

Измерение энергии пучка коллайдера ВЭПП-2000

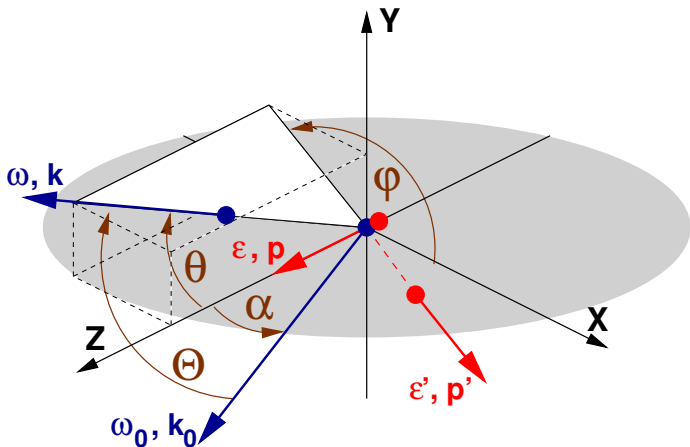
Николай Мучной

Budker INP SB RAS, Novosibirsk, Russia

29 марта, 2013

- 1 Введение
- 2 ВЭПП-2000: e^-e^+ коллайдер с круглыми пучками
- 3 Калибровка энергетической шкалы HPGe
- 4 Сравнение с методом РД

Комптоновское рассеяние: кинематика

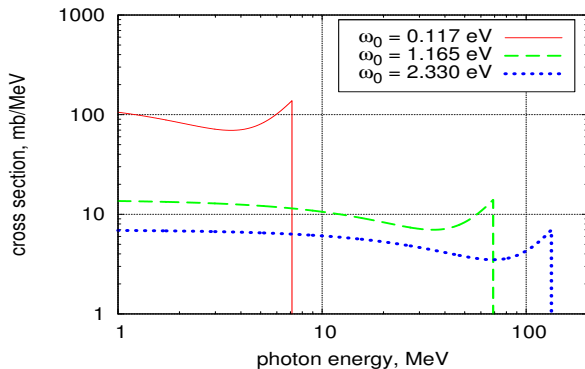


$$\omega = \omega_0 \frac{1 - \beta \cos \alpha}{1 - \beta \cos \theta + \frac{\omega_0}{\varepsilon} (1 - \cos \Theta)}$$

Комптоновское рассеяние: ω_{max} и ε

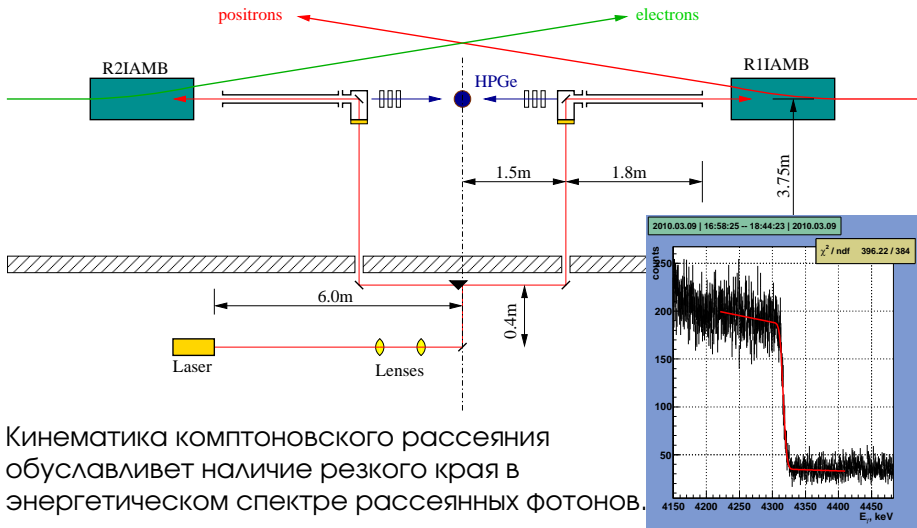
Встречные пучки ($\alpha = \pi$):

$$\omega_{max} = \frac{\varepsilon^2}{\varepsilon + m^2/4\omega_0} \Rightarrow \varepsilon = \frac{\omega_{max}}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{m^2}{\omega_0\omega_{max}}} \right)$$



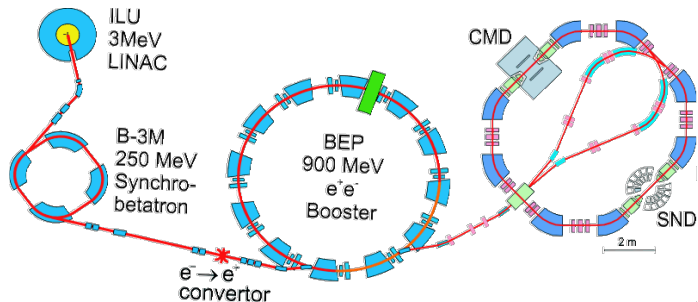
$$\alpha = \pi$$
$$\varepsilon = 2\text{GeV}$$

ВЕРС-II: Измерение энергии пучка



- 1 Введение
- 2 ВЭПП-2000: e^-e^+ коллайдер с круглыми пучками
- 3 Калибровка энергетической шкалы HPGe
- 4 Сравнение с методом РД

