

SHIELD 程序靶设计的实用化及其 在 W 靶参数设计中的应用*

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和重离子研究所 北京 100871)

摘要 将 GEANT3.21 中的几何设计和图示技术移植到 SHIELD 程序中,并在此基础上对几种具有复杂构造的 W 靶进行参数设计的初步研究.

关键词 散裂靶 几何设计 图示化 产生子

1 引言

目前,我国加速器驱动的“洁净核能系统”^[1]的研究正处于概念设计阶段,人们需要对各种结构的靶和堆进行设计并用蒙特卡罗方法进行模拟研究.我们曾经用 SHIELD 程序对铅散裂靶参数进行初步研究^[2],经检验该程序在预言中子微分截面方面与实验符合得很好,这说明它的产生子是比较有效的.但 SHIELD 程序对复杂靶的处理能力很有限.为了模拟计算的实用化,必须解决对任意靶结构的软件处理问题,而 SHIELD 程序原有的靶设计很难满足概念设计阶段各种方案认证的要求.另一方面,在高能物理中,人们发展了一套称为 GEANT 的软件包,这个软件包是无数物理学家经过多年的努力发展而来的,它的各个部分独立性很强,所以它可以在高能物理以外的许多领域得到应用. GEANT 中的几何设计部分功能强大,可以用很简洁的方法对付很复杂的大型探测器的设计,因而也能描写任意复杂的靶结构和形状.本工作的目的就是按照概念设计的需要,把 GEANT3.21 中的几何设计技术和图视化技术移植到 SHIELD 程序中^[3],并在此基础上列举几种具有复杂构造的 W 靶,以显示程序所具有的功能,并进行参数设计的初步研究.

2 GEANT3.21 中的几何设计技术和图视化技术及其移植

GEANT3.21 的几何设计包括体的定义和各个体之间的关系.体的定义包括体的名字(它必须是 GEANT 的 16 种基本的形状中的一种)、体所占空间的大小、局部坐标系(每

1998-10-19收稿,1999-03-22收修改稿

* 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项目

一种基本形状有其特定的局部坐标系),以及体中的介质.定义了体以后,还要定义各体之间的关系.例如一个体可以有其子体或母体.如果体 A 完全放在体 B 中(当然此时要指出体 A 的局部坐标与体 B 的局部坐标之间的关系),且体 A 所占体积被 A 的介质所替代,我们说体 A 是体 B 的子体(同时体 B 是体 A 的母体).由此可以构造各种复杂的探测器系统或靶系统.然后,GEANT3.21 能给出以下信息:(1)一个给定粒子目前处于什么介质中;(2)一个给定粒子沿给定的运动方向离下一个介质还有多远.

在 SHIELD 程序运行过程中也能(靠文件 MEDIUM.F 和 GEMCA.F)给出上述两个信息. MEDIUM.F 对每一个序号定义相应的介质,而 GEMCA.F 定义靶的组成.然后,程序在细致考察粒子所在坐标和运动方向与靶的各个界面之间的关系的的基础上给出粒子确切位置的信息. SHIELD 程序的缺点在于,它只能处理 8 种体,而且各个体的描述方式没有一个统一的规律.

为了改进 SHIELD 程序的设计功能,我们用 GEANT 的几何设计代替 SHIELD 中相关部分.修改后,SHIELD 能更一般性地回答问题(1)和(2)从而能很方便地处理很复杂的靶系统,并能把处理结果利用 GEANT 的图视技术直观地展示出来.在原来的 SHIELD 程序中,若靶的形状很复杂,需要输入很复杂的几何参数,而且得不到自动图视结果.实践表明,SHIELD 与 GEANT 连接的程序运行速度与原来的非常接近.加上了 GEANT 的功能后 SHIELD 甚至可以定义出 LEP(Large Electron Positron Spectrometer)这样复杂的探测器,用它设计散裂靶的形状和结构是足够了.

3 靶设计应用举例

我们国家的专家建议在第一阶段采用固体 W 靶,并用水作冷却剂.我们以此为例,做了计算.本文所列举的靶的形状及尺寸,均是人为的尝试,主要是显示程序的功能,但有关结果也有一定的实用价值.

