

$B=1$

Гипероны

 $J^{\pi} = 1/2^{+}$

	S	M, МэВ	τ, c	Распад
Λ^0	-1	1115.7	$2.6 \cdot 10^{-10}$	$N\pi$
Σ^{+}	-1	1189.4	$0.8 \cdot 10^{-10}$	$N\pi$
Σ^0	-1	1192.6	$7.4 \cdot 10^{-20}$	$\Lambda\gamma$
Σ^{-}	-1	1197.4	$1.5 \cdot 10^{-10}$	$N\pi$
Ξ^0	-2	1314.8	$2.9 \cdot 10^{-10}$	$\Lambda\pi^0$
Ξ^{-}	-2	1321.3	$1.6 \cdot 10^{-10}$	$\Lambda\pi^{-}$
Ω^{-}	-3	1672.5	$0.8 \cdot 10^{-10}$	ΛK^{-} ($J^{\pi} = 3/2^{+}$)

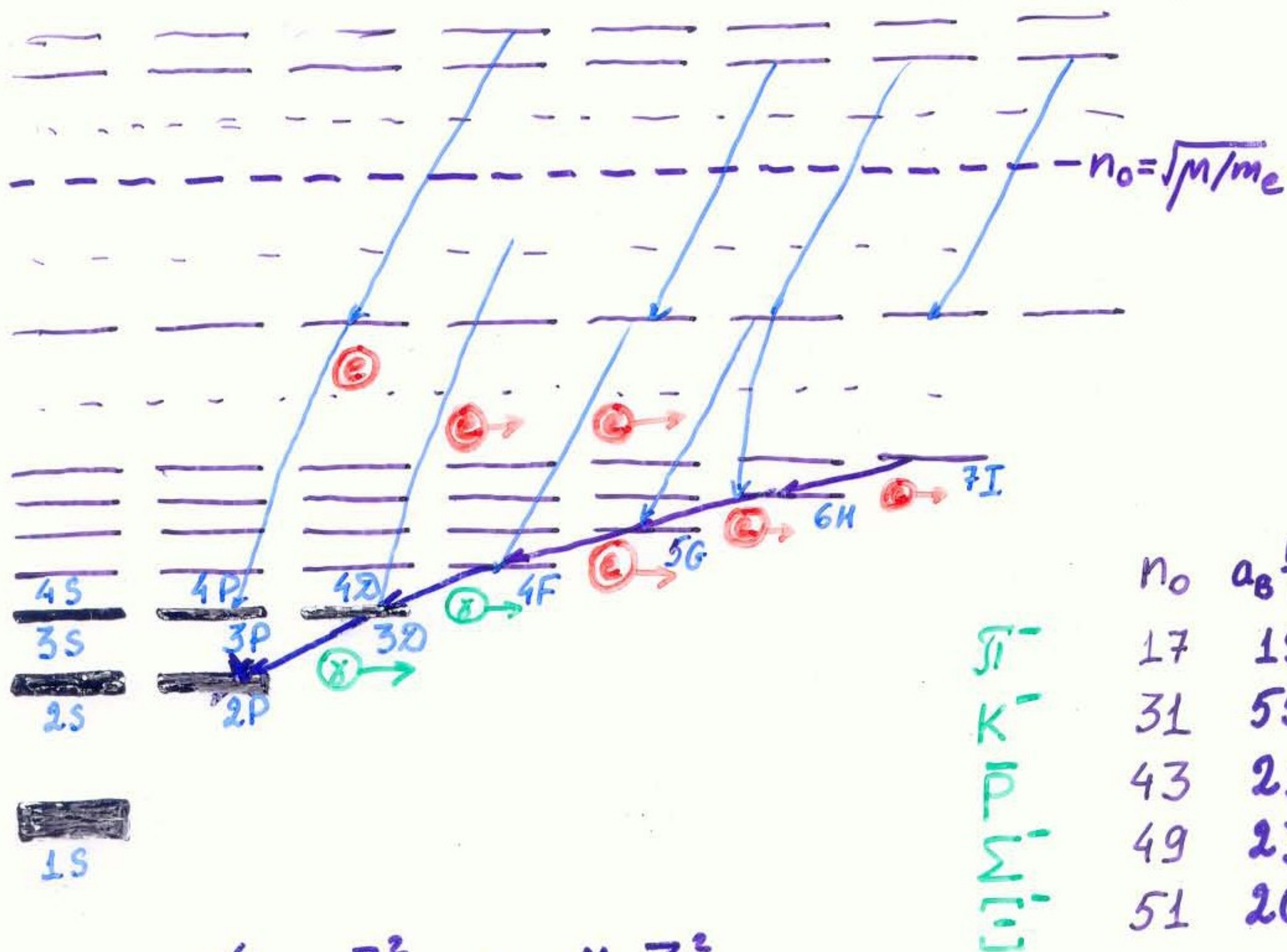
 $B=0$

Мезоны

 $J^{\pi} = 0^{-}$

	S	M, МэВ	τ, c	Распад
$\pi^{\pm}$	0	139.6	$2.6 \cdot 10^{-8}$	$\mu\nu_{\mu}$
π^0	0	135.0	$8.4 \cdot 10^{-16}$	$\gamma\gamma$
K^{+}	+1	493.7	$1.2 \cdot 10^{-8}$	$\mu\nu_{\mu}, \pi\pi$
K^{-}	-1			
K^0	+1	497.7	$0.8 \cdot 10^{-10}, 5.1 \cdot 10^{-8}$	$\pi\pi, 3\pi$
$\bar{K}^0$	-1			

Схема уровней адронного атома



$$E_n = -\frac{e^4}{2\hbar^2} \mu \frac{Z^2}{n^2} = R_y \cdot \frac{\mu}{m_e} \frac{Z^2}{n^2}$$

$$R_y = 13.6 \text{ эВ}$$

$$R_n \sim \frac{\hbar^2}{e^2} \frac{n^2}{\mu Z} = a_B \cdot \frac{m_e}{\mu} \frac{n^2}{Z} ; \quad a_B = 5.3 \cdot 10^4 \text{ фм}$$

Сдвиг и поглощение

$$\Delta E_{ne} = E_{ne}^{(c)} - E_{ne}$$

$$\Gamma_{ne} \quad \tau = \frac{\hbar}{\Gamma_{ne}}$$

$$E_{ne} = \Delta E_{ne} + \frac{i}{2} \Gamma_{ne}$$

$\Delta E_{ne} > 0$ притяжение
 $\Delta E_{ne} < 0$ отталкивание



$$\varepsilon_{ne} = \langle \psi | V | \psi \rangle$$

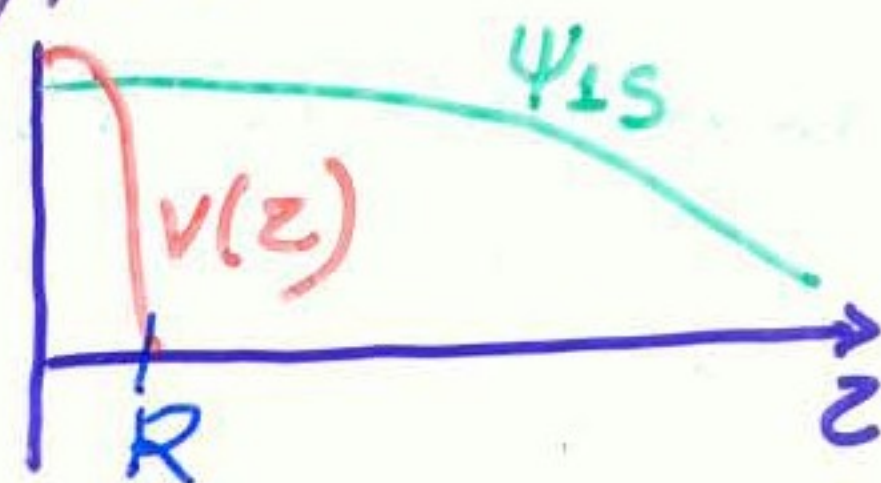
ψ - кулоновская волновая функция адрона

V - потенциал сильного взаимодействия адрона с ядром

$$\varepsilon_{1s} = \int \psi_{1s}^*(\vec{z}) V(\vec{z}) \psi_{1s}(\vec{z}) d^3z =$$

$$= \int_0^\infty R_{1s}^2(z) V(z) z^2 dz \cong$$

$$\cong R_{1s}^2(0) \int_0^\infty V(z) z^2 dz$$



$$F_B(K) = - \frac{2\mu}{\hbar^2} \int_0^\infty \frac{\sin Kz}{Kz} V(z) z^2 dz$$

$$F(K=0) = -a = - \frac{2\mu}{\hbar^2} \int_0^\infty V(z) z^2 dz$$

$$\varepsilon_{1s} = R_{1s}^2(0) \frac{\hbar^2}{2\mu} a = \frac{2e^6}{\hbar^4} \mu^2 z^3 a$$

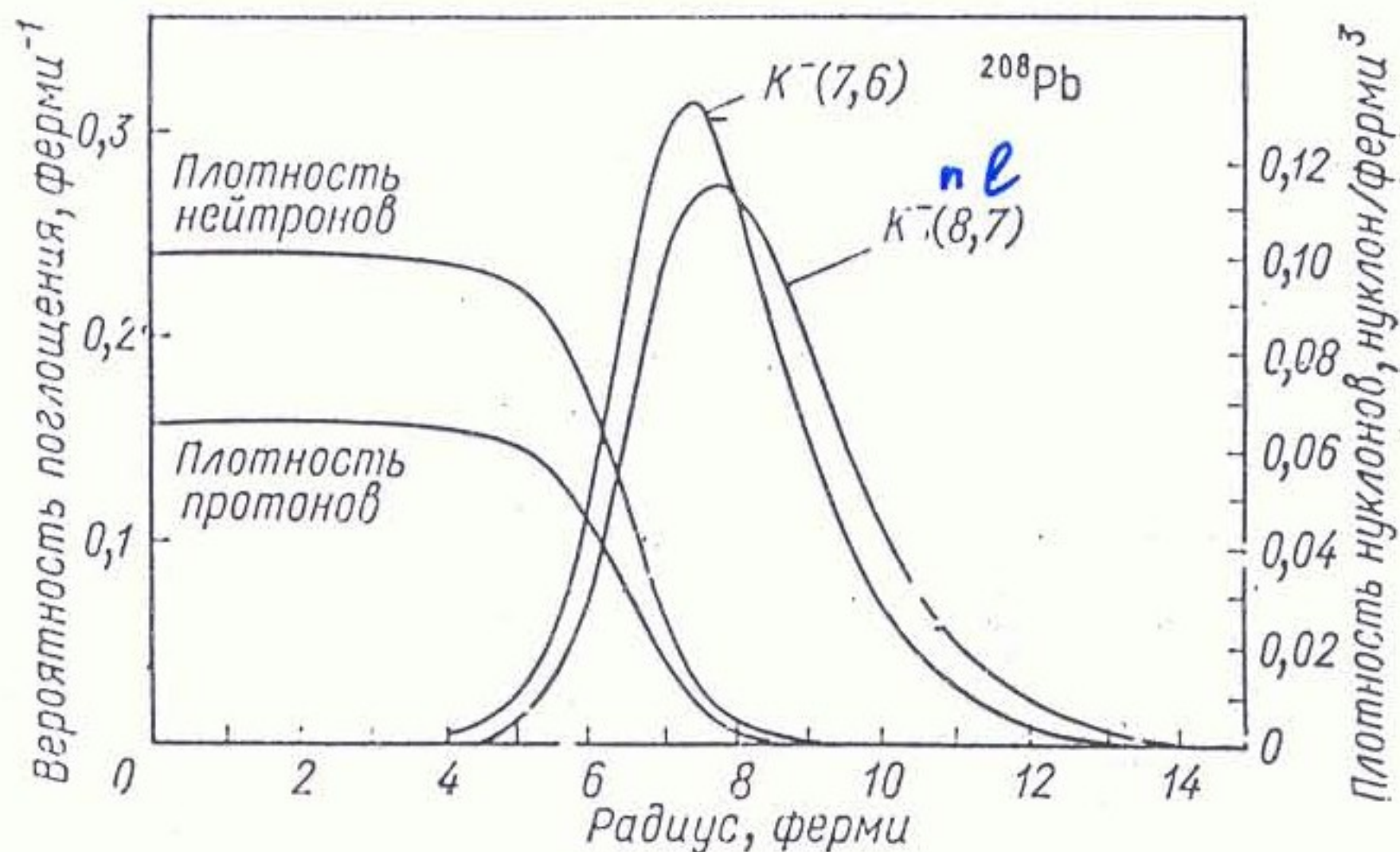
Распределение вероятности поглощения

K-атом Pb

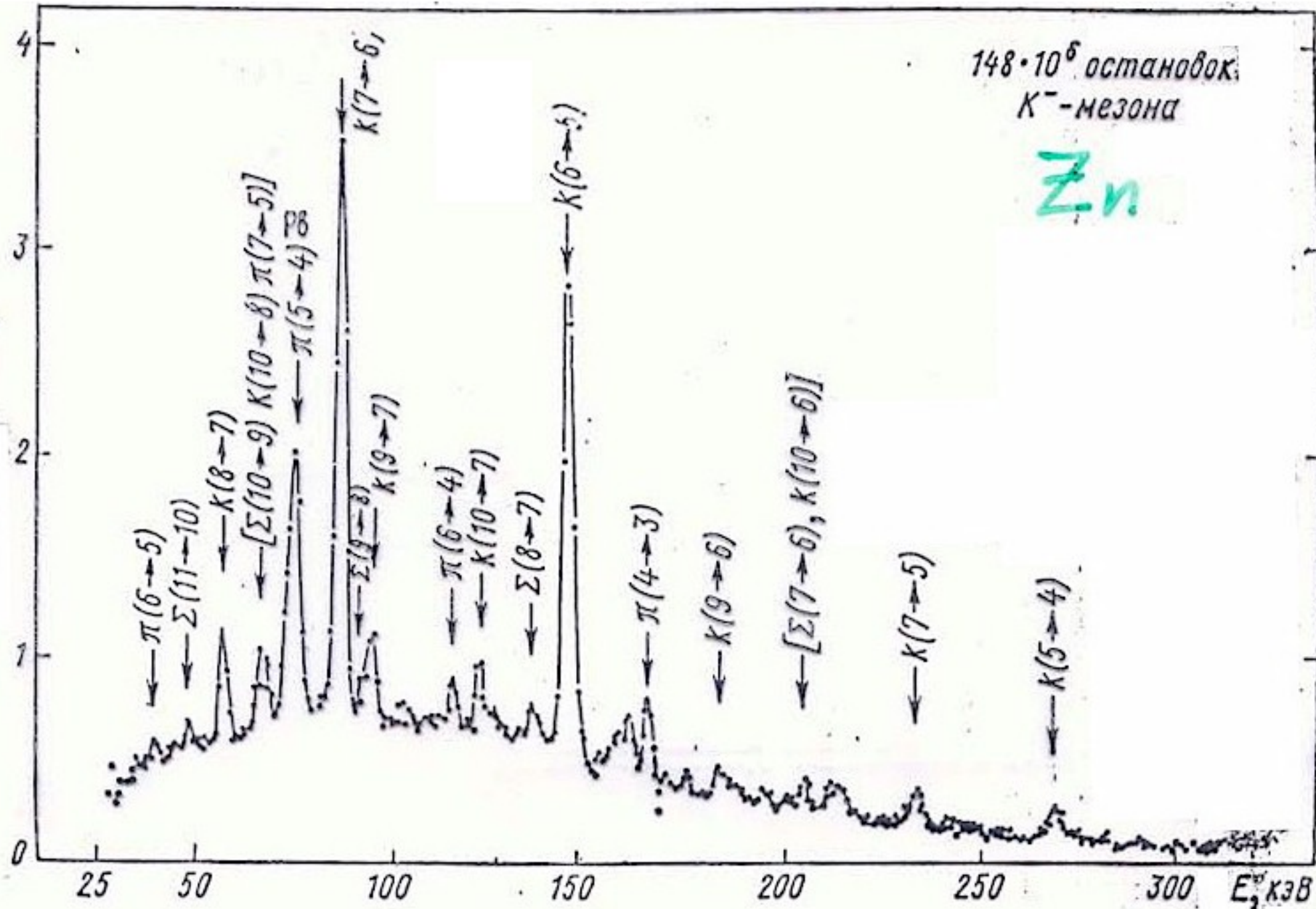
$$R_8 = 43 \text{ фм}$$

$$R_7 = 33 \text{ фм}$$

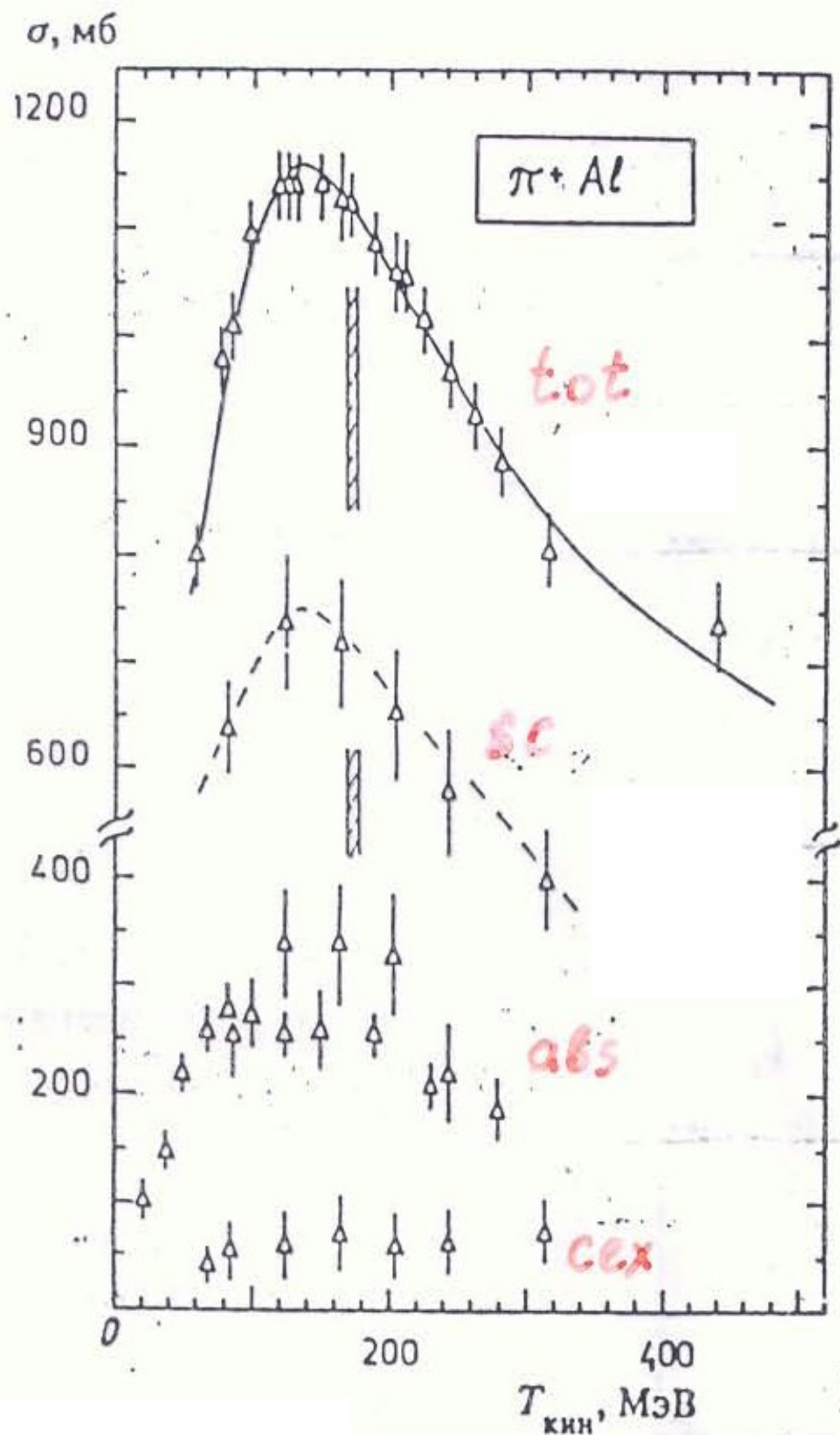
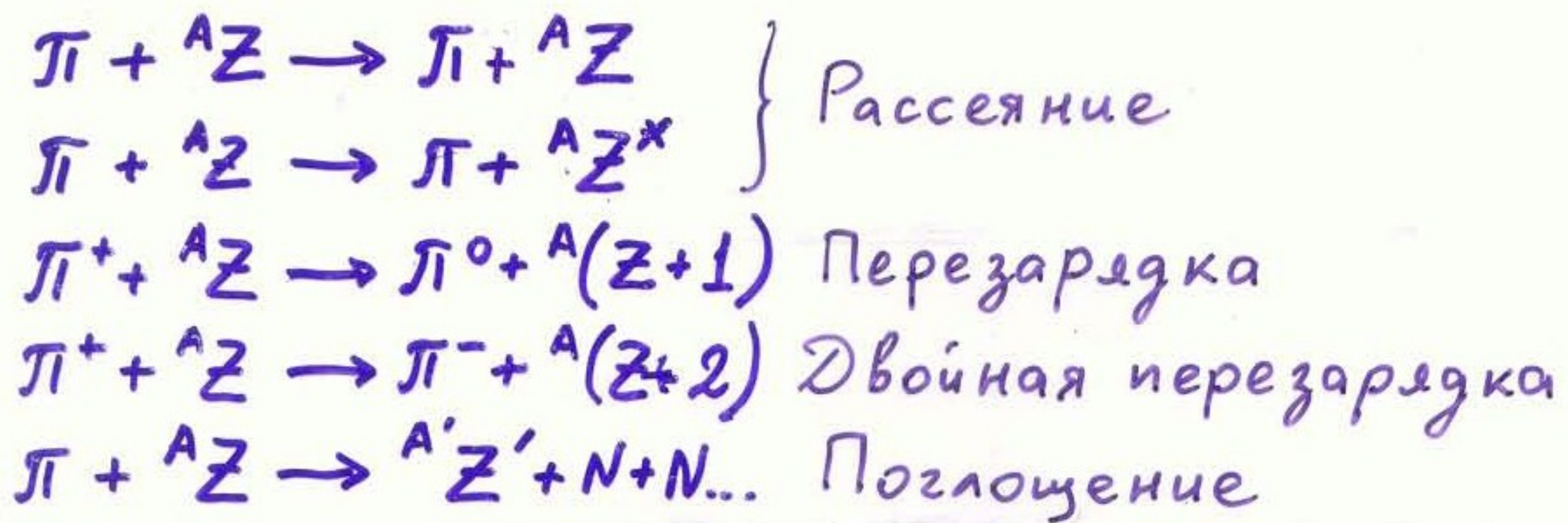
$$R_6 = 24 \text{ фм}$$



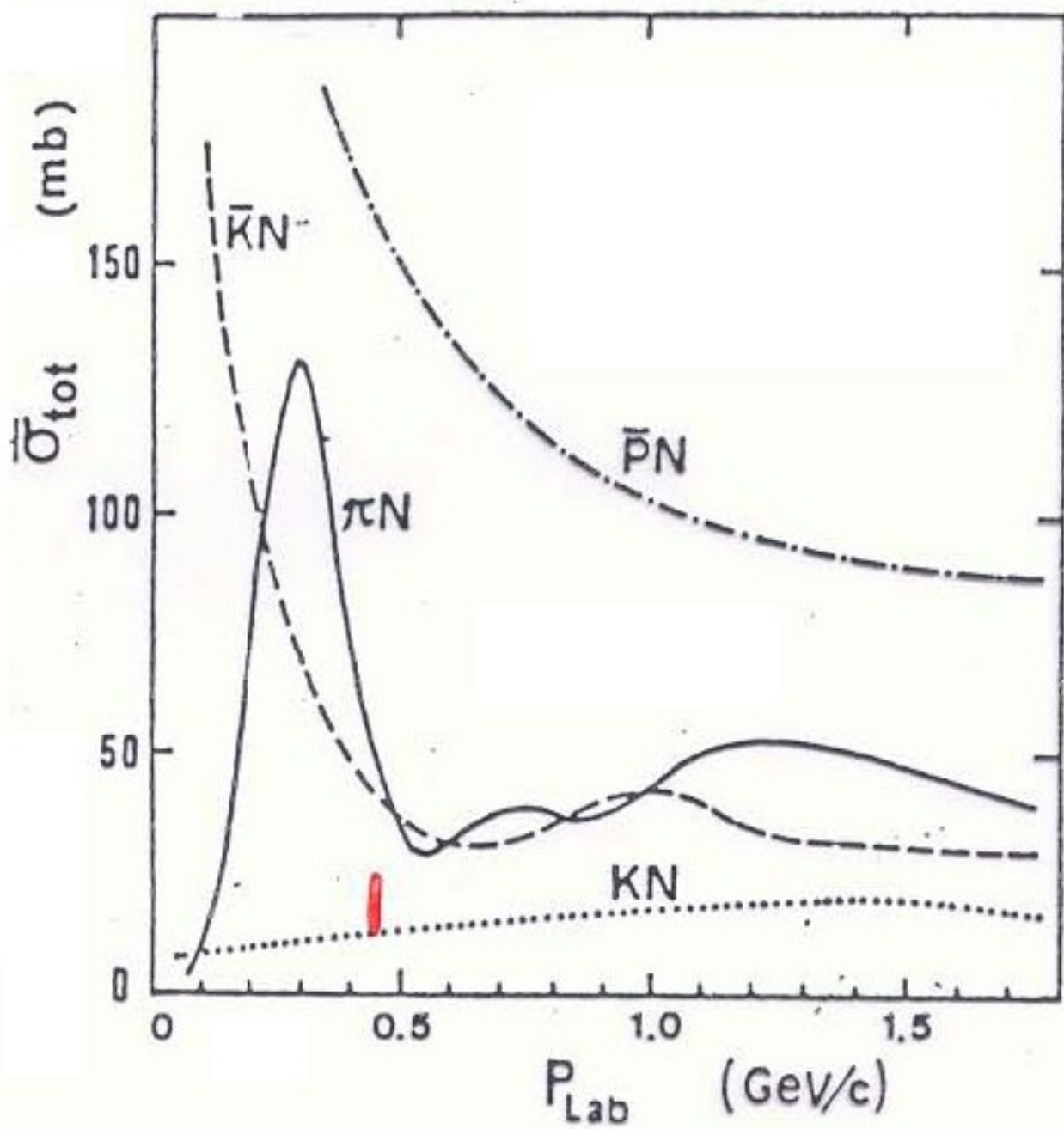
Число импульсов, 10^3



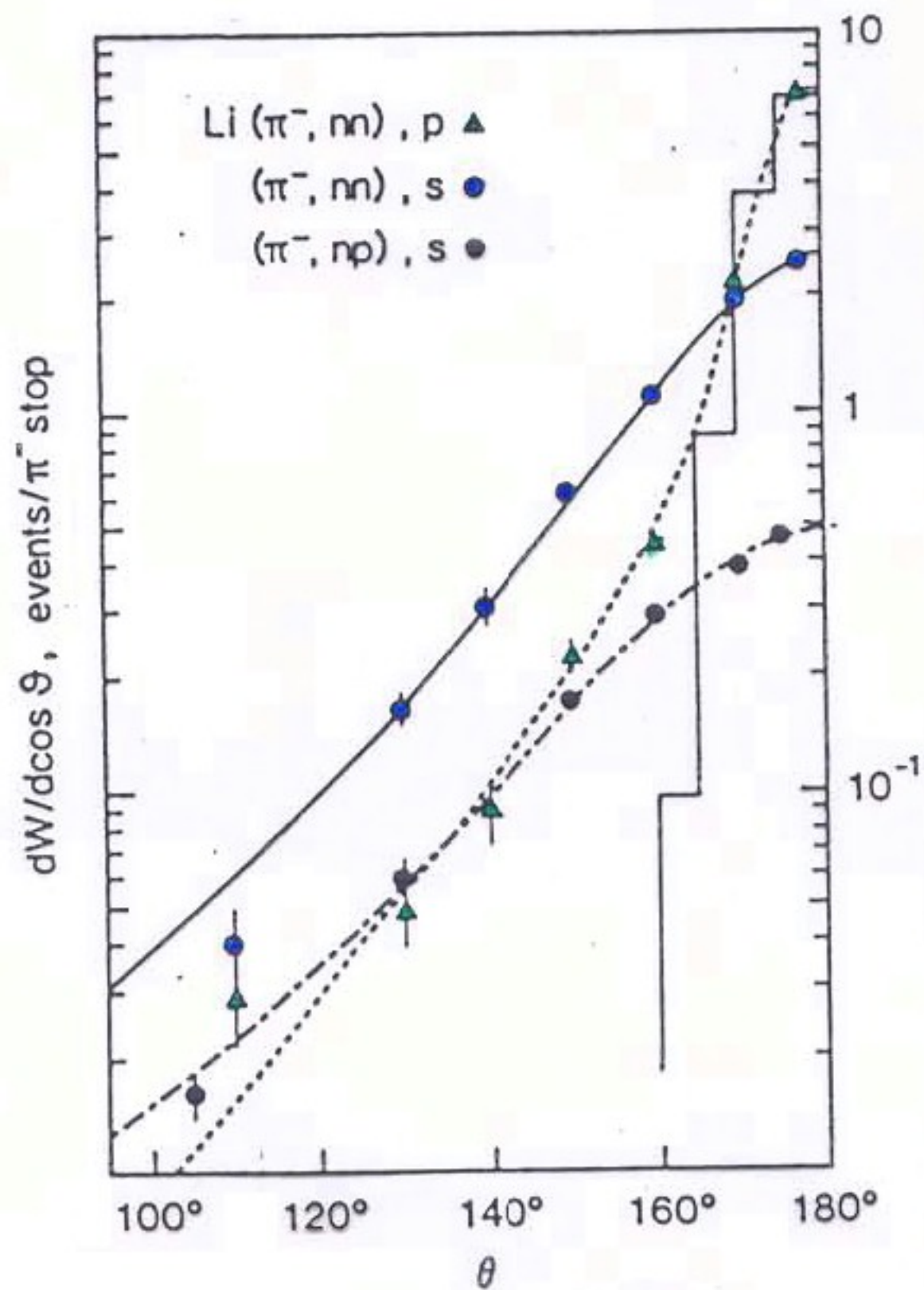
Пион-ядерное взаимодействие



Полные сечения,
усредненные по
изоспину



Поглощение остановившихся пионов на ${}^6\text{Li}$



Δ -резонанс



$$\Delta^{++}, \Delta^+, \Delta^0, \Delta^- \quad J^P = \frac{3}{2}^+ \quad T = \frac{3}{2}$$

$$m = 1232 \text{ MeV} \quad \Gamma = 120 \text{ MeV}$$

$$|\pi^+ p\rangle = \langle 11 \frac{1}{2} \frac{1}{2} | \frac{3}{2} \frac{3}{2} \rangle |T = \frac{3}{2}\rangle = |T = \frac{3}{2}\rangle$$

$$\begin{aligned} |\pi^- p\rangle &= \langle 1-1 \frac{1}{2} \frac{1}{2} | \frac{3}{2} -\frac{1}{2} \rangle |T = \frac{3}{2}\rangle + \langle 1-1 \frac{1}{2} \frac{1}{2} | \frac{1}{2} -\frac{1}{2} \rangle |T = \frac{1}{2}\rangle = \\ &= \frac{1}{\sqrt{3}} |T = \frac{3}{2}\rangle - \sqrt{\frac{2}{3}} |T = \frac{1}{2}\rangle \end{aligned}$$

$$|\pi^- n\rangle = |T = \frac{3}{2}\rangle$$

$$|\pi^+ n\rangle = \sqrt{\frac{1}{3}} |T = \frac{3}{2}\rangle + \sqrt{\frac{2}{3}} |T = \frac{1}{2}\rangle$$

$$\begin{aligned} |\pi^0 n\rangle &= \langle 10 \frac{1}{2} -\frac{1}{2} | \frac{3}{2} -\frac{1}{2} \rangle |T = \frac{3}{2}\rangle + \langle 10 \frac{1}{2} -\frac{1}{2} | \frac{1}{2} -\frac{1}{2} \rangle |T = \frac{1}{2}\rangle = \\ &= \sqrt{\frac{2}{3}} |T = \frac{3}{2}\rangle + \frac{1}{\sqrt{3}} |T = \frac{1}{2}\rangle \end{aligned}$$

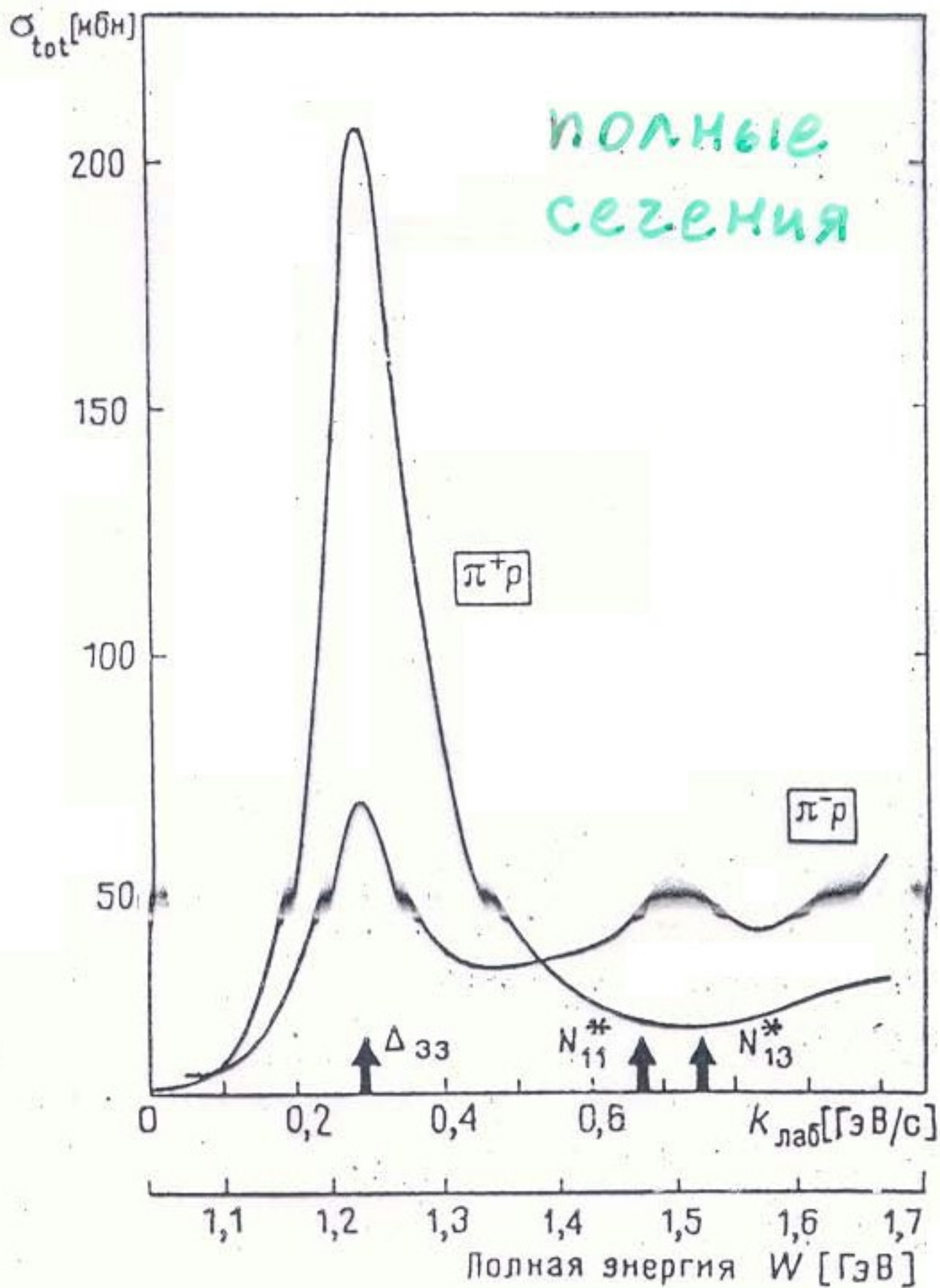
$$\sigma_{ee}(\pi^+ p) \sim |\langle T = \frac{3}{2} | F | T = \frac{3}{2} \rangle|^2$$

$$\sigma_{ee}(\pi^- p) \sim \frac{1}{9} |\langle T = \frac{3}{2} | F | T = \frac{3}{2} \rangle|^2$$

$$\sigma(\pi^- p \rightarrow \pi^0 n) \sim \frac{2}{9} |\langle T = \frac{3}{2} | F | T = \frac{3}{2} \rangle|^2$$

$$\sigma_{ee}(\pi^+ p) : \sigma_{ee}(\pi^- p) : \sigma(\pi^- p \rightarrow \pi^0 n) = 9 : 1 : 2$$

$$\sigma_{ee}(\pi^0 p) \quad \sigma(\pi^0 p \rightarrow \pi^+ n)$$



Амплитуда πN -рассеяния (усредненная по спину нуклона)

$$F(\vec{k}, \vec{k}') = \underbrace{b_0 + b_1(\vec{t}_\pi \cdot \vec{t}_N)}_{s\text{-волна}} + \underbrace{[c_0 + c_1(\vec{t}_\pi \cdot \vec{t}_N)](\vec{k}' \cdot \vec{k})}_{p\text{-волна}}$$

$$\vec{t}_\pi \cdot \vec{t}_N = \begin{cases} 1 & \pi^+ p \text{ и } \pi^- n \\ -1 & \pi^- p \text{ и } \pi^+ n \end{cases}$$

Оптический пион-ядерный потенциал

$$U(z) = B_0 \rho(z) + B_1 \delta \rho(z) + \vec{\nabla} (C_0 \rho(z) + C_1 \delta \rho(z)) \vec{\nabla}$$

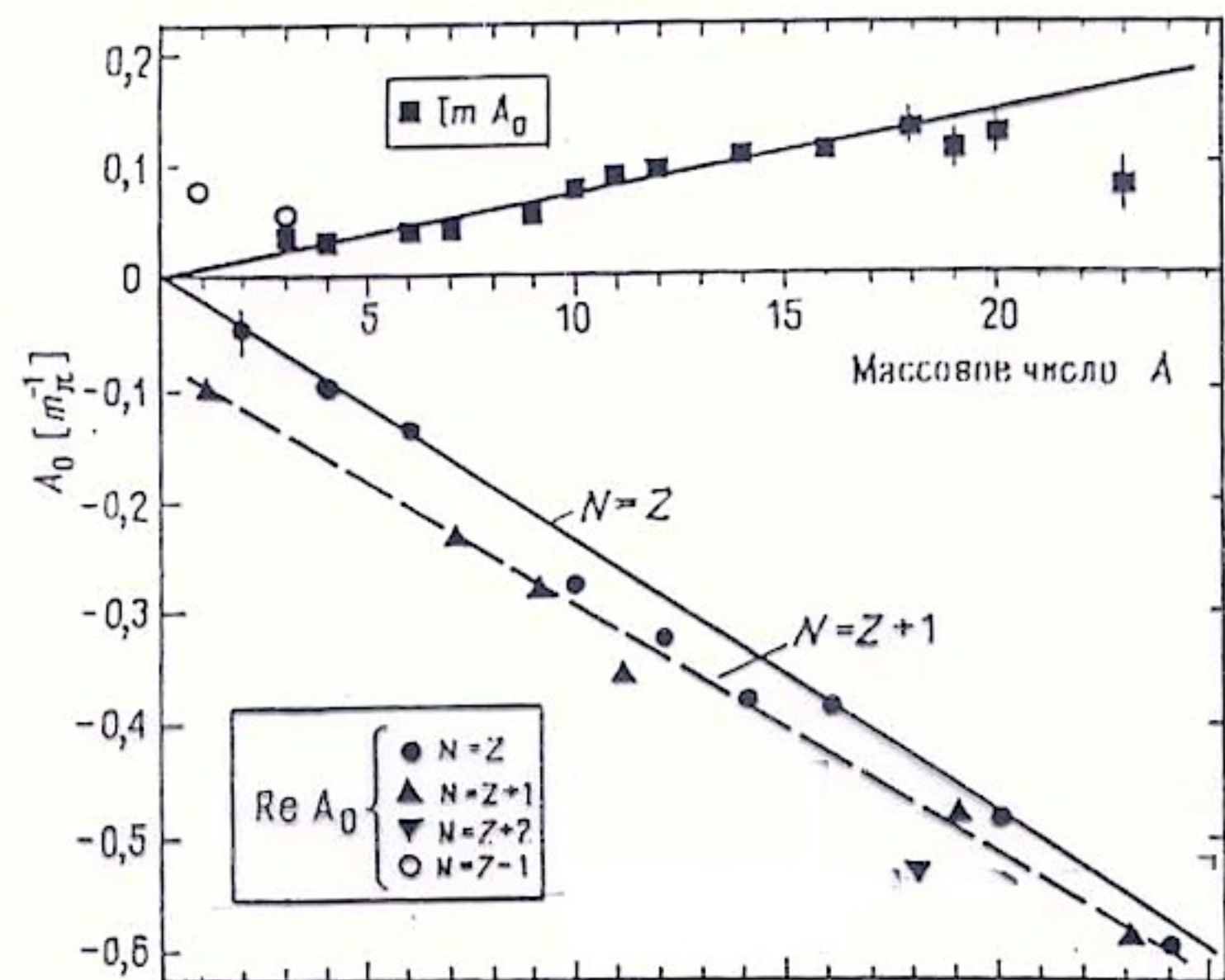
$$\rho(z) = \rho_p(z) + \rho_n(z) \sim A \bar{\rho}(z)$$

$$\delta \rho(z) = \rho_n(z) - \rho_p(z) \sim (N - Z) \bar{\rho}(z)$$

$$W(z) = D_1 \rho^2(z) + D_2 \vec{\nabla} \rho^2(z) \vec{\nabla}$$

$$V_{opt}(z) = U(z) + i W(z)$$

$$U(z) \rightarrow U(z) + E_1 \rho^2(z) + E_2 \vec{\nabla} \rho^2(z) \vec{\nabla}$$



