

Государственный научный центр  
Российской Федерации  
Институт физики высоких энергий  
(г.Протвино Московской обл.)

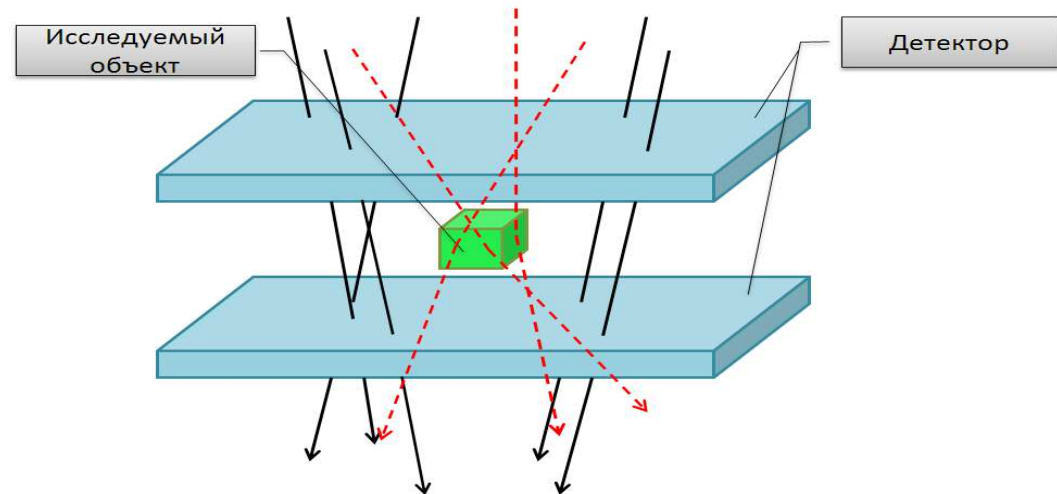
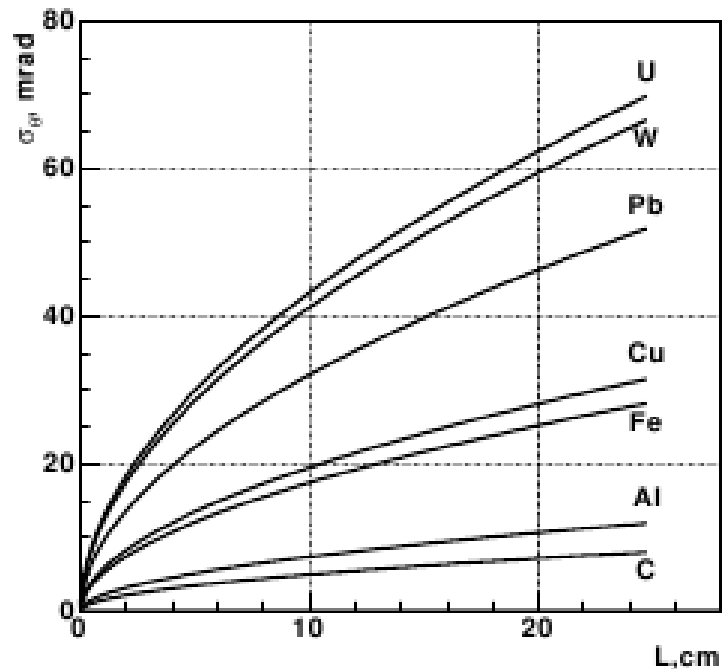
А.А.Борисов, М.Ю.Боголюбский, Н.И.Божко, А.Н.Исаев, А.С.Кожин, А.В.Козелов,  
И.С.Плотников, В.А.Сенько, М.М.Солдатов, Р.М.Фахрутдинов, Н.А.Шаланда,  
О.П.Ющенко, В.И.Якимчук

# Исследование и разработка методики мюонной томографии на космическом излучении в ГНЦ ИФВЭ

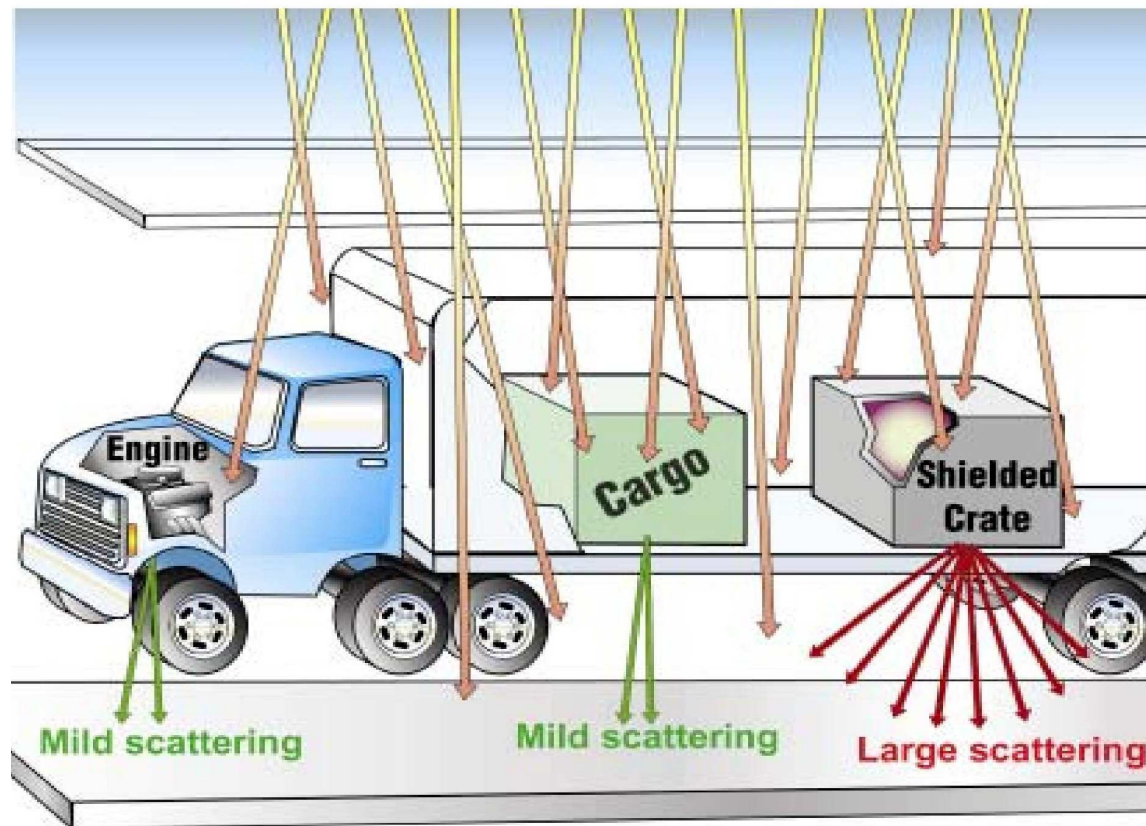
07.11.2013

**Мюонная томография базируется на следующих принципах:**

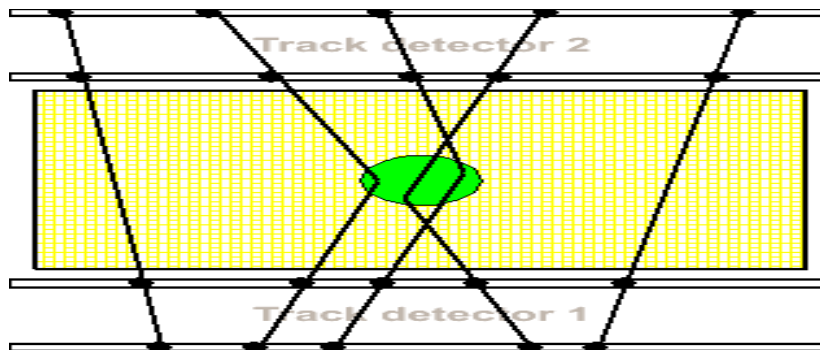
- **Естественный фон космич. излучения на поверх. Земли на 99% состоит из мюонов (~10000 мюонов на 1 кв.м в минуту)**
- **Высокая проникающая способность мюонов**
- **Кулоновское взаимодействие зависит от  $Z$  материала**
- **Изменение направления движения мюона в результате многократного кулоновского рассеяния (на рис. слева - зависимость среднеквадратичного отклонения угла рассеяния мюона с импульсом 2ГэВ/с от толщины материала.**



## Возможное применение метода мю-томо



Для сканирования больших объемов требуются трековые детекторы большой площади с хорошим пространственным ( $\sim 0.2\text{мм}$ ) и угловым ( $\sim 1\text{ мрад.}$ ) разрешением. В ГНЦ ИФВЭ богатый опыт создания больших дрейфовых камер.





# Моделирование

«Виртуальный эксперимент» с помощью программы GEANT3.

