Экспериментальные методы в ФВЭ

- Взаимодействие излучения с веществом
- Детекторы частиц

Введение

Виды фундаментальных взаимодействий

- гравитация
- сильное («ядерное»)

- электромагнитное +
- слабое

= электрослабое

Электромагнитное взаимодействие:

- электрические заряды
- фотон

Квантовая механика

Квантовая теория поля

Квантовая электродинамика

Релятивистская механика

Некоторые обозначения и соотношения релятивистской механики

$$\beta = v/c < 1$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \geq 1$$

$$E^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2$$

$$E/(mc^2) = \gamma$$

$$pc/E = \beta$$

Единицы измерения и фундаментальные постоянные

$$E^2 = (m\,c^2)^2 + (pc)^2 \quad \rightarrow$$

[E] = эВ

[p] = эВ/c

[m] = эВ/c^2

$$\Delta p \Delta x = \underline{h} \quad \rightarrow$$

[x] = $\underline{h}$c * эВ$^{-1}$

Коэффициент преобразования

$\underline{h}$c = 200 МэВ*Фм (1 Фм = 10^{-13} см)

c = 1 $\rightarrow$ $E_0 = m$

$\underline{h}$ = 1 $\rightarrow$ $E_\gamma = \omega = 2\pi / \lambda \rightarrow$ **(400 нм)$^{-1}$ = 3.14 эВ**

k = 8.6 * 10^{-5} эВ/К $\rightarrow$ **kT(300 K) = 26 *10^{-3} эВ**

Единицы измерения и фундаментальные постоянные

Постоянная взаимодействия **$\alpha = e^2/(\underline{h}c) = 1/137\ldots$**

Классический радиус электрона

$r_e = e^2 / (m_e c^2) = \alpha^* (\underline{h}c) / (m_e c^2)$

$= 1/137 * 200$ МэВ*Фм $/ 0.511$ МэВ $= 2.8$ Фм

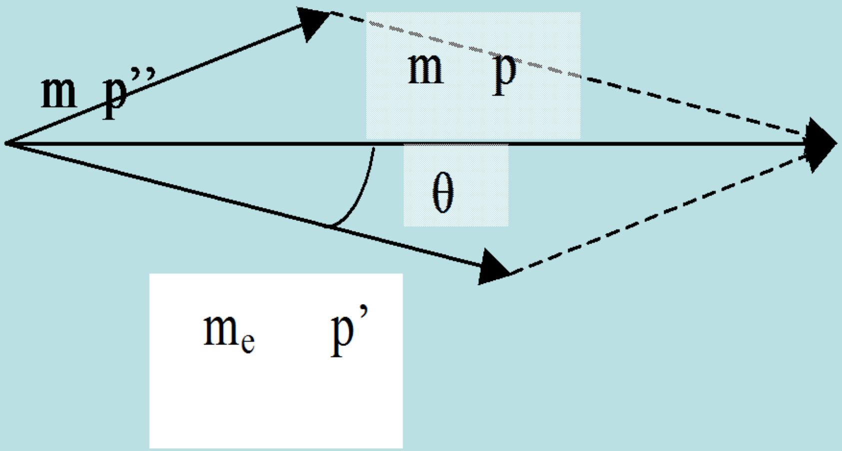
(радиус нуклона ~ 1 Фм)

Радиус Бора

$a_B = (\underline{h}c)^2 / (m_e c^2 \; e^2) = r_e / \alpha^2 = 53 * 10^{-10}$ см

Столкновение тяжёлой частицы со свободным электроном

1. Задача: найти максимальную кинетическую энергию (отдачи) электрона *T* в столкновении с частицей массой *m* и импульсом *p*



2. Рассмотреть решение в 2-х предельных случаях:

При $m \ll p \ll m^2/m_e$

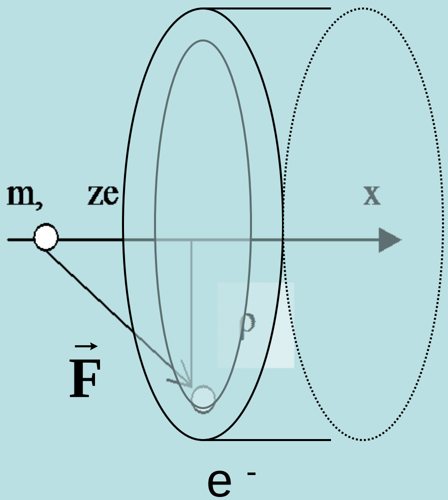
При $p \gg m^2/m_e$

(соответствует $p \gg 40$ ГэВ для $m = m_\pi = 140$ МэВ)

Ионизационные потери энергии

- Кулоновское взаимодействие заряженной частицы с электронами (и ядрами*)   в-ва
- Ионизация и возбуждение

Ионизационные потери энергии. Простая модель



Поперечный переданный электрону импульс для силы

$$F_{\perp} = \frac{ze^2 b}{(x^2+b^2)^{3/2}}$$

$$\Delta p_{\perp} = \int F_{\perp}\, dt = \frac{2ze^2}{bv}$$

используем

$$\int \frac{dx}{(x^2+b^2)^{3/2}} = \frac{x}{b^2\sqrt{x^2+b^2}} \rightarrow \int_{-\infty}^{+\infty} f dx = \frac{2}{b^2}$$

Энергия (нерелятив. случай)

$$\Delta T = \frac{\Delta p_{\perp}^2}{2m_e} = \frac{2z^2e^4}{m_e v^2}\cdot\frac{1}{b^2}$$

Передача энергии электронам, содержащимся с плотностью n_e в кольцевом слое (b, b+*d*b) * *d*x

объёмом *d*V = 2πb *d*b dx

$$d^2T = \Delta T\, dV n_e = \frac{4\pi n_e z^2 e^4}{m_e v^2}\cdot\frac{db}{b}dx$$

Полная потеря

$$\frac{dE}{dx} = \int_{b_{min}}^{b_{max}} \frac{d^2T}{dx}(b)\,db = \frac{4\pi n_e z^2 e^4}{m_e v^2}\ln\frac{b_{max}}{b_{min}} = \frac{2\pi n_e z^2 e^4}{m_e v^2}\ln\frac{\Delta T_{max}}{\Delta T_{min}}$$

Ионизационные потери энергии. Формула Бете – Блоха

$$\frac{dE}{\rho dx} = \frac{z^2}{\beta^2}\frac{Z}{A}K\left[\ln\frac{2m_e\gamma^2\beta^2}{I} - \beta^2 - \frac{\delta}{2}\right]$$

