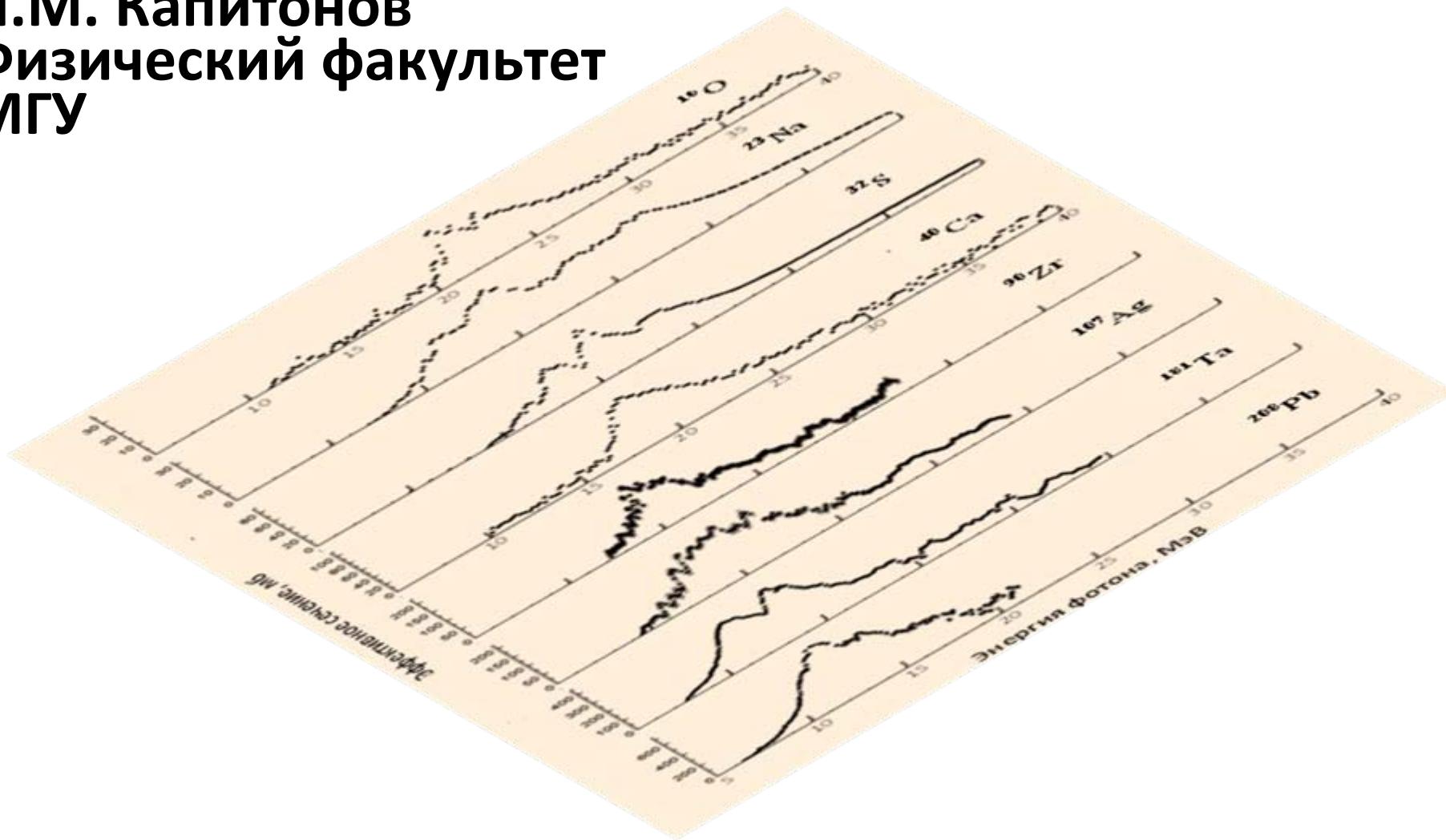
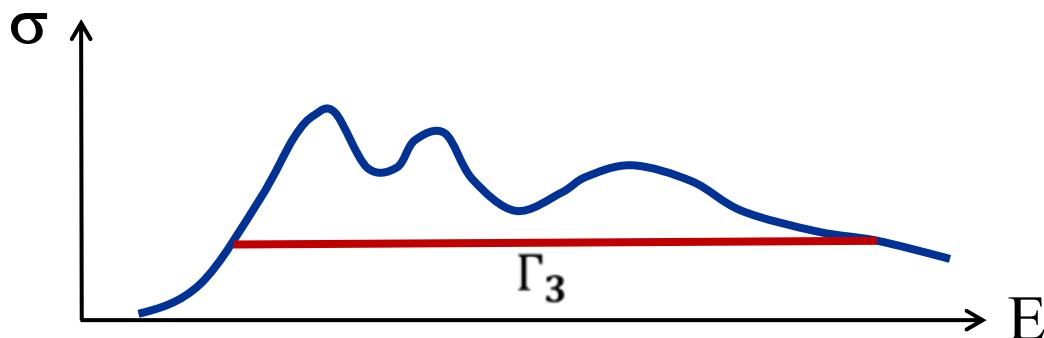
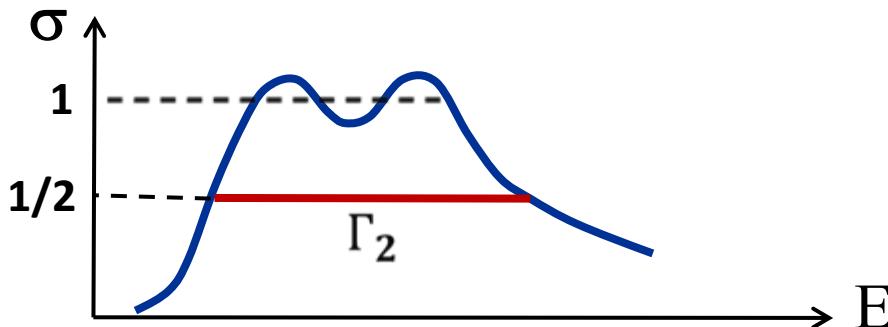
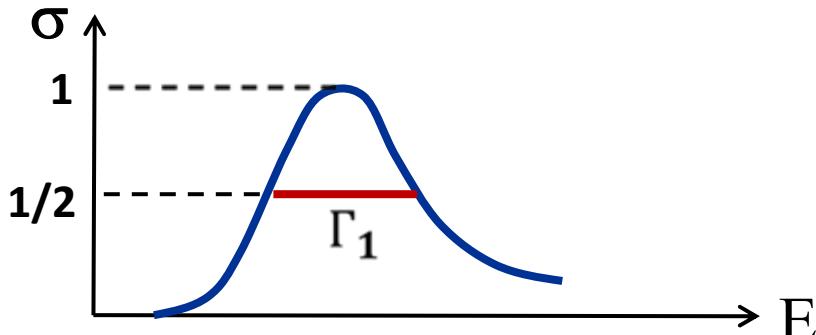


Ширина Гигантского Дипольного Резонанса

И.М. Капитонов
Физический факультет
МГУ



Что будет пониматься под шириной Гигантского Дипольного Резонанса (ГДР)?



Γ_3 - ширина основной области фотопоглощения

Что влияет на ширину ГДР?

1. Ширина распада Γ^{\uparrow} входных ($1p1h$) состояний с вылетом нуклона в непрерывный спектр.
2. Ширина разброса входных состояний.
3. Ширина распада Γ^{\downarrow} входных состояний по состояниям более сложной природы ($2p2h, 3p3h, \dots$).

Ширина разброса входных состояний возникает за счёт следующих эффектов:

1. Разброс E1-переходов из одной оболочки.
2. Разброс E1-переходов из разных оболочек (конфигурационное расщепление ГДР).
3. Расщепление E1-переходов по изоспину (изоспиновое расщепление ГДР).
4. Расщепление E1-переходов за счёт несферичности ядра (деформационное расщепление ГДР).

Источники фотоядерной информации

- 1. База фотоядерных данных CDFE (сотни сечений).**
- 2. База характеристик атомных ядер CDFE.**
- 3. Атлас сечений фотопоглощения ядер с $A = 12\text{-}65$,
составленный в 2002 г. Б.С. Ишхановым, И.М.
Капитоновым, Е.И. Лилеевой, Е.В. Широковым,
В.А. Ероховой, М.А. Ёлкиным, А.В. Изотовой.**
- 4. Многочисленные оригинальные экспериментальные
и теоретические работы.**
- 5. Обзоры. Монографии.**

Ширина ГДР меняется в широких пределах: 4 – 30 МэВ

Она максимальна в самых легких ядрах ($A \leq 14$),
достигая в них величины ≈ 30 МэВ.

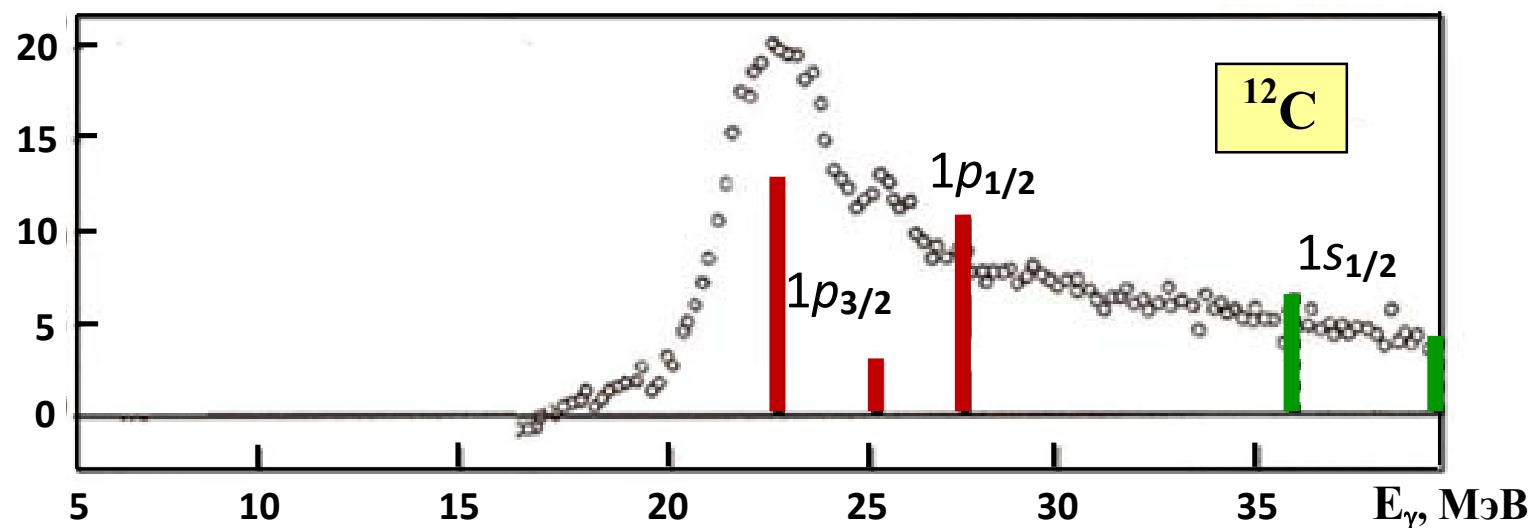
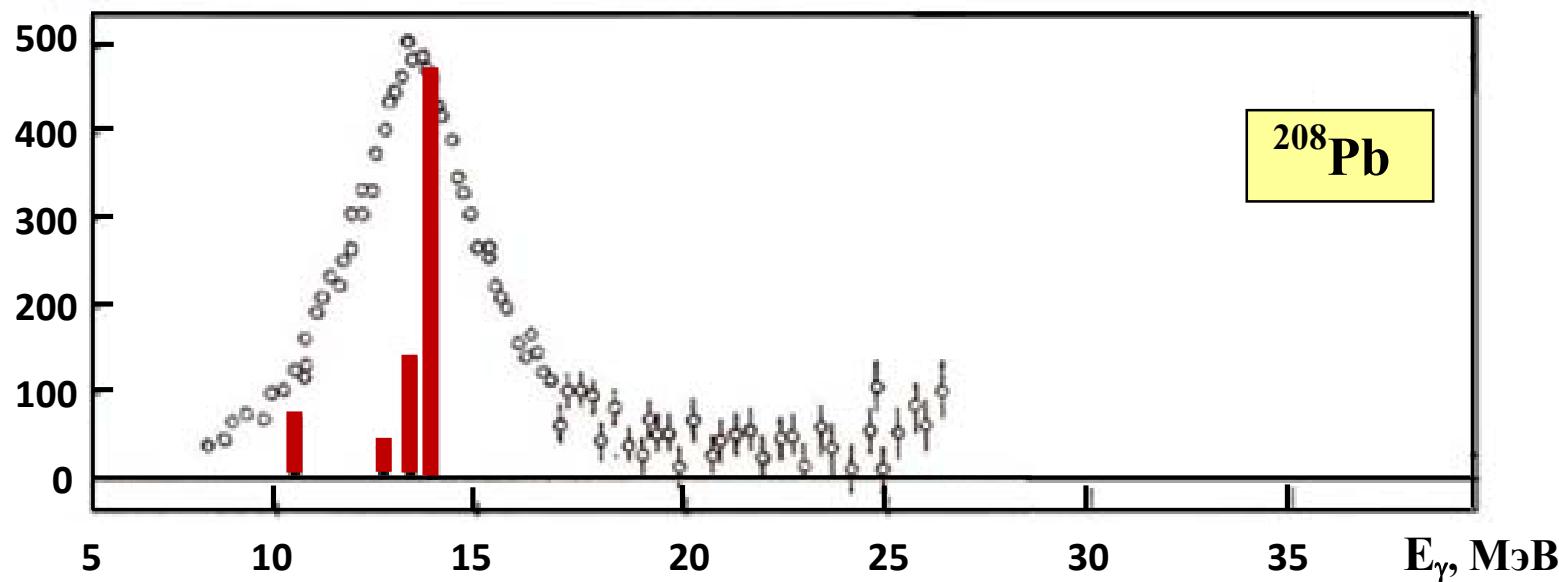
С ростом A имеет место тенденция сжатия области
концентрации основных E1-переходов.

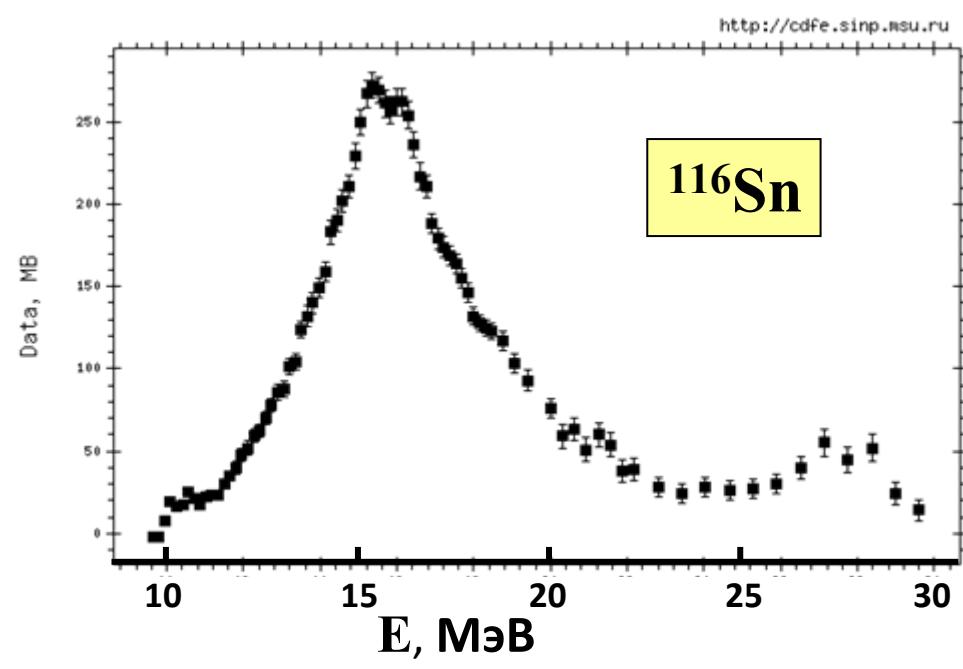
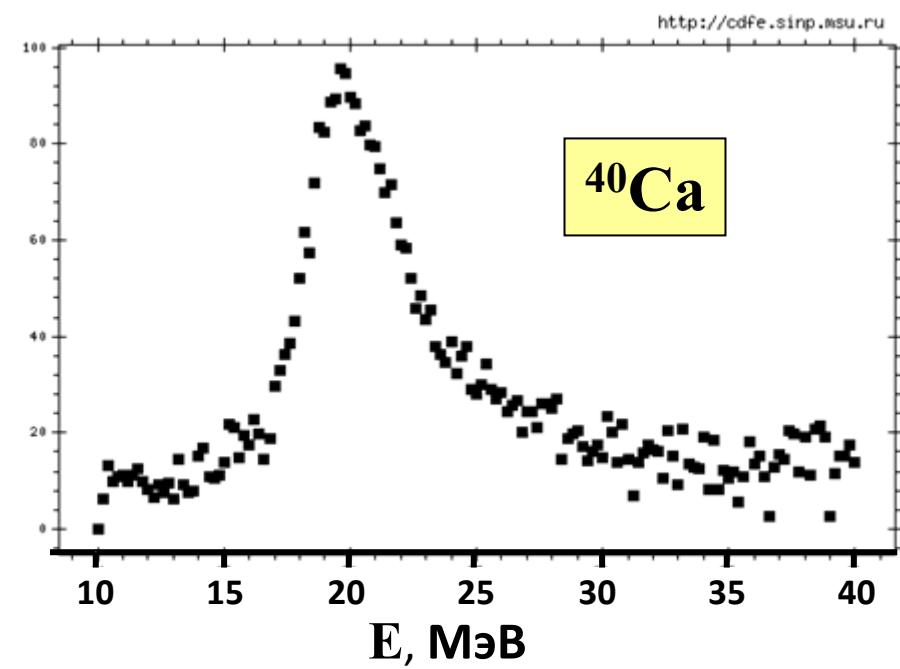
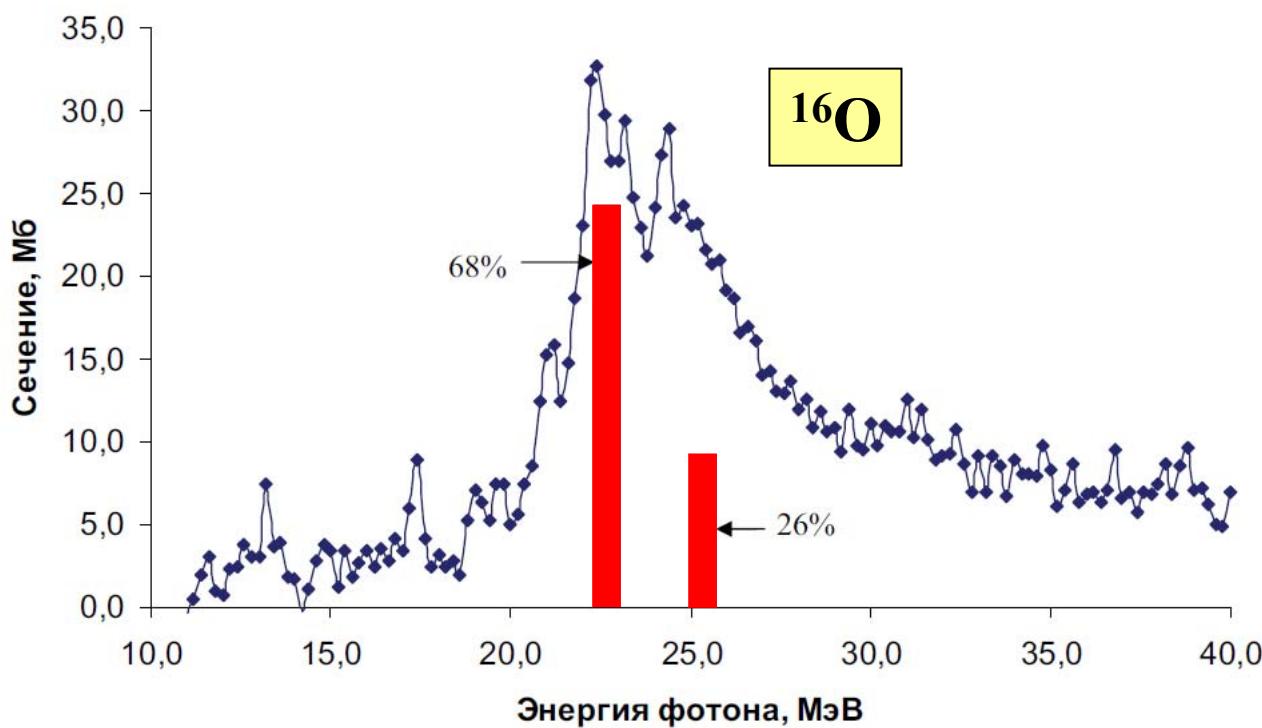
В ядрах 1d2s-оболочки ($A = 16 – 40$) она меняется в
интервале 5 – 20 МэВ.

В ядрах с $A = 50 – 140$ ширина ГДР 4 – 12 МэВ.

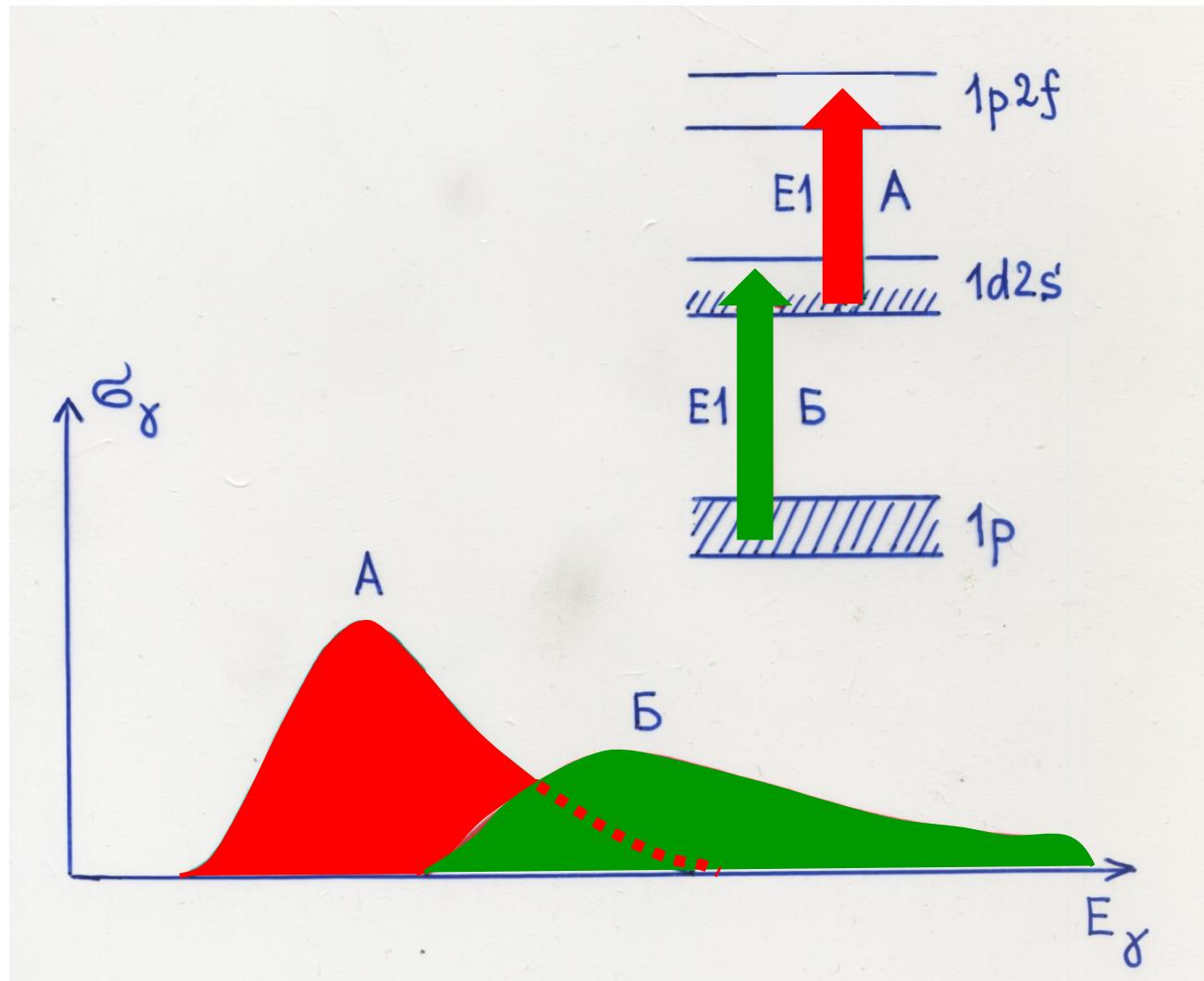
В ядрах с $A \geq 140$ ширина ГДР 4 – 8 МэВ.

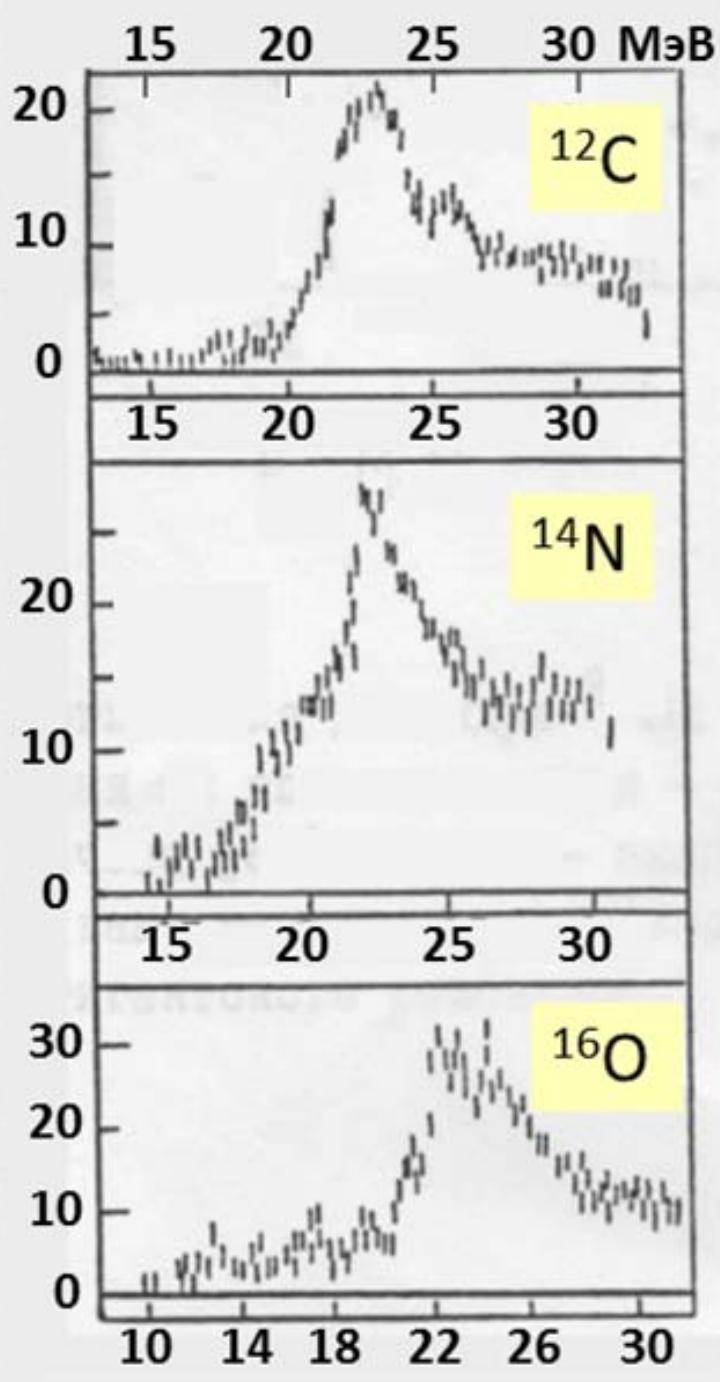
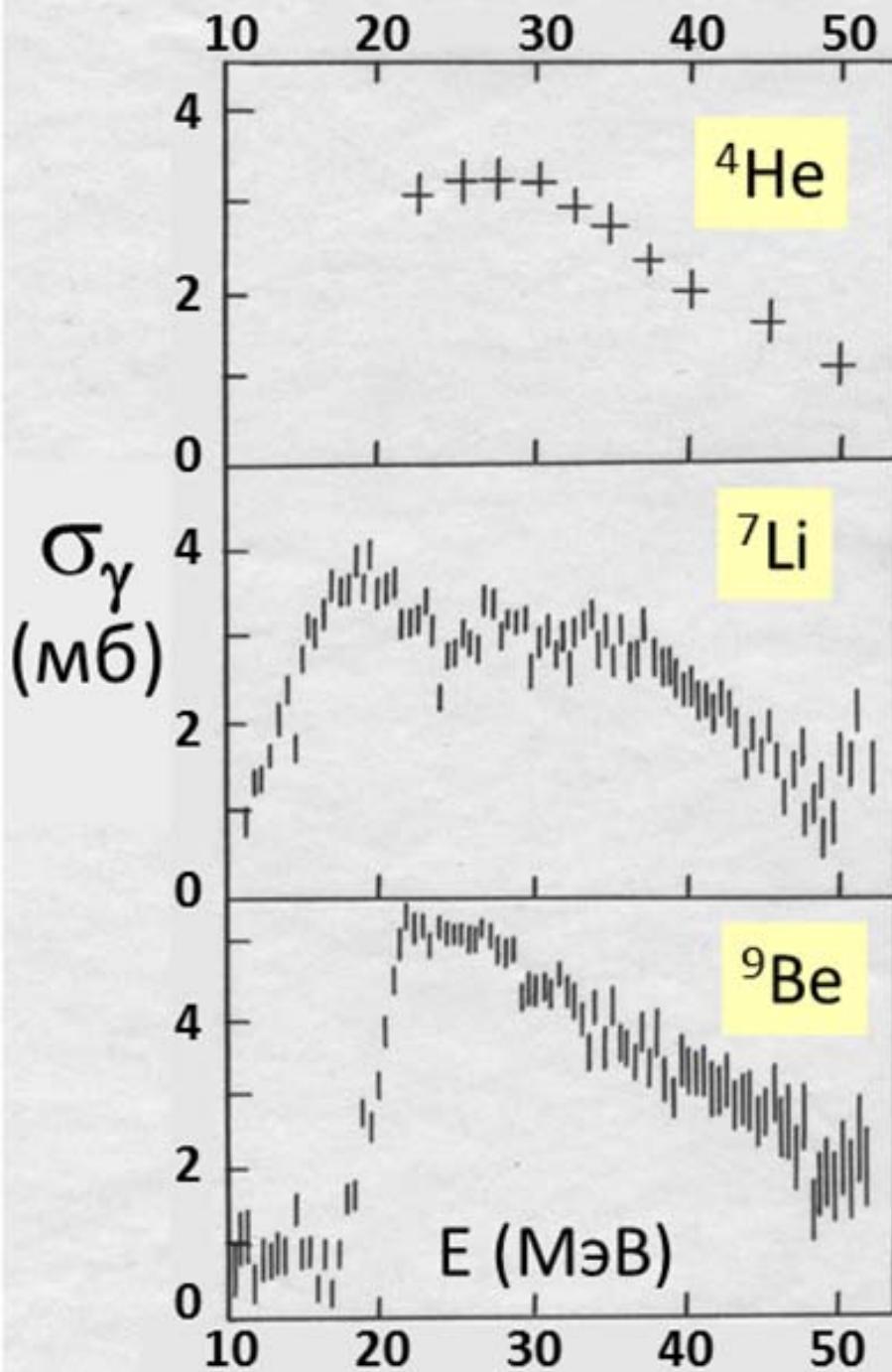
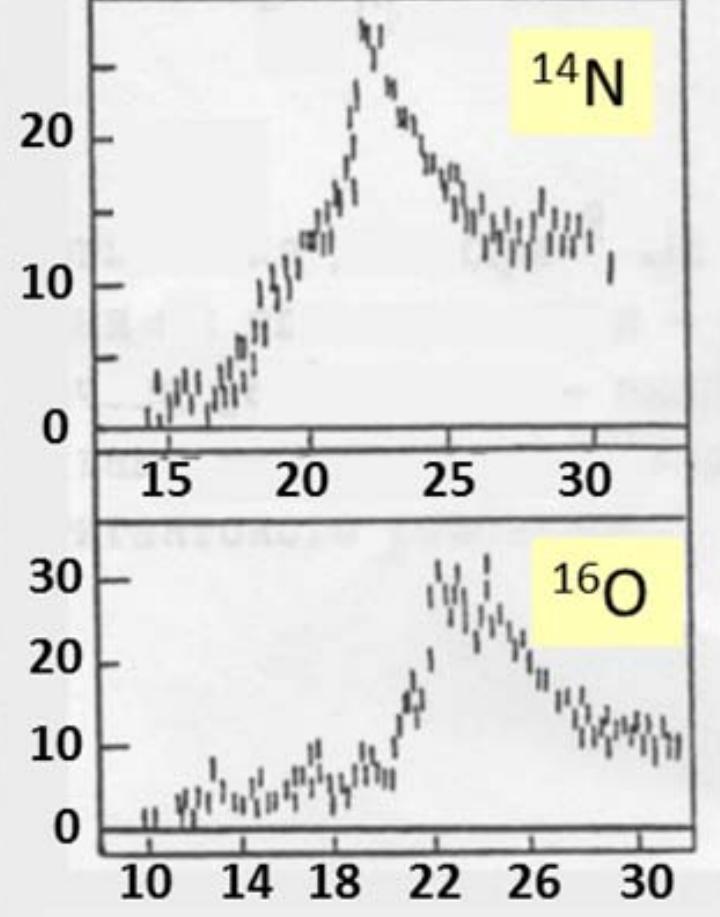
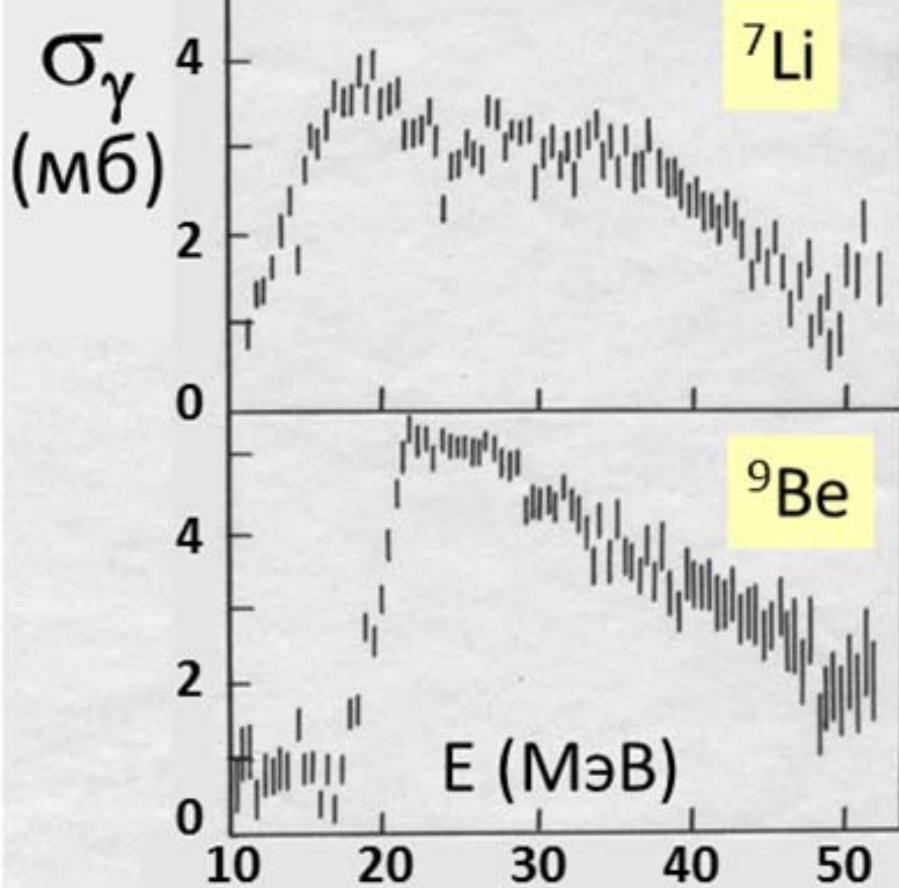
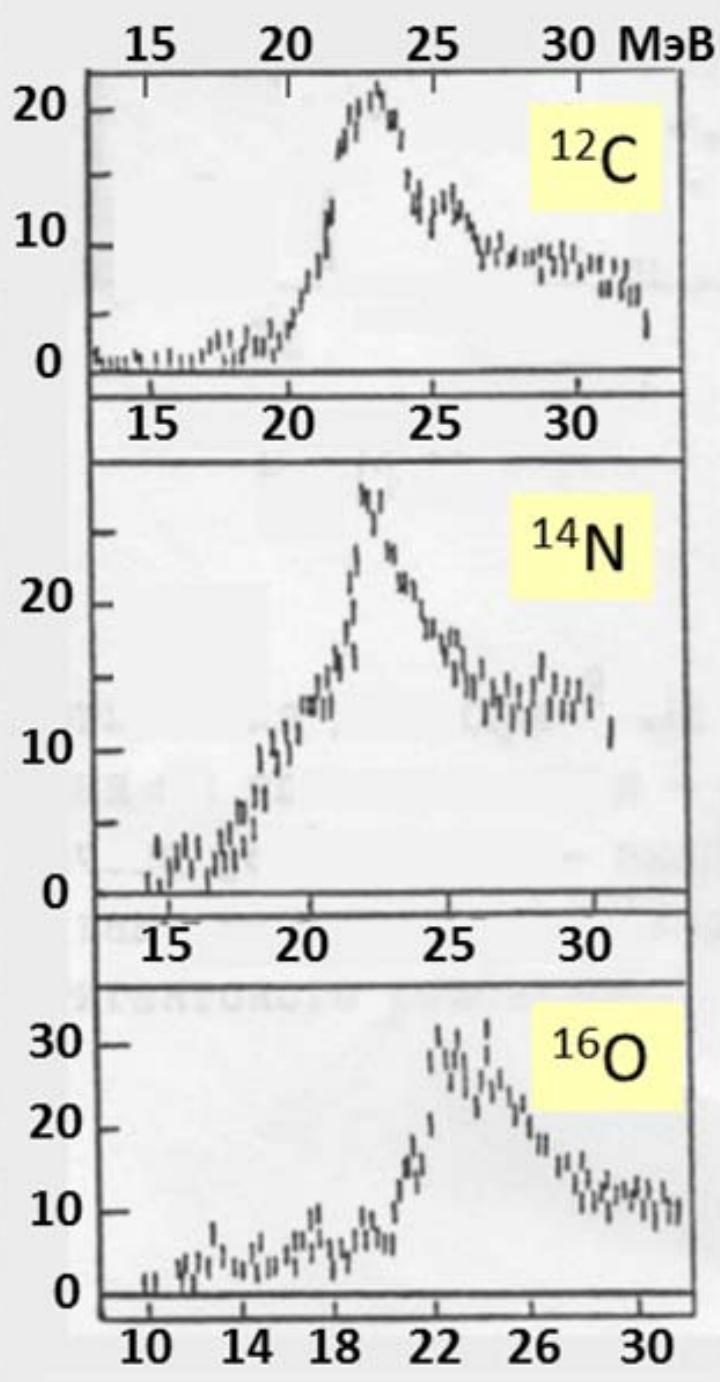
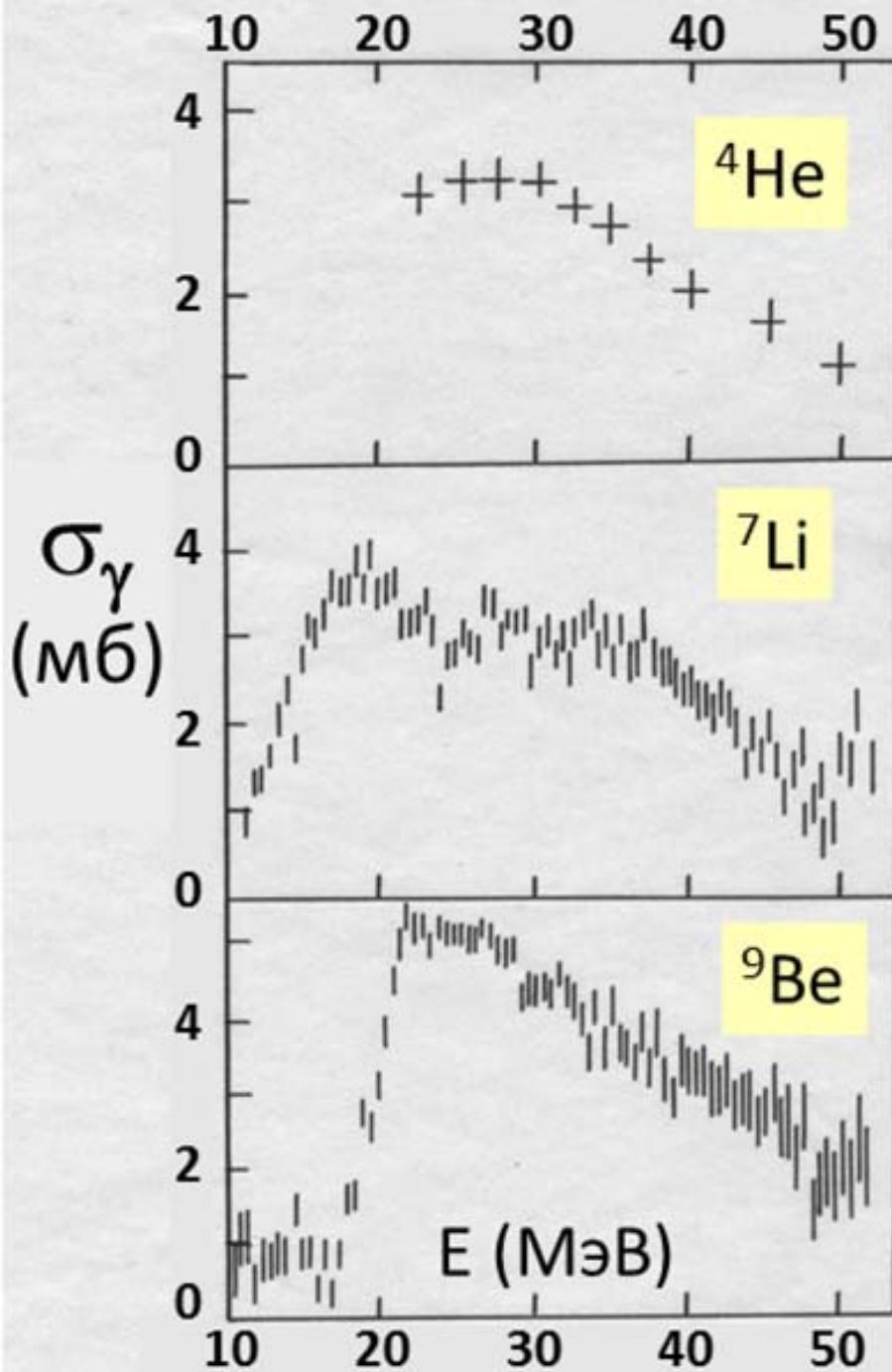
**Ширина ГДР минимальна в сферических ядрах с заполненными оболочками.
Для них ГДР представим одиночным резонансом с полушириной 4-5 МэВ**

