

ЕФИ-760(75)-84

индекс 3624

ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ИНФОРМАЦИИ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ПО АТОМНОЙ НАУКЕ И ТЕХНИКЕ

Ц.А.АМАТУНИ

ELSS - I. УНИВЕРСАЛЬНАЯ ПРОГРАММА МОДЕЛИРОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЛИБНЕЙ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ МЕТОДОМ
МОНТЕ-КАРЛО



ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ЕРЕВАН-1984

Введение

В настоящее время в связи с широким применением ливневых детекторов для регистрации электронов и фотонов высокой энергии в экспериментах, проводимых на ускорителях и в космических лучах, часто возникает необходимость в оценочных расчетах при проектировании и оптимизации характеристик этих детекторов. Наиболее адекватный подход к решению задач, встречающихся на практике, заключается в аналоговом моделировании каскадного процесса методом Монте-Карло. Большое разнообразие в конструкции, принципе работы, области измеряемых энергий ливневых детекторов электронов и фотонов обуславливает необходимость создания универсальной программы, позволяющей моделировать электромагнитные ливни заданной энергии в неоднородных поглотителях произвольной геометрии.

Нами была создана универсальная программа моделирования электромагнитных ливней высокой энергии ELSS-1, отвечающая вышеприведенным требованиям. В работе [1] было приведено описа-

ние основных физических процессов и алгоритмов моделирования, реализованных в программе, сравнение результатов расчета с некоторыми экспериментальными данными, с целью проверки правильности работы программы, а также некоторые результаты расчетов характеристик ливневых детекторов и электромагнитных ливней в области энергий до 1 ТэВ.

В данной статье приведены основные характеристики программы ELSS-1 и правила пользования.

I. Основные характеристики программы

1. Назначение:

- аналоговое моделирование электромагнитных ливней методом Монте-Карло;
- в состав программы включены подпрограммы, позволяющие вычислить сечения (дифференциальные и полные) взаимодействия электронов и фотонов с веществом.

2. Тип извлекаемой информации: задается и организуется пользователем (энерговыведение в заданном объеме, число частиц данного типа, пересекающих заданную поверхность, их энергетическое, координатное, угловое распределение и т.п.).

3. Процессы и эффекты, учтенные в программе ELSS-1: (подробнее см. [1]):

- рождение пары e^+e^- и тормозное излучение электронов с учетом произвольного экранирования, эффекта плотности и эффекта Ландау-Померанчука-Мигдала;

- ионизационные и радиационные потери энергии электронов и позитронов с учетом флуктуаций и эффекта плотности Ферми для ионизационных потерь;
- многократное рассеяние электронов и позитронов (теория Мольер):
- e^-e^- рассеяние;
- e^+e^- рассеяние;
- комптоновское рассеяние фотонов;
- фотоэффект (на К оболочке);
- двухфотонная аннигиляция позитронов на лету.

4. Энергия начальной частицы (e^+, e^-, γ): теоретического ограничения сверху на начальную энергию нет, так как точно учтены эффекты влияния среды на сечения тормозного излучения и рождения пары при высоких энергиях, однако необходимо помнить, что время моделирования одного ливня линейно растет с начальной энергией.

5. Энергии обрезания E_{min} (полная энергия) и K_{min} для электронов и фотонов: это энергии, ниже которых моделирование переноса ливневых частиц прекращается и они "поглощаются в точке" выделяя там всю энергию. Энергии обрезания E_{min} и K_{min} задаются пользователем. Величина K_{min} не должна быть существенно меньше энергии К - края поглощения. Обычно $K_{min} \approx 0,01-0,1$ МэВ. Минимальное значение энергии обрезания для электронов определяется в основном применимостью теорий Мольер многократного рассеяния и составляет примерно 1-1,5 МэВ ($T_{min} = E_{min} - mc^2 \approx 0,5-1$ МэВ).

