



ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

24

Г.В.Росляков, Г.И.Фиксель

ИСТОЧНИК АТОМОВ ВОДОРОДА
НИЗКОЙ ЭНЕРГИИ

ПРЕПРИНТ 85-40



НОВОСИБИРСК

ИСТОЧНИК АТОМОВ ВОДОРОДА НИЗКОЙ ЭНЕРГИИ

Г.В.Росляков, Г.И.Фиксель

Для многих экспериментальных и исследовательских целей, в частности для подпитки плазмы в магнитных ловушках, нужны устройства, создающие интенсивные потоки (в десятки эквивалентных ампер) атомов водорода с энергией в сотни электронвольт. Традиционный способ получения атомарных пучков: перезарядкой в газовых мишенях предварительно ускоренных ионных пучков мало эффективен из-за низкой энергии требуемых атомарных пучков. В настоящем сообщении приводятся результаты экспериментальных исследований альтернативного способа генерации атомарных пучков низкой энергии: нейтрализацией плазменного потока отражением его от металлической поверхности. Известные к началу нашей работы экспериментальные и теоретические расчетные результаты [1] были весьма обнадеживающими и предсказывали достаточно высокие коэффициенты отражения частиц $R_N \sim 50\%$ и энергии $R_E \sim 30\%$ при энергии ионов ~ 100 эВ.

Нашей задачей являлись: исследование коэффициентов отражения R_N , R_E от обычных конструкционных материалов, экспериментальная проверка возможности нейтрализации ионных потоков с энергией в сотни электронвольт и плотностью потока в несколько ампер на 1 см^2 и создание экспериментальной модели источника быстрых атомов для подпитки плазмы в установке "АМБАЛ".

Схема экспериментов по определению коэффициентов отражения и энергетических спектров отраженных атомов приведена на рис.1. Поток свободно разлетающейся водородной плазмы из источника плазмы 1 [2] попадал на приемную пластину 2 калориметра 1, на которую подавалось отрицательное напряжение относительно анода источника плазмы. Плотность потока плазмы измерялась передвижным датчиком 6, а также контролировалось по току на пластину. Величина ионного тока на пластину составляла I_A при пространственной неоднородности $\approx 5\%$, длительность импульса $\leq 0,1$ сек.

По известному потоку мощности, идущему на пластину, рассчитывалось ожидаемое изменение ее температуры

$$\Delta T_{расч} = \frac{j_+ U_{пл} \tau}{C}$$

где j_+ - плотность тока протонов, $U_{пл}$ - напряжение на пластине, C - теплоемкость пластины, τ - время импульса. Экспериментально измеряемое термодарой 5 приращение температуры пластины $\Delta T_{эксп}$ всегда было меньше $\Delta T_{расч}$. Этот дефицит объясняется отражением части энергии от пластины. По измеренным и расчетным значениям ΔT определялся коэффициент отражения энергии:

$$R_E = 1 - \frac{\Delta T_{эксп}}{\Delta T_{расч}}$$

Теплоемкость пластины определялась из табличных данных, а также калибровалась импульсным облучением калориметра пучком протонов с энергией 16 кэВ, коэффициент отражения которых при этой энергии пренебрежимо мал.

На рис.2 показана зависимость R_E от $U_{пл}$ для нержавеющей стали, ниобия и молибдена. Для стали и ниобия значения R_E совпадали в пределах точности эксперимента. Для молибдена измеренная величина R_E заметно меньше.

Измеряемая величина коэффициента R_E не зависела от температуры поверхности (она изменялась при помощи подогревателя 4 в диапазоне 20+600°C) от вакуумных условий и от длительности потока плазмы на пластину.

Для определения энергетического спектра отраженных частиц калориметр помещался в положение Б на рис.1. При этом отраженные атомы проходили через поток плазмы, где часть из них перезаряжалась при столкновениях с протонами плазмы и затем анализировалась по энергии в магнитном анализаторе 7.

Полученные спектры атомов в зависимости от напряжения на пластине показаны на рис.3. Верхняя граница спектра соответствует напряжению на пластине, нижняя граница $\approx 30+50$ эВ определялась фоновыми потоками из плазмы. На этом же рисунке показана зависимость относительной средней энергии атомов $\bar{E}_a/eU_{пл}$ от напряжения на пластине $U_{пл}$.

В предположении, что отраженная энергия уносится отраженными атомами, можно определить коэффициент отражения частиц

как

$$R_N = R_E \frac{eU_{пл}}{\bar{E}_a}$$

Определенная по этой формуле зависимость R_N от $U_{пл}$ показана на рис.2 (для нержавеющей стали).

При вычислении средней энергии \bar{E}_a энергетические спектры обрезались снизу при энергии $\approx 20+30$ эВ. Это обстоятельство приводит только к завышению \bar{E}_a и, следовательно, к занижению R_N .

Помимо потока отраженных атомов существует поток атомов, десорбированных с пластины ионной бомбардировкой. Действительно, присутствие в опытах десорбированного потока атомов низких энергий ~ 10 эВ косвенно подтверждалось наличием идущих с пластины отрицательных ионов водорода H^- с энергией, равной потенциалу пластины. Известно, что отраженные и десорбированные атомы могут с определенной вероятностью вылететь в виде H^- , которые затем ускоряются полным приложенным отрицательным напряжением.

Было установлено, что в течение первых ~ 10 мкс с пластины идет поток отрицательных ионов с энергией равной которой по истечении этого времени падает на 2-3 порядка. Величина его растет с ростом остаточного давления в камере и падает с прогревом пластины.

