

ПРОЕКТ ЦИКЛИЧЕСКИХ КОЛЛАЙДЕРОВ НА СВЕРХВЫСОКУЮ ЭНЕРГИЮ В ЦЕРН

*А. В. Богомяков^а, И. А. Кооп^а, Е. Б. Левичев^{а,1}, П. А. Пиминов^а,
С. В. Синяткин^а, Д. Н. Шатилов^а, М. Бенедикт^б, К. Ойдэ^б,
Ф. Циммерманн^б*

^а Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

^б ЦЕРН, Женева, Швейцария

В 2014 г. в ЦЕРН началось проектирование комплекса FCC циклических коллайдеров (адронного FCC-hh и лептонного FCC-ee) на сверхвысокую энергию, которые, как предполагается, должны будут заменить LHC после окончания его научной программы. ИЯФ СО РАН принимает активное участие в разработке электрон-позитронного коллайдера FCC-ee. Схема встречи пучков типа Crab Waist, использование которой для FCC-ee было предложено в ИЯФ, позволит получить высокую светимость в широком диапазоне энергий и в настоящее время рассматривается в качестве базовой. В докладе рассказывается о проекте FCC, его особенностях, основных параметрах, ограничениях и перспективах развития. Акцент делается на более детально проработанном лептонном коллайдере.

The Future Circular Colliders (FCC) design study launched at CERN in 2014 includes lepton (ee) and hadron (hh) colliders with unprecedented collision energy about an order of magnitude beyond the existing Large Hadron Collider (LHC). Budker Institute of Nuclear Physics is an active collaborator of the FCC project. The paper discusses the FCC project concept, parameters, status and future perspectives with emphasizing the FCC-ee collider Crab Waist collision option.

PACS: 01.52.+g; 29.20.D-

ВВЕДЕНИЕ

Обновленная в 2013 г. Европейская стратегия в области фундаментальной физики ставит перед ЦЕРН в качестве одной из приоритетных задач изучение возможности создания «глобального и амбициозного ускорительного проекта, акцентированного на протон-протонный и электрон-позитронный коллайдеры сверхвысокой энергии» [1]. Для выполнения поставленной задачи в ЦЕРН в 2014 г. стартовал международный проект FCC (Future Circular Collider — циклический коллайдер будущего) [2], который предполагает создание адронного коллайдера FCC-hh с энергией соударений до 100 ТэВ и лептонного коллайдера FCC-ee в диапазоне энергий (в системе центра масс) от 91 ГэВ (Z -бозон) до 350 ГэВ (физика t -кварков) с обеспечением высокой светимости в районе 240 ГэВ для

¹E-mail: levichev@inp.nsk.su

детального изучения свойств бозона Хиггса [3]. Оба коллайдера должны максимально использовать одну инфраструктуру, в частности — кольцевой тоннель длиной 80–100 км. Опционально рассматривается создание протон-лептонного коллайдера FCC-he, интегрирующего возможности адронного и лептонного коллайдеров.

Физические и технические проблемы, связанные с разработкой и проектированием циклических коллайдеров на сверхвысокую энергию проекта FCC, обсуждаются в предлагаемой статье. Поскольку первым этапом проекта предусматривается создание FCC-ee и эта установка является более проработанной на сегодняшний день, именно лептонный коллайдер мы описываем более детально. Акцент делается на схеме встречи пучков типа Crab Waist (CW) [4], использование которой для FCC-ee было предложено в ИЯФ СО РАН.

1. ПРОТОН-ПРОТОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР FCC-hh

Оба коллайдера — лептонный и протонный — будут использовать (последовательно по времени) один и тот же кольцевой тоннель длиной $L = 80–100$ км (рис. 1, слева), что накладывает определенные ограничения на конфигурацию машин. При длине тоннеля 100 км сверхпроводящие магниты с полем $B = 16$ Тл позволяют достичь энергии столкновений в FCC-hh $E_{hh} = 100$ ТэВ, что и принято за базовые параметры. Увеличение поля до 20 Тл даст возможность или поднять энергию, или уменьшить длину тоннеля. FCC-hh, как и LHC, будет иметь четыре места встречи (рис. 1, справа). Основные параметры FCC-hh приведены в табл. 1 в сравнении с параметрами LHC и его модернизированного варианта HL-LHC (High Luminosity LHC).

