

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

И Ф В Э 82-54

ОКУ/ОП

Ю.М.Адо, В.И.Балбеков, А.С.Белов, А.Н.Васильев,
С.С.Герштейн, Я.С.Дербезев, А.Н.Зеленский, А.М.Комаратенко,
В.М.Мохов, Э.А.Миз, А.А.Наумов, В.В.Нижегородцев,
С.Б.Нурушев, Л.Б.Парфенов, Ю.К.Пилипенко, Ю.А.Плис,
Р.А.Рзаев, В.П.Сахаров, Е.Ф.Трошкин, Б.В.Чуйко

**ВОЗМОЖНОСТЬ УСКОРЕНИЯ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ПРОТОНОВ
В УСКОРИТЕЛЕ ИФВЭ**

Ю.М.Адо⁺, В.И.Балбеков⁺, А.С.Белов⁺⁺, А.Н.Васильев⁺,
С.С.Герштейн⁺, Я.С.Дербенев^{xx}, А.Н.Зеленский⁺⁺, А.М.Кондратенко^{xx},
В.М.Мохов⁺, Э.А.Мяз⁺, А.А.Наумов⁺, В.В.Нижегородцев⁺,
С.Б.Нурушев⁺, Л.Б.Парфенов⁺, Ю.К.Пилипенко^{xxx}, Ю.А.Плис^{xxx},
Р.А.Рзаев⁺, В.П.Сахаров⁺, Е.Ф.Троянов⁺, Б.В.Чуйко⁺

ВОЗМОЖНОСТЬ УСКОРЕНИЯ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ПРОТОНОВ
В УСКОРИТЕЛЕ ИФВЭ

- ⁺ Институт физики высоких энергий, Серпухов
⁺⁺ Институт ядерных исследований АН СССР, Троицк
^{xx} Институт ядерной физики СО АН СССР, Новосибирск
^{xxx} Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Аннотация.

Адо Ю.М., Балбеков В.И., Белов А.С., Васильев А.Н., Герштейн С.С., Дербенев Я.С., Зеленский А.Н.,
 Кондратенко А.М., Мохов В.М., Мяз Э.А., Наумов А.А., Нижегородцев В.В.,
 Нурушев С.Б., Парфенов Л.Б., Филипенко Ю.К., Плис Ю.А., Рзаев Р.А., Сахаров В.П., Троянов Е.Ф.,
 Чуйко В.В.

Возможность ускорения поляризованных протонов в ускорителе ИФВЭ. Серпухов, 1982.

23 стр. с рис. (ИФВЭ ОКУ/ОП 82-54).

Библиогр. 37.

В работе обсуждается возможность ускорения поляризованных протонов в ускорителе с жесткой фокусировкой на энергию 70 ГэВ Института физики высоких энергий. Рассматриваются вопросы инжекции частиц в У-70 с использованием как существующего линейного ускорителя И-100, так и нового кольцевого инжектора (бустера). Проведены оценки деполаризующих эффектов в У-70, обусловленные наиболее опасными резонансами. Кратко обсуждаются вопросы измерения степени поляризации пучка на разных этапах ускорения. Делается вывод о возможности ускорения поляризованных протонных пучков до энергии 70 ГэВ с интенсивностью около 10^{11} частиц/цикл и поляризацией $\sim 70\%$.

Abstract

Ado Yu.M., Balbekov V.I., Belov A.S., Vasiliev A.N., Gershtein S.S., Derbenev Ya.S.,
 Zelenskiy A.N., Kondratenko A.M., Mokhov V.M., Miaz E.A., Naumov A.A., Nizhegorodtsev V.V.,
 Nurushev S.B., Parfenov L.V., Filipenko Yu.K., Plis Yu.A., Rzaev R.A., Sakharov V.P.,
 Troyanov E.F., Chujko V.V.

Possibility to Accelerate Polarized Protons at IHEP Accelerator. Serpukhov, 1982.

p. 23. (IHEP 82-54).

Refs. 37.

Possibility to accelerate a polarized proton beam at IHEP strong focusing 70 GeV machine is discussed, the problems of particles injection to U-70 both with the existing I-100 linac and with a new ring-injector (booster) are considered. Depolarization effects at U-70 due to strong resonances are estimated. Polarization measurements at different acceleration stages are briefly discussed. A conclusion is made on possibilities to accelerate polarized proton beams up to 70 GeV with intensity $\sim 10^{11}$ pp and 70% polarization.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование поляризационных явлений в физике высоких энергий вызывает в последнее время повышенный интерес. Это связано в основном с двумя обстоятельствами. Во-первых, в отличие от многих теоретических (модельных) предсказаний, утверждавших, что спиновые эффекты должны исчезать с ростом энергии, экспериментально обнаружены весьма значительные эффекты, например в корреляционных параметрах $A_{NN}^{/1/}$, инклюзивном образовании Λ^0 от 24 ГэВ до 1 ТэВ^{/2/} и в инклюзивном образовании π^0 -мезонов при 24 ГэВ^{/3/}. Во-вторых, квантовая хромодинамика (КХД) предсказывает ряд поляризационных эффектов количественно^{/4/}, и крайне желательно их проверить. Так как предсказания относятся к области высоких энергий и больших переданных импульсов, возникает потребность в получении поляризованных протонных пучков как больших энергий, так и больших интенсивностей. Предложенные способы формирования поляризованных пучков за счет, например, Λ^0 -распада^{/5-8/} хотя и являются простыми, однако в лучшем случае их интенсивность ограничивается величиной $\lesssim 10^8$ част./цикл. Даже при энергиях первичного пучка ~ 1 ТэВ для ряда принципиальных экспериментов (большие P_T) нужны интенсивности $\gg 10^{10}$ част./цикл, и именно это стимулировало в свое время перевод ускорителя на 12 ГэВ Национальной лаборатории в Аргонне (США) на ускорение поляризованных протонов.

В последнее время серьезно изучаются возможности ускорения поляризованных протонов в ускорителях с жесткой фокусировкой. Были представлены соответствующие предложения в ЦЕРНе^{/9/}, КЕК^{/10/}, Брукхейвене^{/11,12/}, Сакле^{/13/}, Дубне^{/14/} и ФНАЛе^{/15/}. В настоящее время проект в Брукхейвене находится в стадии реализации, где предполагается получить первый ускоренный пучок с энергией 25 ГэВ к осени 1982 года. Активно ведется работа по получению пучка поляризованных дейтронов на синхротроне в Дубне^{/14/}. Ниже рассматривается возможность ускорения поляризованных протонов в У-70.

