

# $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$ 源衰变电子在空气介质中的 径迹结构理论模拟

刘喃喃, 刘书焕, 麻江江, 杨永青, 万俊生

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710613)

**摘要:**利用 Monte-Carlo 方法模拟了 $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  源衰变电子径迹及能谱分布, 分析比较了源衰变电子与次级电子、韧致辐射光子能量分布和空间径迹结构的差异。模拟结果为 $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  源的辐射防护、屏蔽设计及其应用研究提供了相关理论参考。

**关键词:** $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  源; 径迹结构; 电子; Monte-Carlo 方法

中图分类号: Q6; TL7; R3

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2008)S0-0326-06

## Theoretical Simulation of Track Structure in Atmosphere Produced by $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$ Source

LIU Nan-nan, LIU Shu-huan, MA Jiang-jiang, YANG Yong-qing, WAN Jun-sheng

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710613, China)

**Abstract:** The distribution of the decay electron tracks and spectra induced by  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  source were simulated with Monte-Carlo method. The track structures and spectra of decay electrons were compared with those of secondary electrons and bremsstrahlung photons, and the differences among them were analyzed. The simulation results may offer some theoretical references for radiation protection, shielding design and application studies of  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  source.

**Key words:**  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  source; track structure; electron; Monte-Carlo method

辐射粒子径迹的研究对于在微观微纳米级水平上深入理解辐射粒子行为及其辐射效应机制的研究具有重要意义,它是开展辐射效应和微纳米剂量探测模拟的重要研究手段之一。 $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  源是一种在军事、能源、医学和科学研究等领域均具有广泛应用的常用 $\beta$  辐射源,人们采用理论和实验的方法已开展了 $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  源宏观剂量的研究工作<sup>[1-8]</sup>,形成

了典型形状 $\beta$  源宏观剂量理论计算模型<sup>[5-8]</sup>和实验测量方法<sup>[1-4,8]</sup>。但针对 $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  源衰变粒子径迹的微观剂量学特性的研究鲜有报道。为从微观机制上理解 $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  源衰变粒子行为,本工作采用 Monte-Carlo 模拟程序 Geant4 理论模拟对比该 $\beta$  源衰变产生的电子、次级电子和光子的能谱分布和径迹结构分布特点,为 $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  源的屏蔽设计、辐射防

护及其微剂量学的深入研究提供初步的理论基础。

### 1 <sup>90</sup>Sr-<sup>90</sup>Y 源衰变电子径迹模拟模型设计

<sup>90</sup>Sr、<sup>90</sup>Y 为 β<sup>-</sup> 衰变核素，<sup>90</sup>Sr 的 β 衰变半衰期为 28.6 a，其衰变子体 <sup>90</sup>Y 的半衰期为 64.1 h，<sup>90</sup>Sr 半衰期较长，可与其短暂的衰变产物 <sup>90</sup>Y 相平衡。β<sup>-</sup> 衰变产生的衰变能主要在电子与反中微子之间分配，形成它们的动能。这种分配是随机的，因此，衰变产生的电子能谱和反中微子谱均为连续谱。<sup>90</sup>Sr、<sup>90</sup>Y 衰变电子最大能量  $E_{max}$ 、平均能量  $E_{ave}$  及其在空气中的射程列于表 1。

表 1 <sup>90</sup>Sr-<sup>90</sup>Y β 衰变电子能量和射程<sup>[4]</sup>

Table 1 Range and energy of decay electrons produced by <sup>90</sup>Sr-<sup>90</sup>Y<sup>[4]</sup>

核素	在空气中的射程 <sup>1)</sup> /cm	
	$E_{ave}=0.196$ MeV	$E_{max}=0.546$ MeV
<sup>90</sup> Sr	41	187
核素	在空气中的射程 <sup>1)</sup> /cm	
	$E_{ave}=0.935$ MeV	$E_{max}=2.284$ MeV
<sup>90</sup> Y	375	1 037

