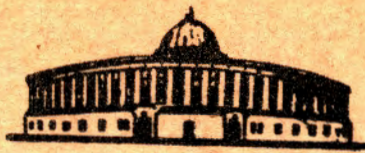


18
Ф-68

746



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Э. Фишер ^{x)}

746

МОДЕЛЬ НАКОПИТЕЛЬНОГО КОЛЬЦА
ДЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 2 МЭВ

Сообщение на научном семинаре
Лаборатории высоких энергий 7 апреля 1961 года

^{x)} ЦЕРН, Женева

В В Е Д Е Н И Е

У Европейской организации по ядерным исследованиям, которую принято кратко называть ЦЕРН, много общего с Объединенным институтом в Дубне, но тем не менее есть и черты, различающие их.

Одной из характерных особенностей ЦЕРНа является то, что его научная программа посвящена исключительно физике высоких энергий. Кроме того, у ЦЕРНа меньше сотрудников – немного больше тысячи, и меньшая территория – 40 гектаров. Другая разница состоит в том, что отделы ЦЕРНа не так независимы друг от друга, как лаборатории Объединенного института. Насколько я понимаю организацию Объединенного института, каждая лаборатория могла бы существовать отдельно. Не так у ЦЕРНа.

ЦЕРН разделен на 12 отделов. У каждого отдела есть своя довольно специализированная задача. Среди них есть Отдел протонного синхротрона и Отдел синхроциклотрона, которые обслуживают и обеспечивают работу ускорителей на 25 Бэв и на 600 Мэв, формируют пучки и выводят их в измерительный павильон. Сами же эксперименты выполняются другим отделом, Отделом ядерной физики. Крупная аппаратура, необходимая для экспериментов, такая как отклоняющие магниты, квадрупольные линзы, пропановая пузырьковая камера, черенковские счетчики и т.д. строятся Отделом аппаратуры ядерной физики. Кроме того, есть Теоретический отдел, который, в основном, должен заниматься физикой элементарных частиц, и Отдел по обработке данных и документов, в который входит сектор электронных счетных машин, группа обработки снимков и библиотека. Как вы видите, все отделы связаны между собой. Работа всего ЦЕРНа – это совместная работа всех отделов.

1104/5
48

Я лично являюсь членом Отдела разработки ускорителей, возглавляемого проф. Шохом. Целью нашего отдела является изучение новых принципов ускорителей частиц, а также изучение новых принципов экспериментальной аппаратуры, используемой в физике частиц высоких энергий. Иными словами, целью нашего отдела является разработка технических приспособлений для физических экспериментов, которые будут проводиться ЦЕРНом в дальнейшем.

Отдел разделен на следующие три сектора:

- 1) Сектор по исследованию кольца для накопления электронов с энергией 2 Мэв,
- 2) Сектор по созданию высокочастотного сепаратора,
- 3) Общий сектор.

Я работаю в I^М секторе, и, в основном, буду говорить о накопительном кольце. Но сначала я кратко остановлюсь на работе двух других секторов.

Одной из проблем экспериментальной физики высоких энергий является разделение пучков сверхрелятивистских частиц, у которых импульс и заряд одинаковы, но массы покоя различных. Одним из возможных решений этой проблемы является высокочастотный сепаратор, который очень похож на линейный ускоритель. Но одним из основных различий является то, что высокочастотное напряжение направлено перпендикулярно пучку. Если все параметры налажены правильно, то отклоняться будут только частицы в малом интервале массы, а все другие частицы сохраняют свое направление. Этот вид сепаратора изучается и будет построен нашим вторым сектором.

Третий общий отдел включает в себя несколько менее крупных экспериментальных задач, как, например, маленький бетатрон, предварительные опыты на искровой камере и на сверхзвуковой пузырьковой камере.

НАКОПИТЕЛЬНОЕ КОЛЬЦО ДЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ В 2 МЭВ

Теперь я вернусь к I-му сектору, в котором строится накопительное кольцо для электронов в 2 Мэв. Работой руководит Келл Йонсон и Кейт Зильвесхун. Научными сотрудниками являются П.Кирштейн, М.Пентц, А.Сузини, Ф.Фергер и Э.Фишер. Проектирование началось год тому назад и мы рассчитываем, что запустим машину в первой половине 1962 г.

Накопительное кольцо является моделью, предназначенной для изучения принципа сохранения и накопления последовательных сгустков частиц в кольцевой вакуумной камере с магнитным направляющим и фокусирующим полем, постоянным по времени.

Эти исследования представляют довольно большой интерес, так как предполагается, что только при помощи накопления пучков будет возможно получить такую высокую плотность частиц, которая будет необходима для проведения экспериментов со встречными пучками.

Как Вам известно, со встречными релятивистскими пучками возможно получить гораздо большие энергии в системе центра масс, чем с одним пучком ускоренных частиц, направленных на мишень.

Однако процесс накопления сам по себе полон довольно трудных проблем, часть которых может быть решена только при помощи опытов.

Следует заметить, что эксперименты со встречными пучками не являются единственным случаем применения накопительного кольца.

Обратимся, например, к трудностям, встречающимся в экспериментах со счетчиками на обычном синхротроне, который создает короткие по времени импульсы частиц, когда во время импульса собы-

тия следуют друг за другом быстрее, чем может сосчитать счетчик. Эта проблема могла бы быть разрешена при помощи ускорителя с накопительным кольцом, где все частицы, уходящие из пучка из-за рассеяния на газе или потерь на излучение попадали бы на мишень и создавали бы там постоянный пучок вторичных частиц. Более того, накопительное кольцо может быть использовано, например для отделения антипротонов от других отрицательно заряженных, но распадающихся частиц. Было бы, конечно, очень дорого строить накопительное кольцо только для последних упомянутых выше целей. Накопительное кольцо будет не на много дешевле, чем синхротрон с такой же энергией. Но если бы накопительные кольца уже существовали для экспериментов со встречными пучками, то их можно было бы применять и для других целей.

