

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И.Будкера СО РАН

А.С. Зайцев, К.Ю. Михайлов, Е.П. Солодов

КАЛИБРОВКА ЭНЕРГИИ ПУЧКОВ
КОЛЛАЙДЕРА ВЭПП-2М
НА ПИКЕ ϕ -МЕЗОНА

ИЯФ 2003-39

НОВОСИБИРСК
2003

Калибровка энергии пучков коллайдера ВЭПП-2М на пике ϕ -мезона

А.С. Зайцев¹, К.Ю. Михайлов, Е.П. Солодов

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
630090 Новосибирск, СО РАН

Аннотация

Ошибка измерения массы нейтрального каона [1] в сильной степени зависит от точности измерения энергии e^+e^- пучков. Метод резонансной деполяризации позволяет измерять энергию пучков в момент деполяризации с относительной точностью $\Delta E/E \approx 10^{-5}$, однако для измерения массы необходимо знать среднюю энергию для каждого экспериментального захода. В данной работе изучался температурный дрейф энергии накопителя ВЭПП-2М с использованием данных деполяризационных измерений и измерений импульсов заряженных каонов, зарегистрированных детектором КМД-2. Получено значение коэффициента температурного дрейфа $k = -36.2 \pm 2.6$ кэВ/°С. С учетом этих измерений, средняя энергия пучков для набора интересующих нас экспериментальных заходов определена с точностью $13 \div 19$ кэВ.

© *Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН*

¹E-mail: azaitsev@dx1cmd.inp.nsk.su; Web Site: <http://cmd.inp.nsk.su/~azaitsev>
Электронная версия данной работы доступна для коллаборации КМД-2 на странице <http://cmd.inp.nsk.su/~azaitsev/index.php?cmd2dp> или по ссылке http://cmd.inp.nsk.su/~azaitsev/papers/lab_memo_ph/MKSVEnergy.ps

1 Введение

Метод измерения массы нейтрального каона, использованный в работе [1], основан на полной реконструкции распада $K_S^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ и кинематическом соотношении между энергией каона, пространственным углом разлета и отношением импульсов пионов. Точность измерения массы нейтрального каона в этом методе в значительной степени определяется точностью измерения средней энергии e^+e^- пучков. Метод резонансной деполяризации [2] позволяет измерять энергию пучков в момент деполяризации с относительной точностью $\Delta E/E \approx 10^{-5}$, однако для измерения массы необходимо знать среднюю энергию пучков для каждого экспериментального захода. Поскольку экспериментальные данные набирались в промежутках между деполяризационными измерениями при фиксированном поле в поворотных магнитах коллайдера **ВЭПП-2М** [3, 4, 5], необходимо изучать долговременную стабильность энергии пучков.

Как было показано в работах [6, 7], основной эффект, приводящий к нестабильности энергии, обусловлен вариациями средней температуры поворотных магнитов кольца **ВЭПП-2М**. Вариации температуры приводят к изменениям геометрии кольца коллайдера и, как следствие, периметра равновесной орбиты пучков и смещению их средней энергии². В данной работе изучение температурного дрейфа было выполнено двумя методами. Первый метод аналогичен использованному в работе [8] и основан на рассмотрении зависимости энергии пучков, измеренной методом резонансной деполяризации, от средней температуры кольца накопителя при фиксированном магнитном поле в поворотных магнитах. Второй метод, основанный на изучении корреляции между средним импульсом каонной пары в процессе $e^+e^- \rightarrow \phi \rightarrow K^+K^-$ и энергией пучков, опирается на экспериментальные данные, полученные детектором **КМД-2** [9, 10, 11], и данные измерений температур элементов накопителя.

²Этот эффект мы будем далее называть *температурным дрейфом энергии пучков*.

2 Методы анализа

2.1 Измерения температуры кольца ВЭПП-2М

Под средней температурой кольца накопителя ВЭПП-2М будем понимать среднее значение показаний датчиков, установленных на поворотных магнитах. На каждом магните было установлено по два датчика и еще один датчик был расположен на дополнительном магните, включенном последовательно с основными поворотными магнитами кольца ВЭПП-2М и служащим для контроля стабильности поля. Таким образом, система температурного контроля коллайдера содержит 9 температурных датчиков. Съем информации производился с частотой $\approx 2 \text{ мин}^{-1}$, что соответствует ≈ 400 измерениям температуры за время одного экспериментального захода детектора КМД-2.

2.2 Калибровка по деполяризационным измерениям

Время, необходимое для проведения одного измерения энергии пучков методом резонансной деполяризации, составляет несколько часов, что затрудняет проведение измерений до и после каждого экспериментального захода, продолжительность которого составляет порядка часа. Для изучения эффекта температурного дрейфа энергии были использованы данные деполяризационных измерений, проведенных в ходе экспериментов РНИ-94/1, РНИ-94/2, РНИ-96 и РНИ-98³. В этих экспериментах набор статистики осуществлялся в промежутках между измерениями энергии блоками по $3 \div 10$ заходов и интервал времени между двумя последовательными измерениями в одной энергетической точке не превышал 50 часов.

На Рисунке (1) показана зависимость разности значений E_{run} от разности средних температур T_{av} для двух последовательных деполяризационных измерений при постоянном поле в поворотных магнитах накопителя. Зависимости аппроксимировались линейной функцией $\Delta E_{run} = q + k \Delta T_{av}$, при этом точки, отмеченные маркером “×”, не учитывались, так как они соответствуют парам деполяризационных измерений до и после срыва поля в магнитах ВЭПП-2М. После срыва магнитная система коллайдера в течение длительного промежутка времени выходила

³Использованные условные обозначения экспериментов являются общепринятыми в коллаборации КМД-2, более подробную информацию можно найти в препринте [12].

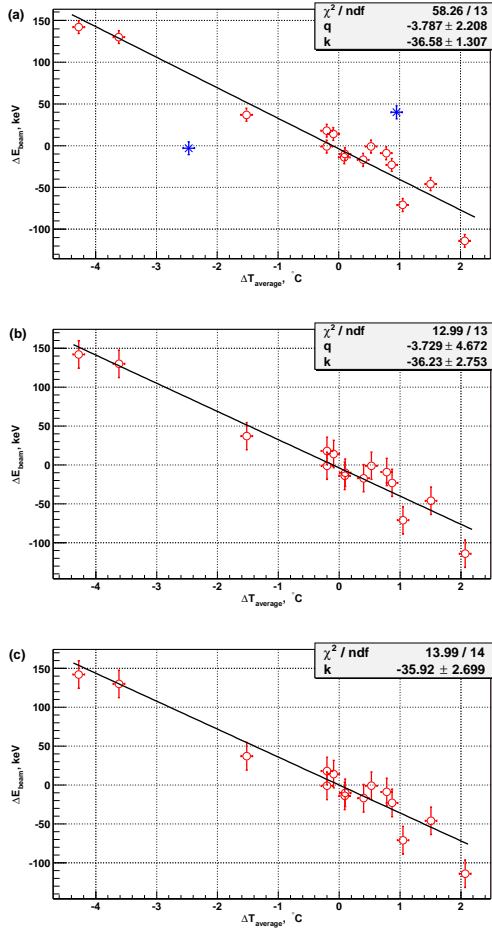


Рис. 1: Зависимости отклонения средней энергии пучка ΔE_{run} от отклонения средней температуры ΔT_{av} кольца коллайдера. Каждая точка соответствует двум последовательным деполяризационным измерениям энергии. Точки, отмеченные маркером “×” не учитывались при аппроксимации, так как они возникают при учете одного деполяризационного измерения после срыва поля в магнитах ВЭПП-2М. Показаны различные варианты аппроксимации:

