

18
K-43
985



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
Лаборатория высоких энергий

П. Кирстайн

P-985

СИСТЕМА ИНЖЕКЦИИ МОДЕЛИ
НАКОПИТЕЛЬНОГО КОЛЬЦА
ДЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ
С ЭНЕРГИЕЙ 2 МЭВ

Дубна 1962 год

П. Кирстайн^{х)}

P-985

СИСТЕМА ИНЖЕКЦИИ МОДЕЛИ
НАКОПИТЕЛЬНОГО КОЛЬЦА
ДЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ
С ЭНЕРГИЕЙ 2 МЭВ

1480/3 мс

^{х)} ЦЕРН, Женева

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

А Н Н О Т А Ц И Я

В этом докладе описана система инъекции модели накопительного кольца. Даны некоторые детали генератора Ван-де-Граафа и метод стабилизации посредством спектрометра. Обсуждаются расчеты электронно-оптической системы от транспортировки пучка генератора до кольца.

Д-р П. Кирстайн

I. ВВЕДЕНИЕ

В Европейской организации по ядерным исследованиям, которую принято кратко называть ЦЕРН, один отдел занимается проблемами создания новых больших ускорителей. Этот отдел рассматривает две проблемы. Во-первых, мы рассматриваем возможности и трудности накопительных колец для протонов с энергией 25 Бэв (энергия синхрофазотрона в ЦЕРНе); во-вторых, исследуем вопросы больших установок с энергией более ста Бэв (может быть триста или тысяча). Конечно тот факт, что мы исследуем эти вопросы, не значит, что один из них будет осуществлен в ЦЕРНе или хотя бы, что мы присоединимся к такому проекту. Тем не менее, научный Совет ЦЕРНа согласился, чтобы мы исследовали эти вопросы и пригласили ученых из стран участниц ЦЕРНа, а также из других стран. Поэтому мы надеемся, что ученые из СССР и США также присоединятся к нам в ЦЕРНе для этих исследований.

Я не хочу говорить больше о проблемах больших машин, потому что мы только сейчас начинаем правильно исследовать их. Хотя мы написали предварительную статью / I / о накопительных кольцах для протонов с энергией 25 Бэв, необходимо будет решить много деталей до тех пор, пока это будет рабочее предложение. До настоящего времени мы работали только над моделью накопительного кольца. Эта модель будет накапливать электроны с энергией 2 Мэв. Мы надеемся, что она начнет работать этим летом. Нет необходимости

описывать все подробности этой модели; они были описаны в докладе, который мой коллега прочел Вам год тому назад^{/2/}, Тем не менее, я хочу Вам напомнить наиболее важные параметры кольца, чтобы пояснить вещи, о которых я скажу ниже. Модель будет работать с энергией 2 Мэв; ее радиус 4 м, и поперечное сечение $3 \times 10 \text{ см}^2$. При этом радиусе и энергии жизнь электронов при вакууме 10^{-9} торр - 1 сек. Кратковременная стабильность магнитного поля будет 0,01%, а долговременная стабильность - 0,1%.

Мы хотим сделать точные измерения распределения частиц по энергии в накапливаемом пучке и колебаний пучка в фазовой плоскости. Поэтому необходимо создать сложную систему инжекции, чтобы получить как можно меньшие бетатронные колебания. Принятый принцип системы инжекции интересен не только для малых ускорителей, но также и для больших установок. Мы использовали много элементов системы инжекции большой установки в ЦЕРНе и разработали несколько новых, поэтому я надеюсь, что Вы также заинтересуетесь системой инжекции такой небольшой установки.

Система инжекции состоит из четырех частей: источник электронов, электронно-оптическая система, инфлектор и спектрометр. Об источнике электронов я не буду говорить много. Это генератор Ван-де-Граафа, и я только опишу те детали, которыми он отличается от обычных генераторов такого типа. Эти детали будут описаны во втором параграфе. Электронно-оптическая система подобна таким же системам в больших машинах, поэтому я опишу ее полностью в третьем параграфе. Э.Фишер^{/ 2 /} Вам уже описывал инфлектор, поэтому я о нем ничего не скажу, а предполагаю, что мы знаем все условия на входе инфлектора.

Собственно, Ван-де-Грааф имеет стабильность 0,1%. Эта стабильность хуже кратковременной стабильности магнитного поля. Поэтому мы построили спектрометр, который использует такой же магнит, как в самом кольце, и электрически последовательно соединен с магнитами кольца. Таким образом, возможно будет заметить разницу между энергией электронов, соответствующих магнитному полю инжекции, и энергией электронов, выходящих из Ван-де-Граафа, меньшую чем 150 эв. С помощью обратной связи будет возможно теоретически сохранять эту разницу меньше чем 200 эв или 0,01%. Спектрометр и метод обратной связи, которые мы будем использовать, чтобы дополнительно стабилизировать Ван-де-Грааф, будет описан в четвертом параграфе.