1. СИСТЕМА ИНЖЕКЦИИ

Возможны два варианта инжекции поляризованных протонов в У-70: с использованием существующего инжектора – линейного ускорителя И-100 на энергию 100 МэВ – и через кольцевой инжектор-бустер на энергию 1,5 ГэВ (после завершения его строительства) (рис. 1).

В первом случае несомненные преимущества имеет многооборотная перезарядная инжекция отрицательных поляризованных ионов. Для частиц с энергией 100 МэВ и n оборотов инжекции без учета потерь получим число протонов на 1 мА тока источника:

$$N = 6,6 \cdot 10^{10} n.$$

Вообще говоря, максимальное число оборотов инжекции примерно может быть равно отношению нормализованных значений аксептанса ускорителя и эмиттанса пучка ионов, выходящих из источника. Ограничивающим фактором, однако, в нашем случае является предельная длительность импульса пучка И-100, которая составляет 150 мкс. Принимая оптимистическое на сегодняшний день значение тока источника отрицательных поляризованных ионов приблизительно 100 мкА, что можно считать достижимым уже в ближайшие годы (см., например, работу^{/16/}), и беря число оборотов инжекции $n = 13$, можно получить $N \approx 10^{11}$ протонов, накопленных для ускорения в У-70.

При инжекции с применением бустера более предпочтительным представляется использование положительных ионов. В том числе это связано с отсутствием на периметре бустера свободных мест для размещения оборудования перезарядной инжекции. В схеме с бустером поляризованные протоны сначала ускоряются в линейном ускорителе до энергии 30 МэВ, а затем инжектируются в бустер. Бустер, в свою очередь, заполняет основной ускоритель частицами в течение 15 с с частотой посылок 20 Гц. Длительность каждого импульса тока пучка, в течение которого осуществляется восьмиоборотная инжекция в бустер, составляет 10 мкс. При такой схеме инжекции число протонов в сгустке на 1 мА тока источника без учета потерь должно быть $N = 2 \cdot 10^{12}$. При этом, согласно оценкам^{/16/}, можно рассчитывать на ток поляризованных протонов источника 1 мА.

Таким образом, сейчас предпочтительным представляется вариант инжекции с использованием бустера, который, с одной стороны, позволяет осуществлять режим накопления пучка для повышения интенсивности, и с другой — повысить энергию инжекции в У-70, т.е. избежать в последнем некоторых низколежащих деполаризирующих резонансов.

2. ИСТОЧНИКИ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ИОНОВ

В качестве основы рабочего варианта источника поляризованных протонов можно рассматривать криогенный источник, разработанный в ЛВЭ ОИЯИ^{/14/}. В настоящее время он дает ток поляризованных дейтронов до 150 мкА с длительностью импульса 1 мс и частотой посылок 0,1 Гц. Этот источник построен по классической схеме с использованием криогенной откачки, сверхпроводящего секступольного разделительного магнита и ионизатора со сверхпроводящим соленоидом. Возможность увеличения тока здесь связана с охлаждением диссоциатора и оптимизацией работы разделительного магнита.

Представляется также целесообразным изучить возможность применения источника лазерного типа, разрабатываемого в ИЯИ АН СССР^{/17/}. Схема

получения поляризованных ионов приведена на рис. 1. Протоны из источника 1 захватывают поляризованные лазерным излучением электроны у атомов натрия.

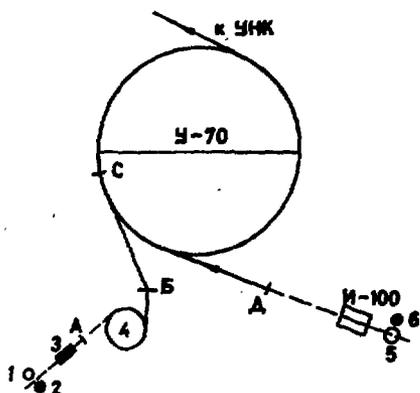


Рис. 1 а) Возможные схемы инжекции поляризованных протонов в У-70. 1 и 2 - источники поляризованных и неполяризованных частиц; 3 - линейный ускоритель; 4 - бустер; И-100 - линейный инжектор протонов на 100 МэВ; 5-6 - источники поляризованных и неполяризованных протонов; А, Б, С, Д - возможные места установок поляриметра.

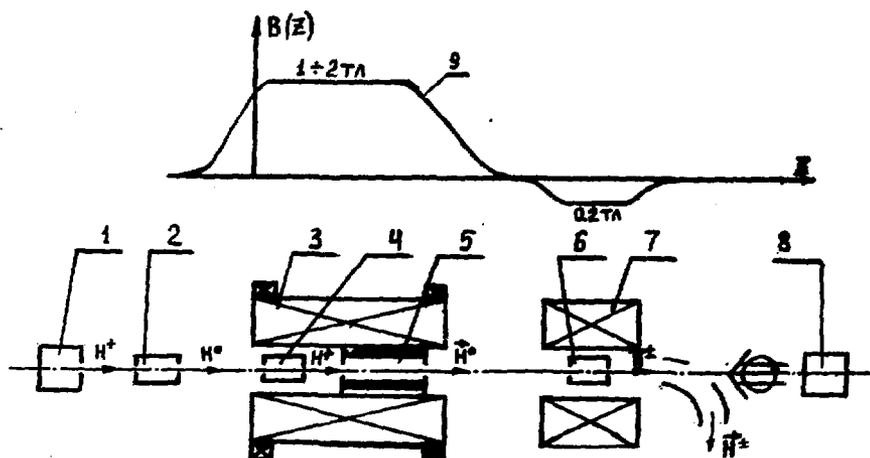


Рис. 1. б). Схема лазерного источника поляризованных ионов. 1 - источник протонов; 2 - лазерная ячейка-нейтрализатор; 4 - гелиевая ячейка; 5 - ячейка с поляризованными парами натрия; 6 - мишень либо гелиевая мишень-ионизатор; 8 - лазер на кристалле с лазерной накачкой; 9 - продольная составляющая магнитного поля соленоидов 3, 7

Перезарядная ячейка с парами натрия 2 находится в магнитном поле соленоида 3. Величина магнитного поля, необходимого для разрыва спин-орбитального взаимодействия в состояниях $2P$, ведущего к деполаризации, составляет $1,5 \div 2$ Тл.

