

ПРОЕКТ ВЭПП-2000 — КОЛЛАЙДЕР, ДЕТЕКТОРЫ, ФИЗИЧЕСКАЯ ПРОГРАММА

© 2004 г. С. И. Середняков

*Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск;
Новосибирский государственный университет, Россия*
Поступила в редакцию 26.03.2003 г.; после доработки 12.08.2003 г.

Приводится краткое описание нового e^+e^- -коллайдера ВЭПП-2000 с максимальной энергией $2E = 2000$ МэВ, сооружение которого ведется в ИЯФ СО РАН. Эксперименты на ВЭПП-2000 будут проводиться с двумя модернизированными детекторами: КМД-2М и СНД. Основным пунктом физической программы является точное измерение полного сечения процесса $e^+e^- \rightarrow$ адроны и парциальных сечений этого процесса с целью проверки моделей QCD, VMD, CVC, а также для уточнения вклада адронов в такие фундаментальные константы, как аномальный магнитный момент мюона $a_\mu = \frac{g-2}{2}$ и постоянная тонкой структуры $\alpha_{em}(M_Z^2)$. Важное значение будут иметь также измерения нуклонных формфакторов на пороге в процессах $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}, n\bar{n}$.

1. КОЛЛАЙДЕР ВЭПП-2000

Проект ВЭПП-2000 был предложен для продолжения физической программы коллайдера ВЭПП-2М [1] в сторону большей энергии — до 2.0 ГэВ в с.ц.м. В новом ускорительном комплексе коллайдер ВЭПП-2М будет заменен на ВЭПП-2000. Схема ускорительного комплекса ВЭПП-2000 показана на рис. 1. Следует заметить, что инжекционная часть комплекса (линейный ускоритель, электронный синхротрон, бустер) остается без существенных изменений.

Основные параметры ВЭПП-2000 следующие [2, 3]:

- а) рабочая энергия (с.ц.м.) 0.4–2.0 ГэВ;
- б) светимость $L = 10^{31} \text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$ при энергии $2E = 1.0$ ГэВ; $L = 10^{32} \text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$ при $2E = 2.0$ ГэВ;
- в) периметр 24.5 м;
- г) ток 200 мА ($E = 0.9$ ГэВ);
- д) размер пучка вдоль орбиты 3.4 см ($E = 0.9$ ГэВ);
- е) энергетический разброс 0.7 МэВ ($E = 0.9$ ГэВ).

Хотя ВЭПП-2000 уступает по светимости e^+e^- -фабрикам, тем не менее его светимость на 2–3 порядка превосходит светимость ранее работающих при энергии $2E > 1.4$ ГэВ коллайдеров DCI (Orsay) и ADONE (Frascati). Ожидаемая интегральная светимость ВЭПП-2000 за 5 лет экспериментов составит ~ 3 фбн⁻¹.

Отличительной особенностью ВЭПП-2000 является необычная фокусирующая система, состоящая как из традиционных квадрупольных линз, так

и из принципиально нового элемента — сверхпроводящих соленоидов с магнитным полем 8 Тл. При прохождении электронов через соленоид плоскость бетатронных колебаний поворачивается на 90°, происходит размешивание вертикальных и горизонтальных бетатронных колебаний, пучок становится круглым в поперечном направлении. Предельный по эффектам встречи ток возрастает, что приводит к повышению светимости коллайдера. Такая схема увеличения светимости будет опробована на ВЭПП-2000.

В настоящее время ведется изготовление и монтаж элементов коллайдера в экспериментальном зале.

2. ДЕТЕКТОР СНД

Эксперименты с детектором СНД (сферический нейтральный детектор) [4] проводились на e^+e^- -коллайдере ВЭПП-2М в период с 1995 по 2000 гг. с интегральной светимостью ~ 30 пбн⁻¹.

Главной частью детектора СНД (рис. 2) является электромагнитный калориметр на основе 1632 кристаллов NaI(Tl), выполненный в виде трех сферических слоев. Общий вес кристаллов NaI(Tl) составляет 3.6 т, телесный угол калориметра $\sim 90\%$ от 4π . Энергетическое разрешение для фотонов составляет $\sigma_E/E = 4.2\%/\sqrt[4]{E(\text{ГэВ})}$ [5], угловое разрешение $\sim 1.5^\circ$. Порог на энергию фотона установлен на уровне 20 МэВ. Для измерения углов вылета заряженных частиц используется система из двух цилиндрических дрейфовых камер с телесным углом 95% от 4π . Точность измерения

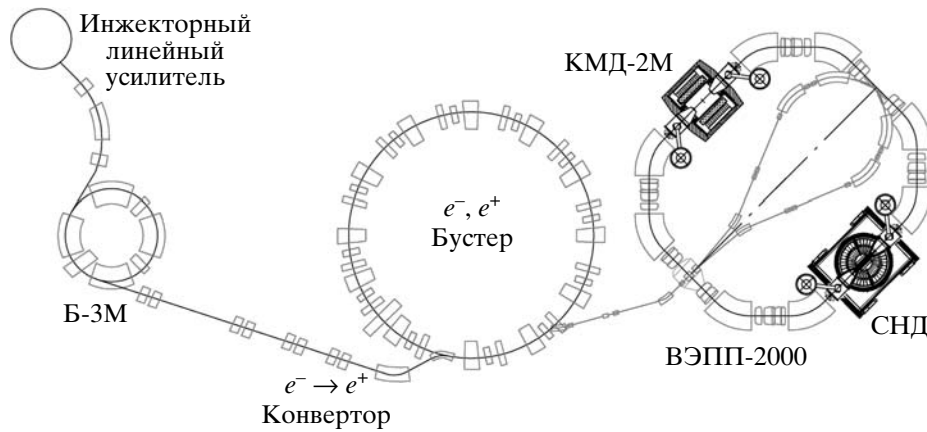


Рис. 1. Схема ускорительного комплекса ВЭПП-2000. Коллайдер ВЭПП-2000 с двумя детекторами СНД и КМД-2М показаны в правой части рисунка.

