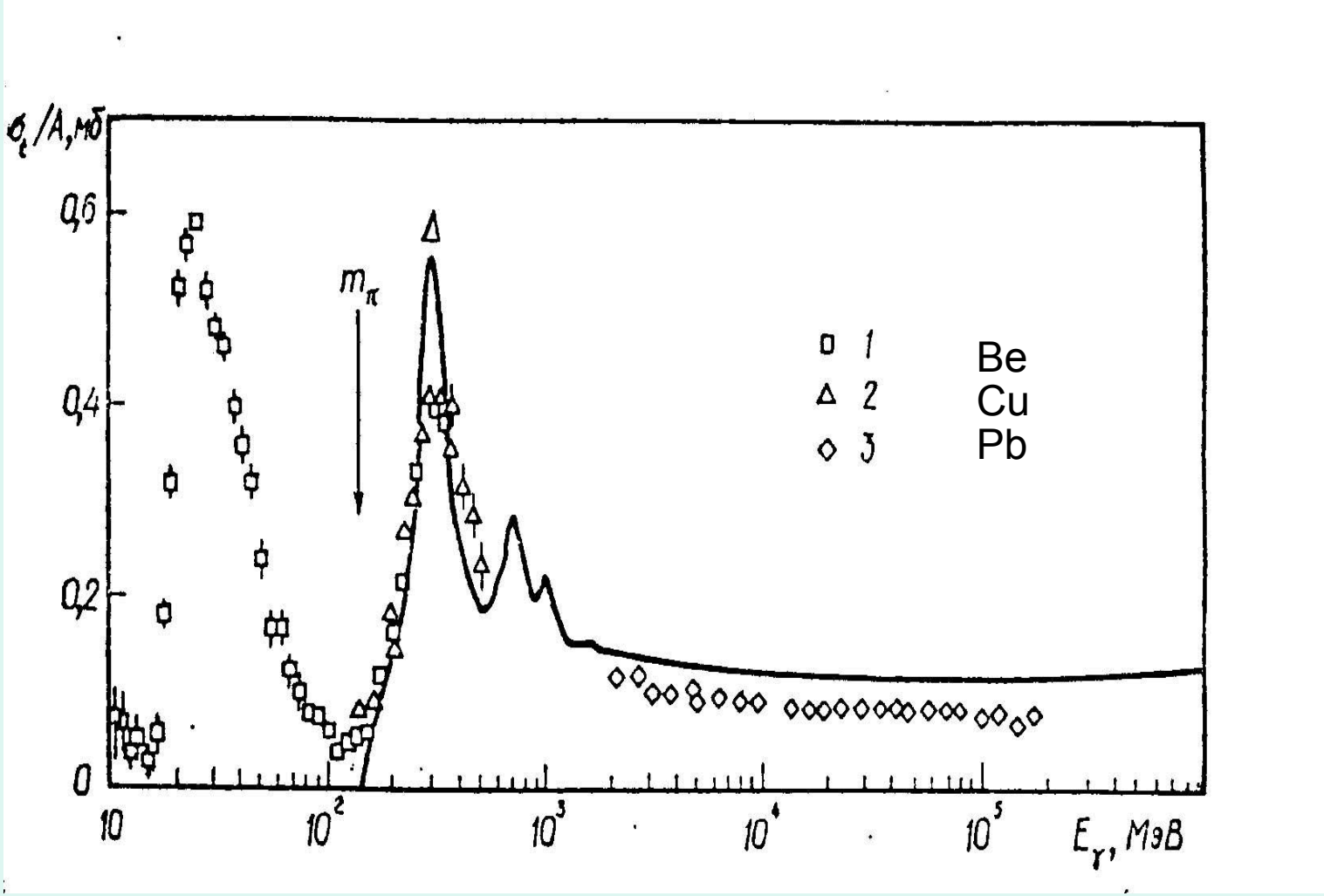
Взаимодействие реальных и виртуальных фотонов с ядрами и нуклонами в резонансной области энергий.