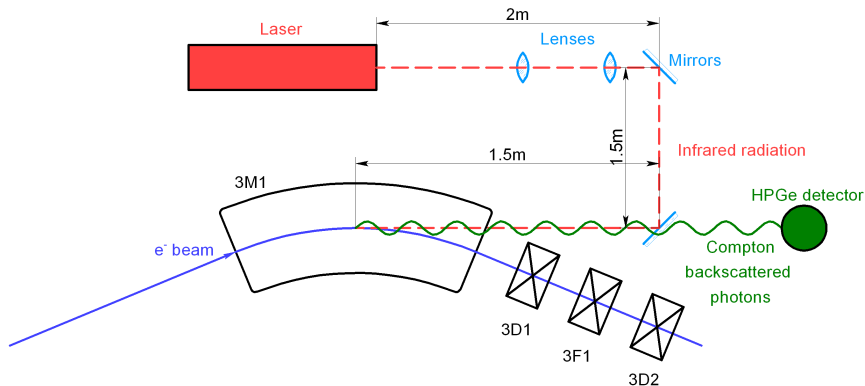
ВЭПП-2000: коллайдер с круглыми пучками



beam energy $E_0 = 0.1 - 1^{(*)}$ GeV
circumference $C = 24.388$ m
RF frequency $f_0 = 172$ MHz
mom. compaction $\alpha = 0.036$
synchrotron tune $\nu_s = 30.73$ kHz
betatron tunes $Q_x = 4.1, Q_z = 2.1$

emittances $\varepsilon_x = \varepsilon_z = 220$ nm
i.p. beta func. $\beta_x = \beta_z = 6.3$ cm
energy spread $\sigma_E/E = 7 \cdot 10^{-4}$
bunch length $\sigma_s = 3.3$ cm
particles/bunch $- 10^{11}$
 $L_{max} = 10^{32} \text{ cm}^{-2} \times \text{s}^{-1} (\times 2 \text{ i.p.})$

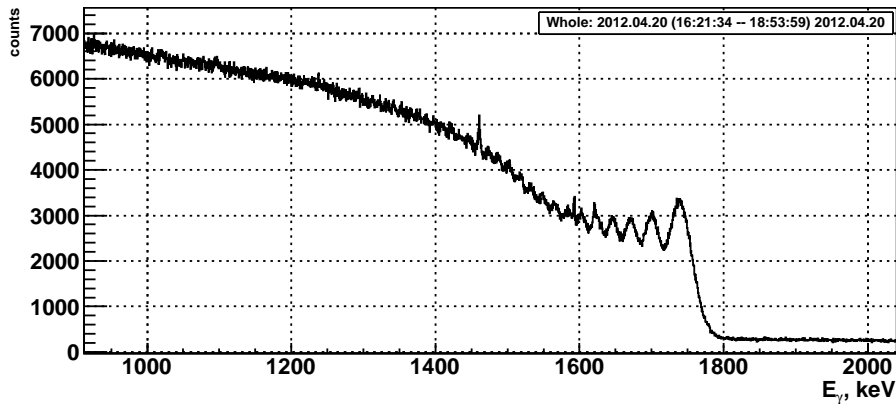
Схема расположения оборудования



Радиус орбиты в поворотном магните $R = 140$ см

Апрель 2012: первые измерения...

Энергия пучка $E=990$ MeV, лазерного фотона $\omega_0=0.117$ эВ, $B=2.38$ Т.



Backscattering of Laser Radiation on Ultrarelativistic Electrons in a Transverse Magnetic Field: Evidence of MeV-Scale Photon Interference

E. V. Abakumova, M. N. Achasov, D. E. Berkaev, V. V. Kaminsky, N. Yu. Muchnoi,*

E. A. Perevedentsev, E. E. Pyata, and Yu. M. Shatunov

*Budker Institute of Nuclear Physics Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences and Novosibirsk State University,
630090 Novosibirsk, Russia*

(Received 3 November 2012)

In this Letter we report an observation of interference effects in Compton scattering in the experiment held on the VEPP-2000 collider. Infrared laser radiation was scattered head-on the 990 MeV electrons inside the dipole magnet, where an electron orbit radius is about 140 cm. It was observed that the energy spectrum of backscattered photons, measured by a HPGe detector, differs from that defined by the Klein-Nishina cross section and scattering kinematics of free electrons. The explanation of the effect, proposed in terms of classical electrodynamics, is in agreement with QED calculations.

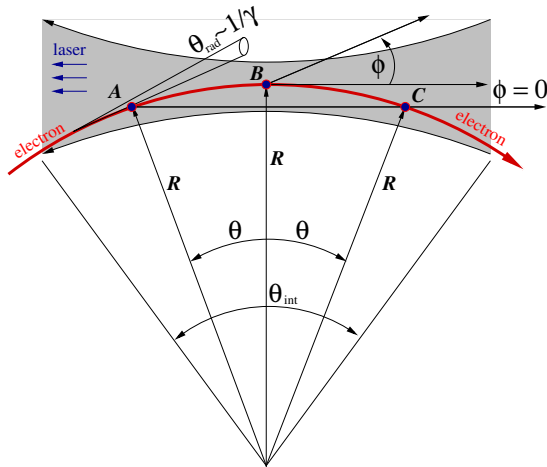
DOI:

PACS numbers: 12.20.Fv, 11.80.-m, 34.80.Pa

Область лазер-электронного взаимодействия

Interaction length depends on transverse laser waist size w .

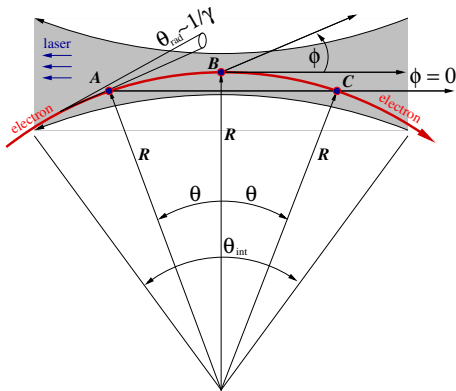
$$w \simeq 0.1 \text{ cm} \rightarrow L_{int} \simeq 2\sqrt{2wR} \simeq 10 \text{ cm}.$$



$$\theta_{int} \simeq L_{int}/R \simeq 70 \text{ mrad}, \text{ while } \theta_{rad} \sim 0.5 \text{ mrad for 1 GeV electron.}$$

Интерференция рассеянных волн?

Since $\theta_{int} \gg \theta_{rad}$, only $\phi = 0$ case is a matter of interest



Time for electron $A \rightarrow B \rightarrow C$:

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

Time for photon $A \rightarrow C$:

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

Phase shift:

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

where λ_0 is the laser wavelength.

1 MeV photon has $\lambda = 1.24 \cdot 10^{-12}$ m. For $R = 140$ cm, $E = 1$ GeV,
 $\Delta\Phi = 2\pi$ when $\theta \simeq 0.1/\gamma$ and $\overline{AC} \simeq 10^{-2}$ cm $\simeq 10^8 \lambda$!

