

С 345
К-142
Б2-9-5176.

Казанский Г.С.



+

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б2-9-5176

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 1970

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория высоких энергий

Г.С.КАЗАНСКИЙ

Б2-9-5176

СЗ45
К-142

"ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОВРЕМЕННОГО
РАЗВИТИЯ УСКОРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ".

(Обзор материалов VII Международной конференции
по ускорителям элементарных частиц, проходившей
в г.Ереване в сентябре 1969 года)

ВУЗОВСКОЕ ПОСЛУЖИЕ
КАЗАНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
№ 11/100 1970 г.

г.Дубна

1970 года

Объединенный институт
высоких энергий
Библиотека

С.Ф. 2969

СОДЕРЖАНИЕ ОБЗОРА

1. Некоторые задачи физики высоких энергий и теории элементарных частиц.	стр. 5
2. Встречные пучки и некоторые проблемы	стр. 6
3. Получение большой интенсивности на Серпуховском ускорителе	стр. 8
4. 0 " SLAC "	стр. 9
5. Корнельский ускоритель (США)	стр. 9
6. Ускоритель на 200 Гэв (Батавия США)	стр. 10
7. CERN	стр. 11
8. Кибернетический ускоритель на 1000 Гэв	стр. 12
9. Электронный синхротрон <i>NIKNA</i> (Англия)	стр. 13
10. Коллективный метод ускорения (Беркли США)	стр. 13
11. Коллективный метод ускорения (ОИЯИ СССР)	стр. 14
12. Усовершенствование УЭЖ (Беркли США)	стр. 15
13. Дискуссия	стр. 15
14. Эффекты больших токов в ускорителях (Брукхейвен США)	стр. 15
15. О поляризации пучков	стр. 16
16. К вопросам модернизации. Направления и некоторые данные	стр. 17
17. Применение вычислительной техники для управления ускорителями.	стр. 18
18. Ферриты в автоматически перестраиваемом резонаторе	стр. 19

19. TO выводе пучка частиц на физический эксперимент	стр. 20
20. Ускорение тяжелых ионов	стр. 28
21. Новые устройства на синхротроне "Сатурн" (Франция)	стр. 29
22. Отдельные замечания	стр. 30

В в е д е н и е .

Обзор содержит краткие конспекты основных проблемных докладов и обобщенные автором заметки по отдельным задачам ускорительной техники, на основании материалов сообщений из равных лабораторий мира, представленных на Международную конференцию по ускорителям элементарных частиц, происходившую в г.Ереване (СССР) в сентябре месяце 1969 года.

I. Некоторые задачи физики высоких энергий и
теории элементарных частиц.
(ИТЭФ г. Москва Л.Б.Окунь)

Изложить проблемы физики высоких энергий в двадцатиминутном докладе, задача поистине достойная места проведения конференции - Всесоюзная спортивная база, однако, ряд вопросов по основным важным направлениям можно наметить.

Существует три рода частиц: 1) Фотон (одна); 2) Лептоны (8 частиц); 3) Адроны (около 200 частиц) без учёта семи барионов.

На первый взгляд, имеет место довольно внушительное количество носителей информации о процессах, происходящих в микромире. Однако всего этого недостаточно для построения законченной теории элементарных частиц.

Исследования частиц ведутся по классам взаимодействия:

1. Электромагнитные взаимодействия - фотоны.
2. Электромагнитные и слабые взаимодействия - лептоны.
3. Электромагнитные, слабые и сильные взаимодействия - адроны.

Какие же задачи в настоящее время стоят перед физикой высоких энергий и насколько удовлетворяется их решение, имеющимся диапазоном энергий ускорителей заряженных частиц?

Одна из задач - проверка основных положений квантовой электродинамики (электромагнитные и слабые взаимодействия).

Следует заметить, что теория электромагнитных взаимодействий достаточно хорошо разработана. Этого нельзя сказать о слабых взаимодействиях. Слабое взаимодействие (по эффекту) растет с энергией E и современных уровней энергий недостаточно для окончательных фундаментальных исследований в этой области.

Предполагается (теория), что при энергиях ~ 300 Гэв, слабые взаимодействия должны перейти в сильные (уменьшается расстояние между частицами), поэтому физики с нетерпением ждут установок с большими энергиями (500–1000 Гэв).

Интересна задача исследования лептонов и их взаимодействия.

Например: 1) лептон — лептон; 2) лептон — фотон, т.е.

$$\int_{\omega}^e = W$$

— это условная запись лептонного тока (e) при слабом взаимодействии (ω). (W) — здесь, либо новая частица, либо новый эффект.

Теория указывает на существование 36 лептонных токов. В располагаемом исследовании диапазоне энергий, их обнаружено пока только два.

Остается нерешенной — задача странности J — мезона.

И, наконец, поиски новых частиц. Нет ещё примерно 200 частиц, пока не обнаружено ещё 27 многозарядных частиц (а они должны быть).

А есть ли кварки? Их ^{искали} в морской воде, в медузах, в Серпухове...

На все эти вопросы должны ответить высокие энергии. Поиск фундаментальных частиц, античастиц, поиск силы, ответственной за нарушение CP-инвариантности — это пути к завершению теории элементарных частиц.

Главные методические вопросы: асимптотика и экстремальное разрешение.

2. Встречные пучки и некоторые проблемы.

(Будкер. ИЯФ СО АН СССР).

