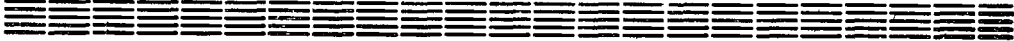




AM9800006

Препринт ВФИ-1322(17)-91

ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱԶԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ
ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
YEREVAN PHYSICS INSTITUTE



Ա.Ս.ԱՄԱՏՈՒՆԻ, Ր.Օ.ԱՎԱԿՅԱՆ, Ա.Յ.ԲԱԲԱՅԱՆ, Ա.Ի.ԲԱՐՅՈՒՇԵՎ,
Դ.Լ.ԲԱՅԿՅԱՆ, Դ.Ա.ՎԱՐՏԱՊԵՏՅԱՆ, Կ.Ս.ԵԴԻՅԱՆ, Յ.Մ.ԼԱԶԻՆԵՎ,
Դ.Ա.ՄԱՐՏԻՐՕՍՅԱՆ, Վ.Ս.ՆԻԿՈՐՕՍՅԱՆ, Ա.Ա.ՕԳԱՆԺՅԱՆՅԱՆ,
Կ.Ա.ՏԱԾՕՅԱՆ, Խ.Ա.ՏԻՄՈՆՅԱՆ, Ա.Ր.ԹՄԱՆՅԱՆ, Ր.Վ.ԹՄԱՆՅԱՆ,
Վ.Ի.ՍԱԿԱՆՈՎ

ՍԵՐՏՍԵԿՏԻՎՆԵ ՐԱԶՎԻՏԻԱ
ԵՐԵՎԱՆՏԻ ԷԼԵԿՏՐՈՆՈ-ՓՕՏՈՆՈՑԻ
ԿՈՄՍԼԵԿՏԱ

29 - 16

Ը
ԸՆԻԻԱտոմինֆոմ
ԵՐԵՎԱՆ - 1991

**We regret that
some of the pages
in this report may
not be up to the
proper legibility
standards, even
though the best
possible copy was
used for scanning**

Ա.Յ.ԱՄՏՏՈՒՆԻ, Ռ.Հ.ԱՎԱԳՅԱՆ, Ա.Ջ.ԲԱԲԱՅԱՆ, Ա.Ի.ԲԱՐԻՇԵՎ,
Հ.Լ.ԲԱՅԱԹՅԱՆ, Կ.Շ.ԵՂՅԱՆ, Ա.Ռ.ՔՈՒՄԱՆՅԱՆ, Ռ.Վ.ՔՈՒՄԱՆՅԱՆ,
Է.Մ.ԼԱՋԻԵՎ, Հ.Ա.ՄԱՐՏԻՐՈՅԱՆ, Վ.Ց. ՆԻԿՈՂՈՅԱՆ,
Կ.Ա.ՄԱՒՈՅԱՆ, Խ.Ա.ՍԻՄՈՆՅԱՆ, Հ.Հ.ՎԱՐԴԱՊԵՏՅԱՆ, Վ.Ի.ՑԱԲԱՆՈՎ,
Ա.Ա.ՕՀԱՆՋԱՆՅԱՆ

ԵՐԵՎԱՆԻ ԷԼԵԿՏՐՈՆԱ-ՓՈՏՈՆԱՑԻՆ ՀԱՄԱԼԻՐԻ ԶԱՐԳԱՑՄԱՆ
ՀԵՌԱՆԿԱՐՆԵՐԸ

Քննարկվել է Երևանի սինթրոտրոնի ընթացիկ վիճակը, ինչպես նաև
Նրա նորացման և կառարելագործման մոտակա ծրագիրը: Քննարկվել են
Երևանի էլեկտրոնա-ֆոտոնային համալիրի զարգացման երկարաակ հեռանը-
կարային ծրագրերի տարբերակները:

Երևանի Ֆիզիկայի ինստիտուտ

Երևան 1991



ВВЕДЕНИЕ

Запуск в 1967 г. самого крупного в Советском Союзе электронного ускорителя на энергию 6 ГэВ [1] явился итогом напряженного труда коллективов многих научных, проектных, промышленных и строительных организаций страны. За истекшие два десятилетия на Ереванском синхротроне была реализована широкая экспериментальная программа исследований.

В области фундаментальных наук выполнен большой цикл исследований по фоторождению и электророждению мезонов и нуклонных резонансов, в которых особую роль сыграл созданный на ускорителе пучок поляризованных γ - квантов, позволивший получить уникальные данные по спиновым корреляциям в процессах фоторождения.

Выполнен также большой цикл экспериментальных работ по релятивистской ядерной физике с помощью пучков фотонов и электронов гигаэлектронвольтных энергий, что в заметной степени способствовало закреплению приоритета советской науки в этой, родившейся в СССР, новой области физики высоких энергий.

За пределами нашей страны широко известны достижения ученых ЕрФИ в области теоретической физики (физики элементарных частиц,

ядерной физики, теории переходного излучения и других процессов, связанных с прохождением заряженных частиц через вещество, разработке новых методов ускорения).

Международное признание получили также экспериментальные работы, выполненные на Ереванском ускорителе по обнаружению, исследованию и использованию свойств переходного излучения. Заметим, что около половины всех теоретических и экспериментальных работ по переходному излучению в мире опубликованы сотрудниками ЕрФИ.

На Ереванском ускорителе выполнены научно-исследовательские работы по обнаружению и исследованию свойств излучения, возникающего при каналировании электронов в кристаллах. Эти работы активно продолжаются и в настоящее время на специально сформированном узкоколлимированном пучке выведенных электронов.

В области методических исследований отметим работы по созданию трековых искровых камер, отмеченные Ленинской премией 1970 г. Разработанные в ЕрФИ для нужд экспериментов на ускорителе пластические сцинтилляторы на основе полистрола удостоены Большой Золотой медали Лейпцигской ярмарки 1980 г.

В области прикладных исследований на Ереванском ускорителе выполнен цикл работ, хорошо известный специалистам по радиационной физике полупроводников и радиационной биофизике, по применению синхротронного излучения и рентгеновской топографии поверхностей.

На всем протяжении эксплуатации Ереванского синхротрона, начиная с 1968 г. [2,3], осуществлялась планомерная модернизация его отдельных узлов. Наиболее значительные результаты

были получены после замены металло-эпоксидной вакуумной камеры на керамическую, перевода системы питания кольцевого электромагнита на тиристорные модули, создания плоской вершины с длительностью до 4,0 мсек, мощного автогенератора на основе импульсного усилительного клистрона с положительной обратной связью в системе СВЧ питания линейного ускорителя-инжектора синхротрона, увеличения энергии инжектора с 50 до 75 МэВ, перевода системы ВЧ питания ускорителя на новые лампы, создания системы автоматизированного сбора и обработки информации о параметрах ускорителя, а также системы одновременного вывода двух гамма-пучков.

Анализ современного состояния физики элементарных частиц и ядерной физики, проведенный в ЕРФИ, в других центрах СССР (ХФТИ [4], ФИАН [5]) и за рубежом (СББАФ [6], APS [7] (США), ESRF (Франция) [8], STA SR (Япония) [9], ELSA (ФРГ) [10], показывает, что наряду с созданием новых крупных ускорителей и накопителей тераэлектронвольтных энергий электронно-позитронные комплексы на энергию 2-8-16 ГэВ со средним током в десятки и сотни микроампер, коэффициентом заполнения $df \leq 100\%$, частотой ВЧ поля 500-1000 МГц и малым разбросом по энергии будут играть решающую роль не только в фундаментальных исследованиях свойств адронов и ядер, но и в исследованиях для прикладных целей в широкой области создания новых технологий и материалов.

Бесструктурный характер электрона, хорошая изученность при- сущих ему электромагнитных взаимодействий делает электрон почти идеальным инструментом в исследовании кварковой структуры адронов и ядер.

Энергии электронов 2-6 ГэВ достаточно для исследования состояний внутри нуклонов и ядер ~ 1 Ферми.

Большое значение коэффициента заполнения позволяет анализировать на совпадение две и более частицы в конечном состоянии процессов рассеяния электронов на нуклонных ядрах, что необходимо для выяснения их структуры и обнаружения новых состояний адронной и ядерной материи. Кроме того, большое значение коэффициента заполнения позволяет подавить фон случайных совпадений при больших значениях тока электронов, подающих на мишень, что, в свою очередь, позволяет исследовать процессы с малыми значениями сечений.

В то же время, становится очевидным, что электронно-позитронные комплексы с непрерывными циркулирующими малоэмиттансными пучками больших интенсивностей в диапазоне энергии 2-6-8 ГэВ являются одновременно, при соответствующем использовании "винглеров" и "ондуляторов", прекрасными источниками коллимированных мощных фотонных пучков в диапазоне энергий 1-100 кэВ для фундаментальных и прикладных исследований (химия, биология, материаловедение, медицина и т.д.).

Указанные обстоятельства, полностью осознанные в научном мире в последние десятилетия, породили целый ряд предложений по созданию новых или модернизации существующих электронных ускорителей (см. рис.1) как в Советском Союзе (например, ХУМ, ФИАН), так и за рубежом (например, СЕБАФ, ELSA, APS, STA SR, ESRF) [4-10].

Проведенная в ЕРФИ детальная оценка условий проведения различных типов экспериментов в области физики элементарных частиц,

физики атомного ядра и прикладных исследований показывает, что необходимо, в первую очередь, такое техническое перевооружение и модернизация Ереванского синхротрона, которое обеспечит получение пучков электронов с энергией до 6 ГэВ, с интенсивностью от 0,5 до 2,5 мкА, с коэффициентом заполнения до 50 % при длительности "плоской вершины" до 20 мсек с относительно малыми разбросами по энергиям и эмиттансом выведенных пучков.

