

基于 $(e,e'xn)$ 反应的库仑激发 截面理论与实验研究

杨宇祺

yangyuqi@ihep.ac.cn

2026年7月16日



研究背景



理论分析

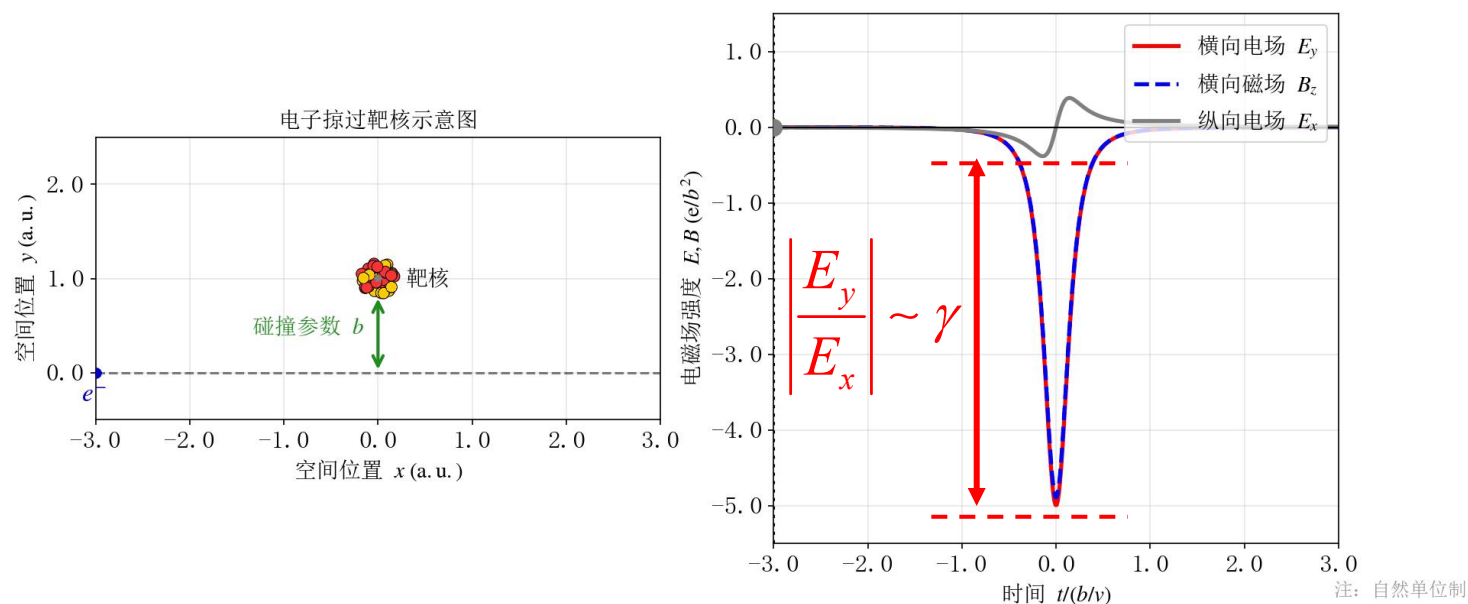


实验测量



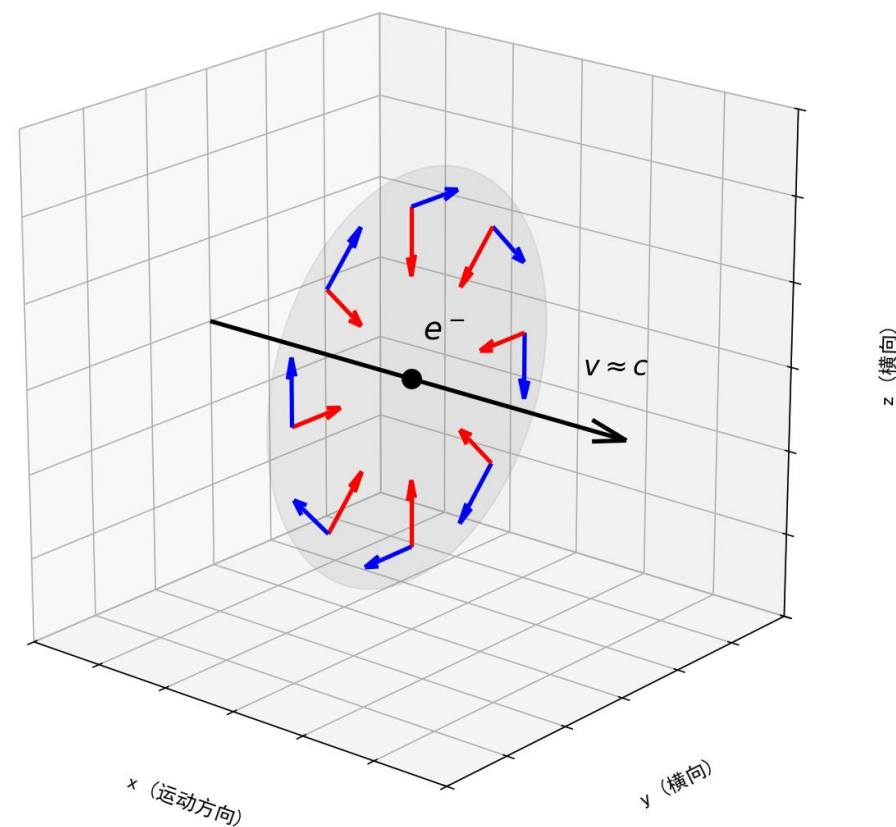
应用与展望

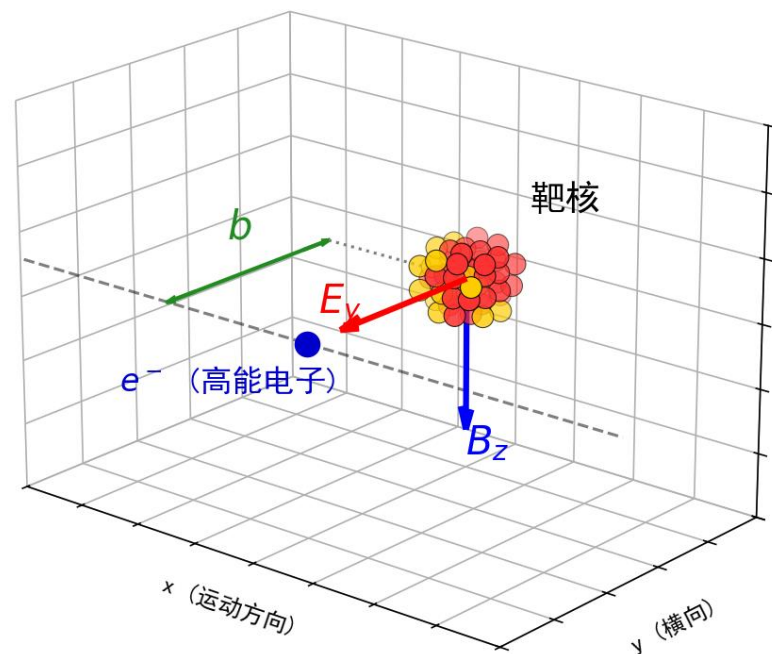
相对论电子掠过靶核时的电磁场演化 ($\gamma=5.0$)



靶核在电子产生的瞬时强电磁场下被激发

自然单位制下，横向电场 E_y 和
磁场 B_z 大小相等，互相垂直

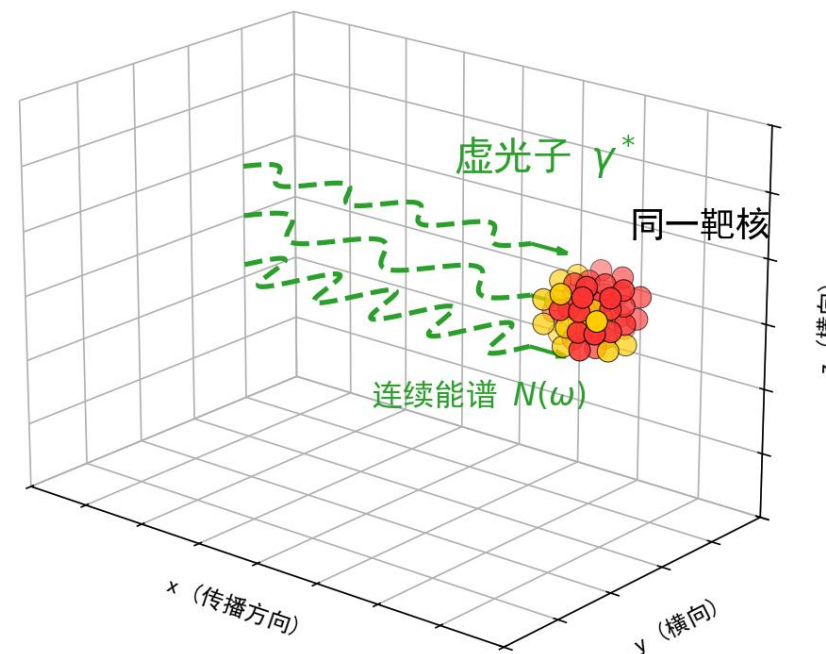




实际物理过程：
高速电子掠过产生的相互垂直强横向电磁脉冲

等效于
(Equivalent to)