Необходимы высокие энергии в центре масс. В ускорителях с неподвижной мишенью по отношению к реакции, возникающей в результате взаимодействия, исследователь движется со скоростью света, тогда

как при сталкивающихся пучках исследователь находится в системе центра масс. Сравнительная легкость получения больших энергий при столкновении пучков указывает на перспективность применения таких ускорительных комплексов.

$$\varepsilon_{\text{реал}} = \sqrt{\frac{2mc^2}{\varepsilon_{\text{вир}}}} \cdot \varepsilon_{\text{вир}}$$

Важный параметр - светимость

$$L = \eta \frac{N_1 N_2}{S T}$$

где N_1, N_2 - число частиц в одном и втором сгустке,

η - коэффициент взаимодействия,

T - время взаимодействия,

S - сечение взаимодействия.

Наиболее активные работы по встречным пучкам проводятся в Новосибирске и Стенфорде.

Существуют параллельные проекты электрон-позитронного ускорителя на 100 Гэв для решения задач электродинамики, поиска ρ - мезона и решение загадки μ - мезона. Нужны лептонные взаимодействия на очень больших энергиях. Сложность (особенно для ускорителей с неподвижной мишенью) состоит в том, что с возрастанием энергии падает формфактор, так что слабые взаимодействия проще исследовать на встречных пучках. Проблема плотности пучков должна решаться за счёт создания накопителей с большим N (300-400 тыс.гс), что можно осуществить на безжелезных синхротронах. Перспективно накопление, например, μ - мезонов и использование их во встречных пучках. Разгадка μ - мезона там! Решение задачи бунчировки пучков большой плотности методом "электронного охлаждения" даёт новую силу накопителям. В конце 1970 года такая установка будет осуществлена в Новосибирске. Современная теория, новые методы ускорения и современный уровень техники разрешает в ближайшие 10-20 лет иметь энергии частиц $\sim 2 \cdot 10^{15}$ эв. Но проще получить сталкивающиеся пучки с энергией 1000 Гэв. Энергия в ц/м

будет $\sim 2 \cdot 10^{15}$ эв, но достижение её гораздо проще и экономичнее.

3. Получение большой интенсивности
на Серпуховском ускорителе.

(НАУМОВ, ИФВЭ, Серпухов)

Решены следующие задачи:

1. Увеличение тока инжектора до 100 мА
2. Улучшение согласования СФ \rightarrow ЛУ, Эмитанс -1,75 см/мрад
3. Применение дебанчера на время инжекции.
4. Корректировка поля инжекции.
5. Снижение скорости нарастания магнитного поля на 30%.
6. Коррекция орбиты.
7. Коррекция частоты свободных колебаний (скомпенсирован кулоновский сдвиг).

Рабочая интенсивность при 76 Гэв $\sim 1 \cdot 10^{12}$ р/м. Предполагается при более тщательной настройке получить $5 - 6 \cdot 10^{12}$ р/м

Обнаружены следующие эффекты:

1) При I_i - 100 мА, нагрузка резонаторов. Подводимая мощность в/ч возросла в 2 раза.

2) При отклонении траектории движения пучка на 2 мм (изменения радиуса ускорения) размер пучка увеличивается вдвое.

Другие данные:

Осуществлен "стол" магнитного поля на $H = 12 \cdot 10^3$ эрстед - длительность может быть сделана $\sim 1,5$ сек. Равномерность "стола" $\sim 5 \cdot 10^{-4}$. Стабильность уровня обеспечивается методом компарирования аналогового сигнала H с прецизионным заданным уровнем.

Управление "столом"- через B -timer, Абсолютная привязка "стола" по локальному датчику магнитного поля. Аперриодическое затухание переходного процесса в момент перехода в "стол" магнитного поля обеспечивается применением специального фильтра.

4. 0 SLAC

Результаты работы Стенфордского ускорителя.

1. $E = 21,5$ Гэв , 55 мА , $\Delta M = 1\%$

2. Большая плотность тока приводит к кулоновскому расталкиванию. Форма импульса имеет двугорбую форму.

Применение импульсной фокусировки магнитного поля внешним сигналом снижает этот эффект и импульс приобретает колоко^{лос}образную форму.

3. Исследована долговечность мощных к^слитронов и периодичность их замены. Приводится соответствующая статистика, которая определяла эффективность работы ускорителя.

4. Осуществлено ускорение позитронов и прерывистых пучков.

5. Осуществлено управление " $SLAC$ " при помощи управляющей счётной машины РДР-9 (к сожалению, подробного сообщения об этом не было).

5. 0 Корнельском ускорителе (США) .

Стоимость 12 мл. ^{\$} Начато строительство ^в 1963г. В 1968 - ускоритель работал на эксперимент . Запускался ускоритель в 2 этапа:

I этап - получено $E_{max} = 7,0$ Гэв и II этап - $E_{max} = 10$ Гэв .
Штат лаборатории: 45 физиков, из них: 23 студента и 22 доктора .
Частота повторения $F = 60$ гц , $I = 10^4$ а/им.

R установки = 100 метров. $H_{max} = 30$ тэс. 4 ускоряющих станций .

Ускорение осуществляется на 4 гармонике. Частота ускоряющего напряжения $f_{\text{уск.}} = 4 f_{\text{сбр.}}$. Осуществлен режим вывода одного сгустка из 4-х . Корнельский синхротрон предполагается перенести в Аргон и использовать машину как бустер ZGS , а так же для исследования эффектов, связанных с пространственным зарядом. Жизнь медленной машины в большой интенсивности . Частное сообщение: Обнаружен примечательный факт. При ускорении 5а пучков обнаружены ускоренные ионы p-5 Мэв, He - 9 Мэв , N₂ - 20 Мэв .
(возможность ускорения ионов в сильноточных электронных пучках)

6. 200 Гэв ускоритель (Батавия - США) .