В то же время сигналы при анализе спектра положительных ионов имели временную зависимость, совпадающую с временной зависимостью потока плазмы, их величина не зависела от вакуумных условий в широком диапазоне давлений остаточного газа $10^{-6}+10^{-4}$ торр, от температуры поверхности, которая изменялась в диапазоне 20+600°C. Все эти факты свидетельствуют о том, что определенные коэффициенты отражения и энергетические спектры относятся к отраженным от поверхности частицам, а не к десорбированному потоку. Полученные данные показали, что коэффициенты отражения достаточно велики для конструкционных материалов, которые могут быть использованы для источника атомов.

Основываясь на этих данных и с учетом конструктивных особенностей установки АМБАЛ, была сконструирована модель источ-

ника атомов низкой энергии. Схема этого источника показана на рис.4. В качестве источника плазмы был выбран источник на основе дугового разряда с холодным катодом 1 и магнитно-изолированным анодом 2 [2]. Он способен создавать потоки водородной плазмы в десятки экв.А и длительностью 0,1+0,5 сек; газовая эффективность путем оптимизации режимов работы может быть доведена до $\approx 95\%$. Источник плазмы помещается во внешнее поле, которое в нашем случае создавалось отдельными катушками (на рис. не показаны), либо является полем установки, куда идет инжекция. Для экранировки от внешнего магнитного поля источник помещен в экран 4.

Магнитное поле препятствует свободному разлету плазмы, вследствие чего поток плазмы попадает на отражатель 5, выполненный в виде конуса. Материал отражателя - нержавеющая сталь. На отражатель подано отрицательное напряжение относительно анода источника плазмы. Протоны, ускоренные в ленгмюровском слое, бомбардируют поверхность и отражаются от нее в виде быстрых атомов.

Измерения плазменного потока показали, что при выключенном внешнем магнитном поле на отражатель идет около 20+25% от ионного потока плазмы. При включении внешнего магнитного поля весь поток плазмы идет на отражатель. Были проведены измерения пространственного распределения плотности потока плазмы по поверхности отражателя. На рис.5 показана зависимость плотности потока плазмы от расстояния вдоль образующей отражателя - конуса при различных азимутальных углах относительно направления внешнего магнитного поля. На том же рисунке показано геометрическое место точек с максимальной плотностью тока на поверхности отражателя. Из приведенных данных следует, что разлет плазмы происходит в основном по силовым линиям магнитного поля, величина плотности потока плазмы достигает 1 А/см^2 при полном токе на отражатель 30 А.

Следующей стадией было изучение потока отраженных атомов. На рис.6 показана зависимость полной мощности потока атомов от мощности, падающей на отражатель $W_{отр}$, которая определялась как $W_{отр} = I U_{отр}$, где I - ток протонов на отражатель, $U_{отр}$ - напряжение на отражателе. Полная мощность измерялась калориметром в виде диска из меди ϕ 200 мм, причем предва-

рительно был измерен коэффициент отражения энергии от меди [3]*. На рис.7 показано пространственное распределение плотности потока мощности, измеренное импульсным болометром на основе пирокристалла $LiNbO_3$. Из этих данных видно, что даже в отсутствие напряжения на отражателе регистрируется значительный поток мощности. Коллимированием входного угла болометра, было установлено, что этот поток мощности идет из анодного отверстия источника плазмы, закрывая болометр стеклом из LiF , мы убедились, что излучение из разряда с длиной волны $\lambda > 1100 \text{ \AA}$ не вносит вклада в поток мощности. Было сделано предположение, что из источника плазмы идет поток ускоренных атомов, которые возникают непосредственно в разряде, например, при перезарядке ускоренных протонов. Для определения интенсивности потока и энергии этих атомов, равно как и отраженных, были проделаны следующие эксперименты.

В одном из них мы независимым образом измеряли полную мощность W и полную силу давления F атомарного потока. Полная мощность, как было сказано выше, измерялась калориметром, а сила давления - прибором маятникового типа *. Поскольку $W = I \bar{E}$, а $F = \sqrt{2m\bar{E}} I (1 + R_p)$, где I - интенсивность потока, \bar{E} - средняя энергия, R_p - коэффициент отражения импульса атомов, то эти измерения позволяют определить I и \bar{E} .

Целью другого эксперимента было непосредственное определение энергии атомов по доплеровскому смещению линии H_α - рис.8. Контур линии измерялся спектрографом СТЭ-1 перемещением выходной щели вместе с фотоумножителем ФЭУ-84.

Атомы, выходящие из источника, движутся в плазменном потоке и возбуждаются сопутствующими электронами. В положении а) луч зрения направлен вдоль плазменного потока и регистрируется излучение "убегающих" атомов, такая геометрия была выбрана для избежания засветки излучением плазмы. Видно, что измеряемый контур расщеплен на два пика, что соответствует излучению сопутствующего газа и излучению убегающих атомов. В положении б) луч зрения направлен поперек движения атомов и эти два пика совпадают.

Излучение отраженных атомов измерить не удалось, т.к. плазменный поток и поток отраженных атомов пересекаются в узкой *

*Дунев П.А. Дипломная работа, Новосибирский университет, Новосибирск, 1984.

области непосредственно вблизи поверхности отражателя.

Результаты этих экспериментов приведены в табл. I.

Таблица I

Ток протонов на отражатель, А		32	
Напряжение на отражателе, В		160	
Мощность на отражателе, Вт		5120	
		Атомы из плазмы	Отраженные атомы
Мощность потока атомов, Вт		470	1100
Измерение импульса и мощности	Средняя энергия, эВ	17	80
	Поток, А	27	14
Измерение энергии по допл. смещению	Средняя энергия, эВ	21	?
	Поток, А	22	?