2. Генератор Ван-де-Граафа

Я не хочу описывать все детали генератора, а только укажу Вам его главные параметры и нестандартные детали. Полная энергия генератора 2 Мэв. Он имеет две трубки для ускорения электронов. В конце 1959 года, когда мы заказывали машину, мы хотели строить симметричный кольцевой фазотрон с встречными пучками. Поэтому нам нужны были или генератор с двумя пучками, или два генератора, или система для перемены пути одного пучка. Мы решили, что Ван-де-Грааф с двумя трубками будет самым простым решением. Когда мы изменили проект и начали строить накопительное кольцо, мы решили, что второй пучок можно будет использовать для стабилизации генератора.

Генератор запускается импульсами света извне генератора. Максимальный ток каждого пучка в импульсе - 1,5 а. Длительность

импульса 0,4 - 1,6 мксек, в то время как длительность оборота электронов в кольце 80 нсек, поэтому мы строим импульсный генератор, чтобы получить импульсы более короткие. Обычно импульсный ток другого пучка не превышает 1-2 ма. Главный пучок будем называть "первый пучок" и другой - "второй пучок". Эмитанс пучка (площадь пучка в координатах x, x') в метре от генератора при энергии 2 Мэв и токе 1,5а равен 2 мм х мрад. Даже без стабилизации посредством спектрометра энергия пучка не отклоняется за короткое время (1 час), больше чем ± 1000 эв. Эта величина относится к началу импульса первого пучка, потому что при больших токах напряжение падает много больше за импульс (напряжение падает на 7 Кв, если 1 мккулон уносится в коротком импульсе из генератора). Мы используем это падение напряжения для стабилизации генератора посредством спектрометра. Максимальный средний ток ускоренных электронов 1,5ма.

Чтобы получить эти токи, необходимо использовать оксидный катод с вакуумом 10^{-6} торр. Так как вакуум в кольце должен быть 10^{-9} торр, нам необходим хороший вакуум в ускоряющих трубках генератора. Во всем кольце мы используем титановые насосы; всякие следы масла сказываются на времени жизни трубок, поэтому мы решили использовать титановые насосы также и в генераторе.

Все другие детали генератора самые обычные.

3. Электронная оптическая система

а) Введение

В этом докладе я Вам не буду надоедать численными подобностями электронно-оптической системы. Они были полностью описаны

в статье / 3 / которая в библиотеке уже есть. Я хочу Вам только описать причины, по которым мы выбрали окончательный вариант. Чтобы это сделать, я сначала опишу некоторые основные предположения о пучках и элементах, которые мы будем использовать. Для электронно-оптической системы необходимо знать не только размеры пучка в поперечном направлении, но также угловое распределение. Обычно можно рассматривать движение в двух поперечных направлениях, не зависящих друг от друга и от энергии. Не совсем правильно сказать, что поперечное движение не зависит от энергии в таких системах. Однако отклонение частицы от оси состоит из двух членов; один зависит только от энергии, и не зависит от начальных расстояний частиц от оси. Другой зависит только от начальных координат (расстояние от оси и угол) и почти не зависит от энергии. Первый член описывает хроматический эффект системы; этот член одинаковый для всех частиц с подобной энергией. Он равен нулю, если нет отклонения в системе. Например, в линзах этот член равен нулю, и так же в отклоняющих элементах в плоскости перпендикулярной отклонению. В каждой плоскости этот член характеризует линейное и угловое отклонение орбиты от оси. Второй член описывает влияние начальных условий. Поэтому он характеризуется 2×2 матрицей в каждой плоскости, которая показывает, каким образом конечные линейные и угловые отклонения зависят от начальных условий. Для краткости эти два члена будут называться \underline{U} и \underline{A} . В установках, подобных нашей, частицы с бетатронными колебаниями, меньшими определенной величины, лежат внутри эллипса в фазовой плоскости (я предполагаю, что вы все знаете подробно о фазовой плоскости; если же нет, то она была описана, например, в статье / 3 /). Изменение равновесной орбиты

в накопительном кольце также зависит линейно от энергии в горизонтальной плоскости и не зависит от энергии в вертикальной плоскости. Частицы, которые выходят из генератора Ван-де-Граафа, лежат также внутри эллипса в фазовой плоскости.

В линейном приближении все элементы, которые используются в электронно-оптических системах, трансформируют эллипсы в фазовой плоскости в другие эллипсы. Это поясняется на рис. I. Если моноэнергетичные электроны занимают площадь, ограниченную эллипсом S , в фазовой плоскости до какого-то элемента, то после элемента граница будет определяться другим эллипсом - S' . Если моноэнергетичные электроны другой энергии заключены внутри S , то после элемента граница будет S'' . Из того, что я сказал раньше о влиянии элемента электронно-оптической системы, ясно, что форма S и форма S' одинаковы, только центры эллипсов не будут совпадать друг с другом. Эти свойства элементов дают нам возможность рассматривать только изменения формы эллипсов. Все площади в фазовой плоскости сохраняются согласно теории Лиувилля; поэтому при анализе системы необходимо рассмотреть только две пары чисел. Одна пара описывает движение центра эллипса - это хроматический член, другая описывает форму эллипса постоянной площади. В этом параграфе мы будем заниматься изучением этих двух пар чисел. Мы хотим, чтобы наша система была гибкой. Поэтому мы разделили ее на три части. Одна - для хроматического исправления, вторая - для ограничения пучка, и третья - для наладки формы пучка, который выходит из генератора в область принимаемости кольца. Для этих трех частей мы используем разные методы, поэтому я опишу их отдельно.

