

重离子反应中子剂量学研究进展

李桂生

(中国科学院近代物理研究所)

随着国际上许多重离子加速器的陆续建成运转和重离子物理实验研究的发展,重离子反应中子剂量学研究已成为保健物理研究的重要课题。八十年代以来,保健物理学家所关心的重离子反应出射中子能谱、中子产额、中子剂量率、中子角分布、中子辐射屏蔽以及重离子反应中子多重性等许多方面的研究都取得了新的进展。

一、重离子反应出射中子能谱的研究和测量

重离子反应出射中子的能谱决定了出射中子的能量分布,而能量分布和角分布是重离子反应中子剂量学研究和中子辐射屏蔽计算的重要依据。因此,能谱研究和测量是重离子反应中子剂量学研究的基础性工作。

1976年,橡树岭国家实验室的 H. W. Bertini 等^[1]利用 Monte Carlo 方法在重离子反应是靶核和入射离子的单个核子之间的碰撞这一假设前提下,计算了 192 MeV、500 MeV、700 MeV 和 900 MeV ^{12}C 轰击 Fe 靶时不同角度上的出射中子能谱和部分质子能谱(图 1 给出了一个典型的计算谱)。这些计算表明,在各个方向上,能量高于入射单核能的出射中子都占有一定的比例。T. A. Gabriel 等人^[2]在 1973 年计算了 1.2 GeV ^{12}C 离子轰击 C 靶时的出射中子能谱,其中 20 MeV 以上的中子占出射总中子的 60% 以上,而 100 MeV 以上的中子约占 7%。

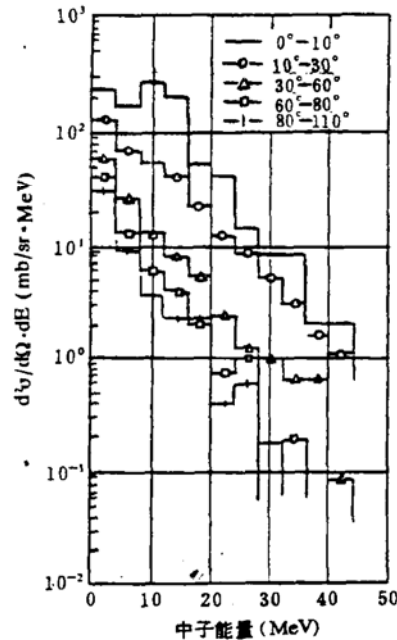


图 1 192 MeV $^{12}\text{C} + \text{Fe}$ 计算得到的中子谱^[1]

1979-1981 年期间,美国 LBL 和肯特州立大学物理系的 R. Madey, R. Cecil 和 W. Schimmerling 等人^[3,4,5]相继报导了他们用飞行时间法测量的 337 MeV/u Ne 离子轰击厚 C、Al、Ca 和 U 靶时 12 MeV 以上出射中子在 30°、45°、60° 和 90° 的能谱角截面。图 2 是 Ne+C 反应出射中子能谱角截面的典型结果。

这些测量表明,出射中子分为三个能区:① 低能蒸发区;② 反映核子内部动量分布的高能指数区;③ 反映准自由碰撞和预平衡过程的中能区。在前角方向上,中能区出现一个较为平坦的趋势,随着出射角度的增加,“平”区变得越来越不明显,在大角度处中能

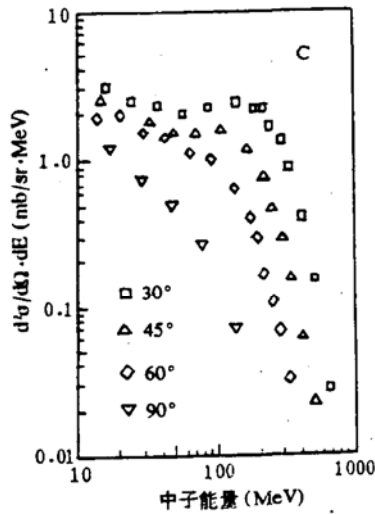


图2 337MeV Au Ne 轰击厚C靶时 30°、45°、60°和 90°的能谱角截面

区并入指数区,而在 90°处近乎消失。这是因为中能区包括了一些直接碰撞过程之故。从图 2 可以看出,C 靶的 30°谱在 150MeV 左右(稍低于入射单核能)有一很宽的峰,它是准自由核子-核子碰撞的反映。