Среднюю энергию и поток отраженных атомов можно вычислить, основываясь на измеренных ранее коэффициентах отражения энергии и частиц. В данном случае необходимо учесть геометрию разлета отраженных атомов, часть которых вследствие широкого углового разброса при отражении испытывает повторные соударения с отражателем, что интегрально приводит к уменьшению коэффициентов отражения. Учитывая это мы получили, что средняя энергия отраженных атомов составляет 80 эВ, а поток 14 экв.А, что согласуется с результатами табл. I.

В этих исследованиях на модели атомарного источника использовалась конструкция и режим работы источника плазмы не оптимизированный по расходу газа. При напуске водорода в 58 экв.А в пересчете на атомы, поток рабочего вещества распределяется, как было показано, на 32 А плазменного потока и 21+27 экв.А потока атомов с энергией 20 эВ. В свою очередь из 32 А плазмы было получено 14 экв.А отраженных атомов со средней энергией 80 эВ.

Как следует из результатов работы [2], возможно в оптимальном режиме иметь газовую эффективность источника плазмы

близкую к 100%. Это должно привести к снижению низкоэнергетичной компоненты атомарного потока. Возможна также такая модификация источника плазмы, при которой все рабочее вещество будет выходить в виде диссоциированного в разряде водорода. При этом, как следует из проведенных нами предварительных экспериментов, выходящие атомы будут иметь энергию масштаба десяти электрон-вольт. Это позволит, в принципе иметь атомарный источник без поверхностной нейтрализации.

Авторы выражают благодарность Г.И.Димову за постановку работы, И.И.Морозову за помощь в проведении экспериментов.

Л и т е р а т у р а

1. Машкова Е.С., "Физика плазмы", 1979, т.5, вып.6, стр.1385.

2. Морозов И.И., Росляков Г.В., препринт ИЯФ 83-71, Новосибирск.

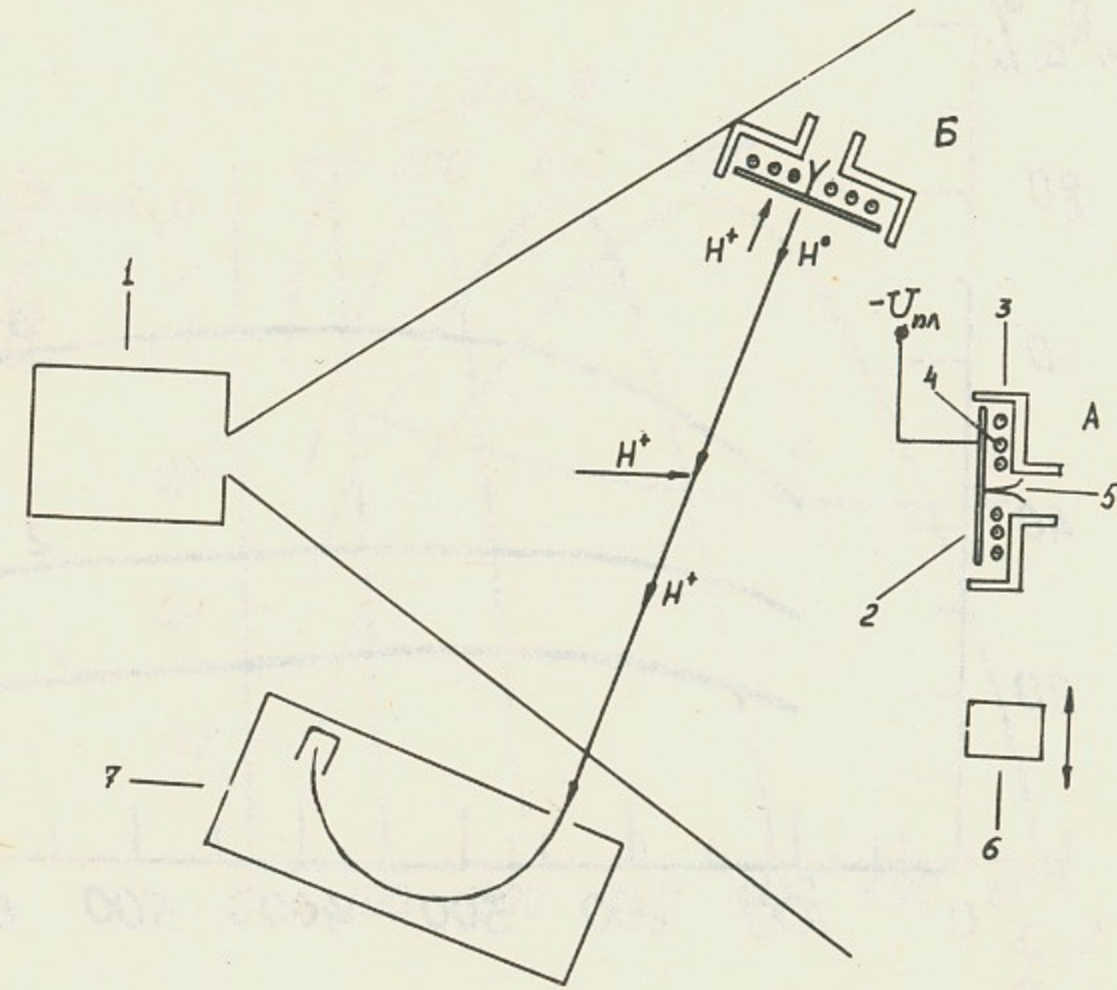


Рис.1. Схема эксперимента по определению коэффициентов отражения и энергетических спектров отраженных атомов
 1 - источник плазмы, 2 - приемная пластина калориметра, 3 - корпус калориметра, 4 - подогреватель, 5 - термопара, 6 - датчик плотности плазменного потока, 7 - энергоанализатор.

