

应用 MORSE 程序计算中子的 天空反散射

吴靖民 孙岳

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

1994-03-09 收稿

摘 要

用中子源模拟粒子加速器,以 MORSE 程序分析计算由于天空反散射引起的中子剂量当量的变化规律,揭示了天空反散射的实质,计算结果可供加速器或核设施环境评价和防护设计使用。计算模型采用将中子源置于空心圆柱体中,圆柱体分为有顶盖屏蔽和无顶盖屏蔽两种情况。中子源能量分别为 2.38 MeV、14 MeV 和巨共振中子。中子源为各向同性。此外,还分析计算了不同的发射立体角和不同散射介质的影响。

关键词 MORSE 程序,粒子加速器,天空反散射。

1 引 言

粒子加速器是一台强辐射源,核辐射(主要是中子)从屏蔽体中泄漏,甚至在距加速器很远的地方都可以探测到比天然本底更高的辐射水平。其辐射一部分来自从顶部逸出经大气反散射的中子,通常称为“天空反散射”(Skyshine),另一部分则直接来自中子的贯穿辐射。

寻求粒子加速器和核设施周围天空反散射的分析表达式,是当今辐射防护的重要课题之一,这在高能加速器上尤为突出。早在五十年代,保健物理学家们就关注天空反散射问题,并进行了大量的理论和实验研究,在早期建造的高能加速器周围都进行过天空反散射的测量,从而积累了不少的实验数据和提出一些经验公式。然而,迄今为止,尚未进行完善的理论分析工作。

Rindi 和 Thomas^[1] 对以往天空反散射的认识做了如下归纳:

- (1) 辐射强度随着距离的增加至少按平方反比的规律减弱;
- (2) 距加速器很远的地方,辐射场中主要成分是中子;
- (3) 对于能量为 GeV 级的高能加速器,当它具有足够厚的屏蔽体时,中子通过屏蔽体后其能谱是平衡的。而对于低能加速器,或者缺乏足够厚顶部屏蔽的加速器,则随着距离的增加,中子能谱趋于硬化。

(4) 经验表达式

$$\Phi(r) \approx \frac{aQe^{-r/\lambda}}{4\pi r^2}$$

是一个简单而又能较确切表达天空反散射注量的公式,它几乎适用于大部分加速器。式中 a 为常数, Q 为相当的中子源强, r 为讨论点至源(或加速器)的距离。从大量实验求得大气衰减系数 λ 在 267 m 与 850 m 之间。

上述两位学者还指出:当今,由于对核装置周围居民所受的剂量更为关注,如果要完成环境影响的评估,而它又为政府官员所采纳,那么这种评估就应该是尽可能的精确。纵然天空反散射所产生的公众剂量非常非常小,也应该认为用较粗的方法来保守估计居民剂量是不明智的。所以必须要获取较为精确的天空反散射数据。

用实验来评估天空反散射并不那么容易。原因之一是在大距离处进行可靠的测量有困难,那里的辐射水平与天然本底相当;二是在不同的加速器上采用不同的测量方法,难以获得统一的结论。所以在文献中所提出的结论往往各不相同。

Stevenson^[2] 曾提出用计算机程序(如 ASPIC)来计算天空反散射是行之有效的办法。本文应用低能中子源来模拟加速器或其它产生强中子源的核设施,用 MORSE 程序计算中子的天空反散射。其结果可用于加速器或其它核设施环境影响的评估和防护设计。

2 MORSE 程序简述

MORSE (the Multigroup Oak Ridge Scholastic Experiment) 程序是一种多功能的描述中子和 γ 射线迁移行为的编码。它用蒙特卡罗技术解低能 (≤ 20 MeV) 粒子的波尔兹曼迁移方程^[3]。

MORSE 程序按下列步骤进行:

- (1) 选定一个源粒子;
- (2) 确定作用截面及发生碰撞前的距离,然后按迁移方程进行计算;
- (3) 如果粒子在系统内迁移,且在同一介质中发生作用,则将粒子迁移至一个新的位置,得到新的能量、方向和数值,遂将参数储存,再进行步骤(2);
- (4) 如果粒子迁移出本系统,则将粒子迁移至边界,在边界处得到一个新粒子,再按步骤(2)进行;
- (5) 如果总的迁移距离越出本系统而发生在另一作用截面的介质里,则将粒子分别迁移至介质的边界,再按步骤(2)进行。

