

37

И Н С Т И Т У Т  
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН СССР

ПРЕПРИНТ ИЯФ 76 - 62

Я.С.Дербенев, А.М.Кондратенко, А.Н.Скринский

О ПОЛУЧЕНИИ ПУЧКОВ С НУЖНОЙ ПОЛЯРИ-  
ЗАЦИЕЙ В НАКОПИТЕЛЯХ И УСКОРИТЕЛЯХ

Новосибирск

1976

Я.С.Дербенев, А.М.Кондратенко, А.Н.Скринский

О ПОЛУЧЕНИИ ПУЧКОВ С НУЖНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ  
В НАКОПИТЕЛЯХ И УСКОРИТЕЛЯХ

(Изложение доклада, представленного на сессию  
Отделения ядерной физики АН СССР, Москва,  
ноябрь 1976 г.)

А н н о т а ц и я

Приводится краткий обзор основных результатов исследований поведения поляризации частиц в накопителях и ускорителях. Описаны конкретные варианты получения продольно поляризованных частиц введением магнитных полей в промежутки. Предложен способ ускорения процесса радиационной поляризации электронов и позитронов и обращения ее направления в накопителях с помощью сильного знакопеременного магнитного поля, вводимого на участке орбиты. Рассмотрены способы подавления резонансной деполяризации при ускорении частиц до больших энергий.

1. К настоящему времени существуют два основных способа получения поляризованных частиц высокой энергии. Первый - получать их из имеющихся источников на низкой энергии, ускоряя их затем в ускорителе. Во втором способе, применимом для легких частиц, используется эффект радиационной самополяризации. Известно, что двигаясь достаточно время в накопителе, ультрарелятивистские электроны либо позитроны могут поляризоваться под действием синхротронного излучения /1/.

В связи с этим, одна из основных задач - выяснить, каким условиям должны удовлетворять электромагнитное поле ускорителя или накопителя и параметры пучка для сохранения поляризации частиц. Для электронов и позитронов в накопителе встает вопрос о выяснении условий, обеспечивающих возникновение естественной поляризации.

Важной задачей является создание пучков поляризованных частиц с требуемым направлением поляризации. Для этого необходимо исследовать поведение спинов, не ограничиваясь обычной геометрией магнитных полей существующих накопителей и ускорителей.

Эти вопросы рассматривались в довольно широком круге работ. В проведенных исследованиях выявлены широкие возможности управления поляризацией частиц в накопителях и ускорителях и проведения экспериментов с поляризованными пучками.

2. В работах /2-4/ установлено существование устойчивого периодического движения спина в стационарных условиях движения частиц в накопителе или ускорителе в произвольно меняющихся по направлению электромагнитных полях, не нарушающих устойчивости орбитального движения. При движении частицы по замкнутой траектории, движение ее спина представляет процессию вокруг периодического направления (оси прецессии). Эта ось прецессии обязательно повторяется в данном месте орбиты от оборота к обороту, как бы сложно ни было ее изменение вдоль орбиты, и представляет собой устойчивое направление поляризации. Это важный практический результат, открывающий возможность введением специальных полей создавать в нужном месте любое устойчивое наперед заданное направление поляризации.

В общем случае так же, как и при движении в почти постоянном по направлению магнитном поле, периодическое движение спина неустойчиво лишь в узких областях спиновых резонансов, когда ча-

стота вращения спина вокруг оси совпадает с частотами орбитального движения и их целочисленными комбинациями.

Исследование устойчивости радиационной поляризации с учетом всех реальных факторов, проведенное в работах /5-II/, показало, что в накопителях можно обеспечить высокую степень поляризации электронов и позитронов. В работах /9-II/ содержатся формулы, позволяющие находить степень равновесной поляризации и время релаксации в накопителях с произвольными полями. В неоднородном поле возникает дополнительный поляризующий механизм, обусловленный спин-орбитальной связью, который отсутствует при движении в постоянном по направлению магнитном поле. Ниже рассмотрен пример, когда радиационная поляризация полностью обязана этому механизму. Интересно отметить, что максимальная степень поляризации достигается в неоднородном поле специального вида и равна 95% (в однородном - 92%).

В работе /10/ показана возможность длительного существования поляризованных частиц в накопителях со встречными пучками. Оказывается, что максимальное число встречных частиц, не нарушающее процесс самополяризации, примерно такое же, какое допустимо по условиям орбитальной устойчивости встречных пучков.

