



Б. С. Ишханов

**Фотоядерные реакции
и астрофизика**

Photonuclear reactions and astrophysics

B. S. Ishkhanov*

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

V. N. Orlin, K. A. Stopani, and V. V. Varlamov

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

(Dated: Compiled on February 28, 2013)

Photonuclear reactions play a prominent role in the nucleosynthesis processes in stars and in the Early Universe. Traditional and modern methods of studying photonuclear reactions are considered. Different factors which determine accuracy of photonuclear data are discussed. Cross sections of photonuclear reactions relevant to astrophysics are given.

Распространенность химических элементов



Схематическая кривая распространенности химических элементов в Солнечной системе.

REVIEWS OF MODERN PHYSICS

VOLUME 29, NUMBER 4

OCTOBER, 1957

Synthesis of the Elements in Stars*

E. MARGARET BURBIDGE, G. R. BURBIDGE, WILLIAM A. FOWLER, AND F. HOYLE

*Kellogg Radiation Laboratory, California Institute of Technology, and
Mount Wilson and Palomar Observatories, Carnegie Institution of Washington,
California Institute of Technology, Pasadena, California*

"It is the stars, The stars above us, govern our conditions";
(*King Lear*, Act IV, Scene 3)

but perhaps

"The fault, dear Brutus, is not in our stars, But in ourselves,"
(*Julius Caesar*, Act I, Scene 2)

TABLE OF CONTENTS

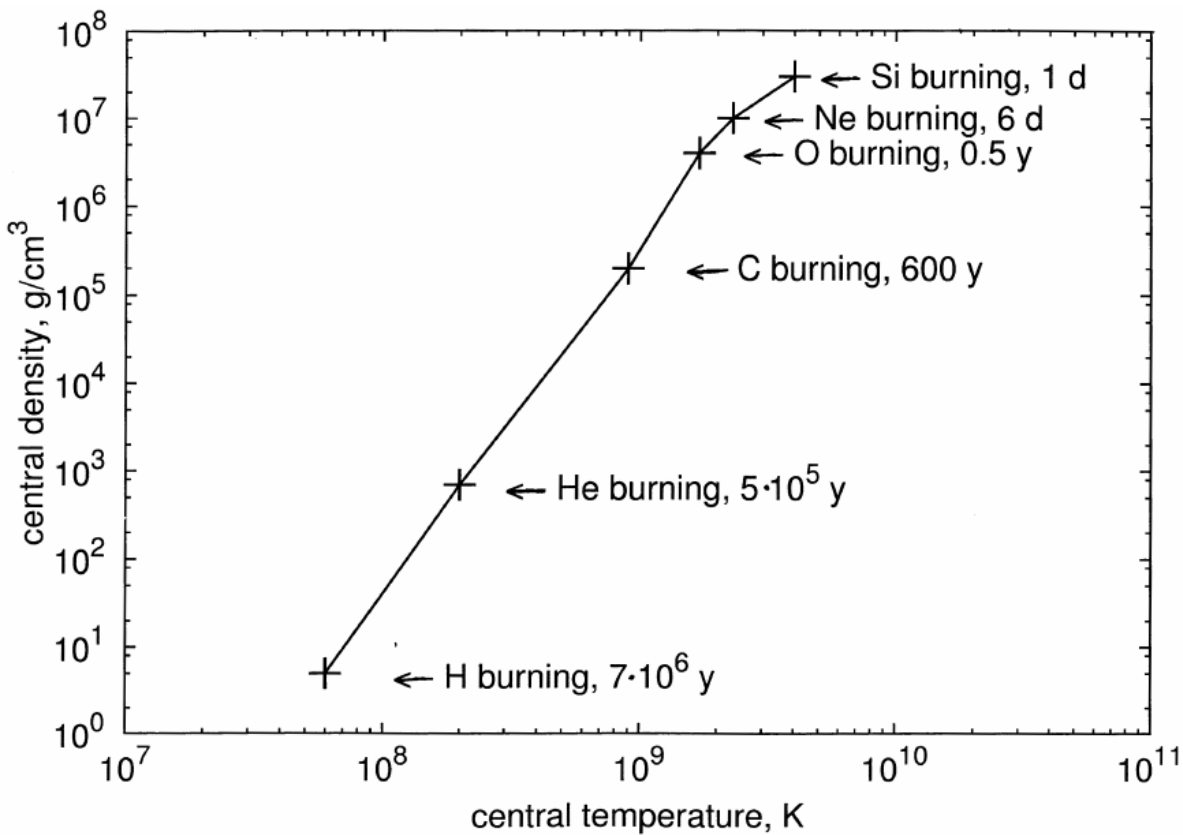
	Page
I. Introduction.....	548
A. Element Abundances and Nuclear Structure.....	548
B. Four Theories of the Origin of the Elements.....	550
C. General Features of Stellar Synthesis.....	550
II. Physical Processes Involved in Stellar Synthesis, Their Place of Occurrence, and the Time-Scales Associated with Them.....	551
A. Modes of Element Synthesis.....	551
B. Method of Assignment of Isotopes among Processes (i) to (viii).....	553
C. Abundances and Synthesis Assignments Given in the Appendix.....	555
D. Time-Scales for Different Modes of Synthesis.....	556
III. Hydrogen Burning, Helium Burning, the α Process, and Neutron Production.....	559
A. Cross-Section Factor and Reaction Rates.....	559
B. Pure Hydrogen Burning.....	562
C. Pure Helium Burning.....	565
D. α Process.....	567
E. Succession of Nuclear Fuels in an Evolving Star.....	568
F. Burning of Hydrogen and Helium with Mixtures of Other Elements; Stellar Neutron Sources.....	569
IV. e Process.....	577
V. s and r Processes: General Considerations.....	580
A. "Shielded" and "Shielding" Isobars and the s , r , p Processes.....	580
B. Neutron-Capture Cross Sections.....	581
C. General Dynamics of the s and r Processes.....	583
VI. Details of the s Process.....	583

* Supported in part by the joint program of the Office of Naval Research and the U. S. Atomic Energy Commission.

Образование химических элементов

1. *Горение водорода.* Один из основных процессов, поддерживающих длительное выделение энергии в звездах. При горении водорода происходит слияние четырех ядер водорода с образованием ядра ${}^4\text{He}$. Этот процесс происходит либо в pp-цепочке ядерных реакций, либо в циклических ядерных реакциях с участием C, N, O, Ne и др., играющих роль катализатора. Сюда же относятся процессы с участием протонов, в которых образуется некоторое количество легких элементов.
2. *Горение гелия.* После того, как в звезде накапливается гелий, под действием сил гравитации гелиевое ядро звезды сжимается, становится горячим и в нем начинается процесс горения гелия с образованием ядер ${}^{12}\text{C}$, ${}^{16}\text{O}$, ${}^{20}\text{Ne}$.
3. *α -процесс.* Процесс последовательного добавления α -частиц к ядру ${}^{20}\text{Ne}$ с образованием ядер ${}^{24}\text{Mg}$, ${}^{28}\text{Si}$, ${}^{32}\text{S}$, ${}^{36}\text{Ar}$, ${}^{40}\text{Ca}$. Он описывает повышенную распространенность атомных ядер типа $N\alpha$, где α - ядро ${}^4\text{He}$, а N - целое число.
4. *e -процесс.* Процесс, в котором в условиях термодинамического равновесия образуются атомные ядра, расположенные в районе железного максимума.
5. *s -процесс.* Образование ядер тяжелее железа в результате медленного последовательного захвата нейтронов. Скорость s -процесса сравнима со скоростью β -распада радиоактивных ядер, образующихся в результате захвата нейтронов. Длительность s -процесса — от 10^2 до 10^5 лет. s -процесс отвечает за образование максимумов в распространенности атомных ядер с $A \sim 90, 138$ и 208 .
6. *r -процесс.* Образование ядер тяжелее железа в результате быстрого последовательного захвата нейтронов со скоростью, существенно превышающей скорость β -распада образующихся радиоактивных ядер. Характерное время r -процесса — $0,01\text{--}100$ с. В результате r -процесса в кривой распространенности элементов возникают максимумы при $A = 80, 130$ и 195 .
7. *p -процесс.* Образование наиболее легких изотопов химических элементов. Он включает в себя реакции (p, γ) , (γ, n) .
8. *X -процесс.* Процесс нуклеосинтеза, ответственный за образование изотопов ${}^{6,7}\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$, ${}^{10,11}\text{B}$. Считается, что эти элементы образуются в реакциях расщепления ${}^{12}\text{C}$ и ${}^{16}\text{O}$ под действием космических лучей.

Образование химических элементов в звездах



Возможные ядерные реакции в звездах

Масса, M_{\odot}	Возможные ядерные реакции
0.08	Нет
0.3	Горение водорода
0.7	Горение водорода и гелия
5.0	Горение водорода, гелия, углерода
25.0	Все реакции синтеза с выделением энергии

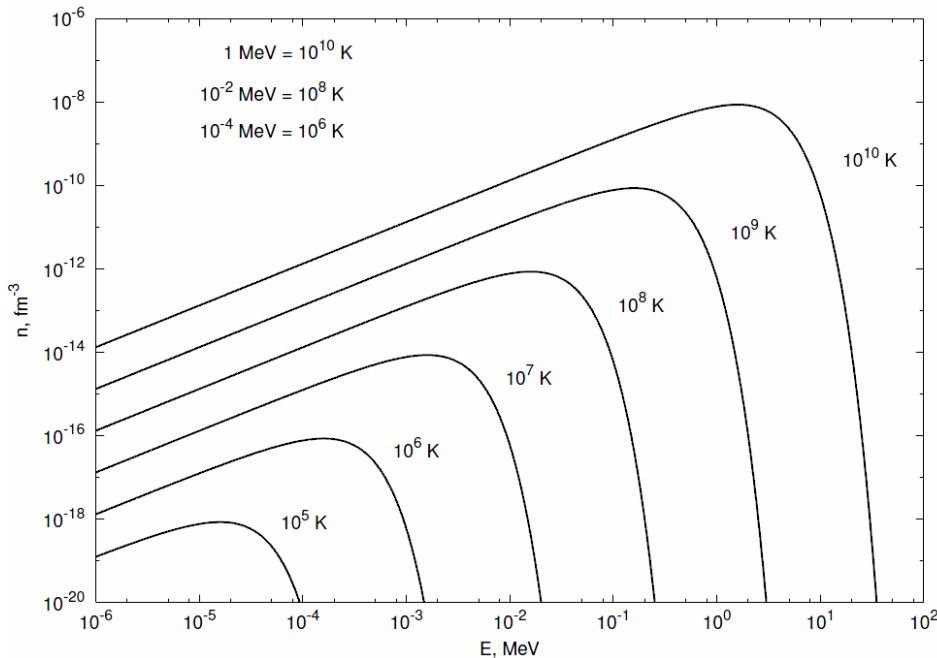
Основные источники γ -квантов в космической среде и звездах

Источниками γ -квантов в звездах и космической среде являются:

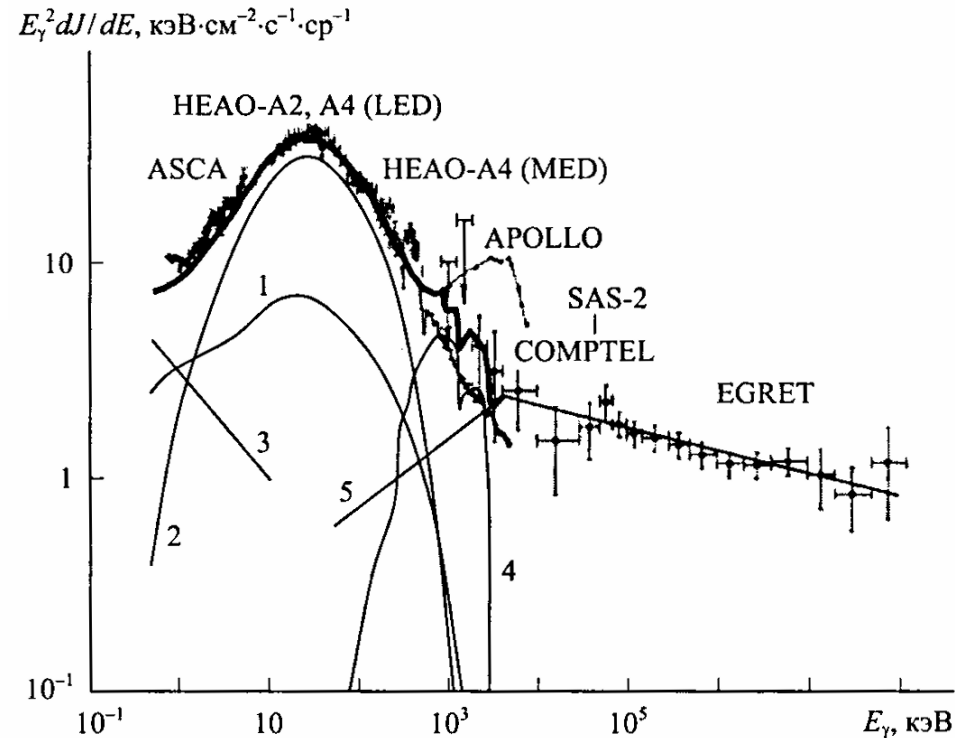
- аннигиляция частиц и античастиц, образовавшихся в результате Большого взрыва;
- тормозное и магнитотормозное излучение электронов, позитронов;
- обратное комптоновское рассеяние малоэнергичных фотонов на высокоэнергичных электронах;
- распад $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$;
- радиационные переходы возбужденных состояний атомных ядер;
- рассеяние реликтовых фотонов на атомных ядрах высокой энергии;
- ускорение электронов на турбулентностях межзвездной плазмы;
- γ -излучение сверхновых, активных ядер галактик.

Основные источники γ -квантов

$$n = \left(\frac{1}{\hbar c} \right)^3 \frac{E^2}{\pi^2} \frac{1}{\left(e^{\frac{E}{kT}} - 1 \right)}$$

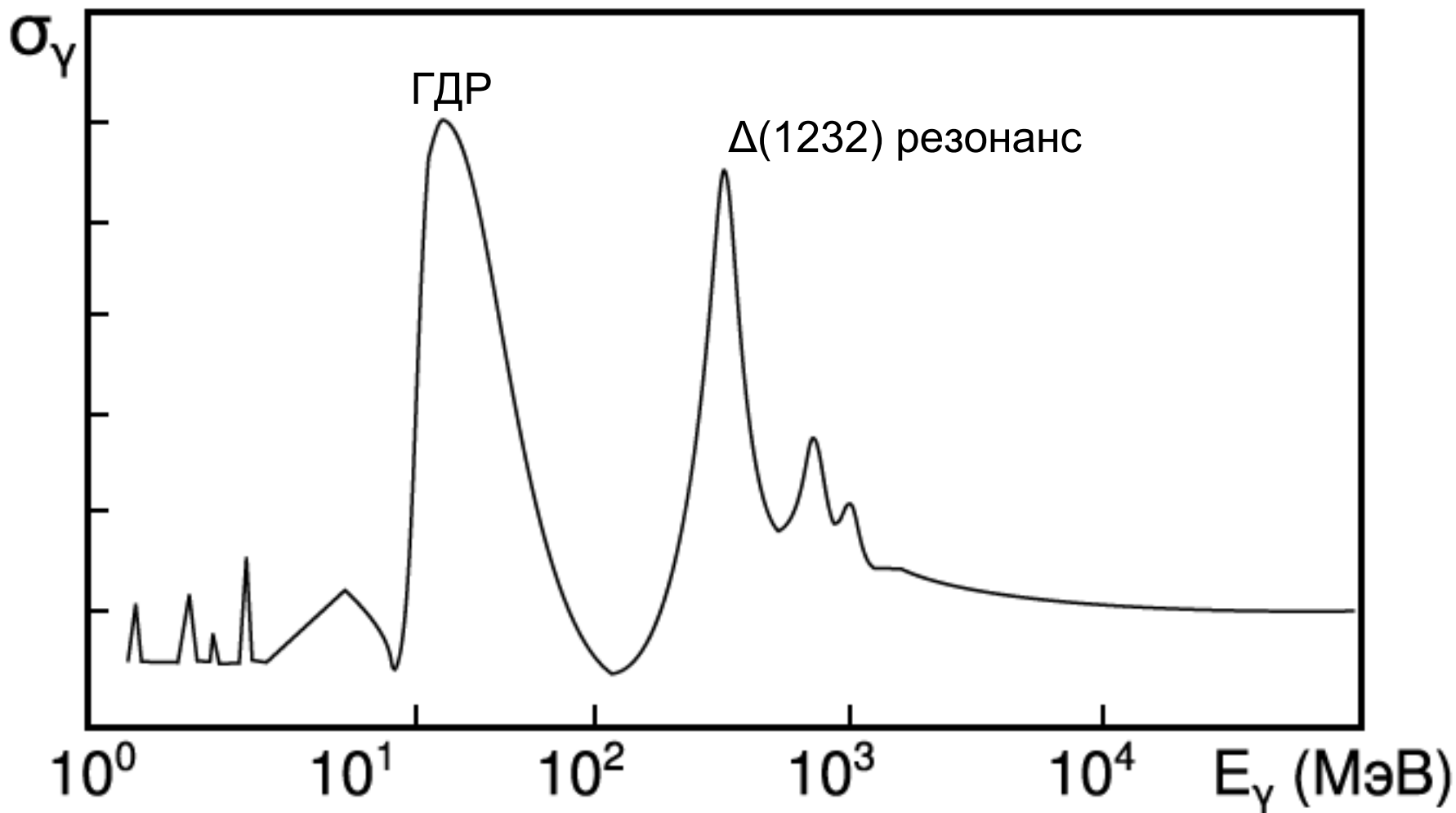


Число фотонов в единице объема спектра равновесного излучения.



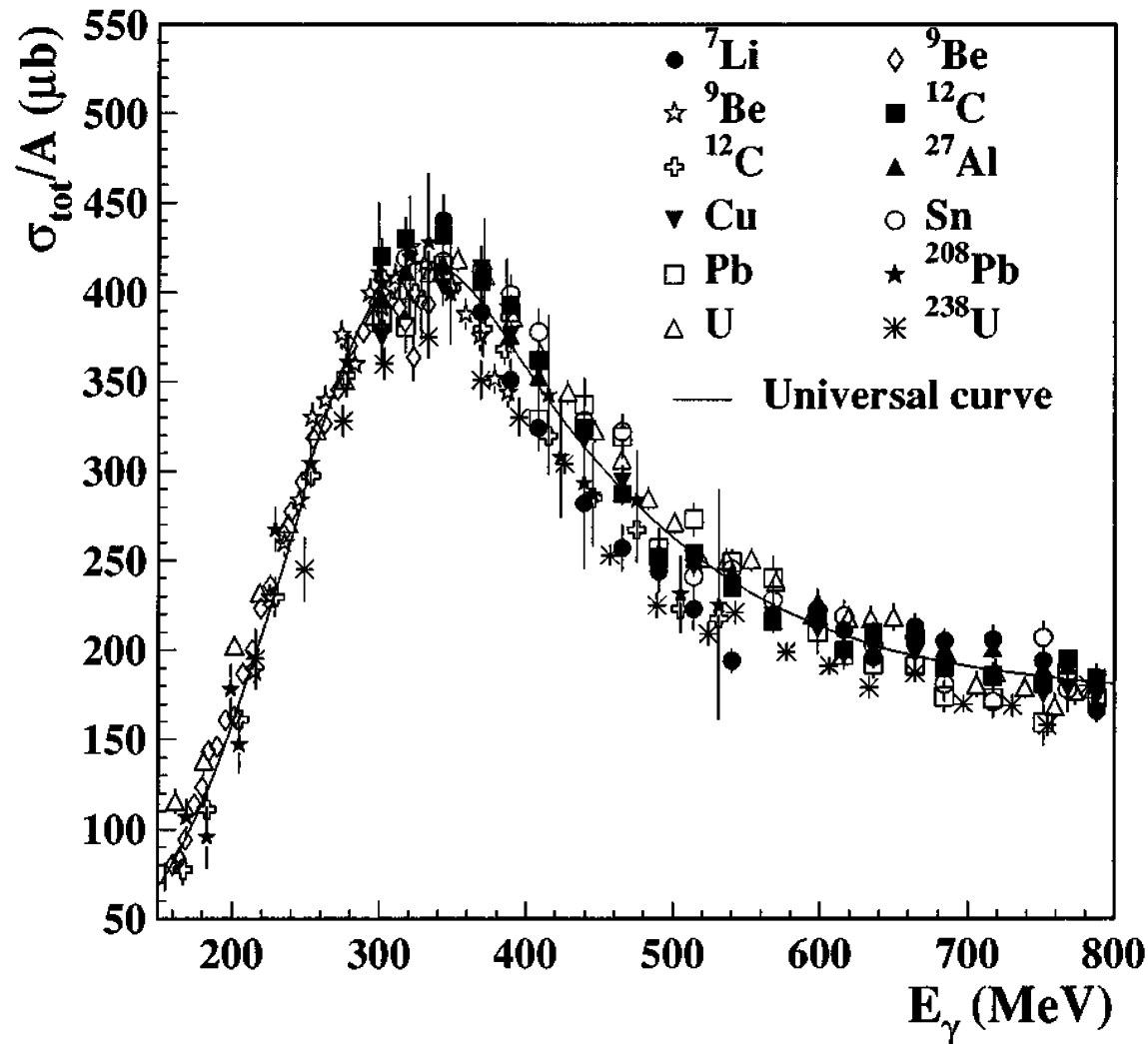
Широкий спектр диффузного внегалактического излучения от рентгеновского до гамма-диапазона по данным различных экспериментов. Кривые линии представляют теоретические оценки вкладов: 1 - сейфертовых галактик 1-го типа; 2 - H-го типа; 3 - квазаров; 4 - сверхновых 1-го типа; 5 – блазаров для степенного спектра с показателем -1,7 при энергиях ниже 4 МэВ и -2,15 при более высоких энергиях. Утолщенная сплошная линия соответствует сумме всех вкладов.