Для того чтобы избежать роста эмитанса при перезарядке протонов в сильном магнитном поле, предлагалось поместить источник протонов в это же поле, что представляется довольно затруднительным, ввиду известных факторов неустойчивости плазмы в сильных полях. Радикальное решение этих трудностей состоит в том, что в соленоид инжектируется пучок нейтральных атомов водорода, который на дополнительной мишени перезаряжается в протоны уже в области однородного поля. Затем протоны снова нейтрализуются при захвате поляризованного электрона у натрия. Таким образом, на выходе и входе соленоида мы имеем нейтральный пучок, роста эмитанса не происходит.

Далее осуществляется неадиабатический переход в область противоположно направленного магнитного поля второго соленоида 7, при этом происходит поляризация протонов по спине. В этом соленоиде помещается перезарядная ячейка 6 либо с парами щелочных металлов (в этом случае с эффективностью до 10% образуются поляризованные отрицательные ионы водорода), либо с гелием, тогда образуются протоны с эффективностью до 80%.

Возможности этого метода еще окончательно не определены. Однако, если использовать результаты работы ^{129/} по созданию эффективной поляризованной натриевой мишени, где получена степень поляризации 90% при перезарядке 20% тока протонов, а также взять известные параметры лучших протонных источников с высокой яркостью, то можно рассчитывать на получение в импульсе ~ 1 мА тока H^+ и до 10 мА тока поляризованных протонов. Отметим также, что в заданном временном режиме работы инжектора частота повторения 20 Гц, длительность 10 мкс — необходимые для поляризации натрия параметры лазерного излучения легко могут быть получены в лазерах на красителях с ламповой накачкой. В этой схеме необходимо разработать устройство, исключающее попадание паров натрия в вакуумный объем протонного линейного ускорителя.

Для использования ионных источников с продольной и поперечной поляризацией необходимо предусмотреть на выходе линейного ускорителя спин-прецессор для согласования направления поляризации вводимого пучка с требуемым в бустере при ускорении.

3. ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ДЕПОЛЯРИЗАЦИИ В У-70 И БУСТЕРЕ

Известно, что ускорение поляризованных частиц представляет значительную проблему в связи с прохождением в процессе ускорения спиновых резонансов. Оценки, сделанные ранее для синхротронов с жесткой фокусировкой /18-24/, показывают, что без принятия специальных мер поляризация пучка разрушается при достижении энергии 5 ГэВ.

Деполаризация при ускорении происходит из-за пересечения большого числа резонансов между частотой прецессии спина в основном поле (пропорциональной энергии) и частотами возмущающих горизонтальных полей на траектории частиц:

$$\nu_0 \approx \gamma G \approx \nu_k \approx K_\theta \pm K_z Q_z \pm K_x Q_x, \quad (1)$$

где $2\pi\gamma G$ - угол поворота спина относительно скорости вокруг вертикального направления за оборот частицы в ускорителе (γ - релятивистский фактор, $G = (g - 2)/2 = 1,79$; g - гидромагнитное отношение для протона); Q_z и Q_x - число вертикальных и радиальных бетатронных колебаний на обороте; K_z , K_x , K_θ - целые числа. Каждому набору K_z и K_x отвечает серия резонансов с различными номерами азимутальных гармоник K_θ . Резонансы при $K_z = K_x = 0$ обязаны радиальным и продольным полям на замкнутых орбитах, появляющимся при искажении идеальной структуры магнитного поля. Среди резонансов $\nu_0 = K \pm Q_z$ наиболее мощными являются резонансы с номерами K_θ , кратными числу элементов периодичности, не связанные с искажениями магнитной системы. Мощности резонансов $\nu_0 = K \pm Q_x$ пропорциональны связи вертикальных колебаний с радиальными. Мощности нелинейных резонансов $|K_z| + |K_x| > 1$ значительно меньше линейных и быстро убывают с ростом номеров K_z и K_x .

После прохождения каждого резонанса при обычно выполненном условии размешивания по фазам прецессии спина вокруг поля, связь средних вертикальных проекций вычисляется по формуле /23,25/

$$\langle S_z^+ \rangle = \langle (2e^{-2iJ_k} - 1) S_z^- \rangle, \quad (2)$$

где параметр $J_k = \pi |\omega_k|^2 / 4 |v'_0 - v'_k|$ определяется скоростью прохождения резонанса $v'_0 - v'_k$ и его мощностью ω_k ($\pi / \omega_k \cdot v'_0$) — время переворота вертикальной поляризации в точном резонансе в стационарных условиях.

Изменение степени поляризации может быть малым при быстром ($J_k \ll 1$) либо при медленном прохождении ($J_k \gg 1$). Промежуточные прохождения должны быть исключены, так как они заведомо приводят к потере поляризации пучка.

В табл. 1 и на рис. 2 приводятся результаты расчета мощностей внутренних резонансов

$$v'_0 = \pm Q_z + KP, \quad (3)$$

где $P = 12$ — число суперпериодов,

Для У-70 скорость прохождения резонансов за счет подъема энергии равна (в ед. частоты обращения)

$$v'_0 = \frac{1,8R}{c} \cdot \frac{\gamma_{\max}}{T_{\text{уск}}} \approx 4 \cdot 10^{-5}.$$

Параметр адиабатичности J_k для резонансов (3) изменяется от малых значений (быстрые прохождения) до максимально больших (медленные прохождения). Таким образом, в результа-

те ускорения поляризация будет заведомо разрушена резонансами промежуточной мощности ($J_k \sim 1$).

Дополнительную опасность представляют и резонансы $J_k \gg 1$ из-за синхротронной модуляции энергии, приводящей к расщеплению основного резонанса на более мелкие, прохождение которых может уже оказаться промежуточным. Чтобы исключить этот эффект, необходимо обеспечить достаточно сильное выполнение условия

$$|\omega_k|^2 \gg Q_y \sigma, \quad (4)$$

где Q_y и $\sigma = v_0 (\Delta\gamma)_0 / \gamma$ — частота и амплитуда синхротронных колебаний частоты прецессии $v_0 = \gamma G$.