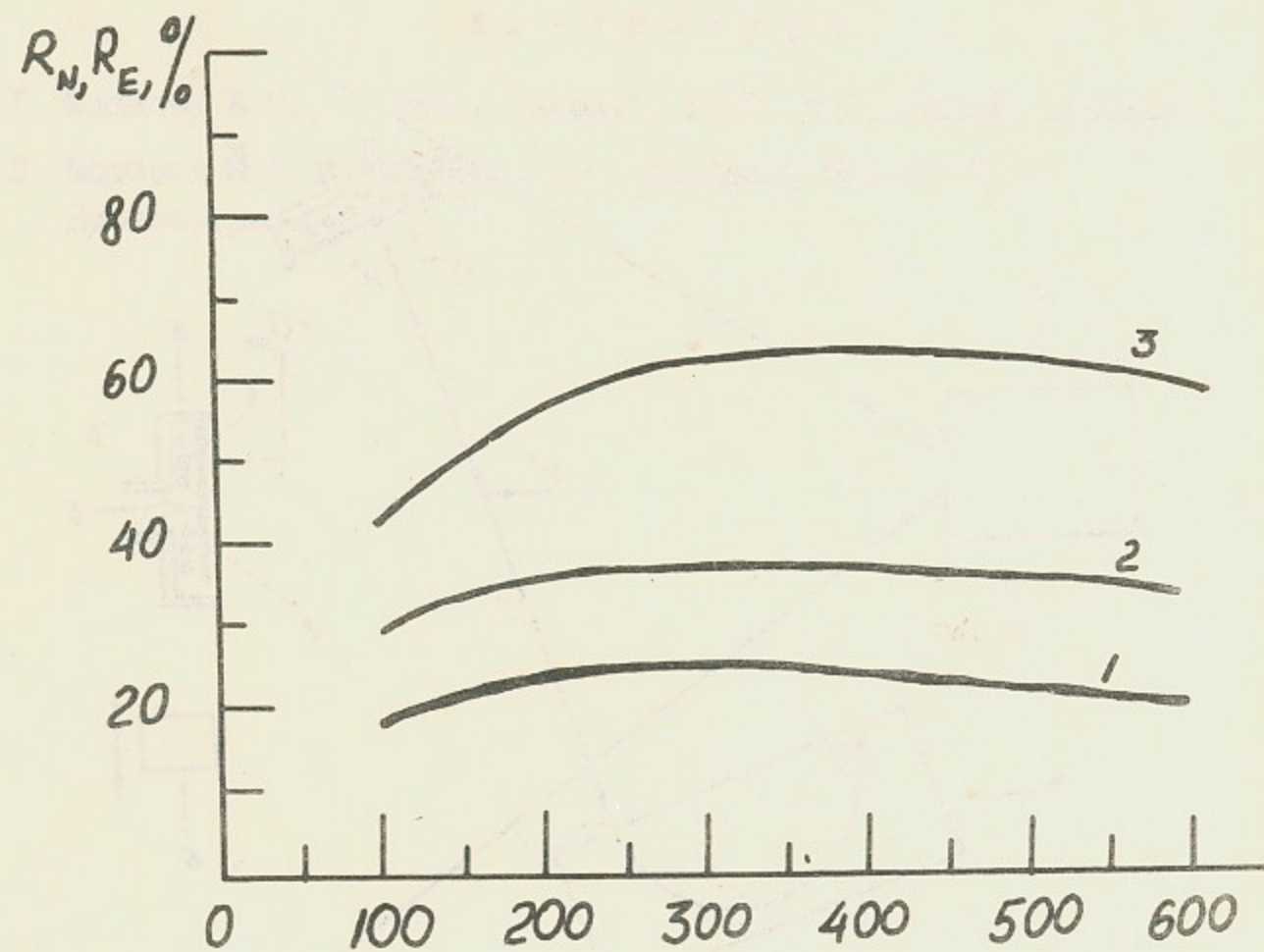


Рис.2. Зависимость коэффициентов отражения энергии R_E и частиц R_N от напряжения на пластине $U_{пл}$. 1 - R_E , молибден; 2 - R_E , нержавеющая сталь, ниобий; 3 - R_N , нержавеющая сталь, ниобий.