$\pi^- p$

$$\Delta E_{1s} = +7.11 \pm 0.05 \text{ eV}$$

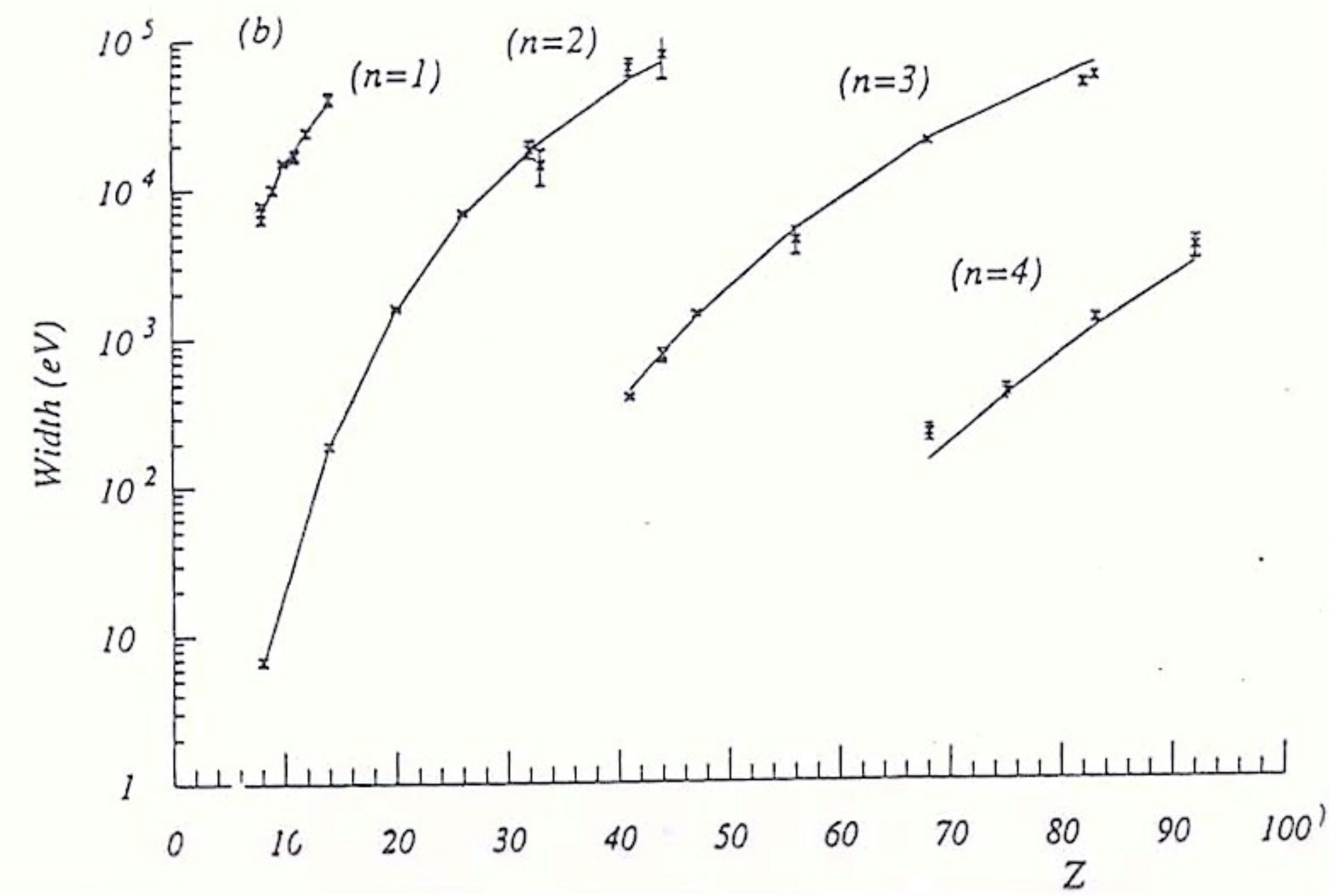
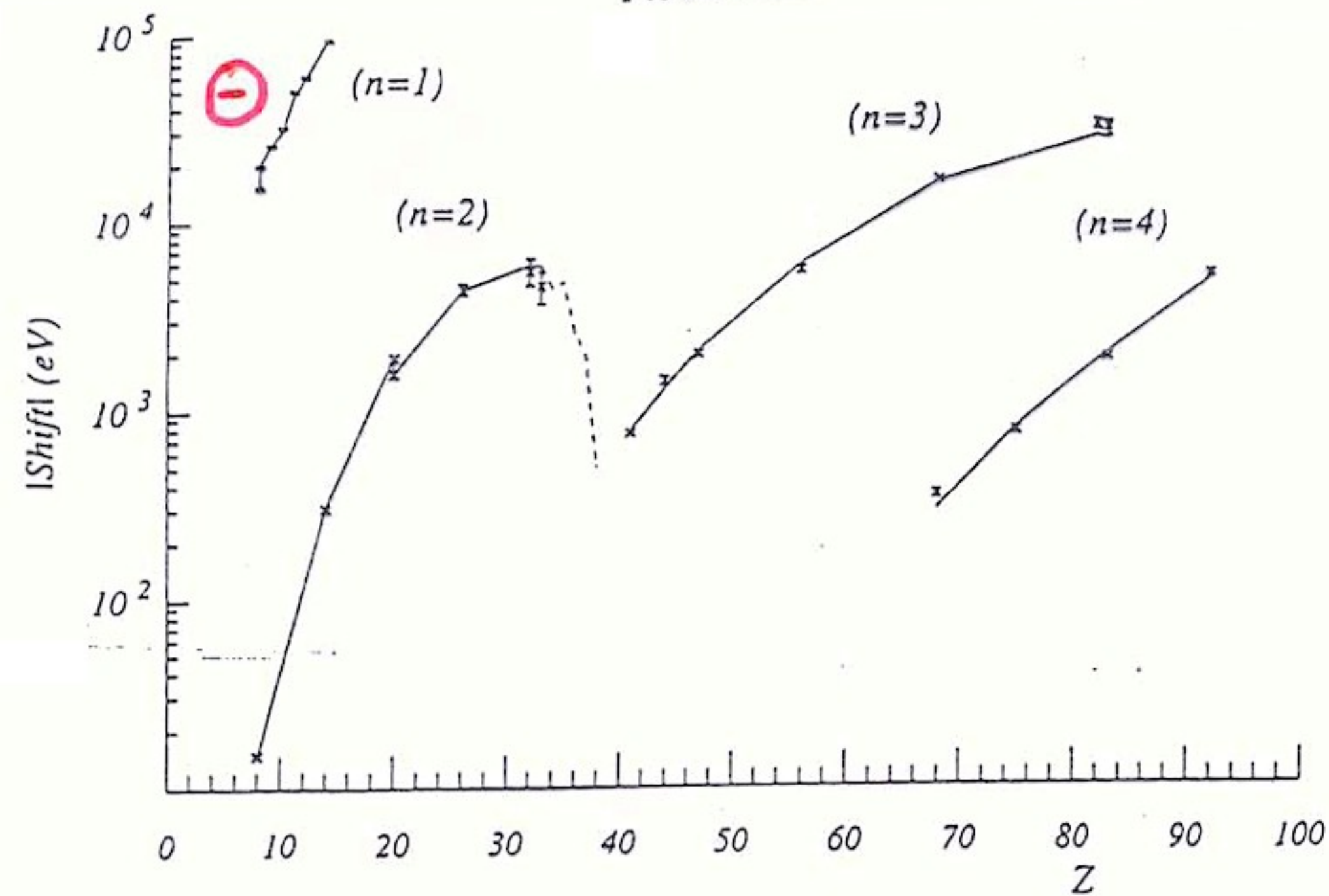
$$\Gamma_{1s} = 0.87 \pm 0.08 \text{ eV}$$

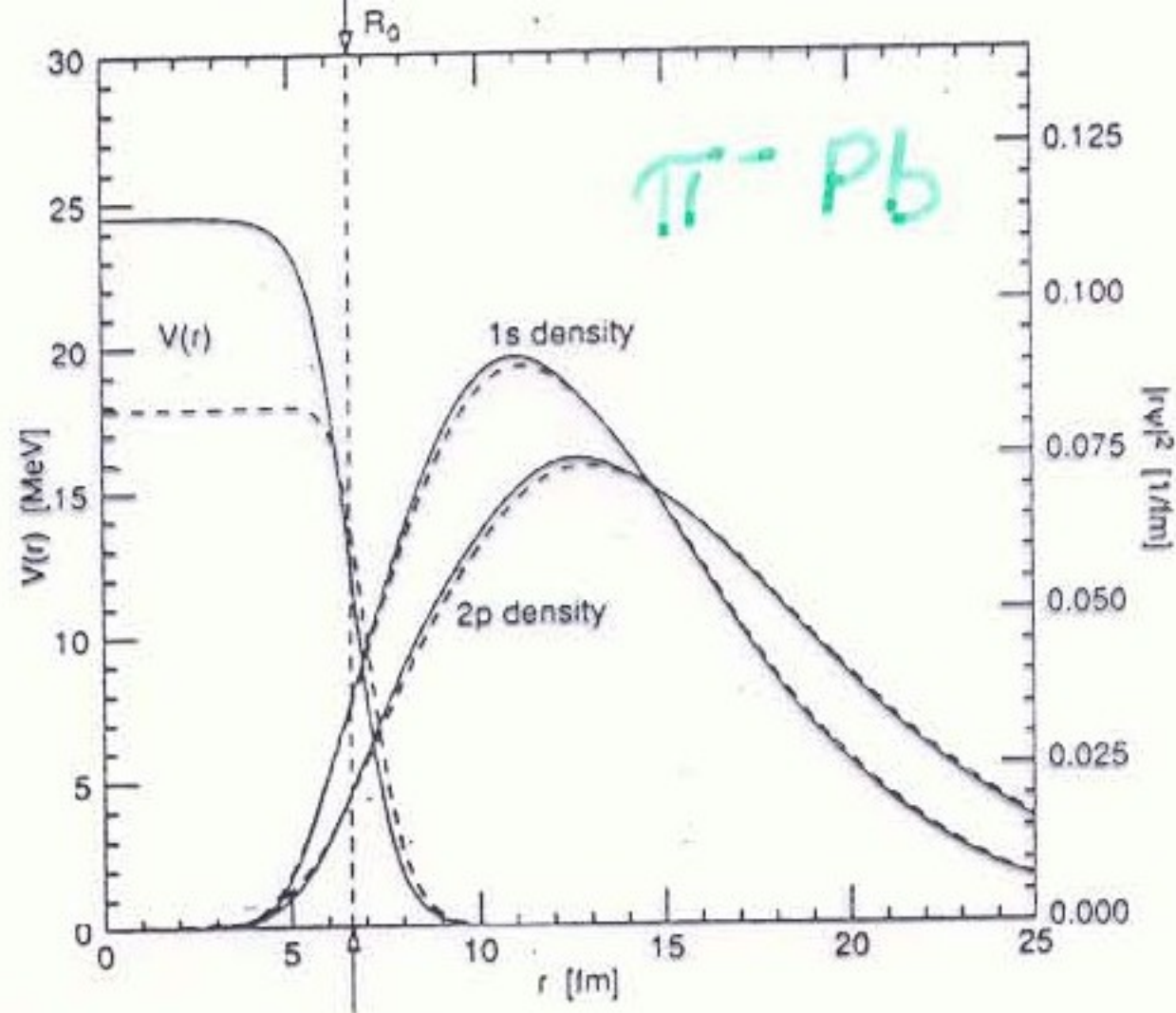
$\pi^- d$

$$\Delta E_{1s} = -2.46 \pm 0.05 \text{ eV}$$

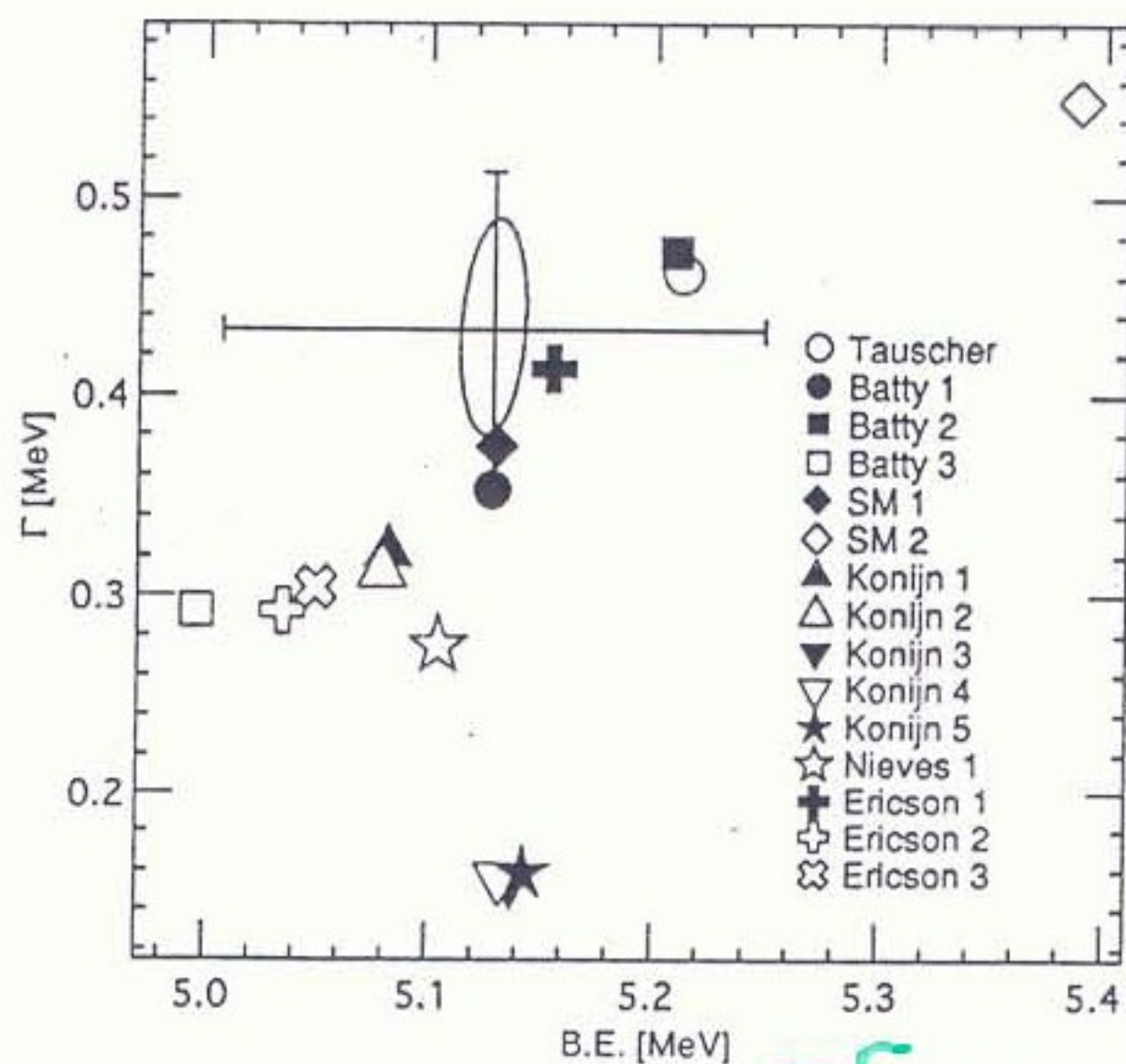
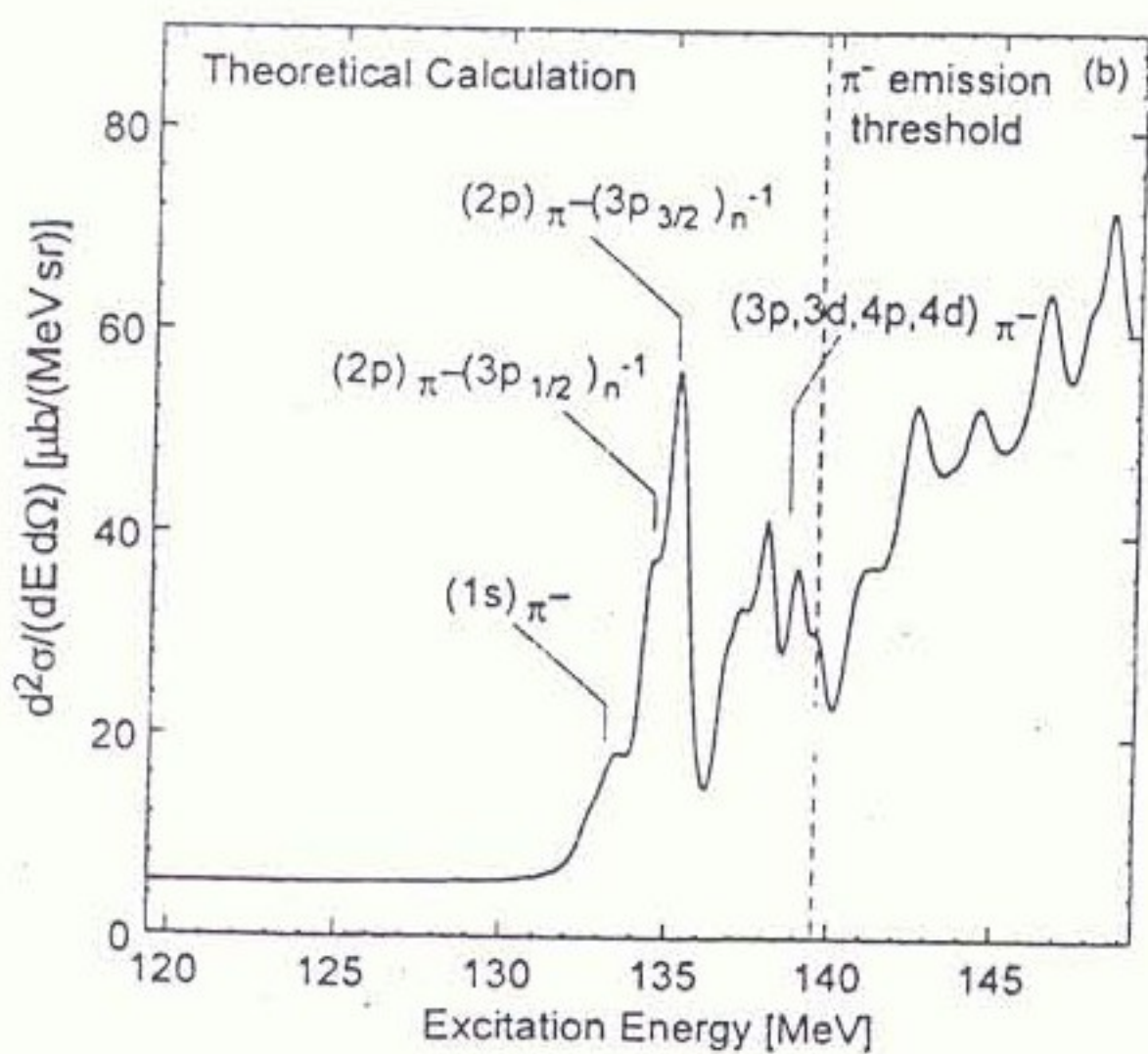
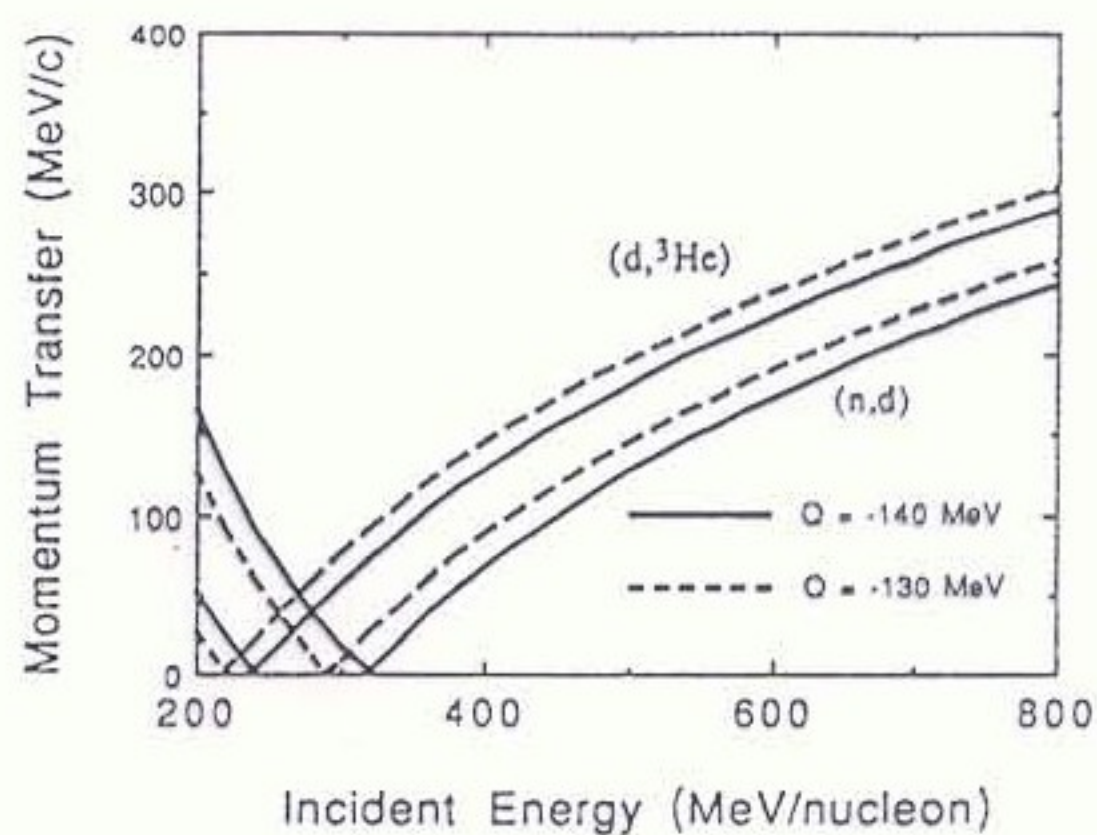
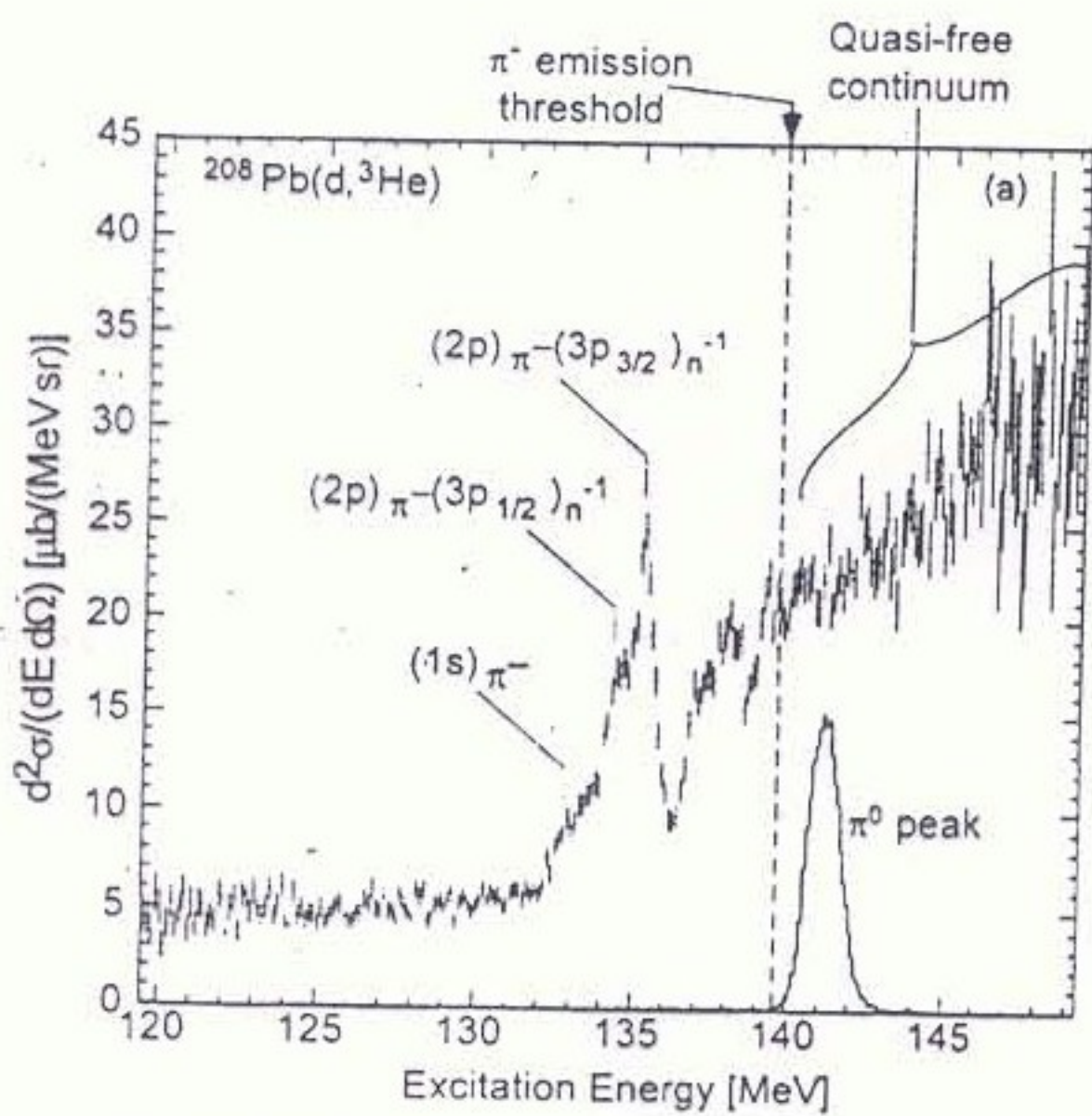
$$\Gamma_{1s} = 1.19 \pm 0.10 \text{ eV}$$

Pionic atoms



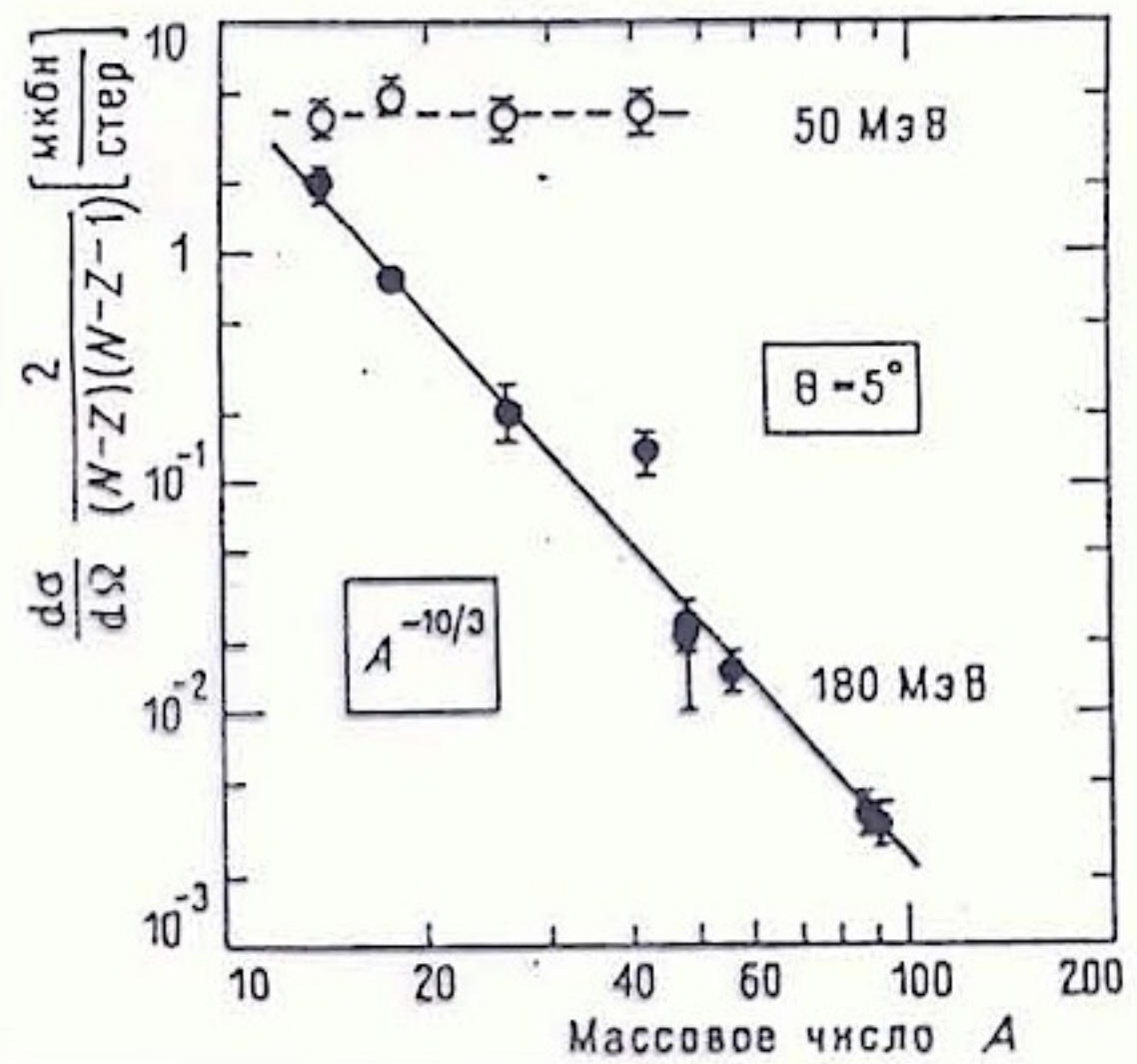
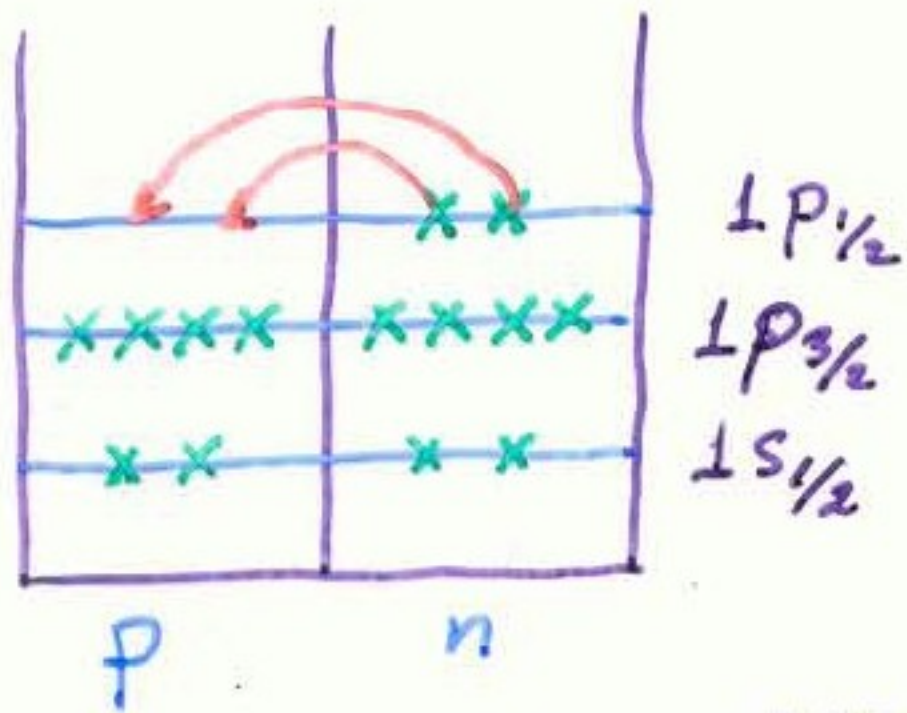


$^{208}\text{Pb}(d, ^3\text{He})$
 $T_d = 600 \text{ MeV}$

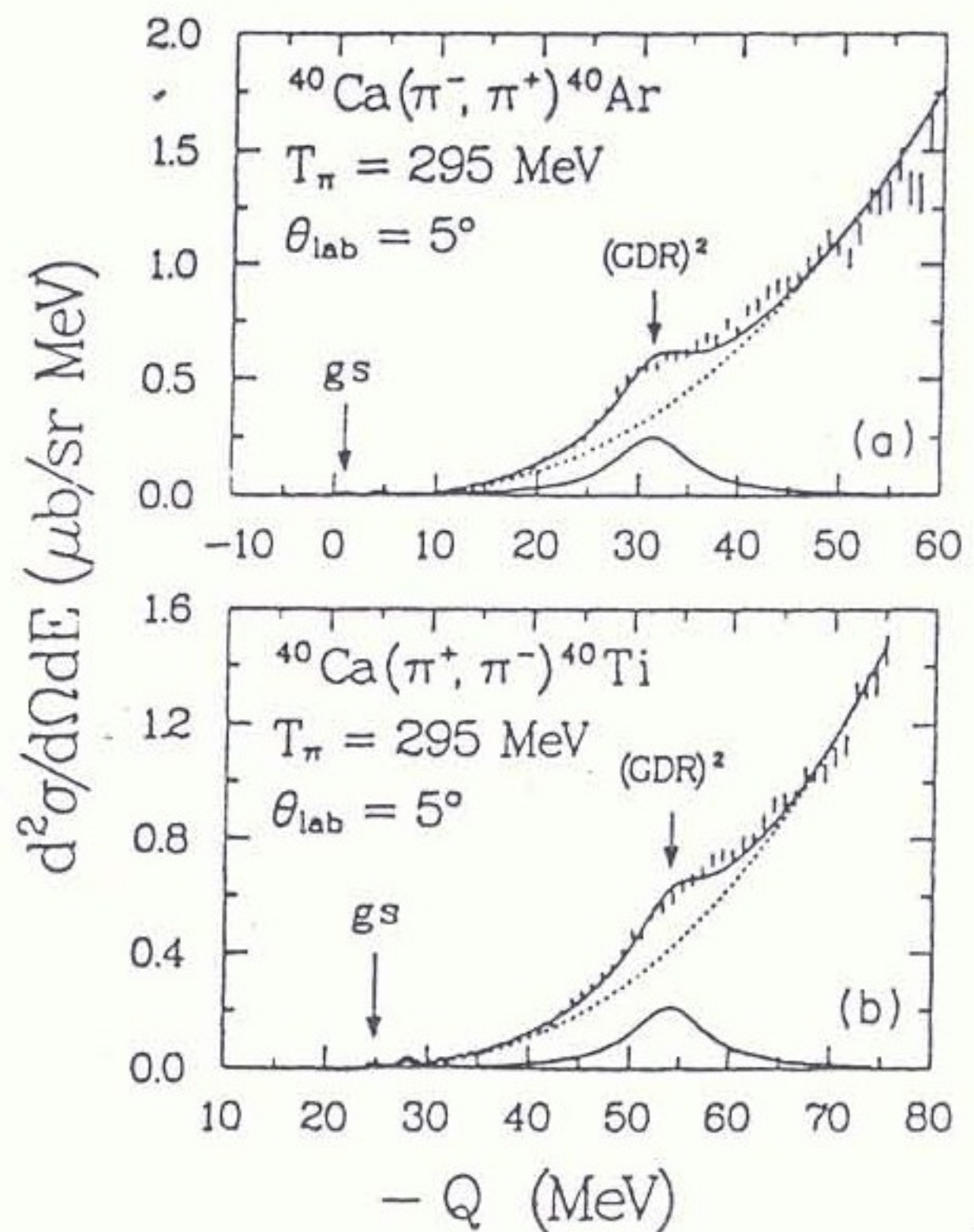
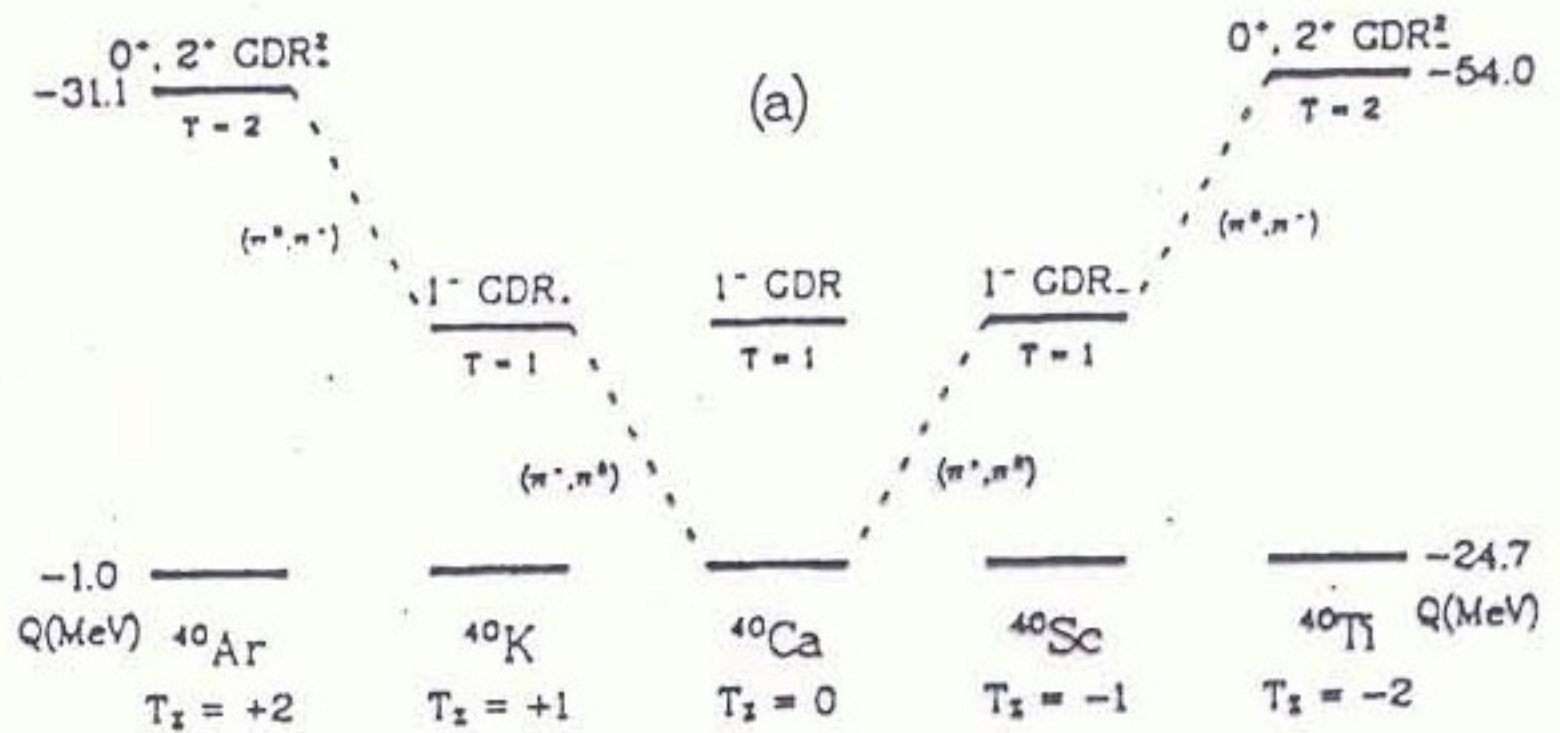
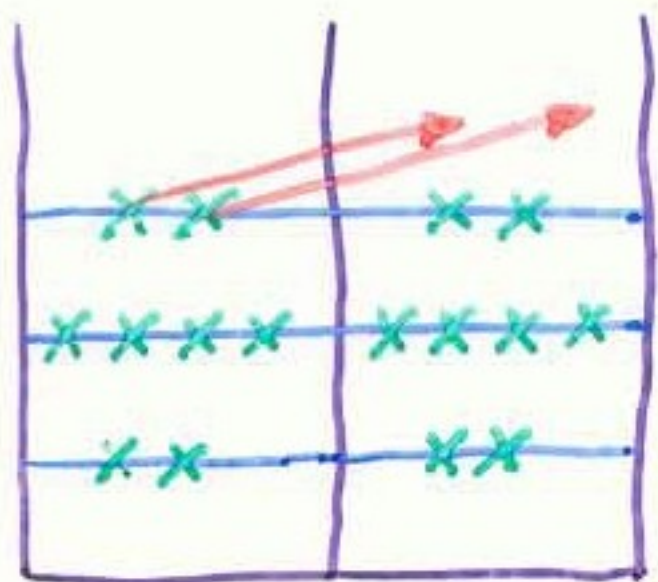