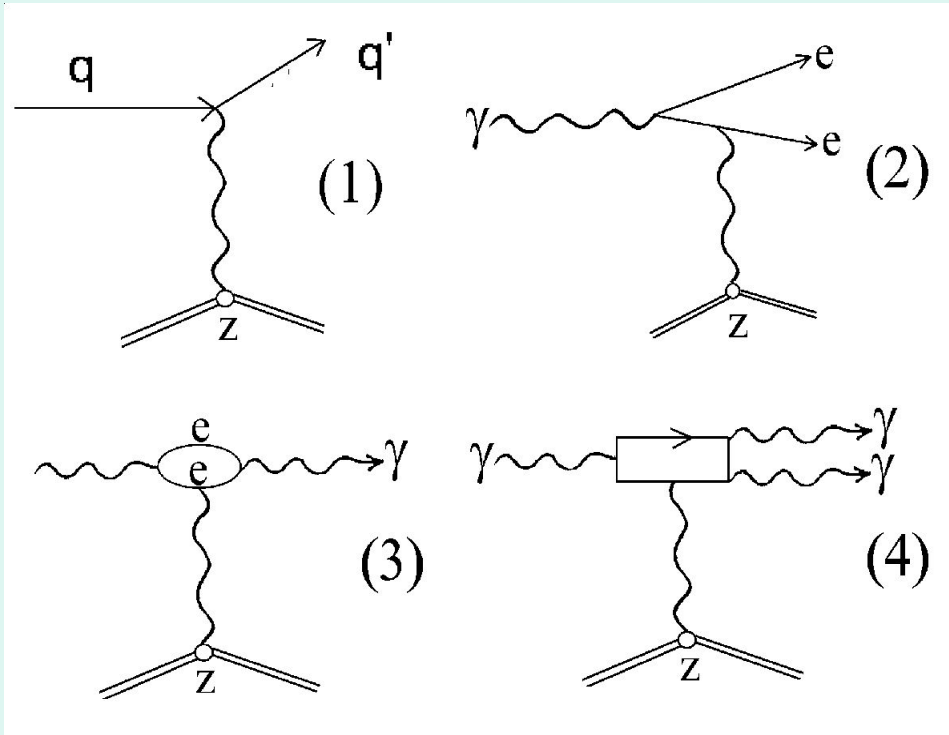
НЕДОРЕЗОВ В. Г.
Институт ядерных исследований РАН

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 x [(F1 gN)2 +t (F2 gN)2 + 2t (F1 gN +F1 gN)2 tan2 (q/2)]*
- *t = Q2 /4MN2 ,*
- *F1,2 g,p = 2/3 F1,2 u - 1/3 F1,2 d - 1/3 F1,2 s ,*
- *F1,2 gN = 2/3 F1,2 d - 1/3 F1,2 u - 1/3 F1,2 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:

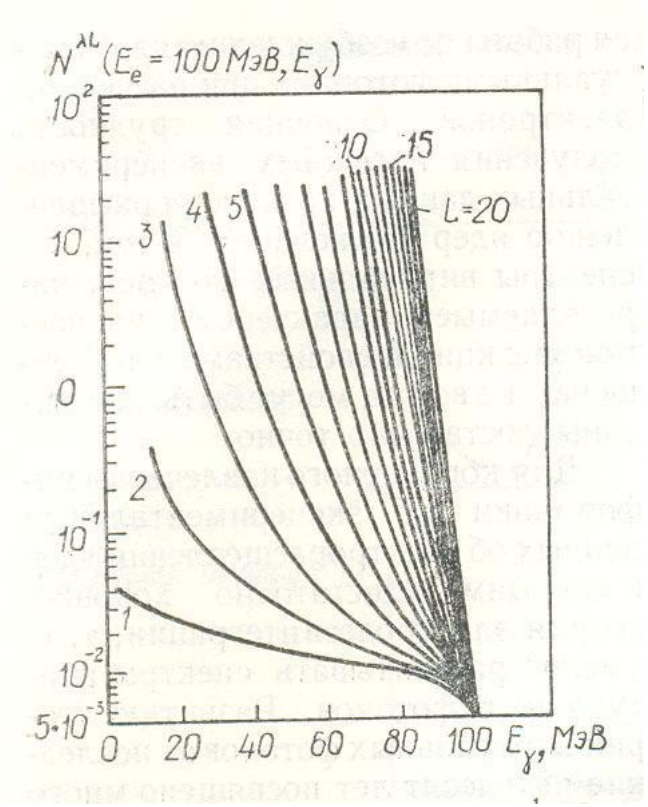
$C_L = 2(E_e - E_\gamma)/E_\varepsilon$ for $\lambda l = E1$,

