



#### 基于<sup>n</sup>MCP的光中子成像方法

#### 杨祎罡

1清华大学工程物理系

2粒子技术与辐射成像教育部重点实验室

\*yangyigang@mail.tsinghua.edu.cn

中国物理学会高能物理分会第十一届全国会员代表大会暨学术年会





### 1. 研究背景

- 中子成像提供了与X射线成像不同的、互补的关于被检测物体的信息。
- 单一射线(无论是中子,还是光子)的衰减仅能提供"t<sub>m</sub>质量厚度(g/cm<sup>2</sup>)"
  和 "μ<sub>m</sub>质量衰减系数(cm<sup>2</sup>/g)"的乘积。
- 但实际中无论 $t_m$ 和 $\mu_m$ 都是未知量。
- · 为了形成对被检测物体的认识,需要得到两个测量值,才能对tm和µm形成认识。

### 光子中子双模成像的基本原理





- 反应堆、散裂源
  - 有着高的产额(10<sup>17</sup>n/s或更高),因此在大的准直比(>100:1)下仍能获得不低于 10<sup>8</sup>n/cm<sup>2</sup>/s的注量率,这使成像所需的统计性容易得到保证。
  - 缺乏成像光子,需要单独提供X射线源,带来系统复杂度。
- 光中子源
  - 反应产额相对较低,难以超过1/100 (n/入射粒子),在靶热功率限制的条件下,实际中子产额最高~10<sup>14</sup>n/s。
  - 光核反应所需要的光子,在产生中子的同时,也可以用来开展光子成像。





### 单电子加速器的双模成像技术



### X射线与中子的能谱

X射线能谱及对应的平均质量衰减系数 中子能谱 (模拟与测量) Simulated result 3.0x10<sup>-3</sup> **(a)** 10<sup>5</sup> X-ray flux (/e-/MeV) 2.5x10 Experimental result Simulated result  $2.0 \times 10^{-3}$ 10<sup>4</sup> Neutron Flux (n/cm<sup>2</sup>/s/eV) 1.5x10<sup>-3</sup>  $1.0x10^{-1}$ 10<sup>3</sup> 5.0x10<sup>-4</sup> 0.0 10<sup>2</sup> X-ray Energy (MeV) Mass attenuation coefficient (cm<sup>2</sup>/g) 1.4 Scattered X-ray **(b)** 200 kV X-ray tube 1.2 10<sup>1</sup> 1.0 0.8 10<sup>0</sup> 0.6 0.4 Experimantally measured thermal neutron flux (10 meV ~300 meV) = 2500 n/cm 10<sup>-1</sup> 0.2 10<sup>-2</sup> 10<sup>-1</sup> 10<sup>0</sup> 10<sup>2</sup> 10<sup>1</sup> 0.0 Neutron Energy (eV) 20 40 60 80 Atomic number (Z)

8 /24

#### 如何兼容X射线成像与中子成像







#### Micro Channel Plate



#### The neutron sensitive MCP



#### 两种不同读出的<sup>n</sup>MCP探测器

- 积分式
  - ✓适用于高的flux,具备在短时间内获得好的统计性的能力
  - ? 信号形成环节多, 会引入额外的噪声
- 计数式
  - ✓适用于低或不高的flux,在暗计数低的情况下,也可以在短时间内获得好的统计性
  - ? 不能用于强源

# (1) 积分式探测器



探测器对于X flash的响应



#### a) 轻水(0.2g/cm<sup>2</sup>)

b)重水(0.22g/cm<sup>2</sup>)

c) 电缆

d)铅皮覆盖的塑料勺

e) 2mm厚铅皮





e) 2mm厚铅皮



# a) 轻水(0.2g/cm<sup>2</sup>) b) 重水(0.22g/cm<sup>2</sup>) c) 电缆 d) 铅皮覆盖的塑料勺

e) 2mm厚铅皮





双模成像系统的能力:

- ✓ 物质属性区分
- ✓ 同位素分辨
- ✓ H元素敏感
- ✓ 重金属穿透

### (2) 计数式探测器



#### 1.) WSA电极



$$X = D * \frac{f_s - f_{s\min}}{f_{s\max} - f_{s\min}}$$
$$Y = D * \frac{f_w - f_{w\min}}{f_{w\max} - f_{w\min}}$$
$$f_s = \frac{S}{W + S + Z}, f_w = \frac{W}{W + S + Z}$$



$$C_{WSA_Z} \propto D^2$$

$$ENC = Q_0 + kC_{WSA} \propto D^2$$

$$X = D * \frac{f_s - f_{s\min}}{f_{s\max} - f_{s\min}}$$

$$d(X) \propto d(D^3)$$

$$FWHM_{x,y} \propto D^3$$



# 两种探测器的比较



#### 3. 小结

- nMCP探测器因为高的时间和空间分辨率,在中子成像领域中可发挥重要作用。
- 不同的读出方式,适用于不同的应用对象。
  - 对于高flux的情况,积分式的读出方法是唯一可行的,但此时引入的中间噪声较大,在flux较低时图像的 信噪比不好;
  - 对于低或不高flux的情况,计数式的读出方法更加有利,无论是从空间分辨和时间分辨的角度都能获得更好的效果。

更多详细内容可参考: Applied Sciences (ISSN 2076-3417) Special Issue "Advances in Neutron Imaging"

- Yu, Y.; Zhang, R.; Lu, L.; <u>Yang, Y.</u> The Bimodal Neutron and X-ray Imaging Driven by a Single Electron Linear Accelerator. Appl. Sci. 2021, 11, 6050. <u>https://doi.org/10.3390/app11136050</u>
- https://www.isnr.de/images/nr\_newsletter/NR17.pdf

感谢国家自然基金重点项目"基于单加速器的X射线及中子射线双模成像方法研究"(11735008)资助

