

Ю.К.Пилипенко

Объединенный институт ядерных исследований
Дубна, 141980Аннотация

В соответствии с программой исследований в области релятивистской ядерной физики в синхрофазотроне ОИЯИ ускоряется широкий набор пучков ядер. В последние годы экспериментальные возможности синхрофазотрона расширены за счет получения пучка поляризованных дейтронов. Для этой цели созданы криогенный источник "Полярис", поляриметр пучка после линейного ускорителя с мишенями ^3He , ^4He , внутренний поляриметр пучка высоких энергий.

В докладе приводятся описания устройств и сообщаются результаты работы по получению поляризованного пучка.

Введение

Синхрофазотрон ОИЯИ с энергией 4,5 ГэВ/нукл. используется для исследований в области релятивистской ядерной физики. В нем ускоряется широкий набор пучков ядер (таблица. 1). Это стало возможно благодаря созданию целого ряда источников. На синхрофазотроне работают: дуоплазмотрон, источник с накоплением полностью ионизированных ядер "Крион" ¹, лазерный источник ² и источник поляризованных дейтронов "Полярис" ³. Пучки ядер из источников, до инжекции в кольцо, ускоряются в форинжекторе, а затем в линейном ускорителе до энергии 5 МэВ/нукл. С целью увеличения интенсивности пучков ядер высокой зарядности создана система криооткачки, ⁴ что улучшило вакуум в камере ускорителя на порядок

Таблица 1

Интенсивности пучков на синхрофазотроне

Наименование частиц	Число ионов в импульсе
p	$4 \cdot 10^{12}$
d	$1 \cdot 10^{12}$
$^3\text{He}^{2+}$	$5 \cdot 10^8$
$^4\text{He}^{2+}$	$2 \cdot 10^{10}$
$^7\text{Li}^{3+}$	$5 \cdot 10^{10}$
$^{12}\text{C}^{6+}$	$2 \cdot 10^9$
$^{16}\text{O}^{8+}$	$5 \cdot 10^8$
$^{19}\text{F}^{9+}$	$5 \cdot 10^7$
$^{22}\text{Ne}^{10+}$	$1,5 \cdot 10^7$
$^{24}\text{Mg}^{12+}$	10^4
$^{28}\text{Si}^{14+}$	$2 \cdot 10^7$ ж
	$5 \cdot 10^4$ ж

ж с криооткачкой

Действующие источники поляризованных частиц — технологически сложные устройства, состоят из многих систем и потребляют значительную мощность для электропитания. Большая часть энергии расходуется для работы вакуумных насосов и магнитов.

Обычно источники ионов размещаются на высоковольтной платформе форинжектора, имеющей небольшие размеры и ограниченную мощность автономного генератора.

В связи с этим был предложен и разработан криогенный вариант источника ^{3,5,6}. Вакуумная откачка в криогенном источнике при формировании атомарного пучка осуществляется за счет конденсации газа на криоповерхностях, охлаждаемых до температуры 4,2 К. Магнитные поля в установке создаются с помощью сверхпроводящих магнитов, работающих в режиме "замороженного" тока. Электропитание необходимо только для систем управления и контроля, для высокочастотных генераторов и других устройств, потребляющих относительно небольшую мощность.

Криогенный источник поляризованных дейтронов "Полярис" со всем оборудованием, обеспечивающим его работу, был смонтирован на ускорителе в 1981 г. и пучок впервые был ускорен в синхрофазотроне до высоких энергий (рис. 1) ⁷.