Двойная перезарядка пионов

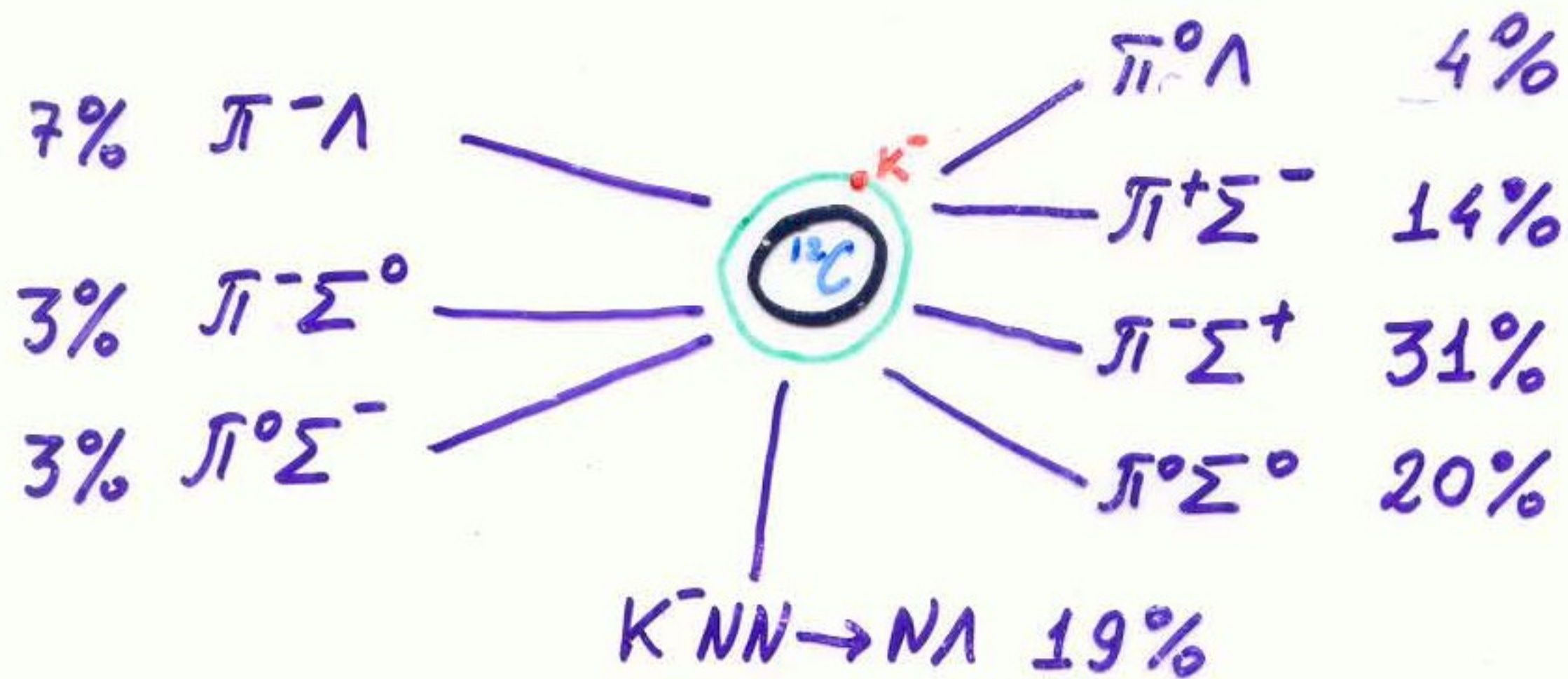
Аналоговое состояние



Переходы с изменением изоспина



Каналы поглощения K^- -мезонов ядром



$J^\pi = \frac{1}{2}^-$
 $\Lambda(1405)$
 $M = 1406 \pm 4 \text{ MeV}$
 $\Gamma = 50 \pm 2 \text{ MeV}$

$$R_{\text{pi}} = \frac{R(\Sigma^+ \pi^-) + R(\Sigma^- \pi^+)}{R(\Sigma^- \pi^0)}$$

$$\frac{R_{\text{pi}}(\text{Ag, Br})}{R_{\text{pi}}(\text{C, N, O})} \sim \frac{1}{5}$$

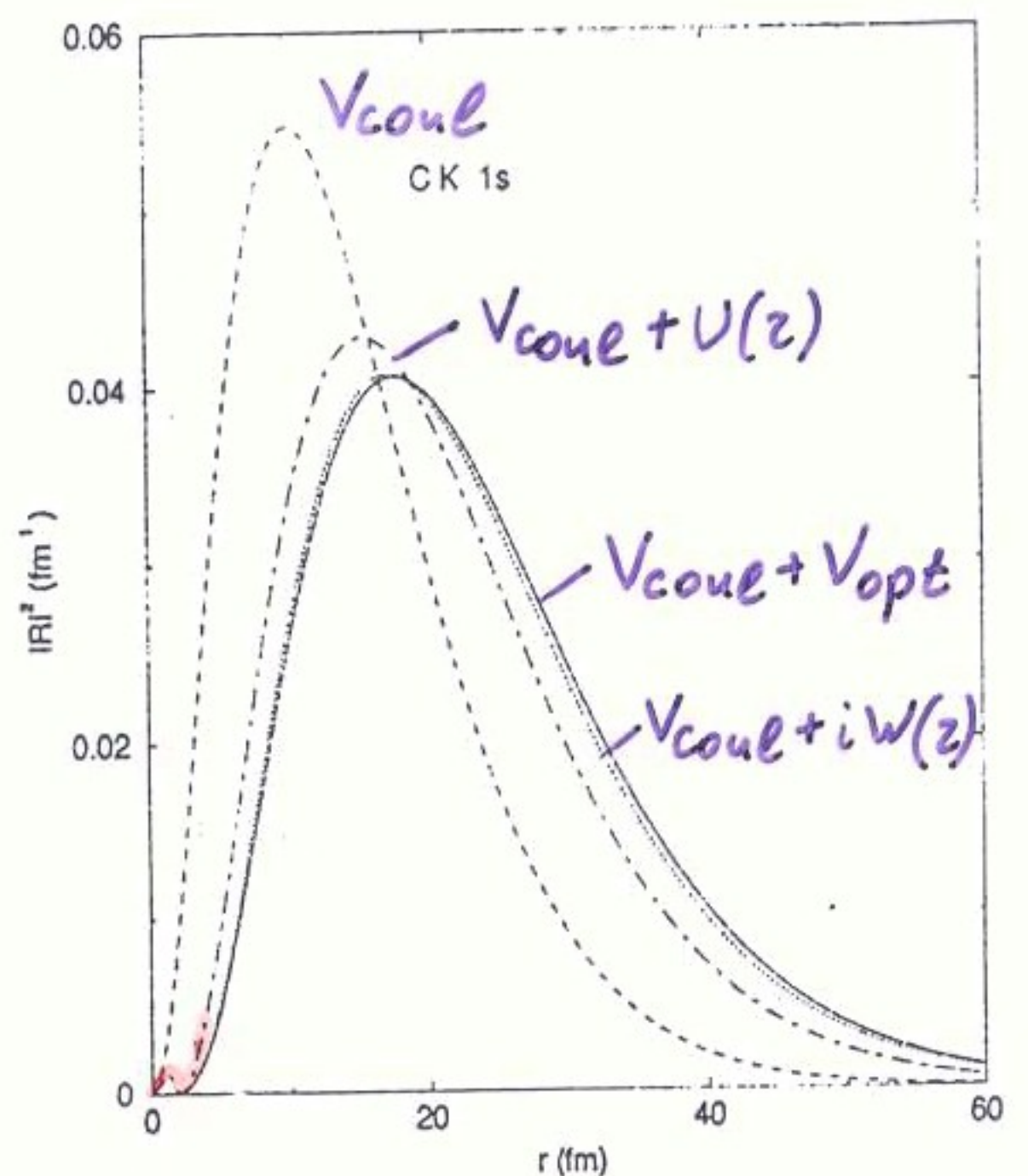
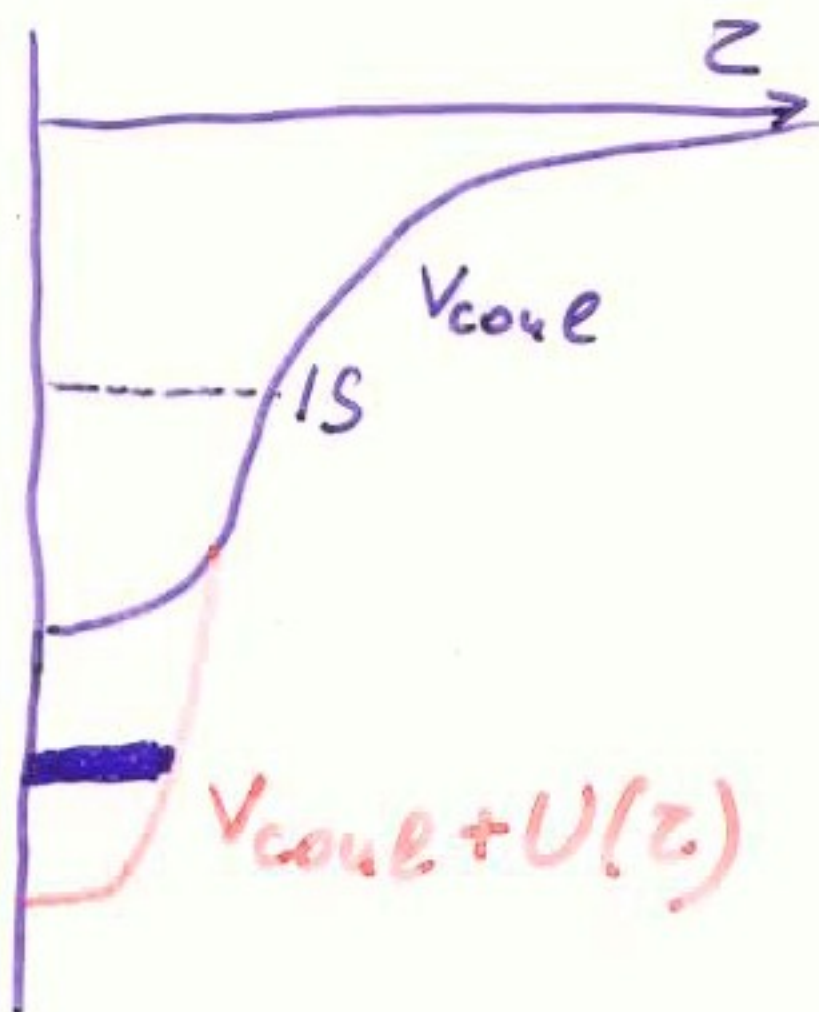
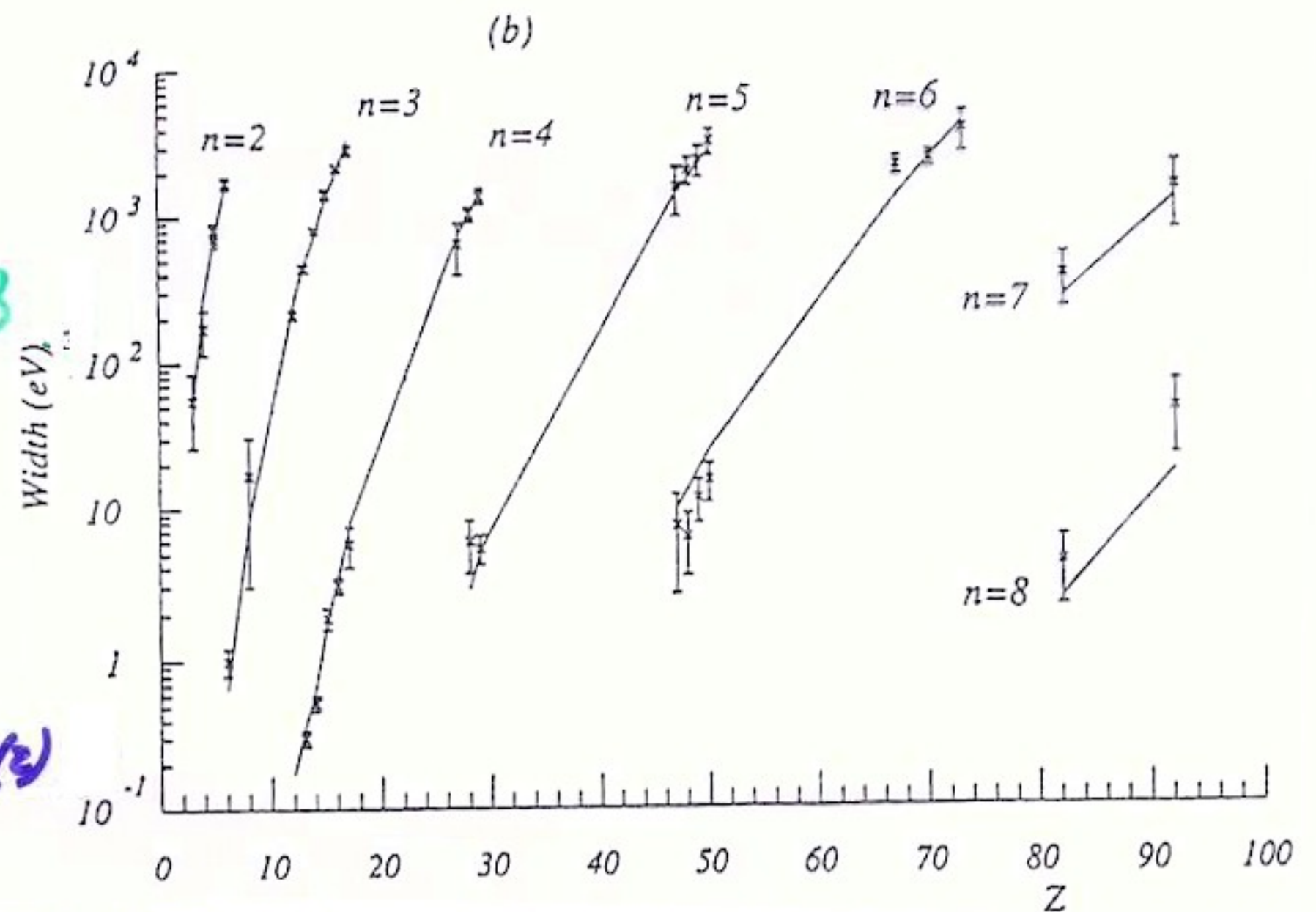
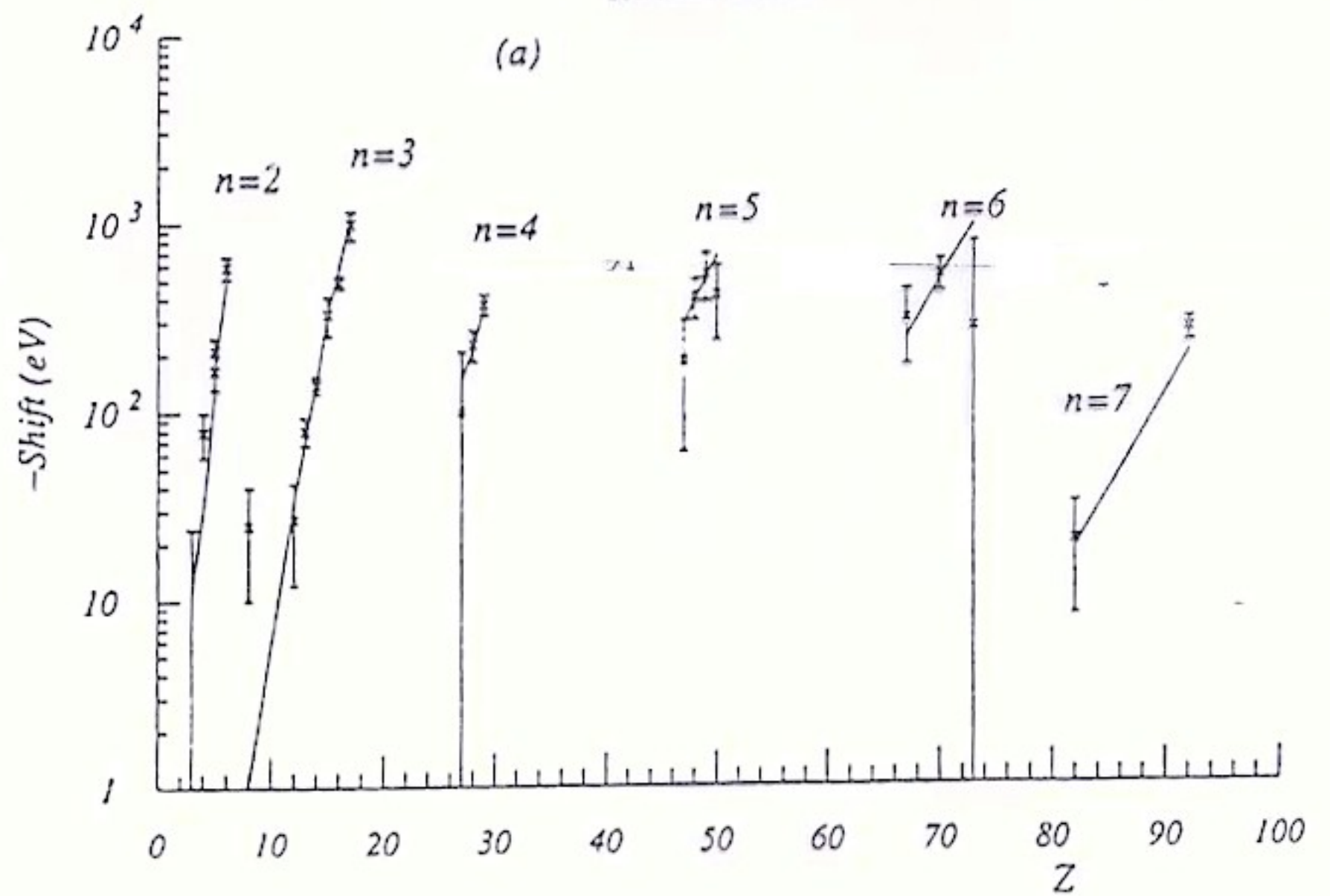
$K^- p$
 $\Delta E_{1s} = -320 \pm 70 \text{ eV}$
 $\Gamma_{1s} = 400 \pm 300 \text{ eV}$

2003
 $\Delta E_{1s} = -175 \pm 26 \pm 15 \text{ eV}$
 $\Gamma_{1s} = 120 \pm 90 \pm 15 \text{ eV}$
 2005
 $\Delta E_{1s} = -193 \pm 37 \pm 6 \text{ eV}$
 $\Gamma_{1s} = 249 \pm 111 \pm 30 \text{ eV}$

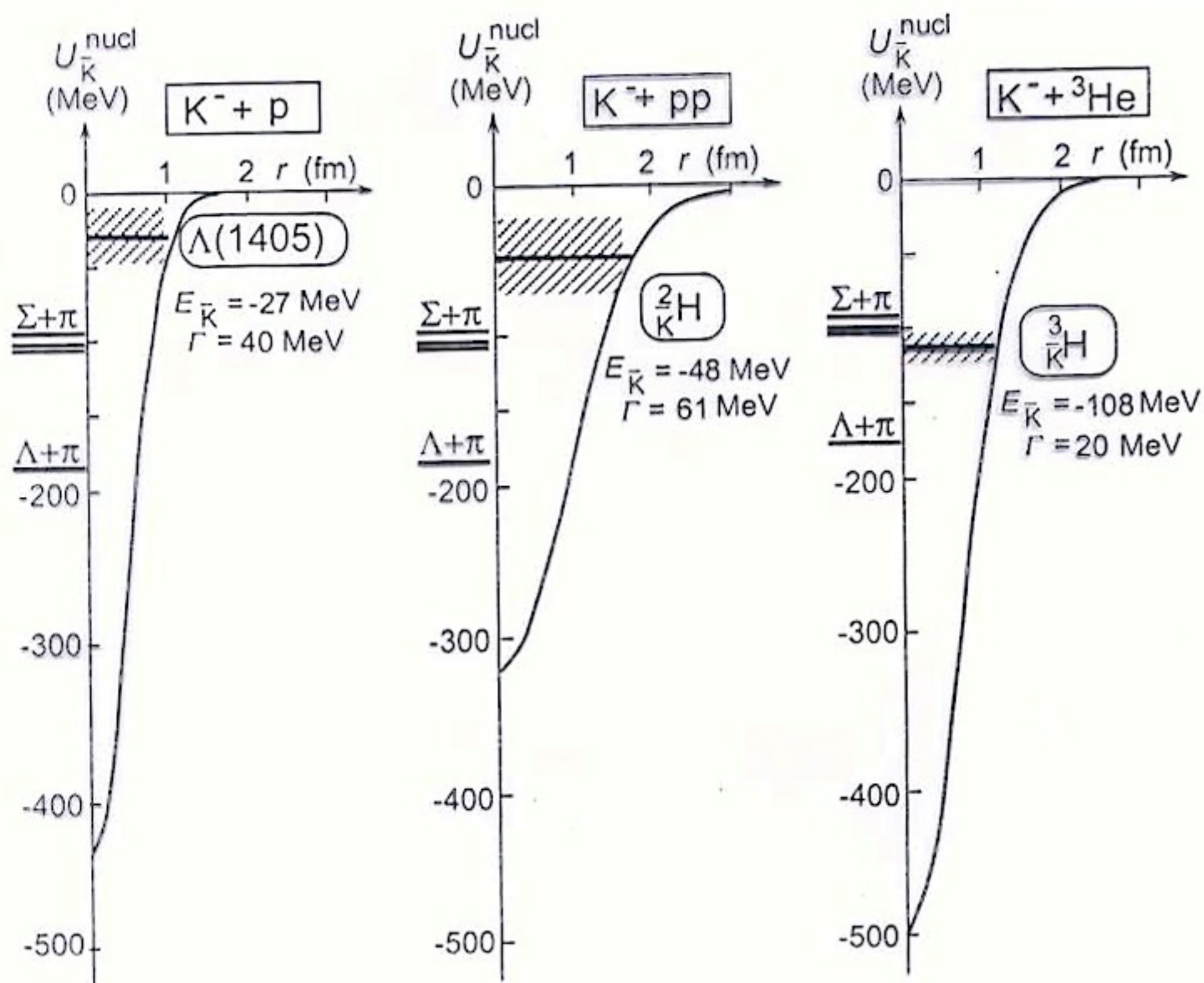
$V_{opt}(z) = U(z) + iW(z)$

$U(z) = B_0 \rho(z) + B_1 \delta \rho(z)$

$W(z) = D_0 \rho(z) + D_1 \delta \rho(z)$

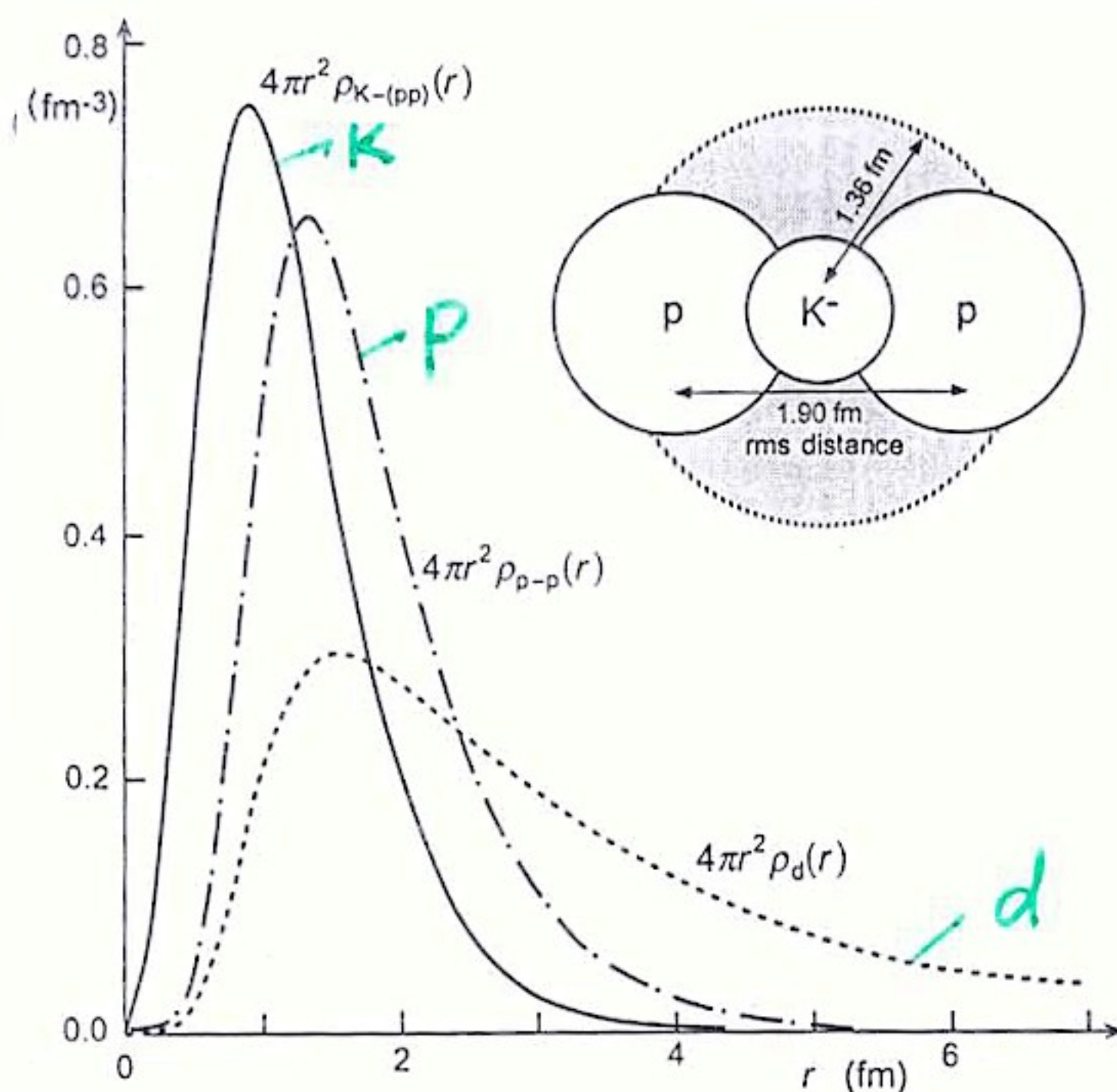


Каонные ядра



Сжатие ядра

Высокие плотности



2003

$K^- + {}^3\text{He}$

$B = 173 \pm 4 \text{ MeV}$

$\Gamma \sim 25 \text{ MeV}$

Нейтральные каоны: осцилляции и регенерация

$$|K_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |K_0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |\bar{K}_0\rangle \approx |K_S\rangle$$

$$|K_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |K_0\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}} |\bar{K}_0\rangle \approx |K_L\rangle$$

$$CP = +1$$

$$CP = -1$$

Начальное состояние ($t=0$)

$$|K_0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |K_1\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |K_2\rangle$$

$$|K(t)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} e^{iE_1 t} |K_1\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} e^{iE_2 t} |K_2\rangle =$$

$$E = m + i\frac{\Gamma}{2}$$

$$\Gamma = \frac{1}{\tau}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}} \left[e^{im_1 t} e^{-\frac{\Gamma_1 t}{2}} |K_1\rangle + e^{im_2 t} e^{-\frac{\Gamma_2 t}{2}} |K_2\rangle \right]$$

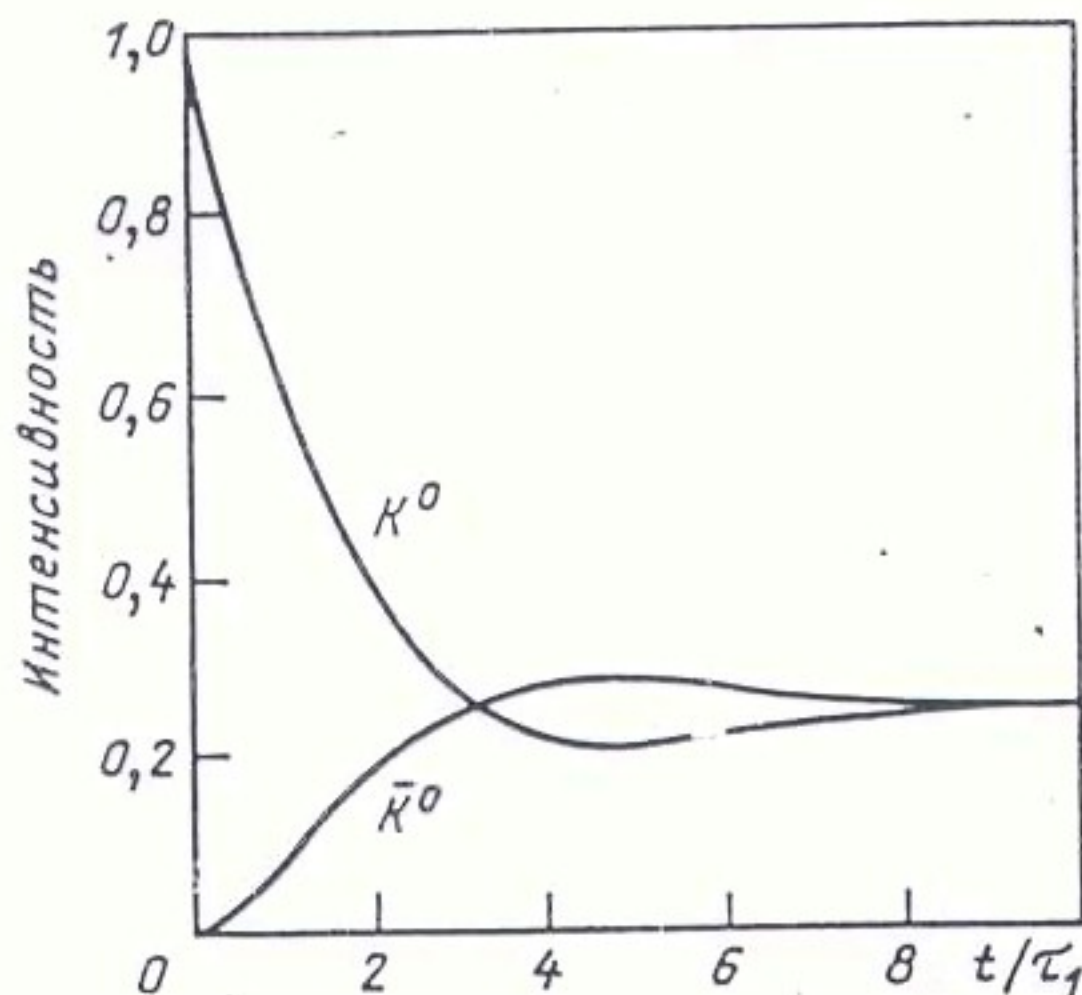
$$\langle K_0 | K(t) \rangle = \frac{1}{2} e^{im_1 t} e^{-\frac{\Gamma_1 t}{2}} + \frac{1}{2} e^{im_2 t} e^{-\frac{\Gamma_2 t}{2}}$$

$$P_{K_0}(t) = \frac{1}{4} \left[e^{-\Gamma_1 t} + e^{-\Gamma_2 t} + 2e^{-\frac{(\Gamma_1 + \Gamma_2)t}{2}} \cos \Delta m t \right]$$

$$P_{\bar{K}_0}(t) = \frac{1}{4} \left[e^{-\Gamma_1 t} + e^{-\Gamma_2 t} - 2e^{-\frac{(\Gamma_1 + \Gamma_2)t}{2}} \cos \Delta m t \right]$$

$$\Delta m = m_{K_L} - m_{K_S} = 3.49 \cdot 10^{-12} \text{ МэВ}$$

$$= 0.53 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$$



Регенерация короткоживущих каонов

$$t \gg \tau_1$$

$$|K(t)\rangle = |K_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |K_0\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}} |\bar{K}_0\rangle$$

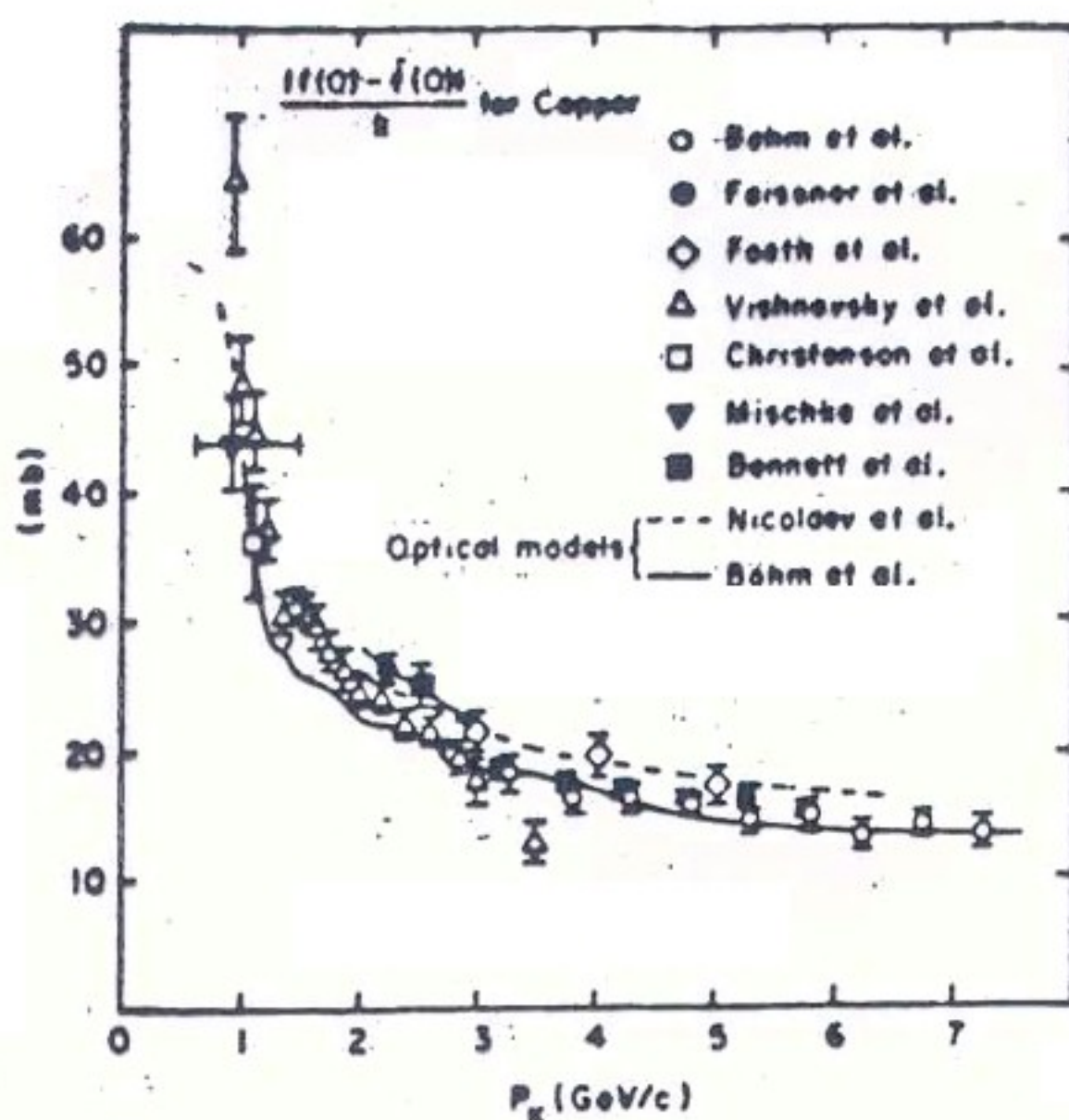
После взаимодействия с нуклоном или ядром

$$\begin{aligned} |K\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} (f(\theta) |K_0\rangle - \bar{f}(\theta) |\bar{K}_0\rangle) = \\ &= \frac{1}{2} (f(\theta) + \bar{f}(\theta)) |K_2\rangle + \frac{1}{2} (f(\theta) - \bar{f}(\theta)) |K_1\rangle \end{aligned}$$

