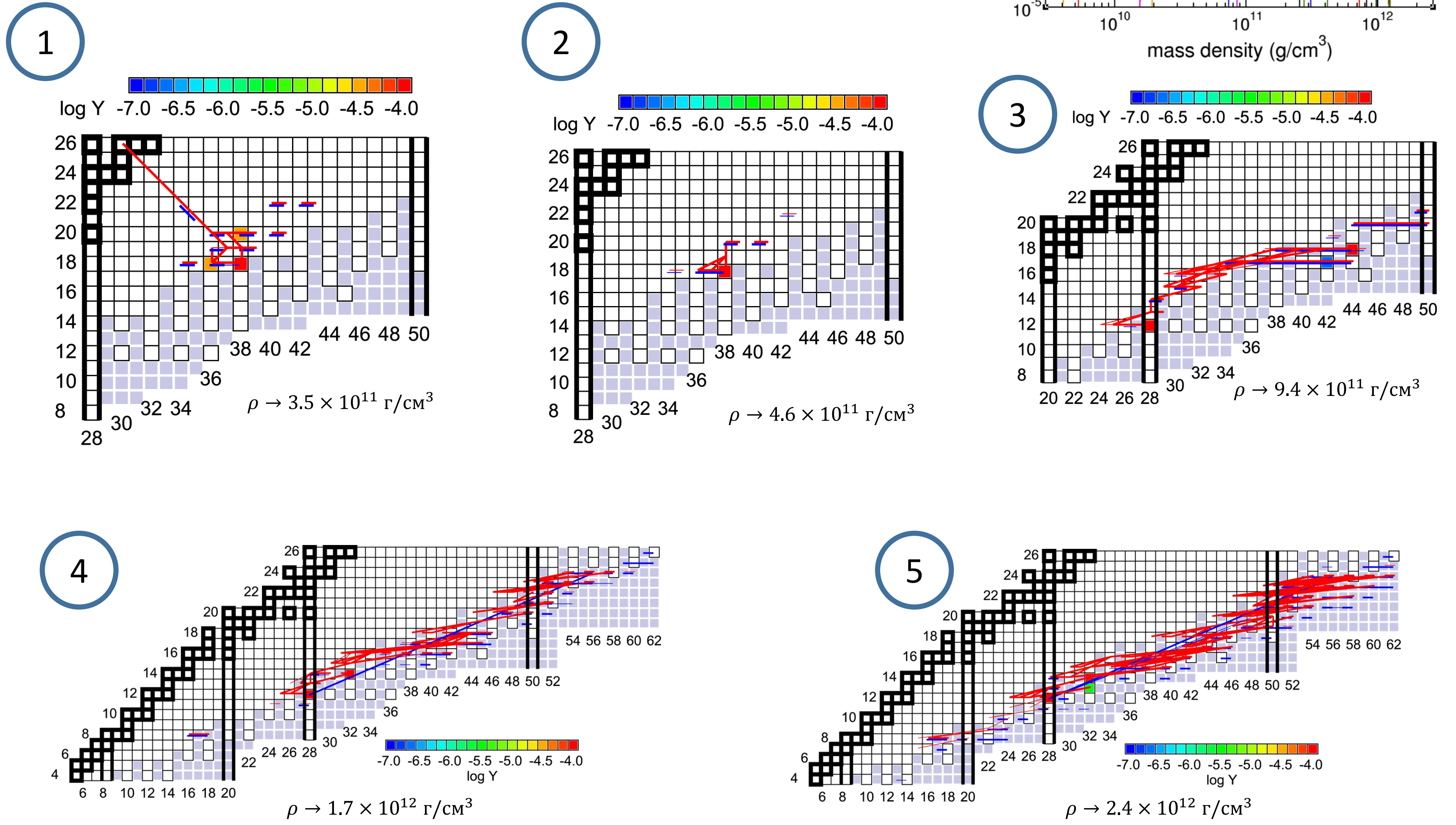
Прослежена гомогенизация ядерного состава в области внутренней коры, связанная с оболочечными эффектами.

Работа задаёт базу для исследования чувствительности моделей аккрецированной коры к эффектам ядерной физики и самосогласованного моделирования эволюции коры в аккрецирующих НЗ.