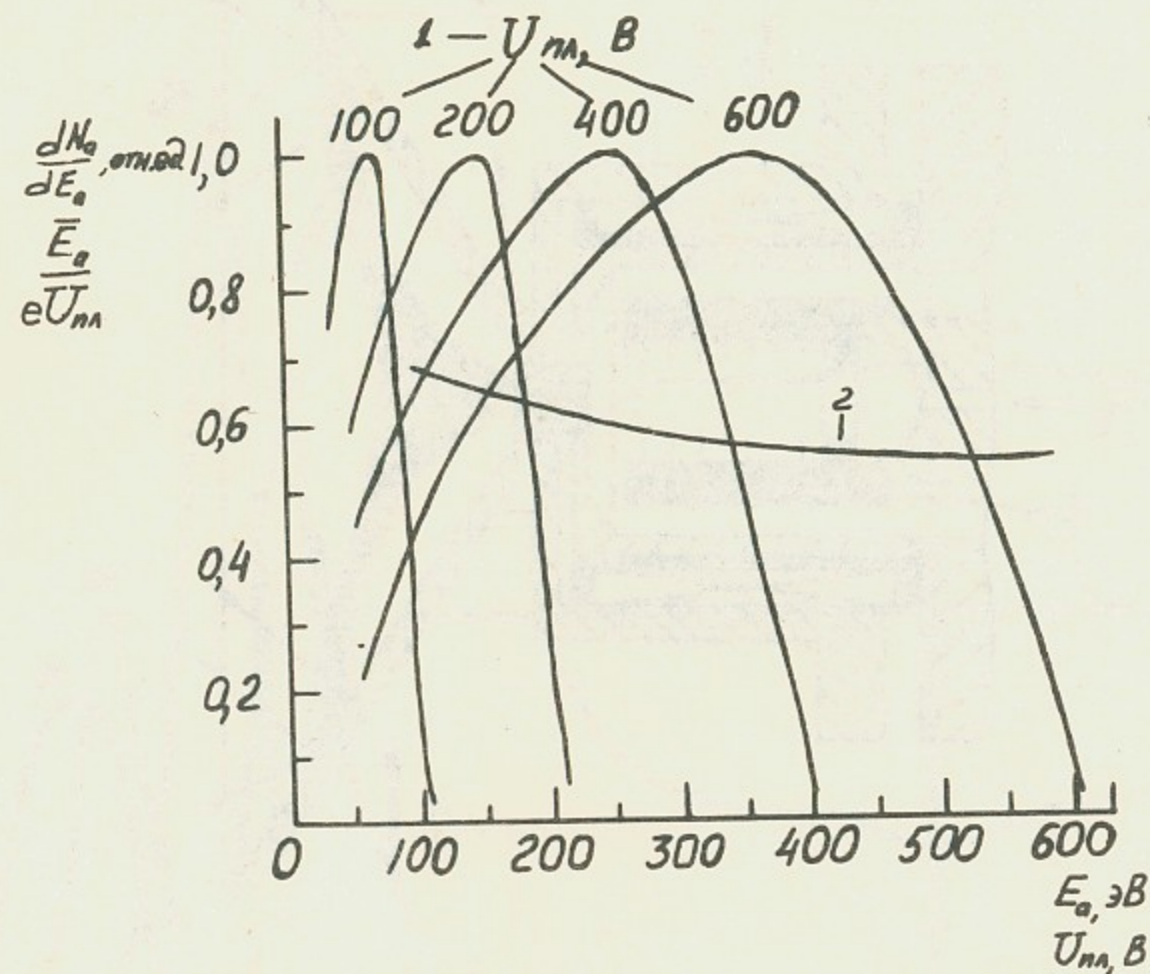


Рис.3. 1 - энергетические спектры отраженных атомов при различных напряжениях на пластине $U_{пл}$, 2 - зависимость относительной средней энергии атомов $\bar{E}_a / eU_{пл}$.

