

$B=1$ **Гипероны**

S

M, MeV

 Λ^0

-1

1115.7

 Σ^+

-1

1189.4

 Σ^0

-1

1192.6

 Σ^-

-1

1197.4

 Ξ^0

-2

1314.8

 Ξ^-

-2

1321.3

 Ω^-

-3

1672.5

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

T, C

Распад

 $2.6 \cdot 10^{-10}$ $N\pi$ $0.8 \cdot 10^{-10}$ $N\pi$ $7.4 \cdot 10^{-20}$ $\Lambda\gamma$ $1.5 \cdot 10^{-10}$ $N\bar{\pi}$ $2.9 \cdot 10^{-10}$ $\Lambda\pi^0$ $1.6 \cdot 10^{-10}$ $\Lambda\pi^-$ $0.8 \cdot 10^{-10}$ ΛK^- $(J^\pi = \frac{3}{2}^+)$ $B=0$ **Мезоны**

S

M, MeV

 π^\pm

0

139.6

 π^0

0

135.0

 K^+

+1

493.7

 K^-

-1

 K^0

+1

497.7

 \bar{K}^0

-1

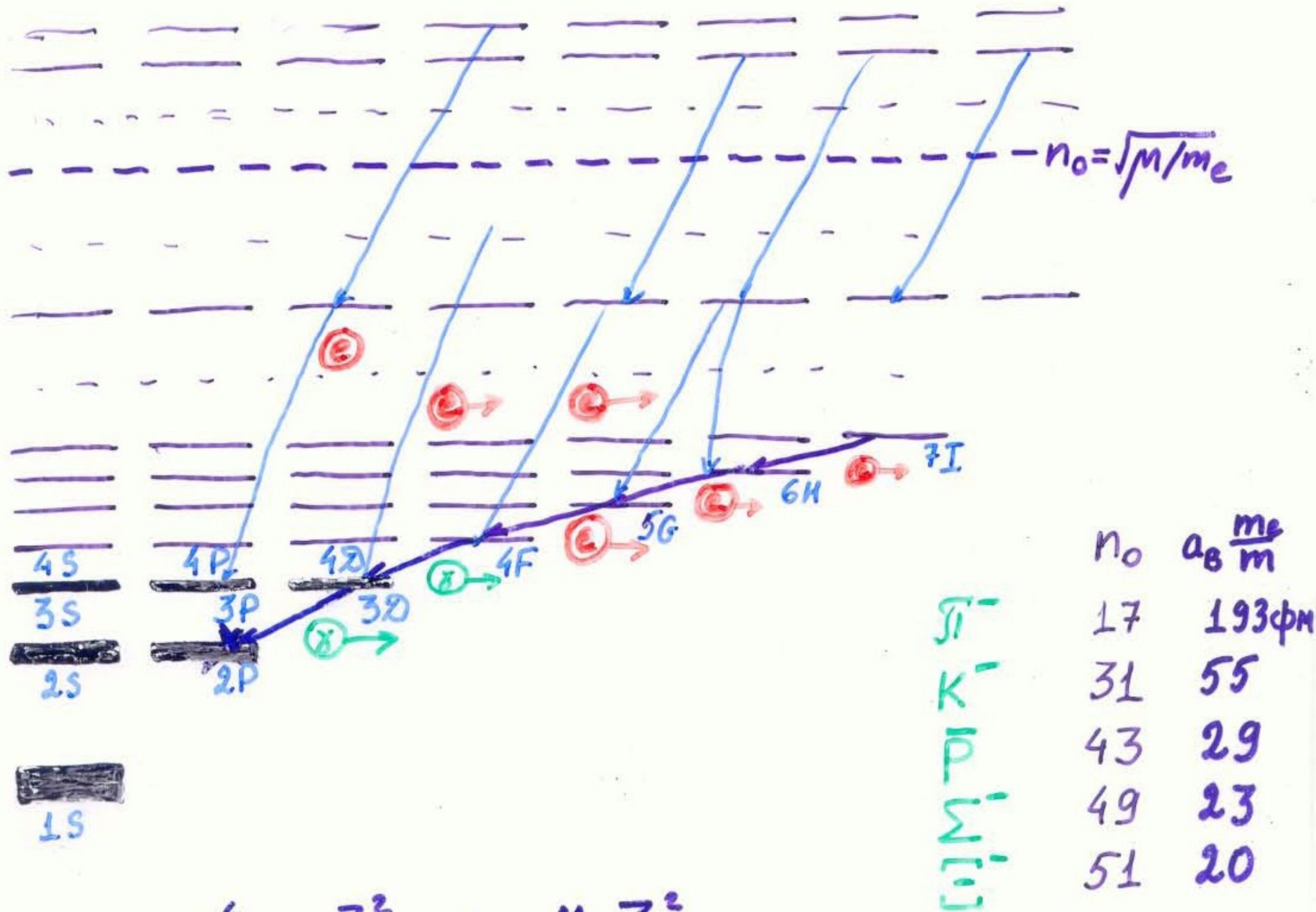
 $J^\pi = 0^-$

T, C

Распад

 $2.6 \cdot 10^{-8}$ $M\nu_\mu$ $8.4 \cdot 10^{-16}$ $\delta\delta$ $1.2 \cdot 10^{-8}$ $M\nu_\mu, \pi\bar{\pi}$ $0.8 \cdot 10^{-10}, 5.1 \cdot 10^{-8}$ $\pi\bar{\pi}, 3\pi$

Схема уровней адронного атома



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

$$R_y = 13.6 \text{ эВ}$$

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

Свечение и поглощение

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

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

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



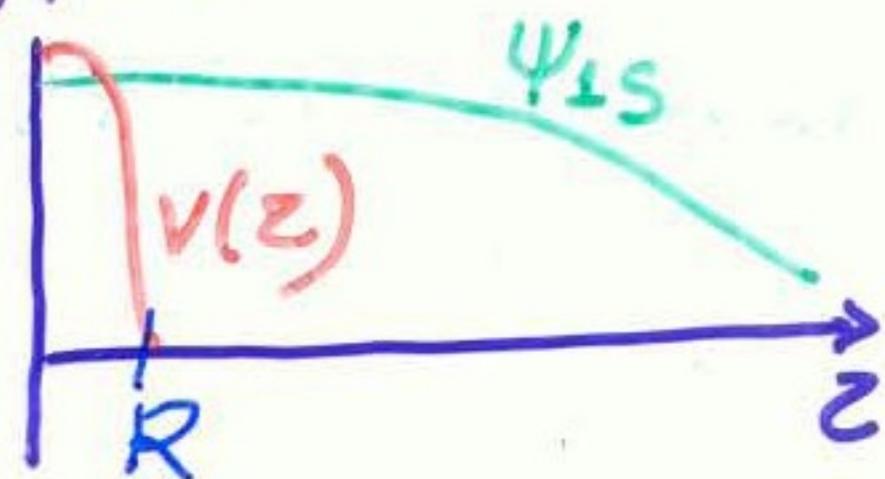
$$E_{ne} = \Delta E_{nl} + \frac{i}{2} \Gamma_{nl}$$

$$\mathcal{E}_{ne} = \langle \Psi | V | \Psi \rangle$$

Ψ - кулоновская волновая функция адрона

V - потенциал сильного взаимодействия адрона с ядром

$$\begin{aligned}\mathcal{E}_{1S} &= \int \Psi_{1S}^*(\vec{z}) V(\vec{z}) \Psi_{1S}(\vec{z}) d^3 z = \\ &= \int_0^\infty R_{1S}^2(z) V(z) z^2 dz \approx \\ &\approx R_{1S}^2(0) \int_0^\infty V(z) z^2 dz\end{aligned}$$



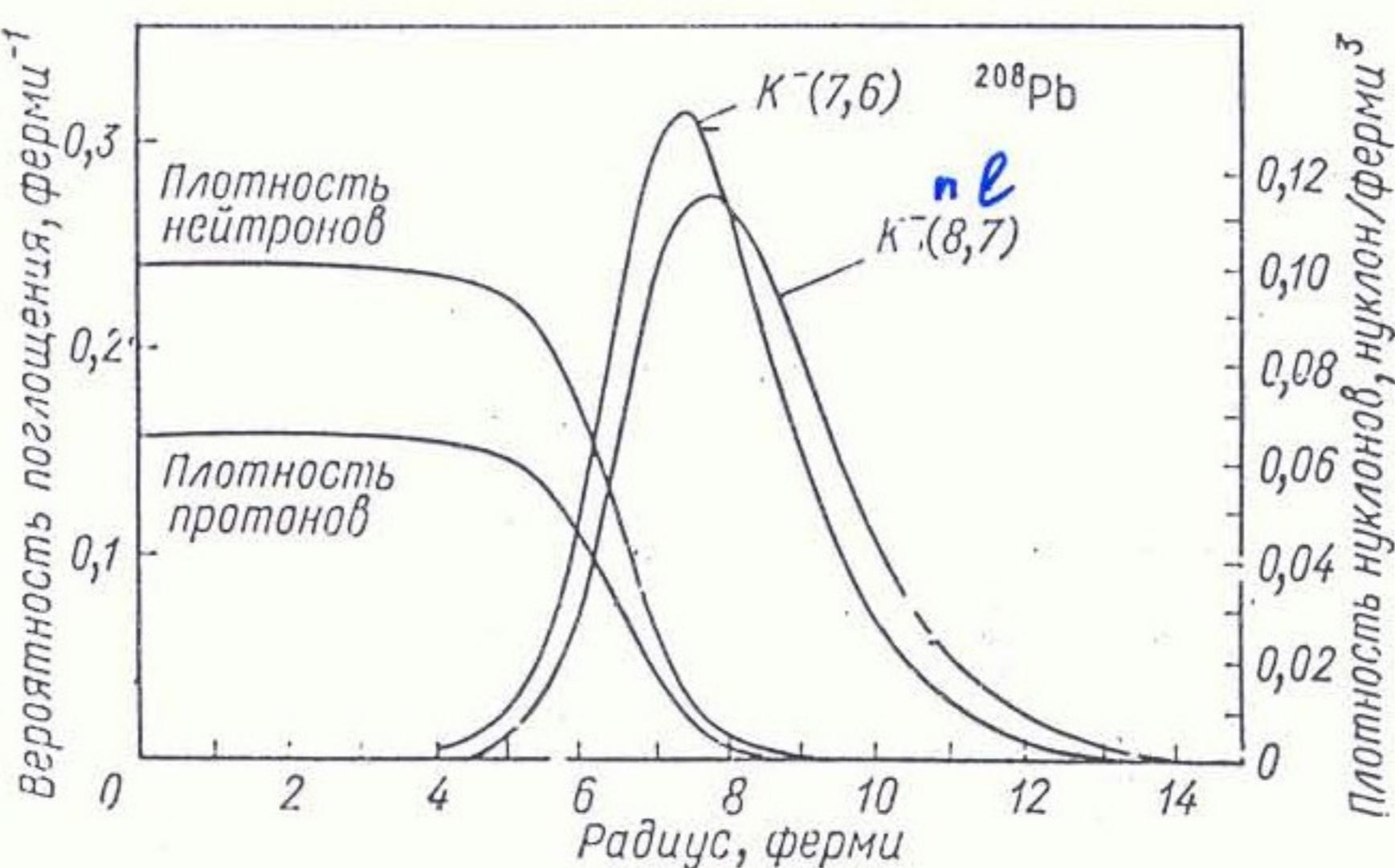
$$F_B(k) = -\frac{2M}{\hbar^2} \int_0^\infty \frac{\sin kz}{kz} V(z) z^2 dz$$

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

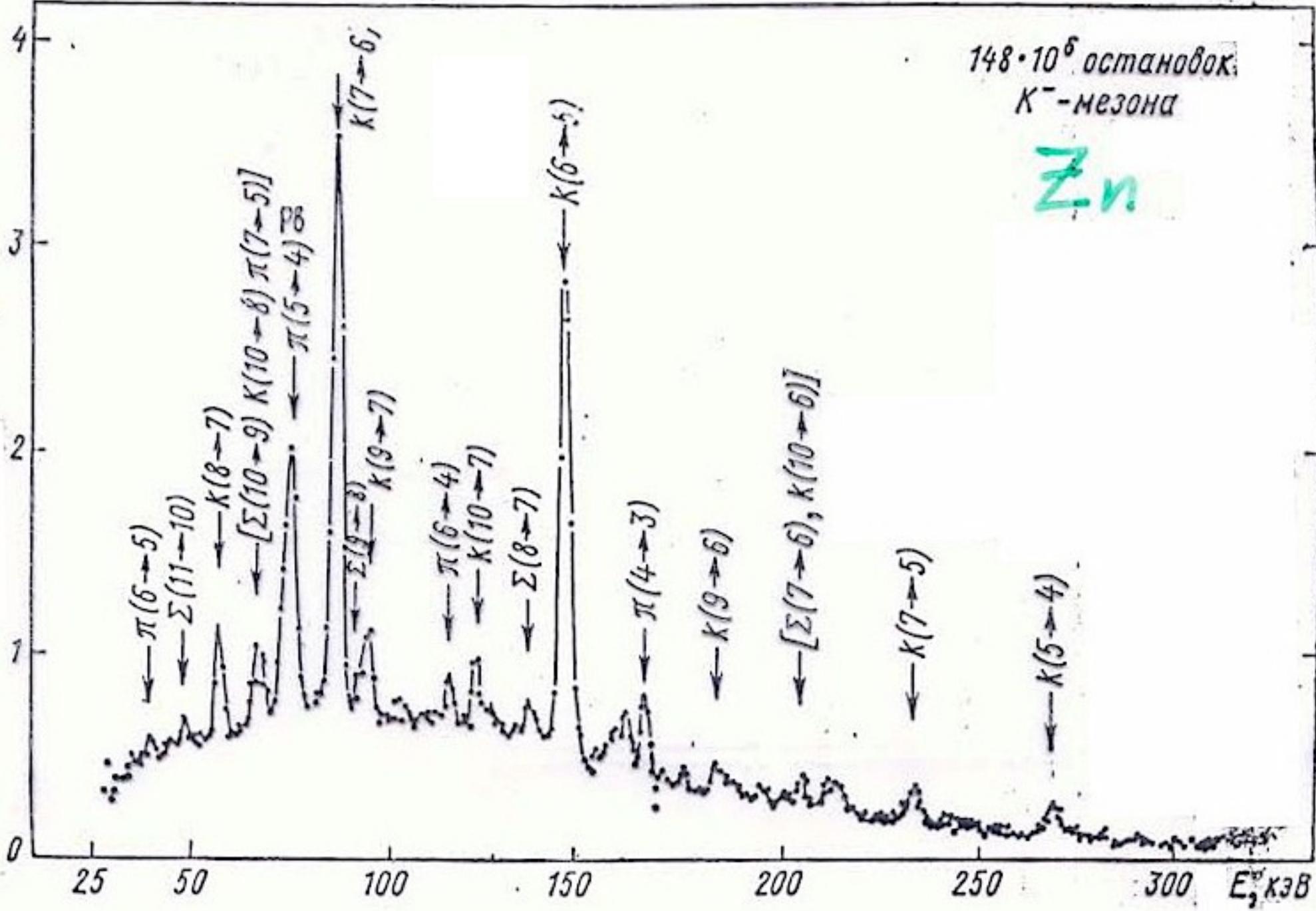
$$\mathcal{E}_{1S} = R_{1S}^2(0) \frac{\hbar^2}{2M} a = \frac{2e^6}{\hbar^4} M^2 Z^3 a$$

Распределение вероятности поглощения K-атомом Pb

$$\begin{aligned}R_8 &= 43 \text{ фм} \\ R_7 &= 33 \text{ фм} \\ R_6 &= 24 \text{ фм}\end{aligned}$$

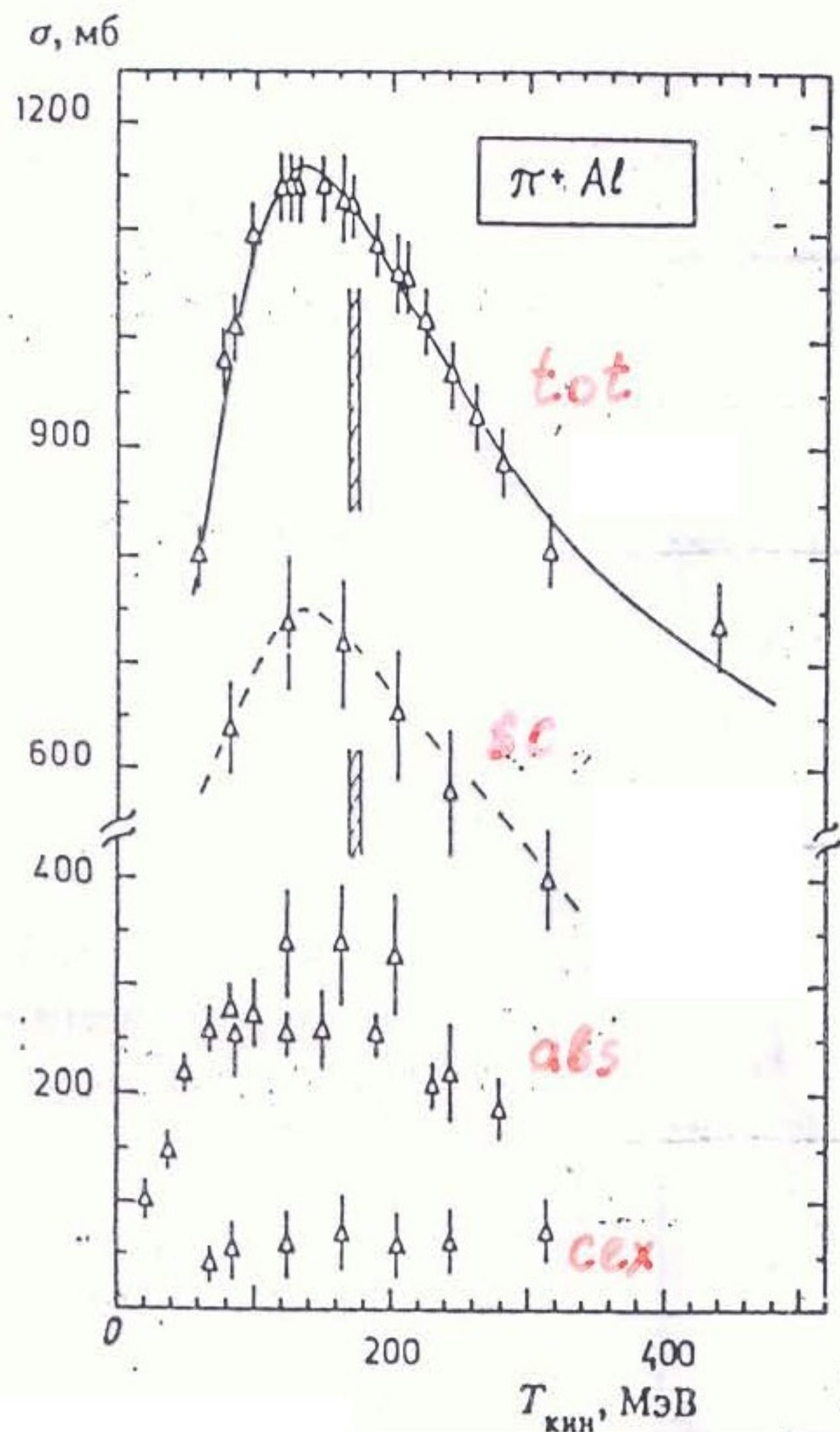


Число импульсов, 10^3

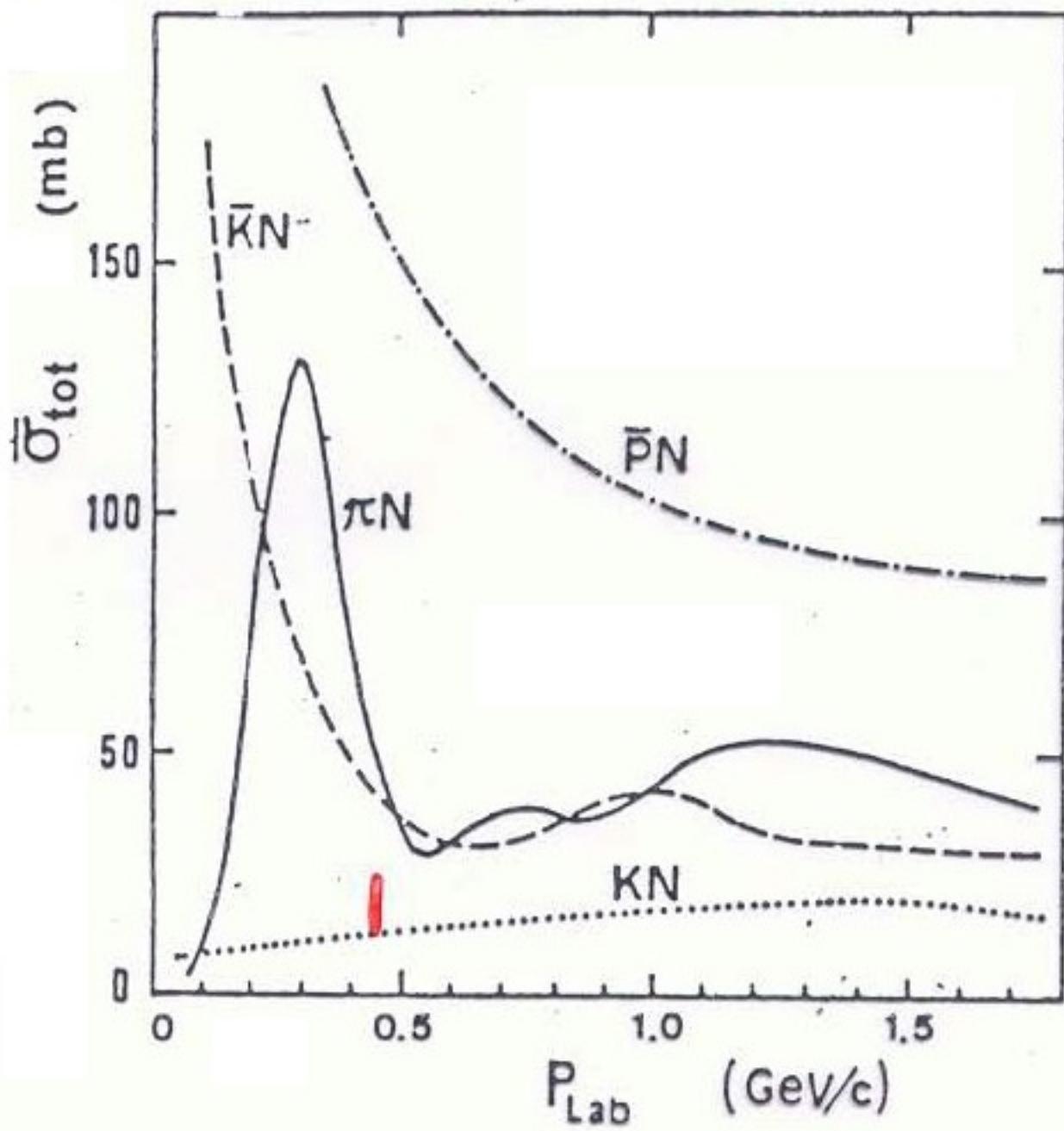


Пион-ядерное взаимодействие

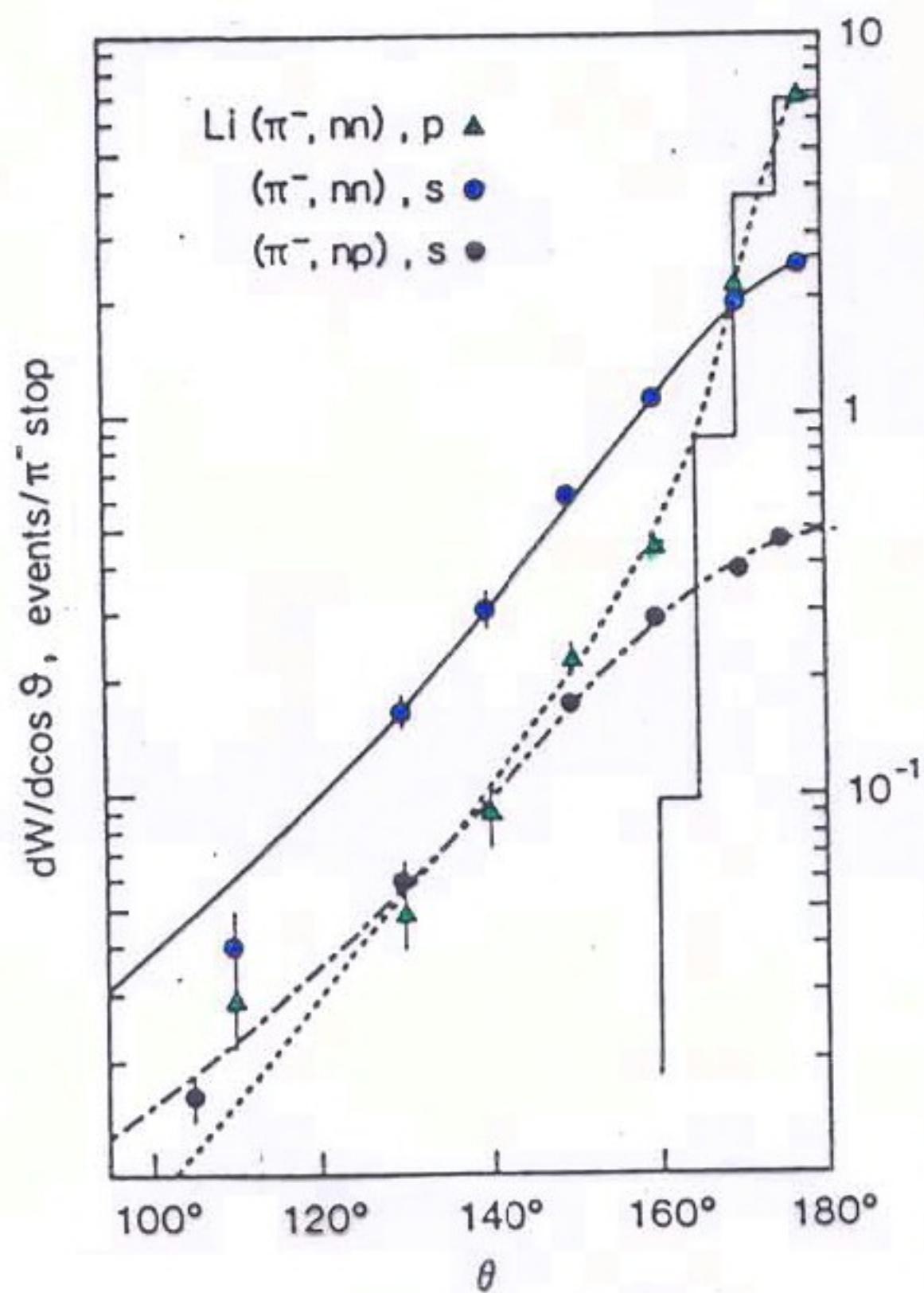
- $\pi + {}^A\text{Z} \rightarrow \pi + {}^A\text{Z}$ } Рассеяние
 $\pi + {}^A\text{Z} \rightarrow \pi + {}^A\text{Z}^*$
 $\pi^+ + {}^A\text{Z} \rightarrow \pi^0 + {}^A(Z+1)$ Перезарядка
 $\pi^+ + {}^A\text{Z} \rightarrow \pi^- + {}^A(Z+2)$ Двойная перезарядка
 $\pi + {}^A\text{Z} \rightarrow {}^{A'}\text{Z}' + N + N\dots$ Поглощение



Полные сечения, усреднение по изосициллу



Поглощение остановившихся пионов на ^6Li



Δ - резонанс



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

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

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

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

$$= \frac{1}{\sqrt{3}} |T = \frac{3}{2}\rangle - \sqrt{\frac{2}{3}} |T = \frac{1}{2}\rangle$$

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

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

$$|\bar{\pi}^0 n\rangle = \langle 10 \frac{1}{2} - \frac{1}{2} | \frac{3}{2} - \frac{1}{2} \rangle |T = \frac{3}{2}\rangle + \langle 10 \frac{1}{2} - \frac{1}{2} | \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \rangle |T = \frac{1}{2}\rangle =$$

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

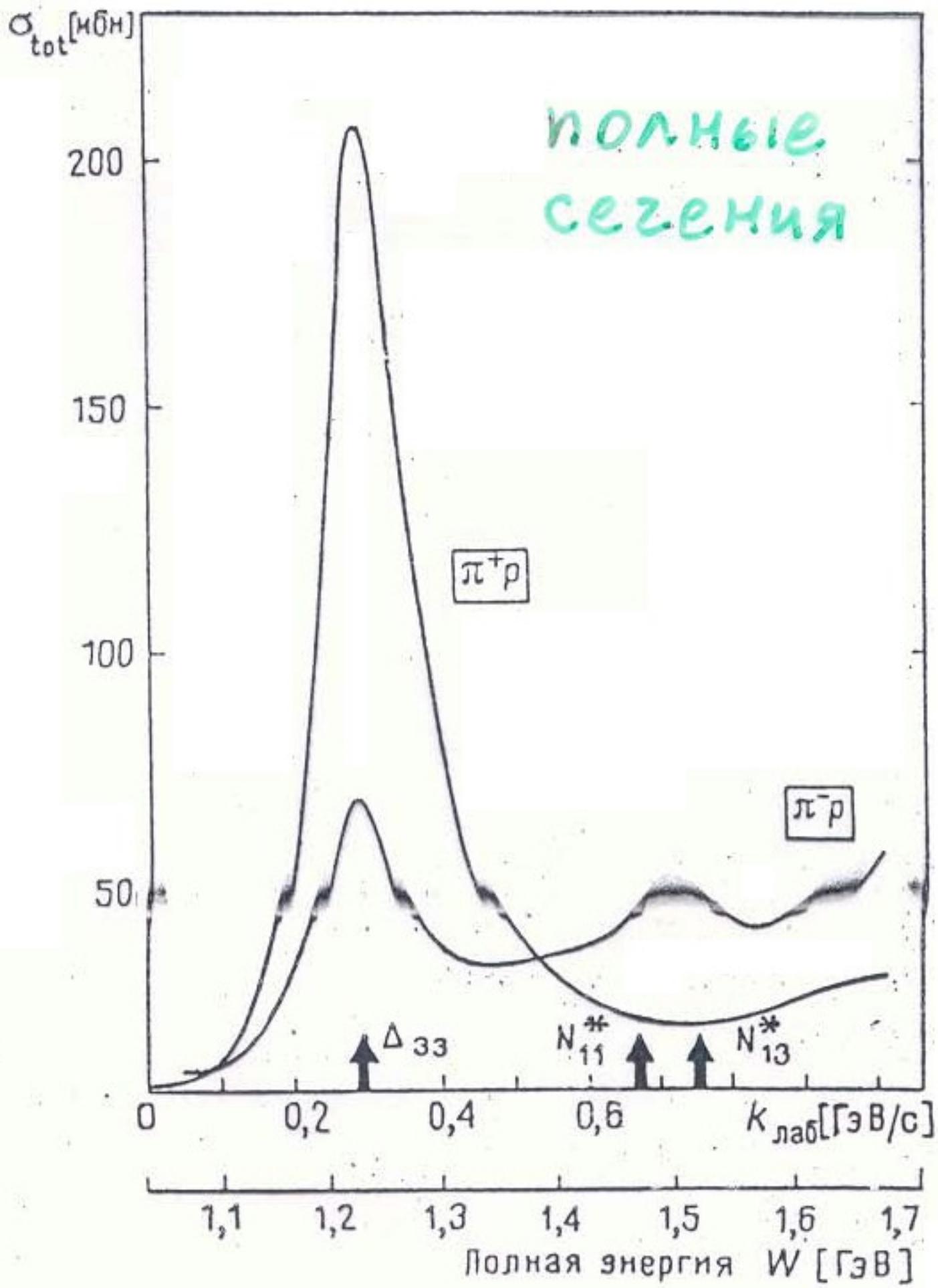
$$\tilde{\sigma}_{ee}(\bar{\pi}^+ p) \sim |\langle T = \frac{3}{2} | F | T = \frac{3}{2} \rangle|^2$$

$$\tilde{\sigma}_{ee}(\bar{\pi}^- p) \sim \frac{1}{9} |K_{T = \frac{3}{2}} |F| T = \frac{3}{2} \rangle|^2$$

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

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

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



Амплитуда πN -рассеяния (усредненная по спину нуклона)

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

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

Оптический пион-ядерный потенциал

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

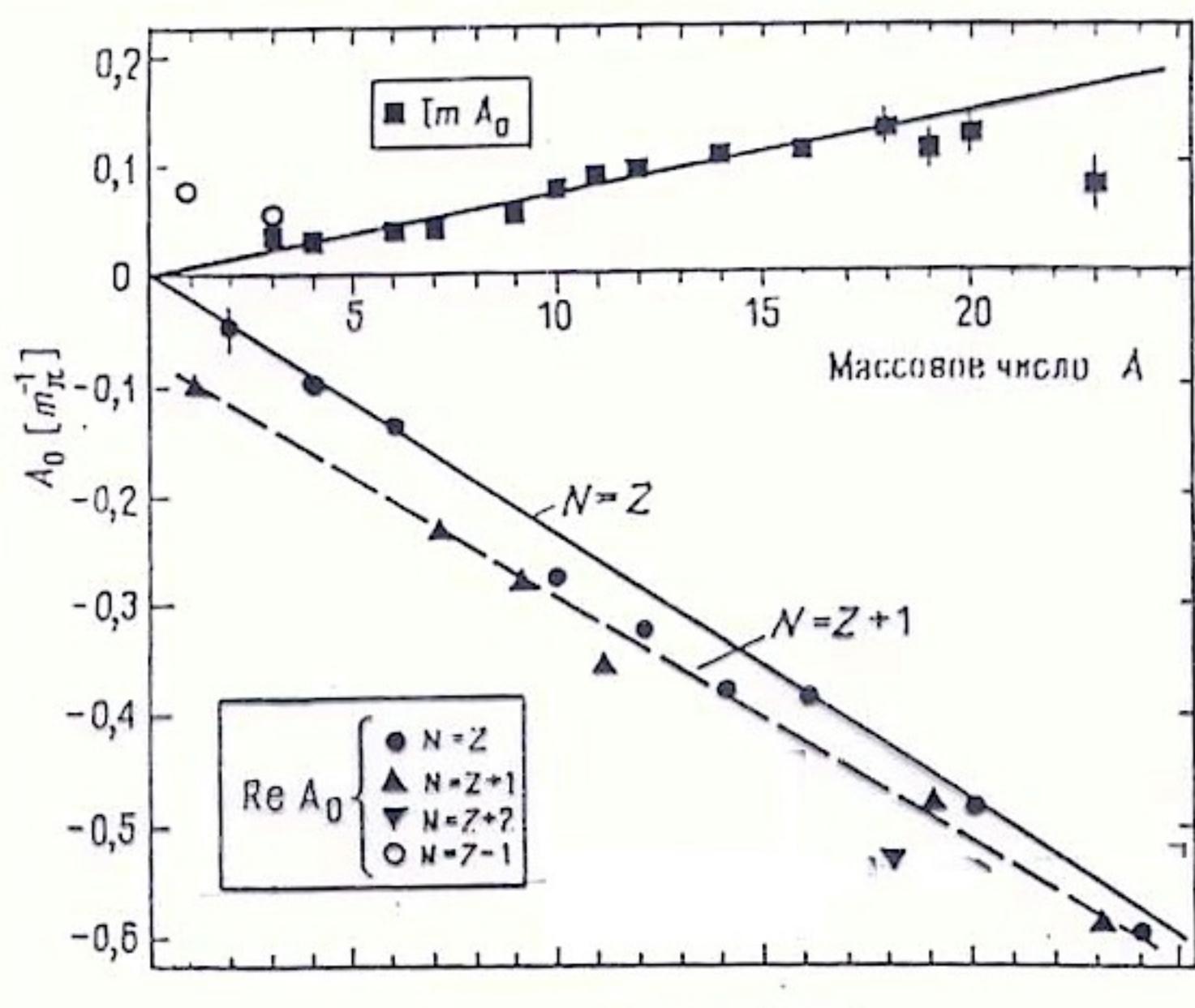
$$\rho(z) = \rho_p(z) + \rho_n(z) \sim A \bar{\rho}(z)$$

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

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

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

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



$\bar{\pi}^- p$

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

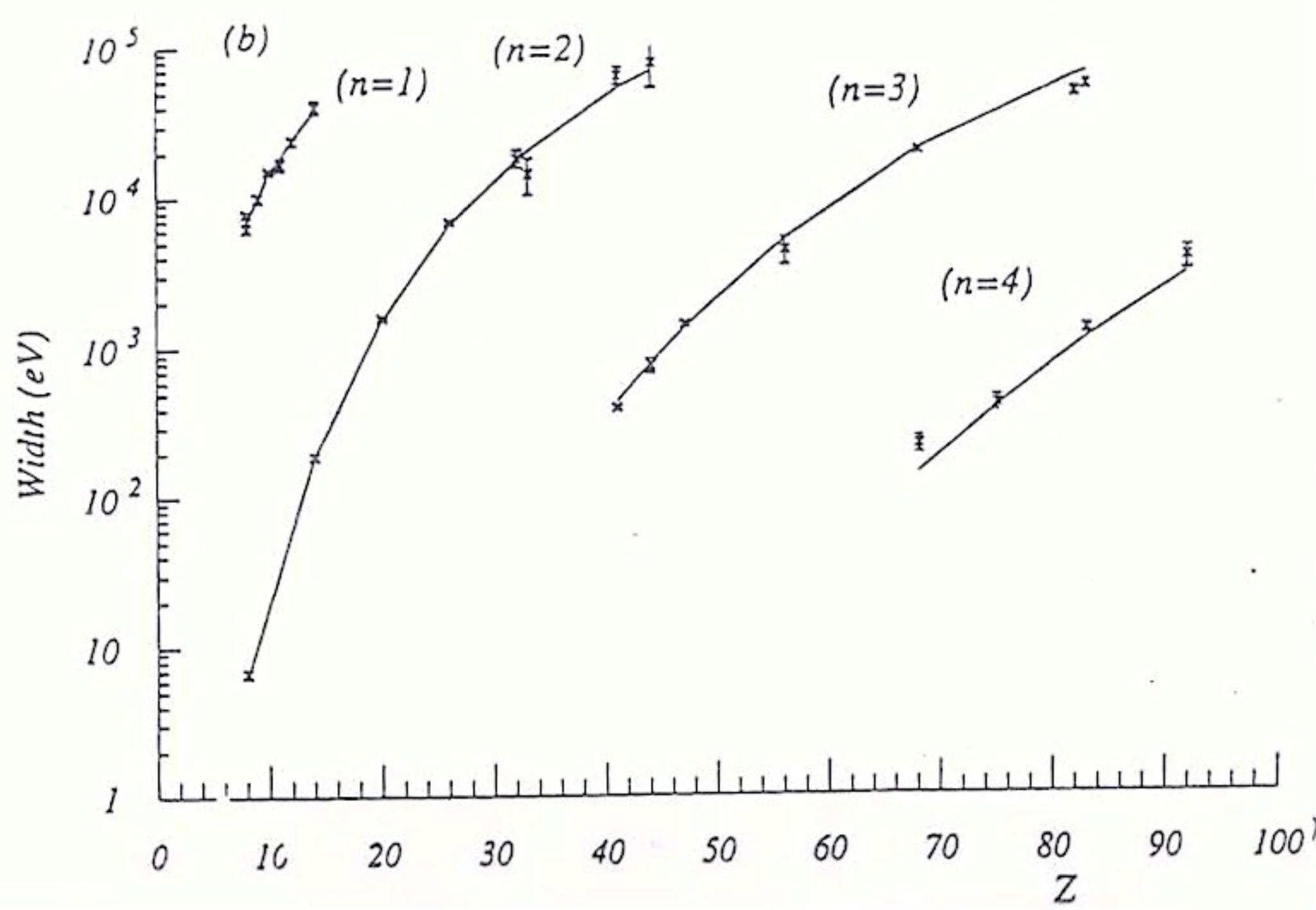
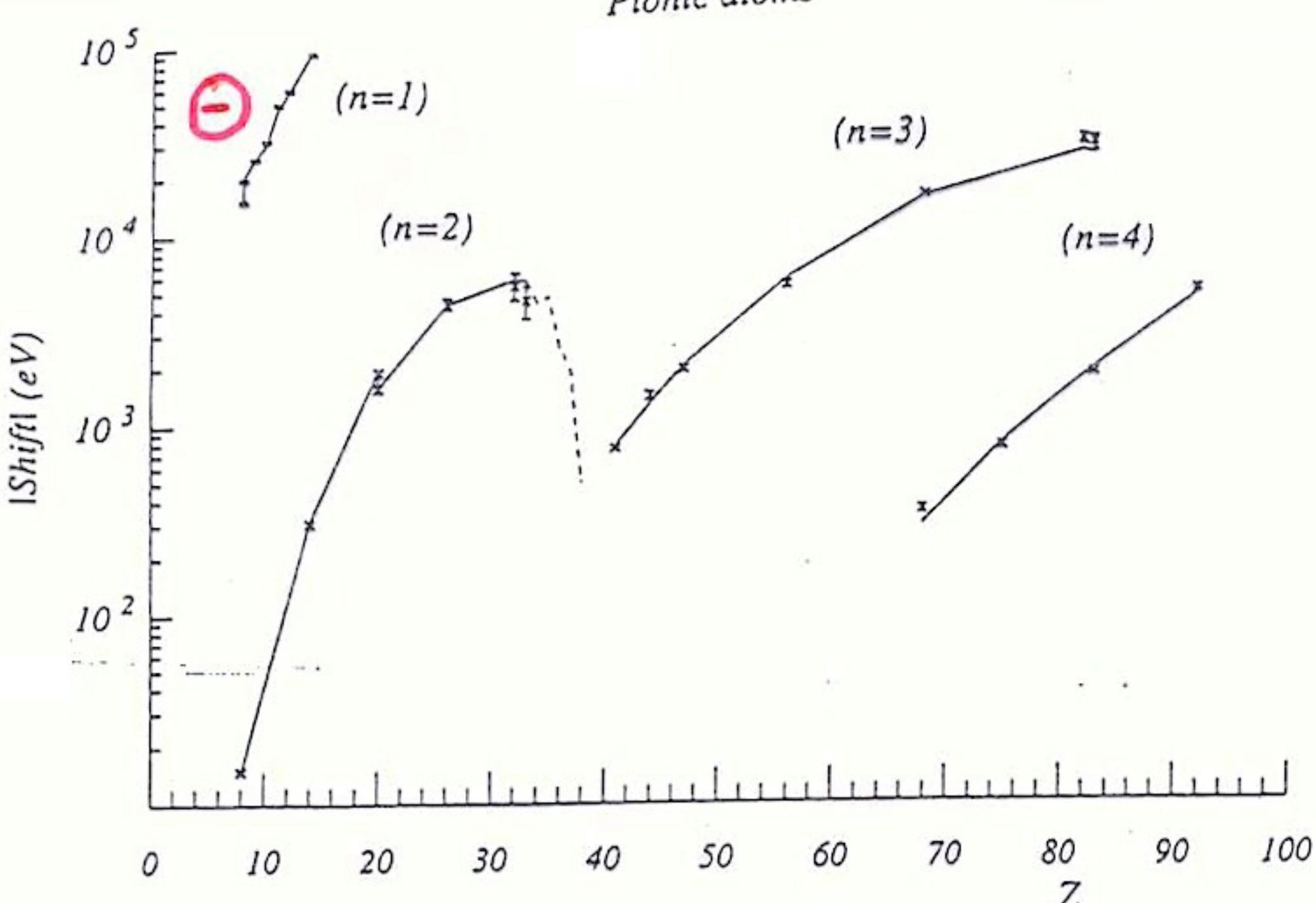
$$\Gamma_{1S} = 0.87 \pm 0.08 \text{ eV}$$