对每一组共计算 10^5 个粒子。

以下叙述粒子注量的估算。一般情况下,粒子注量是空间位置、能量、时间和方向等参量的函数。实际应用中仅要求注量是空间位置和能量的函数。在 MORSE 程序中有四种计算粒子注量的方法,这里阐述常用的一种方法,称为“统计估算法”,它尤为适用于深部贯穿问题。

注量由两部分构成:其一为非碰撞效应,代表源和生成的粒子。其二为碰撞效应,表

示所有散射的粒子离开碰撞的区域。对非碰撞粒子项假设所有源和生成的粒子都具有各向同性的特性,可写作:

$$\Phi(E, r)_{uc} = \sum_{j=1}^N \frac{e^{-\Sigma_t(E)|r_j-r|}}{4\pi|r_j-r|^2} \cdot \frac{W}{M},$$

式中 W 为源或生成粒子的数值; r_j 为源或生成粒子的坐标; r 为探测器的坐标; $\Sigma_t(E)$ 为总截面 (cm^{-1}); N 是能量为 E 至 $E + \Delta E$ 的全部源和生成粒子总和; M 为源粒子总数。

碰撞粒子项可写作:

$$\Phi(E, r)_c = \sum_{j=1}^N \frac{g(E' \rightarrow E, Q' \rightarrow Q) e^{-\Sigma_t(E)|r_j-r|}}{|r_j-r|^2} \cdot \frac{W}{M},$$

式中 $g(E' \rightarrow E, Q' \rightarrow Q)$ 是能量为 E' 、方向为 Q' 的粒子散射至能量为 E 、方向为 Q 的几率; 方向是从粒子指向探测器; N 为碰撞粒子的总数; W 为产生粒子的数值, 在天空反散射计算中只考虑碰撞粒子项。在算得中子能谱后, 可以求得相应的中子剂量当量:

$$DE = \sum_{j=1}^N \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \frac{\Phi_j(E)}{g_j(E)} \cdot dE,$$

式中 $\Phi_j(E)$ 是能量为 E 至 $E + dE$ 间的粒子注量; E_{\max} 和 E_{\min} 分别为相对的最大和最小能量限值; $g_j(E)$ 是中子注量转化为剂量当量的转换因子, 单位为 $(\text{n}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec})(\text{mSv}/\text{h})^{-1}$ 。

3 计算模型

3.1 几何模型

MORSE 程序计算中采用的几何模型如图 1 所示。中子源安置在空心的混凝土圆柱中。圆柱体分无顶盖和有 15 cm 混凝土顶盖两种情况。无顶盖时, 在中子源的上方距地面 8 m 处有一小块吸收体, 它能完全吸收中子。圆柱体内径 3 m, 高 9 m, 壁厚 30 cm, 假设混凝土密度很大, 以致中子无法从侧面贯穿, 但要考虑中子在圆柱体内壁的散射。这样中子只能向上辐射通过介质散射到达探测点。圆柱体外为混凝土地面, 厚 30 cm。顶盖和地面为普通混凝土, 其密度为 $2.3\text{g}/\text{cm}^3$ 。

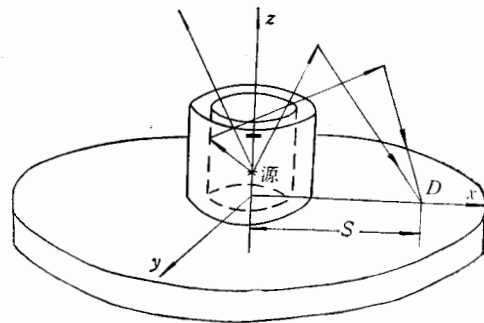


图 1 MORSE 计算几何模型

散射介质为均匀的空气或水蒸汽。散射体为正圆柱体, 在散射体边界处中子完全被吸收, 即中子数为零。

3.2 中子源

对于具有足够屏蔽厚度的高能加速器, 中子通过屏蔽体后的能谱达到平衡, 它类似于

宇宙射线谱,其平均能量为 2.38 MeV。在电子加速器中,光子能量低于 50 MeV 时,光致蜕变过程在“巨共振”区域内占主导地位。巨共振中子的能量为几 MeV,共振的宽度从 4MeV 到 8 MeV (最大值一半处的全宽度)。此外,在粒子加速器的 $D(d,n)T$ 反应中,产生 14 MeV 中子。所以,中子源能量分别选为 2.38 MeV、14MeV 和巨共振中子三种,可代表典型加速器及一般核设施的中子,并假定中子源是各向同性的。