Инжектором для нашего накопительного кольца служит ускоритель Ван де Граафа на 2 Мэв, который был заказан когда-то для другой модели ускорителя, но от которой потом отказались. Это и явилось главной причиной выбора энергии. Но на деле энергия в 2 Мэв удобна, так как электроны при этой энергии достаточно релятивистски - полная энергия в пять раз больше, чем энергия покоя, - но потери из-за электромагнитного излучения еще незначительны. После инъекции каждый импульс будет ускорен (или замедлен) высокочастотным напряжением около 100 Кэв с тем, чтобы оттянуть пучок на несколько сантиметров от системы ввода.

МАГНИТЫ

Выбранная нами система магнитов состоит из 12 тридцатиградусных заворачивающих магнитов с параллельными полюсными накопечниками и 24 квадрупольных линз с переменным градиентом.

Таблица I показывает основные параметры модели и рисунок I схематический чертеж участка магнитной системы. Фокусировка электронов в кольце осуществляется как квадрупольными линзами, так и краями заворачивающих магнитов. Угол между орбитой и нормалью к краю заворачивающих магнитов равен $7^{\circ}30'$, что составляет $1/4$ отклоняющего угла. При этом условия фокусные расстояния заворачивающих магнитов равны по аксиальному и радиальному направлениям. Краевая фокусировка сама по себе, т.е. в том случае, когда квадрупольные линзы не включены, дает значения $\nu = 1,86$ по обоим направлениям. ν обозначает количество бетатронных колебаний на один оборот. При включении линз значение ν может быть увеличено вплоть до теоретического предела в $N/2=6$.

Обычно значения ν_x и ν_z равны. Но возможно, до определенного предела, создавать разницу в двух значениях ν при помощи асимметричного возбуждения квадрупольных линз. Эта настройка ограничена нелинейностями, которые она влечет за собой.

Описанная выше магнитная система принадлежит к семейству магнитов "FFAG" (fixed field, alternating gradient). Но она отличается от других систем этого типа своим малым интервалом энергии и вместе с тем малым радиальным расстоянием между начальной и конечной орбитами.

Оно составляет только 4 см при среднем радиусе в 4 м. Поэтому нет необходимости выполнять условие геометрического подобия всех орбит. Можно примириться с небольшим изменением значения ν

Конечно, было бы возможно выбрать в качестве магнитной системы ту систему, которая используется в обычном синхротроне с переменным градиентом. Но наш магнит имеет два очень ценных преимущества перед магнитом синхротрона. Первое из них - это возмож-

ность настройки значений ν в большом интервале. Вторым преимуществом является тот факт, что создание магнитов этой системы не требует каких-либо специальных исследований, которые необходимы при создании магнита сложной конфигурации. Можно просто вынуть из ящика чертежи существующих заворачивающих магнитов и квадрупольных линз с хорошо известными магнитными свойствами, изменить, если необходимо их масштаб, и отдать их на завод. В нашем случае это привело к значительному выигрышу во времени.

У некоторых из наших физиков создалась даже следующая точка зрения: если будет нужно построить еще один протонный синхротрон на 25 Бэв, подобный уже существующему, тогда будет лучше создать магнитную систему также из отдельных ноль-градиентных заворачивающих магнитов и квадрупольных линз. С первого взгляда кажется, как-будто такая магнитная система нуждается в большем диаметре, чем у обычного синхротрона, из-за места, необходимого для размещения квадрупольных линз. Но практически это не является причиной. В магните синхротрона максимально возможная напряженность магнитного поля находится вне вакуумной камеры. Но в магните с параллельными полюсными наконечниками максимально возможная напряженность поля идентична напряженности поля в месте пучка. Таким образом, заворачивающие магниты могут быть сделаны более короткими, освободив таким образом место для размещения линз.

В А К У У М

Успешное накопление пучков частиц зависит, кроме других причин, от одного чисто технического, но тем не менее очень серьезного условия - обеспечения сверхвысокого вакуума.

Время жизни накапливаемых частиц должно быть во много раз больше, чем время одного цикла инжекции и накопления. В случае нашей модели время одного цикла будет приблизительно 10^{-2} сек. Отсюда желательно получить время жизни более 1 сек. Поэтому мы попытаемся получить вакуум 10^{-9} , для которого время жизни, рассчитанное по многократному рассеянию равно 4 сек. Однократное рассеяние и потери частиц, вызванные излучением, при этой энергии незначительными. Предварительные опыты показали, что в вакуумной камере нашей модели может быть получен вакуум $\sim 10^{-9}$.

Участки вакуумной камеры, которые находятся между магнитными полюсами, будут иметь эллиптическое поперечное сечение с апертурой 10×5 см. Прямолинейные участки камеры могут иметь любое сечение, в зависимости от аппаратуры, вмонтированной там. Камера будет построена из нержавеющей вакуумной плавки стали с низким содержанием углерода и высоким содержанием никеля и магнитной проницаемостью $\mu \approx 1,002$. Внутренняя поверхность камеры будет отполирована электролитическим способом. Фланцы будут уплотнены O-образными кольцами из чистого золота. До операции модели камера будет прогрета до температуры 300°C .

Предусматривается девять насосных установок, три турбомолекулярных насоса для предварительной откачки и шесть титановых ионоабсорбционных насосов. Каждый насос обоих образцов имеет скорость откачки в 140 л/сек. После того, как титановые насосы включены, турбомолекулярные насосы перекрываются индиевыми затворами.

