

# Моделирование радиационных полей на ускорителях заряженных частиц и ядер

**Г.И. Смирнов**

С соавторами Коллаборации **FLUKA** и фонда **TERA**

# Содержание

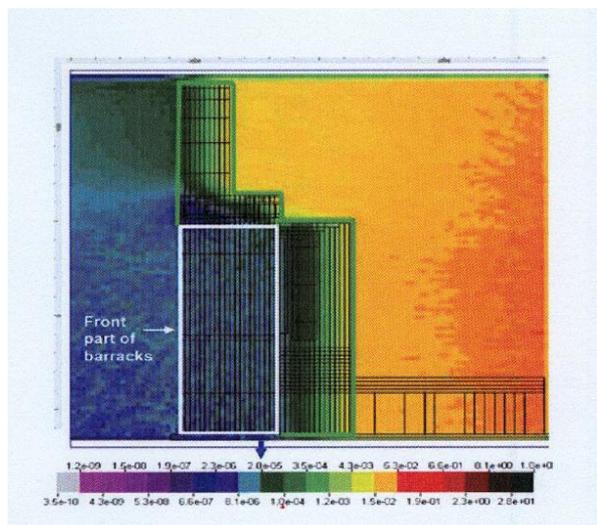
- Введение: История и новые возможности
- Линейный ускоритель для протонной терапии
- Ядерные и электромагнитные взаимодействия в столкновениях релятивистских ядер
- Потери пучка в бустере НИКА
- Радиационные повреждения (смещение атомов)
- Заключение

# 1. Введение: История и новые возможности

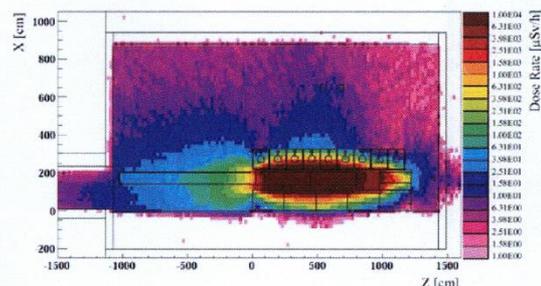
Параметры, используемые в конструировании радиационной защиты на трёх этапах:

- 1) Задание эффективной дозы в зоне доступа
- 2) Оценка радиационных полей в зоне доступа в отсутствии защитных сооружений
- 3) Расчет фактора ослабления дозы облучения, определенной в (2) по отношению к эффективной дозе в (1)

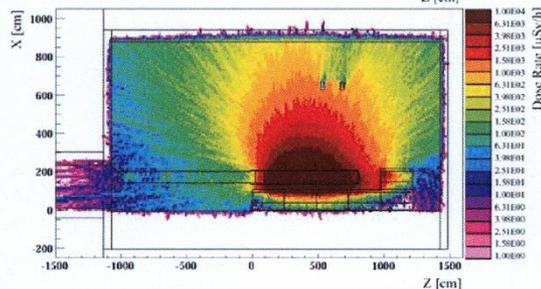
Примеры расчета с помощью **FLUKA** Монте Карло: ЛНС-b (слева) и Поглотитель пучка ЛНС (7 ТэВ) после одного года работы и одной недели охлаждения (справа)



Контур с дозой 20 мЗв/год



С защитой сверху



Без защиты

В основе модели адрон-ядерных взаимодействий, принятой в системе программ **FLUKA** заложена последовательность расчетов:

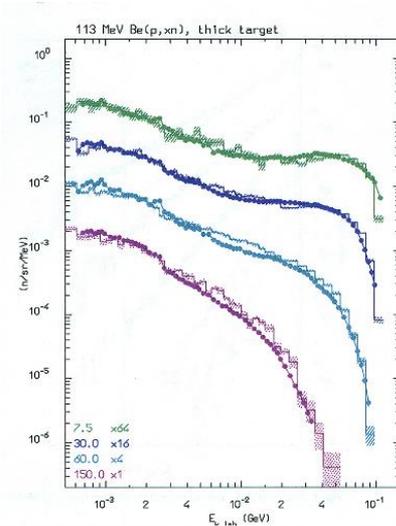
- 1) Грибов-Глаубер каскад в столкновениях при высоких энергиях
- 2) (Обобщенный) внутриядерный каскад
- 3) Предравновесная эмиссия нуклонов и ядерных фрагментов
- 4) Девозбуждение горячего ядра — Испарение / Фрагментация / Деление

Некоторые из этапов могут быть опущены в зависимости от энергии первичной частицы

# Сравнение с экспериментом

Be(p,n)X

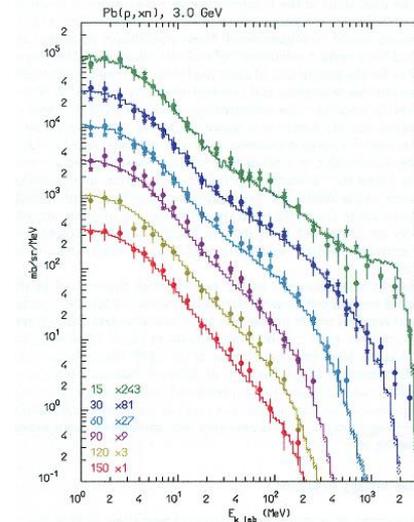
E = 113 MeV



Выход нейтронов под различными углами

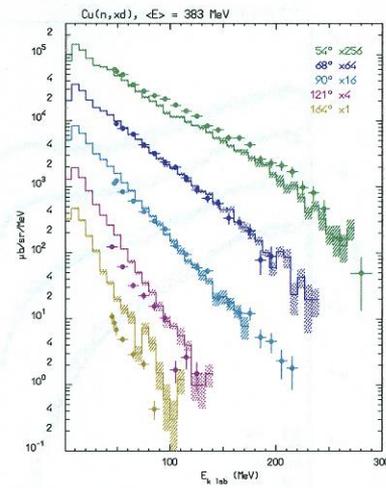
Pb(p,n)X

E = 3 GeV



Cu(n,D)X

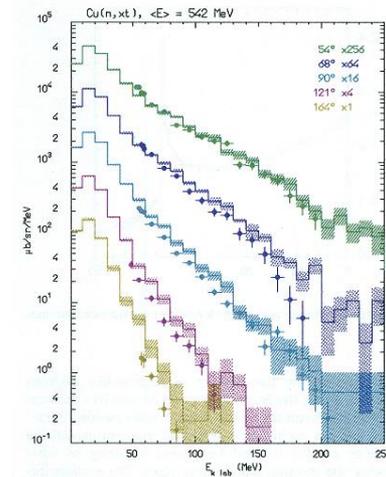
E = 383 MeV



Выход дейтронов под различными углами

Cu(n,T)X

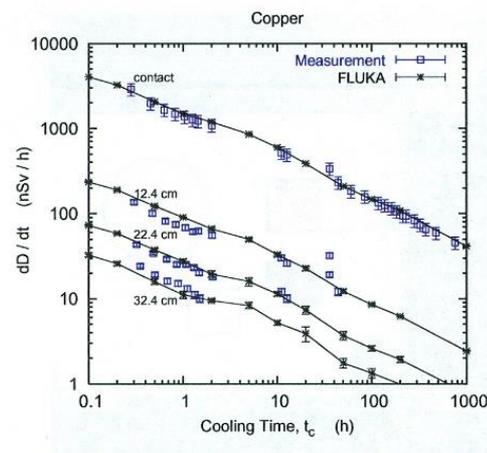
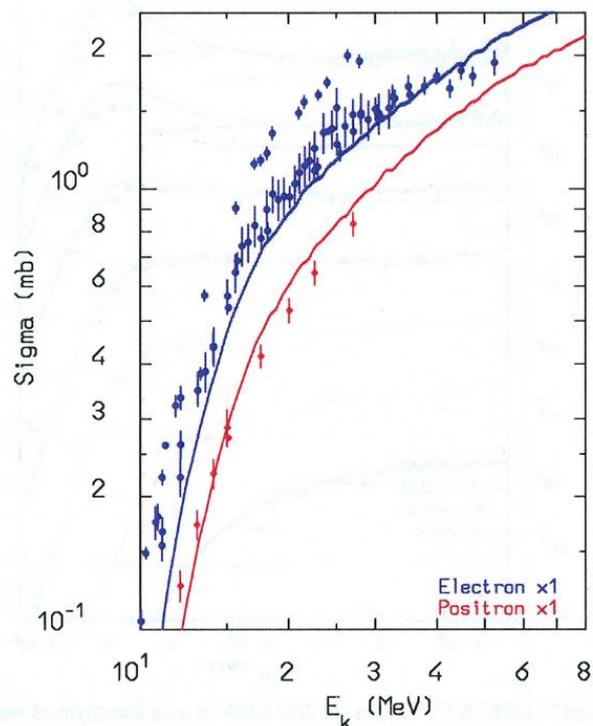
E = 542 MeV



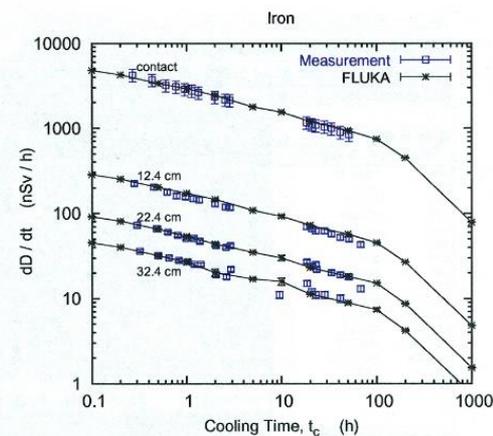
Выход трития под различными углами

# Сравнение с экспериментом

Сечение деления  $^{238}\text{U}$  в пучках  $e^-$  (синий) и  $e^+$  (красный)



**Cu**



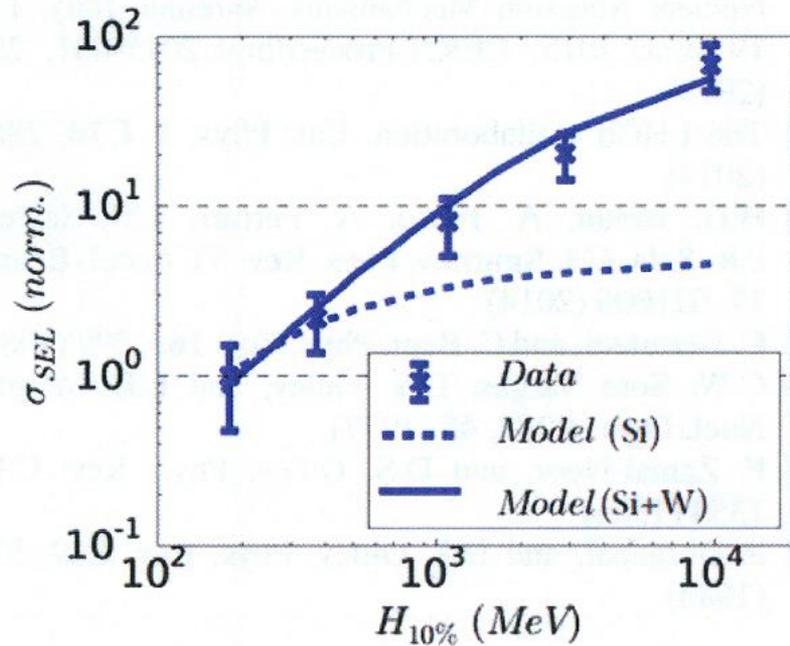
**Fe**

Интенсивность дозы (nSv/h) в зависимости от времени остывания на разных расстояниях между образцом и детектором

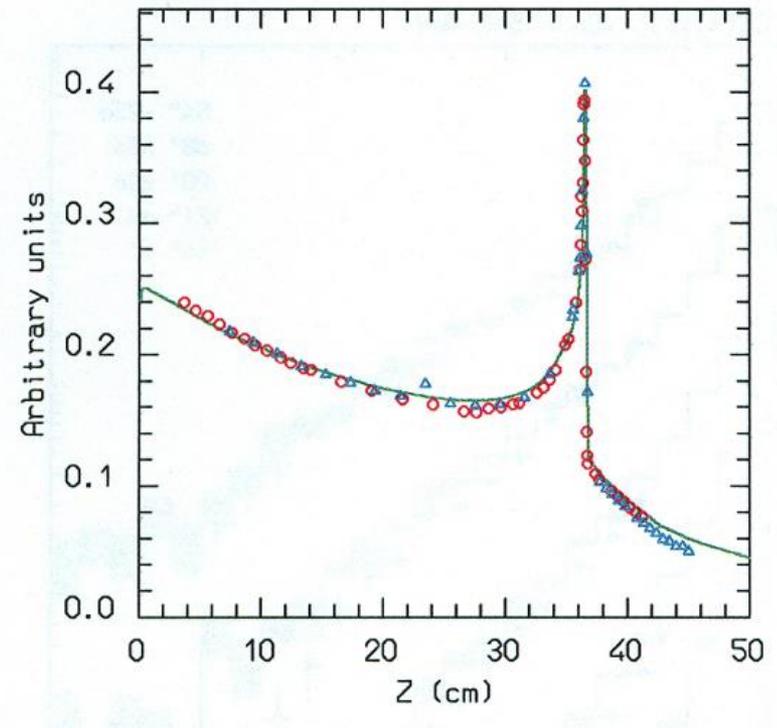
## Сравнение с экспериментом. Новые возможности.

