

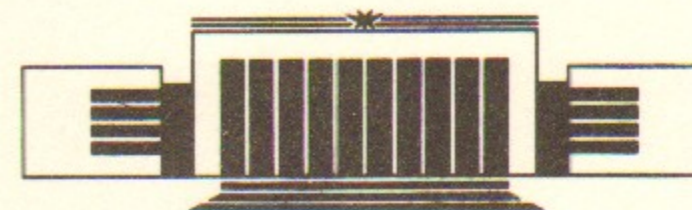


19
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

И.Б. Вассерман, М.А. Любимова

**МАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ
ПОЛУПРОЗРАЧНОЙ МАГНИТНОЙ СЕТКИ
И ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ
ПРОХОЖДЕНИЯ ПУЧКА ЧЕРЕЗ НЕЕ**

ПРЕПРИНТ 89-28



НОВОСИБИРСК

МАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛУПРОЗРАЧНОЙ МАГНИТНОЙ
СЕТКИ И ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРОХОЖДЕНИЯ
ПУЧКА ЧЕРЕЗ НЕЕ

Вассерман И.Б., Любимова М.А.

А Н Н О Т А Ц И Я

В работе описано устройство полупрозрачной магнитной сетки, совмещающей две функции: организация предельно резкой "ступеньки" магнитного поля — на длине много меньшей ларморовского радиуса частиц — и эффективное пропускание частиц сквозь сетку. Приведены результаты магнитных измерений. Проведен численный эксперимент по пропусканию пучка частиц через сетку. Отобран режим работы, при котором сетка имеет высокую прозрачность для частиц (свыше 80%). Предложены варианты геометрии сетки. Предложены возможные применения сетки; особо просчитан вариант применения ее для вывода частиц из позитронной ловушки с последующим захватом пучка в ускоритель.

ВВЕДЕНИЕ

Для инжекции позитронов в ускоритель Г.И.Будкером была предложена идея позитронной ловушки /1/, где позитроны, рождающиеся при прохождении электронов через конвертор, тормозятся на газе до околотепловой энергии и накапливаются.

Накопленные в ловушке позитроны предполагалось затем инжектировать в ускоритель. С этой целью частицы ускоряются с помощью электрического поля, образующегося на фронте бегущей вдоль соленоида электромагнитной волны, до энергии порядка 100 кэВ /2/.

Чтобы вывести частицы из ловушки с продольным магнитным полем в пространство без поля, необходимо сорвать их с магнитной силовой линии. Это можно сделать, организовав область спада магнитного поля таким образом, чтобы ее длина Δ была много меньше ларморовского радиуса ρ частицы

$$\Delta/\rho \ll 1 \quad (1)$$

Другими словами, была поставлена задача резко нарушить адиабатичность продольного магнитного поля, устроив перепад от 2 кГс до нуля на длине, много меньшей 6 мм (ларморовский радиус в нашем случае).

В данной работе ставилась цель сформировать область спада магнитного поля на выходе ловушки так, чтобы обеспечить выполнение условия (1). Сделать это можно, поставив перпендикулярно магнитным силовым линиям ферромагнитную заслонку с отверстиями для частиц, направляющую магнитный поток по радиусам на периферию в магнитопровод. Такая заслонка-сетка (рис.1а) должна иметь достаточно большую прозрачность для частиц и в то же время эффективно втягивать в себя магнитный поток.

Для достижения цели мы частично жертвуем прозрачностью системы для частиц, но эта жертва не должна быть слишком большой, иначе теряется смысл работы. Поэтому в плоскости, перпендикулярной оси системы, площадь, занимаемая ферромагнетиком, должна быть минимальной. Во-первых, увеличим сечение ферромагнетика на периферии за счет протяженности в направлении оси системы S' . Во-вторых, будем нагружать ферромагнетик за пределами линейной зависимости $B(H)$, однако избегая насыщения; вследствие этого все наши расчеты должны быть проверены на опыте.