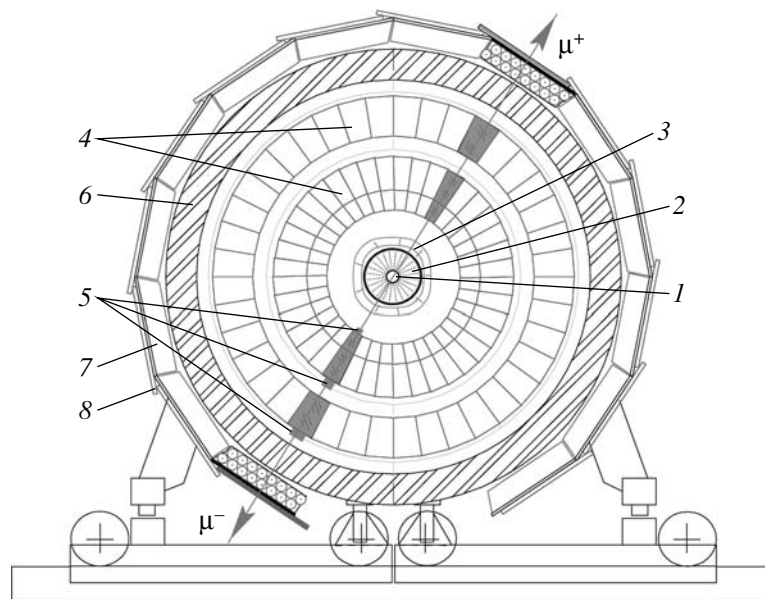


Рис. 2. Детектор СНД, вид в плоскости поперек направления пучков: 1 — вакуумная камера; 2 — дрейфовые камеры; 3 — аэрогелевые черенковские счетчики; 4 — NaI(Tl)-счетчики; 5 — фототриоды; 6 — железный поглотитель; 7 — стримерные трубки; 8 — сцинтилляционные счетчики.

азимутального угла составляет 0.4° , а полярного угла $\sim 2^\circ$. Снаружи калориметра установлен мюонный детектор, состоящий из стримерных трубок [6].

В настоящее время проводится модернизация СНД [7]. Сооружается новая дрейфовая камера в качестве трекового детектора. Дополнительным элементом СНД будет аэрогелевый черенковский счетчик (показатель преломления $n = 1.13$), позволяющий разделять π - и K -мезоны до импульса $900 \text{ МэВ}/c$. В новом детекторе СНД будут также обновлены электроника и система считывания и обработки данных.

3. ДЕТЕКТОР КМД-2М

Схема детектора КМД-2М [8] показана на рис. 3. КМД-2М представляет собой сверхпроводящий соленоид с полем 1.5 Тл , толщиной $0.15X_0$, внутри которого размещена дрейфовая камера, обеспечивающая измерение углов вылета и импульсов заряженных частиц. Угловая точность $\sim 5 \text{ мрад}$, импульсное разрешение $\sim 3\%$ при импульсе 1 ГэВ , среднее число проволок вдоль трека — 19.

Калориметр КМД-2М — комбинированный. В торцевой части он состоит из кристаллов ВГО со считыванием на кремниевых фотодиодах. В баррельной части калориметр состоит по ходу частиц

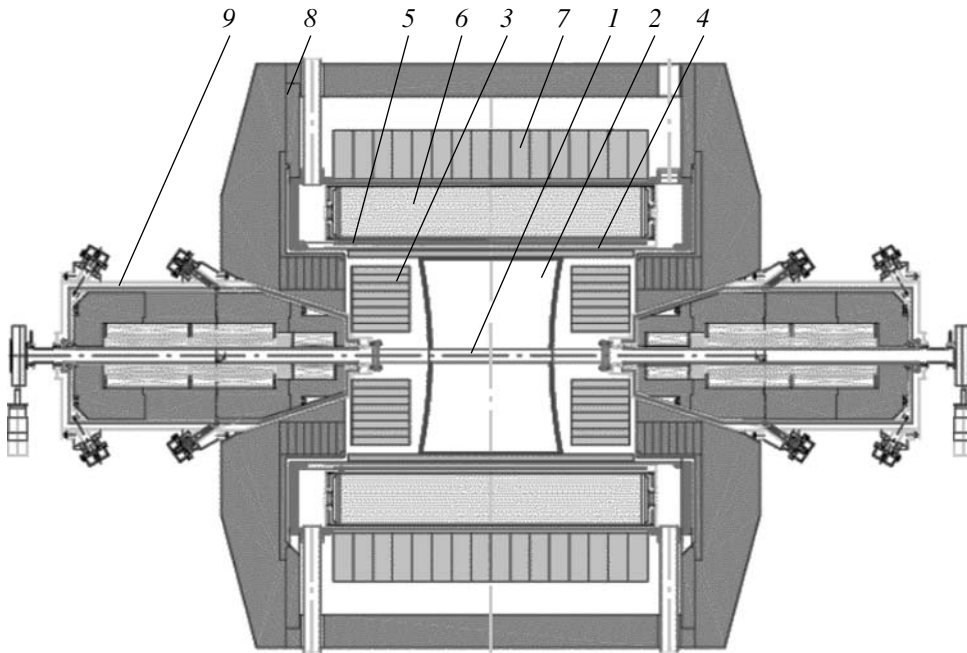


Рис. 3. Детектор КМД-2М, вид вдоль направления пучков: 1 – вакуумная камера; 2 – дрейфовые камеры; 3 – ВГО-калориметр; 4 – Z-камера; 5 – сверхпроводящий соленоид; 6 – LXe-калориметр; 7 – CsI-калориметр; 8 – ярмо магнита; 9 – сверхпроводящие фокусирующие соленоиды.

из жидкого криптона ($8X_0$) и кристаллов CsI(Tl) ($5X_0$). Калориметр КМД-2М является мелкосекционированным по телесному углу, что позволяет с высокой эффективностью регистрировать события с большой множественностью или с близкими частицами. Энергетическое разрешение калориметра ожидается в пределах 3–6% для фотонов с энергией 0.1–1 ГэВ. Угловое разрешение – от 0.3° в баррельной части до 1° в торцах.

Снаружи калориметра установлена пробегная система на основе плоских сцинтилляционных счетчиков для улучшения разделения π - и K -мезонов и подавления космического фона.

4. ФИЗИЧЕСКАЯ ПРОГРАММА

Полное сечение e^+e^- -аннигиляции в адроны

Величина $R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{адроны})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)}$ является фундаментальной величиной в кварковой модели и в КХД. В первом приближении $R = 3 \sum_q e_q^2$, и для первых трех кварков u, d, s величина $R \simeq 2$. Расчетное значение величины R с учетом поправок КХД согласуется с экспериментальными данными при энергии $2E > 1.5$ ГэВ. Область ВЭПП-2000 $2E = 1.4\text{--}2.0$ ГэВ является резонансной или переходной областью энергии. Здесь сечения основных процессов, дающих наибольший вклад в R , резко изменяются с энергией. Экспериментальные

ошибки в этих сечениях пока велики и приводят к ошибке $\Delta R/R \simeq 10\%$. Задача ВЭПП-2000 – уменьшить эту ошибку до 2–3%.