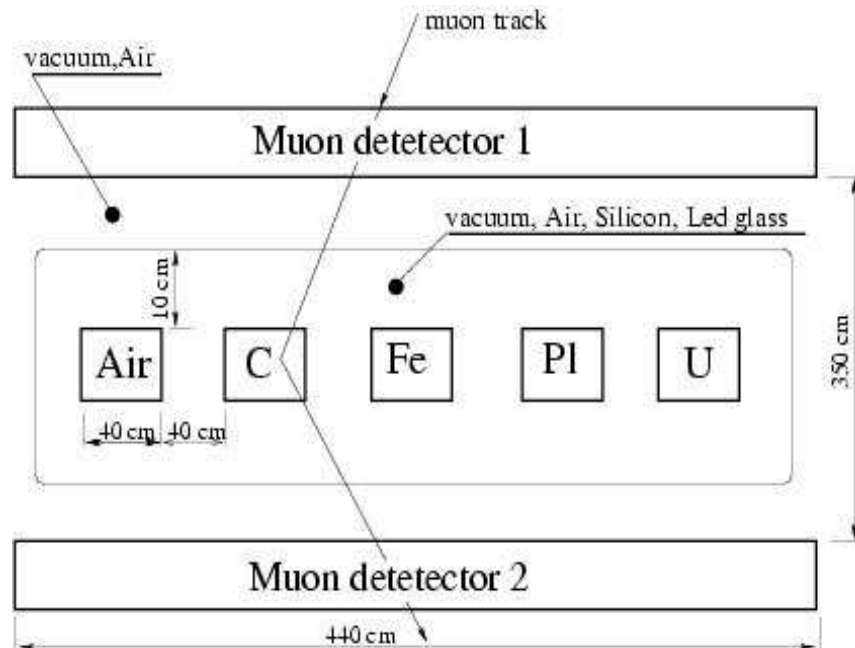
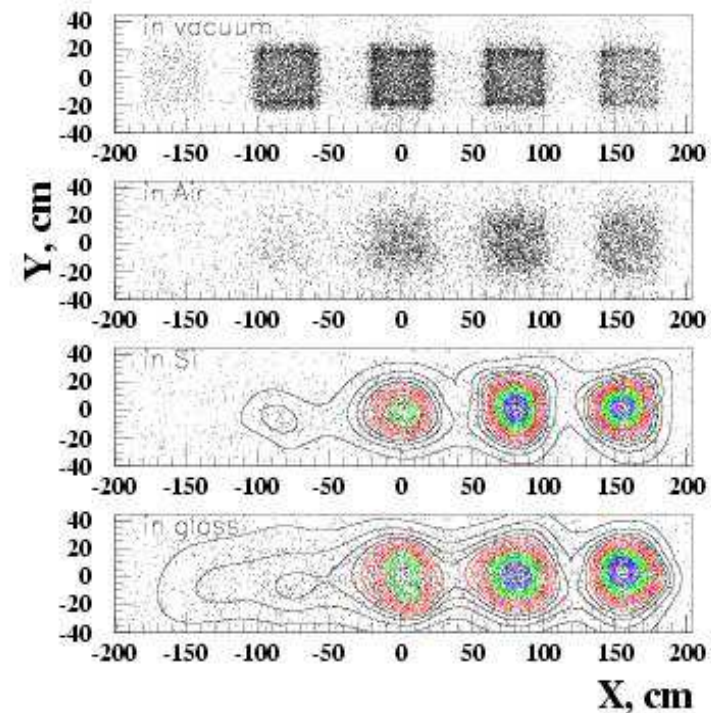


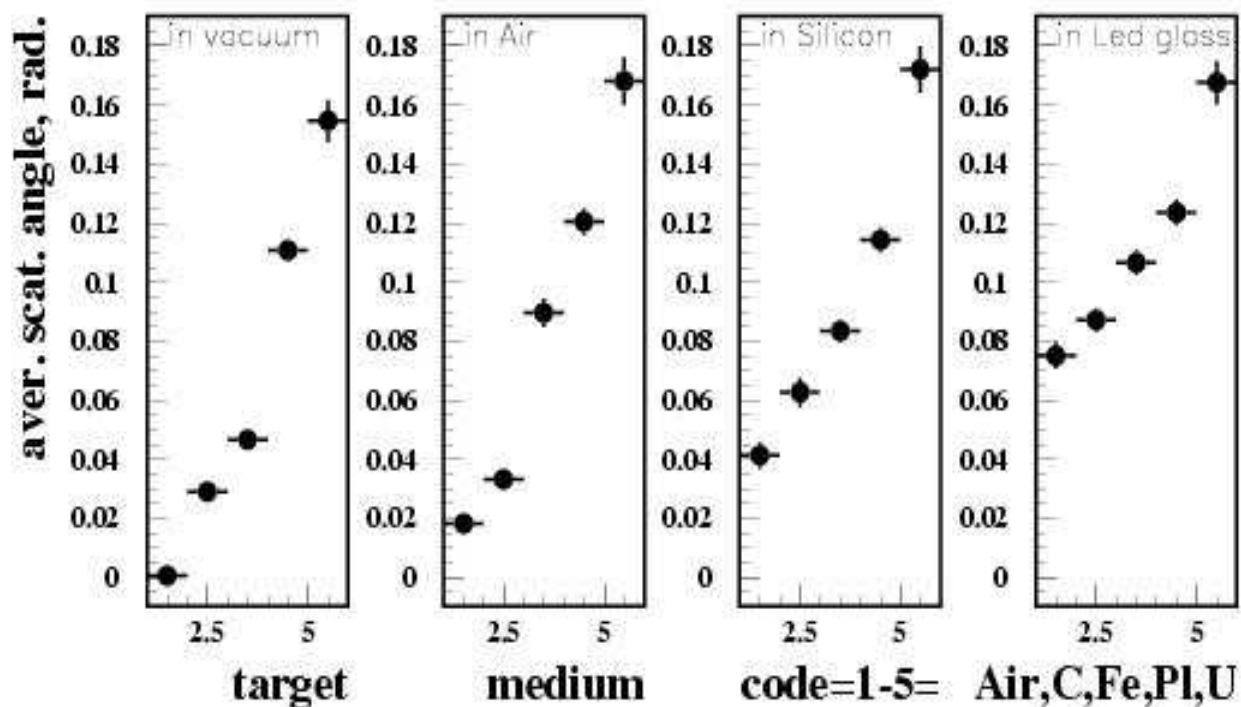
Схема установки из двух мюонных детекторов, между которыми - объекты 40 x 40 x 40 куб.см из материалов с различным  $Z$  (воздух, углерод, железо, свинец, уран).



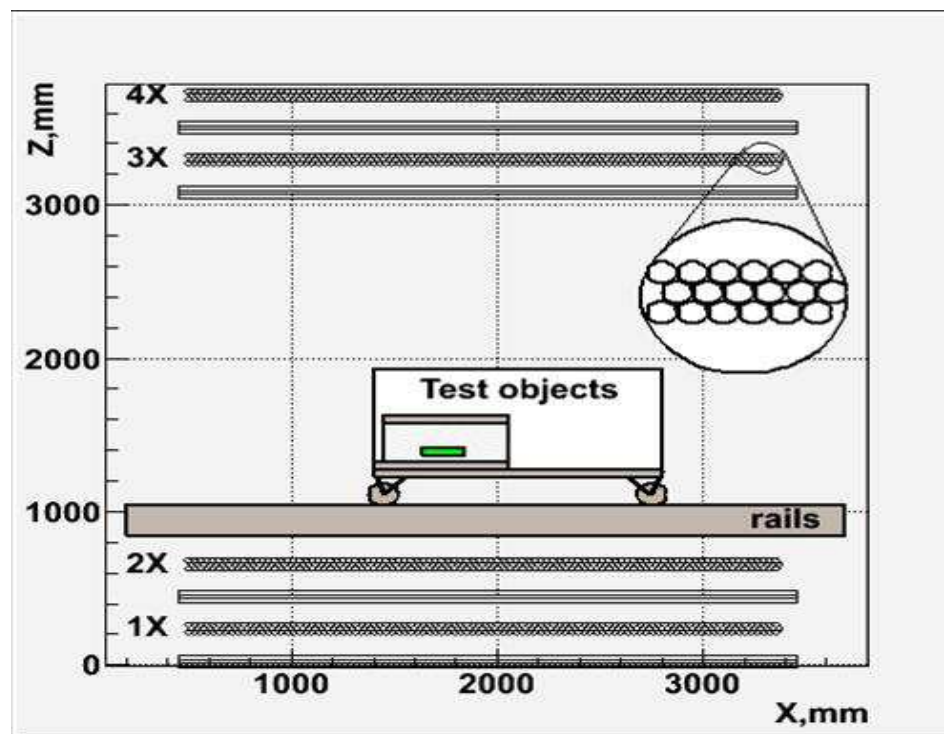
Реконструкция образов этих объектов через 100 сек. экспозиции в среде из вакуума, воздуха, песка, свинцового стекла.

# Моделирование

Для этого «эксперимента» на графиках внизу для всех сред видна явная зависимость среднего угла многократного кулоновского рассеяния мюонов от материала объекта.



# Мюонный томограф с площадью перекрытия 3 x 3 кв.м



Камеры из 30-мм дрейфовых трубок,  $L=3$  м; в сумме 2304 трубок.

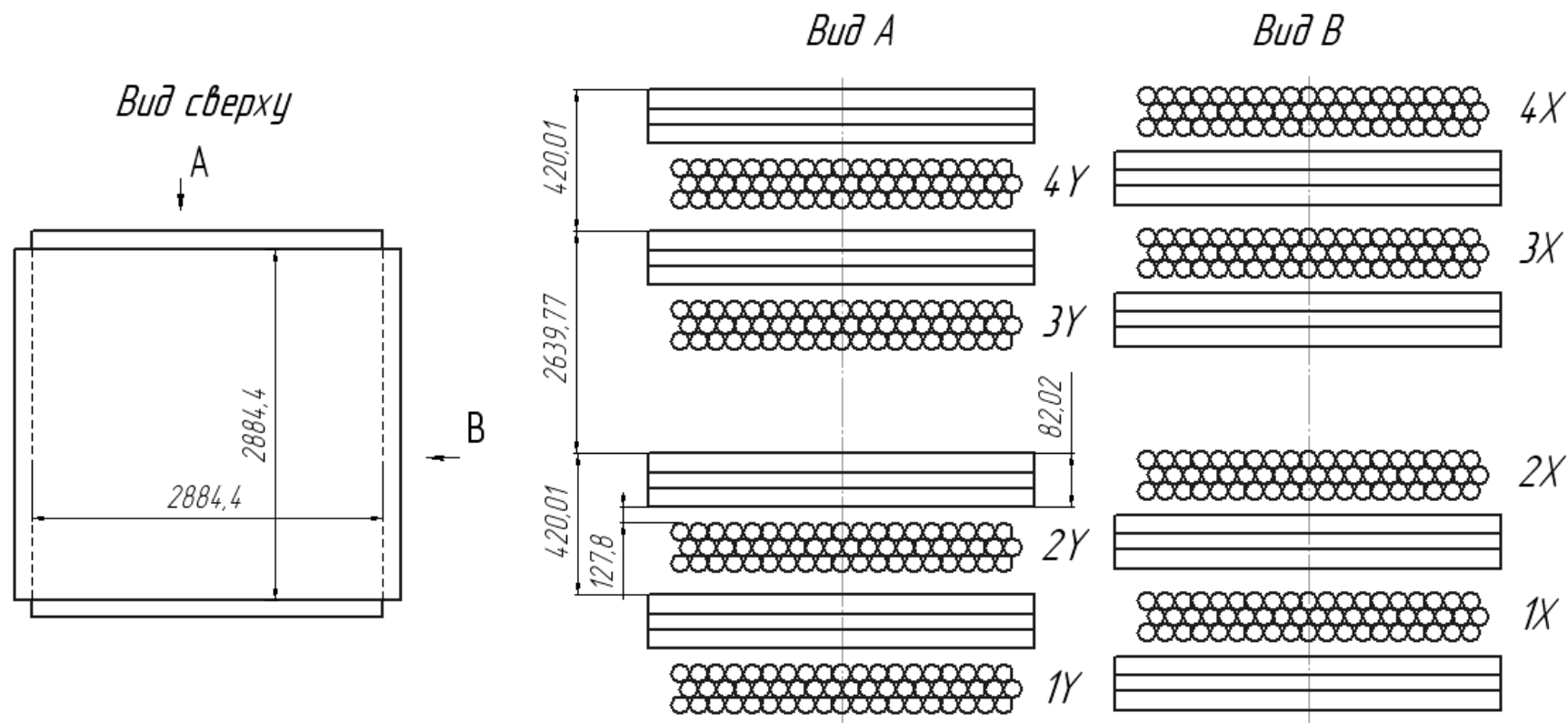
Рабочий газ – аргон-углекислота (93:7).