Достижение таких значений параметров планируется осуществить до 93-95 г.г. в соответствии с разработанной программой реконструкции в модернизации Ереванского синхротрона [2,3], которая предусматривает в основном создание инжектора на 120 МэВ с импульсным током 1 А, новой ускоряющей ВЧ-системы на частоту 466 МГц, "плоской вершины" длительностью до 20 мсек, реконструкцию магнитной системы синхротрона (создание магнитной системы с разделенными функциями и с обеспечением режима суперциклического синхротрон-стретчера [11-12], увеличение качества и количества выводимых пучков, модернизацию системы диагностики и контроля за работой ускорителя и др.

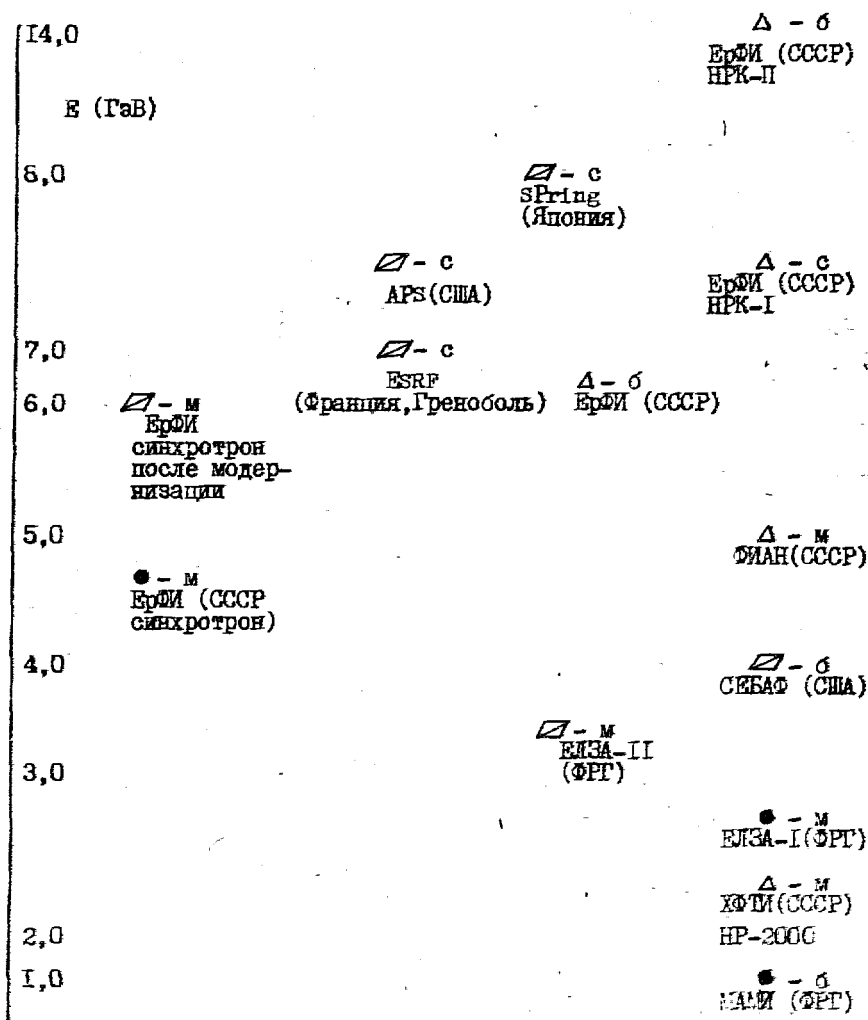
Новые значения параметров модернизированного Ереванского синхротрона обеспечат ему возможность находиться в передовых рядах мировой семьи электронных ускорителей, являясь базой для проведения актуальных экспериментов в области физики элементарных частиц и ядра по крайней мере до начала следующего века.

Перспективная программа развития предусматривает получение пучков электронов с энергиями в диапазоне 6-14 ГэВ и интенсивностью 5-100 мА при коэффициенте заполнения 100 %. Такие значения параметров могут быть достигнуты только в случае созда-

ния большого накопительно-растяжительного электронного кольца (НРК-I до 7,5 ГэВ, НРК-II до 14 ГэВ) диаметром, в 5-7 раз превышающим диаметр кольца Ереванского синхротрона. Первоначально в качестве инжектора для большого кольца предусматривается использовать реконструированный Ереванский синхротрон, что обеспечивает получение электронных пучков с энергиями 6-7,5 ГэВ и средним током до 10 мкА.

В большом кольце будет обеспечена возможность создания, с использованием современных "вигглеров" и "осцилляторов", 20-25 независимых каналов мощных фотонных пучков в диапазоне энергии 0,1-100 кэВ и яркостью до 10^{19} фот/мм² мрад² мА 0,1 % вВ. Такой электронно-фотонный комплекс позволит Ереванскому институту находиться не только в передовых рядах мировой семьи исследователей адронов и ядер, но и одновременно выдвигает Советский Союз к началу нового тысячелетия в ряд передовых стран в области разработки новых технологий и создания новых материалов, в областях развития медицины, химии, биологии и т.д. Заметим, что специализированные источники СИ третьего поколения на энергию 6-8 ГэВ уже создаются в США (APS), в Западной Европе (ESFR) и в Японии (STA SR) [7-9].

Увеличение энергии до 14 ГэВ (НРК-II) и тока пучка до 100 мкА в большом кольце предусматривается осуществлять путем создания в последующем нового современного инжектора на ту же энергию и с током до 1 А с использованием высокоградиентных линейных ускорителей либо с использованием новых методов ускорения. До создания современного инжектора в качестве промежуточной возможности увеличения энергии пучка в большом кольце можно использовать известный метод медленного повышения энергии в накопителях.



- - эксплуатируемые
- ▣ - сооружаемые
- △ - планируемые
- δ - $I_{ср.п.} > 100$ мкА
- с - $10 < I_{ср.п.} < 100$ мкА
- м - $0,1 < I_{ср.п.} < 10$ мкА

Рис. 1 Таблица электронных ускорителей с $dE > 10\%$ и $E < 14$ ГэВ

ГЛАВА I

ЕРЕВАНСКИЙ СИНХРОТРОН

§ I Основные параметры

Ереванский быстроциклический электронный синхротрон на энергию 6 ГэВ, как уже отмечалось, успешно эксплуатируется с начала 1968 г. и в последнее время ежегодно обеспечивает в среднем 4500-5000 часов чистого пучкового времени (при планируемом 5000-5500 ч.) для проведения на внутренних и выведенных электронно-фотонных пучках экспериментов по физике частиц, ядерной физике и по прикладным исследованиям.

Учитывая, что одновременно с эксплуатацией осуществляется непрерывная модернизация и совершенствование основных систем синхротрона, в настоящее время его параметры и возможности заметно отличаются от первоначальных [I] .

Общие параметры

Номинальная энергия (ГэВ):

без "плоской вершины" в магнитном поле.....	6, I
с "плоской вершиной" длительностью 2,0-4,5 мсек.....	2-4, 5
Число электронов в цикле ускорения.....	I IO ^{II}
Частота повторения циклов (Гц).....	47-63
(создана возможность синхронизации частоты циклов с частотой промышленной сети)	
Циркулирующий ток (мА).....	22
Период обращения (мсек).....	0,7229
Средний радиус установки (м).....	34,49
Поперечные размеры туннеля (м).....	6,8x7,5

Магнитная система

Тип фокусировки	знакопеременная
Последовательность фокусировки.....	ТОБЛОД
Число бетатронных колебаний на обороте	
радиальных.....	5,276
вертикальных.....	5,294
Количество магнитных блоков.....	46
Длина магнитных блоков (м).....	
по полю FD =	3,2152 м
DF =	3,2147 м
по градиенту FD =	3,1316 м
DF =	3,1359 м
Радиус кривизны в блоках ρ =	24,56 м
Значения функции $(\beta_r)_{\max}$ =	12,11 м
$(\beta_z)_{\max}$ =	12,19 м
$(\beta_r)_{\min}$ =	3,9 м
$(\beta_z)_{\min}$ =	3,91 м
Показатель магнитного поля (n).....	113,181
Напряженность поля (Т)	
при инъекции (начиная с весны 1969 г.).....	0,0099
максимальная.....	0,7955
Количество и длина (м) прямолинейных промежутков больших (между фокусирующими полублоками).....	24-1,316
коротких (между дефокусирующими полублоками).....	24-1,290
Время ускорения (мсек).....	9,3
Длительность "плоской вершины" - (мсек).....	1,0-4,5
Пиковая мощность питания (мВт).....	3,0

Титановых.....	53
Средняя скорость откачки (л/сек).....	53x600

Система вывода пучков

Медленный резонансный вывод первичных пучков

число каналов.....	I
длительность вывода (мсек).....	0,5-2,5
Частота циклов вывода (Гц).....	25
Эффективность вывода.....	20-30 %
Расходимость выведенного электронного пучка	
по Z	0,4 мрад
по Γ	0,6-0,8 мрад

Медленный бим-бамп вывод с внутренних мишеней

вторичных гамма-пучков:

количество каналов.....	3
длительность вывода (мсек).....	I, 0-3,5
частота циклов вывода (Гц).....	47-53
коэффициент заполнения (% , макроскопический).....	5, 0-15, 0

Число одновременно выводимых вторичных пучков.....2

Число каналов синхротронного излучения.....3

Число фотонов в пучках СИ в полосе

$$\Delta\lambda/\lambda = 10^{-3} \text{ при энергии } 4,5 \text{ ГэВ и токе}$$

10 мА ускоренного пучка в телесном угле I мрад на длинах волн

=	$\lambda = 0,6 \text{ \AA}$	$4 \cdot 10^{10}$
	$\lambda = 1,5 \text{ \AA}$	$8 \cdot 10^{10}$
	$\lambda = 2,0 \text{ \AA}$	$0,5 \cdot 10^{10}$

Кроме того, в системах вывода пучков созданы возможности уменьшения многократности прохождения и углового разброса частиц при их наведении на внутренние мишени, что существенно улучшает параметры когерентного излучения с тонких кристалличес-

ких мишеней.

