

铅散裂靶参数的初步研究*

徐春成 叶沿林 陈陶 应军 马经国 刘洪涛

(北京大学技术物理系重离子研究所 北京 100871)

摘要 在束流能量为 150MeV 的前提下计算了中子产额对铅靶尺寸的依赖性. 选择某一靶尺寸后讨论了靶系统的放射性活度随时间的变化. 最后则比较了不同靶尺寸下的中子能谱.

关键词 加速器 铅散裂靶 核碎片 放射性活度

1 引言

最近, 我国的许多核科技专家认为我国应该在加速器驱动的“洁净核能系统”^[1]的研究上, 跟踪和掌握国际上的最新进展. 为此, 中国原子能科学院、中科院高能物理研究所、北京大学等单位, 正向国家申请, 开展加速器驱动的“洁净核能系统”的基础研究. 第一步的目标是建造 150MeV 的强流质子加速器并开展一些实验测量工作. 在这一大型项目中, 散裂靶的作用是将容易加速的质子转变为实际需要的中子, 其重要性是显而易见的^[2]. 在 150MeV 束流能量条件下, 散裂靶中中子产额、放射性、中子谱等有其特点. 例如, 在 150MeV 束流能量条件下, 中子产额对散裂靶大小有何依赖? 靶中放射性活度随时间变化有什么特点? 与 1GeV 束流能量情形有什么不同? 另外, 150MeV 束流能量下变化靶大小, 中子谱有何变化? 本文将在简单介绍 SHIELD 程序, 并把 SHIELD 程序预言的双微分截面同实验做比较的基础上, 利用 SHIELD 程序对上述问题作出一些初步的分析, 供有关人士参考.

2 对 SHIELD 程序的简介和检验

2.1 对 SHIELD 程序的简介

SHIELD 程序产生于 70 年代初. 它主要是用来对任意形状、任意组分的靶中的强子级联过程做模拟的^[3]. 它可以用来模拟核子、 π 介子、K 介子、反核子、 μ 子等在介质中的

1998-03-11 收稿

* 国家自然科学基金(19675003)、核工业科学基金(Y7197AY002)和国家教委跨世纪优秀人才计划基金资助

传输. 它计及了带电粒子的电离能损以及 π 介子和 K 介子的 2 体和 3 体衰变.

强子级联模拟程序的好坏, 主要取决于它的强子-核作用的产生子. SHIELD 程序的强子-核作用的产生子, 具体地说, 是把整个过程分成核内的碰撞快过程, 预平衡发射和平衡态的退激发. 在本工作所关心的能量范围(入射质子的能量小于 3GeV), 核内快过程用的是杜布纳的级联模型. 模型假定核内快过程可等效于若干个强子-核子碰撞的子过程, 所用截面为自由强子-核子碰撞截面. 预平衡发射^[4]假定快过程产生的粒子会以质子、中子、复合粒子等形式发射, 以使体系达到平衡. 对于已达平衡的剩余核的退激发, 包括几个模型: 对 $A < 16$ 的核, 用的是费米碎裂模型^[5]; 对于中等质量及重核, 若每核子激发能大于 2MeV, 则采用统计多重碎裂模型^[6]. 每核子激发能小于 2MeV 时, 则多重碎裂模型可以简化为重核的“蒸发”与裂变机制的竞争. 平衡态的退激发完成了强子-核产生子.

在完成了强子-核作用产生子以后, 产生出来的次级粒子(包括蒸发出来的中子)继续在介质中传输, 可能再次与核作用, 或衰变产生光子、正负电子、中微子等. 对低能中子的 ($E < 14.5\text{MeV}$) 传输, SHIELD 程序还做了一个较细致的处理, 即基于 BNAB 的 26 群中子的数据库, 它考虑了中子与核中的核子的弹性散射 (n, n), 非弹性散射 (n, n'), 中子被原子核的吸收 (n, a), 中子的倍增 ($n, 2n$) 以及中子引起的原子核裂变.