Форма отверстий в сетке может быть самой разнообразной (рис.2): сетка может представлять собой сито с дырочками круглой, квадратной и др. формы, являться совокупностью нитей, направленных по радиусу или параллельно друг другу, или обращенными от периферии к центру треугольными лепестками и т.д. По мере удаления от центра сечение сетки должно увеличиваться, так чтобы сохранилась постоянная плотность магнитного потока по сечению сетки.

Чтобы убедиться, что нелинейные явления не нарушают ожидаемой геометрии магнитного потока, был изготовлен макет сетки из ферромагнетика. Для простоты изготовления макет был сделан в виде квадратной рамки с окном 60x60 мм, в котором были натянуты полоски листовой стали 345 толщиной 0,35 мм с зазором 0,7 мм; выбор ферромагнетика с высоким удельным сопротивлением и толщина полоски диктовались величиной скин-слоя, поскольку измерения проводились в квазистационарном поле с периодом $3 \cdot 10^{-3}$ сек.

Проекция макета на плоскость xy , перпендикулярную полю в ловушке, схематически изображена на рис.1б. Полоска лежит в плоскости Sx ; в направлении S' полоски имеют переменную толщину. Расчетный профиль полоски — линейно нарастающий от нуля в сере-

дине до 6 мм у края сетки, однако по технологическим причинам использовался профиль, утолщенный в середине (рис.3).

Для измерения поля в окрестностях сетки использовался холловский зонд размером 2x2 мм; измерялись поперечные поля H_x , H_y и продольное поле H_z до и после сетки; перед измерением зонд был сориентирован на определенную компоненту поля в контрольном объеме.

Продольное поле создавалось в длинном соленоиде, по которому пропускался ток от разряда контура с периодом $3 \cdot 10^{-3}$ с, во много раз превышающим период ларморовского обращения частицы и тем более время пролета через область магнитного градиента; таким образом, для частицы поле было квазистационарным. Соленоид закрыт с одной стороны шихтованным магнитопроводом, в который вставлена ферромагнитная сетка (рис.1б).

Результаты измерения поперечного поля H_y приведены на рис.4 и 5. На рис.4 видно, что поля рассеяния до сетки и после нее направлены в противоположные стороны. На рис.5 видно нелинейное возрастание H_y при увеличении H_z свыше 1 кГс, что, надо полагать, свидетельствует о магнитном нагружении сетки за пределами линейной зависимости $B(H)$. Имеющиеся поперечные поля после сетки, которые не превышают 7% от полного поля, связаны с локальным насыщением конкретной сетки, использованной в эксперименте, и могут быть еще уменьшены, хотя это не является принципиальным для выполнения поставленной задачи.

Благодаря сохранению магнитного потока

$$\int_0^{\Delta} H_z ds = H_s h/2$$

где h — величина зазора, Δ — протяженность области проникновения поля в зазор; S' — продольная координата. При достаточно большом значении магнитной проницаемости μ величина Δ по по-

рядку равна h , но это следовало проверить на опыте при сохранении той же плотности магнитного потока в материале. На укрупненном макете холловским зондом размером в половину зазора была определена протяженность области проникновения поля в зазор в направлении s' ; границей области Δ считалась точка, где сигнал на зонде обращается в нуль. Величина Δ оказалась приблизительно равной $h/2$ в соответствии с ожиданием для ненасыщенного ферромагнетика.

В предположении, что приобретаемая частицей поперечная скорость v_{\perp} остается малой в сравнении с продольной v_{\parallel} , при интегрировании силы Лоренца имеем:

$$v_{\perp} = \frac{e}{mc} \int \vec{H} \times d\vec{s} \equiv \frac{e}{mc} N$$

где интеграл берется по пути следования частицы. Подынтегральное выражение отлично от нуля в окрестности сетки и в зазоре. Величина интеграла N в зависимости от x и y , полученная суммированием по точкам вдоль оси s' с экспериментально определенными значениями H_{\perp} , приведена на рис. 6.

