

# 能量从 10 keV 到 300 MeV 的电子和光子 在物质中若干物理参数计算程序

张贵山 张焕乔

(原子能研究所, 北京)

本工作提供一组计算程序, 可计算电子的能量损失(碰撞损失、韧致辐射损失、阻止本领)及射程、电子韧致辐射光子能谱及韧致辐射光子数目分布、电子和光子的反应几率(电子韧致辐射几率, 电子同电子碰撞几率, 光子康普顿散射几率、核场中对生成几率)。物质组成可分为单一元素、化合物或混合物。能量范围从 10 keV 到 300 MeV 分为 75 个间隔。以数据表的形式给出上述诸量。结果满意。

**关键词** 电子能量损失及射程, 电子韧致辐射光子能谱及数目分布, 电子和光子反应几率。

## 一、引言

在许多研究实验领域中, 定量地给出电子在物质中的能量损失及射程、电子韧致辐射光子能谱及韧致辐射光子数目分布、电子和光子的各种反应几率是很有实际意义的。目前已有的成果<sup>[1-5]</sup>, 由于能量范围和物质组成等方面的局限, 尚不能满足研究光电级联簇射和探测粒子实验的需要。

我们采用了 Bethe 理论、Sternheimer 密度效应修正、Koch-Motz 截面表达式、Moller 和 Klein-Nishina 公式等, 在 TQ-6 计算机上使用 BCY 语言编制了一组计算程序。它由四个独立的程序构成: 计算电子能量损失及射程程序; 计算电子韧致辐射光子能谱及数目分布程序; 计算电子反应几率程序; 计算光子反应几率程序。该组程序使用方便, 计算量不大。可对任意物质(单一核素、化合物或混合物)计算。粒子能量从 10 keV 到 300 MeV。作为初始能量的函数以数据表的形式给出上述各物理参数, 结果可靠。使用本组程序提供的数据, 计算低能  $\gamma$  射线在 NaI(Tl) 中能量沉积<sup>[6]</sup>和铅玻璃对高能  $\gamma$  射线探测效率<sup>[7]</sup>, 均得到了令人满意的结果。

## 二、公式及计算

### 1. 电子能量损失及射程

碰撞能量损失, 起因于穿行物质的原子的电离和激发。根据 Bethe 慢化理论, Rohrlich 和 Carlson<sup>[8]</sup>给出了电子碰撞能量损失的计算公式, 考虑 Sternheimer 密度效应修正, 公式为:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{coll} = \frac{2\pi N r_0^2 m_0 c^2}{\beta^2} \frac{Z}{A} \left[ \ln \frac{T^2(T+2)}{2I^2} + \frac{T^2/8 - (2T+1)\ln 2}{(T+1)^2} + 1 - \beta^2 - \delta \right]. \quad (1)$$

这是对单核给出的, 对化合物或混合物应当取和。式中所用的符号意义及各量单位参见文献[3] (例如  $I$  为平均激发能, 以  $m_0c^2$  为单位)。Bakker 和 Segre<sup>[9]</sup>以  $I_{A1} = 150 \text{ eV}$  为标准给出了某些核素的值, 在无实验值情况下, Sternheimer<sup>[10]</sup>给出了经验公式 ( $Z \geq 13$ ):

$$I = 9.76 Z + 58.8 Z^{-0.9} (\text{eV}). \quad (2)$$

密度效应  $\delta$ , Sternheimer<sup>[10]</sup>提供一理论公式:

$$\delta = \sum_{j=1}^J \left[ f_j \ln \left( \frac{l_j^2 + l^2}{l^2} \right) \right] - l^2 (1 - \beta^2), \quad (3)$$