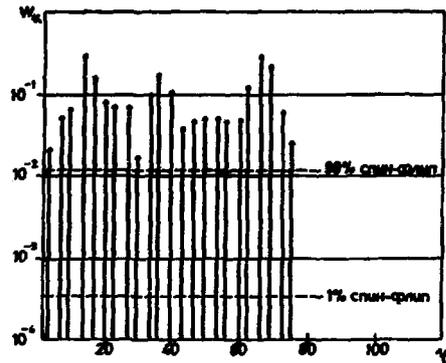


Рис. 2. Мощность деполяризующих внутренних резонансов ω_k в зависимости от фазового фактора Лоренца для У-70. Принято в расчетах: ускоритель У-70 — (1,4-мм-метр) при доменной энергии.

Таблица 1

Мощность деполаризующих резонансов ускорителя ИФВЭ на энергию 70 ГэВ

№№ п/п	КР $\pm Q_z$	γ	ω_k
1	12 - Q_z	1,23	0,0196
2	0 + Q_z	5,47	0,0494
3	24 - Q_z	7,93	0,0663
4	12 + Q_z	12,17	0,3040
5	36 - Q_z	14,63	0,1623
6	24 + Q_z	18,88	0,0848
7	48 - Q_z	21,34	0,0673
8	36 + Q_z	25,58	0,0687
9	60 - Q_z	28,04	0,0169
10	48 + Q_z	32,29	0,0982
11	72 - Q_z	34,74	0,1754
12	60 + Q_z	38,99	0,1084
13	84 - Q_z	41,45	0,0396
14	72 + Q_z	45,69	0,0444
15	96 - Q_z	48,15	0,0510
16	84 + Q_z	52,40	0,0522
17	108 - Q_z	54,86	0,0456
18	96 + Q_z	59,10	0,0423
19	120 - Q_z	61,56	0,1117
20	108 + Q_z	65,81	0,2756
21	132 - Q_z	68,26	0,2233
22	120 + Q_z	72,51	0,0575
23	144 - Q_z	74,97	0,0208

Следующей опасной группой резонансов для У-70 являются резонансы несовершенств

$$\nu_0 \approx K. \quad (5)$$

Оценки показывают, что параметры J_k для этого множества резонансов хотя и имеют в среднем меньшее значение, чем для резонансов (3), также представлены в широком интервале значений от малых до больших.

Традиционно известными мерами предотвращения деполаризации при ускорении являются компенсация гармоник резонансов несовершенств (5) и обеспечение предельно быстрого прохождения внутренних резонансов (3) путем скачков бетатронных частот^{/28/}. С помощью таких приемов Аргонской группе удалось ускорить поляризованные протоны до максимальной энергии ускорителя ZGS 12 ГэВ^{/29/}. Этой же группой разработан проект ускорения поляризованных протонов до энергии 25 ГэВ в синхротроне AGS (Брукхейвен)^{/30/}.

Применение этих методов требует детального и тонкого анализа систем спиновых резонансов (с учетом синхротронной модуляции энергии), создания сложных электронных устройств и кропотливой работы по детектированию поляризации пучка после прохождения каждого из опасных резонансов. Трудности на этом пути быстро растут с энергией.

Более эффективным представляется комплекс мер, сочетающих быстрое прохождение внутренних резонансов не слишком большой мощности за счет скачков бетатронных частот и глубоко адиабатическое прохождение внутренних резонансов большой мощности и резонансов несовершенств^{/26/}. Выполнение условия (4) при адиабатическом прохождении резонансов (5) легко обеспечить преднамеренным увеличением мощностей спиновых резонансов. Последний прием успешно испытан на накопителе ВЭПП-2М^{/31/}, где для прохождения резонанса $\nu_0 = 1$ в промежутке накопителя вводилось продольное магнитное поле.

Имеется также принципиально новый метод, предложенный в работах^{/26,32/}, который основан на существенной перестройке спинового движения. Суть метода состоит в том, что в прямолинейный промежуток ускорителя вводится

сильное продольное или поперечное поле специальной конфигурации с таким расчетом, чтобы вертикальная поляризация после прохождения промежутка оказалась перевернутой. В этом случае спиновая частота становится как бы полуделой при всех энергиях и спиновые резонансы становятся практически невозможными. Задача сохранения поляризации при ускорении при этом является не более сложной, чем ее сохранение при стационарных условиях. Устойчивость поляризации при введении сильных полей на орбиту вытекает из самых общих свойств спинового движения^{/33,25/}.

Для поворота спина на начальной стадии ускорения могут быть использованы продольные магнитные поля, практически не возмущающие орбиту пучка. Требуемые для поворота спина на 180° значения поля определяются выражениями

$$H_{\parallel} \cdot \ell = 3,75 E, \quad (6)$$

$$H_{\perp} \cdot \ell = 5,5, \quad (7)$$

где E - энергия частиц в ГэВ, H - в Тесла и ℓ - метрах.

Например, если в ускорителе ИФВЭ использовать продольное поле для подавления резонанса при $\gamma = 5,44$, то, полагая длину большого прямолинейного промежутка $\ell = 4,8$ м^{/34/}, найдем, что необходимое значение поля составит $H = 4$ Т. Такой соленоид должен быть сверхпроводящим. В этом случае практически исключается возможность использовать его при других энергиях в соответствии с выражением (6).

Однако с ростом энергии предпочтительными становятся поперечные поля, которые не зависят от энергии, хотя и возмущают орбиту частиц. Можно избежать искажений орбиты вне района действия таких полей, если использовать поля разных направлений. При этом интегральная величина поперечного поля будет зависеть от конкретного варианта.

Рассмотрим схему поворота спина винтовым поперечным магнитным полем с целым числом периодов^{/27/}. Винтовое поле можно записать в виде

$$H_x + iH_z = H_0 e^{i2y}, \quad (8)$$

где H и \mathcal{X} – постоянные, а y – координата вдоль скорости. Пусть $M = \mathcal{X} \ell / 2\pi$ – число периодов поля на занимаемой им длине ℓ .

