

Дискуссионный клуб в Разливе

Прецизионное измерение энергии на e^+e^- коллайдерах

Виктор Жилич

и использовались материалы из докладов

И.Николаев+Н.Мучной



Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН
Новосибирск

25 июля 2025

Для чего нужно точное измерение энергии пучков?

Список согласно частоты вероятности применения:

- Воспроизводимость и стабильность режимов работы ускорителя или накопителя.
- Работа в области резонансов или пороговых сечений
- Абсолютная калибровка измерения импульсов в трековой системе детекторов
- Измерение масс частиц, особенно узких резонансов.

Использование в экспериментах по точному измерению масс

Частица	Установка	Детектор	Дата
$\Phi, K^\pm$	ВЭПП-2М	ОЛЯ	1975-1979
$J/\psi, \psi(2S)$	ВЭПП-4	ОЛЯ	1980
$\Upsilon(1S), \Upsilon(2S), \Upsilon(3S)$	ВЭПП-4	МД-1	1982-1986
$\Upsilon(1S)$	CESR	CUSB	1984
$\Upsilon(2S)$	DORIS II	ARGUS, Crystal Ball	1983
K^0, ω	ВЭПП-2М	КМД	1987
Z	LEP	ALEPH, DELPHI, L3, OPAL	1993
$J/\psi, \psi(2S), \tau, D^0, D^\pm, \psi(3770)$	ВЭПП-4М	КЕДР	2002-2015

Измерение масс частиц на ВЭПП-4

Частица	Масса, МэВ	Точность $\Delta M/M$	Детектор	Годы
J/ψ	3096.93 ± 0.09	$2.9 \cdot 10^{-5}$	OLYA	1979-1980
$\psi(2S)$	3686.00 ± 0.10	$2.7 \cdot 10^{-5}$	OLYA	1979-1980
$\Upsilon(1S)$	$9460.57 \pm 0.09 \pm 0.05$	$1.1 \cdot 10^{-6}$	MD-1	1983-1985
$\Upsilon(2S)$	10023.5 ± 0.5	$5.0 \cdot 10^{-5}$	MD-1	1983-1985
$\Upsilon(3S)$	10355.2 ± 0.5	$4.8 \cdot 10^{-5}$	MD-1	1983-1985
J/ψ	$3096.900 \pm 0.002 \pm 0.006$	$2.0 \cdot 10^{-6}$	KEDR	2002-2008
$\psi(2S)$	$3686.099 \pm 0.004 \pm 0.009$	$2.7 \cdot 10^{-6}$	KEDR	2002-2008
$\psi(3770)$	$3772.9 \pm 0.5 \pm 0.6$	$2.1 \cdot 10^{-4}$	KEDR	2002-2006
D^0	$1865.30 \pm 0.33 \pm 0.23$	$2.2 \cdot 10^{-4}$	KEDR	2004
D^+	$1869.53 \pm 0.49 \pm 0.20$	$2.8 \cdot 10^{-4}$	KEDR	2004
τ	$1776.69^{+0.17}_{-0.19} \pm 0.15$	$1.4 \cdot 10^{-4}$	KEDR	2005-2008
D^0	$1865.100 \pm 0.210 \pm 0.039$	$1.1 \cdot 10^{-4}$	KEDR	2024
D^+	$1869.560 \pm 0.288 \pm 0.089$	$1.6 \cdot 10^{-4}$	KEDR	2024

Методы измерения энергии пучка: Стандартные

- Измерение с использованием магнитного поля вдоль орбиты. Опирается на две простые формулы: $E = eBR$ и $d\varphi = dl/R$, где E – энергия, B – магнитное поле. По теории циклических ускорителей (решения Флоке), частицы движутся по замкнутым траекториям и можно проинтегрировать по 2π .

Поле может быть рассчитано на основе токов в магнитах или даже измерено вдоль всей орбиты. Нужна хорошая система пикапов для учета влияния линз и других элементов.

К примеру, КЕКВ при первом запуске в 1999 г попал на пик $\Upsilon(4S)$ $M = 10580 \text{ MeV}$ с точностью около 5 MeV .

$$E = \frac{e}{2\pi} \oint B_{\perp} dl$$

$$\Delta E/E \gtrsim 10^{-3} - 10^{-4}$$

Relative accuracy

$$\Delta E \sim 0.1 - 0.5 \text{ MeV}$$

Методы измерения энергии пучка: Стандартные-1

- Спектрометр: основан на отклонении частиц в специально откалиброванном магните. Для этого необходимо точно знать карту поля и орбиту пучка внутри магнита. В ИЯФе такой метод используют для выведенного пучка или для работы с Рассеянными Электронами.
На будущих коллайдерах этим методом предполагается побанчевое измерение энергии.

$$E = \frac{e}{\Delta\theta} \int B_{\perp} dl$$

$$\Delta E/E \gtrsim 10^{-4}$$

Методы измерения энергии пучка: Стандартные-2

- Расчет энергии в ВЭПП-4М.
Абсолютная точность 5–25 MeV, относительная
0.1 – 1.0 MeV.