↔

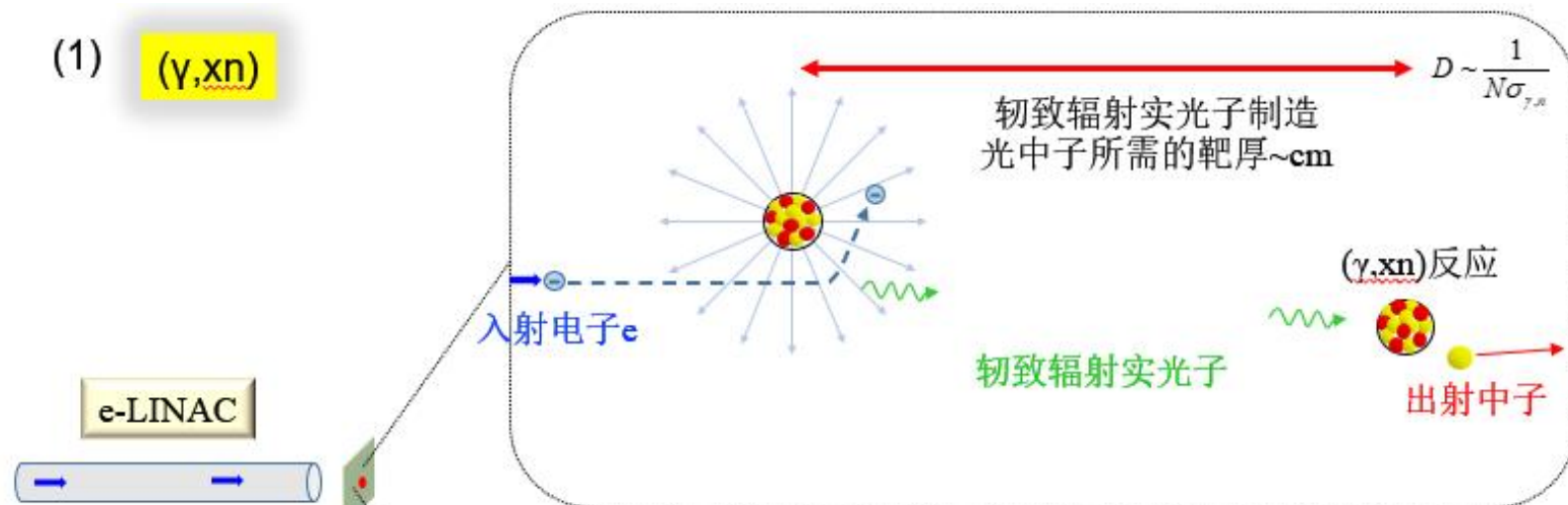


等效物理模型：
具有连续能谱的虚光子辐射场

等效光子方法把库仑激发问题转化为虚光子谱与光核截面的点积问题：

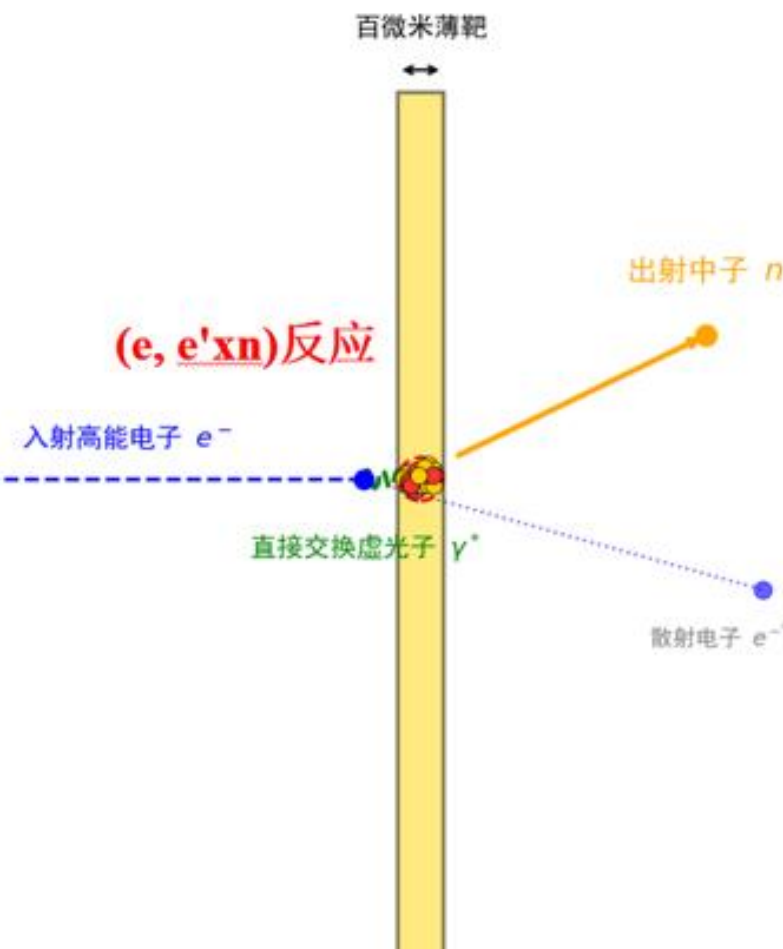
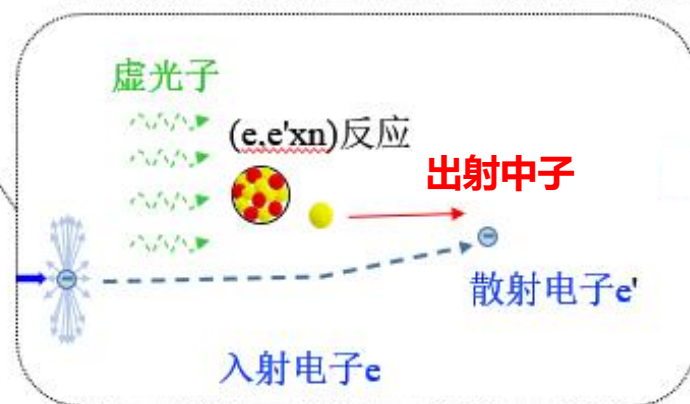
$$\int_{E_{th}}^{E_e} \sigma_{\gamma}(E_{\gamma}) N_{virtual}(E_{\gamma}, E_e) dE_{\gamma} = \sigma_e(E_e)$$

(1) (γ, xn)



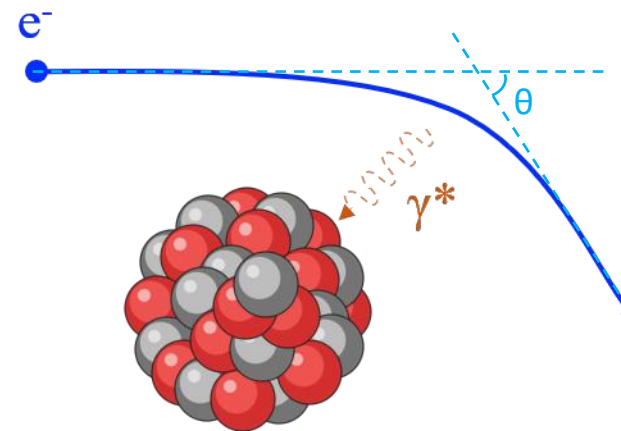
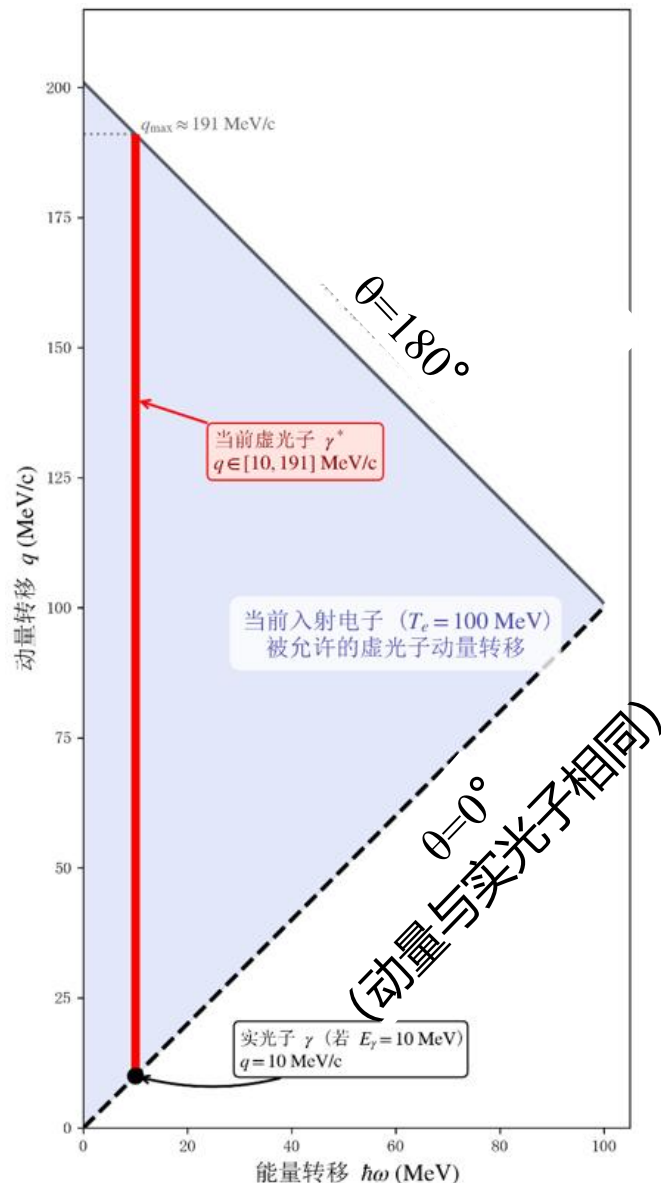
(2)