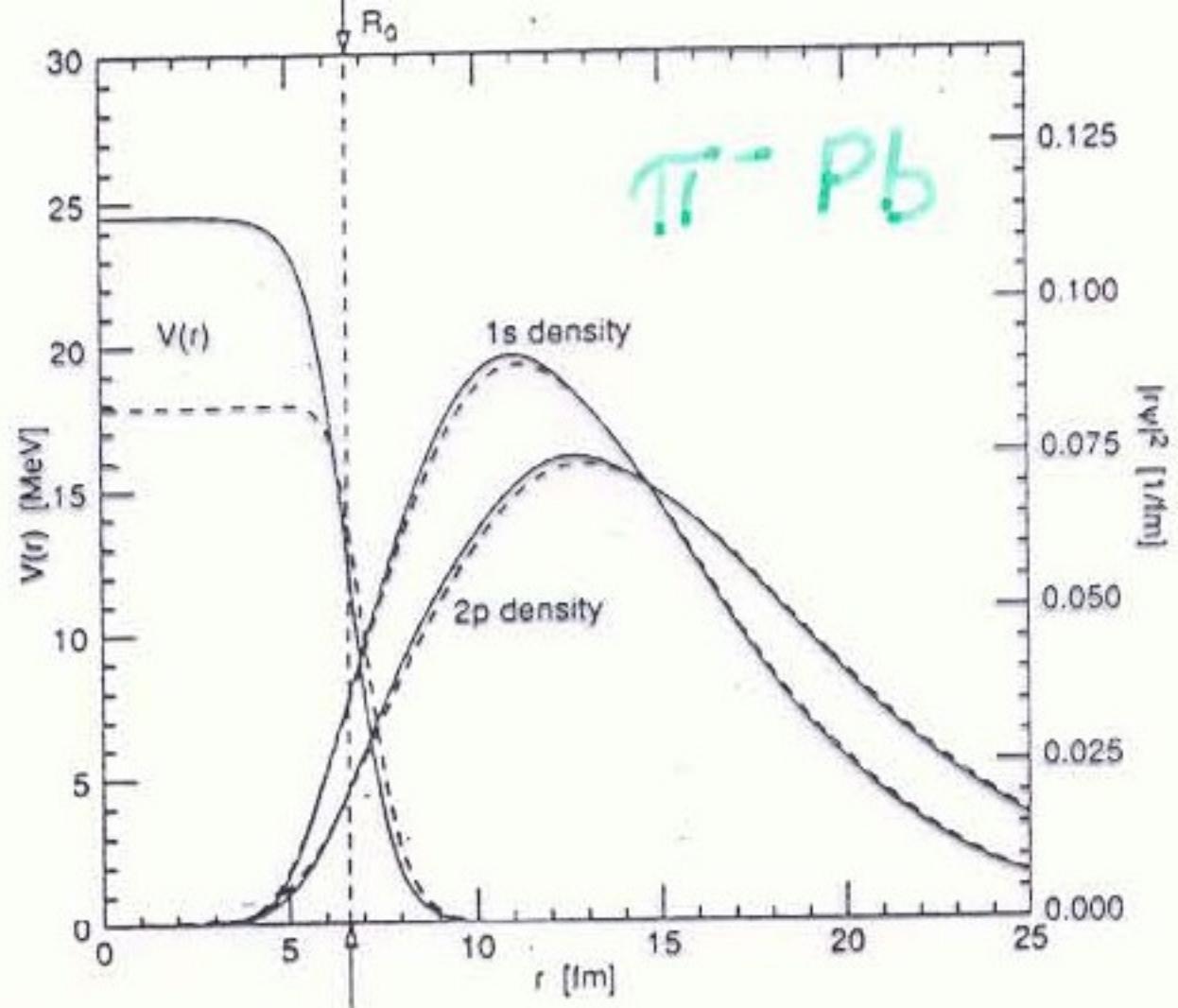
$\bar{\pi}^- d$

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

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

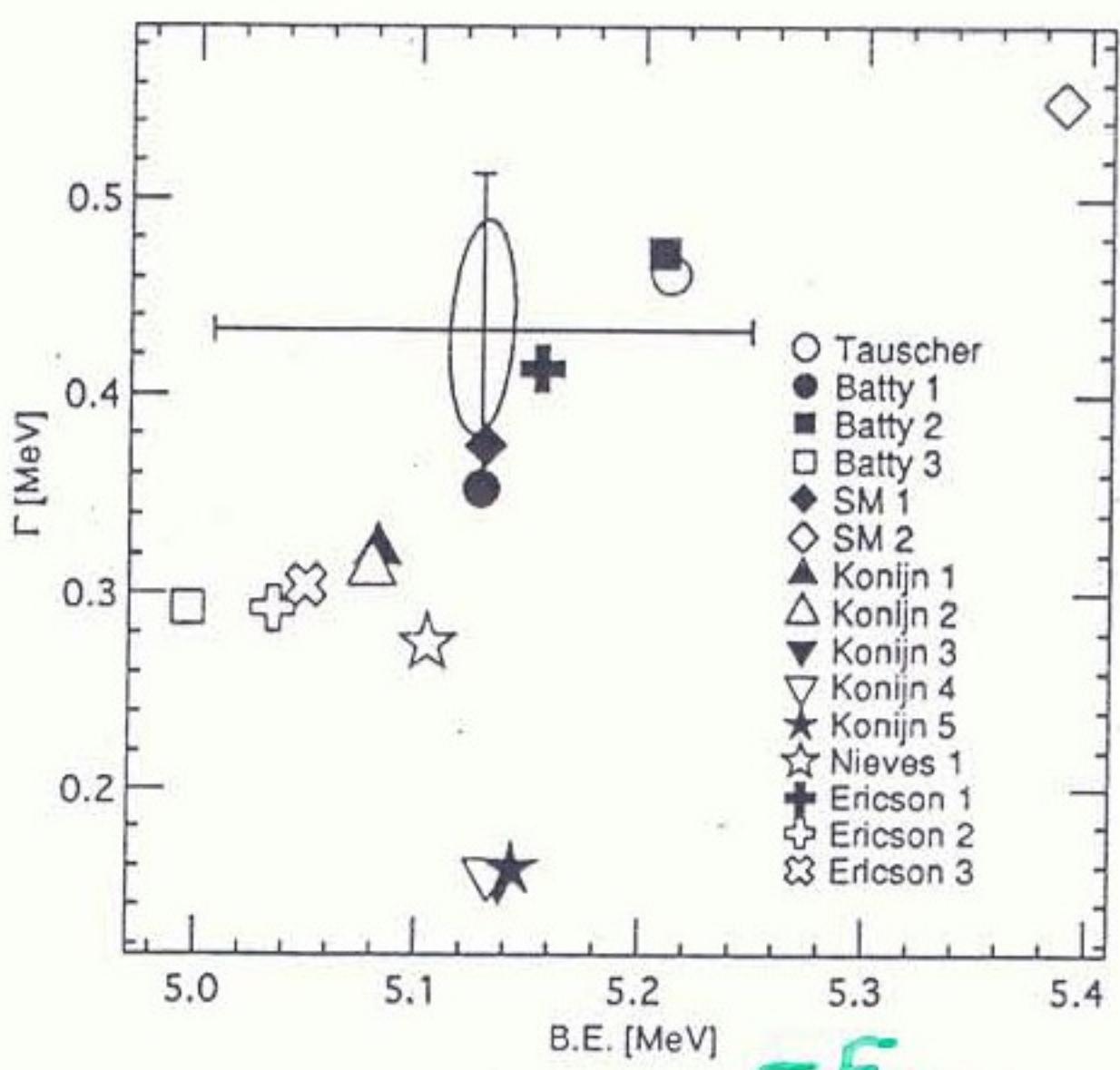
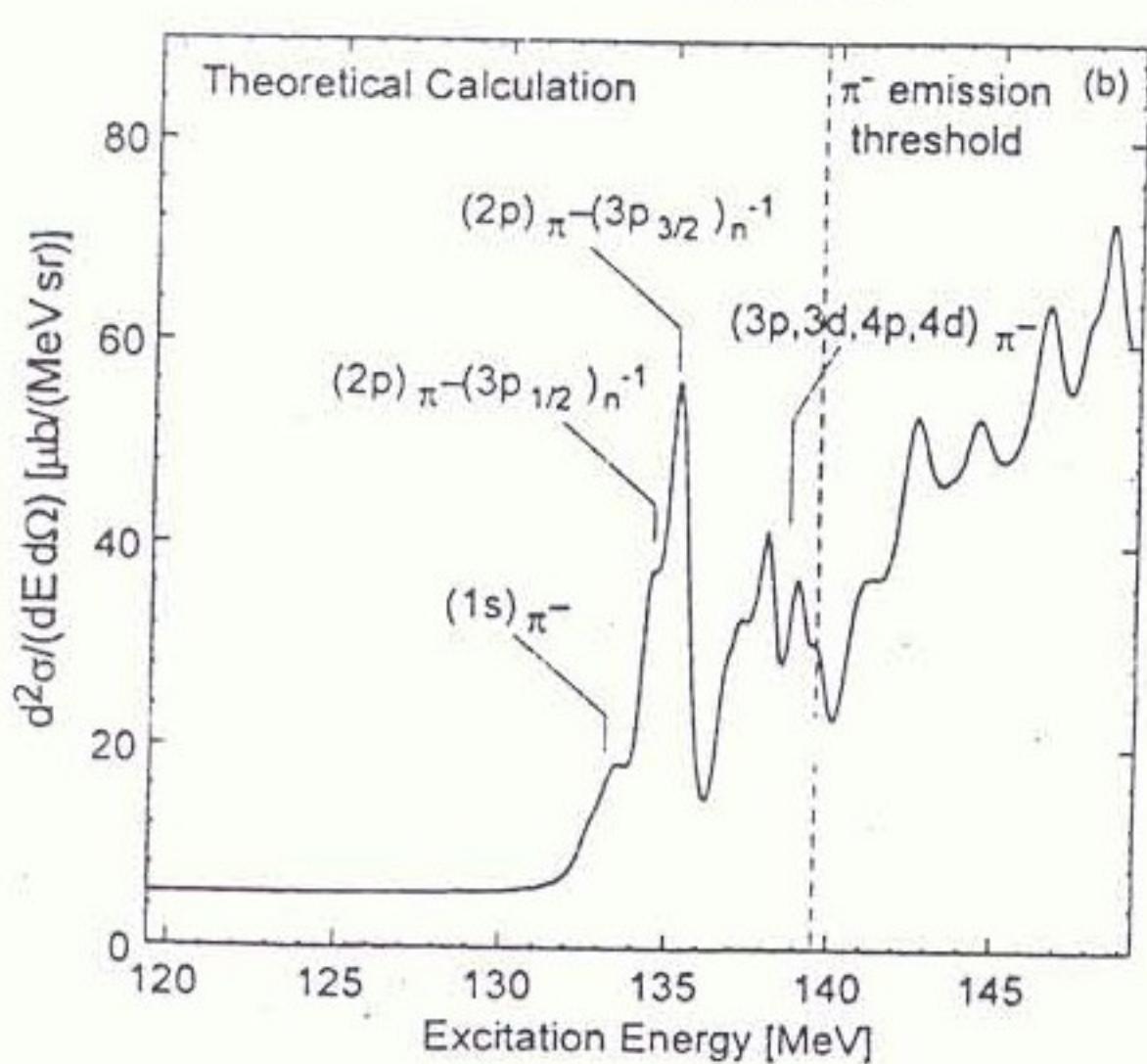
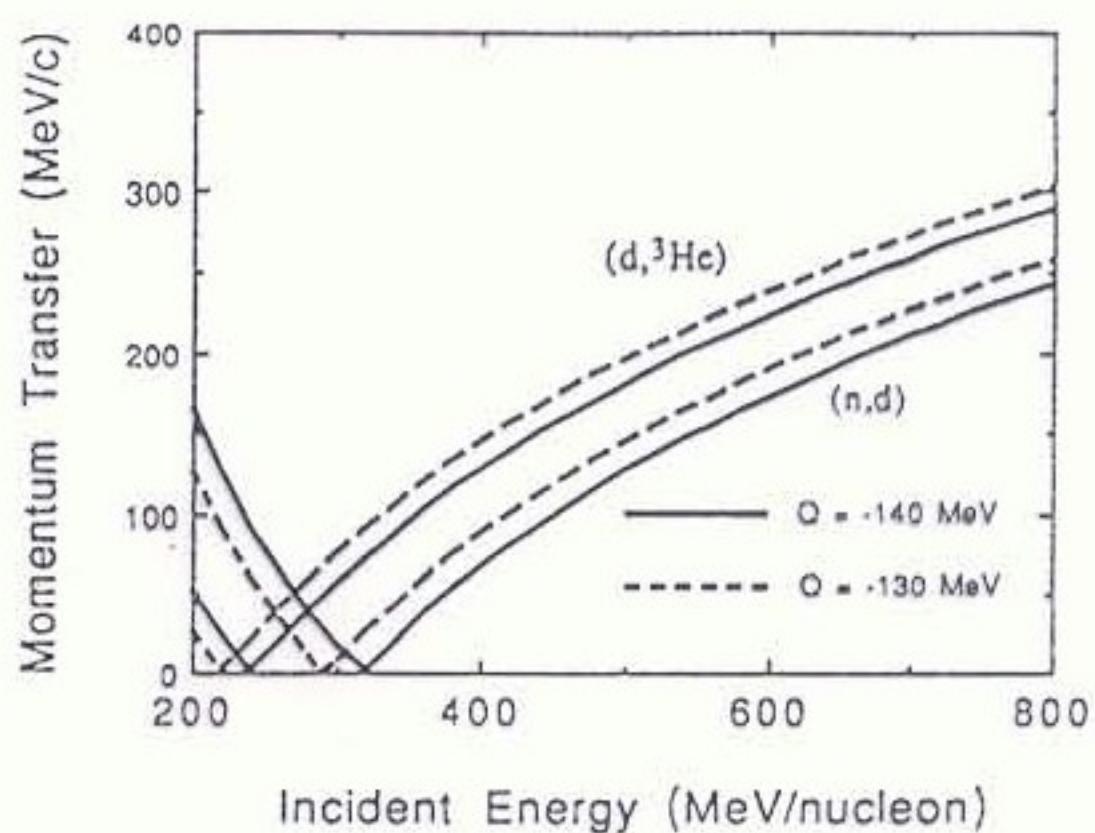
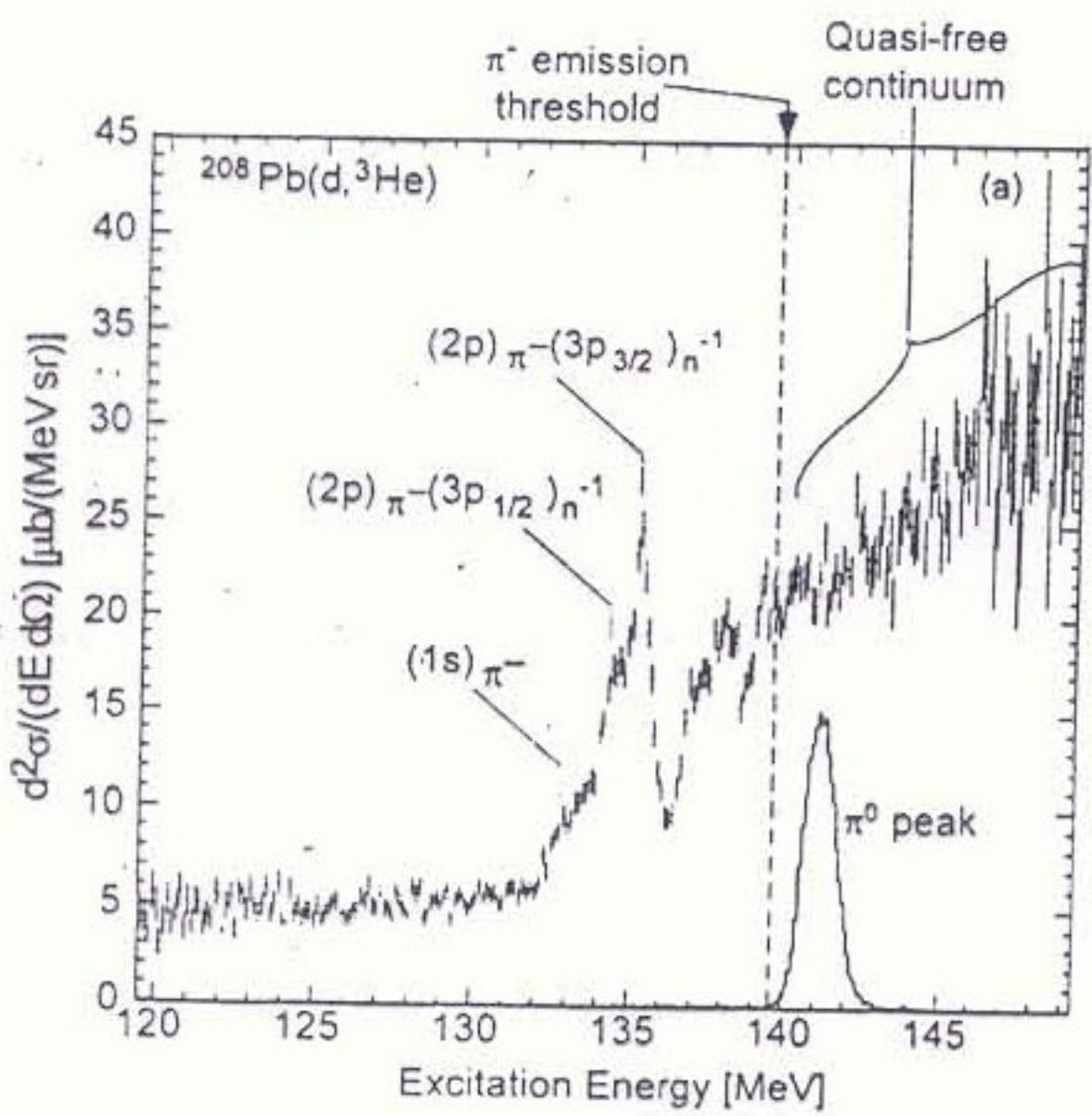
Pionic atoms





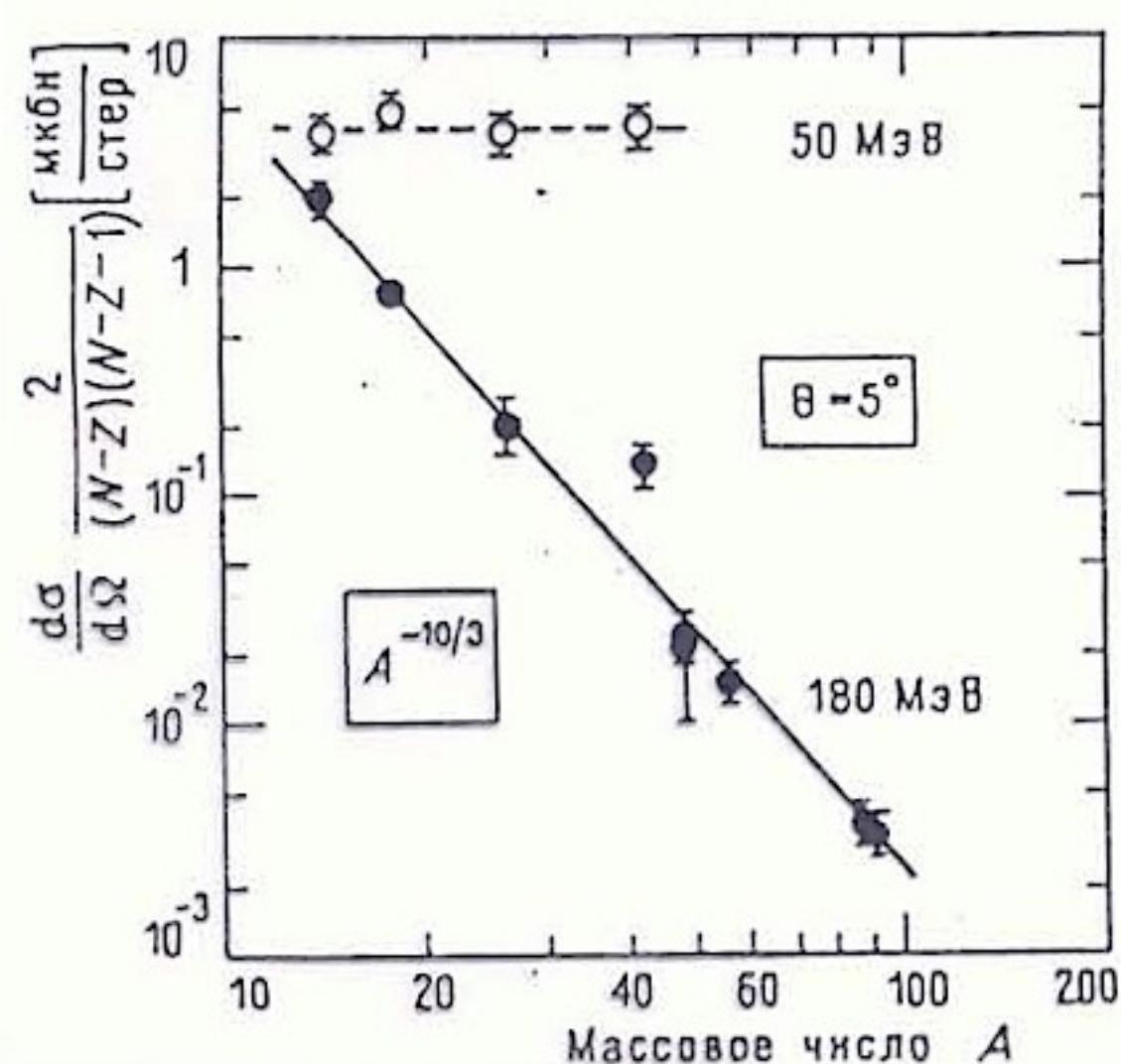
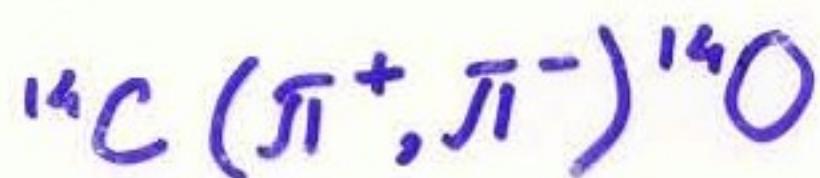
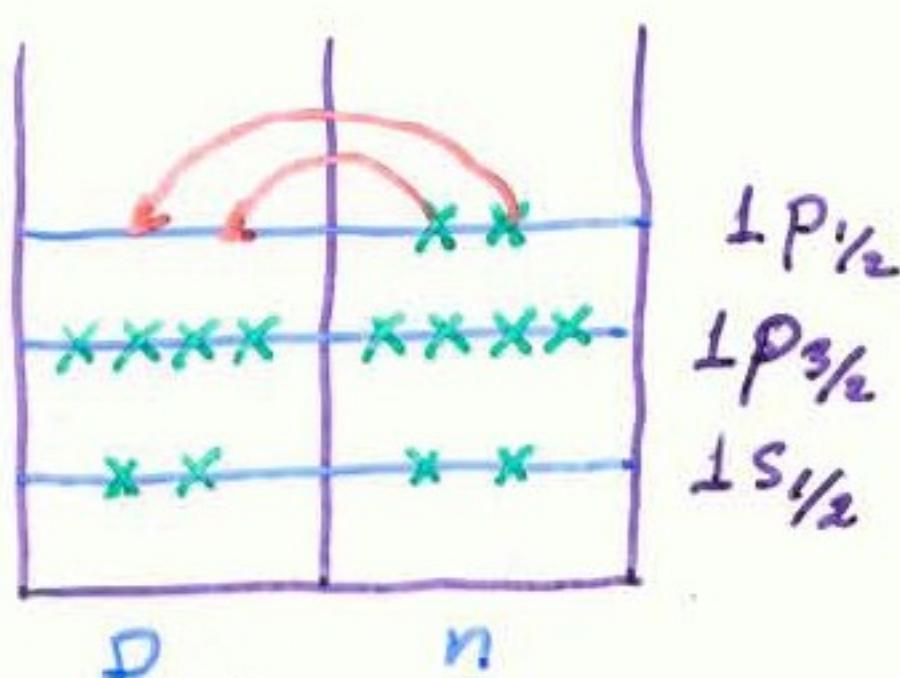
$^{208}\text{Pb}(d, ^3\text{He})$

$T_d = 600 \text{ MeV}$

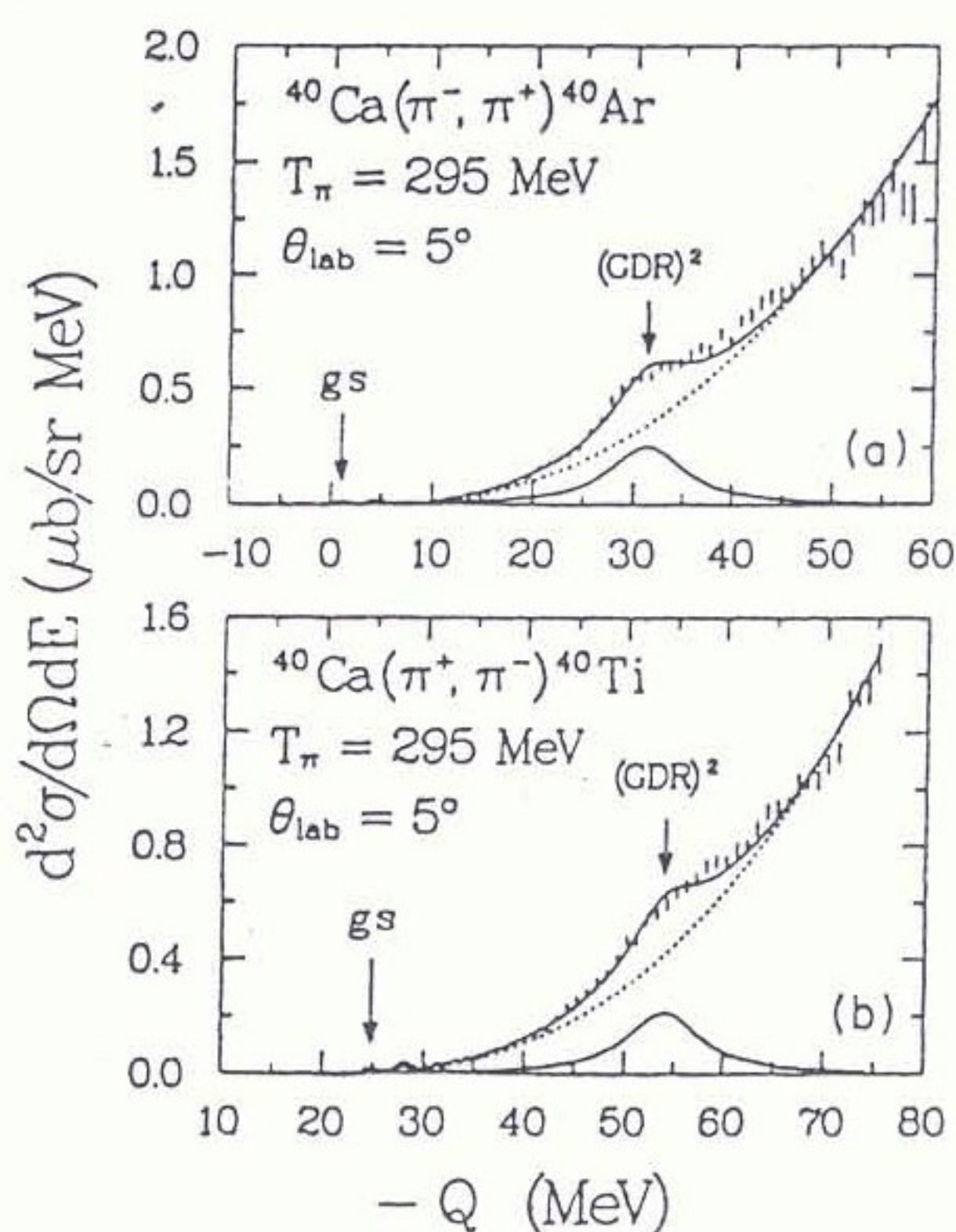
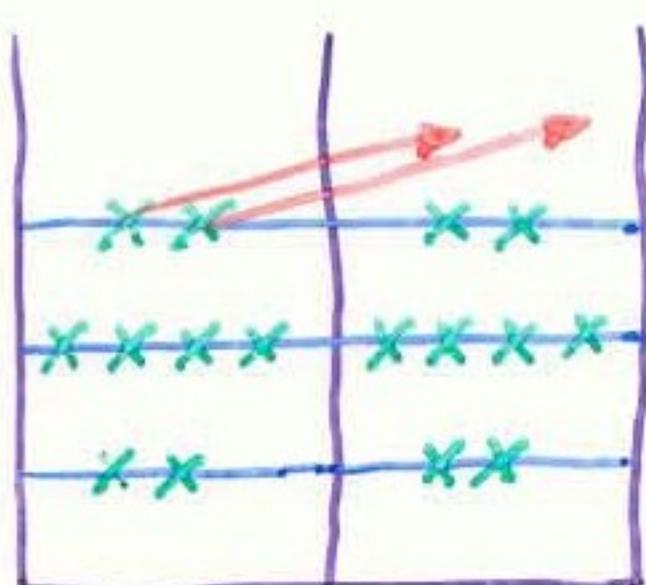
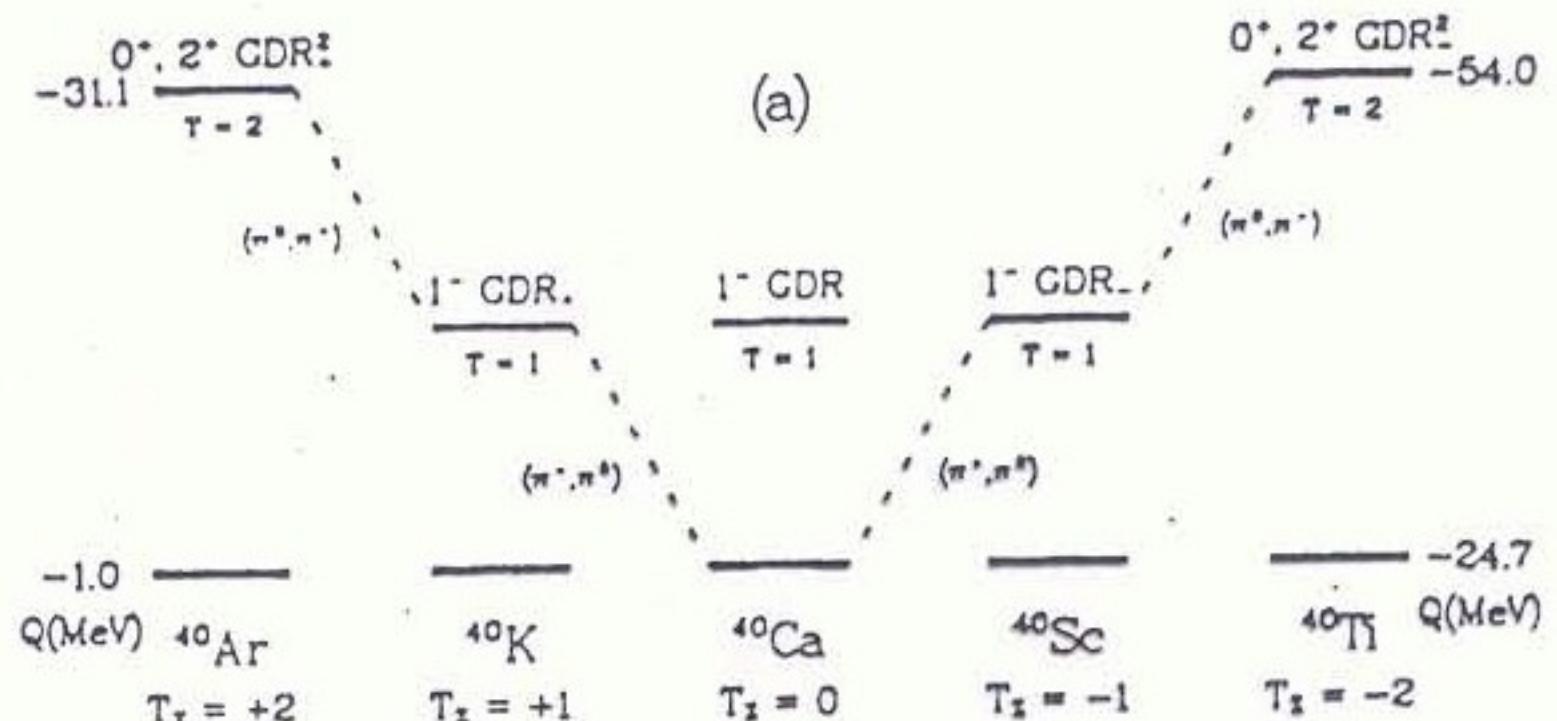


Двойная первая зарядка пионов

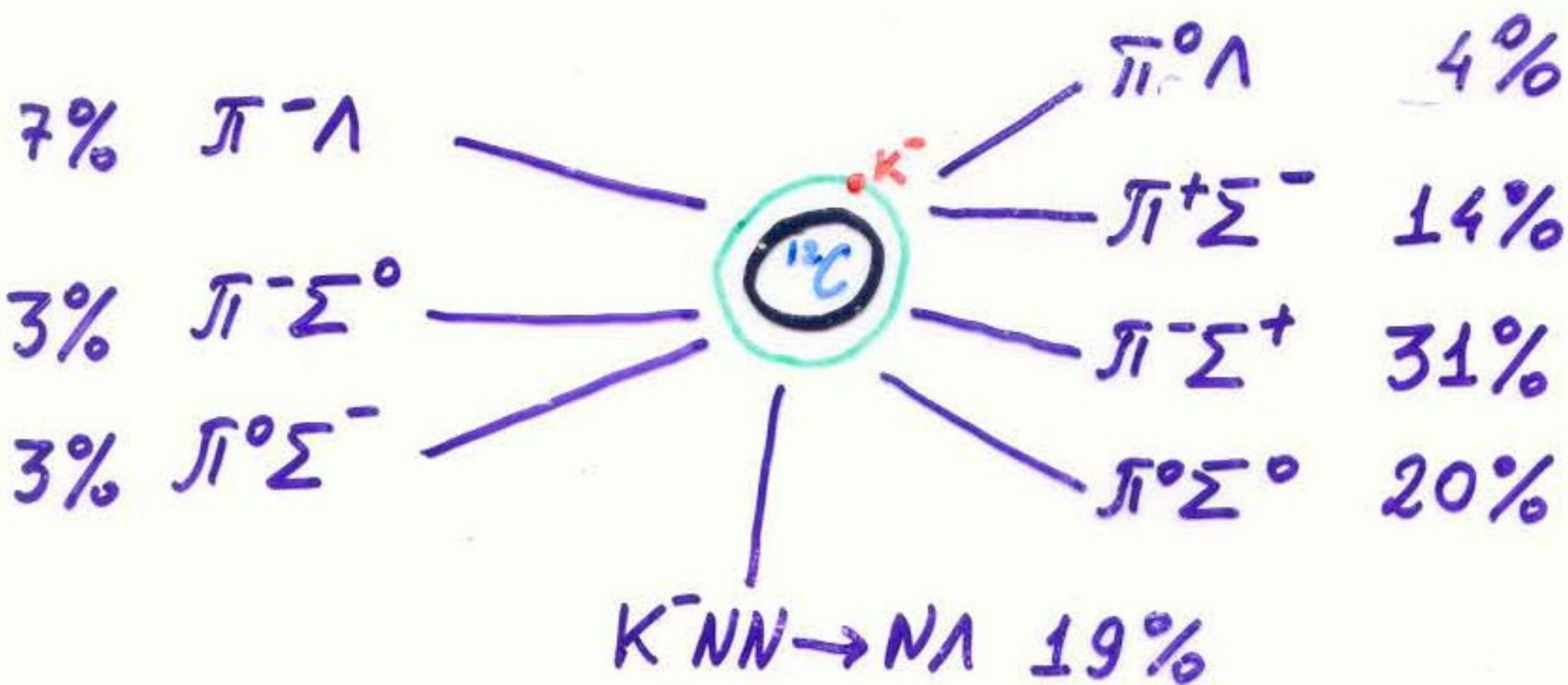
Аналоговое состояние



Переходы с изменением изоспина



Каналы поглощения K^- -мезонов ядром



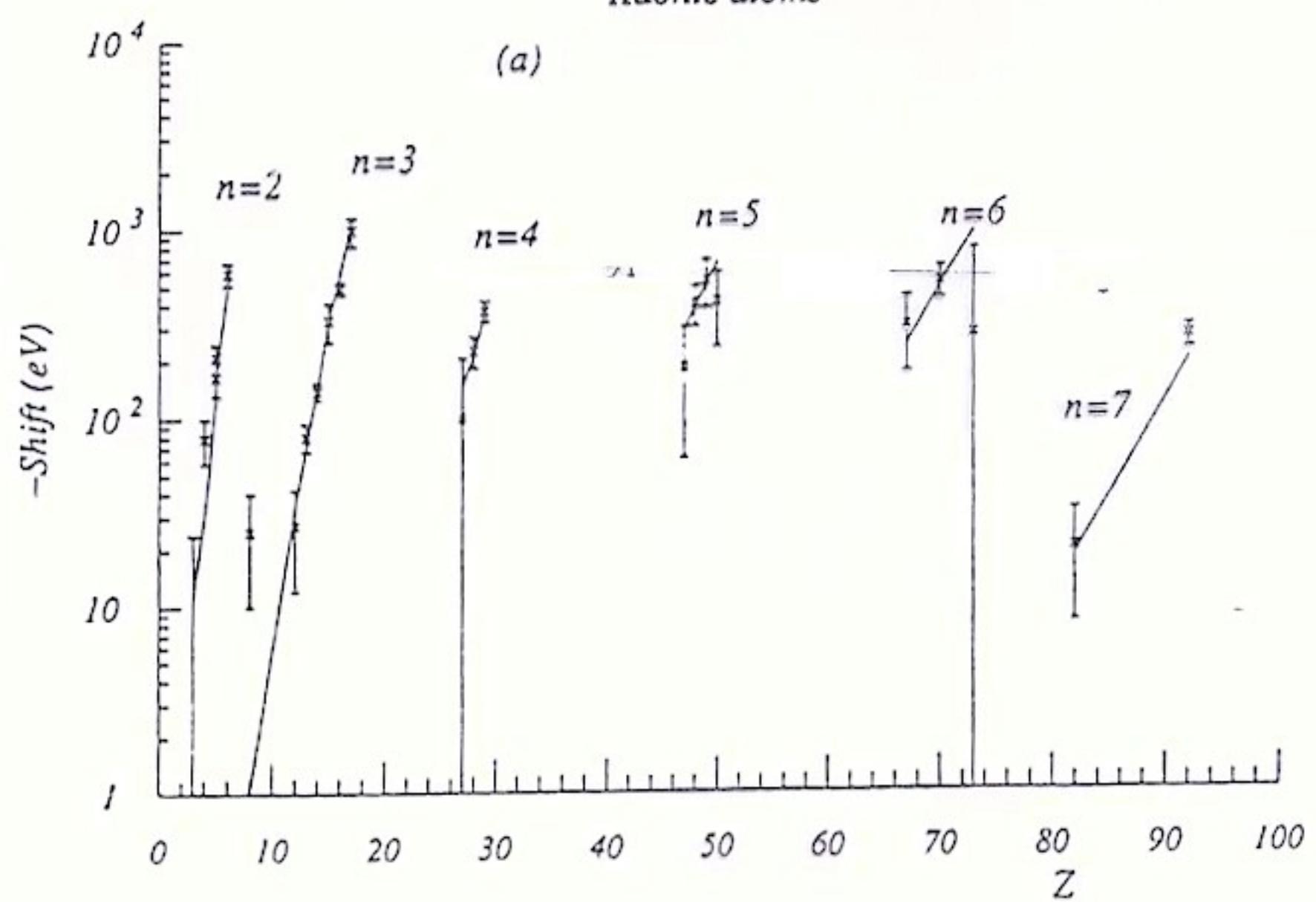
$\Lambda(1405)$

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

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

$$\frac{R_{pn}(Ag, Bz)}{R_{pn}(C, N, O)} \sim \frac{1}{5}$$

Kaonic atoms



$\kappa^- p$

$$\Delta E_{1s} = 320 \pm 70 \text{ eV}$$

$$\Gamma_{1s} = 400 \pm 300 \text{ eB}$$

2003

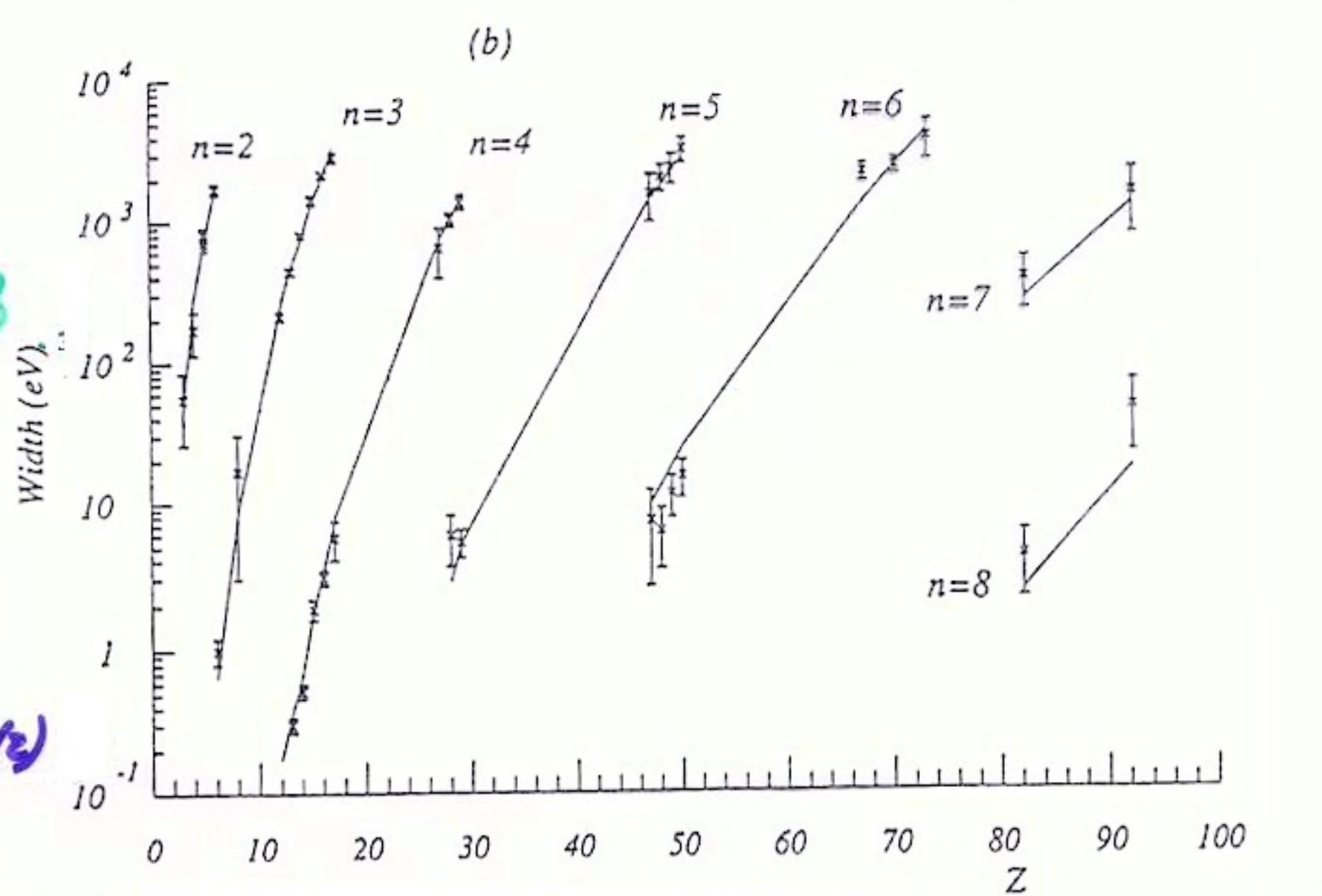
$$\Delta E_{1s} = -175 \pm 26 \pm 15 \text{ eB}$$