6. Поглотитель: может иметь произвольную геометрию (которая задается пользователем (см. ниже)) любого количества кусочно-однородных областей (в том числе и вакуум) и состоять из десяти или меньшего количества любых веществ, каждое из которых, в свою очередь, может быть смесью до 10 элементов. Например, если поглотитель - это "сэндвич" железо + сцинтиллятор, то число областей равно сумме числа железных и сцинтилляционных пластин плюс 2 (вакуум до и после "сэндвича"), число веществ равно двум (железо и сцинтиллятор), вещества состоят: железо из одного элемента, сцинтиллятор из двух (С и Н).
7. Единицы длины и энергии: для всех энергетических величин везде используется единица МэВ. Единица длины устанавливается пользователем (см. ниже) (мм, см, м, км, г/см², рад.ед.).
8. Точность результатов: статистическая точность определяется числом промоделированных ливней. Вопросы, связанные со скоростью сходимости отдельно не изучались. Систематические ошибки, как показывает сравнение расчетов с экспериментальными данными [1], обычно не превышают ~10%.
9. Быстродействие: τ (машинное время, необходимое для моделирования одного ливня) определяется, в основном, отношением начальной энергии к энергии обрезания для электронов $R = E_0 / E_{min}$, но зависит также от критической энергии ϵ вещества, в котором моделируется ливень (τ тем больше, чем меньше ϵ при $E_{min} \leq \epsilon$) и от

геометрической сложности поглотителя (наиболее быстро ливень моделируется в однородном бесконечном поглотителе). При $R \approx 10^{-4}$, в зависимости от указанных дополнительных факторов величина $\tau \approx 1-5$ с/соб. Приведенное значение τ относится к ЭВМ ICL - I906 и по-видимому верно также для любой другой ЭВМ с быстродействием $\approx 10^6$ оп/с.

10. Объем программы: 75 К байт (текст программы ≈ 2500 строк).
11. Язык программирования: ФОРТРАН.
12. Машинно-зависимые процедуры: отсутствуют.
13. Вызываемые функции и подпрограммы: из любой стандартной библиотеки подпрограмм (при необходимости, также пакет подпрограмм гистограммирования типа NBOOK, HANDYRAC и т.п.).
14. Устройства В/В: считыватель с перфокарт и АЦПУ (магнитные ленты, диски и др. - при необходимости и по усмотрению пользователя).
15. ЭВМ: ICL - I906, БЭСМ-6.
Программа обладает достаточно высокой транспортабельностью и может быть без труда поставлена и на других типах ЭВМ.

2. Правила пользования программой

Для пользования программой ELSS-1 необходимо:

- 1) подготовить карты данных, определяющих тип, энергию начальной частицы, энергии обрезания для электронов и фотонов, вещество

или набор веществ, в которых развивается ливень и число моделируемых ливней;

2) написать подпрограмму с названием ACCESS, которая вызывается из подпрограмм моделирования ливня и предоставляет доступ пользователю к процессу моделирования (для задания геометрии поглотителя, извлечения и при необходимости гистограммирования интересующих его величин, управления процессом моделирования и т.п.).

2.1. Содержание и формат карт данных

Блок-схема программы ELSS-1 показана на рис.1. Подпрограмма DATAIN осуществляет чтение перфокарт с данными, подпрограмма PREPAR - подготовительная, вычисляет и засылает в соответствующие блоки COMMON сечения и константы, необходимые для подпрограмм моделирования. Подпрограмма SHOWER моделирует заданное пользователем число ливней.

Необходимые карты данных следующие:

1. Общий заголовок (произвольный буквенно-цифровой текст длиной не более 80 символов).
2. Название единицы длины (формат A2). Может быть мм, см, м, км, GR (г/см^2), RL (радиационная единица длины).
3. Электрический заряд начальной частицы (± 1 для e^\pm , 0 для γ), энергия обрезания для фотонов, энергия обрезания для

электронов (полная энергия) и энергия начальной частицы (формат I2, 3E I0.3).

4. Число видов веществ (должно быть ≤ 10). Формат - I2.

5. Названия веществ (в столбик, если веществ много, в формате A4). Для двадцати наиболее часто встречающихся веществ достаточно указать мнемонические названия из табл.1. Для других веществ, не указанных в таблице после карты названия, должна быть одна карта с значением плотности ρ (в единицах г/см^3) и числа элементов N_c , составляющих это вещество (N_c должно быть не более 10), в формате E I0.3, IX, I2 и N_c карт с указанием Z_i, A_i, W_i ($i = 1, N_c$) - заряда ядра, атомного веса и парциального веса i -го элемента в данном веществе, причем $\sum_{i=1}^{N_c} W_i = 1$, в формате 3E I0.3.