$C_L = 0$ for $\lambda l = M1$,

$C_L = 8/3\,[(E_e - E_\gamma)/E_\varepsilon]^2$ for $\lambda l = E2$,

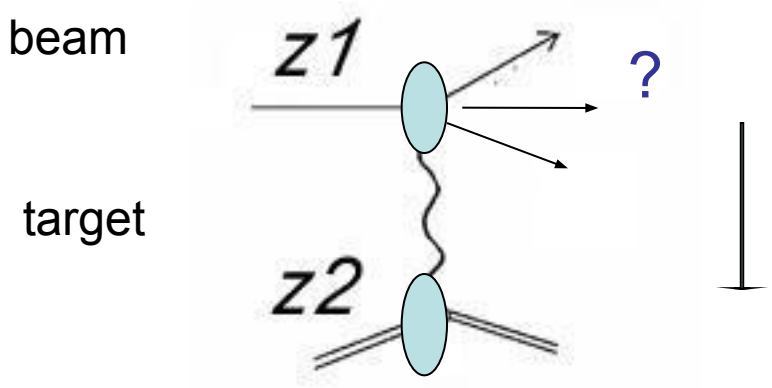
C_L depends on the nuclear size and charge

Z=92



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

Кулоновская диссоциация



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

Поток виртуальных фотонов

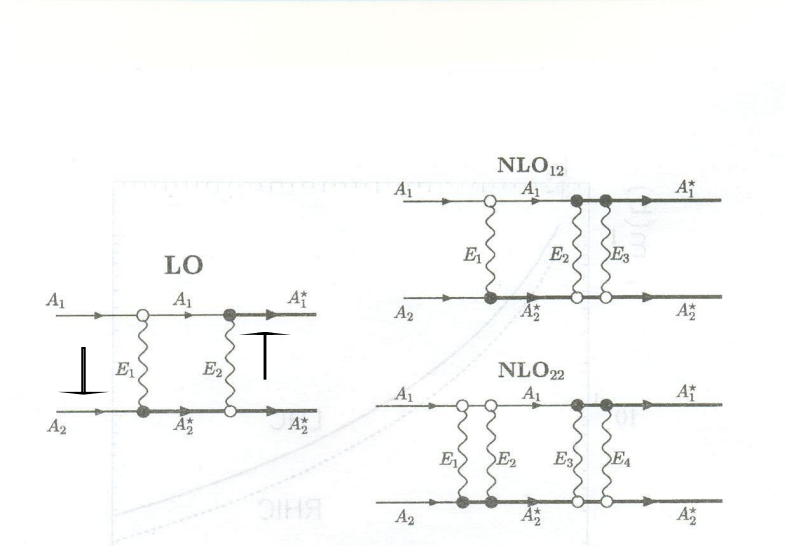
$$F = \frac{Z^2\alpha}{\pi^2 b^2}\frac{1}{\omega}$$

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

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

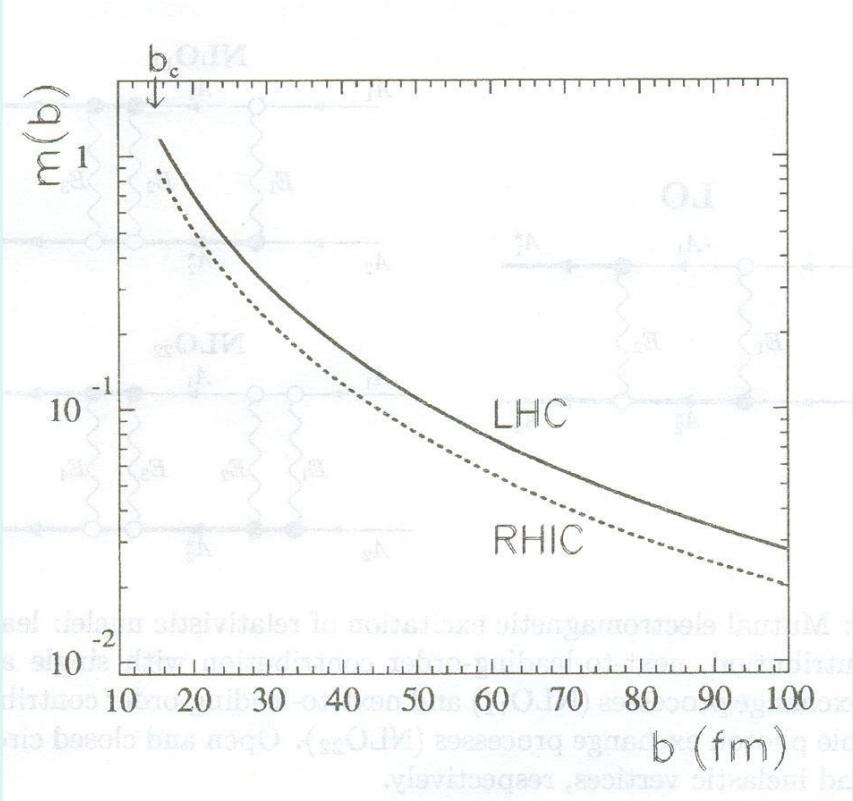
[Л.Е.Лазарева, С.М.Поликанов, B.Berman]