$(e, e'xn)$



- 点源特性
虚光核反应可以通过薄靶实现更好的点源特性

库仑激发的特点



- 高动量/角动量
虚光子不受能量动量关系约束，相较于实光子可以传递更高的动量和角动量



研究背景



理论分析



实验测量

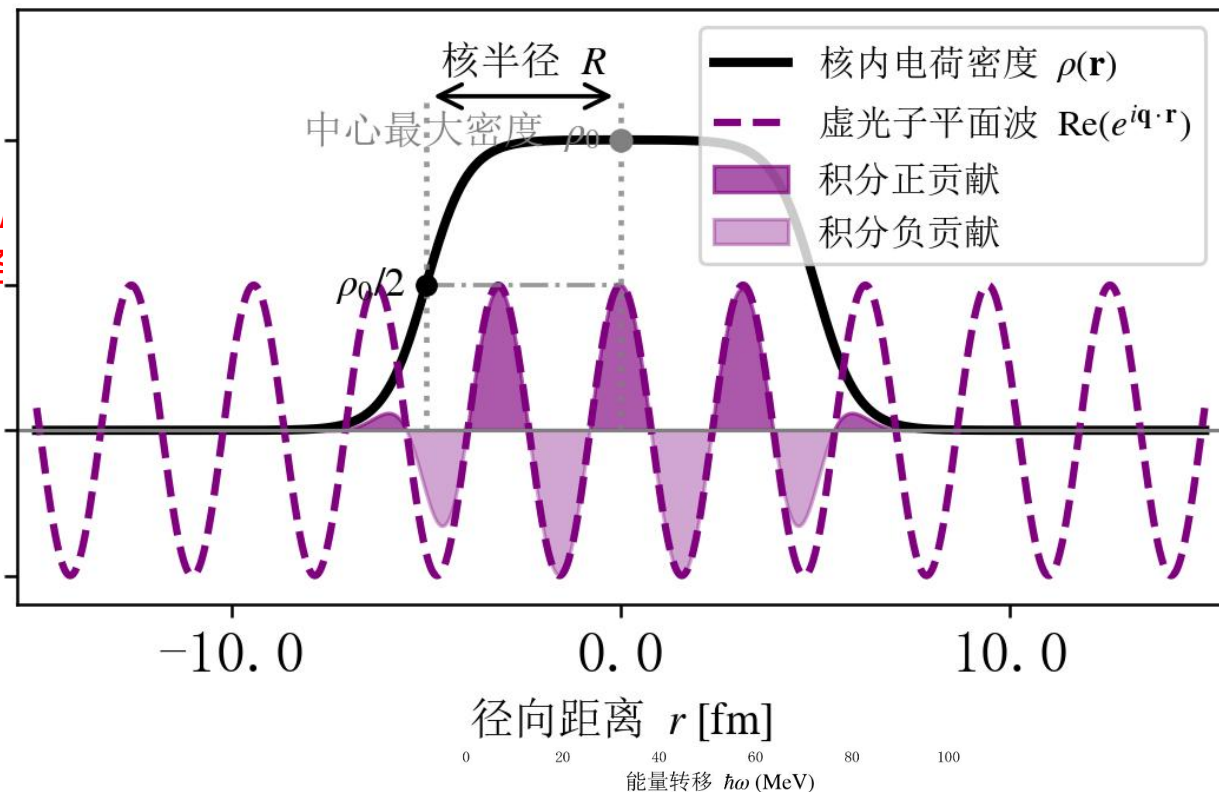
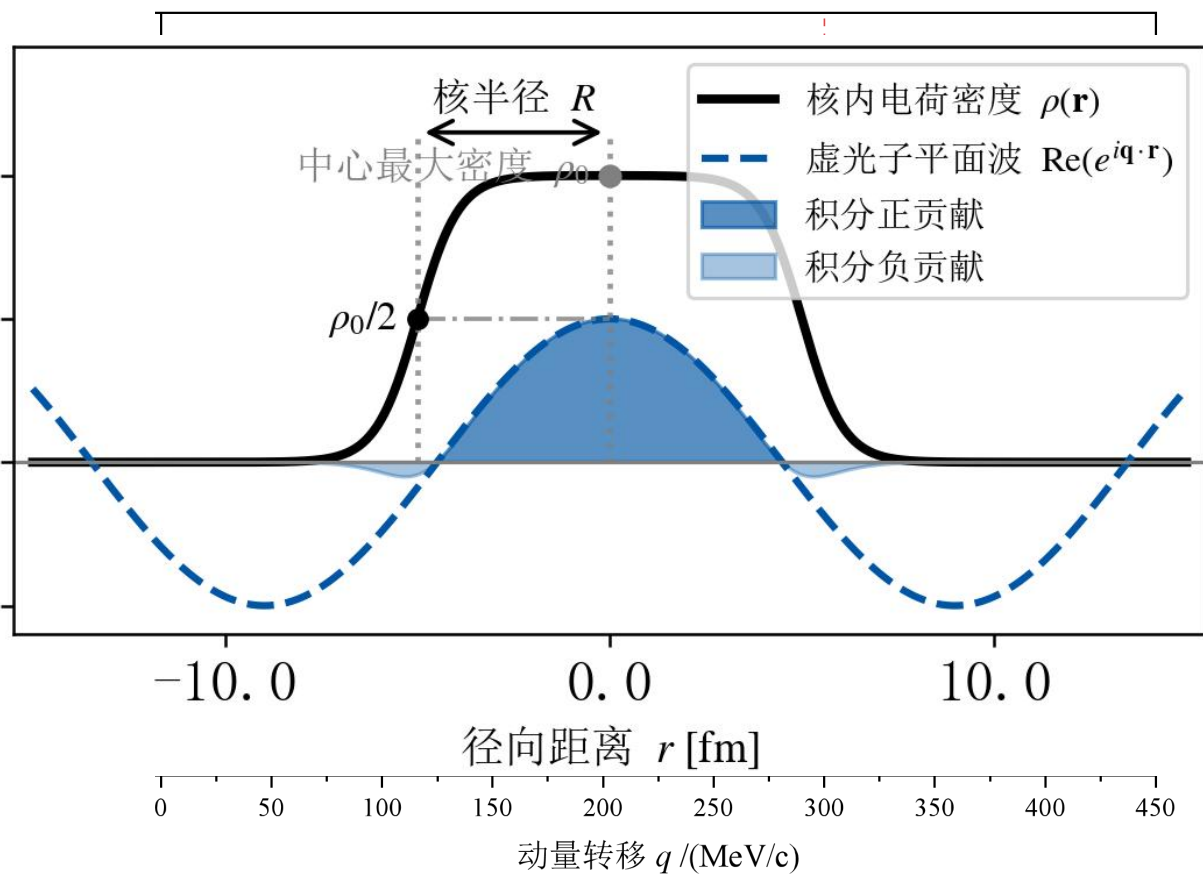