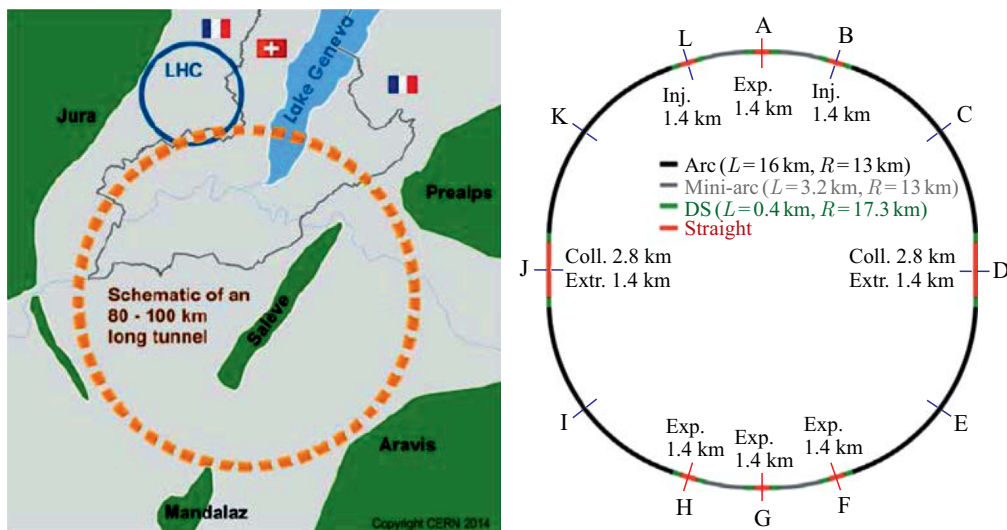


Рис. 1. Слева — изображение тоннеля FCC длиной 100 км в районе Женевского озера. Справа — схема кольца FCC-hh: А и G — основные места встречи с высокой светимостью; Н и F — дополнительные места встречи для специальных экспериментов; L и В — промежутки инжекции; J и D — коллиматоры и оборудование аварийного сброса пучков

Таблица 1. Основные параметры адронных коллайдеров ЦЕРН

Параметр	LHC	HL-LHC	FCC-hh	
			Baseline	Ultimate
Энергия (ц. м.), ТэВ	14		100	100
Магнитное поле, Тл	8,33		16	16
Периметр, км	26,7		100	100
Пиковая светимость, $10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	1	5	5	20
Частиц в сгустке, 10^{11}	1,15	2,2	1	0,2
Ток, А	0,6		0,5	0,5
Максимальное число сгустков	2808		10600	53000
Интервал между сгустками, нс	25		25	5
Событий в одном столкновении	27	135	170	680
β -функция встречи, м	0,55	0,15	1,1	0,3
Критическая энергия СИ, кэВ	0,044		4,3	4,3
Полная мощность СИ, МВт	0,007	0,0146	4,5	4,5
Продолжительность времени затухания, ч	12,9		0,54	0,54

Магниты LHC, использующие сверхпроводник NbTi, позволяют получить поле до 10 Тл. В магнитах со сверхпроводником Nb₃Sn достигнуто максимальное поле 16 Тл, что и принято за основу в FCC-hh. Производство провода Nb₃Sn достаточно развито, и несколько магнитов и линз, использующих такую технологию, планируется поставить на модернизированный HL-LHC. Существуют исследовательские программы по изготовлению магнитов с комбинированной обмоткой, включающие секции из Nb₃Sn и высокотемпературных сверхпроводников, позволяющие в перспективе получить в требуемой апертуре поле до $\sim 19\text{--}20$ Тл. Эта величина принята в качестве предельной для магнитов FCC-hh.