Для мажорантной оценки возьмем самые "плохие" точки $x=0$, $y = +20$ мм (рис. 6). При вычислении интеграла учтем, что поля рассеяния до сетки и после нее направлены в противоположные стороны (рис. 4). Область интегрирования до сетки пометим индексом 1, после сетки - индексом 2, а в зазоре - индексом 3.

$$\text{Max}(N_{1y} + N_{2y}) = -340 \text{ Гс}\cdot\text{см} + 230 \text{ Гс}\cdot\text{см} = -110 \text{ Гс}\cdot\text{см}.$$

$$\text{Max}(N_{1x} + N_{2x}) = -40 \text{ Гс}\cdot\text{см} + 160 \text{ Гс}\cdot\text{см} = 120 \text{ Гс}\cdot\text{см}.$$

Значение интеграла в зазоре N_3 ограничено сверху величиной $0,5Nh$ в силу сохранения магнитного потока; в середине зазора оно равно нулю. Таким образом

$$|N_3| \leq 0,5Nh = 0,5 \cdot 2 \text{ кГс} \cdot 0,7 \text{ мм} = 70 \text{ Гс}\cdot\text{см}.$$

Вектор N_3 направлен вдоль оси y и меняет свою величину от $+0,5Nh$ до $-0,5Nh$ внутри зазора.

$$\text{Max } N_y = \text{Max}(N_{1y} + N_{2y}) + \text{Max } N_3 = 180 \text{ Гс}\cdot\text{см}$$

$$\text{Max } N_x = \text{Max}(N_{1x} + N_{2x}) = 120 \text{ Гс}\cdot\text{см}$$

Складываем векторно компоненты интеграла по оси x и по оси y .

$$\text{Max } N = \sqrt{(\text{Max } N_x)^2 + (\text{Max } N_y)^2} = \sqrt{(120)^2 + (180)^2} = 220 \text{ Гс}\cdot\text{см}$$

Это соответствует поперечной скорости

$$v_{\perp} = \frac{5,3 \cdot 10^{17} \cdot 220}{3 \cdot 10^{10}} \text{ см/сек} = 3,9 \cdot 10^9 \text{ см/сек}$$

(сравним: при энергии 100 кэВ продольная скорость

$$v_{\parallel} = 1,64 \cdot 10^{10} \text{ см/сек}).$$

ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ ПРОХОЖДЕНИЯ ПУЧКА

Изучение динамики прохождения пучка, ускоренного в продольном магнитном поле, проводилось с помощью программы "RING", основанной на теории, описанной в /4/. Параметры установки для вытягивания позитронов принимались согласно /2/.

Эмиттанс пучка позитронов, ускоренных в ловушке, определяется двумя факторами:

I. Наличие первоначального ненулевого импульса, связанного с тем, что замедление происходит до энергий порядка потенциала ионизации.

Угол для частицы, имеющей поперечную энергию 10 эВ и продольную энергию 100 кэВ:

$$\alpha_0 = \frac{p_{\perp}}{p_{\parallel}} \approx 10^{-2}$$

где p_{\perp} и p_{\parallel} - соответственно поперечный и продольный импульсы ускоренной частицы.

2. Многократное рассеяние позитронов на атомах газа в процессе вытягивания позитронов из ловушки.

Среднеквадратичный угол рассеяния согласно /5/:

$$\langle \alpha_m^2 \rangle \approx Z^2 \left(\frac{E_s}{p v} \right)^2 \cdot \frac{t}{x_0}$$

где Z - заряд ядра, $E_s = 15$, t - пройденный путь, x_0 - радиационная длина в веществе, $p v$ - в МаВэ.

Для параметров ловушки, заполненной гелием при плотности $n \approx 10^{19} \text{ см}^{-3}$ длиной 10 см получим $\sqrt{\langle \alpha_m^2 \rangle} \approx 0,5 \cdot 10^{-2}$.

Таким образом, полный эмиттанс пучка ускоренных позитронов составляет $\sim (30+45) \text{ см} \cdot \text{мрад}$.

