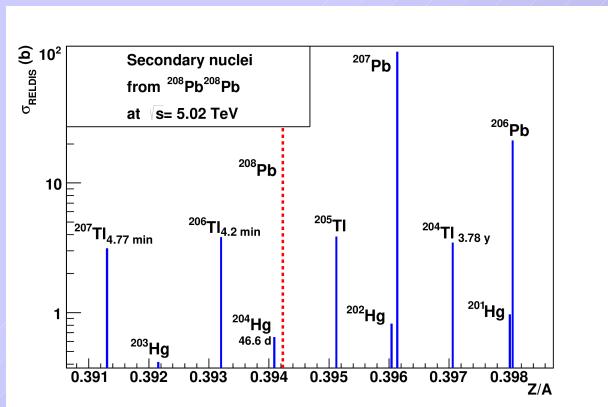


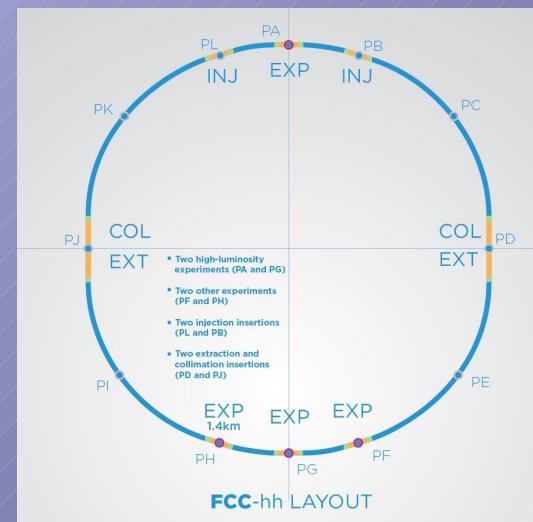
# Ядерные данные для коллайдеров ядро-ядро

И. А. Пшеничнов  
Институт ядерных  
исследований РАН

*pshenich@inr.ru*



НИИЯФ МГУ  
Семинар ОЭПВАЯ  
20.11.18



**На БАК в ЦЕРНе изучаются столкновения ядер с энергиями в  $\sim 3000$  раз превышающими их массу, не говоря уже об энергии связи нуклонов и энергии возбуждённых состояний ядер.**

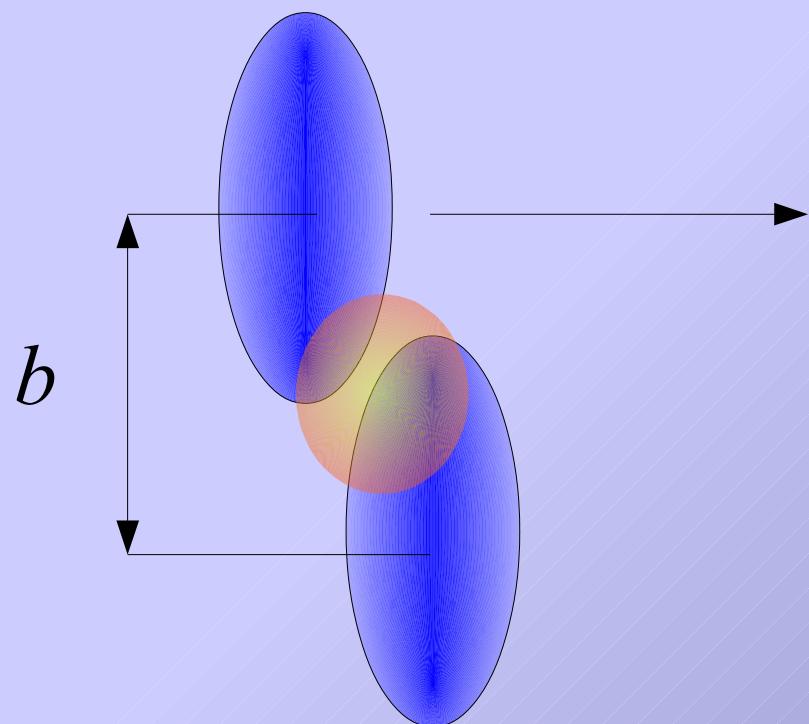
- Рекордные плотности энергии дают возможность исследовать фазовый переход между адронной материей и кварк-глюонной плазмой.
- На первый взгляд влиянием ядерной структуры в ядерно-ядерных столкновениях можно полностью пренебречь: значение имеют только количества нуклонов в каждом из ядер и размеры ядер.
- Однако в дальнейшем будет показано, что классическая ядерная физика, физика фотоядерных реакций, ядерная структура занимают определённое место на БАК.

# Содержание

- Физика электромагнитных взаимодействий на CERN SPS и LHC. Основные понятия, теория, модель RELDIS.
- Эксперименты по изучению ЭМД и сравнение теории с их результатами.
- Технические проблемы на LHC в результате электромагнитных взаимодействий  $^{208}\text{Pb}$ , ускорение других ядер?
- ЭМД на будущих коллайдерах: HL-LHC, HE-LHC, FCC-hh. Альтернатива  $^{208}\text{Pb}$ ?

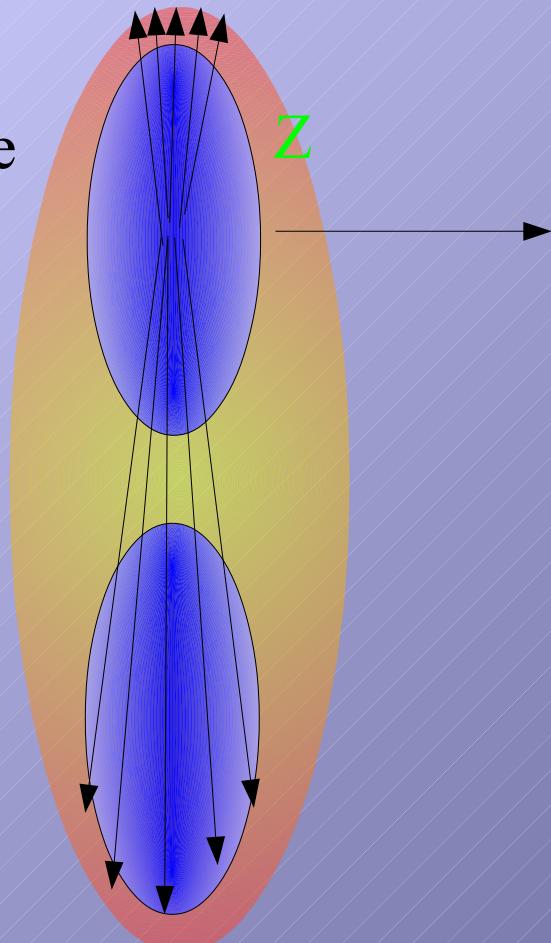
# *В зависимости от прицельного параметра наблюдаются либо адронные либо электромагнитные взаимодействия*

Адронные взаимодействия



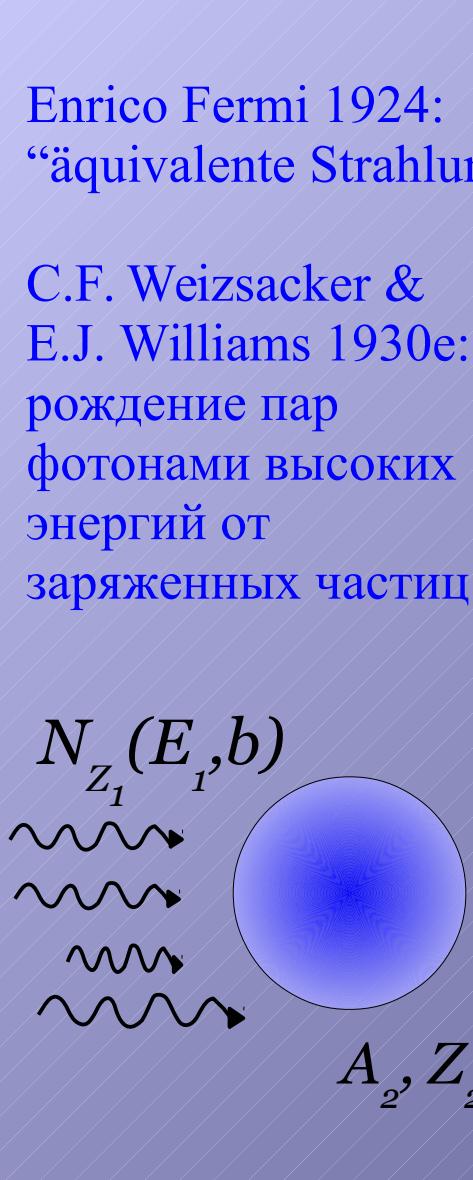
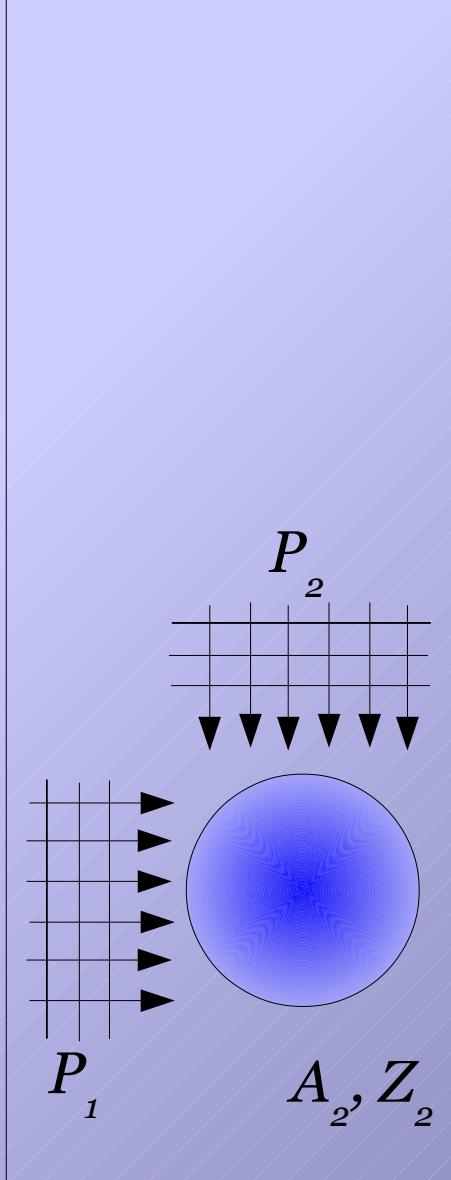
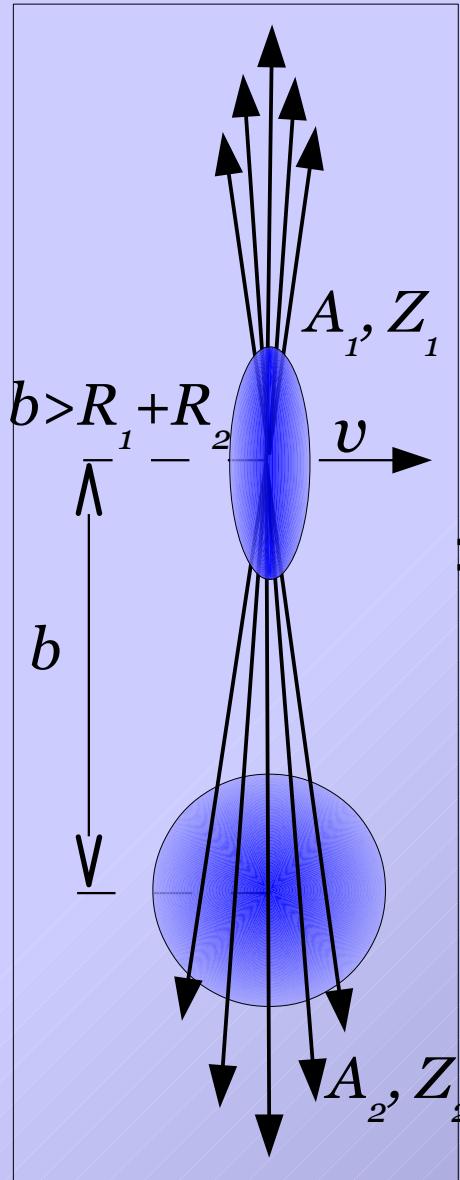
Плотности ядер перекрываются.  
Сильные взаимодействия.

Ультра-  
периферические  
взаимодействия

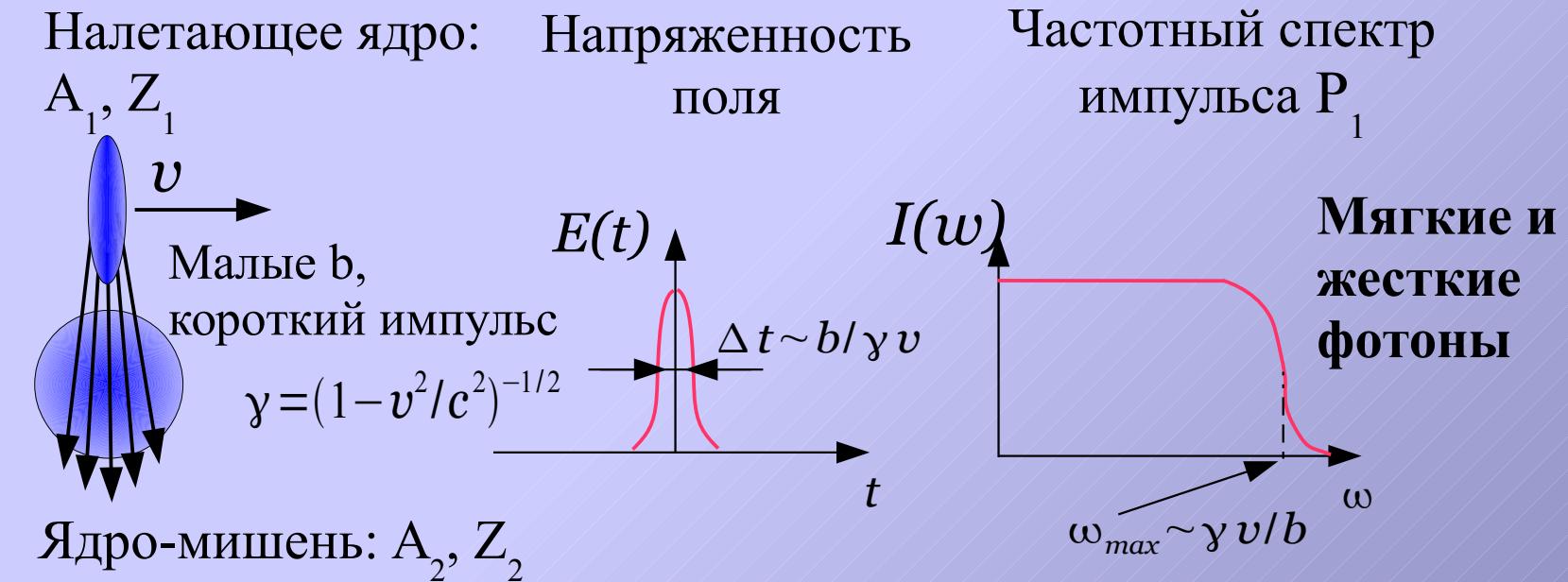


Нет перекрытия ядерных  
плотностей. Дальнодействующие  
электромагнитные силы.

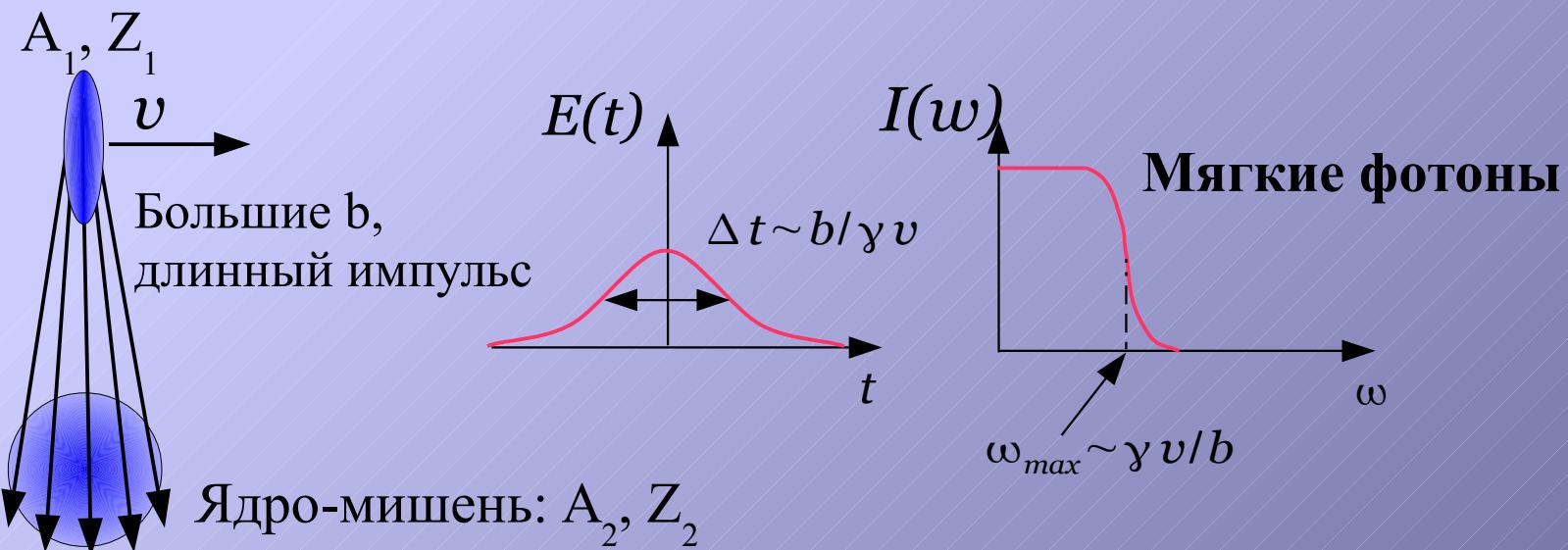
# Метод эквивалентных фотонов Вайцзеккера-Вильямса



# Спектр частот эквивалентного излучения



Налетающее ядро:



# Спектр фотонов Вайцзеккера-Вильямса

Спектр эквивалентных фотонов от ядра  $(A_1, Z_1)$ ,  $\gamma \gg 1$   
которые поглощаются ядром  $(A_2, Z_2)$  в столкновении с прицельным  
параметром  $b$

$$N_{Z_1}(E_1, b) = \frac{\alpha Z_1^2}{\pi^2} \frac{x^2}{\beta^2 E_1 b^2} \left( K_1^2(x) + \frac{1}{\gamma^2} K_0^2(x) \right).$$

$x = E_1 b / \gamma \beta$        $\alpha$  - постоянная тонкой структуры

$K_0, K_1$  - модифицированные функции Бесселя

Среднее число фотонов, поглощённых ядром  $(A_2, Z_2)$ :

$$m_{A_2}(b) = \int_{E_{min}}^{E_{max}} dE_1 N_{Z_1}(E_1, b) \sigma_{A_2}(E_1),$$

$\sigma_{A_2}(E_1)$  - полное сечение фотопоглощения ядром  $(A_2, Z_2)$

# Интегрируем по прицельному параметру

Спектр эквивалентных фотонов от ядра  $(A_1, Z_1)$  которые поглощаются ядром  $(A_2, Z_2)$  в столкновении с прицельным параметром  $b$

$$N_{Z_1}(E_1, b) = \frac{\alpha Z_1^2}{\pi^2} \frac{x^2}{\beta^2 b^2} \left( K_1^2(x) + \frac{1}{\gamma^2} K_0^2(x) \right).$$

$x = E_1 b / \gamma \beta$        $\alpha$  - постоянная тонкой структуры

$K_0, K_1$  - модифицированные функции Бесселя

$$\xi = E_1 R / \gamma \beta$$

Интегрируем:  $n_{Z_1}(E_1) = 2\pi \int_0^\infty db b N(E_1, b) =$

$$= \frac{2\alpha Z_1^2}{\pi} \frac{1}{\beta^2} \left[ \xi K_0(\xi) K_1(\xi) - \frac{\beta^2 \xi^2}{2} (K_1^2(\xi) - K_0^2(\xi)) \right]$$

Полное сечение ЭМД

в первом порядке вычислим как:

$$\sigma^{ED} = \int_{E_{min}}^{E_{max}} \frac{dE_1}{E_1} n_{Z_1}(E_1) \sigma_{A_2}(E_1)$$

$\sigma_{A_2}(E_1)$  - полное сечение фотопоглощения ядром  $(A_2, Z_2)$

# Спектры эквивалентных фотонов — замечательные выражения

$$n(E) = \frac{2\alpha Z^2}{\pi} \frac{1}{\beta^2} \left[ \xi K_0(\xi) K_1(\xi) - \frac{\beta^2 \xi^2}{2} (K_1^2(\xi) - K_0^2(\xi)) \right]$$

$$\xi = ER/\gamma\beta$$

Получены Э. Ферми в  
1924 году и  
используются  
до сегодняшнего дня,  
когда построены и  
работают RHIC и LHC!

Die in diesem Ausdruck vorkommenden Integrale können mit den modifizierten Besselschen<sup>1)</sup> Funktionen zweiter Art, nullter und erster Ordnung ausgedrückt werden. Man hat in der Tat

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\cos \omega \kappa d \kappa}{(1 + \kappa^2)^{3/2}} = 2 \omega K_1(\omega),$$

1924 год

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\kappa \sin \omega \kappa d \kappa}{(1 + \kappa^2)^{3/2}} = -2 \omega K_0(\omega).$$

Durch diese Formeln finden wir sofort:

$$J(\nu) = \frac{8 \pi c \varepsilon^2 \nu^2}{v^4} \left\{ K_0^2 \left( \frac{2 \pi \nu b}{v} \right) + K_1^2 \left( \frac{2 \pi \nu b}{v} \right) \right\}, \quad (4)$$

setzen wir zur Abkürzung

$$B(\omega) = K_0^2(\omega) + K_1^2(\omega),$$

so finden wir

$$J(\nu) = \frac{8 \pi c \varepsilon^2 \nu^2}{v^4} B \left( \frac{2 \pi \nu b}{v} \right). \quad (5)$$

<sup>1)</sup> Siehe z. B. Gray, Mathews and MacRobert-Bessel Functions, London 1922, wo man auch numerische Tabellen dieser Funktionen finden kann. Über die Fouriersche Entwicklung dieser Kräfte siehe auch Bohr, l. c. 9

# **Вопрос: гигантские резонансы характеризуются определёнными мультипольностями $E1$ , $E2$ , $M1$ ...**

Стоит записать так: (Winther & Alder, 1979, semiclassical approach)

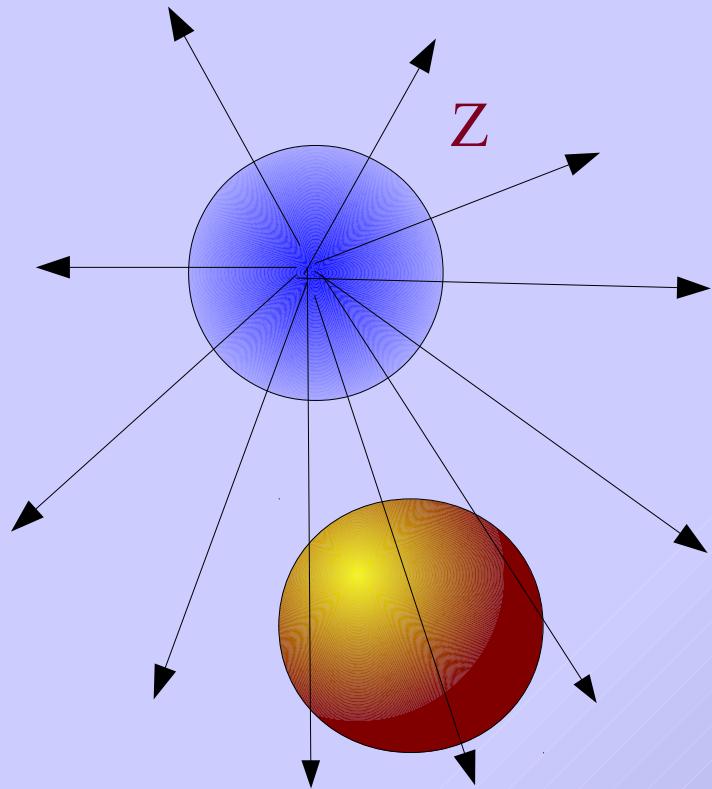
$$\sigma^{ED} = \sum_l \int_{E_{min}}^{E_{max}} \frac{dE}{E} \left[ n_{El}(E) \sigma_A^{El}(E) + n_{Ml}(E) \sigma_A^{Ml}(E) \right]$$

$$n_{E1}(E) = \frac{2\alpha Z^2}{\pi} \frac{1}{\beta^2} \left[ \xi K_0(\xi) K_1(\xi) - \frac{\beta^2 \xi^2}{2} (K_1^2(\xi) - K_0^2(\xi)) \right]$$

$$n_{M1}(E) = \frac{2\alpha Z^2}{\pi} \left[ \xi K_0(\xi) K_1(\xi) - \frac{\xi^2}{2} (K_1^2(\xi) - K_0^2(\xi)) \right]$$

$$n_{E2}(E) = \frac{2\alpha Z^2}{\pi} \frac{1}{\beta^4} \left[ 2(1 - \beta^2) K_1^2(\xi) + \xi(2 - \beta^2)^2 K_0(\xi) K_1(\xi) - \frac{\beta^4 \xi^2}{2} (K_1^2(\xi) - K_0^2(\xi)) \right]$$

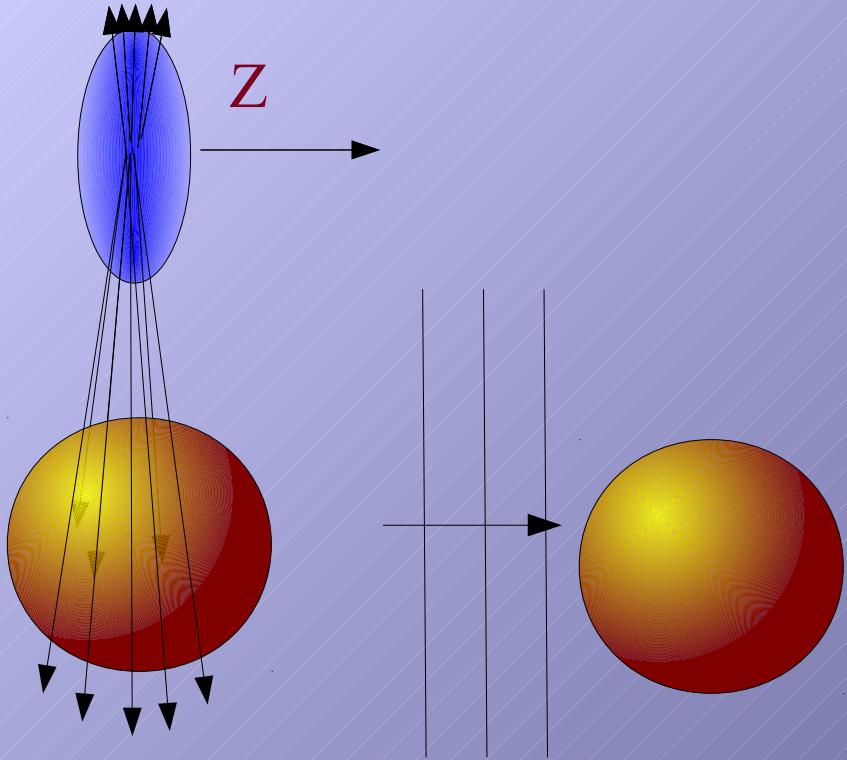
## Низкие энергии



Неоднородность поля  
внутри мишени обеспечивает  
большой вклад квадрупольной  
компоненты

$$n_{E2} \gg n_{E1} \gg n_{M1}$$

## Ультра- релятивистские энергии



Плоская волна, участвуют  
все мультипольности

$$\gamma \gg 10, \quad n_{E2} \approx n_{E1} \approx n_{M1}$$

# **В рассматриваемом ультрарелятивистском случае:**

$$\gamma \gg 10, \quad \beta \rightarrow 1$$

И спектры для всех мультипольностей совпадают!

$$n_{E2} \approx n_{E1} \approx n_{M1} = n$$

Все мультипольности входят в расчеты с одинаковым весом,  
используем

$$\sigma_A(E) = \sum_{\pi l} \sigma_A^{\pi l}(E)$$

$$\sigma^{ED} = \int_{E_{min}}^{E_{max}} \frac{dE}{E} n(E) \sigma_A(E)$$

О мультипольностях можно забыть  
и использовать выражение для  
спектра эквивалентного излучения,  
полученное Э. Ферми  
(оно совпадает с  $n_{E1}$ )!

