

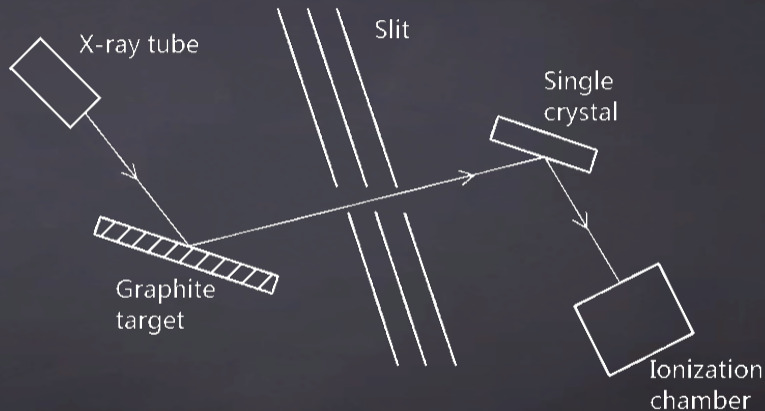
Обратное комптоновское рассеяние лазерного излучения на пучке релятивистских электронов

Николай Мучной

ИЯФ СО РАН

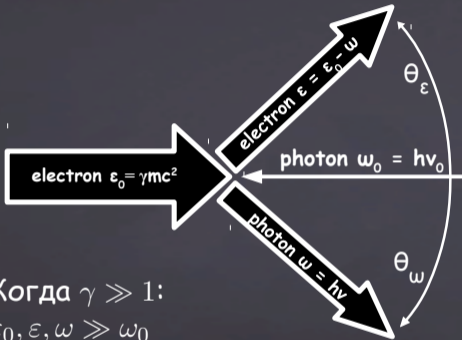
ИЛФ СО РАН - 1 июня 2018 г.

Эффект Комптона - 1923 (Нобелевская премия 1927 г.)



$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos \theta), \text{ где } \frac{h}{mc} \equiv \lambda_c = 1.43 \cdot 10^{-12} \text{ м}$$

Углы рассеяния



Когда $\gamma \gg 1$:
 $\varepsilon_0, \varepsilon, \omega \gg \omega_0$

Универсальный параметр рассеяния

$$u = \frac{\omega}{\varepsilon} = \frac{\theta_\varepsilon}{\theta_\omega} = \frac{\omega}{\varepsilon_0 - \omega} = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon}{\varepsilon}$$

находится внутри диапазона

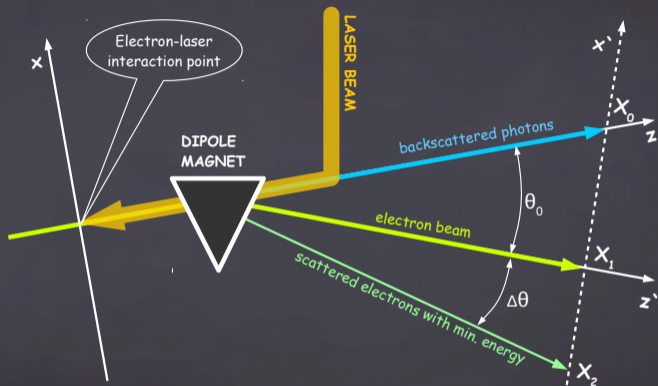
$$0 \leq u \leq \kappa = \frac{4\omega_0\varepsilon_0}{(mc^2)^2} = 4\gamma \frac{\omega_0}{mc^2}$$

$\kappa \simeq 1.53$ для $\varepsilon_0 = 100$ ГэВ и $\omega_0 = 1$ эВ

Углы рассеяния: $\theta_\omega = \frac{1}{\gamma} \sqrt{\frac{\kappa}{u} - 1}$; $\theta_\varepsilon = \frac{u}{\gamma} \sqrt{\frac{\kappa}{u} - 1}$.

$\max(\theta_\varepsilon) = 2\omega_0/mc^2$ ($\simeq 10^{-5}$ рад для зеленого света).

Схема проведения экспериментов



▶ Ф. Р. Арутюнян, В. А. Туманян

ЖЭТФ - 1963 - т. 44 № 6.

