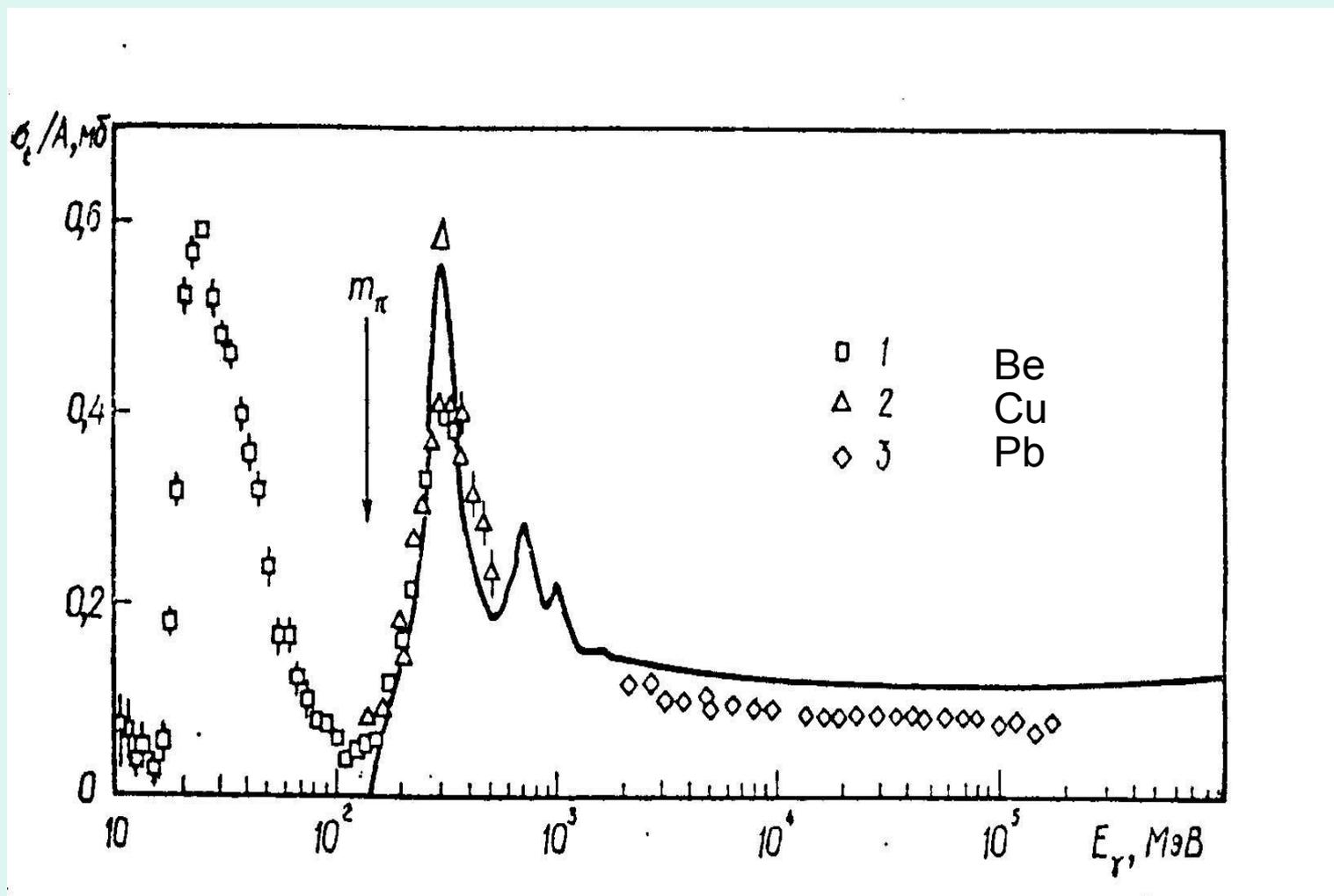


*Взаимодействие реальных и виртуальных фотонов
с ядрами и нуклонами в резонансной области энергий.*

*НЕДОРЕЗОВ В. Г.
Институт ядерных исследований РАН*

Основные направления (А.М.Балдин): [70-е годы]

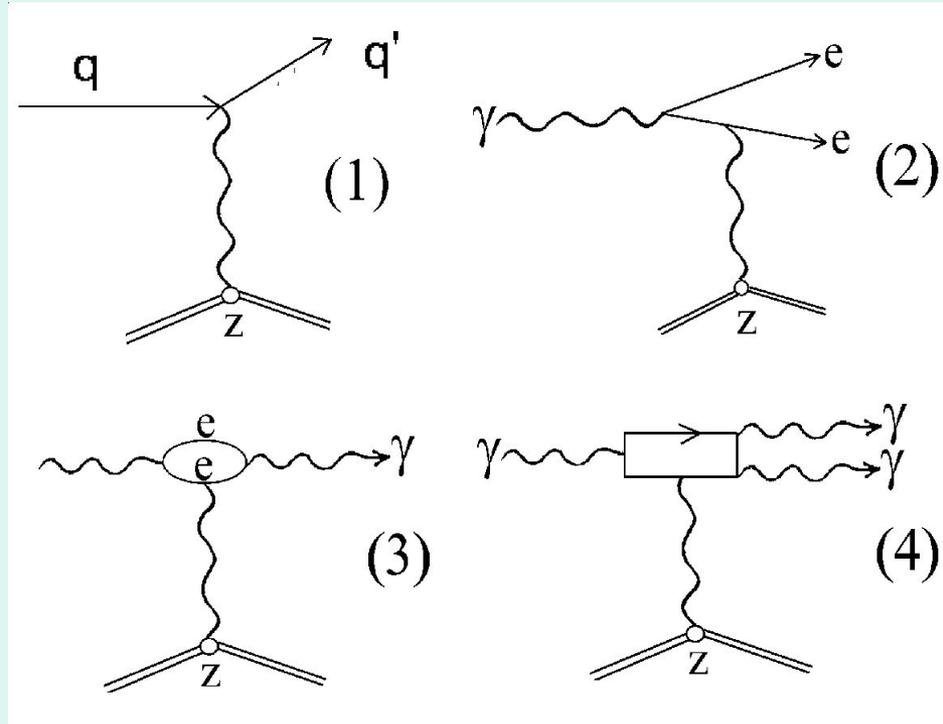
- Оптическая анизотропия ядер и нуклонов,
- Правила сумм и спиновые свойства нуклона
- Адронизация фотонов в асимптотической области энергий,