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



$$\sigma_s^{ED}(\mathrm{LO}) = 2\pi \int_{b_c}^{\infty} bdbP_s(b) = 2\pi \int_{b_c}^{\infty} bdbm_{A_2}(b)e^{-m_{A_2}(b)},$$

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



b – impact parameter
LO – leading order

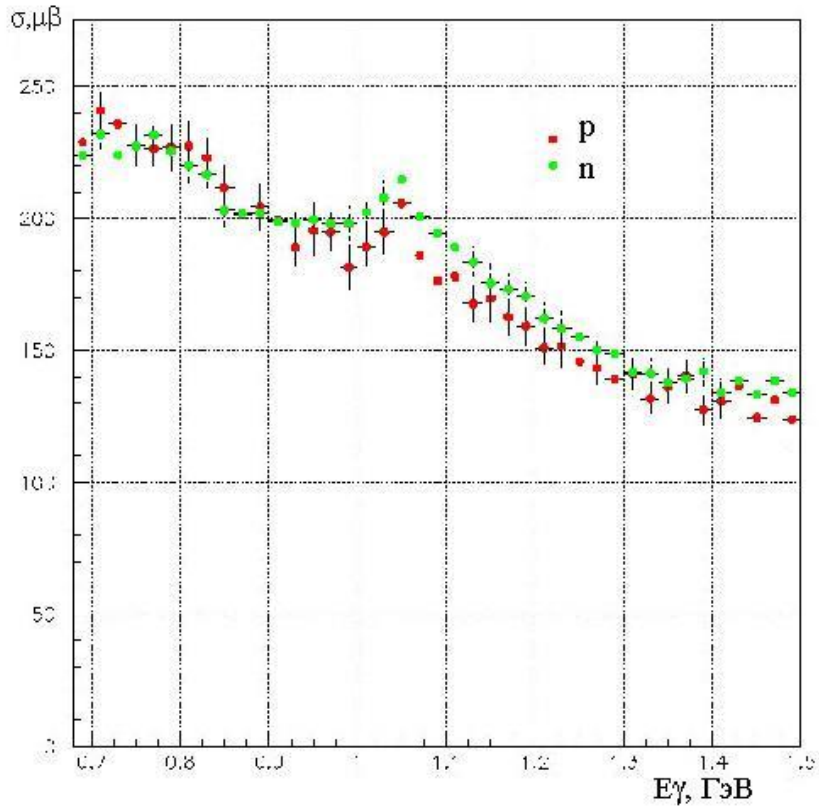
I.A.Pschenichnov , EMIN 2006

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.)