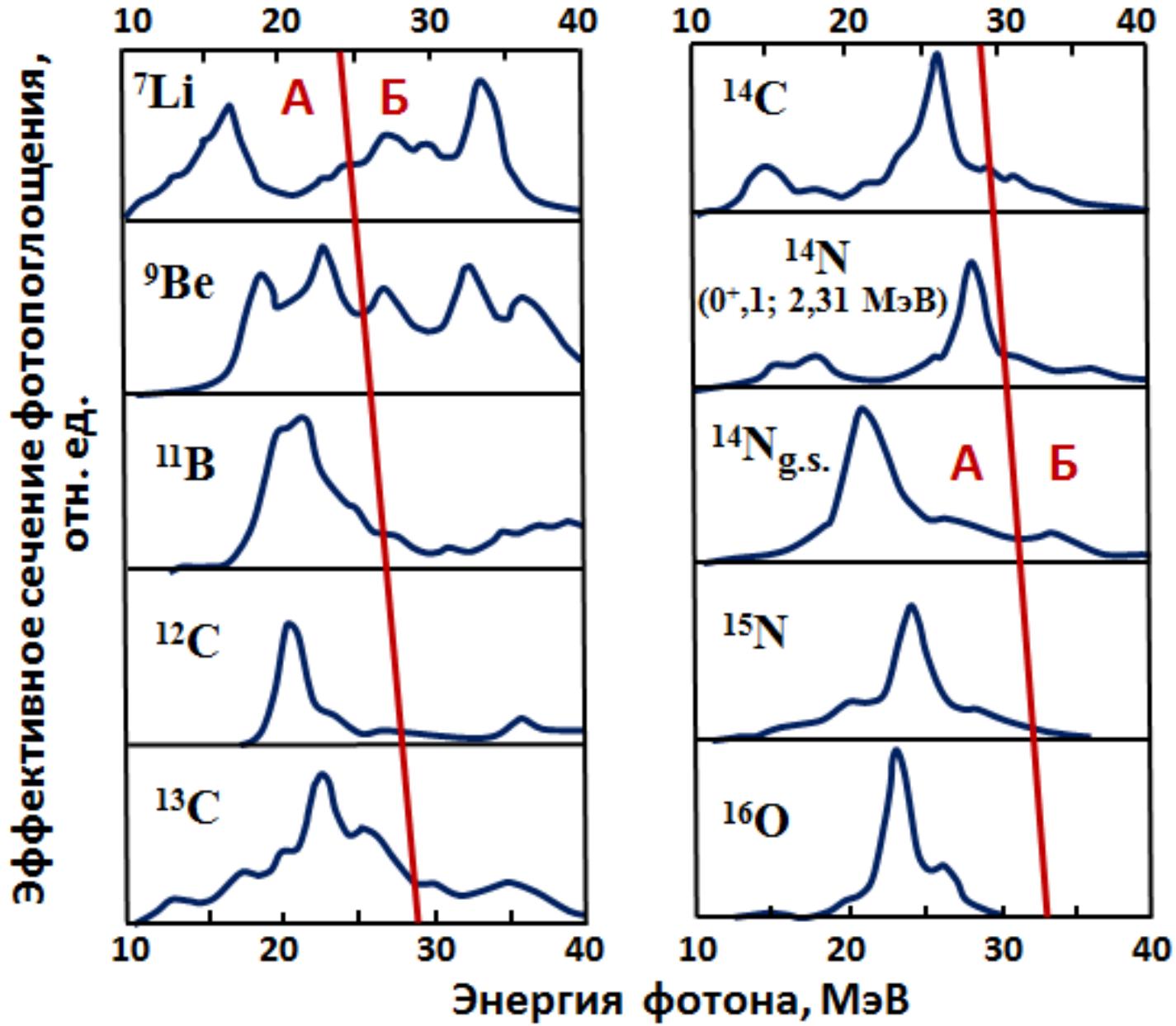
σ , мб σ , мб

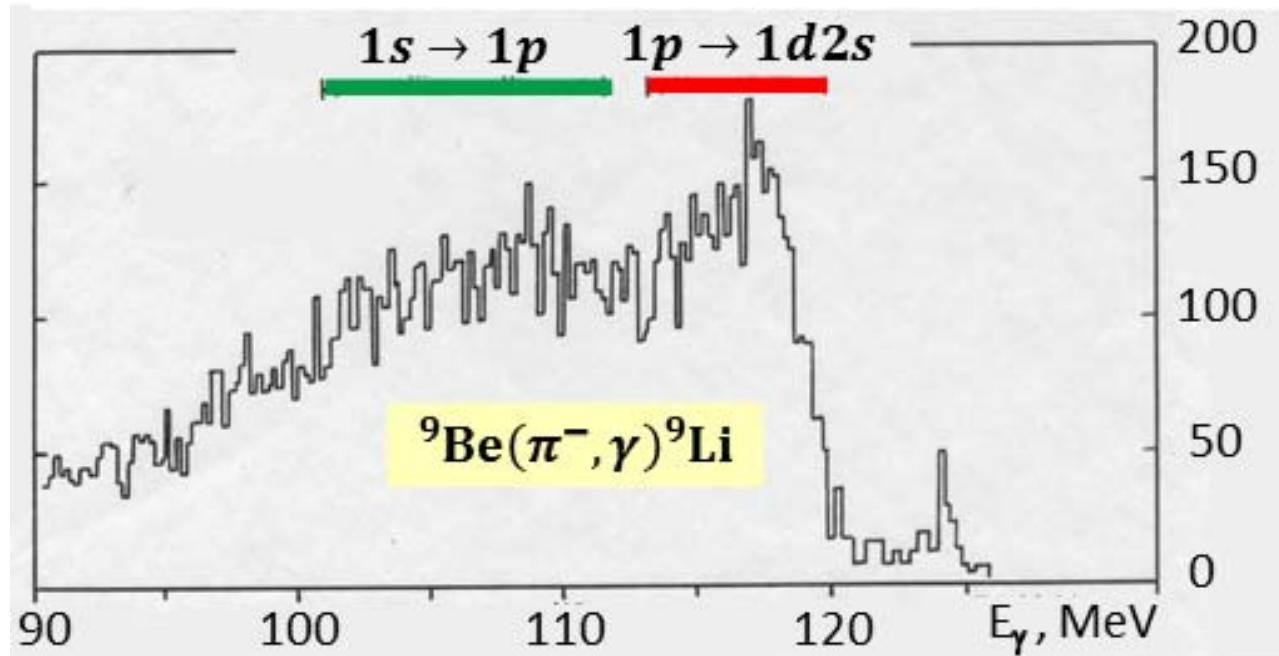
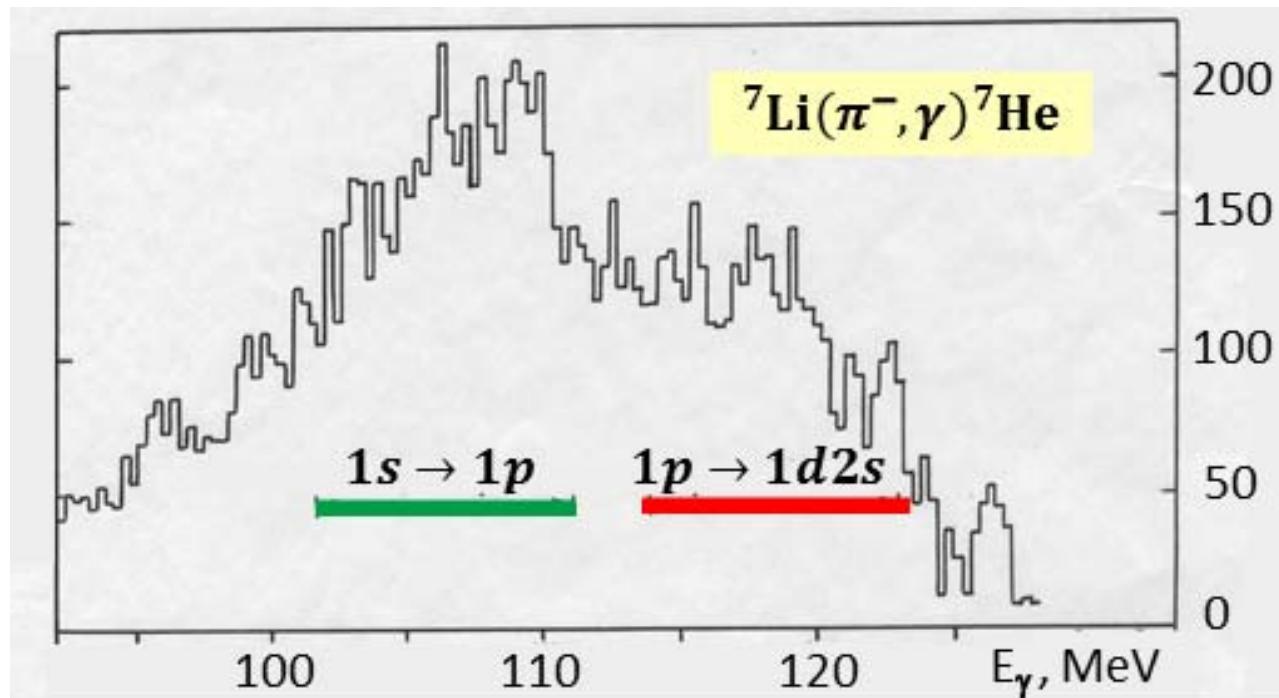


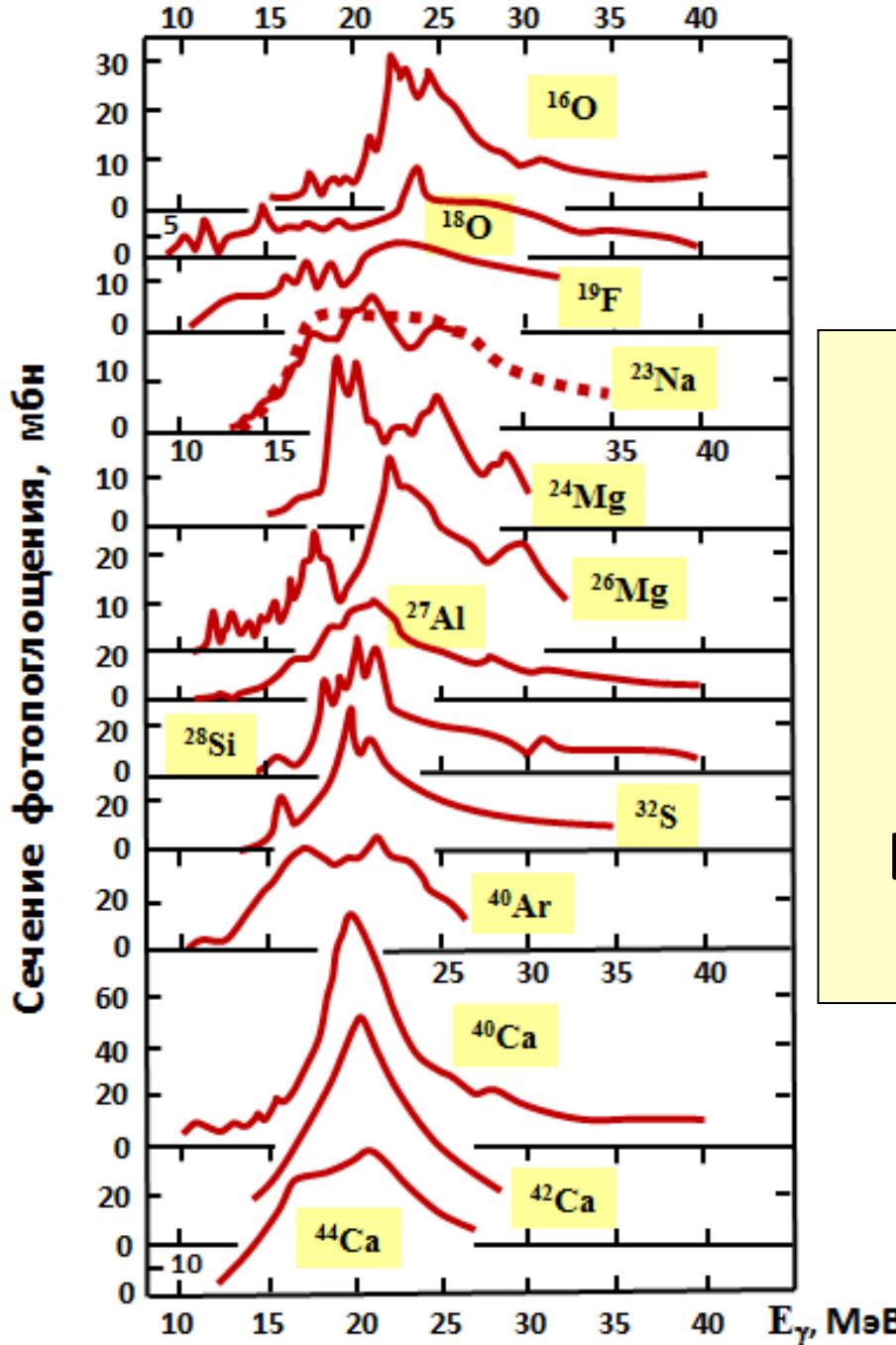
Главным фактором увеличения ширины ГДР
в легких ядрах с числом нуклонов до ≈ 50
является **конфигурационное расщепление**







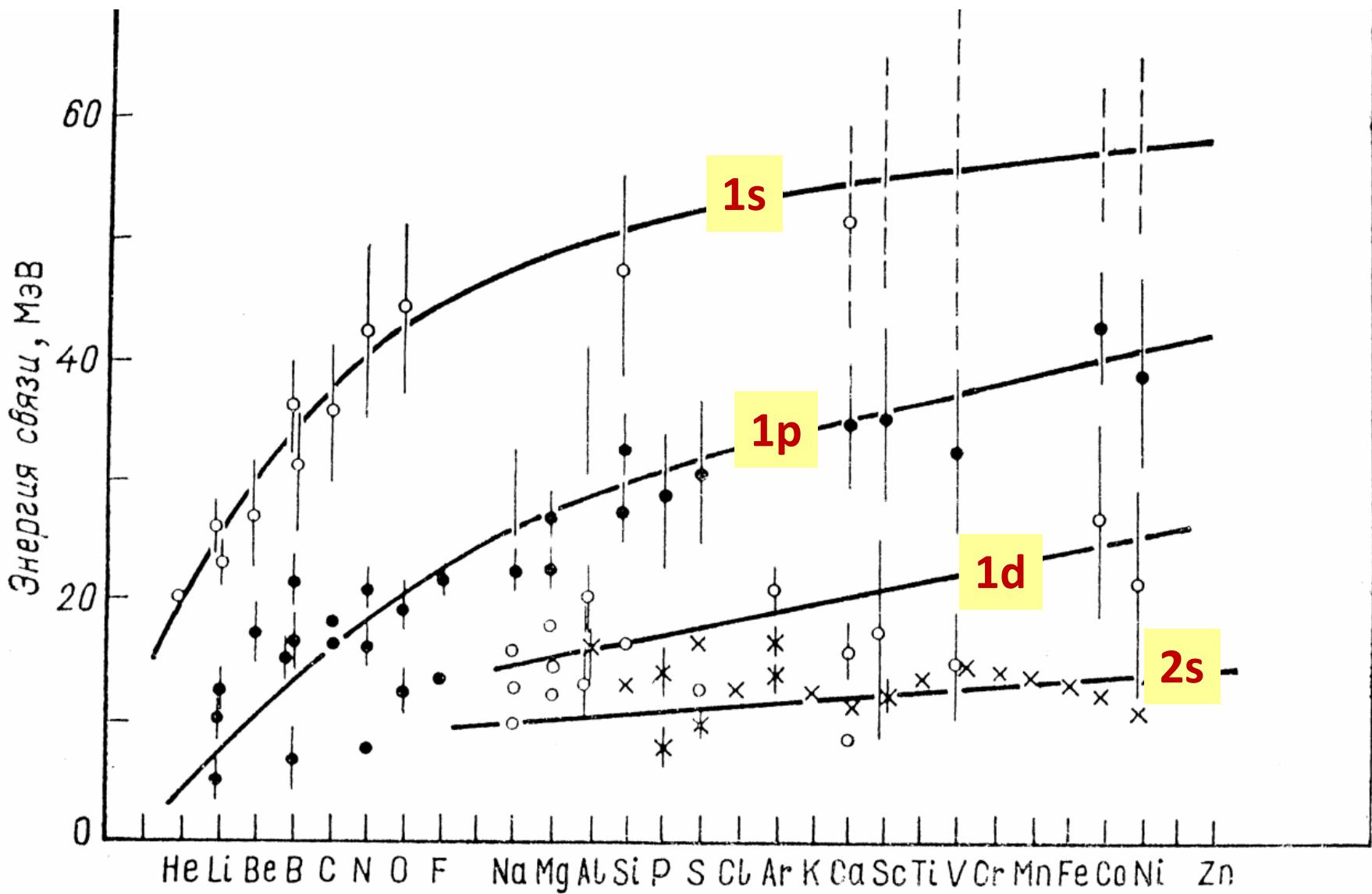




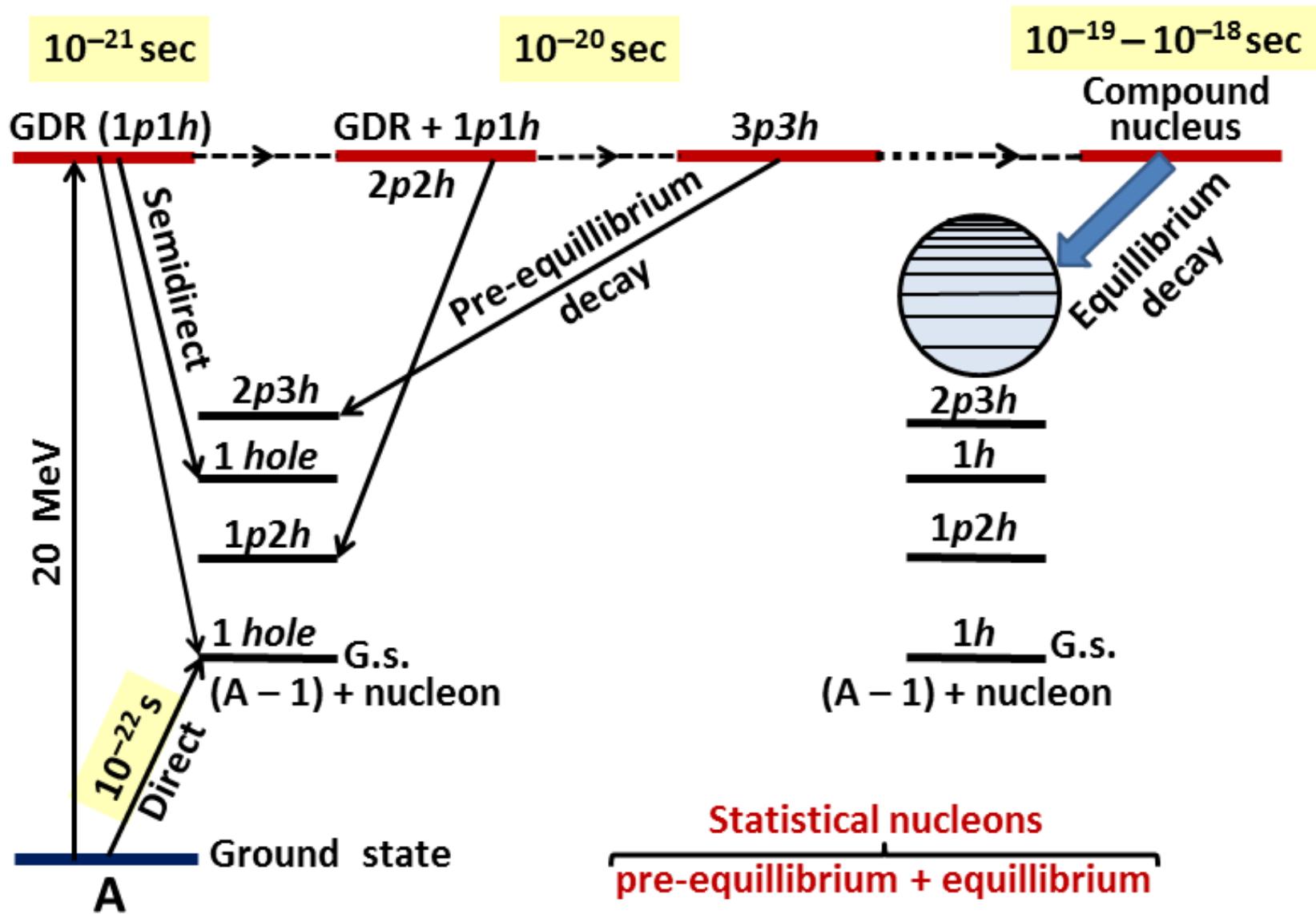
Ядра 1d2s-оболочки ($A = 16 - 44$)

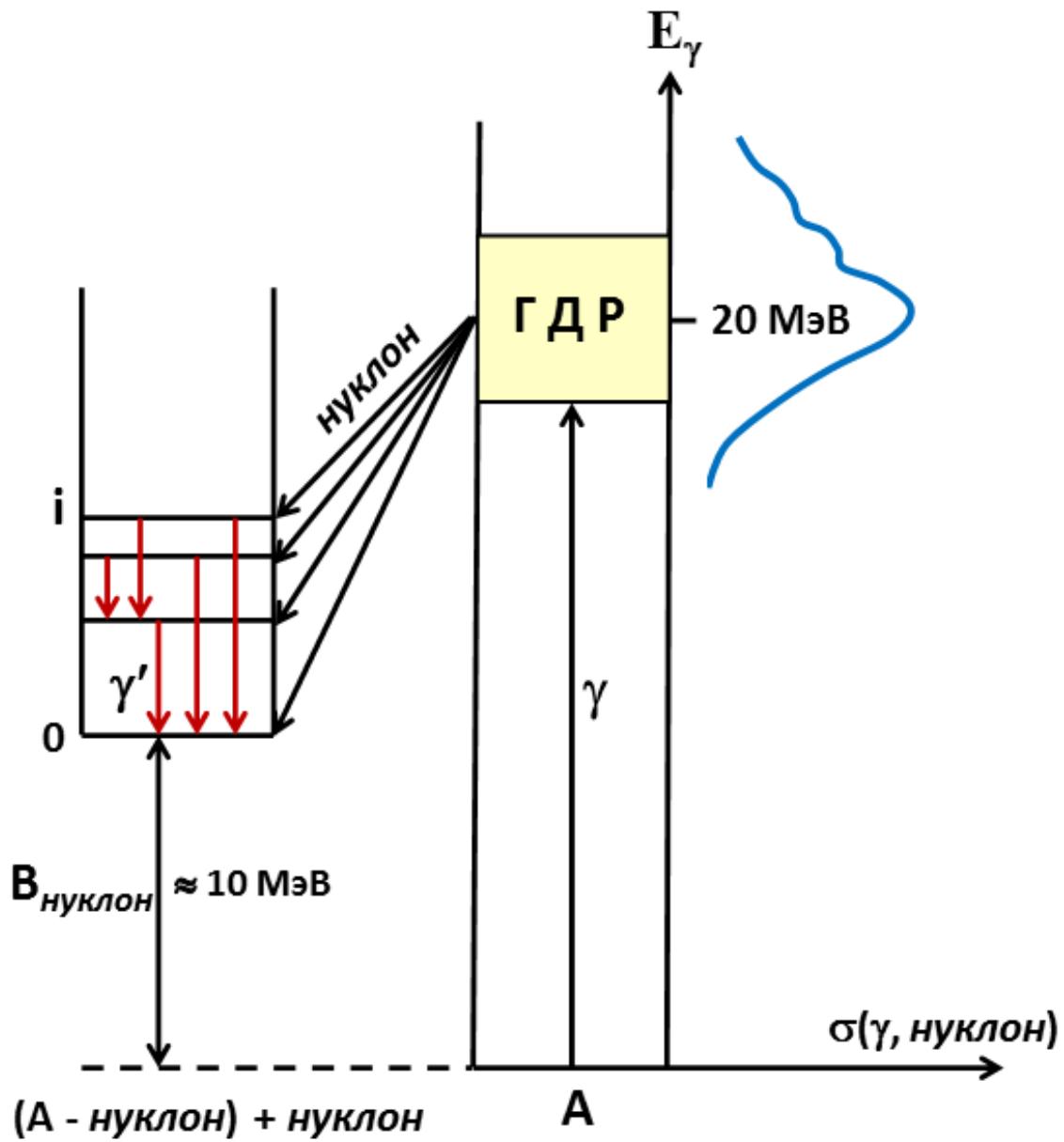
Экспериментальные
сечения фотопоглощения.
Ширина сечений меняется
в интервале 5 – 20 МэВ