# Ограничения из кинематики процесса

Условие когерентности (излучают все заряды в ядре с радиусом  $R$ , ядро остается в основном состоянии) ограничивает квадрат уносимого фотоном 4-импульса :

$$Q^2 \leq 1/R^2$$

поэтому излучение ядра состоит из фотонов с малой виртуальностью, в отличие от таковых в реакциях  $(e, e')$  – *фотоядерные реакции с реальными фотонами.*

Обозначим 4-импульс фотона  $q^\mu = (E_\gamma, \vec{q}) = -Q^\mu$

Считаем, что движущееся со скоростью  $v$ ,  $\gamma = 1/(1 - v^2)^{1/2} \gg 1$  ультрарелятивистское ядро осталось в своем основном состоянии а фотон унес пренебрежимо малую часть кинетической энергии ядра. Вместе с условием когерентности это дает:

$$q_{\parallel} \approx E_\gamma < \frac{\gamma}{R}, \quad q_{\perp} < \frac{1}{R}.$$

# Столкновения ядер на RHIC и LHC

- Тяжёлые ядра  $Z \sim 80$
- Огромное Лорентц-сжатие:  $\gamma_{eff} = 2\gamma_{beam}^2 - 1$
- Для LHC:  
$$\gamma_{eff} = 1.7 \times 10^7$$

«Сжатие железнодорожного состава  
до толщины листа бумаги»

RHIC:  $E_\gamma < 300 \text{ GeV}$

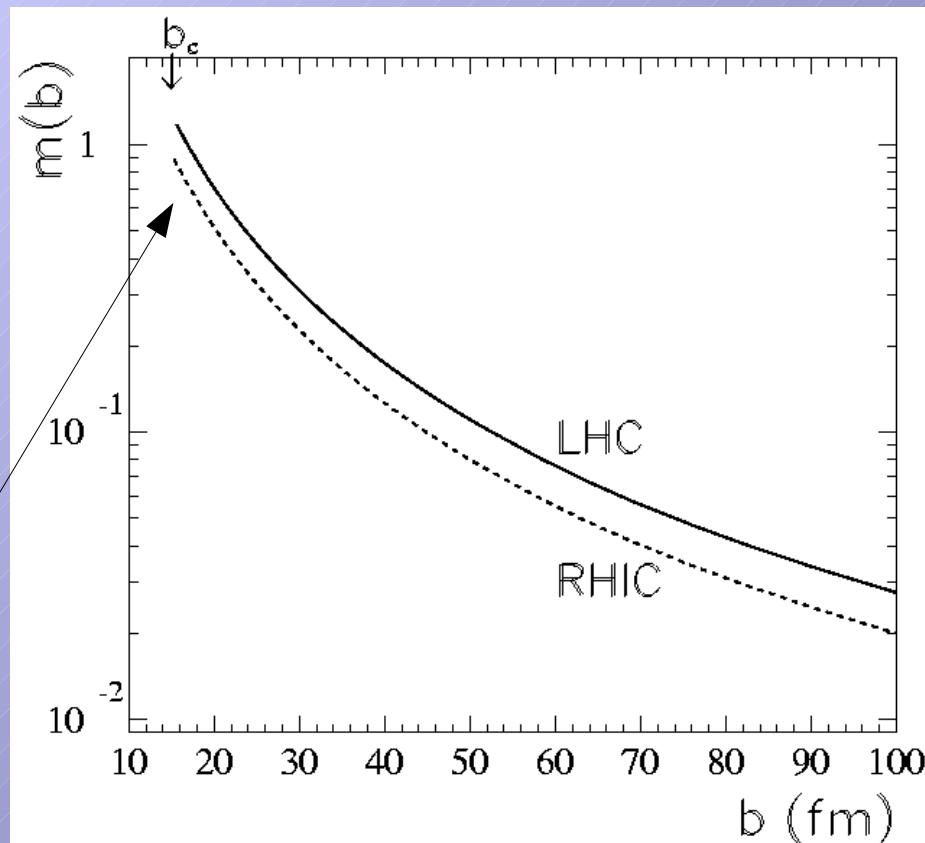
$$\sqrt{s}_{\gamma N} < 24 \text{ GeV}$$

LHC:  $E_\gamma < 200 \text{ TeV}$

$$\sqrt{s}_{\gamma N} < 600 \text{ GeV}$$

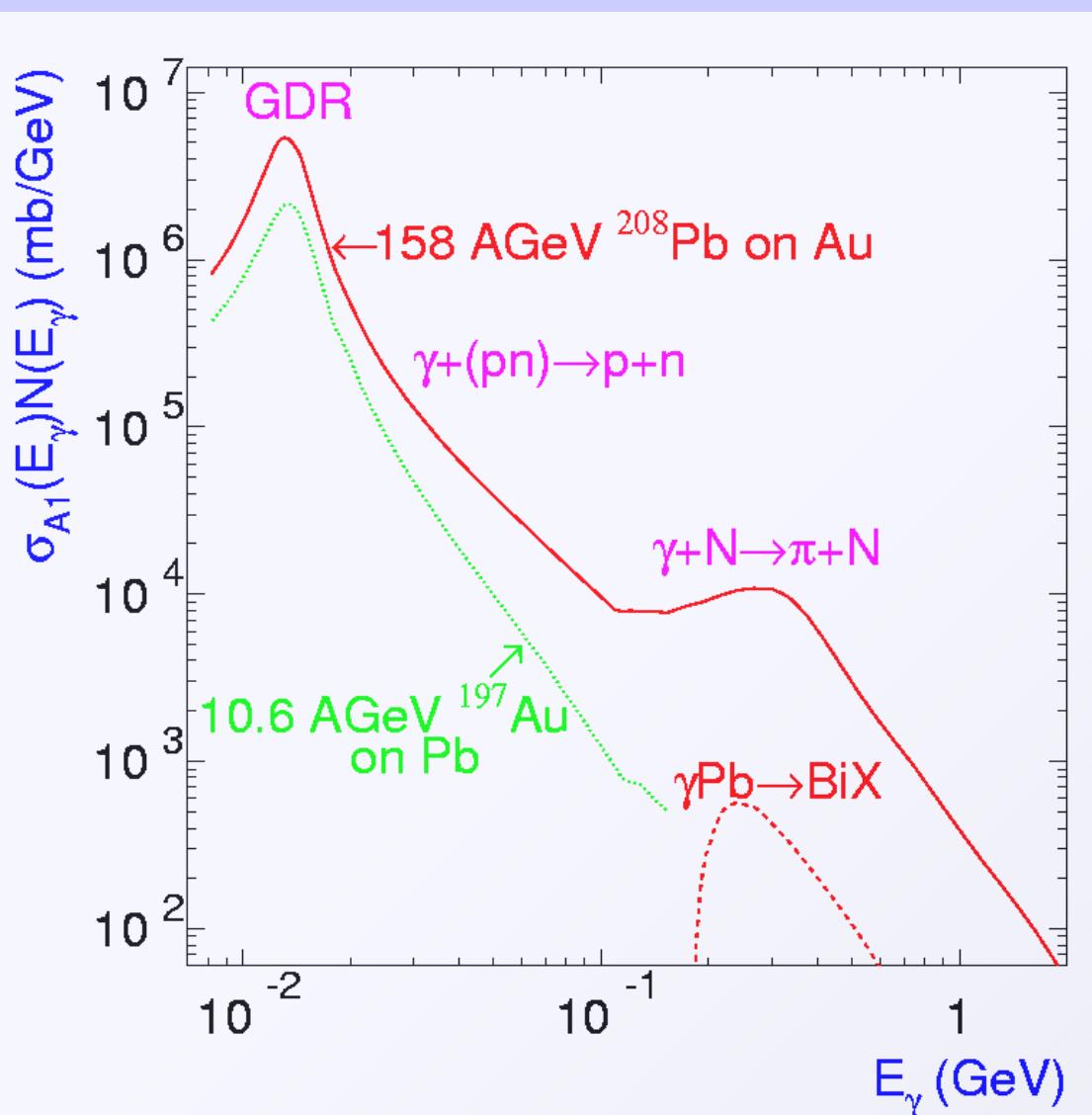
Распределение Пуассона.

Средние числа поглощённых  
фотонов приближаются к единице  
при малых  $b$ : многофотонные процессы



I.A.P., Proc. EMIN-2003, p.234

# Спектр эквивалентных фотонов и процессы фотопоглощения на ядрах:



Поглощение фотонов ядрами:

Возбуждение гигантских резонансов (GDR),  $E_\gamma < 30$  МэВ

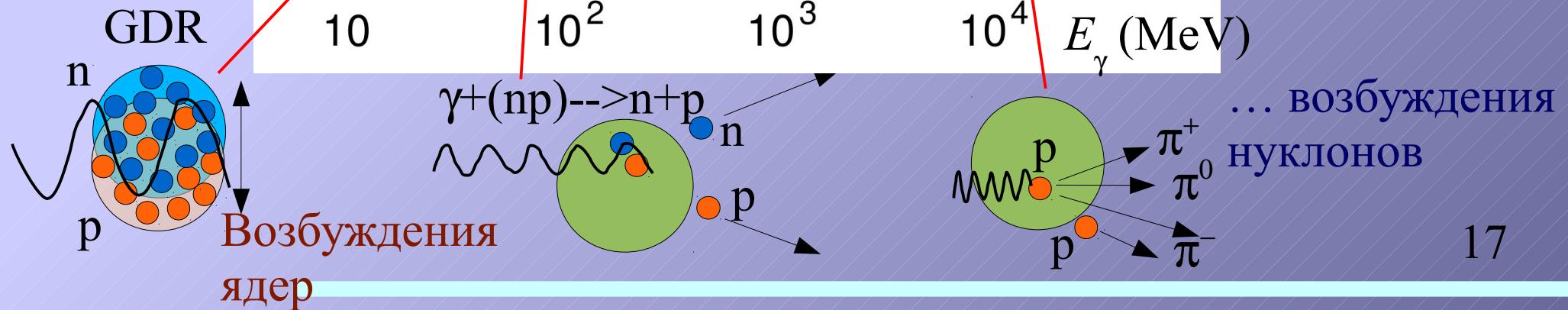
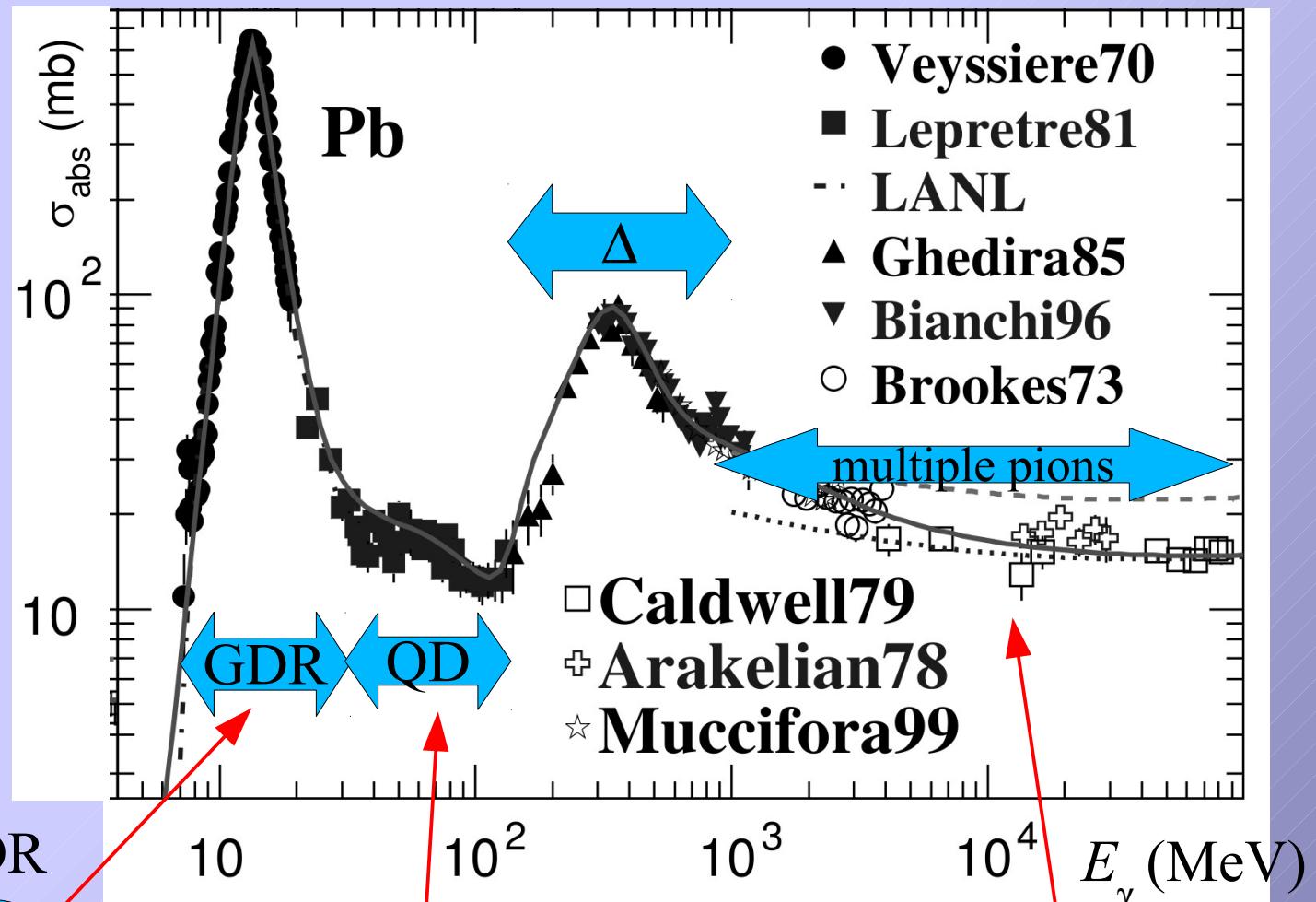
- Квазидейtronное поглощение:  $\gamma + (\text{pn}) \rightarrow \text{p} + \text{n}$ ,  $E_\gamma < 140$  МэВ
- Возбуждение  $\Delta$ -изобары
- Множественное рождение пионов

Необходима совершенная модель фотоядерных реакций!

# **Для описания взаимодействия фотонов с ядрами создана модель RELDIS: Relativistic EElectromagnetic DISSociation**

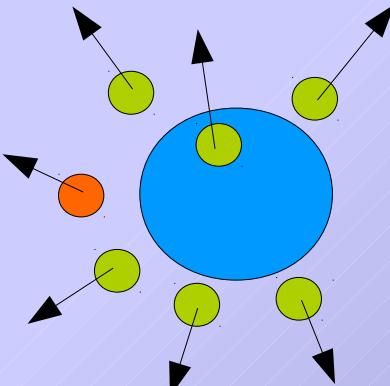
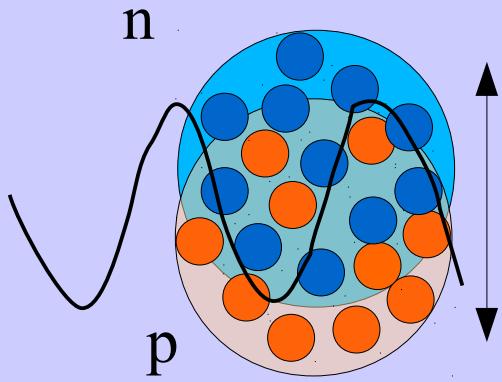
- RELDIS опирается на модель фотоядерных реакций (ИЯИ, И.А.П., А.С. Ильинов, с 1995 года)
- Поглощение фотонов ядрами рассматривается как многостадийный процесс:
  - поглощение фотона на внутриядерном нуклоне или на квазидейтонной паре (учитывается свыше 100 каналов при энергиях фотонов несколько ГэВ)
  - внутриядерный каскад образовавшихся адронов
  - статистический распад возбужденного остаточного ядра: конкуренция между испарением нуклонов и делением.
- Модель RELDIS: И.А.П, И.Н.Мишустин, Я.Бондорф, А.С.Ботвина

# Различные механизмы взаимодействия фотонов с ядрами



# Распад возбуждённых ядер: испарение, деление, мультифрагментация

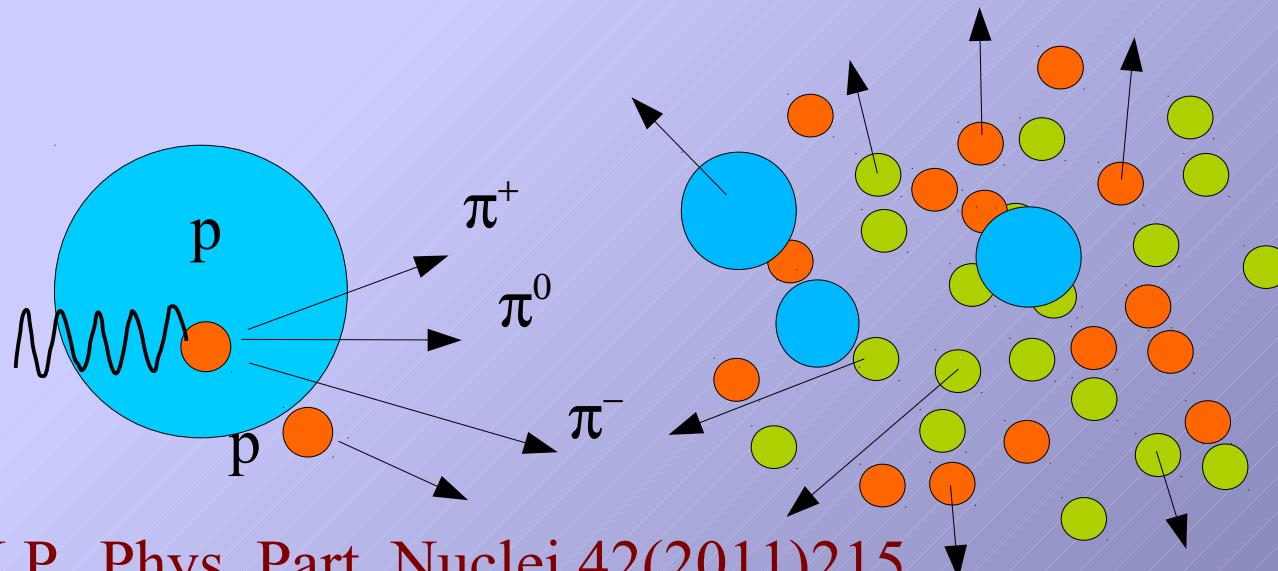
GDR



Из тяжелых ядер при низких возбуждениях испаряются преимущественно нейтроны

n  
p

Statistical multifragmentation model (SMM):  
J.P.Bondorf et al., Phys. Rept. 257(1995)133,  
включает испарение и деление

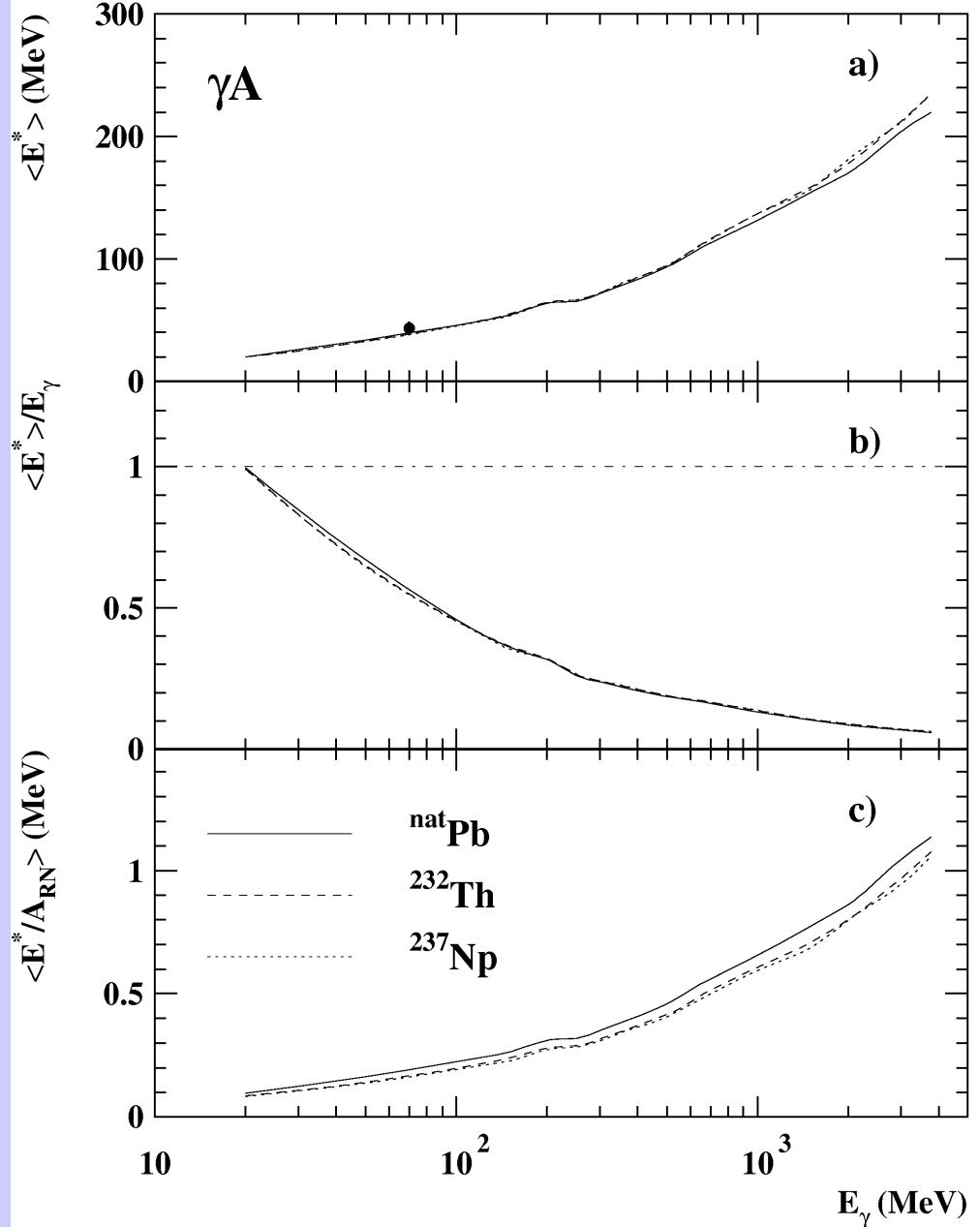


I.P., Phys. Part. Nuclei 42(2011)215

Мультифрагментный распад возможен для легких ядер  
см. I.P., I. Mishustin,  
J. Bondorf et al.,  
PRC 57 (1998) 1920

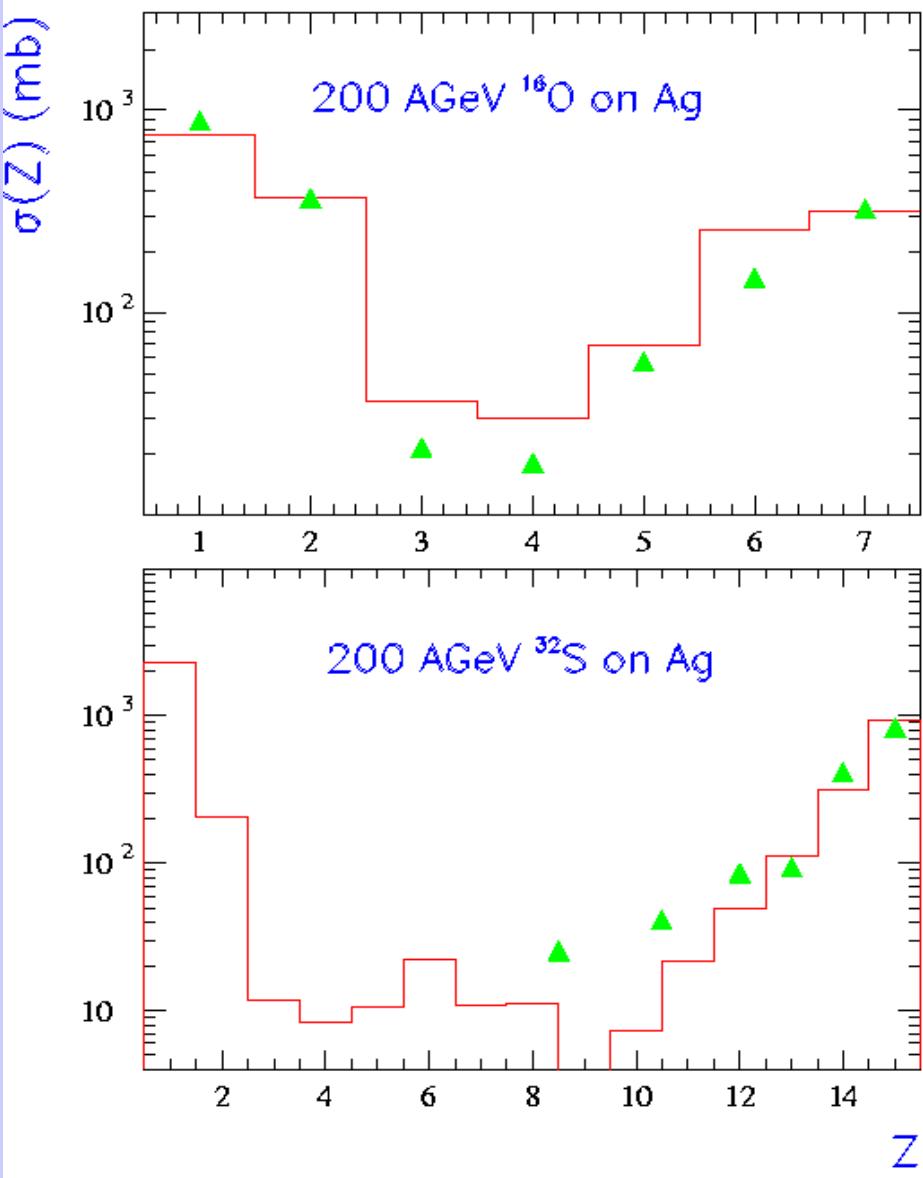
# Эволюция энергии возбуждения остаточного ядра с ростом $E_\gamma$

- $\langle E^* \rangle$  растёт с увеличением  $E_\gamma$
- Доля энергии фотона, переходящая в  $\langle E^* \rangle$  в среднем падает
- Переход от коллективных возбуждений ядра к возбуждению отдельных нуклонов ( $\Delta$ -изобара и другие барионные резонансы)
- $\langle E^* \rangle / A_{RN} < 1.5$  МэВ. Для тяжёлых ядер доминирует испарение нуклонов и деление



I.A.P. et al., Eur. J. Phys. A 24(2005)69

# Развал легких ядер под действием ЭМ полей



ЭМ диссоциация 200A ГэВ  $^{16}\text{O}$   
в фотоэмulsionии

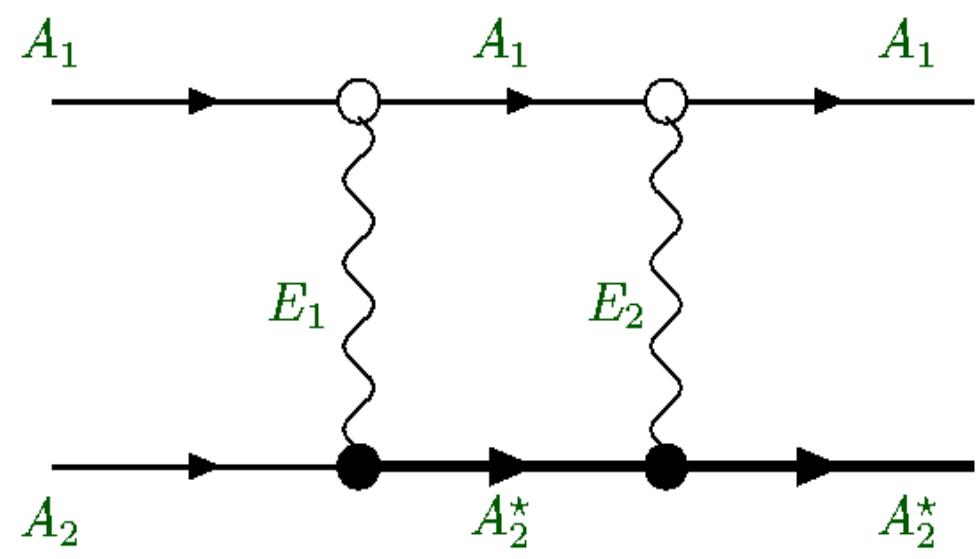
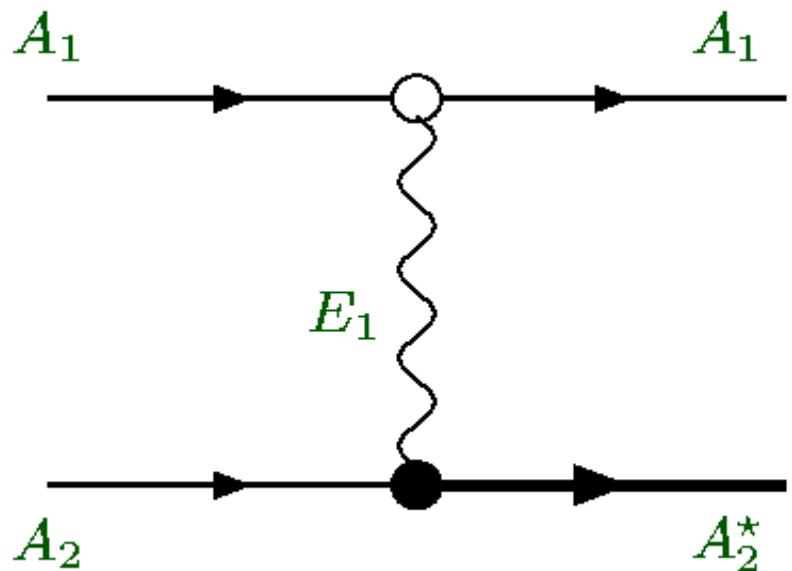
Мода распада	Доля %		
	RELDIS	Эксперимент	
		G.Baroni et al., 1990	G.Singh et al., 1992
$^{15}\text{N}+\text{p}$	46.7	56.08+/-3.93	49.45+/-6.62
$^{12}\text{C}+\alpha$ $^{12}\text{C}+2\text{d}$	43.2	25.58+/-2.61	23.01+/-4.80
$^{11}\text{B}+\alpha+\text{p}$			
$^8\text{Be}+\alpha+2\text{d}$	6.26	4.42+/-1.10	10.62+/-3.06
$^8\text{Be}+^7\text{Li}+\text{p}$			
$^7\text{Li}+2\alpha+\text{p}$			
$^7\text{Li}+\alpha+2\text{d}+\text{p}$	0.95	2.49+/-0.83	4.42+/-1.98
$^7\text{Li}+4\text{d}+\text{p}$			
$4\alpha$			
$3\alpha+2\text{d}$			
$2\alpha+4\text{d}$			
$\alpha+6\text{d}$	3.0	8.01+/-1.49	12.39+/-3.31

# Поглощение одного или двух фотонов приводящее к одиночной диссоциации

Наблюдаем за разрушением одного из ядер!

