

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ АН СССР  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

40

С.Г.Попов, Д.К.Топорков

**ВОЗМОЖНОСТЬ ПОЛУЧЕНИЯ  
ПЛОТНОГО АТОМНОГО ПУЧКА  
ПОЛЯРИЗОВАННОГО ВОДОРОДА**

ПРЕПРИНТ 80-129



Новосибирск

ВОЗМОЖНОСТЬ ПОЛУЧЕНИЯ ПЛОТНОГО  
АТОМНОГО ПУЧКА ПОЛЯРИЗОВАННОГО ВОДОРОДА

С.Г. Попов, Д.К. Топорков

А Н Н О Т А Ц И Я

В работе описан источник поляризованных частиц (водорода или дейтерия) с толщиной струйной мишени  $5 \cdot 10^{10}$  ат/см<sup>2</sup> на расстоянии 40 см от края шести - полюсного магнита. Приведен расчет толщины мишени при использовании магнитов с большим числом полюсов. Обсуждаются другие возможности повышения плотности атомов в струе.

В последние годы очень сильно возрос интерес к экспериментам с поляризованными частицами. Это инициировало новую серию работ по получению интенсивных пучков поляризованных ионов (для их последующего ускорения) и по получению поляризованных мишеней. Важное место в этих работах занимают исследования по получению источников поляризованных частиц методом атомного пучка / 1 / , в основе которого лежит классический опыт Штерна и Герлаха / 2 / . Именно таким способом в настоящее время получены максимальные интенсивности поляризованных ионных пучков / 3 / .

Наш интерес к этому методу связан еще и с тем, что в Институте разработан метод постановки экспериментов со сверхтонкой внутренней мишенью в накопителях заряженных частиц / 4 / . В отличие от традиционной постановки поляризационных экспериментов с выпущенным из ускорителя пучком, где требуется достаточно толстая поляризованная мишень (как правило это твердые криогенные мишени с большой долей примесей) этому методу адекватна мишень в виде газовой струи / 5 / .

Целью работы является повышение интенсивности и /или/ плотности пучка поляризованного водорода или дейтерия, полученные методом атомного пучка. Схема установки для получения поляризованных частиц приведена на рис.1. Основные её элементы:

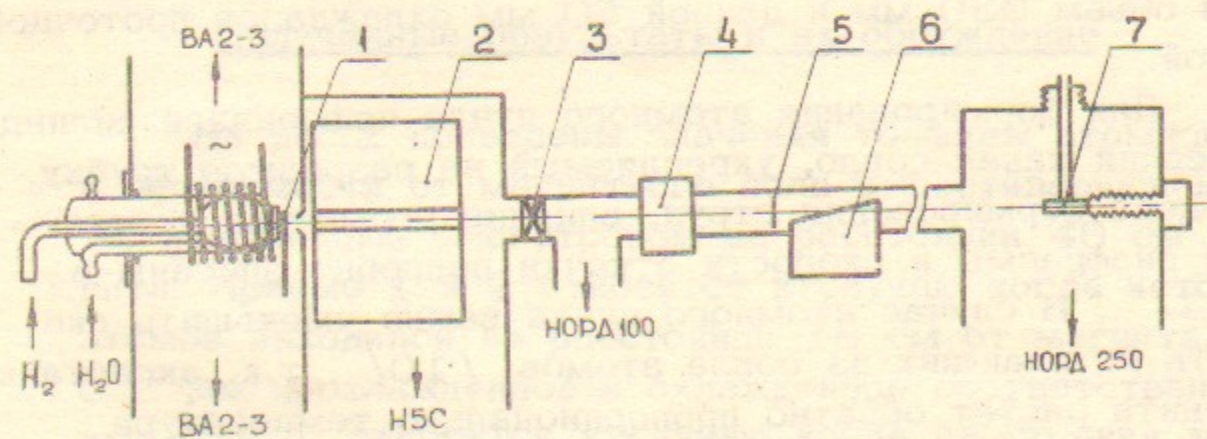


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

1 - сопло, охлаждаемое жидким азотом, 2 - шестиполюсный

магнит, 3 — клапан, 4 — омегатрон, 5 — узкая щель, 6 — отклоняющий магнит типа Раби, 7 — подвижный канал измерительной лампы.