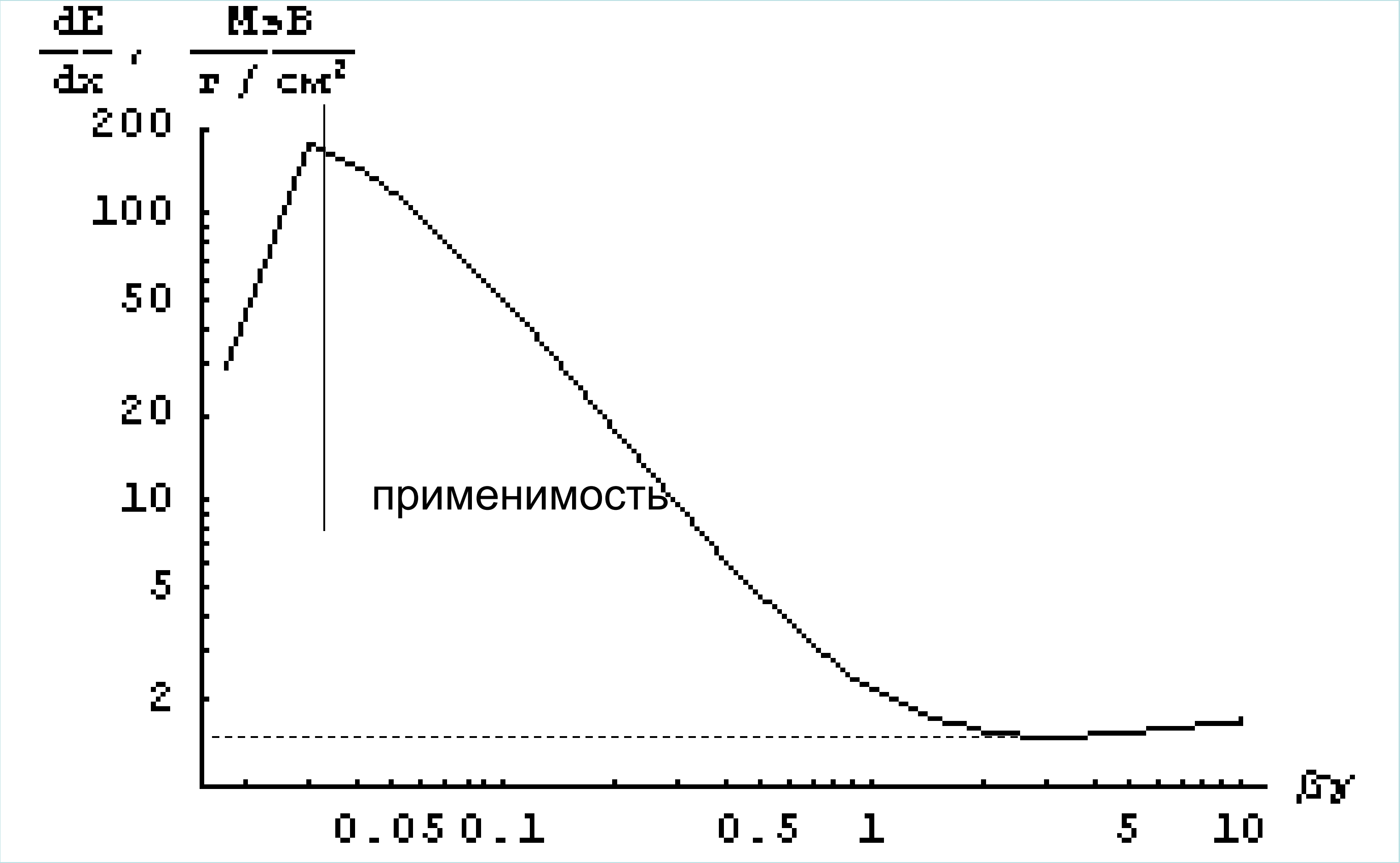
$$K/A = \frac{4\pi e^4 N_A}{m_e A} = 4\pi r_e^2 m_e N_A / A = 0.3\ \text{МэВ} * \text{см}^2/\text{г} \quad (A = 1\text{г}/\text{моль})$$

Здесь N_A – число Авогадро,
Z и A – атомный номер и массовое число вещества,
I – его (*средний*) *потенциал ионизации*,
z – заряд (в единицах *e*) ионизирующей частицы,
β - скорость
e, r_e и m_e – заряд, классический радиус и масса электрона.