注：1) 空气参考条件为 22 ℃、101.325 kPa

<sup>90</sup>Sr、<sup>90</sup>Y 衰变产生的粒子类型为电子、反中微子及电子与介质相互作用产生的光子。根据源衰变电子能量分布，在 Geant4 模拟程序中，选用了类 G4MultipleScattering、G4LowEnergyIonisation 和 G4LowEnergyBremsstrahlung 等低能物理模型分别描述了低能电子的多重散射、电离和韧致辐射过程，采用类 G4LowEnergyRayleigh、G4LowEnergyPhotoElectric、G4LowCompton 和 G4LowEnergyGammaConversion 分别描述了低能光子的瑞利散射、光电效应、康普顿散射和电子对效应等物理过程。根据电子在空气中的射程，设计的 <sup>90</sup>Sr-<sup>90</sup>Y 源衰变电子径迹模拟几何示意图如图 1 所示。

图 1 中，铯靶的形状为半径 1 μm、高 1 μm 的均质柱体，<sup>90</sup>Sr β 衰变核素在铯靶内均匀分布；靶衬底铝为半径 3 cm、厚 3 mm 的柱体，源周边及表面用 3 μm 厚的金层屏蔽；衬底及源靶周围介质为空气。源前方空气柱的几何为半

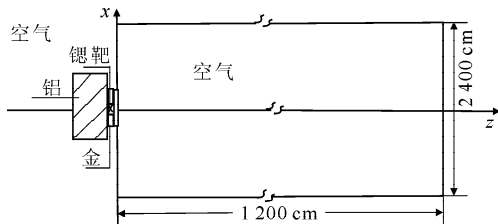


图 1 <sup>90</sup>Sr-<sup>90</sup>Y 源衰变粒子径迹模拟几何设计示意图

Fig. 1 Geometric design scheme of simulation for decay particle tracks of <sup>90</sup>Sr-<sup>90</sup>Y β decay source

径 1 200 cm、高 1 200 cm 的柱体，模拟几何坐标原点设在源屏蔽金层前表面几何中心。

在模拟过程中，<sup>90</sup>Sr-<sup>90</sup>Y 源衰变电子能量的确定利用了 Geant4 的核衰变数据库 (G4RADIOACTIVEDATA) 提供的 <sup>90</sup>Sr、<sup>90</sup>Y 核素衰变数据和 GPS (G4 General Particle Source) 源粒子抽样工具，源衰变粒子出射方向服从各向同性分布。

### 2 模拟结果

为分析 <sup>90</sup>Sr-<sup>90</sup>Y 源衰变电子及其次级电子、光子空间径迹分布与粒子能量的关系，根据设计的模拟几何，模拟计算了 <sup>90</sup>Sr、<sup>90</sup>Y、<sup>90</sup>Sr-<sup>90</sup>Y 衰变电子初始能量谱和次级电子、光子在空气介质中的初始能量谱分布 (图 2~6)，并模拟跟踪了 <sup>90</sup>Sr 源粒子衰变产生的电子、光子径迹空间分布 (图 7~15)。

### 3 结果分析与讨论

1) <sup>90</sup>Sr-<sup>90</sup>Y β 衰变在空气介质中产生的次级电子初始能量谱为连续谱；次级电子初始能量谱分布范围为几百 eV~0.3 MeV。由模拟能谱计算的 <sup>90</sup>Sr、<sup>90</sup>Y 衰变产生的初始衰变电子谱平均能量分别约为 0.207 和 0.90 MeV，在偏差允许范围内，与文献 [4] 的结果相吻合。

2) <sup>90</sup>Sr-<sup>90</sup>Y β 衰变电子与周围介质产生的韧致辐射光子能量亦为连续分布，但光子能量较低，在模拟几何内跟踪到的最大光子能量约 1 MeV。

