

Семинар памяти Б.С. Ишханова

Фотоядерные исследования. Состояние и перспективы.

20.10.2022

И.М. Капитонов

Фотоядерное наследие группы Б.С. Ишханова

НИИЯФ МГУ

Фотоядерные исследования

1. Группа Б.С. Ишханова.
2. Начало. Энергетические спектры фотопротонов и фотопротонные сечения.
3. Фотонейтронные сечения и сечения фотопоглощения. Промежуточная структура гигантского резонанса.
4. Центр данных фотоядерных экспериментов.
5. Распад гигантского дипольного резонанса с заселением отдельных уровней конечных ядер:
 - а. Спектры фотопротонов в режиме сканирования верхней границы тормозного излучения,
 - б. Спектры гамма-квантов девозбуждения конечных ядер,
 - в. Спектроскопия уровней конечных ядер и полупрямой распад гигантского резонанса.
 - г. Конфигурационное расщепление гигантского резонанса.
5. Изоспиновое расщепление гигантского резонанса. Его ширина.
6. Исследования в области ниже гигантского резонанса. Ядерная резонансная флуоресценция.
7. Исследования выше гигантского резонанса. Многопуклонные фотоядерные реакции.
Квазидейтронный механизм фоторасщепления.

Параллельные и сопутствующие исследования и направления деятельности

1. Экспериментальные методики.
2. Ускорители.
3. Электромагнитные возбуждения нуклонов.
4. Кафедра и педагогический процесс.

Группа Б.С. Ишханова

1. Б.С. Ишханов, дфмн,
2. И.М. Капитонов, дфмн,
3. В.В. Варламов, дфмн,
4. И.М. Пискарев, кфмн,
5. Б.И. Горячев, кфмн,
6. Б.А. Юрьев, кфмн,
7. О.П. Шевченко, кфмн,
8. Е.В. Лазутин, кфмн,
9. В.И. Мокеев, дфмн,
10. В.И. Шведун, дфмн,
11. А.В. Шумаков, кфмн,
12. В.Н. Орлин, дфмн,
13. Н.Г. Гончарова, дфмн,
14. И.Н. Бобошин, дфмн,
15. И.А. Тутынь, кфмн,
16. Е.В. Широков, кфмн,
17. М.Е. Степанов, кфмн,
18. И.В. Макаренко, кфмн,
19. А.А. Кузнецов, кфмн,
20. С.С. Белышев С.С.,
21. К.А. Стопани, кфмн

и ещё около полусотни кандидатов физ.мат. наук

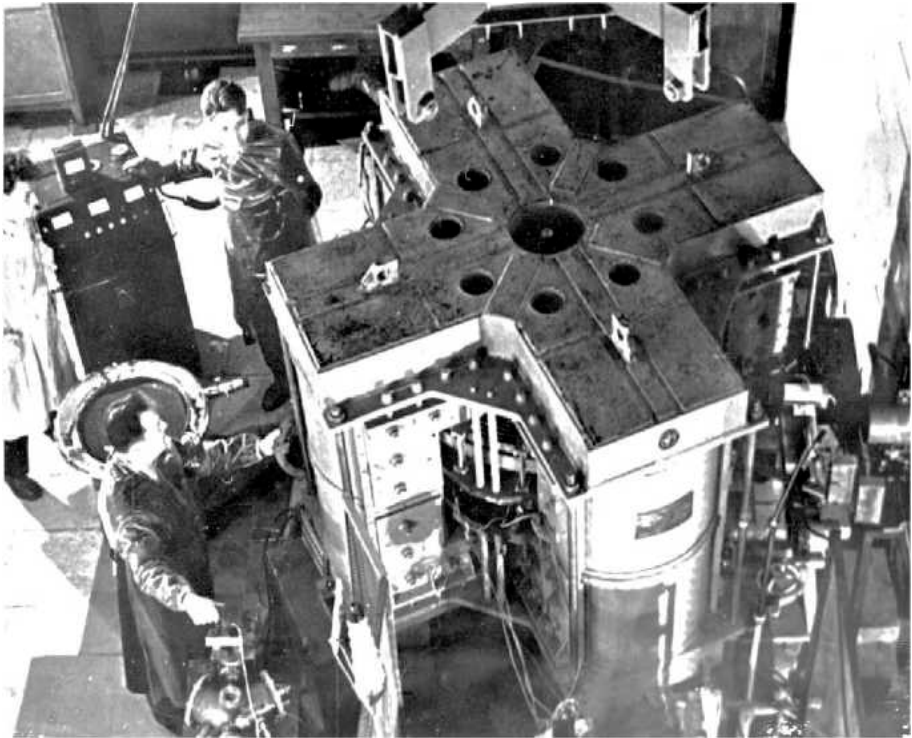
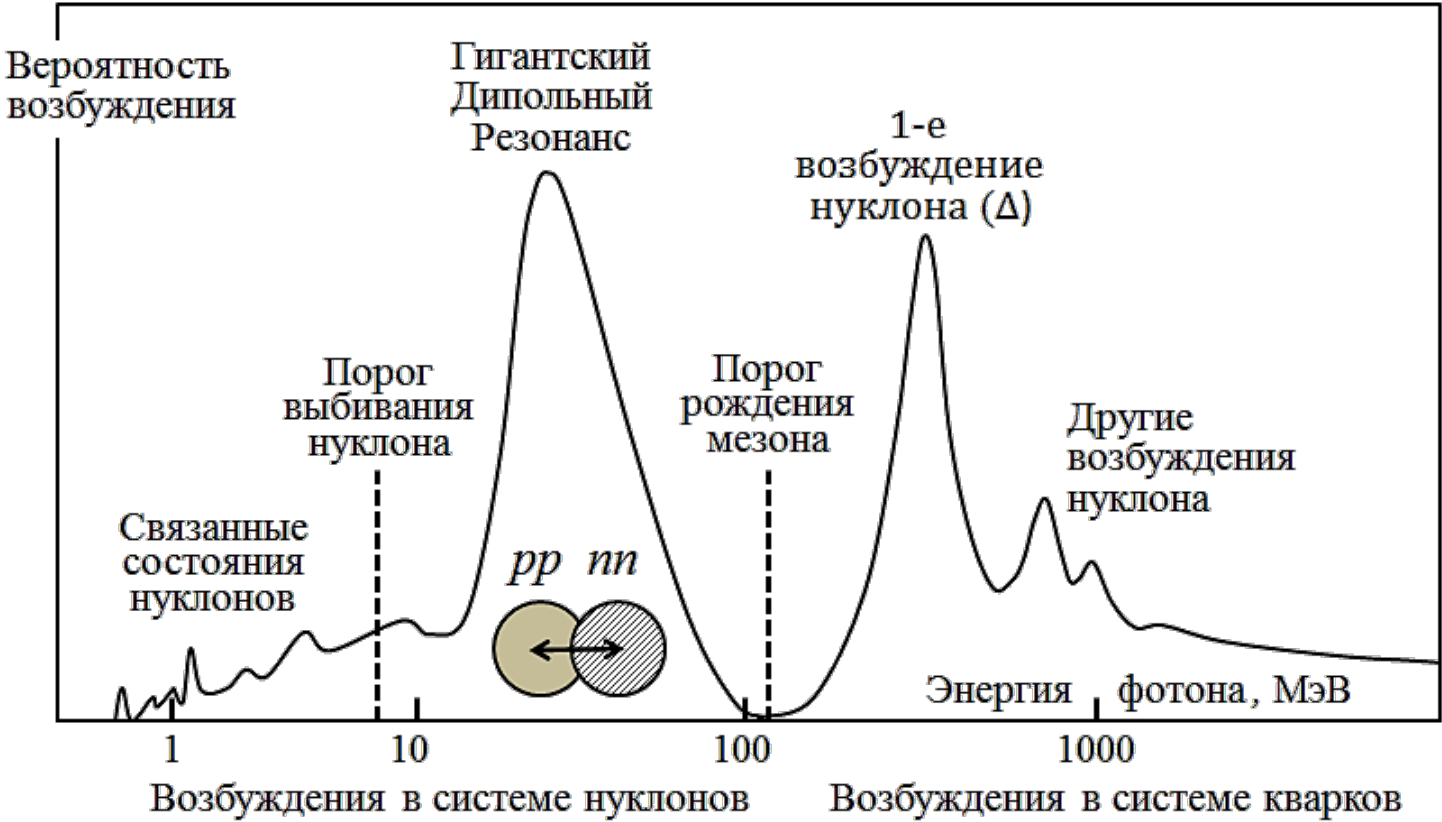




1945 г.
Аркадий Бейнусович
Мигдал
(1911 - 1991)

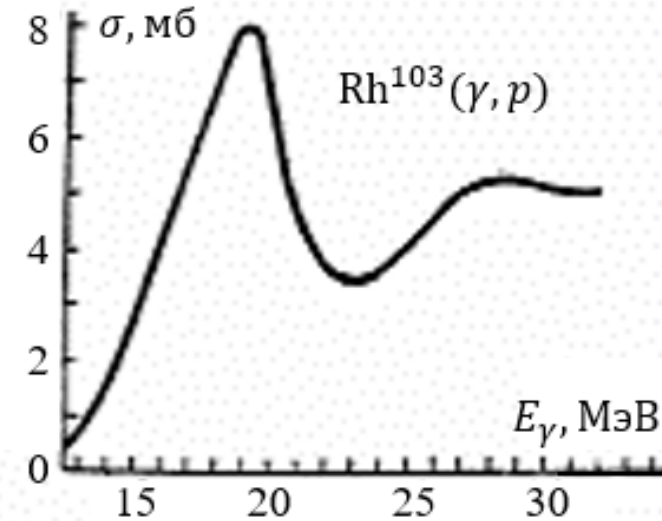
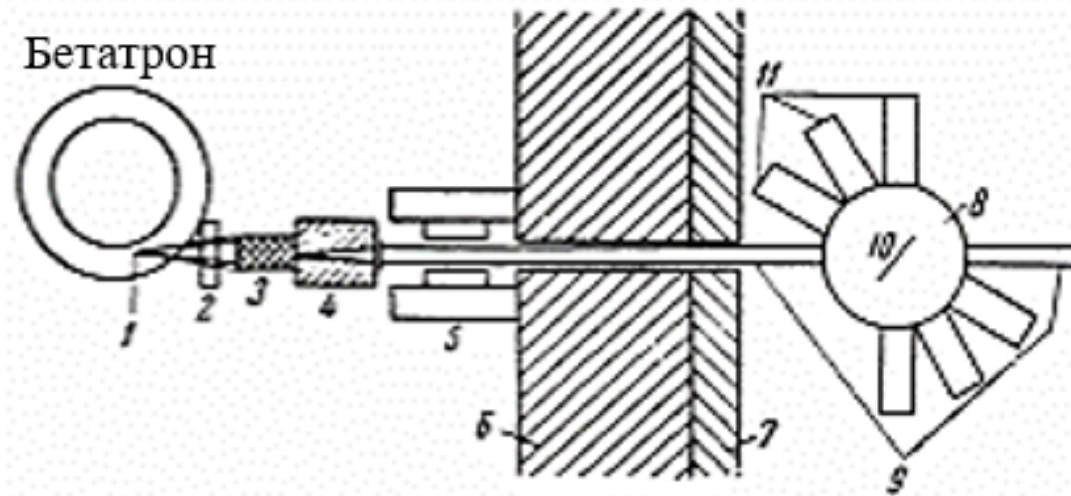


1961 г.
Валериан Григорьевич
Шевченко
(1923 - 1991)



Бетатрон НИИЯФ МГУ на энергию 35 МэВ

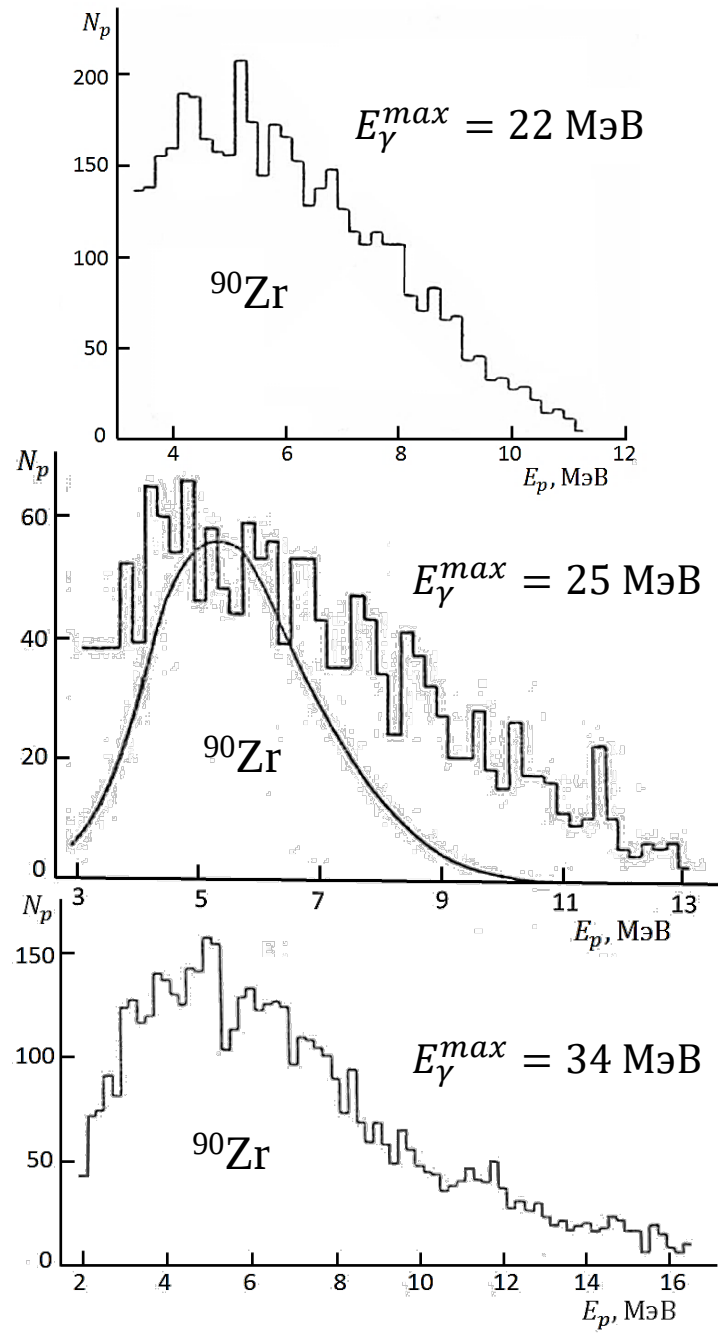
Б.С. Ишханов, Э.Н. Корниенко, Ю.И. Сорокин, И.Г. Шевченко, Б.А. Юрьев. Сечение реакции $\text{Rh}^{103}(\gamma, p)$. ЖЭТФ, т. 45, с. 38-42, 1963.



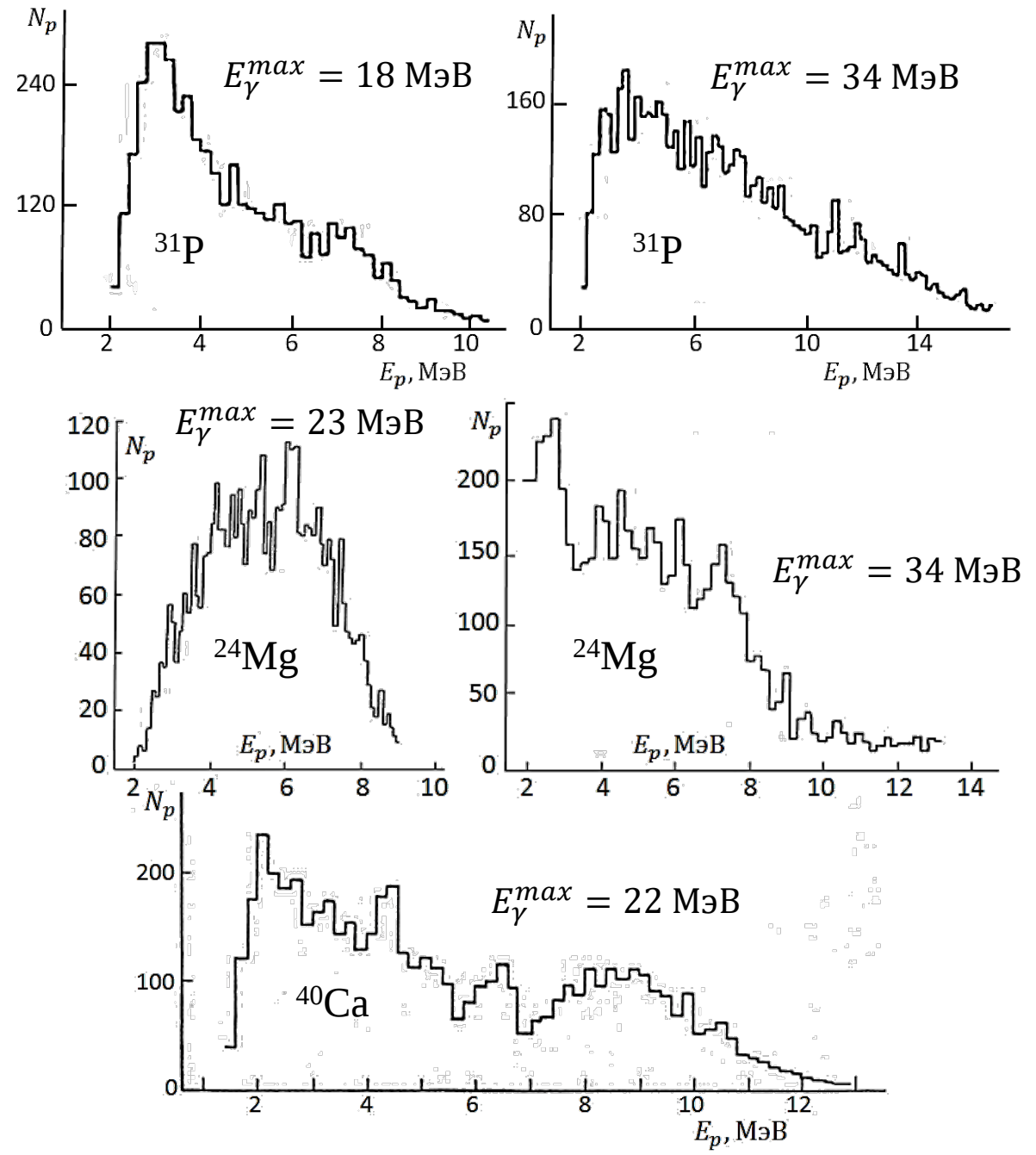
Регистрация фотопротонов с помощью тонких (1 мм) сцинтилляторов CsJ

1. Б.С. Ишханов, И.М. Капитонов, Э.Н. Корниенко, В.Г. Шевченко, Б.А. Юрьев. Фотопротоны из кальция. ЖЭТФ, т. 46, с. 1484-1486, 1964.
2. I. Dushkov, B.S. Ishkhanov, I.M. Kapitonov, V.G. Shevchenko, B.A. Yur'ev. Photoprotons from Zr. Phys. Lett., v. 3, p. 310-312, 1964.
3. B.S. Ishkhanov, I.M. Kapitonov, V.G. Shevchenko, B.A. Yur'ev. (γ, p) cross section for Mg, P and S. Phys. Lett., v. 9, p. 162-164, 1964.
4. B.S. Ishkhanov, I.M. Kapitonov, V.G. Shevchenko, B.A. Yur'ev. The giant resonance of the γ -quantum dipole absorption in Ca^{40} . Compt. Rend. Congr. Int. Phys. Nucl., Paris, v. 2, p. 1042-1044, 1964.

Ядерные эмульсии



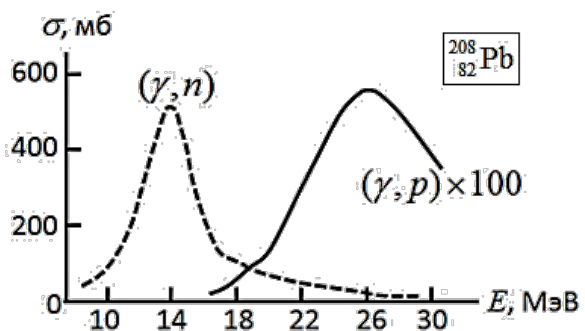
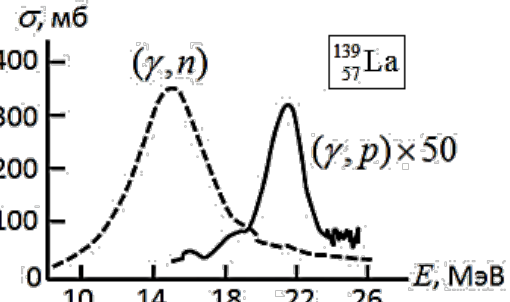
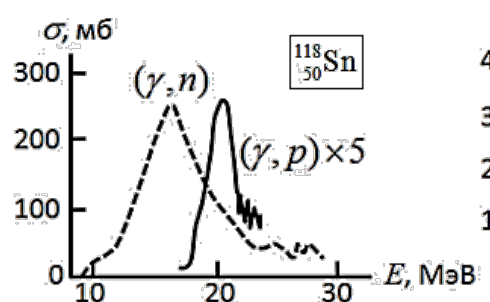
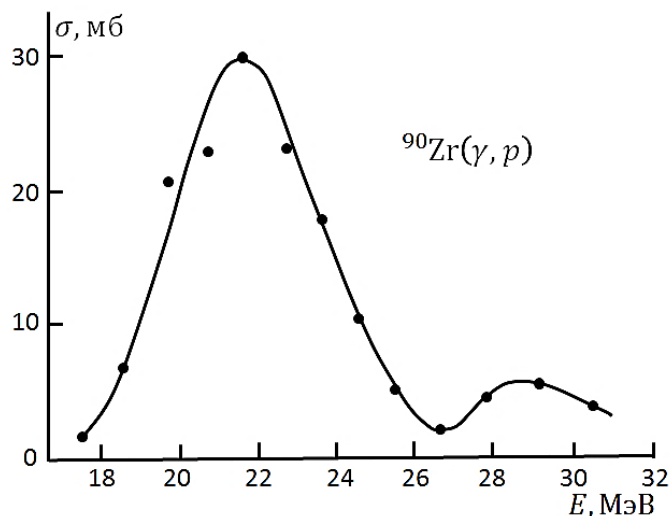
Энергетические спектры фотопротонов и фотопротонные сечения



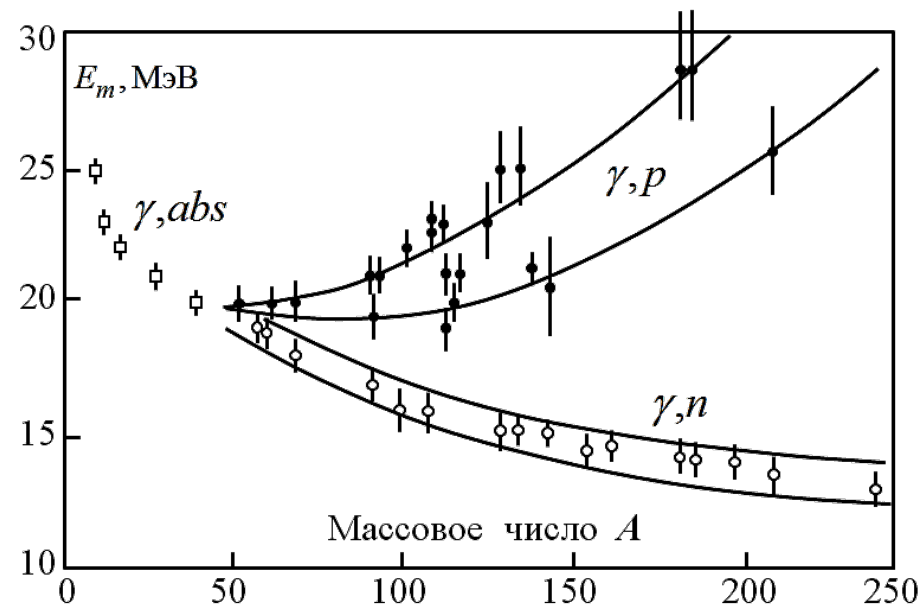
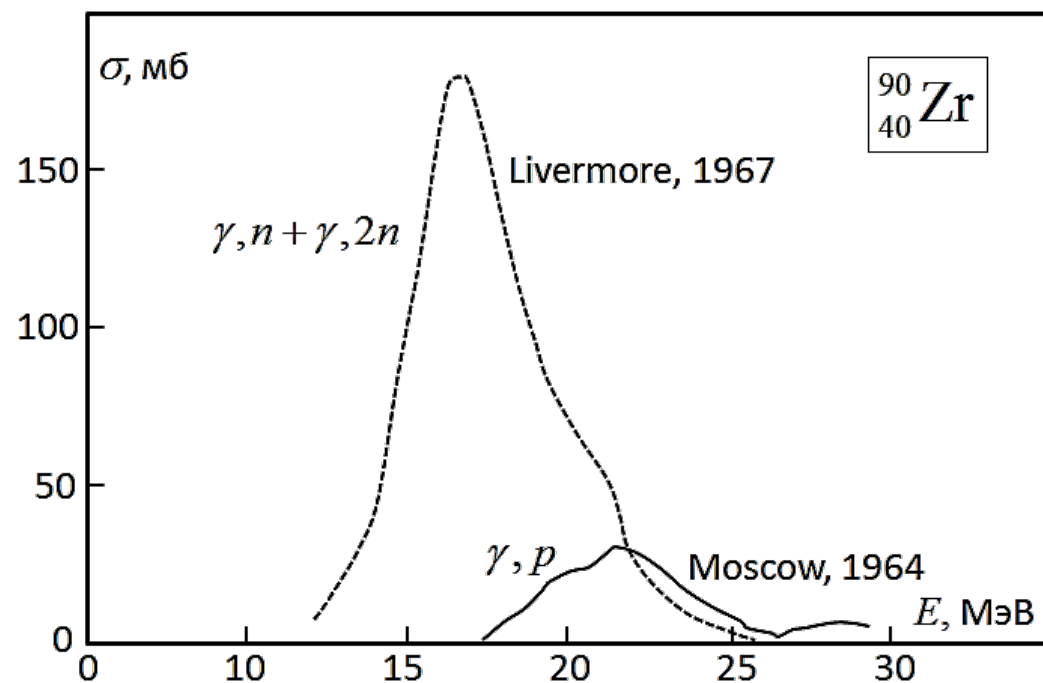
Первое чёткое указание на изоспиновое расщепление гигантского резонанса

Энергетические спектры фотопротонов и фотопротонные сечения

НИИЯФ МГУ
1964



^{11}B
 ^{12}C
 ^{16}O
 ^{23}Na
 ^{24}Mg
 ^{26}Mg
 ^{27}Al
 ^{28}Si
 ^{31}P
 ^{32}S
 ^{40}Ca
 ^{52}Cr
 ^{58}Ni
 ^{60}Ni
 ^{90}Zr
 ^{103}Rh

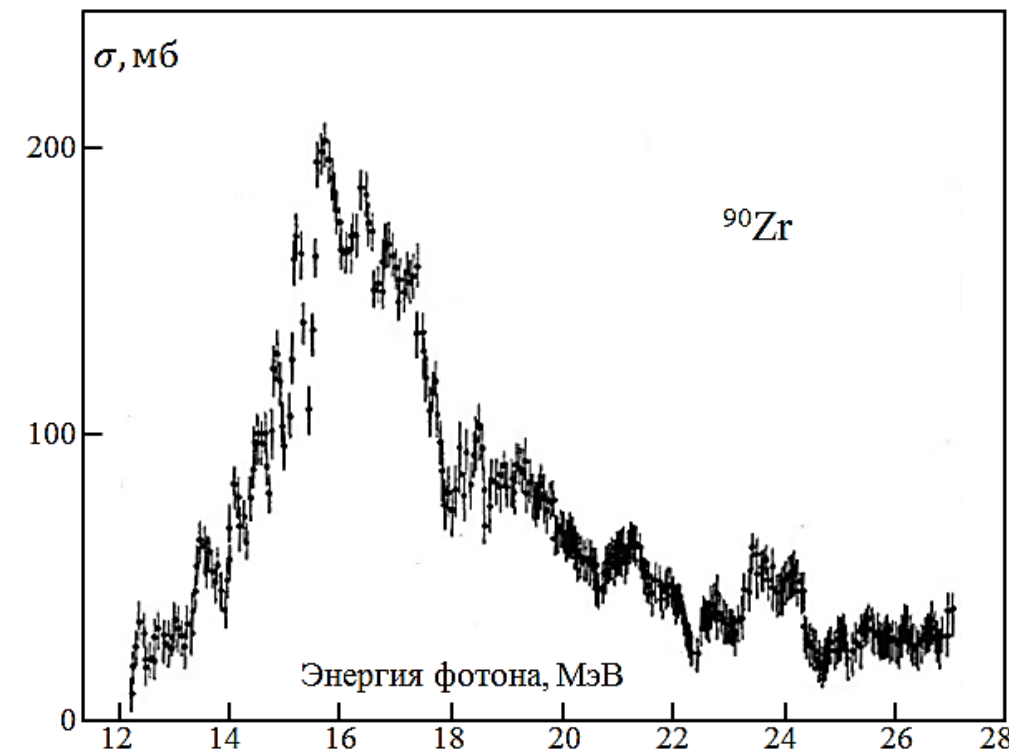
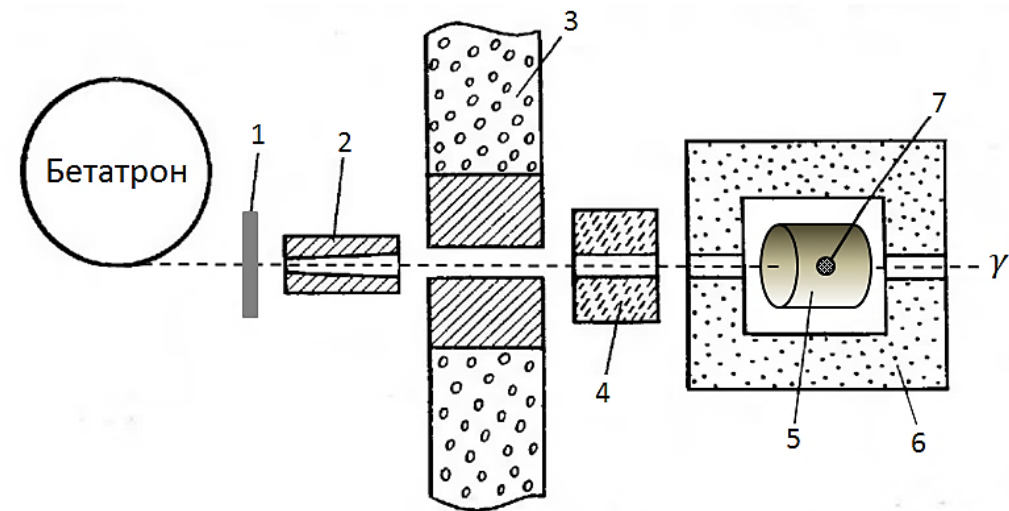


Фотонейтронные сечения и сечения фотопоглощения. Промежуточная структура гигантского резонанса

1967-1974 Измерение фотонейтронных сечений

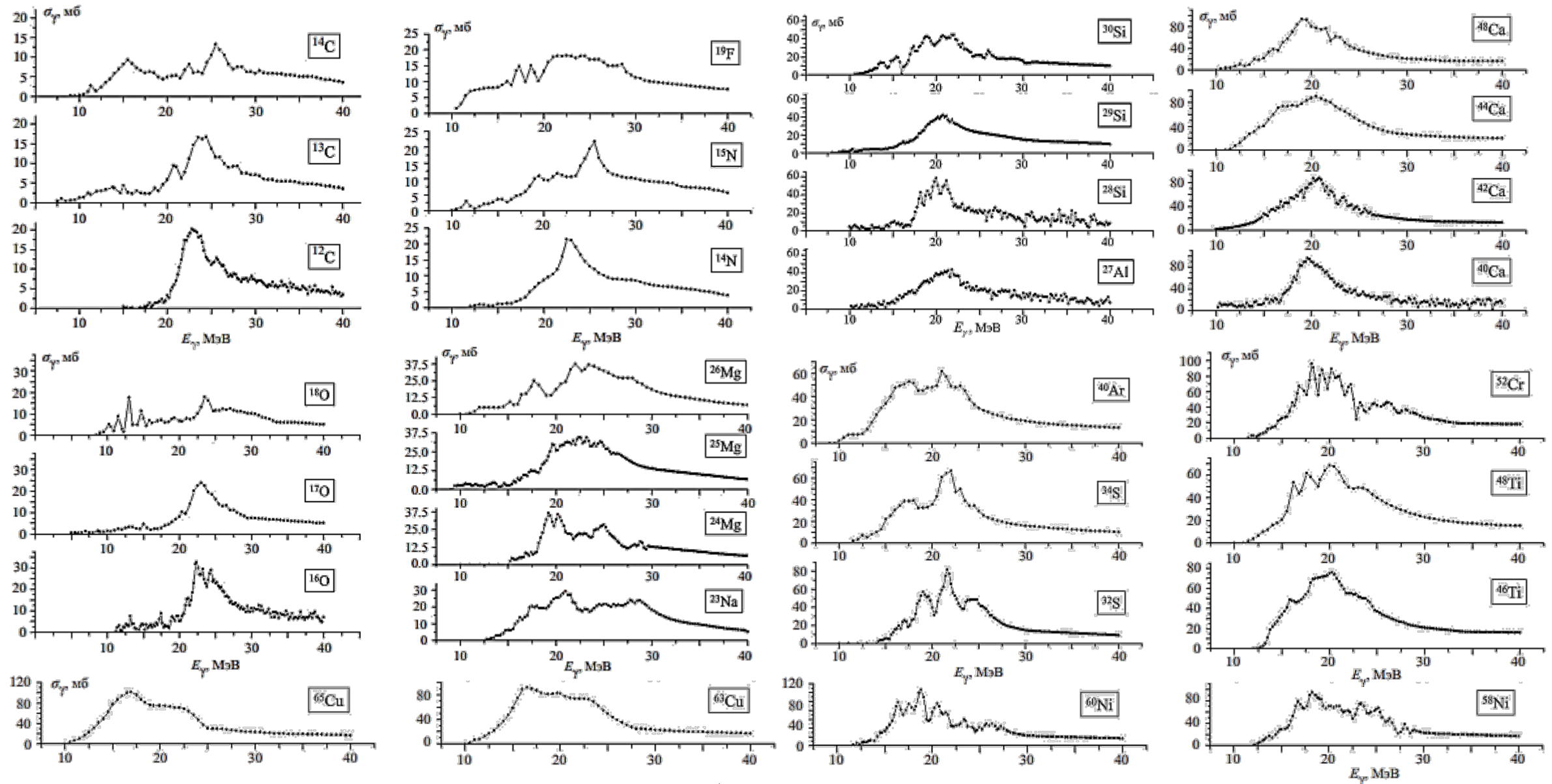


^{12}C
 ^{16}O
 ^{24}Mg
 ^{26}Mg
 ^{27}Al
 ^{28}Si
 ^{31}P
 ^{40}Ca
 ^{51}V
 ^{52}Cr
 ^{52}Cr
 ^{55}Mn
 ^{59}Co
 ^{58}Ni
 ^{60}Ni
 ^{63}Cu
 ^{64}Zn
 ^{68}Zn
 ^{89}Y
 ^{90}Zr
 ^{92}Mo
 ^{98}Mo
 ^{107}Ag
 ^{109}Ag
 ^{181}Ta
 ^{208}Pb



Фотонейтронные сечения и сечения фотопоглощения. Промежуточная структура гигантского резонанса

$^{12,13,14}\text{C}$, $^{14,15}\text{N}$, $^{15,16,17}\text{O}$, ^{19}F , ^{23}Na , $^{24,25,26}\text{Mg}$, ^{27}Al , $^{28,29,30}\text{Si}$, $^{32,34}\text{S}$, ^{40}Ar , $^{46,48}\text{Ti}$, $^{40,42,44,48}\text{Ca}$, $^{58,60}\text{Ni}$, $^{63,65}\text{Cu}$,



Сечения фотопоглощения

Глобальные параметры гигантского резонанса

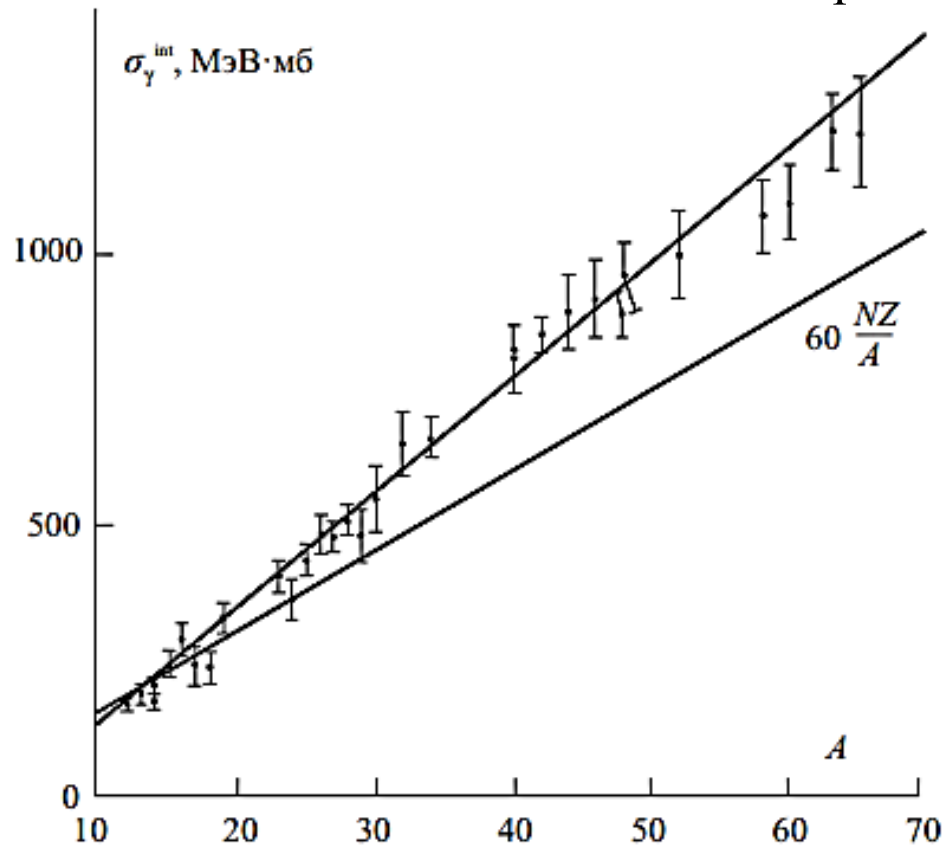


Рис. 10. Интегральные сечения фотопоглощения ядер с $A = 12-65$ в сравнении с классическим дипольным правилом сумм ($60NZ/A$ МэВ·мб)

$$\sigma_{\gamma}^{\text{int}} = \int_0^{\infty} \sigma_{\gamma}(E_{\gamma}) dE_{\gamma} = 60 \frac{NZ}{A} (1 + \Delta) \text{ МэВ} \cdot \text{мб},$$

$$\Delta = 0,30 - 0,35$$

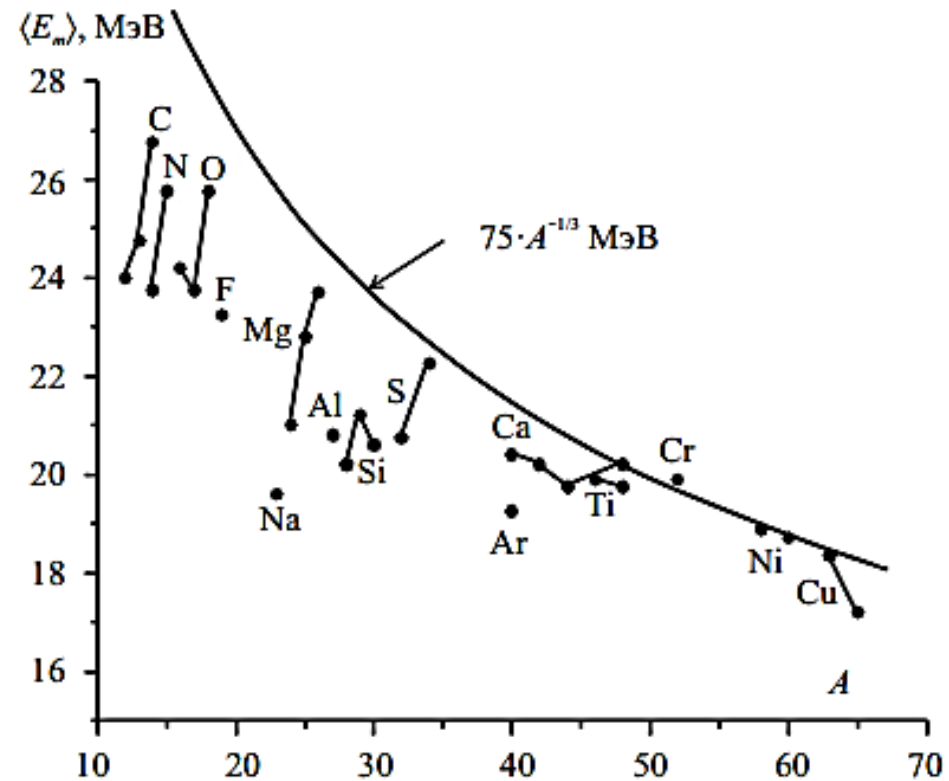


Рис. 11. Энергии максимумов гигантского дипольного резонанса ядер с $A = 12-65$. Линия $75 \cdot A^{-1/3}$ МэВ — предсказание коллективной (гидродинамической) модели

где $60 \frac{NZ}{A}$ МэВ·мб является классическим дипольным правилом сумм, а Δ — вклад обменных сил Майорана и Гейзенберга в тензорную часть межкулонного потенциала

1978

Центр данных фотоядерных экспериментов

В.В. Варламов, Б.С. Ишханов, И.М. Капитонов, И.Б. Теплов, В.Г. Шевченко.