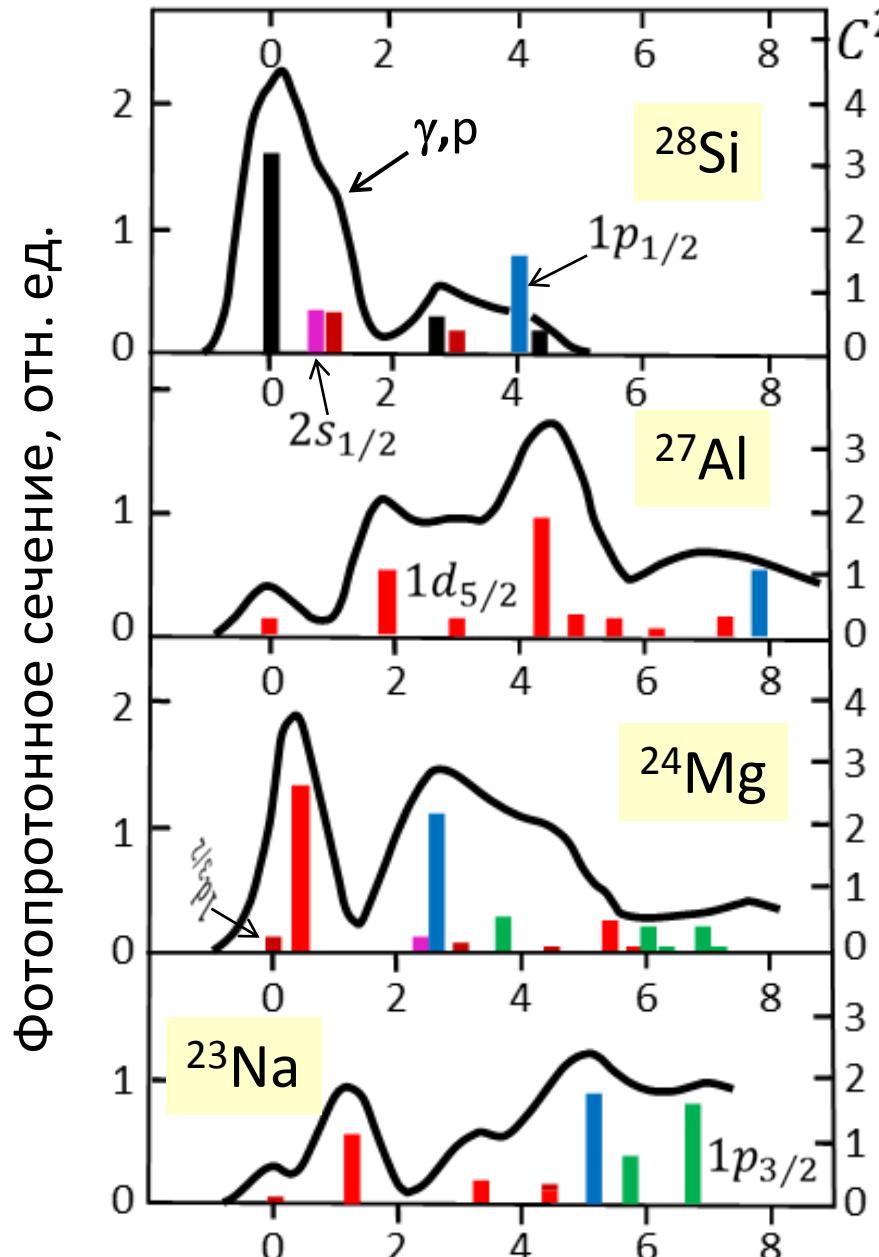
Конфигурационное расщепление является следствием того, что расстояние между внутренними оболочками лёгких ядер существенно больше, чем между внешними



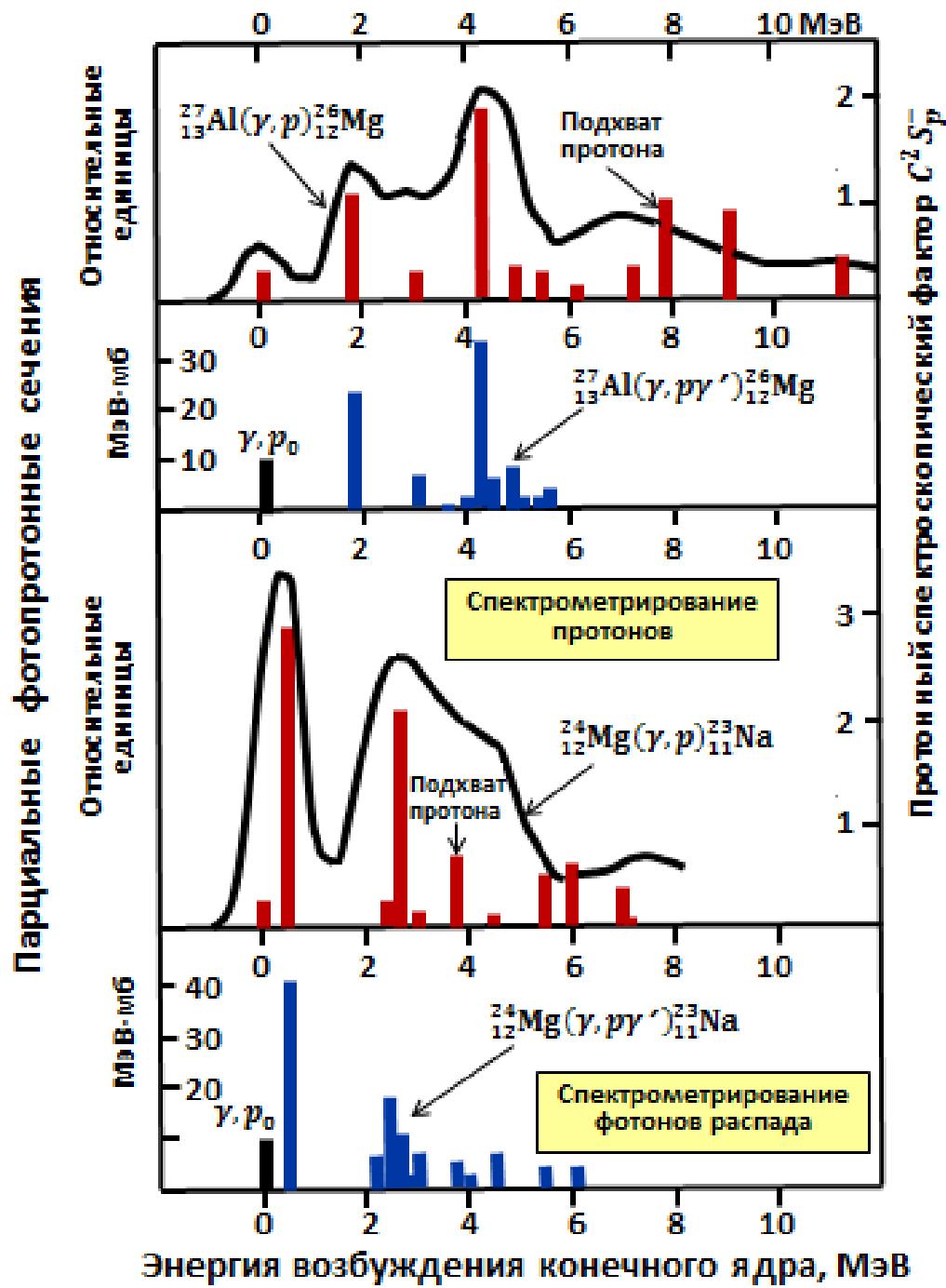
Конфигурационное расщепление ГДР легких ядер установлено в фотонуклонных экспериментах фиксирующих отдельные уровни конечных ядер

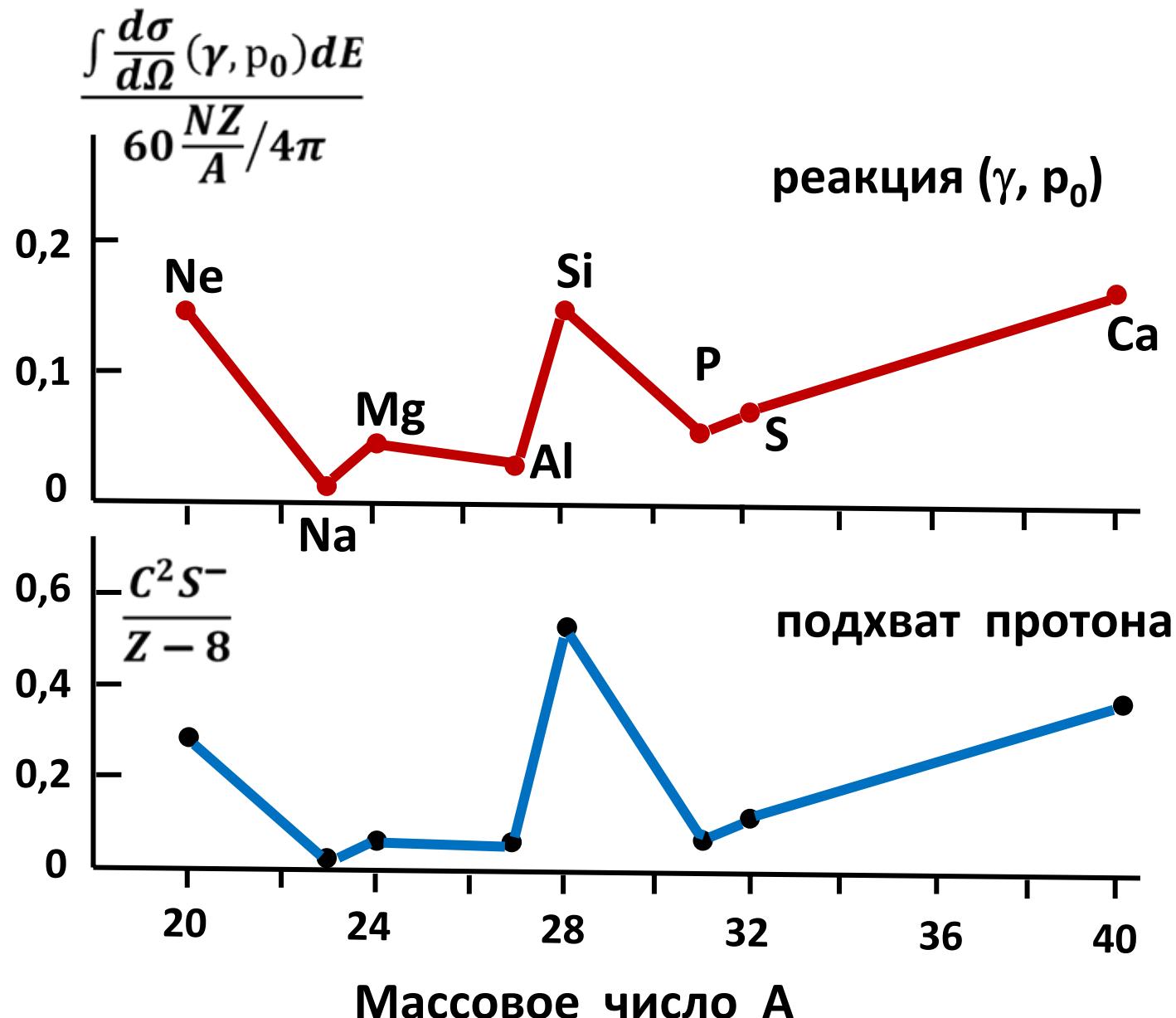


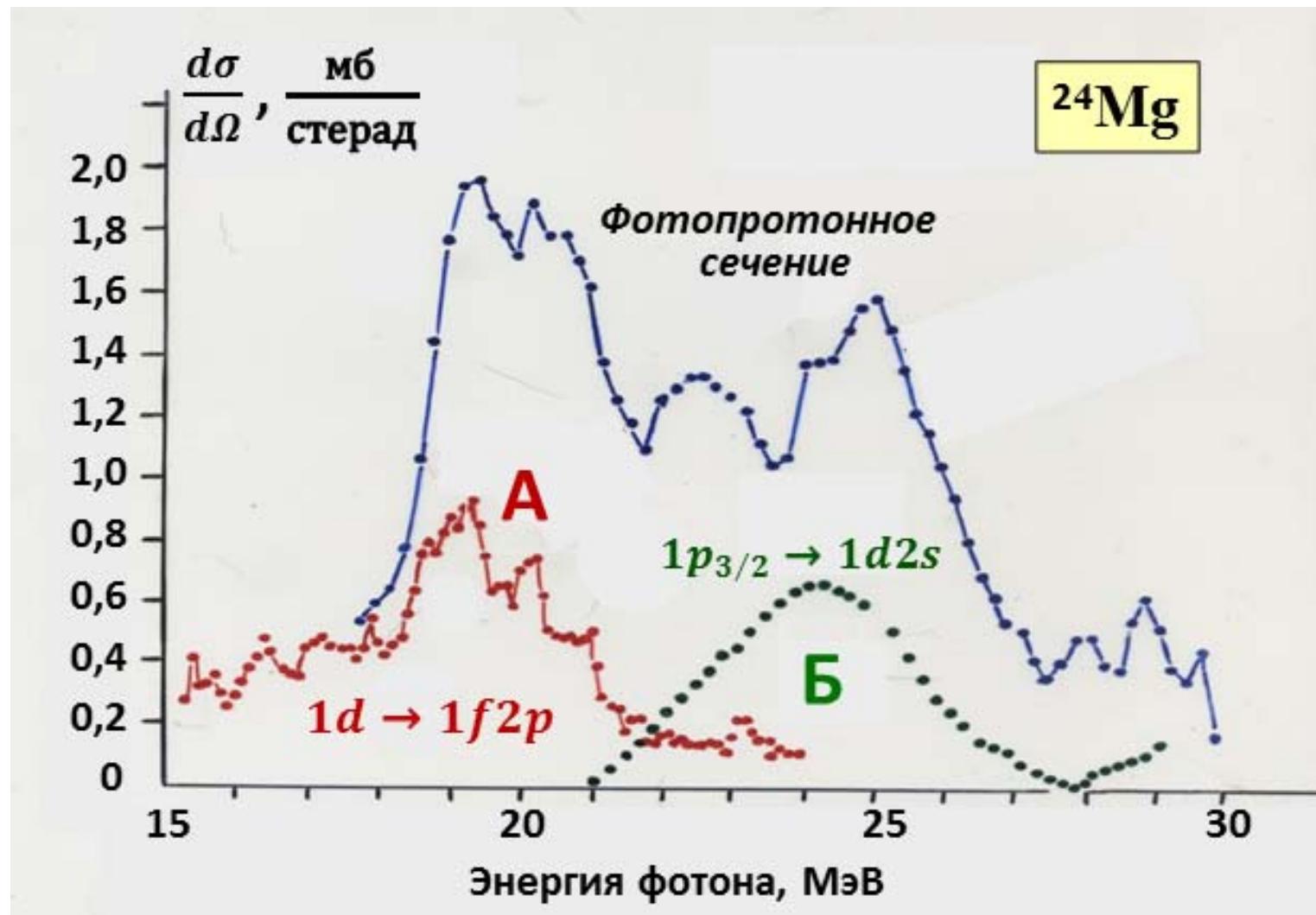


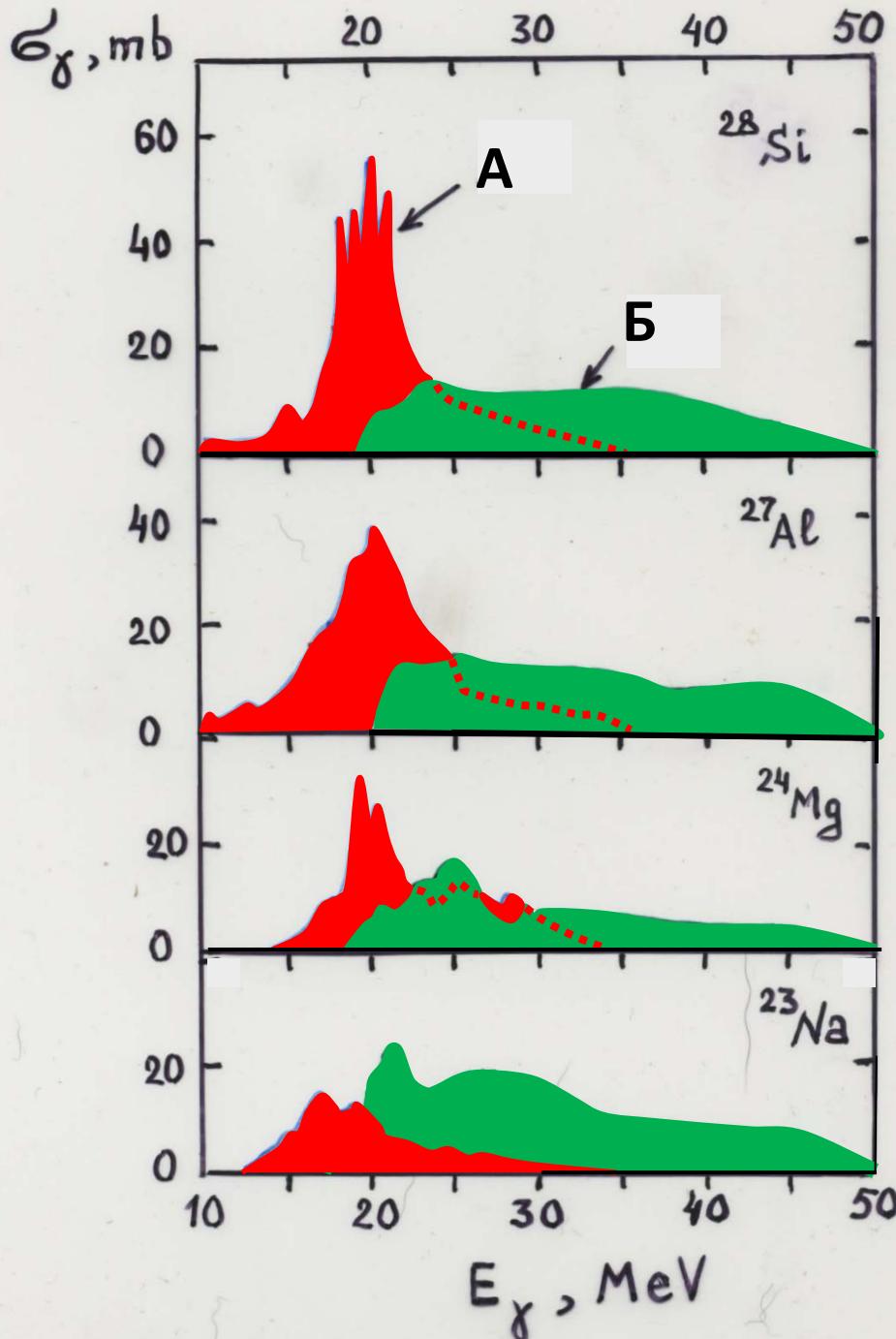


Сравнение
парциальных фотопротонных
сечений с данными
реакций протонного
подхвата





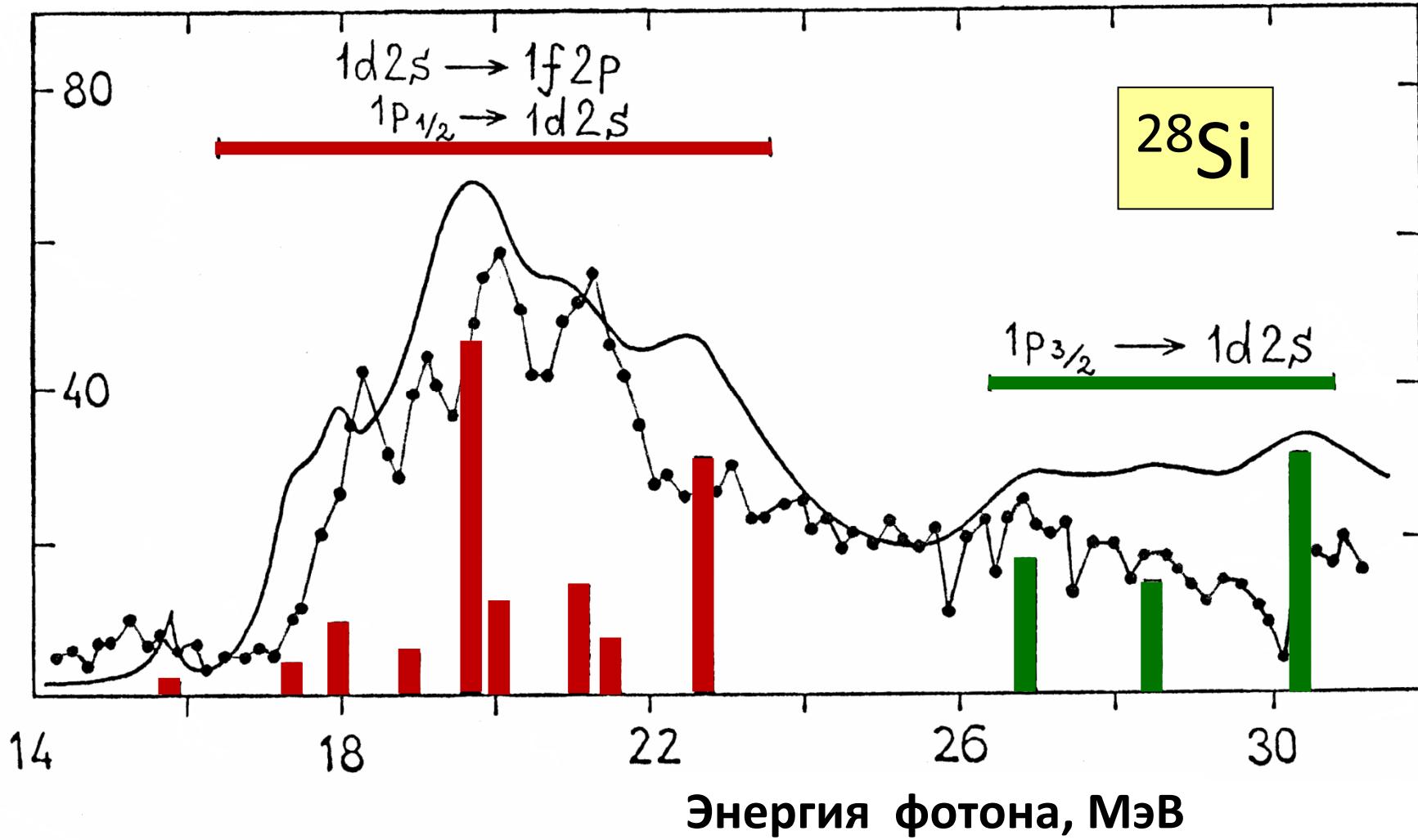




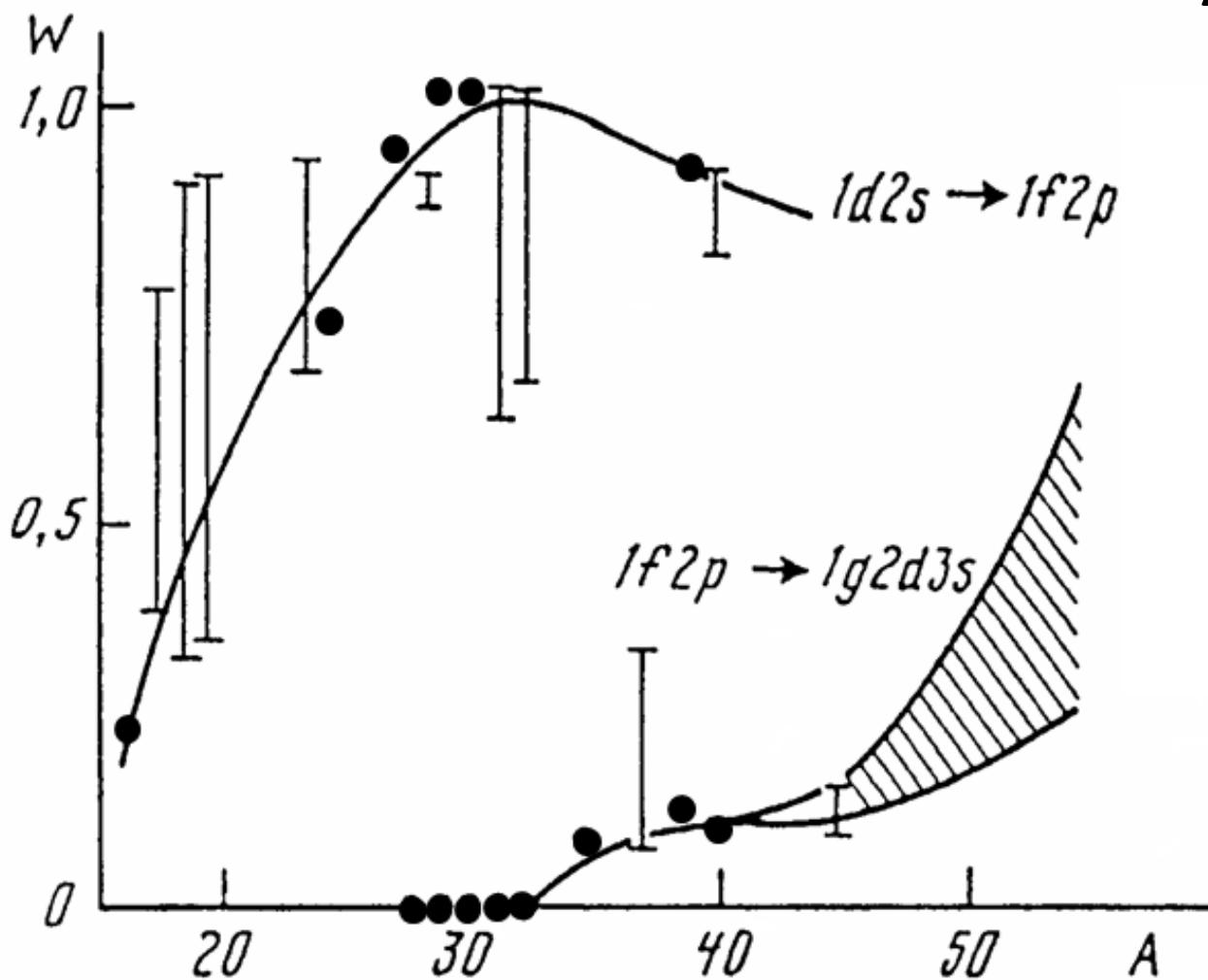
Величина конфигурационного расщепления ГДР ядер $1d2s$ -оболочки ≈ 10 МэВ

Ветвь А испытывает полуправильный распад, ветвь Б – полуправильный и статистический в сравнимыхолях.

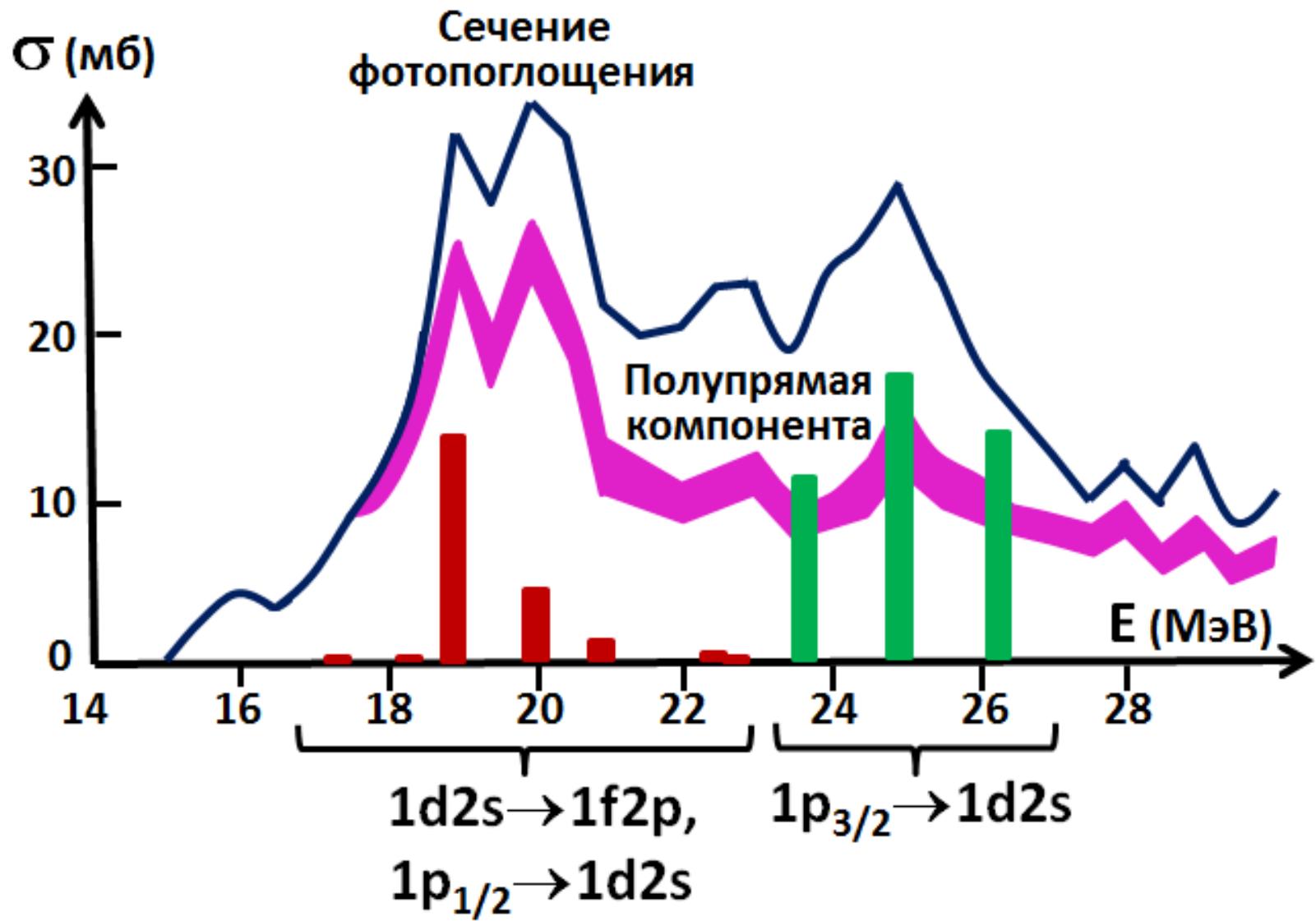
Сечение, мб

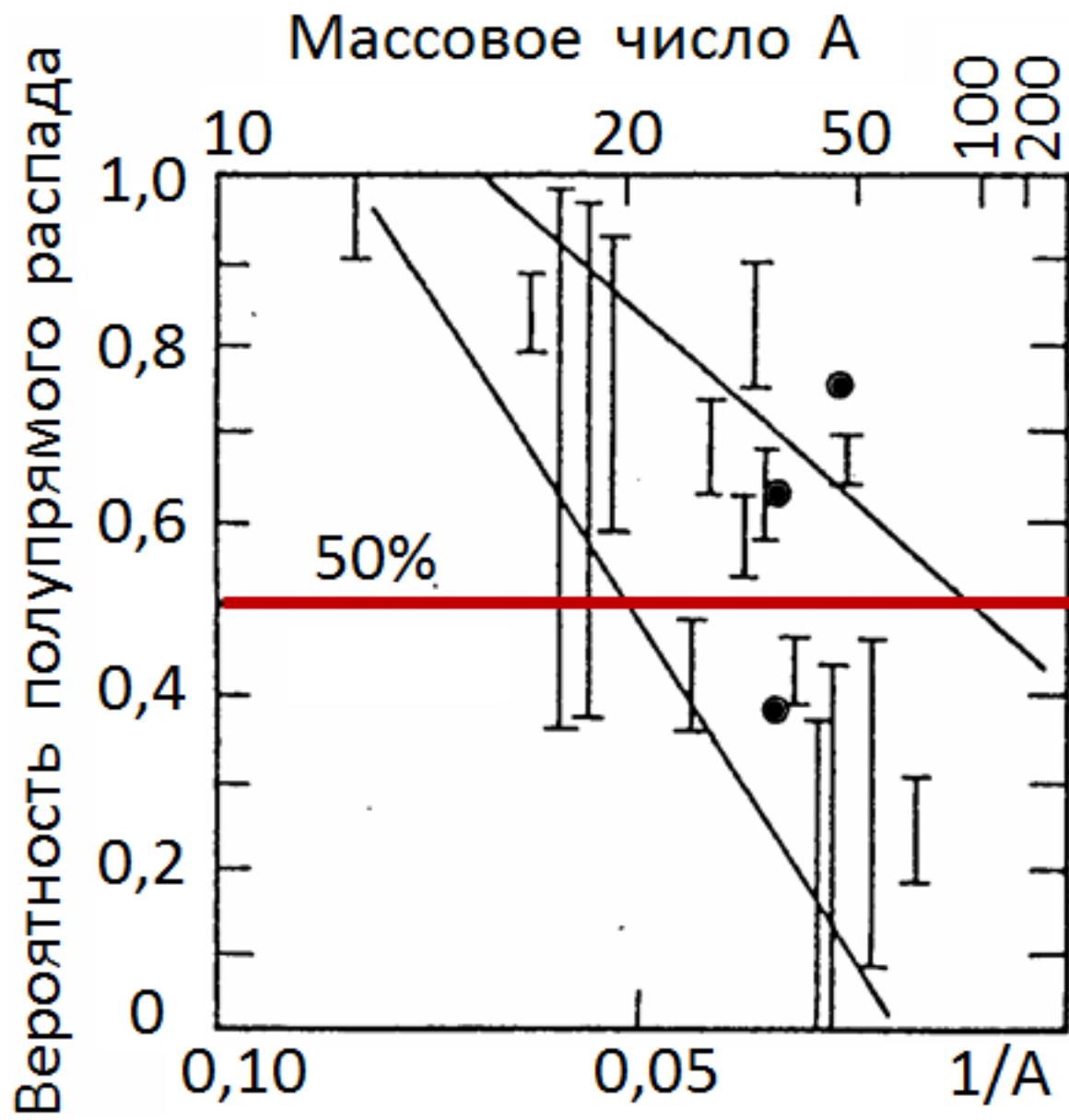


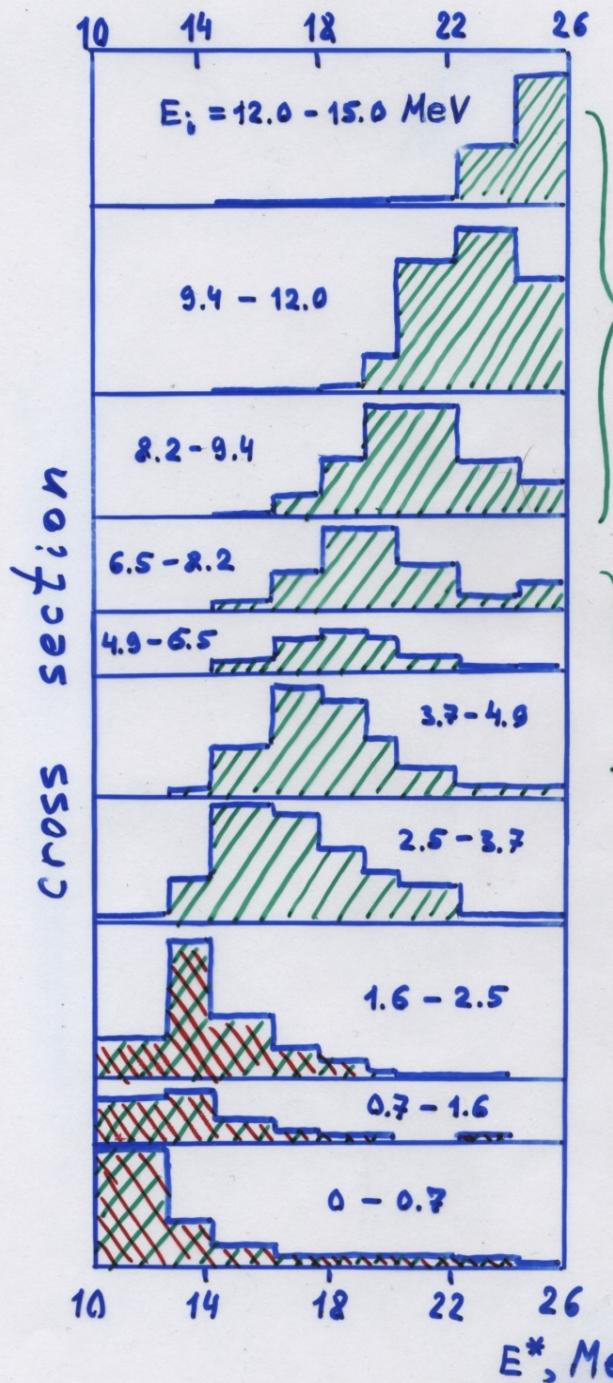
Вероятность возбуждения ветви A ($1d2s \rightarrow 1f2p$)
гигантского резонанса у ядер
с числом нуклонов 16 - 40