$$\Gamma_{1s} = 120 \pm 90 \pm 15 \text{ eB}$$

$$2005 \quad \Delta E_{1s} = -193 \pm 37 \pm 6 \text{ eB}$$

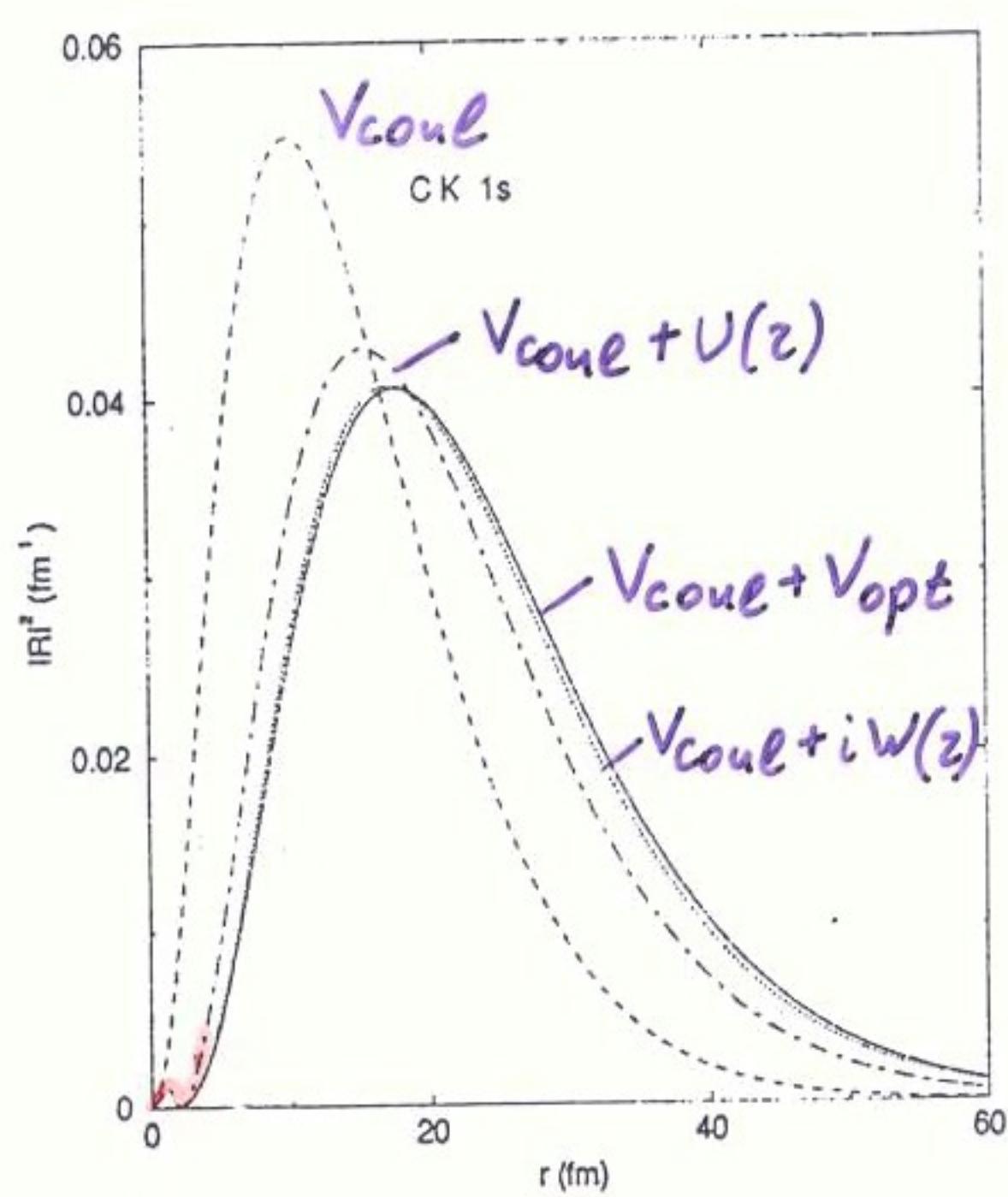
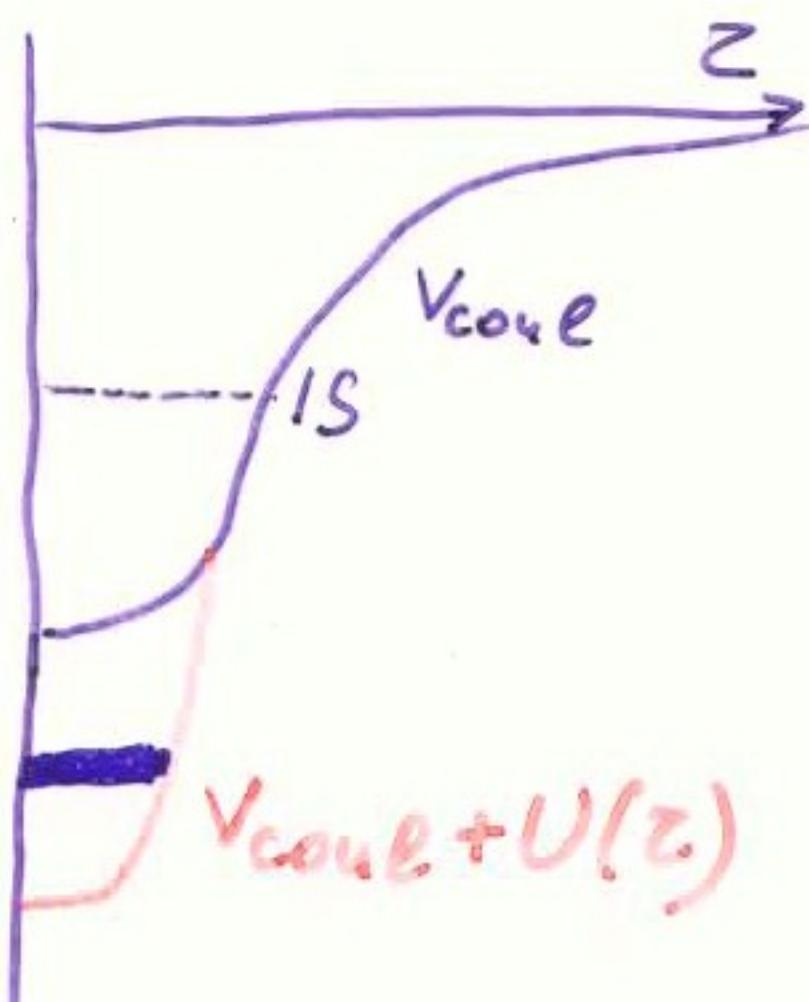
$$\Gamma_{1s} = 249 \pm 111 \pm 30 \text{ eB}$$

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

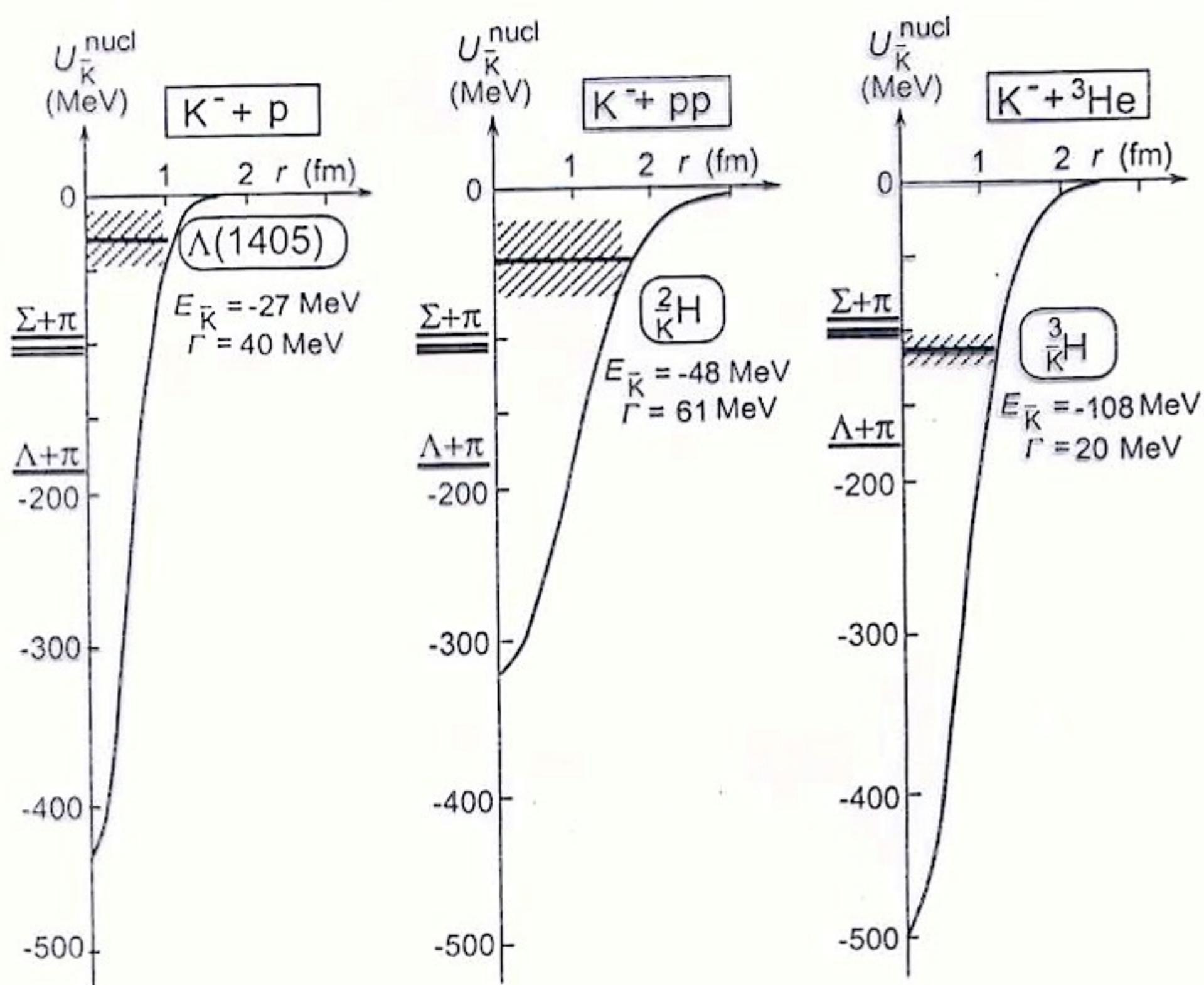


$$U(z) = B_0 \rho(z) + B_1 \delta \rho(z)$$

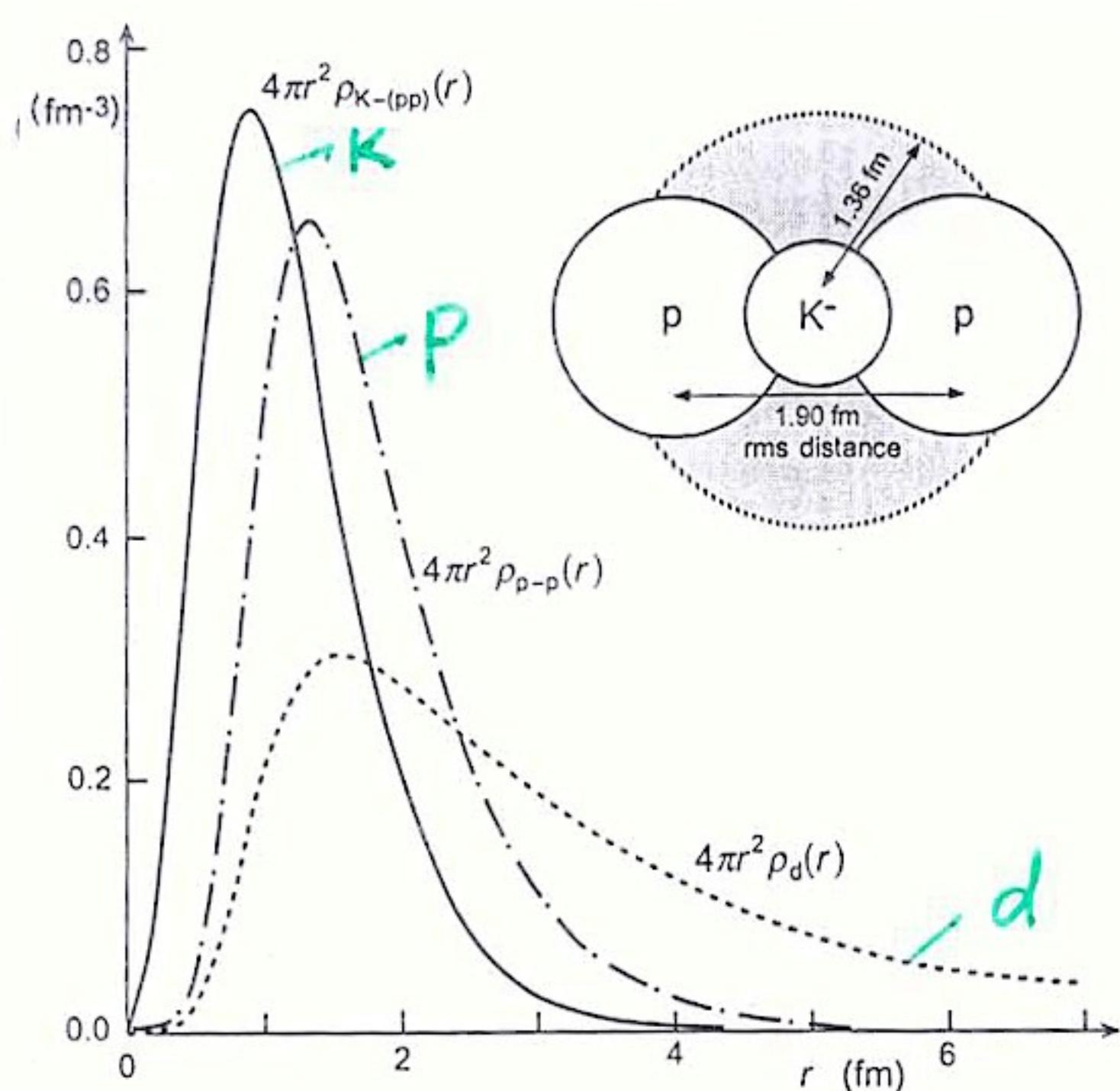
$$W(z) = D_0 \rho(z) + D_1 \delta \rho(z)$$



Каонные ядра



Сжатие ядра Высокие плотности



2003

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

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

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

Нейтральные каоны: осциляции и рекуперация

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

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

$$CP = +1$$

$$CP = -1$$

Начальное состояние ($t=0$)

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

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

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

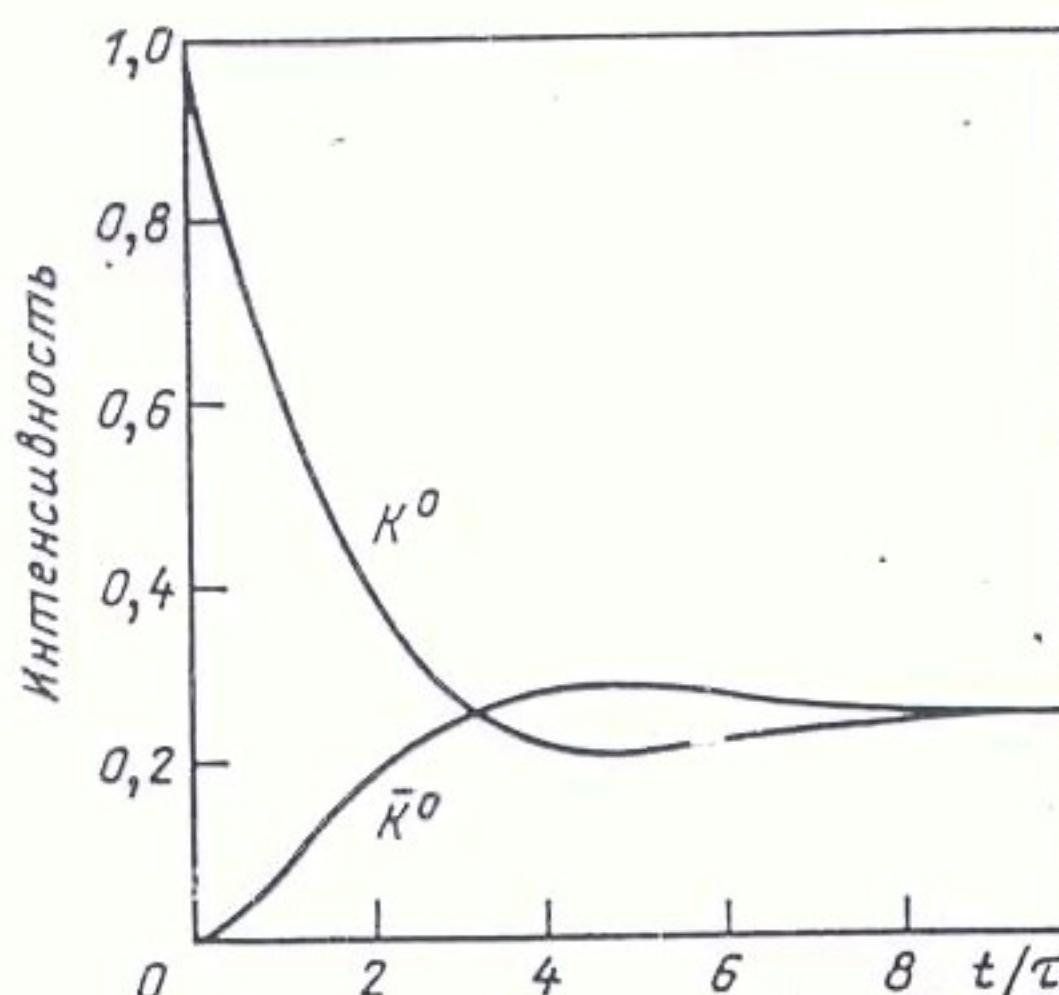
$$\langle K_0 | K(t) \rangle = \frac{1}{2} e^{im_1 t} e^{-\frac{\Gamma_1 t}{2}} + \frac{1}{2} e^{im_2 t} e^{-\frac{\Gamma_2 t}{2}}$$

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

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

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

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



Регенерация коротко живущих каонов

$t \gg \Sigma_1$

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

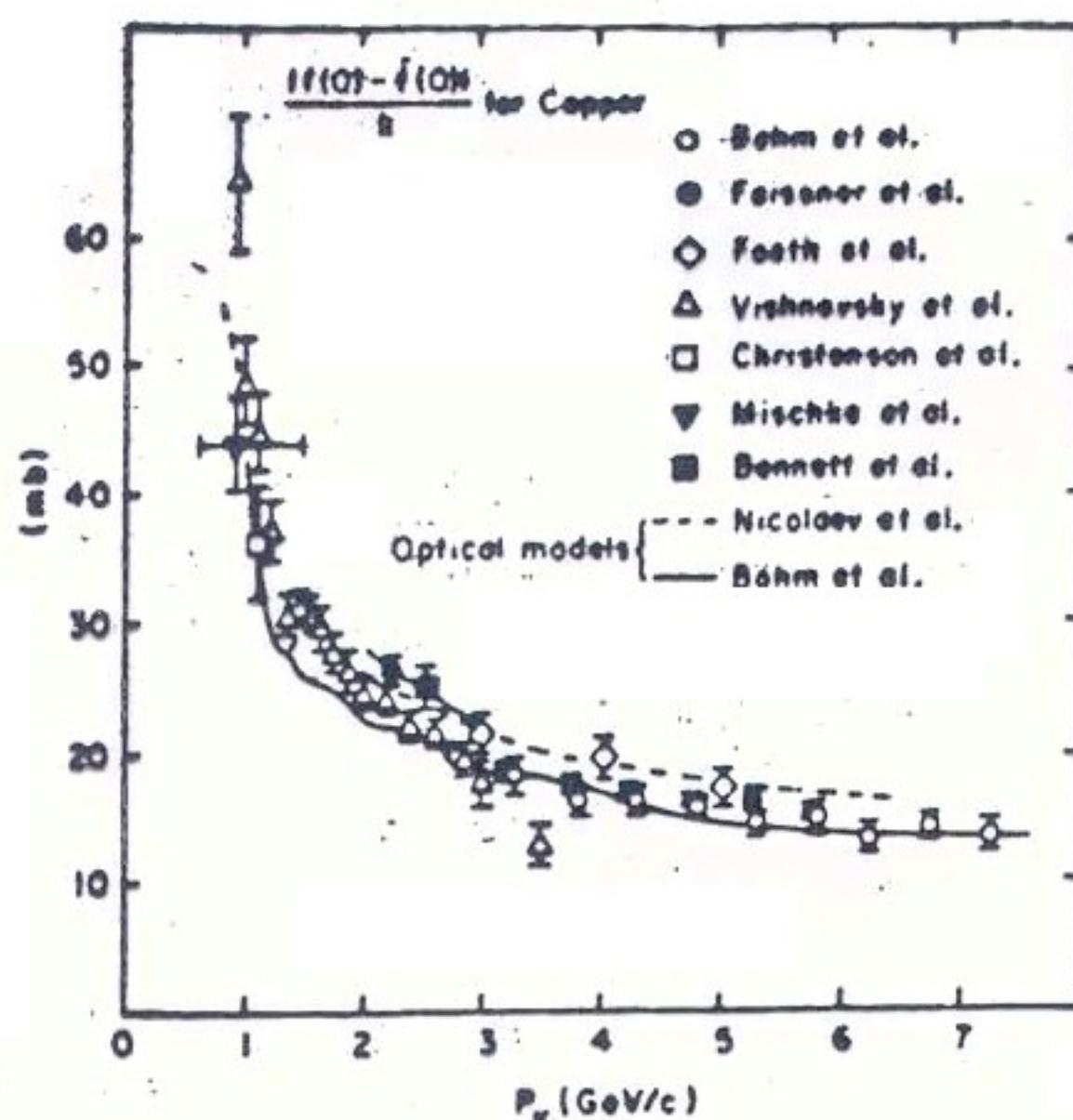
После взаимодействия с нуклоном или ядром

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

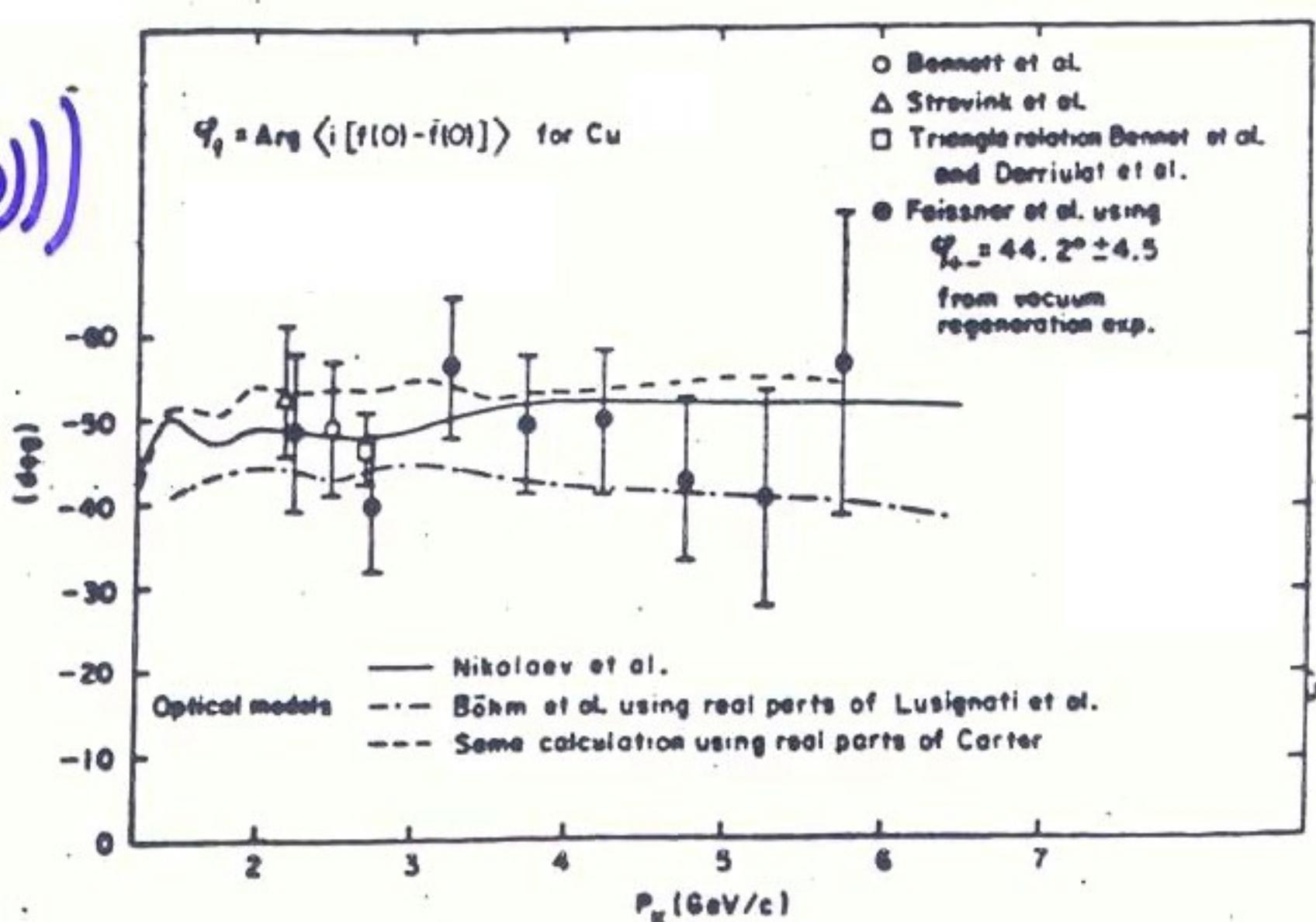
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} (K_2 \rightarrow K_1) = \frac{1}{4} |f(\theta) - \bar{f}(\theta)|^2$$



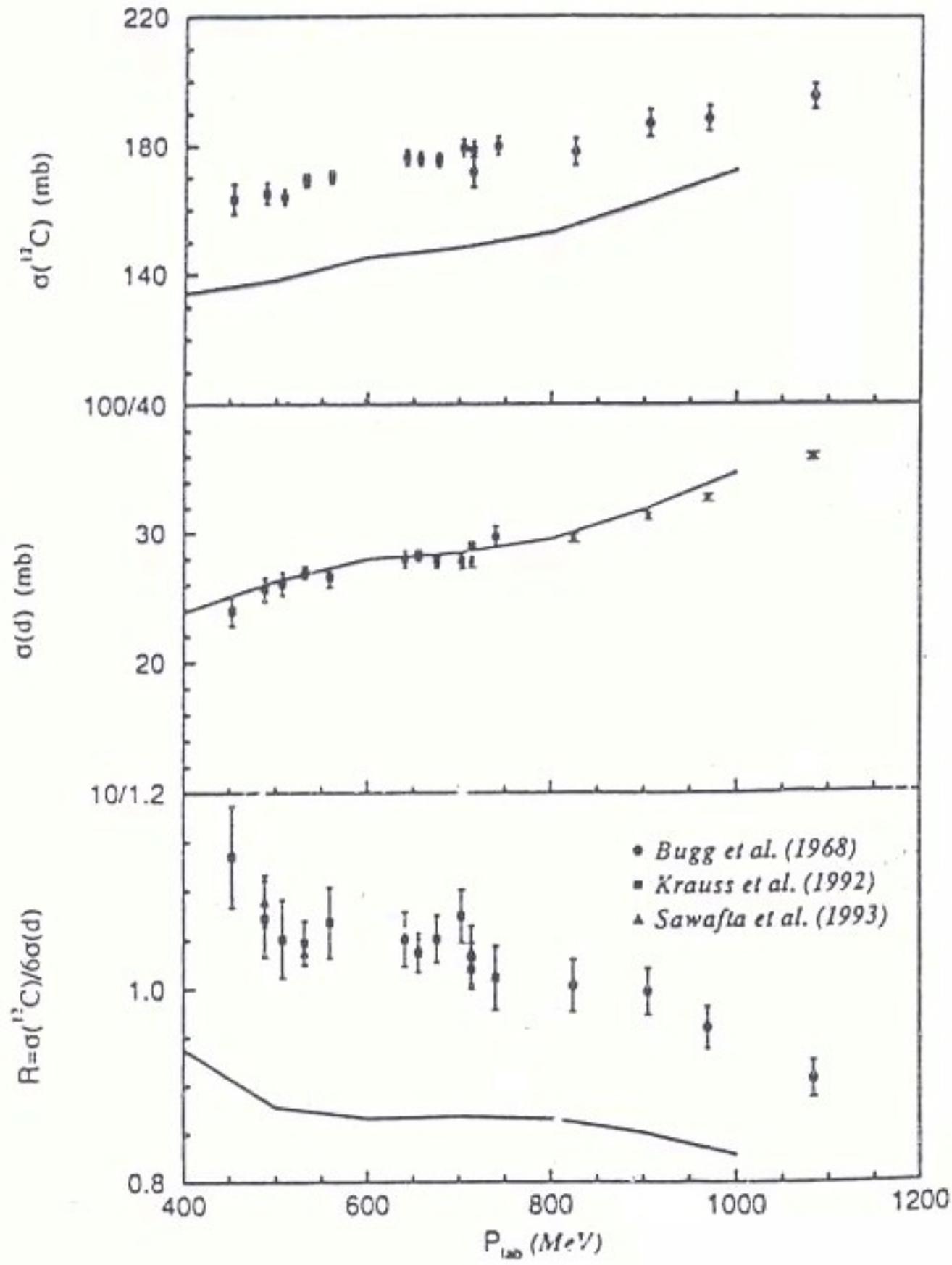
$$\frac{|f(0) - \bar{f}(0)|}{\kappa}$$



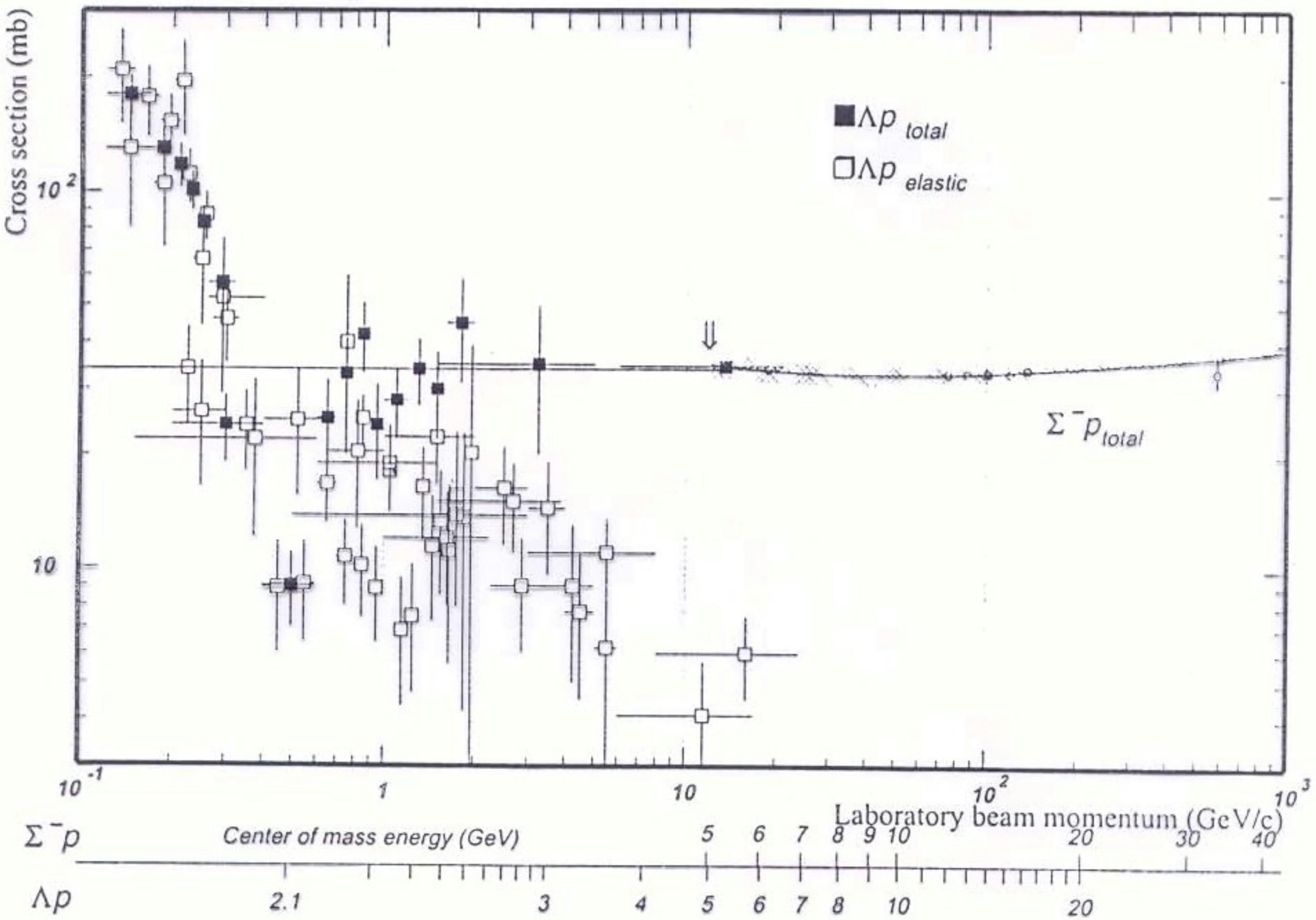
$$\text{Arg}(i(f(0) - \bar{f}(0)))$$



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



Сечения гиперон-нуклонного взаимодействия



Энергии связи Λ -гиперонов

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

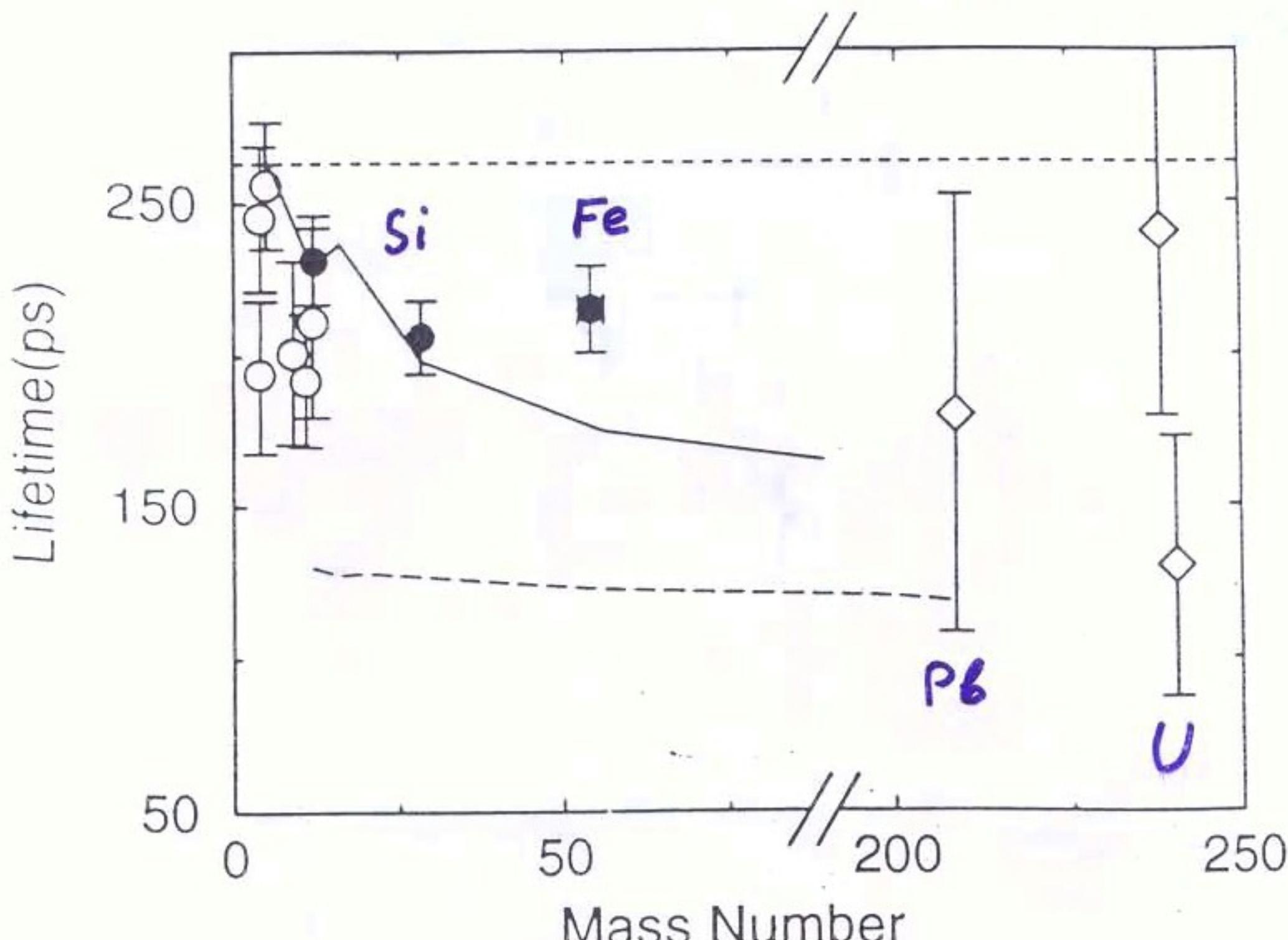
$$= M(^AZ) + M_\Lambda - M(^{A+1}\Lambda Z)$$

