



РОСАТОМ

Р Ф Я Ц
ВНИИЭФ

XIII Забабихинские научные чтения

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЁТА ПЕРЕНОСА УЛЬТРАРЕЛЯТИВИСТИЧЕСКИХ ПРОТОНОВ

Докладчик: Д.Е. Ларин
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»

март 2017

- перенос протонов описывается аналитическими уравнениями;
- практическое отсутствие вторичного излучения;
- сечение взаимодействия протонов с веществом в области десятков ГэВ не зависят от энергии;
- любое изображение сводится к плотности распределения вероятности.

$$h_{y=g(x)}(t) = f_x(g^{-1}(t)) \cdot \frac{d(g^{-1}(t))}{dt} \longrightarrow h_{a \cdot x + b}(t) = \frac{1}{|a|} h_x\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

$$h_{x+y}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f_x(t-\tau) \cdot g_y(\tau) d\tau \quad h_{x \cdot y}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f_x\left(\frac{t}{\tau}\right) \cdot g_y(\tau) \frac{d\tau}{|\tau|}$$

Для краткости обозначим гауссово распределение как

$$\text{gauss}(x, \sigma) = \frac{e^{-x^2/2\sigma^2}}{\sqrt{2\pi\sigma^2}}$$

- Многократное кулоновское рассеяние (формула Мольера):

$$\Theta_{\text{coul}}(\theta) = \text{gauss}(\theta, \theta_0), \quad \theta_0[\text{рад}] \approx \frac{14,1 \cdot 10^{-3}}{E} \sqrt{\frac{L}{L_{\text{rad}}}}$$

- Адронное рассеяние (формула Борна):

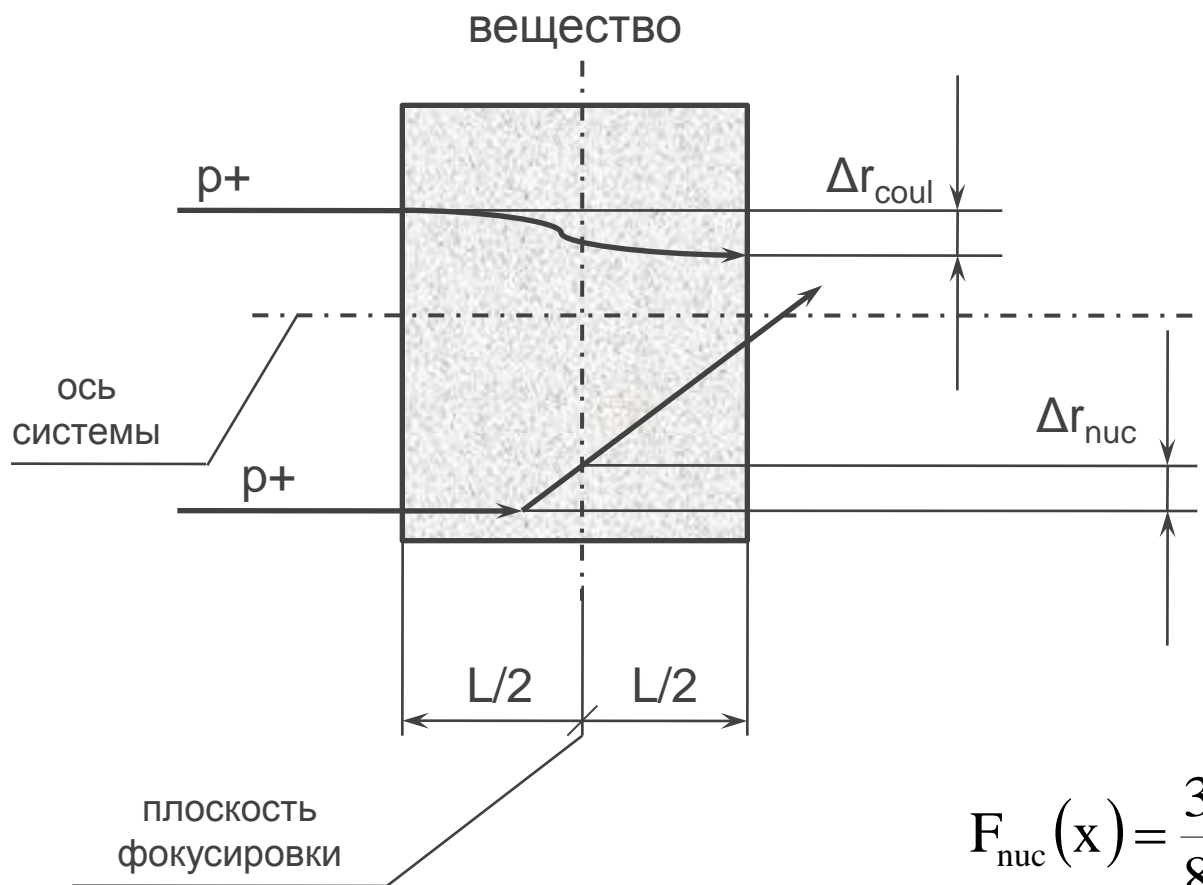
$$\Theta_{\text{nuc}}(\theta) = \frac{3\pi}{8ka} \cdot \frac{J_1^2(\theta ka)}{\theta^2},$$