И Н Ф Л Е К Т О Р

Одним из неудобств того, что ускоритель и накопительное кольцо разделены друг от друга и не находятся в одном и том же кольцевом магнитном направляющем поле, является необходимость иметь быстрое переключающее устройство для ввода пучка частиц в накопительное кольцо. Вся сложность состоит в том, что нам желательно пользоваться инжекцией на один оборот. При этом виде инжекции магнитное или электромагнитное отклоняющее поле занимает небольшой участок замкнутой орбиты, принадлежащей энергии инжекции. Частицы начинают движение в среднем без бетатронной амплитуды и отклоняющее поле должно быть равно нулю тогда, когда первая инжектированная частица закончила свой первый оборот. Противоположностью инжекции на один оборот является инжекция на несколько оборотов. При этом отклоняющее поле находится вне замкнутой орбиты для энергии инжекции, и частица начинает движение параллельно к замкнутой орбите со сравнительно большой бетатронной амплитудой и будет снова проходить через место отклоняющего поля только после нескольких оборотов. В синхротроне, где обычно применяется инжекция на несколько оборотов, большая первоначальная бетатронная амплитуда не так серьезна, ввиду того, что бетатронная амплитуда уменьшается во время ускорения благодаря адиабатическому затуханию. Однако в накопительном кольце, где пучок ускоряется очень мало, большая первоначальная бетатронная амплитуда сохраняется и снижает максимальную плотность накопленного пучка, который может быть получен.

Время оборота в нашей модели с длиной орбиты - 24 м равно 8×10^{-8} сек. Таким образом время спада отклоняющего поля должно быть $< 8 \times 10^{-9}$ сек., для того, чтобы получить эффективную инжекцию.

Инфлектор для такого короткого времени спада был разработан О'Нилом в Станфорде, США, для его экспериментов со встречными пучками электронов в 500 Мэв. Он пользуется электронно-магнитным полем прямоугольной волны в коаксальном волноводе. Такая же система была изучена и разработана Кюпером и Плассом в ЦЕРНе для вывода протонных сгустков из синхротрона на 25 Бэв. Синхротрон ЦЕРНа ускоряет с двадцатикратной частотой оборота. Поэтому циркулирующий пучок состоит из 20 сгустков, длиной в 20 м каждый. Следовательно время, требуемое для вывода одного сгустка из синхротрона равно времени, необходимому для инъекции в один оборот в электронное накопительное кольцо. Это явилось одной из причин того, что длина орбиты была выбрана не меньше 24 м.

Коаксиальный волновод инфлектора изображен на рисунке 2. Внутренний диаметр - 3 см и внешний диаметр - 6 см. Волновод сделан из меди и покрыт серебром. Волновое сопротивление равно 41,6 ома и скорость волны равна скорости света. Пучок электронов проводится между внутренним и внешним проводниками, параллельно оси слегка изогнутого коаксиального волновода. Внешний проводник имеет продольный зазор для входа и выхода электронного пучка и для перемещения его во время ускорения с орбиты инъекции на орбиту накопления.

Обратимся теперь к полям в волноводе. Электрическое поле прямоугольной волны является радиальным, и магнитное поле является циркулярным по отношению к волноводу. Сила, действующая на электрон равна

$$\vec{F} = -e \left[\vec{E} + (\vec{v} \times \vec{B}) \right]$$

Векторы \vec{E} , \vec{v} и \vec{B} являются ортогональными друг к другу. Если волновой вектор $(\vec{E} \times \vec{H})$ противоположен скорости \vec{v} , тогда векторное произведение $(\vec{v} \times \vec{B})$ параллельно \vec{E} . Его абсолютное значение равно $\beta |E|$, так как $|\vec{B}| = \frac{|E|}{c}$. Это означает, что две силы, возникающие из электрического и магнитного полей имеют одинаковое направление и для релятивистских частиц имеют, кроме того, одинаковое значение.

$$\vec{F} = -e \vec{E} (1 + \beta) \approx -2e \vec{E}$$

К сожалению, инфлектор имеет не только отклоняющие, но также и электроннооптические свойства, он фокусирует в z -направлении и дефокусирует в x -направлении. Это дефокусирование в x -направлении ограничивает угол отклонения. Если попытаться пользоваться только отклоняющими свойствами коаксиального волновода, то будет необходим угол отклонения больше, чем 20° . В этом случае инфлектор настолько увеличит радиальный разброс инжектируемого пучка, что преимущество инжекции в один оборот будет потеряно. Поэтому было решено использовать сначала в одном прямолинейном участке статическое электрическое отклонение, а затем в следующем прямолинейном участке - электромагнитное отклонение при помощи коаксиального волновода, с отклонением только в 3° . Геометрия поясняется рисунком 3. Он показывает отклонение пучка от центра вакуумной камеры. Параметры инфлектора в 3° равны:

$$B = 5,4 \text{ ГАУСС} \quad U = 2,55 \text{ КВ}$$

$$E = 1,8 \text{ КВ/СМ} \quad I = 61 \text{ А}$$

Вся отклоняющая система состоит из следующих частей:

1. Генератор высокого напряжения +5 кв.
2. Электростатически заряженный волновод длиной в 15 м.
3. Искровой промежуток для запуска.
4. Инфлектор длиной в 36 см.
5. Согласованное сопротивление.

Система схематически изображена на рисунке 4.

Образование прямоугольной волны станет понятным, если обратить внимание на распределение напряжения вдоль волновода до и после запуска искрового промежутка, как показано на рисунке 4. Длина волны равна $\frac{2L}{c}$, где L - длина заряженного волновода, и его напряжение равно $\frac{U_0}{2}$, где U_0 - напряжение питающего высоковольтного генератора.

Время спада конца волны определяется временем формирования газового разряда. Для каждого напряжения и каждого вида газа функция времени формирования от давления газа имеет минимум. В нашем случае этот минимум для азота - около 6 атм.

Другим довольно интересным моментом является влияние отклоняющей волны на накопленный пучок. Часть магнитного поля будет излучаться через зазор в область накопленного пучка. Учет показал, что магнитное поле в области пучка будет не больше, чем 2×10^{-2} гаусс, с чем вполне можно примириться. При необходимости рассеянное поле может быть уменьшено применением на зазоре специальных губ. Мы, может быть, будем изучать влияние импульсного рассеянного поля уменьшением радиального расстояния между орбитами инжекции и накопления.