Лидирующий порядок (LO)  
98-99%

Следующий к лидирующему (NLO)  
1-2%



- упругий процесс
- неупругий процесс

# Одиночная электромагнитная диссоциация

Сечение электромагнитной диссоциации (LO) с развалом ядра  $A_2$

по каналу  $i$ :

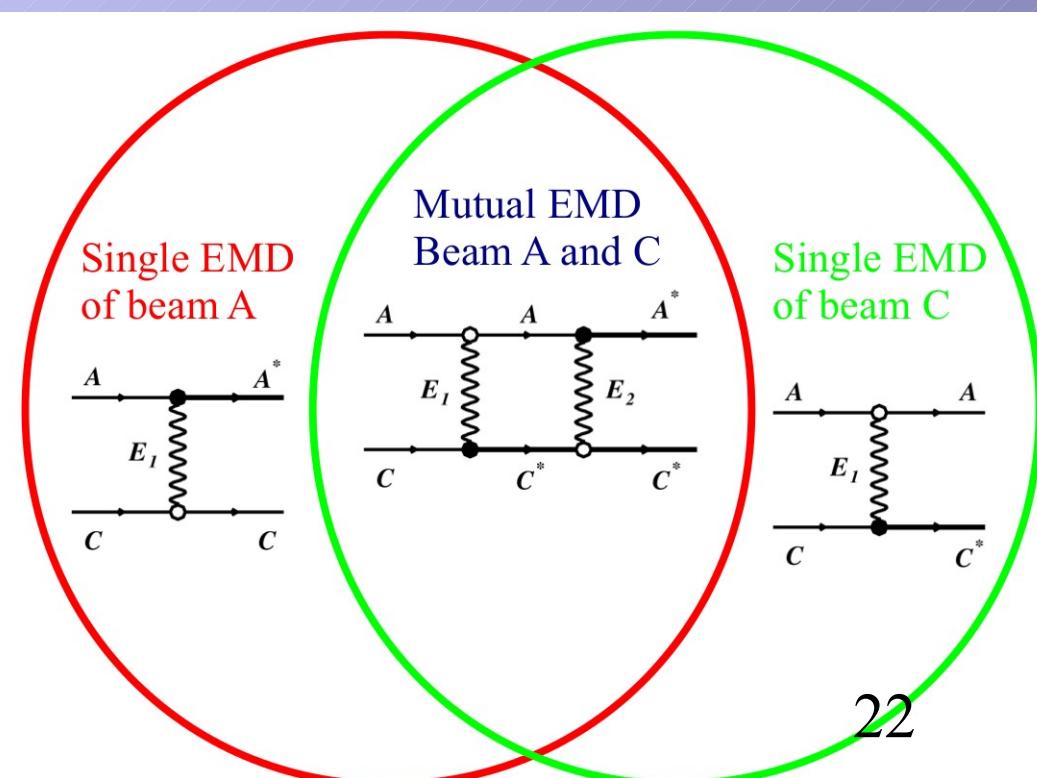
$$\sigma_{A_2}^{\text{SED}}(i) = 2\pi \int_{b_c}^{\infty} db b P_{A_2}(b, i),$$

$$P_{A_2}(b, i) = e^{-m_{A_2}(b)} \int_{E_{min}}^{E_{max}} dE_1 N_{Z_1}(E_1, b) \sigma_{A_2}(E_1) f_{A_2}(E_1, i),$$

$\sigma_{A_2}(E_1)$  - полное сечение фотопоглощения

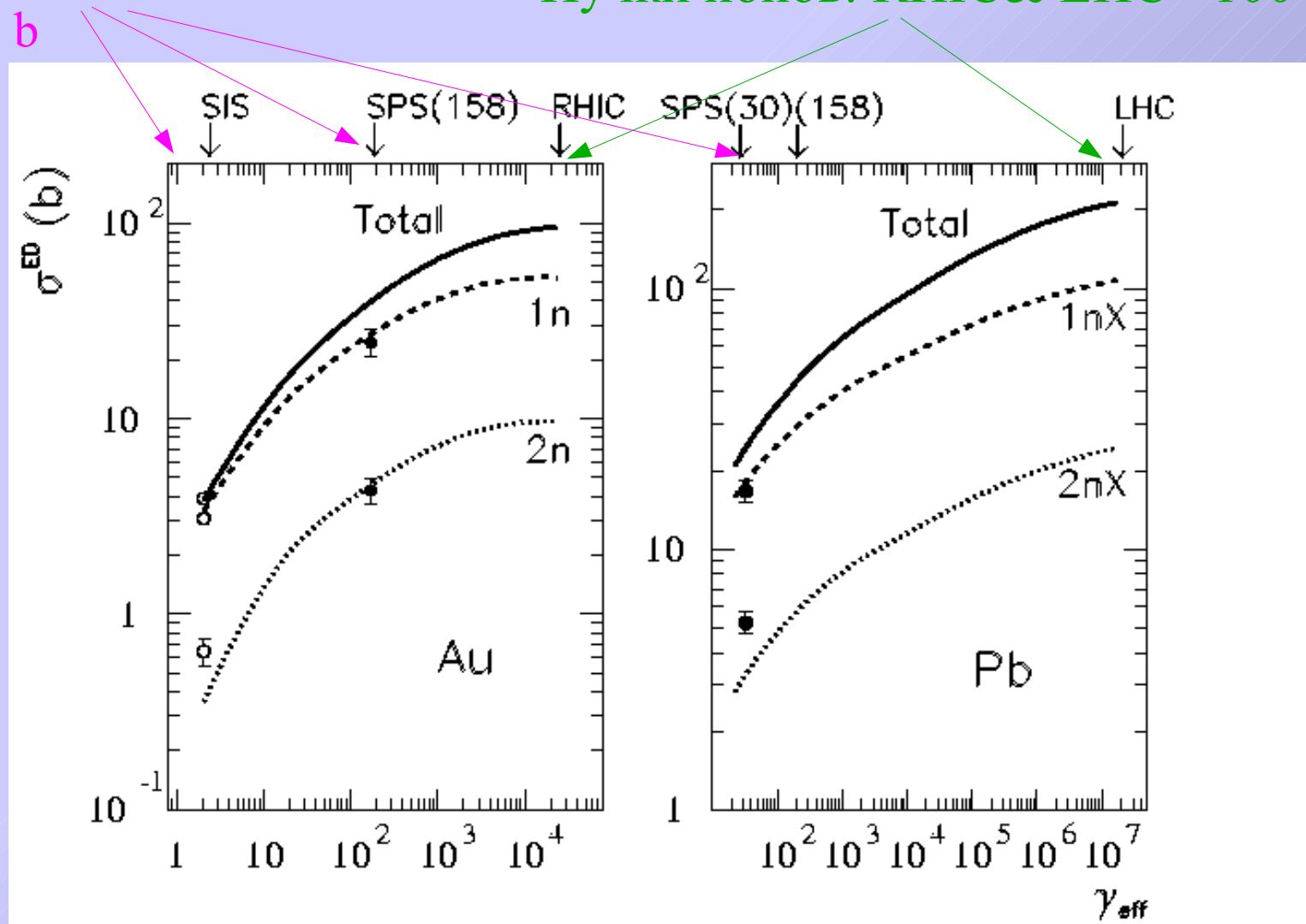
$f_{A_2}(E_1, i)$  - брэнчинг распада ядра  $A_2$  по каналу  $i$

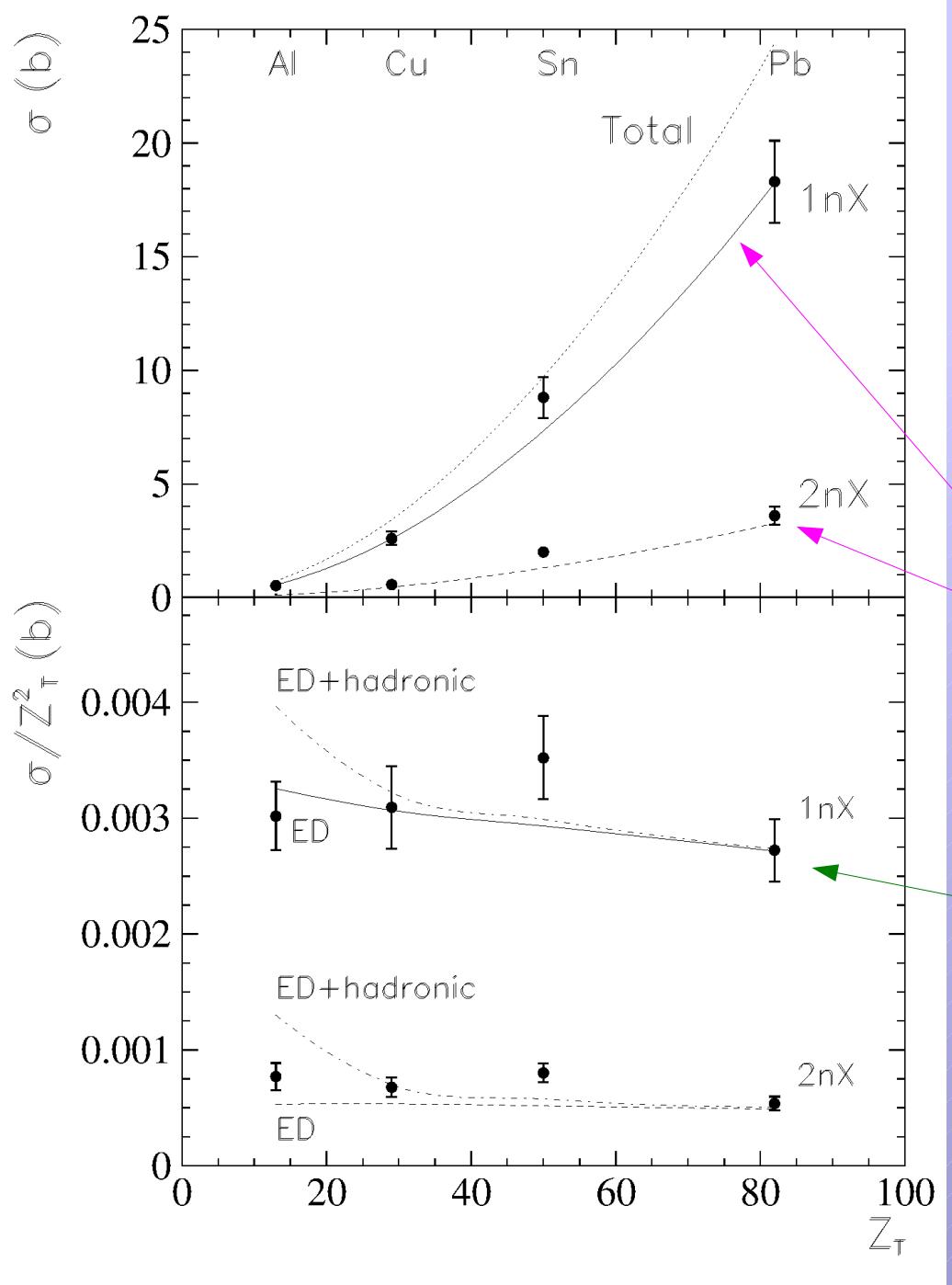
Вычисляется методом Монте-Карло



# Эмиссия нейтронов в электромагнитной диссоциации ядер золота и свинца

Фиксированные мишени  
~10-30 b





# Эксперимент ALICE-lumi Эмиссия нейтронов вперед Pb 30 ГэВ/нуклон @SPS

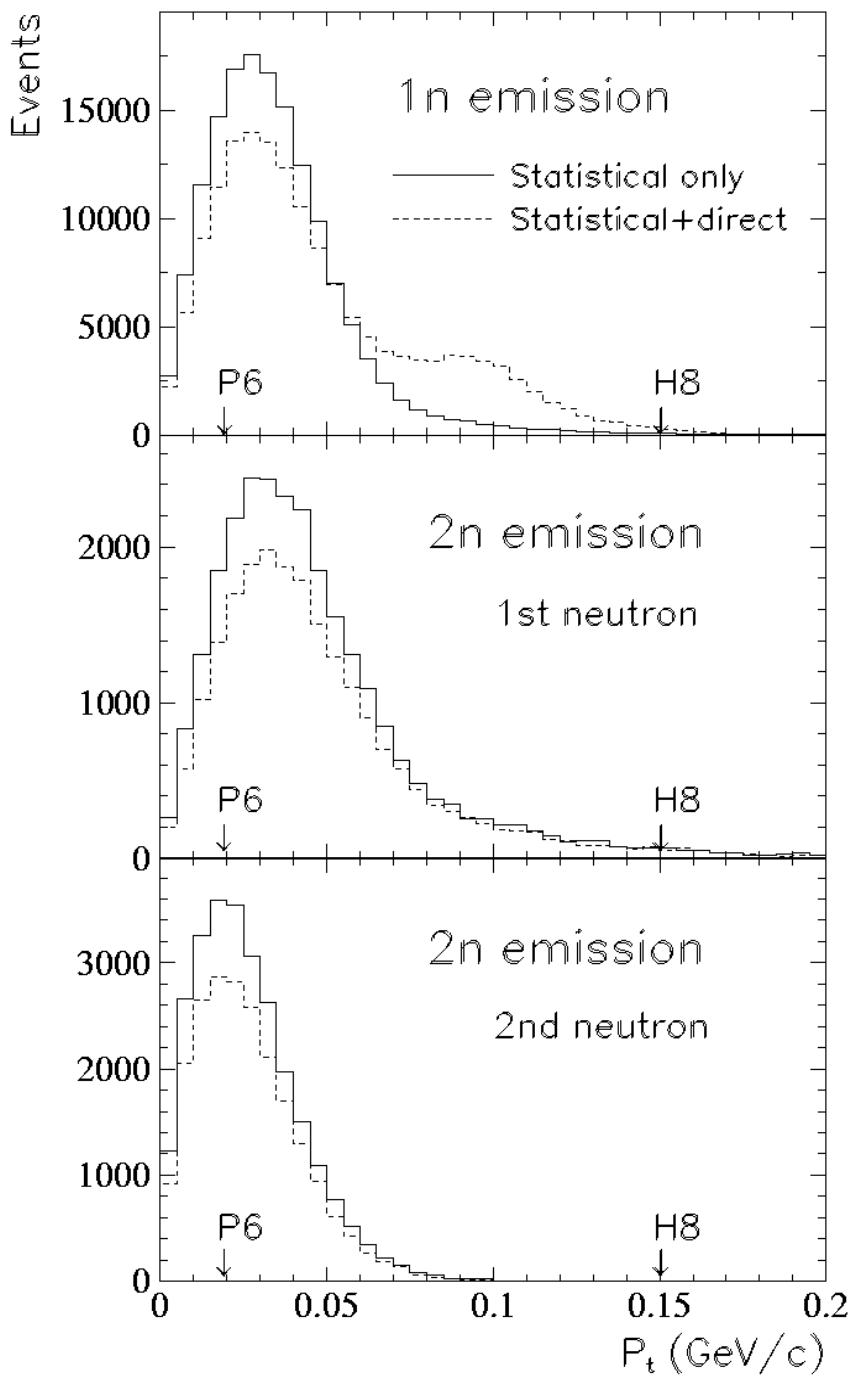
ИЯИ-Турин-ЦЕРН

Электромагнитные  
процессы  $\sim Z_{\text{target}}^2$

$\sigma/Z_{\text{target}}^2 \sim \text{const}$

Прямое измерение эмиссии  
нейтронов вперед

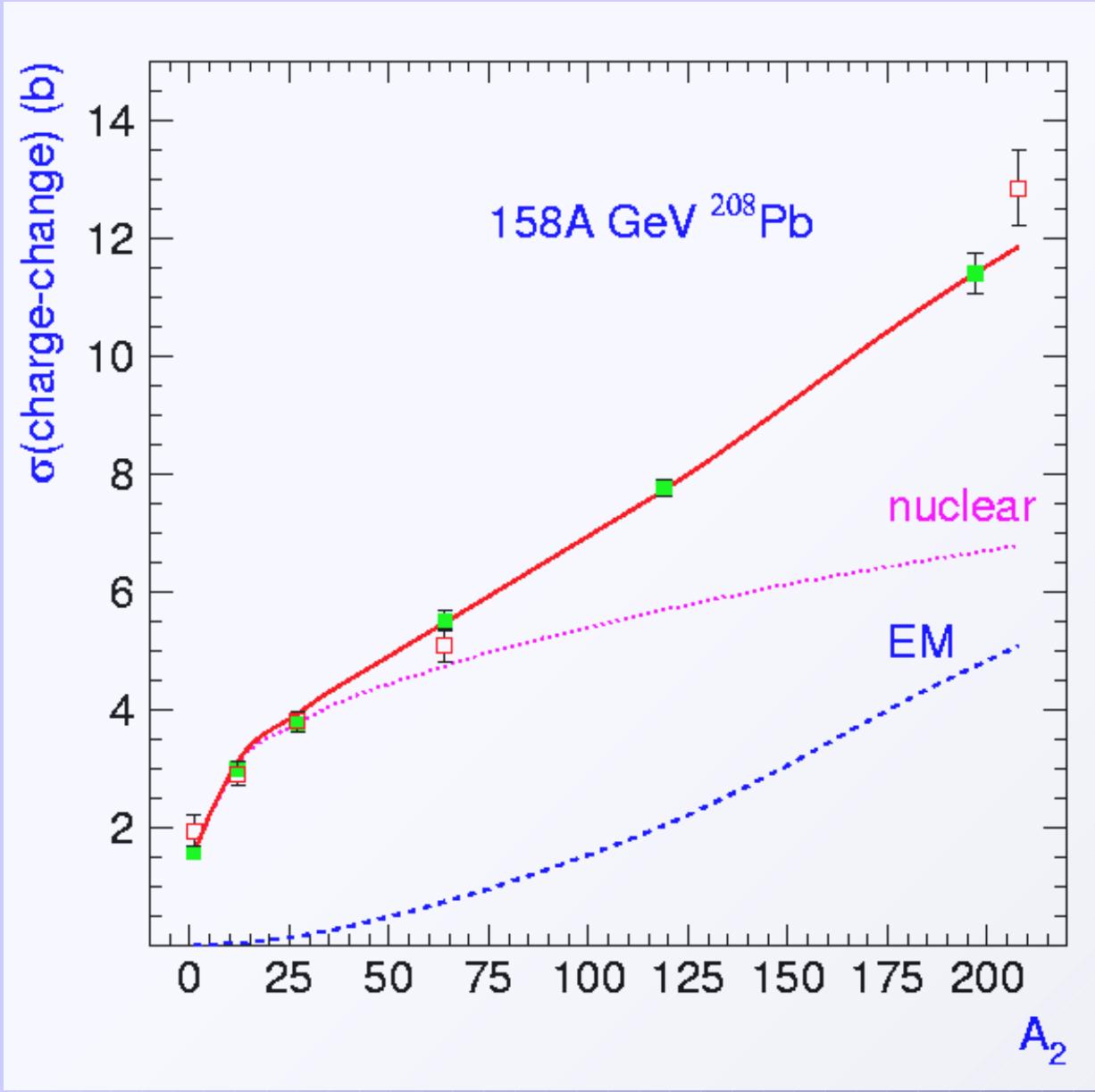
Кривые — результаты RELDIS



## Эмиссия нейтронов вперед: предсказания модели *RELDIS*.

Малые поперечные импульсы нейтронов,  
 $P_t < 0.1$  ГэВ/с, от  
 электромагнитной  
 диссоциации — эффективно  
 регистрируются с помощью  
 ZDC (см. далее)

# Полное сечения изменения заряда ядра



C. Scheidenberger, I.A.P. et al.,  
Phys. Rev. C 70(2004)014902

электромагнитное  
взаимодействие -  
RELDIS

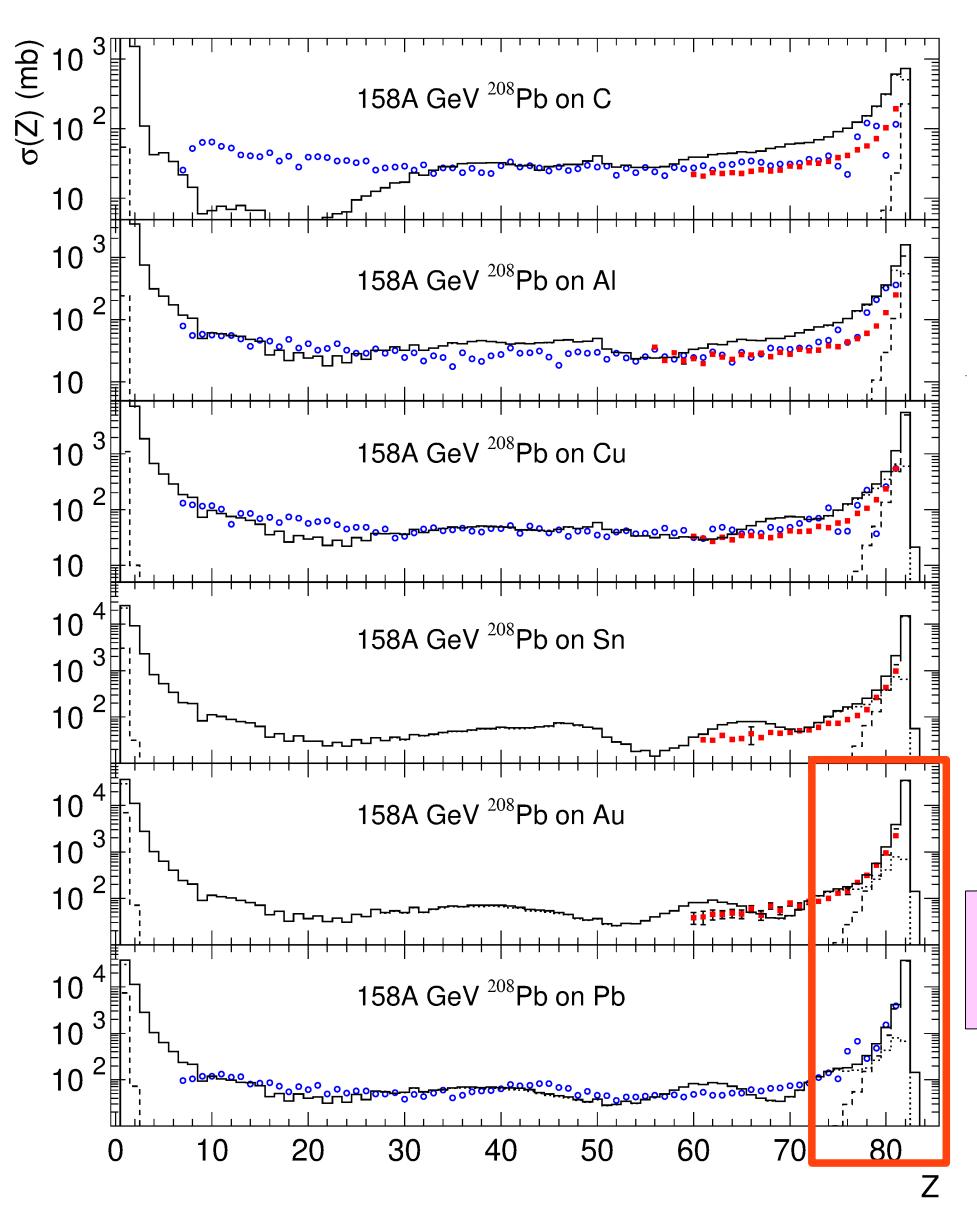
адронное  
взаимодействие –  
модель  
abrasion-ablation

На тяжёлых мишенях  
вклады сопоставимы!