6. Число моделируемых ливней - NEVREQ (формат I6).

2.2. Основные блоки COMMON

Блоки COMMON, имеющиеся в программе ELSS-1, можно разделить на две группы - основные и вспомогательные. В вспомогательных блоках COMMON хранится информация типа часто используемых констант, сечений и других величин, о которых пользователь может и не знать, так как они не используются при обработке ливня. Поэтому остановимся только на основных блоках COMMON.

I) COMMON/PARINI/IQI,IRI,WPI,VI,XI,YI,ZI,UI,VI,WI,NEVREQ,
NEVSIM,NEVSAV - содержит параметры начальной частицы:
IQI - заряд начальной частицы (0 для γ , ± 1 для e^\pm)
IRI - номер области, в которой находится начальная частица.

По умолчанию программа устанавливает $IRI=2$.

WTI - вес начальной частицы (в настоящей версии программы не используется)

EI - энергия начальной частицы (для e^{\pm} полная энергия)

XI, YI, ZI - координаты входа частицы в поглотитель. По умолчанию программа устанавливает $XI = YI = ZI = 0$

UI, VI, WI - направляющие косинусы начальной частицы. По умолчанию программа устанавливает $UI=VI=0$, $WI=1$ так что ливень развивается вдоль оси Z

NEVREQ - заданное пользователем число генераций ливней

NEVSIM - число промоделированных ливней

NEVSAV - может быть использована при организации "спасения" накопленной статистики или программы.

2) COMMON/PARAMS/IQ, IM, IR, WT, E, X, Y, Z, U, V, W, IDISC -
- содержит параметры "текущей" частицы, перенос которой моделируется:

IQ - заряд (0 для γ , ± 1 для e^{\pm})

IM - номер вещества, в котором находится частица

IR - номер области, в которой находится частица

WT - вес частицы (не используется)

E - энергия частицы (для e^{\pm} - полная энергия)

X, Y, Z - координаты частицы

U, V, W - направляющие косинусы частицы

IDISC - по умолчанию $IDISC = 0$. Если же пользователь присваивает $IDISC = +1$, то текущая частица сразу же выбрасывается из процесса моделирования, если $IDISC=-1$ то текущая частица выбрасывается только после того,

как она перенесена на шаг STERA (см. ниже) и промоделированы многократное рассеяние и ионизационные потери на шаге. Для фотонов $IDISC = +1$ эквивалентно $IDISC = -1$. При выбрасывании текущей частицы из процесса моделирования программа приступает к моделированию переноса очередной частицы из стека (см. [I]).

Поясним подробнее значение переменных IM и IR на примере поглотителя, представляющего собой, например, "сэндвич" алюминий + жидкий аргон. Веществу, указанному в картах данных, первым (например, АС), присваивается $IM = 1$, вторым - $IM = 2$. Переменная IM используется как индекс массивов, в которых хранятся значения и другие константы, относящиеся к данному веществу. Итак, в указанном примере $IM = 1$ означает, что частица находится в алюминии, $IM = 2$ - в жидком аргоне. Переменная IR нумерует области: допустим $IR = 1$ ($IM = 0$) - вакуум, $IR = 2$ алюминий, $IR = 3$ жидкий аргон, $IR = 4$ снова алюминий и т.д. Между переменными IM и IR пользователь должен установить соответствие при помощи массива MED, так, чтобы $IM = MED(IR)$. В нашем примере должно быть $MED(1) = 0$, $MED(2) = 1$, $MED(3) = 2$, $MED(4) = 1$, $MED(5) = 2$ и т.д.

3) COMMON/STPSIZ/STEPS, STEP, STERA, STEPC, IROLD, IRNEW, IGROS
STEPS - псевдопробег до очередного дискретного столкновения (см. [I]), промоделированный программой.