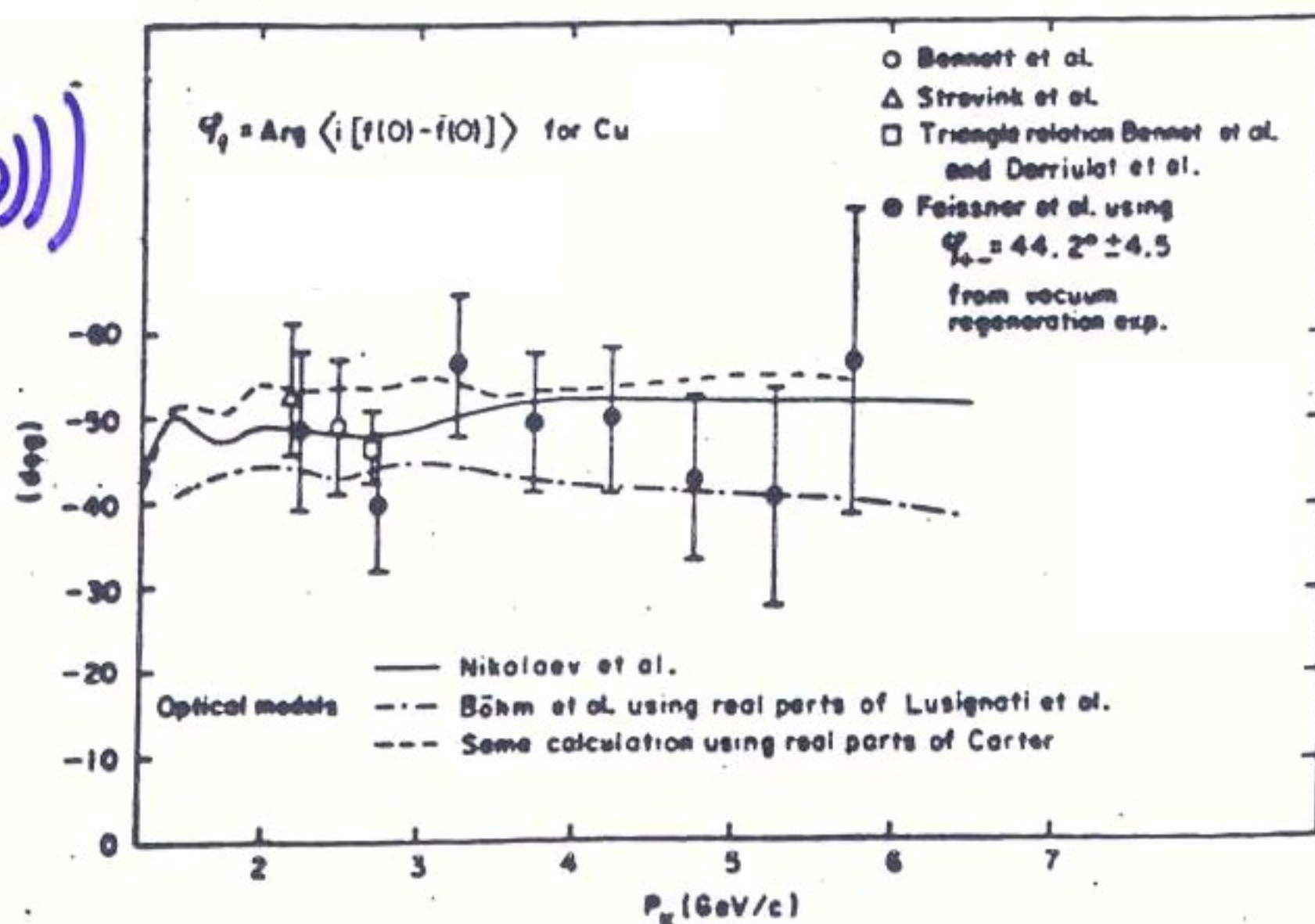
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} (K_2 \rightarrow K_1) = \frac{1}{4} |f(\theta) - \bar{f}(\theta)|^2$$

$$K_L Cu \rightarrow K_S Cu$$

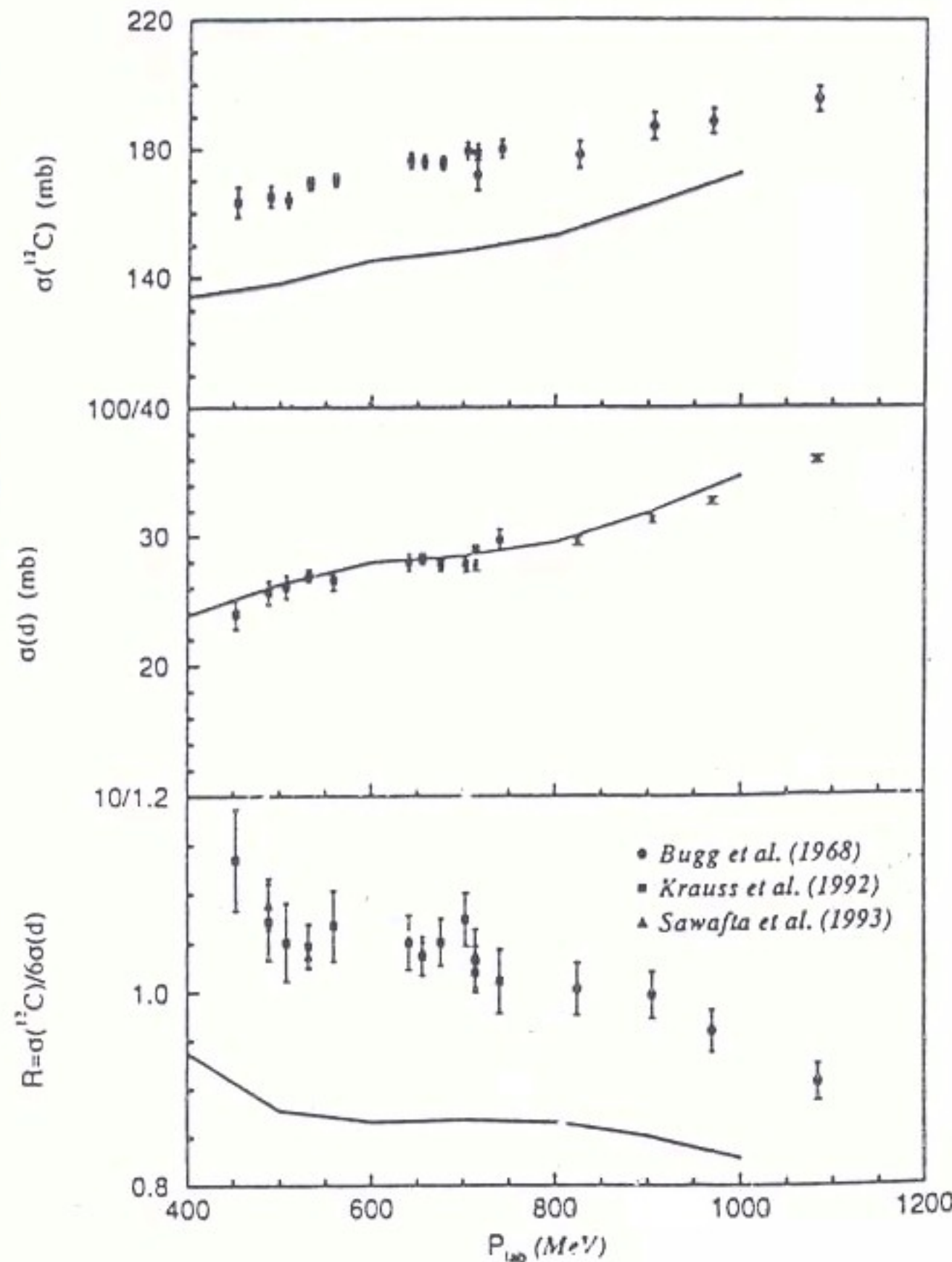
$$\frac{|f(0) - \bar{f}(0)|}{K}$$



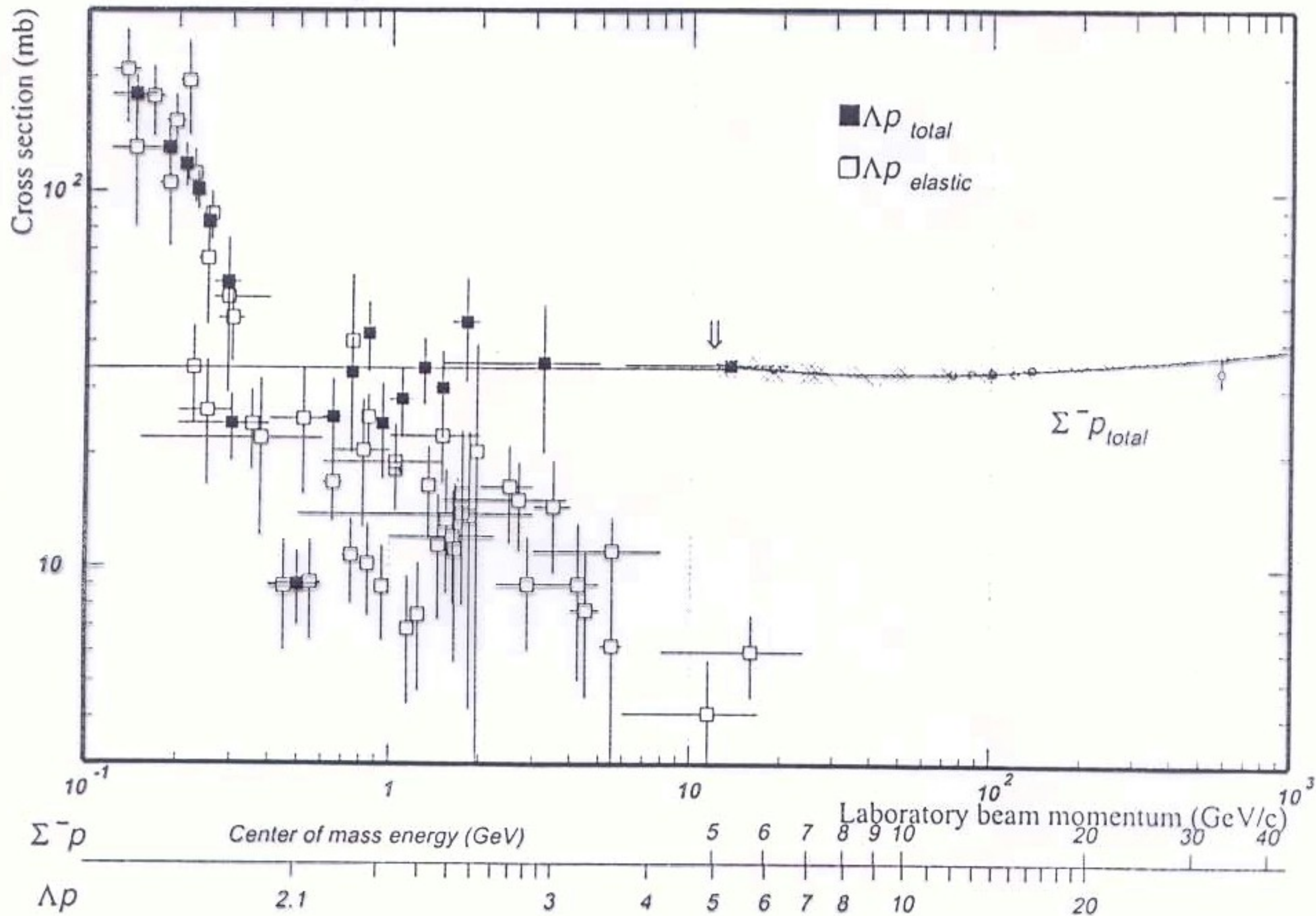
$$\text{Arg}(i(f(0) - \bar{f}(0)))$$



$$R = \frac{\sigma_{tot}(K^+ {}^{12}\text{C})}{6\sigma_{tot}(K^+ d)}$$



Сечения гиперон-нуклонного взаимодействия



Энергии связи Λ -гиперонов

$$B_{\Lambda} = B_{\text{tot}}({}^{A+1}_{\Lambda}Z) - B_{\text{tot}}({}^AZ)$$

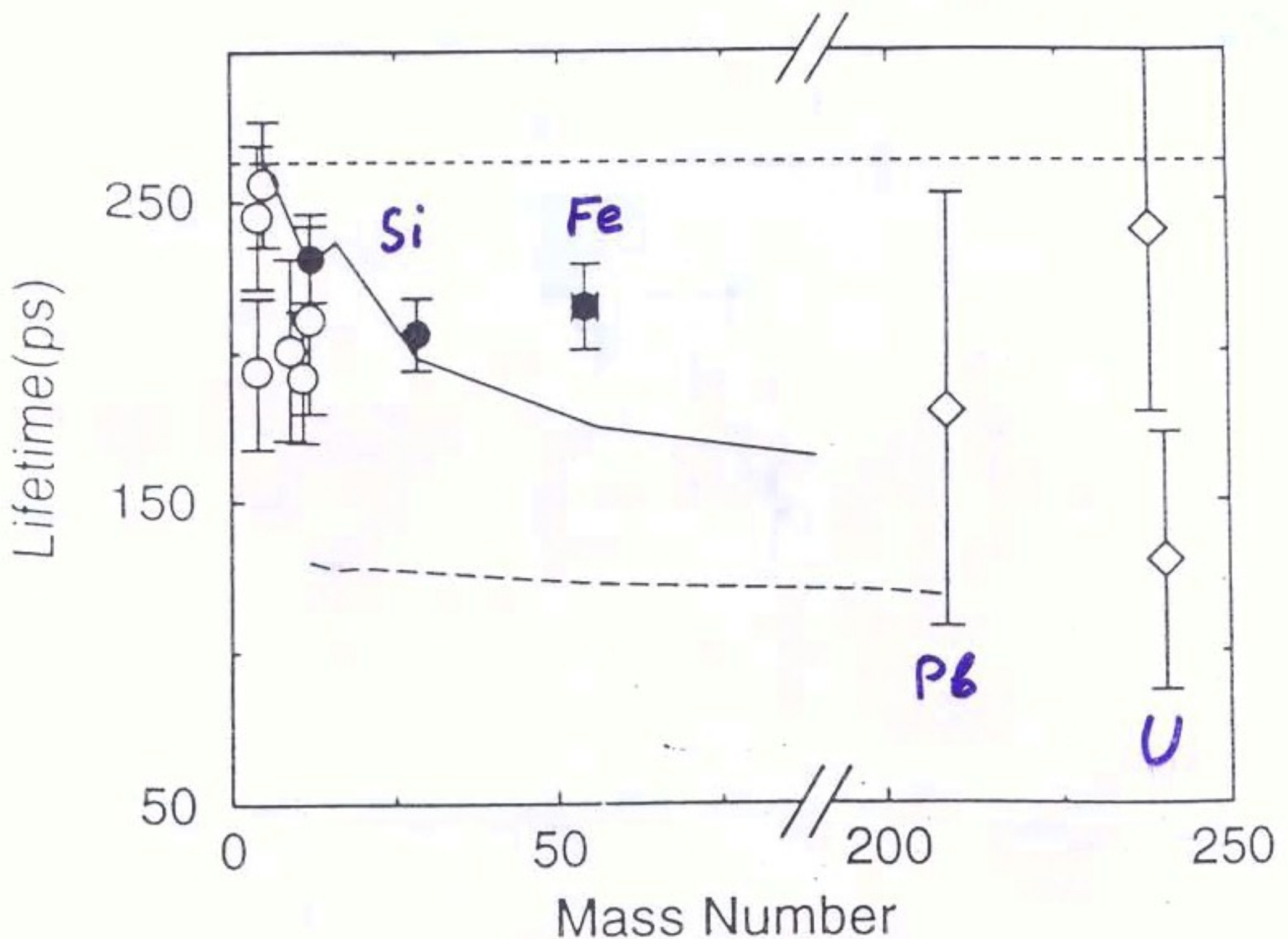
$$= M({}^AZ) + M_{\Lambda} - M({}^{A+1}_{\Lambda}Z)$$

Гиперядро

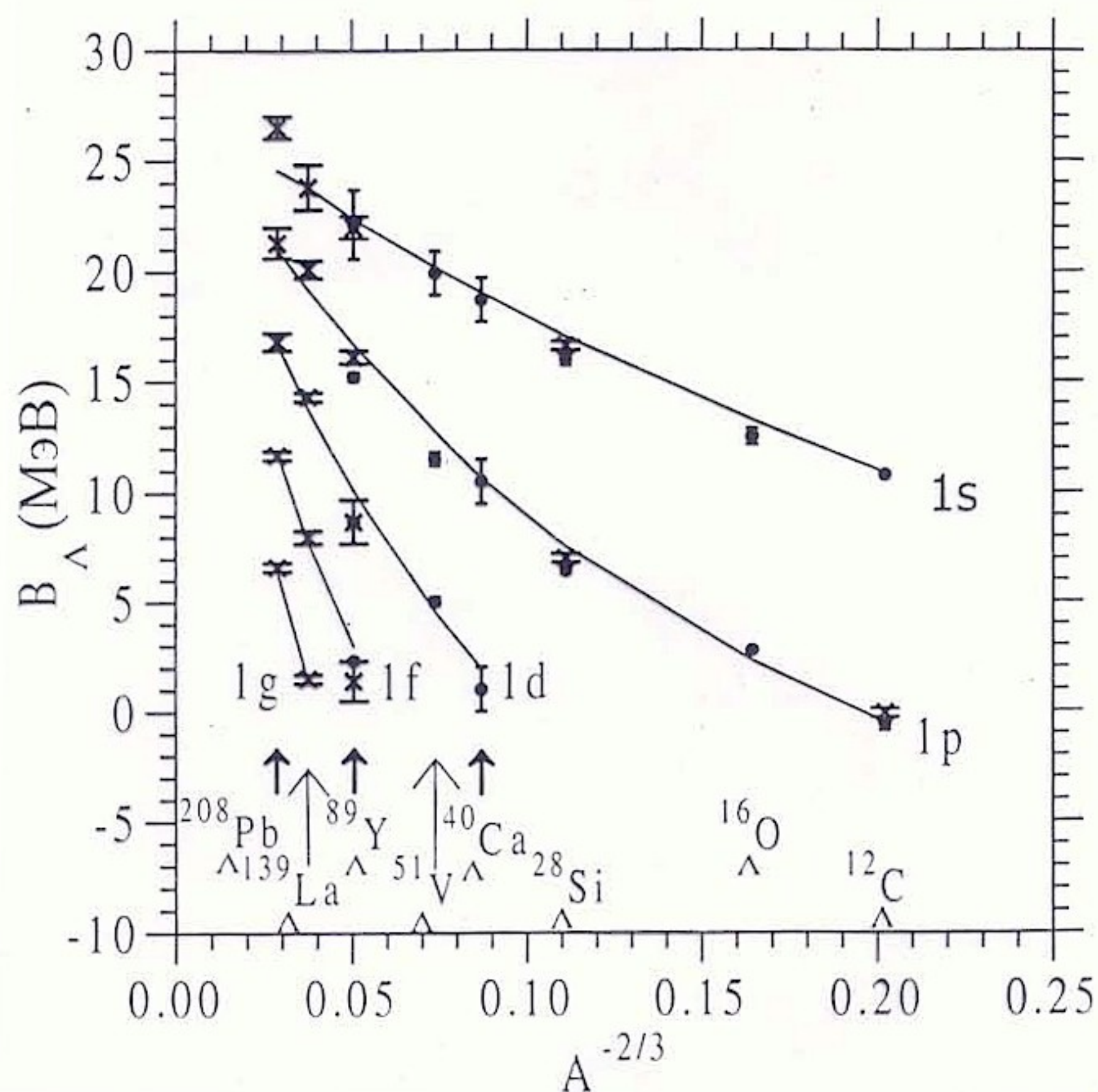
$B_{\Lambda}, \text{МэВ}$

${}^3_{\Lambda}\text{H}$	0.13 ± 0.05
${}^4_{\Lambda}\text{H}$	2.04 ± 0.04
${}^4_{\Lambda}\text{He}$	2.39 ± 0.03
${}^5_{\Lambda}\text{He}$	3.12 ± 0.02
${}^6_{\Lambda}\text{He}$	4.18 ± 0.10
${}^9_{\Lambda}\text{Be}$	6.71 ± 0.04
${}^{12}_{\Lambda}\text{C}$	10.75 ± 0.10
${}^{16}_{\Lambda}\text{O}$	12.5 ± 0.35
${}^{40}_{\Lambda}\text{Ca}$	18.7 ± 1.0
${}^{89}_{\Lambda}\text{Y}$	22.0 ± 0.5
${}^{208}_{\Lambda}\text{Pb}$	26.5 ± 0.5

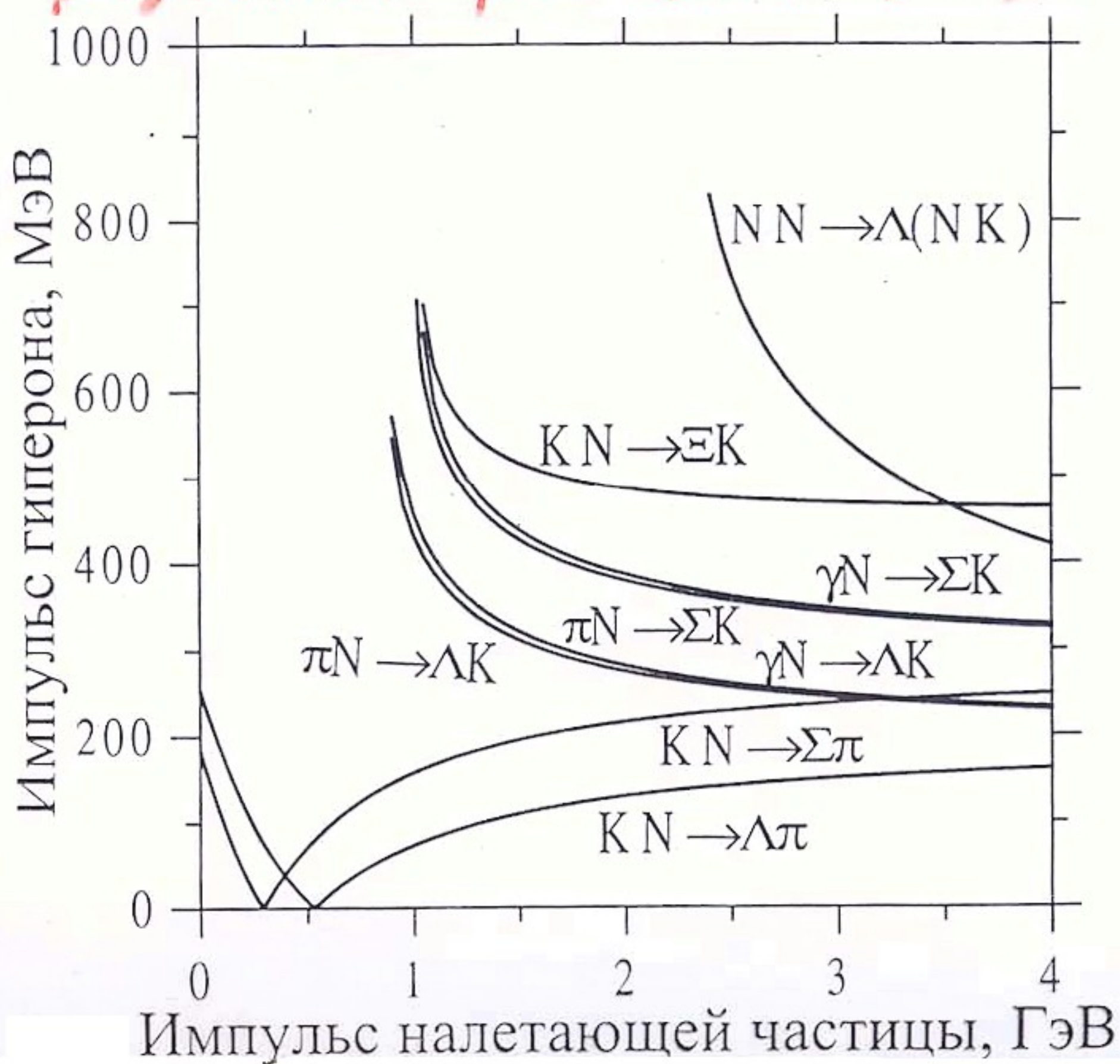
Время жизни Λ -гиперядер



Энергии связи одночастичных состояний Λ -гиперона

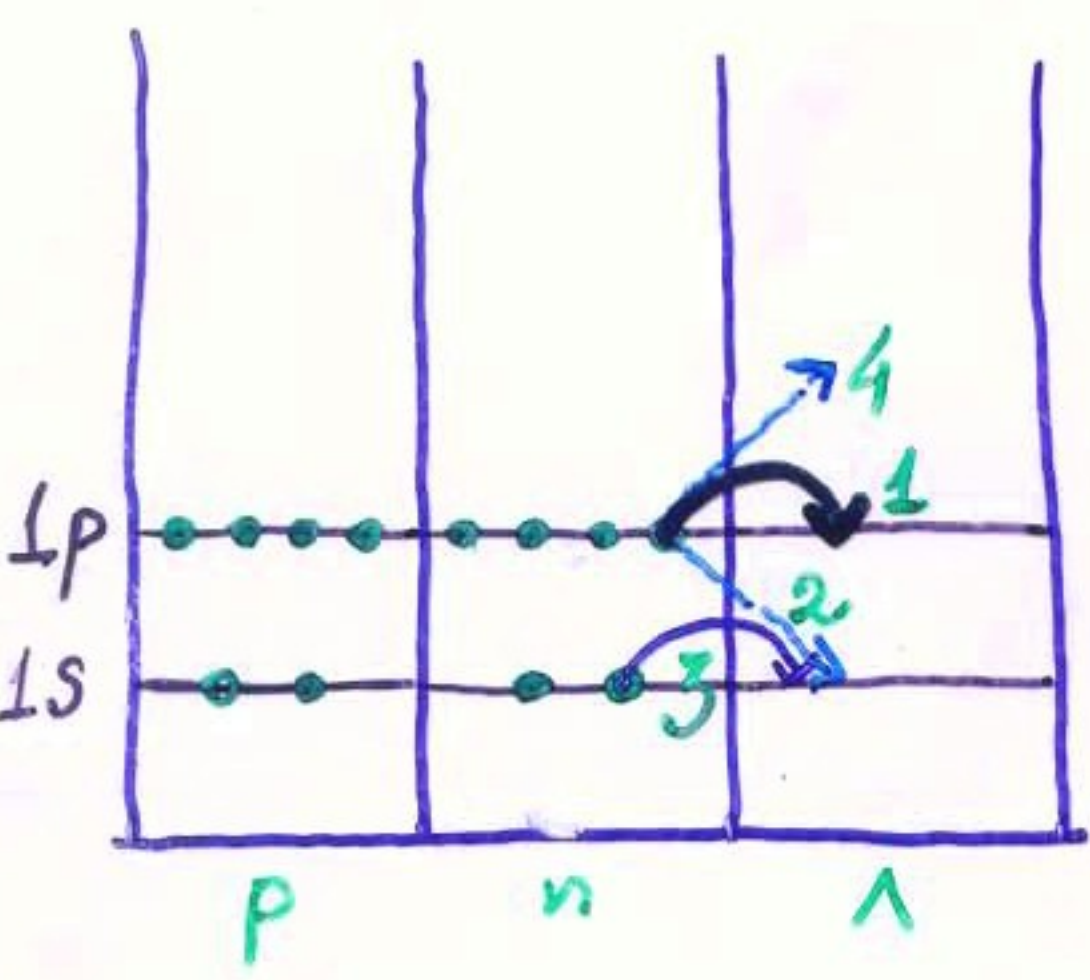


Импульс, передаваемый гиперону. В различных реакциях рождения

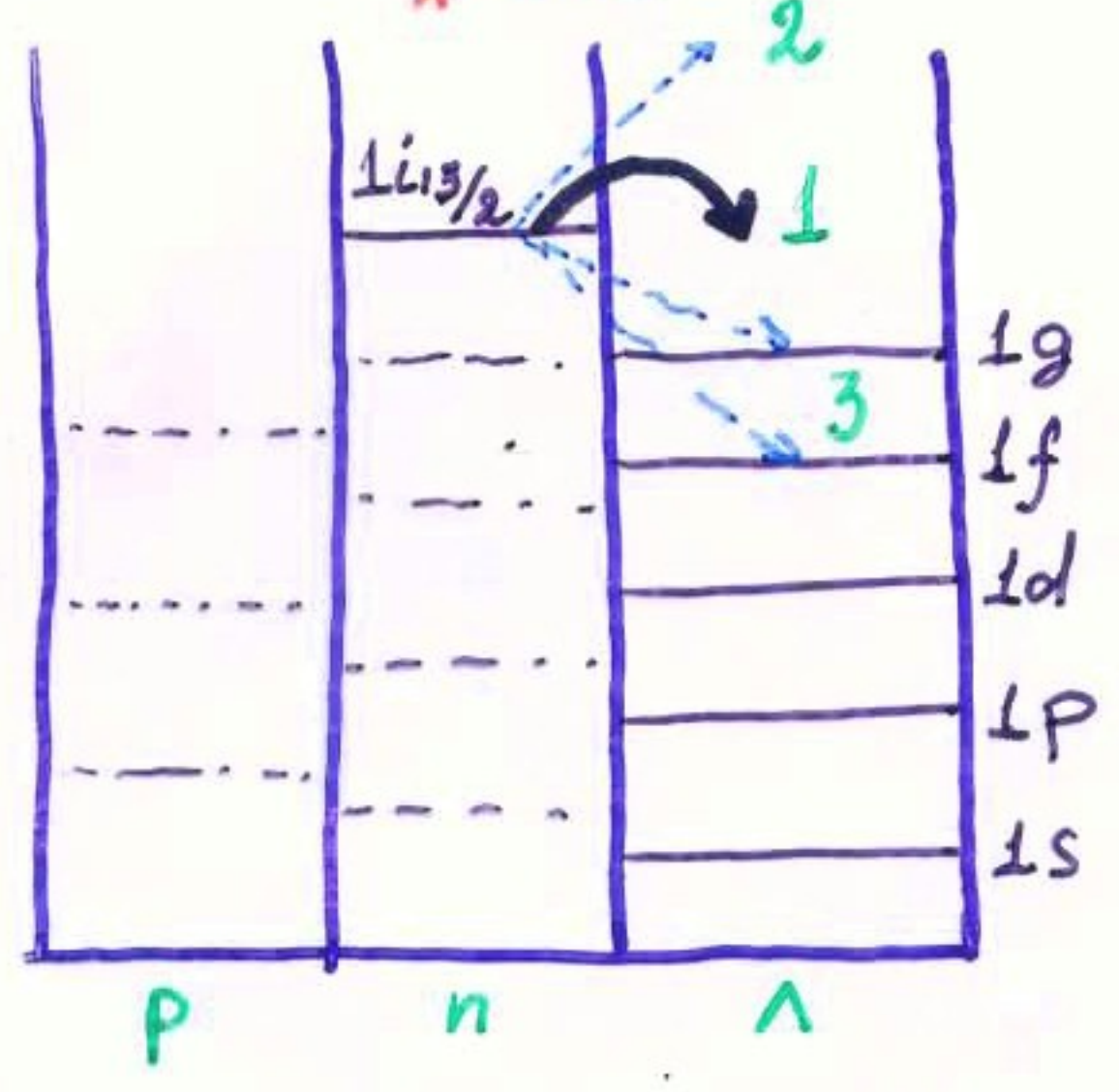


$$^A_Z(\kappa^-, \pi^-)^{\Lambda}_Z$$

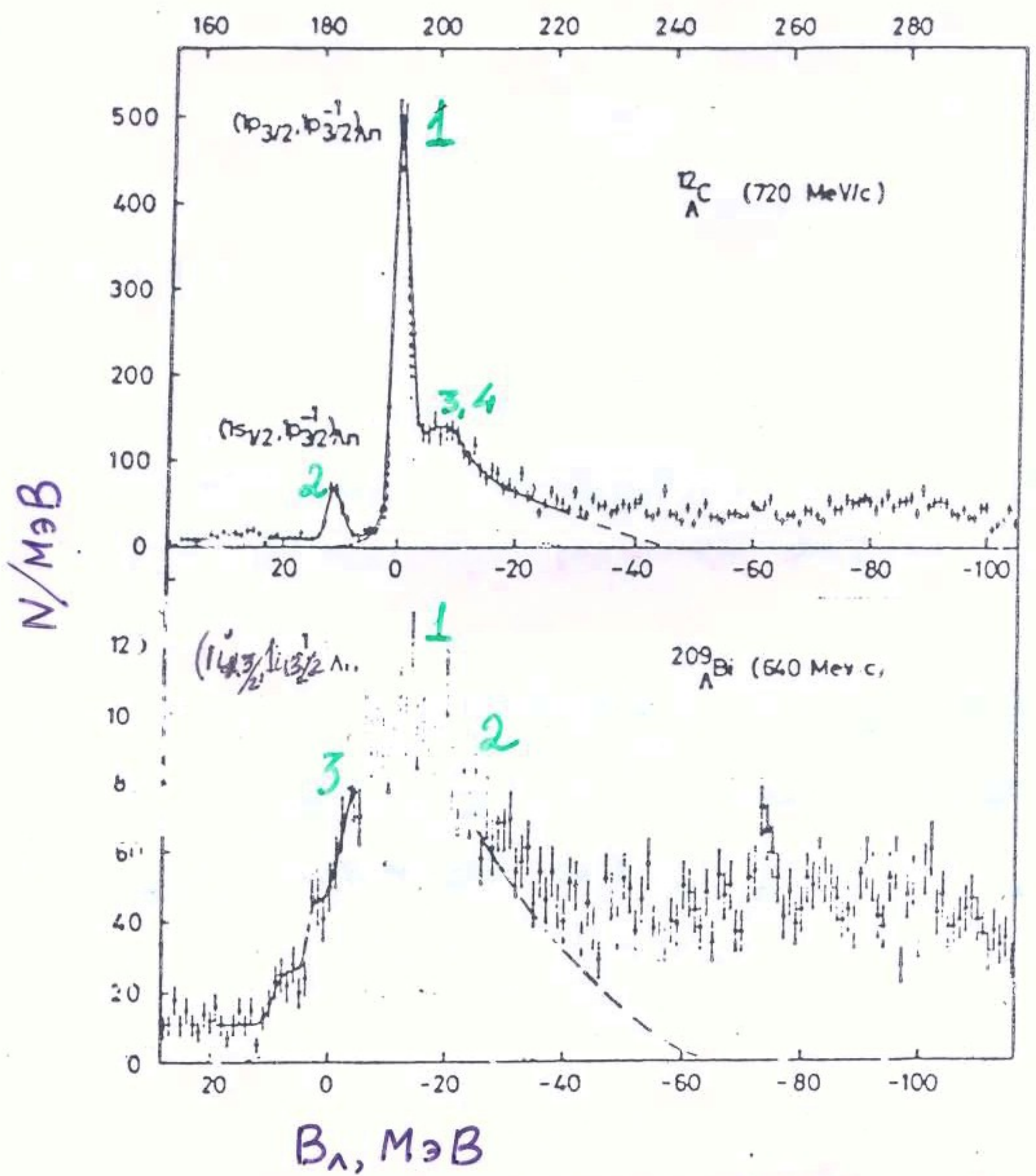
$^{12}_\Lambda C$



$^{208}_\Lambda Pb$

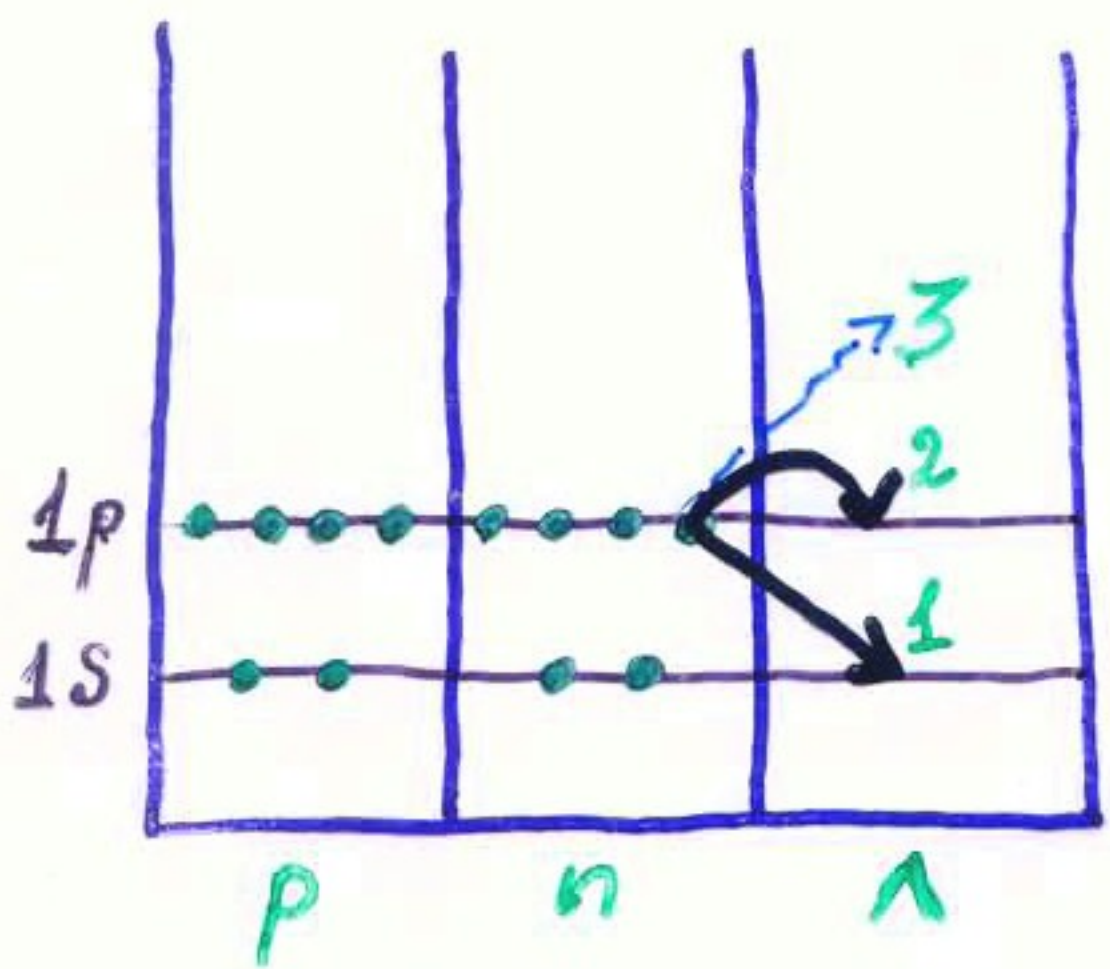


$M_{HY} - M_\Lambda$ (MeV)

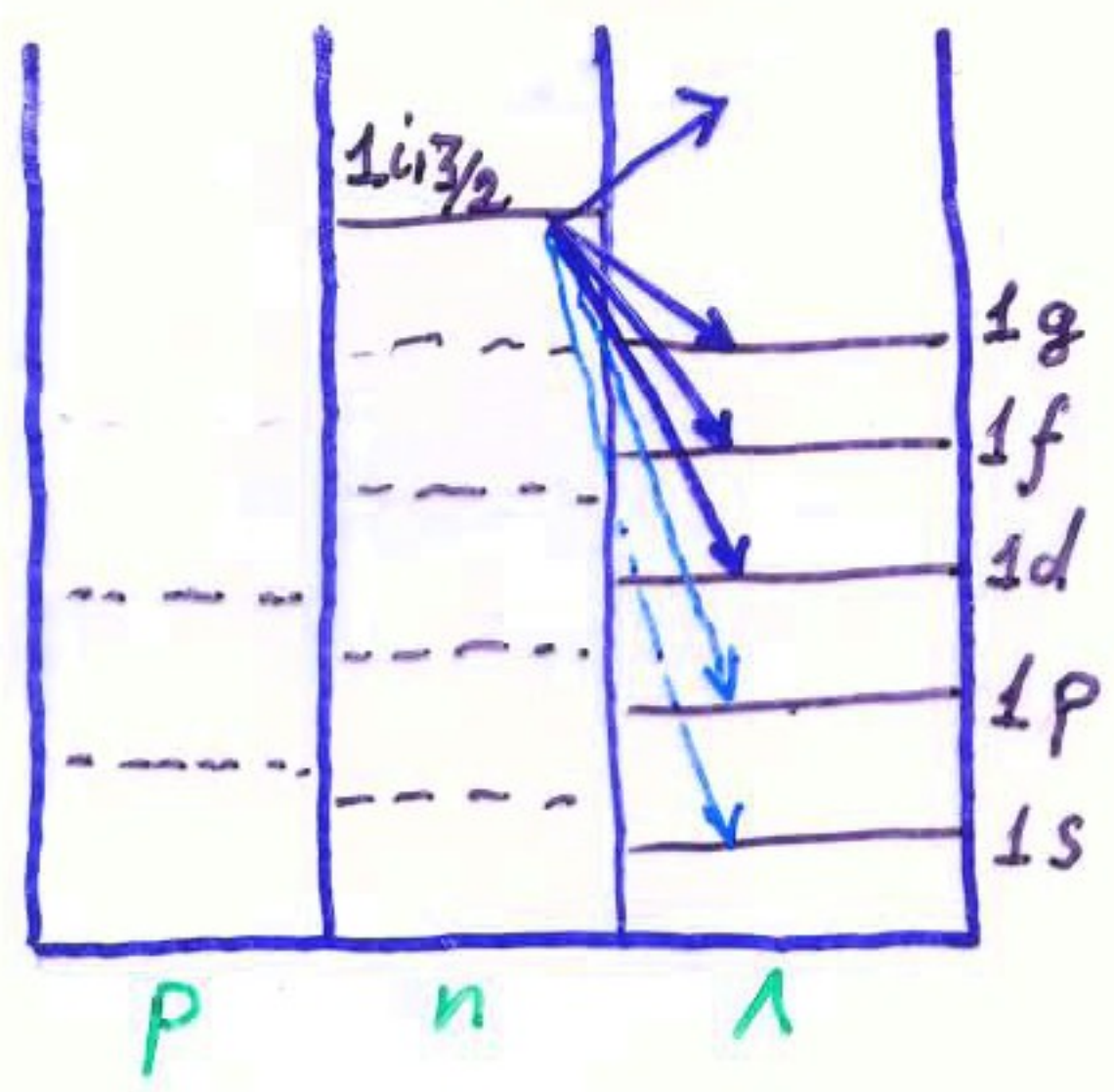


$A_Z(\pi^+, K^+) \Lambda_Z$

$^{12}_\Lambda C$



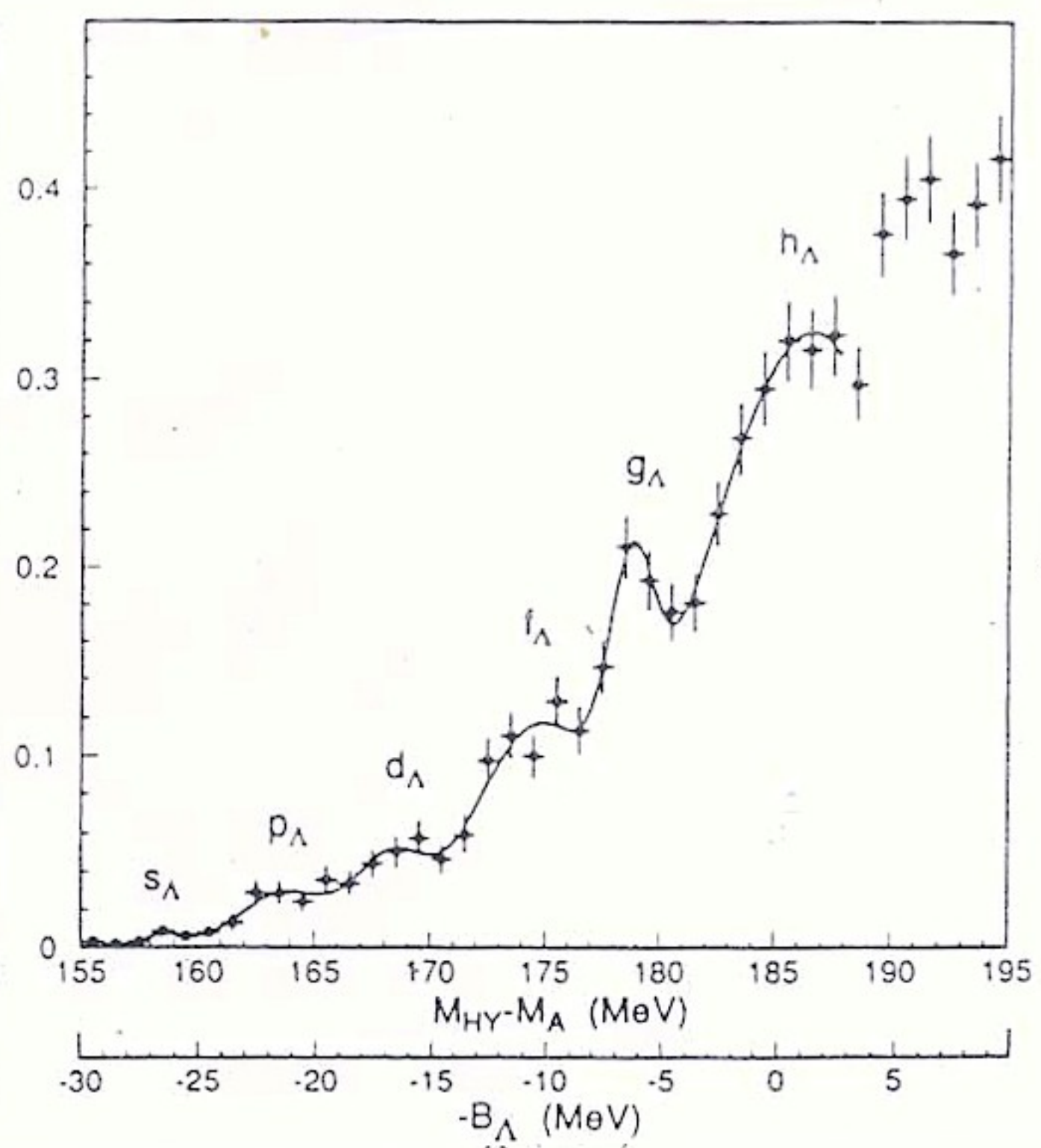
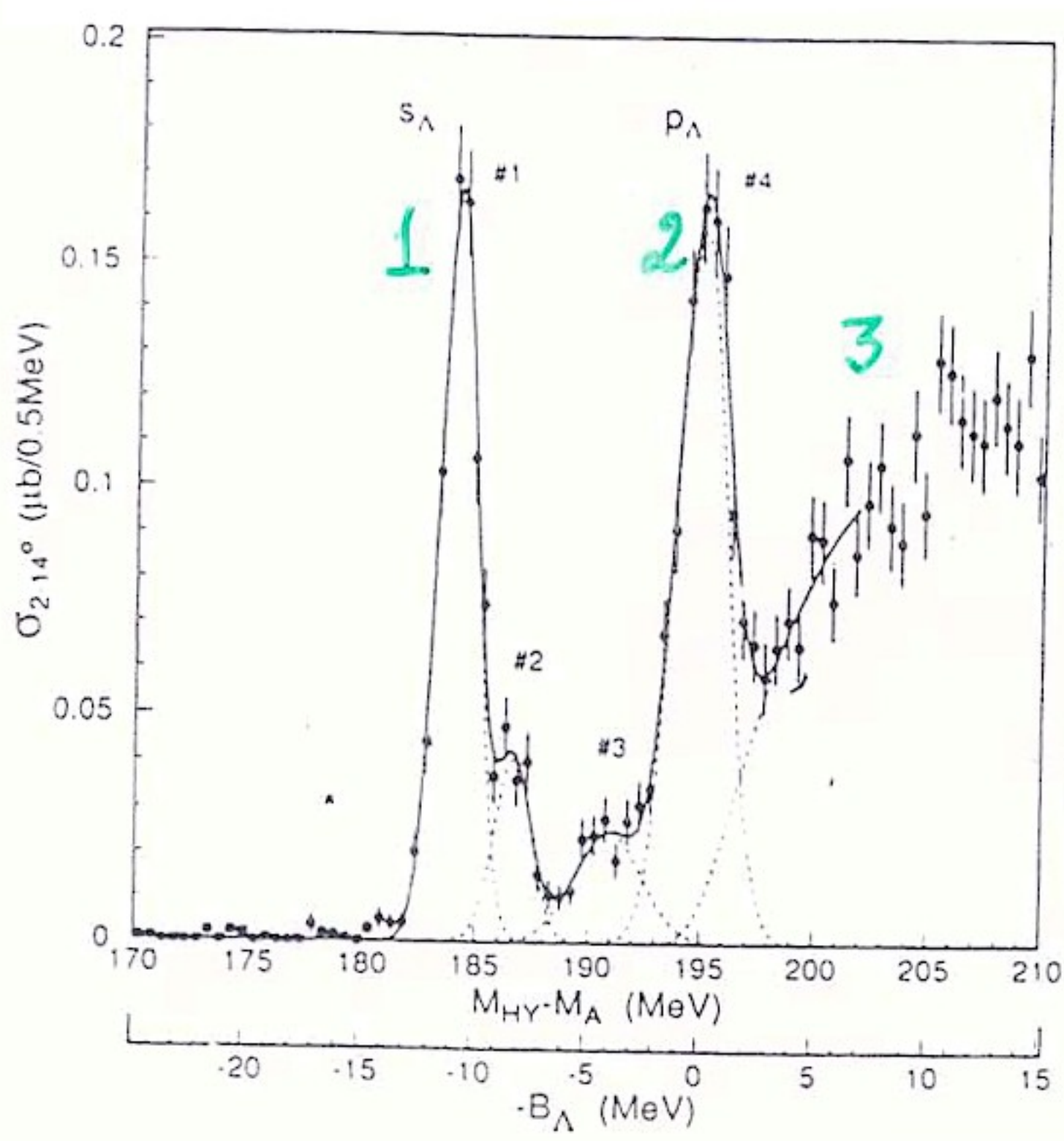
$^{208}_\Lambda Pb$