Проектирование близко к завершению. Изготовление компонент ЛУ, синхротрона-бустера и магнитов ~~начался~~ ^{начался} в 1969 году . Создан протип источника. Здание и основное кольцо сооружаются . Протоны с энергией 200 Гэв предполагается получить в 1972 году . В это же время будут начаты эксперименты. Земляные и бетонные работы закончены повсеместно, как и сооружение надземных павильонов. На половину установлен бустер ($E = 8 \text{ Gev}$; $\Delta f = 7\% - 25\%$ причём в последнем случае предусмотрено снижение H_c ; $R = 75 \text{ м}$; $J = 1 \cdot 10^{12}$)
Проектирование было начато ускорителя группой в 60 человек. В настоящее время лаборатория имеет 400 человек.

Дополнительные замечания:

1. Бустер не предполагается использовать для физического эксперимента.

2. Создан проект "расщепляющей станции" для вывода пучка (отдельными и групповыми сгустками).

3. Работа без внутренних мишеней.

4. Предполагается создание накопительных колец.

Радиус большого кольца 1 км . Магнитная структура: $\Phi O D O$, магниты разрешают увеличивать H для работы в режиме 400 Гэв .

Апертура 5,1 x 10,2 см и 3,8 x 12,7 см . Шесть прямолинейных встроенных участков $L = 51$ м. $W'_1 = 10$ Гэв . Инжекция и вывод будут осуществлены в одном прямолинейном участке. Φ - тунеля + 3м Система контроля и управление питанием магнита и линз будут осуществлены с применением ЦВМ . Программа работ по большому кольцу рассчитана на 2 года.

Дополнительные данные:

1) Смонтированы и запущены в опытную эксплуатацию: форинжектор

$E = 750$ кэв и 1 секция ЛУ - $W'_{11} = 10,4$ Мэв. Проведены все замеры характеристик на этом этапе .

2) Исследованы возможности достижения $E_{max} = 500$ Гэв .

3) Существует проект получения $E_{max} \approx 1500$ Гэв с большим кольцом, или кольцо на кольце со сверхпроводящими магнитами. Ускоритель на $E = 200$ Гэв будет использован как инжектор.

7. ЦЕРН. Ускоритель на $E_{max} = 300$ Гэв не докладывался.

Проектирование завершается.

8. Кибернетический ускоритель на 1000 Гэв

(РТИ АН СССР) .

Основные данные уже докладывались неоднократно. Дополнительные данные:

1. Бустер в три этапа: I - 6 , II - 10 , III - 18 Гэв .

2. Предполагается разработка 264 ёмкостных датчика с выводом информации с них на ЭВМ . Задачи: а) Управление частотой бетатронных колебаний, регулировка токов гитающих линзы.

б) Управление моделью ФОДО (100 магнитных блоков, 10 суперпериодов)

в) В качестве периферийной машины предполагается использовать машину "Днепр", Главный процессор - М-20 .

3. Получение магнитного поля в зазоре $H = 64 \cdot 10^3$ гс за счёт применения сверхпроводящих магнитов (Переход к энергии $5 \cdot 10^3$ Гэв) .

4. Предложение РТИ АН: - строить кибернетический ускоритель на $E_{max} = 5 \cdot 10^3$ Гэв на международной основе.

5. Этапы: I - 500 Гэв , длительность цикла 2,5 сек ; $E_{бет} = 6$ Гэв ЛУ - 200 Мэв. II - 1000 Гэв, длительность цикла 0,5 сек ;

$E_{бет} = 18$ Гэв , ЛУ - 800 Мэв . III- Работы по переходу к

$E_{max} = 5 \cdot 10^3$ Гэв .

6. Уточненные данные:

а) Поле на равновесной орбите $16 \cdot 10^3$ эрстед .

б) $R = 2080$ м.

в) ЛУ = 800 Мэв.

г) $\frac{\Delta f}{f} = 0,12\%$

д) $t_{зак} = 1$ сек.

е) Частота повтор.цикл. - 20 гц .

9. Электронный синхротрон NINA (Англия) .

В 1969 году на электронном синхротроне предполагается увеличение энергии электронов с 3-х Гэв до 15 Гэв . Увеличение энергии будет достигнуто за счёт создания большого кольца с разнесённым магнитным полем и уменьшенным радиусом кривизны . Разрабатываются в/ч устройства и система выводов с использованием в/ч отклонения .

Дополнительные данные: 1. Предполагается использовать на ускорителе Ae - бетонную радиационную защиту .

2. Будет осуществлена коррекция орбиты через ЭВМ .

3. Для настройки режимов применена ЭВМ с супервизором и световым карандашом .

4. В связи с экономией, кратность повышается до $q = 10$.

5. Окончание работ 1974 г.

10. Коллективный метод ускорения (Беркли США)

(метод коллективных колец)

Преимущество: 1) Большая равновесная энергия V_s (прирост на метр , на единицу длины). 2) Можно ускорять даже нейтральные частицы . 3) Возможность получения больших J ;

Типы: 1) ЛУ - ускорители электронных колец (УЭК) .

2) Ускорение на гребне волны (когерентный метод) .

3) Плазменные методы .

