

# Электромагнитные возбуждения и фрагментация ультрарелятивистских ядер

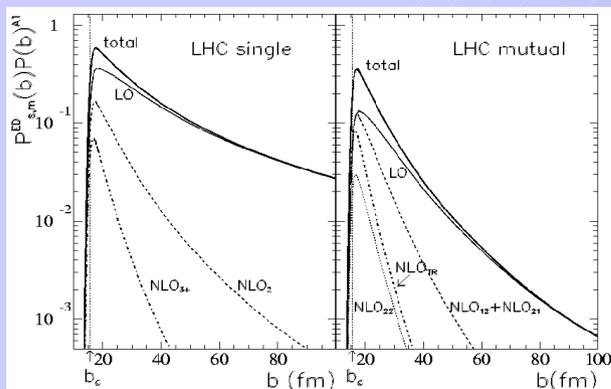
(по материалам докторской  
диссертации)

*И. А. Пшеничнов*

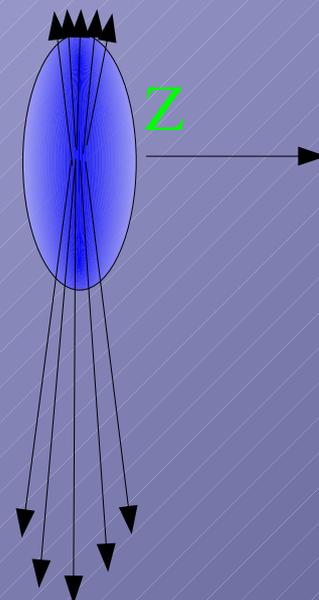
*Институт ядерных исследований РАН*

*117312 Москва*

*pshenich@inr.ru*



Семинар ОЭФ ИЯИ  
14 сентября 2010



# Электромагнитные возбуждения и фрагментация ультрарелятивистских ядер

## Аннотация

Воздействие Лорентц-сжатого кулоновского поля ультрарелятивистского ядра на ядро-партнер по столкновению приводит к его возбуждению, фрагментации и рождению частиц. Разнообразные реакции под действием виртуальных фотонов моделируются методом Монте-Карло с помощью модели RELDIS, которая успешно описывает процессы фрагментации ядер на ускорителях SPS, RHIC и LHC.

Рассматриваются многофотонные процессы возбуждения гигантских резонансов в сталкивающихся ядрах, которые имеют большие сечения при энергиях LHC. Это позволит изучать тройные возбуждения гигантских резонансов, которые еще не наблюдались при низких энергиях. Регистрация нейтронов от взаимной электромагнитной диссоциации ядер на LHC позволяет измерять его светимость, опираясь на предсказания RELDIS. Результаты модели использованы для оценки воздействия ядерных фрагментов на сверхпроводящие магниты LHC.

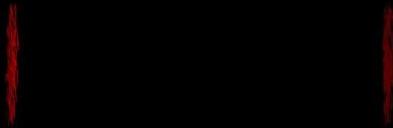
---

# О чем мы узнаем сталкивая ядра при низких и высоких энергиях?

	<i>20 – 1000 Мэв/нуклон</i>	<i>свыше 1 ГэВ/нуклон</i>
<i>Сильные взаимодействия, центральные и периферические столкновения ядер</i>	уравнение состояния ядерной материи, фазовый переход ядерная жидкость - нуклонный газ, мультифрагментация, кластерная структура ядер (с 70-х годов прошлого века)	плотную и горячую ядерную материю, фазовый переход адроны – кварки и глюоны (с 80-х годов)
<i>Электромагнитные взаимодействия, ультрапериферические столкновения</i>	возбуждения низколежащих уровней, гигантских резонансов, изомеров, взаимодействия нестабильных ядер (с 50-х годов)	?

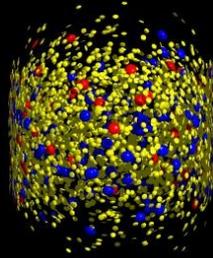
# Столкновения ядер на LHC: можно забыть о ядерной структуре, коллективных возбуждениях?

Pb+Pb  $E_{cm}=5.5$  TeV t=-19.00 fm/c



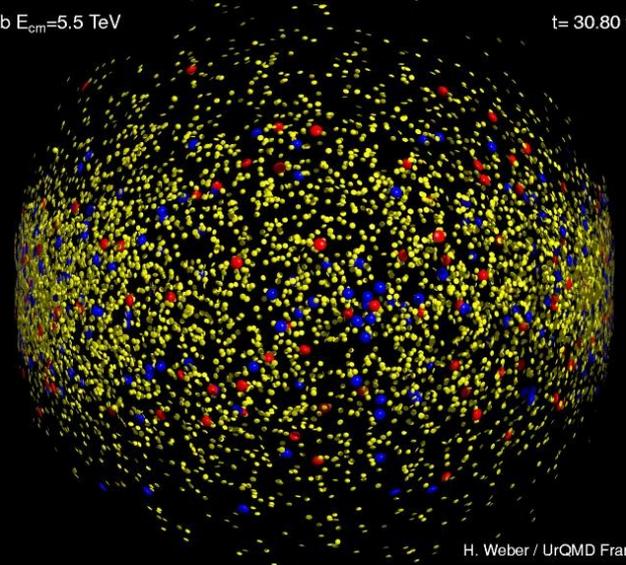
H. Weber /

Pb+Pb  $E_{cm}=5.5$  TeV t= 10.80 fm/c



H. Weber / UrQMD Frar

Pb+Pb  $E_{cm}=5.5$  TeV t= 30.80 fm/c



H. Weber / UrQMD Frankfurt/M

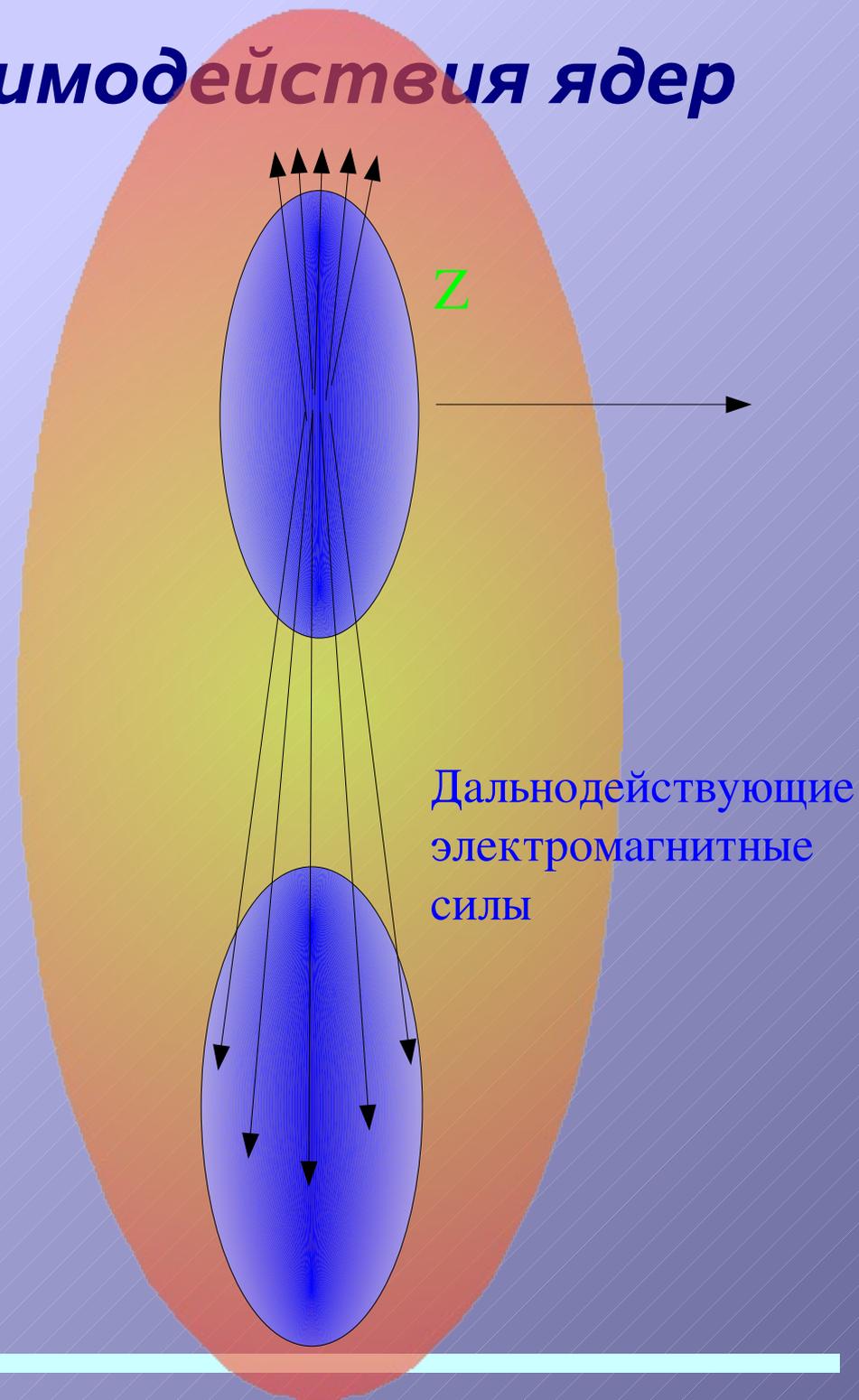
нуклоны: красный

мезоны: желтый

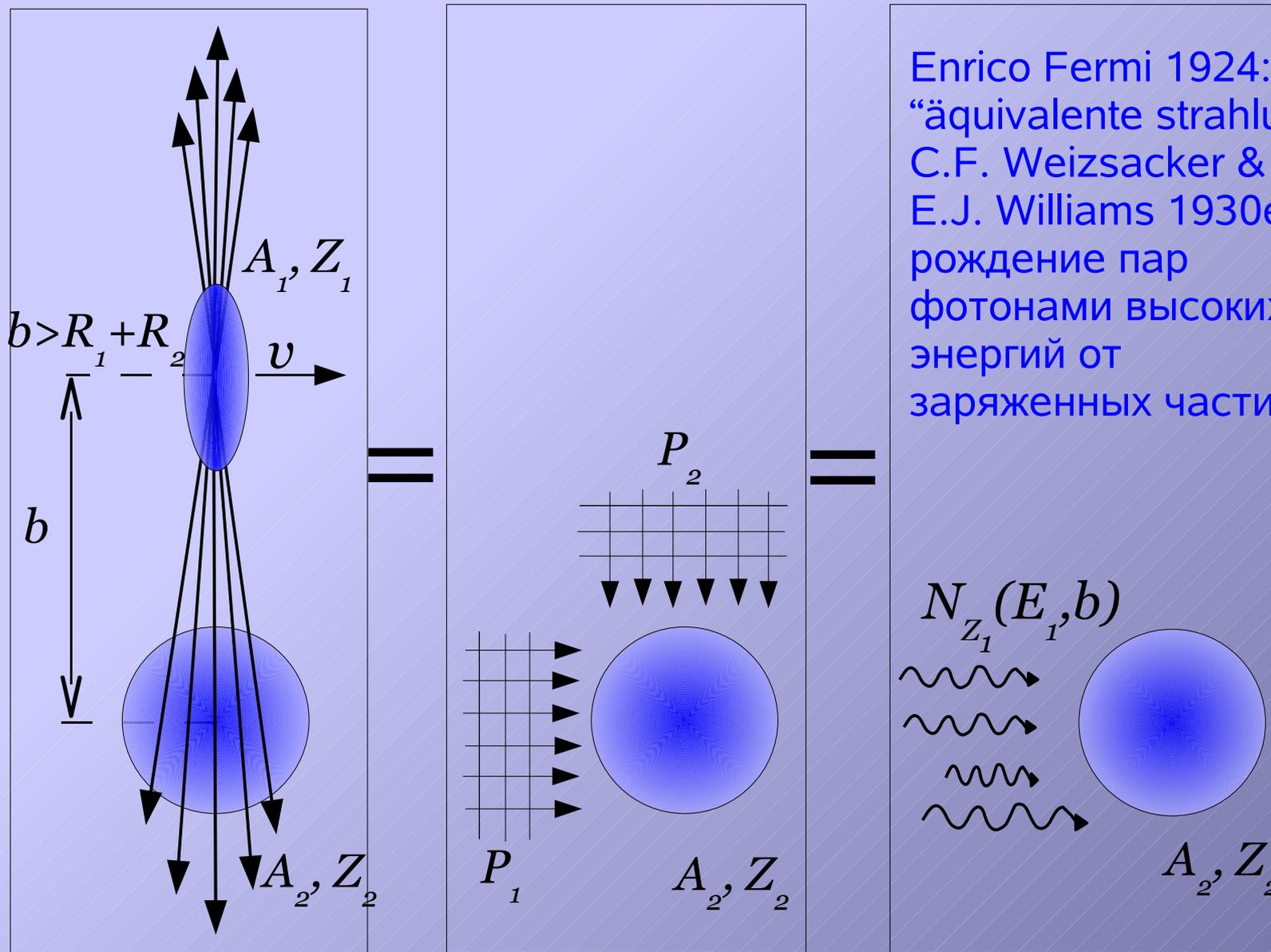
возбужденные барионы: синий

# Электромагнитные взаимодействия ядер

- **Ультрапериферические взаимодействия:** нет перекрытия ядерных плотностей
- *Воздействие Лорентц-сжатых кулоновских полей может быть представлено как поглощение эквивалентных фотонов (Weizacker-Williams method)*
- **Фотоядерные реакции:** возбуждение ядер, электромагнитная диссоциация и фоторождение адронов
- **Взаимодействие фотонов друг с другом:** рождение лептонных и мезонных пар



# Метод эквивалентных фотонов Вайцзеккера-Вильямса



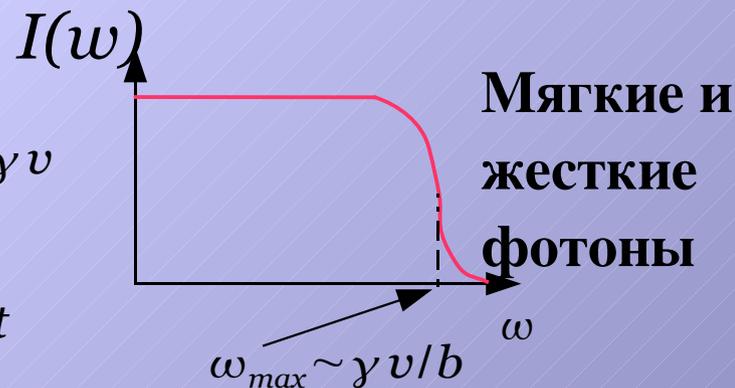
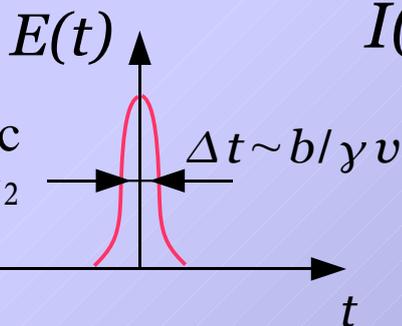
Enrico Fermi 1924:  
“äquivalente strahlung”  
C.F. Weizsacker &  
E.J. Williams 1930e:  
рождение пар  
фотонами высоких  
энергий от  
заряженных частиц

# Спектр частот эквивалентного излучения

Налетающее ядро:  $A_1, Z_1$       Напряженность поля      Частотный спектр импульса  $P_1$

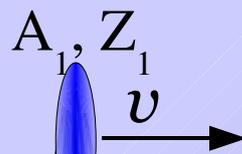


Малые  $b$ ,  
короткий импульс  
 $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$

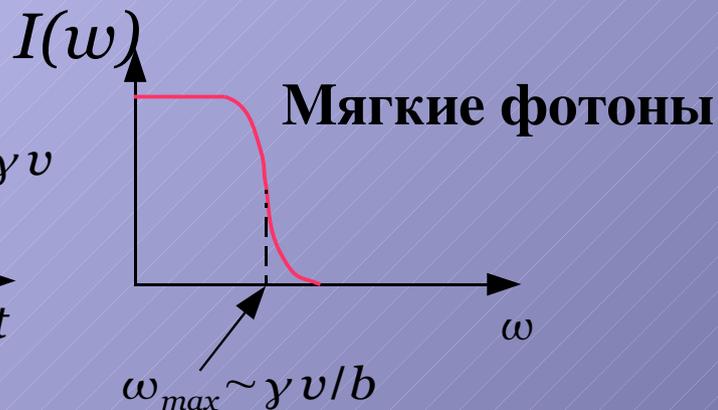
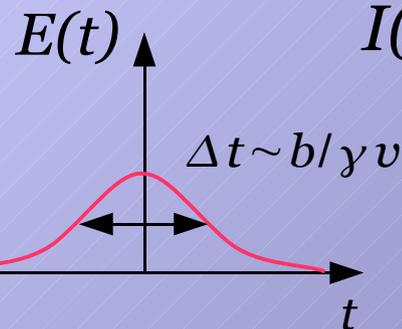


Ядро-мишень:  $A_2, Z_2$

Налетающее ядро:



Большие  $b$ ,  
длинный импульс



Ядро-мишень:  $A_2, Z_2$

# 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 как  $q^\mu = (E_\gamma, q_\perp, q_\parallel) = -Q^\mu$ . Считаем, что движущееся со скоростью  $\mathbf{v}$ ,  $\gamma = 1/(1-v^2)^{1/2} \gg 1$  ультрарелятивистское ядро осталось в своем основном состоянии и фотон унес пренебрежимо малую часть кинетической энергии ядра. Вместе с условием когерентности это дает:

$$q_\parallel \approx E_\gamma < \gamma R$$

$$q_\perp < 1/R$$

# Основные соотношения метода Вайцзеккера-Вильямса – спектр фотонов

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

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

$\alpha$  - постоянная тонкой структуры,  $K_0$  и  $K_1$  – модифицированные функции Бесселя

- Среднее число фотонов поглощенных ядром  $(A_2, Z_2)$ :

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

$\sigma_{A_2}$  – полное сечение фотопоглощения для ядра  $(A_2, Z_2)$

# Основные соотношения метода Вайцзеккера-Вильямса – сечение

Для вычисления сечения электромагнитной диссоциации (LO) с развалом ядра  $A_2$  по каналу  $i$  проинтегрируем по энергии фотона:

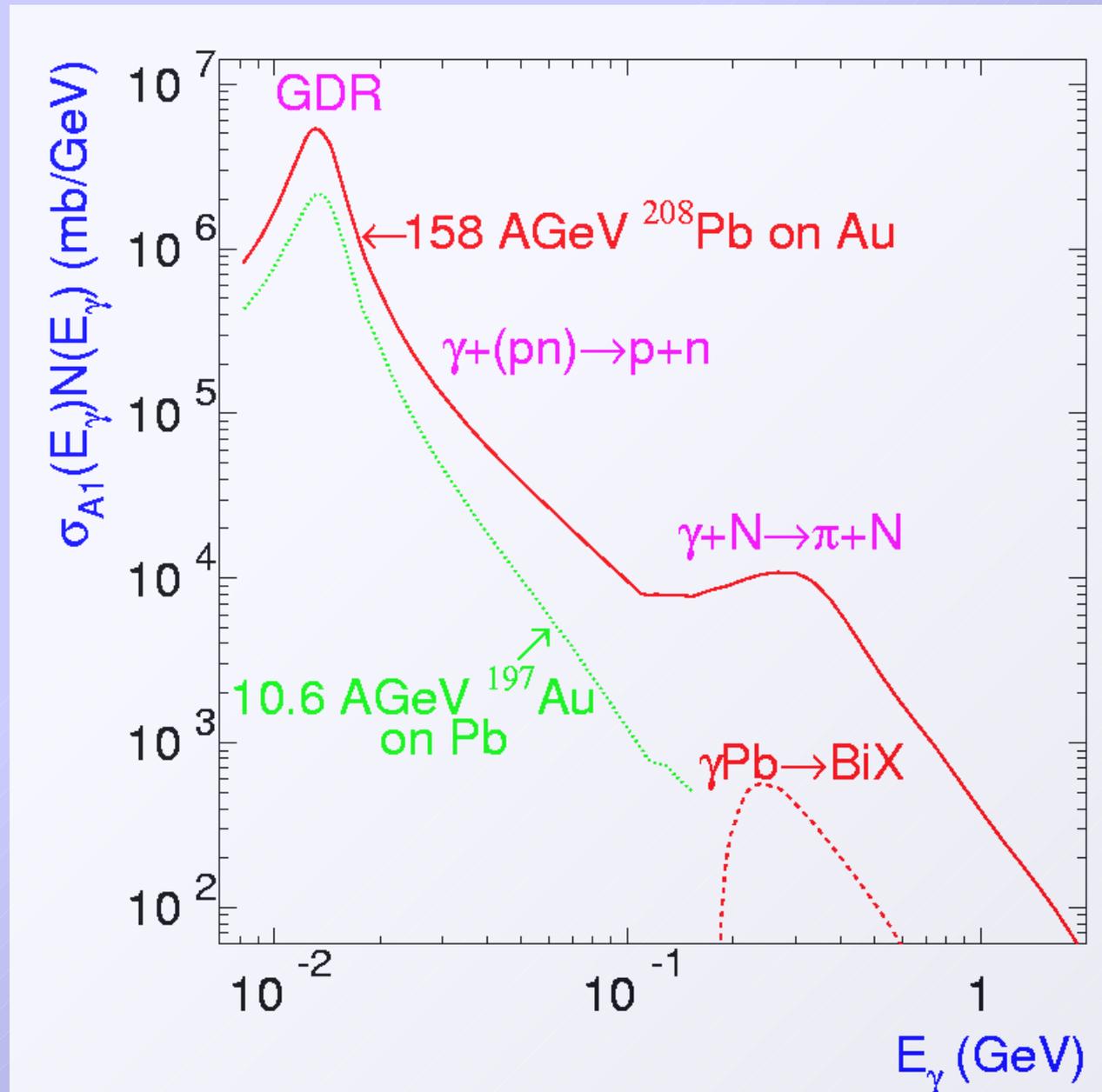
$$\sigma_{A_2}^{LO}(i) = \int_{E_{min}}^{E_{max}} N_{Z_1}^{LO}(E_1) \sigma_{A_2}(E_1) f_{A_2}(E_1, i) dE_1$$