Сечение образования одиночных сбоев в зависимости от жесткости энергетического спектра смешанных радиационных полей

Микроскопическое  $\rightarrow$  макроскопическое сечение

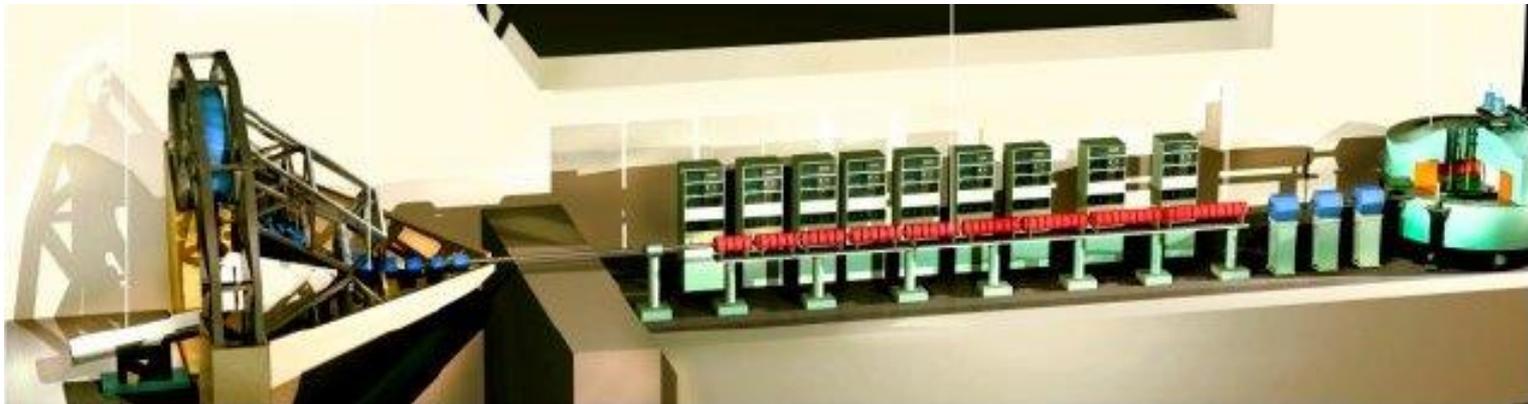


Доза облучения в зависимости от глубины в водяном фантоме для ионов  $^{20}\text{Ne}$  с энергией 670 МэВ/n



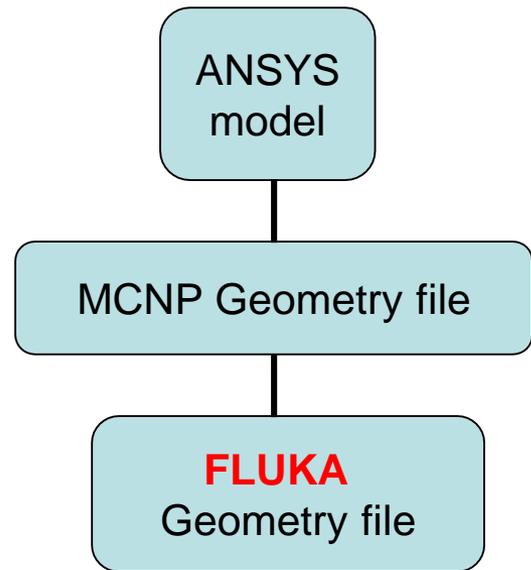
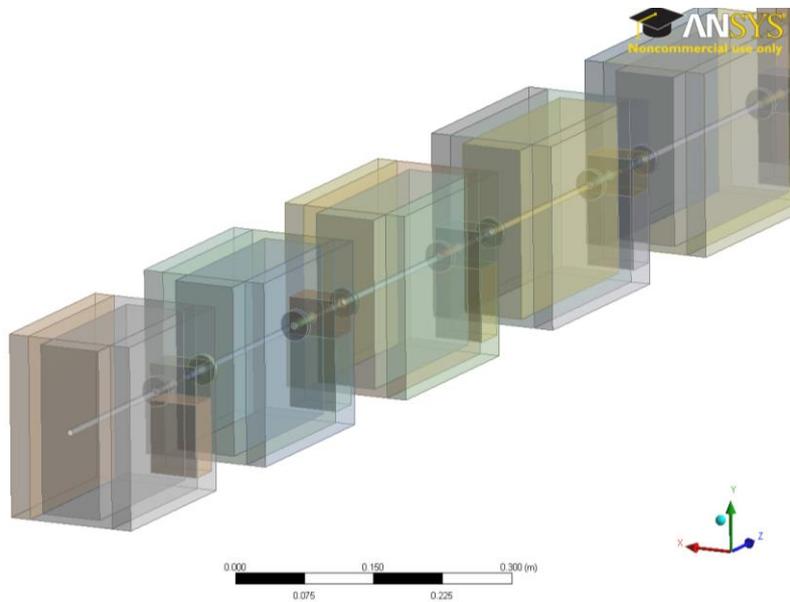
## 2. Cyclotron-linac combination for proton therapy

- Hospital in Biella, Italy
- Commercial high-current proton cyclotron — 30 MeV
- Linac-booster — 225 MeV,  $I = 1$  nA, (3 GHz frequency)
- Design of a compact shielding around Linac-booster



## ANSYS model for linac-booster

- Modular structure design: **30** modules (tanks) in the latest version
- RF cavities (**Cu + vacuum**)
- Quadrupoles (**Sm-Co** permanent magnets)
- Beam pipe (**Fe**)
- Two cooling plates on two opposite sides (**Cu** + circuits for **water** flow)

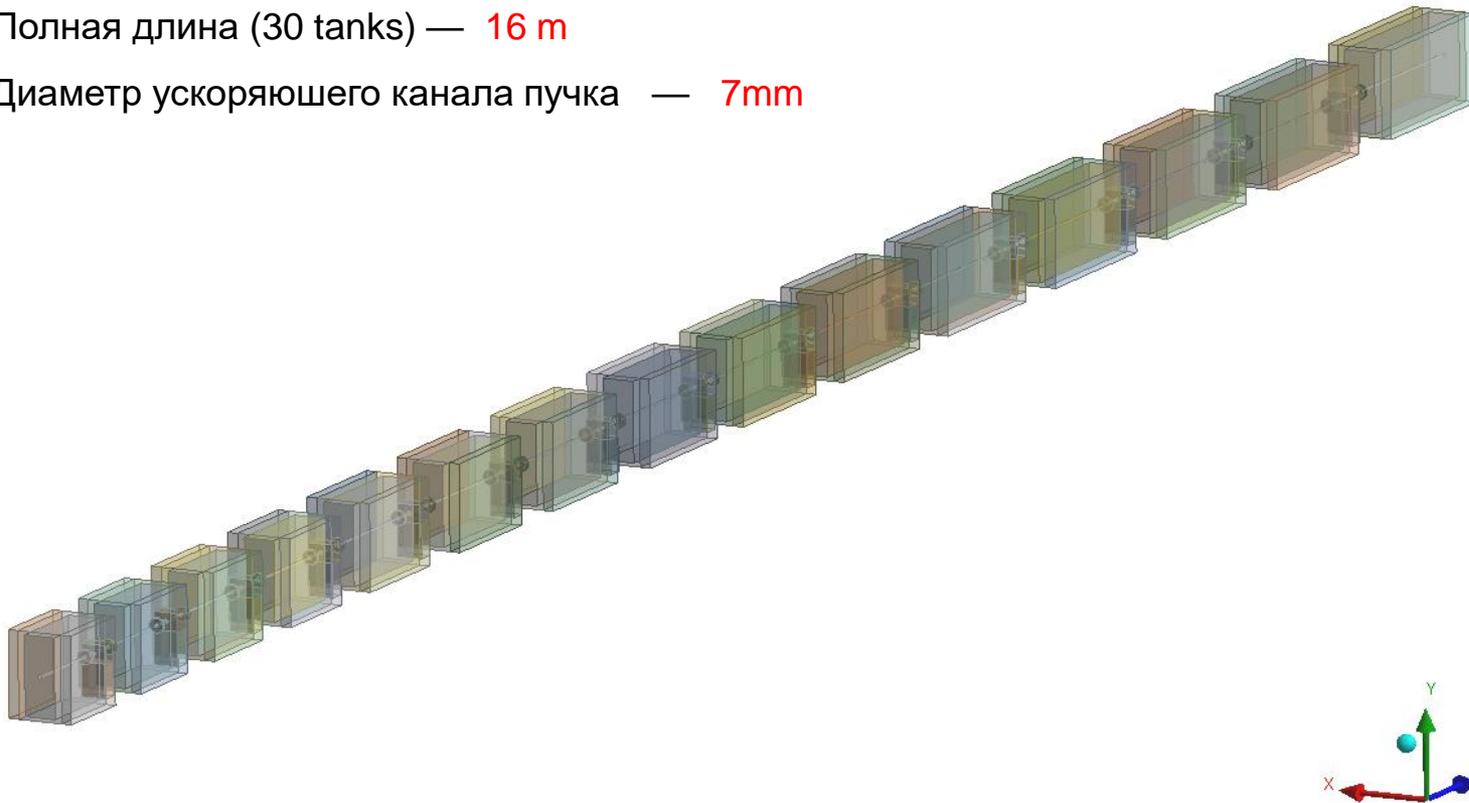


## ANSYS model for linac-booster (15 tanks)



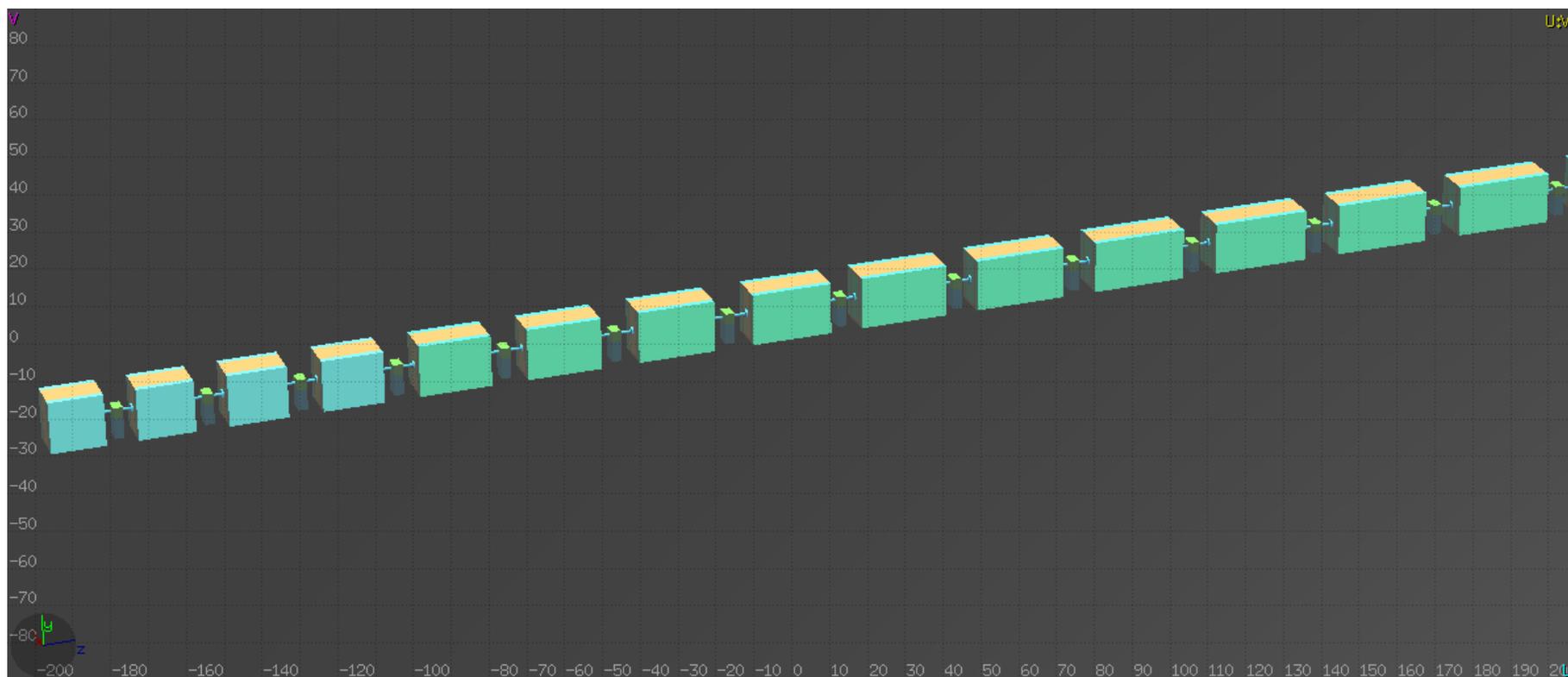
Полная длина (30 tanks) — 16 m

Диаметр ускоряющего канала пучка — 7mm



# FLUKA model for linac-booster

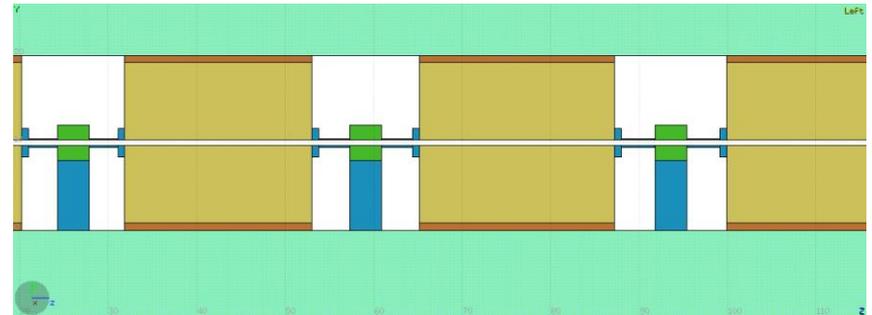
- First **14** tanks are shown



# FLUKA geometry model for a few tanks of the linac-booster

- 30 tanks of different length and materials
- Гало пучка с меняющимся профилем и энергией взаимодействует с элементами конструкции в 240 точках

Y



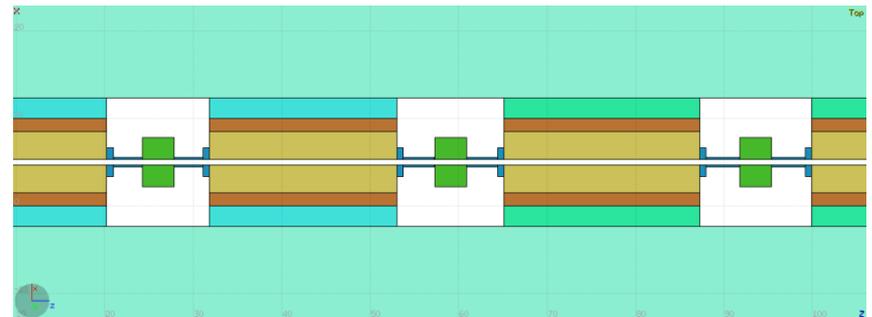
Z

## Четыре главных области взаимодействия

- 1 Коллиматоры
- 2 Квадруполи (Sm-Co)
- 3 Передняя плоскость резонатора
- 4 Канал пучка в резонаторе

X

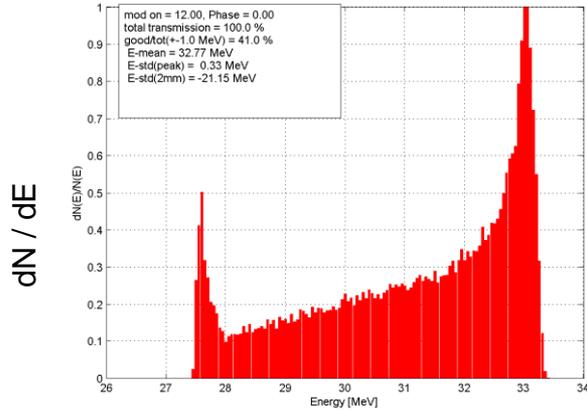
Beam



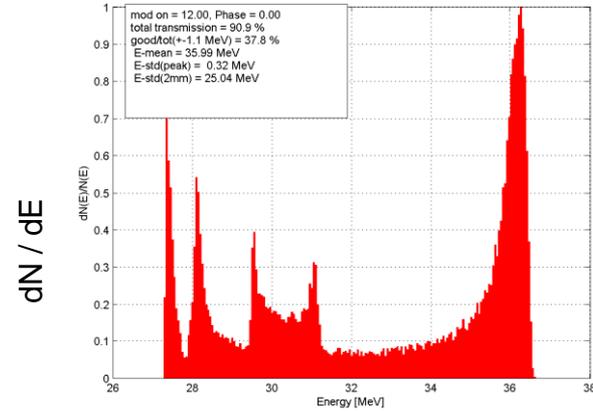
Z

Г.И. Смирнов

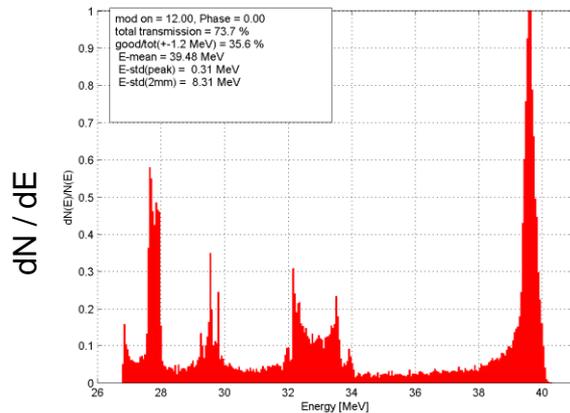
# Beam energy profile $E(N_t)$ in tanks 1 — 4 (Beam dynamics calculations)