$^{12}C(\pi^+, K^+) \Lambda^{12}C$

$p_\pi = 1.05 \text{ GeV}/c$

$^{208}Pb(\pi^+, K^+) \Lambda^{208}Pb$



$$Z(a, b) \sim Z$$

$$F(q) \sim \langle f | \sum_{j=1}^N e^{i\vec{q} \cdot \vec{r}_j} U(j) | i \rangle$$

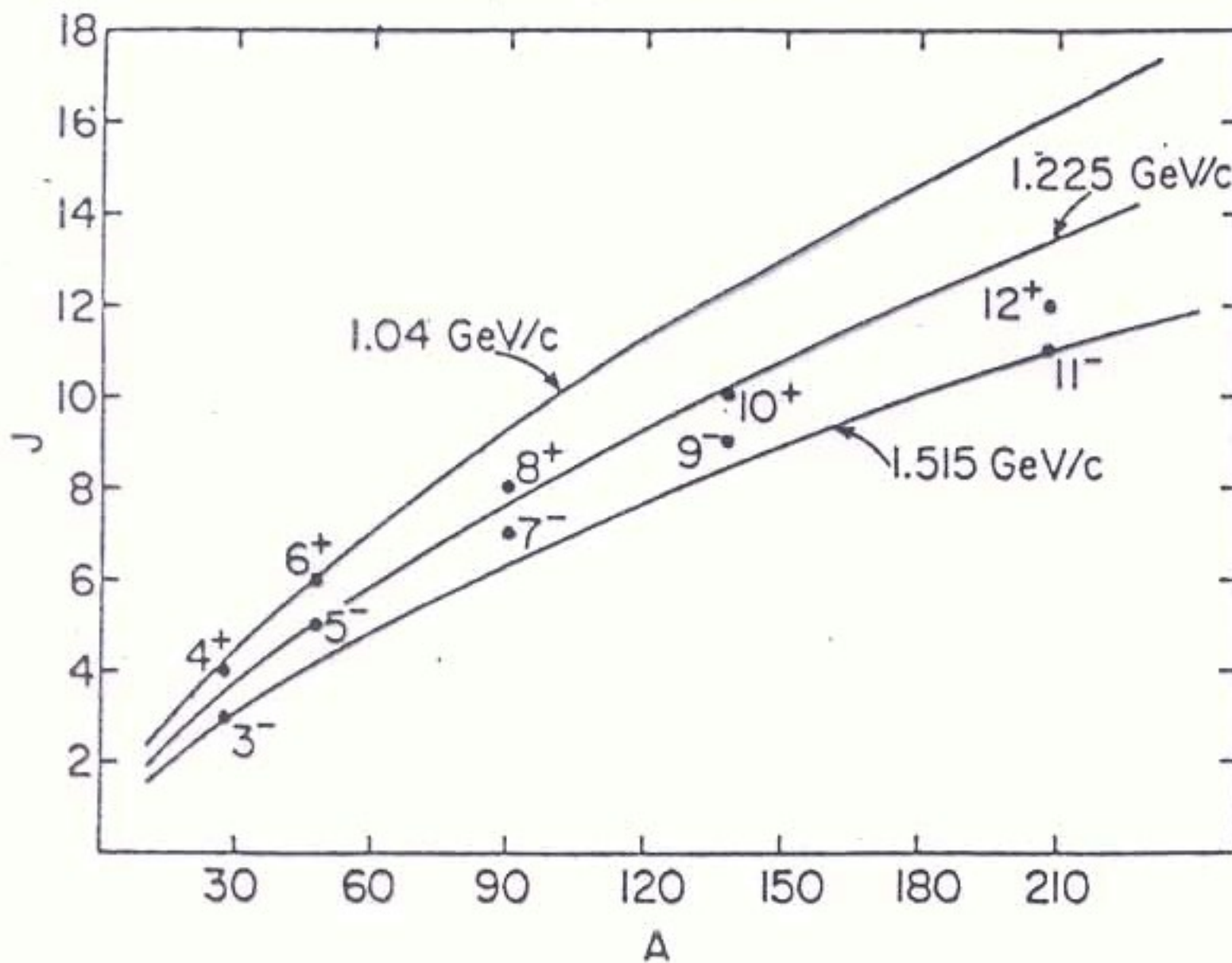
$$|i\rangle = |J=0\rangle$$

$$F(q) \sim \sum_{j=1}^N \langle JM | \sum_{em} j_e(qz) Y_{em}(\Omega) U(j) | 00 \rangle$$

$$\sim \sum_{j=1}^N \langle JM | j_j(qz) Y_{JM}(\Omega) U(j) | 00 \rangle$$

$$J \approx qR$$

(π^+, K^+)

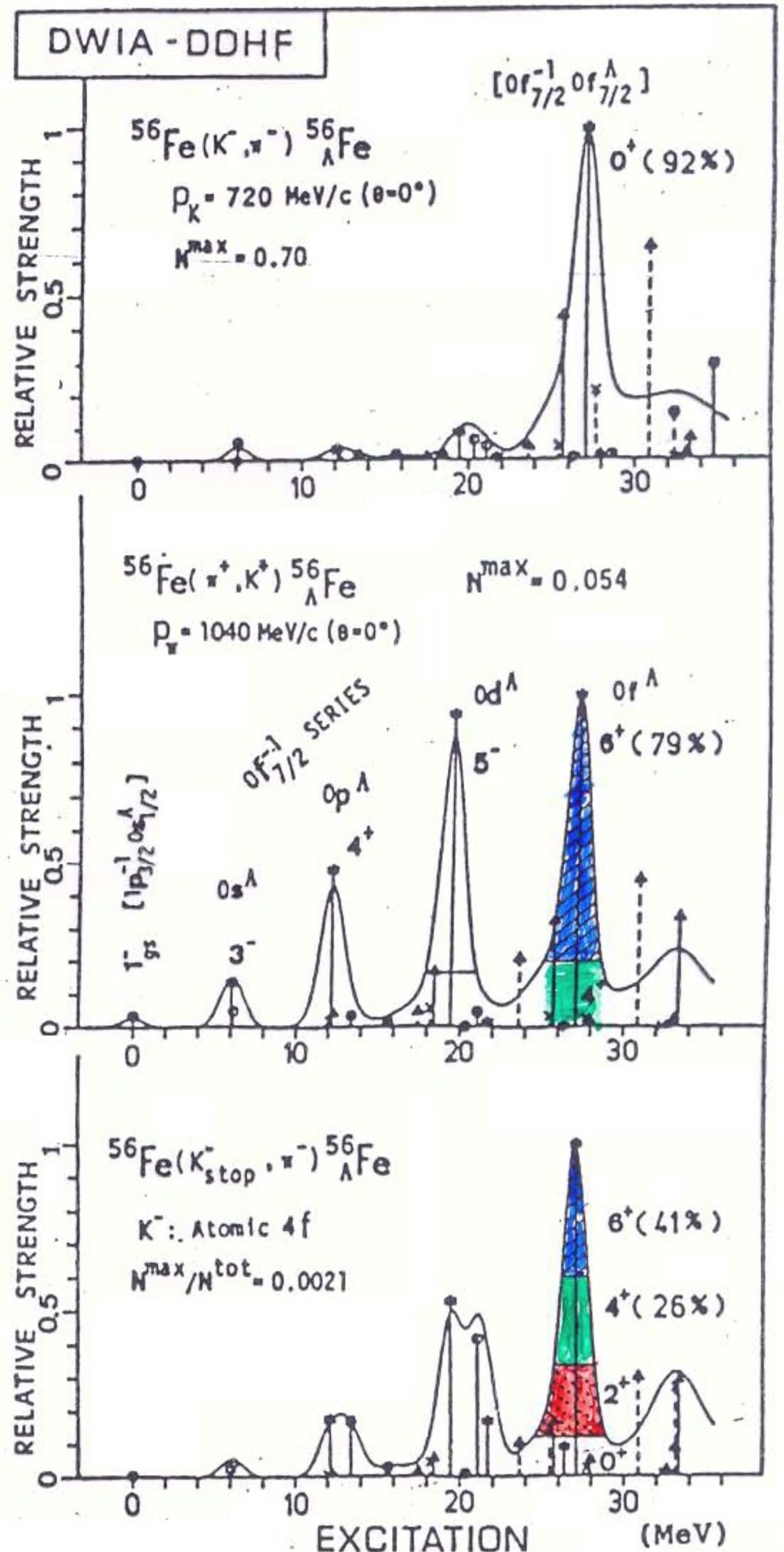


Ск.счета (2Я/2ас) Разреш. (МэВ) Фон

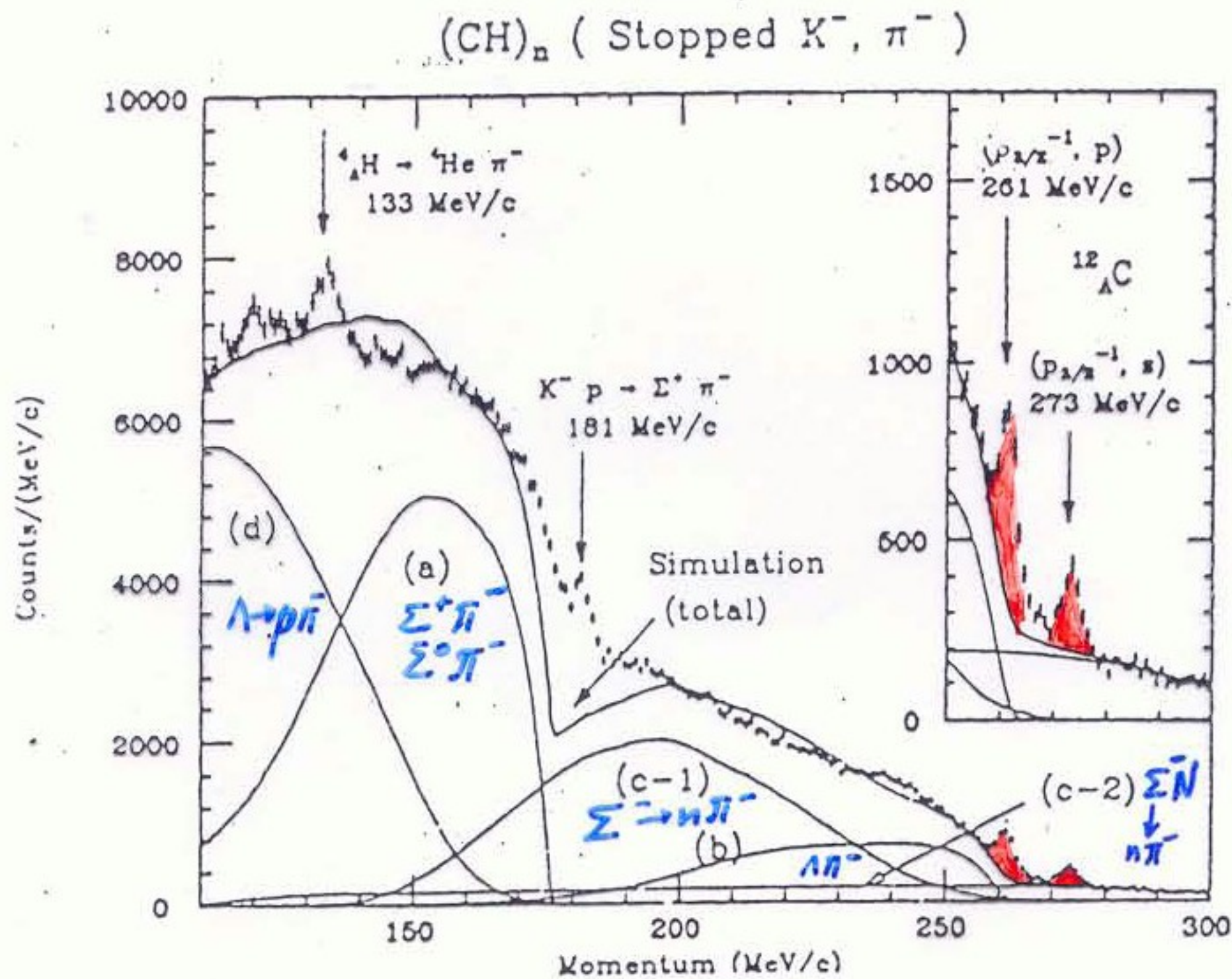
(K^-, π^-) <10 3 большой

(K_{stop}^-, π^-) 80 4 очень большой

(π^+, K^+) 10 1.5 малый



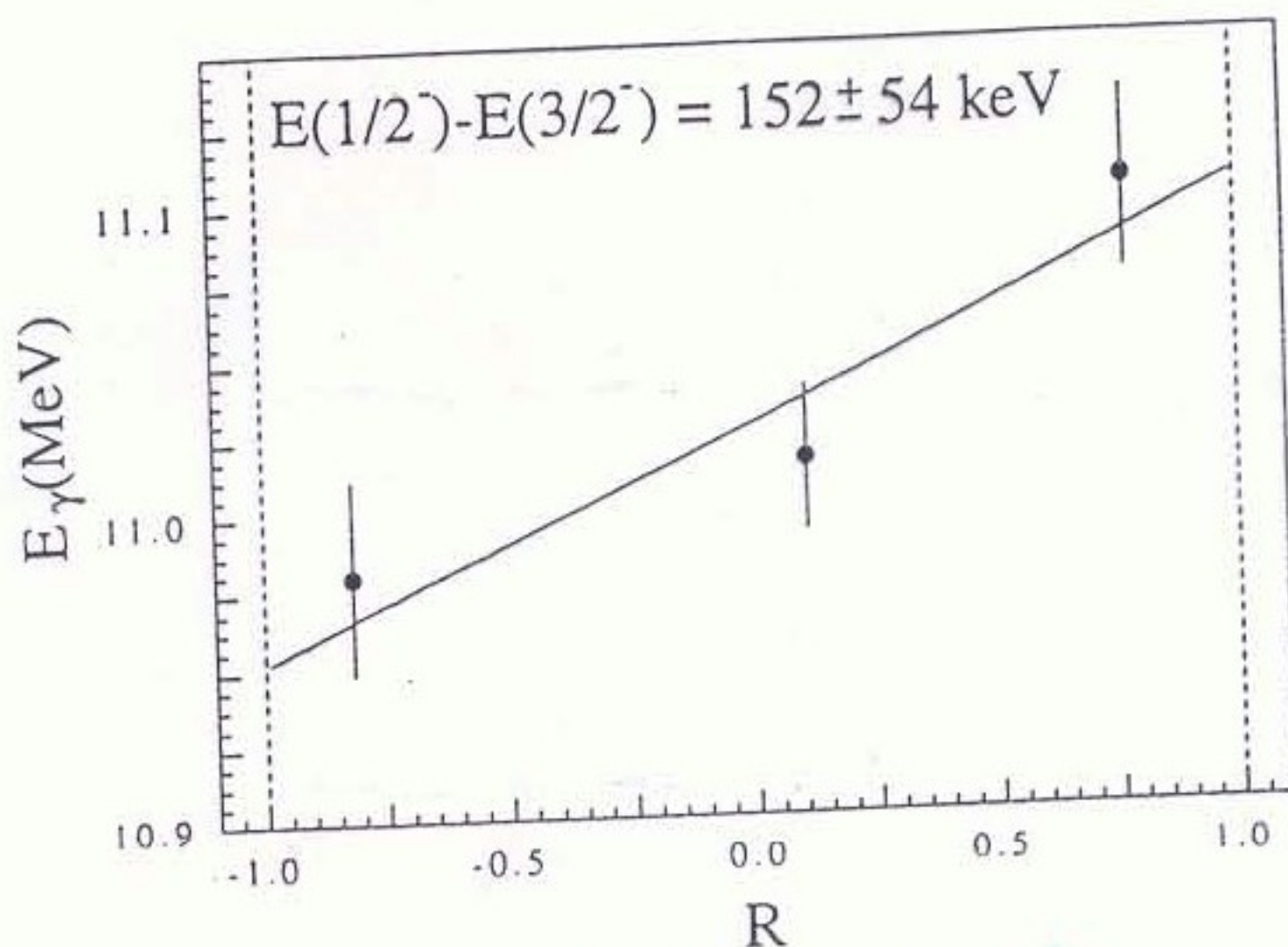
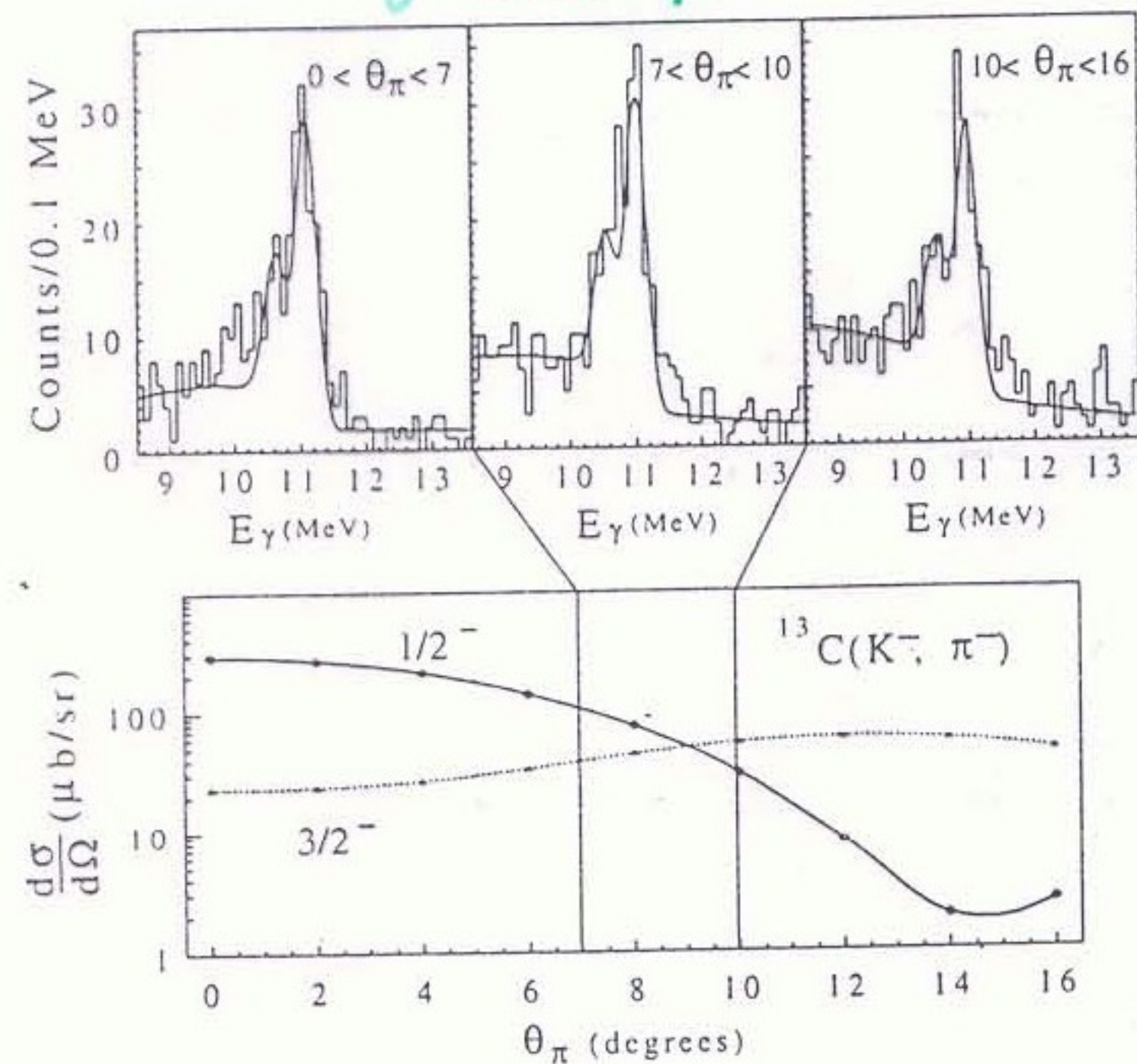
$^{12}\text{C}(\text{K}^-, \pi^-)$
в покое



$^{13}\text{C}(\text{K}^-, \pi^-)^{13}\text{C}^*$
 $\rightarrow ^{13}\text{C} + \gamma$

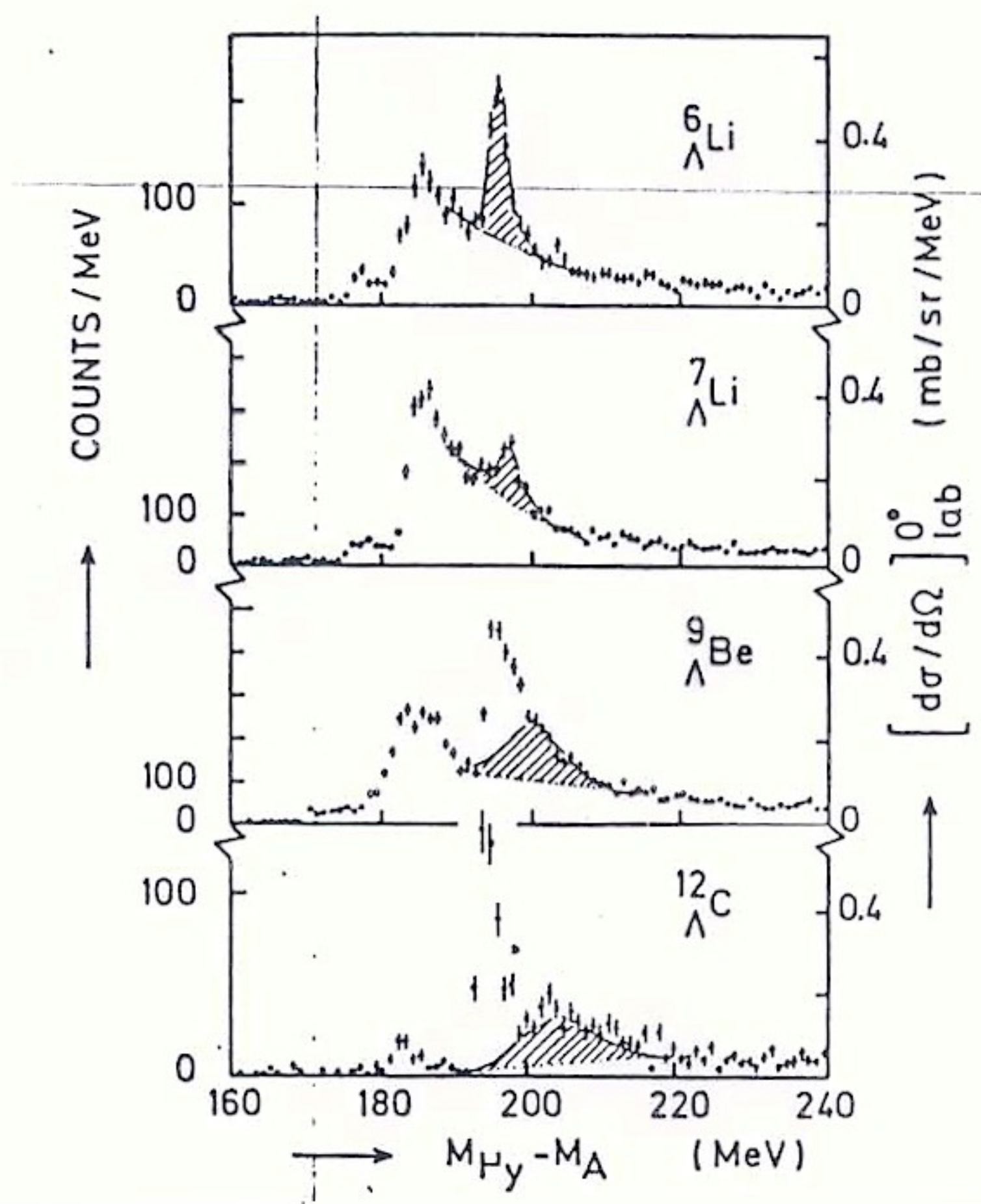
$^{13}\text{C}^* : ^{12}\text{C} \otimes \Lambda(4p)$

γ -спектр



$$\frac{N(1/2) - N(3/2)}{N(1/2) + N(3/2)}$$

Нейтронные Λ -состояния в ядрах



Энергии и ширины

(π^+, π^-)

(p, pn)

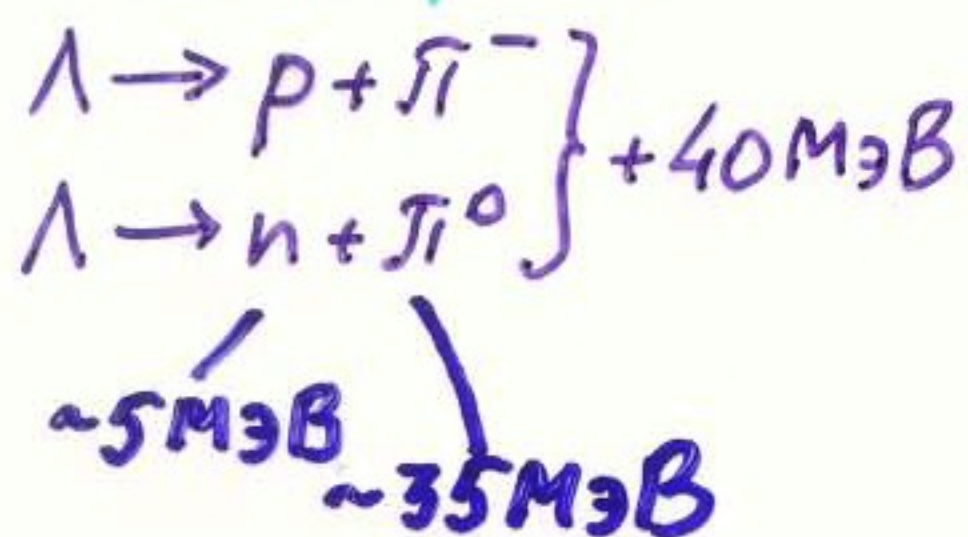
${}^6\text{Li}$	24.0 ± 0.5	0.7 ± 1.0	23.7 ± 0.4	5.1 ± 0.3
${}^7\text{Li}$	26.6 ± 0.5	1.6 ± 1.5	26.0 ± 0.6	7.1 ± 0.5
${}^9\text{Be}$	29.7 ± 1.0	5.0 ± 2.0	29.2 ± 0.8	7.5 ± 0.9
${}^{12}\text{C}$	39.3 ± 1.5	9.0 ± 2.0	36.3 ± 0.6	13.4 ± 0.8
${}^{16}\text{O}$			42.2 ± 1.0	18.1 ± 1.1

S_n $M_{\Lambda} B$ Γ

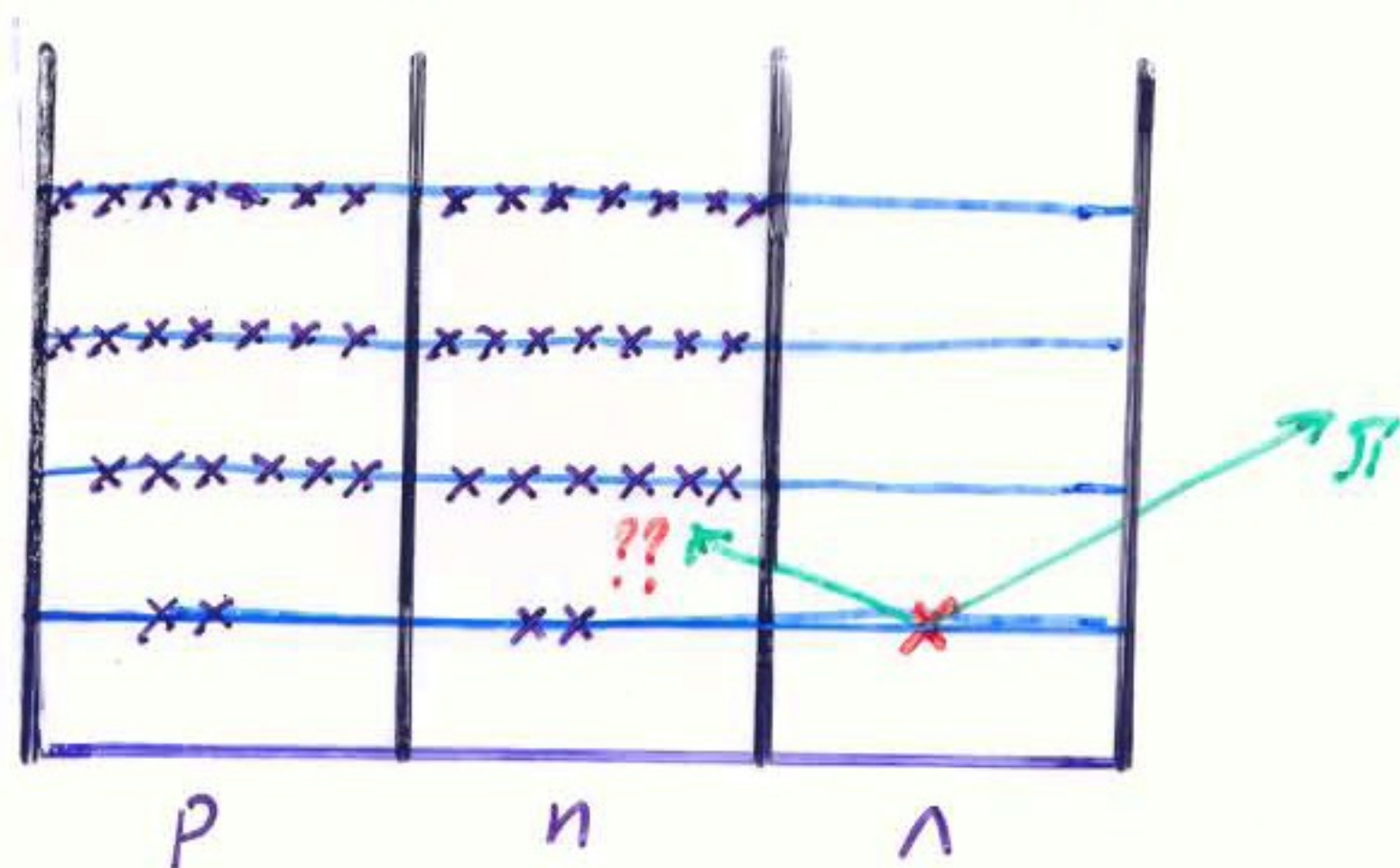
S_n $M_{\Lambda} B$ Γ

Распады

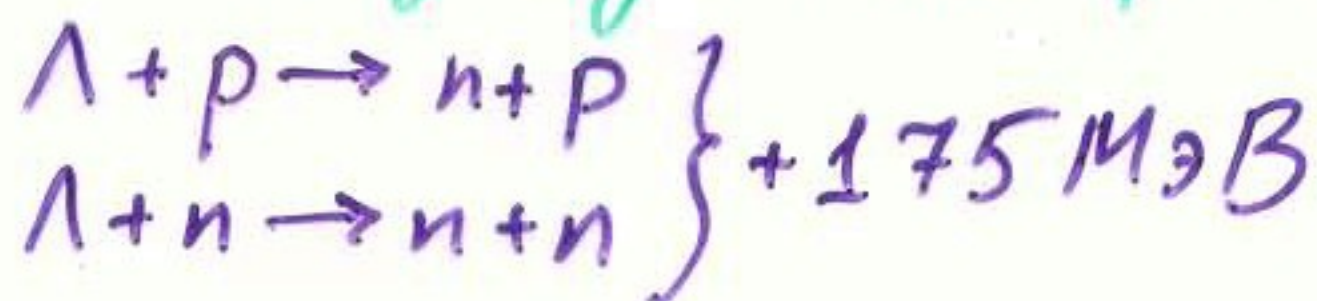
Распад
свободного
 Λ -гиперона



Распад Λ -гиперядра



Пионный распад подавлен принципом Паули
Безмезонный распад



Σ , Ξ и Ω -гипероны в ядрах

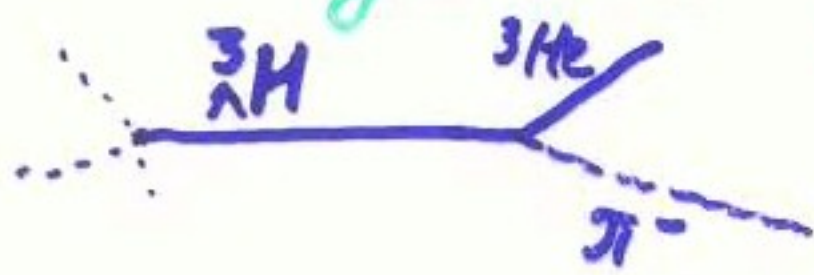
Конверсия - сильный процесс с сохранением странности