其中  $f_j$  表示属于  $1 \leq j \leq J$  层的电子数目与总电子数目之比, 而  $l_j$  和  $l$  分别由

$$l_j = \frac{h\nu_j}{h\nu_p} \rho', \quad (4)$$

$$\beta^{-2} - 1 = \sum_{j=1}^J \frac{f_j}{l_j^2 + l^2} \quad (5)$$

给出, 这里  $h\nu_j$  为  $j$  壳层的结合能 (原子电离势), 等离子体能量  $h\nu_p$  和多重因子  $\rho'$  为:

$$h\nu_p = 28.81 \sqrt{\frac{\rho Z}{A}},$$

$$\rho' = I / \exp \left\{ \sum_{j=1}^J f_j \ln (h\nu_j) \right\}$$

注意, 当电子能量小于  $E_{\min}$  时, 方程 (5) 不能求解, 这时假定  $\delta = 0$ 。  $E_{\min}$  是由

$$\beta_{\min}^{-2} - 1 = \sum_{j=1}^J \frac{f_j}{l_j^2} \quad (6)$$

计算的。我们使用改进的 Pegasus 方法由方程 (5) 解得  $l^2$ , 这里初值要给定合适。

轭致辐射能量损失由

$$\left( \frac{dE}{dx} \right)_r = \frac{N}{A} \frac{E}{m_0 c^2} \Phi_r(E) \quad (7)$$

给出其中:

$$\Phi_r(E) = \frac{1}{E} \int_0^T E_\nu d\sigma(E_\nu), \quad (8)$$

这里  $d\sigma(E_\nu)$  表示能量为  $E$  的电子产生一个能量为  $E_\nu$  的光子的几率。函数  $\Phi_r(E)$  可用不同的表达式来近似, 我们采用 Koch-Motz<sup>[11]</sup>截面公式:

$$\begin{aligned} 10 \text{ keV} \leq T < 2 \text{ MeV}, & \quad d\sigma = A f_E d\sigma^{3BN}, \quad E_r > 0.01 T \\ 2 \text{ MeV} \leq T < 15 \text{ MeV}, & \quad d\sigma = A d\sigma^{3BN}, \quad r > 15 \\ & \quad d\sigma = A d\sigma^{3BSd}, \quad 2 < r < 15 \\ & \quad d\sigma = A d\sigma^{3BSc}, \quad r < 2 \\ 15 \text{ MeV} \leq T < 50 \text{ MeV}, & \quad d\sigma = d\sigma^{3BN}, \quad r > 15 \\ & \quad d\sigma = A d\sigma^{3BSd}, \quad 2 < r < 15 \\ & \quad d\sigma = A d\sigma^{3BSc}, \quad r < 2 \\ 50 \text{ MeV} \leq T \leq 300 \text{ MeV}, & \quad d\sigma = d\sigma^{3BN}, \quad r > 15 \\ & \quad d\sigma = d\sigma^{3CSa}, \quad 2 < r < 15 \end{aligned} \quad (9)$$

$$d\sigma = d\sigma^{3CS_c}, \quad r < 2$$

其中  $A$  为修正因子, Koch 和 Motz<sup>[11]</sup> 以两条曲线形式给出 Al 和 Cu 的值, 文献[12]中给出了 H, Na, Al, Ge, I 和 Au 的值。依据这些曲线值, 可对每一核素给出  $A$  的制表值。Elwert<sup>[13]</sup> 给出了库仑修正因子:

$$f_E = \frac{\beta_0 \{1 - \exp[-2\pi z / (137\beta_0)]\}}{\beta \{1 - \exp[-2\pi z / (137\beta)]\}}, \quad (10)$$

$d\sigma^{3BN}$ ,  $d\sigma^{3BSd}$ ,  $d\sigma^{3BS_c}$ ,  $d\sigma^{3CSa}$ ,  $d\sigma^{3CS_c}$  表达式相当繁杂, 详见[3]之附录。我们使用自动选步长的 Simpson 求积法计算(8), 对其发散点作截断处理。

对化合物或混合物, 采用 Thompson<sup>[14]</sup> 假设, 方程(7)描述为:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_f = \sum_k p_k \left(\frac{dE}{dx}\right)_{f,k}, \quad (11)$$

其中  $p_k$  为  $k$  种核的权重,  $\left\{\left(\frac{dE}{dx}\right)_{f,k}\right\}$  为  $k$  种成份物质的韧致辐射能量损失。