Вклад величины R в аномальный магнитный момент (АММ) мюона $a_\mu = \frac{g-2}{2}$

АММ мюона является одной из фундаментальных констант физики элементарных частиц. По величине АММ составляет $\sim 10^{-3}$ от полного магнитного момента, и эта маленькая величина $a_\mu = \frac{g-2}{2}$ в настоящее время в эксперименте E821 (BNL) [9] измерена с точностью 0.7 ppm (1 ppm = 10^{-6}). Расчетное значение АММ имеет примерно такую же точность: 0.9 ppm [10]. Однако в расчете есть проблемы. Дело в том, что определяющий вклад в расчетную точность дает адронная поляризация вакуума (АПВ), которая пока не может быть получена из первых принципов КХД. Для расчета АПВ используются экспериментальные данные по полному сечению процесса $e^+e^- \rightarrow$ адроны. В величину R , а она как раз и измеряется на ВЭПП-2М и ВЭПП-2000, наибольший вклад дают меньшие энергии (область ρ -мезона).

Наиболее точные измерения величины R были сделаны группой КМД-2 [11] в Новосибирске. Расчетная величина АММ по этим данным отличается в меньшую сторону (на три стандартных

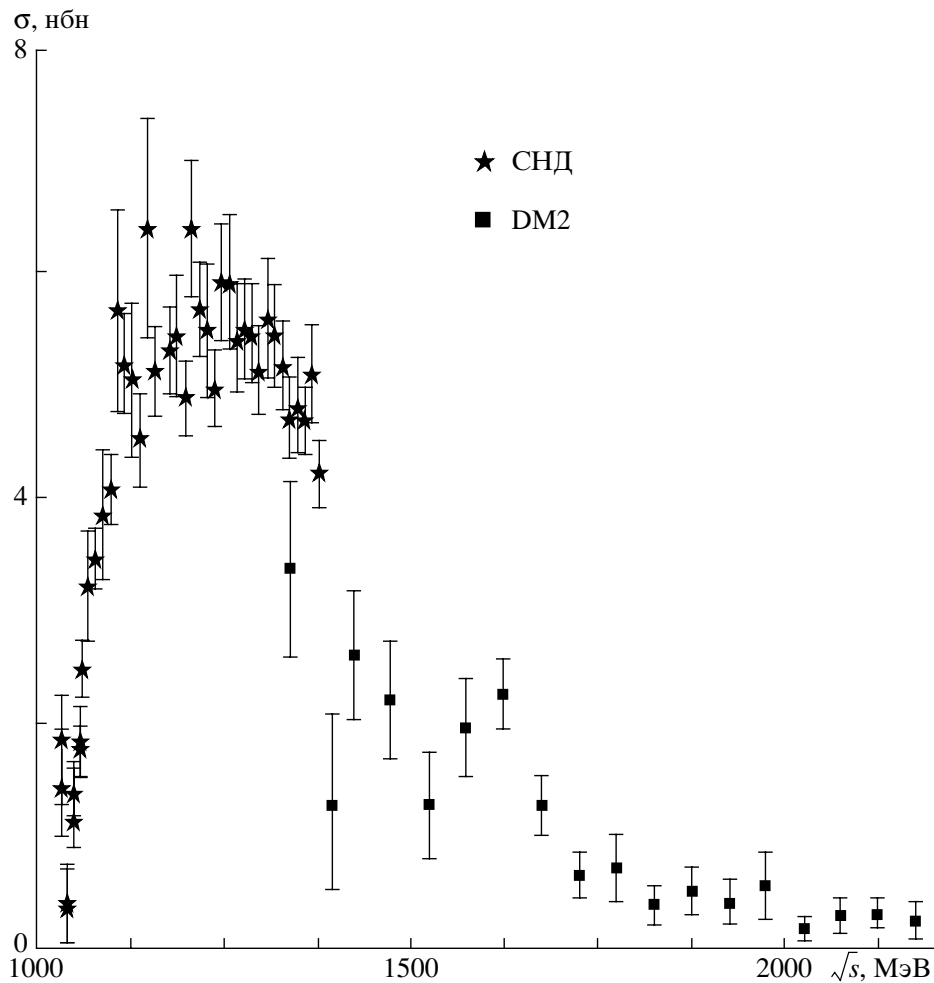


Рис. 4. Экспериментальные данные по сечению процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$.

отклонения (2.9 ppm) от эксперимента E821. Значение АММ по распадам τ -лептона также ниже результата E821, но здесь разница меньше (1.5σ). Новые измерения R на ВЭПП-2000 являются совершенно необходимыми, так как достоверно установленное отклонение эксперимента от расчета для АММ означало бы нарушение стандартной модели.

Вклад величины R в значение постоянной тонкой структуры $\alpha_{em}(M_Z^2)$

Постоянная тонкой структуры α_{em} , как известно, слабо растет с ростом энергии и на пике Z^0 -бозона ее значение составляет уже $1/129$ (вместо привычного значения $1/137$ в пределе нулевой энергии). Однако если точность $\alpha_{em}(0)$ составляет 4×10^{-8} [12], точность величины $\alpha_{em}(M_Z^2)$ гораздо хуже: $\sim 10^{-3}$.

Улучшение точности $\alpha_{em}(M_Z^2)$ имеет важное значение для прецизионной проверки электросла-

бой модели. Например, проверка соотношения

$$\sin^2 \theta_W (1 - \sin^2 \theta_W) = \frac{\pi \alpha_{em}(M_Z^2)}{\sqrt{2} G_F M_Z^2}$$

(зависимость от M_t и M_H не включена) ограничена точностью $\alpha_{em}(M_Z^2)$. Погрешности в других величинах этого соотношения значительно меньше:

$$\delta G_F \sim 10^{-5}; \quad \delta M_Z \sim 10^{-4}.$$

Константа $\alpha_{em}(M_Z^2)$ рассчитывается в КЭД с привлечением экспериментального сечения процесса $e^+e^- \rightarrow$ адроны аналогично расчету АММ, однако здесь наибольший вклад в поправку АПВ дают более высокие энергии. Тем не менее по данным 1999 г. область энергии $2E < 2 \text{ ГэВ}$ дает вклад $> 30\%$ в ошибку $\alpha_{em}(M_Z^2)$. Поэтому новые более точные измерения величины R на ВЭПП-2000 ($< 1\%$ на ρ -мезоне и $2-3\%$ в интервале $1-2 \text{ ГэВ}$) с условием улучшения точности при более высокой энергии, например на ВЭПП-4М, позволят

