

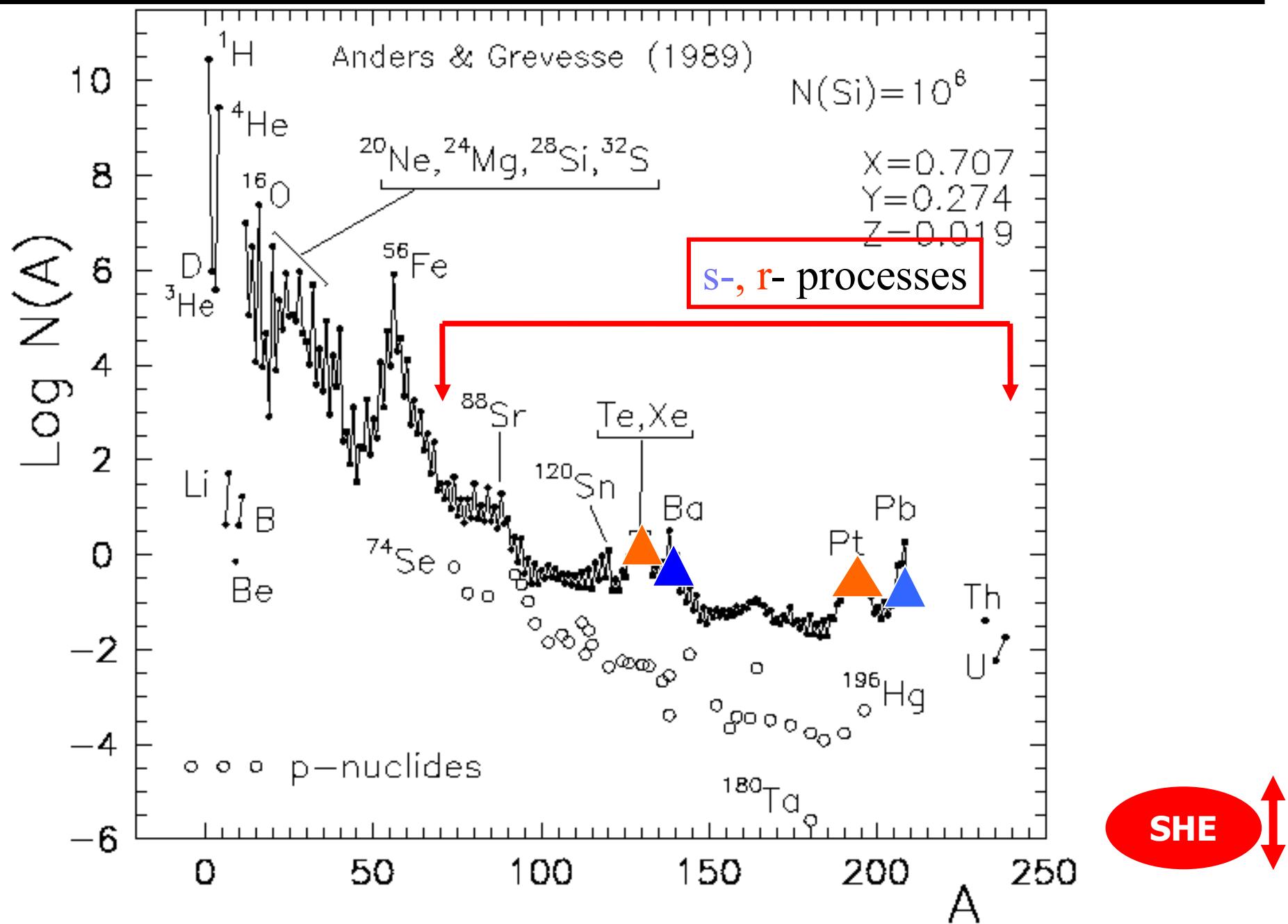
Нуклеосинтез тяжелых элементов в r -процессе

Панов Игорь Витальевич

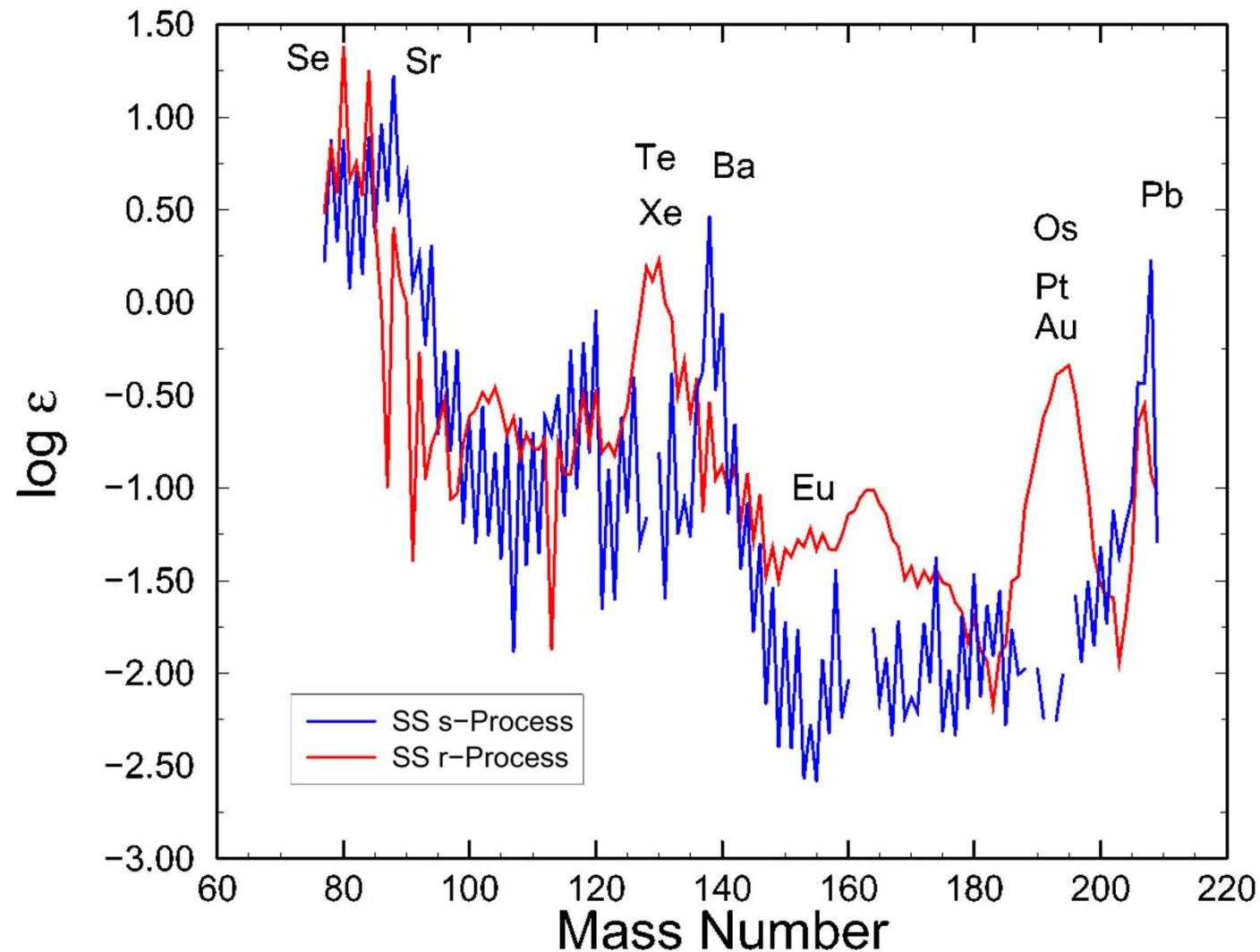
НИЦ “КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ” - ИНСТИТУТ
ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

1. Введение (астрофизический нуклеосинтез и r -процесс)
2. Теоретические сценарии r -процесса – от в СН* до СНЗ.
3. Образование тяжелых элементов. Модели.
4. Модель ветров. Холодный и горячий r -процесс
5. Волна нуклеосинтеза и образование тяжелых ядер.
6. Особенности протекания r -процесса в трансурановой области и образование сверхтяжелых элементов
7. Тесные двойные системы, NS+NS – m_1/m_2 - ?
8. Ядерные данные: скорости реакций, массовые модели, барьеры деления, запаздывающие процессы, ...
9. Заключение

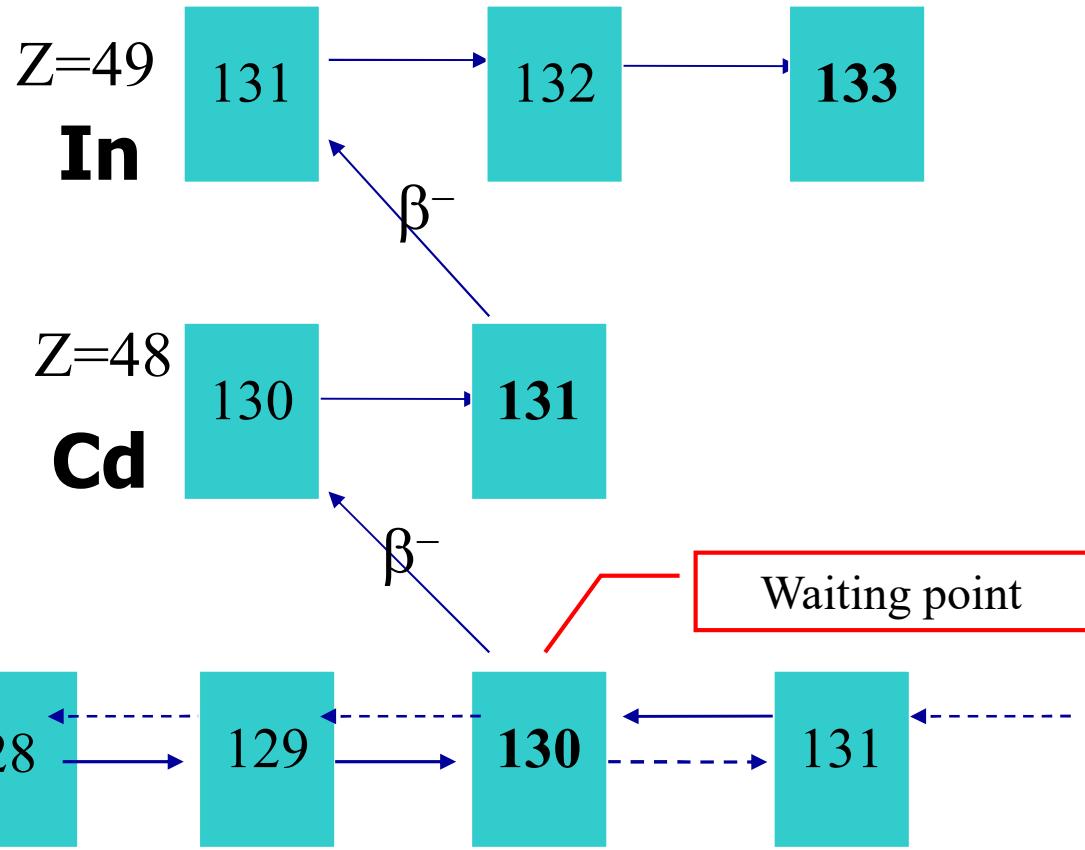
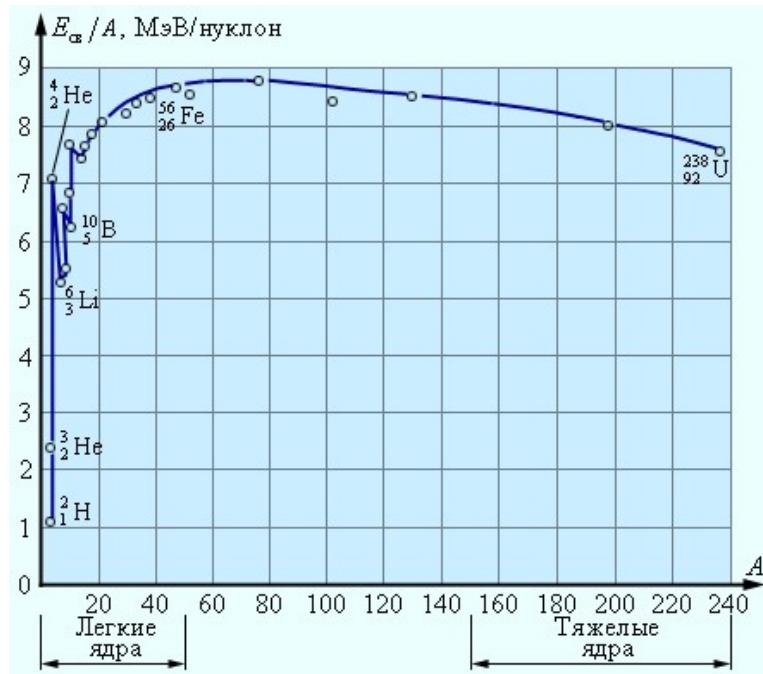
1. Распространенность химических элементов



1. Распространенность химических элементов в солнечной системе, образованных в r- и s- процессах $N_r = N_{\odot} - N_s$

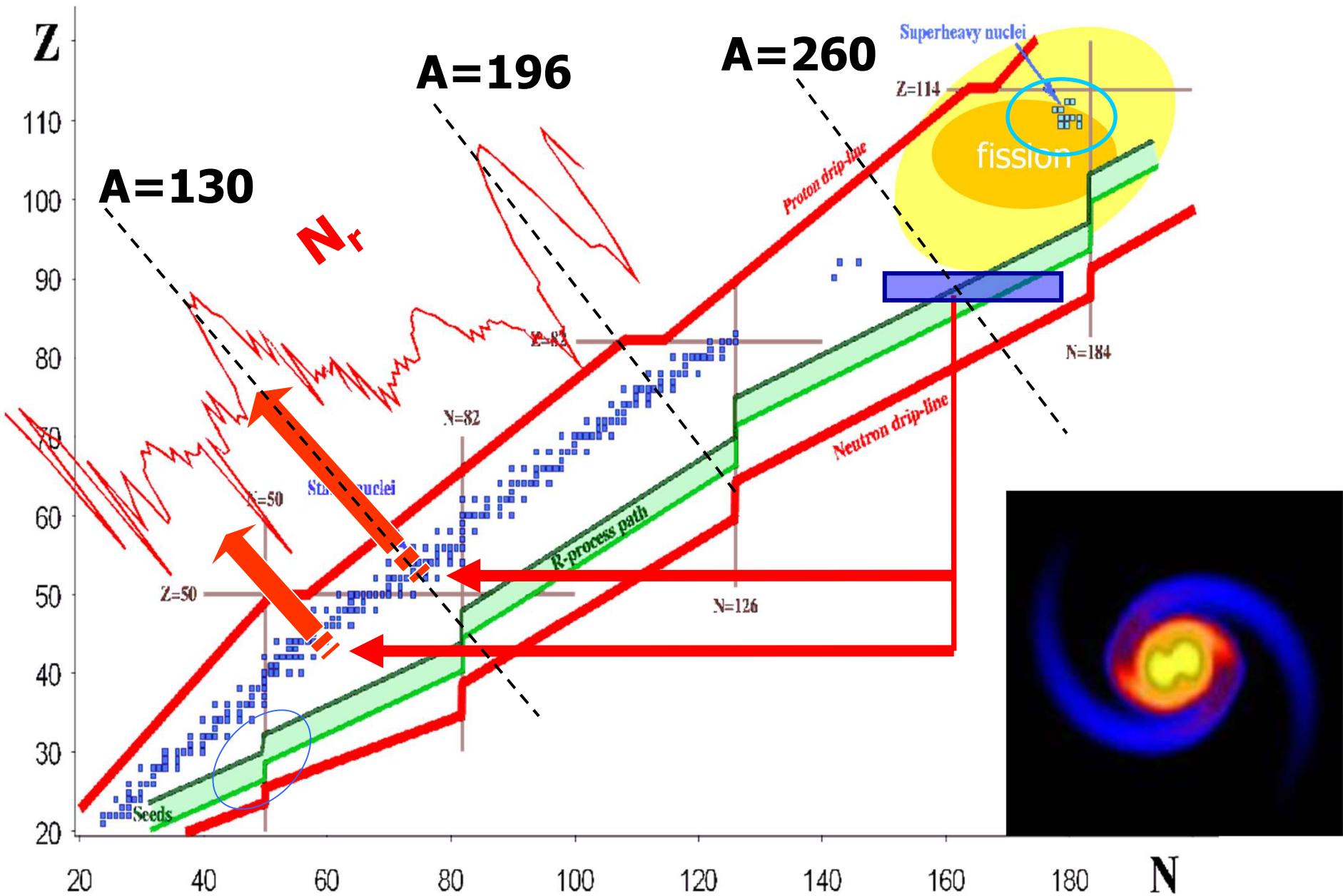


1. нуклеосинтез в реакциях с нейтронами ($T_9 < 2$):



r-процесс: $n_n > 10^{22}$ $\lambda_{n\gamma} \gg \lambda_\beta$; (s-процесс: $n_n < 10^{12}$ $\lambda_{n\gamma} \ll \lambda_\beta$)

1. Карта ядер и путь r -процесса



2. Сценарии, краткая история

Сверхновые – термоядерные и коллапсирующие ($s > 200 k_B$)
high entropy wind? Woosley et al. 1992-94

Гелиевая вспышка? (Truran at al.)

Нейтрино-индуцированный r -процесс - СНП

Epstein, Colgate 1988; Nadehin, Panov, 1998

Струи (взрывы) на поверхности NS (Б.-Коган, Чечеткин)

Гамма-всплески и Джеты (Cameron, 2000)?

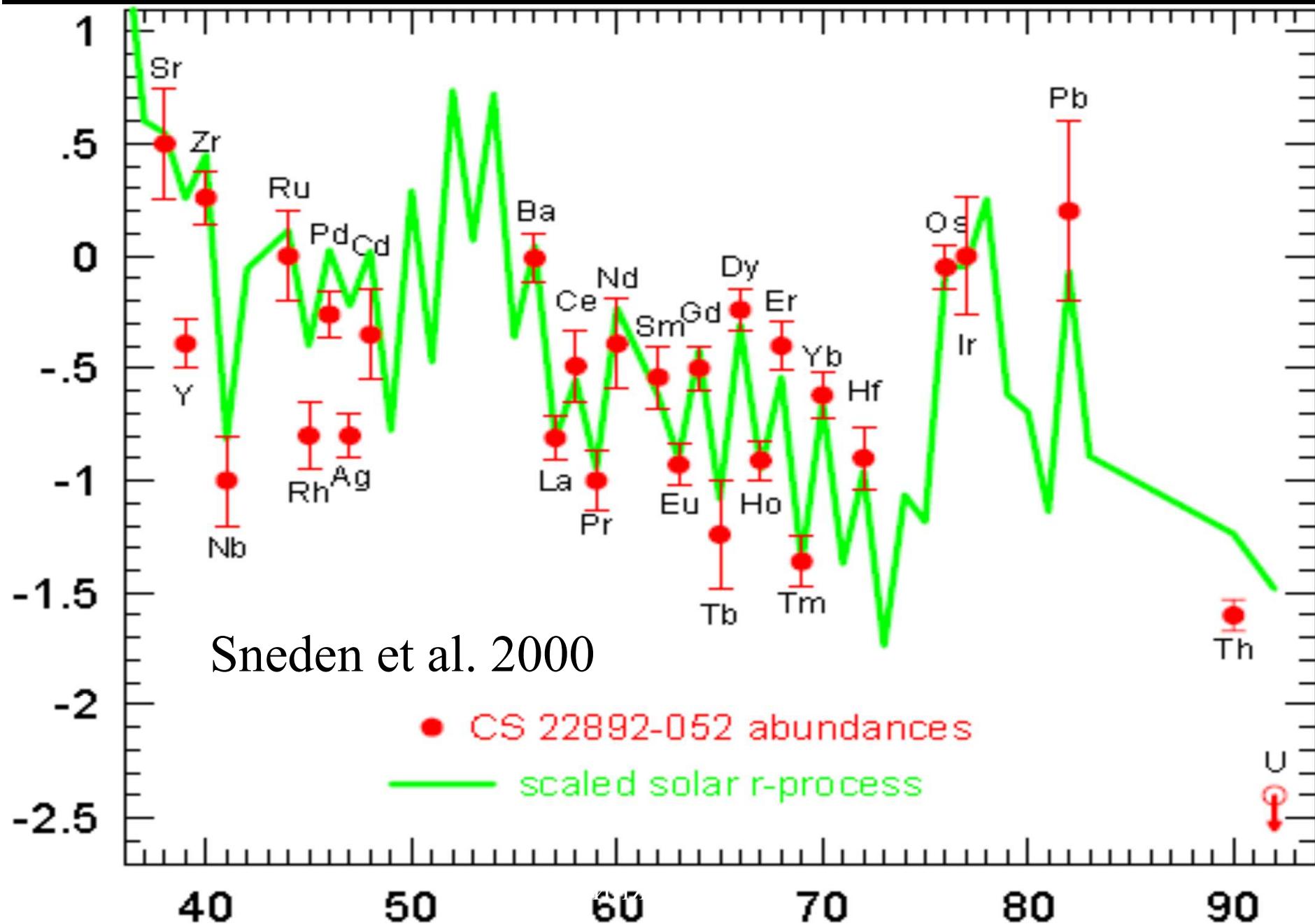
Слияние нейтронных звезд: (Блинников и др. 1984)

модель - Rosswog et al 1998/1999)

CCSNe – $Y_e \sim 0.5$ (Huedepol et al. 2010;)

Редкие массивные CH (MHD, quark,...)

2. Y_z , старые звезды, металличность $Z < 0.001$ $[Fe/H] \sim -3.1$



2. Сценарии. Необходимые условия для r-процесса, Зародышевые ядра (seeds); источники нейтронов

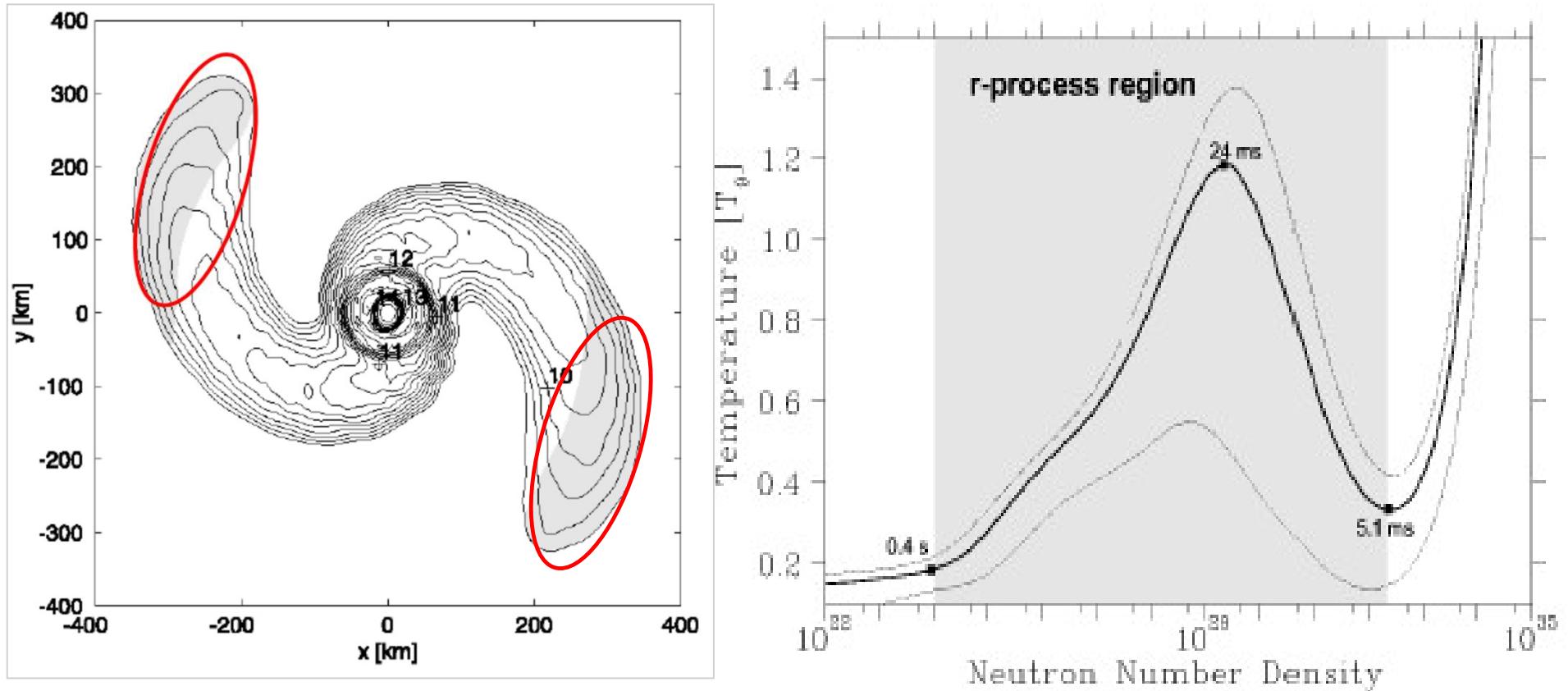
От взрывов СН до

“Fe”; n/seeds ~150
 (α,n) -: $^{22}\text{Ne}(\alpha,n)^{25}\text{Mg}$
 $^{12}\text{C}(^{12}\text{C},n)^{23}\text{Mg}$; $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$
взрыв SN, $M=25\text{M}_\odot$,
Woosley et al. 1992,94
 $s>250\text{k}_\text{B}$ Hot ν -wind
Freiburghouse et al. 1999
 $T_9 \sim 1$, $\rho_0 \sim <10^6 \text{ г/см}^3$

Слияния нейтронных звезд

“Fe” и легкие ядра
n/seeds ~150
 $\text{NSM} \sim 1.2\text{M}_\odot + 1.4\text{M}_\odot$ -ejecta, $T_9 < 2$, $\rho \sim 1-10^7$
 $Y_e = (1-\eta)/2 \sim 0.01-0.42$
Rosswog, et al. 1999
Rare SN (MHD, quark,...)
Winds and collisions

Сценарий Neutron Star Merger



Neutron star merger scenario - $T_9(t)$, $Y_n(t)$, $\rho(t)$

Rosswog et al Astron. Astrophys. 341, 499 (1999)

Freiburghaus et al. AJ 525 (1999); $0.01 < Y_e < 0.20$ ($0.05, 0.15$)

2.(4). Тесные двойные системы. СНЗ.

GW170817

Слияние двух нейтронных звезд
Наблюдалось детекторами гравитационных волн LIGO / Virgo и более 70 электромагнитными обсерваториями.



Расстояние
130 млн. световых лет

Произошло
17 Августа 2017

Тип
Слияние нейтронных звезд



Почти одновременная регистрация гравитационных волн и гамма-лучей от GW170817 дает все указания на то, что это **килоновая**.

Полученные на Очень большом телескопе (VLT ESO, Very Large Telescope) спектры показывают присутствие **цезия и теллура**, выброшенных в пространство. Эти и другие тяжелые элементы, такие как золото и платина, рассеиваются в космосе после взрывов килоновых. Таким образом, наблюдения указывают на формирование элементов тяжелее железа при ядерных реакциях в недрах сверхплотных звездных объектов. Существование этих образованных в r -процессе тяжелых элементов рассчитывалось неоднократно в разных моделях слияния нейтронных звезд.

Теперь появились и наблюдательные подтверждение существования килоновых. Одновременно получены самые веские на сегодняшний день доказательства того, что кратковременные гамма-всплески обусловлены слияниями нейтронных звезд.