Перед началом проектирования системы инжекции все подробности магнитной системы кольца были известны. Поэтому мы знаем, как равновесная орбита зависит от энергии, а также форму пучка на фазовой плоскости, которая дает самые малые бетатронные колебания. Форма пучка, выходящего из генератора, была менее известна, но у нас было приблизительное представление о ней. В дальнейшем подробнее это можно посмотреть в статьях ЦЕРНа ^{3,4}.

Ахроматическая система

Я уже рассказал, как можно описать влияние элемента электронно-оптической системы. Математически величины отклонения и угла частицы, y и y' , после такого элемента зависят от величины отклонения и угла частиц x и x' перед элементом в каждой плоскости согласно уравнению

$$\begin{pmatrix} y \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix} + \varepsilon \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} \quad (I)$$

Здесь a_{1j} , u_1 не зависит от энергии, a_{ij} - ортогональная матрица и величина ε равна

$$\varepsilon = (p/p_0 - 1), \quad (2)$$

где p - импульс частицы, а p_0 - номинальный импульс инжекции так, что ε очень мало. Уравнения, подобные (I), справедливы и для горизонтальной и для вертикальной плоскости. Можно записать (I) в форме

$$\underline{y} = \underline{A} \underline{x} + \varepsilon \underline{u}, \quad (3)$$

где \underline{Y} , \underline{X} , \underline{U} — векторы, и \underline{A} — 2×2 матрица. N таких элементов с матрицами и векторами \underline{A}_1 , \underline{U}_1 преобразовывают \underline{X} в \underline{Y} по уравнению

$$\underline{Y} = (\underline{A}_N \underline{A}_{N-1} \dots \underline{A}_1) \underline{X} + \epsilon (\underline{U}_N + \underline{A}_N \underline{U}_{N-1} + \underline{A}_N \underline{A}_{N-1} \underline{U}_{N-2} \dots) \quad (4)$$

В (4) мы пренебрегли членами порядка ϵ^2 и выше.

Я уже сказал, что вертикальное положение равновесной орбиты зависит в нашем случае от импульса, т.е. от \mathcal{E} . Поэтому система будет ахроматической по вертикали, если все \underline{U}_1 — нули. Из-за этого для нас нежелательны отклонения в вертикальном направлении. Необходимо, чтобы мы инжектировали изнутри кольца, хотя генератор находится вне кольца. Поэтому необходимы два вертикальных отклонения. Но из-за того, что эти отклонения равны, хотя и происходят в противоположных направлениях, ахроматический эффект очень мал. Форма отклоняющих магнитов довольно сложная, поэтому трудно рассчитывать точно их фокусировку. Это одна причина того, почему мы отделяли систему для ограничения пучка от системы для наладки формы пучка.

В горизонтальном направлении отклонение равновесной орбиты от положения ее при импульсе p_0 дается вектором \underline{Y}_0 , где \underline{Y}_0 — заданная величина. Из-за практических соображений мы хотели использовать только электростатические дефлекторы и области дрейфа. Для области дрейфа длиной L

$$\underline{A} = \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \underline{U} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

в каждой плоскости.

II

Для горизонтального отклонения на угол θ с радиусом кривизны r

$$\underline{A}_H = \begin{pmatrix} \cos \sqrt{2} \theta & (r/\sqrt{2}) \sin \sqrt{2} \theta \\ -(\sqrt{2}/r) \sin \sqrt{2} \theta & \cos \sqrt{2} \theta \end{pmatrix}, \quad \underline{U}_H = \begin{pmatrix} r(1 - \cos \theta) \\ \sin \theta \end{pmatrix} \quad (6)$$

в горизонтальной плоскости, и

$$\underline{A}_V = \begin{pmatrix} 1 & r \theta \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \text{и} \quad \underline{U}_V = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

в вертикальной плоскости.

Мы знаем, что положение пучка, который выходит из генератора, не зависит от энергии. Поэтому система (4) дает хроматический эффект (5) если

$$(\underline{U}_N + \underline{A}_N \underline{U}_{N-1} + \dots) = \underline{Y}_0 \quad (8)$$

Теоретически необходимо использовать только один элемент типа (6), чтобы удовлетворить (8), но параметры этого элемента в нашем случае не могут быть использованы. Поэтому мы используем два одинаковых элемента с областью дрейфа между ними. Получающаяся ахроматическая система показана на рис. 2.