3) 由于电子、光子、反中微子与介质相互作用机制的差异，电子与光子径迹明显不同，空气及周围介质对电子的散射较为严重，电子径

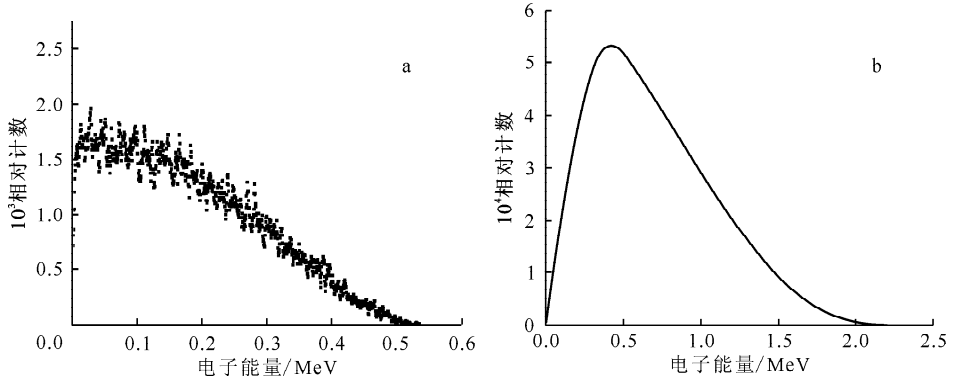


图 2  $^{90}\text{Sr}$ (a)、 $^{90}\text{Y}$ (b)  $\beta$ 衰变初始电子归一化能谱分布

Fig. 2 Normalized initial energy spectra of decay electrons produced by  $^{90}\text{Sr}$  (a) and  $^{90}\text{Y}$  (b)

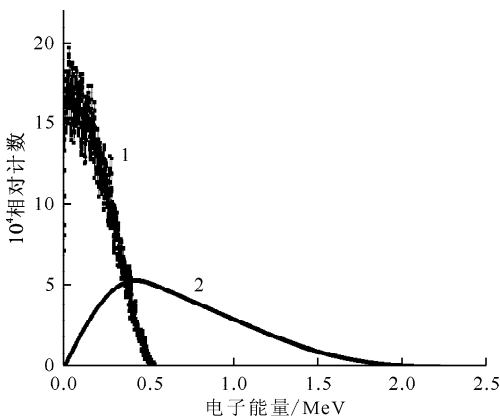


图 3  $\beta$ 衰变电子归一化能谱对比

Fig. 3 Comparison between  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{90}\text{Y}$  normalized decay electron spectra

1— $^{90}\text{Sr}$ ; 2— $^{90}\text{Y}$

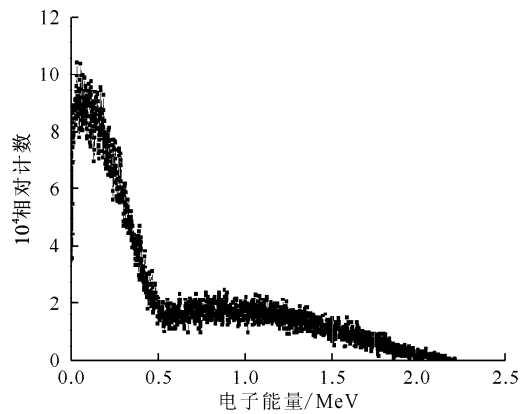


图 4  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$   $\beta$ 衰变归一化电子能谱分布

Fig. 4 Normalized initial energy spectrum of decay electrons produced by  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$

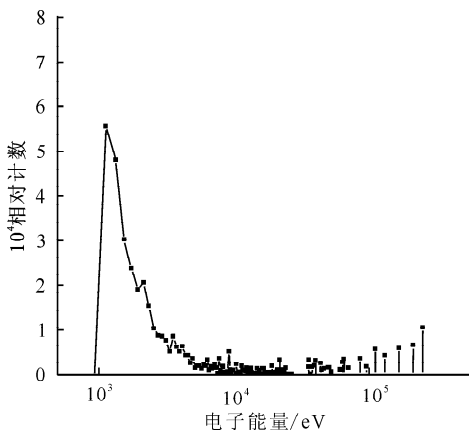


图 5  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$   $\beta$ 衰变在空气中产生的归一化次级电子能谱分布