阻止本领为碰撞能量损失和韧致辐射能量损失之和, 由方程(1)和(11)计算。

根据电子连续慢化假设, 射程定义为能量为  $E$  的电子在给定的物质中所穿行的总距离:

$$P(T) = \int_0^T \left[ \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{coll}} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_f \right]^{-1} dT. \quad (12)$$

当电子能量小于 1 keV 时, 上式不再成立, 应由 Nelms<sup>[15]</sup> 方法计算:

$$P(T) = P(T_{\min}) + \int_{T_{\min}}^T \left[ \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{coll}} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_f \right]^{-1} dT, \quad (13)$$

其中  $E_{\min} = 1$  keV,  $P(T_{\min})$  如下计算: 假定(12)中被积函数在  $E=0$  和  $E=1$  keV 间是线性的, 且  $E=0$  时, 被积函数为零;  $E=1$  keV 时, 被积函数由方程(1)和(11)计算。

## 2. 电子韧致辐射光子能谱及数目分布

定义  $\left(\frac{dn}{dK}\right)_{E_0}$   $dK$  表示初始能量为  $E_0$  的一个电子在物质中慢化而产生的能量在  $(K, K+dK)$  间的光子数, 于是初始能量为  $E_0$  的电子在化合物或混合物中慢化产生的韧致辐射光子能谱为:

$$\begin{aligned} \left(\frac{dn}{dK}\right)_{E_0} &= \int_{K+m_0c^2}^{E_0} \left(\frac{d\sigma}{dK}\right)_E / \left(\frac{dE}{dx}\right)_E dE \\ &= \sum_{i=1}^{g_i} \int_{g_{i-1}}^{g_i} \sum_{k=1} \left(\frac{d\sigma}{dK}\right)_{ik} / \sum_{k=1} \left(\frac{dE}{dx}\right)_k dE, \end{aligned} \quad (14)$$

其中  $\left(\frac{d\sigma}{dK}\right)$  为韧致辐射截面,  $\left(\frac{dE}{dx}\right)$  为物质的阻止本领, 脚标  $k$  表示  $k$  种核,  $g_i$  积分限由(9)的约束条件确定。由于  $g_i$  不一定是递增的, 故计算(14)颇为繁杂, 最好把方程(14)简化(参见[4]的附录)。若以  $K/T_0$  为光子能量单位, 则方程(14)写成:

$$\left(\frac{dn}{d(K/T_0)}\right)_{E_0} = \int_{K+m_0c^2}^{E_0} T_0 \left(\frac{d\sigma}{dK}\right)_E / \left(\frac{dE}{dx}\right)_E dE. \quad (15)$$

初始能量为  $E_0$  的电子, 在能量  $(K_{\min}, T_0)$  间所发射的韧致辐射光子数目为:

$$n(E_0, K_{\min}) = \int_{T_{\min}}^{T_0} dK \int_{K+m_0c^2}^{E_0} \left(\frac{d\sigma}{dK}\right)_{E'} / \left(\frac{dE}{dx}\right)_E dE' \quad (16)$$

一般地取能量下阈  $K_{\min} = 0.04 m_0c^2$ , 因为  $K_{\min} = 0$  时, 理论截面发散。

### 3. 电子的反应几率

韧致辐射, 动能为  $E$  的电子在单一物质中穿行, 发射能量在  $(E', E' + dE')$  的光子几率由<sup>[16]</sup>

$$\Phi_{\text{brem}}(E, E') dE' = 4 \alpha \frac{N}{A} Z^2 r_0^2 \frac{dE'}{E'} F(u, v) \quad (17)$$

给出, 其中  $F(u, v)$  为慢变化函数, 表征屏蔽效应。对化合物或混合物, 上式成为:

$$\Phi_{\text{brem}}(E, E') dE' = \sum_{k=1} p_k \frac{dE'}{E'} F_k(u, v), \quad (18)$$