Импульсы будут инжектироваться с внутренней стороны накопительного кольца, так как орбита инжекции находится ближе к центру кольца, чем орбита накопления. Инжекция с наружной стороны была бы тоже возможна, но в этом случае пришлось бы замедлить импульсы, вместо того, чтобы ускорять их.

ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ СИСТЕМА И ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ ПРОГРАММА.

В одном из прямолинейных промежутков будет находиться ускоряющий зазор, окруженный высокочастотным резонатором. Частота будет второй кратности частоты оборота, т.е. 25 мегагерц, с модуляцией 1% и напряжением в 100-150 вольт.

Программа напряжения и частоты системы очень существенна для эффективного накопления пучков, и основной целью работы с нашей моделью является найти оптимальную высокочастотную программу. Прежде чем пояснить, какие моменты мы собираемся изучать, мне придется вкратце и в упрощенной форме описать теорию накопления пучков.

Процесс накопления описывается в литературе как движение в фазовой плоскости так называемого синхронного колебания. Это — относительное движение частицы в продольном направлении, вызванное высокочастотным полем, которое может быть постоянным по частоте, т.е. стационарным, или частотномодулированным, будучи ускоряющим или замедляющим. Движение описано дифференциальным уравнением в двух канонических переменных $W = \int \frac{dE}{\omega}$ и ϕ , где E — энергия, ω — частота оборота и ϕ — фаза, частицы по отношению к высокочастотному напряжению. В фазовой плоскости W и ϕ теорема Лиувилля имеет силу: сгусток частиц ведет себя в фазовой плоскости как несжимаемая жидкость. Невоз-

можно увеличить плотность частиц по фазовой плоскости. Но может произойти так, что плотность уменьшится, если к сгустку примешивается "пустая площадь фазы".

В нашем специфическом случае, где частота оборота практически постоянна, $W \simeq \frac{E}{\omega}$ и мы можем также в фазовой плоскости переменных E и ϕ рассматривать поведение сгустков частиц как поведение несжимаемой жидкости.

Теперь обратимся к рисункам 5.1 - 5.6.

1) Импульс инжектируется с энергией E_i и с энергетическим разбросом ΔE_i , когда высокочастотное поле не включено. Уже существует накопленный пучок со средней энергией E_{st} и разбросом ΔE_{st} .

2) Включается стационарное высокочастотное поле. Появляется сепаратриса. Площадь, охваченная сепаратрисой, называется по-английски "бакит" или "ведро". Частицы внутри ведра двигаются по замкнутым траекториям вокруг средней фазы Π . Включение может быть адиабатическим, т.е. медленным; в этом случае сохраняется площадь сгустка, или быстрым, не адиабатическим; в этом случае сгусток распространяется по всему ведру. Совокупность накопленных частиц, называемая по-английски "Стэк", я позволю себе перевести это по-русски как "стопка", - искривляется высокочастотным полем, но в ней нет никаких замкнутых траекторий. Частицы не синхронны с высокочастотным полем.

3 и 4) Частота начинает уменьшаться. "Стационарное ведро" становится "движущимся ведром", которое имеет меньшую площадь и средняя фаза которого отличается от Π , так что электроны внутри ведра приобретает энергию. Ведро

поэтому поднимается, но средняя энергия стопки остается постоянной.

5) Когда ведро достигает стопки, высокочастотное напряжение выключается.

6) Стопка становится независимой от ϕ и имеет новый увеличенный разброс энергии, где увеличение разброса энергий больше или равно разбросу инжектированного сгустка.

Накопленный пучок должен иметь по возможности большую плотность потока. Максимальная плотность потока зависит, кроме других причин, от плотности частиц стопки в фазовой плоскости. Мы определяем эффективность накопления как отношение плотности стопки по фазовой плоскости к плотности инжектированного пучка. Предполагая однородные функции распределения, мы можем писать:

$$\frac{n_{st}}{\Delta E_{st}} = \eta \frac{n_i}{\Delta E_i}$$

где η - эффективность накопления, $0 \leq \eta \leq 1$ и n_{st} и n_i обозначают количество частиц в стопке и во время инжекции. Весь процесс накопления может быть разделен на три отдельные стадии: синхротронный захват, ускорение и подключение нового пучка к накопленному пучку. Эффективность, таким образом, может быть записана как произведение трех факторов:

$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3$$

В некоторых процессах плотность может сохраняться только если процесс проходит медленно, т.е. адиабатично. Поэтому приходится идти на компромисс время одного цикла накопления не должно быть слишком большим. Как я уже сказал раньше, это время должно быть намного короче, чем время жизни накопленной частицы. Другой ком-

промисс - это компромисс с потерей частиц в различных процессах, так как выпуск частиц из инжектора является ограниченным. Процессы захвата и ускорения являются, в принципе, такими же, как и в синхротроне. Но требования, а отсюда и оптимальные условия, различны. В синхротроне желательно избегать потери частиц, а в накопительном кольце - избегать потери плотности частиц.

Наиболее неизвестным, а отсюда и наиболее интересным процессом, является процесс подсоединения нового ускоренного пучка к накопленному пучку с неизбежным возбуждением последнего. На языке фазовой плоскости это называется "вылить ведро в стенку". Существует очень много способов такого подсоединения: высокочастотное поле может быть выключено быстро или медленно, при модулированной частоте, или при постоянной частоте; ведро может быть освобождено в середине, на дне или наверх стопки.

Эффекты возмущения стопки ведром, приближающимся или пересекающим стопку, могут быть изучены, если стопка уже существует, при помощи экспериментов с "пустым ведром", т.е. с программированным высокочастотным полем без инъекции нового пучка частиц. Эти эксперименты с "пустым ведром" будут, наверное, проводиться, используя вторую совершенно независимую высокочастотную систему.

ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ ЗАРЯД

Другой немалой областью для опытов являются осложнения, вызванные пространственным зарядом. Отличаются поперечные и продольные эффекты пространственного заряда.

