

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

683/2-81

9/2-81
10-80-656

Д.Т.Бурилков, М.Ф.Лихачев, П.К.Марков,
П.Т.Тодоров, Р.К.Траянов

ПРОГРАММА "ПЕРУН"
ДЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ
СОБЫТИЙ
В ЭКСПЕРИМЕНТАХ
ПО ПОИСКУ НОВЫХ ЧАСТИЦ
НА УСТАНОВКЕ БИС-2

1980

1. ВВЕДЕНИЕ

В экспериментах по поиску новых частиц и узких барионных резонансов используется установка БИС-2. Ее схема показана на рис. 1.

Основными элементами установки являются магнит /1/ и пропорциональные камеры /ПК/. Камеры позволяют регистрировать координаты треков заряженных частиц. Импульсы частиц определяются с помощью измерения угла поворота трека частицы в магнитном поле. Наличие в установке детекторов мюонов /2/ и электронов /3/ позволяет производить идентификацию лептонов.

Установка работает на линии с ЭВМ ЕС-1040. Информация о каждом событии, удовлетворяющем условиям триггера, записывается на магнитные ленты /МЛ/ для проведения последующей обработки.

В ходе обработки данных, записанных на МЛ, необходимо по координатам искр, зарегистрированным в каждой камере, восстановить траектории движения частиц, а также для предварительного отбора событий вычислить некоторые их кинематические характеристики.

Такую реконструкцию осуществляет специальная программа, названная нами "Перун".

В данной работе описывается структура программы "Перун" и логика работы отдельных ее блоков. Исследованию эффективности и точности реконструкции событий этой программой будет посвящена отдельная работа.

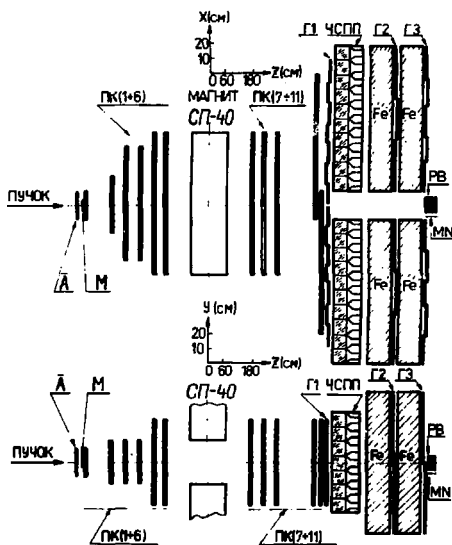


Рис. 1. Схема установки БИС-2.

2. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА УСЛОВИЙ ПОИСКА СОБЫТИЙ

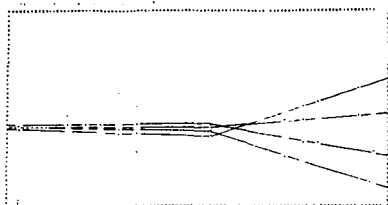


Рис. 2. Топология типичного события с небольшой фоновой загрузкой /X- и Y-проекции/.

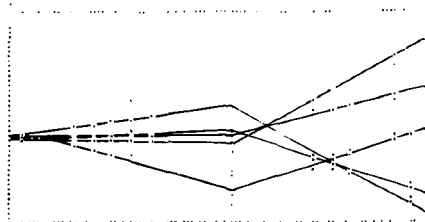


Рис. 3. Топология типичного события со значительной фоновой загрузкой /X- и Y-проекции/.

В экспериментах, где исследуемые процессы имеют малые поперечные сечения /порядка микробарн/, необходимо использовать интенсивный поток падающих на мишень частиц. Это приводит к появлению фона, особенно в ПК, расположенных до магнита.

Некоторое представление о характере зарегистрированных установкой событий, геометрию которых должна восстановить программа 'Перун', дают их изображения, напечатанные на бумаге с помощью цифropечатающего устройства /рис. 2, рис. 3/. Анализ таких изображений показал, что для одних событий практически нет фоновых искр, в то время как для других поиск трека надо осуществлять среди большого количества фоновых искр. Ясно, что эффективность и скорость поиска и реконструкции в этих крайних случаях будут существенно различаться.