Охвачены автоматическим контролем с помощью ЭВМ более 250 параметров синхротрона, в том числе все дискретные и временные параметры систем вывода пучков.

§ 2 Краткий обзор основных результатов физических исследований

На Ереванском синхротроне осуществляется большая программа экспериментов по фоторождению адронов на нуклонах и ядрах с целью проверки и развития современных представлений о структуре адронов и атомного ядра. В 70-х годах при изучении реакций фоторождения мезонов на ядрах впервые было определено полное сечение взаимодействия нестабильного η^0 -мезона с нуклоном для энергии фотонов 2 ГэВ. Полученное сечение хорошо согласуется с предсказанием аддитивной модели кварков. Данные ЕРФИ вместе с результатами последующих экспериментов с фотонными (СЛАК, НИИ ЯФ ТПИ) и адронными (ИТЭФ) пучками позволили определить энергетическую зависимость этого сечения в интервале 1-48 ГэВ и проверить справедливость кварковой модели в широкой энергетической области. Данные по изучению процессов некогерентного фоторождения \mathcal{K}^{\pm} -мезонов на различных ядрах при энергиях фотонов 2 и 3 ГэВ вместе с результатами ранее выполненных на Стенфордском линейном ускорителе (СЛАК, США) экспериментов при энергиях 8-16 ГэВ позволили установить, что эффективные числа нуклонов ядра в рассматриваемом процессе не зависят от энергии в широком интервале.

В ЕРФИ с высокой точностью были выполнены эксперименты по

исследованию реакций одиночного фоторождения η^0 -мезонов, чувствительных к распределению протонов и нейтронов в ядрах. На основании полученных и существующих к тому времени результатов проанализирована вся совокупность данных о распределении нейтронов в ядрах и впервые показано, что для ядра свинца характерно существование так называемых гало нейтронов.

Создание квазимонохроматических пучков фотонов высоких энергий, обладающих высокой степенью поляризации (до 80 %), на много лет вперед определило характерную для Ереванского ускорителя программу исследования спиновых корреляций в процессах фоторождения. Необходимо подчеркнуть при этом, что качество поляризованных пучков Ереванского ускорителя (отношение сигнала к фону) в несколько раз превышает качество аналогичных пучков в других центрах в силу особенностей его магнитной структуры и создания возможности уменьшения кратности прохождения и углового разброса частиц при их наведении на внутренние мишени. На ускорителе была выполнена обширная программа работ по изучению поляризационных явлений в фоторождении (π^{\pm} , η^0 , $\eta^{\prime 0}$) мезонов на нуклонах. Полученные в ЕрФИ экспериментальные данные во многом стимулировали развитие феноменологических моделей фоторождения мезонов как в ЕрФИ, так и в других научных центрах; при этом были уточнены механизмы фоторождения, систематика и статистические характеристики нуклонных резонансов в области 1-2 ГэВ. Результаты поляризационных экспериментов по фоторождению нуклонных резонансов играют важную роль для проверки предсказаний кварковых моделей строения барионов и особенно для поиска дикварковых резонансов. В 1964-1965 гг. на Ереванском синхротроне

В поляризационных экспериментах получены первые указания на возможное существование дибарионных состояний в реакциях фоторасщепления дейтрона поляризованными фотонами и фоторождения f_1^0 -мезонов на дейтроне.

В 70-е годы выполнен большой цикл исследований по экспериментальному изучению структуры протонов и нейтронов на внутреннем пучке синхротрона. Измеренные значения электромагнитных радиусов протона и дейтрона, полученные в сотрудничестве с лабораторией ядерных проблем (ОИЯИ, Дубна), находятся в одном ряду с наиболее точными мировыми данными.

На синхротроне ЕрФИ экспериментаторами института совместно с сотрудниками ФИАН СССР с помощью оригинальной методики измерено сечение реакции упругого фоторождения π^0 -мезонов на ядрах гелия и получены значения, согласующиеся с теоретическими предсказаниями, полученными ранее в ЕрФИ.

С использованием канала выведенных электронов на пучке меченых фотонов синхротрона измерены полные сечения фотопоглощения на ядрах (впервые в области 0,5–1,5 ГэВ), фотоделения ядер урана и образования на ядрах π^0 -мезонов без заряженных частиц в конечном состоянии.

В институте получило значительное развитие сравнительно новая область - релятивистская ядерная физика, становление которой в основном инициировано работами советских ученых (ЛВЭ ОИЯИ, ИГЭФ). На Ереванском синхротроне исследовалось кумулятивное образование протонов и пионов с помощью высокоэнергетичных фотонов и электронов. Впервые доказано, что в фотообразовании кумулятивных частиц соблюдаются закономерности фраг-

ментации ядер (ядерный скейлинг кумулятивного эффекта), наблюдаемые ранее на адронных пучках (ЛВЭ, ОИИИ, ИТЭФ); и что рождение кумулятивных частиц на ядрах является универсальным процессом по отношению к типу взаимодействия (электромагнитного и сильного). В настоящее время проводятся новые эксперименты с целью получения данных по корреляционным характеристикам кумулятивных процессов фото- и электророждения.

С первых дней работы синхротрона на вторичных пучках электронов были начаты работы по экспериментальному исследованию свойств рентгеновского переходного излучения. Детально были исследованы энергетические и спектральные характеристики излучения в различных средах с периодическим и случайным распределением неоднородностей. В результате этих работ были разработаны и изучены детекторы рентгеновского переходного излучения (детекторы РПИ) для идентификации частиц высоких энергий, основанные на методах энерговыделения, характеристического излучения, подсчета числа кластеров и пр. Ряд этих разработок лег в основу идентификаторов частиц, широко используемых в настоящее время на современных ускорителях и коллайдерах, а также в экспериментах с космическими лучами.

Как уже отмечалось, сотрудники БрИИ были в числе пионеров теоретических и экспериментальных исследований по созданию поляризованного χ -пучка с энергией в несколько гигаэлектронвольт путем торможения электронов в кристаллических средах. Как естественное продолжение этих работ, в последние годы в Институте осуществляется широкая программа изучения ориентационных явлений, возникающих при прохождении электронов и позитронов высо-

ких энергий через кристаллы (под малыми углами относительно осей кристалла). Выполнены систематические измерения спектров когерентного тормозного излучения, получены данные, согласующиеся с теорией, по ориентационной зависимости интегральной интенсивности излучения. Экспериментально обнаружен сначала в ЕрФИ, а затем в СЛАКе (с участием сотрудников ЕрФИ и ХФТИ) новый механизм электромагнитного излучения электронов и позитронов - излучение при каналировании. Исследованы спектрально-угловые характеристики излучения ультрарелятивистских электронов при плоскостном и осевом каналировании при энергии 4,7 ГэВ в монокристаллах алмаза при различных ориентациях и толщинах: наблюдалось значительное усиление в пиковой области спектра излучения и подавление в жесткой области по сравнению с дезориентированным кристаллом, обнаружена также сильная ориентационная зависимость угла многократного рассеяния при малых углах влета в режиме осевого каналирования. Опыты по детальному изучению этого явления, которое может иметь также и прикладное значение, в настоящее время продолжаются.

ГЛАВА II

ПРОГРАММА РАЗВИТИЯ ЕРЕВАНСКОГО СИНХРОТРОНА

§ I Программа физических исследований

Достижения физики высоких энергий последних лет указывают на наличие нерешенных фундаментальных проблем в области промежуточных энергий I-I4 ГэВ на электронных ускорителях. Особая роль электронов и фотонов в исследовании адронной и ядерной материи и той области энергий, где можно ожидать перехода от адронных к кварковым степеням свободы, обусловлена тем, что эффекты, связанные с адронами и ядерными структурами, проявляются в их взаимодействии с этими объектами в наиболее "чистом" виде. Квантовая хромодинамика, удовлетворительно описывающая сильные взаимодействия на малых расстояниях, не в состоянии описать всех свойств адронов при больших расстояниях: имеются проблемы, связанные с удержанием кварков в адронах.

Особое значение приобретает исследование ядерных сил и структуры ядер, в частности, на малых расстояниях (расстояние меньше, чем нуклонные размеры $< 1\text{Ф}$) в связи с возможностью объяснения природы ядерных сил, исходя из кварковой структуры нуклонов.

Открывается возможность для

- исследования кварковой структуры адронов, ядер, малонуклонных систем, изучения кварк-партоновых структурных функций ядер;
- поиска и исследования дибаррионных и экзотических резонансов, поиска аномальных состояний ядерного вещества;

- исследования процессов с большим энерговыделением в ядерном веществе, процессов фрагментации, глубоконеупругих процессов;
- поиска и исследования фазовых переходов в ядерной материи.

В связи с этим разрабатываемая в ЕРФИ программа предусматривает выполнение:

- систематических экспериментальных исследований процессов фотото и электророждения частиц (эксклюзивные реакции) в области энергий $I-14$ ГэВ и сравнение с предсказаниями различных теоретических моделей с учетом кварковой структуры взаимодействующих частиц;
- мультиполяризационные исследования на нуклонах и малонуклонных системах в процессах фоторождения и электророждения. Известно, что поляризационные эксперименты очень чувствительны к свойствам различных степеней свободы в ядрах. Это дает дополнительные тесты для отбора существующих теорий. Предусматривается, кроме измерения реакции с поляризованными фотонами, выполнить двойные поляризованные эксперименты с измерением; в частности, поляризации рождаемых нуклонов
- исследований по обнаружению экзотических состояний элементарных частиц (мультикварковые состояния, гермафродиты, глюоны в связанном состоянии), дибарионов;
- исследованию фото- и электророждения частиц и резонансов на ядрах;
- исследование процессов фрагментации кварков в адроны в ядерных мишенях;
- исследование структуры электрослабого взаимодействия в поляризованных экспериментах по электророждению на ядрах.