Точки - эксперименты:  
C. Scheidenberger et al.,  
S. Cecchini et al.,  
NPA 707 (2002) 513

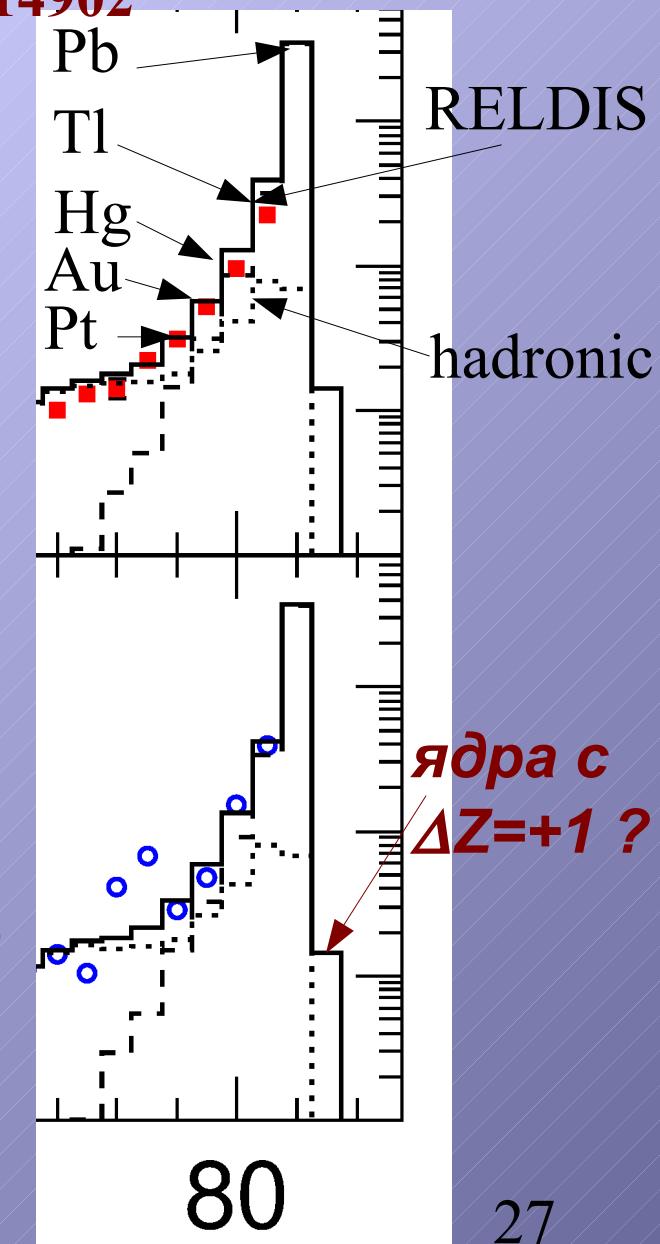
# RELDIS хорошо описывает данные по выходу различных элементов

C. Scheidenberger, I.A.P. et al., Phys. Rev. C 70(2004)014902

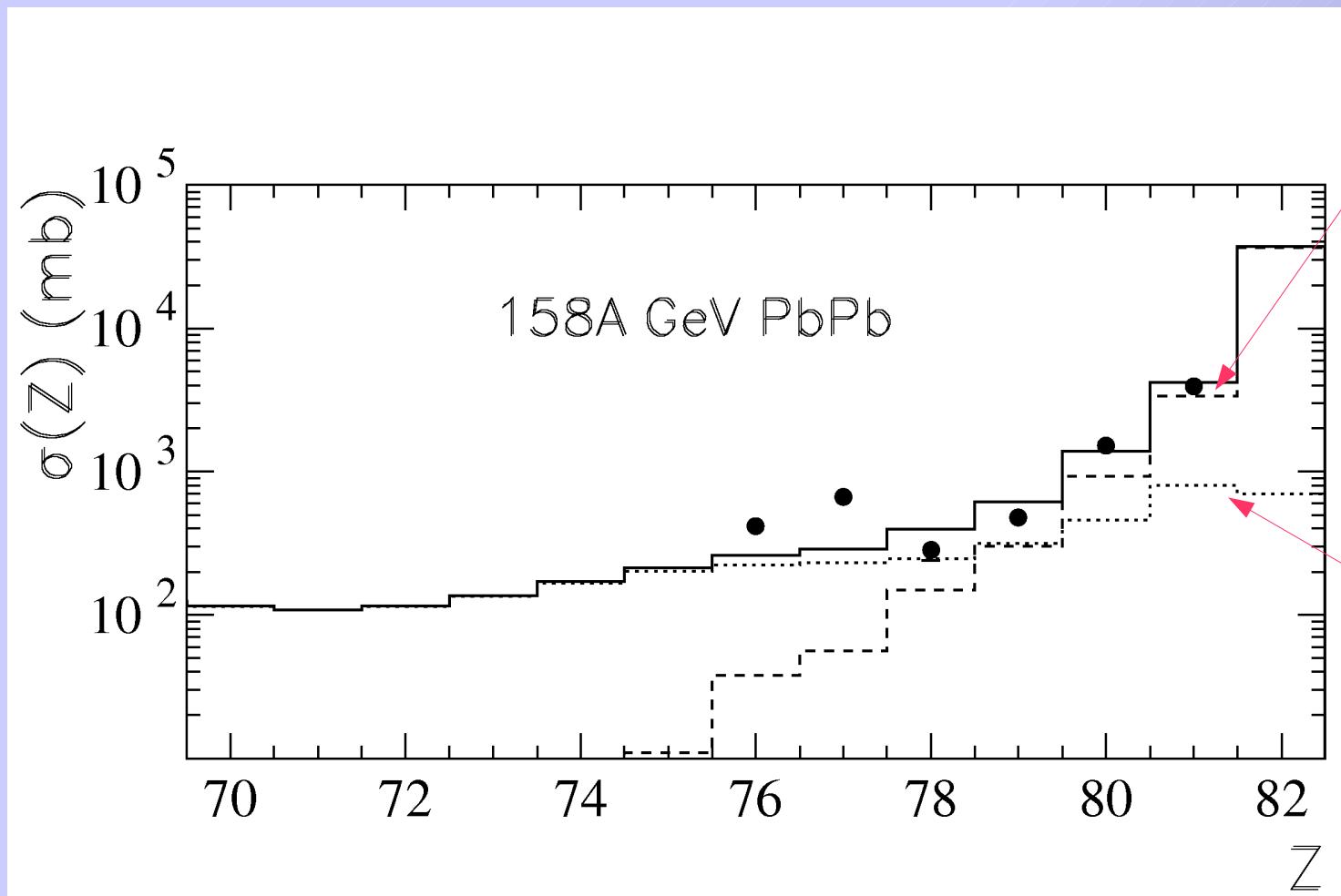


MUSIC  
ionization  
chambers

Nuclear  
tracks  
in CR39



# Вывод: электромагнитный вклад доминирует во взаимодействиях ядер с небольшими изменениями заряда при $\gamma \gg 10$



электромагнитная фрагментация доминирует в каналах  
 $\Delta Z = -2, -1, 0, +1$

адронная фрагментация

I.A.P. et al., Phys. Rev. C 70(2004)014902

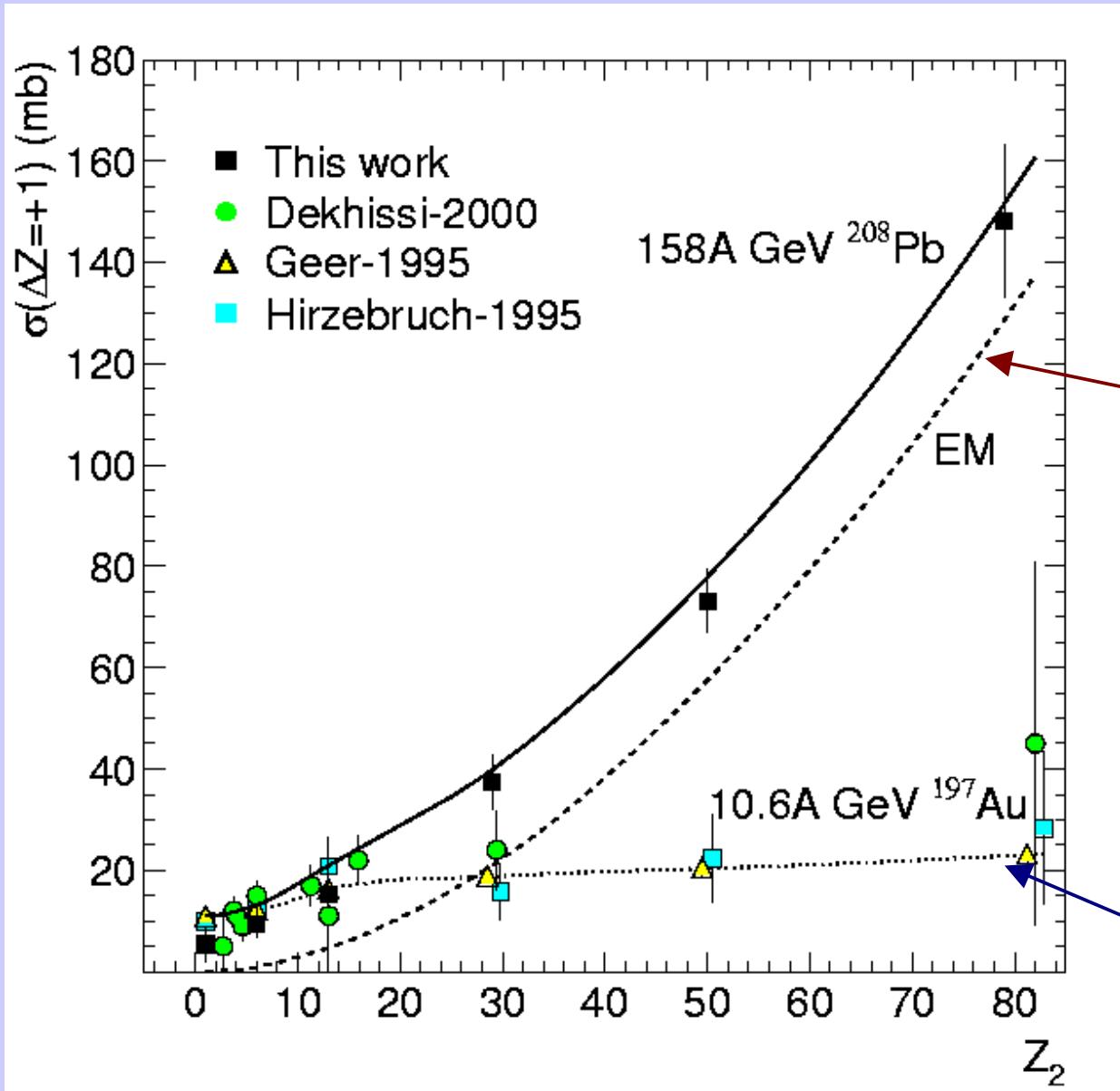
Эксперимент: H. Dekhissi et al., NPA662 (2000) 207

# Трансмутация ядер $^{208}\text{Pb}$ на LHC

	нуклиды	$\sigma_{\text{EMD}}(Z)(\text{b})$
Z=82	$^{188-208}\text{Pb}$	144.7
Z=81	$^{185-207}\text{Tl}$	29.9
Z=80	$^{181-206}\text{Hg}$	13.
Z=79	$^{178-205}\text{Au}$	6.2
всего Z=79-82		193.8

- Одно ядро золота образуется в результате ЭМД почти так же часто, как происходит адронное взаимодействие Pb-Pb!
- Мечта средневековых алхимиков реализована на БАК ...

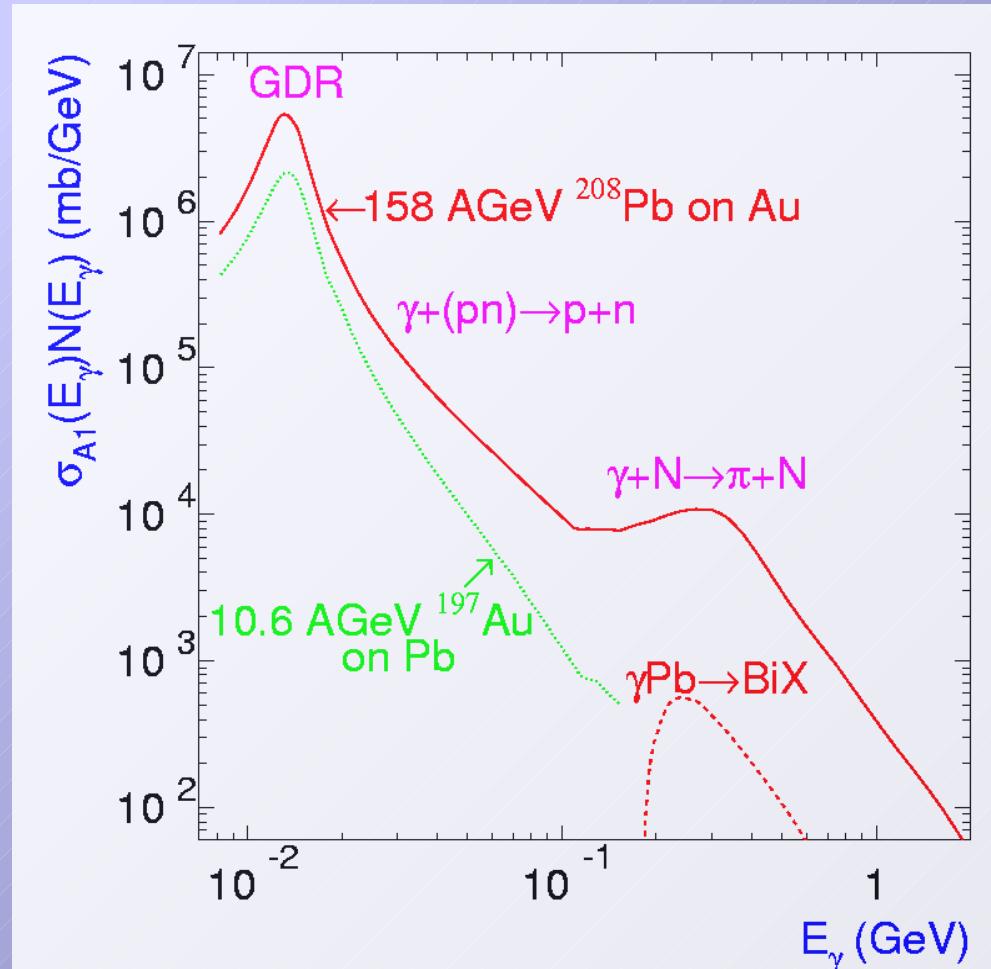
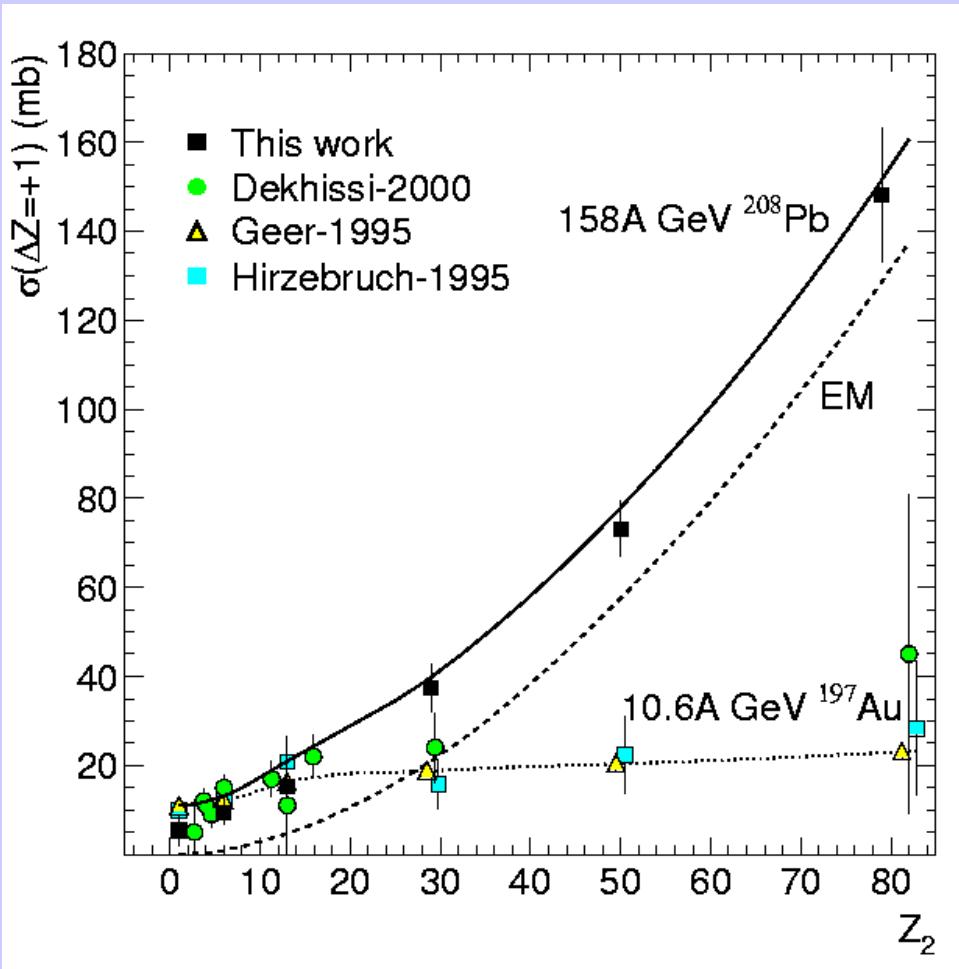
# Зависимость сечения $\Delta Z=+1$ от ядромишени при разных энергиях



Сечение  $\sim Z_{\text{target}}^2$  при энергиях CERN SPS 158A ГэВ:  
электромагнитные взаимодействия

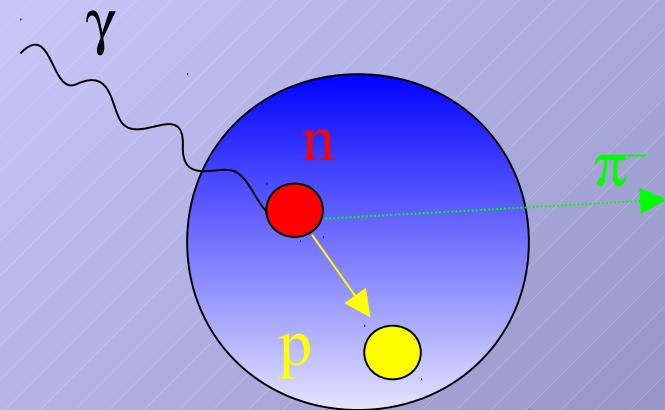
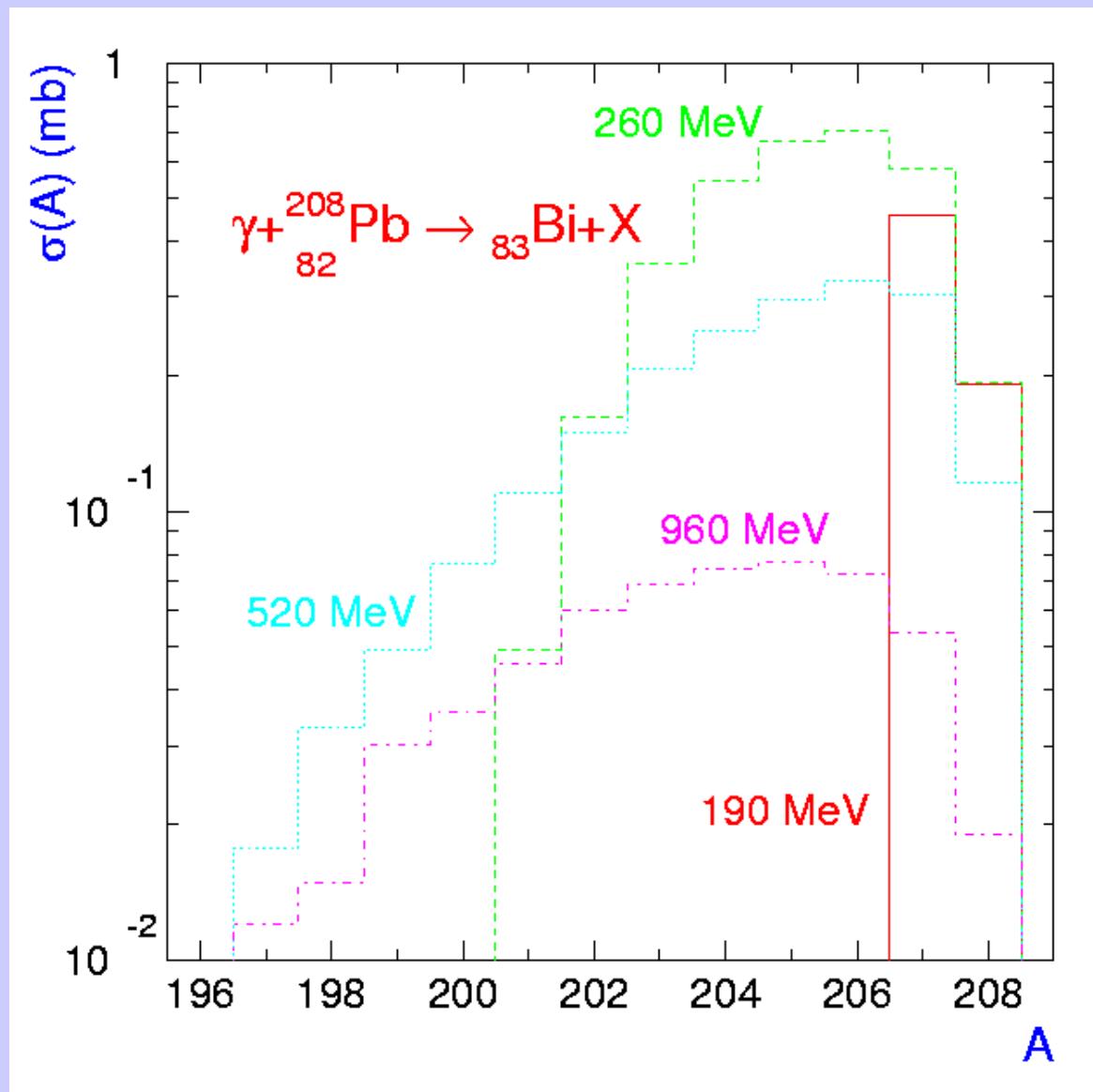
Слабая зависимость от  $Z_{\text{target}}$   
при энергиях AGS 10.6A ГэВ:  
периферические адронные взаимодействия, перезарядка

# Сопоставим со спектром эквивалентных фотонов



C. Scheidenberger, I.A.P. et al.,  
Phys. Rev. Lett. 88 (2002) 042301

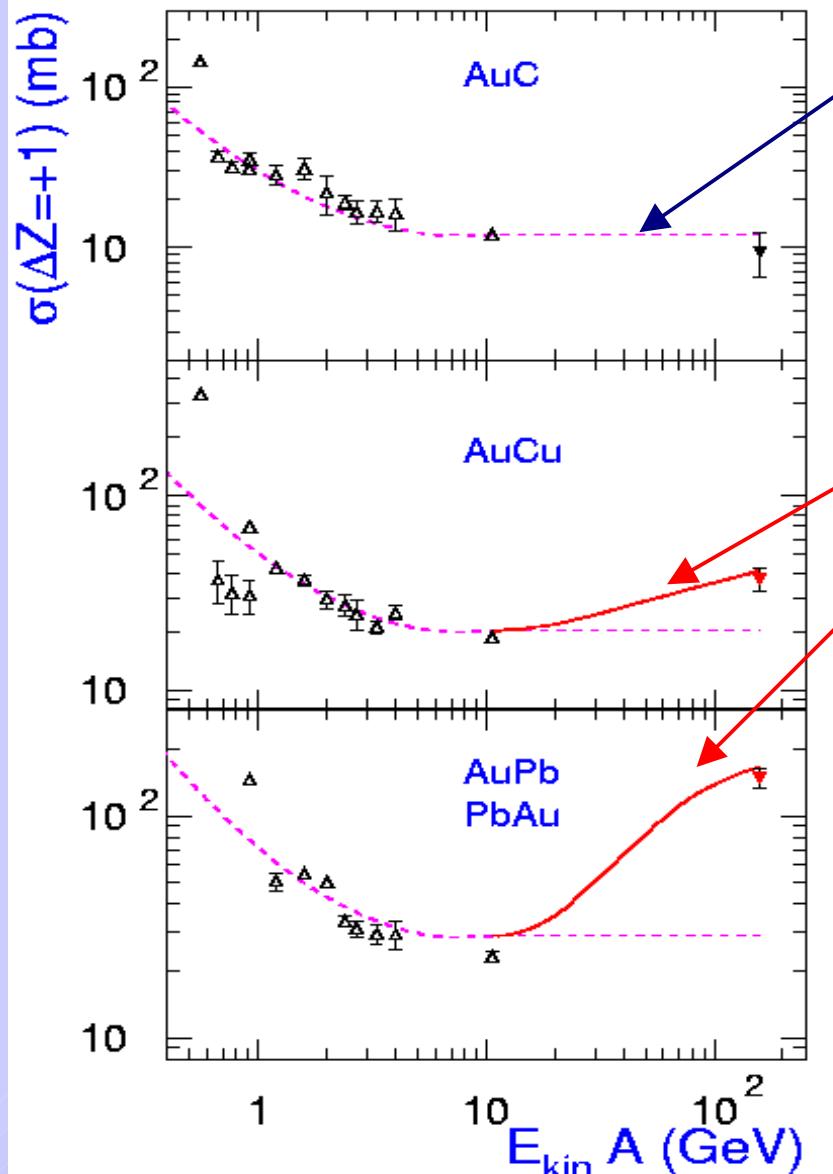
# Образование $^{83}\text{Bi}$ из $^{208}_{82}\text{Pb}$ под действием эквивалентных фотонов



фоторождение  $\pi^-$  на нейтроне, протон отдачи захватывается ядром, а  $\pi^-$  его покидает

Примеры вычислений  
RELDIS  
для  $E_\gamma = 190, 260, 520$  и  
 $960$  МэВ

# Учет ЭМ механизма для $\Delta Z=+1$ требует пересмотра прежних аппроксимаций



Tsao, Silberberg, Barghouty,  
Astrophys. Journ. 501 (1998) 920



Следует учитывать ЭМ процесс  $\Delta Z=+1$  для взаимодействий средних и тяжелых ультрамаргиналистских ядер с  $\gamma \gg 10$

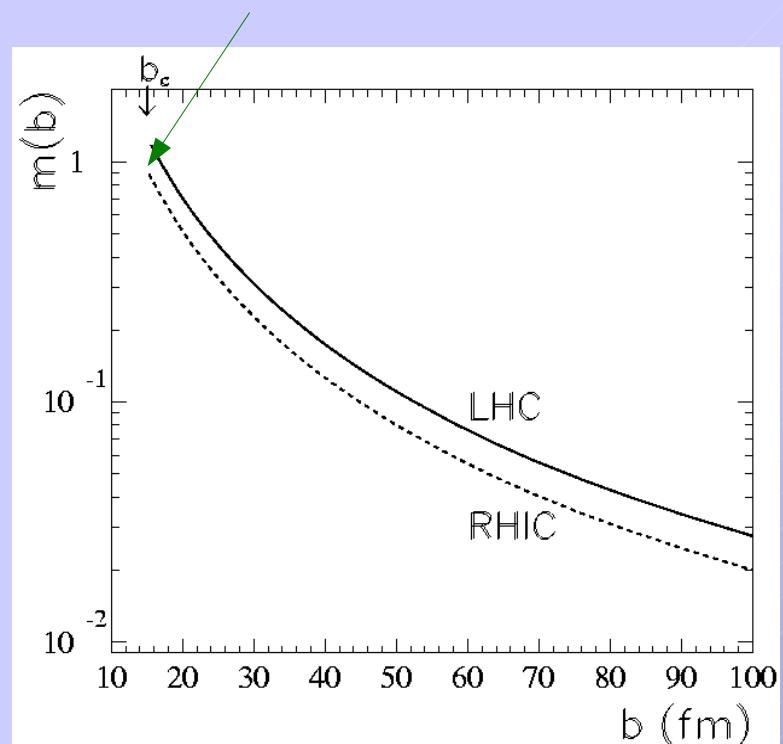
Точки: Geer'95, Cummings'90, Waddington'00

C. Scheidenberger, I.A.P. et al.,  
Phys. Rev. C 70(2004)014902

# Взаимная электромагнитная диссоциация: в одном столкновении разрушаются оба ядра

В столкновениях с малыми

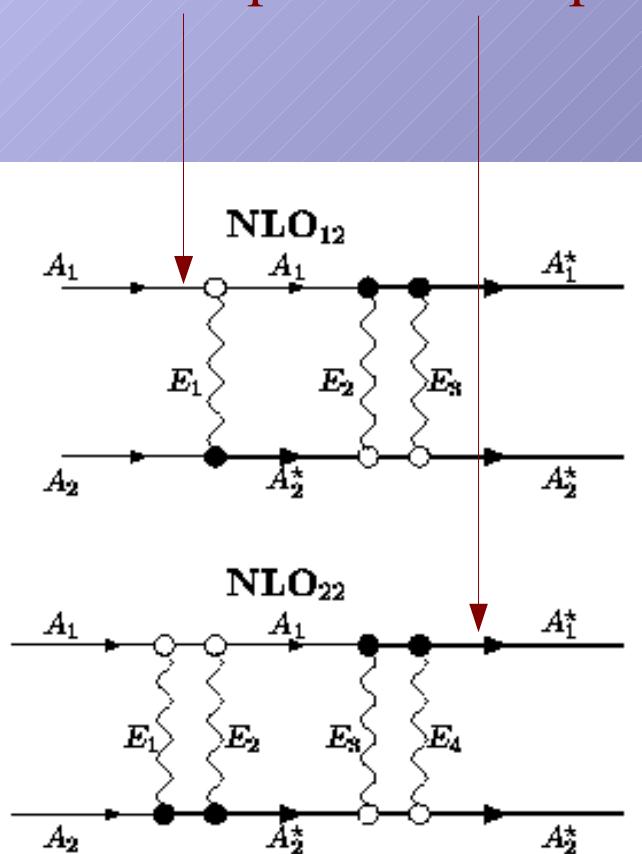
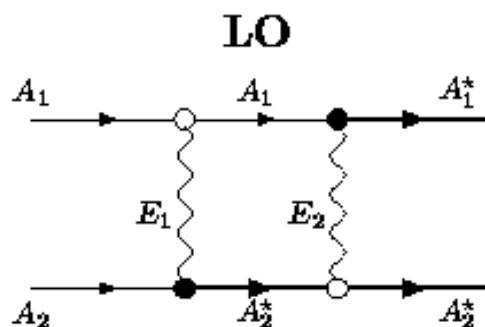
$b \sim R_1 + R_2$  поглощается в среднем один фотон на каждое ядро – вероятны поглощения 2 и 3 фотонов!



Взаимная  
диссоциация  
6.2 барн @LHC

Также три и четыре  
фотона:  
1.5 барн и 0.23 барн

3.9 барн



# **Моделирование взаимной диссоциации**

Сечение электромагнитной диссоциации (LO) с развалом ядер  $A_1$  и  $A_2$  по каналам  $i$  и  $j$ , соответственно:

$$\sigma_{LO}^{\text{MED}}(i|j) = 2\pi \int_{b_c}^{\infty} db b P_{A_1}(b, i) P_{A_2}(b, j)$$

Каждое излучение фотона можно рассматривать независимо от остальных:

Энергия фотонов ограничена:  $E_1, E_2 < E_{max} = \gamma/R$

Полная энергия излучающего фотон ядра:  $E_A = \gamma M_A$

Отношение  $\frac{E_{max}}{E_A} = \frac{1}{RM_A} < 10^{-4}$  для тяжелых ядер достаточно мало!

Импульс и энергия ядра практически не меняются в процессе излучения. Последовательность излучения фотонов для вычисления сечений не важна.

