

ц 840 в

А-139

Абдинов О.Б

+



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Абдинов, О.Б.

Б2-4-5476.

~~Б2-4-5476~~

Б2-4-5476

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 1970

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
Лаборатория теоретической физики

О.Б.Абдьюв

~~Б2-4-5442~~

Б2-4-5476

48408
А. 139

с. ф. 3107

РАСЧЕТ РАСПАДА ЛЕГКИХ ВОЗБУЖДЕННЫХ ЯДЕР

~~5 ноября 70~~

25 XII 70

Дубна 1970г.

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
БИБЛИОТЕКА

Расчет ядерных сечений при высоких энергиях обычно делают по каскадно-испарительной модели, в которой после I^{ой} стадии внутриядерного каскада остается ядро в возбужденном состоянии. 2^{ая} стадия описывает процесс снятия возбуждения в предположении, что энергия возбуждения равномерно распределяется по всем степеням свободы. Этот процесс обычно вычисляется через испарительный формализм Вайскопфа [1]. Но в легких ядрах энергия возбуждения столь велика, что условия применимости этой теории оказываются полностью нарушенными. В последние годы был предложен и использован в расчетах новый метод, основанный на модели развала Ферми [2-5].

Вероятность перехода на ед. времени из стационарного состояния I системы в континуум стационарных состояний J той же энергии есть

$$P_{I \rightarrow J} = \frac{2\pi}{\hbar} |M_{IJ}|^2 \rho_0 V \quad (1)$$

где $|M_{IJ}|^2$ - квадрат матричного элемента перехода, а ρ_0 - плотность состояний конечной системы на единичный энергетический интервал в объеме V , из которого нормализованы волновые функции [6].

Приближение Ферми состоит из следующих аргументов:

I. Предсказания о множественности рождения, которые мы хотим получить на начальной стадии изучения неупругих столкновений частиц, намного менее детальны тех предсказаний, которые мы могли бы получить, если бы знали функцию M_{IJ} .

2. Из статистической механики известно, что при интегрировании по всей области пространства, которое необходимо осуществить при вычислении вероятности процесса, динамические черты усредняются и остаются только несколько характерных для процесса констант.

3. Т.к. вычислять M_{IJ} никто не может, то в силу первых двух аргументов это можно пока не считать необходимым, тем более, что даже ограниченные знания о M_{IJ} приводят к разумным результатам.

Согласно статистической гипотезе M предполагается не зависящим ни от V , ни от J , а связанным только с объемом взаимодействия Ω . Тогда суммирование по всем V дает некий весовой фактор $P_n(J)$ — он показывает число независимых собственных функций полного спина J и J_z , которые можно построить из функций конечных частиц с изотоп. спинами $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$. $P_n(J)$ — число возможных каналов реакций. (В случае применения стат модели к ядру $P_n(J) = 1$, т.к. мы ничего не знаем об изотопическом состоянии возбужденного ядра-осколка).

Окончательно для вероятности образования n -частиц получаем

$$W_n(E_0) = \left[\frac{\Omega}{(2\pi)^3} \right]^{n-1} \frac{\prod_{i=1}^n (2J_i + 1)}{G_n} P_n(J) \beta_n(E_0) \quad (2)$$

$\beta_n(E_0)$ — плотность уровней в конечном состоянии, равная для нерелятивистского случая:

$$\beta_n(E_0) = \frac{\left(\frac{2\pi}{h} \right)^{\frac{3}{2}(n-1)}}{\left[\frac{3}{2}(n-1) \right]!} \left(\frac{\prod_{i=1}^n M_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \right)^{\frac{3}{2}} T_0^{\left[\frac{3}{2}(n-1) \right]} \quad (3)$$

где J_i и M_i — спин и масса конечных частиц;

$T_0 = E_0 - \sum_{i=1}^n M_i$ — кинетическая энергия распадающихся частиц;

G_n — фактор тождественности ($G_n = n! n_p!$).