Гиперядро

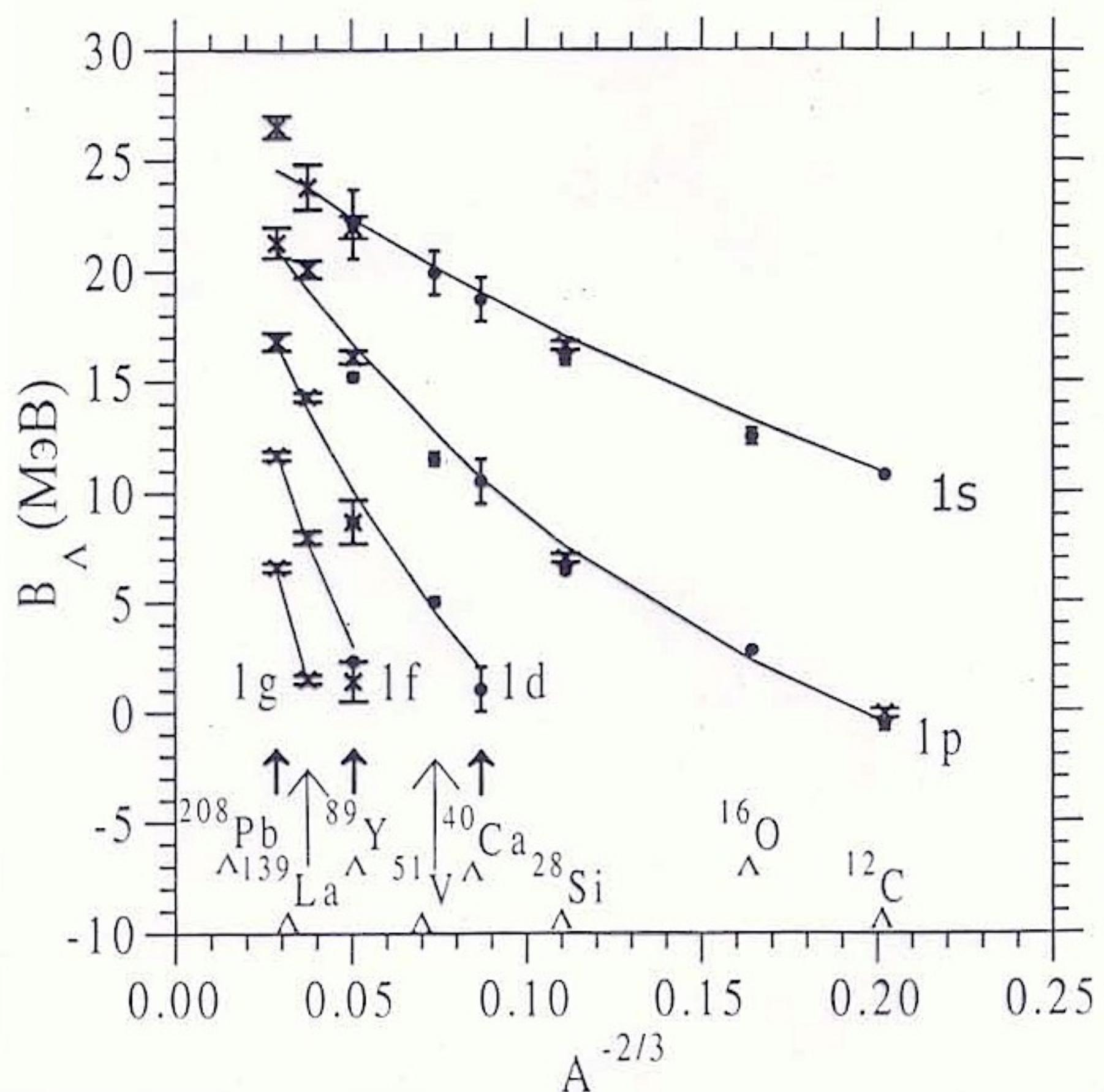
$B_\Lambda, \text{МэВ}$

$^3_\Lambda \text{H}$	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

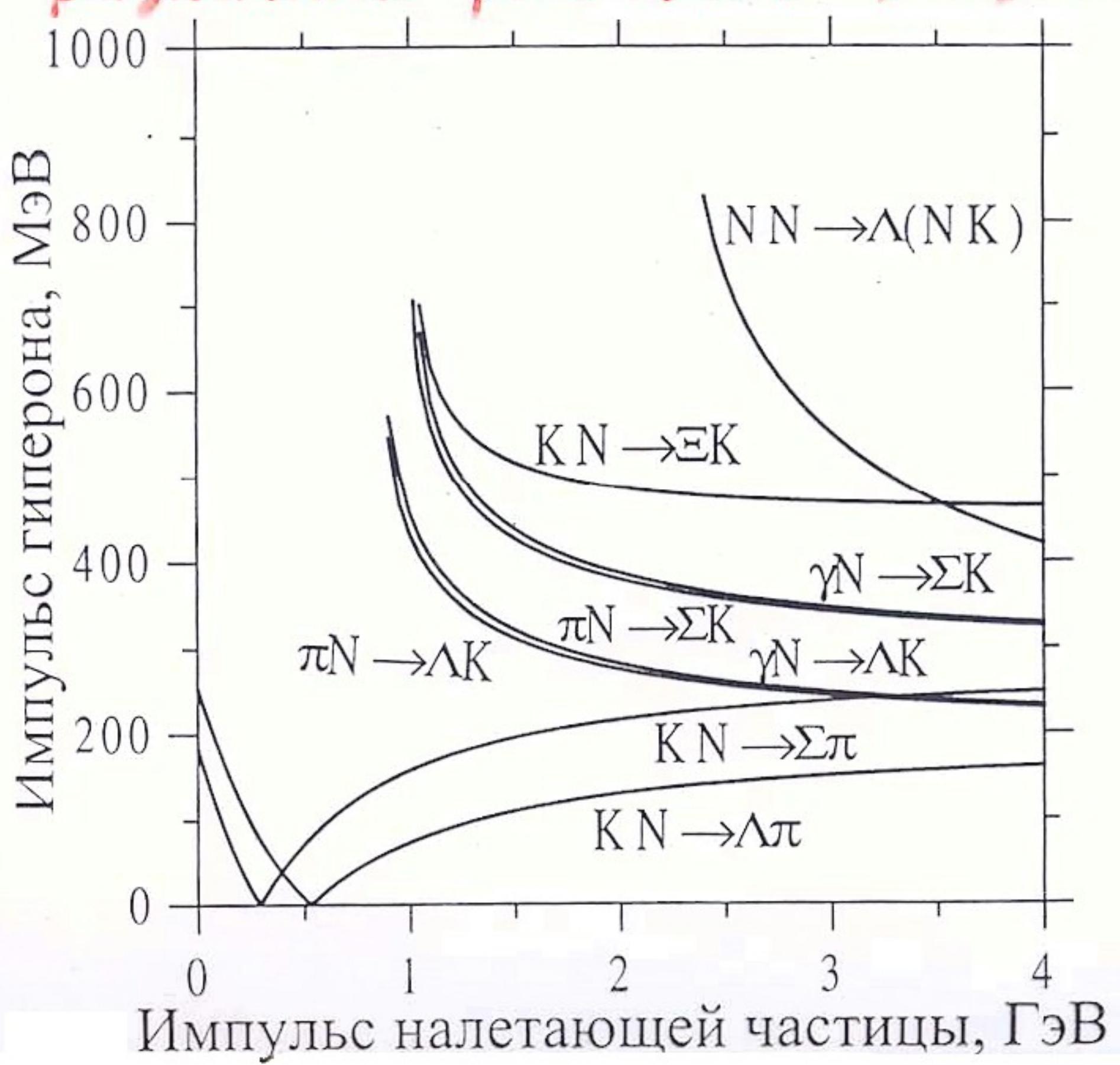
Времена жизни Λ -гиперядер



Энергии связи одночастичных
состояний Λ -гиперона

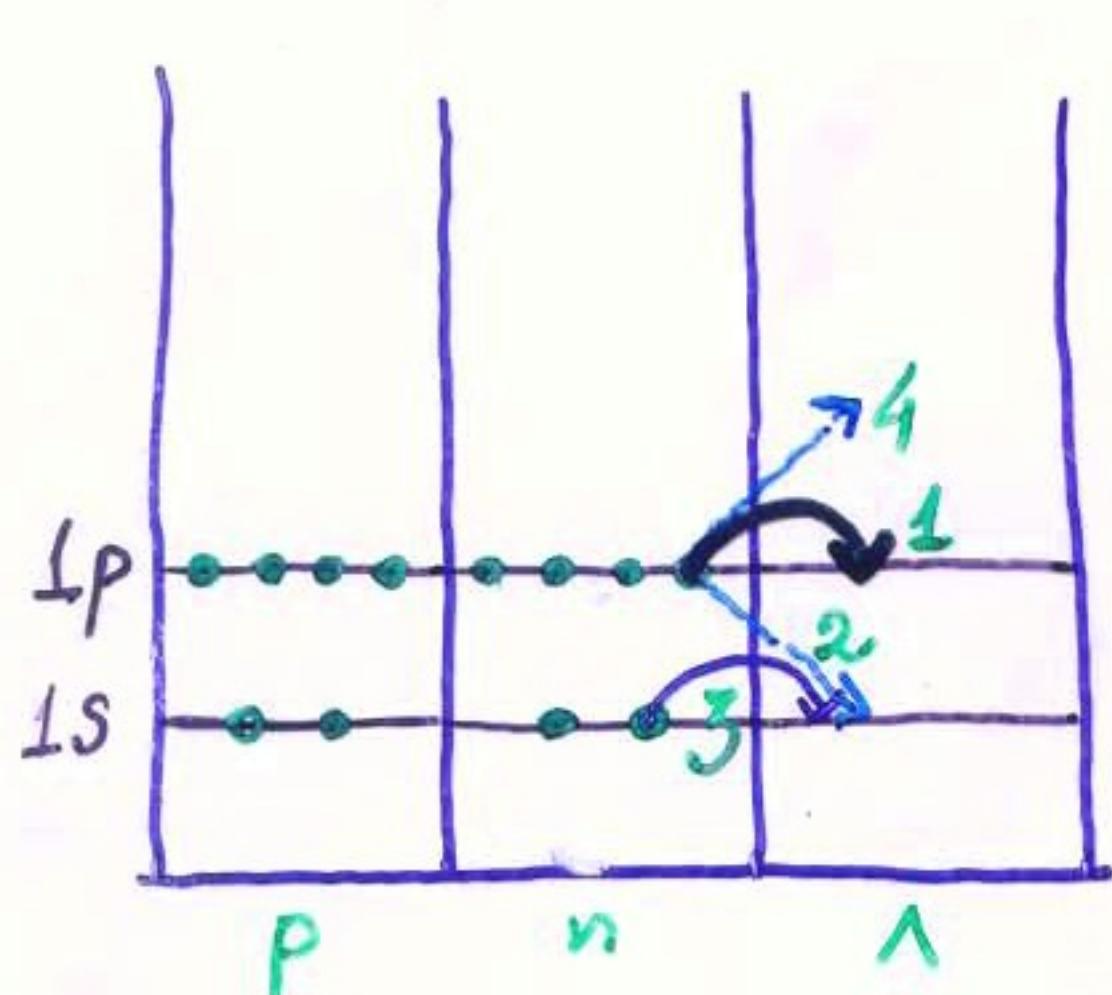


Импульс, передаваемый гиперону, в
различных реакциях рождения

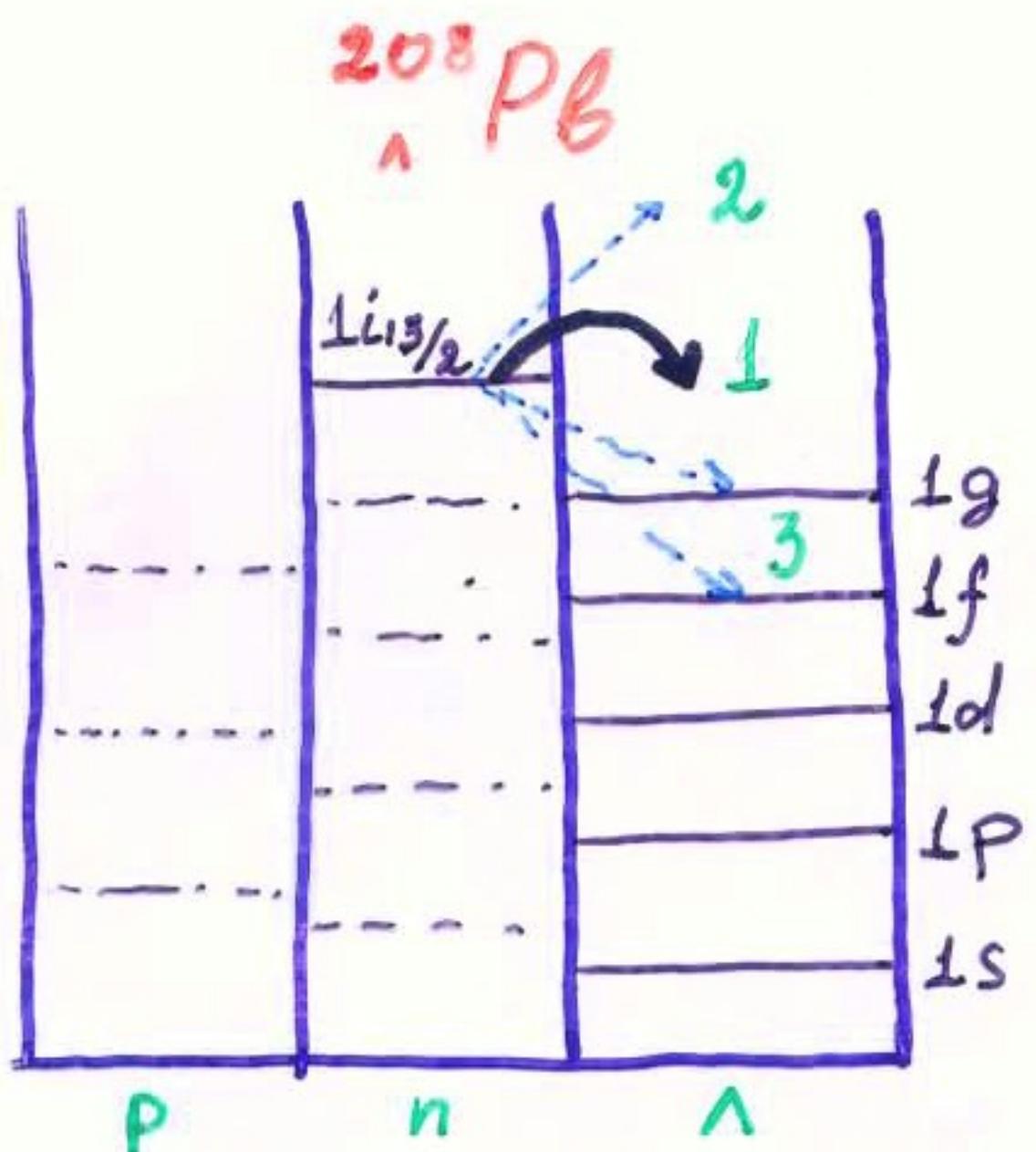


$\Lambda \bar{Z} (\bar{K}^-, \pi^-) \Lambda \bar{Z}$

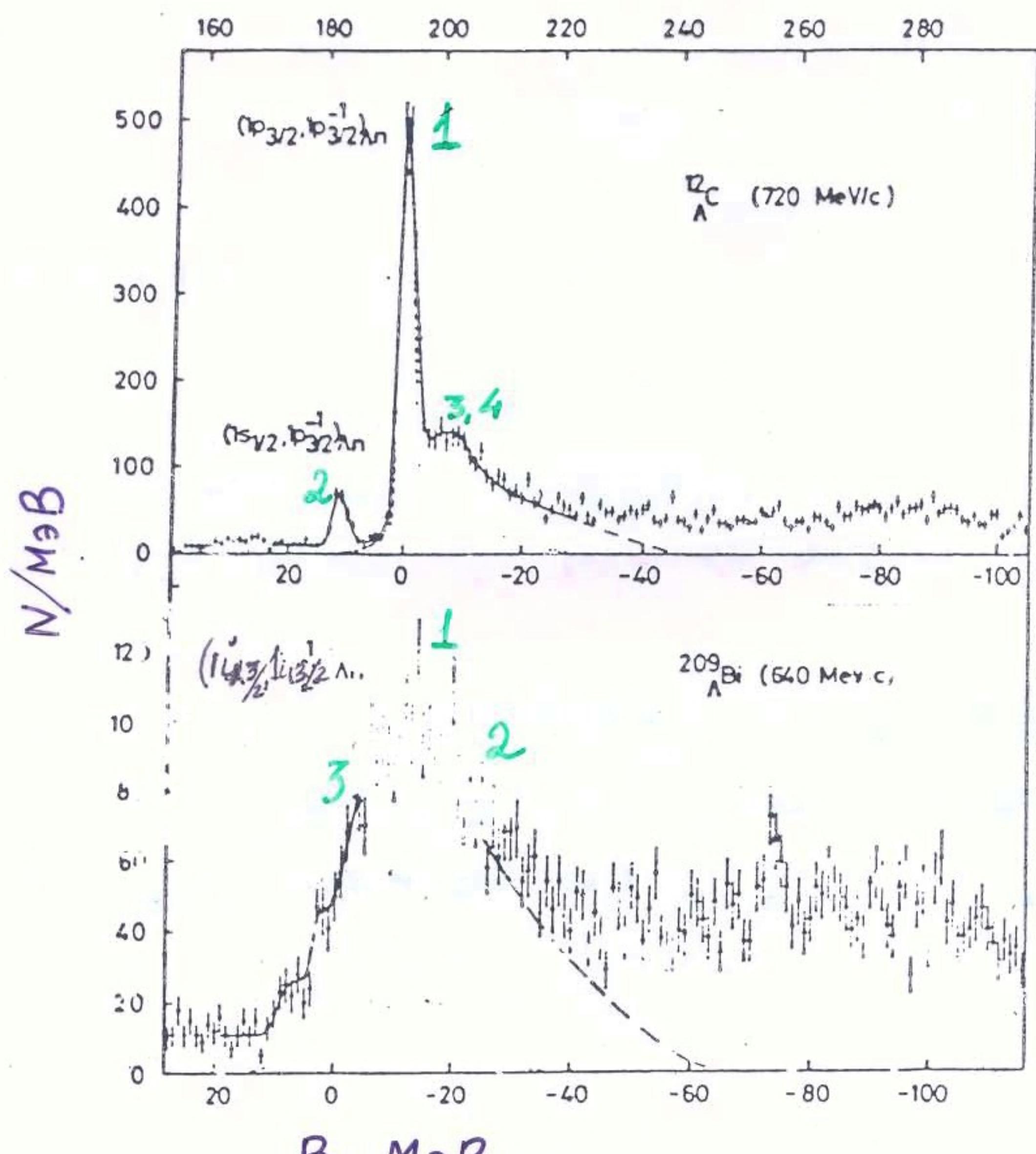
$^{12}_\Lambda C$



$^{208}_\Lambda Pb$



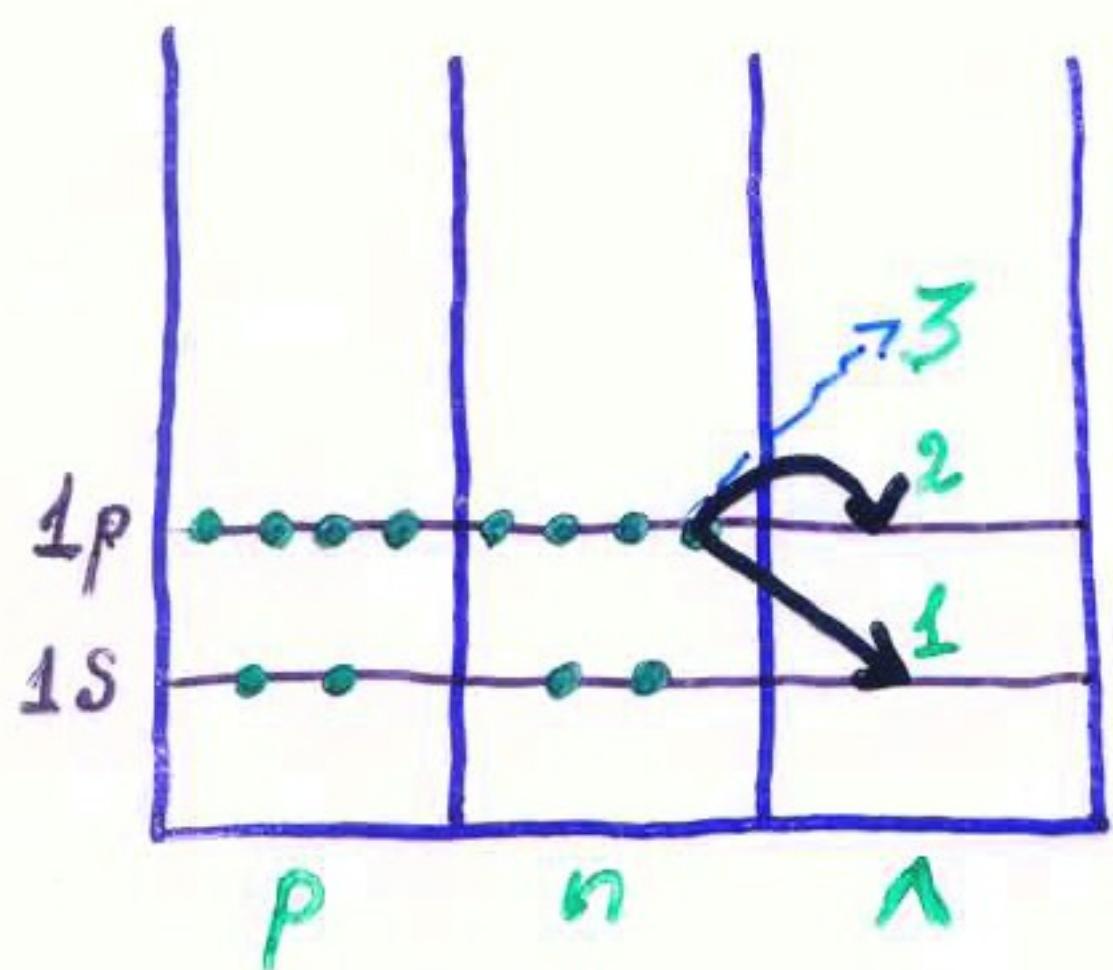
$M_{HY} - M_A$ (MeV)



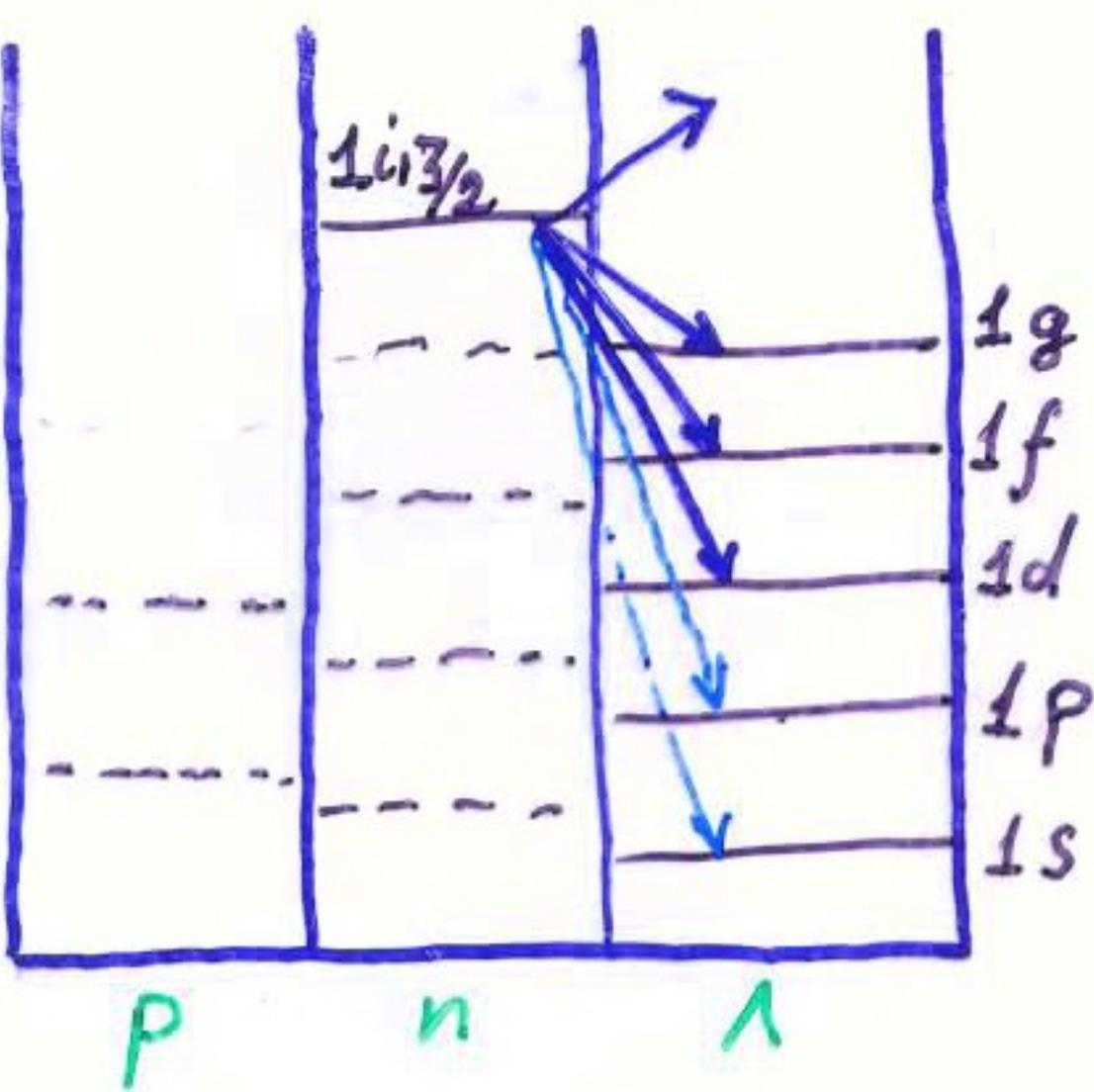
$B_\Lambda, M_\Lambda B$

$A\bar{\Sigma}(\pi^+, K^+)\Lambda\bar{\Sigma}$

$^{12}\Lambda C$



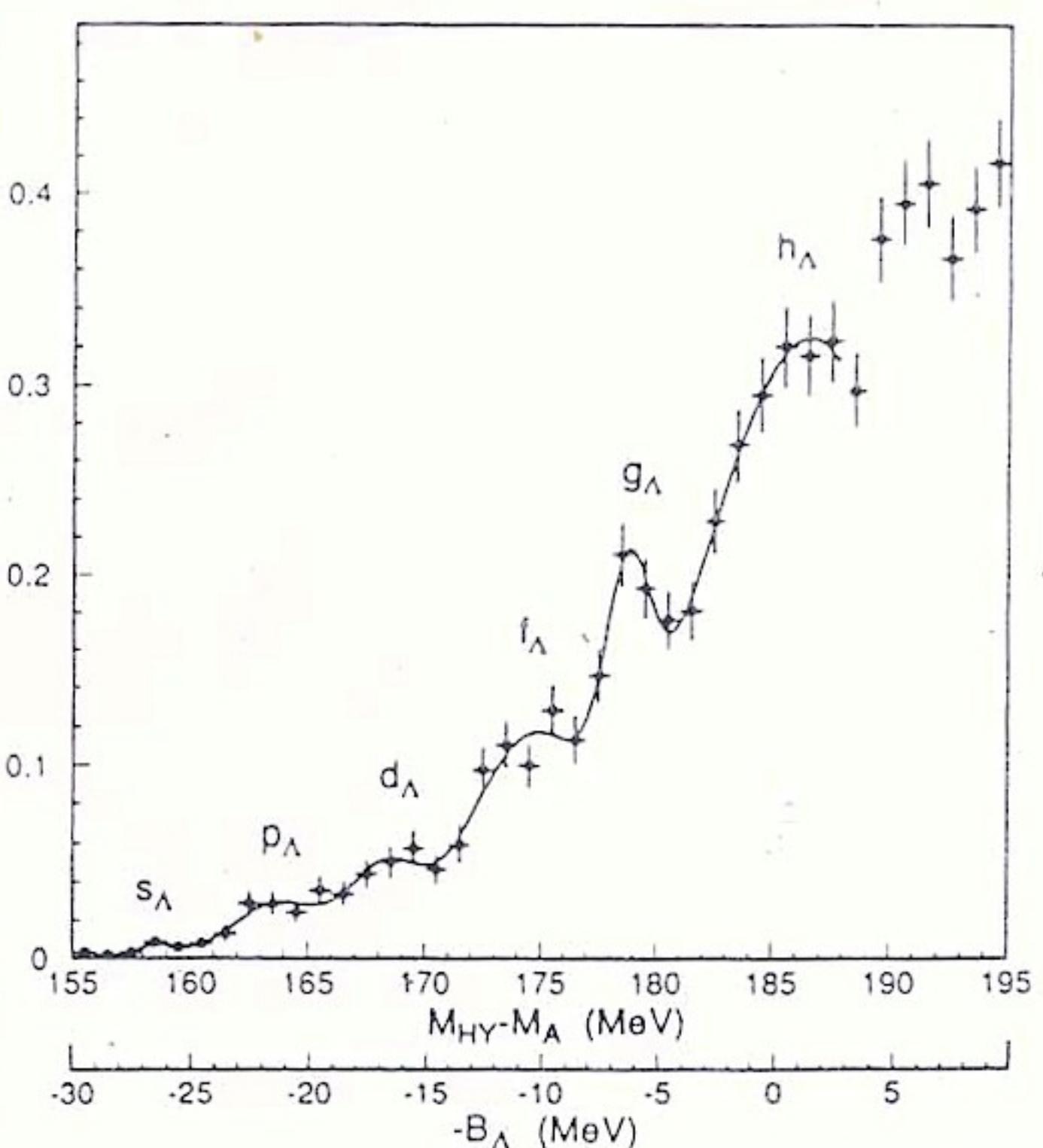
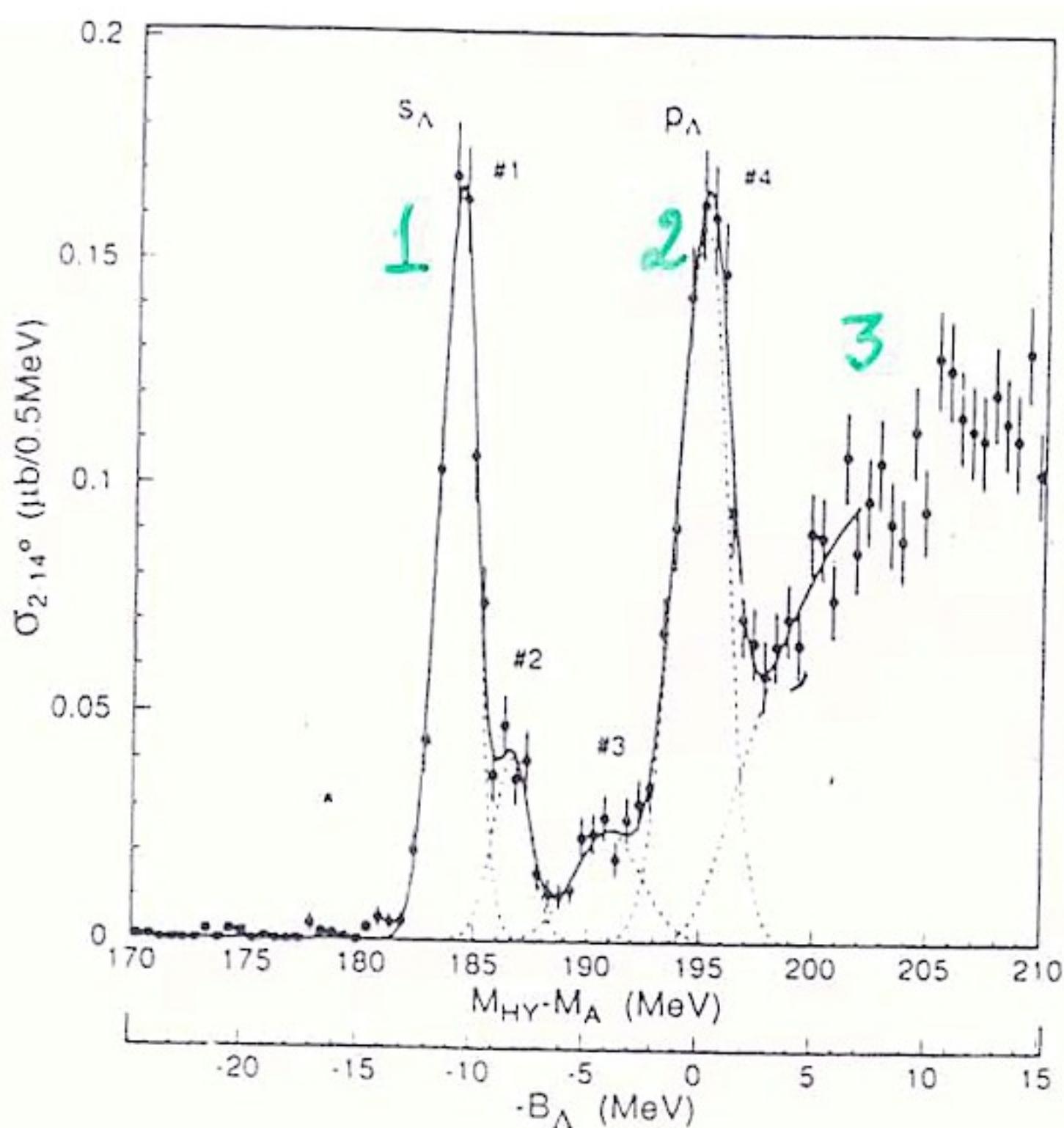
$^{208}\Lambda Pb$



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

$$P_T = 1.05 \Gamma_3 B/c$$

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



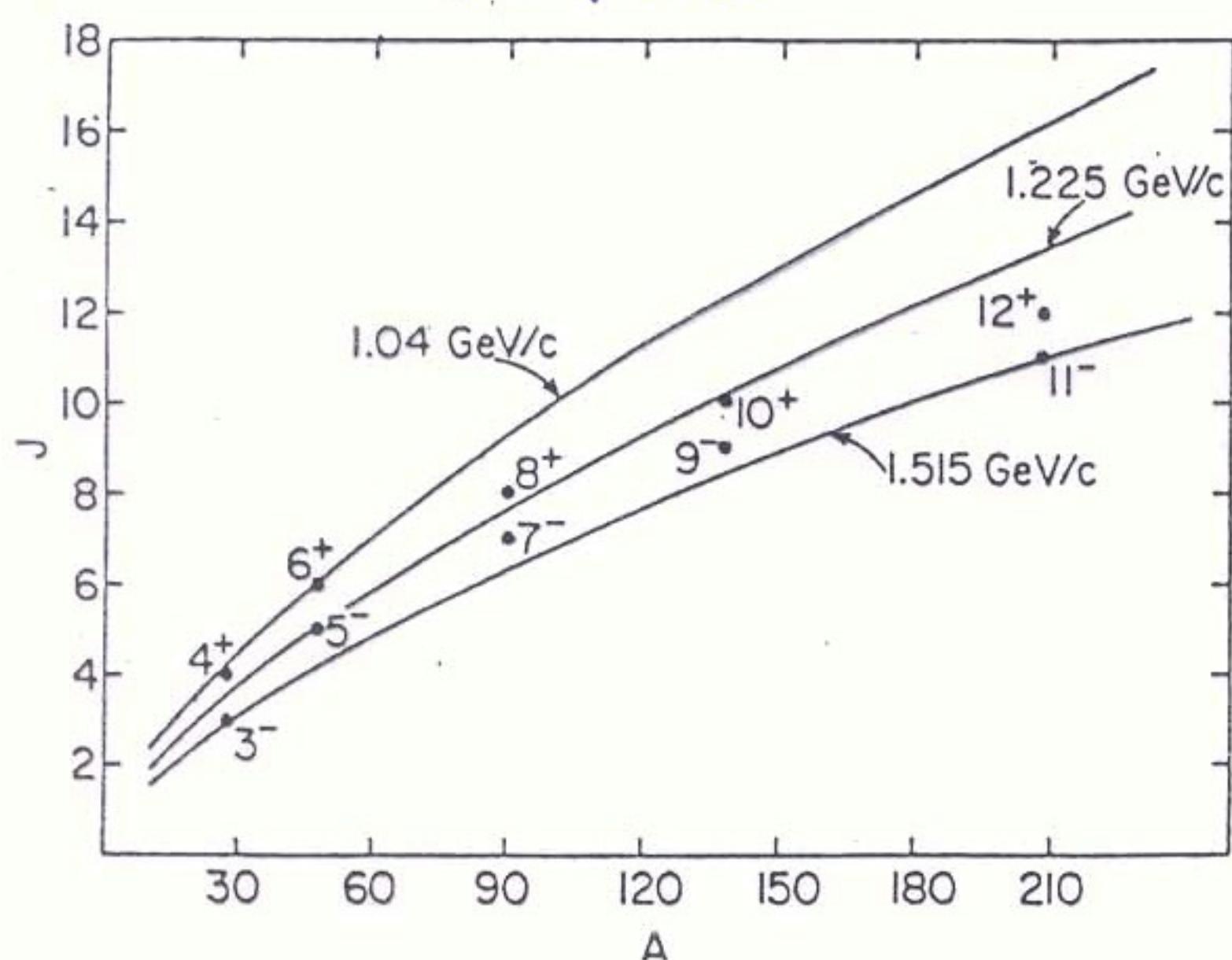
$\Sigma(a, b) \Sigma$

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

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

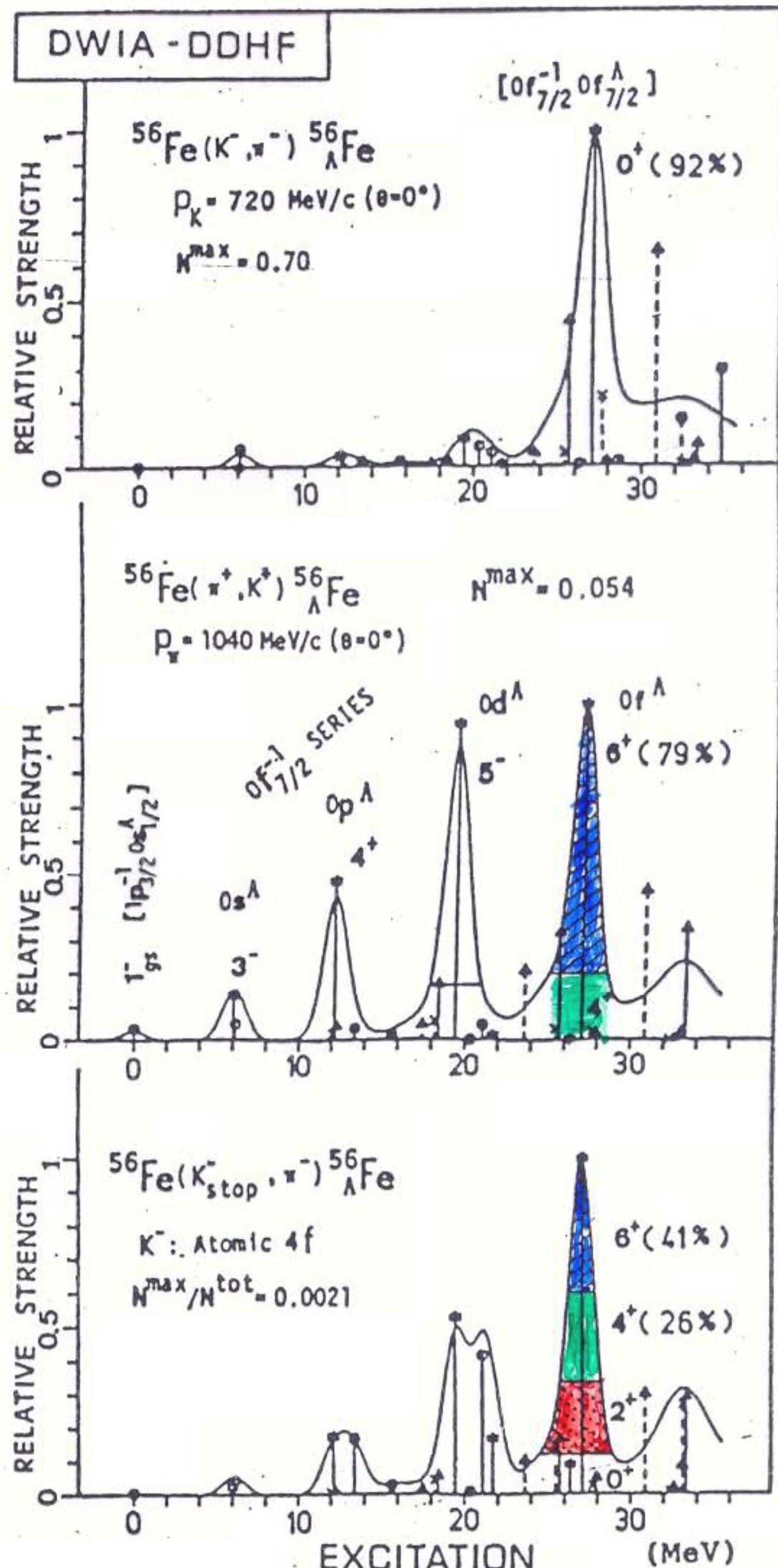
$$F(q) \sim \sum_{j=1}^N \langle JM | \sum_{em} j_e(qz) Y_{em}(\Omega) U_-(j) | 00 \rangle$$