SHIELD 程序考虑过程很全面, 它的开放式结构还有利于它的修改和发展. 由于采用了不少基于实验的数据库, 因此它的预言较可靠, 程序运行速度也很快. 在运行过程中保留了所有粒子的信息. 它是一个与 HETC 等平行发展的程序. 在本节下半部分, 将用它做中子的微分截面的预言, 并在可能的地方与实验做比较. 在第 3 节, 用它讨论在 150MeV 束流能量条件下, 中子产额对铅散裂靶大小的依赖性. 在第 4 节, 用它讨论铅靶中放射性活度随时间变化. 在第 5 节, 用它讨论靶大小的变化对中子能谱的影响. 在本文中所有提及的中子产额均指的是飞出靶外的中子产额.

2.2 薄靶上中子产额微分截面的研究

薄靶上的中子产额的测量有利于检验模型的正确性, 也容易得到模型之不足之所在. 参考实验条件在程序中定义束流为沿 z 轴的聚焦束流. 靶为 $10 \times 10 \times 1.2\text{cm}^3$ 的薄靶, 它置于和 xy 平面成 15° 角的方向上. 图 1 是入射束流能量为 1500MeV 时得到的. 分别在 15° 、 30° 、 60° 、 90° 、 120° 、 150° 角方向得理论预言值并与实验值^[7]比较, 可以看出总的说来理论与实验值的符合相当好. 细致一点做分析, 在束流能量为 1500MeV, 铅靶情形, 出射中子谱在 1—10MeV 区(主要来自蒸发中子), 总体说来(90° 角除外), 程序高估了中子产额约 30%(当然, 高估的部分中, 在 1—3MeV 区域贡献较大). 在 10—100MeV 区(90° 角除外), 程序预言的结果与实验符合得比 HETC 好^[7]. 能量大于 100MeV 的中子, 主要集中在小角度. 在这一趋势上, 理论与实验是一致的, 但程序在 15° 角低估, 而在 30° 和 60° 角高估了该能区的中子产额. 在 90° 角, 1—3MeV 的中子产额预言得较好, 而在大于 3MeV 能区, 程序低估了中子产额约一半. 总的说来, SHIELD 程序在预言中子谱方面比 HETC 稍好, 但比 NUCLEUS^[7]差. 究其原因, 可能是因为 NUCLEUS 程序考虑了核介质对核子-核子相互作用截面的影响, 而 SHIELD 和 HETC 均未考虑; SHIELD 程序考虑了核的多重碎裂, 但 HETC 未考虑. 有关程序的改进将在别的文章中讨论. 本工作还就同样的薄靶

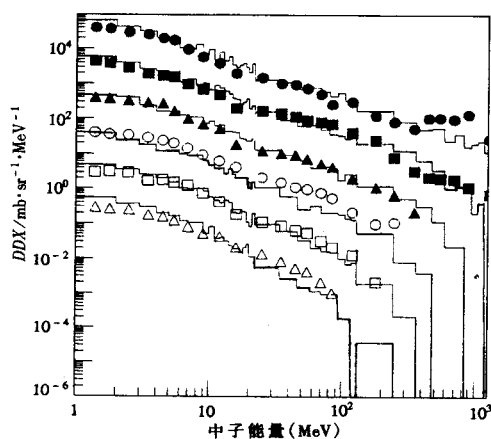


图 1 铅靶中子产额的双微分截面

入射质子束流能量为 1500 MeV. 理论值取自 SHIELD 程序而实验值取自文献 [7]

- 15° (× 100); ■——30° (× 10);
- ▲——60° (× 1.0); ○——90° (× 0.1);
- 120° (× 0.01); △——150° (× 0.001).

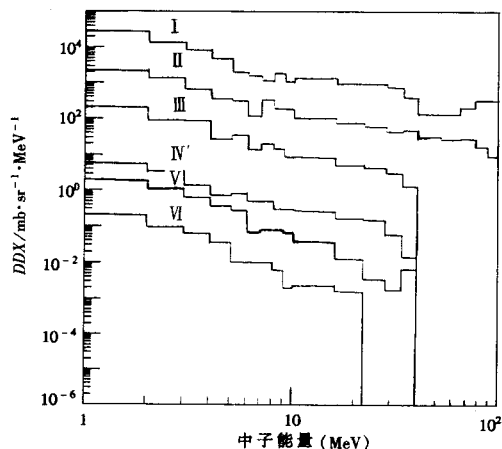


图 2 铅靶中子产额的双微分截面的理论预言

取自 SHIELD 程序, 入射质子能量 150 MeV

- I——15° (× 100); II——30° (× 10);
- III——60° (× 1.0); IV——90° (× 0.1);
- V——120° (× 0.01); VI——150° (× 0.001).