Из приведенных изображений событий видно, что фоновая загрузка ПК, расположенных за магнитом, значительно меньше, чем ПК, расположенных перед магнитом. Поэтому целесообразно начинать реконструкцию с ПК за магнитом, где, кроме того, треки лучше разделяются.

Камеры БИС-2 объединены в два блока. Первый блок состоит из камер 2-6. Нумерация камер принята по возраста-

нию их Z-координат. Второй блок состоит из двух плеч /ПК 7, 8, 9, 10 и 7, 8, 9, 11 соответственно/. Для облегчения пространственной шивки X- и Y-треков в каждой блоке одна из ПК повернута на угол 10° в плоскости, перпендикулярной оси Z.

Реконструкция события осуществлялась в системе координат, начало которых расположено в центре магнита. Направление оси Z совпадает с направлением нейтронного пучка, ось X направлена направо, а ось Y - вниз.

Логика запуска была выбрана такой, чтобы отбирать события с 4 и больше заряженными частицами. Так как интерес представляют многотрековые события /3÷6 треков/, то программа реконструкции должна правильно восстанавливать именно такие события. Основная трудность восстановления события - правильная идентификация искр, т.е. нахождение из всех искр тех, которые принадлежат данному треку.

В общем случае, если через установку прошло n частиц, должно наблюдаться в горизонтальной и вертикальной проекциях по n треков. В некоторых случаях, когда плоскость одного из распадов, давших m частиц, перпендикулярна плоскостям XOZ или YOZ, в одной из проекций будет зарегистрировано $(n-m+1)$ треков. Аналогичная картина возникает, когда расстояние между треками события меньше пространственной разрешающей способности ПК. Программа реконструкции должна находить и восстанавливать и такие события.

На этапе поиска и реконструкции события в программе используется оригинальный алгоритм. Он опирается на несколько основных принципов:

- 1/ Поиск начинается с ПК за магнитом, где меньше фона.
- 2/ На каждом этапе реконструкции события оптимально используются физические законы, которым должны подчиняться траектории частиц.
- 3/ Каждый последующий этап восстановления события оптимально использует информацию, полученную на предыдущих этапах.

3. АНАЛИЗ ТРАЕКТОРИЙ ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ ЧАСТИЦ

Детальный количественный анализ траекторий частиц позволяет:

- 1/ выработать эффективные критерии для поиска реальных треков и отбрасывания ложных,
- 2/ разработать методы для более точного восстановления геометрических и кинематических параметров события.

Траектории частиц вне области, где действует поле магнита, хорошо описываются прямыми линиями. Нами приняты следующие обозначения:

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= BX_1 \cdot Z + AX_1 \\ Y_1 &= BY_1 \cdot Z + AY_1 \end{aligned} \right\} \quad \text{-- полутрек перед магнитом,}$$

$$\left. \begin{aligned} X_2 &= BX_2 \cdot Z + AX_2 \\ Y_2 &= BY_2 \cdot Z + AY_2 \end{aligned} \right\} \quad \text{-- полутрек за магнитом,}$$

где BX_1, BX_2, BY_1, BY_2 - тангенсы угла наклона, а $(AX_1, AY_1), (AX_2, AY_2)$ - координаты прямых при $Z=0$.

Используя хорошо известные законы движения заряженных частиц в однородном и постоянном магнитном поле, нетрудно получить количественные связи между параметрами трека перед и за магнитом.

3.1. Связи полутреков в X-проекции

Так как магнитное поле направлено по оси Y , то траектория частицы в X -проекции не зависит от импульса частицы в Y -проекции. Для дальнейших рассмотрений важны величины:

1/ $DX = AX_1 - AX_2$ - расстояние между координатами продолжений полутреков перед и за магнитом при $Z=0$.

2/ $DZX = DX / (BX_2 - BX_1)$ - координата точки пересечения продолжений полутреков перед и за магнитом.

3/ DXM - расстояние между продолжением полутрека за магнитом в плоскости $Z=0$ и действительной траекторией частицы в магнитном поле в этой плоскости.

Здесь не будем приводить конкретных формул для этих величин, а обсудим результаты численных расчетов для тех импульсов (P) и углов (α) вхождения частиц в область магнитного поля, которые реально встречаются в эксперименте. Они приведены для DX, DZX, DXM на рис. 4, рис. 5 и рис. 6 соответственно. При расчетах принято, что поле $B = 1,33$ Т, а его эффективная длина $l = 1,5$ м. На рисунках показаны распределения только для отрицательных частиц. Для положительных частиц они имеют тот же вид, если изменить знак у всех углов. Из рис. 4, 5, 6 можно сделать следующие выводы:

1. Для большинства треков P больше 5 ГэВ/с/ $|DX| < 1$ мм.