-----  
диссоциатор, формирователь струи с системой откачки и шестиполосный магнит. Для измерения параметров струи применялись, показанные на рисунке, омегатронный масс-спектрометр и манометрическая лампа с каналом для пучка.

В современных источниках поляризованных частиц для получения атомарного пучка, как правило, используется высокочастотный 20+50 Мгц разряд /6/. Подобные источники обеспечивают степень диссоциации в пучке 50% при давлении в разрядной трубке 1 Тор. В /7/ указывается, что переход в СВЧ диапазон должен обеспечить более высокую степень диссоциации при более высоких давлениях. В работе /8/ применен СВЧ разряд с частотой 2.45 Гц, мощность генератора 400 Вт. Разряд горит устойчиво до давления 5 Тор, ожидаемая степень диссоциации 80%.

В нашей установке использовался ВЧ генератор с частотой 20 Мгц, мощностью до 5 кВт. Разрядная трубка диссоциатора, выполненная из кварцевого стекла, была внесена в вакуумный объем с целью увеличения откачки из области между соплом и диафрагмой (см.рис.1.). Разрядный объем Ø30 мм и длиной 50 мм охлаждался проточной водой.

Для формирования атомного пучка применялся цилиндрический канал-сопло, укрепляемый на разрядную трубку. Процесс формирования струи, влияние геометрии отсекающей диафрагмы и скорости откачки подробно описаны в /9/. В случае атомного пучка важно уменьшить скорость истекающих из сопла атомов /10/, т.к. аксептанс магнита растет обратно пропорционально температуре и выигрыш в плотности при данном расходе газа через сопло  $\sim T^{-3/2}$ .

В работе исследовались: неохлаждаемое сопло-канал длиной 2 мм, диаметром 2 мм выполненный в диске из

кварцевого стекла и охлаждаемые жидким азотом сопла-каналы длиной 5 мм, Ø 2 мм и длиной 2 мм, Ø 1 мм выполненные в медном диске. Истекающий из сопла газ откачивался с помощью двух вакуумных агрегатов ВА2-3. Скорость откачки из области сопла  $2 \cdot 10^3$  л/сек по водороду и остается постоянной до расхода 1,5 лТор/сек. Шестиполосный магнит имел длину 15 см и постоянную апертуру равную 8 мм. Величина магнитного поля измерялась с помощью миниатюрного датчика Холла. Максимальное значение поля вблизи полюса 7 кГс. Вакуумный объем, в котором расположен магнит, откачивался насосом Н5С с азотной ловушкой.

Для измерения плотности атомного пучка использовался омегатрон РМО-1, расположенный на расстоянии 40 см от края магнита. В пластинах датчика были сделаны отверстия для атомного пучка, а сам датчик смонтирован внутри корпуса из нержавеющей стали. За омегатроном расположен отклоняющий магнит типа Раби /11/. По отклонению пучка в магните можно определить скорость атомов. Для измерения интенсивности пучка использовался манометрический датчик ММ-14, соединенный сифонами с подвижным блоком, имеющим канал для пучка.

### Полученные результаты и их обсуждение

На рис.2 приведены значения толщины атомного пучка в зависимости от магнитного поля в шестиполосном магните, измеренные омегатроном на расстоянии 40 см от магнита. Кривые 1 и 2 относятся к случаю когда источник атомов находился на расстоянии 18 см от магнита, сопло Ø 2 мм неохлажденное и охлажденное соответственно. Кривые 3 и 4 относятся к случаю когда расстояние между соплом и магнитом равно 3 см, сопла охлажденные Ø2 мм и 1 мм соответственно. Расход водорода для сопел Ø2 мм равен 0,55 лТор/сек, для сопла Ø 1 мм 0,3 лТор/сек. Отличительной чертой кривых 2,4 является сильное уменьшение плотности с дальнейшим ростом магнитного поля, т.е.