Виртуальные фотоны

Рассеяние электронов и тяжелых ионов

более высокая мультипольность взаимодействия,
заметный вклад компоненты с продольной поляризацией



Электромагнитный форм-фактор:

- $ds/dW = ds/dW_{Mott} \times [(F_1 g_N)^2 + t (F_2 g_N)^2 + 2t (F_1 g_N + F_1 g_N)^2 \tan^2 (q/2)]$
- $t = Q^2 / 4MN^2$,
- $F_{1,2} g_{p} = 2/3 F_{1,2} u - 1/3 F_{1,2} d - 1/3 F_{1,2} s$,
- $F_{1,2} g_N = 2/3 F_{1,2} d - 1/3 F_{1,2} u - 1/3 F_{1,2} s$

Спектры виртуальных фотонов

В.Недорезов, Ю.Ранюк. Фотоделение ядер за гигантским резонансом
«Наукова Думка» (1989).

λl – multipolarity,
 α – electromagnetic fine structure constant,

C_L - structure function:

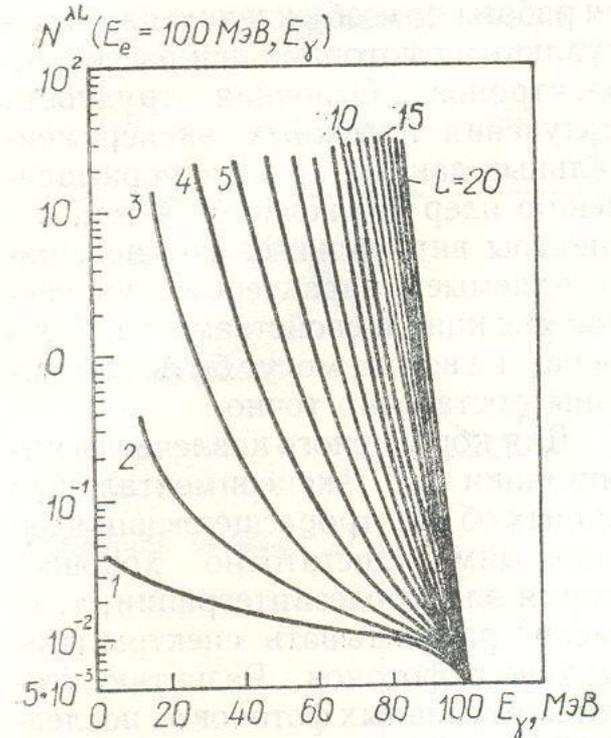
$$C_L = 2(E_e - E_\gamma)/E_\varepsilon \quad \text{for } \lambda l = E1,$$

$$C_L = 0 \quad \text{for } \lambda l = M1,$$

$$C_L = 8/3 \left[(E_e - E_\gamma)/E_\varepsilon \right]^2 \quad \text{for } \lambda l = E2,$$

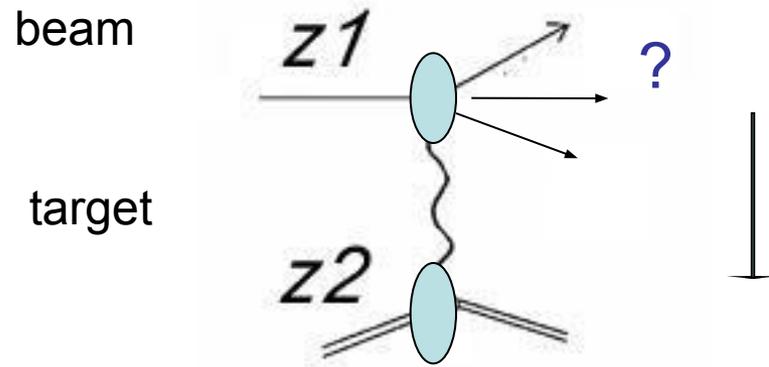
C_L depends on the nuclear size and charge

Z=92



$$N^{\lambda l}(E_e = E_e, E_\gamma) = \frac{\alpha}{\pi} \left\{ \left[1 + \left(\frac{E_e - E_\gamma}{E_e} \right)^2 \right] \times \ln \frac{2E_e(E_e - m_e)}{m_e E_e} - C_L \right\}$$