По УЭК - сделано много экспериментов во многих научных центрах мира. Основная проблема - устойчивость плотных колец. В плазменном ускорителе проблема состоит в самостабилизации заряженного сгустка при ускорении его нейтральной плазмой. (Замечание Сесслера: - плазменные бетатроны из-за отсутствия устойчивости себя не оправдали) .Б

Перспективны: 1) Импульсные электронные пучки с мощностью 10^{13} ватт для ускорения ионов.

2) Плазменные волноводы (большие E в малых объёмах, хорошая продольная и радиальная устойчивость, возможность регулировки V_{ϕ}), для когерентного ускорения, т.к. плазма движется

$$\vec{P} = \vec{E} \vec{H}$$

Наиболее интересны работы по ускорению электромагнитными волнами (Харьков, Файнберг).

Еще одно перспективное направление - лазер, для когерентного ускорения. Наибольший практический выход в ближайшее время ожидается в направлении УЭК (Мы на пороге решения проблемы!). Было указано на проблему использования ускоренных пучков УЭК - растяжка пучка, которая пока, к сожалению, не имеет решения, но не является неразрешимой проблемой.

II. Объединенный институт ядерных исследований

(СССР, Саранцев)

Сообщение посвящено результатам и проблемам. Проведен сравнительный анализ с методом сталкивающихся пучков метода УЭК. Практический выход ожидается быстрее от УЭК. Некоторые данные:

1) 1000 Гэв м/б получено без больших экономических затруднений в ЛУ (ЭК) на 10 км длине.

2) E_{max} зависит от плотности электронов сгустка, т.е. силы электрического поля. Для указанного случая достаточно в электронном кольце иметь 10^{14} эл. В ОИЯИ на модели получены первые результаты: 70 Мэв (ускорены ионы азота). Проблемы: 1) Резонанс $\nu_R = 1$. 2) Создание необходимой длины потенциальной ямы при ускорении в спадающем магнитном поле. 3) Компенсация излучения.

Перспективы: 1) Быстрое прохождение резонанса $\nu_a = 1$
2) Применение импульсных магнитных полей в малых объемах (использование криогенной техники). 3) Сверхпроводящие резонаторы в/ч .

12. Усовершенствование УЭК (Беркли) .

I. Предполагается ускорить тяжелые ионы в 1970 г.

Данные ЭИЛУ $N_e = 1 \cdot 10^{12}$; $R = 3,5$ см; $z = 2$ см

$V_s = 12$ МэВ/м f повт. ≈ 10 гц, t имп. ≈ 20 нсек

ΔM - регулируется Проблемы общие для УЭК Добавление проблемы нагрузки резонаторов самим электронным кольцом.

13. Дискуссия : Будкер - Саранцев .

Саранцев: Коллективным методом достаточно просто получить энергию $E_{max} = 2 \cdot 10^{15}$ эв. "

Будкер: " И столкнуть! .. $E_{max} = 2 \cdot 10^{22}$ эв - это больше, чем мог сделать господь бог ! "

14. Эффекты больших токов в ускорителях

(Е.Д.Курант. Брукхейвен. США)

Указаны случаи возникновения нестабильностей под действием объёмного заряда: а) когерентные нестабильности, б) взаимодействие со стенками камеры, в) дефокусировка за счёт наличия ошибок поля H и градиента \dot{H} , n г) возмущение продольных колебаний в результате фазового переброса .

Эффекты, регистрируемые в этих случаях:

1) Изменение частоты бетатронных колебаний и, как следствие, смещение резонансов в рабочую область.

- 2) Дефокусировка пучка.
- 3) Ограничение интенсивности.
- 4) Колебания формы пучка, т.е. нет адиабатического затухания.

Имеет место растягивание пучка по азимуту и соответственно модуляция плотности сгустка, так как фокусирующие силы неизбежно действуют.

Рекомендованные методы борьбы с указанными явлениями:

1) Обратная связь: $V_0 = \varphi(\Delta J(t))$

2) Сдвиг частоты бетатронных колебаний может быть скомпенсирован скачкообразным изменением γ_{tr}

3) Реактивная нагрузка камеры снимается диэлектрическим покрытием, обеспечивающим условие:

$$g = \frac{1}{c} \cdot \beta^2 L$$

C - ёмкость пучок-камера

L - индуктивность камеры .

15. О поляризации пучков (по сообщениям PPS(США); "Сатурн" Франция)

Некоторые замечания:

1) Использование спиновых резонансов. Когерентные спиновые резонансы ведут к поляризации пучков и к изменению направленности поляризации, в то время как некогерентные спиновые резонансы ведут к деполаризации инжектируемых пучков. Вектор начальной поляризации направлен вдоль направления ведущего магнитного поля.

2) Для поляризации пучков используются резонансы связи.

3) На PPS разработан бустер на 75 МэВ $J = 2 \cdot 10^{15}$ р/сек, на котором предполагается отрабатывать эффект поляризации пучков.

4) Работы по поляризации p и d проделаны на "Сатурне" (Фран.)

16. К вопросам модернизации.

Некоторые данные и направления (по ряду сообщений) .

1. Как правило, везде применяют увеличение кратности q , так как при этом получается лучше разрешение по затрате высокочастотной мощности (это особенно важно для электронных ускорителей), улучшение характеристик пучка (уменьшение азимутальных размеров сгустков, что улучшает, в свою очередь, эффективность и дозировку пучка при выводе).

2. На всех ускорителях мира широко внедряются ЭВМ и ЦВМ при управлении режимами ускорения и вывода заряженных частиц. В частности, управление и контроль Линуса (структура: дрейфовые трубки и волновод) на 800 Мэв, осуществляется при помощи ЭВМ.