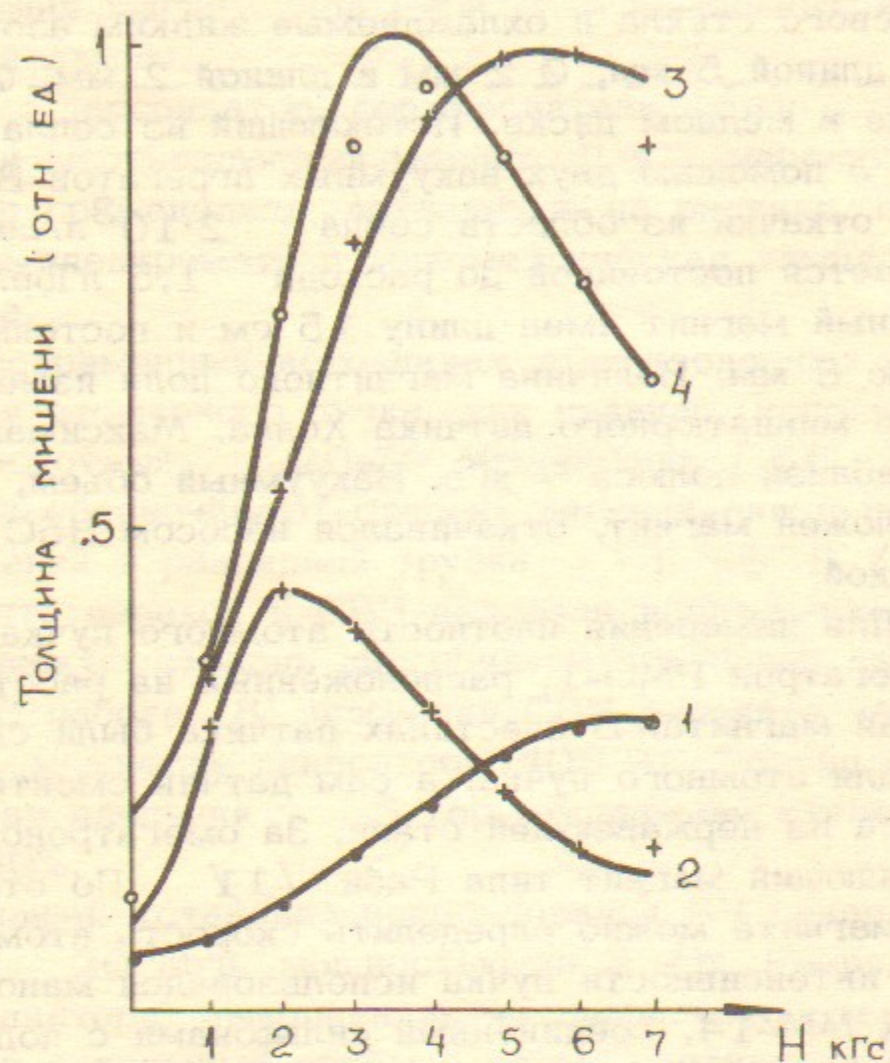


Рис.2. Толщина атомного пучка ( $\text{ат}/\text{см}^2$ ) в зависимости от магнитного поля на расстоянии 40 см от магнита. Линии — показания омегатрона,  $\bullet$ ,  $+$ ,  $\circ$  — расчетные значения с распределением по скоростям из таблицы 1.

с увеличением аксептенса магнита. В случае короткого магнита, такое поведение плотности объясняется тем, что основной вклад в плотность пучка дают атомы, фокусирующие на ось магнита (см.рис.3), т.е. атомы с данной скоростью при заданном магнитном поле и плотность пучка есть трансформированное магнитом распределение по скоростям. Из сравнения поведения расчетной плотности от магнитного поля и измеренной выбиралось распределение по скоростям вида  $dn \sim v^3 \cdot \exp(-m(v-v_s)^2/kT) dv$ . Для использованных сопел константы распределения  $v_s$ ,  $T$ , а также наиболее вероятная скорость вычисленная по распределению и измеренная по отклонению пучка в магните Раби приведены в таблице