Объем взаимодействия в данном случае взят как объем ну-
клонов ядра

$$\Omega = \frac{4}{3} \pi r_0^3 A \quad (4)$$

Подставляя значения Ω и $\beta_n(E_0)$ в (12) и переводя ее в
Гэв получим

$$W_n(E_0) = \frac{\left[\frac{(r_0 \cdot 5.06)^3}{3 \cdot (\pi \cdot 0.5)^{0.5}} \right]^{n-1}}{\left[\frac{5}{2}(n-1) - 1 \right]!} \frac{A^{n-1}}{G_n} \left(\frac{\prod_{i=1}^n M_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \right)^{3/2} \prod_{i=1}^n (2\gamma_i + 1) T_0^{\left[\frac{5}{2}(n-1) - 1 \right]} \quad (5)$$

Канал k мы считали возможным, если энергия T_0 превышала
кулоновскую энергию остаточного ядра

$$C_k = 0.000144 \sum_{i=1}^{n-1} \frac{z_i z_j}{A_i^{1/3} + A_j^{1/3}} \quad \Gamma \approx 6 \quad (6)$$

где $z_j = Z - \sum_{e=1}^j z_e$ $A_j = A - \sum_{e=1}^j A_e$

Подпрограмма F E R M I

К ней обращаются с известными уже остаточным ядром (т.е. известно A, Z_e и E_e^* — энергия возбуждения остаточного ядра). Прежде чем идти на вычисление распада проверяется условие

$$E_e^* > E_{min}^e \quad (1)$$

т.е. мы считаем, что распад происходит в том случае, когда энергия возбуждения больше чем минимальная энергия отрыва E_{min}^e последнего протона или нейтрона от остаточного ядра (E_{min}^e — выбралось из $|B|$). Если условие (1) не выполнялось, то мы считаем остаточное ядро конечной частицей, а возбуждение снимающим γ -излучением. Если же условие (1) выполнялось, то считаем идет распад. После того как вычистен канал, проверяется условие

$$T_0 = E_0 - \sum_{i=1}^n M_i > 0 \quad (2)$$

Если условие (2) выполнено, то вычисляются кулоновская энергия канала C_k и проверяется условие

$$T_0 > C_k \quad (3)$$

Если условия (2) или (3) не выполняются, то рассчитывается новый канал реакции. Если условия (2) и (3) выполнены, то рассчитывается фактор тождественности S_k и вычисляется вероятность канала W_k . Суммируется вероятность всех каналов $\sum_k W_k$ и вероятность получения каждого изотопа в каналах $\sum_k W_k f$. Далее идет вычисление следующего канала. После того как вычислены все каналы реакций развала, проверяется, был развал хоть в одном канале или нет. Если развала не было, то остаточное ядро считается конечной частицей $W_e = 1$. Если развал был, то нормируем вероятность (из условия, что общая вероятность развала каждого

остаточного ядра равна 1)

$$W_f = \frac{\sum_k W_{kL}}{\sum_k W_k} \quad (4)$$

В результате мы получаем выход всех возможных изотопов при рас-
паде остаточного ядра.

Обозначения в подпрограмме:

$$\begin{aligned} T0 &= T_0, & E0 &= E_0, & E01 &= E^*, & J(1) &= A, & J(2) &= Z \\ AM1 &= \sum_{i=1}^v M_i, & AM2 &= \prod_{i=1}^v M_i, & HM &= \frac{1}{G_n}, & QVL &= C_k \\ HI\text{INP} &= \text{INP} = \prod_{i=1}^n (2\gamma_i + 1), & SV\text{ER}(L) &= W_{kL} \\ VER &= W_k, & SV\text{ERT} &= \sum_k W_k, & SV\text{ERTN}(L) &= W_L \end{aligned}$$

Подпрограмма CANAL

К этой программе обращаются для вычисления каналов реакций распада с A и Z ядра, которое распадается. В ней перебираются все возможные каналы по условию

$$A = \sum_{i=1}^n A_i, \quad Z = \sum_{i=1}^n Z_i \quad (1)$$

Выход из подпрограммы после каждого найденного канала. Когда перебраны все каналы ($n > A$, т.к. у нас в распаде конечными частицами являются только нуклоны и ядра) $NCA \cdot I = I$ - признак конца. Как видно из работы подпрограммы и из информации, которую она использует, возможны каналы, в которых конечная частица может находиться в возбужденном состоянии.