Вычисление по основному полю

$$I_1=600.0, H_1=524.1$$

$$I_2=700.0, H_2=607.4$$

$$I_3=1000.0, H_3=856.8$$

$$I_4=1600.0, H_4=1354.3$$

$$I_5=1900.0, H_5=1602.5$$

$$I_6=2200.0, H_6=1849.8$$

$$H=H_6 + \frac{H_6 - H_5}{I_6 - I_5} (I_H - I_6), \quad E = 1.0449 \cdot H$$

$$E = 1.0449 \cdot [1849.8 + 0.8243 \cdot (I_H - 2200.0)]$$

С учетом поправок от F7, D7, FS, DS

$$E = 1.0449 \cdot [1849.8 + 0.8243 \cdot (I_H - 2200.0)] +$$

$$+ 0.1121 \cdot I_{F7} - 0.075 \cdot I_{D7} -$$

$$- 0.0230 \cdot (I_{FS1} + I_{FS2}) + 0.0168 \cdot (I_{DS1} + I_{DS2})$$

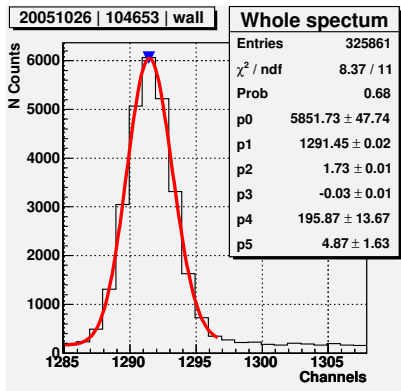
Обратное Комптоновское рассеяние (ОКР)

- Основная идея – лазерный луч, через систему управляемых зеркал, заводится в вакуумную камеру и фокусируется в нужном месте орбиты. Для ВЭПП-4М это место встречи. При рассеянии монохроматического лазерного излучения на $e^\pm$ пучке, спектр отраженных фотонов квази-равномерный в интервале $0 - \omega_{max}$, с резким правым краем.

$$\omega_{max} = \frac{4\gamma^2\omega_0}{(1 + 4\gamma\omega_0/mc^2)}, \quad \gamma = E_b/m_e, \quad E_b = \frac{\omega_{max}}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{m^2}{\omega_{max}\omega_0}} \right)$$

- При энергии пучка 0.5–2.0 ГэВ фотон инфракрасного лазера около 0.12 эВ переходит в γ -квант с энергией 0.5-6 МэВ.
- Для измерения энергии γ -квантов используется полупроводниковый детектор на основе сверхчистого германия – High Purity Germanium (HPGe).
Чувствительность – оклол 0.5 кэВ/канал. Эффективность регистрации по фотопику около 5% для края Комптона на 5 МэВ.
- Энергетическая шкала калибруется при помощи изотопных источников в интервале 0.5 – 2.6 МэВ. Для достижения точности вычисления энергии 10^{-5} нужно иметь стат. и сист. ошибки для положения пиков ≤ 0.2 канала.

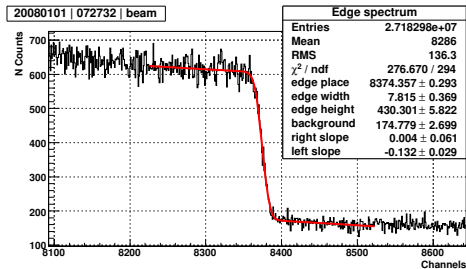
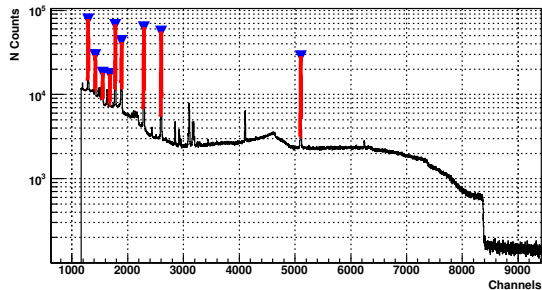
Детектор фотонов (Canberra 125 см³)



Линия изотопа Cs^{137} 661.657 кэВ

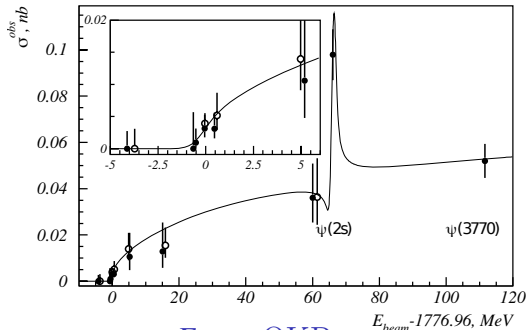
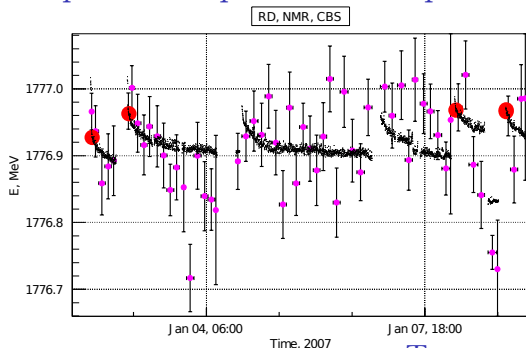
Разрешение детектора $\sigma(E) = (0.6 + 0.3 * E_\gamma[\text{MeV}])$ кэВ, (1 – 3) канала в нашей области. При рабочей загрузке ухудшается примерно в 2 раза.