$$\vartheta = \frac{1}{ka} = \frac{\hbar c}{E} \sqrt{\frac{2\pi\zeta}{\sigma_{\text{tot}}}} = \frac{\hbar c}{E} \sqrt{\frac{4\pi N_a \lambda_{\text{tot}}^2}{A \cdot \lambda_{\text{el}}}} = \frac{54,3}{E[\text{ГэВ}]} \sqrt{\frac{\lambda_{\text{tot}}^2 / \lambda_{\text{el}} [\text{Г/см}^2]}{A[\text{Г/моль}]} [\text{мрад}]}$$

Линейные смещения протона



РОСАТОМ



$$\Delta r_{\text{coul}} = \frac{L}{2} \cdot \left(\frac{\theta_1}{\sqrt{3}} + \theta_2 \right)$$

$$F_{\text{coul}}(x) = \text{gauss} \left(x, \frac{\theta_0 L}{\sqrt{3}} \right)$$

$$F_{\text{nuc}}(x) = \frac{3\pi\vartheta}{8\lambda_{\text{el}}} \int_0^L e^{-\frac{t+L/2}{\lambda_{\text{el}}}} \cdot \frac{J_1^2(x/t\vartheta)}{x^2} \cdot t \cdot dt$$

Распределение потерь энергии протона в веществе

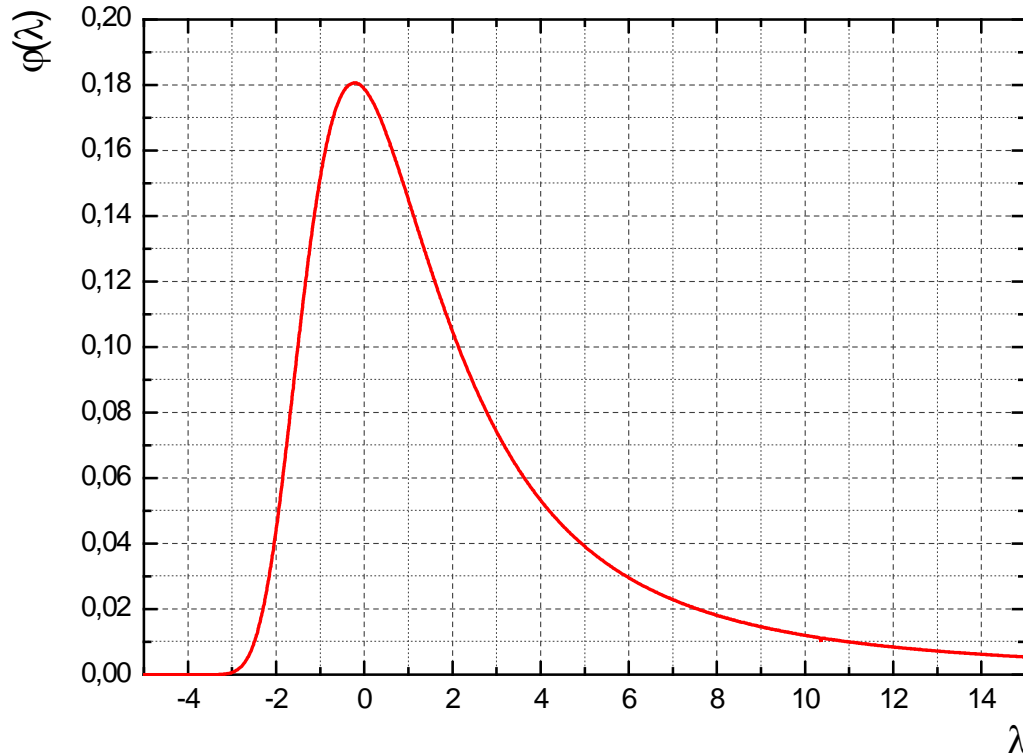


РОСАТОМ

$$\Delta r_{\text{chrom}} = D \cdot \theta \cdot \frac{\Delta E}{E_0 - E_{\text{настр}}} = D \cdot \theta \cdot \delta \cdot \frac{E_0}{E_0 - E_{\text{настр}}}$$