Сечение фотопоглощения ядра ^{24}Mg и его полуправая компонента







$^{58}\text{Ni}(e, e' p_i)^{57}\text{Co}$
 Mainz

$1d_{5/2}^{-1}$

$^{58}\text{Ni}(\gamma, p_i \gamma)^{57}\text{Co}$
 Moscow

$1d_{3/2}^{-1}$

$2s_{1/2}^{-1}$

$1f_{7/2}^{-1}$

$2p_{3/2}^{-1}$

$1f_{7/2}^{-1}$

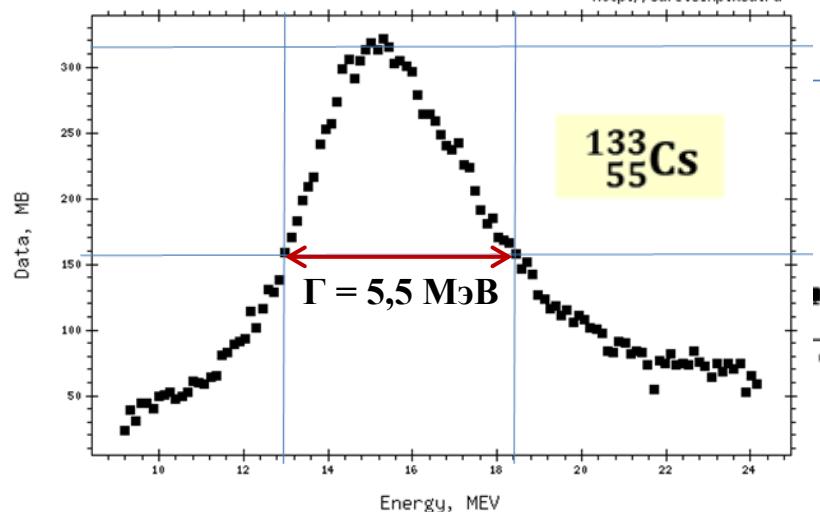
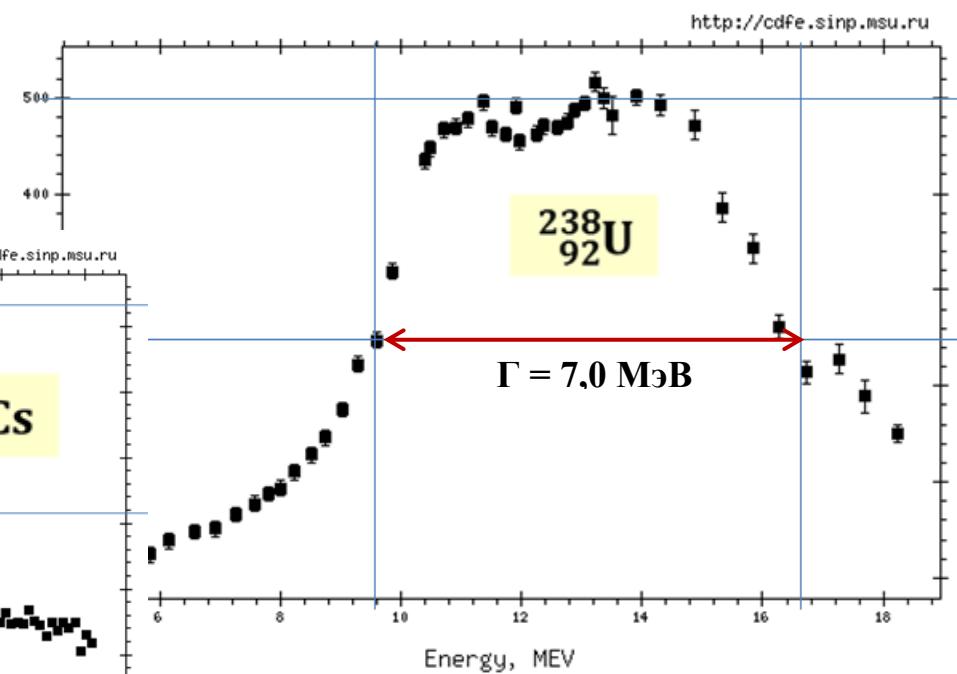
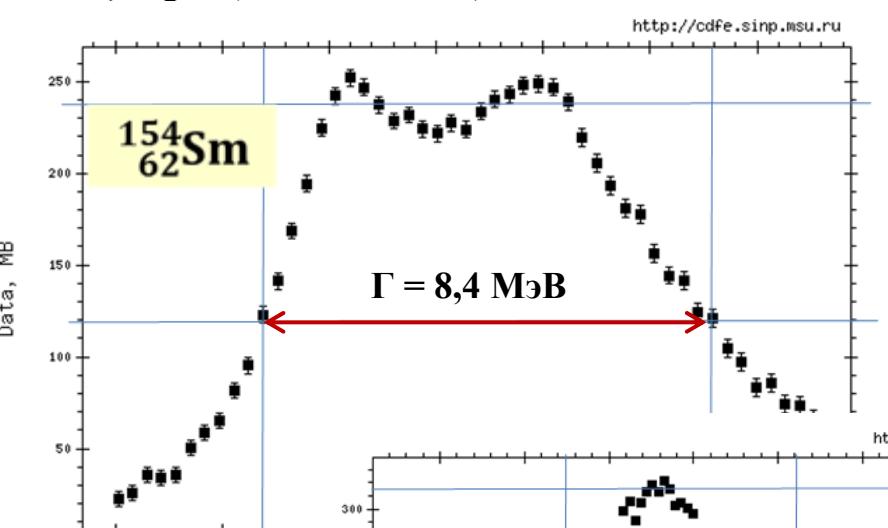
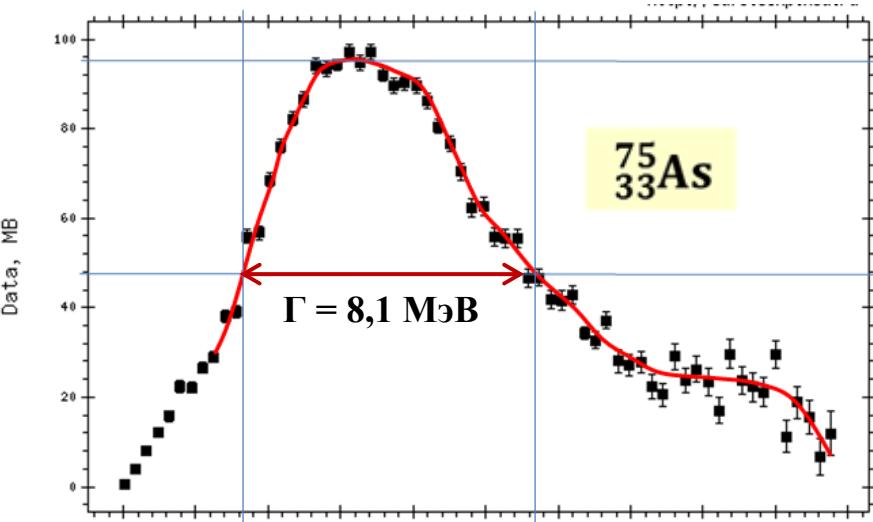
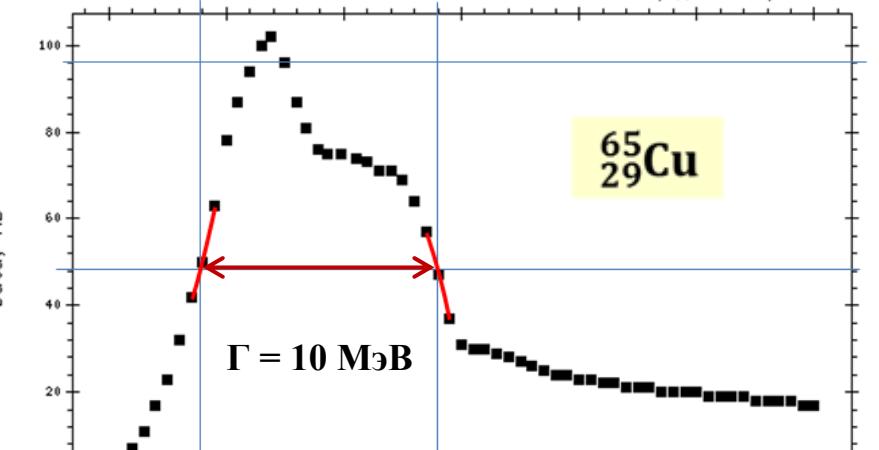
Конфигурационное расщепление гигантского резонанса исчезает с ростом A , но прослеживается вплоть до $A \approx 60$

Вывод

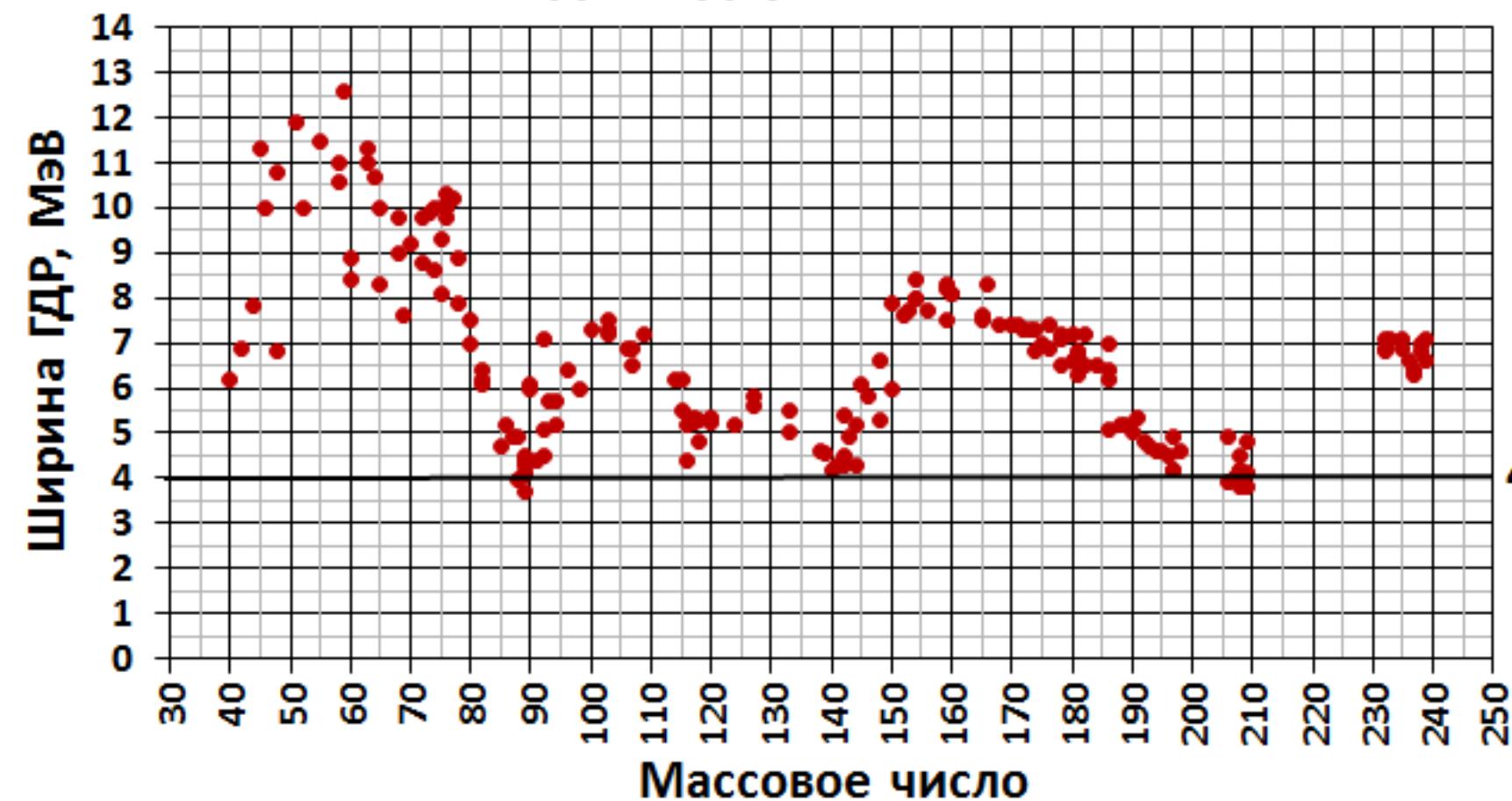
Ширина ГДР достигает наибольших величин в легких ядрах $1p$ и $1d2s$ -оболочки ($A < 40 - 50$). Основным фактором увеличения ширины ГДР этих ядер по сравнению с магической (4-5 МэВ) является конфигурационное расщепление. Для ядер $1d2s$ -оболочки ширина ГДР со стороны высокоэнергичного хвоста частично возрастает за счёт разброса Б-ветви входных состояний ГДР по состояниям более сложной природы.

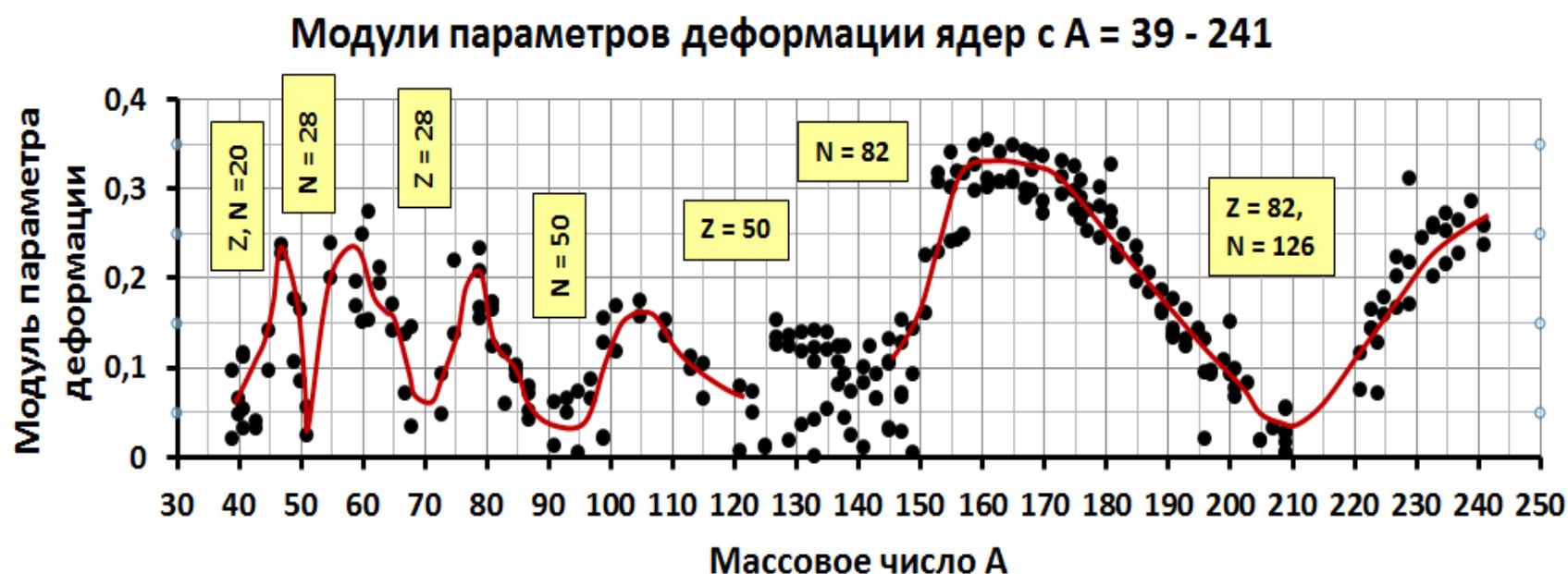
Ширины гигантского резонанса ядер с $A > 40$

**Проанализированы
192 экспериментальных сечения
для 121 нуклида**

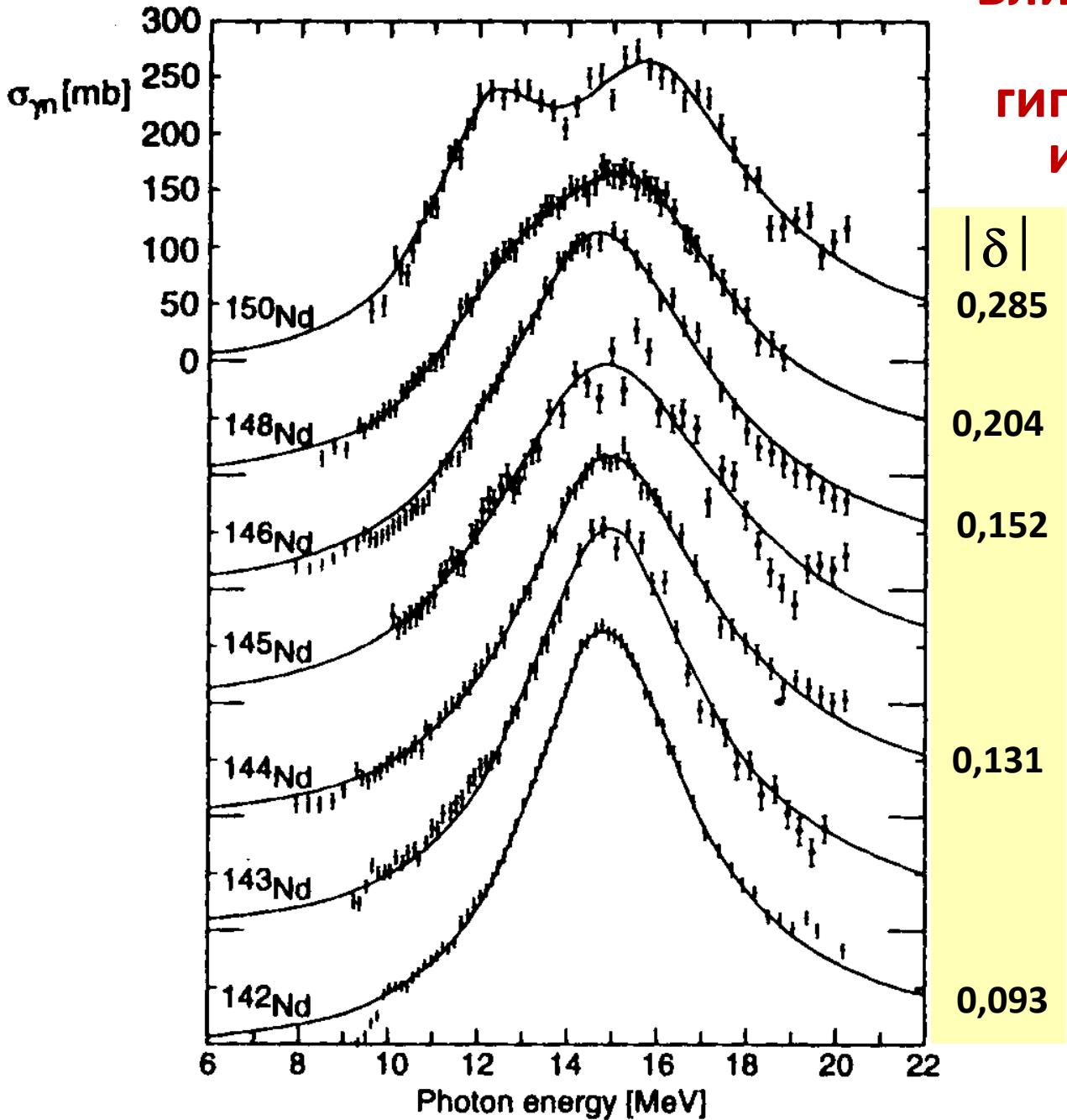


Ширины гигантского резонанса для ядер с $A = 40 - 239$





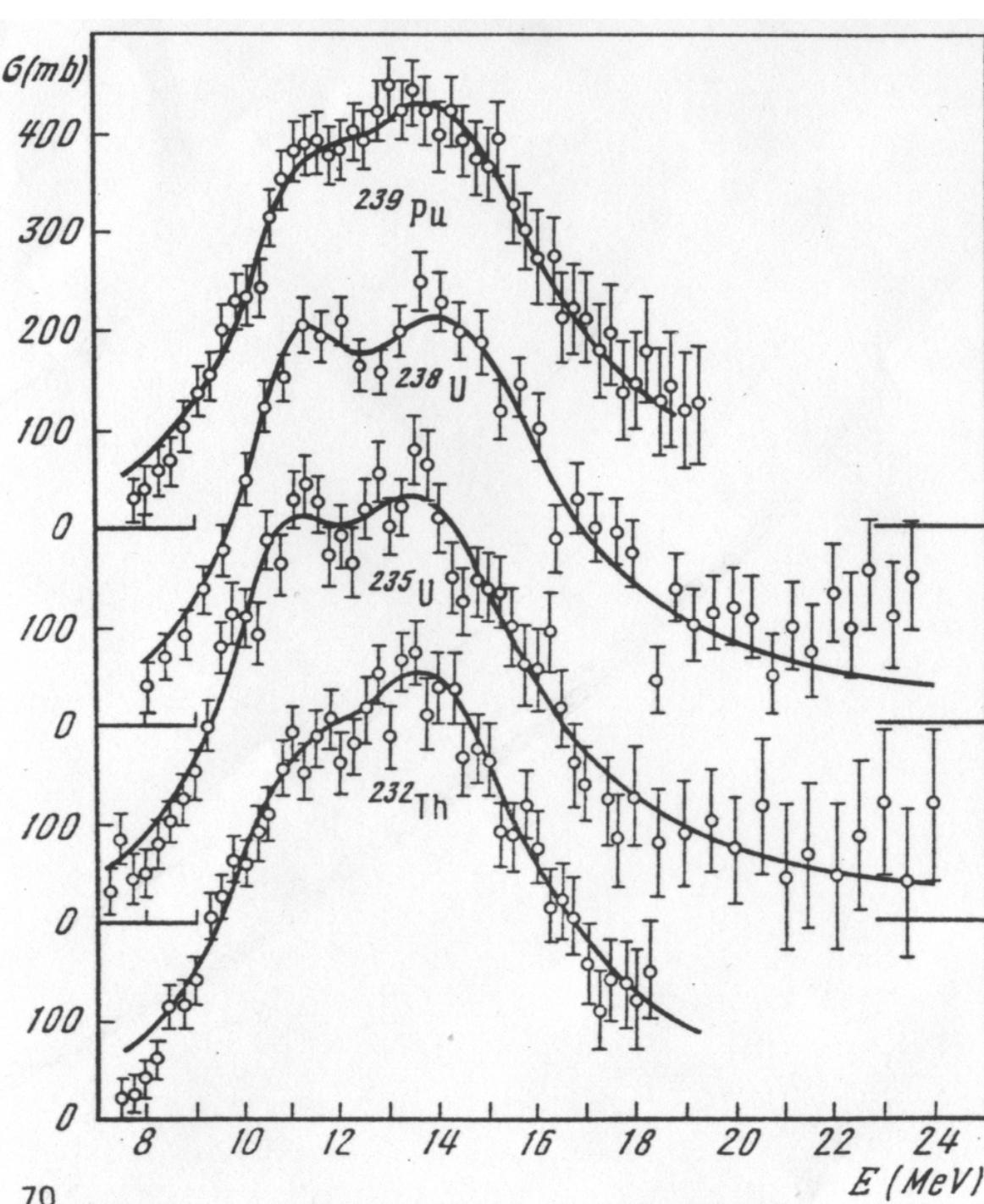
Влияние несферичности на форму гигантского резонанса изотопов неодима



Saclay

$|\delta|$

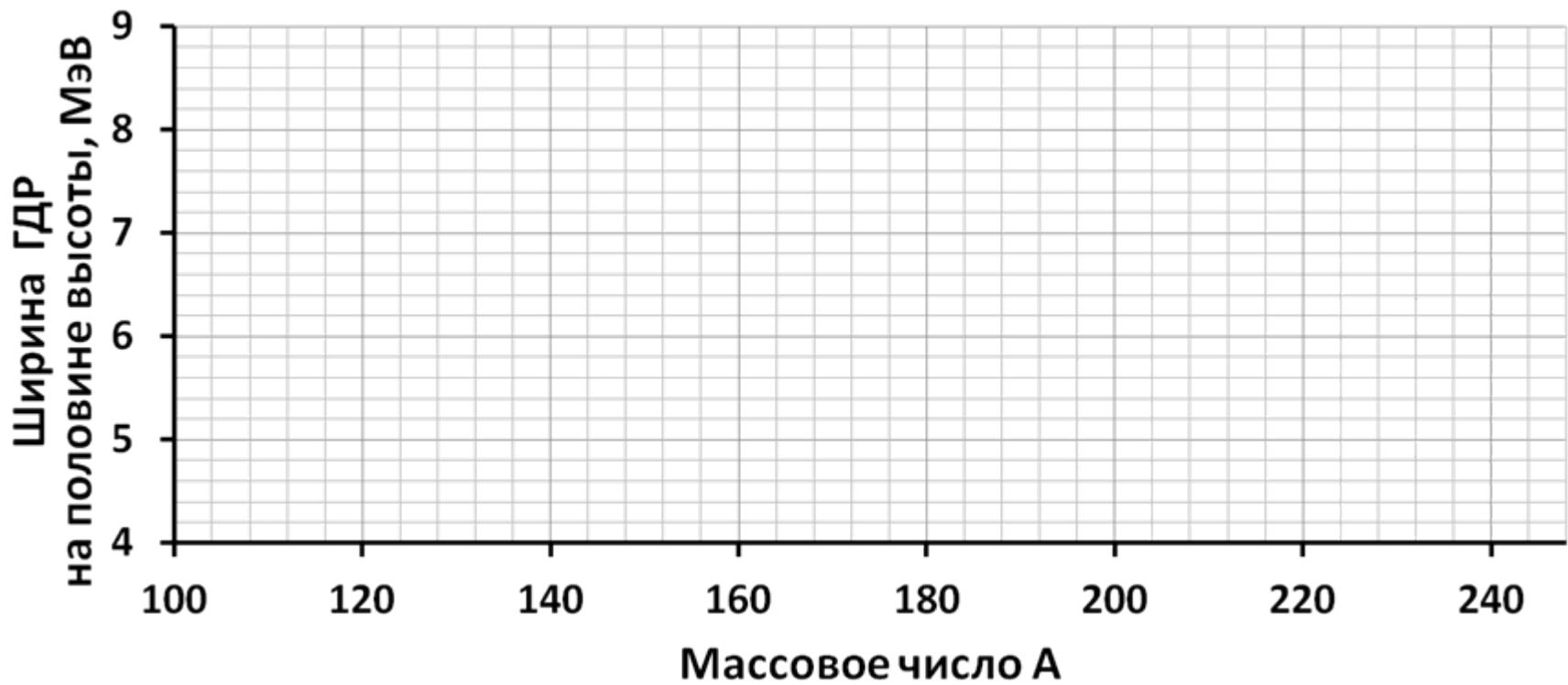
0,285
0,204
0,152
0,131
0,093



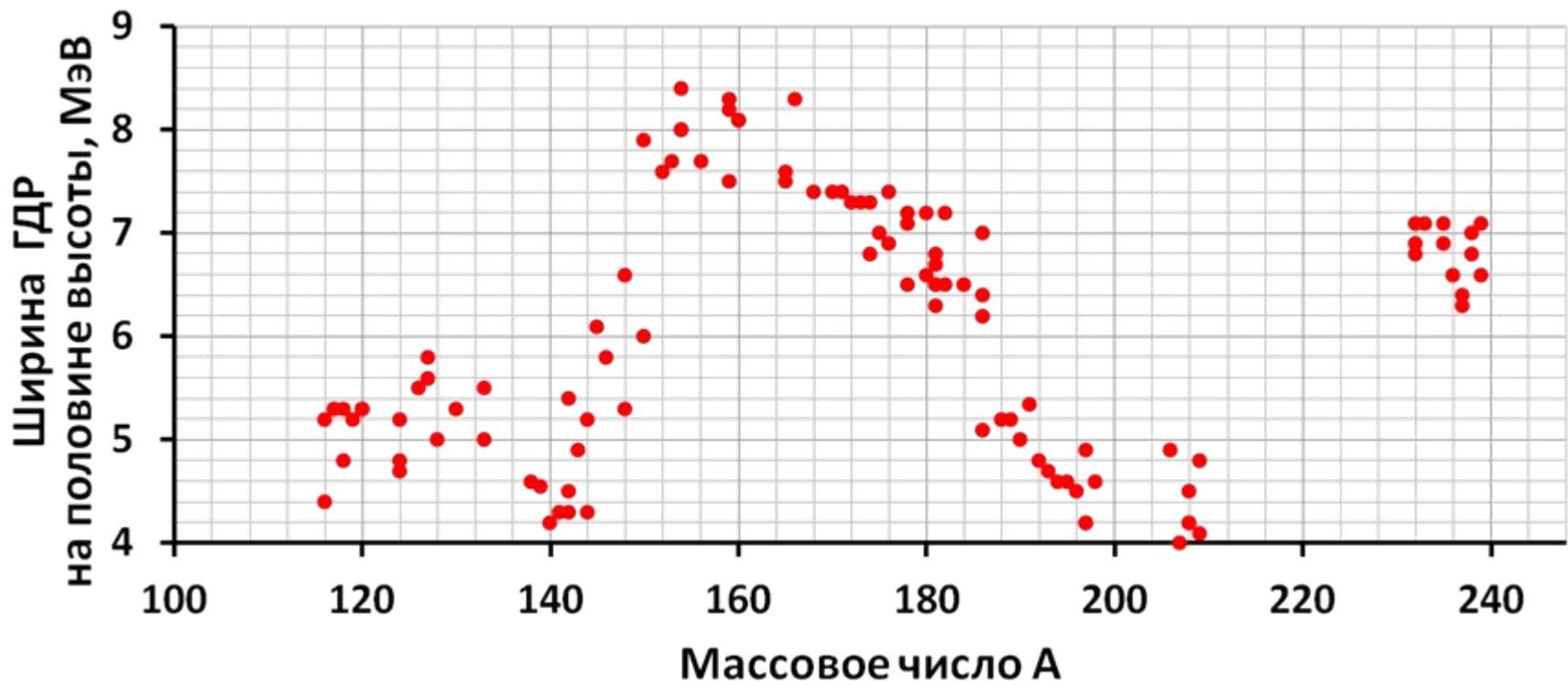
Сечения
фотопоглощения
самых тяжёлых ядер