Принцип работы источника "Полярис" (рис. 2)

При разработке источника поляризованных дейтронов для синхрофазотрона была принята схема атомарного пучка, т.к. источники такого типа имеют максимальную интенсивность. В нем последовательно реализуются следующие технологические процессы:

Диссоциация молекул. Атомарный дейтерий получается в высокочастотном разряде, возбуждаемом в стеклянной колбе при давлении в несколько Тор и при частоте 80 МГц. В разряде при малых давлениях происходит реакция атомов в молекулы происходит на стенках. Колба диссоциатора изготавливается из стекла пирекс, имеющего малый коэффициент рекомбинации. Сопловой канал выполняется из пирекса или фторопласта. Минимум скорости рекомбинации для пирекса наблюдается при температуре около 110 К. В этом случае атому требуется около $5 \cdot 10^4$ соударений для рекомбинации в молекулу ⁸. Скорость рекомбинации резко возрастает при дальнейшем понижении температуры.

Формирование холодного атомарного пучка. Атомарный поток из диссоциатора формируется с помощью сопла, коллимирующих устройств и дифференциальной системы криооткачки газа. Для получения максимальной интенсивности диаметр сопла, размеры коллиматоров, расстояния между ними должны быть оптимизированы. В "Полярисе" диаметр сопла 3 мм, сепаратора 4,5 мм, расстояние между ними 8 мм. Расход газа при критическом истечении определяется

$$Q = P_0 \left(\frac{2\gamma}{R T_0 (\gamma + 1)} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} A_c,$$

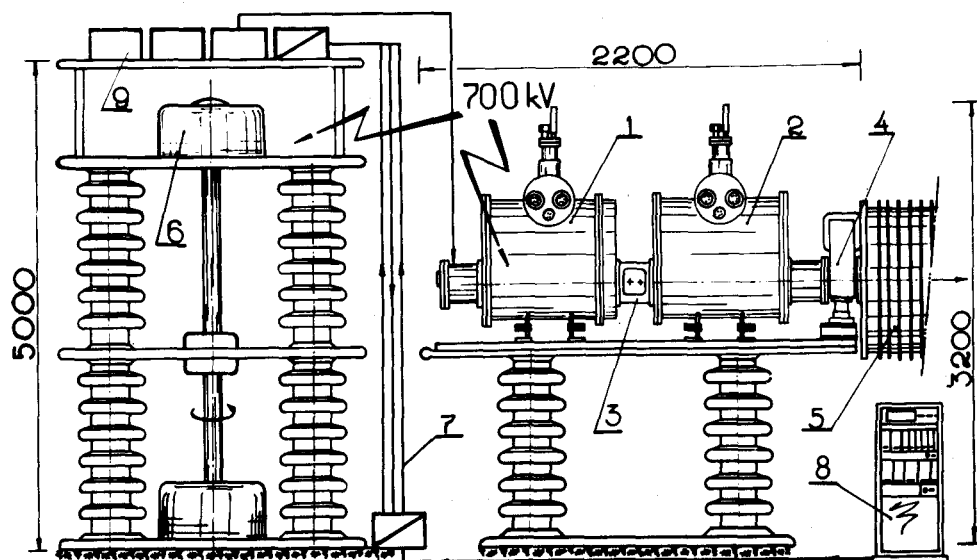


Рис. 1. Схема размещения источника "Полярис" на форинжекторе линейного ускорителя.

- 1 - криогенный источник поляризованных атомов дейтерия,
- 2 - криогенный ионизатор Пеннинга, 3 - система ядерной поляризации,
- 4 - узел ориентации спина, 5 - ускорительная трубка, 6 - генератор электропитания,
- 7 - оптоволоконные линии, 8 - микро-ЭВМ "Электроника-60",
- 9 - микропроцессор, исполнительная электроника, высоковольтные источники.