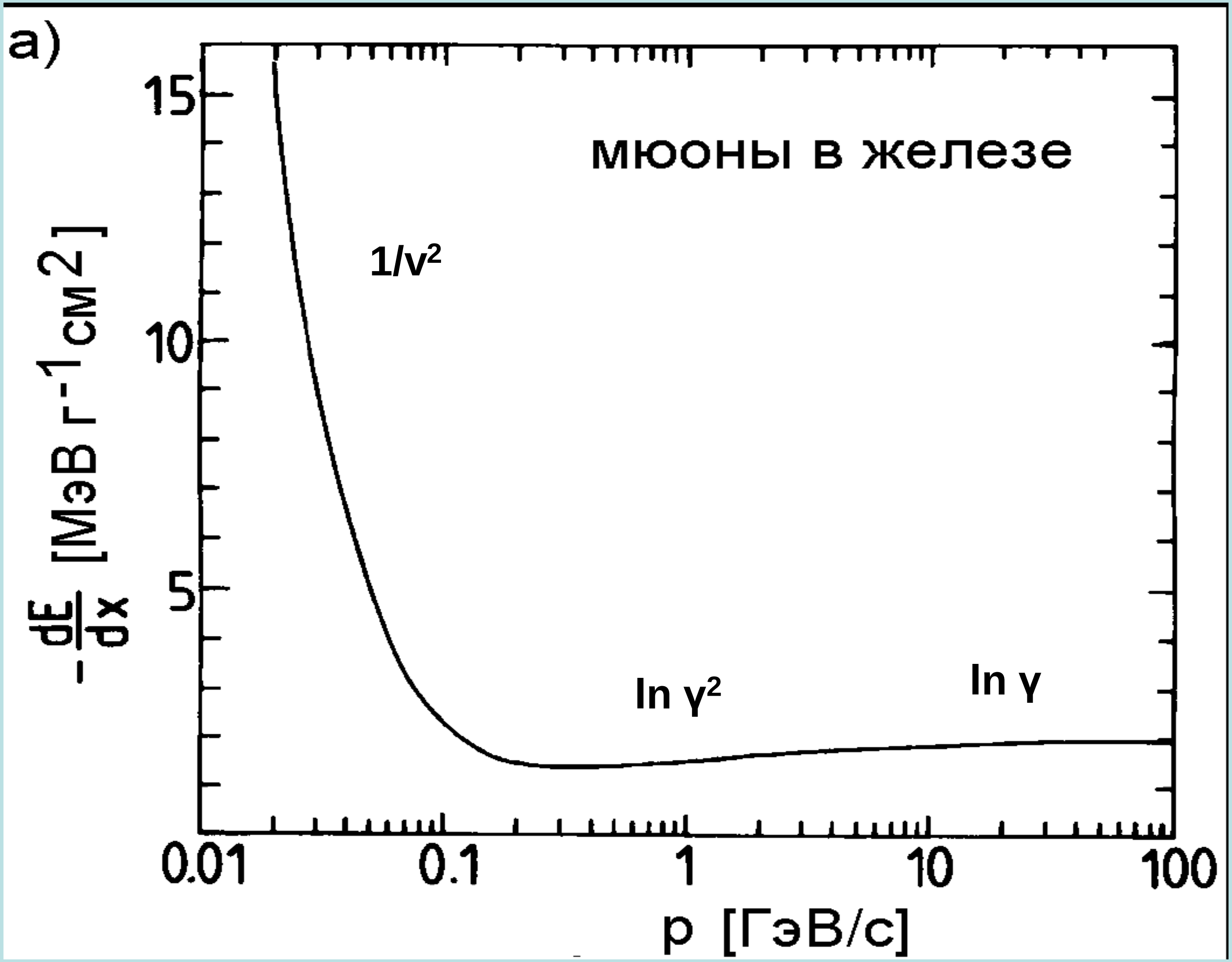
N.B.

- $m \gg m_e$
- нет тождественности
- нет учёта спина

Кривая dE/dx как ф-ия βγ



Ионизационные потери мюона в железе



Ионизационные потери.
Эффект плотности среды

2 фактора роста потерь с γ в квантово-механическом подходе (ф-ла Бете-Блоха как Борновское приближение задачи рассеяния):

- рост T_{max}
- Лоренцево «сжатие» продольной компоненты поля → рост вклада «дальних» столкновений

Компенсирующий фактор - поляризация среды (ω_p - плазменная частота в данном в.-ве). Фактор «плотности среды» в ф.-ле ББ:

$$\delta = 2\ln\frac{\hbar\omega_p\gamma}{I} + \mathrm{const}$$

$$\hbar\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m_e}} = 29\sqrt{\rho\frac{Z}{A}} \quad \text{эВ} \quad ([\rho] = \text{г}/\text{см}^3)$$

приводит к замедлению ($\ln\gamma^2$ → $\ln\gamma$) релятивистского роста потерь в области $\gamma > \gamma_p = I / \omega_p$

