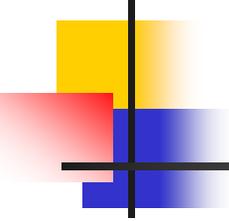




Ядерные реакции на среднетяжелых разделенных изотопах и на тяжелых радиоактивных ядрах.

А.Р.Балабекян

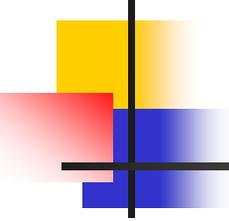
Работа выполнена в ОИЯИ (Дубна) и на
кафедре ядерной физики ЕГУ



Содержание

- Введение
- Методика эксперимента
 - усовершенствование и автоматизация метода
- Исследование ядерных реакций на разделенных изотопах олова ($^{112,118,120,124}\text{Sn}$)
 - определение механизма образования остаточных ядер в массовой области $40 \leq A \leq 80$
- Исследование ядерных реакций на тяжелых радиоактивных ядрах ^{237}Np , ^{241}Am , ^{129}I .
 - Оценка трансмутации радиоактивных отходов на протонном пучке
- Заключение
- Список литературы

Описание проблемы

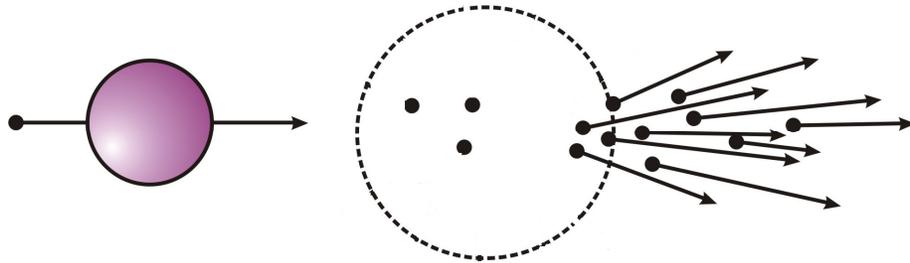


Исследование сечения образования остаточных ядер и кинематических характеристик продуктов позволяет определить

- Механизм образования продуктов ядерных реакций.
- Структуру ядер мишеней и продуктов.
- Преобразование ядер в радиоактивных отходах.

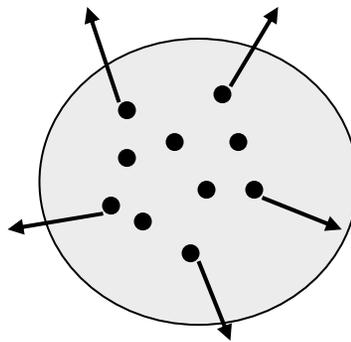
Каскадно-испарительная модель

$E_i = 100 \text{ MeV to } 20 \text{ GeV}$



Cascade

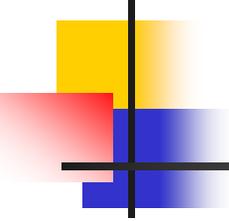
$\tau = 10^{-23} \text{ сек}$



Evaporation

$\tau = 10^{-18} \text{ сек}$

Экспериментальные предпосылки

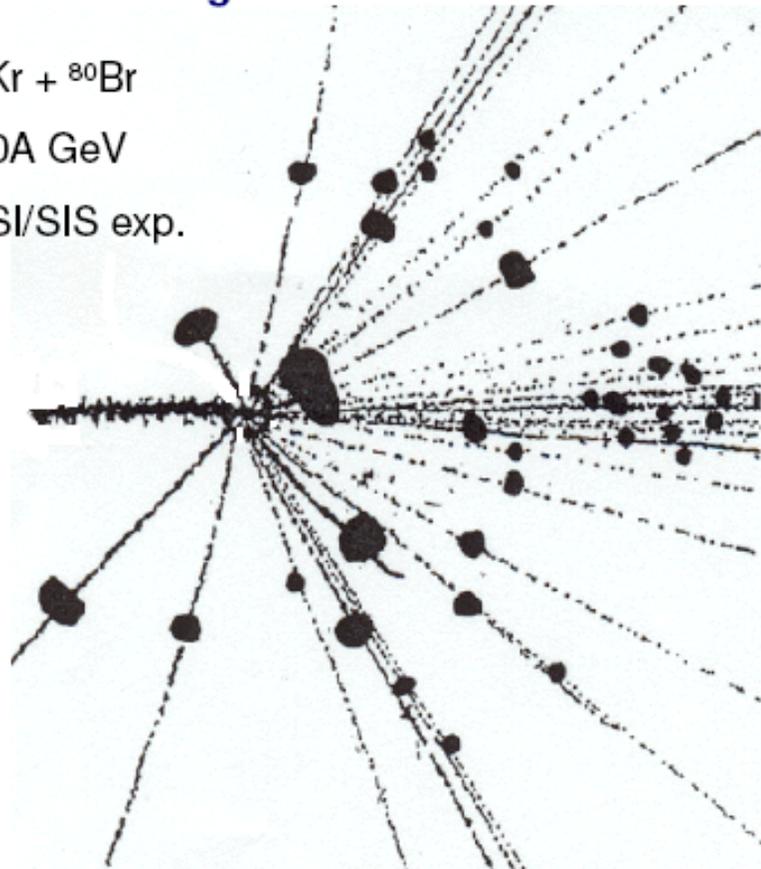


- Jakobsson B. et al. *Z.Phys.A* 1982
(множественное рождение фрагментов на фотоэмульсиях при взаимодействии ^{12}C с энергией 250 МэВ/нуклон / Беркли ($Z > 2$))
- Hüfner J. *Phys.Rep.* 1985, Lynch W.G. *Ann.Rev.Nucl.Part.Sci.* 1987 ($E_p = 50\text{-}1000\text{MeV/nucleon}$)

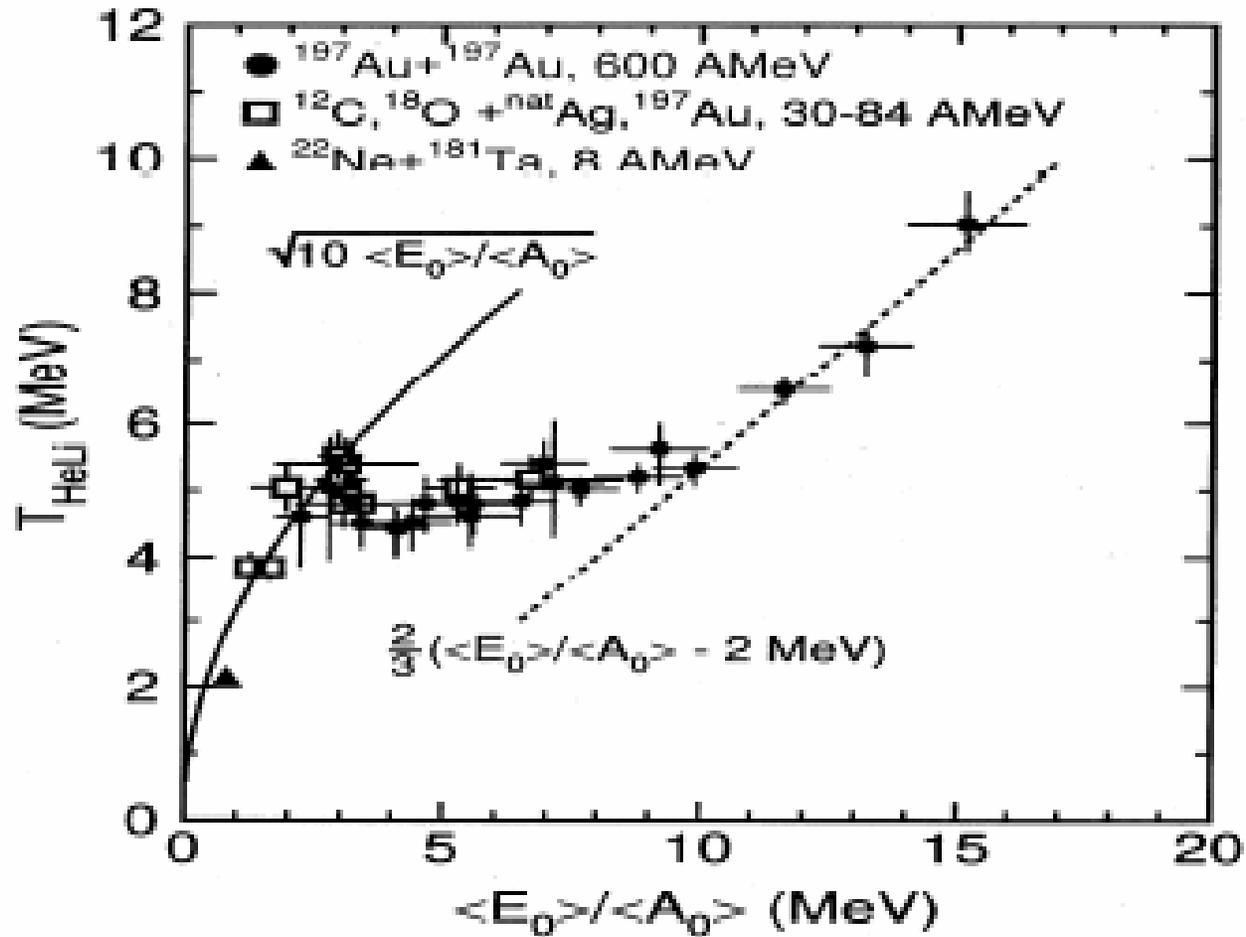
”Multifragmentation” was first observed in p-nucleus collisions, [*O.V. Lozhkin, N.A. Perfilov, Zh. Eksp. Teor. Fiz. 31 (1962) 913*], in **nucleus-nucleus collisions** (participant breakup) in a Bevalac experiment in 1977, [*B.Jakobsson et al., Z. Physik A 307 (1982) 293*], all with **nuclear emulsion technique**.

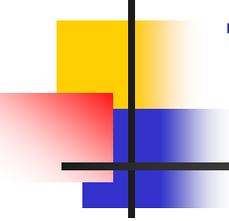
Multifragmentation

$^{86}\text{Kr} + ^{80}\text{Br}$
1.0A GeV
GSI/SIS exp.



Каллорическая кривая



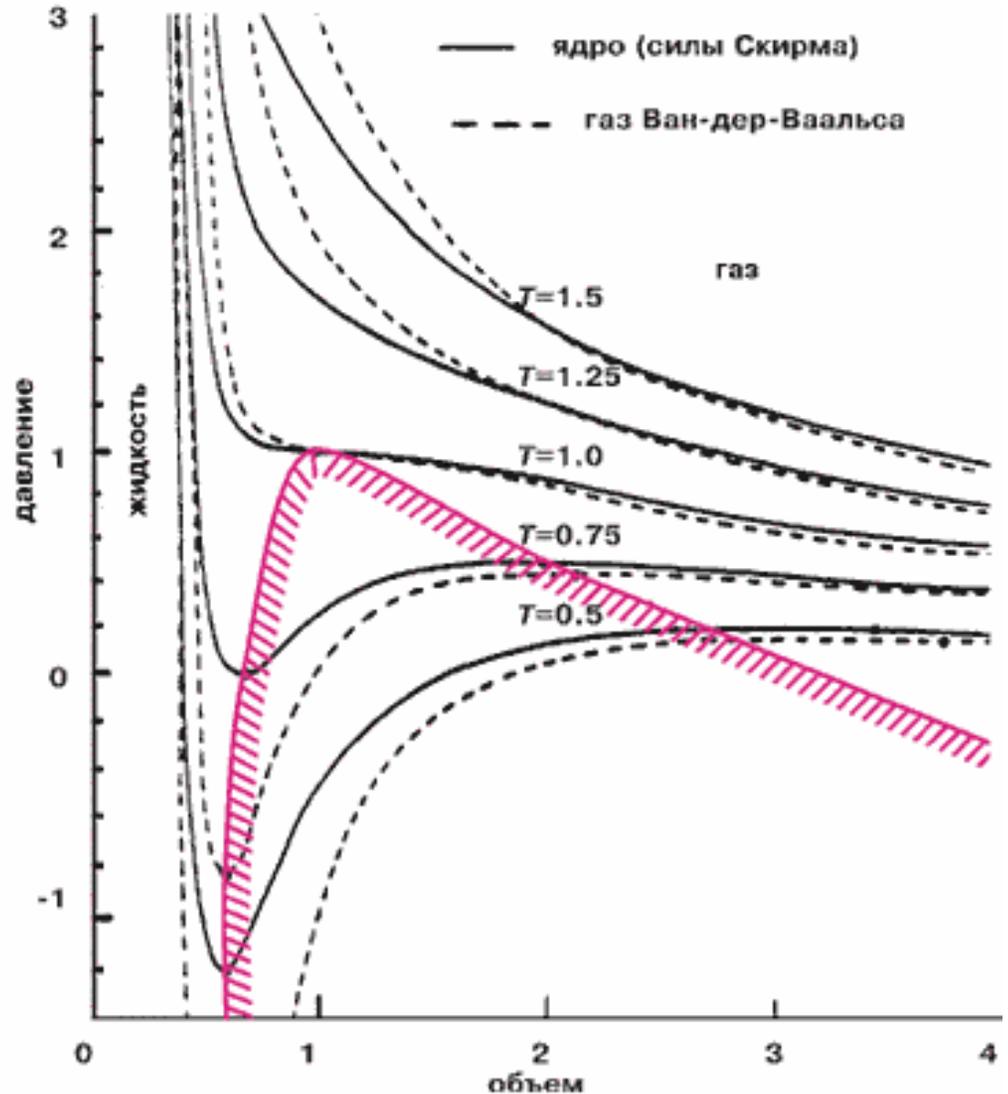


Теоретические модели

- Statistical Multifragmentation Model
(**SMM model (since 1985)**, Phys.Reports, 1995)
- Expanding Evaporating Source Model (**EES model**, W.Friedman, Phys. Rev.C 42, 667-673,1990)
- Antisymmetrized Molecular Dynamics Model
(**AMD model**, Phys.Rev C68, 051601, 2003)

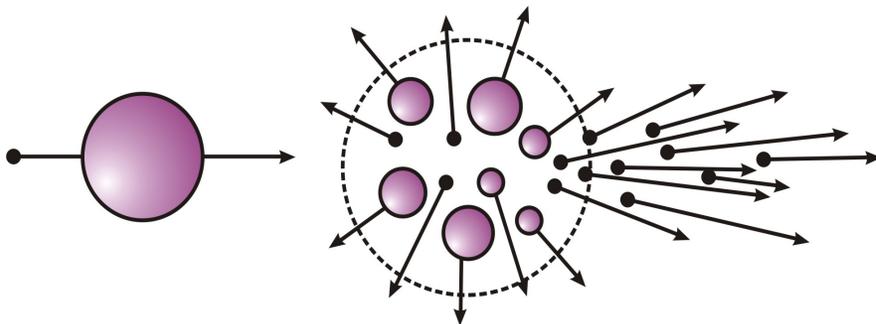
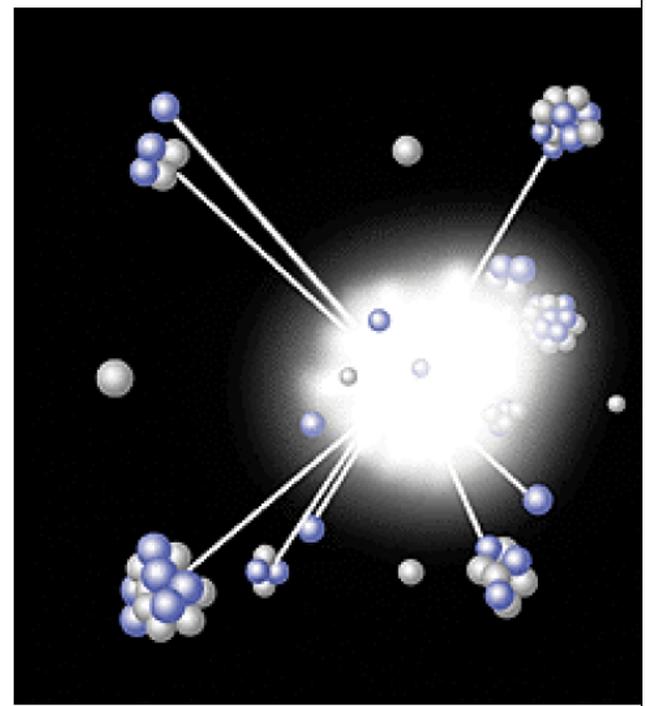
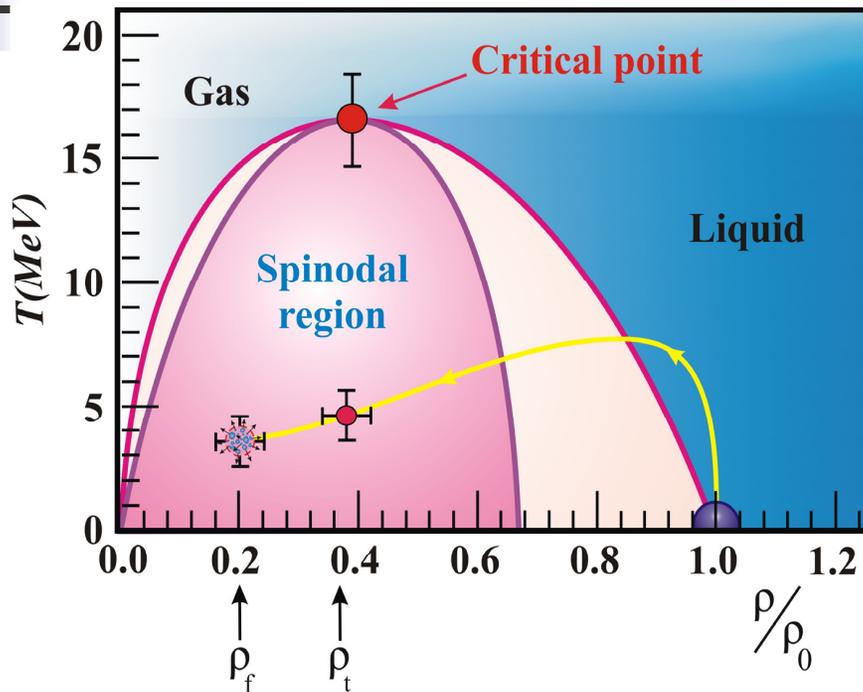
Изотермы

Isotermes for the nuclear matter (solid lines) and for the classical liquid-gas system (dashed line). Pressure and volume are per unit of critical meanings. By color the region of phase unstability (spinodal region) is singled out.



Фазовая диаграмма для ядерной материи

$2 \leq Z \leq 20$



Grand-canonical approximation

Density of fragments with mass
A and charge Z in nuclear matter

$$\langle \rho_{AZ} \rangle = g_{AZ} \frac{V_f}{V \lambda_T^2} A^{3/2} \exp \left[-\frac{1}{T} [F_{AZ}(T, \rho) - \mu A - \nu Z] \right]$$

$$\rho = \frac{M}{V} = \sum (\rho_{AZ}) \quad \lambda_T = \sqrt{\frac{2\pi\hbar^2}{m_N T}}$$

$$F_{AZ} = F_{AZ}^B + F_{AZ}^S + E_{AZ}^C + E_{AZ}^{Sym}$$

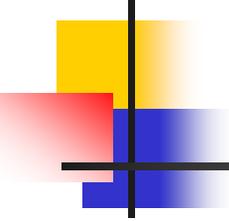
$$F_{AZ}^B = (-W_0 - T^2 / \varepsilon_0) A$$

$$F_{AZ}^S = B_0 A^{2/3} (T_c^2 - T^2) / (T_c^2 + T^2)^{5/4}$$

$$E_{AZ}^C = c \frac{Z^2}{A^{1/3}}$$

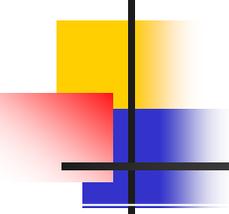
$$E_{AZ}^{Sym} = \gamma (A - 2Z)^2 / A$$

ρ -total density,
 M is the number of nucleons,
 V -volume of the system,
 V_f -excluded free volume,
 g_{AZ} -degeneracy of fragments,
 λ_T -the nucleon thermal wavelength,
 μ and ν are the chemical potentials for the nucleon number and charge conservation in the system,
 F_{AZ} -free energy of fragments
 F_{AZ}^B -The bulk energy
 $W_0=16\text{MeV}$ -binding energy of nuclear matter,
 $\varepsilon_0=16\text{MeV}$ —the inverse level density
 F_{AZ}^S —surface energy
 $B_0=18\text{MeV}$ —surface coefficient
 $T_c=18\text{MeV}$ —critical temperature of nuclear matter
 E_{AZ}^C —the coulomb energy
 E_{AZ}^{SYM} — the symmetry energy of nuclear matter
 $\gamma=94\text{MeV}$ -the symmetry energy parameter



Экспериментальный обзор

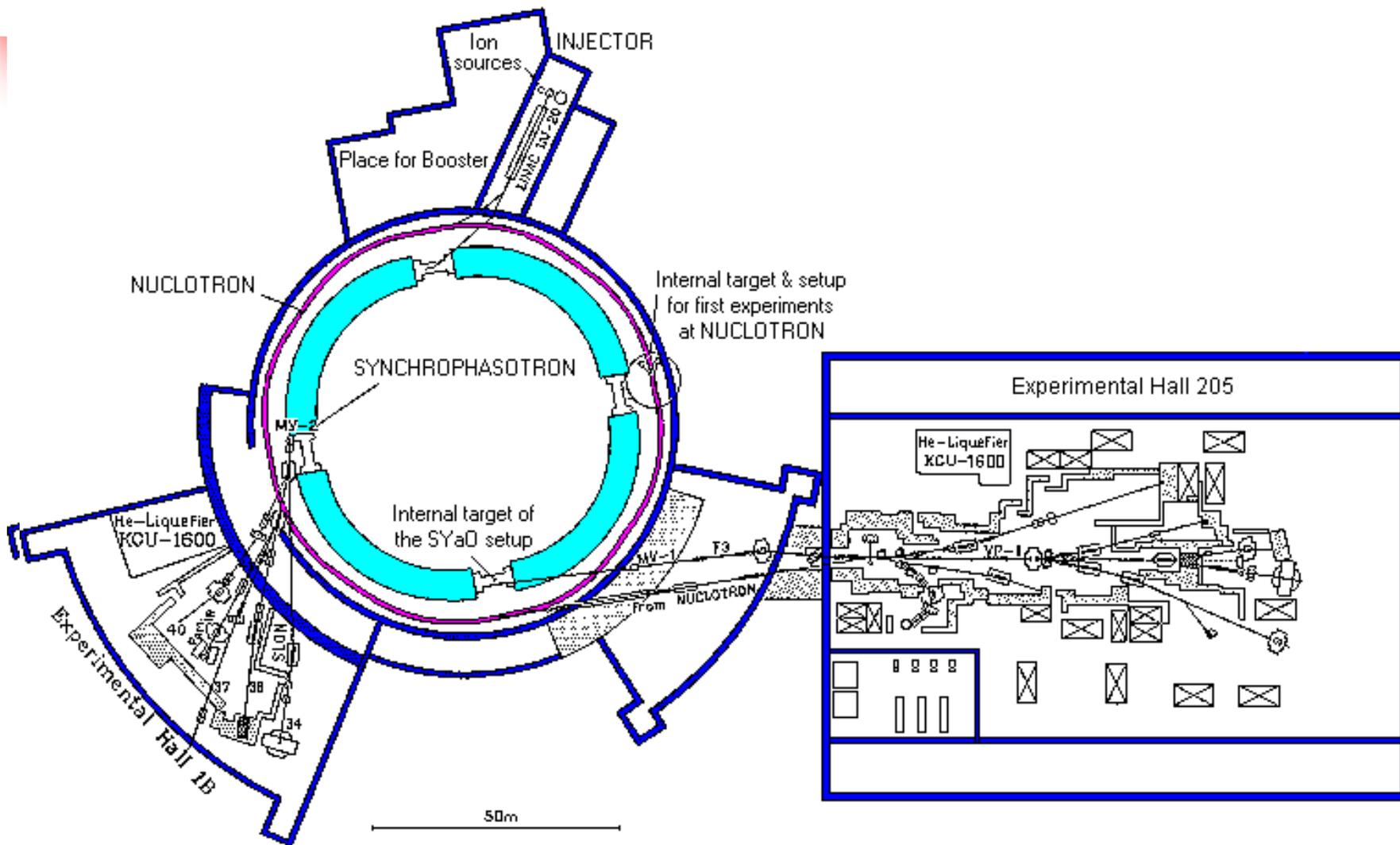
- ALADIN and INDRA(4π experiment) GSI
fragment mass region $2 < Z < 20$
- ISiS(Indian Silicon Sphere) collaboration,
leader Vic Viola, 4π experiment, target-gold ($2 < Z < 20$)
- EOS(Equation of State) collaboration
target-gold,lanthanum and krypton($2 < Z < 20$)
- FAZA collaboration (Dubna)
leader Karnaukhov V.A., 4π experiment, target-gold ($2 < Z < 20$)



Цель и задачи работы

- Исследование сечений образования и кинематических характеристик остаточных ядер в реакциях протонов и дейтронов с разделенными изотопами олова с целью определения механизма образования остаточных партнеров промежуточных массовых фрагментов ($40 \leq A \leq 80$).
- Исследование сечений образования выходов остаточных ядер в реакциях протонов с тяжелыми радиоактивными ядрами с целью систематизации и планирования трансмутации радиоактивных отходов.
- Развитие современных спектроскопических методик для решения поставленных задач, автоматизации эксперимента и обработки данных.