Где  $f_{A_2}(E_1, i)$  определен как брэнчинг фотоядерной реакции

с распадом по каналу  $i$  и использована спектральная функция:

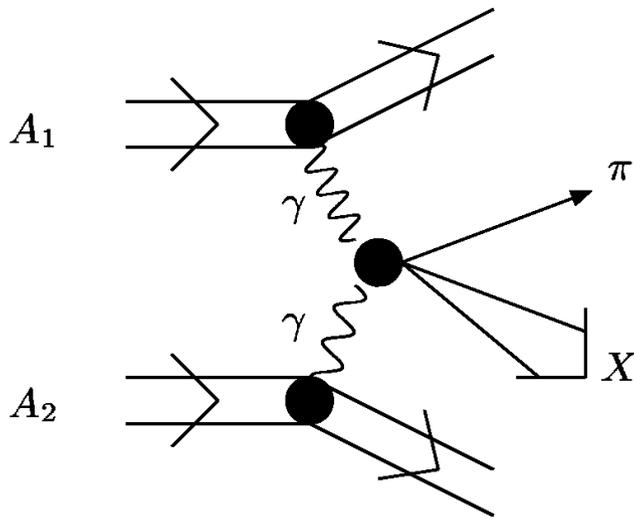
$$N_{Z_1}^{LO}(E_1) = 2\pi \int_{b_c}^{\infty} e^{-m_{A_2}(b)} N_{Z_1}(E_1, b) b db$$

# Спектр эквивалентных фотонов и сечение фотопоглощения на ядрах:

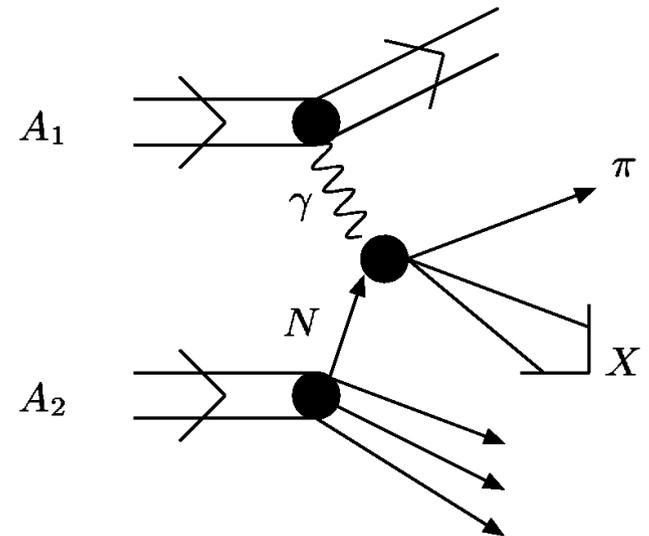


# Взаимодействие эквивалентных фотонов друг с другом и с внутриядерными нуклонами

Пример: рождение мезонов в  $\gamma\gamma$  и  $\gamma N$  процессах



**Fig. 1.** Meson production in  $\gamma\gamma$  fusion.

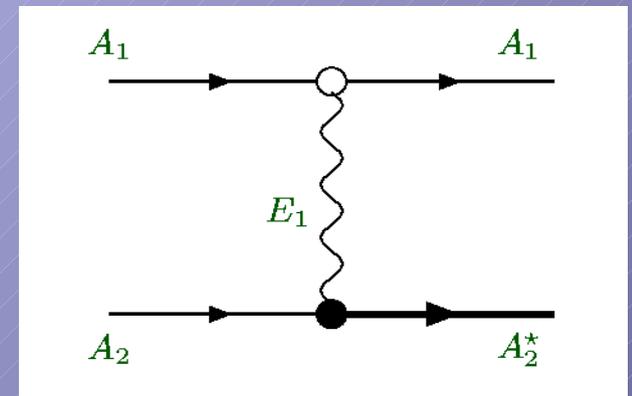


**Fig. 2.** Meson production in  $\gamma A$  collision.

# Модель *RELDIS: Relativistic ELectromagnetic DISsociation*

- RELDIS опирается на модель фотоядерных реакций (ИЯИ, 1995-2008, И.А. Пшеничнов, А.С. Ильинов)
  - Поглощение фотонов ядрами – 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 – модель SMM: конкуренция испарения нуклонов и кластеров - деление - мультифрагментация
-

# *I. Наблюдаем ЭМ возбуждение и распад одного из ядер...*

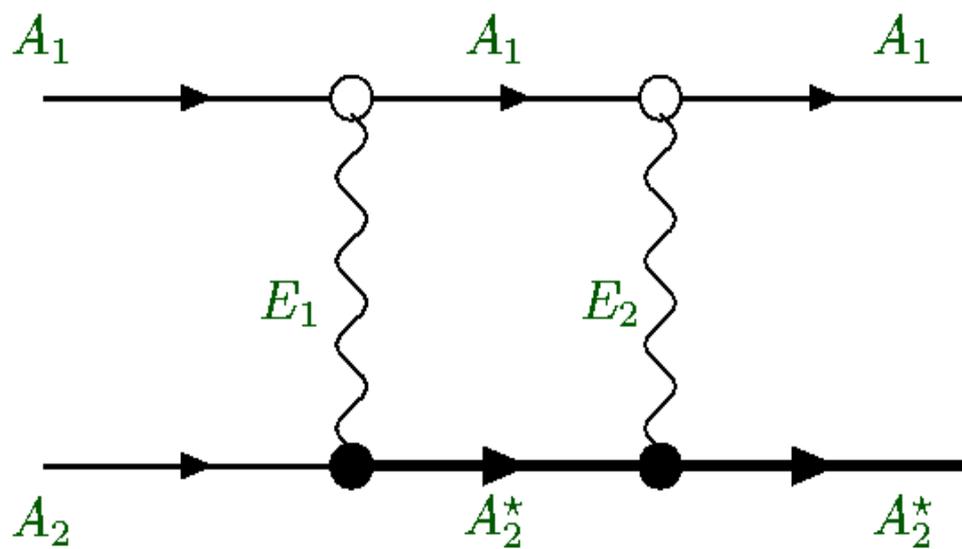
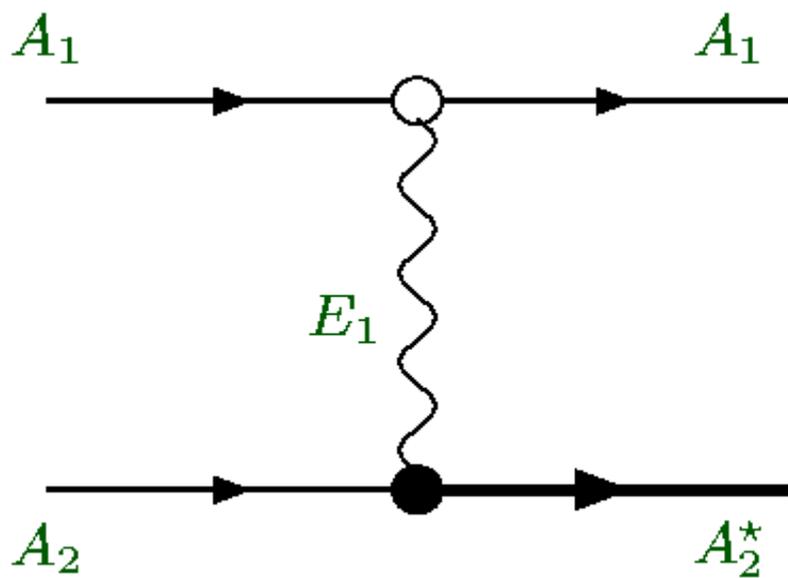


# Поглощение одного или двух фотонов приводящее к одиночной диссоциации

Разрушается одно из ядер!

Лидирующий порядок 98-99%

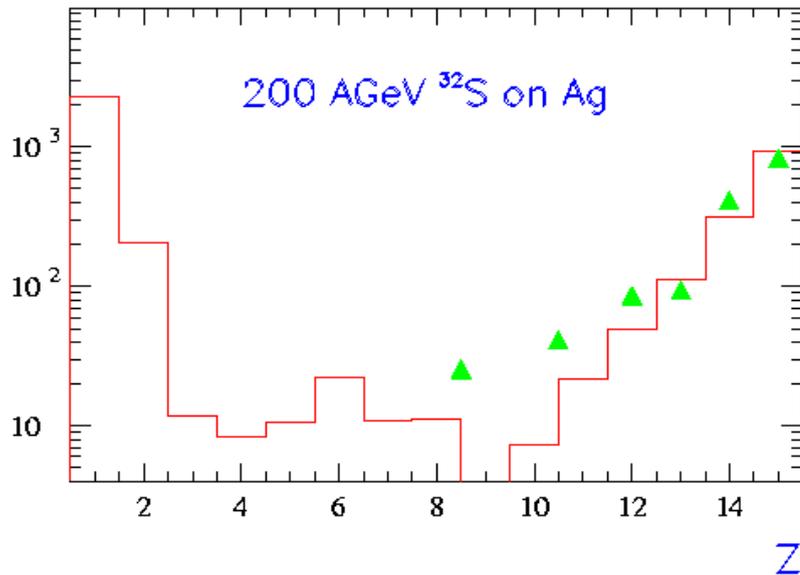
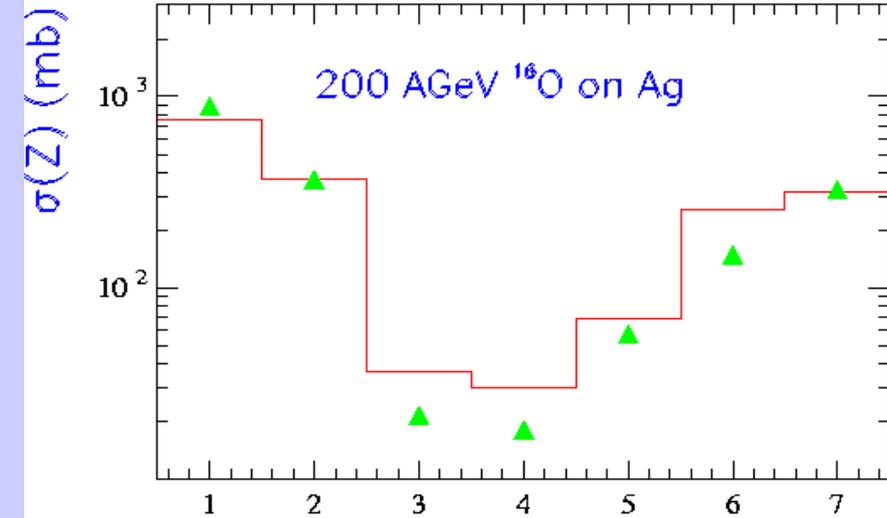
Следующий к лидирующему 1-2%



- упругий процесс
- неупругий процесс

# Пример развала легких ядер под действием электромагнитных полей

ЭМ диссоциация 200А ГэВ  $^{16}\text{O}$  в фотоэмульсии

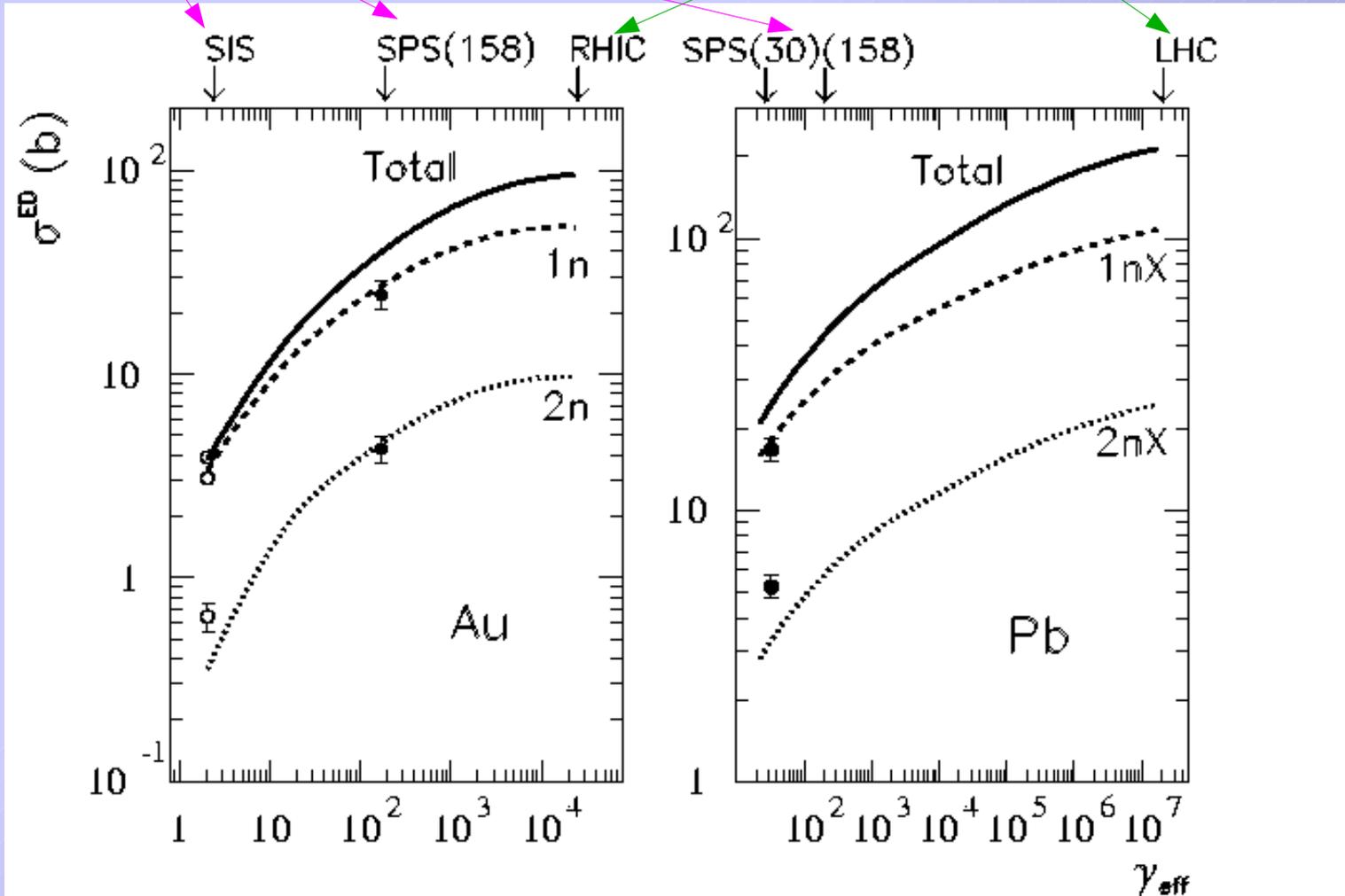


Мода распада	Доля %		
	RELDIS	Эксперимент	
		G. Baroni et al., 1990	G. Singh et al., 1992
$^{15}\text{N}+\text{p}$	46.7	56.08+/-3.93	49.45+/-6.62
$^{12}\text{C}+\alpha$ $^{12}\text{C}+2\text{d}$	43.2	25.58+/-2.61	23.01+/-4.80
$^{11}\text{B}+\alpha+\text{p}$ $^8\text{Be}+\alpha+2\text{d}$ $^8\text{Be}+^7\text{Li}+\text{p}$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

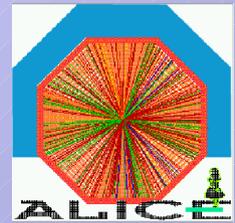
# Эмиссия нейтронов в электромагнитной диссоциации ядер свинца

Фиксированные мишени  
~10-30 б

Пучки ионов: RHIC & LHC ~100-200 б



Для коллайдеров:  $\gamma_{eff} = 2\gamma_{beam}^2 - 1$ , для LHC –  $1.7 \cdot 10^7$



# Эксперимент ALICE-lumi

## Эмиссия нейтронов вперед

### Pb 30 ГэВ/нуклон @SPS

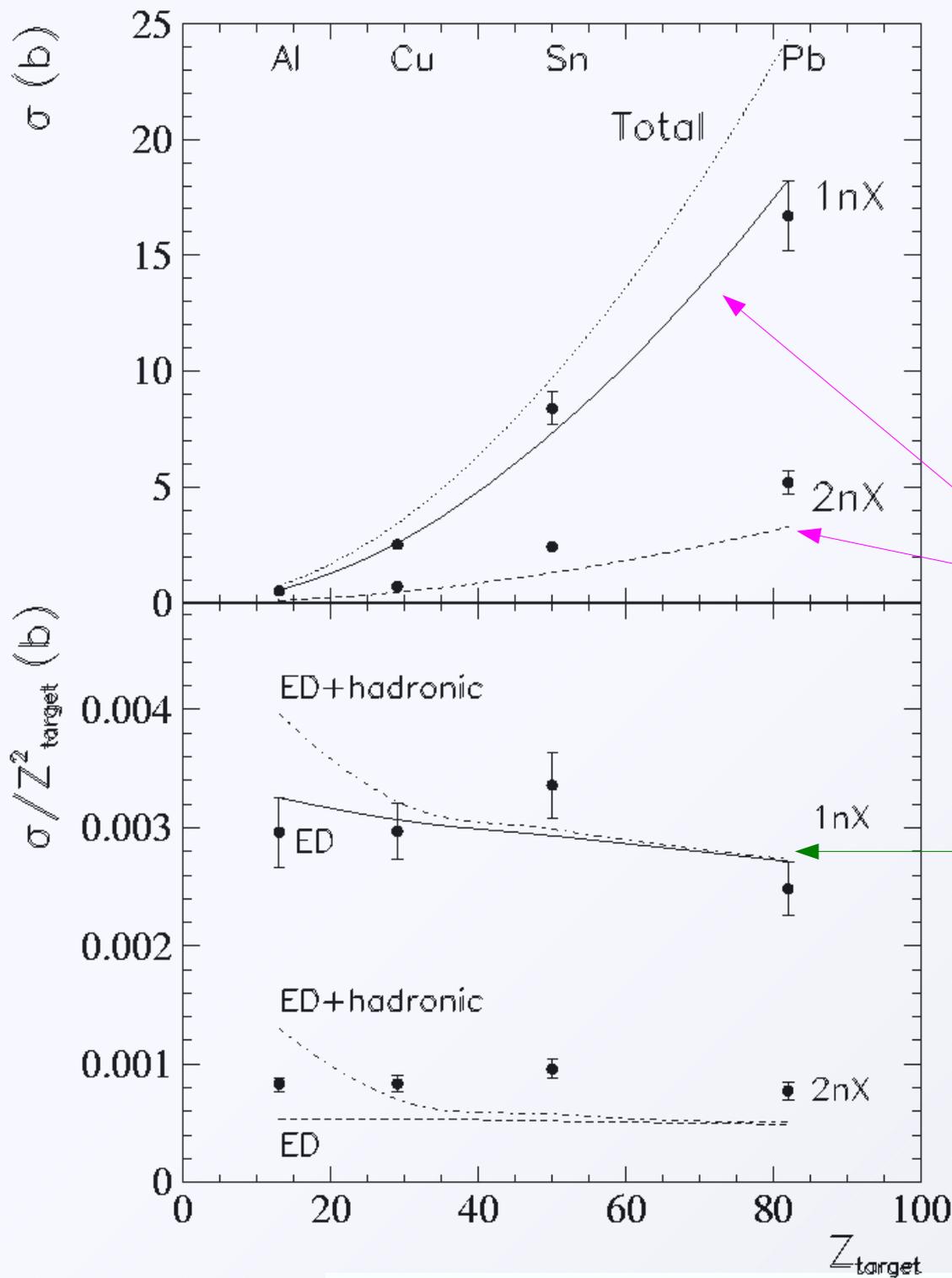
ИЯИ-Турин-ЦЕРН

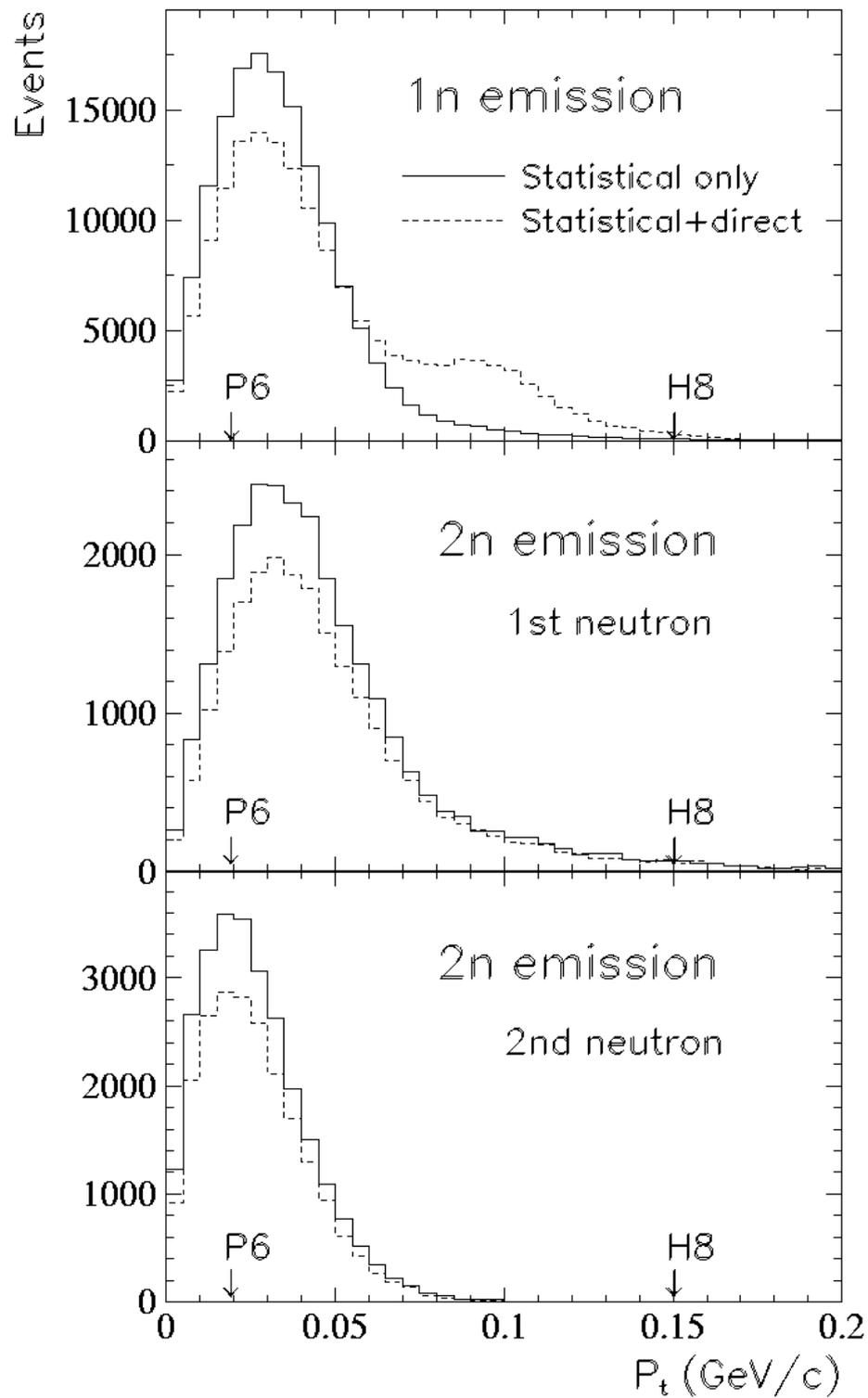
Электромагнитные процессы  $\sim Z^2_{\text{target}}$

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

Прямое измерение эмиссии нейтронов вперед

М.В. Golubeva et al.,  
Phys Rev **C71** (2005) 024905.