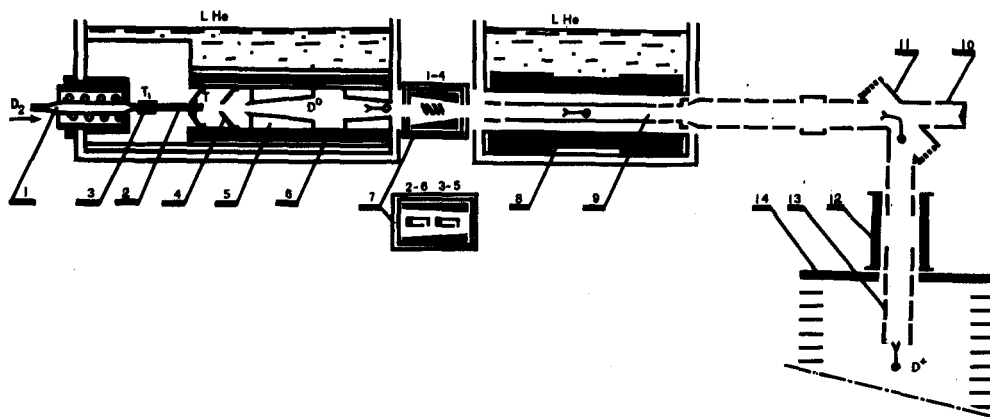


Рис. 2. Схема источника "Полярис". 1 - диссоциатор, 2 - фторопластовая трубка и аккомодатор, 3 - нагреватель, 4 - сепаратор, 5 - полюсные наконечники, 6 - сверхпроводящий шестиполосный магнит, 7 - ВЧ-ячейки, 8 - сверхпроводящий соленоид, 9 - электроды ионизатора, 10 - цилиндр Фарадея, 11 - электростатическое зеркало, 12 - соленоид спин-прецессора, 13 - ионная оптика, 14 - ускорительная трубка.

где: P_0 , T_0 - давление и температура газа в диссоциации, A_c - площадь сопла.

Плотность атомарного пучка без учета процесса рекомбинации обратно пропорциональна наиболее вероятной скорости атомов, т.е. пропорциональна $T^{-1/2}$. Температура атомов зависит от эффективности охлаждения потока в канале сопла. В нашем случае колба диссоциатора (1) плотно вставлена во фторопластовый корпус, имеющий тепловой контакт с азотным экраном ($T = 90$ K). Истечение газа из диссоциатора происходит по фторопластовой трубке (2) ($L = 95$, $\phi = 3$ м), конец которой на выходе имеет температуру около 30 K. Расход дейтерия составляет $0,05 \text{ см}^3/\text{имп.}$ длительностью 80 мс.

Пространственное разделение атомов пучка по состояниям сверхтонкой структуры. Атом представляет собой магнитный диполь, поэтому процесс разделения по спину электрона происходит в градиентном магнитном поле шестиполосных магнитов. Известно, что телесный угол захвата атома шестиполосным магнитом обратно пропорционален температуре:

$$\Omega \approx 2,1 \cdot \frac{M_B \cdot B_0}{kT},$$

где M_B - магнетон Бора, B_0 - магнитное поле на полюсном наконечнике.

Так как пучок тепловых атомов не монохроматичен, то задача по оптимизации разделения и фокусировки нейтрального пучка решается не просто, компромиссное решение удастся получить, применяя несколько магнитов. Для повышения монохроматичности атомарного пучка необходи-

мо снижать температуру потока и добиваться более высоких чисел Маха при сверхзвуковом течении. В "Полярисе" шестиполосный разделительный магнит (6) с обмотками из сверхпроводника выполнен в виде 2-х секций: у первой секции (5) расстояние между противоположными наконечниками полюсов возрастает от 10 мм до 18 мм при длине магнита 100 мм, а у второй секции уменьшается с 20 мм до 16 мм при длине наконечников 70 мм. Расстояние между секциями 45 мм. Наконечники выполнены из сплава 49K2Ф и позволяют получить поле $B_0 = 1,0$ Тл.