Центр данных фотоядерных экспериментов.

Государственная служба стандартных справочных данных.
Информационный бюллетень № 7, с. 12-13, 1978.

LOMONOSOV MOSCOW STATE UNIVERSITY, SKOBELTSYN INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS,

CENTRE FOR PHOTONUCLEAR EXPERIMENTS DATA

CENTR DANNYKH FOTOYADERNYKH EKSPERIMENTOV

CDFE: Home Page

Welcome to the CDFE Website.

Online Services available at CDFE:

What are you looking for?	Database
All known about atomic nuclei and nuclear reactions. Numerical data, graphics, and bibliography	 <u>Nuclei and Reactions Unified Digital Information System</u> [description] Last updated: October 25th, 2019
Abundances, atomic masses, mass excesses, binding energies, spin-parities, moments, deformations, decay modes of ground and metastable states, energies of first isobar-analog states	 <u>Nucleus Ground and Isomeric State Parameters</u> [description] Last updated: June 15th, 2011
Parameters and features of various nuclear reactions with incident photons, neutrons, charge particles, and heavy ions from the international EXFOR data fund	 <u>Nuclear Reaction Database (EXFOR)</u> [description] Last updated: November 10th, 2019
<u>Nucleus state parameters:</u> Energies, spin-parities half-times (decay modes), metastabilities, isospins, angular momenta, spectroscopic strengths, etc.; <u>α-, β-, γ-transition parameters:</u> Energies, intensities, multipolarities, branching ratios, mixing ratios, etc.	 <u>Complete Nuclear Spectroscopy Database "Relational ENSDF"</u> [description] Last updated: May 6th, 2014

Online Services

Partners

OECD NEA DB COMPUTER PROGRAM SERVICES

Links

Contacts

About

Team

Publications

Russian Pages

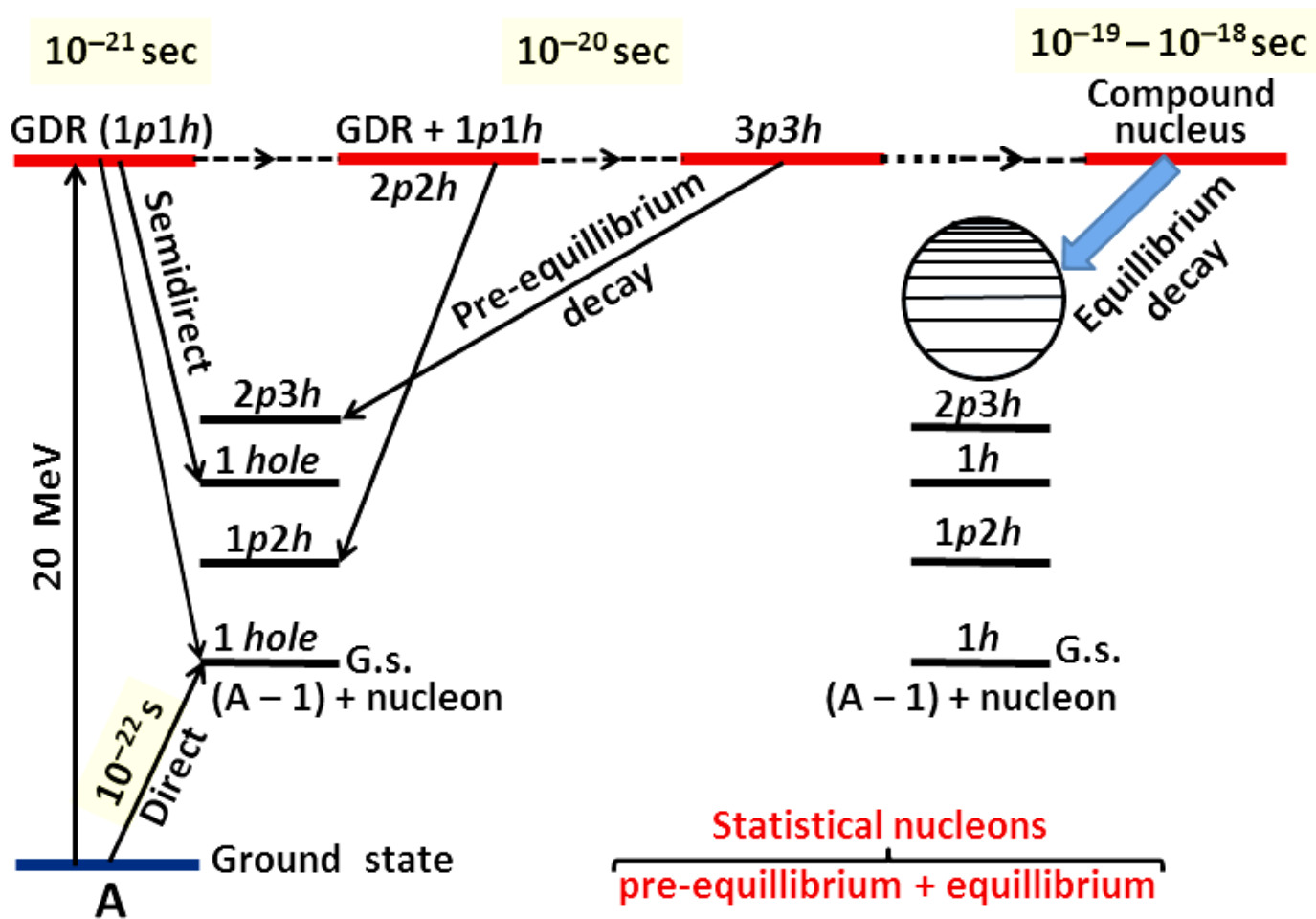
B.S. Ishkhanov, I.M. Kapitonov,
V. Surgutanov, V.V. Varlamov.
CDFE status report.
Fifth IAEA Consult. Meeting
Nucl. Reaction Data Centres.
Brookhaven 1980, p. 115.



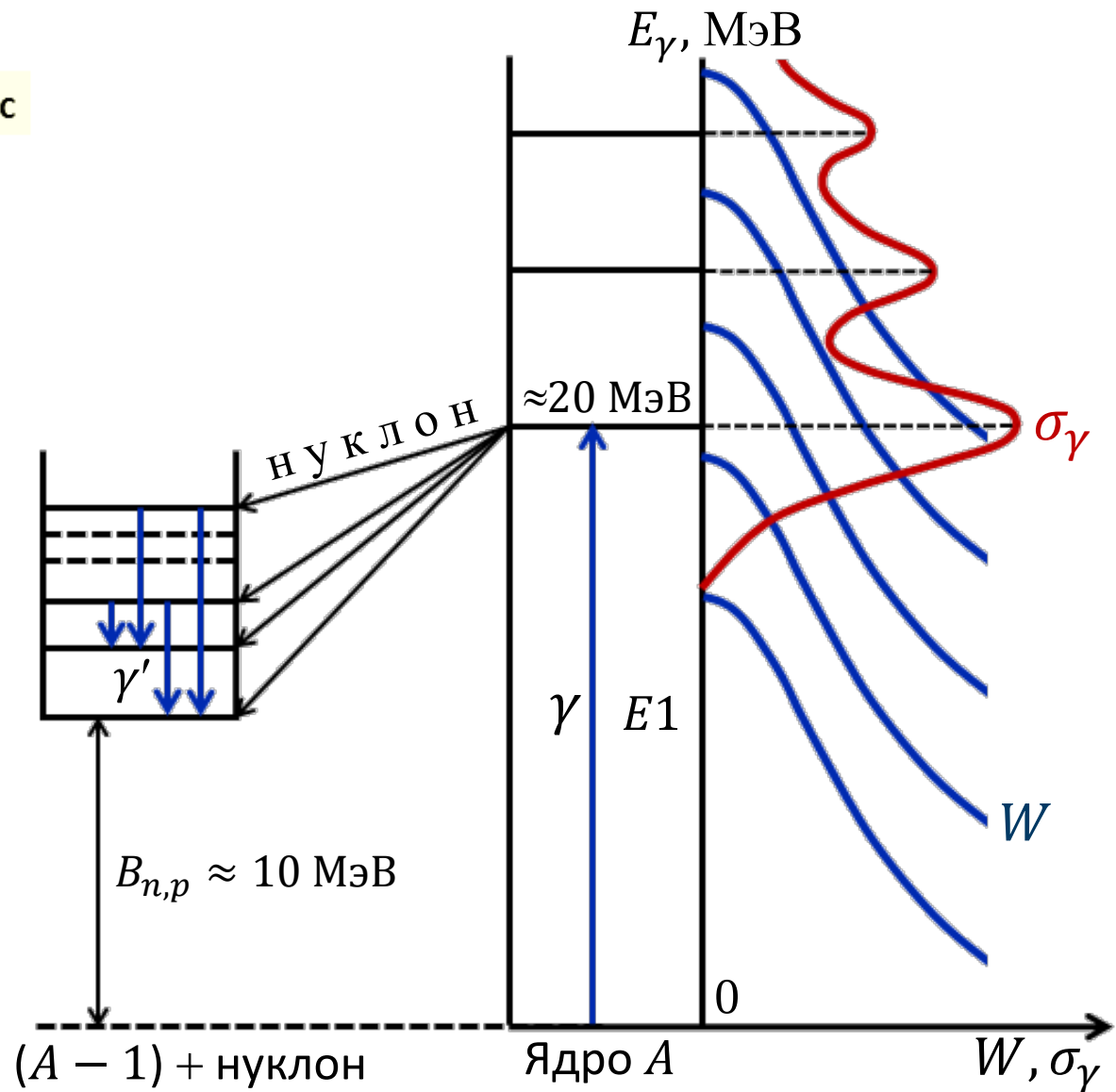
Варламов Владимир Васильевич

Распад гигантского дипольного резонанса с заселением отдельных уровней конечных ядер

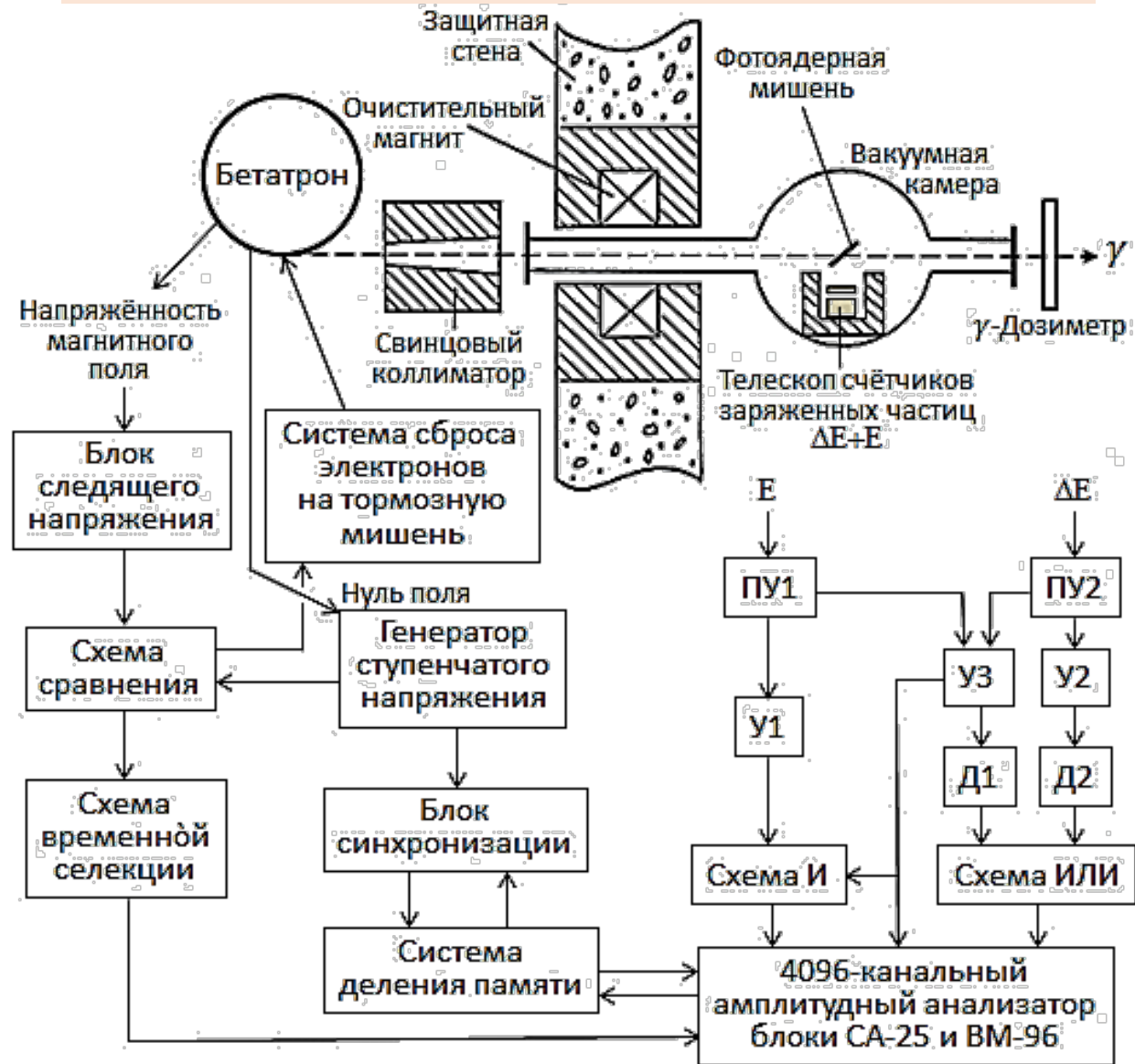
Диаграмма распада
отдельного входного состояния гигантского резонанса



Использование тормозного излучения
с различными верхними границами
для измерения фотонуклонных спектров



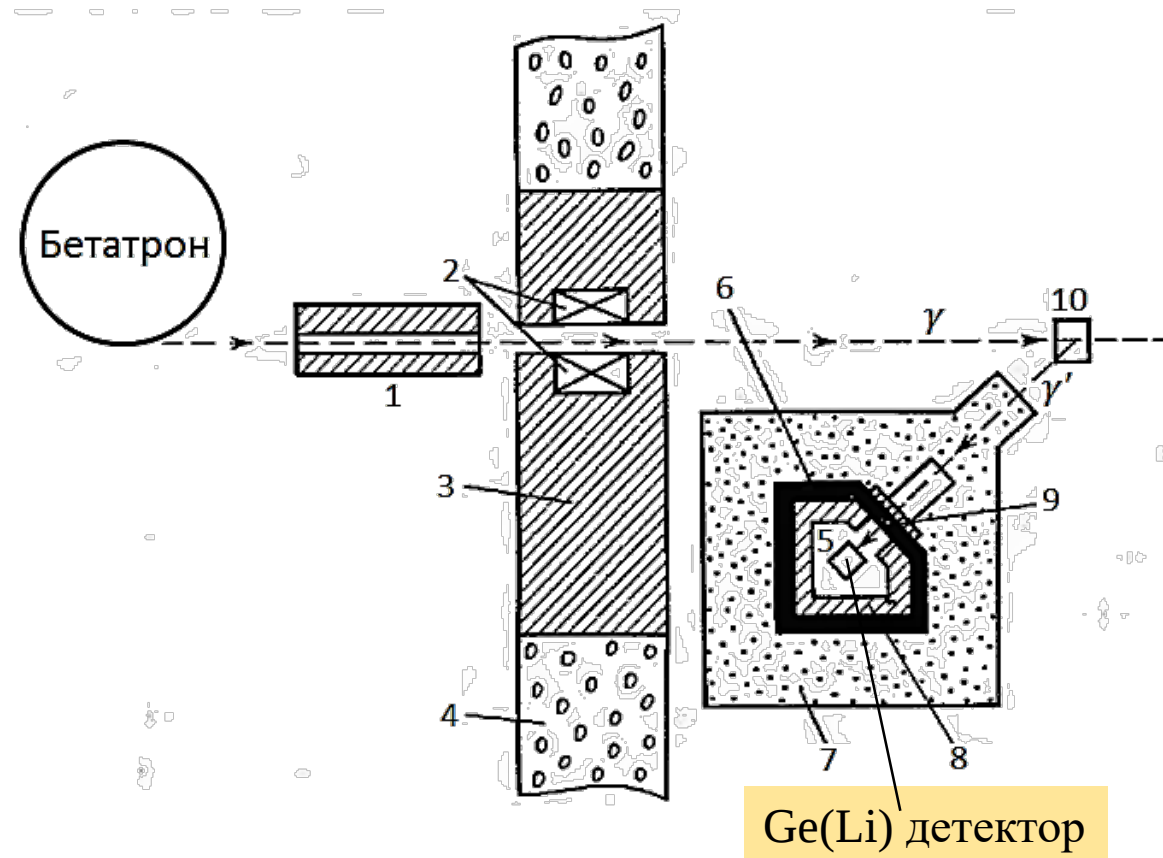
Измерение спектров фотопротонов в режиме быстрого сканирования верхней границы тормозного излучения



Измерение спектров гамма-квантов девозбуждения конечных ядер

НИИЯФ МГУ

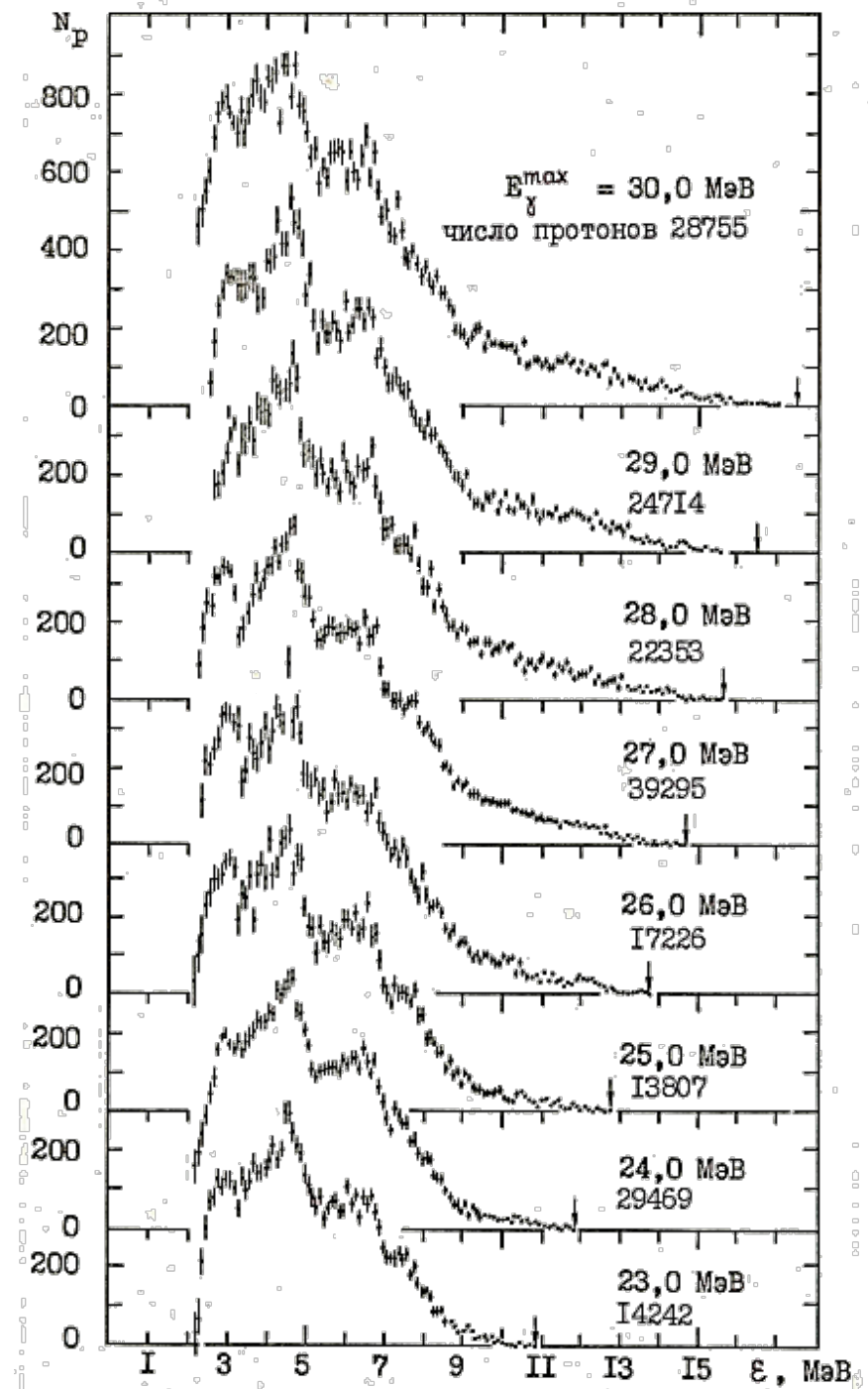
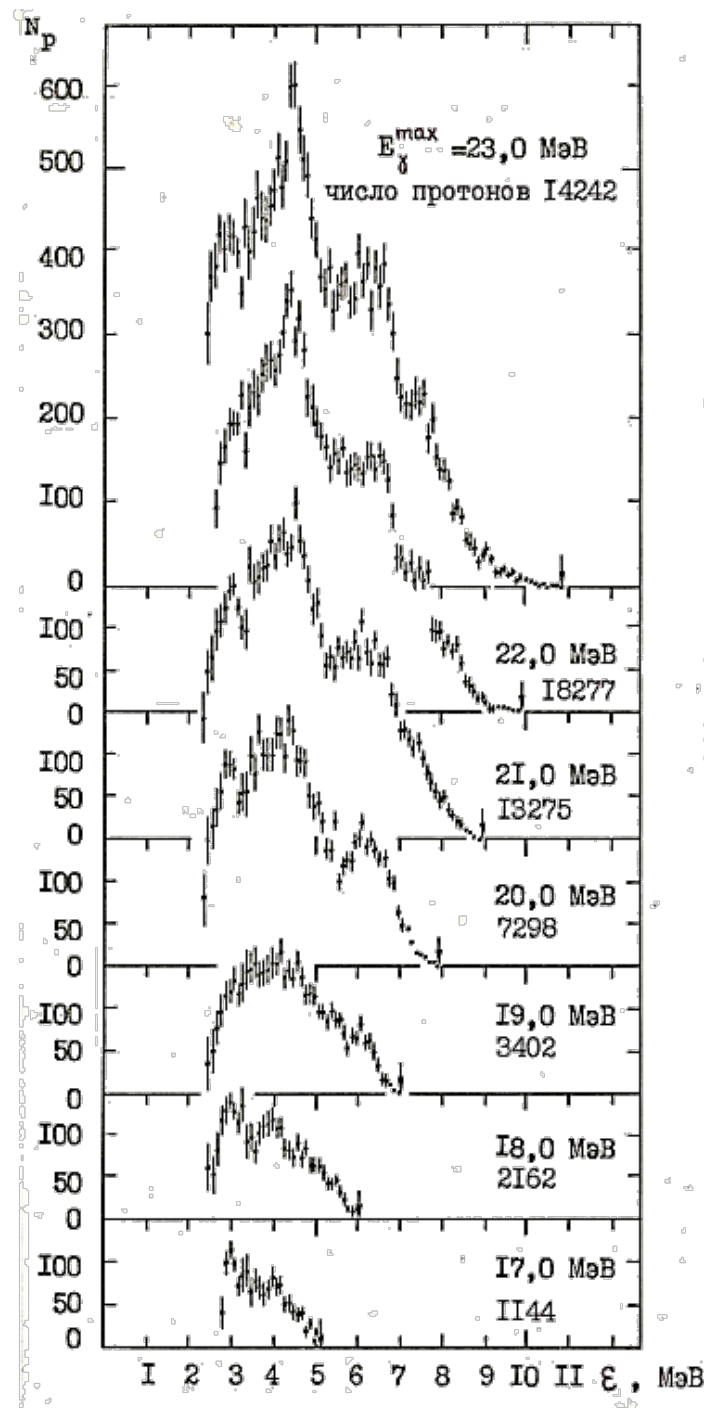
^{11}B , ^{16}O , ^{23}Na , ^{27}Al , ^{31}P , ^{32}S , ^{35}Cl , ^{37}Cl , ^{39}K , ^{40}Ca , ^{45}Sc , ^{58}Ni



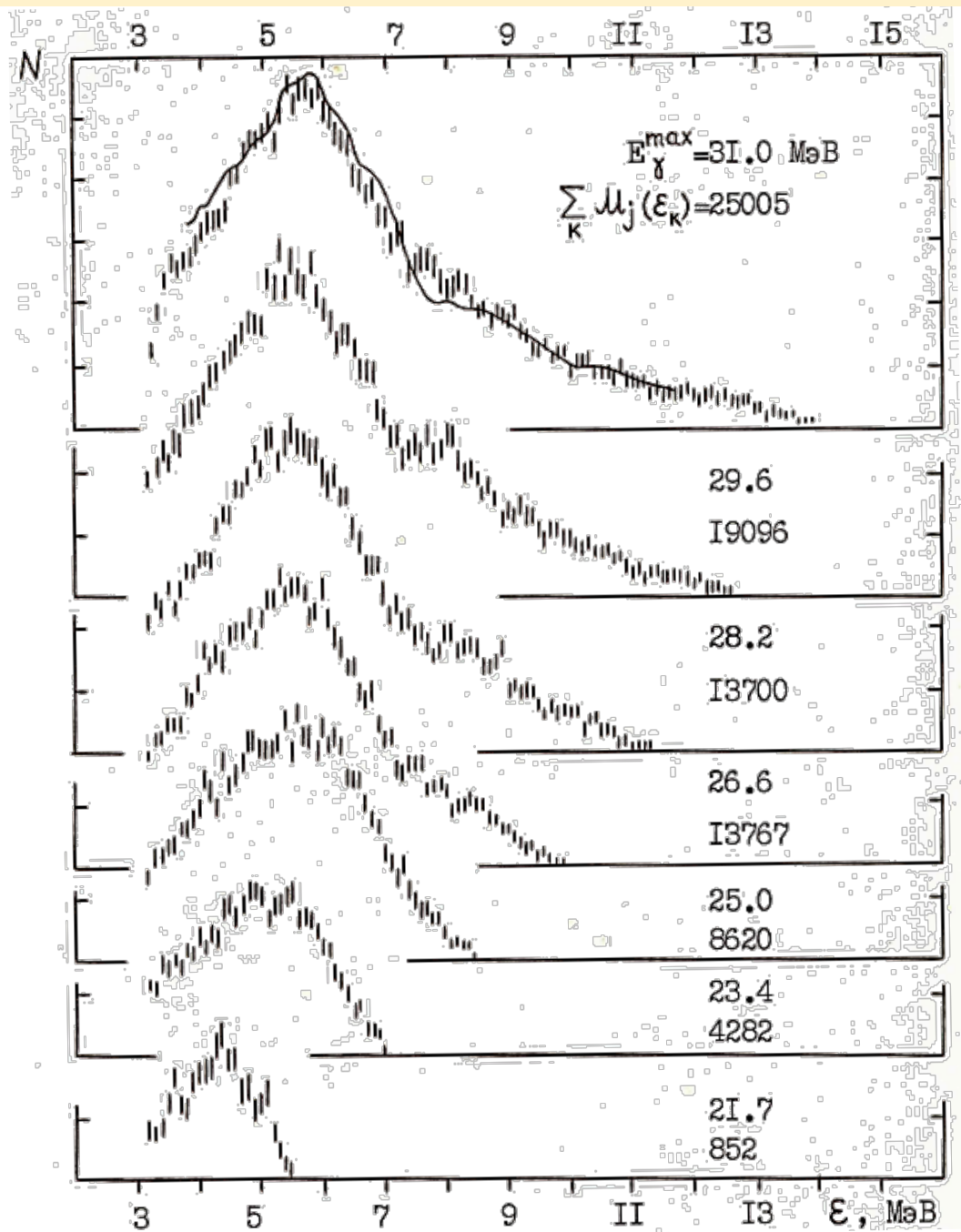
Привлекались данные других групп по ядрам ^{17}O , ^{18}O , ^{19}F , ^{24}Mg , ^{26}Mg , ^{28}Si , ^{29}Si , ^{30}Si ,

^{12}C , ^{23}Na , ^{24}Mg , ^{26}Mg , ^{27}Al , ^{28}Si , ^{32}S – измерено 84 протонных спектров

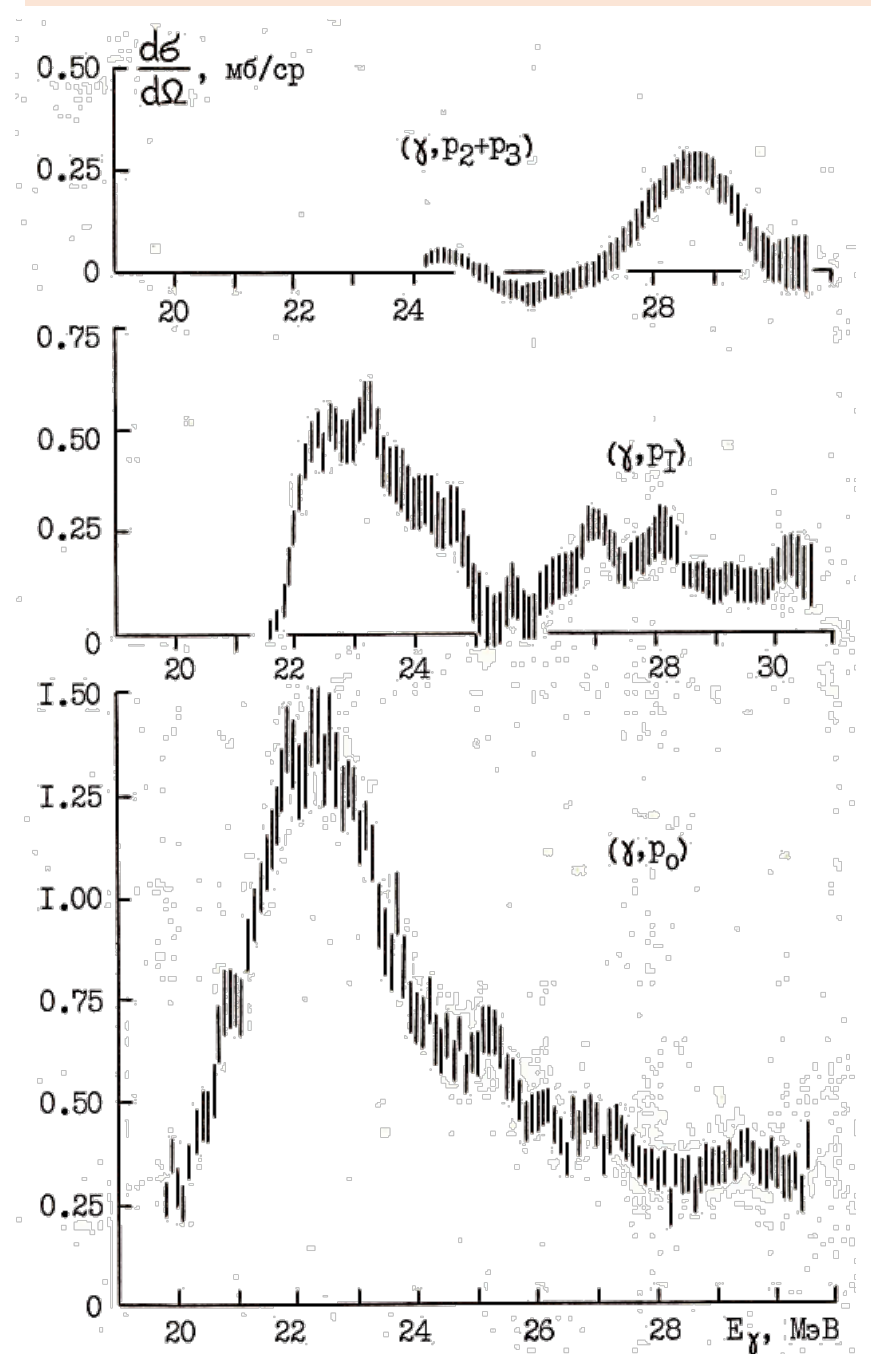
Спектры фотопротонов для ^{24}Mg
при 15-ти верхних границах
тормозного спектра