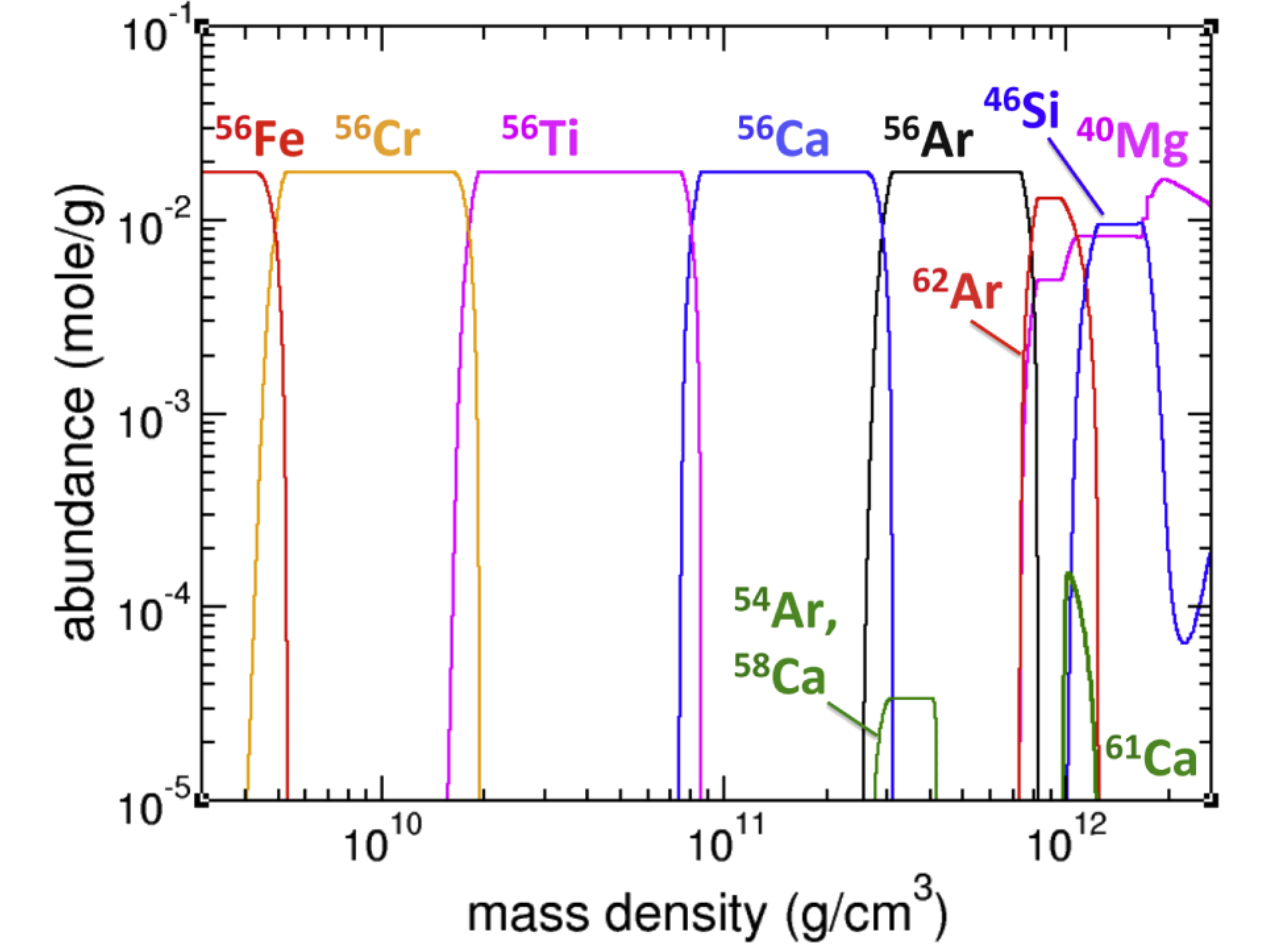
На диаграммах N-Z показаны интегральные потоки в реакциях. Красные линии – с уменьшением Z или увеличением N. Синие – наоборот. Толстые линии показывают потоки более  $10^{-6}$  моль/г, тонкие между  $10^{-8}$  и  $10^{-6}$ . Цветом показаны содержания элементов к концу соответствующего этапа. Содержания с  $\log Y < -7$  не раскрашены. Жирные квадраты – стабильные ядра; вертикальные жирные линии – магические N.

### Fe56

Основные этапы ядерного горения (1-5) и изменение состава (справа) для исходной железной композиции. Появление нейтронов происходит при  $\rho = 2.9 \times 10^{11} \text{ г/см}^3$  в реакции  $^{56}\text{Ca}(EC)^{56}\text{K}(EC, 2n)^{54}\text{Ar}$  и приводит к ветвлению сети реакций и многокомпонентному составу (диаграмма 1).