Фотоядерные реакции

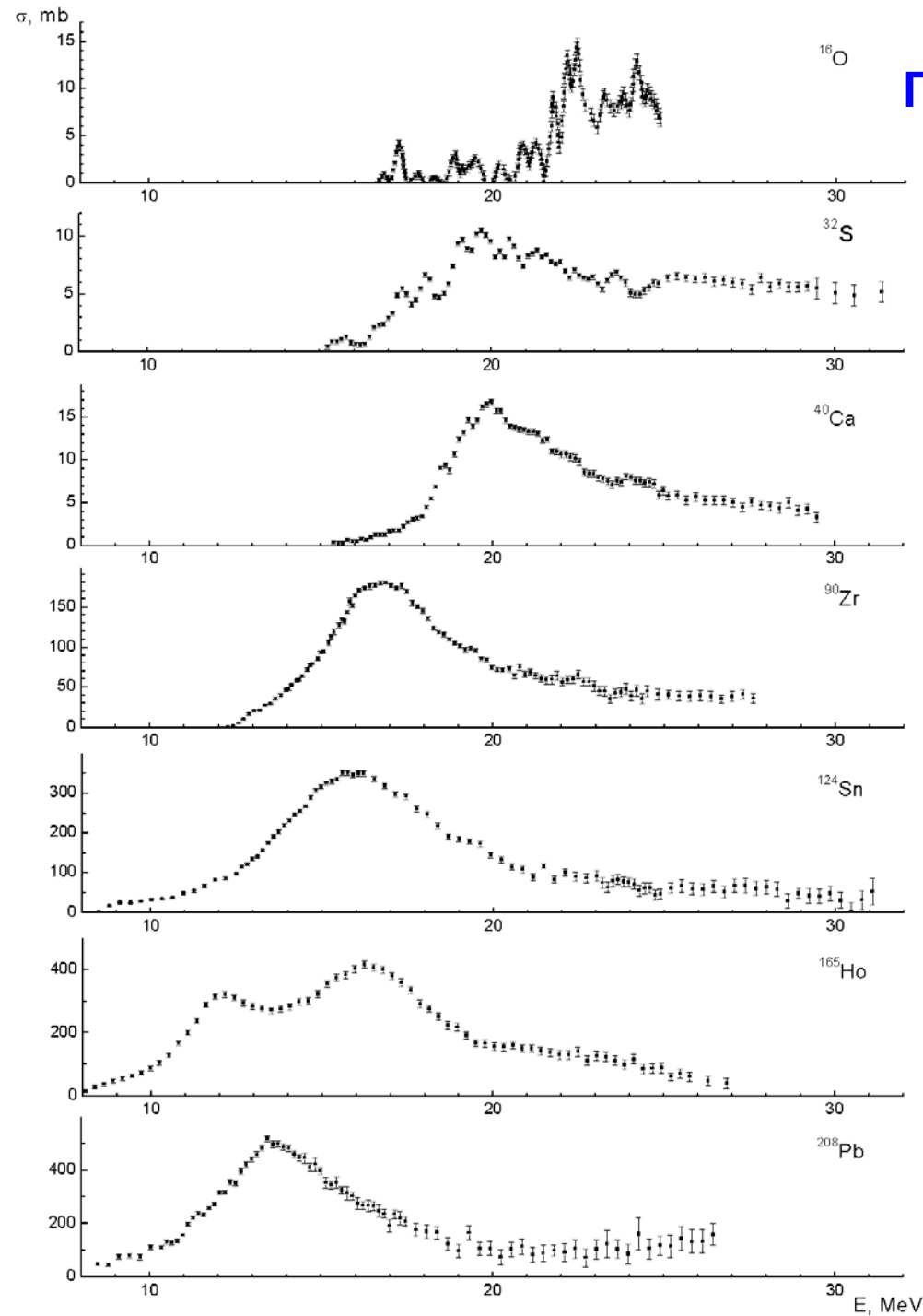


Схематическая зависимость сечений реакций от энергии γ -квантов

Δ(1232) резонанс в ядрах



Отношение полного сечения фотопоглощения к массовому числу A для средних и тяжелых ядер по данным работы [M. MacCormick *et al.*, Phys. Rev. C **55**, 1033 (1997)]. Сплошная кривая – усреднение по имеющимся данным.



Гигантский дипольный резонанс

Положение максимума ГДР

$$E \approx 78 A^{-1/3} \text{ МэВ}$$

Интегральное сечение ГДР

$$\sigma_{\text{int}} = \int_{\text{GDR}} \sigma(E) dE \approx 60 \frac{NZ}{A} \text{ МэВ} \cdot \text{мб}$$

Расщепление максимума ГДР в деформированных ядрах

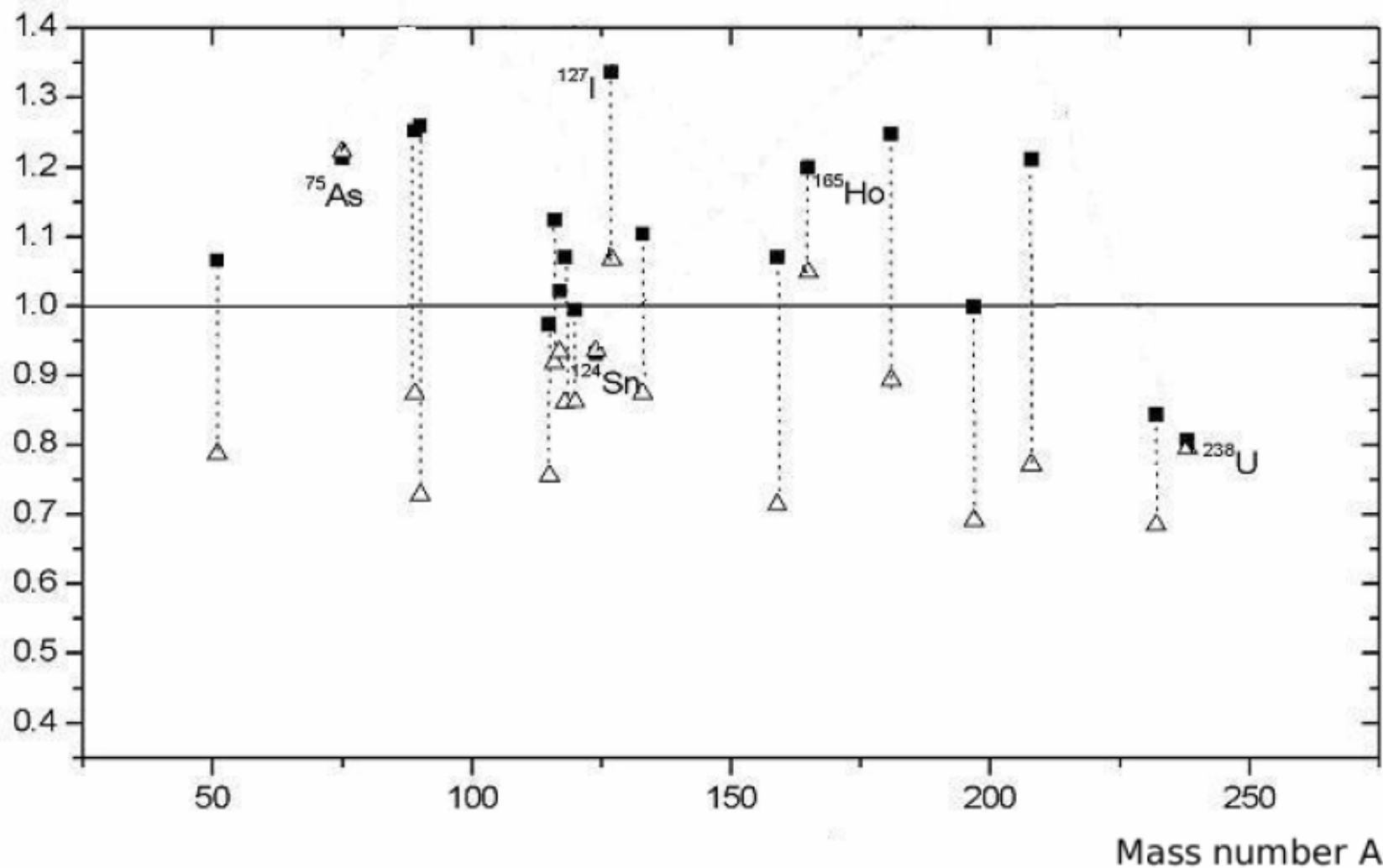
$$E_a = 78 \frac{r_0}{a} \text{ МэВ}, \quad E_b = 78 \frac{r_0}{b} \text{ МэВ}$$

$$\Delta E = E_b - E_a = 78 A^{-1/3} \beta \text{ МэВ}$$

(γ, xn) reaction cross sections in the energy range of the GDR.

Фотонейтронные сечения

$$R^{int} = \sigma_S^{int} / \sigma_L^{int}, \text{ arb. units}$$

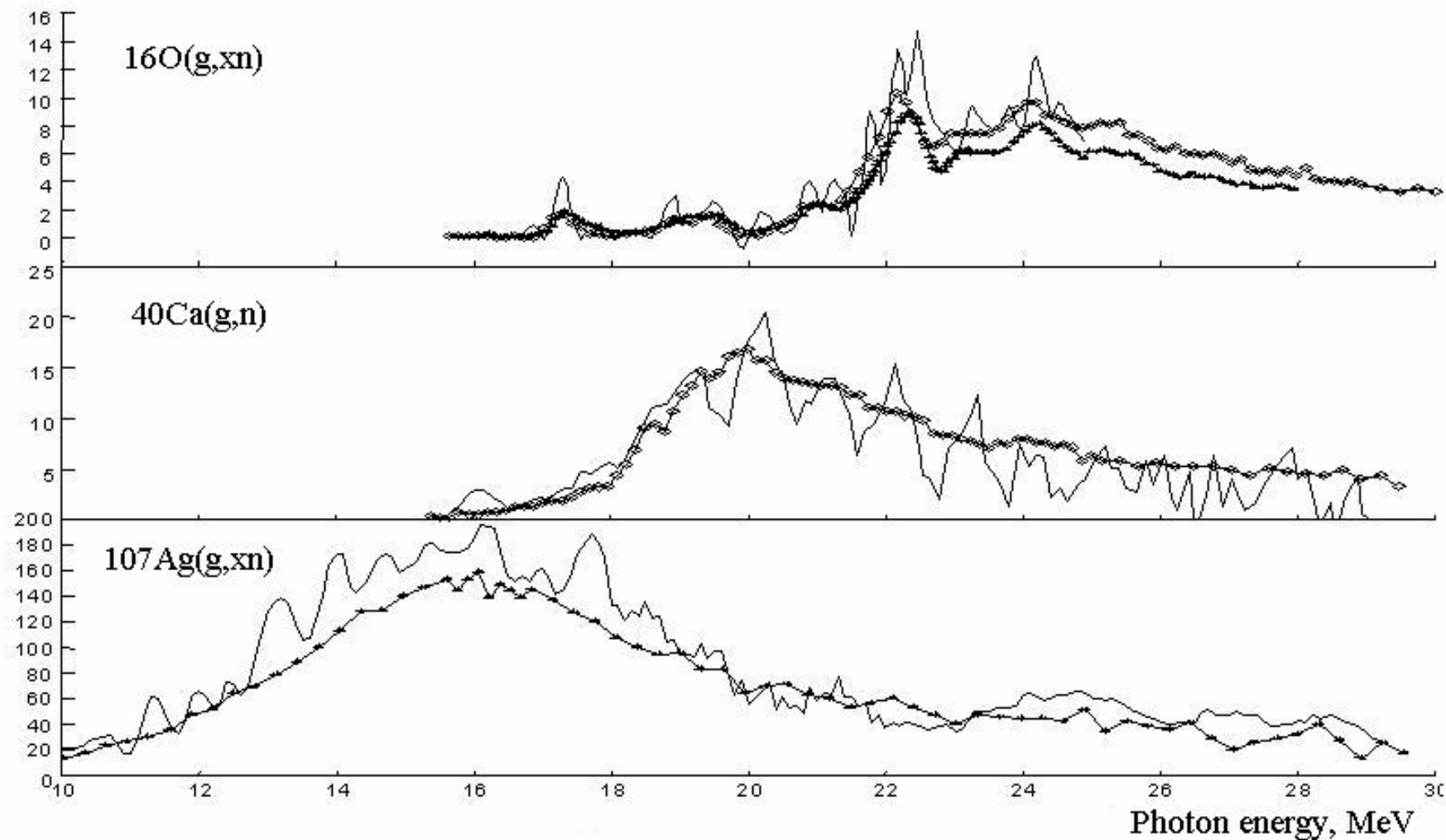


Данные Саклэ и Ливермора

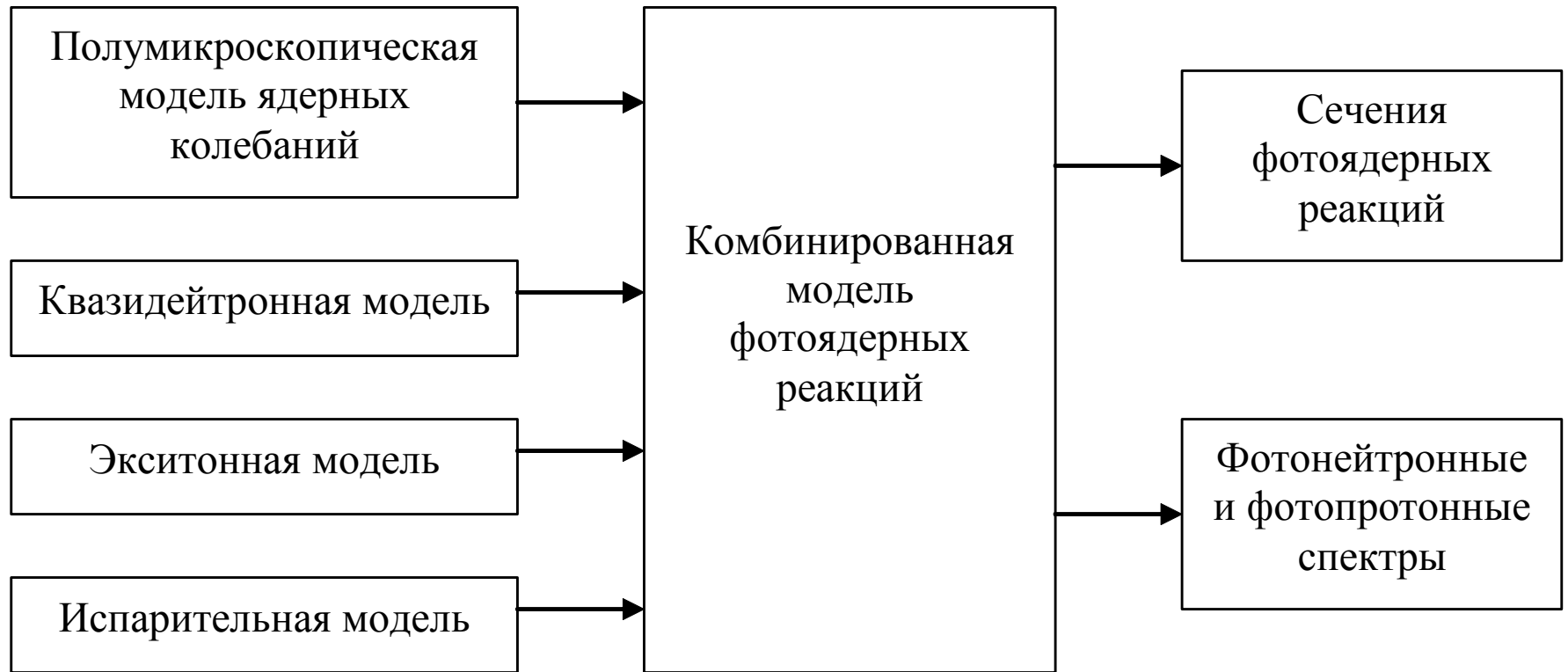
Сечения фотонейтронных реакций

Тормозные и квазимонохроматические эксперименты

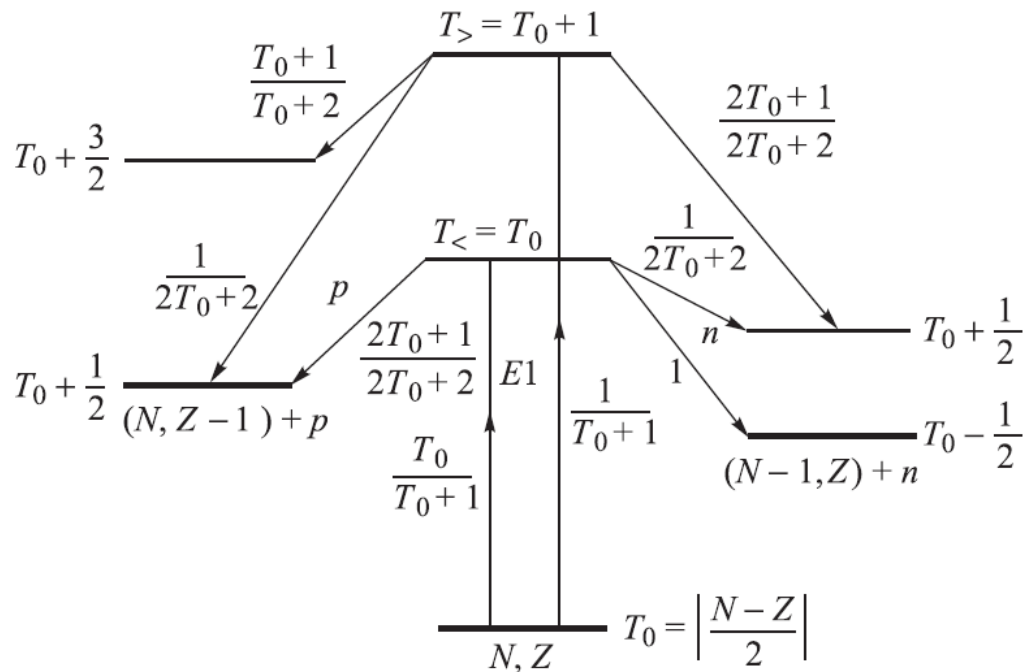
Cross section, mb



Комбинированная модель фотоядерных реакций

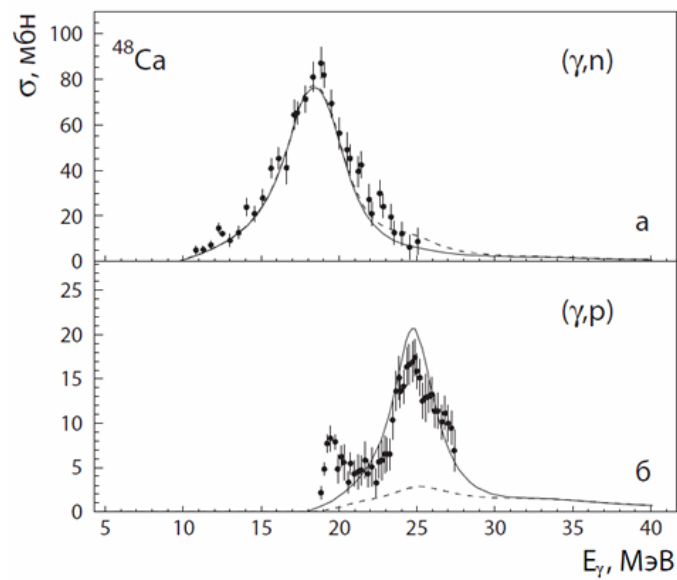
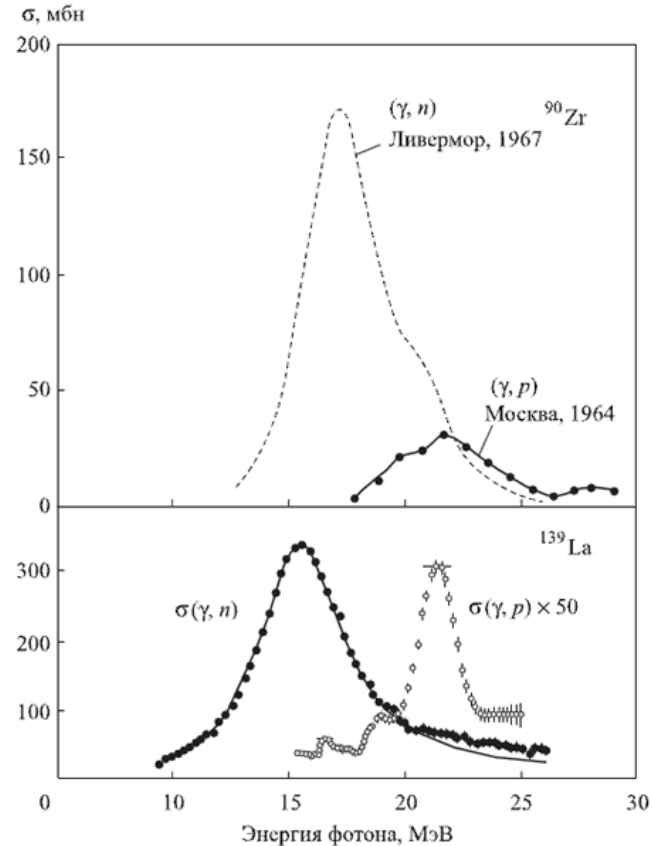