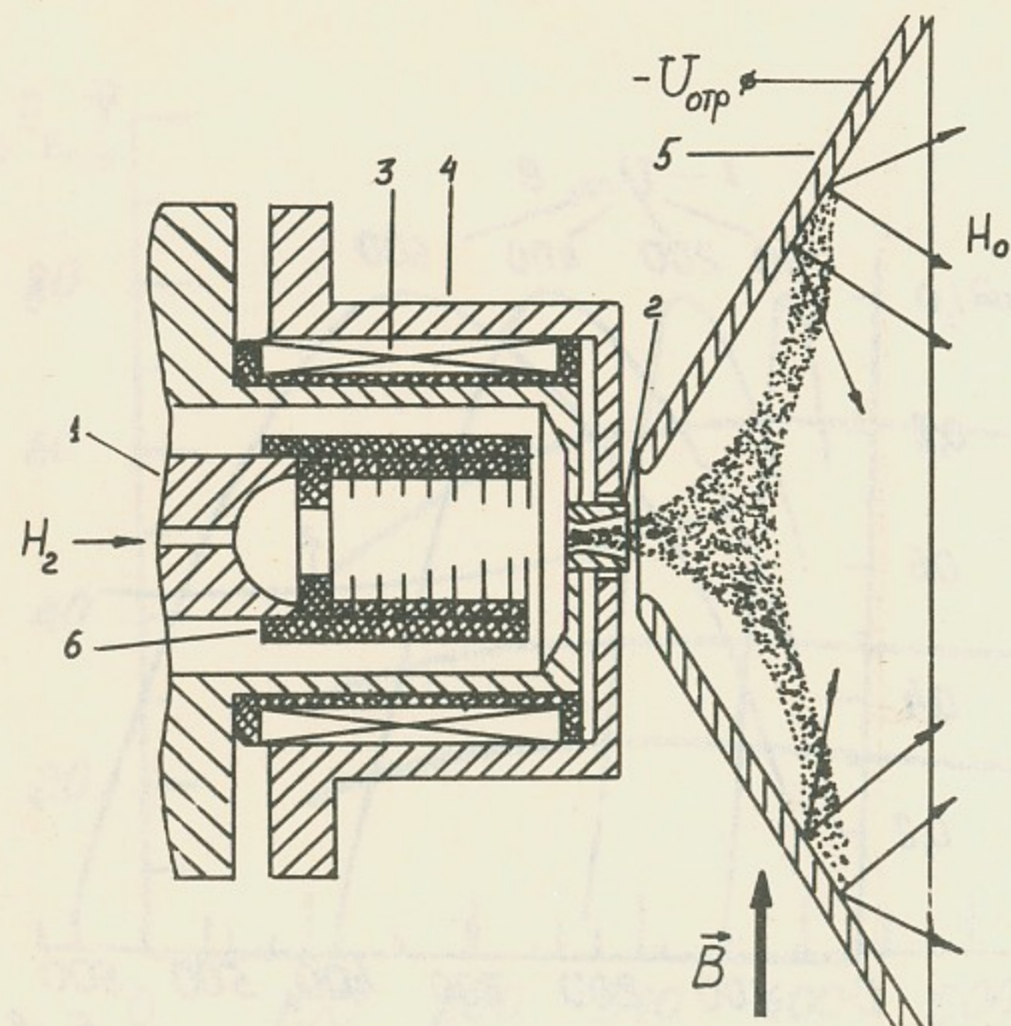


Рис.4. Схема источника атомов низкой энергии: 1 - катод, 2 - анод, 3 - катушка внутреннего магнитного поля, 4 - магнитный экран, 5 - отражатель, 6 - керамический изолятор с диафрагмами.

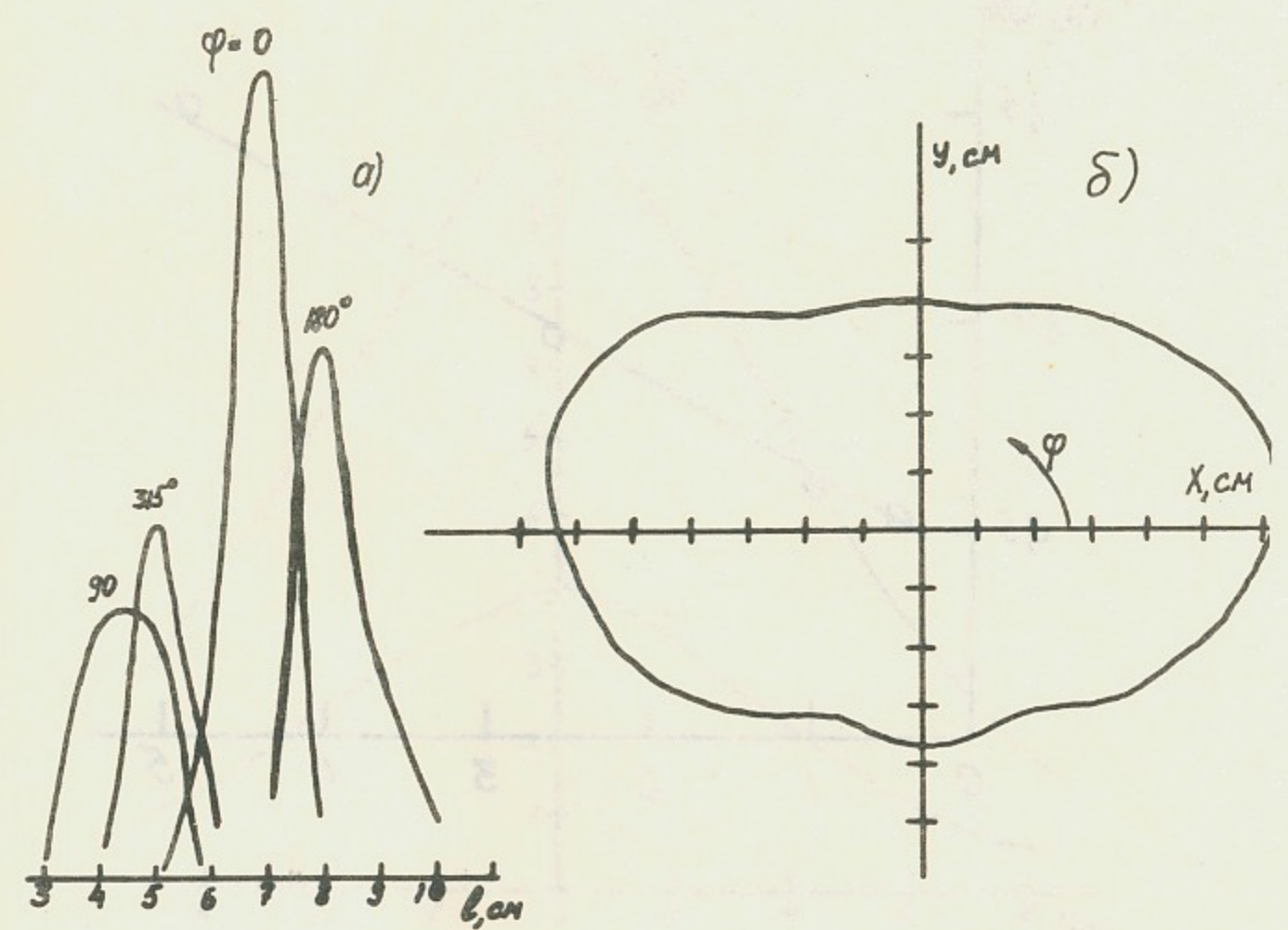


Рис.5. а) Пространственное распределение плотности потока плазмы на поверхности отражателя;
б) Линия максимальной плотности потока плазмы на поверхности отражателя.