Интерференция рассеянных волн

While $\theta, \psi, 1/\gamma \ll 1$ one has:

$$\Delta\Phi(\theta) \simeq \frac{\omega R}{c} \left\{ \theta \left(\frac{1}{\gamma^2} - \frac{4\omega_0}{\omega} + \psi^2 \right) + \frac{\theta^3}{3} \right\}. \quad (1)$$

When $\Delta\Phi$ is an odd (even) multiple of π one observes an interference minimum (maximum). The scattered field amplitude is:

$$U(\omega, \psi) \propto \omega \int_0^\infty \left(e^{i\frac{\Delta\Phi(\theta)}{2}} + e^{-i\frac{\Delta\Phi(\theta)}{2}} \right) d\theta = 2\omega \int_0^\infty \cos \frac{\Delta\Phi(\theta)}{2} d\theta. \quad (2)$$

Change of the integration variable $\theta \rightarrow \xi = \theta(\omega R/2c)^{1/3}$ gives:

$$U(\omega, \psi) \propto \omega^{2/3} \text{Ai}(x), \text{ where } x = \left(\frac{\omega R}{2c} \right)^{2/3} \left(\frac{1}{\gamma^2} - \frac{4\omega_0}{\omega} + \psi^2 \right), \quad (3)$$

and $\text{Ai}(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \cos \left(xt + \frac{t^3}{3} \right) dt$ is the Airy function.

The intensity of a scattered wave: $I = |U|^2 \propto \omega^{4/3} \text{Ai}^2(x)$.

To obtain the energy spectrum of scattered photons one takes an integral over the vertical angle ψ and divides the result by $\hbar\omega$:

$$\frac{d\dot{N}_\gamma}{d\hbar\omega} \propto \omega^{1/3} \int_0^\infty \text{Ai}^2(x) d\psi. \quad (4)$$

This integral can be expressed via the primitive of Airy function:

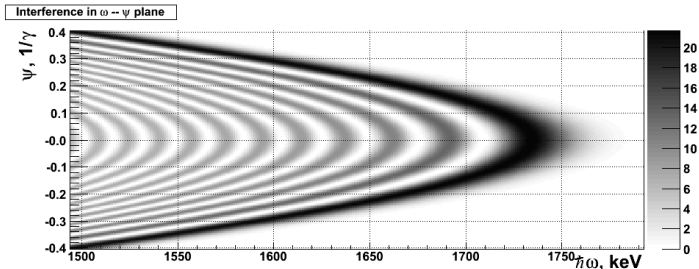
$$\int_0^\infty \text{Ai}^2(a + by^2) dy = \frac{1}{4\sqrt{b}} \int_z^\infty \text{Ai}(z') dz', \quad z = 2^{2/3} a.$$

Hence, the final form of the interference factor is:

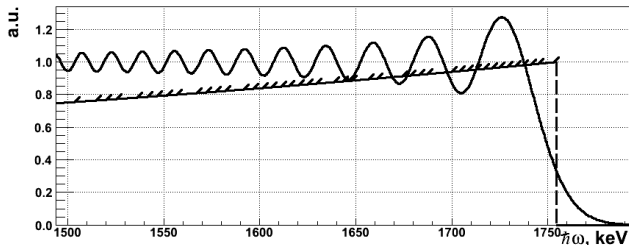
$$\frac{d\dot{N}_\gamma}{d\hbar\omega} \propto \int_z^\infty \text{Ai}(z') dz' = \frac{1}{3} - \int_0^z \text{Ai}(z') dz', \quad \text{where} \quad (5)$$

$$z = \left(\frac{\omega R}{c}\right)^{2/3} \left(\frac{1}{\gamma^2} - \frac{4\omega_0}{\omega}\right). \quad (6)$$

Интерференция до и после интегрирования



Solid line: Interference after integration over ψ . Dashed line: Klein-Nishina cross section.



Parameters: $\omega_0=0.117 \text{ eV}$, $E_e = 900 \text{ MeV}$, $R=140 \text{ cm}$ ($B=2.144 \text{ T}$)

Quantum recoil account: $\omega \rightarrow \omega \cdot E / (E - \hbar\omega)$.

(V. N. Baier, V. M. Katkov, and V. S. Fadin, Radiation by Relativistic Electrons. Atomizdat, Moscow, 1973)

An electron radius is coupled with its energy and magnetic field strength by the balance between the Lorenz and centrifugal forces: $\beta E = cBR$. It is convenient to perform $R \rightarrow E/cB$ substitution.

Let's introduce new variables:

$$u = \frac{\hbar\omega}{E - \hbar\omega}, \quad \kappa = \frac{4E\hbar\omega_0}{m^2}, \quad \chi = \frac{E}{m} \frac{B}{B_0},$$

where $B_0 = m^2/\hbar c^2 = 4.414 \cdot 10^9$ T is the Schwinger field strength.

Now z looks like:

$$z = \left(\frac{\omega R}{c}\right)^{2/3} \left(\frac{1}{\gamma^2} - \frac{4\omega_0}{\omega}\right) \rightarrow (u/\chi)^{2/3} (1 - \kappa/u). \quad (7)$$

V. Ch. Zhukovsky and I. Herrmann. Journal of Nuclear Physics 14 №1 (1971) 150-159
Compton effect and Induced Compton Effect in Constant Electromagnetic Field.