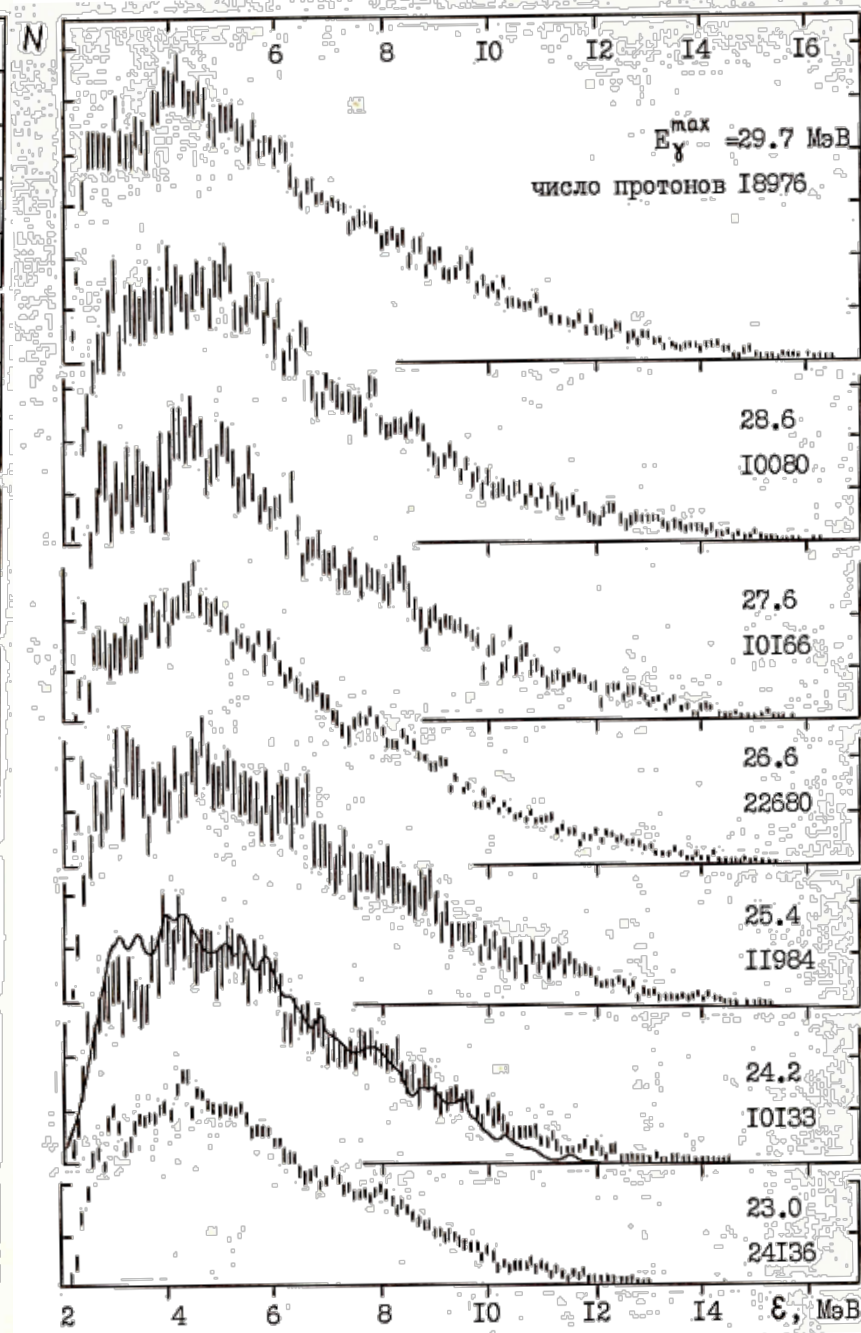
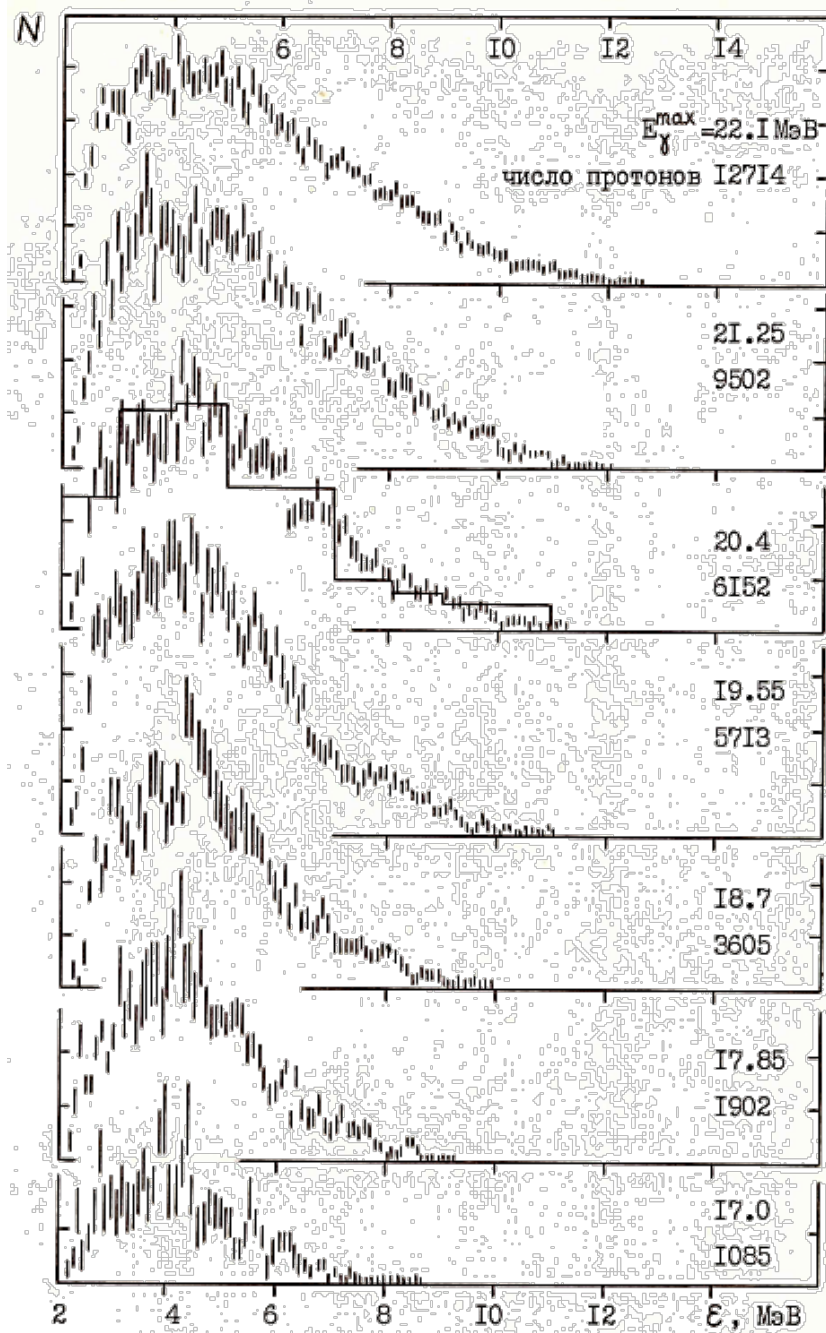
Спектры фотопротонов для ^{12}C при 7-ми верхних границах тормозного спектра



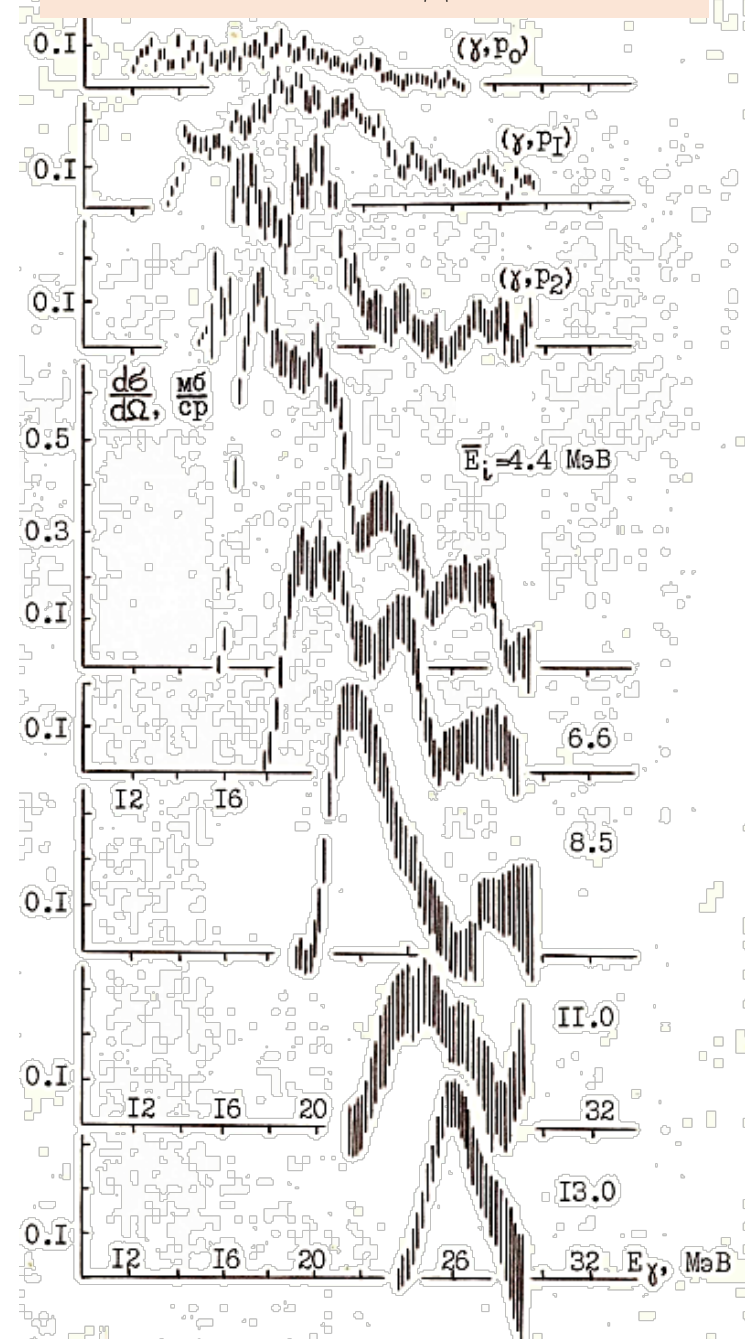
Парциальные фотопротонные сечения для ^{12}C



Спектры фотопротонов для ^{27}Al при 14-ти верхних границах тормозного спектра



Парциальные фотопротонные сечения для ^{27}Al

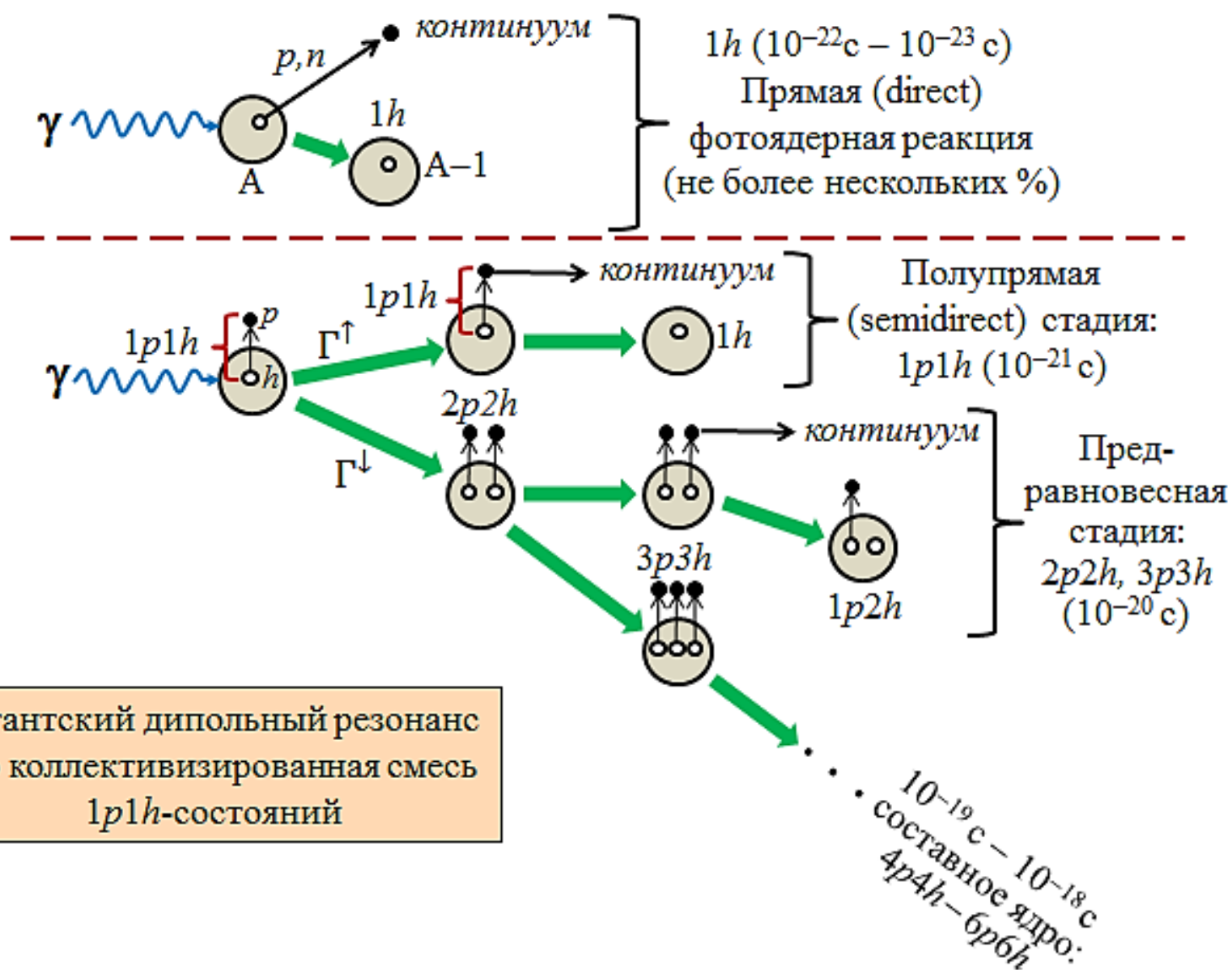


Эксперименты по измерению фотоядерных сечений с заселением отдельных уровней конечных ядер были выполнены в период 1974 – 1991 гг. Всего были получены сведения примерно о 300 парциальных нуклонных каналах распада гигантского резонанса.

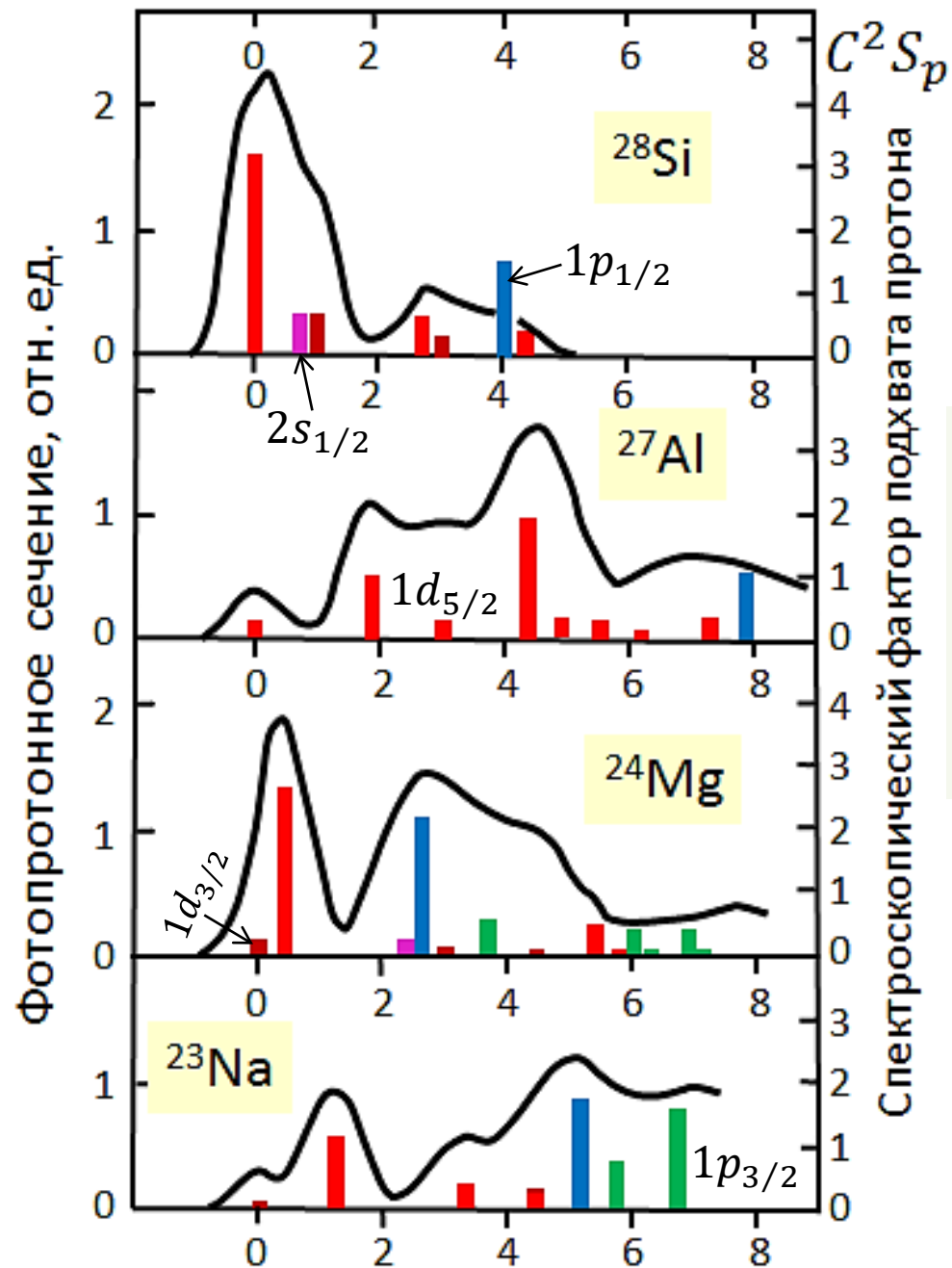
1. В.В. Варламов, Б.С. Ишханов, И.М. Капитонов, Ж.Л. Кочарова, И.К. Певцова, И.М. Пискарев, О.П. Шевченко. Фотопротонные спектры из ^{58}Ni . Ядерная физика, т. 21, с. 457, 1975.
2. В.В. Варламов, Б.С. Ишханов, И.М. Капитонов, Ж.Л. Кочарова, В.И. Шведун, О.П. Шевченко. Характеристики распада высоковозбужденных состояний ^{26}Mg . Изв. АН СССР, сер. физ., т. 39, с. 1744, 1975.
3. B.S. Ishkhanov, I.M. Kapitonov, V.I. Shvedunov, V.G. Shevchenko, V.V. Varlamov. Photoproton energy spectra and isospin effects in the decay of highly excited states of Ni isotopes. Nucl. Phys. v. A283, p. 307, 1977.
4. В.В. Варламов, Б.С. Ишханов, И.М. Капитонов, Ю.И. Прокопчук, В.И. Шведун. О заселении уровней конечного ядра в реакции $^{24}\text{Mg}(\gamma, p)^{23}\text{Na}$. Изв. АН Каз. ССР, серия физическая, № 6, с. 32, 1978.
5. И.М. Капитонов, Е.В. Лазутин, В.И. Мокеев, Е.С. Омаров, И.М. Пискарев. Исследование реакции $(\gamma, X\gamma')$ на ядре ^{11}B . Ядерная физика, т. 30, с. 1175, 1979.
6. В.В. Варламов, Б.С. Ишханов, И.М. Капитонов, Ю.И. Прокопчук, В.И. Шведун. О роли нуклонов различных оболочек в формировании гигантского дипольного резонанса ядра ^{24}Mg . Ядерная физика, т. 30, с. 1185, 1979.
7. В.В. Варламов, Б.С. Ишханов, И.М. Капитонов, А.Н. Панов, В.И. Шведун. Исследование вклада различных конфигураций в гигантский дипольный резонанс ядра ^{28}Si . Изв. АН СССР, сер. физ., т. 43, с. 186, 1979.
8. N.G. Goncharova, B.S. Ishkhanov, I.M. Kapitonov, V.M. Parfent'eva, A.V. Shumakov, V.I. Shvedunov. A study of the $^{12}\text{C}(\gamma, p)^{11}\text{B}$ -reaction leading to the final nucleus in the various states. Int. Conf. Nucl. Phys. with Electromagnetic Interactions, Mainz, Contributed Papers, p. 4.9, 1979.
9. B.S. Ishkhanov, I.M. Kapitonov, V.I. Shvedunov, V.V. Varlamov. On the role of various configurations in the formation of the giant dipole resonance of the 1d-2s shell nuclei. Int. Conf. Nucl. Phys. with Electromagnetic Interactions, Mainz, Contributed Papers, p. 4.13, 1979.
10. B.S. Ishkhanov, I.M. Kapitonov, V.N. Orlin, I.M. Piskarev, V.I. Shvedunov, V.V. Varlamov. Decay channels of the giant dipole resonance in ^{26}Mg . Nucl. Phys., v. A313, p. 317, 1979.
11. B.S. Ishkhanov, I.M. Kapitonov, V.I. Shvedunov, V.V. Varlamov, A.V. Shumakov. A study of the $^{12}\text{C}(\gamma, p)^{11}\text{B}$ reaction leading to the formation of the final nucleus in individual states. Proc. Int. Conf. Nucl. Phys., Berkly, p. 863, 1980.
12. K.M. Irgashev, B.S. Ishkhanov, I.M. Kapitonov. Partial photonucleon cross sections and the ^{24}Mg giant dipole resonance. Nucl. Phys., v. A483, p. 109, 1988.
13. I.M. Kapitonov. Partial Photonucleon Cross Sections and Decay Mechanism of Giant Dipole Resonance. In: From Spectroscopic to Chaotic Features of Nuclear Systems. World Scientific, 1992. XXI International Symposium on Nuclear Physics, Germany 4-8 November 1991, p. 96.

1. B.S. Ishkhanov, I.M. Kapitonov, A.V. Shumakov. Systematics of the single-particle properties of the 1d₂s-shell nuclei. Nucl. Phys., v. A394, p. 131-138, 1983.
2. В.В. Варламов, И.Н. Бобошин, Б.С. Ишханов, И.М. Капитонов. Анализ данных по реакциям однонуклонной передачи и структура атомных ядер. Депонировано ВИНТИ № 6140-B86, МГУ-М., 1986, 31 стр.
3. И.Н. Бобошин, В.В. Варламов, Б.С. Ишханов, И.М. Капитонов. Метод совместной оценки данных по реакциям срыва и подхвата. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерные константы. Выпуск 4, с. 87-93, 1987.
4. И.Н. Бобошин, В.В. Варламов, Б.С. Ишханов, И.М. Капитонов. Исследование одночастичных свойств ядер на основе данных по реакциям однонуклонной передачи из файла ENSDF. Препринт НИИЯФ МГУ-88-36/57.
5. V.V. Varlamov, I.N. Boboshin, B.S. Ishkhanov, I.M. Kapitonov. The Method for Evaluation of the Nuclear Structure Parameters on the Basis of Joint Analysis of Data on Nuclear Stripping and Pick-up Reactions. Abstracts Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, May 30 – June 3, 1988, Mito, Japan, p. 153.
6. V.V. Varlamov, I.N. Boboshin, B.S. Ishkhanov, I.M. Kapitonov. Investigation of the One-Particle Properties of Nuclei on the Basis of the Data on One-Nucleon Transfer Reactions from ENSDF. Abstracts Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, May 30 – June 3, 1988, Mito, Japan, p. 157.
7. И.Н. Бобошин, В.В. Варламов, Б.С. Ишханов, И.М. Капитонов. Спектроскопические данные из файла ENSDF и одночастичные свойства ядер 1f-2p оболочки. Вопросы атомной науки и техники, выпуск 3, серия: Ядерные константы, с. 59-69, 1989.
8. I.N. Boboshin, B.S. Ishkhanov, I.M. Kapitonov, V.V. Varlamov. Single-particle properties of the 1f₂p shell nuclei on the basis of proton stripping and pick-up data. Nucl. Phys., v. A496, p. 93-107, 1989.
9. И.Н. Бобошин, В.В. Варламов, Б.С. Ишханов, И.М. Капитонов. Анализ структуры ядер протонной (1f-2p)-оболочки на основе данных по однонуклонному срыву и подхвату. Изв. АН СССР, сер. физ., т. 53, с. 2046-2051, 1989.

Стадии фотоядерной реакции



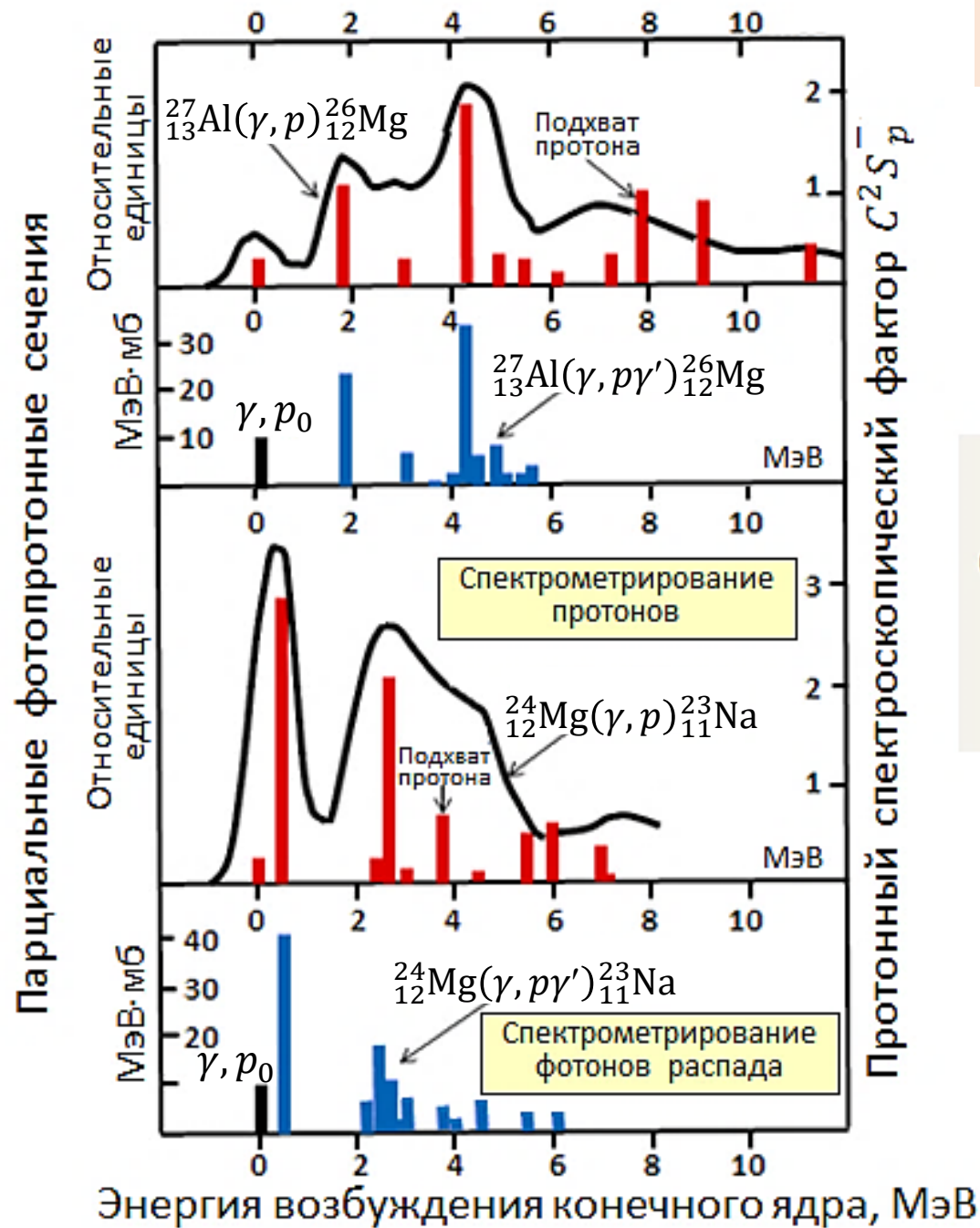
Энергия возбуждения конечного ядра, МэВ



Распад гигантского дипольного резонанса
с заселением отдельных уровней конечных ядер

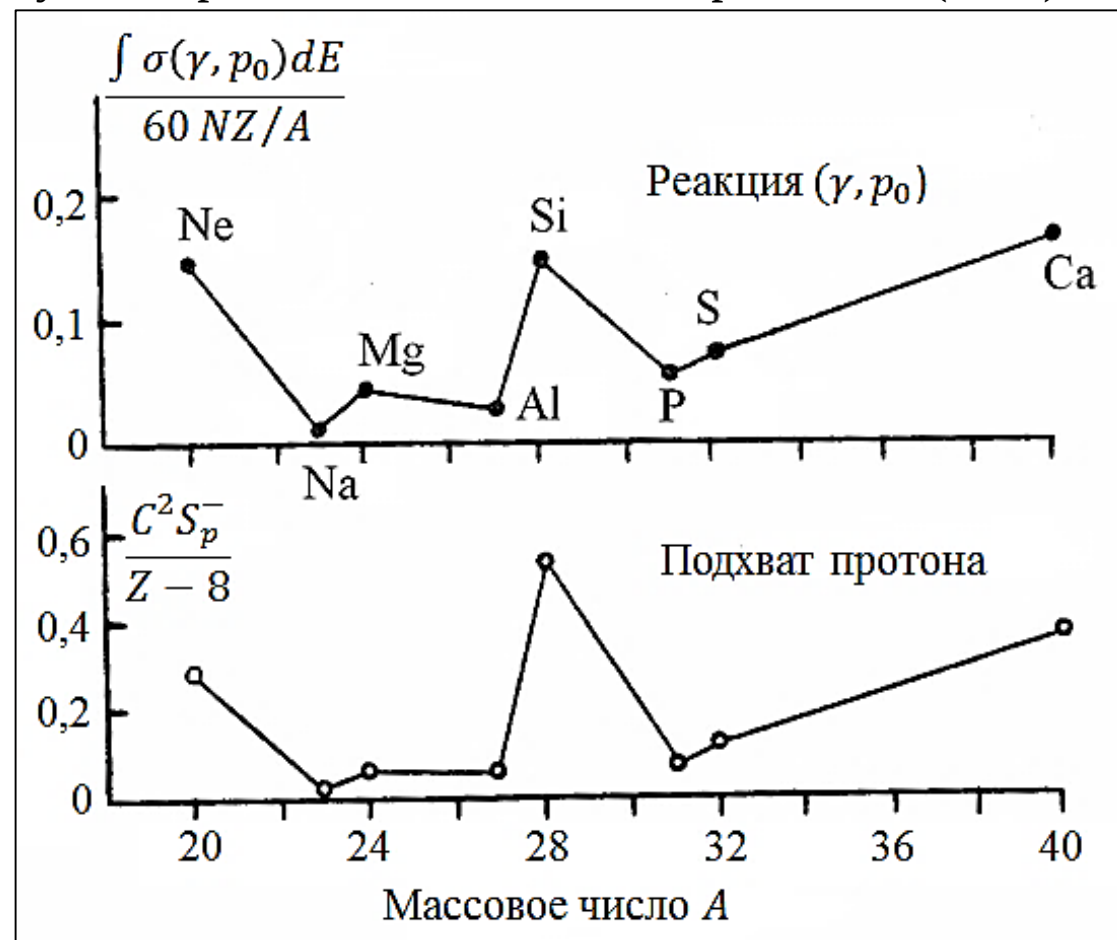
Сравнение
парциальных фотопротонных
сечений с данными
реакций протонного
подхвата

Распад гигантского дипольного резонанса
с заселением отдельных уровней конечных ядер



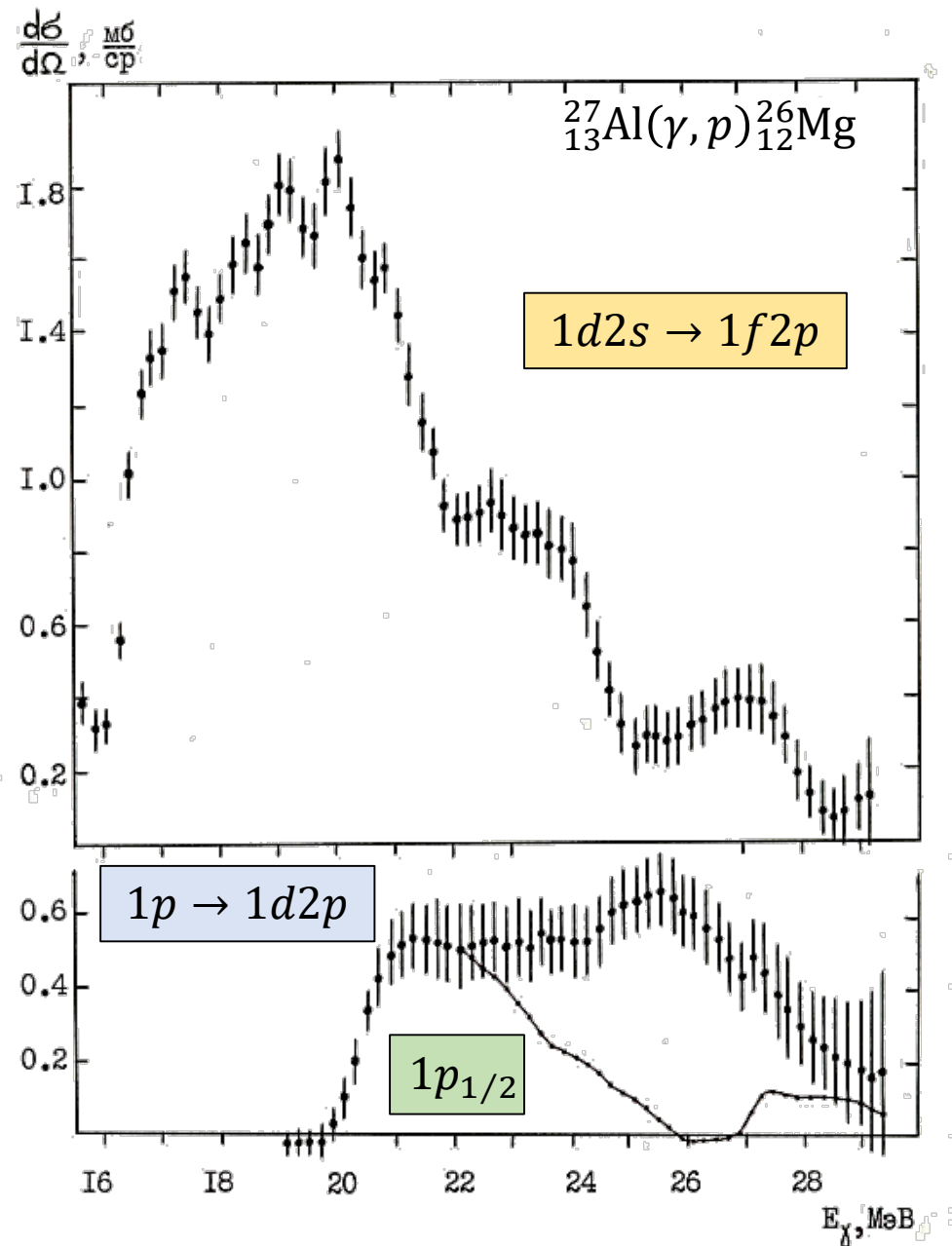
Сравнение
спектрометрирования
фотопротонов
и фотонов распада

R.A. Eramzhyan, B.S. Ishkhanov, I.M. Kapitonov, V.G. Neudatchin.
Physics Reports v. 136, numbers 4-6, p. 229-400 (1986)



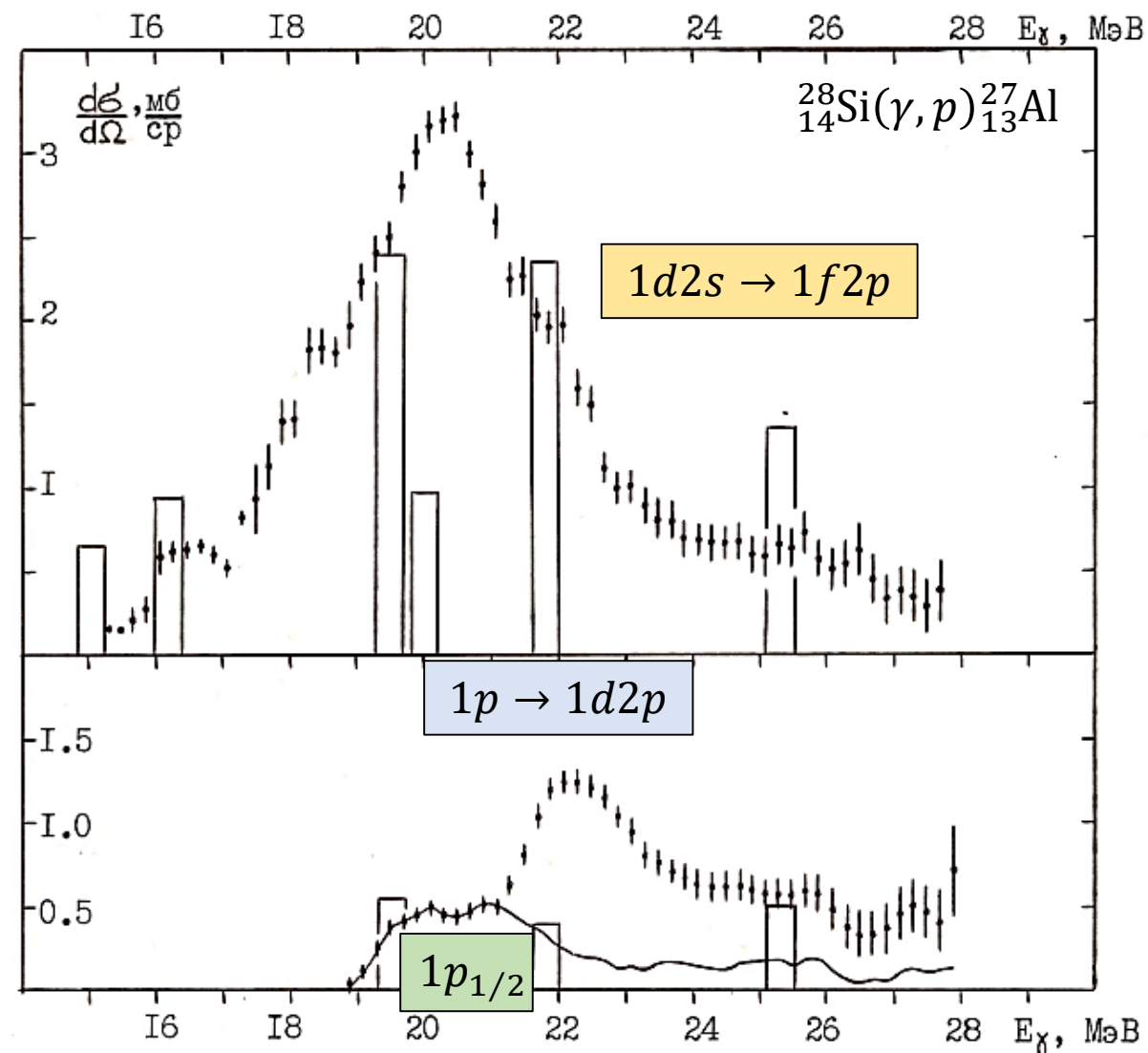
Сравнение нормированных интегральных сечений (γ, p_0) -реакции (верхний рисунок) с нормированными спектроскопическими факторами заселяемых основных состояний конечных ядер (нижний рисунок).