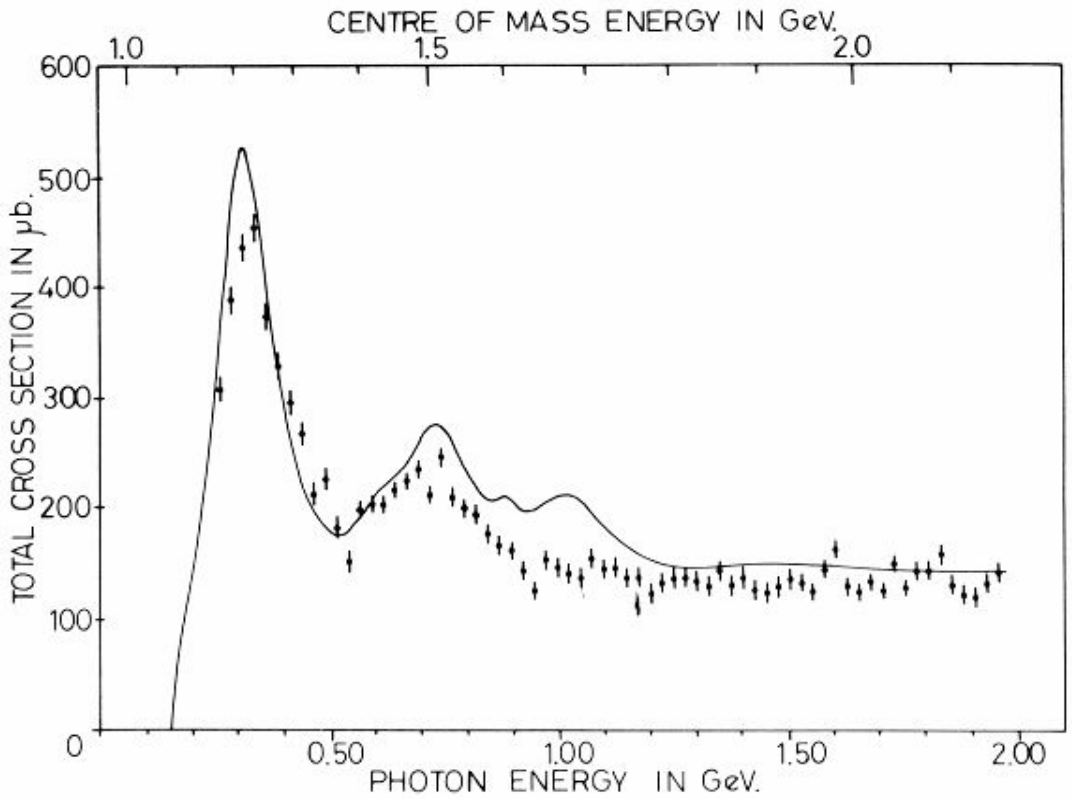


Fig. 8. This shows the values of σ_T^n in the resonance region obtained by subtracting the measured σ_T^p values from the deuterium values corrected for internal motion of the nucleons. The solid curve is the smooth fit to the measured σ_T^p values.

Амплитуда комптоновского рассеяния фотона на нуклоне и дисперсионные соотношения:

$$f = \mathbf{e'^*}\ \mathbf{e}\ f_1(w) + i\, w\, \boldsymbol{\sigma}\ \mathbf{e'^*} \times \mathbf{e}\, f_2(w)$$

e - калибровочно инвариантный оператор ЕМ поля, $\boldsymbol{\sigma}$ **-** спиновый оператор нуклона.

$f1(0) = -\ (\mathbf{a} / \mathbf{Z^2} / \mathbf{M})$, $f2(0) = (\mathbf{a}\, \mathbf{k}^2 / \mathbf{2M}^2)$, M – масса, $\mathbf{a} = \mathbf{e^2} / \mathbf{4\pi} = 1/137$, $\mathbf{eZ}$ – электрический заряд, $\mathbf{k}$ - аномальный магнитный момент нуклона

Дисперсионные соотношения : $f_1(0) = -\ (\alpha / Z^2 / M) + \omega^2/2\pi^2\ \sigma_{tot}(w')/f(\omega')\, d\omega'$
$f2(0) = (\alpha\, k^2 / 2M^2) + \omega^2/2\pi^2\ \Delta\sigma_{tot}(\omega')/\varphi(\omega')\, d\omega'/\omega'$, $\sigma_{tot}(\omega) = \sigma_{3/2}(\omega) + \sigma_{1/2}(\omega)$, $\Delta\sigma_{tot}(\omega) = \sigma_{3/2}(\omega) - \sigma_{1/2}(\omega)$,

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 $Z^2\alpha > 1$

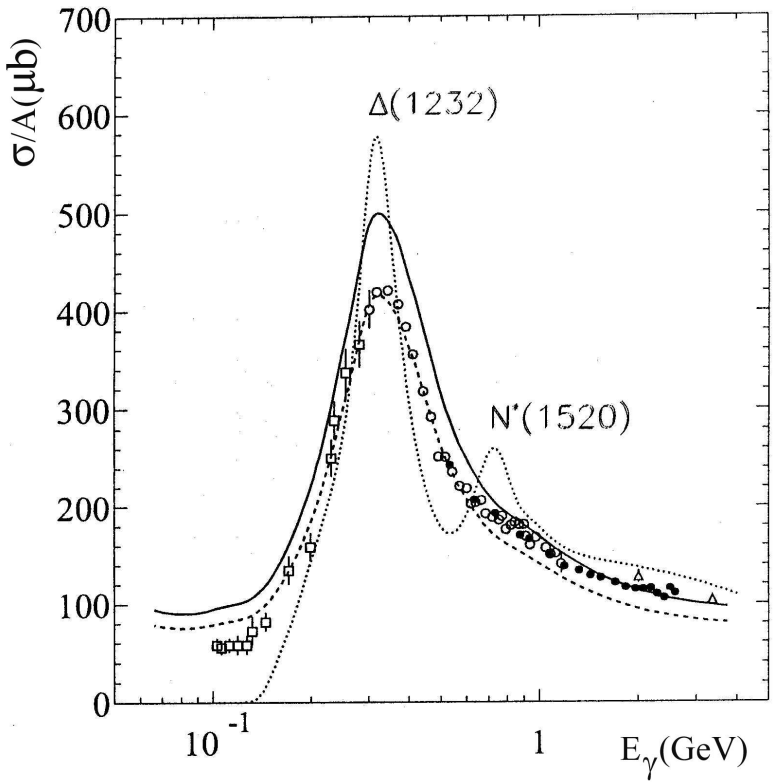
В совместном эксперименте ИЯИ РАН - ИЯФ СО РАН обнаружено отклонение от принципа аддитивности в полных сечениях фотопоглощения, позднее подтвержденное в JLAB.