Рабочие спектры ОКР



Красным показаны подгонки пиков и края.

Калибровка энергии в эксперименте по измерению массы тау-лептона



Точность измерения E_b по ОКР

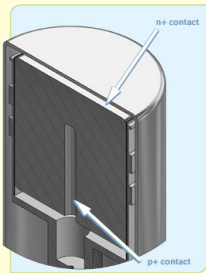
составляла около 50 кэВ за 1 час набора спектров. Ошибка калибровки шкалы HPDG дает сист.ошибку 30 – 100 кэВ из-за неопределенности формы пиков от изотопных γ -квантов и нелинейности шкалы детектора.

$$M_\tau = 1776.69^{+0.17}_{-0.19} \pm 0.15 \text{ МэВ}$$

HPGe детектор γ -квантов и его аппаратура

Hardware

HPGe coaxial detector,
p-type or n-type



(image: www.canberra.com)

Multichannel Analyzer
ORTEC® DSPEC Pro™



integral nonlinearity

± 250 ppm

(www.ortec-online.com)

Pulse Generator
BNC PB-5



integral nonlinearity

± 15 ppm

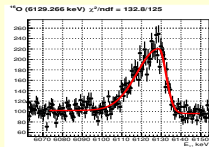
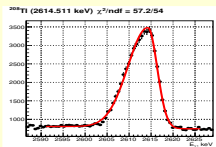
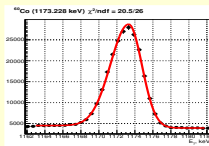
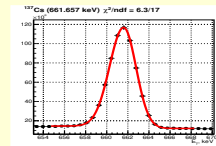
(www.berkeley-nucleonics.com)

Калибровка шкалы HPGе по изотопным пикам и генератору точных сигналов.

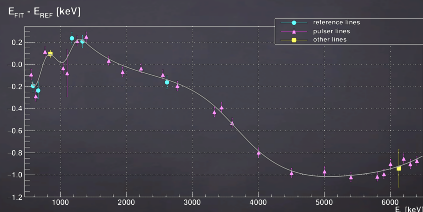
Калибровочные пики изотопных γ -квантов (левый рис.)

Нелинейность шкалы, определенная по генератору (правый рис.)

HPGe calibration: photo-peaks fits (BEPC-II 2016)

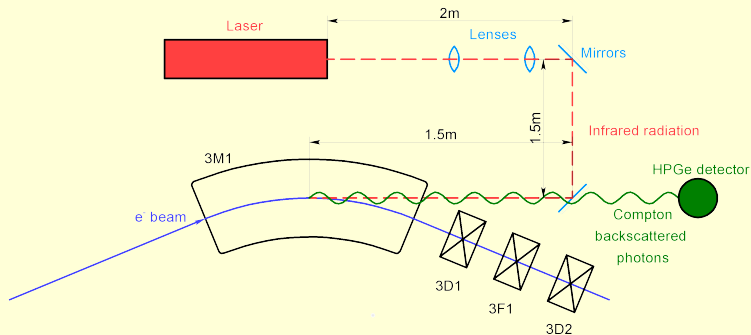


Absolute Energy Scale



14 / 26

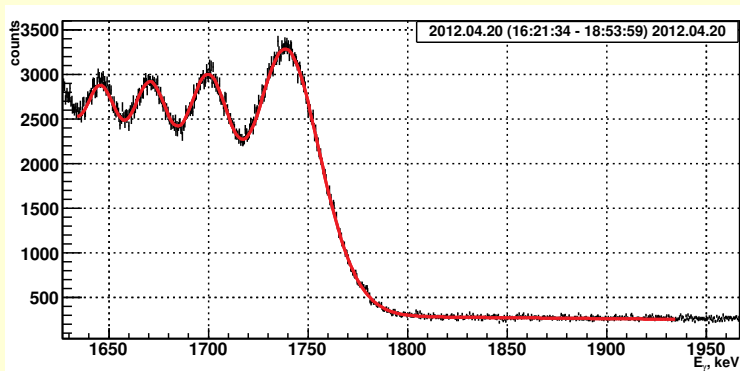
VEPP-2000 Beam Energy Measurement System



Beam orbit radius in the VEPP-2000 dipole $R = 140$ cm

Спектр ОКР при работе на ВЭПП-2000

Experimental spectrum & fit / PRL 110 2013 140402



The edge of the energy spectrum with the fit result:

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

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

Расчетный спектр ОКР для ВЭПП-2000 с учетом интерференции

Interference of scattered photons / PRL 110 2013 140402

The photon spectrum is:

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

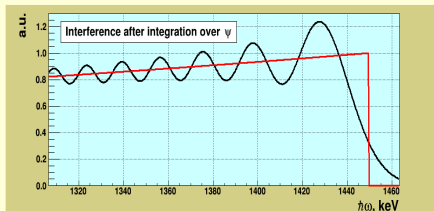
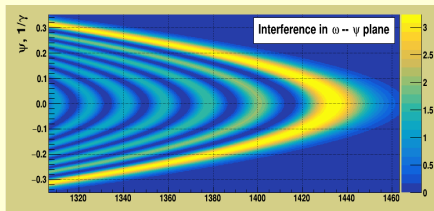
where

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

and

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

is the Airy function.