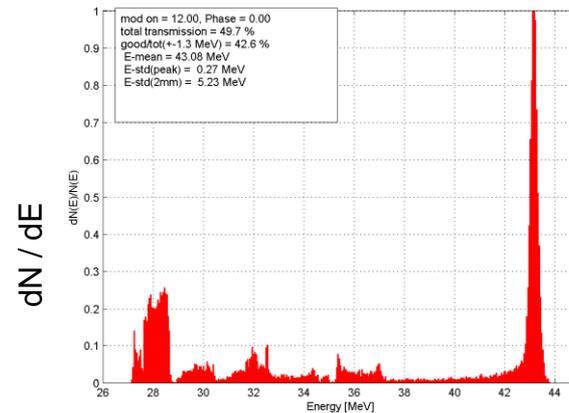
Beam energy (MeV)



Beam energy (MeV)

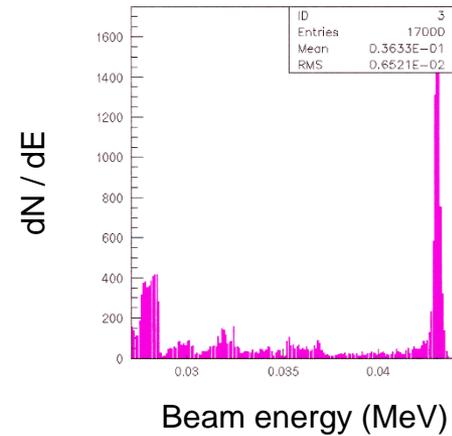
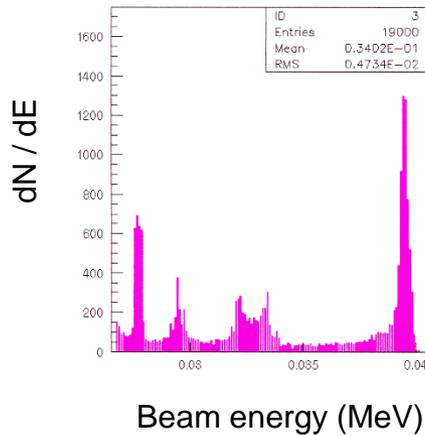
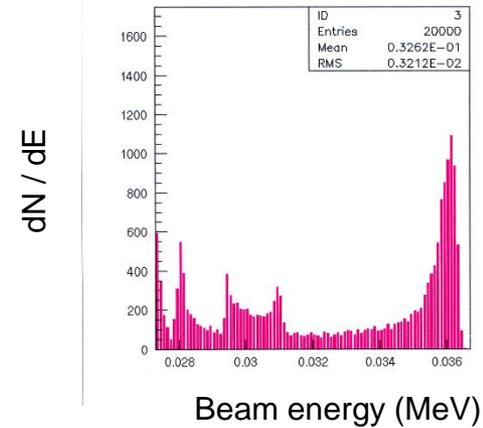
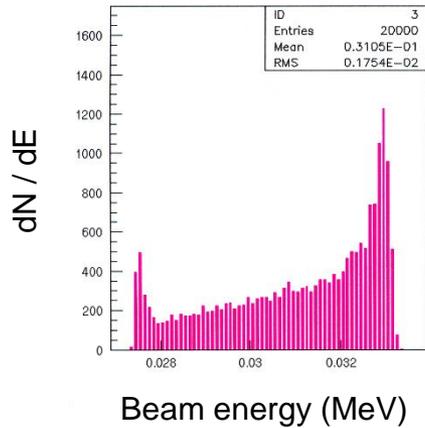


Beam energy (MeV)



Beam energy (MeV)

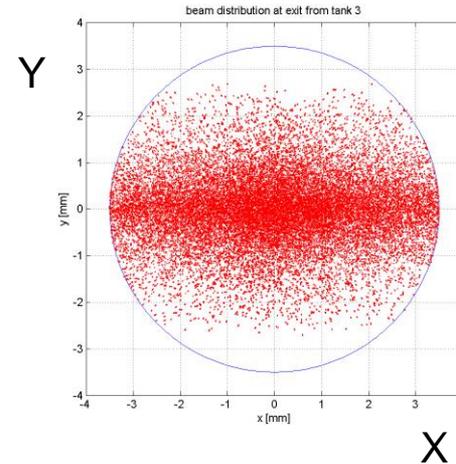
# Beam energy profile $E(N_t)$ in tanks 1 — 4 (FLUKA simulation)



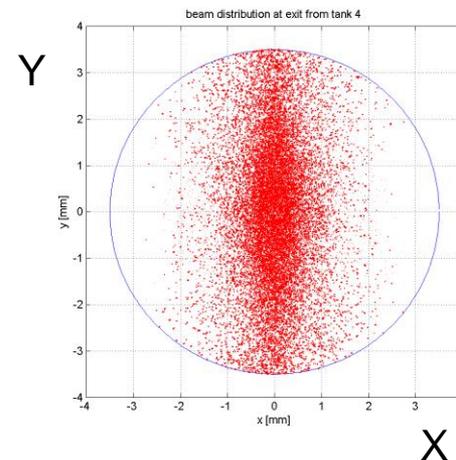
## Spatial beam distribution as a function of X, Y, Z

Профиль протонного пучка в канале  
диаметром 7 мм

- Poorly focused beam in the first 10 tanks causing beam loss
- Maximal losses in tank **3** (19.7%) and tank **4** (20.3%)
- Virtually no loss after tank 15

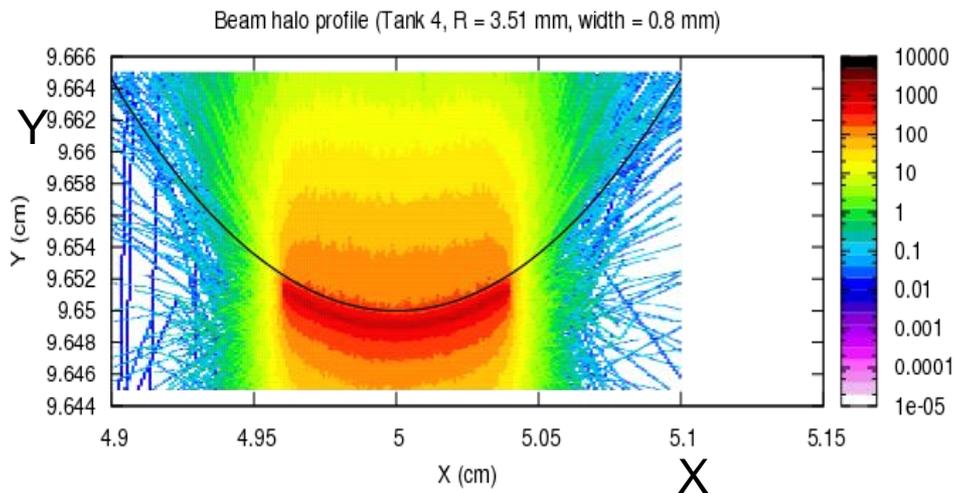


Tank **3**



Tank **4**

## Моделированный профиль пучка, потерянного в резонаторе (гало), и треки вторичных протонов



- **Beam halo as a non-divergent narrow two component beam:**  
 $\Delta\Theta = 0$   
 $\Delta R = 0$   
 $|R_x| = 3.5 \text{ mm}$  (odd tank number)  
 $|R_y| = 3.5 \text{ mm}$  (even tank number)
- **Inside each tank:**  
 $dN / dZ = \text{const}$   
 $\Delta Y = \text{const}$  (odd tank number)  
 $\Delta X = \text{const}$  (even tank number)

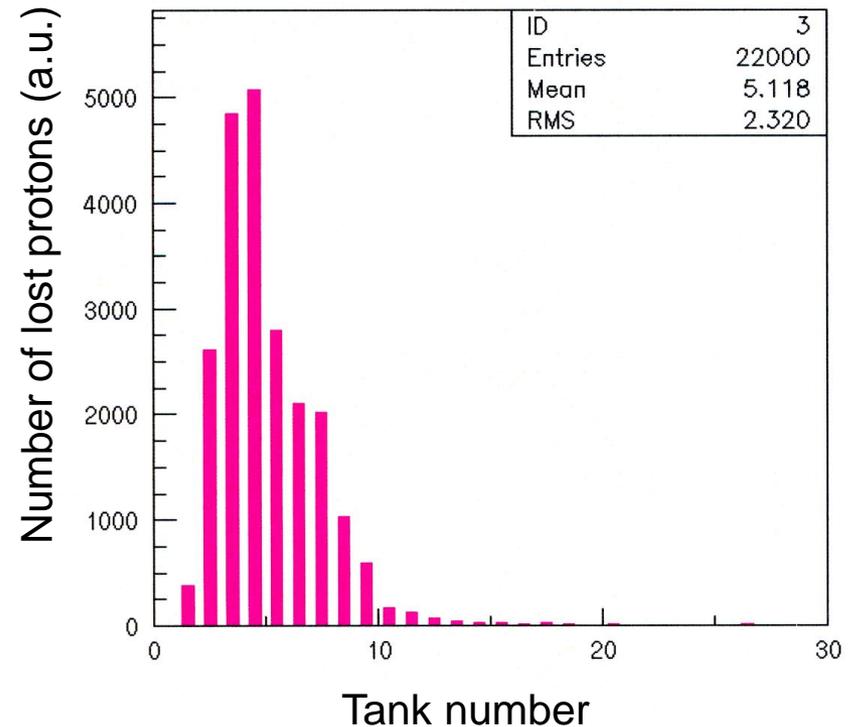
## Structure of beam losses as function of Z

Dynamics of beam losses simulated by Degiovani (TERA Foundation):