3. Линейный ускоритель на 2 Гэв (Стенфорд США) выполнен на ниобиевых резонаторах. В 1970 г. предполагается получить $I \cdot 10^4$ имп. с $E = 100$ Мэв . Стоимость 3 млн. 300 тыс. долларов. Стенфордский двухмильный сверхпроводящий ЛУ на 100 Гэв . Некоторые данные:

а) скважность 100% при 25 Гэв и 6% при 100 Гэв ^{б)} мощность пучка $W = 300$ ^{кв}

4. О материалах для сверхпроводящих систем: а) Al при $15^\circ K$ по сверхпроводимости конкурирует с $NbTi$ и пропускает огромной плотности токи.

б) $NbTi$ применяется для изготовления нитей. Нить изготавливается из 100 прядей ($\ell = 0,5$ мм); 2 кг такого сверхпроводника разрешает получать $H = 20$ тыс. гауссов .

5. Лаусон (Чилтон, Англия) предложил создавать сверхпроводящие ускорители на международной основе.

6. Рассмотрен большой вопрос: создание криостата на базе обыкновенной нормальной стали. Стоимость пропорциональна H . Запасенная энергий растет как квадрат радиуса.

6. Управление положением пучка ускоряемых частиц.

На модели кибернетического ускорителя применена управляющая вычислительная машина типа "Днепр" (стоимость 150 тыс. руб.)

Данные: $(8 \cdot 10) \cdot 10^3$ операционных в сек. Память $4 \cdot 10^3$ слов; 1 слово - 29 бит. Имеется 250 аналоговых каналов. Ввод напряжения по 60 каналам. **Время** преобразования 50 мксек. Задача: автоматически регулируется поперечное смещение пучка по заданной программе.

Разработаны две программы: 1) Программа первого оборота .

2) Программа циркулирующего пучка.

На синхротроне НИИЭФА применена ЦВМ, обеспечивающая изменение амплитуды магнитного поля синхротрона по заданной программе и поддерживается точность соответствия сигнала программы с точностью $\pm 1 \cdot 10^{-4}$. Разработаны А-Ц преобразователи. Вся информация представлена цифровым кодом. В основном решаются задачи о стабилизации параметров ускорительной установки. Программой исследований предусмотрена организация выхода на ЭВМ .

В Сакле ("Сатурн") , осуществлено управление замкнутой орбитой в протонном синхротроне (3 Гэв) . Разработан проект управления орбитой для проектируемого 45 Гэв синхротрона с разделенными функциями.

Разработана программа наладки машины. Разработана программа начальной коррекции. Во всех случаях задатчиком информации регулируемого объекта является пучок инжектируемых и ускоряемых частиц. Система автобалансировки магнитного поля предложена представителями Ереванского ускорителя. Доложена теоретическая разработка и результаты эксперимента на 8-ми блоках.

18. Ферриты в автоматически перестраивающихся резонаторах в/ч систем ускорителей.

(РТИ АН СССР, Ф.А.Водопьянов)

Недостатки: 1) Запаздывание в изменении магнитной проницаемости.

2) Уменьшение добротности при быстром намагничивании.

3) Самовозбуждение АПЧ за счёт магнитострикционного резонанса в феррите.

Отсюда: 1) Ограничения на скорость изменения управляющего сигнала.

2) Уменьшение добротности ведет к удорожанию в/ч систем,

19. 0 выводе пучка частиц на физический эксперимент
(по сообщениям из разных лабораторий мира) .

1) Медленный вывод (ЦЕРН) Эффект 90% . Возможен неучёт естественной нелинейности ведущего магнитного поля.

2) Медленный вывод (200 ГЭВ, Батава). Проблемы: а) Большая интенсивность и большая энергия.

б) Большая интенсивность - время взаимодействия мишени.
Разработана система НАЛ с акцентом на медленный вывод.

3. Быстрый вывод (ИФВЭ) - совместная разработка с ЦЕРН.

Некоторые данные:

1. Для точной привязки вывода используется *B - timer*

2. Точность установки зазора септума $\pm 0,1\%$.

3. Допуск на модуляцию (10-20%).

4. Вертикальное сжатие обеспечивается удаленностью рабочей точки от области резонанса.

5. Для вывода используется формагнит и основной (2 сексты - польные линзы).

6. Толщина септума 0,5 мм .

7. Искажение по 29 гармонике .

8. Длительность импульса 1 сек (при частичном выводе - *m* ступков)

9) Применена компенсация кубической нелинейности.

10) При замыкании орбиты, искажается фазовый объём.

11) Необходимо учитывать, что применение линз может вызвать резонансы более высокого порядка.

12) Заданное число банчей выводится в три различных канала.

За один цикл ускорения.

13) Применение двух магнитов, вызвано наличием большой естественной нелинейностью ведущего магнитного поля на больших индукциях.

4. Трехоборотный быстрый вывод (Брукхейвен, США) .

Брукхейвенский синхротрон предполагается использовать в виде бустера для суперускорителя. Работы по трехоборотному выводу велись именно в связи с этим. Возбуждение будет производиться на нелинейном резонансе $\nu_x = 8\frac{2}{3}$ резонансный рост амплитуд будет ограничен введением *октупольных* составляющих в азимутальное распределение поля. Режим рассчитан на ЭВМ. Рассмотрен так же эффект разброса импульсов.

Многokратный и многоканальный вывод (ЦЕРН) .

Применяются подвижные магниты на ускорителе. Создается разнополярное искажение ^кразличным точкам азимута.