($\omega_0=0.117$ eV, $E_e = 900$ MeV, $R=140$ cm)

Идея метода резонансной деполяризации

Движение спина во внешнем поле

Томас, Френкель (1926), Bargmann, Michel, Telegdi (1959)

$$\frac{ds^i}{d\tau} = 2\mu F^{ij}s_j - 2\mu' u^i F^{jk}u_j s_k$$

$$\frac{d\vec{s}}{dt} = \underbrace{2\mu \frac{\vec{s} \times \vec{B}'}{\gamma}}_{\text{динамическое}} + \underbrace{(\gamma - 1) \frac{\vec{s} \times [\vec{v} \times \dot{\vec{v}}]}{v^2}}_{\text{кинематическое}} = \vec{\Omega} \times \vec{s}$$

$\vec{B}'$ - магнитное поле (прецессия Томаса)

в с.п.э

Существенную роль играет аномальный магнитный момент электрона:

$$a_e = \frac{g - 2}{2} = \frac{\mu - \mu'}{\mu_0}$$

В циклическом накопителе

Теория движения “спина” в циклических машинах в значительной мере была разработана в ИЯФе в 70х годах. (Возможно, продолжается до сих пор – см. недавнюю работу А. Мильштейна по нейтронам.)

$$\Omega = \omega_{\text{обp}} \left(1 + \frac{E}{m_e} a_e \right)$$

В любом месте накопителя есть мгновенная ось $\vec{\Omega}$, вокруг которой спин прецессирует. Если нет соленоидов, ось направлена по ведущему полю.

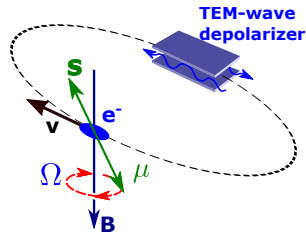
Идея метода резонансной деполяризации (РД)

Если на поляризованную частицу воздействовать локальным квази-поперечным магнитным полем, то спин начнет вращаться вокруг него на некий угол $\delta\varphi$. Для циклического/периодического движения пучка можно подобрать условия, при которых малые воздействия будут складываться (резонансно!) и диффузионно уменьшать поляризацию пучка. (А еще можно повернуть спин на большой угол без разрушения поляризации). Сегодняшняя точность знания μ', m_e около 10^{-10} , поэтому ошибка E_b определяется точностью измерения частоты деполяризации.

Из-за цикличности движения, частота поляризации не уникальна.

$$\Omega = \omega_0 n \pm \omega_d, \quad n \in \mathbb{Z}$$

$$E = 440.648\,462\,134(137) [\text{МэВ}] \times \left(n - 1 \pm \frac{\omega_d}{\omega_0} \right)$$



Что нужно для реализации метода РД?

1. Поляризованные пучки электронов
2. Поляриметр
3. Деполяризатор

Радиационная поляризация

Эффект Соколова-Тернова (1963)

Получение поляризованных пучков частиц достаточно непростая задача. Как оказалось, электроны в циклических машинах могут поляризоваться естественным путем за счет Синхротронного Излучения. В классической аналогии, магнитный момент диссипативно занимает минимальное значение по энергии $\vec{\mu} \cdot \vec{H}$.

В квантовом описании, при излучении кванта СИ вероятности перехода с переворотом спина разные для параллельной и анти-параллельной конфигураций. Это приводит к постепенной поляризации пучка. Максимальная степень поляризации ограничивается квантовыми флуктуациями.

Радиационная поляризация-1

Для однородного поля H авторы получили:

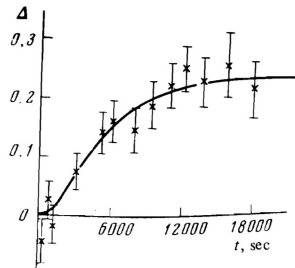
$$\tau_p = P_0 \frac{\lambda_C}{\alpha c} \frac{1}{\gamma^2} \left(\frac{H_0}{H} \right)^3 \quad P_0 = \frac{8\sqrt{3}}{15} \approx 92.4\%$$

$$P(t) = P_0 \frac{\tau}{\tau_p} (1 - e^{-t/\tau}); \quad \tau = \frac{\tau_d \tau_p}{\tau_p + \tau_d}$$

$H_0 = \frac{m_e^2 c^2}{q_e \hbar} \simeq 4.414 \times 10^{13} \text{ Гс}$ – поле Швингера.