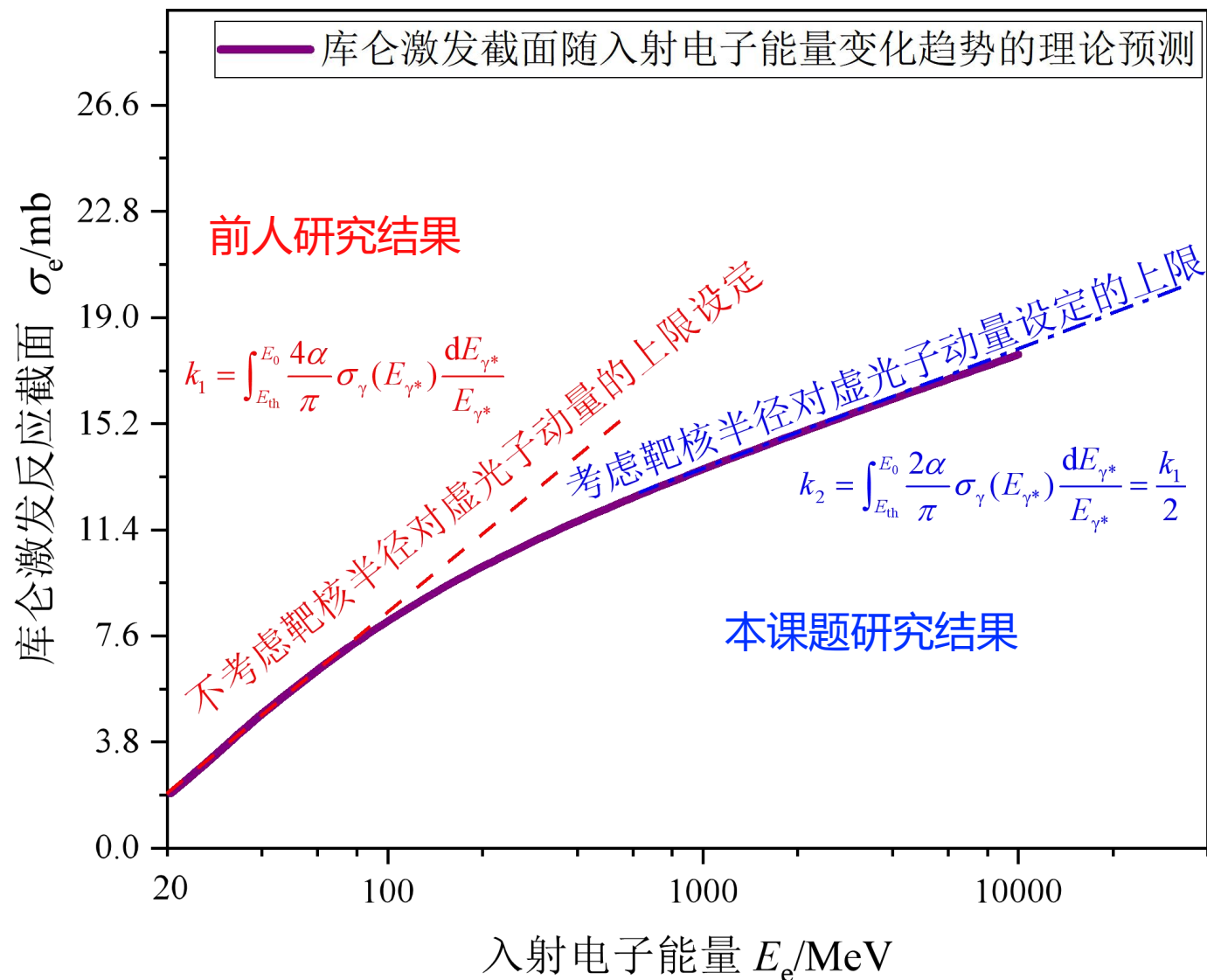
应用与展望

$$\sigma_e(E_e) = \int_{E_{th}}^{E_e} \sigma_\gamma(E_\gamma) N_{\text{virtual}}(E_\gamma, E_e) dE_\gamma$$

$$|F(\vec{q})|^2 = \frac{\sigma_{\text{ext}}}{\sigma_{\text{point}}} = \left| \int \rho(\vec{r}) e^{i\vec{q}\cdot\vec{r}/\hbar} d^3r \right|^2$$

高频振荡的波函数的正半周期与负半周期在积分域内的贡献相互抵消





结论一
低/中能区可看到截面
随 $\ln(E_e)$ 线性增长。

结论二
考虑核尺寸动量截断后，
随能量升高高斜率逐渐减
小至原来的一半。



研究背景



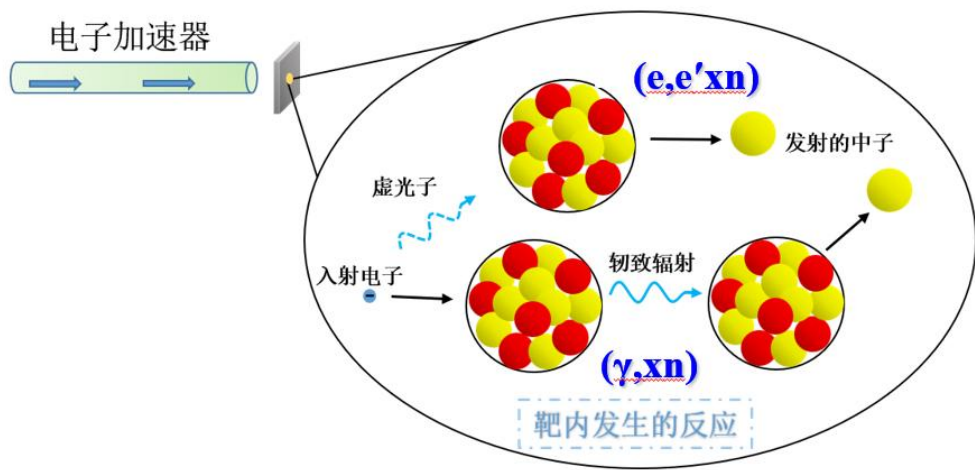
理论分析



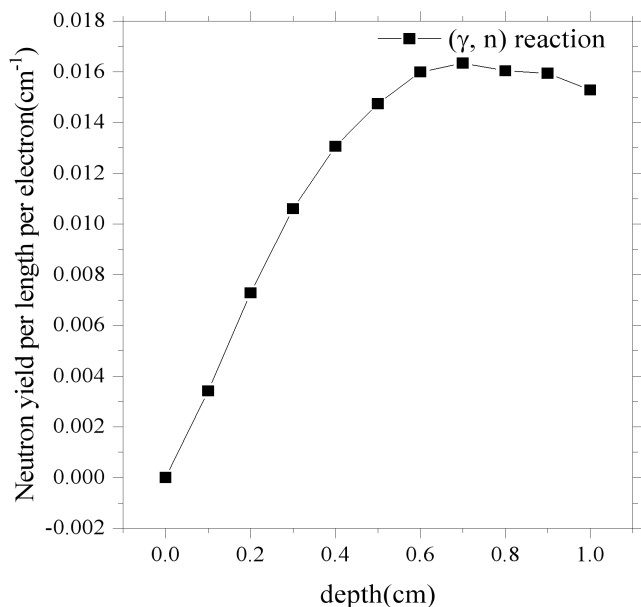
实验测量



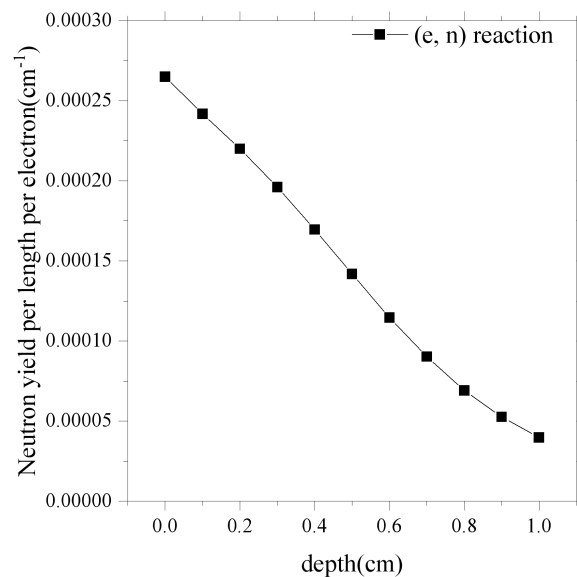
应用与展望



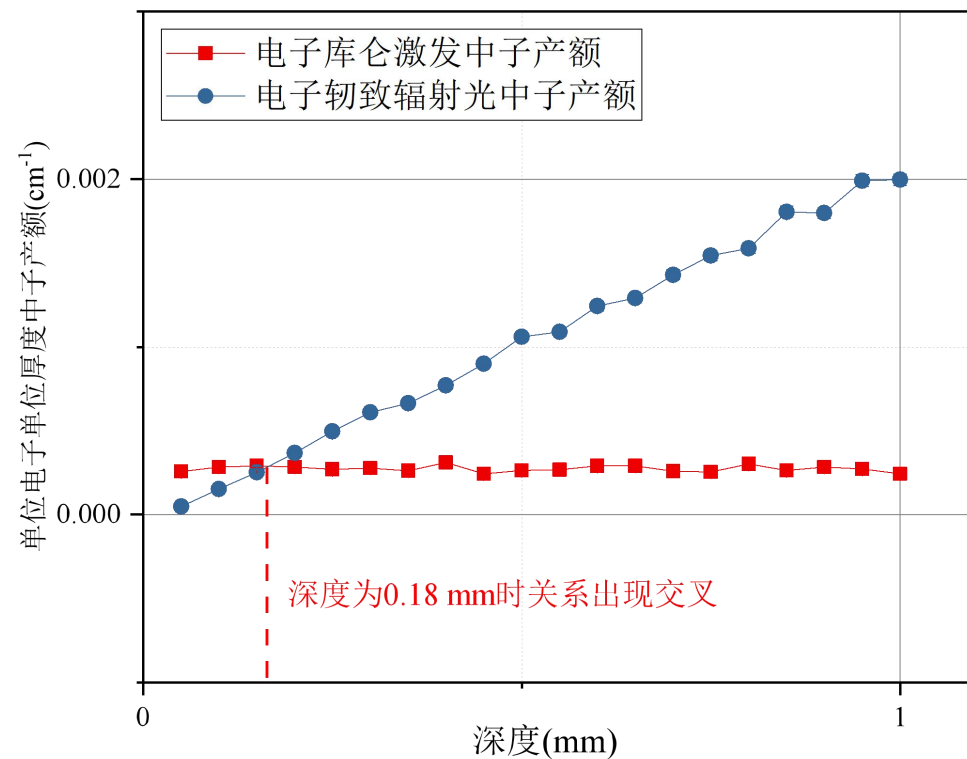
($e \rightarrow \gamma$)和($\gamma \rightarrow n$)两个过程的卷积