Поперечный эффект вызывается следующим образом: отрицательный пространственный заряд отталкивает электроны от центра пучка, и таким образом уменьшает частоту бетатронных колебаний. "Предельный пространственный заряд" достигается, когда одна из частот подошла к одному главному резонансу, то-есть после перемещения частоты $\Delta \nu \simeq 0,2$ по крайней мере.

В случае нашей модели этот предел достигается в отсутствии положительных ионов и предполагая значение $\nu \simeq 3$ при линейной плотности пучка равной 3×10^{12} электронов на сантиметр. Линейной плотностью называется количество электронов на радиальный интервал.

Совсем другое дело, если положительные ионы, созданные столкновениями с молекулами остаточного газа, захвачены в поле отрицательного пространственного заряда электронного пучка. Захват ионов прекращается лишь тогда, когда пучок нейтрализован, то есть когда количество захваченных ионов равно количеству циркулирующих электронов. Положительный пространственный заряд повышает частоту бетатронных колебаний, но перемещение частоты значительно больше чем перемещение, вызванное тем же самым количеством электронов. Электроны движутся с высокой скоростью и их магнитное поле вызывает силу, направленную к центру пучка.

Ее значение $F_M = \beta^2 F_E$ где $\beta = \frac{v}{c}$ и F_E электростатическая сила, вызванная пространственным зарядом. Эти две силы почти полностью компенсируют друг друга и остается сила

$$F = (1 - \beta^2) F_E = \frac{1}{\gamma^2} F_E$$
$$\gamma^2 = \frac{E}{m_0 c^2} \quad , \quad E - \text{полная энергия.}$$

Перемещение частоты пропорционально действующей силе. Поэтому перемещение частоты нейтрализованного пучка в γ^2 раз больше и с обратным знаком, чем перемещение для часто электронного пучка той же самой плотности.

В случае нашей модели, где $\gamma = 5$ и $\gamma^2 = 25$, предельный пространственный заряд для нейтрализованного пучка приблизительно равен 10^{11} э/см. Из-за этой причины мы решили вмонтировать в вакуумную камеру так называемые чистящие электроды параллельно к пучку. Эти электроды будут находиться на потенциале в 100-200 В по сравнению с потенциалом камеры, что будет вполне достаточно для вывода ионов из области пучка.

Чистящее поле будет иметь вертикальное направление и переменный знак, так что средняя плоскость орбит будет искривляться, но не перемещаться по высоте.

Продольная неустойчивость плотного пучка с энергией выше критической предсказана теоретиками, но, насколько мне известно, до сих пор еще не обнаружили этого экспериментально. Мы надеемся, что нам удастся исследовать этот эффект.

НАКОПИТЕЛЬНЫЕ КОЛЬЦА ДЛЯ ПРОТОНОВ 25 БЭВ.

Принцип накопления пучков было бы заманчиво использовать для протонов 25-ти-бэвного синхротрона в ЦЕРНе для проведения экспериментов со встречными пучками. В этом случае энергия в центре масс для сталкивающихся протонов была бы 50 Бэв. Следует заметить, что для достижения такой же энергии с помощью одного пучка, направленного на мишень из водорода, необходима была бы энергия ускоряемого пучка 1300 Бэв.

1104/5 48.

Эта идея по существу является движущей силой в нашей работе с моделью. Однако я хочу еще раз подчеркнуть, что это является действительно только идеей, и ни в коей мере не может называться проектом. Изучается возможность такого проекта.

До настоящего времени Совет ЦЕРНа даже не обсуждал этот вопрос. Наконец такое решение зависит не только от Совета ЦЕРНа, но также от государств - членов ЦЕРНа, так как стоимость пары накопительных колец была бы приблизительно в два раза больше, чем стоимость существующего синхротрона, то есть 250 миллионов швейцарских франков или 50 миллионов новых рублей.

ТАБЛИЦА I.

Параметры модели накопительного кольца.

Инжектор Ван-де-Граафа:

Полная энергия	$E_i = 2,5$ МэВ
Энергетический разброс	$\Delta E_i = 500$ эВ
Время импульса	$\tau_i = 10^{-7}$ сек.
Ток импульса	$I_i = 1$ А

Магнитная система:

Число секторов	$N = 12$
Длина орбиты	$\Pi = 24$ м
$\Delta R = R_{st} - R_i$	$\Delta R = 4$ см
(R_{st} радиус накопления, R_i радиус инжекции)	
Количество бетатронных колебаний на оборот	$\nu_{мин.} = 1,86$
	$\nu_{макс.} = 6$

$$\nu_{\text{практ.}} = 2,25 - 4,75$$

$$\frac{\Delta \Pi}{\Pi} = \alpha \frac{\Delta p}{p}$$

$$\alpha^{-1} = 4,55 - 17,3$$

(p импульс электронов)

$$\Delta E = E_{st} - E_i \quad \Delta E = 62 - 144 \text{ кэВ}$$

(E_{st} энергия накапливаемого пучка, E_i энергия инжекции)

Заворачивающие магниты:

Напряженность (для 2,5 МэВ)	$B = 142$ гаусс
Показатель	$\frac{\partial B}{\partial x} = 0$
Радиус кривизны	$\rho = 60$ см
Угол отклонения	$\theta = 30^{\circ}$

Квадрупольные линзы

Апертура

$D = 8$ см

Показатель (для $\nu = 3,25$)

$\frac{\partial V}{\partial x} = 5$ гаусс/см

Напряженность на наконечнике

$|B| = 20$ гаусс

Высокочастотная система

Кратность

2

Частота

25 МГц

Модуляция

1%

Вакуум

10^{-9} мм рт.ст.