Например: $B^{10} \rightarrow L_i^6 + 2d$
 $\rightarrow L_i^{6*} + 2d$

где L_i^{6*} - возбужденное состояние ядра L_i^6 с энергией 3,5 Мэв.

В подпрограмме для удобства сделан дополнительный вход (ENTRY KANAL).

Обозначения в подпрограмме:

$J(1) = MA = A$, $J(2) = MZ = Z$, $LB = n$ - число частиц в канале

$NCA(k)$ - номер ядра в таблице I ($k = 1, n$), $MSA(k) = \sum_{i=1}^k A_i$

Подпрограмма INFORM

В этой подпрограмме заделан весь числовой материал, который необходим для расчета развала по стат. модели ферми. В этой подпрограмме обращаются всего один раз за все время счета. Числовой материал расположен следующим образом:

1) Массив I

На каждое ядро в этом массиве отведено 4 числа:

в I (1,к) - расположены удвоенные спины ядер - $2 J_k$

в I (2,к) - номер ядра в массиве I - N_k

в I (3,к) - массовое число ядра - A_k

в I (4,к) - порядковый номер (заряд) ядра - Z_k

Ядра располагаются в массиве I в порядке возрастания A , а при равном A , в порядке возрастания Z . В массив заносятся также возбужденные состояния ядер с временем жизни $t > 10^{-13}$ сек (см. монограмму /7/).

2) Массив B

В массиве B ядра расположены в том же порядке, что и в массиве I. В B(1,к) - расположены B_{min} - минимальная энергия отрыва одного нейтрона или протона от одного ядра, а в B(2,к) - M_k масса данного ядра (данные эти взяты из /8/).

3) Массив NK

Здесь расположены значения

$$\frac{(\tau_0 \cdot 5.06)^{3-n-1}}{3 \cdot \left(\frac{n}{2}\right)^{1/2}} \cdot \left[\frac{3}{2}(n-1) - 1\right]!$$

для различных n - число частиц

(Приведенные данные соответствуют значению $\tau_0 = 1.4$ ферми).

Литература:

1. V. Weisskopf phys. Rev 22, 295 (1937)
2. J.H. Loree, R.H. Stuart Phys. Rev 94, 1724 (1954)
3. И. Л. Розенталь ЖСЭТФ 23, 118 (1955)
4. M. Bregge, E. Grosse J.de Physique 26, 145 (1957)
5. С.Б.Абдунов, В.С.Барашенков: Сообщение ОИЯИ P2-4788, Дубна, 1969г., Препринт ОИЯИ P2-5023, Дубна 1970г.

6. E. Fermi, Progress. Theor. Phys. 2, 570 (1950)
7. Б.С.Джелепов, Л.К.Пекер. "Схемы распада радиоактивных ядер" "Наука", 1966г.
8. В.А.Кравцов "Массы атомов и энергии связи ядер" Атомиздат, 1965.