"Комптон-эффект на релятивистских электронах и возможность получения пучков жёстких γ -квантов"

▶ Richard H. Milburn

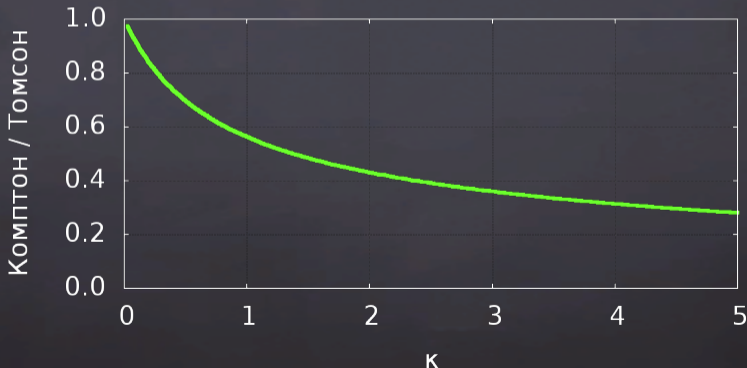
Phys. Rev. Lett. - 1963 - v. 10 № 3.

"Electron Scattering by an Intense Polarized Photon Field"

Сечение рассеяния

$$\sigma_C = \frac{2\pi r_e^2}{\kappa} \left(\left[1 - \frac{4}{\kappa} - \frac{8}{\kappa^2} \right] \log(1 + \kappa) + \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{(1 + \kappa)^2} \right] + \frac{8}{\kappa} \right) \xrightarrow{\kappa \ll 1} \sigma_T(1 - \kappa),$$

где $\sigma_T = \frac{8}{3}\pi r_e^2 = 0.665 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$ - сечение томсоновского рассеяния.



Плотность фотонов в лазерном пучке

Интенсивность излучения в сфокусированном пучке излучения лазера:

$$I(r, z) = \frac{P}{2\pi\sigma(z)^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma(z)^2}\right) \left[\text{Вт/см}^2\right], \text{ где}$$

- ▶ z - ось луча, r - расстояние от оси, P [Вт] - мощность излучения,
- ▶ $\sigma(z) = \sigma_0 \sqrt{1 + (z/z_R)^2}$ - радиус пучка по уровню интенсивности $1/e$,
- ▶ σ_0 - радиус в точке фокусировки ($z = 0$),
- ▶ $z_R = 4\pi\sigma_0^2/\lambda$ - Релеевская длина: $I(0, z_R) = I(0, 0)/2$.

Мощность излучения: $P \equiv \frac{dE}{dt} = h\nu \frac{dN}{dt}$, стало быть $\rho_{\parallel} = \frac{dN}{dz} = \frac{P\lambda}{hc^2} \left[\text{см}^{-1}\right]$.

Вероятность рассеяния

Рассмотрим ультра-релятивистский электрон ($v/c \simeq 1$), движущийся навстречу лазерному лучу по его оси. Плотность фотонной мишени:

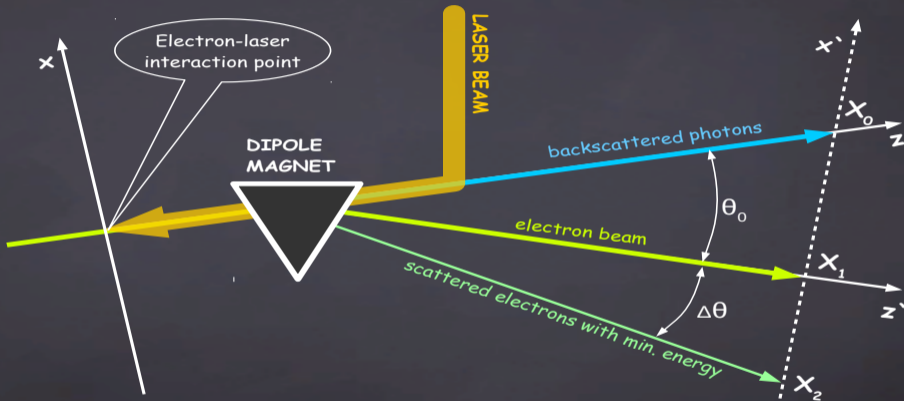
$$\rho_{\perp} = \frac{\rho_{\parallel}}{\pi\sigma_0^2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dz}{1 + (z/z_R)^2} = \frac{4P}{hc^2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dx}{1 + x^2} = \frac{4\pi P}{hc^2} [\text{см}^{-2}].$$

Вероятность томсоновского рассеяния для электрона

$$W = \rho_{\perp} \sigma_T = \frac{P}{P_c}, \text{ где } P_c = \frac{\hbar c^2}{2\sigma_T} \simeq 0.7 \cdot 10^{11} [\text{Вт}]$$

не зависит от длины волны излучения. Сильная фокусировка не обязательна, т. к. может быть "скомпенсирована" длиной взаимодействия.