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

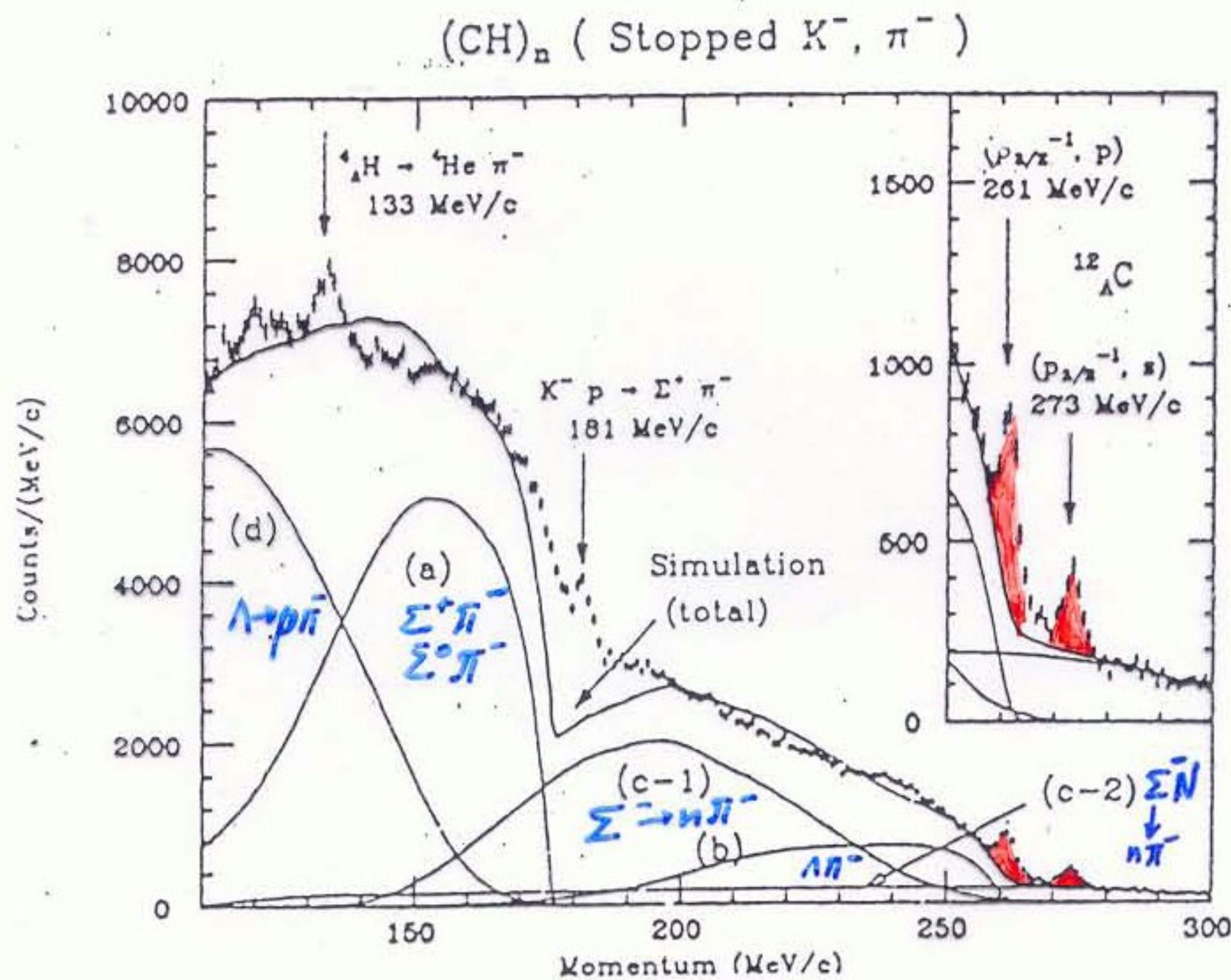
 $J \geq qR$ $(\bar{\pi}^+, K^+)$ 

Ск. счета Радиош. ФОН
(28/29c) (M9B)

(K^-, \bar{K}^-)	<10	3	Большой
(K_{stop}^-, π^-)	80	4	очень Большой
(π^+, K^+)	10	1.5	Малый



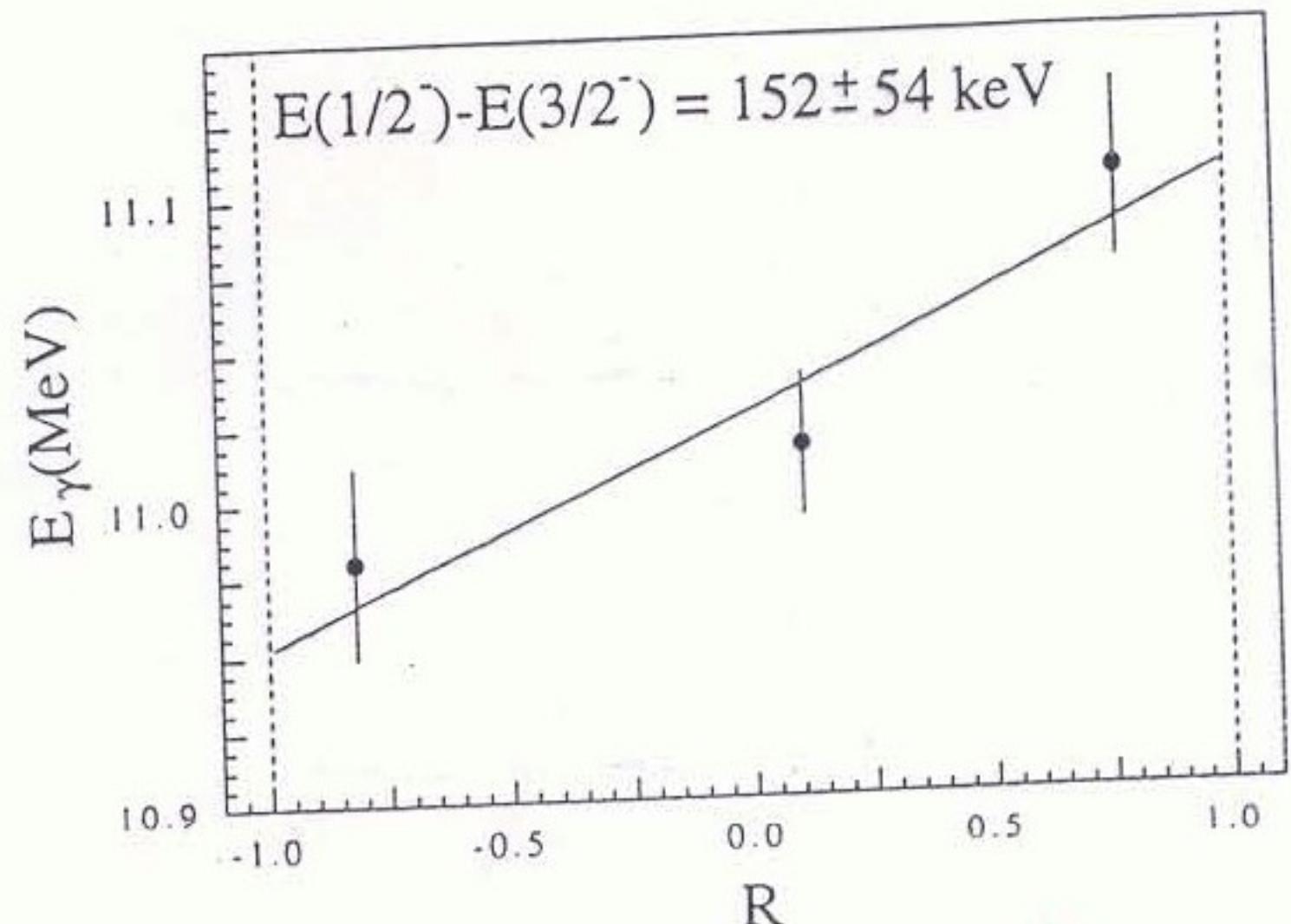
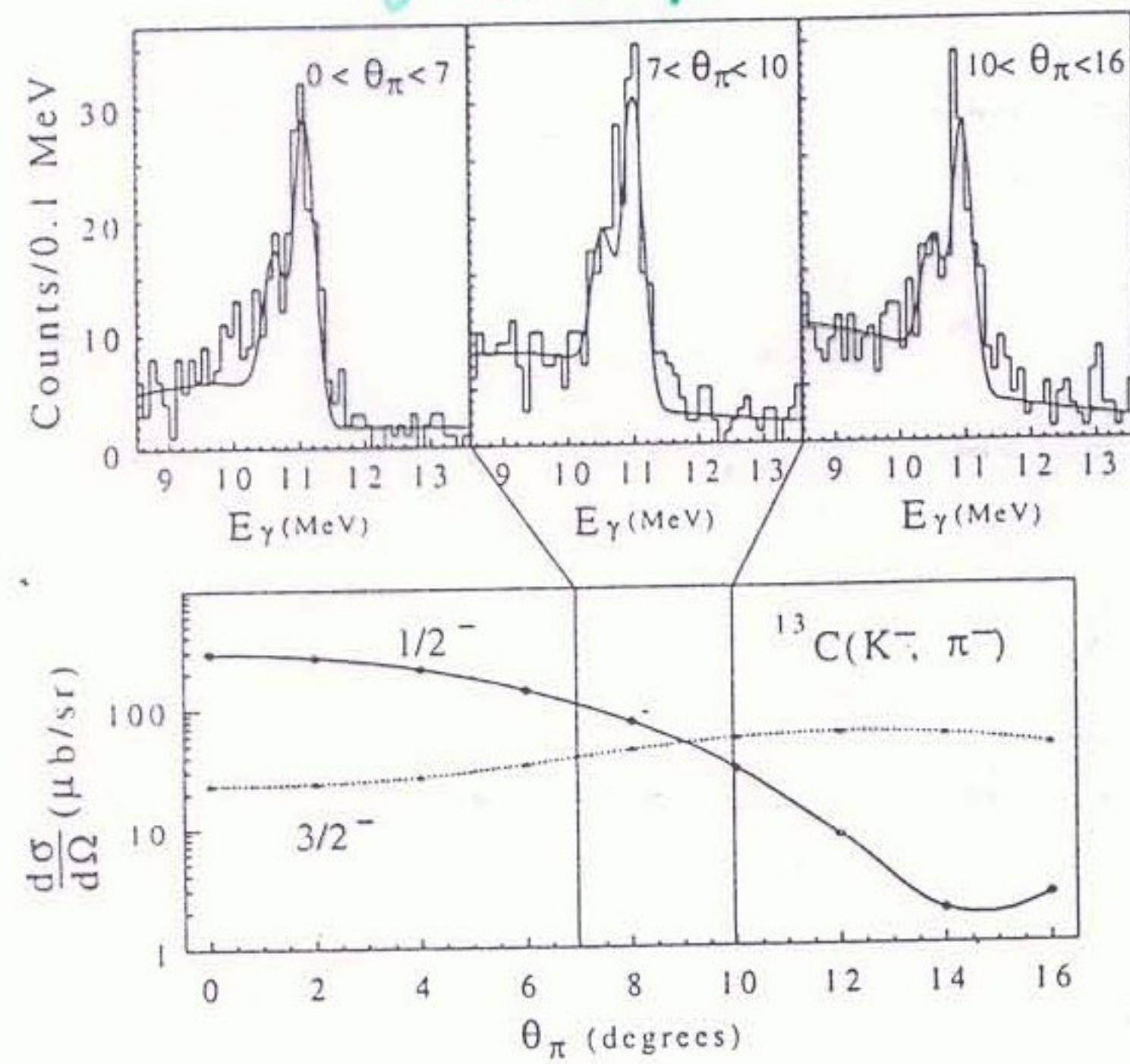
$^{12}\text{C}(\bar{K}^-, \pi^-)$
боковое



$^{13}\text{C}(\bar{K}^-, \pi^-) ^{13}\text{C}^*$

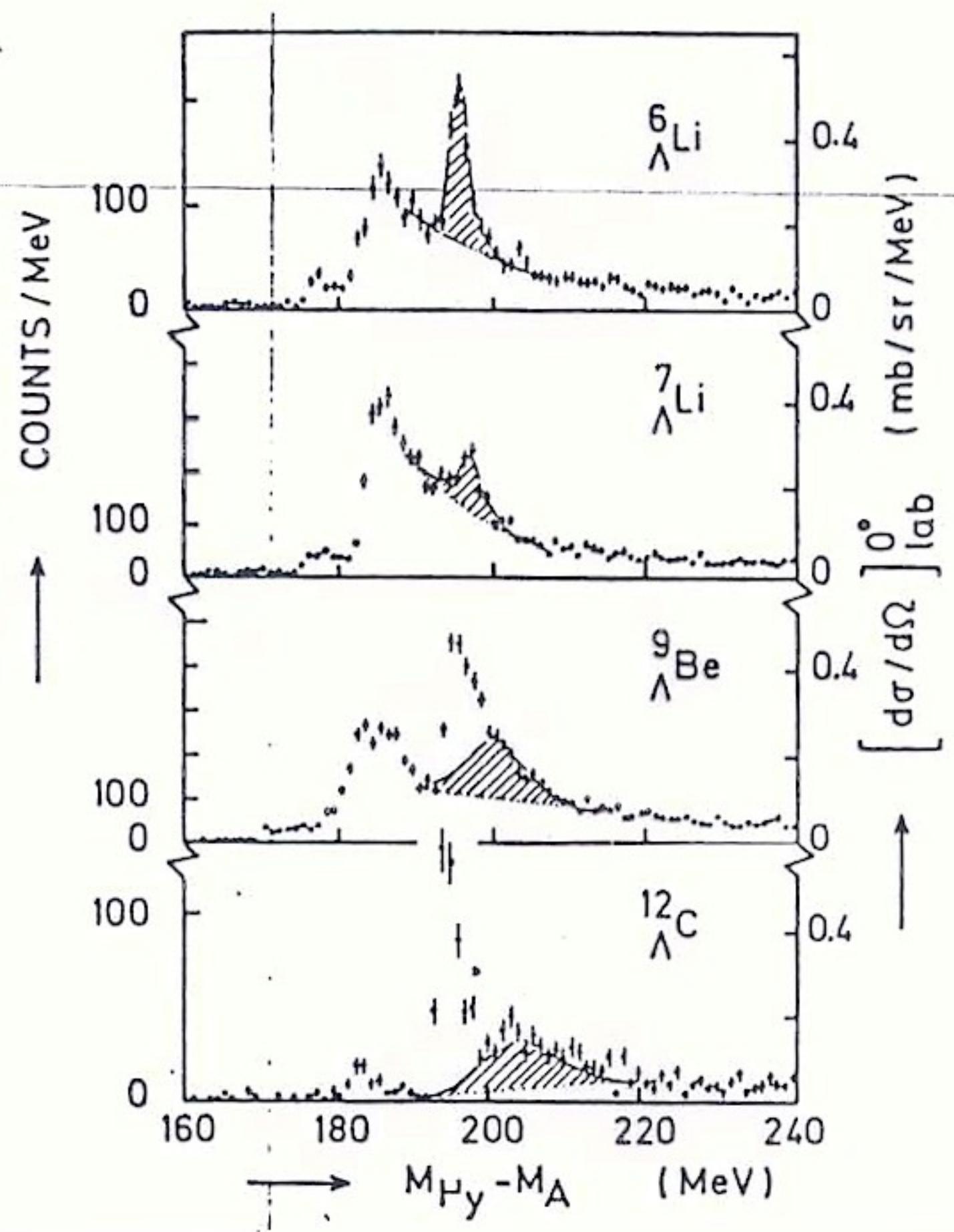
$^{13}\text{C}^* : ^{12}\text{C} \otimes \Lambda(1p)$

γ -спектр



$$\frac{N(\gamma_2) - N(3/2)}{N(\gamma_2) + N(3/2)}$$

Нейтронные 1S-состояния в ядрах



Энергии и ширины

(K^-, π^-)

(p, pn)

	E	Γ	E	Γ
${}^6\text{Li}$	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

$M_{\pi}B$

S_n

Γ

$M_{\pi}B$

S_n

Γ

Распады

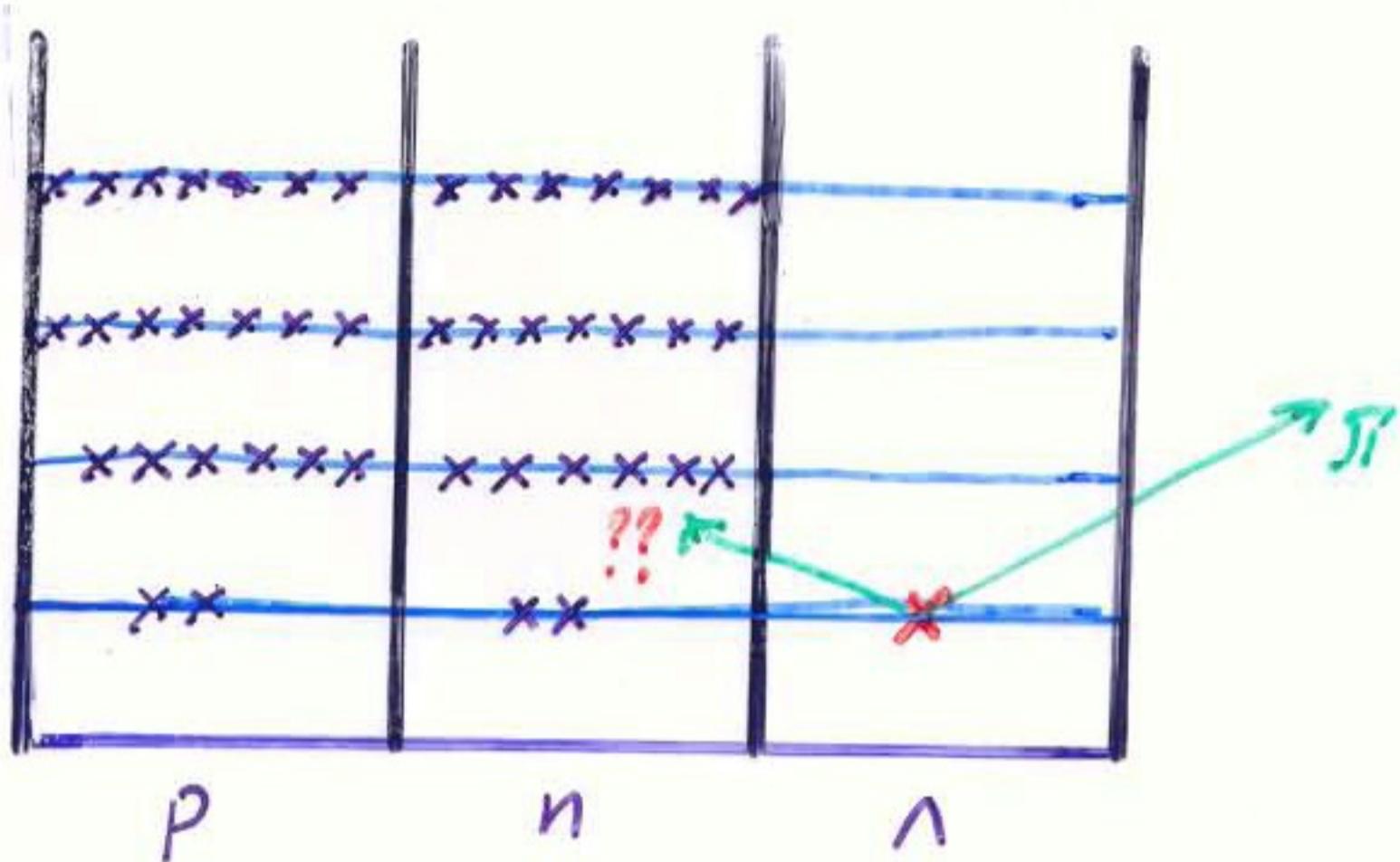
Распад свободного Λ -гиперона

$$\begin{aligned} \Lambda &\rightarrow p + \pi^- \\ \Lambda &\rightarrow n + \pi^0 \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} +40 \text{ МэВ} \\ +40 \text{ МэВ} \end{array} \right\} + 40 \text{ МэВ}$$

$\sim 5 \text{ МэВ}$

$\sim 35 \text{ МэВ}$

Распад Λ -гиперядра



Пионный распад подавлен принципом Паули
Безмезонный распад

$$\begin{aligned} \Lambda + p &\rightarrow n + p \\ \Lambda + n &\rightarrow n + n \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} +175 \text{ МэВ} \\ +175 \text{ МэВ} \end{array} \right\} + 175 \text{ МэВ}$$

Σ , Ξ и Ω - гипероны в ядрах

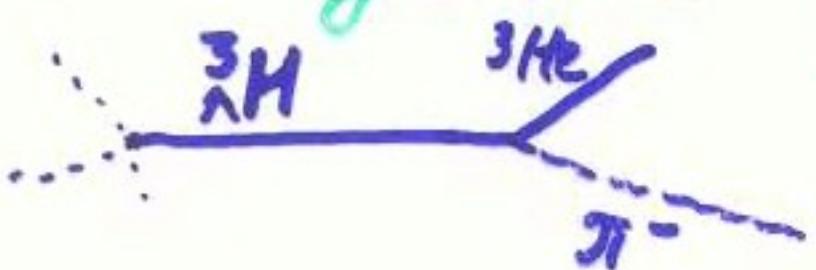
Конверсия - сильный процесс с сохранением страничности



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

Измерение времен жизни гиперзаряженных частиц

1) Наблюдение распадов на лету в фотозумусах



Только $^1\text{H}, ^3\text{He}$

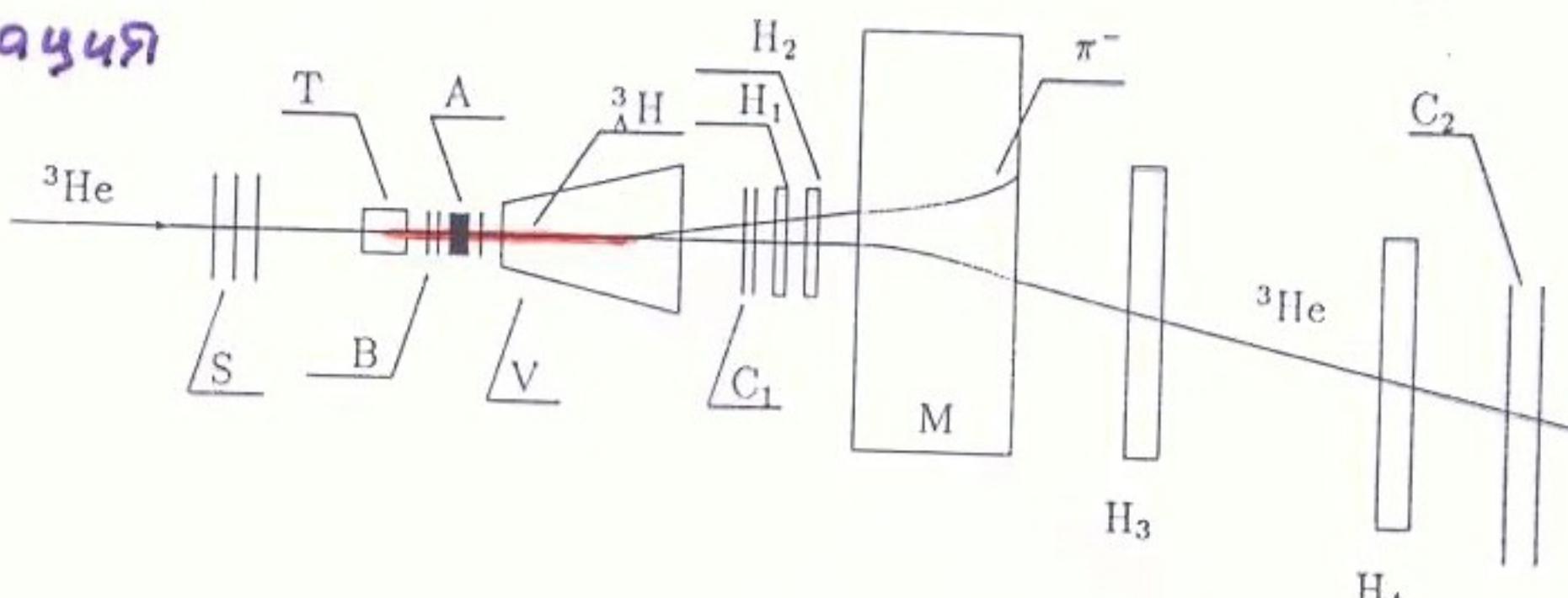
2) Измерение времени задержки в экспериментах на совпадение



СТАТИСТИКА

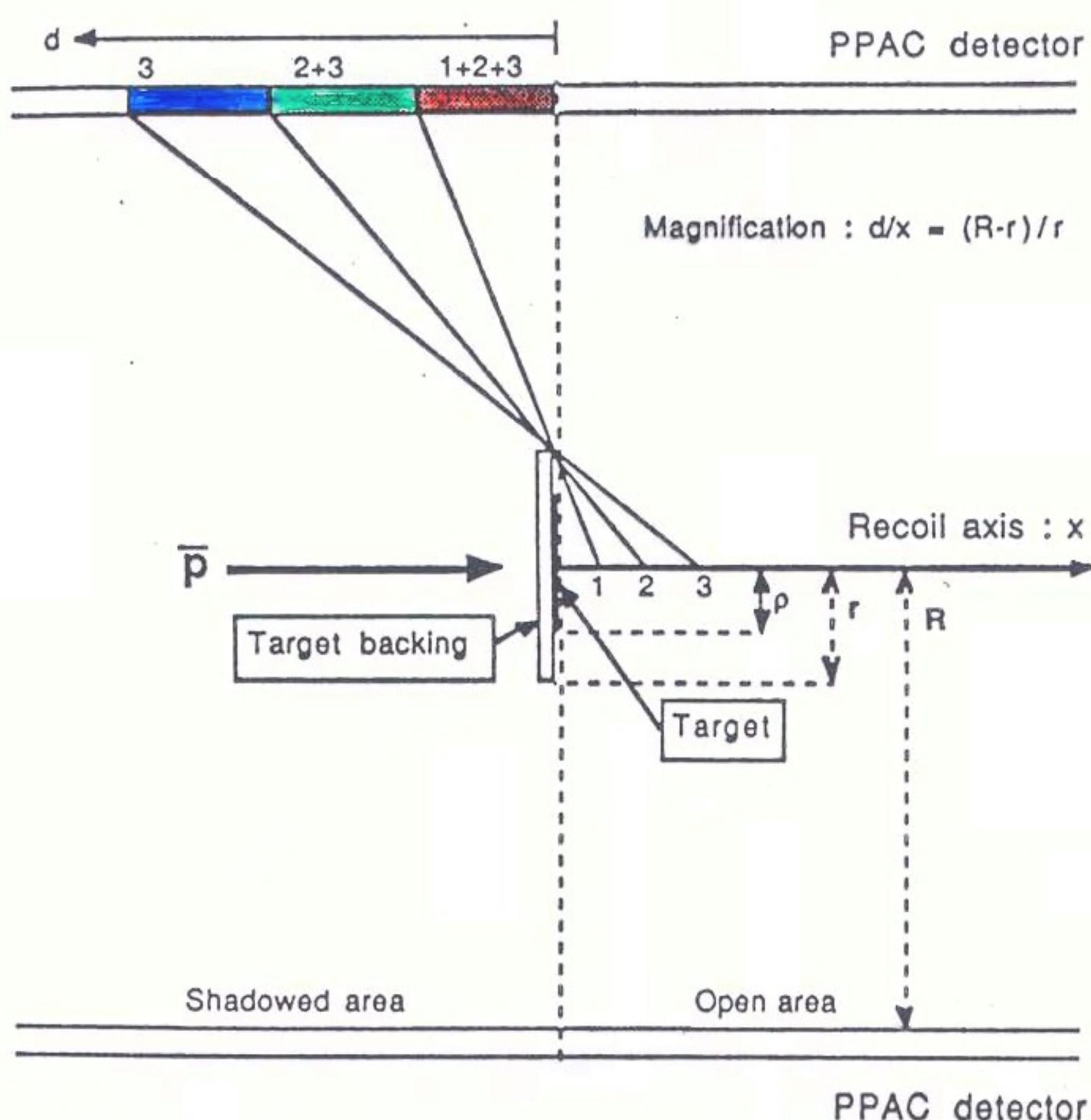
3) Реакции на тяжелых ионах - время пролета

идентификация

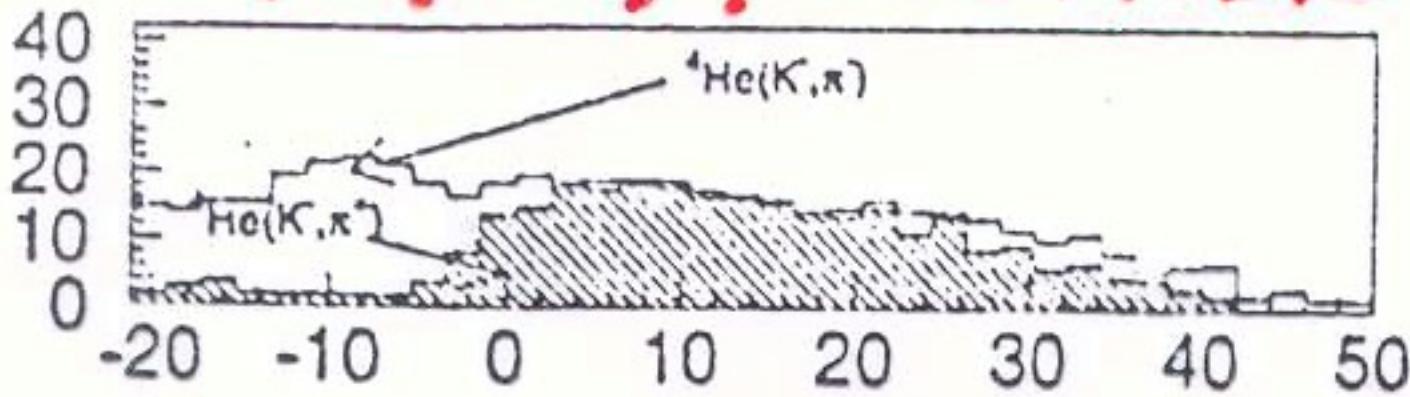


4) Задержанное деление

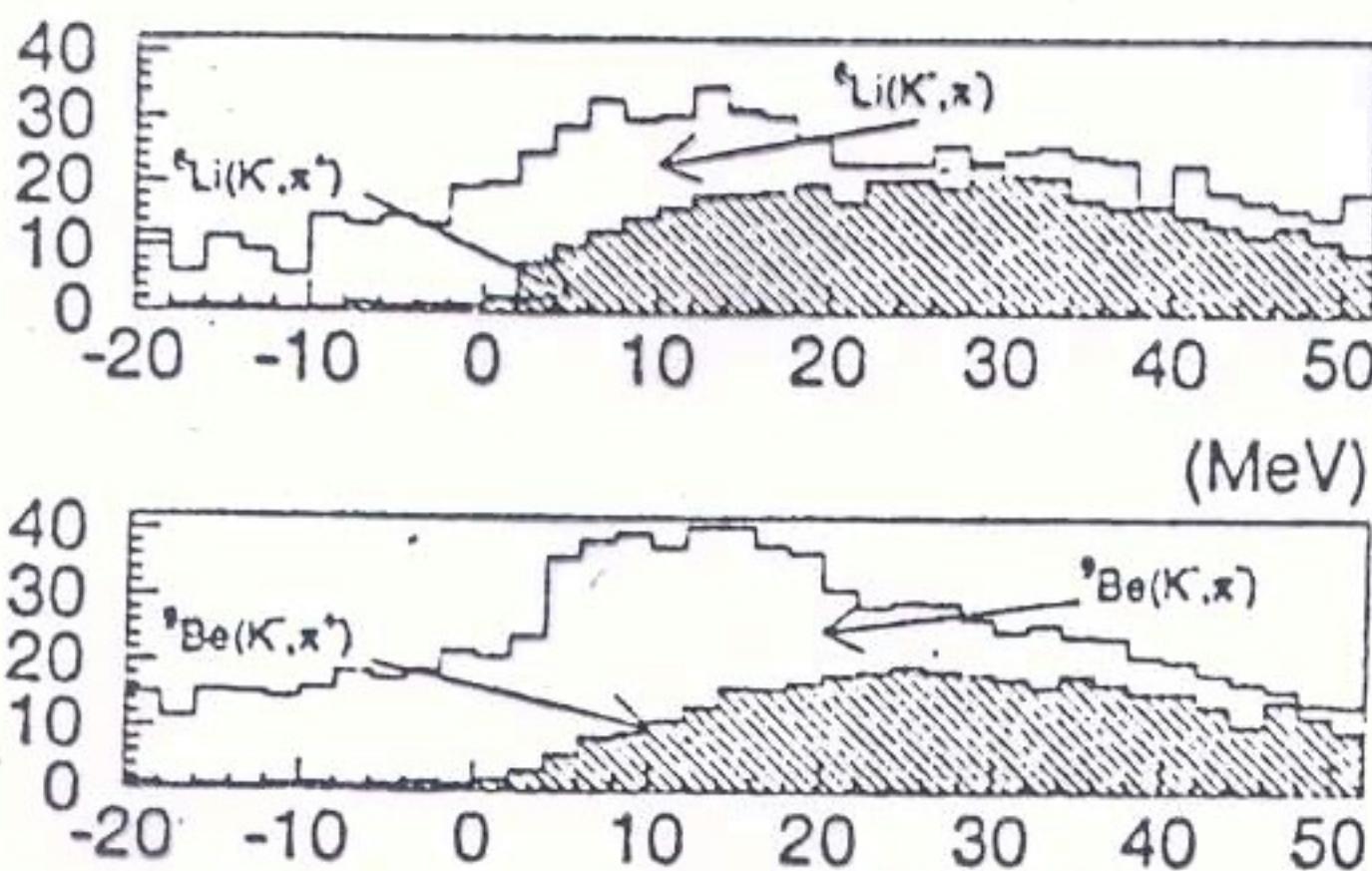
ТОЛЬКО ТЯЖЕЛЫЕ ГИПЕРЗАРЯДРЫ



$(K^-, \pi^\mp), 600 M_3 B/c$

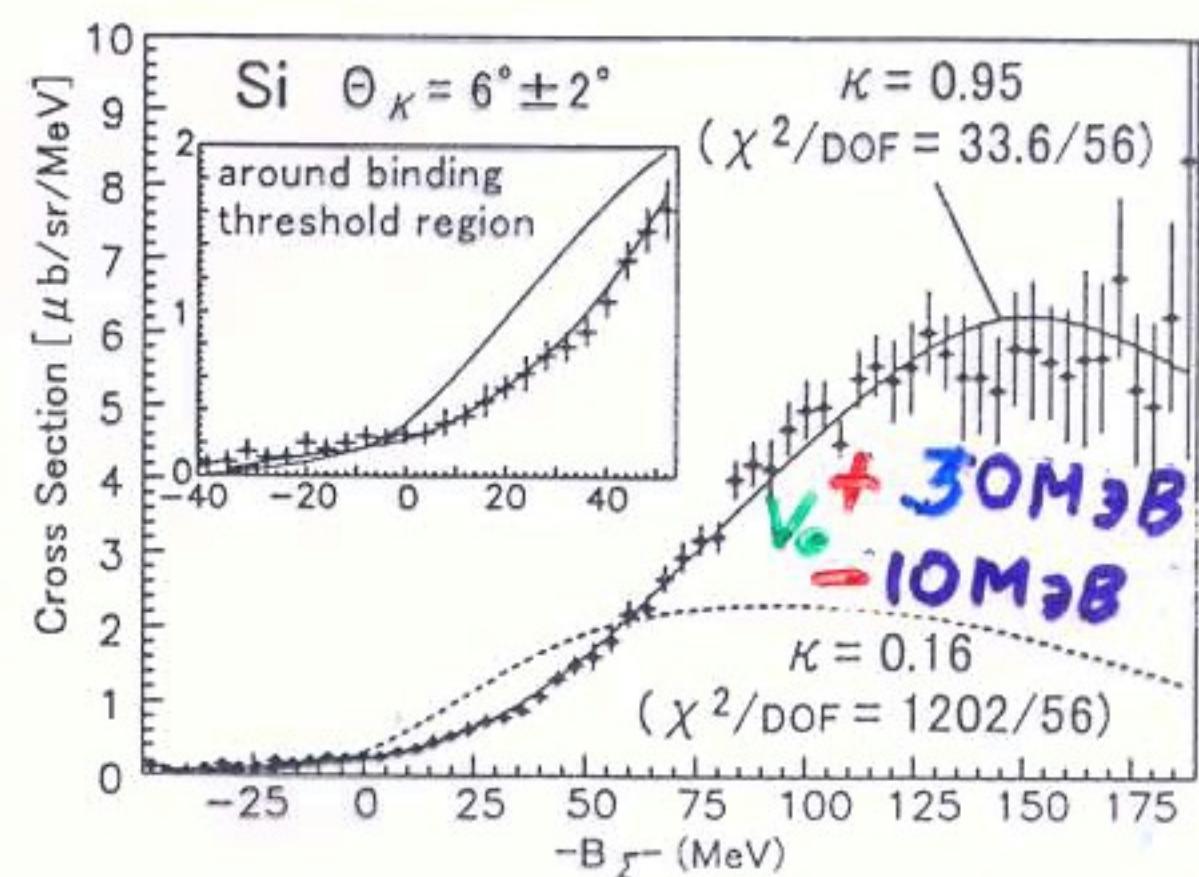


$d^2\sigma/d\Omega dE (\mu b/sr/MeV)$



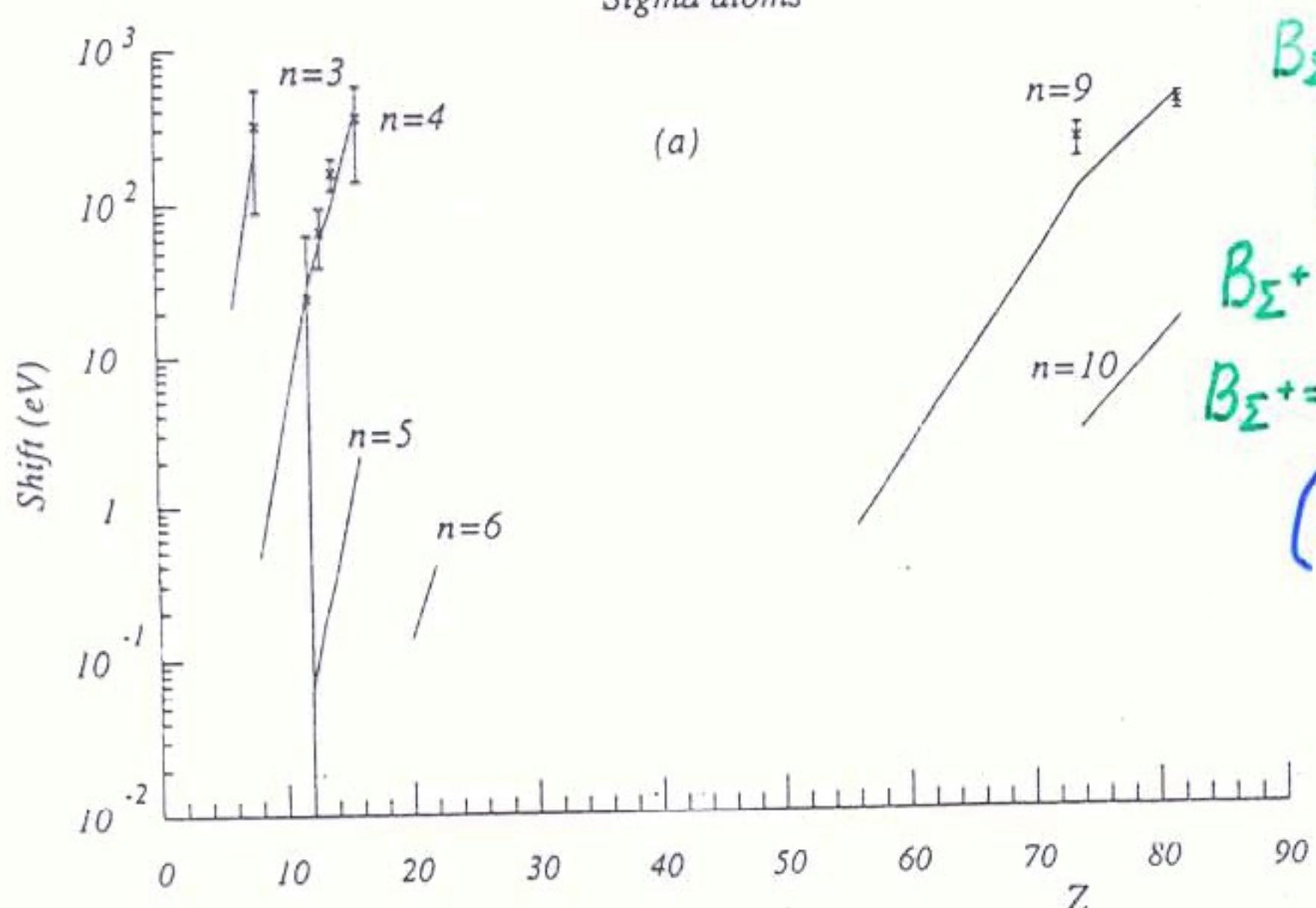
$-B_\Sigma, M_3 B$

$(\pi^-, K^+), 1.2 M_3 B/c$

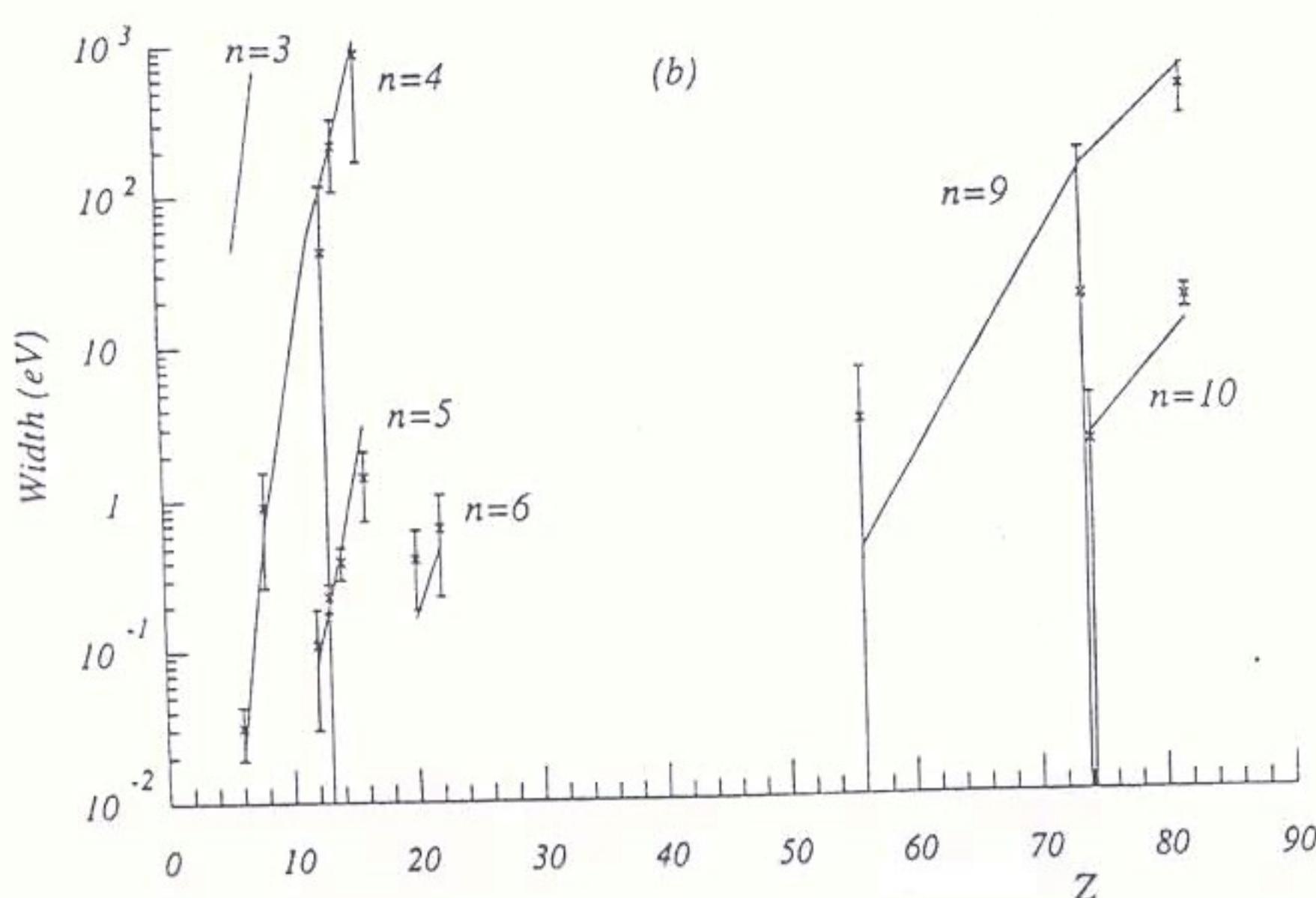


${}^4\Sigma$ He

Sigma atoms



(a)