Расчет проводился для широкого диапазона начальных эмиттансов от 20 до 1280 для двух значений магнитного поля в ловушке: 1 кГс и 2 кГс.

В зависимости от места "рождения" позитронов с энергией 100 кэВ меняются условия прохождения пучка ускоренных позитронов и параметры пучка на выходе из ловушки.

Установка дополнительного соленоида с продольным полем 1 кГс позволяет провести пучок ускоренных позитронов ко входу в ускоритель с параметрами, обеспечивающими захват пучка во всем диапазоне рассматриваемых начальных данных.

Результаты расчета приведены на рис.3 для различных значений начального эмиттанса и различных начальных значений координат, где "рождаются" ускоренные позитроны. Край соленоида учитывался в линейном приближении:

$$H_s = H_{s0} + \frac{\partial H_s}{\partial s} \cdot s$$

Существенным является вопрос прозрачности сетки для прохождения позитронов. Для величины магнитного поля в соленоиде $H_s = 2 \text{ кГс}$ геометрическая прозрачность составляет 2/3 (66%), т.е. потери пучка за счет этого фактора составляют 1/3. Существует еще один механизм, приводящий к потерям пучка, связанный с неудачной фазой "рождения" позитронов в ловушке. В этом случае пучок подходит к сетке с очень малым размером и большими углами и частично гибнет за счет конечной длины решетки в направлении S . Однако в связи с тем, что размер решетки по S в центре может быть сделан достаточно малым ($\sim 0,1$ от величины зазора), то, как показывает более внимательное рассмотрение, этим эффектом в первом приближении можно пренебречь.

Для варианта с магнитным полем $H_s = 1 \text{ кГс}$ полные потери могут быть уменьшены в два раза за счет увеличения геометрической прозрачности (прозрачность 83%).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложено и исследовано магнитное устройство с резкой неадиабатичностью, позволяющее эффективно (не менее 66%) выводить частицы из продольного магнитного поля величиной 1+2 кГс через отверстие с большой апертурой (70 мм). Сделан расчет конкретной схемы вывода частиц с последующим захватом в ускоритель.

Исследованное магнитное устройство может быть применено также для организации перехода частиц из области без магнитного поля в магнитное поле, а также для формирования "столика" магнитного поля, если магнитными сетками закрыть соленоид с обоих концов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Г.И.Будкер. Атомная энергия, 1965, т.19, вып.6, стр.505.
2. В.П.Самников. Исследование прохождения позитронов через газы. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук. Новосибирск, 1978 г., стр.77.
3. В.Косслет. Введение в электронную оптику. Из-во иностр. лит. М., 1950, стр.122.
4. В.Н.Литвиненко, Е.А.Переведенцев. Труды VI-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, т.II, 1978, стр.285.
5. Л.К.Юан, Ву Цзян-Сун. Принципы и методы регистрации элементарных частиц. Из-во иностр.лит., М., 1963 г., стр.85.

