

# 重离子加速器的次级辐射和天空反照

朱连芳 苏有武 陈学兵

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

**摘要** 综合了近年来发表的重离子加速器次级辐射的估算方法和测量结果,给出了重离子加速器天空反照剂量分布的估算方法.

**关键词** 重离子加速器 最大次级辐射 天空反照

## 1 引言

由于带电粒子与物质相互作用时,除本身会造成被照物质的辐射损伤外,产生的次级辐射种类繁多,能区很宽,贯穿力很强,这是造成工作人员、周围环境和居民辐射危害的主要来源<sup>[1]</sup>.重离子加速器是一种大型辐射装置,重离子束流与各种靶材料的相互作用将产生强度极高的次级辐射.在确定了被加速粒子种类、最大能量、最大束流强度、束流输运效率和靶材料种类后,就可根据最具有代表性的核反应确定最大次级辐射的强度和能谱,并依此进行加速器屏蔽设计、空气活化产物浓度估算及环境影响的预评价.重离子加速器天空反照剂量分布是控制加速器周围居民剂量限值的主要依据.

## 2 最大次级辐射强度和能谱的确定

对低能重离子束与靶材料相互作用产生的次级中子的确定,人们已积累了部分实验数据,但对中高能重离子的实验数据报道的很少.为了估算中能以上重离子与靶相互作用的次级中子产额,人们往往利用积累颇多的轻粒子数据进行近似估算.

为了收集和利用已有的实验数据,Hi-ragama. H 等人<sup>[2]</sup>从1965年到1989年的13种杂志中,收集了20MeV以上的高能粒子屏蔽实验和理论估算的有关资料,列表给出了加速器类型、加速粒子的种类和能量、靶核及屏

蔽材料的组成和厚度、屏蔽设计的几何条件、实验结果及估算方法和所得各种参数.其中用带电粒子轰击厚靶生成次级中子、质子和 $\alpha$ 粒子的有关文献报道,仅在1984年以后才有所发现. R. A. Cecil 等人<sup>[3]</sup>对加速器产生的710MeV的 $\alpha$ 粒子轰击水、碳、铜和铅靶,及640MeV的 $\alpha$ 粒子轰击铅靶产生的次级中子能谱和角分布进行了实验测定.图1为710MeV的 $\alpha$ 粒子阻止在厚铅靶中所产生的大于给定能量 $T$ 的次级中子产额的能谱.该图可归纳出一个简单的经验公式,用来估算任何大于给定能量 $T$ 的次级中子总产额

$$Y[> T(\text{MeV})] = 2.35T^{-0.65} \quad (1)$$

这里 $Y$ 为每个 $\alpha$ 粒子所产生的能量大于 $T$ (MeV)的次级中子总产额.表1给出为每100个710MeV的 $\alpha$ 粒子阻止在各种厚靶中所产生的能量大于10MeV的总中子产额.

表1 每100个710MeV的 $\alpha$ 粒子产生的能量大于10MeV的次级中子数

靶种类	总中子数	朝前方向	
		$(0^\circ < \theta < 90^\circ)$	$(0^\circ < \theta < 180^\circ)$
水	52	48	4
碳	58	54	4
铜	51	44	7
铅	51	43	8

在该实验工作中还测定了3~300MeV能区的中子产额分布.在沿束流朝前方向 $0^\circ \sim 6^\circ$ 的立体角范围内出现约120MeV的峰值,在总的中子产额中占有重要的份额.同710MeV

的  $\alpha$  粒子相比, 640MeV 的  $\alpha$  粒子产生的次级中子具有类似的能谱和角分布, 但由于  $\alpha$  粒子能量的降低, 产额也降低约 20%。该实验测量的最大不确定度主要来源于实验室散射中子对本底的贡献。实验数据的总不确定度估计为 (9~13)%, 统计不确定度约 5%。用级联模型对  $\alpha$  粒子阻止在氧靶中次级中子产额的计算发现, 在朝前的方向上与对水靶的实验测定相一致。但计算结果比实验测定的结果要小。