Магнитное поле на входе $\vec{H}(0)$ ориентируем в радиальном направлении \vec{e}_x . Тогда после прохождения винтового поля орбита будет смещена также вдоль \vec{e}_x . Это смещение можно компенсировать, если в участки до и после винтового поля ввести вертикальные поля с противоположными знаками (см. рис. 3). Направление результирующей оси поворота y этой "змейки" практически не отклоняется от скорости частицы.

Интеграл вертикального поля выберем из условия полного восстановления орбиты. В частности, расположив участки I и III с полем той же величины вплотную к участку II, для длины ℓ_0 имеем

$$\ell_0 = \frac{\ell}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{2}{\pi M}} - 1 \right].$$

Полный интеграл поля равен

$$HL = H(\ell + 2\ell_0) = 1,7\pi \sqrt{\left(1 + \frac{2}{\pi M}\right)(1 + 4M)}. \quad (9)$$

Выпишем формулы для вычисления максимальных отклонений орбиты в описанных схемах (рис. 4 и 5):

$$\Delta Z_{\max} = \frac{\ell}{\pi \gamma G M^{3/2}}, \quad (10)$$

$$\Delta X_{\max} = \frac{3\ell}{4\pi \gamma G M^{3/2}}. \quad (11)$$

Для примера, при $L = 3$ м, $\gamma = 2,5$ имеем

M	HL (Т·м)	ΔZ_{\max} (см)	ΔX_{\max} (см)	H (Т)
1	16	19	15	5,3
2	19	7	5	6,3

Непрерывное винтовое поле (8) можно заменить винтообразной системой кусочно постоянных полей. Приближая, например, два периода восемью участками, имеем следующие параметры для случая $M = 2$:

$$HL = 21, \Delta Z_{\max} = 7, \Delta X_{\max} = 5, H = 7. \quad (12)$$

Отметим, что сдвиг бетатронных частот, возникающий от краевых полей магнитов "змейки", довольно мал даже на энергии инжекции в У-70 ($\Delta Q \sim (\gamma G)^2$) и при необходимости может быть легко скорректирован. При установке такой "змейки" в ускоритель, устойчивая (периодическая по орбите) поляризация направлена вдоль скорости в промежутке, диаметрально противоположном "змейке". При инжекции пучка поляризация должна быть ориентирована вдоль равновесного направления в месте инжекции. В частности, можно инжектировать продольно поляризованный пучок в противолежащий "змейке" промежуток.

Есть возможность сохранить вертикальное направление равновесной поляризации в полукольцах ускорителя, если применить не одну, а две переворачивающие "змейки", расположив их в двух противолежащих промежутках (рис. 6). Результирующие оси вращения этих змеек должны быть горизонтальными и взаимно перпендикулярными, чтобы спиновая частота оставалась равной $1/2 \cdot 2735,36$.

Наиболее естественно при использовании "змеек" применять продольные поля на низкой энергии, не искажающие замкнутую орбиту, и поперечные поля при высокой энергии, когда смещение орбиты достаточно мало. Из-за малости длин промежутков У-70 необходимо использовать сверхпроводящие магниты с сильными полями. Их переключение в процессе ускорения ($\tau \sim 1$ с) представляет известные трудности. В связи с этим важным является поиск оптимизированных схем "змеек", требующих минимального интеграла поперечного поля при допустимом искажении орбиты на энергии инжекции в У-70 и позволяющих работать со стационарно включенными полями. Приведенный выше пример "змейки" еще не является самым экономным, хотя, по-видимому, близок к оптимальному.

При более детальной проработке следует изучить также вариант с заменой нескольких магнитных блоков У-70 специальными магнитами, обеспечивающими сохранение поляризации без нарушения динамических характеристик ускорителя.

При проведении пучка через бустер ($\gamma_{\max} = 2,5$) из резонансов, которые следует принимать во внимание, главными являются

$$\gamma G = 4, \quad \gamma G = 3,8 = Q_x, \quad \gamma G = Q_x - K. \quad (13)$$

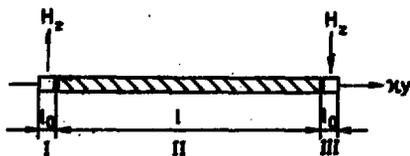


Рис. 3. Схема "змейки" с винтовым полем.

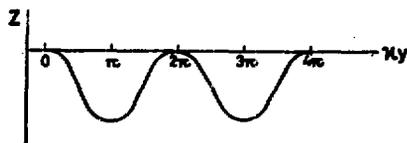


Рис. 4. График вертикального смещения в "змейке".

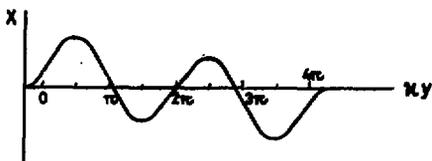


Рис. 5. График горизонтального смещения в "змейке".

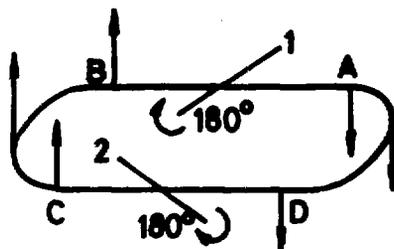


Рис. 6. Траектория периодической поправки при двух переворотах (вид на орбиту в проекции).

Оценка дает медленное прохождение резонанса $\gamma G = Q_x$ с параметром адиабатичности $J_x \sim 10^3 \div 10^4$. Резонанс несовершенства $\gamma G = 4$ при точности установки линз 0,2 мм дает слабо адиабатическое прохождение. Для резонансов связи $\gamma G = Q_x - K$, которые могут возбуждаться в районах

$$\begin{aligned} 30 \div 100 \text{ МэВ} & \text{ при } Q_x = 3,8 \text{ и } K = 2, \\ 350 \div 650 \text{ МэВ} & \text{ при } Q_x = 4 \text{ и } K = 2, \\ 100 \div 400 \text{ МэВ} & \text{ при } Q_x = 3,5 \text{ и } K = 1 \text{ (если поднимать выше 4,5),} \end{aligned} \quad (14)$$

можно ожидать промежуточное прохождение. Возможно, будет необходимым учитывать и некоторые резонансы высших порядков.

