

中子激发碳、氧、铁、铜的模拟研究

唐世彪 阴泽杰 朱大鸣 黄 环

(中国科学技术大学近代物理系 合肥 230026)

摘要 本文利用欧洲粒子物理实验室开发的一个包容大量探测器描述和模拟工具的软件系统 Geant4(版本号: Geant4.7.0, 2005)模拟了不同元素被中子激发的特征 γ 谱。对于不同能量的入射中子, 各种特征 γ 光子有着不同的产额, 以此提出了最优化入射中子能量的概念。对元素 C、O、Fe 和 Cu 的模拟结果显示, 对于不同元素, 其最优化能量也有所不同。这些元素的主要特征 γ 光子能量基本在 0.8—7 MeV 范围内。

关键词 Geant4 软件, 最优化能量, 入射中子, 特征 γ 光子

中图分类号 TN25, O571.33

中子入射引发非弹性散射, 产生激发效应或者核反应: 激发效应放出 γ 光子, 核反应放出不同的粒子: 氦核(Alpha)、氚核(Triton)、氘核(Deuteron)和质子(Proton)^[1,2]; 入射中子能量不同, 发生激发效应和核反应的几率也不同, 这里存在一个最优化入射中子能量的问题: 在此能量上尽可能少地产生核反应, 同时尽可能多地激发其主要特征 γ 射线。在此特别介绍两个参数: (1)特征 γ 光子产生率(Producing ratio of characteristic gamma photon): 一次中子入射所产生的特征 γ 光子, 描述了特征 γ 光与入射中子的依赖关系; 此值越大, 特征 γ 光的产率越高。(2)核反应比(Nuclear reaction ratio): 发生核反应的碰撞/产生特征 γ 光的碰撞数, 描述了核反应与好碰撞的比率, 要做到尽量小; 此值越小说明核反应的几率越小, 越有利于医学上的应用。

1 Geant4 系统

Geant4 是由欧洲核子研究中心(CERN)开发的一个包容大量探测器描述和模拟工具的软件系统。近年来, 随着使用 Geant4 的人越来越多以及 Geant4 自身的发展, 其应用也越来越广, 已经逐渐扩展到辐射分析、宇宙射线分析、肿瘤学分析和评估等^[3]。

Geant4 在 HEP 中主要应用在两个方面: (1)对穿越实验装置的粒子径迹进行跟踪, 并模拟粒子与探测器的相互作用; (2)给出实验装置的几何描述和粒子径迹的图形表述。同时 Geant4 给出了一整套较低能的光子和电子与物质作用的机制, 其中的物理过程包括: 光电效应、康普顿效应、瑞利效应、韧致辐射和电离作用^[4]。在程序中, 可以通过设定阈

值来控制跟踪过程中的最小能量。

本文利用 Geant4 对人体以及日常生活中常见的元素(C、O、Fe、Cu)进行模拟, 并给出它们在不同能量中子入射下各参数的变化。

2 模型的建立

模拟模型如图 1 所示, SSD=100cm(SSD: Source to surface distance), 中子准直入射; 为了减少统计误差, 每次模拟选择的事例为 100 万; 为了使中子尽量多地反应, 选择靶的体积较大。

在模拟计算时, Geant 提供了很多的控制参数, 其中主要的是在跟踪次级粒子时, 需要通过设置阈值的方式来改变次级粒子的能量阈值, 不同的参数也会影响计算结果。我们在模拟计算时设定的阈值为 CutValue=1mm。

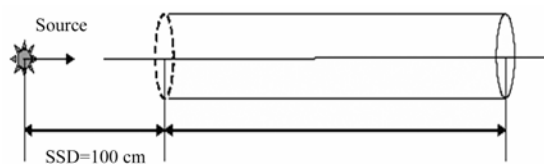


图 1 模拟模型几何图

Fig. 1 An illustration of the simulated experimental situation

3 模拟结果及其分析

3.1 中子入射能量的选择

我们选择能量的标准是: 在保证各种元素的核反应比在一个可接受的范围内(越小越好)的前提下, 希望特征光产生率越大越好。

中国科学院“百人计划”项目资助

第一作者: 唐世彪, 男, 1982 年出生, 2004 年毕业于中国科学技术大学, 现为该校在读博士研究生, 从事信息处理和核电子学的研究

收稿日期: 2006-02-14, 修回日期: 2006-09-22

经过模拟得到的参数随入射中子能量的变化曲线如图 2 和图 3 所示。首先考虑核反应比率,如图 2 所示。由图 2 可以看到,铁元素和铜元素的核反应比在整个能量区域内都较低,而碳、氧元素则相对较高,尤其是氧元素,只有入射中子能量在 7.6—8.3 MeV 之间时,核反应比才小于 0.10,因此在选择入射能量时需要仔细。