中子源位于混凝土圆柱的轴线上 ($x=0, y=0$), 离地面 1 m。为比较中子源不同发射立体角的散射效应,用改变中子源的高度来实现,也可以同时改变源的高度和圆柱的内径来实现。

3.3 散射介质

在天然本底的监测中,本底值受气候(如雨、雪等)的影响。为比较不同介质对散射的影响,计算中采用空气、水蒸汽(湿度为 100%)以及空气和水蒸汽的混合体作介质。

3.4 探测器的位置

探测器和源的距离,从 50 m 直至 1000 m,探测器距地面高度为 1m。

4 计算结果与分析

4.1 中子剂量当量的变化

对于不同能量的中子源,无论是顶盖有屏蔽还是无屏蔽,中子剂量当量随距离变化的规律都十分类似,图 2 表示 2.38 MeV 中子剂量当量 D 随距离 S 的变化规律。正如 Rindi 和 Thomas^[1] 指出的,无论是质子加速器还是电子加速器,也无论是高能加速器或低能加速器,其中子注量随距离的变化都非常相似。这是因为具有足够厚屏蔽的加速器,其泄漏中子的能量类似宇宙射线谱,以低能中子(几 MeV)占主要成分。MORSE 程序计算结果揭示了随着距离的增加,中子能量逐渐减小,在远距离处,剂量当量中主要成分是几 MeV 的中子。所以都呈现同一衰减规律。这就是天空反散射的实质。

正因为如此,保健物理学家们才有可能寻得适用于各类加速器的经验公式。如 Lindebaum^[4] 提出两个经验公式:

$$\Phi(r) \sim 1/r^2, \quad (1)$$

和

$$\Phi(r) \sim \frac{a}{4\pi r^2} e^{-r/\lambda}. \quad (2)$$

Rindi 和 Thomas^[1] 在综合某些经验公式的基础上,提出

$$\Phi(r) = \frac{aQ}{4\pi r^2} (1 - e^{-r/\mu})e^{-r/\lambda} \quad (r \geq 5 \times 10^3 \text{cm}), \quad (3)$$

式中系数 $a = 2.8$, $\mu = 5.6 \times 10^3 \text{cm}$, $\lambda = 2.67 \times 10^4 \text{cm}$, Q 为相对中子源的强度。公式(1)仅表示随距离的平方成反比规律减弱。而公式(2)和(3)则考虑了大气的散射和吸收。