Внутренний объем для тестовых объектов:  $3 \times 3 \times 2$  м<sup>3</sup>.

Тележка с электроприводом, на рельсах.

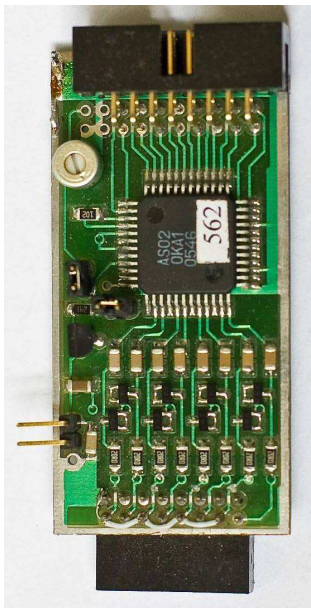
Максимальная нагрузка ~1000 кг

# Схема расположения дрейфовых камер в томографе





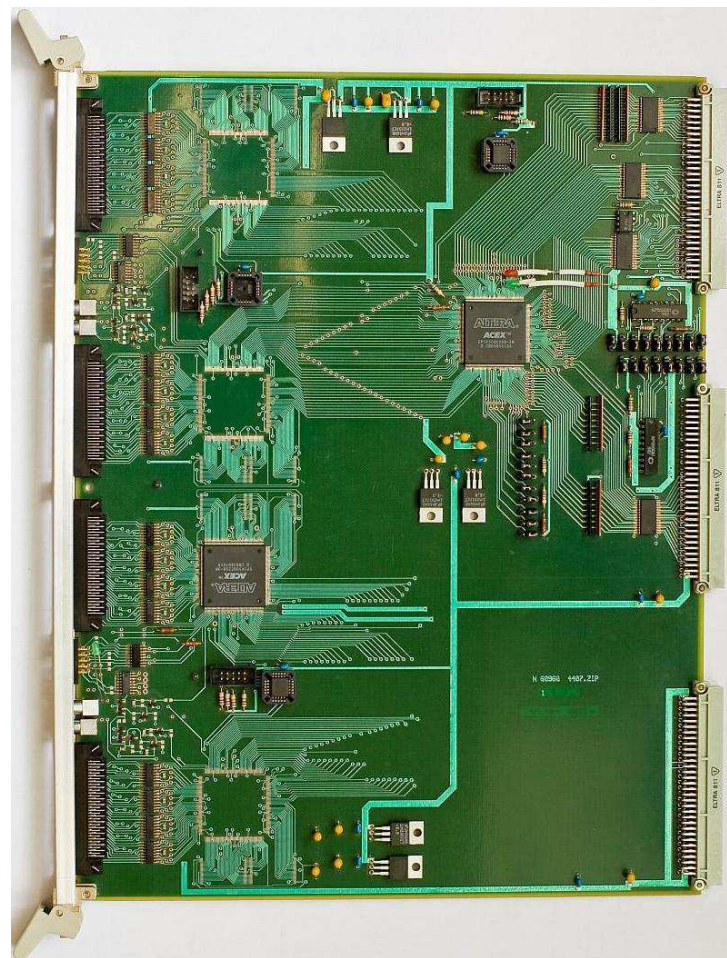
# Электроника дрейфовых камер изготовлена в ИФВЭ (по программному обеспечению – см. отдельный доклад)



Слева – 8-канальный усилитель на базе ИС ОКА-1М.

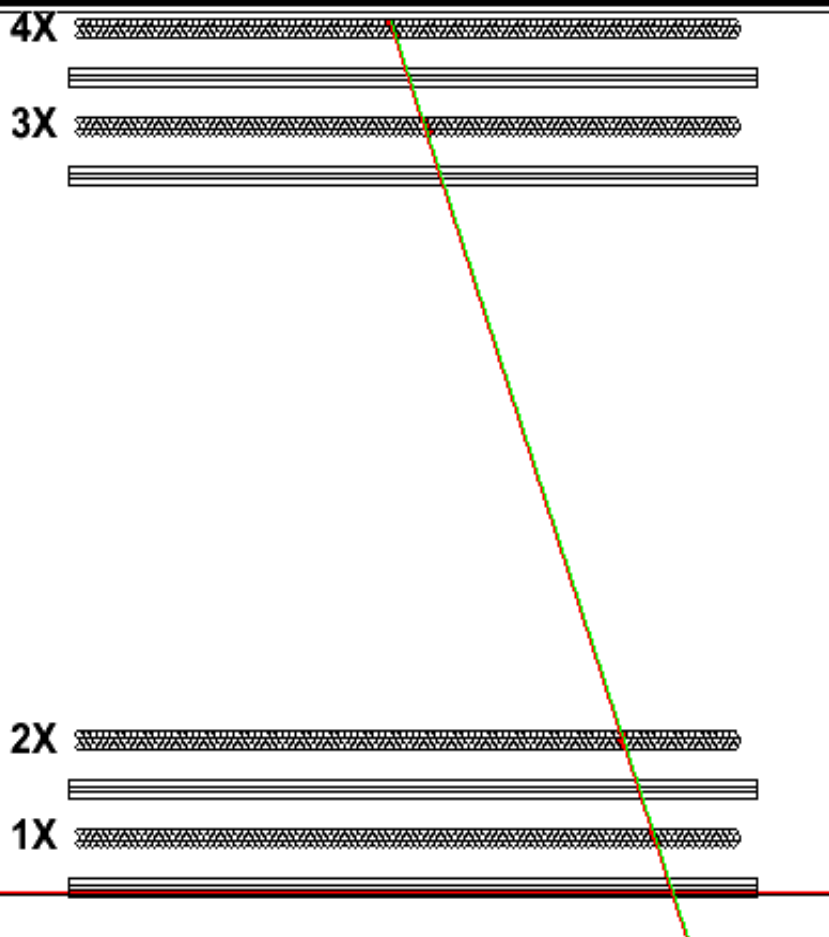
Внизу: три платы усилителей на общей переходной плате

Справа: 128-канальный модуль ВЦП (с шагом квантования 1 нс) в стандарте VME 9U.