3. Хорошо известной ситуацией, в которой могут существовать поляризованные пучки, является движение в ускорителе или накопителе с почти постоянным по направлению магнитным полем. Естественным направлением устойчивой поляризации является направление вдоль поля, поперечное к скорости частицы.

Уже и в этой ситуации поляризованные пучки существенно расширяют возможности проведения физических экспериментов. В частности, по азимутальному распределению продуктов реакции поперечно-поляризованных встречных пучков можно судить о спиновых свойствах конечных состояний.

Становится возможным проводить и прецизионные эксперименты. Примерами такого рода экспериментов являются способ абсолютного измерения средней энергии пучка /12/ (полученная точность  $1 \cdot 10^{-4}$ ) и планируемый в ближайшее время в Институте ядерной физики СО АН СССР (Новосибирск) эксперимент по сравнению аномальных магнитных моментов позитрона и электрона с относительной точностью порядка

$10^{-5}$ . Для этих целей используется малое высокочастотное магнитное поле, которое при резонансной настройке деполяризует пучок /4,6,11/. Такой деполяризатор использовался в экспериментах по обнаружению радиационной поляризации в накопителях ВЭПП-2, ВЭПП-2М ИЯФ СО АН СССР /13,14/. Изменение состояния поляризации фиксировалось по изменению частоты актов рассеяния частиц внутри сгустка, при которых энергии частиц менялись больше чем, примерно, на 10%; этот вариант регистрации является развитием способа, предложенного в работе /15/.

Большой интерес представляет получение пучков с любым заданным направлением поляризации. Так, например, в экспериментах с продольно-поляризованными (параллельно скорости) электрон-позитронными встречными пучками одинаковой спиральности закрывается электродинамический однофотонный канал, и поэтому подчеркиваются остальные аннигиляционные процессы: либо не однофотонные, либо не электродинамические.

Первые предложения (1970г.) создания нужного направления поляризации, в частности, продольного, содержались в работах /2,3/ (см. также обзор /6/ стр. 477 (р.714)). Продольно поляризованные пучки можно получить многими способами. С методической точки зрения полезно отметить, что возможность осуществить, выбором геометрии магнитного поля, устойчивое движение спина с заданным направлением в нужном месте орбиты аналогична возможности добиться устойчивости орбитального движения частиц в накопителе со сложной формой равновесной траектории. Как известно, можно обеспечить устойчивость орбитального движения и по отношению к радиационным эффектам. Точно так же, выбирая должным образом геометрию магнитного поля вблизи равновесной орбиты, можно получить радиационную поляризацию высокой степени.

4. Рассмотрим простые примеры, как можно получить продольно поляризованные электрон-позитронные (электрон-электронные) встречные пучки /3/. Введем в прямолинейный промежуток накопителя радиальное магнитное поле  $H_z$ . Требуемая величина для поворота спина относительно скорости на угол  $\pi/2$  для электронов равна  $\ell H_z = 23$  кгаусс  $\times$  метр, где  $\ell$  - длина участка с введенным полем (для протонов  $\ell H_z = 27$  кгаусс  $\times$  метр). Варьируя величину  $H_z$  по промежутку, можно получить любое требуемое на-

правление поляризации в месте встречи. Для восстановления направления поляризации вдоль поля и скорости после прохождения промежутка нужно наложить условие  $\oint H_2 d\ell = 0$ . Не представляет существенных затруднений восстановить и орбиту на выходе из промежутка. В таких вариантах обеспечивается также высокая степень радиационной поляризации.

При вращениях в заданной плоскости поперечными к скорости полями, существует связь между углами поворота скорости  $\alpha$  относительно основной плоскости орбиты и спина  $\psi$  относительно скорости:

$$\frac{\alpha}{\psi} = \frac{2}{\gamma(q-2)}$$

( $\gamma$  - релятивистский фактор,  $q$  - фактор частицы). При повороте радиальными полями в точке осуществления продольной поляризации угол наклона скорости равен  $\pi / [\gamma(q-2)]$ . Таким образом, амплитуда вертикальных искажений в промежутке с введенным радиальным полем будет зависеть от энергии.

Выбор варианта определяется конкретными экспериментальными условиями. Например, траектория частиц в промежутке может иметь вид, изображенный на рис. 1.