STEP - расстояние, на которое пользователь разрешает перенести частицу. Оно может быть вычислено из геометрии поглотителя. Для неоднородных поглотителей рекомендуется брать STEP равным расстоянию вдоль направления движения текущей частицы до границы той области, в которой находится частица.

По умолчанию программа устанавливает $STEPU=STEPR$

$STEPA$ - расстояние, на которое программа решает перенести текущую частицу. Вычисляется программой: для электронов,
 $STEPA = \min(STEPR, STEPU, R(E, E_{min}))$,
где $R(E, E_{min})$ - средний пробег для замедления до энергии E_{min} , для фотонов $STEPA = \min(STEPR, STEPU)$

$STEPR$ - в данной версии программы не используется.

$IROLD$ - номер области, в которой находится частица до переноса на шаг $STEPA$. Программой устанавливается $IROLD = IR$.

$IRNEW$ - номер области, в которую перейдет частица после переноса на шаг $STEPA$. Устанавливается пользователем, когда известно, что после переноса на шаг $STEPA$, частица пересечет границу данной области (при $STEPU \leq STEPR$).

Например, если можно пронумеровать области слева направо, то $IRNEW = IROLD + 1$, если частица летит вперед и $IRNEW = IROLD - 1$, если частица летит назад.

$ICROS$ - вычисляется программой: $ICROS = 1$, если частица пересекла границу раздела двух областей (и находится на границе), в противном случае $ICROS = 0$

4) COMMON/ENERGY/ELOSI, ELOSC, ELOST, EOLD, ENEW

$ELOSI$ - величина потерь энергии на ионизацию на пути $STEPA$

$ELOSC$ - энергия, поглощенная в точке взаимодействия (энергия подпороговых частиц, рожденных в взаимодействии)

$ELOST = ELOSI + ELOSC$ - полная энергия, выделившаяся на отрезке пути $STEPA$.

$EOLD$ - энергия частицы до переноса на шаг $STEPA$

$ENEW$ - энергия частицы после переноса на шаг $STEPA$

5) COMMON/CUTOFF/AE, AP, ELM, TE.

AE - энергия обрезания для e^{\pm} (полная энергия)

AP - энергия обрезания для γ

$ELM = 0,511$ MeV масса покоя электрона

$TE = AE - ELM$ энергия обрезания e^{\pm} (кинетическая энергия)

6) COMMON/PARSEC/IFAIL, IQS(2), WTS(2), ES(2), US(2), US(2), WS(2)

содержит параметры вторичных частиц:

$IFAIL$ - если $IFAIL = 0$, то взаимодействие "принято" ($cm[I]$),

в противном случае взаимодействие фиктивное. При

$IFAIL=0$ IQS содержит заряды вторичных частиц,

WTS - веса вторичных частиц ($= I$ в данной версии)

ES - энергии вторичных частиц (для e^{\pm} полная энергия)

US, VS, WS - направляющие косинусы вторичных частиц.

Координаты точки взаимодействия - X, Y, Z (см. COMMON/PARAMS/

7) COMMON/MEDIUM/NMED, NAME(1 ϕ), RHO(1 ϕ), $X\phi$ (1 ϕ), MED(1 $\phi\phi\phi$)

содержат параметры веществ:

$NMED$ - число веществ

$NAME$ - названия веществ (холлеритовские)

RHO - плотности ($г/см^3$)

$X\phi$ - радиационные длины (в единицах, указанных пользователем)

MED - массив индексов областей, устанавливающий соответствие между переменными IM и IR , $IM = MED(IR)$
(массив заполняется пользователем).

8) COMMON/DEVICE/IDBG, ILP, ICR, ICP, IMT

$IDBG$ - устанавливает режим отладочной печати. По умолчанию

$IDBG = \emptyset$ и печать отсутствует. При $IDBG = 1$ рас-

печатываются некоторые переменные на входе подпрограмм моделирования переноса e^{\pm} (ELEPOS) и γ (PHOTON), при IDBG \neq 2 то же на входе подпрограмм моделирующих ионизационные потери ILOSS и многократное рассеяние (MSCAT), при IDBG \neq 3 то же на входе подпрограмм моделирующих конкретные процессы: PAIRP - рождение e^{\pm} , BREMS - тормозное излучение, MOLLR - e^-e^- рассеяние, VNAVN e^+e^- рассеяние, COMPT - комптоновское рассеяние, ANNIN - аннигиляция e^+ в 2γ , PHOTE - фотоэффект

