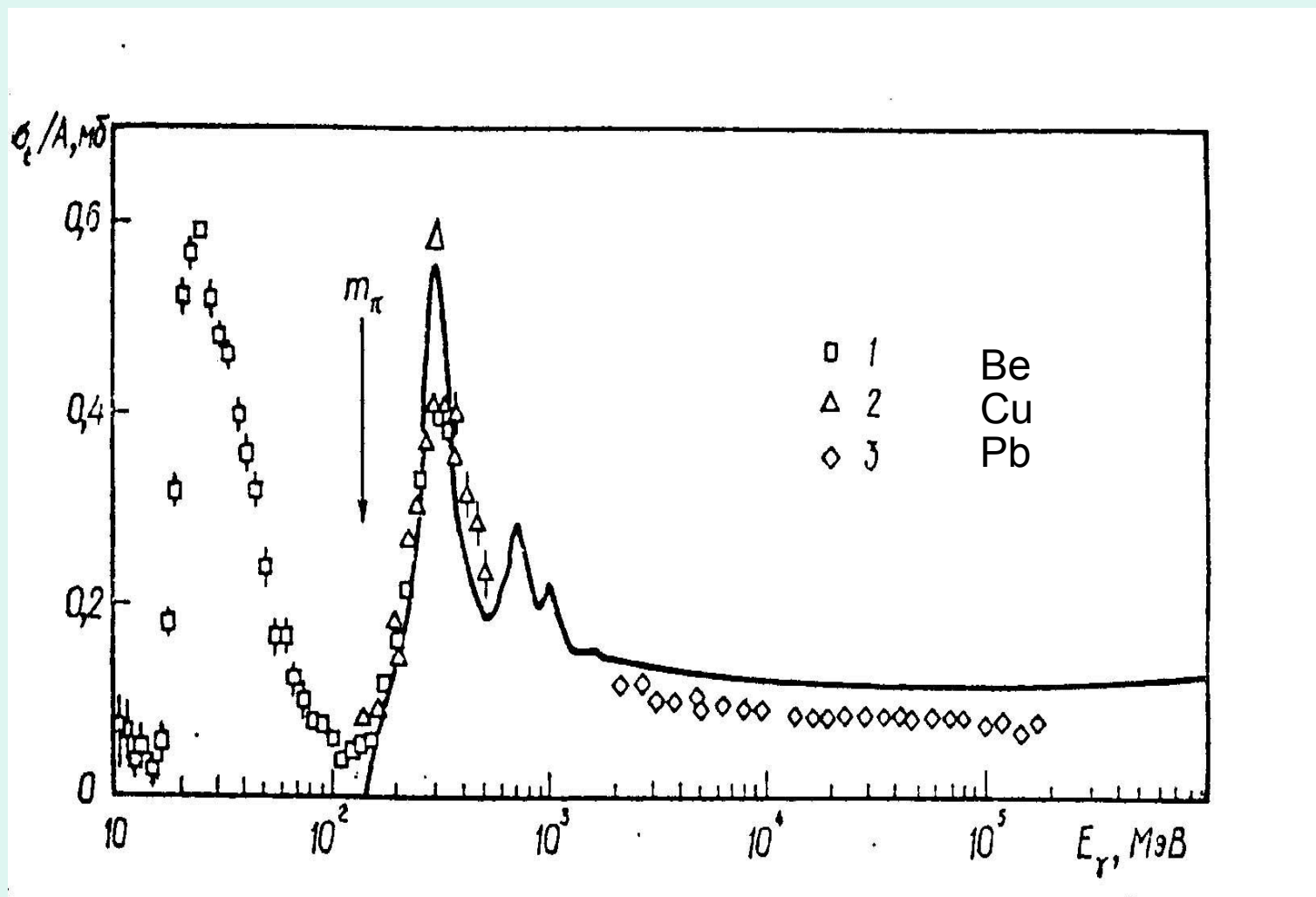


*Взаимодействие реальных и виртуальных фотонов  
с ядрами и нуклонами в резонансной области энергий.*