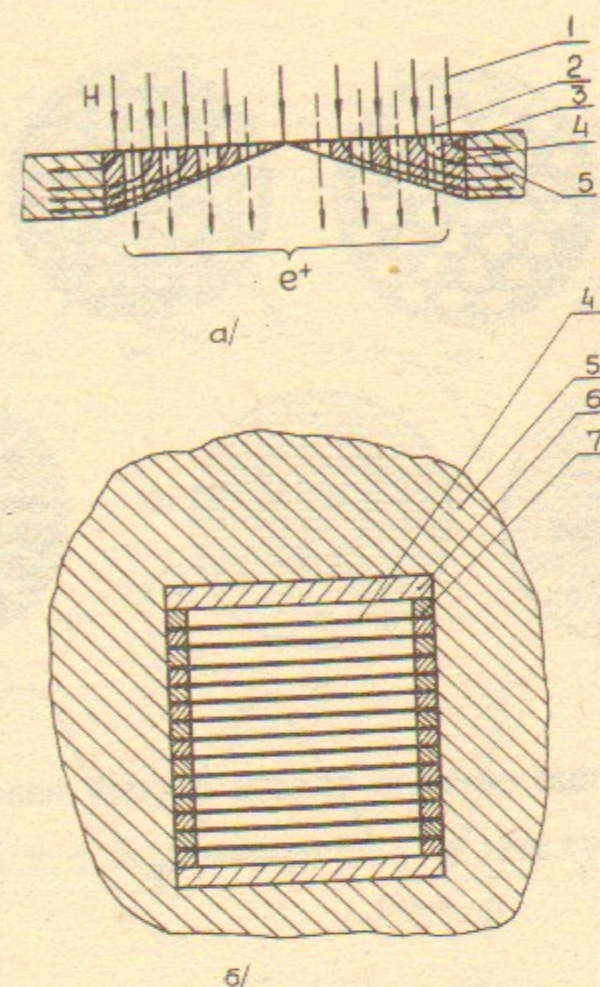


Рис.1. Устройство и принцип работы магнитной сетки.

- а. Принцип работы магнитной сетки.
- б. Схематическое изображение магнитной щелевой сетки, использованной в эксперименте.
1. силовые линии магнитного поля,
2. траектории частиц,
3. отверстия в сетке,
4. магнитный материал сетки (в эксперименте - полоски магнитного материала),
5. магнитопровод, в который вставлена сетка,
6. немагнитный элемент конструкции для натяжения полосок,
7. прокладки для обеспечения постоянства ширины щели.

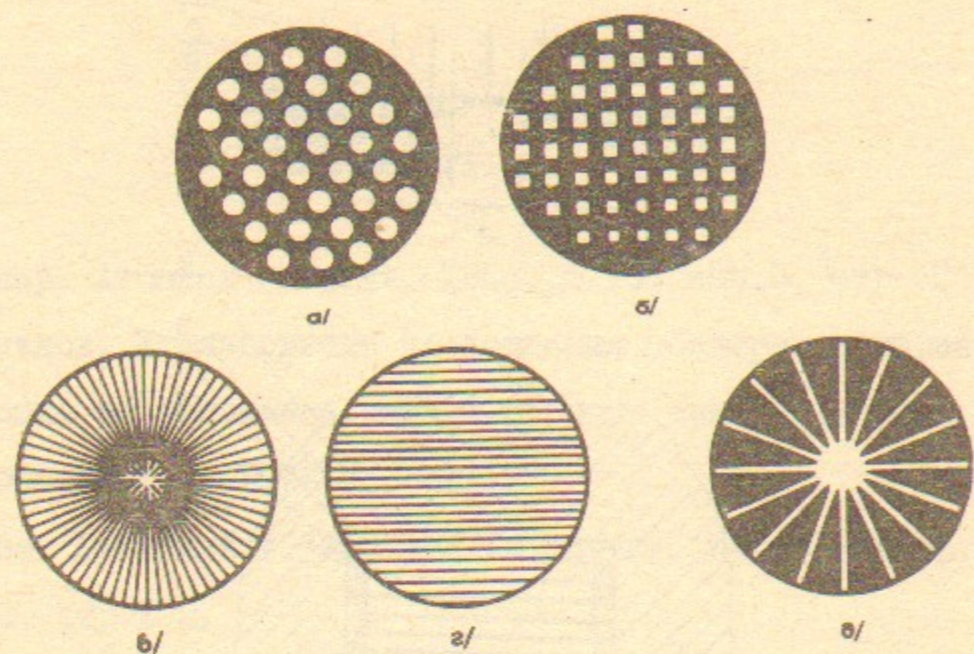


Рис.2. Магнитные сетки с разной формой зазоров:
 а - круглой; б - квадратной; в, г, д - щелеобразной.