Дубна

```

SUBROUTINE FERMI (J,E01,SVERTN)
BLOCK OF BREAK UP ( THE FERMI STATISTICAL MODEL )
DIMENSION J(2),NCA(18),I(4,80),B(2,80),HK(17),SVERTN(80),SVER(80)
COMMON/DRHAN3/I,B,HK
DO 2 L=1,80 $ IF(J(1)-I(3,L))2,1,2
1 IF(J(2)-I(4,L))2,3,2
2 CONTINUE
3 ANA=B(2,L) $ BL=B(1,L) $ EB=E01+ANA $ IF(EB-PL)4,4,5
4 SVERTN(L)=SVERTN(L)+1. $ RETURN
5 LMAX=L $ NT=1 $ DO 6 K=1,LMAX $ SVER(K)=0.
6 CONTINUE $ SVERT=0. $ CALL KANAL(J,NCA,LB,NCAN1)
7 IF(NCAN1)8,8,25
8 INP=1 $ AM1=. $ AM2=1. $ DO 9 F=1,LB $ L=NCA(K) $ IN1=I(1,L)+1
INP=INP+IN1 $ AM0=B(2,L) $ AM1=AM1+AM0 $ AM2=AM2+AM0
9 CONTINUE $ T=E0-AM1 $ IF(T)24,24,10
10 HA=J(1) $ HQ=J(2) $ LB1=LB-1 $ SCQ=0. $ DO 11 K=1,LB1
L=NCA(K) $ HA1=I(3,L) $ HQ1=I(4,L) $ HA=HA-HA1 $ HQ=HQ-HQ1
SCQ=SCQ+(HQ*HQ1)/(HA*(1./3.)+HA1*(1./3.))
11 CONTINUE $ QUL=(0.00144*SCQ)/1.4
IF(T-QUL)24,24,12
12 NT=0 $ HM=1. $ LG=1 $ L=2
13 NST=0 $ L1=L-1 $ DO 15 K=L,LB $ IF(NCA(K)-NCA(L1))15,14,15
14 NST=NST+1
15 CONTINUE $ IG=1
16 IF(NST-IG)18,17,17
17 IG=IG+1 $ LG=LG*IG $ GO TO 16
18 HLG=LG $ HM=HM*(1./HLG) $ LG=1
19 L=L+1 $ IF(L-LB)20,20,22
20 N=L-2 $ L1=L-1 $ DO 21 K=1,N $ IF(NCA(K)-NCA(L1))21,19,21
21 CONTINUE $ GO TO 13
22 HLB=LB-1 $ HHA=J(1) $ HINP=INP $ T1=T*(1.5*(HLB+1))-1.
VER=HK(LB)*HHA**HLB*HM*(AM2/AM1)**(2./2.)*HINP*T1
SVERT=SVERT+VER $ DO 23 K=1,LB $ L=NCA(K) $ SVER(L)=SVER(L)+VER
23 CONTINUE
24 CALL KANAL(J,NCA,LB,NCAN1) $ GO TO 2
25 IF(NT)27,27,26
26 L=LMAX $ GO TO 4
27 DO 26 L=1,LMAX $ SVERTN(L)=SVERTN(L)+SVER(L)/SVERT
28 CONTINUE $ RETURN $ END

```

```

SUBROUTINE CANAL(J,NCA,LB,NCAN)
BLOCK OF CALCULATION OF CANAL OF BREAK UP
DIMENSION J(2),NCA(18),I(4,80),P(2,80),HK(17),NSA(18)
COMMON/DRHANS/I,B,HK
LB=2 $ MA=J(1) $ MZ=J(2)
9 L=0
10 L=L+1 $ NB=I(3,L) $ NCA(1)=L
11 IF(MA-LB+2-NB)10,12,10
12 NCA(1)=NCA(1)-1 $ IF(NCA(1)-1)21,13,13
13 L=NCA(1) $ NSA(1)=I(3,L) $ IF(LB-2)14,14,23
14 NCA(LB)=0 $ ENTRY KANAL
15 NCA(LB)=NCA(LB)+1 $ LD=LB-1 $ IF(NCA(LD)-NCA(LB))16,17,17
16 GO TO (12,24,28,32),LD
17 L=NCA(LB) $ NSA(LB)=NSA(LD)+I(3,L) $ IF(MA-NSA(LB))16,18,15
18 NQ=0 $ DO 19 K=1,LB $ L=NCA(K) $ NQ=NQ+I(4,1)
19 CONTINUE $ IF(MZ-NQ)16,20,15
20 NCAN=0 $ RETURN
21 LB=LB+1 $ IF(MA-LB)22,9,9
22 NCAN=1 $ RETURN
23 NCA(2)=0
24 NCA(2)=NCA(2)+1 $ IF(NCA(1)-NCA(2))12,25,25
25 L=NCA(2) $ NSA(2)=NSA(1)+I(3,L) $ IF(MA-NSA(2))12,12,26
26 IF(LB-4)14,27,27
27 NCA(3)=0
28 NCA(3)=NCA(3)+1 $ IF(NCA(2)-NCA(3))24,29,29
29 L=NCA(3) $ NSA(3)=NSA(2)+I(3,L) $ IF(MA-NSA(3))24,30,30
30 IF(LB-5)14,31,31
31 NCA(4)=0
32 NCA(4)=NCA(4)+1 $ IF(NCA(3)-NCA(4))28,33,33
33 L=NCA(4) $ NSA(4)=NSA(3)+I(3,L) $ IF(MA-NSA(4))28,34,34
34 IF(LB-6)14,35,35
35 RETURN $ END