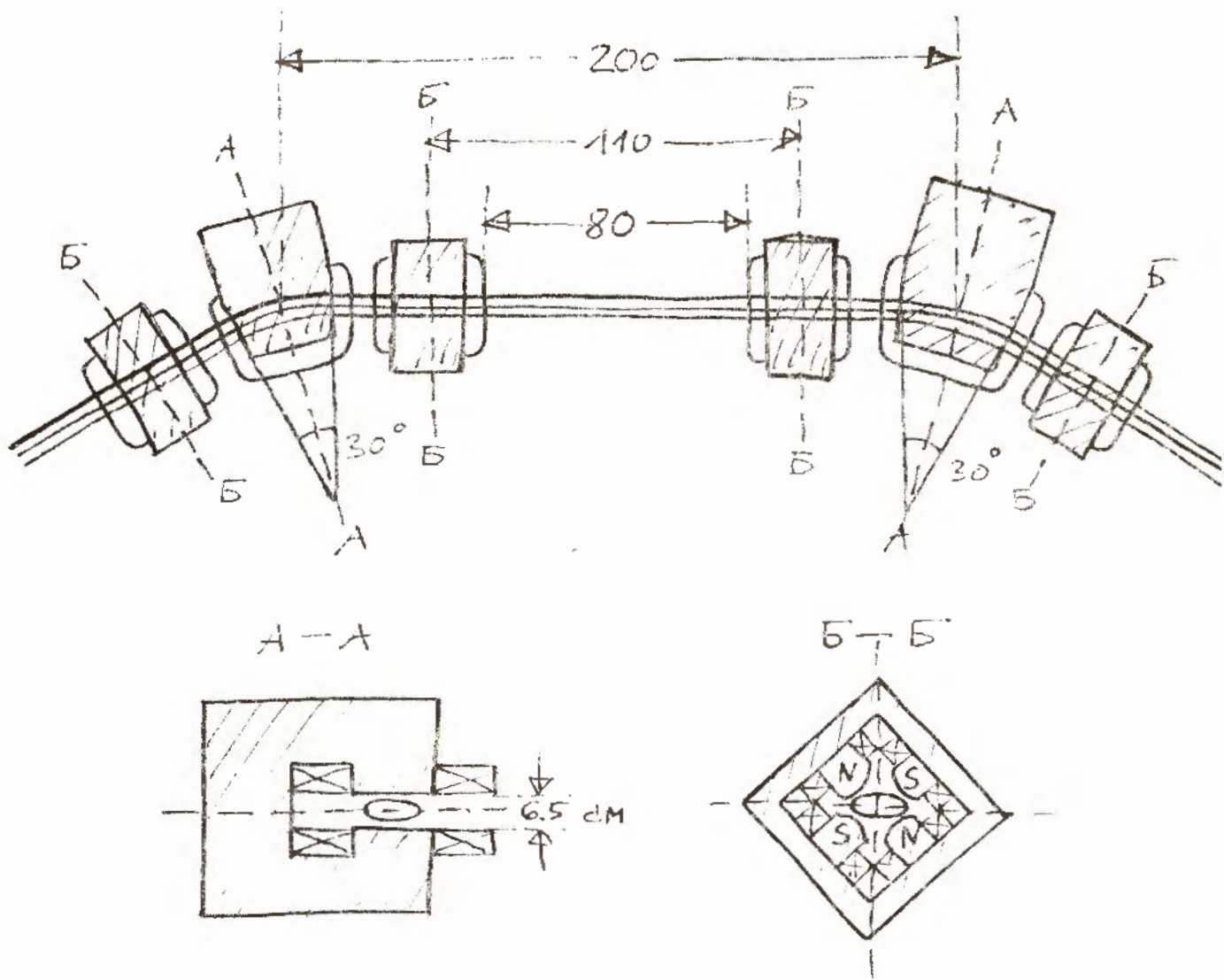


Рисунок 1

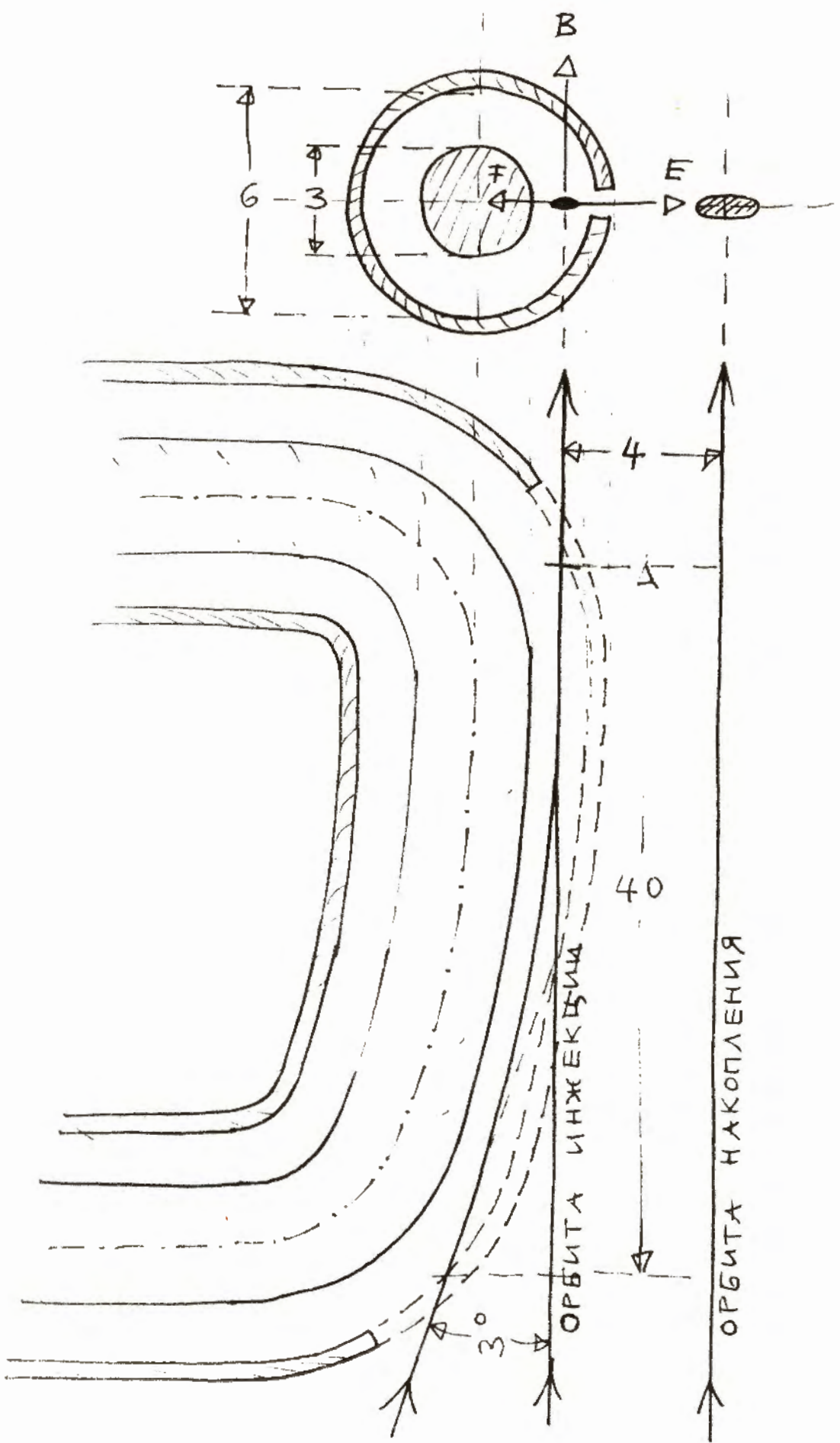