在入射束流能量为 150 MeV 时得到中子产额的双微分截面的预言 (图 2), 以待国内未来的实验检验.

3 中子产额对铅靶尺寸变化的依赖性

尽管程序本身在预言中子的双微分截面 $d^2\sigma/d\Omega dE$ 方面仍然存在有待改进的地方, 但程序用来预言中子总产额时, 它和实验, 以及和别的许多程序之间符合是相当好的^[3]. 由于实际产生的主要是低能中子, 所以, 本节所说的中子产额, 是指能量 $E < 14.5$ MeV 的中子产额. 而且, 在本节和下节所用束流均是指沿圆柱轴线入射的聚焦束流.

考虑中子与靶核的反应包括低能中子在靶中的倍增, 低能中子被靶核的吸收, 中子与靶核发生的弹性与非弹性碰撞等综合因素, 可以预知过大或过小的靶都得不到最高中子产额. 图 3 是固定圆柱形靶直径 $\phi = 70$ cm, 改变长度 L 时 (也以 cm 为单位) 圆柱形靶每 GeV 能量的中子产额的变化. 束流能量为 150 MeV. 可以看出, 当 $L = 60$ cm 时, 每 GeV 能量的中子产额就基本上达到最大值. 从 $L = 60$ cm 到 $L = 70$ cm, 仍然有轻微上升, 而大于 70 cm 以后反而有轻微下降. 图 4 是固定 $L = 70$ cm, 改变 ϕ 大小的圆柱形靶每 GeV 能量的中子产额的变化. 当 $\phi = 90$ cm, 中子产额达到极大值. 然而, ϕ 在 60—90 cm 之间产额变化很小.

要确定靶的合适大小是一件非常复杂的事. 它要考虑堆的设计、散热、靶的制作工艺、中子产额等综合因素. 图 3 和图 4 从一个侧面给靶的设计提供参考. 考虑到取 $\phi = 20$ cm, $L = 20$ cm 的靶已能使中子产额达到最大值的近 90%, 后面的讨论不妨取 $\phi = 20$ cm, $L = 20$ cm 的圆柱形靶.

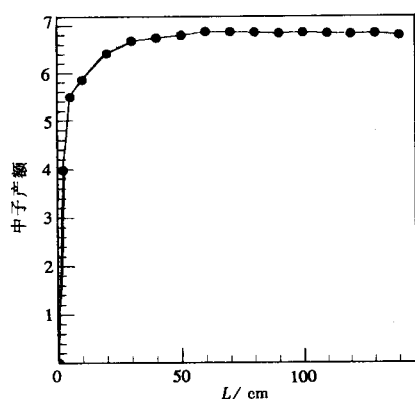


图3 圆柱形铅靶, 固定 $\phi=70\text{cm}$, 改变 L 值时
每GeV束流能量的中子产额的变化

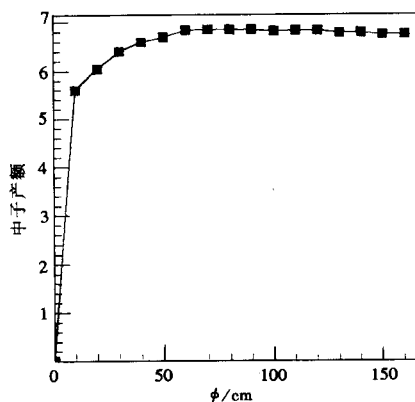


图4 圆柱形铅靶, 固定 $L=70\text{cm}$, 改变 ϕ 值
时
每GeV束流能量的中子产额的变化

4 靶中放射性积累的研究

从现在起, 固定靶为 $\phi = 20\text{cm}$, $L = 20\text{cm}$ 的圆柱形铅靶. 质子打入铅靶中产生低能中子的同时还在靶内积累放射性核素. 计算 30mA 束流运行一年, 靶中的放射性积累. 先计算束流能量为 1600MeV 的情形. 图 5 显示总的放射性活度随时间的变化. 同时还显示由中子、质子、和能量低于 20MeV 的中子引起的放射性活度随时间的变化. 图 6 显示总