Изоспиновое расщепление ГДР

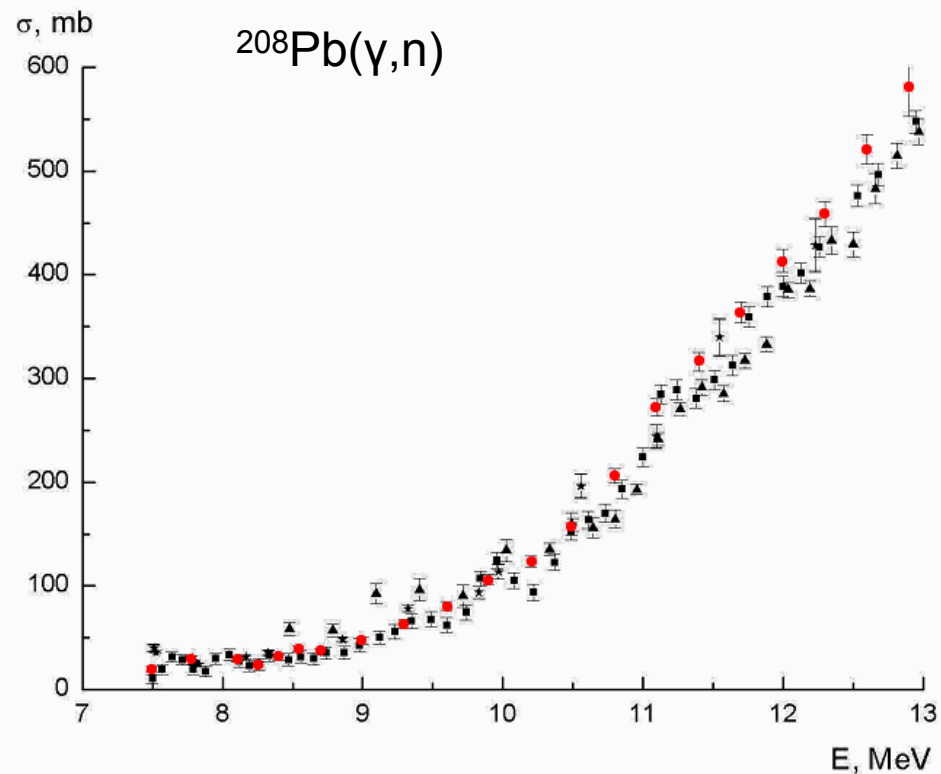
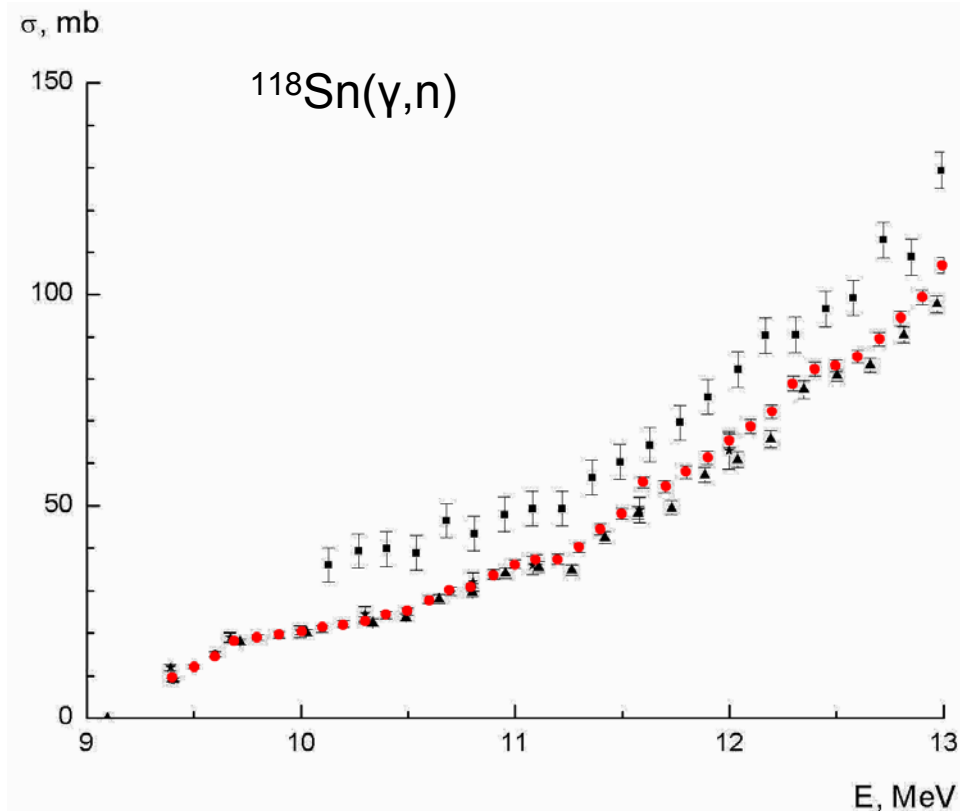


$$\frac{C^2(T_>)}{C^2(T_<)} = \frac{1}{T_0} \left(\frac{1 - 1.5T_0 A^{-2/3}}{1 + 1.5A^{-2/3}} \right).$$

$$E(T_>) - E(T_<) = 60 \frac{T_0 + 1}{A} \text{ МэВ}.$$



Оцененные сечения $^{118}\text{Sn}(\gamma, n)$, $^{208}\text{Pb}(\gamma, n)$



Comparison between our evaluated ([16] dots) and experimental (Saclay|squares, Livermore|triangles, Utsunomiya [26]|stars) data for the $^{118}\text{Sn}(\gamma, n)^{117}\text{Sn}$ reaction cross section near threshold.

Comparison between our evaluated ([28] dots) and experimental (Saclay|squares, Livermore|triangles, Utsunomiya [27]|stars) data for the $^{208}\text{Pb}(\gamma, n)^{207}\text{Pb}$ reaction cross section near threshold.

Гамма-активационная методика

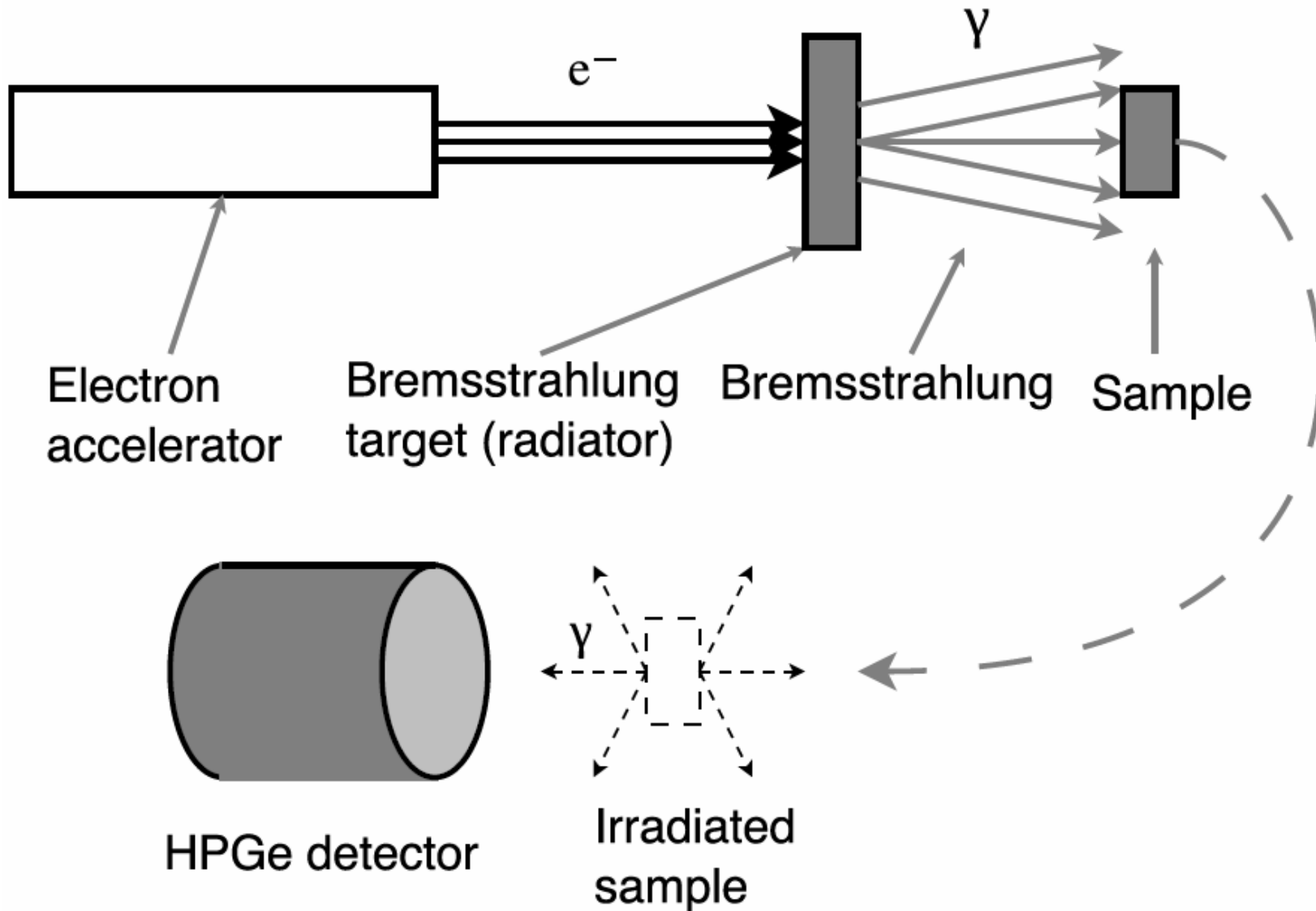
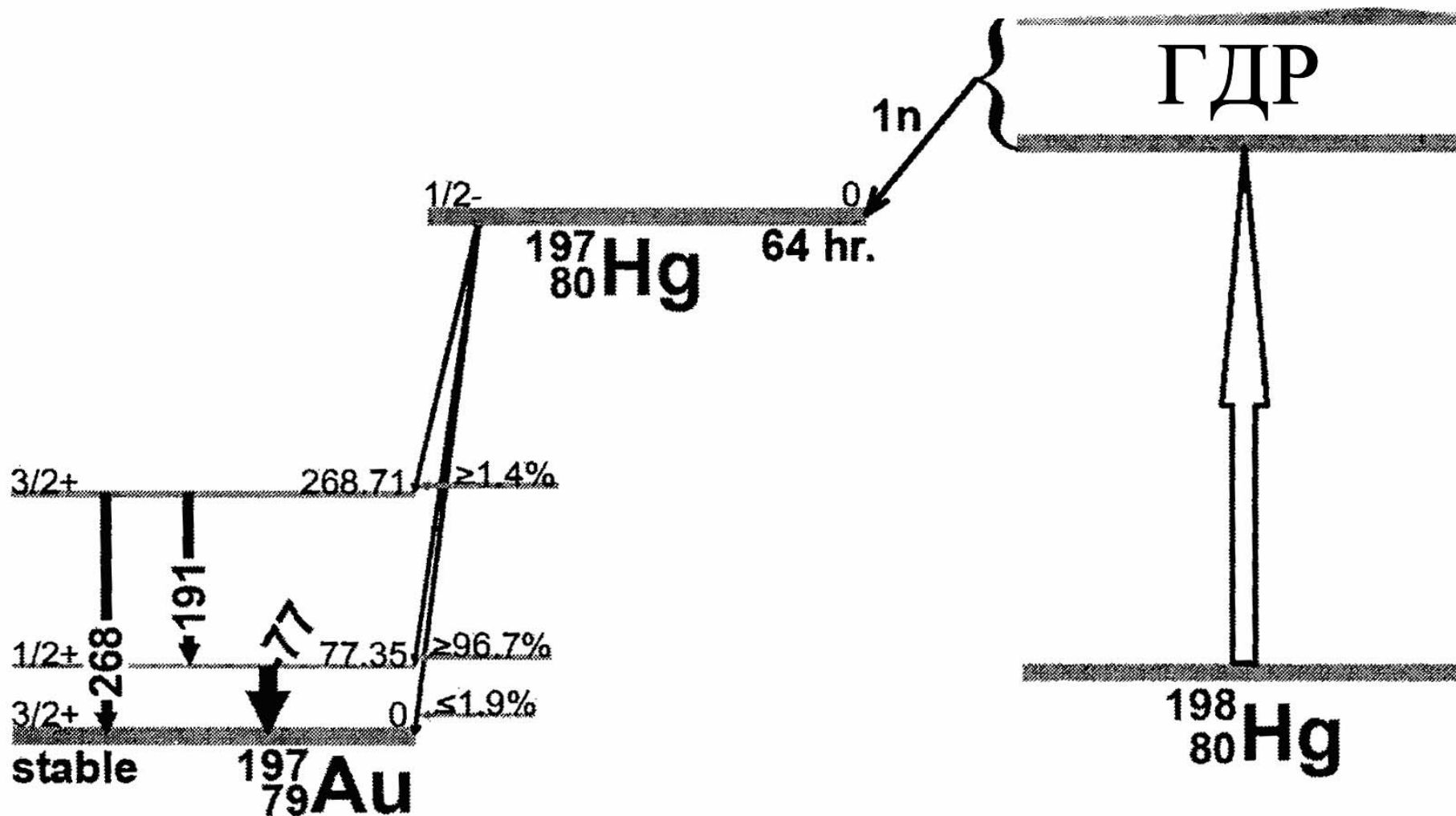


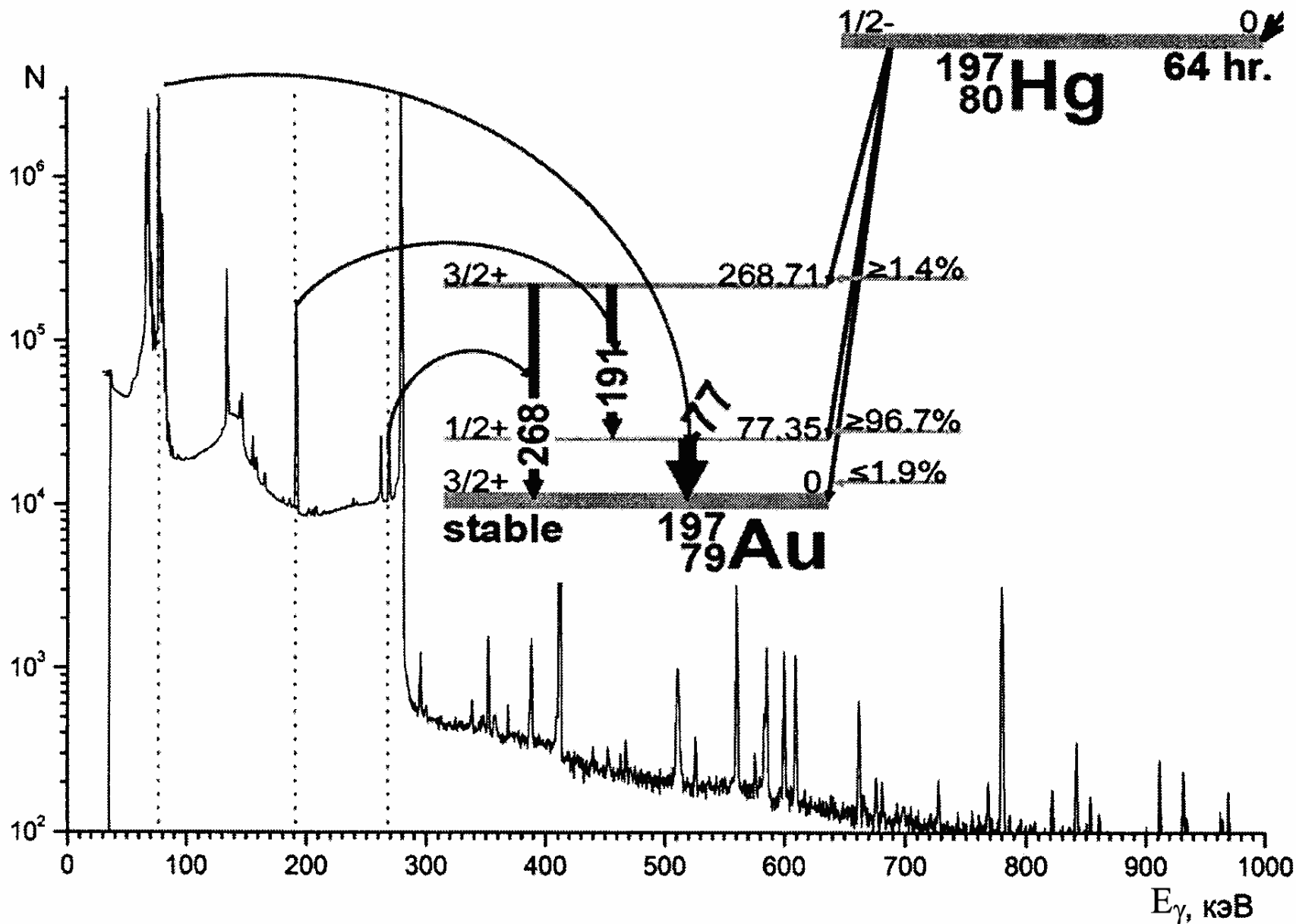
Схема эксперимента на пучке тормозных γ -квантов.

Гамма-активационная методика



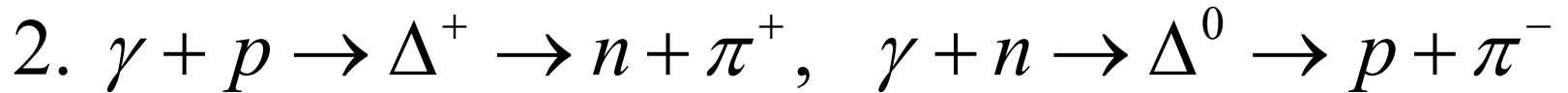
Образование и распад радиоактивного изотопа ^{197}Hg в реакции $^{198}\text{Hg}(\gamma, n)^{197}\text{Hg}$

Гамма-активационная методика

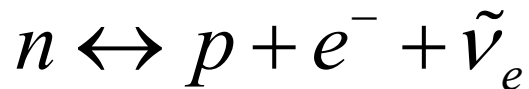
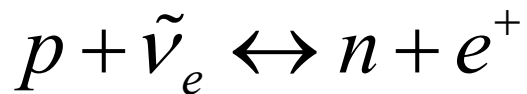
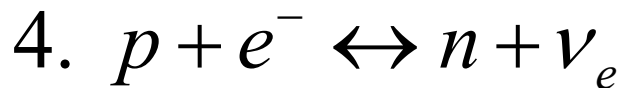


Первичный нуклеосинтез

1. Большой взрыв



3. Реликтовое излучение $n_\gamma / n_N = 10^{-9}$

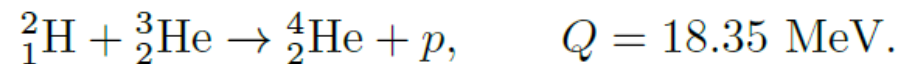
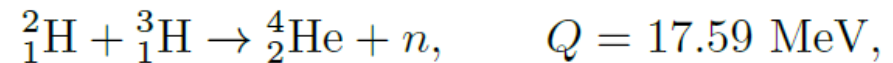
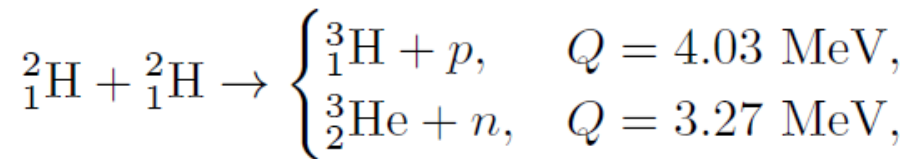
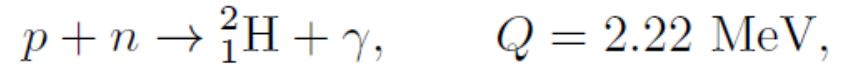
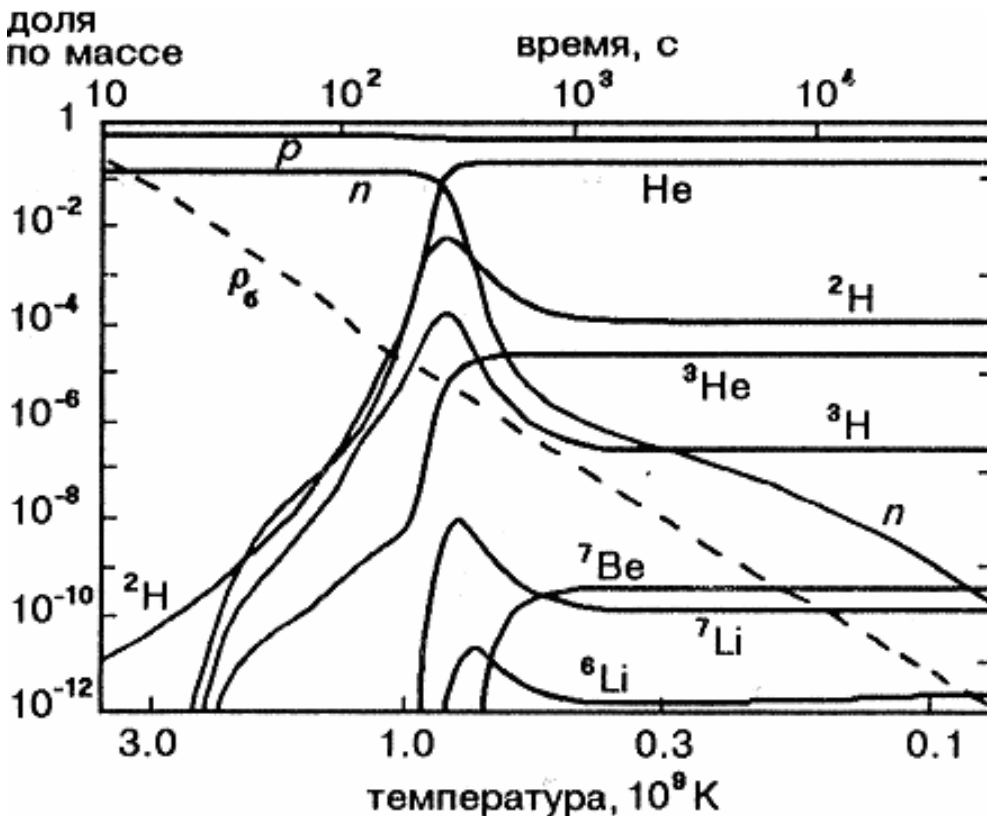


5. Распределение Гиббса

$$\frac{N_p}{N_n} = \frac{e^{-E_p/kT}}{e^{-E_n/kT}} = e^{-(m_p - m_n)c^2/kT} = e^{1,29 \text{ МэВ}/kT(\text{МэВ})} \approx 6.$$