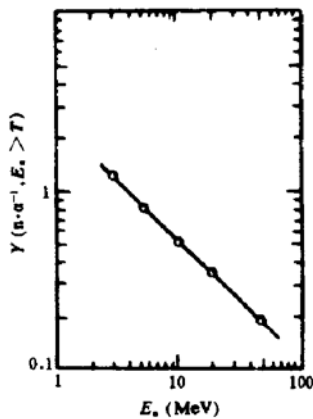


图1 710MeV  $\alpha$  粒子阻滞在 Pb 靶中产生的角度积分的中子产额

T. Kato 等人<sup>[4]</sup>利用 HETC/KFA-1 蒙特卡罗程序<sup>[5]</sup>计算了  $\alpha$  和质子阻止在厚靶中的次级中子能谱和产额。表 2 给出了计算结果。由表 2 可以看出, 当用同种入射粒子照射 Cu 和 Be 时, Cu 靶的总中子产额是 Be 靶的 1.8 倍, 即靶核愈重, 中子产额愈高, 但就级联中子与蒸发中子的比值而言, Be 靶大于 Cu 靶, 即轻靶中产生的次级中子高能组份偏多。当单核能为 500MeV 的  $\alpha$  粒子照射 Cu 靶和 Be 靶时, 总中子产额分别为 17.66 和 8.93, 如减去  $\alpha$  本身带有的二个中子, 则分别为 15.66 和 6.93, 而 500MeV 的 p 照射 Cu 和 Be 靶的总中子产额分别为 4.04 和 2.15, 不难看出, 相同单核能的  $\alpha$  和 p 阻止在同种厚靶中, 其次级中子总产额之比值接近于 4, 即接近于  $\alpha$  和 p 的质量数的比值, 这似乎显示构成入射粒子的核子, 在同靶核相互作用时, 彼此之间是独立无关的。因此轻粒子(如  $\alpha$  和 p)与靶核相互作用的次级中子产额的实验数据, 可以近似地应用于高能重离子与靶核相互作用的次级中子产额的估算, 这对高能重离子加速器的辐射屏蔽设计是很有用的。

表 2 各种能量的  $\alpha$  和 p 阻止在不同厚靶中的次级中子产额

入射粒子	能量 $E_0$ (MeV/u)	靶材料		中子产额(n/a 或 n/p)		
		种类	厚度(cm)	总产额	级联中子	蒸发中子
$\alpha$	100	Cu	2	0.74	0.33	0.41
$\alpha$	177.5	Fe	4.445	2.51	1.26	1.25
$\alpha$	225	Cu	10	6.73	3.12	3.61
$\alpha$	500	Cu	20	19.66	9.50	10.16
$\alpha$	500	Be	80	10.93	8.27	2.66
$\alpha$	600	Cu	30	26.30	12.67	13.63
$\alpha$	800	Cu	40	34.90	16.90	18.00
p	225	Cu	10	1.03	0.45	0.58
p	500	Cu	20	4.04	1.82	2.22
p	500	Be	80	2.15	1.54	0.61

Kazuo Shin<sup>[6]</sup>等人实验测定了 30MeV 的 p、33MeV 的 d、65MeV 的  $^3\text{He}$  和 65MeV 的  $\alpha$  粒子轰击厚靶时的次级中子和  $\gamma$  射线产额, 并将实测结果与理论计算<sup>[7]</sup>进行了比较。

R. A. Cecil 等人<sup>[8]</sup>实验测定了单核能 337MeV 的 Ne 离子阻止在 C、Al、Cu 和 U 靶中 25MeV 以上的次级中子生成截面和相应的中子倍增数。表 3 给出测量结果, 其不确定

度约10%。由表中可看出,随着靶核质量数的增加,高能次级中子的产额也相应增加。

表3 单核能为337MeV的Ne离子在U、Cu、Al和碳靶中产生的25MeV以上的次级中子能量和角度积分总截面

靶	截面 $\sigma(T>25\text{MeV})$ (bans)			总截面	中子倍增数
	估算值 (0°~30°)	测定值 (30°~90°)	估算值 (90°~180°)		
U	9.20	17.10	3.20	29.50	8.3
Cu	3.39	4.59	0.52	8.50	4.2
Al	1.60	1.80	0.15	3.55	2.4
C	1.09	1.03	0.06	2.18	1.9

Takashi Nakamura<sup>[9]</sup>对有关中子生成截面(薄靶产额和厚靶产额)、中子通过屏蔽体的传输过程和反应截面、中子和质子的活化及散裂截面等核数据的现状进行了分析和讨论,对实验数据和理论估算结果进行了比较。综合了用于加速器屏蔽设计所必须的基本核数据。作者认为,在现阶段,对20MeV以上的能量范围,核数据无论是在数量上或在精度上都是很不够的。JAERI(Japan Atomic Energy Research Institute)的Takasaki分所正在进行单能中子束的屏蔽和截面实验,以能提供和改善所必须的基本核数据。