此外,文献[4]还测量了上述重离子反应的中子与质子生成截面的比值。为了解释实验事实,他们的实验数据用火层模型(Fire-Streak model)和核内级联模型(Interanuclear-cascade model)进行了理论拟合,后者与实验结果符合得比较好。

二、重离子反应的中子产额和中子多重性的研究

重离子反应的中子产额和中子多重性是重离子反应中子剂量学研究的重要基本数据,它们决定了出射中子的强度,因此,也决定了中子屏蔽的厚度。总中子产额可以用下式计算:

$$Y = \int_0^R \Delta Y \cdot dt \quad (n/ion) \quad (1)$$

$$\text{其中 } \Delta Y = \iint_{4\pi} \frac{d\sigma}{d\Omega} \cdot d\Omega \cdot dE \cdot \frac{N_A}{A}$$

$$(cm^2 / g \cdot ion) \quad (2)$$

这里, N_A 是阿伏伽德罗常数, A 是靶核质量, R 是离子的射程。

低能区,E. L. Hubbard 等^[6]测量了 10MeV/u 左右的重离子轰击几种厚靶时的中子产额,得出下述基本规律:①中子产额随靶原子质量增加而增加,但在 Cu-Pb 靶的范围内,产额的变化不大;②中子产额随入射离子能量的增加而增加;③在能量相同的情况下,较轻重离子的中子产额高于较重重离子。

1979年,法国 Orsay 的 F. Clapier^[7]用雷姆计测量了 40-500MeV 重离子束轰击厚靶时的中子剂量率,并与轻离子的中子剂量率做了比较。在综合了文献[7-12]的基础上,给出了重离子反应中子产额的经验拟合公式^[13]

$$Y(\omega, Z) = C(Z) \omega^{\beta(Z)} \quad (13)$$

ω 是入射离子的单核能(MeV/u); $C(Z)$ 和 $\beta(Z)$ 是拟合参数

$$C(Z) = \frac{1.95 \times 10^{-4}}{Z^{2.75}} \exp(-0.475(\log z)^2) \quad (4)$$

$$\beta(Z) = 1.22\sqrt{Z} \quad (5)$$

F. Clapier 等的研究表明,低能区重离子反应的中子产额 $Y = 2 \times 10^{-5} - 10^{-3} n/ion$,比同样能量下的轻离子反应中子产额低 2-3 个数量级;能量相同的重离子,其中子产额的差别很大,但对入射单核能相同的重离子,其中子产额的差别就很小了;重离子反应的中子产额与入射离子在靶中的射程(能量)有关,与反应系统的库仑位垒有关。

1987年,Z. Y. Guo 等^[14]在 Oxford 核物理实验室 10 MV 串列加速器上完成了用单核能在 0.9-6MeV 的 14 种低能重离子束(^7Li , ^9Li , ^9Be , ^{10}B , ^{11}B , ^{12}C , ^{13}C , ^{16}O , ^{18}O , ^{24}Mg , ^{27}Al , ^{28}Si , ^{40}Ca 和 ^{58}Ni)轰击 12 种厚靶(Li, Be, C, 尼龙-66, Mg, Al, Ca, Ti, Ni, Cu, Mo 和 Au)的实验,系统地测量了各种弹-靶组合

下的中子剂量当量率和角分布,给出了中子产额、中子剂量当量率和角分布的参数拟合公式。反应总中子产额

$$Y = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} F(\theta_L) r^2 \sin\theta_L d\theta_L d\varphi$$

$$= 4\pi R^2 K_f \bar{D}$$

$$= 8.8 \times 10^4 \bar{D} \quad (n/s(p\mu A)) \quad (6)$$

式中, $F(\theta_L)$ 是中子通量密度 ($n/cm^2 \cdot s$); \bar{D} 是距靶 1m 处的中子平均剂量当量率 ($\mu Sv/h \cdot (p\mu A)$); $K_f \approx 0.7 \frac{h \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}}{\mu Sv \cdot h^{-1}}$ 。