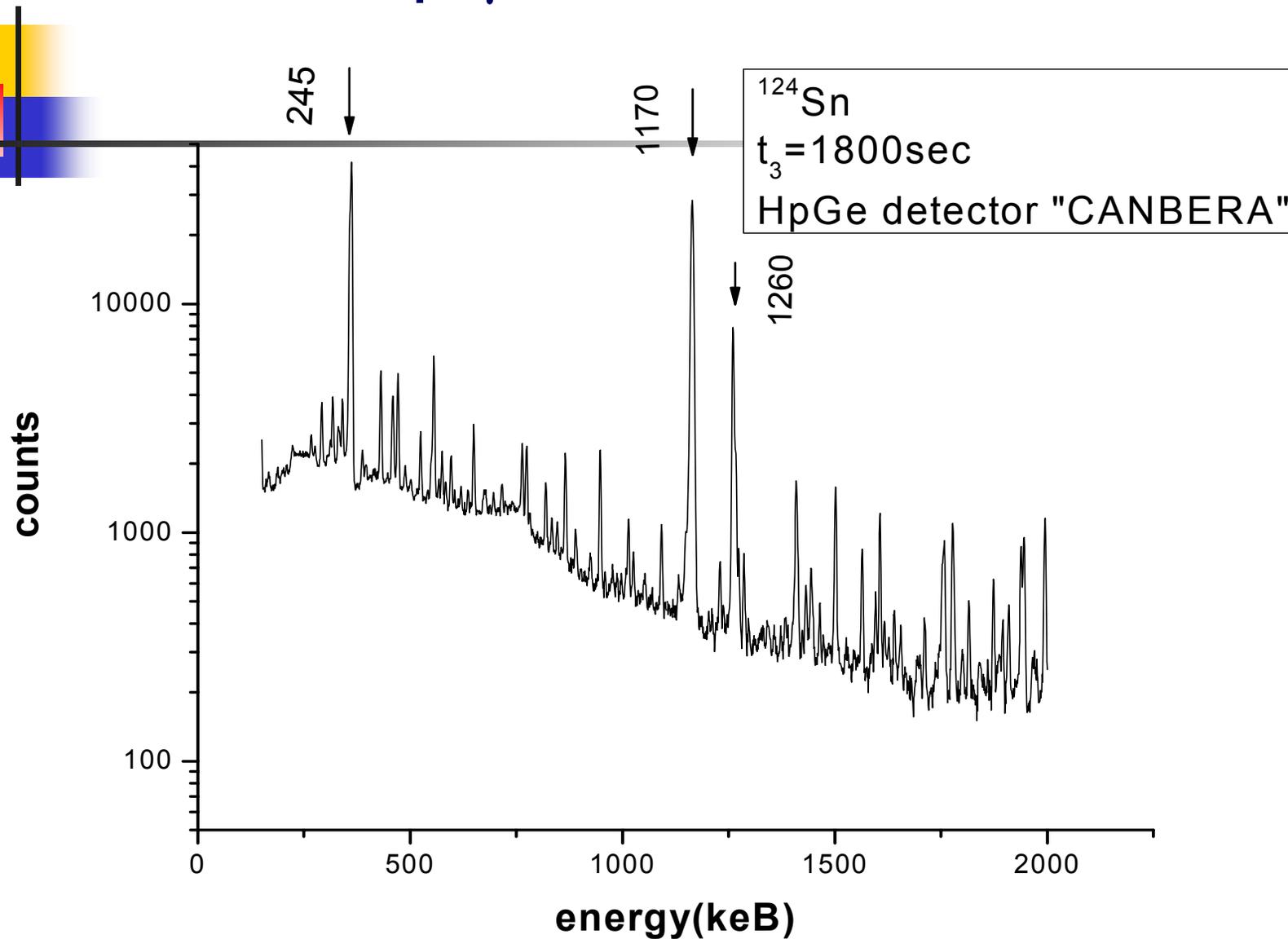
Глава I Методика эксперимента



HPGe детекторы

	CANBERRA	ORTEC(old)	ORTEC(new)
Resolution [keV] (Eg=1332keV)	1.78 keV	1.86 keV	1.80 keV
Relative efficiency [%] (Eg=1332keV)	18.9	27.7	28.3
Absorbing layer Be, Al, Ge	0.50 mm 0.3 μm	1.27 mm 0.3 μm	0.50 mm 0.3 μm

Спектр γ -квантов



Filename: e:\ab\deim02\124sn4.Chn

File created or changed: 17.03.03

No.of channels: 8050

Evaluated : 26.09.03 17:09:24

Live time: 1800.0 s Real time: 1947.0 s Dead time: 7.55 %

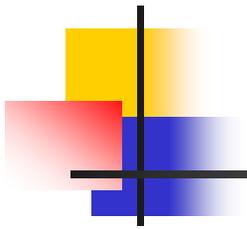
Counts total: 5052060 Input counts/sec: 2807

Satellite peaks:

channel	cherr	energy	area	aerr%	fwhm	chisq	it	left	n	lim	isotope
955.028	0.174	416.348	1882.8	12.7	4.86	1.22	14	935	37	517	
2959.788	0.076	1293.359	2659.7	4.5	5.84	0.94	18	2936	43	221	
2968.870	0.564	1297.332	285.1	19.1	5.85	0.94	18	2936	43	221	
3342.359	0.110	1460.720	1010.4	6.7	5.60	0.65	9	3317	41	171	
3118.226	0.066	1362.670	3411.0	3.1	6.15	1.06	9	3095	57	221	
3131.333	0.057	1368.404	4193.7	2.8	6.16	1.06	9	3095	57	219	
6289.850	1.243	2750.142	221.0	46.3	8.16	0.72	11	6267	49	65	
6296.199	0.204	2752.920	2211.1	4.9	8.16	0.72	11	6267	49	65	

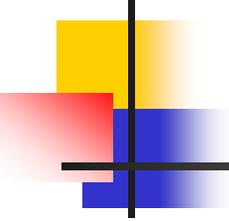
Площадь пика
полного погочения

Методика эксперимента



$$\sigma = \frac{S \cdot \lambda \frac{t_r}{t_l}}{k\eta\varepsilon N_y N_b (1 - e^{-\lambda t_1}) e^{-\lambda t_2} (1 - e^{-\lambda t_r})}$$

В формуле сечения образования остаточных ядер эффект мертвого времени учитывает множитель t_r/t_l , где - t_r реальное время измерения, а t_l - живое время измерения.



В программе учтены

- Уточнение энергий характерных γ линий
- Вычет всевозможных фоновых линий
- Идентификация продуктов по периодам полураспада и по энергиям γ линий
- Разложение сложных γ линий
- Нестабильность пучка по времени и по интенсивности

1. Data handling.

ENGCOR5



PUREGAM3



ISOMER



EFFCOR5



MIDLIT3



TRANSCS

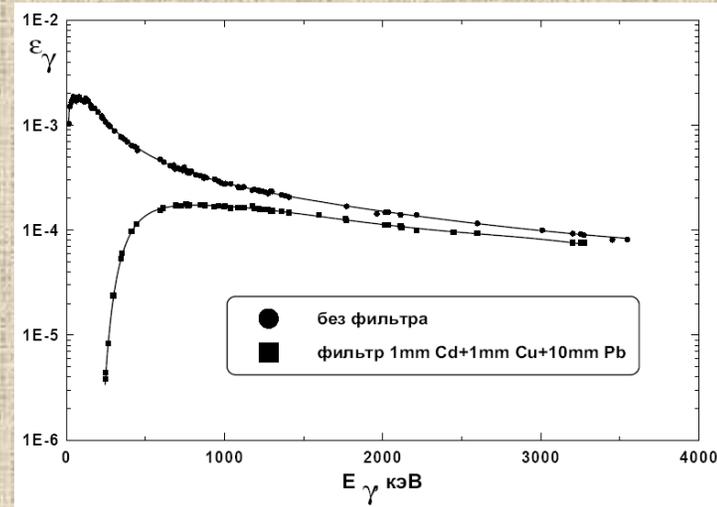
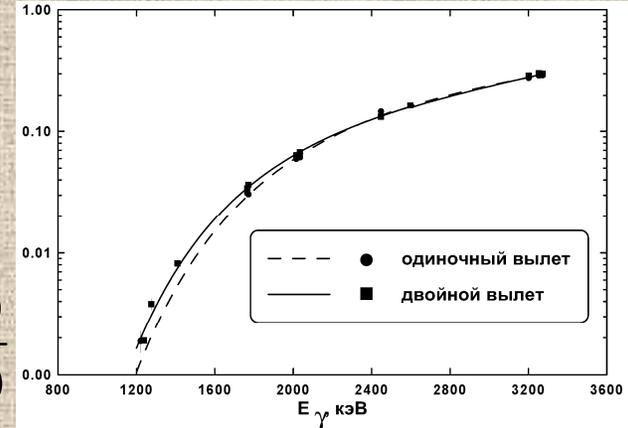
Вход: $N_\gamma(i)_{\text{Deimos}} \quad N_\gamma(i) \rightarrow E_\gamma(i)$

$$\frac{I_\gamma^{\text{SEP,DEP}}}{I_\gamma} = \exp\left(\sum_{i=0}^4 a_i ((\ln(E_\gamma))^i)\right)$$

$$S_\gamma(E_\gamma^i) = \left\{ \begin{array}{l} Ae^{-\lambda_a t_2(i)} (1 - e^{-\lambda_a t_{3,r}(i)}) + \\ + Be^{-\lambda_b t_2(i)} (1 - e^{-\lambda_b t_{3,r}(i)}) \end{array} \right\} \frac{t_{3,l}(i)}{t_{3,r}(i)}$$

$$I_\gamma^n = S_\gamma^n / \exp\left(\sum_{i=0}^8 b_i ((\ln(E_\gamma))^i)\right)$$

$$K = \frac{I_\gamma^{\text{lit}} \cdot I_{\gamma,\text{max}}^{\text{exp}}}{I_\gamma^{\text{exp}} \cdot I_{\gamma,\text{max}}^{\text{lit}}}; \quad I_\gamma^{\text{lim}}; \quad K \leq 1$$



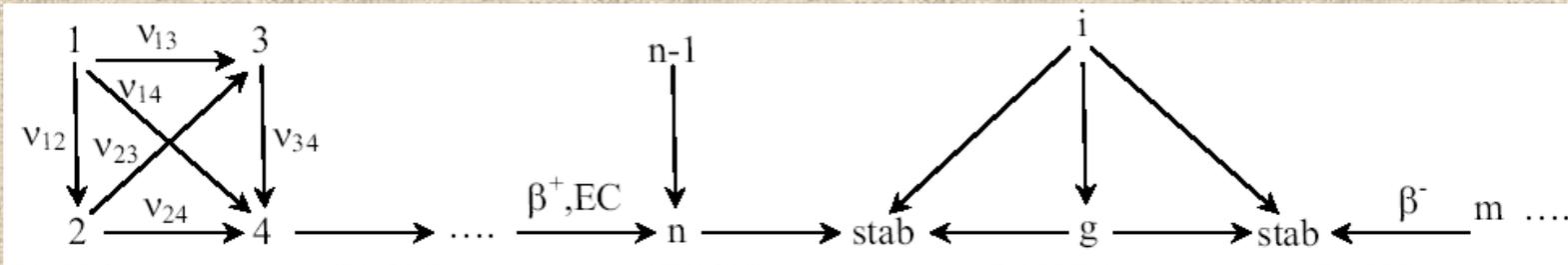
$$\sigma_a(E_\gamma^j) = \frac{S_i(E_\gamma^j) \lambda_a t_{3,r}}{N_p N_t \epsilon_\gamma I_\gamma(E_\gamma^j) (1 - e^{-\lambda_a t_1}) e^{-\lambda_a t_2} (1 - e^{-\lambda_a t_{3,r}}) t_{3,l}}$$

Выход программы, определяющей сечения образования ядер остатков из мишени олова в эксперименте проведенном в рамках данной работы. В таблице приведены средневзвешанные значение сечения и его погрешности – статистические (internal) и из разброса (external).

N	E	dE	sig	dsig	sig2	dsig2	id
1	539.509	0.089	8.347E-0027	1.129E-0027	8.348E-0027	1.129E-0027	100Pd(G)
2	539.296	0.153	4.185E-0027	7.297E-0028	4.187E-0027	7.300E-0028	100Pd(G)
3	538.966	0.286	8.014E-0027	2.061E-0027	8.014E-0027	2.061E-0027	100Pd(G)
SS weighted avg=			5.62276E-0027		5.62509E-0027		
SS sigma int =				5.87420E-0028		5.87577E-0028	
1	539.509	0.089	5.724E-0026	7.738E-0027	5.727E-0026	7.742E-0027	100Rh(G)
2	539.296	0.153	6.139E-0026	6.334E-0027	6.341E-0026	6.338E-0027	100Rh(G)
SS weighted avg=			5.86473E-0026		5.86761E-0026		
SS sigma int =				7.73375E-0027		7.73776E-0027	
3	474.410	0.241	1.186E-0026	2.308E-0027	1.186E-0026	2.308E-0027	102Rh(G)
4	475.340	0.232	1.943E-0026	3.059E-0027	1.943E-0026	3.059E-0027	102Rh(G)
5	474.628	0.234	1.200E-0026	1.891E-0027	1.200E-0026	1.891E-0027	102Rh(G)
SS weighted avg=			1.33369E-0026		1.33369E-0026		
SS sigma int =				1.31963E-0027		1.31963E-0027	

Кумулятивные сечения

Изобарическая цепочка для β распада РЯ ($A=\text{const.}$) :

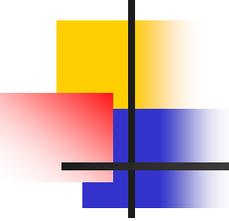


Общая формула для кумулятивных сечения:

$$\sigma_n^{cum} = \sigma_n^{ind} + \sum_{m=1}^{n-1} B_{mn} \sigma_m^{ind} \quad \begin{array}{l} v_{mn} \equiv 0 \text{ при } n-m > 3 \text{ для нечетных } m \\ v_{mn} \equiv 0 \text{ при } n-m > 2 \text{ для четных } m \end{array}$$

$$B_{mn} = v_{mn} + \sum_{l_1 > m}^{n-1} v_{ml_1} v_{l_1 n} + \sum_{l_2 > l_1}^{n-1} \sum_{l_1 > m}^{n-2} v_{ml_1} v_{l_1 l_2} v_{l_2 n} + \dots$$

$$K_e = \frac{R_j(t_3)}{\sqrt{R_j(t_3) + 2R_f(t_3)}} \sqrt{c} \sqrt{k}$$



Выводы

- Автоматизирован процесс обработки экспериментальных данных для ускоренного получения окончательных результатов
- Разработана методика для определения оптимальных параметров эксперимента по изучению ядер-продуктов находящихся в сложных цепочках распада.

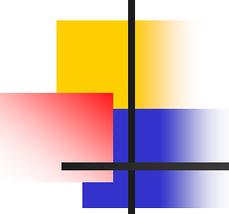
Глава II

Исследование ядерных реакций на разделенных изотопах олова ($^{112,118,120,124}\text{Sn}$)



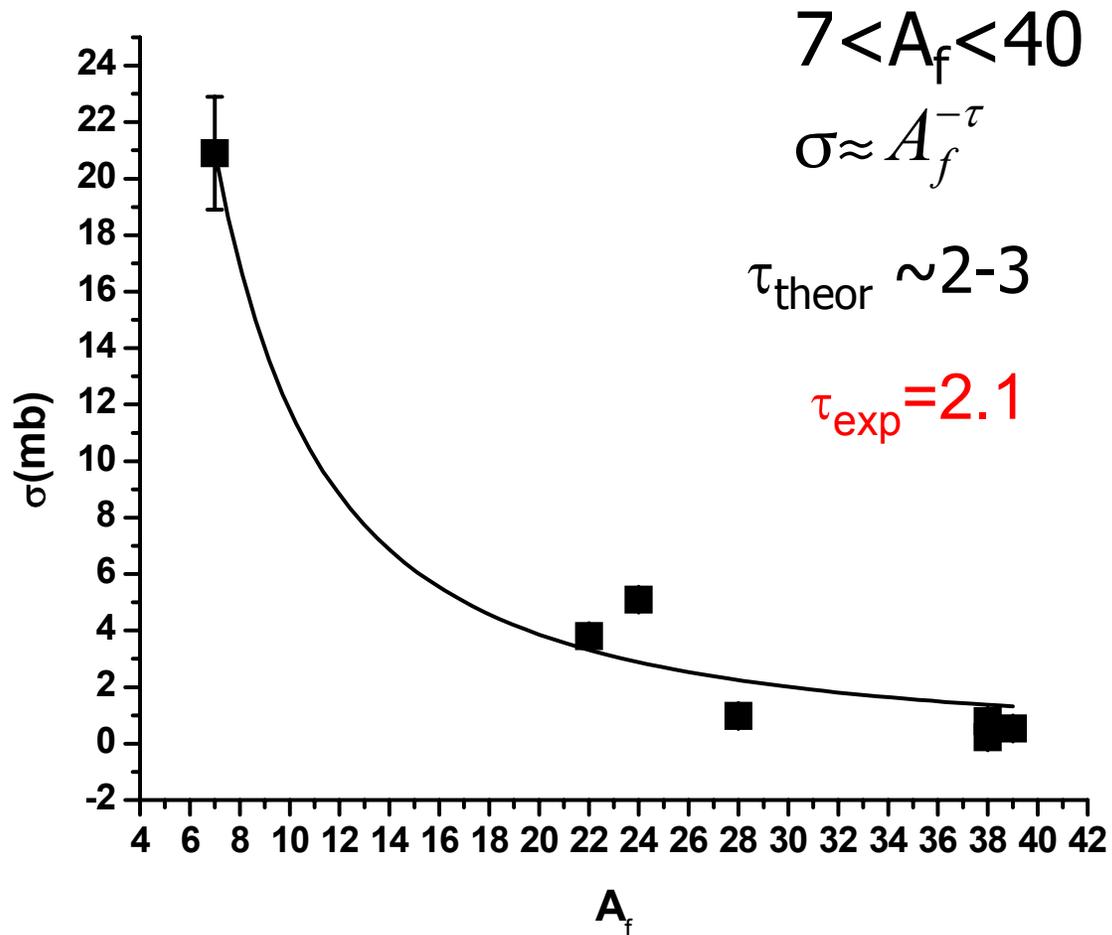
- Исследование ядерных реакций на разделенных изотопах олова при энергиях протонного пучка $E_p=0.66;1;3.65;8.1\text{ГэВ}$.
- Исследование ядерных реакций на разделенных изотопах олова при энергии дейтронного пучка $E_d=3.65\text{ГэВ/нуклон}$.
- Исследование кинематических характеристик остаточных ядер при энергиях протонного и дейтронного пучка 3.65ГэВ/нуклон .

В диссертации исследованы:

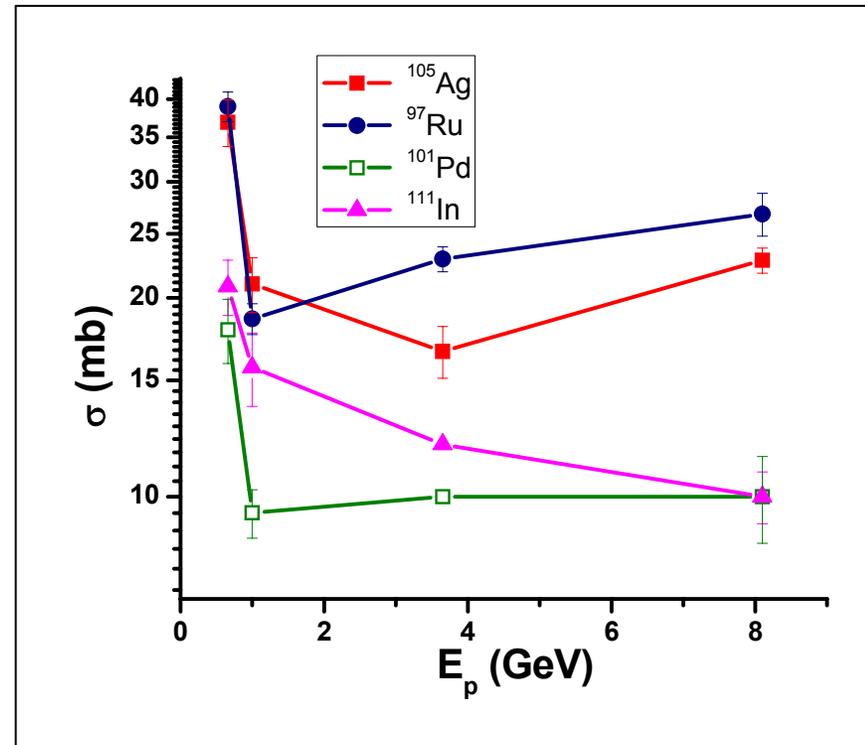
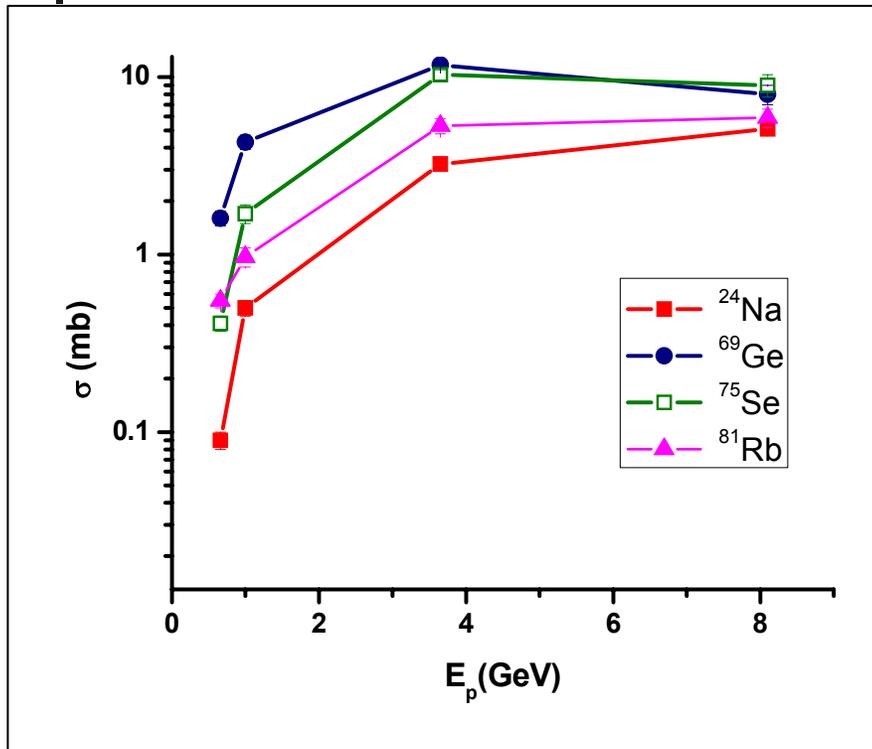


- Реакции с образованием фрагментов, мультифрагментация
- Реакции глубокого расщепления
- Простые реакции, реакции перезарядки
- Образование высокоспиновых, и низкоспиновых состояний продуктов

Степенная зависимость легких фрагментов

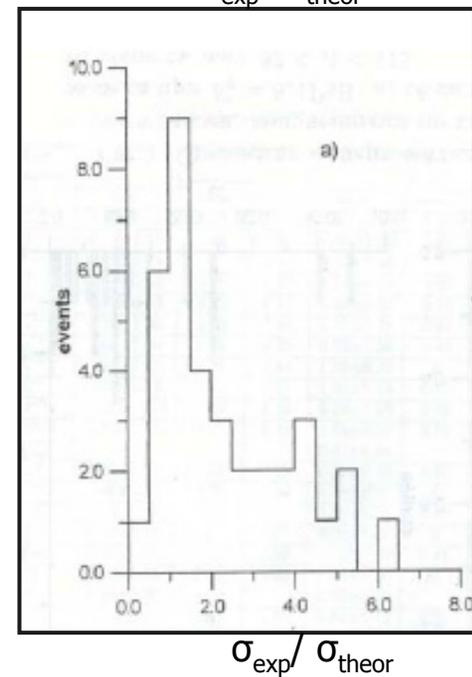
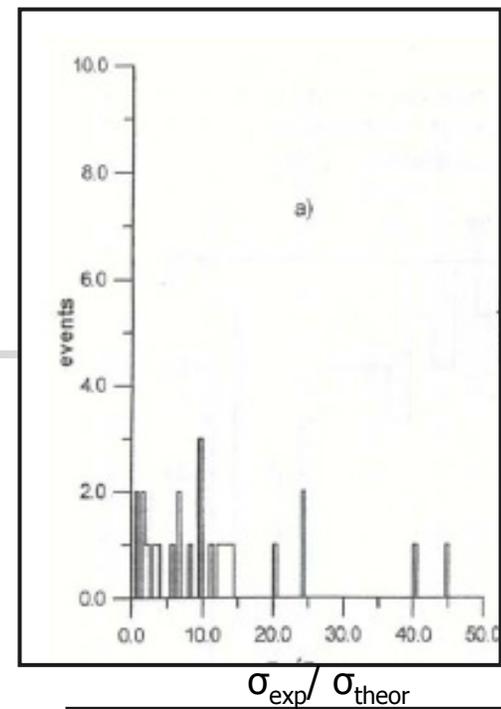
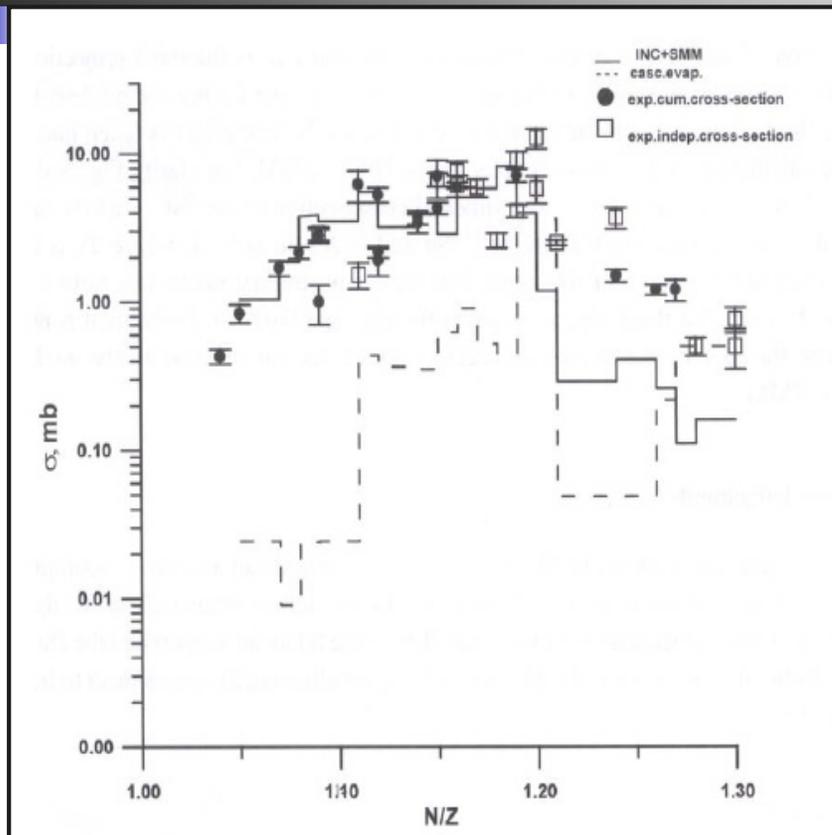


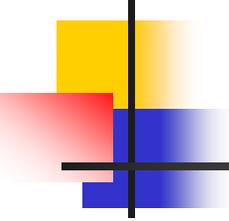
Энергетическая зависимость сечения образования продуктов



Сравнение с каскадно-испарительным и СММ моделями.