Следует отметить довольно большое число событий (~ 170) в одном столкновении пучков (pile up), несмотря на ту же пиковую светимость, что и в HL-LHC. Это объясняется ростом сечения с энергией и требует повышенной эффективности детектора.

Мощность СИ FCC-hh вырастает, по сравнению с мощностью LHC, на несколько порядков и может составлять серьезную проблему как в техническом плане (нагрев «холодной» вакуумной камеры в сверхпроводящих магнитах), так и в плане динамики пучков (учет медленного, но заметного уменьшения размеров пучка при расчете интегральной светимости).

2. ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР FCC-ee

Ввиду большей достижимой энергии адронный коллайдер имеет преимущества в поиске новых частиц или эффектов, а лептонный — в прецизионных исследованиях обнаруженных явлений. Поэтому исходно e^+e^- -коллайдер на сверхвысокую энергию задумывался как фабрика частиц для точного измерения параметров бозона Хиггса, обнаруженного на LHC [5]. Однако вскоре стало ясно, что новая установка (вначале называвшаяся LEP3, затем TLEP (Triple LEP), а теперь — FCC-ee) может обеспечить богатую экспериментальную программу при следующих энергиях пучка:

- 45,5 ГэВ — измерение с высокой точностью массы M_Z и ширины Γ_Z Z -бозона;
- 80 ГэВ — исследования на пороге рождения $W\bar{W}$;
- 120 ГэВ — максимум производства бозонов Хиггса в реакции ZH ;
- 175 ГэВ — исследования на пороге рождения $t\bar{t}$.

В отличие от LEP, новый лептонный коллайдер имеет двухкольцевую структуру для возможности работы с очень большим числом сгустков, что необходимо для получения высокой светимости на низкой энергии. Оба кольца должны размещаться в тоннеле FCC-hh, чья конфигурация схематически показана на рис. 1. Рассматриваются варианты двух или четырех мест встречи.

Пиковая светимость FCC-ee зависит от энергии и тока пучка, схемы встречи («в лоб», Crab Waist (CW) и т. п.), других факторов. Максимальный ток пучка I_{\max} для FCC-ee определяется допустимыми потерями на СИ для одного кольца $P_{\text{SR}} \sim E^4 \cdot I_{\max}/\rho = 50$ МВт, где ρ — радиус орбиты в поворотных магнитах. При этом погонная мощность СИ приблизительно равна той, которая была достигнута в LEP2.

Другим ограничивающим светимость фактором оказалось излучение частицы в поле встречного сгустка (beamstrahlung). На высокой энергии ($E > 100$ ГэВ) в сильном поле встречного пучка существенно растет вероятность испускания частицей кванта столь жесткого ($E_\gamma \sim 10^{-2}E$), что частица оказывается вне энергетического акцептанса и выбывает из пучка [7]. Время жизни из-за такого однократного «пучкового» излучения (single beamstrahlung) оценивается как [7, 8]

$$\tau_{\text{bs}} \propto \exp\left(\text{const} \frac{\eta \rho_b}{\gamma^2}\right) \frac{\rho_b \sqrt{\eta \rho_b}}{L_i \gamma^2}, \quad (1)$$

где ρ_b — средний радиус поворота частицы в поле встречного сгустка; L_i — длина области взаимодействия пучков (для лобового столкновения равна длине сгустка $L_i \approx \sigma_s$, для CW-встречи $L_i \ll \sigma_s$); $\eta = \Delta E/E$ — энергетический акцептанс. Чтобы получить приемлемое время жизни, нужно увеличивать ρ_b и энергетический акцептанс η . Для плоских пучков ρ_b обратно пропорционально поверхностной плотности заряда встречного сгустка:

$$\frac{1}{\rho_b} \propto \frac{N_p}{\gamma \sigma_x \sigma_s} \propto \frac{\xi_y}{L_i} \sqrt{\frac{\varepsilon_y}{\beta_y^*}}, \quad (2)$$

где N_p — число частиц в сгустке; ε_y — вертикальный эмиттанс; ξ_y — сдвиг вертикальной бетатронной частоты; $\beta_y^* \approx L_i$ — вертикальная β -функция в точке встречи. Для получения высокой светимости нужно увеличивать ξ_y и уменьшать β_y^* , что противоречит требованию увеличения ρ_b . Компромиссное решение состоит в небольшом (примерно в два раза) увеличении β_y^* и минимизации вертикального эмиттанса ε_y .