$$\frac{d\dot{N}_\gamma}{d\hbar\omega} \propto \nu_1 \int_z^\infty \text{Ai}(z') dz' + \nu_2 \text{Ai}'(z) + \nu_3 \text{Ai}(z), \text{ where} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \nu_1 &= \frac{1}{8} \left\{ 2 + \frac{u^2}{1+u} - 4\frac{u}{\kappa} + 4 \left[\frac{u}{\kappa} \right]^2 - 16 \left[\frac{u}{\kappa} \right]^2 \left[\frac{\chi}{\kappa} \right]^2 \right\}, \\ \nu_2 &= - \left[\frac{u}{\kappa} \right]^{\frac{4}{3}} \left[\frac{\chi}{\kappa} \right]^{\frac{2}{3}} \left\{ 4 \left[\frac{\chi}{\kappa} \right]^2 + \frac{u^2}{2(1+u)} \left[1 + 4 \left[\frac{\chi}{\kappa} \right]^2 \right] \right\}, \\ \nu_3 &= \left[\frac{u}{\kappa} \right]^{\frac{2}{3}} \left[\frac{\chi}{\kappa} \right]^{\frac{4}{3}} \left\{ 3 - 2\frac{u}{\kappa} + \frac{u^2}{2(1+u)} \left[3 - 4\frac{u}{\kappa} \right] \right\}. \end{aligned}$$

In our case $u \lesssim 10^{-3}$, $\kappa \lesssim 2 \cdot 10^{-3}$ and $\chi \lesssim 10^{-6}$.

$$\frac{d\dot{N}_\gamma}{d\hbar\omega} \propto \mathcal{F}(\omega, E, B, \sigma) = e^{-\frac{\eta^6}{24}} \int_{z+\eta^4/4}^{\infty} e^{\frac{z'\eta^2}{2}} \text{Ai}(z') dz', \text{ where} \quad (9)$$

$$\eta \simeq \sigma \cdot \frac{4}{3} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\kappa}{u} \right) \left(\frac{u}{\chi} \right)^{2/3},$$

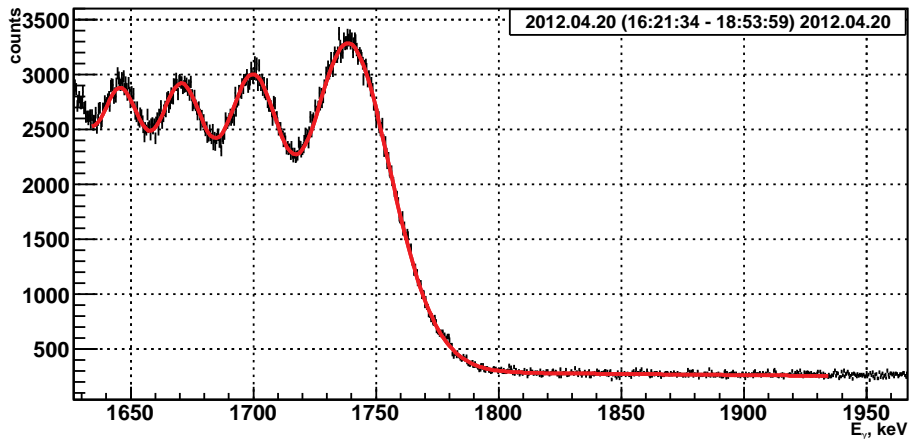
σ – relative width of gaussian electrons energy distribution.

Let's introduce a combined function to describe the shape of the experimental spectrum:

$$f(\omega) = \mathcal{A} \cdot \mathcal{F}(\omega, E, B, \sigma) + \mathcal{B}(\omega), \quad (10)$$

where $\mathcal{B}(\omega) = p_0 + p_1(\omega - \omega_{max})$ is the linear background estimation.

Подгонка спектра



The edge of the energy spectrum with the fit result:

$$\chi^2/NDF = 773.0/745, \text{ Prob.} = 0.231,$$

$$E = 993.662 \pm 0.016 \text{ MeV}, B = 2.3880 \pm 0.0044 \text{ T}, \sigma = 810 \pm 40 \text{ ppm}.$$

- 1 Введение
- 2 ВЭПП-2000: e^-e^+ коллайдер с круглыми пучками
- 3 Калибровка энергетической шкалы HPGe
- 4 Сравнение с методом РД

Абсолютная калибровка шкалы HPGe

Для точного измерения энергий Ge-спектрометром необходимо (рекомендации «Idaho group» – 1975):

- использовать *более одного* спектрометра
- *одновременно и однонаправленно* регистрировать измеряемый спектр и калибровочные линии
- измерять *разницу* энергий между близко расположенными линиями γ -излучения вместо использования полиномиальной интер- или экстраполяции энергетической калибровки в широком диапазоне
- избегать использования величин m_0c^2 и/или $2m_0c^2$ для определения разницы энергий между пиком полного поглощения и эскейп-пиками
- не использовать генераторы для целей интерполяции

- Ищем «хорошую» эмпирическую функцию для описания пиков полного поглощения от калибровочных источников.
- Основные характеристики этой функции – ширина и, вероятно, асимметрия, должны иметь разумную зависимость от энергии в широком диапазоне.
- Рассматриваем возможность использования «хорошего» генератора импульсов для целей интерполяции: BNC PB-5, паспортная интегральная нелинейность 15 ppm, джиттер 10 ppm.



Функция энергетического отклика HPGe

$$f(x) = A \times \begin{cases} 0 < x < +\infty : & \exp\left\{-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right\} \\ -K_0K_1\sigma < x \leq 0 : & C + (1 - C)\exp\left\{-\frac{x^2}{2(K_0\sigma)^2}\right\} \\ -\infty < x \leq -K_0K_1\sigma : & C + (1 - C)\exp\left\{K_1\left(\frac{x}{K_0\sigma} + \frac{K_1}{2}\right)\right\} \end{cases}$$