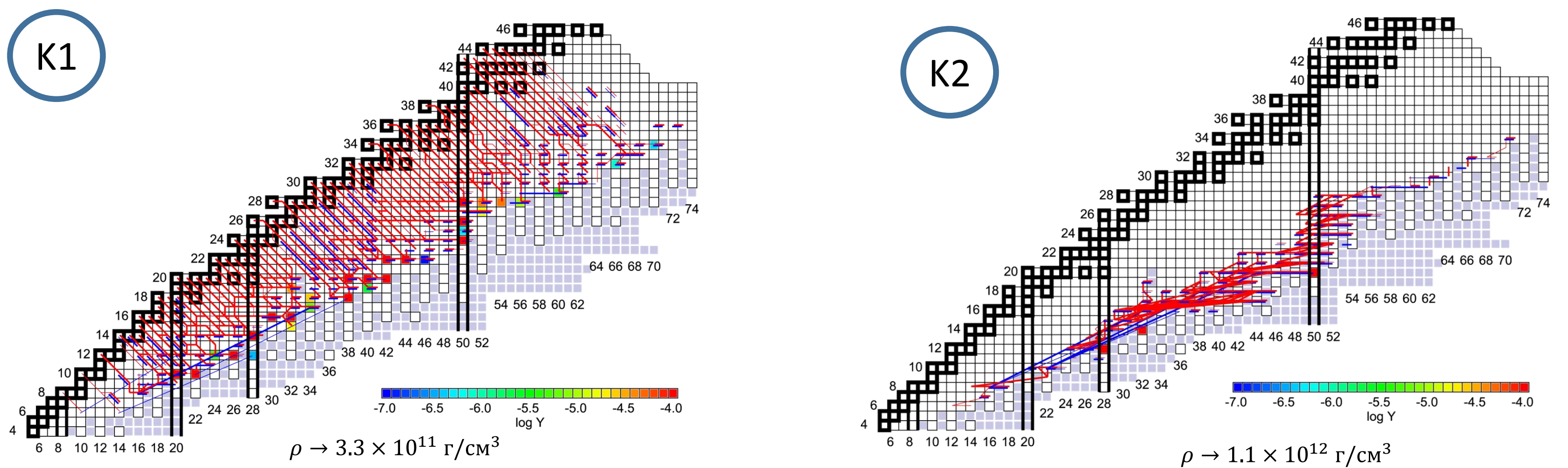


Эволюция состава сжимающегося элемента с железным исходным составом

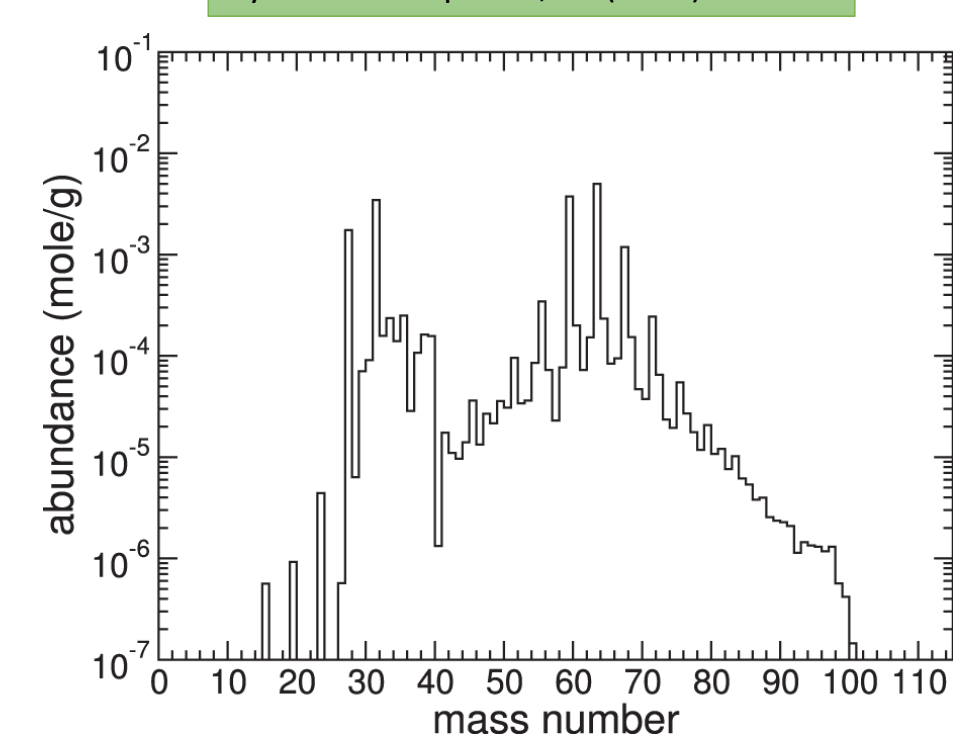


### Kepler XRB

Эволюция пепла рентгеновских вспышек. Начальный состав рассчитан кодом Kepler и показан справа. Диаграмма K1 демонстрирует разветвленную сеть реакций, включающую Урка-пары и пикноядерное горение легких ядер. SEC и fusion-SEC каскады эффективно перерабатывают вещество в трёхкомпонентную смесь  $^{70}\text{Ca}$  ( $N = 50$ ),  $^{46}\text{Si}$  ( $N = 32$ ),  $^{40}\text{Mg}$  ( $N = 28$ ) (диаграмма K2)



Состав пепла рентгеновской вспышки Cyburt et al. *ApJ* 830, 55 (2016)



Ядерное горение в рентгеновской вспышке рис. из Meisel et al. *J. Phys. G* 45, 093001 (2018)