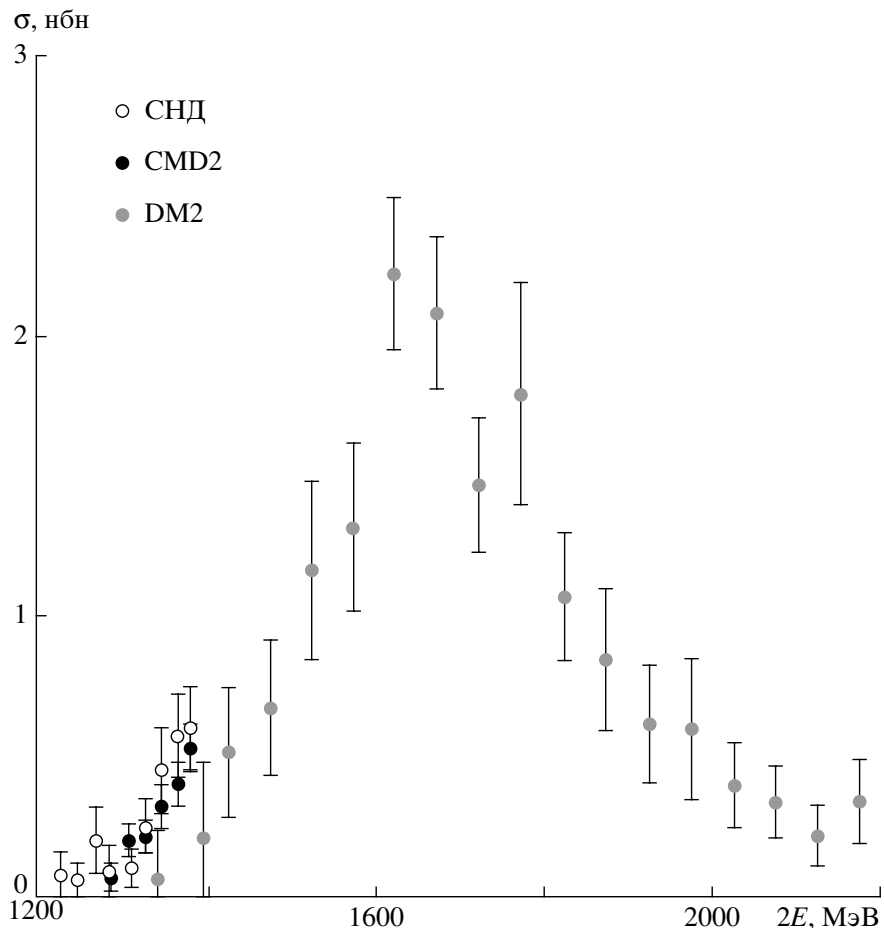


Рис. 5. Экспериментальные данные по сечению процесса $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^+\pi^-$.

будущем значительно улучшить точность проверки электрослабой модели.

Отдельные процессы e^+e^- -аннигиляции в адроны и спектроскопия возбужденных векторных мезонов

Величина R определяется суммой сечений всех адронных процессов, например:

$$e^+e^- \rightarrow 2\pi, 3\pi, 4\pi, 5\pi, K\bar{K}, K\bar{K}\pi, N\bar{N}, \dots$$

Эти процессы доминируют на ВЭПП-2000. При энергии $2E < 1$ ГэВ наибольшее сечение имеют процессы $e^+e^- \rightarrow 2\pi, 3\pi$, далее с ростом энергии эти сечения падают и начинает доминировать процесс $e^+e^- \rightarrow 4\pi$. Для каждого отдельного процесса сечение сравнительно хорошо описывается моделью векторной доминантности (МВД) с поправками, например с учетом зависимости ширины резонанса от энергии. Кроме хорошо известных резонансов $\rho(770)$, $\omega(782)$ и $\phi(1020)$ экспериментально установлено существование более тяжелых

и более широких резонансов (возбужденных кваркониев) [12]:

- $\rho(1450)$: $M = 1465 \pm 25$; $\Gamma = 310 \pm 60$; 4π ;
 - $\rho(1700)$: $M = 1700 \pm 20$; $\Gamma = 240 \pm 60$; 4π ;
 - $\rho(2150)$: $M = 2149 \pm 17$; $\Gamma = 363 \pm 50$; K^+K^- ;
 - $\omega(1420)$: $M = 1419 \pm 31$; $\Gamma = 174 \pm 60$; 3π ;
 - $\omega(1650)$: $M = 1649 \pm 24$; $\Gamma = 220 \pm 35$; $\omega\pi^+\pi^-$;
 - $\phi(1680)$: $M = 1680 \pm 20$; $\Gamma = 150 \pm 50$; K^*K
- (M и Γ – в МэВ).

Параметры возбужденных резонансов, в особенности моды распадов, определены недостаточно хорошо: большие систематические ошибки $\sim 20\%$, слишком большой шаг по энергии при измерениях, низкая статистическая точность. Экспериментальные данные по некоторым процессам, полученные за 30 лет экспериментов на коллайдерах ВЭПП-2, ВЭПП-2М, АСО, ADONE, DCI, показаны на рис. 4–6.

Экспериментальная точность по всем показанным процессам далека от необходимых 3–5%.

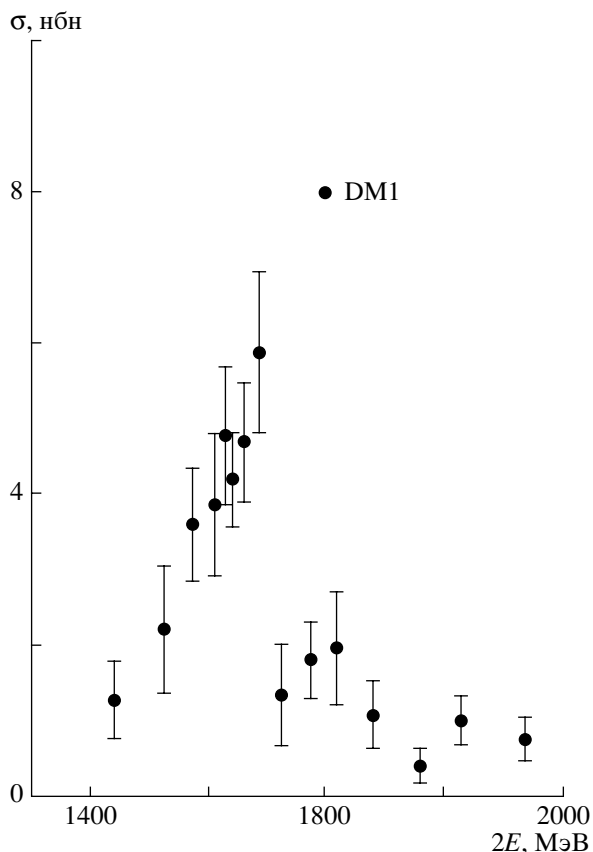


Рис. 6. Экспериментальные данные по сечению процесса $e^+e^- \rightarrow K_S K^+ \pi^-$.