ИЯИ РАН

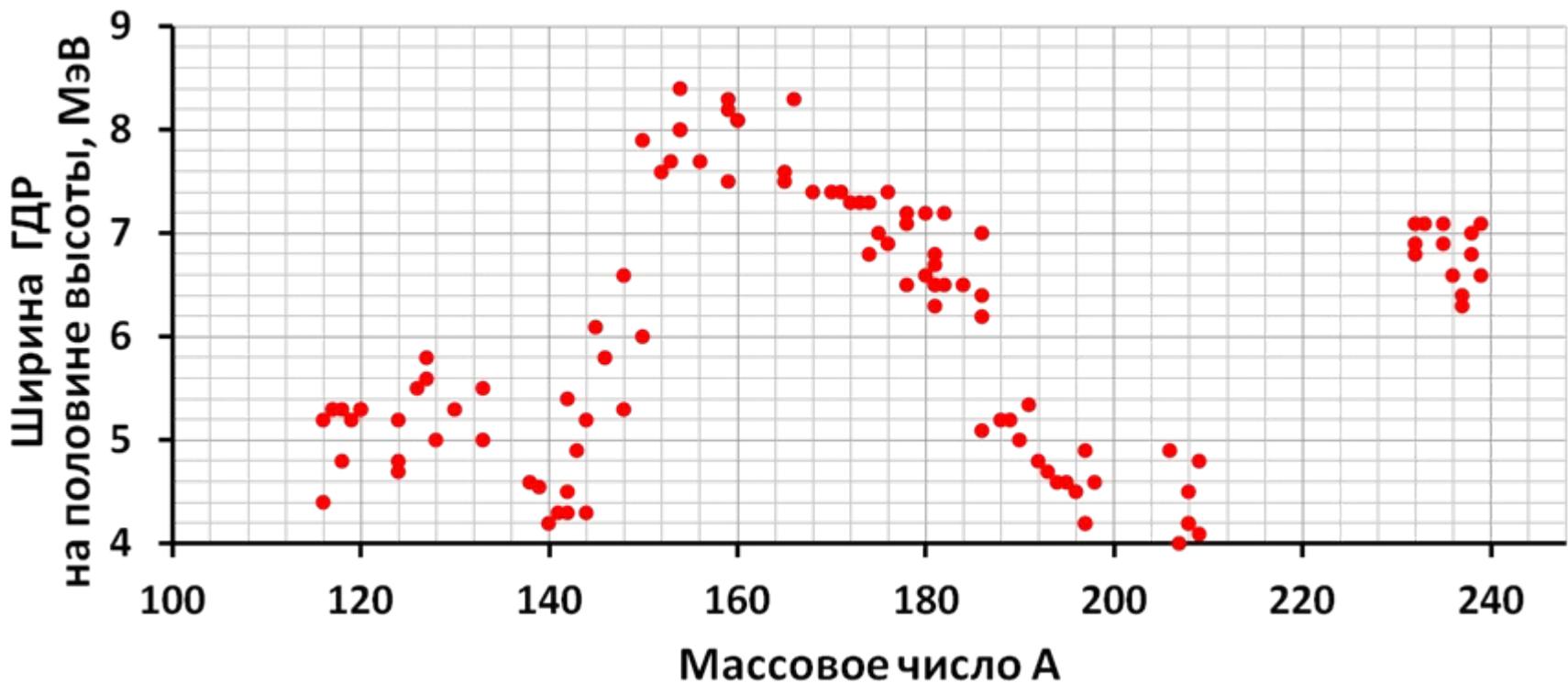
Экспериментальные ширины ГДР



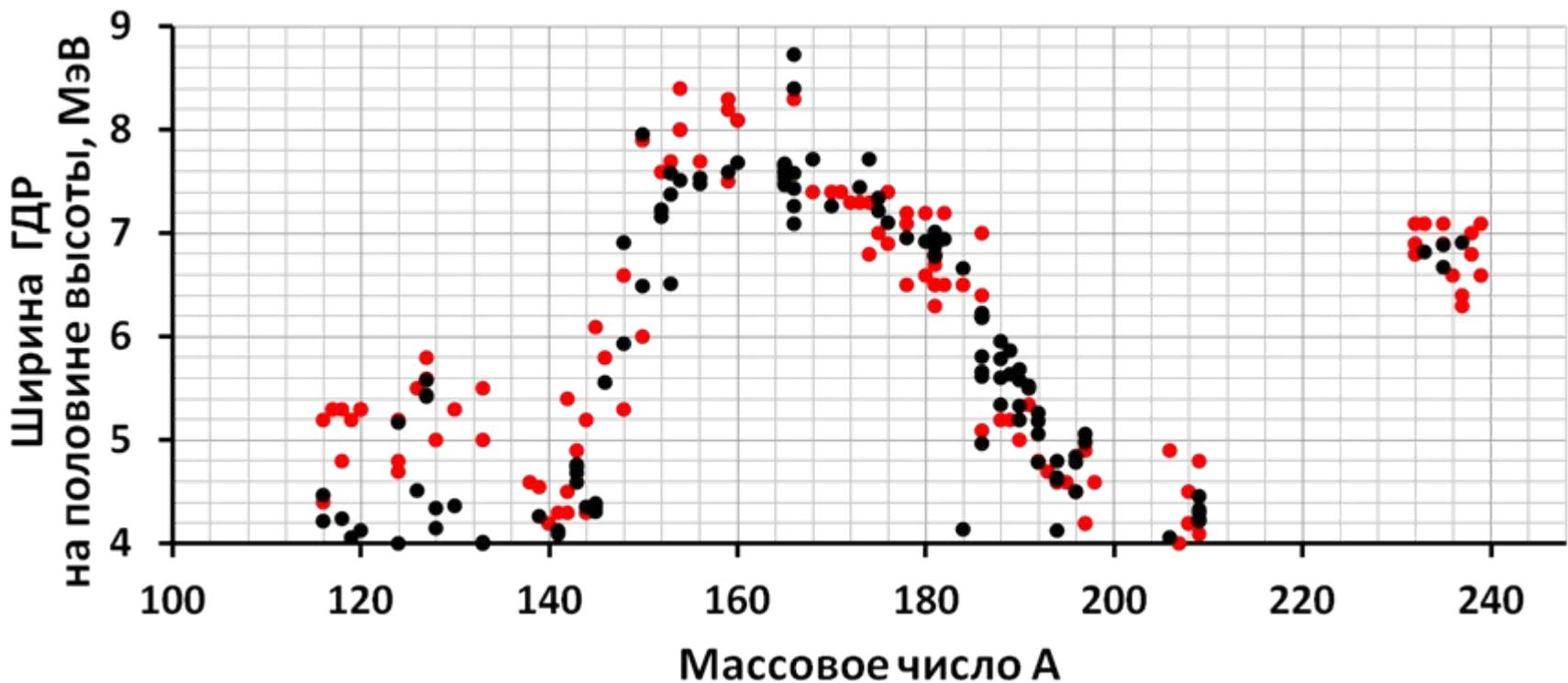
Экспериментальные ширины ГДР



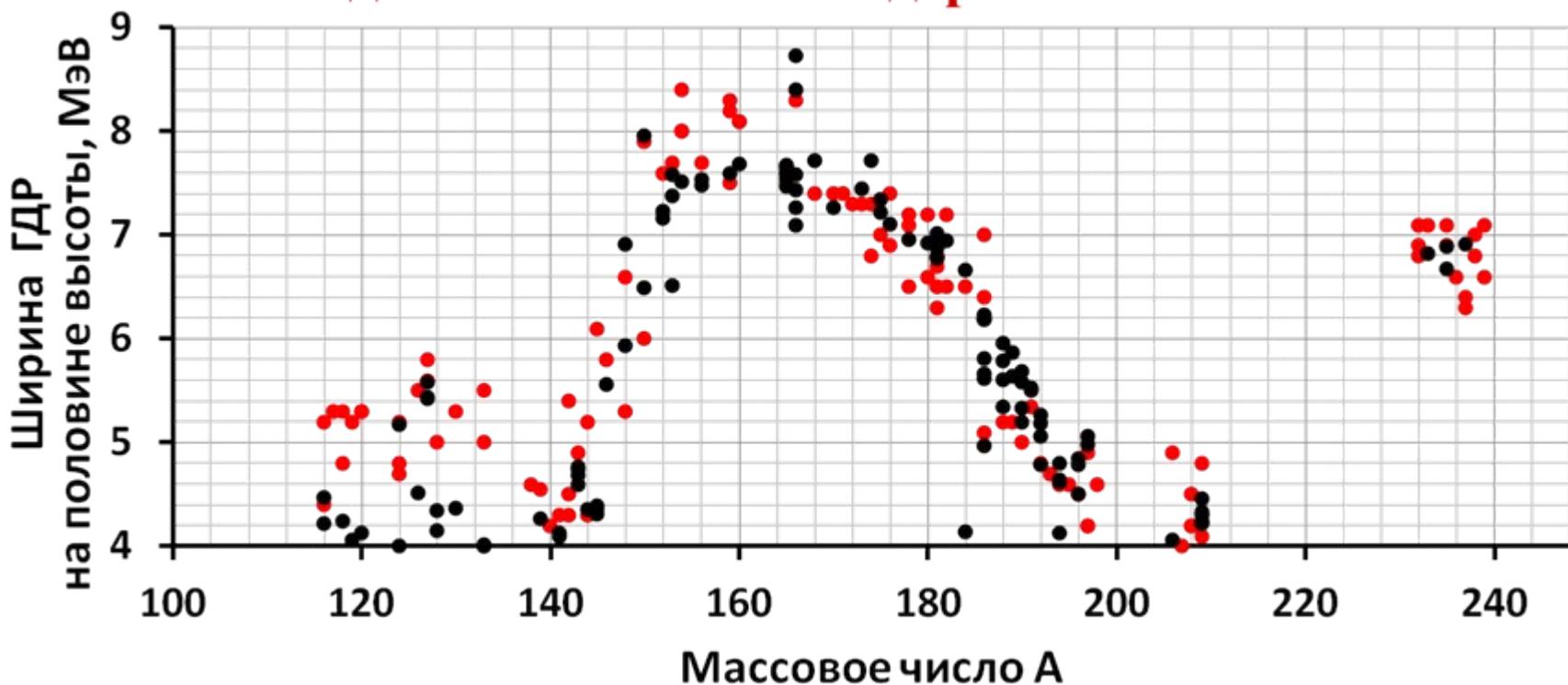
Добавляем (чёрные точки) ширины ГДР, рассчитанные по формуле $\Gamma = \Gamma_0 + \Delta\Gamma = (4 + 11 \cdot |\delta|) \text{ МэВ}$



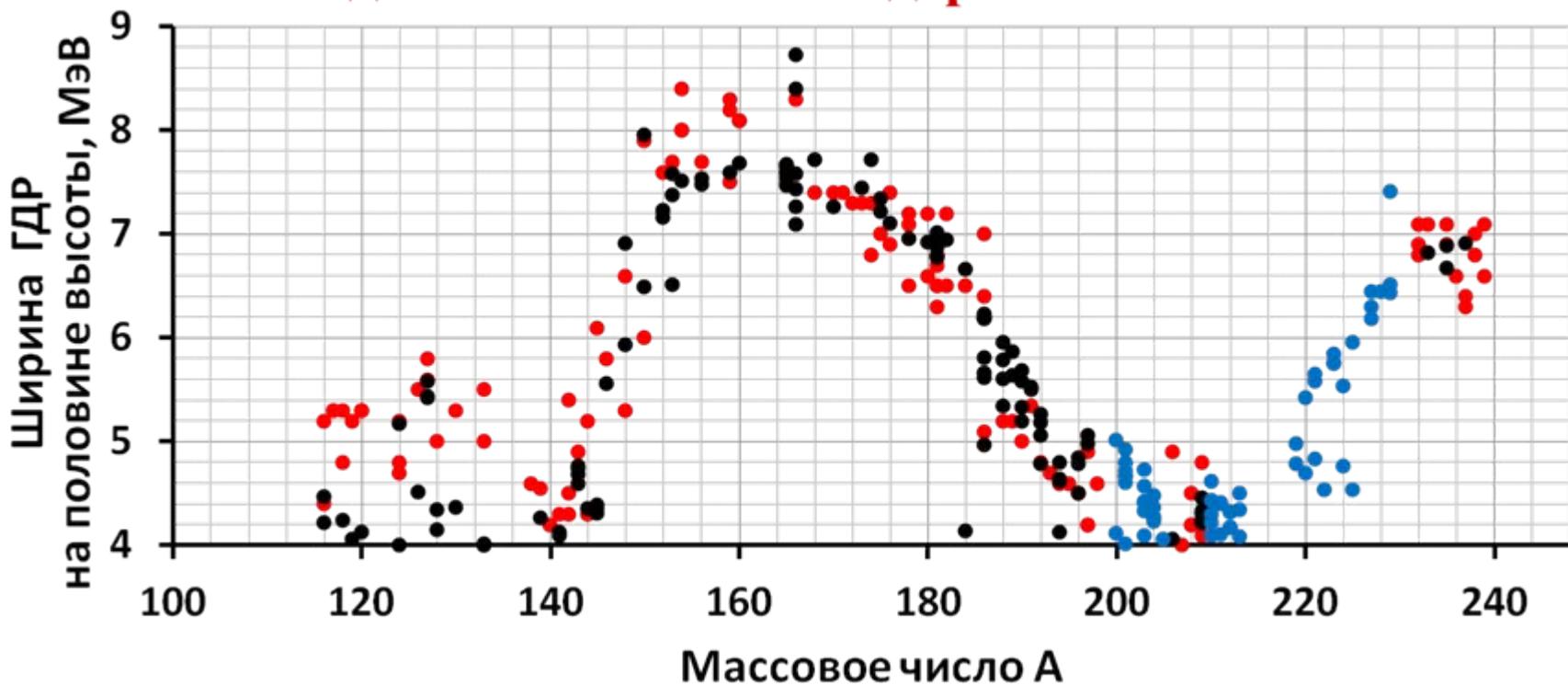
Добавляем (чёрные точки) ширины ГДР, рассчитанные по формуле $\Gamma = \Gamma_0 + \Delta\Gamma = (4 + 11 \cdot |\delta|) \text{ МэВ}$



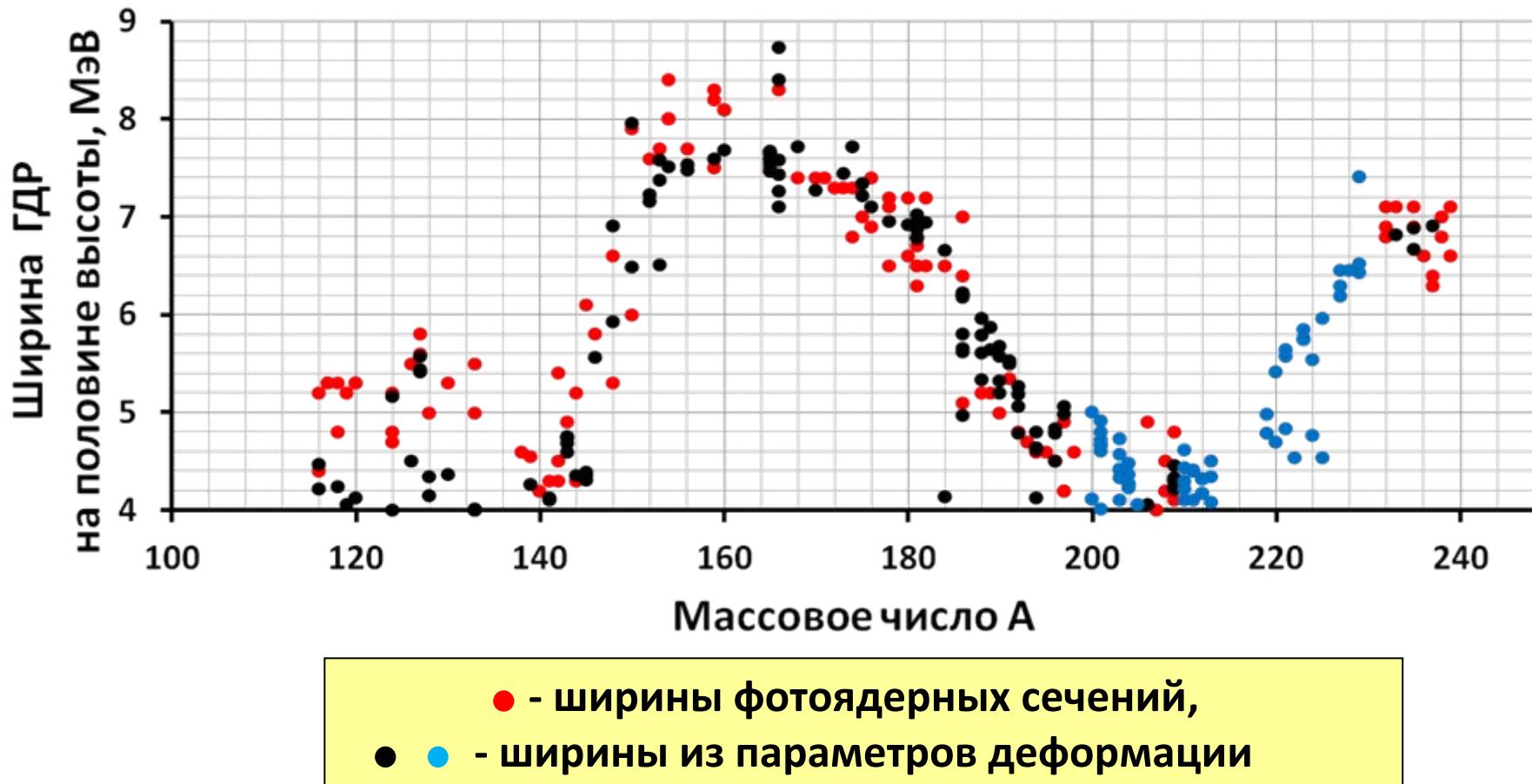
**Добавляем (синие точки) ширины ГДР, рассчитанные
по формуле $\Gamma = \Gamma_0 + \Delta\Gamma = (4 + 11 \cdot |\delta|) \text{ МэВ}$
для нестабильных ядер с $A = 200 - 229$**



**Добавляем (синие точки) ширины ГДР, рассчитанные
по формуле $\Gamma = \Gamma_0 + \Delta\Gamma = (4 + 11 \cdot |\delta|) \text{ МэВ}$
для нестабильных ядер с $A = 200 - 229$**



Ширины ГДР ядер с $A = 116 - 239$



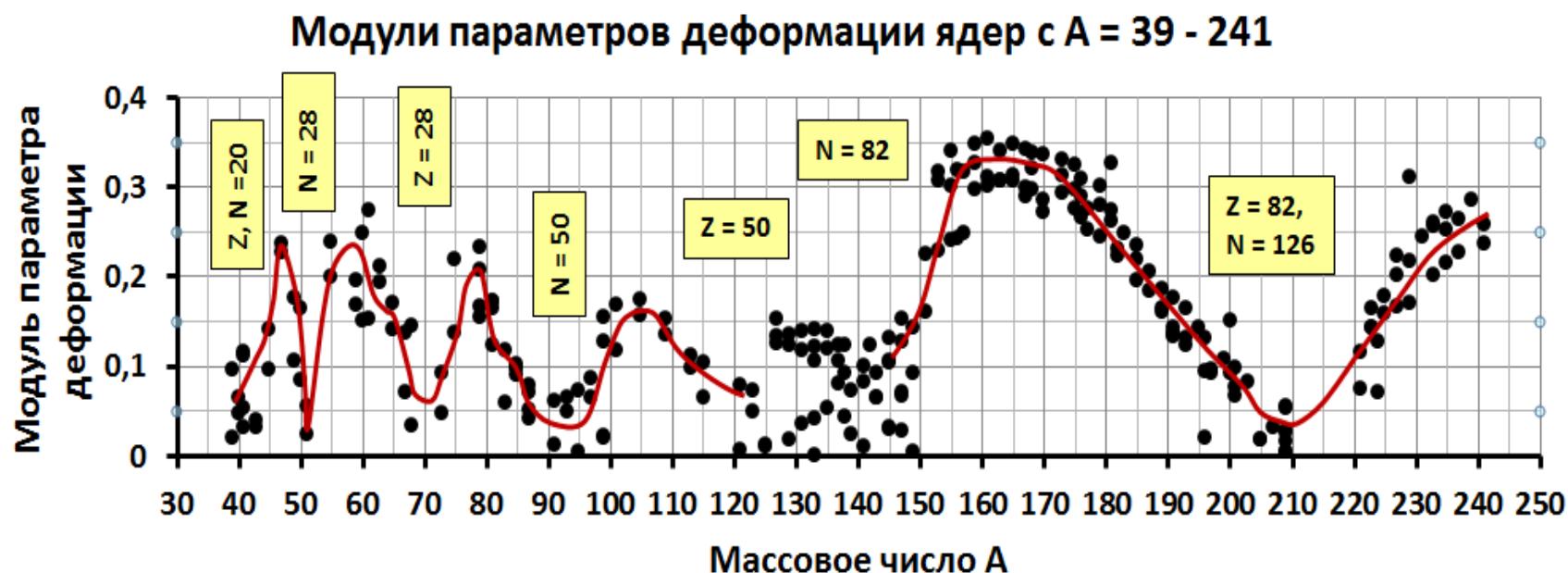
Ширины ГДР рассчитывались из параметров деформации δ с помощью соотношения

$$\Gamma = \Gamma_0 + \Delta\Gamma = (4 + 11 \cdot |\delta|) \text{ МэВ}$$

Вывод

Основным фактором увеличения ширины ГДР тяжёлых ядер ($A > 120$) по сравнению с магической (4 - 5 МэВ) является отклонение формы ядра от сферической (эффект Даноса-Окамото) и это увеличение пропорционально модулю параметра деформации

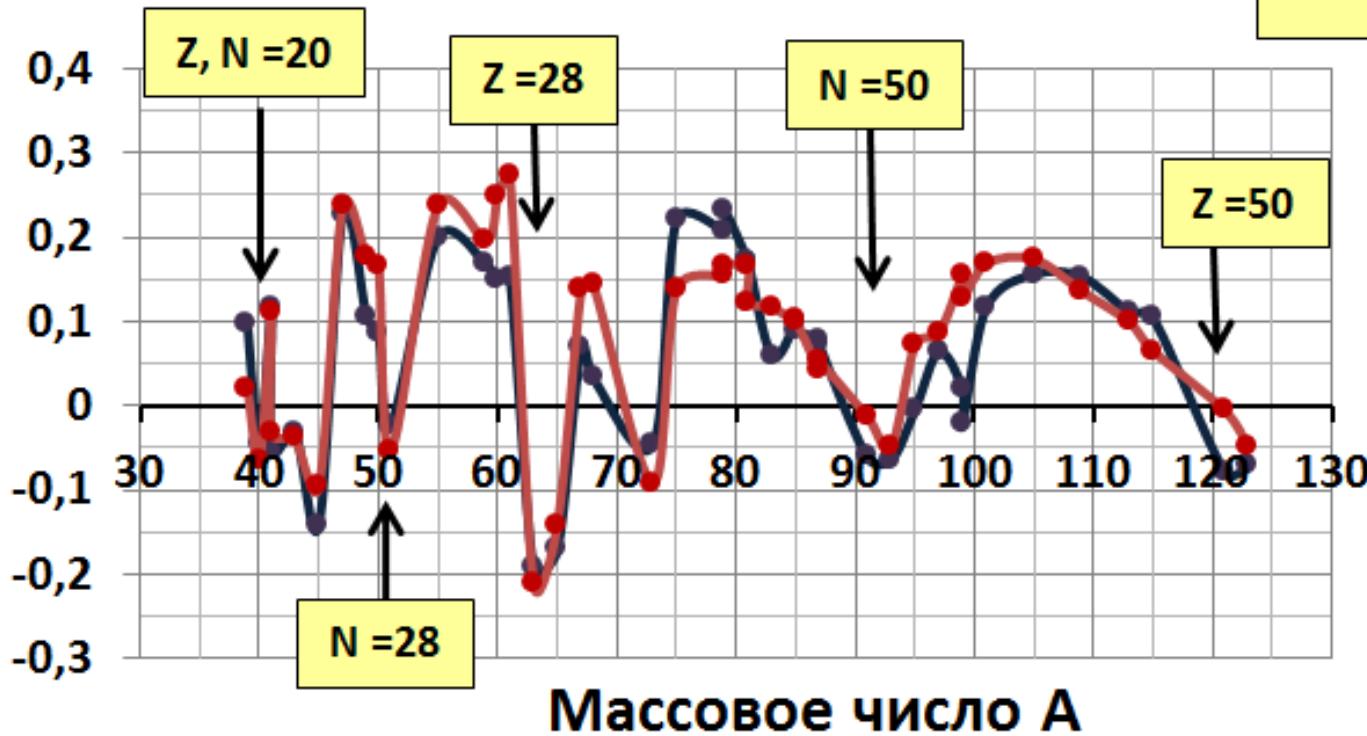
Область массовых чисел 46 - 140



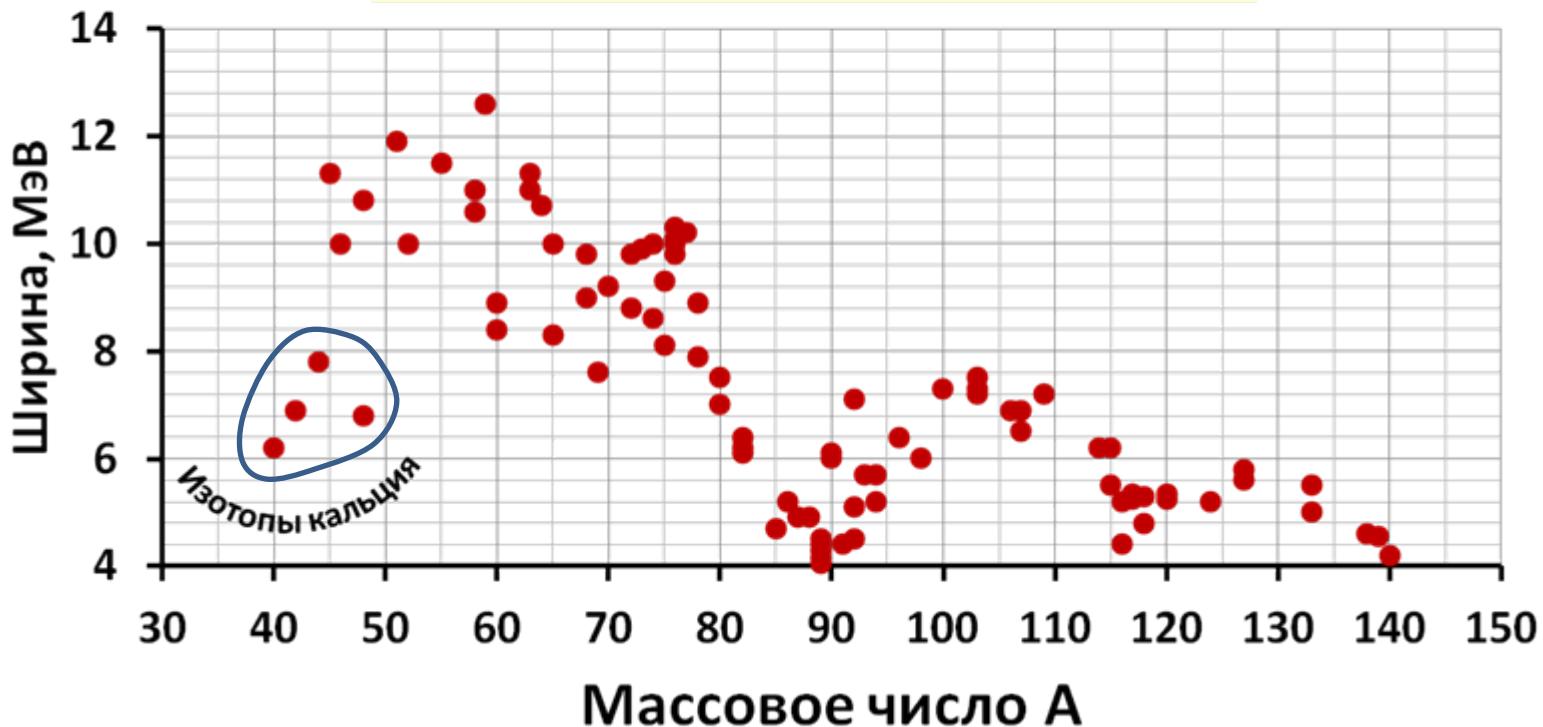
Параметр деформации стабильных и долгоживущих ядер с $A = 39-123$

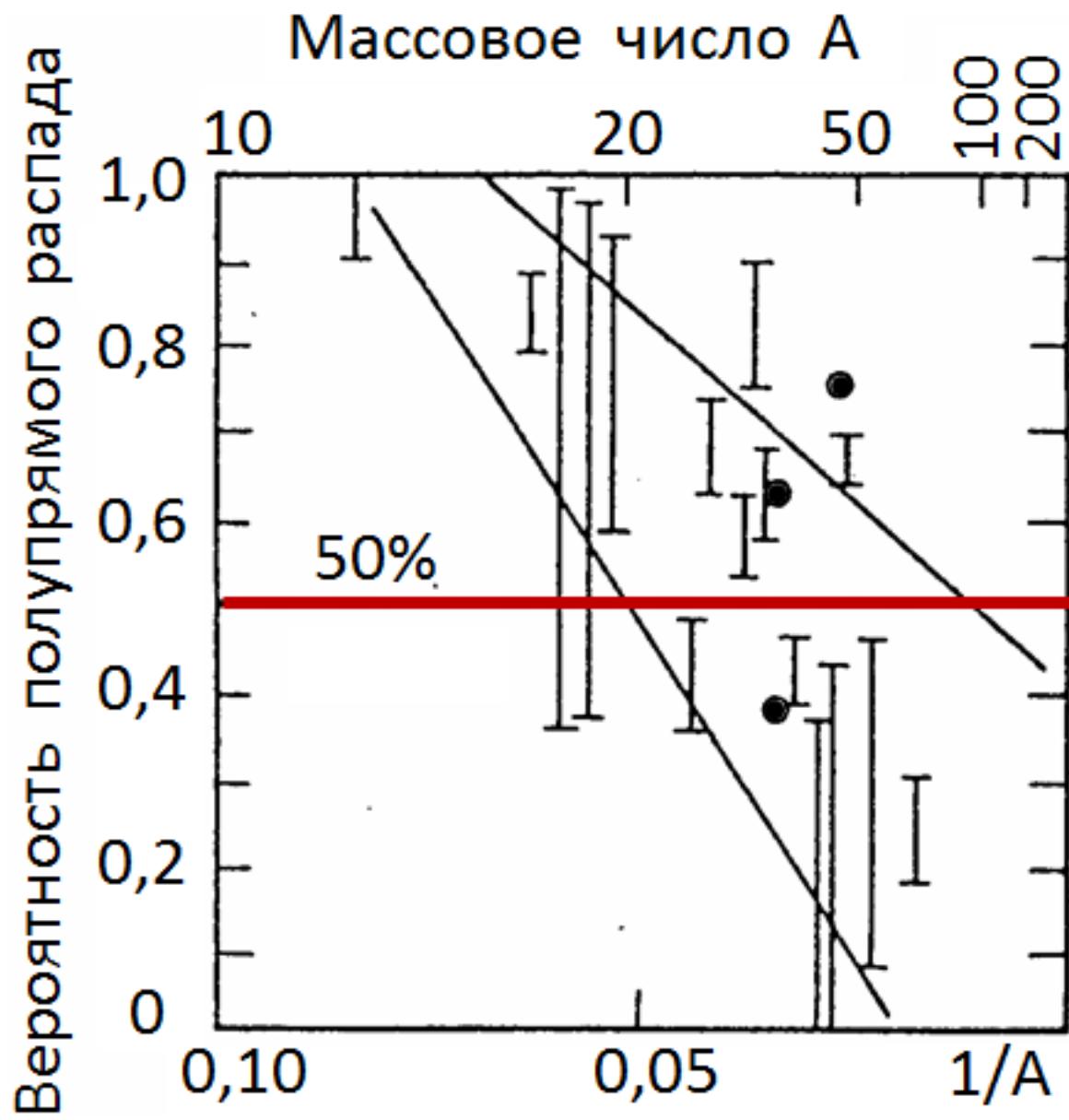
эксперимент
теория

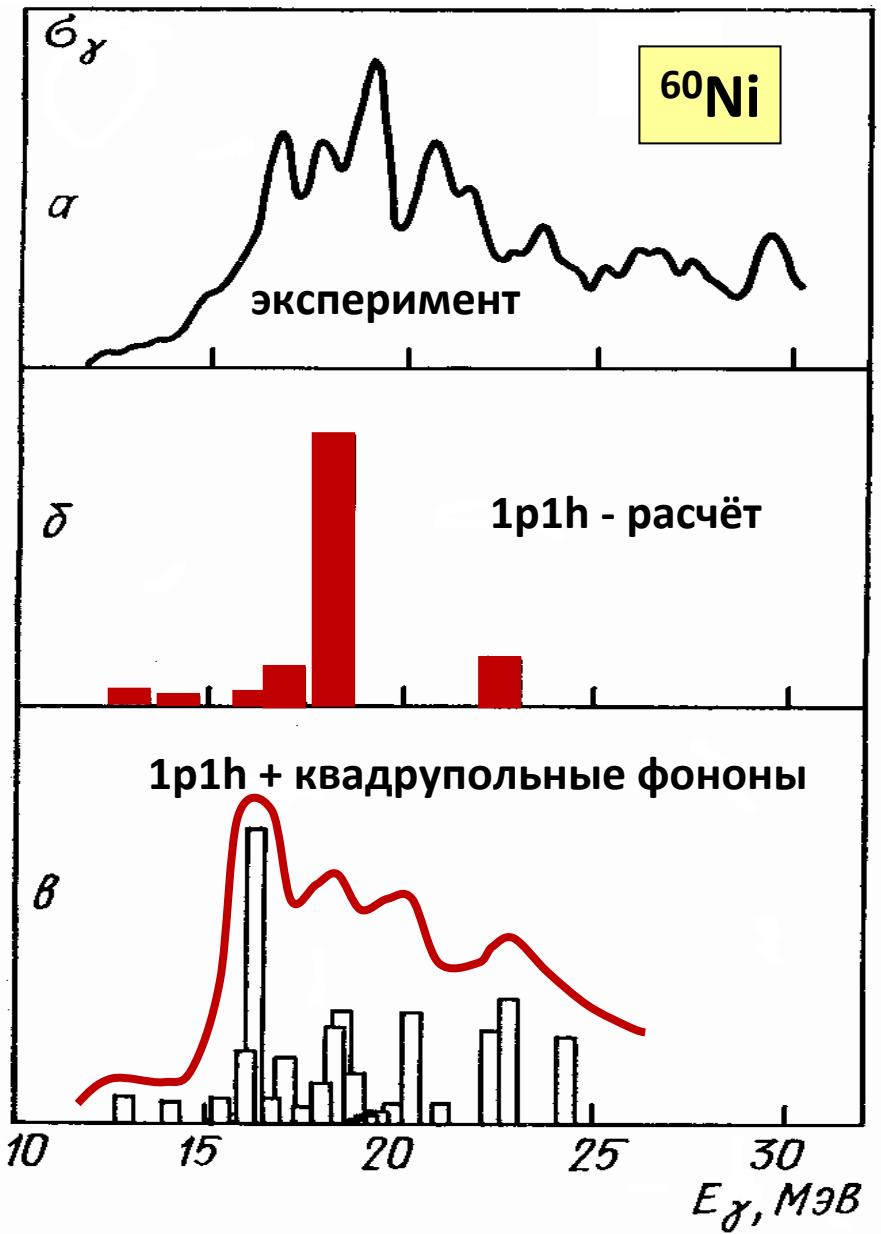
Параметр деформации



Ширина гигантского резонанса ядер с $A = 40 - 140$







Сечение фотопоглощения
 (сумма фотонуклонных сечений),
НИИЯФ МГУ

J.B. Seaborn, D. Drechsel,
 H. Arenhövel, W. Greiner.
 Phys. Lett., 23, 576, 1966

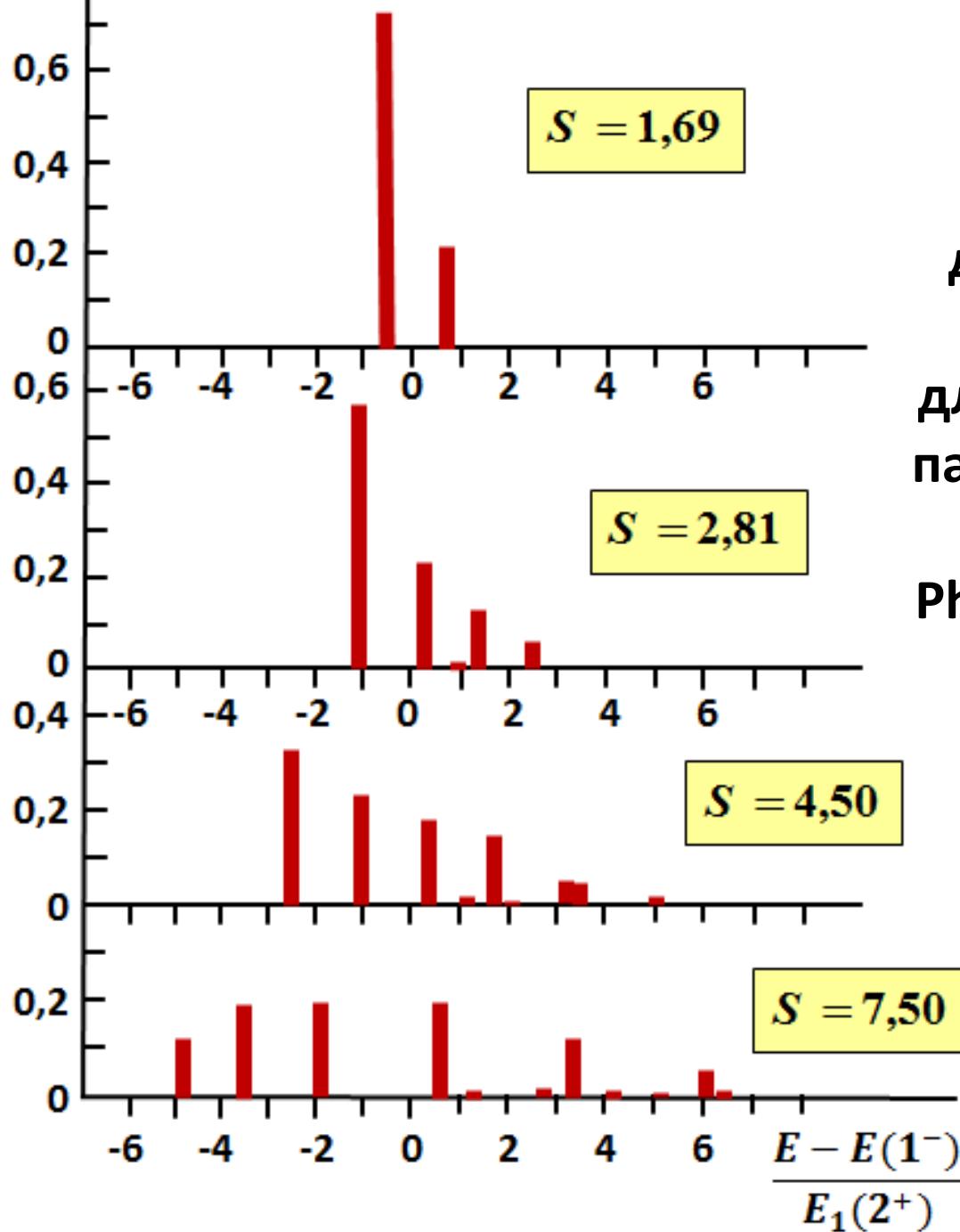
Взаимодействие дипольных и поверхностных квадрупольных колебаний может приводить к возникновению промежуточной структуры ГДР и увеличению его ширины. В сферических ядрах эта связь определяется параметром мягкости:

$$S = \langle \beta \rangle \frac{E(1^-)}{E_1(2^+)},$$

где $\langle \beta \rangle$ - среднеквадратичная амплитуда поверхностных колебаний, $E(1^-)$ - энергия ГДР и $E_1(2^+) = \hbar(C/B)^{1/2}$ - энергия поверхностного фонона.