Времена жизни $\sim 10^{-23} \text{ с}$

Измерение Времени жизни Λ -гиперонов

1) Наблюдение распадов на лету в фотозмусцах



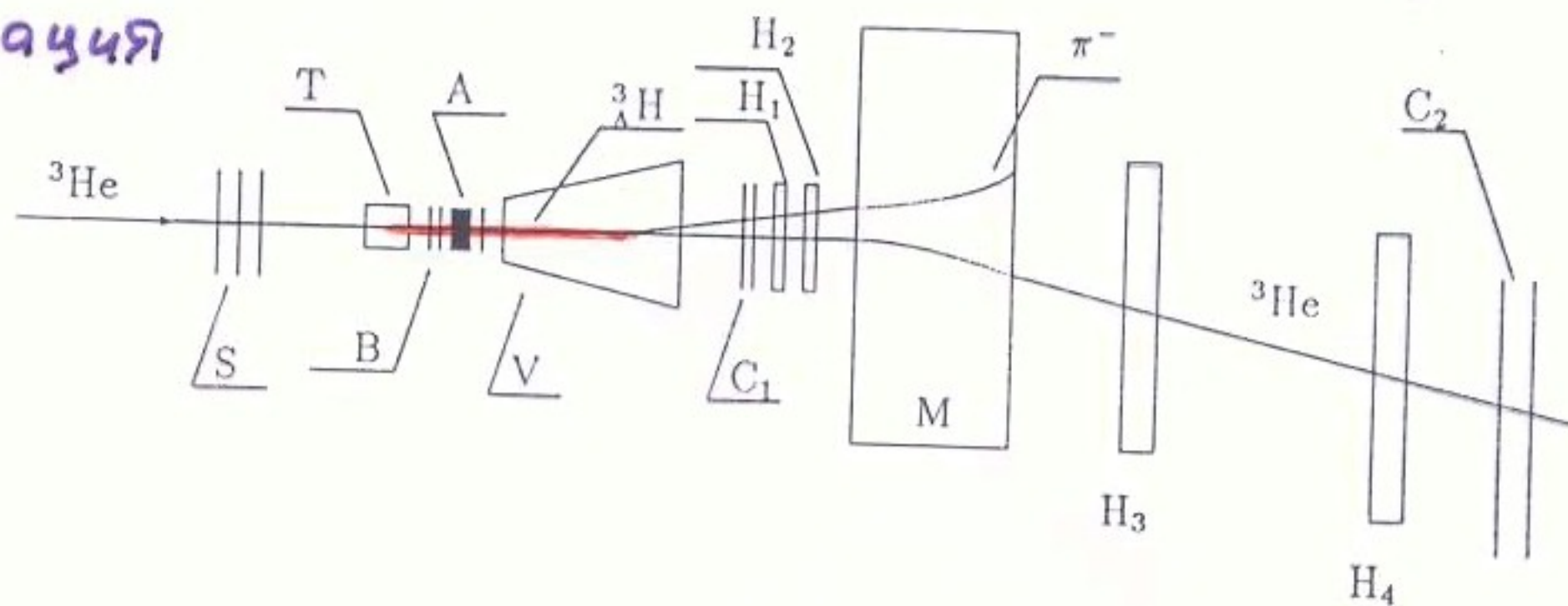
Только ${}^1\text{H}$, ${}^4\text{He}$

2) Измерение времени задержки в экспериментах на совпадение



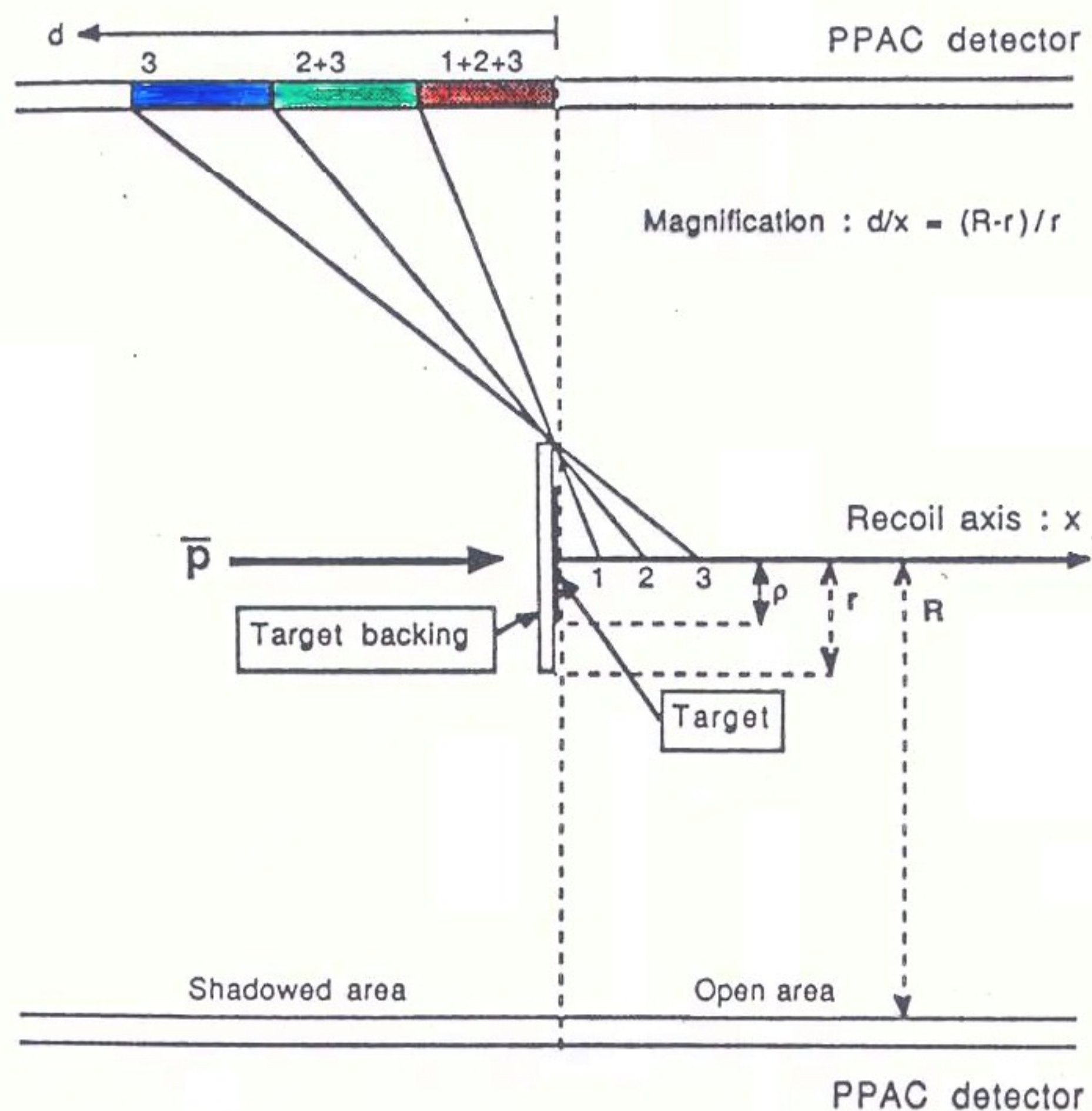
Статистика

3) Реакции на тяжелых ионах - время пролета

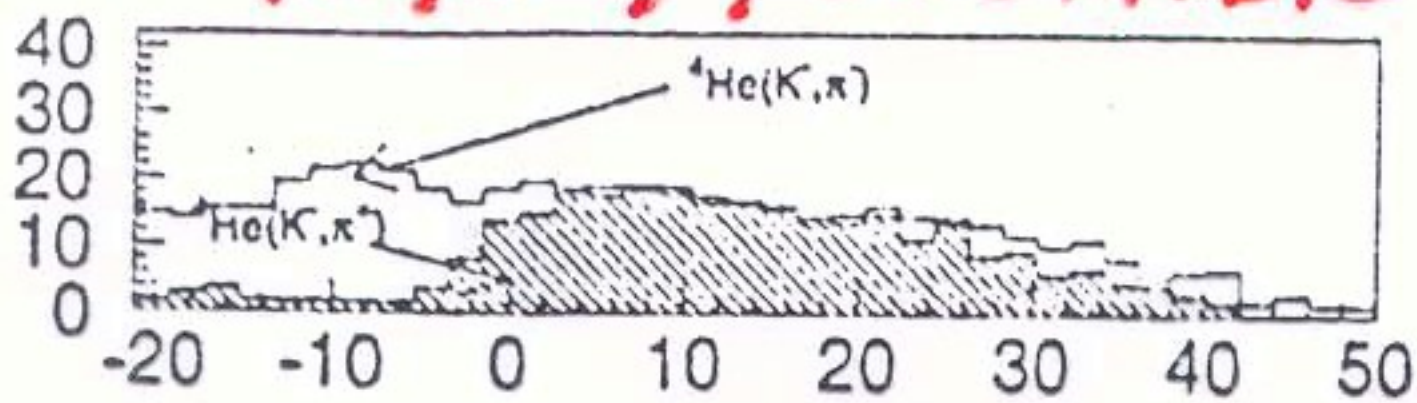


4) Задержанное деление
Только тяжёлые гипергидры

Только Тяжелые задержки

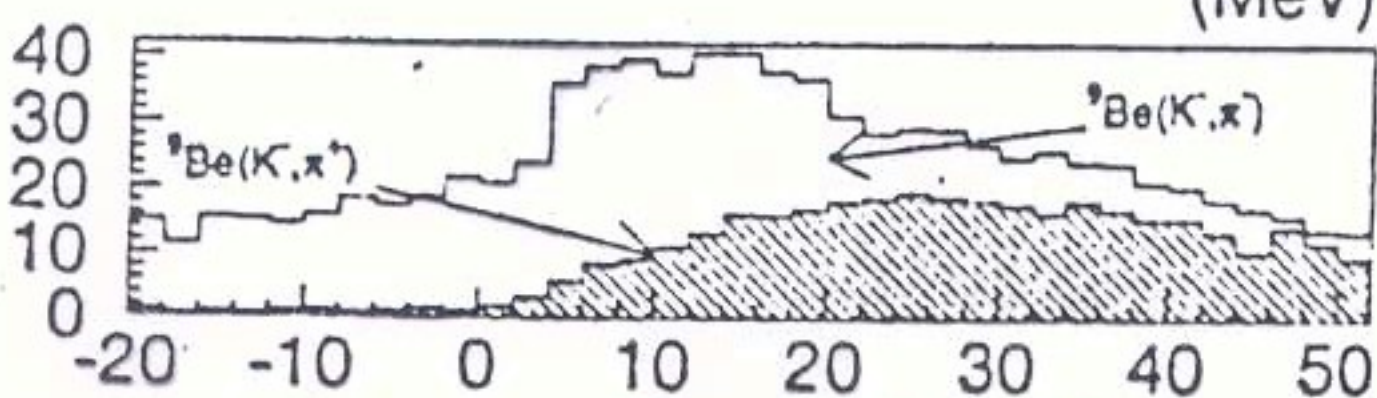
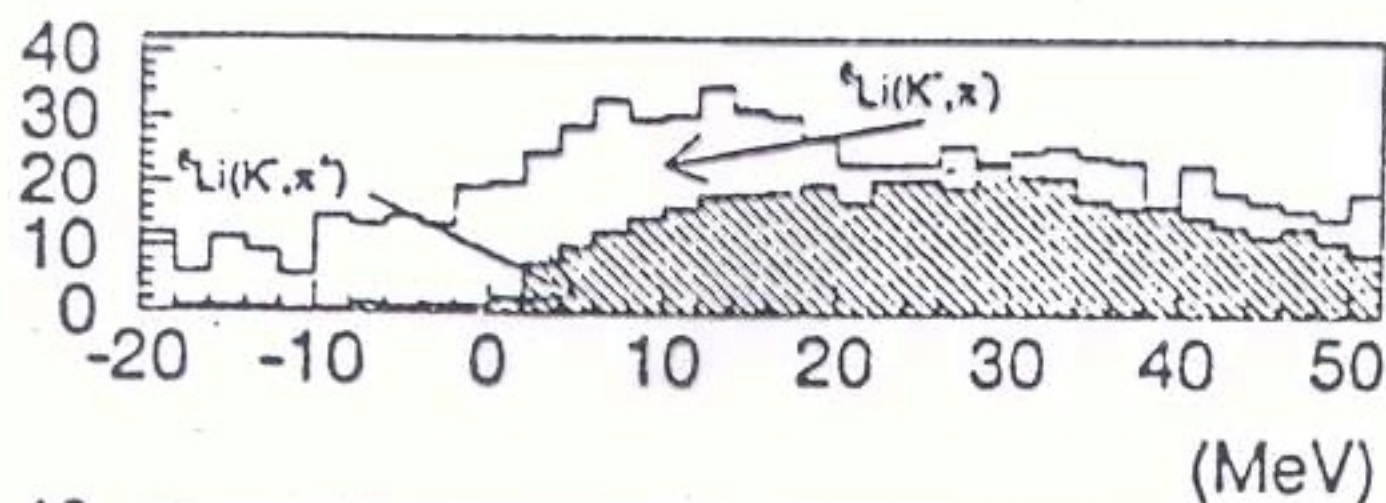


$(K^-, \pi^-), 600 \text{ MeV/c}$

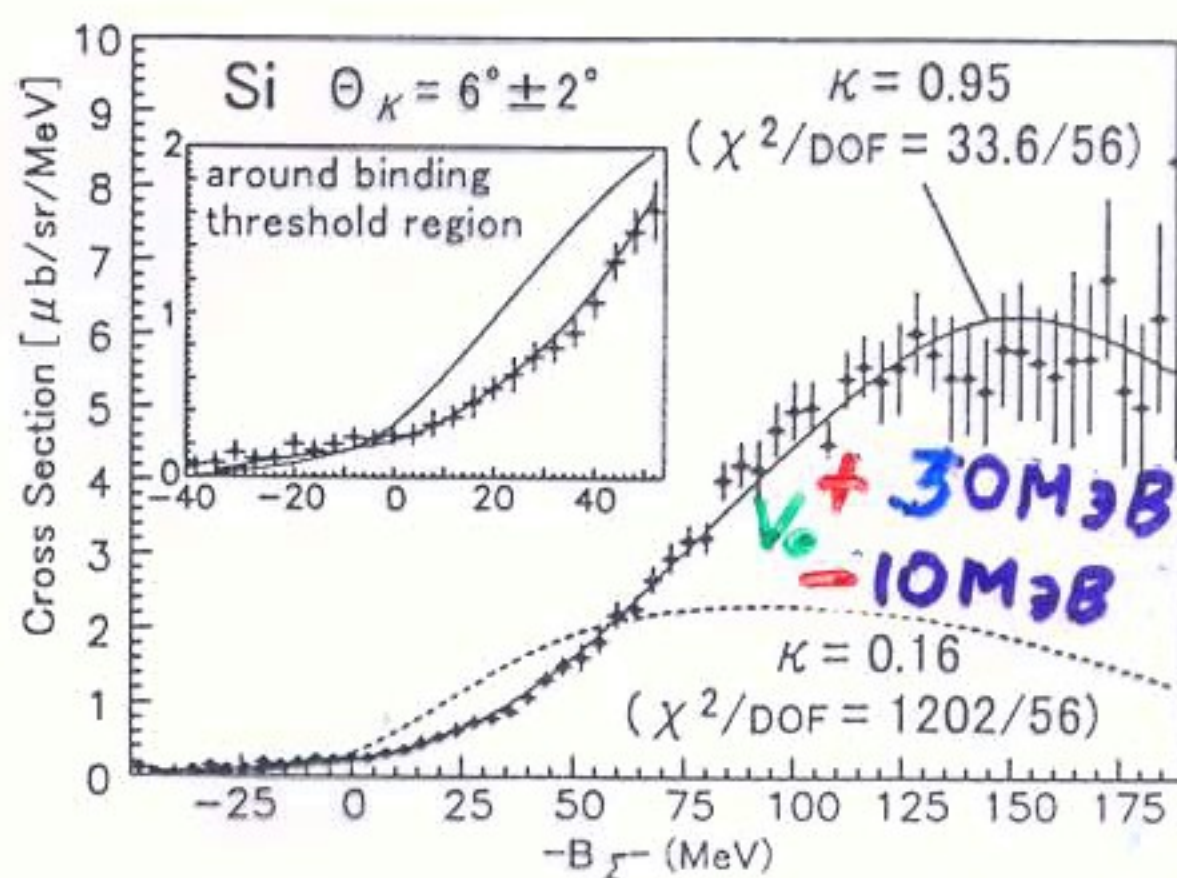


$(\pi^-, K^+), 1.2 \text{ GeV/c}$

$d^2\sigma/d\Omega dE$ ($\mu\text{b/sr/MeV}$)

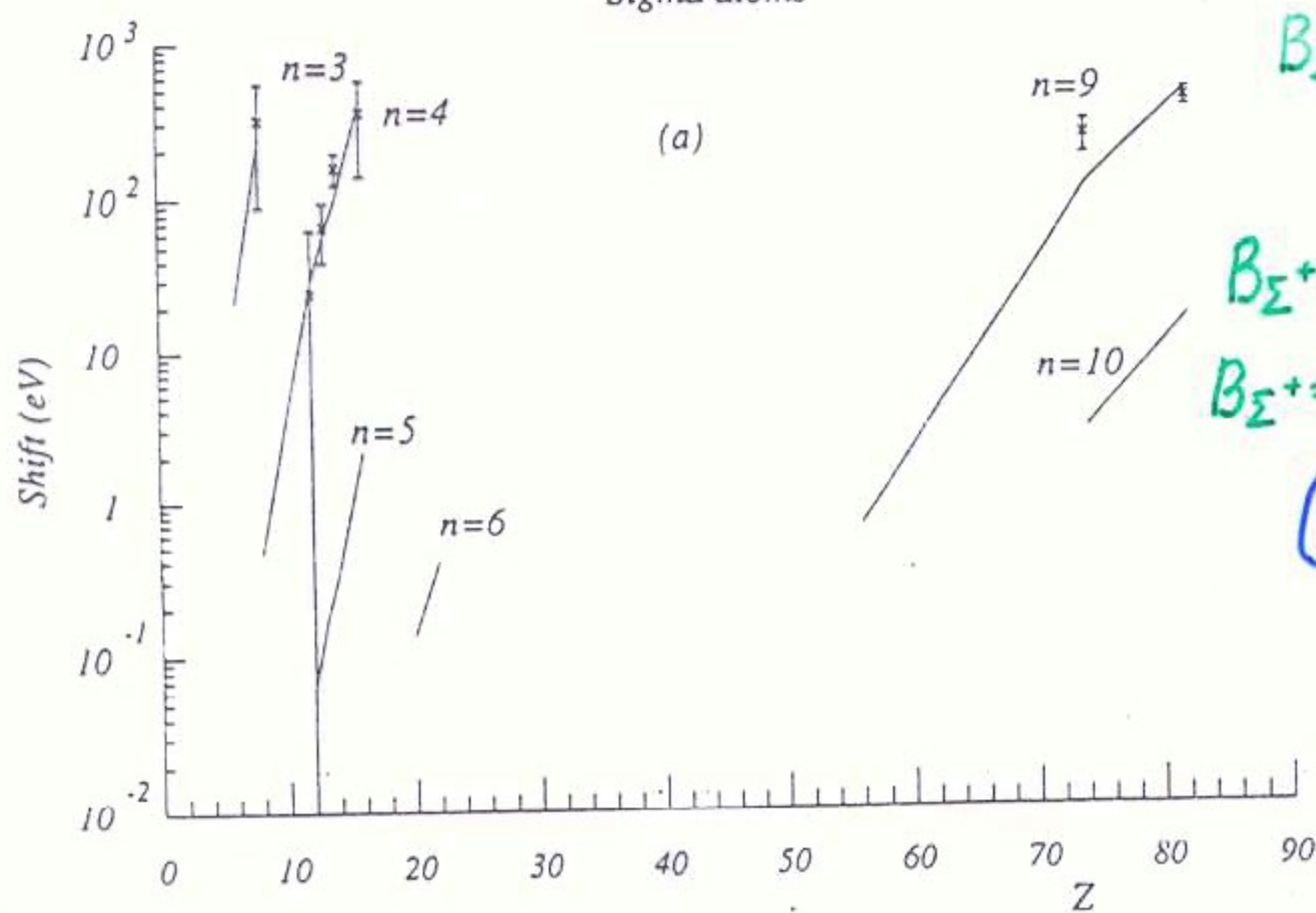


$-B_\Sigma, \text{MeV}$



$^4_\Sigma \text{He}$

Sigma atoms



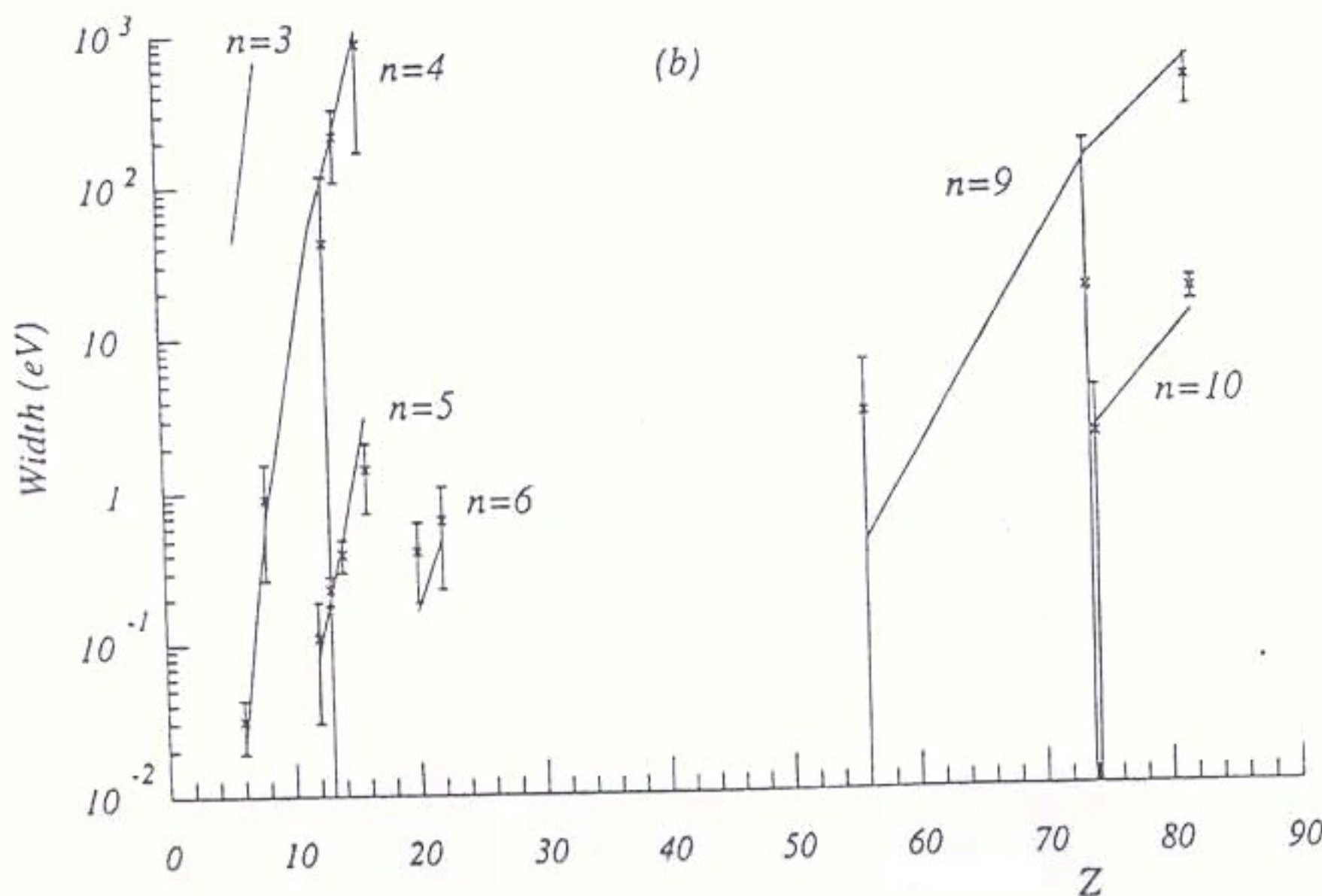
$B_\Sigma^+ = 2.8 \pm 0.7 \text{ MeV}; \Gamma = 12.1 \pm 1.2 \text{ MeV}$

(K_{st}^-, π^-)

$B_\Sigma^+ = 4 \pm 1 \text{ MeV}; \Gamma = 10 \pm 2 \text{ MeV}$

$B_\Sigma^+ = 4.4 \pm 0.3 \pm 1 \text{ MeV}; \Gamma = 7 \pm 0.7 \pm 1.2 \pm 0.6 \text{ MeV}$

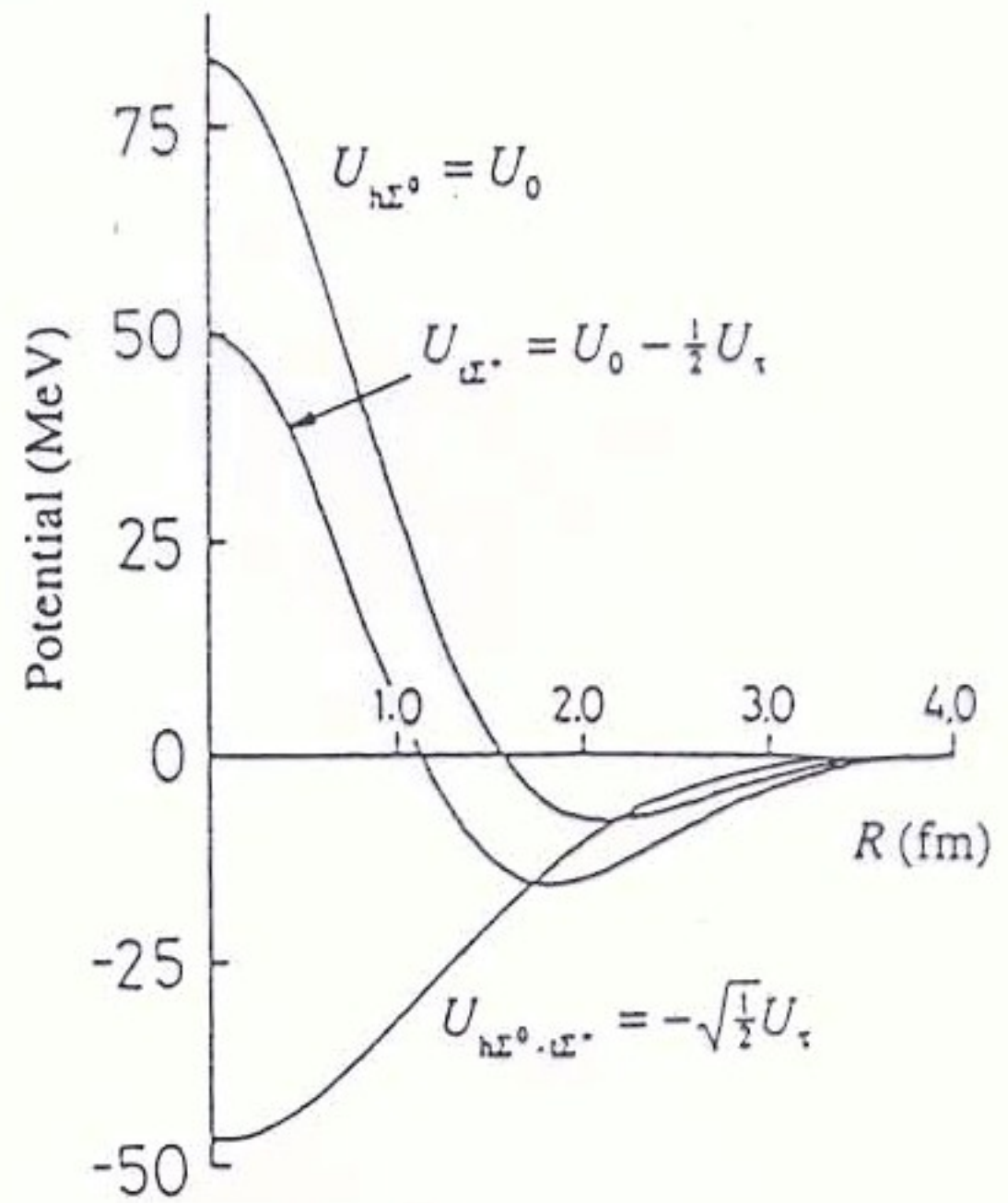
$(K^-, \pi^-), 600 \text{ MeV/c}$



Σ-ядерный потенциал

$$V = U_0 + U_\tau (T_A \cdot t_\Sigma)$$

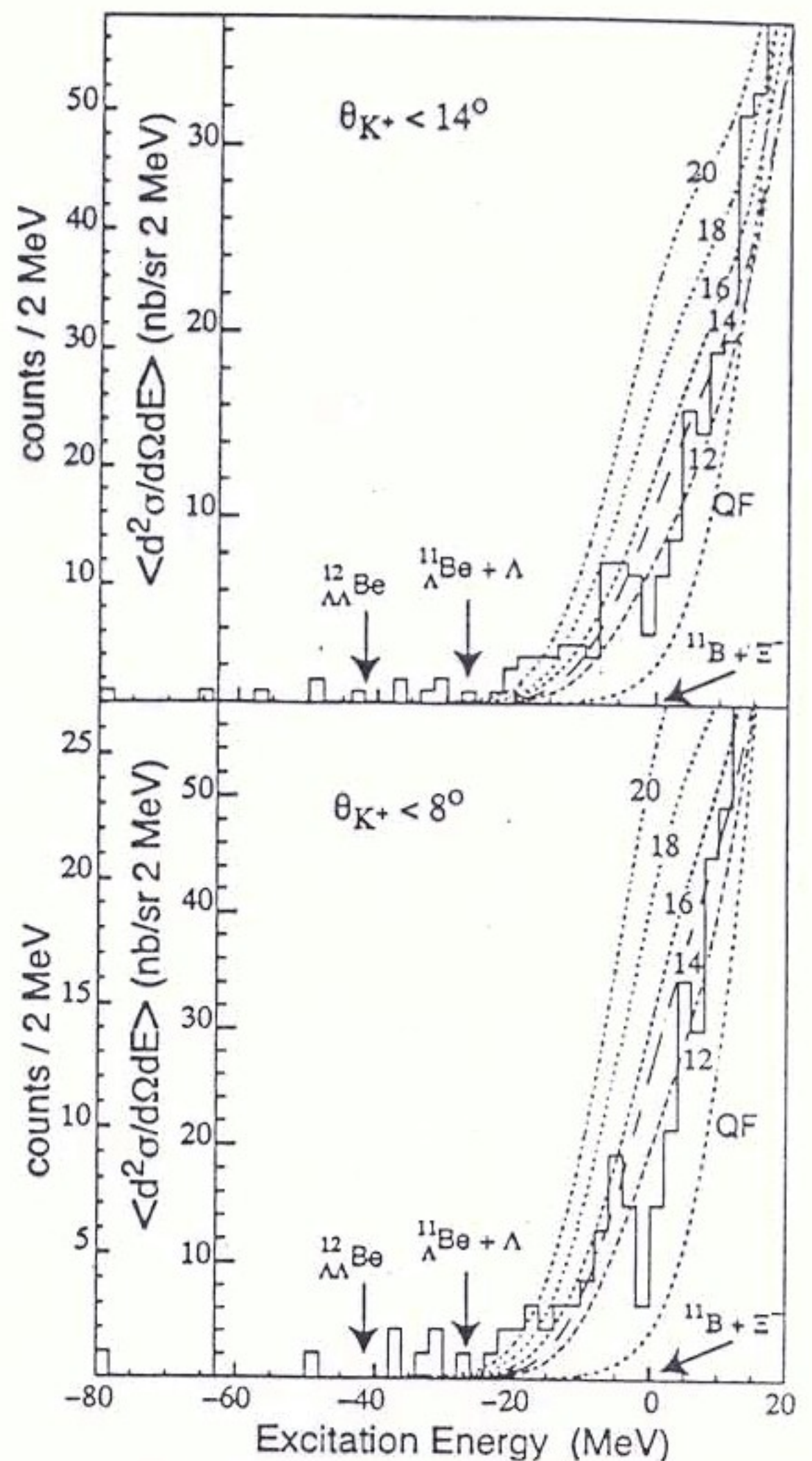
$$U_\tau > 0$$



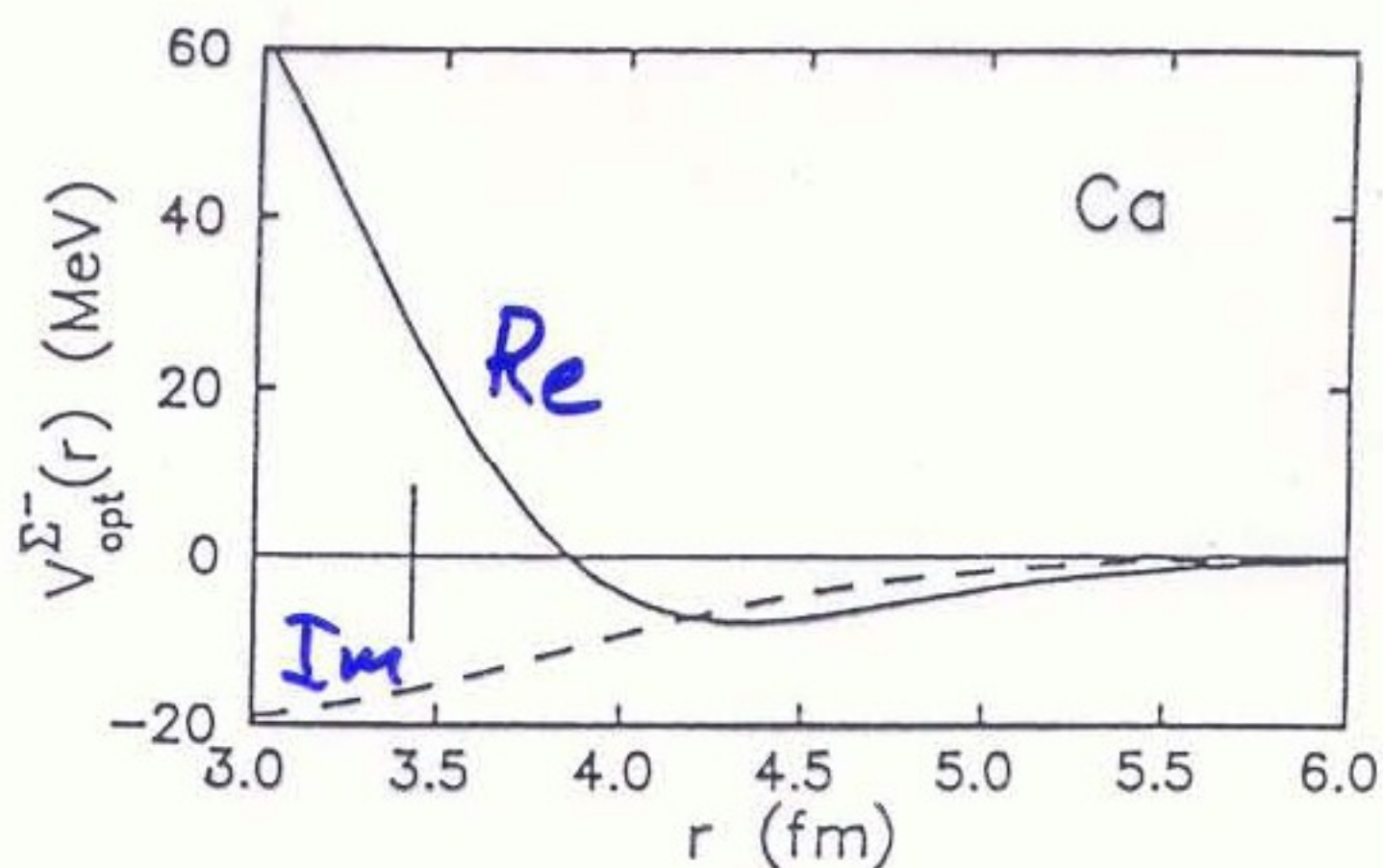
Гиперядра с $S=-2$

$$^{12}\text{C}(\text{K}^-, \text{K}^+)$$

$$1.8 \text{ ГэВ/с}$$



Σ^- - ядерный потенциал



Ξ -гиперядра

Глубина потенциальной ямы

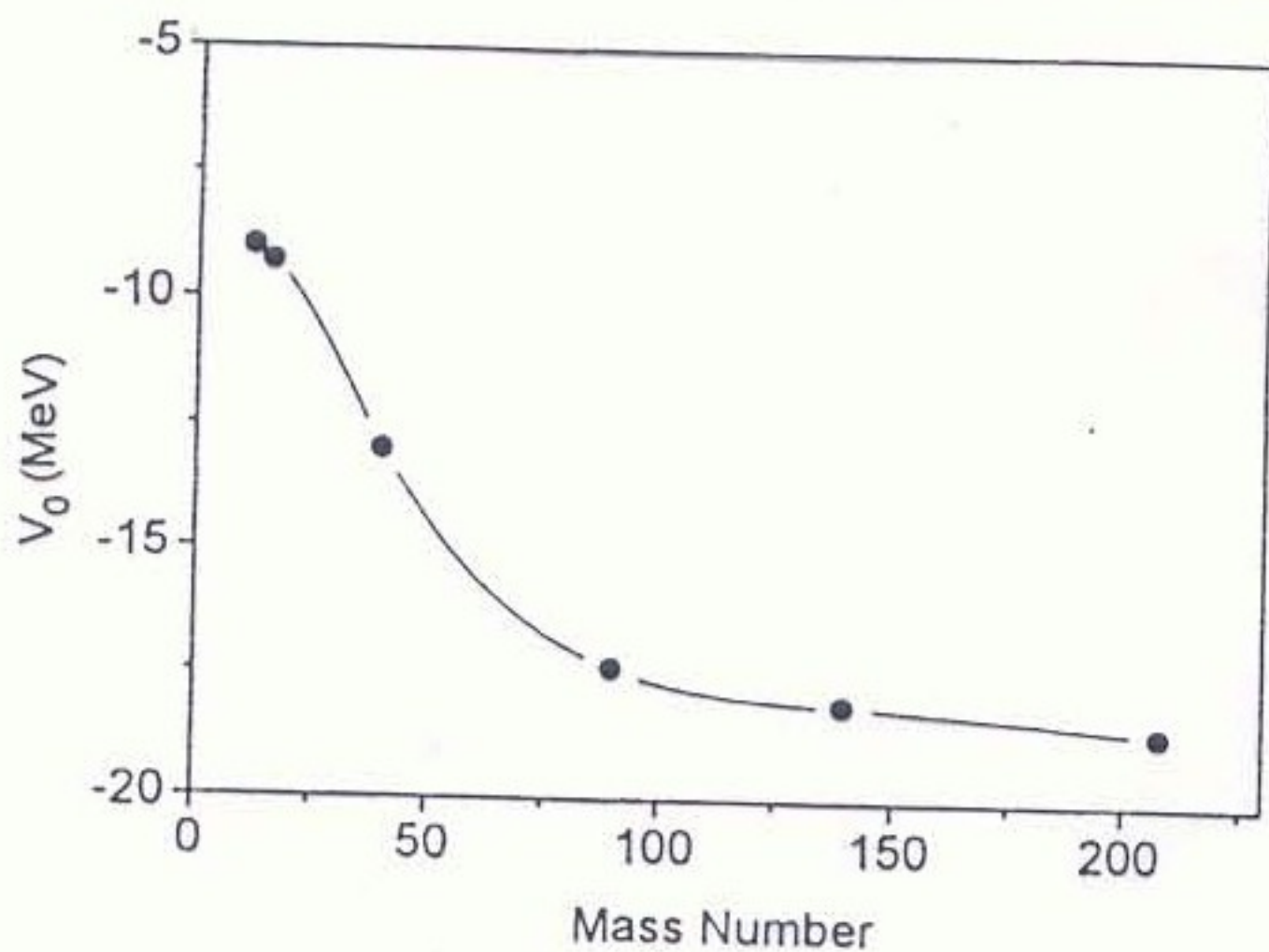
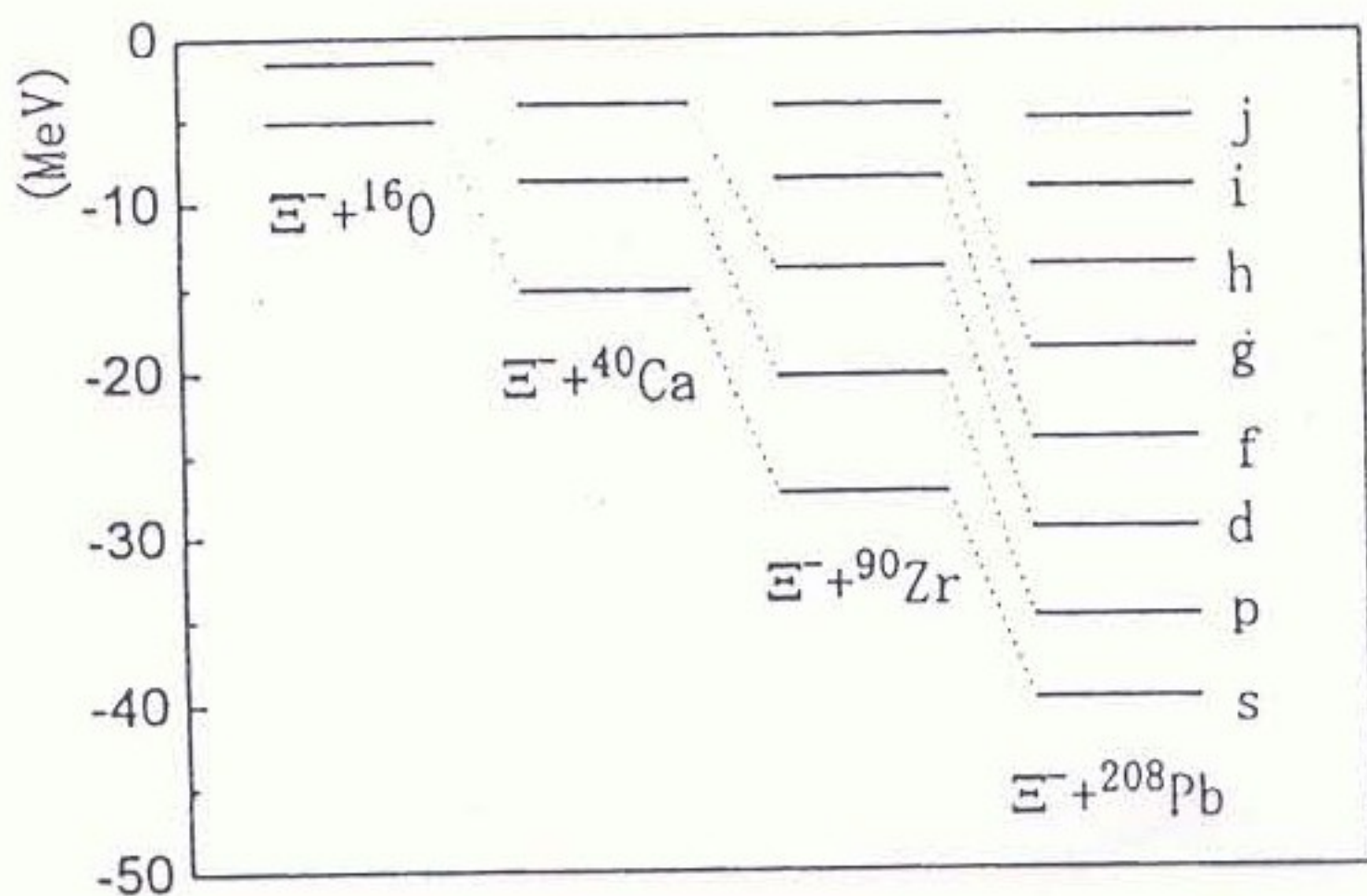


Схема уровней



Гиперядра с большой странностью

Если поместить в нестранное ядро один Σ^- , Ξ^- или Ω -гиперон, он живет только $\sim 10^{-10}$ с и испытывает конверсию, например

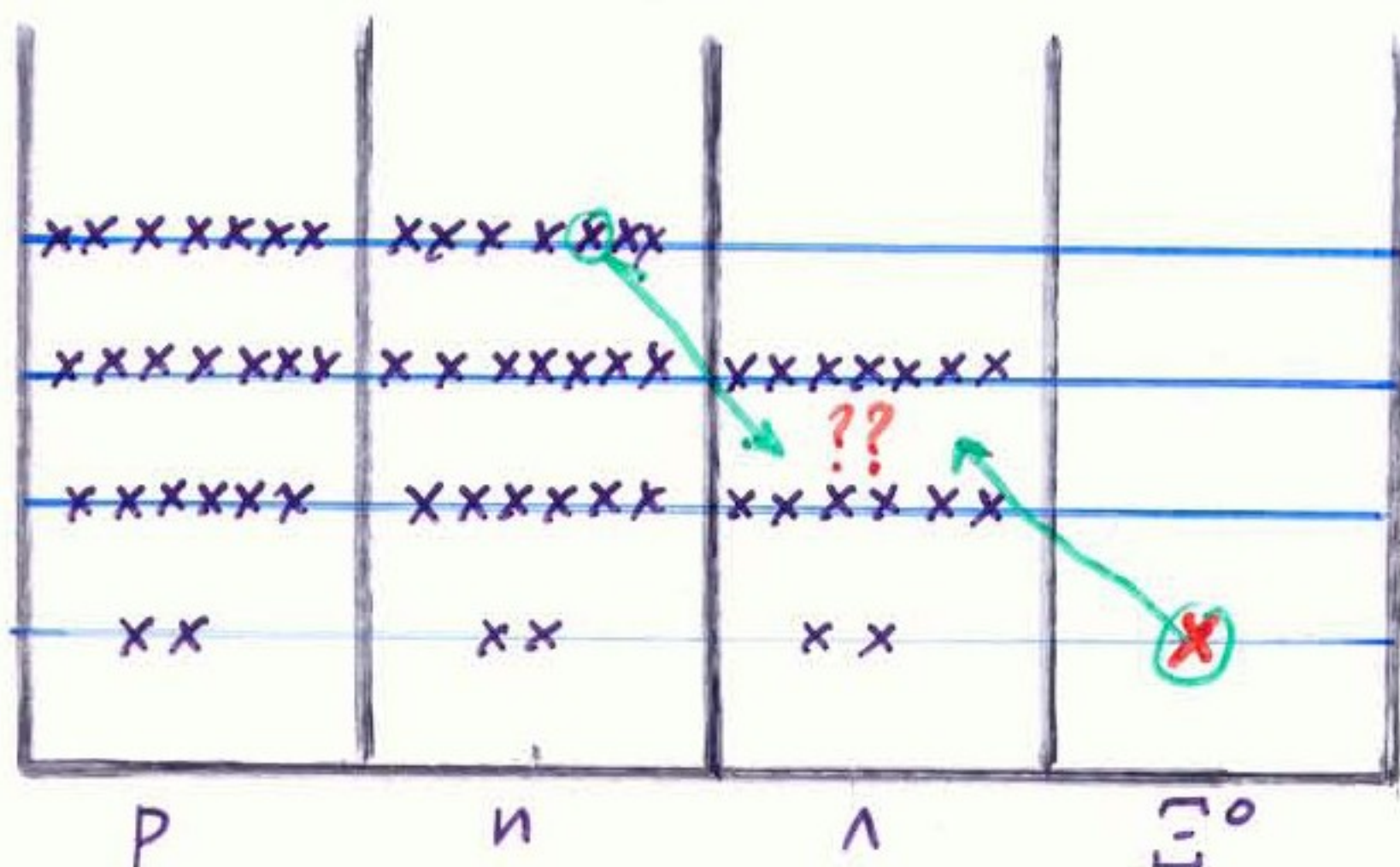


Гиперядра с большой странностью состоят
Только из p, n, Λ ?