короткие вспышки гамма-излучения (<2c) – следствие слияния компактных объектов, NS+NS, в результате которого образуется огромное количество тяжелых нейтроноизбыточных ядер, чей распад приводит к выделению энергии ~ в 1000 раз больше, чем при взрыве Новой == КИЛОНОВАЯ (B.Metzger, 2010):

- 1) S. I. Blinnikov, I. D. Novikov, T. V. Perevodchikova, and A. G. Polnarev, Sov.Astron. Lett. 10, 177 (1984).
- 2) Tanvir, N. R.; Levan, A. J.; et al.; (2013). "A 'kilonova' associated with the short-duration γ -ray burst GRB 130603B". Nature. 500 (7464): 547
- 3) Evans, P. A. et al. Science, in press; doi:10.1126/science.aap9580
Swift and NuSTAR observations of **GW170817**: detection of a blue kilonova
- 4) Tanvir, N. R.; Korobkin, O.; Rosswog, S.... doi:10.3847/2041-8213/aa90b6
The Emergence of a **Lanthanide-Rich Kilonova** Following the Merger of Two Neutron Stars

Tanaka, M., Utsumi, Y., Mazzali, P. A.; Tominaga, N. ... doi:10.1093/pasj/psx121
Kilonova from post-merger ejecta as an optical and near-infrared counterpart of GW170817

3. r-процесс. Модели.

Приближение точки ожидания-waiting point approximation:

$$(n, \gamma) \longleftrightarrow (\gamma, n) \text{ equilibrium}$$

$$dN(Z)/dt = -\lambda_Z N(Z) + \lambda_{Z-1} N(Z-1)$$

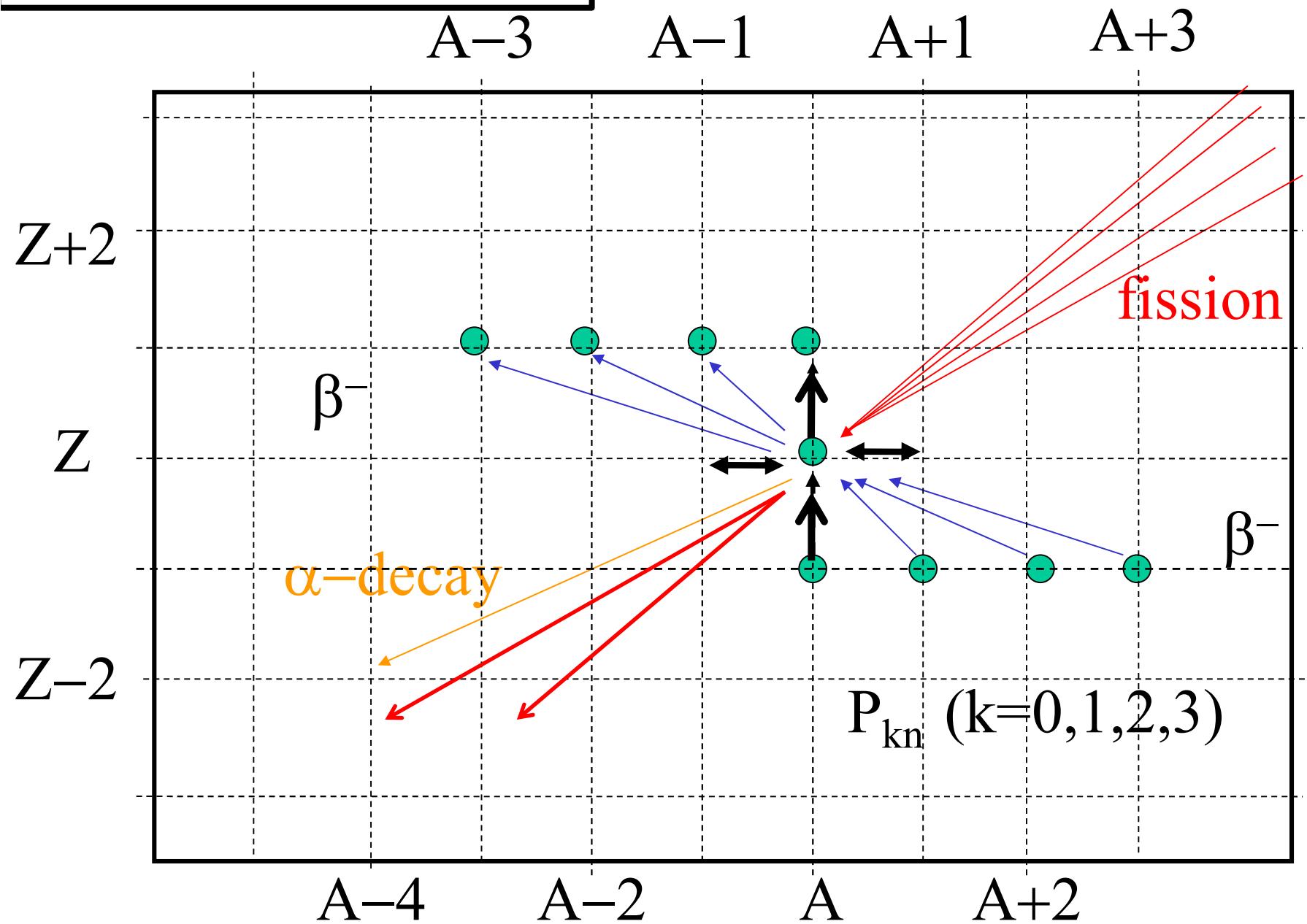
$$P_Z(A) := n(Z, A) / \sum_A n(Z, A) = \frac{n(Z, A)}{n_Z}$$

$$\lambda_Z := \sum_A \lambda_A(Z, A) P_Z(A)$$

$$\frac{dN(Z_i, A_j)}{dt} = \sum_{ijk} c_{ijk} \lambda_k n(Z_i, A_j)$$

NETWORKs: парные реакции с участием n, α, p, γ, 3α, ααn, Реакции горения C, O, деление и α-распад:

3. Модель: реакции



$$dY_{A,Z}/dt =$$

3. Модель: network

$$\begin{aligned} & -\lambda_{n\gamma}(A, Z) \cdot Y_{A,Z} + \lambda_{\gamma n}(A+1, Z) \cdot Y_{A+1,Z} \\ & -\lambda_{\gamma n}(A, Z) \cdot Y_{A,Z} + \lambda_{n\gamma}(A-1, Z) \cdot Y_{A-1,Z} \\ & -\lambda_\beta(A, Z) \cdot Y_{A,Z} + \sum_{k=0,1,2,3} \lambda_\beta(A+k, Z-1) \cdot P_{kn}(A+k, Z-1) \cdot Y_{A+k,Z-1} \\ & + \sum_{A_f, Z_f} W_\beta(A_f, Z_f, A, Z) \lambda_\beta(A_f, Z_f) P_{\beta df}(A_f, Z_f) \cdot Y_{A_f,Z_f} \\ & -\lambda_{nf}(A, Z) \cdot Y_{A,Z} + \sum_{A_f, Z_f} W_{nf}(A_f, Z_f, A, Z) \lambda_{nf}(A_f, Z_f) \cdot Y_{A_f,Z_f} \\ & -\lambda_{sf}(A, Z) \cdot Y_{A,Z} + \sum_{A_f, Z_f} W_{sf}(A_f, Z_f, A, Z) \lambda_{sf}(A_f, Z_f) \cdot Y_{A_f,Z_f}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} dY_n/dt = & -\sum_{A,Z} \lambda_{n\gamma}(A, Z) \cdot Y_{A,Z} \\ & + \sum_{A,Z} \lambda_{\gamma n}(A, Z) \cdot Y_{A,Z} \\ & + \sum_{A,Z} \sum_{k=0,1,2,3} \lambda_\beta(A+k, Z-1) \cdot P_{kn}(A+k, Z-1) \cdot Y_{A+k,Z-1} \\ & + \sum_{A,Z} (\lambda_\beta(A, Z) + \lambda_{sf}(A, Z)) \cdot \nu(A, Z) \cdot Y_{A,Z} \\ & + \sum_{A,Z} \lambda_{nf}(A-1, Z) \cdot \nu(A, Z) \cdot Y_{A-1,Z} \\ & - \sum_{A,Z} \lambda_{nf}(A, Z) \cdot \nu(A, Z) \cdot Y_{A-1,Z}, \end{aligned}$$

Have superheavy elements been produced in nature?

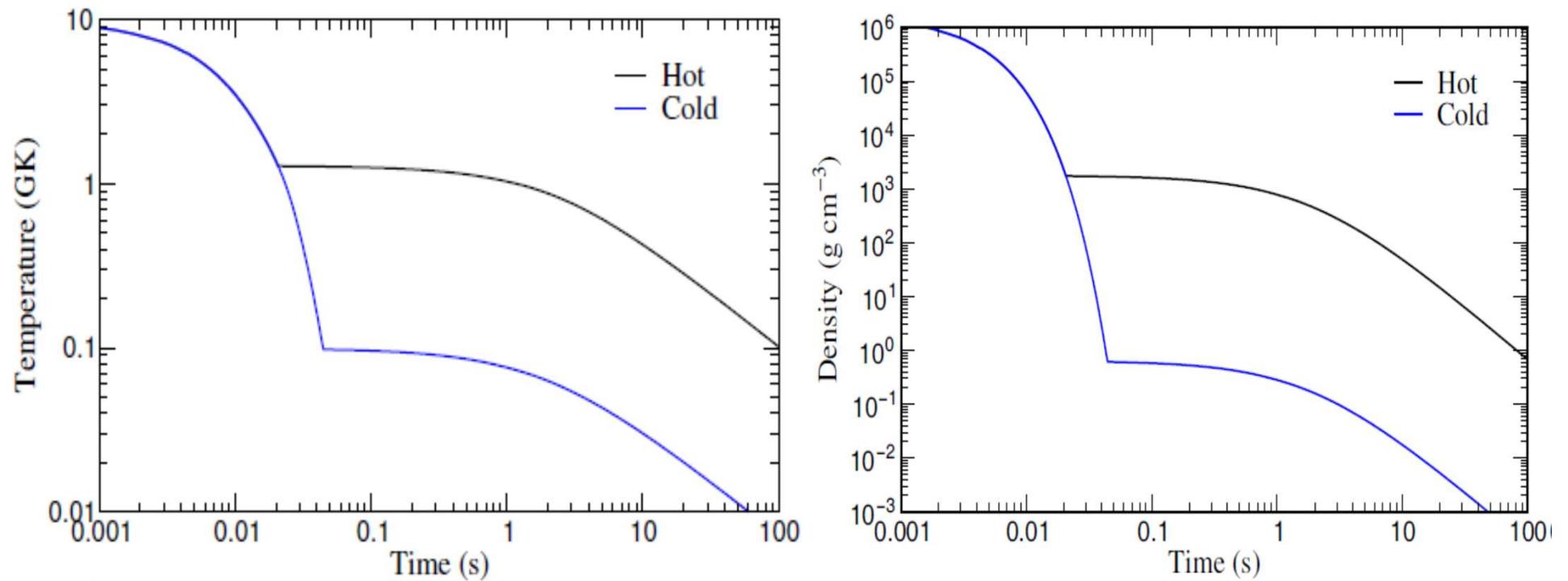
I. Petermann, K. Langanke, G. Martínez-Pinedo, I.V. Panov, P.-G. Reinhard, and F.-K. Thielemann, Eur. Phys. J. A (2012) 48: 122

4. Cold and hot r-процесс

Распространение ветра

- B. Meyer, J. Brown, Astrophys. J. Suppl. 112, (1997).
A.Arcones, H-Th. Janka, L.Scheck, A&A. 467, (2007).
I.V. Panov, H.-T. Janka, Astron. Astrophys. 494, (2009).
T. Fischer, et al. Astron. Astrophys. 517, A80 (2010).
S. Wanajo, H.-Th. Janka, S. Kubono, AJ. 729, (2011).
A. Arcones, G. Martínez-Pinedo, Phys.Rev. C 83, (2011).

4. Cold and hot r-процесс, модель ветра

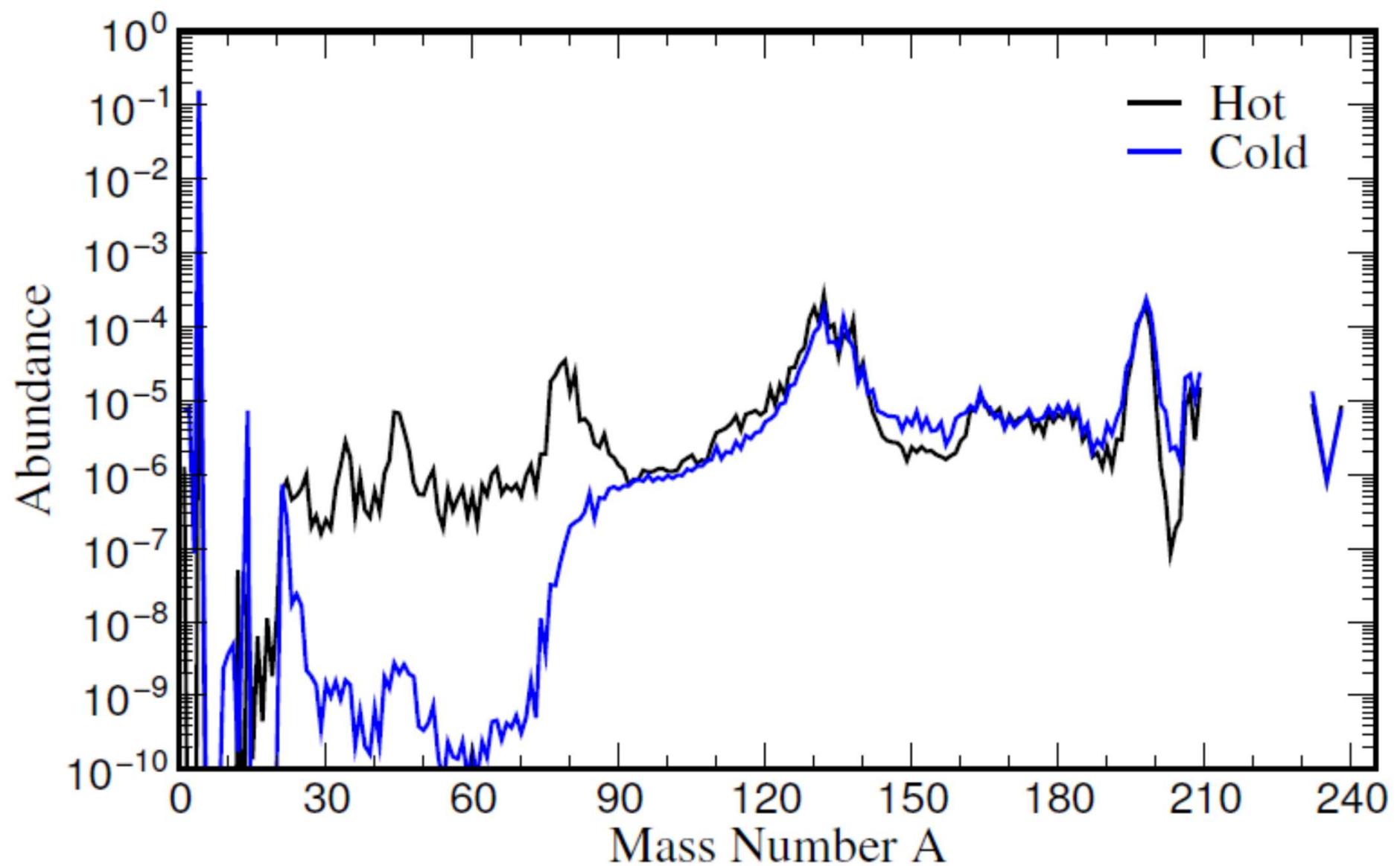


$$\rho(t) = \rho_0 \exp(-t/\tau), \quad T_9(t) = T_9^0 \cdot \exp(-t/3\tau),$$

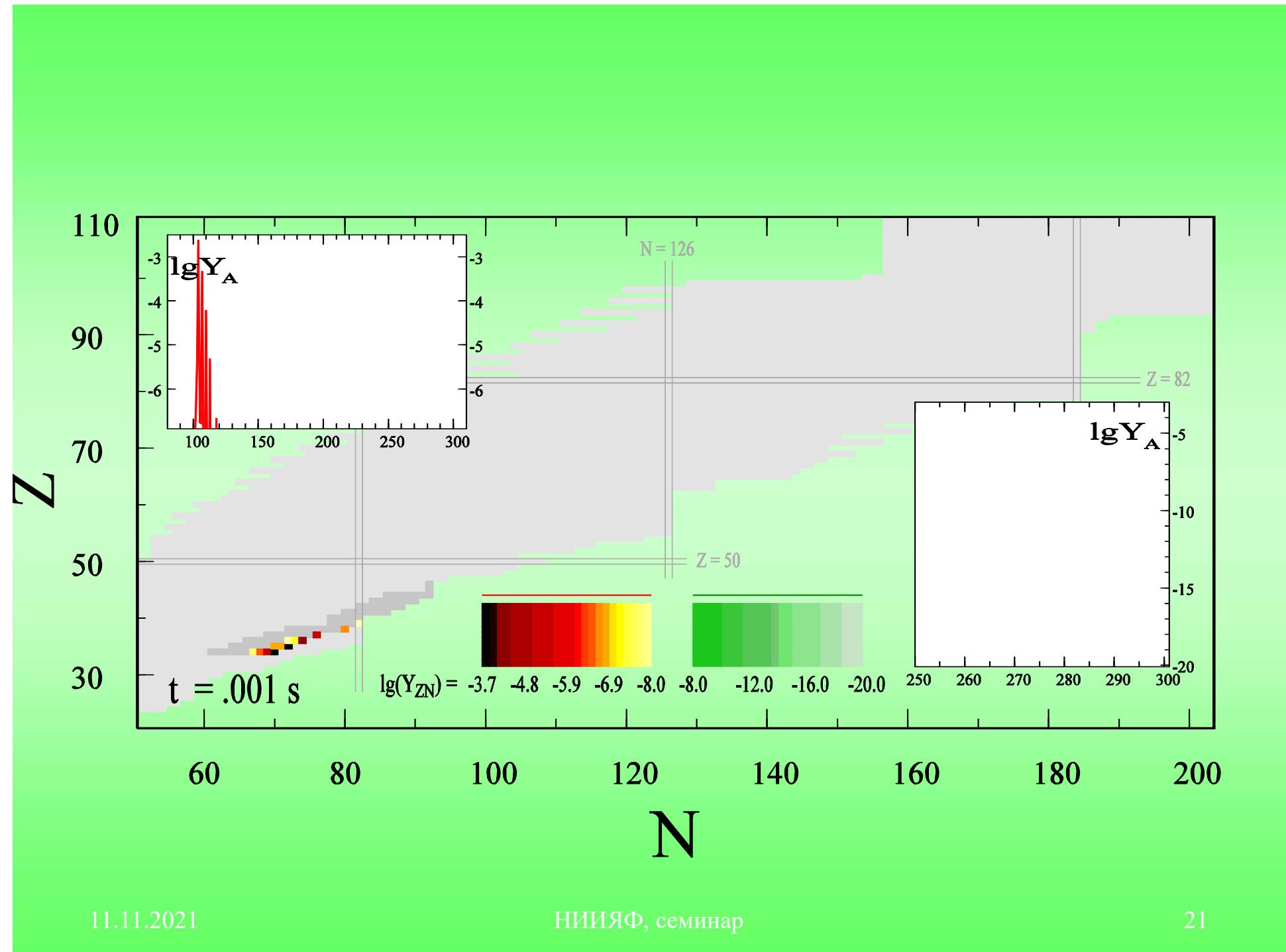
$$\rho(t) = \rho_0 (t/t_0)^{-2} \quad T(t) = T_0 (t/t_0)^{-2/3}, \quad \tau = 3 \text{ мс}$$

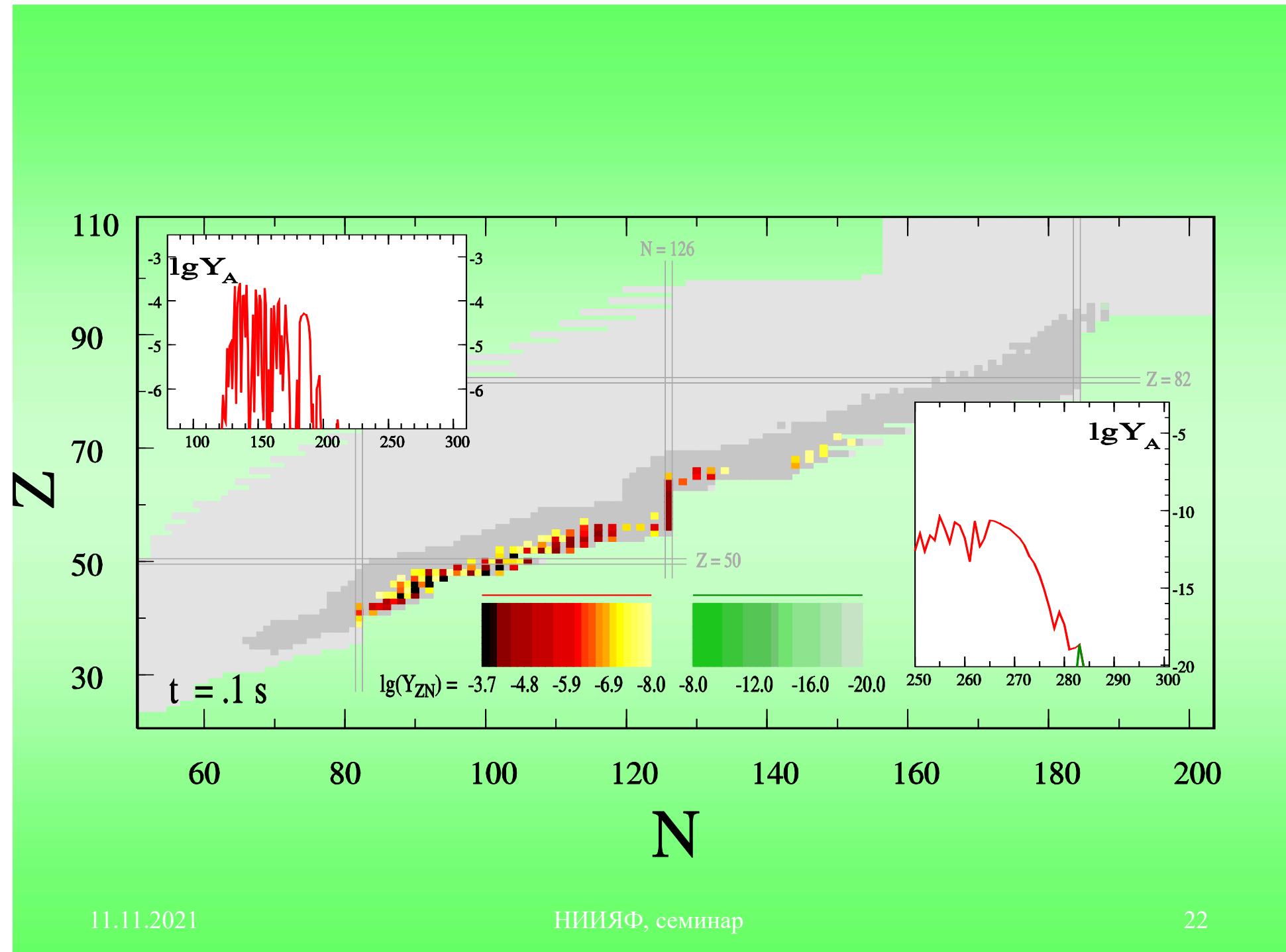
$\rho(t) = \rho_1 [(\Delta + t)/(\Delta + t_1)]^{-2}$ where Δ represents the time scale on which the matter evolves from conditions of almost constant ρ ($t \ll \Delta$) to constant velocity ($t \gg \Delta$), $\Delta = 2c$; **$T = 1.15$ and 0.1 GK** when $t=t_1$ (parameter). We assume $s=200$ k/nucleon, $Y_e = 0.35$ that results in $n/\text{seed} = 290$ at 3 GK.