Причины состоят в низкой интегральной светимости $\sim 5 \text{ пбн}^{-1}$ в интервале энергии $1.4 < 2E < 2 \text{ ГэВ}$ и недостаточном качестве используемых в прошлом детекторов. На ВЭПП-2000 ожидается интегральная светимость $\sim 3 \text{ фбн}^{-1}$, что на три порядка выше имеющейся сегодня. Кроме того, детекторы ВЭПП-2000 (СНД и КМД-2М) — современные детекторы с большим телесным углом и хорошими возможностями по идентификации частиц, поэтому значительное улучшение точности является вполне выполнимой задачей.

Проверка гипотезы CVC

Гипотеза CVC (conservation of the vector current) связывает τ -лептонные распаднe спектры масс адронов с $J^{PG} = 1^{-+}$ и изовекторную часть сечения e^+e^- -аннигиляции в адроны в зависимости от энергии (рис. 7). Так, спектр масс адронов M_h в распаде $\tau^+ \rightarrow \omega \pi^+ \nu$ и сечение $\sigma_{e^+e^-}^{I=1}$ процесса $e^+e^- \rightarrow \omega \pi^0$ связаны следующим соотношением:

$$\frac{dM_h}{dq^2} = \frac{G_F^2 \cos^2 \theta_C (1 + \delta_{EW})}{32\pi^2 \alpha^2 m_\tau^3} \times$$

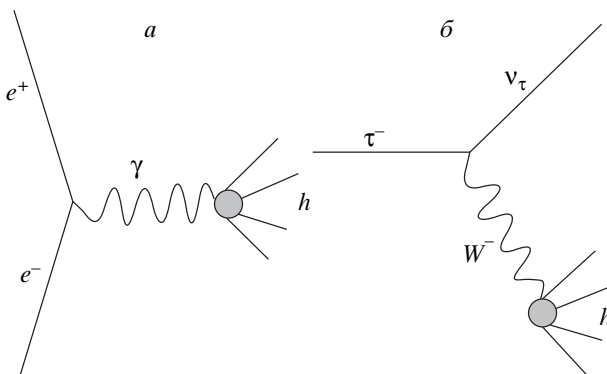


Рис. 7. Диаграммы процессов, иллюстрирующие CVC-гипотезу: а — диаграмма процесса $e^+e^- \rightarrow$ адроны; б — диаграмма процесса распада τ -лептона.

$$\times (m_\tau^2 - q^2)(m_\tau^2 + 2q^2)v_1(q^2),$$

$$v_1(q^2) = \frac{q^2 \sigma_{e^+e^-}^{I=1}(q^2)}{4\pi\alpha^2}.$$

Экспериментальная проверка этого соотношения сейчас проводится для многих изовекторных процессов e^+e^- -аннигиляции и является проверкой электрослабой модели. С другой стороны, в предположении справедливости CVC появляется возможность взаимной проверки данных по e^+e^- -аннигиляции и τ -лептону.

На рис. 8 показано, как согласуются между собой сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \omega \pi^0$, измеренное детектором СНД на ВЭПП-2М [13], и предсказание CVC из распадов τ -лептона в эксперименте SLEO. Это один из лучших примеров проверки CVC. Другой пример уже приводился выше при обсуждении АММ мюона. В том случае главный вклад в АММ дает процесс $e^+e^- \rightarrow \pi^+ \pi^-$, и в результате данные по e^+e^- -аннигиляции оказываются на 1.5% ниже данных по τ -лептону.

Резюмируя, можно сказать, что следующий шаг проверки CVC с точностью $\sim 1\%$ для основных изовекторных процессов может быть сделан на ВЭПП-2000.

Рождение пар нуклонов на пороге

На ВЭПП-2000 становится возможным рождение пар нуклонов в процессах $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}, n\bar{n}$, что позволит извлечь данные об электромагнитных формфакторах протона и нейтрона во времениподобной области передач импульса на пороге рождения нуклонов. Нужно отметить, что для пар мезонов ($\pi^+ \pi^-$, $K \bar{K}$) времениподобные формфакторы хорошо измерены и в них наблюдаются мощные резонансы, такие, как $\rho(770)$ и $\phi(1020)$.

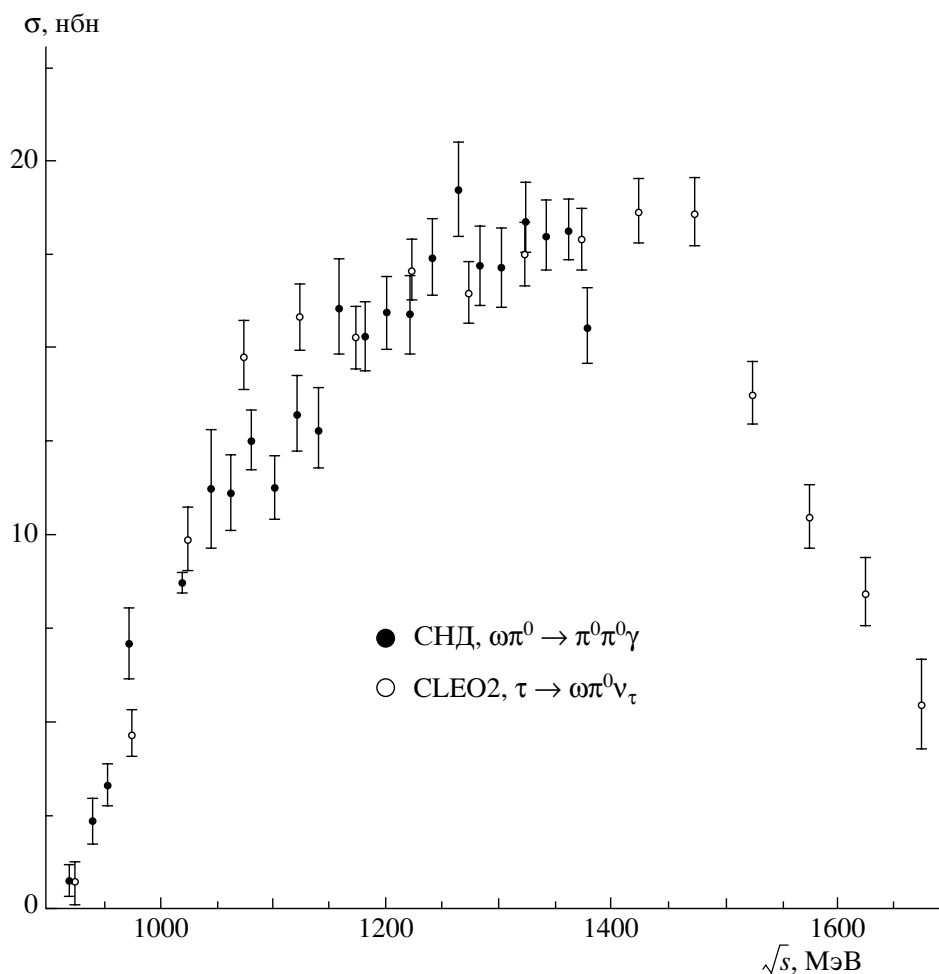


Рис. 8. Сравнение сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0$ (СНД) и предсказания CVC из распадов τ -лептона (CLEO).