Параметр τ_d в последней формуле, “деполяризующее” время, возникает при учете неоднородности полей в реальных накопителях. В области пучковых резонансов, и когда $\frac{E}{m_e} a_e = n$ – целое, там τ_d мало, и поляризация близка к нулю. Максимальная степень рад.поляризации $P = P_0 \frac{\tau}{\tau_p}$. Первые наблюдения:

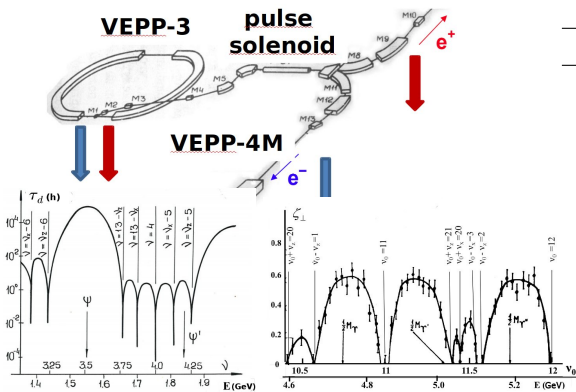
- ВЭПП-2 (Новосибирск), 1970 г.
- Кольцо АСО (Орсей), 1972 г.



Радиационная поляризация на ВЭПП-2 с Тушековским поляриметром, 1974 г, $\tau = 70$ мин

Получение поляризованных пучков на ВЭПП-4М

Polarized beam injection into VEPP-4M ring



Время поляризации

Кольцо	ВЭПП-3	ВЭПП-4М
τ_p [ч]	$\frac{12}{E[\text{ГэВ}]^5}$	$\frac{1540}{E[\text{ГэВ}]^5}$
τ_p @ 1.55 ГэВ	1.34 ч	172 ч
τ_p @ 1.85 ГэВ	0.56 ч	71 ч
τ_p @ 4.1 ГэВ		80 мин
τ_p @ 4.73 ГэВ		39 мин

- Хорошая поляризация пучка для J/ψ , $\psi(2S)$, $\Upsilon(1S)$, $\Upsilon(3S)$
- Проблемы с областью энергии τ -лептона для всех циклических коллайдеров (близко к целому резонансу с частотой обращения $\nu = 4$)

Измеренная степень поляризации на ВЭПП-4 с помощью лазерного поляриметра, 1984 г.

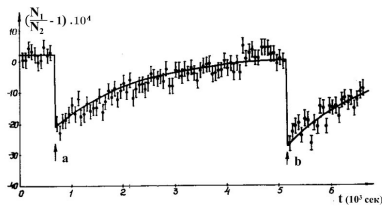
tiny

Немного экзотики – Спиновый свет, который наблюдали в ИЯФе.

Благодаря интерференции с основным излучением возникает добавка СИ, пропорциональная $\frac{\hbar\omega}{E_b}P$, где P – степень поляризации пучка, ω – область спектра СИ, где ведутся измерения. При этом “полезное” число фотонов падает как $\exp(-\omega/\omega_c)$, $\omega_c = \frac{3eH}{2mc}\gamma^2$ – критическая частота.

Была установлена специальная магнитная змейка с полем в центральной части около 2 Т. Измерения делали при высоких энергиях, что давало много света и позволяла быстро поляризовать пучки. Работали в области параметров $\omega \approx 500 \text{ keV} \approx 8\omega_c$, $H = 1.7 \text{ Т}$, $E_b = 5.1 \text{ ГэВ}$:

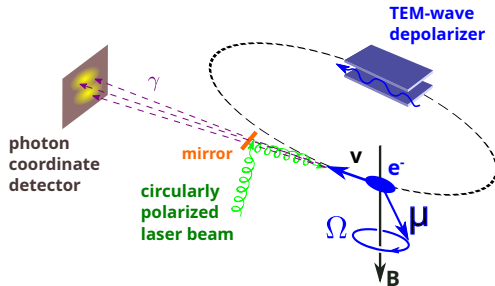
- Указана возможность: Байер+Хозе, 1969 г.
- Попробовали измерить: ВЭПП-3 в 1977 г.
- Увидели: в 1983 г на ВЭПП-4. Благодаря остроумной схеме измерения, скачок интенсивности СИ ($\leq 10^{-4}$) при деполяризации наблюдался с достоверностью ≥ 20 сигма.



Лазерный поляриметр

- Предложен в ИЯФ, Байер+Хозе (1969).
- Впервые реализован на SPEAR, SLAC (1979).
- Работал на ВЭПП-4 (1982):
- Применялся на LEP для измерения массы Z-бозона (1993).
- Снова сделан для ВЭПП-4М (примерно с 2020).