- (a): функцией $\Delta E_{run} = q + k \Delta T_{av}$ при $\sigma_E = 5.5$ кэВ и $\sigma_T = 0.07$ °C.
- (b): функцией $\Delta E_{run} = q + k \Delta T_{av}$ при $\sigma_E = 12.5$ кэВ и $\sigma_T = 0.07$ °C.
- (c): функцией $\Delta E_{run} = k \Delta T_{av}$ при $\sigma_E = 12.6$ кэВ и $\sigma_T = 0.07$ °C.

на стационарный температурный режим и измеренные в это время значения температуры магнитов сильно отклонялись от стационарных.

При построении Рисунка (1a) были заложены следующие значения разрешений для измеряемых параметров: $\sigma_E = 5.5 \text{ кэВ}$ (в соответствии с теоретической оценкой точности метода резонансной деполяризации $\sigma_E \approx 10^{-5} E$) и $\sigma_T = 0.07 \text{ }^\circ\text{C}$ (анализ результатов измерений для заходов с малым перепадом температуры показывает, что точность измерения средней температуры кольца **ВЭПП-2М** $\sigma_T \approx 0.03 \div 0.07 \text{ }^\circ\text{C}$). При таких значениях σ_E и σ_T аппроксимация имеет большое значение $\chi^2/n.d.f = 58.26/13$ и параметр $q = -3.8 \pm 2.2 \text{ кэВ}$ довольно сильно отличается от нуля, что может указывать как на заниженные значения величин σ_E и σ_T , так и на наличие неучтенных эффектов, приводящих к вариациям средней энергии пучков, помимо дрейфа температуры магнитов⁴. Оценку ошибки параметра k с учетом суммарного вклада неконтролируемых дополнительных эффектов можно получить, устанавливая значение $\chi^2/n.d.f$ аппроксимации в единицу. После введения соответствующего масштабного фактора к σ_E , получаем $\sigma_E = 12.5 \text{ кэВ}$, $\chi^2/n.d.f = 12.99/13$, при этом значимость отклонения величины q от нуля резко уменьшилась $q = -3.7 \pm 4.7 \text{ кэВ}$, что и продемонстрировано на Рисунке (1b). Полагая $q = 0$, получаем $\sigma_E = 12.6 \text{ кэВ}$, $\chi^2/n.d.f = 13.99/14$ и

$$k = (-35.9 \pm 2.7_{stat} \pm 0.3_{syst}) \text{ кэВ}/^\circ\text{C}. \quad (1)$$

Последний вариант аппроксимации показан на Рисунке (1c). В качестве оценки систематической погрешности была взята разность значений коэффициента k для двух последних вариантов аппроксимации, приведенных на Рисунках (1b) и (1c).

2.3 Калибровка по среднему импульсу заряженных каонов

2.3.1 Описание метода

Стабильность энергии E пучков накопителя можно контролировать по среднему импульсу P_{av} пары K^+K^- в процессе $e^+e^- \rightarrow \phi \rightarrow K^+K^-$, зарегистрированной в дрейфовой камере детектора **КМД-2**:

$$E(P_{av}) = \sqrt{P_{av}^2 + M_{K^\pm}^2} + \Delta(P_{av}), \quad (2)$$

⁴Одним из неучтенных эффектов является наличие вариаций магнитного поля в поворотных магнитах, однако, как будет показано в Разделе (4), соответствующие величины смещений энергии малы и не превышают 3.7 кэВ.

где $\Delta(P_{av})$ – поправка на ионизационные потери каонов в объеме дрейфовой камеры, радиационные потери начальных частиц и систематическую погрешность измерения импульса [12, 13]. Импульсное разрешение дрейфовой камеры для заряженных каонов с импульсами $P \approx 110$ МэВ/с, что соответствует суммарной энергии $\sqrt{s} \approx 1020$ МэВ, составляет $\sigma_P/P \approx 5\%$ и, главным образом, определяется многократным рассеянием в веществе камеры. Статистическая точность измерения средней энергии пучка по среднему импульсу каонов может быть представлена в виде:

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{\beta_{K^\pm}^2}{\sqrt{N}} \frac{\sigma_{P_{av}}}{P_{av}}, \quad (3)$$

где N – количество зарегистрированных пар каонов, β_{K^\pm} – скорость каона в лабораторной системе отсчета. Поскольку значения β_{K^\pm} в области энергий $\sqrt{s} \approx 1020$ МэВ малы ($\beta_{K^\pm} \approx 0.2$) и количество пар в каждой энергетической точке велико ($N = 10^3 \div 10^4$), статистическая точность данного метода высока: $\sigma_E/E = (2 \div 10) \cdot 10^{-5}$, в то время как в соответствии с результатами работы [12], систематическая погрешность значения энергии пучков достигает ≈ 50 кэВ.

Удобная параметризация функции $\Delta(P_{av})$ для интересующего нас диапазона импульсов ($80 \leq P_{av} \leq 130$) МэВ/с имеет вид:

$$\Delta(P_{av}) = \alpha_1 \beta^{-\alpha_3} + \alpha_2 + \alpha_4^2 \frac{E - \alpha_5}{(E - \alpha_5)^2 + (\Gamma_\phi/4)^2} + \alpha_6 \exp \left\{ -\frac{(P_{av} - \alpha_7)^2}{2\alpha_8^2} \right\}, \quad (4)$$

где $\beta^{-2} = 1 + (M_{K^\pm}/P_{av})^2$, $E^2 = P_{av}^2 + M_{K^\pm}^2$ и $\{\alpha_i\}$, Γ_ϕ – набор параметров, которые первоначально определялись из полного моделирования [13]. После анализа деполяризационных сканирований ϕ -мезона к функции $\Delta(P_{av})$ были добавлены поправки, компенсирующие расхождение между экспериментальными данными и моделированием:

$$\Delta(P_{av}) \rightarrow \Delta_d(P_{av}) = \Delta(P_{av}) + \alpha_9 \Delta P_{av}, \quad \Delta P_{av} = 112.0 \text{ МэВ/с} - P_{av}, \quad (5)$$

при этом параметры α_2 и α_9 были откалиброваны по деполяризационным измерениям энергии пучков. Значимость определенной таким способом величины $\alpha_9 = (3.99 \pm 3.50) \cdot 10^{-3}$ оказалась малой и поправка $\alpha_9 \Delta P_{av}$ на этом основании была отброшена. В Таблице 1 приведены значения $\{\alpha_i\}$ и Γ_ϕ , использованные для расчетов в данной работе. График функции $\Delta_d(P_{av})$ приведен на Рисунке (2).