*НЕДОРЕЗОВ В. Г.  
Институт ядерных исследований РАН*

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

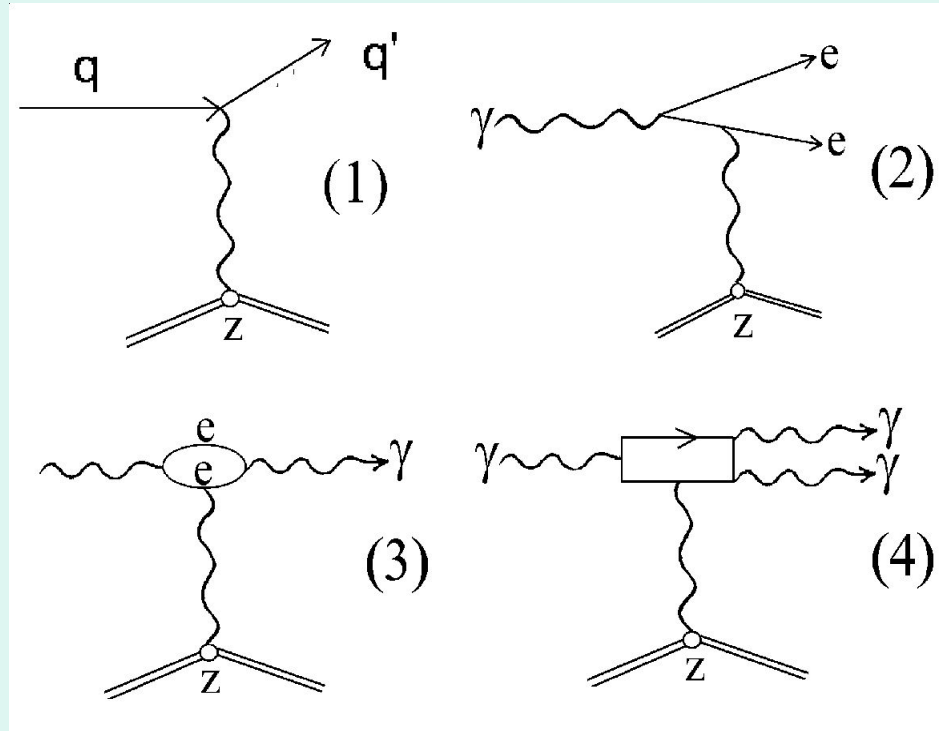
- Оптическая анизотропия ядер и нуклонов,
- Правила сумм и спиновые свойства нуклона
- Адронизация фотонов в асимптотической области энергий,



# 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).

$\lambda l$  – multipolarity,  
 $\alpha$  – electromagnetic fine structure constant,

$C_L$  - structure function:

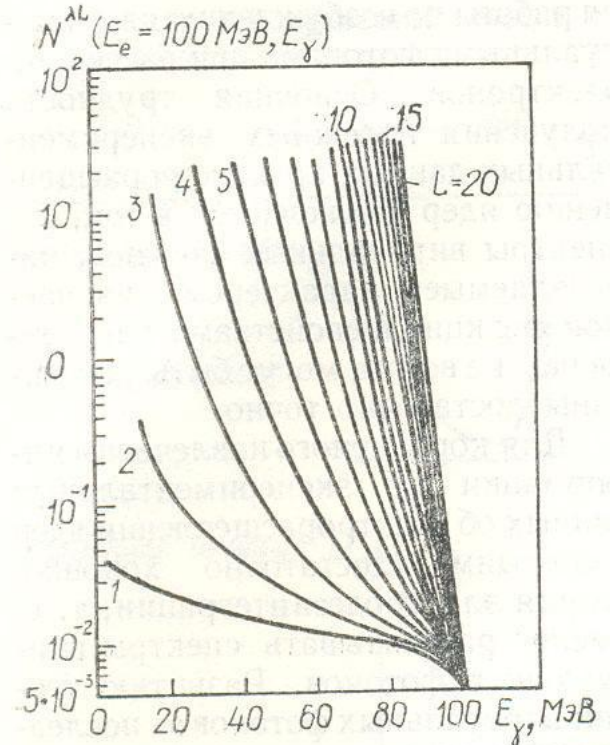
$$C_L = 2(E_e - E_\gamma)/E_\varepsilon \quad \text{for } \lambda l = E1,$$