§ 2 Создание новых экспериментальных установок

Для реализации основной физической программы исследований планируется создание базовых экспериментальных установок в новом восточном экспериментальном зале № 2 (см. рис. 2) на выведенных электронных и γ -пучках ускорителя ЕрМ.

Пучки выведенных электронов формируются использованием стандартных элементов: коллиматоров, квадрупольных линз, отклоняющих магнитов. Мониторирование пучка осуществляется с помощью координатных детекторов вторичной эмиссии и цилиндра Фарадея.

Формирование меченого линейно-поляризованного γ -пучка осуществляется использованием кристаллического радиатора.

Предусматривается создание следующих комплексных экспериментальных установок.

Установка У-1 по фоторождению мезонов и резонансов на меченых поляризованных пучках γ -квантов включает центральный 4π - спектрометрический детектор на базе широкоапертурного магнита МС-12 и детектор переднего направления. 4π -детектор предназначен для регистрации многочастичных процессов с образованием заряженных частиц. С этой целью планируется использование координатных детекторов для анализа импульсов в магнитном поле, время-пролетных детекторов и ливневых детекторов для регистрации γ -квантов. Детекторы направления "вперед" предназначены для регистрации и идентификации высокоэнергетических заряженных и нейтральных частиц.

Установка У-2 для экспериментов по электророждению состоит из спектрометров, смонтированных на поворотных платформах с об-

щей осью вращения. Литный спектрометр МС-1, предназначенный для регистрации рассеянных электронов, состоит из двух линз и анализирующего магнита СП-137. Детектирующая система МС-1 состоит из триггерных сцинтилляционных счетчиков, многопроволочных пропорциональных камер, газового черенковского счетчика и ливневого детектора. Максимальный захват по импульсу $\Delta P/P \approx 5-10\%$, импульсное разрешение при $P_{\text{max}} = 6 \text{ ГэВ/с}$ $\Delta P/P \approx 10^{-3}$, угловой захват 5-10 мстер, угловое разрешение ~ 1 мрад.

Магнитный спектрометр МС-2 предназначен для регистрации адронов (P, П, К) в совпадении с электронами, регистрируемыми спектрометром МС-2. Он также состоит из квадрупольных линз и анализирующего магнита СП-137. Максимальный захват по импульсу $\Delta P/P = 10-15\%$, разрешение по импульсу при $P_{\text{max}} = 4 \text{ ГэВ/с}$ $\Delta P/P \approx 10^{-3}$, угловой захват 10 мстер.

Спектрометр С-3 регистрирует адроны, а также гамма-кванты от распада мезонов (π^0 , η^0) в совпадении с МС-1 и МС-2. Спектрометр С-3 содержит сцинтилляционные детекторы, МПК, нейтронный годоскоп, а также счетчики полного поглощения.

В таблице № I § 3 приведены в систематизированной форме основные этапы развития фундаментальных исследований и связанные с ними требования к модернизации и развитию Ереванского ускоряющего комплекса.

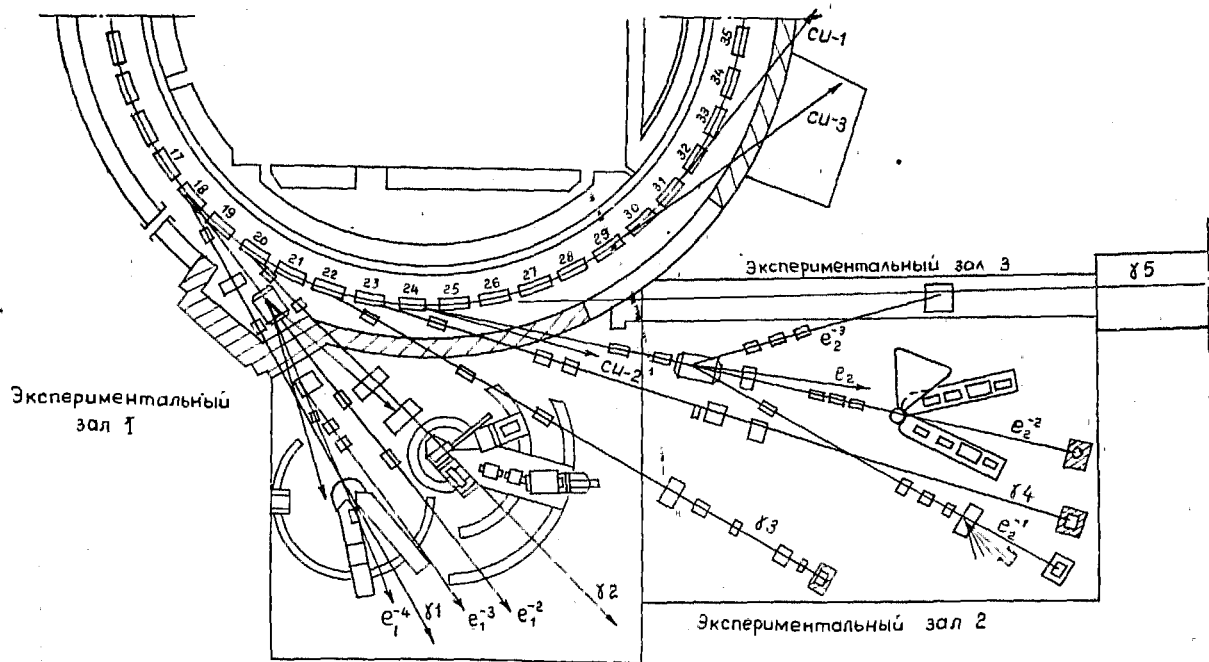


Рис. 2

§ 3 Основные этапы развития фундаментальных исследований и связанные с ними требования к развитию Ереванского электронного синхротрона

Таблица I

№ пп	Область исследований	Требования к параметрам пучков и срокам реализации	Энергия (ГэВ)	Среднее значение ускоренного тока (мкА)	Коэффициент заполнения (%)
1	2	3	4	5	6
1.	Фоторождение, электророждение -резонансная физика $M_p < 2$ ГэВ -ядерная физика (классическая) -прикладные исследования по радиационному материаловедению на пучках СИ (1987-1990 гг.)	$q^2 = I(\text{ГэВ}/c)^2$	4,5 обеспечивается созданием ВЧ системы ВЧ питания синхротрона	0,5-1,0 от существ. системы инъекции с энергией 75 МаВ	20 % будет обеспечено после ввода в эксплуатацию I-ой очереди системы формирования "плоской вершины" длит. 5 мс (1990 г.)
2.	Фоторождение, электророждение -резонансная физика $M_p < 3$ ГэВ -ядерная физика (классическая) -прикладные исследования по радиационному материаловедению на пучках СИ при больших интенсивностях потоков электронов и гамма-квантов и больших энергиях (1990-1995 гг.)	$q^2 = I-2(\text{ГэВ}/c)$	6 обеспечивается созданием и вводом в эксп. новой ус-кор. ВЧ системы синх-на на частоте 466МГц	I-5 обеспечивается созданием ЛУЭ-120 ИЦ (1988-1992 гг.)	50 % после создания II-ой очереди системы чл. верх. длит. 20 мс и демпф. магнитов (1989-1995 гг.)
2.	Развитие этапов I и 2 - создание системы меченых поляризованных фотонов: - физика мезонных резонансов и поиск экзотических адронов ($M_{me3} < 2$ ГэВ) - отдельные проблемы ядерной физики (1990-1993 гг.)		6 (см. этап 2)	0,005 (выведенный ток, см. этап I)	50 % Эсм. этап 2)

	2	3	4	5	6
<p>3. Исследование по пп. 1 и 2 в полном объеме при $q^2 \leq 3(\text{ГэВ}/c)$. Ядерная физика в полном объеме. Обнаружение кварковых эффектов на расстояниях $0,1-0,5$ ($q^2 \leq 3(\text{ГэВ}/c)$) в системах $N-N$. Измерение функции корреляции в процессах $A(e, e', N, N)$, разделение (G_L, G_T):</p> <ul style="list-style-type: none"> - прикладные исследования по радиационному материаловедению в полном объеме в создаваемом в 1986-1992 гг. специальном экспериментальном павильоне; - исследования на пучках СИ в "симбиозном" режиме; полная программа работ по СИ в режиме основного пользователя пучком при высоких яркостях (10^{20} фот-сек) пучков и большом количестве выводных каналов (после 1995 г.) 	6-14	5-100	90-100	<p>обеспечивается путем</p> <ul style="list-style-type: none"> -реконструкции магнитной системы; -увеличения средней мощности ВЧ до 1мВт -создания новой радиационно-стойкой вакуумной камеры; <p>последовательным повышением энергии инжекции в диапазоне 0,2-6 ГэВ</p>	<p>обеспечивается либо реконструкцией синхротрона в суперциклический стретчер-синхротрон, либо созданием большого кольца на 6-14 ГэВ, либо созданием малого стретчера в существующем туннеле.</p>

§ 4 Программа модернизации Ереванского электрон-фотонного комплекса

§ 4.1. Общие соображения

Резюмируя программу фундаментальных исследований в области физики элементарных частиц, ядерной физики и прикладных исследований, изложенную в предыдущих параграфах, можно констатировать, что для ее реализации необходимо решить четыре основные проблемы в области ускорительной физики и техники. Эти проблемы и возможные варианты их решения показаны на диаграмме рис.3. Сущность основных проблем сводится к следующему.