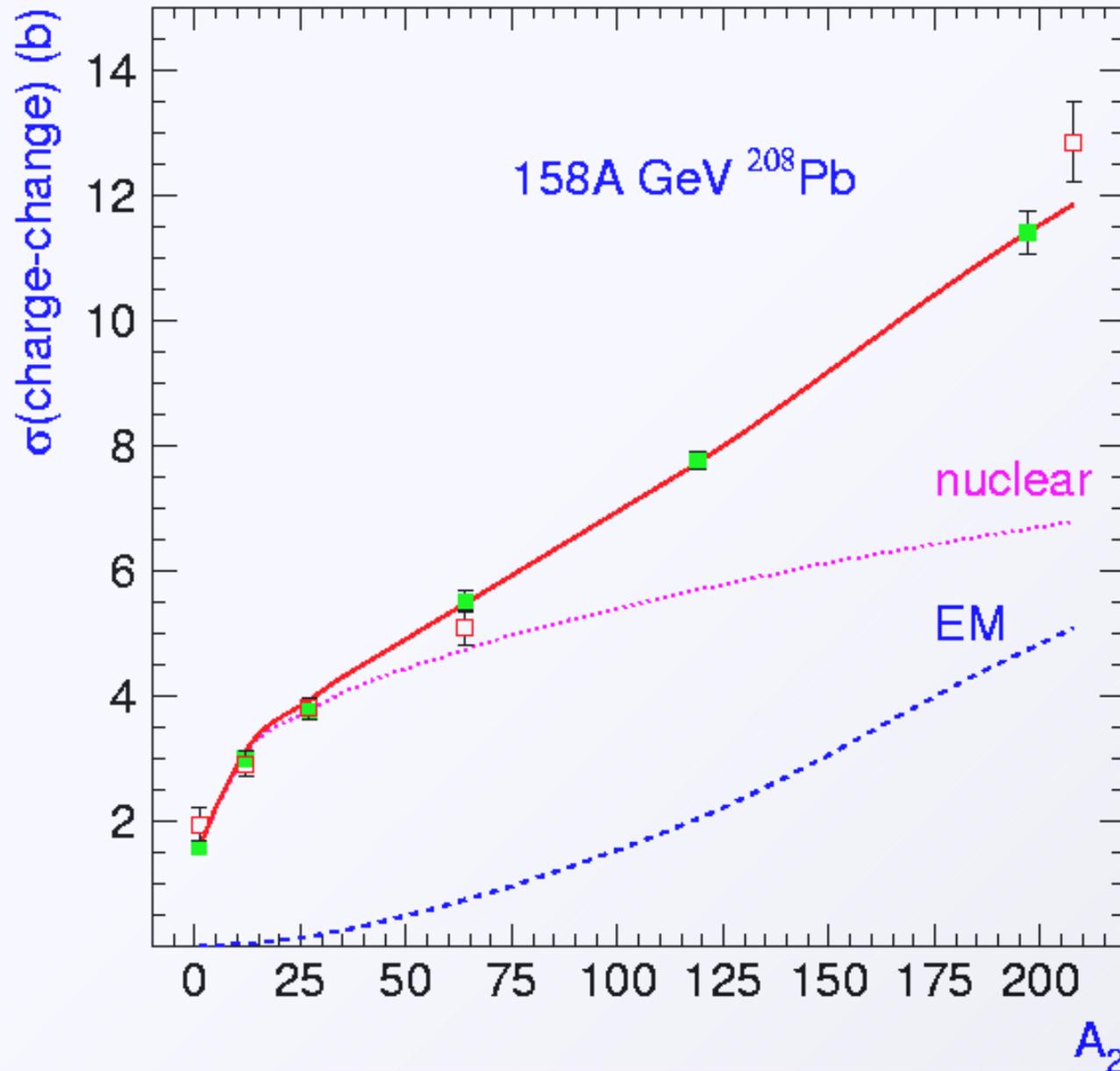




**Эмиссия нейтронов  
вперед: предсказания  
модели  
RELDIS:**

**малые поперечные  
импульсы  
нейтронов  
 $P_t < 0.1$  ГэВ/с**

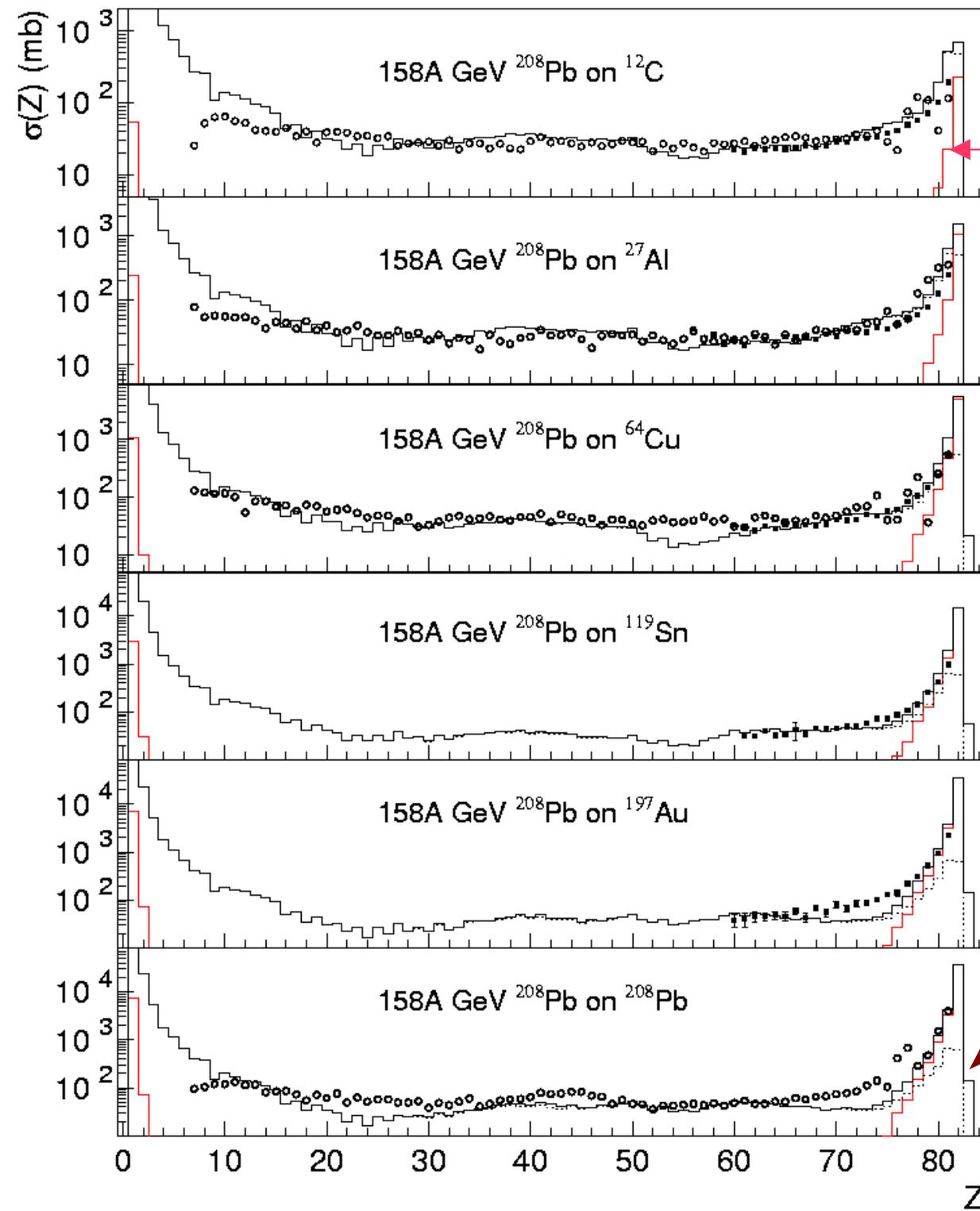
# Полное сечения взаимодействия с изменением заряда ядра



электромагнитное  
взаимодействие -  
RELDIS

адронное  
взаимодействие —  
простая модель  
abrasion-ablation

Эксперимент:  
Scheidenberger 2002  
Cecchini 2002



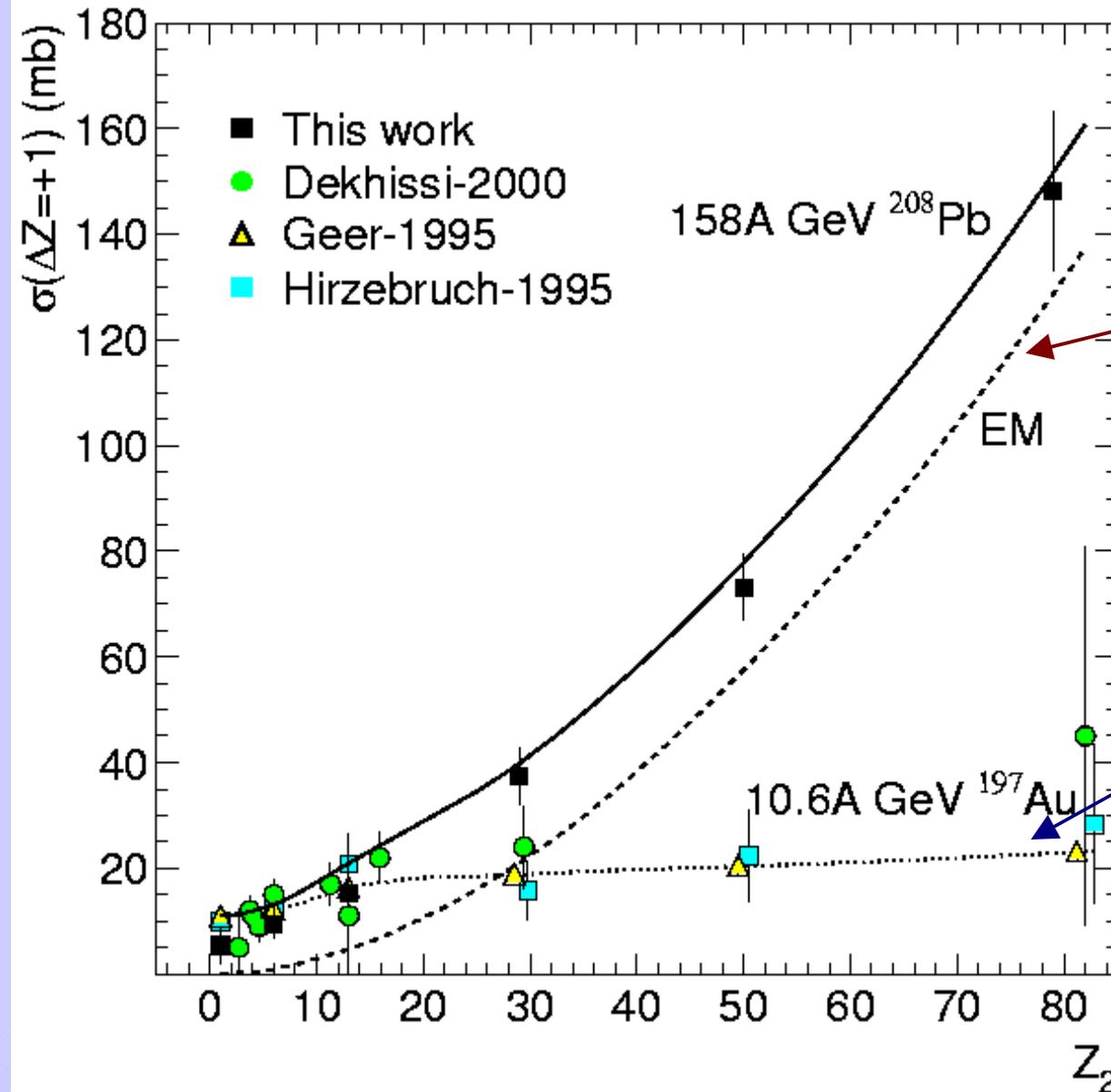
**Вклад электромагнитной фрагментации, потеря ядром протонов – уменьшение заряда**

Эксперимент:

- C.Scheidenberger et al, PRC 70 (2004) 014902
- S.Cecchini et al., NPA 707 (2002) 513

**Видны ядра с  $\Delta Z=+1$ , увеличение заряда, подхват ядром протонов, перезарядка или другой механизм?**

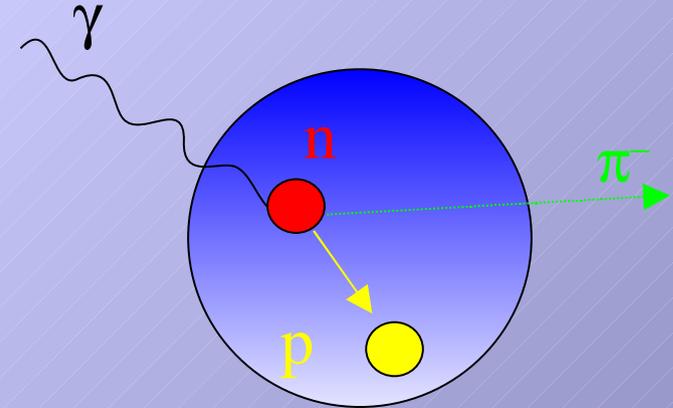
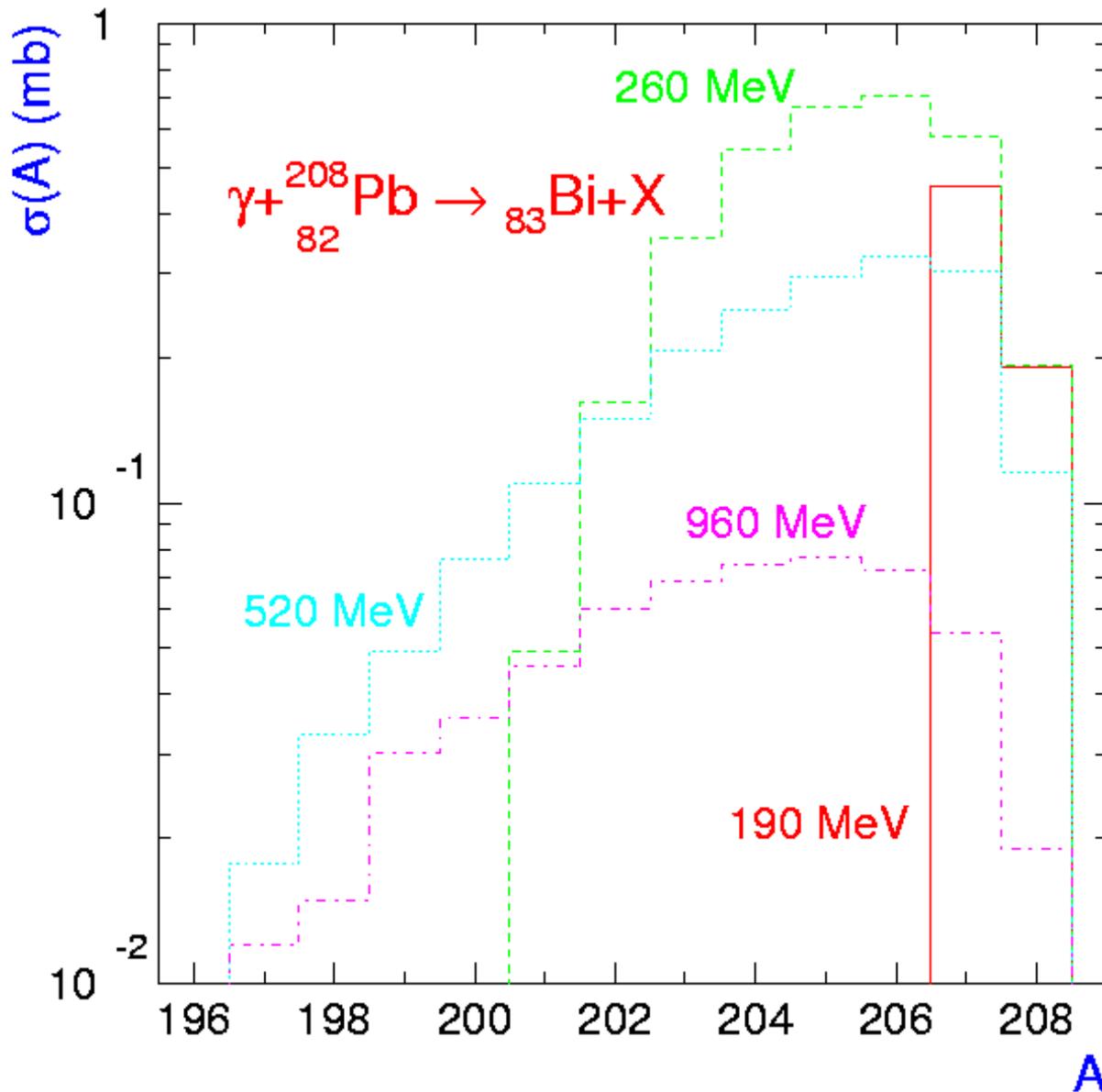
# Зависимость сечения $\Delta Z=+1$ от ядра-мишени при разных энергиях



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

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

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

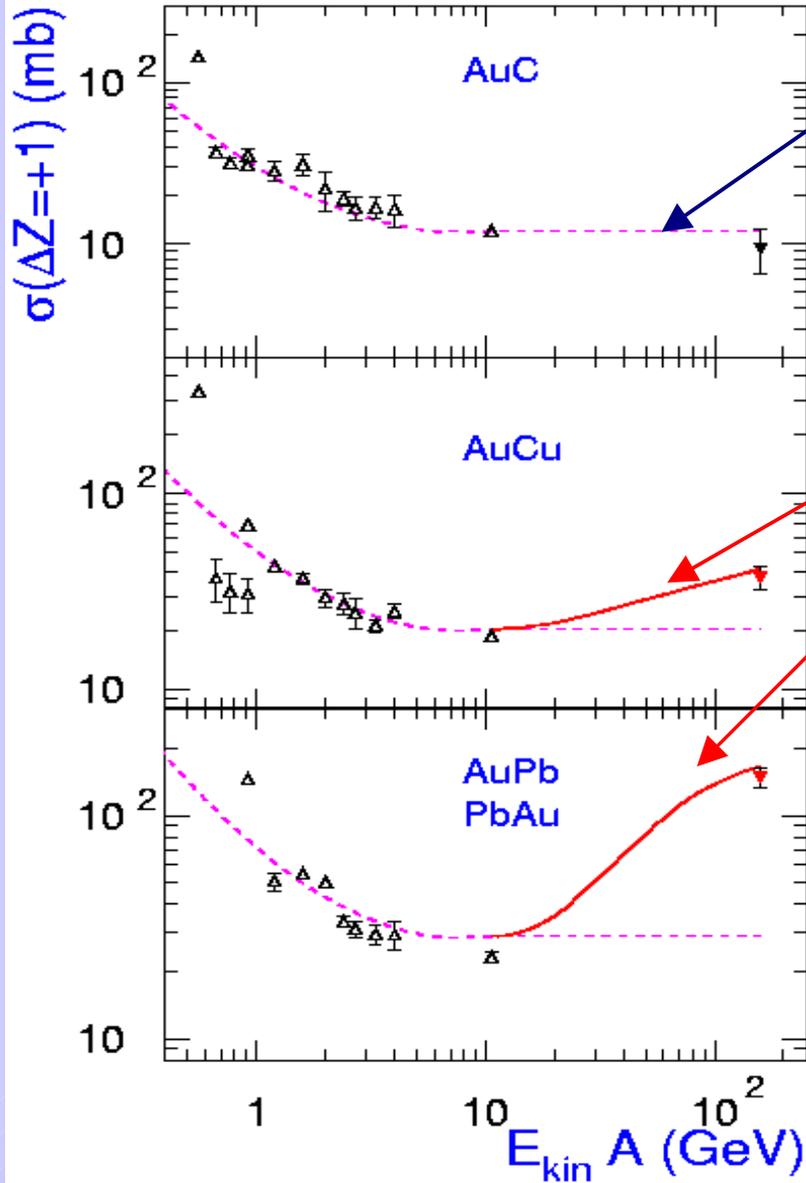


$\gamma n \rightarrow p \pi^-$   
фоторождение  $\pi^-$  на нейтроне, протон отдачи захватывается ядром, а  $\pi^-$  его покидает