A – амплитуда,

$x = 0$ – энергия линии,

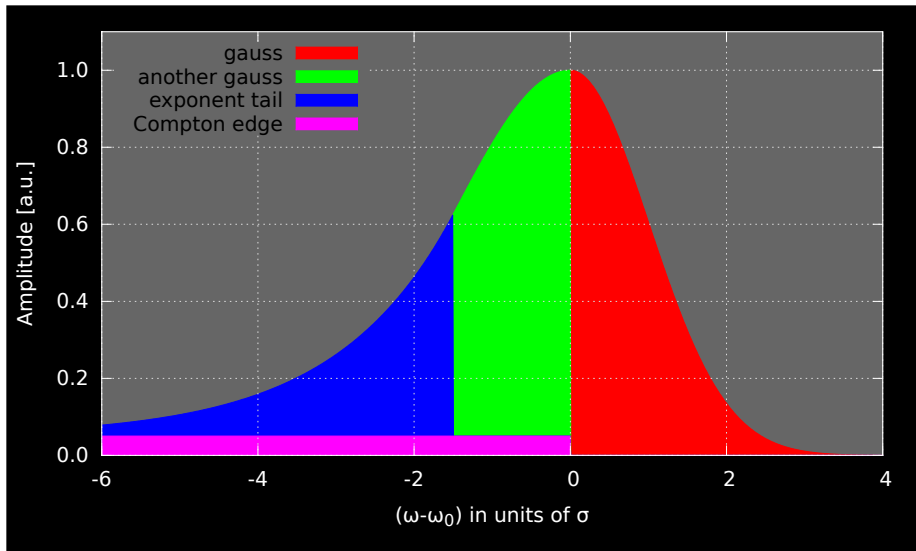
σ – ширина справа,

$K_0\sigma$ – ширина слева,

$-K_1(K_0\sigma)$ – экспоненциальный «хвост» слева,

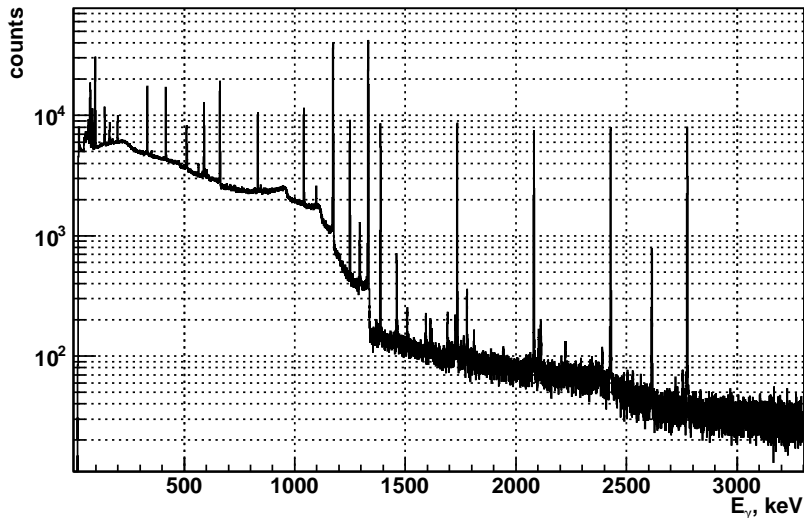
C – отвечает за малоугловое рассеяние.

Функция энергетического отклика HPGe



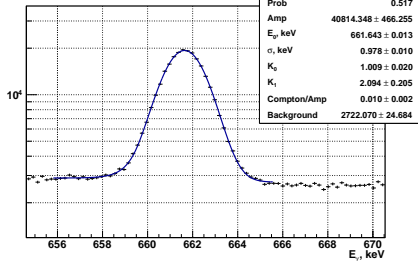
Общий вид энергетического спектра

2013.03.21 (17:53:16 -- 04:57:17) 2013.03.22

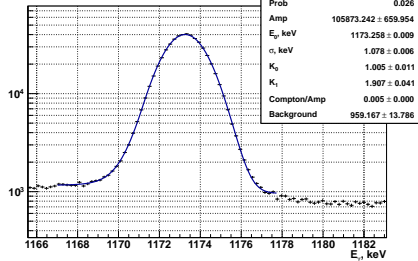


Калибровочные γ -пики

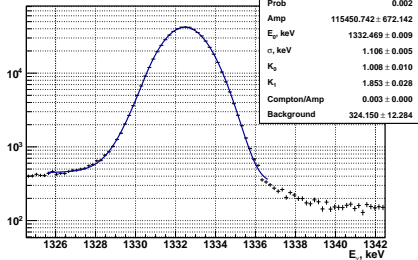
¹³⁷Cs : 661.657 keV



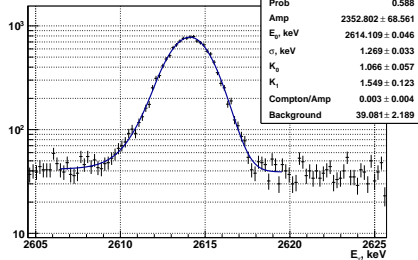
⁶⁰Co : 1173.228 keV



⁶⁰Co : 1332.492 keV

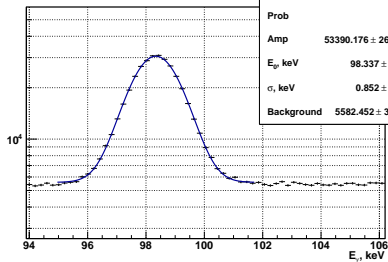


²⁰⁸Tl : 2614.511 keV



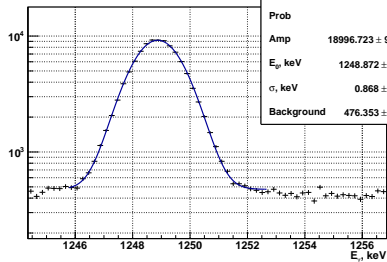
Генераторные пики

$^5\text{PB} : 97.380 \text{ keV}$



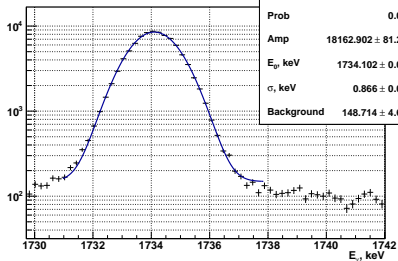
χ^2 / ndf	36.178 / 30
Prob	0.202
Amp	53390.176 ± 264.047
E_γ, keV	98.337 ± 0.004
σ, keV	0.852 ± 0.004
Background	5582.452 ± 30.102

$^5\text{PB} : 1248.849 \text{ keV}$



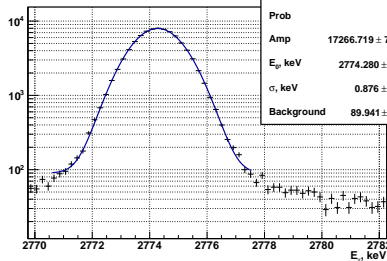
χ^2 / ndf	40.647 / 30
Prob	0.093
Amp	18996.723 ± 92.199
E_γ, keV	1248.872 ± 0.004
σ, keV	0.868 ± 0.004
Background	476.353 ± 7.823