Схема проведения экспериментов

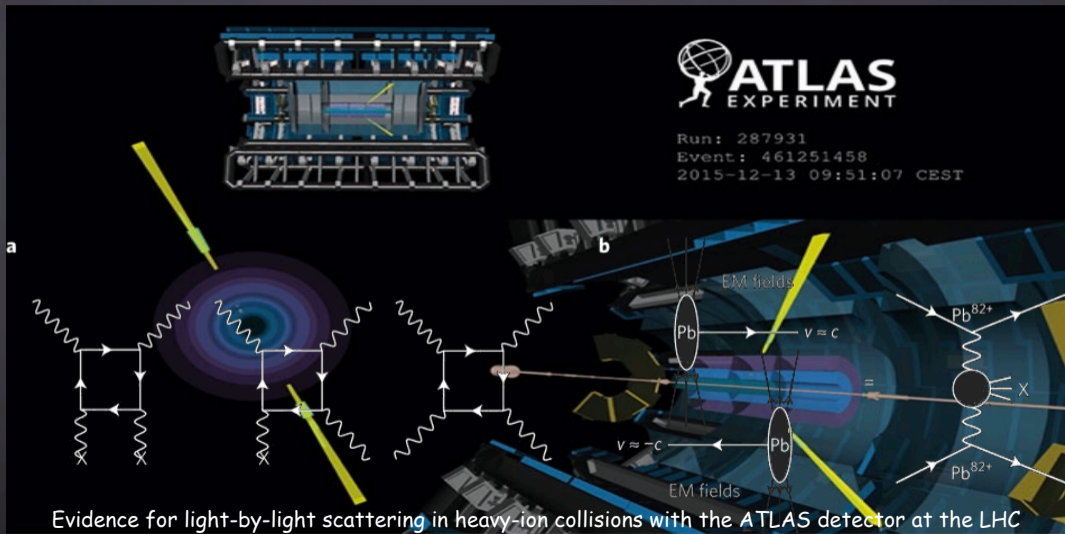


Ток в циклическом ускорителе электронов $I = e \cdot dN/dt$.

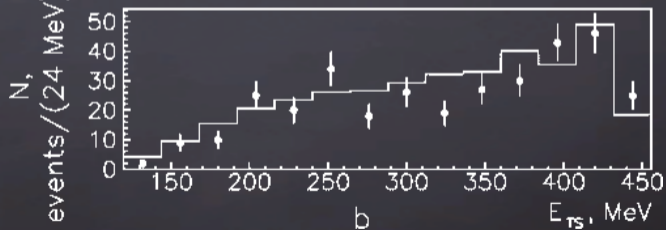
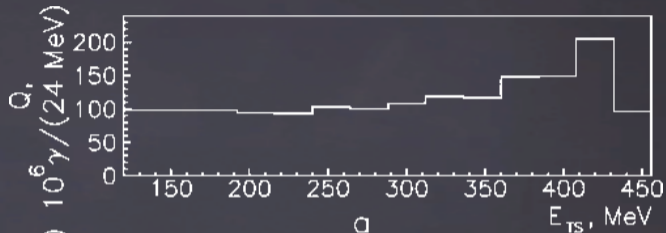
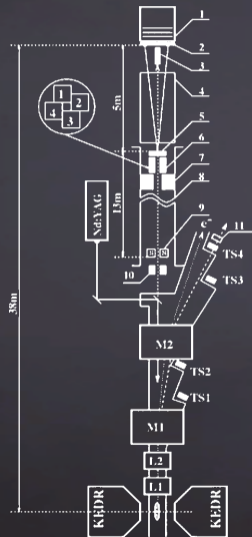
$I = 1.6 \text{ мА}$ это 10^{16} электронов в секунду.

Один ватт лазерного излучения дает $\simeq 10^5 \div 10^7$ актов рассеяния в секунду.