Таблица 1: Значения параметров функции $\Delta_d(P_{av})$.

параметр	значение
α_1	0.3890836 МэВ
α_2	0.5472272 МэВ
α_3	1.343142
α_4	0.3864033 МэВ
α_5	506.3635 МэВ
α_6	0.04314388 МэВ
α_7	110.9493 МэВ/c
α_8	2.074735 МэВ/c
Γ_ϕ	4.410 МэВ

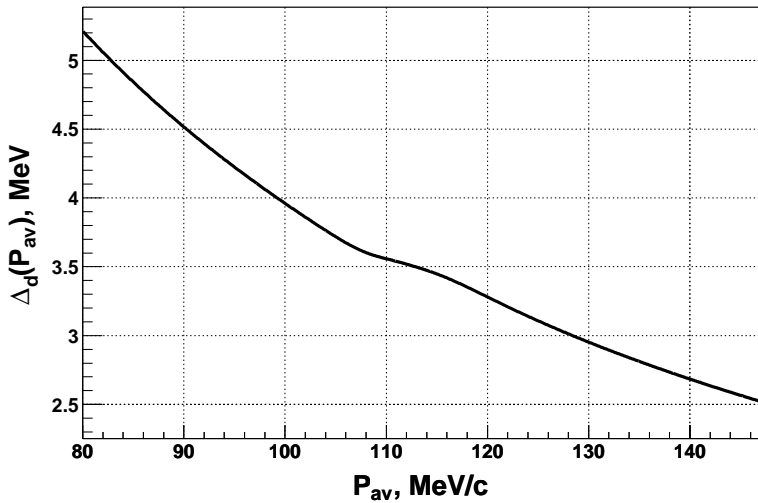


Рис. 2: График функции $\Delta_d(P_{av})$.

2.3.2 Используемая экспериментальная статистика

Набранный детектором **КМД-2** интеграл светимости для использованного нами массива данных с деполяризационной калибровкой энергии и температурным контролем составляет $\int L dt \cong 355 \text{ нб}^{-1}$. Для анализа были использованы 8 точек по энергии, список которых с указанием набранных интегралов светимости и даты проведения эксперимента приведен в Таблице 2.

Таблица 2: Список энергетических точек (№ – порядковый номер точки).

№	Обозначение	Средняя энергия, МэВ	$\int L dt$, нб ⁻¹	Дата
1	point 08	508.543 ± 0.010	76.4	Мар 98
2	point 02	509.068 ± 0.009	33.3	Ноя 94
3	point 03	509.478 ± 0.009	25.6	Янв 94
4	point 04	509.607 ± 0.010	27.2	Апр 96
5	point 05	509.993 ± 0.010	65.0	Ноя 94
6	point 09	510.064 ± 0.010	20.2	Мар 98
7	point 06	510.925 ± 0.011	20.4	Ноя 94
8	point 07	511.986 ± 0.010	51.5	Ноя 94

2.3.3 Условия отбора событий

Для выделения событий процесса $e^+e^- \rightarrow \phi \rightarrow K^+K^-$ были использованы следующие критерии отбора:

1. В дрейфовой камере зарегистрировано два трека с противоположными зарядами, количеством срабатываний на трек $N_{hits} > 10$ и расстояниями от треков до пучка $d_{beam} < 1.0$ см.
2. Полярные углы треков $\theta_{1,2}$, отсчитанные от оси пучков, достаточно велики:

$$\left| \theta_{1,2} - \frac{\pi}{2} \right| \leq 0.9 \text{ рад.} \quad (6)$$

3. Импульсы треков p_i и средний импульс удовлетворяют условиям:

$$\frac{p_1 + p_2}{2} \leq 160 \text{ МэВ}/c, \quad \left| p_i - \sqrt{E_{beam}^2 - m_{K^\pm}^2} \right| \leq 60 \text{ МэВ}/c. \quad (7)$$

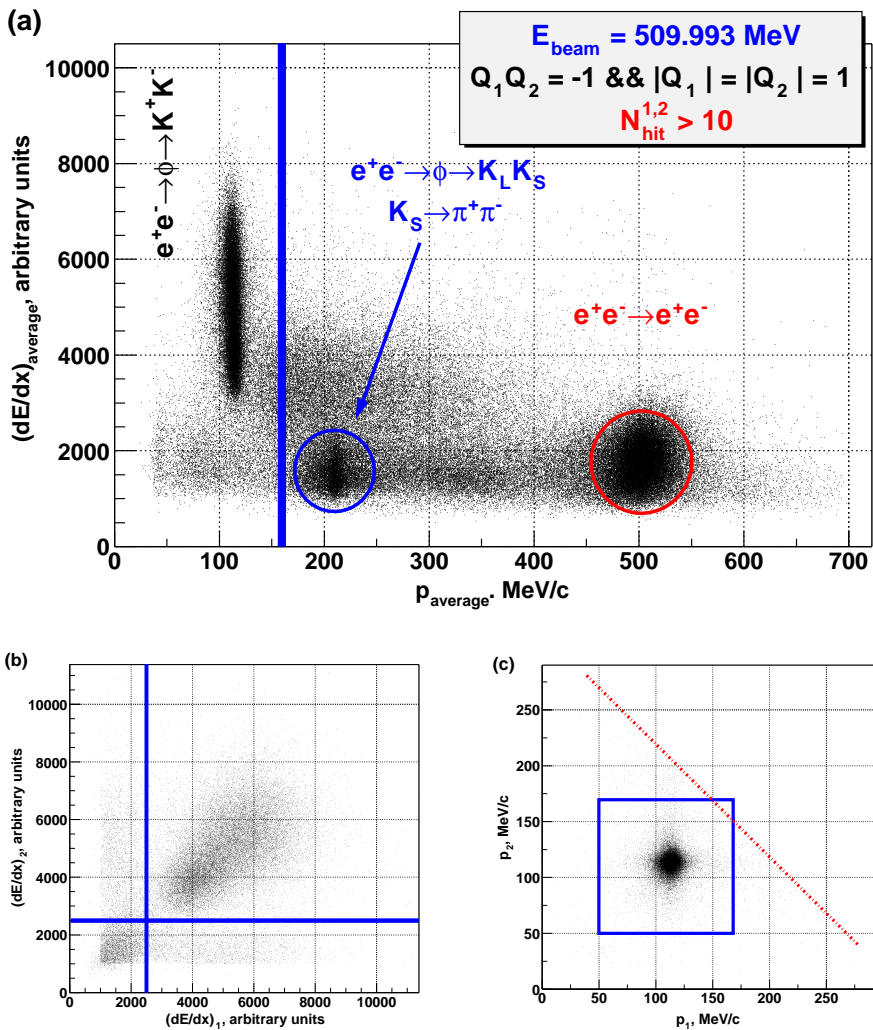


Рис. 3: Основные условия отбора событий процесса $e^+e^- \rightarrow \phi \rightarrow K^+K^-$ для одной энергетической точки $E_{\text{beam}} = 509.993$ МэВ (полное описание условий отбора дано в Разделе 2.3.3); (a): отбор по среднему импульсу треков; (b): отбор по $(dE/dx)_i$ треков; (c): отбор по импульсам p_i треков (пунктирной линией показан отбор по среднему импульсу). Отборы (a), b, c) накладывались последовательно.