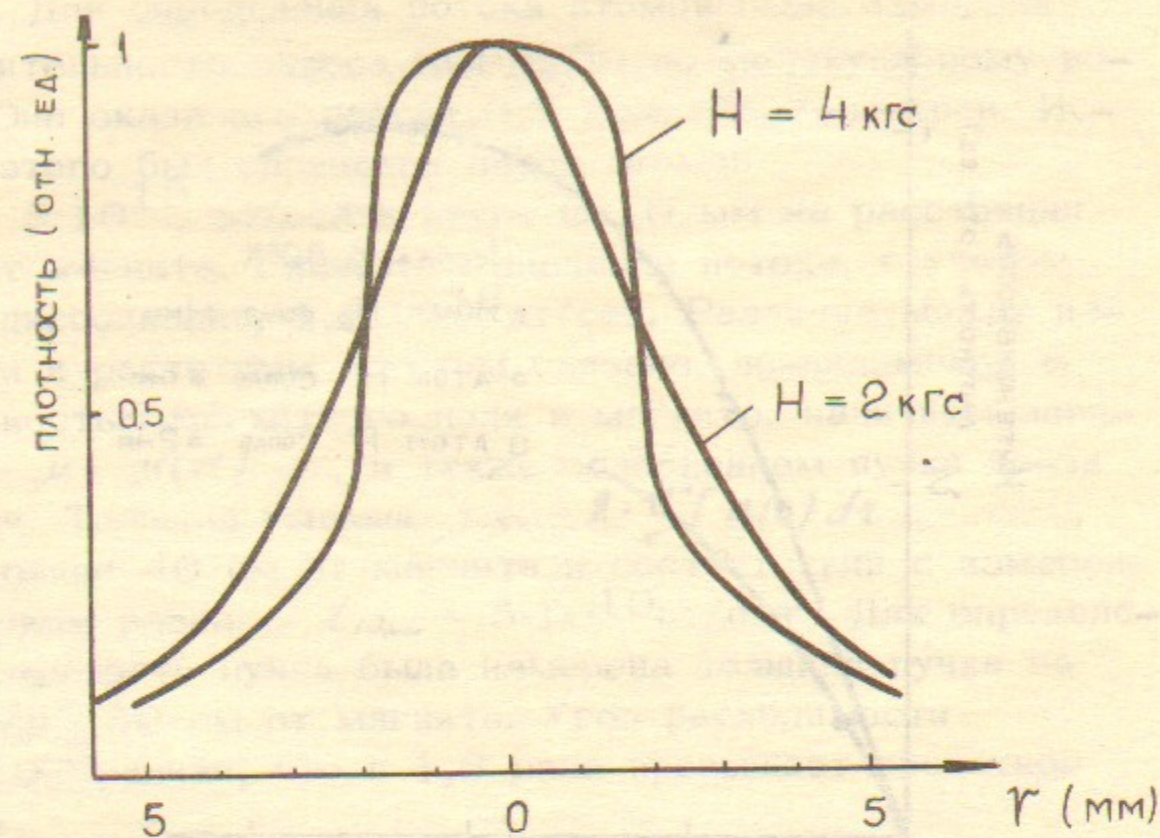


Рис.3. Расчетное распределение плотности в сфокусированном атомном пучке на расстоянии 40 см от магнита.

		$T K^\circ$	$v_s \cdot 10^5 \text{ см/сек}$	$v_{н.в.} \cdot 10^5 \text{ см/сек}$	$v_{0.95} \cdot 10^5 \text{ см/сек}$
1	неохлажденное сопло $\varnothing$ 2 мм	180	2,6	3,3	3,4
2	Охлажденное сопло $\varnothing$ 2 мм	100	1,25	1,9	2
3	Охлажденное сопло $\varnothing$ 1 мм	85	1	1,6	

На рис.4 приведены значения плотности атомного пучка в зависимости от расхода водорода через сопло, а также интенсивность охлажденного молекулярного пучка, измеренная лампой.