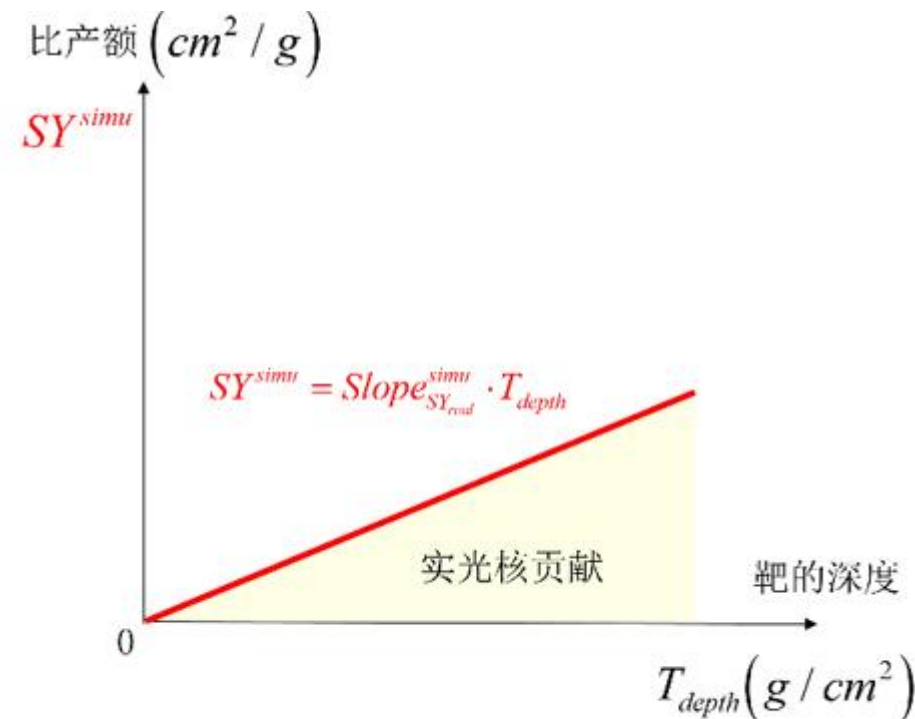
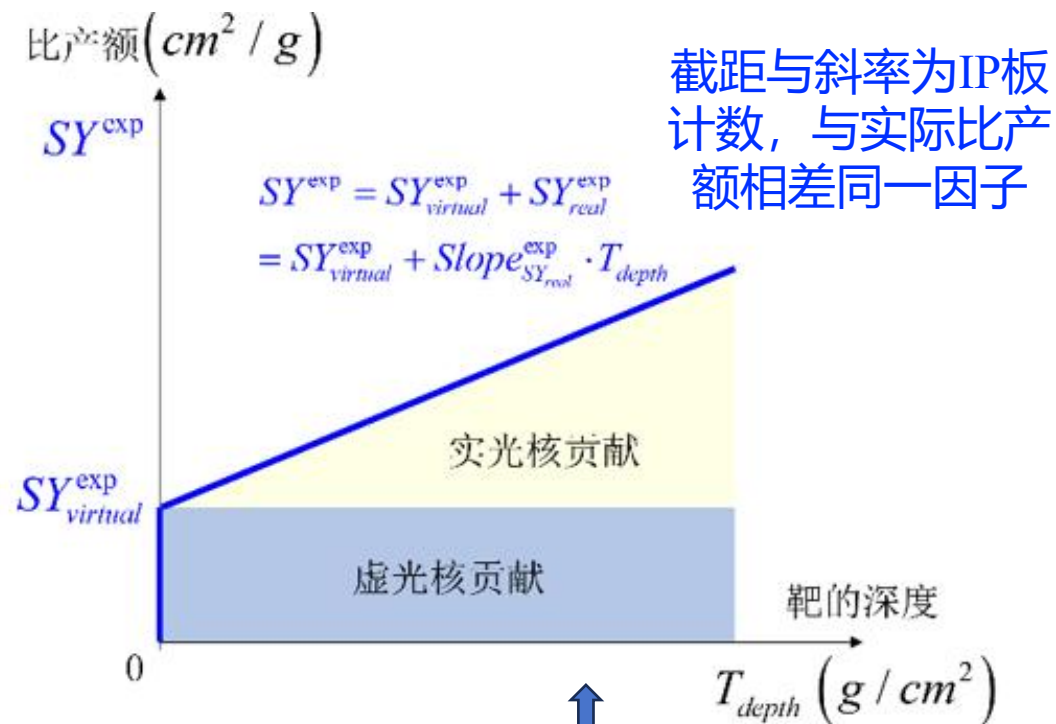


($e \rightarrow n$)一步反应



薄靶中虚实光核反应产额随靶深度关系

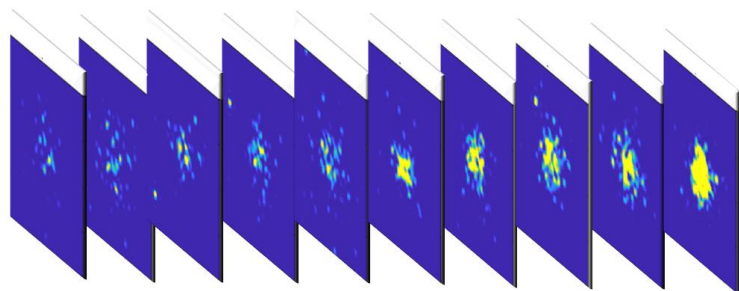




(左)
实验测量

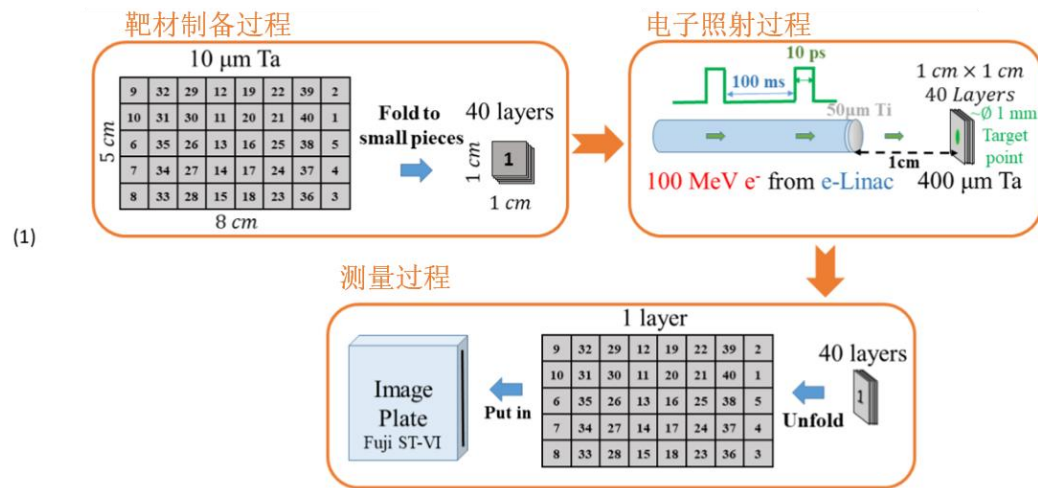
(右)
模拟计算 (仅开放实光核)

IP板测量:

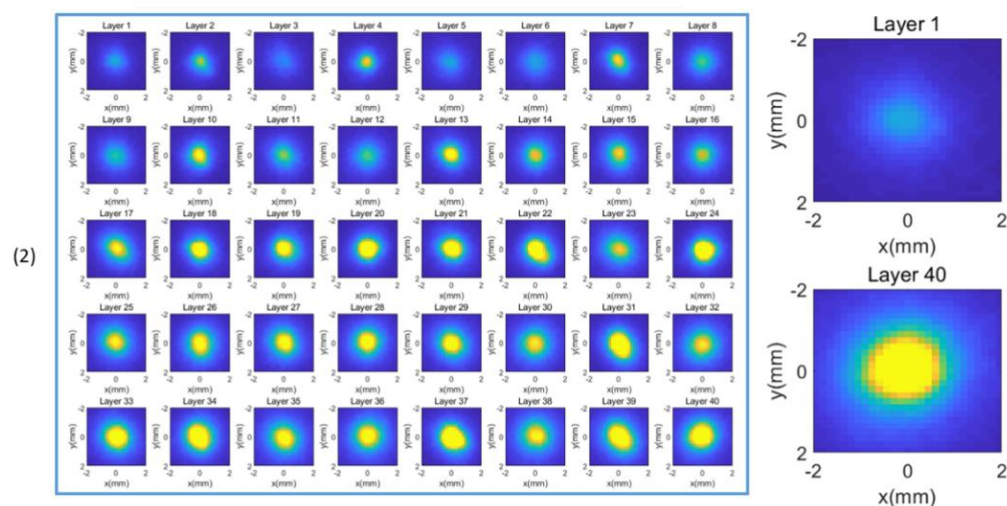


$$\sigma_{\text{virtual}}^{\text{exp}} = \frac{SY_{\text{virtual}}^{\text{exp}}}{\text{Slope}_{SY_{\text{real}}^{\text{exp}}}^{\text{exp}}} \cdot \text{Slope}_{SY_{\text{real}}^{\text{simu}}}^{\text{simu}} \cdot m(\text{Target})$$

实验流程

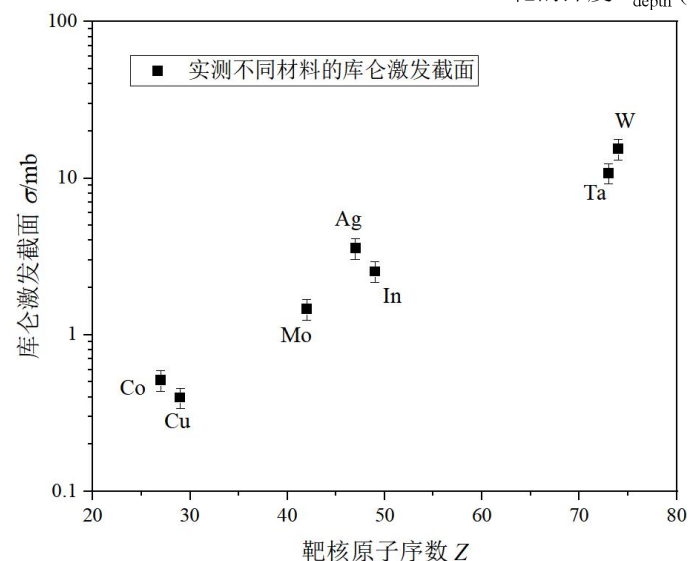
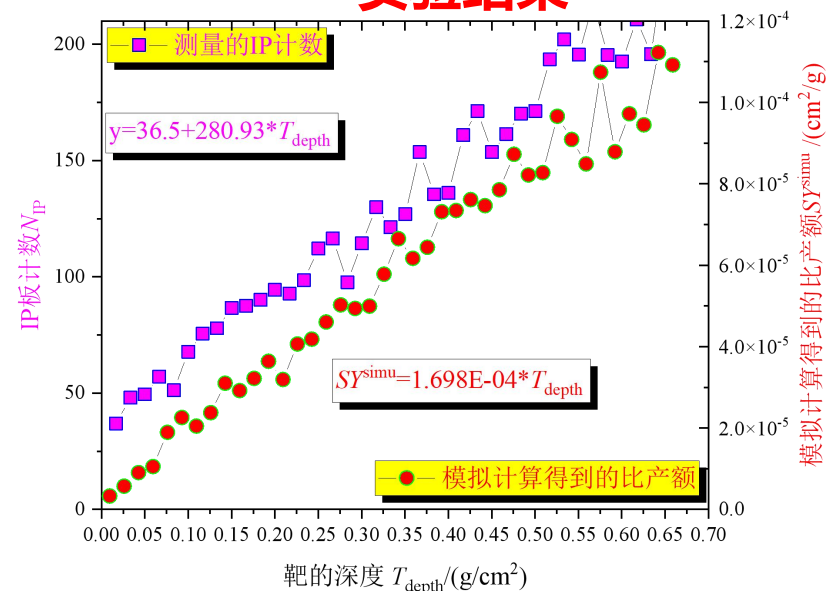


各层钽靶活化分布



实验流程与结果

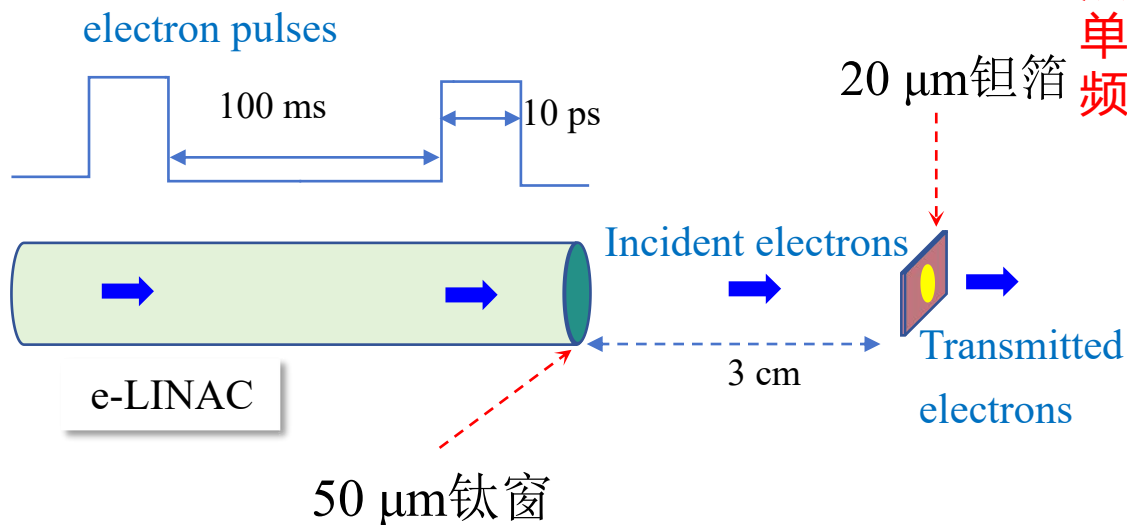
实验结果



无法分辨多中子出射道

Yu Y, Weng X, Yang Y, et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2020, 954: 161747.