Первичная и вторичная ионизация. δ - электроны

- **2 стадии ионизации: прямая (первичная) + энергичные (δ) электроны (вторичная) (I << T << T_{max})**
- **Энергетический спектр δ – электронов:**

$$T(\rho) \propto 1/\rho^2$$

$$dN_\delta(T) \propto dV(\rho) \propto \rho\, d\rho \propto d(\rho^2) \propto d(1/T) \propto 1/T^2$$

$$\frac{d^2N_\delta}{dT\rho\, dx} = \frac{1}{2} K \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \frac{1}{T^2} \approx \frac{0.077}{T^2} \frac{\text{МэВ}}{\text{г}/\text{см}^2}$$

- **угол вылета δ – электронов относительно импульса частицы:**

$$\cos^2\theta \approx \frac{T}{T_{max}} \Rightarrow \theta \approx \frac{\pi}{2}$$

(нерелятив. случай; Kobetich, Katz. Phys.Rev. **170**, 391 (1968))

$$\cos^2\theta \approx \frac{T(m_e + \sqrt{p^2 + m^2})^2}{(T + 2m_e)p^2} \xrightarrow{p>>m,m_e} \frac{T}{T + 2m_e} \xrightarrow{T<<m_e} \frac{T}{2m_e} << 1 \Rightarrow \theta \approx \frac{\pi}{2}$$

Ограниченные ионизационные потери.

Если для регистрации доступны однократные ограниченные потери с $T < T_{cut}$:

замена $T_{max}(\gamma) \rightarrow T_{cut}$ = const, т.е. уменьшение релятивистского роста в dE/dx

С учетом фактора плотности потери dE/dx выходят на плато Ферми: dE/dx(γ) = const

Возможны также дважды ограниченные потери: $T < T < T_{cut}$

Флуктуации ионизационных потерь.

- **Ф-ла ББ – для средних потерь**
- **Каков разброс вокруг среднего?**

Для единичного столкновения

$$W(T) = \frac{1}{N}\frac{dN}{dT} = \frac{C}{T^2}$$

$$\langle T \rangle = \frac{\int_{T_{min}}^{T_{max}} T W(T)\, dT}{\int_{T_{min}}^{T_{max}} W(T)\, dT} = \frac{T_{max} T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \ln\frac{T_{max}}{T_{min}} \approx T_{min} \ln\frac{T_{max}}{T_{min}}$$

$$\langle T^2 \rangle = \frac{\int_{T_{min}}^{T_{max}} T^2 W(T)\, dT}{\int_{T_{min}}^{T_{max}} W(T)\, dT} \approx T_{max} T_{min}$$

$$\sigma_T^2 \equiv \langle T^2 \rangle - \langle T \rangle^2 \approx T_{max} T_{min}$$

Флуктуации ионизационных потерь.

Для «толстого» слоя в.-ва, но с $\Delta E << E$ («много» независимых столкновений)

$$\langle \Delta E \rangle = N \langle T \rangle$$

$$\sigma_E^2 = N \sigma_T^2$$

$$\frac{\sigma_E}{\langle \Delta E \rangle} = \sqrt{\frac{T_{max}}{\langle \Delta E \rangle} \frac{1}{\ln \frac{T_{max}}{T_{min}}}}$$

Простой (нетипичный, низкоэнергичный) случай: $T_{max} << \Delta E$

- **очень много столкновений**
- **«работает» ЦПТ → Гауссово распределение**
- $$\frac{\sigma_E}{\langle \Delta E \rangle} \propto \frac{1}{\sqrt{\rho x}}$$

Распределение Ландау

Сложный случай T_{max}>~ ΔE (высокая энергия, тонкий слой в-ва)

- **ΔE - из малого числа столкновений (~1)**
- **W(T) – «плохое» (σ_T велико)**
- **ЦПТ не работает**

Распределение Ландау ионизационных потерь ΔE в слое ρx:

$$W(\rho x, \Delta E)d(\Delta E) = \xi^{-1}\phi(\lambda)\ d(\Delta E)$$

где $\xi = \frac{K}{2}\frac{z^2}{\beta^2}\frac{Z}{A}\rho x \quad \approx 0.077\rho x$ МэВ ($z = \beta = 1$, $Z/A = 1/2$, $[\rho x] =$ г/см^2) - мера толщины в.-ва (и средних потерь).