4. Отбор по углам расколлинеарности треков в $(r - \phi)$ и $(r - z)$ плоскостях ($\varphi_{1,2}$ – азимутальные углы треков):

$$\left| |\phi_1 - \phi_2| - \pi \right| \leq 0.4 \text{ рад}, \quad |\theta_1 + \theta_2 - \pi| \leq 0.6 \text{ рад}. \quad (8)$$

5. Отбор по dE/dx треков (значения $(dE/dx)_i$ приведены в условных единицах):

$$2.5 \cdot 10^3 < \left(\frac{dE}{dx} \right)_{1,2} < 2 \cdot 10^4. \quad (9)$$

С этими критериями было отобрано $8.9 \cdot 10^4$ пар каонов во всем энергетическом диапазоне. Иллюстрации основных критериев отбора для точки $E_{beam} = 509.993$ МэВ приведены на Рисунке (3).

2.3.4 Измерение калибровочного коэффициента k

Процедура измерения была разбита на три этапа.

1. Для каждого захода с полным количеством пар каонов $N_{K+K^-} > 50$ измерялся средний импульс каонной пары и с помощью соотношения (2) определялась средняя энергия пучков E_{run} . Измерение среднего импульса осуществлялось аппроксимацией распределения по среднему импульсу P_{av} в окрестности пика функцией плотности распределения "гиперболический Гаусс" [14] со средним μ и дисперсией σ , как показано на Рисунке (4а). Для компенсации систематических эффектов, связанных с наличием радиационного хвоста распределения, аппроксимация проводилась в асимметричной окрестности пика $P_{av} \in (\mu - 0.8\sigma; \mu + 2.0\sigma)$. Для оценки вносимой таким выбором систематической погрешности, аппроксимация проводилась и в симметричной $P_{av} \in (\mu - 2.0\sigma; \mu + 2.0\sigma)$ окрестности пика.
2. Для каждой энергетической точки зависимость величины E_{run} от средней температуры T_{av} кольца ВЭПП-2М аппроксимировалась функцией $E_{run} = p_0 + p_1 T_{av}$, где p_1 – искомый коэффициент температурного дрейфа⁵. В качестве иллюстрации, на Рисунке (4б) приведен набор измерений и результат аппроксимации для точки $E_{beam} = 509.993$ МэВ.

⁵Значения параметра p_0 не подвергались дальнейшему анализу.

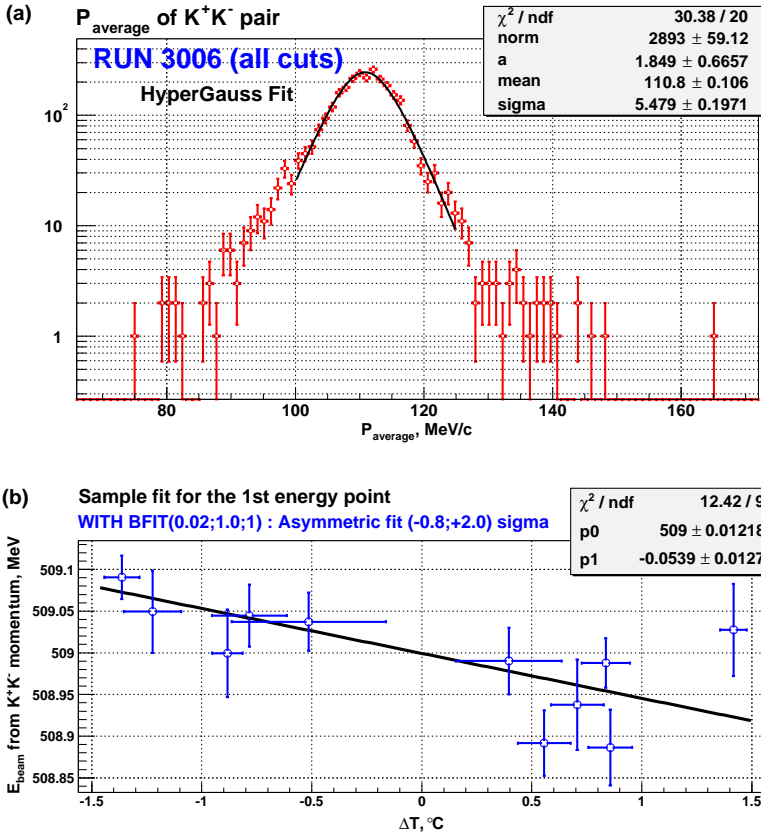


Рис. 4: (а): Пример аппроксимации распределения по среднему импульсу заряженных каонов плотностью распределения "гиперболический Гаусс" [14] для одного захода при наложении условий отбора, перечисленных в Разделе (2.3.3).

(б): Зависимость средней энергии пучка E_{run} от средней температуры T_{av} кольца коллайдера, аппроксимированная функцией $E_{run} = p_0 + p_1 T_{av}$ для энергетической точки $E_{beam} = 509.062$ МэВ. По оси абсцисс отложена разность между средней температурой в заходе T_{av} и средней температурой за полное время набора данных в этой энергетической точке.

3. Проверилось наличие согласования между измерениями коэффициента k для всех энергетических точек, после чего результаты измерений усреднялись⁶, как показано на Рисунках (5) и (6).

Для улучшения разрешения по среднему импульсу каонной пары была предпринята попытка использовать алгоритм реконструкции треков в дрейфовой камере, учитывающий положение места встречи e^+e^- пучков⁷, однако значительного улучшения получить не удалось. Это можно объяснить тем, что импульсное разрешение в основном определяется эффектом многократного рассеяния каонов на стенке вакуумного промежутка детектора **КМД-2** и учет положения места встречи пучков дает малый вклад. На Рисунках (6a) и (6b) приведены результаты измерений параметра k для этого случая.

2.3.5 Анализ погрешностей метода измерения коэффициента k

Статистическая ошибка значения средней энергии E_{run} , измеренной вышеописанным методом, определялась по формуле

$$\sigma_{E_{run}}^{(stat)} = \left| \frac{\partial}{\partial p} \left[\sqrt{p^2 + M_{K^\pm}^2} + \Delta_d(p) \right] \right| \sigma_p, \quad (10)$$

где σ_p – ошибка определения среднего импульса.

Согласно [12], наибольший вклад ≈ 50 кэВ в систематическую ошибку значения E_{run} вносит параметр α_2 функции $\Delta_d(P_{av})$. Поскольку при измерении коэффициента k мы интересуемся лишь разностями значений средних энергий заходов $\Delta E(p_1, p_2) = E(p_1) - E(p_2)$, этот вклад в систематику полностью компенсируется. Вклады остальных параметров функции $\Delta(P_{av})$ в систематическую погрешность $\Delta E(p_1, p_2)$ исчезающе малы.