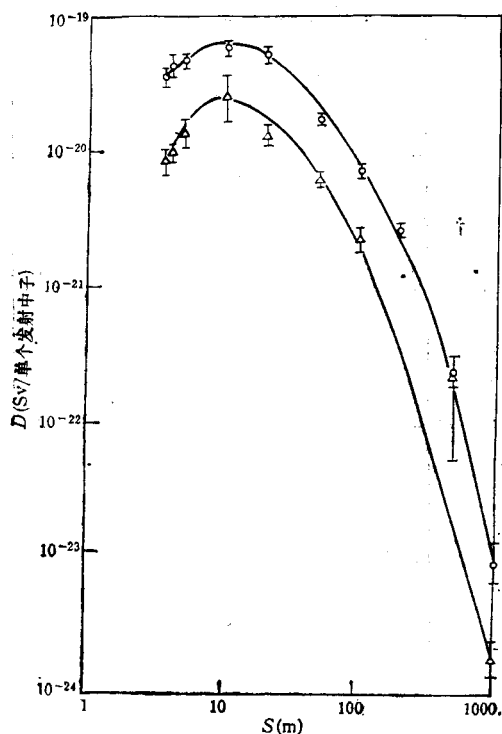


图 2 中子剂量当量 D 随距离 S 的变化
($E_0 = 2.38\text{MeV}$)
○ 无顶盖; Δ 有顶盖屏蔽。

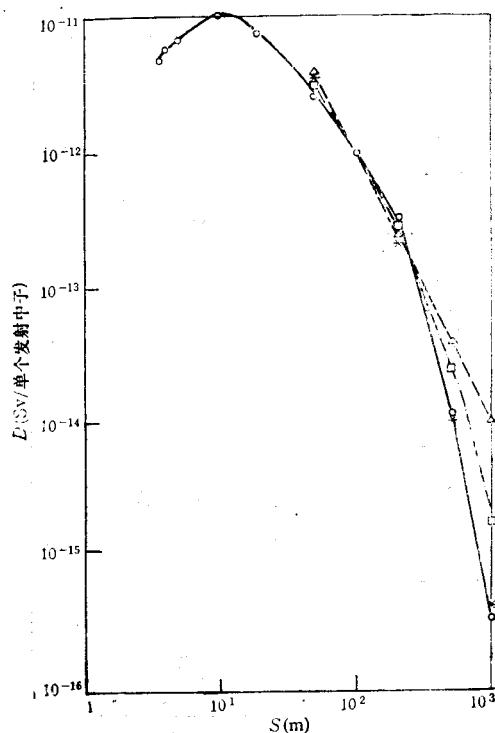


图 3 MORSE 计算与经验公式的比较
○—morse 计算; Δ — $\Phi(r) \sim 1/r^2$;
 \square — $\Phi(r) \sim \frac{1}{r^2} e^{-r/\lambda}$; *— $\Phi(r) \sim \frac{1}{r^2} (1 - e^{-r/\lambda}) e^{-r/\lambda}$ 。

仍以 2.38MeV 的中子源为例。将 MORSE 程序计算结果与上述三个经验公式相比较,并以距源 100m 处为归一点,其结果示于图 3 中。可以看出,除公式(1)之值略高外,其它三个值在 $50\text{—}500\text{m}$ 范围内较好地吻合,尤以公式(3)符合得更好。可见天空反散射剂量至少按距离的平方成反比的规律减弱。

若将 MORSE 程序计算结果与公式(3)进行拟合,则可求得衰减数 $\lambda = 2.86 \times 10^4\text{cm}$,与公式(3)之 $\lambda = 2.67 \times 10^4\text{cm}$ 甚为接近。

在加速器辐射对环境影响的评估中,最感兴趣的是在 $50\text{m—}1000\text{m}$ 范围。因此如果采用经验公式(3)并应用 MORSE 程序计算的 λ 值,则既简单又实用。

4.2 中子源发射立体角的影响

为研究中子源发射立体角的影响,分别计算了两种情况:一是将源置于同一圆柱体内,改变源所在高度以获得不同的立体角;二是同时改变圆柱体的内径和源所在的高度,而保持相同的立体角。最后将源的高度归一到 1cm 处,以便比较。在这里中子源仍为各向同性点源。

图 4 显示 14MeV 中子源发射立体角的影响。可以看到,天空反散射剂量当量计算值随发射角的增加而增加,这是因为天空反散射中子来自两部分,一部分为发射立体角内

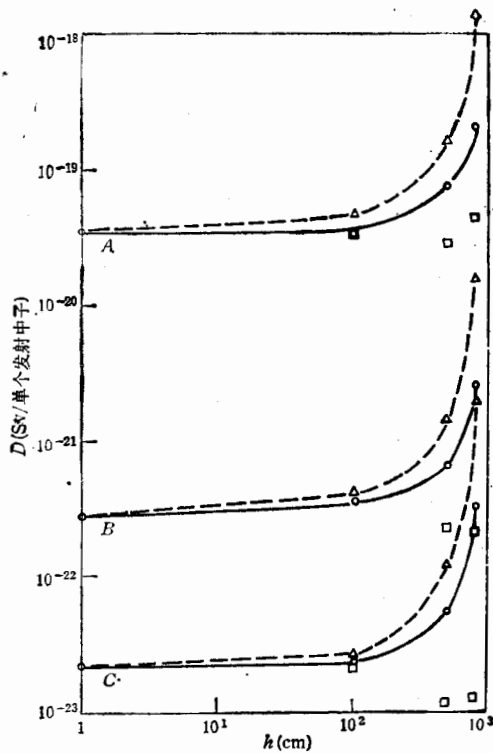


图4 中子剂量当量 D 随源高度 h (发射立体角) 的变化 ($E_0 = 14 \text{ MeV}$)

曲线 A、B、C 分别为探测器距源 50 m、500 m 和 1000 m。

- △ 假设剂量当量正比于发射立体角；
- 中子源在不同高度时的计算值；
- 相等的发射立体角。

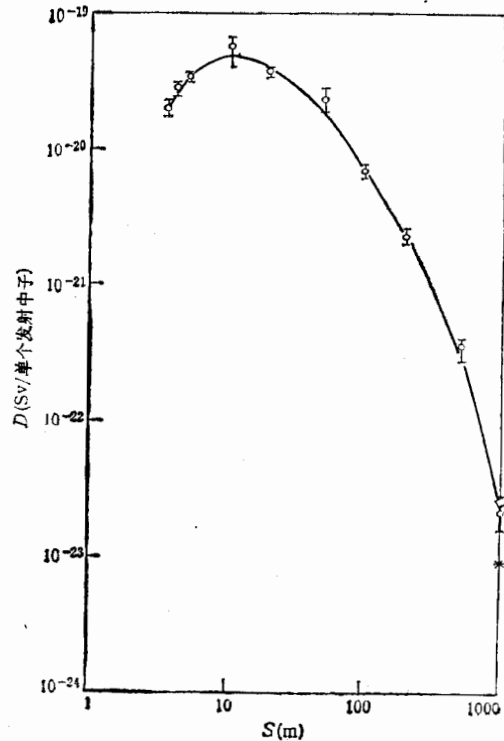


图5 散射介质对天空反散射的影响 ($E_0 = 14 \text{ MeV}$)