Кулоновская диссоциация



$$b > b_{\min} = R_i + R_t \text{ (incident + target)}$$

Поток виртуальных фотонов

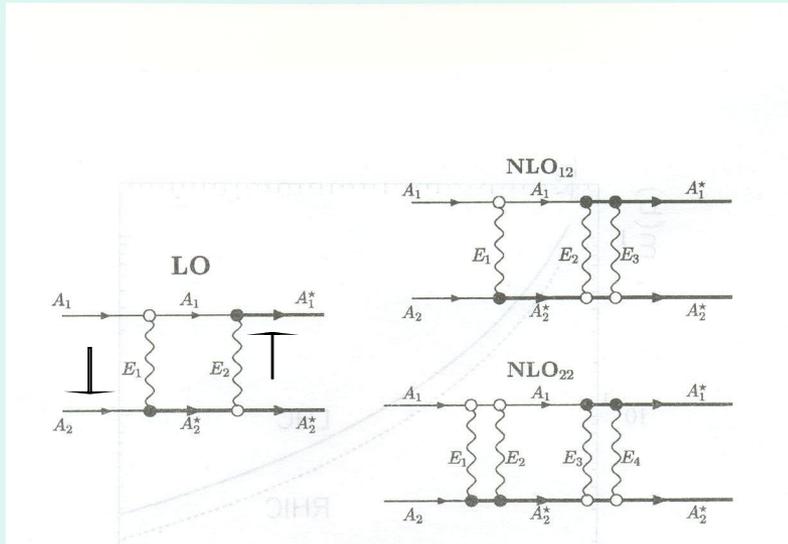
$$F = \frac{Z^2 \alpha}{\pi^2 b^2} \frac{1}{\omega}$$

Спектр виртуальных фотонов (интегрированный по b), $Z = Z_t$

$$\frac{dn(\omega)}{d\omega} \approx \frac{z^2 \alpha}{\pi} \frac{1}{\omega} f\left(\frac{\omega b_{\min}}{\gamma}\right)$$

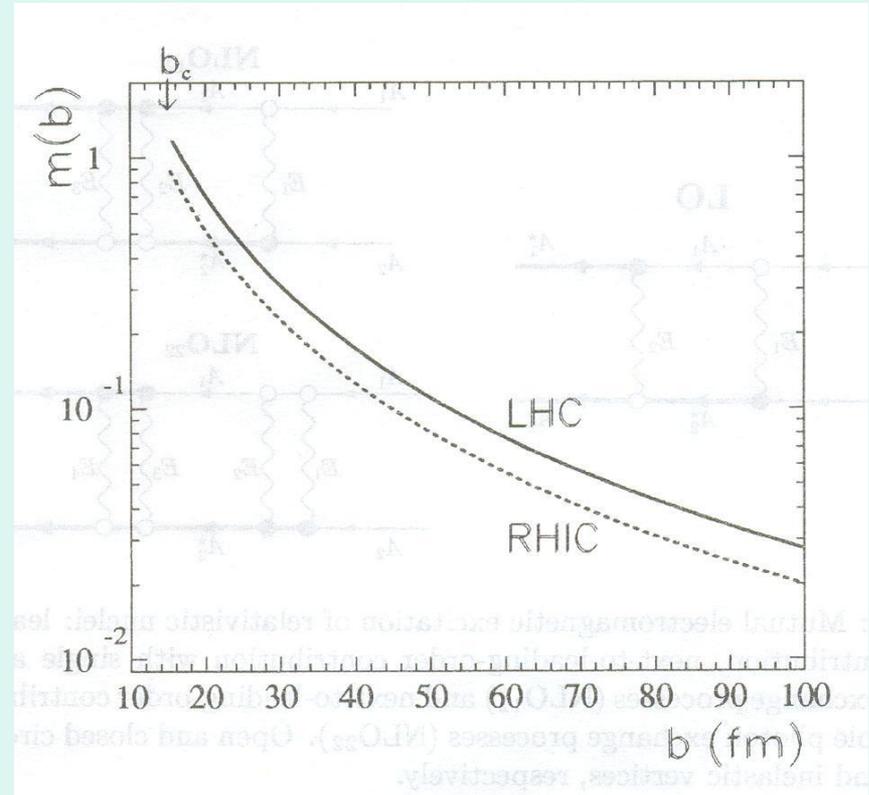
[Л.Е.Лазарева, С.М.Поликанов, В.Вerman]

Среднее число фотонов, поглощаемых в столкновениях Au + Au (RHIC) и Pb + Pb (LHC)



$$\sigma_s^{ED}(\text{LO}) = 2\pi \int_{b_c}^{\infty} b db P_s(b) = 2\pi \int_{b_c}^{\infty} b db m_{A_2}(b) e^{-m_{A_2}(b)},$$

$$\sigma_s^{ED}(\text{NLO}_2) = 2\pi \int_{b_c}^{\infty} b db \frac{m_{A_2}^2(b)}{2} e^{-m_{A_2}(b)}.$$