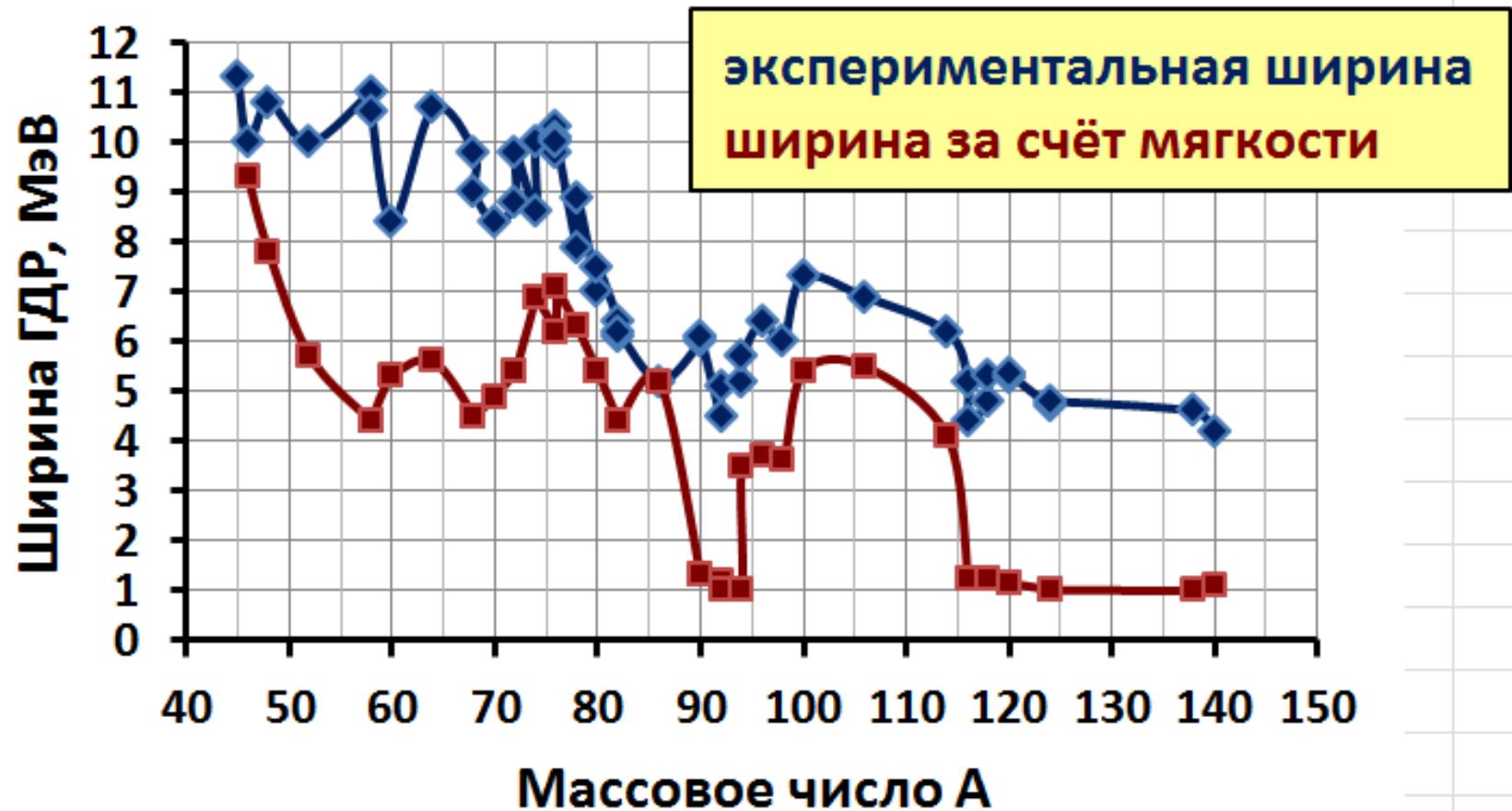
Параметры $E_1(2^+)$ и $\langle \beta \rangle$ могут быть найдены с помощью данных о низкоэнергетических уровнях четно-четных ядер: по энергии возбуждения первого уровня 2^+ и по приведенной вероятности $E2$ -перехода с этого уровня на основное состояние

Относительная сила перехода



Распределение
интенсивности
дипольных переходов
в сферических ядрах
для различных значений
параметров S по данным
M.G. Huber et al,
Phys. Rev., 155, 1973, 1967

Влияние мягкости ядра на ширину ГДР

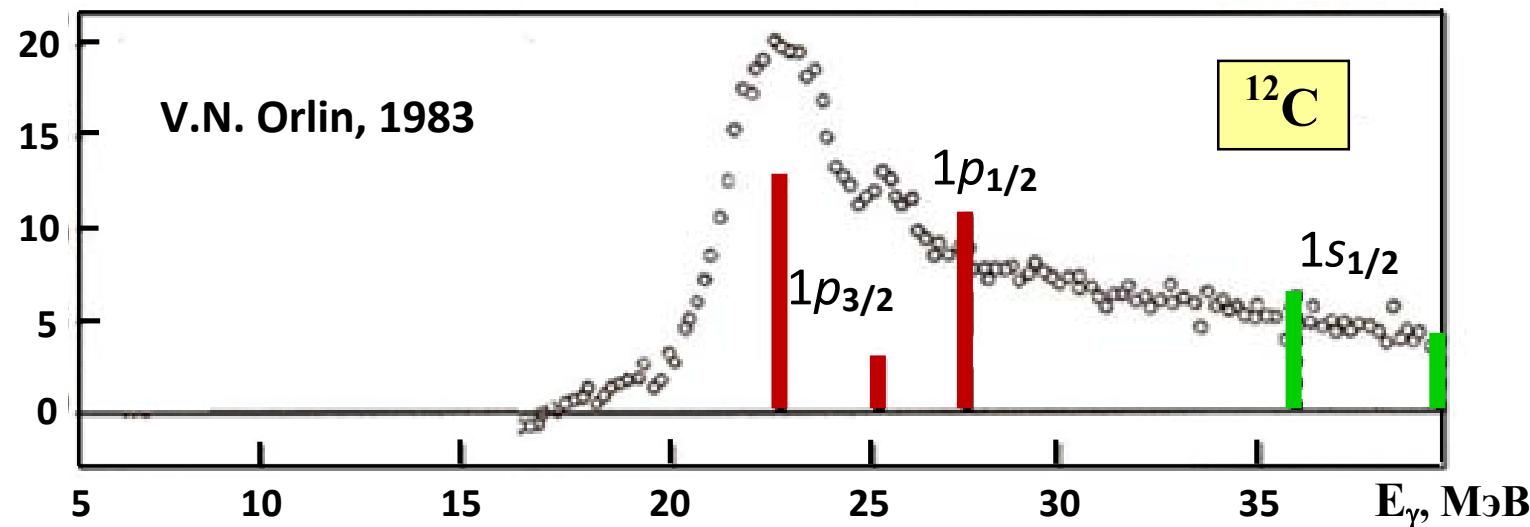


Вывод

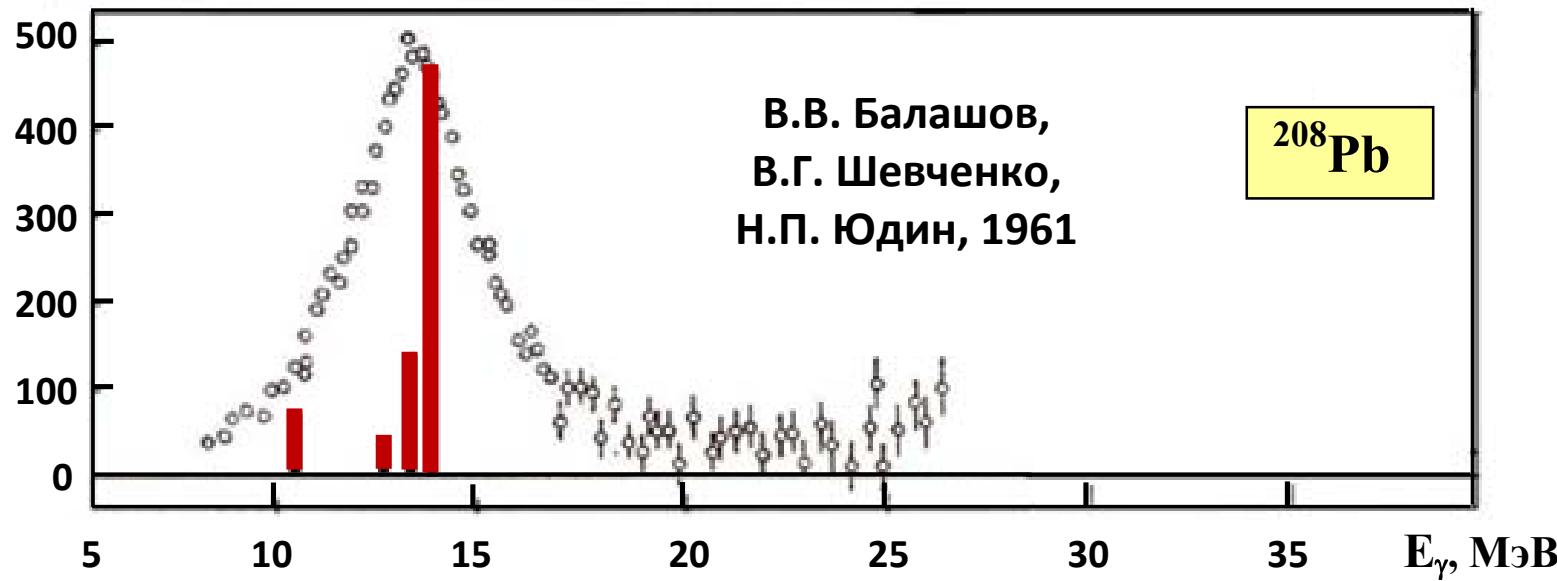
Основным фактором увеличения ширины ГДР ядер с $A = 46 - 115$ по сравнению с магической (4-5 МэВ) является диполь-квадрупольное трение - распад входных состояний на состояния более сложной природы, возникающие за счёт связи входных дипольных состояний с квадрупольными колебаниями поверхности ядра.

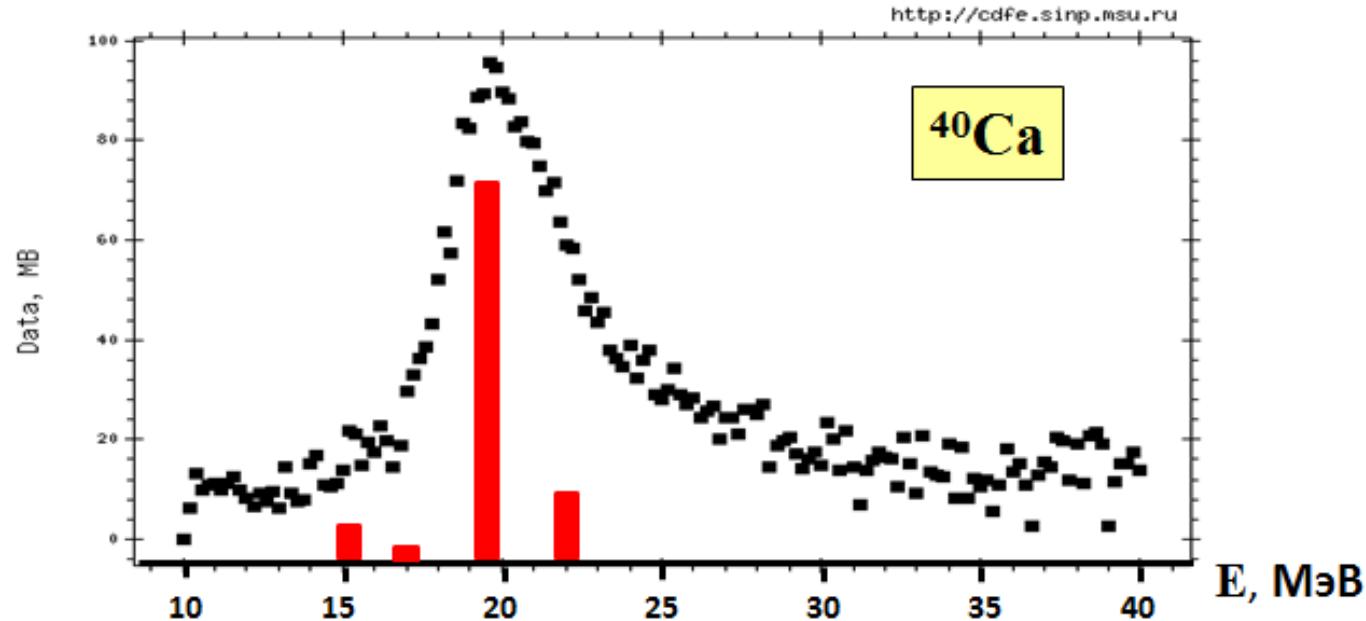
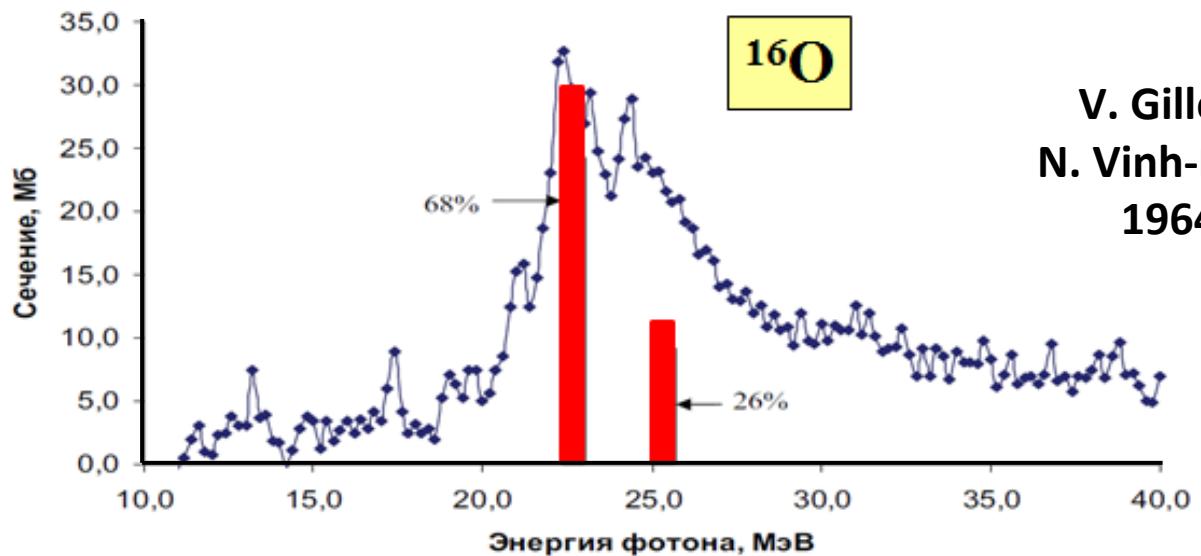
Формирование магической (4 - 5 МэВ) ширины гигантского резонанса

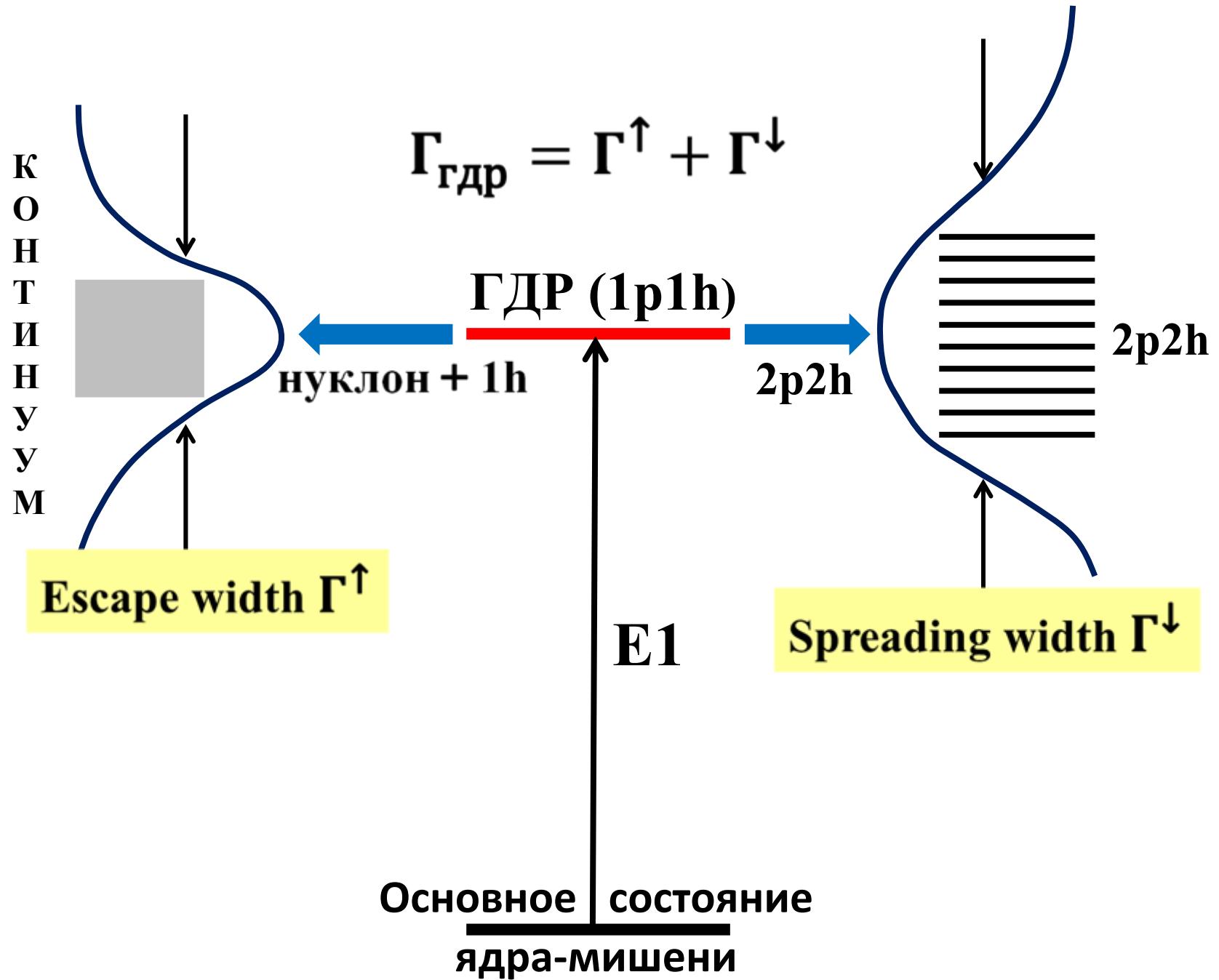
σ , мб

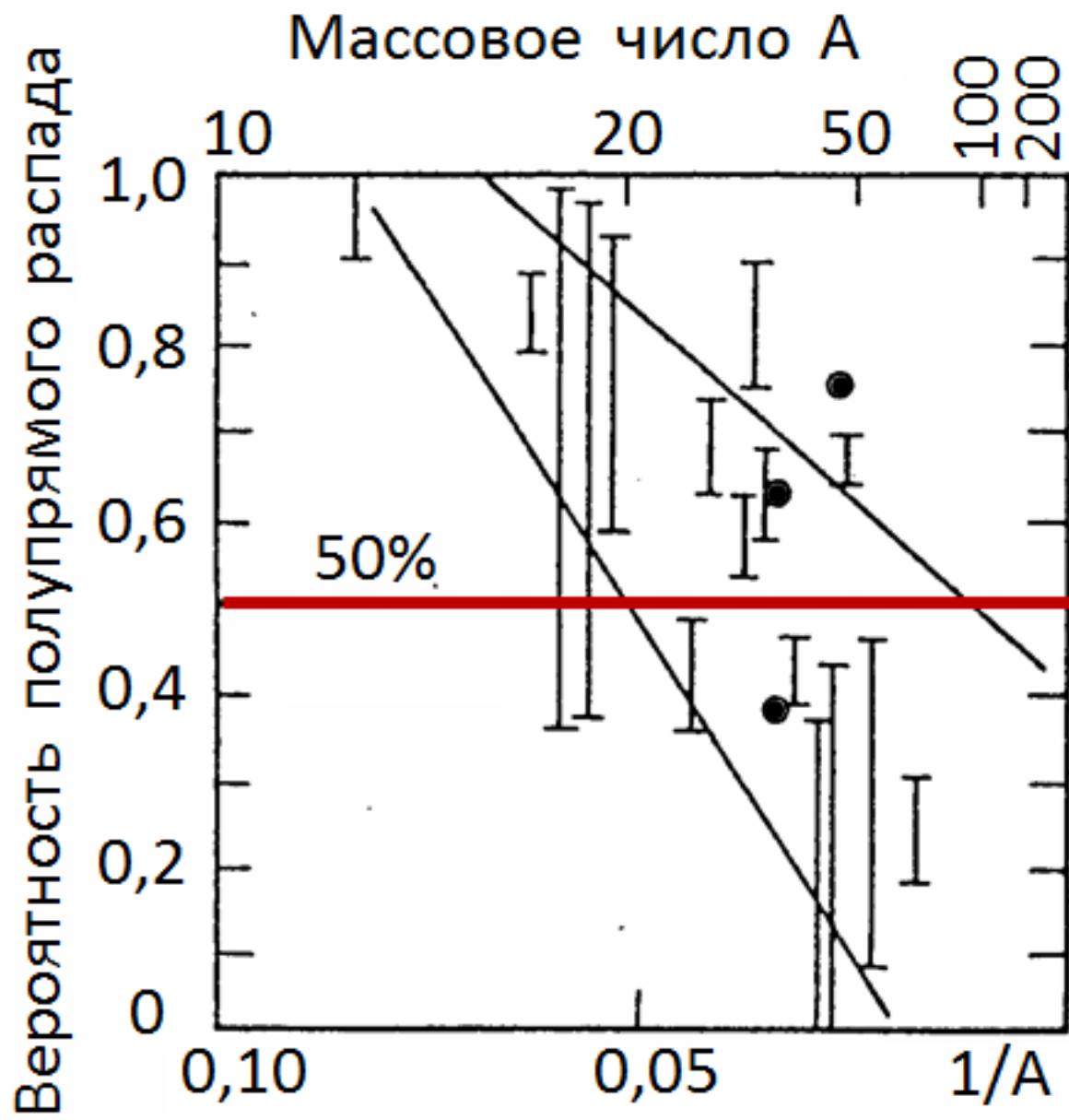


σ , мб









Главным фактором роста Γ^\downarrow при переходе от лёгких ядер к тяжелым является рост плотности ρ_{2p2h} состояний $2p2h$, на которые могут распадаться входные $1p1h$ -состояния.

| Ядро | ^{28}Si | ^{32}S | ^{58}Ni | ^{90}Zr | ^{208}Pb | ^{240}U |
|---------------------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|
| ρ_{2p2h} на 1 МэВ | ≈ 5 | 10-15 | 100 | 200-300 | 1500 - - 2000 | 2500 - - 3000 |

$$\Gamma^\downarrow = 2\pi \left| \langle 2p2h | V | 1p1h \rangle \right|^2 \rho_{2p2h}$$

Для ^{208}Pb :

$$\begin{aligned} \Gamma^\uparrow &\approx 0,5 \text{ МэВ}, \quad \Gamma^\downarrow \approx 3 \text{ МэВ}, \\ \Gamma &\approx \Gamma^\uparrow + \Gamma^\downarrow = \\ &= (0,5 + 3) \text{ МэВ} = 3,5 \text{ МэВ}. \\ \Gamma_{\text{эксп}} &= 4,2 \text{ МэВ}. \end{aligned}$$

С.П. Камерджиев,
Г.Я. Тертычный,
В.И. Целяев, 1997.

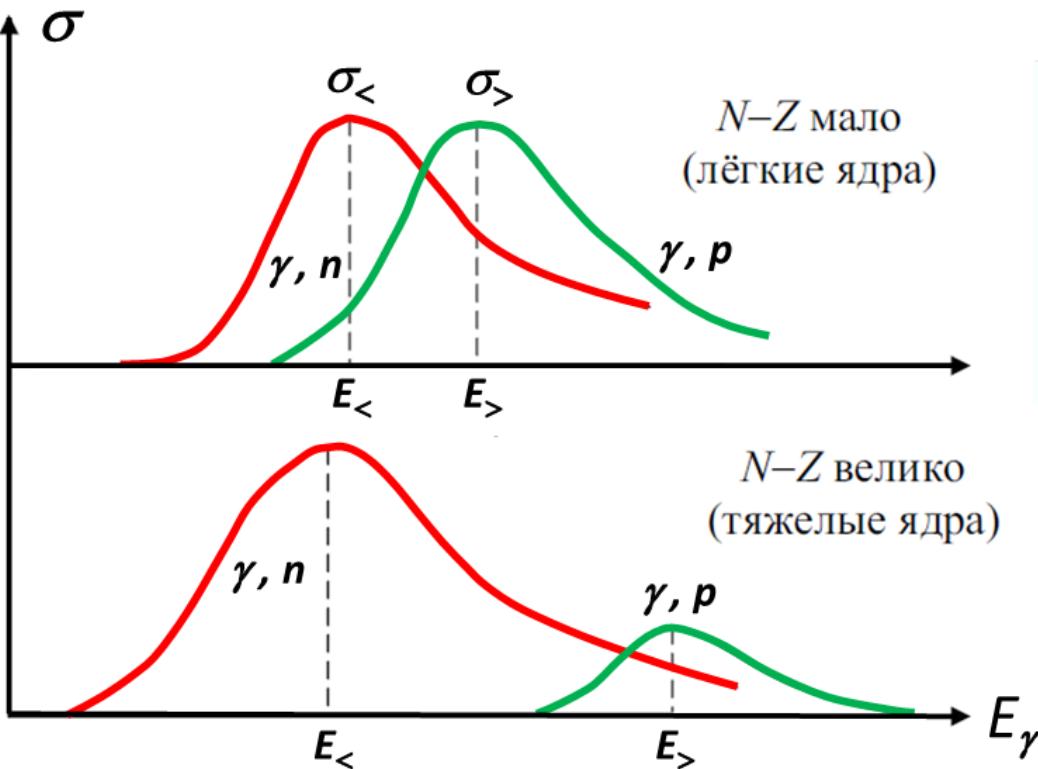
A.M. Davidson, 1972.

Yu.V. Ponomarev et al, 1994

В лёгких ядрах «магическая ширина» (4 - 5 МэВ) формируется главным образом и в сравнимых долях за счёт Γ^{\uparrow} и разброса входных состояний.

В тяжёлых ядрах эти факторы не являются основными. В них «магическая ширина» примерно на 3/4 формируется за счёт Γ^{\downarrow} . Оставшуюся часть создают Γ^{\uparrow} и разброс входных состояний.

**Проявление
изоспинового расщепления
гигантского дипольного резонанса
в его ширине**



S. Falliers, B. Goulard, R.H. Venter.
Phys. Lett. 19, 398 (1965);

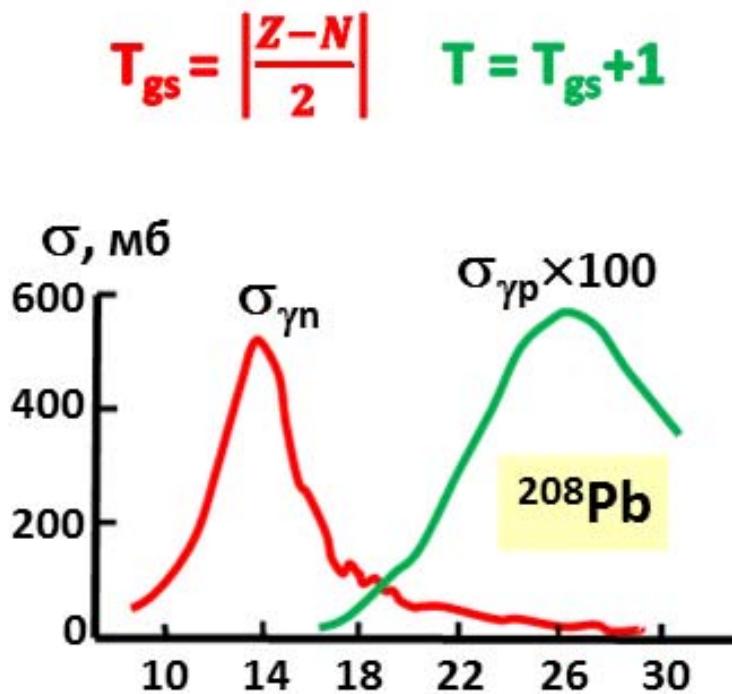
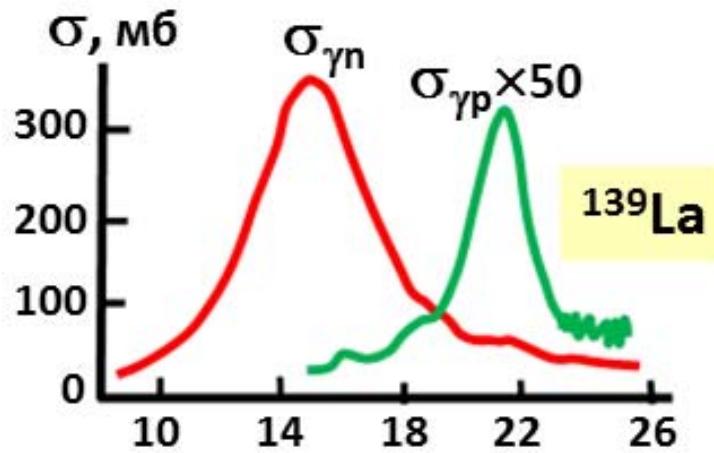
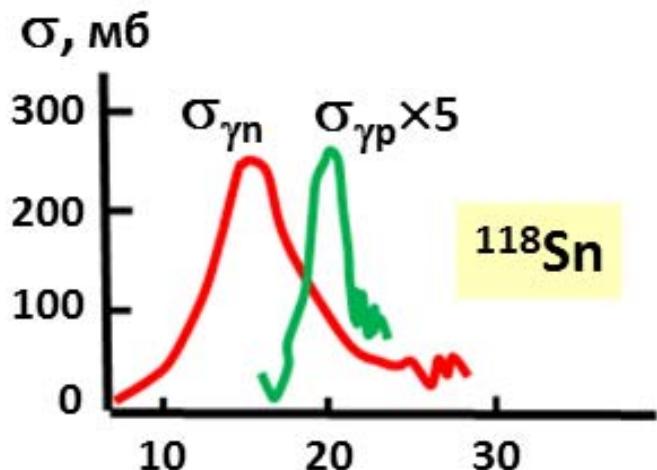
R.Ö. Akyüz, S. Falliers.
Phys. Rev. Lett. 27, 1016 (1971).

$$T_{gs} = \left| \frac{N - Z}{2} \right|$$

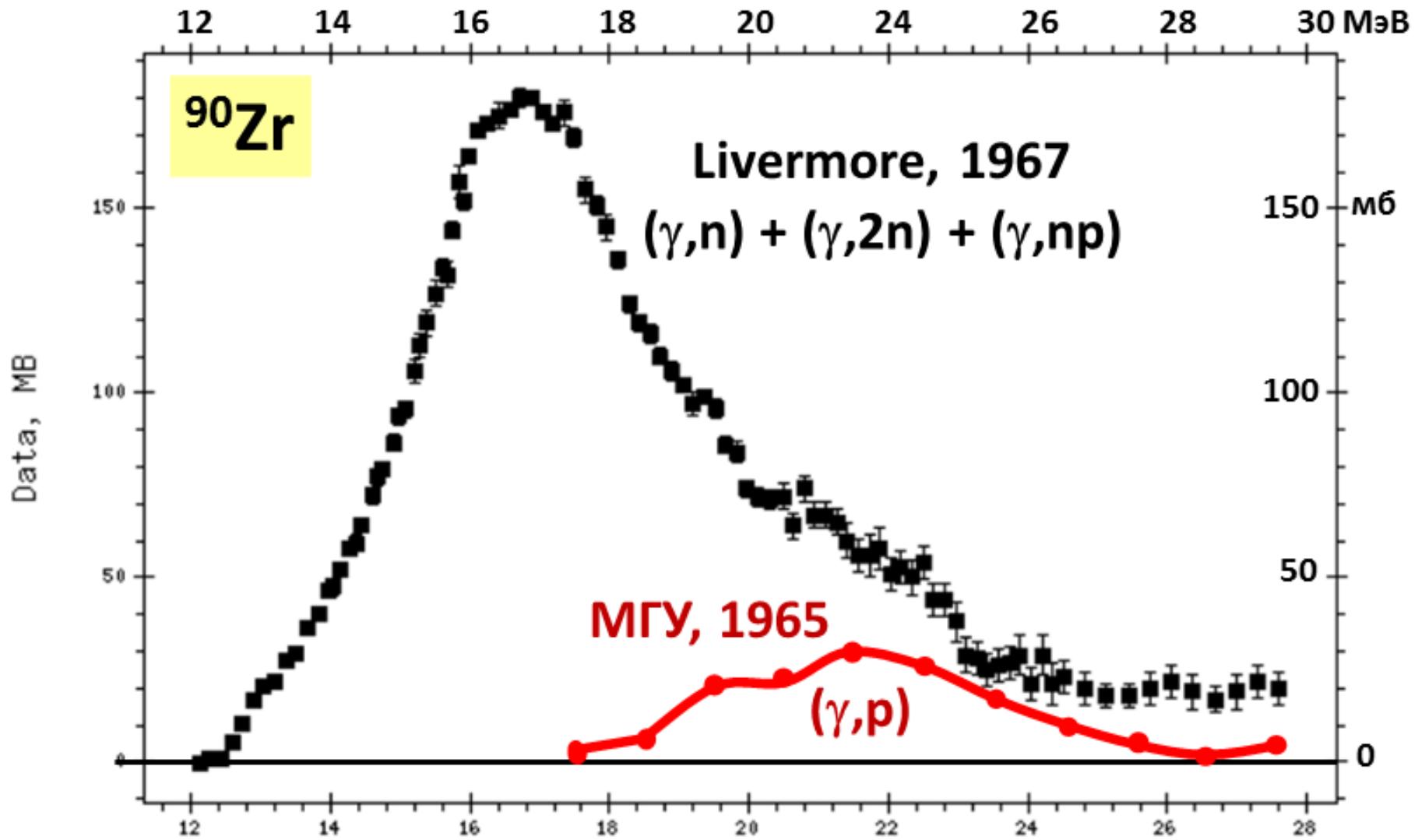
$$\frac{\int \frac{\sigma_>(E)}{E} dE}{\int \frac{\sigma_<(E)}{E} dE} = \frac{1}{T_{gs}} \cdot \frac{1 - 1,5 \cdot T_{gs} \cdot A^{-2/3}}{1 + 1,5 \cdot A^{-2/3}}$$