2.3.6 Результат

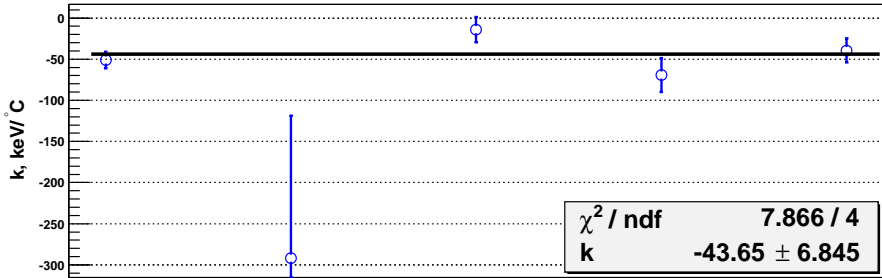
Окончательное значение калибровочного коэффициента k , полученное с помощью метода калибровки по среднему импульсу заряженных каонов:

$$k = (-42.4 \pm 11.7_{stat} \pm 3.1_{syst}) \text{ кэВ}/^\circ C, \quad (11)$$

⁶Так как статистическое согласование наблюдалось во всех случаях.

⁷Принятое в коллаборации **КМД-2** сокращенное название этого алгоритма – **BFIT**.

(a) NO BFIT : Symmetric fit (-2.0;+2.0) sigma



(b) NO BFIT : Asymmetric fit (-0.8;+2.0) sigma

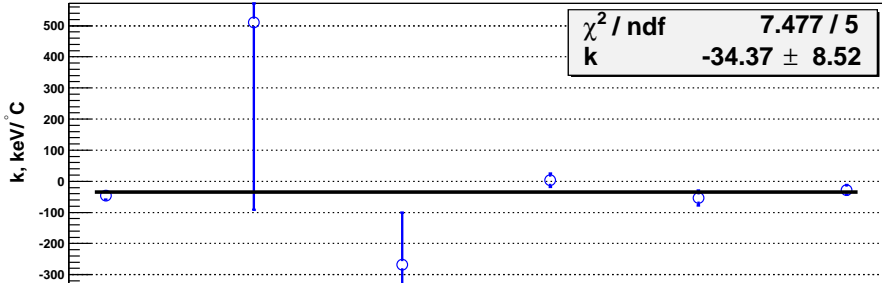
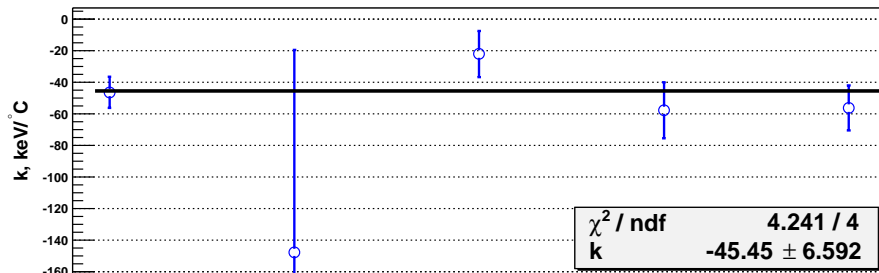


Рис. 5: Результаты измерения калибровочного коэффициента k для всех энергетических точек на основе метода калибровки по среднему импульсу заряженных каонов и итоговая аппроксимация. Измерения, для которых значения $\sigma_k \geq 1 \text{ МэВ}/^\circ\text{C}$, не принимались во внимание при аппроксимации и не приведены на рисунках. Положение пучков **не учитывалось** в процедуре восстановления треков в дрейфовой камере. В случае (a) аппроксимация распределений по среднему импульсу каонов проводилась в симметричной окрестности пика распределения ($\mu - 2.0\sigma; \mu + 2.0\sigma$), в случае (b) – в асимметричной окрестности ($\mu - 0.8\sigma; \mu + 2.0\sigma$), где μ – среднее, а σ – *RMS* распределения.

(a) WITH BFIT(0.02;1.0;1) : Symmetric fit (-2.0;+2.0) sigma



(b) WITH BFIT(0.02;1.0;1) : Asymmetric fit (-0.8;+2.0) sigma

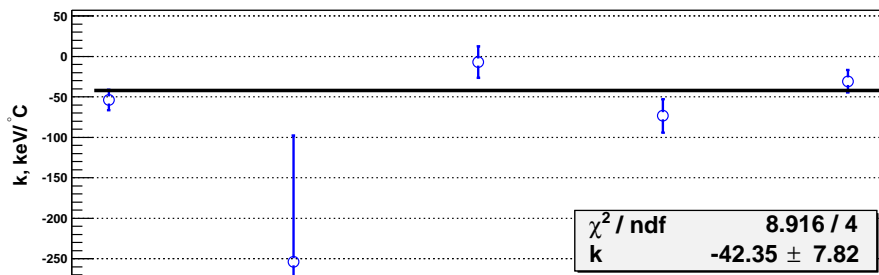


Рис. 6: Результаты измерения калибровочного коэффициента k для всех энергетических точек на основе метода калибровки по среднему импульсу заряженных каонов и итоговая аппроксимация. Измерения, для которых значения $\sigma_k \geq 1 \text{ МэВ}/^\circ\text{C}$, не принимались во внимание при аппроксимации и не приведены на рисунках. Положение пучков **учитывалось** в процедуре восстановления треков в дрейфовой камере. В случае (а) аппроксимация распределений по среднему импульсу каонов проводилась в симметричной окрестности пика распределения ($\mu - 2.0\sigma; \mu + 2.0\sigma$), в случае (б) – в асимметричной окрестности ($\mu - 0.8\sigma; \mu + 2.0\sigma$), где μ – среднее, а σ – RMS распределения.

при этом в статистическую ошибку был введен масштабный фактор $S = \sqrt{\chi^2/n.d.f} = 1.493$ (соответствующая аппроксимация приведена на Рисунке (6b)). В качестве оценки систематической погрешности взята разность значений коэффициента k , полученных для двух случаев аппроксимации: в симметричных и асимметричных окрестностях пиков распределений по среднему импульсу в каждом заходе (Рисунки (6a) и (6b) соответственно).

3 Совместный анализ результатов

Результаты измерений (1) и (11) согласуются в пределах ошибок и являются независимыми, так что они могут быть объединены: итоговое значение приведено в Таблице 3 в строке “(1) & (11)”. Значимость результата (11) мала по сравнению со значимостью (1), так что объединенное значение коэффициента k мало отличается от (1). В то же время метод калибровки энергии по среднему импульсу заряженных каонов позволяет провести прямую проверку наличия температурного дрейфа энергии пучков во время набора детектором экспериментальной статистики.

Таблица 3: Совместный анализ результатов.