Для пар нуклонов ситуация несколько иная. В пороговой области $2E < 2$ ГэВ имеющиеся данные очень скудны, а для кинетической энергии нуклонов $T < 10$ МэВ данных нет вообще. Выход нейтронов измерялся в единственном эксперименте (FENICE, ADONE) [14]. Имеющиеся результаты измерений формфакторов показаны на рис. 9, 10.

Эксперименты на DM2, FENICE при энергии $\sqrt{s} \simeq 2$ ГэВ дают $\sigma_{p\bar{p}} \simeq \sigma_{n\bar{n}} \simeq 1$ нбн и $|G^p| \simeq |G^n| \simeq 0.4$.

$$\text{Для отношения сечений } r = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow n\bar{n})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow p\bar{p})}$$

различные модели нуклонных формфакторов (КХД в варианте с теорией возмущений, МВД (расширенная модель), модель Скирма) дают значения в широком диапазоне $r = 1/4-100$.

Проблемы, изучаемые на ВЭПП-2000, следующие. Действительно ли нейтронный формфактор больше протонного? Подтвердится ли рост формфактора с уменьшением энергии до самого порога?

Можно ли будет измерить электрический и магнитный формфакторы отдельно? Существуют ли связанные состояния $N\bar{N}$ вблизи порога?

В пользу существования связанных состояний $N\bar{N}$ говорят, в частности, данные DM2 (рис. 11) [15] по процессу $e^+e^- \rightarrow 3\pi^+3\pi^-$, которые указывают на возможную резонансную структуру в сечении как раз вблизи порога рождения нуклонов. Можно добавить, что, если связанное состояние $N\bar{N}$ надпороговое, оно может явно наблюдаться в процессах $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}, n\bar{n}$ как нерегулярность в пороговом сечении.

Исходя из оценки сечения $\sigma_{p\bar{p}} \simeq \sigma_{n\bar{n}} \simeq 10^{-34}$ см² на пороге при $T \sim 1$ МэВ (энергетический разброс $\sigma E \simeq 0.7$ МэВ), интегральной светимости $\Delta L \sim 1$ фбн⁻¹ и эффективности регистрации $\epsilon \sim 0.1$ для числа событий нуклон-антинуклонных пар можно получить оценку $N_{p\bar{p}} \sim N_{n\bar{n}} \sim 10^4$ событий. Это более чем на два порядка больше имеющейся в предыдущих экспериментах

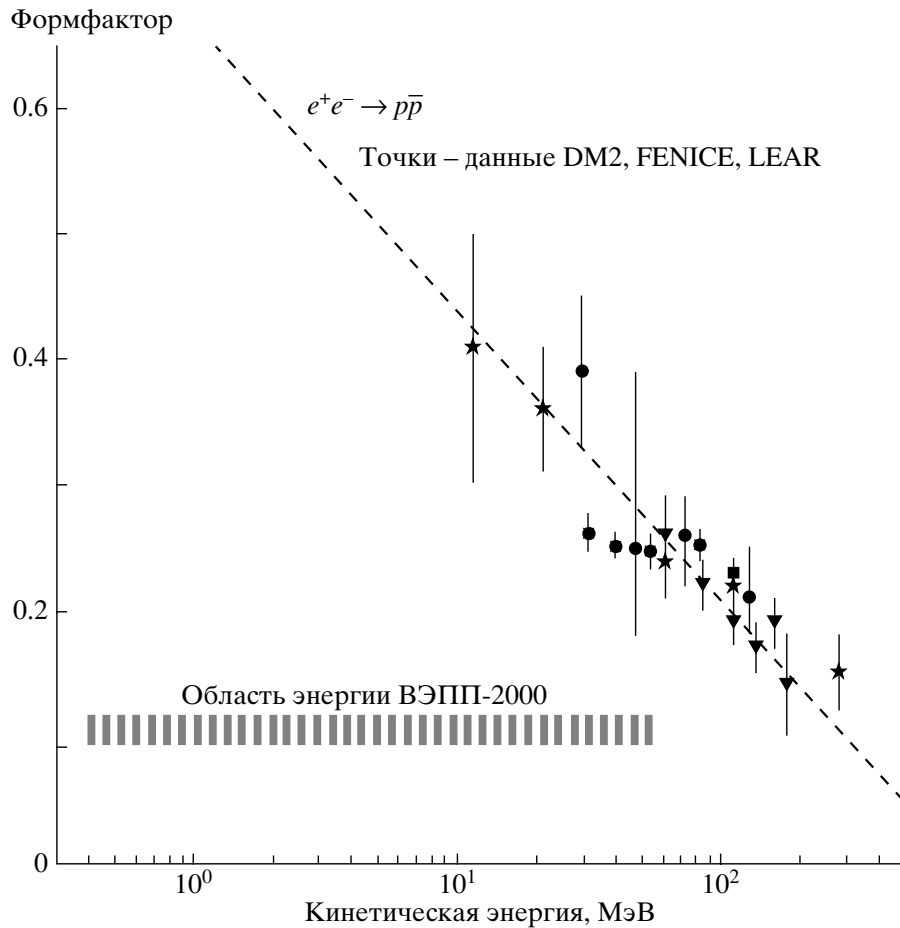


Рис. 9. Экспериментальные данные по формфактору протона.

статистики таких событий. Поэтому можно надеяться, что на ВЭПП-2000 будут получены ответы на многие вопросы, поставленные выше.

Сечение рождения пар протонов на пороге имеет характерный вид ступеньки с энергией $2E = 2M_p$, что позволяет проводить калибровку энергетической шкалы коллайдера. Оценка показывает, что за время измерений ~ 1 сут можно откалибровать энергию с точностью $\Delta E \simeq 0.1$ МэВ, что примерно на порядок меньше энергетического разброса $\sigma E \simeq 0.7$ МэВ.

Вблизи порога рождения пар протонов возможно рождение очень узкого ($\Gamma \sim 10^{-2}$ эВ) кулоноподобного связанного состояния $p\bar{p}$ с энергией связи ~ -12.5 кэВ. К сожалению, из-за энергетического разброса величина сечения рождения этого резонанса падает на много порядков до уровня, составляющего $\sim 1\%$ от сечения процесса $e^+e^- \rightarrow$ адроны. Тем не менее при высокой статистической точности есть шанс наблюдать это явление в том случае, если сечение процесса $e^+e^- \rightarrow$ адроны имеет гладкий вид вблизи порога рождения протонов.