В качестве способов предотвращения деполяризации в бустере можно рассмотреть несколько возможностей.

В бустере существует, в принципе, техническая возможность поднять Q_x до 4,8 + 4,9. Тогда структурные резонансы (13) уходят в район выше 1500 МэВ и могут вообще не достигаться.

Можно скорректировать резонансы на ошибках поля. Реальная точность установки магнитных элементов бустера заведомо может быть выше 0,2 мм. Кроме возможностей систем коррекции, следует изучить способ относительно оперативной юстировки линз бустера по эффекту прохождения резонанса.

Нужно попытаться освободить со временем в бустере один большой промежуток ($\sim 1,5$ м) для установки сверхпроводящего соленоида, поворачивающего спин на 130° . Из (6) можно оценить требуемый интеграл поля в соленоиде для $E_{\max} = 2,1$ ГэВ; $H = 7,83$ Тм.

Несколько слов о резонансах ошибок в У-70. Если потребовать, чтобы все такие резонансы в сумме давали деполяризацию меньше 10% при ускорении до 70 ГэВ, то величина вертикального возмущения замкнутой орбиты не должна превышать 0,3 мм для протонов и ~ 3 мм для дейтронов.

4. ПОЛЯРИЗОВАННЫЕ ПРОТОНЫ В УНК

4.1. Оценки количества резонансов

Как известно, при ускорении поляризованных протонов в кольцевых ускорителях возникают два типа опасных спиновых резонансов, приводящих к деполяризации пучка: собственные резонансы, появляющиеся при кратности частоты прецессии спина ν_k частоте бетатронных колебаний.

$$\nu_k = \gamma G = Kp \pm Q_x, \quad (15)$$

и резонансы несовершенства

$$\nu_k = \gamma G = K. \quad (16)$$

Для оценки количества собственных резонансов примем $Q_z = 36.7$, $P = 160$ (периодичность УНК), тогда для 1-й ступени УНК находим, что их число составляет около 16. Количество резонансов несовершенства гораздо больше и составляет около 1200. Очевидно, что пытаться корректировать или "перескакивать" такое огромное число резонансов бесполезно. Это еще в большей степени относится ко второй ступени УНК. Значит, мы должны отказаться от традиционных способов, применявшихся в Аргонне или реализуемых в настоящее время в Брукхейвене, и ориентироваться на использование схемы "сибирских змеек", как единственно перспективных в данное время способов предотвращения деполяризации при ускорении.

4.2. Мощности резонансов

Конкретные схемы реализации "сибирских змеек" и степени их сложности зависят от того, насколько мощными окажутся резонансные гармоники, определяемые равенствами (1) и (2). Их мощность характеризуется углом отклонения поляризации от вертикали при резонансе за период движения по орбите:

$$\omega_k = \frac{q'}{\omega_0} \langle H_x(\theta) e^{-i\nu_k \alpha(\theta)} \rangle = \frac{\nu_k}{R} \left\langle \frac{d^2 z}{d\theta^2} e^{-i\nu_k \alpha(\theta)} \right\rangle, \quad (17)$$

где $z(\theta)$ – траектория частицы по вертикали; $\alpha(\theta)$ – угол вращения скорости по замкнутой орбите; R – средний радиус кольца, θ – азимутальный угол частицы.

В случае, когда для всех резонансов выполняется условие быстрого прохождения

$$|\omega_k| \ll 1, \quad (18)$$

применение одной или двух "змеек" решает задачу предотвращения деполяризации. При этом, в случае использования одной "змейки" с осью поворота спина на 180° вдоль скорости, равновесное направление поляризации будет находиться в плоскости орбиты и направление вектора поляризации инжектируемого пучка зависит от места инжекции на орбите. То же замечание

относится и к системам вывода. Это представляет определенные неудобства. Если применить две "змейки", оси поворота которых лежат в горизонтальной плоскости и взаимно-перпендикулярны друг другу ("змейки" размещаются в противоположных точках кольца), то устойчивым направлением поляризации окажется направление, нормальное к плоскости орбиты. В таком случае пучок с нормальной поляризацией может быть инжектирован в любом месте кольца.

В связи с общей тенденцией увеличения параметров ω_k с ростом энергии (из-за увеличения поля и, главным образом, из-за увеличения размеров колец) в ускорителях с магнитной структурой такого типа, как в УНК (разделенные функции магнитов, квадруполь большой силы), наступает ситуация, когда для спиновых резонансов

$$\omega_k \geq 1; \quad (19)$$

Оценки показывают, что для УНК $\omega_{k, \text{макс}}$ получается порядка 1-3 уже в первой ступени при $E_{\text{макс}} = 600$ ГэВ.

Ситуация становится еще более трудной при ускорении поляризованных протонов в Тэватроне ($E_{\text{макс}} = 3$ ТэВ). При принятых значениях допусков на магнитную систему и поперечного фазового объема $\omega_{k, \text{макс}}$ составляет около 5. Однако это не означает, что поляризация пучка не может быть сохранена при этих энергиях. Применение "змеек" дает положительный эффект и в этой области энергии, но необходимо вводить соответствующее число "змеек" $N \sim (\omega_k)_{\text{макс}}$ так, чтобы перестройкой спинового движения путем большого числа последовательных переворотов спина исключить резонансы между колебаниями частицы и прецессией спина. Эффективная мощность резонансов (1) и (2) при этом уменьшается в $N/2$ раз, так что при $N \gg \omega_k$ вертикальная поляризация остается устойчивой. Возможно, что специальным подбором корреляции между бетатронными колебаниями и прецессией спина в основном поле при применении "змеек" можно добиваться дополнительного сильного сокращения угла поворота спина и, соответственно, уменьшения ω_k . Эта возможность должна быть подробно изучена.