Ядерная поляризация. Поляризация ядер атомарного пучка осуществляется с помощью высокочастотных переходов между состояниями сверхтонкой структуры. В установке "Полярис" реализуются переходы в слабом и сильном магнитных полях. Для этого разработано 2 типа ВЧ-ячеек (7): а) ячейка векторной поляризации ($P_z = \pm \frac{2}{3}$) для осуществления переходов $1 \rightarrow 4$ и $3 \rightarrow 6$; б) ячейка тензорной поляризации ($P_{zz} = \pm 1$) для переходов $2 \rightarrow 6$ и $3 \rightarrow 5$. Каждая из ВЧ-ячеек состоит из двух резонаторов и дипольного электромагнита с положительным градиентом магнитного поля по ходу пучка. Для уменьшения рассеянного магнитного поля от сверхпроводящего соленоида ячейки защищены тремя магнитными экранами. Пространство, где размещаются ВЧ-ячейки, также экранировано.

Ионизация пучка. Поляризованный пучок атомов дейтерия ионизируется в ионизаторе Пеннинга ³ методом электронного удара. Пучок электронов, образующийся за счет ионизации остаточного газа, осциллирует в магнитном поле сверхпроводящего соленоида ($B = 2,6$ Т) между отражающим и вытягивающим электродами структуры (9). Вытягиваемые из зоны ионизации поляризованные ионы фокусируются ионной оптикой. Продольно поляризованный пучок дейтронов имеет энергию $2,7 \pm 3,0$ кВ. Импульс тока ионизатора показан на рис. 3.

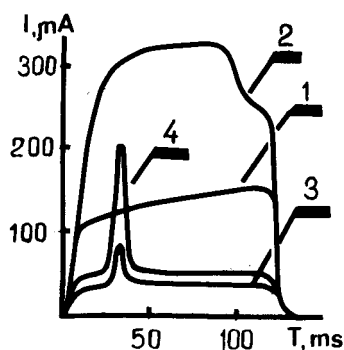


Рис. 3. Сигнал ионного тока.

1, 2 — фоновый и атомарный сигналы, измеряемые цилиндром Фарадея (10); 3, 4 — те же сигналы, измеряемые после ионной оптики (13).

Ориентация спина дейтрона в вертикальном направлении. Во избежание деполяризации пучка в процессе ускорения необходимо, чтобы спины ядер были ориентированы вертикально, т.е. параллельно магнитному полю магнитов кольца синхрофазотрона. Это достигается поворотом пучка электростатическим зеркалом (11) под углом 90° с последующим вращением спина в магнитном поле импульсного соленоида (12).

Система управления и контроля источника

Диссоциатор источника, ВЧ-ячейки ядерной поляризации, электроды ионизатора, соленоид спин-прецессора работают импульсно и управляются с помощью микропроцессора и электроники, установленных на высоком потен-

циале. Обмен информацией между микропроцессором и микро-ЭВМ "Электроника-60", установленной на пульте, производится по оптоволоконным линиям связи (рис. 1). Сигналы о включении ВЧ-ячеек векторной и тензорной поляризации передаются экспериментальным физическим установкам.

Поляриметр пучка низких энергий

Для измерения векторной и тензорной поляризаций после линейного ускорителя разработан поляриметр, основанный на реакциях $^4\text{He}(\vec{d}, d)^4\text{He}$, $^3\text{He}(\vec{d}, p)^4\text{He}$, рекомендованных в качестве эталонных для поляриметров с энергией пучка до 14 МэВ^{10-12} . Схема поляриметра показана на рис. 4. Векторная часть поляриметра размещена в камере, заполненной ^4He , $P = 1,0$ атм. Поляризованный пучок дейтронов после линейного ускорителя коллимируется системой щелей. Дейтроны, упруго рассеянные назад ($\theta_{\text{лаб}} = 126^\circ$), имеют большую асимметрию. В поляриметре детектировались не дейтроны, а α -частицы отдачи, летящие вперед под углом $\sim 15^\circ$. Для регистрации использовались два тонких кремниевых детектора толщиной около $60 \mu\text{м}$. ^3He мишень тензорной части поляриметра ($\varnothing 32$, длина 80 мм , $P = 3$ атм) расположена над векторной камерой поляриметра. Пучок дейтронов, пройдя мишень, тормозится в её доньшке толщиной $300 \mu\text{м}$. В то же время быстрые протоны, эмиттируемые вперед ($\theta = 0^\circ$) из реакции $^3\text{He}(\vec{d}, p)^4\text{He}$, проходят через доньшко и регистрируются кремниевым детектором. Входные окна мишеней выполнены из лавсана толщиной 170 и $250 \mu\text{м}$. Мишени могут передвигаться в вертикальном направлении, что позволяет совмещать их с осью пучка. Типичные спектры показаны