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

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

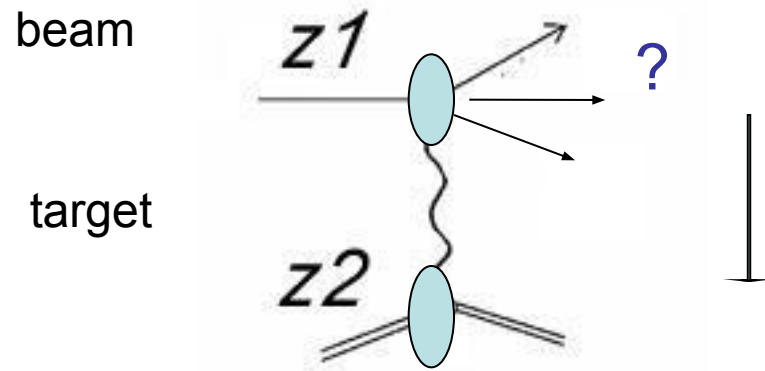
$C_L$  depends on the nuclear size and charge

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

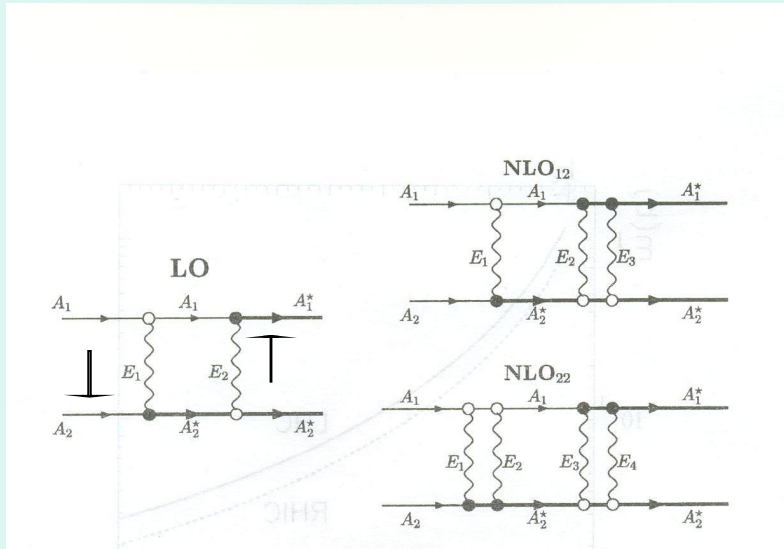
$$F = \frac{Z^2 \alpha}{\pi^2 b^2} \frac{1}{\omega}$$

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

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

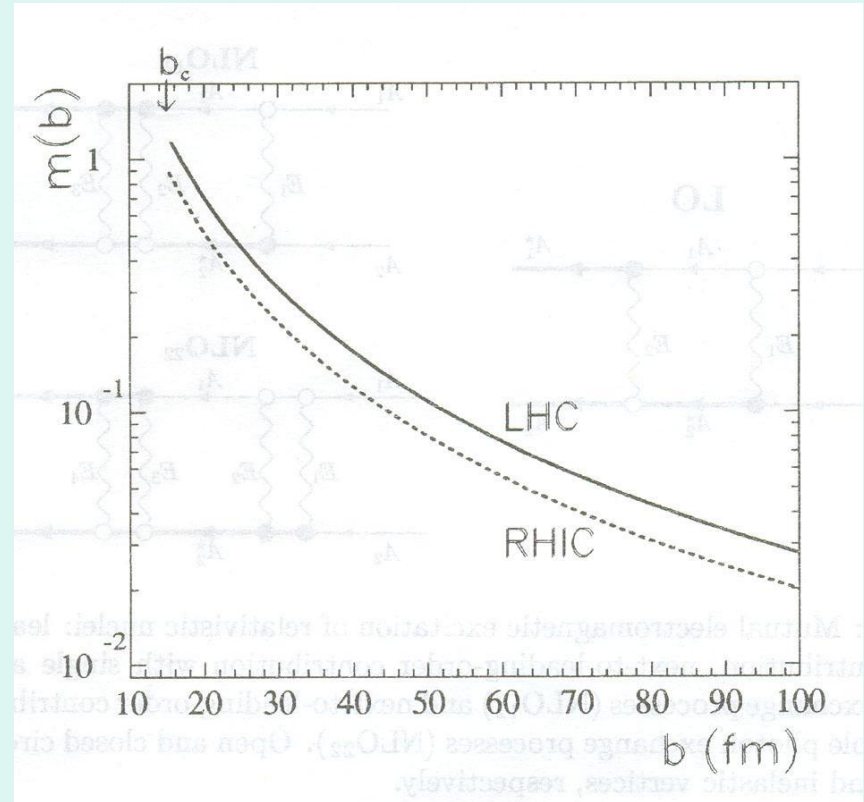
[Л.Е.Лазарева, С.М.Поликанов, В.Вerman]