Нелинейные процессы в КЭД

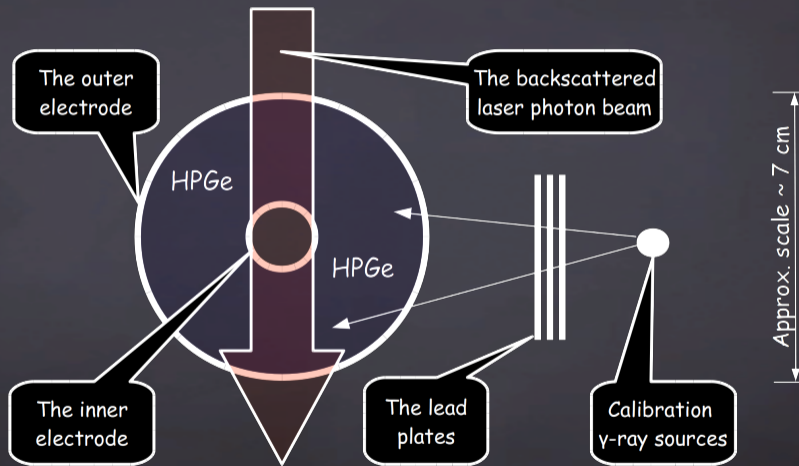


Расщепление фотона (ИЯФ, ВЭТТТ-4М, 1995 - 2002)



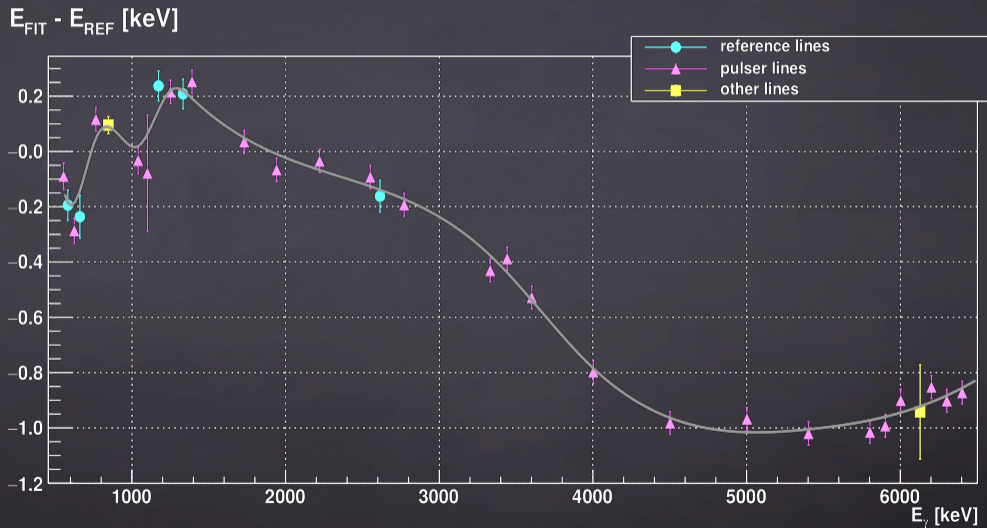
Physical Review Letters V.89 № 6, 2002

Измерение энергии e^\pm пучков



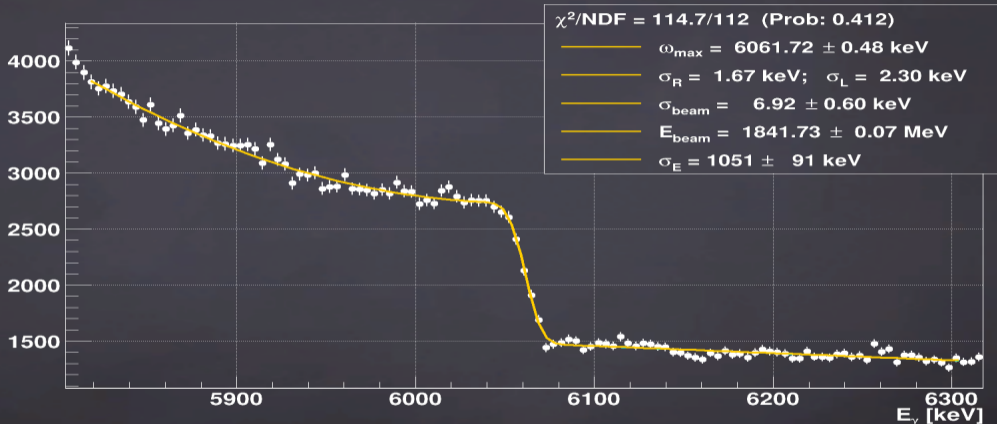
VEPP-4M (2005) ○ BEPC-II (2010) ○ VEPP-2000 (2012)