Главное преимущество схемы CW состоит в том, что предельные значения ξ_y (и, соответственно, светимость) вырастают в 2–3 раза. Однако на энергии 175 ГэВ предельные ξ_y ограничиваются временем жизни τ_{bs} и CW выигрыша не дает. На низкой энергии сильнее проявляется эффект от многократного излучения фотонов в поле встречного сгустка (multiple beamstrahlung), что приводит к увеличению энергетического разброса и удлинению пучка. Аналогией является однократный и многократный эффект Тушека: первый уменьшает время жизни пучка, а второй — увеличивает его размеры. При лобовой встрече удлинение сгустка усиливает эффект hour-glass, что приводит к возбуждению синхротатронных резонансов, снижению пороговых токов и ξ_y и, таким образом, к уменьшению

Таблица 2. Основные параметры лептонных коллайдеров (для FCC-ee даны значения для встречи пучков «в лоб»/CW)

Параметр	FCC-ee			LEP2
	45 (Z)	120 (ZH)	175 (tt)	
Периметр, км	100			26,7
Энергия пучка, ГэВ	45 (Z)	120 (ZH)	175 (tt)	105
Число сгустков	16000/30000	500/1400	50/100	4
Угол пересечения, мрад	0/30	0/30	0/30	0
β_y^* в месте встречи, мм	1	1	2	50
Ток пучка, мА	1450	30	6	3
Потери энергии/оборот, ГэВ	0,03	1,7	7,6	3,3
Мощность СИ/пучок, МВт	50			22
Ускорительное напряжение, ГВ	0,3/0,08	3,6/2,3	11	3,5
Светимость, $10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	20/180	6,8/8,3	1,3/1,2	0,0012

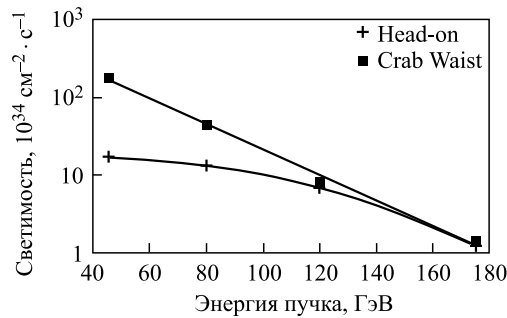


Рис. 2. Светимость FCC-ee (на одно место встречи) в зависимости от энергии для лобовой (Head-on) и Crab Waist встречи

светимости. В схемах столкновений с большим углом Пивинского (частным случаем которых является CW) эта проблема отсутствует, а использование схемы CW позволяет увеличить светимость еще в несколько раз [8].

Основные параметры FCC-ee (в сравнении с параметрами LEP2) приведены в табл. 2, а зависимость пиковой светимости от энергии для лобовой встречи и CW показана на рис. 2.

Поскольку CW-встреча на низкой и промежуточных энергиях FCC-ee дает существенный выигрыш по светимости, а на высокой не имеет особенных недостатков, именно она была выбрана в качестве основной. Такая схема встречи требует относительно большого угла пересечения (в нашем случае 30 мрад), что является дополнительным преимуществом (в том числе на высокой энергии), поскольку автоматически решается проблема разведения пучков в «паразитных» точках встречи в многосгустковом режиме.

Малая вертикальная β -функция в месте встречи $\beta_y^* \approx 1$ мм, необходимая для получения высокой светимости, приводит к тому, что в ближайшей дефокусирующей линзе финального фокуса (ФФ) максимальная вертикальная β достигает значений ≈ 10 км (рис. 3), а сама линза при длине 2,5 м должна иметь градиент около 100 Тл/м.