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



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

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



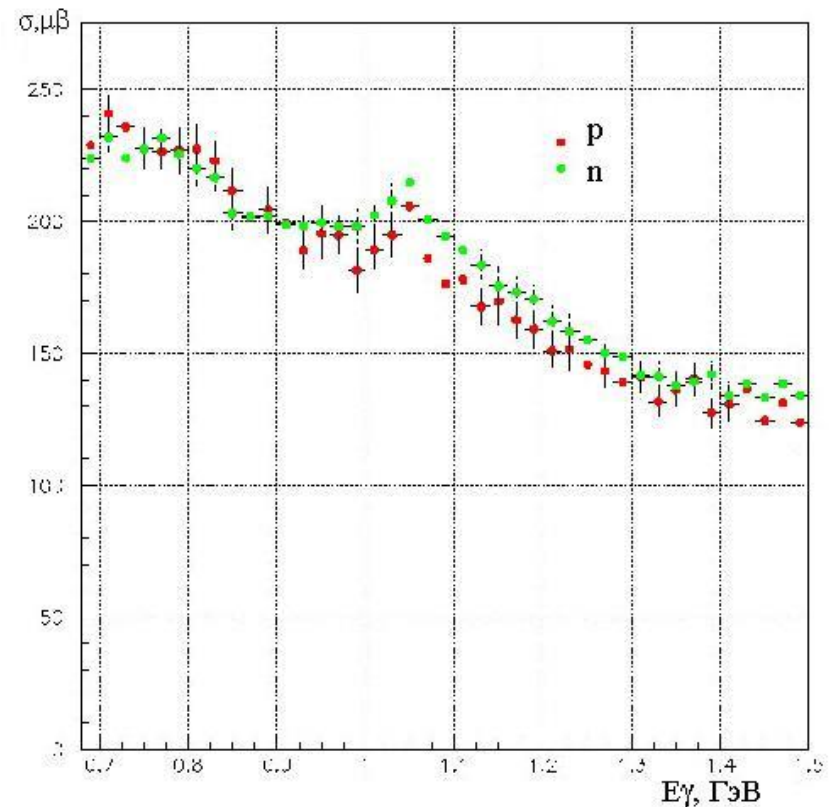
$b$  – impact parameter  
LO – leading order