2. Максимальная величина $|DX| \sim 4$ мм получается при минимальном импульсе и максимальном отрицательном угле /в дальнейшем для краткости будем называть эту комбинацию случаем "максимальной асимметрии"/.

3. Для преобладающей части треков $|DZX| < 3$ мм.

4. Максимальная величина $|DZX| \sim 16$ мм получается при максимальной асимметрии.

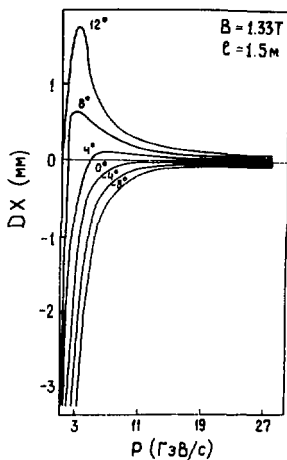


Рис. 4. D_X - расстояние между координатами продолжений полутреков при $Z=0$.

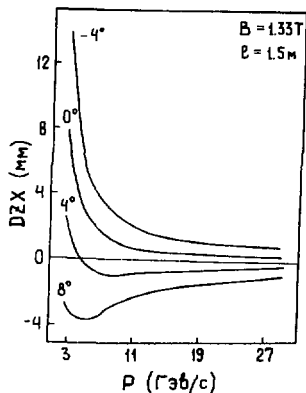


Рис. 5. D_{ZX} - координата точки пересечения продолжения полутреков в X - проекции.

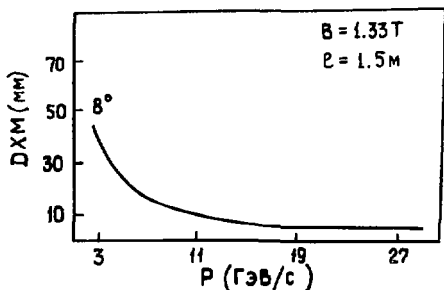


Рис. 6. D_{XM} - расстояние между продолжением полутрека за магнитом в плоскости $Z=0$ и действительной траекторией частицы в магнитном поле в этой плоскости.

5. На основании 1) ÷ 4), можно утверждать, что в первом приближении продолжения полутреков хорошо "сшиваются" при $Z=0$, но для некоторых частиц с импульсами около 3 ГэВ/с следует учитывать величины D_X, D_{ZX} .

6. Максимальная величина $|D_{XM}| \sim 50$ мм получается также при максимальной асимметрии. На рис. 6 приведена только одна кривая, так как кривые при других углах отличаются от нее меньше чем на 1 мм.

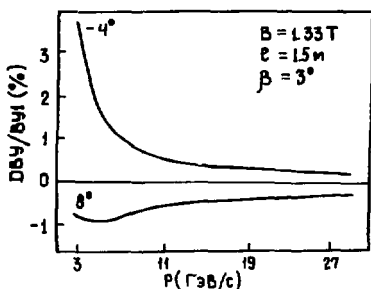


Рис.7. $DBY/BY1$ - излом трека в Y -проекции

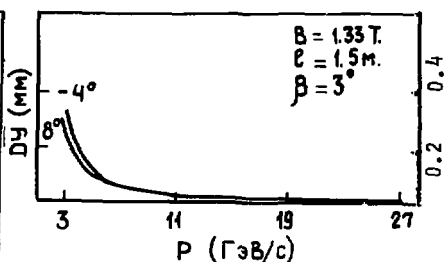


Рис.8. DY - расстояние между продолжениями полутреков в Y -проекции.

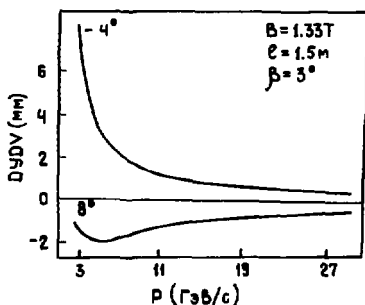


Рис.9. $DYDV$ - расстояние между продолжениями полутреков за и перед магнитом в конце распадного объема.