$42 \leq A \leq 80$



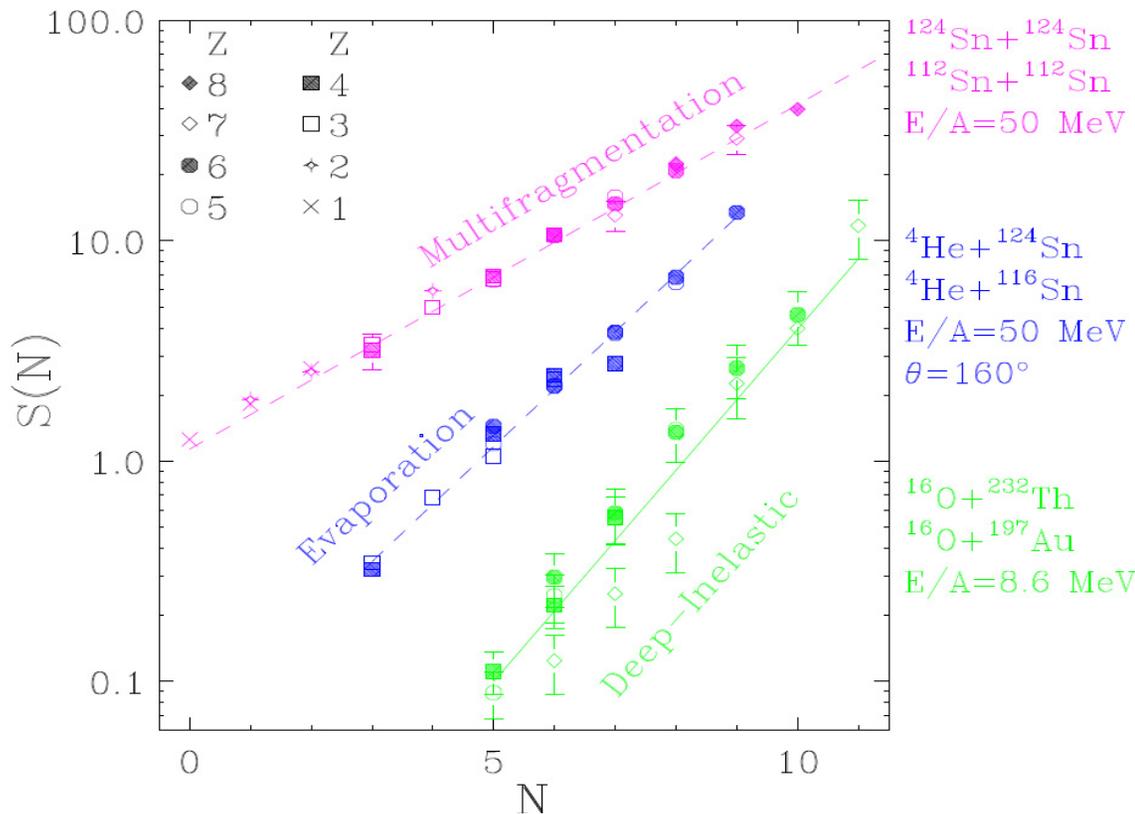


Выводы

- легкие продукты $7 \leq A_f \leq 40$ образуются в процессе мультифрагментации
- вклад механизма мультифрагментации в образовании продуктов в средней массовой области $A_f \geq 40$ составляет в среднем около 50% от общей вероятности образования данного остаточного ядра.

The scaled isotopic ratio

(M.B.Tsang, W.A.Friedman et al. arXiv.nucl-ex/0103010,2001)

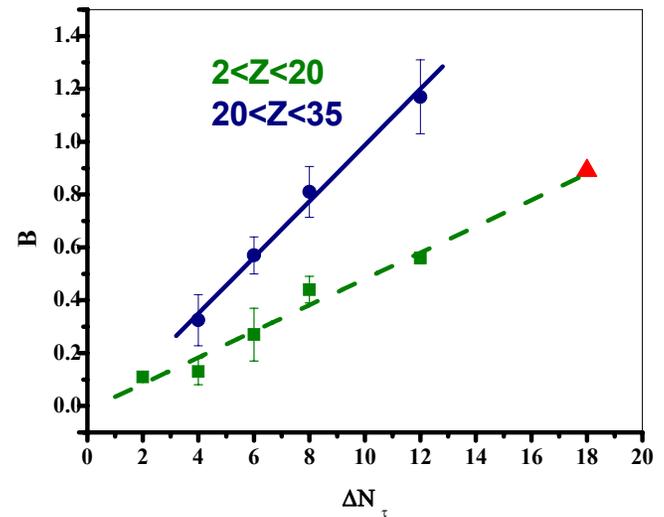
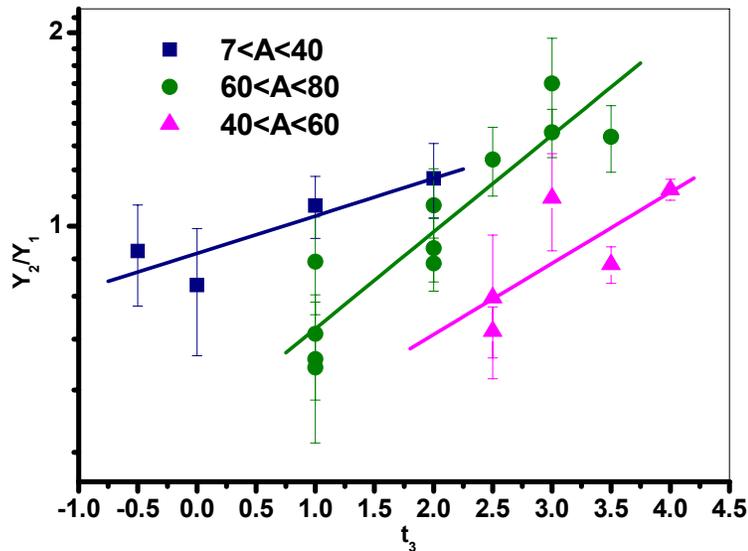


$$R_{21}(N, Z) = Y_2(N_2, Z_t) / Y_1(N_1, Z_t) = C \exp(\alpha N + \beta Z)$$

$$\alpha = \frac{\Delta\mu_n}{T}, \beta = \frac{\Delta\mu_p}{T}$$

Multifragmentation
 $\alpha = 0.37, \beta = -0.40$
 Evaporation
 $\alpha = 0.60, \beta = -0.82$
 Deeply inelastic
 $\alpha = 0.74, \beta = -1.1$

ИЗОТОПИЧЕСКИЙ СКЕЙЛИНГ



$$^{124}\text{Sn} / ^{112}\text{Sn} (\Delta N = 12)$$

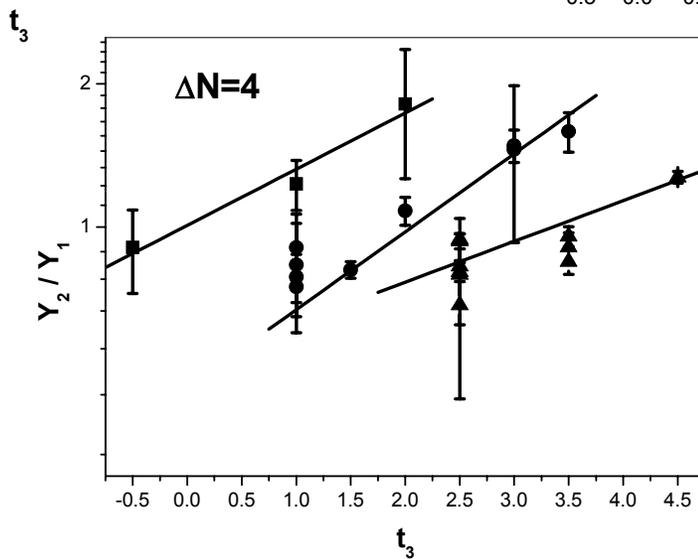
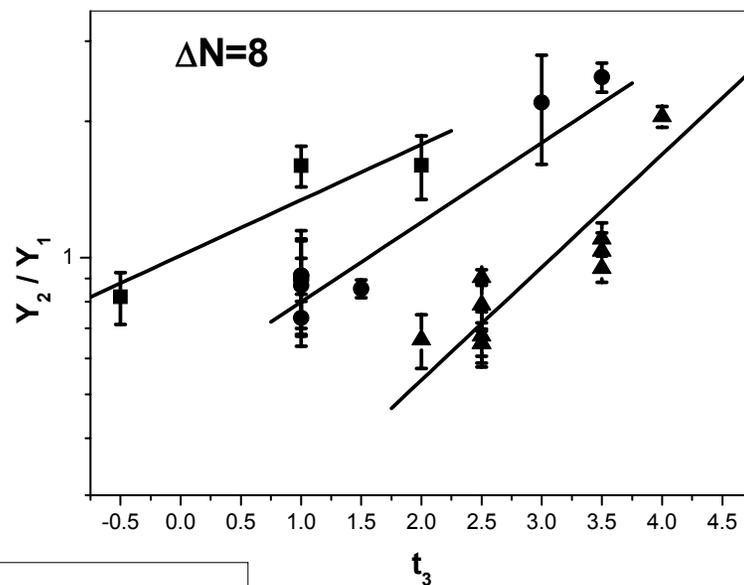
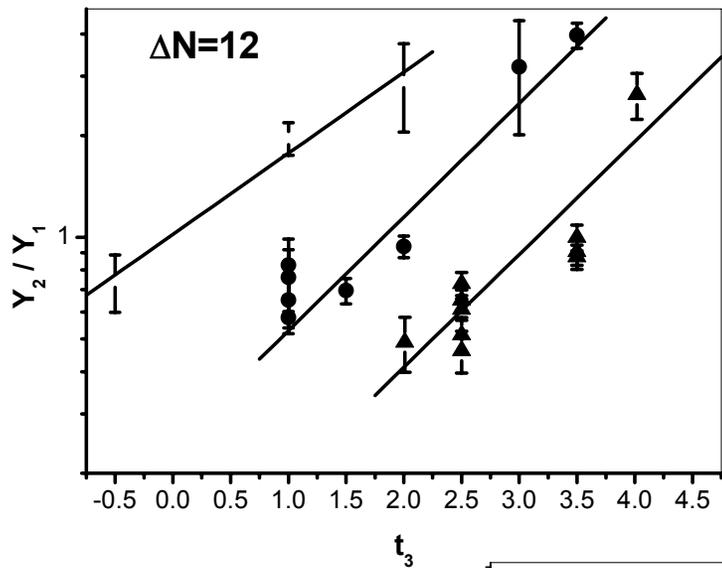
$$^{124}\text{Sn} / ^{118}\text{Sn} (\Delta N = 6)$$

$$^{124}\text{Sn} / ^{120}\text{Sn} (\Delta N = 4)$$

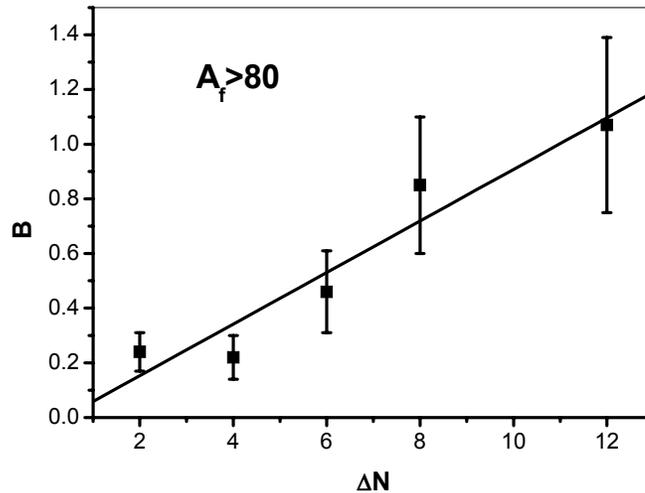
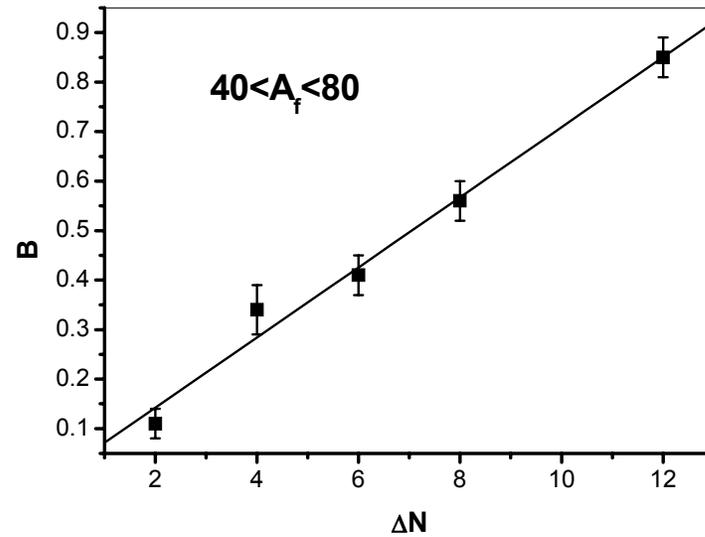
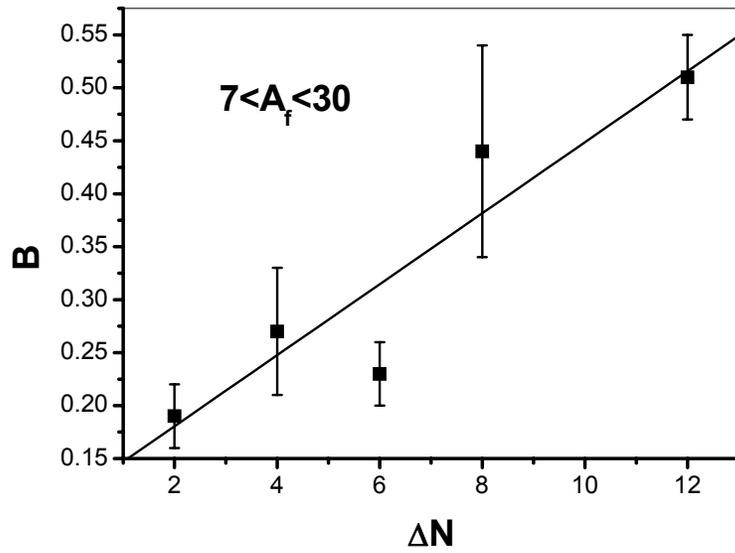
$$^{120}\text{Sn} / ^{118}\text{Sn} (\Delta N = 2)$$

$$R_{21} = \exp(C + Bt_3)$$

ИЗОТОПИЧЕСКИЙ СКЕЙЛИНГ



Параметры В для разных массовых областей

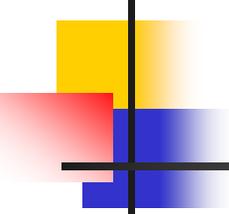


Параметр В ($E_p=3.65$ GeV)

Ядра-продукты	$\Delta N = 2$	$\Delta N = 4$	$\Delta N = 6$	$\Delta N = 8$	$\Delta N = 12$
$7 \leq A \leq 30$	0.19 ± 0.03	0.27 ± 0.06	0.23 ± 0.03	0.44 ± 0.10	0.51 ± 0.04
$40 \leq A \leq 60$	0.11 ± 0.03	0.34 ± 0.05	0.41 ± 0.04	0.56 ± 0.04	0.85 ± 0.04
$70 \leq A \leq 80$	0.18 ± 0.05	0.25 ± 0.13	0.36 ± 0.09	0.51 ± 0.10	0.78 ± 0.21
$^{81-86}Rb$	0.25 ± 0.02	0.32 ± 0.04	0.66 ± 0.02	0.62 ± 0.15	0.94 ± 0.20
$^{93-96}Tc$	0.24 ± 0.07	0.22 ± 0.08	0.46 ± 0.15	0.85 ± 0.25	1.07 ± 0.32

Параметр В ($E_d=3.65$ GeV/A)

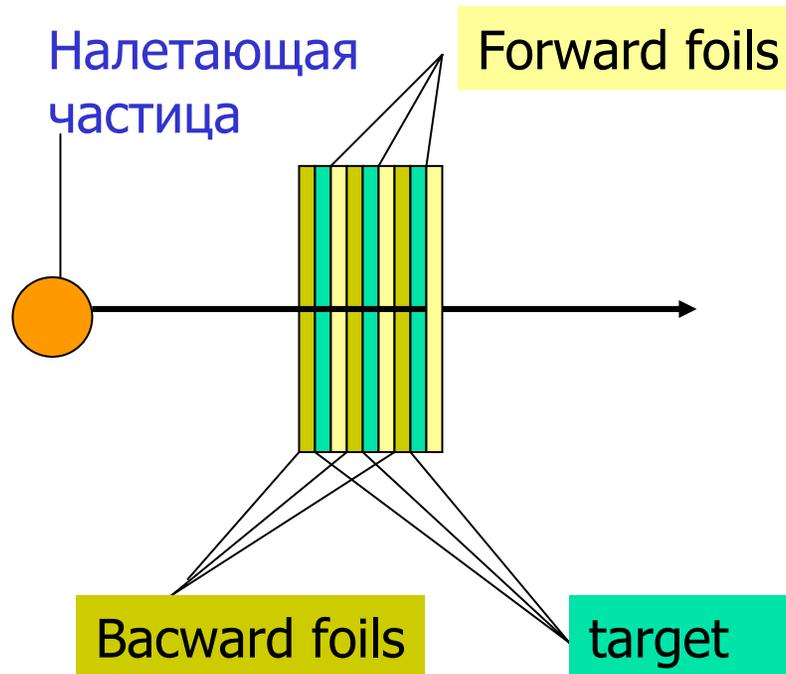
Ядра-продукты	$\Delta N = 4$	$\Delta N = 6$	$\Delta N = 8$	$\Delta N = 12$
$7 \leq A \leq 30$	0.27 ± 0.05	0.26 ± 0.05	0.28 ± 0.12	0.55 ± 0.07
$40 \leq A \leq 60$	0.38 ± 0.1	0.41 ± 0.09	0.41 ± 0.10	0.78 ± 0.14
$70 \leq A \leq 80$	0.19 ± 0.07	0.5 ± 0.1	0.57 ± 0.14	0.77 ± 0.19
$^{81-86}Rb$	0.30 ± 0.08		0.87 ± 0.22	1.17 ± 0.29
$^{93-96}Tc$	0.15 ± 0.08	0.48 ± 0.30	0.51 ± 0.07	1.10 ± 0.40



Выводы

- Впервые наблюдался изоскейлинг для разных пар мишеней ($\Delta N = 12, 8, 6, 4, 2$).
- Изоскейлинг наблюдался как для легких продуктов $7 \leq A_f \leq 40$, так и для продуктов в средней массовой области $40 \leq A_f \leq 80$.
- Получены параметры изоскейлинга для всех массовых областей остаточных ядер.

Исследование угловых распределение остаточных ядер в протон и дейтрон ядерных реакциях(3.65ГэВ/нуклон)

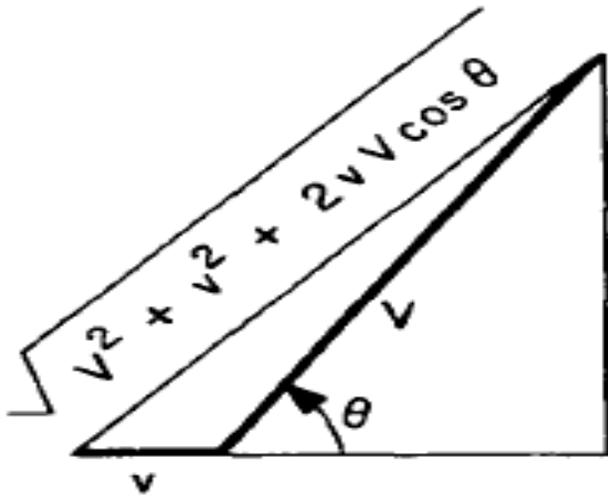


Метод регистрации улавливающих фольг

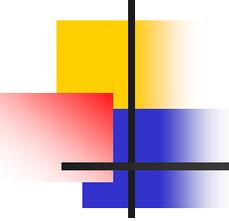
$$F = \frac{N_F}{N_t + N_F + N_B}$$

$$B = \frac{N_B}{N_t + N_F + N_B}$$

Двухступенчатая векторная модель (N.Sugarman, L.Winsberg)



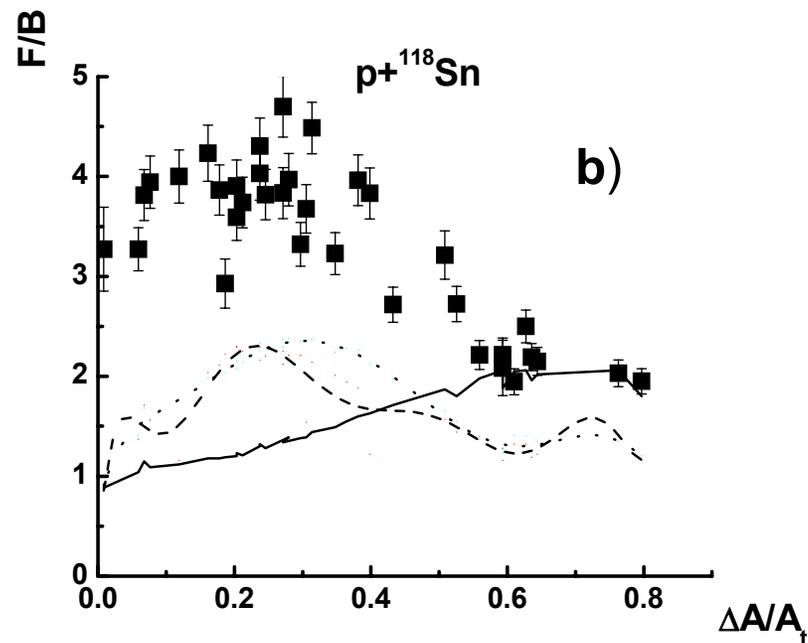
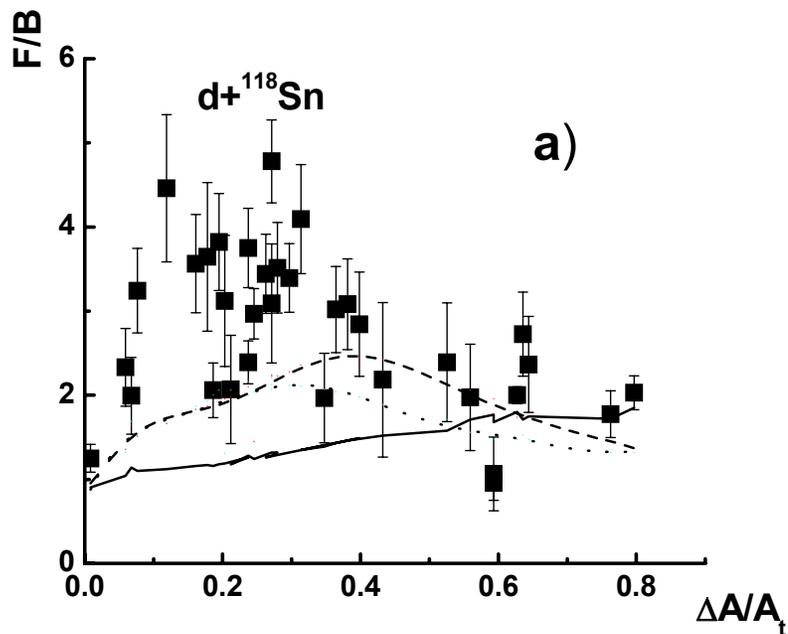
- В первой стадии частица, взаимодействуя с ядром, образует возбужденное ядро со скоростью v_I с импульсом P_{II} и с энергией возбуждения E^* .
- Во второй стадии возбужденное ядро, теряя массу и энергию, приобретает форму ядра отдачи которое движется со скоростью V , имеющий распределение по величине и по направлению.



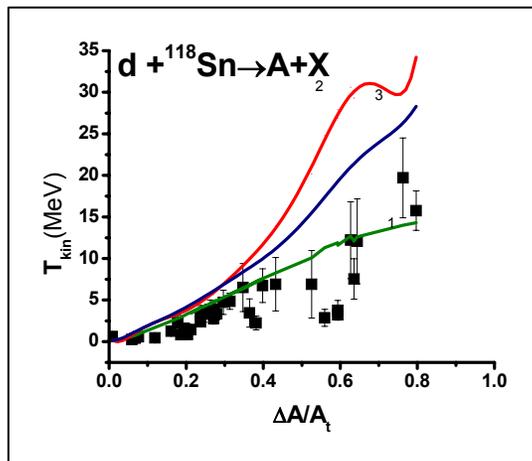
В рамках двухступенчатой векторной модели получены:

- Пробег остаточного ядра в материале мишени (R).
- Скорость и кинетическая энергия остаточного ядра ($V, T_{\text{кин}}$).
- Скорость и передаваемый импульс послекаскадного ядра (v, P_{II}).
- Энергия возбуждения послекаскадного ядра (E^*).

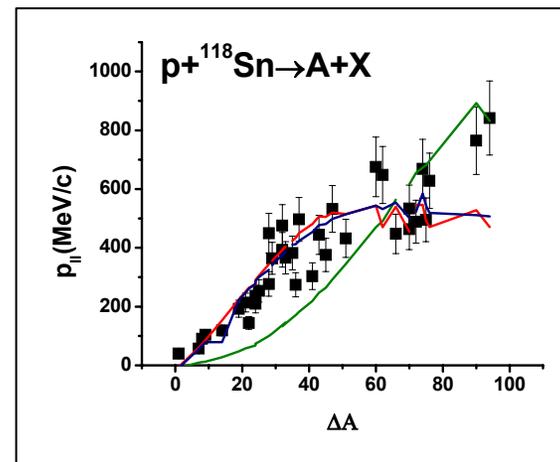
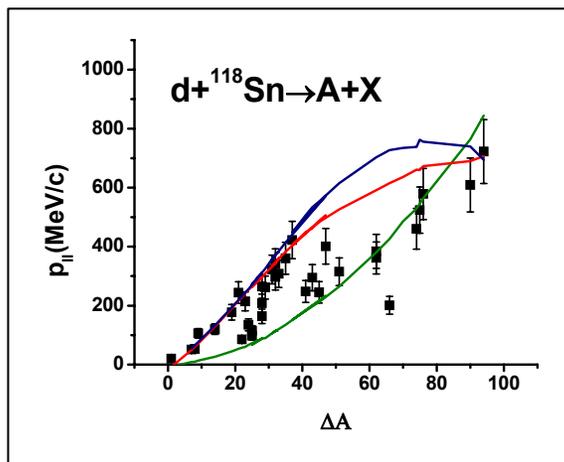
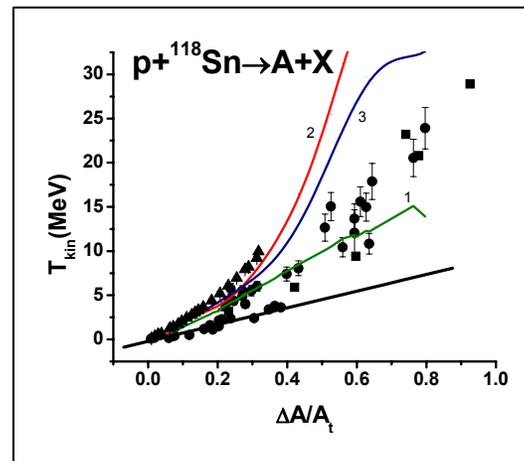
Исследование угловых распределение остаточных ядер в протон и дейтрон ядерных реакциях(3.65ГэВ/нуклон)



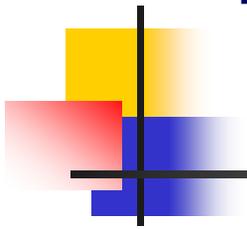
Кинематические характеристики ядер отдачи



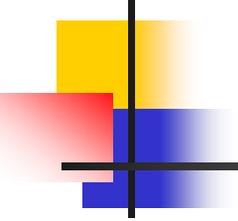
— LAQGSM.S1
— LAQGSM.G1
— LAQGSM.1



Температура послекаскадного ядра и коэффициент асимметрии


$$\alpha = B/2 = \frac{4\gamma}{T} \left[\left(\frac{Z_1}{A_1} \right)^2 - \left(\frac{Z_2}{A_2} \right)^2 \right]$$

	d	p	γ (МэВ)
$7 \leq A \leq 40$	$T \sim 7 \text{ MeV}$	$T \sim 6.83 \text{ MeV}$	~ 13 (теор. ~ 15)
$40 \leq A \leq 80$	$T \sim 4.88 \text{ MeV}$	$T \sim 5.86 \text{ MeV}$	~ 15.9
$80 \leq A \leq 110$	$T \sim 2.36 \text{ MeV}$	$T \sim 3.76 \text{ MeV}$	(теор. = 25)



Выводы

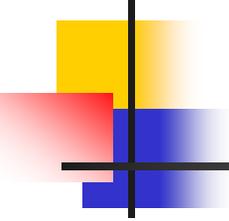
- Сравнение передаваемых продольных импульсов на нуклоне указывает более эффективную передачу импульсов протонами, чем дейтронами.
- Изменение наклона зависимости передаваемых продольных импульсов от числа испущенных нуклонов указывает на вклад механизма мультифрагментации в образование среднетяжелых продуктов ($40 \leq A \leq 80$).
- Сделана оценка температуры послекаскадного возбужденного ядра, что хорошо согласуется с теоретическими предсказаниями.