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

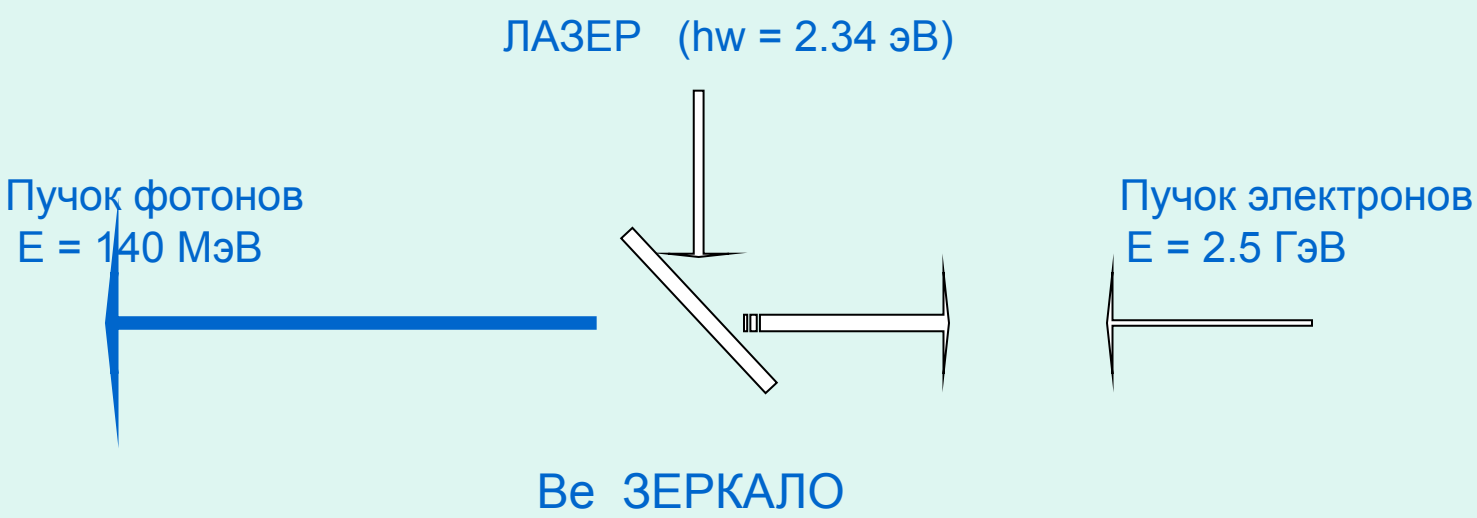
Сечения фотоделения и полного фотопоглощения ядер - актинидов.

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

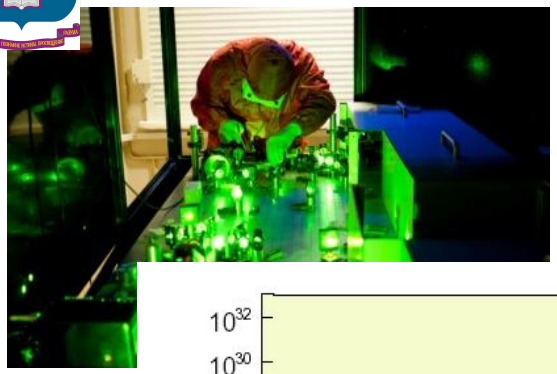
В.П.Кандидов е.а. Кв.Эл-ка 39,3 (2009) 205.