$$T_k + \sum_{i=1}^{30} L_i = 1, \quad i = 1, \dots, 30$$
$$k = 30$$

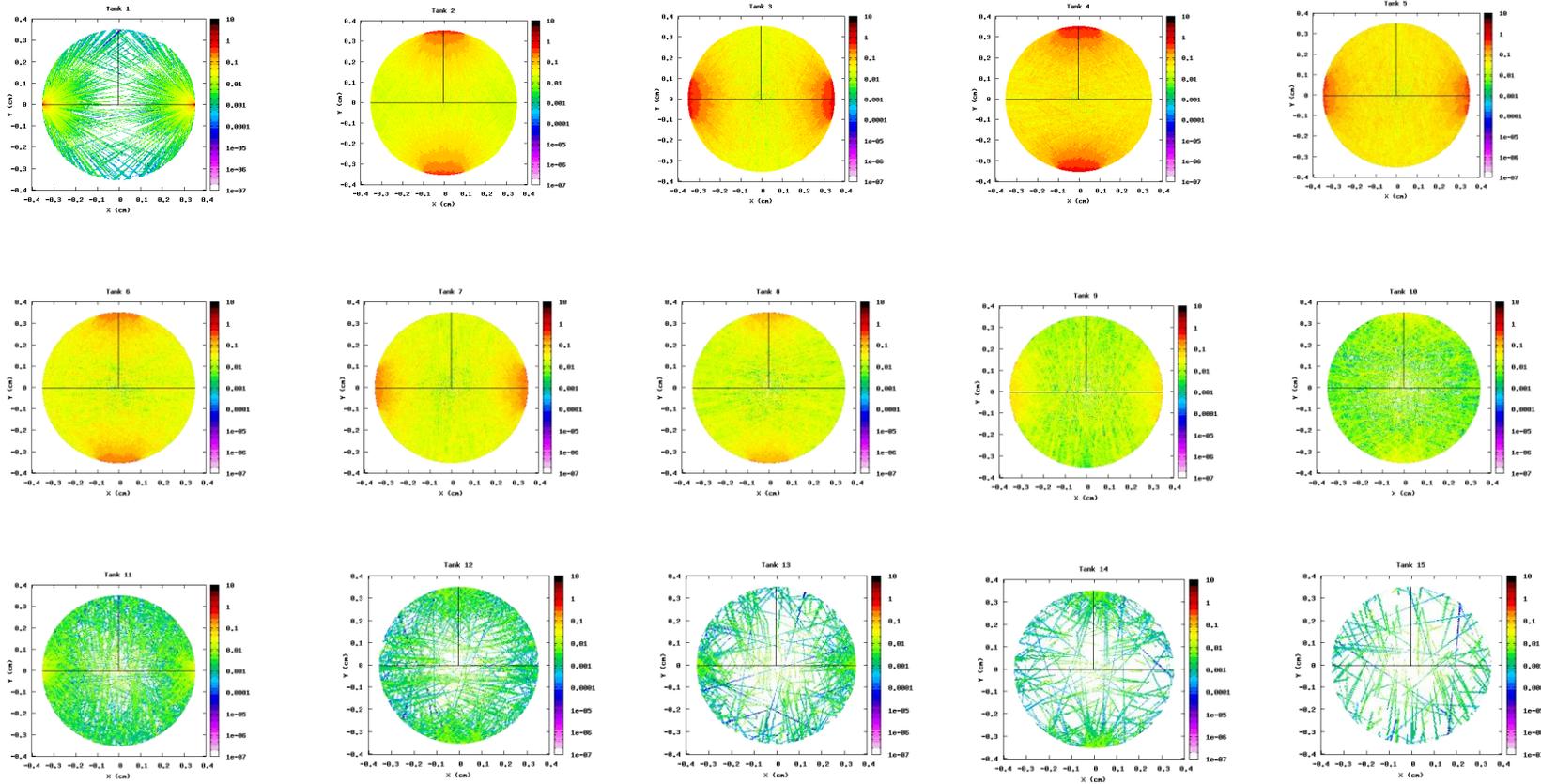
T – transmission

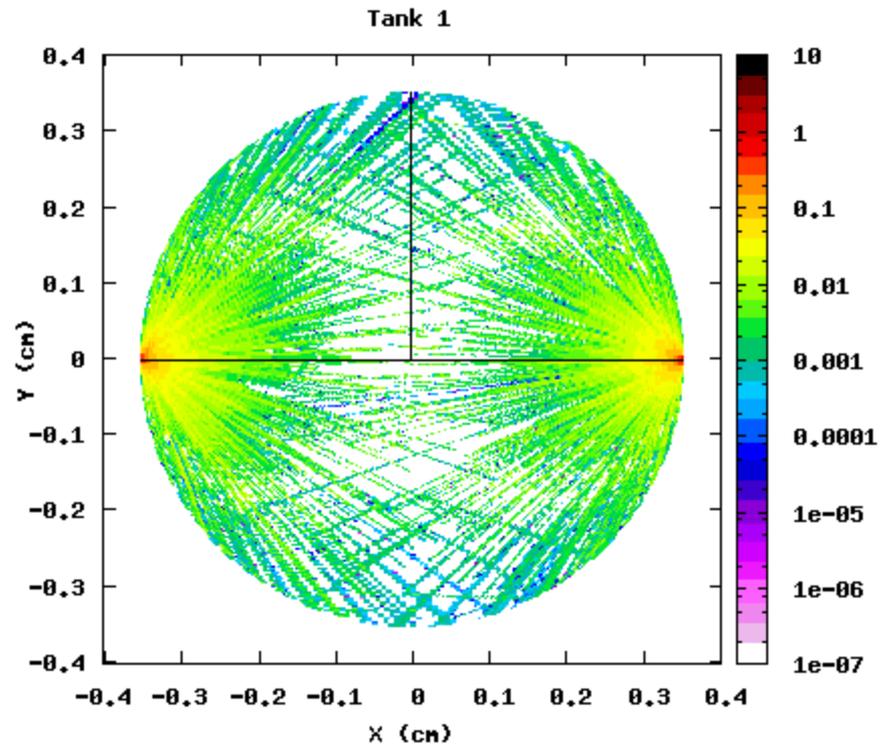
L – beam loss

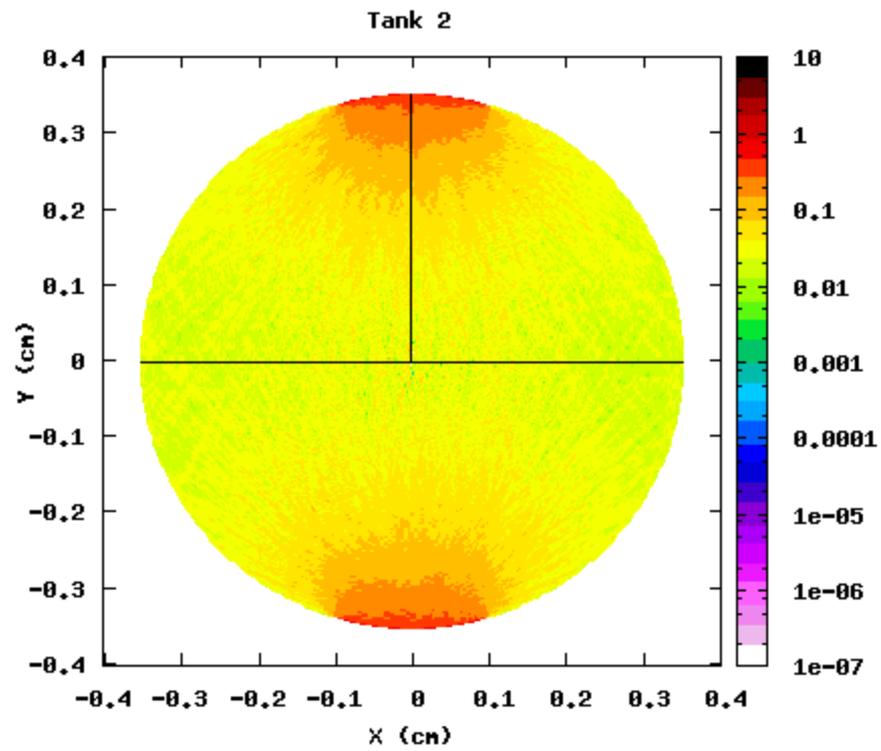


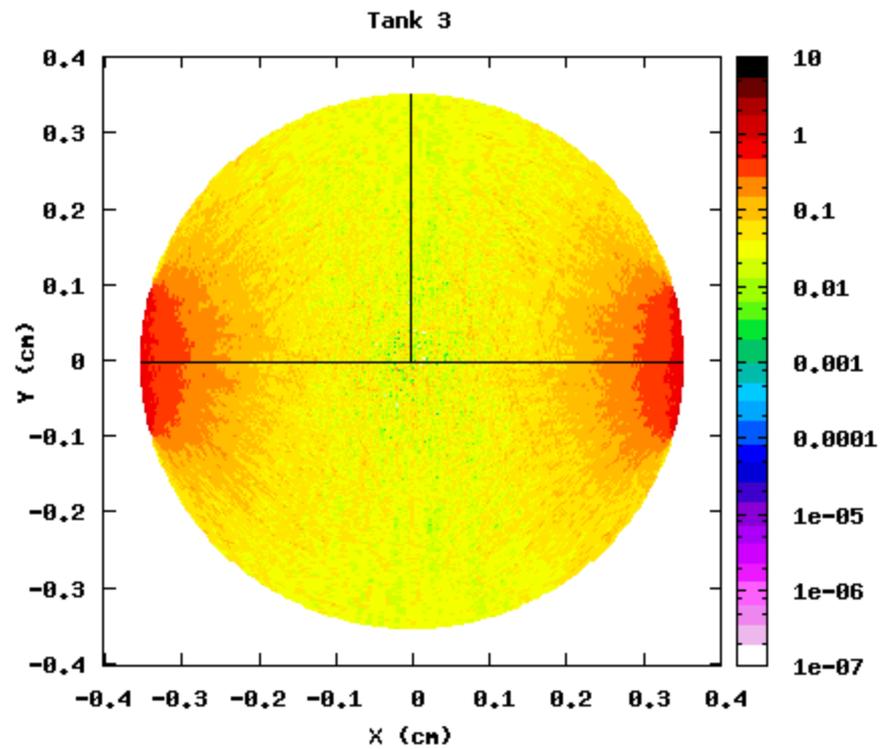
# Simulated beam interactions on the wall of the beam channel

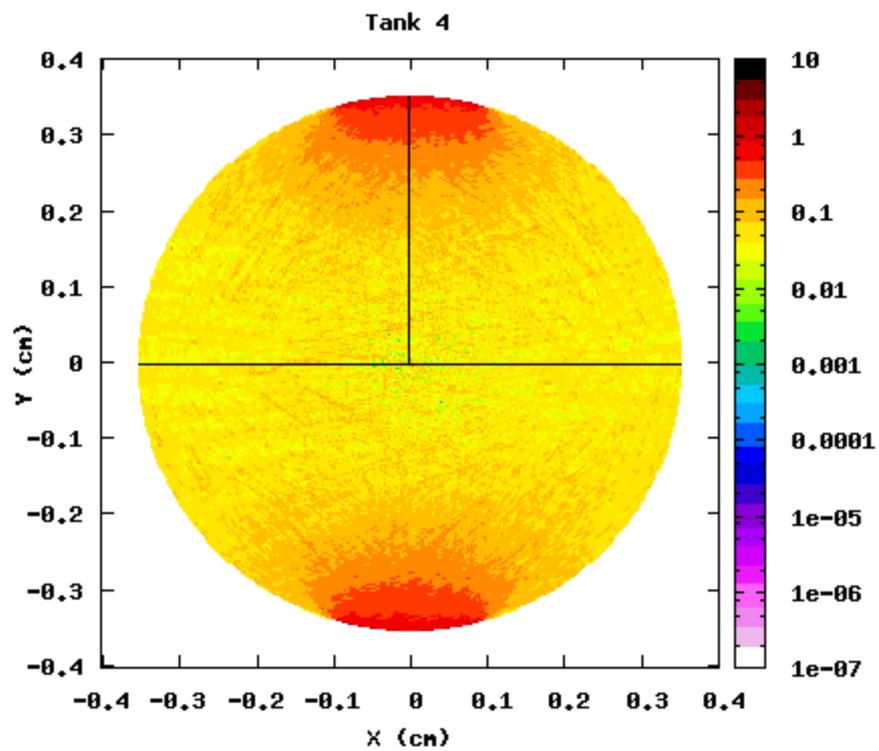
(density of primary and secondary protons inside the bore for each tank)







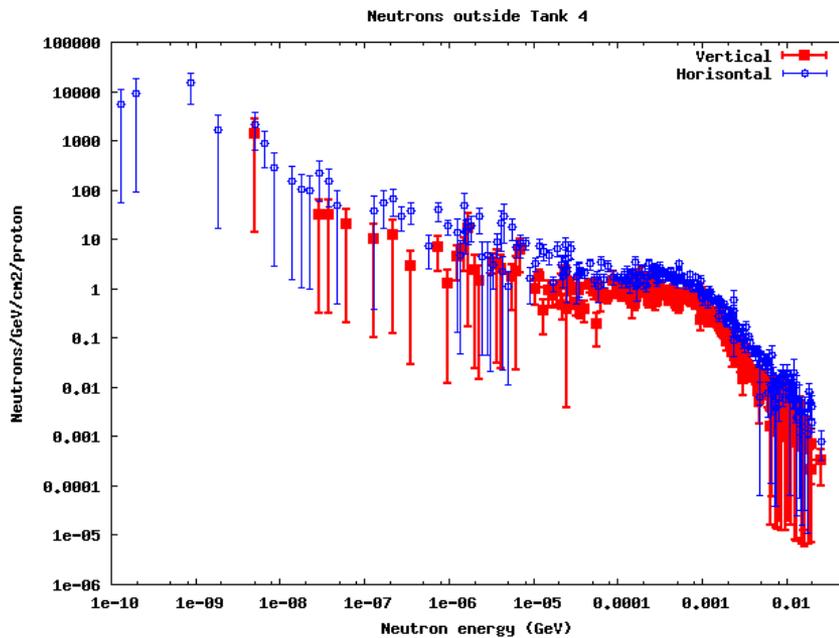




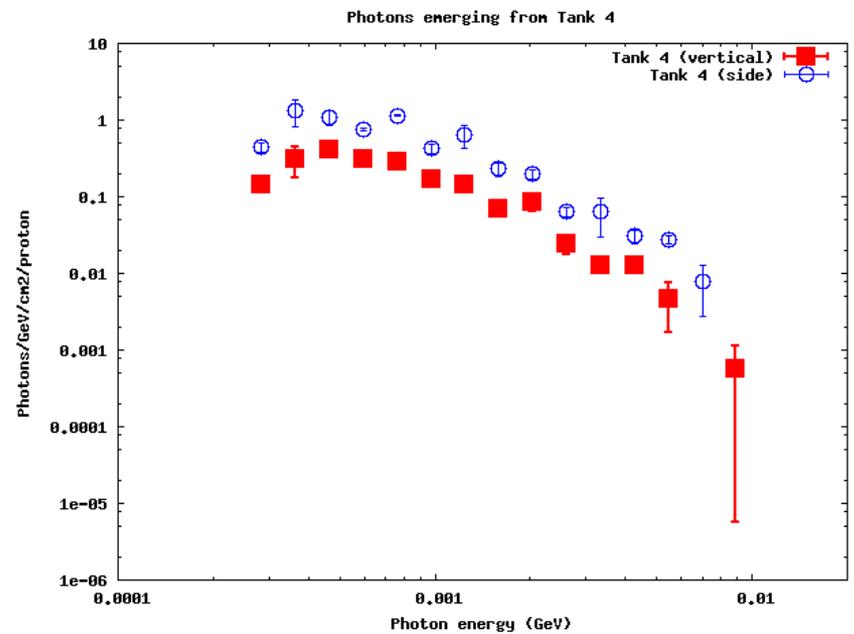
Семинар ЛФВЭ ОИЯИ

# Флюенс фотонов и нейтронов (Tank 4)

В горизонтальном направлении  
В вертикальном направлении

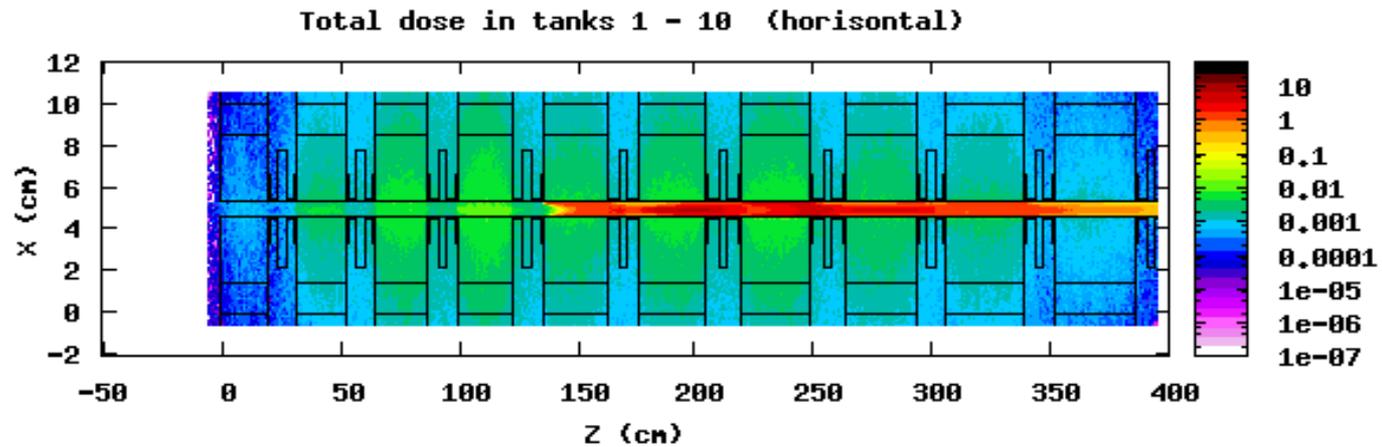


Neutron energy (GeV)



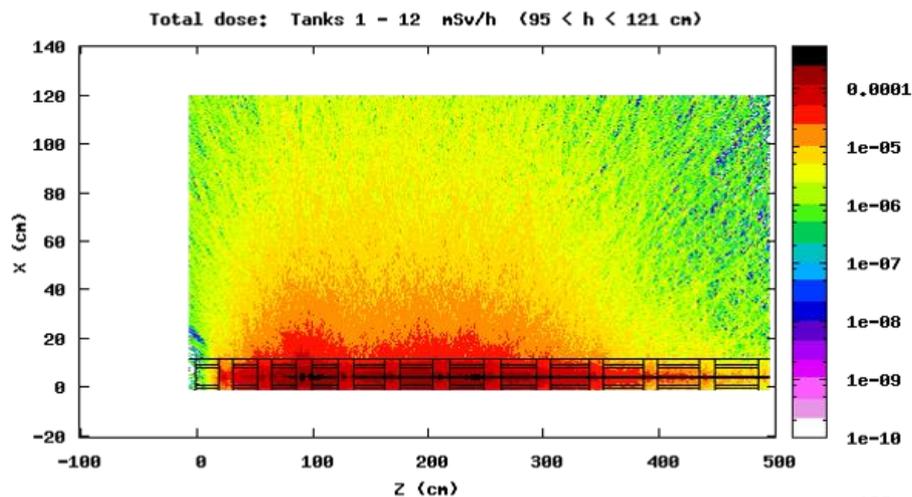
Photon energy (GeV)