```

SUBROUTINE INFORH
 SUBROUTINE OF INFORMATION OF BREAK JP
 DIMENSION I(4,80),B(2,80),HK(16)
 COMMON/DRHANS/I,B,HK

DATA (((I(L1,K1),K1=1,40)),L1=1,4)=1,1,1,0,1,2,1,1,2,3,2,1,1,4,3,
 \$1,1,5,3,2,0,
 \$6,4,2,3,7,5,2,3,8,5,3,9,9,6,2,2,10,6,3,0,11,6,3,0,12,6,4,3,13,7,3,
 \$1,14,7,8,3,15,7,4,1,16,7,4,0,17,8,2,4,18,8,5,0,19,8,4,4,20,8,5,3,2
 \$1,9,3,3,22,9,4,3,23,9,5,0,24,10,4,4,25,10,4,0,26,10,4,6,27,10,5,2,
 \$28,10,5,0,29,10,5,2,30,10,5,0,31,10,6,1,32,11,4,3,33,11,5,1,34,11,
 \$5,5,35,11,5,3,36,11,5,3,37,11,6,2,38,12,5,4,39,12,5,4,40,12,5)
 DATA(((I(L2,K2),K2=41,80)),L2=1,4)=4,41
 \$,12,5,0,42,12,6,4,43,12,6,4,44,12,6,2,45,12,7,3,46,13,5,1,47,13,6,
 \$1,48,13,6,3,49,13,6,5,50,13,6,1,51,13,7,0,52,14,6,2,53,14,6,0,54,
 \$14,6,6,55,14,6,0,56,14,6,2,57,14,7,0,58,14,7,6,59,14,7,6,60,14,7,
 \$0,61,14,8,1,62,15,6,5,63,15,6,1,64,15,7,1,65,15,7,5,66,15,7,1,67,
 \$15,8,1,68,15,8,5,69,15,8,0,70,16,6,2,71,16,7,0,72,16,7,0,73,16,8,
 \$0,74,16,8,6,75,16,8,4,76,16,8,2,77,16,8,0,78,17,8,0,79,17,8)

DATA(H=0.,.95951,0.,.93873,.002224,1.87601,.006257,2.80926,.005493
 \$,2.80924,.019813,3.72817,0.,4.66864,0.,4.66887,.001921,5.60622,.00
 \$4653,5.60271,.00109,5.60627,.00054,5.60705,.007252,6.53497,.006775
 \$,6.53544,.005689,6.53583,.005177,6.53626,0.,7.48645,.002032,7.4724
 \$4,.001722,7.45644,.000133,7.47442,0.,8.40333,.001665,8.39428,0.,8.
 \$39535,.006814,9.32708,.003446,9.330345,.000634,9.33316,.006587,9.3
 \$2642,.005876,9.327139,.0048448,9.328161,.004435,9.328574,.004030,9
 \$,33084,.000534,10.26600,.011229,10.25447,.009072,10.256631,.006770
 \$,10.258933,.006194,10.259509,.008693,10.25645,.003370,11.19061,.00
 \$3278,11.190708,.001700,11.19230,.000750,11.19323,.015956,11.177244
 \$,.011524,11.181677,0.,11.193354,.006339,11.194670,.004886,12.12524
 \$,.005,12.111695,.005,12.11489,0.,12.11590,0.,12.115655,0.001945,
 \$12.134027,.008176,13.043138,0.,13.049228,0.,13.049718,0.,13.04986,
 \$0.,13.050028,0.00755,13.042982,0.,13.045293,0.,13.046814,0.,13.049
 \$422,0.004627,13.048126,.001218,13.981428,0.,13.982178,.01028,13.97
 \$1655,0.,13.976931,0.,13.976956,.007291,13.974415,0.,13.97961,0.,
 \$13.979662,.004251,14.916686,0.0025,14.908564,0.,14.908784,.012126,
 \$14.898255,0.,14.904307,0.,14.904389,0.,14.905171,0.,14.905376)