Формирование пучка

Для уменьшения бетатронных колебаний, как я уже сказал, мы хотим, чтобы поперечное положение и угол движения частицы лежали внутри определенного эллипса в фазовом пространстве. Этот эллипс превращается через уже описанную ахроматическую систему

в другой эллипс. В этом параграфе мы рассмотрим способы, которыми можно обеспечить, чтобы весь пучок лежал внутри этого эллипса в кольце.

В фазовом пространстве прямая апертура определяет прямую линию. Поэтому пара параллельных прямых апертур определяет площадь, которая показана на рис. 3. Линза изменяет эту площадь на площадь рис. 4. Дальнейшая пара параллельных прямых апертур образует параллелограм. Если даны две области дрейфа длиной L_1 и L_2 , две апертуры и линза (см. на рис. 5), то можно регулировать светосилу линзы и зазор между апертурами до тех пор, пока параллелограм в фазовом пространстве не будет иметь максимальную площадь, лежащую внутри необходимого эллипса. Например, если фазовый эллипс - круг, тогда параллелограм максимальной площади был бы квадратом.

Таким образом, можно определить форму эллипса в одном из направлений, например, в горизонтальном. Можно также использовать подобную систему для упругого направления, но будет необходимо использовать другую светосилу линзы. Самым простым методом получения заданных светосил линз в двух перпендикулярных направлениях является использование триплета - трех квадрупольных линз с одинаковым внешним возбуждением.

Система, которую в конце концов мы используем для формирования пучка, показана на рис. 6.

Система наладки

Теперь можно образовать первоначальные эллипсы через ахроматическую систему и затем - систему ограничения пучка и

получить два новых эллипса. Кроме того, мы знаем приблизительно, какие эллипсы выходят из генератора. Два числа определяют эллипс данной площади. Поэтому необходимы четыре независимых переменных для того, чтобы подогнать эллипсы, выходящие из генератора, к эллипсам, которые нужны при входе в систему формирования пучка. Одна система с четырьмя независимыми переменными показана на рис. 7. Необходимо, чтобы светосилы линз в двух направлениях изменялись независимо друг от друга. Подробный расчет для определения этих светосил нетрудно сделать. Можно определить светосилы линз аналитически / 3 /, но у меня нет достаточно времени для описания метода. Этот метод проще, чем использование представления матрицы.

После определения величины этих светосил C_{1H} , C_{1V} , C_{2H} , C_{2V} теоретически, необходимо применить их на практике. Если мы желаем передвигать линзы, то иногда возможно выбрать места, где

$$C_{1H} = - C_{1V} \quad \text{и} \quad C_{2H} = - C_{2V}, \quad (10)$$

чтобы было возможно использовать одиночные квадрупольные линзы для C_1 и C_2 . Однако эллипсы, которые выходят из генератора, изменяются, а, кроме того, для разных условий нам нужны разные эллипсы на входе системы формирования пучка, поэтому будет неудобно каждый раз передвигать линзы. При постоянном положении линз, необходимы только две квадрупольные линзы для каждой C_1 и C_2 . Несмотря на это, проще изменять светосилы в двух направлениях независимо друг от друга с помощью триплетов.

Вся электронно-оптическая система показана на рис. 8. Подробности расчетов, которые проводились для этой системы, описаны в статье^{/3/}.

4. Стабилизация посредством спектрометра

а) Введение

Я уже сказал, что мы хотим обеспечить разницу между энергией электронов, соответствующих магнитному полю инжекции, и энергией электронов, выходящих из Ван-де-Граафа, меньшую чем 150 эв. Необходимо решить две проблемы, чтобы достичь такой точности. Сначала необходимо измерить эту разницу, потом необходимо скорректировать ее. Обычно в спектрометрах устойчивость магнитного поля спектрометра ограничивает точность энергии электронного пучка. У нас это не проблема. Мы хотим, чтобы напряжение генератора следовало за отклонением магнитного поля. Необходимо только исключить другие эффекты, которые изменяются во времени. Следующей проблемой является возможность использовать знание отклонений для стабилизации генератора. За каждый импульс главного пучка напряжение падает на десять тысяч вольт; импульсы повторяются пятьдесят раз в секунду. Поэтому необходимо использовать быстродействующее средство стабилизации. Самый быстродействующий метод - использование другого пучка. Мы делаем так, чтобы заряжающий ток генератора был намного больше среднего тока первого пучка без второго пучка. В этом случае напряжение генератора непрерывно увеличивается. При наличии второго пучка напряжение генератора падает.

Из-за равновесия между этими двумя эффектами напряжение за исключением нескольких миллисекунд после импульса первого пучка должно меняться меньше чем на 200 в.