1. Увеличение коэффициента заполнения αf до 100 %.
2. Увеличение среднего тока ускоренных частиц до 100 мкА.
3. Увеличение энергии ускоренного пучка до 14 ГэВ.
4. Получение яркости СИ до 10^{20} фотон/сек на отдельных участках кольца и увеличение количества каналов СИ до 20-30.

Решение первой проблемы можно осуществить несколькими вариантами, а именно: 1) увеличением энергии инжекции в синхротроне вплоть до 6 ГэВ, 2) созданием стретчера в существующем туннеле синхротрона, 3) реконструкцией синхротрона в суперциклический синхротрон-стретчер (ССС), 4) созданием большого (в 5-7 раз больше в диаметре по сравнению с действующим синхротроном) накопительно-растяжительного кольца (НРК). Из этих вариантов решений наиболее простым представляется вариант переделки синхротрона в СССР. Этот вариант предпочтительнее как с экономической точки зрения, так и с точки зрения оригинальности технических решений.

Осуществление других вариантов решений первой проблемы (см.рис.3) связано как с крупными капиталовложениями, так и с техническими сложностями. В то же время, из того же рис.3 видно, что решение трех из четырех проблем обеспечивается созданием большого кольца, которое в отличие от малого стретчера, имеет значительно долгосрочную перспективу, и поэтому становится очевидным, что разработку большого кольца НРК желательно начать уже сегодня, ибо рано или поздно институт будет вынужден реализовать подобный проект. Эти соображения систематизированы и отражены в "Программе развития Ереванского электронно-фотонного комплекса" на рис.4.

Решение второй основной проблемы, а именно, увеличение интенсивности ускоренного пучка до значений 10-100 мкА связано как с увеличением энергии и тока инжекции, так и с реконструкцией магнитной системы синхротрона. В связи с этим программа развития Ереванского ускорительного комплекса разбита на три этапа, а именно:

- программа первоочередной модернизации (1987-1994) гг.;
- программа второй очереди модернизации (1989-1995) гг.;
- перспективная программа развития (1995-2005)гг. (см.рис.4)

§ 4.2. Программа первой очереди модернизации

Сущность программы первой очереди достаточно подробно отражена во многих публикациях, в частности, в работах [2,3]. Отметим, что цель этой программы в основном сводится к следующему:

- а) доведение дф до 50 % (соответственно с уменьшением

У ср.п. в два раза) при энергии 6 ГэВ. Для этого создается новая ускоряющая ВЧ система и дооснащается система питания электромагнитов для обеспечения плоской вершины (ПВ) до 20 мсек, а также создается 6 демпфирующих магнитов для демпфирования колебаний пучка при высоких энергиях и в период действия ПВ;

б) увеличение I ср.п. до 3-5 мкА. Для этого создается новый инжектор на 120-200 нА с импульсным током 1 А;

в) запуск второго канала свиста электронов и модернизация первого. Для этого создается временных септум-магнита и два отклоняющих;

г) повышение надежности работы микротрона. Для этого осуществляется ремонт и замена вакуумной камеры и создаются новые обмотки электромагнита;

д) компьютерная автоматизация контроля и управления процессами ускорения и вывода пучков с целью увеличения их качества и сервисности обслуживания установки. Эта область непрерывно совершенствуется, и поэтому проблема представляется долгосрочной. В связи с этим этот этап в "Программе" не заумерован.

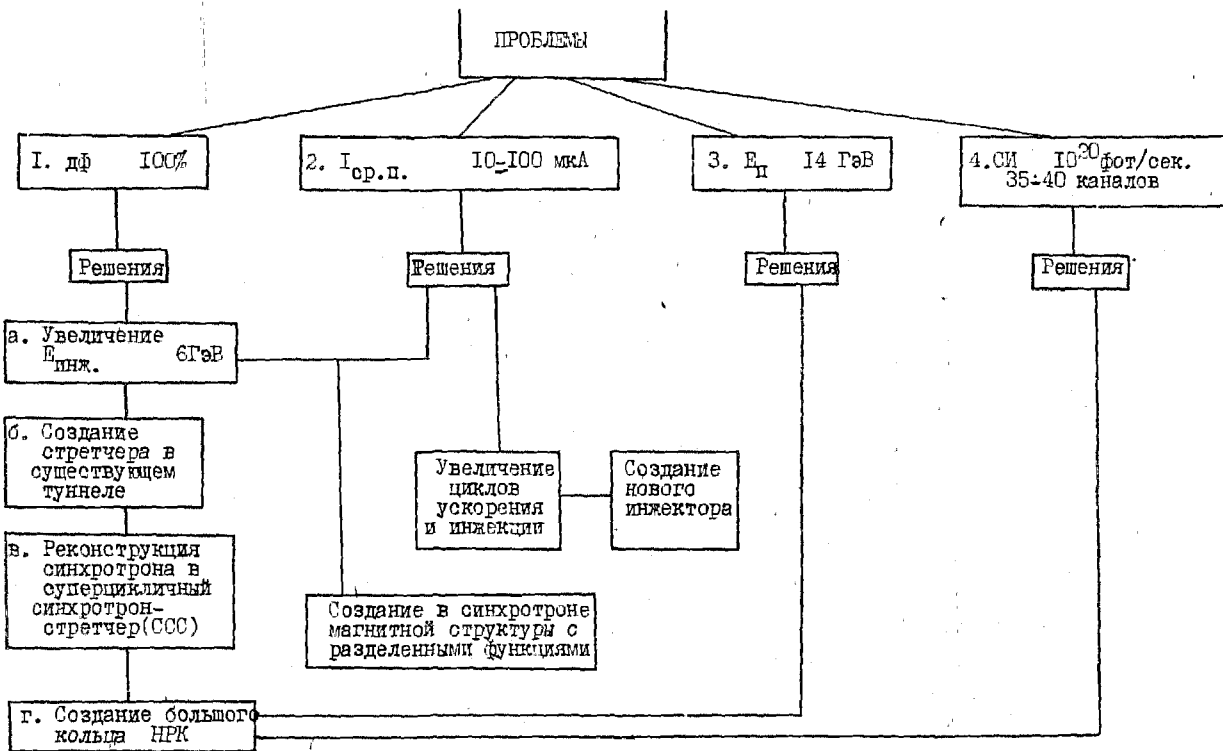


Рис.3

ПРОГРАММА

РАЗВИТИЯ ЕРЕВАНСКОГО ЭЛЕКТРОННО-ОПТОНОГО КОМПЛЕКСА

1967-1994 гг. Первая очередь модернизации	Результат	1969-1995 гг. Вторая очередь модернизации	Результат	1990-2005 гг. Перспективная программа развития
1. Создание нового ВЧ источника	6 ТГц и обод-печенный ПЧ до 100 ГГц	I. Исследование режимов суперцикл. ускорения	Обоснование возможности создания ССС	I2. Разработка проекта и создание большого протяжительно-накопит. кольца НРЭК Результат: $E=14$ ГэВ $d\phi = 90\%$ СИ - 10^{20} фот/сек 35 - 40 каналов СИ
2. Создание инжектора на 120 МВВ	1 ср.п. 10-15 мкс	II. Создание ССС	$d\phi = 90\%$ Без уменьшения 1 ср.п.	
3. Создание демп. магнитов-6 шт.		I0. Разработка проекта создания нитиной с турб. с р. дел. функциями	Исчезновение пачки, системы, уменьшение эмиттанса и увеличение его тока до 10-100 мкА	I3. В случае отрицательных результатов по п.6 и невозможности выполнения п.11- Разработка проекта и создание малого стрелера в существующем туннеле Результаты: $d\phi = 99\%$ $E = 6$ ГэВ
4. Создание ПВ до 20 мксек	$d\phi = 50\%$ с уменьшением 1 ср.п. в 3 раза			
5. Ремонт вакуумной камеры	Надежность	II. Последов. увеличение энергии и тока инж. по мере возможности	Увеличение тока ускорен. пучка и $d\phi$	
6. Создание новых обмоток м.блоков	Надежность			
7. Создание двух септунов и двух откл. магнитов	Создание двух каналов вывода е			I4. Исследование новых методов ускорения и высокоград. линейных структур для создания инжектора на 6-14 ГэВ
Автоматизация	Повышение качества пучков			

Рис.4

§ 4.3. Программа второй очереди модернизации

Вторая очередь модернизации синхротрона предусматривает (рис.4), во-первых, исследование и создание суперциклического синхротрон-стретчера (ССС), некоторые результаты разработки которого описаны в работе [11].

Из этой работы видно, что создание СССР можно осуществить поэтапно. Вначале на действующем синхротроне, при сохранении старых обмоток электромагнита, повысить импульсную частоту f_u питания до 75 Гц, что приведет к увеличению дф до 33 % при конечной энергии ускорения 4,5 ГэВ с сохранением среднего тока ускоренного пучка I ср.п. неизменным. Затем, после установки новых обмоток на блоках электромагнита, повысить f_u до 100-150 Гц, а после создания новой магнитной структуры с разделенными функциями, можно поднять частоту до 250-300 Гц и довести значение дф до 70-80 % при энергии 7,5 ГэВ, что обеспечит выполнение физической программы до 2000 г.

Во-вторых, вторая очередь модернизации (см.рис.4,п.10) предусматривает разработку проекта и создание магнитной структуры с разделенными функциями. Проектные разработки в этом направлении уже начаты и первоначальные результаты приведены в работе [12]. Создание такой магнитной структуры синхротрона позволит не только резко увеличить долговечность магнитной системы, но и приведет к уменьшению эмиттанса ускоренного пучка при 6-7,5 ГэВ без создания демпфирующих магнитов и к возможности увеличения тока пучка до 10-100 мкА в зависимости от выбранного количества циклов ускорения и режимов работы ускорителя.

В-третьих, (п. II, рис.4) предусматривается последовательное увеличение энергии, тока и циклов инжекции. Эти вопросы постоянно разрабатываются сотрудниками лаборатории инжекции и их результаты систематически освещаются в публикациях.