DATA (H=106.3,4439.6,71883.1,65.6E4,3.97E6,1.737E7,5.84E7,
 *1.558E8,3.427E8,6.33E8,1.0E9,1.38E9,1.668E9,1.79E9,
 *1.72E9,1.49E9)
 RETURN * END

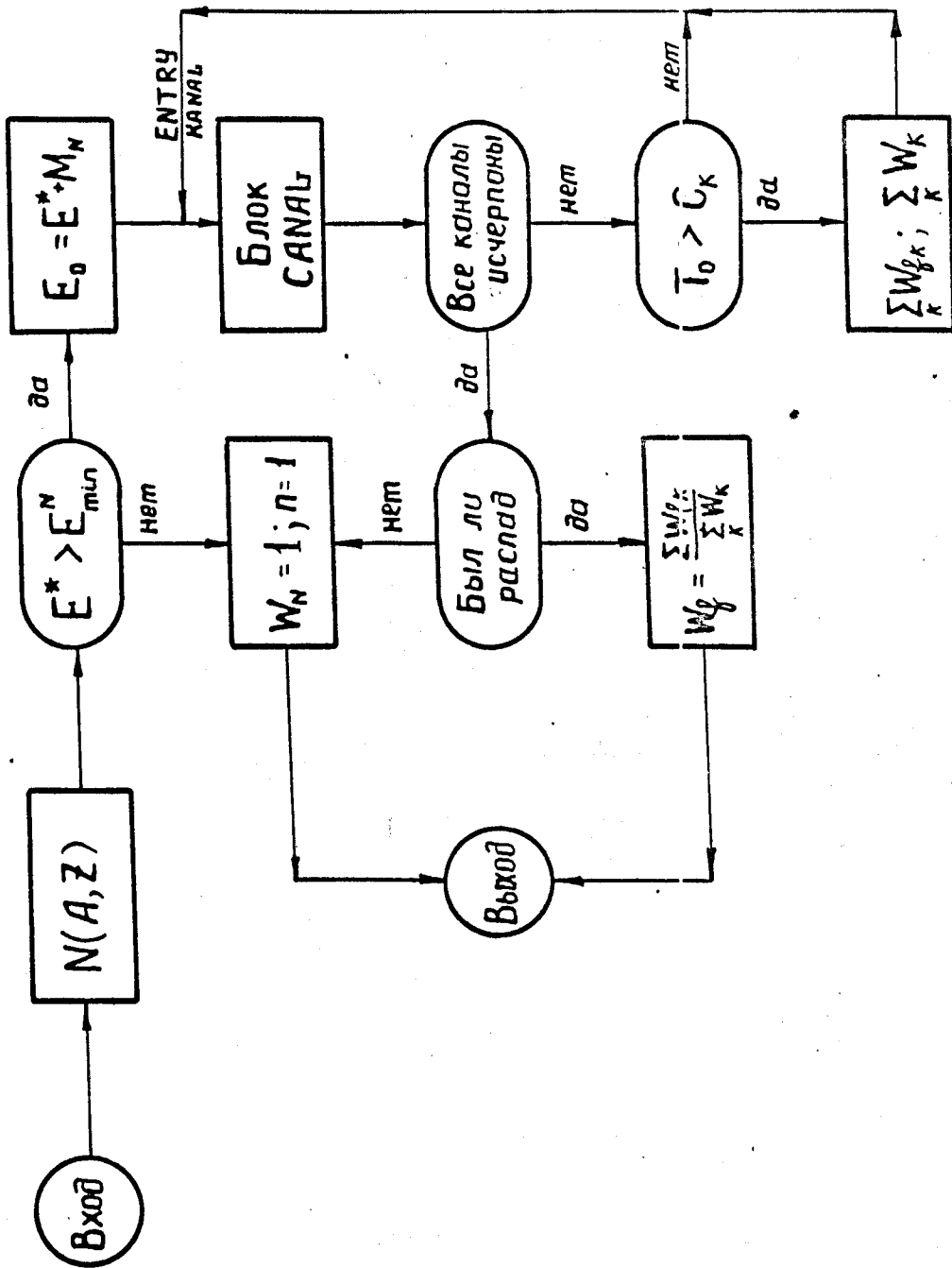


Рис.1. Блок - схема

УЧБМ

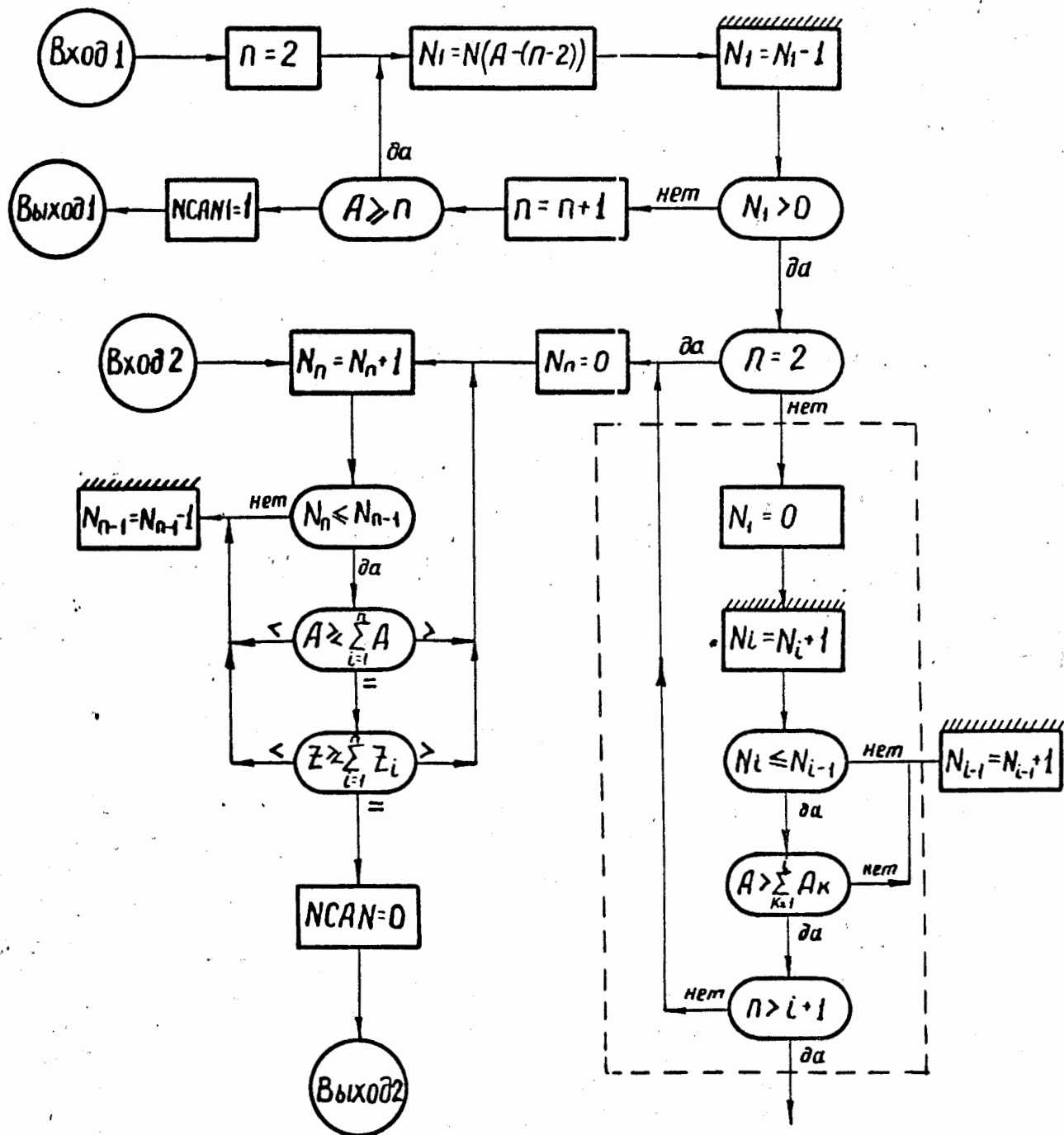


Рис. 2. Блок - схема

CANAL