(b)

$B_{\Sigma^+} = 2.8 \pm 0.7 M_3 B; \Gamma = 12.1 \pm 1.2 M_3 B$
 (K_{st}^-, π^-)

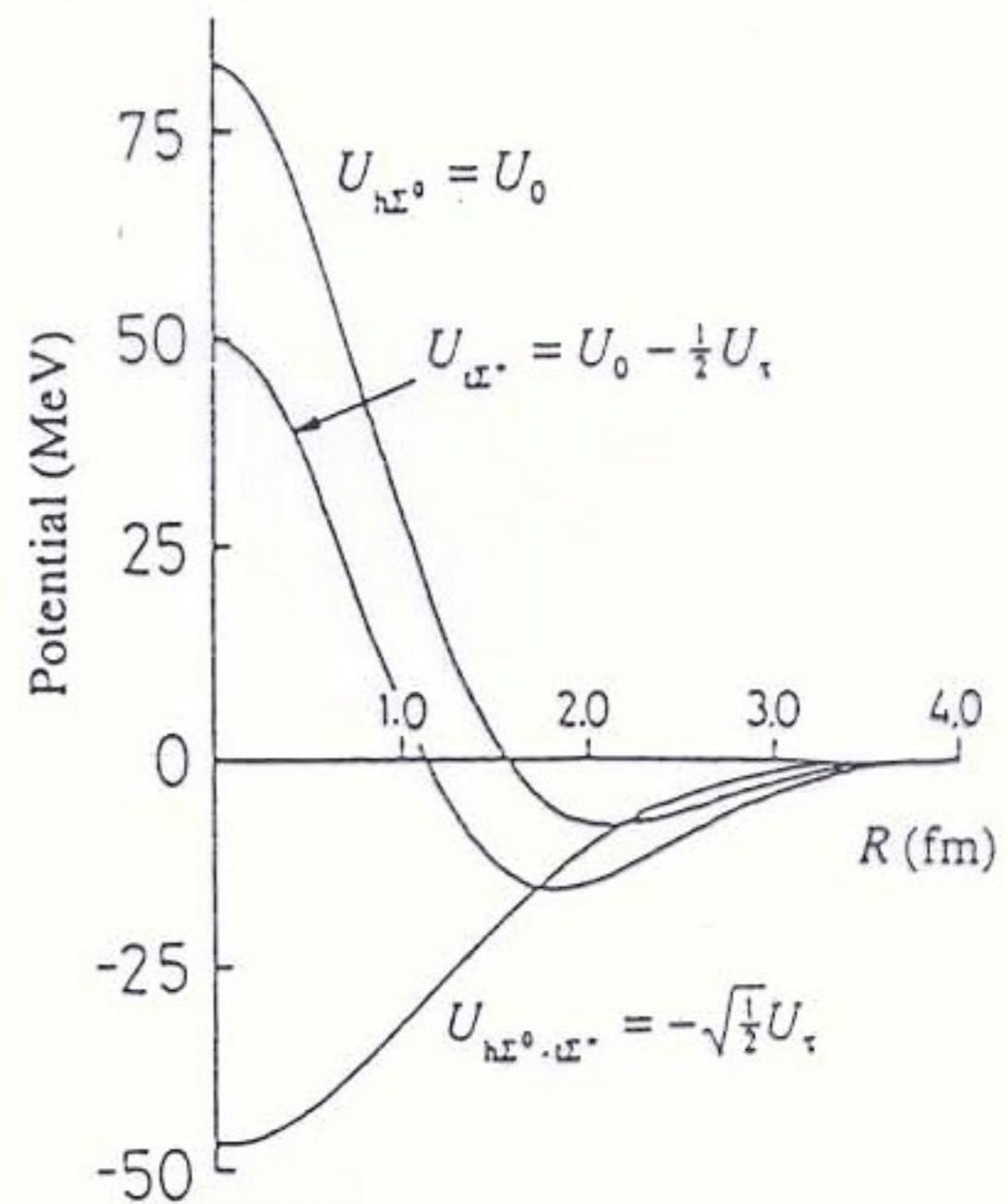
$B_{\Sigma^+} = 4 \pm 1 M_3 B; \Gamma = 10 \pm 2 M_3 B$

$B_{\Sigma^+} = 4.4 \pm 0.3 \pm 1 M_3 B; \Gamma = 7 \pm 0.7^{+1.2}_{-0.6} M_3 B$
 $(K^-, \pi^-), 600 M_3 B/c$

Σ -ядерный потенциал

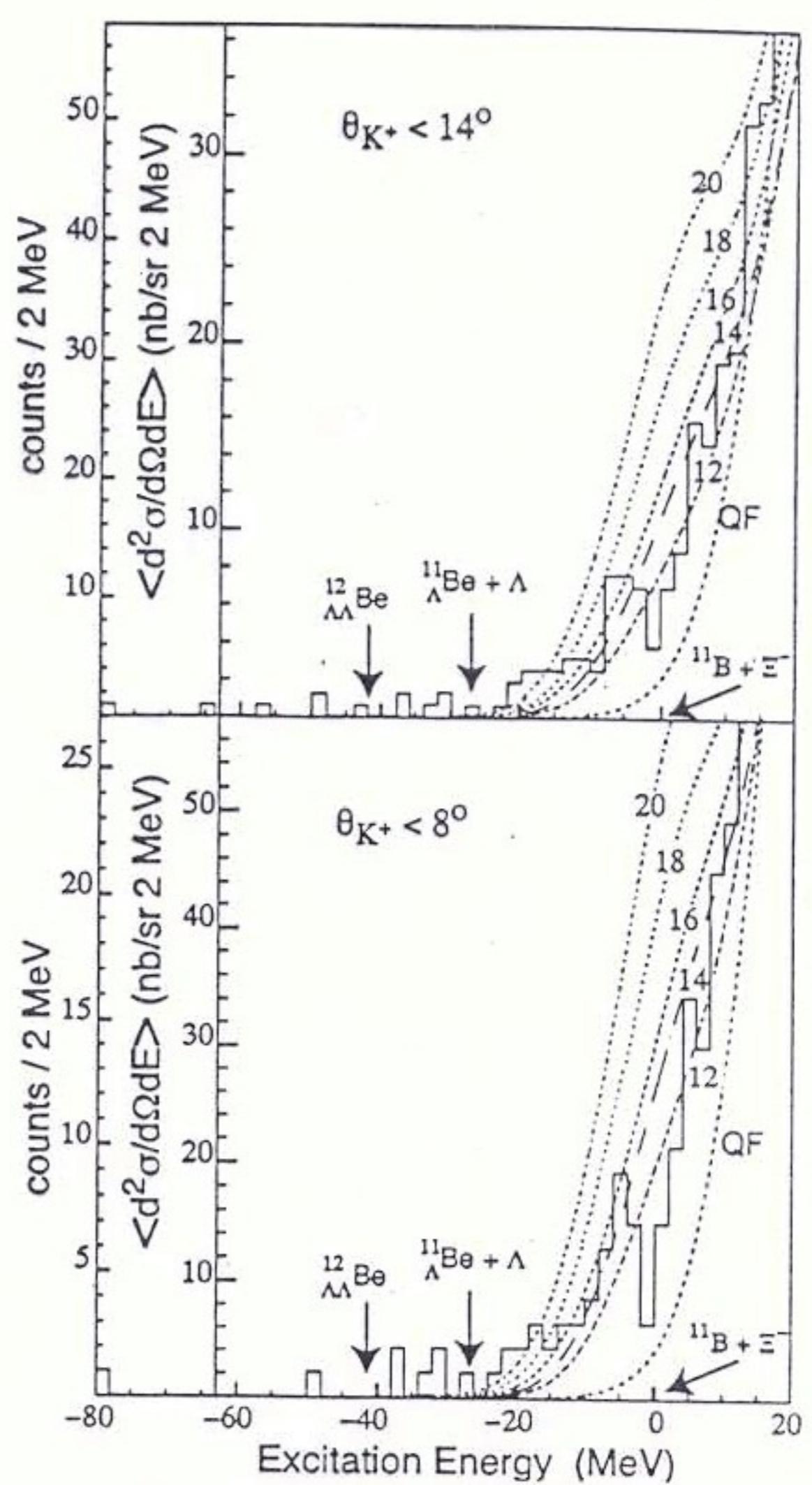
$$V = U_0 + U_\Sigma (T_A \cdot t_\Sigma)$$

$$U_\Sigma > 0$$

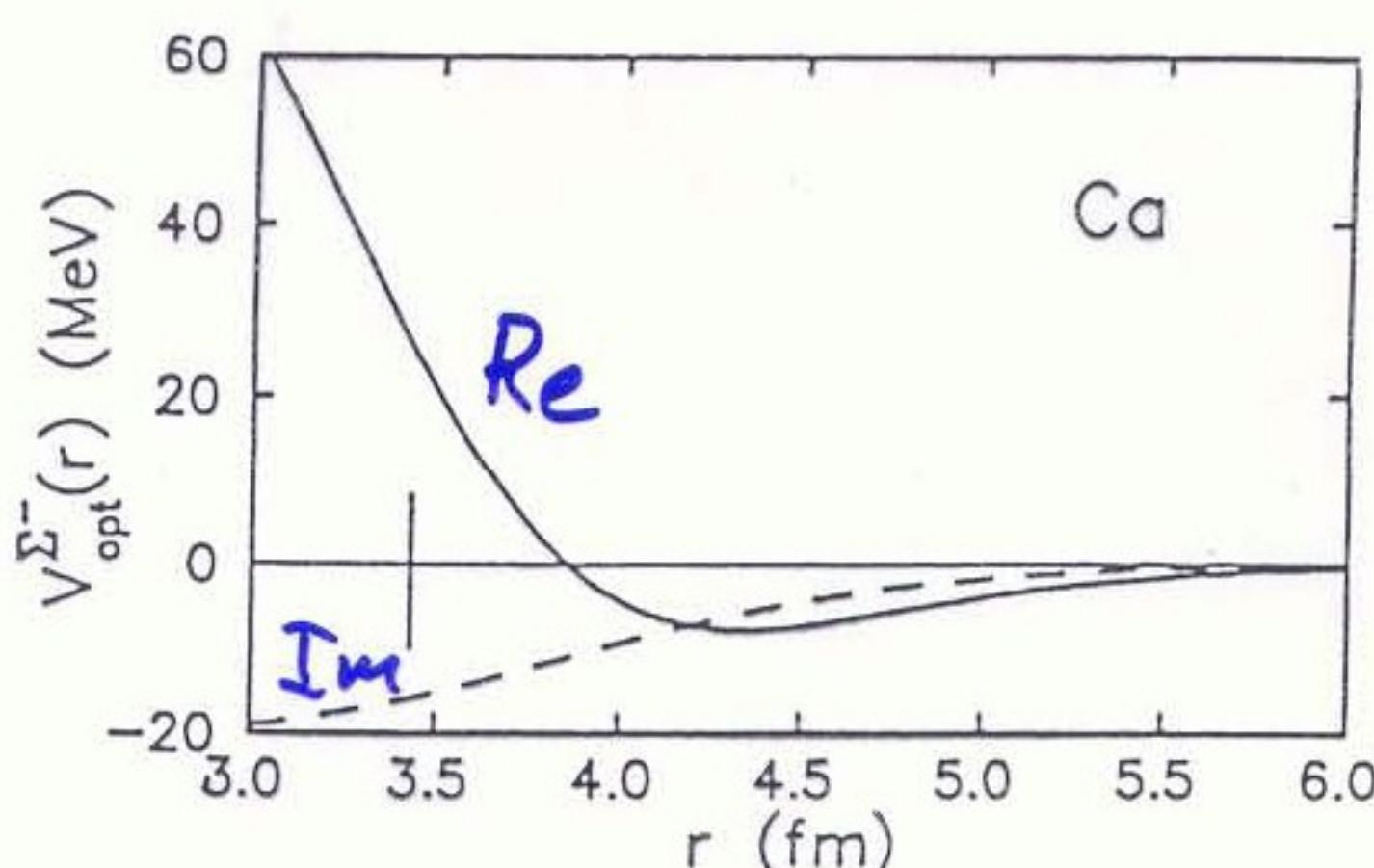


Гиперядра с $S=-2$

$^{12}\text{C}(K^-, K^+)$
1.8 Γ_B/c



Σ^- - ядерный потенциал



Ξ -суперядра

глубина потенциальной ямы

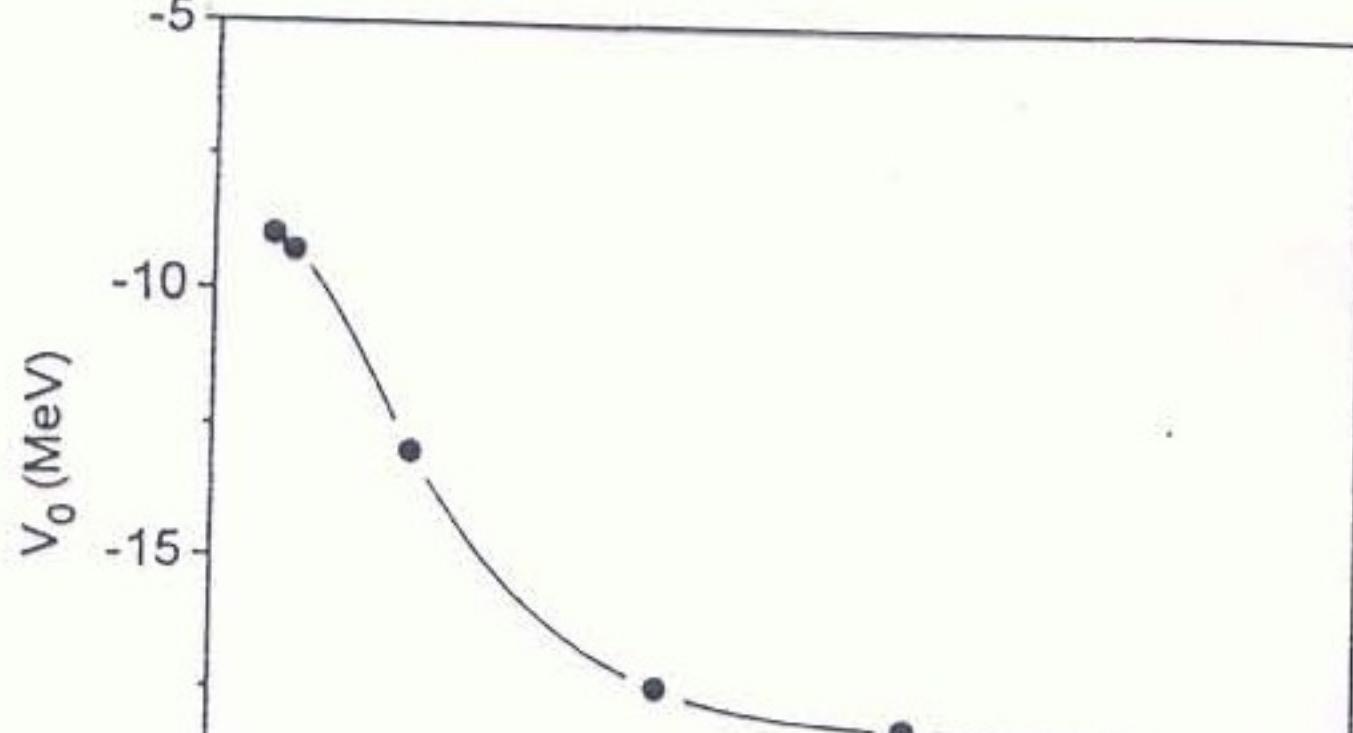
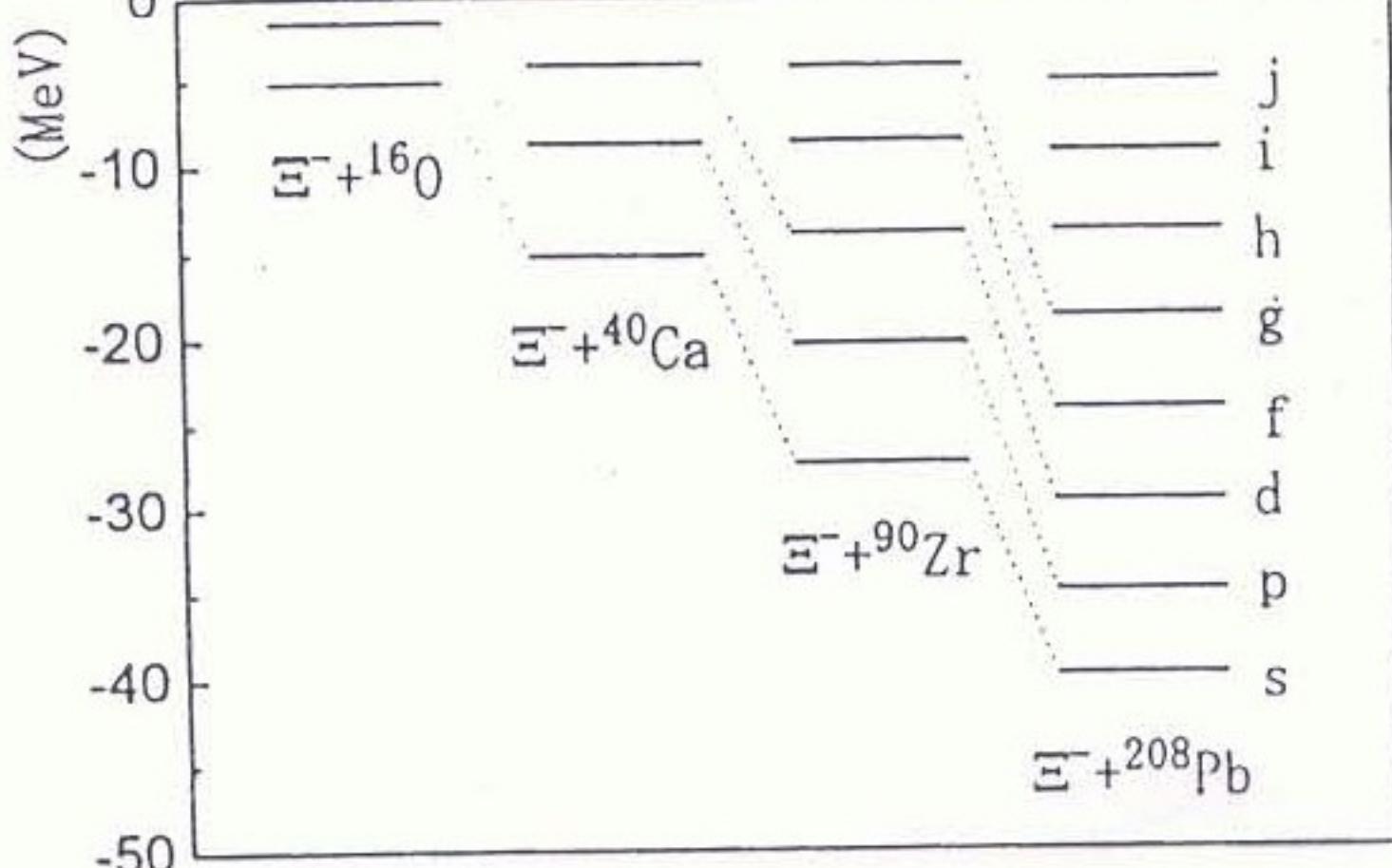


Схема уровней



Гиперядра с большой странностью

Если поместить в нестранное ядро один Σ^- , Ξ^- или Ω^- -гиперон, он живет только $\sim 10^{-23}$ с и испытывает конверсию, например

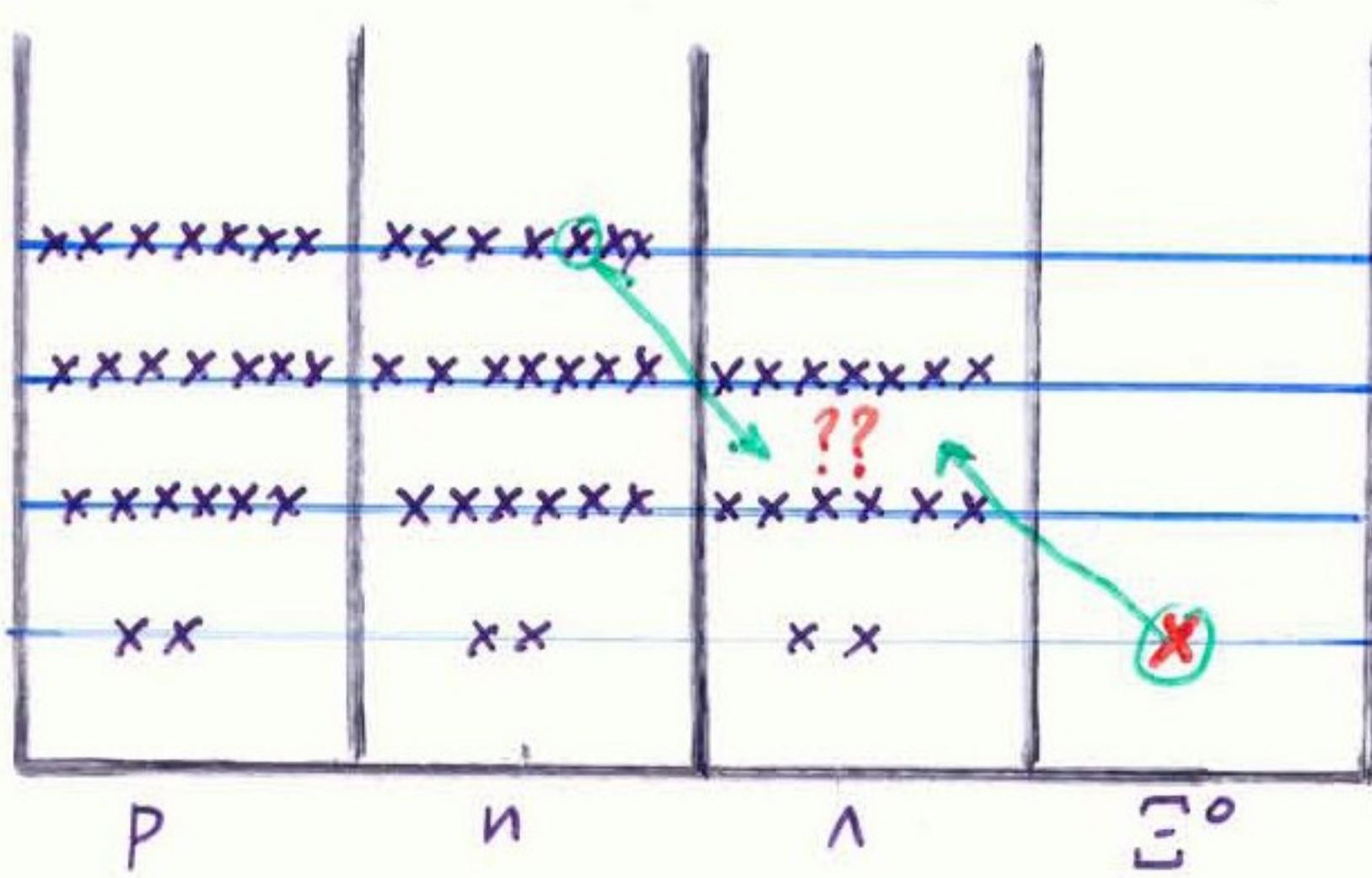


Гиперядра с большой странностью состоят
только из p, n, Λ ?

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

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

$$\sum_i y_i = 1$$

Условие насыщения

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

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

$$M_p + M_{\Xi^-} - 2M_\Lambda + M_{\Xi^+} + M_p - 2M_\Lambda = 0$$

$$M_n + M_{\Xi^0} - 2M_\Lambda + M_{\Xi^0} + M_n - 2M_\Lambda = 0$$

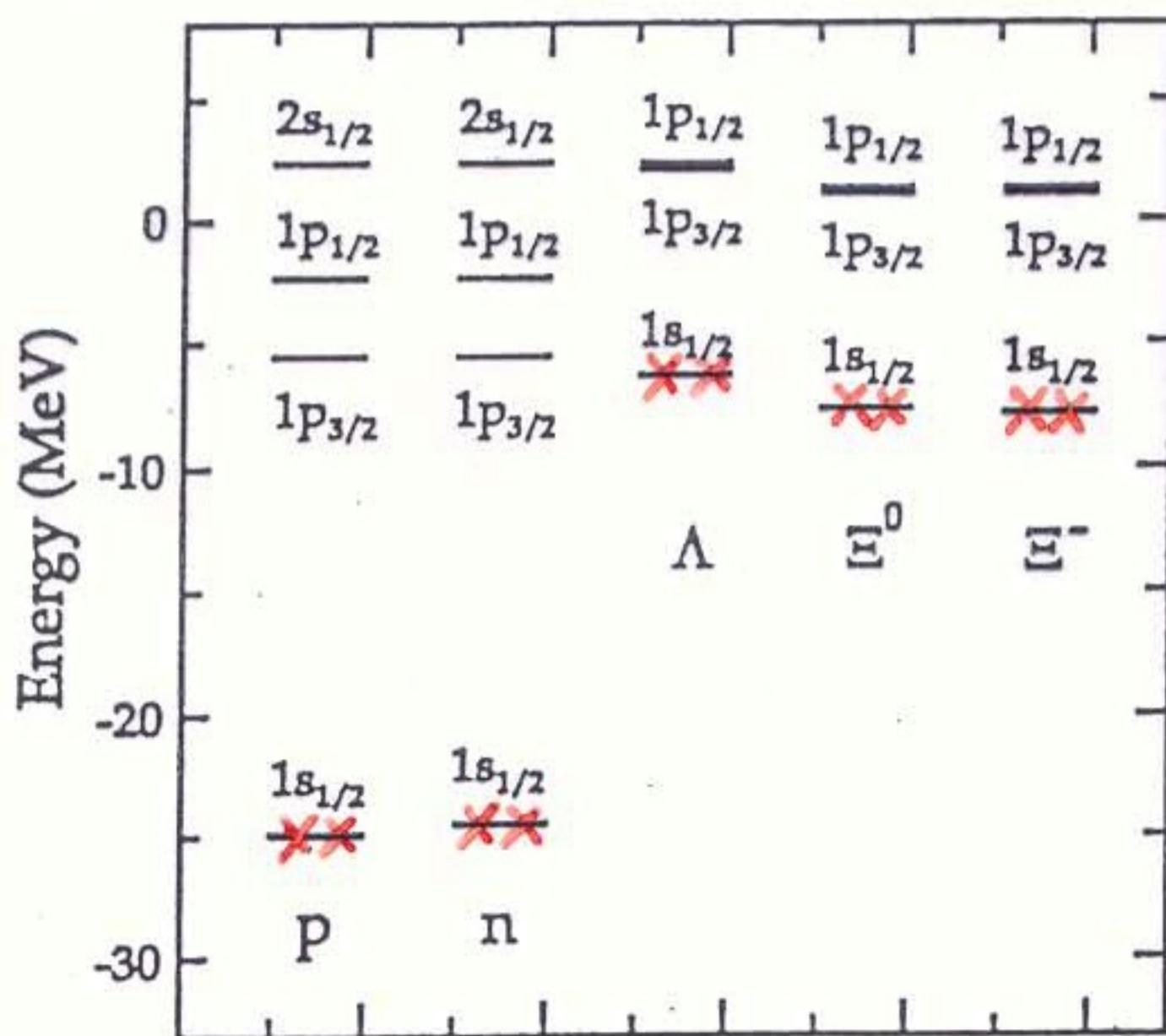
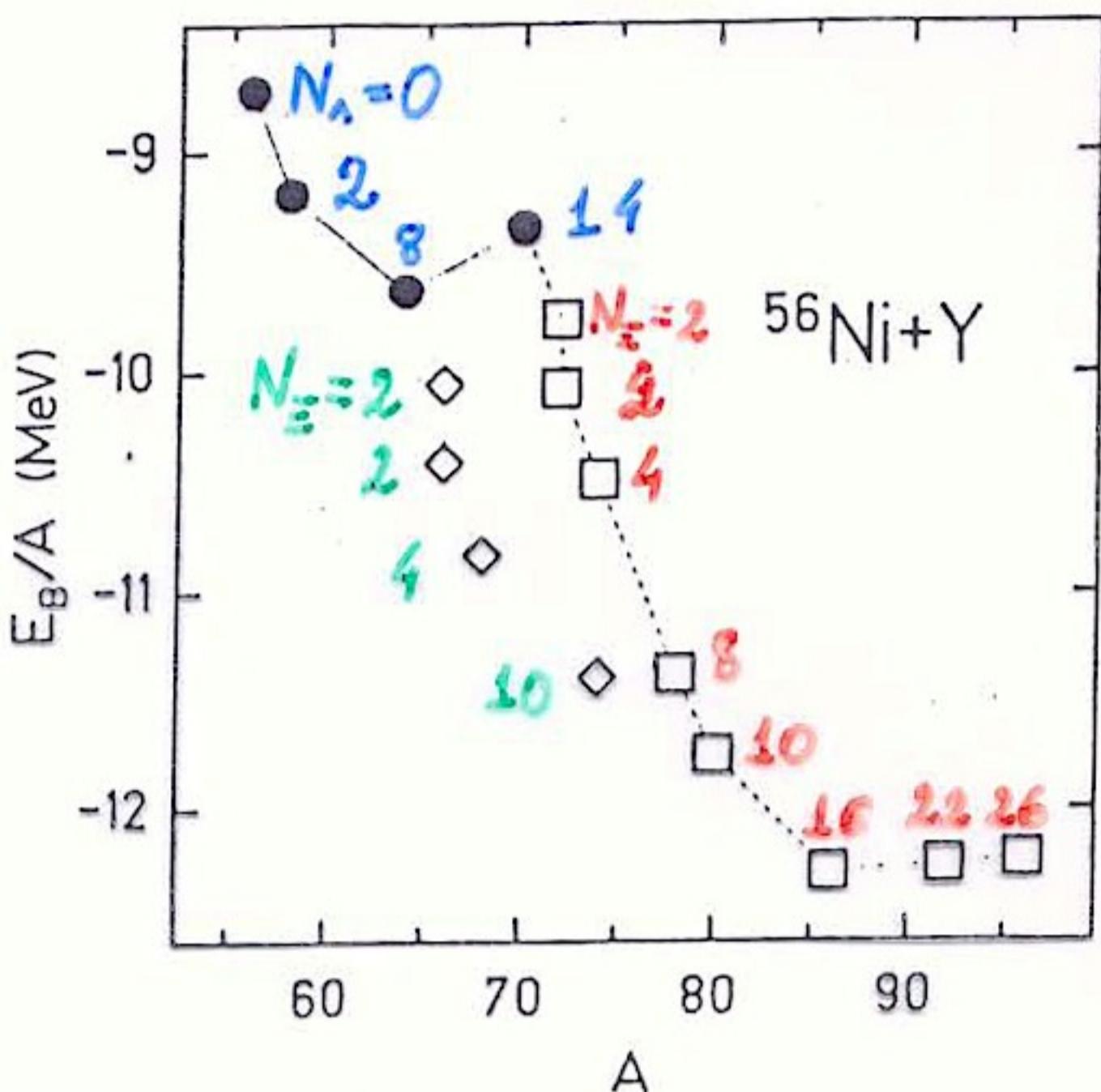
M_i - химический потенциал бариона i

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

Стабильность по отношению к исpusканию барионов

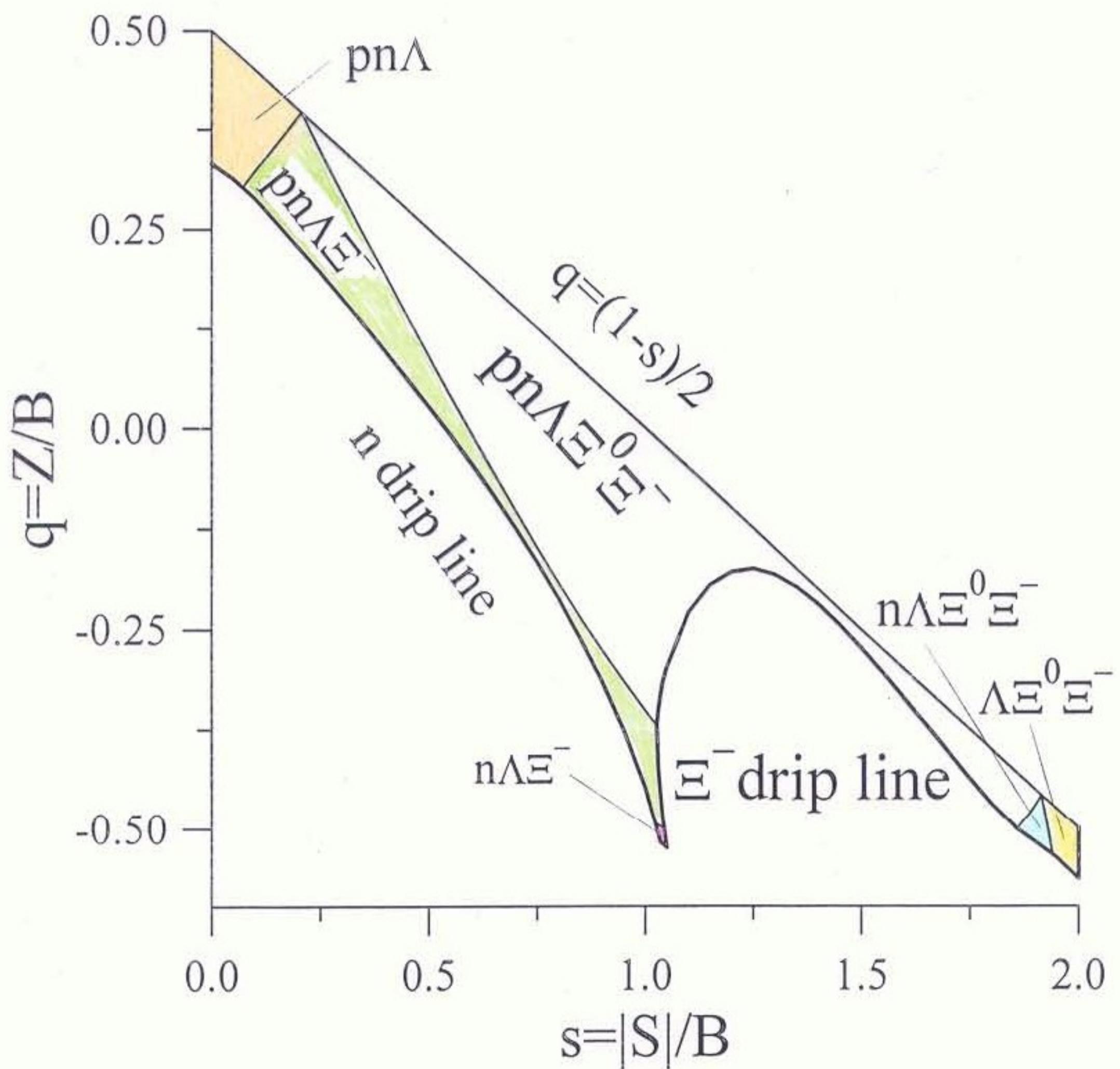
$$M_i < 0 \quad (i = p, n, \Lambda, \Xi^0, \Xi^-)$$

Гиперядра с Большой странностью



Bound state region

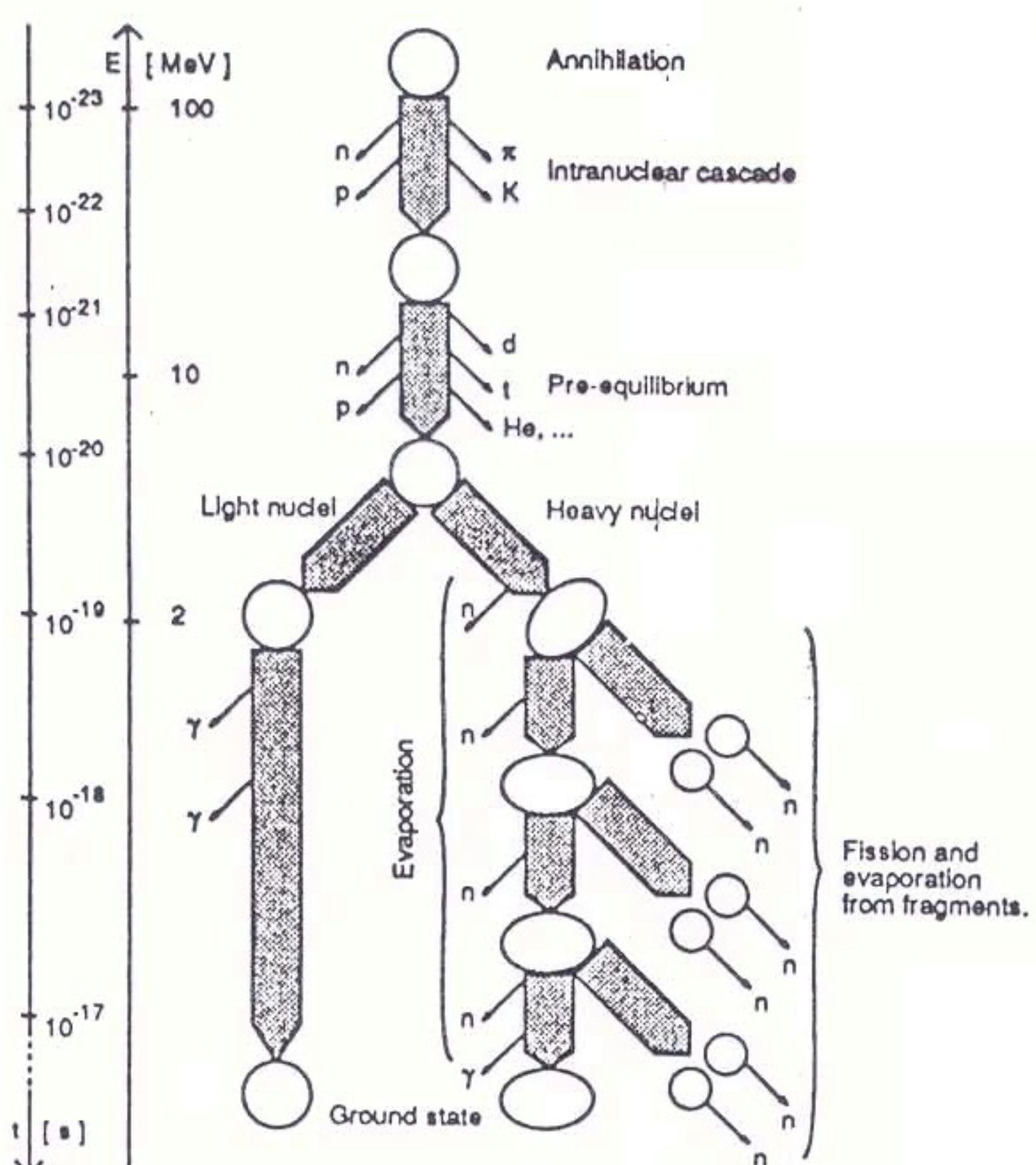
$q = (1-s)/2$ (isospin symmetry line):
zero isospin matterz ($y_P = y_n$; $y_{\Xi^0} = y_{\Xi^-}$)
 n drip line: $M_n = 0$
 Ξ^- drip line: $M_{\Xi^-} = 0$



