

用于 16.7 MeV 脉冲高能 γ 探测的 散射吸收方法研究

谭新建^{1,2}, 欧阳晓平², 王群书²

(1. 清华大学工程物理系粒子技术与辐射成像教育部重点实验室, 北京 100084;

2. 西北核技术研究所, 西安 710024)

[摘要] 在理论分析计算的基础上,提出了基于康普顿效应的散射吸收探测方法,该方法能实现高低能 γ 灵敏度比值达 $10^6 \sim 10^8$,且对高能 γ 灵敏度较大,为 $10^{-21} \sim 10^{-16} \text{ C} \cdot \text{cm}^2$,其性能指标在一定程度上优于目前使用的基于磁分析器与 Cherenkov 探测器的高能 γ 探测方法指标。

[关键词] 高能 γ ; 切伦柯夫探测器; 散射吸收法

[中图分类号] TL81 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2009)08-0048-04

1 前言

在强脉冲辐射场测量中,16.7 MeV 高能 γ 射线产生概率低,且有时存在强度高其 4~5 个量级、平均能量约 2 MeV 的低能 γ 干扰^[1],这就要求探测器对高能 γ 射线的灵敏度高,且具备 5~6 个量级以上的抗低能 γ 干扰能力。

目前国内外通常采用 Cherenkov 探测器配合磁分析方法进行高能 γ 测量^[1~4],该方法信噪比可达 $10^5 \sim 10^6$ 。但由于使用强磁场,一般来说设备体积较为庞大,且需要精细磁场边界调节,在极强低能 γ 本底环境下,抗干扰能力不足,因此使用时受到一定限制。笔者提出一种新的散射吸收探测方法,可以克服以上不足,为高能 γ 探测提供了一个新的技术途径。

2 散射吸收法原理概述

γ 射线与物质相互作用主要有光电效应、康普顿散射和电子对效应。康普顿散射微分截面正比于物质原子序数 Z ,且随着入射 γ 能量增加而降低。而电子对效应截面正比于 Z^2 。

本底 γ 能量分布在 0.5~3 MeV 之间,平均能量约为 2 MeV,其与物质作用方式以康普顿散射为主,由于次级 γ 射线相对入射 γ 有较大偏转角,因此可认为发生康普顿散射的本底 γ 将离开束流孔道。根据 γ 射线与物质作用截面分布特点,通过选择原子序数较小的介质,可在保证大量低能本底 γ 被散射的同时让高能 γ 顺利通过,从而降低本底水平。

在不考虑累积因子的情况下,设高低能 γ 射线穿透厚度为 l ,密度为 ρ 的介质的概率分别为 $P_H(l)$ 和 $P_L(l)$,高低能 γ 穿透相同厚度介质的概率比值(简称为高低能 γ 区分能力)为 $P_{HL}(l) \equiv P_H(l)/P_L(l)$,高能 γ 每衰减一倍对应的高低能 γ 区分能力定义为 $\zeta \equiv P_{HL}(l)/(1/P_H(l)) = P_{HL}(l)P_H(l)$,则

$$P_H(l) = \exp\left(-\frac{\sigma_H N_A}{A} \rho l\right) \quad (1)$$

$$P_L(l) = \exp\left(-\frac{\sigma_L N_A}{A} \rho l\right) \quad (2)$$

$$P_{HL}(l) = \exp\left(\frac{\rho N_A (\sigma_L - \sigma_H)}{A} l\right)$$

[收稿日期] 2008-11-18;修回日期 2009-06-08

[作者简介] 欧阳晓平(1961-),男,湖南宁远县人,西北核技术研究所研究员,博士生导师,从事脉冲中子诊断技术研究;E-mail:oyxp2003@yahoo.com.cn

$$\equiv \exp(\mu_{\text{HL}}l) \quad (3)$$

$$P_{\text{H}}(l) = (P_{\text{HL}}(l))^{-\frac{\sigma_{\text{H}}}{\sigma_{\text{L}} - \sigma_{\text{H}}}} \equiv (P_{\text{HL}}(l))^{-\varepsilon} \quad (4)$$

$$\zeta = \exp\left(\frac{\rho N_{\text{A}}}{A}(\sigma_{\text{L}} - 2\sigma_{\text{H}})l\right) = \exp(\eta_{\text{HL}}l) \quad (5)$$