# Взаимная электромагнитная диссоциация

Полные сечения различных порядков с развалом ядер

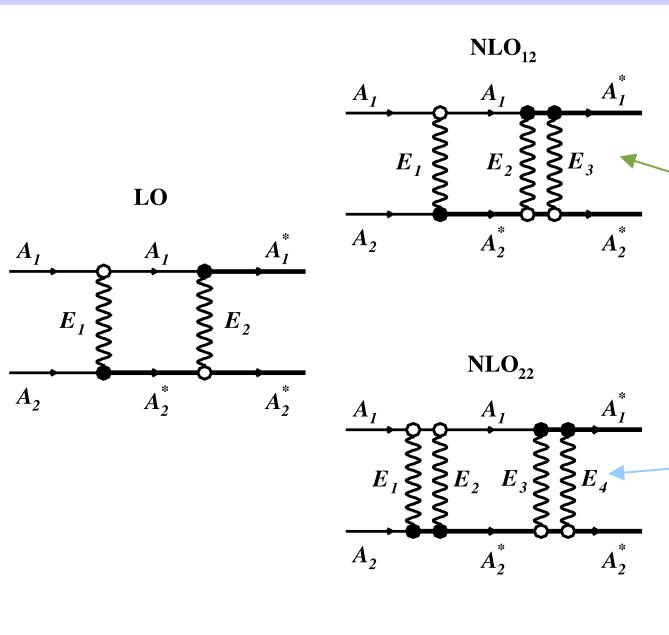
$$\sigma_{\text{LO}}^{\text{MED}} = 2\pi \int_{b_c}^{\infty} db b m_A^2(b) e^{-2m_A(b)},$$

$$\sigma_{\text{NLO}_{12}}^{\text{MED}} = 2\pi \int_{b_c}^{\infty} db b \frac{m_A^3(b)}{2} e^{-2m_A(b)},$$

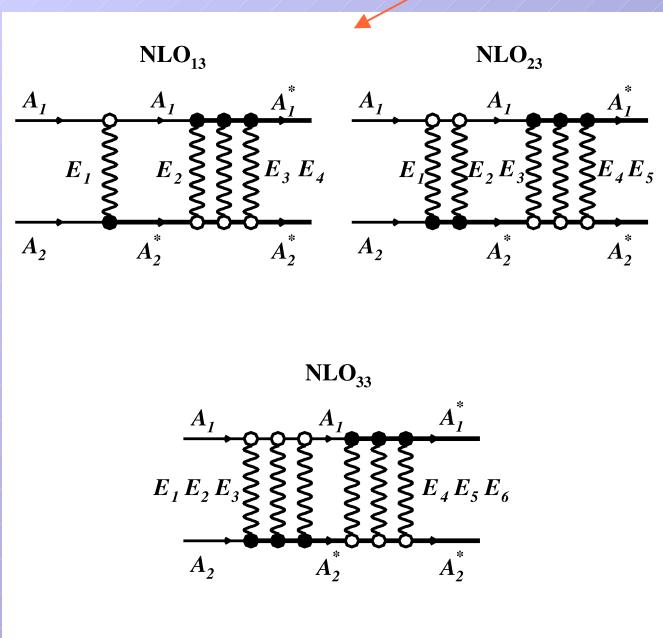
$$\sigma_{\text{NLO}_{22}}^{\text{MED}} = 2\pi \int_{b_c}^{\infty} db b \frac{m_A^4(b)}{4} e^{-2m_A(b)},$$

$$\sigma_{\text{tot}}^{\text{MED}} = 2\pi \int_{b_c}^{\infty} db b [1 - e^{-m_A(b)}]^2.$$

# Во взаимной диссоциации значителен вклад множественных возбуждений



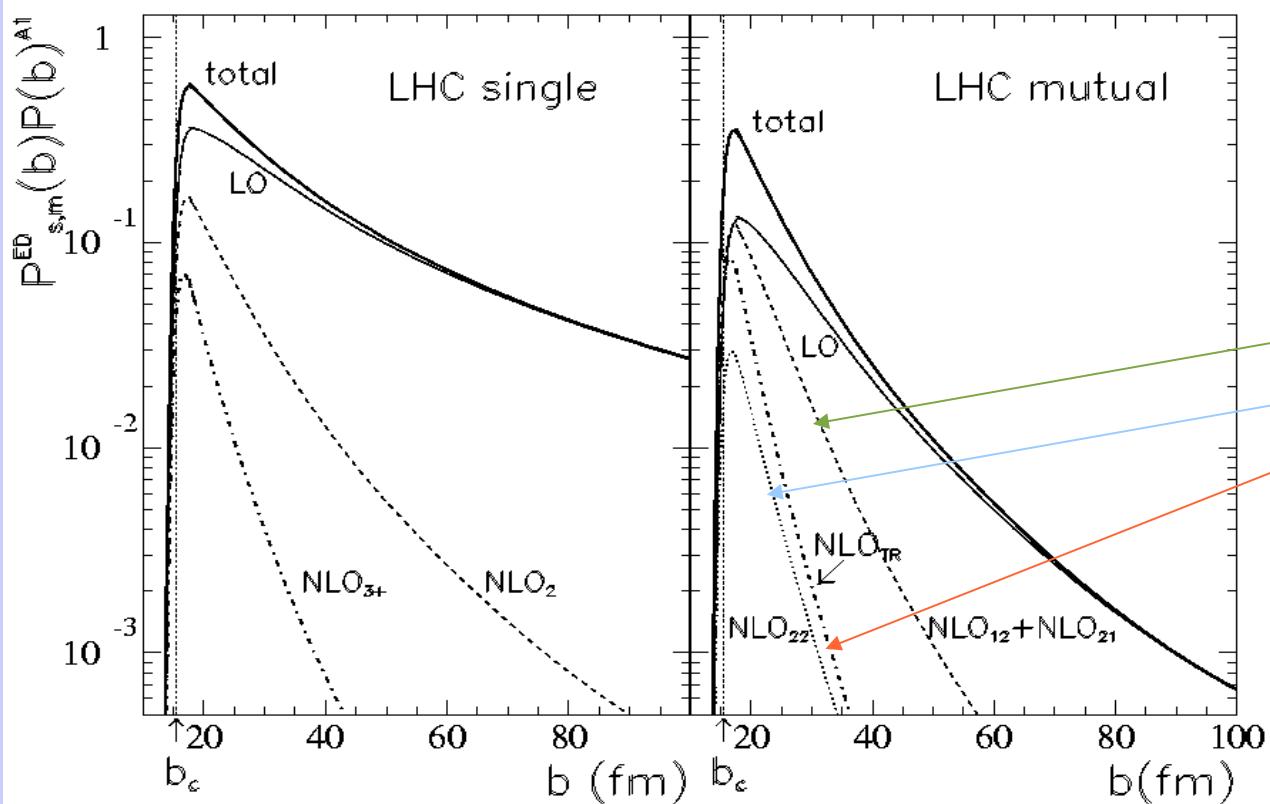
$2.75+2.75 A \text{ ТэВ}$ $PbPb @ LHC$	<i>Сечение (барны)</i>
LO	3.92
NLO <sub>12</sub> +NLO <sub>21</sub>	1.50
NLO <sub>22</sub>	0.23
Тройные возбуждения	0.56
Всего	6.21



Тройные возбуждения ГДР:  
еще не открыты !

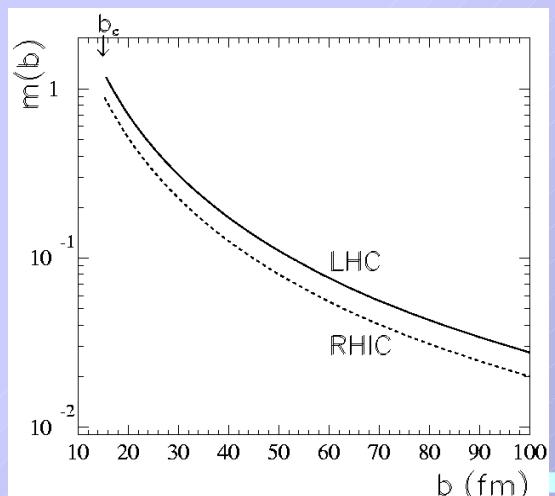
A.J. Baltz, ..., I.A.P. et al.,  
Phys. Reports 458(2008)1

# Множественные возбуждения во взаимной электромагнитной диссоциации характеризуются относительно малыми $b$



$2.75+2.75 A \text{ ТэВ}$ $PbPb @ LHC$	Сечение (барны)
LO	3.92
$NLO_{12}+NLO_{21}$	1.50
$NLO_{22}$	0.23
Тройные возбуждения	0.56
Всего	6.21

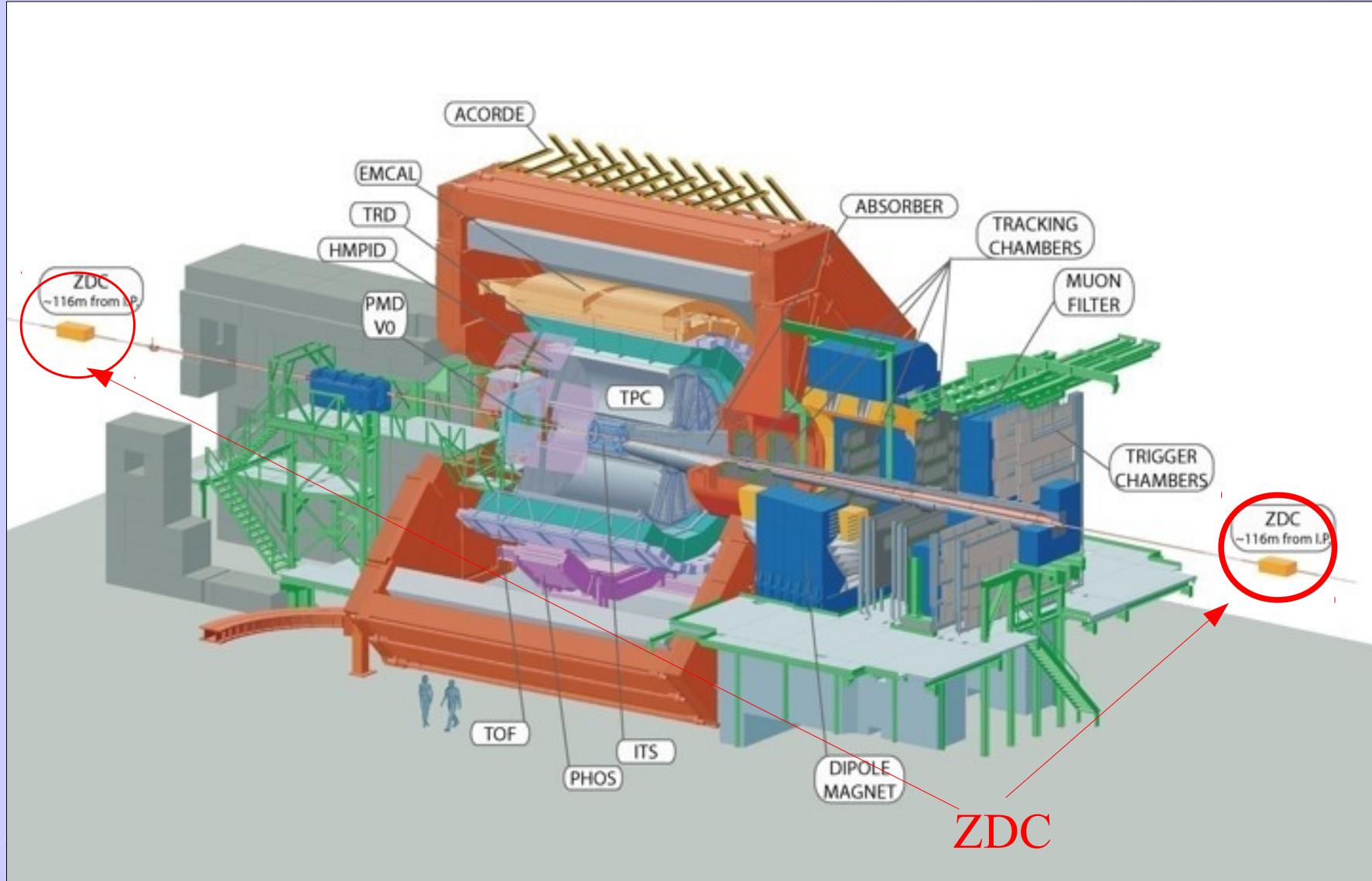
С помощью ZDC можно изучать эффекты ядерной структуры в столкновениях ядер при ультраквантумистских энергиях



A.J. Baltz, ..., I.A.P. et al.,  
Phys. Reports 458(2008)1

I.A.P., Proc. EMIN-2003, p.234

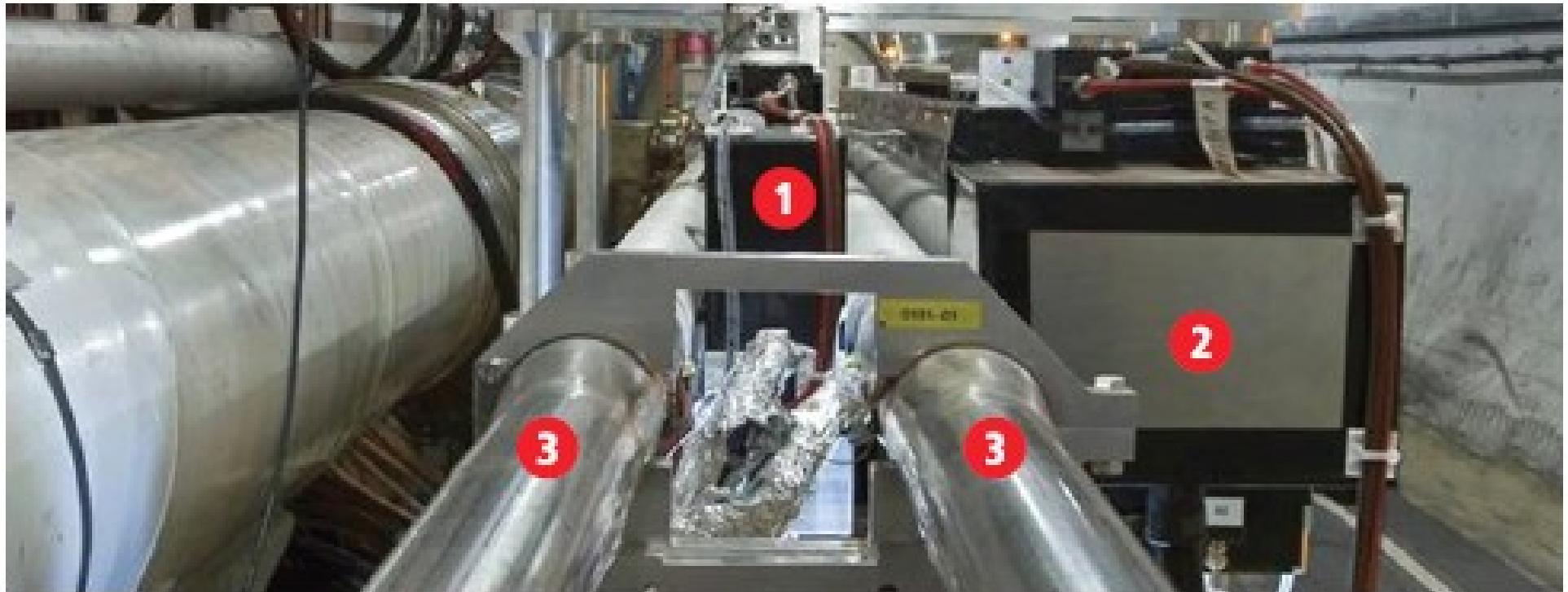
# ZDC в эксперименте ALICE



ZDC позволяют изучать эмиссию нейтронов и протонов вперёд ядрами каждого из пучков.

# ALICE Zero Degree Calorimeters (ZDC)

Детектор ALICE, в отличие от CMS и ATLAS оснащён не только нейтронными, но и протонными ZDC, что позволяет оценить выходы определённых элементов (Pb, Tl, Hg и Au) в ЭМД.

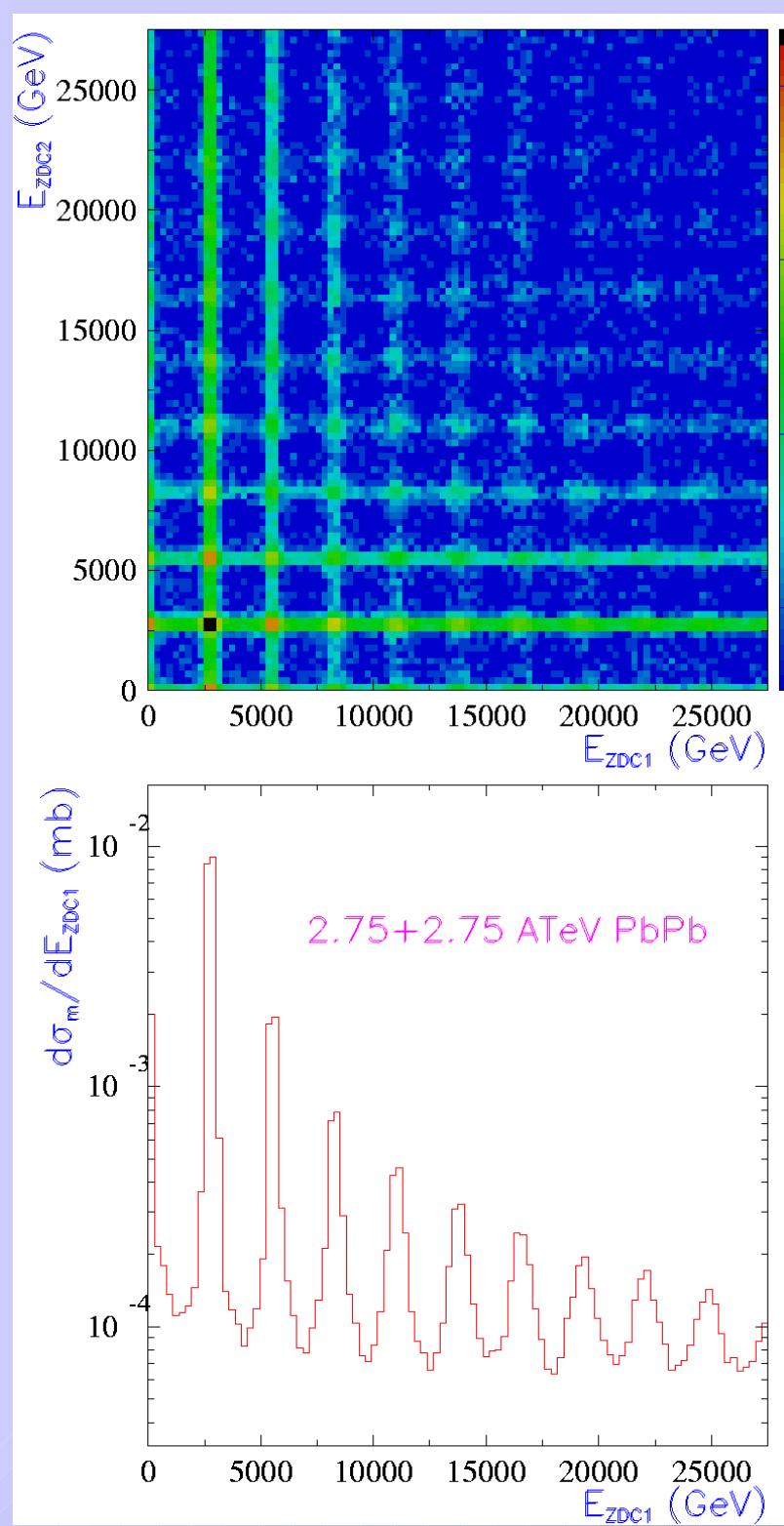


1 ZN

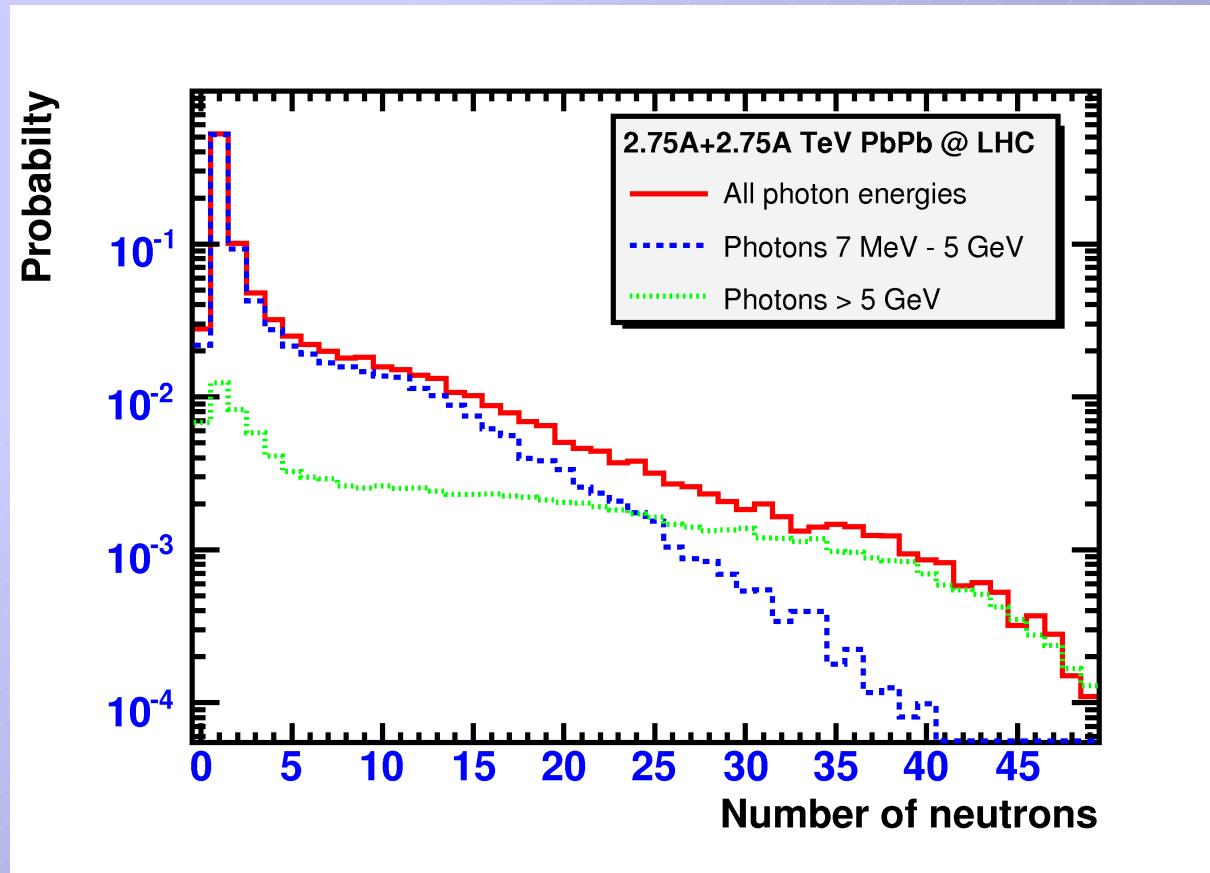
2 ZP

3 beam pipes

view from IP



# Регистрация нейтронов вперед-назад в совпадении

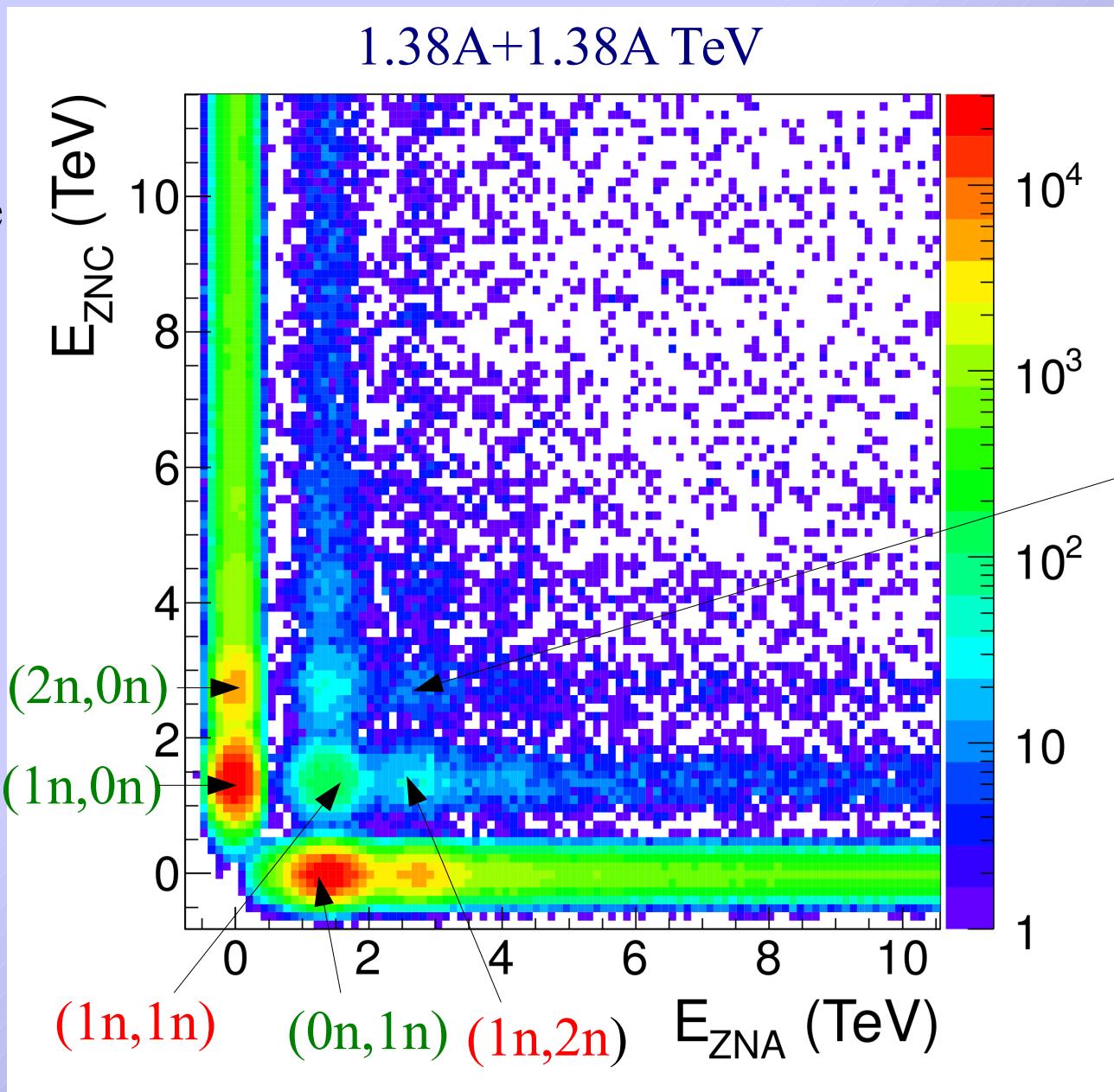


Большие множественности нейтронов  
в результате поглощения фотонов  
высоких энергий

**A.J. Baltz, ..., I.A.P. et al.,  
Phys. Reports 458(2008)1**

# Измерения выходов нейтронов вперёд от ЭМД $^{208}\text{Pb}$

Энергия  
в ZDC  
на стороне  
С



ЭМД одного  
пучка  
доминирует  
(зелёный цвет)

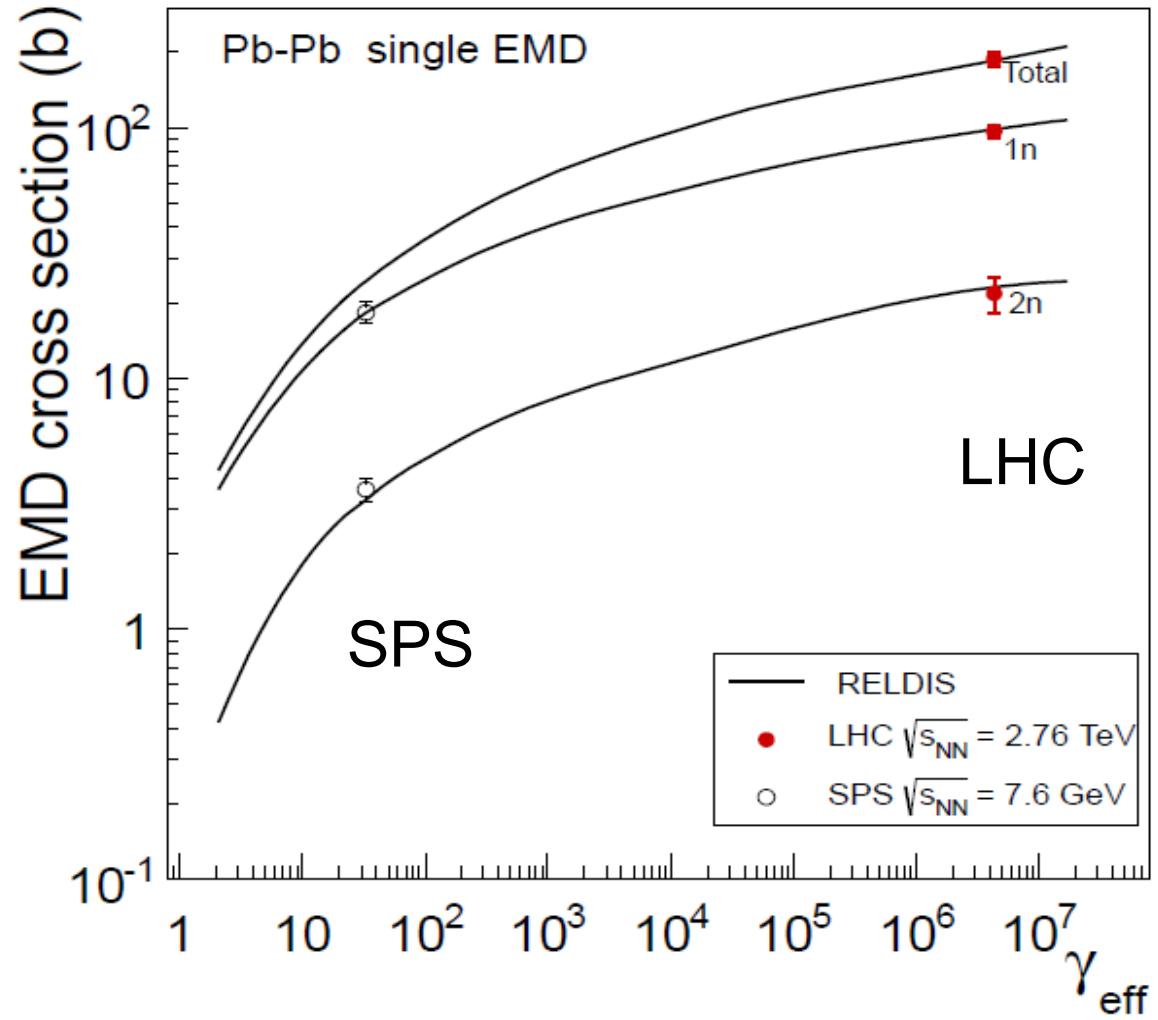
Взаимная ЭМД  
(красный)

(2n,2n)

ALICE  
Collaboration,  
**PRL 109**  
(2012)252302

Энергия в  
ZDC на  
стороне А

# Зависимость от энергии столкновений: SPS vs LHC vs RELDIS



$$\gamma_{\text{eff}} = 2\gamma_{\text{beam}}^2 - 1$$

Данные хорошо описываются RELDIS в диапазоне шести порядков  $\gamma_{\text{eff}}$ .