# Dose evaluation



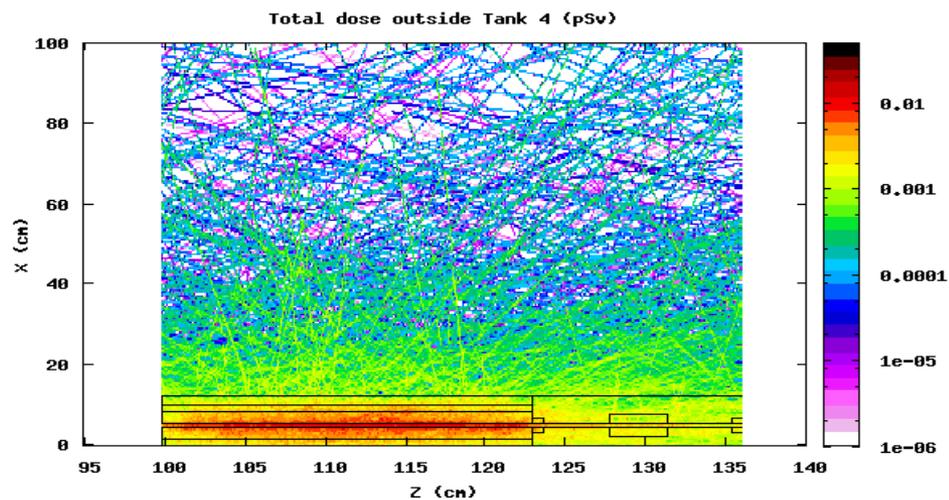
Conversion coefficients **AMB74** → pSv

# Расчет полной дозы в горизонтальной проекции



1.2 m away from tanks 1 – 10 (mSv/h)

1 m away from tank 4 (pSv/h)

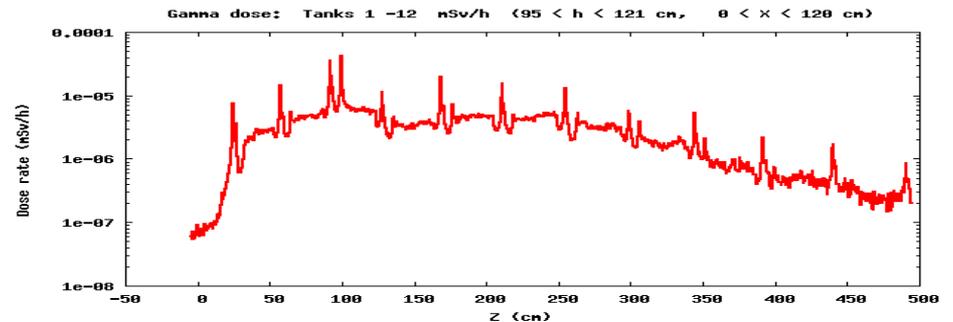
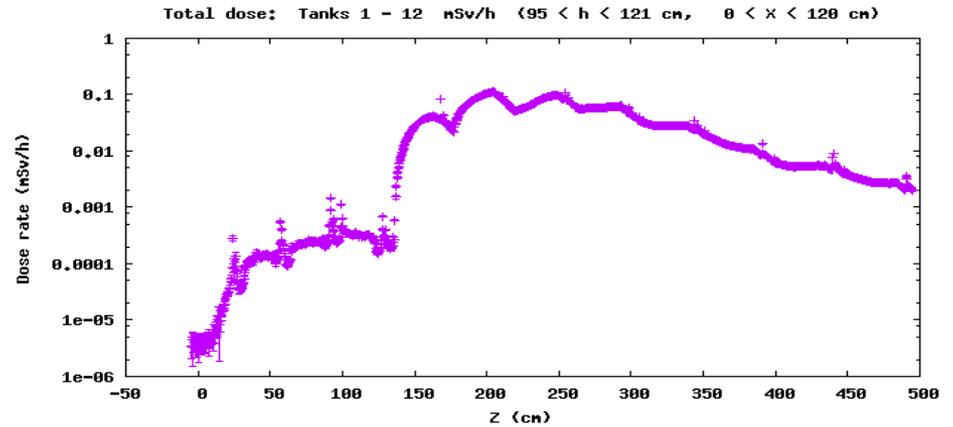


# Сравнение полной дозы облучения с дозой облучения гамма квантами

- Доза облучения на первых 5-и метрах вдоль линейного ускорителя протонов:

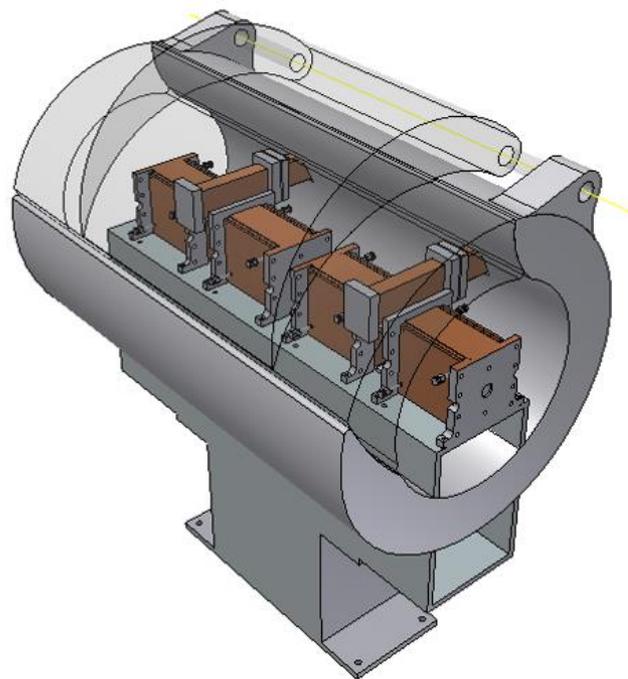
Вверху — полная доза (мЗв/час)

Внизу — доза гамма облучения (мЗв/час)



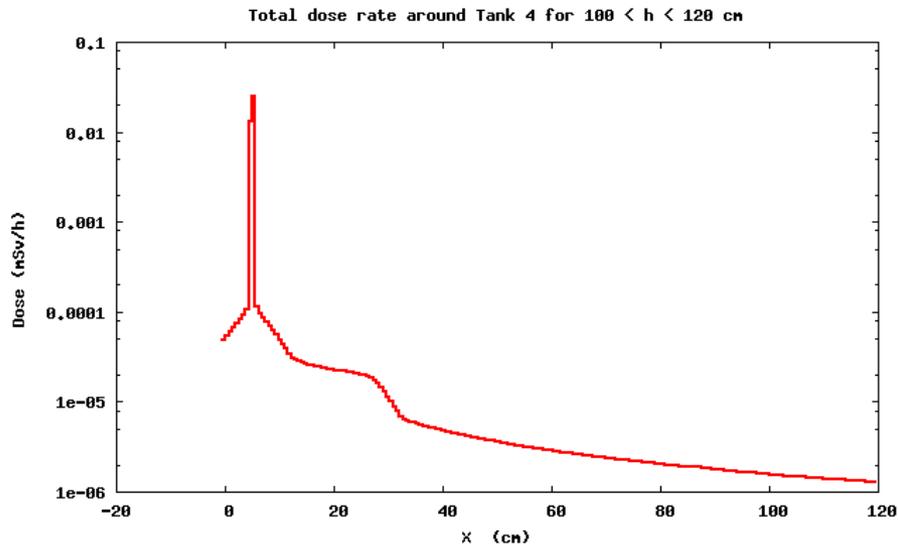
## Compact shielding

- Shielding material — **concrete**. If the wall thickness is **5 cm**, the dose rate at a distance of **1 m** decreases by a factor of about **3**.

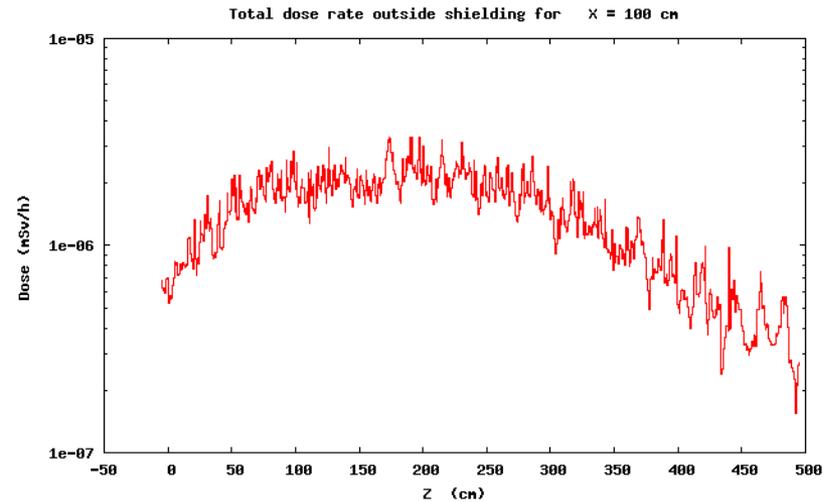


# Эффект компактной бетонной защиты

Интенсивность дозы вблизи TANK-4 как функция расстояния от оси пучка



Интенсивность дозы вдоль оси пучка на расстоянии 100 см от оси пучка



### 3. Ядерные и электромагнитные взаимодействия в столкновениях релятивистских ядер

Адронные взаимодействия ядер:  $0 < b < R_1 + R_2$

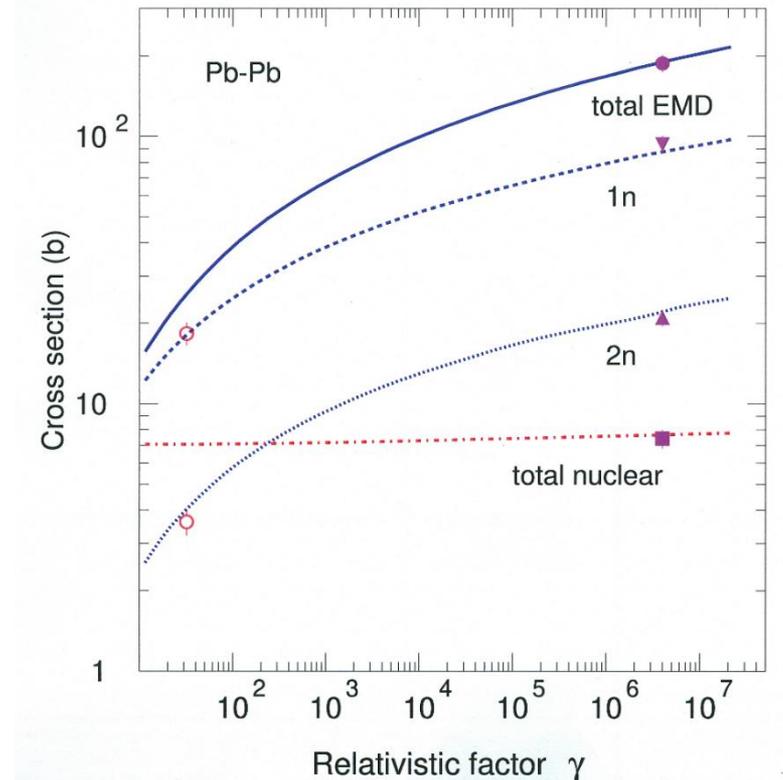
1. Грибов-Глаубер формализм — многократные столкновения
2. Дуальная партонная модель — рождение частиц
3. Концепция зоны формирования — транспорт вторичных частиц в ядре и вторичные взаимодействия в приближении обобщенного внутриядерного каскада
4. Экситонная модель предравновесного распада — термализация ядра

Электромагнитные взаимодействия ядер:  $b > R_1 + R_2$

Метод Вайцекера-Вильямса — представление Лоренц-трансформированных кулоновских полей ядер как поток виртуальных фотонов. Интегрирование спектров из баз данных фотоядерных реакций.

# Ионные пучки на Большом Адронном Коллайдере

- Сравнение расчетов сечений в моделях FLUKA с результатами экспериментов при энергии 158 ГэВ/н и экспериментов на установке ALICE (LHC) при энергии 2.75 + 2.75 ТэВ/н



# Ионные пучки низких энергий

HADRONIC AND ELECTROMAGNETIC ...

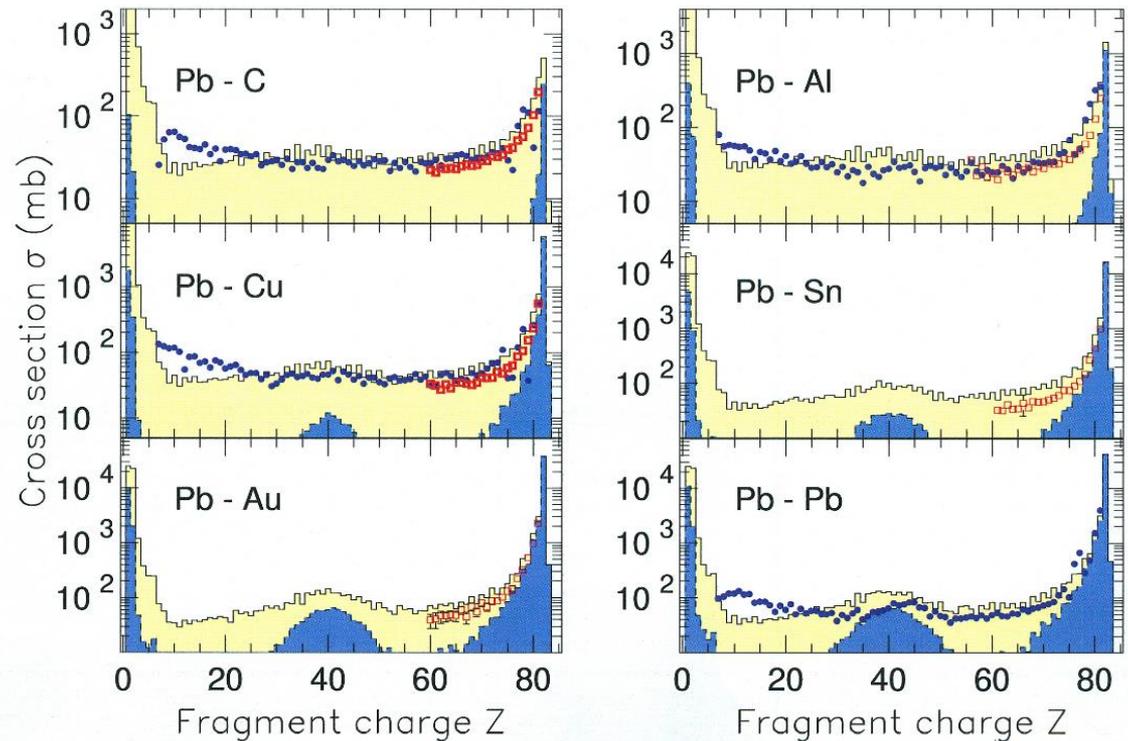
Phys. Rev. ST Accel. Beams **17**, 021006 (2014)

TABLE I. Cross sections of electromagnetic dissociation of the  $^{197}\text{Au}$  target with emission of one and two neutrons by low energy projectile ions.