### 3 重离子加速器的天空反照

“天空反照”(skyshine)来自于大气对于辐射的反散射。当加速器大厅屋顶未加屏蔽或屏蔽层很薄时,在加速器周围都可以观察到天空反照现象。H. Wade Patterson<sup>[1]</sup>认为能够产生大于 $10^9\text{n/s}$ 中子强度的加速器都必须考虑到屋顶的屏蔽问题。在居民人口密度较高的地区,考虑到居民年剂量限值 $1\text{mSv}$ ,尤其应作出天空反照的剂量评估。

1973年,R. H. Thomas<sup>[1]</sup>在总结和归纳大量实验数据的基础上,给出了估算加速器周围天空反照中子注量率分布的经验公式

$$\varphi(r) = \frac{a\theta}{4\pi r^2} (1 - e^{-r/\mu}) e^{-r/\lambda} \quad (r \geq 50\text{m}) \quad (2)$$

这里, $\varphi(r)$ 为中子注量率( $\text{n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ); $\theta$ 为

中子源强度( $\text{n}\cdot\text{s}^{-1}$ ); $r$ 为考察点距源的距离(m); $a$ 为常数,其值为2.8; $\mu$ 为线减弱系数,其值为56m; $\lambda$ 为减弱长度,其值为267m。

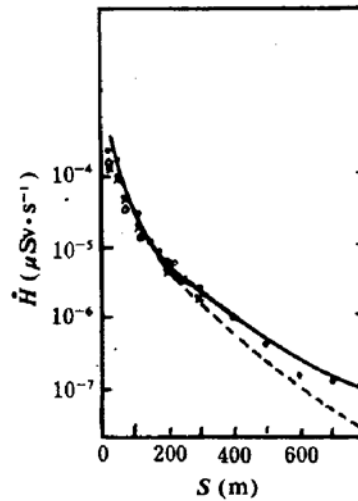


图2 电子同步加速器天空反照实验中测量和计算的中子剂量随距离S分布的测量值和计算值比较

•用大BF<sub>3</sub>计数器测定, ◦用雷姆仪测定, x用B圆柱体测定, —公式估算, --忽略14MeV以上的次级子公式计算

然而由于通过加速器屏蔽产生的次级中子能谱是连续的,对于能量大于150MeV的中子,在空气中的作用长度可达1000m。因此(2)式中给出的系数值仅适用于次级中子能谱中的低能组份(平均能量1.3~4.0MeV之间),对高能组份必须对系数值进行相应的修正。Thomas认为,利用(2)式进行剂量率的估算和屋顶屏蔽的设计是可行的。

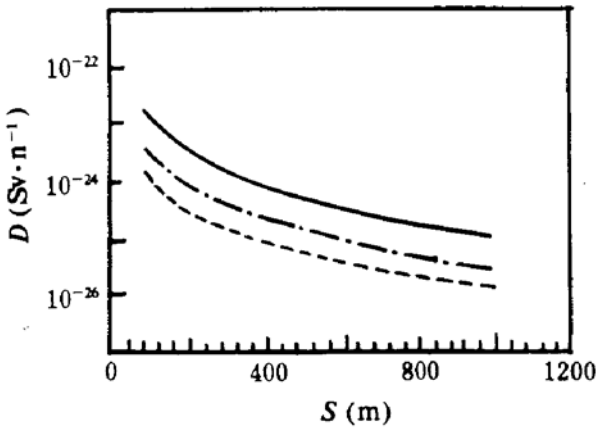


图3 不同温度和湿度状态下,终端站 A 天空反照中子当量剂量随距离 S 的分布  
 — 干空气; - · - 45%水, 74°F; --- 100%水, 100°F

1985 年, Katsumi Hayashi 和 Takashi Nakamura 给出了适用于高达 400MeV 的次级中子及伴生  $\gamma$  射线的天空反照剂量分布

$$D_n(r) = \frac{\theta_n(E_s, \theta_s)}{r} \exp\left[-\frac{r}{\lambda_n(E_s, \theta_s)}\right] \quad (3)$$

$$D_\gamma(r) = \frac{\theta_\gamma(E_s, \theta_s)}{r} \exp\left[-\frac{r}{\lambda_\gamma(E_s, \theta_s)}\right] \quad (4)$$