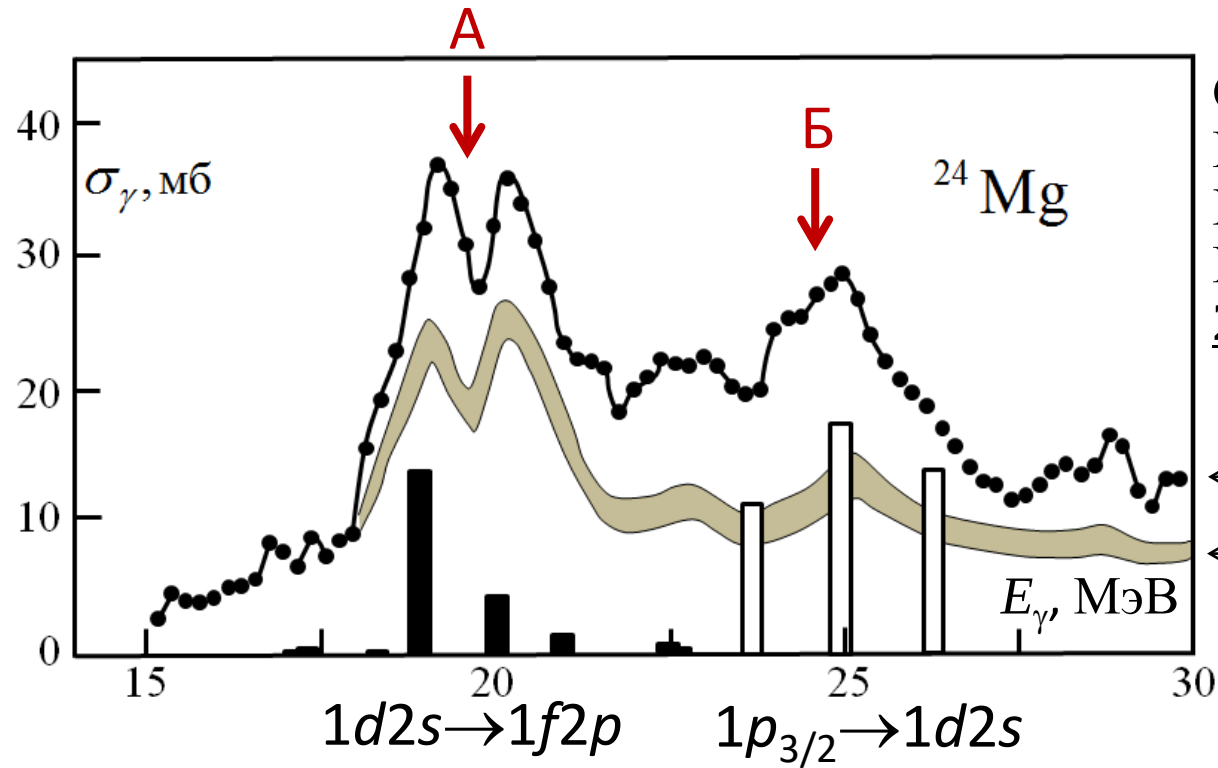
Фотопротонные сечения ядер $^{27}_{13}\text{Al}$ и $^{28}_{14}\text{Si}$ для дипольных переходов из разных оболочек



Распад гигантского дипольного резонанса с заселением отдельных уровней конечных ядер

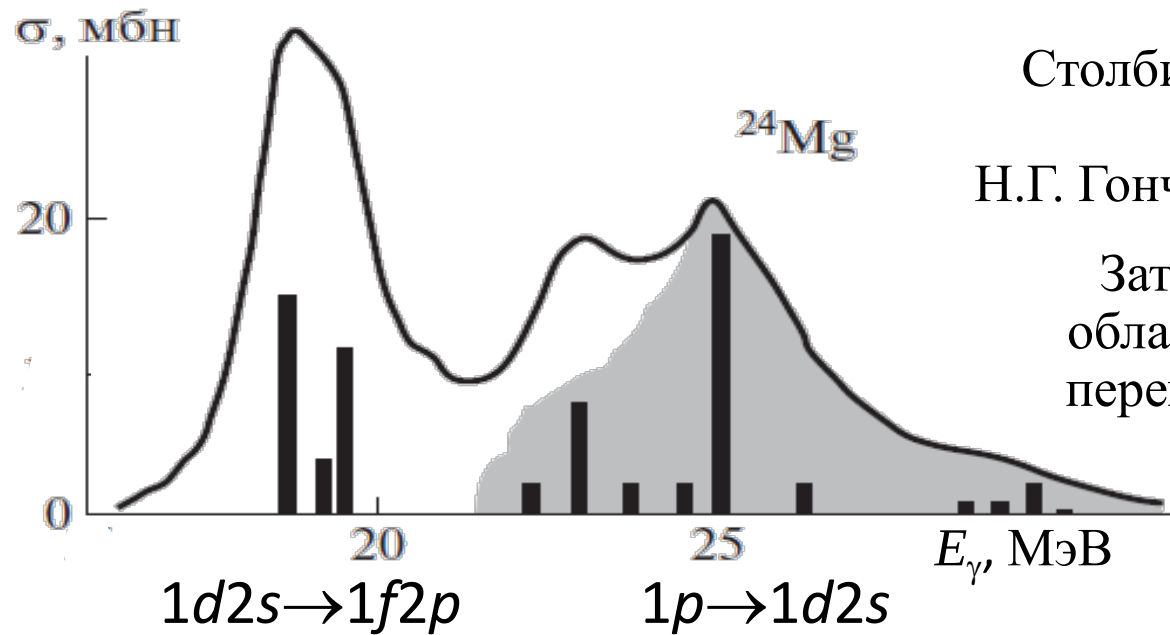
R.A. Eramzhyan, B.S. Ishkhanov, I.M. Kapitonov, V.G. Neudatchin.
Physics Reports v. 136, numbers 4-6, p. 229-400 (1986)





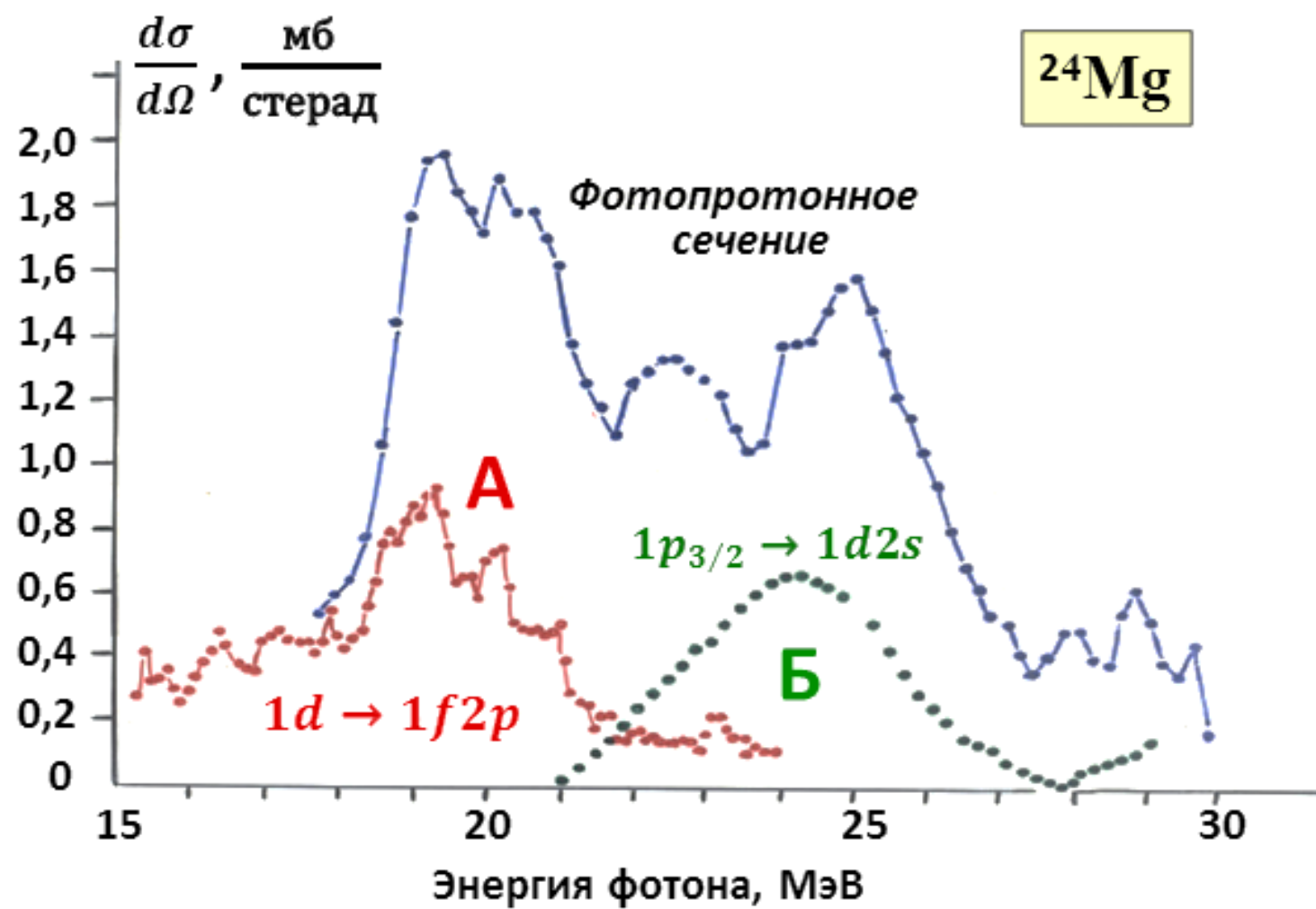
Столбики – расчёт:
 Н.А. Богданова, А.Н. Гальцов,
 Б.С. Ишханов, В.Н. Орлин.
 Вестник МГУ, физика, астр.,
28, 16 (1987).

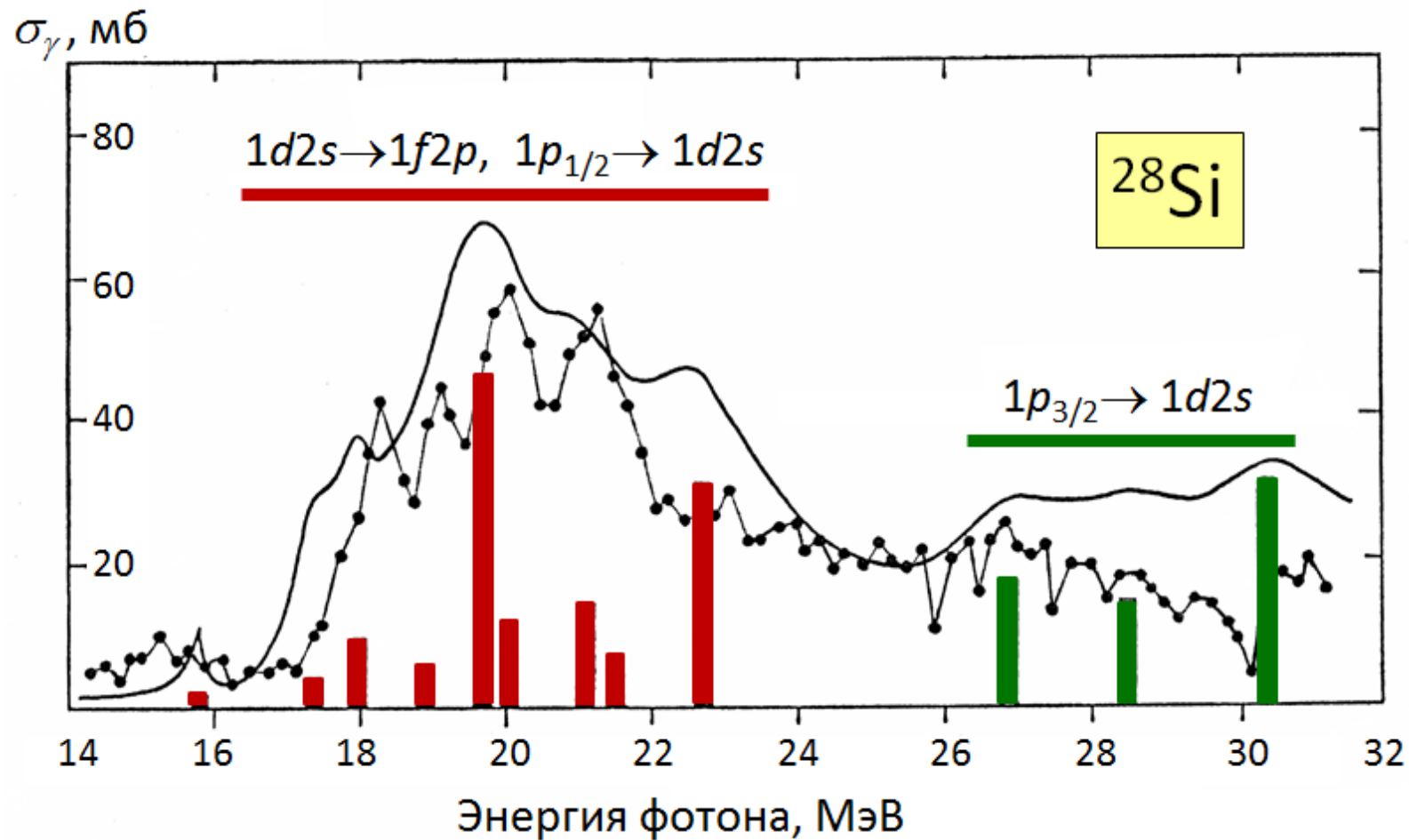
← Полное сечение
 (эксперимент)
 ← Полупрямая
 компонента
 (эксперимент)



Столбики и сплошная линия
 - расчёт:
 Н.Г. Гончарова, ЯФ 82, 56 (2019).

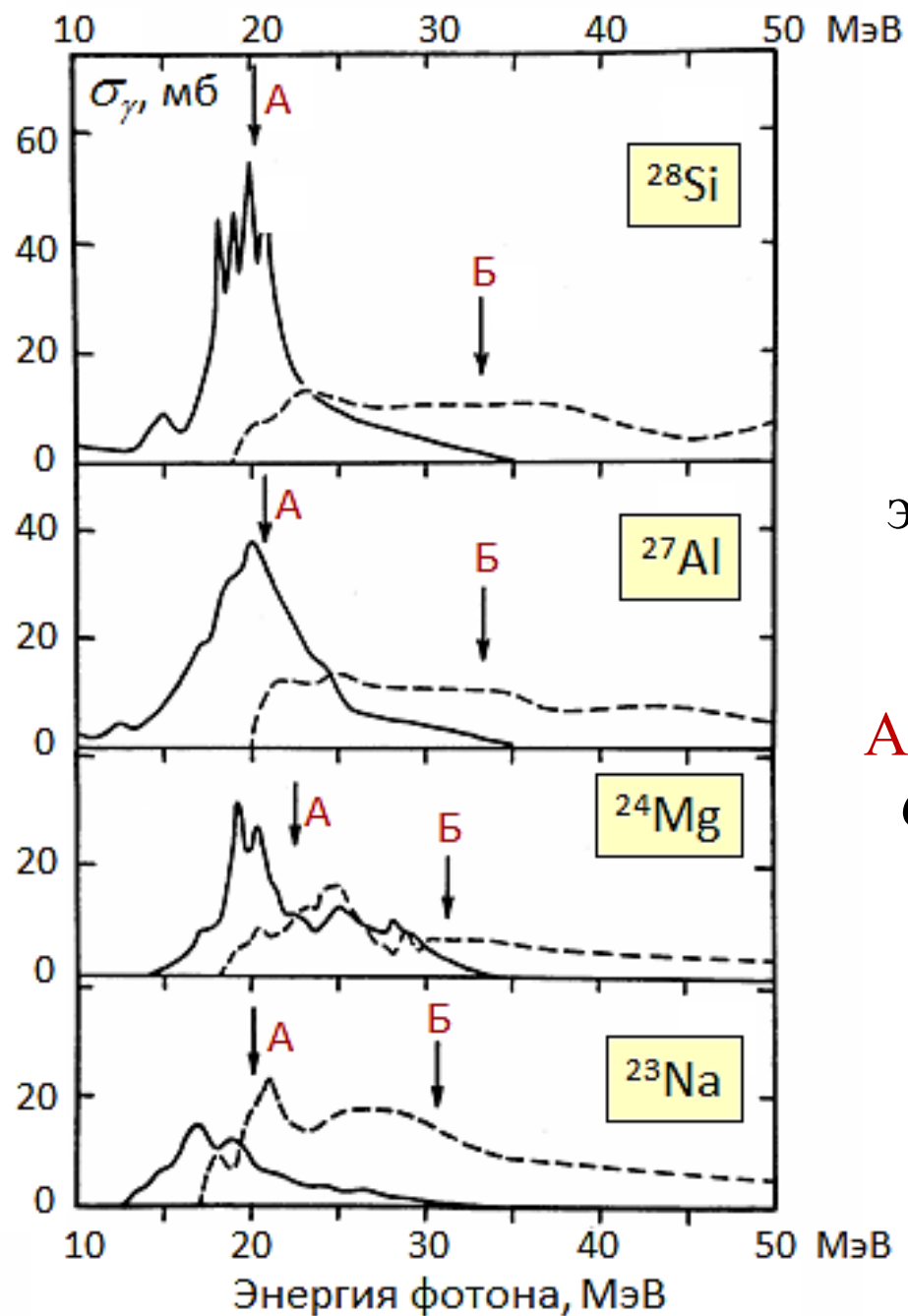
Затемнённый сектор –
 область, где доминируют
 переходы из $1p$ -оболочки





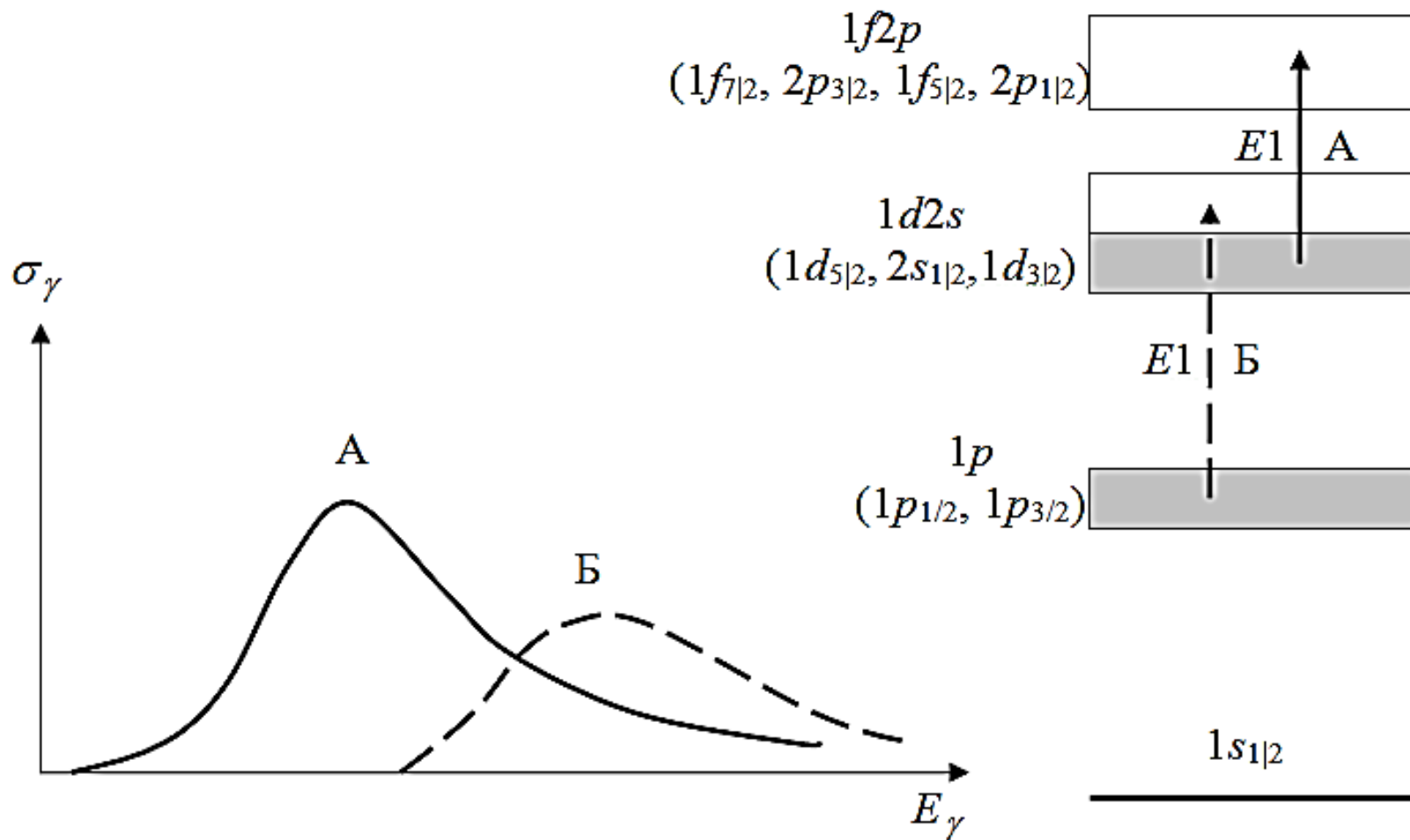
Точки – эксперимент: J. Ahrens et al. Nucl. Phys., A251, 479 (1975).

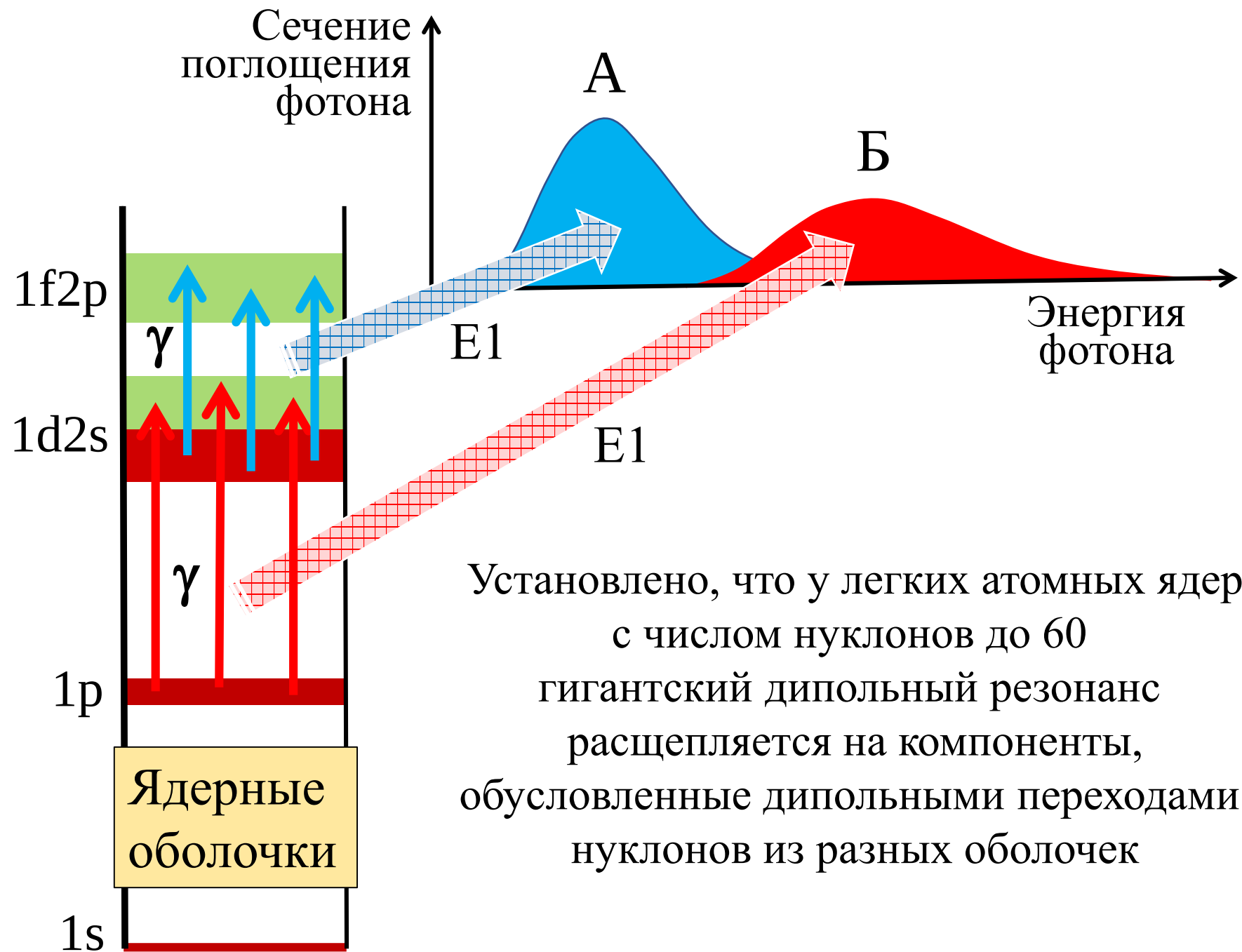
Столбики и линия – расчёт: Б.С. Ишханов, В.Г. Канзюба, В.Н. Орлин. ЯФ, 40, 9 (1984).



Декомпозиция
экспериментальных сечений
фотопоглощения
на компоненты
A ($1d2s \rightarrow 1f2p$) и **B** ($1p \rightarrow 1d2s$).
*Стрелки указывают центры
тяжести компонент.*

Схема формирования конфигурационного расщепления ГДР
в ядрах с незаполненной $1d2s$ -оболочкой (между ^{16}O и ^{40}Ca)





Установлено, что у легких атомных ядер с числом нуклонов до 60 гигантский дипольный резонанс расщепляется на компоненты, обусловленные дипольными переходами нуклонов из разных оболочек

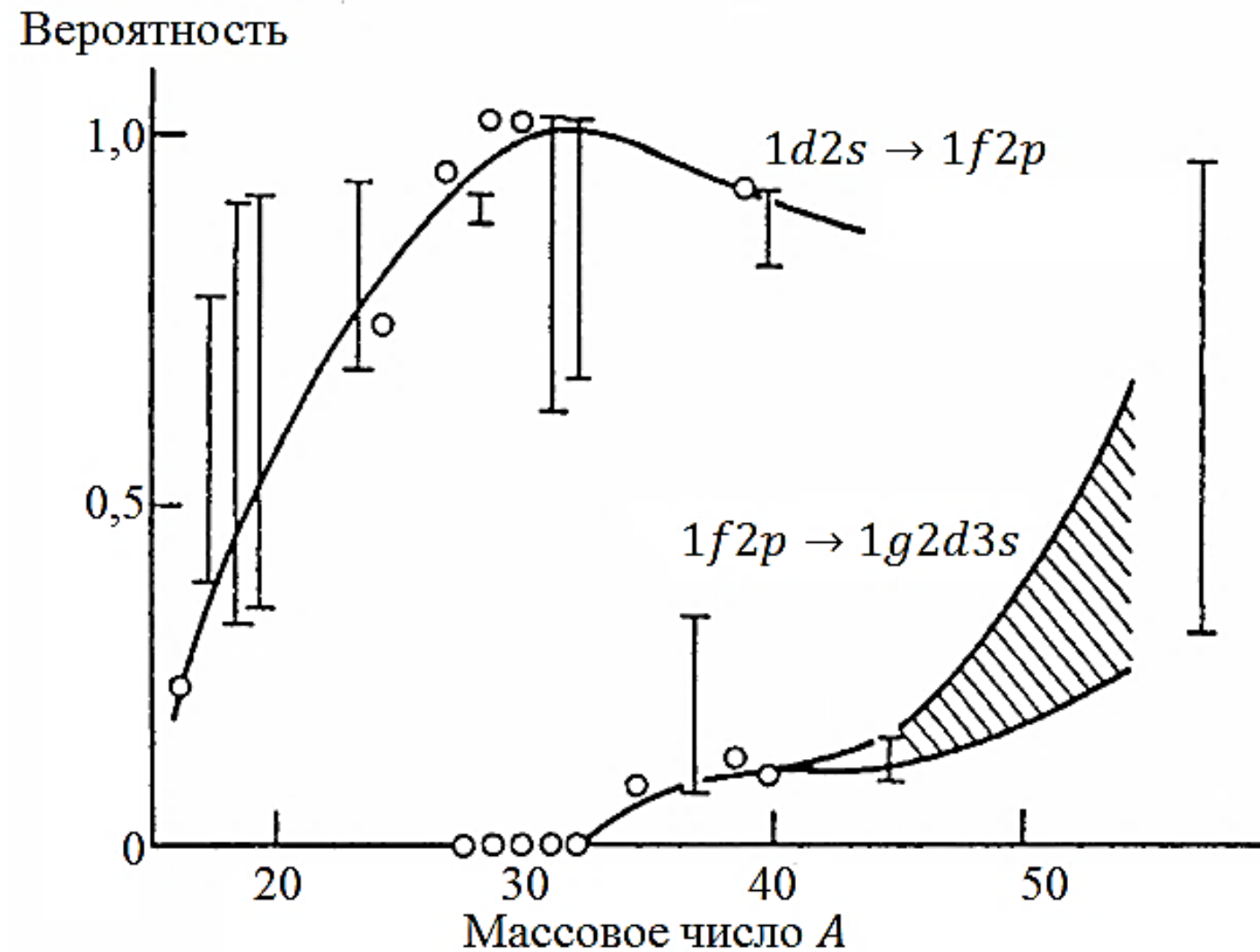
The Giant Dipole Resonance in Light Nuclei and Related Phenomena

R.A. Eramzhyan, B.S. Ishkhanov, I.M. Kapitonov, V.G. Neudatchin

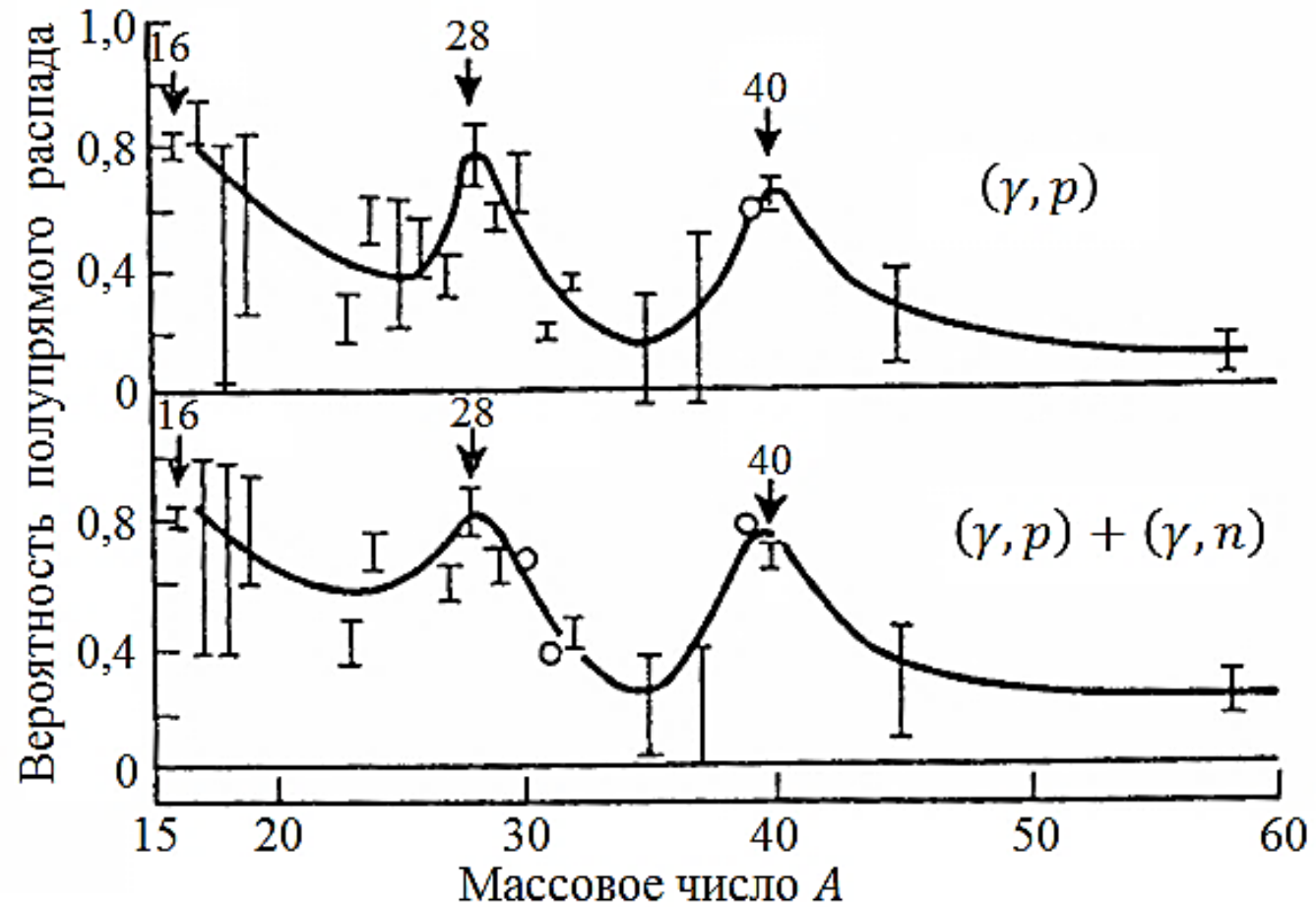
Physics Reports, Volume 136, Issues 4–6, Pages 229–400 (April 1986)

Abstract

The present-day status of the giant dipole resonance (GDR) in light nuclei is discussed with main emphasis on the supermultiplet and **configurational splitting of GDR, which are its most important features**. A great wealth of experimental data, which confirm the existence of the above phenomenon are presented. Consideration is also given to the related problems, such as radiative pion capture and muon capture, spin-isospin dipole excitations, the role of the supermultiplet structure of nuclear levels in the formation of hypernuclear states in processes of the coherent substitution of hyperons for nucleons.

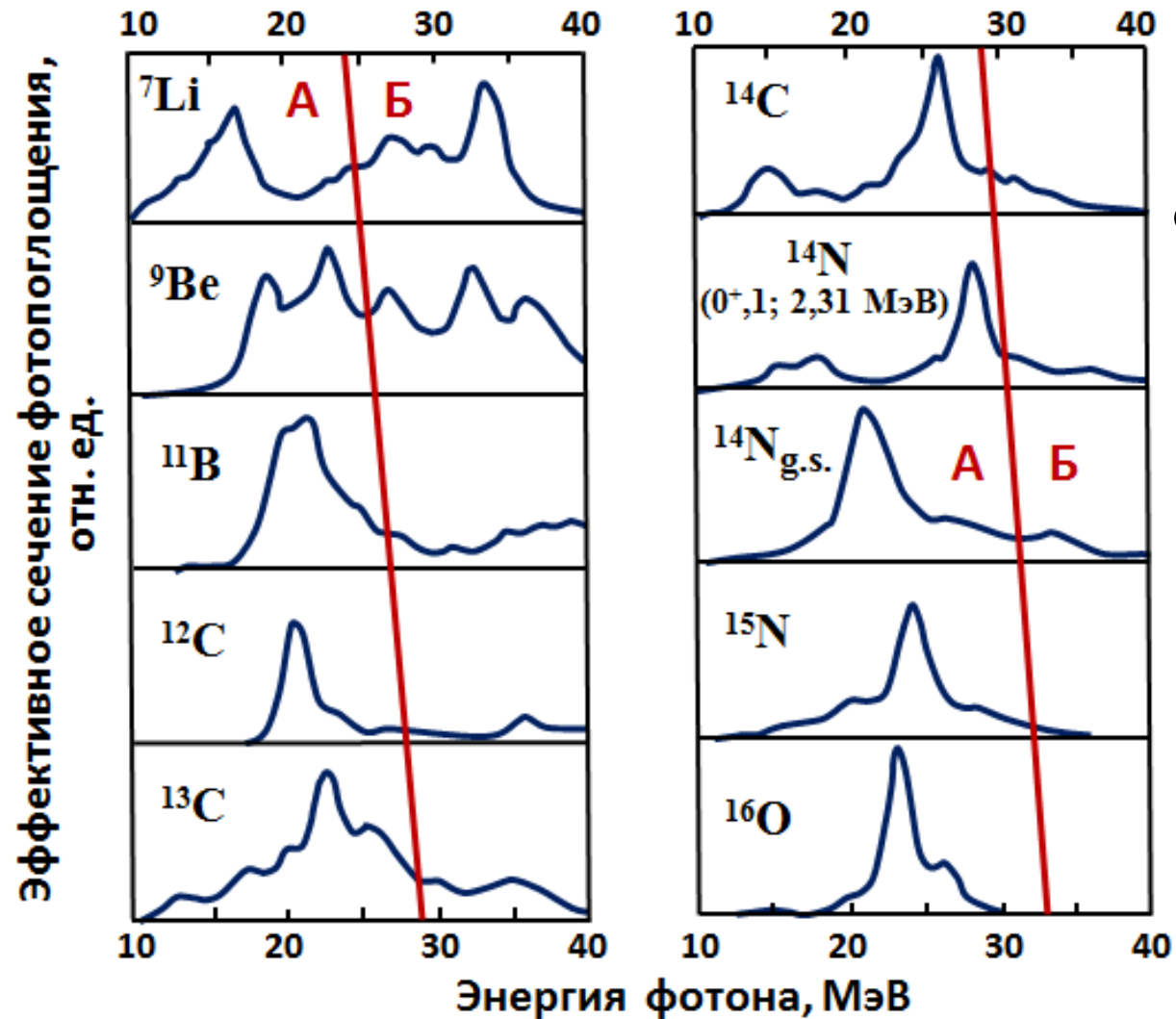


Вероятность E1-переходов из внешних оболочек
для ядер тяжелее ^{16}O .



Вероятность полупрямых процессов в фотопротонном сечении (верхний рисунок) и полном фотонуклонном сечении (нижний рисунок) для ядер с $A = 12 - 58$.