Рождение адронов в процессах “радиационного возвращения на резонанс” (рис. 12)

Рождение адронов с эффективной массой $M < \sqrt{s}$ возможно также в процессах с излучением фотона с энергией $\omega = \frac{s - M^2}{2\sqrt{s}}$ [16]. В англоязычной литературе существует даже специальный термин — процессы типа ISR (Initial State Radiation). Хотя сечение таких процессов значительно меньше, чем при прямом рождении адронов, тем не менее эти процессы обладают рядом особенностей, делающих такую постановку эксперимента целесообразной. Во-первых, интегральная светимость коллайдеров обычно быстро растет с энергией, поэтому, например, на B -фабриках количество рожденных ρ, ω, ϕ -мезонов вполне сопоставимо с тем, что есть при прямом рождении на ВЭПП-2М. Во-вторых, адроны в процессе ISR являются мечеными, так как они сопровождаются фотоном отдачи, что упрощает анализ событий. В-третьих, виден сразу весь спектр масс адронов и возможна

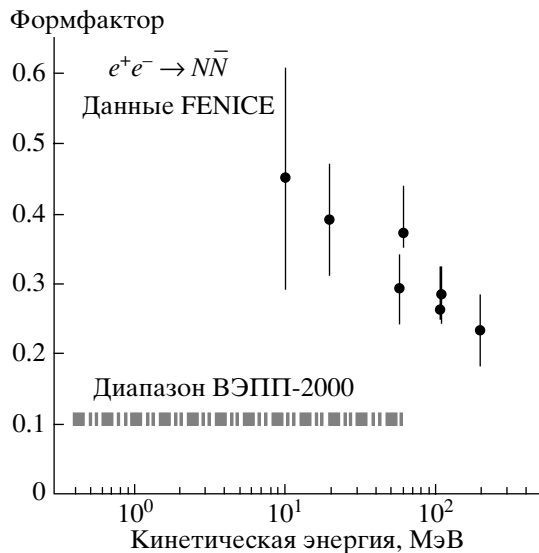


Рис. 10. Экспериментальные данные по формфактору нейтрона.

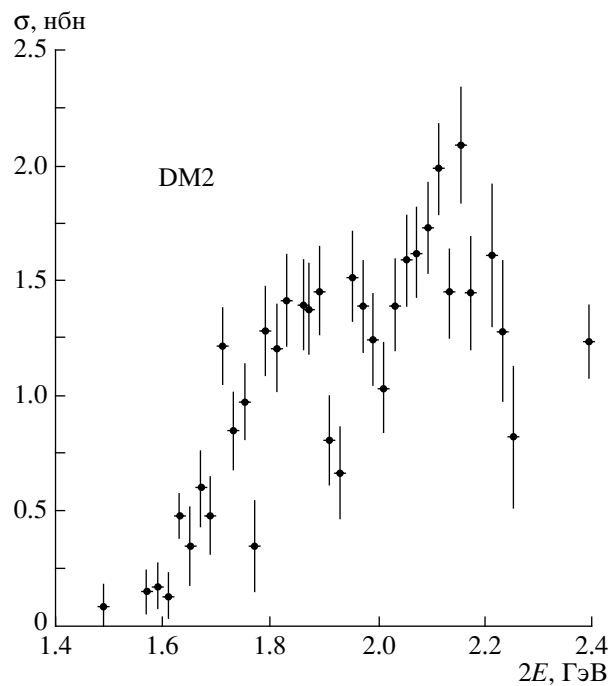


Рис. 11. Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow 3\pi^+3\pi^-$ вблизи порога рождения нуклонов – из работы [15].

нормировка на калибровочный процесс $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-\gamma$.

Даже на ВЭПП-2М (СНД) был хорошо виден такой простой ISR-процесс, как $e^+e^- \rightarrow \omega\gamma \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ (рис. 13). На ВЭПП-2000 при интегральной светимости $\Delta L \sim 3$ фбн⁻¹ ожидается $\sim 10^7$ ρ -мезонов и 10^6 ω -мезонов, что дает возможность провести независимые измерения адронных сечений и параметров векторных мезонов.

Двухфотонная физика

Рождение C -четных мезонов (C^+) на e^+e^- -коллайдере возможно в двух типах процессов: $e^+e^- \rightarrow e^+e^- + C^+$ и $e^+e^- \rightarrow C^+$. Процессы первого типа уже давно изучаются в e^+e^- -экспериментах, в результате чего удалось измерить ширины $\Gamma(C^+ \rightarrow 2\gamma)$ для многих C -четных мезонов и сечения процессов $\gamma\gamma \rightarrow$ адроны.

На ВЭПП-2000 представляет интерес измерить двухфотонные ширины $f_0(980)$ - и $a_0(980)$ -мезонов. Эти скалярные мезоны имеют необычно малую двухфотонную ширину ~ 0.3 кэВ по сравнению с их ближайшим псевдоскалярным соседом $\eta'(960)$ с шириной 4.4 кэВ. Поэтому новое, более точное, измерение $\Gamma_{2\gamma}$ на ВЭПП-2000 будет полезным. Также можно будет заново измерить сечения процессов $\gamma\gamma \rightarrow \pi\pi, \eta\pi, \dots$ при энергии $\sqrt{s} < 1$ ГэВ, где очень мало экспериментальных данных. Статистика рожденных событий этих процессов будет составлять $\sim 10^3 - 10^4$.

Второй тип C -четных процессов $e^+e^- \rightarrow C^+$ изучался ранее только на ВЭПП-2М [17], где

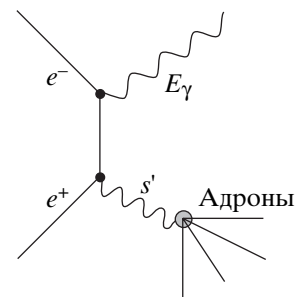


Рис. 12. Диаграмма рождения адронов в процессе радиационного возврата на резонанс.

были установлены верхние пределы электронных ширин $f_2(1270)$ - и $a_2(1320)$ -мезонов на уровне, близком к расчетному. На ВЭПП-2000 с большей интегральной светимостью мы надеемся наблюдать прямое рождение этих мезонов в процессе $e^+e^- \rightarrow f_2(1270), a_2(1320)$.