Глава III

Ядерные реакции на тяжелых радиоактивных ядрах

В третьей главе исследуются ядерные реакции под действием 660 МeВ-ных протонов на радиоактивных ядрах ^{129}I , ^{237}Np , ^{241}Am .

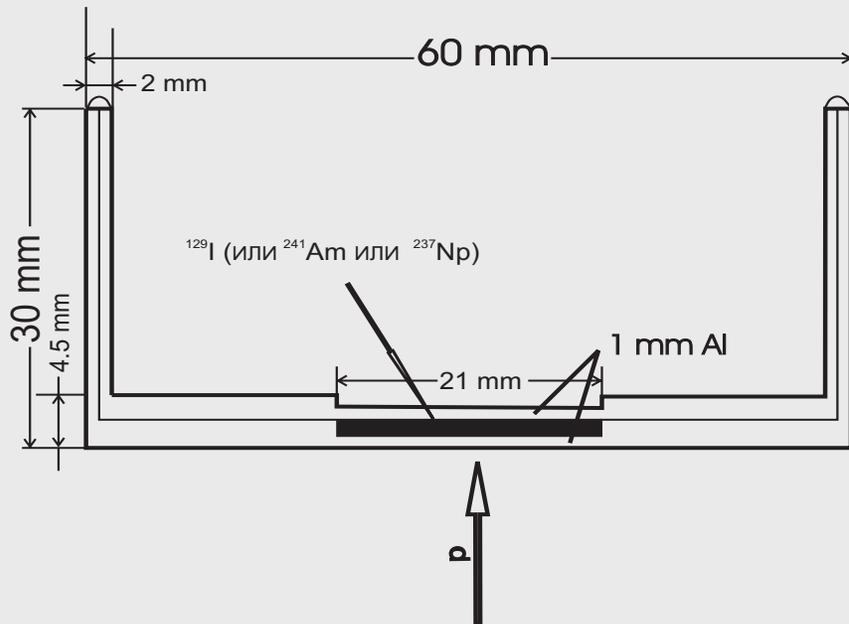
Некоторые радиоактивные отходы U, Pu, ⁹⁹Tc, ¹²⁶Sn, ⁹³Sr, ¹³⁵Cs,
¹²⁹I, ⁷⁹Se. ²³⁷Np and ²⁴¹Am



²⁴¹Am ($T_{1/2}=432.2$ years) Высокая радиоактивность.

²³⁷Np ($T_{1/2}=2.144 \cdot 10^6$ years) – преобладание по массе в отходах и повышенная миграционная способность в биосфере

¹²⁹I ($T_{1/2}=1.57 \cdot 10^6$ years) – повышенная миграционная способность



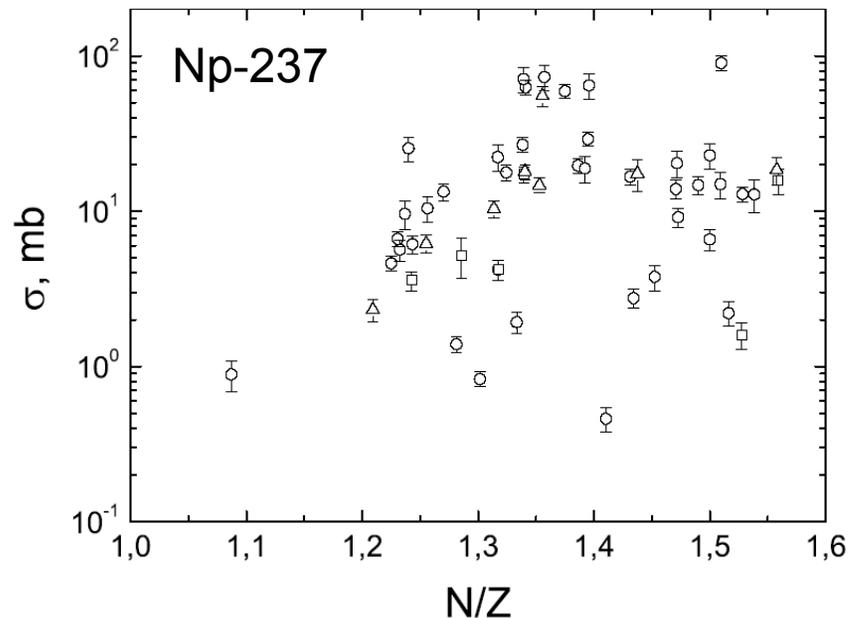
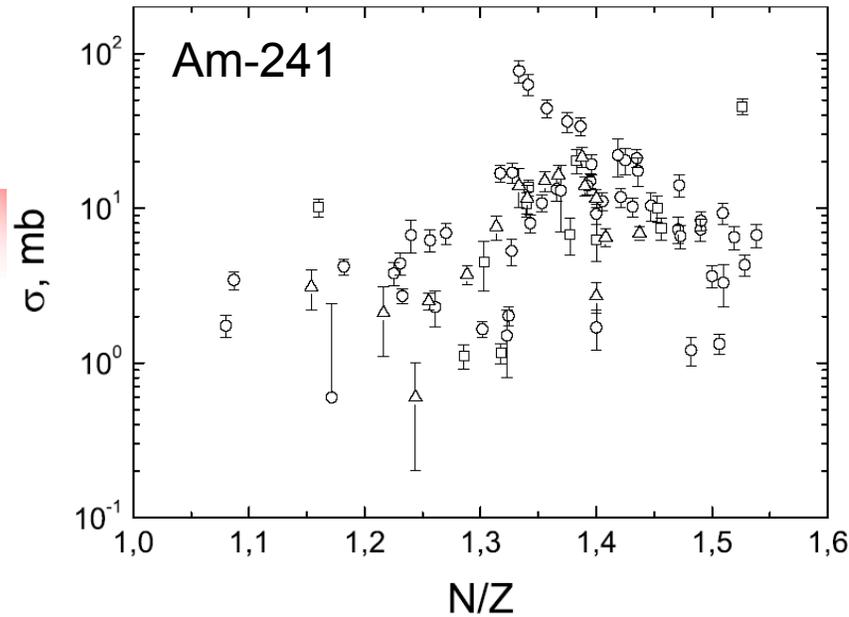
NpO₂, AmO₂, NaI (15% ¹²⁷I + 85% ¹²⁹I).
 Мишени были изготовлены в INPE, Обнинск
 E_p = 660 MeV, I_p = 1.2 μA, масса Al = 79 gm.

Для мониторинга протонного пучка использовалась реакция ²⁷Al(p, 3pn)²⁴Na, with 99 mg mass of Al.

Основные характеристики

Мишени	²³⁷ Np ₉₃		²⁴¹ Am ₉₅		¹²⁹ I ₅₃	
	T _{1/2} , годы	2.144(7) 10 ⁶		432.2(7)		15.7(4) 10 ⁶
Вес (грамм)	0.742	0.742	0.177	0.183	0.5	0.5
Толщина, мм	0.193	0.193	0.043	0.044	0.395	0.395
Активность, мК	0.523	0.523	601	621	0.063	0.063
Интенсивность пучка 10 ¹⁴ p/мин	2.64	2.66	2.72	2.58	2.68	2.68
Время облучения минуты	5	30	5	30	5	30

2. Experimental results. Dependence of cross-sections on residual nuclei.



Identification of γ -lines:

>2800 in ^{129}I , >1000 in ^{241}Am , >500 in ^{237}Np .

Identification of products:

74 in ^{129}I , 80 in ^{241}Am , 53 in ^{237}Np

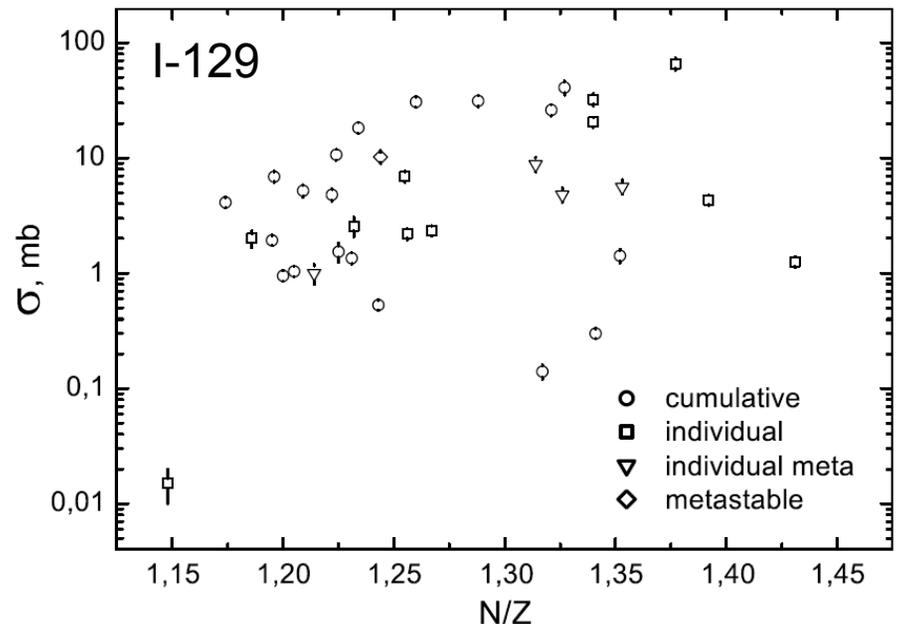
Results are given in tables.

$T_{1/2}$ of products:

from 3.49 min (^{114}Sb) to 252.2 d ($^{110\text{m}}\text{Ag}$)

$N/Z(^{129}\text{I})=1.434$, $N/Z(^{237}\text{Np})=1.548$,

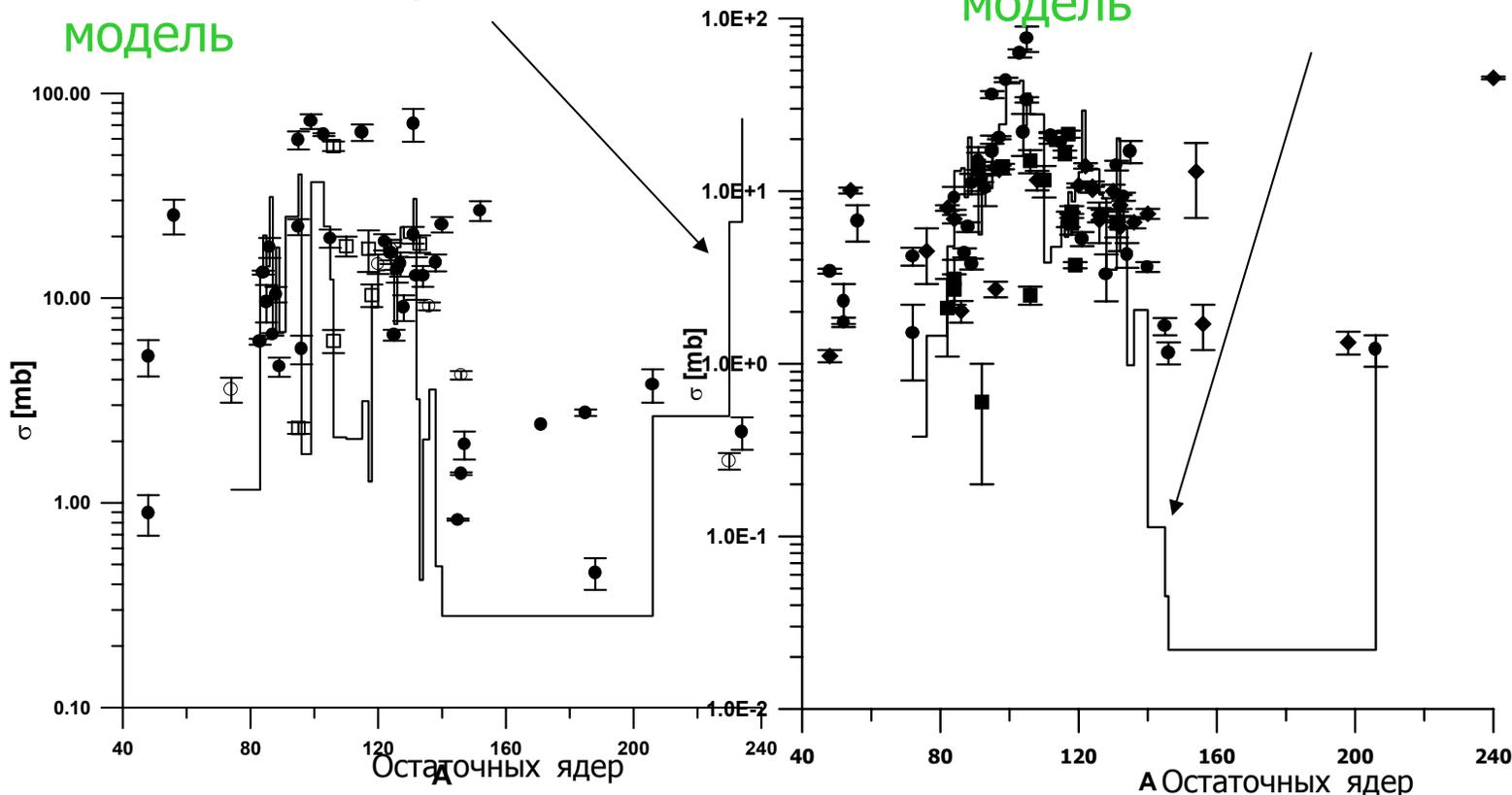
$N/Z(^{241}\text{Am})=1.537$



Сечения образования в зависимости от масс остаточных ядер для мишени ^{237}Np и ^{241}Am .

Каскадно-испарительная модель

Каскадно-испарительная модель



Для ^{237}Np

Для ^{241}Am

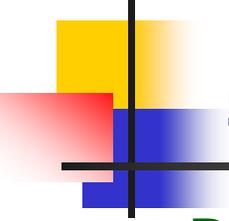
Оценка эффективности трансмутации

Полное
экспериментальное
Сечение неупругого
Взаимодействия
 $\sigma = 470 \text{ мбн}$

Полное сечение
 $\sigma_{\text{пол.}} = 1 \text{ барн}$

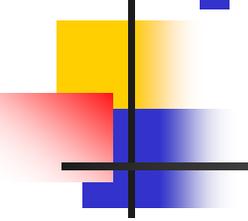
$\tau = 1 \text{ месяц}$
 $\phi = 10 \text{ МА}$
<<выжигание>>
 ^{129}I , ^{237}Np , ^{241}Am
5% (20 мг)

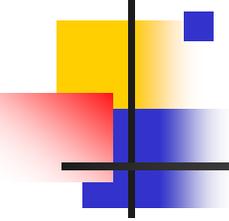
$A_0 = 0.293 \cdot 10^7 \text{ распад/с}$
После 30 дней $A = 9.8 \cdot 10^{12} \text{ распад/с}$
После 10 лет $A = 0.466 \cdot 10^7 \text{ распад/с}$
После 50 лет $A = 2.5 \cdot 10^2 \text{ распад/с.}$

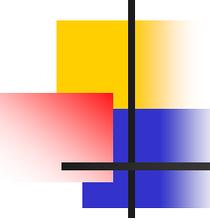


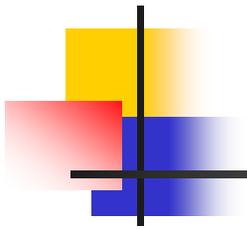
Заключение

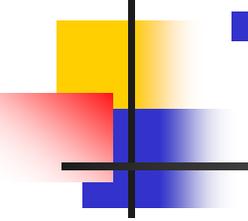
- Развита методика идентификации и определения сечений образования короткоживущих β -нестабильных продуктов ядерных реакций методом наведенной активности. Автоматизирован процесс обработки экспериментальных данных.
- Разработана методика для определения оптимальных параметров эксперимента по изучению ядер-продуктов находящихся в сложных цепочках распада.

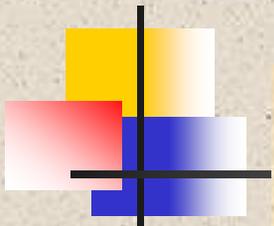
- 
- Впервые экспериментально исследованы процессы (p, xn) , (p, pxn) , (d, xn) и (d, pxn) на обогащенных изотопах олова $^{112}, ^{118}, ^{120}, ^{124}\text{Sn}$ при энергиях начального пучка 0.6, 1.0, 3.65, 8.1 ГэВ/нуклон. Изучены механизмы этих реакций.
 - Впервые исследованы изомерные отношения ≈ 10 ядер-остатков (^{95}Nb , $^{93,94,95}\text{Tc}$) из разделенных изотопов $^{112}, ^{118}, ^{120}, ^{124}\text{Sn}$.

- 
- Исследован характер изменения изомерных отношений сечений и показано, что результат (выход на плато) обусловлен присутствием нейтронного гало в тяжелых изотопах олова и процессом поглощения отрицательных вторичных пионов поверхностными квазидейтронами ($\pi^- + d \rightarrow n + n$).

- 
- Получены новые экспериментальные данные по сечениям образования ядер продуктов в массовой области $7 \leq A \leq A_t$ из обогащенных изотопов олова (^{112}Sn , ^{118}Sn , ^{120}Sn , ^{124}Sn) под действием протонов с энергиями 0.6, 1.0, 3.65, 8.1 ГэВ и дейтронов с энергией 3,65ГэВ/нуклон.
 - Впервые экспериментально исследованы кинематические характеристики ядер-отдачи в реакциях на ^{118}Sn под действием протонов и дейтронов с энергиями 3.65 ГэВ/нуклон.

- 
- Впервые был оценен вклад механизма мультифрагментации в образование продуктов в массовой области $40 \leq A \leq 80$.
 - Впервые исследовано явление изоскейлинга для разных массовых областях фрагментов ($7 \leq A \leq 40$, $40 \leq A \leq 80$, $81 \leq A \leq 96$) и для разных пар мишеней. Получено, что параметр изоскейлинга B чувствителен к механизму образования фрагментов.

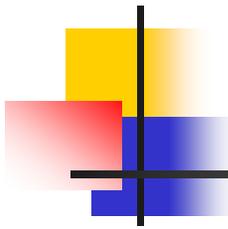
- 
- Впервые получены сечения образования ≈ 70 остаточных ядер из каждой радиоактивной мишени ^{129}I , ^{237}Np и ^{241}Am , соответственно, при облучении протонов с энергией 660 МэВ. Сделана оценка эффективности трансмутации на прямом пучке протонов.

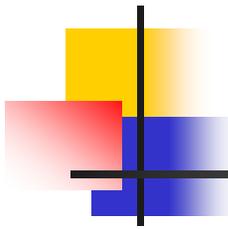


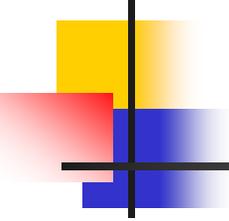
СПАСИБО ЗА
ВНИМАНИЕ!

- Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. V.E.Aleksandryan, G.S.Ivazyan, A.R.Balabekyan et al. *Ядерная Физика* **59** 21-25, 1996.
2. A.S.Danagulyan...A.R.Balabekyan et al. *Ядерная Физика* **60**, 965-969, 1997.
3. A.S.Danagulyan, J.Adam, A.R.Balabekyan et al. *Ядерная Физика* **63**, p. 204-208 (2000).
4. V.Aleksandryan, J.Adam, A.Balabekyan et al. *Nuclear Physics* **V.A674/3-4**, P.539-549, 2000.
5. J.Adam, V.S.Pronskikh, A.Balabekyan et al. *Измерительная Техника* **1**, 57-61 (2001).
6. J.Adam... A.Balabekyan et al. *Measurement Techniques* **44(1)**; 93-100 Jan (2001).
7. J.Adam, A.Balabekyan et al. *Journal of nuclear science and tecnology* **V.1** p.272-274 (2001) (Proceedings of the international conference on nuclear data for science and thechnology, October 7-12, 2001,Japan). (Abstr PAP AM ChEM S 221; 126-NUCL Part 2 APR 1 2001).

- 
8. J.Adam, A.Balabekyan et al. *Applied Radiation and Isotopes* **56/4**, 607-613 (2002).
 9. V.E.Aleksandryan, J.Adam, A.R.Balabekyan et al. *Ядерная Физика* **65** N5 p.776-784 (2002).
 - ~~10. J.Adam, A.Balabekyan et al. *Ядерная Физика* **65** N5 p.797-809 (2002).~~
 11. V.S.Pronskikh, J.Adam, A.Balabekyan et al. Workshop on Nuclear Data for the Transmutation of Nuclear Waste. GSI-Darmstadt, September 1-5, 2003, ISBN 3-00-012276-1, P001.
 12. J.Adam, A.Balabekyan et al. *Письма в ЭЧАЯ (Particles and Nuclei, Letters)* 2004, V.**1**, 4(121) p. 53-64.
 13. A.Balabekyan A.S.Danagulyan et al. *Nuclear Physics A* **735/1-2** p.267-276 (2004).
 14. A. R. Balabekyan, A. S. Danagulyan et al. *Ядерная Физика* **68**, 195-200 (2005).

- 
15. J.Adam, A.Balabekyan et al. Письма в ЭЧАЯ (Particles and Nuclei, Letters) 2005, V.**2**, 6(129) p.25-39.
 16. A.R.Balabekyan, A.S.Danagulyan et al. Ядерная Физика **69** N9 p.1-11 (2006).
 - ~~17. A.R.Balabekyan Известия АН РА серия Физика **41** N6, 445-449 (2006).~~
 18. A.R.Balabekyan Ученые Записки ЕГУ **3**, 36-39 (2006).
 19. A.R.Balabekyan Ученые Записки ЕГУ **2**, 70-73 (2006).
 20. A.R.Balabekyan, A.S.Danagulyan et al. Ядерная Физика **70** N11 1-9 (2007) .



$$R = K V^n$$

$$F W = \frac{1}{4} R \left[1 + \frac{2}{3} (n + 2) \eta + \frac{1}{4} (n + 1)^2 \eta^2 \right]$$

$$B W = \frac{1}{4} R \left[1 - \frac{2}{3} (n + 2) \eta + \frac{1}{4} (n + 1)^2 \eta^2 \right]$$

$$\eta = \frac{v}{V}$$

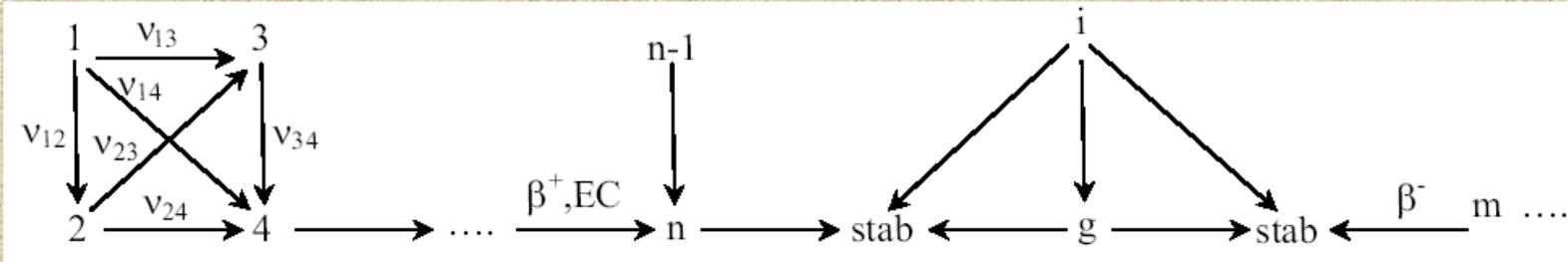
$$\frac{F}{B} = \frac{1 + \frac{2}{3} (n + 2) \eta + \frac{1}{4} (n + 1)^2 \eta^2}{1 - \frac{2}{3} (n + 2) \eta + \frac{1}{4} (n + 1)^2 \eta^2}$$

$$R = \frac{2 W (F + B)}{1 + \frac{1}{4} (n + 1)^2 \eta^2}$$

$$E^* = 3.253 \cdot 10^{-2} k' A_t v [T_p / (T_p + 2)]^{0.5}$$

2. Comparison of experimental and calculation results. Cumulative cross-sect.

Isobar chain (A=const.) for beta decaying RN:



The generalized formula for cumulative CS:

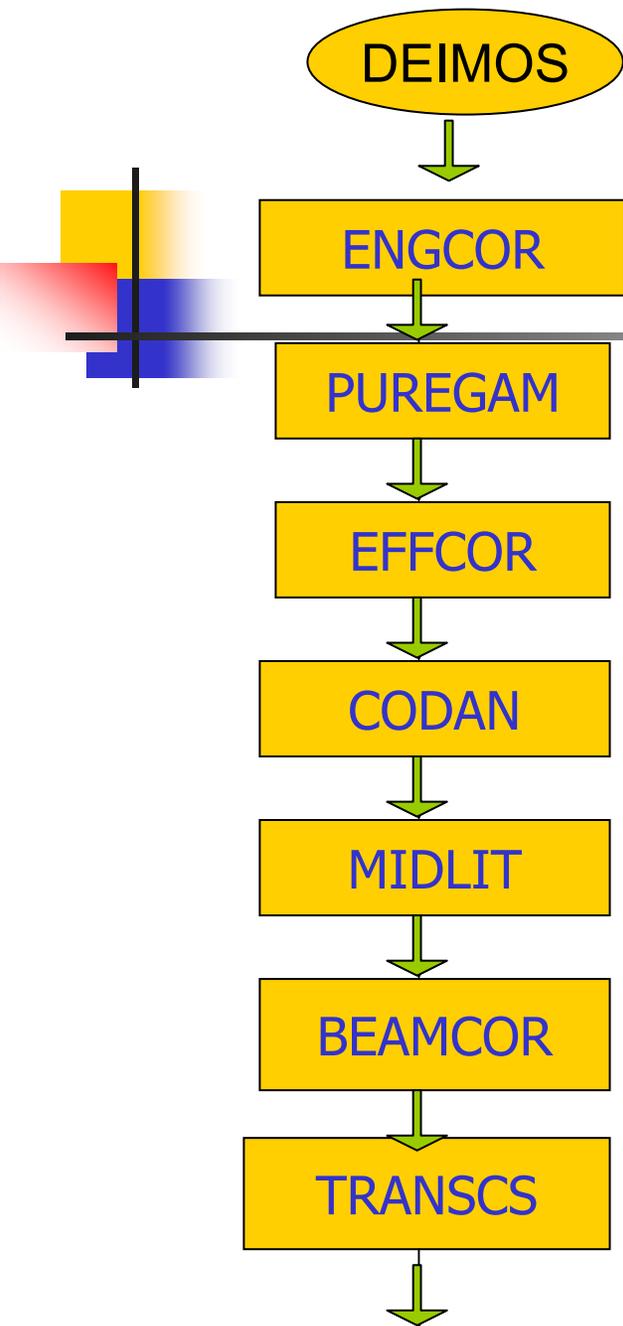
$$\sigma_n^{cum} = \sigma_n^{ind} + \sum_{m=1}^{n-1} B_{mn} \sigma_m^{ind} \quad \begin{array}{l} \nu_{mn} \equiv 0 \text{ при } n-m > 3 \text{ для нечетных } m \\ \nu_{mn} \equiv 0 \text{ при } n-m > 2 \text{ для четных } m \end{array}$$

$$B_{mn} = \nu_{mn} + \sum_{l_1 > m}^{n-1} \nu_{ml_1} \nu_{l_1 n} + \sum_{l_2 > l_1}^{n-1} \sum_{l_1 > m}^{n-2} \nu_{ml_1} \nu_{l_1 l_2} \nu_{l_2 n} + \dots$$

R.Michel' factor for comparison of experimental and calculation CS:

$$\langle F \rangle = 10^{**} \sqrt{\langle (\log \sigma^{cal} - \log \sigma^{exp})^2 \rangle}$$

$$S(\langle F \rangle) = 10^{**} \sqrt{\left\langle \left(\left| \log \left(\frac{\sigma_{cal}^i}{\sigma_{exp}^i} \right) \right| - \log(\langle F \rangle) \right)^2 \right\rangle}$$



Вход: $N_\gamma(i)_{\text{Deimos}} \quad N_\gamma(i) \rightarrow E_\gamma(i)$

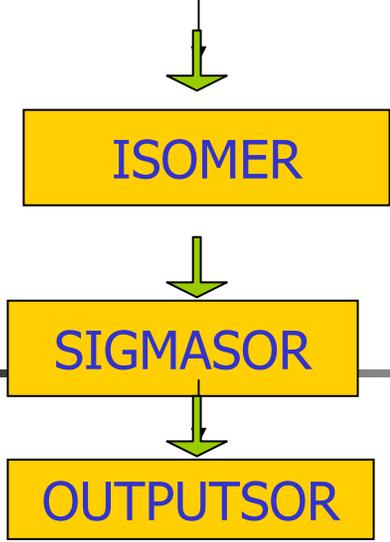
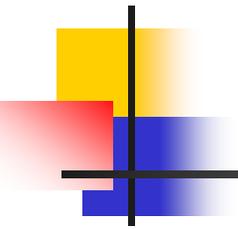
$$\frac{I_\gamma^{\text{SEP,DEP}}}{I_\gamma} = \exp\left(\sum_{i=0}^4 a_i ((\ln(E_\gamma))^i)\right)$$

$$K = \frac{I_\gamma^{\text{lit}} \cdot I_{\gamma,\text{max}}^{\text{exp}}}{I_\gamma^{\text{exp}} \cdot I_{\gamma,\text{max}}^{\text{lit}}}; \quad I_\gamma^{\text{lim}}; \quad K \leq 1$$

$$I_\gamma^n = S_\gamma^n / \exp\left(\sum_{i=0}^8 b_i ((\ln(E_\gamma))^i)\right)$$

$$B = \frac{N_B (1 - e^{-\lambda t})}{\sum W(i) e^{-\lambda t_e(i)} (1 - e^{-\lambda t_p(i)})}$$

$$\sigma_a(E_\gamma^j) = \frac{S_i(E_\gamma^j) \lambda_a t_{3,r}}{N_p N_t \varepsilon_\gamma I_\gamma(E_\gamma^j) (1 - e^{-\lambda_a t_1}) e^{-\lambda_a t_2} (1 - e^{-\lambda_a t_{3,r}}) t_{3,l}}$$



$$S_{\gamma}(E_{\gamma}^i) = \left\{ \begin{array}{l} Ae^{-\lambda_a t_2(i)} (1 - e^{-\lambda_a t_{3,r}(i)}) + \\ + Be^{-\lambda_b t_2(i)} (1 - e^{-\lambda_b t_{3,r}(i)}) \end{array} \right\} \frac{t_{3,l}(i)}{t_{3,r}(i)}$$

сортирует сечения по нуклидам и по энергиям γ -лучей.

усредняет сечения для каждого нуклида по всем измерениям.

Grand Canonicity: density of fragments with mass A and charge Z in nuclear matter

$$\langle \rho_{AZ} \rangle = g_{AZ} \frac{V_f A^{3/2}}{V \lambda_T^3} \exp \left[-\frac{1}{T} (F_{AZ} - \mu A - \xi Z) \right]$$

Total density $\rho = M/V = \sum \langle \rho_{AZ} \rangle$, M is number of nucleons and V is volume of the system. Excluded 'free' volume, V_f .

g_{AZ} is the degeneracy of fragments, $\lambda_T = ((2\pi\hbar^2)/(m_N T))^{1/2}$ is the nucleon thermal wavelength.

μ and ξ are the chemical potentials for the nucleon number and charge conservation in the system.

Free energy of fragments:

$$F_{AZ} = F_{AZ}^B + F_{AZ}^S + E_{AZ}^C + E_{AZ}^{sym}$$

$$\text{Bulk energy: } F_{AZ}^B = (-W_0 - T^2/\epsilon_0)A,$$

$W_0 = 16$ MeV is the binding energy of nuclear matter, and $\epsilon_0 = 16$ MeV is the inverse level density.

Surface energy: $F_{AZ}^S = B_0 A^{2/3} ((T_c^2 - T^2)/(T_c^2 + T^2))^{5/4}$, $B_0 = 18$ MeV is the surface coefficient, and $T_c = 18$ MeV is the critical temperature of nuclear matter.

$$\text{Coulomb energy: } E_{AZ}^C = cZ^2/A^{1/3},$$

in the Wigner-Seitz in the case of electro-neutrality

$$c = (3/5)(e^2/r_0)(1 - 1.5(\rho/\rho_0)^{1/3} + 0.5(\rho/\rho_0)), \text{ with } r_0 = 1.17 \text{ fm.}$$

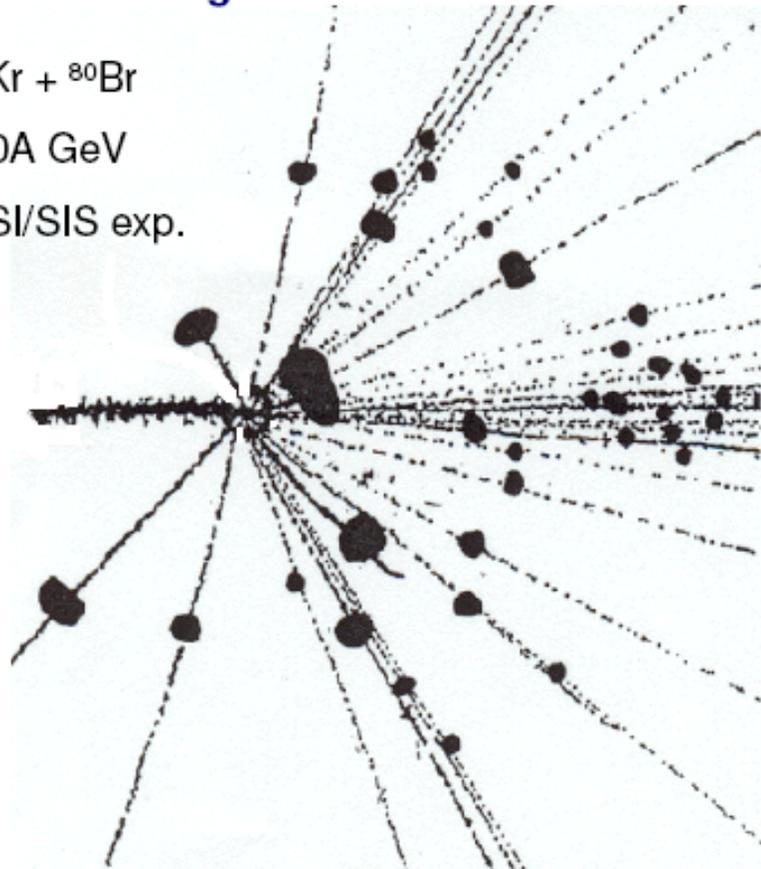
$$\text{Symmetry energy: } E_{AZ}^{sym} = \gamma(A - 2Z)^2/A,$$

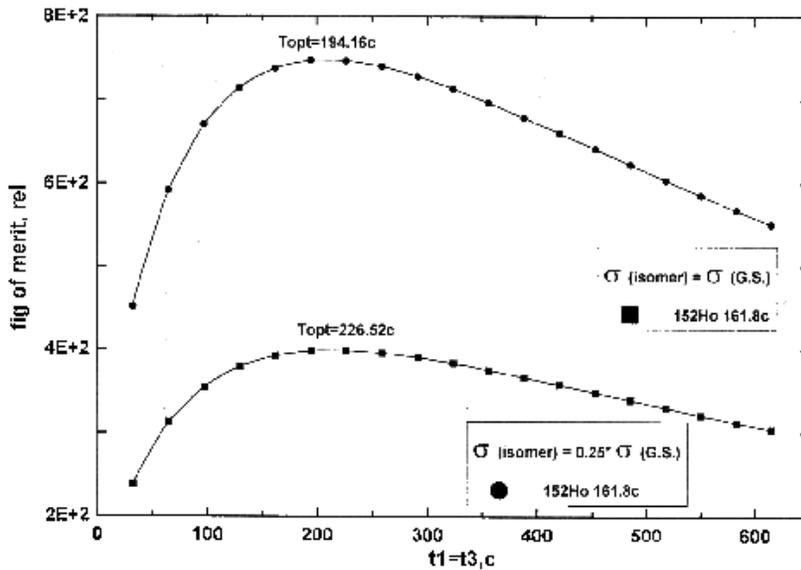
$\gamma = 25$ MeV is the symmetry energy parameter.

”Multifragmentation” was first observed in p-nucleus collisions, [*O.V. Lozhkin, N.A. Perfilov, Zh. Eksp. Teor. Fiz. 31 (1962) 913*], in **nucleus-nucleus collisions** (participant breakup) in a Bevalac experiment in 1977, [*B.Jakobsson et al., Z. Physik A 307 (1982) 293*], all with **nuclear emulsion technique**.

Multifragmentation

$^{86}\text{Kr} + ^{80}\text{Br}$
1.0A GeV
GSI/SIS exp.





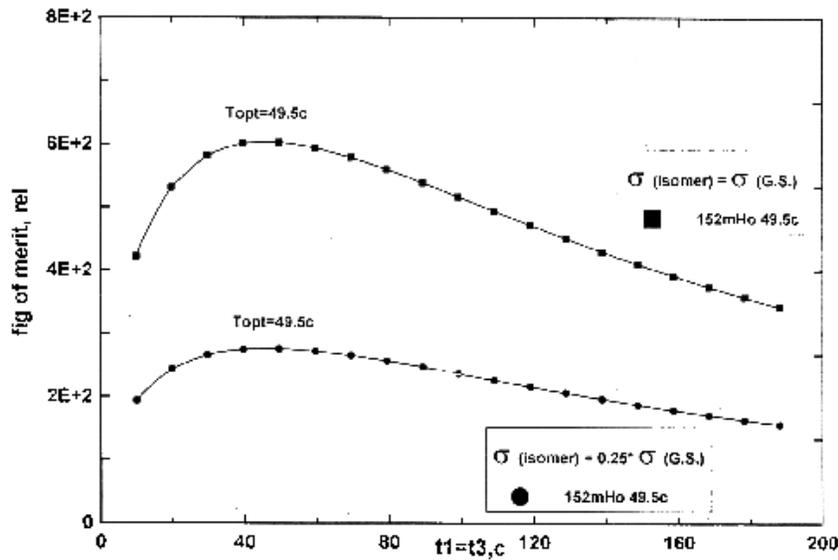
$$K_e = \frac{R_j(t_3)}{\sqrt{R_j(t_3) + 2R_f(t_3)}} \sqrt{c} \sqrt{k}$$

$$N = kR_j(t_3)$$

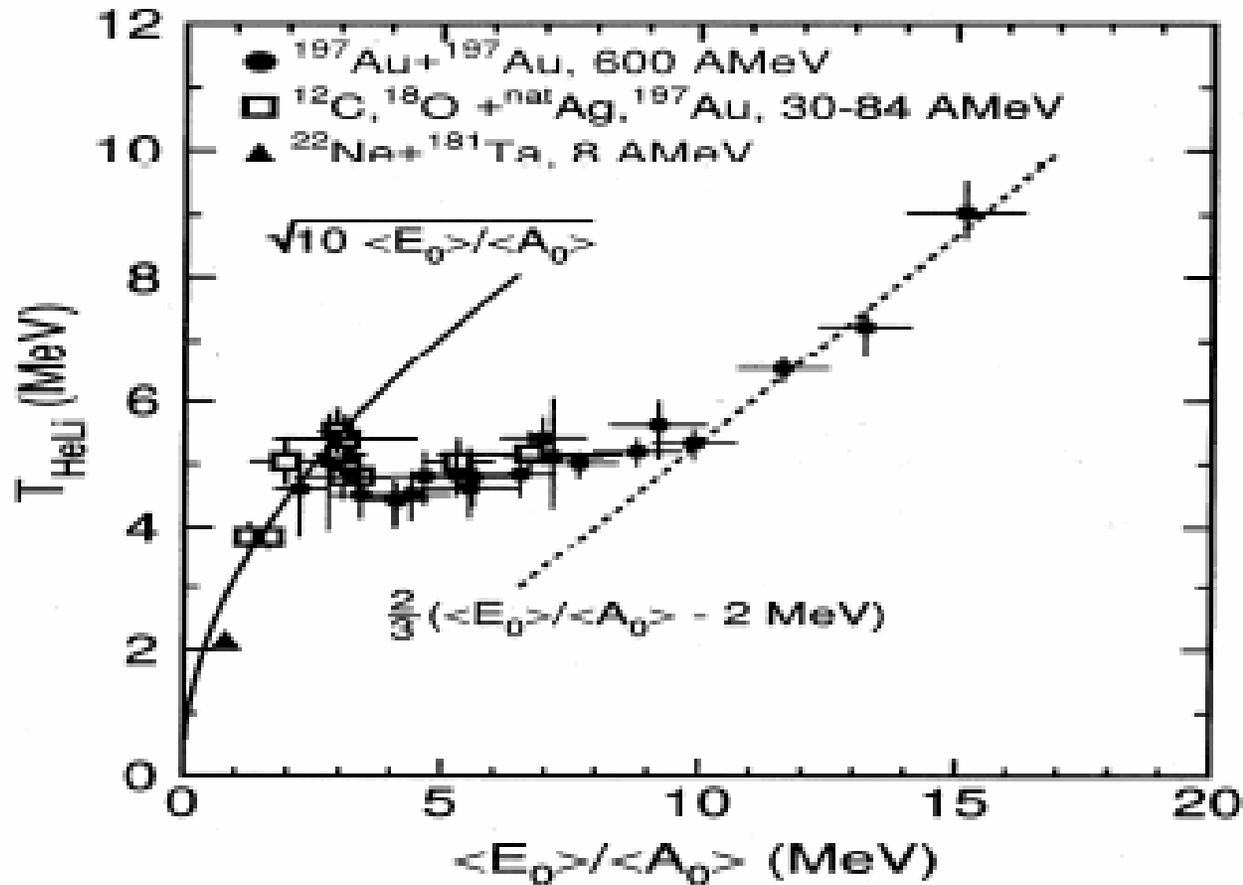
$$\phi = kR_f(t_3)$$

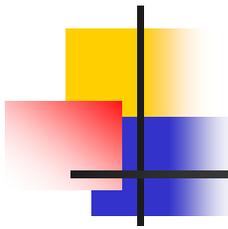
$$T = N + \phi$$

$$R_f(t_3) = R_A(t_3) + R_B(t_3) + R_C(t_3)$$



The caloric curve

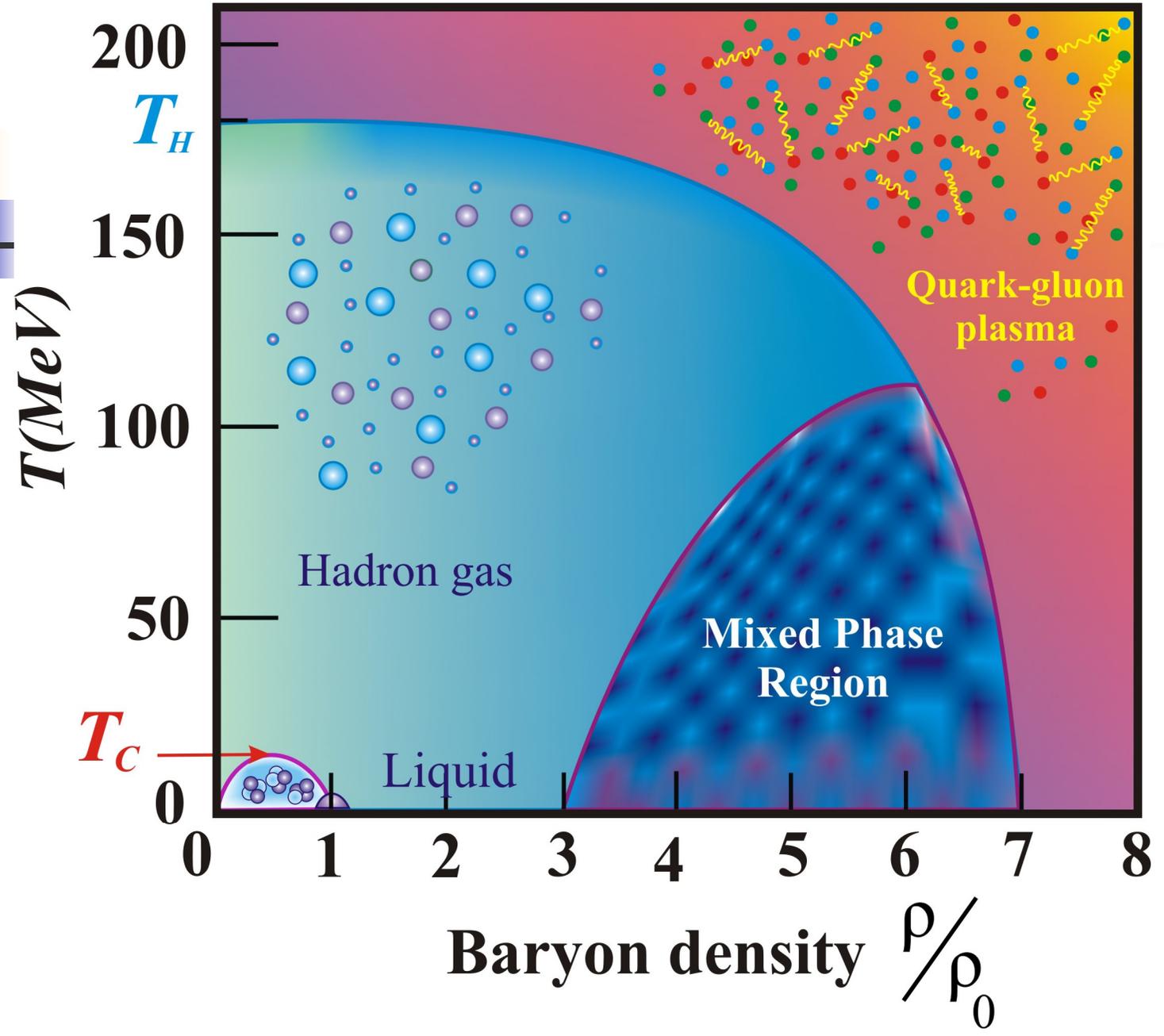
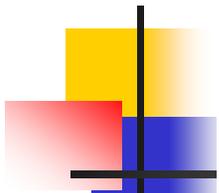


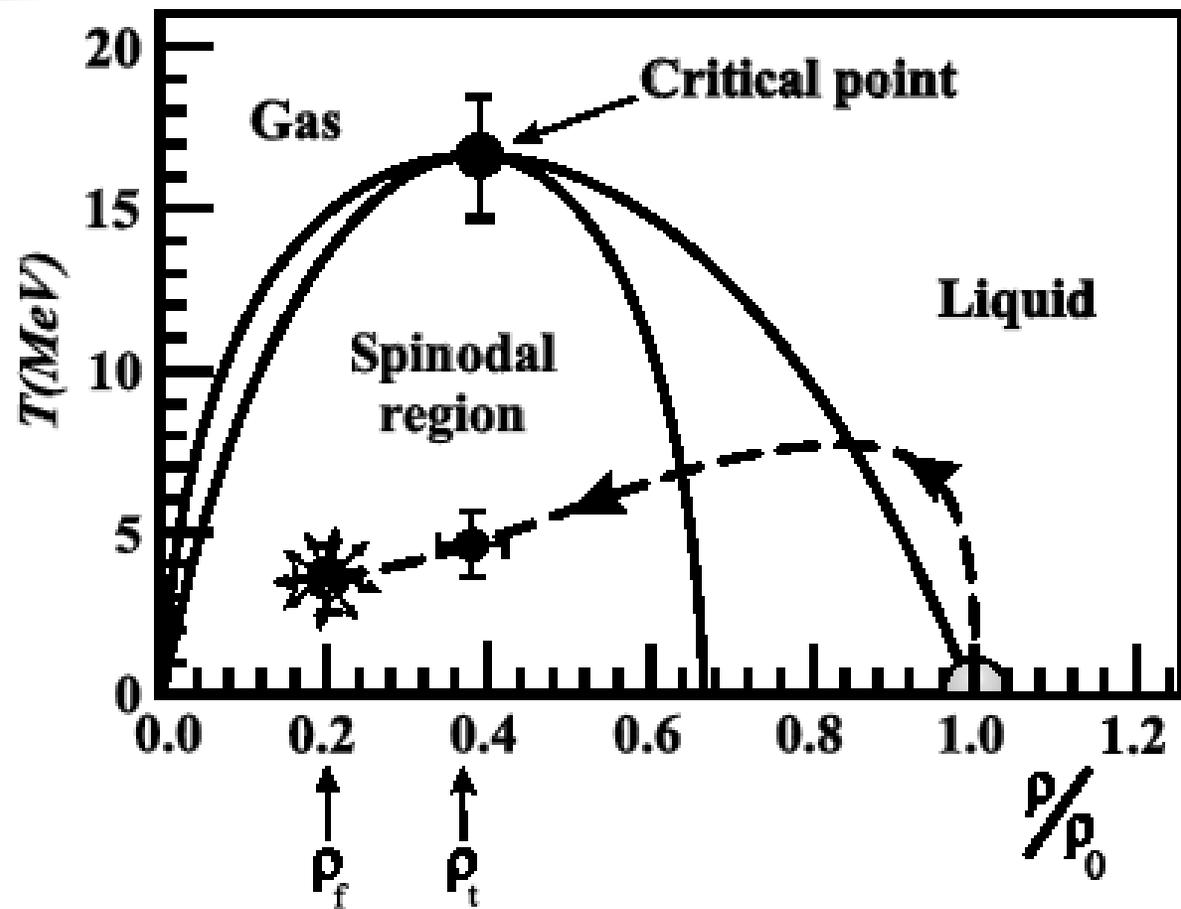
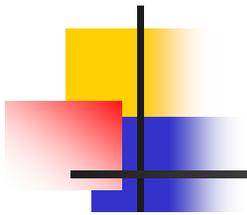