Fig. 5 Normalized initial secondary electron spectrum in dry air produced by  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$   $\beta$  decay source

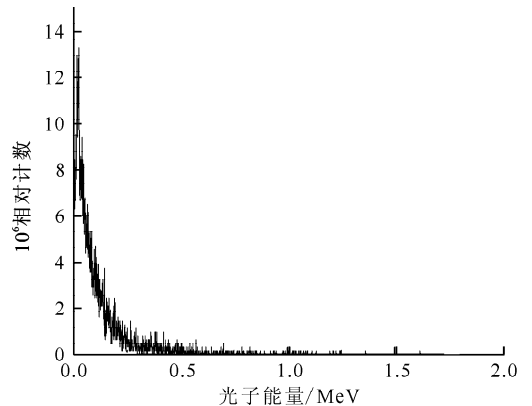


图 6  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$   $\beta$ 衰变在模拟几何内产生的归一化韧致辐射光子能谱分布

Fig. 6 Normalized bremsstrahlung photons spectrum in simulation volume produced by  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$   $\beta$  decay source

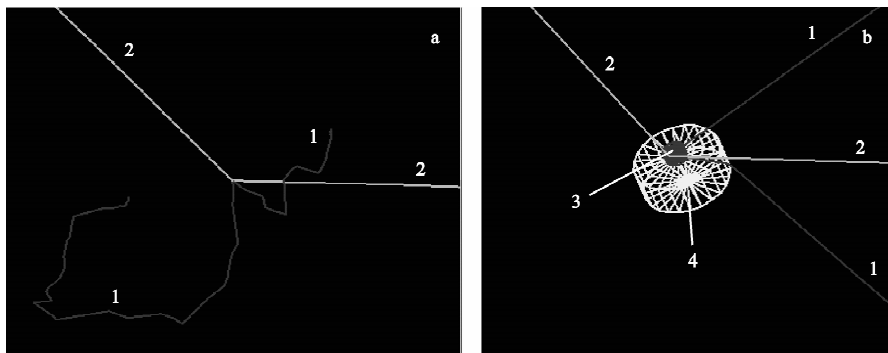


图 7 经放大后模拟的 $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  源单个源粒子衰变产生的电子和反中微子径迹空间分布

Fig. 7 Magnified track distributions of electrons and antineutrinos produced by single particle decay of  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  source

a——放大后的衰变反中微子和电子径迹；b——进一步放大后的靶几何和衰变电子、反中微子径迹  
1——电子径迹；2——反中微子径迹；3——靶；4——镀金层

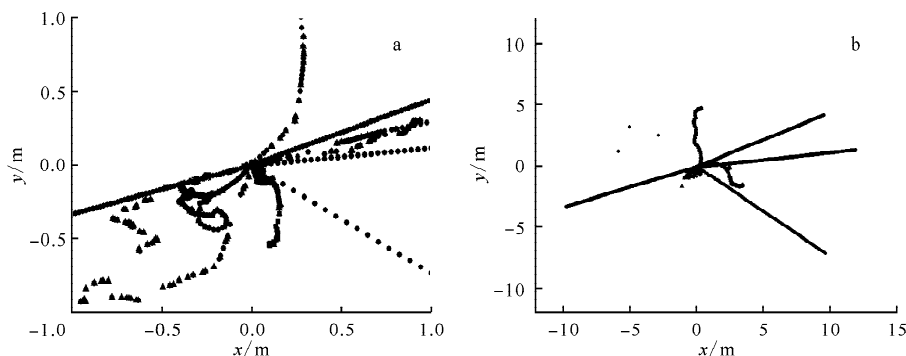


图 8 几个 $^{90}\text{Sr}$  源粒子衰变产生的  $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{90}\text{Y}$  衰变电子及 $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  衰变次级电子径迹在  $x$ - $y$  平面的投影