## 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.)

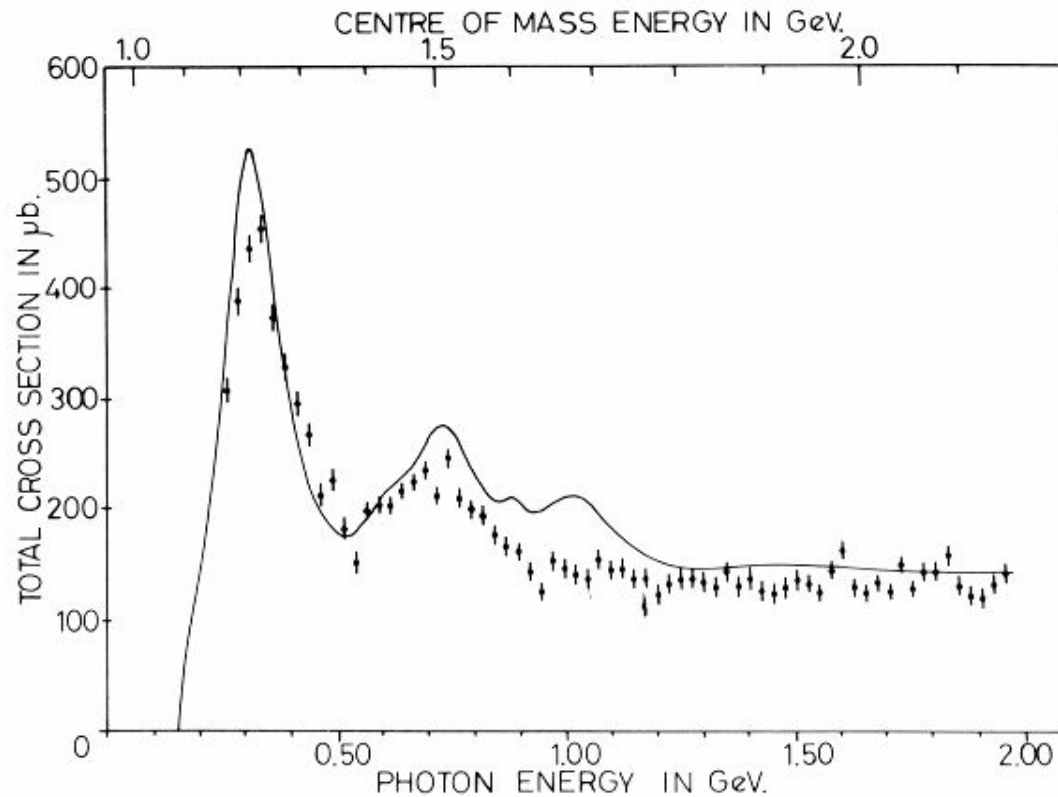


Fig. 8. This shows the values of  $\sigma_{\text{T}}^{\text{n}}$  in the resonance region obtained by subtracting the measured  $\sigma_{\text{T}}^{\text{p}}$  values from the deuterium values corrected for internal motion of the nucleons. The solid curve is the smooth fit to the measured  $\sigma_{\text{T}}^{\text{p}}$  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,  $\sigma$  - 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 $Z^2\alpha > 1$

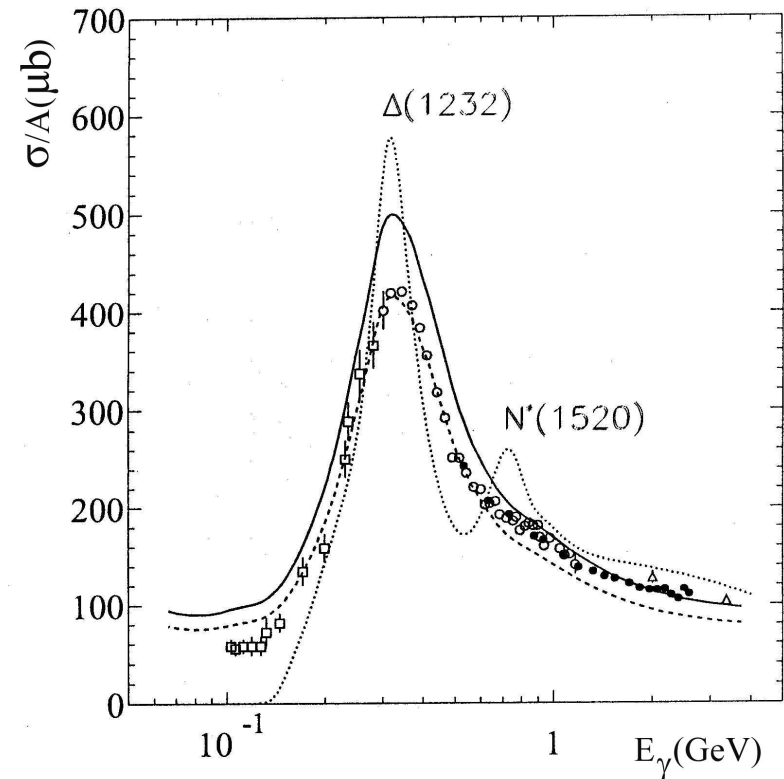
В совместном эксперименте ИЯИ РАН - ИЯФ СО РАН обнаружено отклонение от принципа аддитивности в полных сечениях фотопоглощения, позднее подтвержденное в JLAB.