其中  $P_k$  为  $k$  种核的权重。计算韧致辐射几率, 应对  $dE'$  积分(18), 取  $E'_{\min} = 0.5 \text{ MeV}$  为积分下限, 它小于截断能量。

电子同电子碰撞几率, 我们仅考虑近碰撞而忽略远碰撞(远碰撞导致能量损失)。一个动能为  $E$  的负电子, 由近碰撞产生一个能量在  $(E', E' + dE')$  的次级电子的几率由 Moller<sup>[17]</sup> 公式给出:

$$\Phi_{\text{coll}}^-(E, E') dE' = 2 C m_0 c^2 dE' \left[ \frac{E}{E'(E-E')} - \frac{1}{E'} \right], \quad (19)$$

其中

$$C = \pi N r_0^2 \sum_{k=1} \frac{K_k Z_k}{A_k}, \quad (20)$$

这里  $K_k$  为  $k$  种核的百分重量。次级电子能量  $E'$  变化在  $(\eta, \frac{E}{2})$  间。在正电子情况下, 方程(19)变为:

$$\Phi_{\text{coll}}^+(E, E') dE' = 2 C \frac{m_0 c^2 dE'}{E'^2} \left[ 1 - \frac{E'}{E} + \left(\frac{E'}{E}\right)^2 \right]^2, \quad (21)$$

次级电子能量  $E'$  变化在  $(\eta, E)$  间, 这里待定值  $\eta$  取为  $1.5 \times 10^6 \text{ eV}$ 。方程(19)和(21)对  $dE'$  积分, 不难得到解析表达式, 因而易得电子同电子碰撞几率。

### 4. 光子的反应几率

康普顿散射, 能量为  $E$  的光子, 发生康普顿散射, 产生能量在  $(E', E' + dE')$  间的次级光子的几率由 Klein-Nishina<sup>[18]</sup> 公式给出:

$$\Phi_{\text{comp}}(E, E') dE' = C \frac{m_0 c^2}{E} \frac{dE'}{E'} \left[ 1 + \left(\frac{E'}{E}\right)^2 - \frac{E'}{E} \sin\theta \right], \quad (22)$$

其中  $\sin\theta$  为光子散射前后夹角正弦。散射后能量

$$E' = \frac{m_0 c^2 E}{m_0 c^2 + E(1 - \cos\theta)}, \quad \frac{1}{2} m_0 c^2 < E' < E \quad (23)$$

计算康普顿散射几率, 把(23)代入(22)并对  $dE'$  积分, 由(23)知积分下限取为  $E_{\min} =$

$$\frac{m_0 c^2 E}{m_0 c^2 + 2 E}。$$

对生成, 能量为  $E \gg m_0c^2$  的光子在单一物质中穿行, 发生对生成的理论表达为<sup>[16]</sup>:

$$\Phi_{\text{pair}}(E, E')dE' = 4\alpha \frac{N}{A} Z^2 r_0^2 \frac{dE'}{E'} G(E, v) \quad (24)$$

其中  $G(E, v)$  为  $E$  的慢性化函数, 考虑了屏蔽效应,  $v = \frac{m_0c^2 + E'}{E}$ 。对化合物或混合物有:

$$\Phi_{\text{pair}}(E, E')dE' = \sum_{k=1} P_k \frac{dE'}{E} G(E, v) \quad (25)$$

两个生成电子的能量在  $(0, E - 2m_0c^2)$  间变化, 所以计算对生成几率求积的积分上限取为  $E - 2m_0c^2$ 。由于慢变化函数是多段函数, 故上述求积是分段完成的。

### 三、程序及结果

本文采用上述公式设计计算程序, 是在 TQ-6 机上使用 BCY 语言编制的, 包括四个独立的程序: 甲、计算电子能量损失及射程; 乙、计算电子韧致辐射光子能谱及数目分布; 丙、计算电子反应几率; 丁、计算光子反应几率。本组程序主要功能是: 可对任意物质(单一核素、化合物或混合物)计算; 能量范围从 10 keV 到 300 MeV; 计算结果以数据表的形式给出。本组程序使用方便, 计算时间不长。下面给出输入输出各物理量。