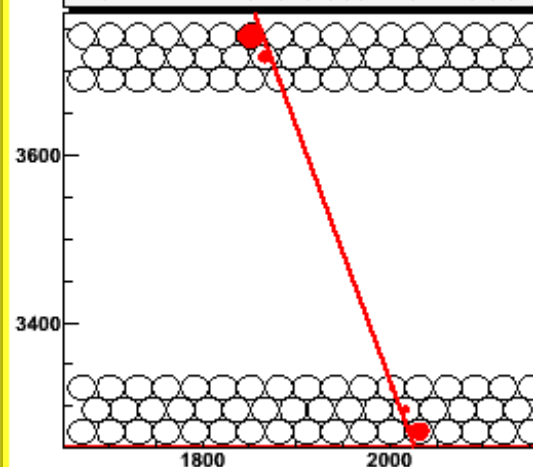


# Пример реконструкции трека (XZ-проекция)

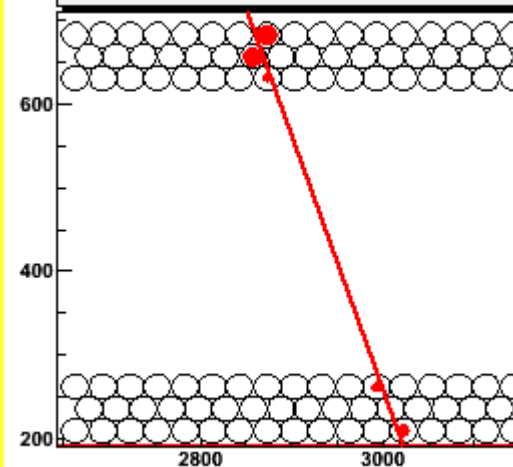
$\mu 3$  XZ Run 59 Cycle 1 Tcl 9120504



X3-X4 Time cluster=9120504

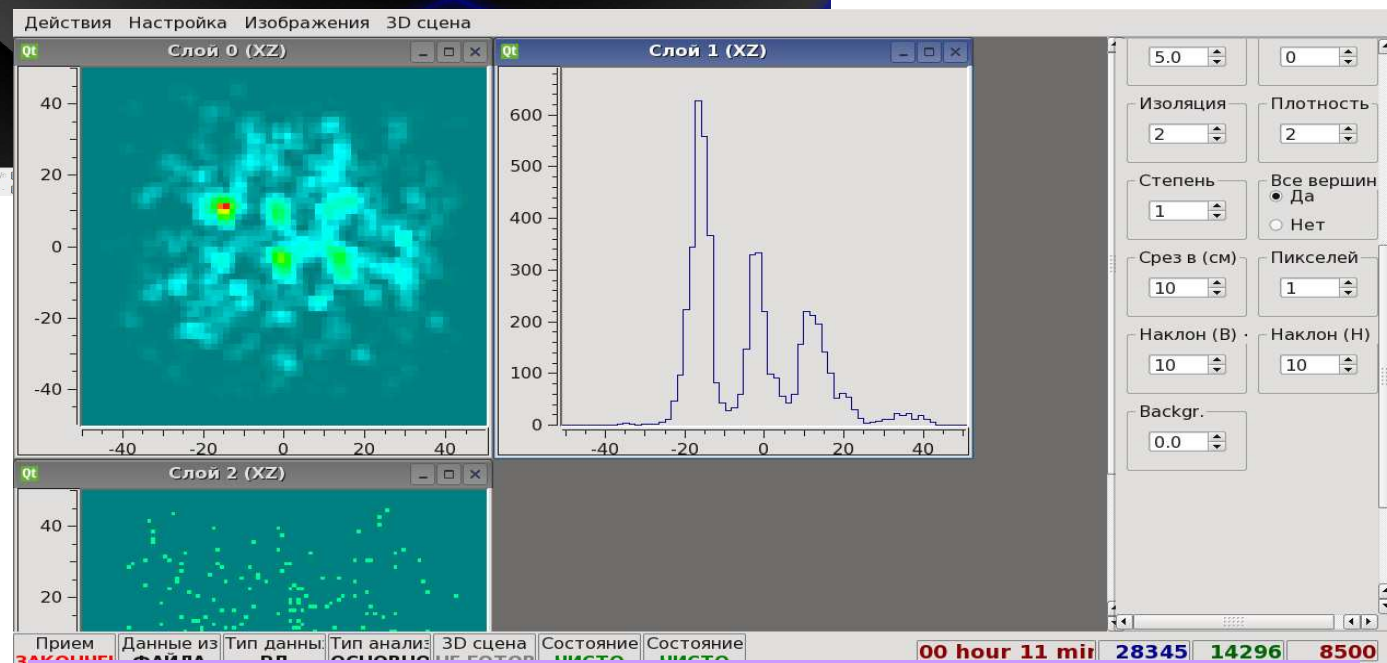
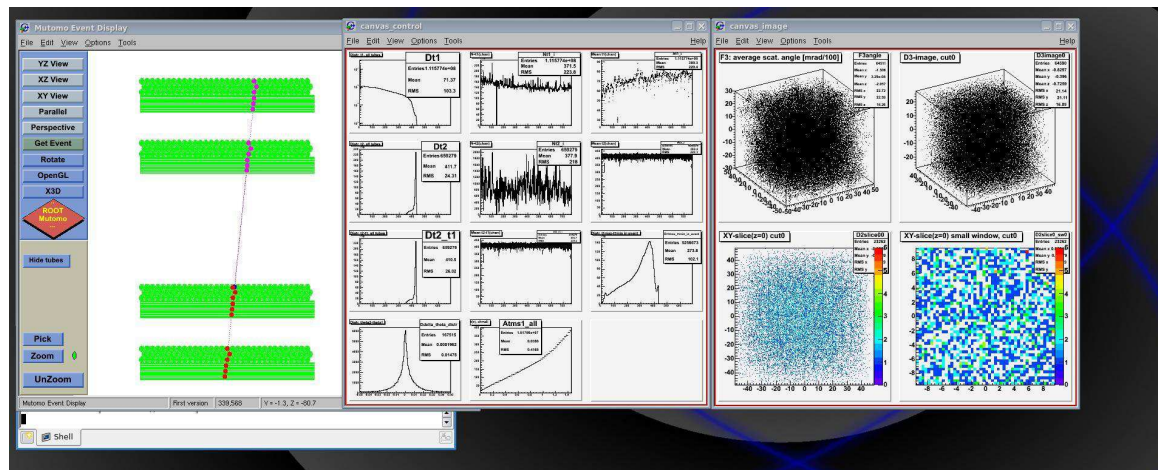


X1-X2 Time cluster=9120504



# Он-лайн контроль установки

Виртуальный  
дисплей он-лайн  
контроля



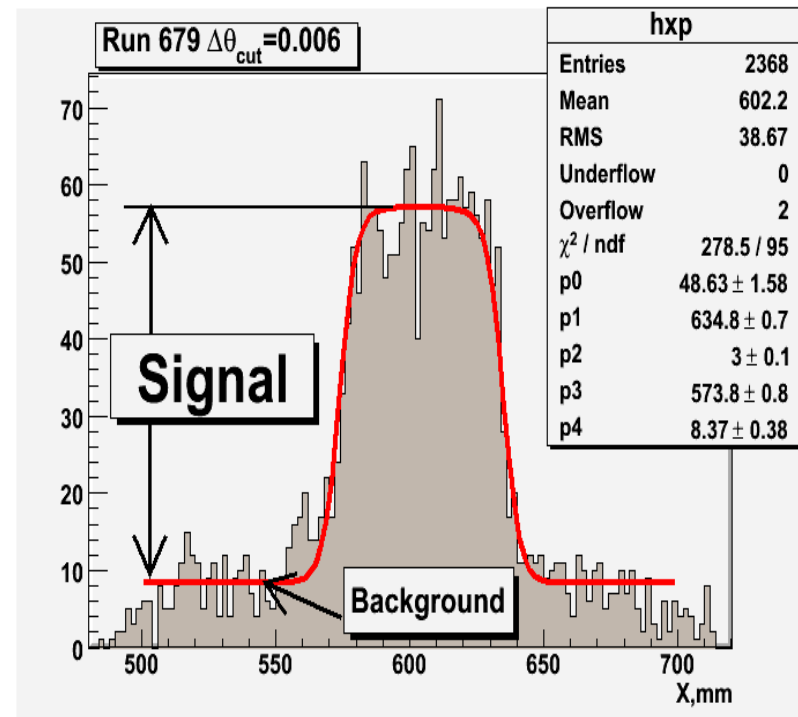
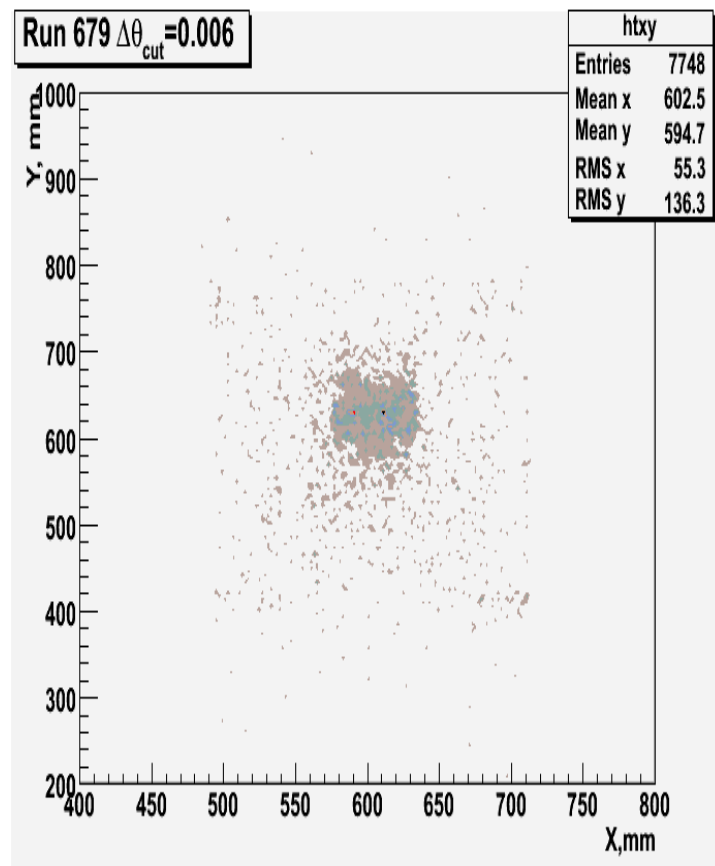
Контрольная панель с 2-D и 1-D срезами изображений