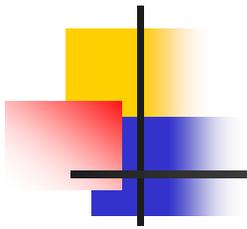
Свободная энергия фрагмента состоит из полной энергии, поверхностной энергии, кулоновской энергии и энергии симметрии:

$$F_{AZ} = F_{AZ}^B + F_{AZ}^S + E_{AZ}^C + E_{AZ}^{Sym}$$

$$E_{AZ}^{Sym} = \gamma(A - 2Z)^2 / A$$






$$\Delta_N^2 = \Delta_T^2 + \Delta_\phi^2$$

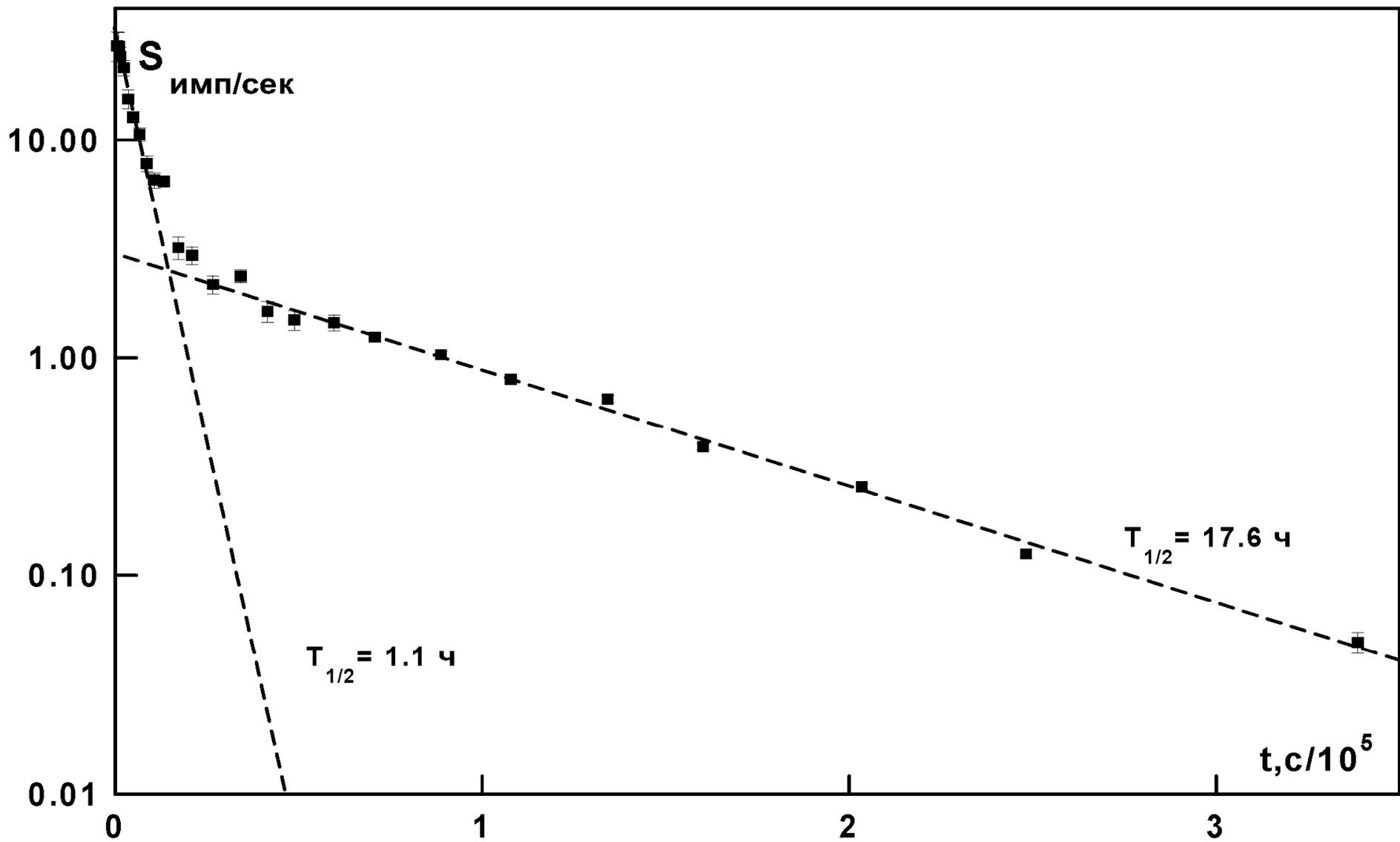
$$\Delta_T = \sqrt{k[R_j(t_3) + R_f(t_3)]c}$$

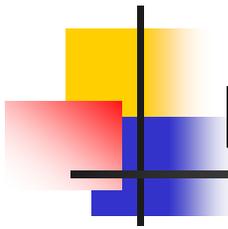
$$\Delta_f = \sqrt{kR_f(t_3)c}$$

$$\frac{\Delta_N}{N}$$

$$K_e = \frac{R_j(t_3)}{\sqrt{R_j(t_3) + 2R_f(t_3)}} \sqrt{c} \sqrt{k}$$

Выход программы CODAN





В диссертации исследованы:

Реакции с
образованием
Фрагментов,
Мульти-
фрагментация

Образование
Высокоспиновых
Состояний
продуктов

Реакции
Глубокого
расщепления

Прстые реакции,
реакции
перезарядки

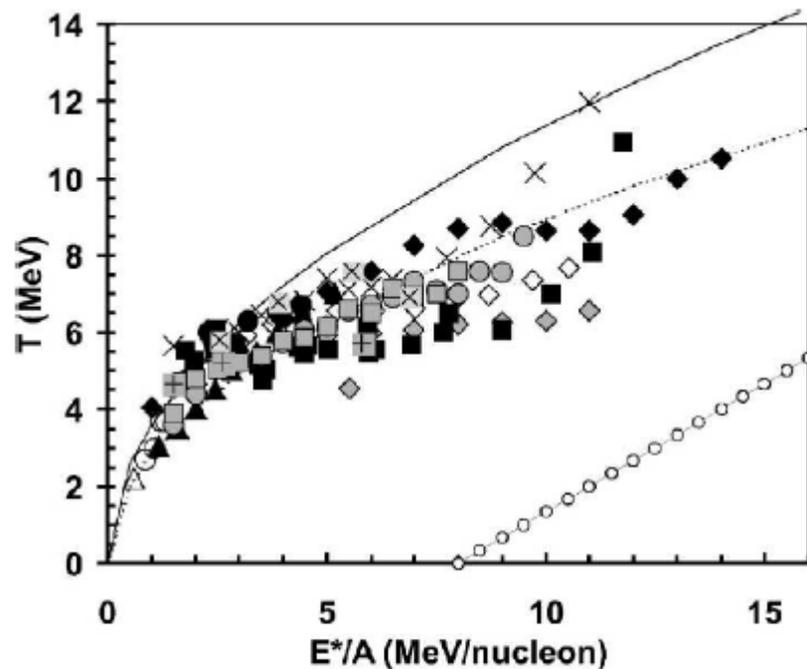
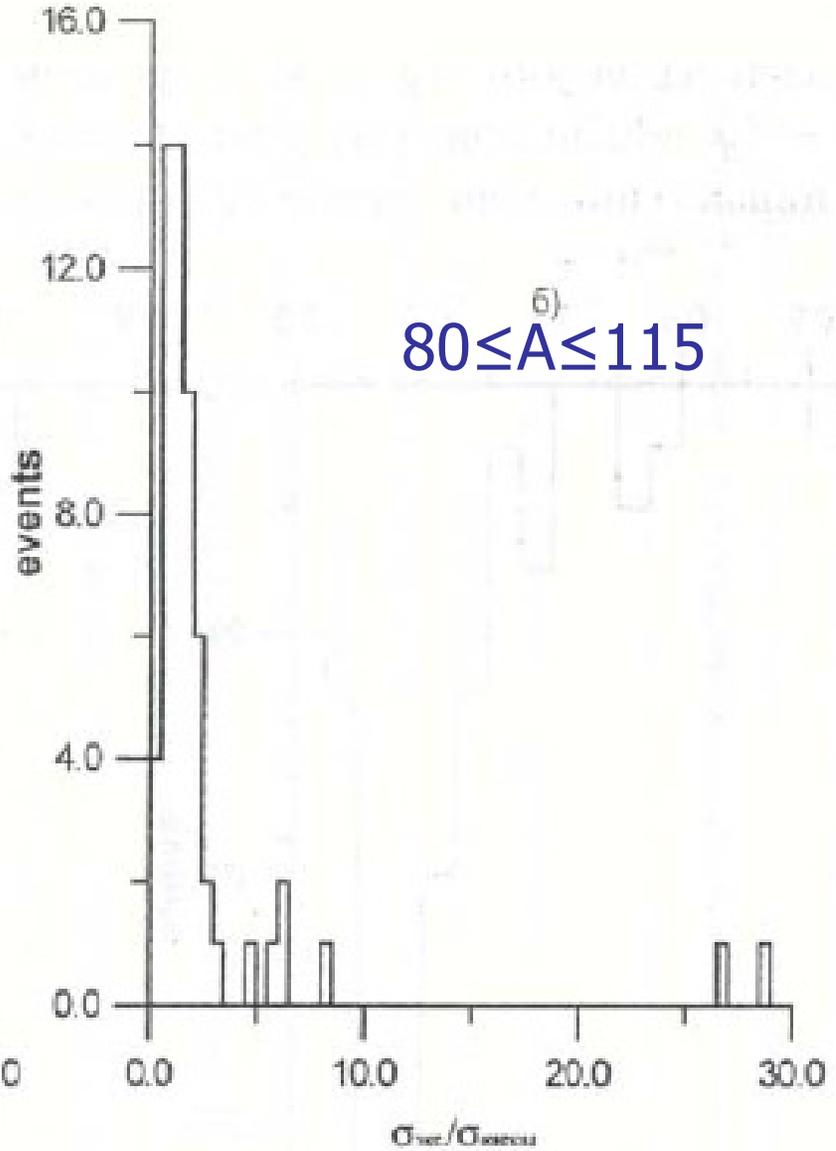
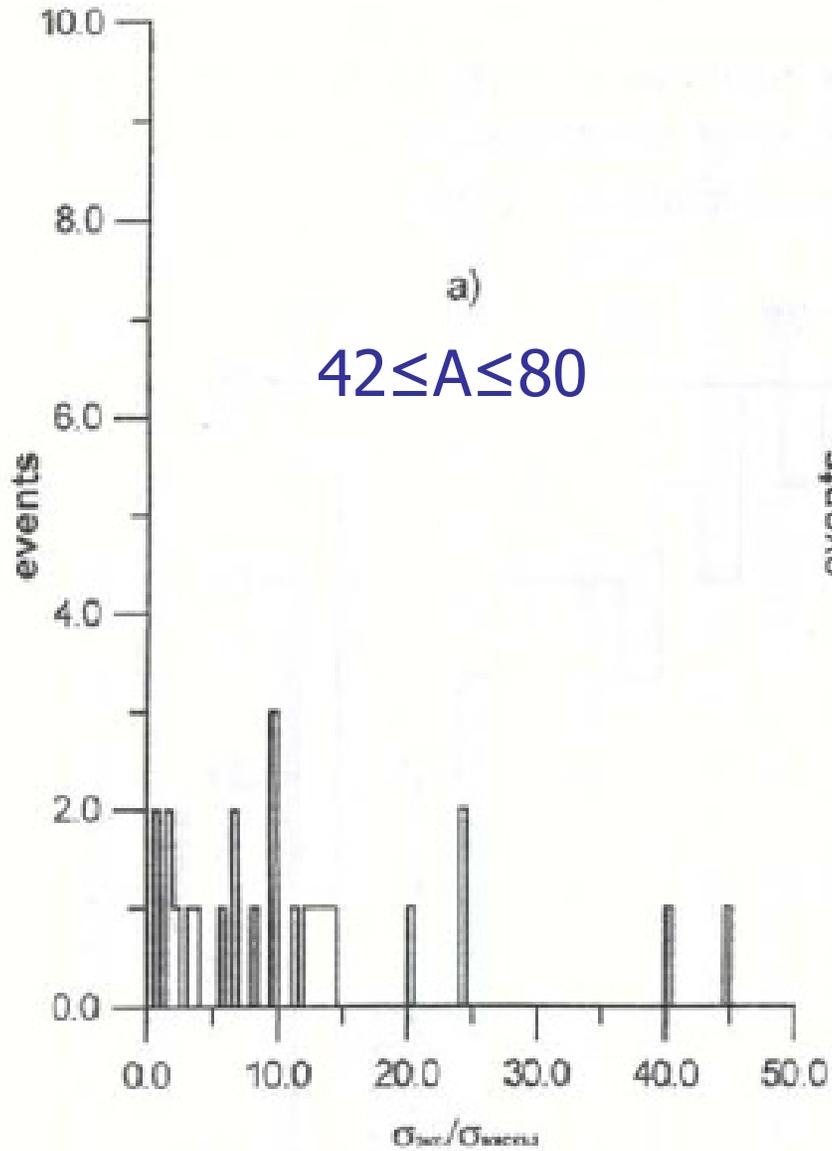
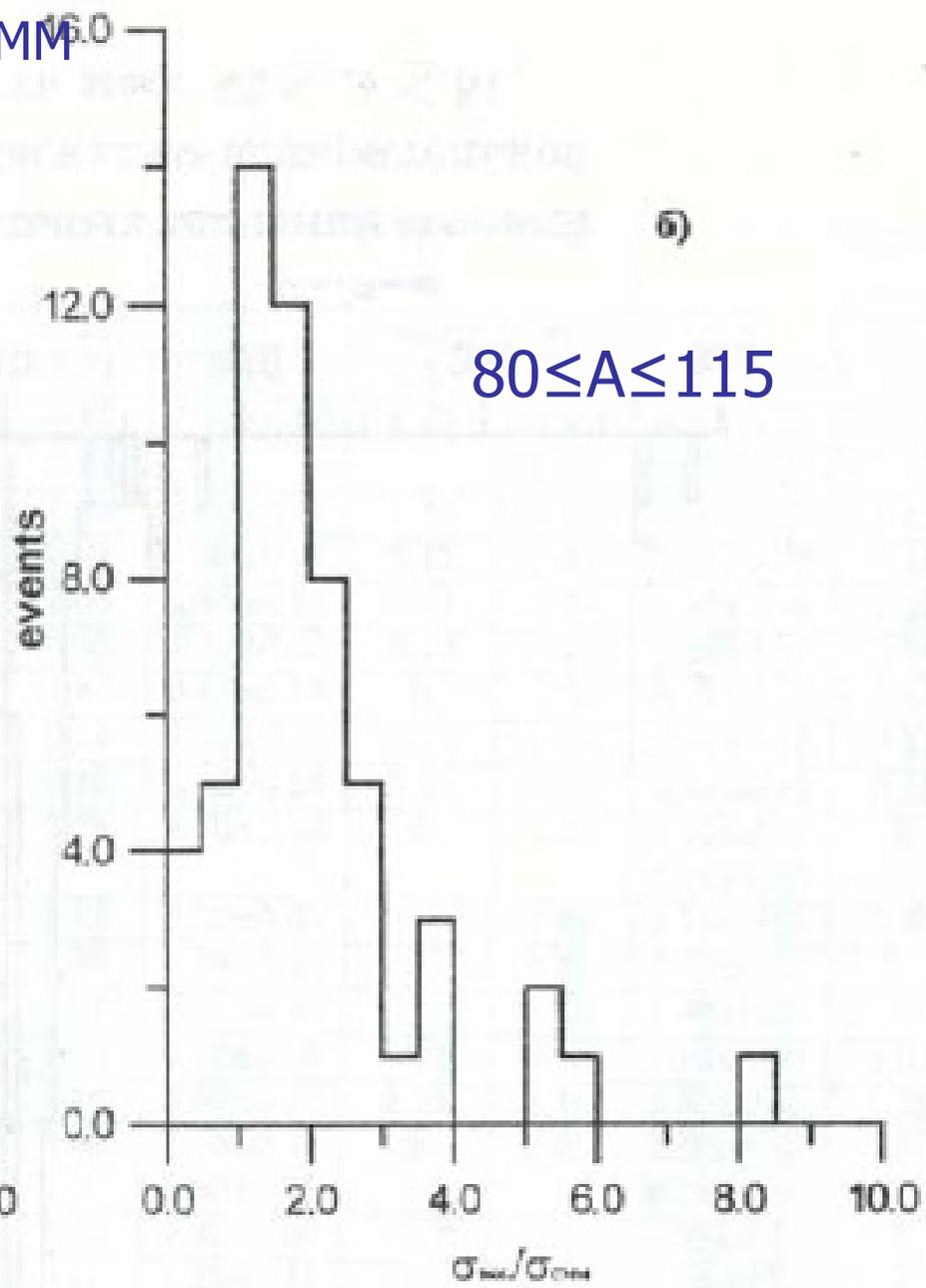
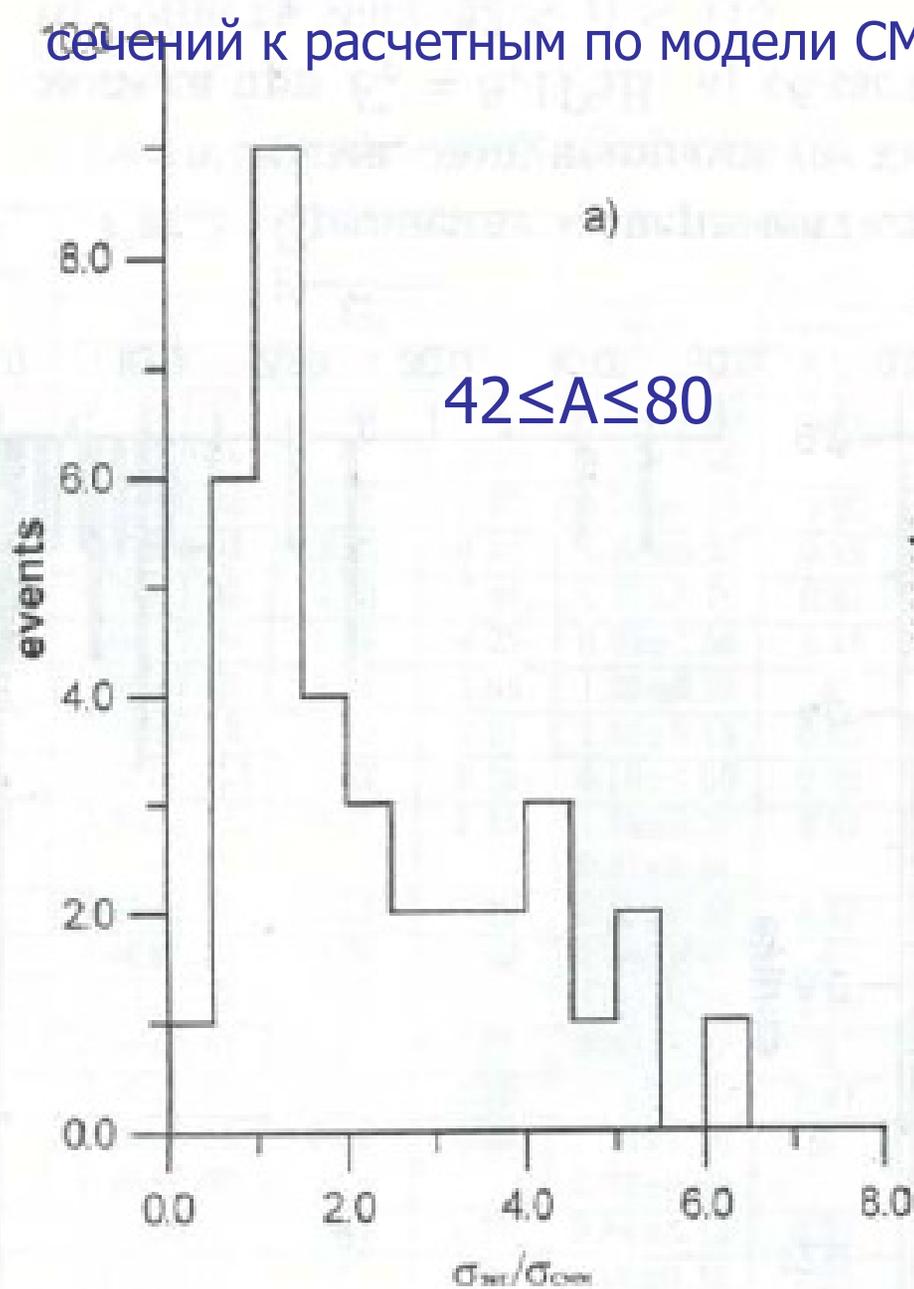


Figure 1. Caloric-curve data from several experiments as compiled by Natowitz et al. [29]. Temperatures deduced from measured spectra of light charged particles and from double-isotope ratios of light fragments are shown as a function of the excitation energy deduced from the measured momentum transfer or from calorimetry. The Fermi-gas model predictions for parameters $K = 8$ and 13 are shown by the dotted and solid lines, respectively. The open circles represent the expectation for a hypothetical nucleon gas.

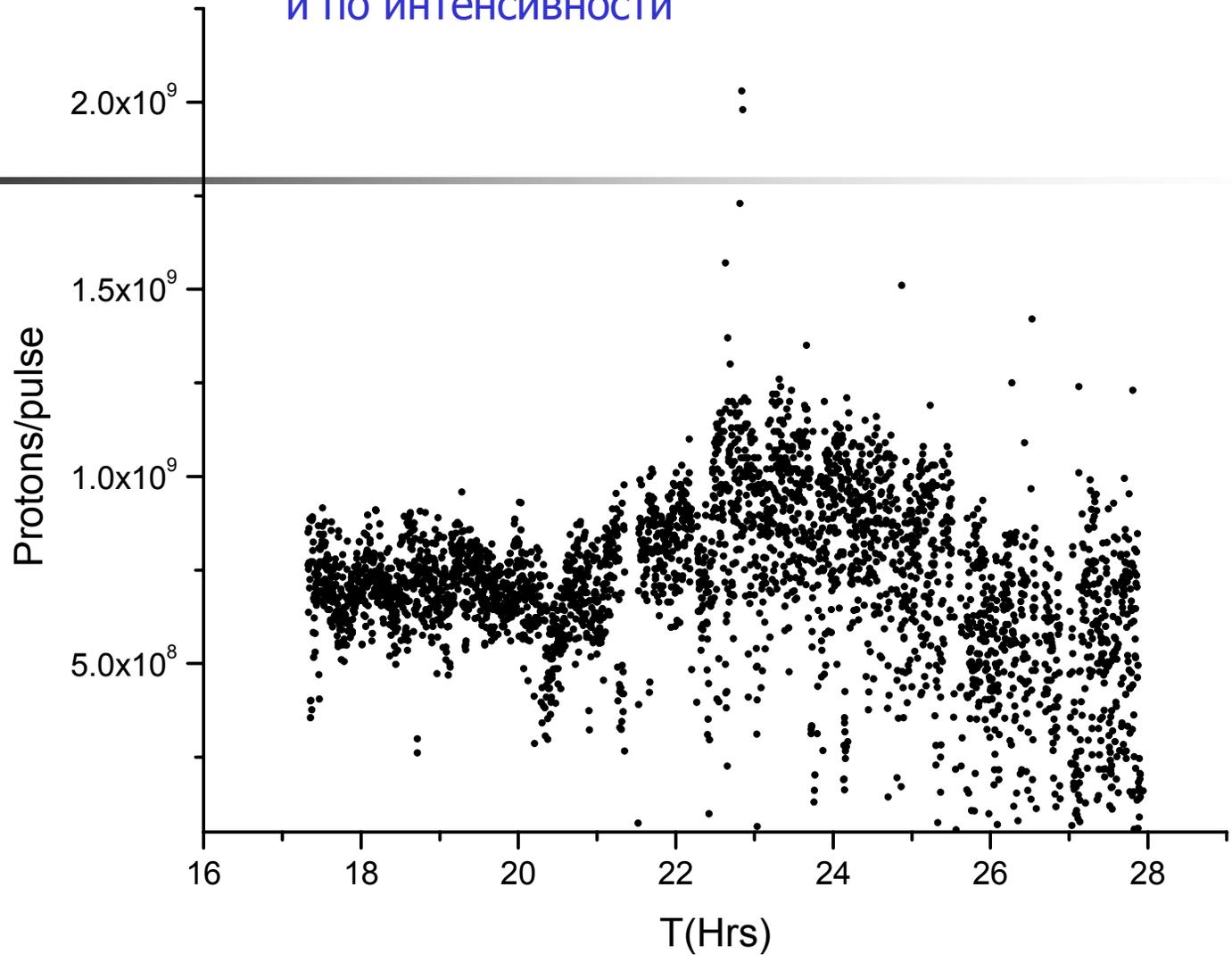
Отношение экспериментальных сечений к
расчетным по каскадно испарительной модели

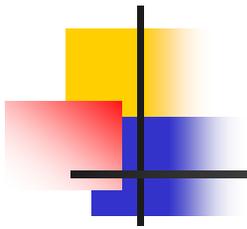


Отношение экспериментальных сечений к расчетным по модели СММ



Нестабильность пучка по времени
и по интенсивности

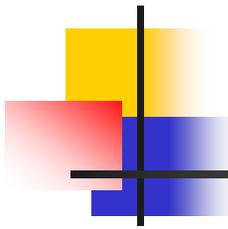




Поправка на флуктуации пучка:

$$B = \frac{N_B(1 - e^{-\lambda t})}{\sum W(i)e^{-\lambda t_e(i)}(1 - e^{-\lambda t_p(i)})}$$

Остат. Ядро	Период Полу.(час)	Фактор В	Остат. Ядро	Период Полу.(час)	Фактор В
^{24}Na	14.96	0.989	^{58}Co	1854.24	1.0
^{28}Mg	20.915	0.993	^{96}Tc	102.0	0.9986
^{43}Sc	3.891	0.948	^{93g}Tc	2.75	0.919
^{44g}Sc	3.93	0.948	^{94}Tc	4.88	0.961
^{44m}Sc	58.608	0.998	^{95}Tc	20.0	0.993
^{46}Sc	201.096	0.999	^{38}Cl	0.6206	0.714
^{48}Sc	43.67	0.997	^{39}Cl	0.9266	0.7599
^{56}Mn	2.578	0.912	^{113}Sn	2761.92	1.0
^{52}Mn	134.184	0.999	^{103}Ag	1.095	0.786
^{42}K	12.36	0.987	^{104}Ag	0.558	0.706
^{43}K	22.3	0.993	^{105m}Ag	990.96	1.0
^{48}V	38.338	0.996	^{106m}Ag	198.72	0.999
^{59}Fe	1068.072	1.0	^{111}Ag	178.8	0.999
^{84m}Y	0.658	0.719	^{105}Rh	35.36	0.986

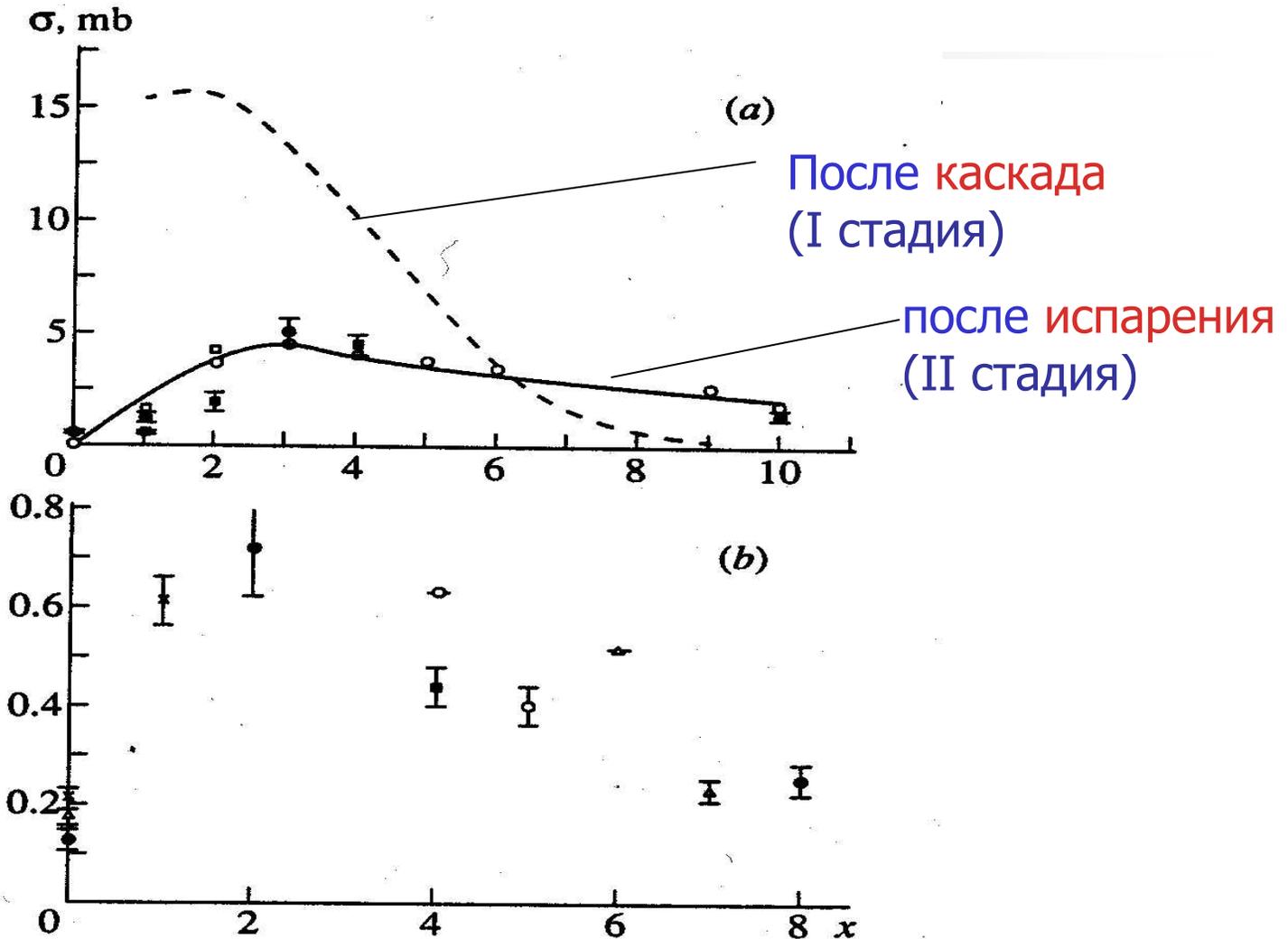


Ядерные реакции, в которых ядро-мишень теряет всего несколько нуклонов, преобладают над остальными процессами - **простые реакции**.