Проверка квантовой электродинамики в процессах с высокой множественностью в конечном состоянии

Существует множество процессов квантовой электродинамики с рождением большого количества частиц на большие углы ($\theta \sim 1$) в конечном состоянии, например:

$$e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma\gamma\gamma, \quad e^+e^-e^+e^-, \quad e^+e^-\gamma\gamma\gamma, \dots$$

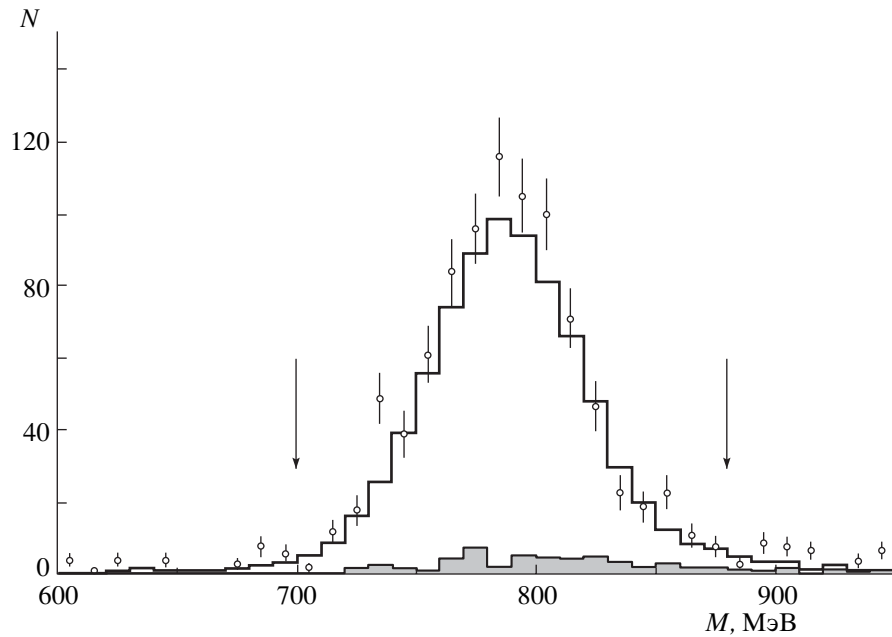


Рис. 13. Спектр масс ω -мезона в процессе $e^+e^- \rightarrow \omega\gamma$. Точки — эксперимент СНД, гистограмма — моделирование изучаемого процесса. Стрелками показаны границы обрезаний, используемые при расчете полного сечения. Затемненная гистограмма — вклад фона.

Сечения этих процессов находятся в интервале 10^{-34} – 10^{-36} см² (в телесном угле детектора), поэтому число событий даже с учетом эффективности регистрации исчисляется сотнями и тысячами. Например, процесс $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma\gamma\gamma$ был впервые обнаружен на ВЭПП-2М детектором НД [18] (наблюдалось 87 событий), а на ВЭПП-2000 есть возможность наблюдения процесса 5-квантовой аннигиляции.

Интерес к таким процессам квантовой электродинамики обусловлен двумя причинами:

1) экспериментальные возможности способствуют развитию методов расчета сечений этих процессов;

2) эти процессы являются фоновыми при поиске редких адронных реакций, например $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma \rightarrow 5\gamma$ или $e^+e^- \rightarrow \phi \rightarrow \pi^0e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma\gamma$, поэтому требуются точные расчеты этих процессов.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная физическая программа для ВЭПП-2000 является достаточно обширной. Несмотря на сравнительно небольшое увеличение энергии ВЭПП-2000 относительно ВЭПП-2М от 1.4 до 2.0 ГэВ, в новом диапазоне энергии появляются следующие новые возможности, которых не было на ВЭПП-2М:

1) в результате экспериментов на ВЭПП-2000 будет уменьшена ошибка в измерении фундаментальной величины R ;

2) можно будет провести тщательное изучение параметров возбужденных векторных мезонов ρ' , ω' , ϕ' , их массы как раз находятся в интервале $2E = 1.4$ – 2.0 ГэВ;

3) так как энергия ВЭПП-2000 больше массы τ -лептона $2E > m_\tau$, становится возможной проверка гипотезы SVC во всем диапазоне распадных спектров τ -лептона;

4) так как энергия ВЭПП-2000 выше порога рождения пар нуклонов, можно будет проводить измерения нуклонных формфакторов во времени-подобной области и решить вопрос о существовании связанных состояний $N\bar{N}$.

Автор выражает благодарность В.Б. Голубеву, Ю.М. Шатунову, Б.И. Хазину и С.И. Эйдельману за полезные обсуждения многих вопросов данной работы.

Данная работа была выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 02-02-16269-а, 03-02-16581) и НШ-1335.2003.2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. G. M. Tumaikin, in *Proceedings of the 10th International Conference on High-Energy Particle Accelerators, Serpukhov, 1977*, Vol. 1, p. 443.
2. I. A. Koop *et al.*, *Frascati Physics Series XVI*, 393 (1999).

3. Yu. M. Shatunov *et al.*, in *Proceedings of the 7th European Particle Accelerators Conference EPAC2000, Vienna, Austria, 2000*, p. 439.
4. M. N. Achasov *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A **449**, 125 (2000).
5. M. N. Achasov *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A **441**, 337 (1998); **401**, 179 (1997).
6. V. M. Aulchenko *et al.*, Preprint Budker INP 85-122 (Novosibirsk, 1985).
7. G. N. Abramov *et al.*, Preprint Budker INP 2001-29 (Novosibirsk, 2001).
8. R. R. Akhmetshin *et al.*, Preprint Budker INP 2001-45 (Novosibirsk, 2001).
9. Muon g-2 Collab. (G. W. Benaett *et al.*), hep-ex/0208001.
10. M. Davier *et al.*, Preprint LAL 02-81, Orsay, hep-ex/0208177.
11. R. R. Akhmetshin *et al.*, Phys. Lett. B **527**, 161 (2002).
12. Particle Data Group, Eur. Phys. J. **15** (2000).
13. M. N. Achasov *et al.*, Phys. Lett. B **486**, 29 (2000).
14. A. Antonelli *et al.*, Nucl. Phys. B **517**, 3 (1998).
15. A. B. Clegg and A. Donnache, Z. Phys. C **34**, 257 (1987).
16. V. Benayoun *et al.*, Mod. Phys. Lett. A **14**, 2605 (1999).
17. M. N. Achasov *et al.*, Phys. Lett. B **492**, 8 (2000).
18. S. I. Dolinsky *et al.*, Phys. Rep. **202**, 99 (1991).

THE VEPP-2000 PROJECT – COLLIDER, DETECTORS, PHYSICAL PROGRAM

S. I. Serednyakov

The description of the new VEPP-2000 e^+e^- collider with maximal CM energy of 2000 MeV, now under construction in Novosibirsk, is given. Two upgraded collider detectors SND and CMD-2M are intended for experiments at VEPP-2000. The main item of the physical program is the precise measurement of the total cross section of e^+e^- annihilation into hadrons and exclusive hadronic channels with the goal of QCD, VMD, and CVC tests and more accurate estimation of the contribution to the muon anomaly and fine structure constant at Z^0 mass. The important item of the program is the study of nucleon form factors at the threshold in the reaction $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}, n\bar{n}$.