Источник	k , кэВ/°C
(1)	$-35.9 \pm 2.7_{stat} \pm 0.3_{syst}$
(11)	$-42.4 \pm 11.7_{stat} \pm 3.1_{syst}$
(1) & (11)	$-36.2 \pm 2.6_{total}$

4 Перекалибровка энергий заходов

Основным приложением результатов измерений калибровочного коэффициента k является учет поправок на температурный дрейф энергии при определении средних энергий экспериментальных заходов. Поскольку величины поправок малы, нет необходимости вводить их к каждому событию, достаточно ввести поправку к средней энергии пучков для каждого экспериментального захода. Средняя энергия захода E_{run} и ее ошибка $\sigma_{E_{run}}$ может быть определена с помощью соотношений:

$$E_{run} = E_{depol} + k(T_{run} - T_{depol}), \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{E_{run}}^2 &= \sigma_{E_{depol}}^2 + \sigma_k^2 (T_{run} - T_{depol})^2 + k^2 (\sigma_{T_{run}}^2 + \sigma_{T_{depol}}^2) + \Delta_{field}^2 \quad (13) \\ &= \sigma_{E_{depol}}^2 + (\sigma_k/k)^2 (E_{run} - E_{depol})^2 + k^2 (\sigma_{T_{run}}^2 + \sigma_{T_{depol}}^2) + \Delta_{field}^2, \end{aligned}$$

где $E_{depol} \pm \sigma_{E_{depol}}$ – значение энергии, измеренное в ближайшей по времени к заходу деполяризованной точке, $T_{depol} \pm \sigma_{T_{depol}}$ – значение средней температуры кольца **ВЭПП-2М** на момент этого деполяризованного измерения, $k \pm \sigma_k$ – значение калибровочного коэффициента, Δ_{field} – оценка вклада от вариаций величины магнитного поля поворотных магнитов коллайдера. Следует отметить, что в формуле (13) систематический характер имеет только лишь вклад $\sigma_{E_{depol}}^2$, в то время как величина $\sigma_{E_{run}}$ соответствует суммарной ошибке значения средней энергии захода⁸.

Оценка величины дрейфа Δ_{field} может быть получена в виде [12]:

$$\Delta_{field} = \frac{\partial E}{\partial B} \Delta B, \quad (14)$$

где $\frac{\partial E}{\partial B} = 37.1 \pm 0.1$ кэВ/Гс [7], ΔB – оценка сверху величины вариации магнитного поля в поворотных магнитах за время набора экспериментальных данных в промежутке между двумя последовательными деполяризованными измерениями энергии пучков. Анализ долговременной нестабильности магнитного поля для деполяризованных сканирований показывает, что ΔB не превышает 0.1 Гс [15], следовательно $\Delta_{field} < 3.7$ кэВ. Малость величины Δ_{field} показывает, что избранный метод (14) оценки вклада вариаций магнитного поля адекватен и более тщательного рассмотрения не требуется.

Полный список деполяризованных заходов и заходов с набором данных с указанием средних температур и энергий приведен в Таблицах 4–6. Для наглядной демонстрации эффекта температурного дрейфа на Рисунке (7) приведены значения вычисленных с помощью соотношений (12) и (13) отклонений средней энергии каждого захода от энергии, измеренной в ближайшей деполяризованной точке.

⁸Это обстоятельство особенно существенно в том случае, когда мы определяем среднее некоторой функции $\langle F(E_{run}) \rangle$ по набору заходов, в том числе и при итоговой аппроксимации константой массы нейтрального каона, независимо измеренной для каждого захода [1]. При этом до аппроксимации необходимо учесть полную ошибку, вносимую в значение $F(E_{run})$ неопределенностью величины E_{run} , а после аппроксимации – приписать результату два дополнительных вклада в систематическую ошибку: $\sigma_{E_{depol}} = 12.6$ кэВ и σ_k – вклад, учитывающий систематическую погрешность калибровочного коэффициента k .

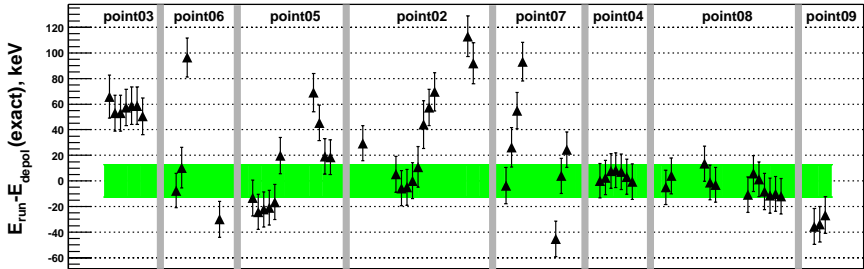


Рис. 7: Величины поправок к энергиям заходов: каждая точка соответствует вычисленному с помощью соотношений (12) и (13) отклонению средней энергии одного захода от энергии, измеренной в ближайшей деполяризационной точке $E_{run} - E_{depol}$, причем при вычислении разности ошибки величин E_{depol} полагались равными нулю. Горизонтальный коридор показывает величину ошибки деполяризационного измерения $\sigma_{E_{depol}} = 12.6$ кэВ. Последовательность заходов хронологически упорядочена, вертикальными разделителями указаны границы энергетических точек (в соответствии с обозначениями Таблицы 2).

Таблица 4: Таблица энергий заходов: **Тип** – тип захода (depol. – деполяризационное измерение энергии **ВЭПП-2М**, data – экспериментальный заход детектора **КМД-2**), **N** – порядковый номер энергетической точки, **ИН** – идентификационный номер захода, **Дата (Время)** – дата и время начала (h:m) захода, $T \pm \sigma_T$ – средняя температура поворотных магнитов коллайдера за время захода, $E \pm \sigma_E$ – средняя энергия пучков **ВЭПП-2М** за время захода (для деполяризационных заходов – измеренное значение энергии пучков), B – поле в поворотных магнитах. Вертикальные стрелки в поле **ИН** для экспериментальных заходов указывают на ближайшее деполяризационное измерение, использованное для привязки.