(1) 用最高可达120MeV的电子照射样品

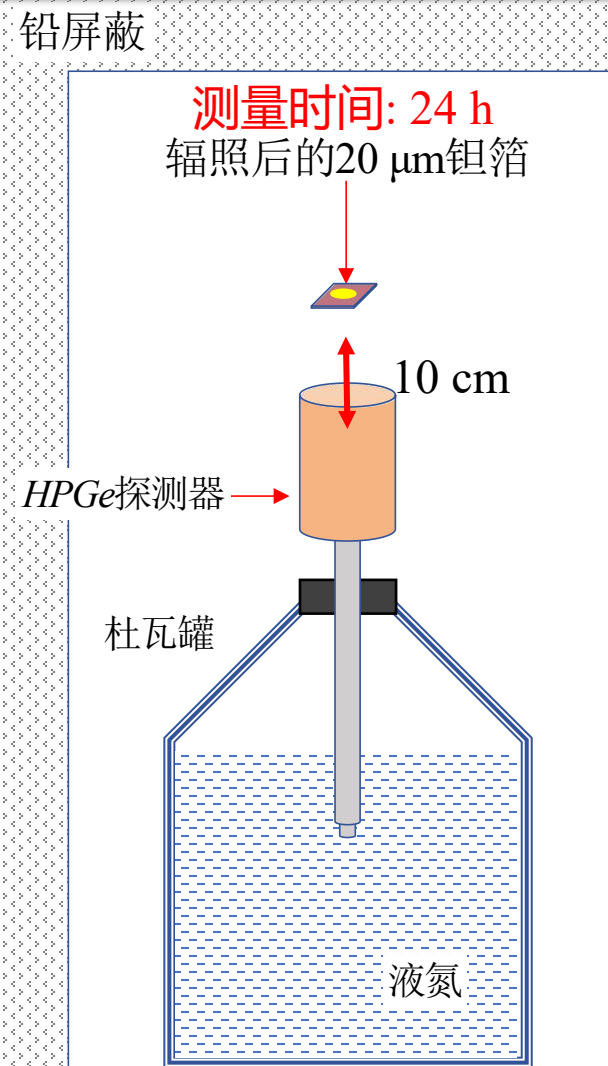


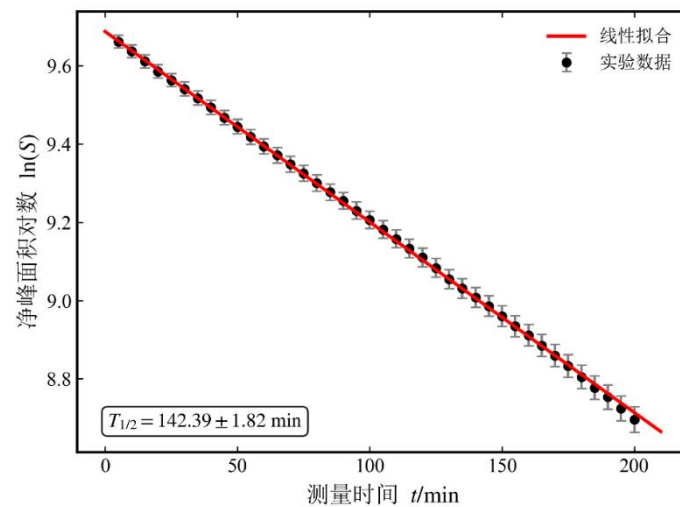
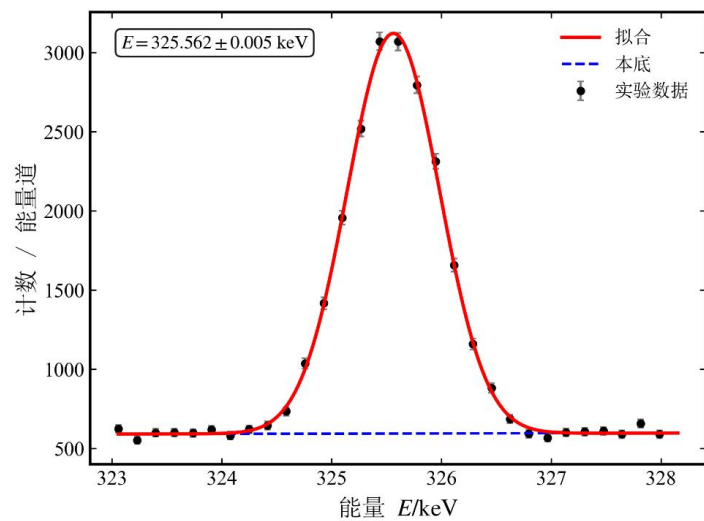
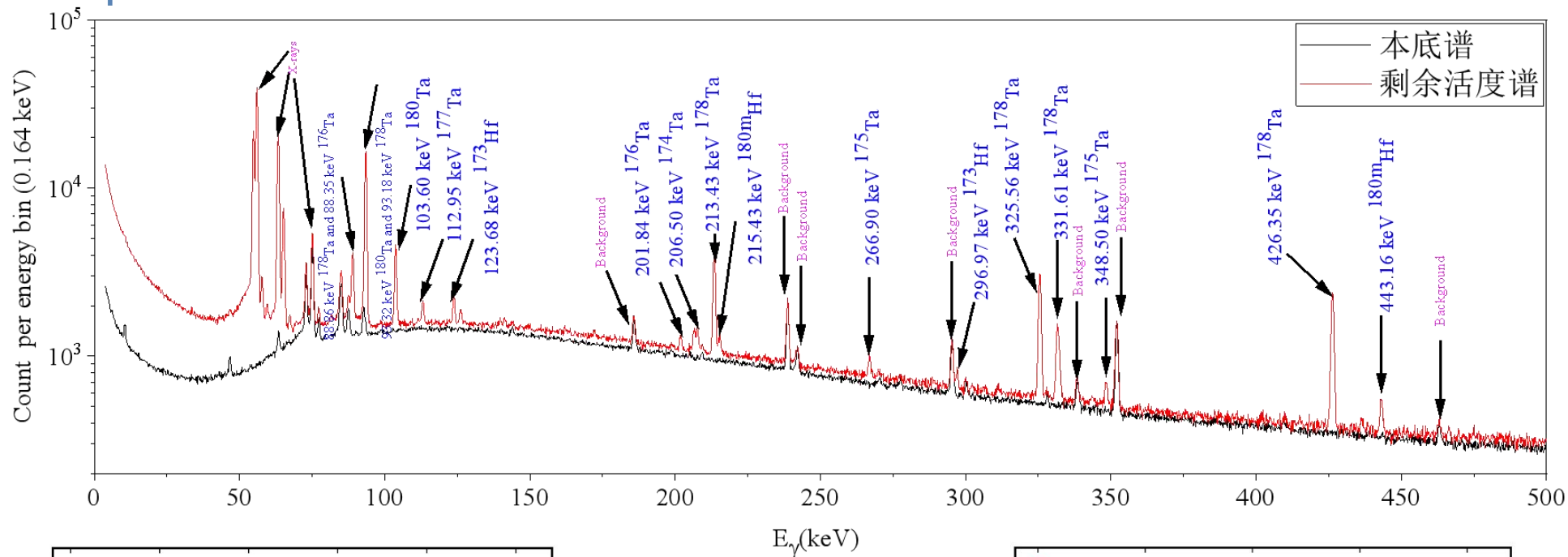
能量: 20~110 MeV
照射时间: 1 h
单发电荷量: ~ 500 pC
频率: 10 Hz



西北核技术研究院
120MeV电子加速器

(2) 用高纯锗探测器测量照射后的样品的剩余活度谱

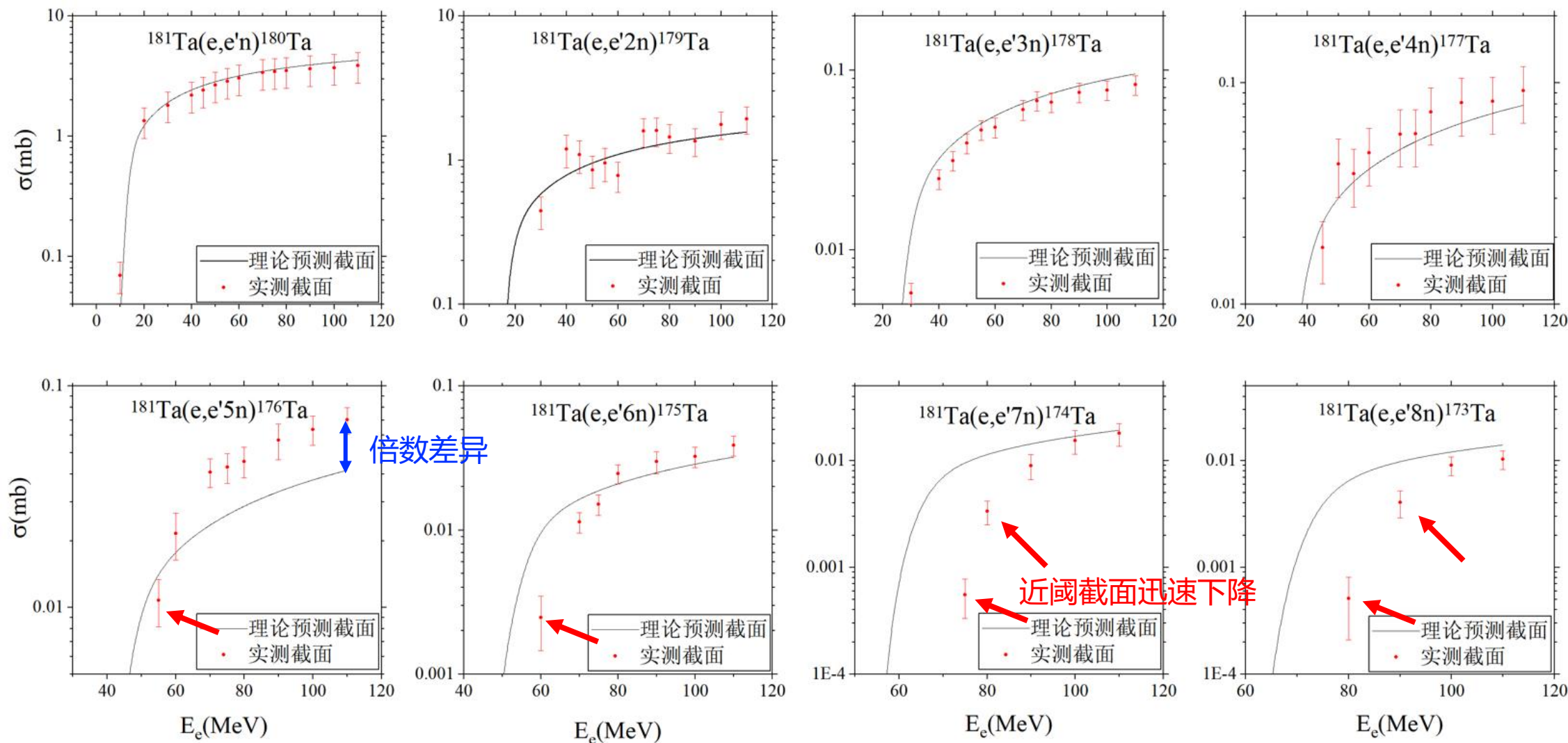




$$\sigma_{(e,e'xn)}^{\text{exp}} = -\frac{1}{ND(1+R_{S/B})} \ln \left[1 - \frac{N_{\text{meas}} \lambda t_{\text{irr}}}{(1-\delta_{\text{sum}}) N_e I_{\gamma} \varepsilon_{\text{HPGe}} \varepsilon_{\text{self}} (1-e^{-\lambda t_{\text{irr}}}) e^{-\lambda t_{\text{cool}}} (1-e^{-\lambda t_{\text{meas}}})} \right]$$