3.1 圆锥形 W 靶

圆锥形 W 靶的半高和底面半径均设计为 $R = 9\text{cm}$,并假定底面对着束流.图 1 是其单事例显示.入射质子能量为 150MeV .质子打 W 的过程可看成是强子-核反应的级联过程,而强子-核反应的整个过程可分为核内碰撞快过程、预平衡发射和平衡态的退激发^[2].整个过程中绝大多数产生的是质子和中子,只有很少量的电子、 π 介子等.图 1 所示的是质子打 W 核产生若干中子,中子再进一步和其它 W 核反应产生更多中子的级联过程.

图 2 展示了 150MeV 入射质子在靶中的分布(取 500 个事例).可以看出,绝大多数质子集中在束流线方向,并停留在射程约为 1.7cm 的地方(这样会造成束流窗口延长线上一段距离内的很强的损伤和放射性).质子在 W 靶中传输,克服电离能损也就只能走过约 1.7cm .质子与 W 的非弹性截面决定了它在走过这一段路程之前能发生非弹性反应的几率很小.若以此作为质子的利用率,则在 150MeV 能量下,质子的有效利用率仅为 0.18.随着质子能量的增加,我们所定义的质子的利用率也增加.例如,能量分别增加到 400MeV 和 600MeV 时,利用率分别增加到 0.5 和 0.72.

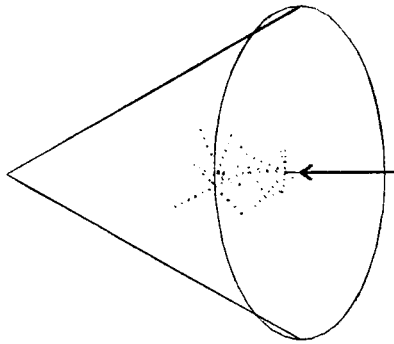


图1 圆锥形W靶的单事例显示
实线代表质子,虚线代表中子.

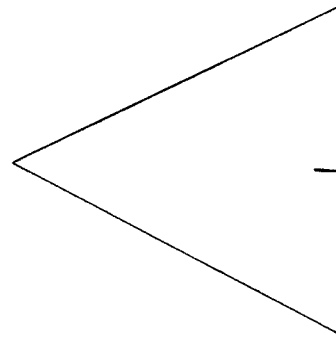


图2 150MeV入射质子的轨迹图

在图3中(条件同图2),展示了中子在靶中的分布(取500个事例).可以看出,我们的靶有点偏大,尤其是后半段,似乎是未起作用.靶的大小选取要考虑很多因素.靶过小,会造成级联反应还没有充分进行就停止了,因而得不到最大的中子产额;靶过大,则由于W对低能中子的强烈吸收,也得不到最大的中子产额^[2];当然,靶的选择还要考虑散热等因素.现在的靶在150MeV能量下每GeV能量产生的中子数为5.513个.如果去掉后半段,使高度仅为9.0cm,结果得到靶在相同条件下产生的中子数为5.515个,因此去掉一些材料反而使产生的中子数略微增加.

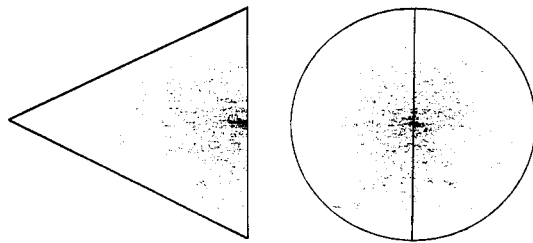


图3 圆锥形靶内中子的轨迹图

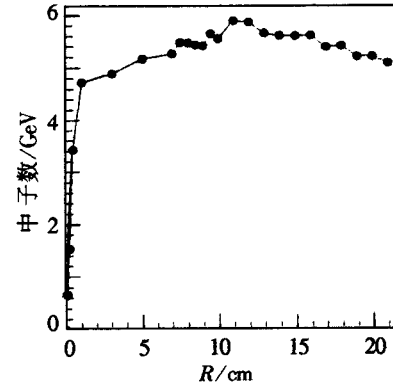


图4 每GeV能量产生的中子数随圆锥尺寸R的变化

图4展示了每GeV能量产生的中子数随圆锥尺寸R的变化.可以看出,当R为10cm时,中子数就已基本上达到了最大值.

3.2 六菱柱形W靶内挖6个圆柱形小孔,小孔中注入水作冷却剂

我们设计靶时使W的实际厚度约为5cm,因为通过计算可知,厚度大于5cm,中子的产额不再增加.