Тип	№	ИН	Дата (Время)	$T \pm \sigma_T, ^\circ C$	$E \pm \sigma_E, \text{МэВ}$	$B, \text{Гс}$
depol.	3	D94_01s1	23 Янв 94 (03:00)	23.93	509.551	13725.05
depol.	3	D94_01s2	23 Янв 94 (07:05)	24.80	509.528	13725.20
depol.	3	D94_01s3	23 Янв 94 (09:40)	24.71	509.542	13725.20
data	3	3001 ↓	24 Янв 94 (21:22)	24.97 ± 0.25	509.494 ± 0.017	
data	3	3002 ↓	25 Янв 94 (03:29)	25.33 ± 0.06	509.480 ± 0.014	
data	3	3005 ↓	25 Янв 94 (05:19)	25.33 ± 0.06	509.480 ± 0.014	
data	3	3006 ↓	25 Янв 94 (06:37)	25.20 ± 0.07	509.485 ± 0.014	
data	3	3007 ↓	25 Янв 94 (11:32)	25.17 ± 0.12	509.486 ± 0.015	
data	3	3011 ↓	25 Янв 94 (12:46)	25.17 ± 0.12	509.486 ± 0.015	
data	3	3014 ↓	25 Янв 94 (14:39)	25.40 ± 0.10	509.478 ± 0.014	
depol.	3	D94_01f1	25 Янв 94 (19:45)	26.78	509.428	13725.10
depol.	3	D94_01f2	25 Янв 94 (21:45)	27.31	509.427	13725.08
data	6	4038 ↓	13 Ноя 94 (19:42)	32.82 ± 0.05	510.867 ± 0.013	
depol.	6	D94_02s	13 Ноя 94 (21:10)	32.61	510.875	13768.28
data	6	4039 ↑	14 Ноя 94 (03:17)	32.34 ± 0.24	510.885 ± 0.016	
data	6	4040 ↑	14 Ноя 94 (17:38)	29.96 ± 0.08	510.971 ± 0.015	
data	6	4041 ↓	14 Ноя 94 (12:58)	29.82 ± 0.10	510.975 ± 0.014	
depol.	6	D94_02f	15 Ноя 94 (16:40)	28.99	511.005	13768.28
depol.	5	D94_03s	18 Ноя 94 (16:45)	29.79	510.002	13741.28
data	5	4056 ↑	18 Ноя 94 (20:12)	30.17 ± 0.12	509.988 ± 0.014	
data	5	4059 ↑	19 Ноя 94 (00:27)	30.46 ± 0.07	509.978 ± 0.014	
data	5	4060 ↑	19 Ноя 94 (04:27)	30.41 ± 0.07	509.980 ± 0.014	
data	5	4061 ↑	19 Ноя 94 (06:32)	30.38 ± 0.05	509.981 ± 0.013	
data	5	4062 ↑	19 Ноя 94 (07:46)	30.26 ± 0.07	509.985 ± 0.014	
data	5	4064 ↑	19 Ноя 94 (11:28)	29.25 ± 0.12	510.022 ± 0.014	
data	5	4066 ↓	19 Ноя 94 (14:42)	29.40 ± 0.12	510.025 ± 0.015	
data	5	4067 ↓	19 Ноя 94 (18:23)	30.05 ± 0.07	510.001 ± 0.014	
data	5	4068 ↓	19 Ноя 94 (22:57)	30.78 ± 0.09	509.975 ± 0.014	
data	5	4074 ↓	20 Ноя 94 (03:20)	30.80 ± 0.06	509.974 ± 0.014	
depol.	5	D94_03f	20 Ноя 94 (15:40)	31.30	509.956	13741.28

Таблица 5: Таблица энергий заходов (продолжение).

Тип	№	ИН	Дата (Время)	$T \pm \sigma_T, ^\circ C$	$E \pm \sigma_E, \text{МэВ}$	$B, \text{Гс}$
depol.	2	D94_04s	20 Ноя 94 (19:30)	32.27	509.005	13714.36
data	2	4075 ↑	21 Ноя 94 (02:03)	31.47 ± 0.06	509.034 ± 0.014	
data	2	4076 ↓	21 Ноя 94 (22:16)	30.61 ± 0.12	509.047 ± 0.014	
data	2	4079 ↓	22 Ноя 94 (01:01)	30.91 ± 0.10	509.036 ± 0.014	
data	2	4080 ↓	22 Ноя 94 (02:51)	30.89 ± 0.11	509.037 ± 0.014	
data	2	4081 ↓	22 Ноя 94 (08:00)	30.76 ± 0.12	509.042 ± 0.014	
depol.	2	D94_04i	22 Ноя 94 (16:30)	30.75	509.042	13714.41
data	2	4082 ↑	22 Ноя 94 (17:55)	30.45 ± 0.24	509.053 ± 0.016	
data	2	4084 ↑	22 Ноя 94 (21:13)	29.54 ± 0.35	509.086 ± 0.019	
data	2	4085 ↑	23 Ноя 94 (04:35)	29.17 ± 0.07	509.099 ± 0.014	
data	2	4088 ↑	23 Ноя 94 (07:17)	28.83 ± 0.13	509.112 ± 0.015	
data	2	4092 ↓	23 Ноя 94 (13:30)	28.69 ± 0.08	509.084 ± 0.016	
data	2	4093 ↓	23 Ноя 94 (18:55)	29.27 ± 0.17	509.063 ± 0.016	
depol.	2	D94_04f	24 Ноя 94 (15:00)	31.80	508.971	13714.38
depol.	7	D94_05s	24 Ноя 94 (21:00)	31.44	511.912	13795.16
data	7	4100 ↑	24 Ноя 94 (22:57)	31.56 ± 0.13	511.908 ± 0.014	
data	7	4101 ↑	25 Ноя 94 (05:14)	30.73 ± 0.20	511.938 ± 0.015	
data	7	4102 ↑	25 Ноя 94 (12:04)	29.93 ± 0.08	511.967 ± 0.014	
data	7	4103 ↑	25 Ноя 94 (18:28)	28.87 ± 0.06	512.005 ± 0.015	
data	7	4104 ↓	26 Ноя 94 (00:37)	28.42 ± 0.03	512.008 ± 0.014	
data	7	4105 ↓	26 Ноя 94 (07:29)	27.06 ± 0.08	512.058 ± 0.014	
data	7	4106 ↓	26 Ноя 94 (11:15)	26.49 ± 0.09	512.078 ± 0.014	
depol.	7	D94_05f	26 Ноя 94 (21:30)	27.16	512.054	13795.19
depol.	4	D96_01s1	12 Апр 96 (12:48)	28.90	509.621	13726.93
depol.	4	D96_01s2	12 Апр 96 (16:50)	29.30	509.604	13726.91
data	4	4545 ↑	12 Апр 96 (22:06)	29.30 ± 0.04	509.604 ± 0.013	
data	4	4546 ↑	13 Апр 96 (00:24)	29.24 ± 0.05	509.606 ± 0.013	
data	4	4547 ↑	13 Апр 96 (08:25)	29.10 ± 0.08	509.611 ± 0.014	
data	4	4548 ↑	13 Апр 96 (10:39)	29.07 ± 0.07	509.612 ± 0.014	
data	4	4549 ↑	13 Апр 96 (12:50)	29.12 ± 0.10	509.611 ± 0.014	
data	4	4550 ↑	13 Апр 96 (15:05)	29.21 ± 0.09	509.607 ± 0.014	
data	4	4551 ↑	13 Апр 96 (16:03)	29.33 ± 0.09	509.603 ± 0.014	

Таблица 6: Таблица энергий заходов (продолжение).