# Реконструкция изображений

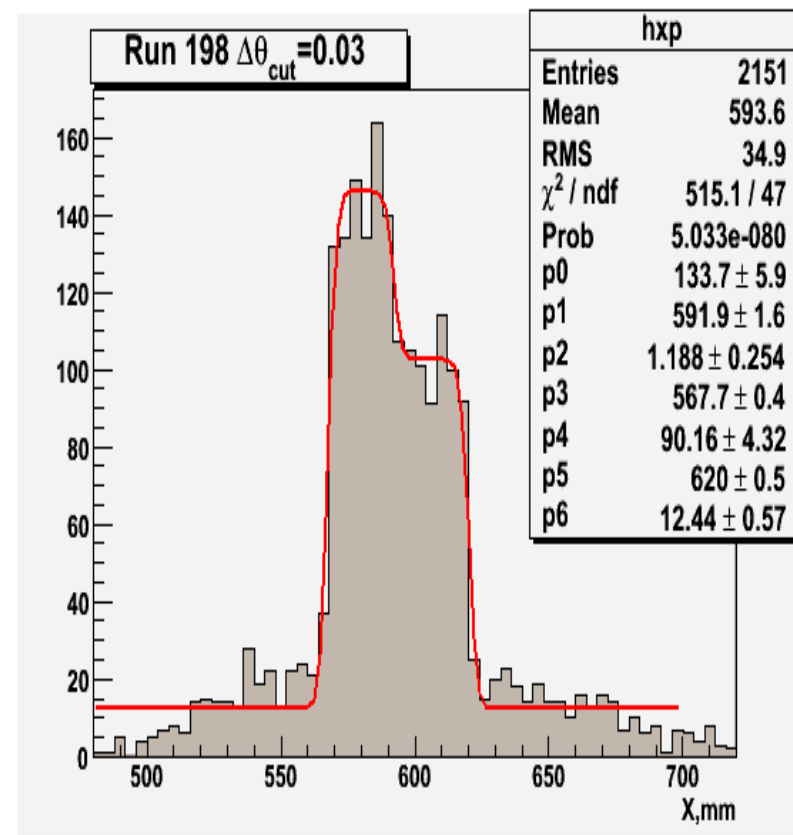
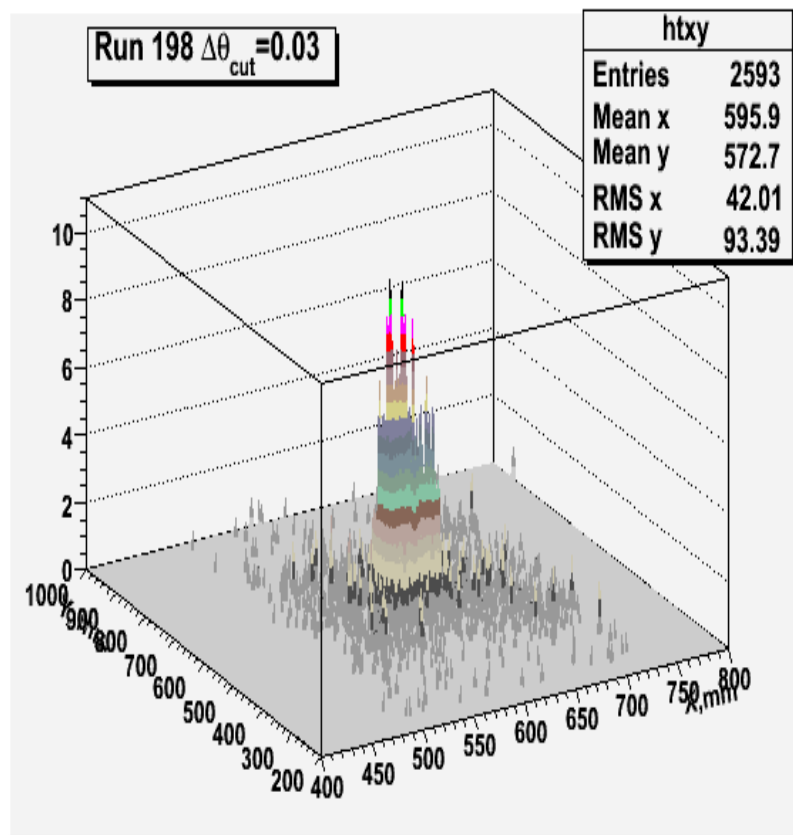
Базисным алгоритмом является метод восстановления вероятной вершины рассеяния на основании информации о параметрах реконструированного трека РОСА ( Point-Of-Closest-Approach). Определяется точка в пространстве, минимально удаленная от компонентов трека, реконструированных в верхней и нижней частях установки, и предполагается, что рассеяние мюона произошло именно в этой точке. Тестовый объем дробится на части (voxels) и анализируются плотности заполнения voxels. Используются различные алгоритмы и методы (статистические, Maximum Likelihood (ML), Algebraic Reconstruction Technique (ART) и др., итерационные процедуры, методы цифровой фильтрации и т.д. для реконструкции 2D и 3D образов объектов.



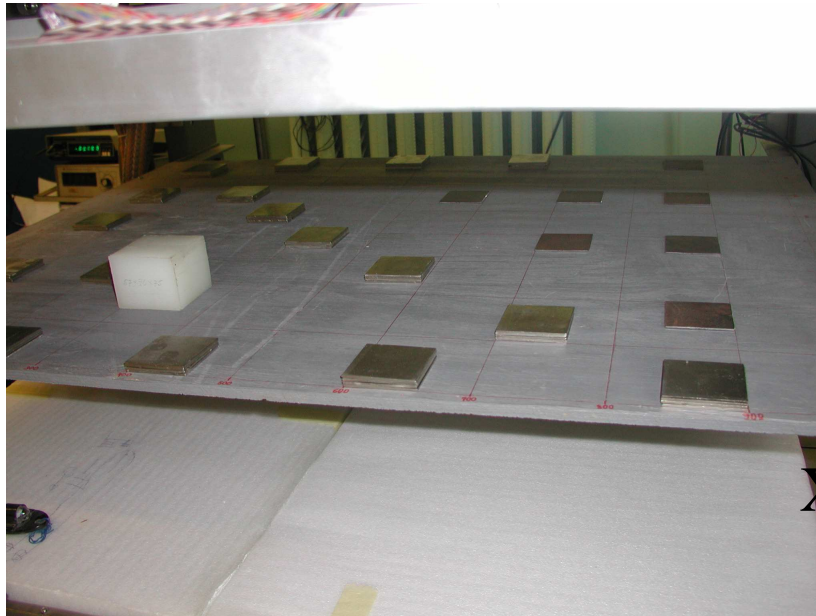
Иллюстрация, как «воспроизводится» в прототипе  
мюонного томографа свинцовый кирпич размером  
 $57 \times 70 \times 75$  куб.мм



Иллюстрация, как «воспроизводятся» и надежно различаются в прототипе два размещенных рядом разнородных объекта: свинцовая пластина 23 x 48 x 380 куб.мм и стальная пластина 25 x 48 x 380 куб.мм. Время экспозиции – несколько минут. Увеличивая время экспозиции, можно существенно улучшать четкость изображения объекта, «размытость» границ.

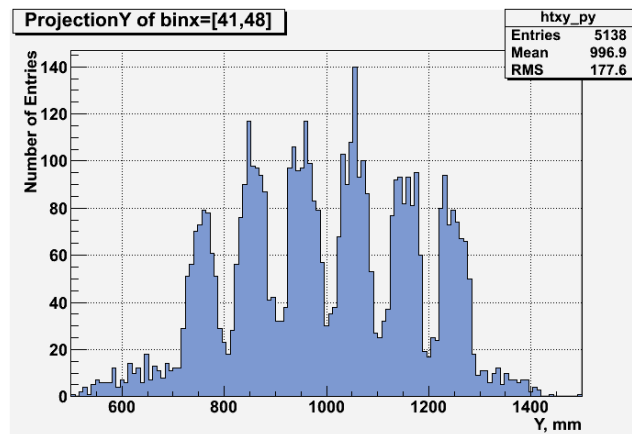
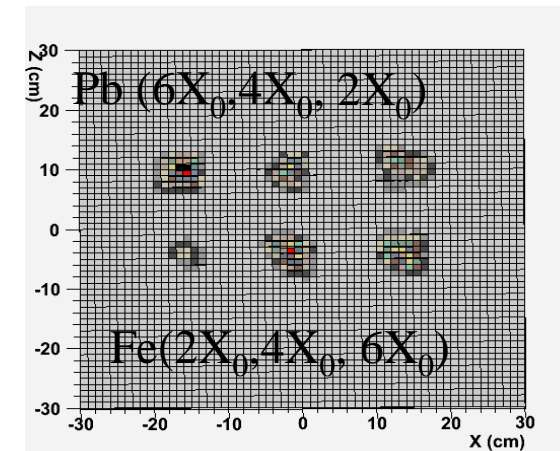