ГЛАВА III

ПЕРСПЕКТИВНАЯ ПРОГРАММА РАЗВИТИЯ

§ I Общие соображения

Долговременная перспективная программа развития фундаментальных исследований в области физики ядра и элементарных частиц в ЕРФИ связана с созданием большого растяжительно-накопительного электронного кольца (НРК) на энергии 6-14 ГэВ (см.рис.3,4). При этом необходимо отметить, что создание такой уникальной установки одновременно обеспечит также выполнение широкой программы прикладных исследований в ряде областей науки и техники, включая, в первую очередь, материаловедение, биотехнологию, медицину, фармакологию, химию, электронику и т.д. Если к тому же учесть, что в наиболее развитых регионах мира, а именно, в Западной Европе $ESRF$ (Франция, г.Гренобль), APS (США, г.Чикаго) и $STA SR$ (Япония) только для этих прикладных целей специально создаются как мощные фотонные источники почти аналогичные установки, то становится очевидным, что создание в ЕРФИ комплекса НРК в многоцелевом варианте исполнения приобретает особое значение. В этом случае также появится редкая возможность для осуществления окупаемости установки, служащей для целей фундаментальных исследований.

Для создания НРК в многоцелевом варианте исполнения необходимо, чтобы проект, в отличие от создаваемых в мире трех мощных фотонных источников, предусматривал три режима работы, основным из которых должен являться режим одновременного вывода фотонных и электронных пучков. Возможность использования такого режима обосновывается тем, что скачкообразный рост и медленное, в течение 20 мсек, уменьшение на 1-5 % интенсивности накопленного пучка в НРК окажется в большинстве случаев приемлемым для проведения экспериментов на фотонных каналах.

Естественно, что в тех случаях, когда необходима прецизионная стабильность параметров фотонных пучков, работа НРК будет осуществляться во втором режиме, т.е. в режиме отсутствия вывода электронных пучков. Третий режим должен предусматриваться для случая вывода электронных пучков большой интенсивности.

В тоже время очевидно, что создание первого одновременного режима работы НРК, не имеющего аналога в мировой практике, представляет само по себе особую задачу. Поэтому в данной работе ниже, в § 2.6, описан разработанный новый метод, позволяющий в принципе осуществить такой режим работы накопительно-растяжительного кольца.

§ 2 Основы проекта большого накопительно-растяжительного кольца на энергии 6-14 ГэВ

§ 2.1. Содержание проекта

В предлагаемом проекте НРК действующий в ЕРФИ электронный синхротрон на 6 ГэВ будет являться инжектором в большое кольцо. При этом НРК располагается на территории промплощадки института так, как показано на рис.5. Кольцо выбрано в виде

двух арок, соединенных двумя большими свободными промежутками, как для оптимального использования имеющихся экспериментальных залов и строительства новых, так и для удобства установки оборудования кольца. Средний радиус кольца выбран в семь раз больше среднего радиуса синхротрона и составляет 241 м. В больших свободных промежутках, длиной около 180 м каждый, будут компактно установлены резонаторы для компенсации потерь на излучение, длинные вигглер-магниты (несколько десятков м) для генерации планируемых сверхинтенсивных фотонных пучков, секступольные линзы для коррекции квадратичной хроматичности и возбуждения резонансной гармоник, а также будет осуществляться ввод и вывод частиц из растяжителя. Отметим, что взаимное расположение синхротрона и растяжительного кольца, показанное на рис.5, позволяет наилучшим образом осуществить ввод электронного пучка, располагая тракт транспортировки в туннеле и частично в экспериментальном зале действующего синхротрона.

В таблице 2 систематизированы возможные режимы работы большого кольца и области их использования.

Таблица 2

Режим	Осуществление	Ток	Область использования
1	2	3	4
I. Одновременное накопление и растяжение	Накопление частиц в течение неск. сек. Затем ввод электронов в растяжитель через каждые 20 мс и непрерывный их вывод из растяжителя	Сред. выводной ток до 5мкА. Скважность 100%. Кол.цирк. частиц 10	Физика исследований ядра и эл. част. Прикладные исследования

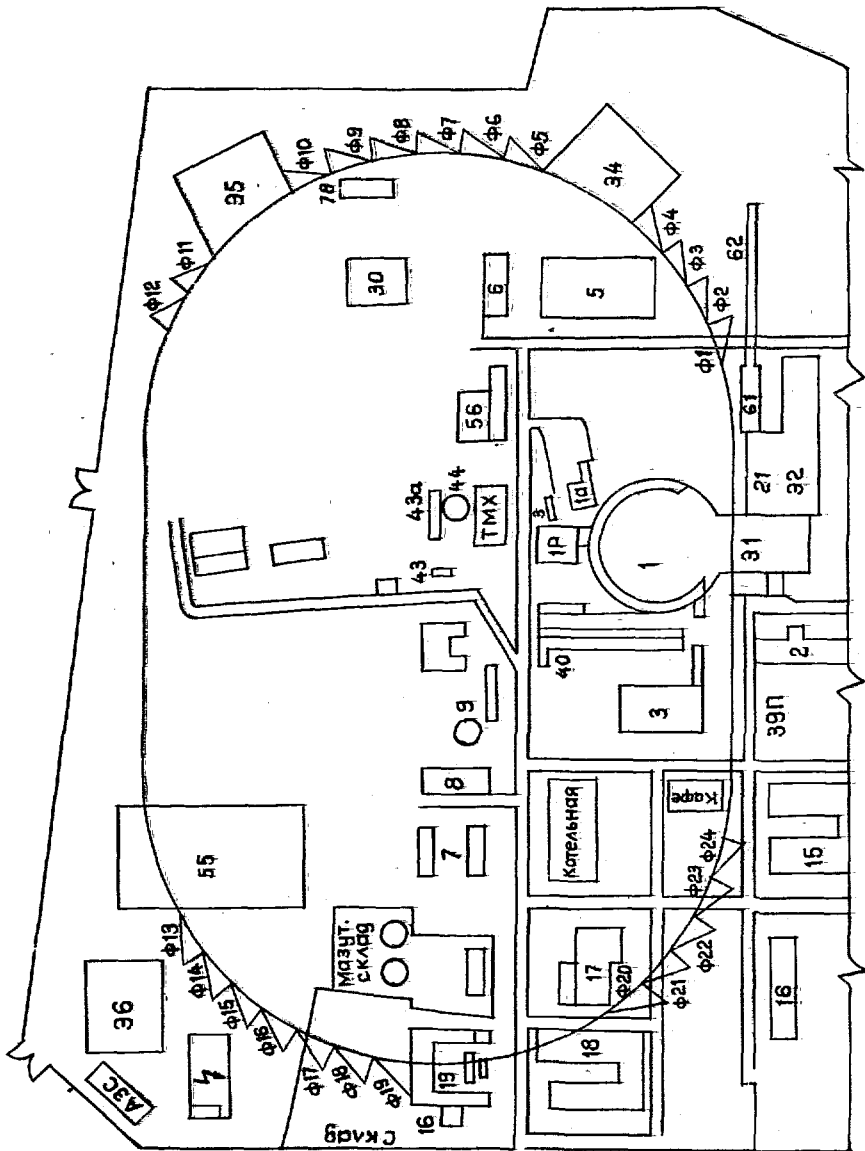


Рис. 5

I	2	3	4
2. Накопление	Накопление частиц в течение неск.сек. Генерация фотонных пучков в течение неск.часов	Кол.чирк. частиц 10^{15}	Прикладные исследования и ядерная физика на внутр. мишенях растяжителя.
3. Растяжение	Ввод электронов в растяжитель через каждые 20 мс. Непрерывный вывод из растяжителя.	Сред.ток вывода до 10 мкА. Скважность 100%	Физика исслед. ядра и элемент. частиц.

§ 2.2. Оценка затрат на реализацию

Проект НРК предусматривает создание на территории ЕрИИ подземного кольца средним диаметром 482 м с поперечным сечением 6 м на глубине 11 м, что соответствует отметке расположения кольца действующего синхротрона.

Проект разрабатывается с учетом необходимости максимального удешевления стоимости и уменьшения сроков сооружения НРК.

Вследствие этого, во-первых, основой для ускоряющей ВЧ системы НРК принята система, основные узлы которой (резонаторы, генераторы, волноводы и т.д.) разработаны и ныне изготавливаются в производстве ЕрИИ для модернизации Ереванского синхротрона. Во-вторых, в качестве основы магнитной системы НРК выбраны магнитные элементы (дипольные магниты, квадрупольные и шестипольные линзы и т.д.) "теплого" кольца УНК, которые хорошо разработаны и ныне находятся в серийном производстве в ПО "Электросила". В-третьих, учитывая, что в ЕрИИ успешно эксплуатируется криогенная станция, которая вырабатывает жидкий гелий в достаточном количестве, в проекте предусматривается создание

3-4-х сверхпроводящих "вигглеров" и "ондуляторов". В-четвертых, строительство подземного кольца НРК будет производиться в некоторых местах методом подземной проходки для устранения необходимости переноса некоторых наземных сооружений. Организация "Метрострой", которая в состоянии решить эту задачу, создана в г.Ереване несколько лет назад и ведет работы по сооружению Ереванского метрополитена.

Для ориентировочной оценки затрат, необходимых для реализации предлагаемого проекта НРК, использовались данные проекта УНК в ИФВЭ (г.Протвино).