该研究得出数十个产额数据,结果表明,中子产额强烈地依赖于入射离子的能量和质量,对给定的能量和离子种类而言,中子产额表现出对靶核 Z 值的依赖。

1982 年,LBL 的 R. Madey 等人^[19]进行了重离子反应中子多重性理论计算的尝试,给出了计算公式

$$M(T > T_0) = \sigma(T > T_0) / \sigma_R \quad (7)$$

$\sigma(T > T_0)$ 是动能 $T > T_0$ 的中子生成截面, σ_R 是总反应截面。337MeV/u Ne 离子轰击厚 C、Al、Cu 和 U 靶的中子多重性计算结果列于表 1。

表 1 337MeV/u Ne+C、Al、Cu、U 靶的中子多重性

靶	T_0 (MeV)	中子多重性 ($T > T_0$) (MeV)					
		0	15	25	50	100	200
U	14.4	8.5	6.8	4.4	3.2	1.8	
Cu	6.1	4.0	3.4	2.3	1.8	1.1	
Al	3.8	2.6	2.2	1.6	1.3	0.87	
C	2.5	1.8	1.6	1.2	1.0	0.70	

R. Madey、R. Cecil 和 W. Schimmerling 等人^[4,5]根据重离子反应能谱角截面的测量得到 337 MeV/u Ne 轰击厚 C、Al、Cu 和 U 靶 ($T_0 = 25$ MeV) 的中子多重性分别为 1.9、2.4、4.2 和 8.3。理论计算值略低于实际测量值。

此外,还有一些重离子反应中子产额和中子多重性的报导,如 100MeV/u ^{12}C 轰击 C 靶时的总中子产额是 0.39^[16], $T > 0$ 时的中子

多重性是 9.66^[17], 82MeV/u ^{12}C 轰击 Fe 靶的总中子产额是 0.23^[16], 135MeV/u ^{12}C 轰击 Fe 靶的总中子产额是 0.56^[18]。

三、重离子反应中子剂量当量率及其角分布.

当一台新的粒子加速器投入运行以后,首要的问题是测量加速器运行时的辐射剂量场分布和进行必要的屏蔽实验。对重离子加速器来说,最重要的是中子剂量场分布和中子屏蔽实验,因为比 γ 射线强得多的中子剂量不仅对运行人员和实验人员有害,而且对高灵敏度辐射探测器和其它精密设备造成威胁。了解辐射剂量及其分布不仅可以掌握各类人员接受辐照的程度,也有助于设置适当的屏蔽,做出合理的实验安排及保护精密仪器设备的安全。众所周知,西欧中心(CERN)、伯克利实验室(LBL)、布鲁克海文国家实验室(BNL)、卢瑟福实验室(RHEL)和劳伦斯实验室(LRL)早期曾做了大量的屏蔽实验,得到了大量有价值的数据^[19]。

1979-1983 年, F. Clapier 等^[7,13]在测量单核能 $\omega \approx 15$ MeV 重离子轰击厚靶的中子剂量当量率的基础上,提出了中子剂量当量率的参数拟合公式:

$$R(\theta, r, i, z, \omega) = Y(z, \omega) \frac{1}{7.2} i \frac{f(\theta, \gamma)}{r^2}$$

$$(mrem/h) \quad (8)$$

和角分布函数:

$$f(\theta, \gamma) = \frac{1}{4\pi} \frac{1}{\ln(1 + \frac{1}{\gamma})} \frac{1}{\gamma + \sin^2(\theta/2)}$$

$$(9)$$

式中, $Y(z, \omega)$ 为(3)式计算; i 是以每秒粒子为单位的重离子流; r 是以 m 为单位的靶距离; ω 是以 MeV/u 为单位的束流能量; γ 是拟合参数。

1980 年, W. F. Ohnesorge 等^[11]在橡树岭国家实验室(ORNL)测量了 147.6 MeV ^{14}N

离子轰击实验靶室后面的不锈钢束流阻止器时束流前向 $\sim 45^\circ$ 上调束人员所在位置、实验靶室外表面以及束流阻止器向后 $\sim 30^\circ$ 方向 1m 处的中子剂量当量率 (mrem/h)。结果指出, 剂量率随束流强度成正比例地增长。由于研究的靶核较少, 和 F. Clavier^[13] 一样, 没有足够的证据来确定中子产额(中子剂量率)对靶核 A 的明显依赖关系。图 3 是文献[13] 给出的低能重离子轰击 Fe、Ni 和 Cu 靶时, 在 90° 方向上 1m 处的中子剂量当量率。