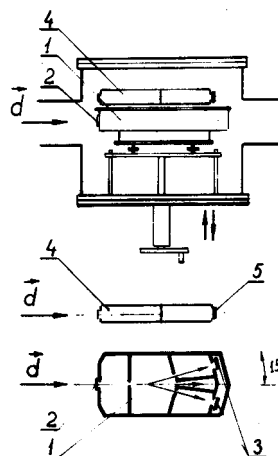


Рис. 4. Схема поляриметра низких энергий.

1 — камера с ^4He и система щелей, 2 — окно из лавсана, 3 — полупроводниковые детекторы регистрации α -частиц, 4 — мишень ^3He , 5 — детектор регистрации быстрых протонов.

заны на рис. 5, 6. Анализирующая способность реакции для нашего случая точно измерена ^{13,14}. В ходе экспериментов определена векторная и тензорная поляризации пучка дейтронов $P_z = -0,53 \pm 0,03$, $P_{zz} = -0,58 \pm 0,06$.

Поляриметр пучка высоких энергий

Для определения степени поляризации пучка в процес-

EMINL= 85 EMINR= 85
EMAXL=140 EMAXR= 140

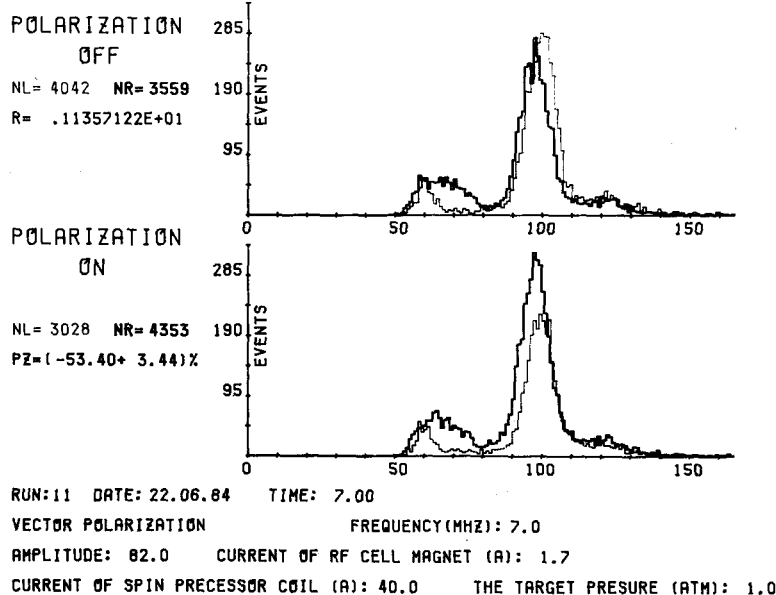


Рис. 5. Спектр α - частиц отдачи.