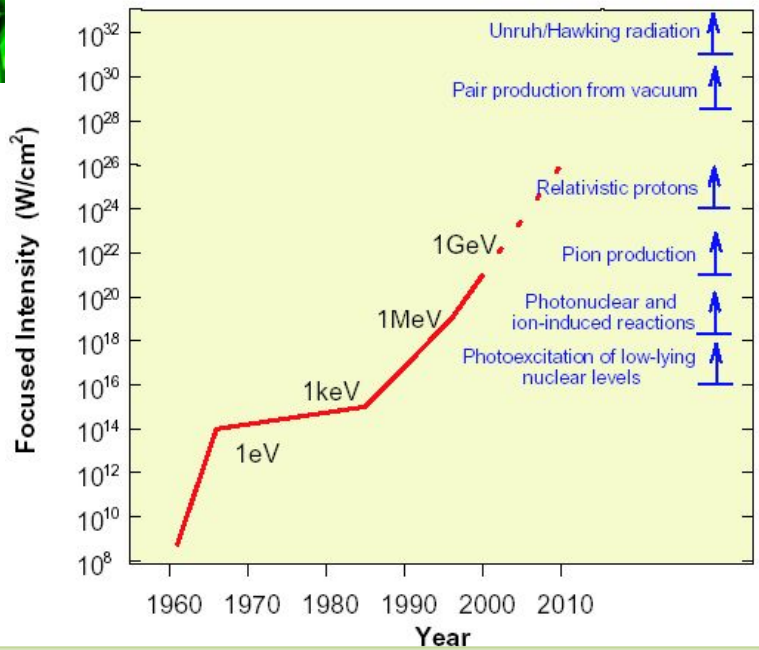
Длительность импульсов –	10^{-14} – 10^{-12} с
Энергия	10 мДж – 26 Дж
Пиковая мощность	0,2 – 200 ТВт
Интенсивность	10^{11} – 10^{13} Вт/см^2
Длины волн	0,248; 0,527; 0,800; 1,06; 1,24 мкм

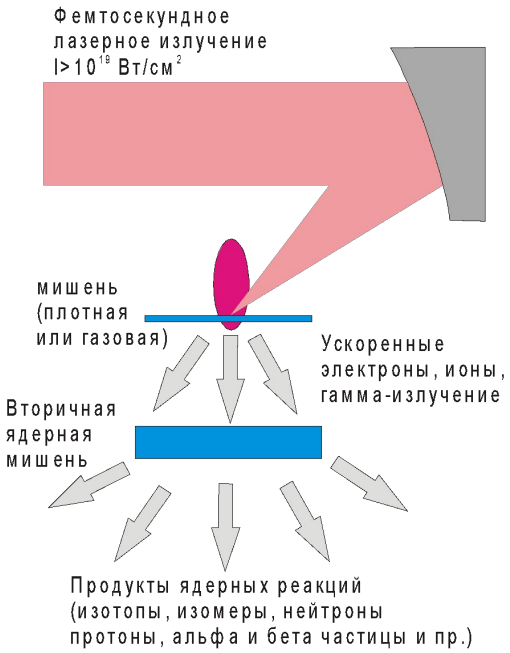
Нелинейное взаимодействие со средой

Общая схема лазерно-индуцированных ядерных процессов

А.Б.Савельев (МГУ)