Некоторые данные: 1) Эффективность вывода 90-99% - зависит от тщательности настройки.

2) $\frac{\Delta P}{P} = 0,1\%$

3) $\frac{\Delta J}{J_{заг}} \approx (5-10)\%$

Замечания: 1) Эффективность 99% было получено после 6 часовой настройки. 2) При сбросе, как правило, теряется один банч. Применена ЦВМ для контроля режима вывода Регистрируемая информация:

- 1) E_k (энергия вывода) .
- 2) Отклоняющее напряжение U
- 3) Номера банчей N .
- 4) Время вывода T .
- 5) Полярность вывода.
- 6) Последовательность сбросов.
- 7) Логика выбора каналов.
- 8) Логика управления.

Примечание: Управляющее устройство выполнено на модулях.

6. Вывод протонов из бустера кибернетического ускорителя на 1000 Гэв (РТИ АН СССР) .

Разработан магнитный **дефлектор**, выполненный в виде двух медных шин $l = 100$ см, возбуждаемых током $J = 10^4$ а, при этом создается $H = 800$ э, частота следования 20 гц

Применение разрядников в схеме питания нежелательно, так как у них ограниченный срок службы. Частая замена в условиях большого радиационного фона-нецелесообразно. Предложена схема на лампах. Сейчас выпускаются р/л, работающие в управляемом режиме в диапазоне 1-100 мгц . В принципе, при выборе режима управления и подбора элементов схемы возможно получение растянутых импульсов ~ 8 сек .

7. Оптимизация структуры с распределенными функциями с точки зрения вывода (новый проект ФРГ, Кралсруэ, Е-60Гэв)

Некоторые данные:

- 1) Система $FOZO$ с поворачивающимися магнитами $\rightarrow FFZOZO$
- 2) Разработка велась по выбору оптимального положения септума на основе детального расчёта искажений орбиты и поиска точек пере-

сечения сепаратрисы с адмишенсом.

3) Тщательно рассчитывался резонанс.

4) Исследовался N_{Lin} резонанс III порядка $\nu_x = 1/3$

Показано, что этот резонанс лучше, чем целый резонанс.

5) При расчёте на ЭВМ, вводилась картина невозмущенного и возмущенного поля, и исследовалась динамика развития резонанса.

6) Расчёты показывают возможность получения растянутых пучков длительностью \sim нескольких сот. микросек.

7) Принят вариант неподвижного септума.

8) Длительность растяжки регулируется за счёт смещения Q при помощи дополнительных обмоток.

8. Вывод пучка на проектируемом 45 Гэв ускорителе (Сакле, Франция)

Некоторые данные: Кикер и септум в прямолинейном промежутке.

Длина секции в зависимости от энергии:

$$L = \propto (E/e)^{1/2}$$

(Это удобно в структуре с разделенными функциями).

Сравнительная табличка:

E	43 Gev	45 Gev
L	9,54 м	26,3 м

9? Резонансный вывод частиц на беватроне (США)

При расчёте особое внимание уделялось рассмотрению эффектов сильных нелинейностей управляющего поля синхрофазотрона. Проведен анализ зависимости $\omega_{CB} = f(A)$, а так же от искажений синусоиды. Удалось создать экономичную систему управления резонансом малыми возмущениями.

- 1) Используется резонанс $\nu = 2/3$ с учётом N_{Lin} основного ведущего магнитного поля.
- 2) Обнаружено смещение ω бетатронных колебаний из-за основного поля, на 0,1%. Дополнительные возмущения оказались некогерентными.
- 3) Искажения получены синусоидальной формы.
- 4) Эмитанс I см/mrad Соотношение радиального и вертикального эмитанса I/I₀ .
- 5) Эффективность вывода 0,85 во внутрь; 0,67 наружу в среднем выход 0,65 - (эксплуатационный режим).
- 6) Естественная N_{Lin} вошла добавкой к построению фазовой картины резонанса.
- 7) $t_{выв}$ - 100 мсек и зависит только от толщины септума.

10. Генерация вторичных частиц на внутренних мишенях ускорителя ИФВЭ.

Разработана система линеаризации растяжки на "столе", использующая обратную связь по току мишени. Осуществляется управление положением орбиты. Неравномерность $\sim \pm 10\%$ при $T_{раск} \sim 500$ мсек. Работают несколько мишеней на несколько каналов, структуры растяжек - 2³, 100, 150 гц . На "столе" пульсации $3 \cdot 10^{-5}$ на уровне $12 \cdot 10^3$ эрстед T "стола" - 1,5 сек , неравномерность "стола" $4 \cdot 10^{-4}$ Целые резонансы при когерентном смещении пучка проявляются от оси камеры на расстоянии 30 мм внутрь и 17 мм вне от центрального радиуса . N_{Lin} резонанс увеличивает размеры пучка .

11. Одновременное облучение внутренней и внешней мишени (Брукхейвен США).

Разработана система использования пучка частиц в течение длительности "стола" магнитного поля, которая обеспечивает сброс

как на внутреннюю, так и на внешнюю мишень.

Некоторые данные:

1) Медленный вывод осуществляется обычным резонансным способом.
2) Равномерность "стола" и его программное изменение контролируется специальной следящей системой (по пучку). Для выравнивания плотности выводимого пучка, имеется обратная связь по \dot{N} .

3) Отклонения пучка осуществляются созданием амплитуды полуволновой деформации орбиты, регулируя её уровень можно осуществлять дозировку интенсивности в пределах от 0 до 75% (внутри) без снижения эффективности медленного вывода, хотя эмитанс (вертикальный) при этом возрастал примерно в 1,6 раза.