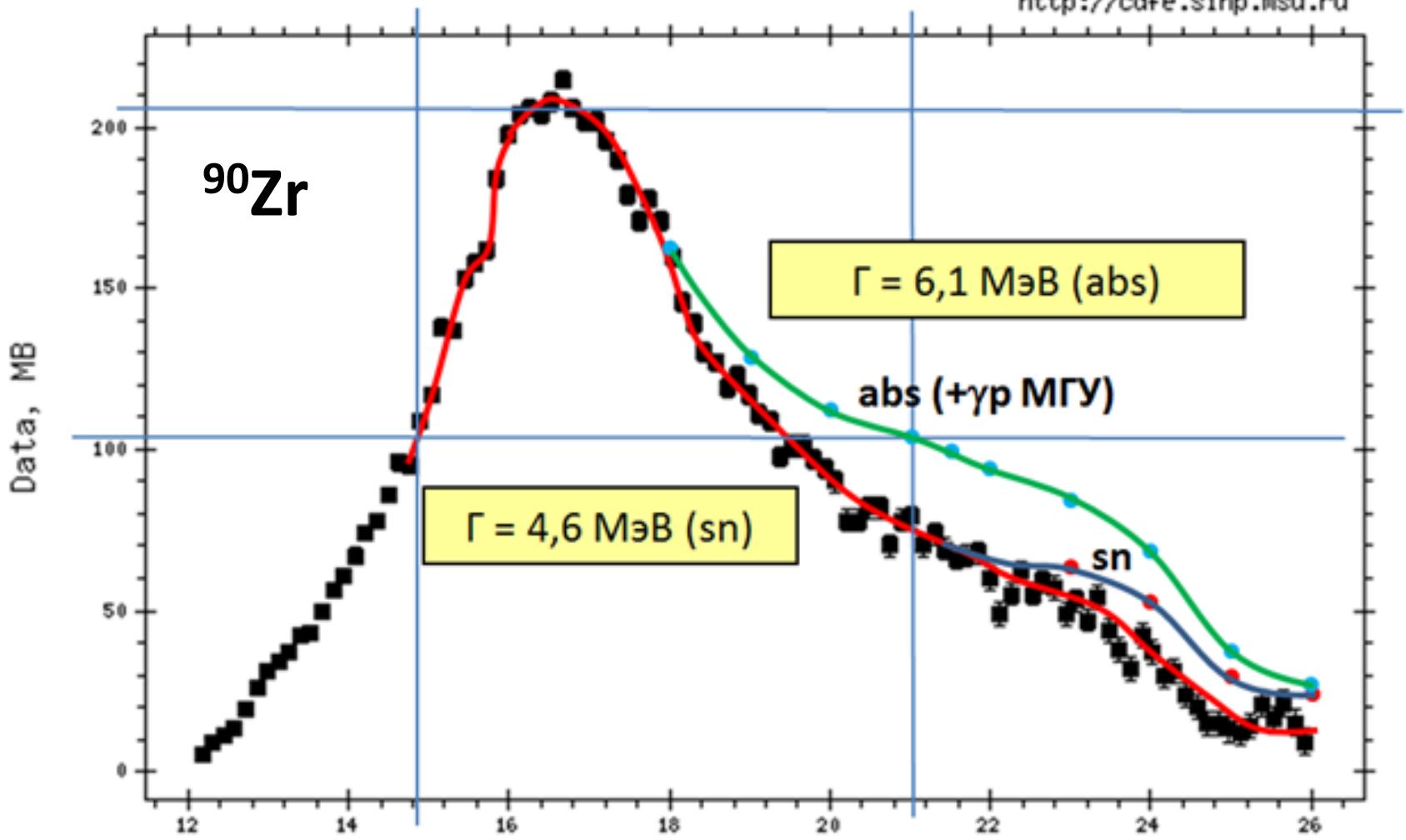
$$E_> - E_< = \frac{60}{A} (T_{gs} + 1) \text{ MeV}$$

Проявление
изоспинового расщепления ГДР
в реакциях (γ, n) и (γ, p)
массивных ядер



$$T_{gs} = \left| \frac{Z-N}{2} \right| \quad T = T_{gs} + 1$$



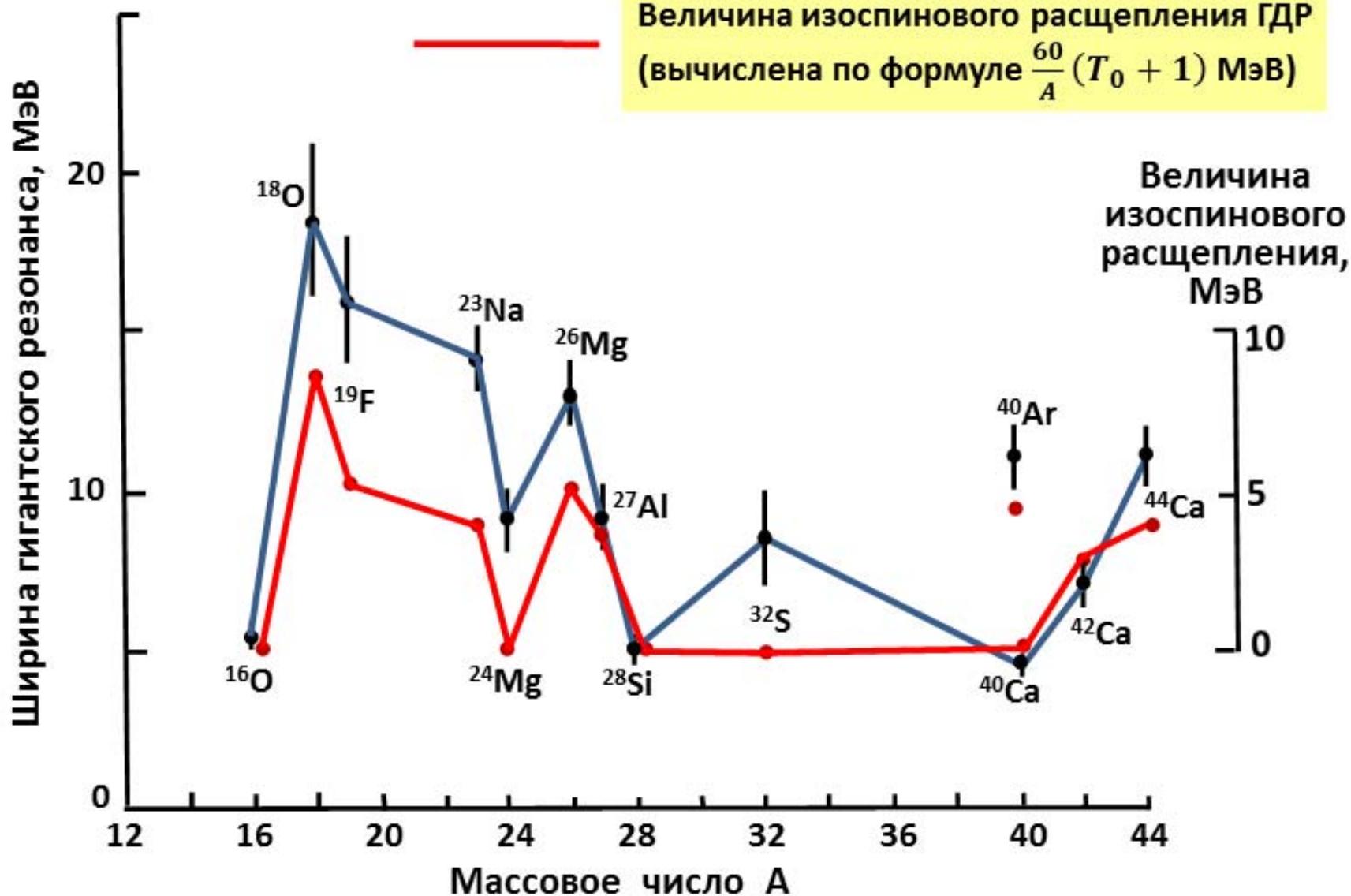


Изотопический эффект в ширине гигантского дипольного резонанса лёгких ядер

И.М. Капитонов,
Ядерная физика,
т. 38, 612 (1983)

Ширина ГДР

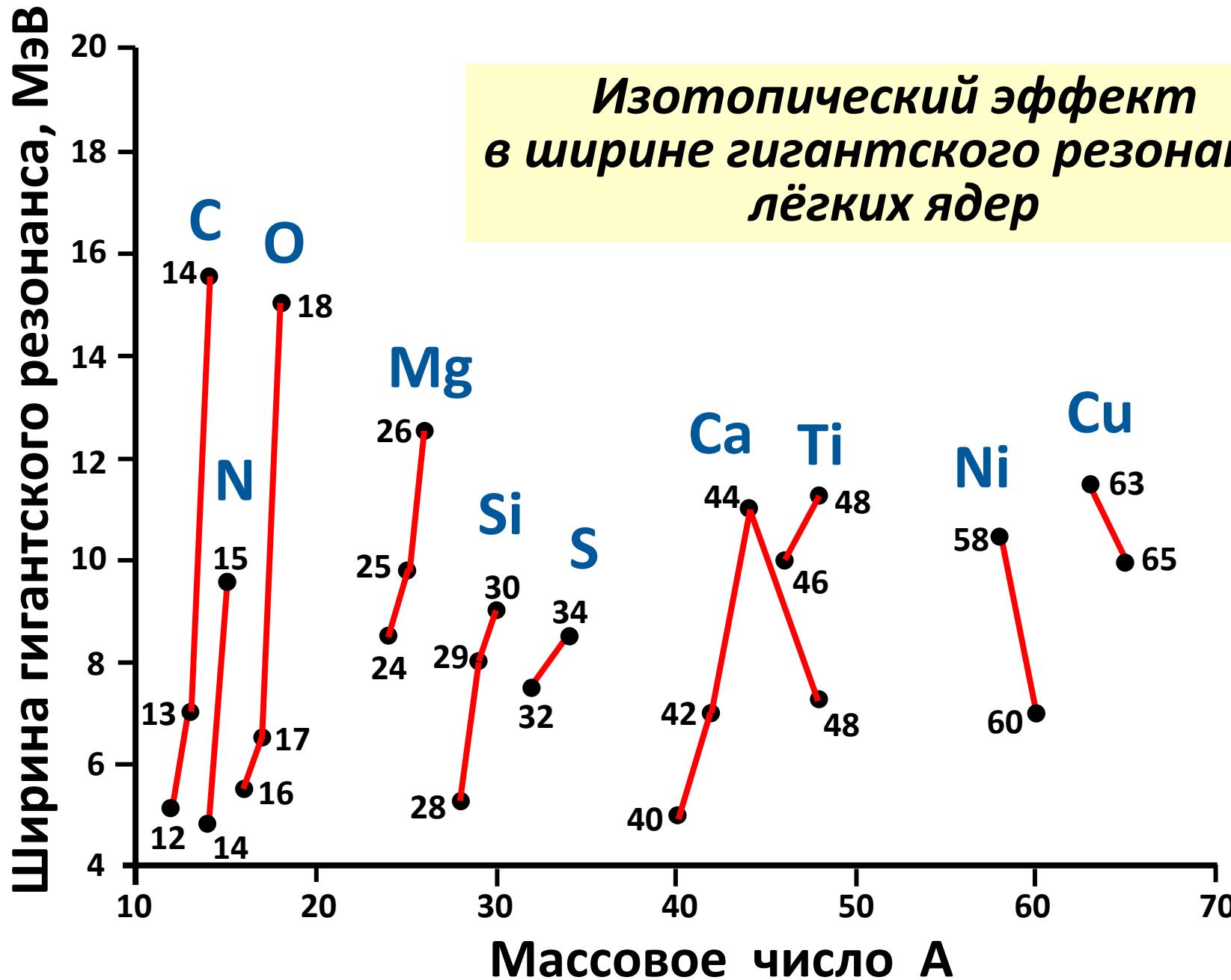
Величина изоспинового расщепления ГДР
(вычислена по формуле $\frac{60}{A} (T_0 + 1)$ МэВ)

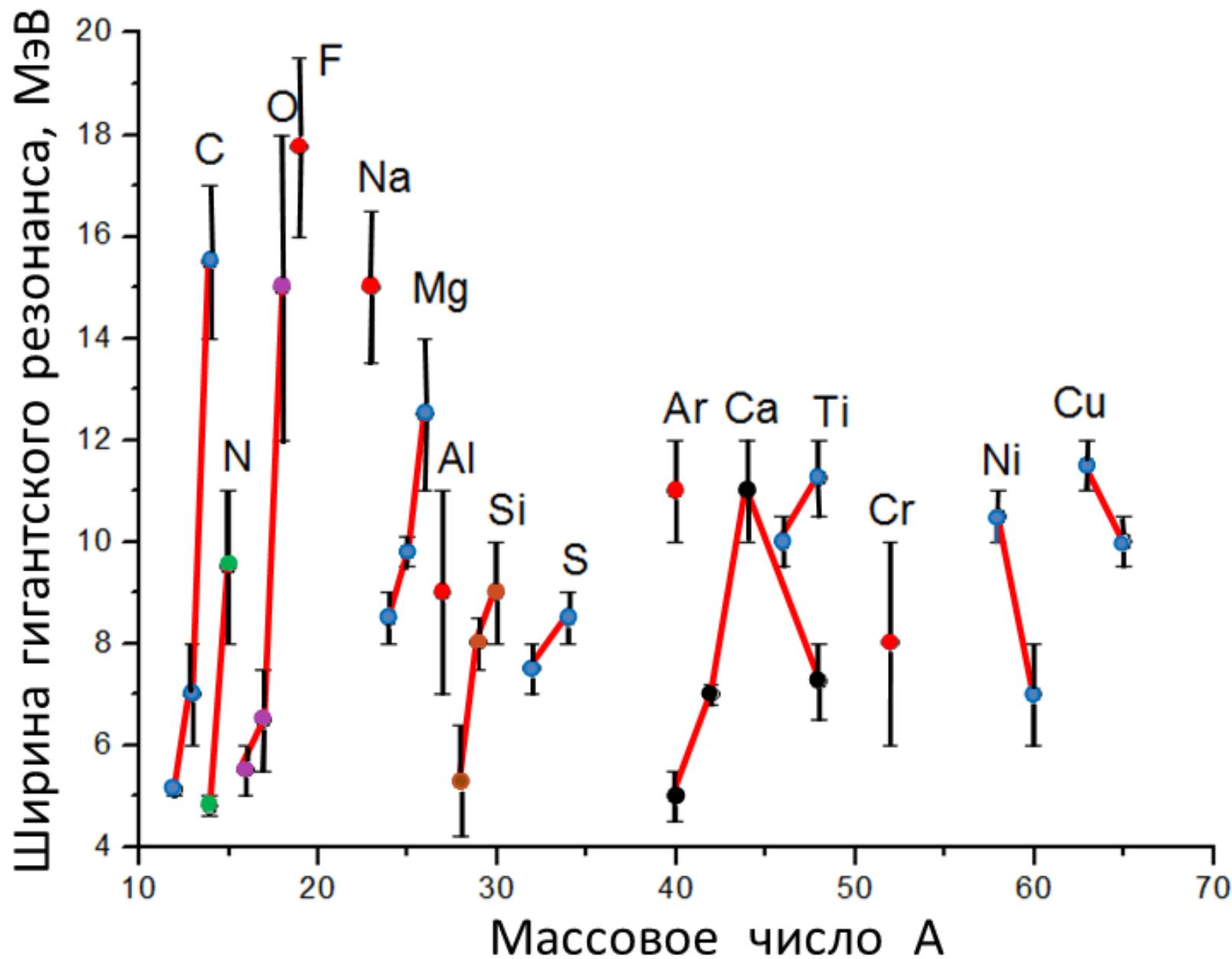


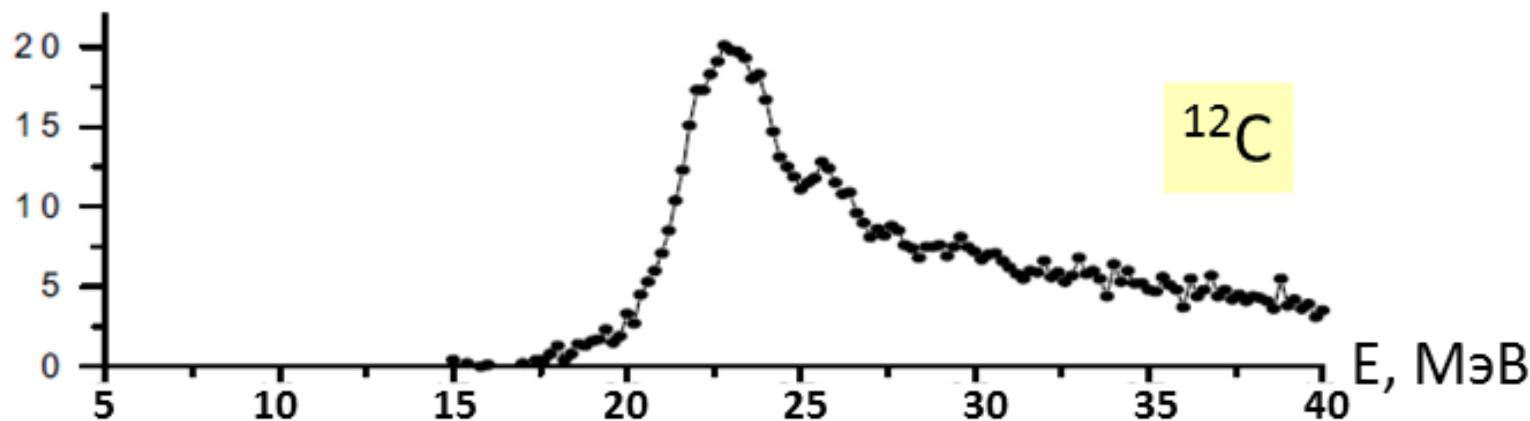
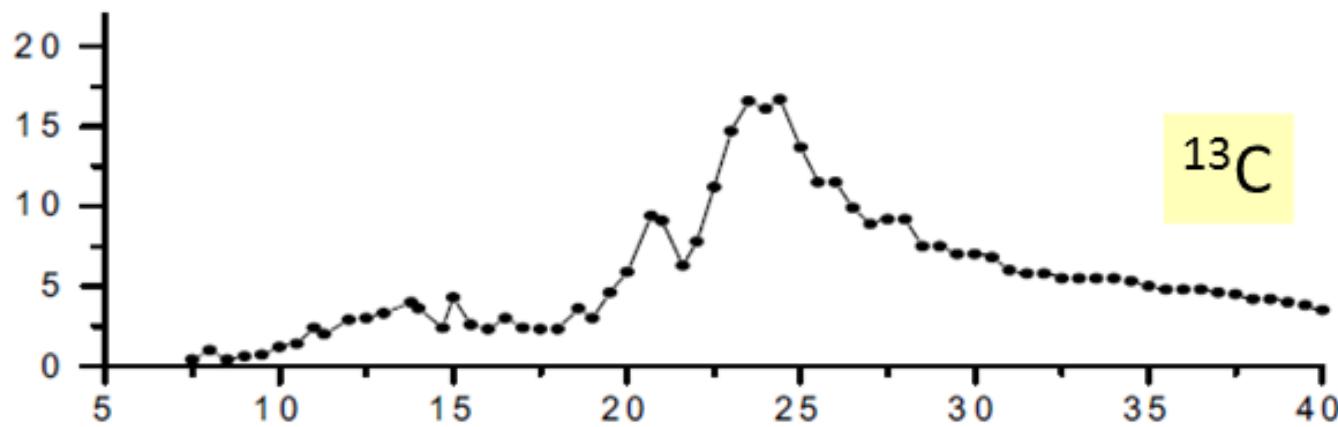
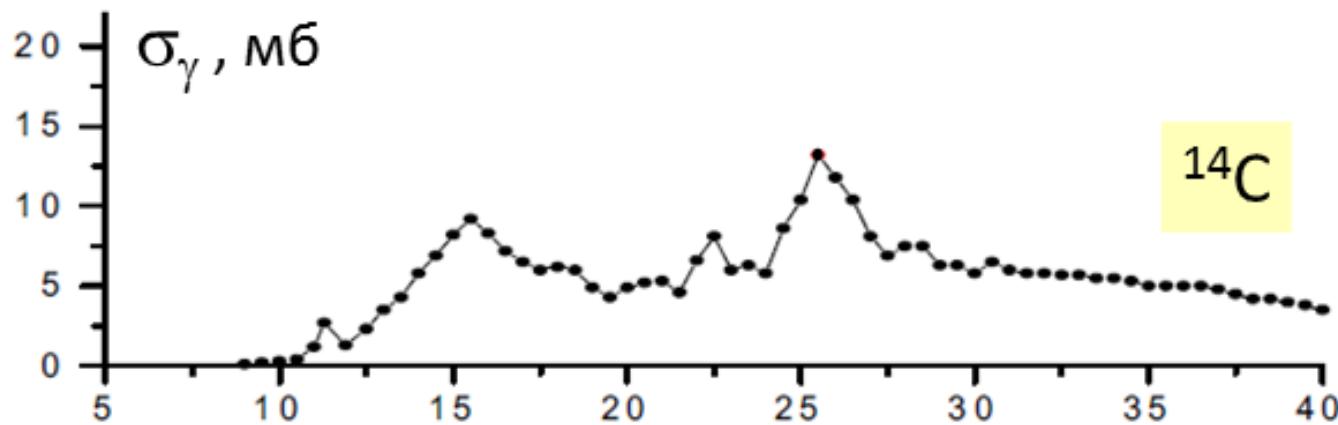
**Создание на основе наиболее надёжных
экспериментальных данных систематики
сечений фотопоглощения ядер с $A = 12 - 65$
(НИИЯФ МГУ, 2002 г.)
и анализ изотопических семейств**

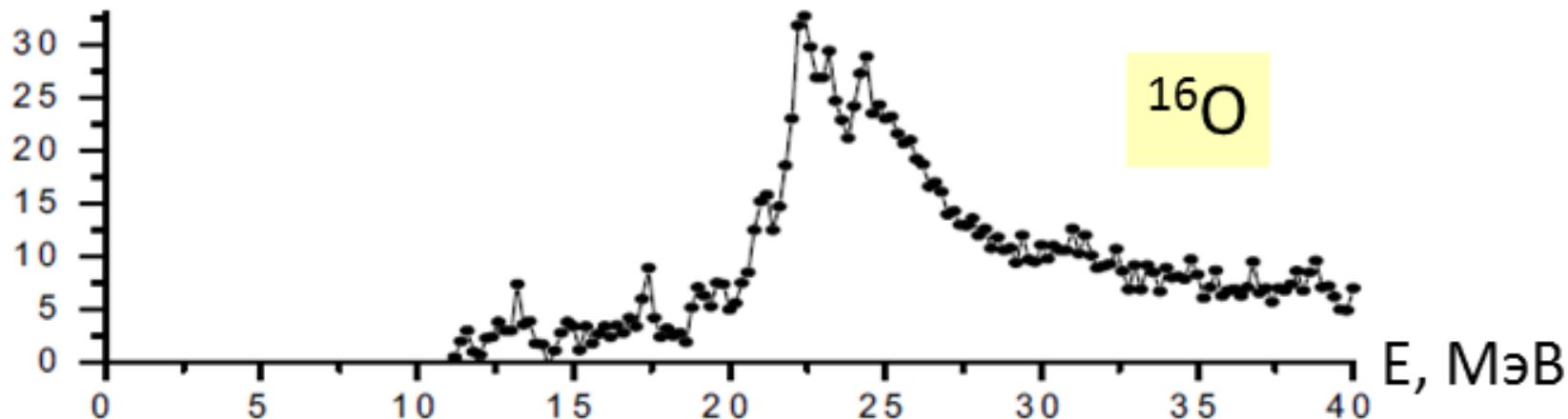
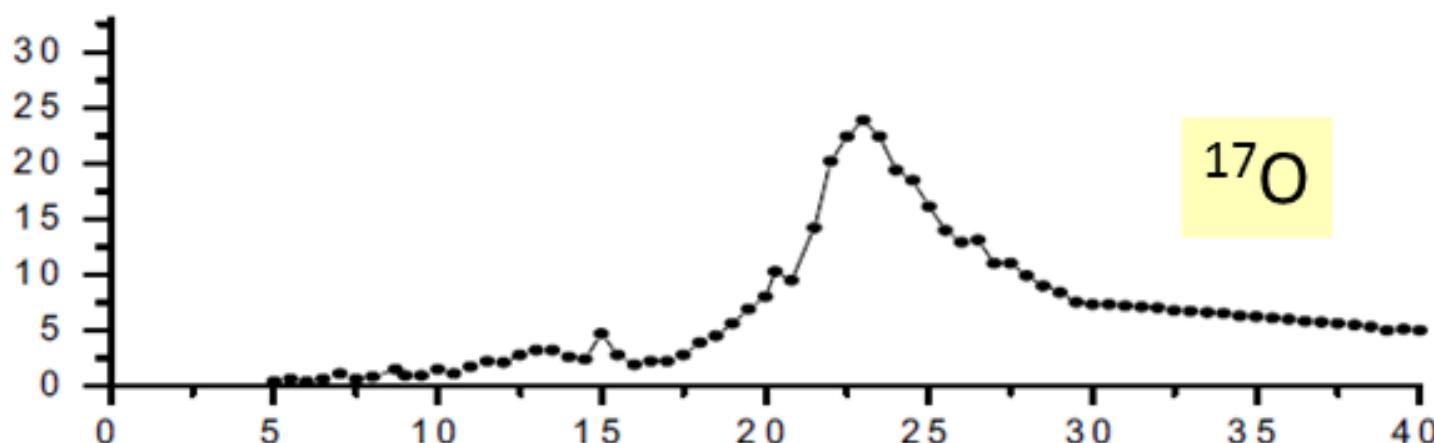
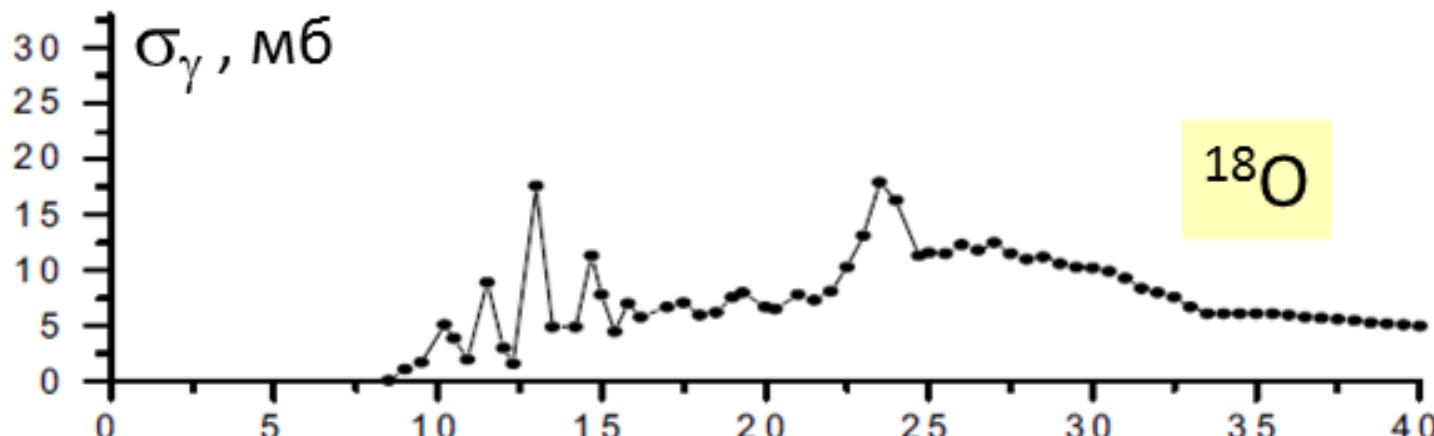
| Z | 6 | 7 | 8 | 12 | 14 | 16 | 20 | 22 | 28 | 29 |
|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| N = Z | ^{12}C | ^{14}N | ^{16}O | ^{24}Mg | ^{28}Si | ^{32}S | ^{40}Ca | | | |
| N = Z + 1 | ^{13}C | ^{15}N | ^{17}O | ^{25}Mg | ^{29}Si | | | | | |
| N = Z + 2 | ^{14}C | | ^{18}O | ^{26}Mg | ^{30}Si | ^{34}S | ^{42}Ca | | ^{58}Ni | |
| N = Z + 4 | | | | | | | ^{44}Ca | ^{46}Ti | ^{60}Ni | |
| N = Z + 5 | | | | | | | | | | ^{63}Cu |
| N = Z + 6 | | | | | | | | ^{48}Ti | | |
| N = Z + 7 | | | | | | | | | | ^{65}Cu |
| N = Z + 8 | | | | | | | ^{48}Ca | | | |

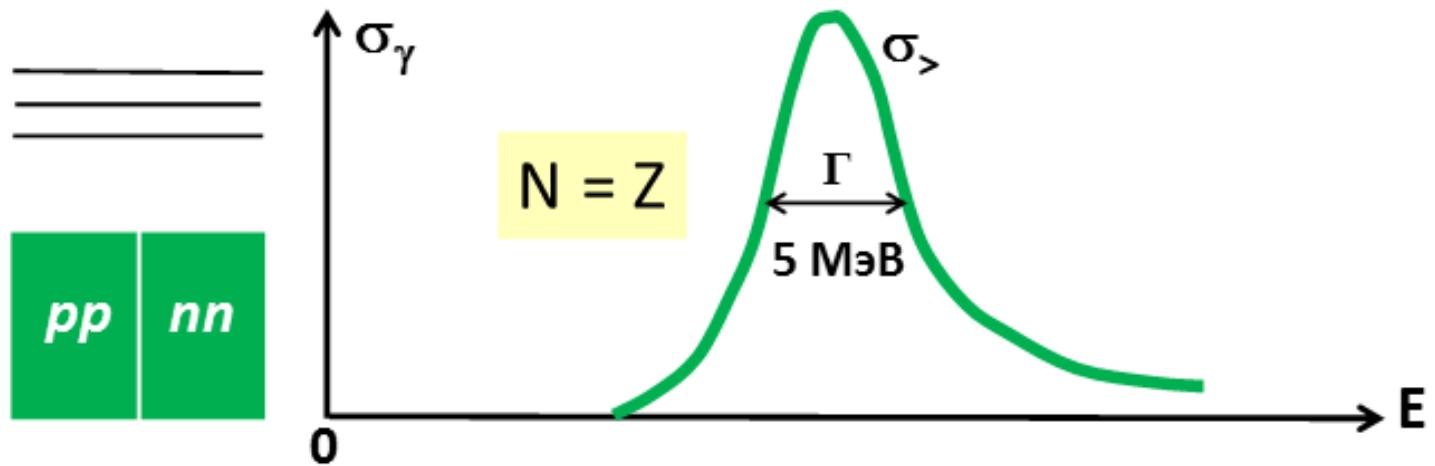
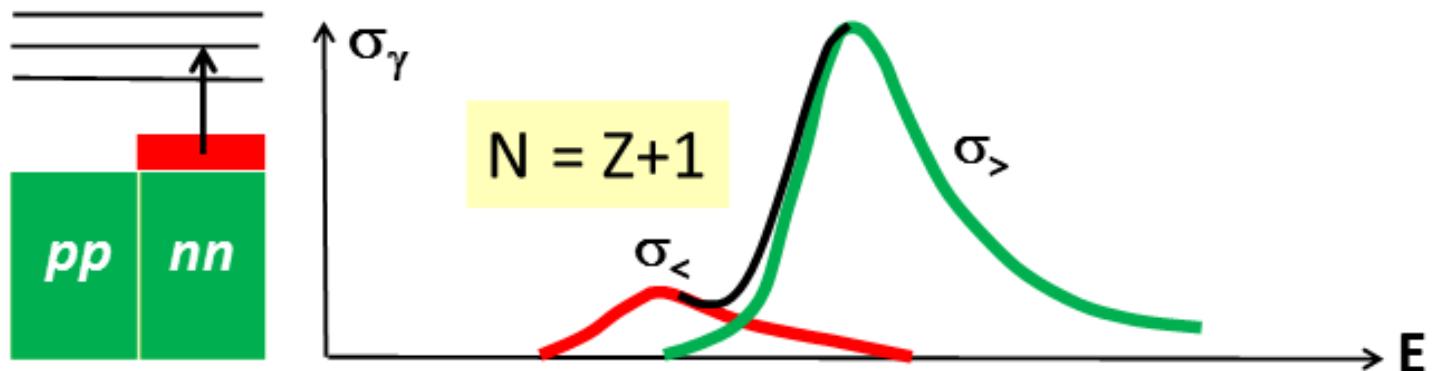
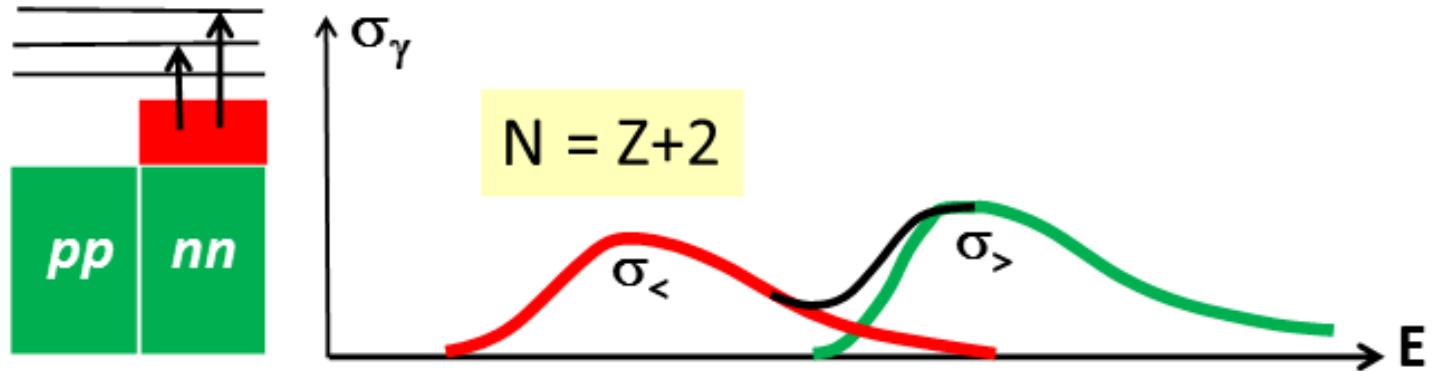
*Изотопический эффект
в ширине гигантского резонанса
лёгких ядер*