б) Система спектрометра и измерений

Схема на рис.9 показывает электронно-оптическую систему спектрометра. Импульс тока (10 ма) выходит из катода K_2 . Большинство этого тока теряется на апертурах A_1 и A_2 . Эти апертуры вместе с линзами C_1 и C_2 уменьшают размер и интенсивность пучка, который падает после магнита M на мишень T .

Мишень - вне вакуума, и пучок переходит через тонкое (0,3мм) окно из алюминия. Когда пучок падает на мишень, его горизонтальный размер - 0,1 мм. Рассеяние на окне увеличивает размер пучка до 0,3 мм. Пучок номинальной энергии падает на один край сцинтиллятора. Поскольку изменению энергий электронов на 150 эв соответствует смещение 0,2 мм, то возможно будет заметить такое отклонение энергии.

г) Метод стабилизации

Мы используем во втором пучке импульсы постоянной длины и тока (0,5 мксек и 10 ма). С таким импульсом напряжение генератора падает на 50 эв. Зарядный ток выбран 0,5 ма, и при отсутствии тока второго пучка, напряжение на генераторе увеличивается со скоростью 5 в/мксек. Поэтому если частота повторения импульсов составляет 100 Кгц, напряжение генератора приблизительно постоянное. Сигнал со сцинтиллятора используется для того, чтобы изменять частоту повторения импульсов напряжения.

С этими параметрами система обратной связи устойчива и может функционировать, если напряжение изменяется на сто Кв. Существующая система стабилизации без спектрометра и второго пучка легко исправляет такие изменения напряжения, которые имеют место только при пробое. С существующей системой стабилизации постоянная времени 100 мсек; с системой стабилизации спектрометра постоянная времени 20 мсек, поэтому связи между системами нет.

Литература

1. H.G.Hereward, K.Johnsen, A.Schoch, C.T.Zilverschoon, CERN Internal Report PS/Int., AR/60 - 35/mod1 (1961).
2. Э.Фишер. Препринт ОИЯИ, 746, Дубна (1961).
3. P.Kirstein, CERN Report 62-4 (1962).
4. M.Bell, K.Johnsen, CERN Internal Report AR/ Int., SR/61-14 (1961).

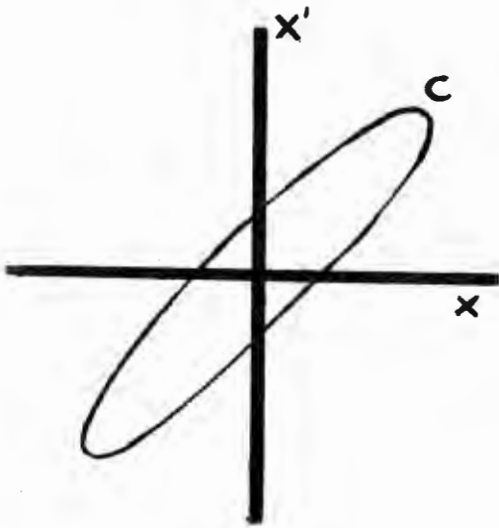


Рис. 1а. Фазовый эллипс перед элементом

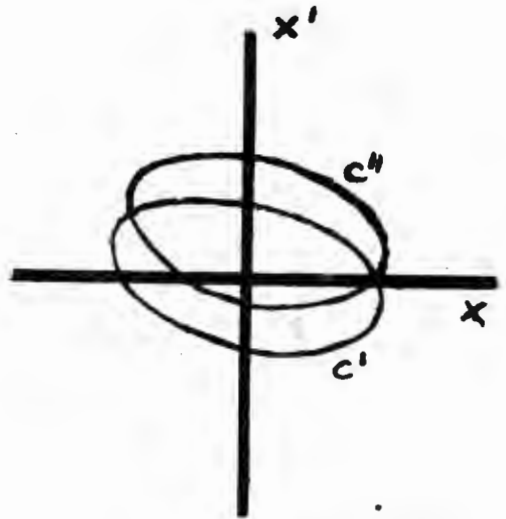


Рис. 1б. Фазовый эллипс после элемента

1480/3 м.