Теоретические сечения фотопоглощения ядер $1p$ -оболочки



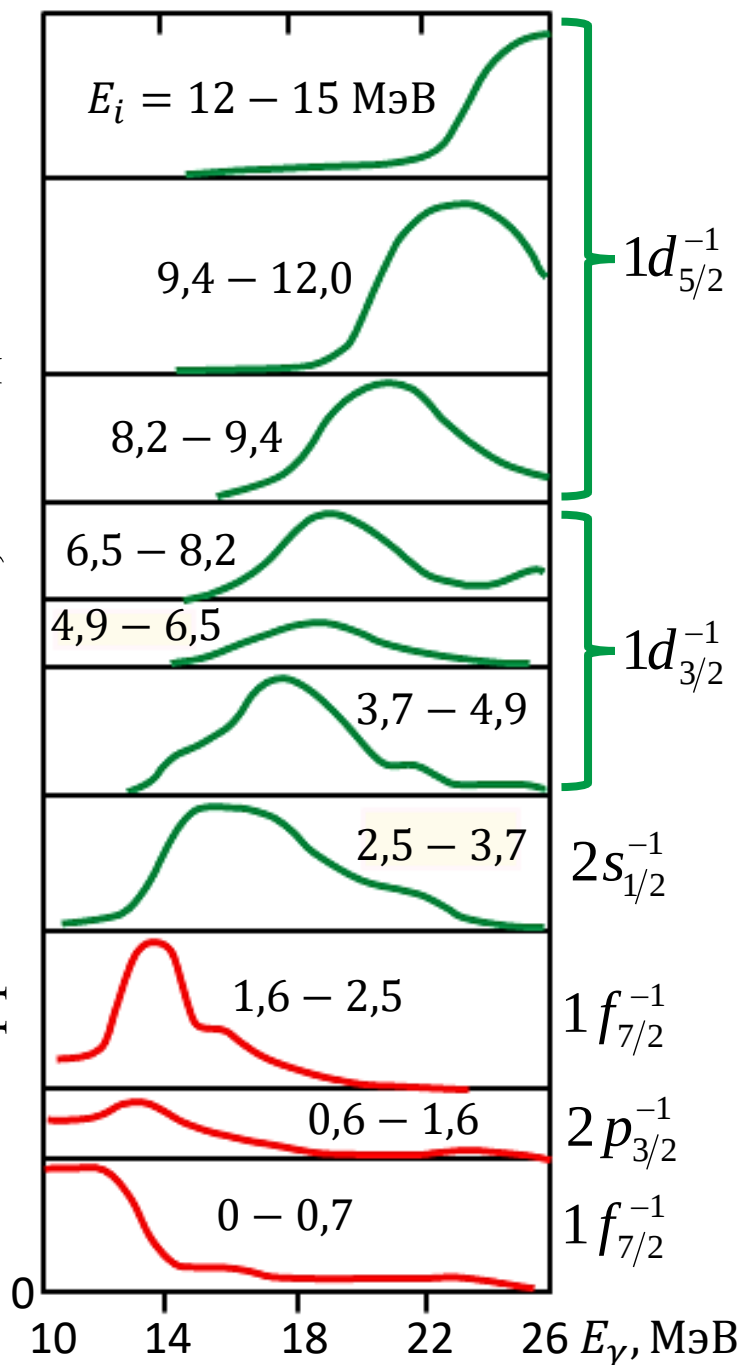
Конфигурационное расщепление
гигантского резонанса определяет
структуру сечений фотопоглощения
ядер $1p$ -оболочки

Гончарова Н.Г.,
Киссенер Х.Р.,
Эрамжян Р.А.

Физика элементарных
частиц и атомного ядра,
16 (1985) 773.

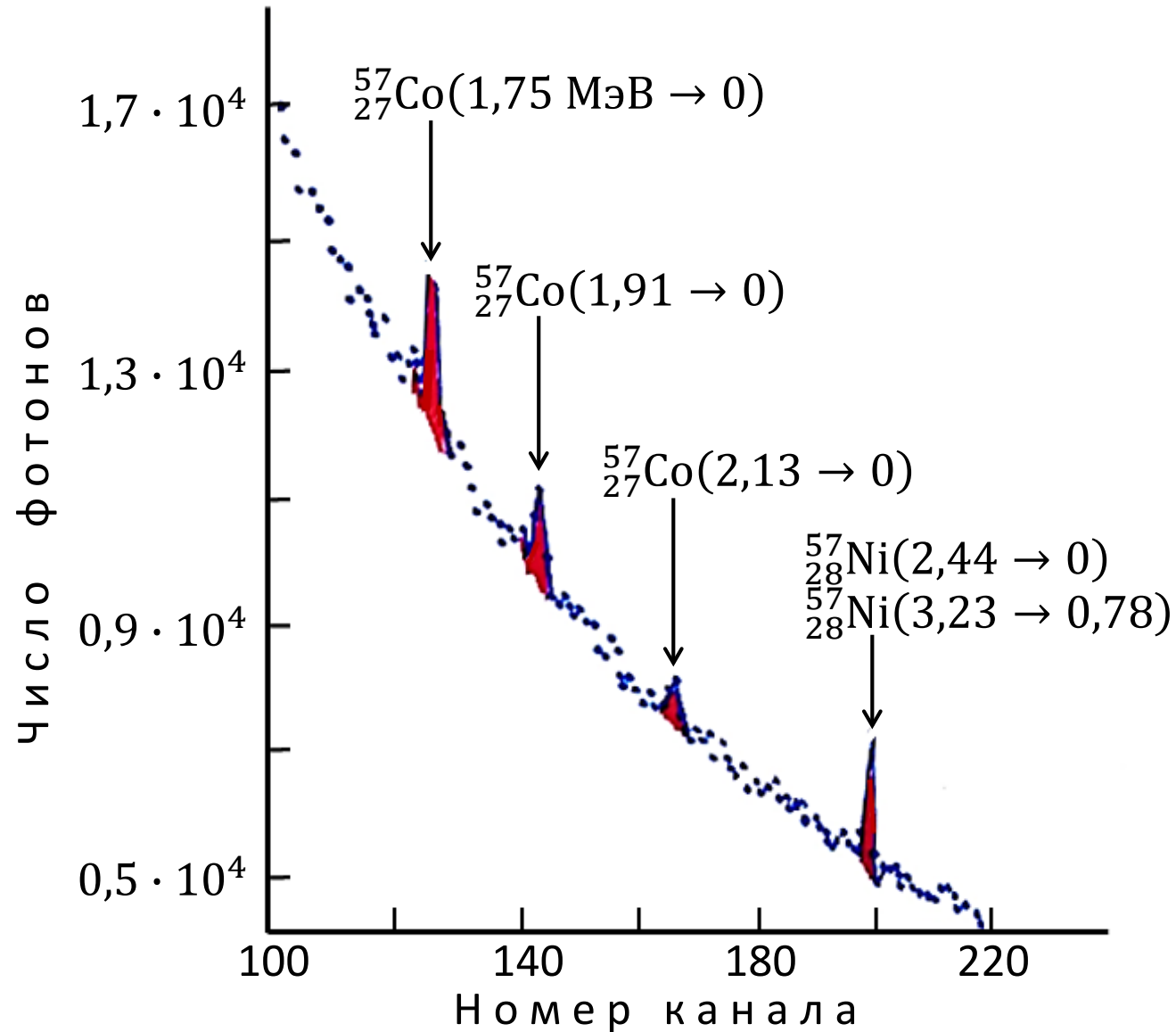
$^{58}_{28}\text{Ni}$

Эффективное сечение, отн. ед.

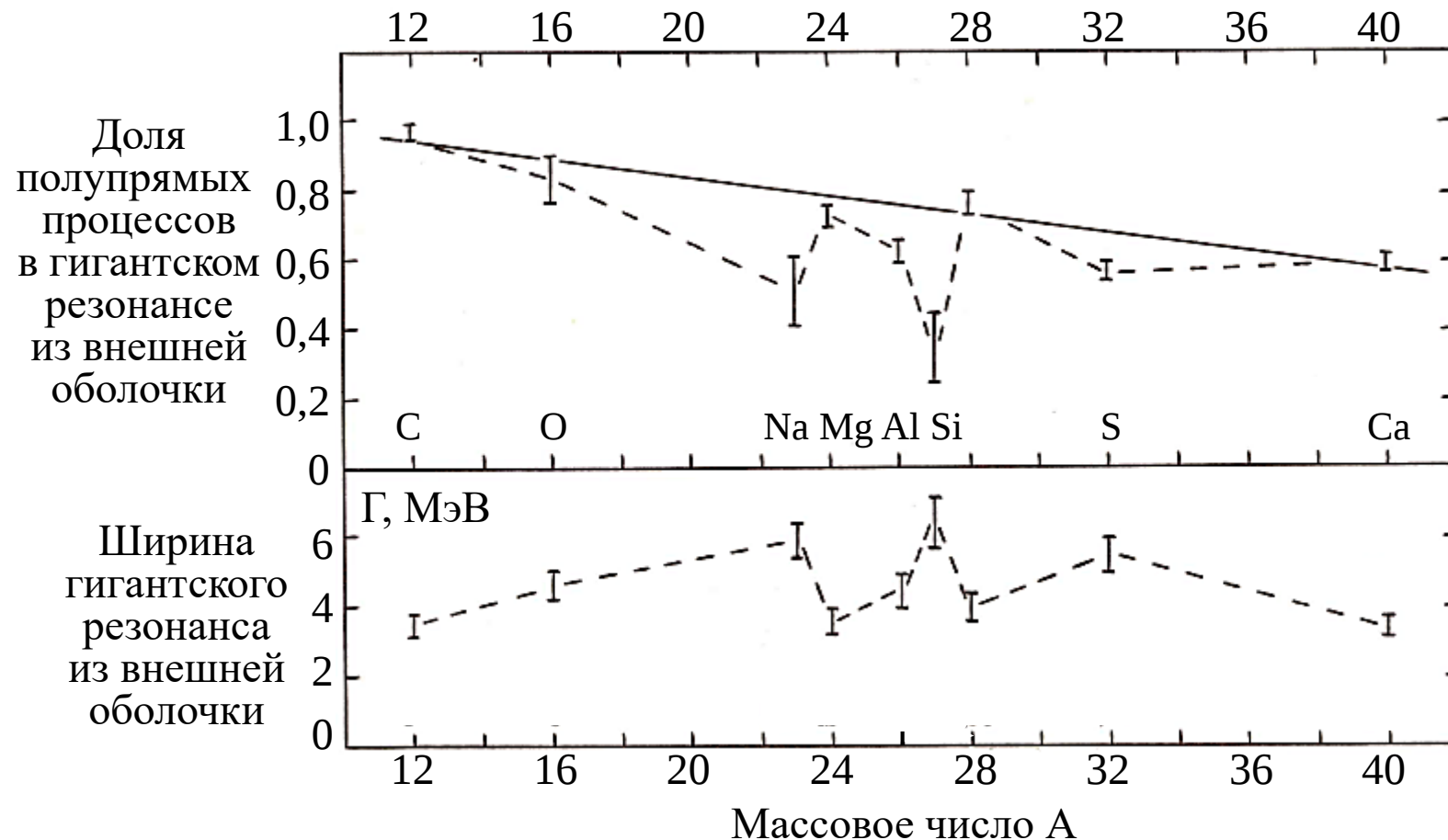


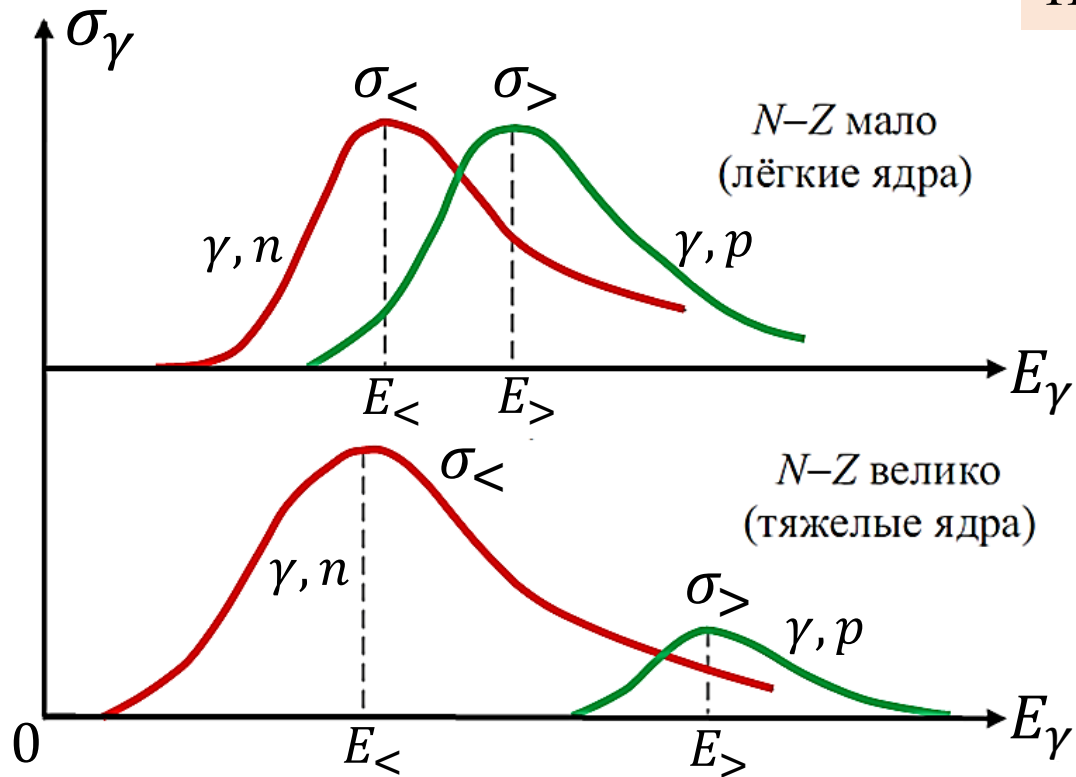
Парциальные сечения реакции $^{58}_{28}\text{Ni}(e, e'p)^{57}_{27}\text{Co}$, измеренные в Майнце (Германия) в кинематике, отвечающей Гигантскому Дипольному Резонансу. Указана дырочная природа заселяемых состояний по данным реакции $^{58}_{28}\text{Ni}(\gamma, p\gamma')^{57}_{27}\text{Co}$, исследованной в НИИЯФ МГУ. Красным цветом отмечены сечения E1-возбуждений из внешней оболочки (ветвь А гигантского резонанса), зелёным – из внутренней оболочки (ветвь Б гигантского резонанса). Отчётливо виден сдвиг к более высоким энергиям ветви Б относительно ветви А, т. е. наблюдается конфигурационное расщепление гигантского резонанса.

Фрагмент спектра фотонов распада конечных ядер ^{57}Co и ^{57}Ni , измеренного в НИИЯФ МГУ на тормозном пучке с верхней границей 32 МэВ и использованного для расшифровки данных реакции $^{58}_{28}\text{Ni}(e, e'p)^{57}_{27}\text{Co}$



Влияние доли полупрямых процессов на ширину гигантского резонанса



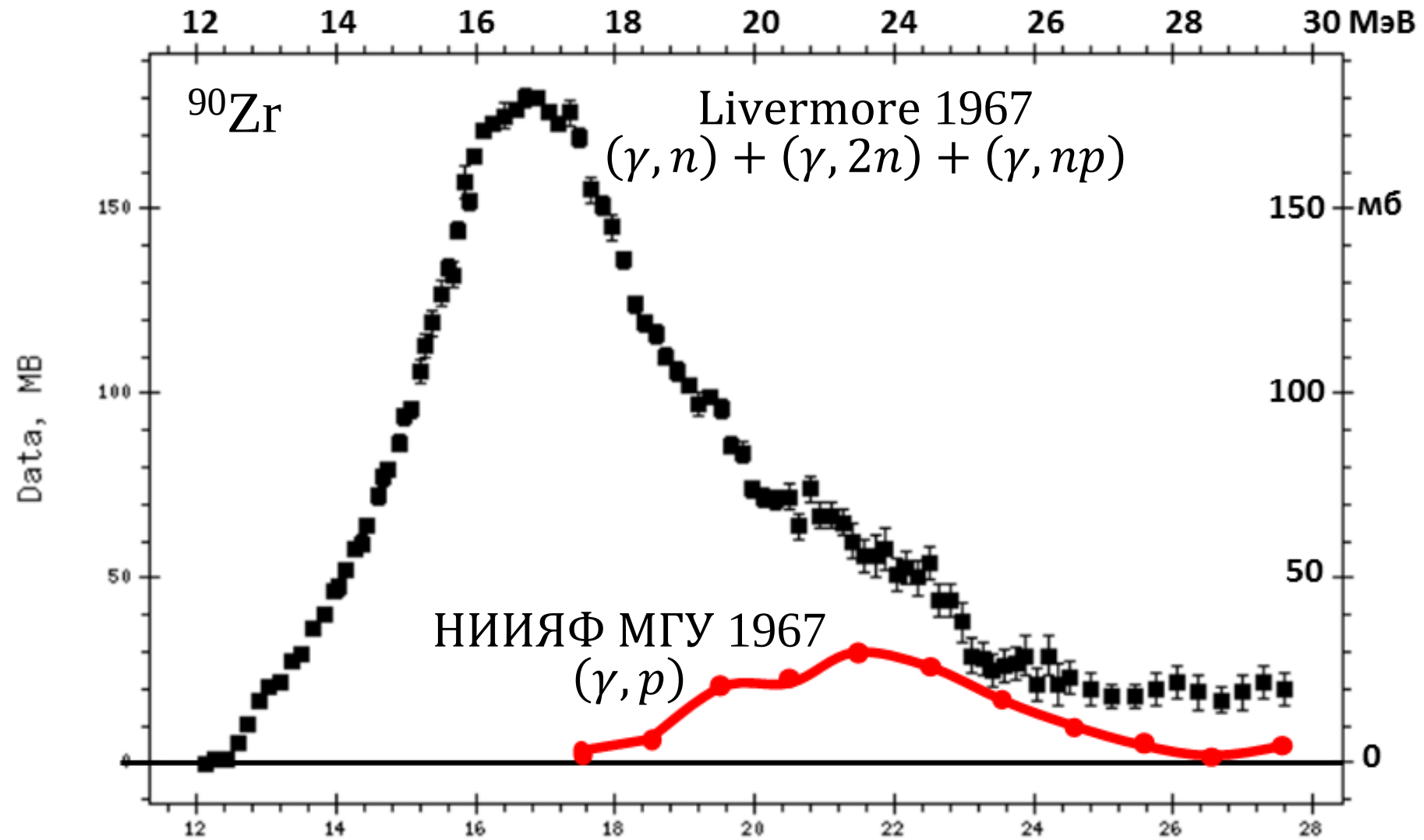


S.Fallieros, B. Goulard, R.H. Venter.
Phys. Lett., 19, 398 (1965).
R.Ö. Akyüz, S.Fallieros. Phys. Rev. Lett.,
27, 1016 (1971)

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

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

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

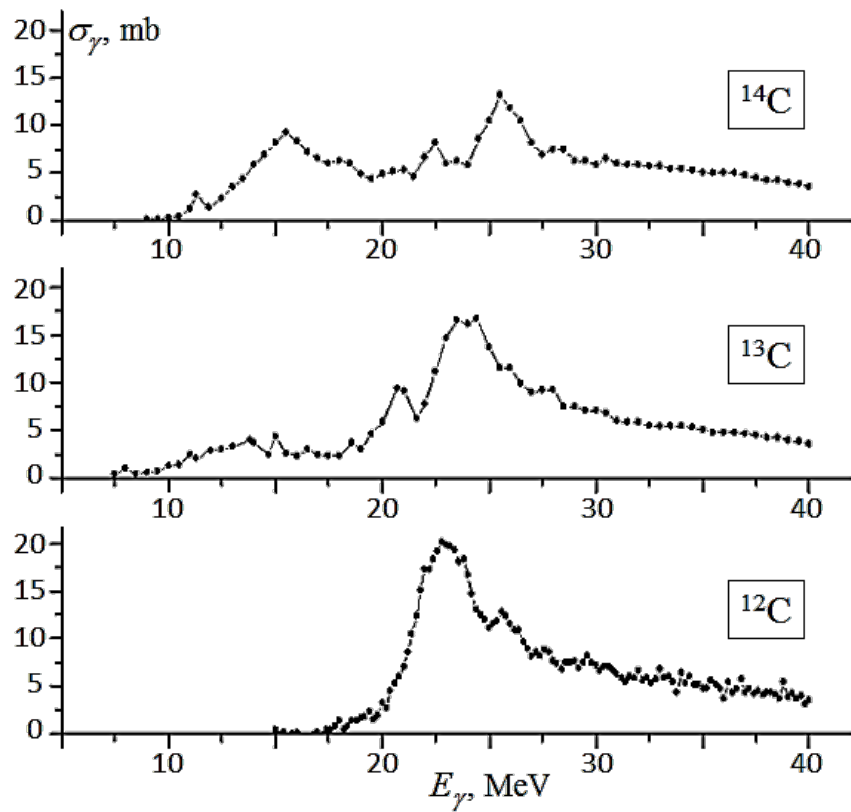


Проявление изоспинового расщепления гигантского дипольного резонанса можно увидеть, исследуя эффективные сечения фотопоглощения ядер-изотопов, т. е. в изотопических семействах

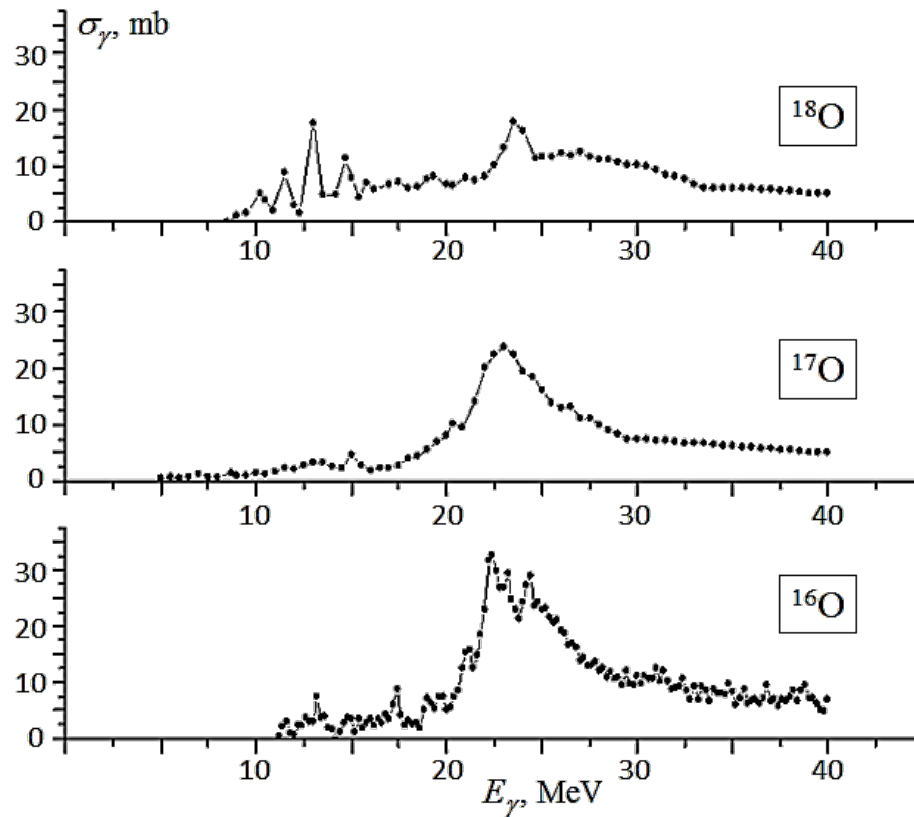
Изотопические семейства

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

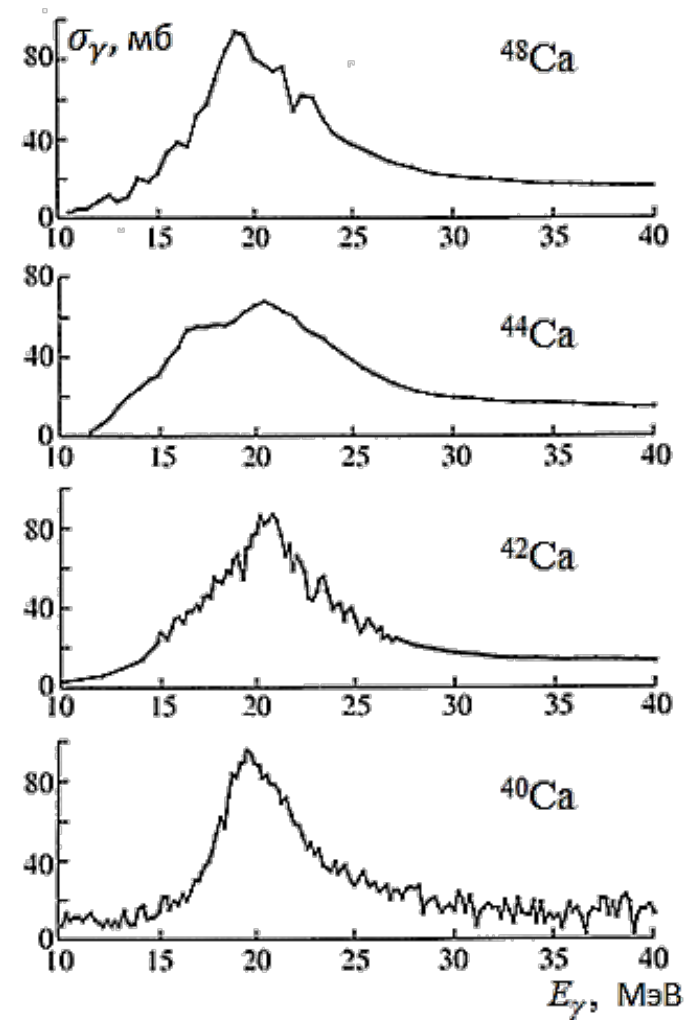
Изотопы углерода



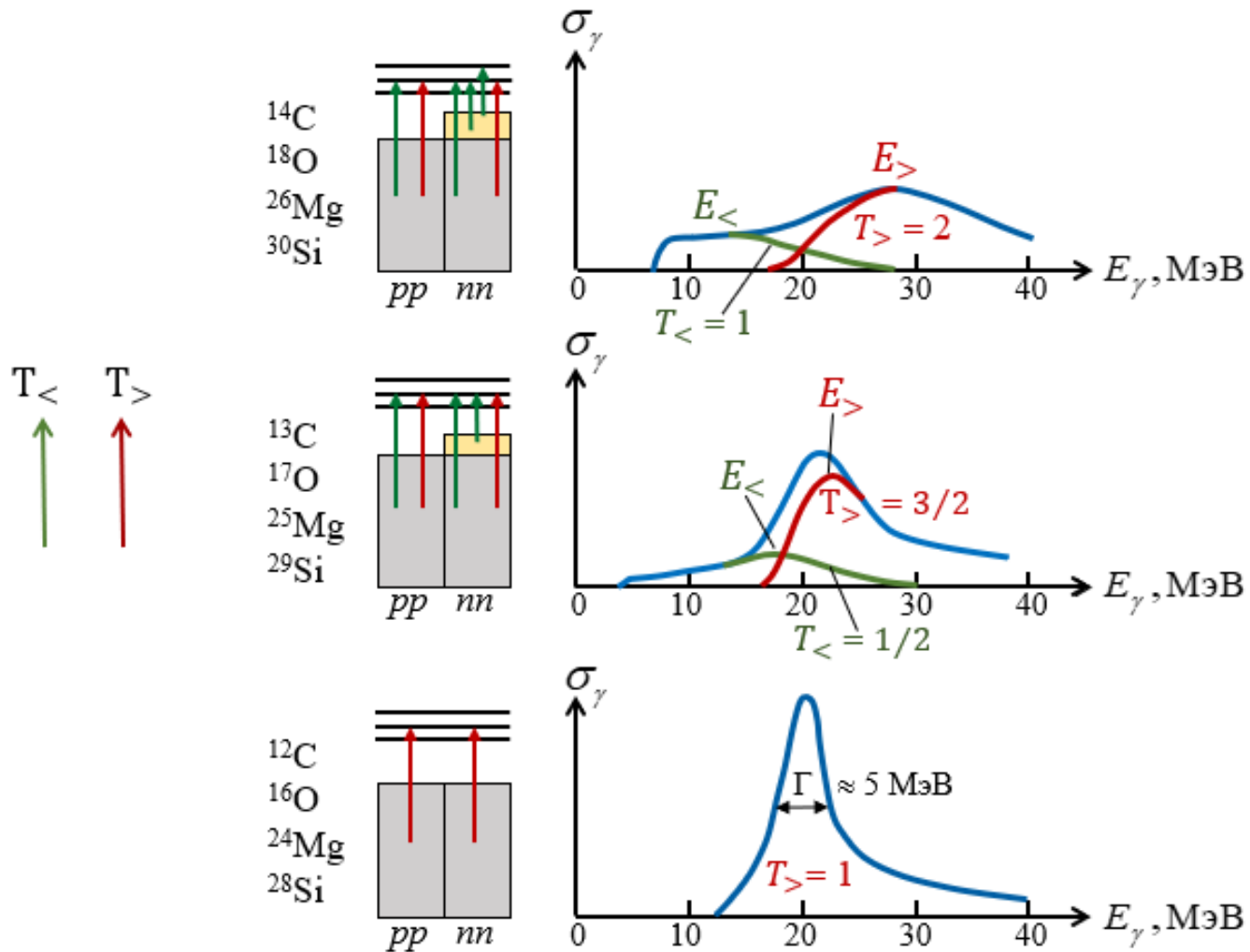
Изотопы кислорода



Изотопы кальция



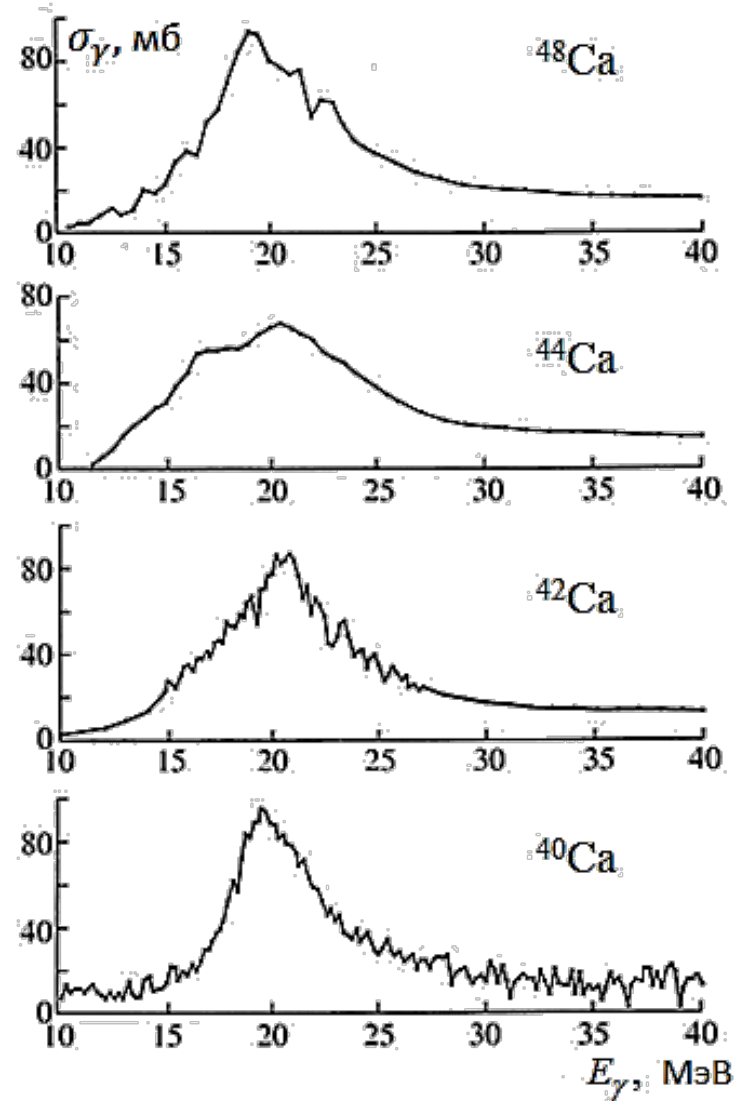
Изоспиновое расщепление гигантского резонанса
в триадах изотопов $Z = N$; $Z, N+1$; $Z, N+2$
($^{12,13,14}\text{C}$, $^{16,17,18}\text{O}$, $^{24,25,26}\text{Mg}$, $^{28,29,30}\text{Si}$)



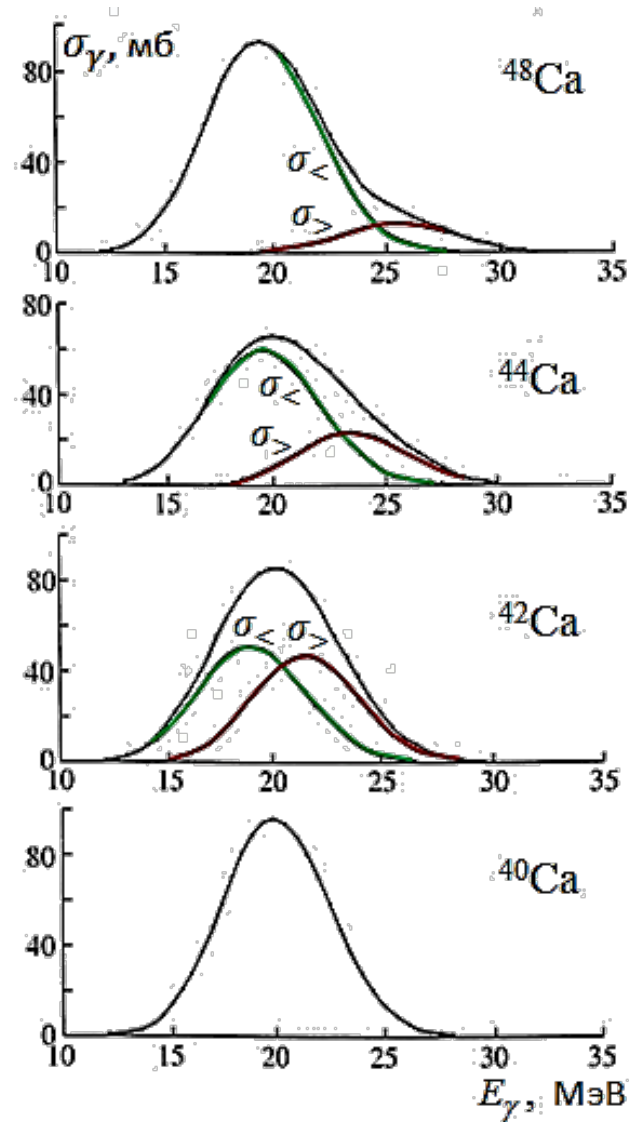
Изоспиновое Расщепление
гигантского резонанса
коррелирует
с конфигурационным

Изоспиновое расщепление ГДР изотопов кальция

Эксперимент



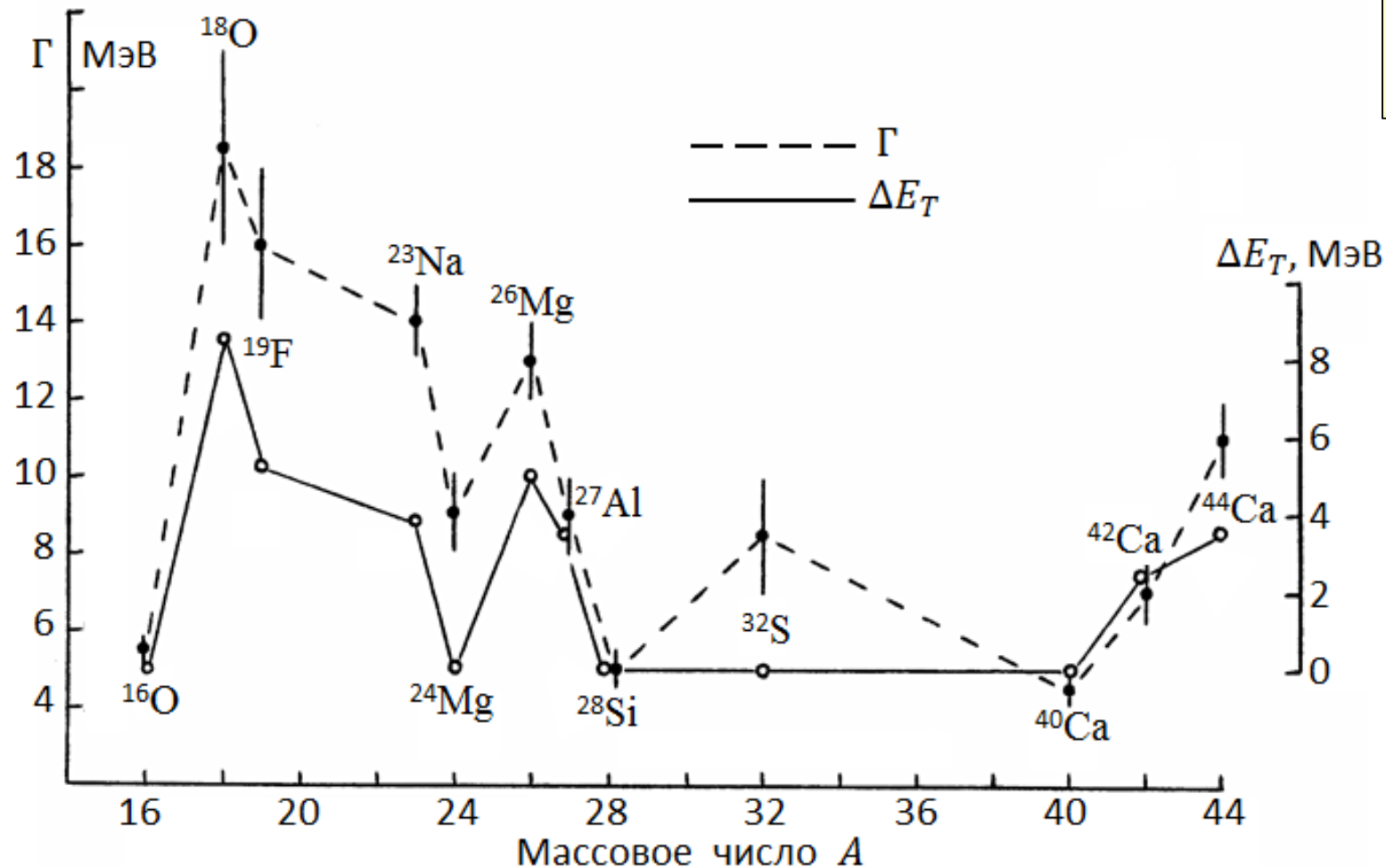
Модель



R.A. Eramzhyan, B.S. Ishkhanov, I.M. Kapitonov, V.G. Neudatchin.