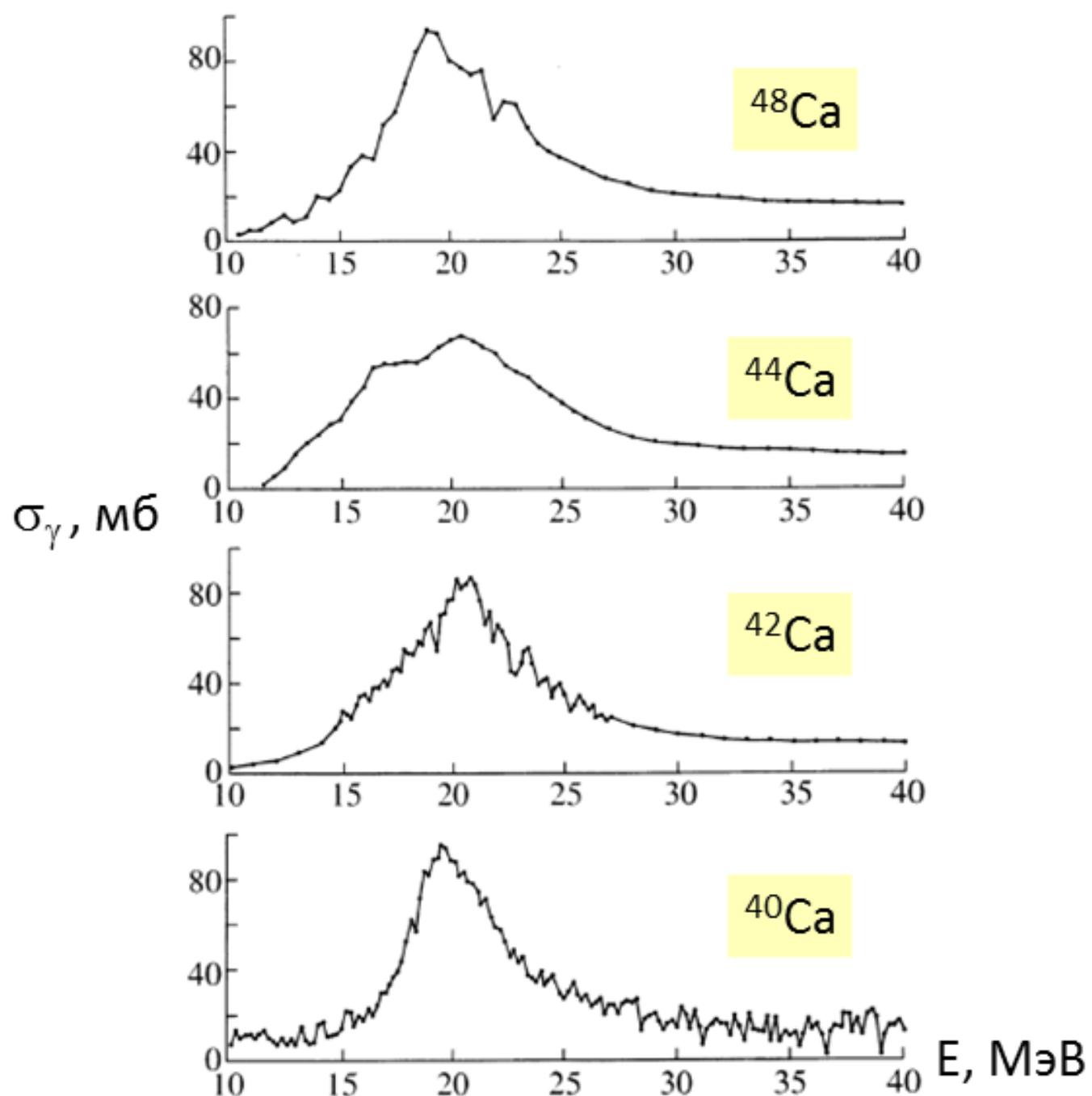


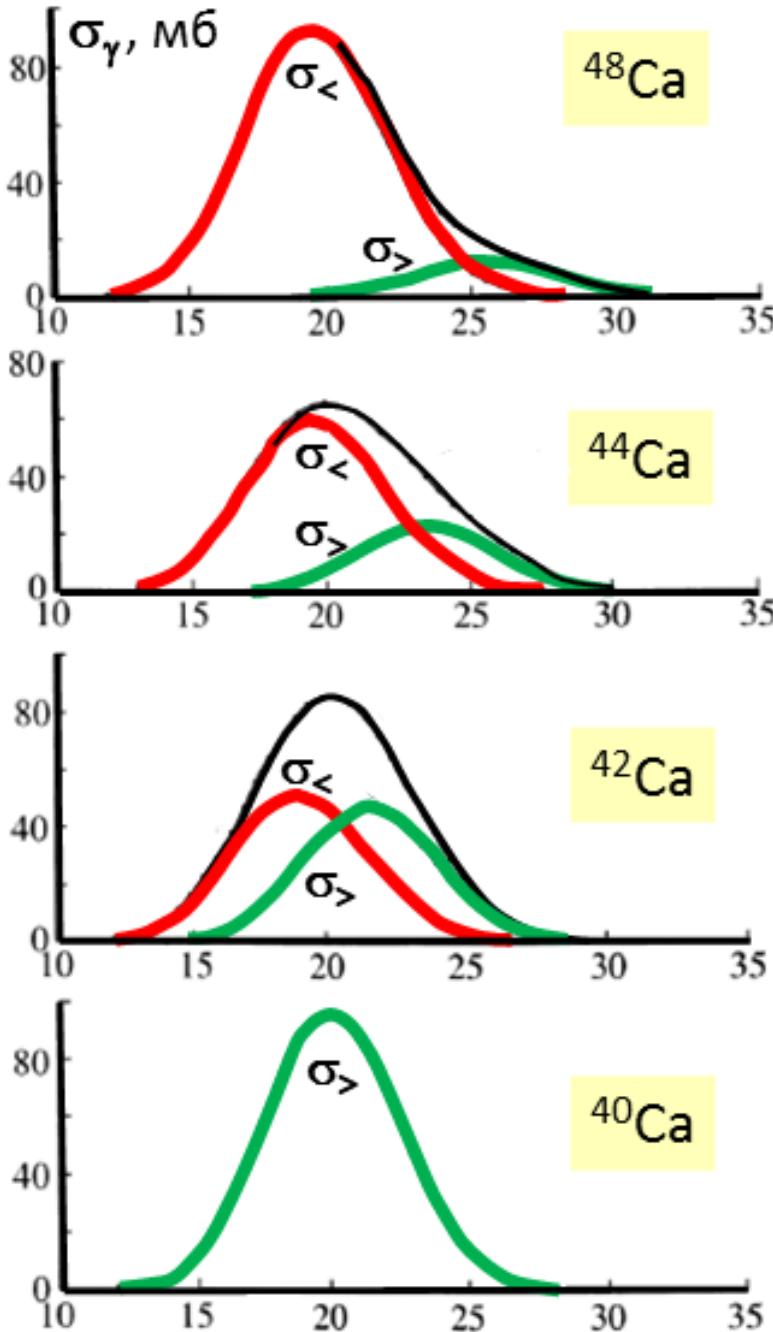








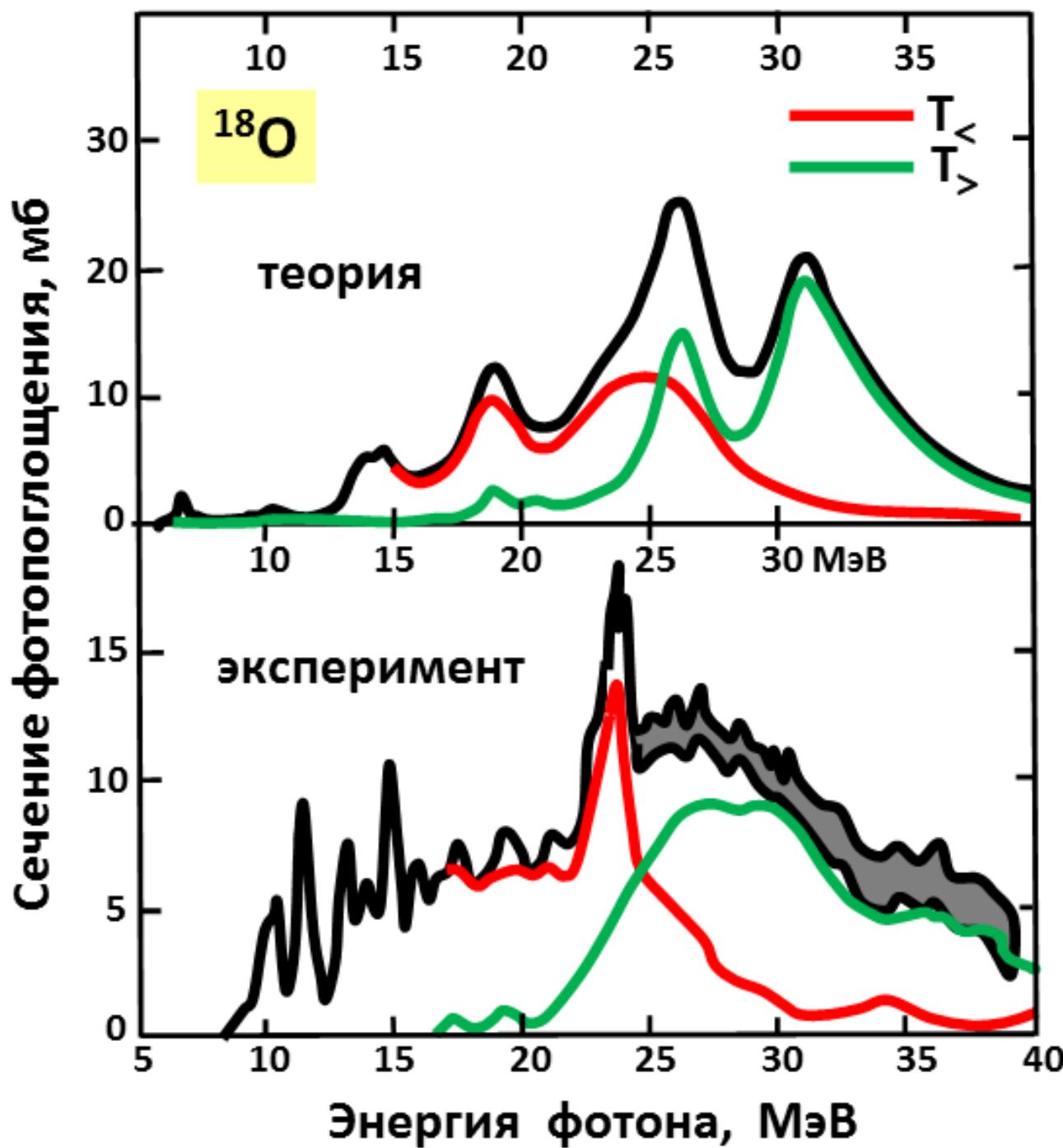




Сравнение эксперимента с концепцией изоспинового расщепления для ^{12}C и ^{40}Ca

| Нуклид | Ширина Γ_{int} | Эксперимент | Теория |
|------------------|------------------------------|-------------|--------|
| ^{12}C | 6,0 | 6,0 | 6,0 |
| ^{13}C | 9,7 | 9,0 | 9,0 |
| ^{14}C | 12,0 | 12,1 | 12,1 |
| ^{40}Ca | 6,2 | 6,0 | 6,0 |
| ^{42}Ca | 6,9 | 6,8 | 6,8 |
| ^{44}Ca | 7,8 | 7,4 | 7,4 |
| ^{48}Ca | 6,8 | 6,5 | 6,5 |

Γ_{int} – минимальный интервал, в котором заключена половина интегрального сечения

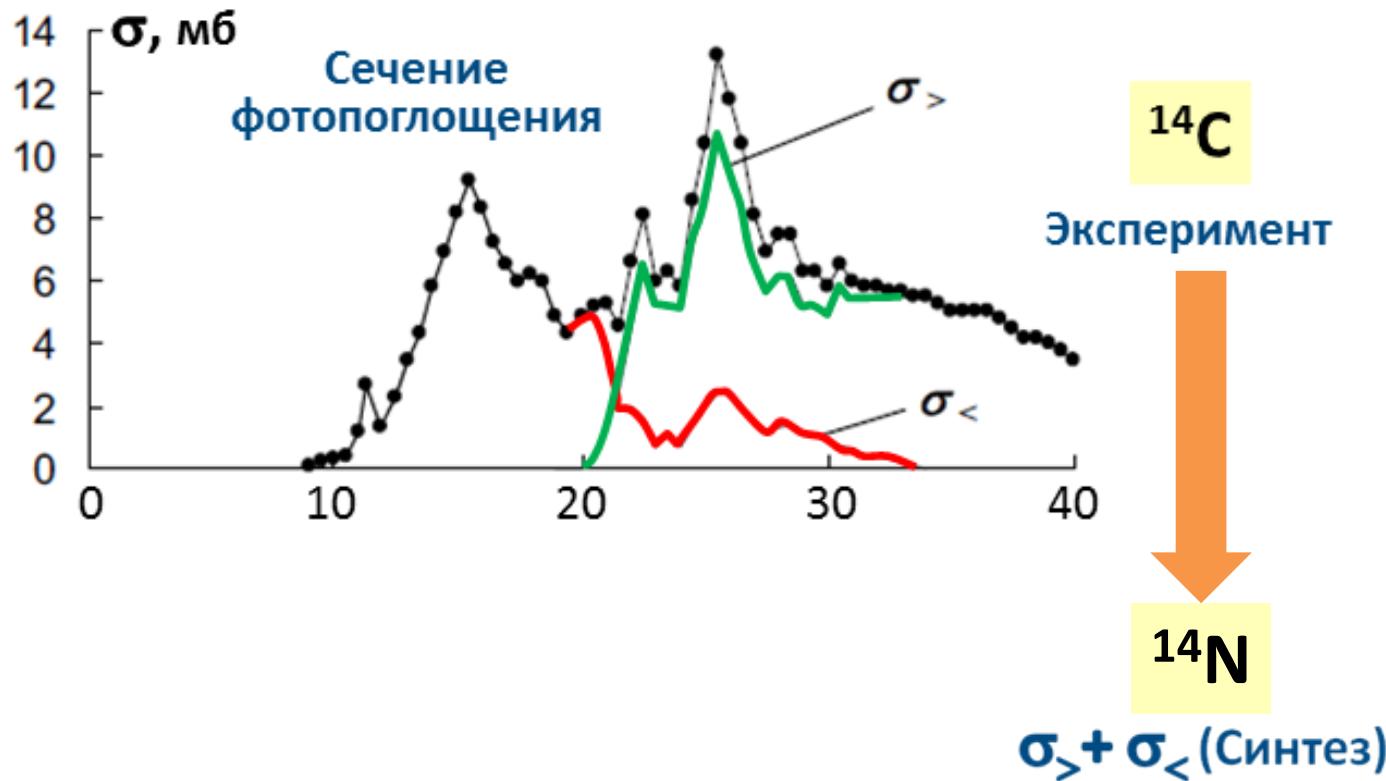


V.I. Assafiri,
I. Morrison.
Nucl. Phys. A427,
460 (1980)

K.G. McNeill,
M.N. Thompson,
A.D. Bates,
J.W. Jury,
B.L. Berman.
Phys. Rev. C47,
1108 (1993)

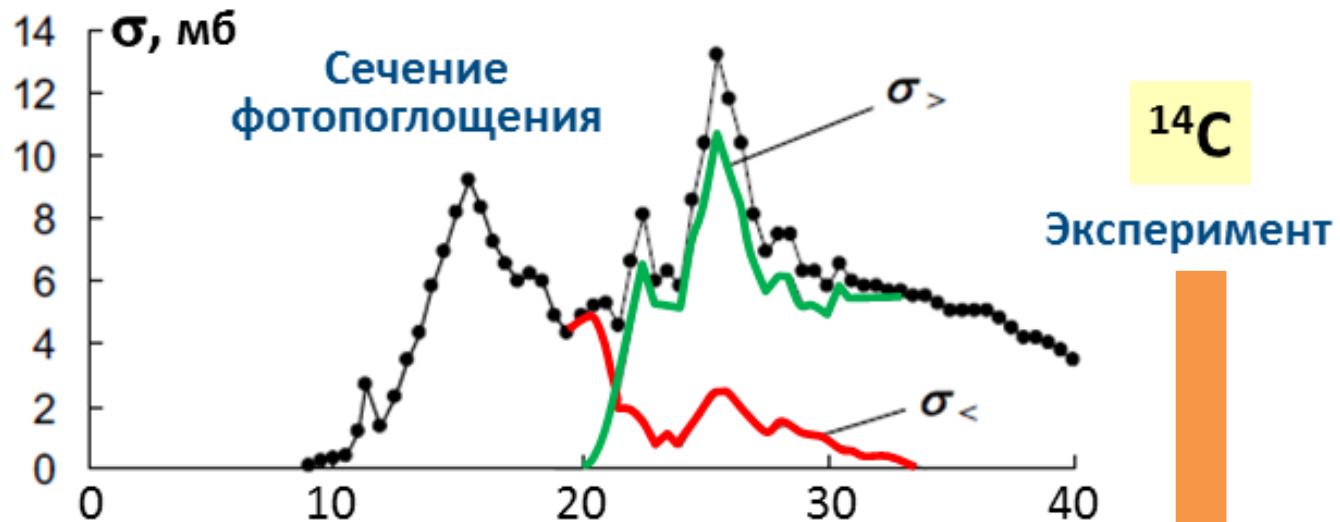
Процедура выключения изоспинового расщепления

Процедура выключения изоспинового расщепления



K.G. McNeill,
M.N. Thompson,
A.D. Bates,
J.W. Jury,
B.L. Berman.
Phys. Rev. C47,
1108 (1993)

Процедура выключения изоспинового расщепления



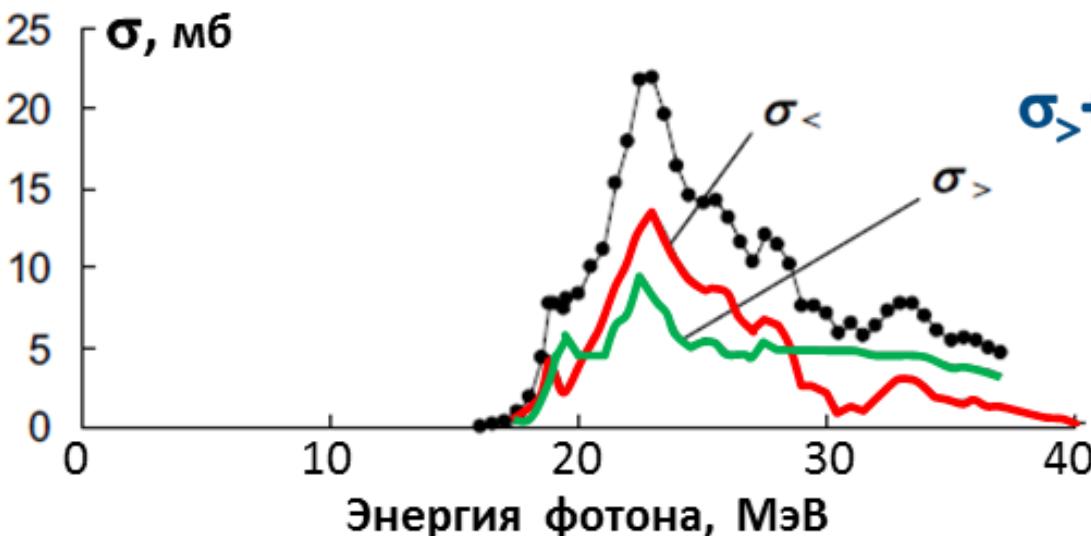
K.G. McNeill,
M.N. Thompson,
A.D. Bates,
J.W. Jury,
B.L. Berman.
Phys. Rev. C47,
1108 (1993)



Эксперимент



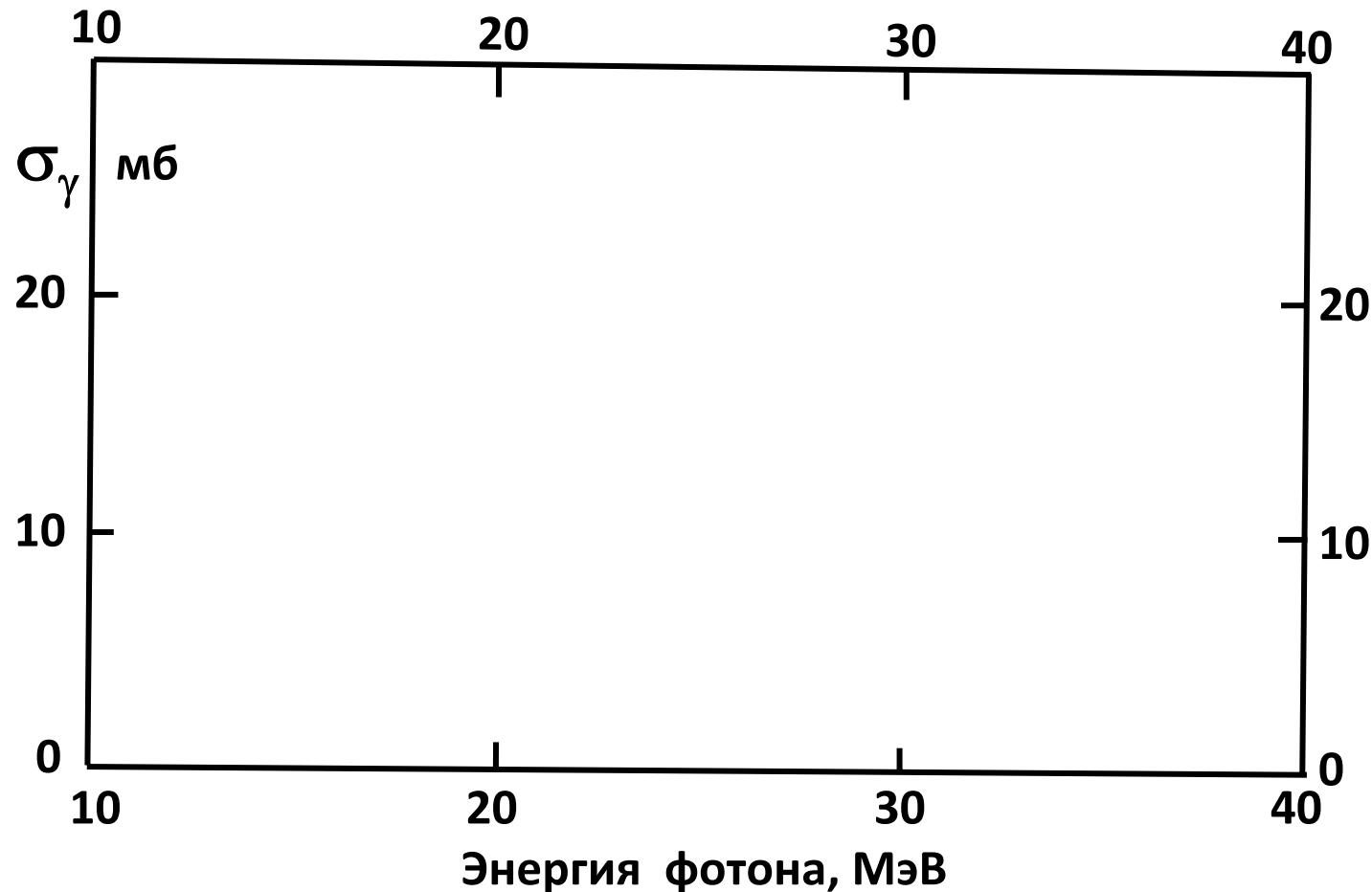
$\sigma_> + \sigma_<$ (Синтез)



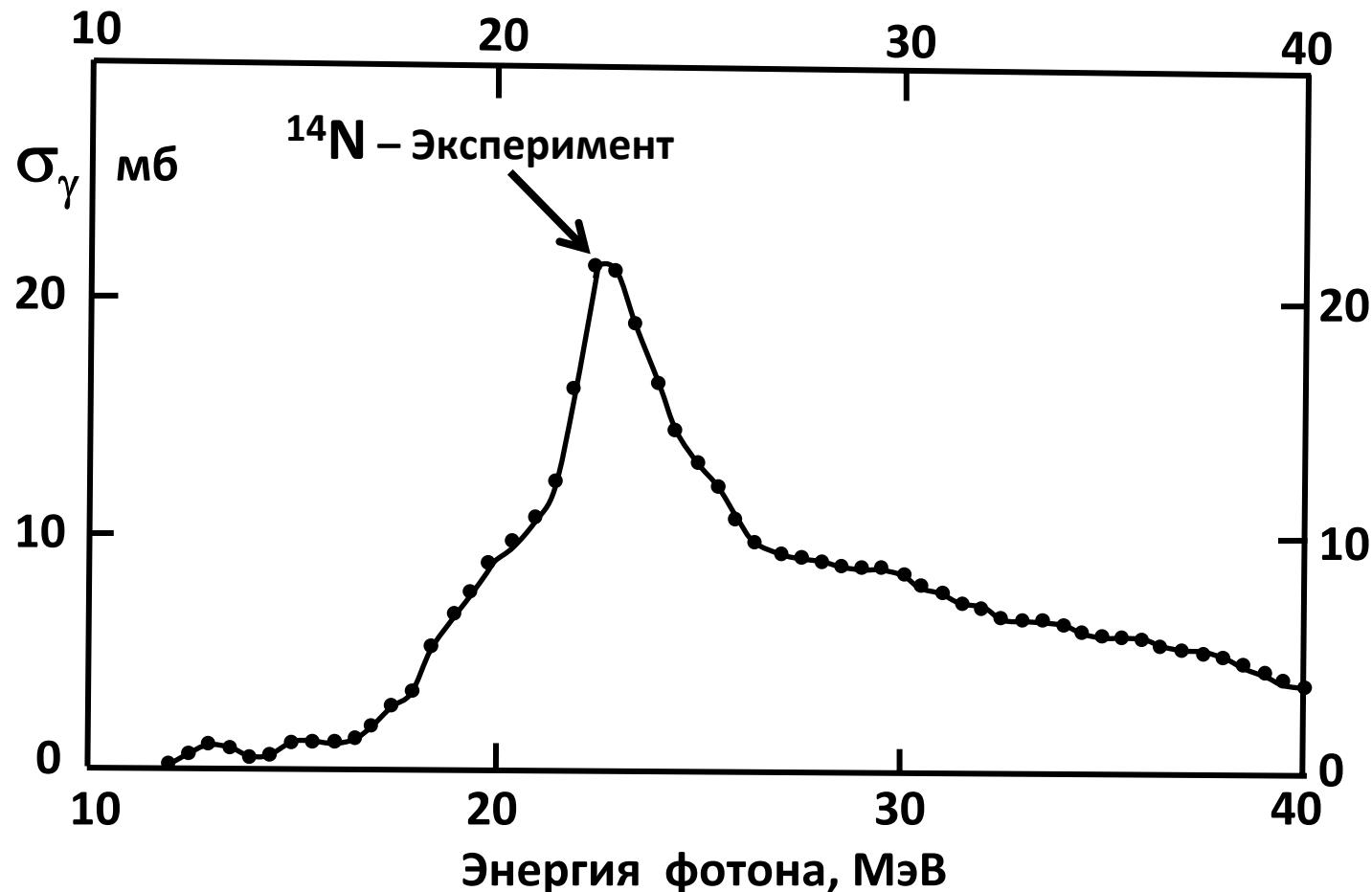
М.А. Ёлкин,
Б.С. Ишханов,
И.М. Капитонов,
Е.И. Лилеева,
И.В. Макаренко,
Е.В. Широков.
Изв. РАН, сер. физ.,
69, 39 (2005)

Сравнение синтезированного ($^{14}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{N}$) сечения фотопоглощения для ^{14}N с экспериментальным

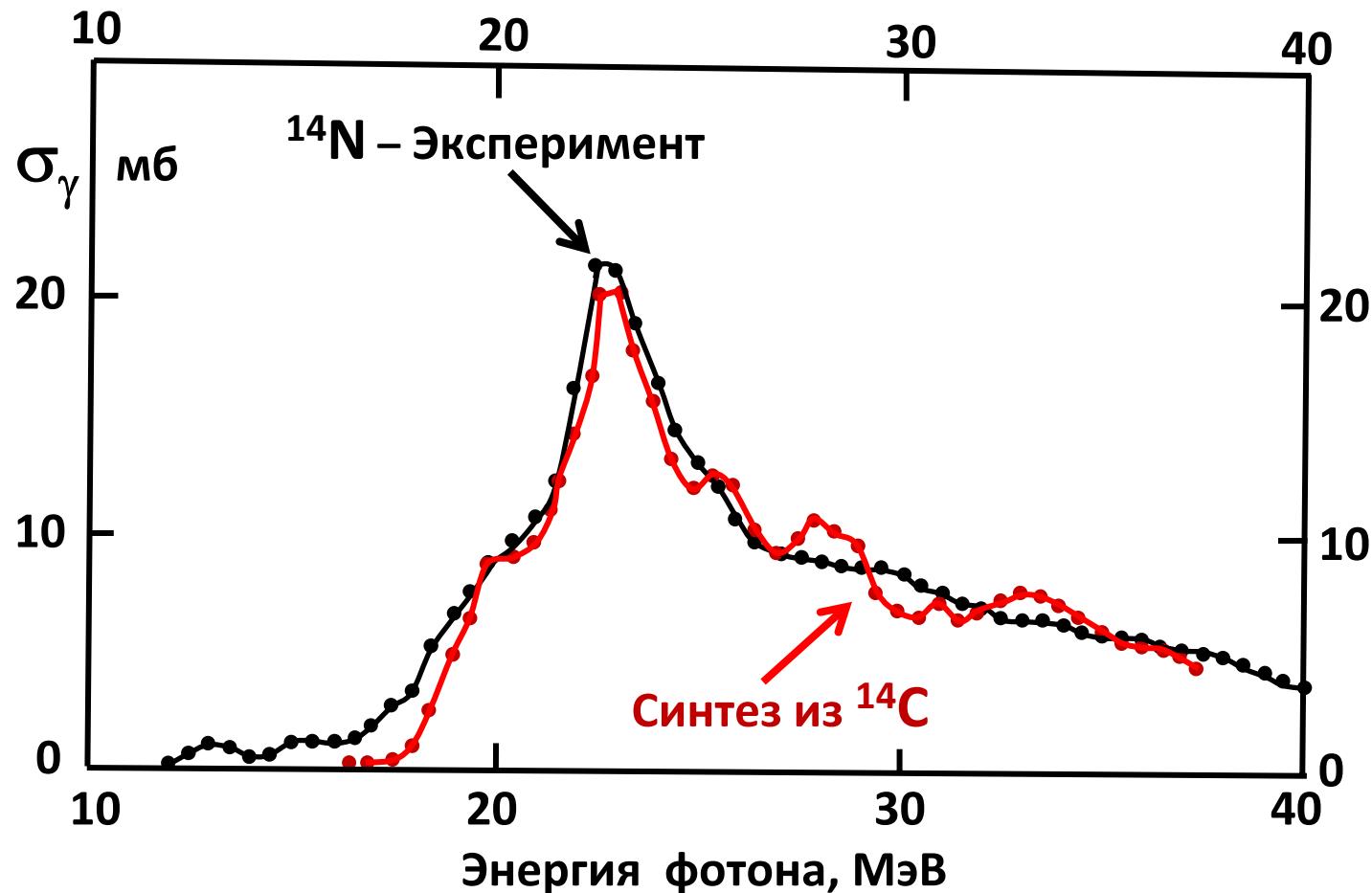
Сравнение синтезированного ($^{14}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{N}$) сечения фотопоглощения для ^{14}N с экспериментальным



Сравнение синтезированного ($^{14}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{N}$) сечения фотопоглощения для ^{14}N с экспериментальным



Сравнение синтезированного ($^{14}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{N}$) сечения фотопоглощения для ^{14}N с экспериментальным



Вывод:

Важным фактором увеличения ширины ГДР лёгких ядер (с A до ≈ 50) по сравнению с магической (≈ 5 МэВ) является разброс входных состояний, возникающий за счёт изоспинового расщепления. При этом ветвь $T_<$ гигантского резонанса формируется из оболочечных переходов группы A . Таким образом, конфигурационное расщепление ГДР в лёгких ядрах поддерживается изоспиновым, имеющим тот же масштаб.

Заключение

1. Минимальная (так называемая «магическая») ширина ГДР равна **4 – 5 МэВ** и характерна для сферических ядер с заполненными оболочками.
2. Главными факторами увеличения ширины ГДР по сравнению с «магической» являются:
 - у лёгких ядер (**A < 50**) – конфигурационное и изоспиновое расщепление ГДР (**до 20 - 30 МэВ**),
 - у средних ядер (**A = 50 - 115**) – взаимодействие с поверхностью ядра (диполь-квадрупольное трение) – **до 12 МэВ**,
 - у тяжёлых ядер (**A > 120**) – несферичность ядра (эффект Даноса-Окамото) – **до 8 МэВ**.

«Магическая» ширина ГДР (**4 – 5 МэВ**) у лёгких ядер формируется в сравнимых долях разбросом $1p1h$ -переходов из одной оболочки и Γ^{\uparrow} , в тяжёлых ядрах – преимущественно за счёт Γ^{\downarrow} .

**Благодарю
за внимание**