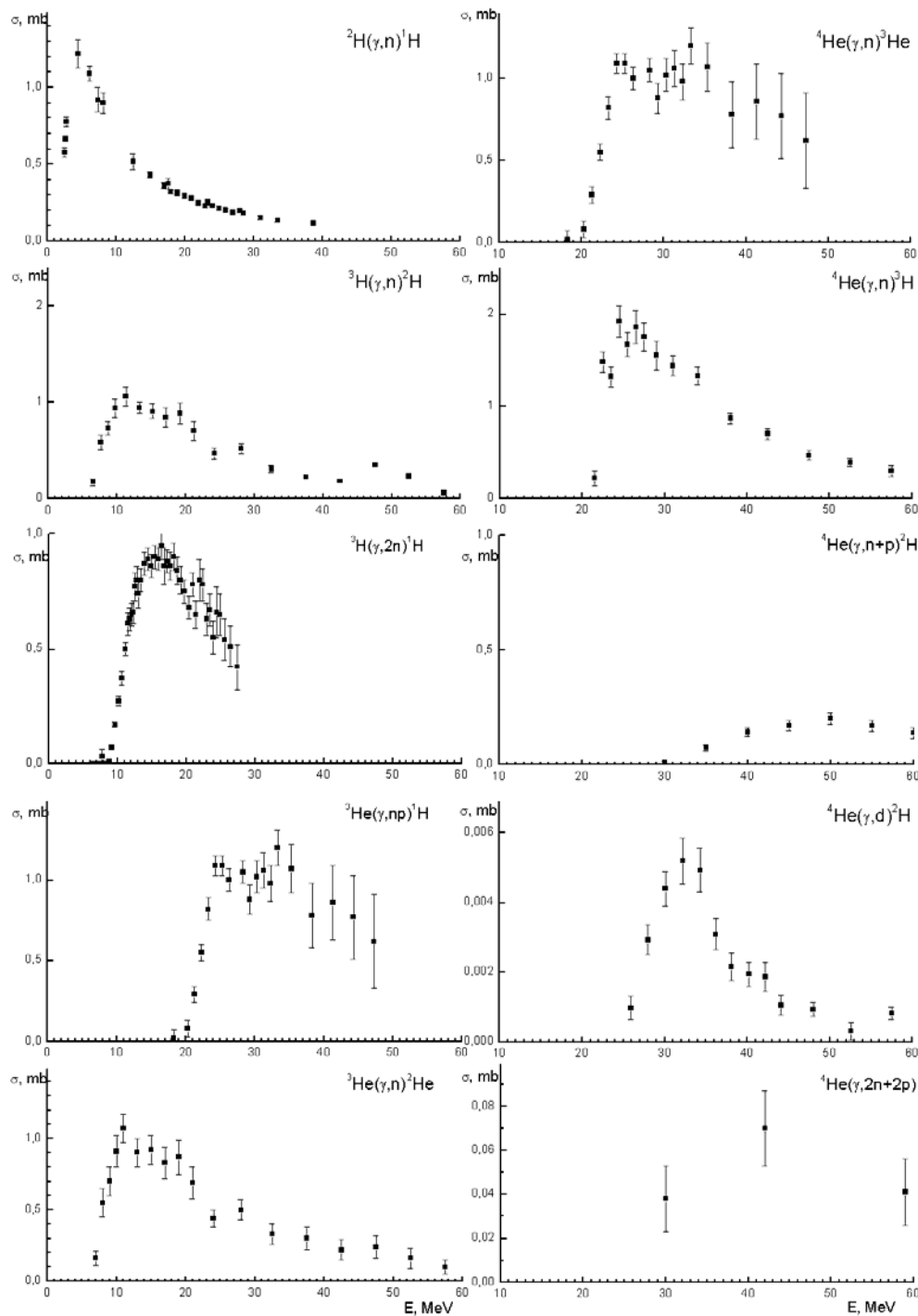
$$T \approx 10^9 \text{ К.}$$

Первичный нуклеосинтез

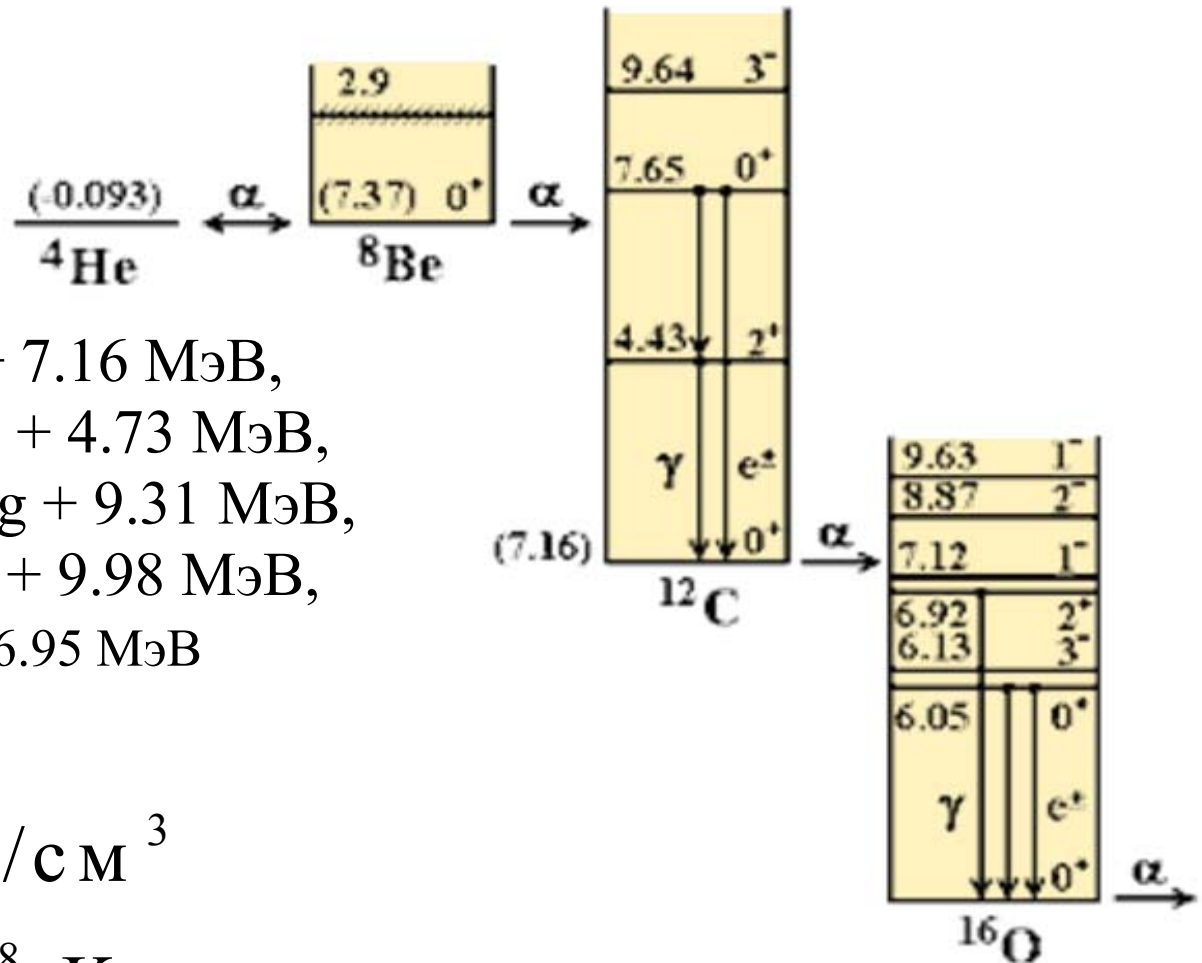
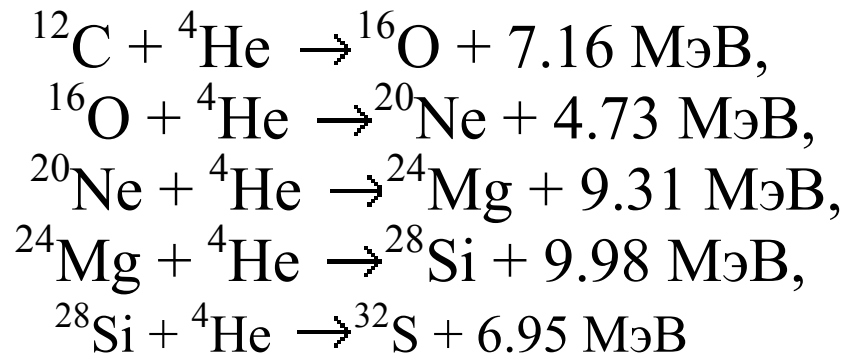
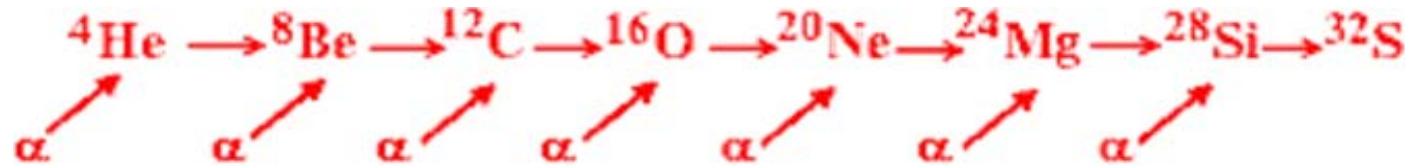


Изменение выхода легчайших ядер и барионной плотности (штриховая линия) на этапе первичного нуклеосинтеза

**Сечения фотоядерных реакций
на изотопах ^2H , ^3H , ^3He
 $E_\gamma < 60$ МэВ.**



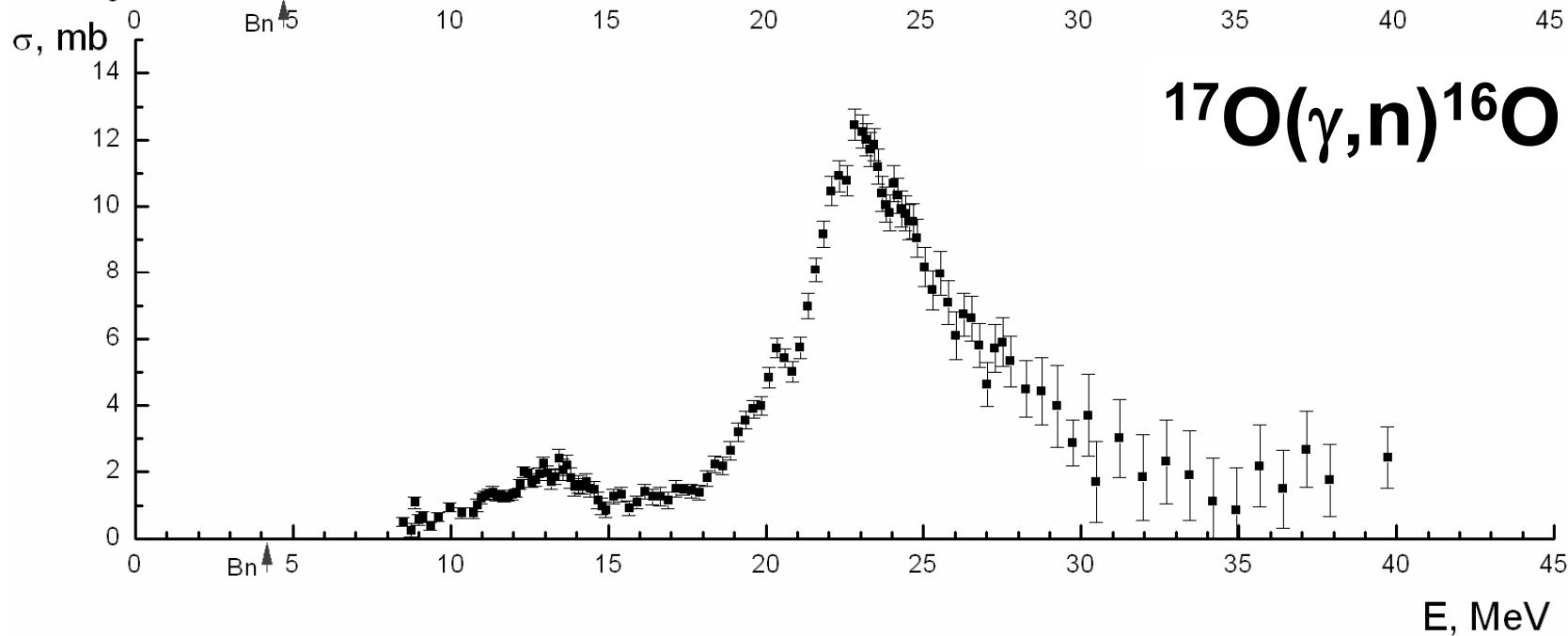
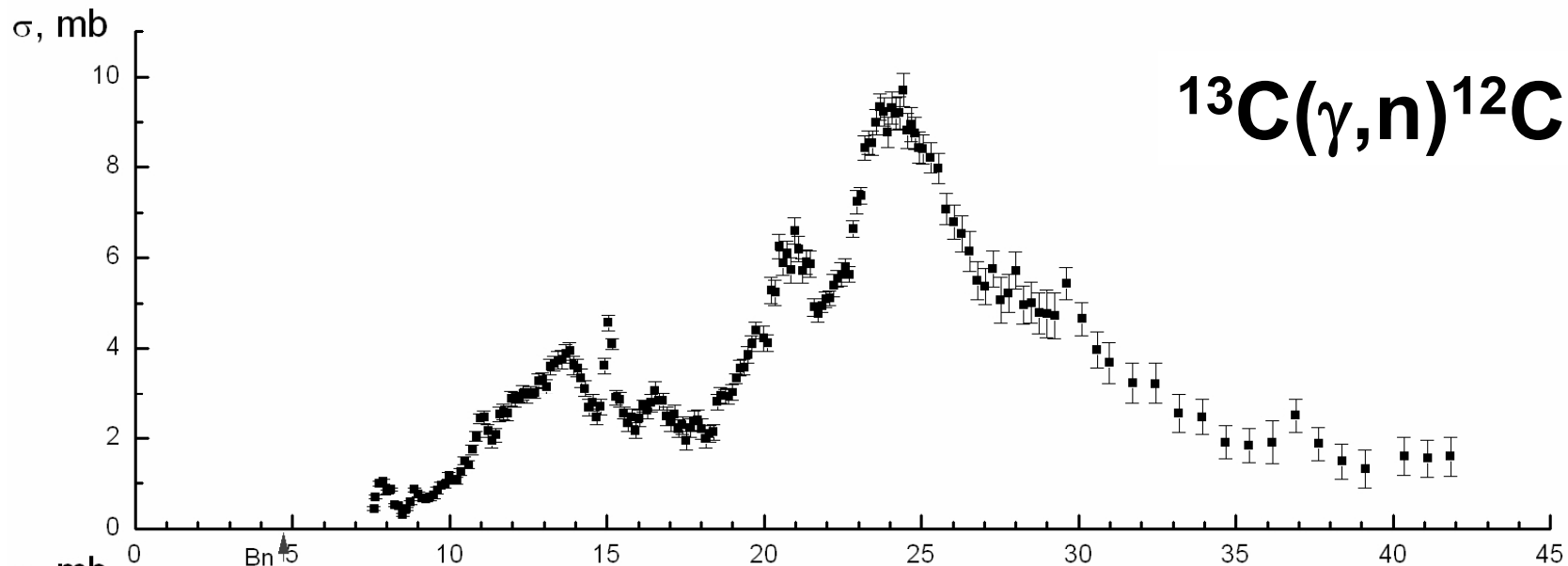
α-процесс в звездах



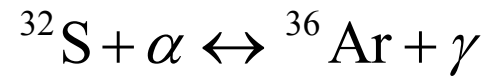
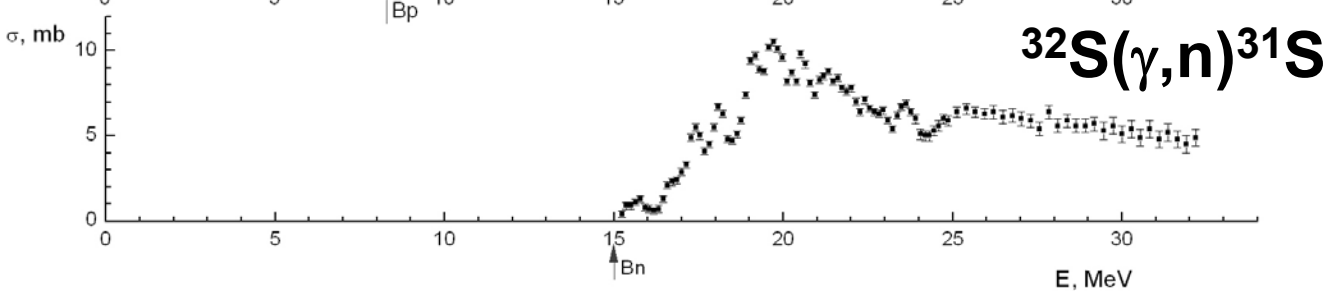
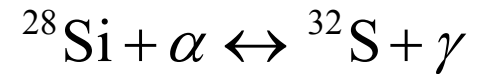
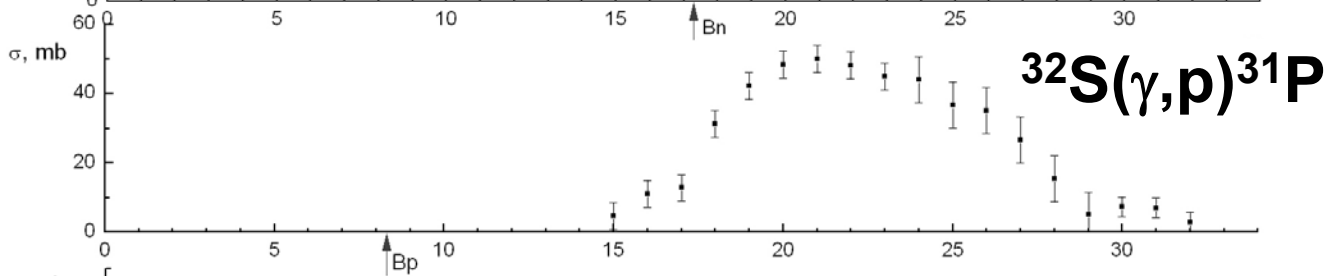
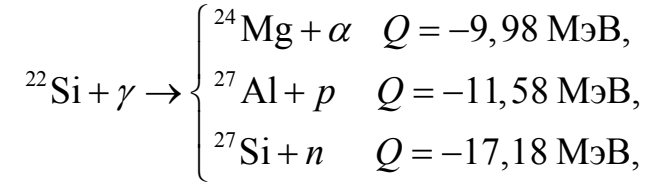
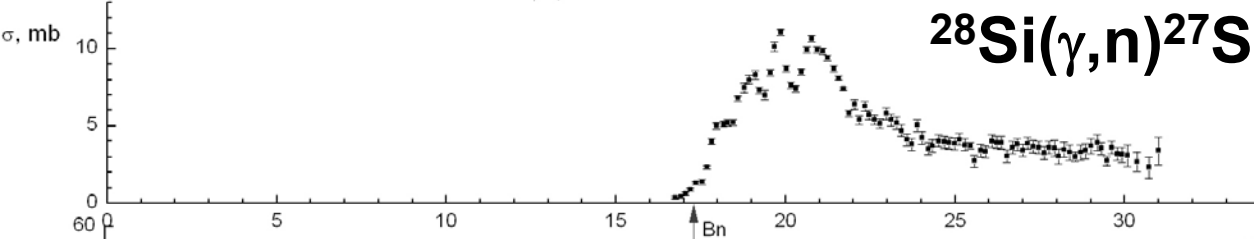
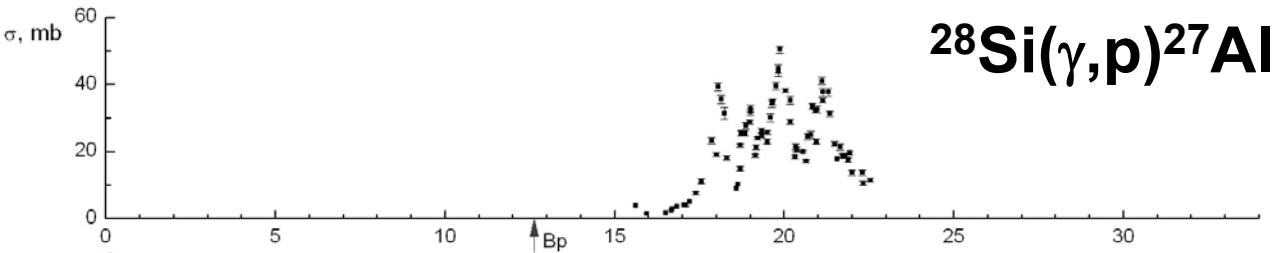
$$\rho = 10^3 \text{ г/см}^3$$

$$T = 2 \cdot 10^8 \text{ K}$$

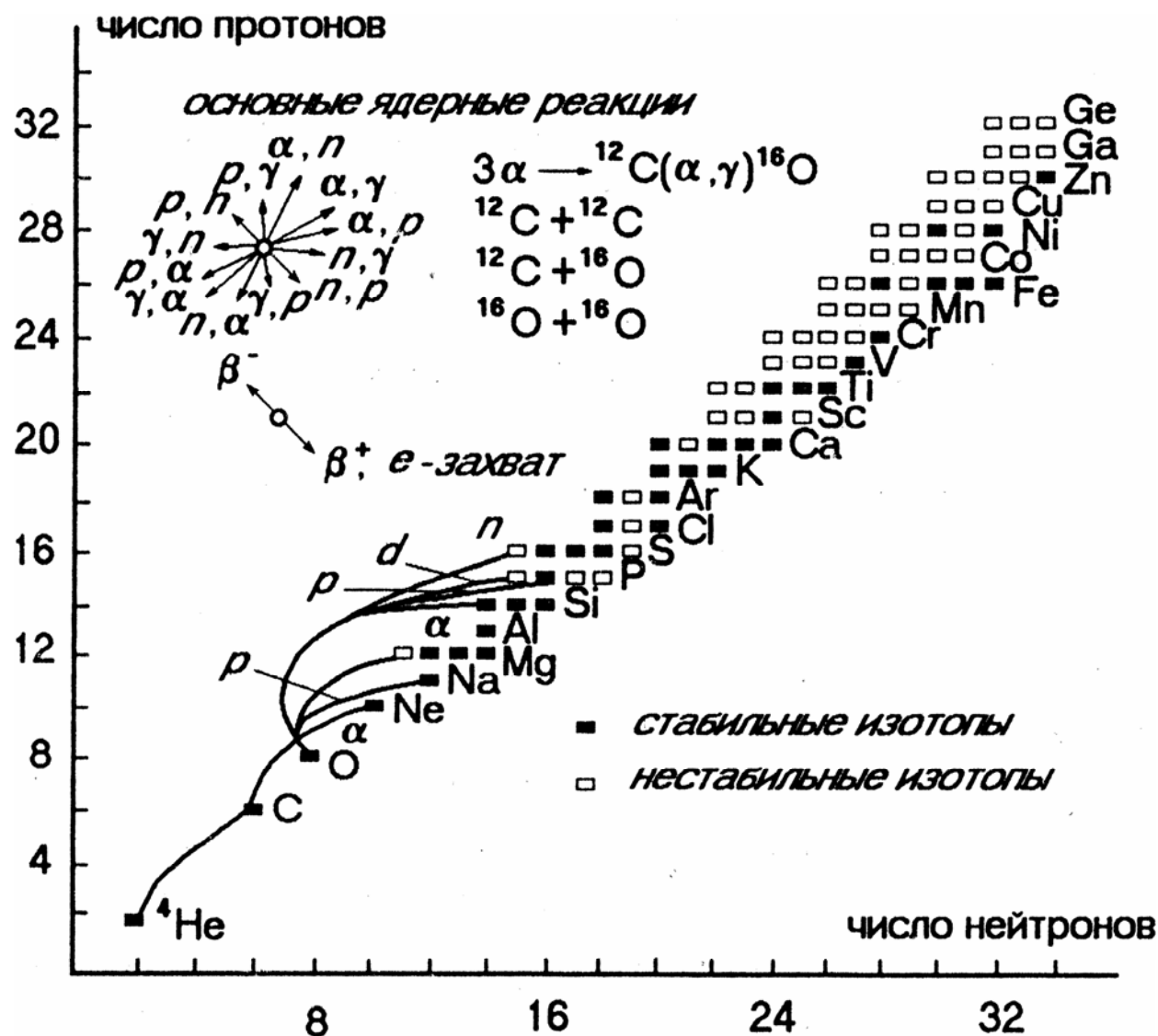
Фотоядерные реакции – источники нейтронов