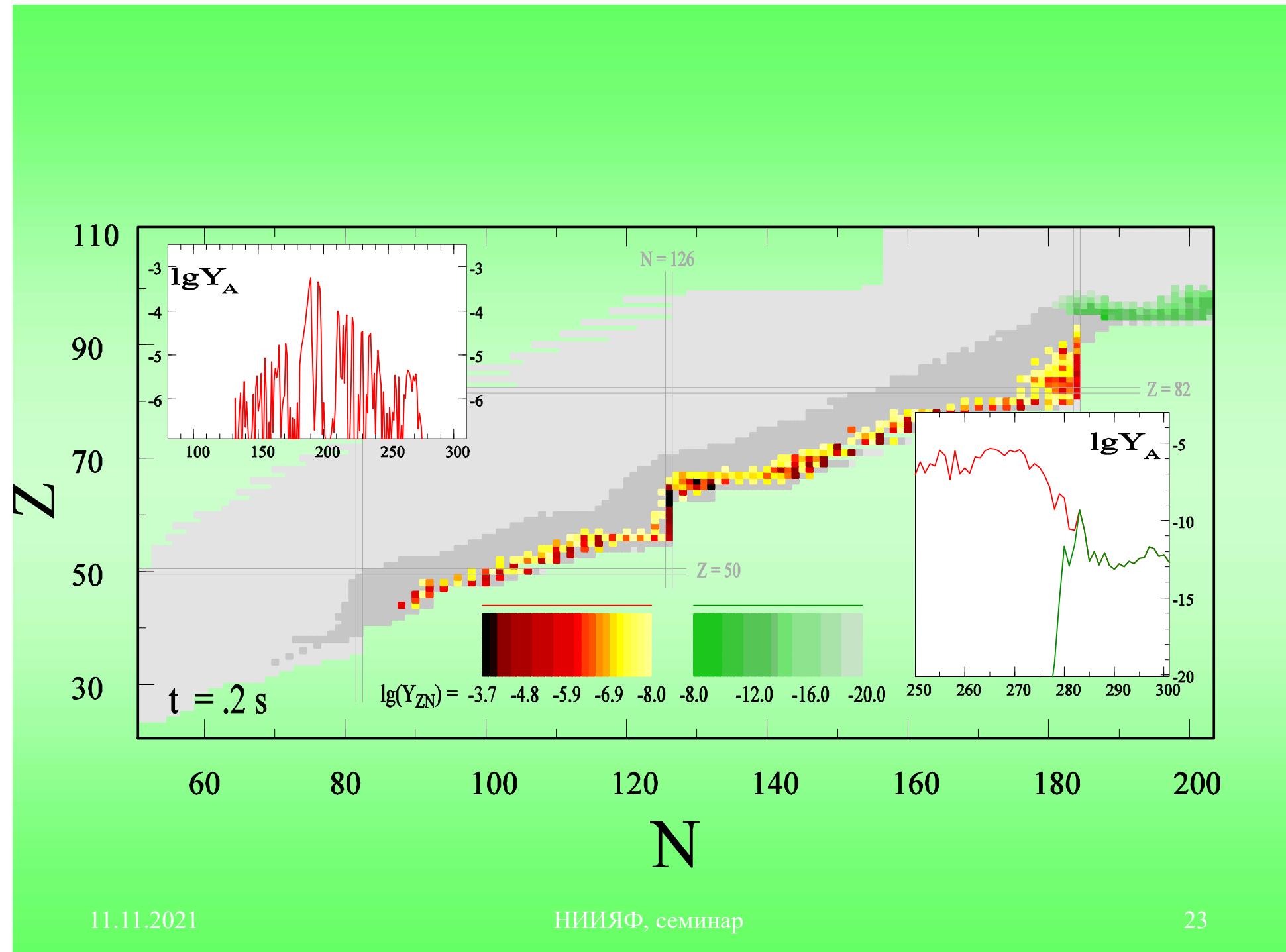
4. Cold and hot r-процесс

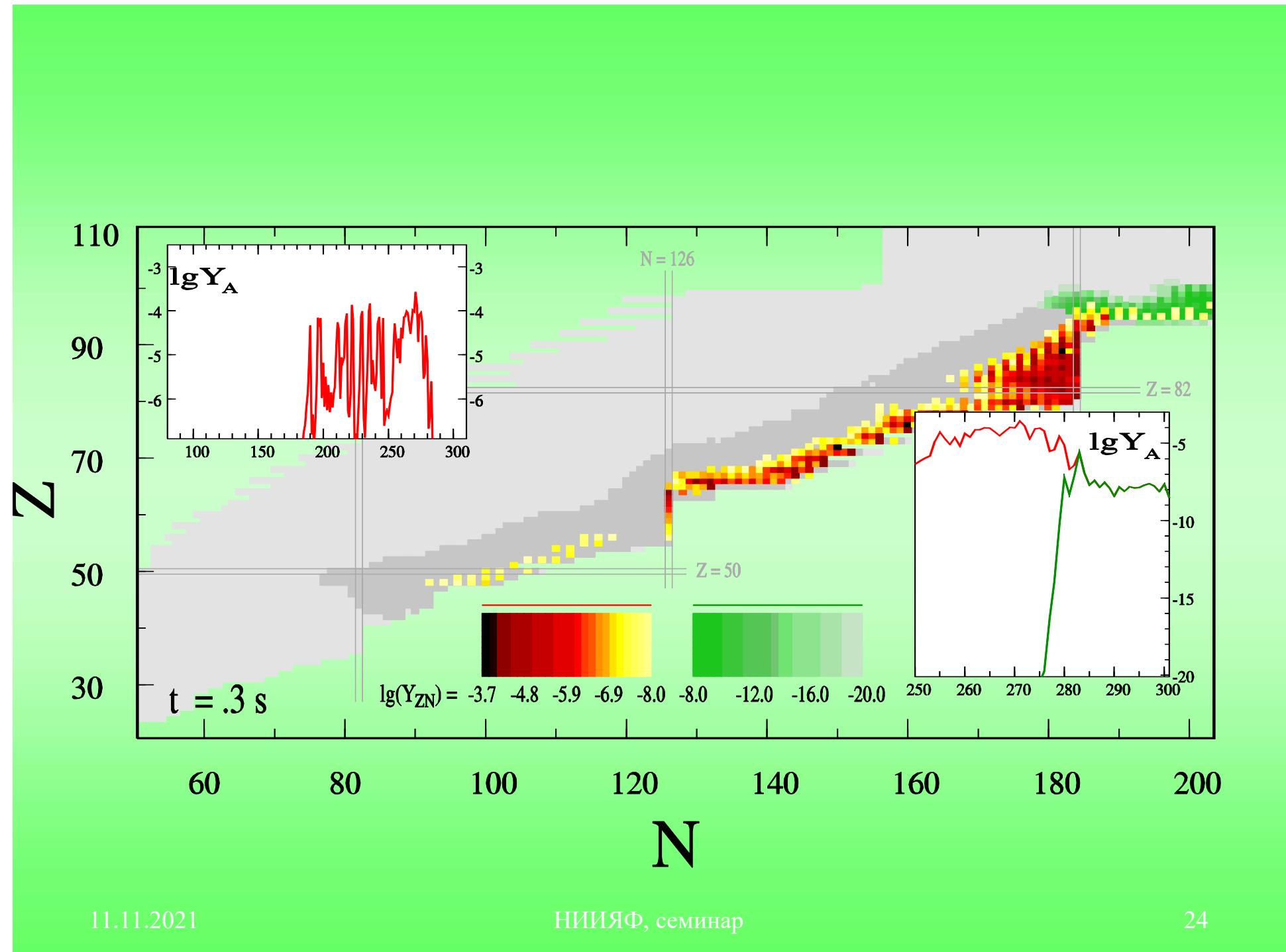


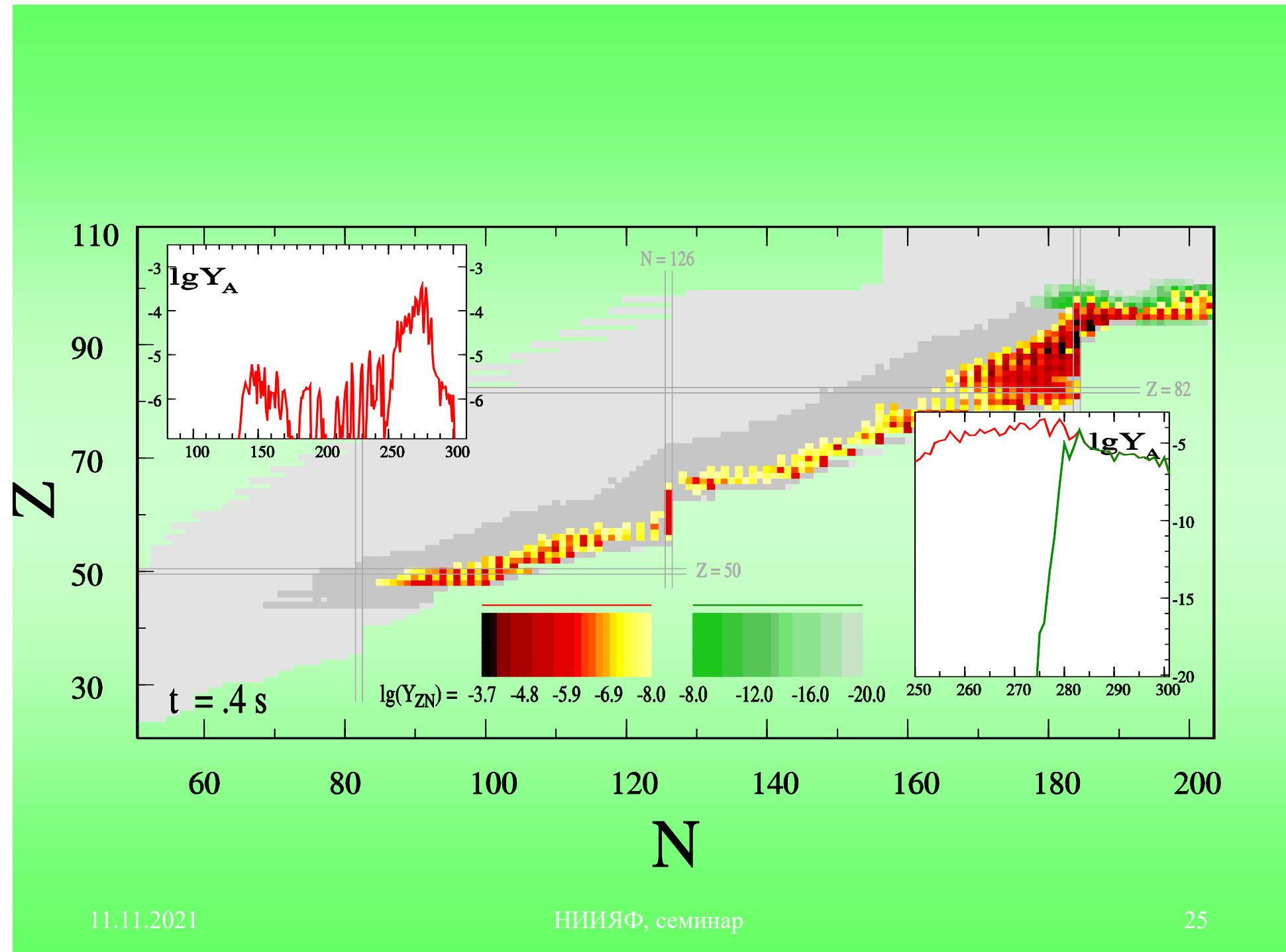
5. ВОЛНА НУКЛЕОСИНТЕЗА
и конечная распространенность
тяжелых элементов, образованных в
 r -процессе в сценарии слияния
нейтронных звезд