Результаты такой оценки затрат приведены в таблице 2а:

Наименовани объектов	Строит. работы млн.р.	Монтаж. работы млн.р.	Суммарные затраты млн.р.
1. Подземное кольцевое помеще- ние и выводные каналы.	32,0	4,2	36,2
2. Экспериментальные замк и боксы.	13,5	6,9	20,4
3. Одноэтажные здания техноло- гического оборудования.	3,1	1,8	4,9
4. Энергосорпус.	1,2	0,8	2,4
5. Магнитная система.	8,3	2,4	10,7
6. ВЧ ускоряющая система.	4,6	1,2	5,8
7. Эксперим.оборуд.,пультовое, первой очереди и др.	8,0	3,5	11,5
Итого:	69,7	20,8	89,9

Таким образом, общие затраты составляют ориентировочно 90-100 млн.рублей, что намного меньше стоимости затрат для реа-

лизации аналогичных зарубежных проектов. Например, стоимость затрат для создания APS в США оценивается в 500 млн. долларов.

Стоимость создания НРК оказалась относительно незначительной не только вследствие выбора разработанных и серийно производимых узлов и элементов ускорителя, надежность которых опробована, а еще и вследствие того, что в ЕРФИ уже почти 30 % будущего комплекса действует и успешно эксплуатируется. Создание НРК предполагается осуществить в период 1995–2005 гг.

§ 2.3. Магнитная система

Для удержания пучка электронов в кольце в растяжительном или накопительном режимах магнитная система выбрана в виде структуры с разделенными функциями, которая обеспечивает затухание всех трех мод колебаний (горизонтальных, вертикальных, синхротронных). Длина орбиты растяжителя в семь раз больше длины орбиты синхротрона и составляет 1512 м. Это позволяет основную часть потерь на излучение сосредоточить на участках, где установлены вигглеры и ондуляторы. На орбите кольца предполагается иметь около 24 источников интенсивных пучков фотонов от вигглеров или ондуляторов, для чего магнитная система выбрана из 46 периодов, по 24 периода в каждой арке. Структура периода приведена на рис.6.

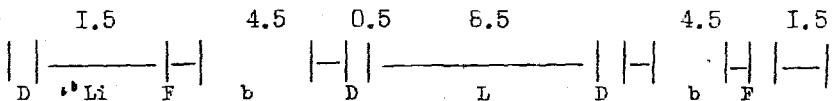


Рис.6

Каждая ячейка периодичности является бездисперсионной и поэтому минимальные горизонтальные размеры электронного пучка достигаются в середине большого свободного промежутка L . При заданном числе бетатронных колебаний и числе периода бездисперсионная структура также обеспечивает по всей длине орбиты минимальные колебания поперечных размеров сгустков, эмиттанса, коэффициента пространственного улотнения орбит и среднеквадратичного разброса по энергии. Кроме того, такая структура значительно улучшает непрерывный равномерный вывод на резонансе третьего порядка из растяжительного кольца. При этом удается также избежать синхро-бетатронных резонансов из-за взаимодействия с ВЧ системой.

В таблице 3 приведены основные параметры магнитной системы растяжительного кольца, рассчитанные первоначально только для энергии пучка до 7,5 ГэВ, т.е. для НРК-I.

Таблица 3

Энергия, E	7,5 ГэВ
Средний радиус, R	241 м
Радиус кривизны в заворачивающих магнитах, ρ	69 м
Структура периода	бездисп.раздел. функции
Длина большого промежутка в кольце	2/180 м
Число периодов N	48
Число заворачивающих магнитов	96
Число квадрупольных линз	350
Длина большого промеж. в периоде	8,5 м
Длина заворачивающего магнита	4,5 м
Длина квадрупольной линзы	0,5 м

Поле в заворачивающем магните	0,365 Т
Апертура (гориз.) магнита	125 мм
Тип магнита	прямоуг.

Выбранные параметры магнитной системы позволяют использовать заворачивающие магниты и квадрупольные линзы, изготавливаемые для сооружаемого в Серпухове ускорительно-накопительного комплекса (УНК). Отметим, что для рассматриваемого варианта провисание равновесной орбиты в заворачивающем магните составляет около 20 мм, что позволяет иметь рабочую апертуру 100 мм, достаточную для нормальной работы накопительно-растяжительного комплекса.

Выбор частот бетатронных колебаний основывался на необходимости иметь пучки электронов с магнитным эмиттансом. При заданной структуре, минимальный эмиттанс достигается при набеге фазы на период в районе 130 град. Учитывая, что непрерывный равномерный вывод из растяжителя предполагается осуществить на резонансе третьего порядка, частота горизонтальных бетатронных колебаний выбрана равной 19,3.

В таблице 4 приведены основные параметры электронного пучка в режиме накопления.

		Таблица 4
Частота бетатронных колебаний	по горизонтали, ν_x	19,3
	по вертикали, ν_z	16,25
Набег фазы за период	по горизонтали, μ_x	130 град.
	по вертикали, μ_z	106 град.
Коэф. цент. пространственного уклонения орбит, α		0,00268
Эмиттанс, ϵ_x (гориз.)		0,04 мм мрад.

Среднеквад. энергет.разброс, $\Delta E/E$		0,077 %
Максимальный гориз.размер, $\sigma_{r \max}$		1,1 мм
Минимальный горз.размер, $\sigma_{r \min}$		0,1 мм
Максимум β функции		30 м
Минимум β функции		0,5 м
Время затухания		
по горизонтали, τ_r		9,46 мсек
по вертикали, τ_z		4,66 мсек
синхротронных колебаний, τ_s		9,4 мсек

Для сшивания бетатронных функций по горизонтали и вертикали в больших свободных промежутках кольца будут установлены по четыре квадрупольные линзы. Кроме того, предполагается формирование в этих промежутках электронных пучков с минимальными поперечными размерами для обеспечения яркости фотонного пучка до 10-20 фот/сек мм² мрад.

§ 2.4 ВЧ система

Частицы в растяжительном кольце теряют часть своей энергии на синхротронное излучение в заворачивающих магнитах и на излучение в ондуляторах и вигглерах.

Потери энергии частицей на синхротронное излучение в заворачивающих магнитах при энергии электронов 7,5 ГэВ составляют 4 МэВ за оборот. Суммарные потери в ондуляторах и вигглерах предполагается иметь такого же порядка.

Выбор равновесной фазы связан с необходимостью обеспечить требуемое квантовое время жизни пучка, ограничиваемое синхротронными колебаниями. Для времени жизни пучка, около десяти часов, равновесная фаза должна составлять примерно 50 град. При

этом апертура сепаратрисы синхротронных колебаний составляет 0,5 %, что достаточно для инжекции электронного пучка их синхротрона с энергетическим разбросом 0,1 %.

В таблице 5 приведены основные параметры ВЧ системы накопительного кольца.

	Таблица 5
Потери энергии за оборот	4,05 МэВ
Потери энергии в вигглерах и ондуляторах до	4 МэВ
Циркулирующий ток	300 мА
Равновесная фаза	50 град.
Мощность, уходящая в пучок	3,2 мВт
Полное сопротивление	7,5 МОм
Пиковое напряжение	175 кВ
Мощность, уходящая в стенки	245 кВт
Кратность радиочастоты	2546
Частота радиочастоты	466,6 мГц
Число резонаторов	60
Полная мощность радиочастоты	3,45 мВт
Мощность радиочастоты	44 кВт

Как уже отмечалось, размещение резонаторов предполагается компактно установить в секторе больших свободных промежутков кольца.

3.5. Фотонные пучки

Исходя из возможностей существующей территории института, предполагается первоначально создать 24 канала фотонных пучков, размещенных в малых свободных промежутках кольца с помощью

вигглеров и ондуляторов длиной не более 7 м. Пучки фотонов для прикладных исследований будут выводиться в экспериментальные залы треугольной конфигурации в плане с катетами 24 x 15 м ($\Phi I = \Phi 24$ см. рис. 5). Кроме того, предполагается установить в одном из двух больших прямолинейных участков (2x160 м) вигглер длиной 60 м, пучок которого будет выводиться в экспериментальный зал № 36. Вывод первичных пучков будет осуществляться в экспериментальные залы № 34-36.

Определим эффективность η использования фотонного комплекса, как отношение полезно используемой мощности излучения пучка к полной мощности излучения в кольце. Этот параметр зависит только от амплитуд магнитных полей и длин магнитов:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\sum H_0^2 L_0}{\sum H_B^2 L_B}}$$

здесь H_0 - амплитуда магнитного поля в ондуляторах и вигглерах, излучение в которых используется потребителем, L_0 - длина магнита, H_B и L_B - соответствующие величины для поворотных магнитов.

В таблице 6 приведены значения мощности $W_{0\text{н}}$ потерь пучка на ондуляторное излучение при энергии электронов в кольце 7,5 ГэВ и токе 300 мА, амплитудах поля ондуляторов (вигглеров) 1 кГс, 5 кГс, 10 кГс, длинах 7 м и 60 м, а также суммарное значение мощности, теряемой на всех ондуляторах и вигглерах, суммарная длина которых составит 350 м. В последней колонке приведены значения параметра эффективности в случае, когда излучение в поворотных магнитах не используется.

Таблица 6

H_0 (кГс)	7	60	350	
I	1,5 кВт	12,6 кВт	75 кВт	0,05
5	37,5 кВт	321 кВт	1,87 кВт	0,59
10	150 кВт	1,3 мВт	7,5 мВт	0,65

Из таблицы 6 можно определить, что полная мощность ВЧ, уходящая в пучок, например, при среднем значении амплитуды магнитных полей всех ондуляторов и вигглеров, равном 5 кГс, составит $W = 1,87/0,59 = 3,87$ мВт.