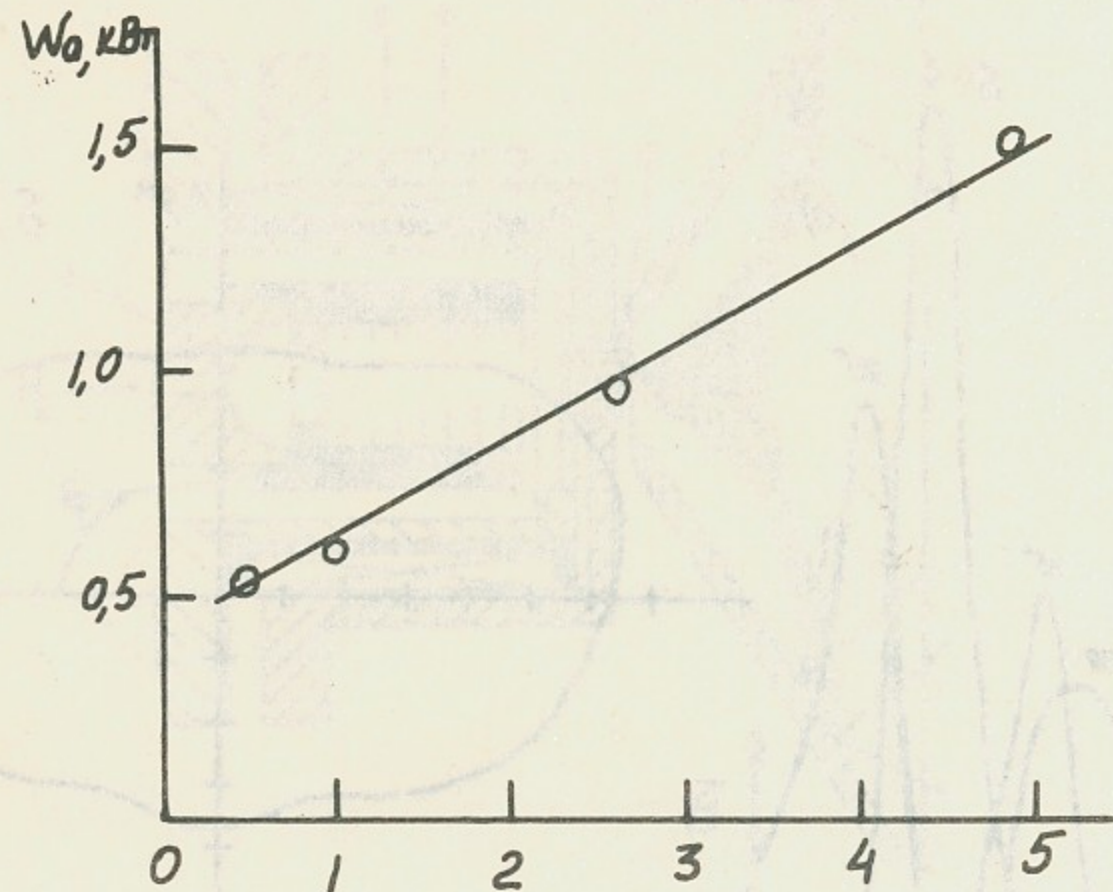


Рис.6. Зависимость полной мощности атомарного пучка W_0 от мощности, падающей на отражатель $W_{отр}$.

