

天 空 反 照

郑 华 智

早在四十年代建造初期的加速器时，就在四周建筑了相当厚的屏蔽墙，但是屏蔽墙外仍发现有出乎意料的辐射场，其强度之大远远超过预计水平。到1950年才认识到这个辐射场是由于加速器没有顶部屏蔽或者太薄，中子和 γ 辐射到天空后，由空气散射反射下来产生的。这种现象也因此得名——天空反照，其影响范围可达距放射源千米以外。同样，地层对辐射也有反照现象，但比空气反照弱得多。在辐射防护的实际工作中，地层反照一般是空气反照的再反照，因此可以统称为天空反照。实际上，它不仅包括空气反照、地层反照，还包括了周围建筑物的散射。放射源周围某一点的天空反照剂量是指放射源的辐射经过各种途径（空气、地层、建筑物等）散射到达该点的剂量总和。

天空反照现象的发现，引起了人们的注意。几十年来，先后在十几个加速器和反应堆上做过实验研究。其中英国卢瑟福实验室在低能直线加速器上做的实验很能说明问题^[1]。该实验室周围是平坦的开阔地，靶室四周有混凝土屏蔽墙，顶部敞开。他们用50 MeV质子轰击厚铝靶，在束流正前方测量中子剂量当量率与测量点和屏蔽墙之间距离的关系，还观察了屏蔽墙的厚度和高度的影响，结果示于图1。

由图可以看到，当墙厚从0.9米(3英尺)增加到1.5米(5英尺)时，剂量率没有太显著变化，从而表明测量点的中子主要来源于天空反照，这又由1.5米墙内部与其外表面剂量当量率的比较所确认，墙内0.9米深处中子剂量当量率比外表面还少1%。图1还揭示了上张立体角的影响和屏蔽墙的阴影效

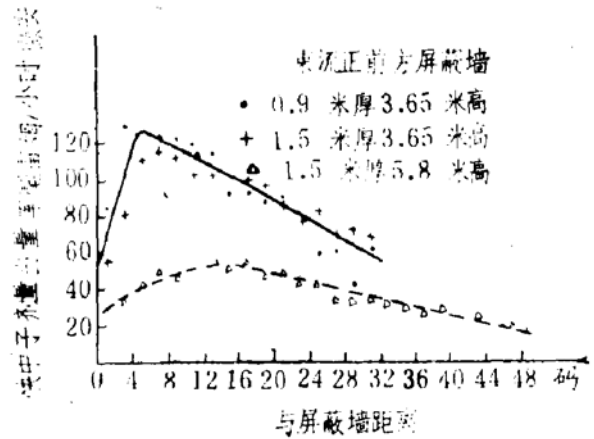


图1. 50MeV质子轰击铝靶时天空反照的中子剂量当量率与距离的关系

应。随着墙高的增加，剂量率显著降低，最大剂量点位置移远了。在这个加速器上测量出的天空反照剂量当量成分如下：

快中子 (平均能量 $\sim 0.5\text{MeV}$)	90%，
γ	10%，
慢中子	1%。

在屏蔽良好的CERN 28GeV质子同步加速器上，距离500米处，用热释光剂量计测得中子剂量当量率约为10毫雷姆/年，而 γ 剂量当量率要小十多倍^[2]。

许多实验表明，对一般加速器，上述成份的大致比例有普遍意义。在质子加速器、重离子加速器、甚至一些较高能量的电子加速器中，天空反照剂量的主要成份都是中子，其能谱分布在热中子和加速粒子能量之间，但对剂量起决定性作用的是0.1~10MeV部分。例如，一个3GeV质子同步加速器，随着与加速器距离的增加，天空反照的中子平均能量略有硬化，从几米处的0.45MeV逐渐增加，到一公里处为1.2MeV。这是因为加速粒子与核靶发生核反应时，释放出的中子常常以低能居多，例如蒸发中子，平均

能量只有几MeV。另一个重要原因是高能中子反散射截面较小,并且经过散射,能量逐渐降低。当然,在某些高能加速器上,高能中子的贡献也是不能轻视的。关于 γ 辐射,在某些电子加速器上可以起主要作用。在屏蔽不足的离子加速器上,对环境也会有一定影响。我国一台600KV高压倍加器,性能提高后,原屏蔽显得不足,在两百米外,还能测量到 γ 天空反照的影响。有趣的是,上述剂量当量成分比例不仅天空反照如此;就是一般低中能加速器(电子加速器除外),距机器稍远处,直接辐射的成份也都如此,屏蔽良好的墙外贯穿谱也是如此。因为都是射线与物质作用的结果。在有些情况下,对中能中子应该给予特别注意。