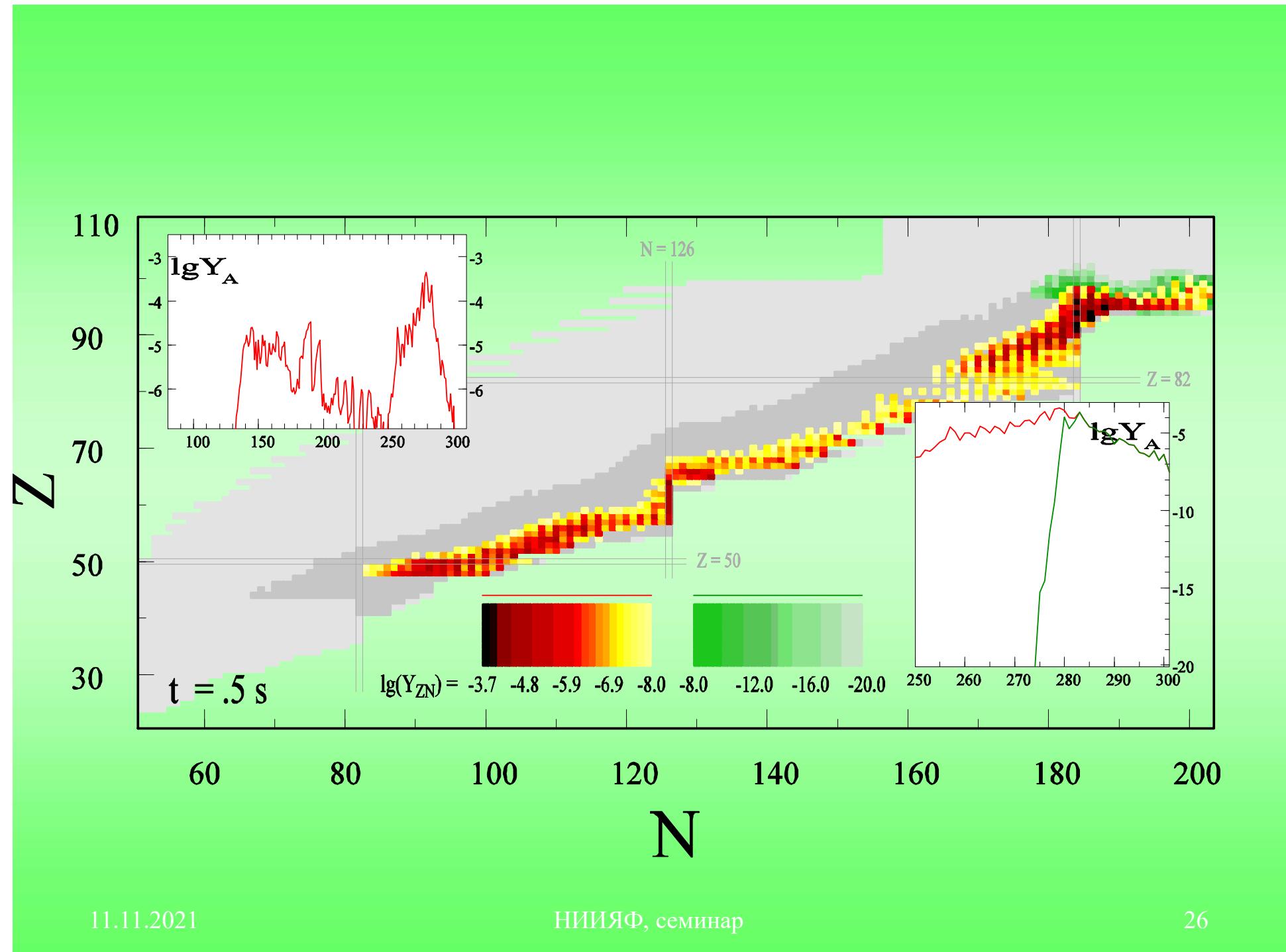


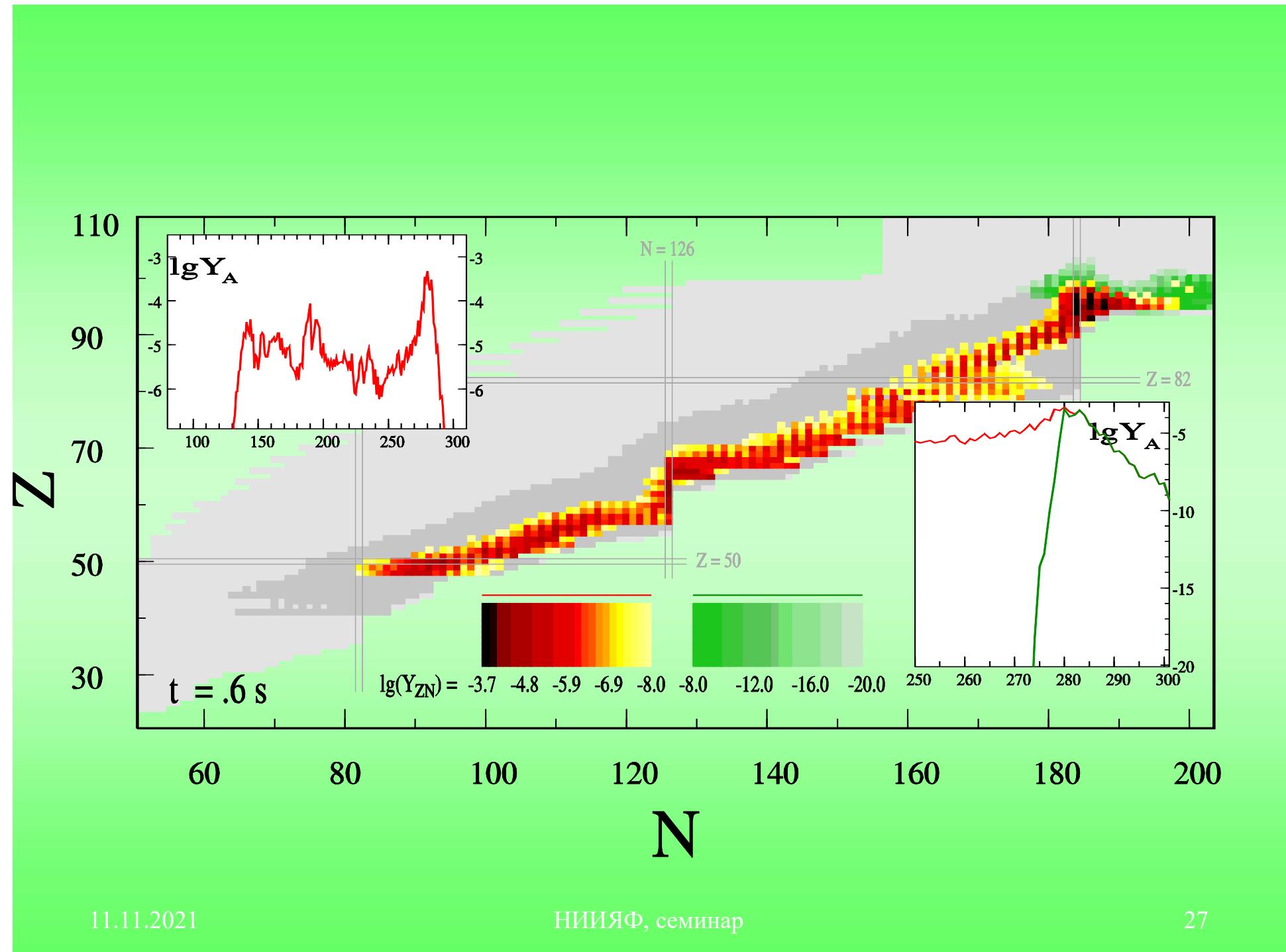


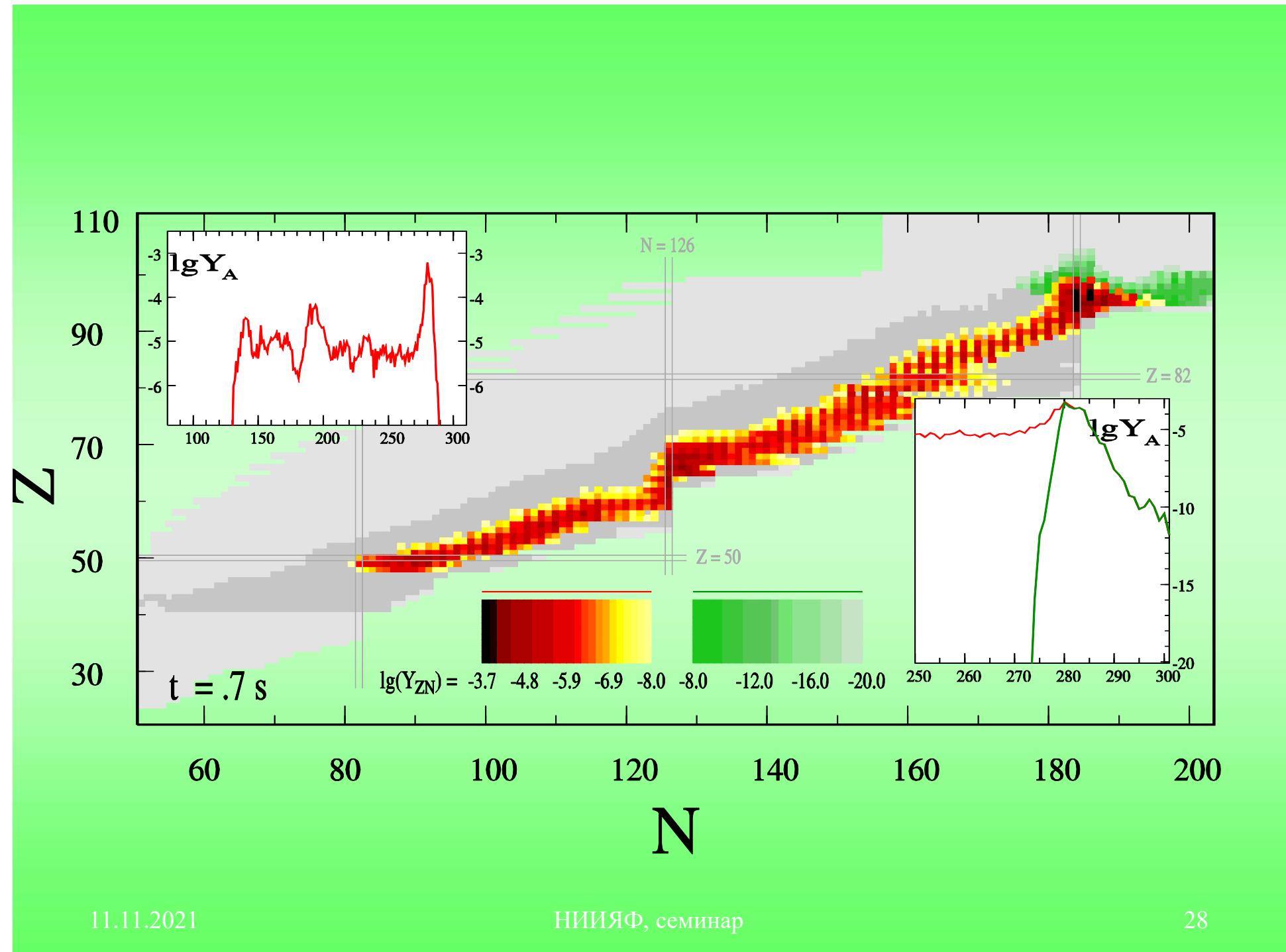


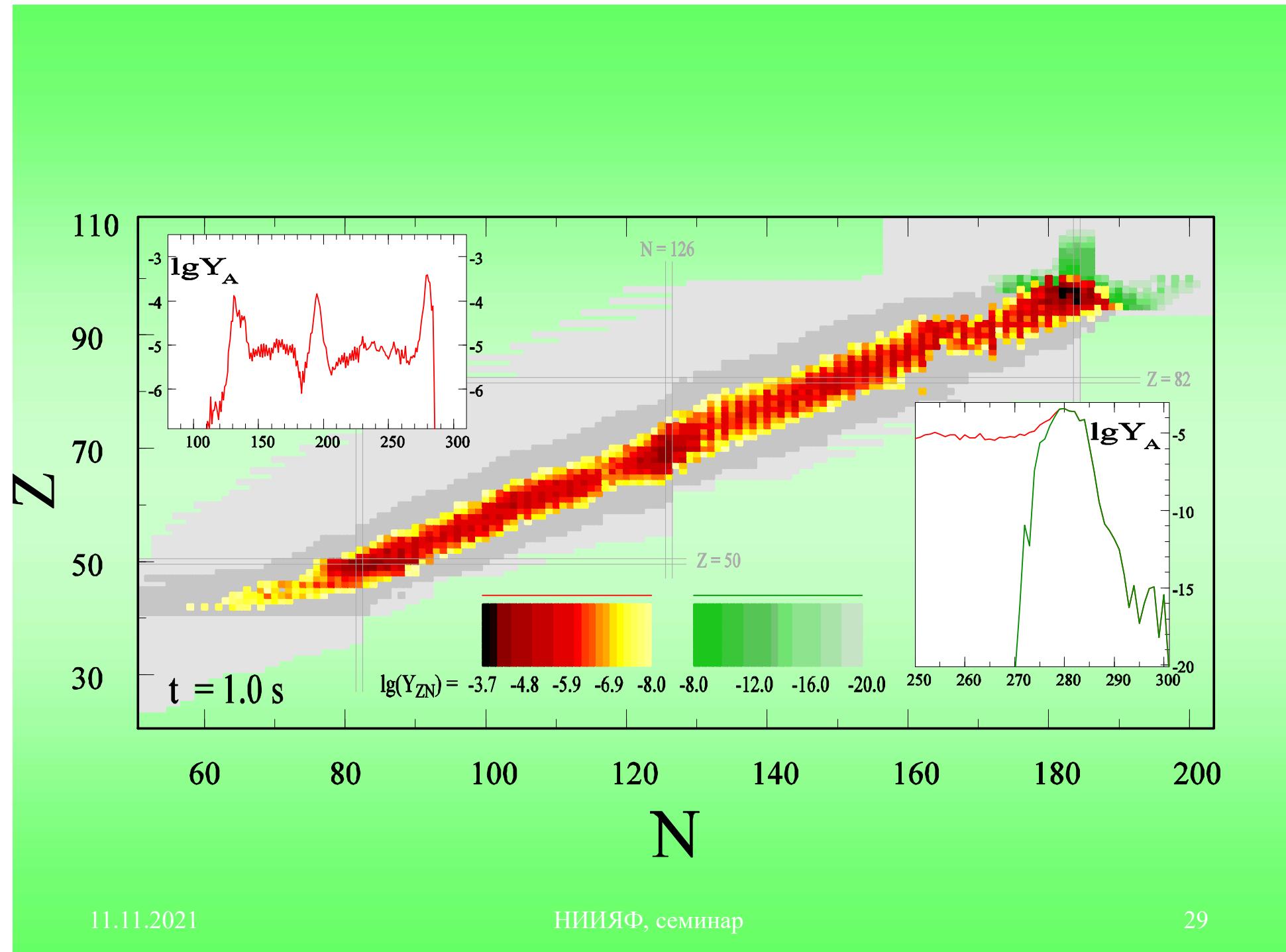


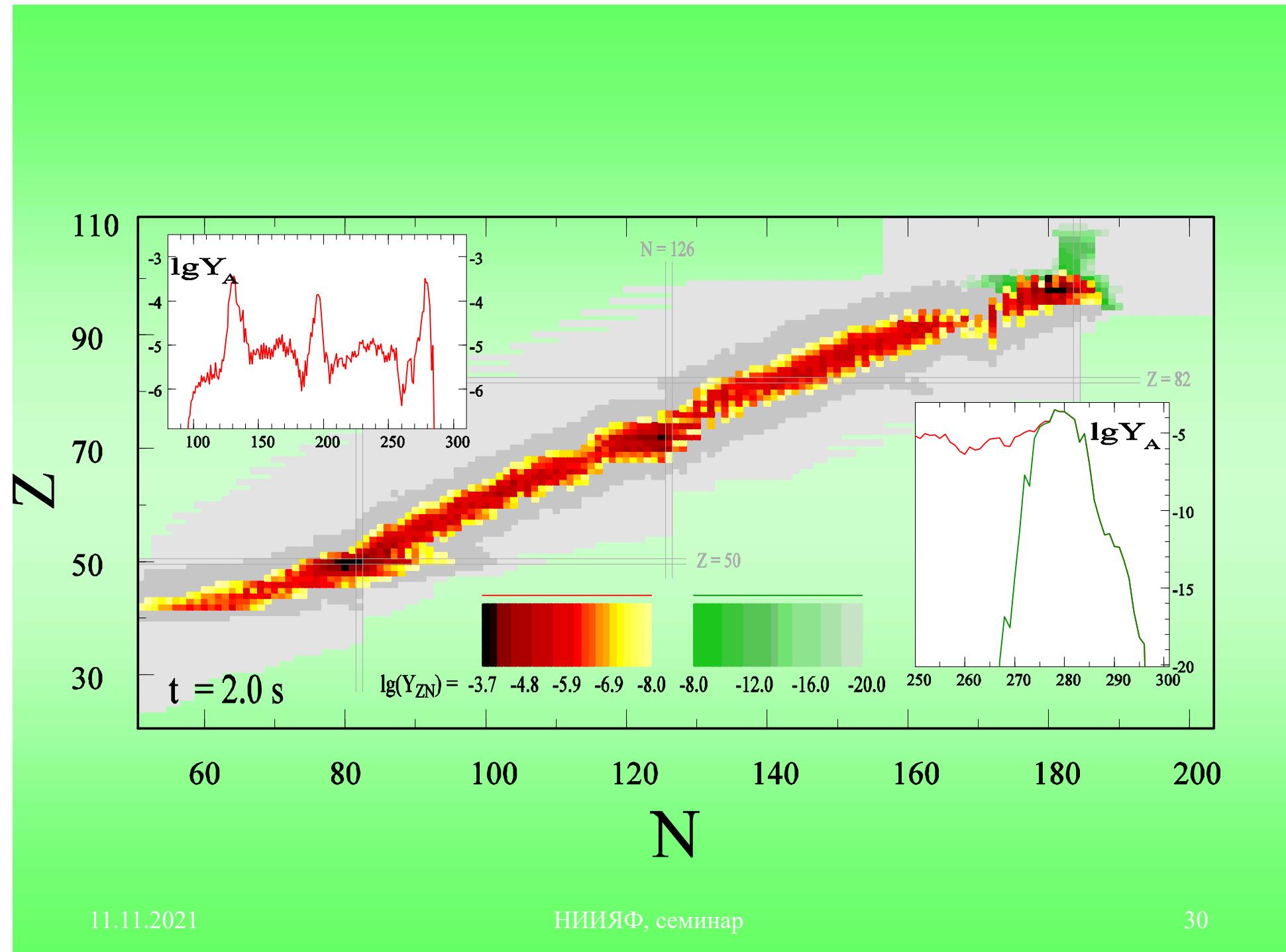




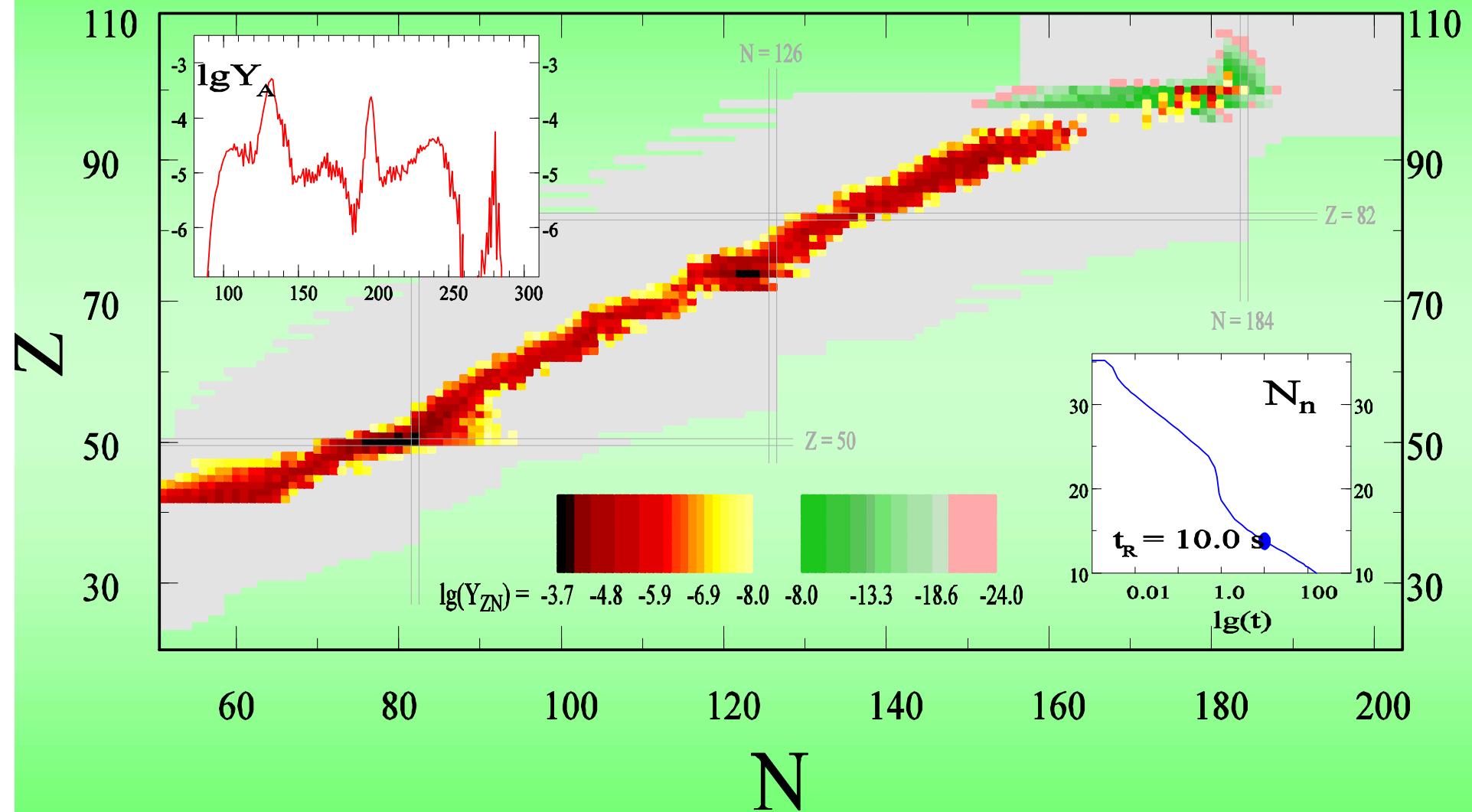


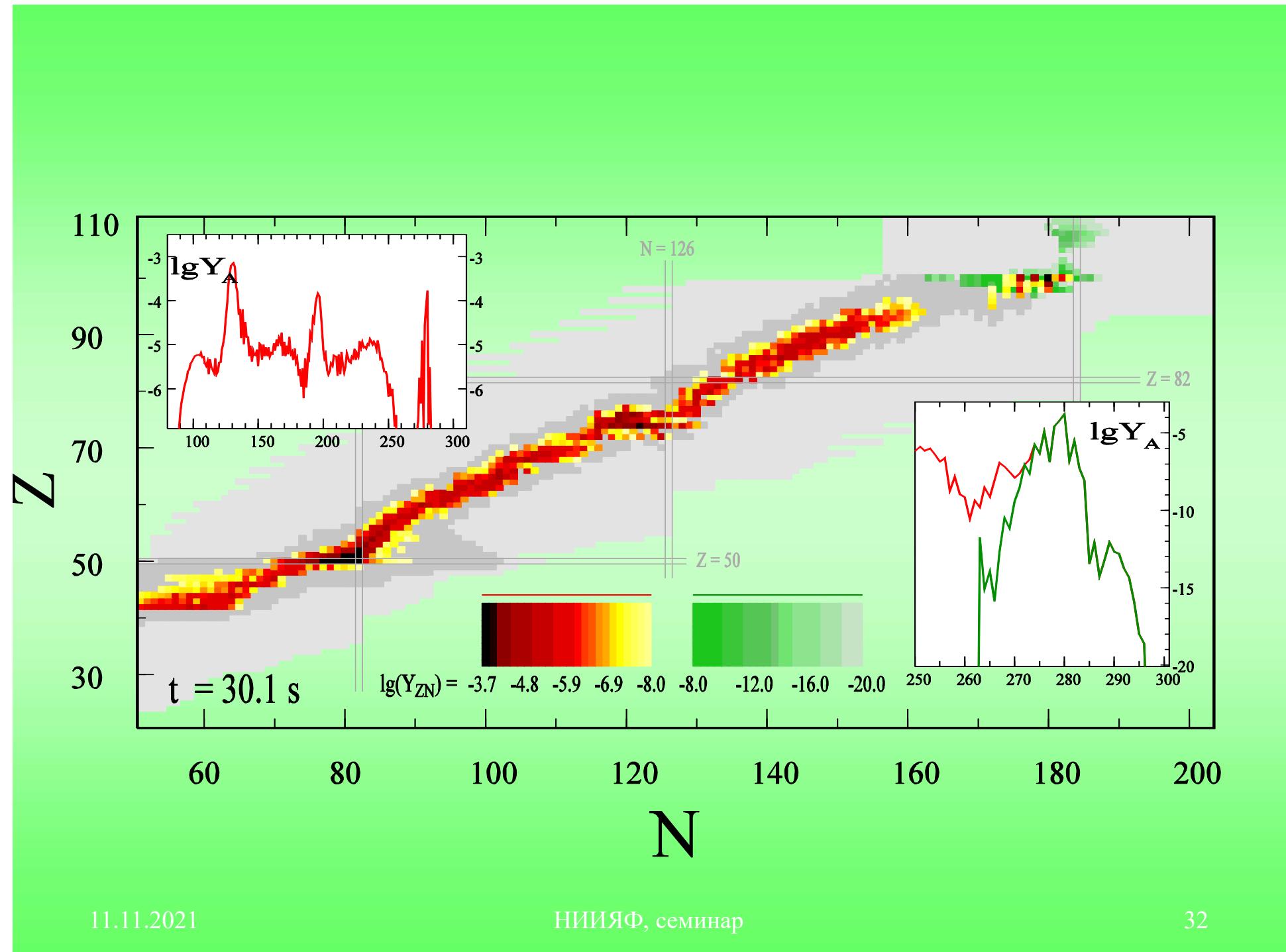


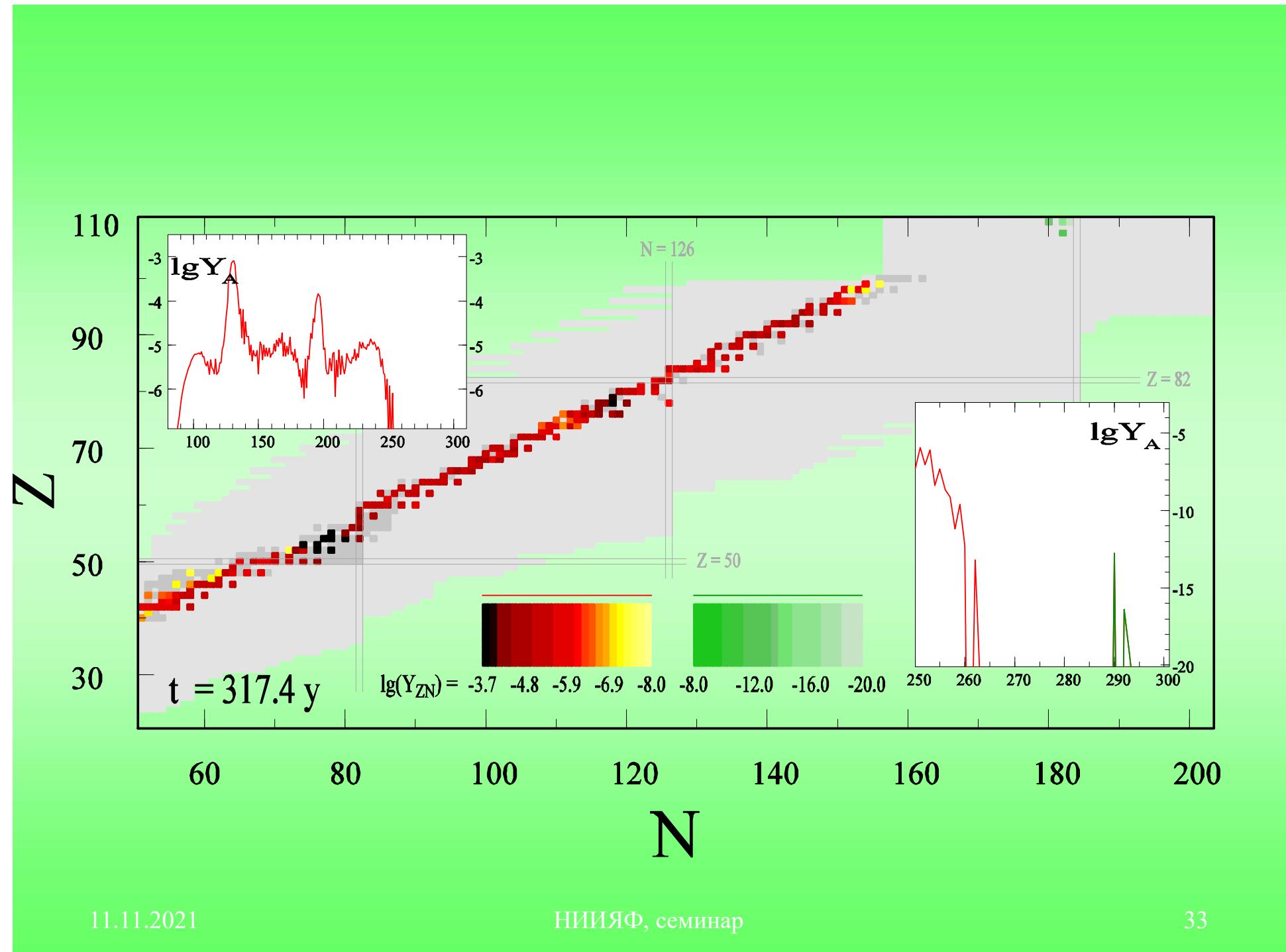




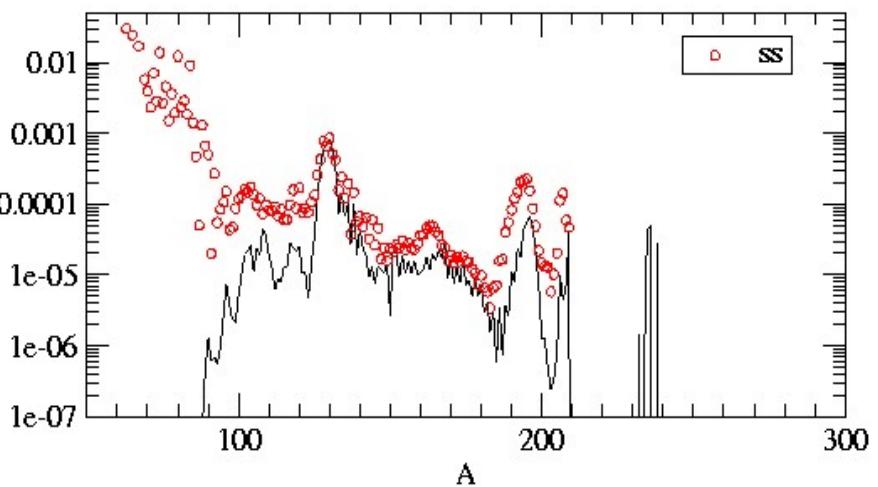
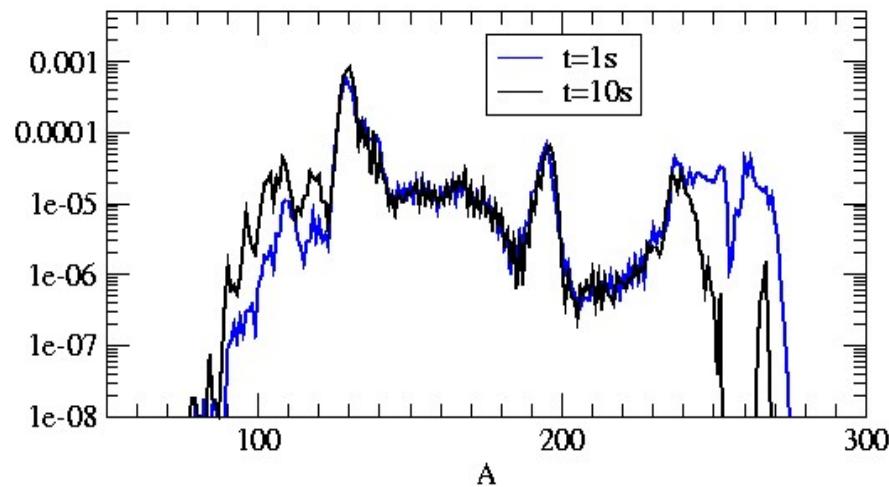
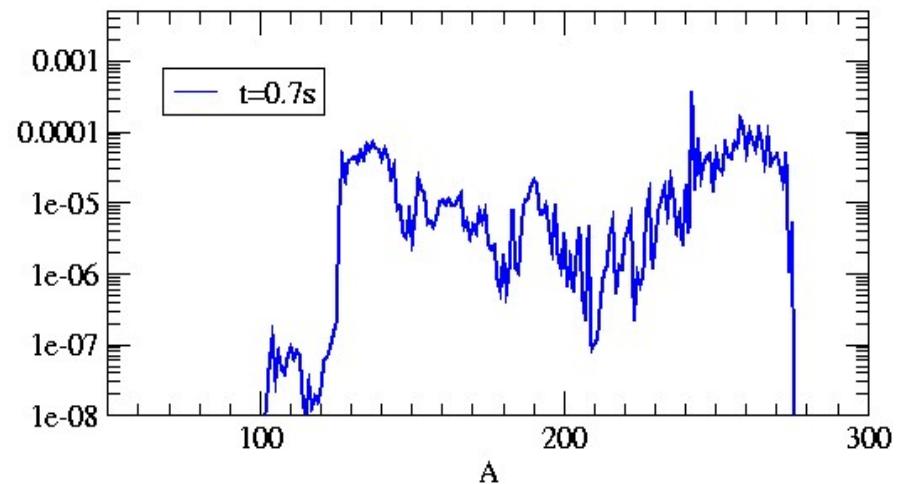
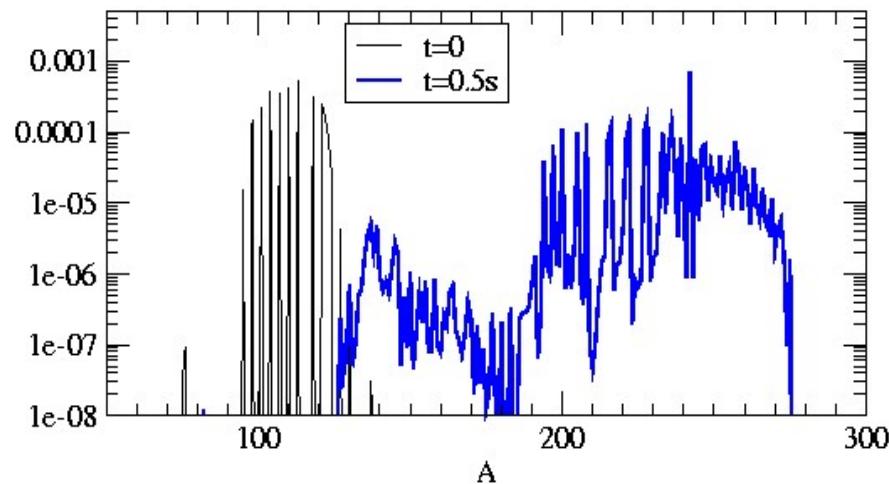
duration of the r-process $\tau_R = 10$ s







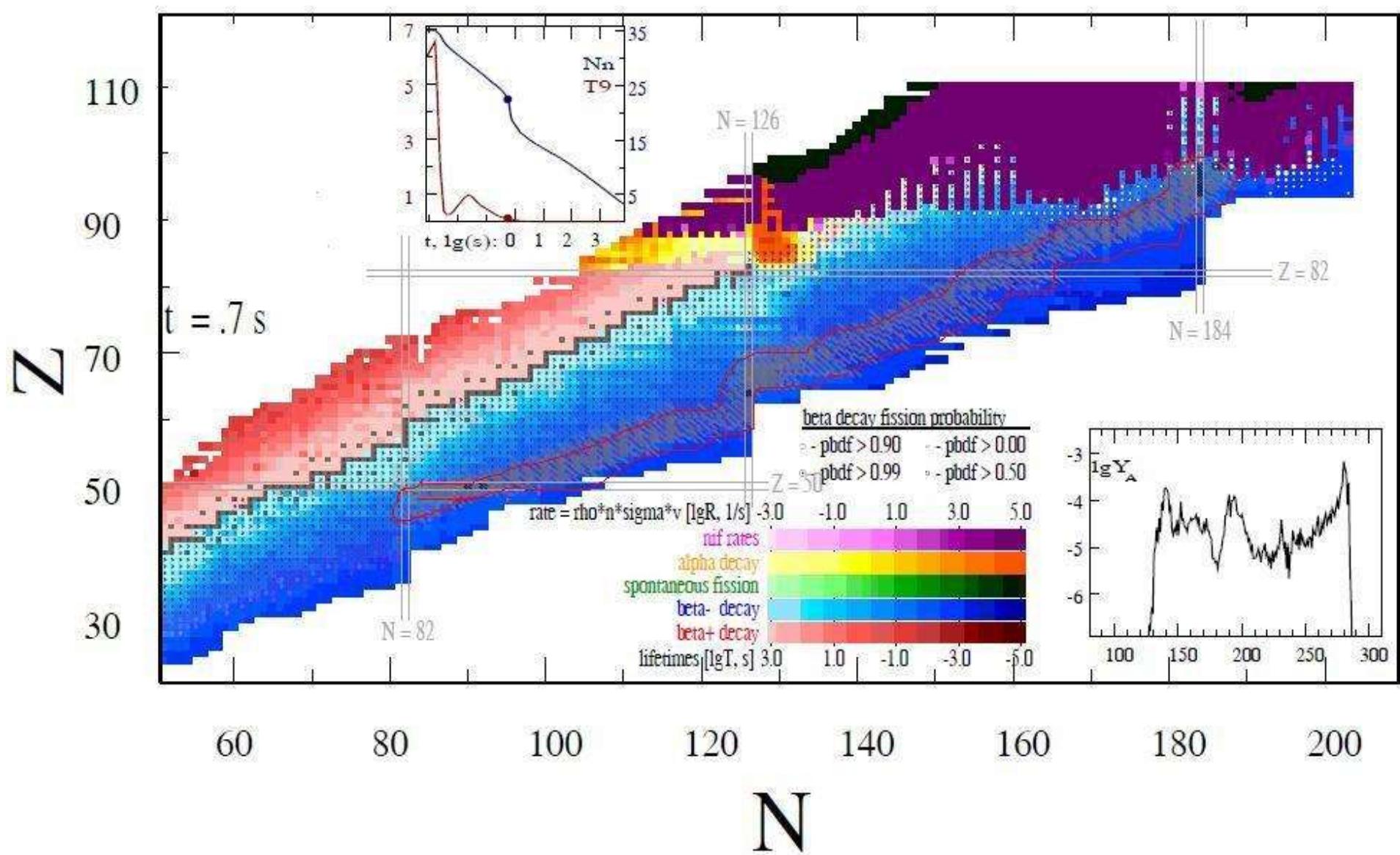
5. Волна нуклеосинтеза и образование тяжелых ядер



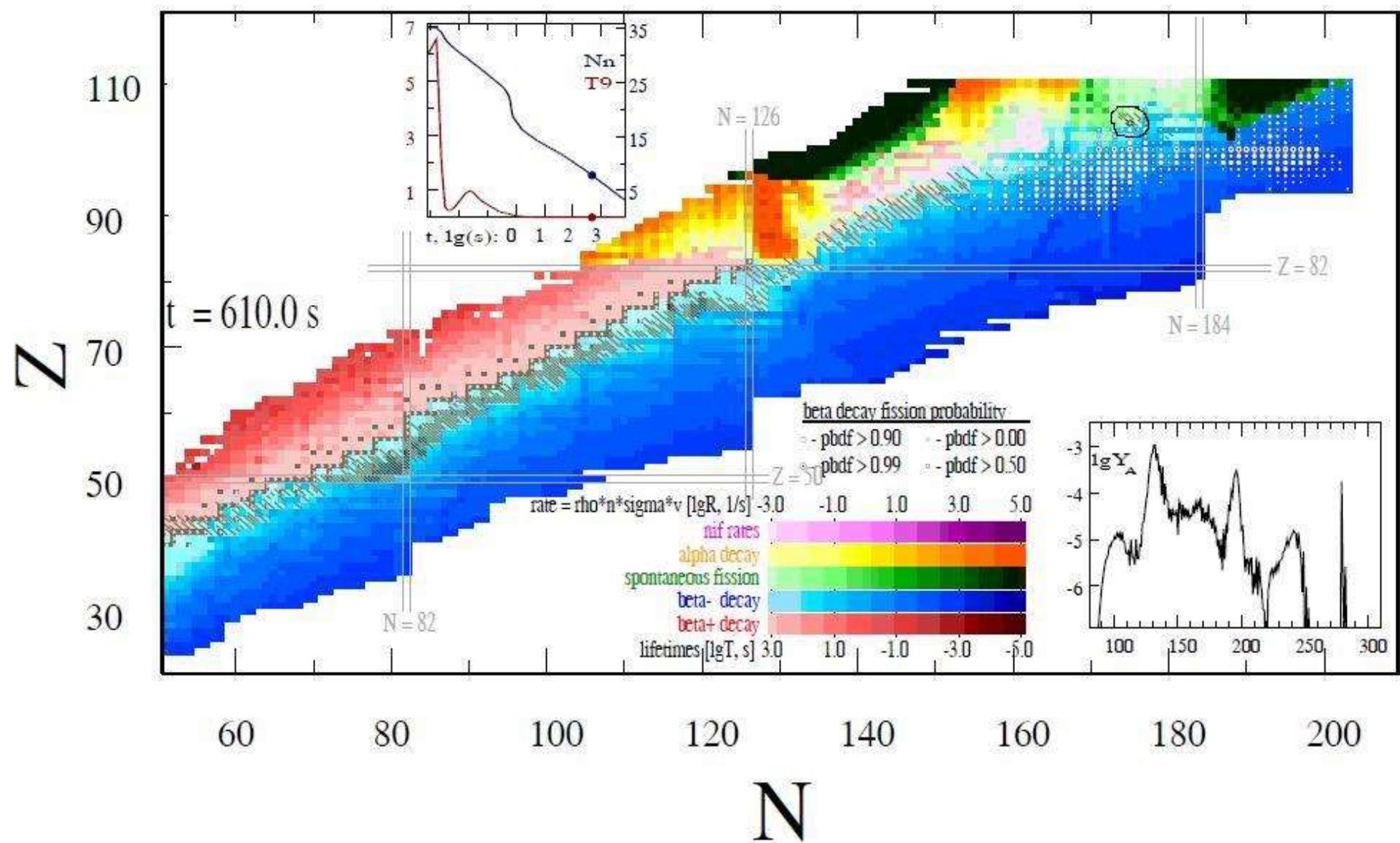
Показатель степени зацикленности r -процесса

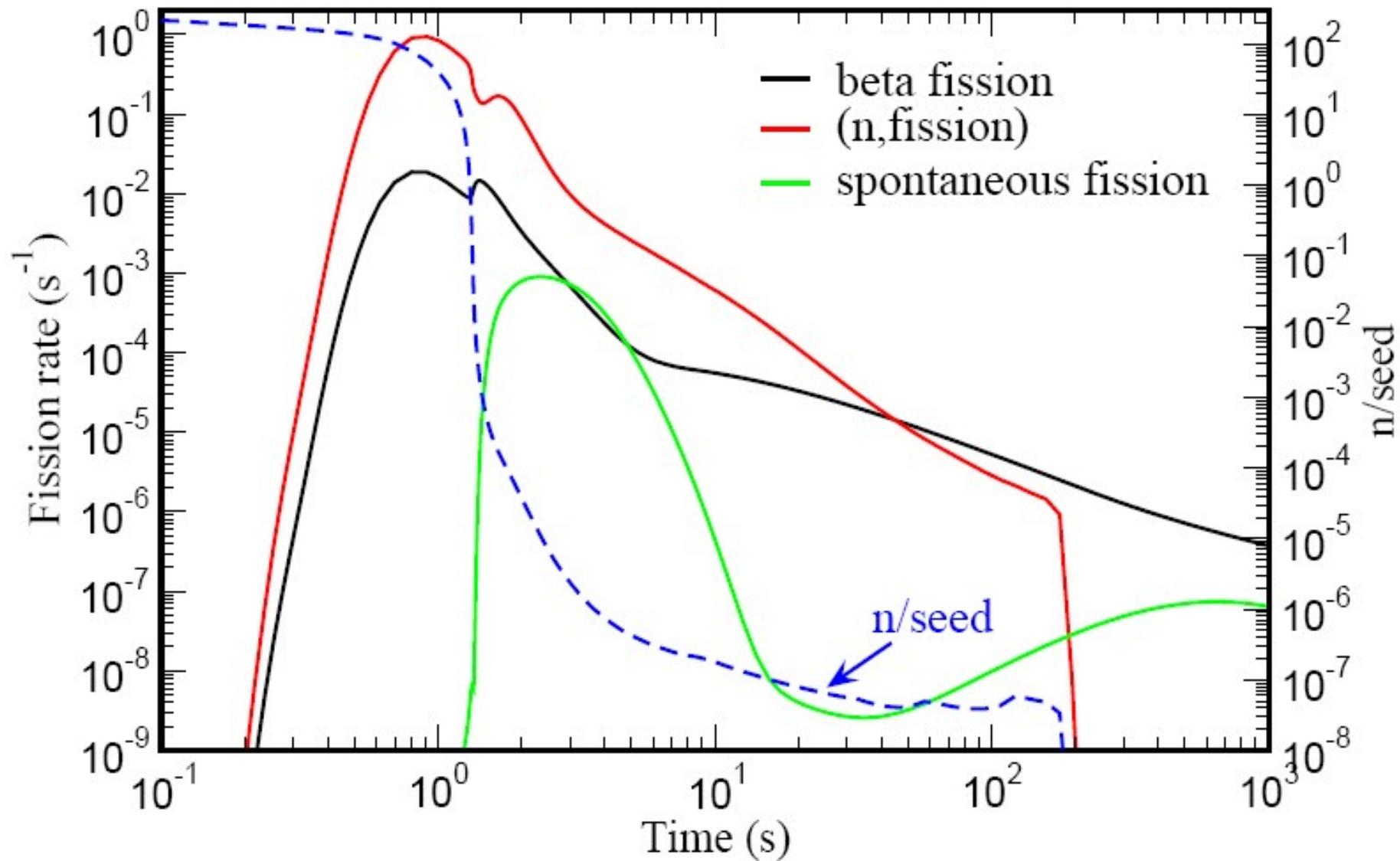
$$n_{\text{cycl}} = (\log_2(\Sigma Y_f / \Sigma Y_{\text{in}})) \sim 1$$

6. Основной r -процесс. Роль деления.