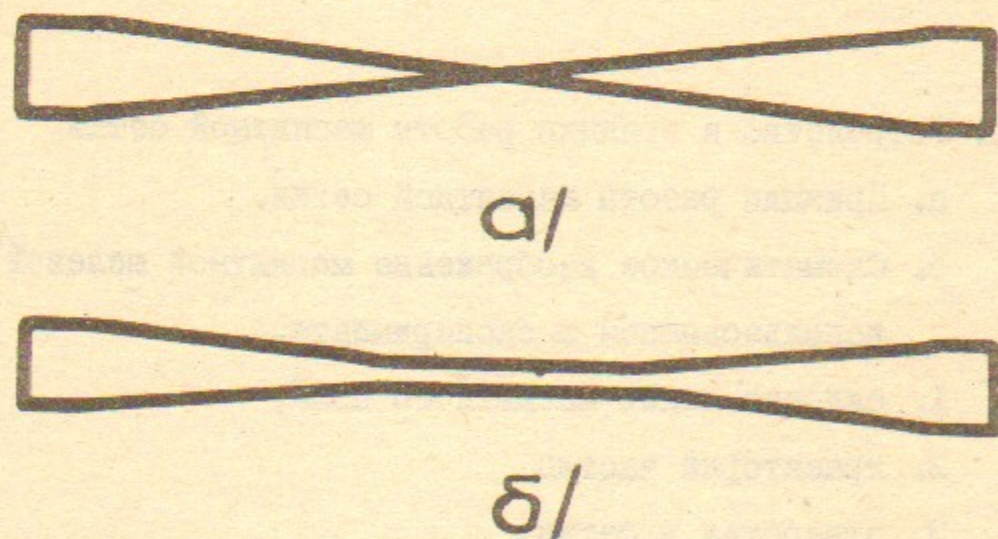


Рис.3. Профиль ферромагнитной полоски.
 а. Расчетный профиль полоски.
 б. Профиль полоски, использованный в макете.

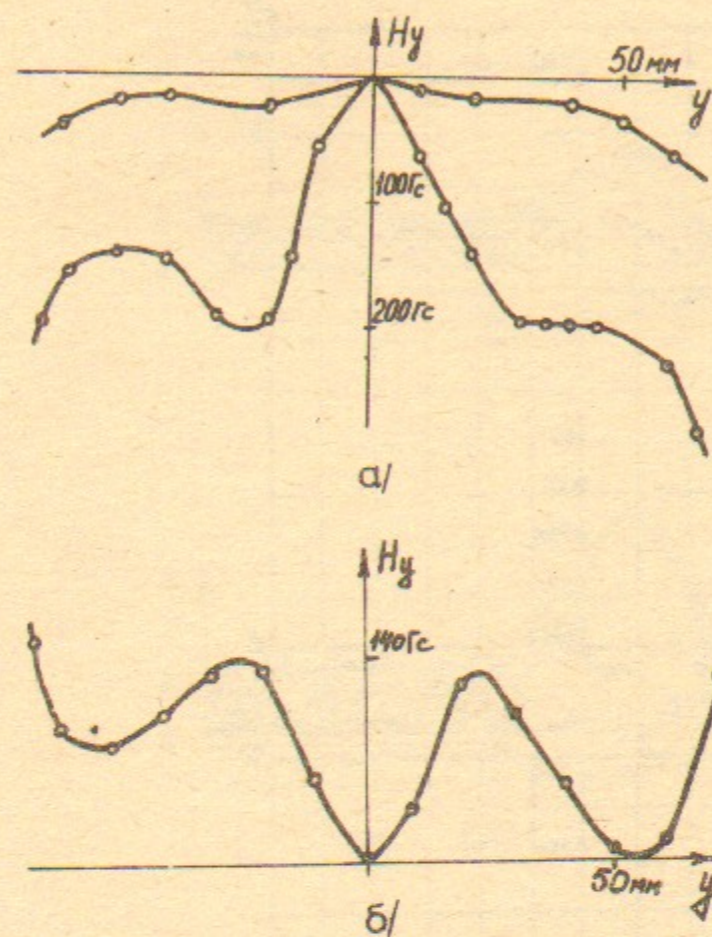


Рис.4. Поперечное магнитное поле
 вблизи сетки.
 а) до сетки;
 б) после сетки.