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

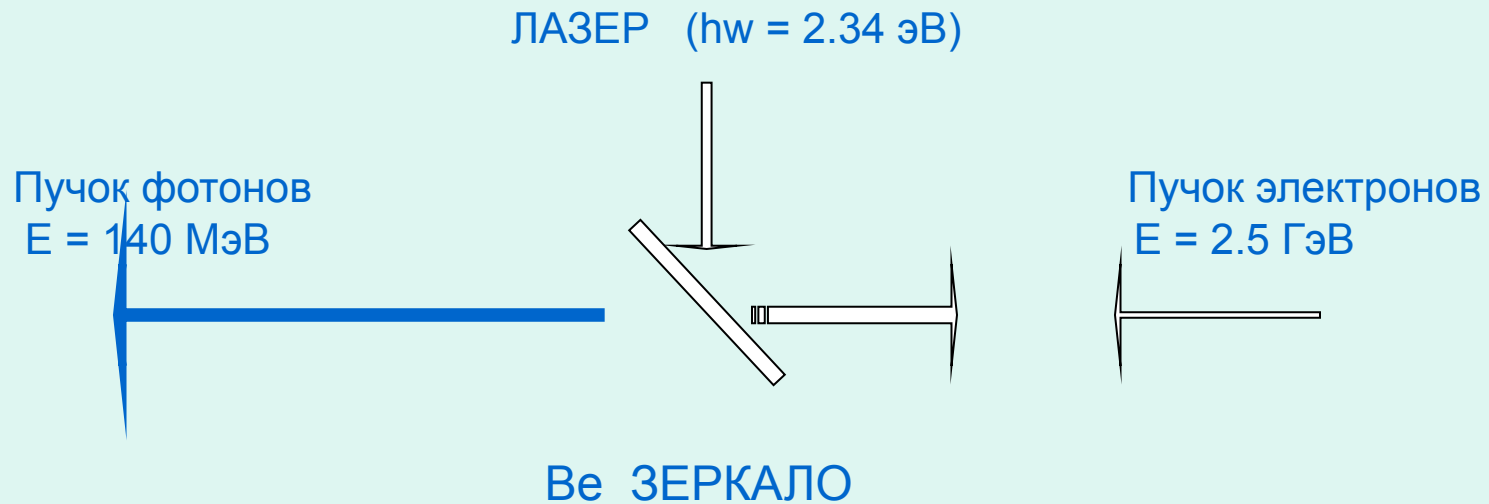
# Сечения фотodelения и полного фотопоглощения ядер - актинидов

[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 <sub>2</sub> (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 <sup>2</sup>
Длины волн	0,248; 0,527; 0,800; 1,06; 1,24 мкм

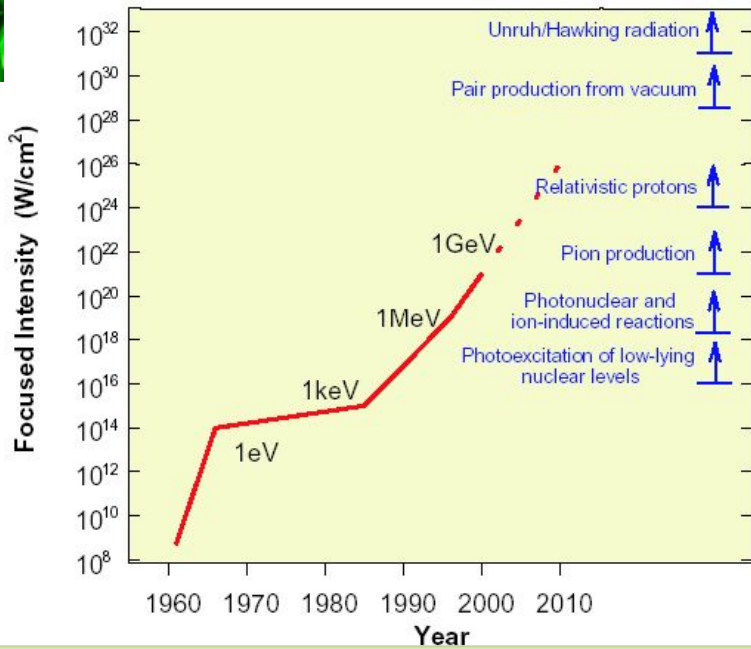
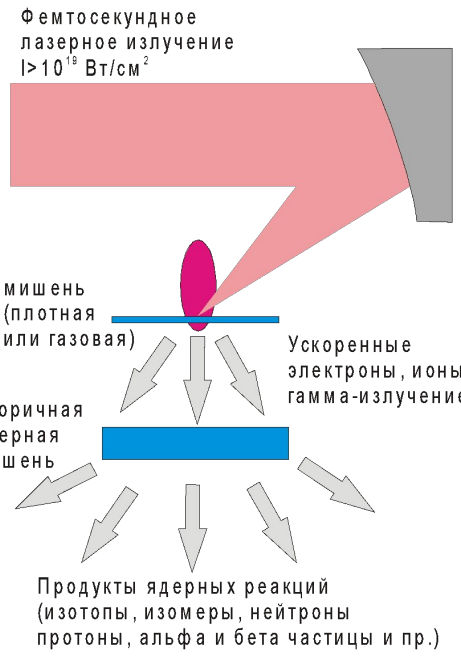
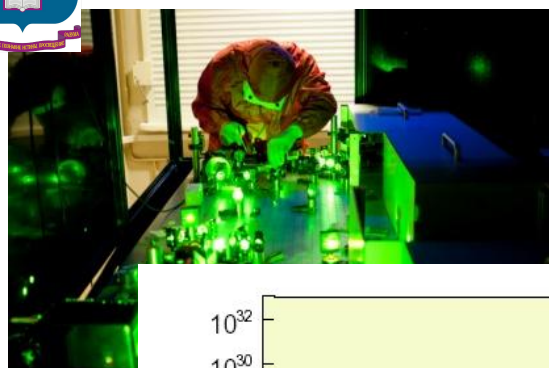