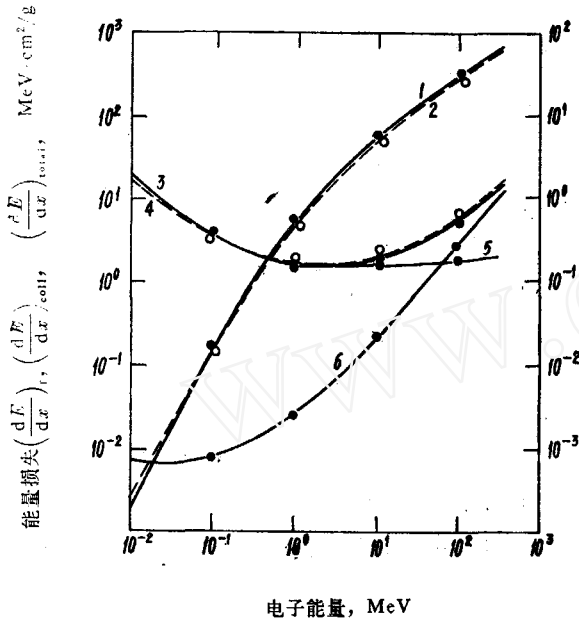
甲、输入数据: 由  $k$  种核构成的物质的原子量  $A_k$ 、相应核的原子序数  $Z_k$ 、相应核的电子壳层数目  $N_k$ 、相应核的平均激发能  $I_k$  (MeV)、相应核相对总体的成份百分重量  $K_k$  (%)、该物质的密度  $\rho$  (g/cm<sup>3</sup>)、修正因子  $A$  的能量取值点  $e_i$  ( $m_0c^2$ )、相应核修正因子数值  $A_{ki}$ 、电子能量分点  $E_i$  (MeV)、相应核中属于  $j$  层电子数目与总数之比  $f_{kj}$  和对应层的电子结合能  $h\nu_{kj}$  (Ry)。

输出结果:	电子能量损失及射程表如下
ENERGY[i]	电子能量分点 (MeV);
IONIZATION[i]	电子碰撞能量损失 (MeV·cm <sup>2</sup> /g);
RADIATION[i]	电子韧致辐射能量损失 (MeV·cm <sup>2</sup> /g);
TOTAL[i]	电子总的能量损失, 即阻止本领 (MeV cm <sup>2</sup> /g);
RANGE[i]	电子射程 (g/cm <sup>2</sup> )。

乙、输入数据: 由  $k$  种核构成的物质的原子序数  $Z_k$ 、相应核在单位体积中的原子数目  $n_k$  (原子数目/cm<sup>3</sup>)、该物质的密度  $\rho$  (g/cm<sup>3</sup>)、韧致辐射电子的初始能量  $T_{0i}$  ( $m_0c^2$ )、韧致辐射光子能谱的能量分点  $(k/T_0)i'$ , ( $0 \leq K/T_0 \leq 1$ )、修正因子  $A$  的能量取值点  $e_i$  ( $m_0c^2$ )、相应核修正因子数值  $A_{ki}$ 、电子能量损失的能量分点  $E_i$  (MeV)、电子在该物质中碰撞能量损失  $(L-I)_i$  (MeV·cm<sup>2</sup>/g) 及韧致辐射能量损失  $(L-R)_i$  (MeV·cm<sup>2</sup>/g)。