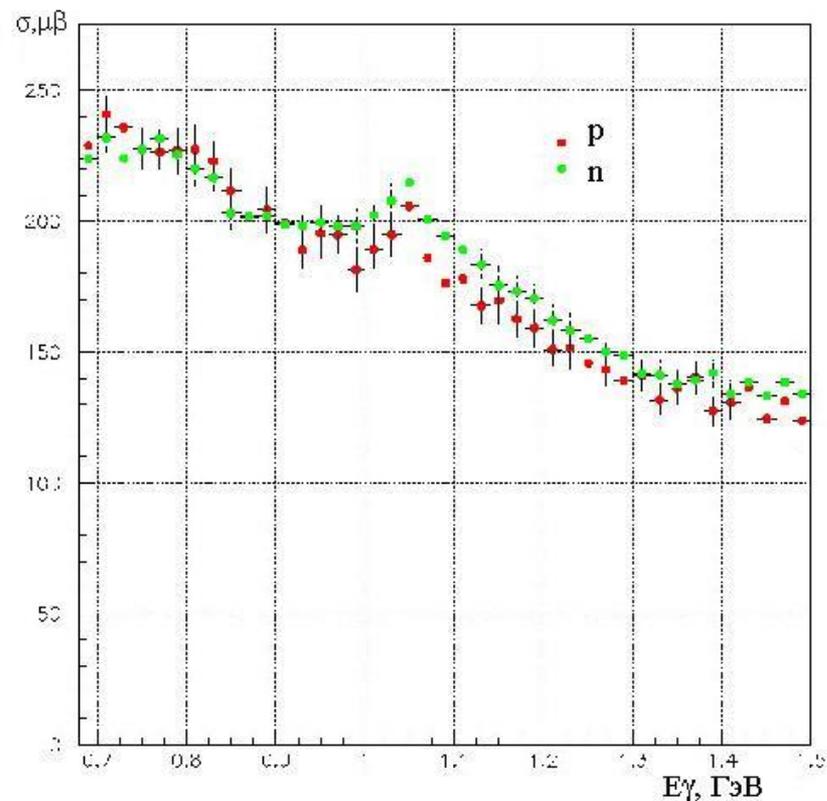
b – impact parameter
LO – leading order

В области нуклонных резонансов: - основной результат последних трех лет

ИЯИ РАН(Москва) - ГРААЛЬ
(Гренобль) - МАМИ (Майнц).

Измерены параметры оптической анизотропии нуклонов и проведена экспериментальная проверка фундаментальных правил сумм.

Показано, что сечения полного поглощения фотонов одинаковы для протона и нейтрона не только в асимптотической области энергий, но и в области нуклонных резонансов.



Полное сечение фотопоглощения на протоне и нейтроне (Армстронг-1972 г.)

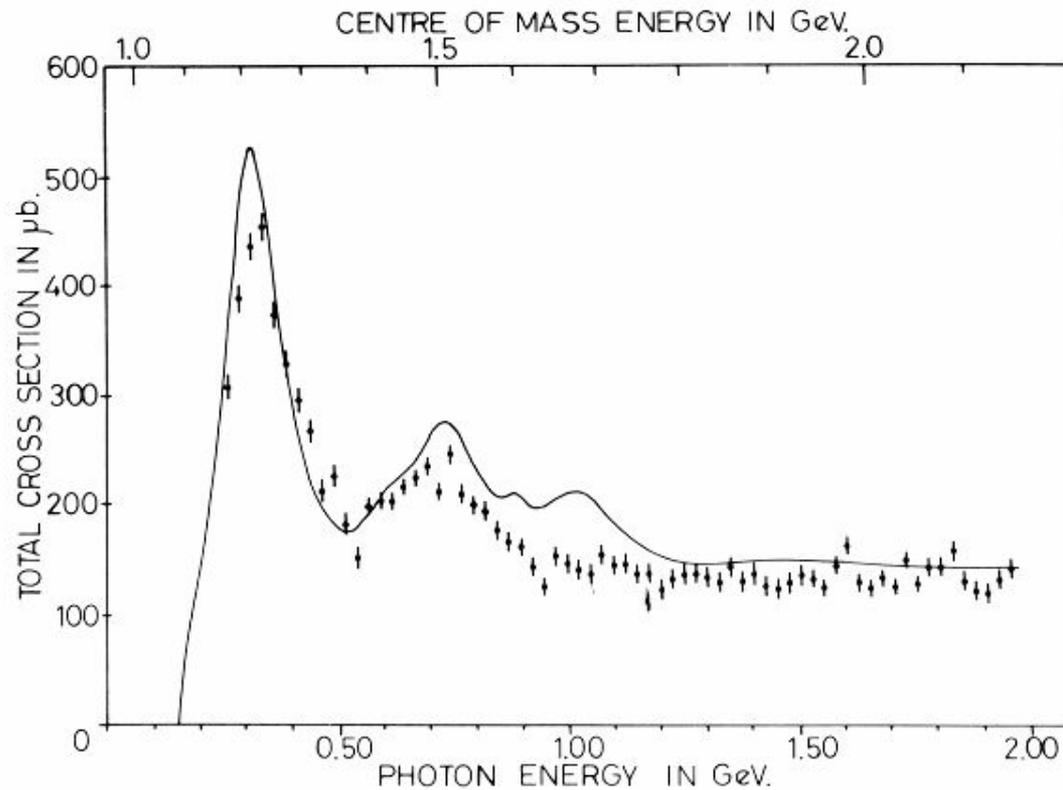


Fig. 8. This shows the values of $\sigma_{\text{T}}^{\text{n}}$ in the resonance region obtained by subtracting the measured $\sigma_{\text{T}}^{\text{p}}$ values from the deuterium values corrected for internal motion of the nucleons. The solid curve is the smooth fit to the measured $\sigma_{\text{T}}^{\text{p}}$ values.

Амплитуда комптоновского рассеяния фотона на нуклоне и дисперсионные соотношения:

$$f = e'^* e f_1(\omega) + i \omega \sigma e'^* \chi e f_2(\omega)$$

e - калибровочно инвариантный оператор EM поля, σ - спиновый оператор нуклона.