EMIND= 20 EMINP= 70
EMAXD=120 EMAXP= 95

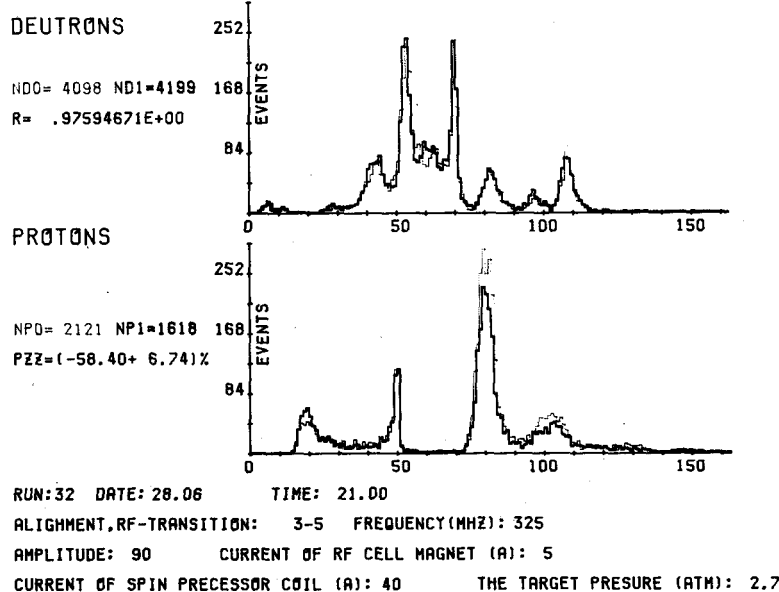


Рис. 6. Спектр быстрых протонов.

се ускорения в камере синхрофазотрона смонтирован внутренний поляриметр. Поляриметр является частью спектрометра ядер отдачи (СЯО-2). Принципиальная схема поляриметра показана на рис. 7. Продукты взаимодействия пучка поляризованных дейтронов с тонкой пленочной мишенью регистрируются двухплечевым спектрометром с полупроводниковыми детекторами. По измерению лево-правой асимметрии реакций упругого рассеяния опреде-

ляется векторная поляризация, а также производится оценка тензорной поляризации пучка.

Использование поляризованного пучка

Синхрофазотрон около 20% рабочего времени работает в режиме ускорения поляризованных дейтронов. Пучок поляризованных дейтронов выводится из ускорителя систе-

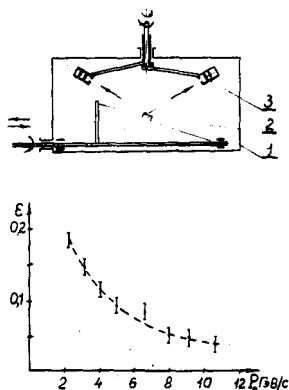


Рис. 7. Схема внутреннего поляриметра. Зависимость лево-правой асимметрии реакции упругого рассеяния на протонах от импульса. 1 - камера ускорителя, 2 - мишень, 3 - полупроводниковые детекторы.