$^5\text{PB} : 1734.407 \text{ keV}$



χ^2 / ndf	79.695 / 30
Prob	0.000
Amp	18162.902 ± 81.200
E_γ, keV	1734.102 ± 0.003
σ, keV	0.866 ± 0.003
Background	148.714 ± 4.654

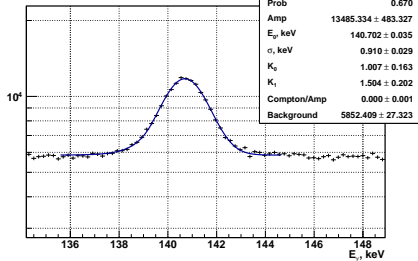
$^5\text{PB} : 2774.891 \text{ keV}$



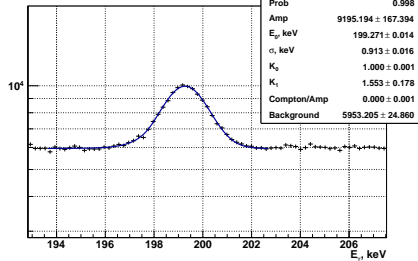
χ^2 / ndf	36.679 / 31
Prob	0.222
Amp	17266.719 ± 76.742
E_γ, keV	2774.280 ± 0.004
σ, keV	0.876 ± 0.003
Background	89.941 ± 3.622