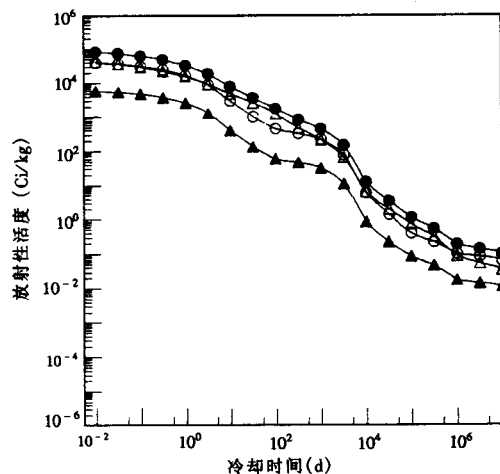


图 5 总的放射性活度以及由中子、质子和能量
低于 20MeV 的中子引起的放射性活度随时间
的变化

束流能量为 1600MeV. ●代表总的活度; ○代表由
中子引起的活度; △代表由质子引起的活度, 而▲代表由
中子 (E 小于 20MeV) 引起的活度.

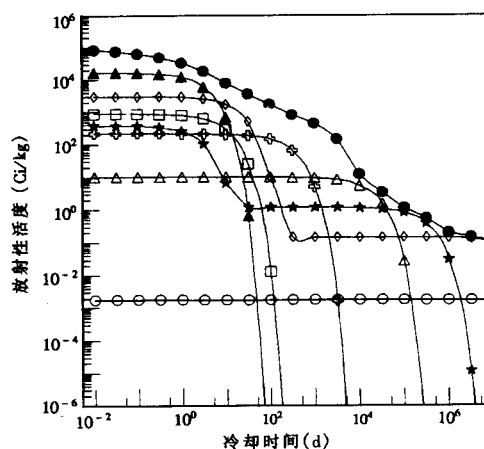


图 6 总的放射性活度以及来自几种典型放射性
元素的放射性活度随时间的变化

●代表总活度; ▲、◇、□、★、☆、△和○分别代表来自
 ^{202}Pb 、 ^{202}Pb 、 ^{202}Tl 、 ^{206}Bi 、 ^{194}Au 、 ^{194}Hg 、 ^{195}Au 、 ^{207}Bi 和
 ^{205}Pb 的贡献. 束流能量为 1600MeV.

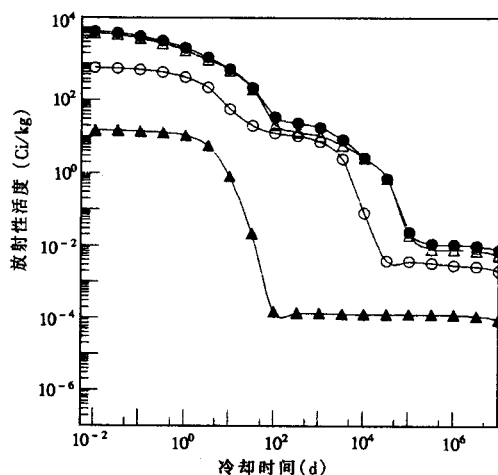


图 7 总的放射性活度以及由中子、质子和能量低于 20MeV 的中子引起的放射性活度随时间的变化

束流能量为 150MeV. ●代表总的活度;○代表由中子引起的活度;△代表由质子引起的活度;而▲代表由中子 (E 小于 20MeV) 引起的活度.

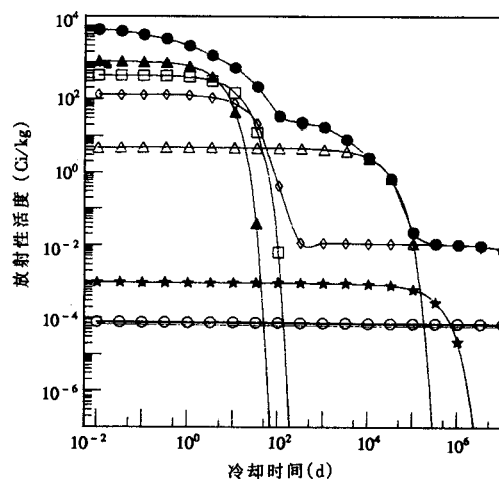


图 8 总的放射性活度以及来自几种典型放射性元素的放射性活度随时间的变化

●代表总活度; ▲、◇、□、★、☆、△和○分别代表来自 ^{203}Pb 、 ^{202}Pb 、 ^{202}Tl 、 ^{206}Bi 、 ^{194}Au 、 ^{194}Hg 、 ^{195}Au 、 ^{207}Bi 和 ^{205}Pb 的贡献. 束流能量为 150MeV.