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

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

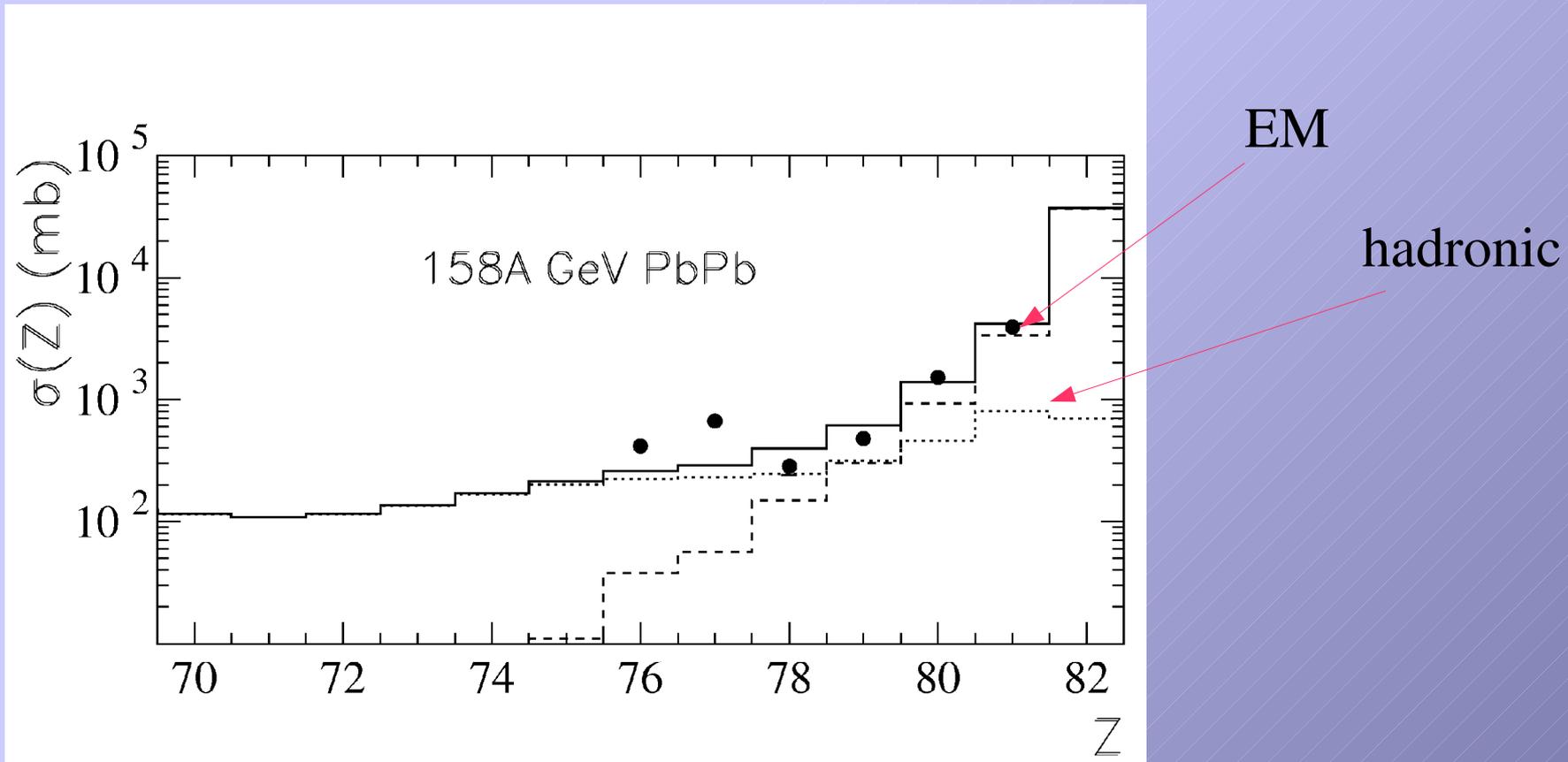
Tsao, Silberberg, Barghouty,  
Astrophys. Journ. 501 (1998) 920



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

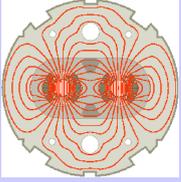
Эксперименты: Geer'95, Cummings'90,  
Waddington'00, Scheidenberger'04

**Вывод: электромагнитный вклад доминирует во взаимодействиях ультрарелятивистских ядер приводящих к небольшим изменениям заряда**

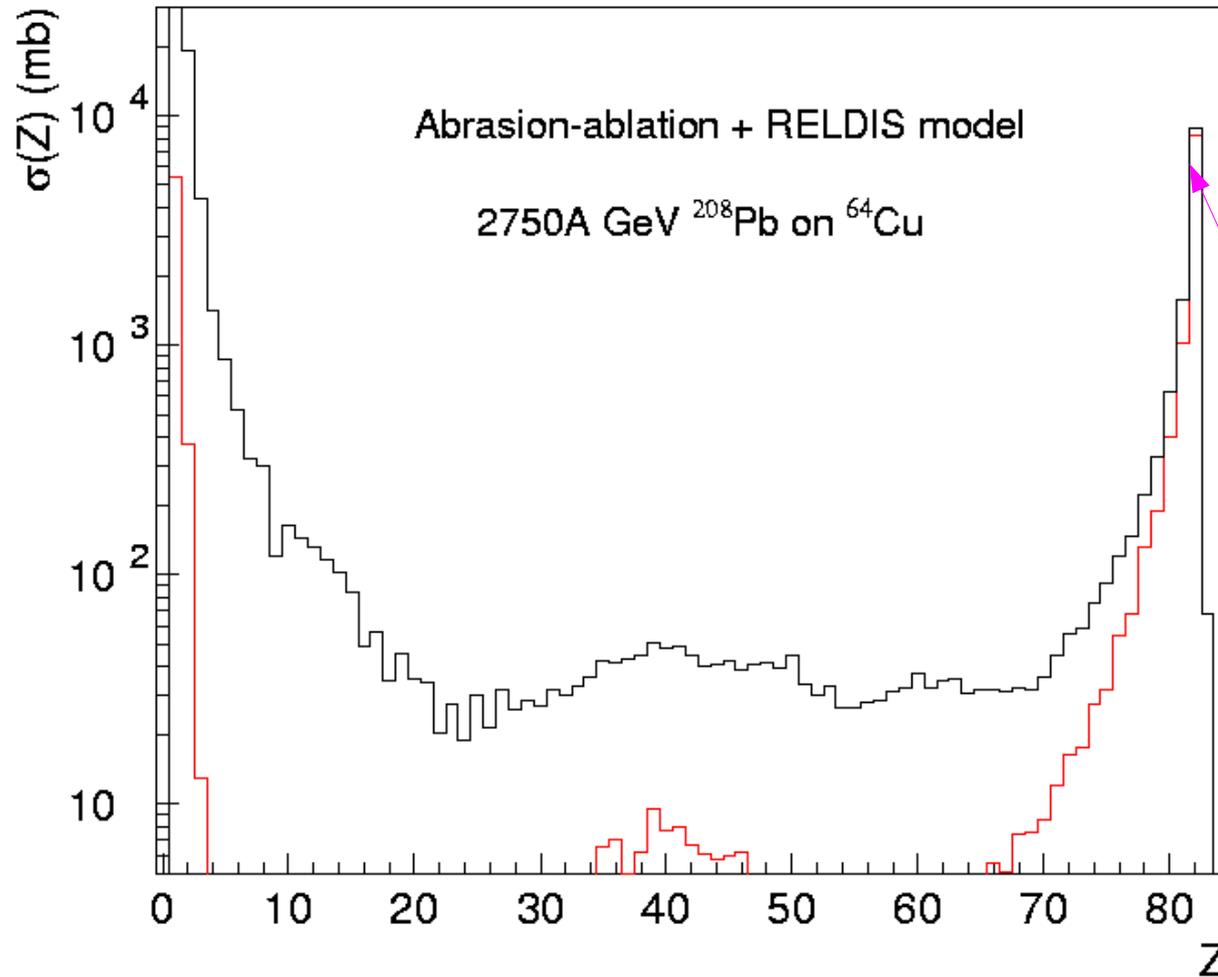


Эксперимент: Н. Dekhissi et al., NPA662 (2000) 207

# Адронная и электромагнитная фрагментация Рв на коллиматорах LHC

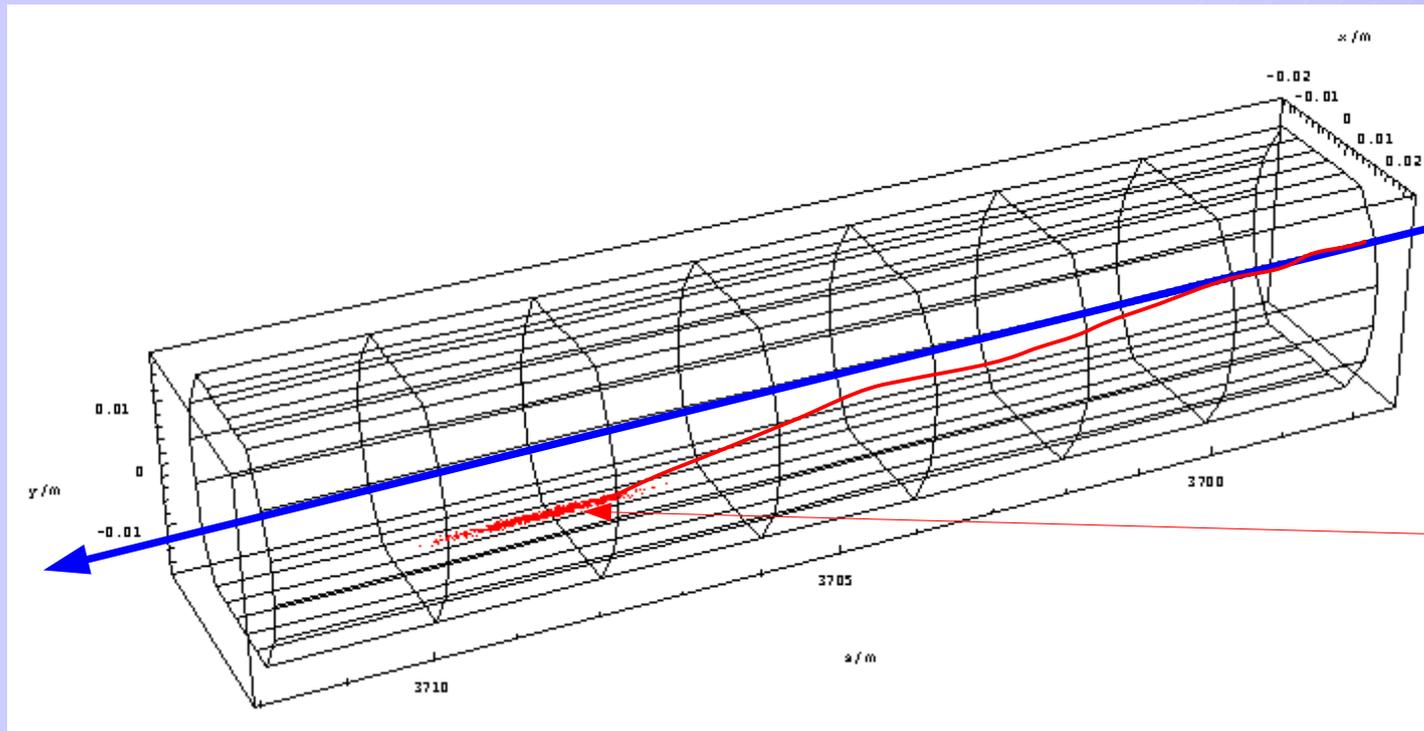
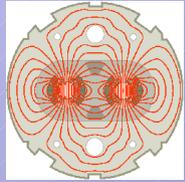


материал – медь



ЭМ вклад  
важен для  
 $\Delta Z=0,-1,-2$

# Потери пучка в результате небольших изменений $Z$ и $A$



ядро пучка  
 $^{208}_{82}\text{Pb}$

ионы с измененным  
 $A$  и  $Z$

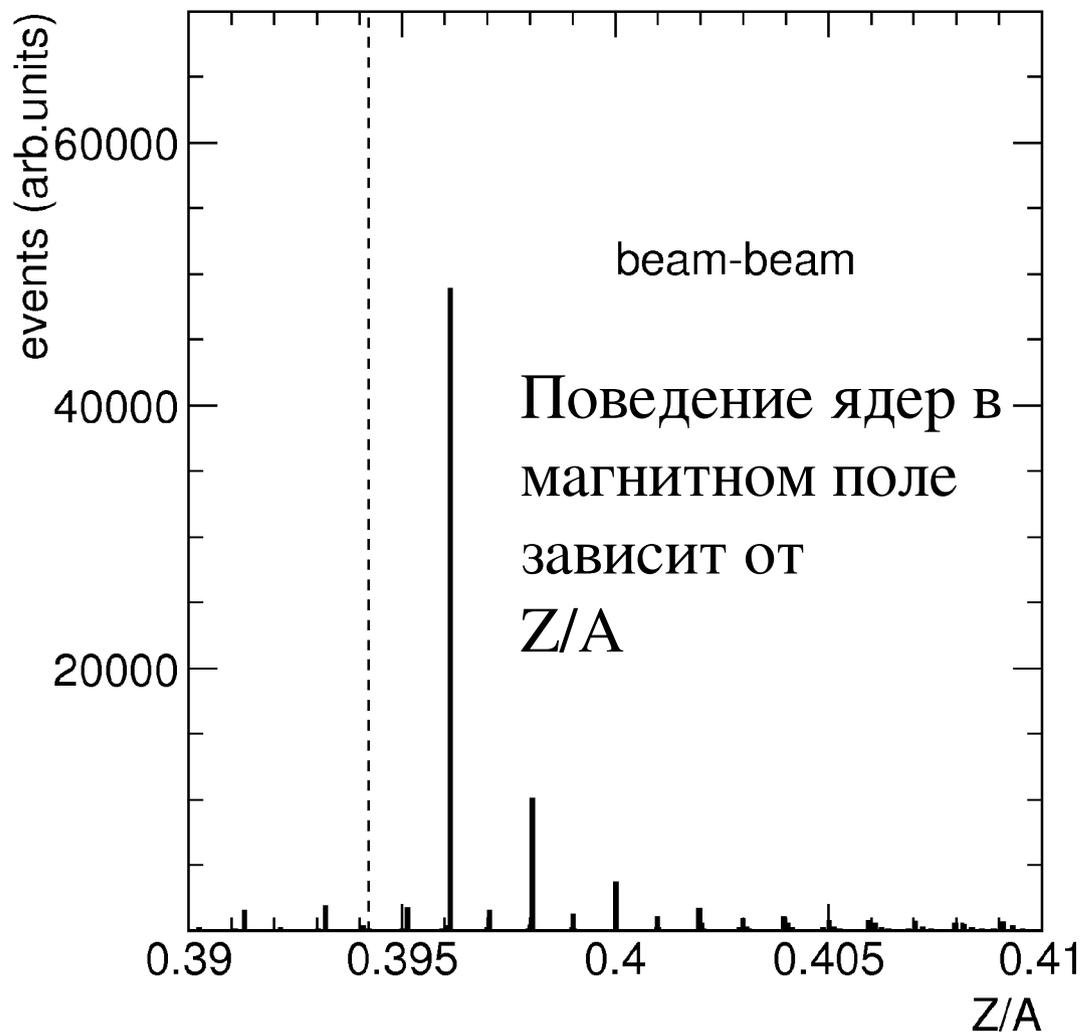
Фрагменты с  $Z$  и  $A$  близкими к ядрам пучка опасны для сверхпроводящих магнитов (локальный нагрев)!

H.H. Braun, R.W. Assmann, A. Ferrari, J.-B. Jeanneret, J.M. Jowett, I.A. Pshenichnov, In Proc. 9th European Particle Accelerator Conference, Lucerne, Switzerland, 5-9 Jul 2004, p. 551;

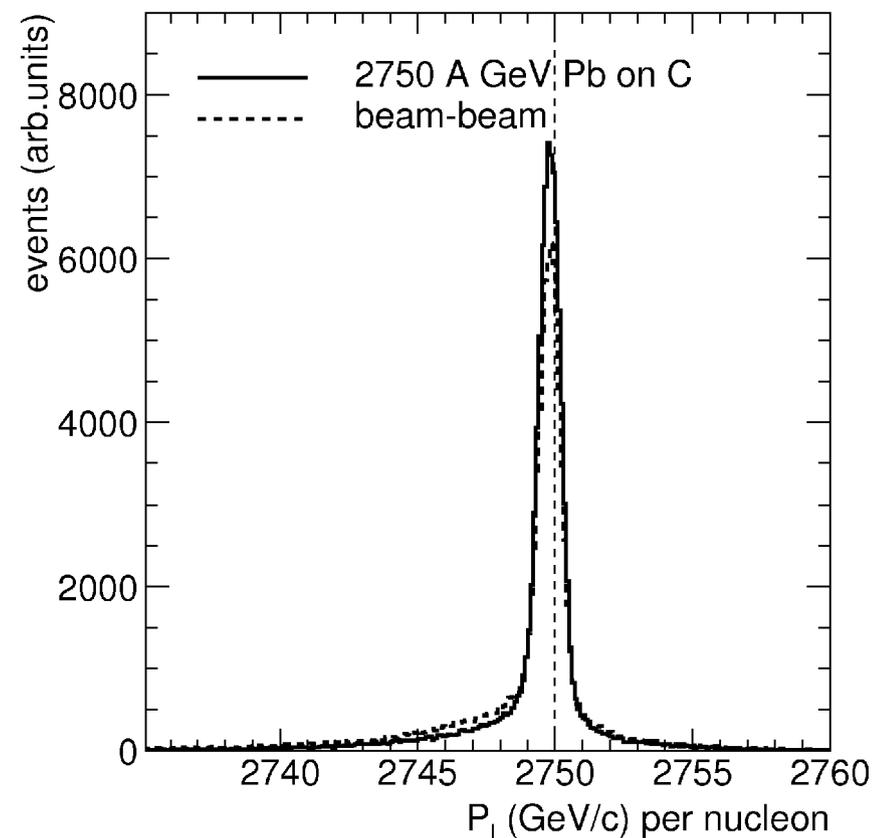
J.M. Jowett, H.-H. Braun, M.I. Gresham, E. Mahner, A.N. Nicholson, E.N. Shaposhnikova, I.A. Pshenichnov, *ibid.*, p. 578.

# Свойства фрагментов близких к ядрам пучка LHC

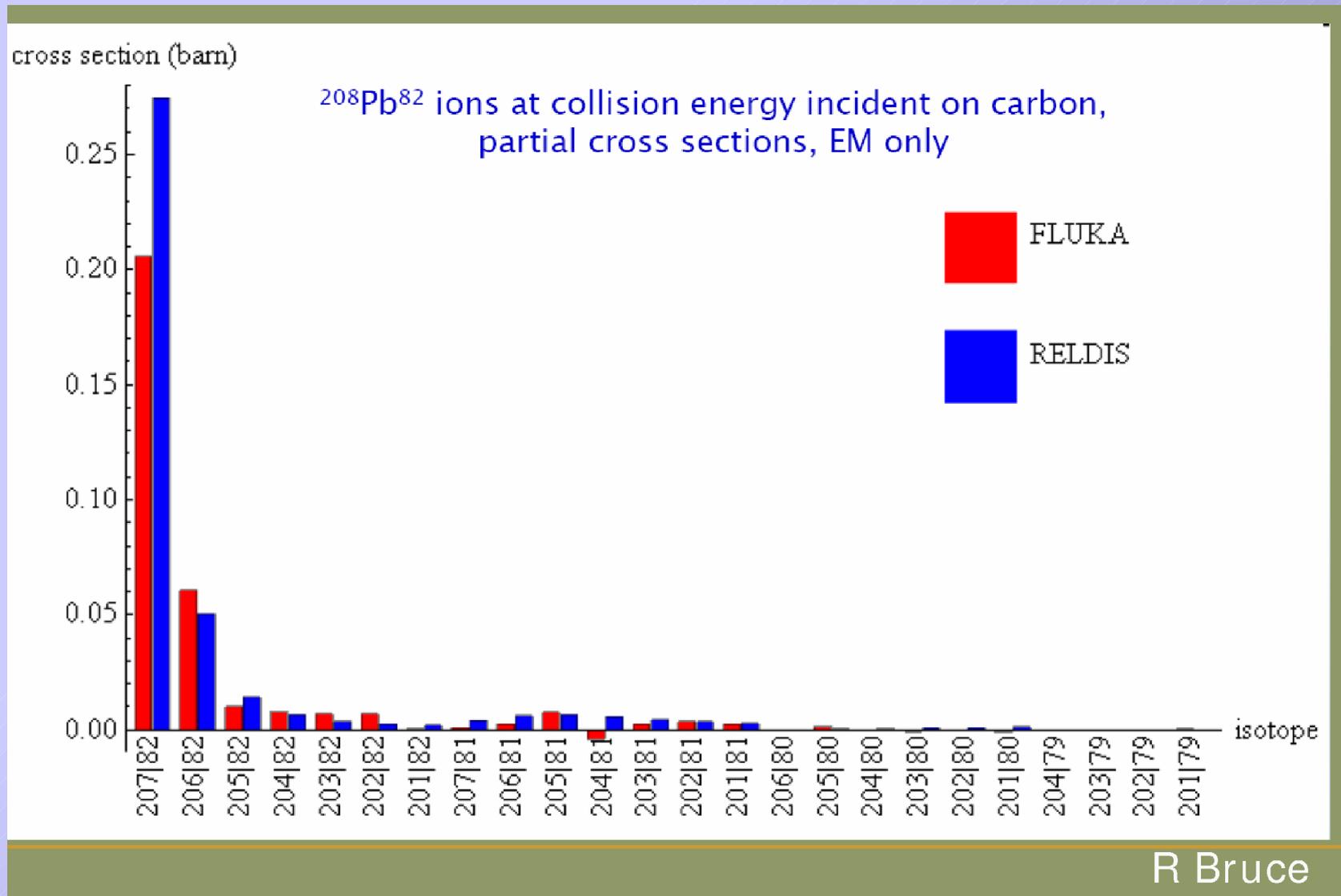
ядра пучка



Изменение импульса ядер в результате эмиссии нейтронов



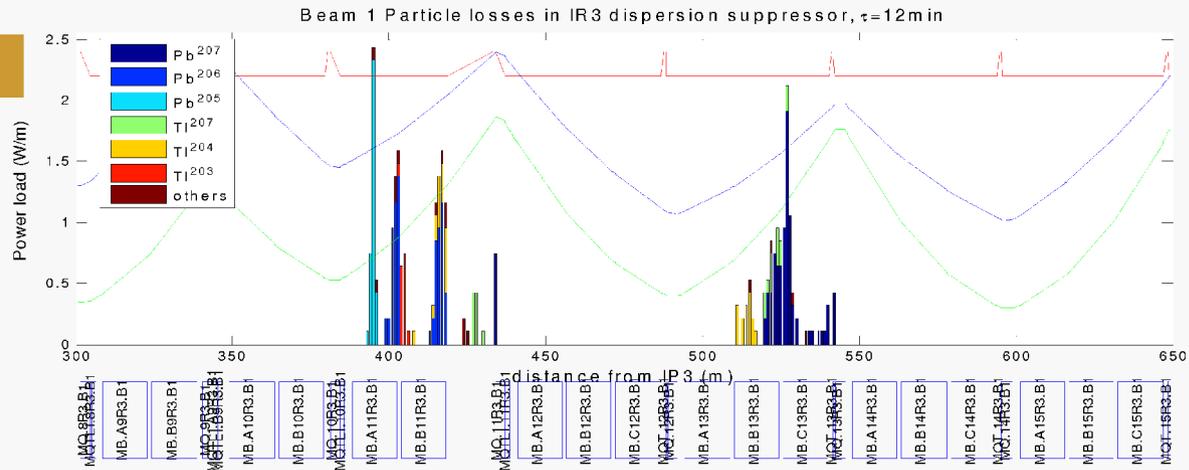
# Первые предсказания *RELDIS* были в дальнейшем сопоставлены с результатами *FLUKA*