ILP - логический номер АЦПУ
 ICR - перфосчитывателя
 ICF - перфоратора
 IMT - магнитофона

2.3. Подпрограмма ACCESS (IFLAG)

Как уже говорилось, подпрограмму ACCESS(IFLAG) должен написать пользователь для своей конкретной задачи (обычно размер подпрограммы не превышает 100 строк на ФОРТРАНе).

Программа моделирования ливней в определенных местах передает управление подпрограмме ACCESS (с IFLAG = I+6), так что пользователь получает возможность управлять процессом моделирования ливня (например, учитывать геометрию поглотителя, извлекать и запоминать необходимую информацию). Ситуации, в которых управление передается подпрограмме ACCESS, видны из рис. 2-4, где приведены блок-схемы подпрограмм SHOWER (основная подпро-

грамма, моделирующая ливни), ELEPOS (моделирование переноса e^{\pm}) и PHOTON (моделирование переноса γ -квантов): вызов с IFLAG=1 - происходит после того, как закончили работу подготовительные подпрограммы (DATAIN и PREPAR) и до начала моделирования первого ливня. Здесь необходимо заполнить массив MED, можно при необходимости использовать также для любых других целей (чтение дополнительных данных, подготовительных вычислений и т.п.),

IFLAG = 2 - происходит перед началом моделирования каждого очередного ливня. Здесь можно переопределять параметры начальной частицы, инициализировать массивы и переменные и т.д.

IFLAG = 3 - происходит после того, как программа промоделировала величину псевдопробега STEPR, но перенос частицы и процессы на этом шаге еще не промоделированы. Частица находится в точке X,Y,Z в области IR, среде IM, движется в направлении U,V,W, при этом IROLD=IRNEW=IR, EOLD=ENEW=E, ICROS=0, IFAIL=1, ELOSI = ELOSC = ELOST = 0, IDISC = 0 (см. 2.2.) Здесь пользователь может (или должен, в зависимости от задачи):

I) если поглотитель - неоднородный, определить STEPU как расстояние вдоль направления движения частицы (U,V,W) от точки, где она находится (X,Y,Z), до границы той области, в которой она находится. При STEPU \leq STEPR необходимо установить значение пе-

- ременной, IRNEW ;
- 2) выбросить частицу из процесса моделирования, установив IDISC = -1 или IDISC = +1;
 - 3) не предпринимать никаких действий, тогда программа устанавливает STEPU = STEPR и продолжает моделирование.

IFLAG=4 - происходит после того, как частица перенесена на шаг STEPA (и находится в точке (X, Y, Z) + STEPA*(U, V, W) и промоделированы все процессы на шаге). При IFAIL=0 в COMMON/PARSEC/ хранятся параметры рожденных в взаимодействии частиц, переменные ELOSI, ELOSC, ELOST - потери энергии, на шаге STEPA, ICROS#0 означает, что произошло пересечение границы области и частица находится в области IRNEW (на границе). Параметры текущей частицы находятся в COMMON/PARAMS/. Здесь, как и в случае вызова с I=3, можно гистограммировать энергию, углы, координаты частицы, а также энергию, потерянную на шаге.

IFLAG=5 - происходит после завершения моделирования очередного ливня. Здесь можно организовать "спасение" накопленной статистики и программы и т.д.

IFLAG=6 - происходит после завершения моделирования всех ливней. Может быть использован для любых целей.