Асимметрия вверх-вниз для лево- и право-циркулярно поляризованного света, рассеиваемого на вертикально поляризованном электронном пучке, ω_0 — энергия лазерного фотона

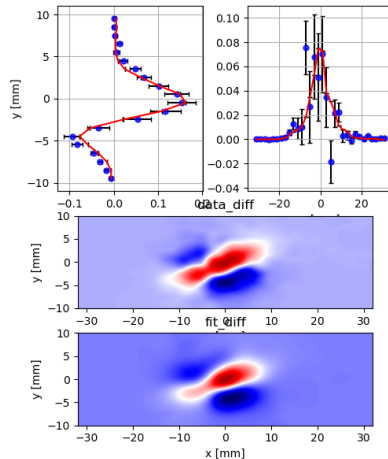
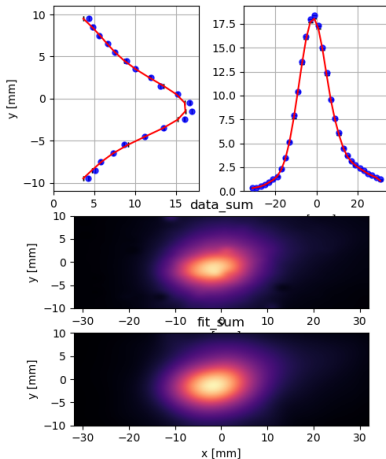


$$A = \frac{N_{\text{вверх}} - N_{\text{вниз}}}{N_{\text{вверх}} + N_{\text{вниз}}} \approx \frac{3}{4} \frac{E\omega_0}{m_e^2} P$$

Пример 2D-подгонки асимметрии координатных спектров на GEM-детекторе, ВЭПП-4М, 2024 г.

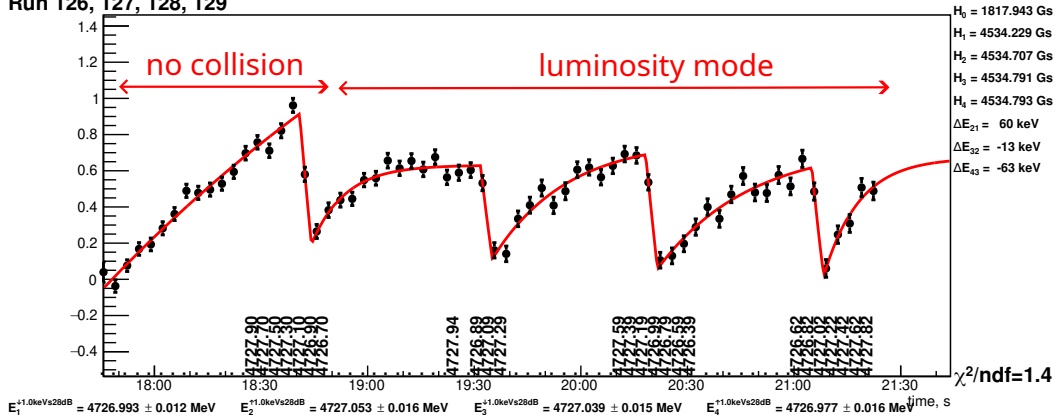
Fit results (fit method 3)

begin: 2023-05-24 18:34:00
end: 2023-05-24 18:34:50
 $\chi^2/ndf = 717/636 = 1.13$
 $prob(\chi^2) = 0.0143$
 $L = 29.90$ m
 $P = 0.808 \pm 0.077$
 $Q = -0.494 \pm 0.014$
 $\beta = 40.57 \pm 0.73^\circ$
 $DN = 0.002 \pm 0.001$
 $k_{reg} = 1.0e-4$



Измерения энергии пучка с помощью лазерного поляриметра непосредственно при наборе событий в области $\Upsilon(1S)$

2023-05-24 17:45:40
Run 126, 127, 128, 129



Эффект Тушека. Тушековский поляриметр

В системе отчета пучка частицы имеют стохастическое движение и сталкиваются, обмениваясь малым импульсом δp , иногда вдоль орбиты. В лаб.системе это приведет к изменению $\Delta p = \pm \gamma \cdot \delta p$. При достаточно большом изменении, одна частица вылетит внутрь орбиты, а другая наружу.

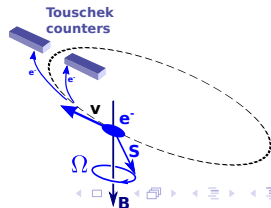
- Эффект Тушека, как причина потерь пучка, был открыт в 1963 г на кольце AdA.
- ИЯФ: Предложение использовать время жизни пучка для определения поляризации, Байер+Хозе, модель - плоский пучок (1968).
- ИЯФ: Тумайкин предложил использовать сцинтилляционные счетчики на совпадение (1970).
- ИЯФ: 2D модель пучка(1976), уточнение с учётом релятивистских поправок (1978) и кулоновских эффектов (2011).