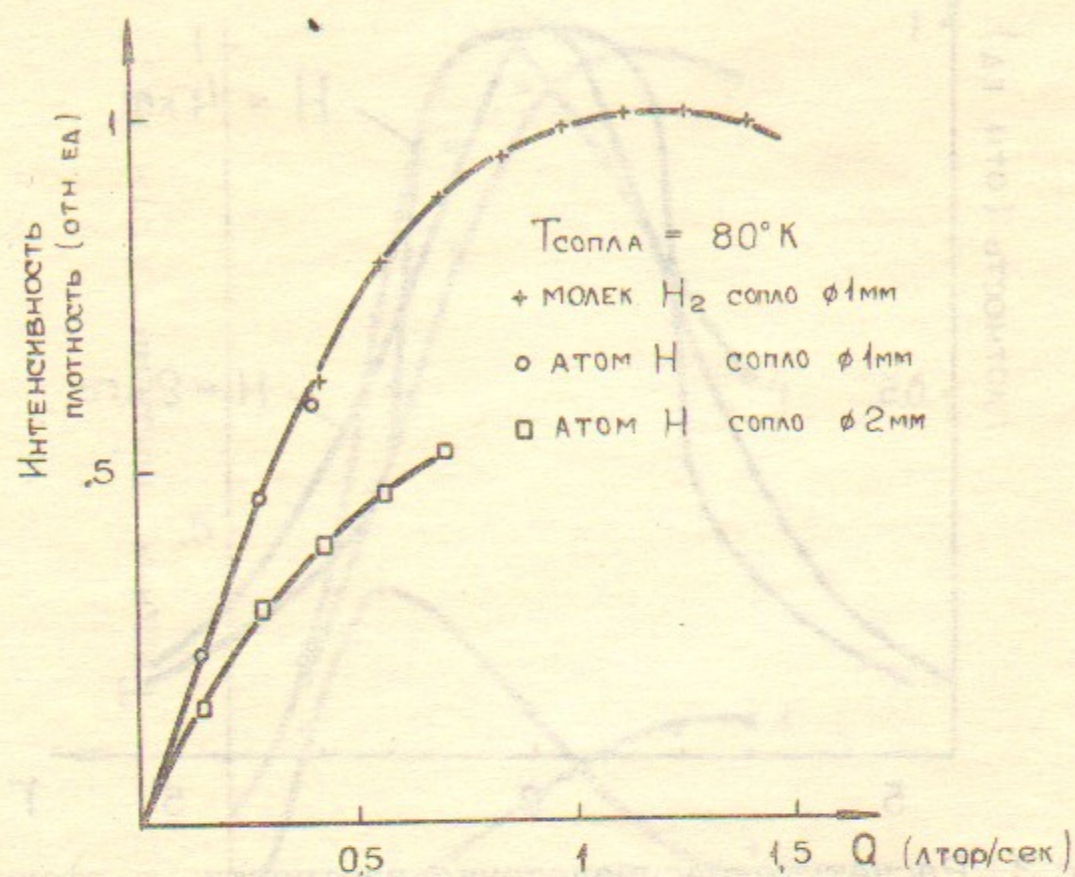


Рис.4. Интенсивность молекулярного и плотность сфокусированного атомного пучка в зависимости от расхода водорода через сопло.

При данном расходе газа, плотность, полученная с соплом  $\varnothing$  1 мм в 1,5 раза выше плотности, полученной с соплом  $\varnothing$  2 мм в соответствии с расчетом (1.65). Видно, что плотность атомного пучка пропорциональна интенсивности молекулярного пучка, что говорит о постоянстве степени диссоциации до расхода 0,4 лтор/сек (давление  $\sim$  2 тор). При большем давлении степень диссоциации резко падает. Степень диссоциации определялась следующим образом. При выключенном шестиполосном магните регистрировался ток омегатрона, настроенного на регистрацию и ток насоса НОРД250. Затем включался магнит и измерения проводились еще раз. Предполагалось, что два атома водорода дают тот же ток в насосе как молекула. Степень диссоциации определялась по формуле  $K = 100\% \times (I_{H250}^+ / I_{H250}^- - 1) / (I_{омег.}^+ / I_{омег.}^- - 1)$ . Измеренная таким образом степень диссоциации оказалась рав-

ной 60%. Для определения потока атомов была измерена производительность насоса НОРД250 по молекулярному водороду. Она оказалась равной 0,7 мол.  $H_2$  / электрон. Исходя из этого был определен поток атомов

$Q = 5 \cdot 10^{15}$  ат/сек в круге  $\varnothing$  10 мм на расстоянии 30 см от магнита. Расчетное значение потока, с учетом степени диссоциации,  $1,1 \cdot 10^{16}$  ат/сек. Различие между измеренным и расчетным потоком связано, по-видимому, с неидеальностью магнитного поля в магните, наличием зависимости  $\mu = \mu(H)$ , а также ослаблением пучка из-за рассеяния. Толщина мишени, т.е.  $2 \cdot \int_0^{r_{max}} n(r) dr$ , на расстоянии 40 см от магнита в соответствии с измеренным потоком равна  $t_{10mm} = 5 \cdot 10^{10}$  ат/см<sup>2</sup>. Для определения расходимости пучка была измерена толщина пучка на расстоянии 250 см от магнита. Угол расходимости  $\alpha \sim 8 \cdot 10^{-3}$  радиан, что в 1,6 раза превышает расчетное значение

Поведение интенсивности молекулярного пучка (см. рис.4) до расхода  $\sim$  1 лтор/сек, хорошо объясняется рассеянием на остаточном газе в установке, что проверялось на насосом водорода в камеру шестиполосного магнита. При расходе 1,4 лтор/сек дополнительное ( $\sim$  20%) ослабление связано, по-видимому, с рассеянием на молекулах, отраженных от диафрагмы и рассеянием молекул пучка друг на друге / 12 /. Ослабление атомного пучка при расходе 0,4 лтор/сек составляет 15%.