在此基础上,我们考虑相应入射中子能量范围的特征光产生率,如图 3 所示。可以看到,铁元素

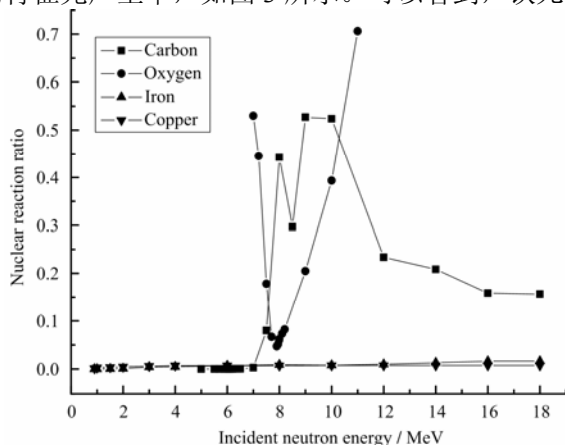


图 2 元素激发核反应率与入射中子能量的关系

Fig. 2 Relationship between nuclear reaction ratio of excited elements and incident neutron energies

表 1 元素的最优化入射中子能量及特征 γ 光子能量

Table 1 Optimal energy of incident neutrons and energy of characteristic gamma photons

元素种类 Kind of element	最优化入射中子能量 Optimal energy of incident neutron / MeV	特征 γ 能量 Energy of characteristic gamma photon / MeV	
		主要 Primary	次要 Secondary
碳 Carbon	5—7.5	4.4391	—
氧 Oxygen	7.6—8.3	6.13	6.0482, 6.9155
铁 Iron	1.5—6	0.847	—
铜 Copper	1.8—6	0.962	1.116

3.2 元素的激发能谱

经过上面的模拟及分析,我们基本了解了各种元素的最佳入射中子能量,下面以最佳入射中子能量去轰击所需要了解的元素,得到各种元素的能谱,同时得到它们的主要激发特征 γ 光子能量。

这里只给出碳元素和铁元素的模拟结果。图 4 给出在 6 MeV 中子入射下的特征 γ 能谱图。由模拟结果谱图可见,碳元素的主要激发特征 γ 光子能量为 4.4391 MeV,并且其产额非常大,基本上没有其它数量较多的特征 γ 光子。图 5 给出在 2.4 和 6 MeV 中子入射下铁元素的特征 γ 能谱图。由图 5 可见,铁元素的主要激发特征 γ 光子能量为 0.847 MeV,其产额也非常大,其它能量的特征 γ 光子非常少,可以忽略。

图 6 给出了相应能量中子入射 4 种元素混合能

的特征光产生率变化不大,而铜元素的产率整体而言较大,因此对于入射中子能量的依赖较小。这里尤其需要注意的是氧元素,通过上面分析,对氧元素激发的优化入射中子能量应该在 7.6—8.3 MeV 之间,而此时的特征光产生率刚好处于最大(大于 0.15),可以说此时对氧元素的激发是比较合适的。

为方便比较,将四种元素的最优化入射中子能量列于表 1。

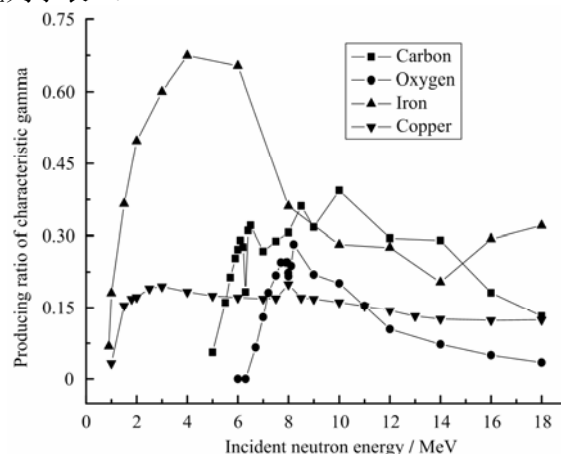


图 3 元素激发特征光产生率与入射中子能量的关系

Fig. 3 Relationship between γ producing ratio of characteristic γ -ray of excited elements and incident neutron energies