Fig. 8 Tracks projection in  $x$ - $y$  plane for both decay electrons produced by  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Y}$  particles respectively and secondary electrons produced by  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  decay electrons induced by several  $^{90}\text{Sr}$  source particles decay

a——径迹局部；b——完整径迹

■—— $^{90}\text{Sr}$  的衰变电子径迹；●—— $^{90}\text{Y}$  的衰变电子径迹；▲—— $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  衰变电子产生的次级电离电子径迹

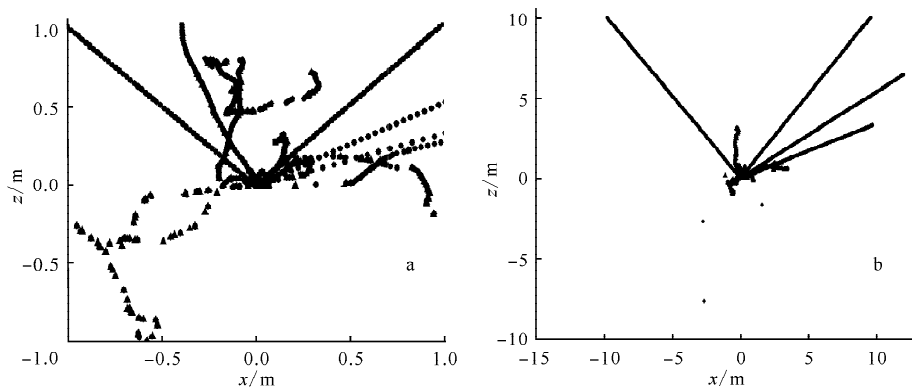


图 9 几个 $^{90}\text{Sr}$  源粒子衰变产生的  $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{90}\text{Y}$  衰变电子及 $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  衰变次级电离电子径迹在  $x$ - $z$  平面的投影

Fig. 9 Tracks projection in  $x$ - $z$  plane for both decay electrons produced by  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Y}$  particles respectively and secondary electrons produced by  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  decay electrons induced by several  $^{90}\text{Sr}$  source particles decay

a——径迹局部；b——完整径迹

■—— $^{90}\text{Sr}$  的衰变电子径迹；●—— $^{90}\text{Y}$  的衰变电子径迹；▲—— $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  衰变电子产生的次级电离电子径迹

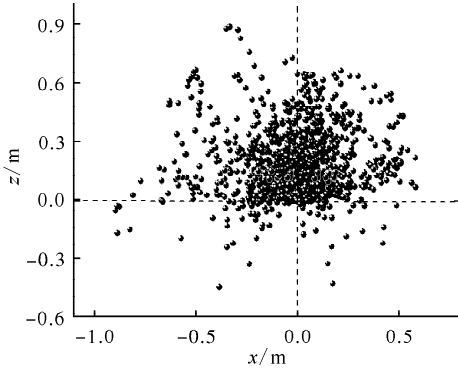


图 10 1 000 个 $^{90}\text{Sr}$  粒子衰变产生的衰变电子径迹在  $x-z$  平面的投影

Fig. 10 Tracks projection in  $x-z$  plane of decay electrons produced by 1 000  $^{90}\text{Sr}$  particles decay

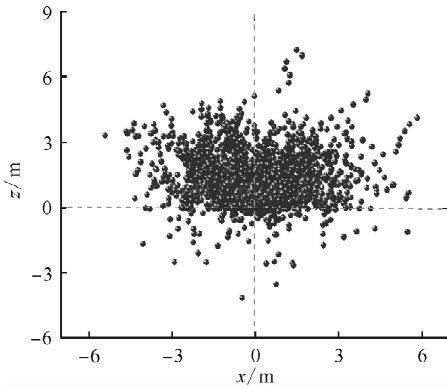


图 11 1 000 个 $^{90}\text{Sr}$  源粒子衰变产生的 $^{90}\text{Y}$  衰变电子径迹在  $x-z$  平面的投影

Fig. 11 Tracks projection in  $x-z$  plane of decay electrons produced by  $^{90}\text{Y}$  particles induced by 1 000  $^{90}\text{Sr}$  source particles decay