# Примеры восстановления (1D, 2D)

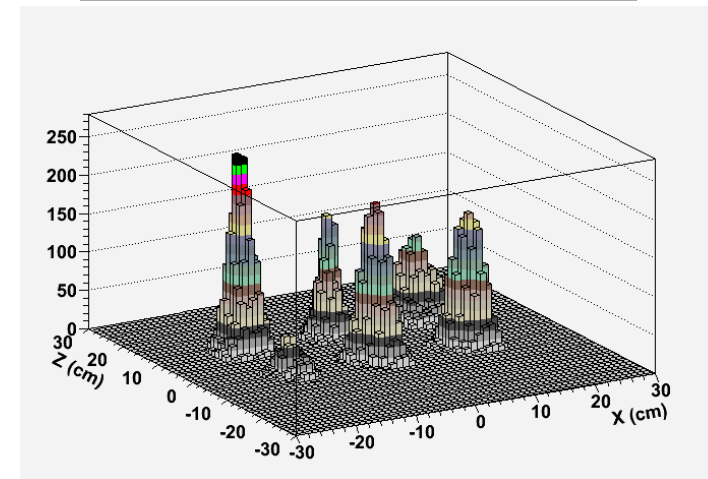


Pb  $1X_0=0.56$  cm  $6 \times 6 \text{ cm}^2$

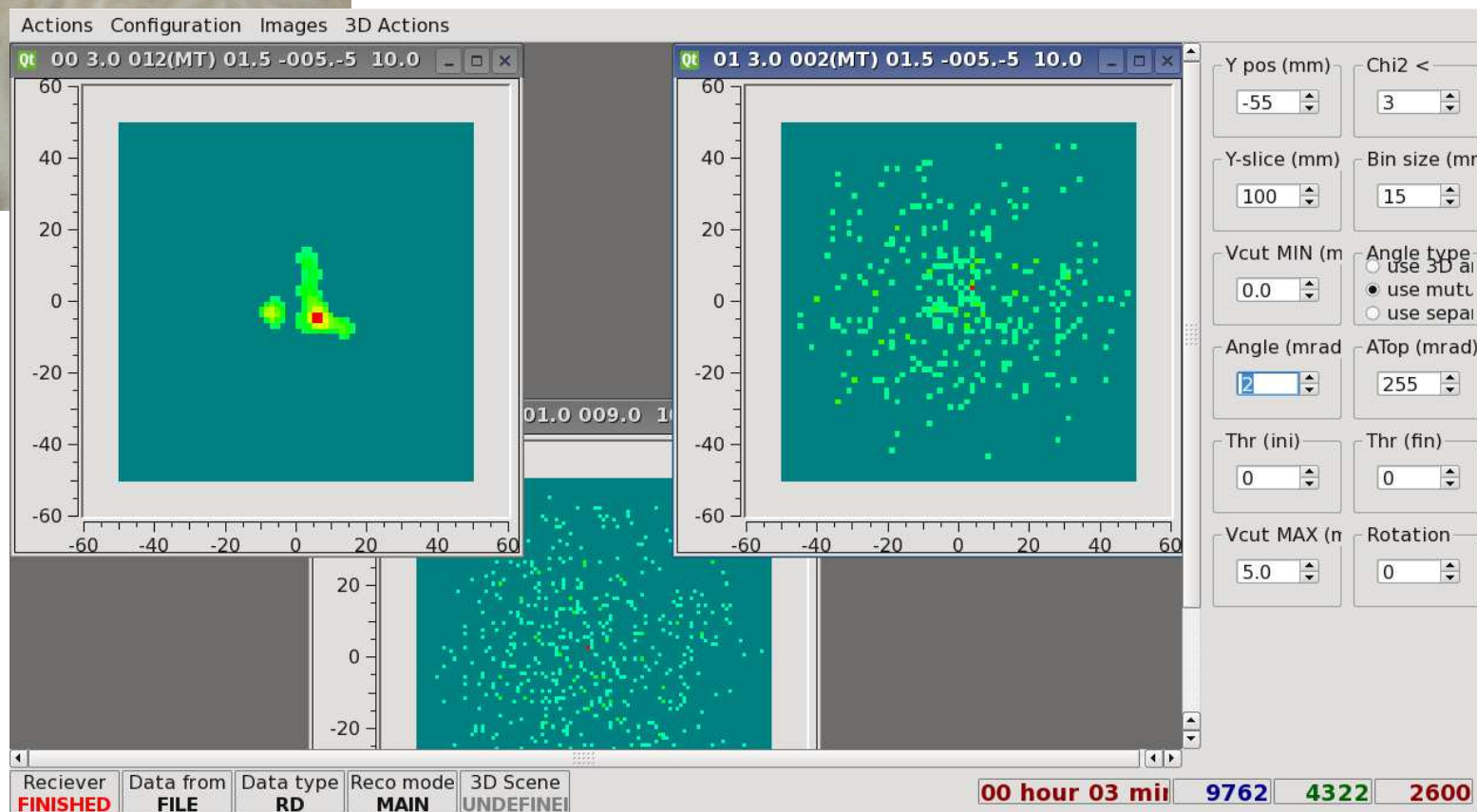
Fe  $1X_0=1.76$  cm 5 minutes



1-D slices

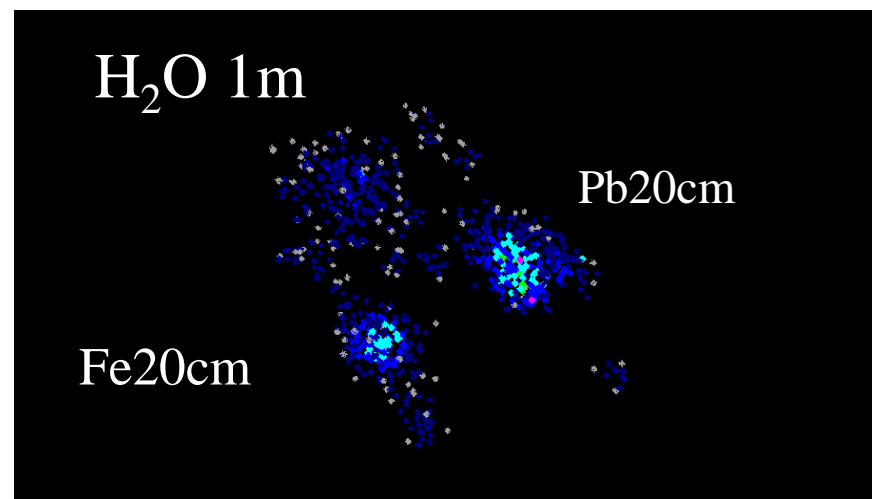
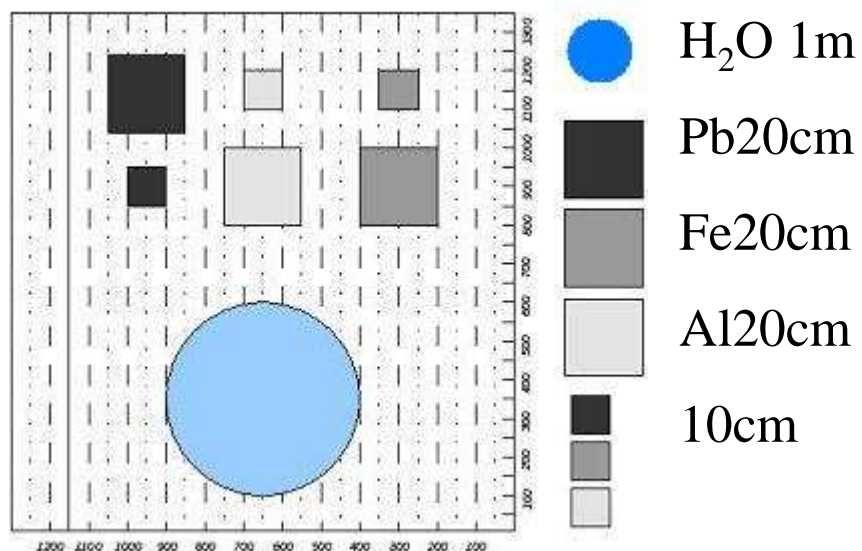


Стальной уголок. На панели справа – необработанное изображение (3 мин.).  
слева – после последоват. применения алгоритмов устранения шума и  
сглаживания (гауссов и медианные фильтры) и порогового устранения  
подложки с малой амплитудой сигнала

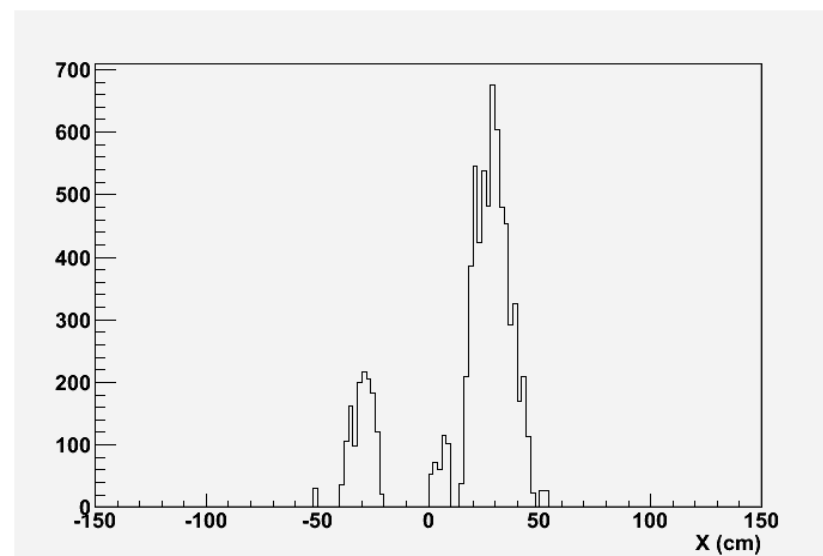




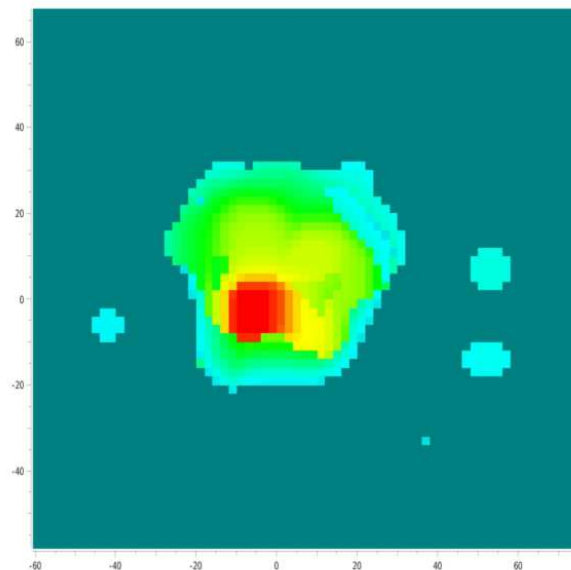
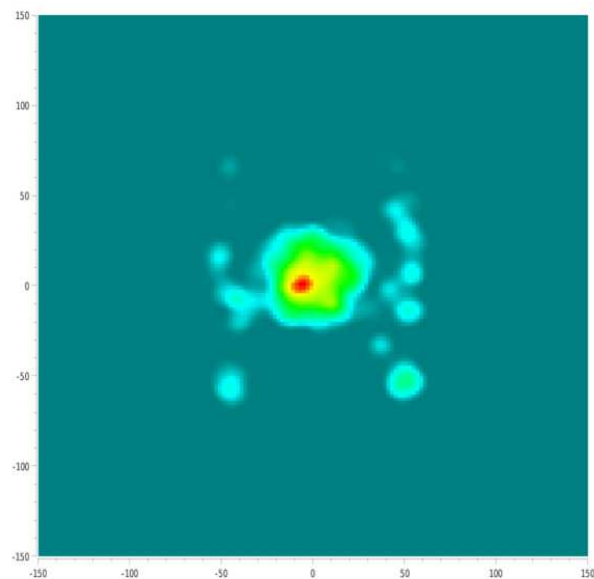
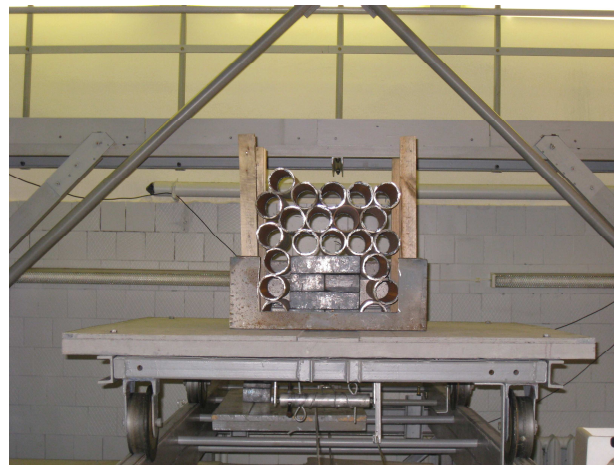
# Примеры восстановления изображений