$f_1(0) = - (a / Z^2 / M)$, $f_2(0) = (a k^2 / 2M^2)$, M – масса, $a = e^2 / 4\pi = 1/137$, eZ – электрический заряд, k - аномальный магнитный момент нуклона

Дисперсионные соотношения : $f_1(0) = - (\alpha / Z^2 / M) + \omega^2 / 2\pi^2 \int \sigma_{tot}(\omega') / f(\omega') d\omega'$
 $f_2(0) = (\alpha k^2 / 2M^2) + \omega^2 / 2\pi^2 \int \Delta\sigma_{tot}(\omega') / \varphi(\omega') d\omega' / \omega'$, $\sigma_{tot}(\omega) = \sigma_{3/2}(\omega) + \sigma_{1/2}(\omega)$, $\Delta\sigma_{tot}(\omega) = \sigma_{3/2}(\omega) - \sigma_{1/2}(\omega)$,

Правила сумм :

Герасимов С.Б. и др.: ГДХ: $Y = (\sigma_{3/2}(\omega) + \sigma_{1/2}(\omega)) d\omega / \omega = 2\pi^2 \alpha k^2 / M^2$
 Балдин А.М.

$$\alpha + \beta = \frac{1}{2\pi^2} \int_{m_\pi}^{\infty} \frac{\sigma_{tot}(\omega)}{\omega^2} d\omega$$

ядра с $Z^2\alpha > 1$

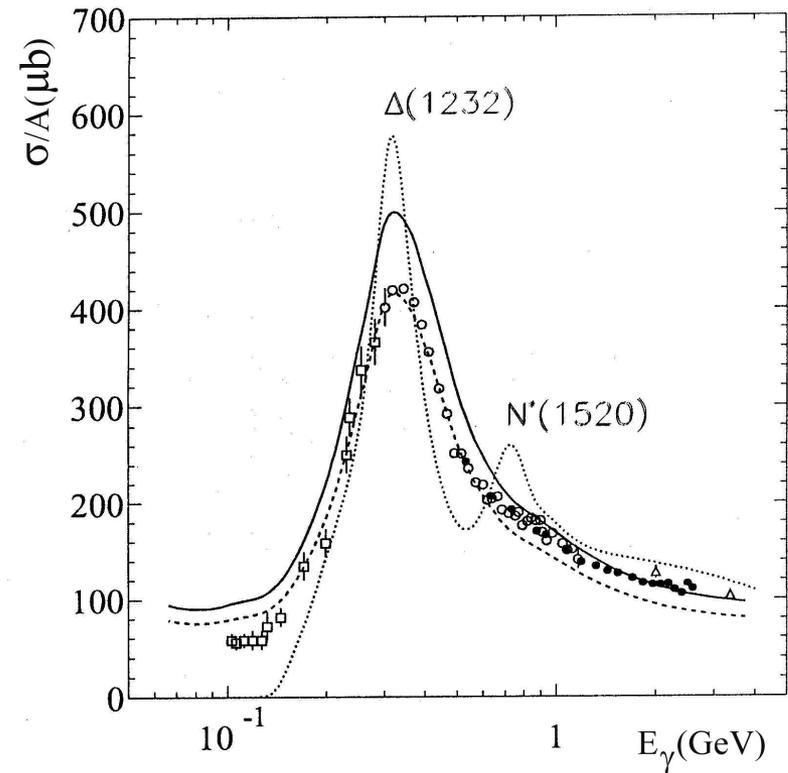
В совместном эксперименте ИЯИ РАН - ИЯФ СО РАН обнаружено отклонение от принципа аддитивности в полных сечениях фотопоглощения, позднее подтвержденное в JLAB.

Получено указание на вклад нелинейных квантово-электродинамических эффектов. В случае деления ядер – актинидов реальными фотонами этот вклад для области нуклонных резонансов составляет около 30%.

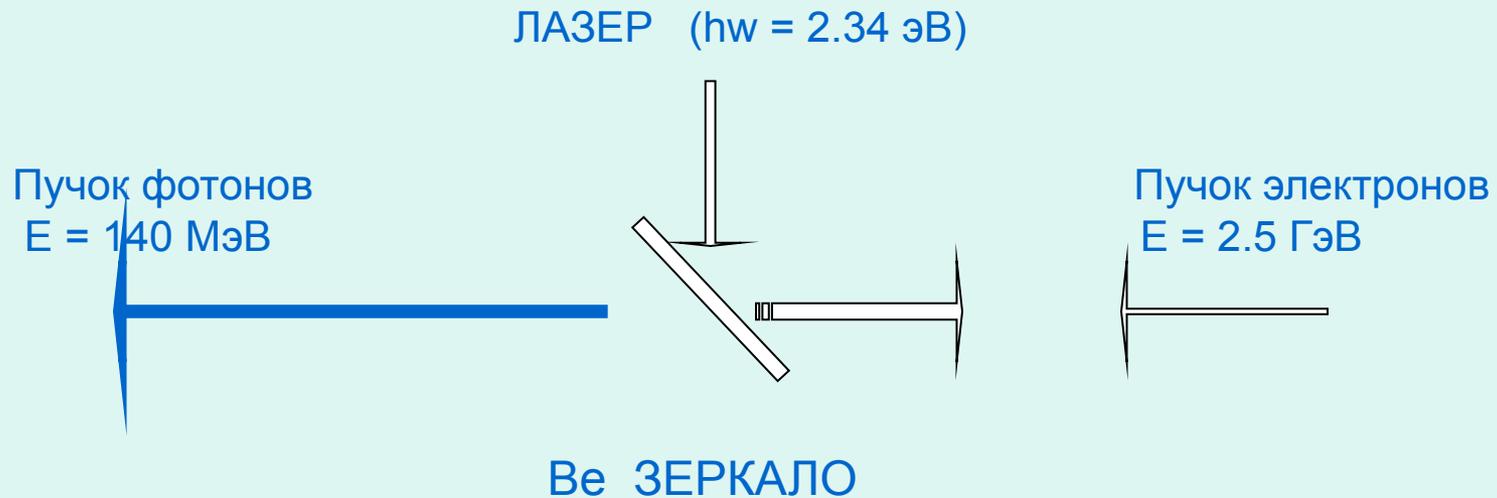
Сечения фотоделения и полного фотопоглощения ядер - актинидов