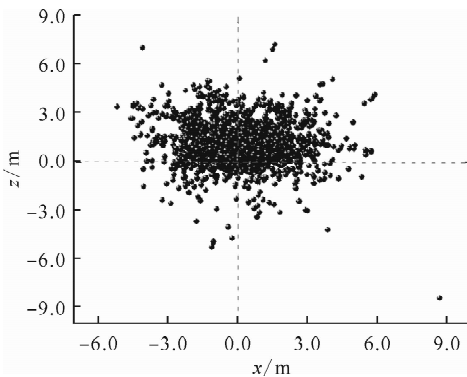


图 12 1 000 个 $^{90}\text{Sr}$  源粒子衰变产生的次级电子径迹在  $x-z$  平面的投影

Fig. 12 Tracks projection in  $x-z$  plane of secondary electrons produced by 1 000  $^{90}\text{Sr}$  particles decay

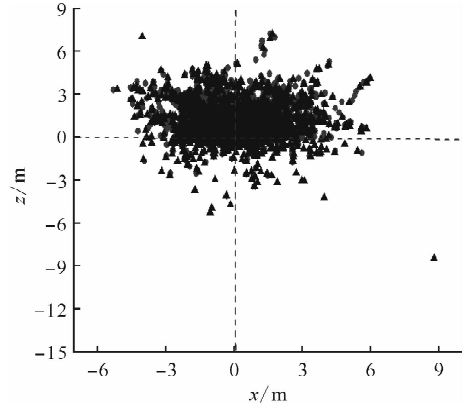


图 13  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  源衰变电子及次级电离电子径迹在  $x-z$  平面的投影

Fig. 13 Tracks projection in  $x-z$  plane of decay electrons and second ionized electrons produced by  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  decay source

■—— $^{90}\text{Sr}$  的衰变电子径迹；●—— $^{90}\text{Y}$  的衰变电子径迹；  
▲—— $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  衰变电子产生的次级电离电子径迹

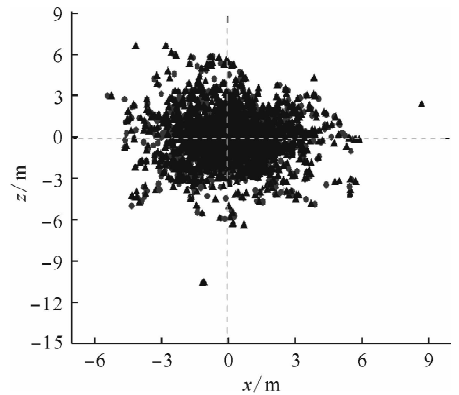


图 14  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  源衰变电子及次级电子径迹在  $x-y$  平面的投影

Fig. 14 Tracks projection in  $x-y$  plane of decay electrons and secondary electrons produced by  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  decay source

■—— $^{90}\text{Sr}$  的衰变电子径迹；●—— $^{90}\text{Y}$  的衰变电子径迹；  
▲—— $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  衰变电子产生的次级电离电子径迹

迹较为曲折；反中微子、光子受介质的散射影响较小，其穿透能力较电子强，径迹分布范围大于电子。

4) 由于源底衬铝板的屏蔽和反散射作用， $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  衰变产生的电子和光子径迹主要为向 $+z$ 轴方向的前向散射分布。

5) 近源端空气层衰变电子、光子径迹密集，低能粒子能量损失较大。

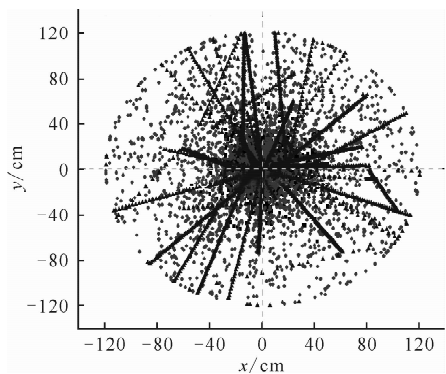


图 15 <sup>90</sup>Sr-<sup>90</sup>Y 源衰变电子、反中微子及轫致辐射光子径迹在  $x$ - $y$  平面的投影

Fig. 15 Tracks projection in  $x$ - $y$  plane of decay electrons, antineutrinos and bremsstrahlung photons produced by <sup>90</sup>Sr-<sup>90</sup>Y decay source