Тип	№	ИН	Дата (Время)	$T \pm \sigma_T, ^\circ C$	$E \pm \sigma_E, \text{МэВ}$	$B, \text{Гс}$
depol.	8	D98_01s	19 Мар 98 (20:00)	26.70	508.543	13698.59
data	8	8411 ↑	19 Мар 98 (20:32)	26.85 ± 0.06	508.538 ± 0.014	
data	8	8412 ↑	20 Мар 98 (00:57)	26.60 ± 0.12	508.547 ± 0.014	
data	8	8413 ↓	20 Мар 98 (06:01)	26.43 ± 0.08	508.546 ± 0.014	
depol.	8	D98_01i1	20 Мар 98 (17:00)	26.80	508.533	13698.59
data	8	8415 ↑	20 Мар 98 (19:56)	26.84 ± 0.05	508.532 ± 0.014	
data	8	8416 ↑	20 Мар 98 (22:05)	26.90 ± 0.06	508.529 ± 0.014	
data	8	8417 ↓	21 Мар 98 (01:58)	26.91 ± 0.09	508.521 ± 0.014	
data	8	8418 ↓	21 Мар 98 (06:53)	26.45 ± 0.12	508.537 ± 0.014	
depol.	8	D98_01i2	21 Мар 98 (10:50)	26.60	508.532	13698.59
data	8	8419 ↑	21 Мар 98 (11:17)	26.57 ± 0.07	508.533 ± 0.014	
data	8	8420 ↑	21 Мар 98 (16:50)	26.83 ± 0.13	508.524 ± 0.014	
data	8	8421 ↑	21 Мар 98 (22:17)	26.93 ± 0.08	508.520 ± 0.014	
data	8	8422 ↑	22 Мар 98 (02:08)	26.89 ± 0.08	508.522 ± 0.014	
data	8	8423 ↑	22 Мар 98 (07:11)	26.94 ± 0.10	508.520 ± 0.014	
data	9	8425 ↓	22 Мар 98 (21:44)	27.80 ± 0.09	509.974 ± 0.014	
data	9	8426 ↓	23 Мар 98 (00:13)	27.74 ± 0.08	509.976 ± 0.014	
data	9	8427 ↓	23 Мар 98 (04:56)	27.55 ± 0.13	509.983 ± 0.014	
depol.	9	D98_02f1	23 Мар 98 (11:00)	26.80	510.010	13740.33

5 Заключение

Итоговое значение коэффициента температурного дрейфа энергии пучков, полученное в данной работе с помощью двух методов измерения, составляет $k = -36.2 \pm 2.6 \text{ кэВ}/^\circ\text{C}$, что находится в согласии с данными предварительного анализа, приведенными в работе [8]. На основе нового измерения была проведена калибровка средней энергии пучков **ВЭПП-2М** с точностью $13 \div 19 \text{ кэВ}$ (вклад систематической погрешности составляет 12.6 кэВ). Полученные результаты могут быть использованы для измерения массы нейтрального каона [1] и уточнения параметров ϕ -мезона с детекторами **КМД-2** и **СНД** [16, 17].

Авторы благодарны Б.И. Хазину, Ю.М. Шатунову, С.И. Эйдельману, Г.В. Федотовичу, И.Н. Нестеренко, Н.М. Рыскулову, П.А. Лукину и Д.А. Горбачеву за критический анализ работы и ценные замечания.

Список литературы

- [1] А.С. Зайцев. Квалификационная работа на соискание степени бакалавра “Прецизионное измерение массы нейтрального каона с детектором КМД-2”. НГУ, Новосибирск, 2001.
- [2] А.Д. Букин, Я.С. Дербенев, А.М. Кондратенко и др. Метод абсолютной калибровки энергии пучков в накопителе. Измерение массы ϕ -мезона. В кн.: Труды 5-го Международного Симпозиума по физике высоких энергий и элементарных частиц. Варшава, (1975) 138–147.
- [3] A.N. Skrinsky. **VEPP-2M** status and prospects and ϕ -factory project at Novosibirsk. Proc. of Workshop on Physics and Detectors for DAΦNE’95. Frascati, April 4-7, 1995. – INFN – Laboratory Nazionali di Frascati, 1995. – Frascati physics series. – Vol. **IV**. 3 – 18.
- [4] В.В. Анашин, И.Б. Вассерман, В.Г. Вещеревич и др. Электрон-позитронный накопитель-охладитель **БЭП**. Препринт ИЯФ **84-114**, Новосибирск, 1984.
- [5] VEPP-2M Collaboration Web Site: <http://www.inp.nsk.su/vepp2m>.
- [6] Б.А. Бакланов, И.Б. Вассерман и др. Стабилизация средней энергии накопителя **ВЭПП-2М** при проведении прецизионных экспериментов. Труды 7-го Всесоюзного Сопещения по ускорителям заряженных частиц, т. 1, стр. 338, Дубна, 1981.
- [7] A.P. Lysenko, I.A.Koop, et al. Beam energy measurement and stabilization at the storage ring **VEPP-2M**. Nucl. Instr. and Meth., **A359** (1995) 419.
- [8] Г.А. Аксенов, Э.В. Анашкин, Р.Р. Ахметшин и др. Прецизионное измерение параметров ω -мезона с детектором **КМД-2**. Препринт ИЯФ **99-85**, Новосибирск, 1999.
- [9] Г.А. Аксенов, В.М. Аульченко, Л.М. Барков и др. Проект детектора **КМД-2**. Препринт ИЯФ **85-118**. Новосибирск, 1985.

- [10] E.V. Anashkin, V.M. Aulchenko, S.E. Baru, et al. General purpose cryogenic magnetic detector **CMD-2** for experiments at **VEPP-2M** collider. **ICFA Instrumentation Bulletin** **5** (1988) 18.
- [11] CMD-2 Collaboration Web Site: <http://cmd.inp.nsk.su>.
- [12] R.R. Akhmetshin, G.A. Aksenov, E.V. Anashkin, et al. Recent results from **CMD-2** detector at **VEPP-2M**. Preprint INP **99-11**, Novosibirsk, 1999.
- [13] R.R. Akhmetshin, G.A. Aksenov, E.V. Anashkin, et al. Measurement of ϕ -meson parameters with **CMD-2** detector at **VEPP-2M** collider. Preprint INP **95-35**, Novosibirsk, 1995.
- [14] А.С. Зайцев. Основные свойства распределения “гиперболический Гаусс”, меморандум Лаб. 2 ИЯФ СО РАН, Новосибирск, 2001.
http://cmd.inp.nsk.su/~azaitsev/papers/lab_memo_ph/HGmemo.ps.
- [15] И.Н. Нестеренко. Частное сообщение.
- [16] M.N. Achasov et al. Препринт ИЯФ **99-16**, Новосибирск, 1999.
M.N. Achasov, et al. Spherical Neutral Detector for **VEPP-2M** collider.
<http://xxx.lanl.gov/abs/hep-ex/9909015>.
- [17] SND Collaboration Web Site: <http://sndfs0.inp.nsk.su>.

А.С. Зайцев, К.Ю. Михайлов, Е.П. Солодов

**Калибровка энергии пучков коллайдера ВЭПП-2М
на пике ϕ -мезона**

A.S. Zaitsev, K.Yu. Mikhailov, E.P. Solodov

**Beam energy calibration of VEPP-2M collider
at ϕ -meson peak**

ИЯФ 2003-39

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев
Работа поступила 15.05.2003 г.

Сдано в набор 22.05.2003 г.

Подписано в печать 26.05.2003 г.

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1.4 печ.л., 1.1 уч.-изд.л.

Тираж 90 экз. Бесплатно. Заказ № 39

Обработано на IBM PC и отпечатано на
ротапринте ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.