2.4. Вспомогательные подпрограммы

В состав программы ELSS-1 включены функции подпрограммы для вычисления сечений (дифференциальных и полных) взаимодействия e^{\pm} и γ с веществом. Эти функции подпрограммы не используются в процессе моделирования и включены в состав программы ELSS-1 только ради предоставления дополнительных вычислительных возможностей. Обращение к этим подпрограммам возможно только после вызовов подпрограмм DATAIN и PREPAR. Названия функций подпрограмм, вычисляющих дифференциальные и полные сечения, начинаются с буквы D и T, соответственно:

DBREMS (E_0, X, IM) - вычисляет значение $d\sigma_s(E_0, X)/dX$ (ф-лы (14) и (28) [1])^{*} для вещества с номером IM.

$$DMOLLR(E_0, X, IM) - d\sigma_m(E_0, X)/dX \quad (37)$$

$$DBNABH(E_0, X, IM) - d\sigma_{bh}(E_0, X)/dX \quad (40)$$

$$DANNIN(E_0, X, IM) - d\sigma_a(E_0, X)/dX \quad (44)$$

$$DPAIRP(E_0, X, IM) - d\sigma_p(E_0, X)/dX \quad (13) \text{ и } (27)$$

$$DCOMPT(E_0, X, IM) - d\sigma_c(E_0, X)/dX \quad (\text{ф-ла } (47))$$

TBREMS (E_0, X_1, X_2, IM) - вычисляет интеграл от $d\sigma_s(E_0, X)/dX$ в пределах X_1, X_2

TBNABH(E_0, X_1, X_2, IM) - то же для $d\sigma_{bh}(E_0, X)/dX$

*) Ниже подразумеваются формулы, приведенные в работе [1], обобщенные, конечно, на случай, когда вещество имеет сложный химический состав.

TMOLLR (Eφ, X1, X2, IM)	- то же для $d\sigma_m(E_0, x)/dx$
TANNIH (Eφ, X1, X2, IM)	- то же для $d\sigma_a(E_0, x)/dx$
TPAIRP (Eφ, X1, X2, IM)	- то же для $d\sigma_p(E_0, x)/dx$
TSCOMP (Eφ, X1, X2, IM)	- то же для $d\sigma_c(E_0, x)/dx$
TRNOTE (Eφ, IM)	- вычисляет полное сечение фотоэффекта для вещества с номером IM (см. формулу (50))
TDEDXI (Eφ, IQ, IM, MODE)	- вычисляет значение средних ограниченных потерь энергии на ионизацию для электронов (IQ = - 1) и позитронов (IQ = + 1) с энергией Eφ (полная энергия) в веществе с номером IM (см. формулу (52)). При MODE = 0 используется точное выражение для поправки на эффект плотности δ, в противном случае используется асимптотическое значение δ, которое справедливо в пределах ≈ 5-6%.

Таблица I

Вещество	Мнемоническое название
Уран	U
Свинец	Pb
Вольфрам	W
М е д ь	Cu
Железо	Fe
Алюминий	Al
Графит	C
Бериллий	Be
Жидкий аргон	LA
Кристалл NaJ	NAI
Свинцовое стекло	
Марки F2	F2
Марки SF5	SF5
Кристалл Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂	BGO
Сцинтиллирующее стекло	SCG
Воздух (1 атм., 20°C)	AIR
Вода	H ₂ O
Бетон	CONC
Плексиглас	PLEX
Пластический сцинт.	PS
90% Ag +10% метан при норм. условиях	MWPC