○ 空气； * 水蒸汽； ◇ 空气与水蒸汽混合物。

所包含的中子,另一部分则来自发射立体角外,通过圆柱体内壁反散射的中子。前者与发射立体角成正比,后者的贡献随发射立体角的增加,反而减小。所以,总效益应小于成正比增加的关系。

在通常的天空反散射计算中,都假定剂量当量与源发射的立体角成正比。MORSE 计算表明,这种假设是偏于保守的。

图中“□”表示相等发射立体角的情况,按理这些值应保持水平才是,然而图中显示的却是在源离地面较高时,剂量当量较低,其原因是由于地面散射的贡献。因源距地面越高,散射引起的贡献越小,对此, McCaslin^[9] 作了详尽的讨论。

4.3 散射介质的影响

计算中采用三种散射介质:空气、水蒸汽(湿度为100%)以及空气和水蒸汽的混合物。图5表示14 MeV中子距源1000 m处剂量当量的变化。可见介质对散射无明显影响。这就可以排除因气候而影响天空反散射测量的干扰。

5 结 论

(1) MORSE 计算揭示了天空反散射的实质,即不同能量的中子,通过大气多次散射后,在远处的剂量当量成分中,主要是几 MeV 的中子,它们呈现出相同的减弱规律。因此,无论是质子加速器还是电子加速器,也无论是高能加速器还是低能加速器,以及其它产生强中子源的核设施,其从顶部泄漏的中子,经天空反散射后,剂量当量的贡献都以几 MeV 中子为主。所以,其衰减规律也相同,并比距离平方成反比规律减弱得更快。

(2) 随着发射源立体角的增加,天空反散射剂量当量也随之增加,但小于成正比例增加。

(3) 散射介质的湿度(如雨、雪、云雾等)对散射的影响很小。

(4) 利用经验公式(3)和 MORSE 计算的 λ 值 ($2.86 \times 10^4 \text{cm}$) 可以简便而有效地计算天空反散射。

本工作是在美国斯坦福大学斯坦福直线加速器中心 (SLAC) 完成的。作者衷心感谢该中心 T. M. Jenkins 教授和加利福尼亚大学劳伦斯贝克莱实验室 (LBL) J. B. McCaslin 教授给予指导和帮助。

参 考 文 献

- [1] A. Rindi, R. H. Thomas, Skyshine-A Paper Tiger: Particle Accelerators. Vol. 7, pgs. 23—39 (1975).
- [2] G. R. Stevanson, Estimation of Radiation Intensities at Large Distances from Loss Areas. CERN, Lab II, Internal Document RA/note 72-10, June 14, (1972).
- [3] T. A. Gabriel, The Methods and Applications of Monte-Carlo in Low Energy ($\leq 20\text{MeV}$) Neutron-Photon Transport (MORSE) Computer Techniques in Radiation Transport and Dosimetry by W. R. Nelson, T. M. Jenkins. New York and London, 1980.
- [4] H. Wade Patterson, R. H. Thomas, Accelerator Health Physics. Chapter 6, pgs. 437—443. Academic Press, New York and London, (1973).
- [5] J. B. McCaslin, Effect of Neutron Scattering on the Calculation of Moderated BF_3 Detectors, Health Physics Note #57. December (1976).

Use of MORSE Program to Calculate Skyshine

Wu Jingmin Sun Yue

(Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Received 9 March 1994

Abstract

The neutron dose equivalent produced by skyshine was calculated using MORSE program. For these calculations, the neutron source was enclosed in a hollow concrete cylinder. There were two cases, one was the cylinder with concrete roof shielding, the other was without a roof. The source energies of 2.38 MeV, 14 MeV and giant resonance (G. R) neutron were calculated separately. We have compared the effects of different models, such as different source emission solid angle and different scattering media. The results can be applied for the estimation of radiological impact to environment and the design of radiation protection on the particle accelerators and other nuclear facilities.

Key words MORSE program, accelerator, skyshine.