Рисунок 2

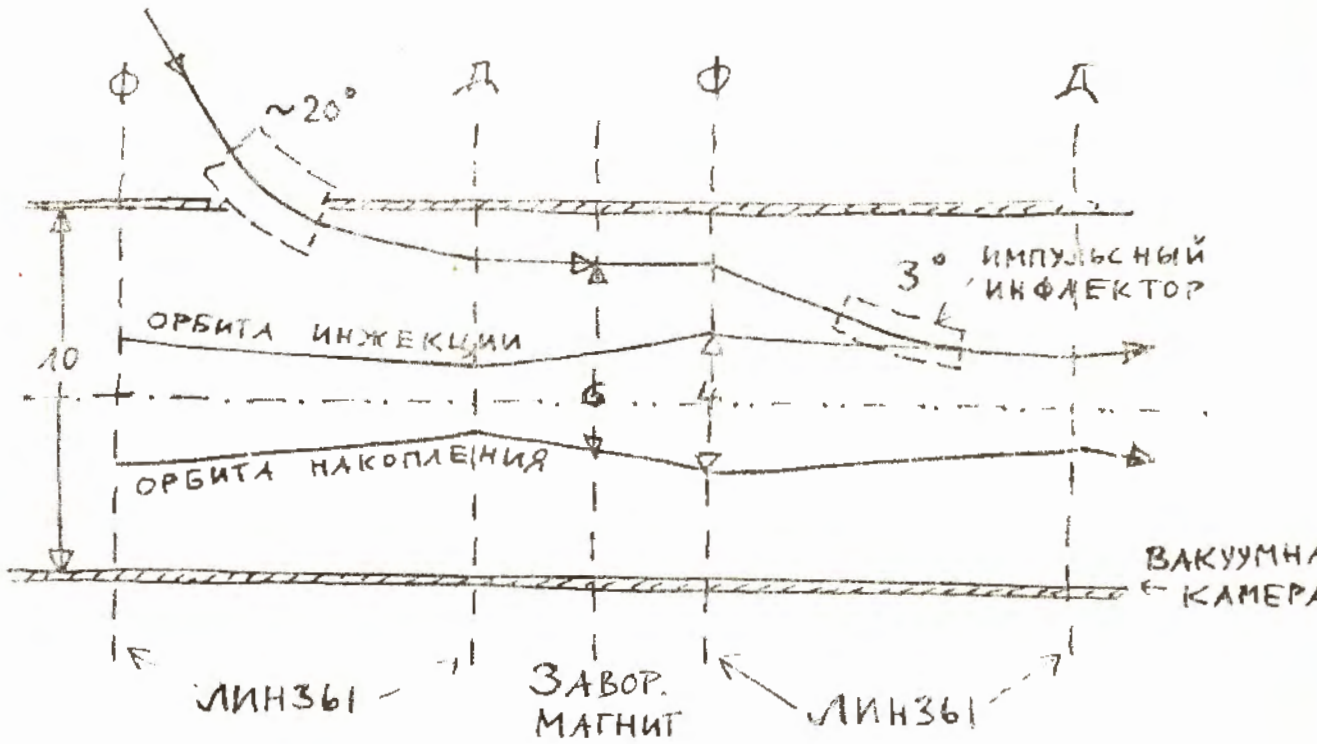


РИСУНОК 3