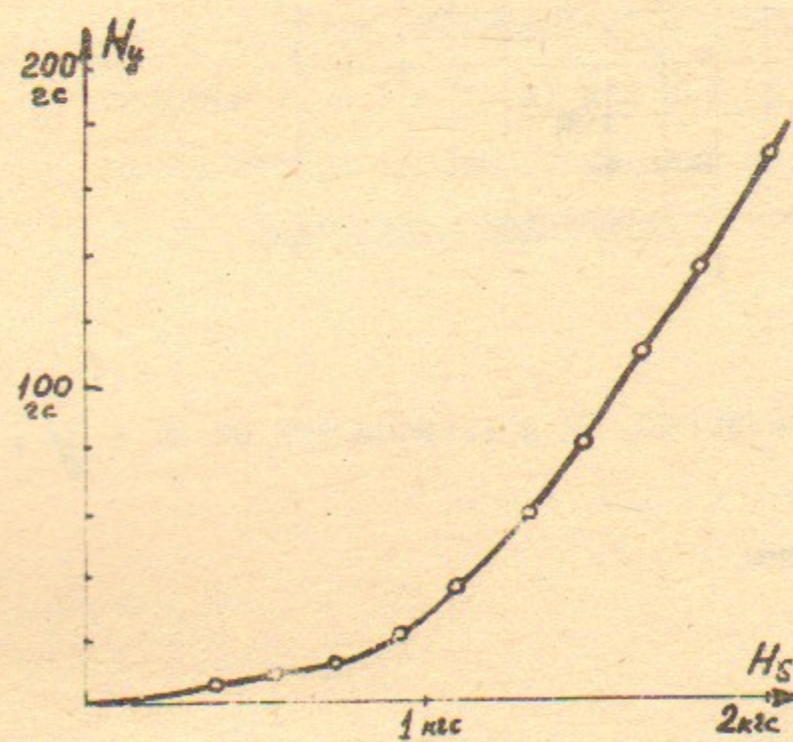
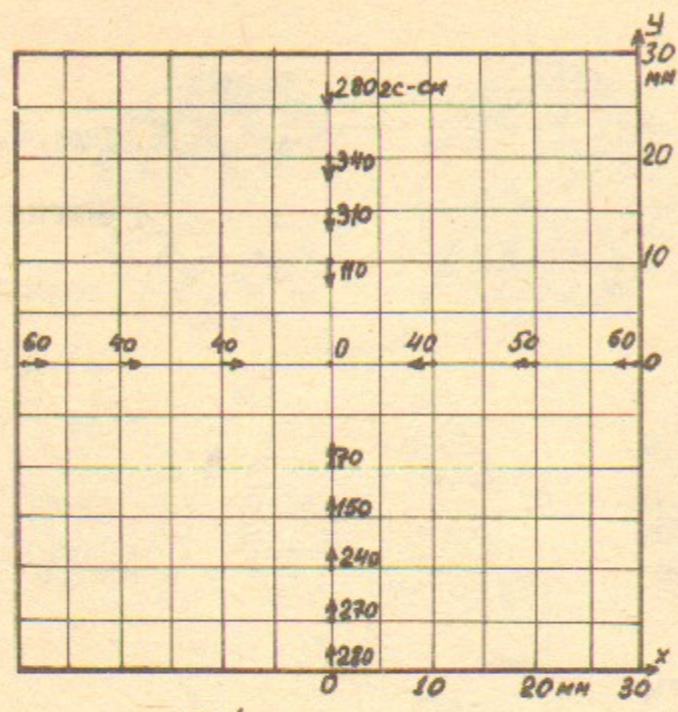
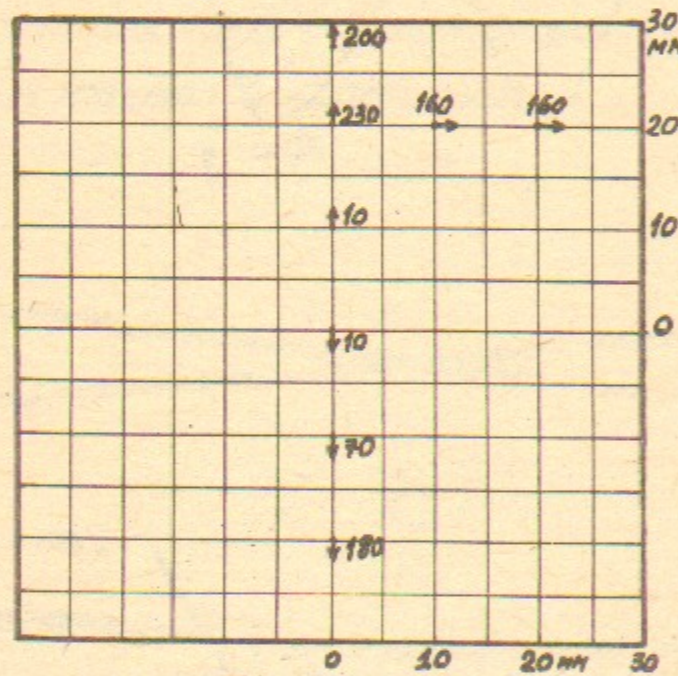