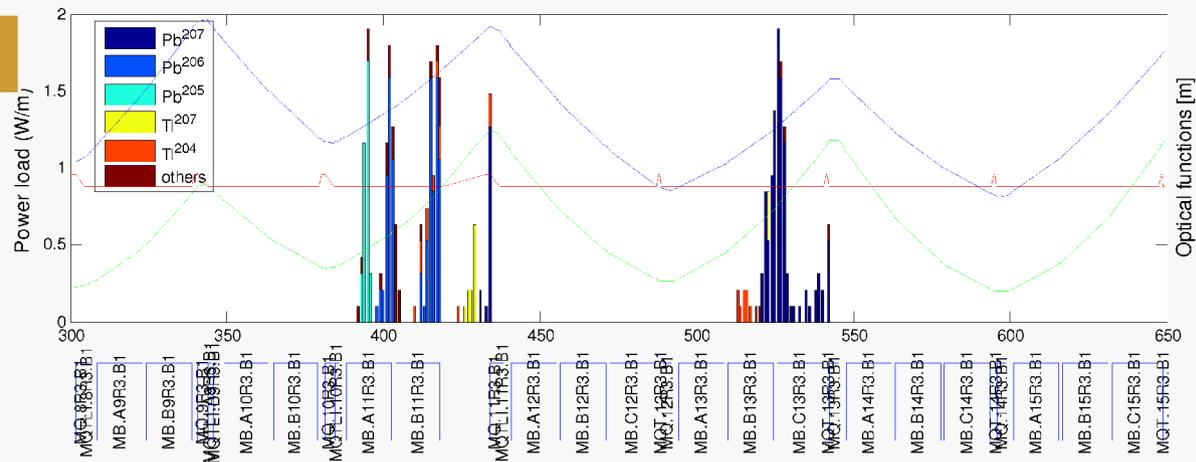
# Сравнение тепловой нагрузки на коллиматоры LHC (IR3) предсказываемой разными моделями

## IR3 momentum collimation at 2.76 TeV

Pshen.

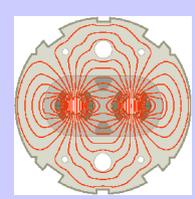


FLUKA



RELDIS + abr-abl: <2.5 W/m

FLUKA <2 W/m



# Моделирование потерь пучков Pb в LHC: последние результаты

PHYSICAL REVIEW SPECIAL TOPICS - ACCELERATORS AND BEAMS 12, 071002 (2009)

## Beam losses from ultraperipheral nuclear collisions between $^{208}\text{Pb}^{82+}$ ions in the Large Hadron Collider and their alleviation

R. Bruce,<sup>1,\*</sup> D. Bocian,<sup>2,1,†</sup> S. Gilardoni,<sup>1</sup> and J. M. Jowett<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CERN, Geneva, Switzerland

<sup>2</sup>Fermi National Accelerator Laboratory, Batavia, Illinois 60510, USA

(Received 13 May 2009; published 29 July 2009)

Electromagnetic interactions between colliding heavy ions at the Large Hadron Collider (LHC) at CERN will give rise to localized beam losses that may quench superconducting magnets, apart from contributing significantly to the luminosity decay. To quantify their impact on the operation of the collider, we have used a three-step simulation approach, which consists of optical tracking, a Monte Carlo shower simulation, and a thermal network model of the heat flow inside a magnet. We present simulation results for the case of  $^{208}\text{Pb}^{82+}$  ion operation in the LHC, with focus on the ALICE interaction region, and show that the expected heat load during nominal  $^{208}\text{Pb}^{82+}$  operation is 40% above the quench level. This limits the maximum achievable luminosity. Furthermore, we discuss methods of monitoring the losses and possible ways to alleviate their effect.

Тепловая нагрузка при работе LHC с пучками  $^{208}\text{Pb}^{82+}$  номинальной светимости: вблизи IP1(ATLAS), IP2(ALICE) и IP5(SMS) допустимый уровень для основных дипольных сверхпроводящих магнитов будет превышен на 40%.

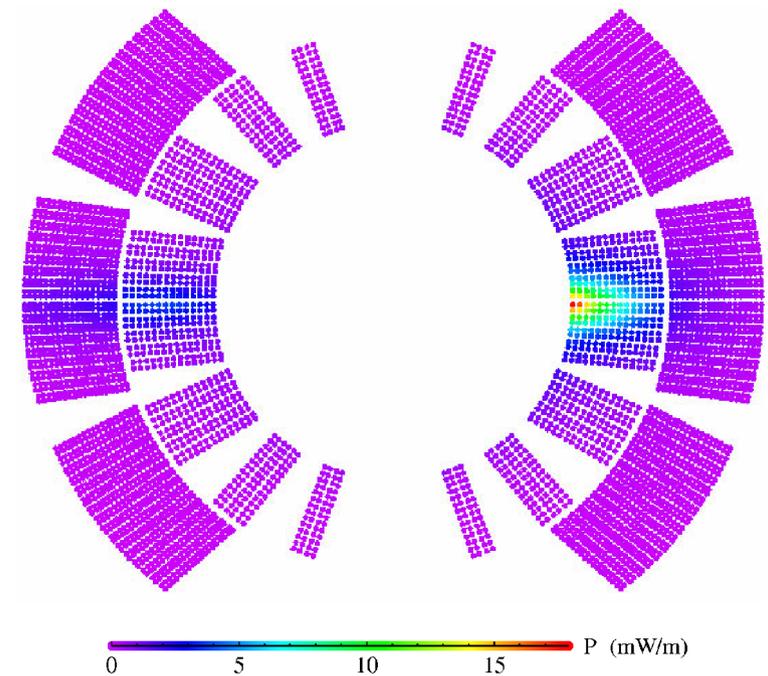
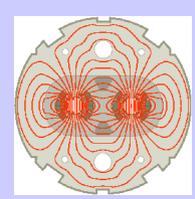


FIG. 11. (Color) The power deposition in each strand of the superconducting coil in the 5 cm-longitudinal cell where it assumes its maximum value, as interpolated from the result of the FLUKA simulation.



# Моделирование потерь пучков Pb в LHC: BFPP, 1n и 2n электромагнитная диссоциация

$$Z_1 + Z_2 \rightarrow (Z_1 + e^-)_{1s_{1/2}} + Z_2 + e^+ \quad (\sim 280 \text{ b})$$

ЭМ диссоциация 1n (EMD1) ( $\sim 100 \text{ b}$ )

2n (EMD2) ( $\sim 30 \text{ b}$ )

ядра  $^{207}\text{Pb}^{82+}$  перехватываются  
существующими коллиматорами

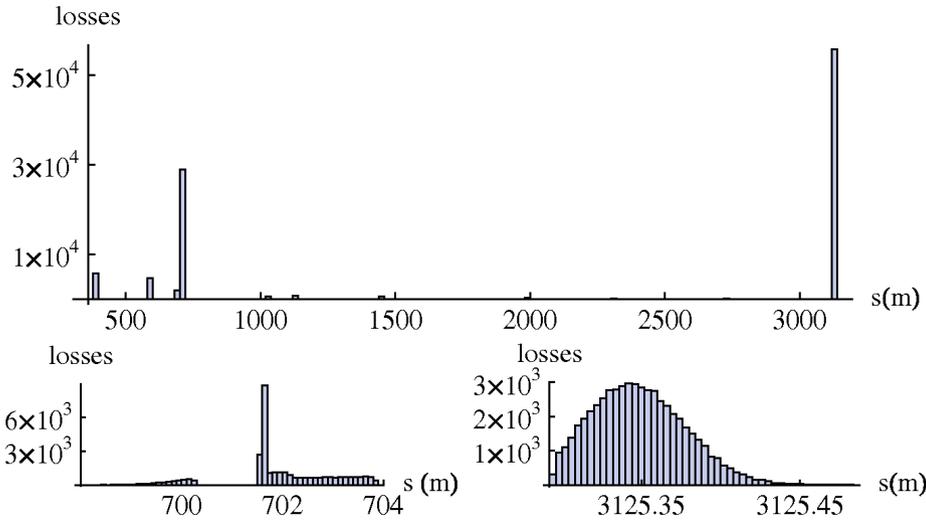


FIG. 15. (Color) The distribution of  $^{206}\text{Pb}^{82+}$  losses after IP2. The two bottom plots show zooms on the largest peaks on the upper plot. Only the loss at  $s \approx 3125 \text{ m}$  risks to induce quenches, because of the small projected spot size.

*Риск квенчинга корректирующего  
магнита (после IP2) в результате  
воздействия  $^{206}\text{Pb}^{82+}$   
образующихся после потери двух  
нейтронов*

BRUCE, BOCIAN, GILARDONI, AND JOWETT

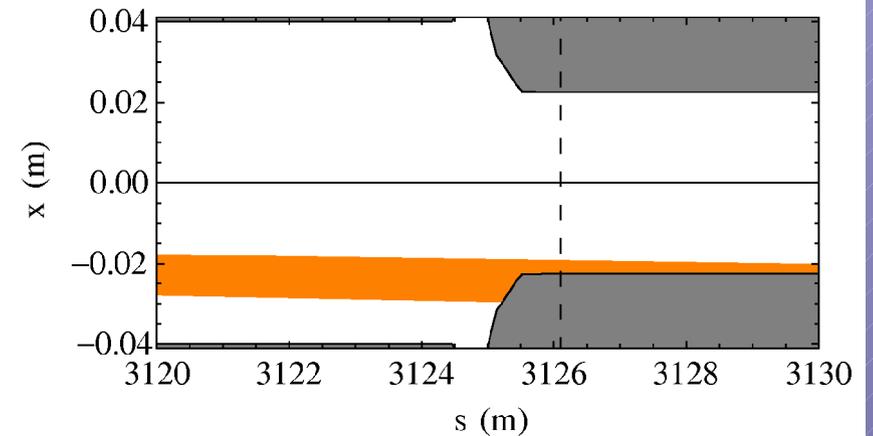
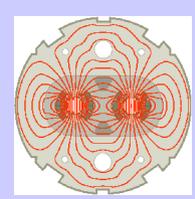


FIG. 16. (Color) The impact of the  $6\sigma$  envelope of the  $^{206}\text{Pb}^{82+}$  ions created by EMD2 at IP2 at an aperture restriction. The projected longitudinal rms spot size on the beam screen is only 2.9 cm. The loss takes place in a drift section and the beginning of next magnet, a corrector, is indicated by a dashed vertical line.



# Моделирование потерь пучков Pb в LHC: выводы

PHYSICAL REVIEW SPECIAL TOPICS - ACCELERATORS AND BEAMS 12, 071002 (2009)

## Beam losses from ultraperipheral nuclear collisions between $^{208}\text{Pb}^{82+}$ ions in the Large Hadron Collider and their alleviation

R. Bruce,<sup>1,\*</sup> D. Bocian,<sup>2,1,†</sup> S. Gilardoni,<sup>1</sup> and J. M. Jowett<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CERN, Geneva, Switzerland

<sup>2</sup>Fermi National Accelerator Laboratory, Batavia, Illinois 60510, USA

(Received 13 May 2009; published 29 July 2009)

Electromagnetic interactions between colliding heavy ions at the Large Hadron Collider CERN will give rise to localized beam losses that may quench superconducting magnets contributing significantly to the luminosity decay. To quantify their impact on the operation of the LHC we have used a three-step simulation approach, which consists of optical tracking, a Monte Carlo simulation, and a thermal network model of the heat flow inside a magnet. We present simulations for the case of  $^{208}\text{Pb}^{82+}$  ion operation in the LHC, with focus on the ALICE interaction region. We find that the expected heat load during nominal  $^{208}\text{Pb}^{82+}$  operation is 40% above the quench level for the maximum achievable luminosity. Furthermore, we discuss methods of monitoring the beam losses and possible ways to alleviate their effect.

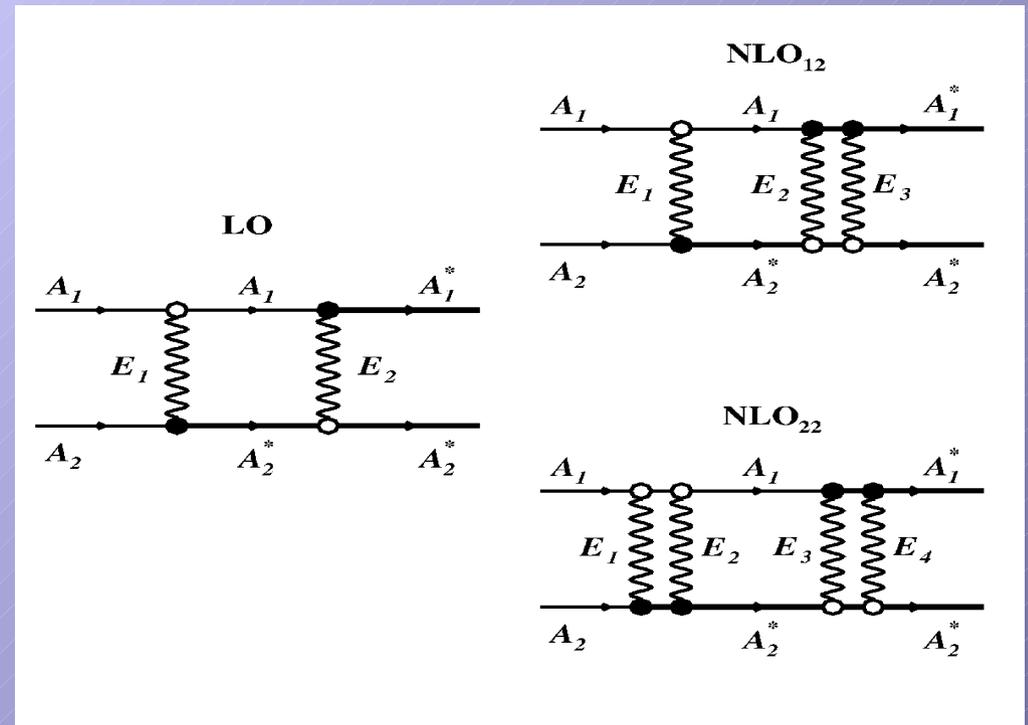
## X. CONCLUSIONS

Electromagnetic interactions, such as bound-free pair production and electromagnetic dissociation in ultraperipheral nuclear collisions at the LHC, modify the charge and mass of beam ions. These particles follow dispersive orbits until they are lost in locations determined by the machine optics, aperture, and the magnetic rigidity of the ions. When sufficiently localized they can heat superconducting magnetic elements enough to make them quench.

We have presented the first fully integrated simulation chain of beam tracking, shower simulation, and a thermal network model to evaluate the heat flow and quench behavior of the superconducting coils immersed in superfluid liquid helium. This simulation has been applied to the most critical loss mechanism, BFPP, occurring in the three heavy-ion collision points in the LHC. Heat deposition caused by  $^{208}\text{Pb}^{81+}$  ions in main dipoles downstream from IP1, IP2, and IP5 is expected to be 40% above the quench limit, while  $^{207}\text{Pb}^{82+}$  from EMD1 stay within the acceptance of the arc and are cleaned by the collimation system. Furthermore, depending on its excitation level, there is some risk from quenches of a corrector magnet downstream of IP2 by  $^{206}\text{Pb}^{82+}$  ions created through EMD2.

*Надежное решение проблемы  
вероятно потребует установки  
дополнительных коллиматоров или  
масок*

## II. Рассмотрим ЭМ возбуждение и распад обоих ядер в одном столкновении

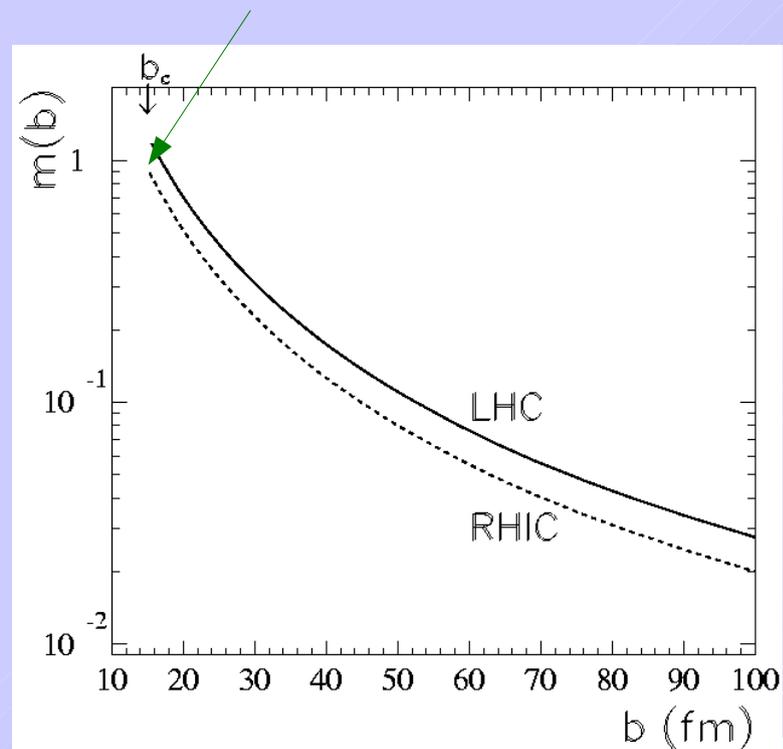


# Взаимная электромагнитная диссоциация: в одном столкновении разрушаются оба ядра

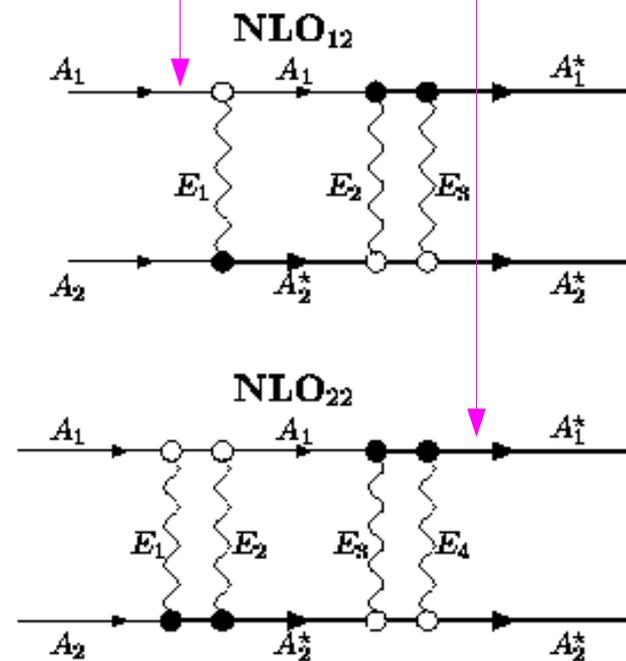
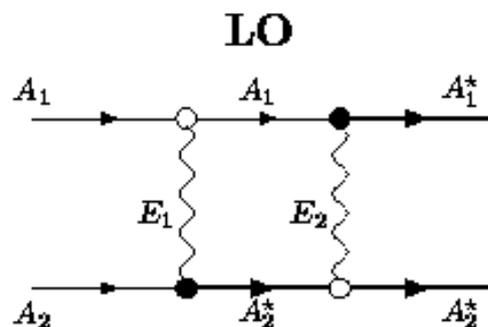
В столкновениях с малыми  $b \sim b_c \sim R_1 + R_2$  поглощается в среднем один фотон на каждое ядро – вероятны поглощения 2 и 3 фотонов!