3.2. Связи полутреков в Y -проекции

Известно, что под действием магнитного поля траектория заряженной частицы в Y -проекции испытывает малые отклонения. Поэтому важны следующие величины:

- 1/ Изменение тангенса угла наклона /излом трека/ - $DBY/BY1 = (BY2 - BY1) / BY1$,
- 2/ $DY = AY2 - AY1$ - расстояние между продолжениями полутреков перед и за магнитом при $Z=0$.
- 3/ $DYDV = BY1 \cdot ZOV + AY1 - (BY2 \cdot ZOV + AY2)$ - расстояние между продолжениями полутреков за и перед магнитом в конце распадного объема.

Результаты расчетов для максимально возможного в YOZ - плоскости угла $\beta=3^\circ$ и для различных значений P и α в XOZ -проекции приведены на рис.7-9 для $DBY/BY1$, DY , $DYDV$ соответственно.

Из этих рисунков можно сделать следующие выводы:

1/ Максимальные изменения ВУ2 по сравнению с ВУ1 составляют $\pm 3,6$ % при Р больше 7 ГэВ/с они не превышают $\pm 1,0$ %.

2/ DY практически не зависит от угла α . Его максимум /0,3мм/ получается при минимальном значении импульса. Величина его такова, что этим эффектом практически можно пренебречь.

3/ Максимум $|DY DV|$ -8 мм получается, как обычно, при максимальной асимметрии. Следовательно, продолжение полутрека за магнитом в область конца распадного объема может выходить за его поперечные размеры не более чем на 8 мм.

4. ЛОГИКА И СТРУКТУРА ПРОГРАММЫ "ПЕРУН"

Программа "Перун" состоит из общей части, организующей работу всей программы, и отдельных подпрограмм, выполняющих следующие операции: чтения события с МЛ, декодировки информации о нем, поиска треков в блоках за и перед магнитом, реконструкции события, вычисления кинематических параметров события, записи результатов на ленты суммарных результатов /ЛСР/.

Операция чтения осуществляется с помощью специальной подпрограммы, написанной на языке АССЕМБЛЕР.

Подпрограмма декодировки информации довольно сложна из-за специфики записи первичной информации на МЛ с максимальной плотностью.

Все остальные подпрограммы написаны на алгоритмическом языке ФОРТРАН и оптимизированы по времени.

4.1 Поиск полутраекторий в области за магнитом /подпрограмма IDEN2/

Вначале при использовании опорных камер определяются полутреки в X- и Y-плоскостях независимо. Так как БИС-2 имеет два плеча, то ПК8 и ПК9 сканируются дважды.

Для нахождения кандидата в полутрек программа требует наличия двух или трех искр, лежащих на одной прямой. При этом всегда требуется, чтобы одна из них была в последней ПК плеча, иначе существенно ухудшается точность восстановления параметров трека. Сначала ищутся кандидаты в полутрек с тремя искрами. При этом налагается дополнительное условие, чтобы отклонение координат средней искры от прямой, проходящей через координаты двух крайних, было не больше определенной величины.

Поскольку эффективность ПК не равна точно 100%, то необходимо также искать кандидаты в полутрек, состоящие из 2 искр.

При этом рассматриваются только такие искры из ПК10 /ПК11/, которые еще не вошли ни в один из кандидатов с 3 искрами.

Чтобы сократить время поиска и уменьшить число ложно генерированных полутреков, необходимо еще на этом этапе максимально ограничить число комбинаций. Это достигается при использовании связей между полутреками для реальных частиц, рассмотренных в 3.1 и 3.2. Они позволяют применить дифференциальные критерии отбора треков, которые зависят от положения каждой искры.

1/ Y -проекция. Так как нас интересуют только треки из мишени и распадного объема, то для каждой Y -искры из ПК10 /ПК11/ можно выделить узкую рабочую область в ПК8 и ПК9. Размеры этой области получаем, связывая координаты искры из ПК10 или ПК11 с "эффективными" границами конца распадного объема / Y_L, Y_R - см. 3.2/. Это сильно уменьшает число кандидатов в трек.