的放射性活度随时间的变化以及几种典型的放射性元素的放射性活度随时间的变化. 在束流能量为 1600MeV 的情形, 放射性主要由质子和中子 (尤其是能量大于 20MeV 高能中子) 引起的. 1600MeV 的情形放射性活度随时间变化与文献 [8] 基本一致. 再计算束流能量为 150MeV 的情形. 图 7 显示总的放射性活度随时间的变化. 同时还显示由中子、质子和能量低于 20MeV 的中子引起的放射性活度随时间的变化. 图 8 显示总的放射性活度随时间的变化以及几种典型的放射性元素的放射性活度随时间的变化. 有趣的是, 在束流能量为 150MeV 的情形, 放射性主要由质子引起的. 另外, 在束流能量为 150MeV 的情形, ^{195}Au 的对放射性的“贡献”为零. 另外, 由质子和中子引起的放射性活度的量的比值与靶的大小也有一定关系.

5 不同靶尺寸下的中子能谱的比较

不同能量的中子与反应堆中的材料的反应机制差异很大, 因此, 不同大小的靶导致不同能谱的中子, 因而与不同的堆相匹配. 因此, 对不同靶尺寸下的中子能谱做一比较很有必要. 图 9—12 是分别对应于四种尺寸的圆柱形靶的中子谱, 靶的直径依次为 10、20、30、40cm, 靶的长度依次为 10、20、30、40cm. 正象预料的那样, 靶越大, 中子谱越软, 即平均中子能量较低.

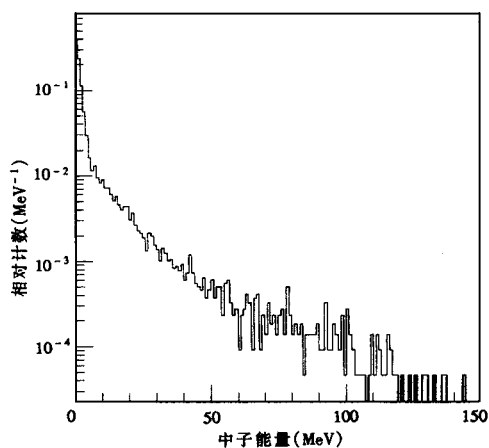


图9 束流能量150MeV时中子能谱
圆柱靶直径 $\phi=10\text{cm}$, 长 $L=10\text{cm}$.

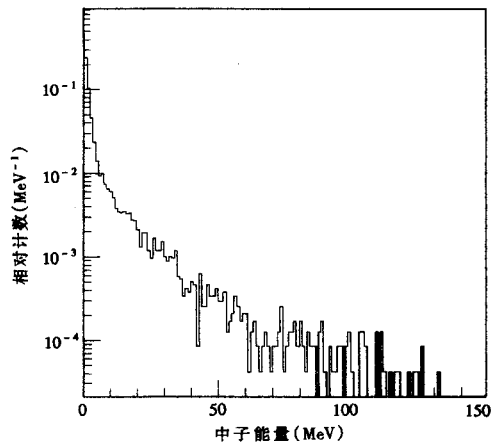


图10 束流能量150MeV时中子能谱
圆柱靶直径 $\phi=20\text{cm}$, 长 $L=20\text{cm}$.