Внутрипучковое
рассеяние $e^-e^- \rightarrow e^-e^-$

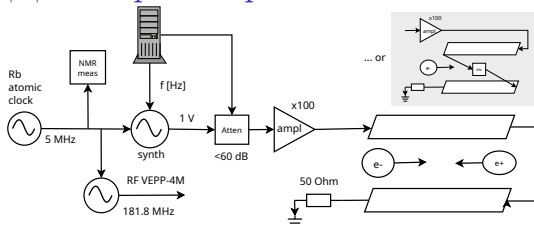
Скорость потерь зависит от квадрата степени поляризации и $\sim \gamma^{-3.5}$, $\eta \approx 0.1$.

$$d\sigma = d\sigma_0 \left(1 - (\vec{s}_1 \vec{s}_2) \frac{\sin^2 \theta}{1 + 3 \cos^2 \theta} \right)$$

$$\frac{dN}{dt} \approx A \frac{N^2}{V \gamma^2 (\Delta p/p)^2} (1 - P^2 \eta)$$



Деполаризатор на основе ТЭМ-волны в параллельных пластинах



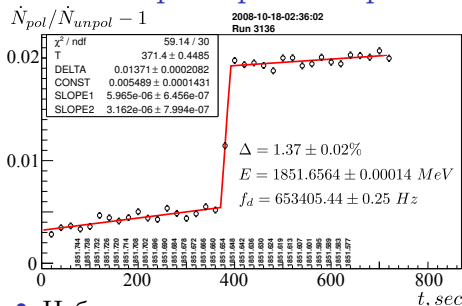
Спин $e^\pm$ ориентирован по вертикали. Волна управляемой частоты бежит по пластине, поле H лежит в плоскости орбиты и поворачивает спин к орбите. Сила деполаризатора, определяющая время деполаризации, зависит от квадрата напряжения и от некой функции спинового отклика (“придуманной” в ИЯФе). Эта функция меняется в сотни раз в зависимости от энергии и места пластин относительно магнитной структуры.

- Стабильность энергии непосредственно зависит от стабильности частоты обращения пучка.

$$\frac{\Delta E}{E} = -\frac{1}{\alpha} \frac{\Delta \omega_0}{\omega_0}$$

- Общй стандарт частоты на основе Rb с точностью 10^{-10} для ВЧ ВЭПП-4М обеспечивает стабильность энергии 10^{-8} ($\alpha = 0.017$).
- Силу деполаризатора надо подобрать так, чтобы он не поворачивал все спины за один проход, а диффузно размешивал их. Но достаточно силен, чтобы время деполаризации было несколько секунд.

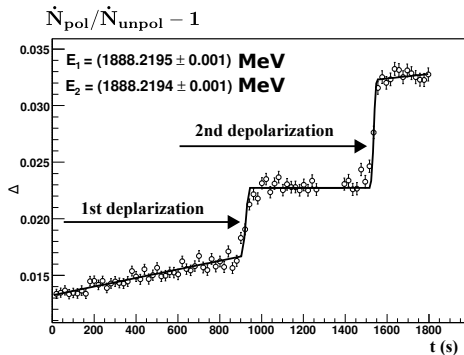
Пример калибровки энергии по эффекту Ташека



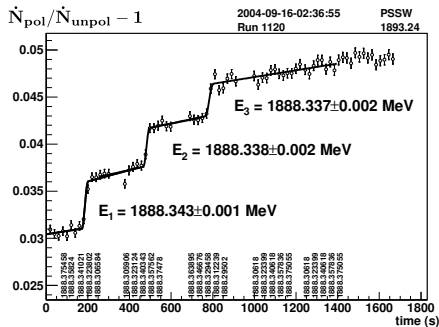
- Небольшие сцинтилляторы вводятся t, sec внутрь вакуумной камеры близко к пучку. Измеряется скорость счета каждые 10-30 сек.
- Для компенсации нестабильностей используется 2 сгустка, один поляризованный. Смотрят на отношение скоростей счета

- На пластины подается сигнал “бегущей” частоты, $f_d = 0.5 - 1 \text{ МГц}$. Скорость изменения частоты соответствует 1-10 кэВ/сек. Диапазон сканирования составляет 0.2 – 2 МэВ.
- Момент деполяризации определяется по резкому изменению отношения скоростей счета.
- Величина скачка 0.2 – 2%.
- По графику подгоняется момент скачка и соответствующая частота.
- По частоте рассчитывается энергия с учетом целочисленного сдвига на $\Delta f_d = n \cdot \omega_0$. Точность ΔE_b несколько кэВ, относительная – около 10^{-6}

Несколько калибровок с одним поляризованным пучком



Двойной переход



Тройной переход

Двойное и тройное сканирование вверх-вниз повышает надёжность калибровки энергии.

Подавляются случаи калибровки на боковых спиновых резонансах частотой 50 Гц.

Какова точность метода?

- Можно достичь точности лучше, чем ширина линии! Но тогда нужна хорошая модель динамики средней поляризации в процессе деполяризации. Раньше в большинстве измерений считалось, что деполяризация мгновенная.

Вопросы точного определения энергии на примере измерения масс J/ψ и $\psi(2S)$ 2003 г

Увидеть момент деполяризации и рассчитать энергию пучка – для прецизионных измерений этого еще недостаточно! Ниже перечислены основные проблемы, которые встречаются экспериментаторов и необходимые шаги для их решения.