#### Выводы

В описанном источнике поляризованных атомов получена струя атомов толщиной  $5 \cdot 10^{10}$  ат/см<sup>2</sup> на расстоянии 40 см от шестиполосного магнита. Показано, что атомы, вытекающие из разряда, можно эффективно охлаждать, применяя медное сопло. Приведенные расчеты хорошо описывают зависимость плотности от магнитного поля в магните и удовлетворительно величину плотности.

Дальнейшее повышение плотности атомного пучка воз-

можно за счет оптимизации параметров основных элементов источника. Для шестиполосного магнита с постоянной апертурой и точечного источника атомов со скоростью  $\vartheta$ , находящегося на оси магнита максимальный телесный угол захвата атомов  $\Omega_{const} = \pi \cdot \mu \cdot H / m \vartheta^2$

$\mu$  — магнитный момент атома,  $m$  — его масса,

$H$  — магнитное поле близи полюса. В магните с оптимально изменяющейся апертурой, когда траектория атома, входящего в магнит под максимально допустимым углом и край полюса совпадают и этот "крайний" атом все время движется в области максимального градиента поля, достигается больший телесный угол [13]. Использование больших телесных углов в этом случае затруднено из-за экспоненциального роста длины магнита от телесного угла.

Так в случае точечного источника атомов со скоростью  $\vartheta = 1,6 \cdot 10^5$  см/сек отстоящего на расстоянии 3 см от "оптимального" шестиполосного магнита с полем в 10 кГс при длине магнита 30 см достигается

$\Omega = 2,7 \cdot \Omega_{const}$ . Для  $\Omega = 4 \cdot \Omega_{const}$  длина магнита около метра. В магните имеющим большее число полюсов сила, действующая на атом вблизи полюса больше, поэтому вероятно, что плотность, полученная с таким магнитом будет выше. Мы провели расчеты (см. приложение) для "оптимальных" магнитов длиной 30 см, с полем

10 кГс имеющих различное число полюсов. Источником атомов с распределением по скоростям 3 из таблицы, является сопло  $\varnothing 1$  мм, отстоящее от магнита на расстоянии 3 см, значение толщины мишени  $t_{2.2 \text{ мм}} =$

$2 \cdot \int_0^{\infty} n(v) dv$  полученные на расстоянии 30 см

за магнитом приведены на рис.5. Как видно 12 полюсный магнит обеспечивает максимальную толщину. Это связано с широким распределением по скоростям в атомном пучке. В шестиполосном магните основной вклад в плотность дают атомы, имеющие скорости в небольшом интервале, которые фокусируются к оси. В 12 полюсном магните существенный вклад в плотность дают атомы со скоростями в более широком интервале и положение этого интер-