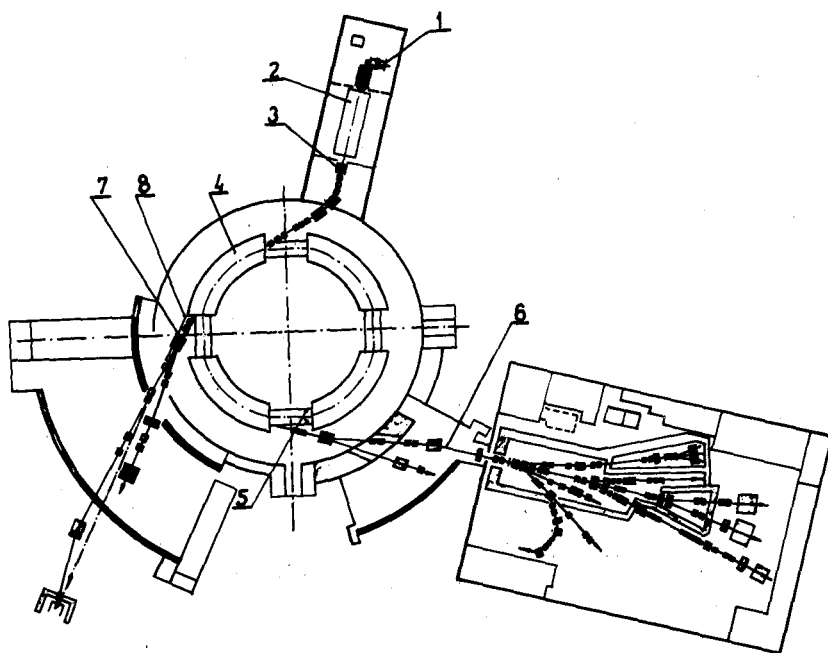


Рис. 8. Схема синхротрона с основными каналами пучков. 1 - источник поляризованных дейтронов, 2 - линейный ускоритель, 3 - поляриметр низких энергий, 4 - синхротрон, 5 - внутренний поляриметр, 6 - канал медленного вывода пучка, 7 - канал быстрого вывода пучка, 8 - канал нейтронного пучка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Donets E.D. Physica Scripta, v.3, p.11, 1983.
2. Безногих Ю.Д. и др. Препринт ОИЯИ, Р9-84-246, Дубна, 1984.
3. Belushkina A.A. et al. In: High Energy Physics with Polarized Beams and Polarized Targets, Basle, 1981, p. 429.
4. Василишин Б.В. и др. Препринт ОИЯИ, 9-84-281, Дубна, 1984.
5. Belushkina A.A. et al. In: High Energy Physics Beams and Polarized Targets, Argonne, 1978 (AIP Conf. Prof. N 51, N.Y. 1979, p.351).
6. Anishchenko N.G. et al. In: Proc. of the 6th Int. Symp. on High Energy Spin Physics, Marseille, 1984 (Journ De Phys., Colloque C2, supplement au n 2, Tome 46, 1985, n. C2-703).
7. Anishchenko N.G. et al. In: Proc. 5th Int. Symp. on High Energy Spin Physics, Brookhaven, 1982 (AIP Conf. Prof. N 95, N.Y. 1983, p.445).
8. Grubler W. In: Polarized Proton Ion Sources, Vancouver, 1983 (AIP Conf. Proc. N 117, N.Y. 1984, p. 1).
9. Романов Ю.И. Препринт ОИЯИ, 13-82-279, Дубна, 1982.

мой медленного и быстрого выводов (рис.8). Интенсивность пучков в конце ускорения равна $5 \cdot 10^8$ дейтр./имп. Степень поляризации, замеренная на внутреннем и выведенных пучках ускорителя, составляет $P_z = -0,5 \pm 0,05$, $P_{zz} = -0,52 \pm 0,03$, что свидетельствует об отсутствии заметной деполяризации в процессе ускорения. Это соответствует расчётам, согласно которым главный собственный резонанс наступает при энергиях более 10 ГэВ. Несколько физических групп ОИЯИ ведут исследования на пучке поляризованных дейтронов, направленные на изучение нуклон-нуклонного рассеяния и структуры дейтрона.

Автор выражает благодарность директору Лаборатории высоких энергий ОИЯИ академику А.М.Балдину, теоретически обосновавшему важность экспериментов с поляризованным пучком и оказывающему полную поддержку при реализации намеченной программы. Автор благодарит большой коллектив сотрудников Лаборатории, принимавших участие в этой работе.

10. Cadmus R.R., Haeberli W. Nucl. Instr. and Meth. 129(1975) 403-408.
11. König V. et al. Nucl. Phys. A166(1971) 393-396.
12. Stephenson R., Haeberli W. Nucl. Instr. and Meth. 169(1980) 483-492.
13. Dries L.J. et al. Phys. Rev. C21(1980) 475-481.
14. Grubler W. et al. Phys. Rev. C22(1980) 2243-2244.

Discussion

Н.И.Алиновский. Какова степень диссоциации?

Ю.К.Пилипенко. Степень диссоциации составляет примерно 70%. Эта оценка, конечно, примерная, которую можно сделать по косвенным измерениям.

Н.И.Алиновский. Какова мощность ВЧ разряда?

Ю.К.Пилипенко. Мощность ВЧ разряда составляет примерно 600-800 Вт.