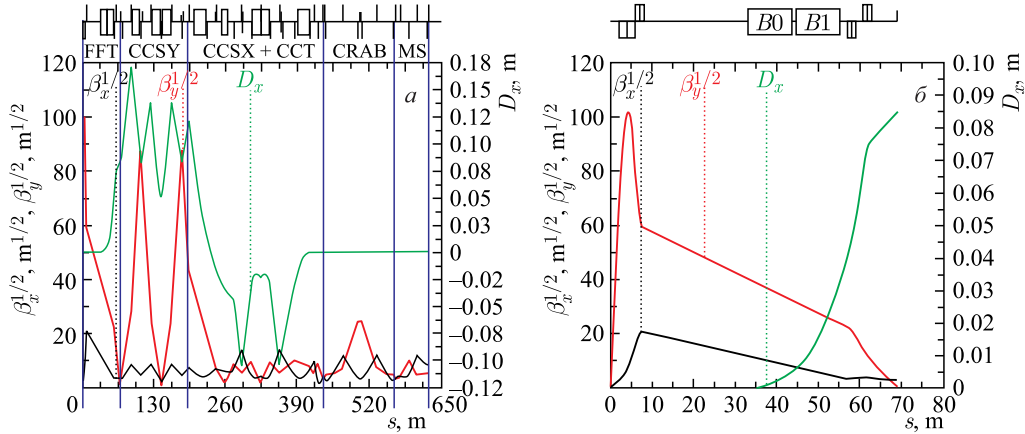


Рис. 3. а) 1/2 промежутка встречи (точка встречи находится в начале координат); б) поведение структурных функций вблизи точки встречи. CCSY и CCSX — секции коррекции вертикального и горизонтального хроматизма

Экстремальные значения β -функций и силы линз $\Phi\Phi$ приводят к целому ряду последствий для динамики пучка. Натуральный хроматизм, создаваемый дублетом линз $\Phi\Phi$ ($\xi_{x,y}^* \sim -L^*/\beta_{x,y}^*$, где L^* — расстояние от точки встречи до линзы), достигает значений $\xi_{x/y}^* \approx -100/-1000$ и должен быть скомпенсирован секступольными линзами как можно ближе к источнику возникновения. Малая $\beta_y^* \approx 1$ мм нарушает «обычное» для расчетов условие параксимальности, и движение частиц нужно рассматривать с учетом следующего порядка по поперечным импульсам, который дает кинематическую нелинейную поправку к гамильтониану

$$\Delta H = \frac{1}{8}(p_x^2 + p_y^2)^2.$$

Из-за больших значений бетатронных функций подчеркивается влияние нелинейных и краевых полей в линзах $\Phi\Phi$ и т.д. Все это уменьшает динамическую апертуру и динамический энергетический акцептанс так, что задача оптимизации нелинейного движения приобретает первостепенное значение.

На рис. 3, а схематично показана геометрия промежутка встречи двух колец. Из-за наличия угла пересечения 30 мрад орбиты пучков вначале расходятся (до $\pm 1,5$ м), а затем идут параллельно. На расстоянии ≈ 500 м от азимута пересечения размещаются так называемые «крабовые» секступольные линзы, осуществляющие разворот вертикальной перетяжки пучка в точке встречи, что эффективно подавляет пучковые резонансы связи [4].

Очевидно, что большие потери энергии на излучение являются серьезной проблемой для FCC-ee. При полной (на два кольца) мощности потерь $P_{SR} = 100$ МВт с учетом КПД ускоряющей системы ее мощность «от розетки» можно приблизительно оценить как $P_{RF} \approx 300$ МВт, а ускоряющее напряжение, требуемое на энергии 175 ГэВ, равно $V_{RF \max} \approx 11$ ГВ. При градиенте 20 МВ/м полная длина ускоряющих сверхпроводящих резонаторов должна быть ≈ 600 м. На максимальной энергии за один оборот частица теряет $U_0 = 7,6$ ГэВ (около 4%), при этом между секциями ускоряющих резонаторов у частицы «пилообразно» (эффект saw tooth) будут меняться орбита, фокусировка и