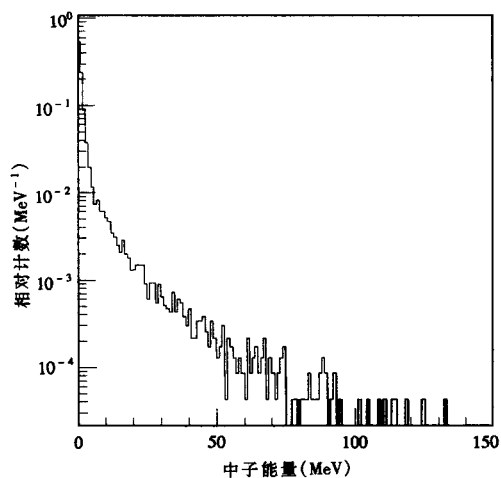


图11 束流能量150MeV时中子能谱
圆柱靶直径 $\phi=30\text{cm}$, 长 $L=30\text{cm}$.

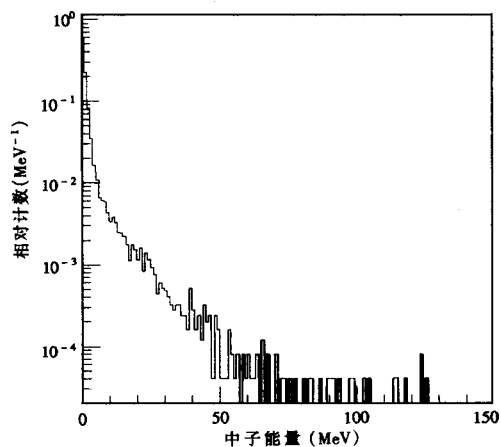


图12 束流能量150MeV时中子能谱
圆柱靶直径 $\phi=40\text{cm}$, 长 $L=40\text{cm}$.

6 结论

SHIELD程序是一个比较完整的核过程模拟程序,可用于散裂过程的分析.但它不涉及原子过程,因而不能用来处理材料损伤等问题.本文在150MeV束流能量下,讨论了低能中子($E < 14.5\text{MeV}$)产额对铅靶尺寸的依赖性;150MeV能量下,靶内的放射性主要是由质子引起的,而在1600MeV情形下主要是由质子和中子引起的;20MeV以上能量的中子,能在靶内引起比较大的放射性;所产生的出射中子谱对靶尺寸较敏感,而本文给出的不同靶的中子能谱有利于靶的设计.

感谢俄罗斯 Sobolevsky 提供的 SHIELD 程序, 以及他的耐心讨论.

参 考 文 献

- 1 Zhao Zhixiang, Nuclear Physics Review (in Chinese), 1997, **14**(2):121
(赵志祥, 原子核物理评论, 1997, **14**(2): 121)
- 2 Xu Chuncheng, Ye Yanlin, Guo Hua, Nuclear Physics Review (in Chinese), 1998, **15**(2):115
(徐春成, 叶沿林, 郭华, 原子核物理评论, 1998, **15**(2): 115)
- 3 Dmentyev A V, Sobolevsky N M, Stavissky Yu Ya. Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res., 1996, **A374**:70
- 4 Gudima K K, Mashnik S G, Toneev V D. Nucl. Phys., 1983, **A401**:329
- 5 Botvina A S, Iljinov A S, Mishustiu I N, Nucl. Phys., 1987, **A475**:663
- 6 Botvina A S, Iljinov A S, Mishustiu I N, Nucl. Phys., 1990, **A507**:649
- 7 ISHIBASHI K, TAKADA H, NAKAMOTO T et al. J. Nucl. Sci. Tech., 1997, **34**(6):529
- 8 Shubin Yu N et al. Proceedings of second Int. Conf. on ADTT, 1996, Kalmar, Sweden, p.953.

Study on the Parameters of the Lead Spallation Target *

Xu Chuncheng Ye Yanlin Chen Tao

Ying Jun Ma Jingguo Liu Hongtao

(*Institute of Heavy Ion Physics, Department of Technical Physics, Peking University, Beijing 100871*)

Abstract Under the interaction of incident proton with 150 MeV, the neutron yields and spectrum of the lead spallation target, as well as the radiation activity deposited on the target, are studied by means of SHIELD code.

Key words accelerator, lead spallation target, nucleus fragments, radiation activity

Received 11 March 1998

* Supported by the National Natural Science Foundation of China (19675003), Science Foundation of Chinese Nuclear Industry (Y7197AY002) and Trans-Century Training Programme Foundation for the Talents by the Ministry of Education