$$\varepsilon_{\text{coul}}(\delta) = \frac{E_0 - E_{\text{настр}}}{\xi \cdot L} \cdot \varphi \left(\frac{\delta \cdot (E_0 - E_{\text{настр}}) + E_{\text{настр}}}{\xi \cdot L} - \ln \left(\frac{\xi \cdot L}{\varepsilon'} \right) - 1 + C \right)$$

$$\theta \cdot \delta = (\varphi_{\text{in}} + \varphi_{\text{coul}} + \varphi_{\text{nuc}}) \cdot (\delta_{\text{coul}} + \delta_{\text{nuc}})$$

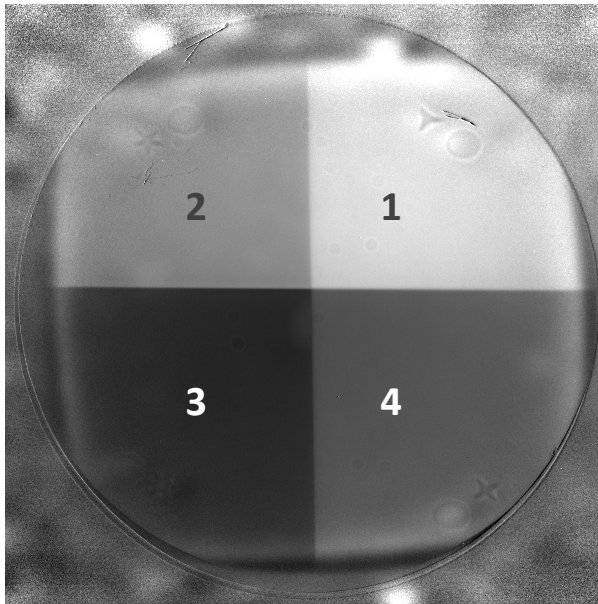


$$\varepsilon' = \frac{(I_Z Z)^2 \cdot \exp \left(1 - \left(\frac{M_p}{E} \right)^2 \right)}{2m_e c^2 \cdot \left(1 - \left(\frac{M_p}{E} \right)^2 \right) \cdot \left(\frac{E}{M_p} \right)^2}$$

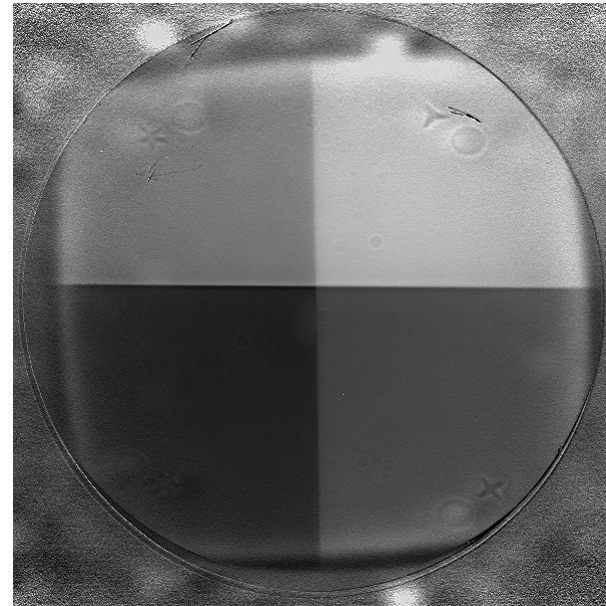
$$\xi = \frac{1}{(4\pi\varepsilon_0)^2} \frac{2\pi e^4 Z N_A \rho}{m_e c^2 A \cdot \left(1 - \left(\frac{M_p}{E} \right)^2 \right)}$$

$$\varepsilon_{\text{nuc}}(\delta) = \frac{3\pi\vartheta}{4} \cdot \frac{J_1^2 \left(\frac{\delta}{\vartheta} \right)}{\delta^2}$$