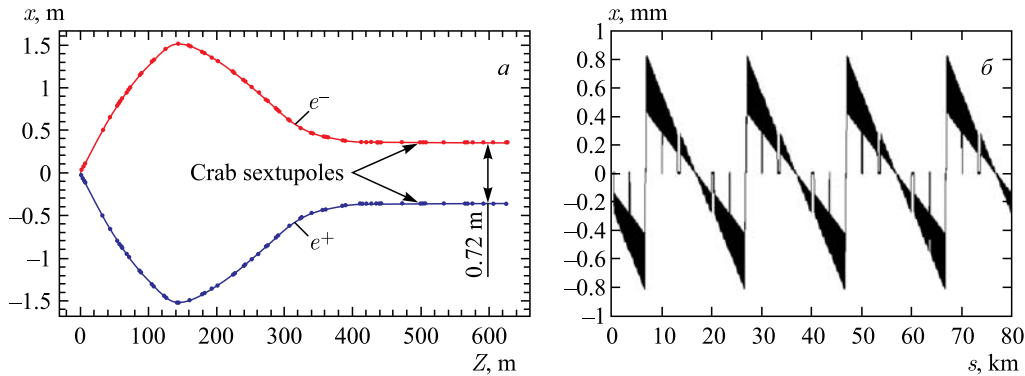


Рис. 4. а) Схема промежутка встречи. б) Изменение орбиты пучка между четырьмя секциями ускоряющих резонаторов

хроматизм (см. рис. 3). Во избежание этого эффекта вдоль орбиты, пропорционально потере энергии, должны меняться величина поля поворотных магнитов, градиент линз и т. п.

Еще одним следствием экстремально мощного СИ является необходимость учета излучения из квадрупольных линз. Мало того, что такое излучение увеличивает общие потери энергии и влияет на эмиттанс пучка, вдобавок, у частицы, движущейся в поле линзы с большим отклонением, меняется декремент затухания, вплоть до антитухания, и тогда такая частица погибает. Этот эффект, получивший название *damping aperture*, изучался еще на LEP [9]; для FCC-ее его значение, ввиду больших энергий, возрастает.

Многие эксперименты, планирующие на FCC-ее, требуют знания энергии пучка с высокой точностью. Наиболее прецизионным способом ее измерения является метод резонансной деполяризации (РД) [10]. Именно с помощью РД на LEP были измерены массы $M_Z = (91187,6 \pm 2,1) \text{ МэВ}/c^2$ и $M_W = (80385 \pm 15) \text{ МэВ}/c^2$. Требования, предъявляемые сейчас физиками к FCC-ее, существенно выше; так, точность определения массы Z -бозона должна стать лучше чем $\pm 0,1 \text{ МэВ}$, а W -бозона — $< \pm 1 \text{ МэВ}$. Хорошее знание энергии необходимо и для других планирующихся экспериментов.

Рекордная относительная точность измерения средней энергии пучка электронов $\approx 10^{-6}$, соответствующая, в принципе, требованиям для FCC-ее, была достигнута на ВЭПП-4М [11, 12] при энергии пучка около 2 ГэВ. Однако при энергиях FCC-ее сильные деполяризационные эффекты, вызванные квантовыми флуктуациями СИ, синхротронными резонансами и т. п., позволяют надеяться на сохранение поперечной поляризации пучка только до энергии $\approx 80 \text{ ГэВ}$ (порог рождения $W\bar{W}$). Эта оценка подтверждается и экспериментальными данными LEP. Кроме того, РД дает знание средней энергии, в то время как энергия столкновения пучков может от нее значительно отличаться. Поэтому кроме РД изучаются альтернативные методы калибровки энергии пучка, в частности, с помощью обратного комптоновского рассеяния, для коллайдеров впервые реализованного на ВЭПП-4М [13].