е-процесс

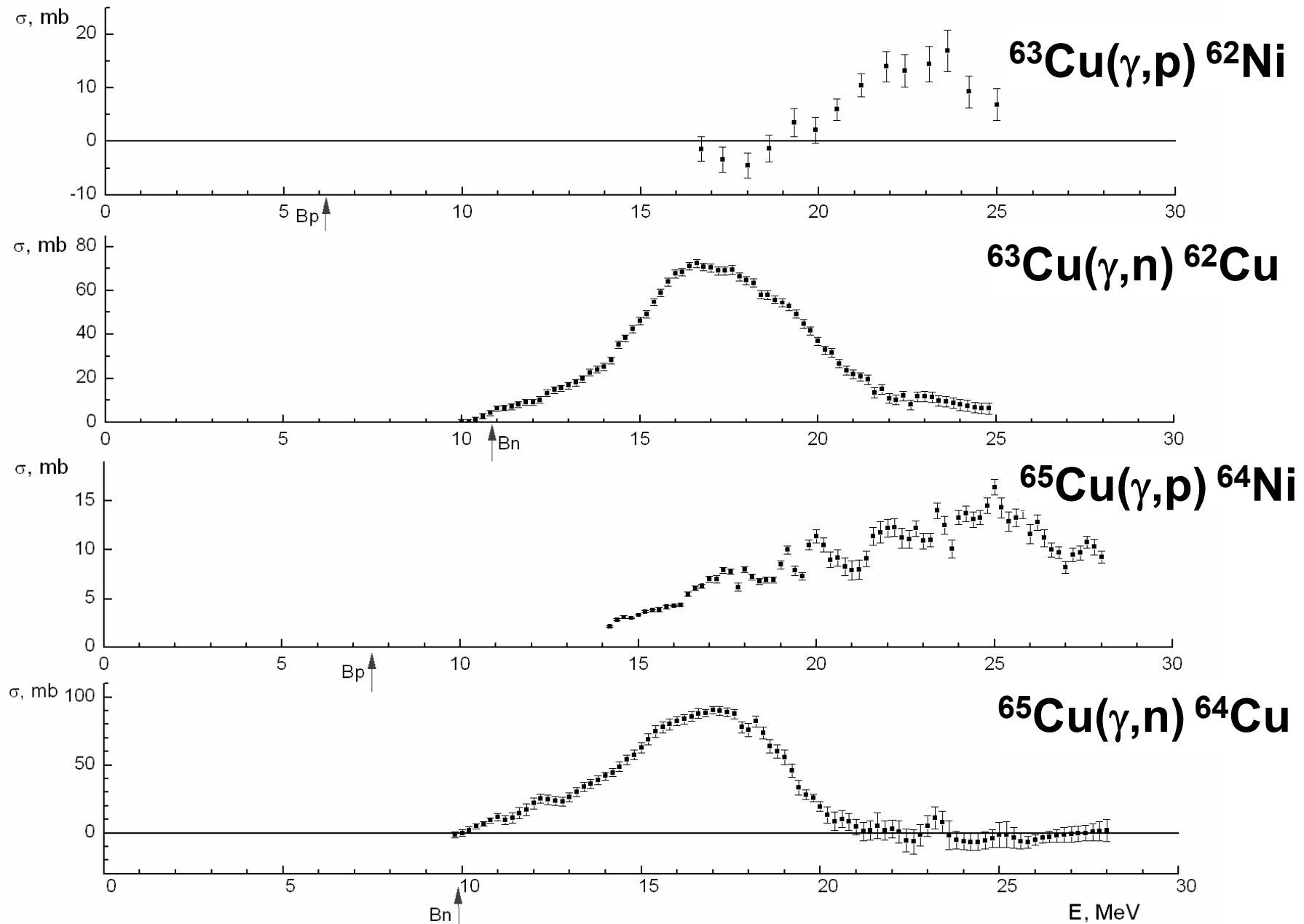


Синтез химических элементов от гелия до германия



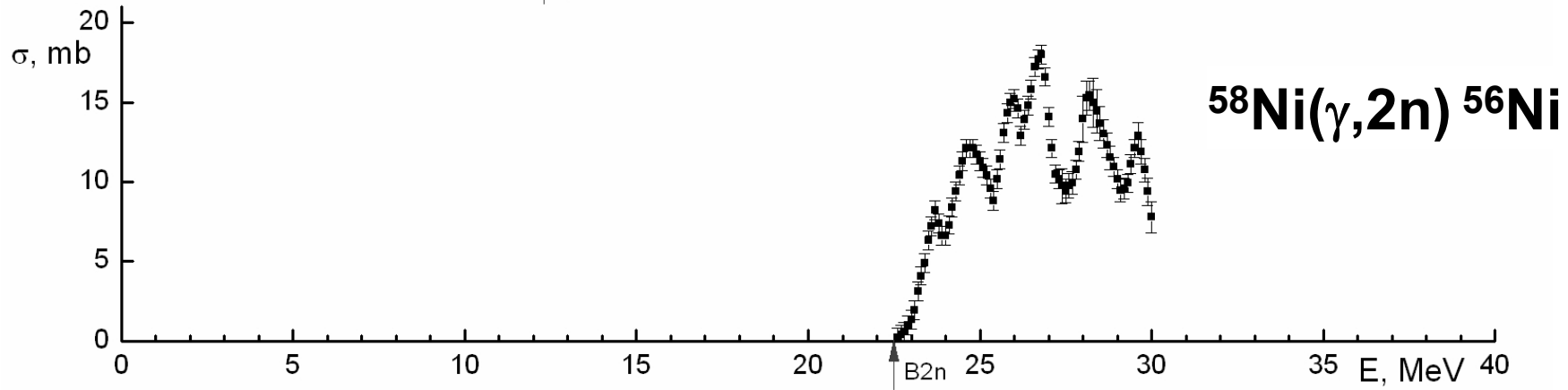
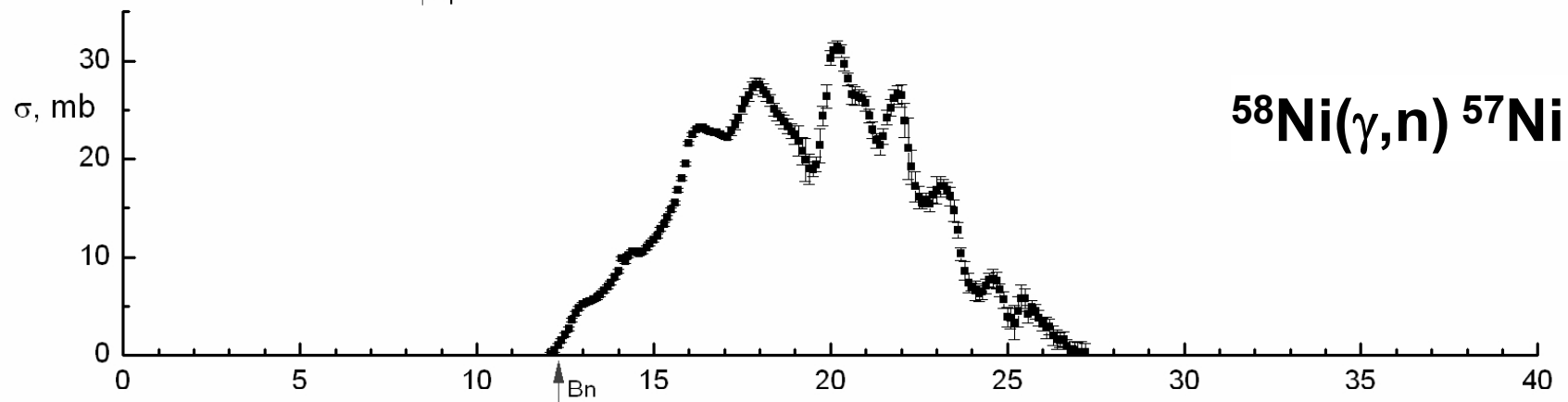
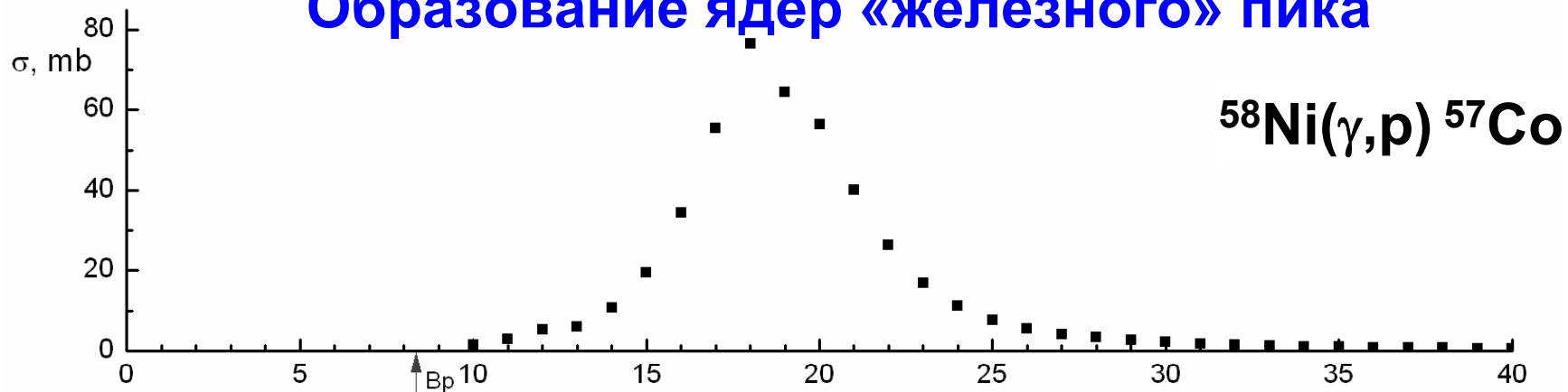
Ядерные реакции, приводящие к синтезу элементов от гелия до германия.

Образование ядер «железного» пика



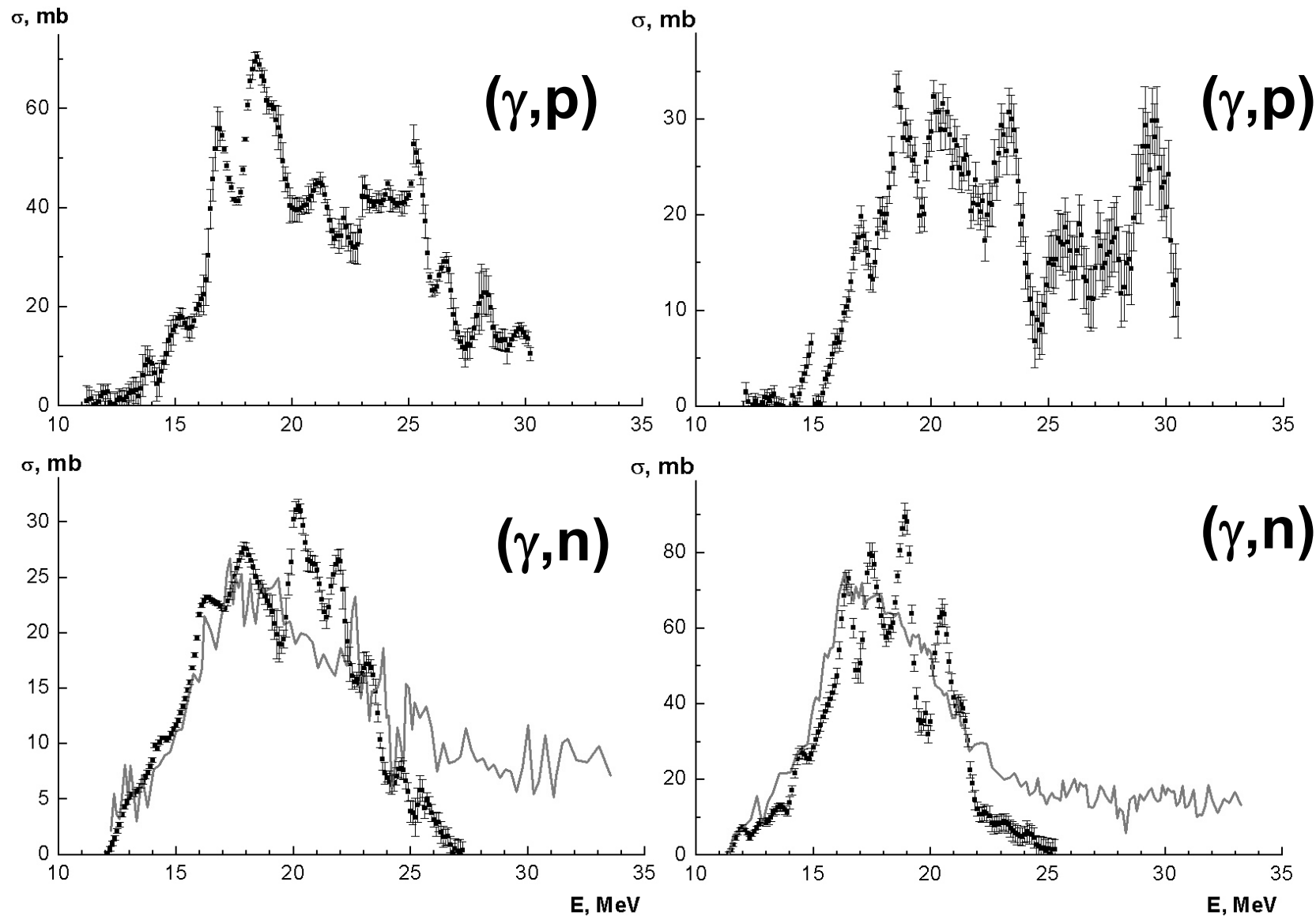
Сечения реакций (γ, p) , (γ, n) на изотопах $^{63,65}\text{Cu}$.

Образование ядер «железного» пика



Сечения реакций (γ, p) , (γ, n) , $(\gamma, 2n)$ на изотопе ^{58}Ni .

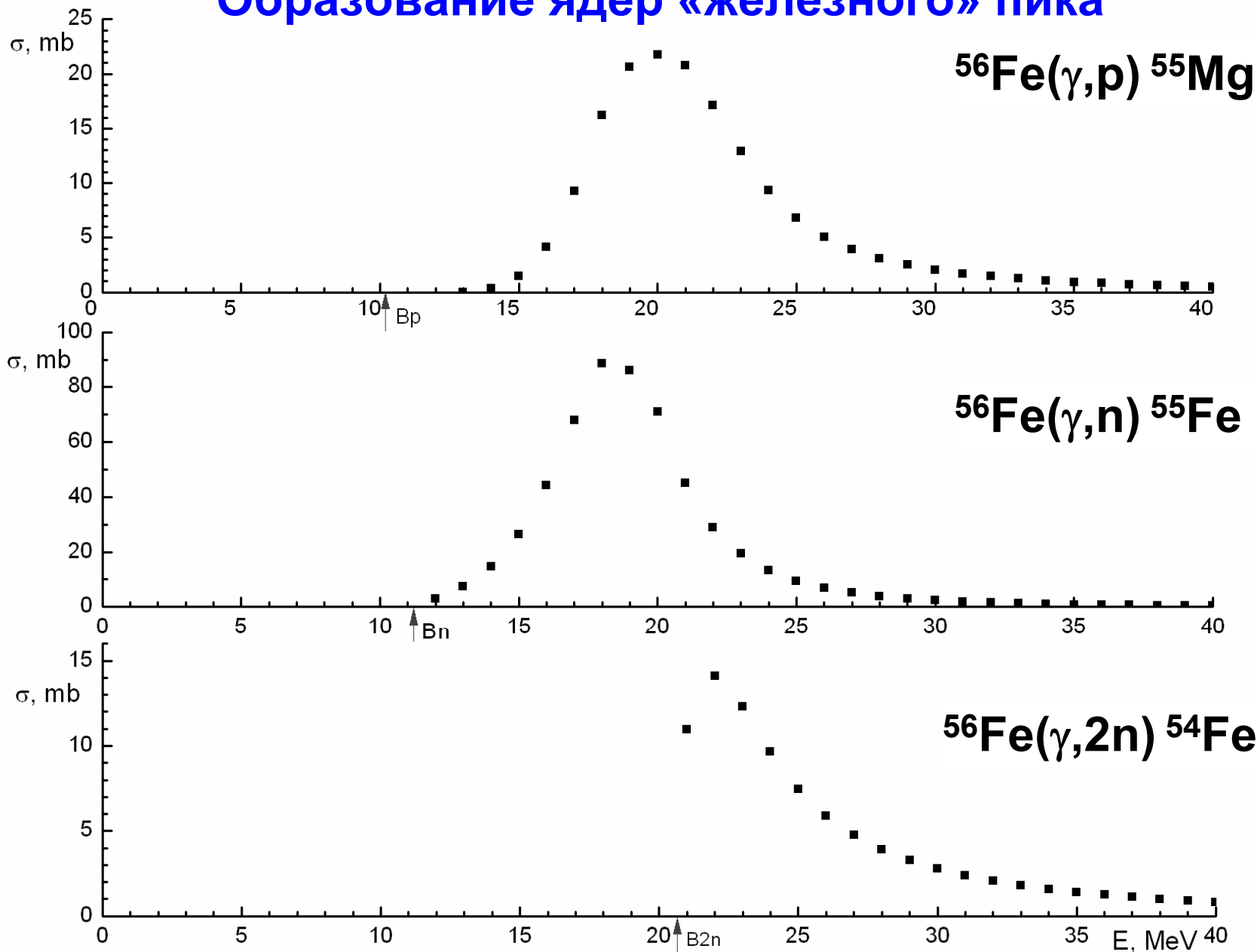
Образование ядер «железного» пика. Изоспиновые эффекты



^{58}Ni

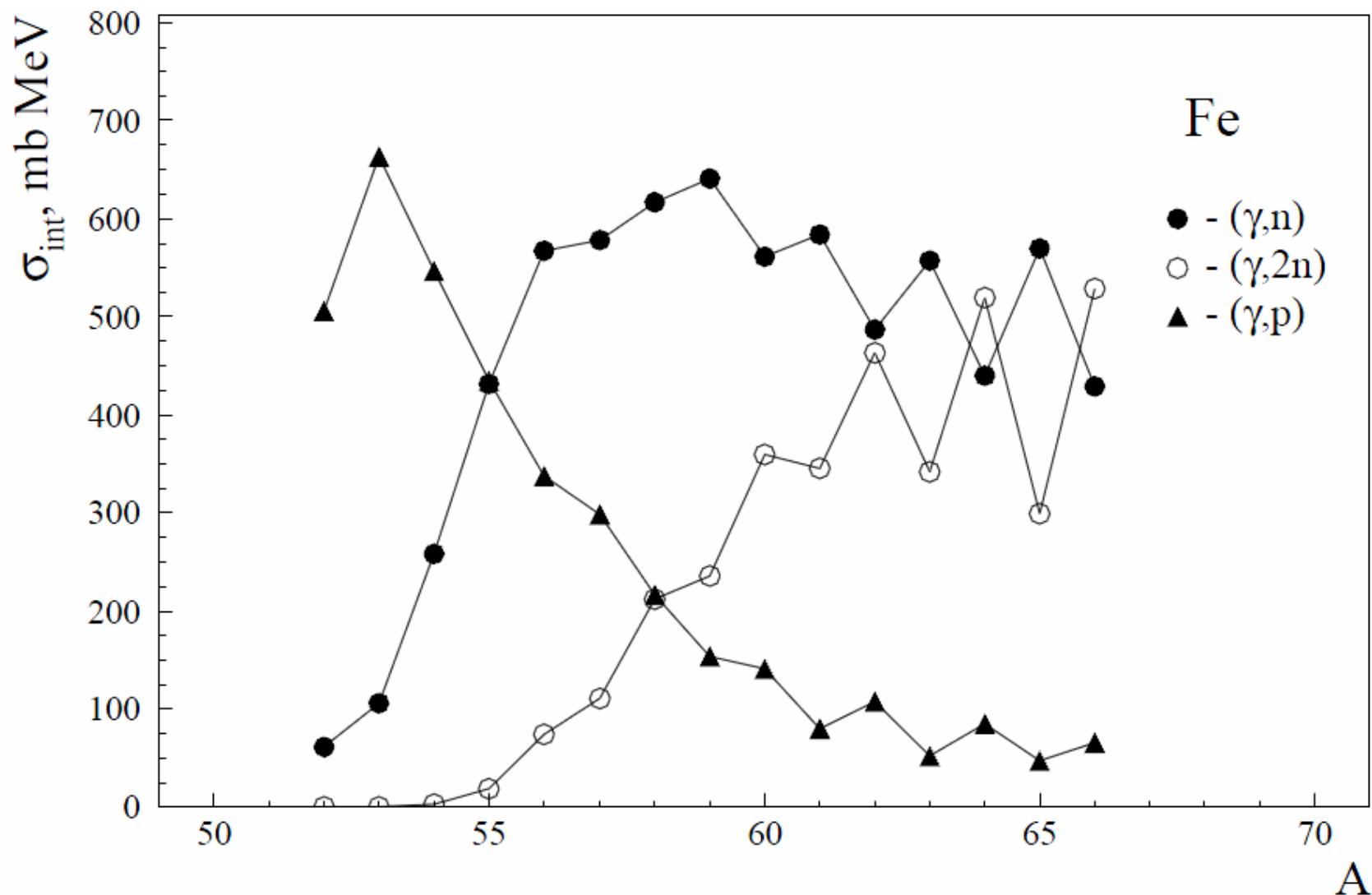
^{60}Ni

Образование ядер «железного» пика



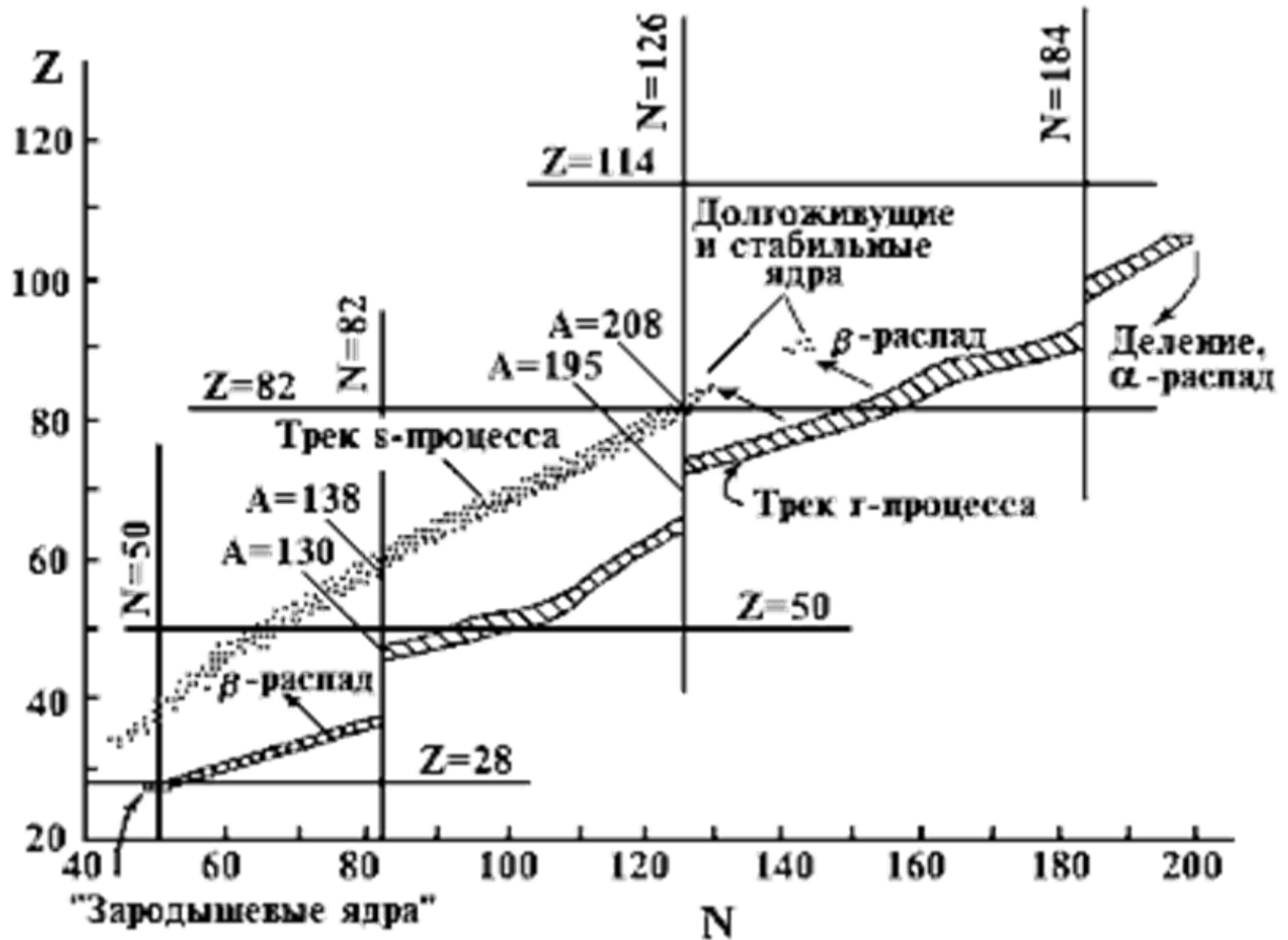
Сечения реакций (γ, p) , (γ, n) , $(\gamma, 2n)$ на изотопе ^{56}Fe .