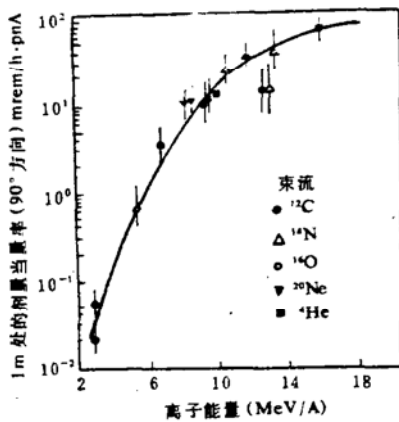


图 3 Fe、Ni 和 Cu 靶 90° 方向上 1m 处的中子剂量当量率

联邦德国 GSI 的 J. G. Festag^[10] 于 1980 年发表了单核能为 5-10MeV 的重离子反应距靶 1m 处中子剂量当量率和 $9.0\text{MeV}/u$ $^{238}\text{U} + \text{U}$ 反应的中子剂量当量率角分布(图 4)。结果表明, 中子剂量当量率随入射离子单核能增加而增加; 中子剂量当量率成明显的前冲分布, 0° 方向上的中子剂量当量率为 90° 处的 10 倍以上; 用活化法测得 20 MeV 以上的中子在 11MeV 以上中子总数中所占比例低于 $1/10$ 。这和文献(20-22) 的结论是一致的。

中子角分布的研究除文献[13] 给出了角分布函数外, 文献[14] 也给出了一个剂量率角分布的表达式:

$$D(\theta_L) = \bar{D} K_m e^{S\theta_L} \quad (10)$$

S 是 $\ln D(\theta_L) \sim \theta_L$ 曲线的斜率; K_m 是归一化常数; \bar{D} 是距靶 1m 处的平均剂量率:

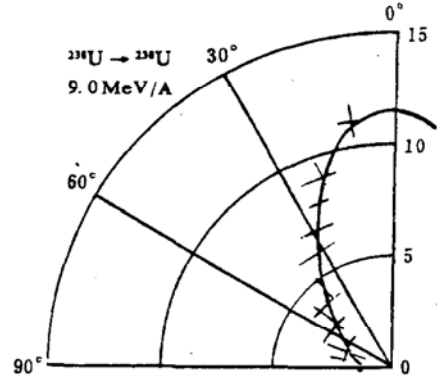


图 4 中子剂量当量率的角分布(任意单位)

$$\bar{D} = D_0 e^{mp} \quad \text{当 } p < 0 \text{ 时} \quad (11)$$

$$\bar{D} = \alpha^2 (P + \beta)^2 \quad \text{当 } p > 0 \text{ 时} \quad (12)$$

$$p = \frac{E_b - CB}{A_b}$$

式中, α 、 β 、 D_0 和 m 是拟后参数, E_b 是束流

能量; $CB = 1.44 \frac{A_b + A_t}{A_t}$

$$\frac{Z_b + Z_t}{(1.9 + 1.209(A_b^{1/3} + A_t^{1/3}))} \quad (\text{MeV})$$

是给定束-靶组合的库仑位垒。该研究表明, 几乎所有归一化角分布都是前向成峰的, 各向异性在低能重离子轰击轻靶时表现得最为明显, 而在低能轻离子轰击重靶时表现的不太明显。这和文献[13] 得出的结论是一致的。

四、重离子反应的中子辐射屏蔽

中子辐射的屏蔽是重离子反应中子剂量学研究的重要课题之一。文献[23] 已对国际上目前已运转的几台重离子加速器的中子屏蔽问题作了简要评述, 这里就不再重复。

在上述重离子反应中子剂量学研究成果的基础上, 可以得出一些初步结论:

1. 低能重离子反应的中子产额和中子剂量率与入射离子有关。在一定的束流能量下, 重离子反应的中子产额比轻粒子反应低 2-3 个数量级; 入射离子的单核能越高, 中子产额和中子剂量率越高。

2. 入射单核能一定时, 中子产额和中子剂量率随靶核质量的增加而缓慢地增加。

3. 重离子反应出射中子均为前向成峰分布, 高能重离子轰击轻靶时, 这种趋势尤为明显, 而低能轻离子轰击重靶时, 则相对地趋于各向同性。出射中子数随出射角增大而减小, 且高能中子比低能中子的减小更快。