Fe 10cm, Al 10cm, Pb 20cm



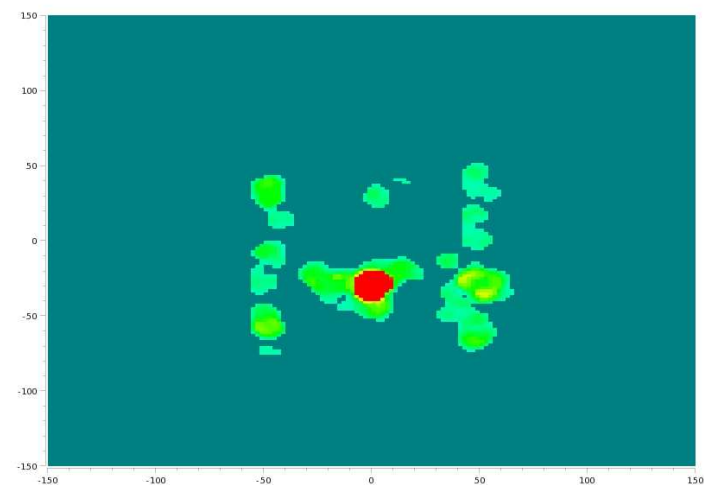
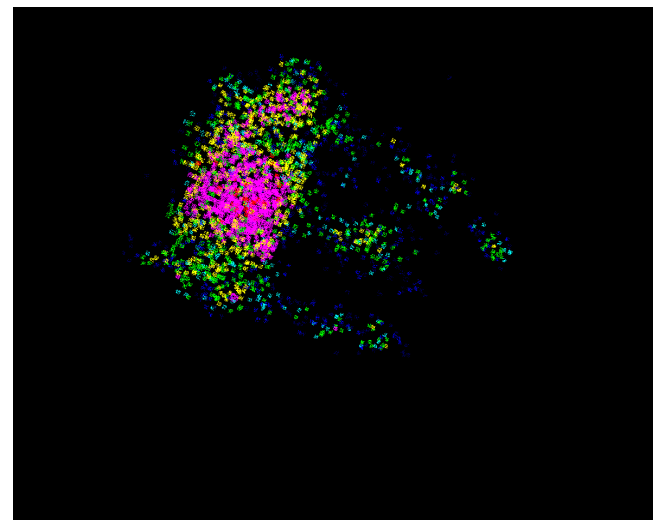
# Примеры восстановления изображений



Свинцовые кубы с ребром 10 и 20 см под слоем стальных труб.

Экспозиция: 3 минуты.

# Примеры восстановления изображений (свинцовый куб с ребром 20 см под 30 см стали)

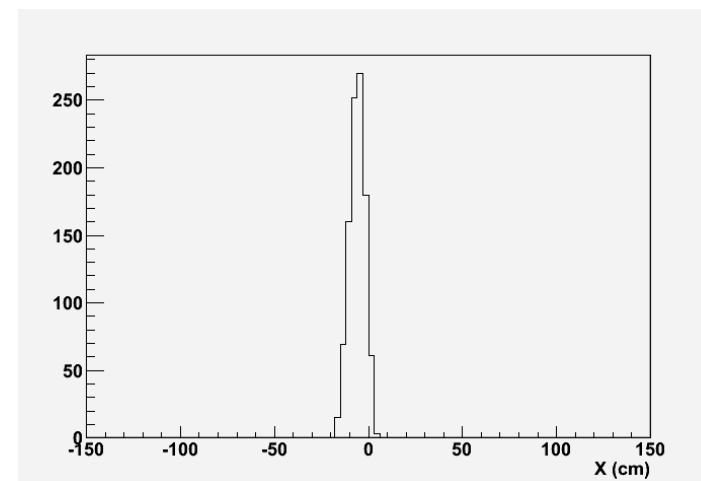
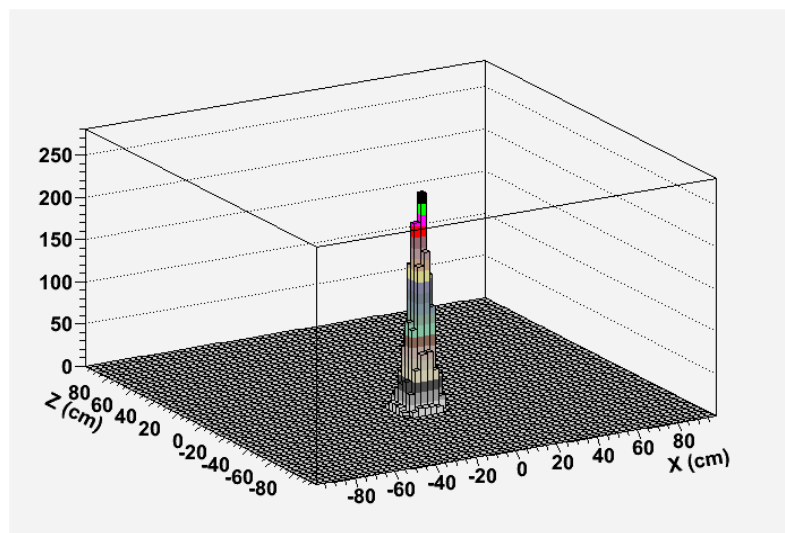


# Примеры восстановления изображений (свинцовый куб под 30 см стали)



Свинцовый куб с ребром 20 см.  
3 минуты экспозиции

1D и 2D гистограммы после  
цифровой фильтрации



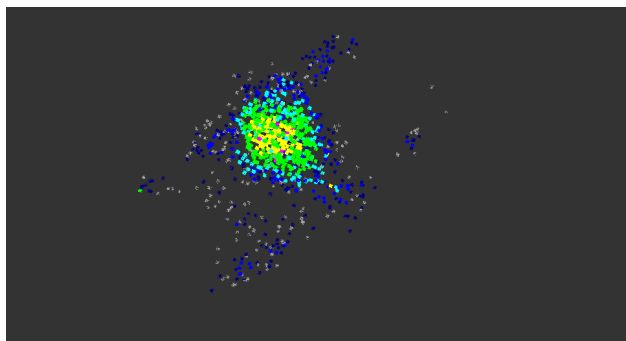
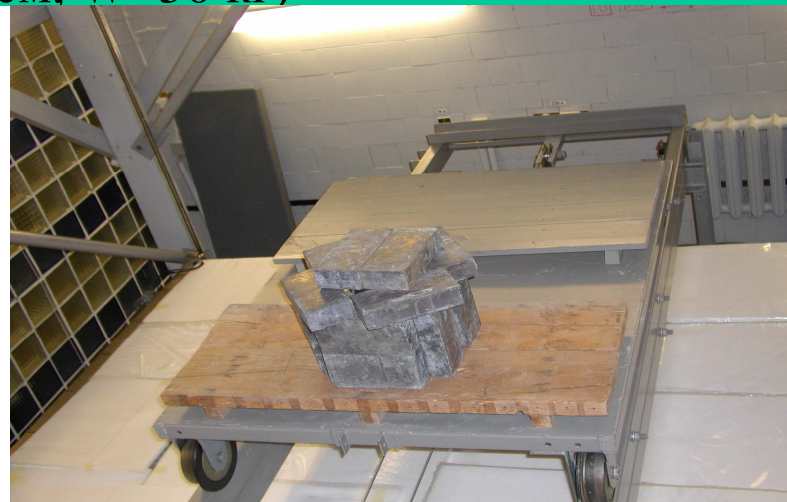


# Примеры восстановления изображений

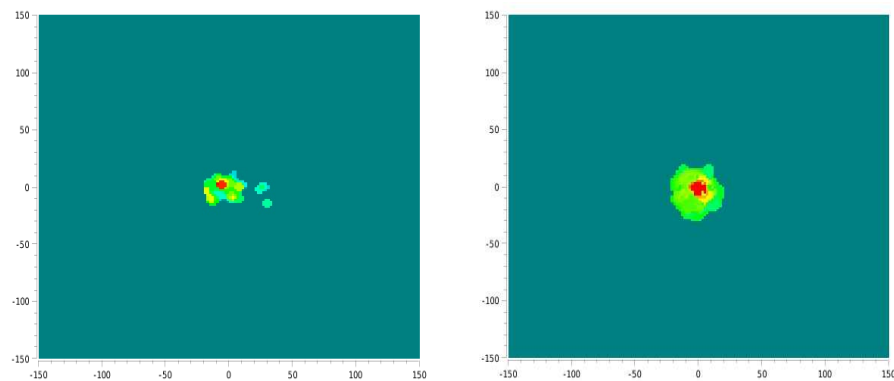
(контейнер ГАММАРИД21 из обедненного урана в стальном корпусе,  
D=18см, H=19 см, W=50 кг)



Контейнер  
окружен  
свинцовыми  
кирпичами



Экспозиция: 2 мин.



Экспозиция: 1 и 10 мин.,  
цифр.фильтрация.

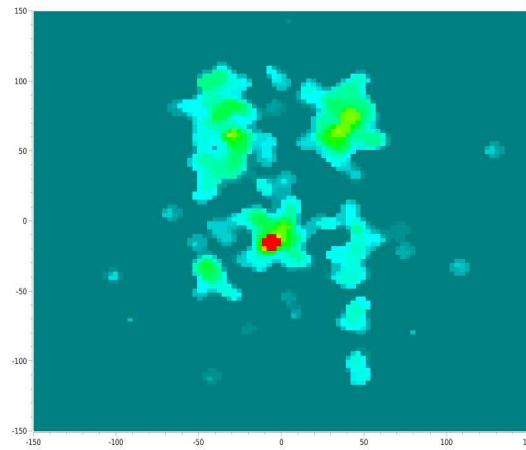
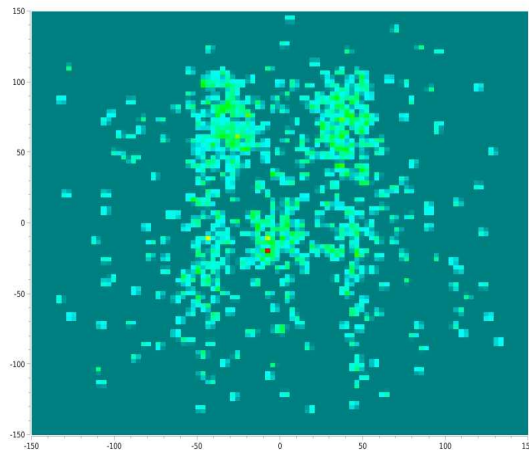
# Примеры восстановления изображений

(контейнер ГАММАРИД21 из обедненного урана в стальном корпусе,  
D=18см, H=19 см, W=50 кг)



Тот же контейнер в  
ящике с песком

Экспозиция: 1 мин.