Образование ядер «железного» пика

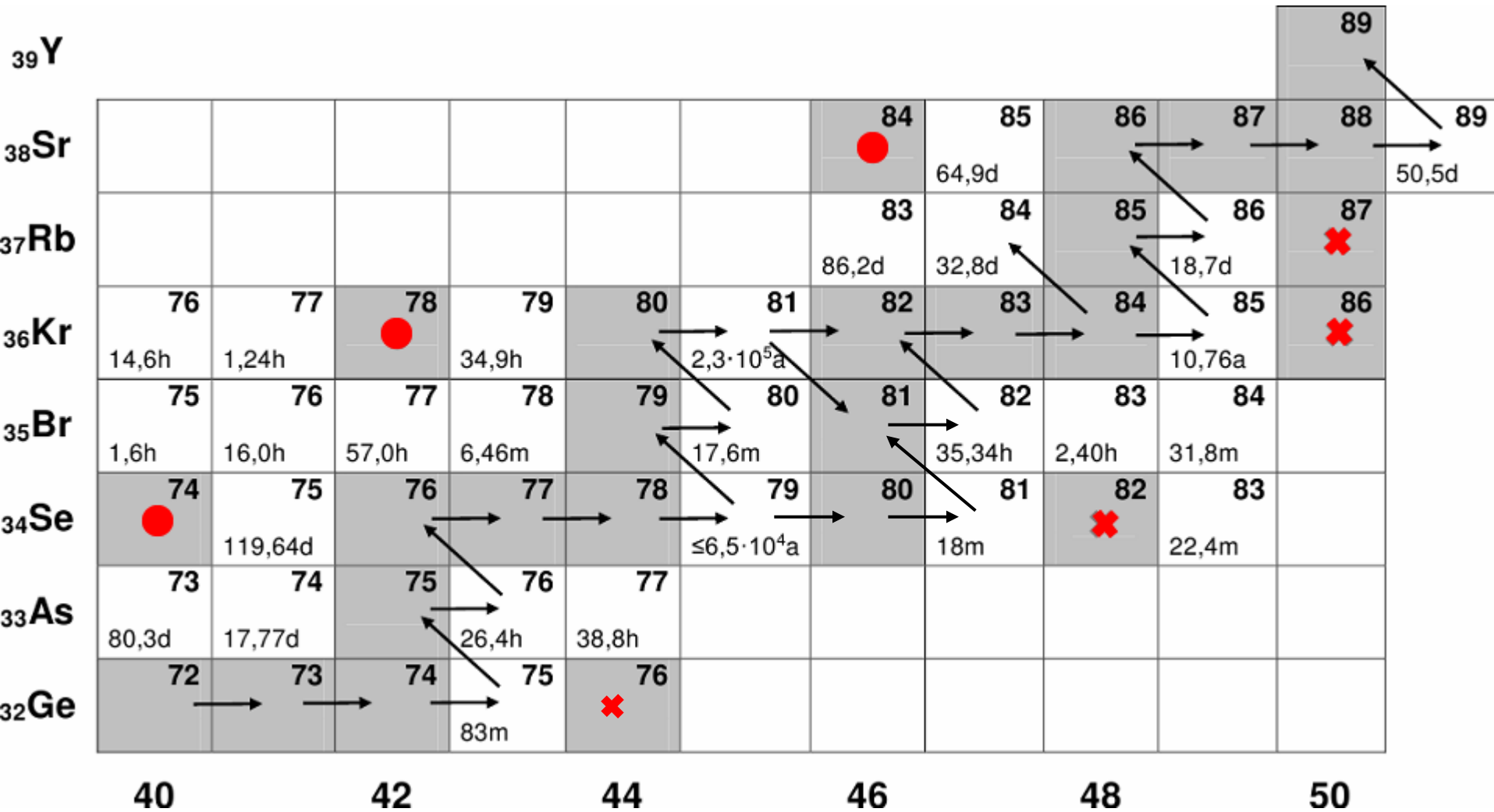


Интегральные сечения реакций (γ, p) , (γ, n) , $(\gamma, 2n)$ на изотопах Fe в зависимости от массового числа A .

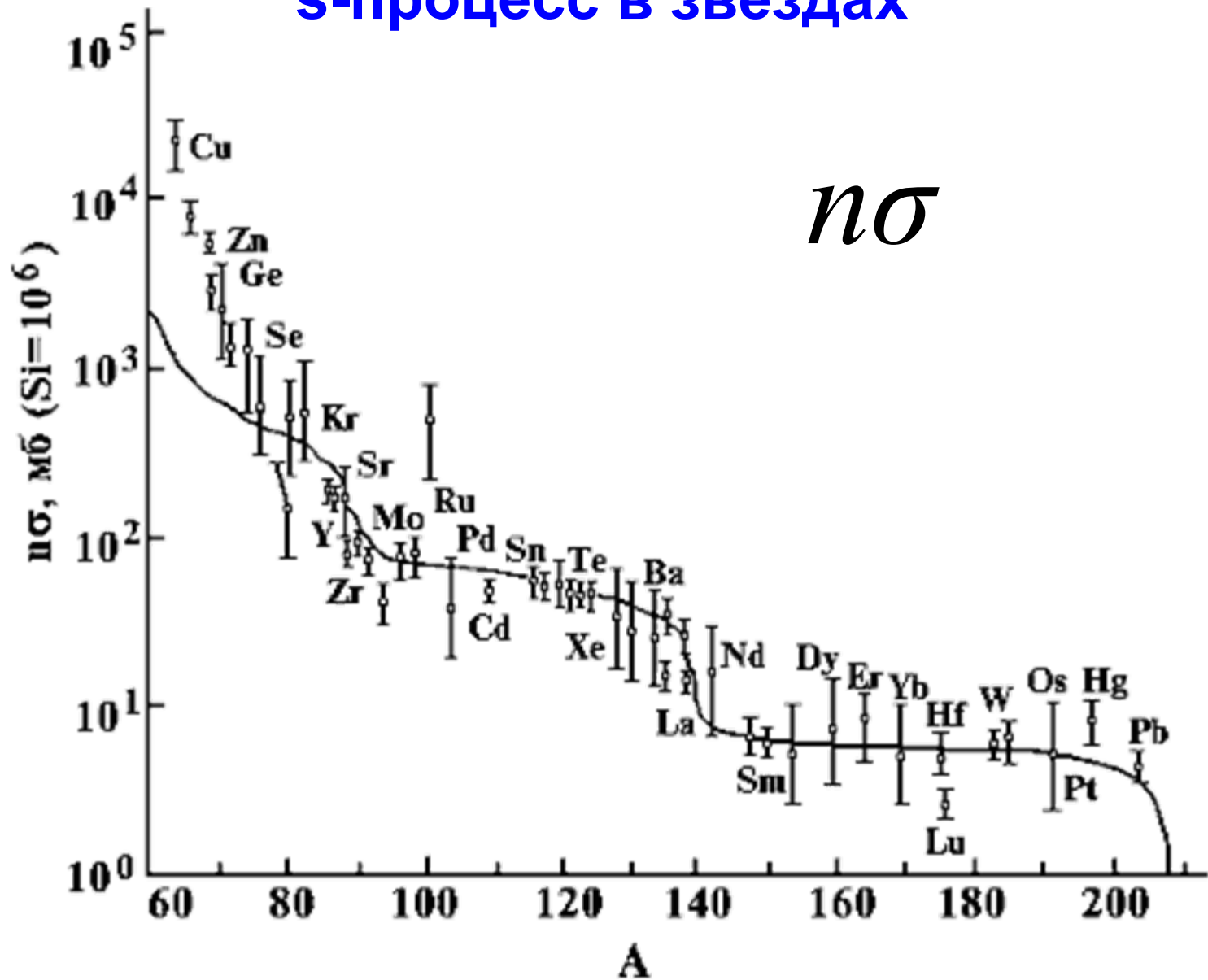
s- и r-процессы в звёздах



Траектория s-процесса изотопов A=72-89



с-процесс в звёздах

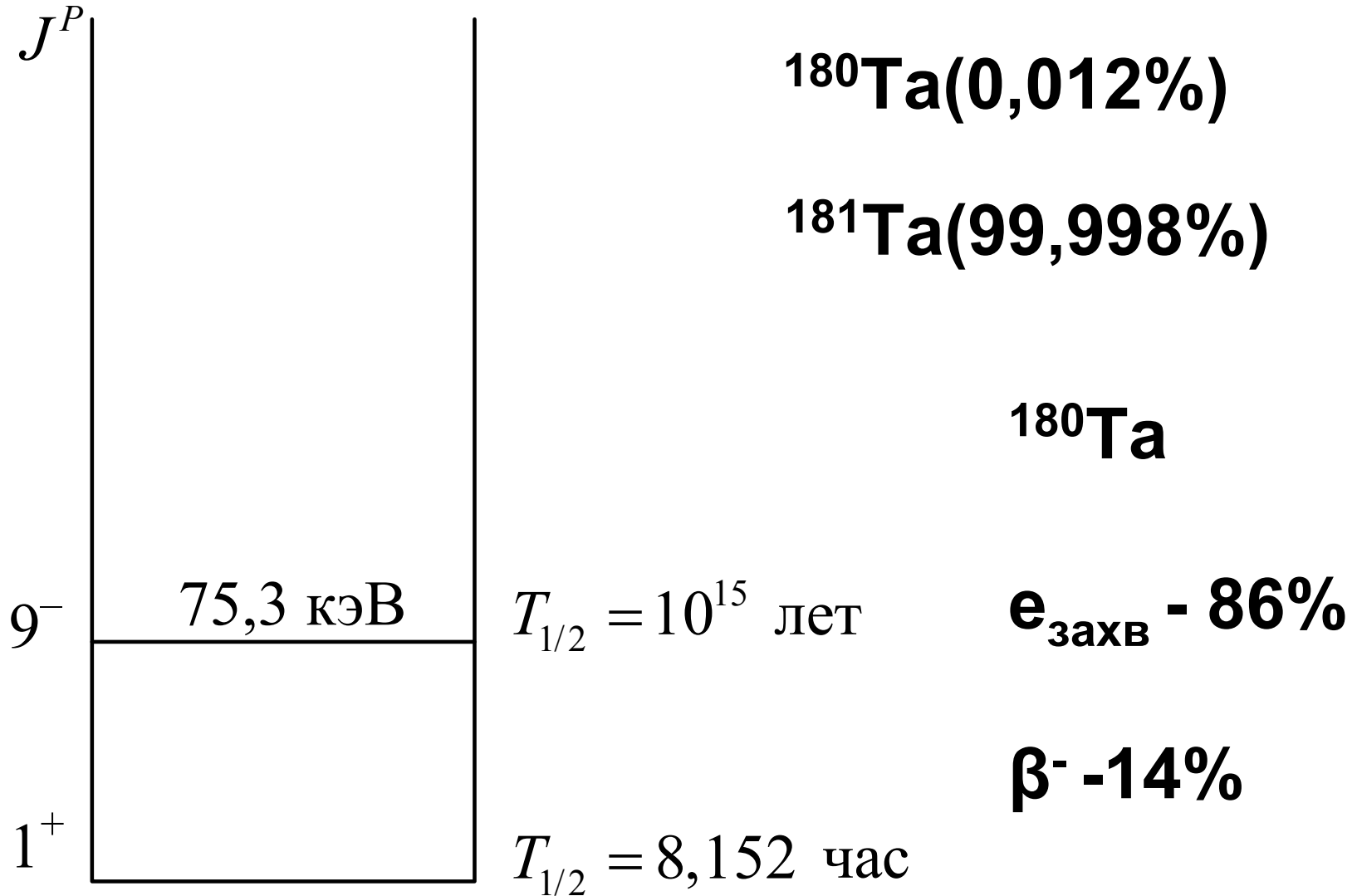


Экспериментальная зависимость $n\sigma$ от массового числа A для элементов Солнечной системы.

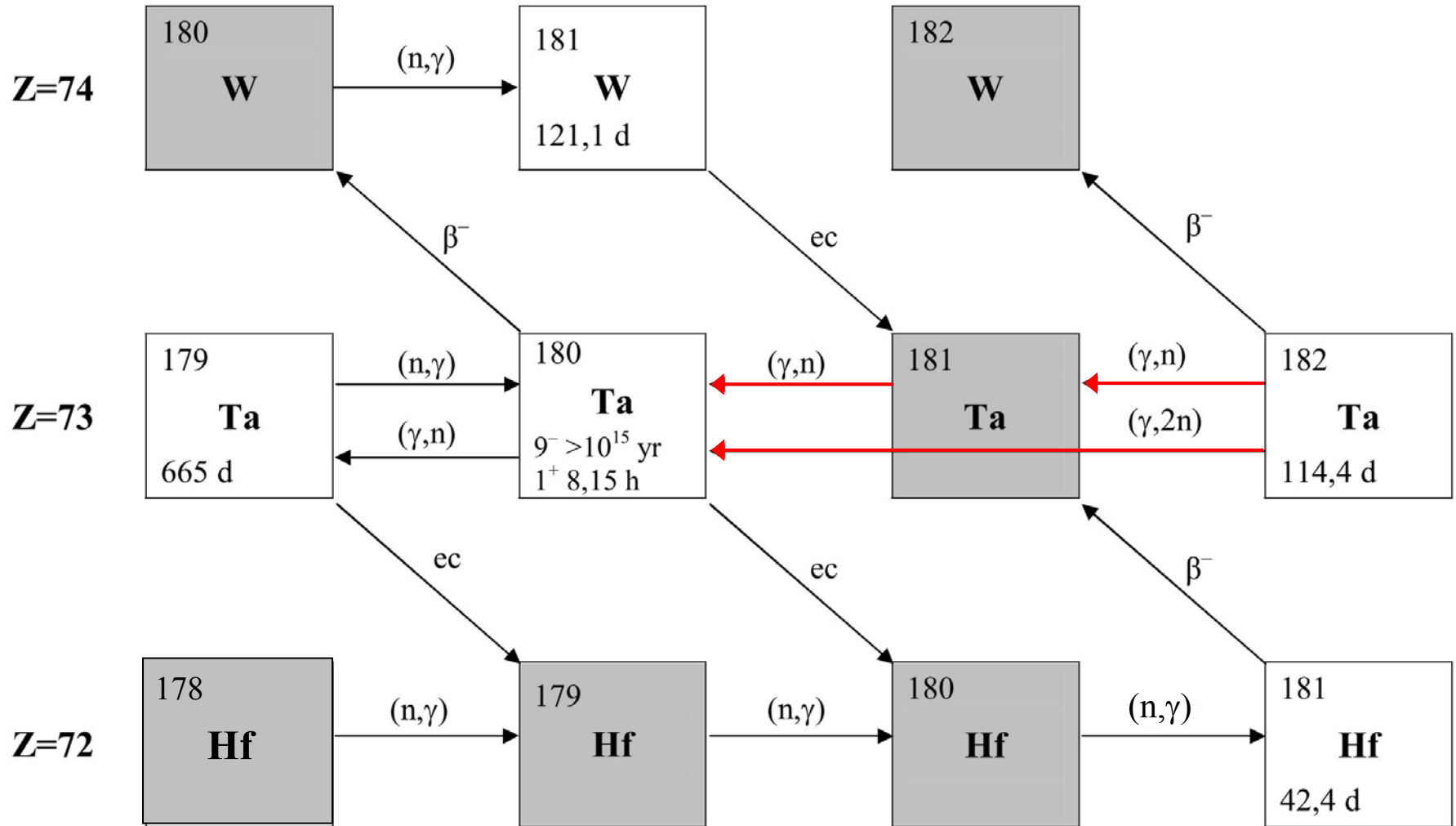
Р-нуклиды

Nucleus	Anders and Grevesse	Nucleus	Anders and Grevesse
⁷⁴ Se	0.55	¹³² Ba	0.00453
⁷⁸ Kr	0.153	¹³⁸ La	0.000409
⁸⁴ Sr	0.132	¹³⁶ Ce	0.00216
⁹² Mo	0.378	¹³⁸ Ce	0.00284
⁹⁴ Mo	0.236	¹⁴⁴ Sm	0.008
⁹⁶ Ru	0.103	¹⁵² Gd	0.00066
⁹⁸ Ru	0.035	¹⁵⁶ Dy	0.000221
¹⁰² Pd	0.0142	¹⁵⁸ Dy	0.000378
¹⁰⁶ Cd	0.0201	¹⁶² Er	0.000351
¹⁰⁸ Cd	0.0143	¹⁶⁴ Er	0.00404
¹¹³ In	0.0079	¹⁶⁸ Yb	0.000322
¹¹² Sn	0.0372	¹⁷⁴ Hf	0.000249
¹¹⁴ Sn	0.0252	¹⁸⁰ Ta	2.48e-06
¹¹⁵ Sn	0.0129	¹⁸⁰ W	0.000173
¹²⁰ Te	0.0043	¹⁸⁴ Os	0.000122
¹²⁴ Xe	0.00571	¹⁹⁰ Pt	0.00017
¹²⁶ Xe	0.00509	¹⁹⁶ Hg	0.00048
¹³⁰ Ba	0.00476		