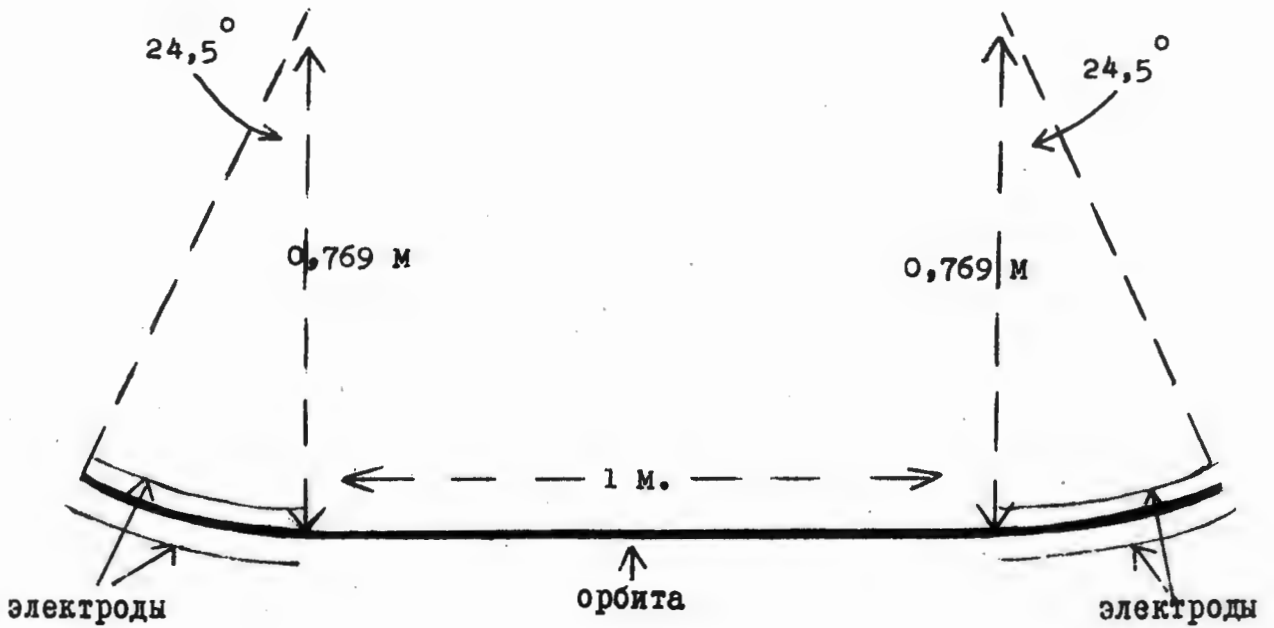


Рис. 2. Ахроматическая система.

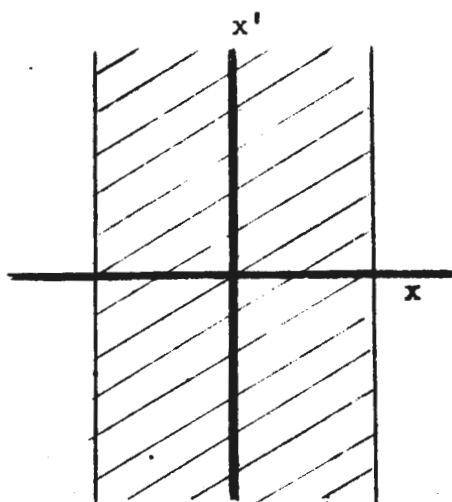


Рис. 3. Площадь, определенная парой апертур в месте расположения апертур.

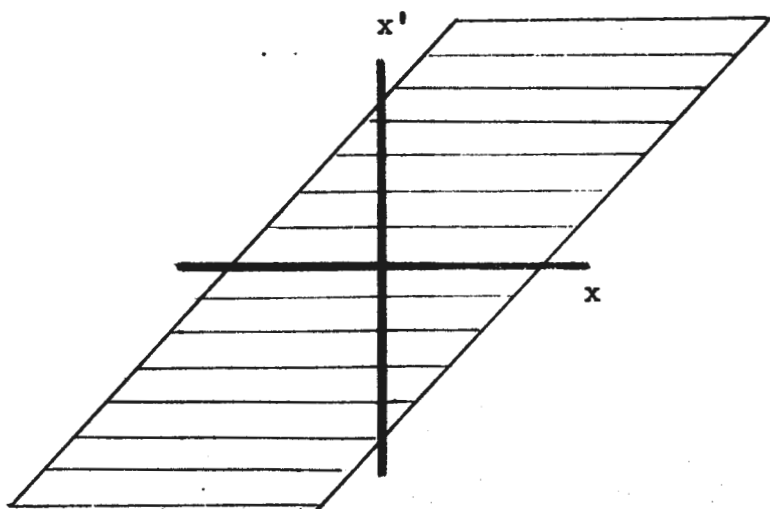


Рис. 4. Площадь, определенная парой апертур, после линзы и пространства дрейфа.

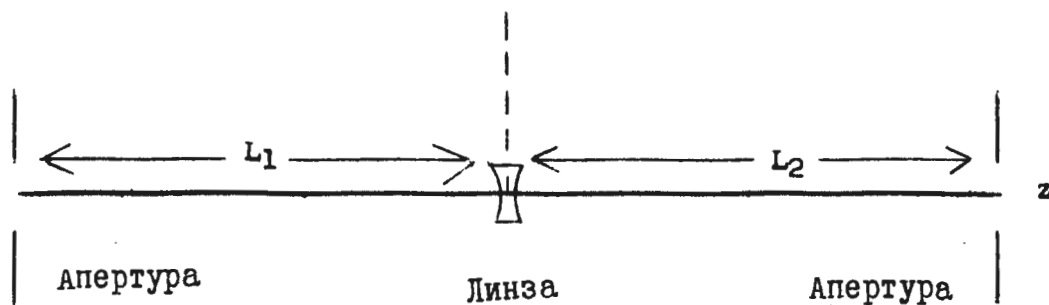


Рис. 5. Система двух апертур, двух пространств дрейфа и линзы.