J. Schaffner et al. Ann. Phys. 235(1994)35:

При достаточно большом N_Λ конверсия $\Xi N \rightarrow \Lambda\Lambda$ становится запрещена принципом Паули. Наоборот, при слишком большом N_Λ становится возможным обратный процесс $\Lambda\Lambda \rightarrow \Xi N$

Гиперядра с большой странностью состоят, вообще говоря, из p, n, Λ , Ξ^0 и Ξ^- , причем должны выполняться условия равновесия по отношению к конверсии



Гиперядерная материя – бесконечная материя при фиксированных $s = |S|/B$ и $q = Z/B$

S – суммарная странность ($S = N_\Lambda + 2N_{\Xi^0} + 2N_{\Xi^-}$)

Z – суммарный электрический заряд ($Z = N_p - N_{\Xi^-}$)

B – суммарный барионный заряд

(полное число барионов) ($B = N_p + N_n + N_\Lambda + N_{\Xi^0} + N_{\Xi^-}$)

энергия на барион

$$\frac{E}{B} = \frac{E}{B} \left(\rho, y_p = \frac{N_p}{B}, y_n = \frac{N_n}{B}, y_\Lambda = \frac{N_\Lambda}{B}, y_{\Xi^0} = \frac{N_{\Xi^0}}{B}, y_{\Xi^-} = \frac{N_{\Xi^-}}{B} \right)$$

$$\sum_i y_i = 1$$

Условие насыщения

$$\frac{\partial (E/B)}{\partial \rho} = 0$$

Условия химического равновесия ($\Lambda \leftrightarrow \Xi N$)

$$\mu_p + \mu_{\Xi^-} - 2\mu_\Lambda + \mu_{\Xi^-} + \mu_p - 2\mu_\Lambda = 0$$

$$\mu_n + \mu_{\Xi^0} - 2\mu_\Lambda + \mu_{\Xi^0} + \mu_n - 2\mu_\Lambda = 0$$

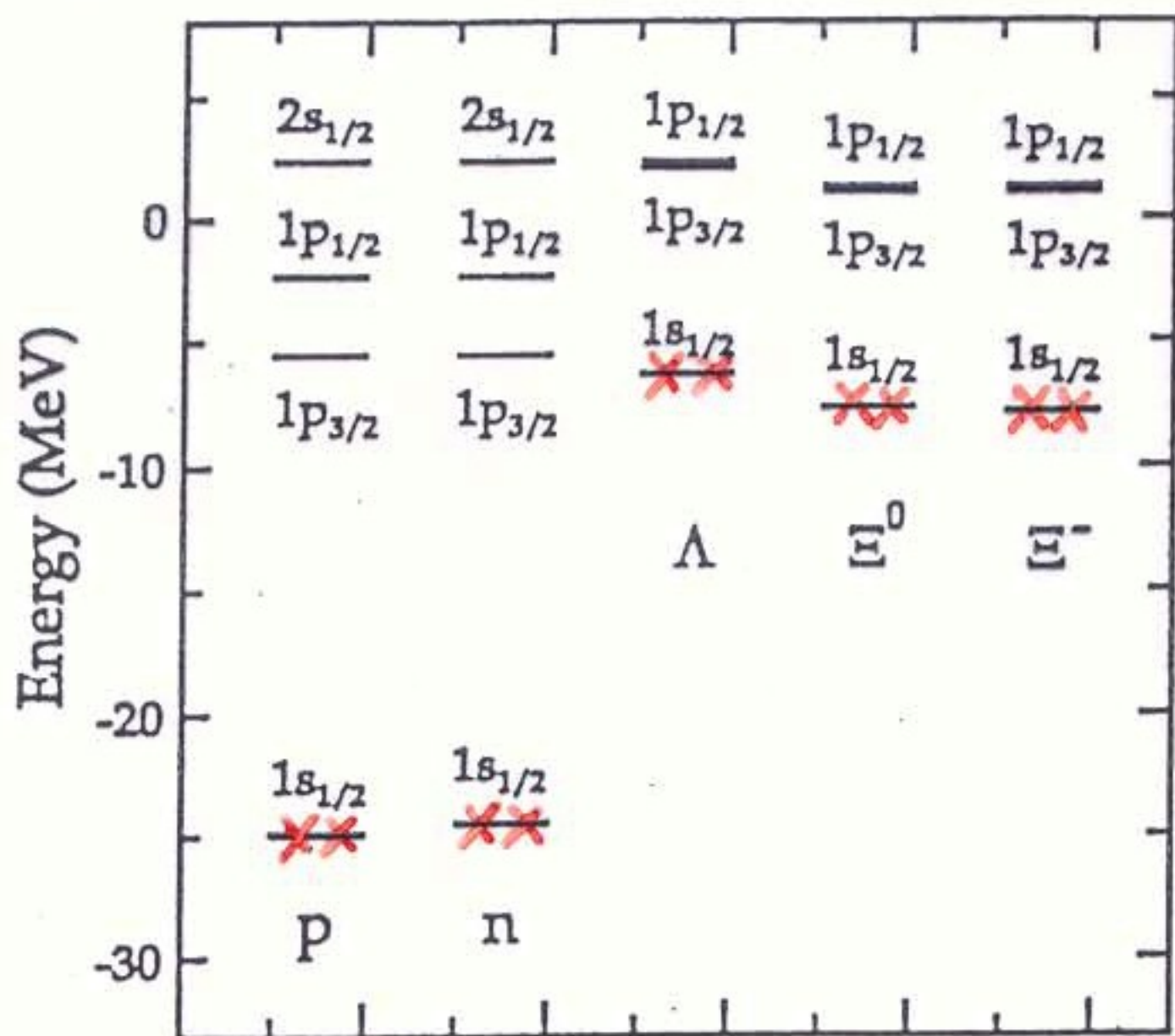
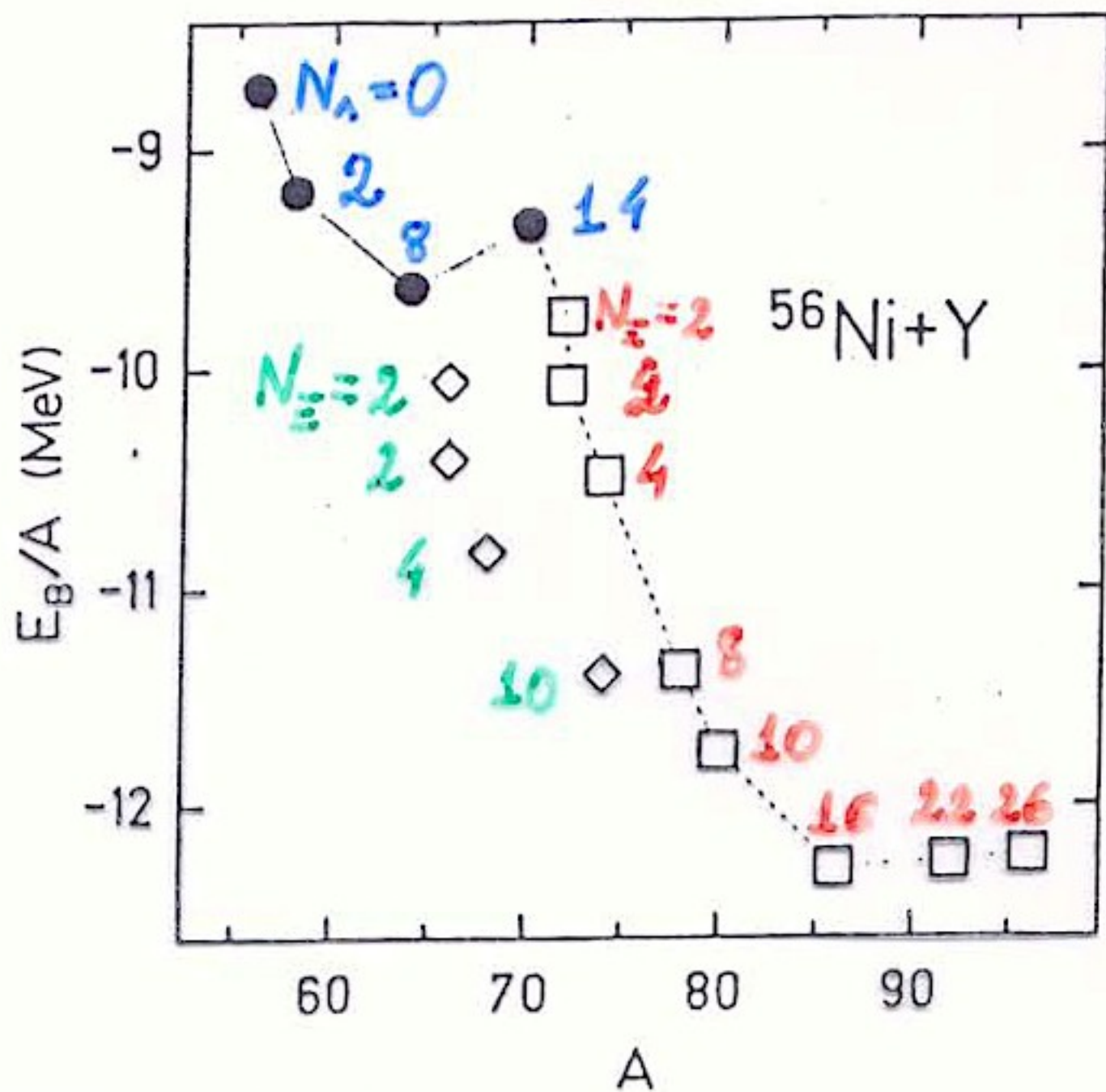
μ_i – химический потенциал бариона i

Таким образом, остаются две независимые переменные (s и q)

Стабильность по отношению к испусканию барионов

$$\mu_i < 0 \quad (i = p, n, \Lambda, \Xi^0, \Xi^-)$$

Гиперядра с Большой странностью



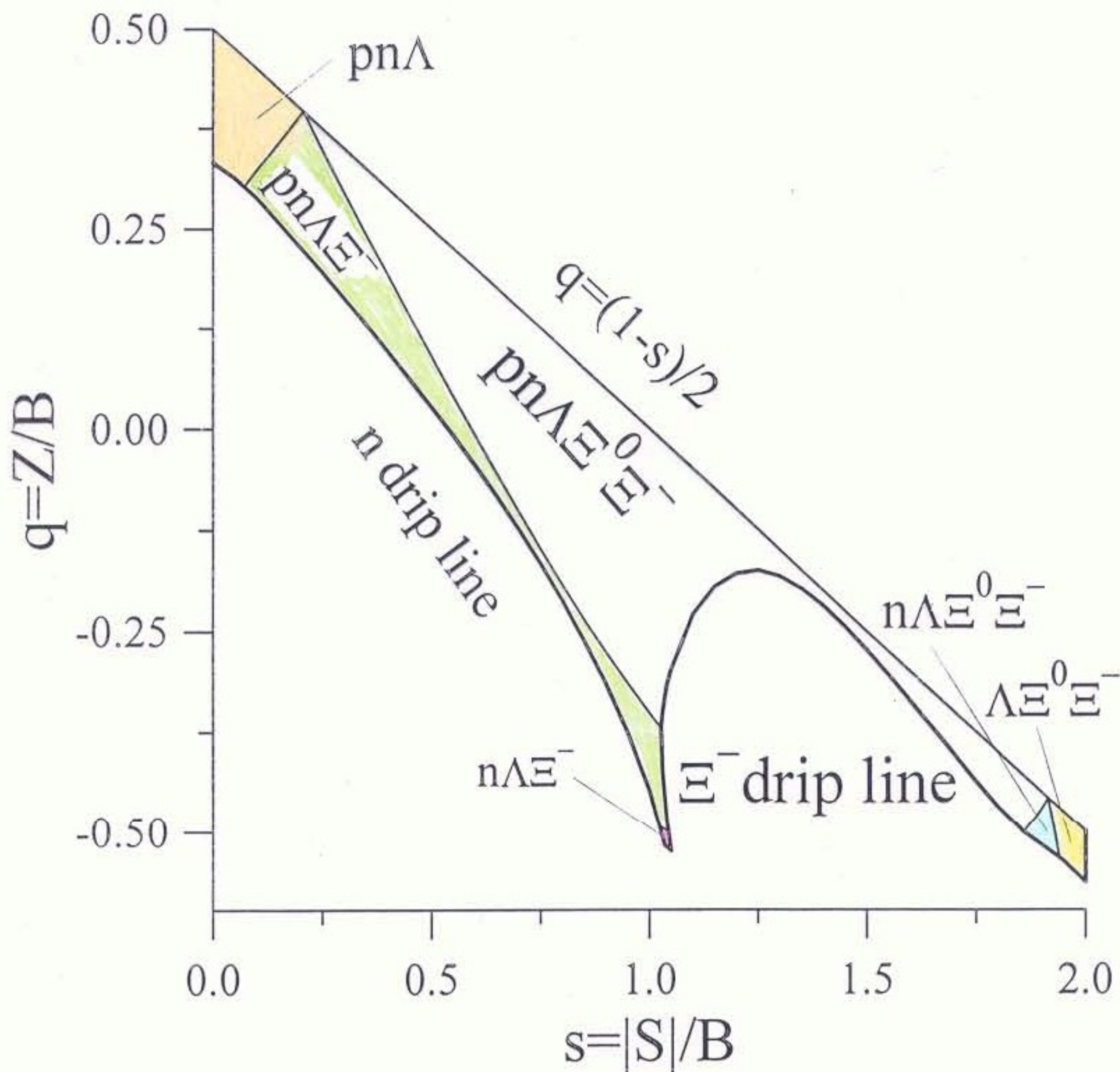
Bound state region

$q = (1-s)/2$ (isospin symmetry line):

zero isospin matter ($y_p = y_n$; $y_{\Xi^0} = y_{\Xi^-}$)

n drip line: $\mu_n = 0$

Ξ^- drip line: $\mu_{\Xi^-} = 0$

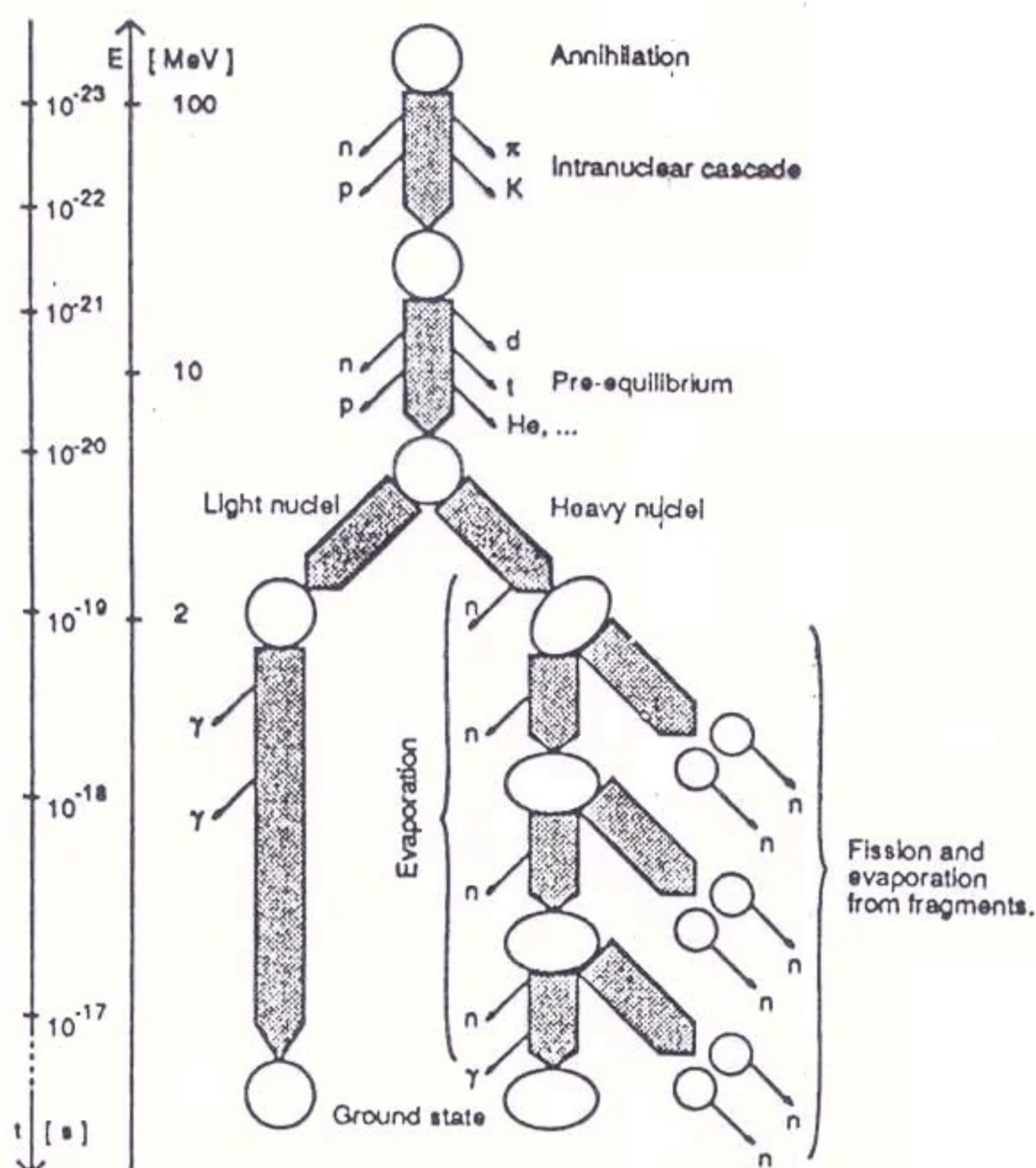


Аннигиляция $\bar{p}p$ в покое (%)

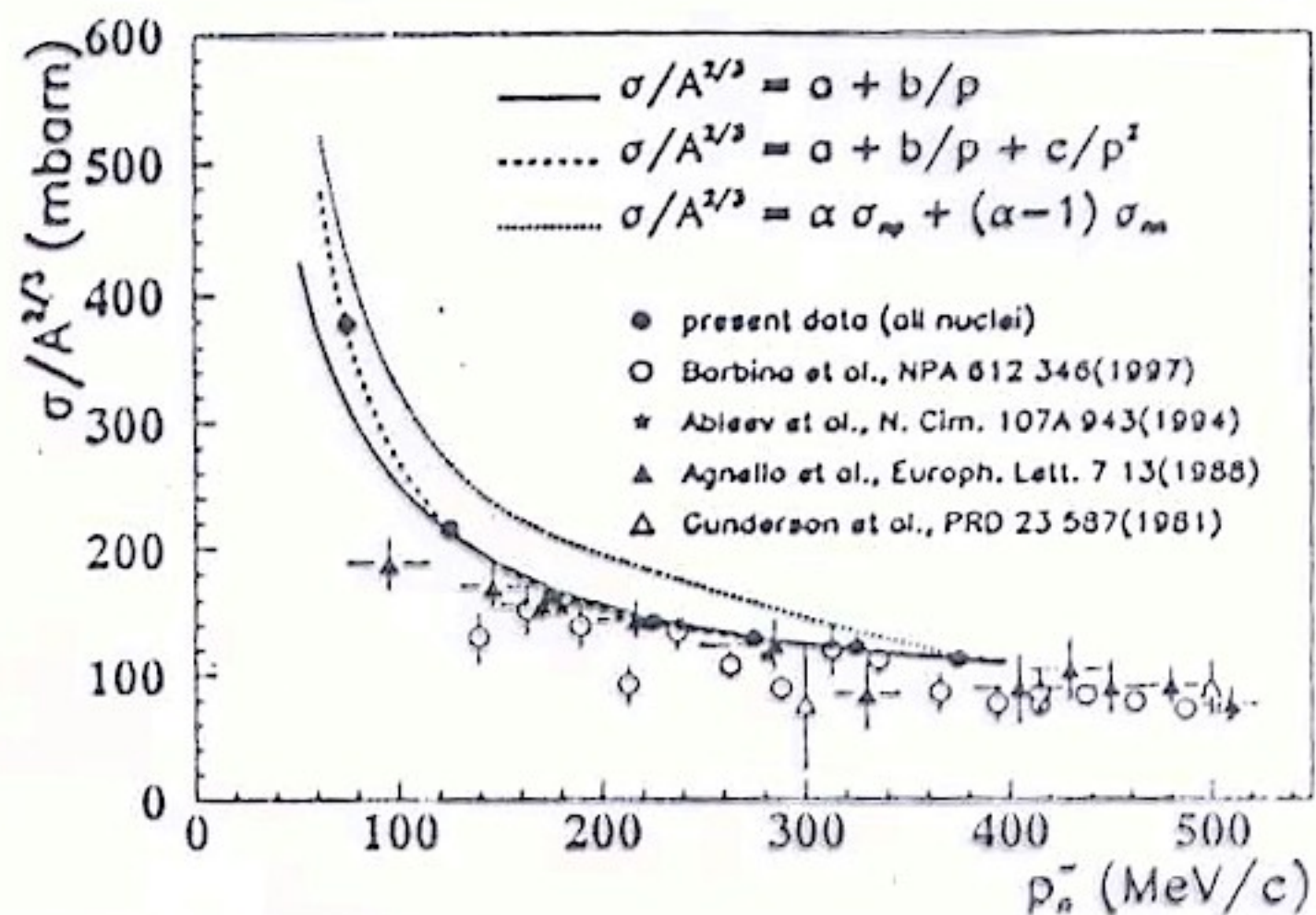
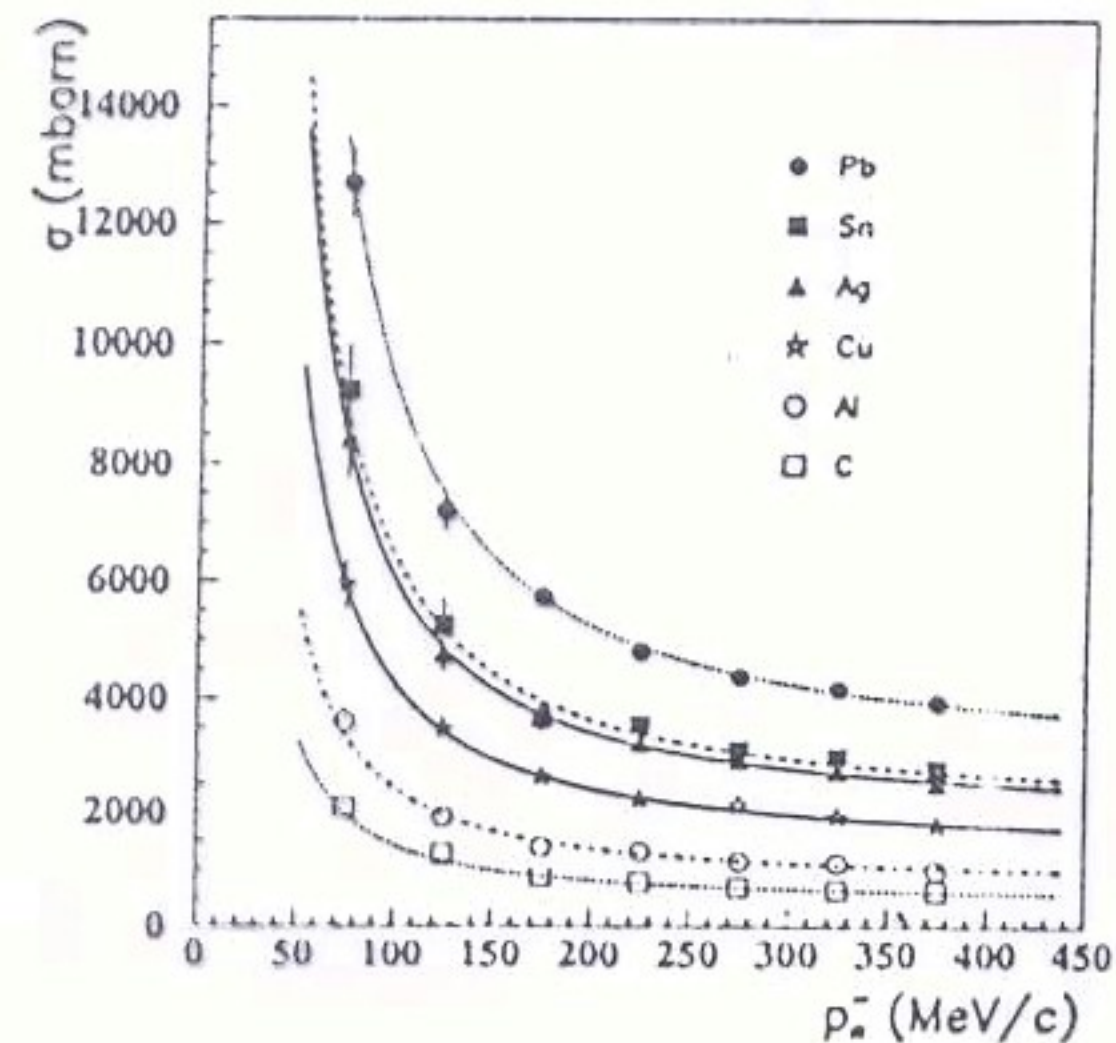
2 π	0.4
3 π	8
4 π	18
5 π	46
6 π	22
7 π	6
8 π	0.3

$\bar{K}K$	0.2
$\bar{K}K\pi$	0.5
$\bar{K}K2\pi$	0.9
$\bar{K}K3\pi$	0.2

Аннигиляция антикварклов на ядрах

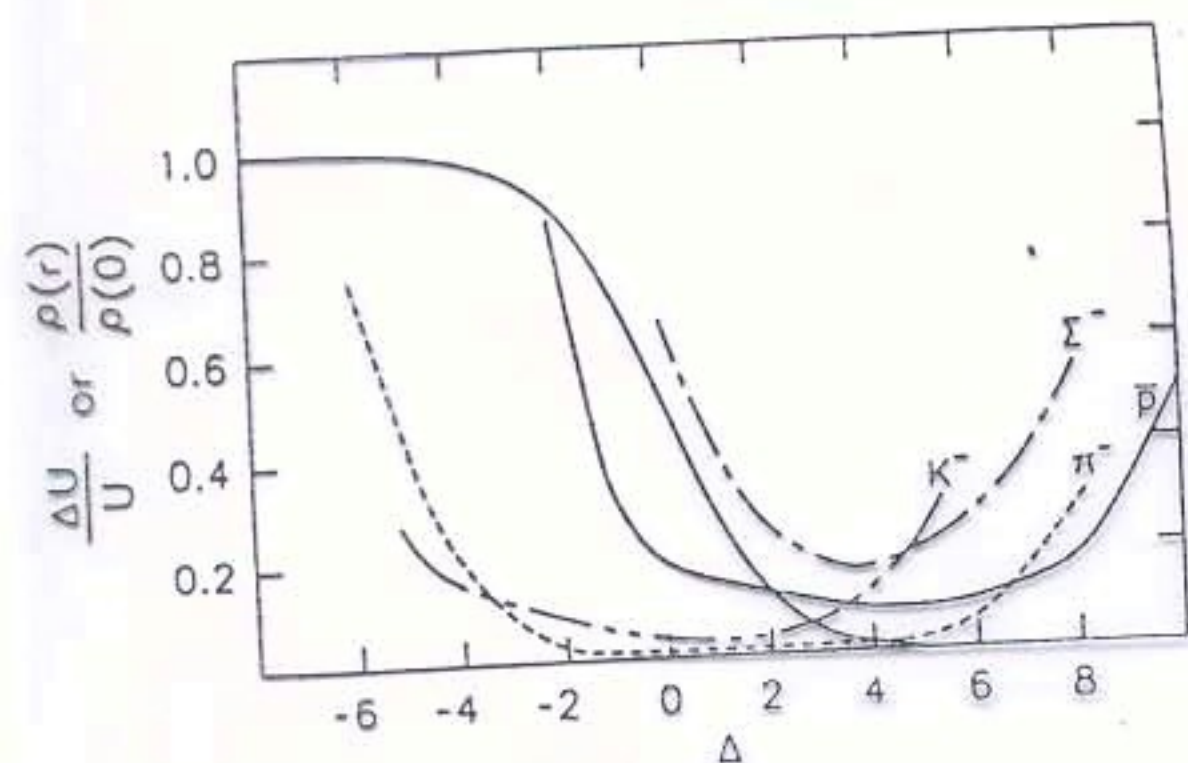


Сечения аннигиляции антинейтронов на ядрах



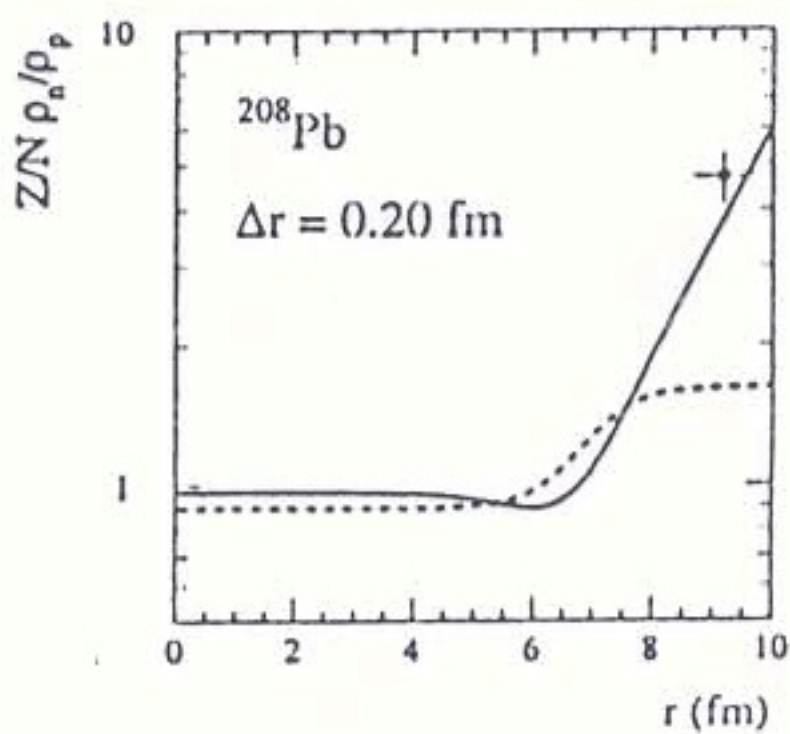
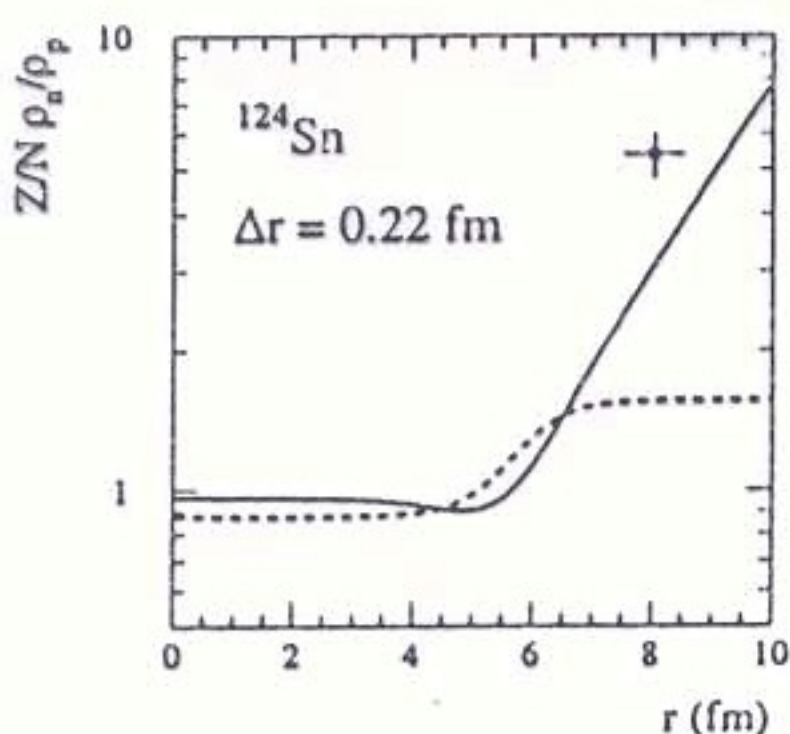
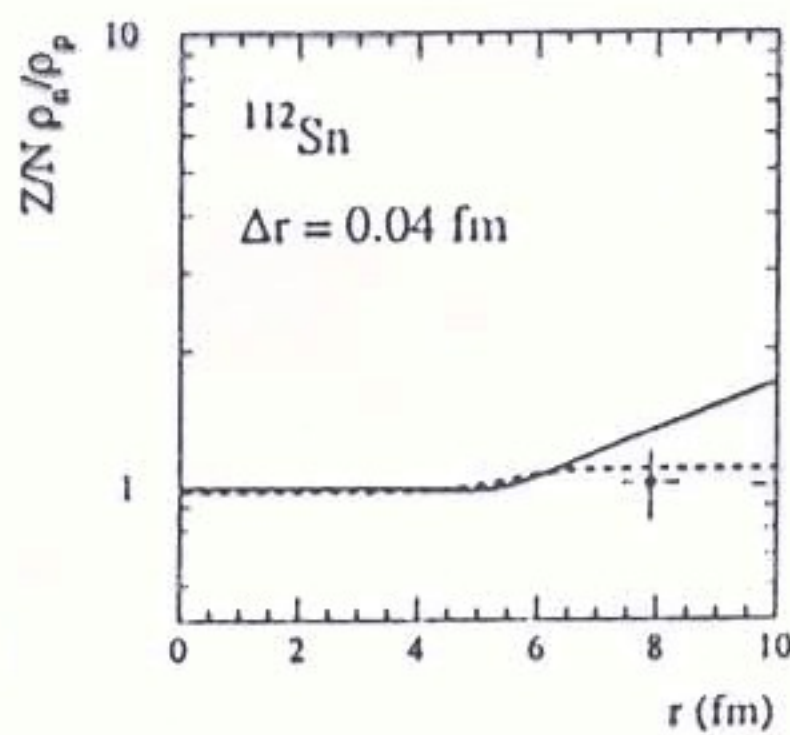
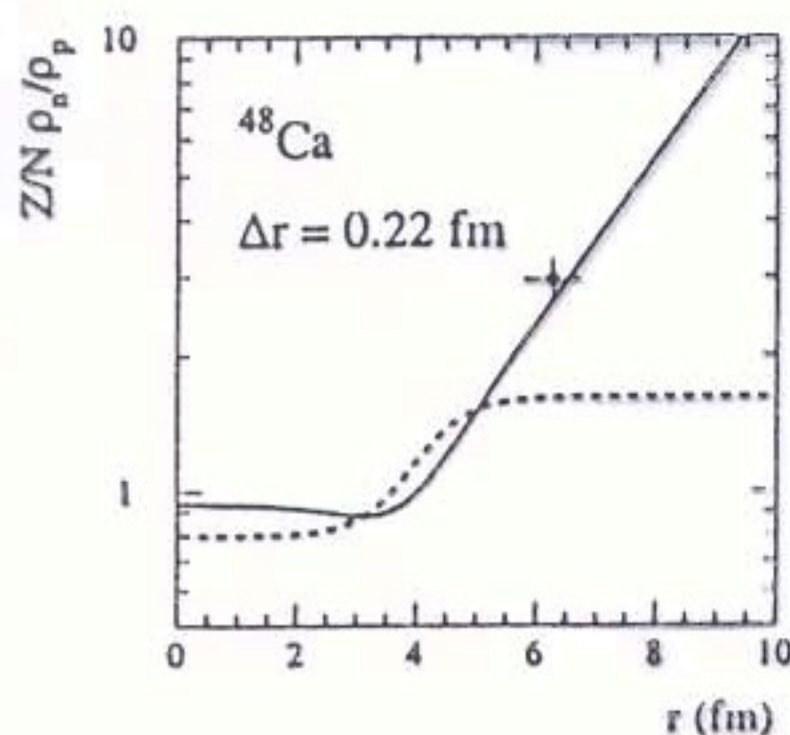
Оптический потенциал

$$V_{opt} = (B_0 + B_2 \left(\frac{\rho(z)}{\rho(0)} \right)^2) \rho(z) + B_1 \delta \rho(z) + \vec{\nabla} (C_0 \rho(z) + C_1 \delta \rho(z)) \vec{\nabla}$$



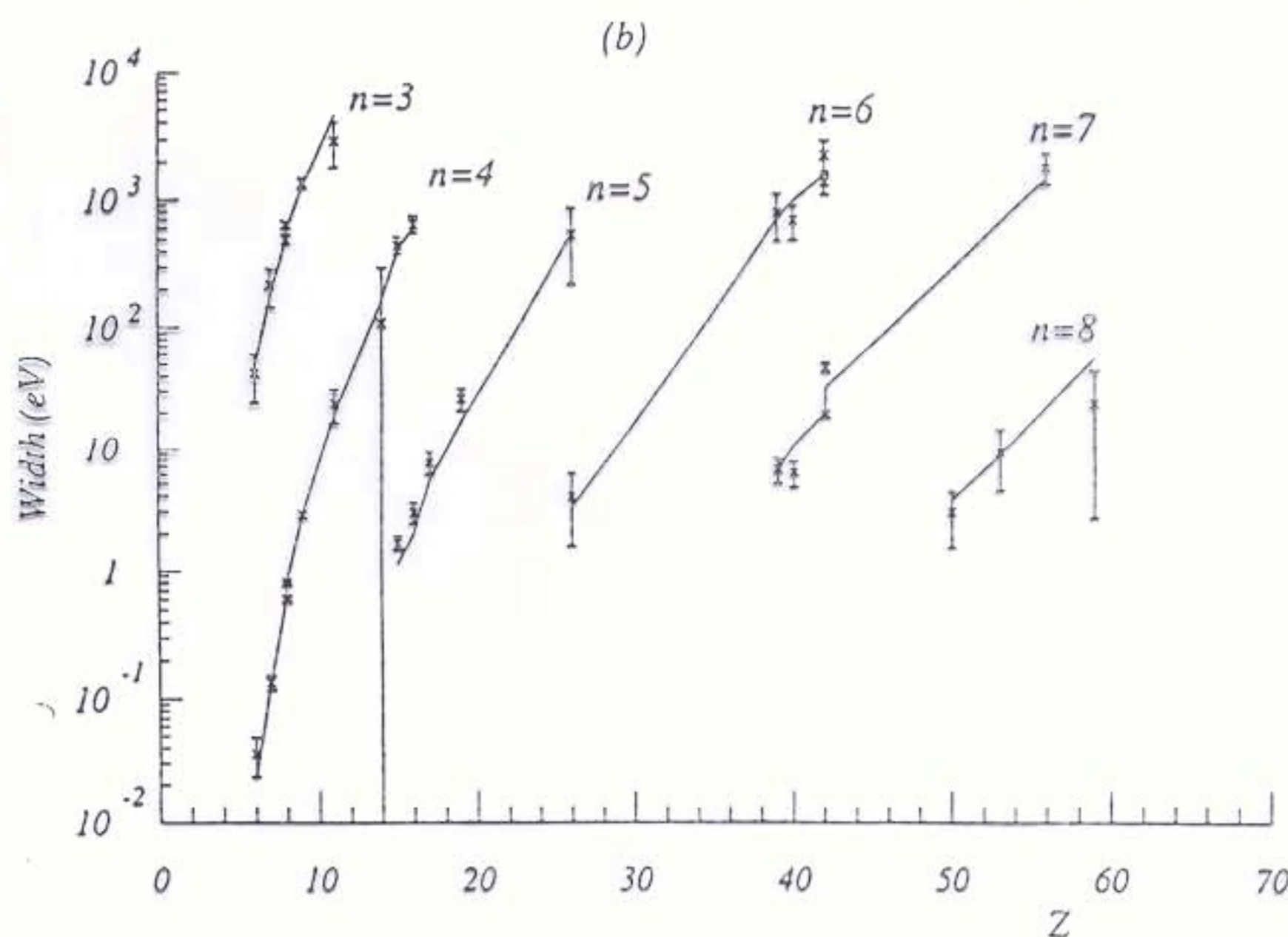
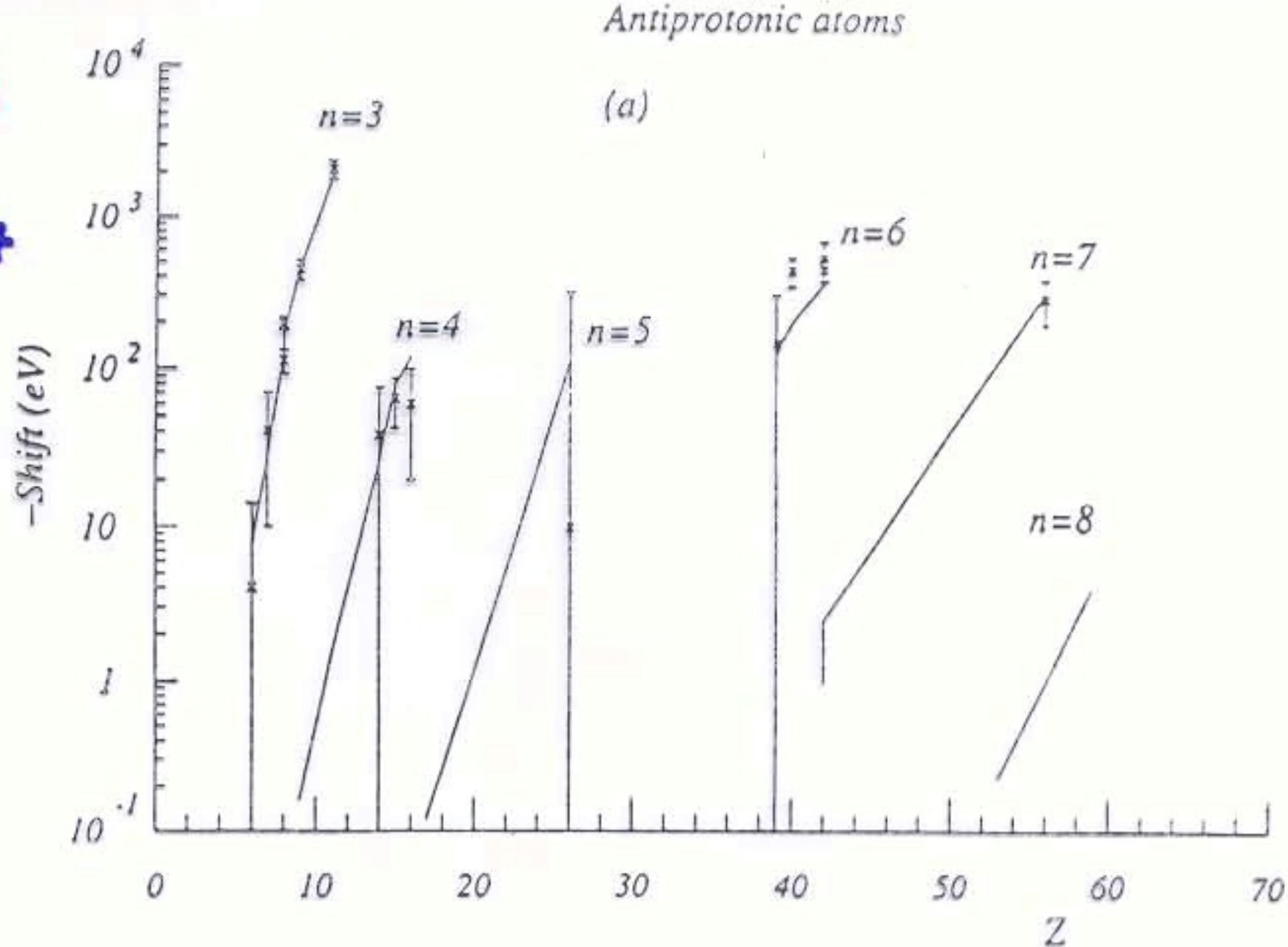
$\bar{p}p$: $\epsilon_{15} = -730 \pm 30 \text{ MeV}$
 $\Gamma_{15} = 1060 \pm 80 \text{ MeV}$

$p\bar{d}$: $\epsilon_{15} = -1.05 \pm 0.25 \text{ MeV}$
 $\Gamma_{15} = 1.10 \pm 0.75 \text{ MeV}$



$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + \exp\left(\frac{z-R}{d}\right)}$$

— $R_p = R_n$ ("2a10")
 - - - $d_p = d_n$ ("myda")



Адрон-ядерные системы и взаимодействия

пучки
небольшой
энергии

атомные
состояния

связанные
ядерные
состояния

специфич.
реакции
на ядре

поглощение

пионы

+

+

-

двойная
перезарядка

$\pi NN \rightarrow NN$

каоны K^+, K^0

+

-

-

образование
пентакварка

-

антикаоны
 $K^-, \bar{K}^0$

+

+

+?
(наблюдение
ширина)

образование
гиперонов
и гиперядер

$\bar{K} N \rightarrow \pi Y$

Λ -гипероны

-

-

+

слабкий распад

Σ -гипероны

-

+

+/-
(изоспин,
ширина)

$\Sigma N \rightarrow \Lambda N$

Ξ -гипероны

-

+(наблюдение)

+

образование
 $\Lambda\Lambda$ -гиперядер

$\Xi N \rightarrow \Lambda\Lambda$

актинуклоны

+

+

?