谱的比较(都是 100 万个入射中子)。而 4 种元素的特征 γ 光子能量见表 1。

通过上述 4 种元素的模拟分析,我们发现,不同元素的特征 γ 谱有很大的区别,这些都与我们已

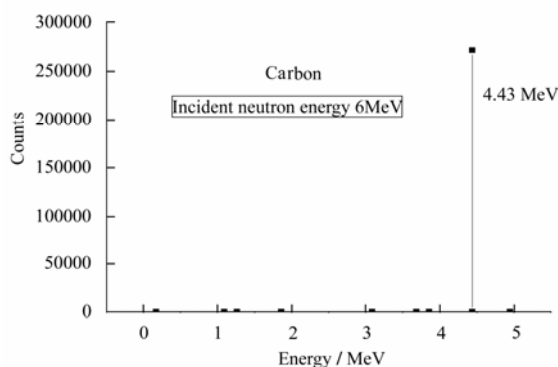


图 4 碳元素激发的 γ 能谱

Fig. 4 Gamma spectrum of excited carbon

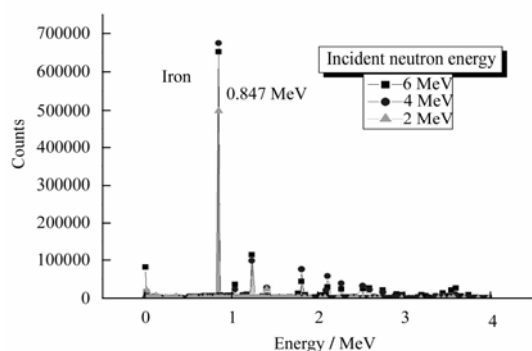


图5 铁元素激发的 γ 能谱
Fig. 5 Gamma spectrum of excited iron

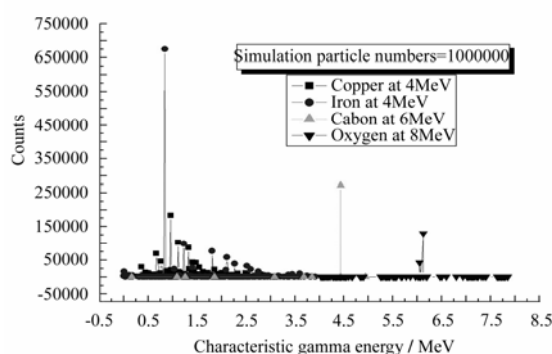


图6 元素的混合能谱图
Fig. 6 Gamma spectrum of mixed excited elements

知的一致^[2,5]。最重要的是,对于不同能量的入射中子,不同能量的特征 γ 光子有着不同的产额,这就牵涉到最优化入射中子能量的问题。而某些元素的特征 γ 光子能量比较接近,例如铁的0.847 MeV和铜的0.962 MeV,就有可能在实际的测量中由于距离太近而引起混扰,这时候需要用到铜元素的其它一些与0.847 MeV距离较远的特征 γ 能量,例如1.116 MeV。这样我们可以通过改变入射中子能量,从而改变1.116 MeV特征 γ 光的产额,利用1.116 MeV的特征 γ 光来鉴别铜元素,这样就去除了

铜元素和铁元素可能的混扰。

4 结论

经过模拟分析,我们可以知道,对于不同元素,其最优化入射中子能量也有所不同,这要求我们在分析不同元素时,应该选择合适的中子能量,这就牵涉到中子源的选择问题。另外,对人体以及日常生活中常见的元素进行模拟(上面只列出了其中四种元素:碳、氧、铁、铜)以及调研分析发现,基本上这些元素的主要特征 γ 光子能量范围是在0.8—7 MeV之间。因此,我们在今后类似的工作中将主要考虑此能量区间内的 γ 射线。而此能量区间的 γ 射线有一些相似的性质^[2],例如康普顿散射截面都较大等,这都将有助于我们今后的工作。

参考文献

- 唐孝威. 粒子物理实验方法. 北京: 人民出版社, 1982
TANG Xiaowei. Particle physics experimental methods, Beijing: People Press, 1982
- 徐克尊. 粒子探测技术. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1981
XU Kezun. Particle detection technology, Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1981
- Agostinelli S, Allison J, Amako K, et al. Nucl Instrum Methods, 2003, **A506**: 250—303
- Physics Reference Manual at the Geant4. Available from: <http://geant4.web.cern.ch/geant4>
- 核素图表编辑组. 核素常用数据表. 北京: 原子能出版社, 1977
Nuclide Chart/Table Editorial Group. Table of Useful Nuclide Data, Beijing: Atomic Energy Press, 1977

Simulation study of neutron stimulating elements: carbon, oxygen, iron and copper

TANG Shibiao YIN Zejie ZHU Daming HUANG Huan

(Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract The characteristic gamma spectrums of different elements stimulated by neutrons have been studied using Geant4 (Geant4.7.0, 2005), a Monte Carlo simulation software. The results show that for different incident neutrons, the yield of different characteristic gamma photons are variational, from which the conception of optimal incident neutron energy is suggested. These results indicate that optimal energy for different elements is varied and the energies of characteristic gamma photons for all the elements are mainly in the range of 0.8—7 MeV.

Key words Geant4, Optimal energy, Incident neutron, Characteristic gamma photon

CLC TN25, O571.33