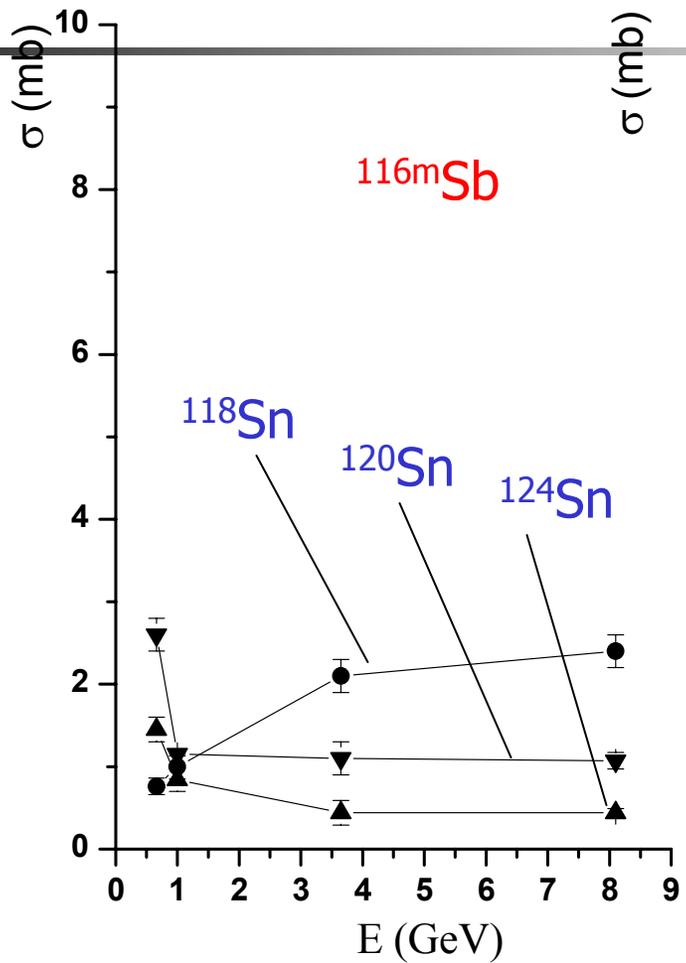
Прямые взаимодействия
с выбиванием нейтрона
 $E^* \leq 10$ МэВ

Неупругое рассеяние
падающей частицы
на поверхностных нуклонах
 $E^* \sim 10-20$ МэВ

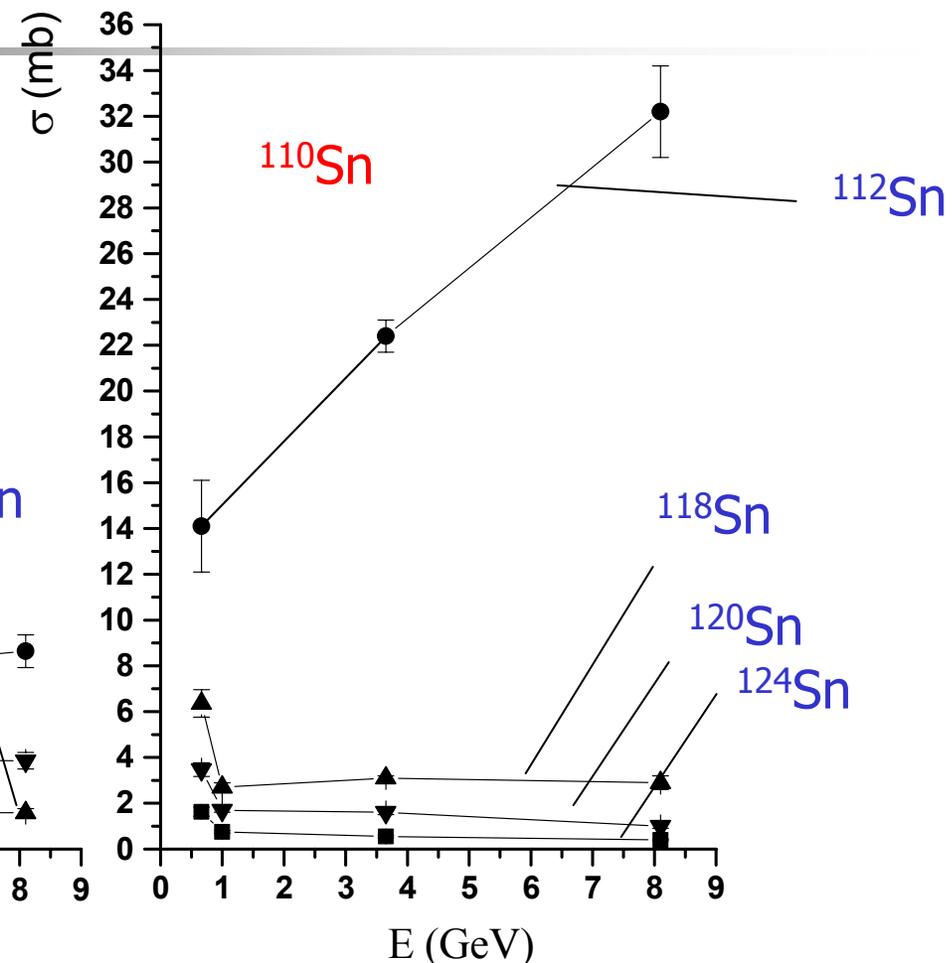
Зависимость сечений реакций (p, xn) и выходов реакций ($\gamma, \pi xn$) от числа испущенных нейтронов x .



Зависимость величин сечения образования ядер остатков от энергии налетающего протона а) ^{116m}Sb , б) ^{110}Sn



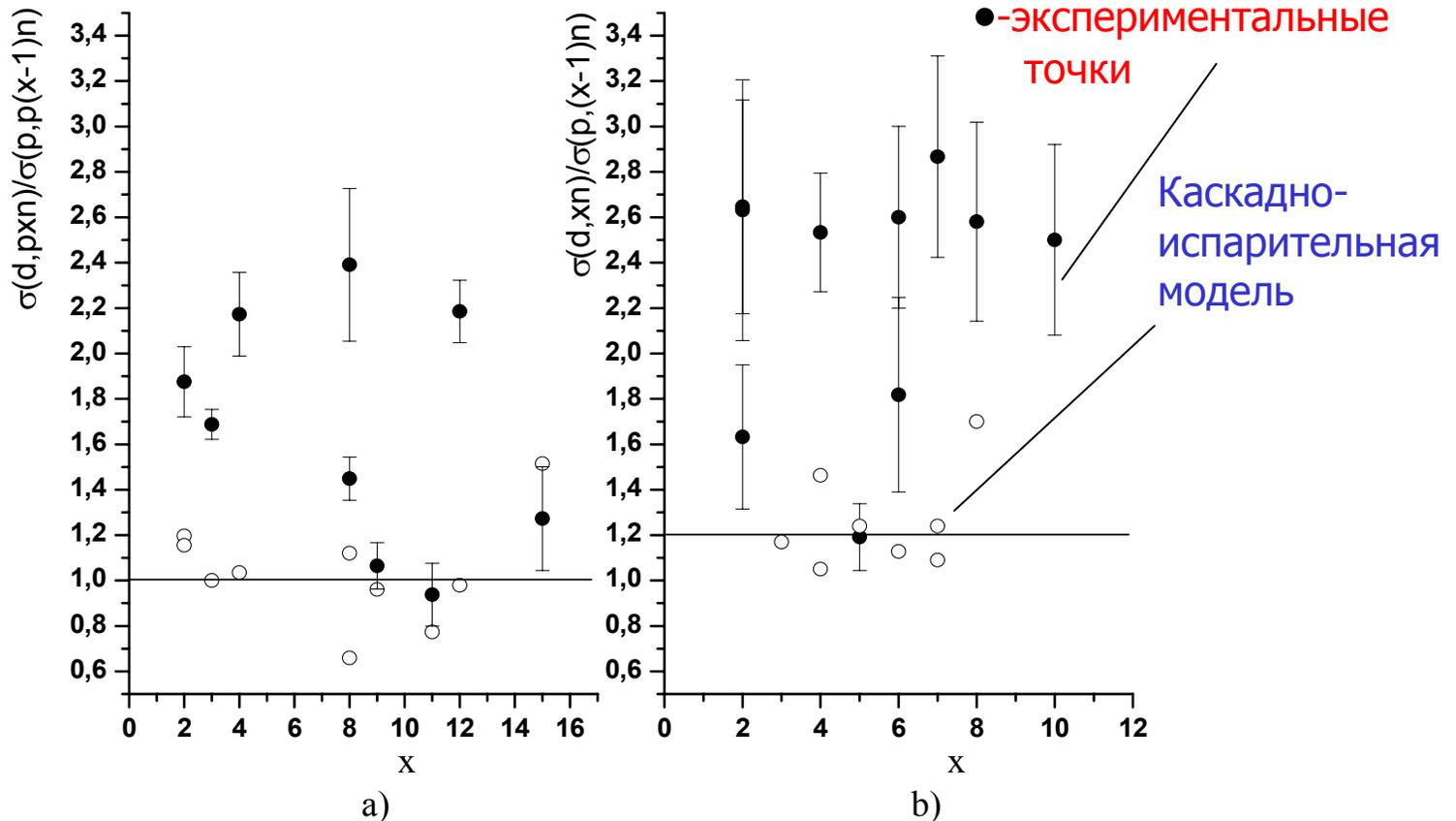
a)

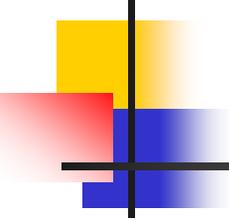


b)

Зависимость отношения сечений образования остаточных ядер дейтрон- и протон-ядерных реакций от числа вылетевших нейтронов

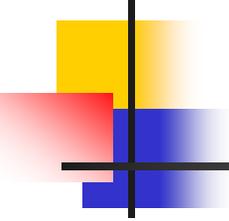
Зарядово-обменные реакции





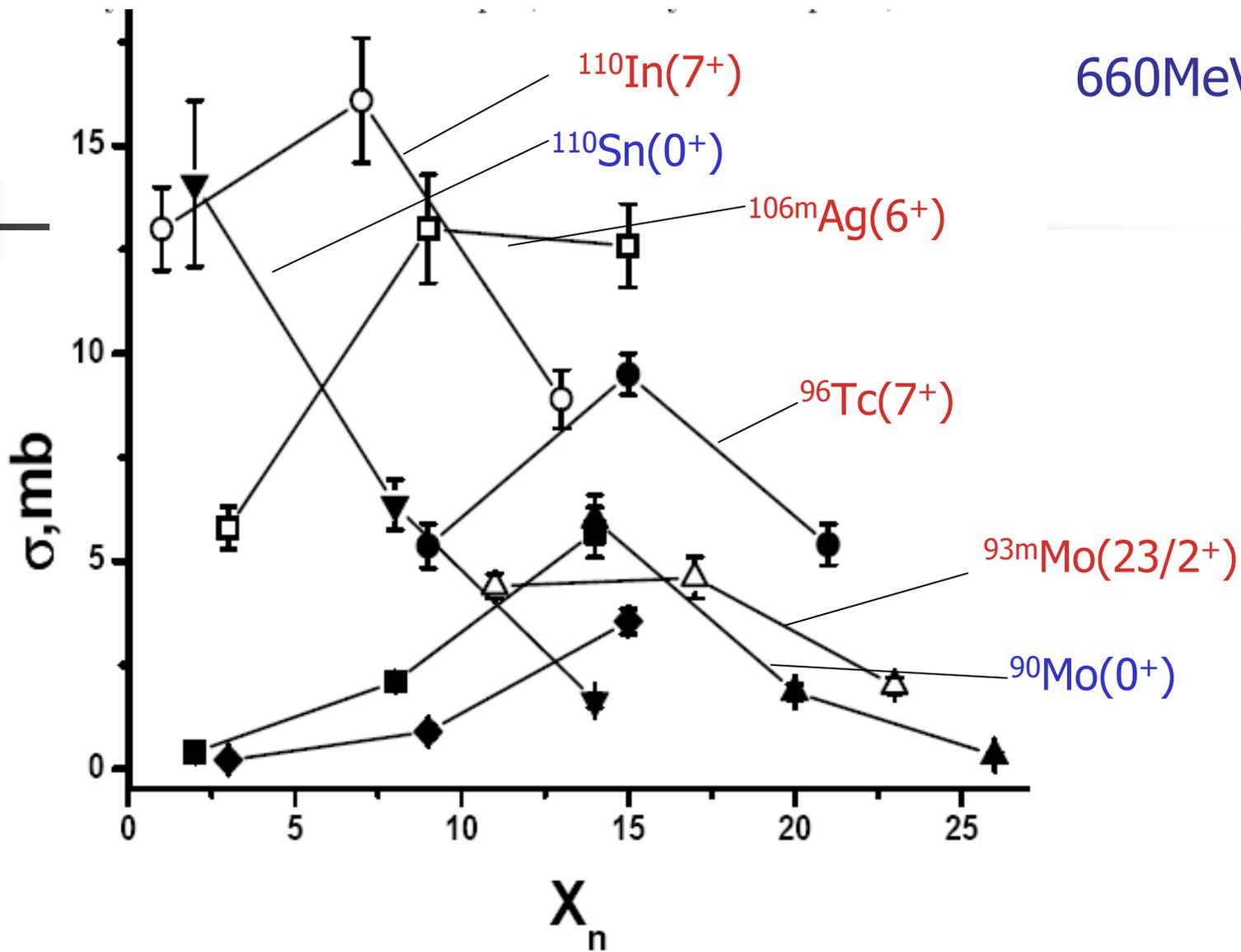
Выводы

- В реакциях (p, xn) вылетевшие x нейтроны имеют испарительный характер.
- В реакциях $(p, 3n)$ и $(p, p2n)$ включается механизм мезонообразования
- Для (d, xn) и (d, pxn) реакций экспериментальные данные превышают теоретические предсказания ~ 2 раза.



Исследование сечения образования
высокоспиновых и низкоспиновых
состояний остаточных ядер,
изомерные отношения

660MeV



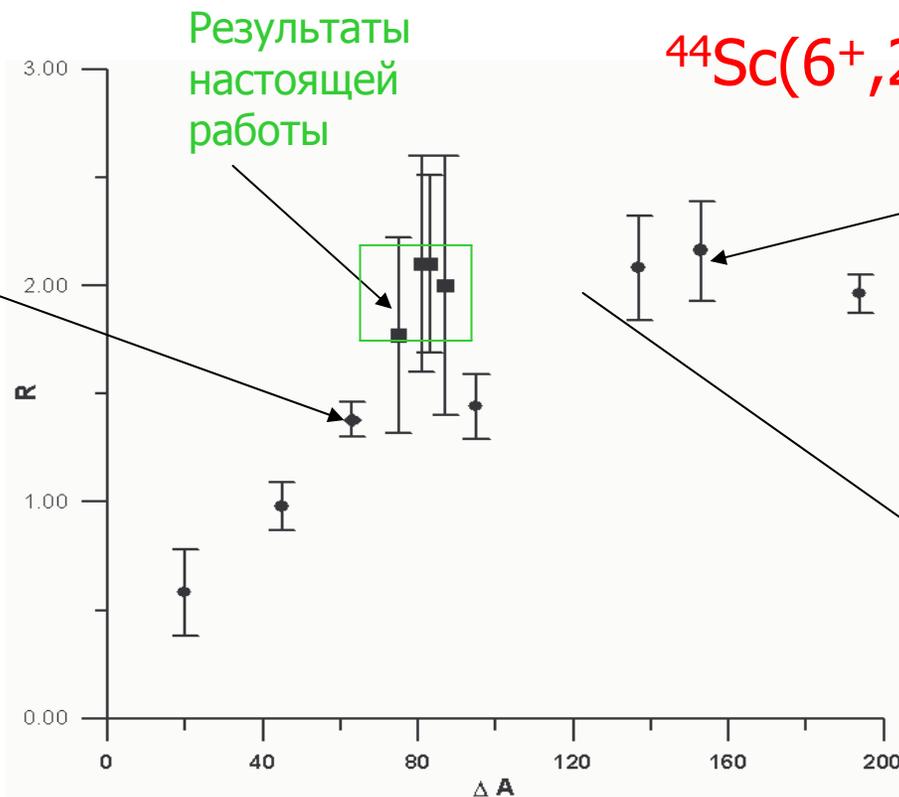
Изомерные отношение ядер остатков

Остаточное ядро	$R = \sigma_{IH} / \sigma_{IL}$						
	^{112}Sn	^{118}Sn		^{120}Sn		^{124}Sn	
	8.1 ГэВ	8.1ГэВ	1 ГэВ	8.1ГэВ	1 ГэВ	8.1ГэВ	1 ГэВ
$^{117}\text{Cd}(11/2^-, 1/2^+)$	-	-	-	1.46±0.41	2.04±0.20	3.15±0.5	3.0±0.45
$^{117}\text{In}(9/2^+, 1/2^-)$	-	2.34±0.5	2.3±0.3	6.00±0.46	2.60±0.47	8.67±2.10	4.05±0.90
$^{116}\text{Sb}(8^-, 3^+)$	-	0.52±0.08	0.56±0.10	1.07±0.19	1.15±0.21	2.17	-
$^{110}\text{In}(7^+, 2^+)$	0.8±0.1	2.30±0.22	3.9±0.4	2.40±0.23	3.1±0.5	2.36±0.25	4.05±0.91
$^{108}\text{In}(6^+, 1^-)$	0.22±0.13	3.1±0.64	2.4±0.35	3.3±0.93	3.7±0.4	2.6±1.39	3.65±0.88
$^{104}\text{Ag}(5^+, 2^+)$	1.26±0.15	2.35±0.35	3.27±0.62	2.75±0.25	2.45±0.32	2.80±0.39	3.66±0.86

$^{102}\text{Rh}(6^+, 2^-)$	2.61±0.3	2.30±0.75	3.00±1.06	2.47±0.33	-	2.72±0.60	-
$^{101}\text{Rh}(9/2^+, 1/2^-)$	2.98±0.44 ^a	1.22±0.24	1.20±0.23	1.93±0.29	1.8±0.3	1.38±0.23	1.38±0.25
$^{99}\text{Rh}(9/2^+, 1/2^-)$	4.97±0.80	4.8±1.1	6.15±1.10	4.23±0.64	3.5±0.5	6.6±0.9	5.44±1.25
$^{95}\text{Tc}(9/2^+, 1/2^-)$	8.34±1.49	8.40±0.96	7.90±0.63	11.19±0.9	8.6±0.9	12.50±1.87	11.37±1.30
$^{95}\text{Nb}(9/2^+, 1/2^-)$	0.65±0.12	1.20±0.25	0.82±0.16	-	-	-	0.96±0.17 ^a
$^{94}\text{Tc}(7^+, 2^+)$	4.70±0.73	6.55±0.80	5.1±1.1	7.5±1.3	8.4±1.8	11.4±1.6	12.0±3.4
$^{93}\text{Tc}(9/2^+, 1/2^-)$	-	4.30±1.46	-	-	7.67±1.53	-	-
$^{87}\text{Y}(9/2^+, 1/2^-)$	-	1.7±0.3	1.80±0.27	3.55±0.53	3.40±0.76	2.87±0.52	-
$^{86}\text{Y}(8^+, 4^-)$	3.00±0.43	2.1±0.3	3.1±0.5	2.59±0.30	2.95±0.40	2.7±0.4	2.70±0.82
$^{84}\text{Rb}(6^-, 2^-)$	-	0.83±0.35	-	0.96±0.14	-	1.28±0.13	-
$^{52}\text{Mn}(6^+, 2^+)$	-	4.24±0.71	-	-	-	-	-
$^{44}\text{Sc}(6^+, 2^+)$	1.77±0.45	2.1±0.5	-	2.10±0.41	-	2.0±0.6	-

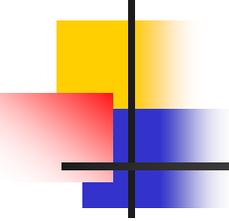
Изомерные отношения R в зависимости от числа вылетевших нейтронов ΔA для $^{44}\text{Sc}(6^+, 2^+)$

N.T.Porile et al.
Phys Rev.C
19,2288(1979)



E.Hagebo, H.Ravn
J.Inorg.Nucl.Chem.
31,897(1969)

присутствием
нейтронного гало
в тяжелых изотопах
олова, $\pi^- + d \rightarrow n+n$



Выводы

- Достоверность полученных в настоящей работе данных подтверждается хорошим совпадением с данными других экспериментальных групп.
- Изомерные отношения зависят от структуры конкретных ядер (^{95}Nb , ^{95}Tc)
- Выход на плато изомерных отношений объясняется присутствием нейтронного гало в тяжелых изотопах олова, а также процессом $\pi^- + d \rightarrow n + n$

Изоскейлинг в рамках СММ

модели

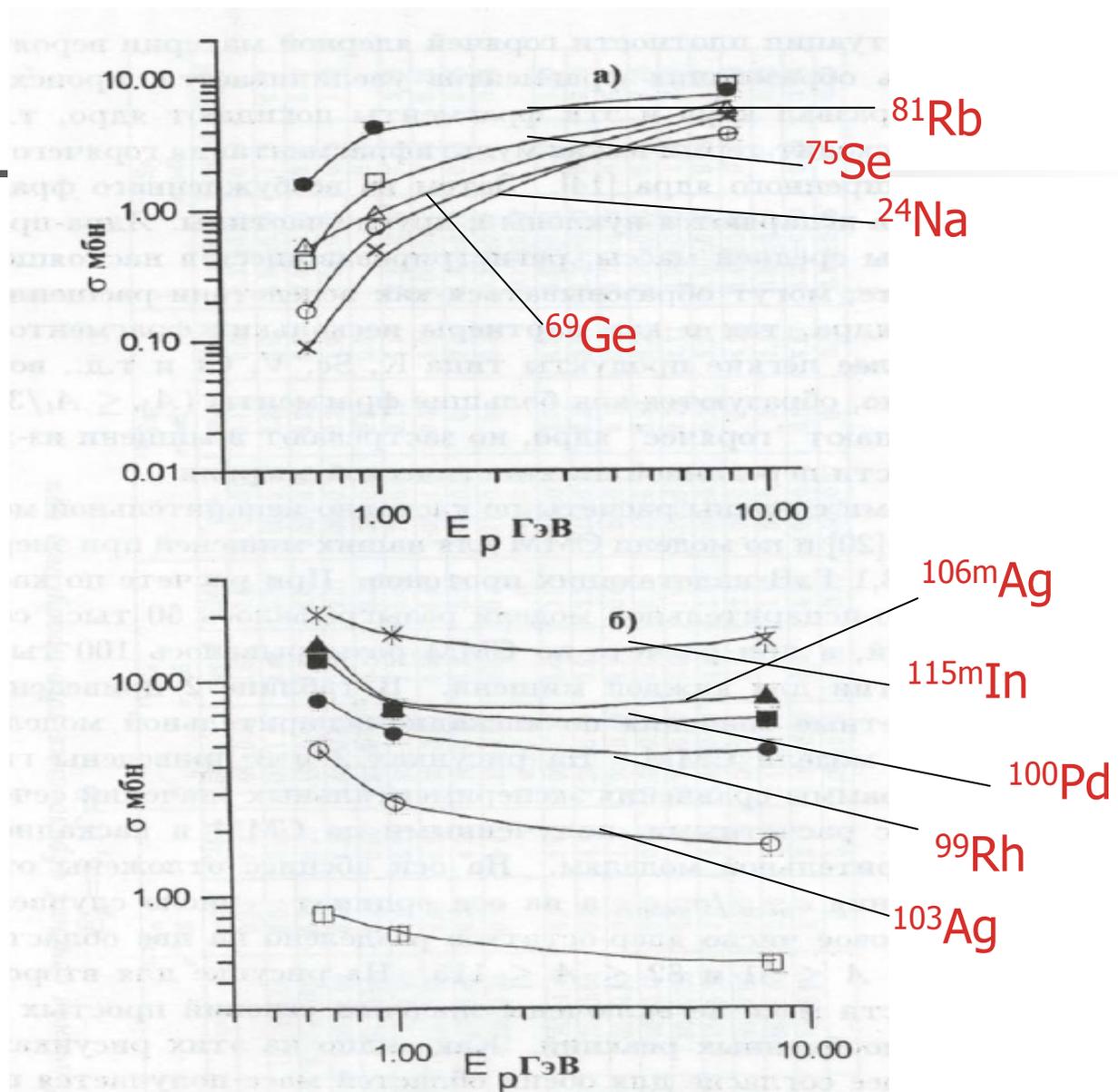
$$R_{21}(N, Z) = Y_2(N_2, Z_t) / Y_1(N_1, Z_t) = C \exp(\alpha N + \beta Z)$$

$$\alpha = \frac{\Delta\mu_n}{T}, \beta = \frac{\Delta\mu_p}{T}$$

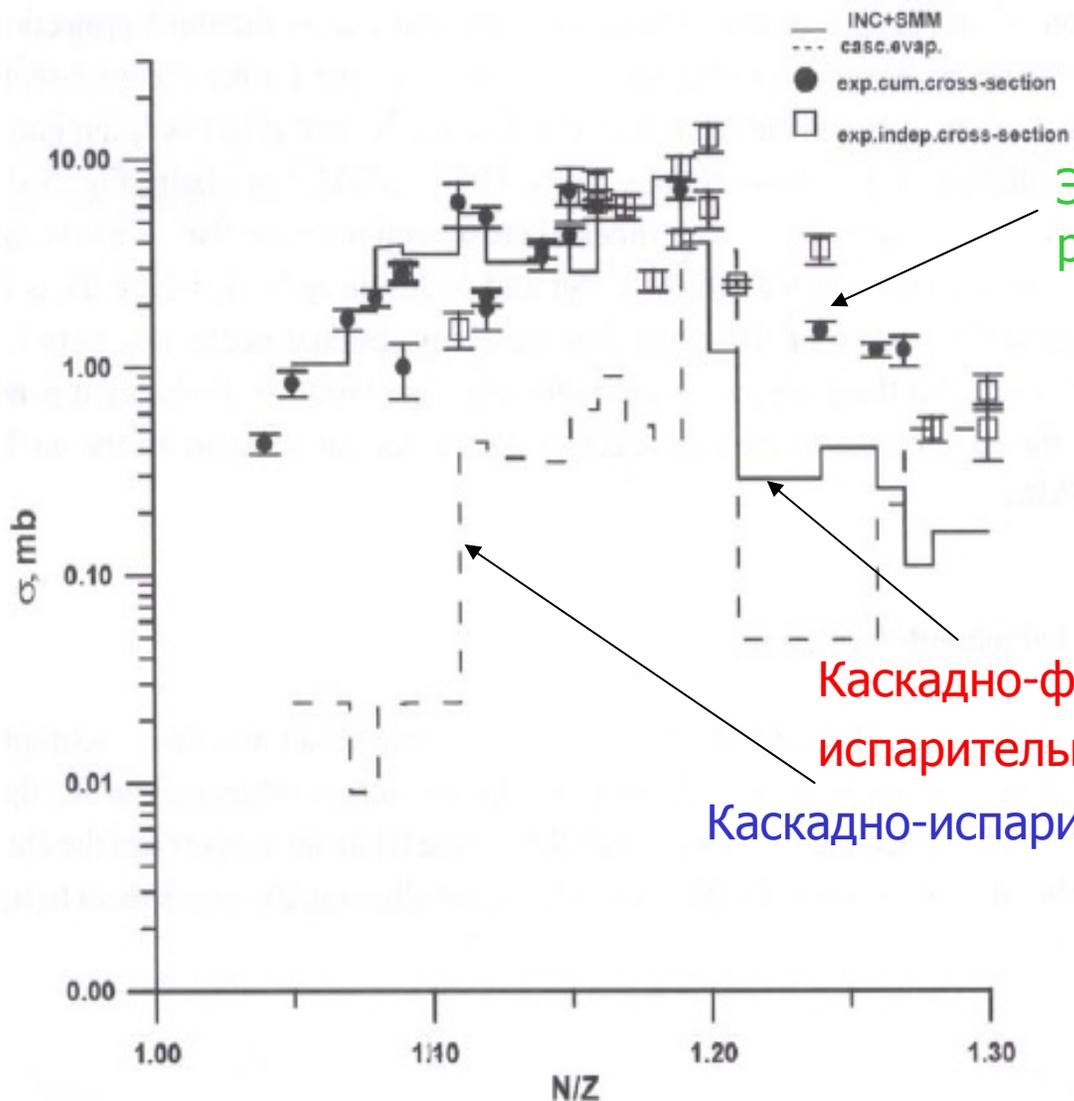
$$R_{21} = \exp(C + Bt_3)$$

Энергетическая зависимость сечений

а) ^{81}Rb , ^{75}Br , ^{75}Se , ^{69}Ge , ^{24}Na б) ^{115}In , ^{103}Ag , ^{100}Pd , $^{106\text{m}}\text{Ag}$



Зависимость значений экспериментальных и расчетных сечений от N/Z продукта для мишени ^{118}Sn .