Подмножество событий: взаимная диссоциация  
6.2 барн @ LHC

Также три и четыре фотона:  
1.5 барн и 0.23 барн



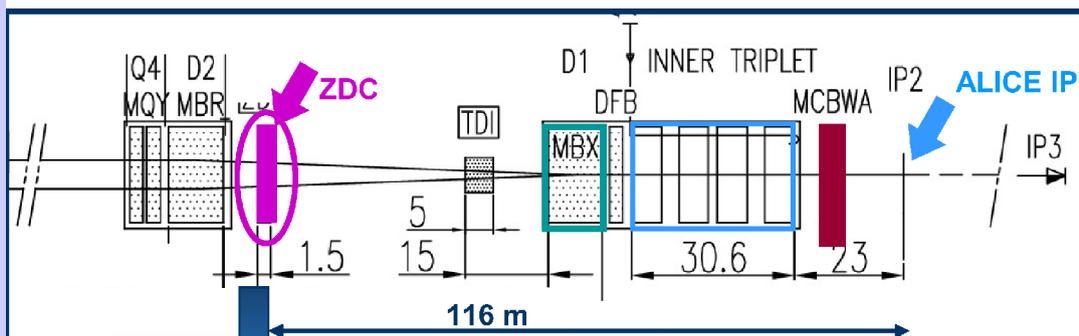
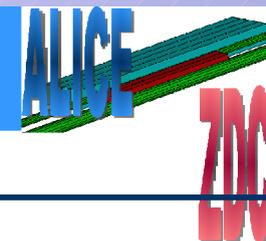
3.9 барн



# Детекторы ZDC в эксперименте ALICE

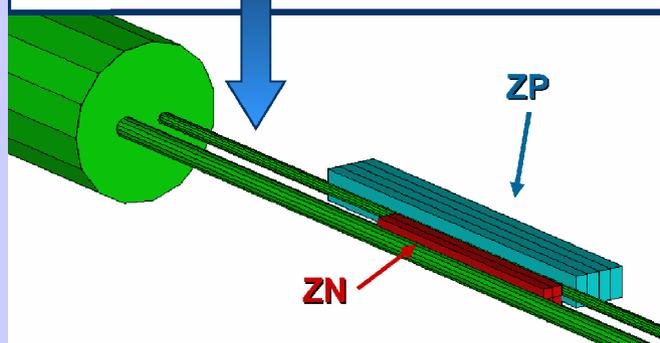


## ALICE ZDC



Zero degree energy detected where the circulating beams are spatially separated in two beam pipes

→ ZDC placed at 116 m from IP at 0° relative to LHC beam axis



Spectator neutrons and protons separated by magnetic elements of the LHC beam line → 2 distinct detectors: 1 for protons (ZP), 1 for neutrons (ZN)

Detection technique: quartz fibres calorimetry

→ the technique fulfills two requirements:

- compact detectors
- radiation hardness

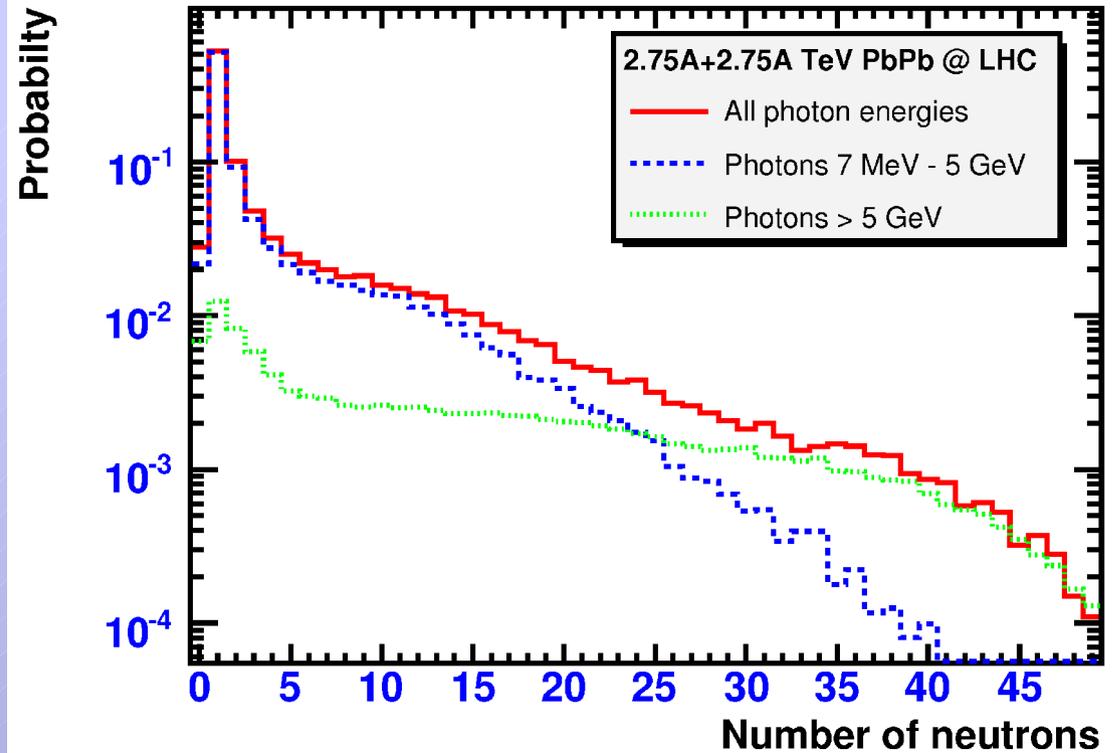
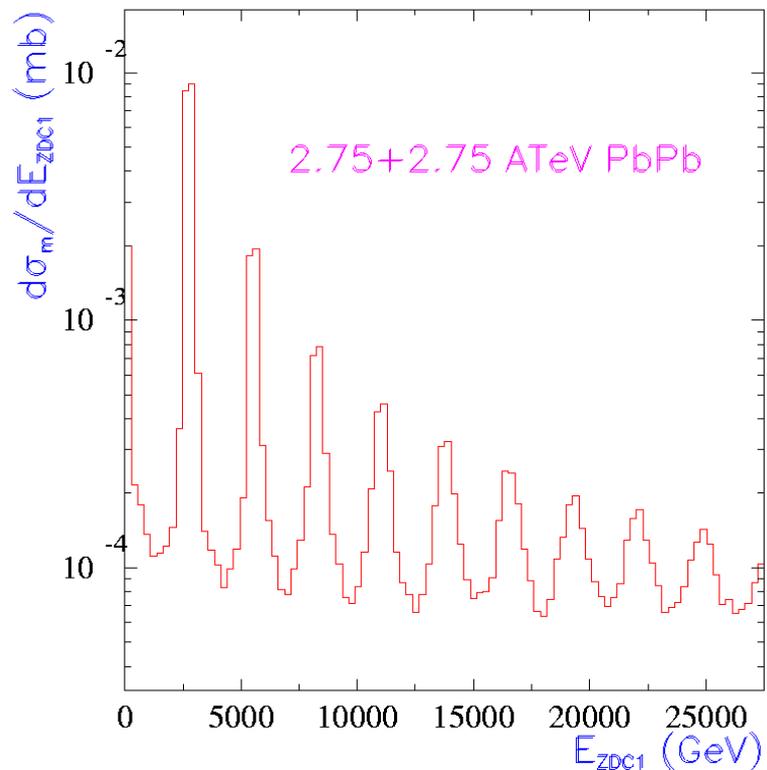
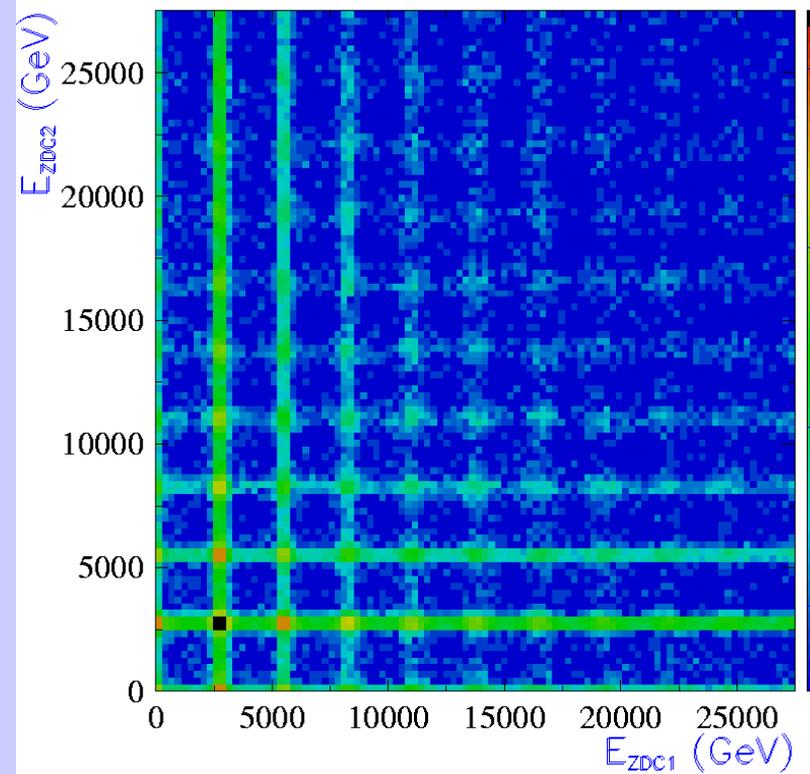
2 identical systems on both sides relative to IP

→ reduced background, improved resolution on centrality

	ZN	ZP
Dimensions [cm <sup>3</sup> ]	7.04 x 7.04 x 100	12 x 22.4 x 150
Absorber material	W alloy	brass
$\rho_{\text{absorber}}$ [g cm <sup>-3</sup> ]	17.61	8.48
Filling ratio	1/22	1/65

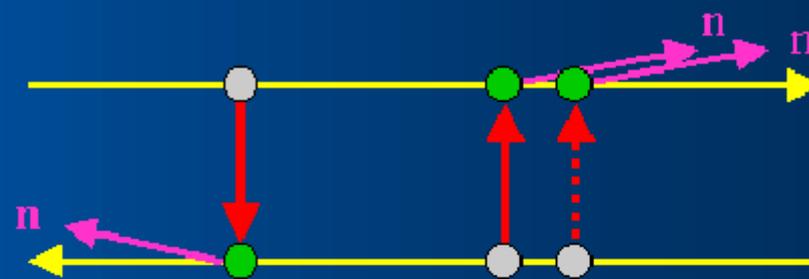
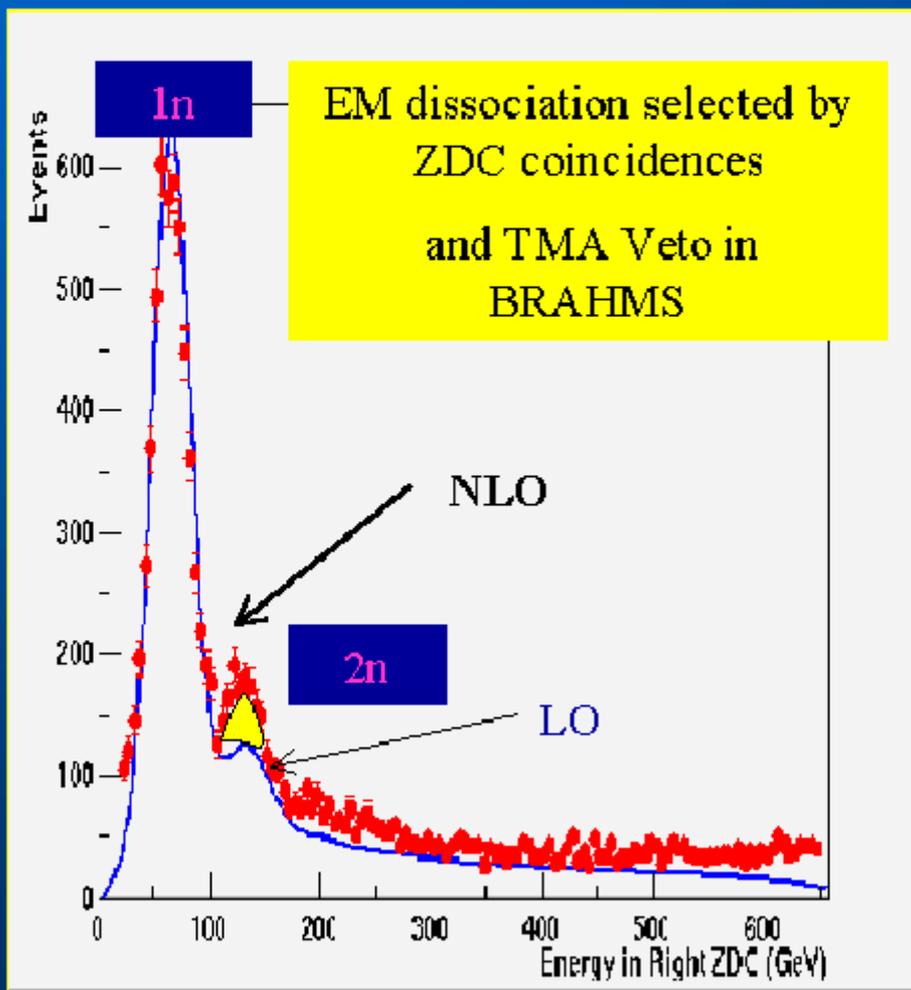


# Регистрация нейтронов вперед-назад в совпадении



Большие множественности нейтронов в результате поглощения фотонов высоких энергий

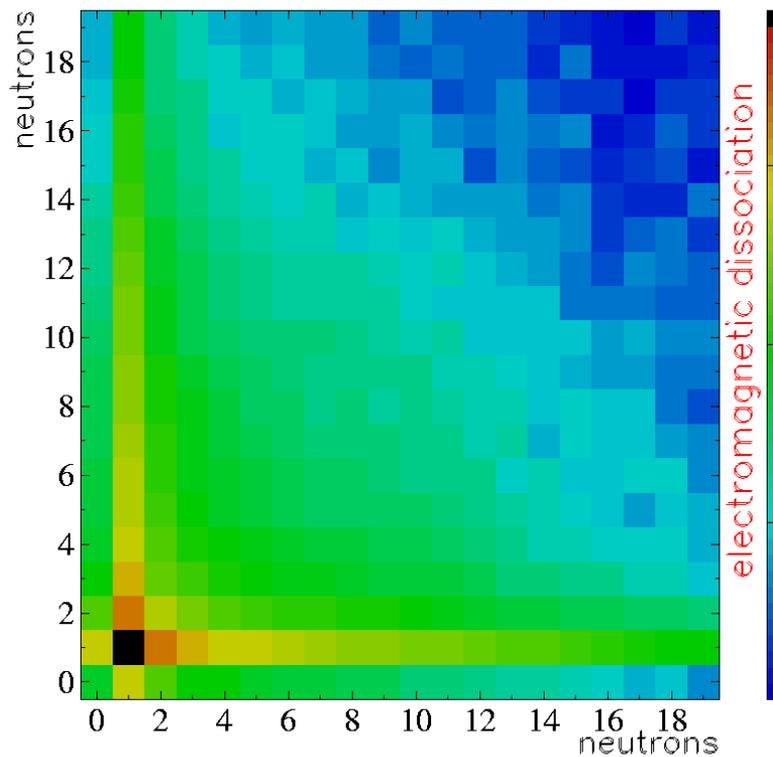
# Electromagnetic nuclear dissociation



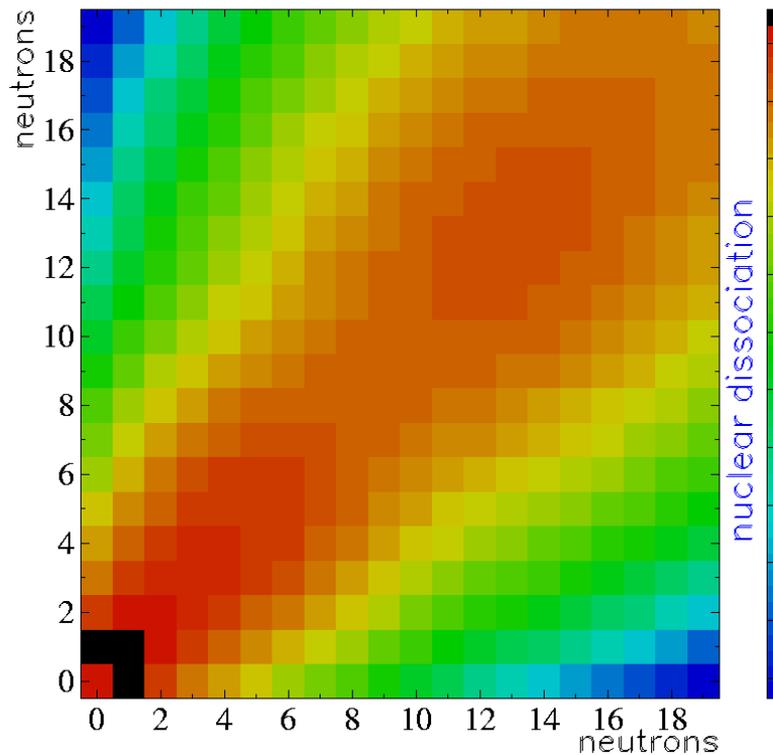
LO+NLO Mutual EM

- Mutual Electromagnetic dissociation
- (Spectrum of virtual photons) \* (absorption cross section) = WW
- Multiphonon GDR excitation,  $\sigma_{abs}$
- EM vs Nuclear coll.
- => neutron (L\*R) coincidences
- RELDIS. Pshenichnov, JPB, IM, et al.

2.75+2.75 ATeV PbPb



**Особые свойства взаимной электромагнитной диссоциации: ядра разрушаются независимо – возможны несимметричные события**



**Центральные или периферические столкновения: совокупность NN-столкновений – симметричный развал**

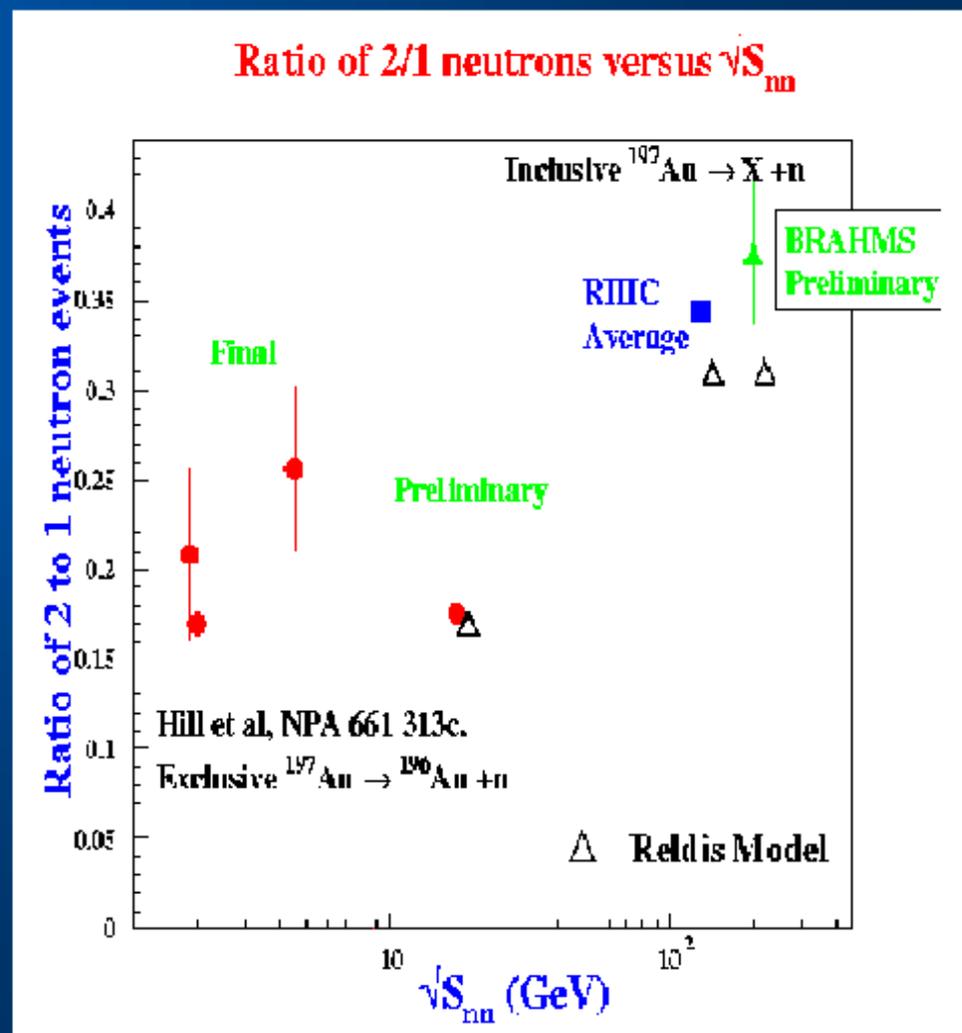
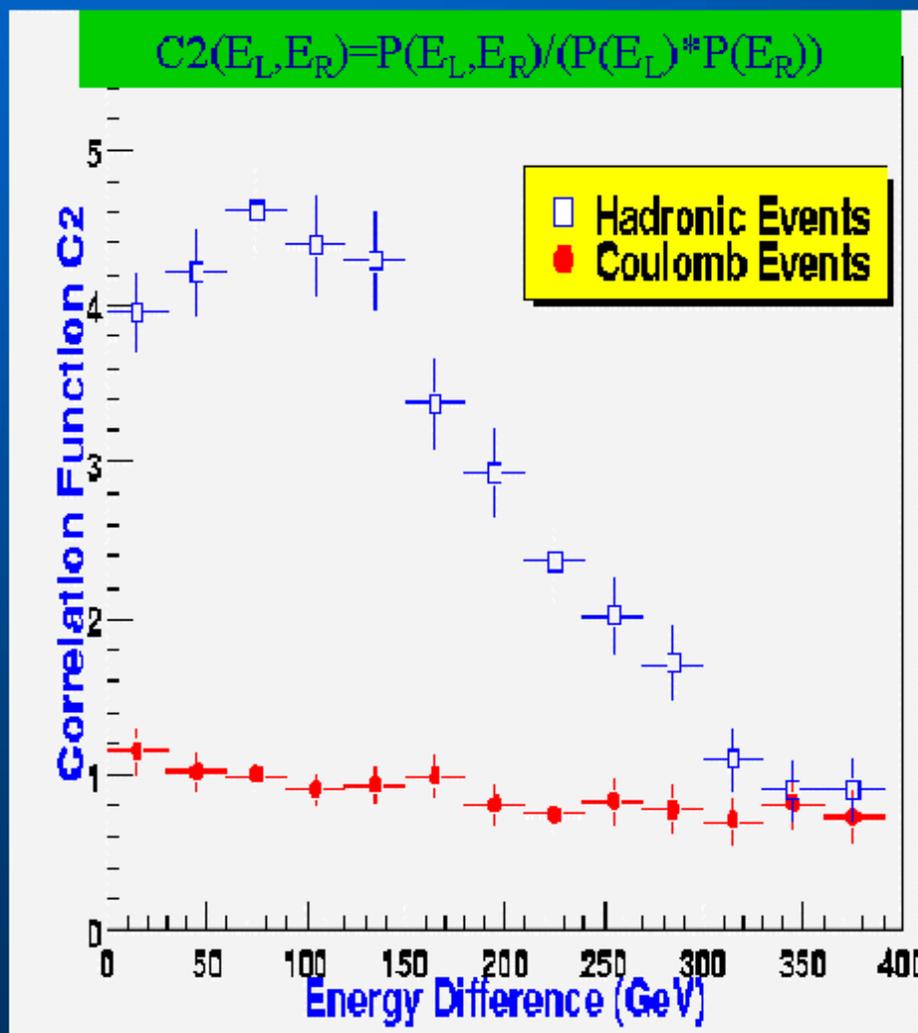