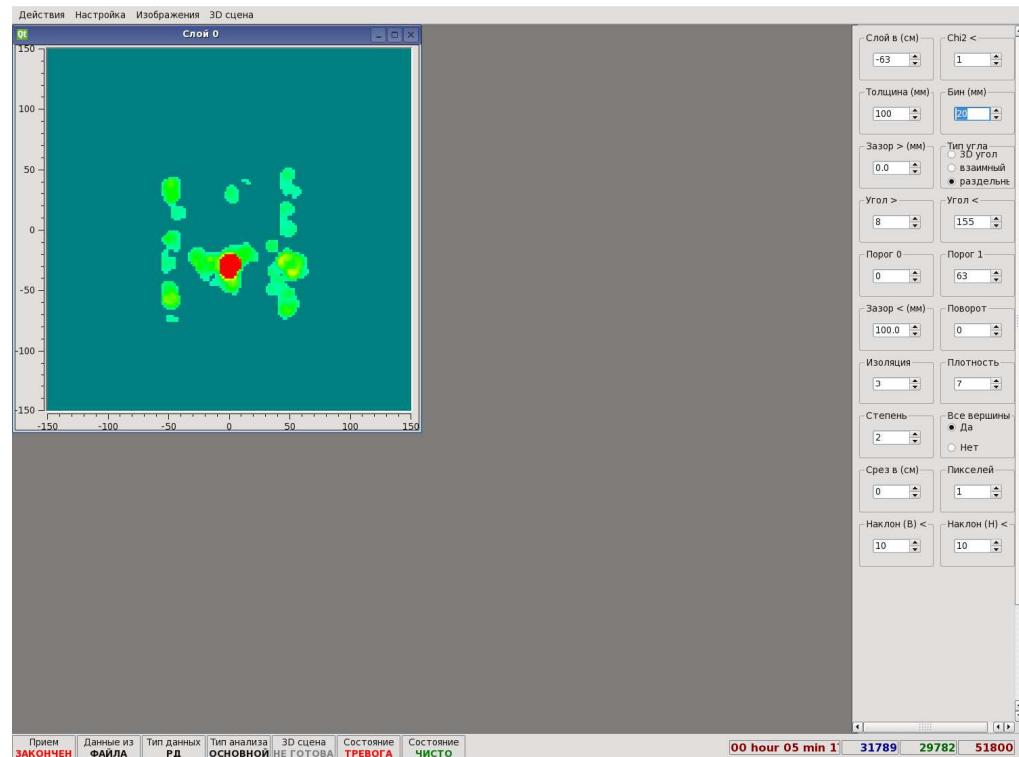


Начальное 2-D  
изображение и  
после процедуры  
цифровой  
обработки

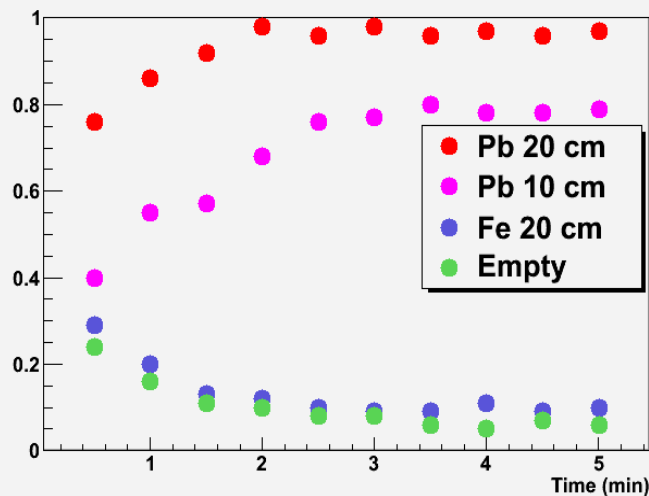
# Примеры восстановления изображений (свинцовый куб под 30 см стали)



Свинцовый куб с ребром 20 см, 3 мин.

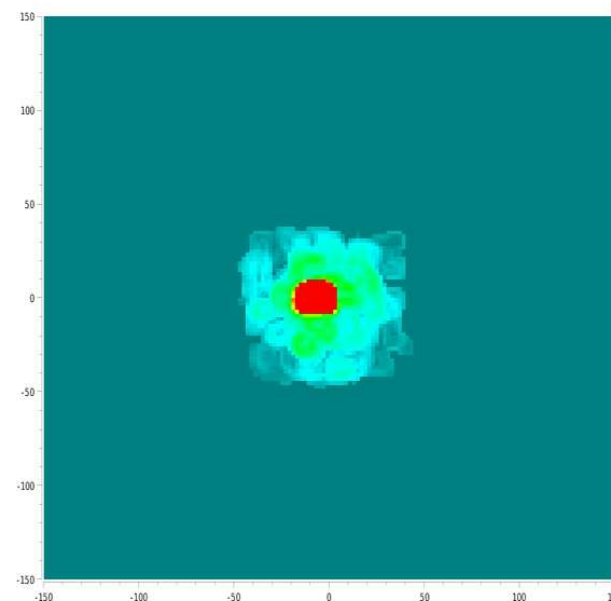
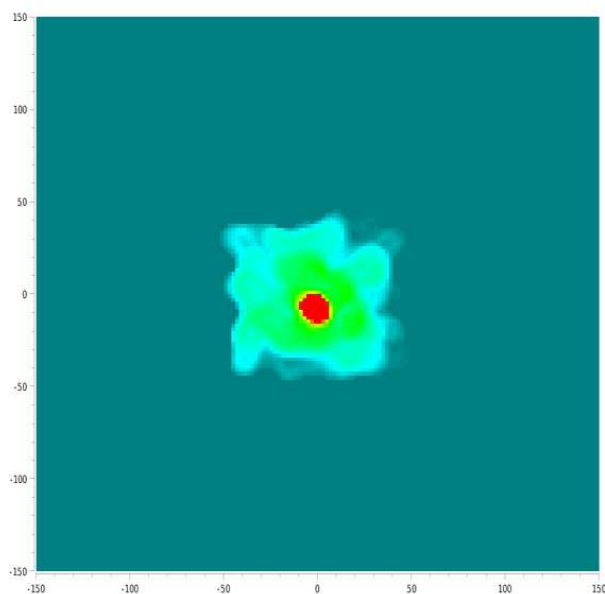
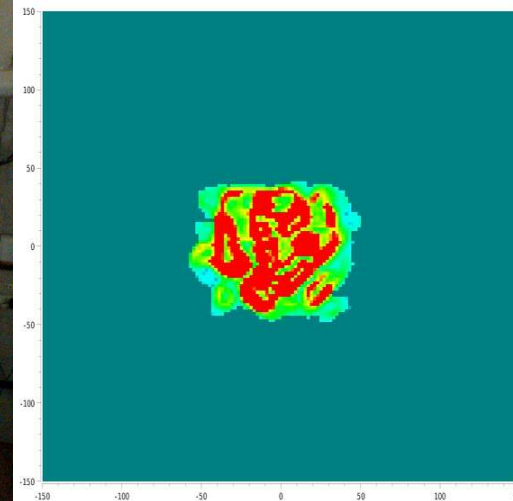
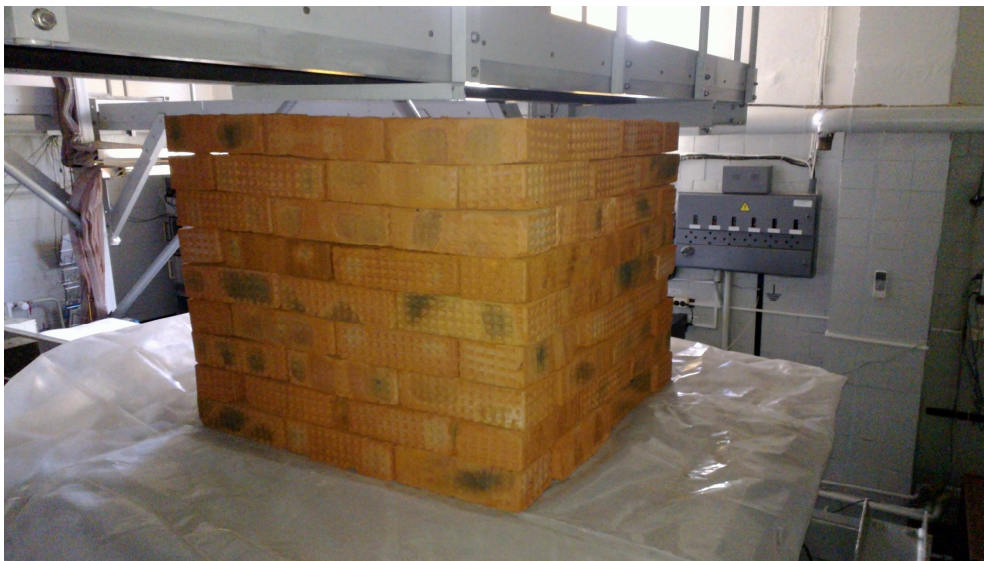


Сигнал ТРЕВОГА – присутствие плотного мат-ла



Вероятность обнаружения для мат-лов  
разной плотности в зависимости от  
времени экспозиции

# Кирпичный домик монолитный, со сталью, со свинцом





2012г. Первый коммерческий мюонный томограф. Изготовлен компанией “Decision sciences” (США). Установлен в порту “Freeport” на Багамах.



# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работы по методике мюонной томографии продолжаются при поддержке Госкорпорации РосАтом (контракт №Н.4х.44.90.13.1120 на 2013-2015гг).

Основное направление работ – разработка и изготовление накамерной электроники дрейфовых камер, что позволит избавиться от огромного количества кабелей (два верхних фото).

Образцы новой накамерной электроники уже разработаны (нижние фото).