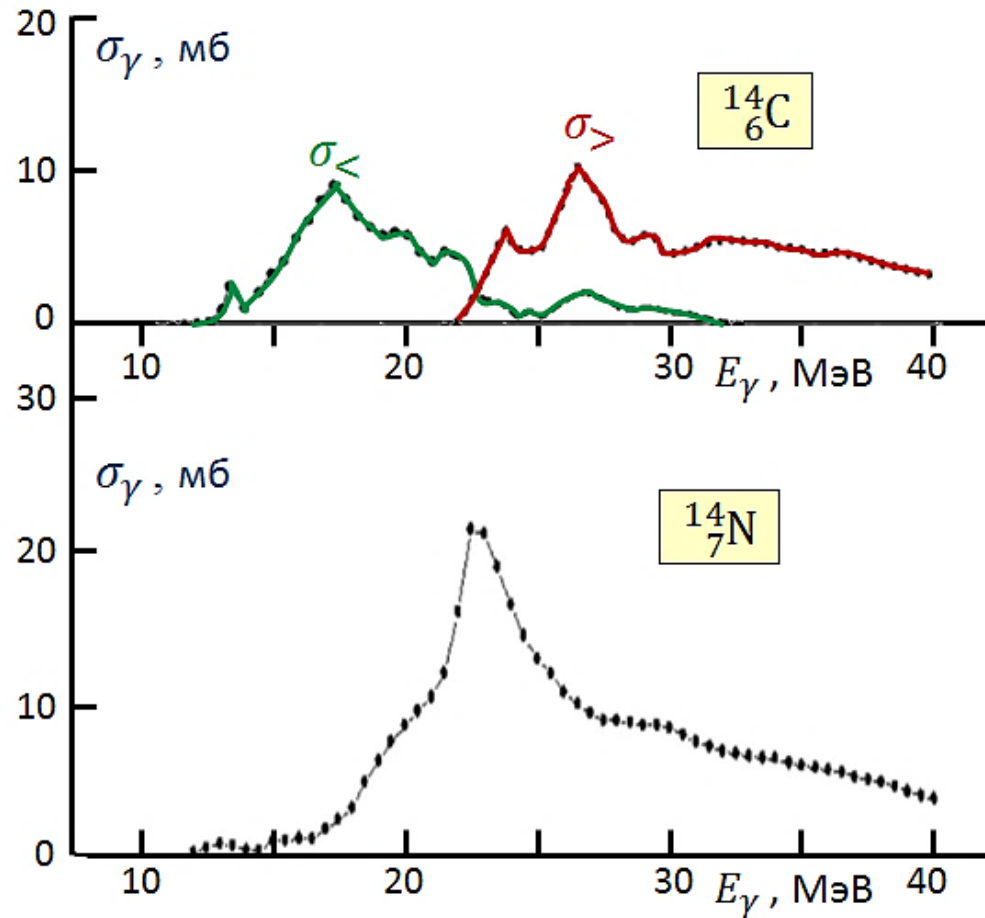
Physics Reports v. 136, numbers 4-6, p. 229-400 (1986)

Ширины Γ гигантского резонанса ядер $1d2s$ -оболочки
и величины ΔE_T его изоспинового расщепления



Изотопический эффект
в ширине гигантского резонанса
(установлен в НИИЯФ МГУ)

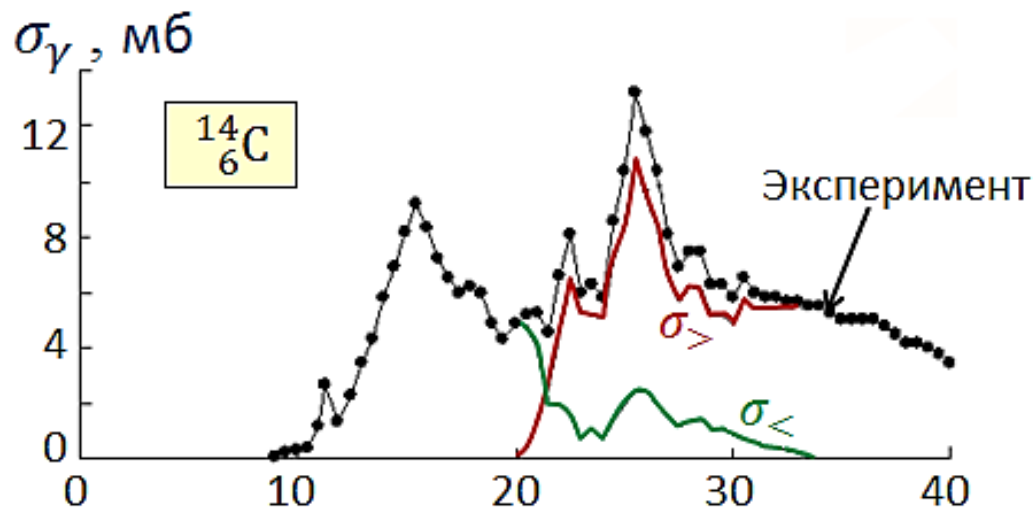
Экспериментальные данные, использованные в процедуре «выключения» изоспинового расщепления ГДР



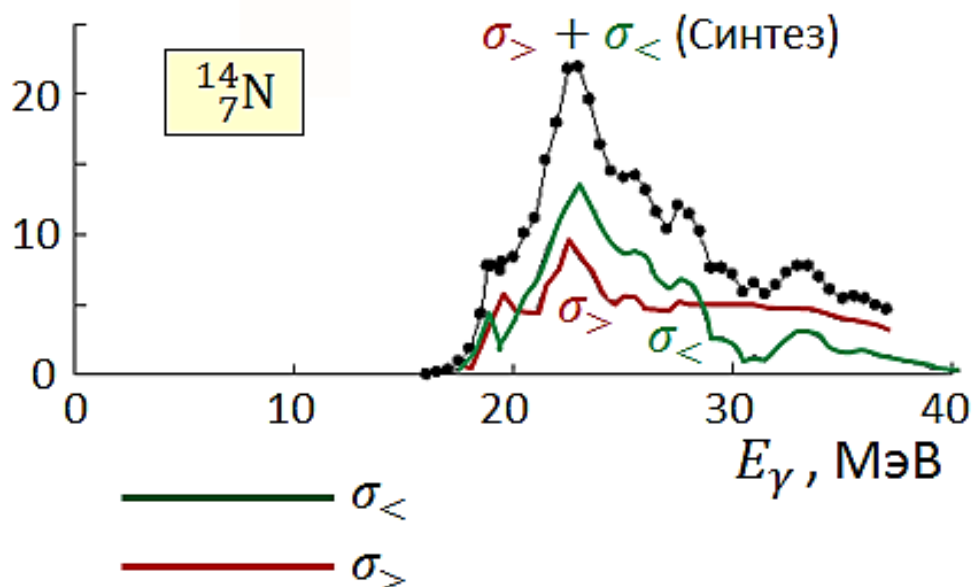
Экспериментальное сечение фотопоглощения для $^{14}_6\text{C}$ было разделено на основе анализа известных реакций (γ, p) , (γ, n) , (γ, n_0) , $(\gamma, 2n)$ на изоспиновые компоненты в работе K.G. McNeil, M.N. Thompson, A.D. Bates, J.W. Jury, B.L. Berman. Phys. Rev., C47, 1108 (1993).

Экспериментальное сечение фотопоглощения для $^{14}_7\text{N}$ получено в работах N. Bezic N., D. Brajnik, D. Jamnik, G. Kernel. Nucl. Phys. A, v. 128, p. 426 (1969) и E.G. Fuller. Physics Reports. v. 127, №3, p. 185 (1985).

Пересчет $^{14}_6\text{C} \rightarrow ^{14}_7\text{N}$



K.G. McNeil,
M.N. Thompson, A.D. Bates,
J.W. Jury, B.L. Berman.
Phys. Rev., C47, 1108 (1993).
(γ, p), (γ, n), (γ, n_0), ($\gamma, 2n$)



Учтено изменение масштаба
изоспиновых компонент сечений,
вызванное сдвигом энергий

$$\sigma(E_\gamma) = \frac{4\pi^2}{\hbar c} E_\gamma |f|\vec{D}|i|^2 \rho(E_f)$$

$\vec{D}$ – электрический дипольный
момент ядра,

$\rho(E_f)$ – плотность конечных
состояний

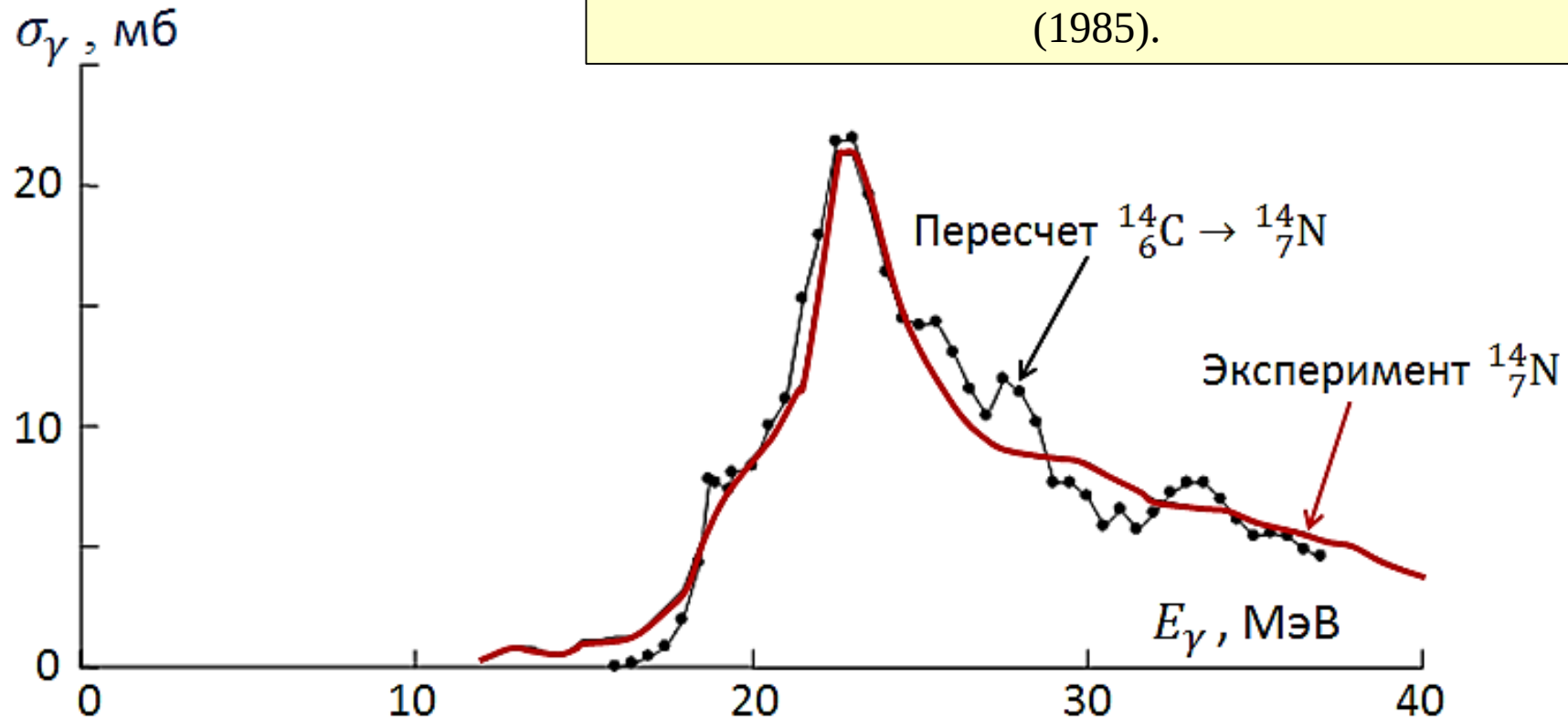
Сравнение экспериментального сечения фотопоглощения ядра $^{14}_7\text{N}$
с пересчитанным с помощью процедуры $^{14}_6\text{C} \rightarrow ^{14}_7\text{N}$

Эксперимент:

N. Bezic N., D. Brajnik, D. Jamnik, G. Kernel.

Nucl. Phys. A, v. 128, p. 426 (1969).

E.G. Fuller. Physics Reports. v. 127, №3, p. 185
(1985).

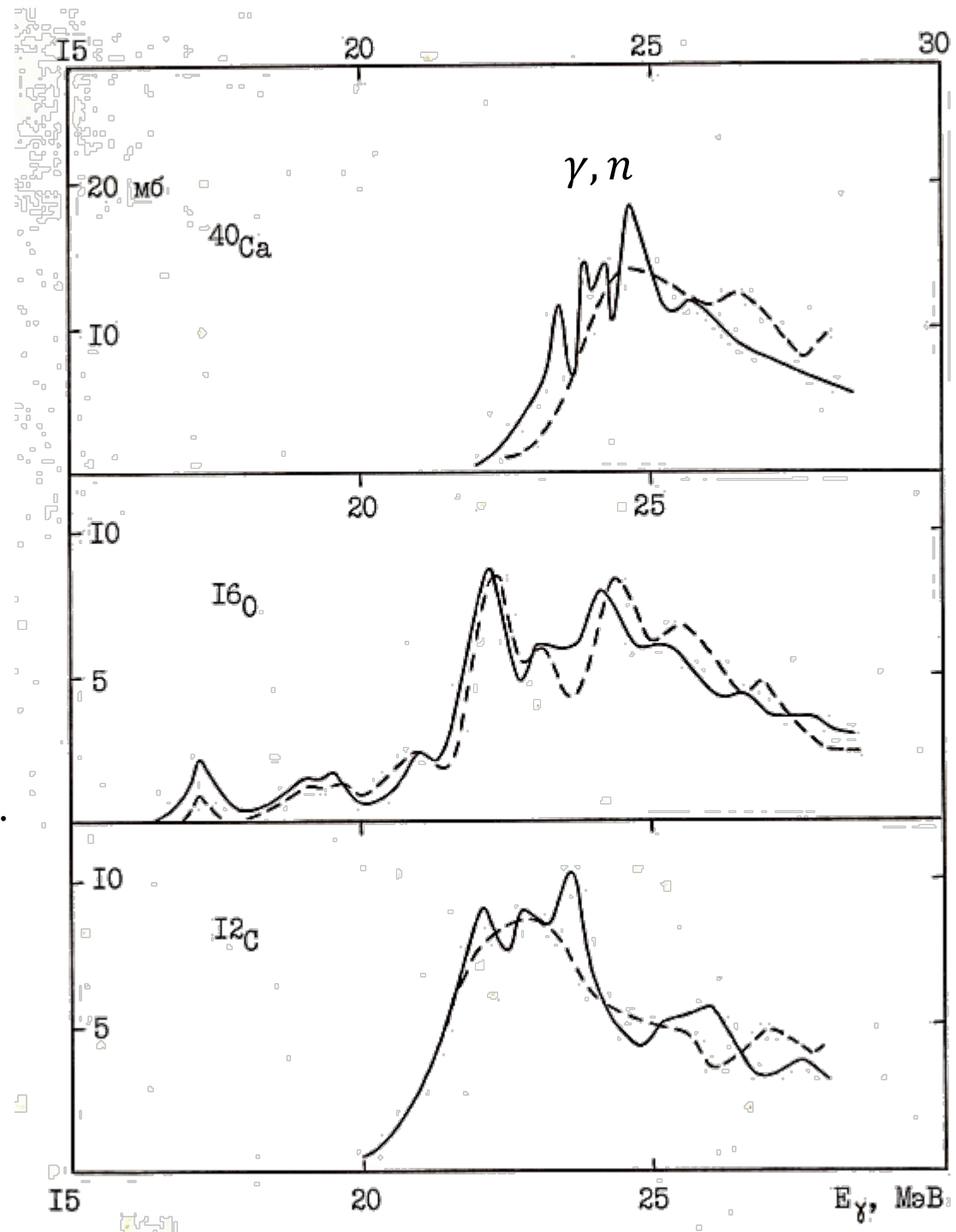


1983 НИИЯФ МГУ

Пересчёт из протонных экспериментальных сечений
в нейтронные при высокой чистоте по изоспину
состояний гигантского резонанса
и сравнение с ними в абсолютных единицах.

Сплошные линии – γ, n -эксперимент
Пунктирные – пересчёт из γ, p -эксперимента

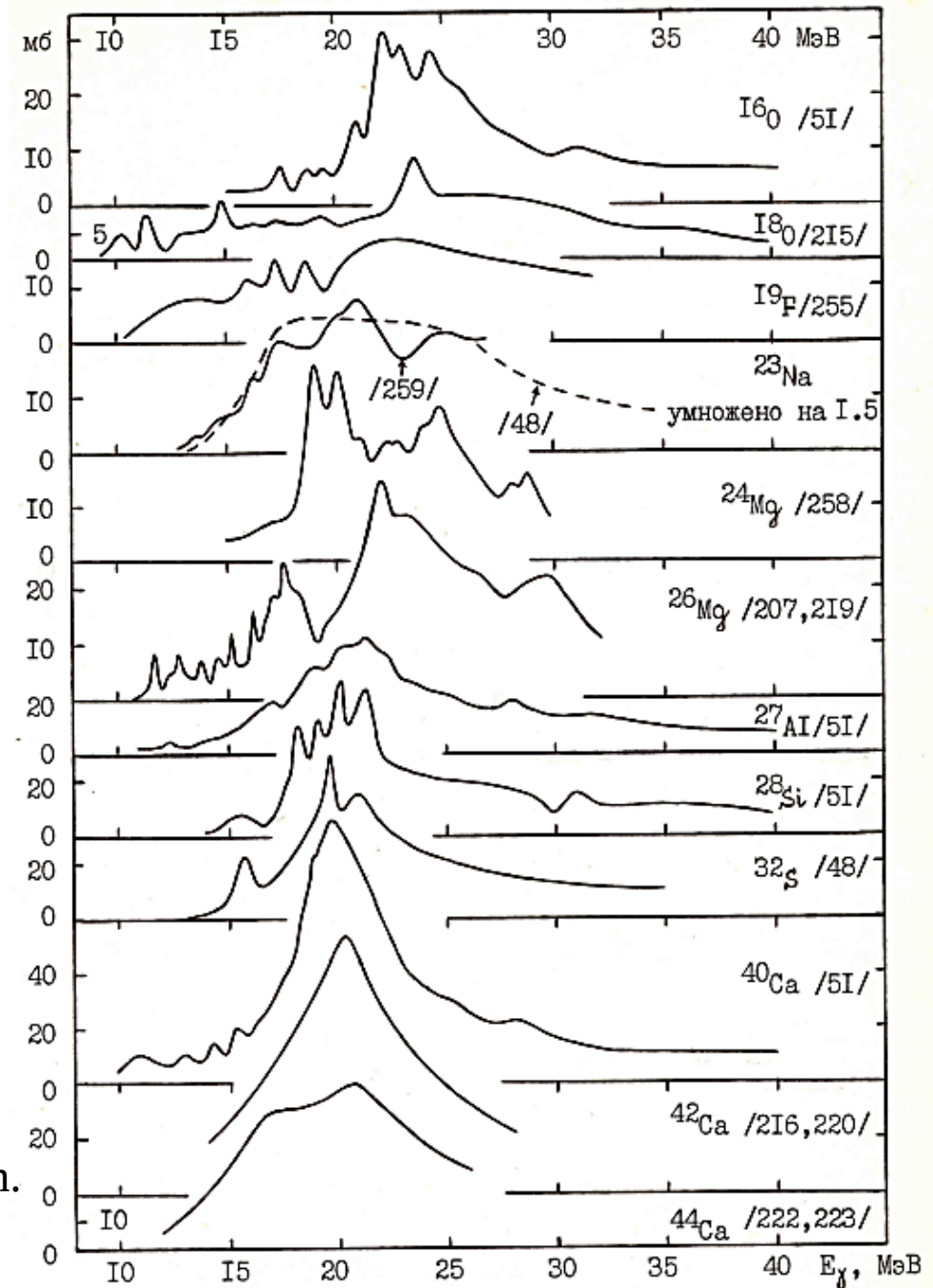
R.A. Eramzhyan, B.S. Ishkhanov, I.M. Kapitonov, V.G. Neudatchin.
Physics Reports v. 136, numbers 4-6, p. 229-400 (1986)



Проблема структуры и ширины ГДР

Показаны **экспериментальные сечения фотопоглощения ядер $1d2s$ -оболочки** (от ^{16}O до ^{44}Ca). Видно что ширина ГДР (область разброса по энергии основной доли сечения) меняется от 5 до 20 МэВ и нет никакой определённой тенденции в изменении этой величины с ростом A . Более того, изменение числа нуклонов в ядре на 1-2 может привести к кардинальному (в разы) изменению ширины сечения. Долгое время не удавалось понять, с чем связан такой большой разброс в ширине для ядер, имеющих близкие A и чем в этом плане отличаются легкие средние и тяжёлые ядра. Эта проблема тесно связана и с той структурой, которая наблюдается в фотоядерных сечениях.

R.A. Eramzhyan, B.S. Ishkhanov, I.M. Kapitonov, V.G. Neudatchin.
Physics Reports v. 136, numbers 4-6, p. 229-400 (1986)



Ширина гигантского резонанса 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.

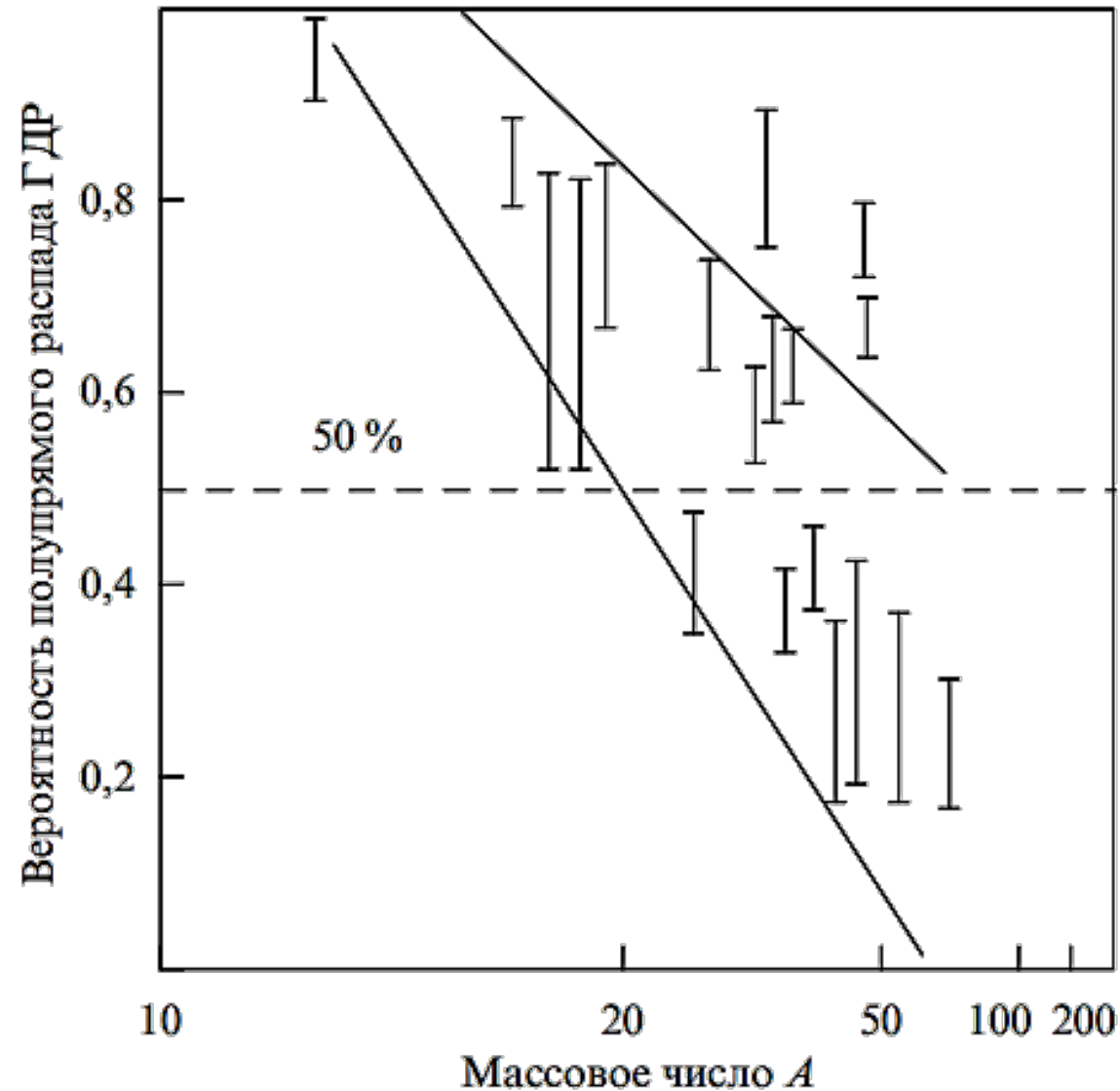
Что влияет на ширину гигантского резонанса?

1. Ширина полупрямого распада входных ($1p1h$) состояний с вылетом нуклона в непрерывный спектр.
2. Ширина разброса входных состояний.
3. Ширина распада входных состояний по состояниям более сложной природы ($2p2h$, $3p3h$, ...).

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).

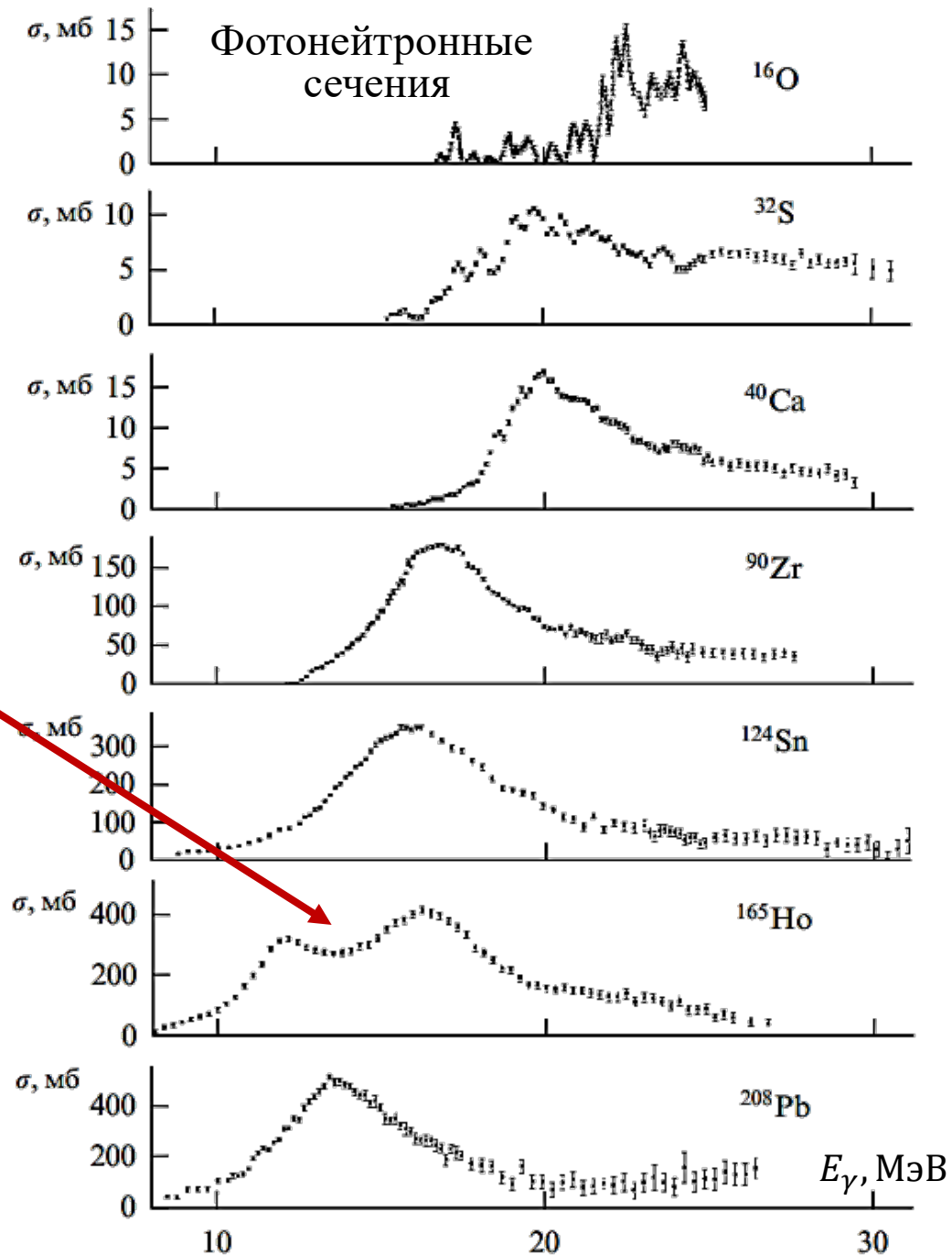
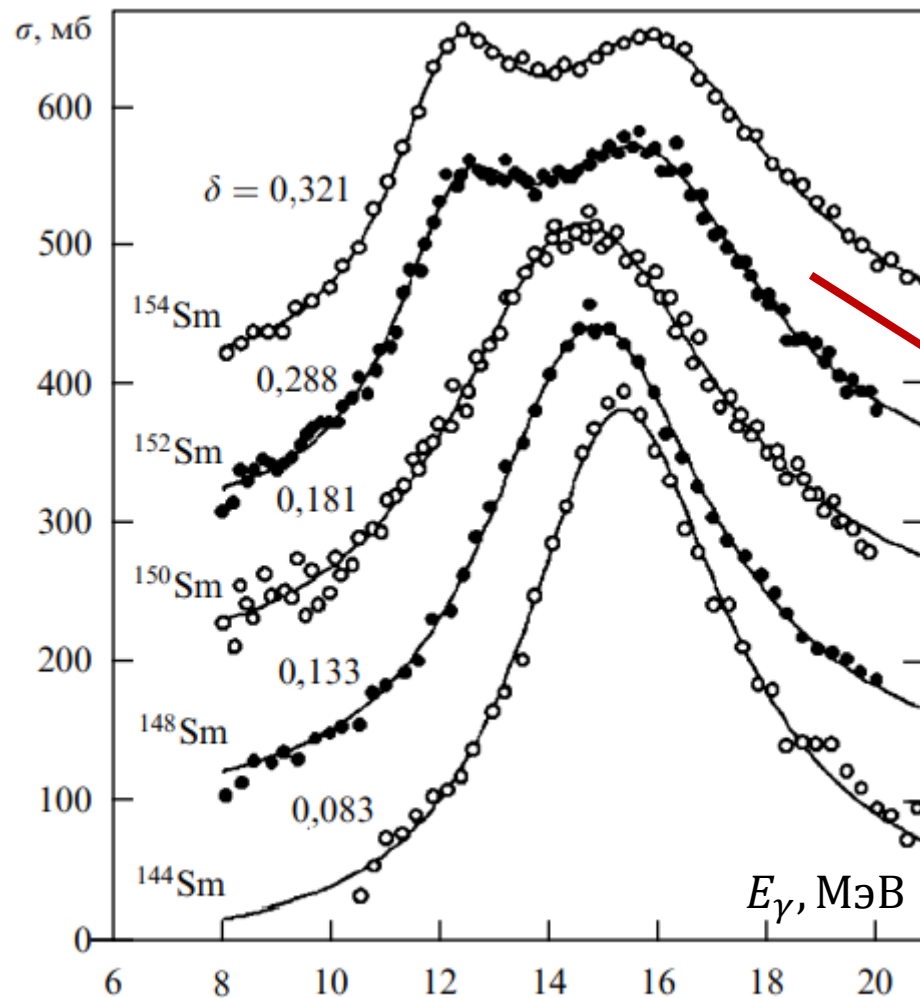
Вероятность полупрямого распада гигантского резонанса
в зависимости от массового числа A



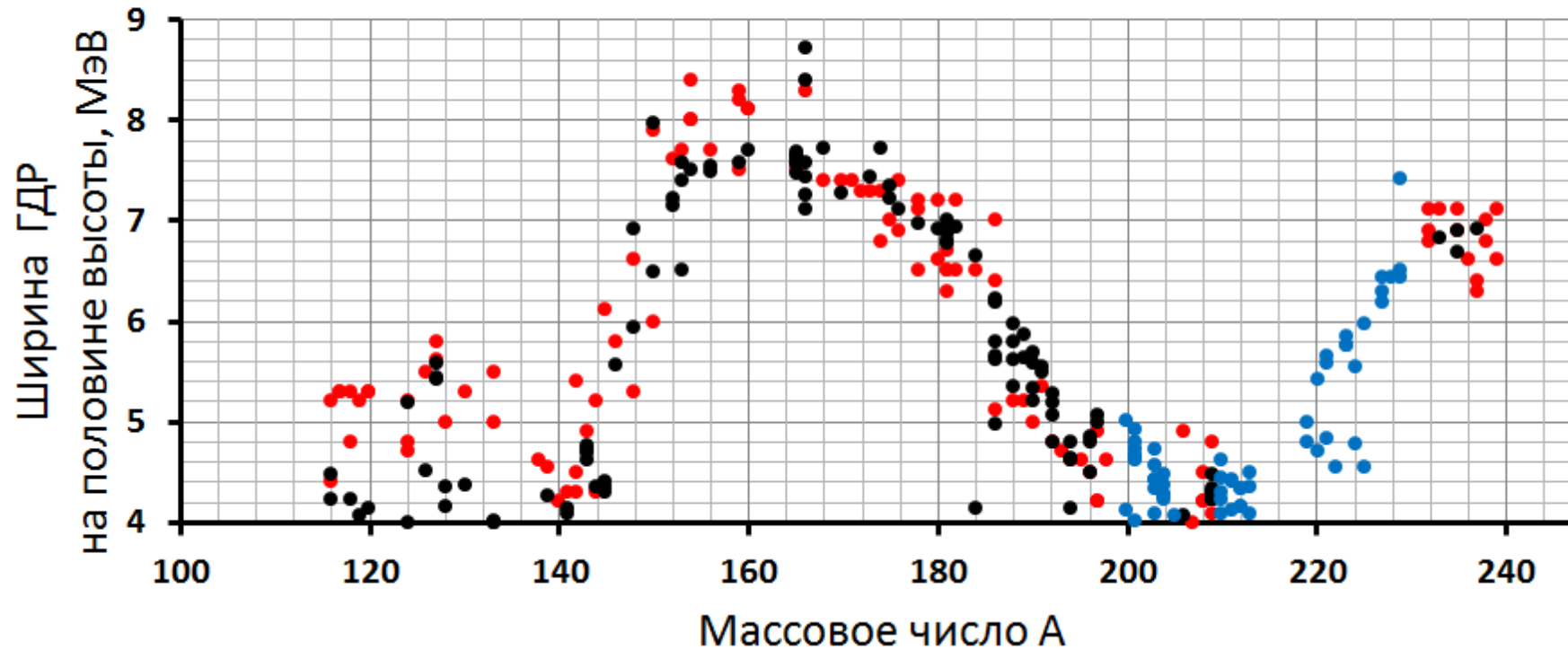
Полупрямой распад
важен для легких ядер

Эффект Даноса-Окамото

Фотонейтронные сечения изотопов самария
Carlos et al. Nucl. Phys. A225, 171 (1974)



Ширины ГДР ядер с $A = 116 - 239$



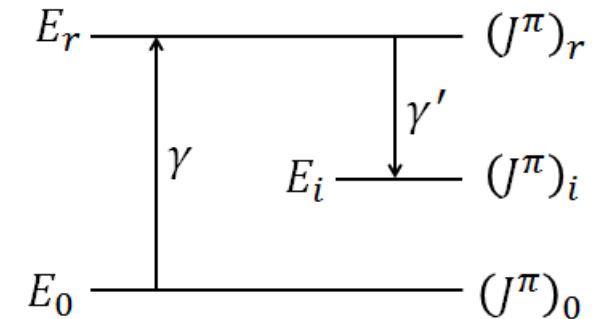
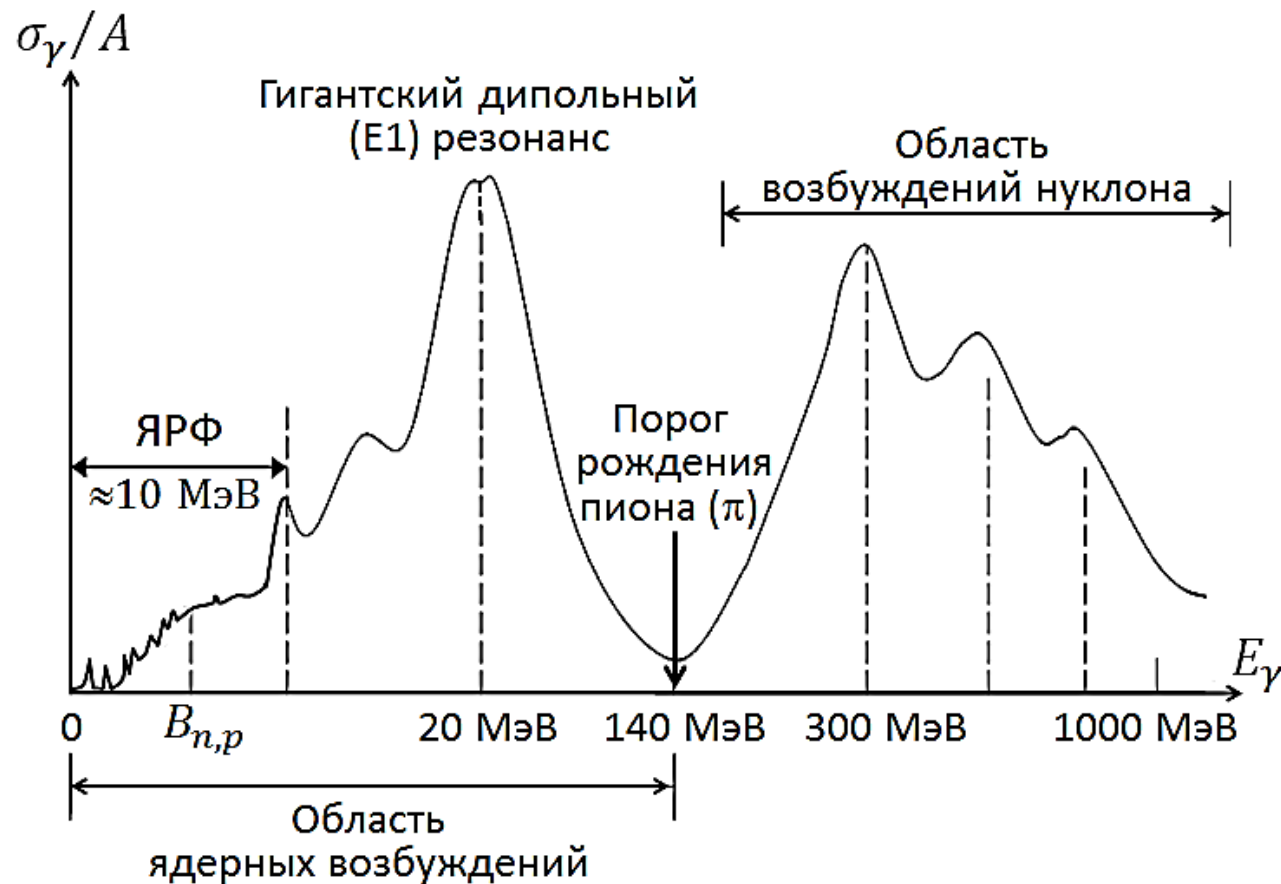
- ● ширины фотоядерных сечений,
- ширины из параметров деформации

Ширины ГДР рассчитывались из параметров деформации δ
с помощью соотношения

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

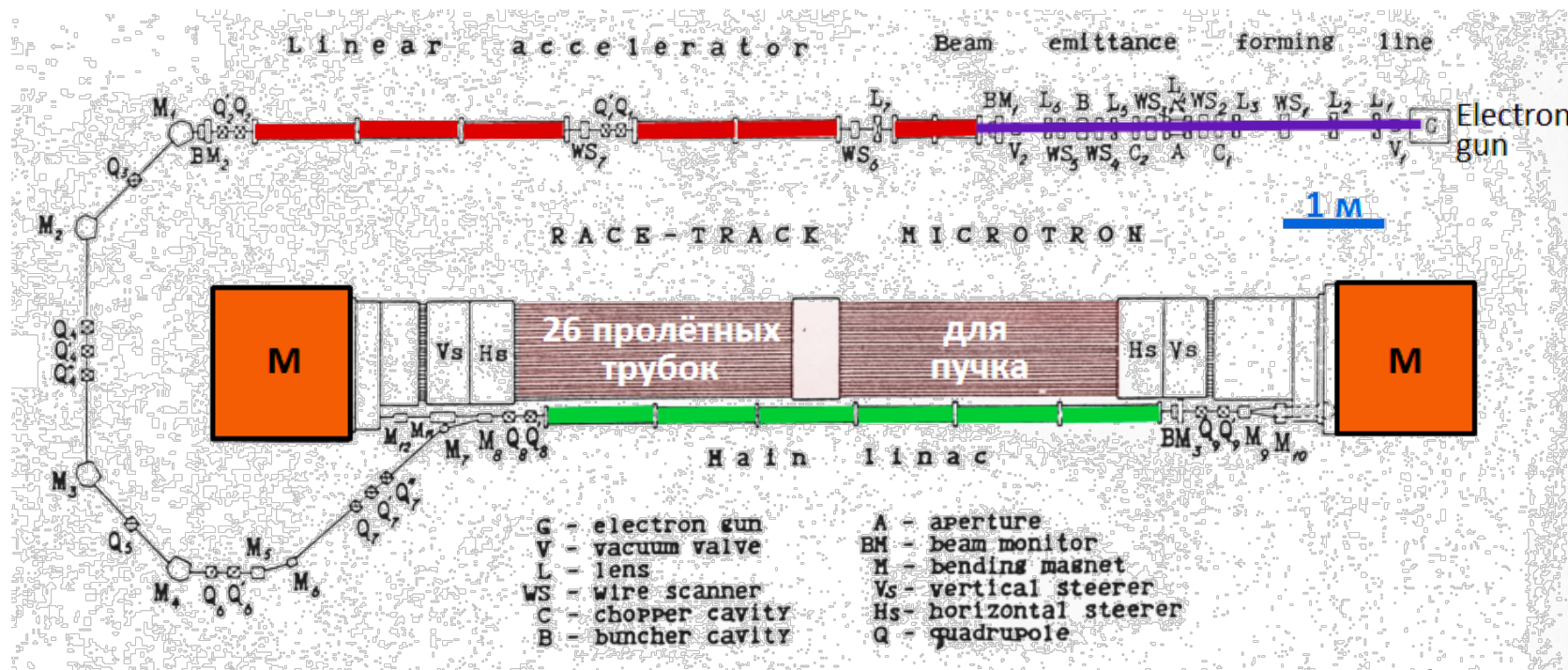
1. Минимальная (так называемая «магическая») ширина ГДР равна **4 – 5 МэВ** и характерна для сферических ядер с заполненными оболочками.
2. Главными факторами увеличения ширины ГДР по сравнению с «магической» являются:
 - у лёгких ядер (**$A < 50$**) – конфигурационное и изоспиновое расщепление ГДР (**до 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 их полупрямым распадом, в тяжёлых ядрах – преимущественно шириной распада $1p1h$ - состояний по состояниям более сложной природы ($2p2h$, $3p3h$, ...).