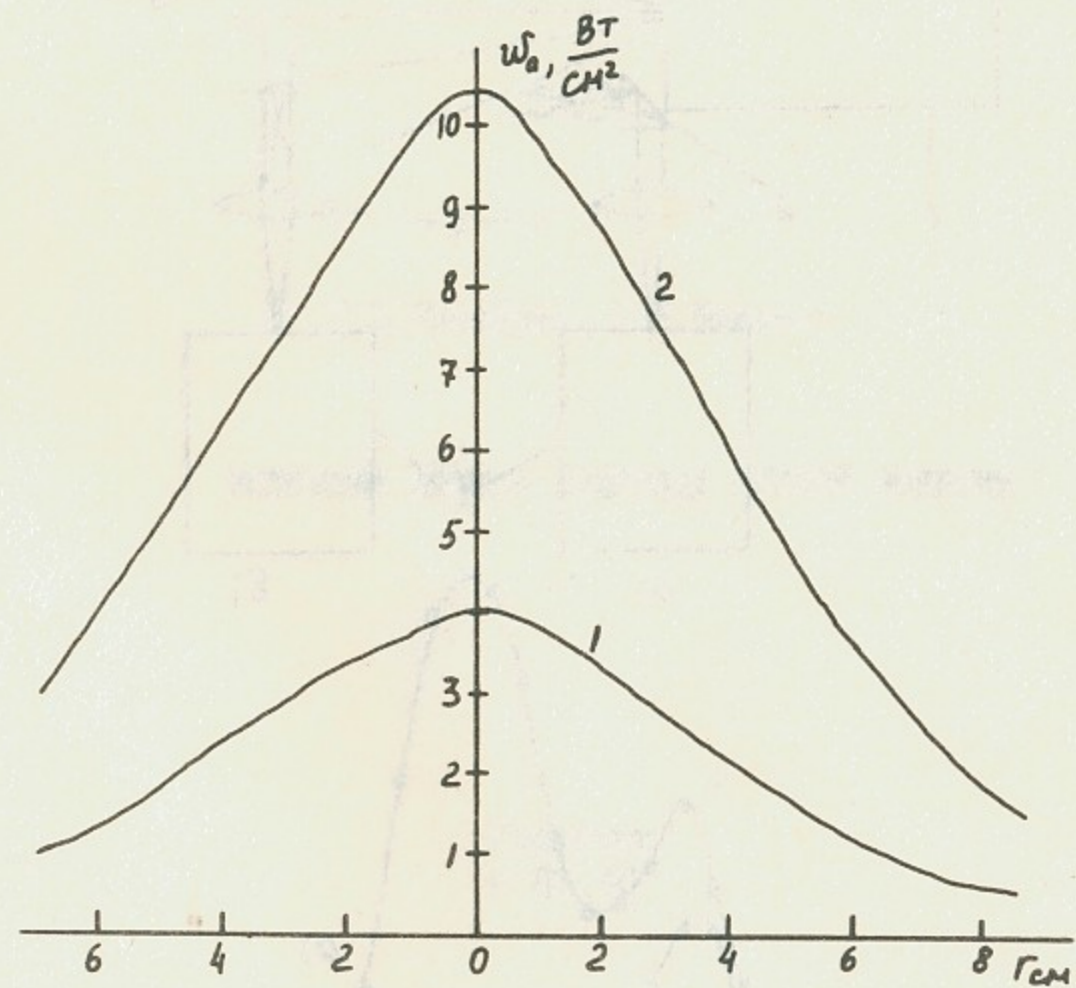


Рис.7. Пространственное распределение плотности потока мощности атомов w_0 в 2,5 см от отражателя. 1 - $W_{отр} = 0$, 2 - $W_{отр} = 3,1$ кВт.

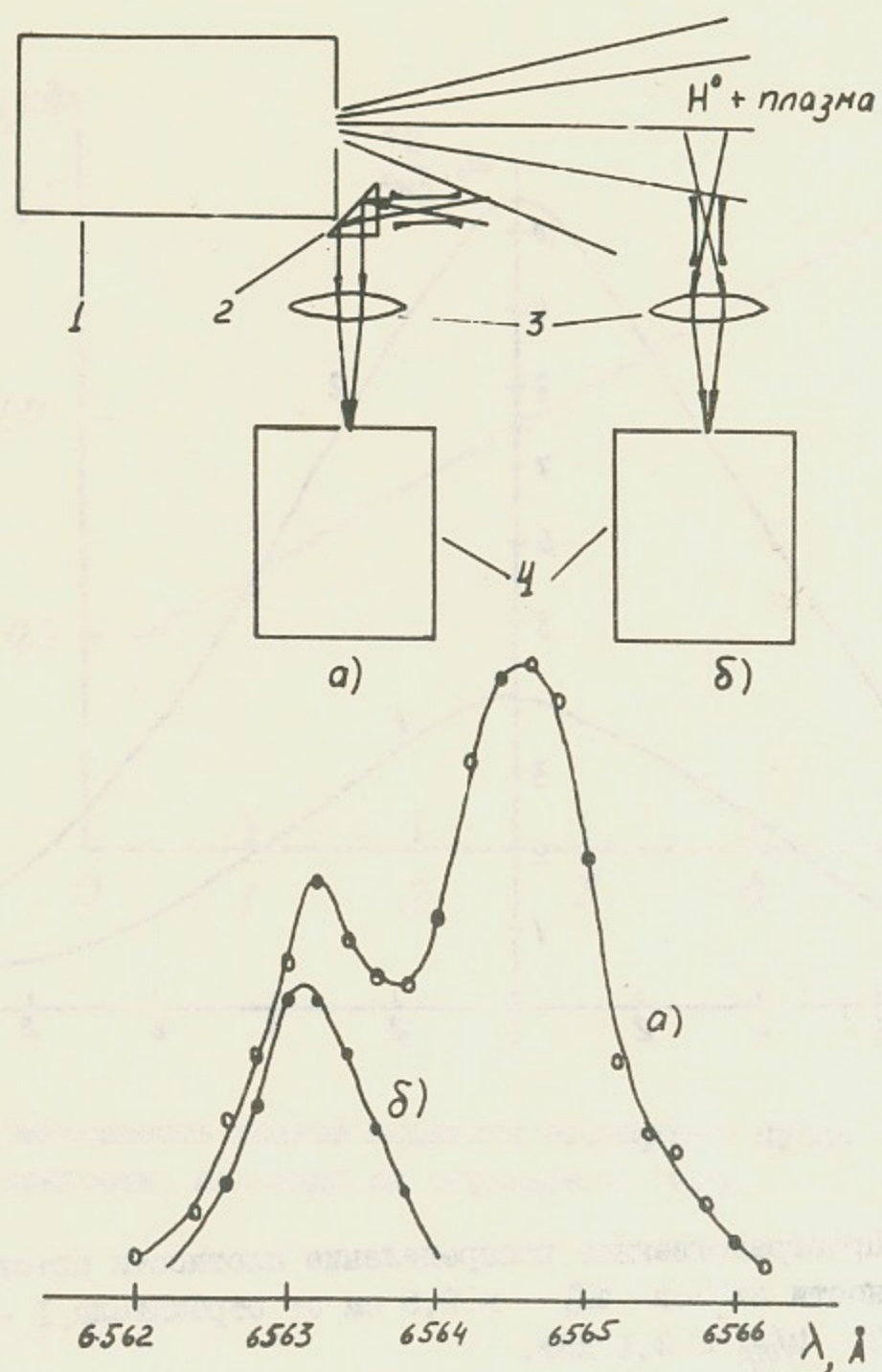


Рис.8. Схема измерения доплеровского смещения линии H_{α} .
 1 - источник плазмы, 2 - призма, 3 - линза, 4 - спектрограф.

Г.В.Росляков, Г.И.Фиксель

ИСТОЧНИК АТОМОВ ВОДОРОДА НИЗКОЙ ЭНЕРГИИ

Препринт
 № 85-40

Работа поступила - 14 марта 1985 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов
 Подписано к печати 29.03-1985 г. МН 06629
 Формат бумаги 60x90 1/16 Усл.л.4 печ.л., 1,1 учетно-изд.л.
 Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 40.

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 90