**Нелинейное взаимодействие со средой**

# Общая схема лазерно-индуцированных ядерных процессов

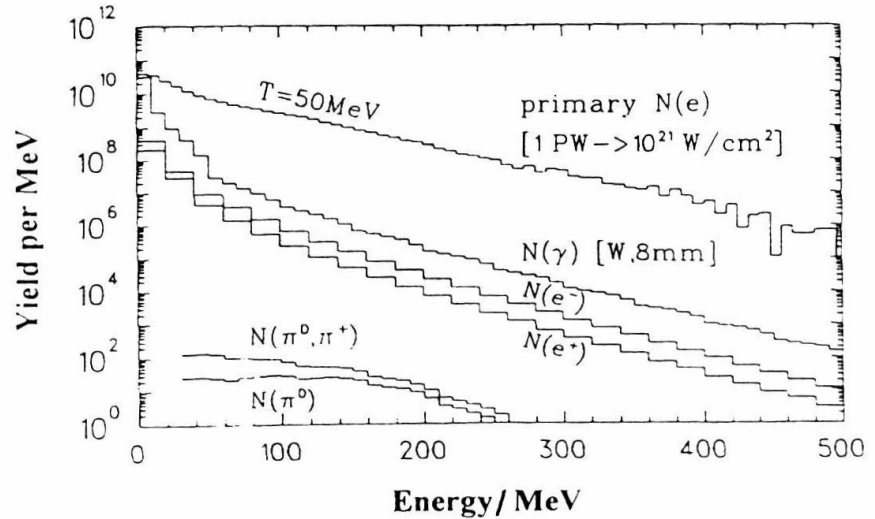


А.Б.Савельев (МГУ)