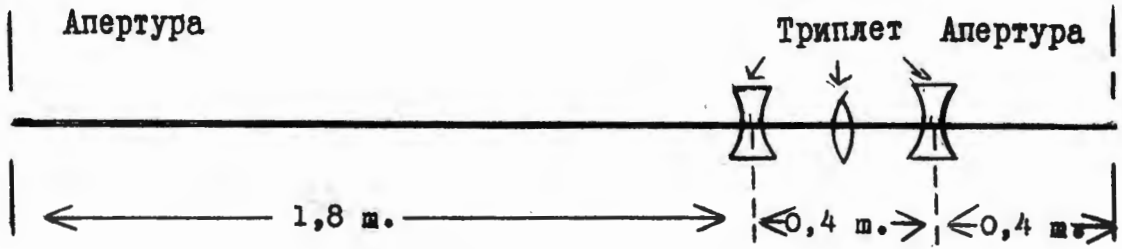


Рис. 6. Система для формирования пучка

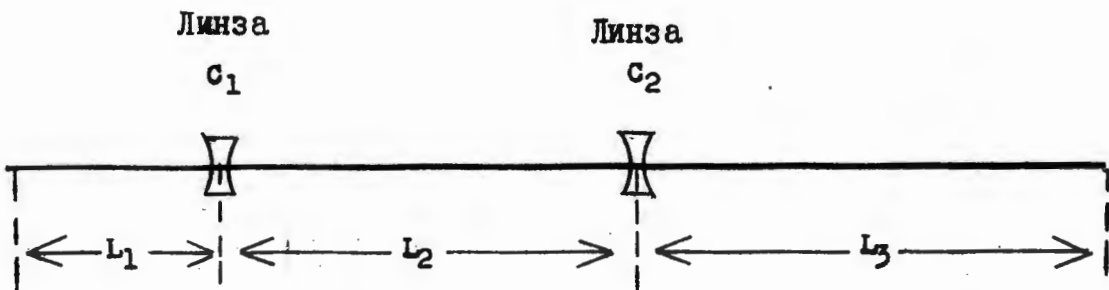


Рис. 7. Одна система для системы наладки

- AP - Апертура
- ED - Электростатические дефлекторы
- M - Магнит для вертикального отклонения
- T - Триплет

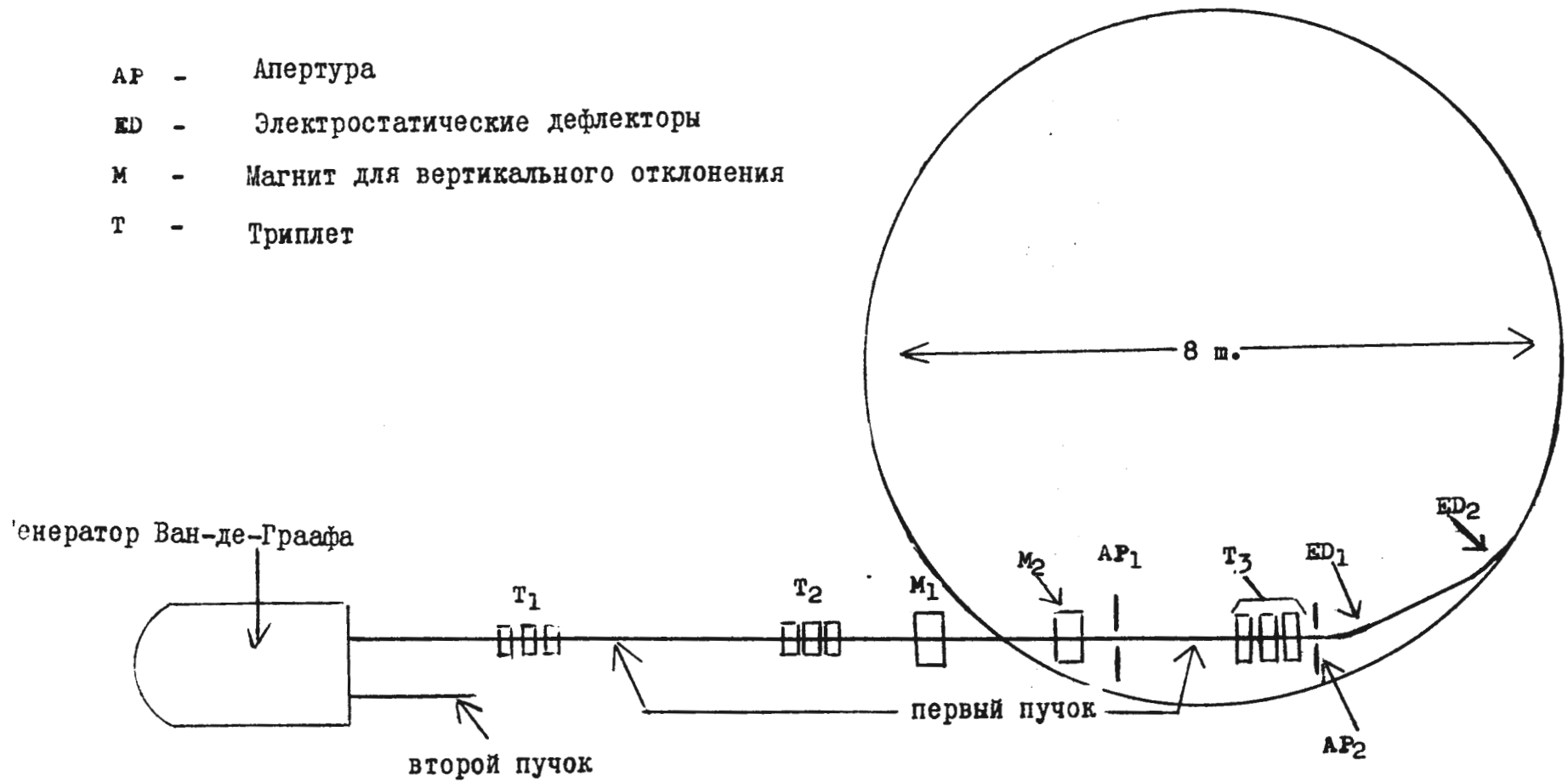
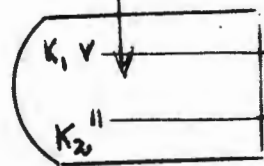