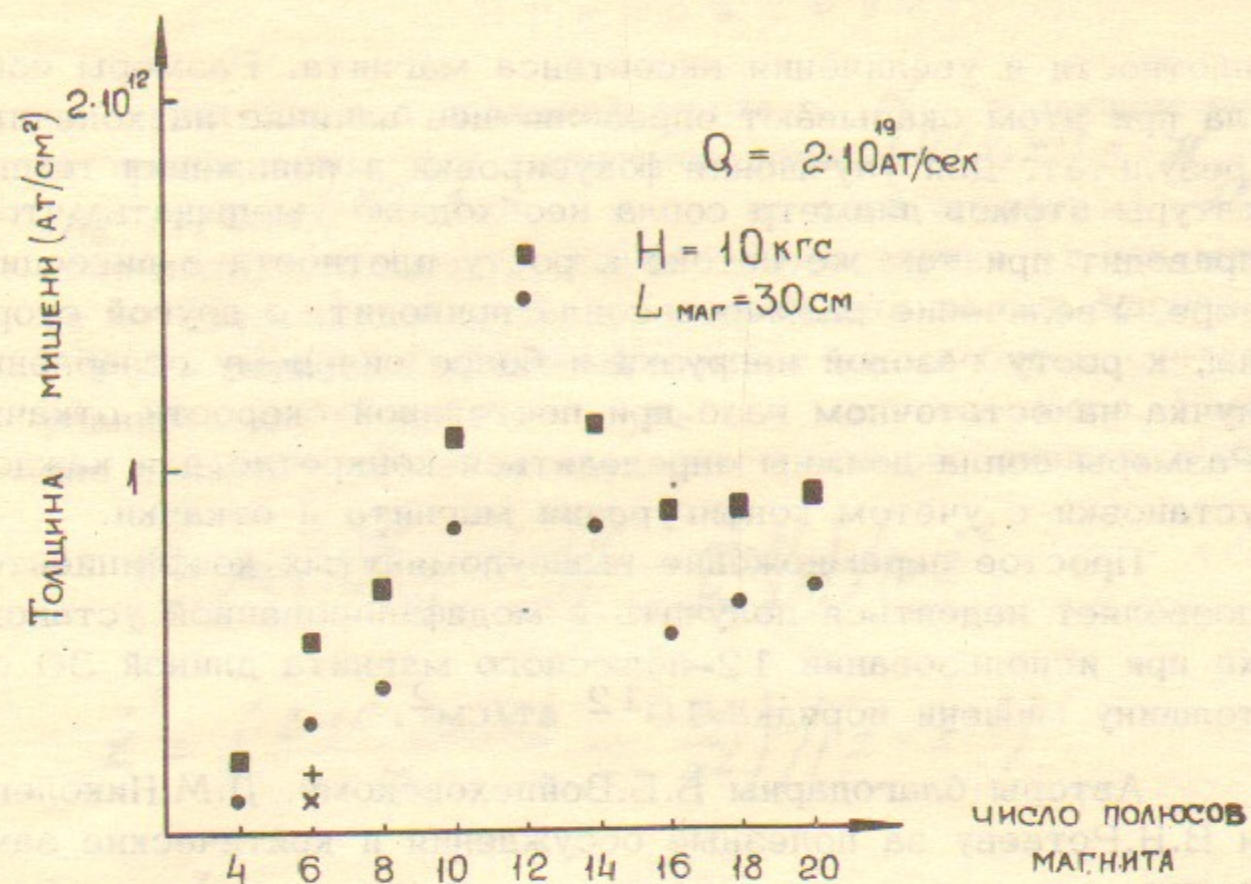


Рис.5. Расчетное значение толщины атомного пучка на расстоянии 30 см от "оптимального" магнита в зависимости от числа полюсов магнита.

■ — толщина в размере 30 мм, ● — толщина в размере 5 мм, + , X — толщины для магнита используемого в установке.

вала сдвинуто в сторону меньших скоростей относительно наиболее вероятной скорости. Таким образом, применение "оптимального" 12 полюсного магнита должно привести к увеличению плотности в 5-10 раз.

Для получения возможно большего потока поляризованных частиц нужно иметь в диссоциаторе максимально возможное произведение давления газа на процент диссоциации. Применение СВЧ разряда, по-видимому, позволит поддерживать более высокое давление в диссоциаторе, что приведет к увеличению интенсивности атомного пучка примерно в два раза.

Система формирования струи должна создавать возможно больший поток частиц в телесный угол магнита при возможно меньших скоростях, для обеспечения максимальной

плотности и увеличения аксептанса магнита. Размеры сопла при этом оказывают определяющее влияние на конечный результат. Для улучшения фокусировки и понижения температуры атомов диаметр сопла необходимо уменьшать, что приводит при том же потоке к росту плотности в диссоциаторе. Увеличение размеров сопла приводит, с другой стороны, к росту газовой нагрузки и более сильному ослаблению пучка на остаточном газе при постоянной скорости откачки. Размеры сопла должны определяться конкретно для каждой установки с учетом конфигурации магнита и откачки.

Простое перемножение вышеупомянутых коэффициентов позволяет надеяться получить в модифицированной установке при использовании 12-полюсного магнита длиной 30 см толщину мишени порядка  $10^{12}$  ат/см<sup>2</sup>.

Авторы благодарны Б.Б.Войцеховскому, Д.М.Николенко и В.Н.Ротаеву за полезные обсуждения и критические замечания.