[I.Pshenichnov](#), e.a. *Eur.Phys.J.A24:69-84,2005*.

- Кривая из точек – свободный протон
- Сплошная кривая – актиниды
- Разные точки – ядра от Be до U



Метод обратного комптоновского рассеяния



интенсивность (фотон/сек):

| | |
|--------------------------------|-----------|
| Аргон (ультрафиолет) | 10^7 |
| CO ₂ (инфракрасный) | 10^{10} |
| На свободных электронах | 10^{12} |
| Рециркулятор | 10^{15} |

$$\frac{d\sigma}{dn} = 4\pi r_0^2 \left[\frac{K}{1+n} + \frac{1+n^2}{K} - \frac{4n^2}{(1+n^2)^2} \right]$$

Мощные фемтосекундные лазерные импульсы

В.П.Кандидов е.а. Кв.Эл-ка 39,3 (2009) 205.

| | |
|--------------------------|--|
| Длительность импульсов – | $10^{-14} – 10^{-12}$ с |
| Энергия | 10 мДж – 26 Дж |
| Пиковая мощность | 0,2 – 200 ТВт |
| Интенсивность | $10^{11} – 10^{13}$ Вт/см ² |
| Длины волн | 0,248; 0,527; 0,800; 1,06; 1,24 мкм |

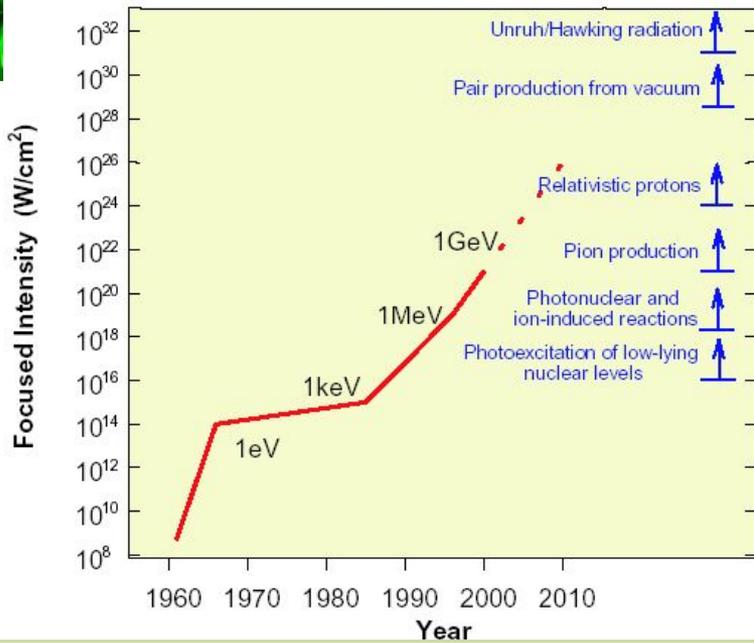
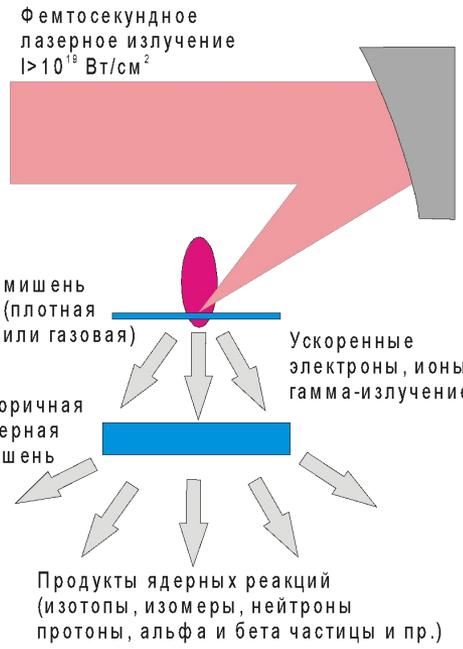
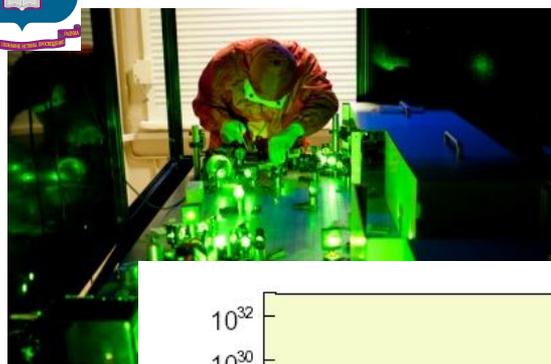