Наличие сильных резонансов может и не быть опасным, если сделать их прохождение адиабатическим, так как в этом случае мы получим полный реверс поляризации. Опасность может возникать из-за возможного присутствия при этом "паразитных" боковых (или модуляционных) резонансов, которые будут проходить с промежуточной скоростью (недостаточно быстро). Кроме того, мощности основных резонансов несовершенств хотя и с весьма малой вероятностью могут иметь промежуточную силу, что также привело бы к деполяризации. В этих условиях очень полезной может оказаться "подстройка" магнитной системы по эффекту детектирования поляризации. Дополнительное применение небольшого числа "змеек" будет необходимо для предотвращения деполяризации на ограниченном числе резонансов несовершенств, а также резонансов связи и резонансов высших порядков. Таким образом, в целом применение "змеек" в области ТэВ-ных энергий необходимо и решает задачу сохранения поляризации.

Отдельного рассмотрения заслуживают вопросы транспортировки поляризованного пучка от У-70 в 1-ю ступень УНК, перевод из 1-й ступени во 2-ю и вывод пучка. Практически важным является согласование равновесной поляризации пучка между последовательными ускорителями всего тракта пучка. При необходимости здесь могут применяться известные элементы, поворачивающие поляризацию нужным образом.

5. ПОЛЯРИМЕТРЫ

На разных стадиях ускорения поляризованного пучка необходимо иметь измерительную аппаратуру для определения степени поляризации пучка (поляриметры). При этом в зависимости от энергии частиц в пучке, а также используемой в качестве анализатора реакции поляриметры могут быть разной сложности^{137/}.

Для определения степени поляризации пучка на выходе линейного ускорителя - инжектора в бустер (перед вводом его в бустер) целесообразно

использовать простой абсолютный поляриметр, схема которого приведена на рис. 7а. Он состоит из двух телескопов счетчиков, расположенных симметрично относительно направления луча

и направленных на углеродную мишень толщиной $0,1 \text{ г/см}^2$. Каждый телескоп содержит три сцинтилляционных счетчика. Первые два счетчика имеют толщину 3 мм, третий 2 мм; между 2-м и 3-м располагается полиэтиленовый фильтр толщиной 4 мм. Таким образом, возможно измерять как время пролета (расстояние от центра мишени до 3-го определяющего счетчика 2 м), так и пробег частиц, что достаточно для идентификации нужных протонов. При угле рассеяния 55° , анализирующая способность углерода составляет $85 \pm 5\%$. С учетом дифференциального сечения (10 мб/стер) при интенсивности 10^{10} пол.прот./цикл можно измерять поляризацию пучка с точностью $\pm 2\%$. Так как мишень тонкая, возможно непрерывное использование такого поляриметра.

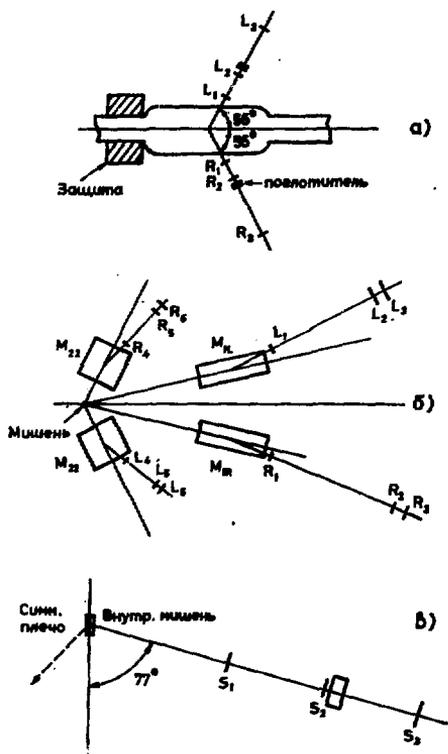


Рис. 7. Схемы поляриметров.

Для слежения за поляризацией пучка, ускоряемого бустером, можно использовать поляриметр, показанный на рис. 7б и основанный на измерении упругого $p-p$ -рассеяния. Собственно поляриметр представляет собой устройство, состоящее из двух сопряженных телескопов счетчиков и магнитов, которое детектирует углы и энергию частиц с целью выделения составляющей упругого рассеяния. Так как с изменением импульса положение максимума

анализирующей способности упругого pp-рассеяния меняется в нашем случае в пределах $P_T = 0,2 - 0,4$ ГэВ/с, целесообразно предусмотреть соответствующее изменение угла регистрации. Статистическая точность $\sim 1\%$ может быть достигнута при интенсивности $\sim 10^{10}$ поляр.пр./цикл, примерно за 0,5 часа работы поляриметра.

Для поляризационных измерений в У-70 можно рассмотреть два способа. Первый заключается в использовании внешнего поляриметра и требует вывода из У-70 пучка при нужных импульсах, например до и после прохождения опасных деполаризирующих резонансов. Внешний поляриметр аналогичен показанному на рис. 7б, однако все базовые расстояния должны увеличиваться с импульсом.

Другой вариант, показанный на рис. 7в, представляет собой внутренний поляриметр, в котором протоны отдачи, испускаемые тонкой внутренней мишенью (пленка) при бомбардировке ее поляризованным пучком, детектируются двумя симметрично расположенными телескопами счетчиков. При выбранном угле протонов отдачи 77° , что соответствует $P_T^2 = 0,15$ (ГэВ/с)², упругое сечение еще достаточно велико (около 20 мб). Отметим, однако, что анализирующая способность в указанном интервале энергии падает приблизительно как $A_{pp} = 0,75/p$. Поэтому время измерения поляризации при заданной точности калибровки будет расти пропорционально импульсу. Реальная анализирующая способность окажется несколько ниже из-за вывала ядерного взаимодействия, для определения которого требуются специальные измерения.