Определяемые характеристики:

- энергия возбуждения состояния (резонанса) E_r ,
- его спин J ,
- его чётность π ,
- ширина распада в основное состояние Γ_0 ,
- ширины распадов в возбуждённые состояния Γ_i ,
- приведённые вероятности переходов $B(\pi, J)$.



Характеристики ускорителя-инжектора электронов непрерывного действия НИИЯФ МГУ

Максимальная энергия электронов	6,6 МэВ
Фактор заполнения рабочего цикла, D	100%
Относительный энергетический разброс	$\pm 3 \cdot 10^{-3}$
Фазовая длина электронных сгустков (банчей)	$6^\circ \pm 2^\circ$
Частота следования банчей	2450 МГц
Максимальный средний ток	1 мА
Нормализованный поперечный эмиттанс	$< 5 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$

План-схема Moscow CW RTM. Красным выделен ускоритель-инжектор, зелёным – главный ускоритель, фиолетовым – линия формирования эмиттанса пучка, оранжевым – поворотные магниты.

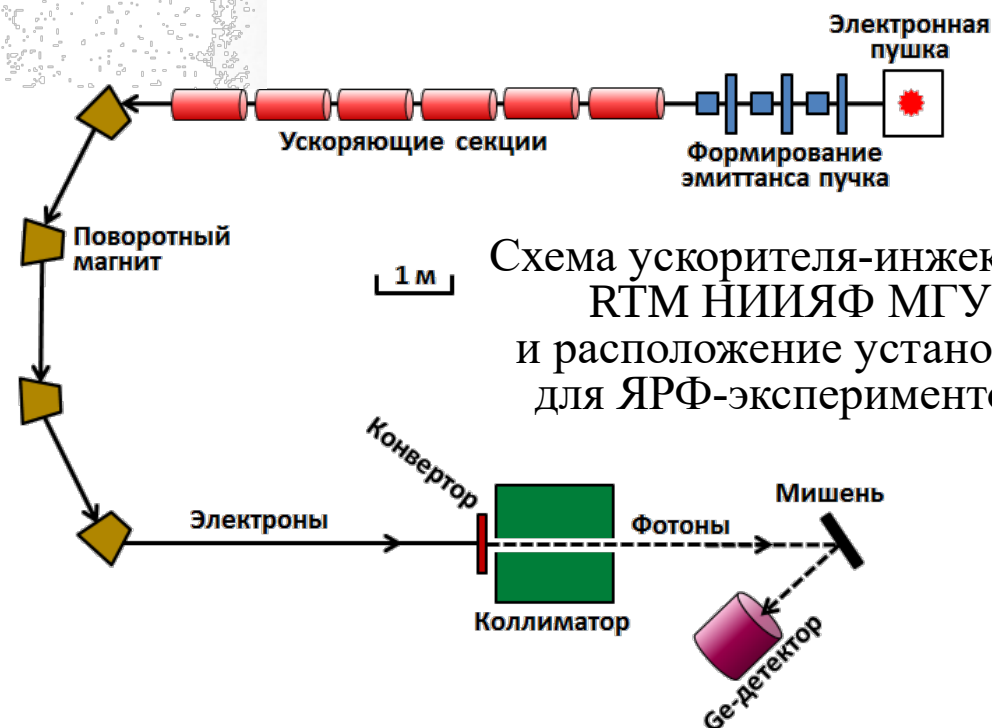
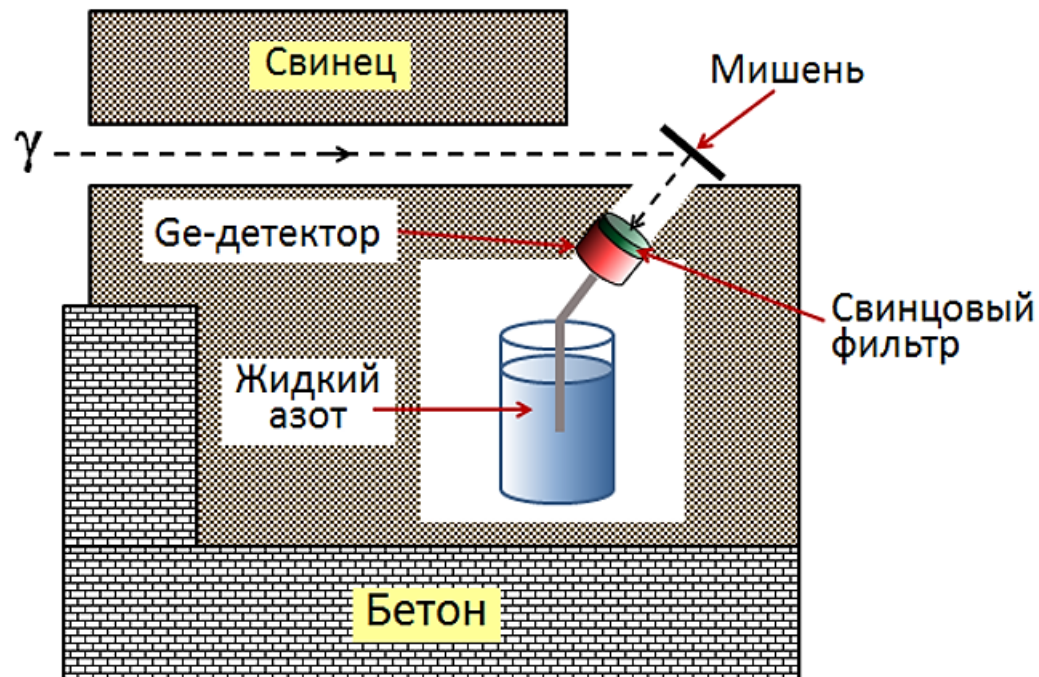
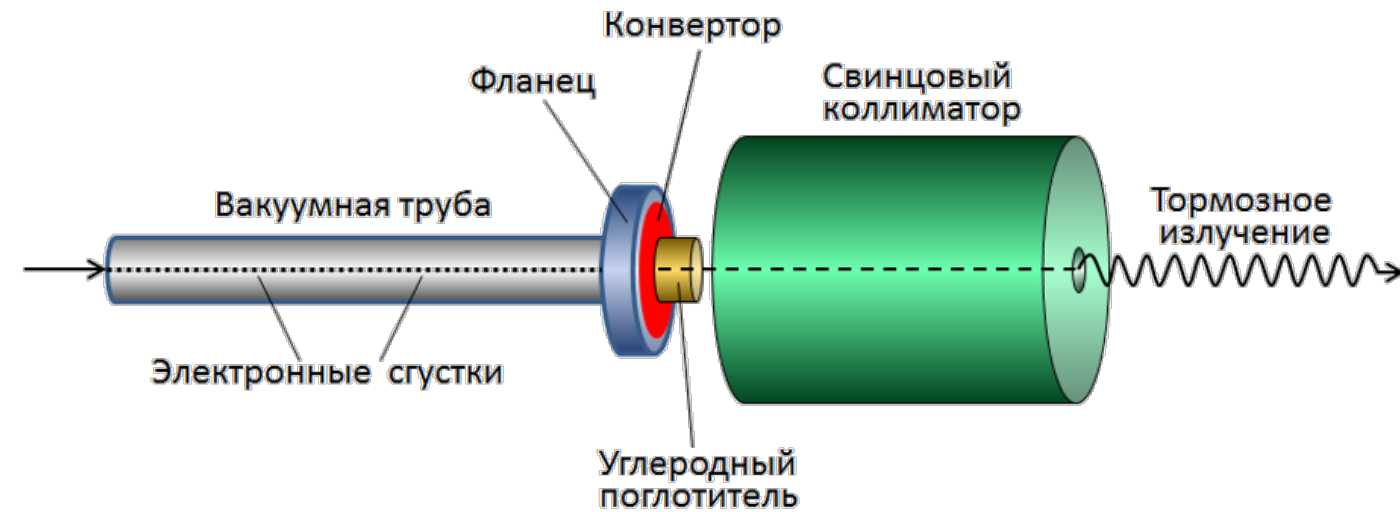
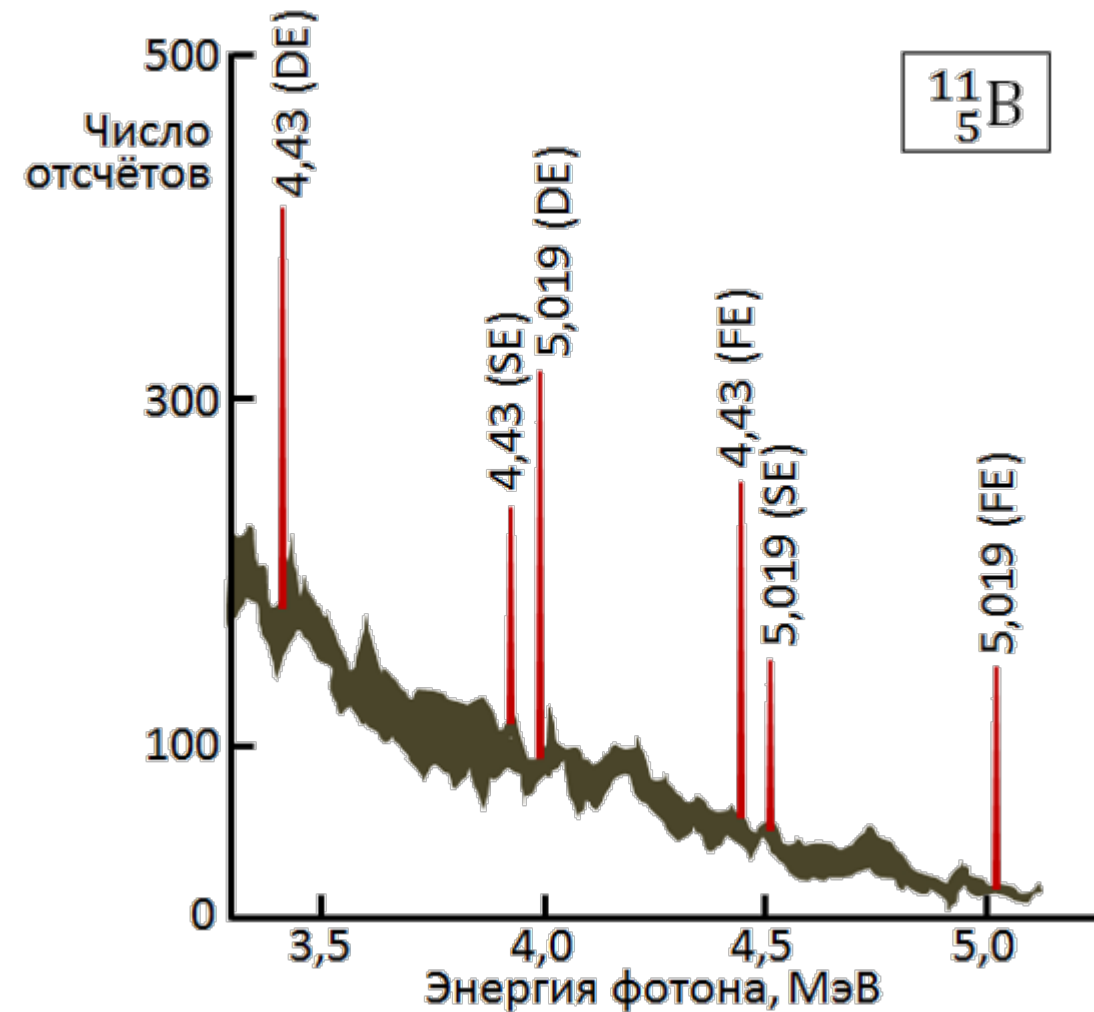


Схема ускорителя-инжектора RTM НИИЯФ МГУ и расположение установки для ЯРФ-экспериментов.

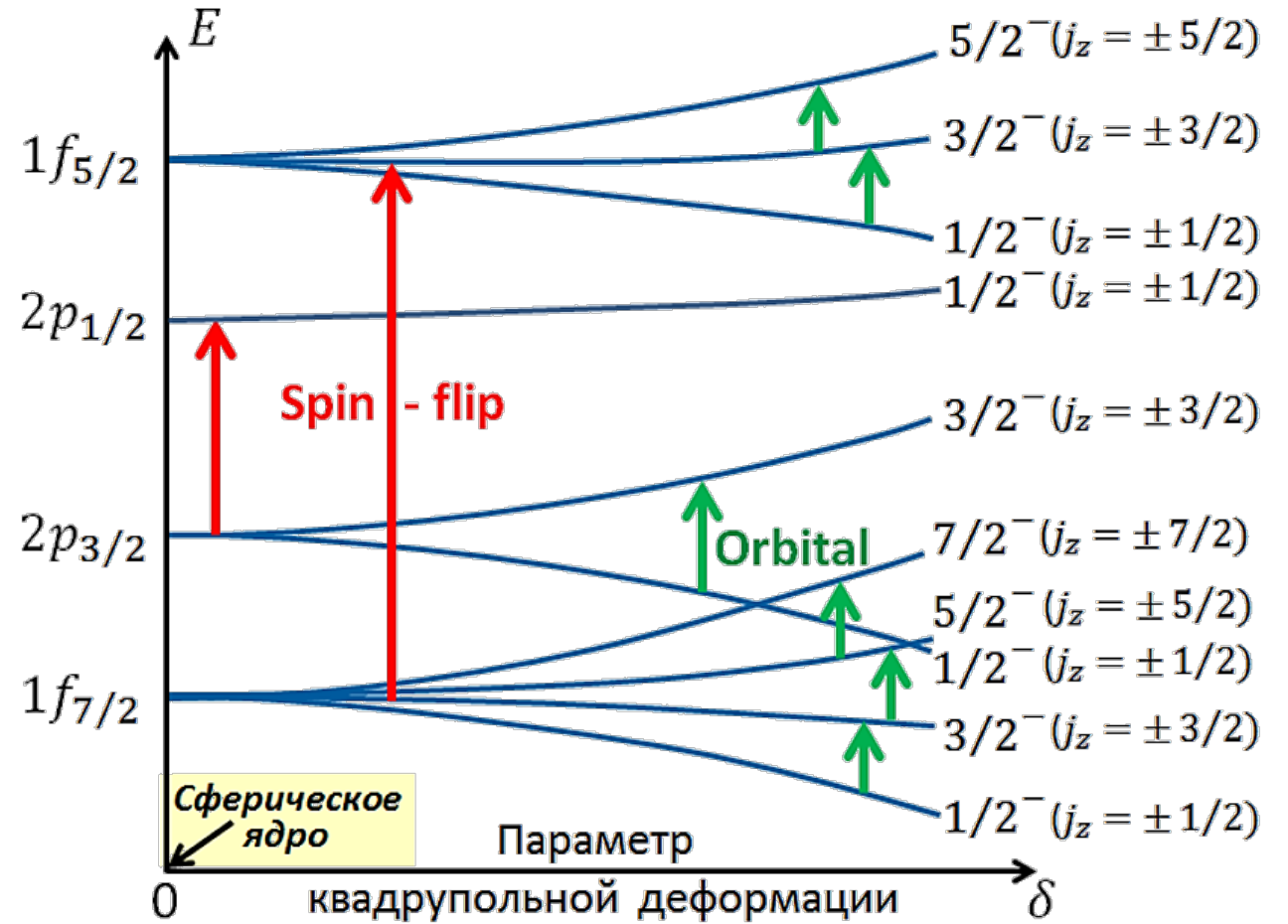
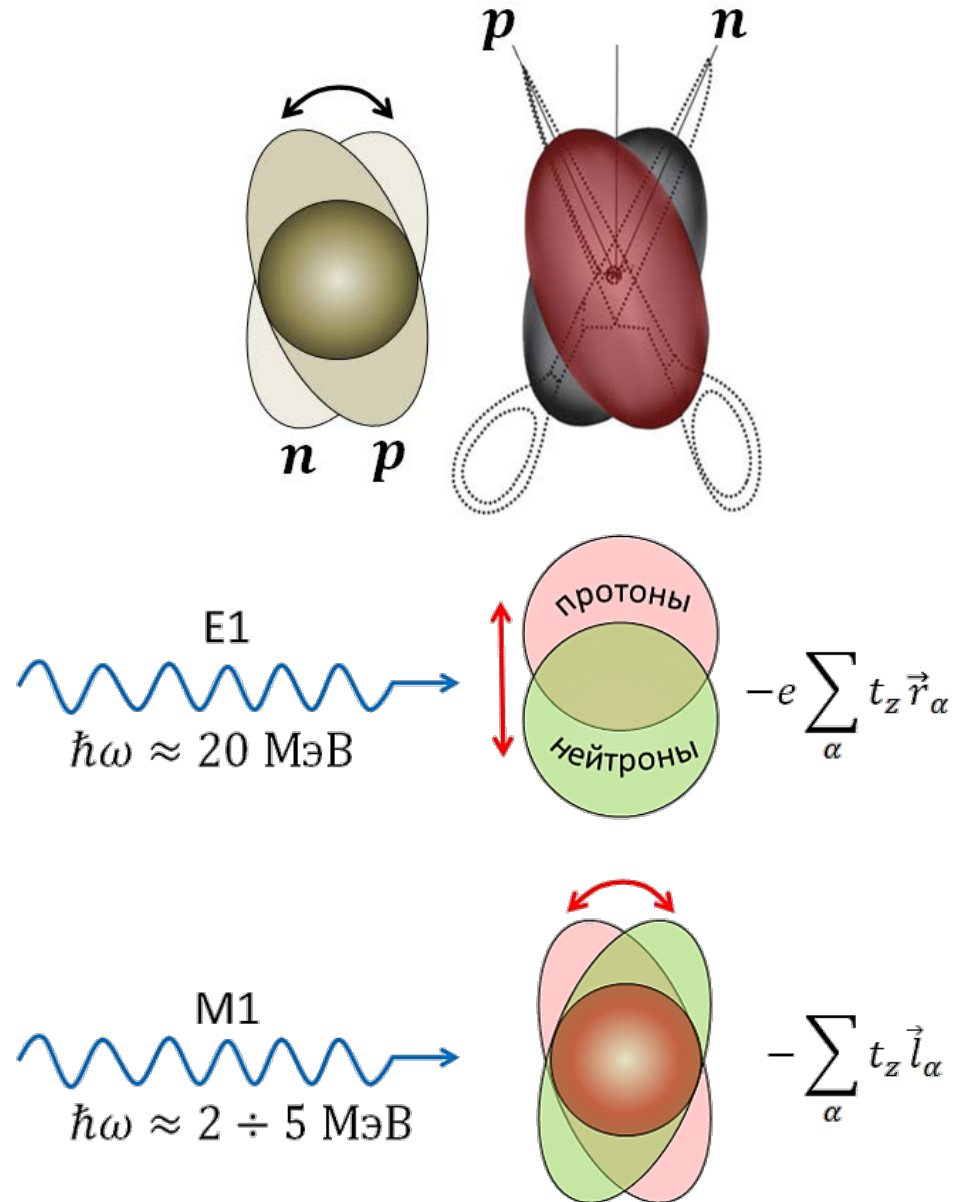


Установка для регистрации резонансно рассеянных Фотонов Ge-детектором.

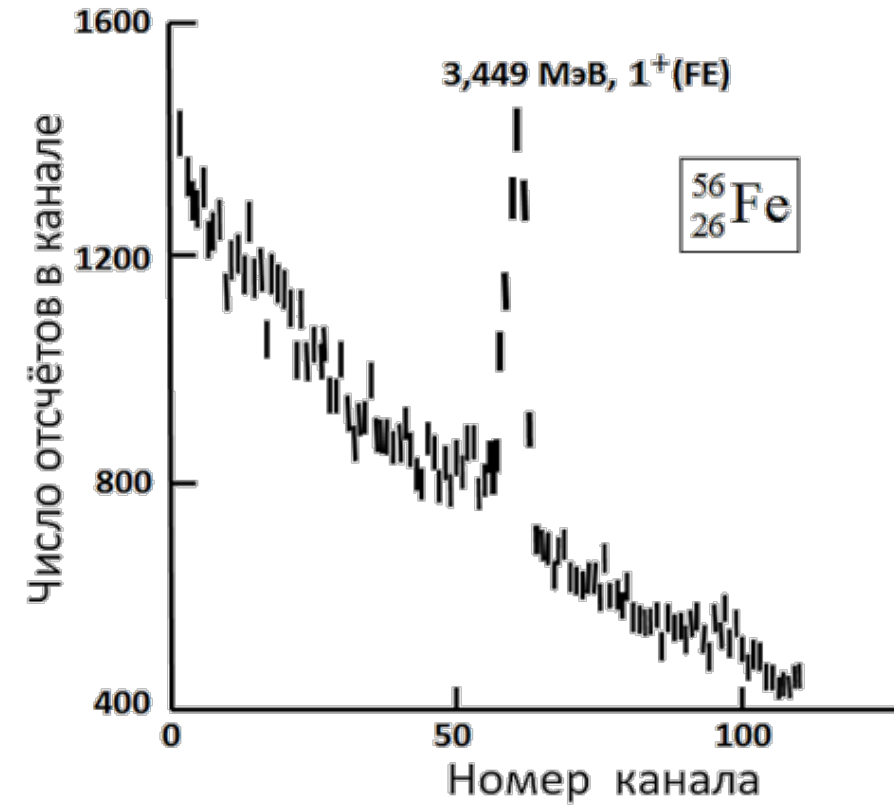
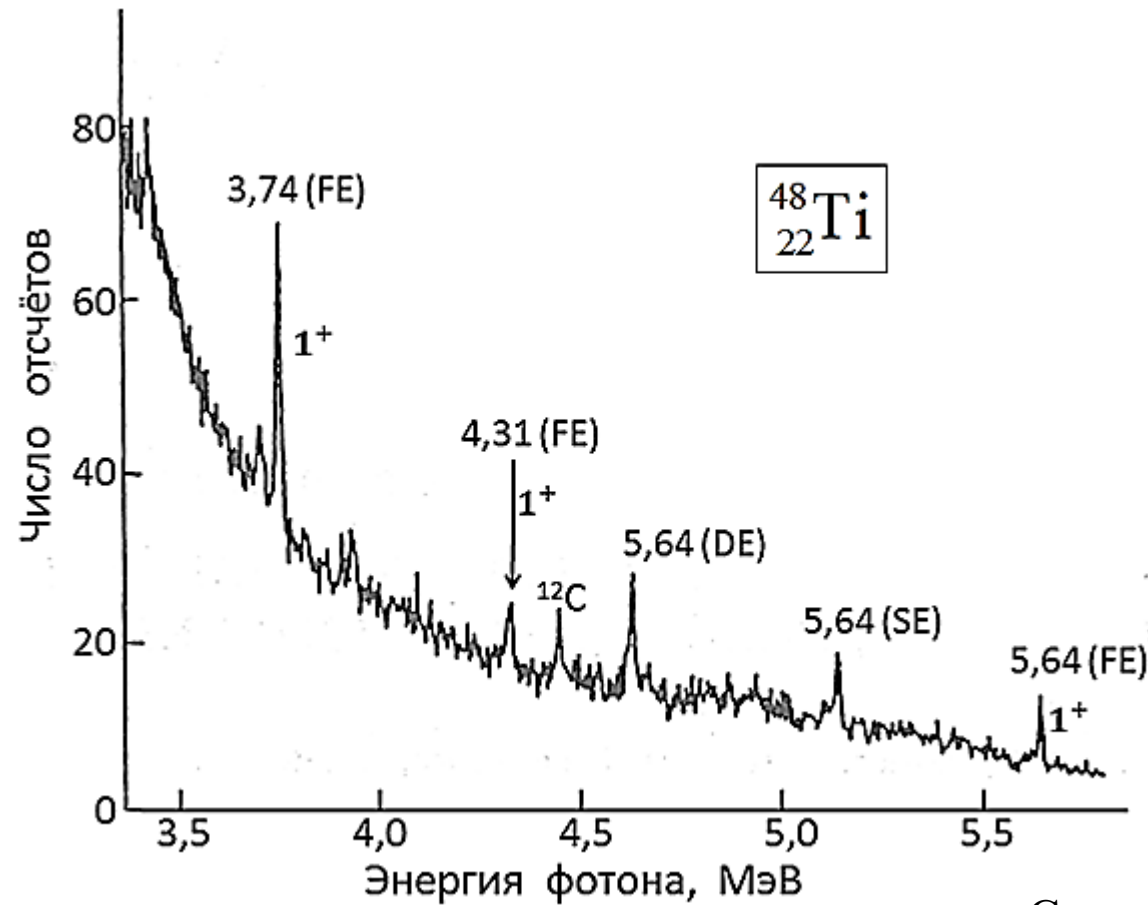


Спектр фотонов, полученный на ЯРФ-установке НИИЯФ МГУ от мишени $^{11}_5\text{B}$. Использовался Ge(НР)-детектор с относительной эффективностью 10%. Указаны энергии γ -линий в МэВ.

Исследование орбитальных (ножничных) M1-переходов (угловых дипольных колебаний) в ядрах $1f2p$ -оболочки



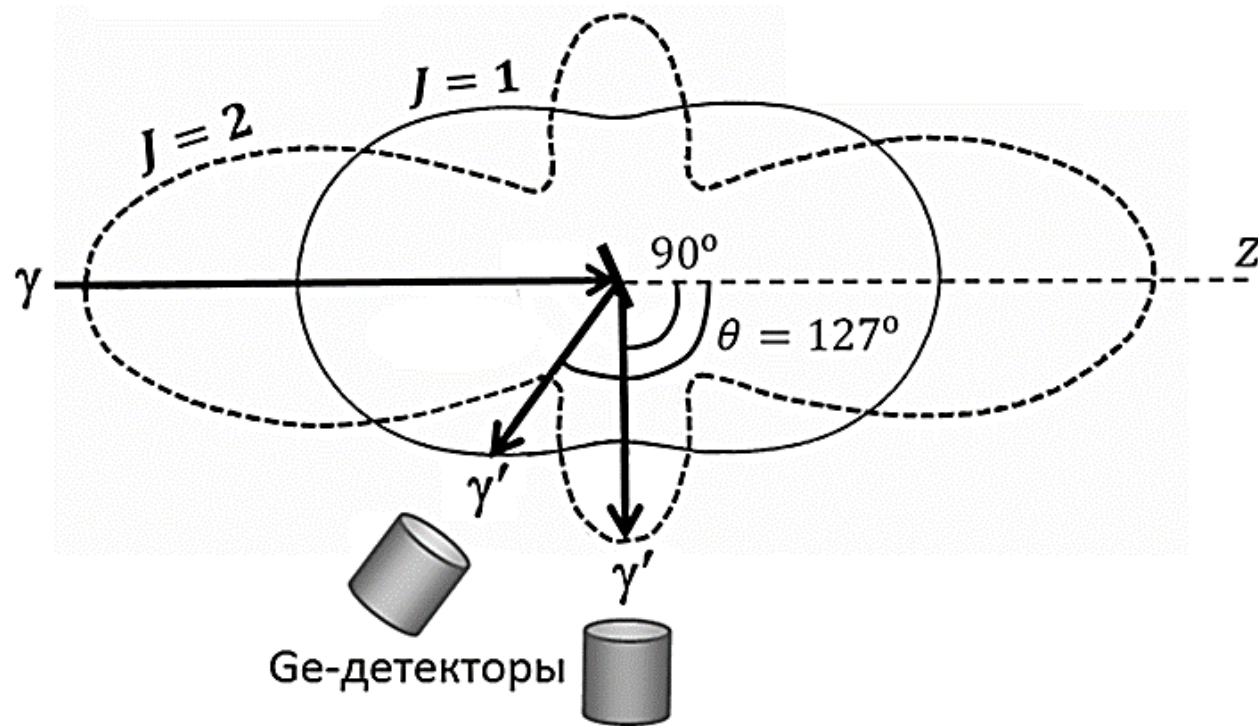
Однуклонные спин-флиповые и орбитальные
M1-переходы несферическом ядре $1f2p$ -оболочки



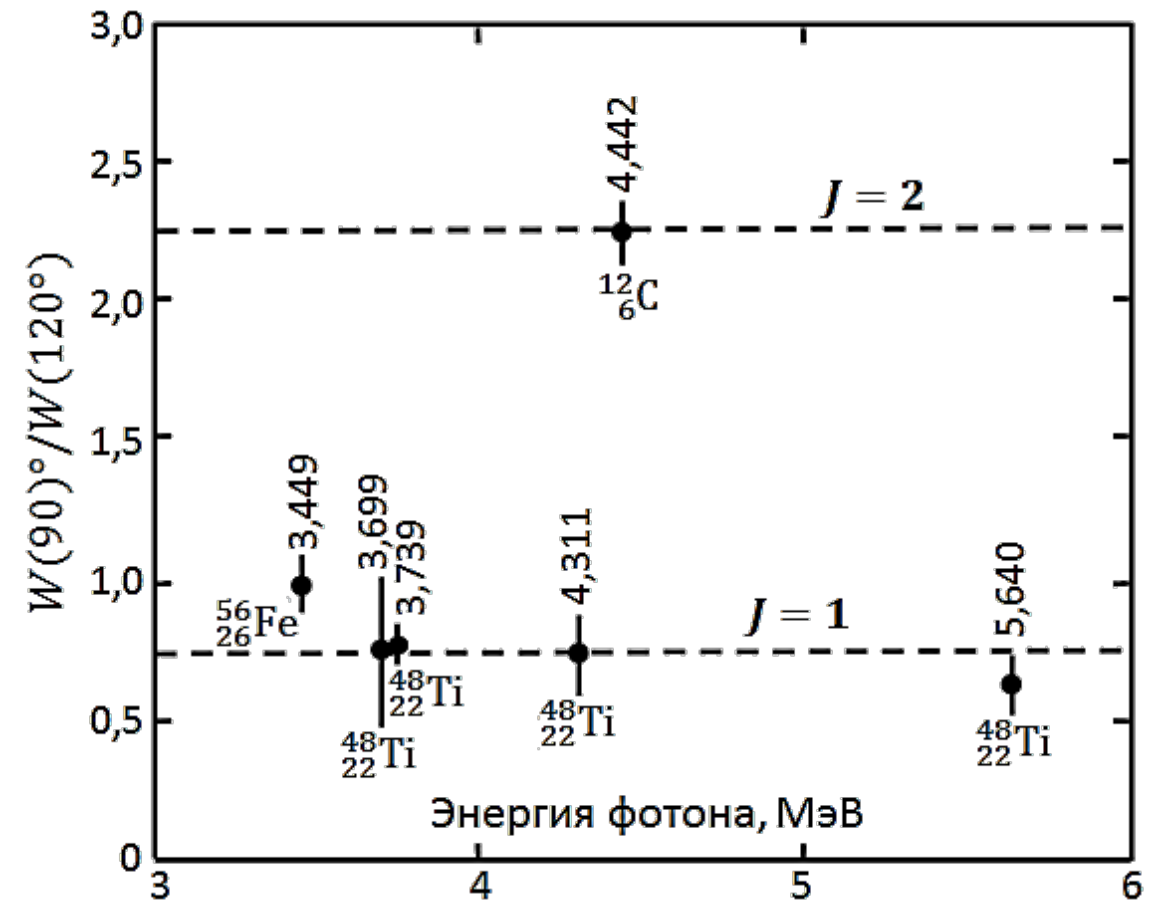
Сравнение значений $B(\text{M1})$, полученных для 1^+ -возбуждений ядра ^{48}Ti в НИИЯФ МГУ и научных центрах Германии

Изотоп	E , МэВ	$B(\text{M1})$, μ_N^2
^{46}Ti	4,316	$1,01 \pm 0,1$
^{48}Ti	3,739	$0,41 \pm 0,04$
	4,311	$0,25 - 0,30$
	5,640	$0,52 \pm 0,06$
^{56}Fe	3,449	$0,65 \pm 0,07$

E , МэВ	γ, γ' НИИЯФ МГУ	γ, γ' Dynamitron (Германия)	e, e' S-Dalinas (Германия)
3,739	$0,41 \pm 0,04$	$0,45 \pm 0,06$	$0,50 \pm 0,08$
5,640	$0,52 \pm 0,06$	$0,59 \pm 0,20$	$0,50 \pm 0,08$

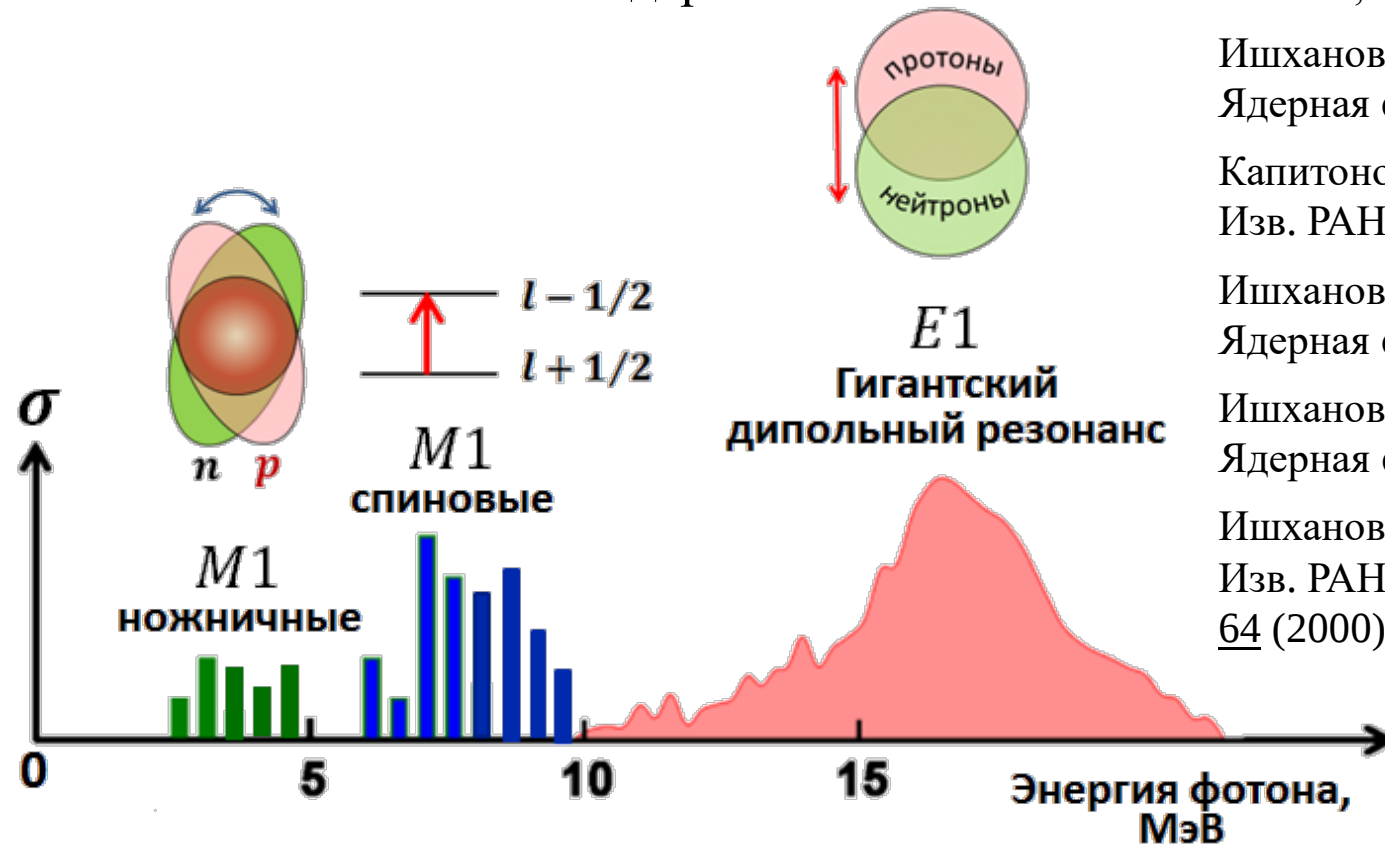


Диаграммы дипольного (сплошная линия) и квадрупольного (пунктир) рассеяния фотонов в плоскости реакции и углы рассеяния, обеспечивающие наиболее надёжное разделение излучений с $J = 1$ и 2



Идентификация мультипольности резонансно рассеянных фотонов

Структура спектра дипольных возбуждений атомных ядер



Алимов А.С. и др. Вестник МГУ, Сер. 3:
Физика, астр. 34 №5 (1993) 33.