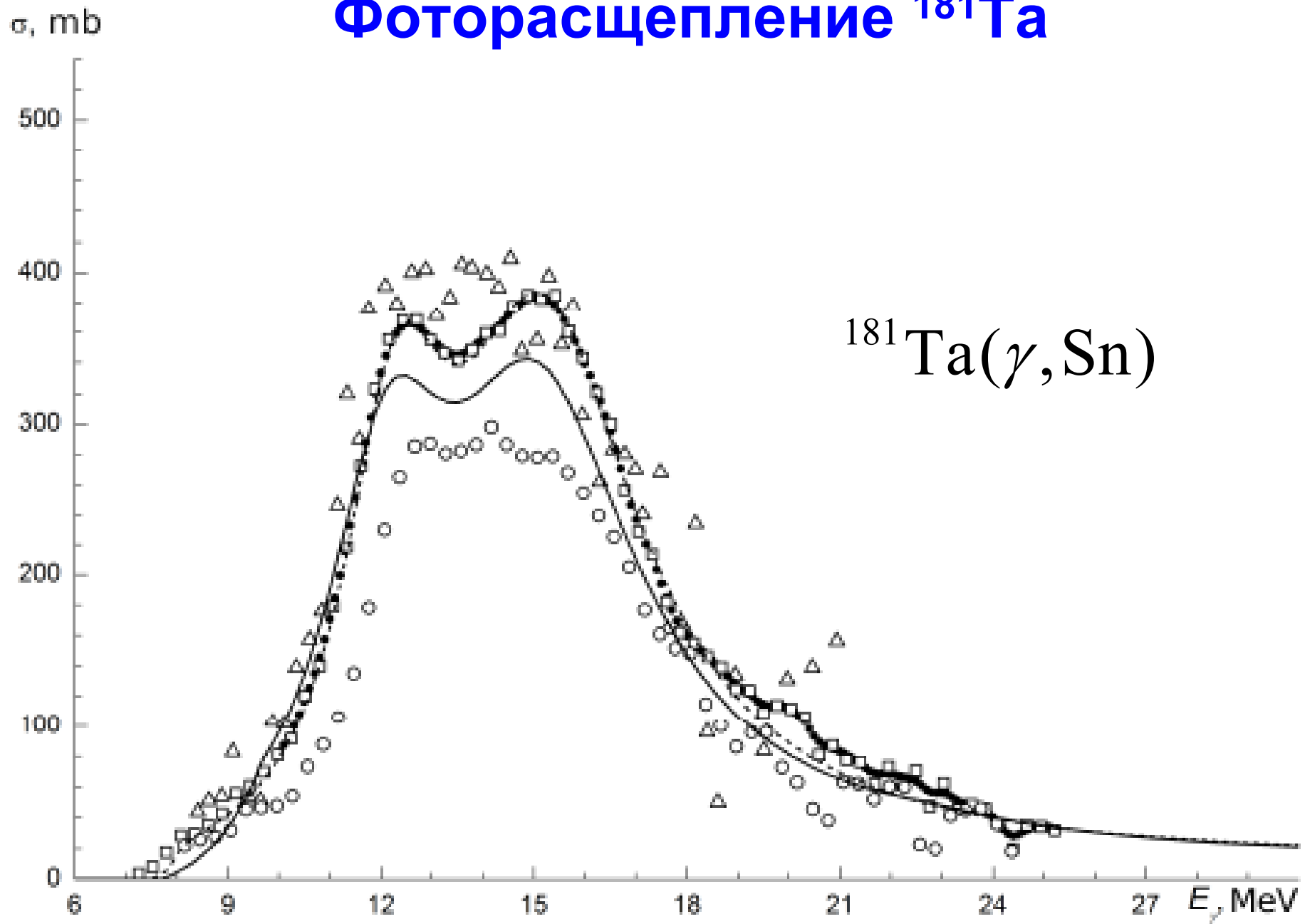
Изотоп ^{180}Ta

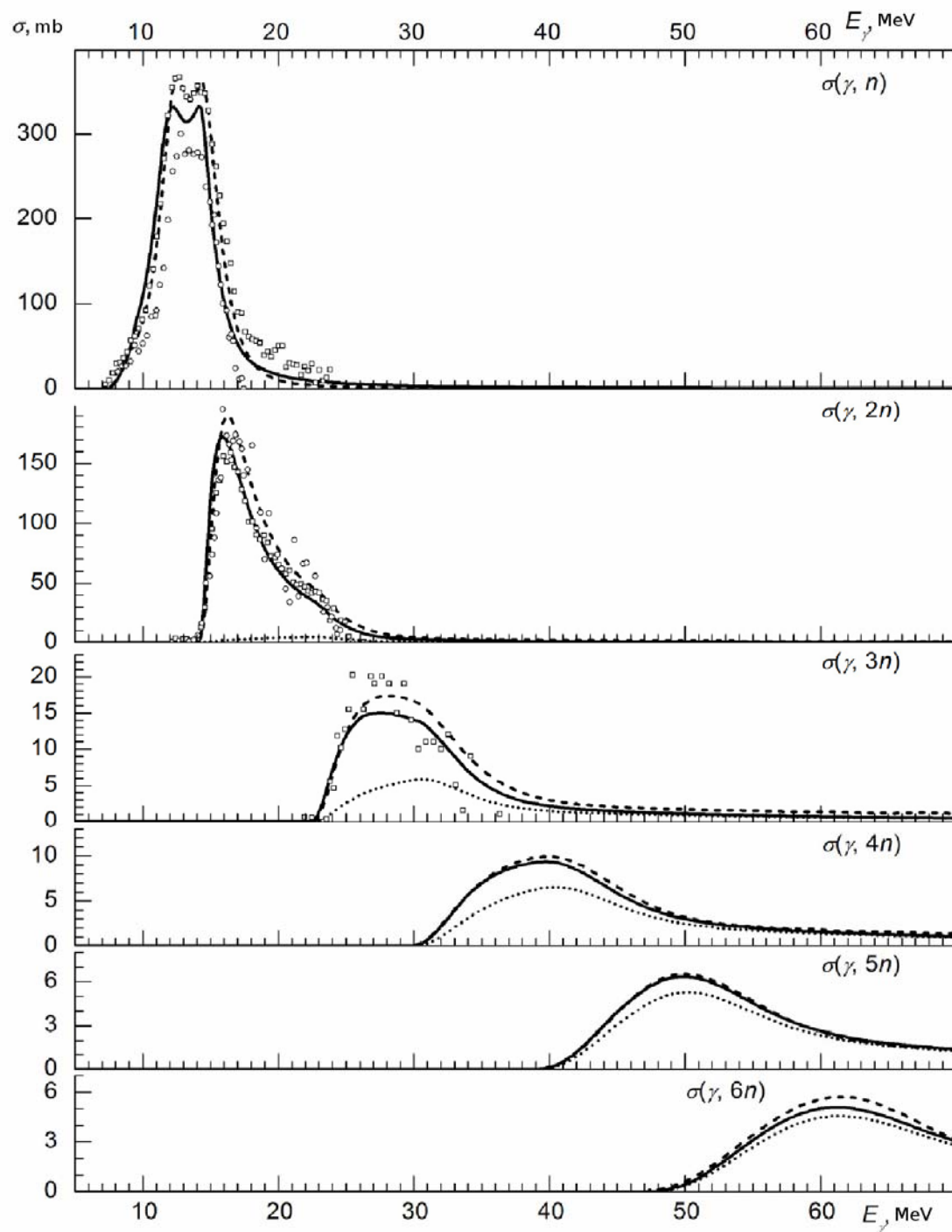


Образование р-нуклида ^{180}Ta



Фоторасщепление ^{181}Ta





**Фотонейтронные
реакции различной
множественности
на изотопе ^{181}Ta**

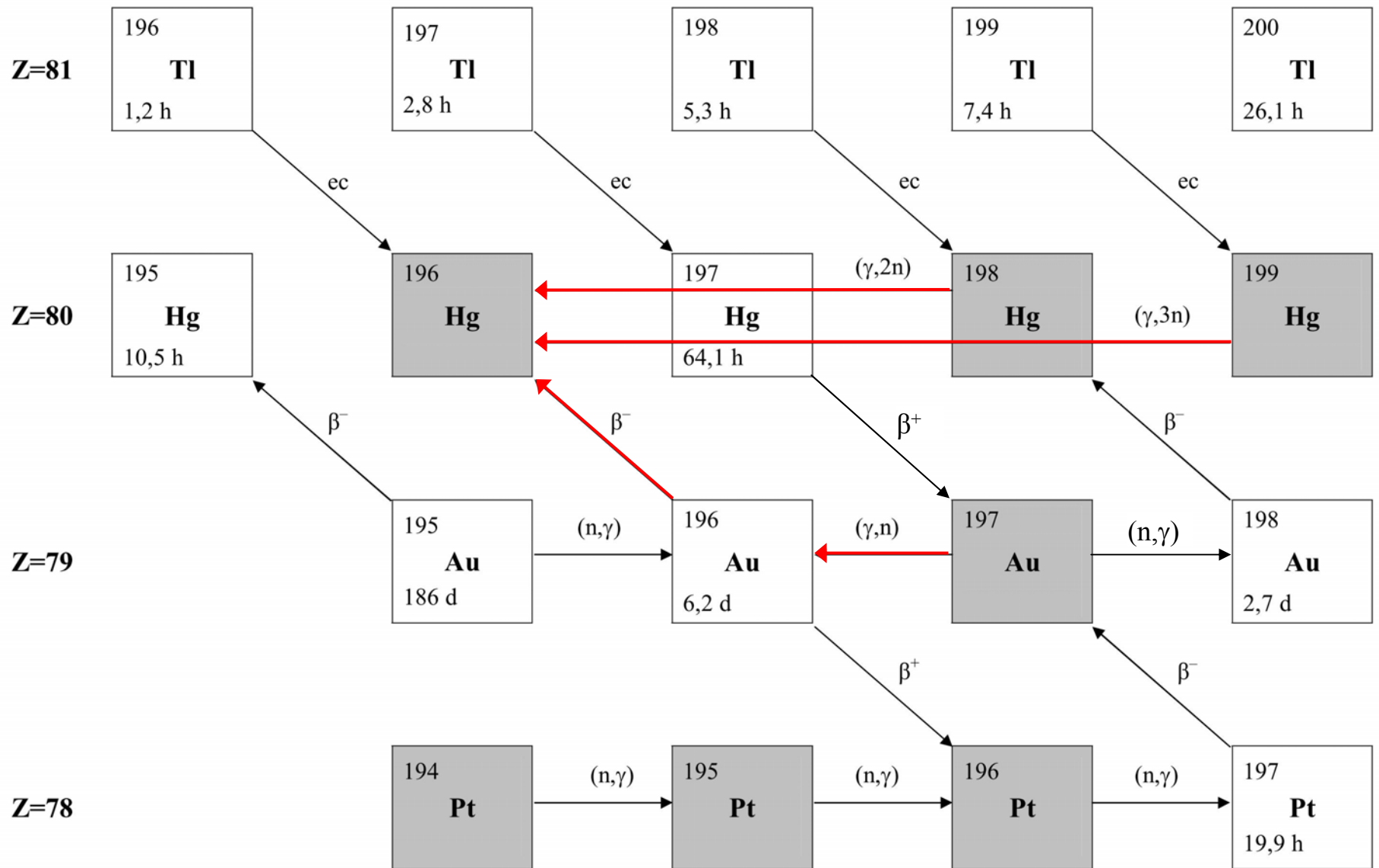
Фоторасщепление ^{181}Ta

Reaction	J_F^P	Yield Y					
		Experiment	C.M. [33]	TALYS [40]	[35]	[36]	[42]
$^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180\text{g.s.}}\text{Ta}$	1^+	1	1	0.93	1	1	1
$^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180\text{m}}\text{Ta}$	9^-			0.07			
$^{181}\text{Ta}(\gamma, 2n)^{179}\text{Ta}$	$7/2^-$	0.34 ± 0.07	0.29	0.32	0.42	0.24	0.37
$^{181}\text{Ta}(\gamma, 3n)^{178\text{g.s.}}\text{Ta}$	1^+	$(1.8 \pm 0.4) \cdot 10^{-2}$	$2.4 \cdot 10^{-2}$	$2.7 \cdot 10^{-2}$		$2 \cdot 10^{-2}$	
$^{181}\text{Ta}(\gamma, 3n)^{178\text{m}}\text{Ta}$	7^-	$(5 \pm 1) \cdot 10^{-3}$					
$^{181}\text{Ta}(\gamma, 4n)^{177}\text{Ta}$	$7/2^+$	$(1.7 \pm 0.5) \cdot 10^{-2}$	$1.0 \cdot 10^{-2}$	$1.1 \cdot 10^{-2}$			
$^{181}\text{Ta}(\gamma, 5n)^{176}\text{Ta}$	$(1)^-$	$(5 \pm 1) \cdot 10^{-3}$	$3.7 \cdot 10^{-3}$	$3.7 \cdot 10^{-3}$			
$^{181}\text{Ta}(\gamma, 6n)^{175}\text{Ta}$	$7/2^+$	$(1.4 \pm 0.3) \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$1.3 \cdot 10^{-3}$			
$^{181}\text{Ta}(\gamma, 7n)^{175}\text{Ta}$	3^+		$6 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-5}$			
$^{181}\text{Ta}(\gamma, p)^{180\text{g.s.}}\text{Hf}$	0^+		$7 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-4}$			
$^{181}\text{Ta}(\gamma, p)^{180\text{m}}\text{Hf}$	8^-	$(5 \pm 1) \cdot 10^{-4}$		$3 \cdot 10^{-5}$			
$^{181}\text{Ta}(\gamma, pn)^{179\text{g.s.}}\text{Hf}$	$9/2^+$		$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$			
$^{181}\text{Ta}(\gamma, pn)^{179\text{m}}\text{Hf}$	$25/2^-$	$(4 \pm 3) \cdot 10^{-5}$					

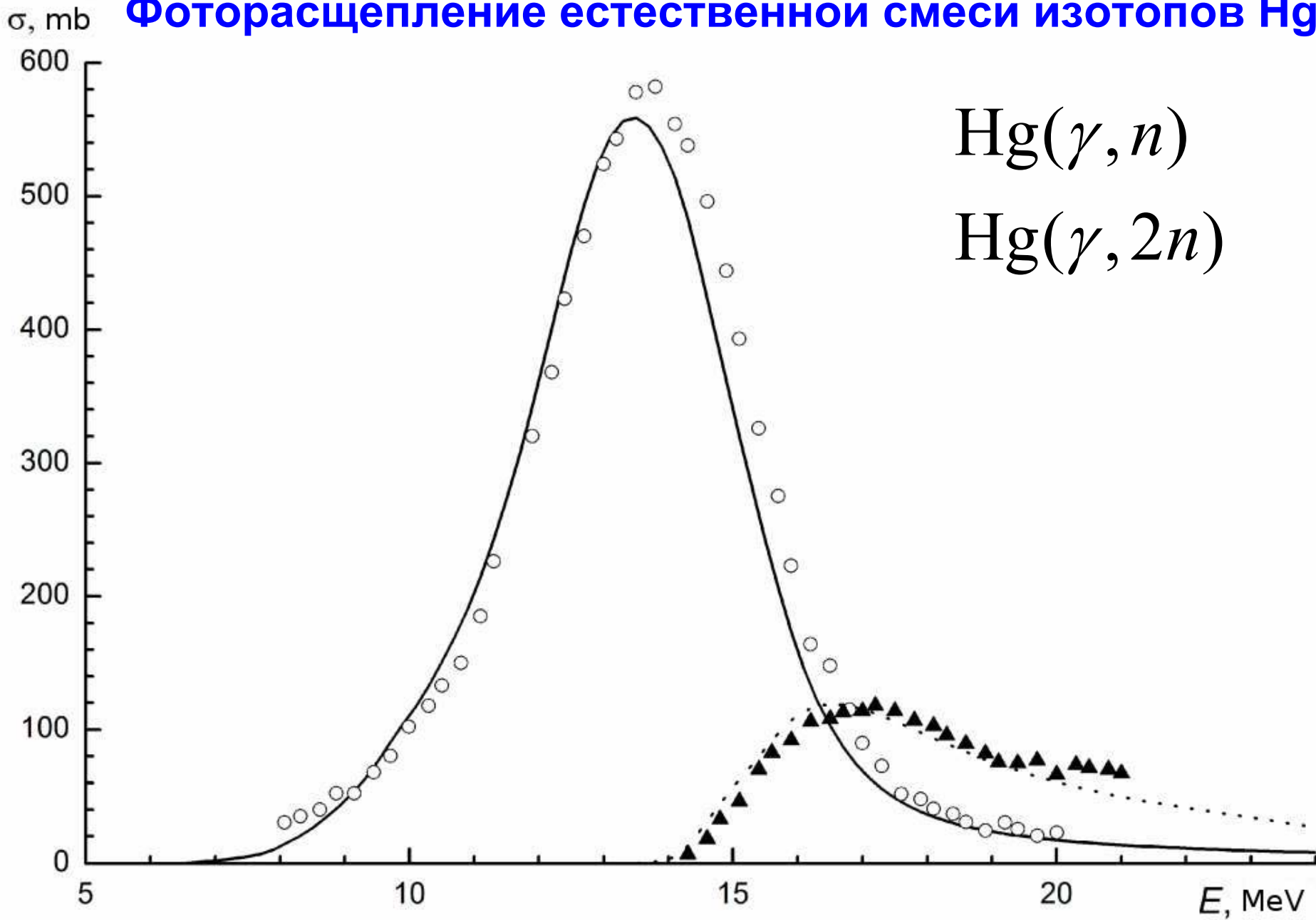
Изотопы Hg

Tl192 9.6 м (2-)	Tl193 21.6 м 1/2(+)	Tl194 33.0 м 2-	Tl195 1.16 ч 1/2+	Tl196 1.84 ч 2-	Tl197 2.84 ч 1/2+	Tl198 5.3 ч 2-	Tl199 7.42 ч 1/2+	Tl200 26.1 ч 2-	Tl201 3.0421 дн 1/2+	Tl202 12.31 дн 2-	Tl203 29.524 1/2+	Tl204 3.78 л 2-	Tl205 70.476 1/2+	Tl206 4.202 м 0-
<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>				<i>m</i>
Hg191 49 м 3/2(-)	Hg192 4.85 ч 0+	Hg193 3.80 ч 3/2(-)	Hg194 444 л 0+	Hg195 10.53 ч 1/2-	Hg196 0.15 0+	Hg197 64.14 ч 1/2-	Hg198 9.97 0+	Hg199 16.87 1/2-	Hg200 23.10 0+	Hg201 13.18 3/2-	Hg202 29.86 0+	Hg203 46.594 дн 5/2-	Hg204 6.87 0+	Hg205 5.14 м 1/2-
<i>m</i>		<i>m</i>		<i>m</i>		<i>m</i>		<i>m</i>						
Au190 42.8 м 1-	Au191 3.18 ч 3/2+	Au192 4.94 ч 1-	Au193 17.65 ч 3/2+	Au194 38.02 ч 1-	Au195 186.098 дн 3/2+	Au196 6.1669 дн 2-	Au197 100 3/2+	Au198 2.69517 дн 2-	Au199 3.139 дн 3/2+	Au200 48.4 м (1-)	Au201 26.0 м 3/2+	Au202 28.4 с (1-)	Au203 60 с 3/2+	Au204 39.8 с (2-)
<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>				
Pt189 10.87 ч 3/2-	Pt190 0.014 6.5E11 л 0-	Pt191 2.83 дн 3/2-	Pt192 0.782 0+	Pt193 50 л 1/2-	Pt194 32.967 0+	Pt195 33.832 1/2-	Pt196 25.242 0+	Pt197 19.8915 ч 1/2-	Pt198 7.163 0+	Pt199 30.80 м 5/2-	Pt200 12.6 ч 0+	Pt201 2.5 м (5/2-)	Pt202 44 ч 0+	Pt203 10 с (1/2-)
				<i>m</i>		<i>m</i>		<i>m</i>		<i>m</i>			<i>m</i>	
Ir188 41.5 ч 1-	Ir189 13.2 дн 3/2+	Ir190 11.78 дн 4-	Ir191 37.3 3/2+	Ir192 73.827 дн 4+	Ir193 62.7 3/2+	Ir194 19.28 ч 1-	Ir195 2.5 ч 3/2+	Ir196 52 с (0-)	Ir197 5.8 м 3/2+	Ir198 8 с	Ir199 6 с			Ir202 11 с (1-,2-)
		<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>					

Образование р-нуклида ^{196}Hg

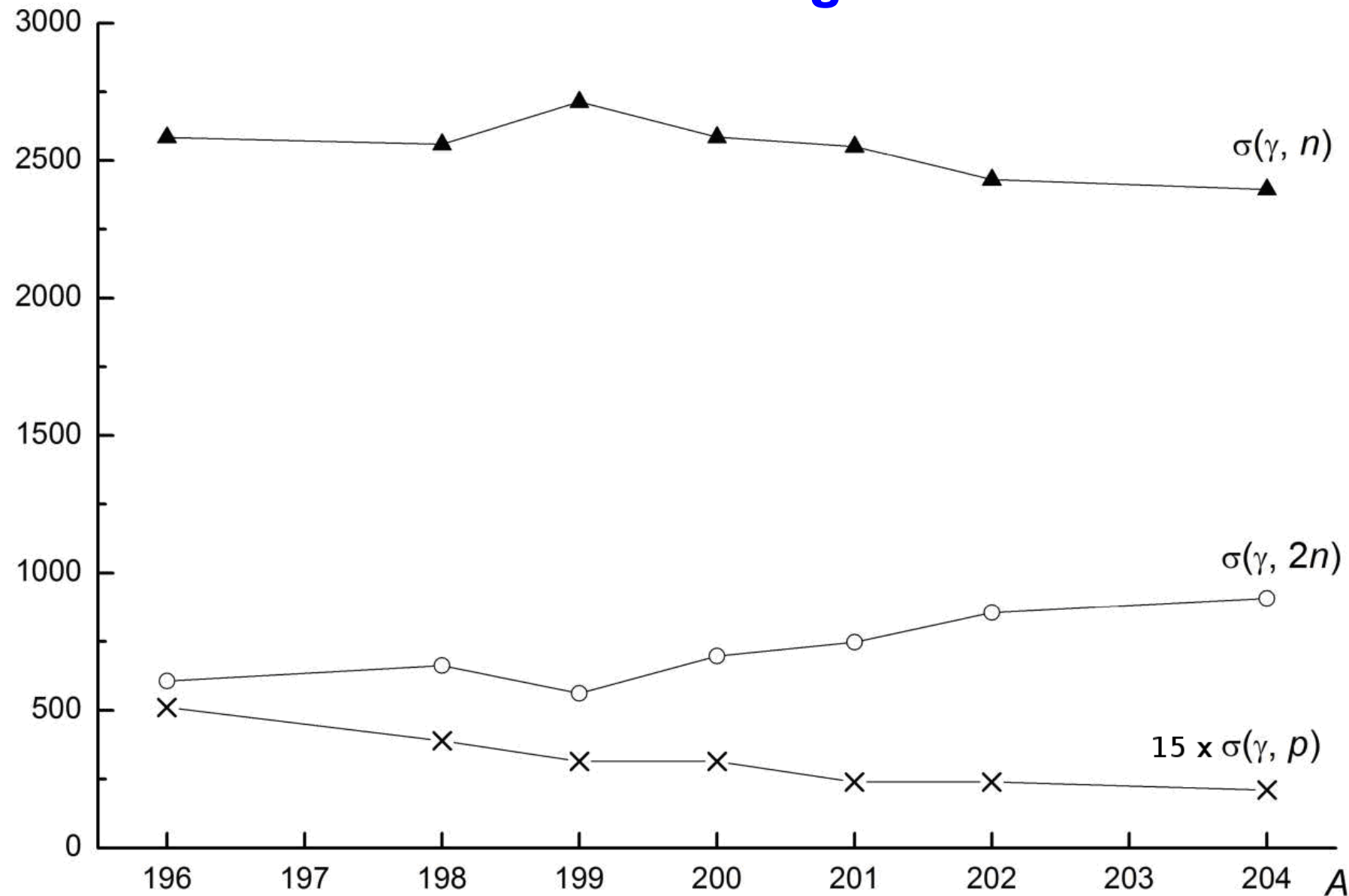


Фоторасщепление естественной смеси изотопов Hg



Изотопы Hg

$\sigma_{\text{int}}, \text{MeV} \cdot \text{mb}$



Рассчитанные в комбинированной модели сечения реакций (γ, n) , $(\gamma, 2n)$, (γ, p) на естественной смеси изотопов ртути.