4) Имеющие место потери частиц $\sim 10\%$, вклинки отнесены за счёт уменьшения апертуры камеры при внесении полуволнового искажения орбиты.

5) Две мишени на "столе" работают через цикл (вне, внутрь). Но есть режим двух сбросов в одном цикле на "столе". "Раздвижка" их лимитируется "мертвым" временем коммутатора токов в отклоняющих системах.

6) При одновременной работе, необходимо уменьшать эмитанс.

7) Измерение эмитанса осуществляется I2 -ю аналоговыми детекторами за линзами. Детекторы в виде пластин наклонных к пучку, между ними фольга, на которую подано $U = +60 \text{ В}$. Возникающий ток вторичной электронной эмиссии ($\sim 58 \mu\text{А}$) выводится на счётчики и обрабатывается ЭВМ.

I2. Резонансная раскачка колебаний при медленном выводе

(Ереван)

Используется резонанс :

$$Q = K \pm \frac{1}{3}$$

Усредненный расчёт динамики резонанса производился матричным методом (преобразование фазовых координат), как это сделано в ЦЕРН . Особенность раскачки: $\Delta Q_z = 0,1 \pm 0,2$ и нужно создавать очень большую N_{Lin} поля секступольных линз . Длительность "стола" для Бреванского ускорителя $t_{ст} \sim 1 - 2 \text{ мсек}$

Для создания резонанса установлены секступольные линзы по всему азимуту ускорителя. Кубичная нелинейность

$$Q_{30} = \left(\frac{d^3 B}{dt^3} \right)_0 \quad - \text{компенсируется.}$$

13. Медленный вывод (Брукхейвен США) .

Используется резонанс $8^2/3$. Некоторые данные:

- 1) Длительность вывода $\sim 400 \text{ мсек}$ с модуляцией 40% из-за пульсаций системы питания.
- 2) Эффект, вывода $> 80\%$.
- 3) Расчёту подвергалась картина трансформации фазового объёма через рассеянные поля ускорителя.
- 4) Соотношение (z, z) -эмитажсов
 $2 z_{эз} = z_{эрасч.} ; 4 z_{эз} = z_{эрасч.}$
- 5) $\frac{\Delta E}{E} \cong 0,5\%$
- 6) При осуществлении медленного вывода делается дополнительно дебанчировка пучка в течение 50 мсек (сбой фазы в/ч) .
- 7) Эмитажсы: $z = 0,9 \text{ см/мрад}$; $z = 0,15 \text{ см/мрад}$
- 8) Высокочастотная структура за счёт предварительного выбрасывания части банчей .

14. Вывод при целочисленном резонансе (ЦЕРН) .

Используются две квадрупольные линзы , удаленные друг от друга на расстоянии половины длины волны бетатронных колебаний, что существенно улучшает режим :

1) Меньше зависимость от временных нестабильностей ведущего магнитного поля.

2) Меньше разброс импульсов частиц в пучке.

3) Равные отклонения невозмущенных равновесных орбит не влияют на конфигурацию радиальных фазовых плоскостей.

4) Септум выполнен из вольфрамовых проволочек.

15. Многokратная, многоканальная система быстрого вывода синхрофазотрона (ЦЕРН) .

Три выведенных пучка за цикл. Программирующая система осуществляет дозировку банчей в каждом сгустке и хронирование энергии и выбор канала.

Некоторые данные:

1) Эффективность вывода 97%, (регистрируется при помощи флажка перед септумом магнита).

2) Измерение потерь ~~пучка~~ пучка при помощи аргоно-сцинтилляционных камер. Данные потерь - 1,5 -2% в канале, 0,5-1,5% на септуме.

3) Для медленного вывода используется $Q = 6,25$, эффективность вывода $\sim 80\%$. При этом имеет место довольно широкая полоса не-/прозрачности.

Данные по системам вывода сведены в Таблицу (см. Приложение I)

20. Ускорение тяжелых ионов.

Высокоинтенсивный бустер на энергию 75 Мэв разработан на PPS в связи с планом ускорения тяжелых частиц на протонном комплексе синхрофазотрона (3 Гэв).

Бустер предполагается разместить между инжектором (VdG) и основным кольцом PPS. Бустер позволит: 1) получить $J = 2 \cdot 10^{13}$ р/сек (сейчас $J = 1 \cdot 10^{12}$ р/сек - ограничено объёмным зарядом), 2) инжектировать поляризованные протоны и многозарядные ионы. В основном кольце будут ускорены тяжелые ядра до $E = 1$ Гэв/нукл. Для этого сооружения жается металлокерамическая камера 6 см x 18 см, которая позволит получить давление ниже 10^{-8} мм Hg. Получен пучок ускоренных дейтонов с энергией 600 Мэв, (использован однократно закон изменения частоты для протонов). Однако, в конце 1969 будут получены дейтоны с $E = 2,3$ Гэв и He^{++} $E = 4,6$ Гэв. В дальнейшем предполагается осуществить строительство большого алюминиевого бустерного кольца с полем 45 кгс и энергией 10-15 Гэв, PPS ^{будет} инжектором.

Строительство бустера дешевле, чем сооружать ЛУТИ

Схема: | V d G | → | бустер | → | PPS | - гораздо надежней и удобней в эксплуатации. Дважды "ободранный" гелий получался двойным конвертированием. Подготовлена аппаратура для ускорения C и N₂.