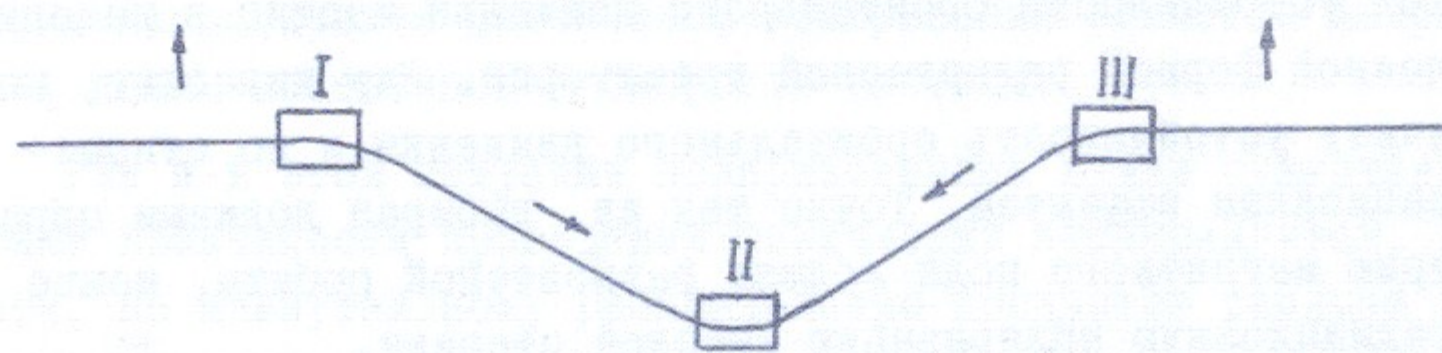


Рис.1

Радиальное магнитное поле поперечно плоскости рисунка и введено в областях I, II и III. Продольная поляризация противоположных направлений осуществляется между областями I, II и II, III. (Стрелками указано направление поляризации).

Другим примером может служить вариант, предложенный в работе /16/ (см.рис.2)

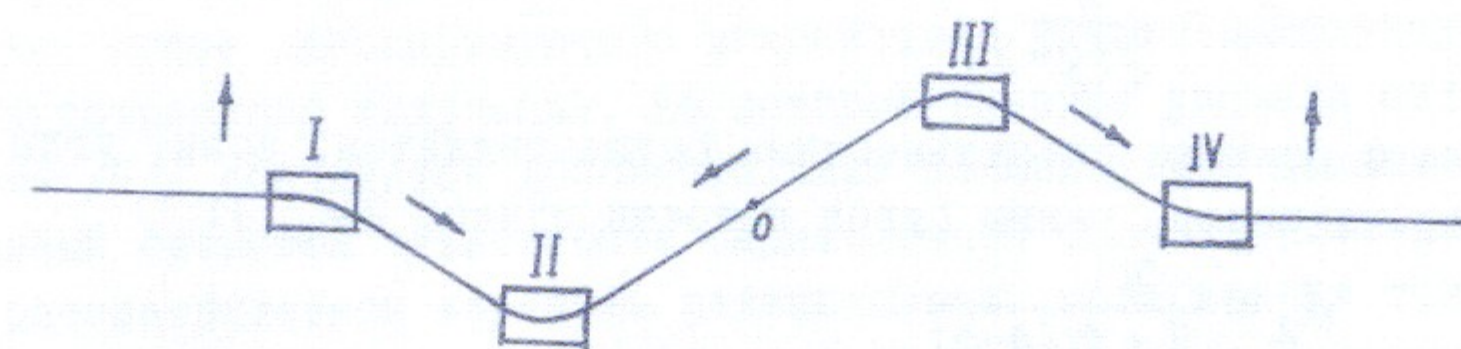


Рис.2

Здесь продольная поляризация осуществляется между областями II и III. (Продольная поляризация противоположного направления может иметь место между областями I, II и III, IV). Особенность этого варианта заключается в том, что встреча продольно-поляризованных частиц осуществляется в точке O, положение которой по вертикали не зависит от энергии.

При движении по одной орбите в любом магнитном поле электроны и позитроны за счет излучения поляризуются в противоположных направлениях (в частности, это сохраняется и в месте осуществления продольной поляризации). Можно получить встречные электрон-позитронные пучки и с одинаковым направлением поляризации. Для этого достаточно раздвинуть энергии поляризованных пучков радиальным электрическим полем и перевернуть направление поляризации одного из пучков, проведя его адиабатически через созданный спиновый резонанс /4/. Состояние поляризации с обращенным направлением динамически столь же устойчиво, как и "естественное", и лишь вследствие радиационных процессов будет медленно релаксировать к последнему.