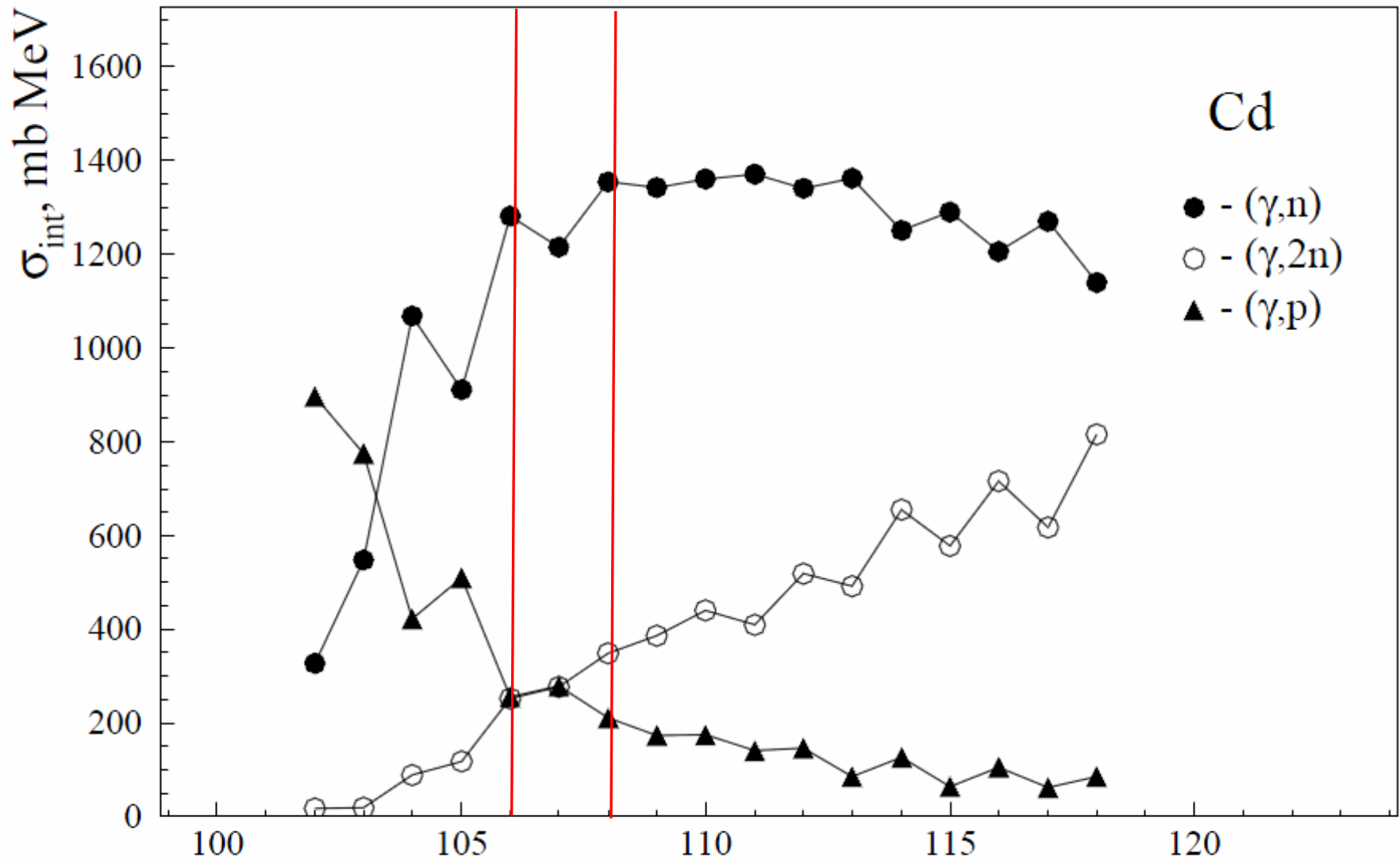
Фоторасщепление изотопов Hg

Initial nucleus	Reaction	Final nucleus	Spin, parity J^P			Reaction yield			
			Initial nucleus	Final nucleus		Experiment		Calculation[33]	
				G. s.	Isomeric state	$E^{\max} = 19,5$ MeV	$E^{\max} = 29,1$ MeV	$E^{\max} = 1$ MeV	$E^{\max} = 29,1$ MeV
^{204}Hg	(γ, n)	^{203}Hg	0+	5/2-		1.22 ± 0.24	1.16 ± 0.23	1.05	0.99
^{200}Hg	(γ, n)	^{199}Hg	0+	1/2-				1.06	1.10
		$^{199\text{m}}\text{Hg}$			13/2+	0.087 ± 0.018	0.085 ± 0.017		
^{198}Hg	(γ, n)	^{197}Hg	0+	1/2-		1.26 ± 0.26	1.27 ± 0.29	1.02	1.01
		$^{197\text{m}}\text{Hg}$			13/2+	0.10 ± 0.02	0.15 ± 0.03		
^{196}Hg	(γ, n)	^{195}Hg	0+	1/2-		0.90 ± 0.17	0.88 ± 0.20	1	1
		$^{195\text{m}}\text{Hg}$			13/2+	0.10 ± 0.03	0.12 ± 0.03		
^{202}Hg	(γ, p)	^{201}Au	0+	3/2+		$< 10^{-4}$	$(1.4 \pm 0.7)10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-4}$
^{201}Hg	(γ, p)	^{200}Au	3/2-	1(-)		$(2.3 \pm 0.6)10^{-4}$	$(2.4 \pm 0.5)10^{-3}$	$0.7 \cdot 10^{-4}$	$8.4 \cdot 10^{-4}$
		$^{200\text{m}}\text{Au}$			12-	$< 4 \cdot 10^{-6}$	$< 10^{-5}$		
^{200}Hg	(γ, p)	^{199}Au	0+	3/2+		$(4.6 \pm 1)10^{-4}$	$(2.8 \pm 0.6)10^{-3}$	$1.0 \cdot 10^{-4}$	$1.1 \cdot 10^{-3}$
^{199}Hg	(γ, p)	^{198}Au	1/2-	2-		$(3.9 \pm 0.8)10^{-4}$	$(2.7 \pm 0.5)10^{-3}$	$1.5 \cdot 10^{-4}$	$1.3 \cdot 10^{-3}$
		$^{198\text{m}}\text{Au}$			(12-)	$< 1 \cdot 10^{-6}$	$< 10^{-5}$		
^{198}Hg	$(\gamma, n + p)$	^{196}Au	0+	2-		$< 2 \cdot 10^{-6}$	$(6 \pm 2)10^{-5}$	10^{-9}	$7 \cdot 10^{-4}$

Изотопы Cd и Pd

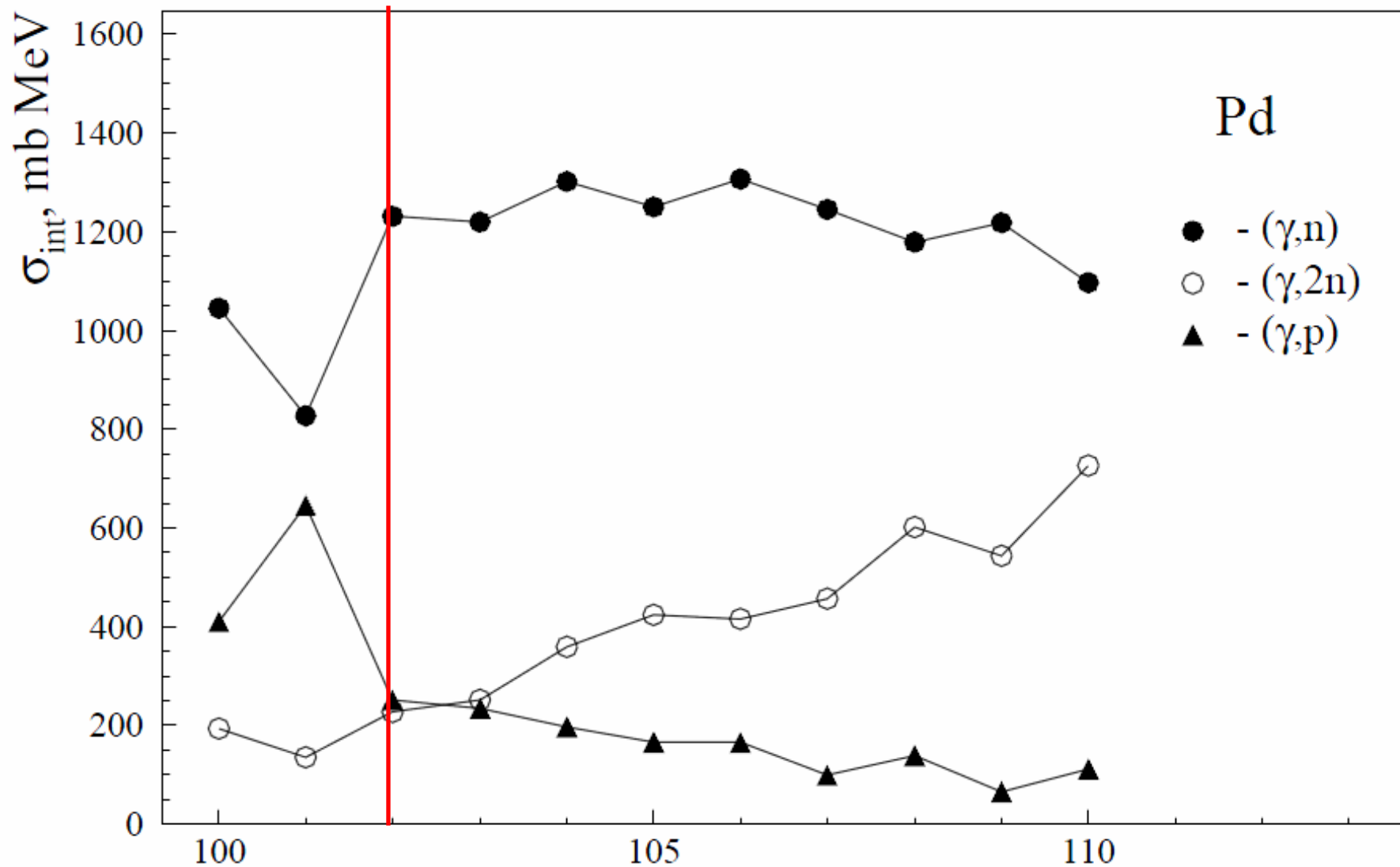
In103 65 с (9/2+)	In104 1.80 м (6+)	In105 5.07 м 9/2+	In106 6.2 м 7+	In107 32.4 м 9/2+	In108 58.0 м 7+	In109 4.167 ч 9/2+	In110 4.9 ч 7+	In111 2.8047 дн 9/2+	In112 14.97 м 1+	In113 4.29 9/2+	In114 71.9 с 1+	In115 95.71 4.41Е14 л 9/2+	In116 14.10 с 1+	In117 43.2 м 9/2+	In118 5.0 с 1+
m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
Cd102 5.5 м 0+	Cd103 7.3 м 5/2+	Cd104 57.7 м 0+	Cd105 55.5 м 5/2+	Cd106 1.25 2ε 0+	Cd107 6.50 ч 5/2+	Cd108 0.89 2ε 0+	Cd109 461.4 дн 5/2+	Cd110 12.49 0+	Cd111 12.80 1/2+	Cd112 24.13 0+	Cd113 12.22 7.7Е15 л 1/2+	Cd114 28.73 0+	Cd115 53.46 ч 1/2+	Cd116 7.49 3.1Е19 л 2β- 0+	Cd117 2.49 ч 1/2+
							m		m		m		m		m
Ag101 11.1 м 9/2+	Ag102 12.9 м 5+	Ag103 65.7 м 7/2+	Ag104 69.2 м 5+	Ag105 41.29 дн 1/2-	Ag106 23.96 м 1+	Ag107 51.839 1/2-	Ag108 2.37 м 1+	Ag109 48.161 1/2-	Ag110 24.6 с 1+	Ag111 7.45 дн 1/2-	Ag112 3.130 ч 2(-)	Ag113 5.37 ч 1/2-	Ag114 4.6 с 1+	Ag115 20.0 м 1/2-	Ag116 2.68 м (2)-
m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m		m		m	m
Pd100 3.63 дн 0+	Pd101 8.47 ч 5/2+	Pd102 1.02 0+	Pd103 16.991 дн 5/2+	Pd104 11.14 0+	Pd105 22.33 5/2+	Pd106 27.33 0+	Pd107 6.5Е6 л 5/2+	Pd108 26.46 0+	Pd109 13.7012 ч 5/2+	Pd110 11.72 0+	Pd111 23.4 м 5/2+	Pd112 21.03 ч 0+	Pd113 93 с (5/2+)	Pd114 2.42 м 0+	Pd115 25 с (5/2+)
							m		m		m		m		m

Изотопы Cd



Интегральные сечения реакций (γ, p) , (γ, n) , $(\gamma, 2n)$ на изотопах Cd^A
в зависимости от массового числа A .

Изотопы Pd



Интегральные сечения реакций (γ, p) , (γ, n) , $(\gamma, 2n)$ на изотопах Pd A
в зависимости от массового числа A .

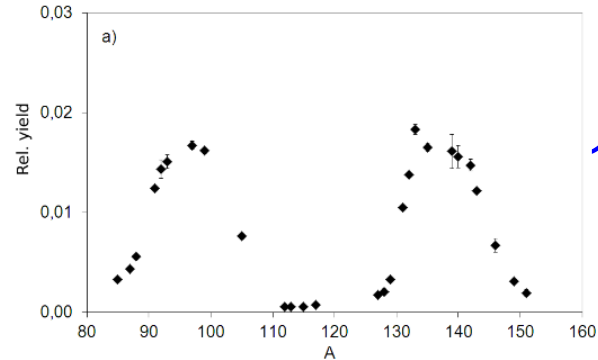
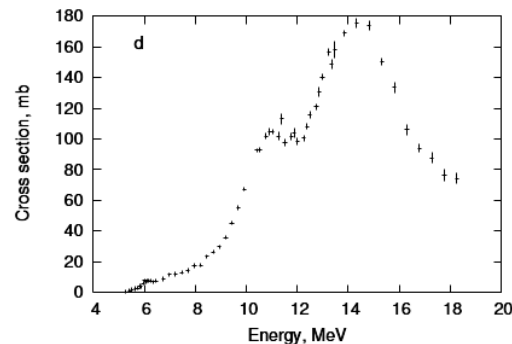
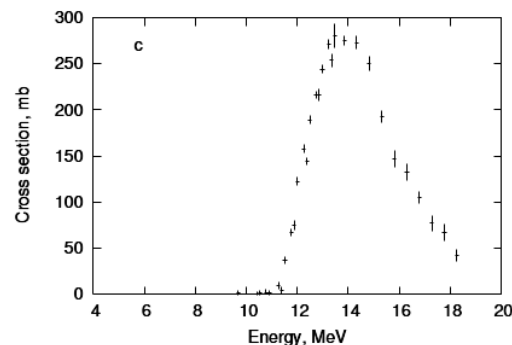
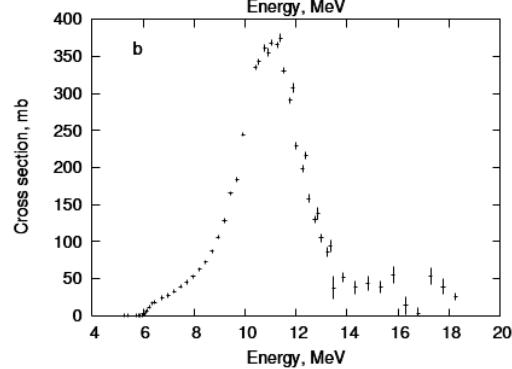
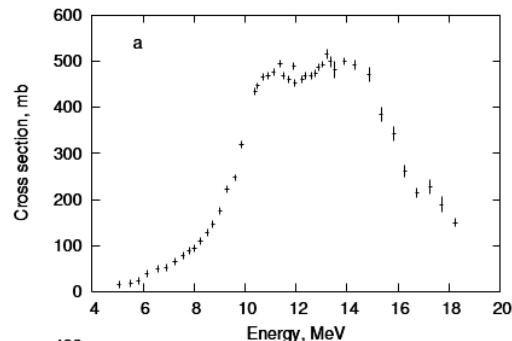
Фотоделение ^{238}U

полное
поглощение

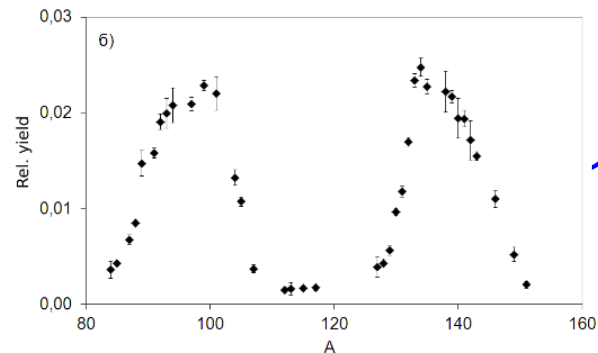
(γ, n)

$(\gamma, 2n)$

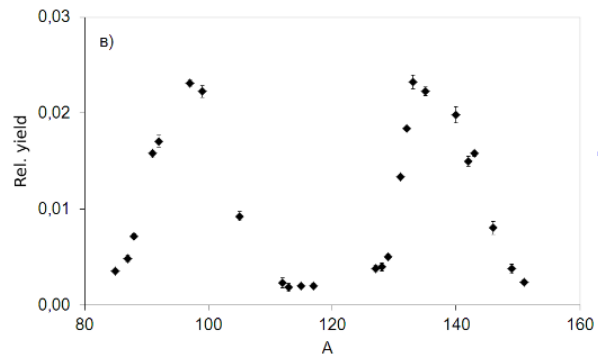
(γ, f)



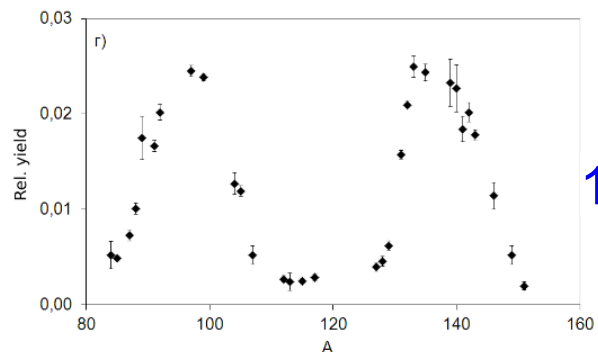
11,9 МэВ



13,7 МэВ



14,4 МэВ



15,6 МэВ

Особенности ядерных реакций в звездах

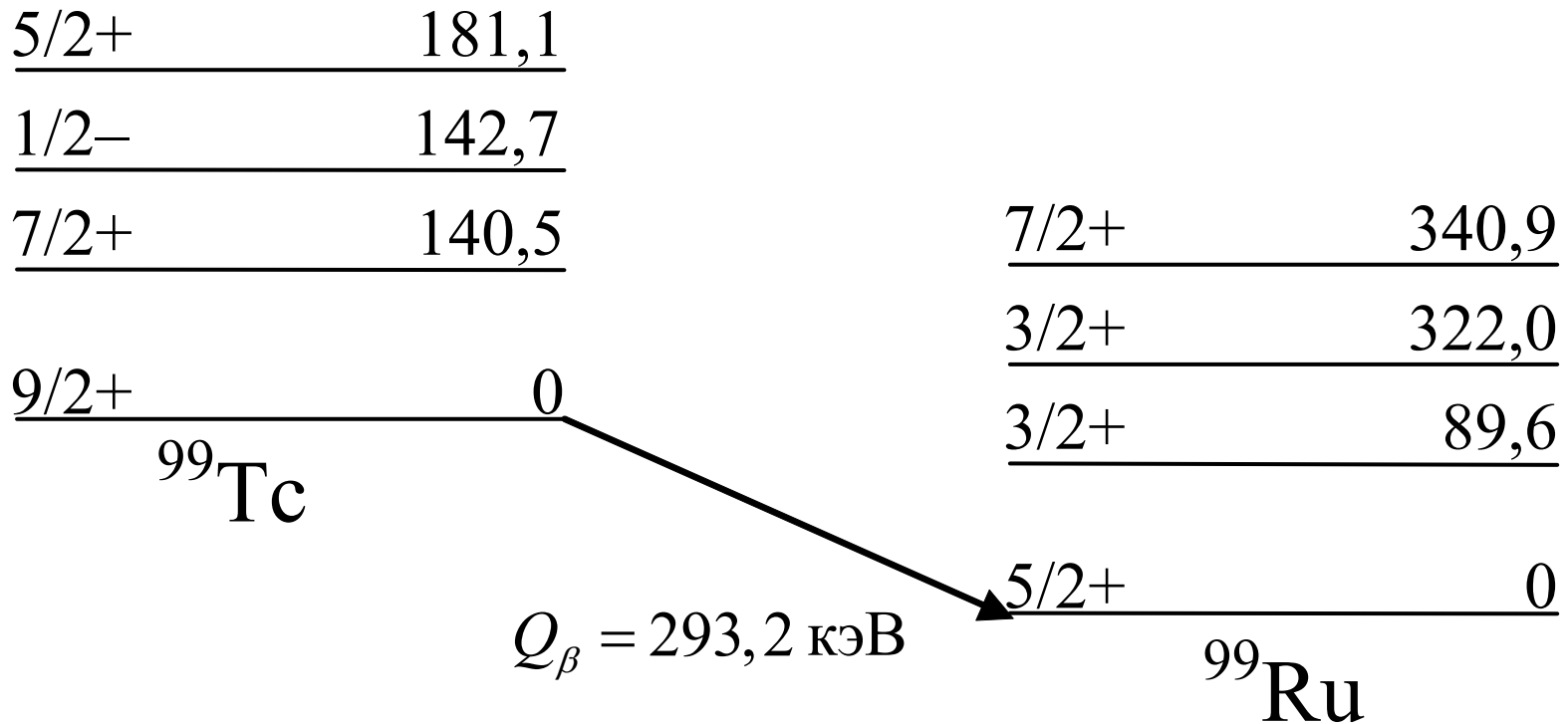
1. Звездная плазма
2. Особенности β -распада

$$e^{-}\text{-захват} \quad p + e^{-} \rightarrow n + \nu_e ,$$

$$e^{+}\text{-захват} \quad n + e^{+} \rightarrow p + \tilde{\nu}_e$$

3. Изменение свойства атомных ядер в среде $\rho > \rho_{\text{ядерн}}$

β-распад ^{99}Tc — ^{99}Ru



Период полураспада ^{99}Tc из основного состояния, измеренный в лабораторных условиях, составляет $T_{1/2} = 2,1 \cdot 10^5$ лет. При температуре $T > 3 \cdot 10^8$ К в результате β-распада из возбужденного состояния ^{99}Tc на возбужденное состояние ^{99}Ru период полураспада $T_{1/2}$ становится меньше 10 лет.

**Благодарю
за внимание**