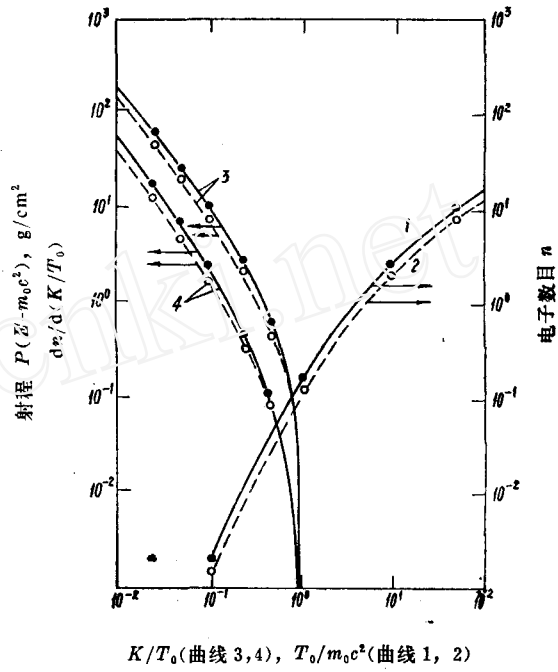
输出结果: 对每一韧致辐射电子的初始能量, 给出相应的韧致辐射光子数目及韧致辐射光子能谱数据表, 最后给出作为电子初始能量函数的韧致光子数目分布。

E-Energy	电子的初始能量 ( $m_0c^2$ );
B-Number	韧致辐射光子数目;
B-P-Spectrum( $K/T_0, K, N$ )	韧致辐射光子能谱分布;

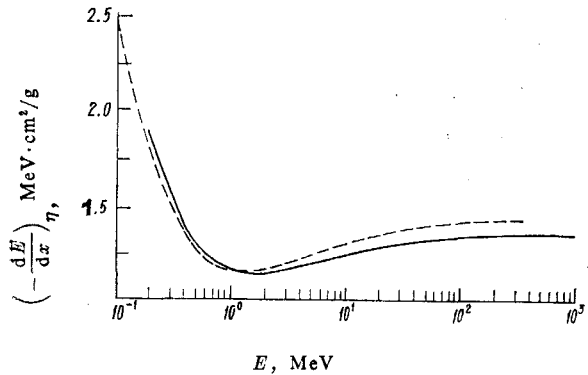


电子能量, MeV

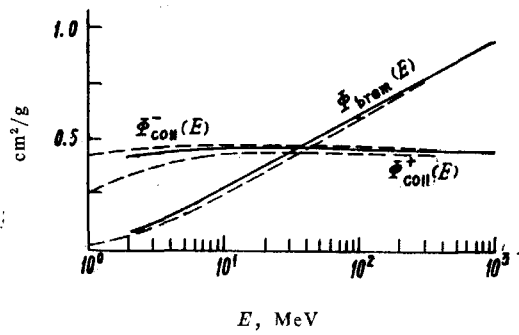
图 1 电子在单核 Ne 和化合物 SiO<sub>2</sub> 中的能量损失及射程  
 实线和虚线为本程序计算值; . 和○为 Pager 等人计算值; 1— $P_{ion}(E-m_0c^2)$ ; 2— $P_N(E-m_0c^2)$ ; 3— $(\frac{dE}{dx})_{total}^{SiO_2}$ ; 4— $(\frac{dE}{dx})_{total}^{Ne}$ ; 5— $(\frac{dE}{dx})_{coll}^{SiO_2}$ ; 6— $(\frac{dE}{dx})_t^{SiO_2}$



单核 Ge 和化合物 NaI 中电子的韧致辐射光子能谱  $dn/d(K/T_0)$  及其数目分布  $n$   
 实线(NaI)和虚线(Ge)为本程序计算值; . 和○为文献[4, 10]的值; 1— $n(NaI)$ ; 2— $n(Ge)$ ; 3— $T_0/mc^2=50$ ; 4— $T_0/mc^2=5$



能量为  $E$  的电子远距离碰撞导致的能量损失  
 虚线为本程序对铅玻璃(SF-2)的计算值; 实线为 Longo 等人对铅玻璃(SF-5)的计算值,  $\eta=0.15$  MeV.