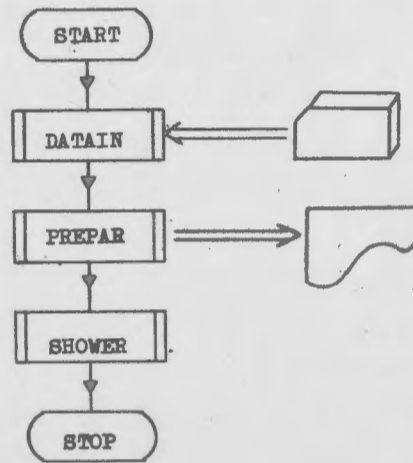


FIG. 1

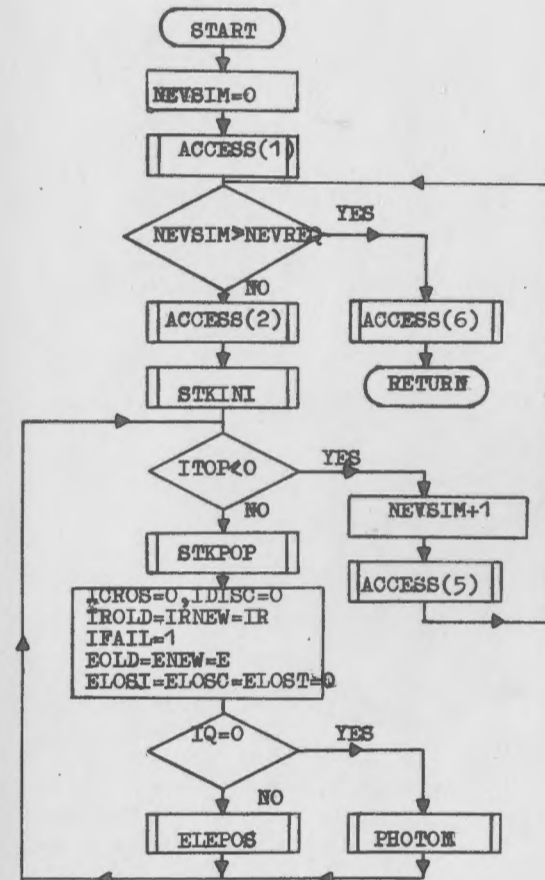


FIG. 2