Гладкая и монотонная зависимость позволяет с уверенностью экстраполировать результаты для данного ядра к большим энергиям

SPS: ALICE-LUMI experiment,  
PRC 71 (2005) 024905

LHC: ALICE Collaboration,  
PRL 109 (2012) 252302 43

# Практическое применение: мониторинг светимости коллайдеров

Количество нейтронов в единицу времени + теоретическое значение сечения взаимной диссоциации => светимость

Следует использовать наиболее достоверное (стабильное) значение: сумму сечений эмиссии одного или двух нейtronов !

Сечение (мб)	$E_\gamma \leq 24$ МэВ LO	$E_\gamma \leq 140$ МэВ LO	Весь диапазон $E_\gamma$ LO+NLO		
	RELDIS $P_n^{\text{dir}}=0$	GNASH	RELDIS $P_n^{\text{dir}}=0$	RELDIS $P_n^{\text{dir}}=0$	RELDIS $P_n^{\text{dir}}=0.26$
$\sigma_m^{\text{ED}}(1nX 1nY)$	519	488	544	727	805
$\sigma_m^{\text{ED}}(1nX 2nY) +$ $\sigma_m^{\text{ED}}(2nX 1nY)$	154	220	217	525	496
$\sigma_m^{\text{ED}}(2nX 2nY)$	11	24	22	96	77
Всего: $\sigma_m^{\text{ED}}(\text{LMN})$	684	732	783	1348	1378

# Соотношение между адронными и ЭМ взаимодействиями на БАК:

beams	E/A (TeV)	E/Z (TeV)	$\sigma_{\text{had}}^{\text{a)}}$ (b)	$\sigma_{\text{EMD}}^{\text{c)}}$ (b)	$\sigma_{\text{BFPP}}$ (b)	$\sigma_{\text{tot}}$ (b)	$\sigma_{\text{had}}/\sigma_{\text{tot}}$ (%)
$^{40}\text{Ar}^{18+}$	2.93	6.5	2.689	1.7	~0.016	4.4	61
$^{40}\text{Ca}^{20+}$	3.25	6.5	2.69	2.	0.034 <sup>d)</sup>	4.7	57
$^{63}\text{Cu}^{29+}$	2.99	6.5	3.65	5.8	~0.46	9.9	36
$^{78}\text{Kr}^{36+}$	3.00	6.5	4.19	12.4	~0.85	17.4	24
$^{84}\text{Kr}^{36+}$	2.79	6.5	4.38	13.4	~0.85	18.6	24
$^{115}\text{In}^{49+}$	2.77	6.5	5.34	40.4	~7.4	53.	10
$^{129}\text{Xe}^{54+}$	2.72	6.5	5.61 <sup>b)</sup>	50.6	~14.6	71.	8
$^{208}\text{Pb}^{82+}$	2.51	6.36	7.66 <sup>b)</sup>	211.4	271.8 <sup>d)</sup>	491.	1.6
$^{238}\text{U}^{92+}$	2.51	6.5	8.37	299.	602.2 <sup>d)</sup>	910.	0.9

<sup>a)</sup> Modified abrasion-ablation (Glauber-like) model, C. Scheidenberger, et al., PRC **70** (2004) 014902

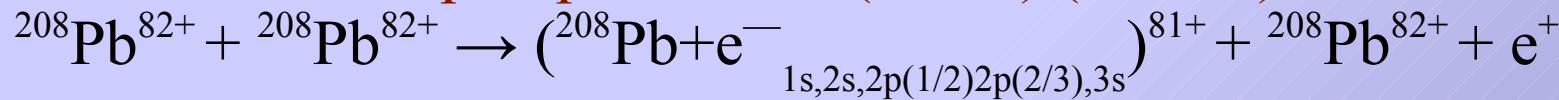
<sup>b)</sup> Glauber MC 3.0 C. Loizides et al., arXiv:**1710.07098**

<sup>c)</sup> RELDIS,. I.P., Phys. Part. Nucl. **42** (2011) 215

<sup>d)</sup> H. Meier et al., PRA **63** (2001) 032713, 1s-3s, 2p states, оценивалось как  $\sim Z^7$  для других ядер

# Весьма вероятны ЭМ процессы, приводящие к небольшим изменениям $A$ и $Z$

- Bound-free  $e^+e^-$  pair production (BFPP) ( $\sim 270$  b):



- Электромагнитная диссоциация (ЭМД):



→ другие каналы, например с эмиссией протонов

- Как BFPP так и ЭМД меняют magnetic rigidity:  $p/Ze = B\rho$ , где  $\rho$  радиус траектории в магнитном поле  $B$  БАК.
- $B\rho \rightarrow B\rho(1+\delta)$  в результате УПВ  $A_0 \rightarrow A$ ,  $Z_0 \rightarrow Z$        $\delta = \frac{Z_0}{A_0} \frac{A}{Z} - 1$

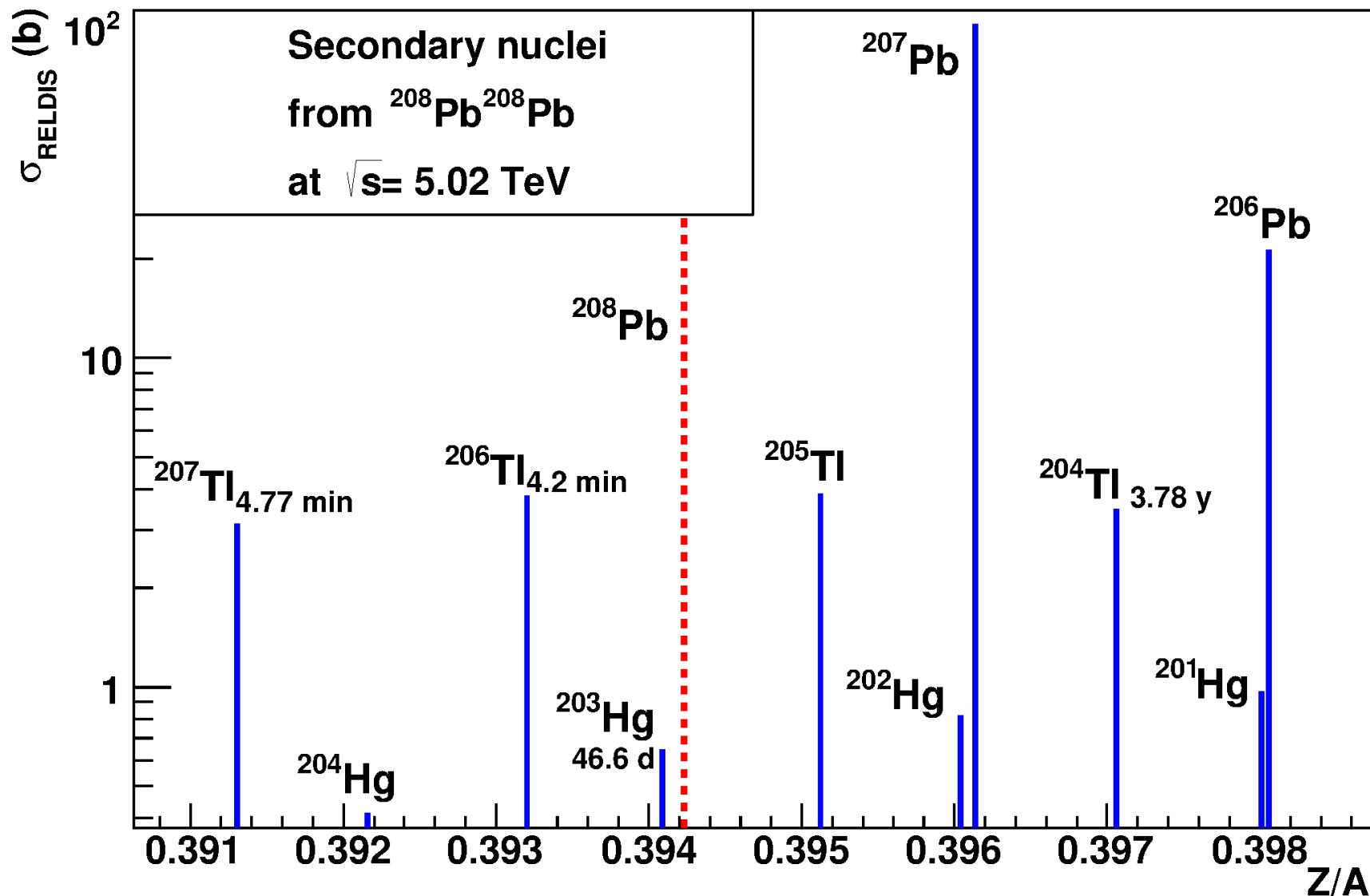
R. Bruce et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams **12** (2009) 071002

C. Bahamonde Castro et al., TUPMW006, Proc. of IPAC2016, Busan, Korea

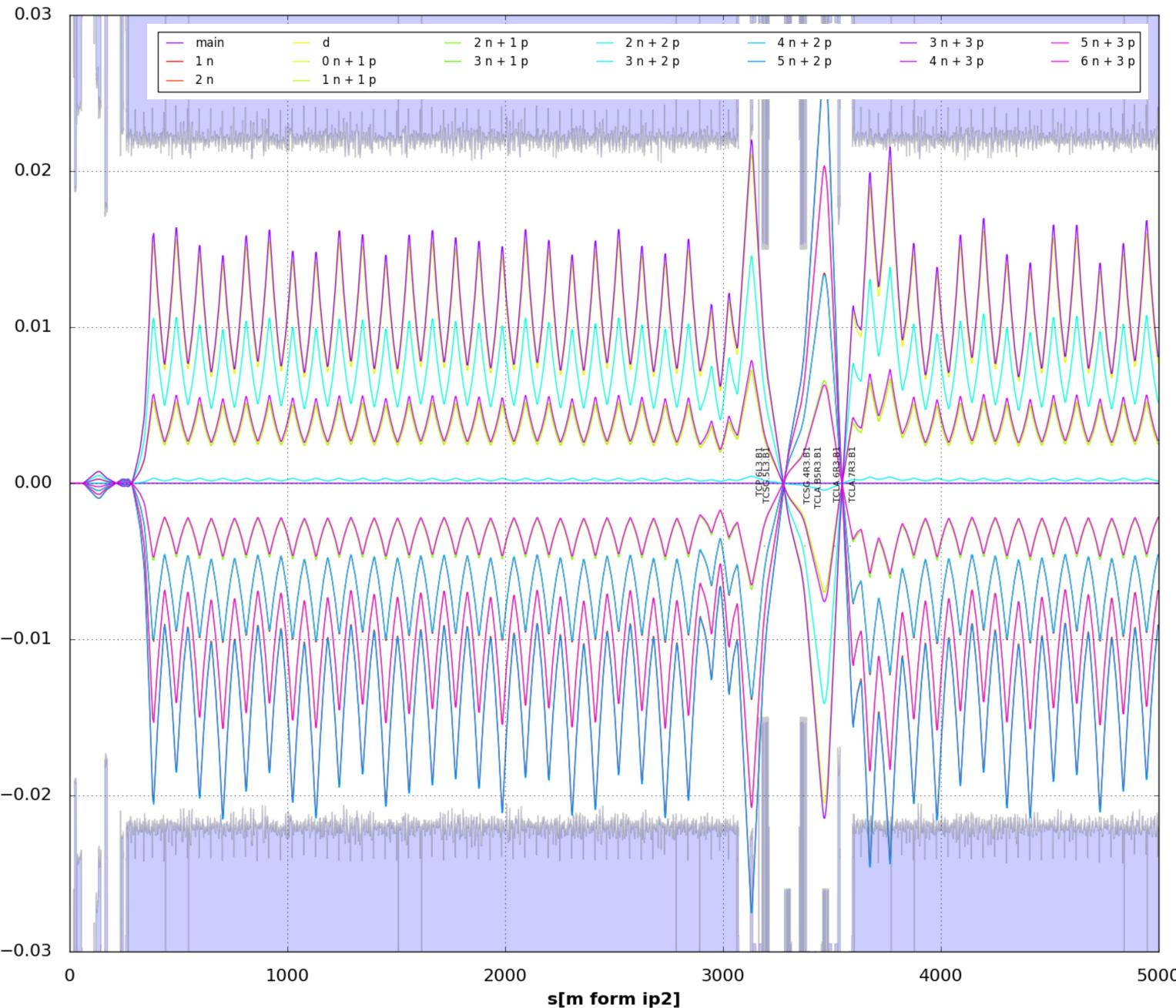
J.M. Jowett et al., TUPMW028, Proc. of IPAC2016, Busan, Korea

P.D. Hermes et al., Nucl. Instr & Meth. A **819** (2016) 73

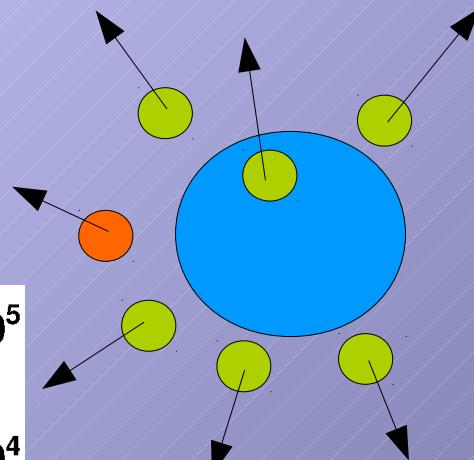
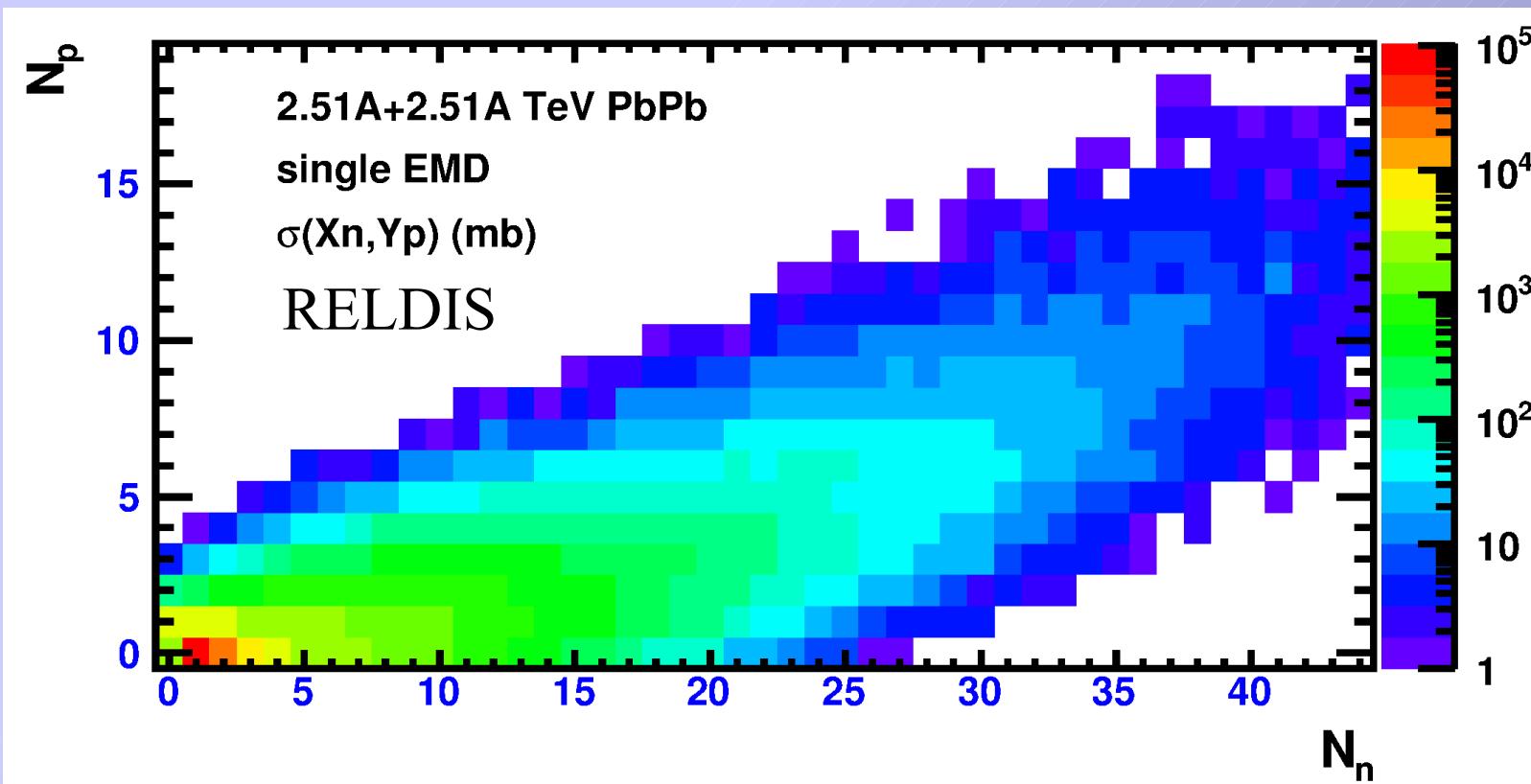
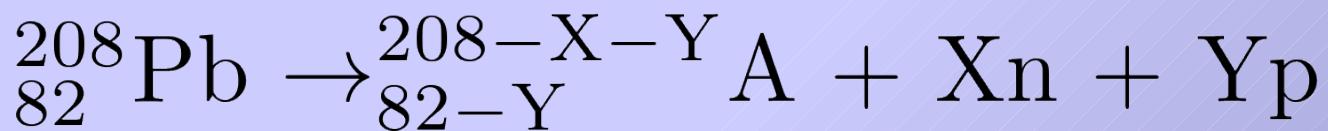
# Основные проблемы создаются ядрами, близкие к $^{208}\text{Pb}$ : $^{206,207}\text{Pb}$ , $^{204,205,206,207}\text{Tl}$ , $^{202,204}\text{Hg}$



# Моделирование траекторий таких ядер внутри БАК



**Вторичные ядра от ЭМД не могут быть зарегистрированы напрямую на БАК, но можно детектировать нейтроны и протоны посредством ZDC**



# *Оценка сечений образования $^{82}\text{Pb}$ посредством регистрации нейтронов и протонов: RELDIS*

Exclusive EMD channel		Inclusive production of a given nuclide		Emission of a given number of neutrons	
Channel	$\sigma$ (b)	Nuclide	$\sigma$ (b)	Neutron multiplicity	$\sigma$ (b)
$^{207}\text{Pb} + 1\text{n}$	101.6	$^{207}\text{Pb} + \text{X}$	103.3	$1\text{n} + 0\text{p}$	103.8
$^{206}\text{Pb} + 2\text{n}$	20.34	$^{206}\text{Pb} + \text{X}$	21.3	$2\text{n} + 0\text{p}$	22.06
$^{205}\text{Pb} + 3\text{n}$	5.99	$^{205}\text{Pb} + \text{X}$	6.77	$3\text{n} + 0\text{p}$	7.53
$^{204}\text{Pb} + 4\text{n}$	2.88	$^{204}\text{Pb} + \text{X}$	3.45	$4\text{n} + 0\text{p}$	4.30

В основном процессы с мягкими фотонами, без других частиц и легких фрагментов

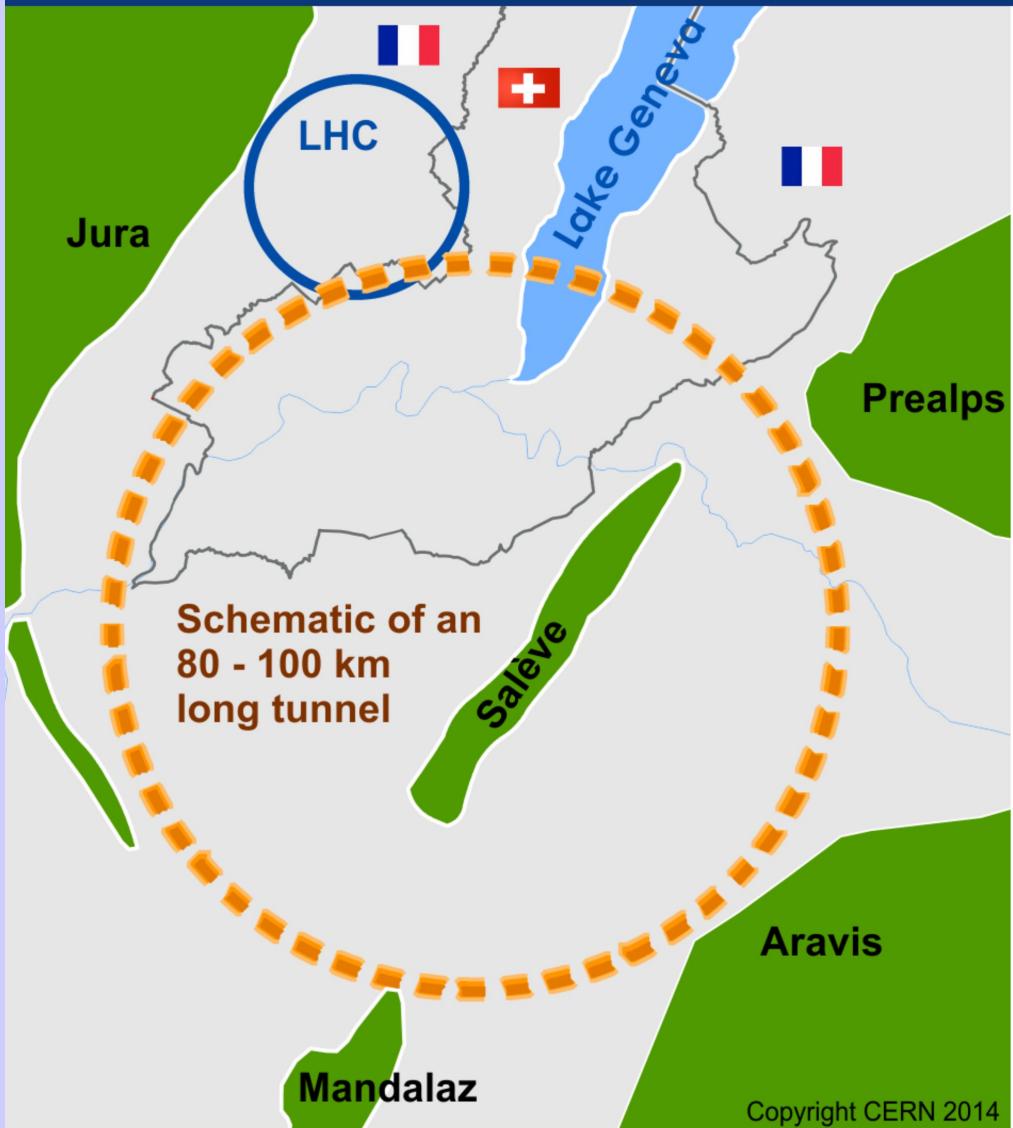
# Оценка сечений образования $^{81}\text{Tl}$ посредством регистрации нейтронов и протонов: *RELDIS*

Exclusive EMD channel		Inclusive production of a given nuclide		Emission of certain numbers of n and p	
Channel	$\sigma$ (b)	Nuclide	$\sigma$ (b)	Multiplicity	$\sigma$ (b)
$^{206}\text{Tl} + 1n + 1p$	2.57	$^{206}\text{Tl} + X$	3.82	$1n + 1p$	3.64
$^{205}\text{Tl} + 2n + 1p$	2.57	$^{205}\text{Tl} + X$	3.87	$2n + 1p$	3.51
$^{204}\text{Tl} + 3n + 1p$	2.27	$^{204}\text{Tl} + X$	3.46	$3n + 1p$	3.11
$^{203}\text{Tl} + 4n + 1p$	1.87	$^{203}\text{Tl} + X$	2.93	$4n + 1p$	2.75

Надежная верхняя оценка сечений образования Tl. Однако помимо  $^{206}\text{Tl} + n + p$ , канал  $^{206}\text{Tl} + d$  также возможен с меньшей вероятностью.