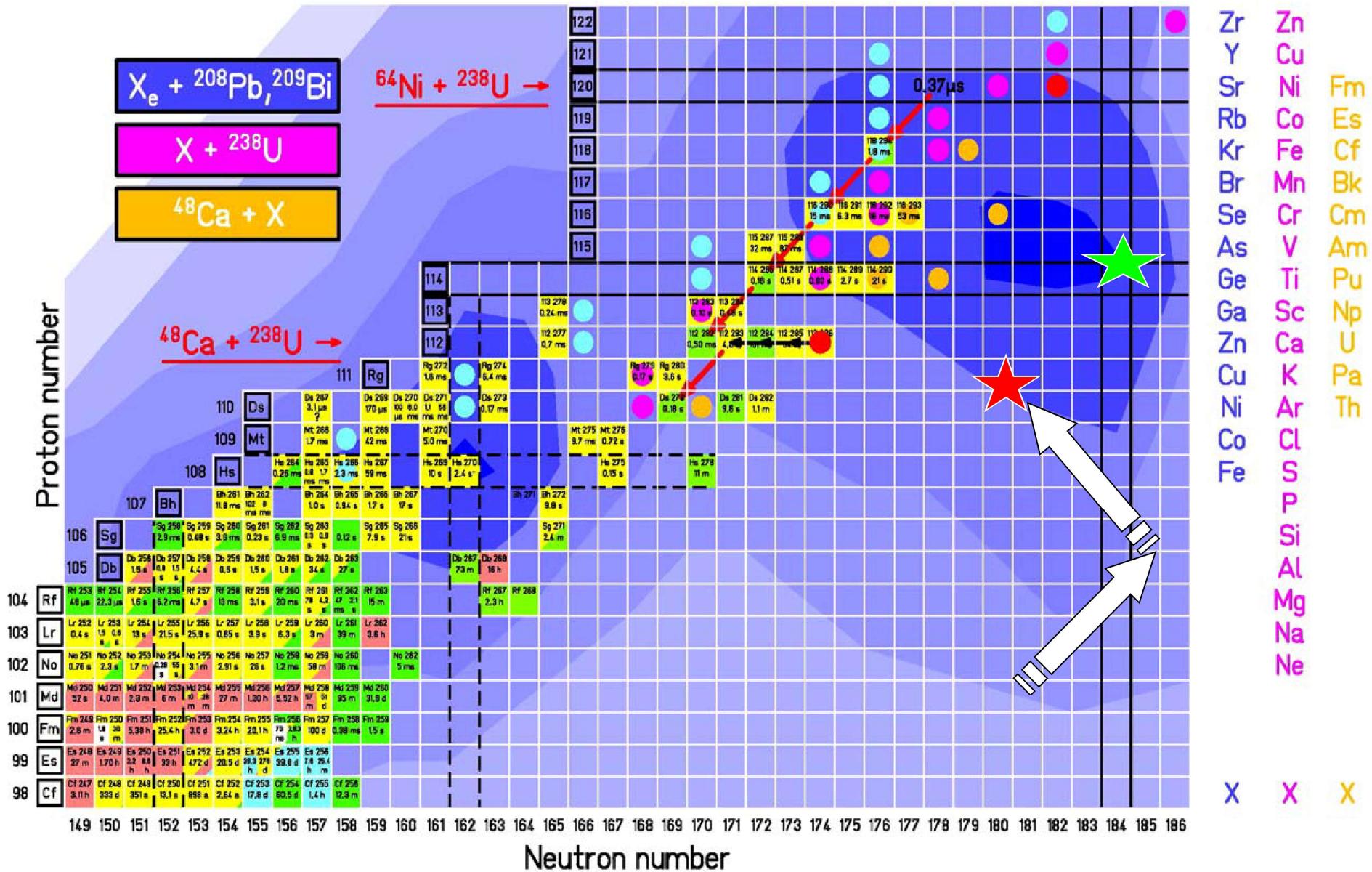
6. Основной r -процесс. Роль деления.





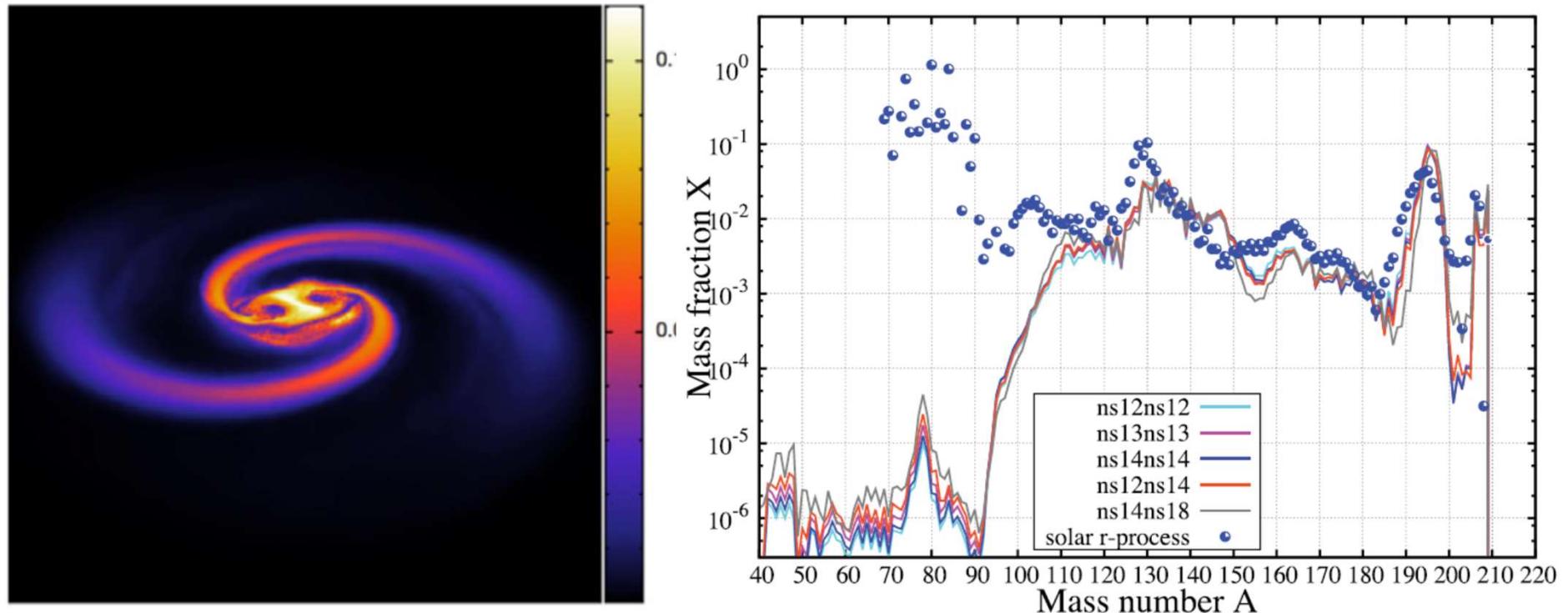
I.Petermann, A.Arcones, A.Kelić, K.Langanke, G.Martínez-Pinedo, W.Schmidt, K-H.Hix,
I. Panov, T. Rauscher, F.-K. Thielemann, N.Zinner, NIC-2008;

6. Образование сверхтяжелых элементов в r -процессе



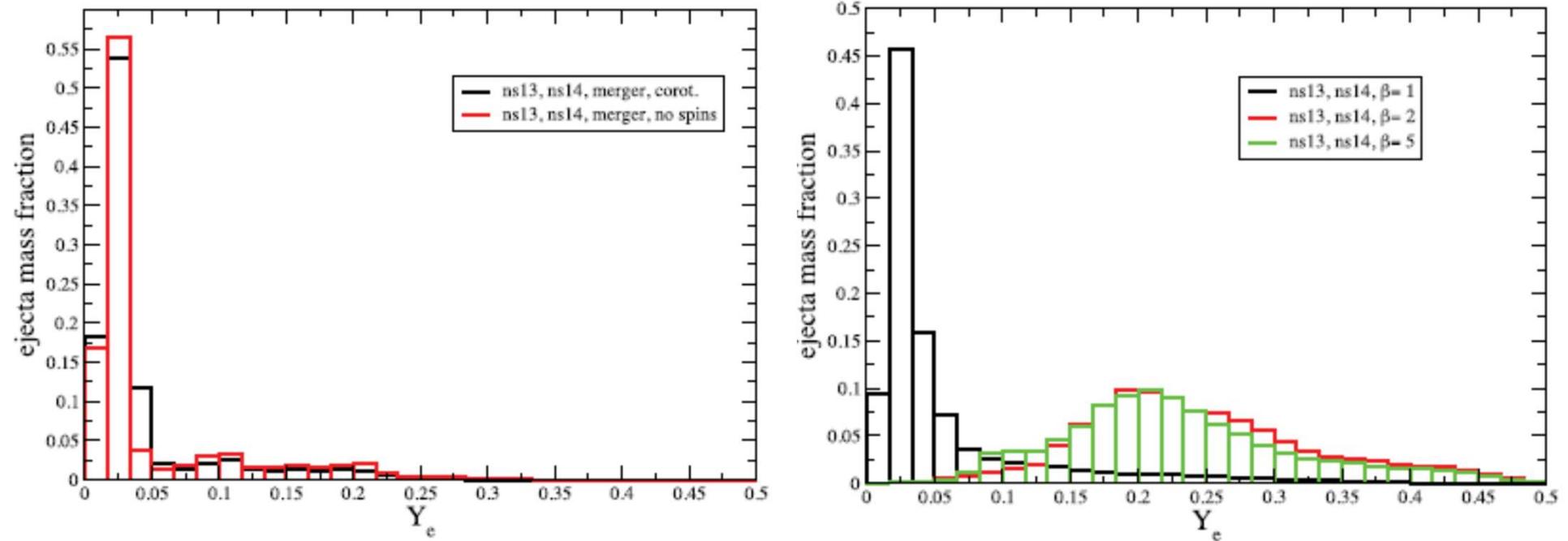
Hofmann, S. Darmstadt; Study $^{64}\text{Ni} + ^{238}\text{U} \Rightarrow (302,120)$ at GSI

7. Тесные двойные системы. СНЗ~одинаковых масс.



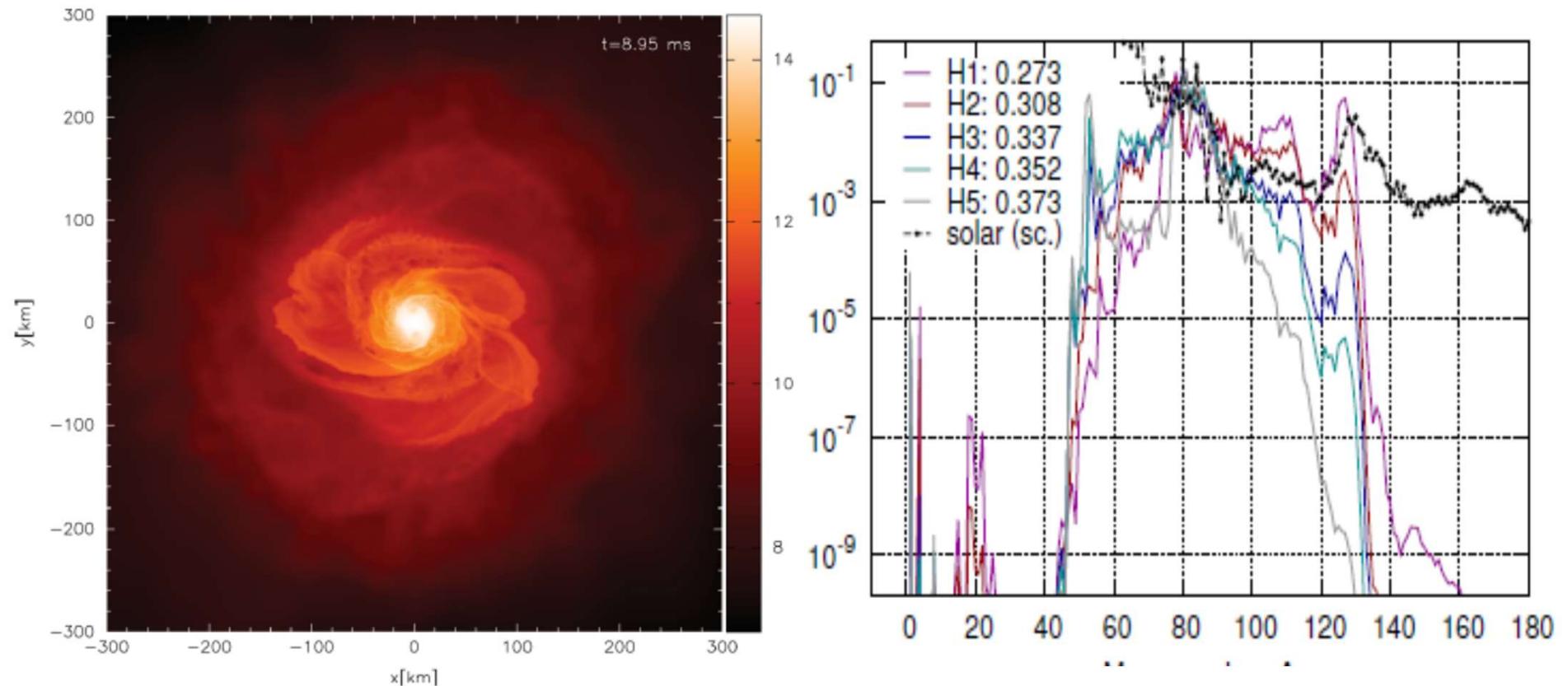
S Rosswog, U Feindt, O Korobkin, M Wu, J Sollerman, A Goobar, G Martinez-Pinedo,
Classical and Quantum Gravity. 34 (2017)

7. Тесные двойные системы. Слияния и столкновения (GClusters).



S. Rosswog, T. Piran and E. Nakar; MNRAS 430, 2585 (2013);
binary mergers versus dynamical collisions

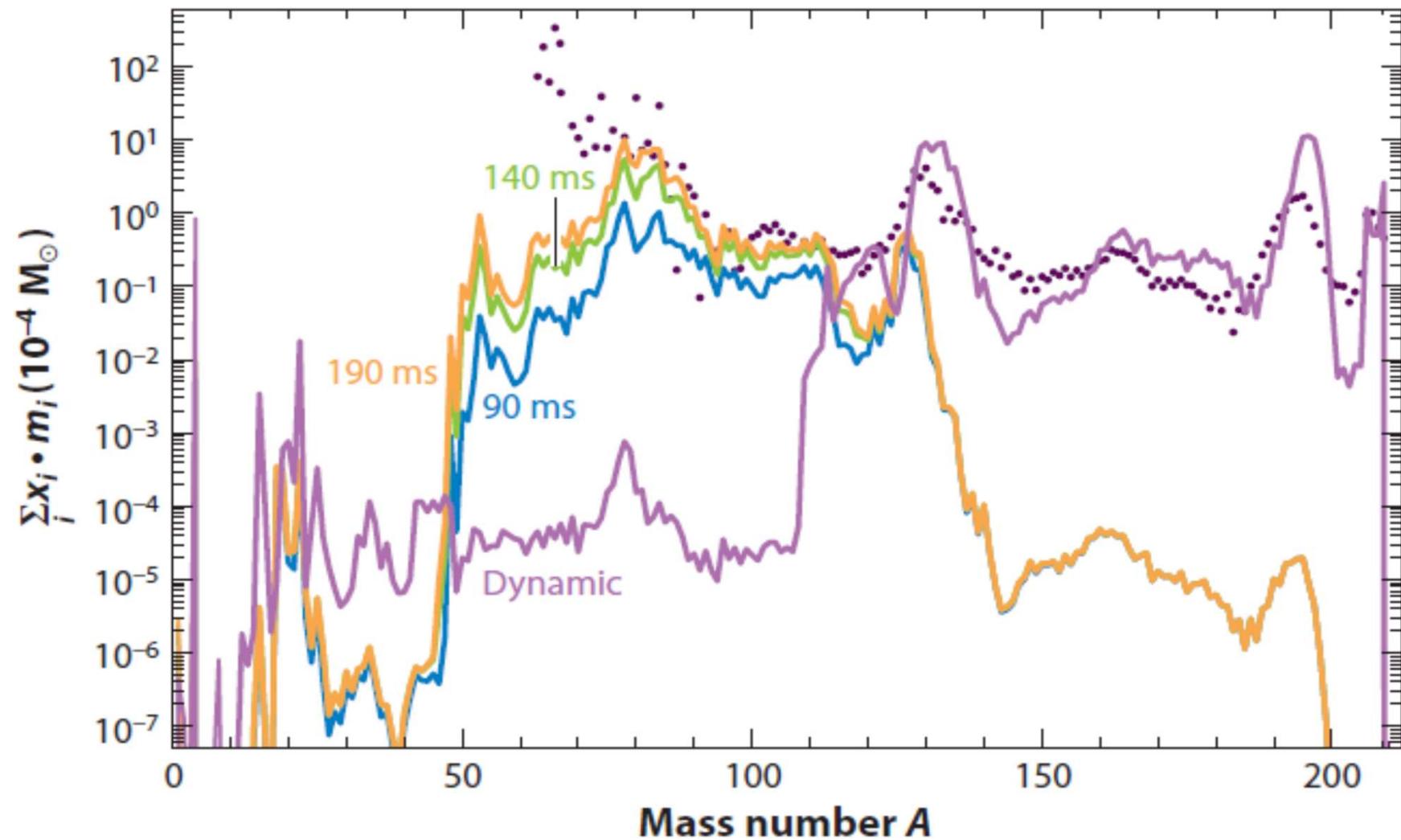
7. Тесные двойные системы. СНЗ.



v cut through the orbital plane at the end of simulation run R (neutron stars with 1.3 and $1.4 M_{\odot}$, $\beta = 2$). The

S. Rosswog, T. Piran and E. Nakar; MNRAS 430, 2585 (2013);
A. Perego, S. Rosswog, R. M. Cabezon, et al. MNRAS 443, 3134 (2014).

The neutrino wind contribution (Martin, et al. AJ. 813 (2015)).
 Dynamic ejecta (Korobkin, Rosswog, et al. MNRAs, 426, 2012)

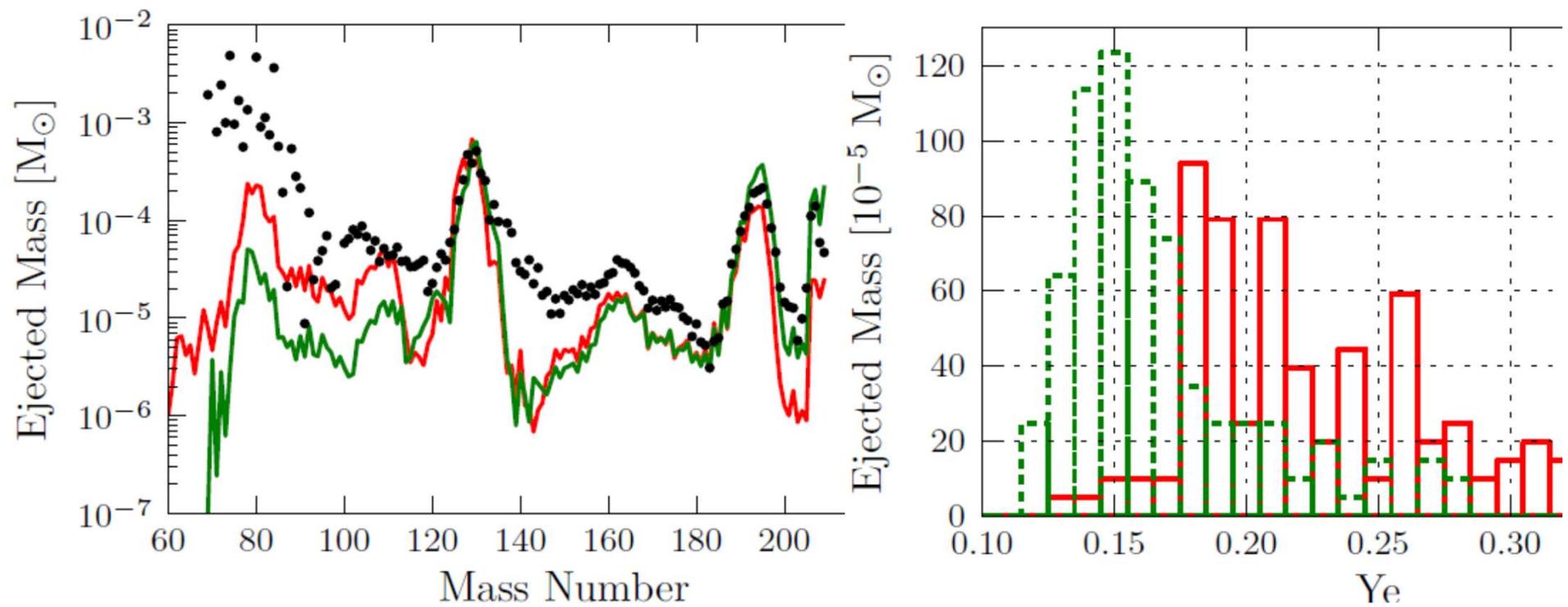


Modified Figure (Martin et al. 2015) from Cowan et al. 2021

Резюме по сценариям r-процесса

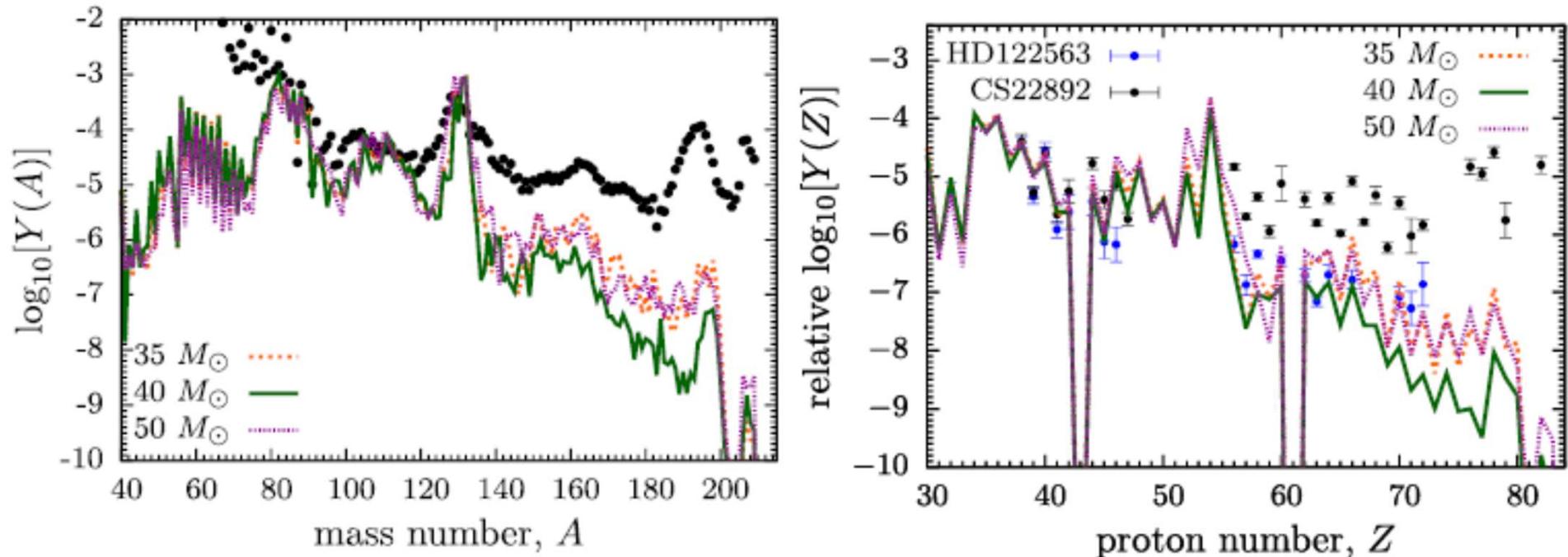
- 1) слияние нейтронных звезд в тесной двойной системе нейтронных звезд (NS+NS)
 - 2) Поток вещества от аккреционного диска вокруг черной дыры, образованной в результате слияния массивных НЗ или NS+BH
 - столкновение нейтронных звезд
 - модель обдирания НЗ
 - 3) взрывы редких типов сверхновых:
MHD +/- существуют наблюдательные признаки существования нейтронных звезд с маг. полями до 10¹⁵ G (magnetars) образованными редким классом СН с магниторотационным механизмом взрыва.
- СН, explosions driven by hadron-quark phase Transition

7. CH с магниторотационным механизмом



C. Winteler et al. 2012, Magneto-rotationally driven Supernovae as the origin of early galaxy r-process elements.

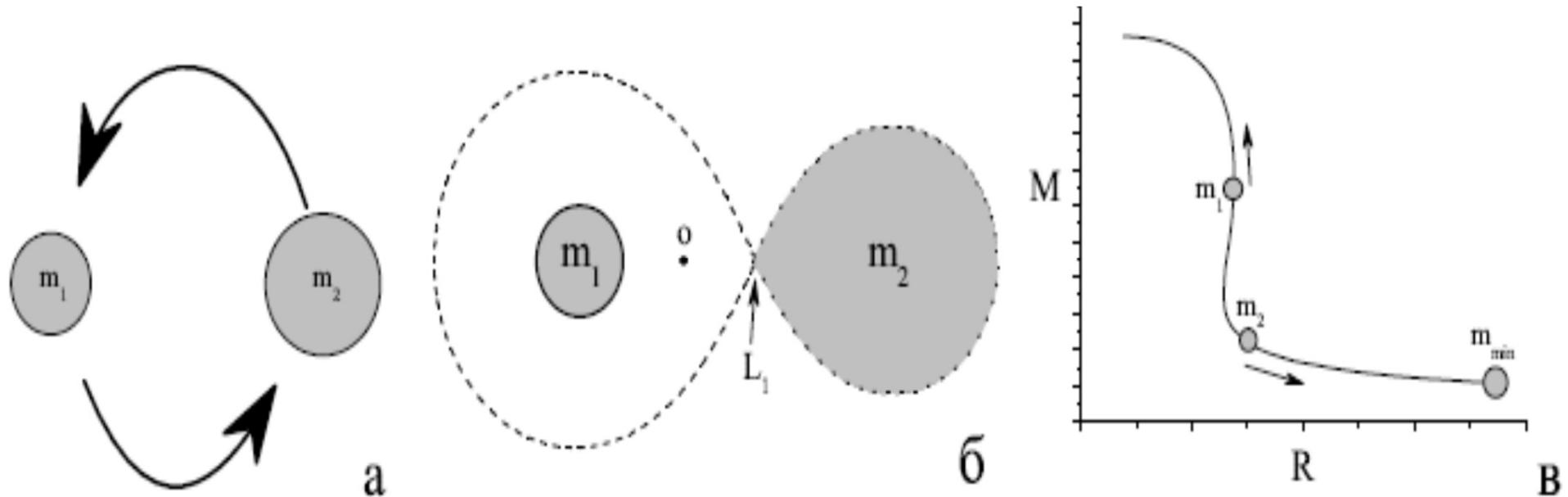
Core-collapse Supernova Explosions Driven by the Hadron-quark Phase Transition as a Rare r-process Site (T. Fischer et al. AJ, 2020)



stars with masses in the range of $35\text{--}50M_\odot$, it has been demonstrated recently that the appearance of exotic phases of hot and dense matter, associated with a sufficiently strong phase transition from nuclear matter to the quark-gluon plasma at high baryon density, can trigger supernova explosions of such massive supergiant stars.