参照JAERI的加速器驱动的金属快堆AC-焚烧炉和W靶结构^[4],现在取六菱柱形W靶,它的高固定在5cm,内挖6个圆柱形小孔,小孔的中心处在六角形中心与顶点连线的中

点上. 小孔的半径取为六角形外切圆半径的 0.09 倍. 取六角形外切圆半径为 $R = 10.4\text{cm}$, 并假定六角形面对着束流.

图 5 展示中子在靶中的分布 (取 500 个事例). 可以看出, 我们的靶横向有点偏大. 靶在 150MeV 能量下每 GeV 能量产生的中子数为 5.411 个. 实际上, R 减小一半, 中子的产额基本不变. 质子在靶中的分布与图 2 的情形很类似, 故没给出图.

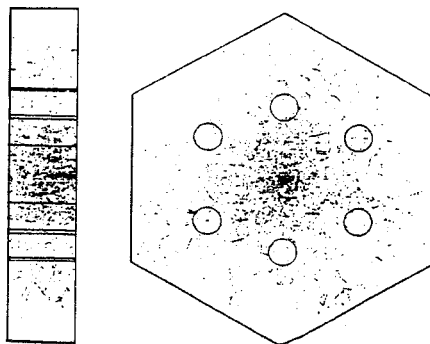


图5 六菱柱形中子的轨迹图

4 线状束流与散焦束流

由图 2 可知, 线状束流会造成束流窗口延长线上一段距离内集中在很小范围内的很强的损伤和放射性. 为此, 有人提议采用散焦束流, 以减少损伤和放射性的集中程度. 那么采用线状束流与散焦束流有何区别? 为了回答这个问题, 我们采用圆锥形 W 靶, 并令 $R = 9\text{cm}$, 且去掉较细的半段, 形成圆台状. 再采用散焦的束流. 设散焦束流的横截面为半径为 r 的圆. 这里不再列出此情形下质子在靶中的径迹分布图. 它与图 2 的主要不同点在于, 质子的轨迹会集中在以束流截面为底, 以与束流平行的线为母线的柱面内. 此时, 束流窗口附近的放射性和损伤的集中程度有所减轻, 但是在深度为 1.7cm 的地方, 仍然会有大量的质子集中在大小接近于束流面积的平面上. 当 $r = 1\text{cm}$ 时, 每 GeV 能量能产生 5.471 个中子, 比线状束流略少一些. 当 $r = 4\text{cm}$ 时, 每 GeV 能量能产生 5.227 个中子, 而 $r = 8\text{cm}$ 时, 每 GeV 能量能产生 3.073 个中子. 散焦束流造成中子产额减少的原因在于, 在散焦束流边缘部分的质子可能还没来得及进行充分反应就飞出了靶外.

5 结论

SHIELD 程序改进以后, 可以适应概念设计的需要; 在 150MeV 束流能量下, 要采用 W 靶, W 的厚度取 5cm 左右较合适; 在 150MeV 束流能量下, 如果靶的设计合理, 每 GeV 能量能产生 5.0—5.8 个中子; 用散焦束流, 可以适当减轻束流窗口附近的放射性和损伤的集中程度, 但是散焦过大, 会造成中子产额的降低.

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, Chen Tao et al. High Energy Phys. and Nuclear Phys. (in Chinese), 1999, 23(4): 673—677
(徐春成, 叶沿林, 陈陶等. 高能物理与核物理, 1999, 23(4): 673—677)
- 3 Dmentyev, A V Sobolevsky N M, Yu Ya Stavisky, Nucl. Instr. Meth in Phys. Res, 1996, A374:70
- 4 Takizuka T. Research and Development on P Acc-Based Transmutation of Nuclear Waste, GLOBL' 95, 1995, 489—496

Improvement on Design of Target by the SHIELD Code and It's Applications to Some Complicated Spallation Targets *

Xu Chuncheng Ye Yanlin Chen Tao Ying Jun Ma Jingguo Liu Hongtao

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

Abstract The technique of the geometric design and graphic displaying of GEANT3 is adopted in the SHIELD code. Some examples of complicated spallation targets are designed and discussed. With the proton beam energy of 150MeV, our results show that the best thickness of W spallation target is 5cm; 5.0—5.8 neutrons can be produced per GeV of beam energy for properly designed W target; the material damage and the radiation deposits are concentrated in the beam axes of about 2 cm long; scattered proton beam may alleviate the concentration, but may also lower the neutron production.

Key words spallation target, geometric design, graphic displaying, generator

Received 19 October 1998, Revised 22 March 1999

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