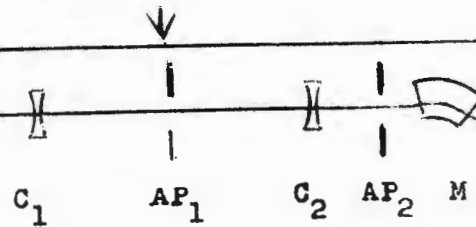
Рис. 8. Электронная оптическая система для первого пучка

- AP - Апертура
- C - Линза
- M - Магнит
- T - Триплет

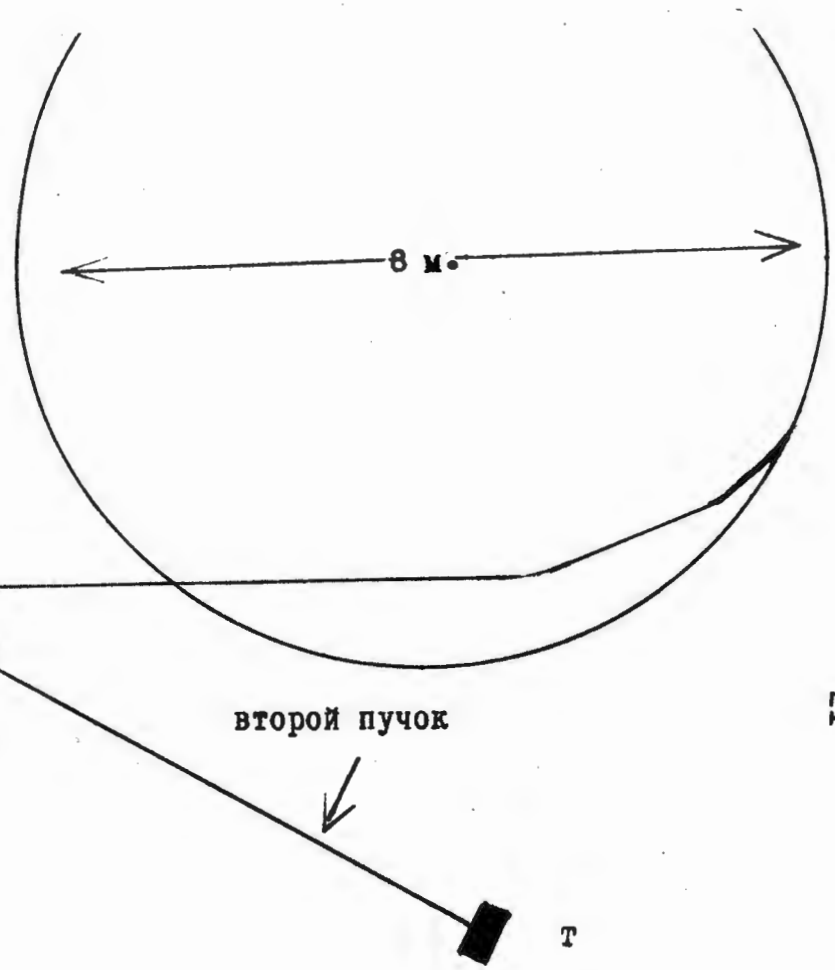
Генератор Ван-де-Граафа



первый пучок



второй пучок



21

Рис. 9. Электронная оптическая система для второго пучка