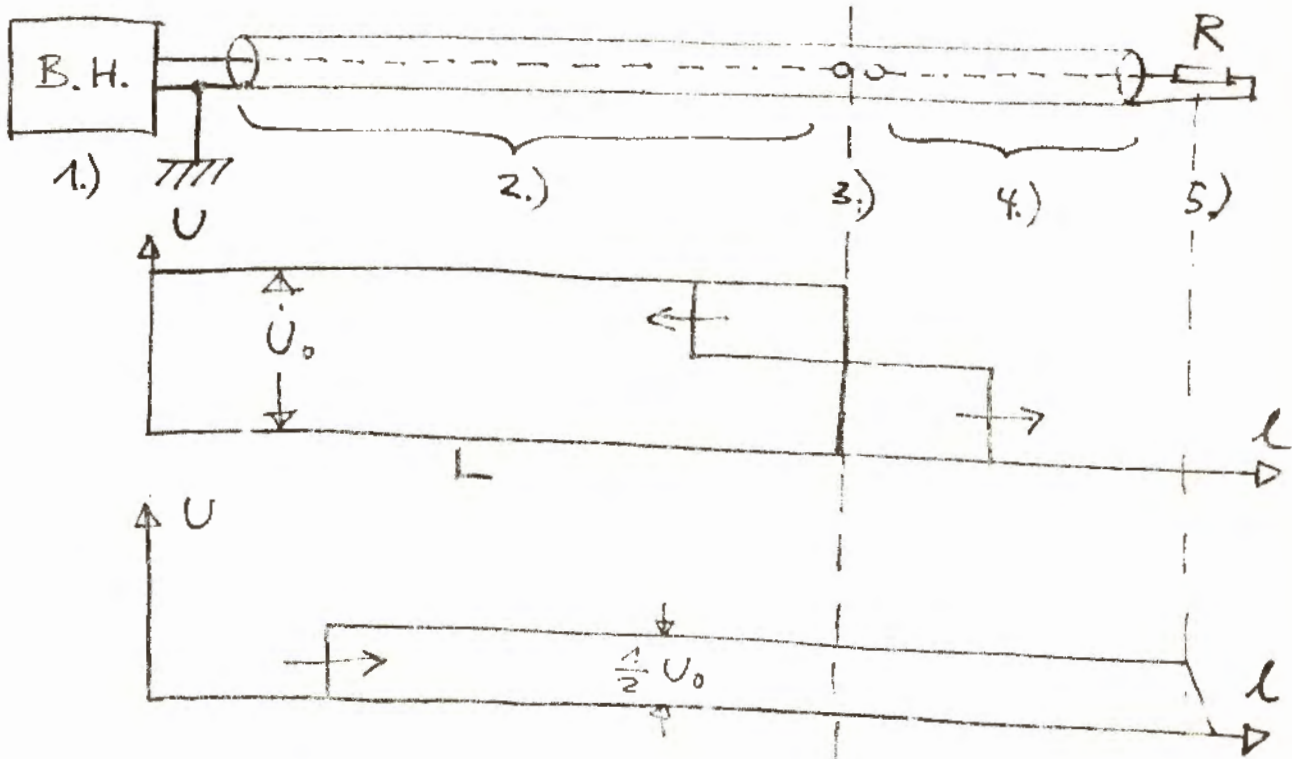
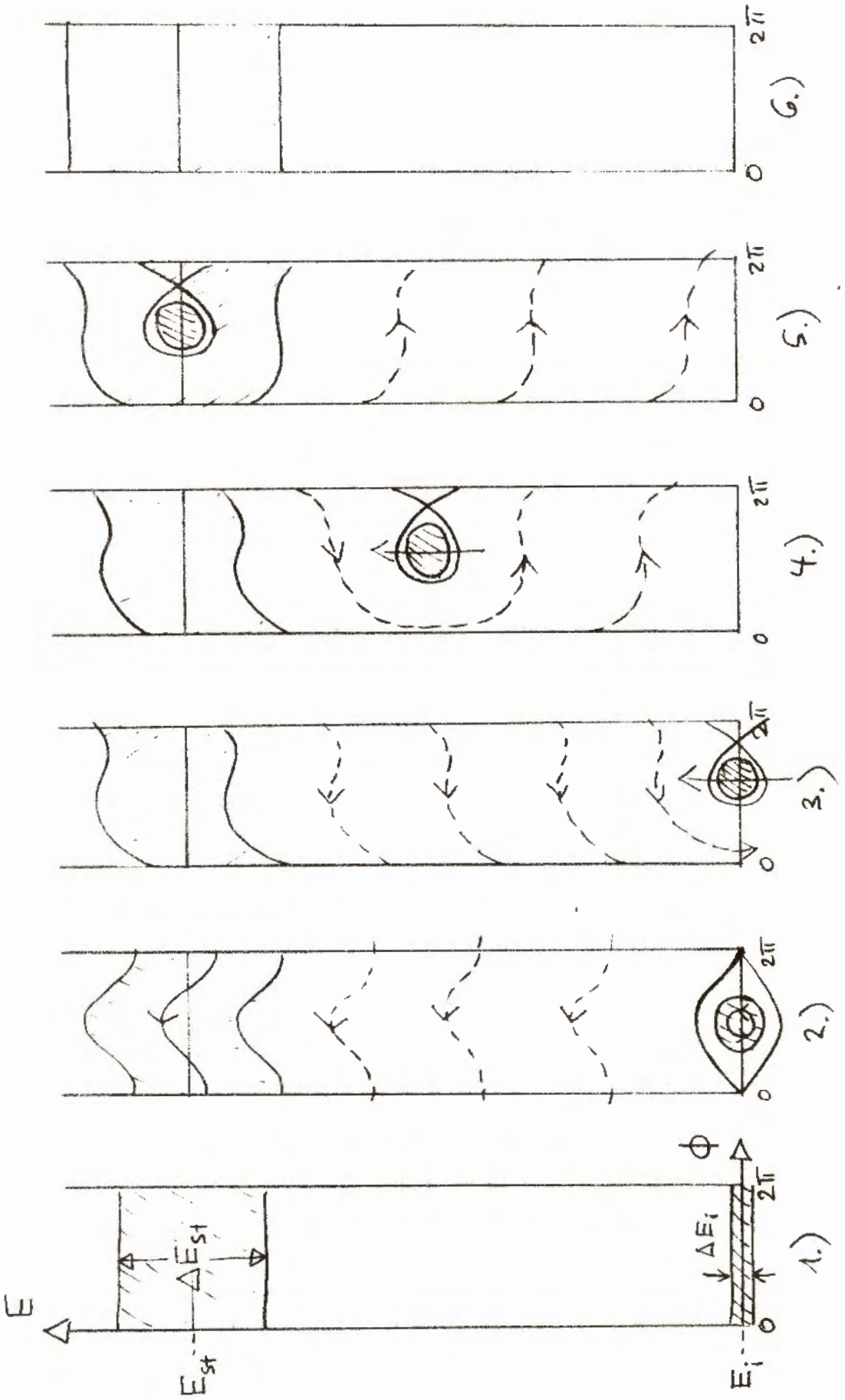


РИСУНОК 4



Рисунки 5