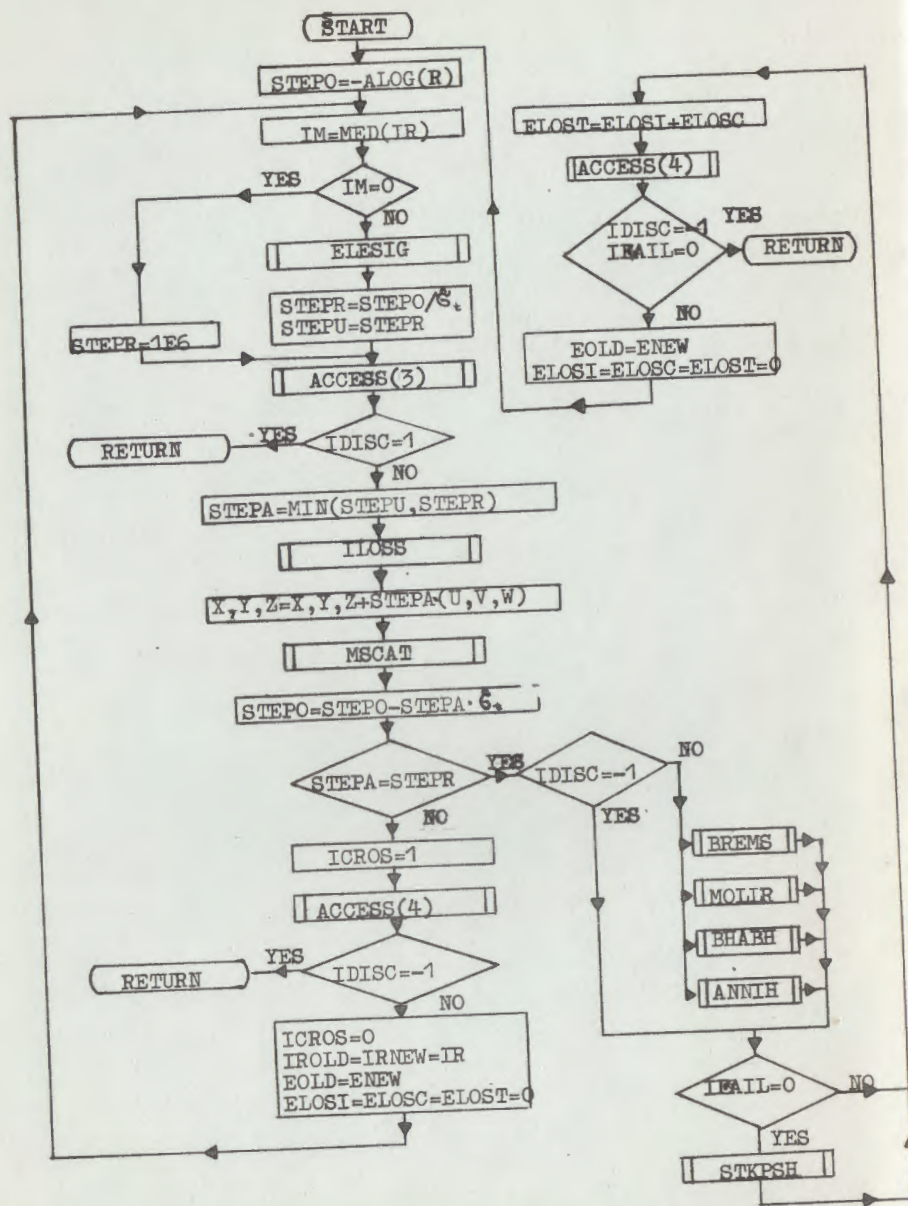


Fig. 3

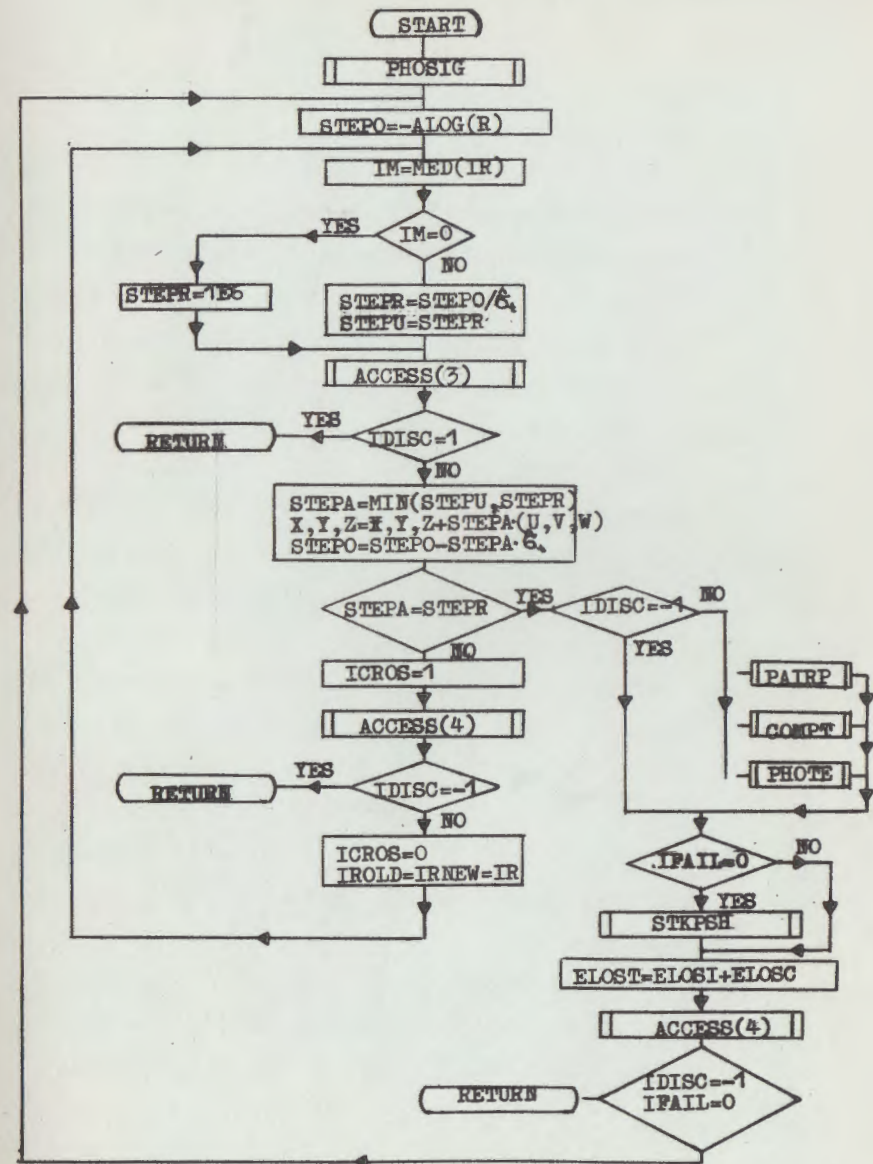


Fig. 4