Нелинейное взаимодействие со средой

Общая схема лазерно-индуцированных ядерных процессов

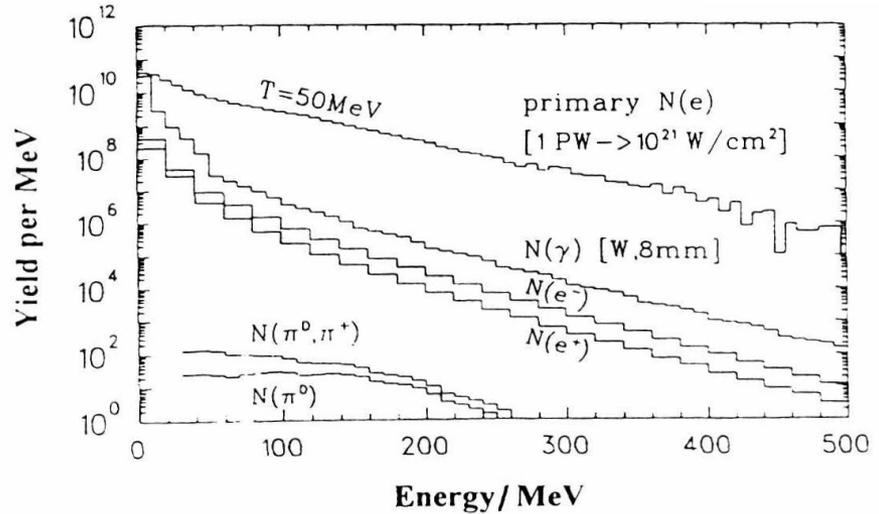


А.Б.Савельев (МГУ)



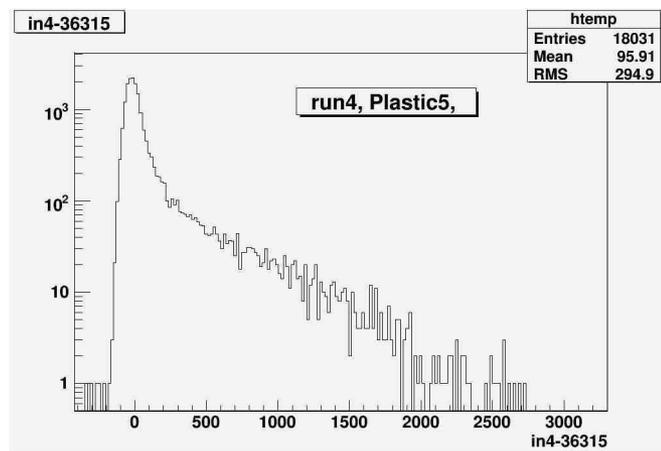
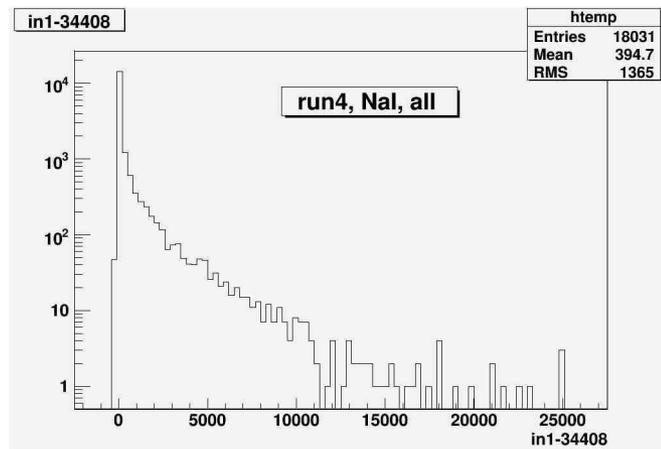
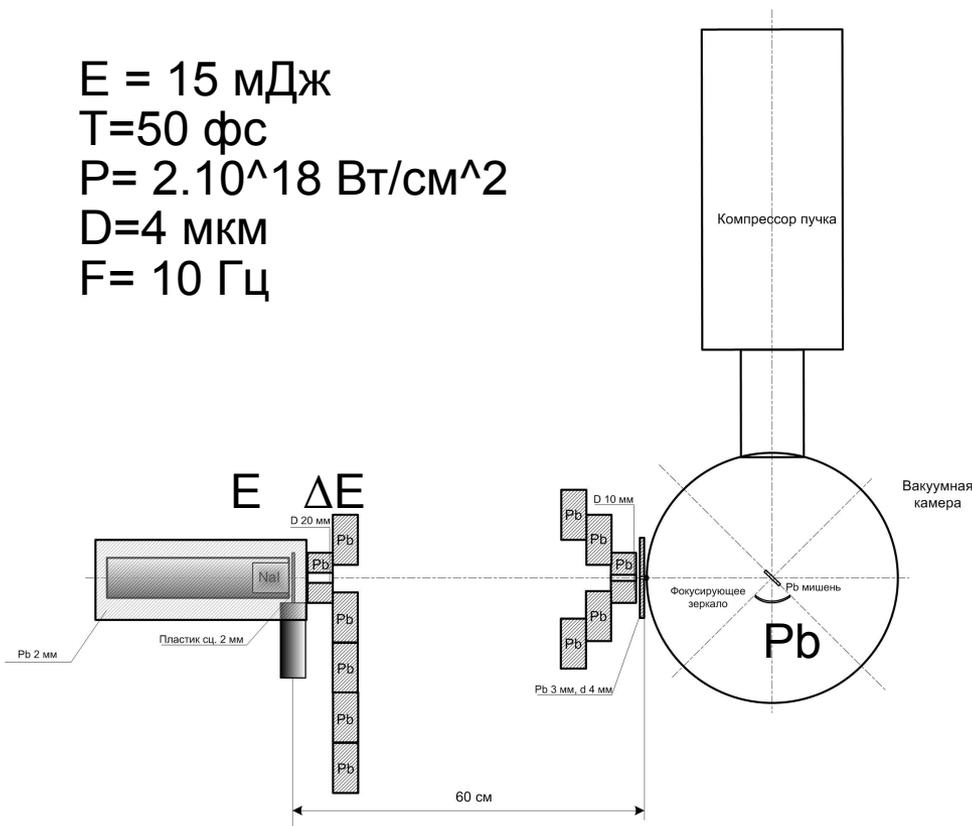
Интенсивность лазерного излучения стремительно растет, одновременно растет и энергия получаемых электронов. Уже сейчас получены пучки электронов с энергией свыше 1 ГэВ, пучки протонов и