**Особые свойства взаимной электромагнитной диссоциации: ядра разрушаются независимо – возможны несимметричные события**



**Центральные или периферические столкновения: совокупность NN-столкновений – симметричный развал**

# Neutral Energy correlations (ZDC)

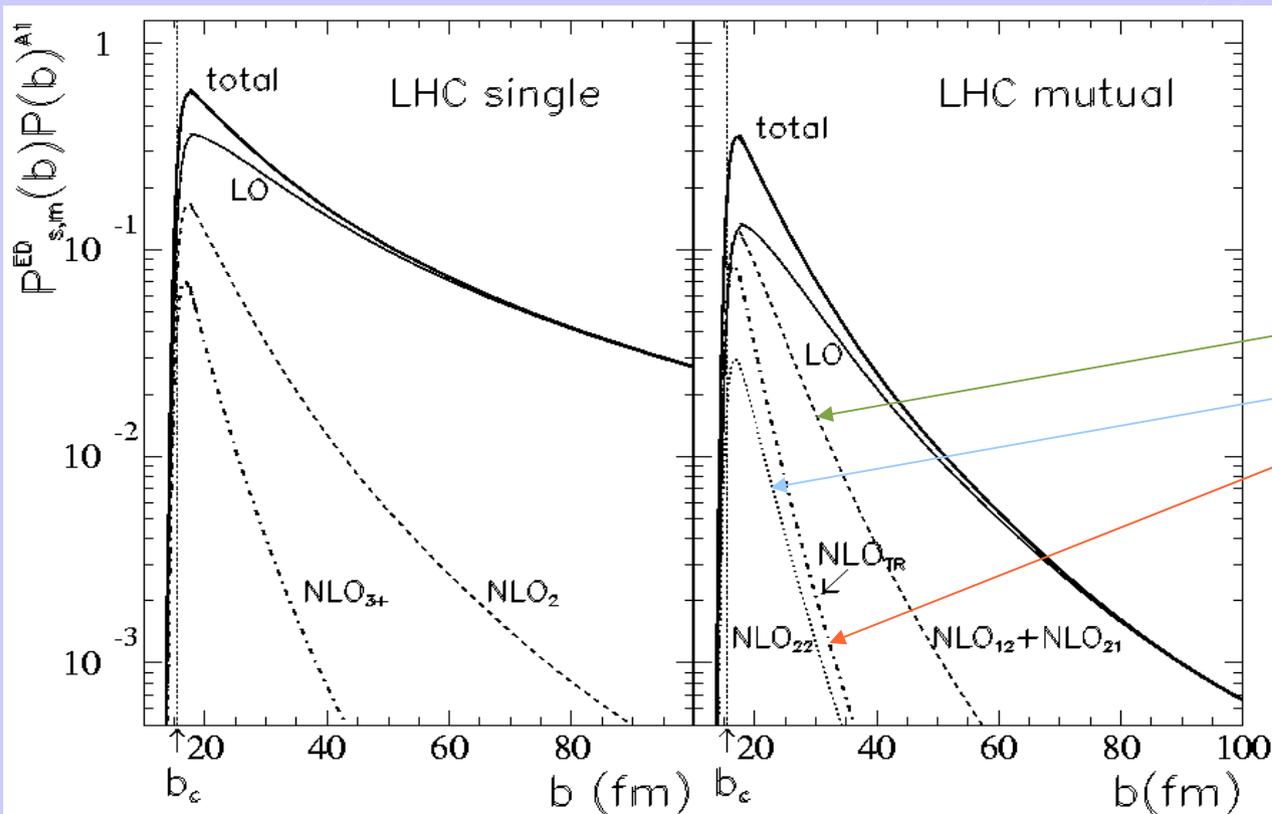


# Отношения сечений $1n$ и $2n$

Таблица 9: Отношения сечений взаимной диссоциации в AuAu столкновениях при энергии 65+65 А ГэВ измеренные в трех экспериментах на RHIC из работы [93]. Теоретические абсолютные значения сечений и их отношения вычислены с помощью модели RELDIS и модели abrasion.

	PHENIX	PHOBOS	BRAHMS	Теория
$\sigma_{\text{tot}}^{\text{MED}}$ (барн)	–	–	–	3.6
$\sigma_{\text{tot}}^{\text{nuc}}$ (барн)	–	–	–	7.29
$\sigma_{\text{tot}} = \sigma_{\text{tot}}^{\text{MED}} + \sigma_{\text{tot}}^{\text{nuc}}$ (барн)	–	–	–	10.89
$\frac{\sigma_{\text{tot}}^{\text{nuc}}}{\sigma_{\text{tot}}}$	$0.661 \pm 0.014$	$0.658 \pm 0.028$	$0.68 \pm 0.06$	0.669
$\frac{\sigma^{\text{MED}}(1nX D)}{\sigma_{\text{tot}}}$	$0.117 \pm 0.004$	$0.123 \pm 0.011$	$0.121 \pm 0.009$	0.138
$\frac{\sigma^{\text{MED}}(1nX 1nY)}{\sigma^{\text{MED}}(1nX D)}$	$0.345 \pm 0.012$	$0.341 \pm 0.015$	$0.36 \pm 0.02$	0.439
$\frac{\sigma^{\text{MED}}(2nX D)}{\sigma^{\text{MED}}(1nX D)}$	$0.345 \pm 0.014$	$0.337 \pm 0.015$	$0.35 \pm 0.03$	0.297
$\frac{\sigma^{\text{MED}}(1nX 1nY)}{\sigma_{\text{tot}}}$	$0.040 \pm 0.002$	$0.042 \pm 0.003$	$0.044 \pm 0.004$	0.061

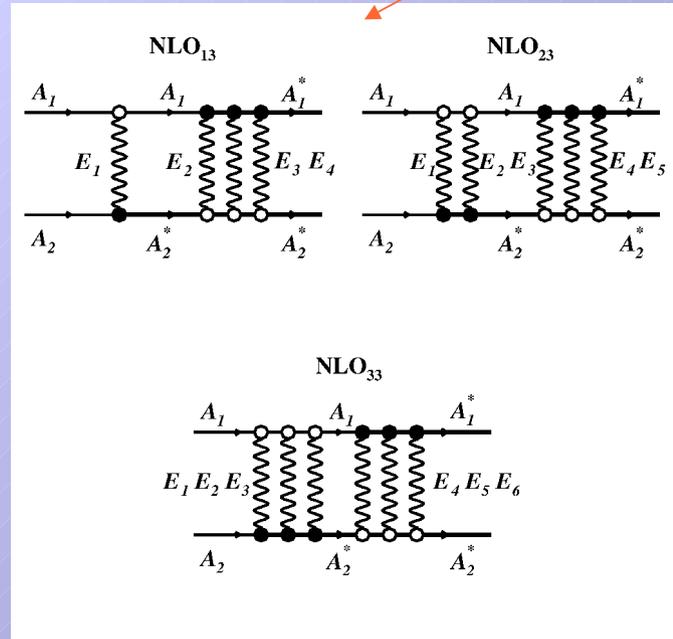
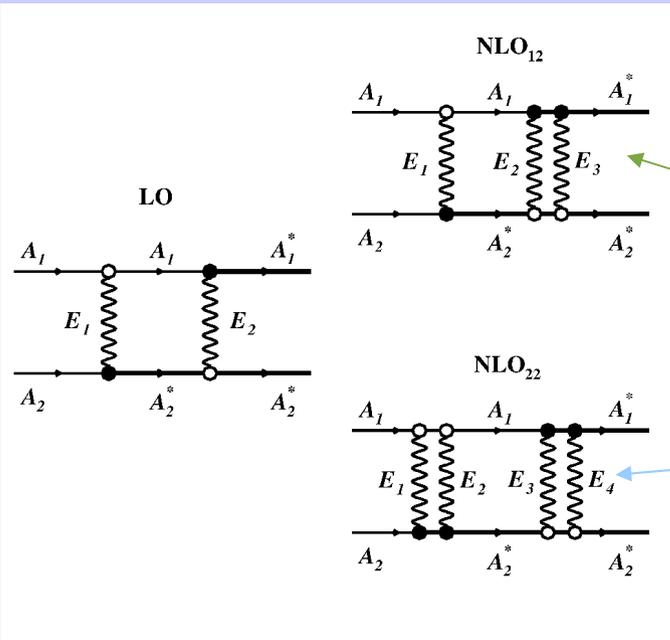
# Во взаимной диссоциации значителен вклад событий с малыми $b$ и множественных возбуждений



<b>2.75+2.75 A ТэВ PbPb @ LHC</b>	<b>Сечение (барны)</b>
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

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

# Во взаимной диссоциации значителен вклад событий с малыми $b$ и множественных возбуждений



$2.75+2.75 A$ ТэВ PbPb @ LHC	Сечение (барны)
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 !

# Кулоновское возбуждение двойного гигантского резонанса в столкновениях ядер при низких энергиях

Nuclear Physics A569 (1994) 175c–182c  
North-Holland, Amsterdam

NUCLEAR  
PHYSICS A

## Relativistic Coulomb Excitation of the 2-Phonon GDR in $^{208}\text{Pb}$

W. Kühn\* for the TAPS and FOPI collaboration

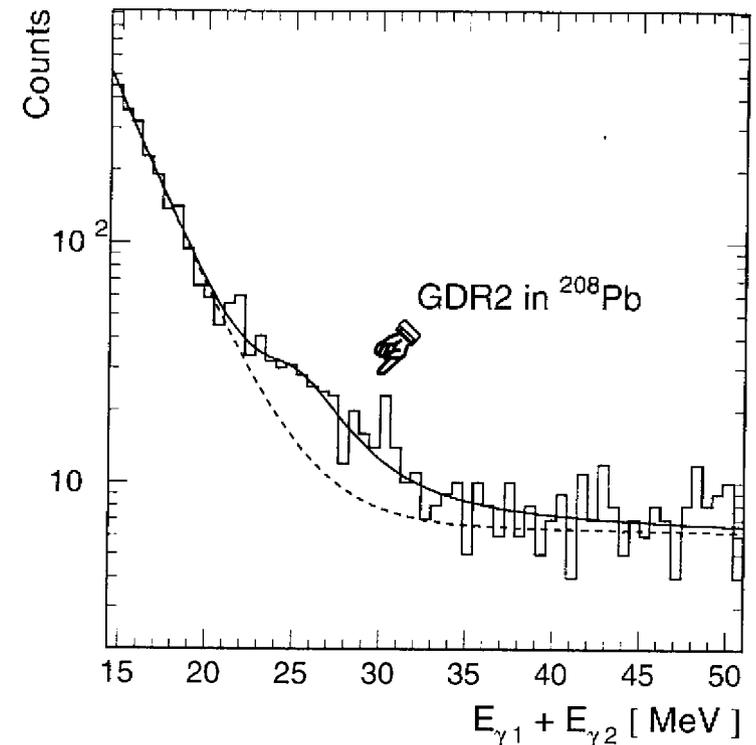
\*II.Physikalisches Institut, Univ. Giessen

The photon decay of the relativistic Coulomb excitation of the double Giant Dipole Resonance (GDR) in the target has been observed in 1 AGeV  $^{209}\text{Bi}$  on  $^{208}\text{Pb}$ . The photon spectrometer TAPS[1] has been used in conjunction with the FOPI[2] detector system at GSI (Darmstadt). For peripheral events which are dominated by relativistic Coulomb excitation, the sum energy of coincident  $\gamma - \gamma$  pairs shows a broad Lorentzian shaped feature at  $25.6 \pm 1.0$  MeV and width of  $5.8 \pm 1.6$  MeV which we assign to the Double GDR observed via the 2- $\gamma$  decay channel.

Возбуждение DGDR в  $^{208}\text{Pb}$  налетающим  $^{209}\text{Bi}$  с энергией 1 ГэВ/нуклон: видно как небольшая особенность в спектре фотонов. Тройные возбуждения сложно увидеть при низких энергиях...

Двойные возбуждения в одиночной диссоциации  $\sim 1\%$ ,  
тройные  $\sim 0.01\%$

180c W. Kühn / Relativistic Coulomb excitation of the 2-phonon GDR in  $^{208}\text{Pb}$



# Практическое применение: мониторинг светимости коллайдеров

A. Morsch & I.A. Pshenichnov, “LHC Experimental Conditions”, ALICE Internal Note 2002-034, и J. Phys. G **30** (2004) 1517

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

Следует использовать наиболее достоверное (стабильное) значение, например сумму сечений эмиссии одного или двух нейтронов !

	Сечение (мб)				
	$E_\gamma \leq 24$ МэВ	$E_\gamma \leq 140$ МэВ		Весь диапазон $E_\gamma$	
	LO	LO		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

# Основные выводы

- Ультрапериферические взаимодействия ядер приводят к потере пучков в тяжелоионных коллайдерах.
  - Взаимная электромагнитная диссоциация будет использоваться для мониторинга светимости LHC, например в эксперименте ALICE.
  - Электромагнитное взаимодействие ультрарелятивистских ядер позволит наблюдать новые эффекты, которые не видны при низких энергиях, например, множественные возбуждения гигантских резонансов сопровождающихся взаимной диссоциацией ядер.
  - Модель RELDIS имеет ряд практических приложений:
    - расчет потерь пучков в LHC
    - применяется для вычислений калибровочных сечений для мониторинга светимости коллайдеров ядро-ядро
    - моделирование диссоциации ядер космических лучей
-

# Научная новизна модели *RELDIS*

- С 1998 до 2004 года программа *RELDIS* была единственным в мире кодом для расчетов электромагнитной диссоциации ультрарелятивистских ядер методом Монте-Карло.
  - По своей универсальности *RELDIS* превосходит прежние методы вычислений использующие только экспериментальные данные по фотоядерным реакциям.
  - После 2004 года расчет одиночной электромагнитной диссоциации методом Монте-Карло стал возможен с помощью кода *FLUKA* и библиотеки *Geant4* (проект *IONMARS*). Однако в обоих случаях учитываются только однофотонные процессы лидирующего порядка.
  - До настоящего времени модель *RELDIS* не имеет аналогов в отношении моделирования многофотонных процессов одиночной и взаимной электромагнитной диссоциации ультрарелятивистских ядер.
-

# Оригинальность полученных результатов

- Впервые показана возможность мультифрагментации ядер под действием кулоновских полей в ультрапериферических столкновениях.
- Впервые объяснена природа нового типа ультрапериферических взаимодействий ядер приводящих к увеличению их заряда. Показано, что такие взаимодействия связаны с рождением отрицательно заряженных пионов в фотопоглощении на внутриядерных нейтронах, и что такие взаимодействия возможны только при энергиях ядер-снарядов выше 10 ГэВ/нуклон.
- Впервые описана совокупность экспериментальных данных по эмиссии нейтронов в ультрапериферических взаимодействиях ядер золота на коллайдере RHIC.
- Предложен новый метод мониторинга светимости коллайдеров, который основан на измерении суммы сечений эмиссии одного и двух нейтронов от взаимной электромагнитной диссоциации сталкивающихся ядер в пучках коллайдера LHC.
- Предложен принципиально новый метод изучения двойных и тройных возбуждений гигантских резонансов посредством регистрации нейтронов от событий взаимной электромагнитной диссоциации ядер в пучках коллайдеров ультрарелятивистских тяжелых ионов.

# Основные результаты на защиту

- Создана не имеющая аналогов модель RELDIS, которая с помощью метода Монте-Карло моделирует одиночные и взаимные электромагнитные возбуждения и фрагментацию ускоренных ядер.
- Модель описывает большинство экспериментальных данных по фрагментации ультрарелятивистских ядер в ультрапериферических столкновениях, включая недавние результаты ИЯИ-ЦЕРН.
- Впервые теорией объяснены данные по изменению зарядов ядер в таких процессах.
- Впервые смоделированы процессы мультифрагментации ядер под действием электромагнитных полей и деления ядер фотонами высоких энергий
- Принятый коллаборацией ALICE метод мониторинга светимости LHC опирается на результаты RELDIS.
- Показано, что электромагнитное взаимодействие ультрарелятивистских ядер позволит наблюдать новые эффекты, которые не видны при низких энергиях, например, множественные возбуждения гигантских резонансов сопровождающихся взаимной диссоциацией ядер.
- Модель RELDIS имеет ряд других практических приложений:
  - расчет потерь пучков в LHC
  - расчеты выходов ядер на FRS в GSI
  - моделирование диссоциации ядер космических лучей

# ***По материалам диссертации опубликовано 22 работы, еще две приняты к публикации***

- В том числе: 15 статей в ведущих зарубежных и отечественных журналах:
  - Обзор в Physics Reports
  - 1 - Phys. Rev. Lett.
  - 6 – Phys. Rev. C
  - 2 – Nucl. Phys.
  - 2 – Eur. J. Phys. A
  - 2 - J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.
  - 1 - ЯФ
  
  - 5 - в сборниках трудов конференций (Elsevier, World Scientific)
  - 2 - ALICE internal notes
  
  - Приняты к публикации:
  - Обзор в ЭЧАЯ (один из первых номеров 2011)
  - Статья в ЯФ (1-й выпуск 2011)
-

# ***Представлено на научных семинарах:***

- Electromagnetic dissociation of ultrarelativistic heavy ions, Frankfurt Institute for Advanced Studies, May 2004
  - Fission and spallation of actinide nuclei by photons, Lab. Naz. Frascati, INFN, September 2003
  - Fragmentation of heavy ions at CERN SPS, Bologna University, December 2002
  - Electromagnetic interactions of ultrarelativistic heavy ions: from CERN SPS to RHIC and LHC colliders, GSI Darmstadt, May 2001
  - Fission and spallation of heavy nuclei by intermediate energy photons, The George Washington University, March, 2001
  - Mutual heavy ion dissociation at ultrarelativistic energies, BNL, February, 2001
  - Электромагнитные взаимодействия ультрарелятивистских ядер на CERN SPS, RHIC и LHC, МИФИ, декабрь 2000
  - Electromagnetic dissociation of heavy nuclei at ultrarelativistic energies, Bologna University, March 1999
  - Electromagnetic processes in peripheral collisions of ultrarelativistic heavy ions, Niels Bohr Institute, December 1999
  - Электромагнитные взаимодействия ядер на коллайдерах RHIC и LHC, НИИЯФ МГУ, декабрь 1998
  - Interactions of intermediate energy photons with nucleons and nuclei, Seminars at LNF Frascati, March-July, 1995
-

# ***Доклады на международных конференциях:***

- Collimation of Heavy Ion Beams in LHC, (with H.-H. Braun, R.W. Assmann, A. Ferrari, J.-B. Jeanneret and J.M. Jowett), 9th European Particle Accelerator Conference, Lucerne, Switzerland, 5-9 Jul 2004.
  - Limits to the Performance of the LHC with Ion Beams, (with J.M. Jowett, H.-H. Braun, M.I. Gresham, E. Mahner, A.N. Nicholson, E.N. Shaposhnikova), 9th European Particle Accelerator Conference, Lucerne, Switzerland, 5-9 Jul 2004.
  - Relativistic heavy ion collider as a photon factory: from GDR excitations to vector meson productions, X International Seminar on Electromagnetic Interactions of Nuclei at Intermediate Energies, Moscow 2003,
  - Simultaneous heavy ion dissociation at ultrarelativistic energies, Bologna 2000 Conference: Structure of the Nucleus at the Dawn of the Century, Bologna, Italy, 29 May - 3 Jun 2000.
  - Nuclear disintegration induced by virtual photons at heavy ion colliders, 2nd KEK - Tanashi International Symposium on Hadron and Nuclear Physics with Electromagnetic Probes, KEK Tanashi, Tokyo, Japan, 25-27 Oct 1999
-

# Публикации по теме диссертации - I

- [1] A.S. Iljinov, I.A. Pshenichnov, N. Bianchi, E. DeSanctis, V. Muccifora, M. Mirazita, P. Rossi, Extension of the intranuclear cascade model for photonuclear reactions at energies up to 10 GeV, Nucl. Phys. A616 (1997) 575-605.
- [2] I.A. Pshenichnov, B.L. Berman, W.J. Briscoe, C. Cetina, G. Feldman, P. Heimberg, A.S. Iljinov, I.I. Strakovsky, Intranuclear-cascade model calculation of photofission probabilities for actinide nuclei, Eur. J. Phys. A24 (2005) 69-84.
- [3] P. Golubev, V. Avdeichikov, K.G. Fissum, B. Jakobsson, I.A. Pshenichnov, W.J. Briscoe, G.V. O'Rielly, J. Annand, K. Hansen, L. Isaksson, H. Jaederstrom, M. Karlsson, M. Lundin, B. Schroeder, L. Westerberg, Pion emission in  $^2\text{H}$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{27}\text{Al}$  ( $\gamma, \pi^+$ ) reactions at threshold, Nucl. Phys. A 806 (2008) 216-229.
- [4] I.A. Pshenichnov, I.N. Mishustin, J.P. Bondorf, A.S. Botvina, A.S. Ilinov, Nuclear multifragmentation induced by electromagnetic fields of ultrarelativistic heavy-ions, Phys. Rev. C57 (1998) 1920-1926.
- [5] I.A. Pshenichnov, I.N. Mishustin, J.P. Bondorf, A.S. Botvina, A.S. Ilinov, Particle emission following Coulomb excitation in ultrarelativistic heavy ion collisions, Phys. Rev. C60 (1999) 044901.
- [6] I.A. Pshenichnov, J.P. Bondorf, I.N. Mishustin, A. Ventura, S. Masetti, Mutual heavy ion dissociation in peripheral collisions at ultrarelativistic energies, Phys. Rev. C64 (2001) 024903.
-