Рис.5. Зависимость
 поперечного поля H_y
 до сетки в точке
 $y = 20$ мм от
 продольного поля H_s



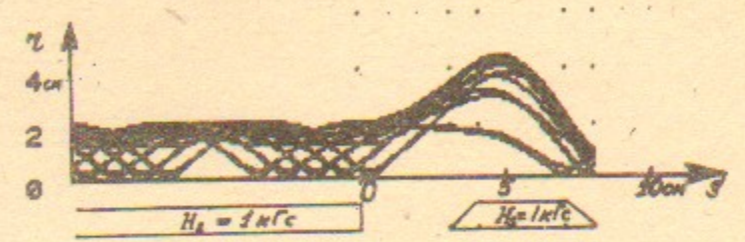
a/



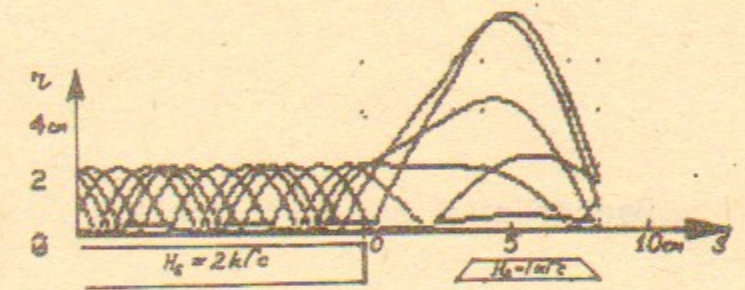
b/

Рис.6. Компоненты интеграла N в зависимости от x и y .

- а) до сетки;
- б) после сетки.



a/



b/

Рис.7. Зависимость размера пучка z , вытягиваемого из ловушки, от продольной координаты при наличии дополнительно фокусирующего соленоида с продольным полем $H_s = 1$ кГс. $E = 100$ кэВ. Эмиттанс $\epsilon_x = \epsilon_y = 20+1280$ мрад. Поле в ловушке $H_s = 1$ кГс (а) и 2 кГс (б). Под кривыми схематически изображено распределение магнитного поля в основном и дополнительном соленоидах.

Вассерман И.Б., Любимова М.А.

МАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛУПРОЗРАЧНОЙ МАГНИТНОЙ СЕТКИ
И ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРОХОЖДЕНИЯ ПУЧКА ЧЕРЕЗ НЕЕ

Препринт
№ 89-

Работа поступила - 15 марта 1989г.

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов
Подписано к печати 24.03.1989г. МН 10110
Формат бумаги 60x90 1/16 усл.л., 0,9 печ.л., 0,9 учетно-изд.л.
Тираж 150 экз. Бесплатно. Заказ № 28

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 90