能量为  $E$  的电子产生的韧致辐射几率  $\Phi_{brem}(E)$  及同正、负电子碰撞几率  $\Phi_{coll}^+(E)$  及  $\Phi_{coll}^-(E)$  图注同图 3。

ENERGY[ $i$ ] 电子的初始能量 ( $m_0c^2$ );  
 NUMBER[ $i$ ] 韧致辐射光子数目。  
 丙、这个程序由甲程序改造而成, 故输入数据同甲。

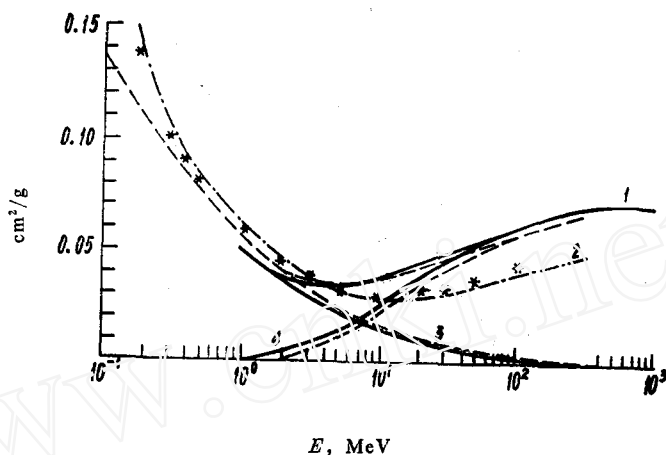


图 5 能量为  $E$  的光子产生康普顿散射几率(曲线 3) $\Phi_{\text{comp}}(E)$ , 对生成几率(曲线 4) $\Phi_{\text{pair}}(E)$  及总几率(曲线 1) $\Phi_{\text{T}}(E)$   
中心线为本程序对 Fe 的计算值(曲线 2) $\Phi_{\text{T}}^*(E)$ ; \* 点为文献[20]的值;虚线为本程序对铅玻璃(SF-2)的计算值;实线为 Longo 等人对铅玻璃(SF 5)的计算值。

输出结果: 电子远距离碰撞能耗、韧致辐射几率、近距离碰撞几率表。

ENERGY[ $i$ ] 电子能量分点(MeV);  
IONIZATION[ $i$ ] 电子远距离碰撞能耗( $\text{MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{g}$ );  
BREMSSTRAHLUNG[ $i$ ] 电子韧致辐射几率( $\text{cm}^2/\text{g}$ );  
COLLISION<sup>-</sup>[ $i$ ] 负电子近距离碰撞几率( $\text{cm}^2/\text{g}$ );  
COLLISION<sup>+</sup>[ $i$ ] 正电子近距离碰撞几率( $\text{cm}^2/\text{g}$ )。

丁、输入数据: 由  $k$  种核构成的物质的原子量  $A_k$ 、相应核的原子序数  $Z_k$ 、相应核成份相对总体的百分重量  $K_k(\%)$ 、光子能量分点  $E_i(\text{MeV})$ 。

输出结果: 光子康普顿散射和对生成几率表。

ENERGY[ $i$ ] 光子能量分点(MeV);  
COMPTON[ $i$ ] 光子康普顿散射几率( $\text{cm}^2/\text{g}$ );  
PAIRPRODUCTION[ $i$ ] 光子对生成几率( $\text{cm}^2/\text{g}$ );  
TOTAL[ $i$ ] 光子康普顿散射和对生成总几率( $\text{cm}^2/\text{g}$ )。

为检验程序的可靠性, 我们计算了一批有代表性的方案。由于物质构成和能量范围的局限, 仅给出部分计算同已有结果的比较情况。

我们计算的电子在单核 Ne 和化合物  $\text{SiO}_2$  中的能量损失及射程, 同 Pages<sup>[3]</sup>等人的结果完全一致(他们计算的能量小于 100 MeV)。

电子韧致辐射光子能谱及数目分布, 对单核 Ge 和化合物 NaI 计算结果表明, 同文献[4]和[12]相一致(那里计算的能量小于 30 MeV)。

电子在混合物铅玻璃(类似 SF-2)中, 远距离碰撞能耗、韧致辐射几率、近距离碰撞几率, 我们的计算值同 Longo<sup>[19]</sup>等人的结果符合较好。