При движении пучков по разным траекториям, как например, в накопителе DORIS (ФРГ) или DCI (Франция), состояния пучков с любыми относительными знаками продольных поляризаций могут быть устойчивыми по отношению к радиационным процессам. Так, при концентрических траекториях (как в упомянутых накопителях) сос-

тояния с одинаковой спиральностью осуществляются, если в месте встречи пучков углы наклона траекторий к основным плоскостям орбит (плоскости орбит параллельны) равны (лобовая встреча):

$$\alpha_1 = \frac{\pi}{\gamma(q-2)}$$

Состояние с разными спиральностями осуществляется, если углы наклонов, например, равны (угол встречи пучков  $2\alpha_2$ ):

$$\alpha_2 = \frac{\pi}{2 + \gamma(q-2)}$$

Тогда поляризация обоих пучков оказывается продольной в системе их центра инерции (векторы спинов, при этом, в месте встречи параллельны основной плоскости орбит пучков).

Другими примерами получения продольной поляризации в прямолинейном промежутке могут служить варианты с использованием (вместо радиальных полей) комбинаций из продольных и вертикальных полей /17/ и комбинаций из радиальных и вертикальных полей /18/.

Исследование устойчивости радиационной поляризации в указанных вариантах может быть произведено количественно, используя результаты работ /8,9/, в которых получены формулы для степени радиационной равновесной поляризации и времени ее установления для накопителей с любым изменением полей вдоль орбит, учитывающие все существенные поляризующие и деполяризующие эффекты.

5. Для создания продольной поляризации можно также использовать продольное магнитное поле, не искажающее равновесной орбиты частиц. Рассмотрим интересный вариант, в котором наиболее ярко демонстрируется также дополнительный поляризующий механизм, возникающий в неоднородном поле /8/. Пусть в накопителе имеются два противоположащих прямолинейных промежутка. Если ввести в один из них постоянное продольное поле  $H_{\parallel}$ , поворачивающее вектор спина на поворота вокруг скорости, то в противоположащем промежутке равновесная поляризация будет направлена вдоль скорости /3/. Требуемая величина поля при этом равна (для электронов)

$$eH_{\parallel} = 26 \cdot 10^{-3} \gamma \text{ кгаусс} \times \text{метр}$$

В этом варианте на основном участке орбиты устойчивое направление поляризации поперечно к направлению управляющего магнитного поля (лежит в плоскости орбиты). На первый взгляд здесь должна отсутствовать радиационная поляризация. Однако в неоднородном поле, кроме деполяризующего воздействия квантовых флуктуаций синхротронного излучения, на которое впервые указали авторы работы /5/, появляется дополнительный поляризующий механизм, обусловленный спиновой зависимостью радиационной силы торможения /8/. В рассматриваемом варианте радиационная поляризация полностью обязана этому механизму. Для энергий частиц, при которых величина  $\gamma(q-2)/2 \lesssim 1$ , степень естественной поляризации может достигать 60 ÷ 70%. Высокую степень радиационной поляризации можно сохранить и при более высоких энергиях, подбирая должным образом фокусирующую систему накопителя. Порядок величины времени поляризации тот же, что и в накопителе без продольного поля. (Подробнее этот вариант будет описан в отдельной работе).

Продольную поляризацию можно получить также введением продольного поля малой величины вблизи значений энергии, при которых  $\gamma(q-2)/2 = 1, 2, \dots$ . При этом, правда, воздействие квантовых флуктуаций синхротронного излучения становится определяющим и, в конце концов деполяризует пучок. В этом случае пучок должен инжектироваться поляризованным, например, из другого накопителя. Можно также продольное поле ввести (адиабатически) после того, как пучок поляризуется в основном поле накопителя. Величина вводимого продольного поля должна быть достаточно большой, чтобы поляризация сохранялась в течении времени эксперимента.

Как уже упоминалось, движение спина будет неустойчивым лишь в узких областях спиновых резонансов. Вне этих областей относительно малые возмущения не могут существенно исказить спинового движения. Интересно отметить, что в варианте с продольным полем, поворачивающим в промежутке спин на поворота, дробная часть частоты прецессии спина (ось прецессии лежит в плоскости орбиты) всегда равна половине частоты обращения частиц в накопителе независимо от энергии.

х) При указанных значениях энергии продольная поляризация осуществляется в обоих противоположащих промежутках введением поля любой величины. Для динамической устойчивости необходимо лишь, чтобы угол поворота продольным полем вектора спина в промежутке превышал некогерентный разброс углов осей прецессии спинов в пучке.