Для анализа движения атома в  $N$ -полюсном магните предположим, что магнитное поле  $|H(r, z)| = H = H_0 \cdot (r/r_m(z))^{N/2-1}$  во всей апертуре.  $H_0$  - поле вблизи полюса,  $r_m(z)$  - расстояние от оси магнита до полюса, ось  $z$  направлена по оси магнита,  $r$  - радиус. Магнитный момент атома будем считать равным  $\mu = \pm \mu_0$ ,  $\mu_0$  - магнетон Бора. Уравнение движения для фокусирующихся атомов запишем в виде:

$$r'' + \mu_0 \left( \frac{\partial H}{\partial r} - r' \frac{\partial H}{\partial z} - \frac{m \cdot M}{\mu_0 \cdot r^3} \right) / m \cdot \dot{z}^2 = 0$$

$$\dot{z}^2 = \left( \frac{2 \cdot (E - \mu_0 \cdot H)}{m} - \frac{M}{r^2} \right) / (1 + r'^2)$$

$$r \cdot \dot{\varphi} = M = \text{const}, \quad \frac{\partial H}{\partial z} = \left( \frac{N}{2} - 1 \right) \cdot \frac{H}{z}$$

$$\frac{\partial H}{\partial z} = - \left( \frac{N}{2} - 1 \right) \cdot \frac{H}{z_m} \cdot \frac{\partial z_m}{\partial z}, \quad r' = \frac{\partial r}{\partial z}$$

$m$  - масса атома,  $E$  - полная энергия. Зависимость апертуры  $r_m(z)$  от длины определялась из условия, что атом с наиболее вероятной скоростью, вылетевший с оси магнита на расстоянии 3 см от его входного отверстия фокусируется (при данной длине магнита и величине магнитного поля) на расстоянии 30 см за магнитом и его траектория совпадает с краем полюса. Для этого в уравнениях надо положить  $M = 0$  и  $r = z_m$ . Затем в этом магните исследовались траектории атомов, вылетающие из источника  $\emptyset 1$  мм с распределением по скоростям и определялось распределение плотности на расстоянии 30 см от магнита. Аналогичные расчеты проделаны для магнита с постоянной апертурой и для дефокусирующихся атомов.



Л и т е р а т у р а :

1. Поляризация нуклонов. Труды международной конференции по поляризационным явлениям в ядрах. Базель, 1960 г. Госатомиздат, Москва 1962 г.
2. *Gerlach, Stern O., Ann. d. Phys., 74, 673 (1924)*
3. *J. Antill et al., CERN/SPS/77-71, SPSC/P 88, Geneva, 1977*
4. П.И.Батурин, С.Г.Попов, Д.К.Топорков. ЖТФ, X У1, 637, 1976. П.И.Батурин, Б.А.Лазаренко, Д.М.Николенко, С.Г.Попов, Ю.Г.Украинцев. ПТЭ, 1978, № 4, 38.
5. В.Ф.Дмитриев, С.Г.Попов, Д.К.Топорков. Квадрупольный формфактор дейтона (проект эксперимента в электронном накопителе). Препринт ИЯФ 76-85, Новосибирск, 1976.
6. Ю.А.Плис, Л.М.Сороко. Пучок поляризованных атомов водорода. ОИЯИ, Р9-10312, Дубна, 1976.
7. *M. Bell et al., CERN/PS/DL/76-9, Geneva, 1976*
8. *E. J. Murphy, J. H. Brophy, Rev. Sci. Instr. 50, 635 (1979)*
9. Исследования с молекулярными пучками. Сборник Мир, 1969.
10. *H. Wilsch, J. Chem. Phys. 56, 1412 (1972)*
11. Н.Рамзей. Молекулярные пучки М., ИЛ, 1960
12. В.С.Троицкий. ЖЭТФ, 41, 389, 1961
13. *Lemonick A., Ripkin F.M., Hamilton B.R. Rev. Sci. Instr., 26, 1112 (1955)*

Работа поступила - 17 апреля 1980 г.

---

Ответственный за выпуск - В.А.СИДОРОВ  
Подписано к печати 28.04.1980 г. МН 07119  
Усл. 0,8 печ.л., 0,7 учетно-изд.л.  
Тираж 180 экз. Бесплатно  
Заказ № 129.

---

Отпечатано на ротапинтере ИЯФ СО АН СССР