以上公式中, σ_{H} , σ_{L} 为高低能 γ 微观总截面, A 为介质质量数, N_{A} 为阿弗加德罗常数。定义高低能 γ 光子相对透射因子 $\mu_{\text{HL}} \equiv (\sigma_{\text{L}} - \sigma_{\text{H}})\rho N_{\text{A}}/A$, 高能 γ 保留因子 $\varepsilon \equiv \sigma_{\text{H}}/(\sigma_{\text{L}} - \sigma_{\text{H}})$, 及 $\eta_{\text{HL}} \equiv (\sigma_{\text{L}} - 2\sigma_{\text{H}})\rho N_{\text{A}}/A$, 分别表示单位长度介质区分高低能 γ 的能力、散射掉低能 γ 同时保留高能 γ 的能力、以及区分高低能 γ 同时保持高能 γ 透射的能力。其中 η_{HL} 是综合反映材料性能的参数, 其数值越大, 性能越好。表 1 为几种散射介质对 16.7 MeV, 2 MeV γ 射线的散射性能, 综合来看, 石墨是较优的选择。

表 1 不同介质的 μ_{HL} , ε 及 η_{HL} 值

Table 1 Value of μ_{HL} , ε and η_{HL} for some media

介质	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	μ_{HL}	ε	η_{HL}
H ₂ 液体	0.078	5.04×10^{-3}	0.369	3.20×10^{-3}
(CH ₂) _n	0.92	1.69×10^{-2}	0.521	8.09×10^{-3}
Li	0.535	1.40×10^{-2}	0.449	7.71×10^{-3}
Be	1.848	4.89×10^{-2}	0.490	2.49×10^{-2}
C	2.267	6.38×10^{-2}	0.582	2.63×10^{-2}
Fe	7.86	8.87×10^{-1}	2.771	-1.57

高低能 γ 与物质作用后, 利用次级电子能量的差异, 即其穿透介质的能力差异, 可考虑在探测器灵敏单元(如闪烁体)前放置吸收材料, 吸收低能 γ 产生的次级电子, 而让高能 γ 产生的高能次级电子顺利进入闪烁体, 这样能进一步提高探测系统对高低能 γ 的区分能力, 但应注意由于低能 γ 的次级 γ 无法通过吸收材料去除, 因此要合理选择闪烁体及吸收体尺寸。

探测系统的总体布局如图 1 所示, 探测器分为散射和探测两部分。图 1 中靶的作用是将入射 γ 转换为电子, 使得闪烁体能在束流通道外进行探测, 避开通道中 γ 的干扰。考虑到重靶的高能 γ 截面更大, 此处靶选择 0.1 mm 的钨, 为最大限度地接收高能 γ 产生的次级电子, 同时避开低能 γ 产生的次级 γ , 选择闪烁体接收角为 $2^\circ \sim 8^\circ$, 考虑到高能 γ 为快脉冲, 因此选择快闪烁体材料 ST401, 闪烁体厚度 2.5 cm。吸收体材料选择轻材料聚乙烯, 以尽可能地使次级电子的能量以电离损失的形式沉积下来, 降低辐射损失的份额, 聚乙烯厚度为 10 mm。

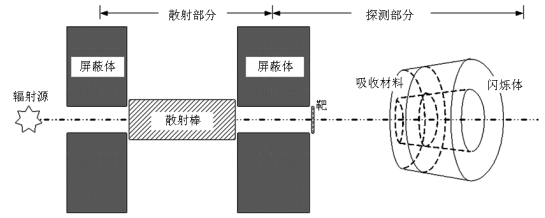


图 1 散射吸收探测方法示意图

Fig. 1 Sketch of scattering absorption method

3 理论模拟

由于要达到 5~6 个量级以上的高低能 γ 分辨能力, 使得探测器对低能 γ 射线探测效率很低, 在蒙特卡罗计算中属于深穿透问题, 笔者将散射部分和探测部分分别使用 MCNP4C 和 Geant4 分开计算。

3.1 散射部分模拟

由于采取式(1), 式(2)计算 γ 射线穿透介质能力时, 忽略了累积因子的影响, 因此解析计算的结果不够准确, 笔者利用 MCNP4C 进行计算, 得到不同 P_{HL} 值时需要的碳棒长度及对应的高能 γ 穿透概率, 结果如表 2 所示。