# Scope of FCC Study



International FCC collaboration (CERN as host lab) to study:

- **$pp$ -collider (*FCC-hh*)**  
→ main emphasis, defining infrastructure requirements  
 **$\sim 16\text{ T} \Rightarrow 100\text{ TeV } pp \text{ in } 100\text{ km}$**
- **$\sim 100\text{ km}$  tunnel infrastructure** in Geneva area, site specific
- **$e^+e^-$  collider (*FCC-ee*),** as potential first step
- **$p-e$  (*FCC-he*) option,** integration one IP, e from ERL
- **HE-LHC with *FCC-hh* technology**
- **CDR for end 2018**



# FCC-pp collider parameters

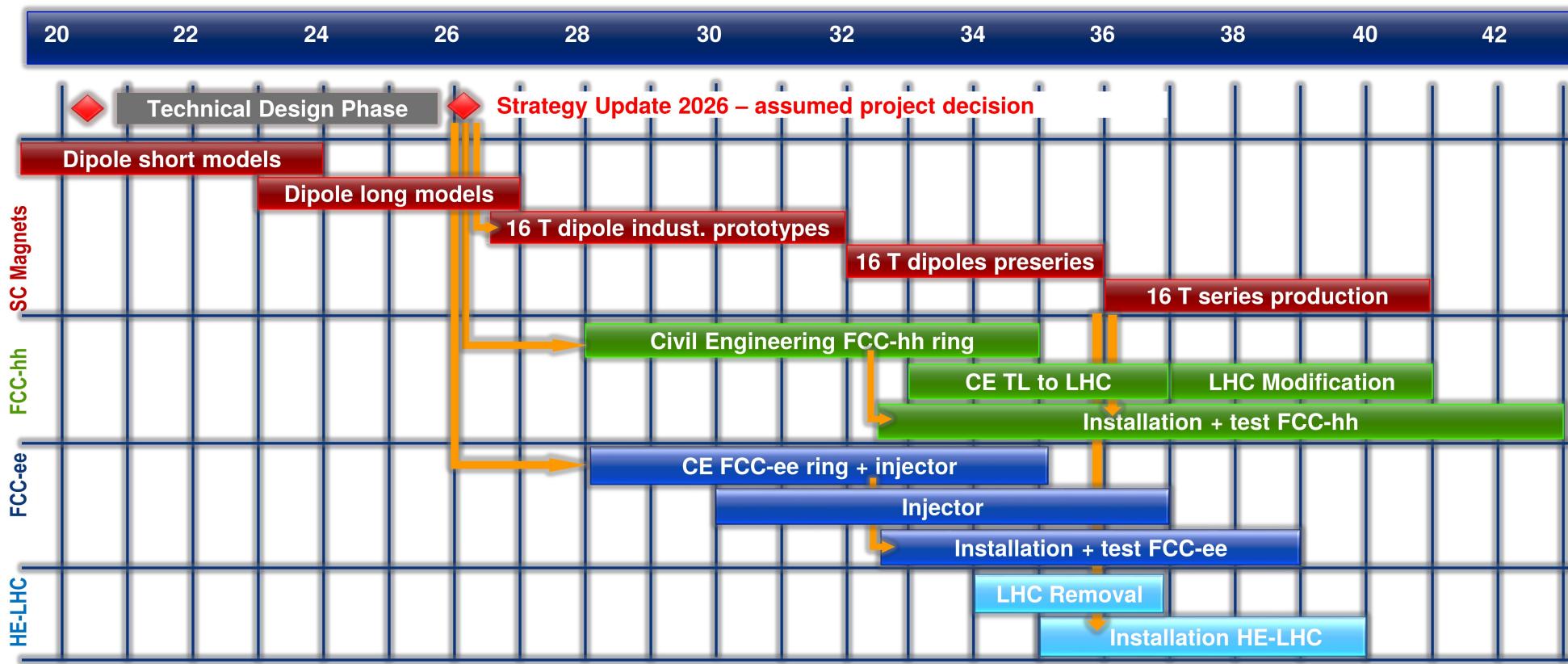
parameter	FCC-hh		HE-LHC	HL-LHC	LHC
collision energy cms [TeV]	<b>100</b>		<b>27</b>	14	14
dipole field [T]	<b>16</b>		<b>16</b>	8.33	8.33
circumference [km]	<b>97.75</b>		<b>26.7</b>	<b>26.7</b>	<b>26.7</b>
beam current [A]	<b>0.5</b>		<b>1.12</b>	<b>1.12</b>	<b>0.58</b>
bunch intensity [ $10^{11}$ ]	<b>1</b>	<b>1 (0.2)</b>	<b>2.2 (0.44)</b>	2.2	1.15
bunch spacing [ns]	<b>25</b>	<b>25 (5)</b>	<b>25 (5)</b>	<b>25</b>	<b>25</b>
synchr. rad. power / ring [kW]	<b>2400</b>		<b>101</b>	7.3	3.6
SR power / length [W/m/ap.]	<b>28.4</b>		<b>4.6</b>	0.33	0.17
long. emit. damping time [h]	<b>0.54</b>		<b>1.8</b>	<b>12.9</b>	<b>12.9</b>
beta* [m]	<b>1.1</b>	<b>0.3</b>	<b>0.25</b>	<b>0.20</b>	<b>0.55</b>
normalized emittance [ $\mu\text{m}$ ]	<b>2.2 (0.4)</b>		<b>2.5 (0.5)</b>	<b>2.5</b>	<b>3.75</b>
peak luminosity [ $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ]	<b>5</b>	<b>30</b>	<b>25</b>	<b>5</b>	<b>1</b>
events/bunch crossing	<b>170</b>	<b>1k (200)</b>	<b>~800 (160)</b>	<b>135</b>	<b>27</b>
stored energy/beam [GJ]	<b>8.4</b>		<b>1.3</b>	<b>0.7</b>	<b>0.36</b>

M. Benedikt and F. Zimmermann, Future Circular Collider Study: <http://cern.ch/fcc>  
 Status and Plans, 3<sup>rd</sup> FCC week, Berlin, 2017

# Следующие 25 лет физики высоких энергий в ЦЕРНе



## Draft Schedule Considerations

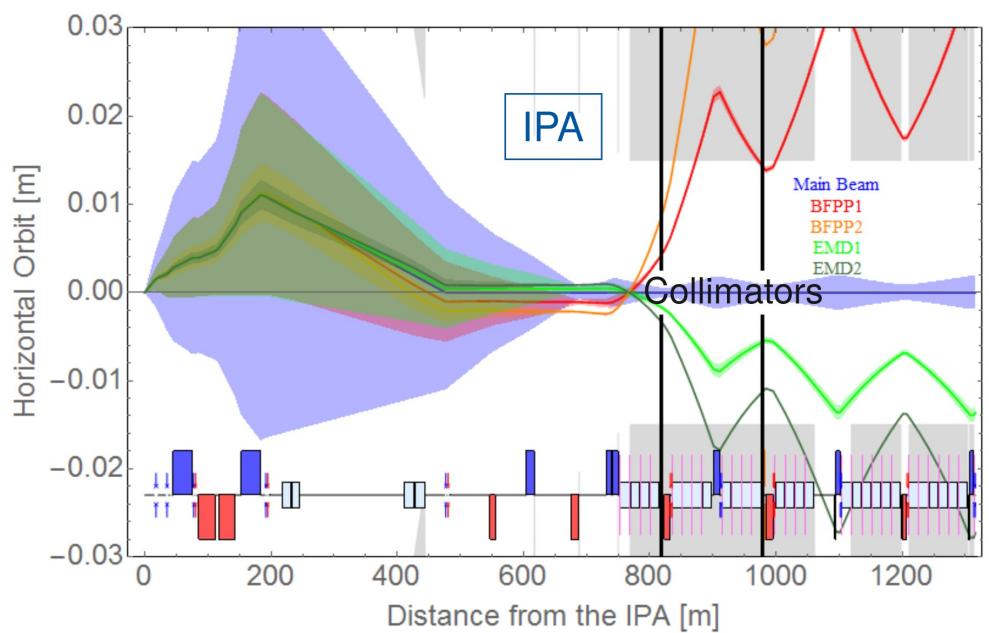
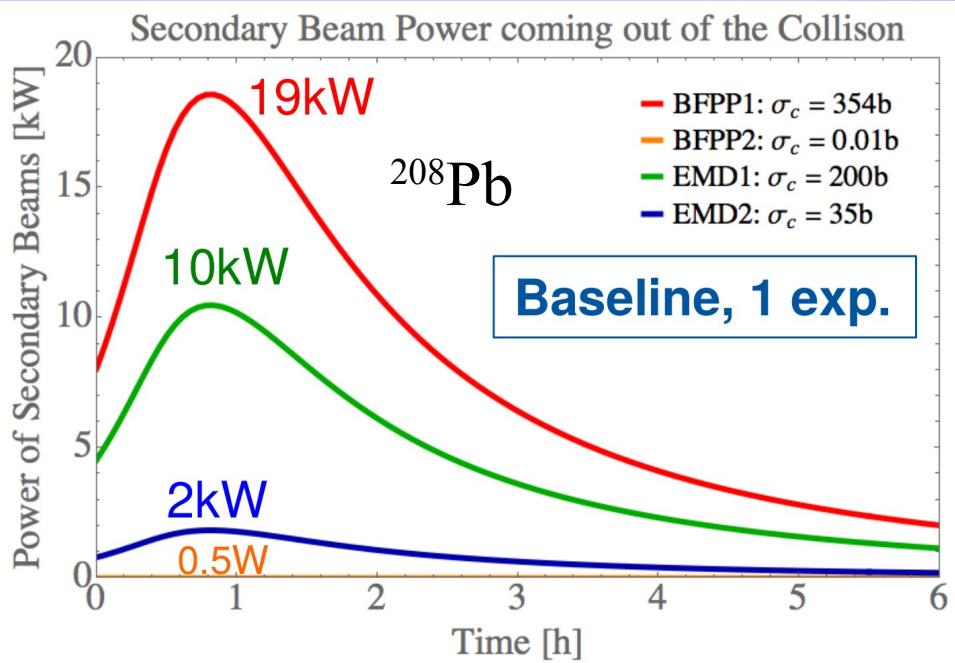
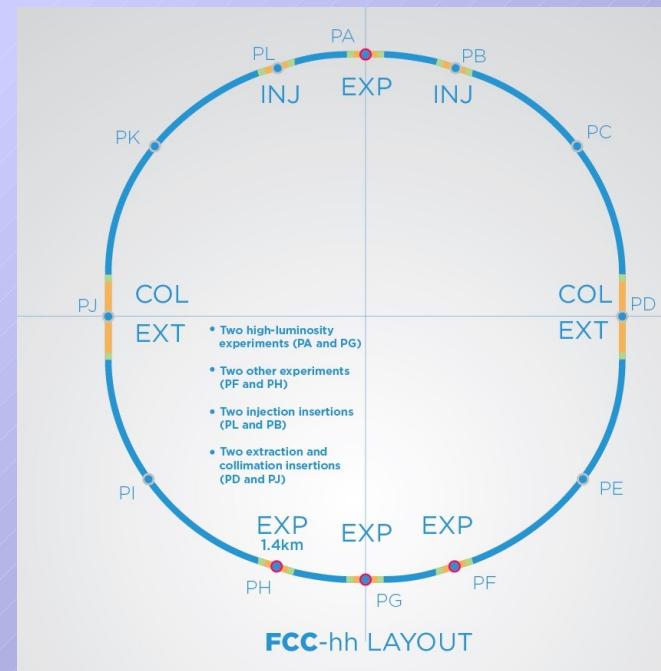


# $^{208}\text{Pb}$ в FCC-hh

FCC-hh Physics YR 3, 635–692, arXiv:1605.01389

M. Schaumann, Phys. Rev. ST Accel. Beams  
18 (2015) 9, 091002, arXiv:1503.09107

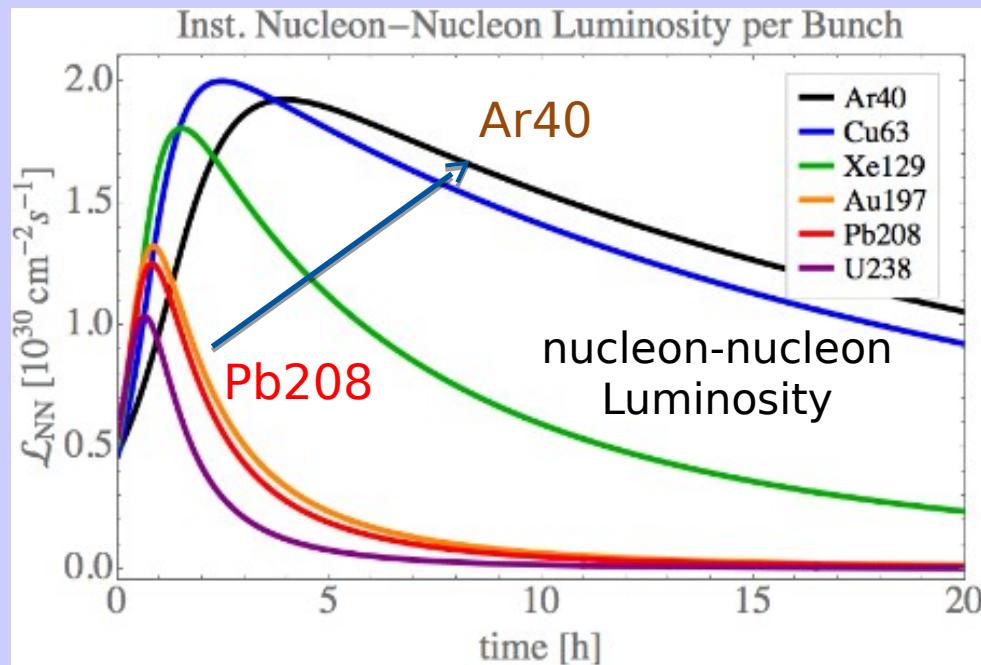
Сравнимые с БАК ЭМД сечения, но энергия  
Пучков в восемь раз выше.



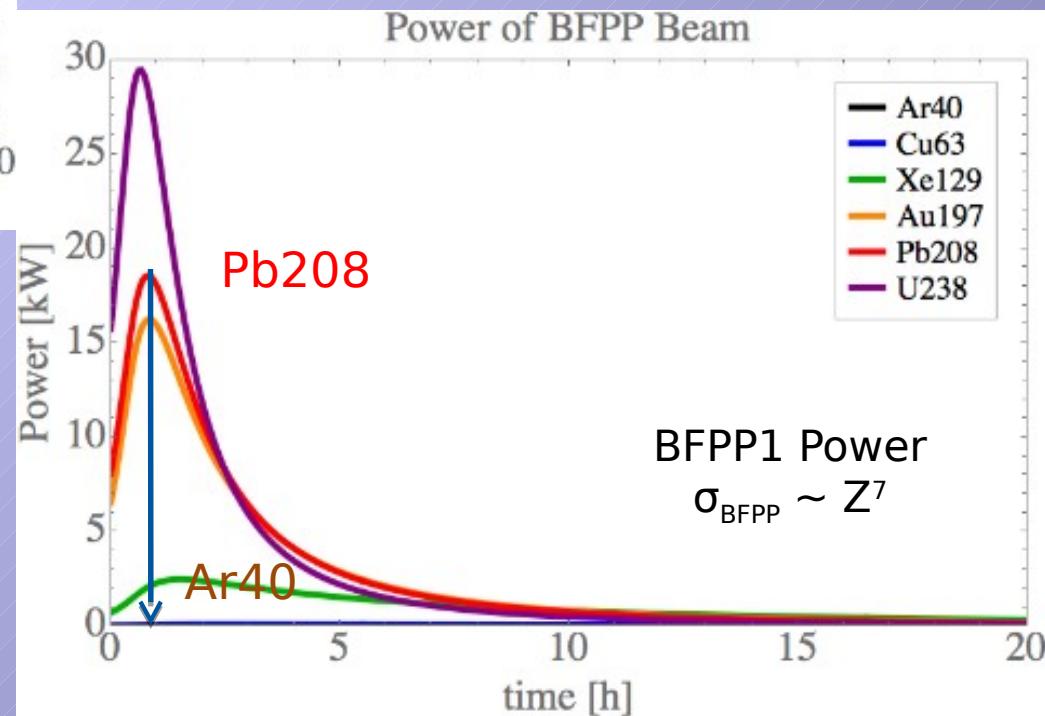
M. Schaumann et al., FCC week Berlin, 30.05.2017

<https://indico.cern.ch/event/556692/contributions/2484258/>

# Преимущества менее тяжелых ядер для FCC-hh



Увеличенное время жизни пучков, большее доля адронных взаимодействий



Снижена мощность пучков вторичных ядер при той же частоте адронных взаимодействий

# Какие ядра сталкивать на FCC-hh?

beams	E/A (TeV)	E/Z (TeV)	$\sigma_{\text{had}}^{\text{a)}}$ (b)	$\sigma_{\text{EMD}}^{\text{c)}}$ (b)	$\sigma_{\text{BFPP}}$ (b)	$\sigma_{\text{tot}}$ (b)	$\sigma_{\text{had}}/\sigma_{\text{tot}}$ (%)
$^{40}\text{Ar}^{18+}$	22.5	50.	2.764	2.2	~0.02	5.	55
$^{40}\text{Ca}^{20+}$	25.	50.	2.767	2.7	0.042 <sup>d)</sup>	5.5	50
$^{63}\text{Cu}^{29+}$	23.	50.	3.74	7.8	~0.6	12.4	31
$^{78}\text{Kr}^{36+}$	23.	50.	4.29	16.6	~1.	22.	20
$^{84}\text{Kr}^{36+}$	21.4	50.	4.5	18.	~1.	23.5	19
$^{115}\text{In}^{49+}$	21.3	50.	5.47	53.8	~9.4	68.7	8
$^{129}\text{Xe}^{54+}$	20.9	50.	5.89	67.9	~18.5	92.3	6
$^{208}\text{Pb}^{82+}$	19.7	50.	7.9 <sup>b)</sup>	284.2	344. <sup>d)</sup>	636.	1.2
$^{238}\text{U}^{92+}$	19.3	50.	8.53	402.	761. <sup>d)</sup>	1171.	0.7

<sup>a)</sup> Modified abrasion-ablation (Glauber-like) model, C. Scheidenberger, et al., PRC **70** (2004) 014902

<sup>b)</sup> Glauber MC 3.0 C. Loizides et al., arXiv:1710.07098

<sup>c)</sup> RELDIS см. I.P., Phys. Part. Nucl. **42** (2011) 215

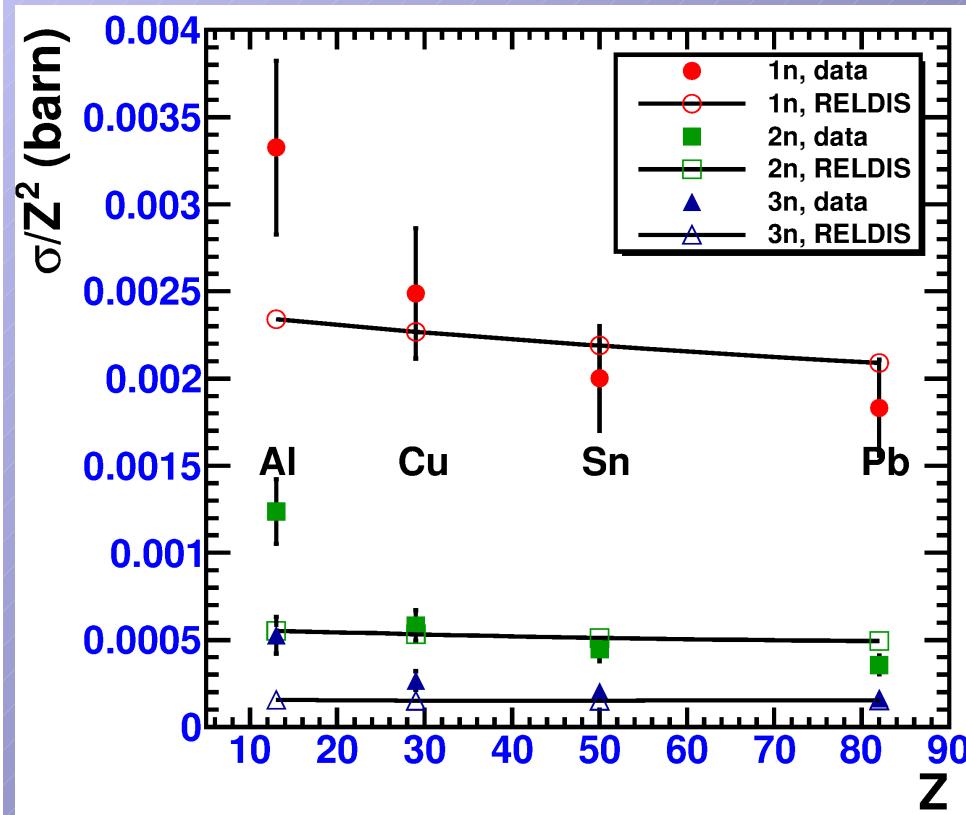
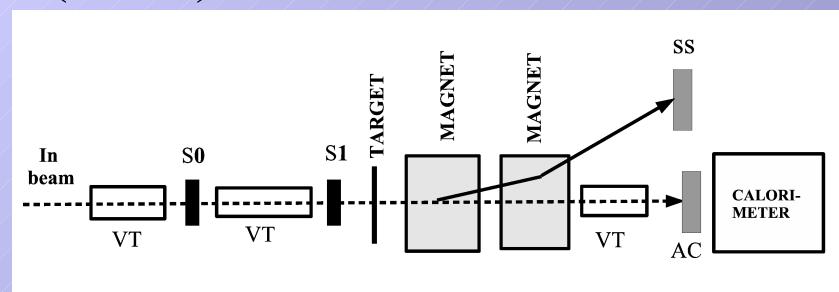
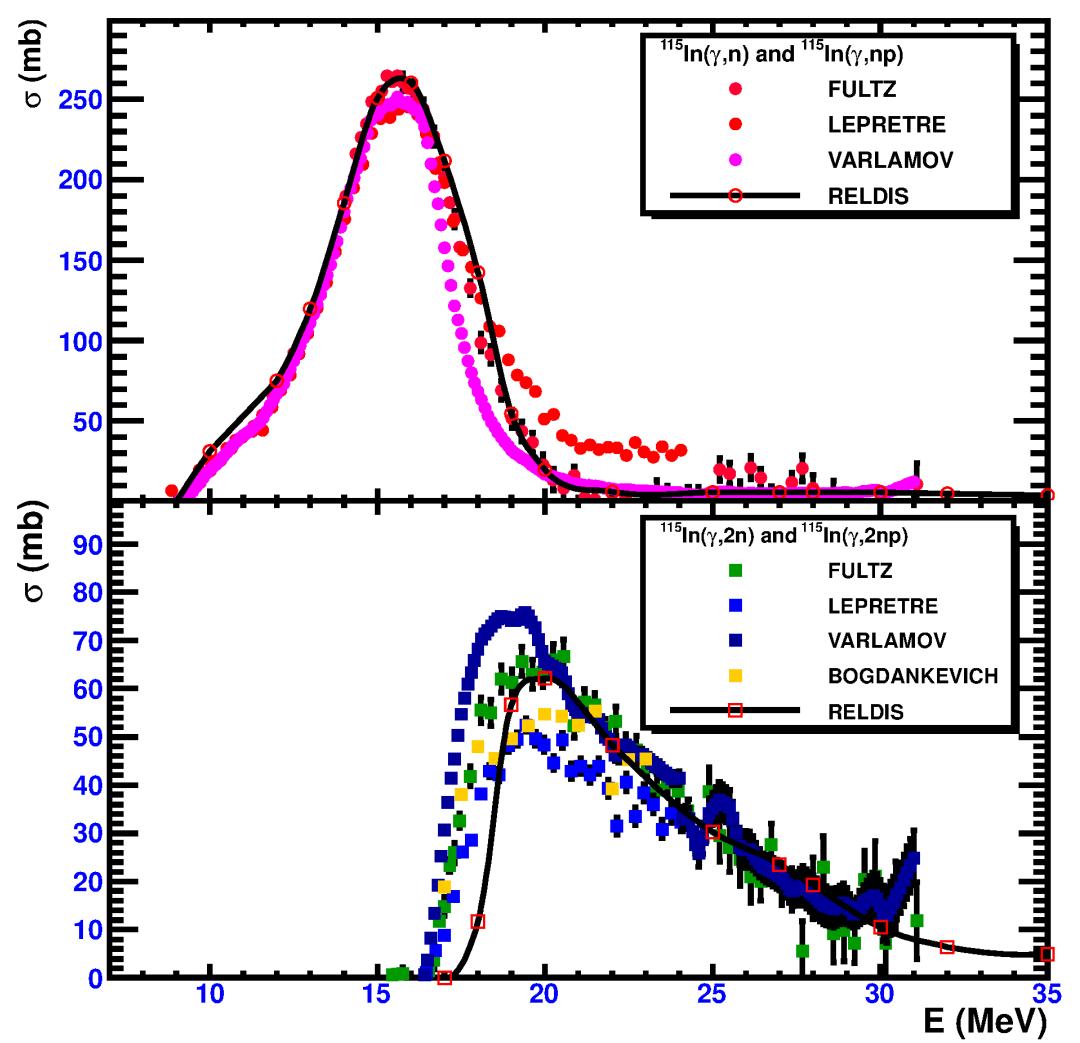
<sup>d)</sup> H. Meier et al., PRA **63** (2001) 032713,  $\sigma_{\text{BFPP}} = A \ln \gamma_c + B$ , оценивалось как  $\sim Z^7$  для других ядер

# Какие ядра сталкивать на FCC-hh?

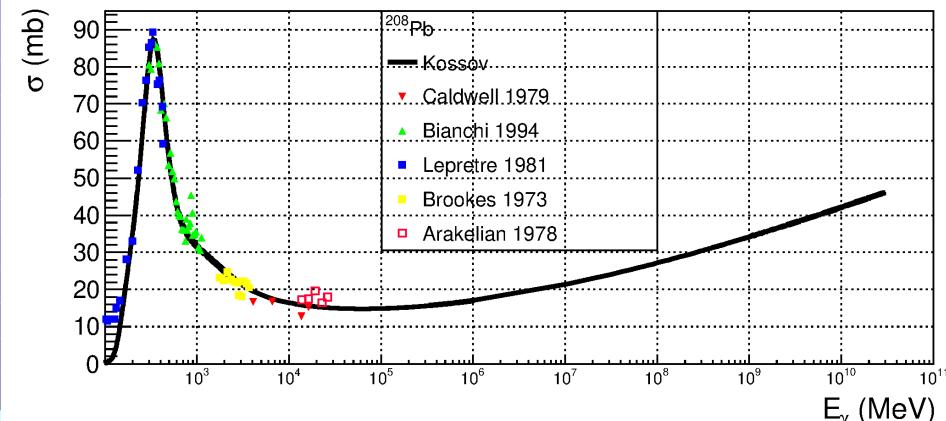
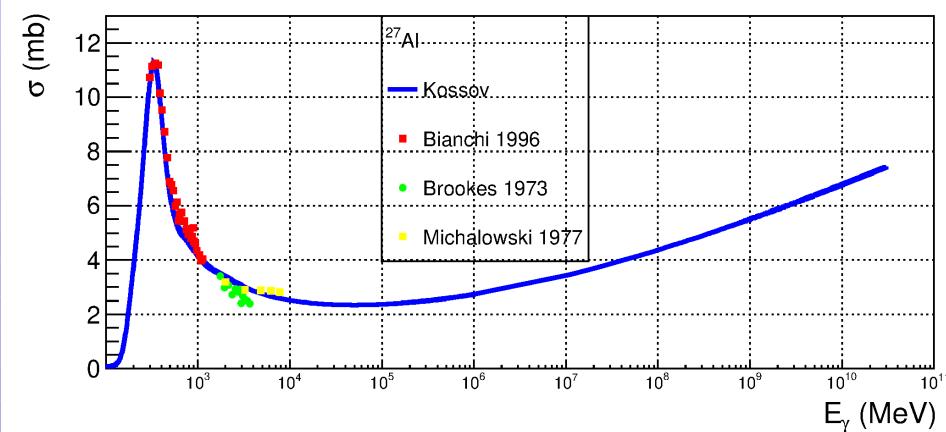
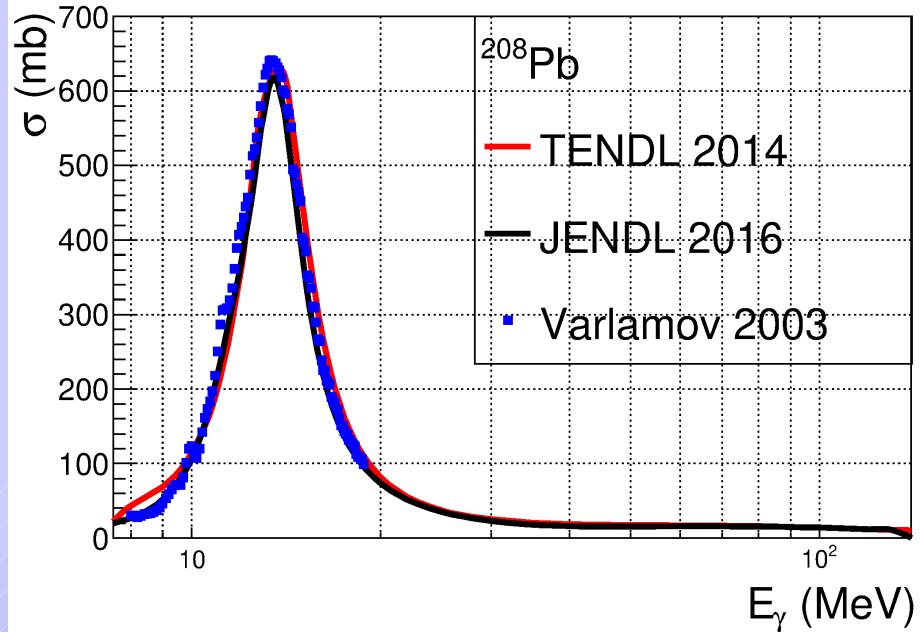
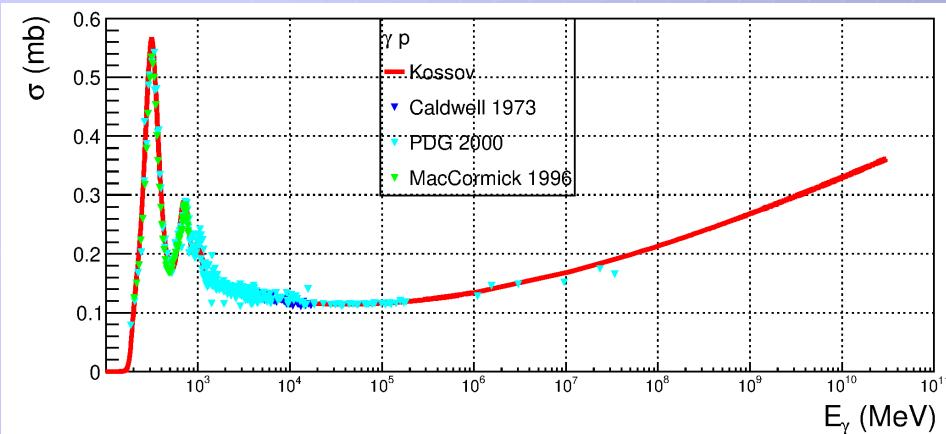
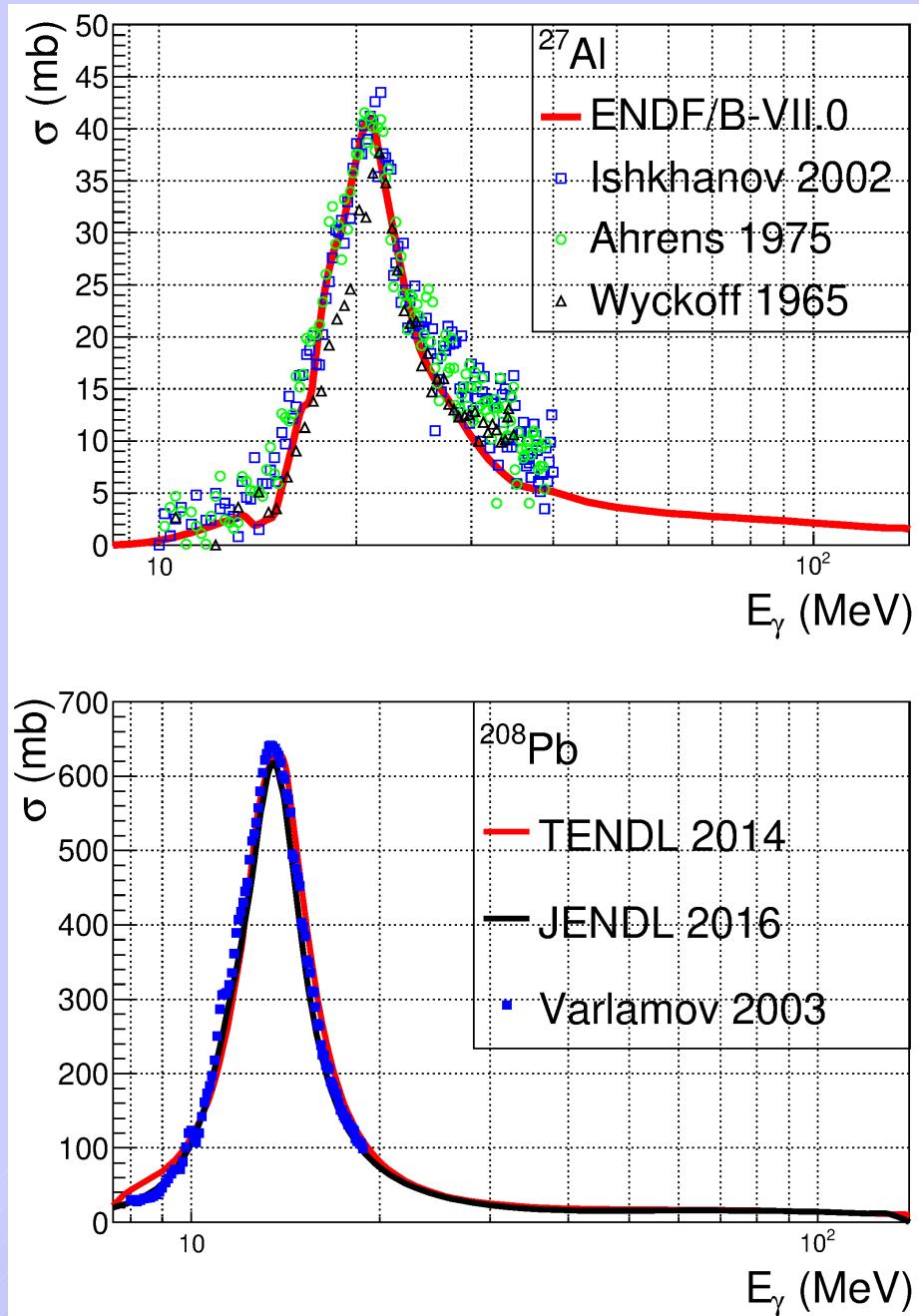
- В идеале — моноизотопы, например,  $^{197}\text{Au}$  (RHIC)
- Или изотопически чистые вещества выделенные для зарядки ECR ионного источника: например 10 г чистого  $^{208}\text{Pb}$  стоят € 9700, и около 1.3 г расходуется за две недели сеанса на БАК, см. Cian O'Luanaigh, *Heavy metal: Refilling the lead source for the LHC*, CERN Accelerating science, 4 Feb 2013, <http://cds.cern.ch/record/1997797>
- Приемлемые химические свойства, безопасность для окружающей среды. Удобны благородные газы, некоторые металлы.
- $^{115}\text{In}$  может подойти. Были проведены измерения на CERN SPS, результаты сопоставлены с RLDIS.