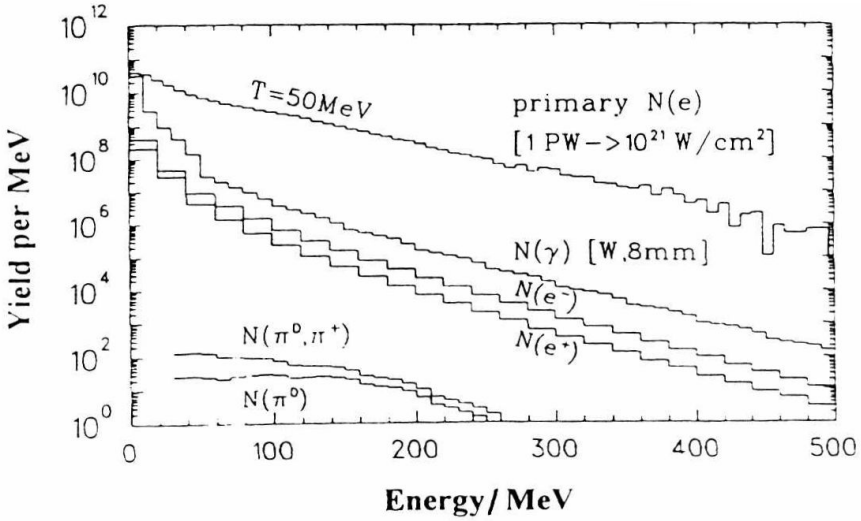






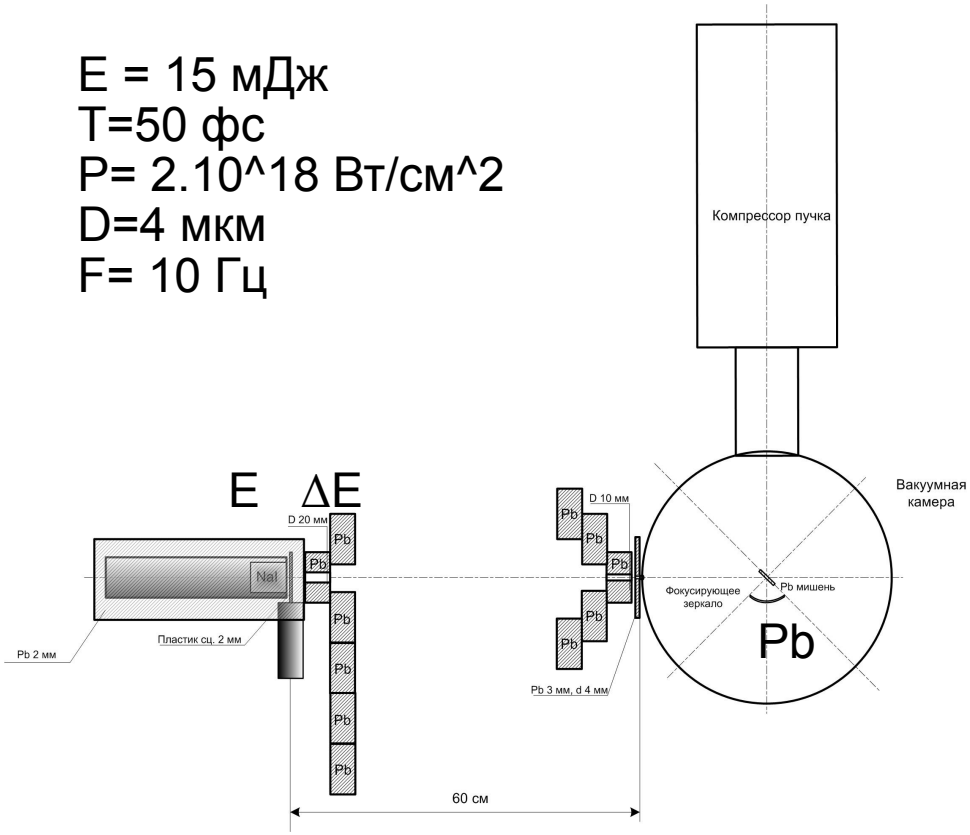
Интенсивность лазерного излучения стремительно растет, одновременно растет и энергия получаемых электронов. Уже сейчас получены пучки электронов с энергией свыше 1 ГэВ, пучки протонов и

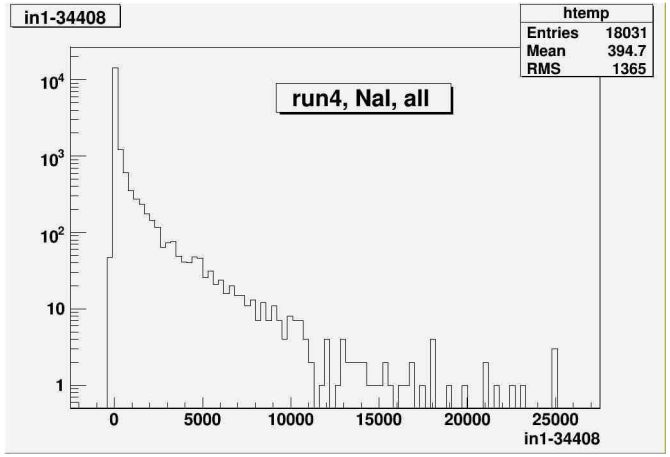
Спектры вторичных частиц (расчет) при мощности лазерного излучения 1ПВт.

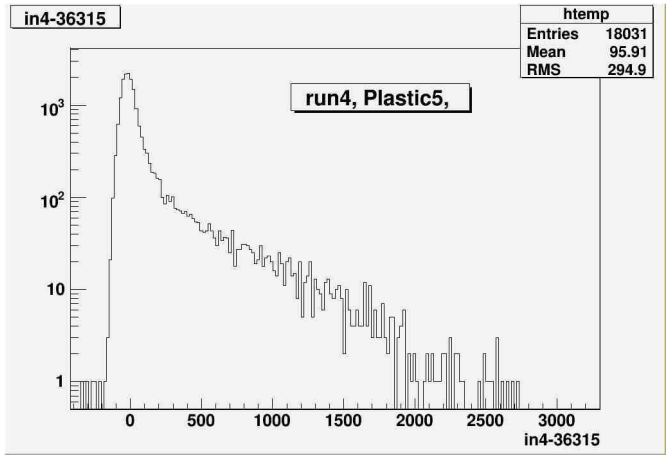


Первые результаты МГУ — ИЯИ РАН (2011)

E = 15 мДж
T=50 фс
P= 2.10^18 Вт/см^2
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 тераватных 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

Главанаков 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. ЛВЭ ОИЯИ, Дубна

Топорков Дмитрий Константинович, д.ф.-м.н, ИЯФ СО РАН, Новосибирск

Шведунов 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