2/ X -проекция. Для каждой искры из ПК10 или ПК11 можно выделить интересную для нас часть объема ПК8 и ПК9, соединяя координаты этой искры с "эффективными" границами области действия магнитного поля / X_{LM}, X_{RM} - см. 3.1/. Эффективность этого критерия сильно зависит от положения искры в ПК10 или ПК11, но тоже позволяет уменьшить на раннем этапе число кандидатов в трек.

После нахождения кандидатов в полутреки в X - и в Y -проекциях подпрограмма MID производит восстановление пространственных полутреков. Для этого используется информация о наличии искр в повернутой камере. Требуется, чтобы в окрестности трека в плоскости ПК7 была хотя бы одна искра.

Наличие дополнительных фоновых искр в окрестности данного полутрека приводит к появлению одной или больше ложных полутраекторий, которые мало отличаются от реальной. Если несколько полутреков попадают внутрь определенного пространственного коридора, то выбирается тот из них, который имеет лучшее χ^2 .

4.2 Поиск полутраекторий в области перед магнитом и составление "сквозных" треков /подпрограмма IDEND /

При поиске полутреков перед магнитом существенно используется информация об уже найденных полутреках за магнитом.

Так как траектория в Y -проекции перед магнитом мало отличается от продолжения полутраектории за магнитом, то составляются только такие полутреки, которые находятся внутри определенных пространственных коридоров. Границы этих коридоров

получаются из продолжения полутрека за магнитом к ПК перед магнитом с учетом возможного отклонения трека /см. 3.2/, координатной неточности камер и ошибок при определении параметров полутрека за магнитом. При этом требуется, чтобы в этих коридорах в опорных камерах было определенное минимальное количество искр.

При поисках треков в X-проекции используется тот факт, что в первом приближении полутреки в областях перед и за магнитом "сшиваются" в центре магнита. Для составления полутрека перед магнитом программа требует наличия 4, 3 или 2 искр в опорных камерах, лежащих на одной прямой. При этом составляются только такие кандидаты, которые "сшиваются" хотя бы с одним из полутреков за магнитом. Это позволяет существенно сократить время, необходимое для восстановления сквозных треков.

Подпрограмма IDEND сначала ищет кандидаты в полутрек с 4, потом с 3 и, наконец, с 2 искрами. При этом выдвигается дополнительное условие о том, чтобы отклонения координат искр в камерах от прямой, проходящей через координату искры в камере с наименьшим порядковым номером и координату продолжения полутрека за магнитом в плоскость $Z=0$, были меньше определенных величин. Эти коридоры определяются с учетом координатной неточности камер, положения данной камеры относительно крайних искр на данной прямой, ошибок параметров полутрека за магнитом и точности выполнения условия о том, что полутреки "сшиваются" при $Z=0$.

После того, как составлены полутреки в X- и в Y-проекциях, подпрограмма MID осуществляет восстановление пространственных полутреков в области перед магнитом таким же способом, как и в области за магнитом.

Возможно, что 2 полутрека перед магнитом "сшиваются" с одним и тем же полутреком за магнитом. Так как вероятность такого события крайне мала, то программа выбирает ту комбинацию сквозного трека, которая при общем фитировании искр перед и за магнитом дает лучшее χ^2 .

Наоборот, не так редки случаи, когда 2 трека до магнита не разделяются, а потом магнитное поле четко их разделяет. Такая ситуация допускается, и программа запоминает обе комбинации в массиве сквозных пространственных треков.

4.3 Вычисление геометрических параметров сквозных треков /подпрограмма SFTT /

Мы воспользовались методом, в котором учитываются те закономерности, которым удовлетворяют траектории реальных частиц. Это позволяет существенно улучшить точности реконструкции трека и события.

1/ X-проекция. Используем тот факт, что в первом приближении $DZX=0$ /см. 3.1/, т.е. $AX_1=AX_2$. Тогда искры перед и за магнитом аппроксимируются ломаной прямой

$$X = BX_1 \cdot (Z - |Z|)/2 + BX_2 \cdot (Z + |Z|)/2 + AX = \Phi_1(Z).$$

Требуем, чтобы сумма квадратов отклонений искр от трека была минимальной:

$$S = \sum_i [X_i - \Phi_1(Z_i)]^2 = \min.$$

Здесь $Z_i - Z$ - координата i -той камеры; суммирование идет по всем искрам сквозного трека.