# Исследования ЭМД $^{115}\text{In}$ на CERN SPS: валидация данных и модели для LHC, FCC-hh

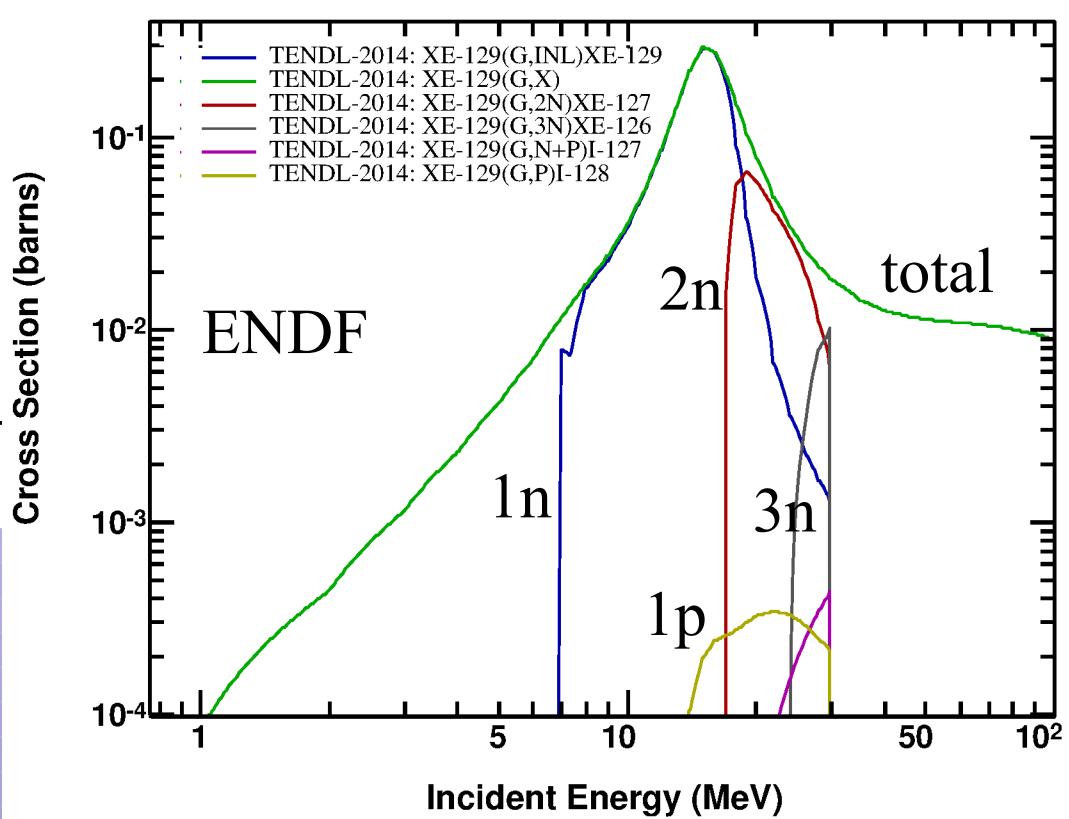
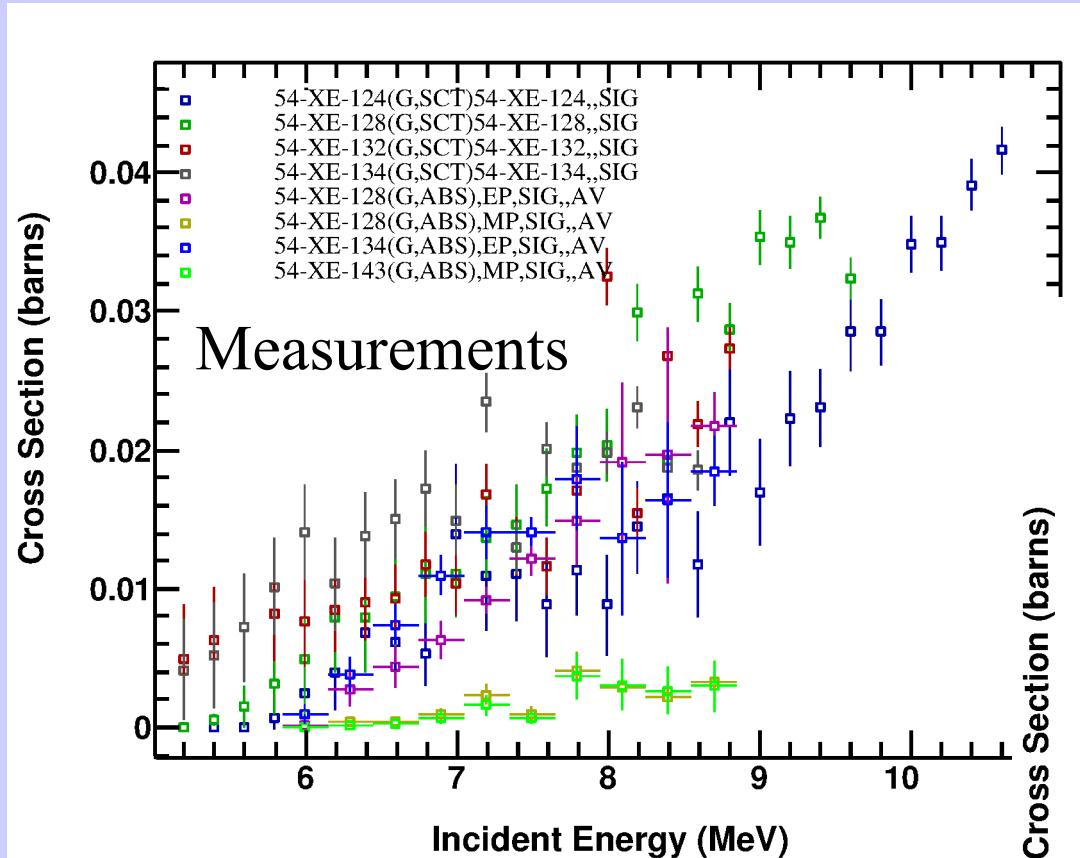
E.V. Karpechev et al., Emission of forward neutrons by 158A GeV  $^{115}\text{In}$   
in collisions with Al, Cu, Sn and Pb, NPA 921 (2014) 60



# Важны также надежные аппроксимации полных сечений: ГДР и выше



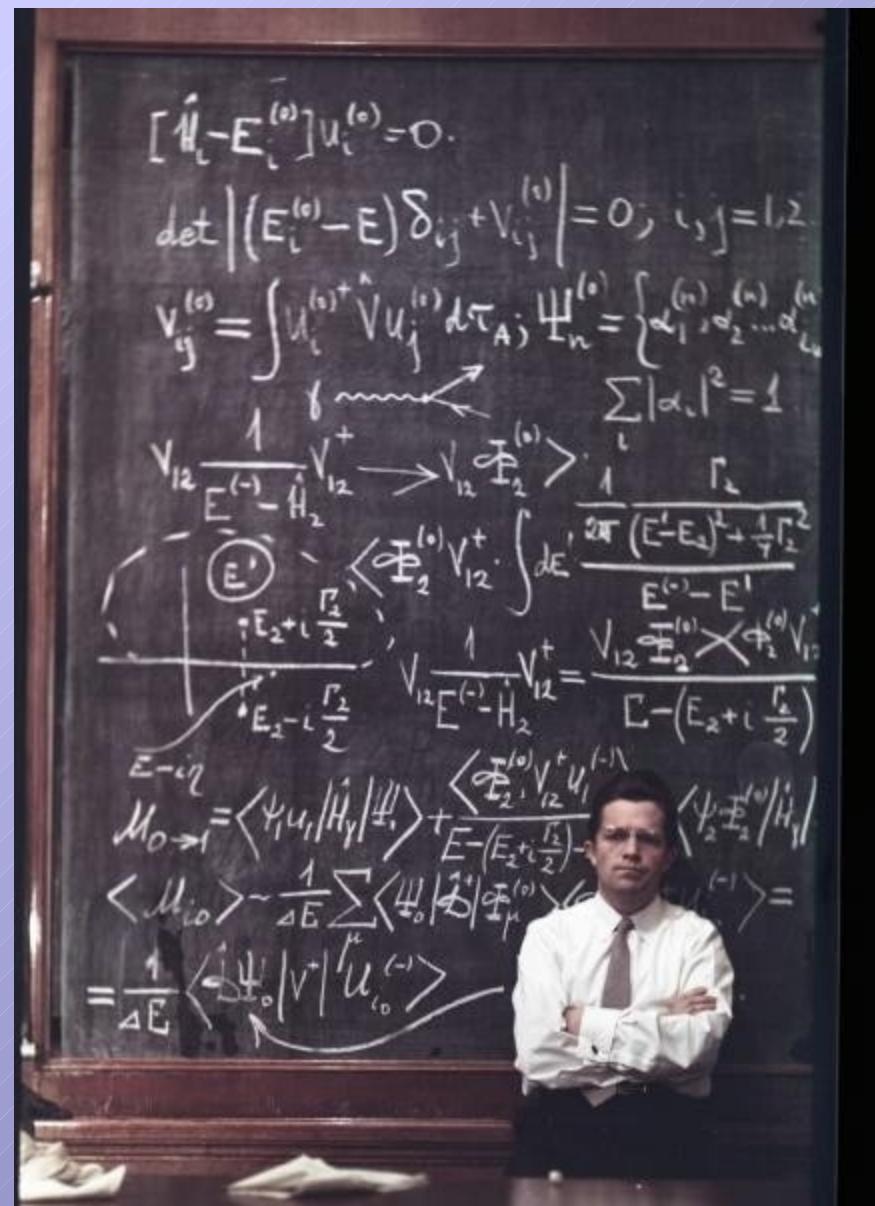
# Фотопоглощение на $^{129}\text{Xe}$



- Ограниченнные данные - только от 5 до 10 МэВ
- Оценённые данные TENDL-2014 ENDF library

# **“Очень жаль, что растет стена между ядерной физикой и физикой высоких энергий” В.В. Балашов**

- Я слышал это от Всеволода Вячеславовича в 80-х когда был студентом физфака.
- Возможно это было сказано потому, что В.В. чувствовал, что физика теряет единство (ср.: теорминимум Ландау)
- В этом выступлении я пытался пробить такую стену:
  - (1) продемонстрировав, что эффекты структуры ядер проявляют себя в столкновениях ядер высоких энергий;
  - (2) показав, что ядерные данные необходимы для физики коллайдеров (LHC, HL-LHC, HE-LHC, FCC-hh).



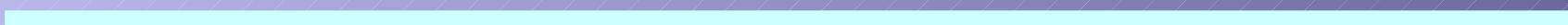
«Поединок», В. Тарасевич  
Word Press Photo Prize, 1963

# Спасибо за внимание!

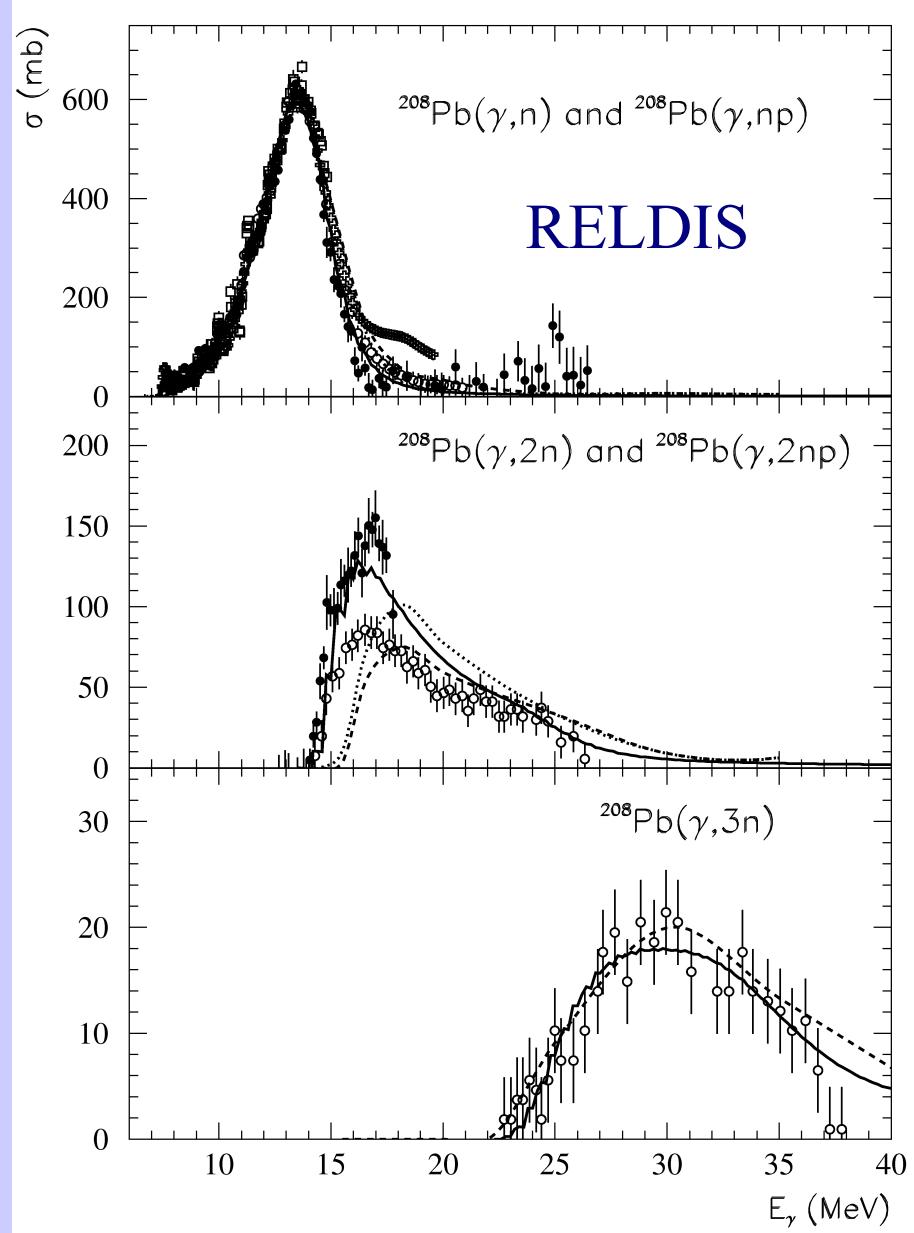
LHC	нуклиды	$\sigma_{\text{EMD}}(Z)$ (b)
Z=82	$^{188-208}\text{Pb}$	144.7
Z=81	$^{185-207}\text{Tl}$	29.9
Z=80	$^{181-206}\text{Hg}$	13.
Z=79	$^{178-205}\text{Au}$	6.2
всего Z=79-82		193.8



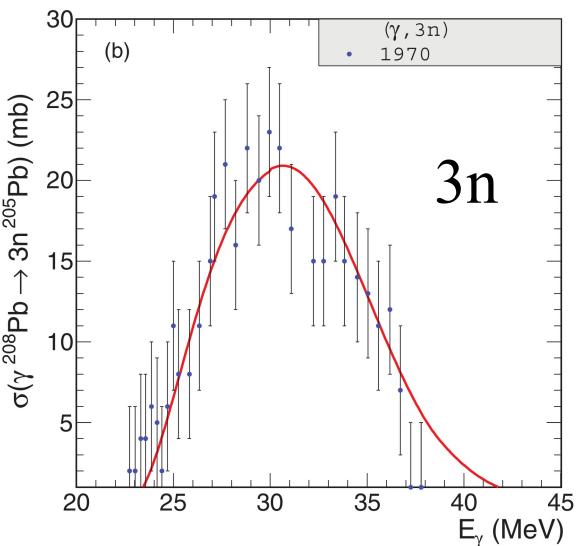
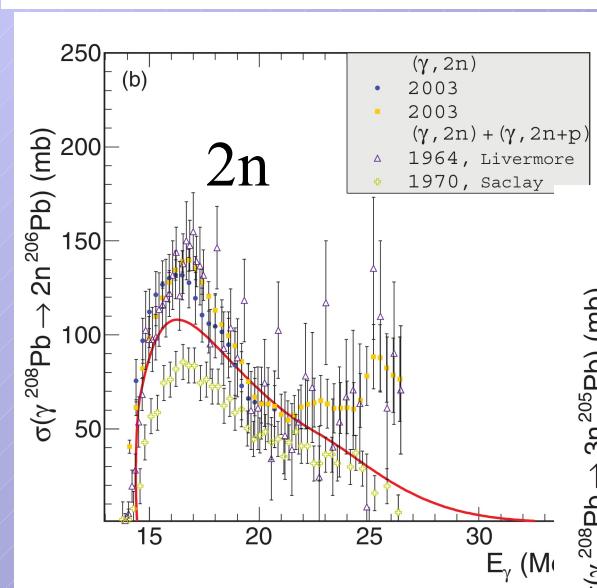
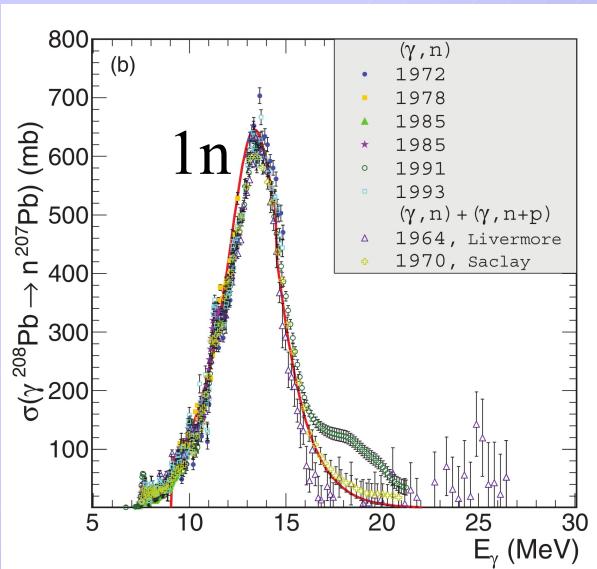
# **Дополнительные слайды**



# Photoneutron cross sections measured in different laboratories may diverge. Evaluated nuclear data have to be used.



I.P. et al., PRC 64 (2001) 024903

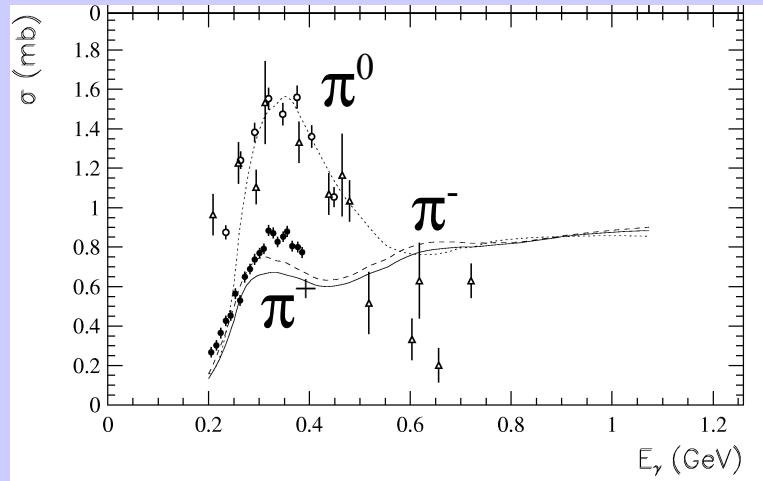


Cracow model

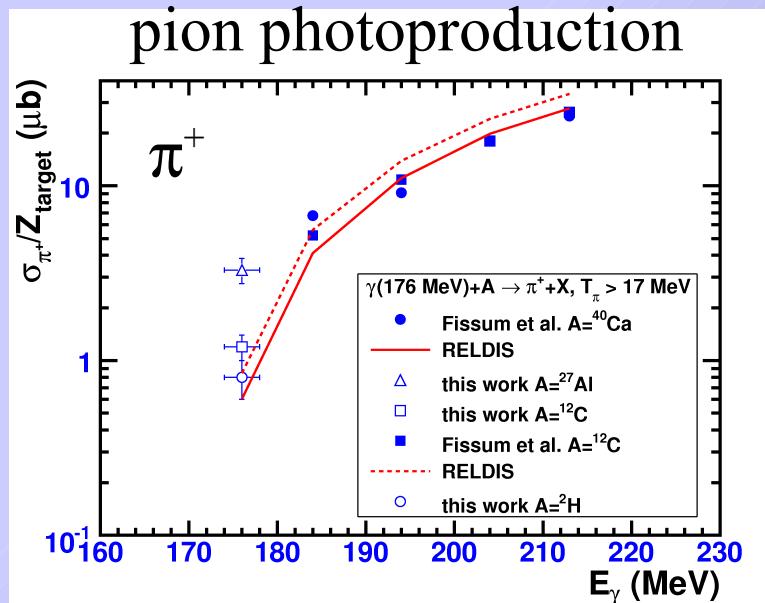
M.Klusec-Gawenda et al.,  
PRC 94 (2014) 054907

It is important to  
use reliable data and  
models to describe  
EMD of Au and Pb  
at RHIC and LHC

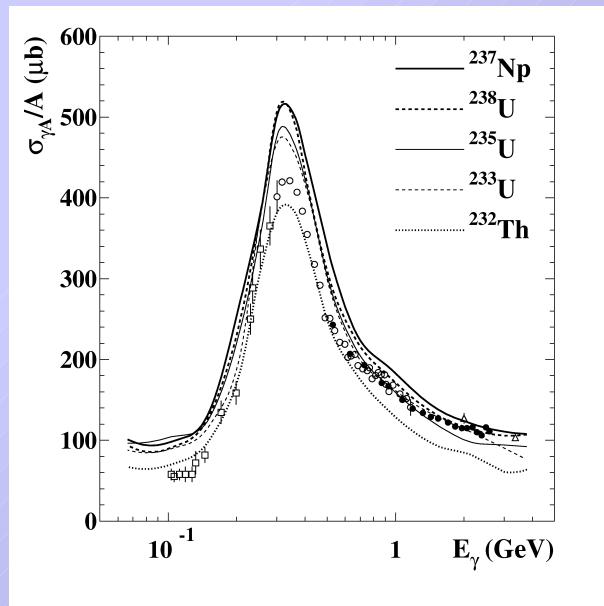
# *RELDIS model to describe photoabsorption and EMD*



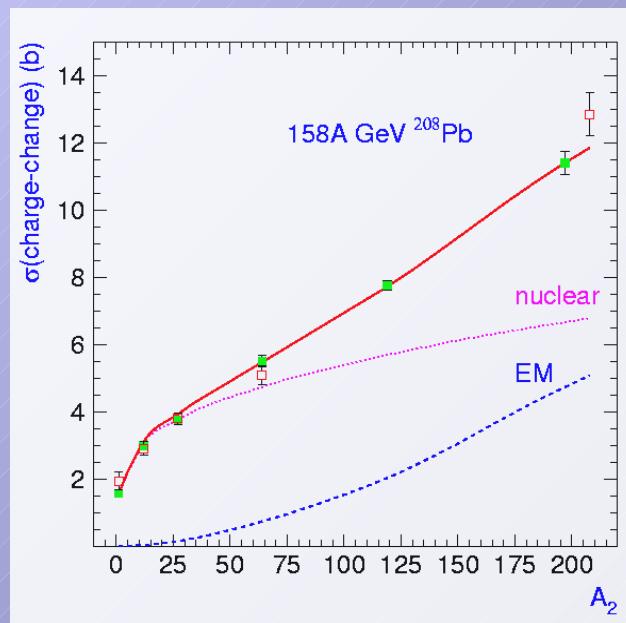
A.S. Iljinov, ..., I.P. et al.,  
Nucl. Phys. A 616(1997)575



P.Golubev, ..., I.P. et al.,  
Nucl. Phys. A 806(2008)216



I.P. et al.,  
Eur. J. Phys. A  
24(2005)69  
fission of  
heavy nuclei by  
photons



20+ papers since 1995

C. Scheidenberger,  
I.P. et al.,  
Phys. Rev. C  
70(2004)014902

Electromagnetic  
dissociation at  
SIS (GSI),  
AGS (BNL),  
CERN SPS