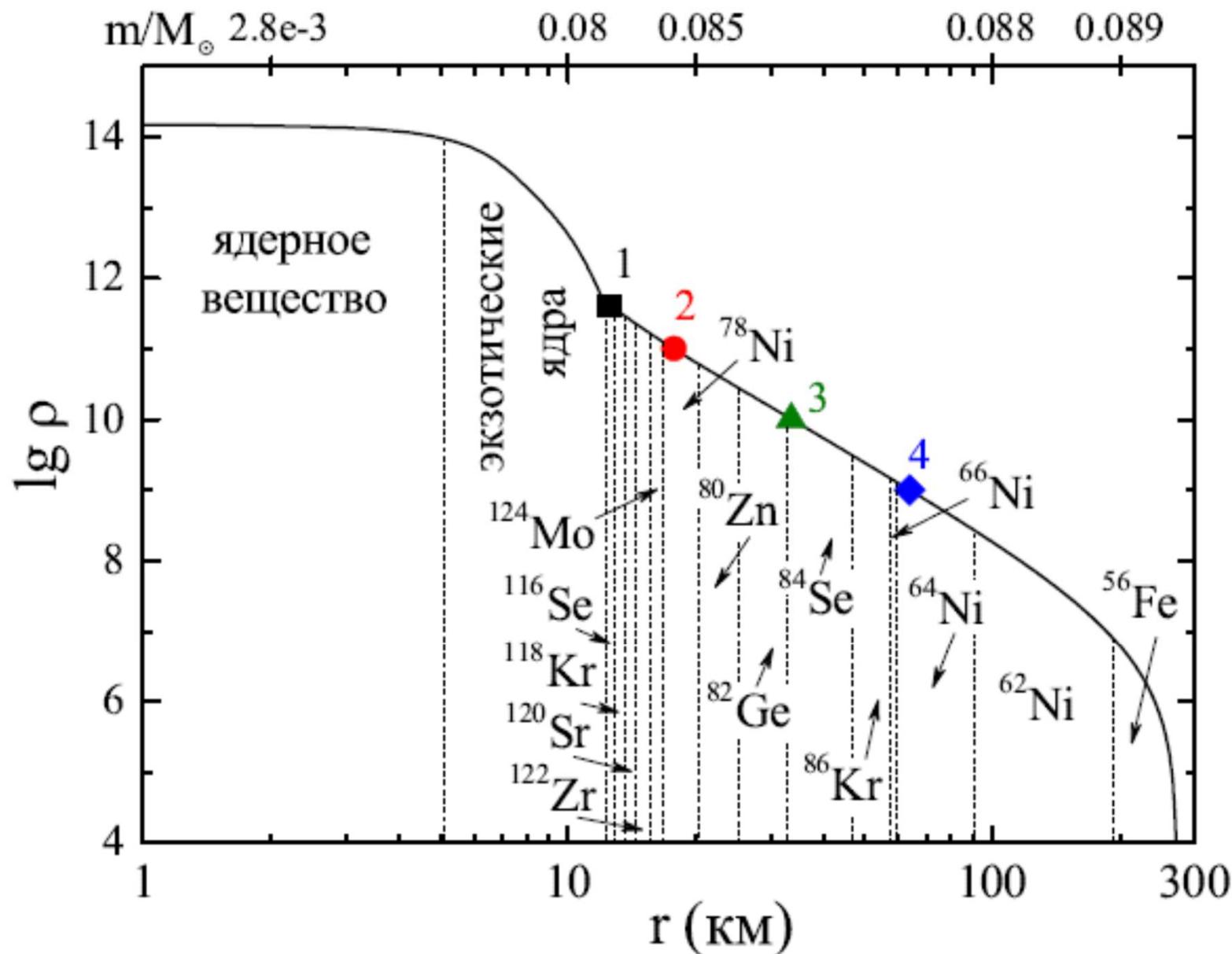
for material being ejected from the surface of the newly born proto-neutron stars in a result of such supernova explosions the r-process was calculated

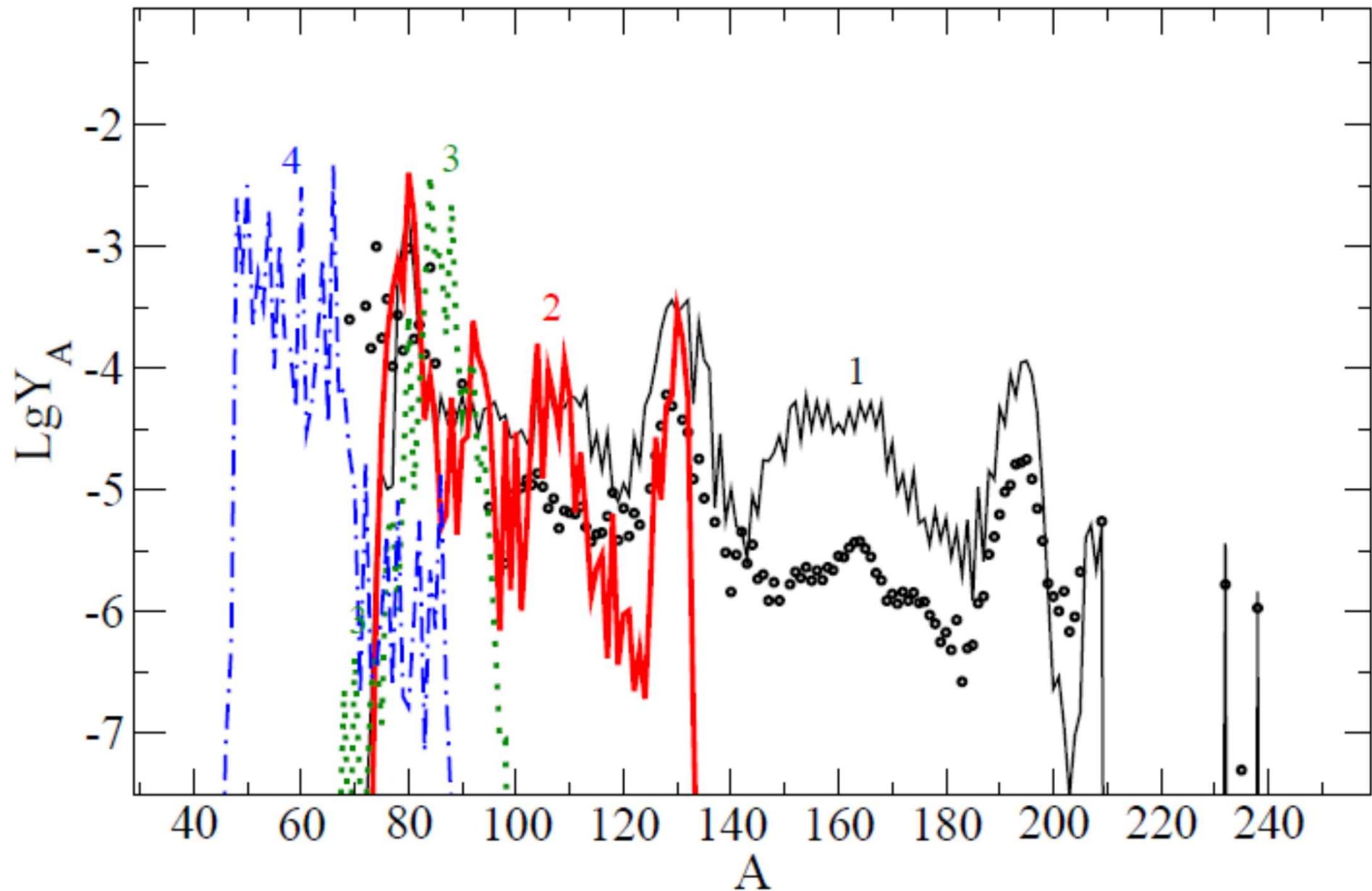
Сценарий обдиранания (Блинников, Надёжин,
Крамарев, Юдин, *Astronomy reports*, 2021)



- а) две нейтронные звезды ($m_1 = 1.4M_\odot$; $M_2=0.5M_\odot$) сближаются из-за гравитационного излучения;
- б) МНЗ переполняет свою полость Роша и начинается перетекание;
- в) отражая процесс перетекания, на диаграмме справа компоненты двойной системы m_1 и m_2 движутся в направлении стрелок.

Структура НЗ минимальной массы.





8. r-процесс. Ядерные данные

В основной r-процесс вовлечено от 3000 до 6000 ядер $\sim n \times 10000$ реакций, $n \sim 2-5$

- ядерные массы и барьеры деления
- бета-распад, $T_{1/2}$
- сечения и скорости реакций (n,g) , (n,g) , ..
- запаздывающие процессы P_{in} , $P_{\beta df}$
силовая функция бета распада – E_x , M^2
- Спонтанное и (n,f) - деление, МРПД
- альфа-распад, $T_{1/2}$
- + (p,X) , (α,X) ,(weak)

8. r-процесс. Ядерные данные: ~ 2000 гг

Mass predictions: Pearson et al. 1995, 1996, ETFSI; Moller et al. 1996, FRDM; Goriely et al. HFB-**14-25** $\sim 2009 - 2020$

Fission barriers: Mamdouh, Pearson et al. 1998, 2001 (ETFSI)

P. Moller, A. J. Sierk, et al. 2009 (FRDM)

Erler, P-G Reinhard, et al. ~ 2011 (SkyrmeHF)

Beta-decay rates, Kratz, Moller, Pfeiffer ~ 2003 (qRPA+FRDM)

Marketin, Paar et al., pnQRPA+.., 2017

Ney, Engel et al. Skyrme Finite Amplitude Method+HFB, 2020

Borzov, Fayans approach in work

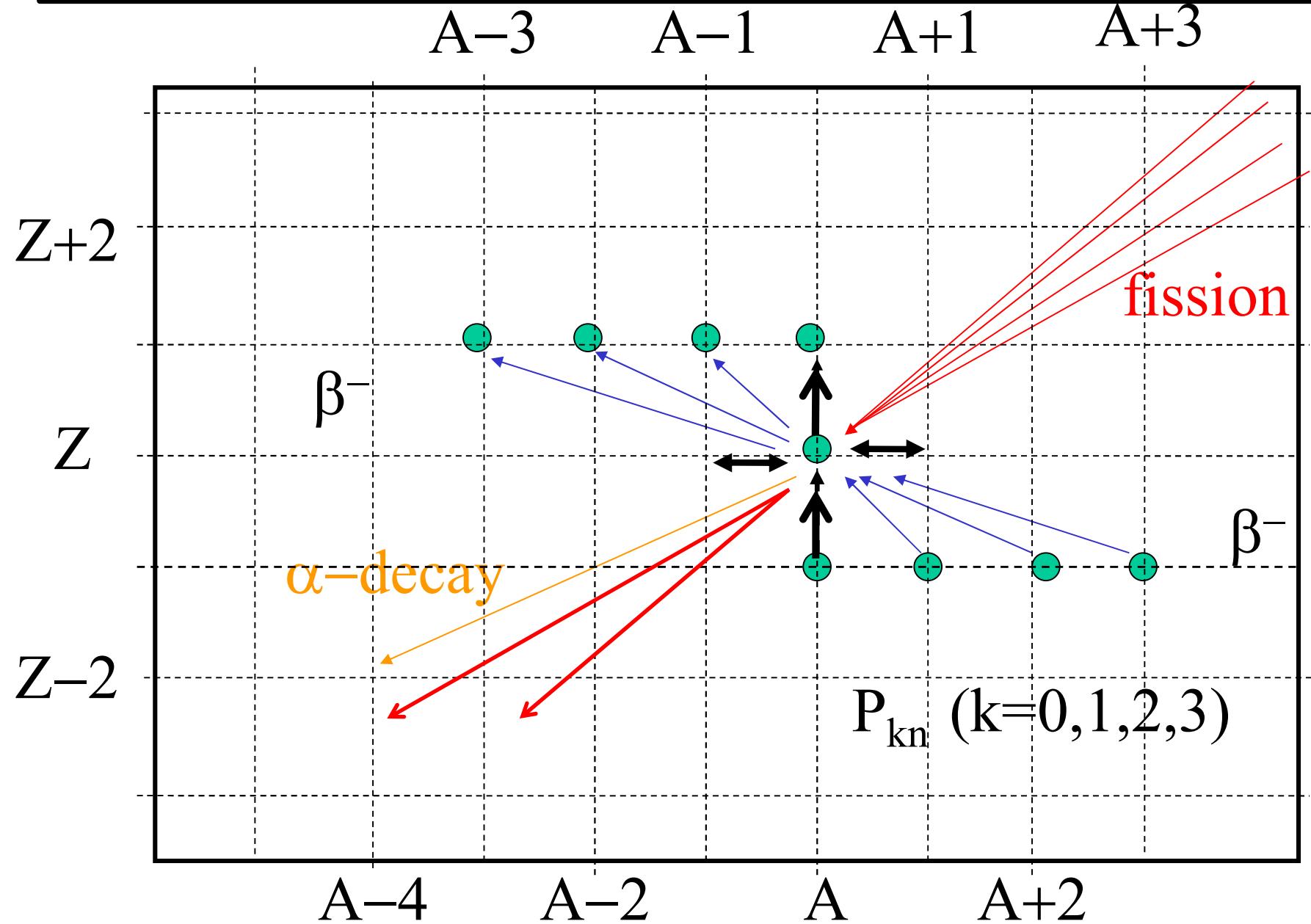
Reaction rates: Thielemann, Rouscher, 2000 ADNDT

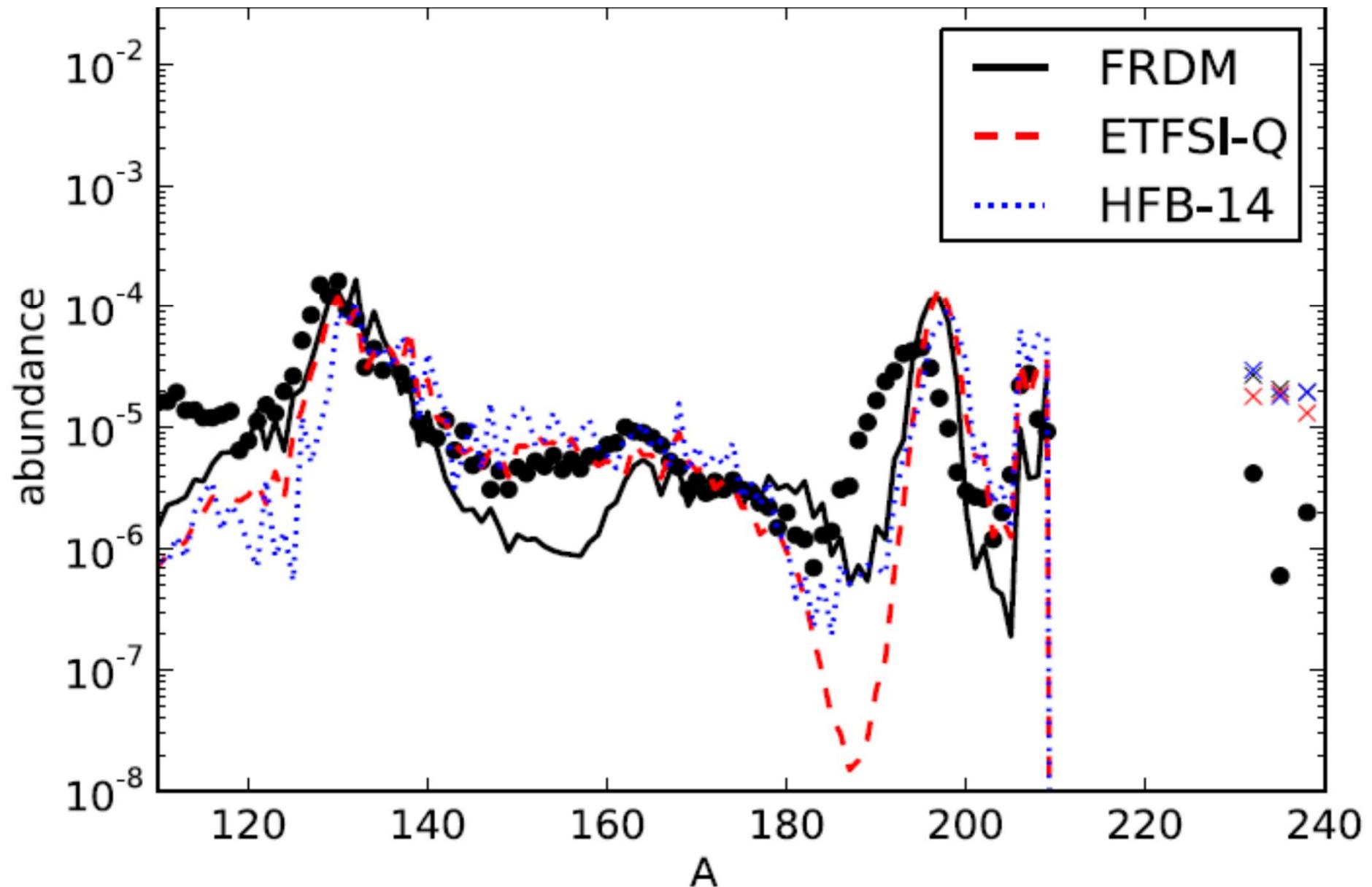
$P_{\beta df}$ – Panov, Thielemann, et al. 2005; SMOKER & NON-smoker

(n,f), (n,g)-rates: Panov, Thielemann, et al. 2010, ETFSI, HFB, FRDM

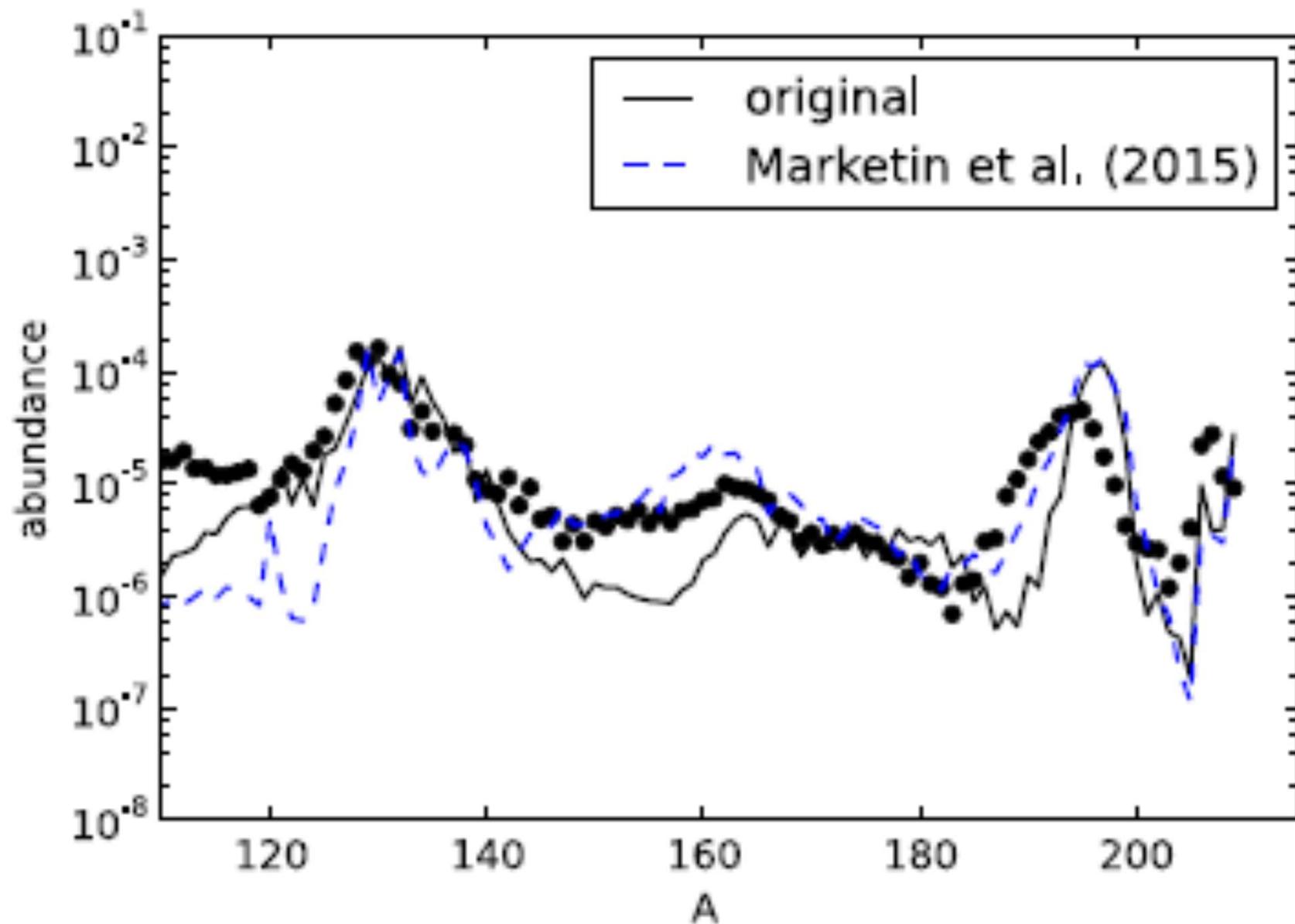
Goriely et al. 2009-up to now; TALYS & MOST codes

8. Ядерные данные: сечения, скорости реакций и распадов



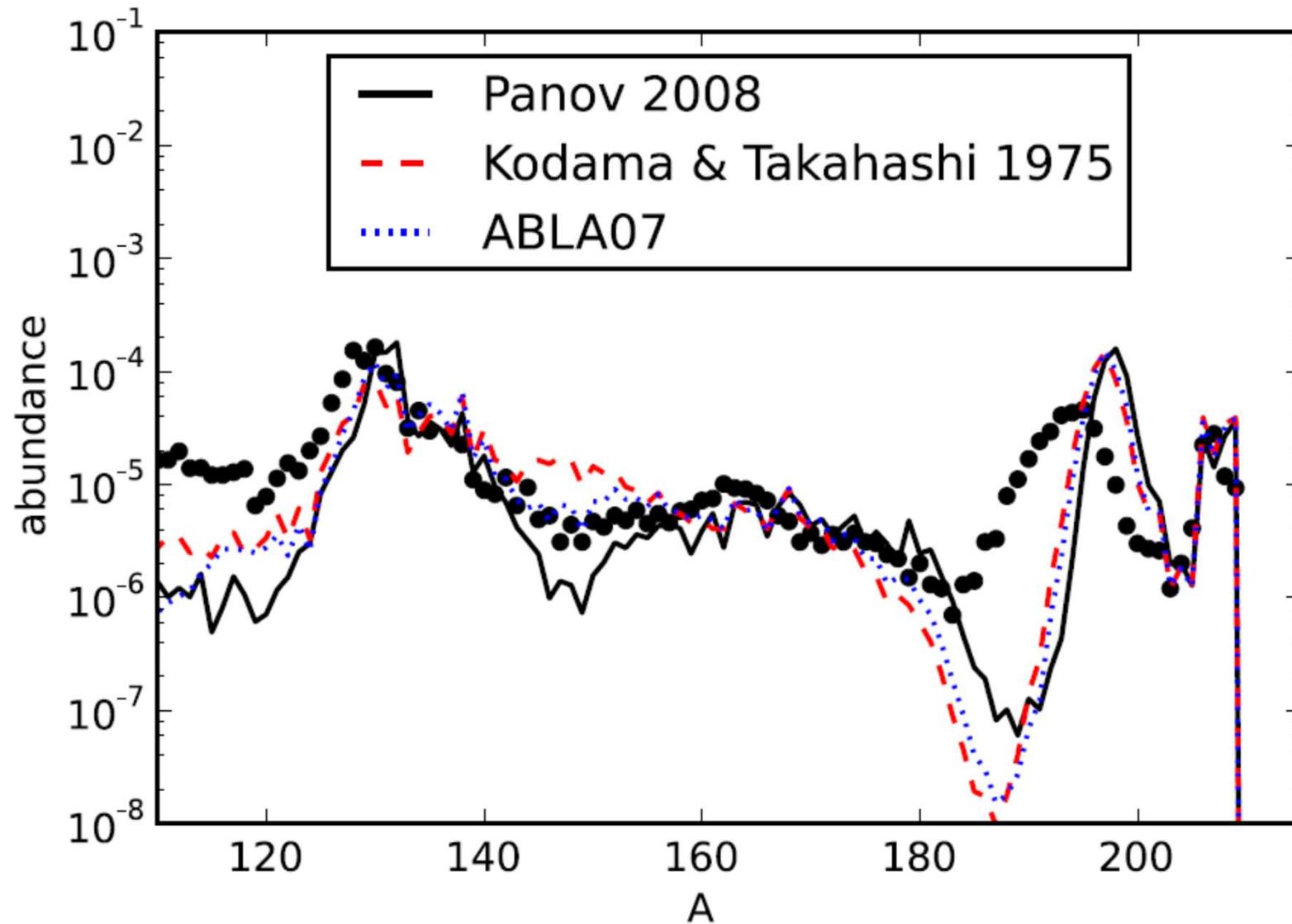


Eichler, Arcones, Kelic, Korobkin, Langanke, Marketin, Martinez-Pinedo, Panov, Rauscher, Rosswog, Winteler, Zinner, Thielemann, AJ 2015.



Eichler, Arcones, Kelic, Korobkin, Langanke, Marketin, Martinez-Pinedo, Panov, Rauscher, Rosswog, Winteler, Zinner, Thielemann, AJ 2015.

fission fragment distributions are tested for the mass model ETFSI-Q



Eichler, Arcones, Kelic, Korobkin, Langanke, Marketin, Martinez-Pinedo, Panov, Rauscher, Rosswog, Winteler, Zinner, Thielemann, AJ 2015.

11 key questions about the universe.