# *Публикации по теме диссертации - II*

- [7] C. Scheidenberger, I.A. Pshenichnov, T. Aumann, S. Datz, K. Summerer, J.P. Bondorf, et al., Electromagnetically-induced nuclear-charge pickup observed in ultra-relativistic Pb collisions, *Phys. Rev. Lett.* 88 (2002) 042301.
- [8] C. Scheidenberger, I.A. Pshenichnov, K. Summerer, A. Ventura, J.P. Bondorf, A.S. Botvina et al., Charge-changing interactions of ultrarelativistic Pb ions, *Phys. Rev.* C70 (2004) 014902.
- [9] U.I. Uggerhoj, I.A. Pshenichnov, C. Scheidenberger, H.D. Hansen, H. Knudsen, E. Uggerhoj, P. Sona, A. Mangiarotti, S. Ballestrero, Charge-changing interactions of ultrarelativistic In nuclei, *Phys. Rev.* C72 (2005) 057901.
- [10] M.B. Golubeva, F.F. Guber, T.L. Karavicheva, E.V. Karpechev, A.B. Kurepin, A.I. Maevskaya, I.A. Pshenichnov, A.I. Reshetin, K.A. Shileev, V.V. Tiflov, N.S. Topilskaya, P. Szymanski, I. Efthymiopoulos, L. Gatignon, P. Cortese, G. Dellacasa, R. Arnaldi, N. De Marco, A. Ferretti, M. Gallio, A. Musso, C. Oppedisano, A. Piccotti, E. Scomparin, E. Vercellin, C. Cicalo, G. Puddu, E. Siddi, Neutron emission in electromagnetic dissociation of ultrarelativistic Pb ions, *Phys. Rev.* C71 (2005) 024905.
- [11] K.A. Chikin, V.L. Korotkikh, A.P. Kryukov, L.I. Sarycheva, I.A. Pshenichnov, J.P. Bondorf, I.N. Mishustin, Inclusive meson production in peripheral collisions of ultrarelativistic heavy ions, *Eur. J. Phys.* A8 (2000) 537-548.
-

## Публикации по теме диссертации - III

- [12] I.A. Pshenichnov, Nuclear disintegration induced by virtual photons at heavy ion colliders, In "Hadron and Nuclear Physics with Electromagnetic Probes", Proc. of the Second KEK-Tanashi International Symposium, Tanashi, Tokyo, Japan, 25-27 Oct 1999, Eds. K. Maruyama and H. Okuno, Elsevier, 2000, pp 93-98.
- [13] I.A. Pshenichnov, Simultaneous heavy ion dissociation at ultrarelativistic energies, In "Nucleus-nucleus collisions", Proc. Bologna 2000 Conference: Structure of the Nucleus at the Dawn of the Century, Bologna, Italy, 29 May - 3 Jun 2000, Eds. G.C. Bonsignori, M. Bruno, A. Ventura and D. Vretenar, World Scientific, 2001, pp 119-122.
- [14] I.A. Pshenichnov, Relativistic heavy ion collider as a photon factory: from GDR excitations to vector meson productions, X International Seminar on Electromagnetic Interactions of Nuclei at Intermediate Energies, Moscow 2003, Proc. of X-Seminar EMIN-2003, publ. INR (2003) Moscow, p. 234-243.
- [15] В.В. Варламов, Б.С. Ишханов, Н.Н. Песков, М.Е. Степанов, И.А. Пшеничнов, Электромагнитная диссоциация ультрарелятивистских ядер и сечения фотоядерных реакций в области гигантских резонансов, ЯФ 67 (2004) 2145-2156.
- [16] I.A. Pshenichnov, J.P. Bondorf, A.B. Kurepin, I.N. Mishustin, A. Ventura, Electromagnetic dissociation of nuclei and collider luminosity monitoring in ALICE experiment at LHC, ALICE Internal Note, ALICE-INT-2002-07.
-

# Публикации по теме диссертации - IV

- [17] P. Cortese, G. Dellacasa, L. Ramello, M. Sitta, S. Ahmad,..., I.A. Pshenichnov, et al., (ALICE Collaboration), ALICE: Physics performance report, volume I, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 30 (2004) 1517-1763.
- [18] B. Alessandro,..., I.A. Pshenichnov, et al., (ALICE Collaboration), ALICE: Physics performance report, volume II, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 32 (2006) 1295-2040.
- [19] A.J. Baltz, G. Baur, D. d'Enterria, L. Frankfurt, F. Gelis, V. Guzey, K. Hencken, Yu. Kharlov, M. Klasen, S.R. Klein, V. Nikulin, J. Nystrand, I.A. Pshenichnov, S. Sadovsky, E. Scapparone, J. Seger, M. Strikman, M. Tverskoy, R. Vogt, S.N. White, The physics of ultraperipheral collisions at the LHC, Phys. Reports 458 (2008) 1-171.
- [20] A. Morsch and I.A. Pshenichnov, LHC Experimental Conditions, ALICE Internal Note, ALICE-INT-2002-034.
- [21] H.-H. Braun, R.W. Assmann, A. Ferrari, J.-B. Jeanneret, J.M. Jowett, I.A. Pshenichnov, Collimation of Heavy Ion Beams in LHC, In Proc. 9th European Particle Accelerator Conference, Lucerne, Switzerland, 5-9 Jul 2004, pp 551-553.
- [22] J.M. Jowett, H.-H. Braun, M.I. Gresham, E. Mahner, A.N. Nicholson, E.N. Shaposhnikova, I.A. Pshenichnov, Limits to the Performance of the LHC with Ion Beams, In Proc. 9th European Particle Accelerator Conference, Lucerne, Switzerland, 5-9 Jul 2004, pp 578-580.
-

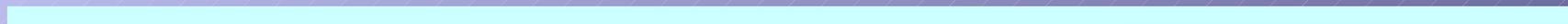
# Публикации по теме диссертации - V

Принято к публикации:

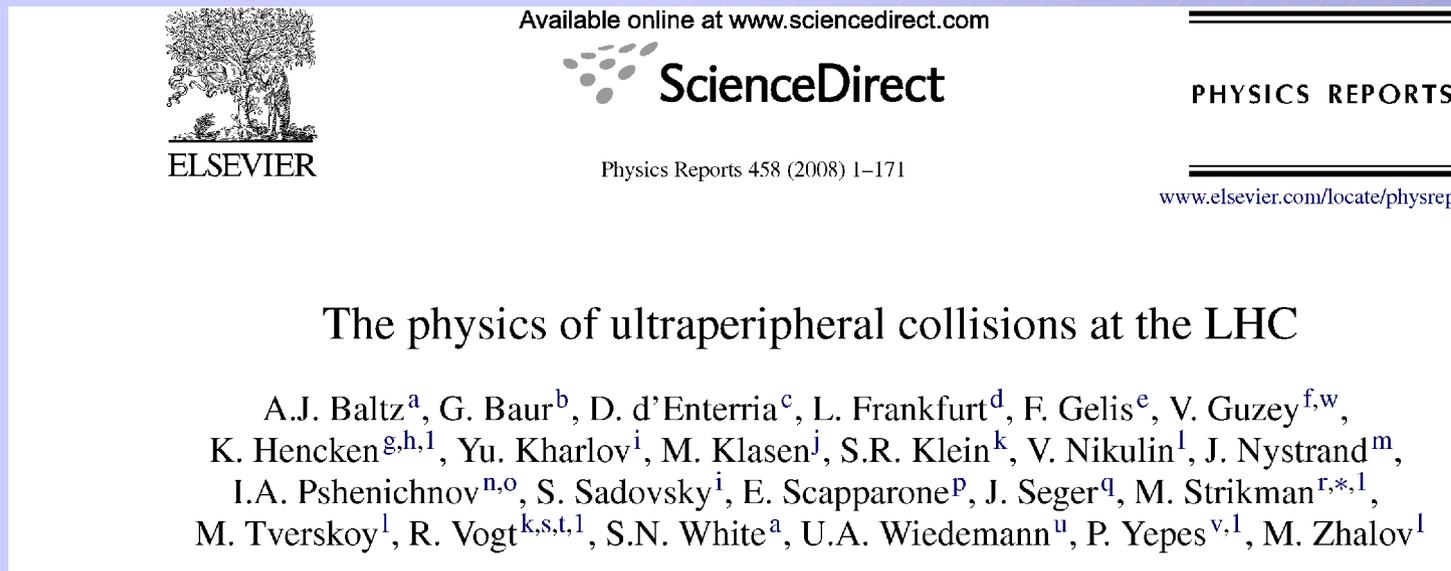
[23] I.A. Pshenichnov, E.V. Karpechev, A.B. Kurepin, I.N. Mishustin, Electromagnetic interactions of ultrarelativistic nuclei, ЯФ, 2011 Сборник трудов Сессии-конференции ОЯФ РАН  
Фундаментальные взаимодействия, Москва, ИТЭФ, 23-27 ноября 2009

[24] И.А. Пшеничнов, Электромагнитные возбуждения и фрагментация ультрарелятивистских ядер, ЭЧАЯ, 2011

# ***Дополнительные слайды***



# Рассмотрен широкий круг задач связанных с физикой ультрапериферических столкновений на LHC



A.J.Baltz et al., *The physics of ultraperipheral collisions at the LHC*,  
Physics Reports 458 (2008) 1-171

# Рассмотрены разнообразные электромагнитные процессы

- Инклюзивное рождение  $\rho^0$ ,  $\phi$
- Инклюзивное рождение  $J/\psi$ ,  $\Upsilon$
- Двухфотонные процессы рождения дилептонных пар, включая те, в которых лептон оказывается связанным
- Small X physics
- Взаимная электромагнитная диссоциация ядер и др.

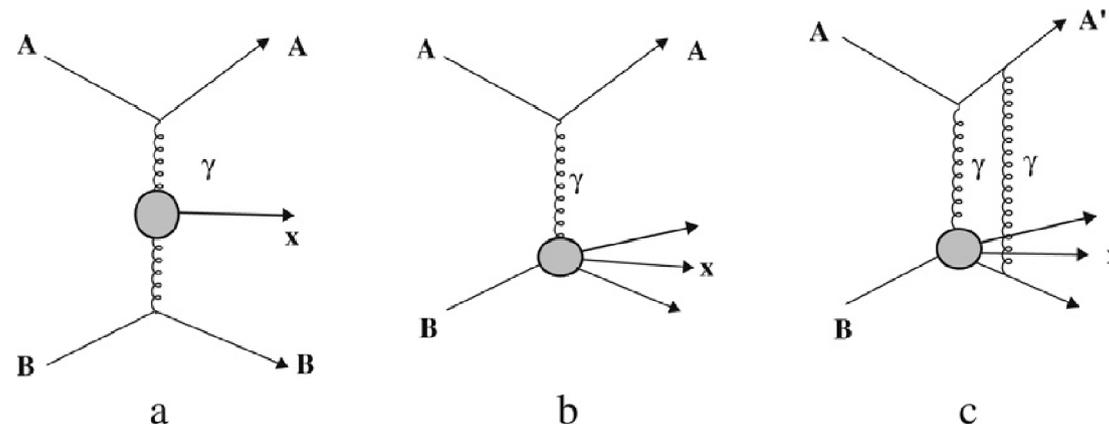


Fig. 2. A schematic view of (a) an electromagnetic interaction where photons emitted by the ions interact with each other, (b) a photon–nucleus reaction in which a photon emitted by an ion interacts with the other nucleus, (c) photonuclear reaction with nuclear breakup due to photon exchange.

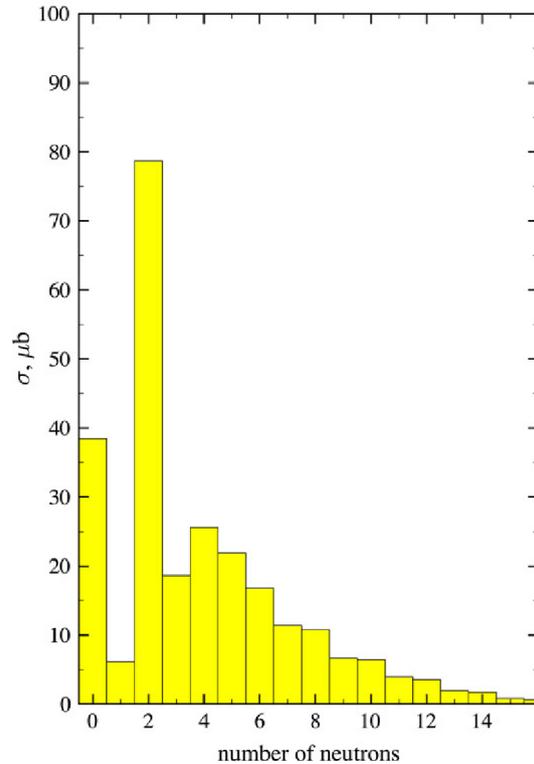


Fig. 34. The incoherent  $J/\psi$  cross section in Au + Au UPCs at RHIC as a function of the number of emitted neutrons. A similar dependence is expected for  $\Upsilon$  production at the LHC. Reprinted from Ref. [96] with permission from Elsevier.

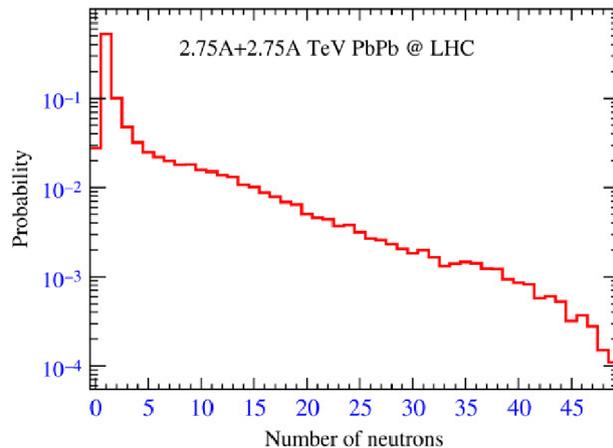
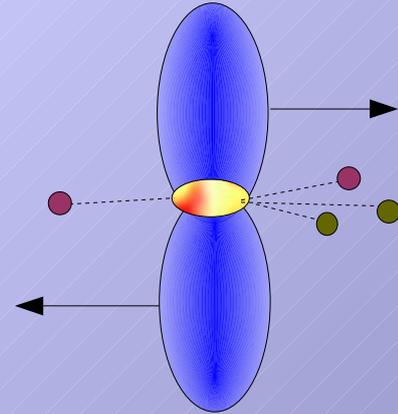


Fig. 35. The neutron production probability in mutual electromagnetic dissociation in Pb + Pb collisions at the LHC.

**Одни процессы  
могут служить  
триггером для  
других:  
определенное  
количество  
нейтронов в  
событиях  
рождения  $J/\psi$**

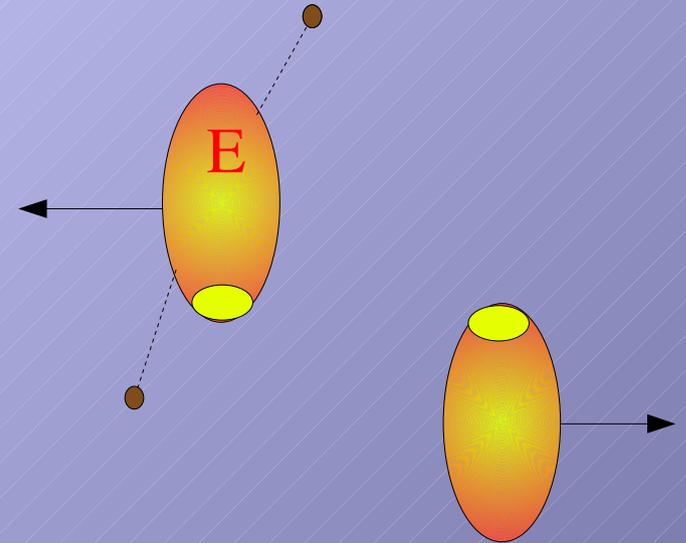
# Модель “abrasion-ablation”

- Первый этап - abrasion of nucleons. Образуется возбужденная система – горячий префрагмент



- Второй этап - ablation\* - распад возбужденной системы, испарение НУКЛОНОВ.

\* Merriam-Webster Dictionary: to remove, especially by evaporating



# Abrasion of nucleons

Nucleons may be abraded from collision partners in hadronic collisions.

Following Glauber multiple scattering theory, (J.Hüfner et al., PRC 12(1975)1888 ): cross section for the abrasion of  $a$  nucleons from the projectile ( $A_1, Z_1$ ) in collision with the target ( $A_2, Z_2$ )

$$\sigma^{nuc}(a) = \binom{A_1}{a} \times 2\pi \int_0^{b_c} b db (1 - P(b))^a P(b)^{A_1 - a}. \quad (1)$$

– with  $P(\vec{b})$  calculated as the overlap of projectile,  $\rho_1(\vec{r})$ , and target  $\rho_2(\vec{r})$  densities:

$$P(\vec{b}) = \int d^2\vec{s} D_1(\vec{s}) \exp\left(-A_2 \sigma_{NN} D_2(\vec{s} + \vec{b})\right), \quad (2)$$

– with the nuclear thickness functions:

$$D_{1,2}(\vec{s}) = \int_{-\infty}^{+\infty} dz \rho_{1,2}(\vec{s}, z). \quad (3)$$

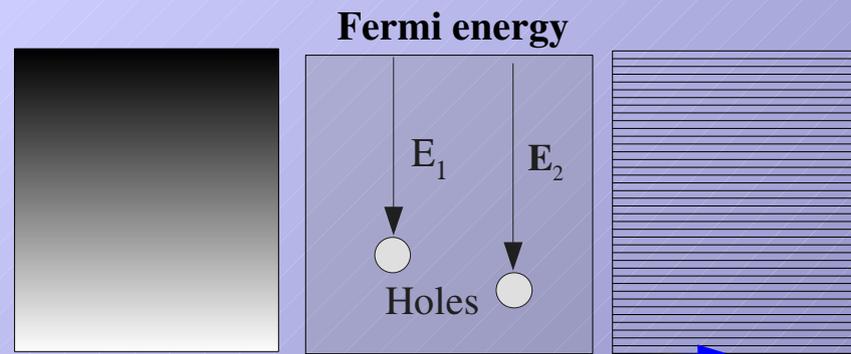
$$\rho_{1,2}(r) = \frac{\rho_0}{1 + \exp\left(\frac{r - r_0 A_{1,2}^{1/3}}{C}\right)}. \quad (4)$$

## Excitation energy of prefragments created by abrasion of nucleons:

## Как вычислить энергию возбуждения $E$ ?

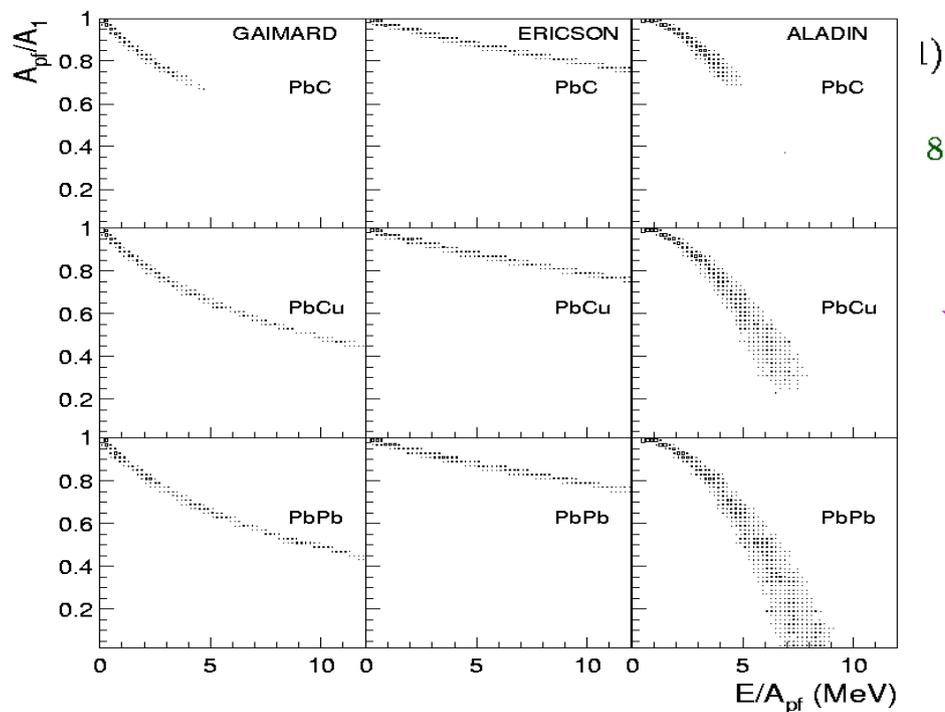
I. Prefragment excitation energy  $E$  computed via the density of states of a nucleus with  $a$  holes.

- Gaimard-Schmidt formula, for each hole with energy  $y$  ( $0 \leq y \leq 40$  MeV):  $g(y) = g_0 - g_1 y$ . Gives 13 MeV for the first removed nucleon,  $\sim 10$  MeV for others.
- Ericson formula, equispaced model:  $g(y) = g_0$ . Gives 20 MeV for the first nucleon,  $\sim 40$  MeV for others.



II. Empirical correlation between excitation energy  $E$  and relative prefragment mass extracted from the analysis of multifragmentation data based on the SMM model:

Например, две дырки:  $E = E_1 + E_2$



Получено из анализа экспериментальных данных: ALADIN data @600 A MeV