Projectile Energy (GeV/n)	Beam ion	$\sigma_{1n}$ (b)		$\sigma_{2n}$ (b)		Experiment Reference
		FLUKA	Experiment	FLUKA	Experiment	
2.1	$^{12}\text{C}$	0.041	$0.075 \pm 0.014$	0.009	$0.009 \pm 0.017$	[45,49]
1.7	$^{20}\text{Ne}$	0.099	$0.151 \pm 0.013$	0.020	...	[47]
2.1	$^{20}\text{Ne}$	0.102	$0.153 \pm 0.018$	0.028	$0.049 \pm 0.014$	[45,49]
1.8	$^{40}\text{Ar}$	0.303	$0.348 \pm 0.034$	0.063	$0.076 \pm 0.018$	[45,49]
1.7	$^{56}\text{Fe}$	0.595	$0.601 \pm 0.054$	0.119	$0.073 \pm 0.013$	[45,49]
1.0	$^{86}\text{Kr}$	0.851	$0.820 \pm 0.062$	0.143	...	[47]
1.26	$^{139}\text{La}$	2.185	$1.97 \pm 0.13$	0.388	$0.335 \pm 0.049$	[49,50]
1.0	$^{197}\text{Au}$	3.528	$3.077 \pm 0.200$	0.573	$0.643 \pm 0.105$	[47]
9.89	$^{197}\text{Au}$	10.84	$8.99 \pm 0.53$	2.65	$2.32 \pm 0.27$	[51]
1.0	$^{209}\text{Bi}$	3.856	$3.244 \pm 0.205$	0.627	...	[47]
0.96	$^{238}\text{U}$	4.454	$3.16 \pm 0.23$	0.694	...	[46]

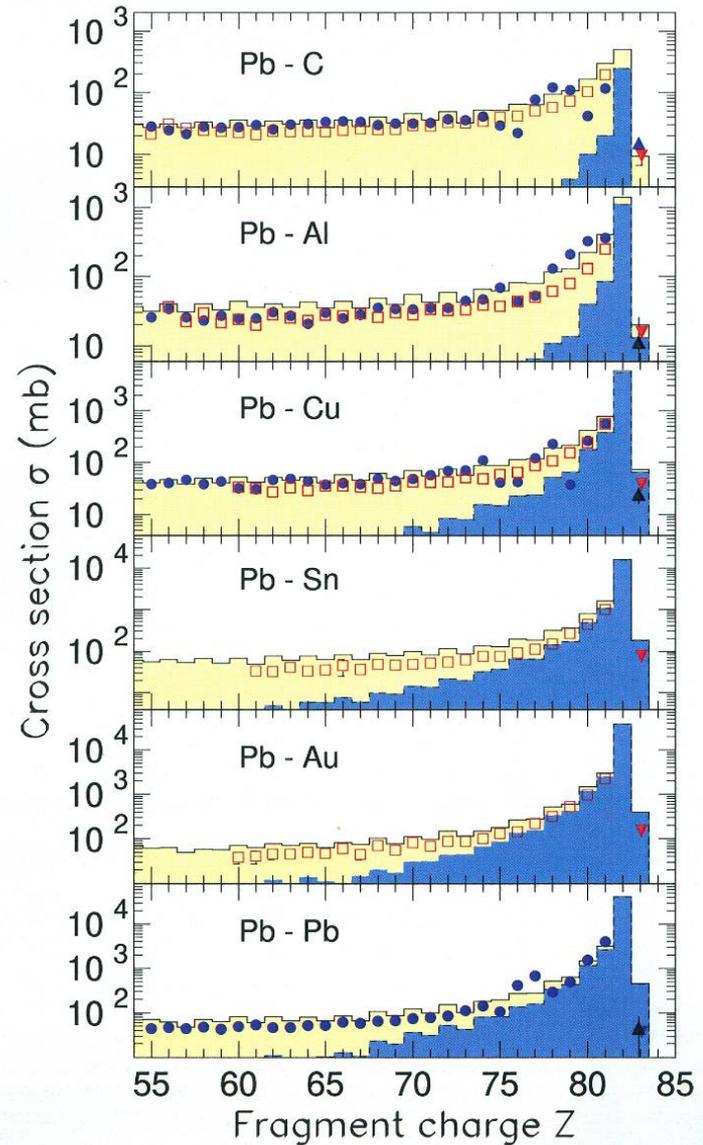
# Ядерные фрагменты в реакциях пучка Pb с энергией 158 ГэВ/н с различными ядрами

Спектры фрагментов ядер как функция  $Z$ , образованных в ядерных реакциях (желтая гистограмма) и в процессах электромагнитной диссоциации ядер (синяя гистограмма)



# Тяжелые ядерные фрагменты

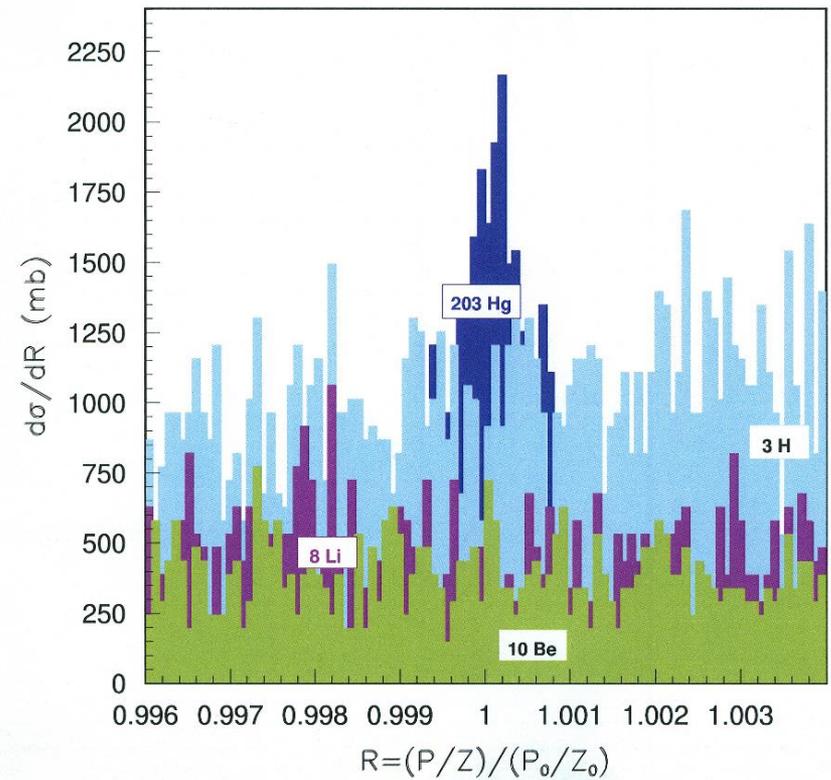
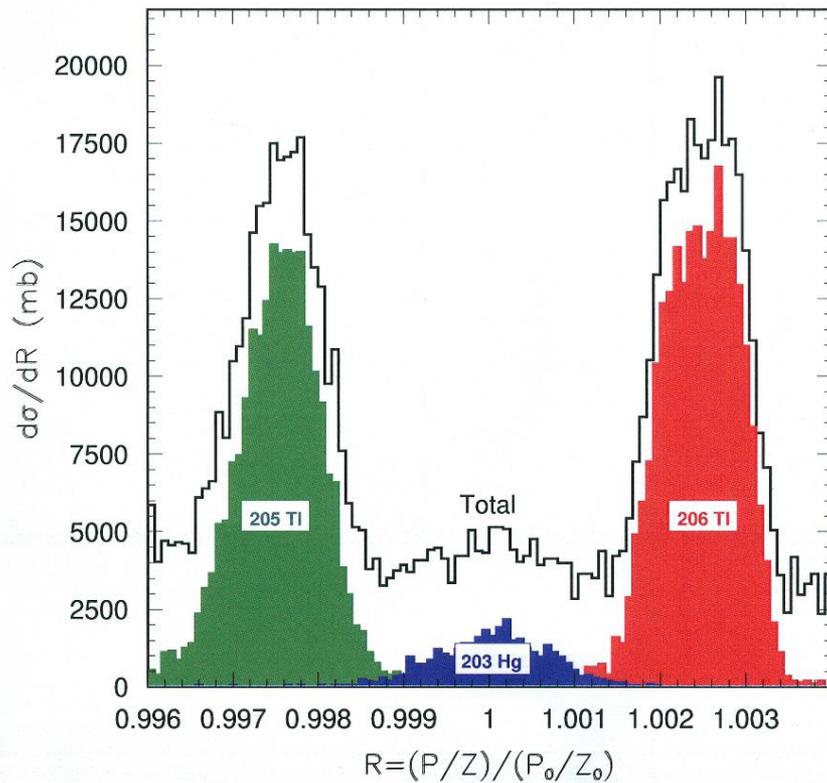
- Спектры фрагментов с большим зарядом  $Z$
- Желтый – ядерные реакции
- Синий — реакции электромагнитной диссоциации



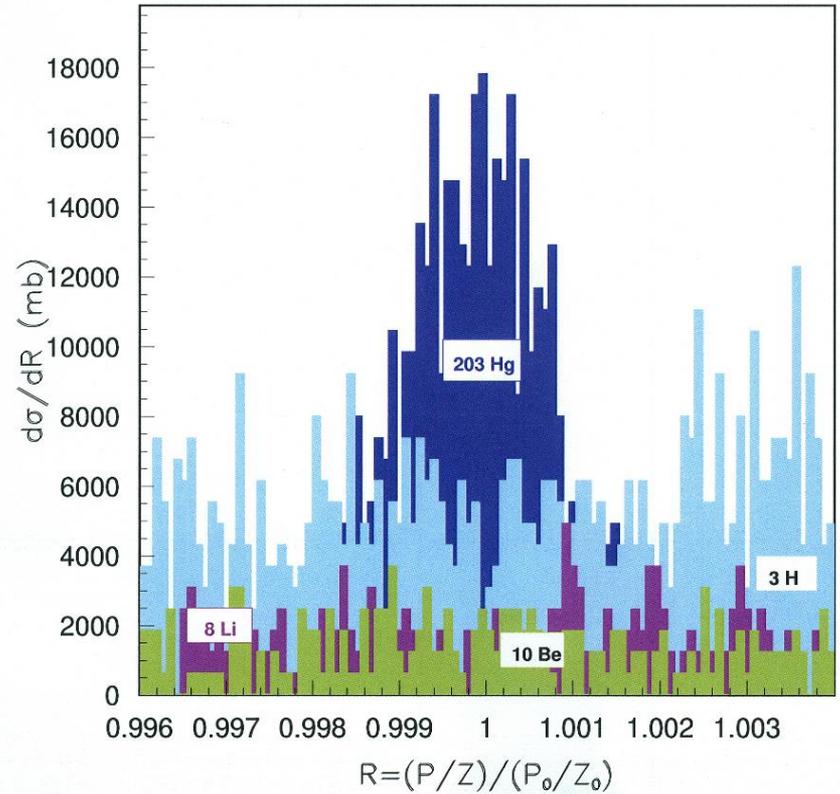
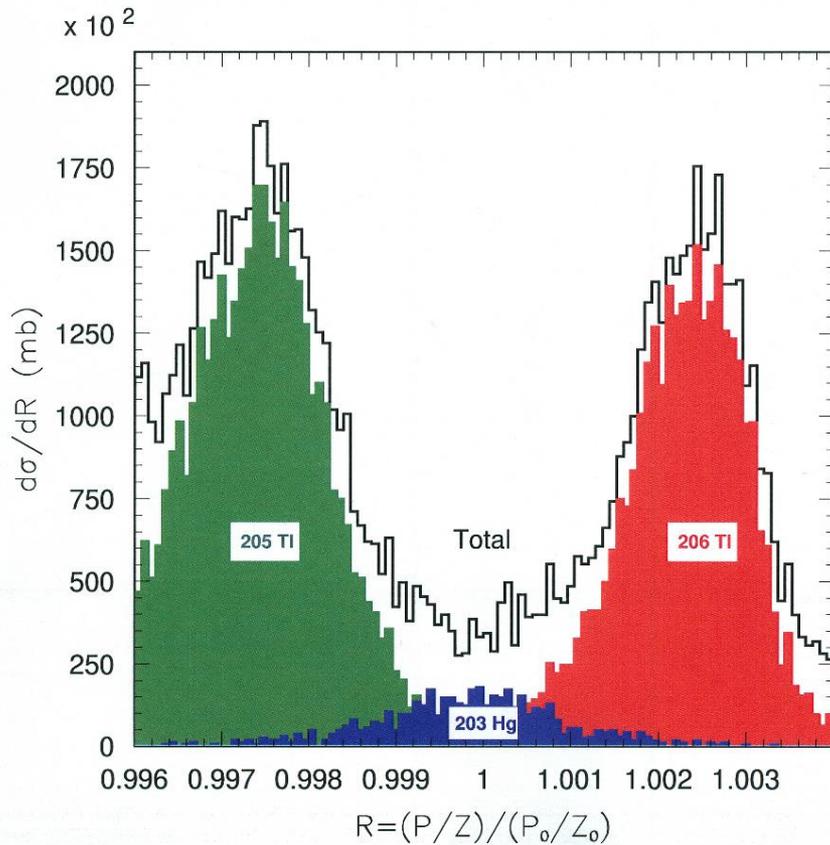
# LHC 7 TeV Pb beam on $^{12}\text{C}$ target

Сечения образования фрагментов ядер пучка в зависимости от относительной жесткости фрагментов

$$B\rho = p/Z$$



# LHC 7 TeV Pb beam on $^{184}\text{W}$ target



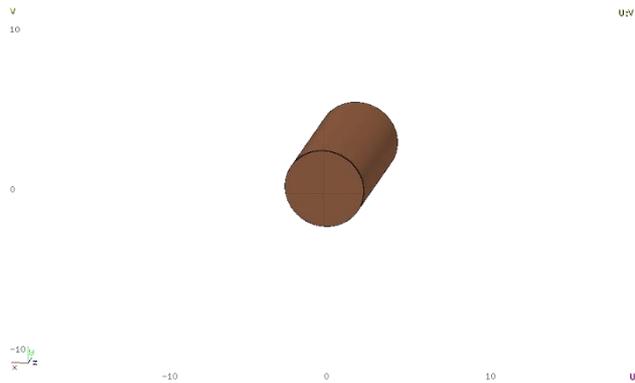
## 4. Потери пучка в бустере НИКА

Гало пучка  $^{197}\text{Au}^{31+}$  инициирует ядерные реакции на скреперах, создавая сильный фон нейтронов. Темп потерь приведен в Таблице