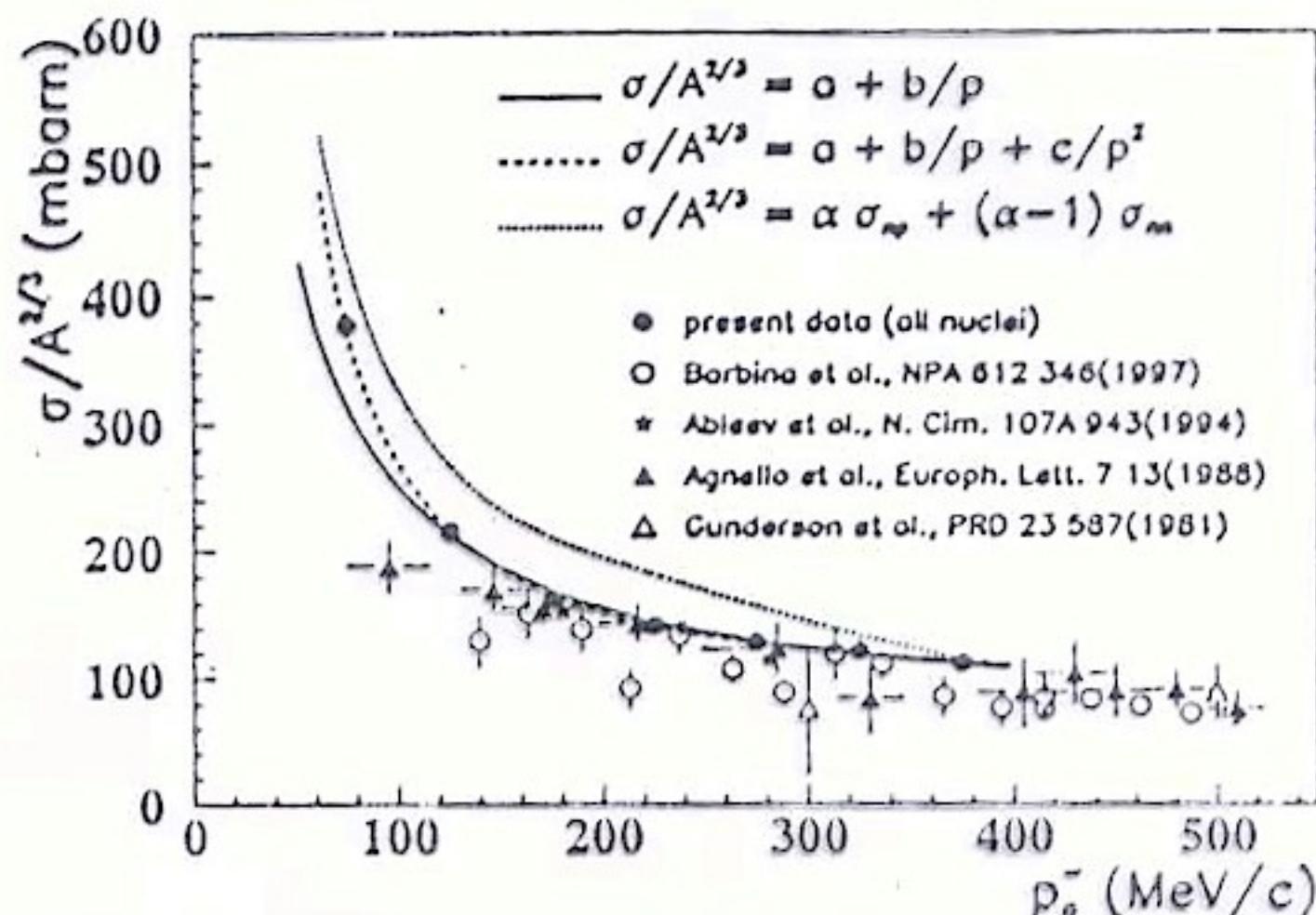
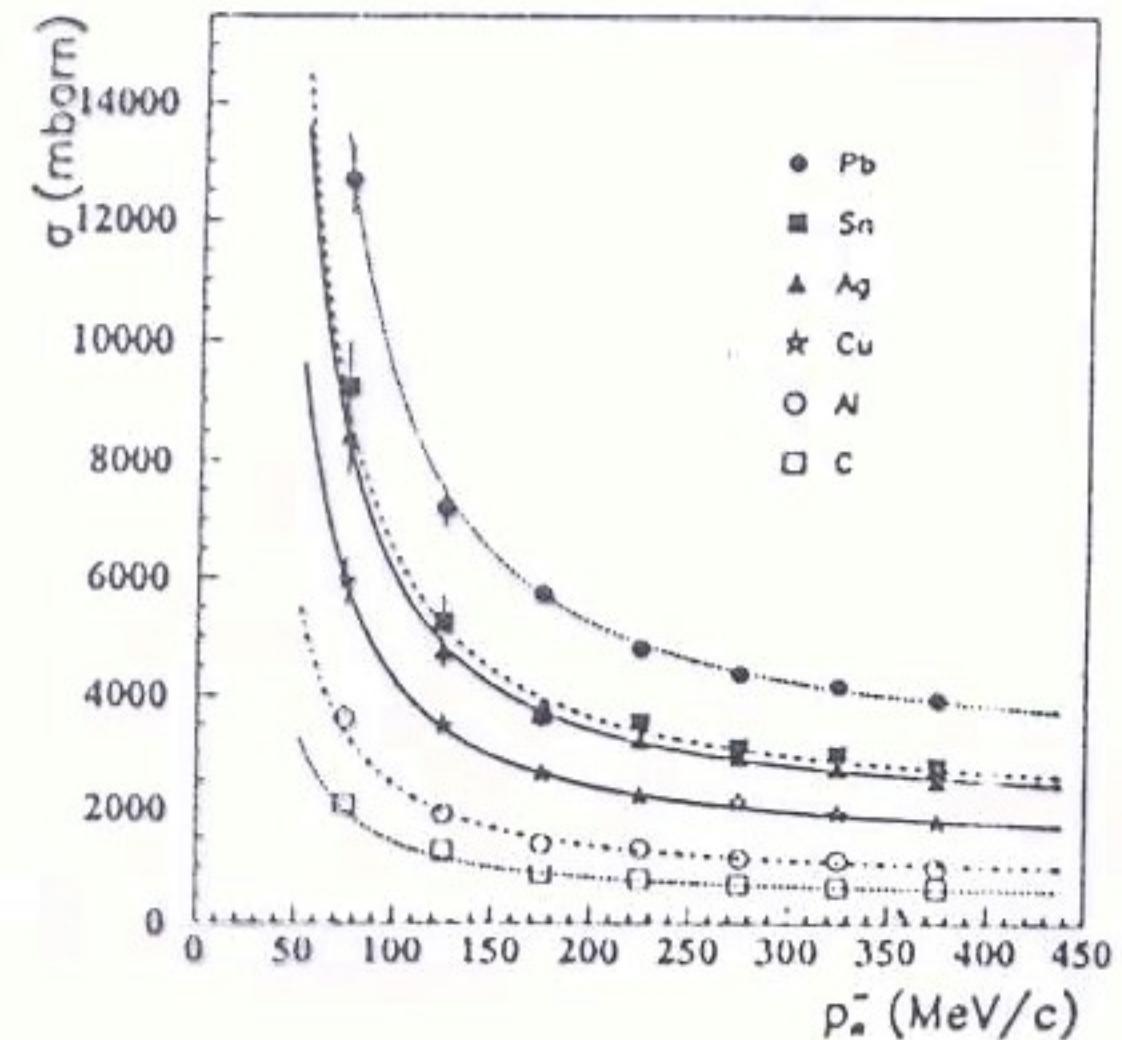
Аннигиляция $\bar{p}p$ в покое

	(%)		
2π	0.4		
3π	8	$\bar{K}K$	0.2
4π	18	$\bar{K}K\pi$	0.5
5π	46	$\bar{K}K2\pi$	0.9
6π	22	$\bar{K}K3\pi$	0.2
7π	6		
8π	0.3		

Аннигиляция антикважонов на ядрах

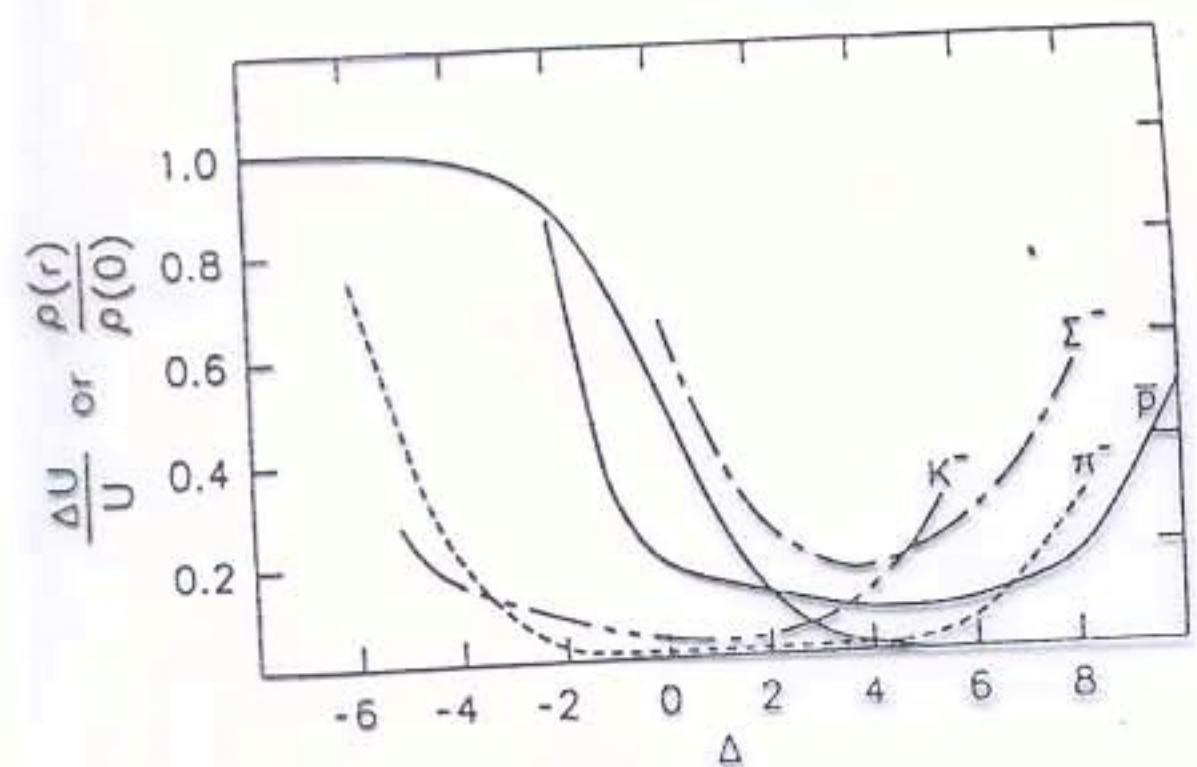


Сечения аннигиляции антинейтронов на ядрах



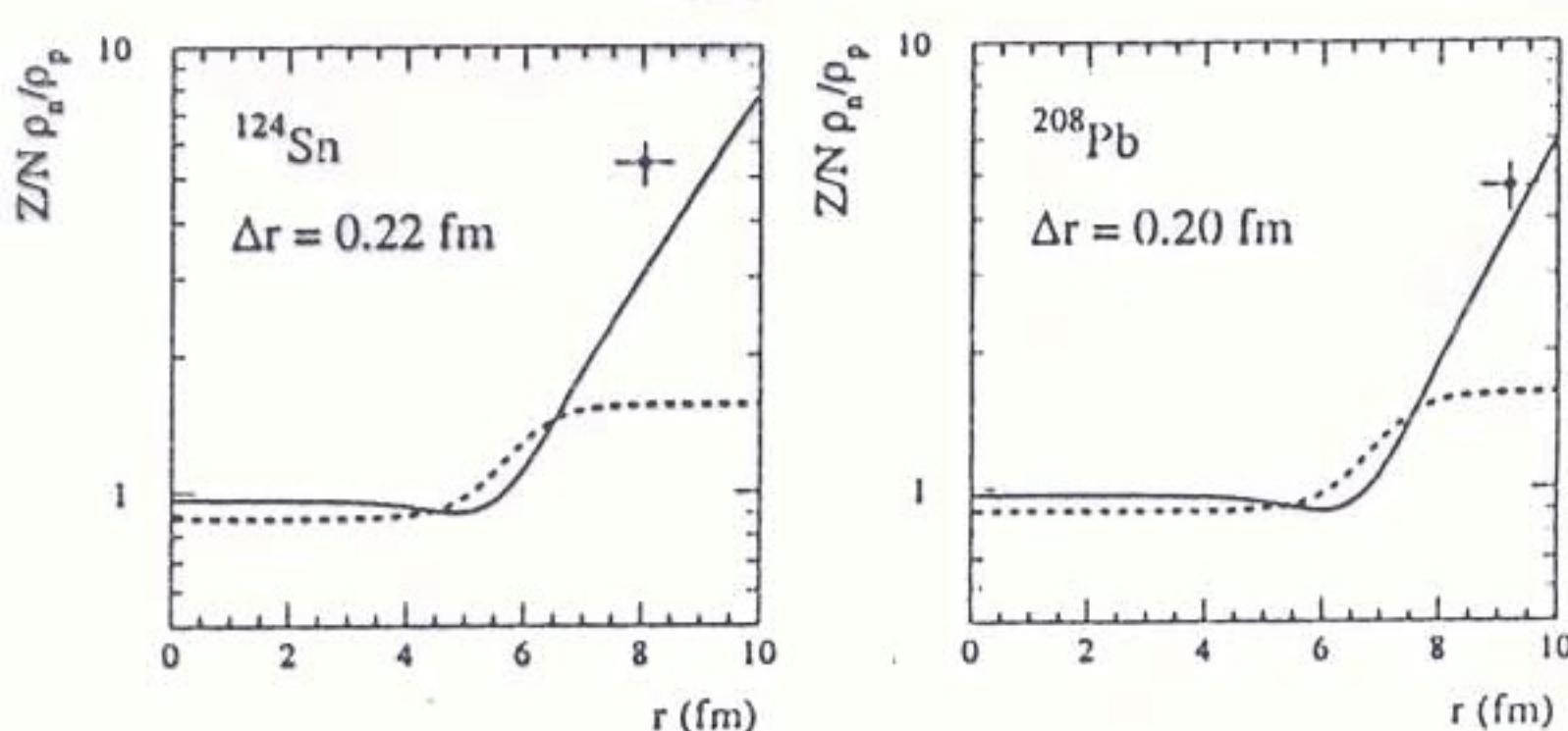
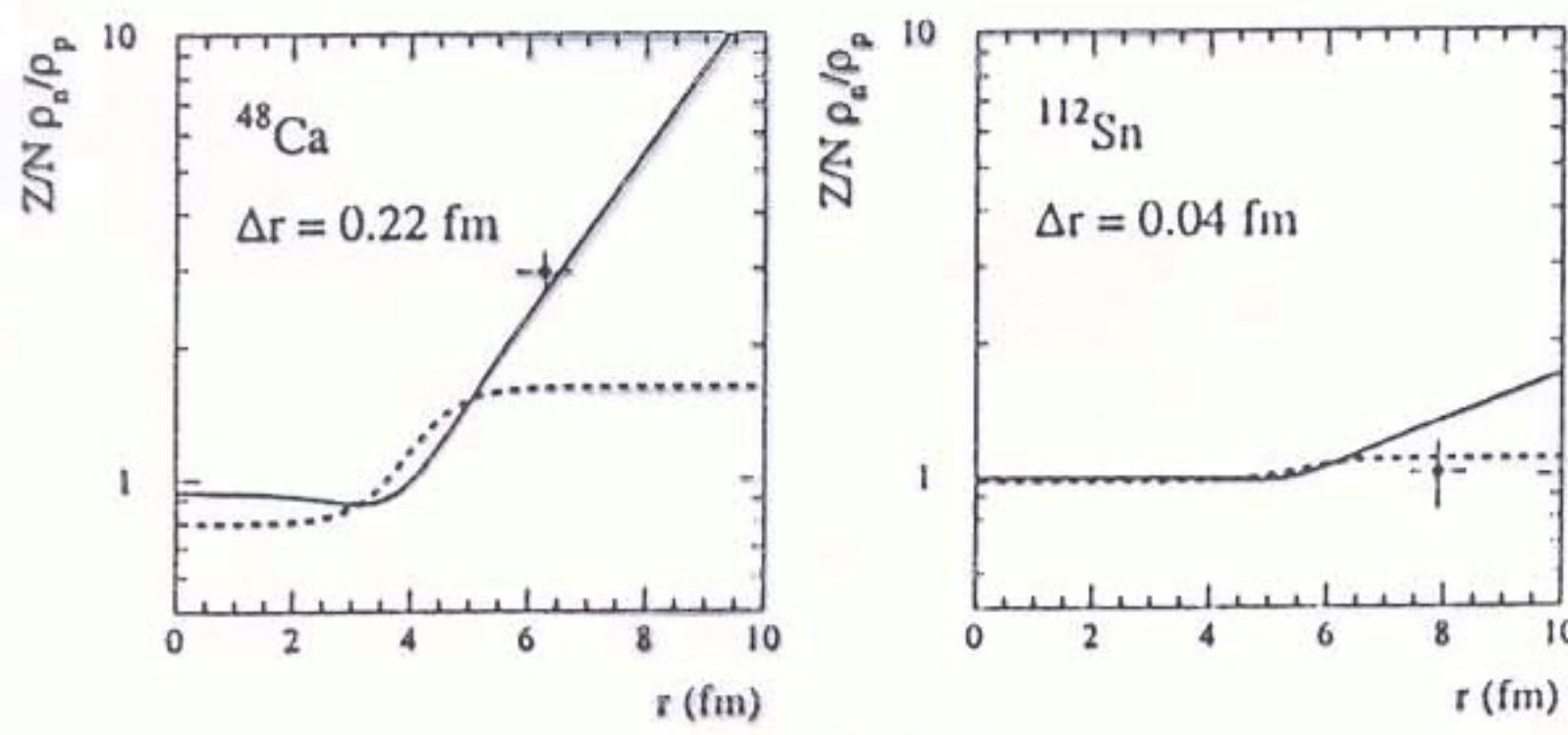
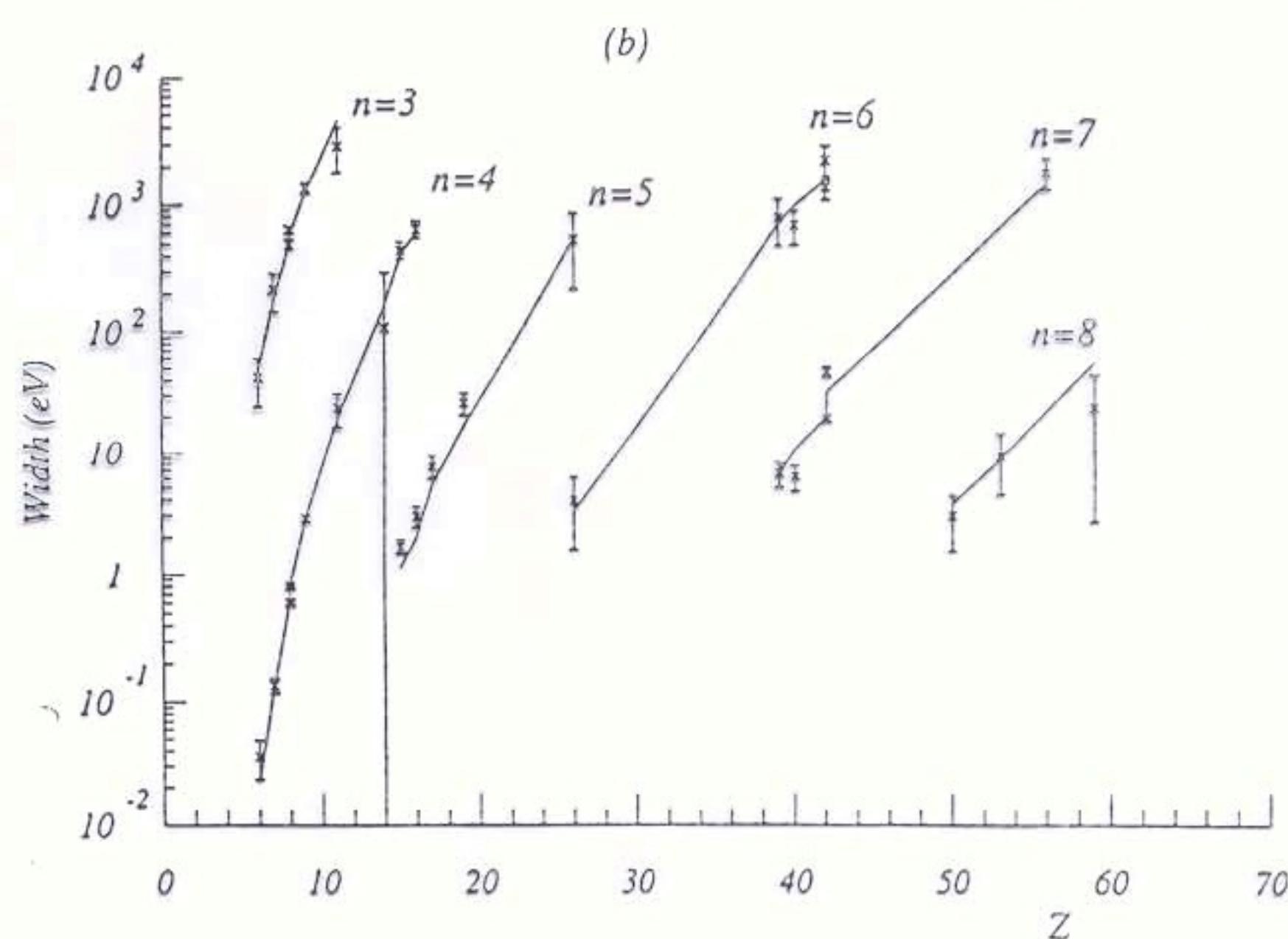
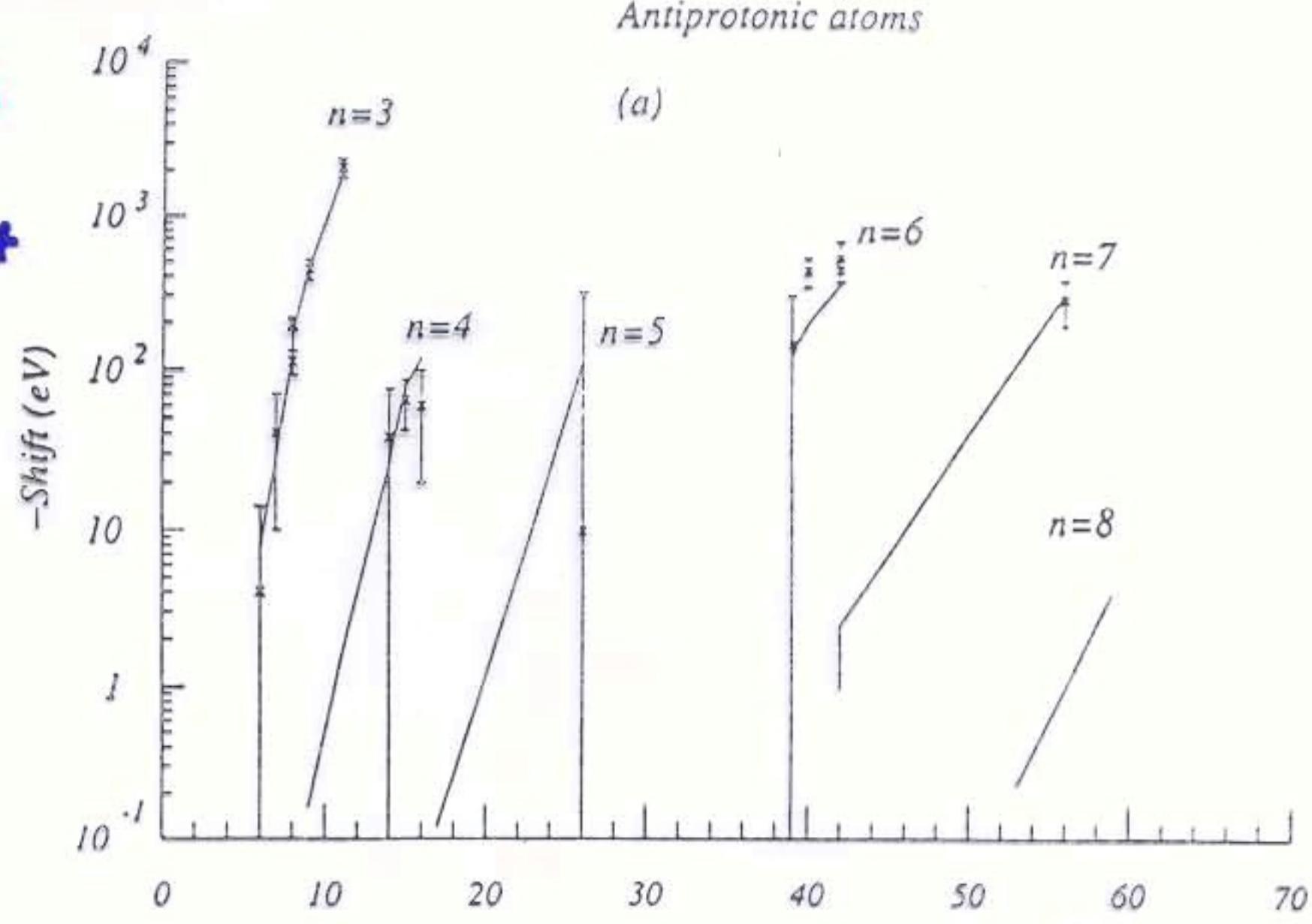
Оптический потенциал

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



$\bar{p}p$: $E_{1s} = -730 \pm 30 \text{ eV}$
 $\Gamma_{1s} = 1060 \pm 80 \text{ eV}$

$p\bar{d}$: $E_{1s} = -1.05 \pm 0.25 \text{ keV}$
 $\Gamma_{1s} = 1.10 \pm 0.75 \text{ keV}$



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

— $R_p = R_n$ ("зано")
 - - - $d_p = d_n$ ("мысна")

Адрои-ядерные системы и Взаимодействия

	пучки небольшой энергии	атомные состояния	связанные ядерные состояния	специфич. реакции на ядре	поглощение
нионы	+	+	-	двойная перезарядка	$\bar{N}N \rightarrow NN$
каоны K^+, K^0	+	-	-	образование пентакварика	-
антикаоны K^-, \bar{K}^0	+	+	+? (наблюдение ширина)	образование гиперонов и гиперзетер	$\bar{K}N \rightarrow \bar{\Lambda}Y$
Λ -гипероны	-	-	+	-	слабый распад
Σ -гипероны	-	+	+/- (изоспин, ширина)	-	$\Sigma N \rightarrow \Lambda N$
Ξ -гипероны	-	+	+	образование ЛЛ-гиперзетер	$\Xi N \rightarrow \Lambda\Lambda$
актинуклоны	+	+	?	аннигиляция	$\bar{N}N \rightarrow$ мезоны

Плотность и фермиевский импульс бесконечной ферми-системы

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

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

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

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

Гравитационное давление

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

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

~~Q/m~~

Давление вырожденного электронного газа

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

$$a) E = \frac{k^2}{2m}$$

$$\mathcal{E} = \frac{3}{4\pi K_F^3} \frac{1}{2m} 4\pi \int_0^{K_F} K^4 dK = \frac{3}{10m} (3\pi^2)^{2/3} n^{2/3}$$

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

$$\delta) E = K$$

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

Нейтронизация



$$E_F = 3.7 \text{ MeV} \quad \rho = 10^9 \text{ g/cm}^3$$



$$E_F = 1.6 \text{ MeV}$$



Материя нейтронных звезд

1) н р е

$$M_n = M_p + M_e$$

2) н р е μ^-

$$M_n = M_e$$

3) н р е $\mu^- \wedge \Sigma \Xi$

$$M_{\Sigma^-} = M_{\Xi^-} = M_n + M_e$$

$$M_n = M_\Lambda = M_{\Sigma^0} = M_{\Xi^0}$$

$$M_p = M_{\Sigma^+}$$

$$M_n = M_p + M_e ; M_n = M_e$$

Уравнение Оппенгеймера - Волкова

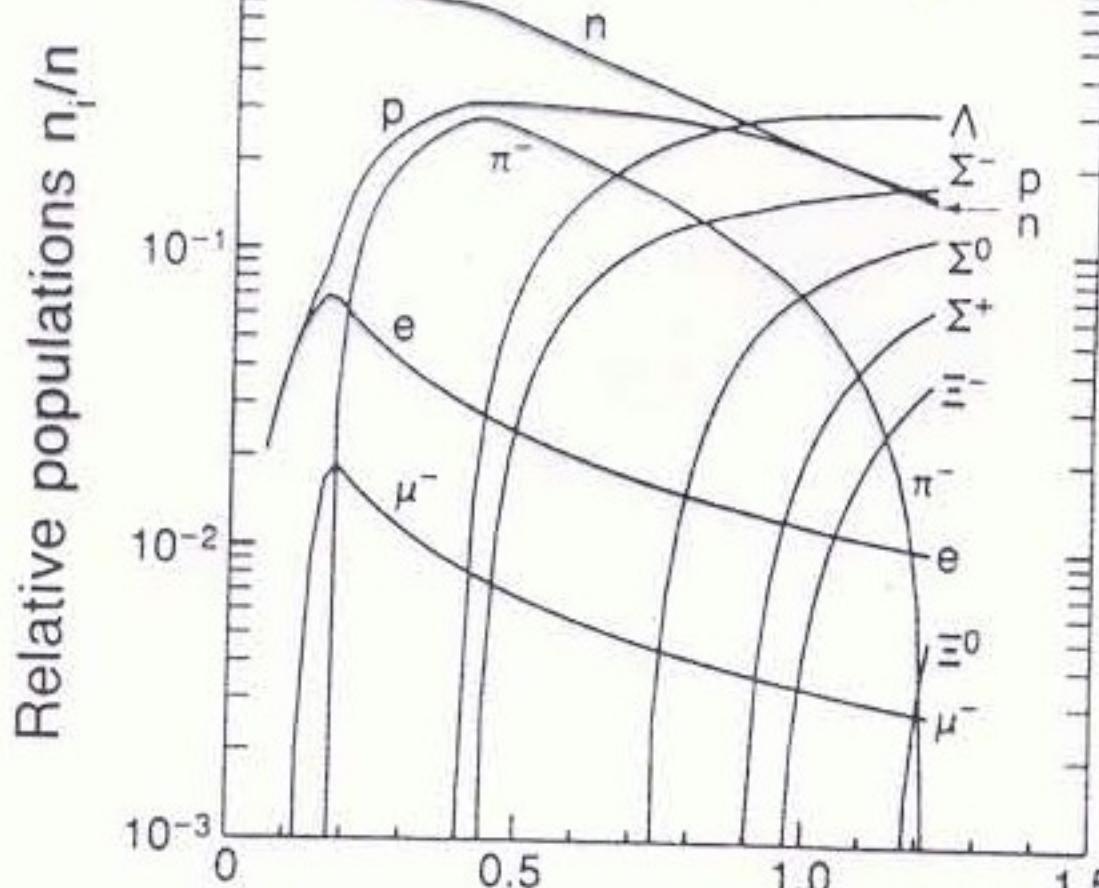
$$\frac{dp}{dz} = -G \frac{(p + \rho)(M + 4\pi z^3 p)}{z^2 - 2GMz}$$