表 2 不同 P_{HL} 时的探测器参数

Table 2 Parameter of detector for different P_{HL}

P_{HL}	碳棒长度 L/cm	高能 γ 穿透概率 P_{H}
10^3	107.0	1.88×10^{-2}
10^4	142.0	4.94×10^{-3}
10^5	177.9	1.30×10^{-3}
10^6	213.9	3.42×10^{-4}

3.2 探测部分模拟

根据以上设计, 采用 Geant4 程序模拟计算, 得到探测器的 γ 灵敏度, 中子灵敏度及 γ 能量沉积时间谱。

1) γ 、中子灵敏度归一到单个 γ 光子或中子, 其入射打靶后与闪烁体作用而沉积的平均能量如图 2 所示。若不考虑闪烁体发光及收集过程的影响, 探测器对 16.7 MeV 入射 γ 的灵敏度是 2 MeV γ 的近 900 倍。高能 γ 被探测到的概率为 3.6×10^{-3} , 而低能 γ 被探测到的概率要低 2 个量级, 约为 3.1×10^{-5} 。较好满足了区分高低能 γ 射线的要求。

从图 2 中还可以看到, 14.1 MeV 聚变中子的平均能量沉积约为 16.7 MeV γ 射线的 1/100, 因此当辐射场中中子强度大时, 需要采取其他手段如飞行时间法^[5], 避开中子的干扰。

2) 探测器时间响应。通过模拟 γ 射线在探测

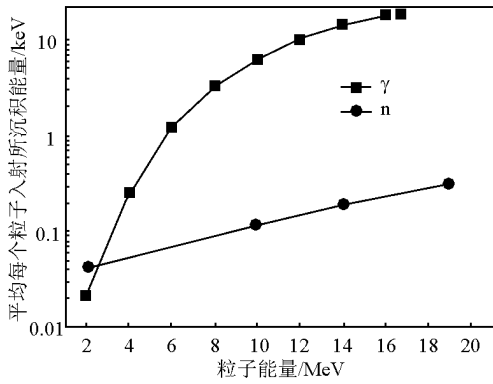


图2 探测器的 γ 、中子灵敏度曲线

Fig. 2 Sensitivity curve of gamma and neutron

器中能量沉积的过程,得到 γ 射线能量沉积的时间分布如图3所示,图中时间零点为 γ 射线到达靶面的时刻。

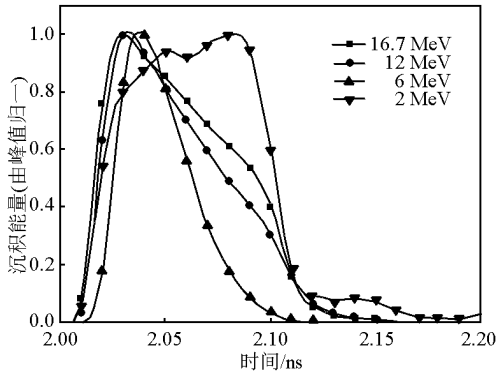


图3 闪烁体中能量沉积时间分布(峰值归一)

Fig. 3 Time spectrum of energy deposition

从图3可见, γ 射线的能量沉积过程大部分在0.1 ns以内完成,其上升时间很短,且上升沿所处时刻基本相同,证明辐射转换时间、各种能量电子从辐射转换体到闪烁体的漂移时间的发散、以及电子吸收材料对探测器时间性能的综合影响基本可以忽略。配合快闪烁体如ST401,BC422^[6]等,可完成对聚变时间过程的诊断。从图3中还可以看到,2 MeV γ 入射时能量沉积时间分布较为平坦,这是由于2 MeV γ 射线打靶产生的次级电子绝大部分已被阻止在吸收体中,而次级 γ 基本无阻挡进入闪烁体,由于 γ 作用截面小,因此能量沉积较均匀分布在闪烁体体积内,能量沉积时间分布半宽度也就约等于 γ 射线穿越2.5 cm闪烁体的时间(约为0.08 ns)。