1. Когда мы измеряем частоту резонансной деполяризации с $\Delta E_b \approx 1.5$ кэВ, нас еще “поджидают” :
 - Мелкие спонтанные изменения режима работы накопителя, которые могут вызвать скачки скорости счета или даже потерю поляризации.
 - Побочные спиновые резонансы, например $\Delta f_d = 50$ Гц из-за пульсаций в магнитах
 - Часто режим измерения энергии несовместим с набором статистики. Поэтому необходимо учитывать дрейф энергии накопителя из-за релаксации магнитов, температуры и даже лунных приливов (до 10 МэВ для LEP).

Точность определения энергии-1

2. Учитывая предыдущее, после деполяризации надо рассчитать среднюю энергию пучка. Например, учетом ширины линии дает сдвиг 2.5 ± 1.0 кэВ.
3. Необходимо пересчитать энергию пучка к точке взаимодействия, так как энергия $e^\pm$ монотонно уменьшается после ВЧ резонатора из-за синхротронного излучения. Поправка около 30 кэВ.
4. Для узкого резонанса разброс энергии в пучках приводит слегка негауссовому распределению светимости по $\frac{dL}{dW}$, которое, к тому же, зависит от точности сведения пучков по вертикали. Получается, что средняя $W \neq (E_{e^+} + E_{e^-})/2$! Для $\Upsilon(1S)$ сдвиг $\Delta W \approx 40$ кэВ (свежие данные). Поправка для ψ составляет $\Delta W = (1 - 5)$ кэВ.
5. Там еще что-то (а может – и много) осталось...
Оставим это профессионалам!

Интерполяция энергии между калибровками. Влияние релаксации магнитов и суточных изменений температуры

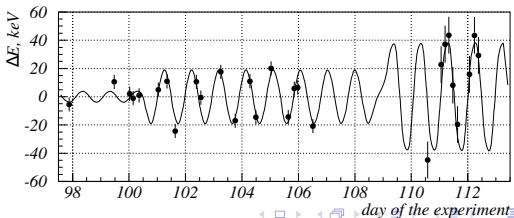
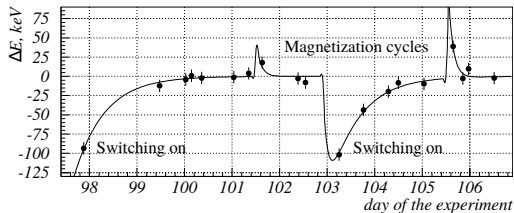
Функция предсказания энергии

$$E = \alpha_H \cdot H_{\text{NMR}} \cdot (1 + \alpha_T \cdot (T_{\text{кольцо}} - T_{\text{NMR}})) \times f(T_{\text{кольцо}}, T_{\text{воздух}}, T_{\text{вода}}) +$$

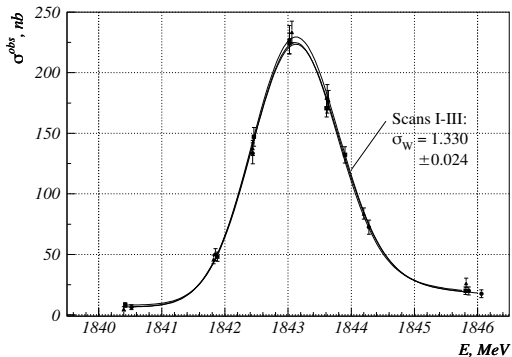
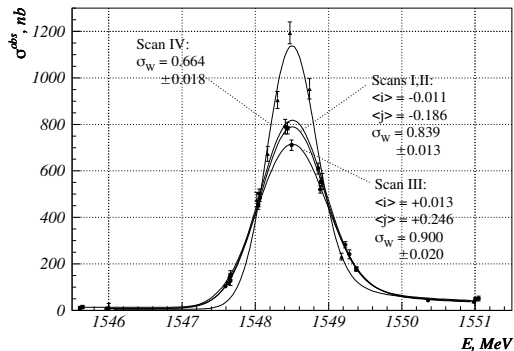
$$+ A(t) \cdot \cos\left(\frac{2\pi t}{\tau_{\text{день}}} - \varphi(t)\right) +$$

$$\delta E_{\text{он}} \cdot \exp\left(-\frac{t_{\text{он}}}{\tau_{\text{он}}}\right) + \delta E_{\text{цикл}} \cdot \exp\left(-\frac{t_{\text{цикл}}}{\tau_{\text{цикл}}}\right) + E_0(\Delta i, t),$$

Точность предсказания энергии $6 \div 8$ кеВ при 218 калибровках энергии



Измерение массы J/ψ (0.7 pb^{-1}) и $\psi(2S)$ (1.0 pb^{-1}) с детектором КЕДР 2003 г



$$M_{J/\psi} = 3096.900 \pm 0.002 \pm 0.006 \text{ МэВ}$$

$$M_{\psi(2S)} = 3686.099 \pm 0.004 \pm 0.009 \text{ МэВ}$$