Поэтому все спиновые резонансы, в том числе и с бетатронными гармониками, фактически становятся невозможными, ибо резонанс означал бы одновременно неустойчивость и орбитального движения.

При больших энергиях легче осуществить переворот спина в промежутке поперечными к орбите магнитными полями, так как требуемая их величина примерно в  $\gamma(g-2)$  раз меньше величины продольного поля. При этом одновременно можно удовлетворить и условию восстановления орбиты.

Продольная поляризация будет устойчиво осуществляться в противолежащем промежутке, независимо от энергии. При высоких энергиях, когда  $\gamma(g-2) \gg 1$ , в этом способе, так же как и в случае с продольным полем, по-видимому, возможно обеспечить радиационную поляризацию специальным выбором фокусирующей системы накопителя.

Возможные для электронов (позитронов) варианты управления поляризацией принципиально могут применяться и к тяжелым частицам. Ввиду отсутствия у тяжелых частиц эффекта радиационной поляризации пучки этих частиц необходимо либо инжектировать уже поляризованными, либо поляризовать их в накопителе каким-нибудь способом. Например, можно надеяться получить поляризованные пучки протонов (антипротонов), используя спиновую зависимость ядерного взаимодействия частиц с поляризованными мишенями и применяя электронное охлаждение для поддержания достаточно малых размеров пучка.

6. Существуют также возможности ускорения процесса радиационной поляризации. Введем в прямолинейные промежутки сильное накоперенное вертикальное магнитное поле  $H_z(\ell)$  (минимальное число осцилляций поля определяется допустимой амплитудой пространственных биений орбиты в промежутке). Согласно работам /6,8, 19,20/ обратное время поляризации  $T^{-1}$  пропорционально величине

$$T^{-1} \sim \gamma^2 \oint |H_z|^3 d\ell$$

Отсюда видно, что увеличением поля на относительно малой длине можно существенно уменьшить время поляризации. Степень равновесной поляризации  $\zeta$  при этом равна

$$\zeta = \frac{8}{5\sqrt{3}} \frac{\oint H_z^3 d\ell}{\oint |H_z|^3 d\ell}$$

Очевидно, что введением "змейки" можно обеспечить высокую степень поляризации без искажения орбиты на основных участках. Условие

$$\oint_S |H_z|^3 d\ell - \left| \int_S H_z^3 d\ell \right| \ll \oint_S |H_z|^3 d\ell$$

выполняется, если поля разных знаков сильно различаются по величине. Одновременно можно удовлетворить условию  $\int_S H_z d\ell = 0$ . Существенно, что этим способом можно изменять и знак равновесной поляризации, меняя знаки полей в "змейке"

Следует, конечно, иметь в виду, что введение сильного поля приводит к увеличению радиационных потерь и декрементов затухания колебаний частиц (с перераспределением декрементов радиальных и энергетических колебаний). Пропорционально  $T^{-1}$  вырастает и скорость диффузии энергии из-за квантовых флуктуаций излучения:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\Delta \mathcal{E}}{\mathcal{E}} \right)^2 = \frac{11}{9} T^{-1}$$

При этом увеличивается энергетический разброс пучка.

7. Одной из важных является задача ускорения поляризованных частиц (протонов, антипротонов) до больших энергий. При ускорении обычно приходится проходить ряд спиновых резонансов, которые могут деполаризовать пучок. Очевидными рекомендациями являются компенсации опасных гармоник возмущающих полей, либо увеличение скорости прохождения резонансов.

В работе /21/ рассмотрены другие возможности, основанные не на подавлении опасных гармоник, а на увеличении их введением специальных полей, до такой степени, чтобы прохождение резонансов стало адиабатическим. Предельными вариантами, когда вводимые поля сильно искажают движение спина, могут служить описанные выше примеры с введением в промежутки полей, поворачивающих спин на поворот. При низких энергиях (на начальной стадии ускорения) удобно использовать продольное магнитное поле (искажение фокусирующих свойств магнитной системы можно, при необходимости, компенсировать введением дополнительных линз). В области высоких энергий ( $\gamma(g-2) \gg 1$ ) целесообразно применять поперечные маг-

нитные поля (с восстановлением орбиты). Включение и выключение поворачивающих полей может производиться адиабатически, с сохранением устойчивости спинового и орбитального движения. При этом инжектировать продольно поляризованный пучок можно непосредственно в противолежащий промежуток, где направление равновесной поляризации параллельно скорости. Поскольку в этих вариантах спиновые резонансы невозможны при любой энергии, в процессе ускорения будет сохранена степень поляризации пучка.