光子康普顿散射和对生成几率, 对单核 Fe 和混合物 SF-2 的计算结果同文献[19, 20]基本一致。我们计算的对生成几率较文献[19]偏低, 这是由于我们仅考虑了核场中的对生成。

由上可见,本组程序计算结果同已有结果相符合,对于没有结果可比较的化合物或混合物以及高能段,我们认为结果也是正确的。使用本组程序提供的计算结果,在计算低能 $\gamma$ 射线在NaI(Tl)中能量沉积<sup>[6]</sup>及铅玻璃对高能 $\nu$ 射线探测效率<sup>[7]</sup>中,均得到了令人满意的结果。

### 参 考 文 献

- [1] M. J. Berger and S. M. Seltzer, NAS-NRC Publication 1133 (1955).
- [2] M. J. Berger and S. M. Seltzer, NASA-SP Publication 3036 (1965).
- [3] L. Pages, et al., *Atomic Data*, **4**, 1 (1972).
- [4] 张贵山, 黄正德, 原子能科学技术, **6**, 711 (1981).
- [5] J. H. Hubbel, NSRDS-NBS 29 (1969)
- [6] 李素梅, 原子能科学技术, **3**, 336 (1984).
- [7] 张贵山, 张焕乔, 高能物理与核物理, **7**, 370 (1983).
- [8] F. Rohrlich and B. C. Carlson, *Phys. Rev.*, **93**, 38 (1954).
- [9] C. J. Bakker and E. Segre, *Phys. Rev.*, **81**, 489 (1951).
- [10] R. M. Sternheimer, *Phys. Rev.*, **145**, 247 (1966).
- [11] H. W. Koch and J. W. Motz, *Rev. Mod. Phys.*, **31**, 920 (1959).
- [12] B. Grosswendt, *Nucl. Instrum. Methods*, **116**, 97 (1974).
- [13] G. Elwert, *Ann. Physik*, **34**, 178 (1939).
- [14] T. J. Thompson, UCRL 1910 (1952).
- [15] A. Nelms, NBS 577 (1956).
- [16] H. A. Bethe and W. Heitler, *Proc. Roy. Soc.*, **A 146**, 83 (1934).
- [17] C. Moller, *Ann. Phys.*, **14**, 531 (1932).
- [18] D. Klein and Y. Nishina, *Z. Physik.*, **52**, 853 (1929).
- [19] E. Longo and I. Sestili, *Nucl. Instrum. Methods*, **128**, 283(1975).
- [20] K. Siegbahn, Alpha-, Beta-, and Gamma-Ray Spectroscopy, North-Holland Pub. Co., 1965

(编辑部收到日期: 1983年10月12日)



(上接第210页)

### 五、结 论

1. 方法的单次测量标准偏差为9—25%,回收率为83—105%。
2. 摄一条谱的用量(蒸干的水解产物)为20 mg。若UF<sub>6</sub>的取样量能控制在1 g左右,则一个工作日能分析十个左右的样品。
3. 方法的测定范围: B, 0.8—30 ppm; Si, 10—150 ppm。

### 参 考 文 献

- [1] 1980 Annual Book of ASTM Standards, pt 45, ASTM, Pa, C 696, Sections 83—90, p. 226.
- [2] 1980 Annual Book of ASTM Standards, pt 45, ASTM, Pa, C 761, Sections 80—87, p. 483.
- [3] Katz J. J., Rabinowitch E., *The Chemistry of Uranium*, 1st Edition, Dover Publication, INC, NY 1951, p. 442.
- [4] Franklin F., Wilson A., UKAEA SCS-R-149(1959).
- [5] 中岛笃之助等, 分析化学, **10**(7), 763(1961).
- [6] 顾国英等, 原子能科学技术, (8), 705(1965).
- [7] 顾国英等, 中国科学技术委员会, 科技研究报告, 原 0051 (1965).
- [8] Hall R. H., Lovell H. L., *Anal. Chem.*, **30**(10), 1665(1958)

(编辑部收到日期: 1984年3月22日)