$$\phi(\lambda) = \frac{1}{2\pi i}\int_{-i\infty+\sigma}^{i\infty+\sigma} exp(u\ln u + \lambda u)du$$

$\lambda = \frac{\Delta E - \Delta E_0}{\xi}$ - нормированное отклонение от наиболее вероятных потерь

$$\Delta E_0 = \xi[ln(\frac{2m_e\beta^2\gamma^2}{I^2}\xi) - \beta^2 + 0.423]$$

Среднее число столкновений <N> = x dN/dx ~ 10 ξ / I

Применимость распред. Ландау 100 I << ξ < 10 Tmax

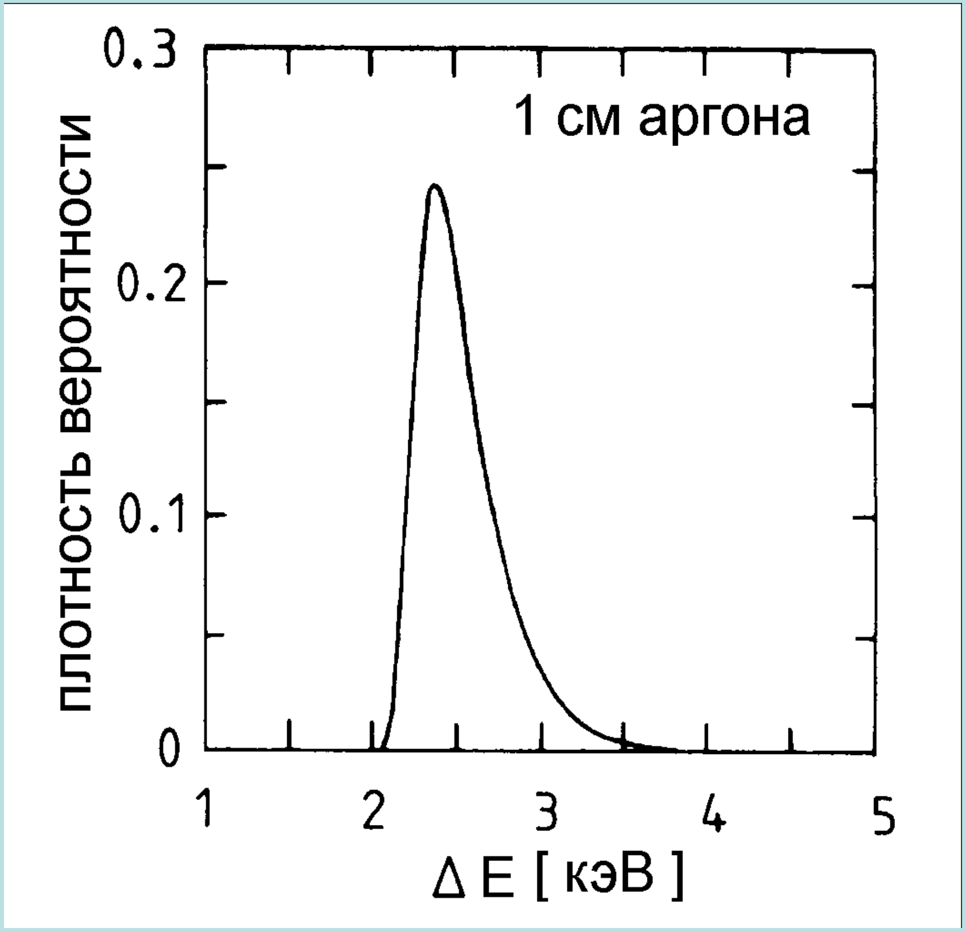
Распределение Ландау

$$\Delta \mathbf{E_0} \propto \rho \mathbf{x}\, ln\, \rho \mathbf{x}$$

$$\langle \Delta \mathbf{E} \rangle \propto \rho \mathbf{x}$$

$$\mathbf{FWHM} \approx 4\xi$$

$$\frac{\mathbf{FWHM}}{\langle \Delta \mathbf{E} \rangle} \approx \mathbf{0.20}$$



FWHM – full width at half maximum

(Ширина на полувысоте)