Задача ускорения или замедления может быть актуальна и для легких частиц. Например, можно быстро поляризовать электроны на высокой энергии, замедлив их затем до нужной в данном эксперименте /21/.

Возможности управления поляризацией, конечно, не исчерпываются приведенными примерами. Но и рассмотренных вариантов достаточно, чтобы прийти к выводу о необходимости учитывать эти возможности при проектировании новых накопителей и ускорителей на большие энергии.

## Л и т е р а т у р а

- I. А.А.Соколов, И.М.Тернов, ДАН СССР 153, 1052 (1963).  
Sov. Phys. Doklady 8, 1203 (1964).
2. Я.С.Дербенёв, А.М.Кондратенко, А.Н.Скринский. ДАН СССР, 192, 1255, (1970). Sov. Phys. Dokl., 15, 583 (1970).
3. Я.С.Дербенёв, А.М.Кондратенко, А.Н.Скринский. Препринт ИЯФ СО АН СССР 2-70 (1970).
4. Я.С.Дербенёв, А.М.Кондратенко, А.Н.Скринский. ЖЭТФ 60, 1216 (1971). Sov. Phys. JETP 33, 658 (1971).
5. В.Н.Байер, Ю.Ф.Орлов. ДАН СССР 165, 783 (1965).
6. В.Н.Байер, УФН, 105, 441 (1971) Sov. Phys. Uspekhi 14, 695 (1972).
7. Я.С.Дербенев, А.М.Кондратенко. ЖЭТФ, 62, 430 (1972)  
Sov. Phys. JETP, 35, 230 (1972).
8. Я.С.Дербенёв, А.М.Кондратенко. ЖЭТФ, 64, 1918 (1973).  
Sov. Phys. JETP, 37, 968 (1973).
9. Я.С.Дербенёв, А.М.Кондратенко. ДАН СССР 217, 311 (1974).
10. А.М.Кондратенко. ЖЭТФ 66, 1211 (1974) Sov. Phys. JETP 39, 592 (1974).
11. А.М.Кондратенко "Динамика спинов частиц в накопителях"  
Кандидатская диссертация ИЯФ СО АН СССР, Новосибирск, 1974.
12. А.Д.Букин, Я.С.Дербенёв, А.М.Кондратенко, Л.М.Курдадзе, С.И.Середняков, В.А.Сидоров, А.Н.Скринский, Г.М.Тумайкин, Ю.М.Шатунов. Доклад на У международной конференции по физике элементарных частиц и атомного ядра. Варшава 1975 г. Препринт ИЯФ СО АН СССР 75-64 (1975).
13. А.Н.Скринский, Г.М.Тумайкин, Ю.М.Шатунов. См.напр. обзор /6/ и материалы У1 зимней школы по теории ядра и физики высоких энергий Л., ФТН им.А.Ф.Иоффе, 1971.
14. Л.М.Курдадзе, С.И.Середняков, В.А.Сидоров, А.Н.Скринский, Г.М.Тумайкин, Ю.М.Шатунов. Труды У международной конференции по физике высокой энергии и атомного ядра. Варшава, 1975 Препринт ИЯФ СО АН СССР 75-66 (1975).



15. В.Н.Байер, В.А.Хозе, Атомная энергия 25, 440 (1968).
16. R.Schwitters, B.Richter SPEAR-175, PEP-Note 87(1974)
17. N.Christ, F.J.M.Farley, H.G.Hereward. Nucl. Inst. and Meth. 115, 227(1974)
18. B.W.Montague. CERN/ISR-LTD/76-2(1976)
19. В.Н.Байер, В.М.Катков ЖЭТФ 52, 1422 (1967).
20. В.Н.Байер, В.М.Катков, В.М.Страховенко ЖЭТФ 58, 1695 (1970)
21. Я.С.Дербенев, А.М.Кондратенко. ДАН СССР 223, 830 (1975).

Работа поступила - 25 мая 1976г.

---

Ответственный за выпуск - С.Г.ПОПОВ  
Подписано к печати 30.УІ-1976г. МН 02849  
Усл. 0,9 печ.л., тираж 250 экз. Бесплатно  
Заказ № 62.

---

Отпечатано на ротапринтере ИЯФ СО АН СССР