аннигиляция

$\bar{N} N \rightarrow \text{мезоны}$

Плотность и фермиевский импульс

бесконечной ферми-системы

$$dN = d\vec{p} dV / (2\pi\hbar)^3 \quad \text{при } T=0 \quad N = \frac{V}{8\pi^3\hbar^3} \frac{4}{3} \pi p_F^3$$

$$n = \frac{1}{6\pi^2} k_F^3 \quad (\text{без учета спина})$$

$$n = \frac{1}{3\pi^2} k_F^3 \quad (S=1/2)$$

$$n = \frac{2}{3\pi^2} k_F^3 \quad (\text{симметричная ядерная материя})$$

Гравитационное давление

$$dF = G \frac{m}{z^2} dm' \quad \frac{dp}{dz} = G \frac{M}{z^2} \rho = \frac{4}{3} \pi G \rho^2 z$$

$$\rho(R) = \int_0^R \frac{dp}{dz} dz = \left(\frac{4\pi}{3} \right)^{1/3} G M^{2/3} \rho^{4/3}$$

Давление вырожденного электронного газа

$$p = n^2 \frac{dE}{dn}$$

а) $E = \frac{k^2}{2m}$

$$\mathcal{E} = \frac{3}{4\pi k_F^3} \frac{1}{2m} 4\pi \int_0^{k_F} k^4 dk = \frac{3}{10m} (3\pi^2)^{2/3} n^{2/3}$$

$$p = \frac{(3\pi^2)^{2/3}}{5m} n^{5/3}$$

б) $E = k$

$$\mathcal{E} = \frac{3}{4} (3\pi^2)^{1/3} n^{1/3}$$

$$p = \frac{1}{4} (3\pi^2)^{1/3} n^{4/3}$$

Нейтронизация



$$E_F = 3.7 \text{ МэВ} \quad \rho = 10^9 \text{ г/см}^3$$

$$E_F = 1.6 \text{ МэВ}$$

Материя нейтронных звезд

1) н р е

$$\mu_n = \mu_p + \mu_e$$

2) н р е μ^-

$$\mu_\mu = \mu_e$$

3) н р е $\mu^- \Lambda \Sigma \Xi$

$$\mu_{\Sigma^-} = \mu_{\Xi^-} = \mu_n + \mu_e$$

$$\mu_n = \mu_\Lambda = \mu_{\Sigma^0} = \mu_{\Xi^0}$$

$$\mu_p = \mu_{\Sigma^+}$$

$$\mu_n = \mu_p + \mu_e ; \mu_\mu = \mu_e$$

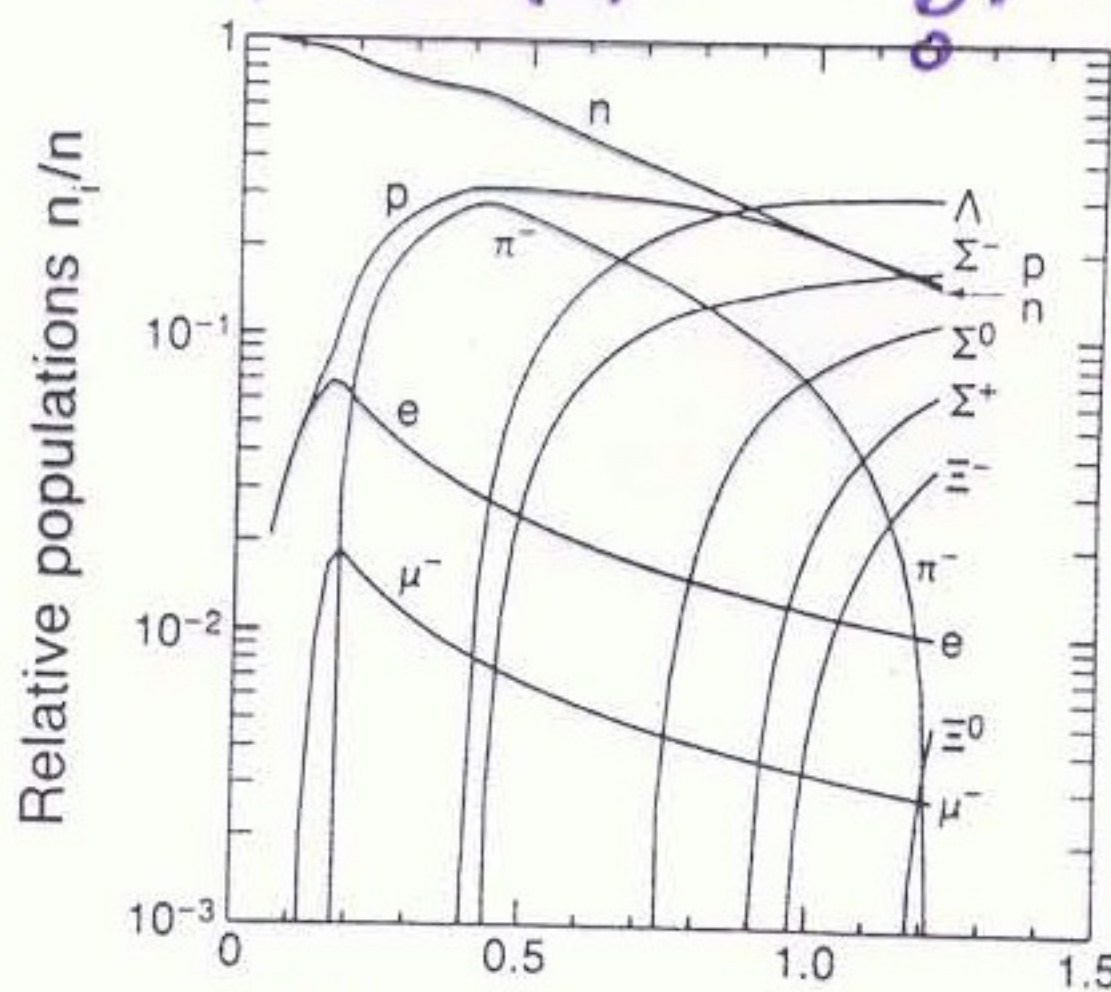
Уравнение Оппенгеймера-Волкова

$$\frac{dp}{dz} = -G \frac{(p + \rho)(M + 4\pi z^3 \rho)}{z^2 - 2GMz}$$

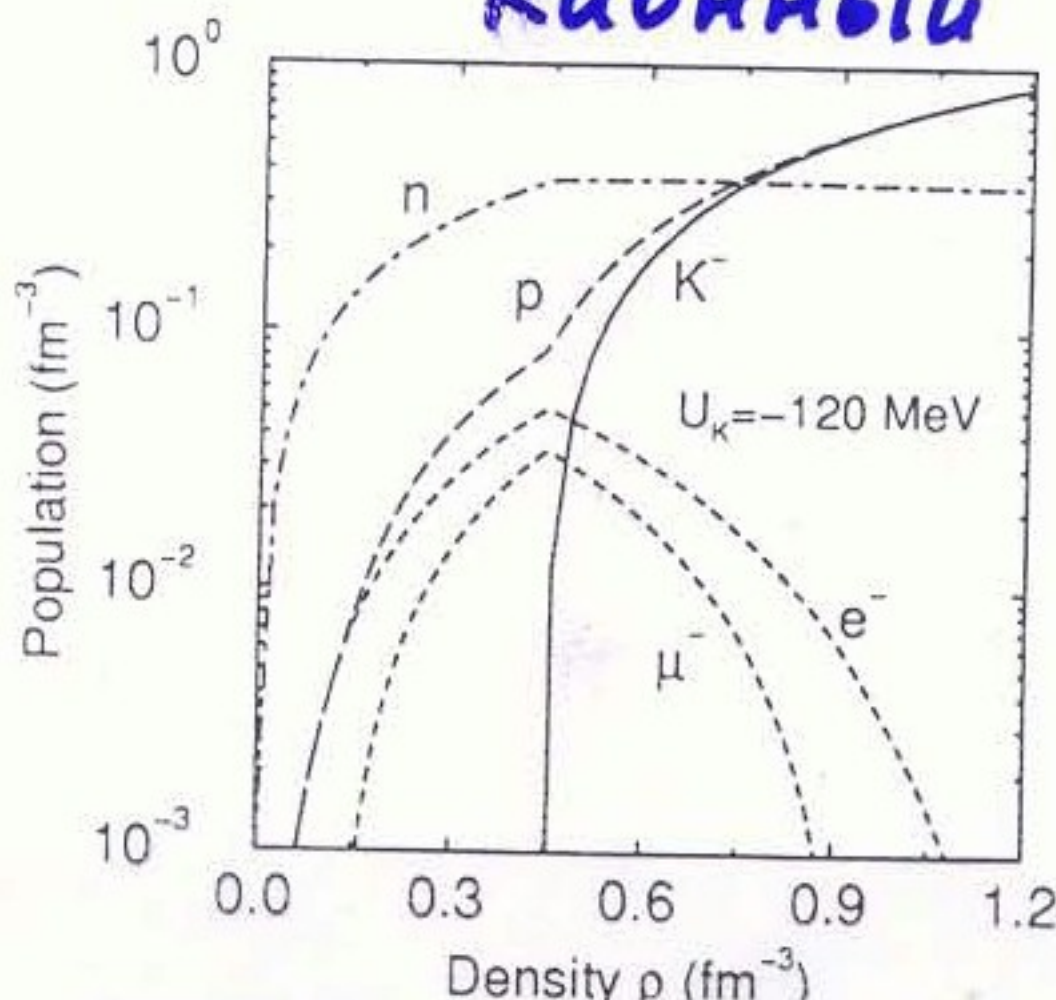
$$M \equiv M(z) = 4\pi \int_0^z \rho(x) x^2 dx$$

Конденсат

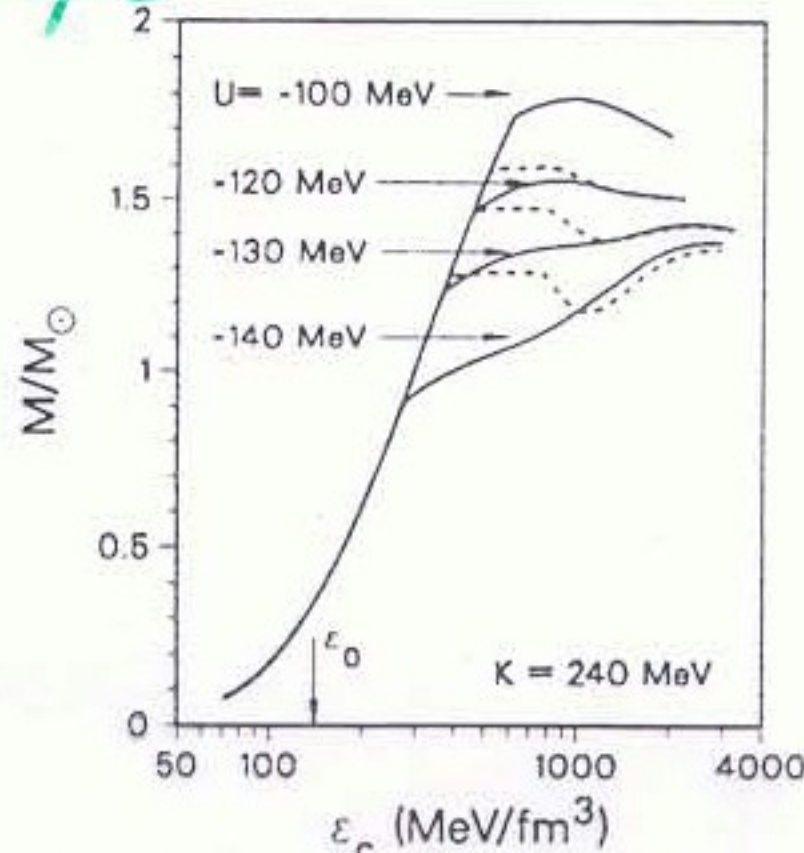
пионный
 $\mu_{\pi^-} = \mu_e$



каонный

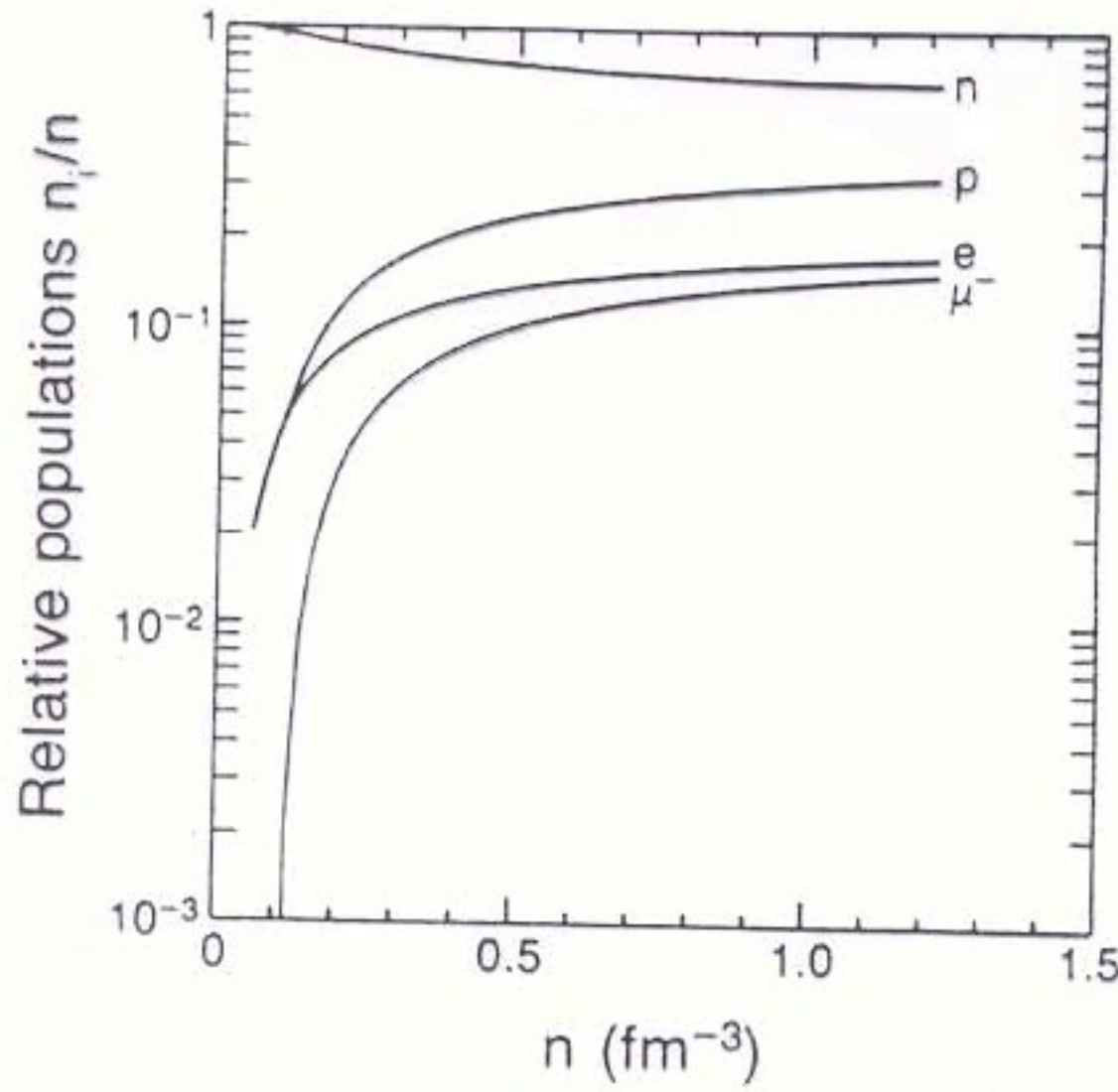


$\mu_{K^-} = \mu_e$

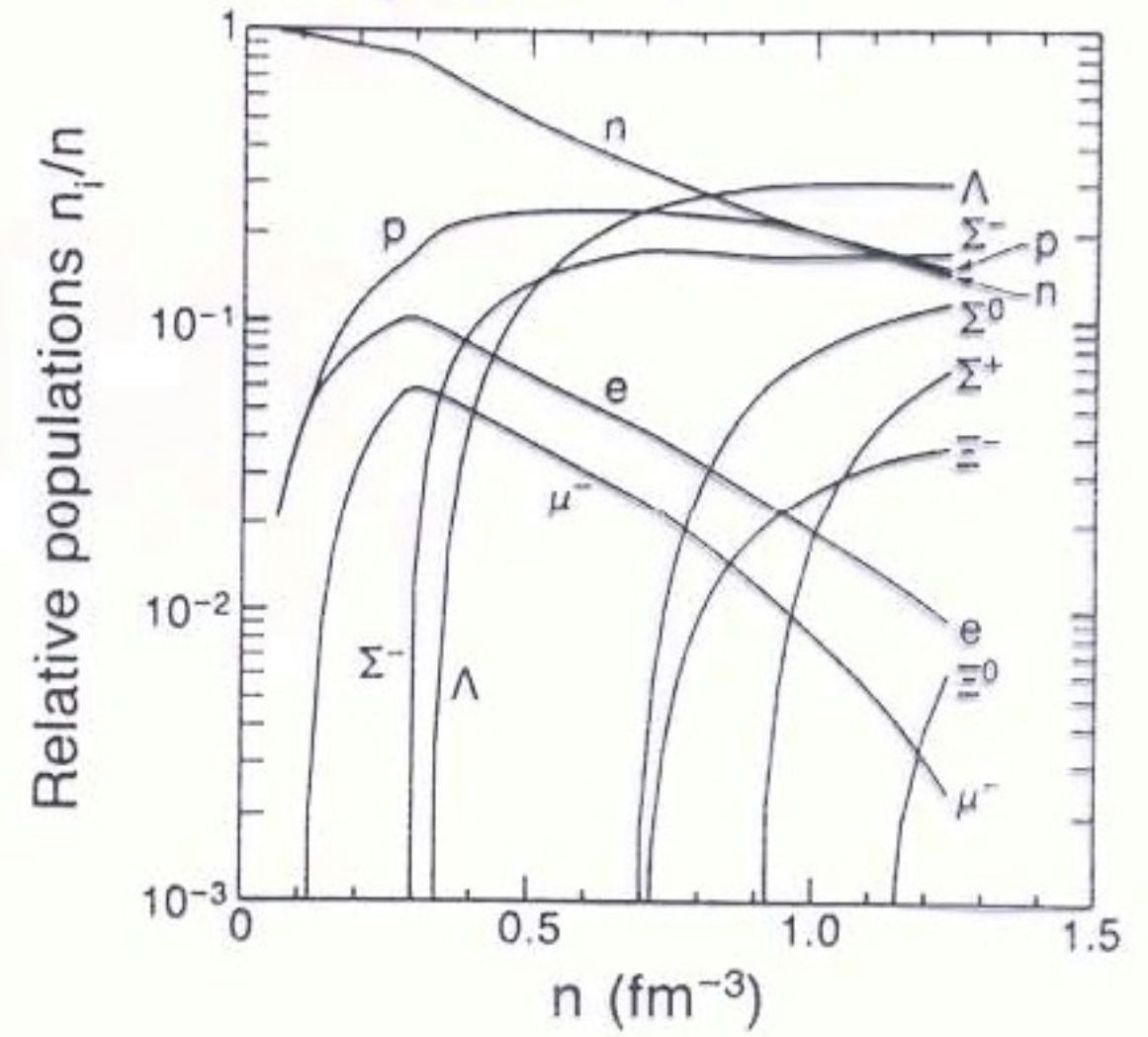


Состав материи нейтронных звезд

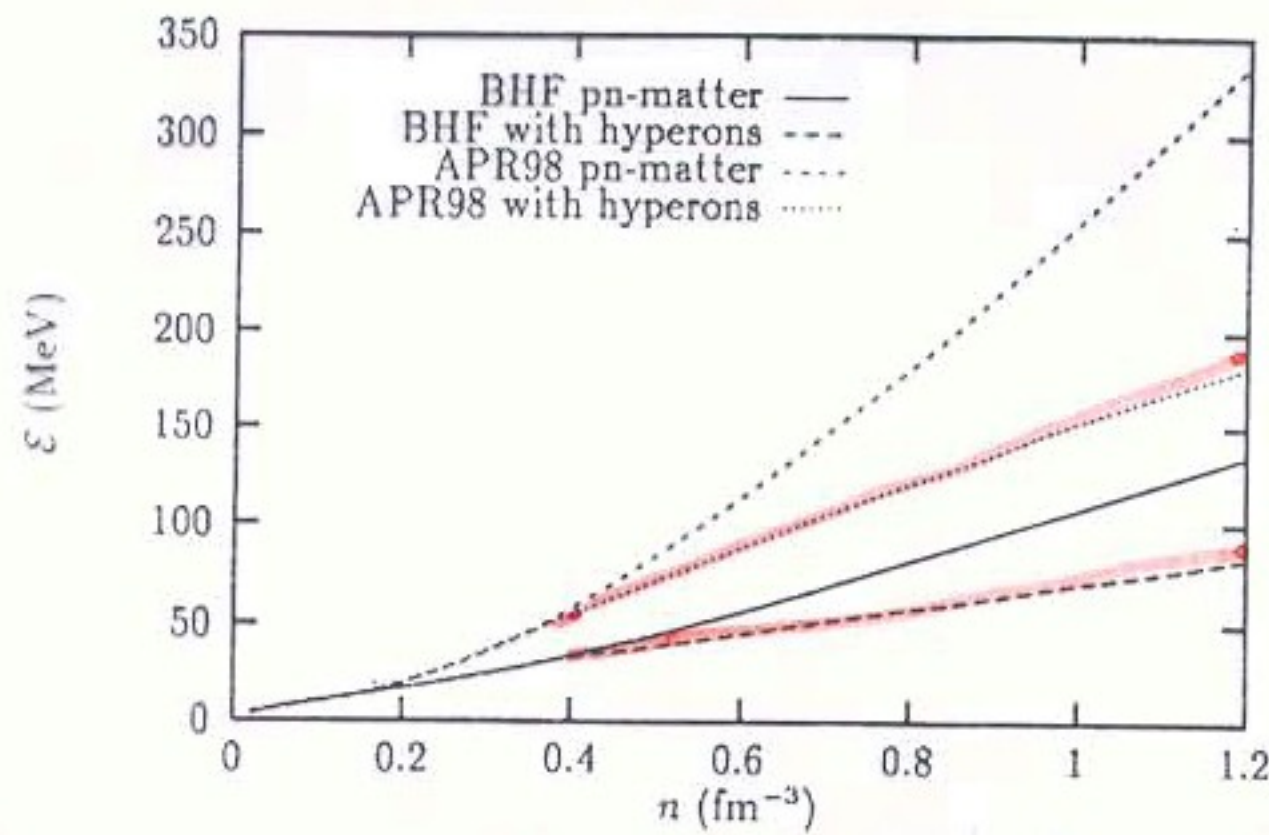
нрем



нрем $\Lambda \Sigma \Xi$

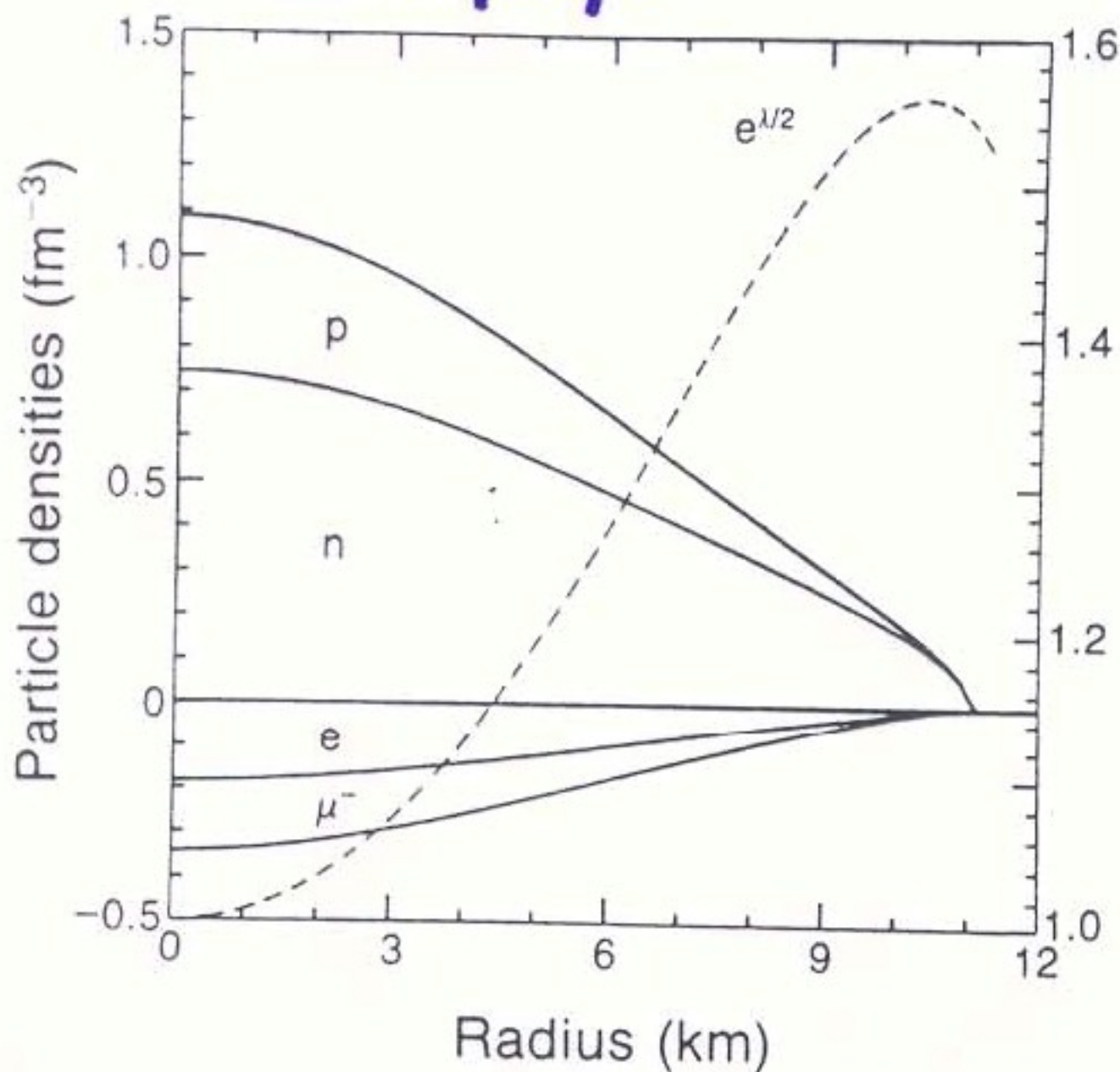


Уравнение состояния

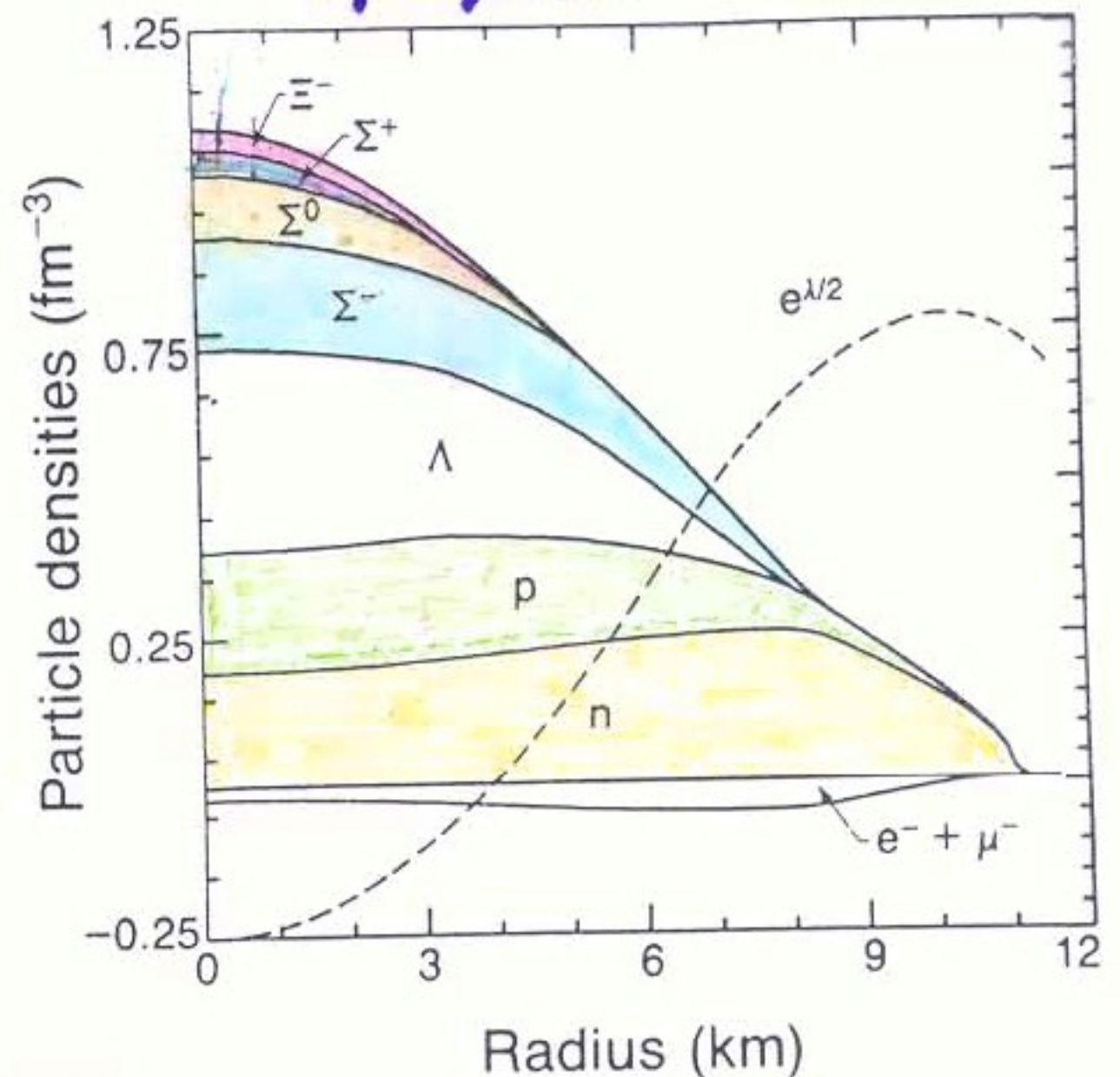


Структура нейтронной звезды

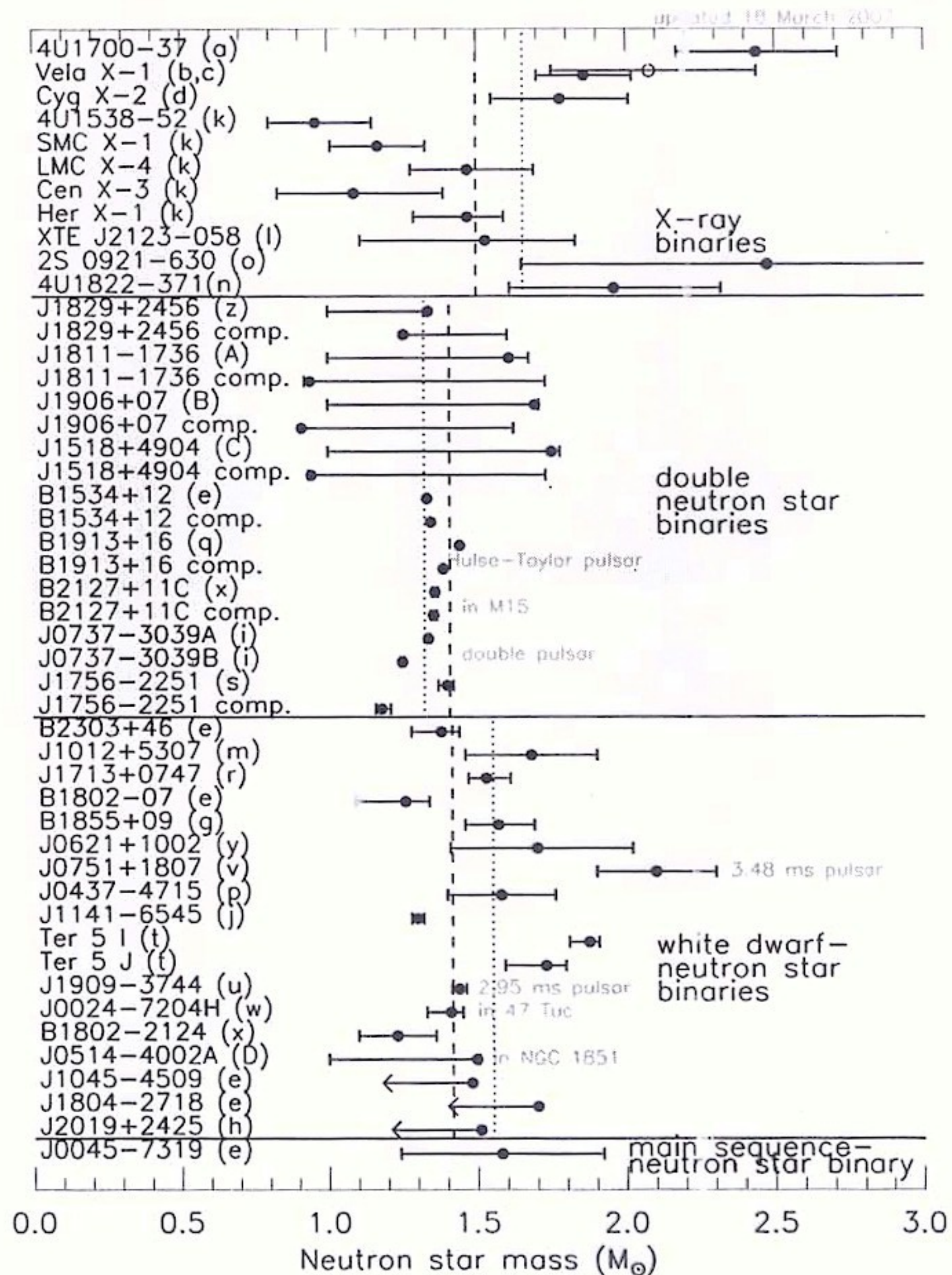
нрем



нрем $\Lambda \Sigma \Xi$



MEASUREMENTS of NEUTRON STAR MASSES and RADII



Object	R (km)	Ref
Omega Cen Chandra	13.5 ± 2.1	Rutledge et al. ('02)
Omega Cen (XMM)	13.6 ± 0.3	Gendre et al. ('02)
M13 (XMM)	12.6 ± 0.4	Gendre et al. ('02)
47 Tuc X7 (Chandra)	$14.5^{+1.6}_{-1.4}$ ($1.4 M_{\odot}$)	Rybicki et al. ('05)
M28 (Chandra)	$14.5^{+6.9}_{-3.8}$	Becker et al. ('03)
EXO 0748-676 (Chandra)	13.8 ± 1.8 ($2.10 \pm 0.28 M_{\odot}$)	Ozel ('06)