Короткоживущие изотопы - захват нейтрона

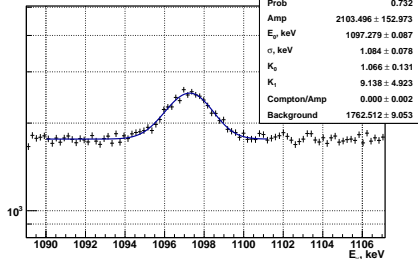
⁷⁵Gem : 139.680 keV



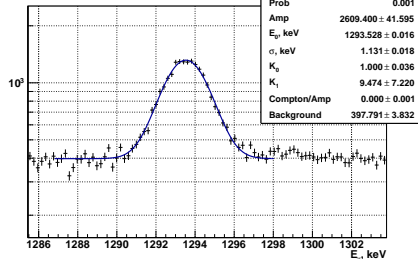
⁷⁵Gem : 198.606 keV



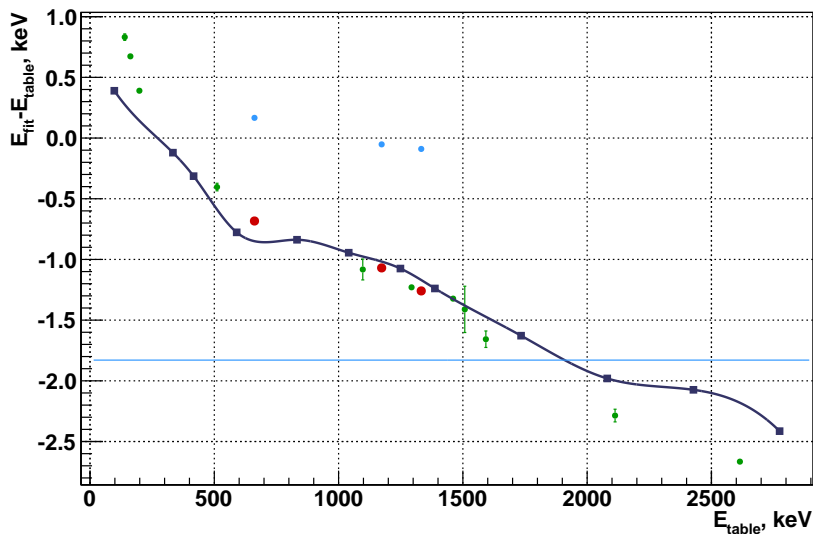
¹¹⁶In : 1097.326 keV



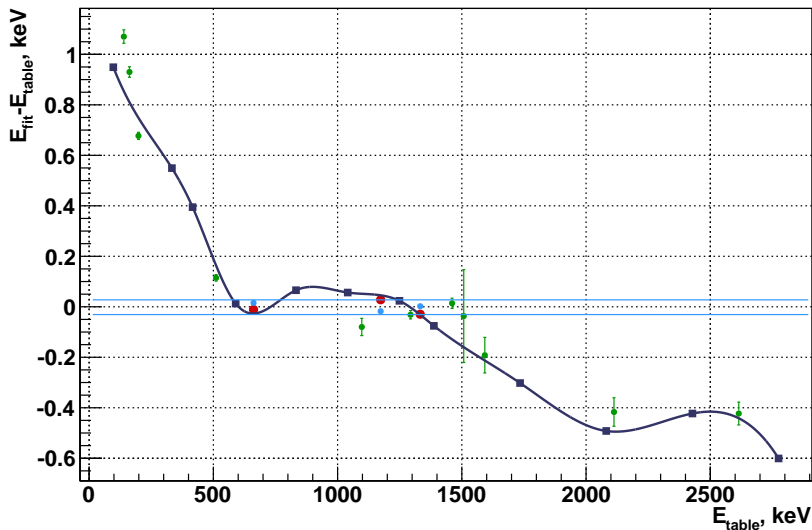
¹¹⁶In : 1293.558 keV



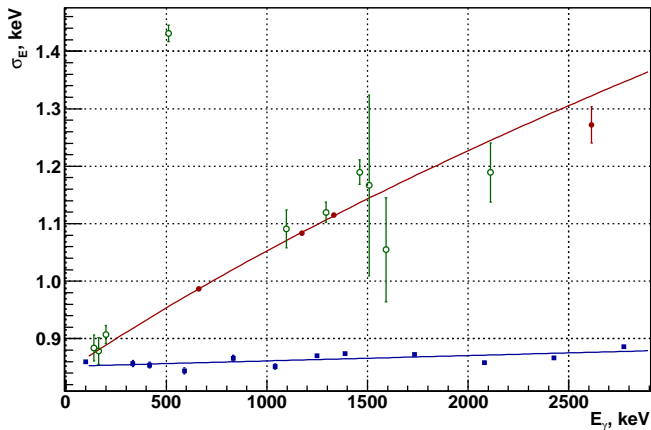
Энергетическая шкала до коррекции



Энергетическая шкала после коррекции



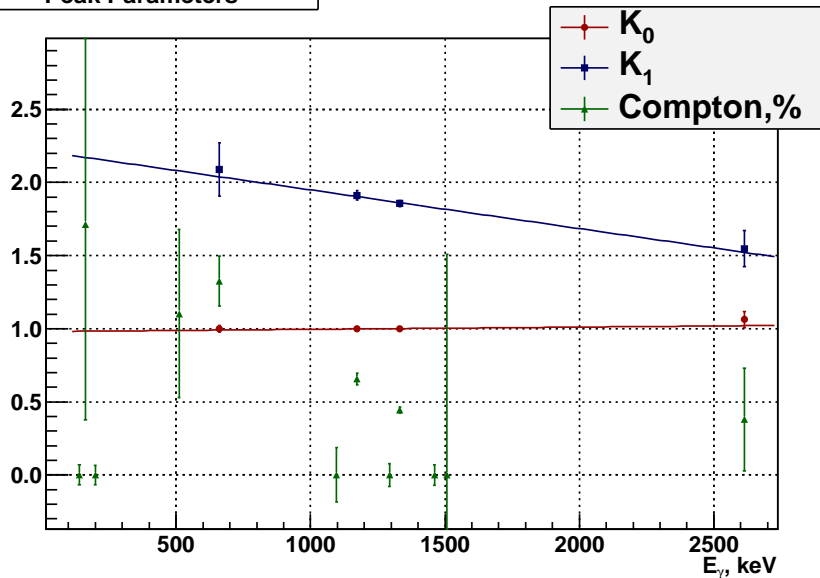
Energy Resolution



$\sigma_E = \sqrt{P_0^2 + F\varepsilon E}$, где F – аналог фактора Фано,
 $\varepsilon=2.96$ эВ – энергия рождения пары зарядов в Ge при 77°K.

Параметры формы пика

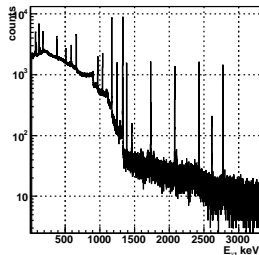
Peak Parameters



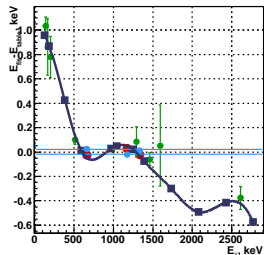
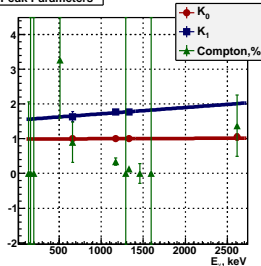
- 1 Введение
- 2 ВЭПП-2000: e^-e^+ коллайдер с круглыми пучками
- 3 Калибровка энергетической шкалы HPGe
- 4 Сравнение с методом РД

Измерение энергии пучка: 510 МэВ

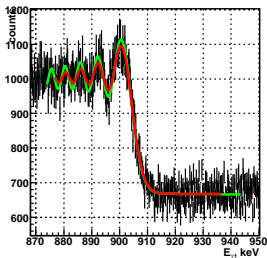
2013.01.30 (21:40:23 -- 00:34:06) 2013.01.31



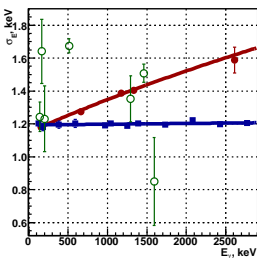
Peak Parameters



2013.01.30 (21:40:23 -- 00:34:06) 2013.01.31



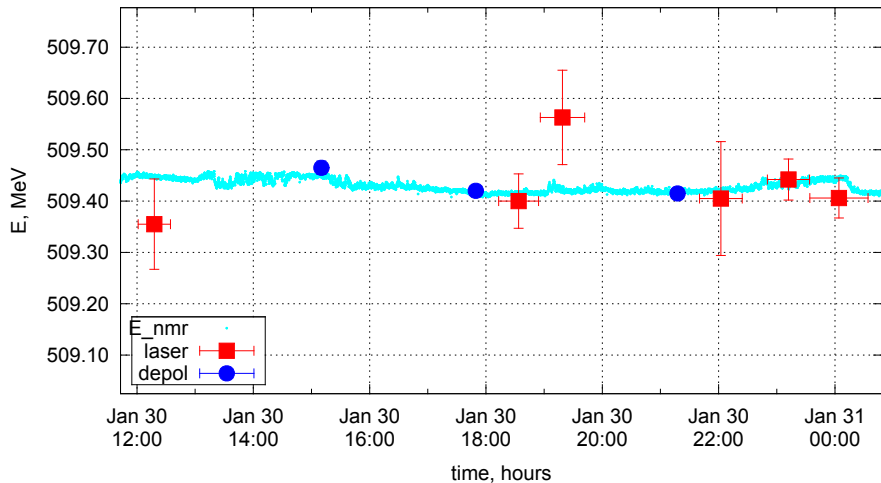
Energy Resolution



Zero = 1.22374 keV
Gain = 0.20149 keV/Ch
"Fano" = 0.169 ± 0.019
"Noise" = 1.148 ± 0.008 keV
 $E_{\text{beam}} = 509.396 \pm 0.033 \text{ MeV}$
 $\sigma_{E_{\text{beam}}} = 293 \pm 44 \text{ keV}$
R = 139.60 ± 3.05 cm
B = 1.2172 ± 0.0266 T
time from: 21:40:23 / 2013.01.30
time upto: 00:34:06 / 2013.01.31