Значение яркости "В" излучения в 60-метровом ондуляторе, устанавливаемом в большом промежутке кольца при амплитуде поля $H_0 = 1$ кГс, длине периода 4 см (что соответствует излученному фотону с длиной волны 1А, или энергией 12,4 кэВ), токе 300 мА, эмиттансах пучка $\epsilon_r = 4 \cdot 10^{-12}$ $\epsilon_z = 1 \cdot 10^{-3}$ составит

$$B_I = 3 \cdot 10^{16} \left(\frac{\text{фотон}}{\text{сек м}^2 \text{ мрад}^2 0,1\% \epsilon W} \right)$$

где (ϵW) - ширина полосы пропускания, а при амплитуде поля 5 кГс

$$B_5 = 1,5 \cdot 10^{19} \left(\frac{\text{фотон}}{\text{сек м}^2 \text{ мрад}^2 0,1\% \epsilon W} \right)$$

что несколько превышает значения яркостей, которые предполагается излучить на вновь создаваемых или проектируемых аналогичных установках [7-5].

§ 2.6. Режим одновременного вывода электронных и фотонных пучков

Как уже отмечалось, отличительной особенностью предлагаемого проекта является возможность одновременного вывода электронных и фотонных пучков. При этом в течение нескольких секунд в большом кольце накапливается ток порядка 300 мА (число частиц 10^{13}) с энергией до 7,5 ГэВ.

Для равномерного заполнения накопительного кольца вывод из синхротрона осуществляется однооборотом в течение семи его циклов ускорения. Используя систему из трех септумов с возрастающим полем и трех быстрых кикеров, эффективность однооборотного вывода частиц можно довести до 95 %.

Тракт транспортировки должен обеспечить при выбранном взаимном расположении синхротрона и растяжителя поворот электронного пучка на угол порядка 40 град., для чего на тракте устанавливаются 6 заворачивающих магнитов длиной 2 м и полем 1,5 Т. Кроме того, для сшивания фазовых траекторий по горизонтали и на плоскости синхротронных колебаний на тракте будут установлены не менее шести квадрупольных линз.

Для ввода в растяжительное кольцо равновесная орбита бампится таким образом, чтобы часть аксептанса оказалась в фазовой плоскости горизонтальных колебаний в точке ввода электронного пучка. После ввода частиц бамп снимается и частицы за счет радиационного затухания группируются вокруг равновесной орбиты. После полного радиационного затухания поперечных колебаний эмиттанс циркулирующего пучка достигает величины порядка $\epsilon_r = 4 \cdot 10^{-2}$ мм мрад, что по сравнению с начальным эмиттансом

инжектированного электронного пучка из синхротрона (~ 5 мм мрад) почти на два порядка меньше. Это обеспечивает, как уже отмечалось, генерацию в большом ондуляторе длиной 60 м и полем 0,5 Т фотонных пучков с яркостью до 10^{19} фот/мм² мрад² мА 0,1 % ϵ_W и энергией 12 кэВ.

Поскольку за расчетное время $\tau_r = 9,5$ мсек амплитуда поперечных колебаний за счет радиационного затухания в большом кольце спадает в e раз, время полного радиационного затухания можно оценить $\tau_o \approx 25$ мсек.

После накопления основного пучка для генерации СИ начинается процесс использования накопителя в качестве растяжителя пучков синхротрона. Для этого в конце каждого цикла ускорения в синхротроне осуществляется многооборотный резонансный вывод (примерно в течение 7-21 оборотов пучка в синхротроне), что приводит к вводу в накопительное кольцо более широкого пучка с эмиттансом примерно в 10 мм мрад.

Медленный равномерный вывод введенного электронного пучка из накопителя в течение 20 мсек предполагается осуществить на резонансе третьего порядка. Как известно [13], вблизи резонанса третьего порядка и при наличии возмущающей секстипольной компоненты магнитного поля на фазовой плоскости горизонтальных колебаний выделяются устойчивая область правильной треугольной формы и неустойчивые области, разделенные сепаратрисами. Площадь устойчивой области определяется близостью частот бетатронных колебаний к точному резонансу ($\nu_r = n/3$) и "эффективной" силой секстиполя. Причем в начале процесса вывода площадь треугольной устойчивой области должна значительно превышать эмиттанс

накопленного пучка и быть меньше рабочего аксептанса камеры на величину, определяемую шагом заброса частиц в выводной септум накопителя. С приближением частоты бетатронных колебаний к точному резонансу устойчивая область сужается. Частицы начинают двигаться к ношу септум магнита (покидать устойчивую область) с момента, когда площадь устойчивой области становится равной большому эмиттансу вновь введенного пучка.

Таким образом, в рассматриваемом режиме работы в устойчивой области находятся в течение времени между инжекциями два пучка: накопленный с малым эмиттансом ϵ_1 для генерации СИ и растягиваемый с большим эмиттансом ϵ_2 для непрерывного вывода. Тогда, изменяя в течение времени между инжекциями близость частоты $\Delta\nu$ до точного резонанса от начального $\Delta\nu_1$ (соответствующего условию начала вывода частиц растягиваемого пучка до конечной величины $\Delta\nu_2$, которое не доходит до значения $\Delta\nu_3$), соответствующего условию начала вывода частиц уже накопленного пучка, будет реализован режим одновременного вывода электронных и фотонных пучков. При этом необходимо подчеркнуть, что указанное смещение частоты бетатронных колебаний не сказывается на накопленном пучке, поскольку его эмиттанс в течение всего процесса остается меньше площади стабильной треугольной области. Отметим также, что число частиц выводимых из синхротрона в каждом цикле ускорения составляет $5 \cdot 10^{11}$, что приведет к колебаниям интенсивности фотонных пучков, не превосходящих 5%. Такие колебания интенсивности фотонных пучков представляются вполне приемлемыми для большинства прикладных исследований. Эффективность вывода растягиваемого пучка оценивается примерно

70 %, поскольку площадь треугольника уменьшается только до эмит-
танса накопленного пучка, что приводит к невозможности полного
использования всего введенного пучка в каждом цикле. С другой
стороны, это имеет и положительный эффект, так как неиспользо-
ванные частицы могут обеспечить "подпитку" накопленного пучка,
что существенно увеличит время его жизни.

В заключение можно отметить, что в настоящее время в ЕРФИ
осуществляется проработка инженерных вопросов и подробная раз-
работка физических основ и технического проекта создания пред-
лагаемого накопительно-растяжительного кольца (НРК).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агбалян Ю.Г., Алиханян А.И. Ереванский электронный синхротрон на энергию 6 ГэВ. Труды Международной конференции по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1963, с.236.
2. Амадуни А.Ц., Бадалян Э.А., Барышев А.И., Бартапетян и др. Проект модернизации электронного синхротрона Ереванского Физического института. Труды V Вс.совещания по ускорителям заряженных частиц. Москва, 1977, ч.2, с.213.
3. Amatuni A., Aleksanian P., Avakian R., Balian G., Baryshev A., Babaiian A., Bayatian G. The Prospects of Improvement and Development of Accelerator at Yerevan Physics Institute, EPAC V1, 1988, p. 305.
4. Гладких П.И., Гончар В.Ю., Григорьев Ю.Н. и др. НР-2000. Накопитель-растяжитель пучка линейного ускорителя электронов ХРТИ/Препринт ХФТИ 90-22. Харьков/ХФТИ, 1990, с.34.
5. Беловинцев К.А. и др. Препринт 88 ФИАН им.Левбедева.Москва 1984.
6. Crunder H.A. et al. Proceedings of the 1987 IEEE Particle Accelerator Conference, 13, (1987).
7. Shenoy G. and Moncton D. An Overview of the Advanced Photon Source. Nucl.Inst.Meth.,1988,v.A266,p.38-43.
8. Haensel R. The European Synchrotron Radiation Facility, Nucl.Inst.Meth.,1988, v.A266, p.68.

9. Hara M., Be S., Nagaoka R., Sasaki S, Wade T. and Kamitsubo H. Storage Ring Design for STA SR Project - in Proc. of the 1988 IEEE Particle Accel.Conference, 1990, v.1, p.476-479.
10. Husman D. et. al. ELSA, a Stretcher and Post Accelerator for the Bonn 2. 5GeV Electron Sync. IEEE Conf. on Part. Ac., New Mexico, 1983.
11. Никогосян В.Ц. и др. Суперциклический синхротрон-стретчер. Препринт ЕВМ -1233(19)-90, Ереван, 1990.
12. Nanoukian R. Lattice Layout for a 6GeV Separate Function Electron Synchrotron at Yerevan, Report, DESY, August, 1988.
13. Симосян Х.А. Новые аспекты теории резонансного вывода частиц из синхротрона. Препринт ЕВМ-III4(77)-88, Ереван, 1988.
14. Амагуни А.Ц., Лазиев Э.М., Нагорский Г.А., Петросян М.Л. и др, ЭЧАЯ, 1989, т.20, вып.5, с.1246.

Рукопись поступила 6 марта 1991 г.

The address for requests:
Information Department
Yerevan Physics Institute
Alikhanian Brothers 2,
Yerevan, 375036
Armenia, USSR

А.Ц.АМАТУНИ, Р.О.АВАКЯН, А.З.БАБАЯН, А.И.БАРЫШЕВ, Г.Л.БАЯТЯН,
Г.А.ВАРТАПЕТАН, К.Ш.ЕГИЯН, Э.М.ЛАЗИЕВ, Г.А.МАРТИРОСЯН,
В.Ц.НИКОГОСЯН, А.А.ОГАНДЖАНИЯН, К.А.САДОЯН, Х.А.СИМОНЯН,
А.Р.ТУМАНИЯН, Р.В.ТУМАНИЯН, В.И.ЦАКАНОВ

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЕРЕВАНСКОГО ЭЛЕКТРОННО-ФОТОННОГО
КОМПЛЕКСА

Редактор Л.П.Мукаян

Технический редактор А.С.Абрамян

Подписано в печать

Формат 60x84/16

Офсетная печать. Уч.изд.л.

Тираж 299 экз. Ц. к.

Зак.тип.№

Индекс 3649

Отпечатано в Ереванском физическом институте
Ереван 36, ул.Братьев Аликханян, 2



ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