为了深入了解天空反照现象,美国橡树岭实验室把加速器提升到34米高的空中,利用氘-氘反应,产生14MeV中子,测量在空气中的传播,探测器距地面的高度在0.2~21米范围内变化,而与中子源的距离保持恒定^[1]。图2(略)给出了布局示意图和测量结果。可以看到,从上面来的中子剂量与探测器位置关系不大,而从下面来的中子剂量随探测器的升高而增加,这显然是地面吸收的影响。测量结果反映出地层的反照也是不容忽视的。图中的实线是根据“首末碰撞模型”的计算结果。模型假定,地层影响主要发生于放射源附近的第一次碰撞和探测器附近的最后一次碰撞。计算结果与实验符合良好。

天空反照的实验研究有许多困难。大距离处的反照很弱,受到了自然本底和仪器灵敏度的限制,周围地理环境条件很少令人满意。因此,寄希望在理论研究上。

首先是S. T. Lindenbaum根据中子的扩散理论,求解均匀空气介质内的扩散方程,考虑地面影响,做适当修正后推导出一个计算公式,与实验比较有两、三倍的误差。以后随着原子核物理参数的不断丰富,计算模型的不断改进,用蒙特卡罗法、两维离散座标

法在大型计算机上做了许多工作,并把计算结果列成图表^[3]。根据这些资料,可以较精确地计算出不同能量,不同上张立体角,不同顶部屏蔽,不同距离处的中子和 γ 的天空反照剂量当量。

在剂量防护的实际工作中,往往不需要十分精确,而是希望可靠和简单些。因此,中子的天空反照,可以用下面的经验公式来估算^[1,4]:

$$\phi(R) = \frac{aQ}{4\pi R^2} (1 - e^{-R/\mu}) e^{-R/\lambda},$$

$$R \geq 50 \text{米}.$$

式中 $\phi(R)$ 是距源R处天空反照的中子剂量率(中子数/厘米²·秒),Q是中子点源强度(中子/秒), $a = 2.8$, $\mu = 56$ 米, $\lambda = 267$ 米。

实验表明,一般加速器,例如30MeV、600MeV、3GeV、10GeV、30GeV的质子加速器,1.1GeV、4GeV的电子加速器产生的天空反照,都可用上式近似计算,其误差可以满足剂量防护的要求。在>50米时,与某些实验测量的分歧<5%。对很高能量的加速器,只要把空气中的衰减长度 λ 按实际值代入,仍可保持一定的精度。

若把 $f(R) = 4\pi R^2 \phi(R)/Q$ 作为天空反照的积累因子,那么它的特点是在110米处达到最大值1.6,在280米处回到1.0,然后指数衰减,衰减长度 $\lambda = 267$ 米。

从这里看到一个有趣现象,加速器产生的中子与反应堆裂变中子在空气中的衰减长度224米颇接近。这样裂变中子的天空反照也可用该经验公式估算。

这个经验公式简单可靠,得到了普遍的承认。近几年我国、日本、法国等新设计建造的加速器,就依据这个公式计算了天空反照对环境的影响,从而确定顶部屏蔽所需厚度。倘若用居民容许受照剂量率代入 $\phi(R)$,可得到监测区的半径和需要占地的参考面积。

关于 γ 的天空反照,文献[5]介绍了一个
(下转43页)

(上接40页)

简单通用的计算方法,借助所给的图表中的参数,可以容易地计算出不同情况下的 γ 天空反照剂量。

天空反照的工程防护是比较简单的,只要把加速器或放射源置于地下,或者在顶部加以足够的屏蔽就可以解决。但是对于所有强的中子源和 γ 源都不能忽视这个问题。当中子源强大于 10^9 中子/秒就需要适当的顶部屏蔽了。

参 考 文 献

[1] A. Rindi and R. H. Thomas, Par-

ticle Accelerators, 7, 23 (1975).

- [2] R. H. Thomas, The Radiological Impact of High-Energy Accelerators on the Environment, Lecture given at Kō Enerugi-Ken, Oho-Machi, Japan (1979).
- [3] R. G. Alsmiller et al., Particle Accelerators, 11, 131 (1981).
- [4] H. W. Patterson and R. H. Thomas, Accelerator Health Physics, p 437 Academic Press New York and London (1973).
- [5] 华旦,核科学与工程,第3卷第4期第366页(1983).