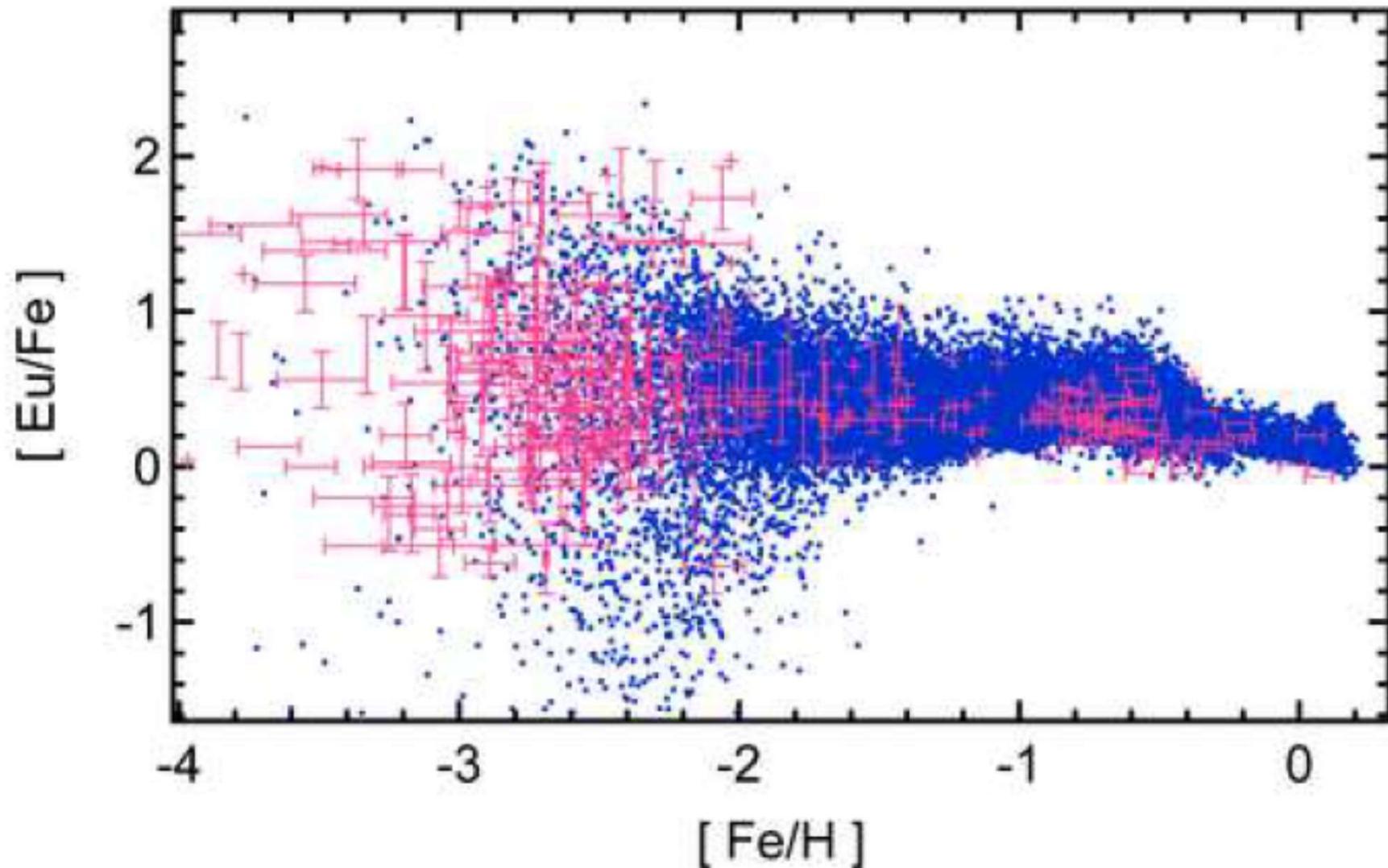
Jan 18, 2001

A panel of US physicists & astronomers has identified a list of 11 fundamental questions about the nature of the universe:

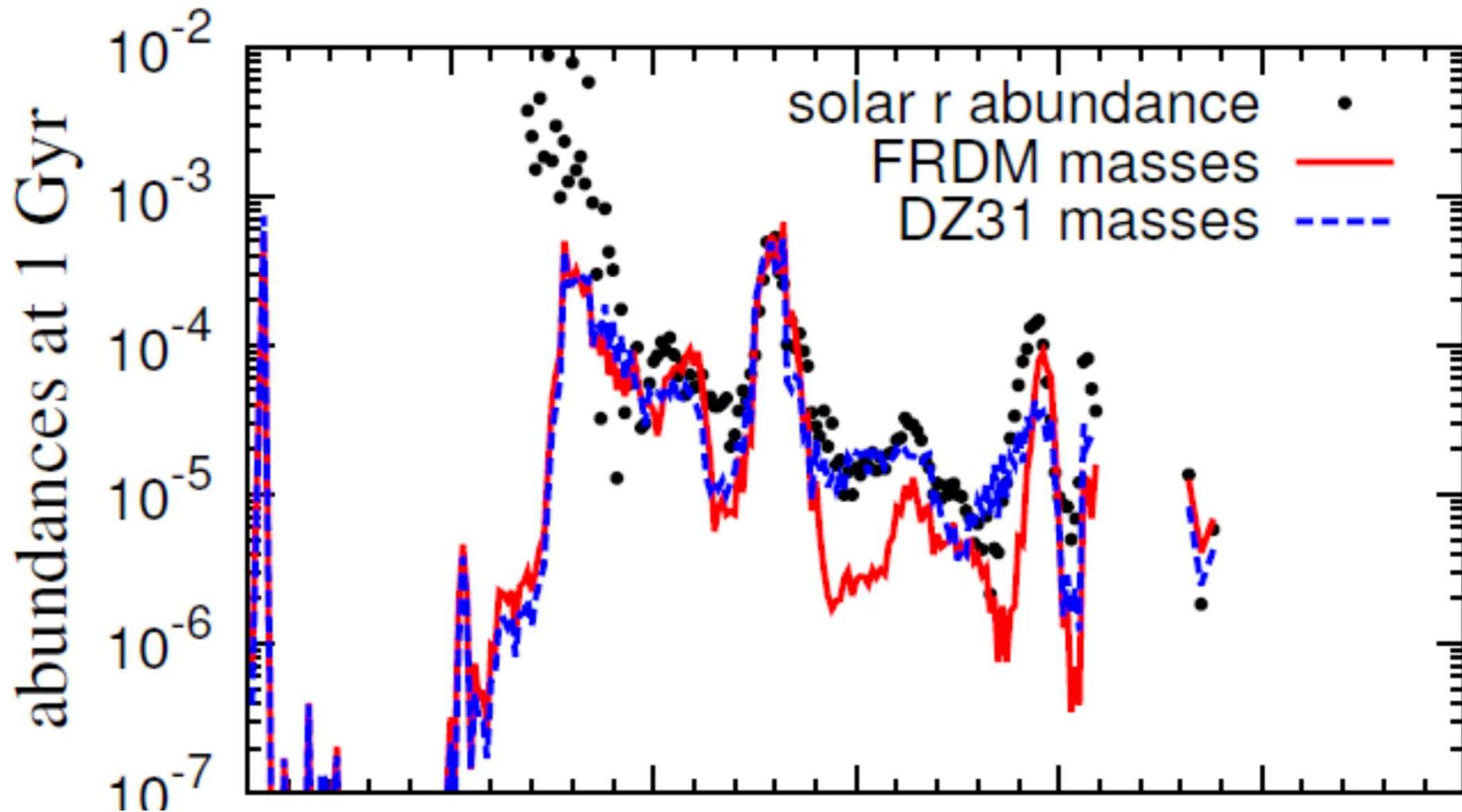
- * What is dark matter? * What are the masses of neutrinos?
- * Are there additional spacetime dimensions?
- * What is the nature of the dark energy?
- * Are protons unstable? * How did the Universe begin?
- * Did Einstein have the last word on gravity?
- * How do cosmic accelerators work and what are they accelerating?
- * Are there new states of matter at exceedingly high ρ & T ?
- * Is a new theory of matter & light needed at the highest E ?
- * How were the elements from iron to uranium made?**

СПАСИБО!

Evolution of Eu-abundances in galactic chemical evolution models,

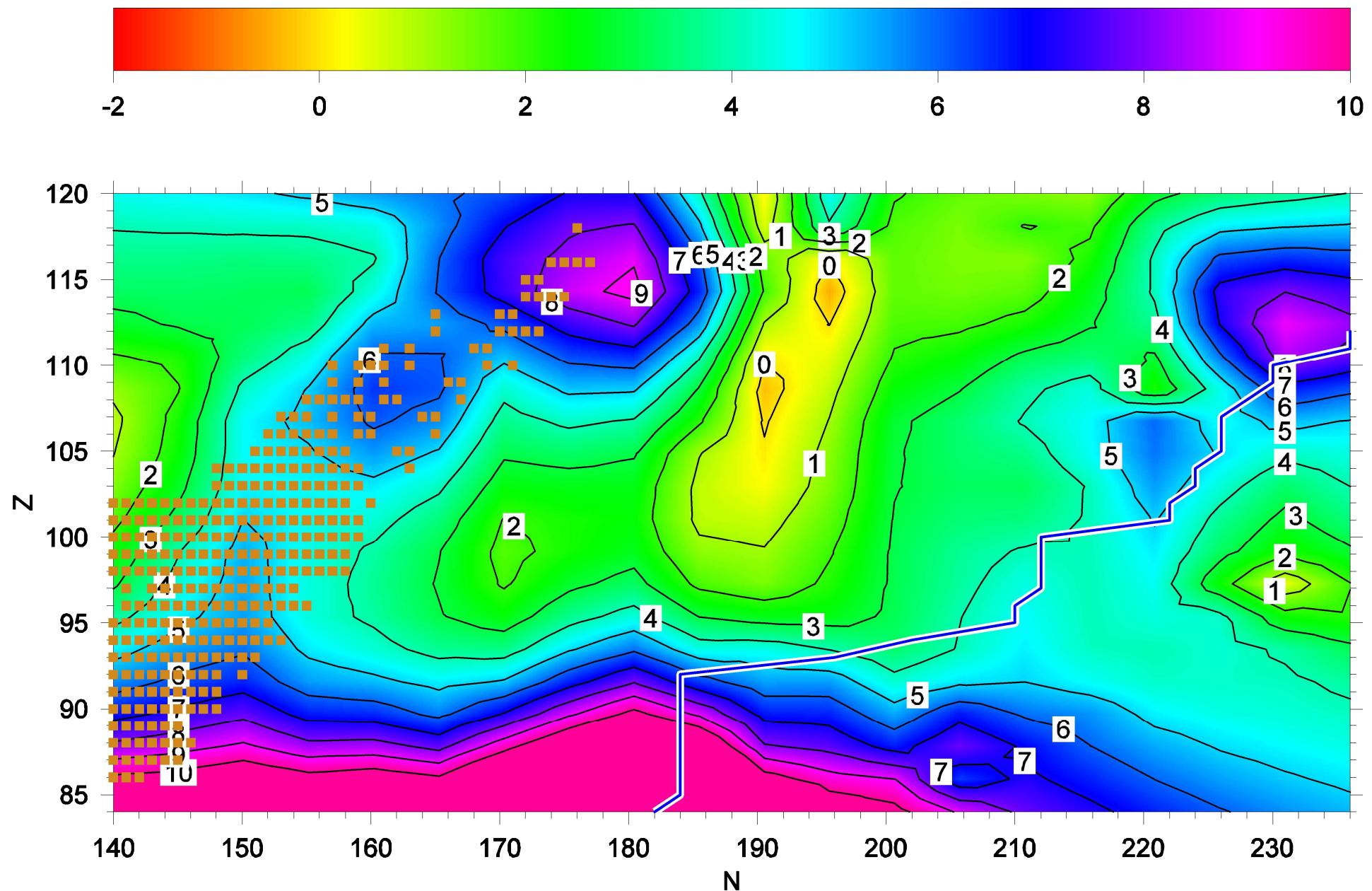


including both magneto-rotational SNe and NSMs as r-process sites
(Wehmeyer et al., MNRAS 452, 2015) magenta - observations

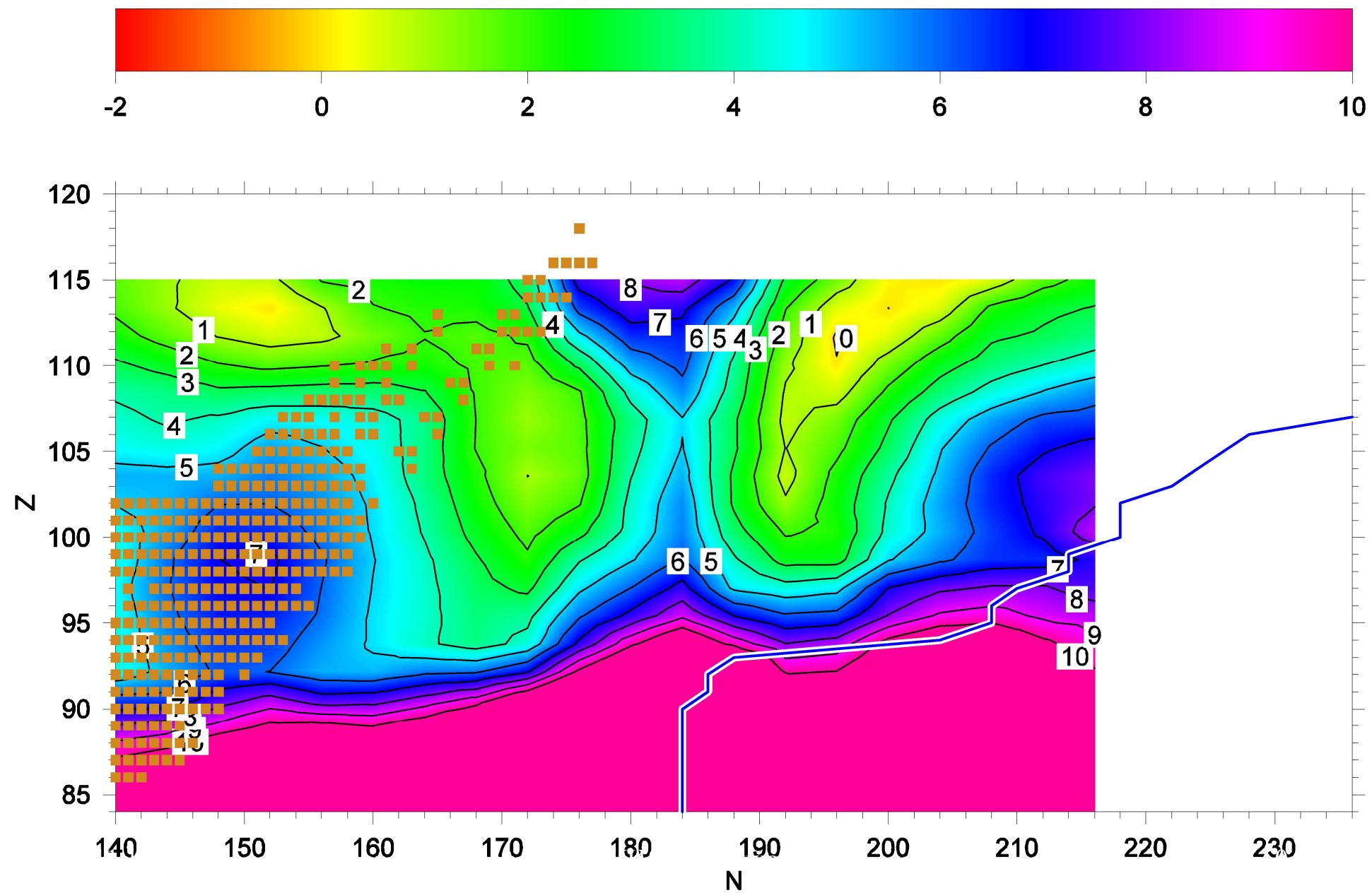


Utilizing the Duflo-Zuker mass model (Duflo and Zuker, 1995);
Meng-Ru Wu, Rodrigo Fernandez, Gabriel Martinez-Pinedo, Brian D. Metzger, Production
of the entire range of r-process nuclides by black hole accretion disc outflows from
neutron star mergers MNRAS 2017

B_f - Myers, Swiatecky; Petermann et al. 2012

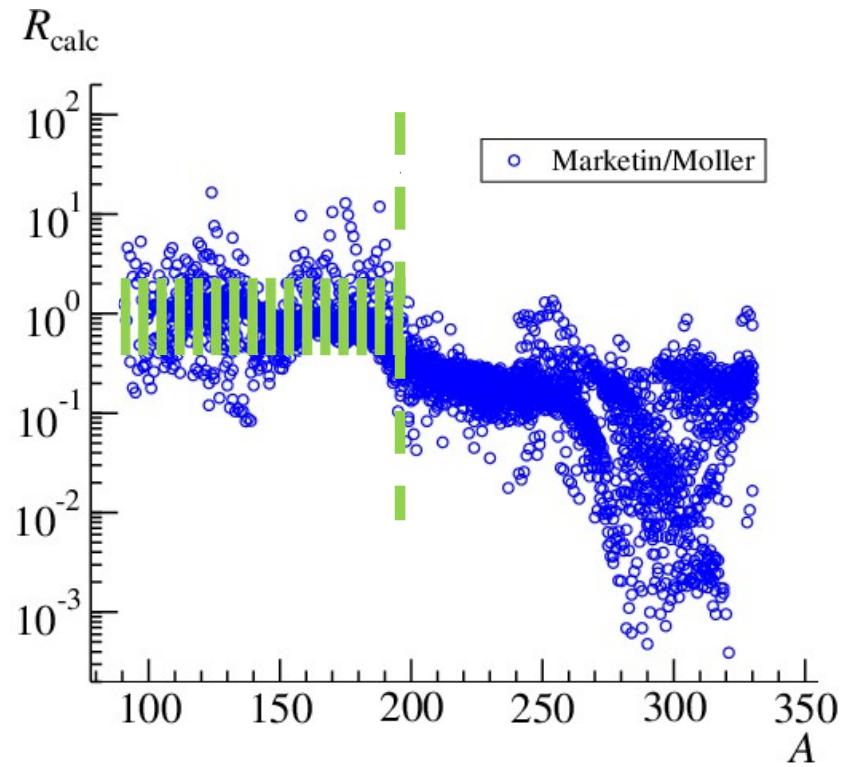
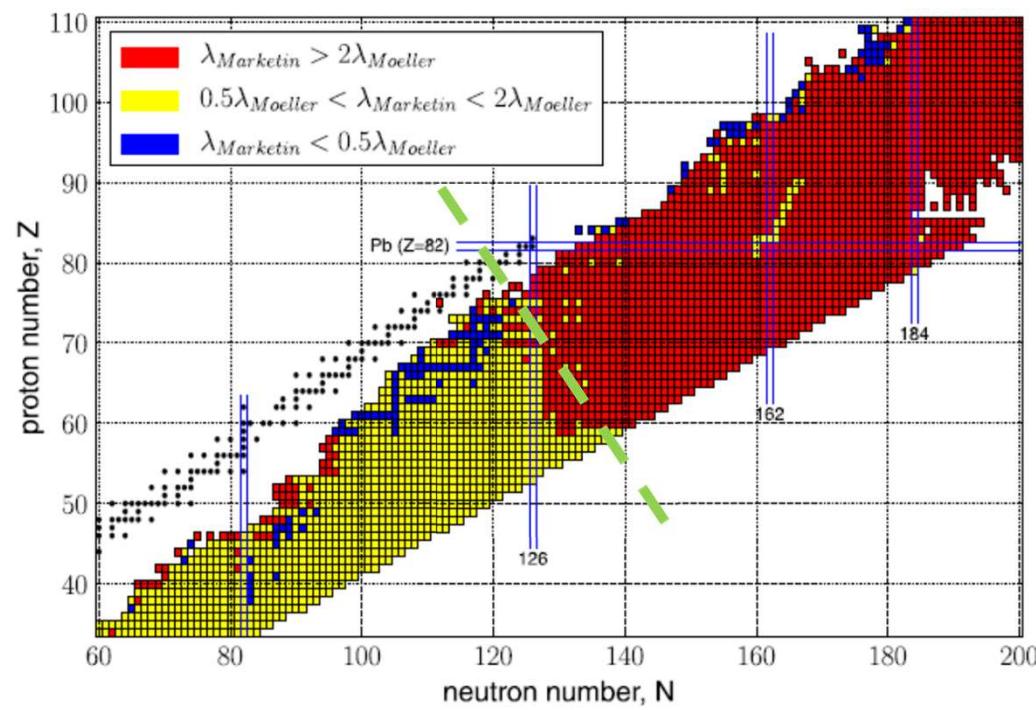


B_f - ETFSI- Mamdouh et al., NP 2001



Beta-decay-rates

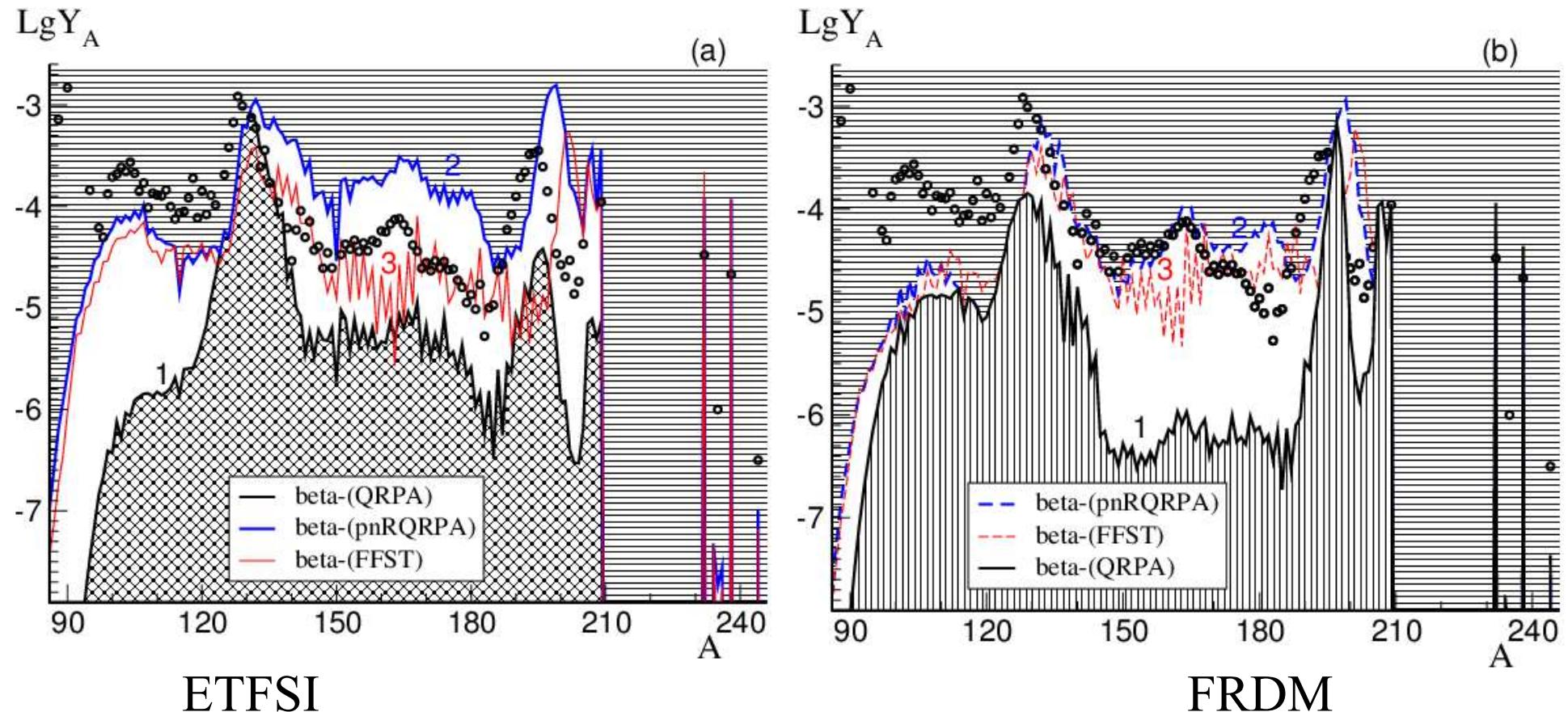
- RPA Petrow, Naumow, H.-V. Klapdor. Z. Phys. A 1978; Klapdor-...-Thielemann Z.Phys.A 299 (1981); qRPA Klapdor et al. 1992
- QRPA+FRDM P. Moller, B. Pfeifer, K.-L. Kratz et al. 1997
QRPA+ff P. Moller, B. Pfeifer, K.-L. Kratz 2003
- FFST Migdal A.(1967); Alexankin V., Lyutostanskii Yu. S., Panov I.V. BETA-model, **1981-1988**;
- FFST-BETA Panov & Lyutostanskii Yu. S et al. 2013-2016
- cQRPA+DF3, Borzov, Fayans, Trykov, 1994; Borzov **2008-2019**- Fully self-consistent framework of **Density Functional plus Continuum Quasi particle Random Phase Approximation (DF + CQRPA)** for ground and excited states.
- T.Nik'si'c, T.Marketin, D.Vretenar, N.Paar 2015-2017; self-consistent covariant density functional theory (CDFT); g.s. - relativistic Hartree-Bogoliubov (RHB) model, and ex.s. - proton-neutron relativistic quasiparticle phase approximation (pn-RQRPA).



Eichler, Arcones, Kelic, Korobkin,
Langanke, Marketin, Martinez-
Pinedo, I. Panov et. al. AJ, 2015

Present evaluations of ratio
 $R = T_{1/2}(\text{pnRQRPA})/T_{1/2}(\text{RPA})$

NSM scenario for main r-process in extremely neutron-rich environments with fission cycling:



$$1 - n_c = 2$$

$$2 - n_c = 1$$

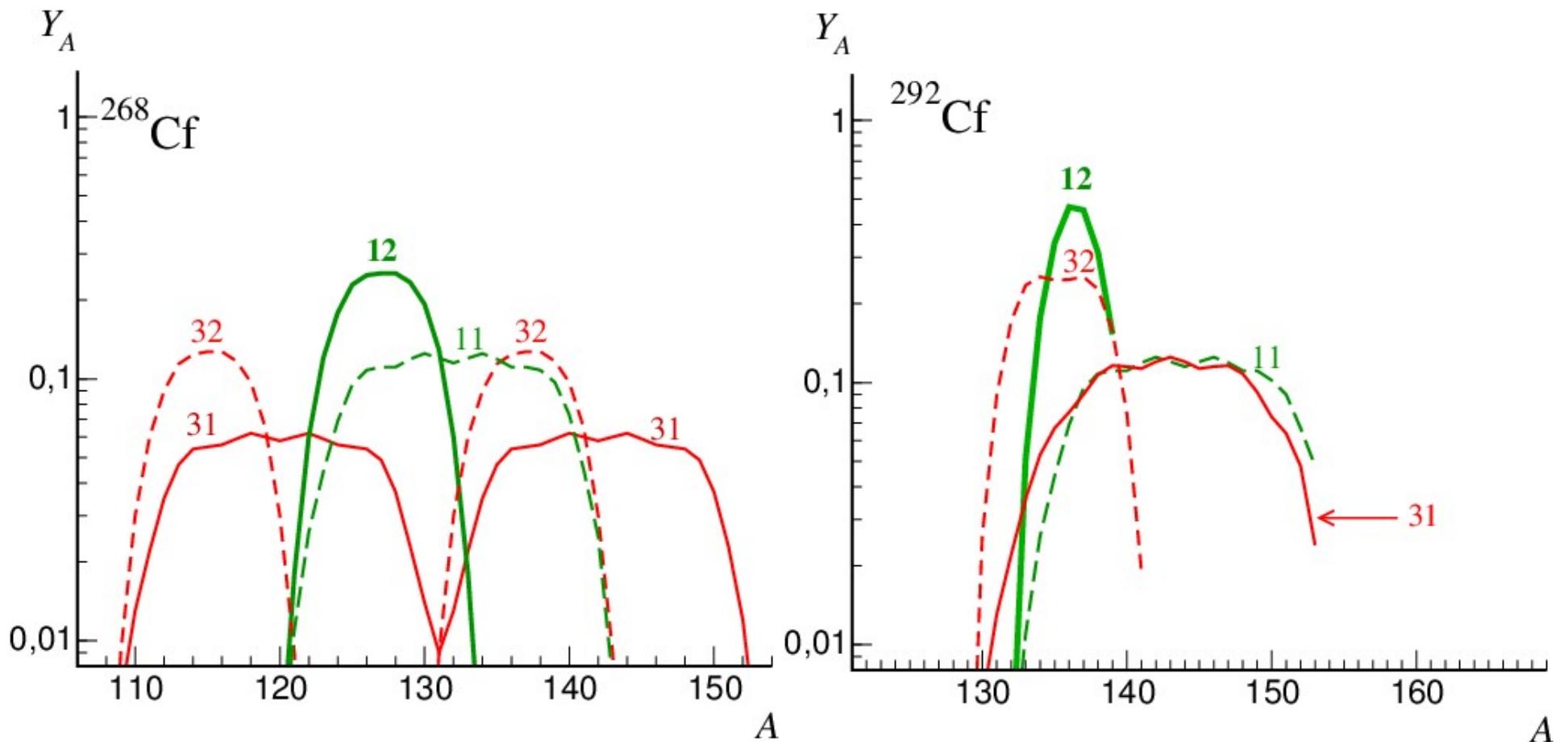
$$3 - n_c = 1.6$$

$$n_c = \text{Log}_2(\sum Y_i^{\text{fin}} / \sum Y_i^0)$$

$$1 - n_c = 0.15$$

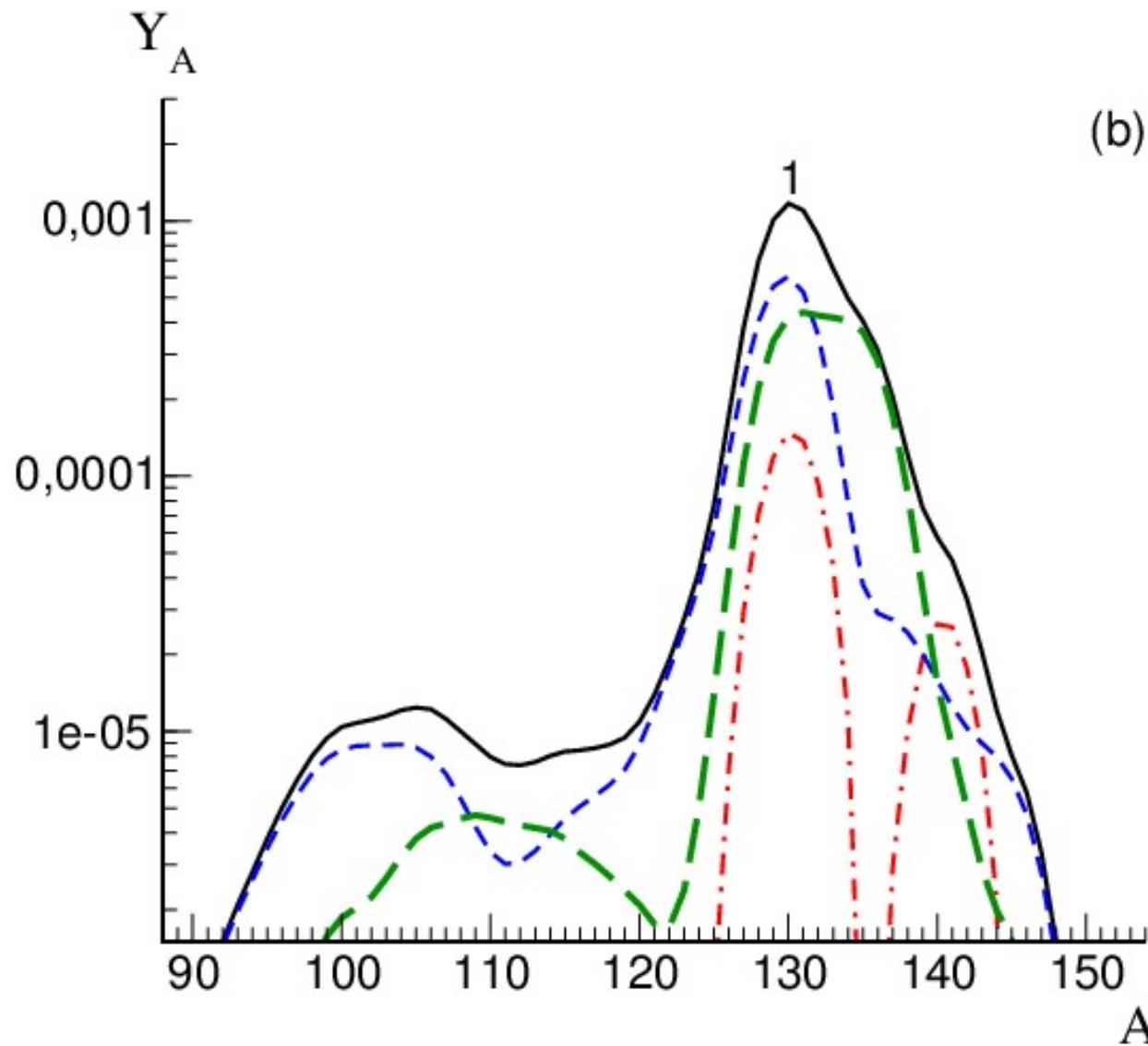
$$2 - n_c = 1.6$$

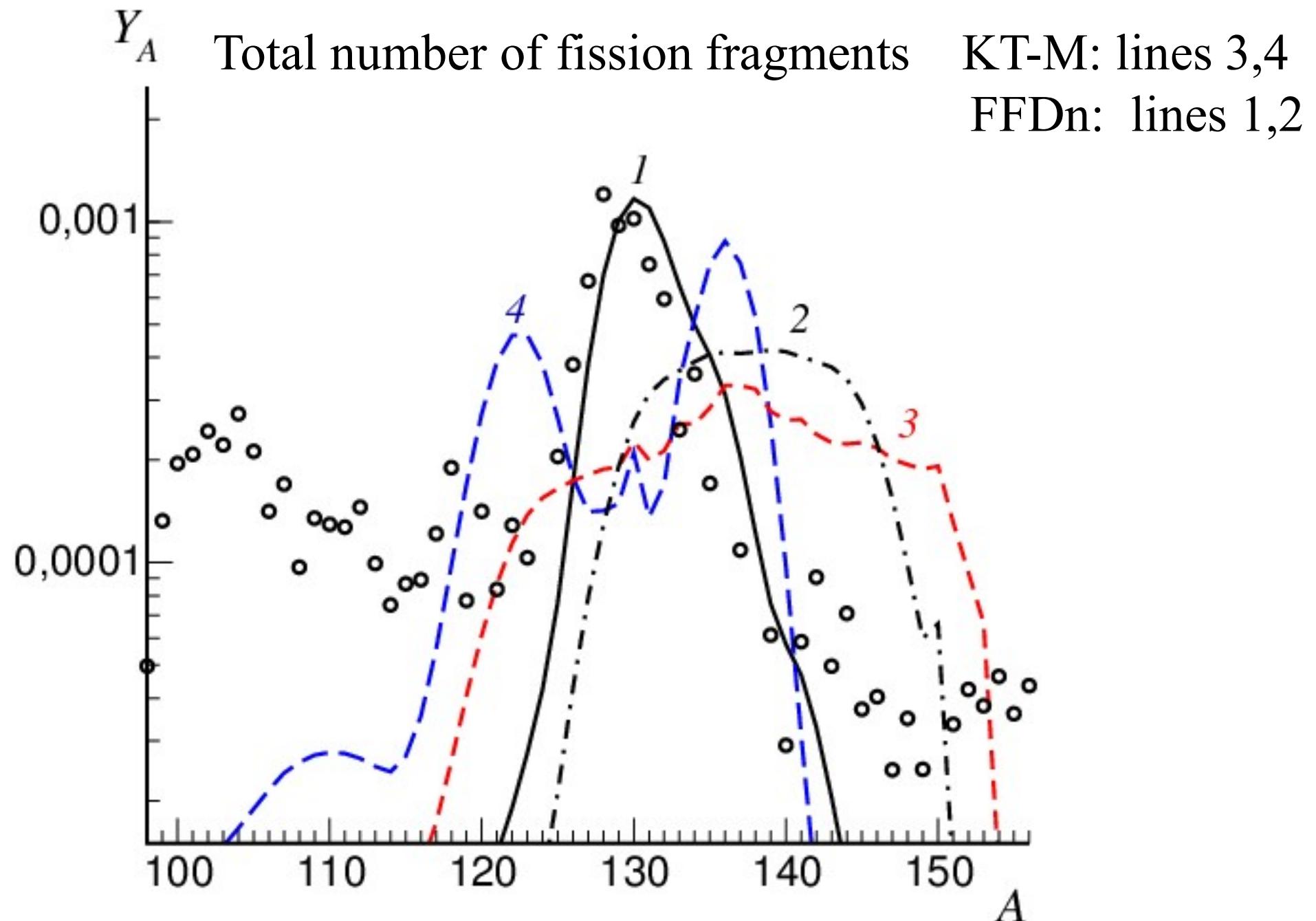
$$3 - n_c = 1.4$$



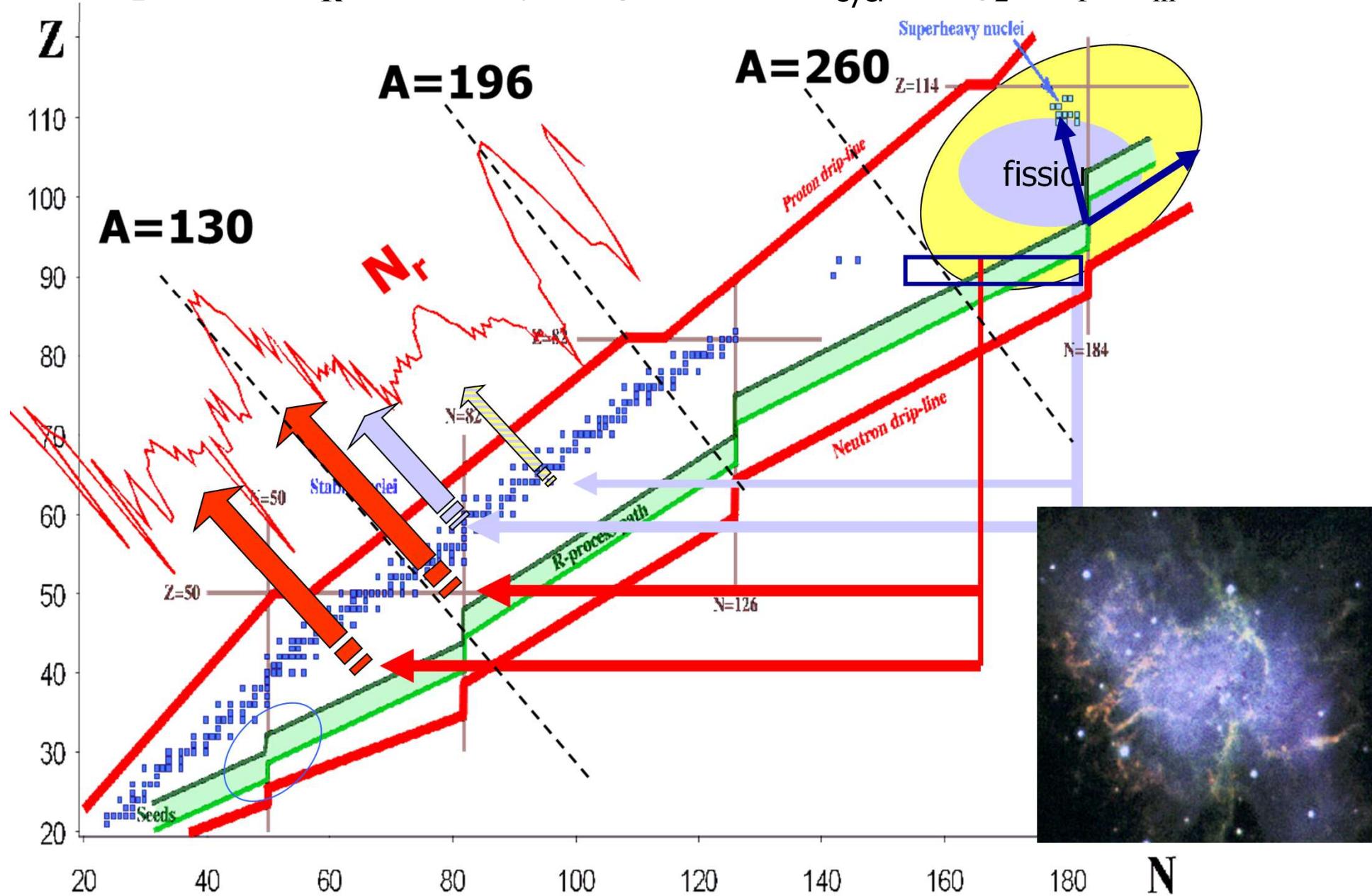
Fission fragment distributions for ^{268}Cf , ^{292}Cf , according to models:
FFDn with fission neutrons v_n (line 12) and artificially reduced v_n (line 11);
KT-M with fission neutrons taking into account (line 32) and with artificially reduced fission neutrons v_n (line 31);

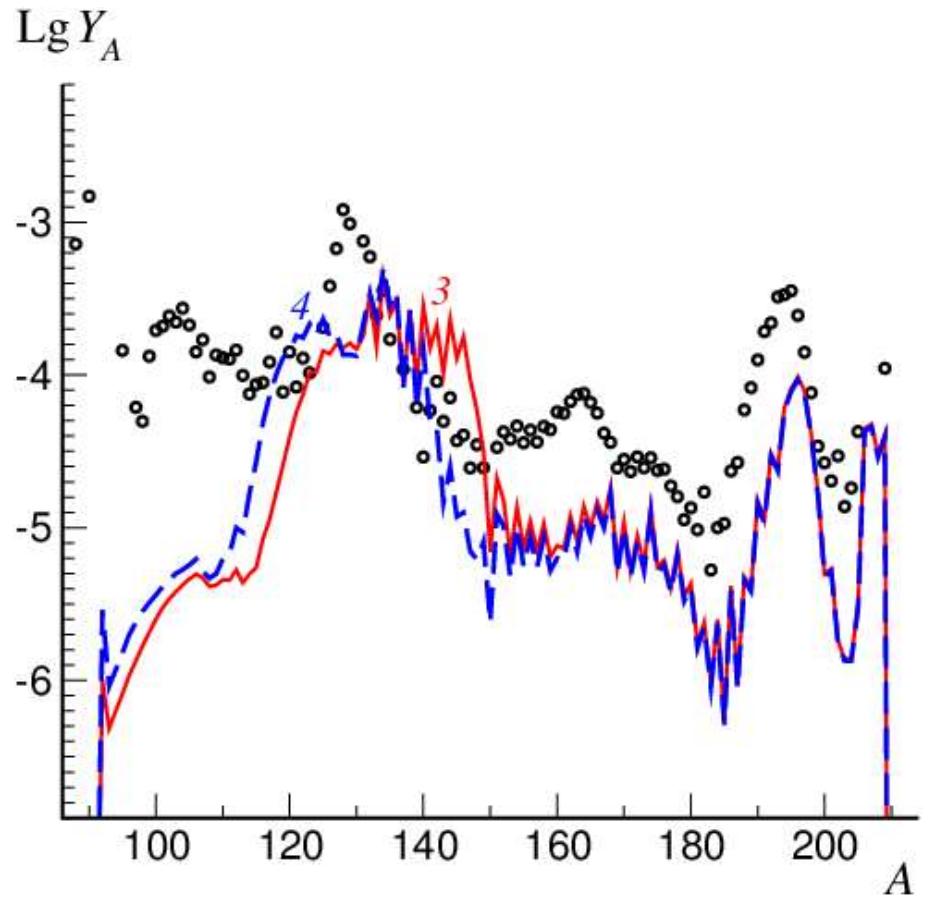
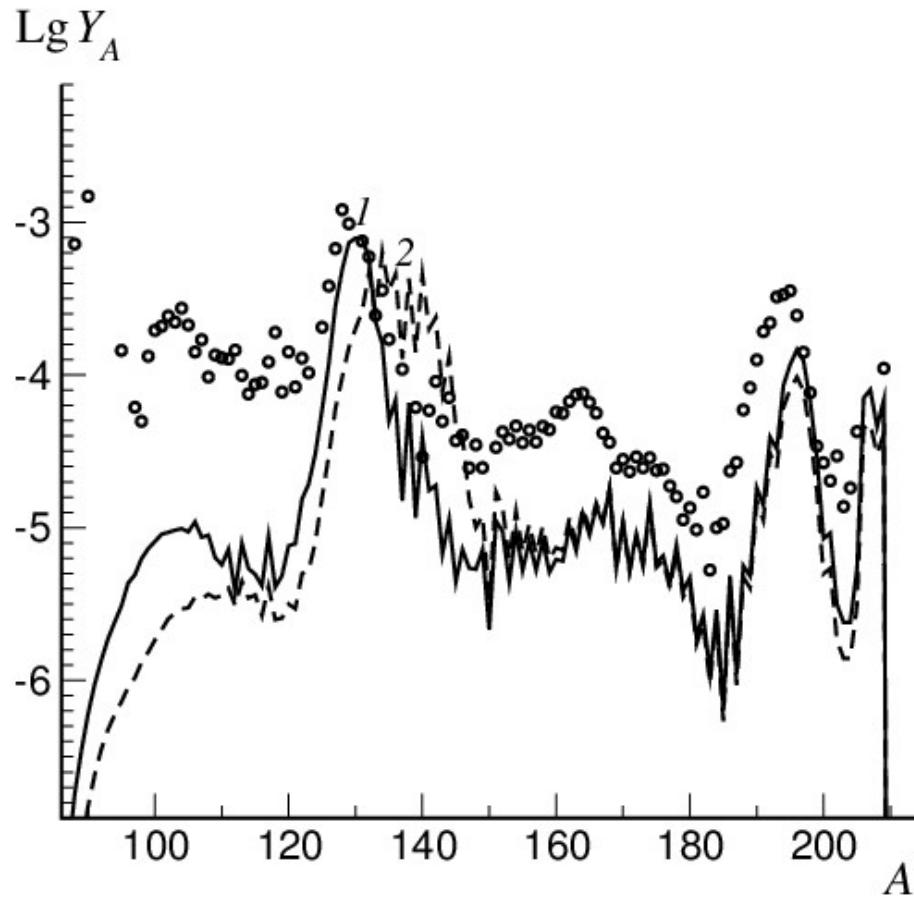
Total number of fission fragments (black line) when FFDn was applied
and fission processes contribution (in color)





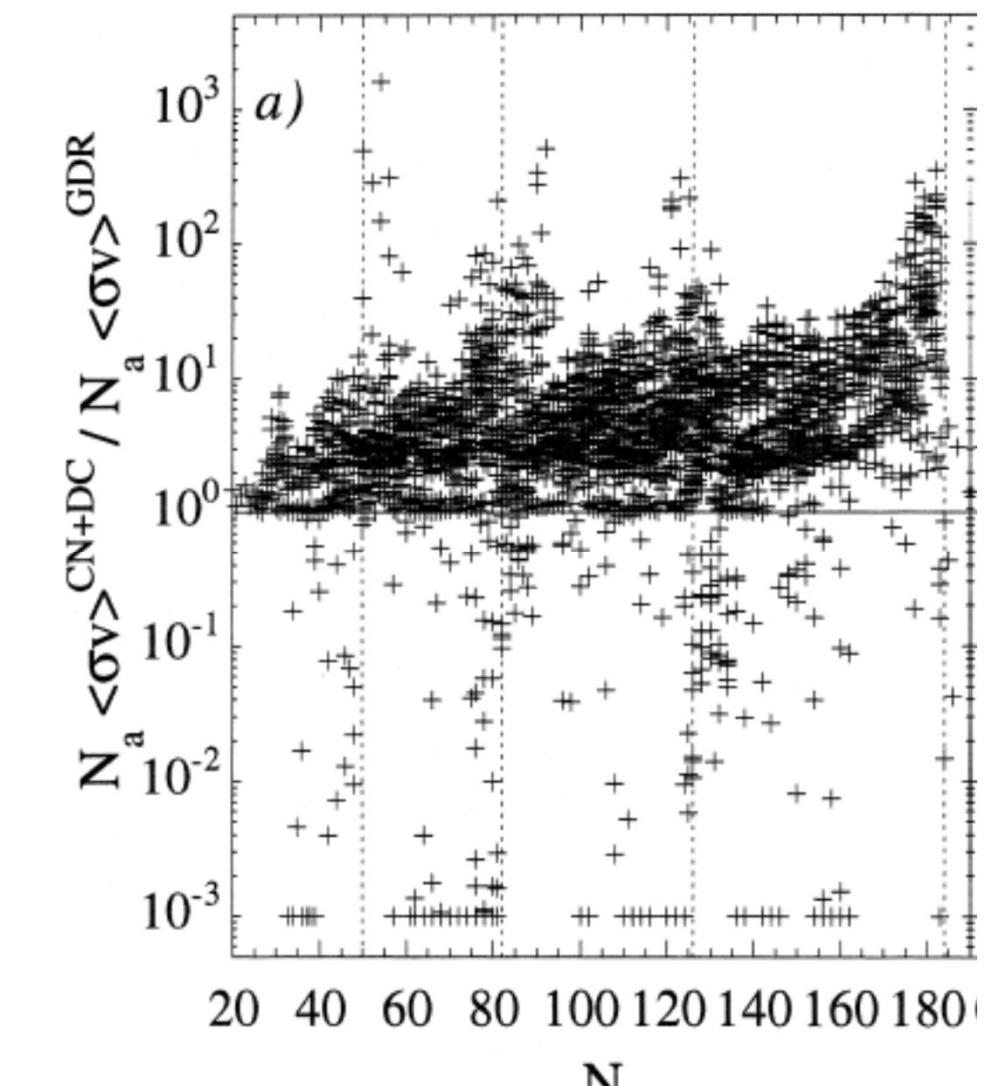
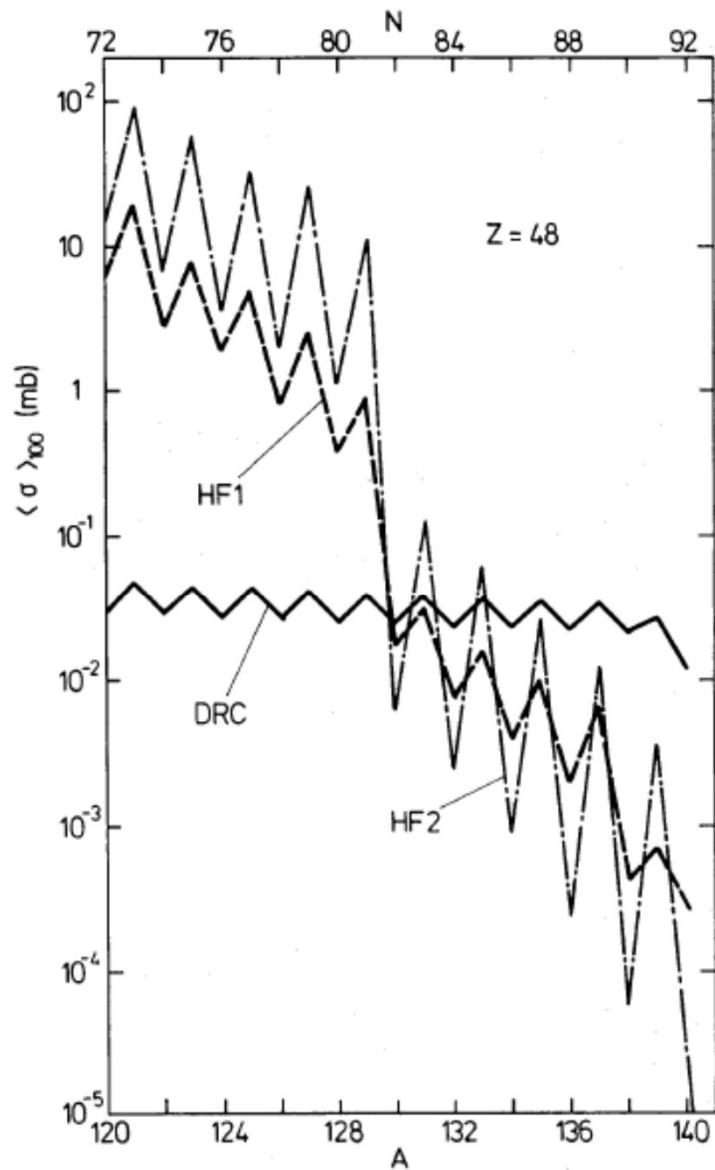
4. r-process: $\tau_R \geq 0.5$ s, cycling number $n_{\text{cycl}} = (\log_2(\Sigma Y_f / \Sigma Y_{\text{in}})) \geq 1$





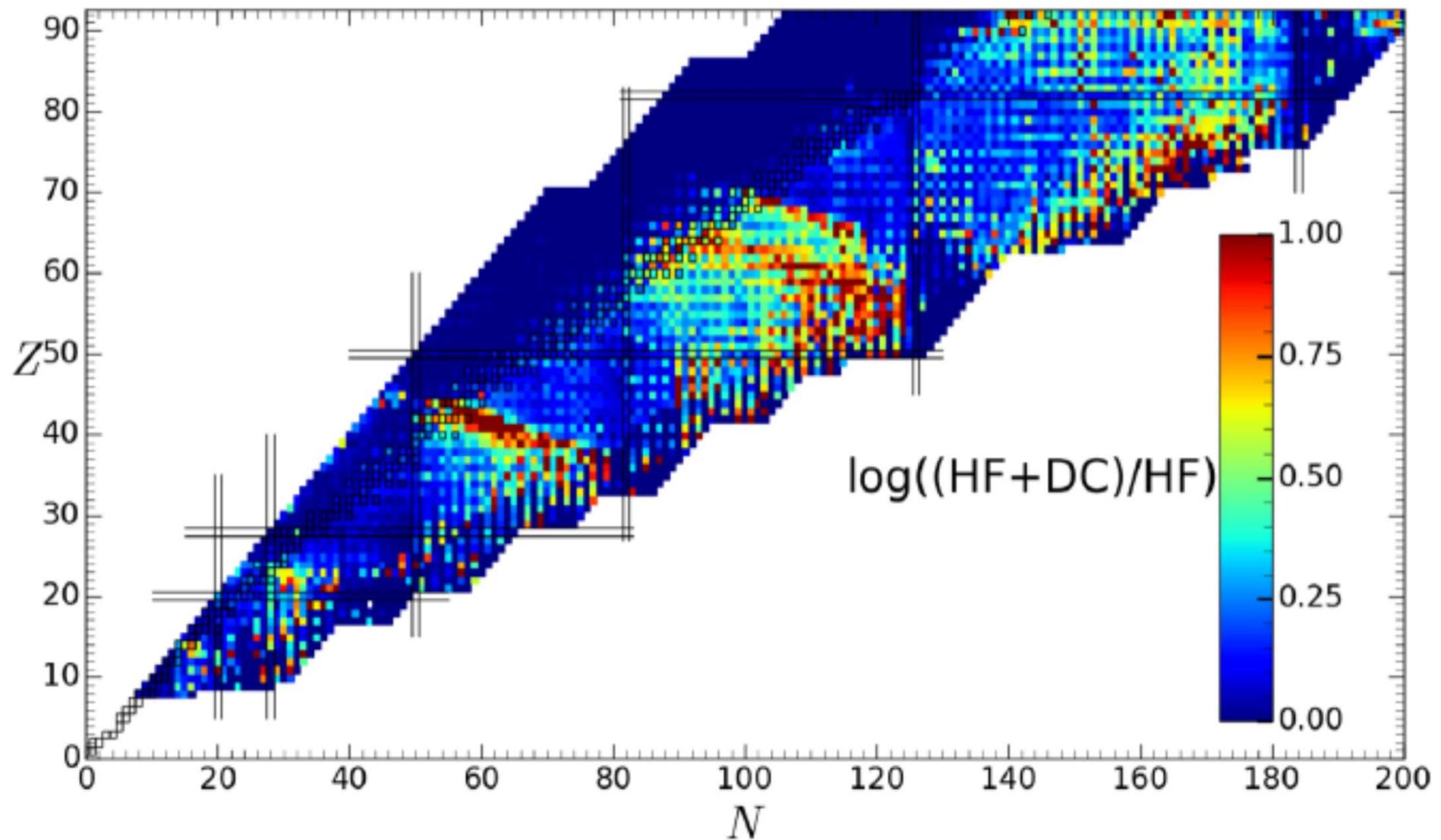
- line 1** — basic parametric set for fission fragment distribution model
Dashed line 2 – model FFDn, but fission neutrons v_n switch off ;
line 3 – basic model KT-M - no fission neutrons v_n ;
Line 4 – model KT-M, but with fission neutrons v_n included;

7. NuDa – $\langle\sigma v\rangle(n,g)$: стат. модель и direct capture



Mathews, 1983; Goriely, 1998

7. Nuclear data – direct capture



Goriely, 2021

Резюме по ядерным данным

Ядерные массы +/--

барьеры деления +/--

(n,g)/(g,n) +/-

Beta-decay rates +/-

Fission rates +/---

Direct capture rates ?/--