Ишханов Б.С., Капитонов И.М., Угасте А.Ю., Широков Е.В. и др.
Ядерная физика 57 (1994) 2120.

Капитонов И.М., Широков Е.В.
Изв. РАН, сер. физическая 59 (1995) 159.

Ишханов Б.С., Капитонов И.М., Родионов Д.А., Широков Е.В. и др.
Ядерная физика 59 (1996) 1157.

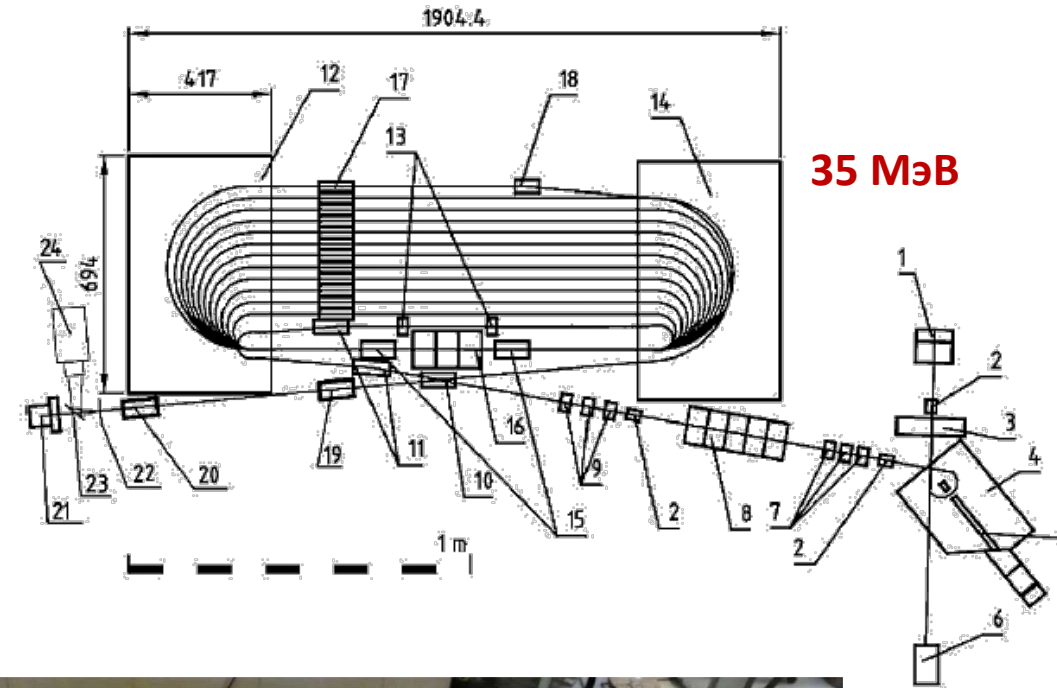
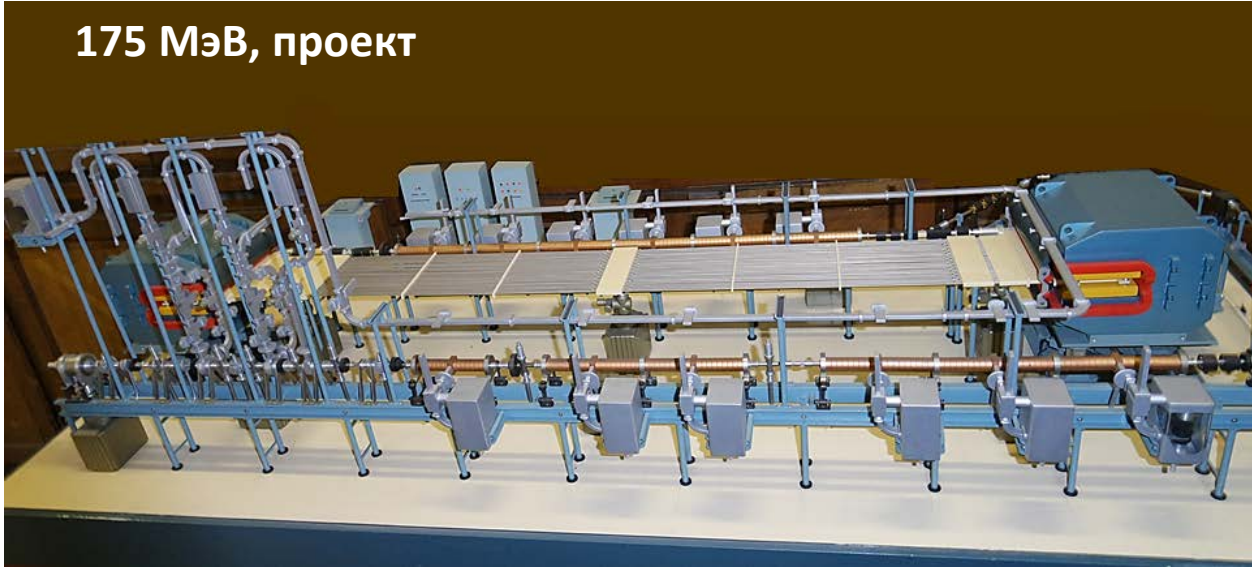
Ишханов Б.С., Капитонов И.М., Широков Е.В. и др.
Ядерная физика 61 (1998) 585.

Ишханов Б.С., Капитонов И.М., Широков Е.В., Юрьев Б.А.
Изв. РАН, сер. физическая 62 (1998) 937; 63 (1999) 1044;
64 (2000) 468.

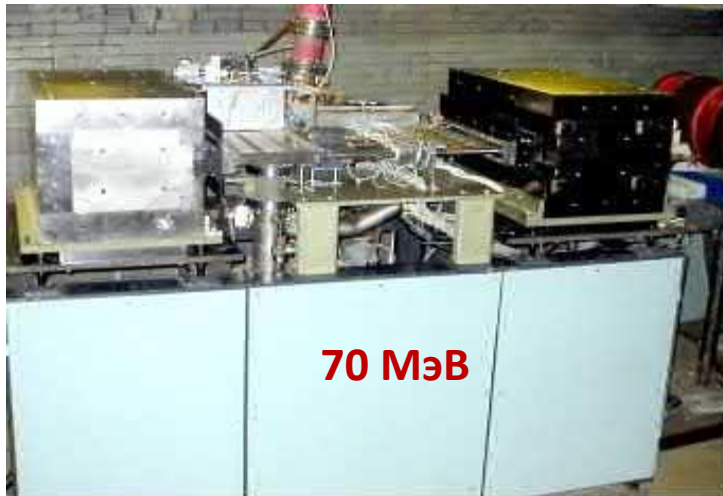
Новые электронные ускорители НИИЯФ МГУ

разрезные микротроны

175 МэВ, проект



70 МэВ



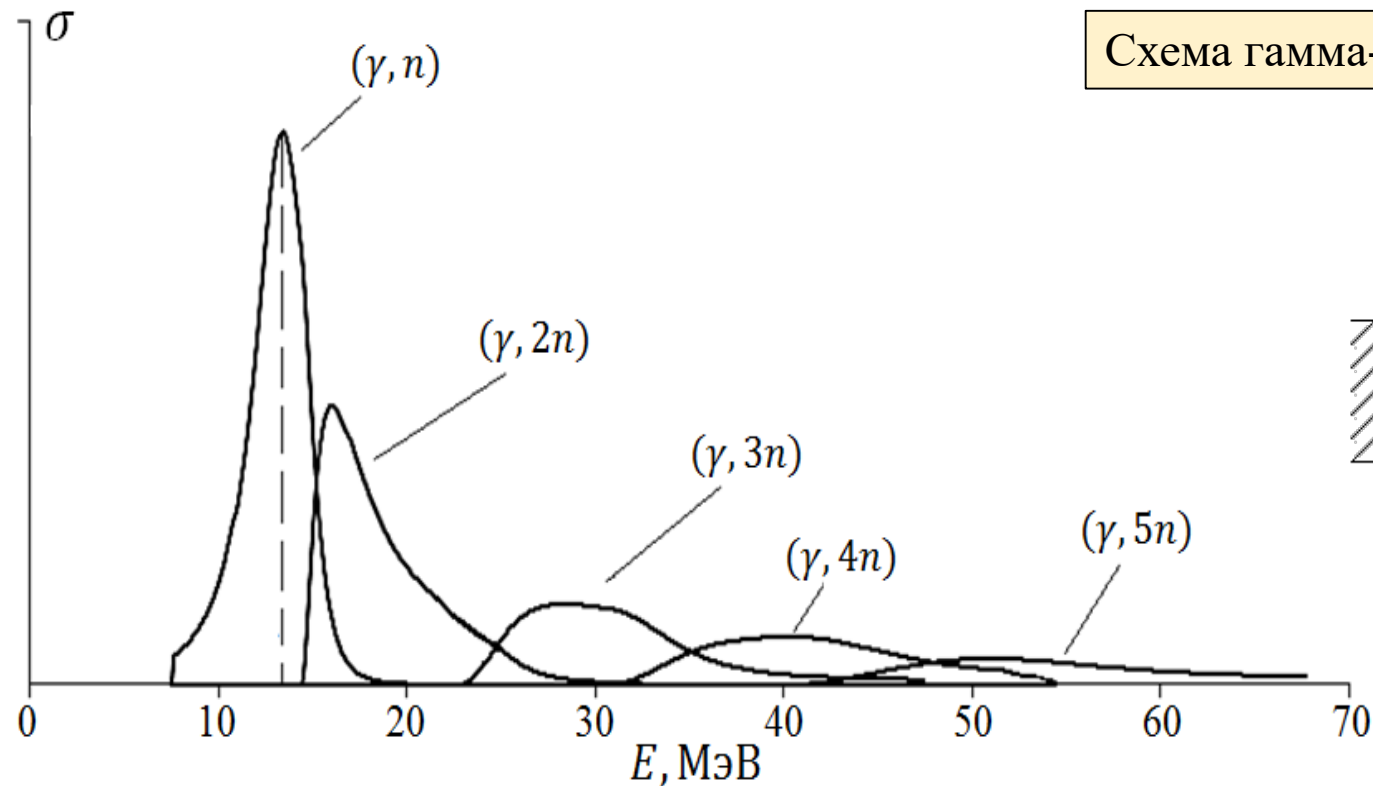
55 МэВ



Фоторасщепление

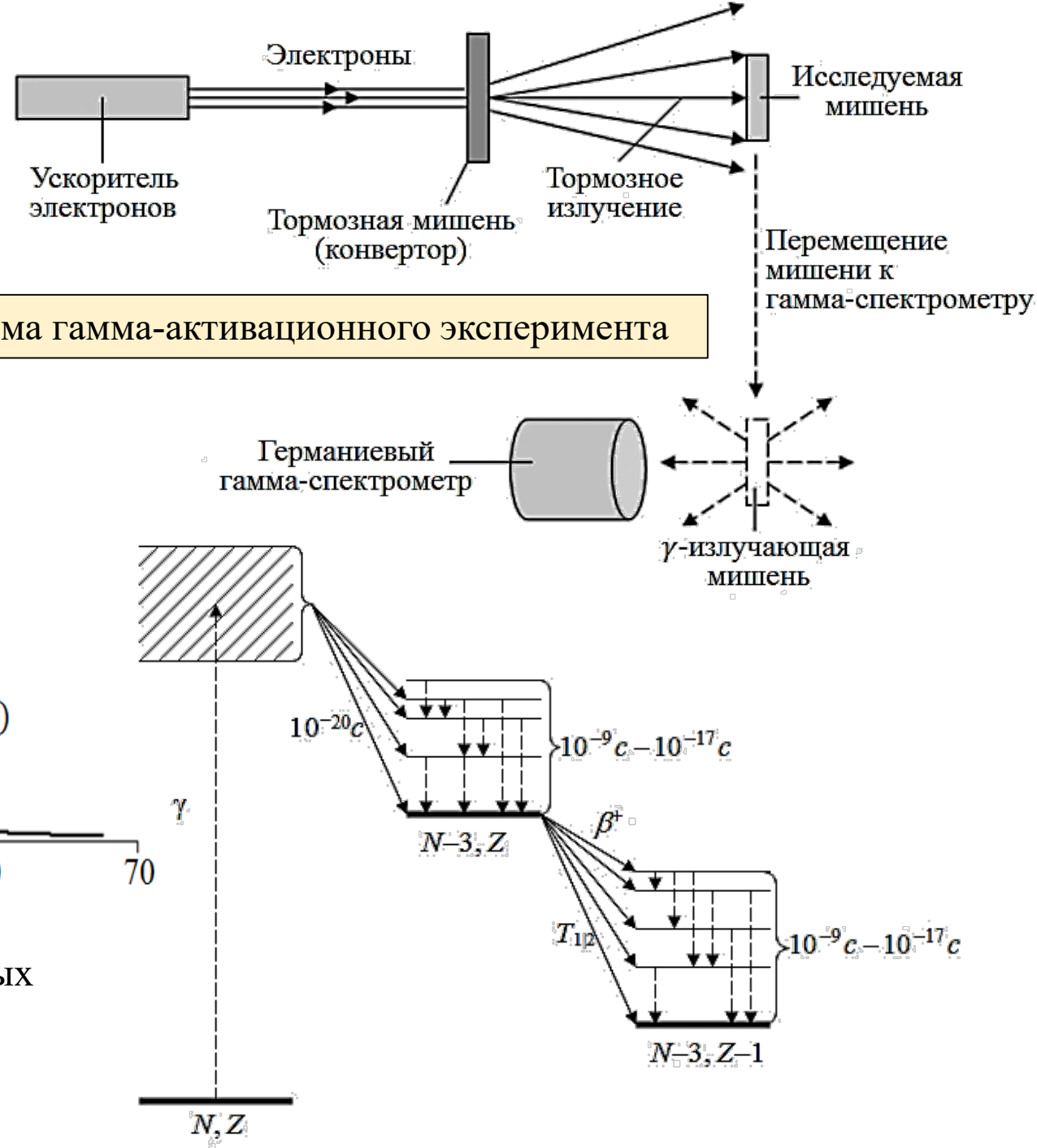
за гигантским дипольным резонансом.
Множественные фотонуклонные реакции.
Гамма-активационный метод.

Начиная с 2007 г.



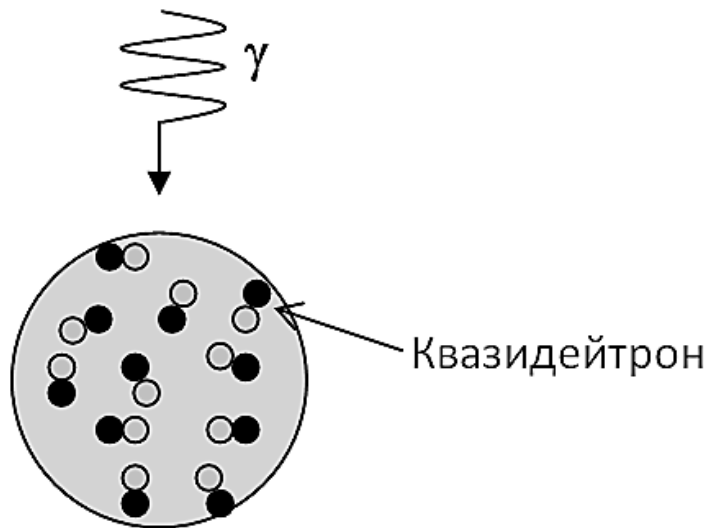
Схематическое изображение сечений множественных фотонейтронных реакций

Схема гамма-активационного эксперимента

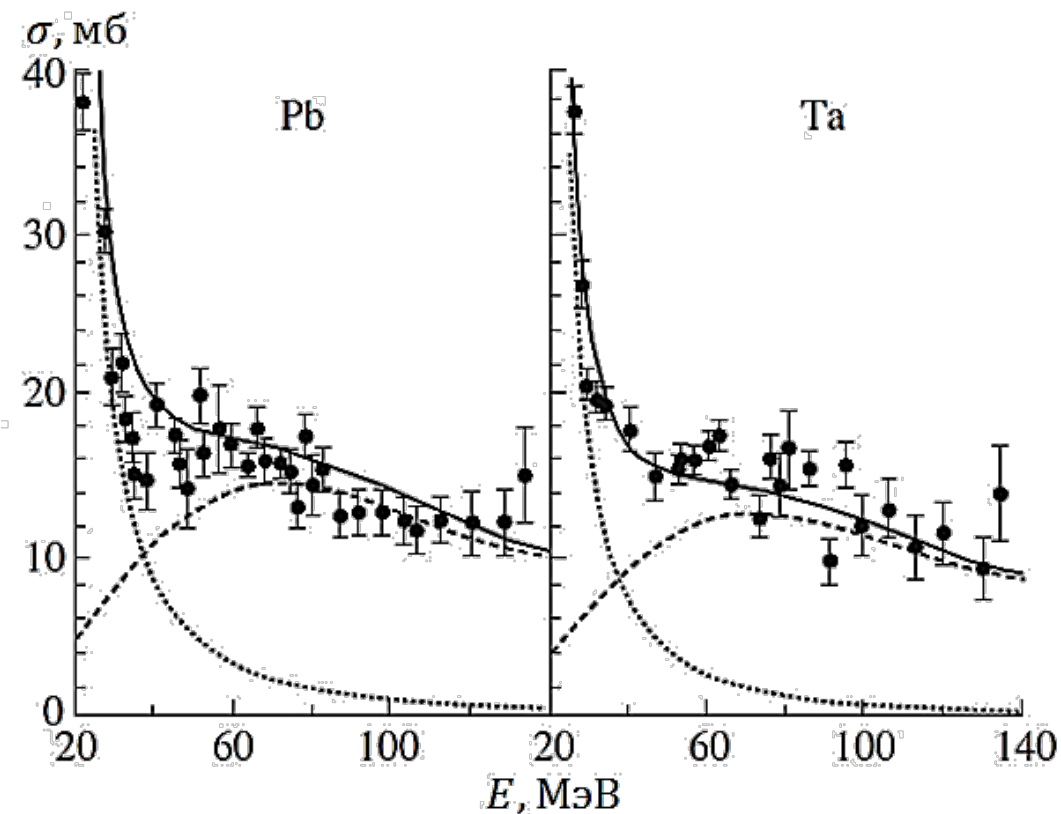


Начиная с 2007 г.

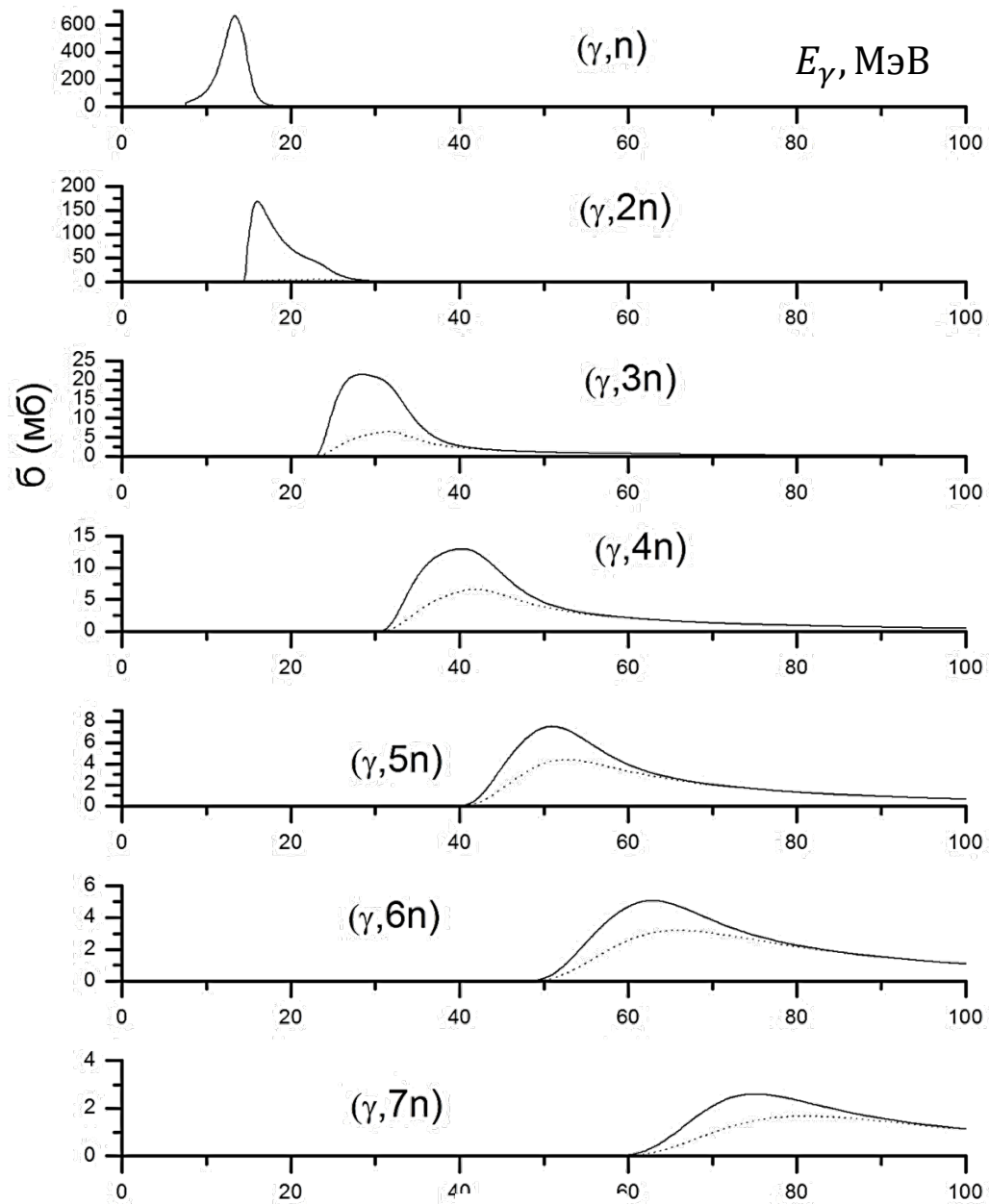
Формирование фотонуклонных сечений за гигантским дипольным резонансом. Квазидейтронный механизм фоторасщепления атомных ядер.



Взаимодействие
высокоэнергичных (40–140 МэВ) фотонов
с квазидейтронами ядра



Экспериментальные точки – сечения фоторасщепления ядер Pb и Ta за максимумом ГДР (Leprêtre A. et al. Nucl. Phys., A367 (1981) 237). Точечные кривые – «хвосты» ГДР. Пунктирные – расчётные квазидейтронные сечения (Chadwick M.V. et al. Phys. Rev., C44 (1991) 814). Сплошные кривые – их суммы.

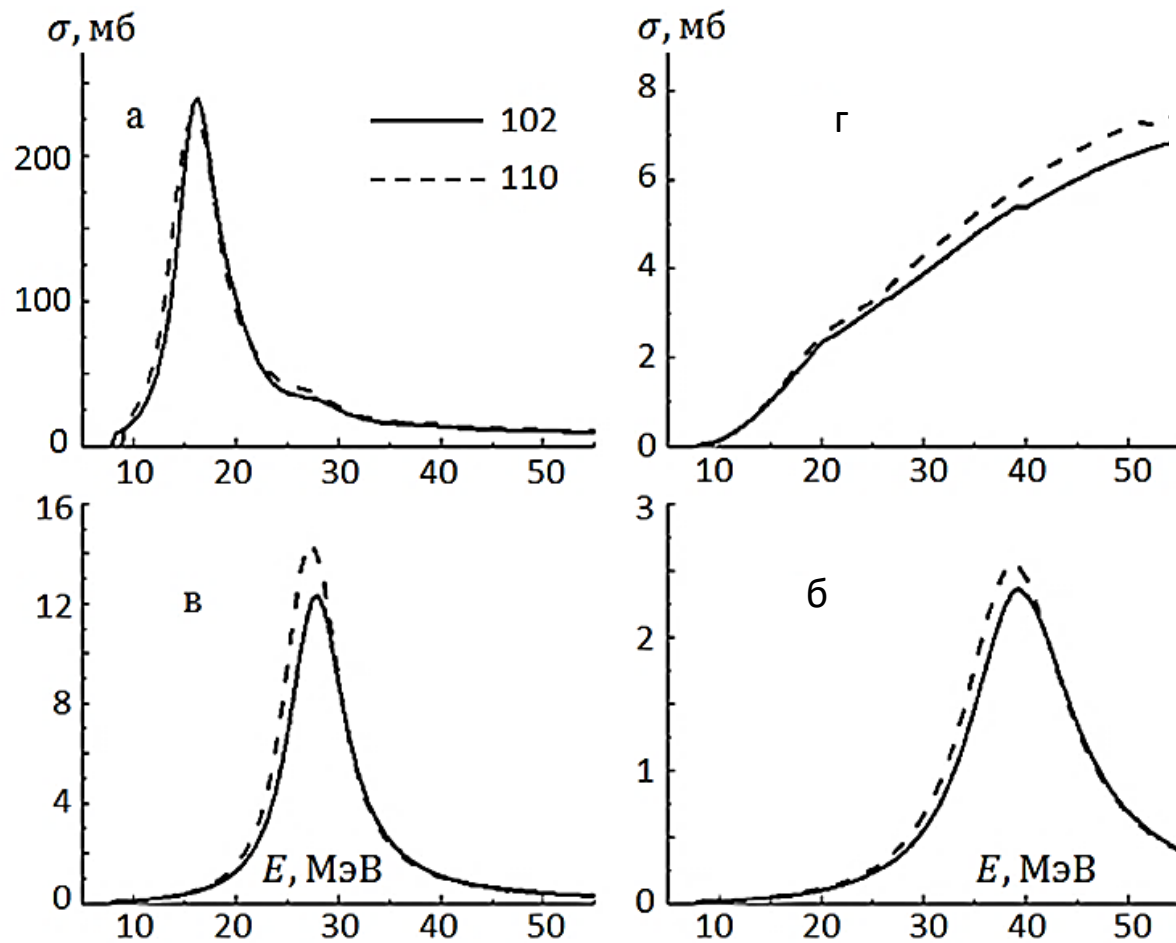


Сечения реакций (γ, in) , где $i = 1 - 7$, для ядра ^{209}Bi , рассчитанные в комбинированной модели фотоядерных реакций. Точечные линии – квазидейтронные сечения.

Комбинированная модель фотоядерных реакций

Ишханов Б.С., Орлин В.Н. Ядерная физика, т. 78 (2015) 601





Полное сечение фотопоглощения σ_{ABS} (а), вклад квазидейтронного механизма КД (б), вклад квадрупольного резонанса КР (в), вклад обертона ГДР2 (г) в полное сечение фотопоглощения для изотопов ^{102}Pd (сплошная линия) и ^{110}Pd (штриховая линия), рассчитанные в КМФР.

Интегральные сечения (в МэВ·мб) полного поглощения фотонов, ГДР, квадрупольного резонанса (КР), ГДР2, квазидейтронного расщепления (КД) для изотопов палладия в области энергий γ -квантов до 60 МэВ.

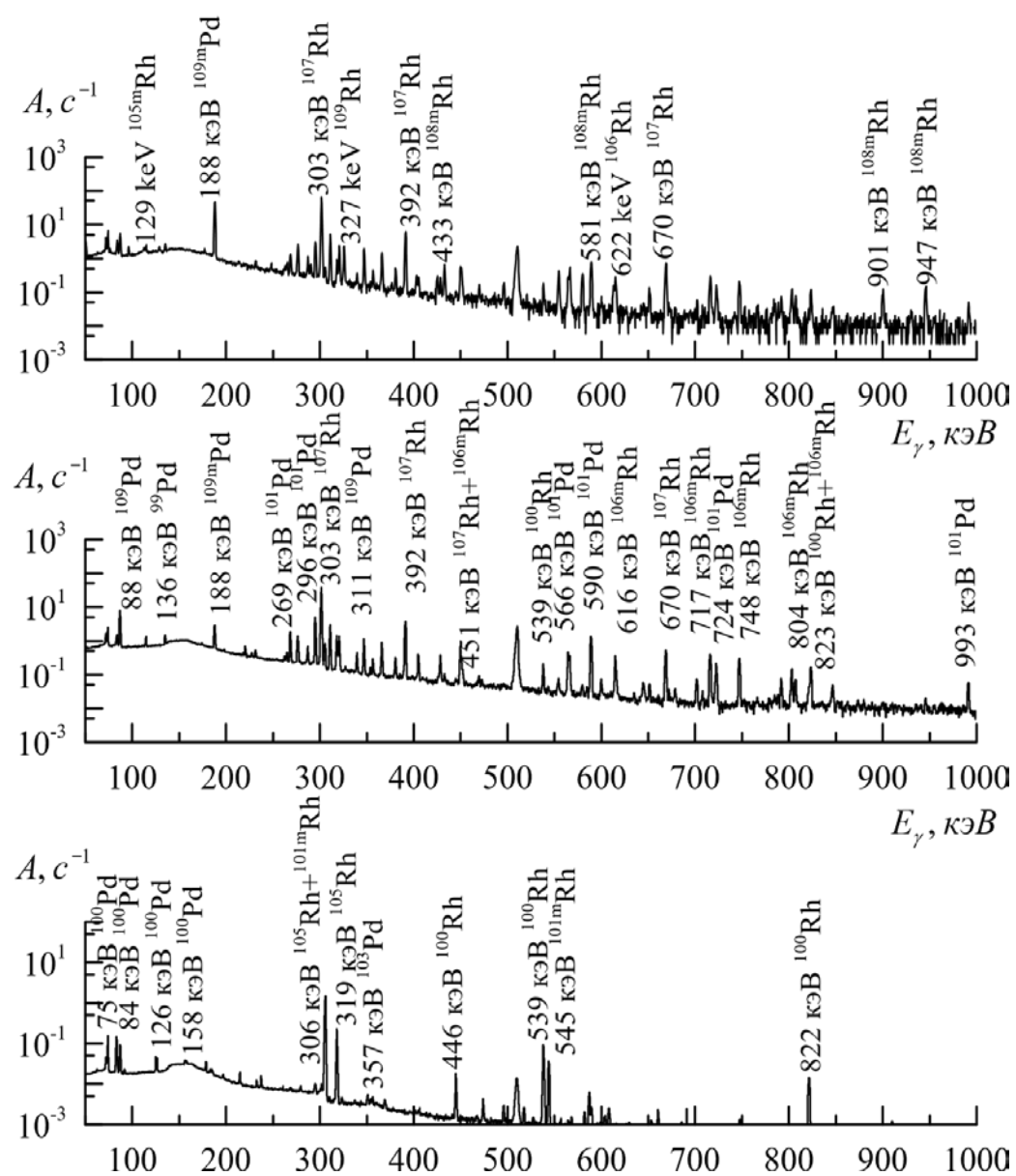
A	Полное	ГДР	КР	ГДР2	КД
102	2100	1767	115	35,0	184
103	2118	1780	118	34,3	187
104	2121	1777	119	35,6	188
105	2154	1805	121	37,4	191
106	2147	1796	122	36,3	193
107	2194	1838	124	35,2	196
108	2180	1820	126	37,9	197
109	2232	1869	128	36,8	200
110	2221	1854	128	37,6	201

Экспериментальные и теоретические выходы фотонейтронных реакций на ядре ^{197}Au в относительных единицах. Теоретические выходы получены в комбинированной модели фотоядерных реакций.

Реакция	Экспериментальный выход	Теоретический выход ГДР + КД	Теоретический выход ГДР
$^{197}\text{Au}(\gamma, n)^{196}\text{Au}$	1,0000	1,0000	1,0000
$^{197}\text{Au}(\gamma, 2n)^{195}\text{Au}$	$0,16 \pm 0,01$	0,20	0,19
$^{197}\text{Au}(\gamma, 3n)^{194}\text{Au}$	$0,023 \pm 0,002$	0,021	0,014
$^{197}\text{Au}(\gamma, 4n)^{193}\text{Au}$	$0,0074 \pm 0,0013$	0,0097	0,0043
$^{197}\text{Au}(\gamma, 5n)^{192}\text{Au}$	$0,0025 \pm 0,0002$	0,0027	0,0010
$^{197}\text{Au}(\gamma, 6n)^{191}\text{Au}$	$0,00050 \pm 0,00007$	0,0006	0,0002

Экспериментальные и теоретические выходы фотонейтронных реакций на ядре ^{209}Bi в относительных единицах. Теоретические выходы получены в комбинированной модели фотоядерных реакций.

Реакция	Экспериментальный выход	Теоретический выход ГДР + КД	Теоретический выход ГДР
$^{209}\text{Bi}(\gamma, 2n)^{207}\text{Bi}$	$1,00 \pm 0,05$	1,0000	1,0000
$^{209}\text{Bi}(\gamma, 3n)^{206}\text{Bi}$	$0,15 \pm 0,03$	0,113	0,080
$^{209}\text{Bi}(\gamma, 4n)^{205}\text{Bi}$	$0,09 \pm 0,02$	0,051	0,025
$^{209}\text{Bi}(\gamma, 5n)^{204}\text{Bi}$	$0,017 \pm 0,003$	0,016	0,007
$^{209}\text{Bi}(\gamma, 6n)^{203}\text{Bi}$	$0,007 \pm 0,002$	0,0041	0,0020
$^{209}\text{Bi}(\gamma, 7n)^{202}\text{Bi}$	$0,00012 \pm 0,00006$	0,00012	0,00007



Спектры остаточной активности облученного образца из природной смеси изотопов палладия через 2,5 минуты, через 10 минут и через три дня после окончания облучения (сверху вниз). Продолжительность измерений спектров составляла 5 минут, 1 час и 20 часов соответственно.

Сравнение экспериментальных и теоретических выходов фотоядерных реакций на изотопах палладия, рассчитанных в КМФР.

Выходы отнесены к одному электрону, падающему на тормозную мишень из вольфрама.

Конечный изотоп	$Y_{\text{эксп}}$	$Y_{\text{КМФР}}$
^{109}Pd	$(1,40 \pm 0,13) \cdot 10^{-6}$	$1,43 \cdot 10^{-6}$
^{103}Pd	$(2,08 \pm 0,11) \cdot 10^{-6}$	$2,31 \cdot 10^{-6}$
^{101}Pd	$(1,38 \pm 0,07) \cdot 10^{-7}$	$1,90 \cdot 10^{-7}$
^{100}Pd	$(2,33 \pm 0,16) \cdot 10^{-8}$	$2,28 \cdot 10^{-8}$
^{99}Pd	$(0,91 \pm 0,4) \cdot 10^{-9}$	$1,37 \cdot 10^{-9}$
^{109}Rh	$(4,18 \pm 0,18) \cdot 10^{-8}$	$4,93 \cdot 10^{-8}$
^{107}Rh	$(1,08 \pm 0,09) \cdot 10^{-7}$	$1,57 \cdot 10^{-7}$
^{105}Rh	$(1,59 \pm 0,06) \cdot 10^{-7}$	$2,39 \cdot 10^{-7}$
^{104}Rh	$(4,77 \pm 2,23) \cdot 10^{-7}$	$2,60 \cdot 10^{-7}$
^{102}Rh	$(4,04 \pm 0,36) \cdot 10^{-8}$	$4,66 \cdot 10^{-8}$
^{101}Rh	$(3,26 \pm 0,30) \cdot 10^{-8}$	$4,46 \cdot 10^{-8}$
^{100}Rh	$(4,97 \pm 0,68) \cdot 10^{-9}$	$9,88 \cdot 10^{-9}$

Спасибо за внимание!