Абсолютная калибровка шкалы



Край спектра КОМПТОНОВСКИХ γ -КВАНТОВ

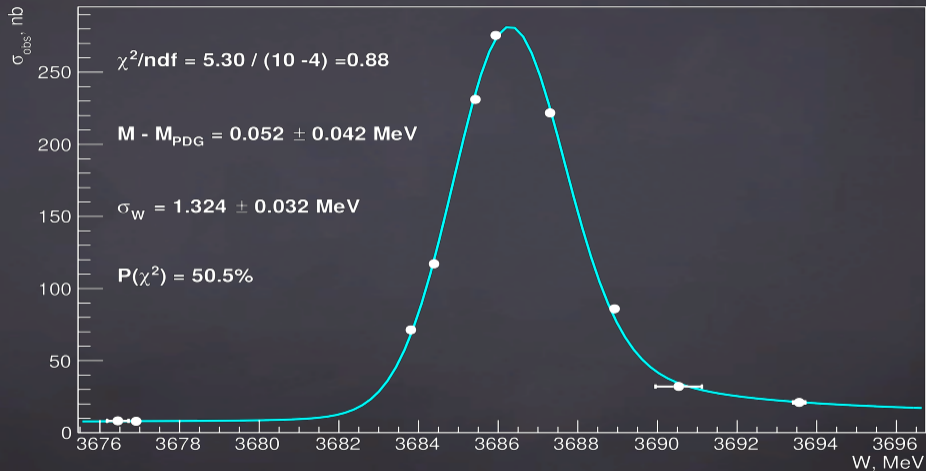
positron: 2018.04.27 [19:20:24 - 12:31:37] 2018.04.28. Live-time: 4 hours 21 min 5 s (16 files).



$$E_{\text{beam}} = \frac{\omega_{\text{max}}}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{m^2}{\omega_0 \omega_{\text{max}}}} \right) \quad (\omega_0 = 0.11706523 \text{ эВ})$$

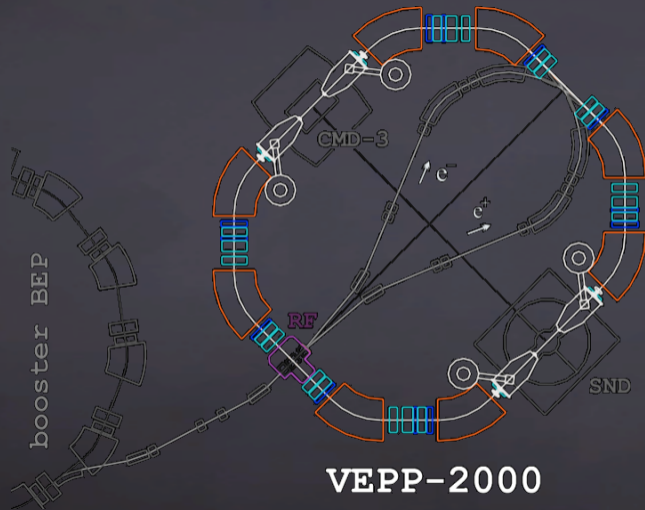
BEPC-II $\psi(2S)$ scan 2017

$\psi(2S)$



Абсолютная точность измерения $\Delta M/M \simeq 2 \cdot 10^{-5}$

ВЭПП-2000: e^+e^- коллайдер в ИЯФ



VEPP-2000

Не нашлось свободного прямолинейного участка!

Периметр:

$$P = 24.388 \text{ м}$$

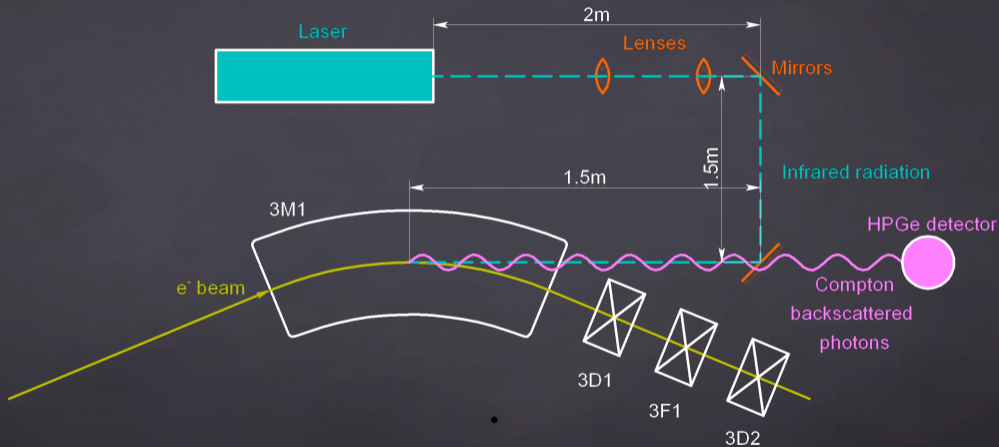
Энергия в с. ц. м.:

$$E = 200 - 2000 \text{ МэВ}$$

Светимость / место встречи:

$$L = 10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$$

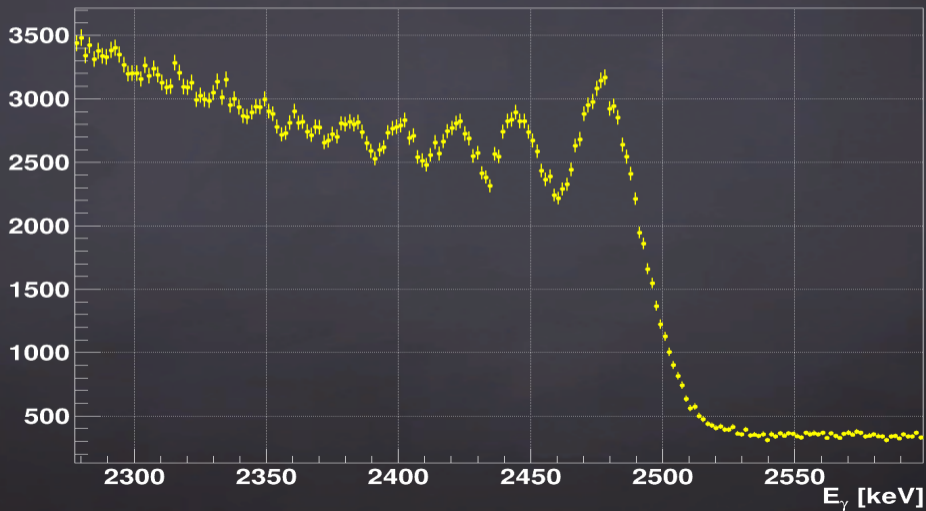
Система ОКР



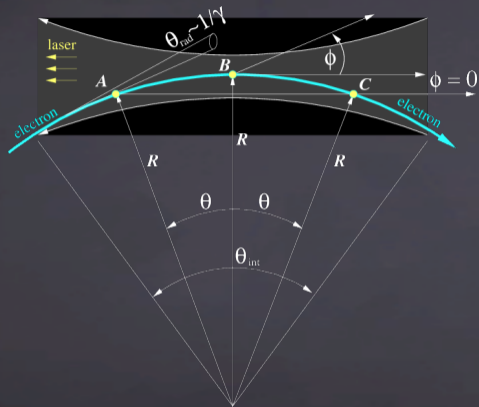
Радиус орбиты в дипольном магните: $R = 140$ см

Измерение (что это?)

porridge: 2017.01.31 [16:59:03 - 20:33:03] 2017.01.31. Live-time: 2 hours 50 min 32 s (10 files).



Рассеяние + интерференция



Время для электрона $A \rightarrow B \rightarrow C$:

$$t_e = \frac{2R\theta}{\beta c}$$

Время для фотона $A \rightarrow C$:

$$t_\gamma = \frac{2R \sin \theta}{c} \cos \psi$$

Набег фазы:

$$\Delta\Phi = 2\pi c \left(\frac{t_e - t_\gamma}{\lambda} - \frac{2t_e}{\lambda_0} \right),$$

λ_0 - длина волны лазера.

$\theta_{int} \gg \theta_{rad}$: берем только $\phi = 0$

Для 1 МэВ фотона $\lambda = 1.24 \cdot 10^{-12}$ м. Для $R = 140$ см, $E = 1$ ГэВ,

$\Delta\Phi = 2\pi$ когда $\theta \simeq 0.1/\gamma$ и $\overline{AC} \simeq 0.1$ мм $\simeq 10^8 \lambda$!