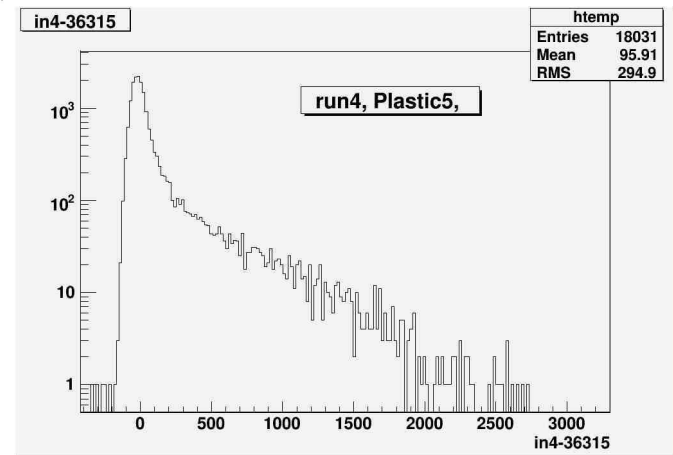
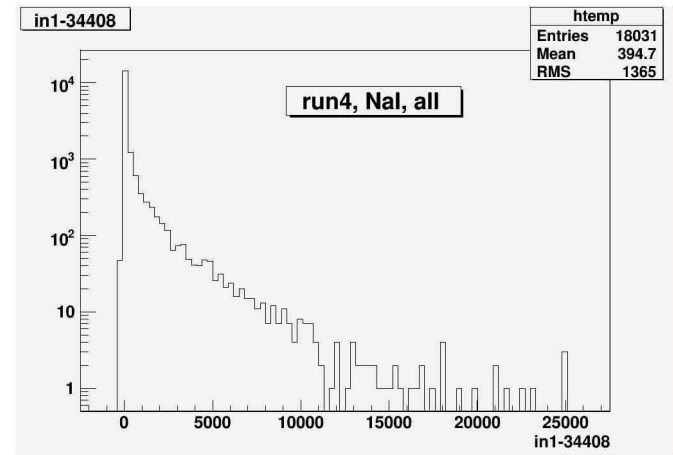
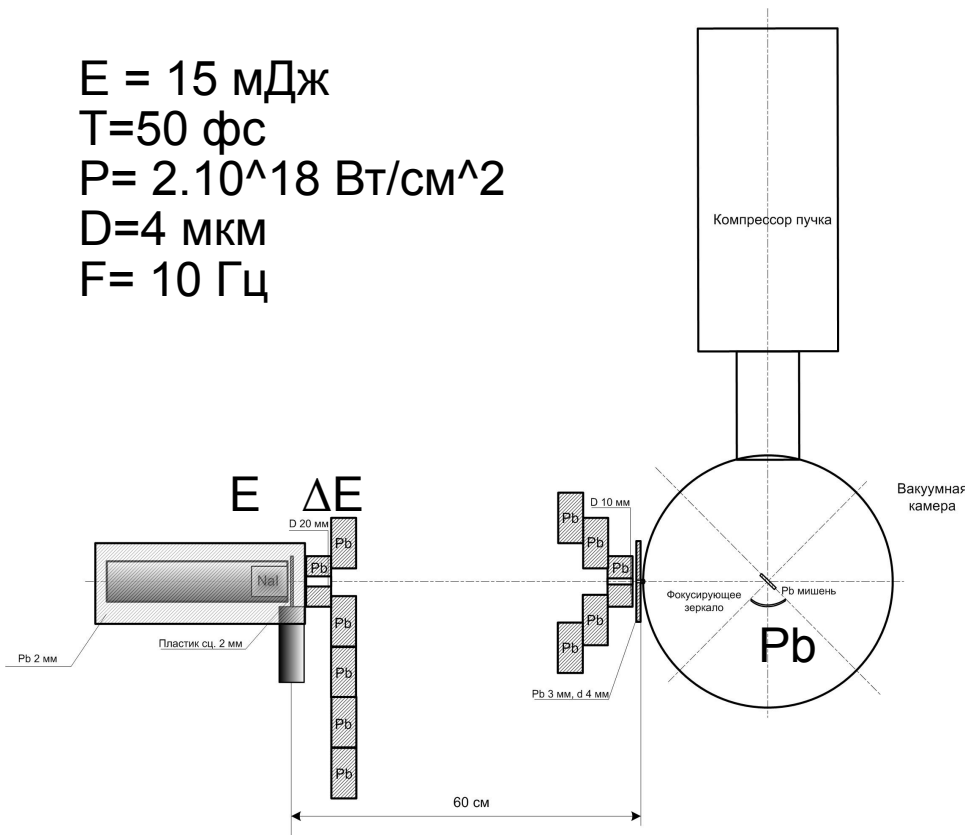
Интенсивность лазерного излучения стремительно растет, одновременно растет и энергия получаемых электронов. Уже сейчас получены пучки электронов с энергией свыше 1 ГэВ, пучки протонов и

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



# Первые результаты МГУ — ИЯИ РАН (2011)

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



# 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