Экспериментальные изображения четырёхсекторного цилиндра



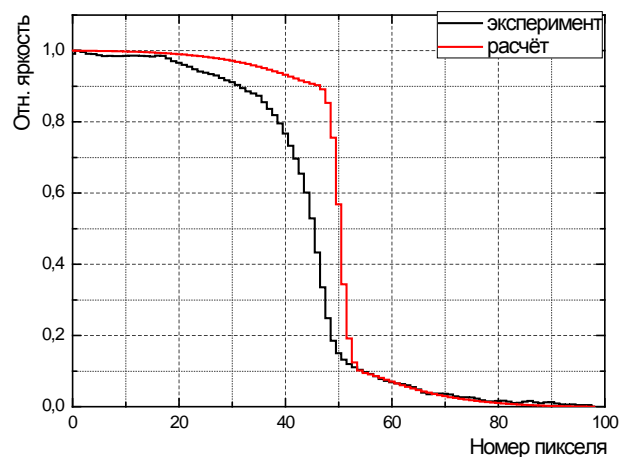
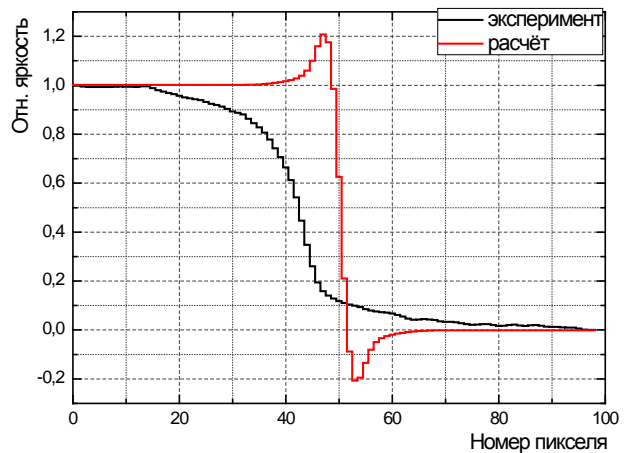
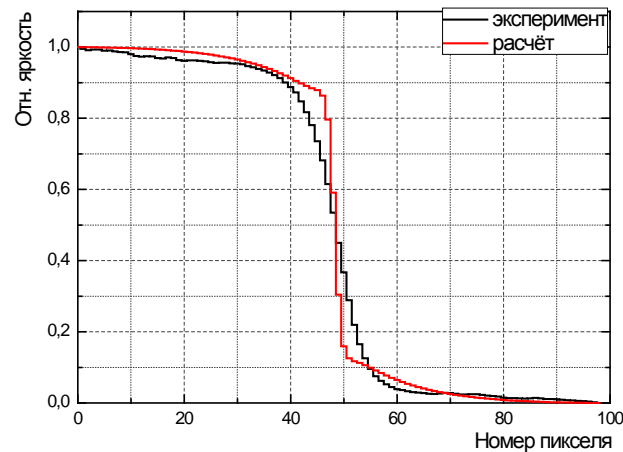
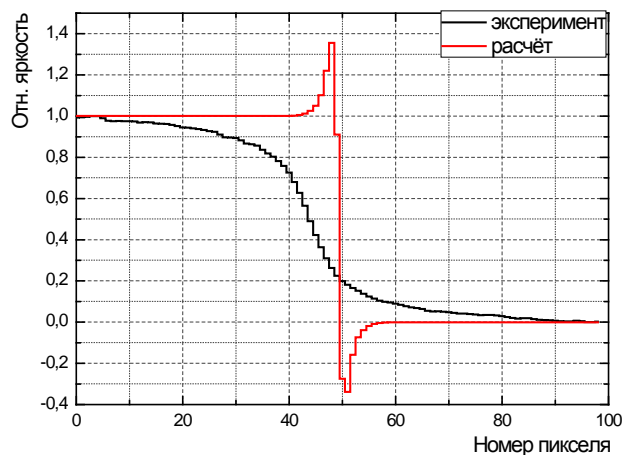
исходное изображение



деконволюзированное
изображение

1 – толщина стали 2 см; 2 – толщина стали 4 см;
3 – толщина стали 8 см; 4 – толщина стали 6 см

Смоделированные изображения четырёхсекторного цилиндра (сравнение с экспериментом)



Вертикальные границы

Горизонтальные границы



Спасибо за внимание

- Боровков А.А. Теория вероятностей. – Москва: Наука, 1986. – 432 с.
- Феллер В. Введение в теорию вероятностей и её приложения, т.1. – Москва: Мир, 1964. – 512 с.
- Flash Radiography with 24 GeV/c protons. C.L. Morris, E. Ables and oths. Journal of Applied Physics, 109, 104905. 2011.
- Physical Review D. Particles and Fields. Pt.1, vol.66, n.1-I. The American Physical Society.
- Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика. Книга 2. Физика элементарных частиц. – Москва: Энергоатомиздат, 1993. – 408 с.
- Амальди У. Как выглядят протоны в пучках сильновзаимодействующих частиц. Успехи физических наук, т. 124, вып. 4. 1978. С. 651-683.
- Штеффен К. Оптика пучков высокой энергии. – Москва: Мир, 1969. – 224 с.
- Ландау Л.Д. Собрание трудов, том 1. – Москва: Наука, 1969. – С. 482-490.