■——电子径迹; ●——反中微子径迹; ▲——光子径迹

6) 因<sup>90</sup>Sr、<sup>90</sup>Y 衰变电子平均能量和最大能量的差异,因此,模拟结果显示,<sup>90</sup>Y 衰变电子的径迹分布范围比<sup>90</sup>Sr 衰变电子的大。<sup>90</sup>Sr-<sup>90</sup>Y 衰变电子产生的次级  $\delta$  电子径迹主要分布在衰变电子径迹附近,但并非所有衰变电子都在其径迹附近产生次级电离电子;能量较高的衰变电子由于其在介质中穿行速度较快,电离阻止本领相对较小,能量相对较高的衰变电子径迹周围产生的次级电离电子径迹密集程度比低能衰变电子的稀疏。

7) 电子、光子及反中微子径迹分布相互独立,即各粒子径迹是由其与周围介质各自相互作用独立形成的。

8) 由于源粒子在源内均匀分布,且出射方向抽样为各向同性,因此,统计结果显示,源衰变粒子径迹在  $x$ - $y$  平面的投影呈各向同性均匀分布。

通过对<sup>90</sup>Sr-<sup>90</sup>Y 源衰变粒子能谱及径迹的理论模拟,直观显示了该源衰变粒子及其次级粒子的能量和径迹结构空间分布特征,模拟结果为深入理解电子、光子、反中微子与介质相互作用的微观机制的差异及<sup>90</sup>Sr-<sup>90</sup>Y 源的应用研究提供了相关理论参考。

## 参考文献:

- [1] 陈慧莉,张衍生,张敏,等.  $\beta$  参考辐射的建立[J]. 原子能科学技术, 1994, 28(3): 200-207.  
CHEN Huili, ZHANG Yansheng, ZHANG Min, et al. Establishment of beta reference radiations[J]. Atomic Energy Science and Technology, 1994, 28(3): 200-207(in Chinese).
- [2] 李景云.  $\beta$  剂量仪和个人剂量计校准[J]. 辐射防护通讯, 2003, 23(4): 1-15.  
LI Jingyun. Calibration of beta dosimeter and personal dosimeter[J]. Radiation Protection Bulletin, 2003, 23(4): 1-15(in Chinese).
- [3] ISO 6980-3—2006(E) Nuclear energy-reference beta-particle radiation-Part 3; Calibration of area and personal dosimeters and the determination of their response as a function of beta radiation energy and angle of incidence[S]. [S. l.]: [s. n.], 2006.
- [4] PRUITT J S, SOARES C G. Calibration of beta-particle radiation instrumentation and sources [M]. Washington: National Bureau of Standard Special Publication, U S Government Printing Office, 1998.
- [5] 贾德林,戴光复,姜恩海,等.  $\beta$  射线致皮肤损伤剂量估算方法研究[J]. 中国辐射卫生, 2004, 13(2): 81-82.  
JIA Delin, DAI Guangfu, JIANG Enhai, et al. Studies on methods of dose estimation for skin injuries from  $\beta$  irradiation [J]. Chin J Radio Health, 2004, 13(2): 81-82(in Chinese).
- [6] 耿建华,陈英茂,陈盛祖.  $\beta$  放射性核素辐射源的吸收剂量点核函数[J]. 核技术, 2003, 26(10): 789-794.  
GENG Jianhua, CHEN Yingmao, CHEN Shengzu. Absorbed dose point kernels of beta ray source[J]. Nuclear Techniques, 2003, 26(10): 789-794(in Chinese).
- [7] 方杰. 辐射防护导论(初版)[M]. 北京: 原子能出版社, 1988: 120-135.
- [8] ICRU. Dosimetry of external beta rays for radiation protection, ICRU report 56-20014[R]. Washington DC: ICRU, 1997.