4. 高能重离子反应出射中子的能谱角截面随出射角增加而指数下降, 中子总截面正比于入射离子和靶核半径之和的五次方; 出射中子的平均多重性与 $\frac{4}{3} \pi r_0^2 (A_T^{1/3} + A_P^{1/3})^2$ 成正比^[19]。

5. F. Clapier 和 Z. Y. Guo 等人提出的中子产额、中子剂量率和出射中子角分布的经验拟合公式提供了低能区重离子反应中子剂量学估算的依据。这些公式可以用来预言该能区尚未研究过的弹-靶反应系统的剂量学参数, 并设计适当的屏蔽, 更合理地安排实验。

从目前发表的研究报告看, 重离子反应中子剂量学的研究多数在低能重离子能区 ($< 50 \text{ MeV/u}$), 取得了一些很有价值的成果, 而中能 ($50 - 200 \text{ MeV/u}$) 和高能区 ($> 200 \text{ MeV/u}$) 还没有低能区那样广泛和深入, 有待进一步工作。

我国的重离子研究多数在低能区和中能区。 $2 \times 13 \text{ MV}$ 、 $2 \times 6 \text{ MV}$ 串列静电加速器和 HIRFL 的相继建成运行, 为在我国开展重离子反应中子剂量学的研究创造了条件。因此, 在低能重离子反应中子剂量学研究已有成果的基础上作一些更为深入的研究, 并在中能区开展一些探索性研究是我国保健物理工作者面临的新课题。目前, 我们已经在中能重离子反应中子屏蔽计算^[17, 24, 25]和 50 MeV/u 重离子反应中子通量密度和角分布测量方面做了一些工作。只要条件允许, 我们将在这一领域继续开展研究, 促进重离子反应中子剂量学研究和保健物理学科的发展。

参考文献

- [1] H. W. Bertini, R. T. Santoro and O. W. Hermann, Phys. Rev. C, Vol. 14, No. 2 590 (1976)
- [2] T. A. Gabriel et al., ORNL-4334 (1973)
- [3] W. Schimmerling et al., Phys. Rev. Lett., Vol. 43, No. 27, 1985 (1979)
- [4] R. A. Cecil et al., Phys. Rev. C, Vol. 24, No. 5, 2013 (1981)
- [5] R. Madey et al., (私人通信)
- [6] E. L. Hubbard et al., Phys. Rev. 118, 507 (1960)
- [7] F. Clapier, Orme des Merisiers, (mai, 1979)
- [8] CEN-S/SPR/SRJ/78-341 (1977)
- [9] Service de Radioprotection-IPN Orsay, 1978
- [10] J. G. Festag, 5th International Congress of IRPA, Jerusalem, 1980
- [11] W. F. Ohnesorge et al., Health Physics 39 (Oct. 1980) 633-636
- [12] J. W. N. Tugn et al., HS-RP/TM 180-68 CERN Technical Memorandum (Oct. 1980)
- [13] F. Clapier et al., NIM 217 (1983)
- [14] Z. Y. Guo et al., NIM B29 (1987) 500
- [15] R. Madey et al., Phys. Rev. C, Vol. 28, No. 2 706 (1983)
- [16] Study Group of NUMATRON, NUMATRON High-Energy Heavy-Ion Facility, Institute for Nuclear Study, University of Tokyo, Japan, 1977
- [17] 李桂兰, 中能重离子反应的中子屏蔽, 核技术, 待发表。
- [18] T. Shketa et al., 日本理化所资料
- [19] H. W. Patterson, R. H. Thomas, Accelerator Health Physics, Academic Press, INC, 1973
- [20] B. Tamain et al., Nucl. Phys. A33(1979)253-268
- [21] A. Garron et al., to be published
- [22] L. Westerberg et al., Phys. Rev. C 18(2)(1978)
- [23] 李桂生, 国内外几台重离子加速器中子屏蔽计算综述, 核物理动态, Vol. 8 No. 1 (1991)
- [24] 李桂生, 郑华智, 重离子反应中子辐射屏蔽计算, 原子能科学技术 Vol. 25, No. 3 (1991)
- [25] 李桂生, 重离子核反应中的中子辐射局部屏蔽, 原子能科学技术, 待发表