Высокая планируемая светимость будет определять время жизни частиц (из-за пучкового излучения, неупругого Баба-рассеяния, эффектов встречи и др.) на уровне $\sim 10\text{--}50$ мин. Для обеспечения требуемой интенсивности пучков необходима непре-

ривная инжекция на энергии эксперимента (top-up injection) из синхротрона-бустера, расположенного в том же тоннеле, что и коллайдер. Ввиду большого времени радиационной поляризации пучков в FCC-ee (~ 190 ч на 45,5 ГэВ) планируется использовать специальные источники поляризованных электронов и позитронов и ускорять пучки с сохранением поляризации в синхротроне-бустере. Для этого последний должен быть оснащен набором сибирских змеек, позволяющих «проходить» спиновые резонансы при ускорении без потери поляризации пучка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ЦЕРН изучается возможность реализации амбициозного (длина орбиты ~ 80 – 100 км) ускорительного проекта FCC, призванного стать флагманом исследований по физике высоких энергий после окончания работы ЛHC. Проект включает три временных стадии и три циклических коллайдера: 1) лептонный (FCC-ee) с энергией столкновений 90–350 ГэВ, 2) адронный (FCC-hh) с максимальной энергией до 100 ТэВ и 3) протон-электронный (FCC-he), использующих одну инфраструктуру. В настоящее время ведется проработка концепции коллайдеров, определение их конфигурации, ограничений и параметров.

Исследования по проектированию коллайдеров с использованием схемы столкновения Crab Waist выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-50-00080).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The European Strategy for Particle Physics Update 2013. CERN Council - S/0106. CERN ESC-E-106. <http://cds.cern.ch/record/1567258/files/esc-e-106.pdf>.
2. FCC site. <http://cern.ch/fcc>.
3. FCC kick-off site. <http://indico.cern.ch/e/fcc-kickoff>.
4. *Raimondi P.* Status of the SuperB Effort // 2nd SuperB Workshop, LNF, Frascati, March 2006;
Raimondi P. et al. Beam–Beam Issues for Colliding Schemes with Large Piwinski Angle and Crabbed Waist. LNF-07/003 (IR). 2007;
Zobov M. et al. Test of Crab-Waist Collisions at DAΦNE Phi Factory // Phys. Rev. Lett. 2010. V. 104. P. 174801.
5. *Blondel A., Zimmermann F.* A High Luminosity e^+e^- Collider in the LHC Tunnel to Study the Higgs Boson. arXiv:1112.2518v1;
Oide K. SuperTRISTAN: A Possibility of Ring Collider for Higgs Factory // KEK Seminar, Feb. 13, 2012.
6. *Blondel A. et al.* LEP3: A High Luminosity e^+e^- Collider to Study the Higgs Boson. arXiv:1208.0504.
7. *Telnov V. I.* Restriction on the Energy and Luminosity of e^+e^- Storage Rings due to Beamstrahlung. arXiv:1203.6563.
8. *Bogomyagkov A., Levichev E., Shatilov D.* Beam–Beam Effects Investigation and Parameters Optimization for a Circular e^+e^- Collider at Very High Energies // Phys. Rev. ST Accel. Beam. 2014. V. 17. P. 28.
9. *Guignard G., Jowett J. M.* Damping Aperture of LEP. LEP Note 407. 1982.

1364 *Богомяжков А. В. и др.*

10. *Букин А. Д. и др.* Метод абсолютной калибровки энергии пучков в накопителе. Измерение массы ϕ -мезона // Тр. V Междунар. симп. по физике высоких энергий и элементарных частиц, 1975. С. 138–162.
11. *Левичев Е. Б.* Статус и перспективы накопительного комплекса ВЭПП-4 // Письма в ЭЧАЯ. 2016. Т. 13, №7(205). С. 1365.
12. *Blinov V. E. et al.* Beam Energy Measurements at VEPP-4M Collider by Resonant Depolarization Technique // ICFA BD Newslett. 2009. No. 48. P. 181–190.
13. *Blinov V. E. et al.* Beam Energy and Energy Spread Measurement by Compton Backscattering of Laser Radiation at the VEPP-4M Collider // Ibid. P. 195–207.