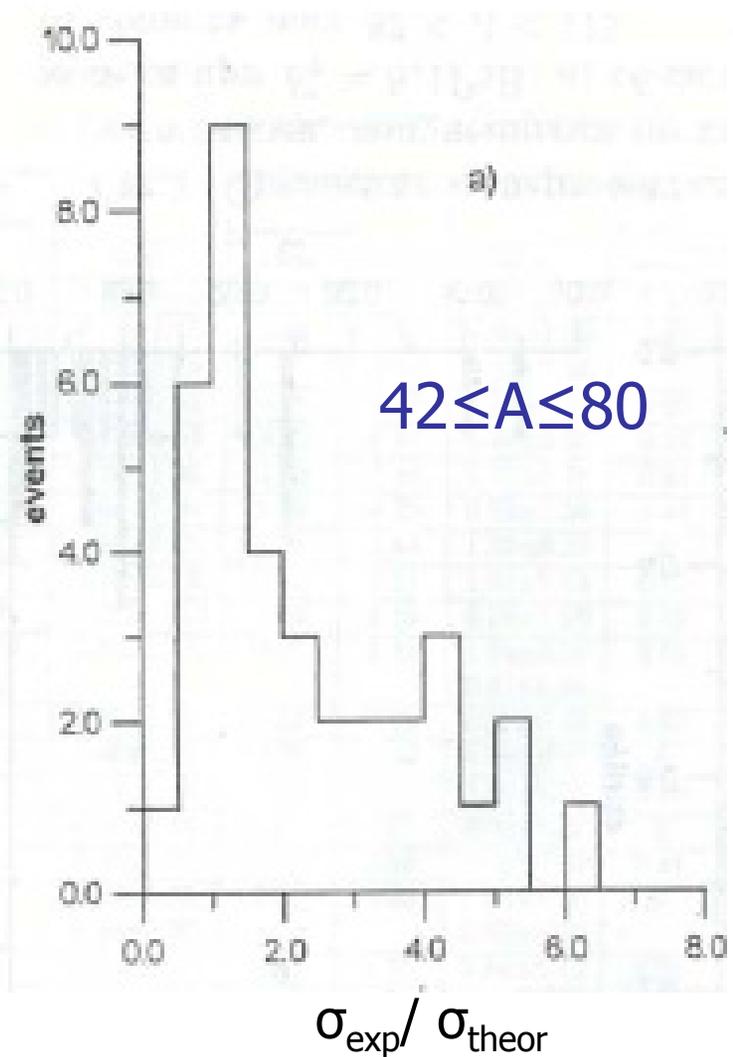
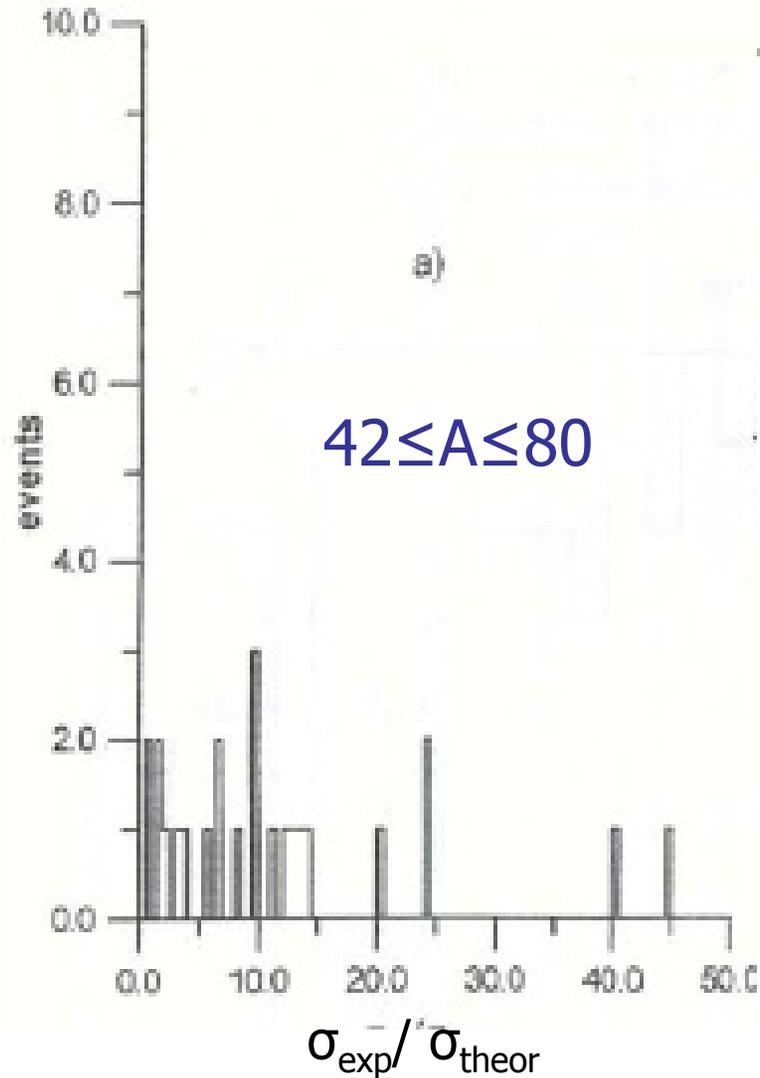
Экспериментальные результаты

Каскадно-фрагментационно-испарительная модель

Каскадно-испарительная модель

Отношение экспериментальных сечений к расчетным по каскадно испарительной модели

Отношение экспериментальных сечений к расчетным по модели СММ



Изоскейлинг в рамках СММ

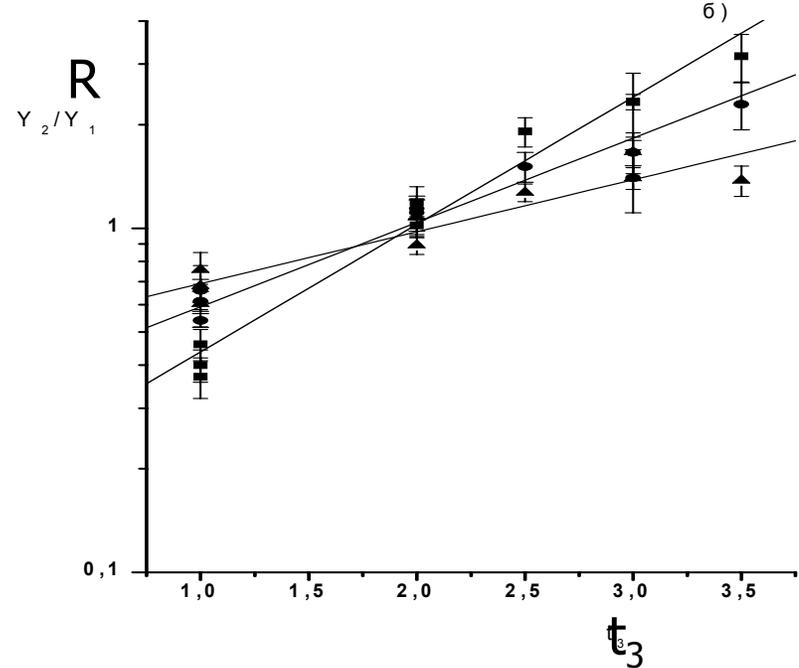
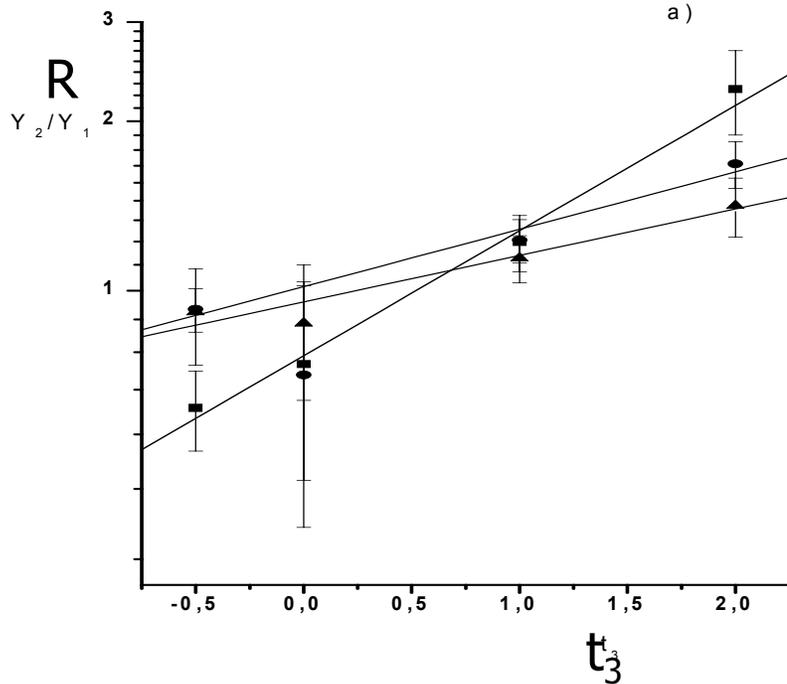
модели

$$R_{21}(N, Z) = Y_2(N_2, Z_t) / Y_1(N_1, Z_t)$$

$$R_{21} = C \exp(\alpha N + \beta Z); R_{21} = \exp(C + Bt_3)$$

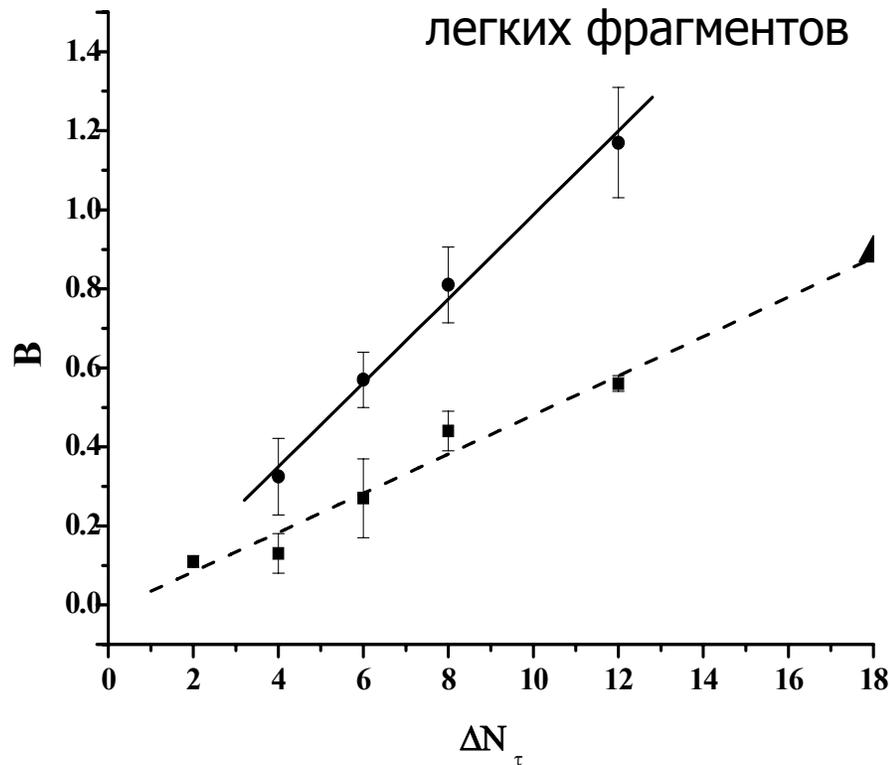
a) $7 \leq A_f \leq 28$, $\Delta N=12$, $\Delta N=6$, $\Delta N=2$

б) $44 \leq A_f \leq 59$, $\Delta N=12$, $\Delta N=8$, $\Delta N=4$



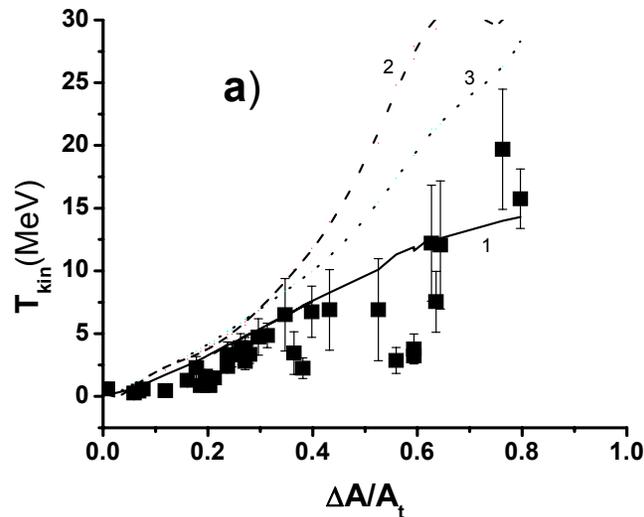
Параметр В в зависимости от разности нейтронного избытка мишени ΔN_t ($E_p=8.1$ ГэВ)

- экспериментальные результаты для среднетяжелых изотопов
- ②-экспериментальные результаты для легких фрагментов

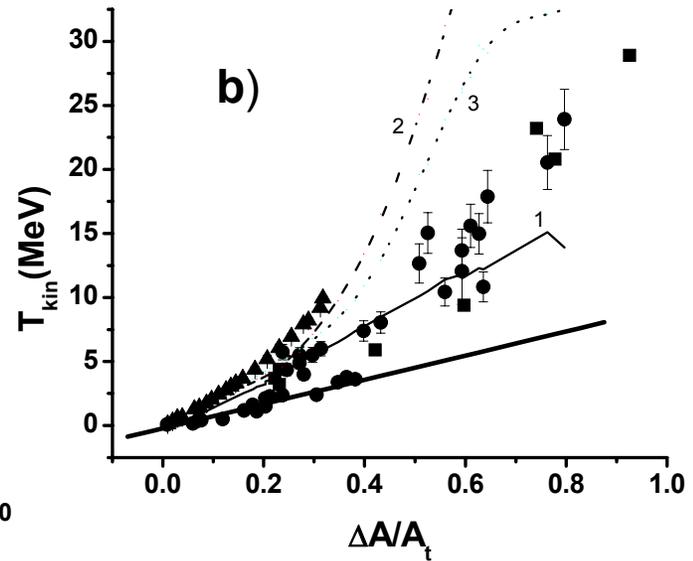


Зависимость кинетической энергии ядер продуктов от части потери масс A/A_t : а) для дейтрон-ядерных реакций б) для протон-ядерных реакций(•). Для сравнения,  указывают экспериментальные результаты для мишени Ag приведенной в литературе,  указывают экспериментальные результаты для мишени Pb приведенной в литературе. Сплошная линия (1) есть расчеты по модели LAQGSM03.01, пунктирная линия (2)- расчеты по модели LAQGSM03.S1, и точечная линия (3) - расчеты по модели LAQGSM03.G1. Толстая сплошная линия есть линейная подгонка экспериментальных данных..

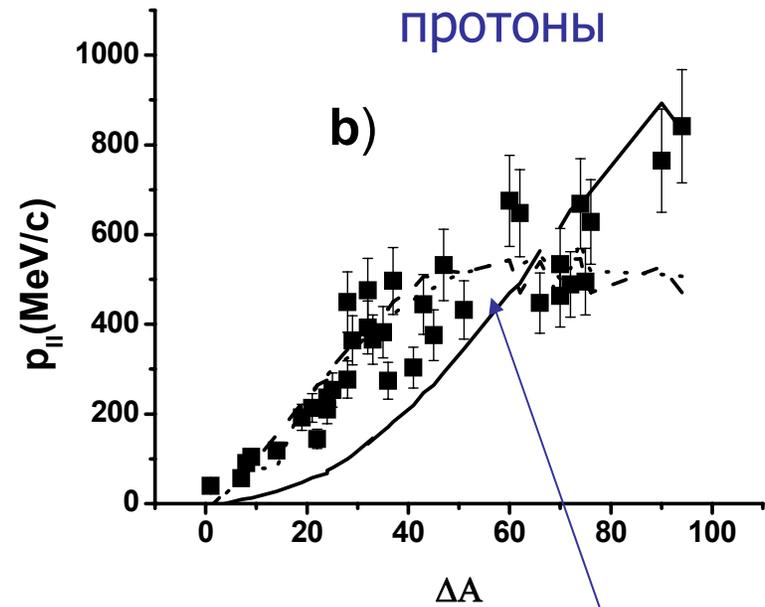
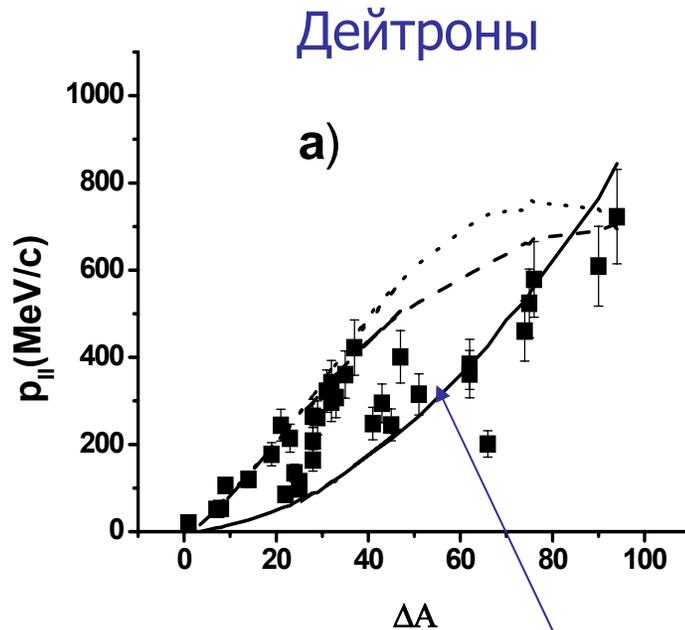
Дейтроны



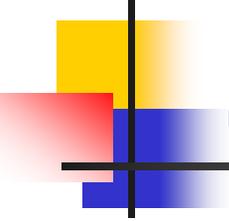
протоны



Зависимость среднего передаваемого импульса от числа испущенных нейтронов



Меняется наклон, вклад нового механизма образования продуктов, Механизм мультифрагментации



Обычно в экспериментах делаются дополнительные предположения.

- Значения v_I и P_{II} в первой стадии постоянны и направлены вперед.
- Скорость во второй стадии распределена изотропно.

Caloric curve

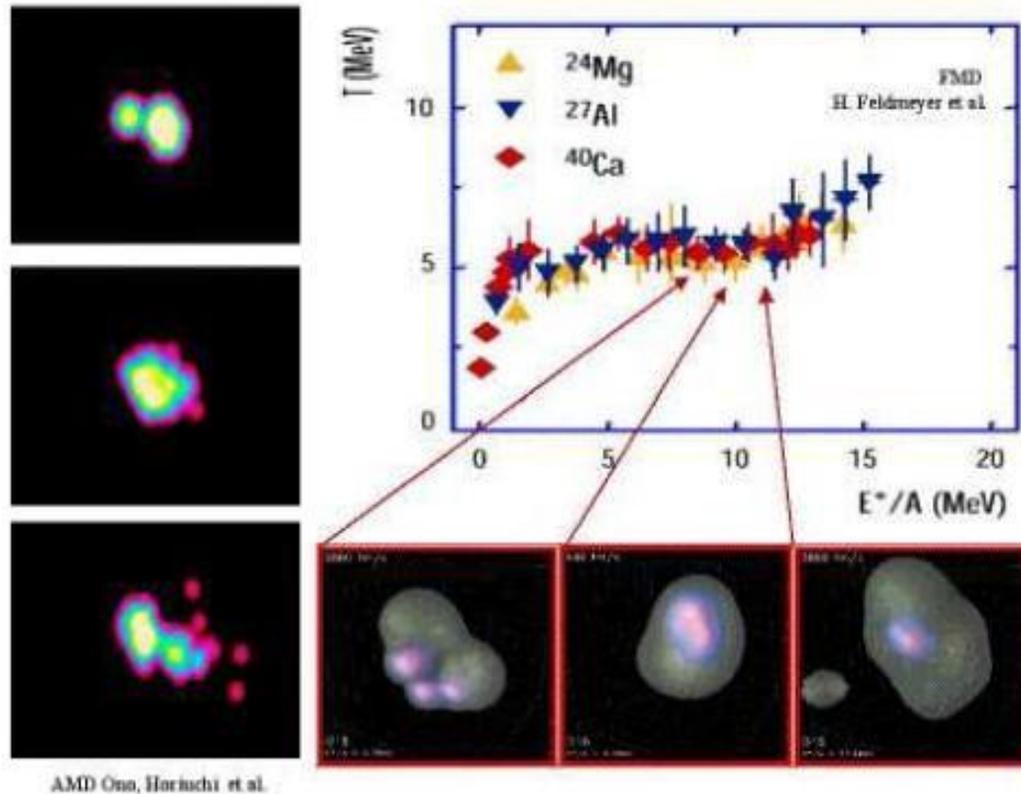
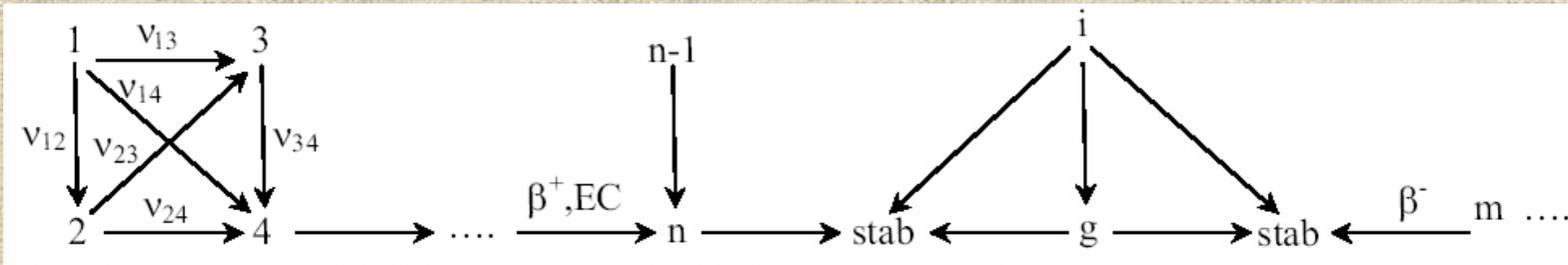


Figure 3: Molecular dynamics simulations of a collision (left ref. [7]) and of an equilibrium (right [8]). The deduced caloric curve for a confined hot Ca nucleus shows a plateau sign of a liquid-gas phase transition.

Кумулятивные сечения

Изобарическая цепочка для β распада РЯ ($A=\text{const.}$) :



Общая формула для кумулятивных сечения:

$$\sigma_n^{cum} = \sigma_n^{ind} + \sum_{m=1}^{n-1} B_{mn} \sigma_m^{ind} \quad \begin{array}{l} v_{mn} \equiv 0 \text{ при } n-m > 3 \text{ для нечетных } m \\ v_{mn} \equiv 0 \text{ при } n-m > 2 \text{ для четных } m \end{array}$$

$$B_{mn} = v_{mn} + \sum_{l_1 > m}^{n-1} v_{ml_1} v_{l_1 n} + \sum_{l_2 > l_1}^{n-1} \sum_{l_1 > m}^{n-2} v_{ml_1} v_{l_1 l_2} v_{l_2 n} + \dots$$

$$K_e = \frac{R_j(t_3)}{\sqrt{R_j(t_3) + 2R_f(t_3)}} \sqrt{c} \sqrt{k}$$