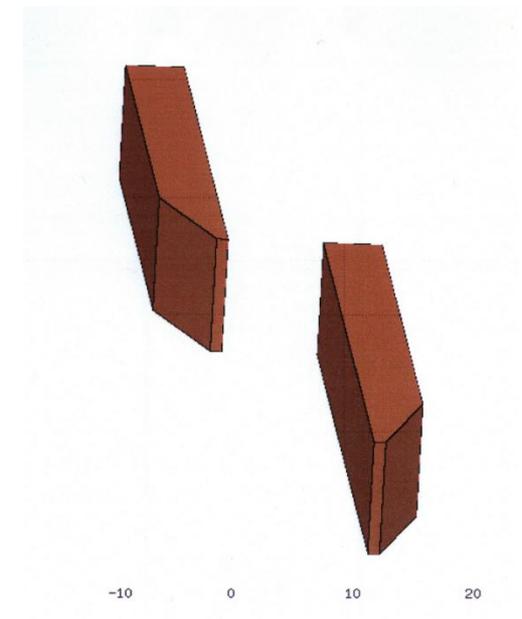
	Источник потерь	Нач. энергия ГэВ/н	Кон. энергия ГэВ/н	Нач. интен.	Конеч. интен.	Суммар. потери	Где происходят	Распределение по энергии
1	Коллайдер	4,5	4,5	$2 \cdot 10^9$	0			
2	Каналы транспортировки и вывод из Нуклотрона	4,5	4,5	$2,11 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^9$	$1,1 \cdot 10^8$ (5%)	локально и равномерно по каналу	4,5 ГэВ/н
3	Ускорение в кольце Нуклотрона	0,572	4,5	$2,22 \cdot 10^9$	$2,11 \cdot 10^9$	$1,1 \cdot 10^8$ (5%)	равномерно по кольцу	равномерно 0,572 - 4,5 ГэВ/н
4	Инжекция в Нуклотрон из бустера	0,572	0,572	$2,25 \cdot 10^9$	$2,22 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^7$ (1%)	локально	0,572 ГэВ/н
5	Обдирка пучка	0,578	0,572	$2,81 \cdot 10^9$	$2,25 \cdot 10^9$	$5,6 \cdot 10^8$ (20%)	локально в ловушке	0,578 ГэВ/н
6	Ускорение в кольце бустера	0,065	0,578	$3,12 \cdot 10^9$	$2,81 \cdot 10^9$	$3,1 \cdot 10^8$ (10%)	локально и равномерно по кольцу	равномерно 0,065-0,578 ГэВ/н
7	Рекомбинация ионов в СЭО	0,065	0,065	$3,9 \cdot 10^9$	$3,12 \cdot 10^9$	$7,8 \cdot 10^8$ (20%)	локально	0,065 ГэВ/н
9	Начальный этап ускорения в бустере	0,0032	0,065	$4,11 \cdot 10^9$	$3,9 \cdot 10^9$	$2,1 \cdot 10^8$ (5%)	равномерно по кольцу	равномерно 0,0032-0,065 ГэВ/н
10	Инжекция в Бустер	0,0032	0,0032	$5,48 \cdot 10^9$	$4,11 \cdot 10^9$	$1,37 \cdot 10^9$ (25%)	локально	0,0032 ГэВ/н
11	Канал NiLAC-Бустер	0,0032	0,0032	$5,77 \cdot 10^9$	$5,48 \cdot 10^9$	$2,96 \cdot 10^8$ (5%)	равномерно по каналу	0,0032 ГэВ/н

## Две модели генерации потерь пучка

Цилиндр из железа  $L = 10$  см и  $D = 5$  см в качестве эквивалента набора скреперов

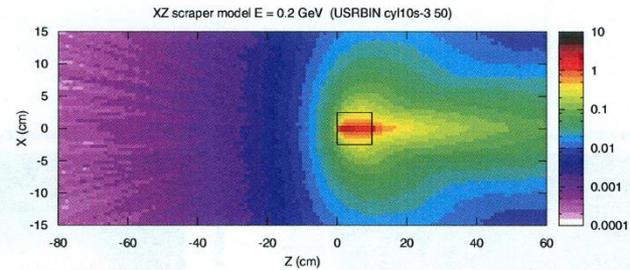


Два скрепера  $L \times H \times D = 40 \times 8 \times 5$  см<sup>3</sup> и  $60 \times 8 \times 5$  см<sup>3</sup>, предложенные в проекте Бустера

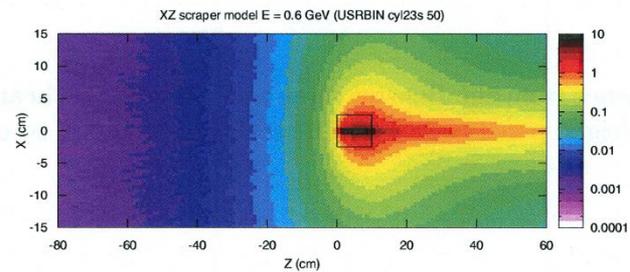


# Замена скреперов цилиндрической мишенью: Флюенс нейтронов в плоскости XZ

$E = 0.2 \text{ GeV}/n$



$E = 0.6 \text{ GeV}/n$



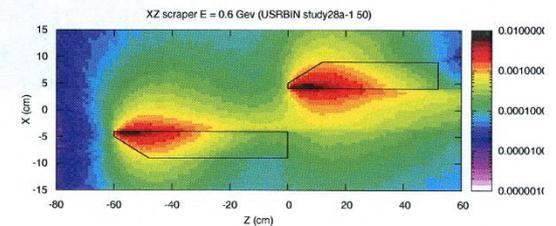
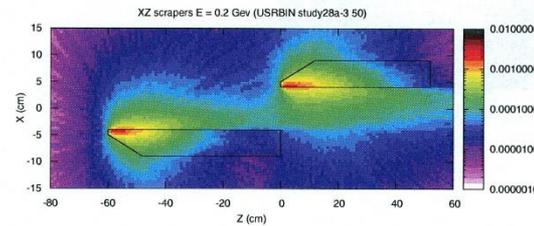
# Две модели взаимодействия пучка со скрепером

## Флюенс нейтронов в плоскости XZ

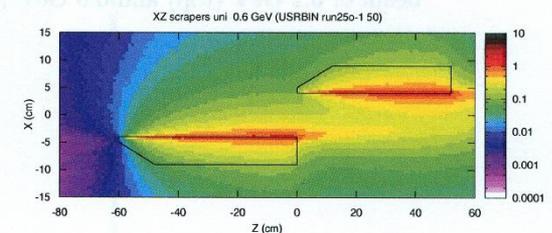
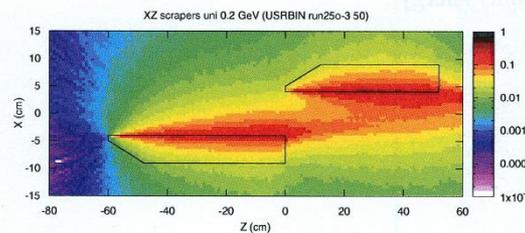
$E = 0.2 \text{ GeV/n}$

$E = 0.6 \text{ GeV/n}$

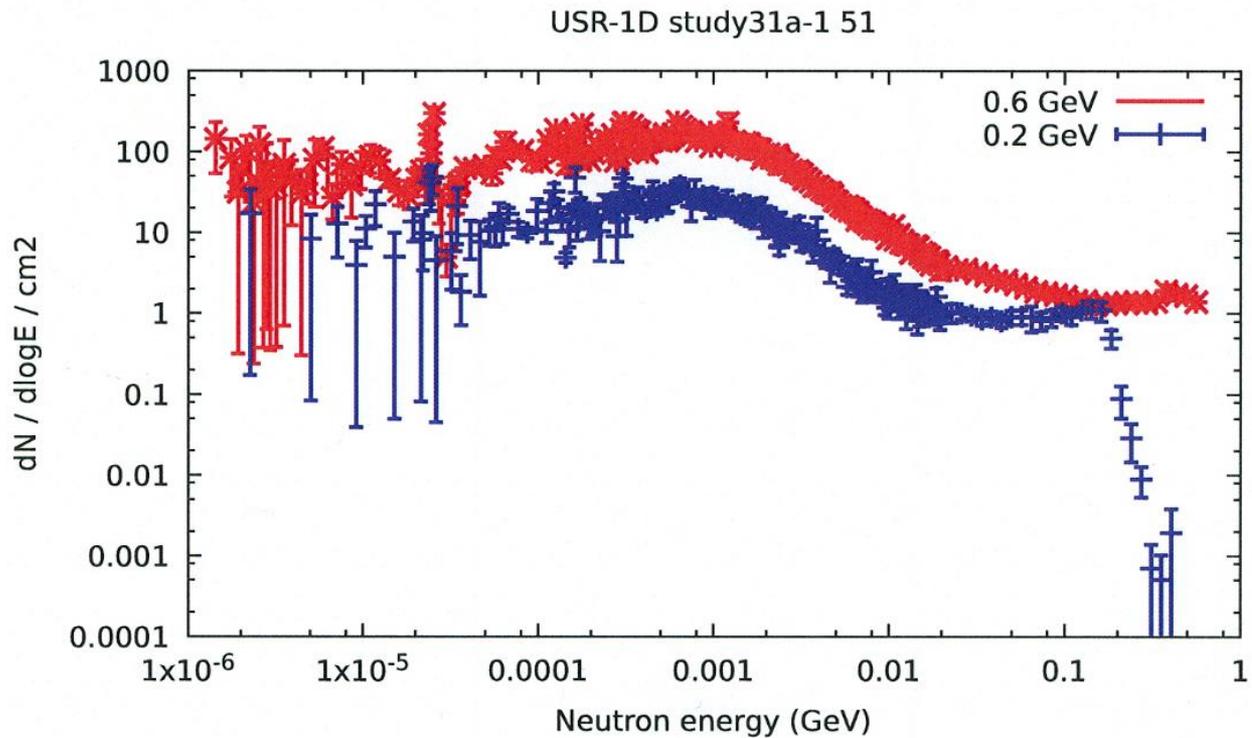
- **Вверху** – взаимодействие гало пучка в передней части скрепера



- **Внизу** – взаимодействие двух компонент пучка по всей длине скрепера



# Флюенс нейтронов как функция энергии

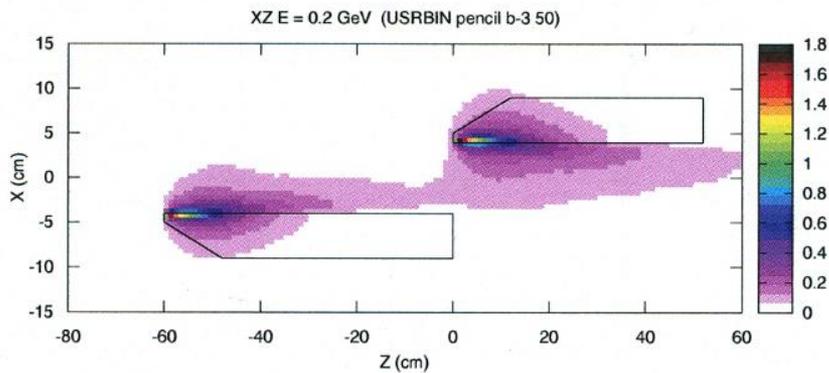


Флюенс нейтронов в пересчете на один ион  $^{197}\text{Au}^{31+}$

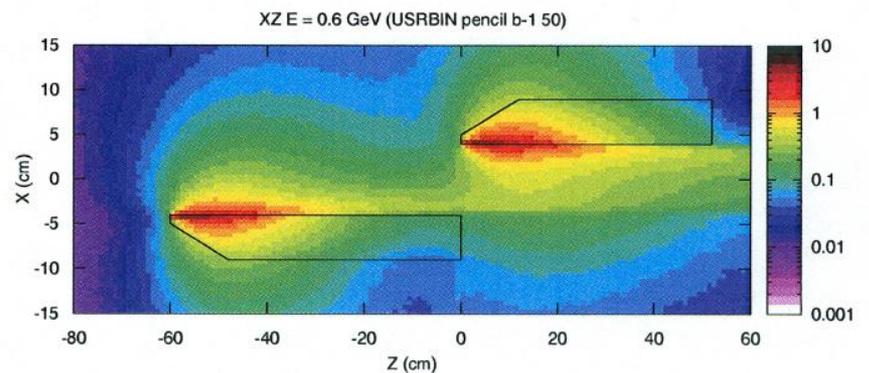
## Модель №3: Точечный пучок

Флюенс нейтронов генерированных  
взаимодействием точечного пучка

$E = 0.2 \text{ GeV/n}$

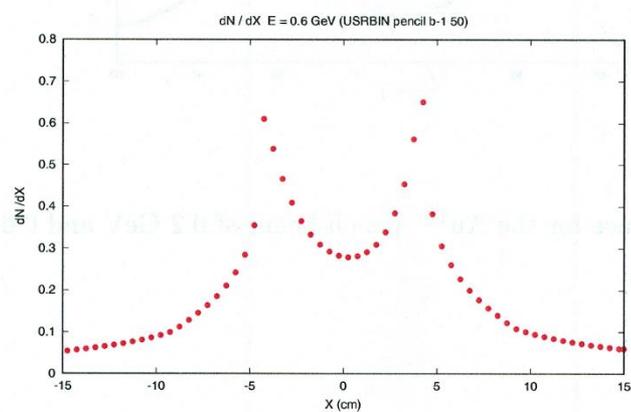
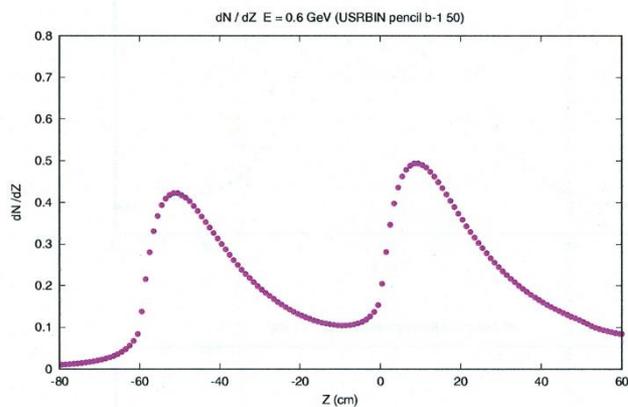
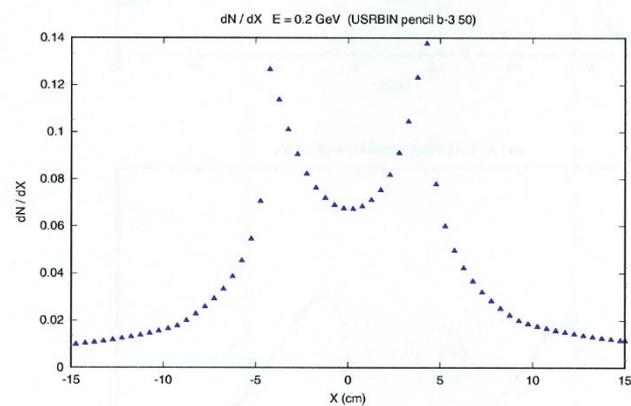
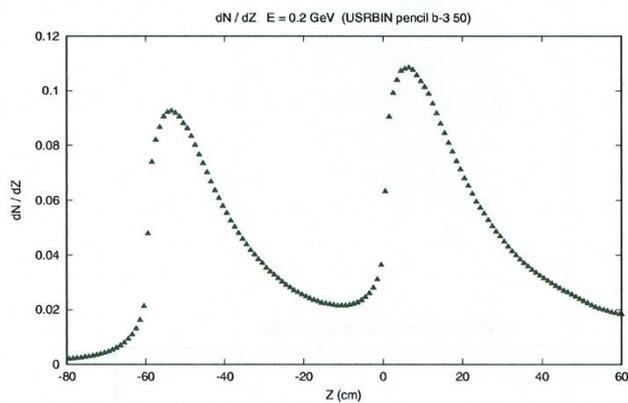