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

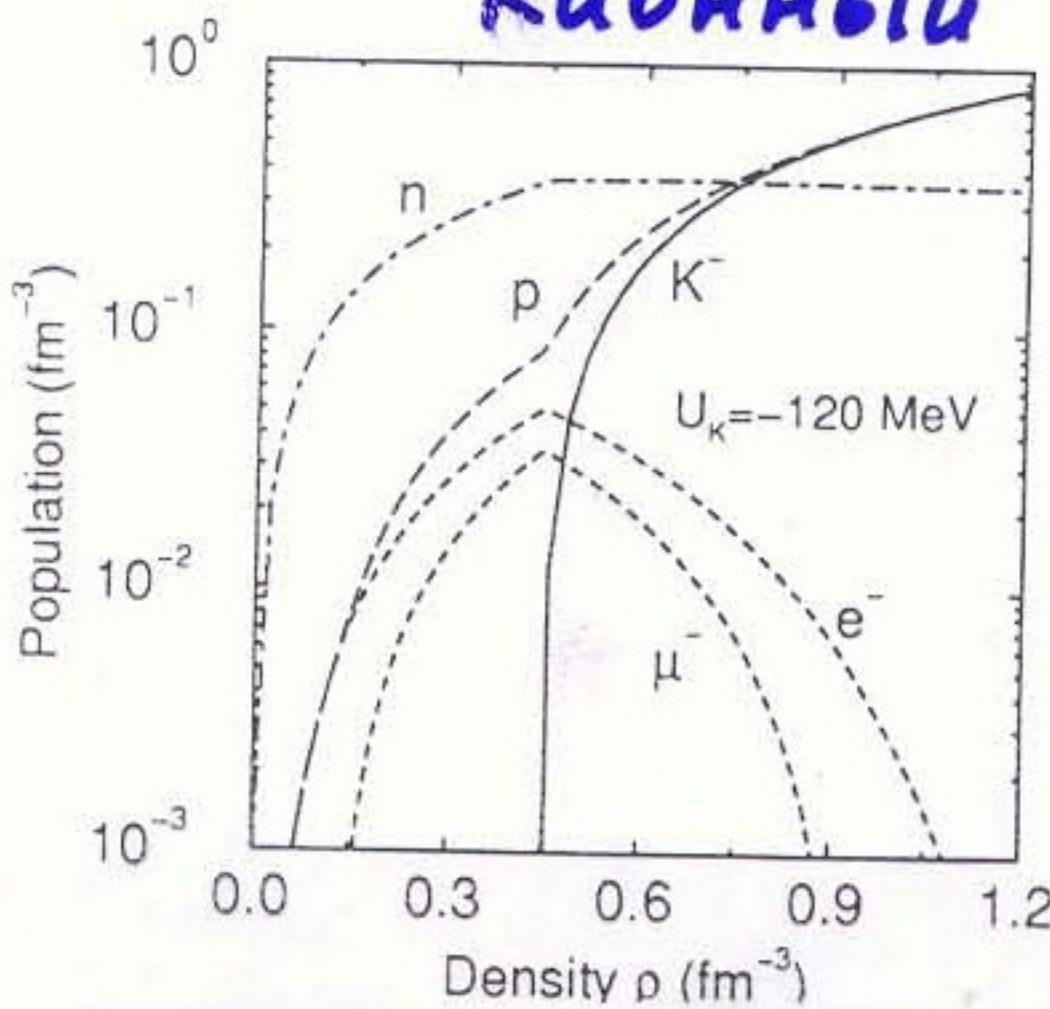
Конденсат

нионный

$$M_{\pi^-} = M_e$$

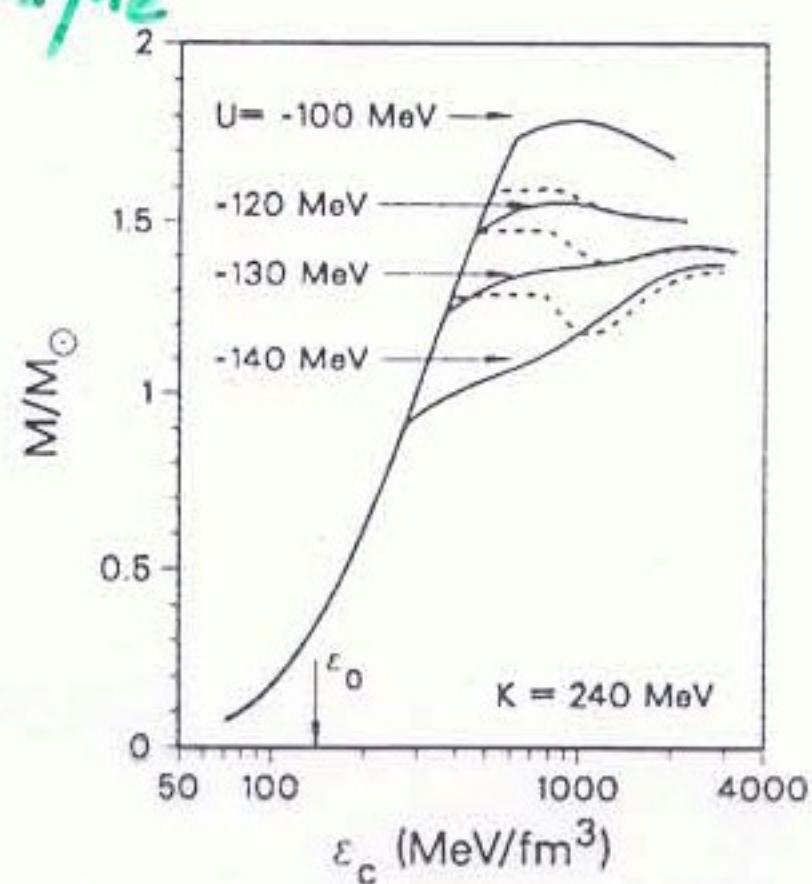


каронный



$$n (\text{fm}^{-3})$$

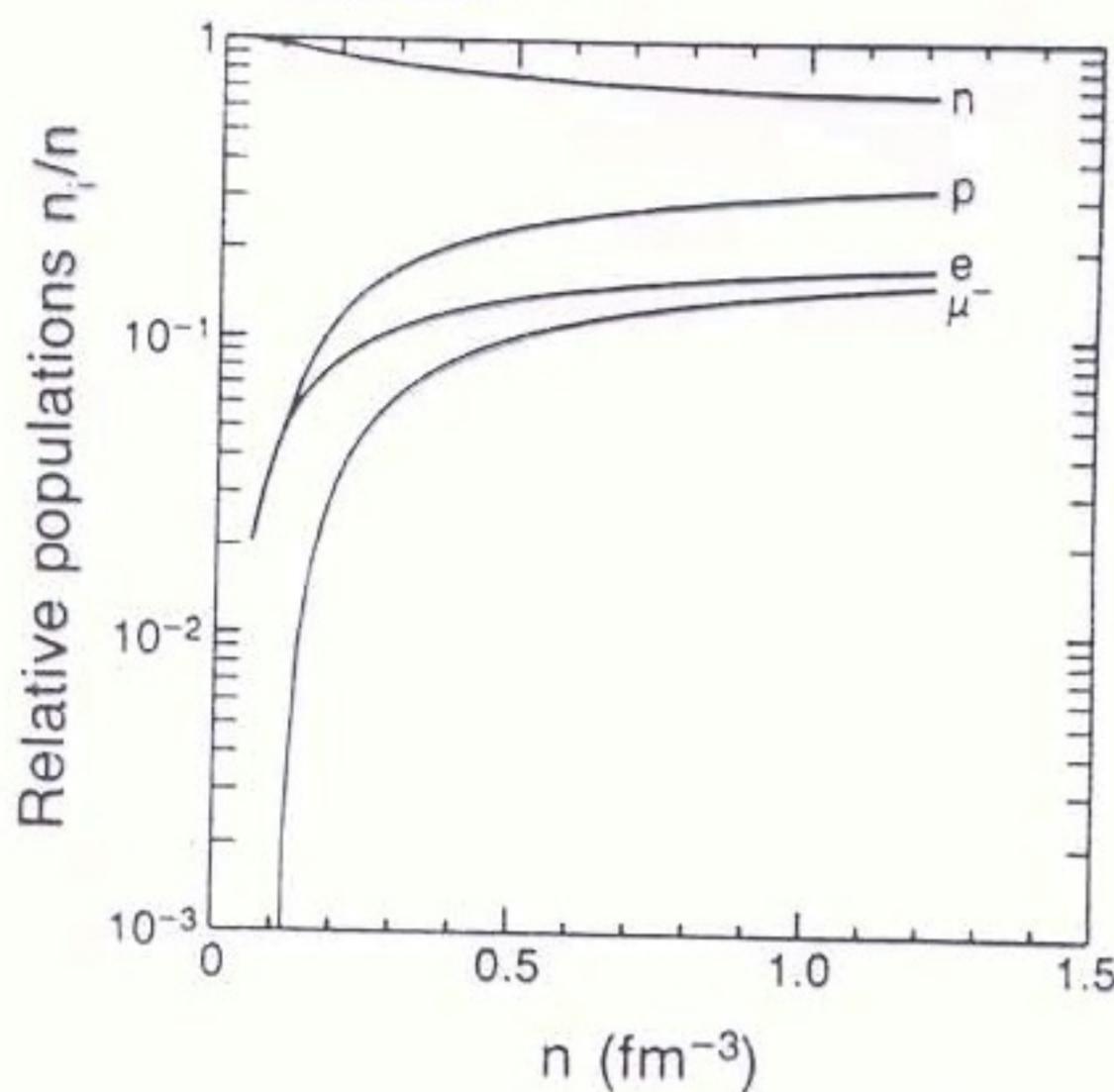
$$M_{K^-} = M_e$$



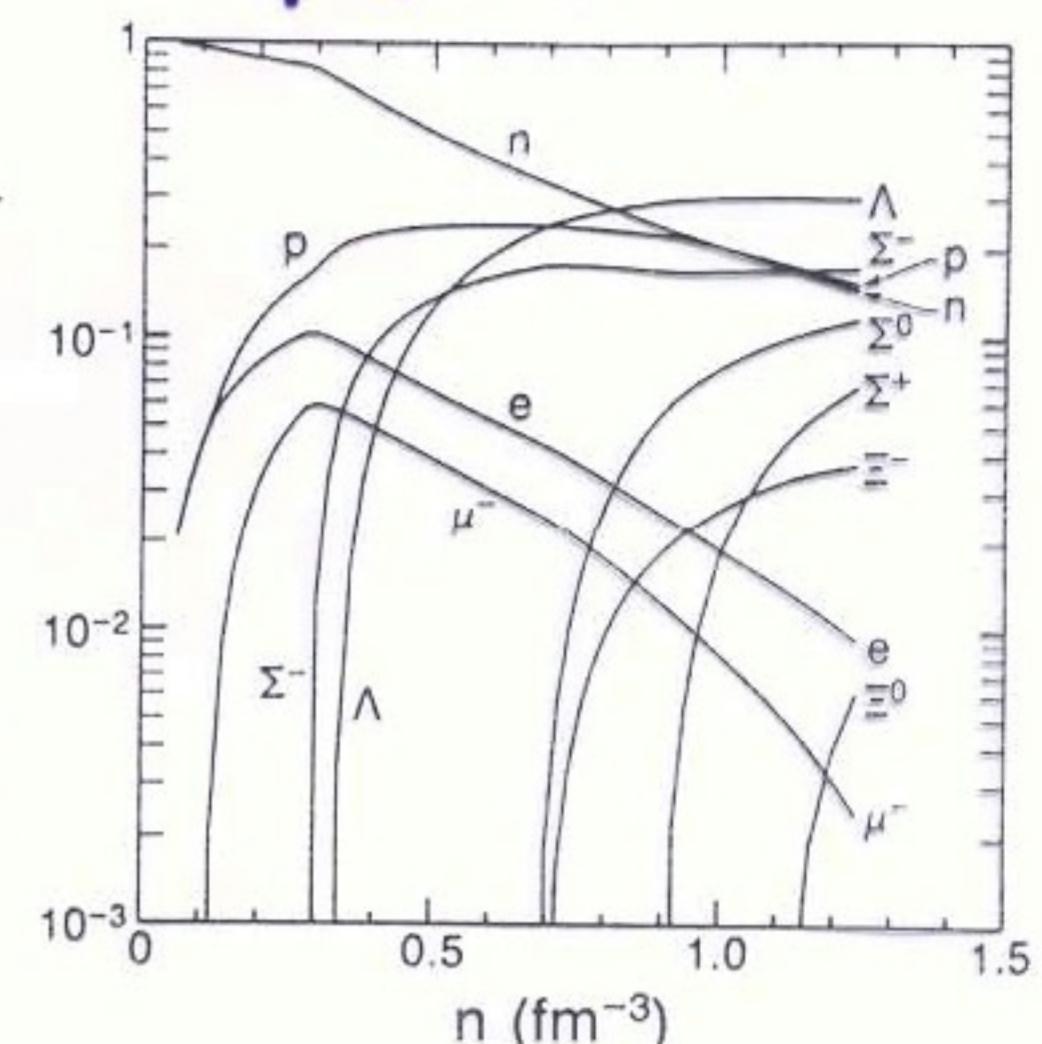
Состав материи

нейтронных звезд

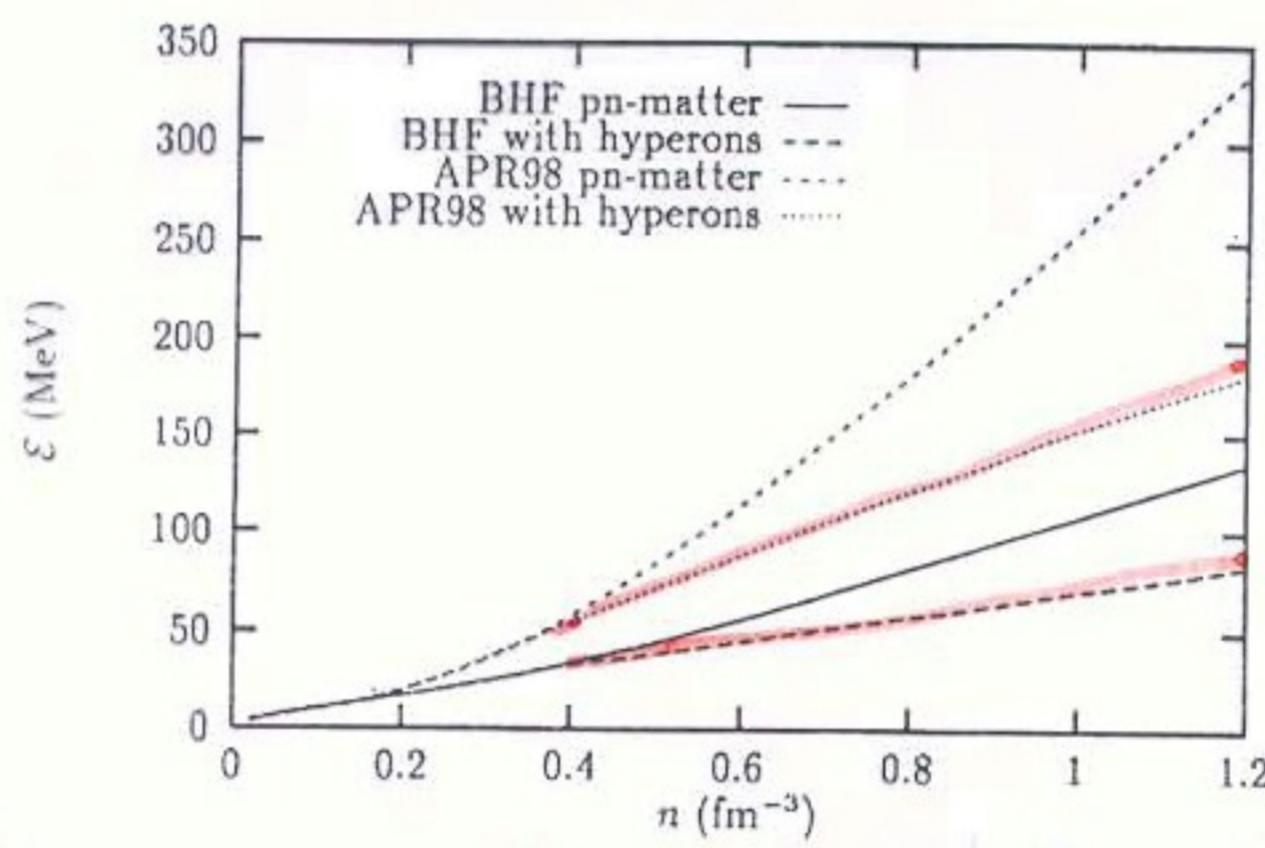
нрсм



ΗΡΕΜΛΣΞ

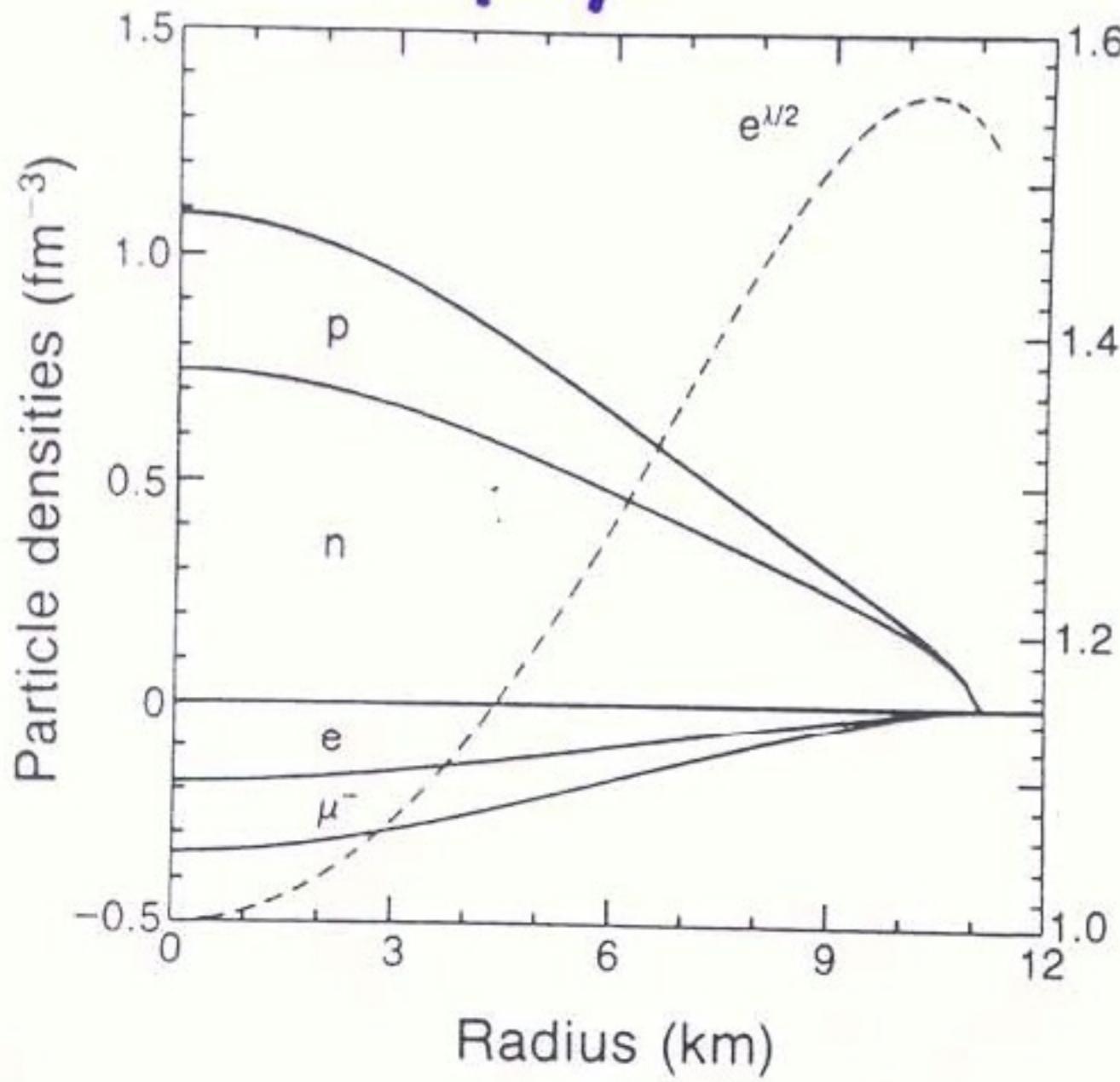


Уравнение состояния

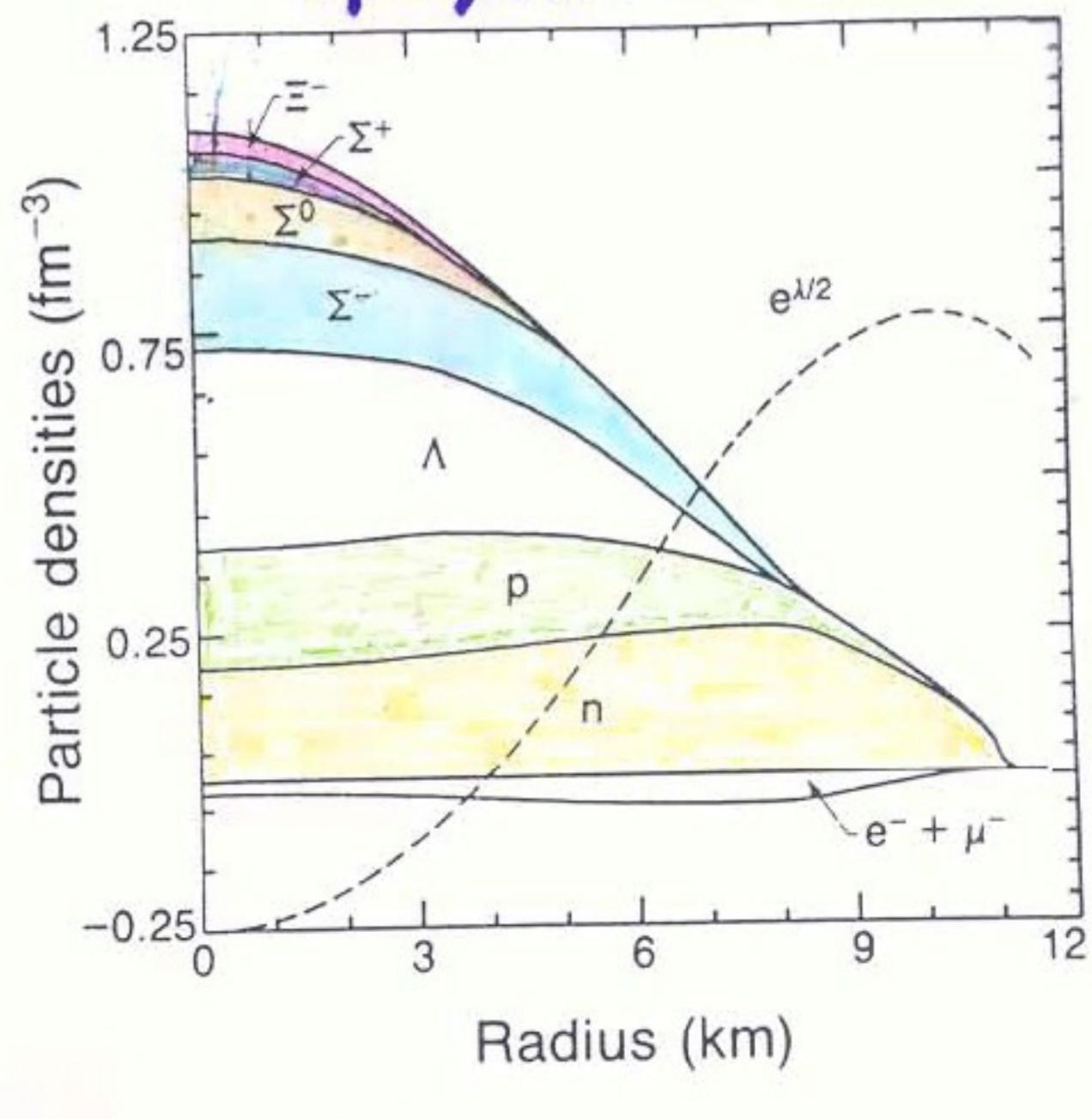


Структура нейтронной звезды

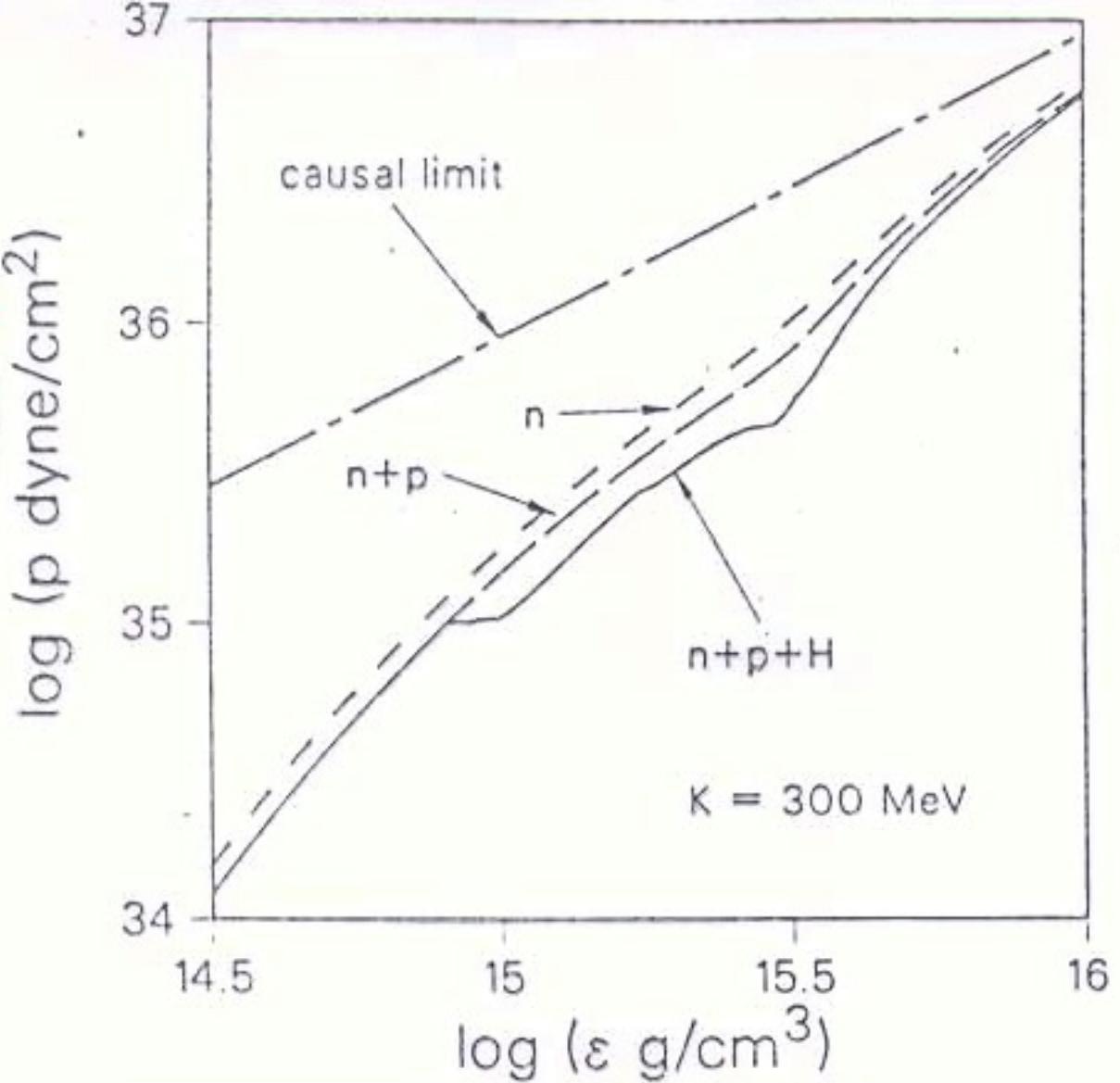
нреч



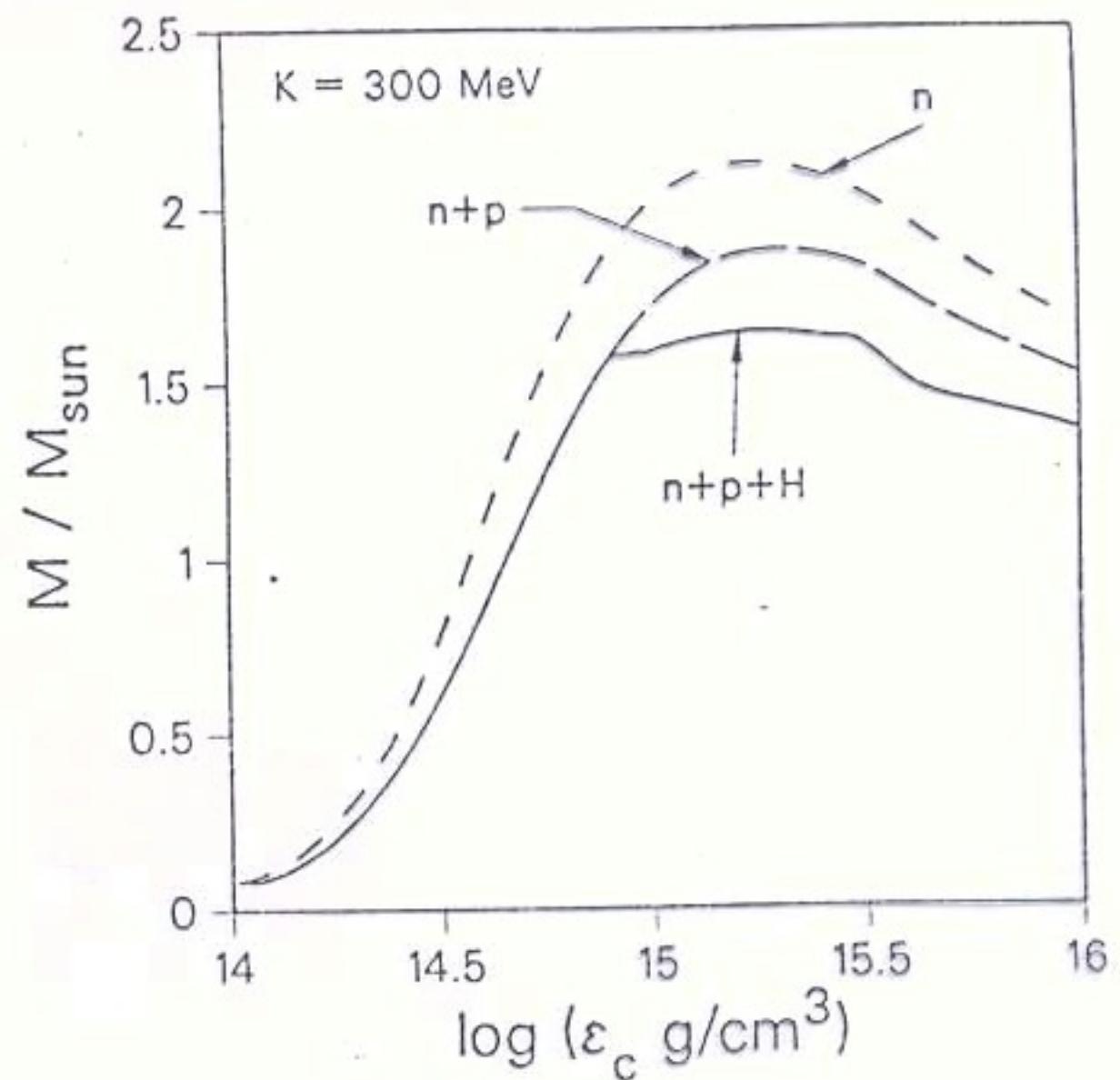
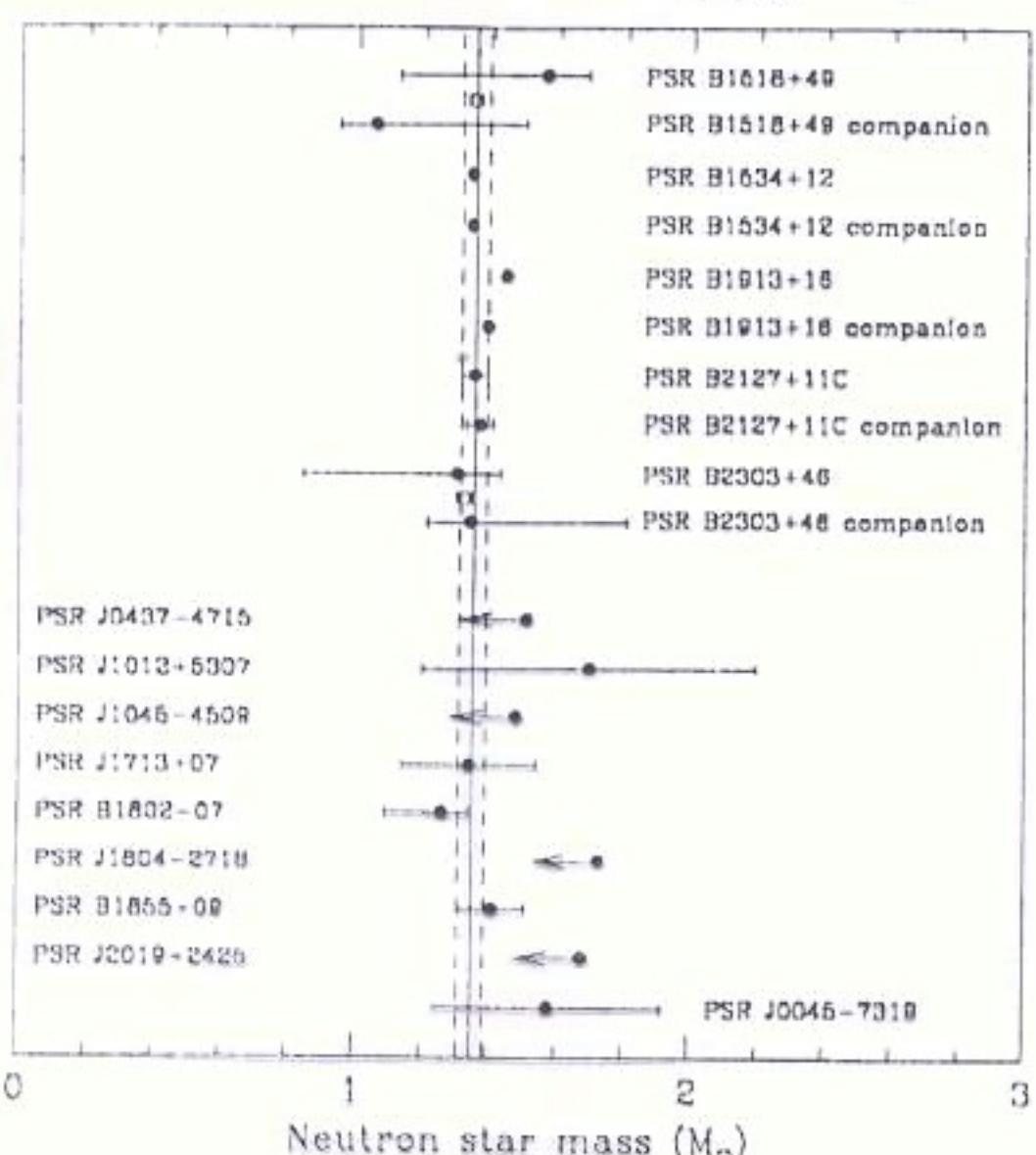
ΗΡΕΜΑΣΞ



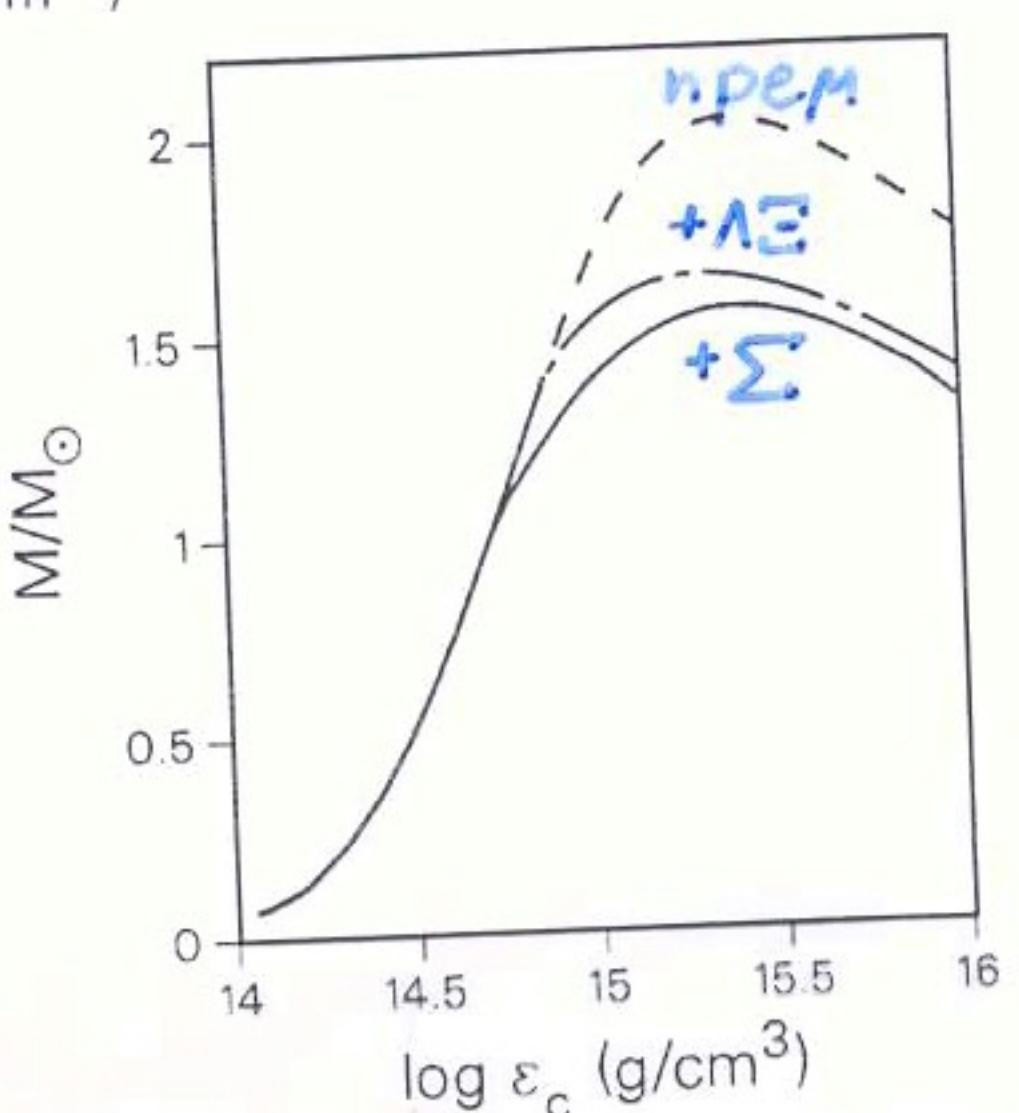
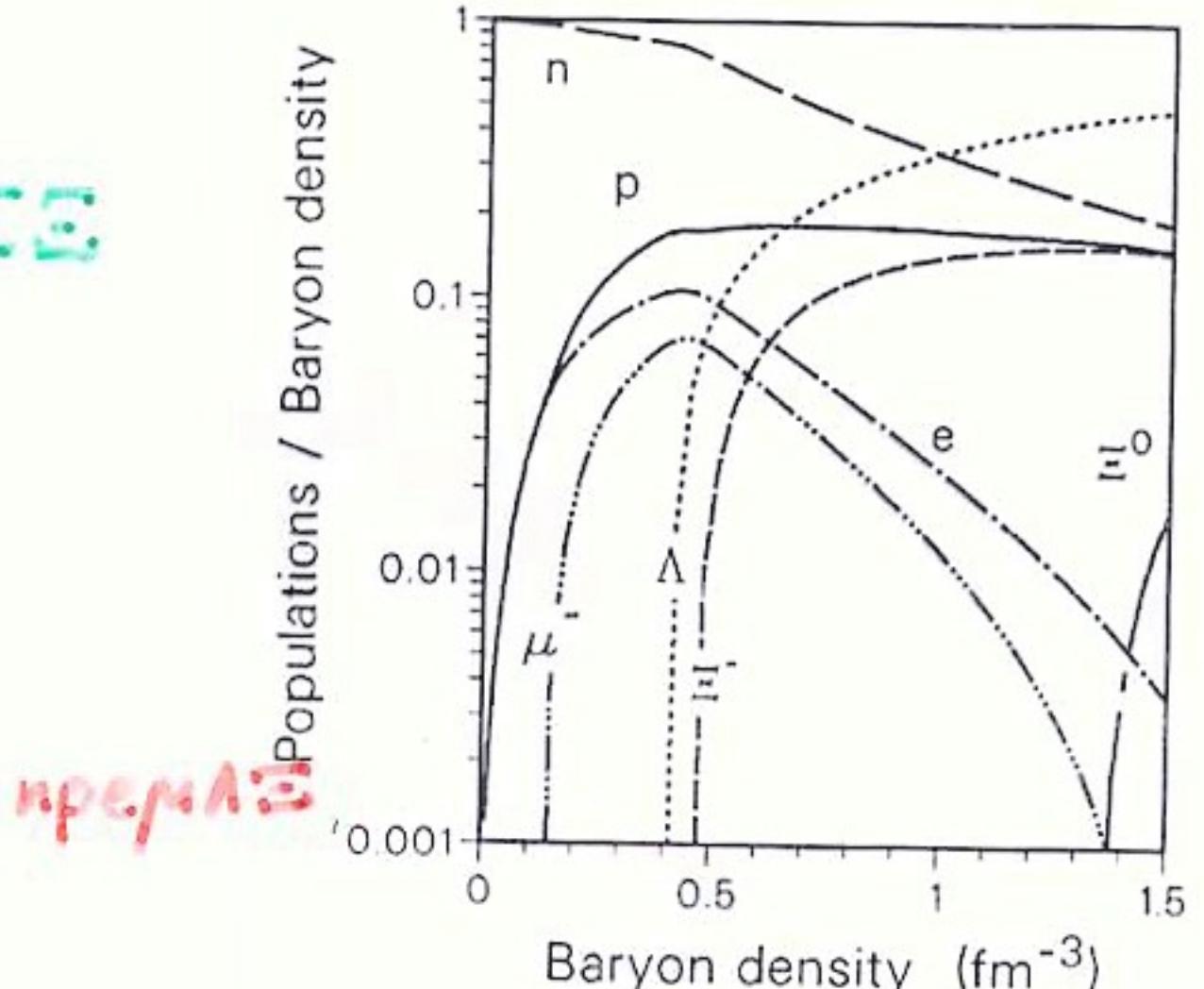
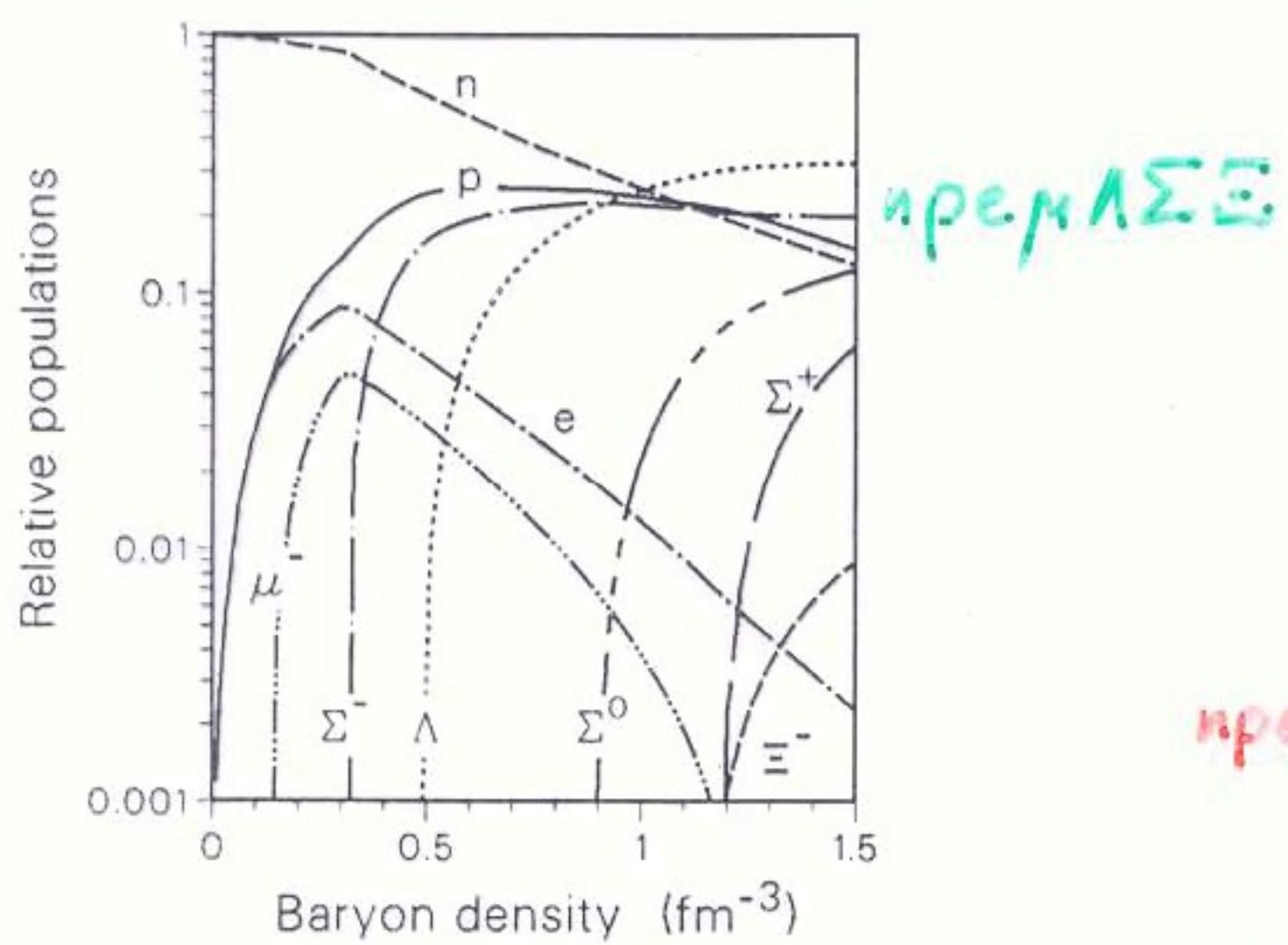
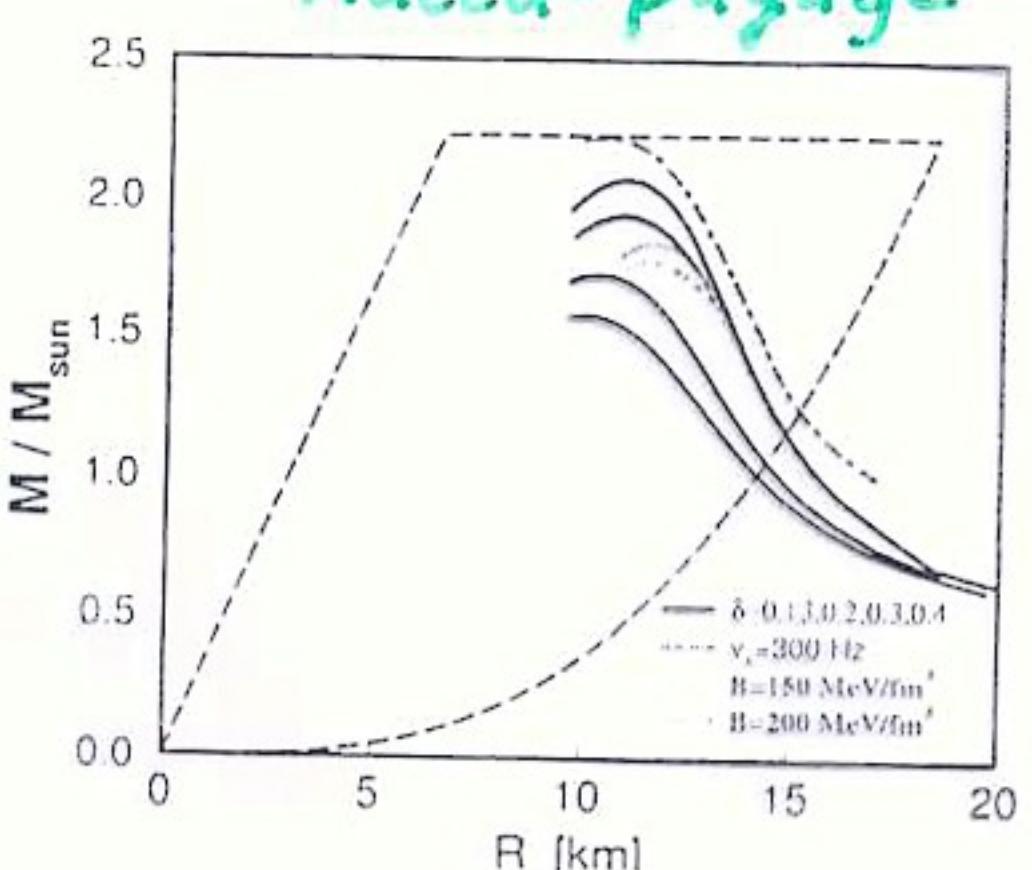
Уравнение состояния



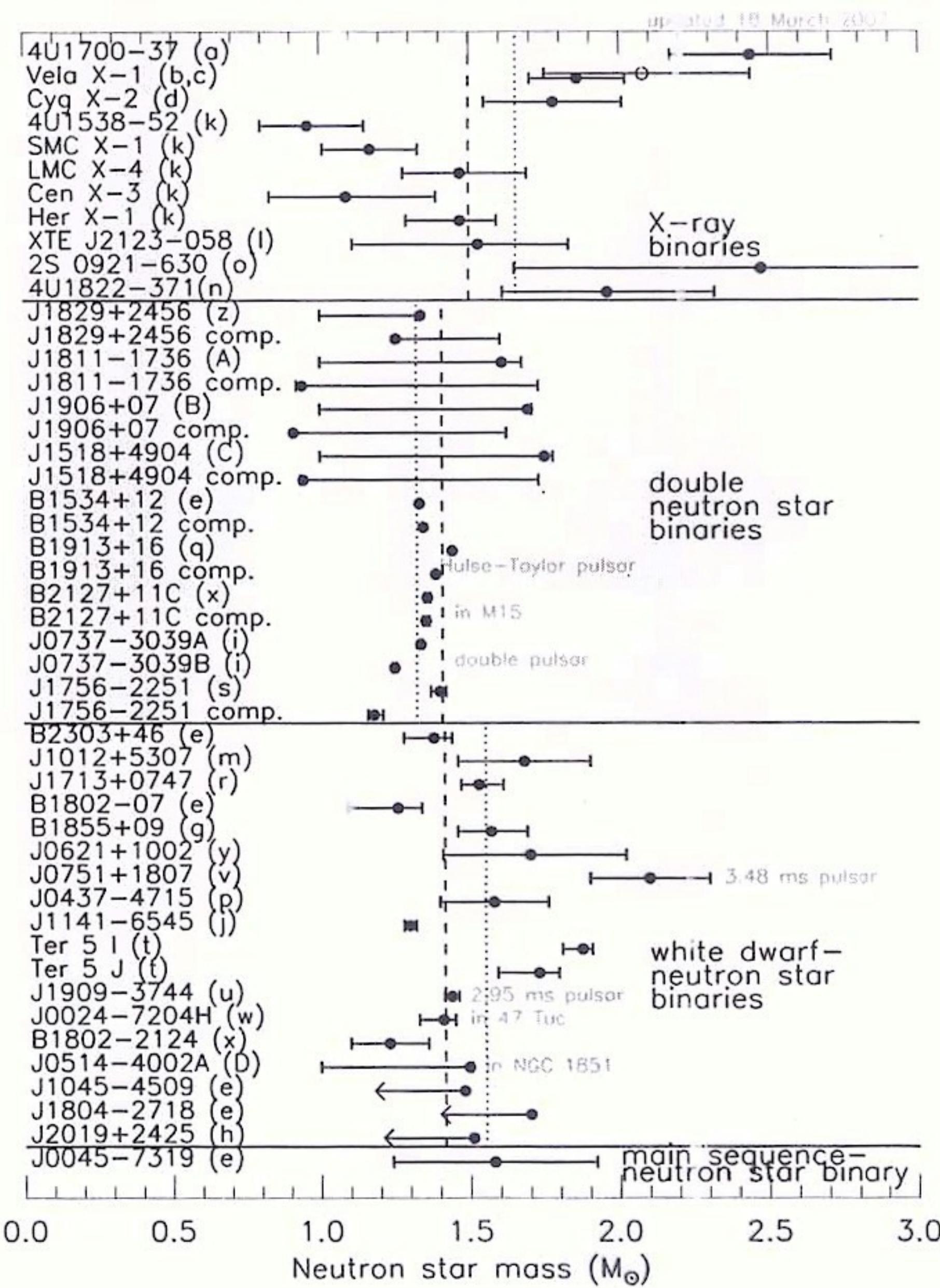
Массы
нейтронных
звезд



Соотношение
"Масса-радиус."



MEASUREMENTS of NEUTRON STAR MASSES and RADII



Object	R (km)	Ref
Omega Cen	13.5 ± 2.1	Rutledge et al. ('02)
Chandra		
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)