Спектры вторичных частиц (расчет) при мощности лазерного излучения 1ПВт.



Первые результаты МГУ — ИЯИ РАН (2011)

$E = 15$ мДж
 $T = 50$ фс
 $P = 2 \cdot 10^{18}$ Вт/см²
 $D = 4$ мкм
 $F = 10$ Гц



Научный совет по электромагнитным взаимодействиям ядер: «Исследование ядерной материи и астрофизических процессов на пучках фотонов, электронов и релятивистских тяжелых ионов»

Программа работ по состоянию на 10.09.2011 г., включая международные проекты, в которых участвуют российские ученые

Прецизионные измерения амплитуд фоторождения мезонов на свободных и связанных нуклонах. Спиновые структурные функции и формфакторы нуклонов, мезонов, гиперонов, легчайших ядер. Реальные и виртуальные фотоны. Эволюция сильных взаимодействий с изменением расстояний (виртуальности) фотонов.

Изучение свойств нестабильных ядер методом рассеяния электронов, включая астрофизические аспекты.

Исследование гигантских резонансов и кластерных эффектов. Фотонейтронные реакции с высокой множественностью, фото- и электроделение ядер.

Изучение ядерных эффектов при взаимодействии интенсивных электромагнитных полей с веществом на пучках релятивистских ионов, электронов и импульсных фемтосекундных тераваттных лазеров. Нелинейные эффекты КЭД и многофотонные обмены.

Прикладные исследования с использованием фотоядерных методов. Системы безопасности. Детектирование взрывчатых веществ и делящихся материалов, медицинская диагностика и терапия.

Компьютерные базы данных по электромагнитным взаимодействиям.

MAMI (Mainz),
GRAAL (ESRF)
MAX (LUND)
C25-P (ФИАН)
CEBAF (USA)
DORIS (DESY
(Gamburg)
ВЭПП-3,4,
Новосибирск,
NUSTAR (GSI),
CERN (Женева)
ELISE (FAIR)
Микротрон
НИИЯФ МГУ
Нуклотрон
ОИЯИ
Лазер...
Физфак МГУ

Недорезов Владимир Георгиевич, профессор, д.ф.-м.н., ИЯИ РАН, Москва –
Ишханов Борис Саркисович, профессор, д.ф.-м.н НИИЯФ МГУ, Москва-
Малахов Александр Иванович, профессор, д.ф.-м.н., ЛФВЭ ОИЯИ, Дубна
Зарубин Павел Игоревич, д.ф.-м.н. ЛФВЭ ОИЯИ, Дубна - *ученый секретарь*
Буров Валерий Васильевич, профессор, д.ф.-м.н. ЛТФ ОИЯИ, Дубна
Варламов Владимир Васильевич, профессор, д.ф.-м.н НИИЯФ МГУ, Москва
Герасимов Серго Борисович, д.ф.-м.н., ОИЯИ, Дубна
Главанакон Игорь Владимирович, , д.ф.-м.н, НИИЯФ ТПУ, Томск
Гуревич Григорий Манович, д.ф.-м.н. ИЯИ РАН, Москва
Камерджиев Сергей Павлович, профессор, д.ф.-м.н., ФЭИ, Обнинск
Кречетов Юрий Федорович, д.ф.-м.н, НИИЯФ ТПУ, Томск
Курепин Алексей Борисович, д.ф.-м.н. ИЯИ РАН, Москва
Лебедев Андрей Иванович, д.ф.-м.н. ФИ РАН, Москва
Львов Анатолий Иосифович, к.ф.-м.н, ФИ РАН, Москва
Николенко Дмитрий Митрофанович, к.ф.-м.н, ИЯФ СО РАН, Новосибирск
Петрунькин Виктор Алексеевич, к.ф.-м.н. ФИ РАН, Москва
Савельев-Трофимов Андрей Борисович, профессор, д.ф.-м.н , Физфак МГУ, Москва
Садовский Сергей Анатольевич, к.ф.-м.н, ИФВЭ, Протвино
Стибунов Виктор Николаевич, д.ф.-м.н, НИИЯФ ТПУ, Томск
Сокол Гарри Арсентьевич, д.ф.-м.н. ФИ РАН, Москва
Таратин Александр Михайлович, д.ф.-м.н. ЛФВЭ ОИЯИ, Дубна
Топорков Дмитрий Константинович, д.ф.-м.н, ИЯФ СО РАН, Новосибирск
Шведун Василий Иванович, профессор, д.ф.-м.н НИИЯФ МГУ, Москва
Чулков Леонид Владимирович, к.ф.-м.н. РНЦ КИ, Москва
Урин Михаил Генрихович, профессор, д.ф.-м.н., МИФИ, Москва