Дифференцируя S по BX_1, BX_2, AX , получаем систему линейных уравнений для искоемых параметров трека, решение которой не представляет особого труда. Однако для треков, импульсы частиц которых невелики, предположение, что $DZX=0$, является грубым. Для улучшения точности реконструкции треков используется итерационная процедура: сначала находятся параметры трека в предположении, что $DZX=0$, по ним вычисляется новое значение DZX , снова определяются параметры трека и т.д. Как показал анализ моделированных и экспериментально найденных событий, достаточно сделать одну итерацию, т.к. сходимость очень быстрая.

2/ Y-проеция. Сначала используется тот факт, что траектория в Y-проекции зависит от траектории в X-проекции /см. 3.2/:

$$BY_2 | BY_1 = \cos(\arctg(BX_1)) / \cos(\arctg(BX_2)) = C,$$

или

$$BY_2 = C \cdot BY_1,$$

где C определяется из траектории, найденной в X-проекции.

Кроме того, как показано в 3.2, с большой точностью выполняется условие $AY_2 = AY_1$. Тогда искры трека в Y-плоскости перед и за магнитом аппроксимируются ломаной прямой

$$Y = BY_1 \cdot (Z - |Z|)/2 + C \cdot BY_1 \cdot (Z + |Z|)/2 + AY = \Phi_2(Z),$$

т.е. требуется, чтобы

$$S = \sum_i [Y_i - \Phi_2(Z_i)]^2 = \min.$$

Дифференцируя S по BY_1, AY получаем систему линейных уравнений, откуда находим параметры сквозного трека в Y-плоскости.

Так как здесь условие $AY_1 = AY_2$ выполнено с высокой точностью, то нет необходимости проводить итерацию для уточнения параметров трека.

4.4 Вычисление некоторых кинематических параметров событий /подпрограммы IMPULS, VERTEX, EFMAS /

Подпрограмма IMPULS вычисляет импульсы всех восстановленных треков. Измерения магнитного поля показали /4/, что в области $-45 \text{ см} < X < 45 \text{ см}$ интеграл магнитного поля по Z с точностью $1 \div 2\%$ не зависит от X . Поэтому считалось, что эта величина - константа. Коррекция импульсов, связанная с этим допущением, может быть внесена на уровне статистического анализа событий.

Подпрограмма VERTEX составляет вилки из разноименно заряженных пар треков. При этом используются хорошо известные формулы, приведенные, например, в /5/.

Подпрограмма EFMAS вычисляет эффективные массы вилок при разных гипотезах о сорте заряженных частиц.

4.5 Выходные данные программы "Перун"

На ЛСР записываются события, где возможны V^0 -распады ($\Lambda^0 \rightarrow p \pi^-, K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-, \bar{\Lambda}^0 \rightarrow \bar{p} \pi^+$).

Для каждого принятого события на ЛСР помещается блок переменной длины, состоящий из целых чисел по 16 бит. В него входит: служебная информация, вся оригинальная экспериментальная информация в декодированном виде, координаты искр, из которых состоят треки, параметры всех треков и параметры всех вилок. Это позволяет с минимальной затратой времени ЭВМ проводить дальнейшую обработку экспериментальных данных.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Программа "Перун" оптимизирована по времени. Среднее время обработки одного события составляет 0,7 с на ЭВМ ЕС-1040 в операционной системе ДОС и 0,5 с при оптимизации в системе ОС.

К настоящему моменту по данной программе геометрической реконструкции обработано около 4 миллионов событий, зарегистрированных установкой БИС-2. Эта работа выполнена в СЭО ОИЯИ

Д.А.Кириловым, И.Г.Косаревым, Н.А.Кузьминым, В.П.Джорджадзе
Э.Д.Молодцовым под руководством Т.С.Григалашвили. Авторы благодарны им за полезные советы по совершенствованию эксплуатационных характеристик программы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вовенко А.С. и др. ОИЯИ, Б1-13-4545, Дубна, 1969.
2. Альберехт К.-Ф. и др. ОИЯИ, 1-7305, Дубна, 1973.
3. Русаков С.В. и др. Препринт ФИАН, № 148, М., 1976.
4. Вовенко А.С. и др. ОИЯИ, Б1-1-7039, Дубна, 1973.
5. Вестергомби Д. и др. ОИЯИ, Р10-7284, Дубна, 1973.