$E = 0.6 \text{ GeV/n}$



# Модель точечного пучка

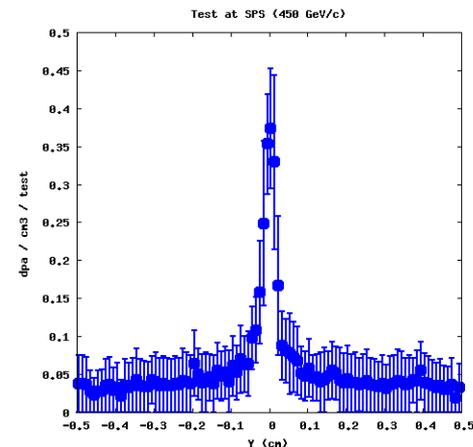
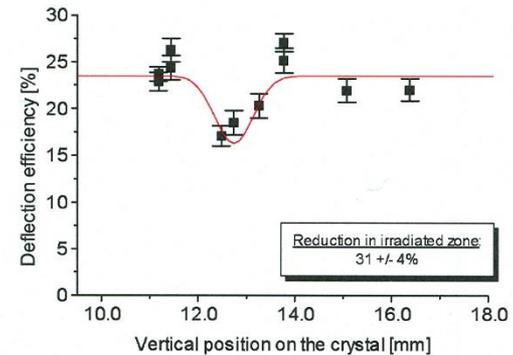
Флюенс нейтронов в плоскости как функция  $Z$  (слева) и  $X$  (справа)



## 5. Радиационные повреждения (смещение атомов)

- **Si crystal** -- **1x10x50 mm<sup>3</sup>** was successfully used as bent crystal to deflect **450 GeV/c** protons from CERN SPS in 1991 to produce parallel **K<sub>0</sub><sup>L</sup>** and **K<sub>0</sub><sup>S</sup>** beams. In 1992 the crystal was tested by irradiating in the T6 target station of the SPS by protons during a full year.
- **FLUKA** simulated this experiment by using scoring binnings **20x200x100 mkm<sup>3</sup>** demonstrating that maximum damage corresponded to **0.4 dpa/cm<sup>3</sup>/test**.

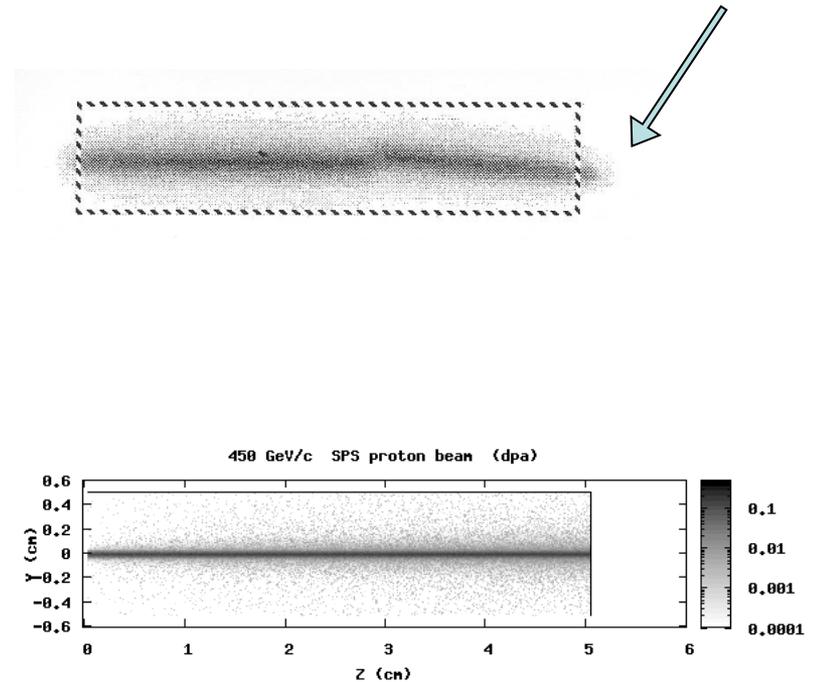
Оценка темпа ухудшения отклоняющей способности кристалла:  $C_d = 77.5\% / \text{dpa} / \text{cm}^3$



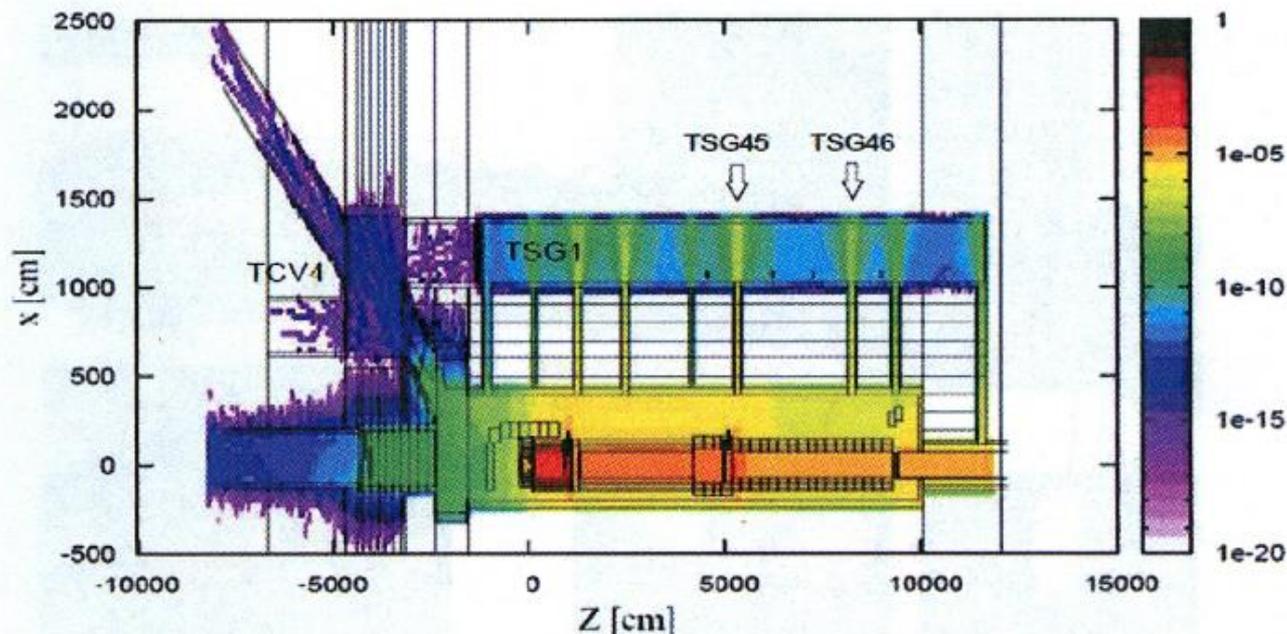
## Визуализация повреждений Si кристалла

- X-ray picture of NA48 crystal taken **TWO** years after exposure in the SPS beam (crystal has been broken)
- Beam area:  $0.24 \text{ mm}^2$
- Flux:  $2.4 \cdot 10^{20} \text{ p/cm}^2$
  
- **FLUKA** simulation of the NA48 crystal in the SPS beam by scoring in the bins  $50 \times 50 \times 100 \text{ mkm}^3$

Effect of radiography smearing



## Радиационные повреждения электроники



Галерея TGS4  
Интенсивность дозы  
0.2 — 30 Gy/неделю

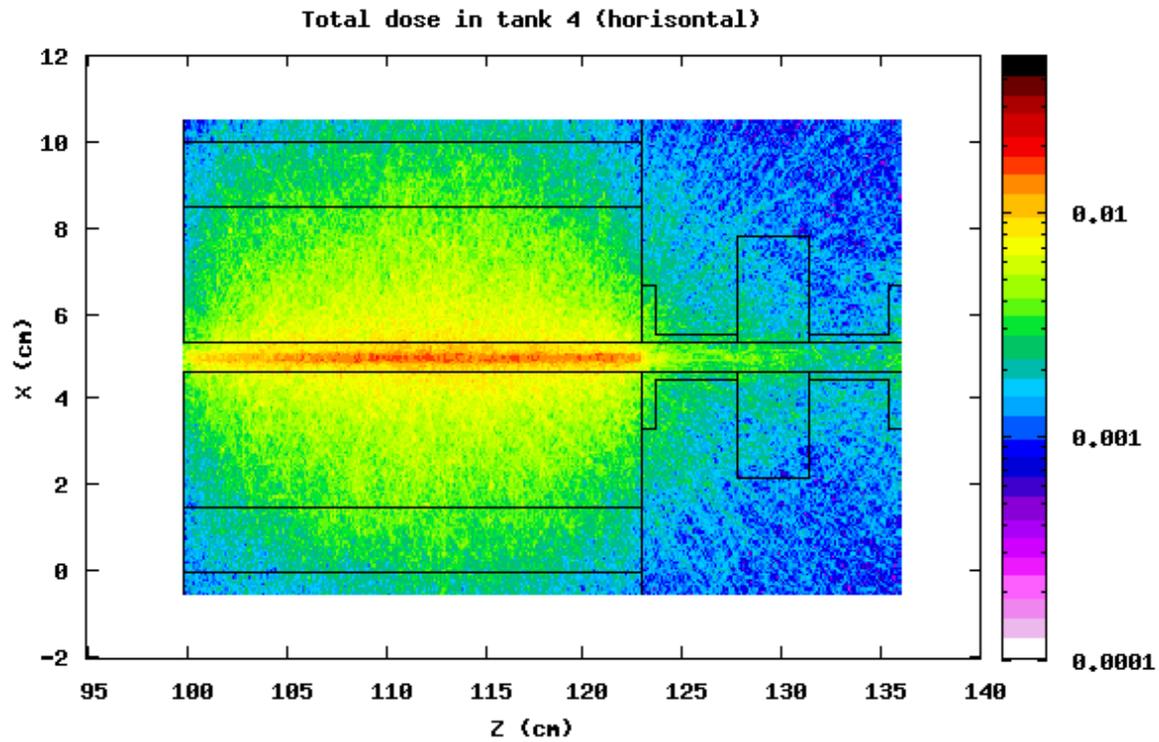
Новое место для  
электроники:  
Галерея TCV4 с  
дополнительной  
бетонной защитой

Флюенс высокоэнергетичных адронов ( $E > 20$  MeV) в канале нейтринного пучка CNGS нормированный на один протон с первичной энергией 400 ГэВ (графитовая мишень)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

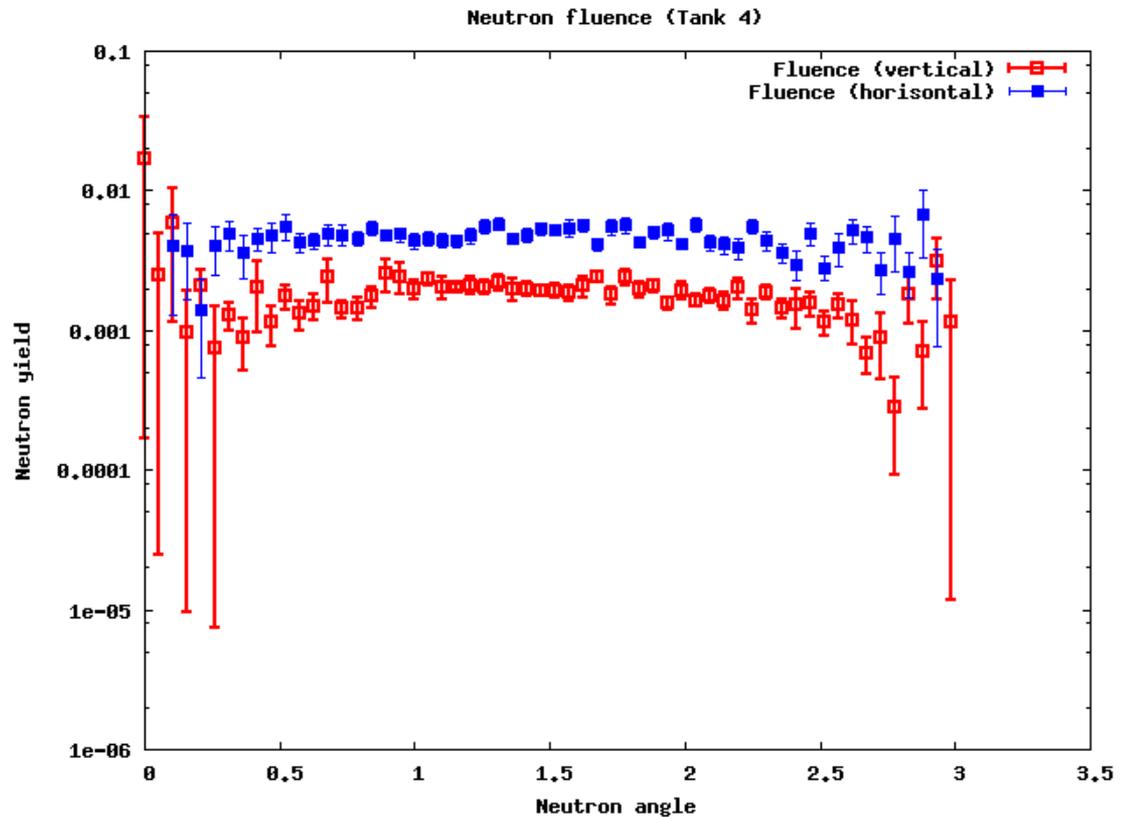
1. Пакет программ **FLUKA** использует модели, каждая из которых сверена с экспериментальными данными. Несмотря на некоторую свободу, предоставленную пользователям в выборе физических моделей и исходных параметров, пакет гарантирует получение согласующихся результатов для разных пользователей.
2. Система программ **FLUKA** проверена как в специальных тестовых экспериментах, так и в первых наборах данных на коллайдере БАК в ЦЕРН.
3. Пакет **FLUKA** используется во всех исследованиях радиационных повреждений электроники, применяющейся на коллайдере БАК.
4. Развита новая методика для генерирования геометрии **FLUKA** начиная с чертежей в системе программ **ANSYS**, проверенная на моделировании 30 модулей линейного ускорителя протонов.

# Расчет полной дозы в горизонтальной проекции (tank 4)



# Angular distribution of outgoing neutrons (outside of tank 4)

Nearly uniform distributions both in horizontal (blue) and vertical (red) directions



# Fluence outside