Состояние PPS на данном этапе:

1. Потери частиц как для протонов, так и для дейтонов 50%.
2. Вакуум $2 \cdot 10^{-6}$ мм Hg
3. 4 резонатора (четвертая кратность).
4. 4-5 экспериментальных установок работают одновременно.
5. $J_{puc} \sim 5 \cdot 10^{10}$ р/с Частота повторения - 20 гц с растяжкой пучка 8 макс. и скважностью 10% (без учёта в/ч структуры).
6. Наносекундная структура банчей.

7. При медленном выводе пучок фиксируется в пятно 4 x 4 мм на расстоянии 30 м от ускорителя.

8. $\eta_{\text{чек}} = 90\%$.

9. "Стол" H-50 мсек с равномерностью 0,001%, при 10 циклах в секунду.

10. Спектр ± 100 кэв .

II. Пути увеличения интенсивности: а) Сепаратрисса специальной формы (не Sin питание в/ч) б) Повышение энергии VdG с 3 до 4 Мэв . в) Коррекция поля инжекции. Ожидается выигрыш в 3 раза

IX.

21. Новые устройства на синхрофазотроне САТУРН (Франция).

Усовершенствование состоит в следующем:

1. Создание линуса на 20 Мэв вместо " VdG " на 4 Мэв .

Получен пучок $J = 15 \text{ мА}$ с сформированным эмитансом $2 \cdot 10^{-6} \text{ рэ/м}$ с энергетическим разбросом ± 150 кэв . Предполагается применение дебанчера на время 600 мкс .

2. Получены дейтоны с энергией 2,3 Гэв . Последовательность в работе в/ч систем следующая: в начале I резонатор в/ч настраивается на III гармонику и при достижении 180 Мэв выключается, остальные резонаторы в этот момент включаются на второй гармонике. При этой коммутации теряется 30% интенсивности. Полученный дейтонный пучок обладал интенсивностью $J_d = 2 \cdot 10^{11} \text{ д/м}$.

Дополнительных потерь, по сравнению с протонами, при захвате не наблюдалось. Коммутация в/ч осуществлялась на "столе" магнитного поля. Этим и обуславливались малые потери при перезахвате.

3. Проводятся работы по генерации поляризованных пучков частиц (протонов и дейтонов). Экспериментально получены пучки порядка нескольких десятков микрсампер. Обнаружено, что поляризованные пучки протонов деполаризуются при энергиях 0,7 и 1,7 Гэв ,


вероятно, за счёт некогерентных возмущающих факторов, так как когерентные возмущения приведут только к повороту плоскости поляризации. Возможно это прохождение "длинных" нелинейных резонансов, так как при быстром, скачкообразном переходе этих энергий деполяризации не происходит.

4. Предполагается развитие программы исследования высокоэнергетических тяжелых ионов .

22. Замечания по высокоинтенсивному бустеру ЦЕРН на 800 Мэв
($J=10^{13}$ р/м . Бустер 4-х дорожечный) :

- 1) Нагрузка пучком в/ч станций . Потеря мощности составит ~ 20%.
- 2) Создан регулируемый усилитель для компенсации просадки мощности в/ч .
- 3) При нагрузке пучком резонаторов в/ч в сильной степени начинают сказываться все флуктуации в частоте и напряжении ускоряющей системы, которые приводят к нежелательным коллективным эффектам.
- 4) Ожидаемый эмитанс: вертикальный 40 мм/п , радиальный I-I30
Согласование эмитанса и аксептанса весьма важно при больших интенсивностях. Необходимо применение специальных магнитных формирующих устройств работающих в режиме оптимизации.
- 5) Оптимальный выбор V_0 по контролю формы пучка .

Примечание: бустер кибернетического ускорителя на 100 Гэв, (на 18 Гэв) предполагается сделать двухдорожечным и применить сверхпроводящие резонаторы.


г. Казанский Г.С. г.

Приложение I
(продолжение)

I	2	3	4	5	6	7	8	9	Примечания
7. Карlsruэ (ФРГ)	AGS	60	300-500мсек	-	-	$v_x = I/3$	Fr ₂₀₀₀	-	Разработка. Проект. Система F ₀ с 8000р. магнитами.
8. Беркли (США)	PS	6,3	100	85% внутр. 67% вне	-	$v_x = 2/3$	$I_{cm}/m_{зад}$ $\frac{z}{z} = I$ $= I\theta$	-	Учтена ествств. нели- нейность ведущего маг- нитного поля, как добав- ка к рвз. 2/3
9. ИФФЭ СССР	AGS	70	500	-	10	-	Вывод на внутр. мишень	-	Вывод на несколько каналов в/ч структура: 25, 100, 150 гц. стол=1,5 сек
10. Брукхейвен (США)	AGS	33	100	80	40%	1) Полуволн. деформац. орбит 2 2) $v_x = 8 - \frac{3}{3}$	Вывод на внутр. мишень	Равномер. $4 \cdot 10^{-4}$ Пульс. $2 \cdot 10^5$ Для выравнивания плот- ности. Обратная связь Применен дебанчер на столе.	
11. АРУС СССР	электр. AGS	6,0	(1-2)	-	-	$Q = k \pm I/3$	-	-	Теоретическое исследование
12. ЦЕРН Женева	AGS	27	быстрый вывод медленный	Вывод задан. числа банчей	-	$Q = 6,25$ для медлен. вывода	-	-	Потери частиц при выво- де 1) 1,5-2% в канале 2) 0,5-1,5% на септуме