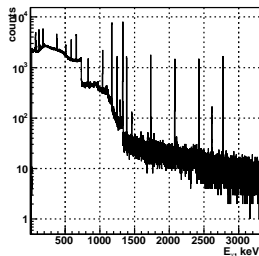
Резонансная деполяризация: 510 МэВ

NMR, Compton, RD compare №1

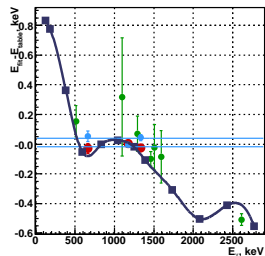
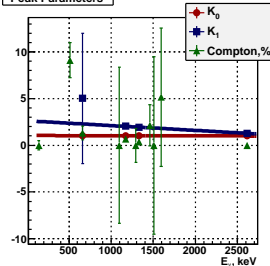


Измерение энергии пучка: 458 МэВ

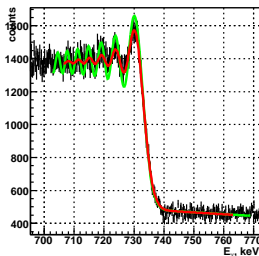
2013.02.03 (18:28:51 - 20:32:17) 2013.02.03



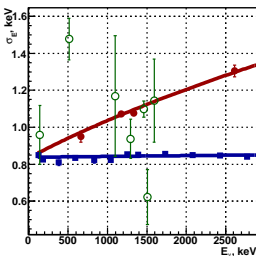
Peak Parameters



2013.02.03 (18:28:51 - 20:32:17) 2013.02.03



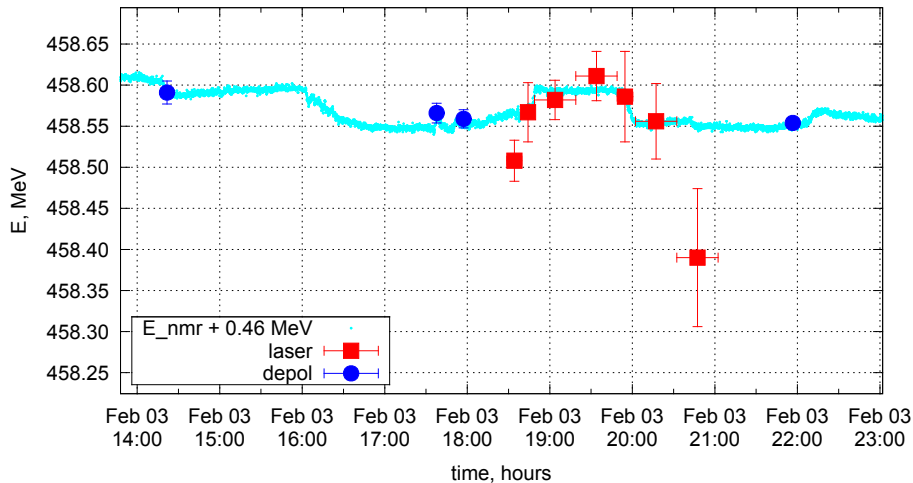
Energy Resolution



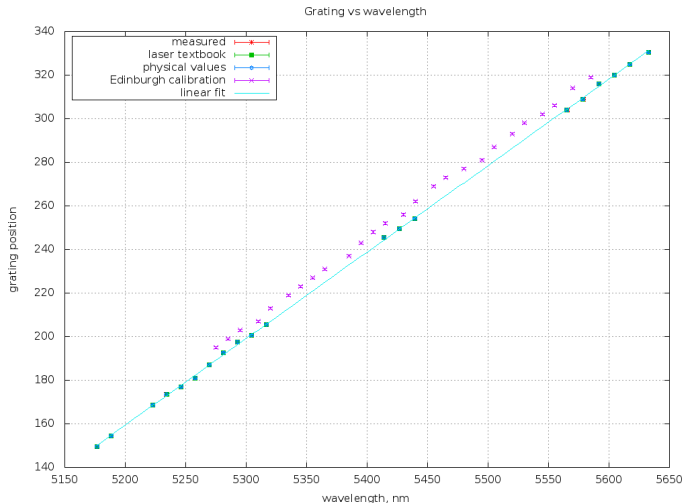
Zero = 1.22658 keV
 Gain = 0.20148 keV/Ch
 "Fano" = 0.127 ± 0.016
 "Noise" = 0.835 ± 0.007 keV
 $E_{\text{beam}} = 458.547 \pm 0.017$ MeV
 $\sigma_{E_{\text{beam}}} = 352 \pm 20$ keV
 R = 139.63 ± 2.29 cm
 B = 1.0954 ± 0.0180 T
 time from: 18:28:51 / 2013.02.03
 time upto: 20:32:17 / 2013.02.03

Резонансная деполяризация: 458 МэВ

NMR, Compton, RD compare №2

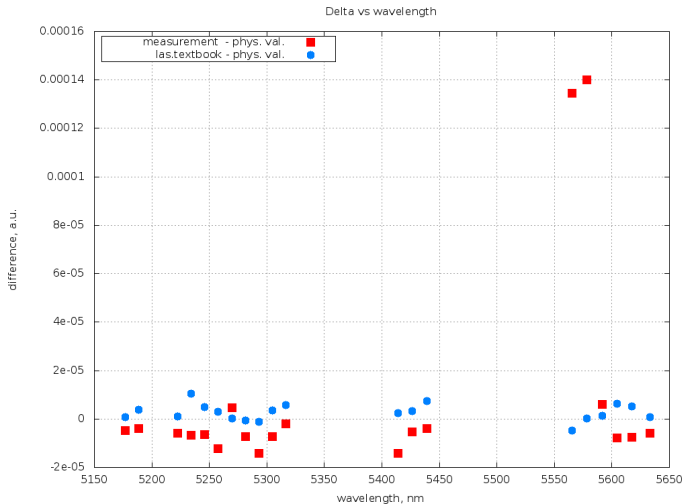


CO лазер Edinburgh Instruments PL-3



Mid-IR Laser Spectrum Analyser – LSA IR-III

CO лазер Edinburgh Instruments PL-3



Mid-IR Laser Spectrum Analyser – LSA IR-III