Спектр рассеянного излучения

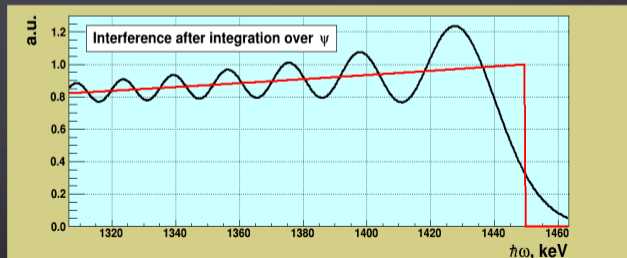
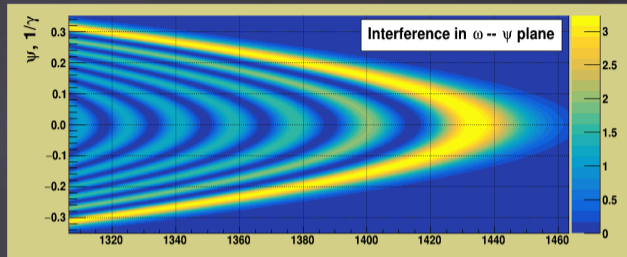
$$\frac{d\dot{N}_\gamma}{d\hbar\omega d\psi} \propto \omega^{1/3} \text{Ai}^2(x),$$

где

$$x = \left[\frac{\omega R}{2c} \right]^{2/3} \left[\frac{1}{\gamma^2} - \frac{4\omega_0}{\omega} + \psi^2 \right],$$

$$\text{Ai}(x) \equiv \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \cos \left(xt + \frac{t^3}{3} \right) dt,$$

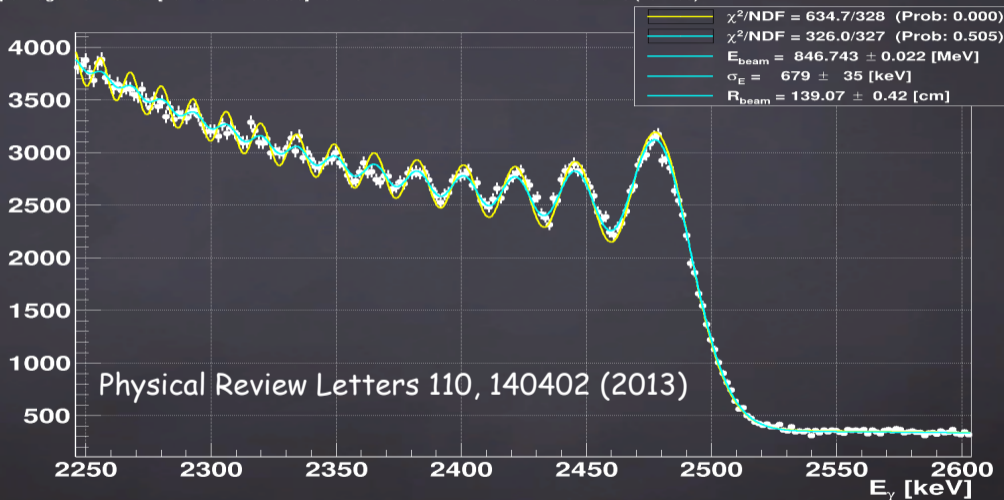
- функция Эйри.



$$\omega_0 = 0.117 \text{ эВ} ; E = 900 \text{ МэВ} ; R = 140 \text{ см}$$

Эксперимент и теория

porridge: 2017.01.31 [16:59:03 - 20:33:03] 2017.01.31. Live-time: 2 hours 50 min 32 s (10 files).



Расчёт КЭД: В.Ч.Жуковский, И. Херрманн. Ядерная Физика т. 14, вып. 1, 1971.

Заключение

- ▶ Обратное комптоновское рассеяние лазерного излучения на пучке релятивистских электронов – уникальный способ получения интенсивного узконаправленного потока монохроматических поляризованных гамма-квантов высокой энергии.
- ▶ Однако, в области жесткого рентгена он существенно уступает по интенсивности и яркости синхротронному излучению.
- ▶ Создание специализированного высокодобротного оптического резонатора в вакууме позволило бы существенно увеличить эффективность рассеяния. Почему бы не попробовать?

СПАСИБО за ВНИМАНИЕ!