式中,  $D_n(r)$  为源中子的总剂量 (Sv/n);  $D_\gamma(r)$  为源中子产生的次级  $\gamma$  射线总剂量 (Sv/n);  $r$  为考察点距源的剂量 (m);  $E_s$  和  $\theta_s$  为源中子的能量和出射角;  $\theta_n(E_s, \theta_s)$  的定义为  $\theta_n = \lim_{r \rightarrow 0} r D_n(r)$ ;  $\theta_\gamma(E_s, \theta_s)$  的定义为  $\theta_\gamma = \lim_{r \rightarrow 0} r D_\gamma(r)$ . (3) 和 (4) 式适用于从热中子到 400MeV 的高能中子的能量范围. 实验测定结果可以看出, 在 100m 到 2km 的范围以内, 固定在地面或地面上 15m 处的源中子的天空反照剂量和伴生  $\gamma$  射线剂量分布都和 (3) 及 (4) 式的计算结果相一致. 对裂变中子、聚变中子和加速器次级中子这三种类型的源中子进行了天空反照实验测定, 图 2 给出电子同步加速器次级中子天空反照实验中中子剂量分布的测定值和计算值的比较. 和 (3) 及 (4) 式的计算相比, 误差均在 30% 以内. 因此其对各种核装置的屏蔽设计都是有用的.

Raikos Sun 对 Lawrence Berkely Labo-

ratory 的连续电子加速装置终端站的中子天空反照进行了理论估算和实验测定, 发现终端大厅内的空气湿度和温度对天空反照中子剂量有明显影响. 图 3 给出不同空气温度和湿度状态的中子剂量分布. 由图可以看出, 空气湿度增加, 中子剂量降低, 这可能由于空气中更多的水分子散射的结果.

#### 4 结束语

重离子加速器的最大次级辐射, 又称之为最大次级辐射输出量, 是重离子加速器辐射屏蔽设计的主要依据, 是决定加速器环境选址、平面布局、辐射分区等必须考虑的重要因素. 加速器次级中子的天空反照剂量分布是进行加速器屏蔽设计和环境剂量评估的重要依据. 准确估算最大次级辐射输出量和天空反照剂量, 是加速器辐射防护设计必不可少的前期准备工作, 这也是国家管理部门进行审批的主要依据之一.

#### 参 考 文 献

- 1 Wade Patterson H, Thomas Ralph H. Accelerator Health Physics, Academic Press New York and London, 1973.
- 2 Baro Hiragama H, et al. KEK-90-18, Dec. 1990, 48
- 3 Cecil R A, et al. Physical Review C, 1980, 21(6):2471
- 4 Takashi Kato, Takashi Nakamura. Nucl. Instru. Method, 1992, A311:548
- 5 Cloth P, et al. Jul-Spez-196, 1983
- 6 Kazuo shin, et al. Phys. Rev., 1984, 129(4):1307
- 7 Armstrong T W, Colborn B L. Nucl. Instru. Method, 1980, 169:161
- 8 Cecil R A, et al. Phys. Rev. C, 1981, 24(5):2013
- 9 Takashi Nakamura. Japan Atomic Energy Research Inst., Tokyo (Japan), May. 1990 719
- 10 Katsumi Hayashi, Takashi Nakamura. Nuclear Science and Engineering, 1985, 91:332
- 11 Sun Rai-Kas. LBL-31150, Dec. 1991

(下转第 50 页)

屏蔽和顶部屏蔽后,实验大厅就无需很厚的屏蔽墙.这将大大节约用于屏蔽的经费开支.

### 参 考 文 献

- 1 Patterson H W, et al. Accelerator Health Physics, Academic Press, Inc., 1973
- 2 李桂生等.原子能科学技术,1991,25(3):8
- 3 李桂生.原子能科学技术,1992,26(2):15
- 4 李桂生.核技术,1992,15(1):13
- 5 李桂生.核技术,1992,15(2):84
- 6 NCRP Report 1977,51
- 7 Cecil R A, et al. Phys Rev., 1981,C24:2013
- 8 李桂生等.高能物理与核物理,1993,6:499
- 9 李桂生.核技术,1993,16(6):370
- 10 李桂生,王经等.核化学与放射化学,1993,15(4):1

## Overhead Shielding of Small Experimental Area for Intermediate Energy Heavy Ion Reaction

Li Guisheng

(*Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000*)

**Abstract** Based on considering the skyshine and the distribution of neutrons emitted from the reaction of  $100\text{MeV/u } ^{12}\text{C}+\text{Cu}$ , the concrete shielding thickness of overhead shielding of the small experimental area in the physical experimental hall is calculated, which would be about 1.1m.

**Key Words** intermediate energy heavy ion reaction small experimental area skyshine neutron overhead shielding

(上接第54页)

## Secondary Radiation and Skyshine from Heavy-ion Accelerators

Zhu Lianfang Su Youwu Chen Xuebing

(*Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000*)

**Abstract** Estimating methods and measuring results of maximum intensity of secondary radiation from heavy-ion accelerators are summarized. Estimating methods of skyshine dose distribution of secondary radiation from heavy-ion accelerators are given.

**Key Words** heavy-ion accelerators maximum intensity of secondary radiation skyshine