Оценим время измерений поляризации пучка при следующих условиях:

Акцептанс каждого телескопа - $\Delta t[\Delta\phi/2\pi] = 10^{-3}$ (ГэВ/с) ² ,	
Интенсивность внутреннего пучка - I_0	10^{10} пр/цикл
Толщина полиэтиленовой мишени	10^{-6} λ_{23}
Период обращения частиц в ускорителе	5 мкс
Время работы поляриметра в каждом цикле (10^3 прох.)	5 мкс
Время нахождения мишени в пучке ($5 \cdot 10^4$ прох.)	250 мкс
$\frac{d\sigma}{dt}$ ($P_T^2 = 0,15$ (ГэВ/с) ²)	20 мб/(ГэВ/с)

В течение 5 мс поляриметр зарегистрирует количество упругих р-р-событий, равное

$$N = 2I_0 \left[\frac{5 \text{ мс}}{5 \text{ мкс}} \right] \cdot (n \cdot \rho \cdot \ell) \left(\frac{d\sigma}{dt} \right) \left(\Delta t \frac{\phi}{2\pi} \right) \cdot \frac{1 \text{ сек}}{250 \text{ мс}} =$$

$$= 2 \cdot 10^{10} \cdot 10^3 \cdot 3,4 \cdot 10^{19} \cdot 2 \cdot 10^{-26} \cdot 10^{-3} \cdot 4 = 5,4 \cdot 10^4 \text{ соб./с. цикл,}$$

или, за 0,5 часа можно накопить около 10^7 событий, что соответствует статистической точности $\leq 1\%$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показывают сделанные выше оценки, имеется реальная возможность ускорения поляризованных протонов в У-70 при условии осуществления ряда довольно сложных технических решений, включая комбинирование способов "перескока" резонансов и создание устройств типа "змейки".

Имеющиеся в У-70 прямолинейные промежутки могут оказаться недостаточно большими для размещения элементов "змейки". В этой связи важно детально изучить возможности замены ряда элементов магнитной структуры У-70 на новые, которые бы совмещали "ускорительные" и "демпфирующие" функции. Изучение этой проблемы будет продолжено.

ЛИТЕРАТУРА

1. E.A.Crosbie et al. Phys. Rev., D23, 600 (1981).
2. G.Bunce et al. Phys. Rev. Lett., 36, 1113 (1976).
3. J.Antille et al. Phys. Lett., 94B, 523 (1980).
4. G.L.Kane et al. Phys. Rev. Lett., 41, 1689 (1978);
D.Sivers. AIP Conf. Proceed. N° 51; G.H.Thomas ed., Argonne, 1978, p. 505.
5. P.Dalpiaz et al. CERN/ECFA/72/4, vol. 1, p. 284.
6. H.W.Atherton and N.Doble. CERN SPS/EA/NOTE 76-18, June 1976.
7. D.Underwood et al. ANL preprint ANL-HEP-PR/78-05, Dec. 1977;
AIP Conf. Proceed. N° 51, Argonne, 1976, p.318.
8. S.Nurushev et al. Proceed. of the 1980 Intern. Symp., Lausanne, 1981, p. 501.

9. O.Barbalat et al. CERN/PS/DL 75-1, January 1975.
10. S.Suwa. AIP Conf. Proceed. N° 51; G.H.Thomas ed., Argonne, 1978, p. 325.
11. Y.Cho et al. AIP Conf. Proceed. N° 42; A.Krisch and A.Salthouse ed., New York, 1976, p. 41.
12. E.D.Courant. Proceed. of the 1980 Intern. Symp., Lausanne, 1981, p. 102.
13. R.M.Буртей. AIP Conf. Proceed. N° 51; G.H.Thomas ed., Argonne, 1978, p. 330.
14. Yu.K.Пилипенко. Proceed. of the 1980 Intern. Symp., Lausanne, 1981, p. 429.
15. L.C.Teng. Proceed. of the 1980 Intern. Symp., Lausanne, 1981, p. 92.
16. W.Наеberli. Proceed. of the 1980 Intern. Symp., Lausanne, 1981, p. 199.
17. А.Н.Зеленский, С.А.Кохановский. Сб. "Программа исследований на мезонной фабрике". Звенигород, ИЯИ 1981.
18. П.Р.Зенкевич. Труды IУ Международной конф. по ускор., Дубна, 1963.
19. E.D.Courant. AIP Conf. Proceed. N° 51; G.H.Thomas ed. Argonne, 1978, p. 307.
20. Ю.А.Плис, Л.М.Сороко. УФН, 107, 281 (1972).
21. В.М.Вайнберг, П.Р.Зенкевич. Препринт ИТЭФ, 101, Москва, 1975.
22. Ю.Ф.Орлов, С.А.Хейфец. Известия АН Арм. ССР, XIII, 1960.
23. M.Froissart, R.Stora. Nucl. Instr. Meth., 7, 297 (1960).
24. X.A.Симонян, Ю.Ф.Орлов. ЖЭТФ, 45, 173 (1963).
25. Я.С.Дербенев и др. ЖЭТФ, 60, 1216 (1971).
26. Я.С.Дербенев, А.М.Кондратенко. ДАН СССР, 223, 830 (1975).
27. Я.С.Дербенев, А.М.Кондратенко. Доклад на Международном симпозиуме по поляризационным явлениям при высоких энергиях, Дубна, 1981.
28. D.Cohen. Rev. Sci. Instr., 33, 161 (1962).
29. Higher Energy Polarized Proton Beams. AIP Conf. Proceed. (Ann. Arbor, 1977) N° 42, New York, 1978;
R.L.Martin. Труды X Межд. конф. по ускорителям заряженных частиц высоких энергий (Протвино, июль 1977), Серпухов, 1978, том. II, стр. 6;
А.Н.Зеленский, С.А.Кохановский. Труды конф. "Поляризационные явления при высоких энергиях", Дубна, 1981.
30. R.C.Fernov and A.D.Krish. UM HE 81-7 (1981).
31. Я.С.Дербенев и др. Труды X Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий (Протвино, июль 1977), Серпухов, 1977, том. II, стр. 76.
32. Я.С.Дербенев, А.М.Кондратенко. Там же, том. II, стр. 70.
33. Я.С.Дербенев и др. ДАН СССР, 192, 1255 (1970).
34. В.В.Владимирский и др. Труды Межд. конф. по ускорителям заряженных частиц высоких энергий, Дубна, 1963, стр. 197.
35. Я.С.Дербенев, А.М.Кондратенко. ДАН СССР 246, 301 (1979).
36. Я.С.Дербенев. Доклад на Международном симпозиуме по поляризационным явлениям при высоких энергиях. Дубна, 1981.
37. J.V.Roberts. AIP Conf. Proceed. N° 42, Ann Arbor 1977, p. 135.

Рукопись поступила в издательскую группу 15 февраля 1982 г.

Цена 15 коп.

© Институт физики высоких энергий, 1982.
Издательская группа И Ф В Э
Заказ 1486. Тираж 250. 1 уч.-изд.л. Т-05686.
Март 1982. Редактор Н.В.Ежова.