4 结语

在实际使用时,可依据实际本底水平选择合适长度的散射材料(石墨棒)配合探测部分实现对高能 γ 射线的探测。如选择110~180 cm的石墨,可实现高低能 γ 灵敏度比值达 $10^6 \sim 10^8$ 。假定选用ST401为闪烁体,其发光的10%被有效收集,光电器件光阴极量子效率为0.2,选配光电管或放大倍数为 10^5 的光电倍增管,对应的高能 γ 灵敏度分别为 $10^{-21} \sim 10^{-16} \text{ C} \cdot \text{cm}^2$ 。

模拟计算结果表明,通过选取快闪烁体和快光电管等,该方法系统响应时间可望达到纳秒甚至亚纳秒级。

笔者提出根据 γ 射线及电子与物质作用方式的特点,利用散射吸收方法实现在强低能本底 γ 环境下的高能 γ 探测。该方法具有高低能 γ 区分能力强,且可根据本底水平选择合适高低能 γ 区分能力以得到较高高能 γ 灵敏度的特点,可满足不同本底水平下高能 γ 的探测,该探测器结构较为简单,因此较目前使用的基于磁分析器与契伦柯夫探测器的聚变 γ 探测方法有一定的优势。

致谢: 感谢西北核技术研究所宋朝晖、韩和同和熊华博士对本方法研究的意见及建议。感谢田耕、谢洪刚在模拟计算方面提供的帮助,并感谢西北核技术研究所第二研究室伽马组全体同仁。

参考文献

- [1] 叶玉云,陈涵德,何锡钧,等. 纳秒级d-T聚变反应的16.7 MeV γ 测量[J]. 原子能科学技术, 1996, 30(2): 127-133
- [2] Michael J M. The fusion diagnostic gamma experiment: a high-bandwidth fusion diagnostic of the national ignition facility[J]. Rev. Sci. Instrum., 1999, 70(1): 1226-1228
- [3] Caldwell S E, Berggren R R. Observation of d-t fusion gamma rays (invited)[J]. Rev. Sci. Instrum., 2003, 74(3): 1837-1841
- [4] John E, Brolley, Joseph S, et al. A gas Cerenkov detector for measuring 16.7-MeV gamma rays from the D(T, γ)5He reaction[R]. 1983. LA-UR-83-1864
- [5] 吴治华,赵国庆,陆福全,等. 原子核物理实验方法[M]. 北京:原子能出版社,1997
- [6] Lerche R A, Phillion D W, Tietbohl G L, et al. 25 ps neutron detector for measuring ICF-target burn history[J]. Rev. Sci. Instrum., 1995, 66(1): 933-935

Scattering-absorbing method for the detection of 16.7 MeV high-energy pulsed gamma

Tan Xinjian^{1,2}, Ouyang Xiaoping², Wang Qunshu²

(1. Key Laboratory of Particle & Radiation Imaging Ministry of Education, Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. North West Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

[Abstract] This paper proposes a new method of diagnosing 16.7 MeV high-energy pulsed gamma, named "scattering-absorbing method". The ratio of the sensitivity of HEG to that of the LEG can reach 10^6 to 10^8 by this new method. The sensitivity of 16.7 MeV high-energy gamma ranges from 10^{-21} to 10^{-16} C·cm². It's better than the traditional method which bases on the magnetic analyzer and Cherenkov detector on some aspects.

[Key words] high-energy gamma; Cherenkov detector; scattering absorption method

(上接9页)

Research on the strategic status and development road map of renewable energy in China

Du Xiangwan¹, Huang Qili², Li Junfeng^{3,4}, Gao Hu³

(1. Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088, China; 2. Northeast China Grid Company Limited, Shenyang 110006, China; 3. Energy Research Institute, National Development and Reform Commission, Beijing 100038, China; 4. China Renewable Energy Industries Association, Beijing 100044, China)

[Abstract] China's economy is in a rapid development period, demand for energy will continue to grow, energy and environmental constraints on sustainable development will be more and more serious, therefore, developing clean energy technologies and accelerating the localization of clean resources development is an inevitable choice. Renewable energy is a kind of technology with small environmental costs, clear developing prospects and less controversy. China has promulgated the *Renewable Energy Law*, passed legislation to establish a strong promotion of the development of renewable energy policy framework, and issued guidance of industrial development of *Renewable Energy and Long-term Development Planning* as well as a series of management policies. Strong development and use of renewable energy sources has been identified as the inevitable selection for China's energy development.

[Key words] China; renewable energy (RE) resource; development target; renewable energy development roadmap