符号	含义	相对误差
N_{meas}	特征衰变 γ 射线的全能峰计数	1% ~ 10%
N_e	照射的总电子数	<2.5%
$\varepsilon_{\text{HPGe}}$	高纯锗探测器对全能峰 γ 的绝对探测效率	<2.5%
$\varepsilon_{\text{self}}$	自吸收效应下，特征衰变 γ 射线离开钽靶的出射率	<1%
I_{γ}	特征衰变 γ 的绝对强度	0.8 ~ 27.6%
λ	$^{181-x}\text{Ta}$ 的衰变常数	0.07% ~ 7%
$t_{\text{irr}}、t_{\text{cool}}、t_{\text{meas}}$	照射时间、冷却时间与测量时间	/
N	^{181}Ta 的数密度	/
D	钽箔的厚度	8.66%
δ_{sum}	符合效应导致的相对计数损失	<1%
$R_{S/B}$	实/虚光核反应产额比	<2%

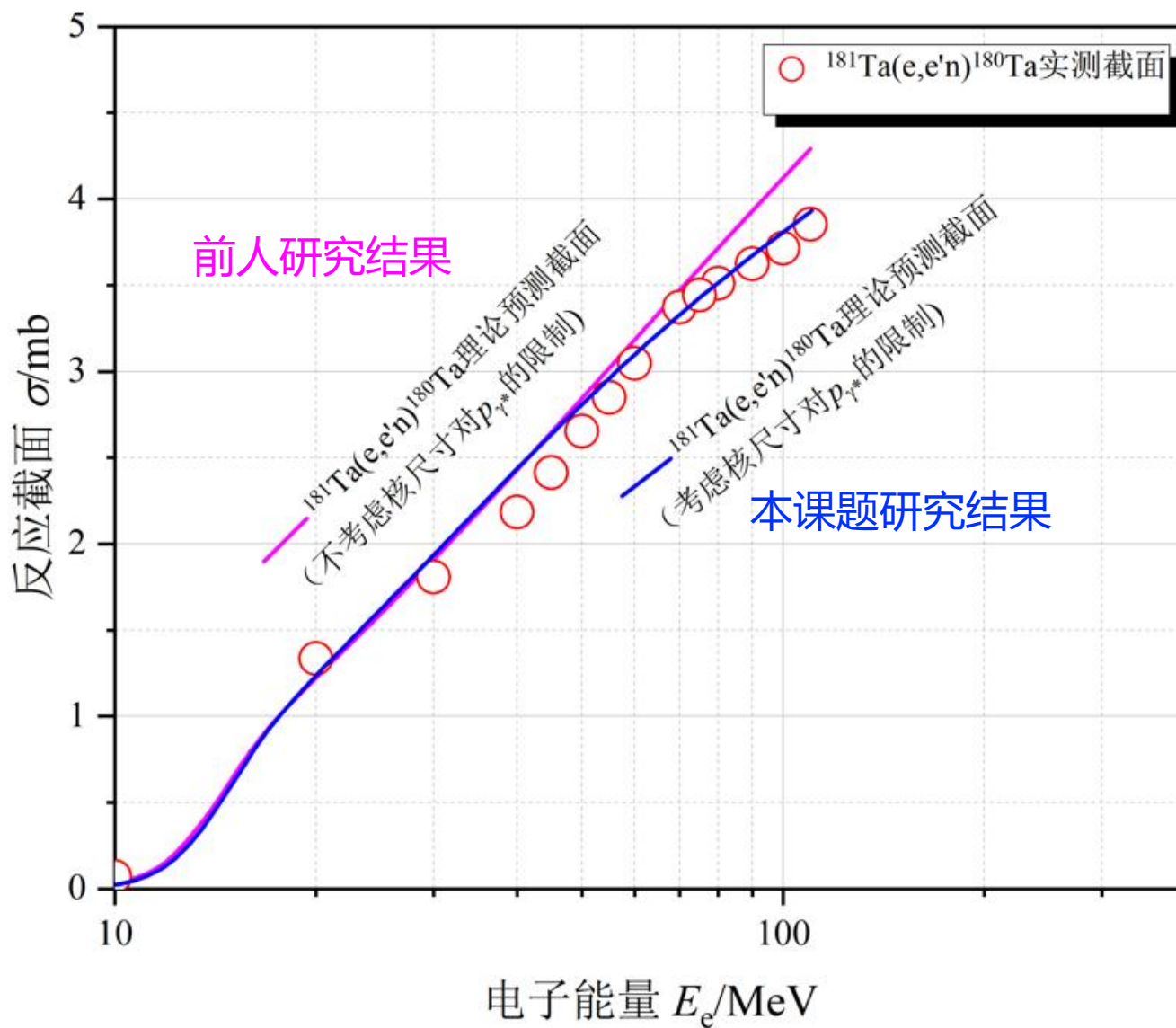
} IAEA



➤ 首次实验获得了 $x_{\max}=8$ 的 $(e,e'xn)$ 截面数据

Yang, Y., Weng, X. & Yang, Y. Eur. Phys. J. Plus 140, 505 (2025).

➤ 以上差异反映了目前核反应理论计算模型对多中子出射道截面的估计可能存在偏差





研究背景



理论分析

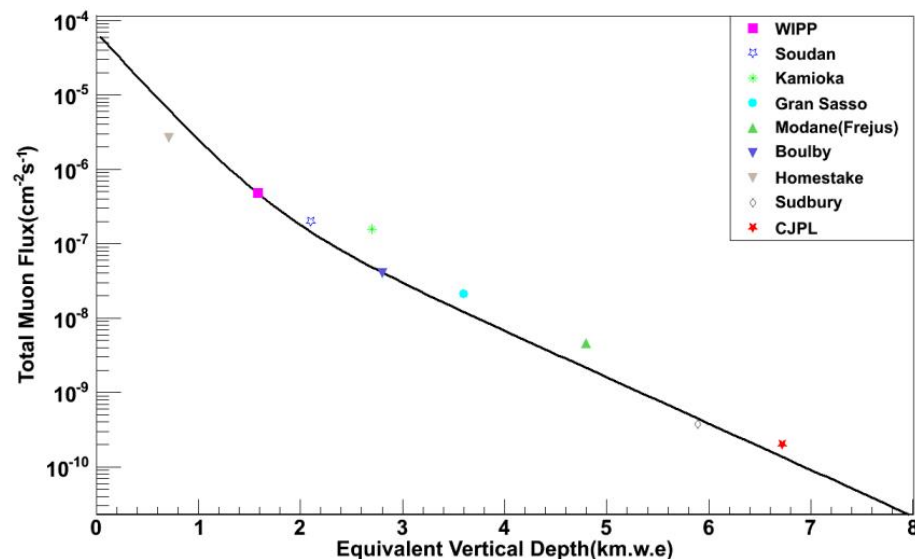


实验测量



应用与展望

- 宇宙线 μ 致中子是深地实验室稀有事例探测中的关键本底



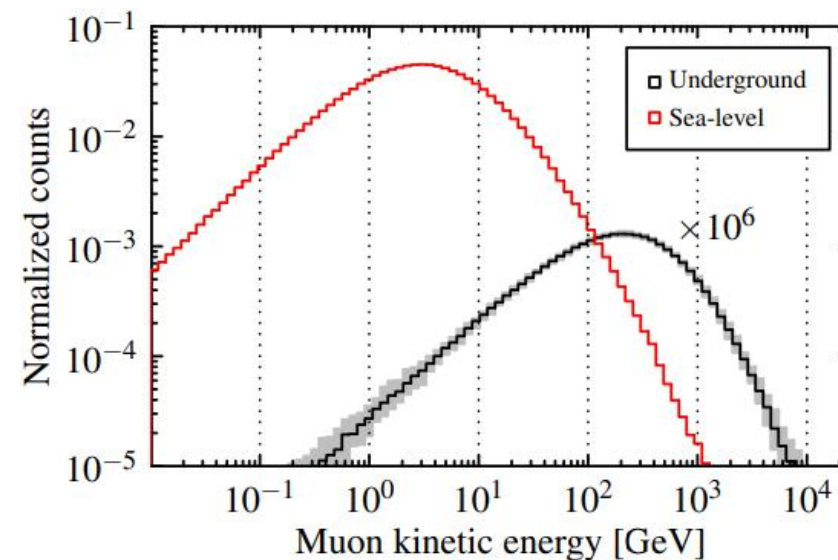
- CJPL (2400 m.w.e.) 在820天内仅记录到343个 μ 子，仅探测到约8个中子。

- 由于 μ 子能量极高且通量很低，直接测量其产生的中子产额十分困难

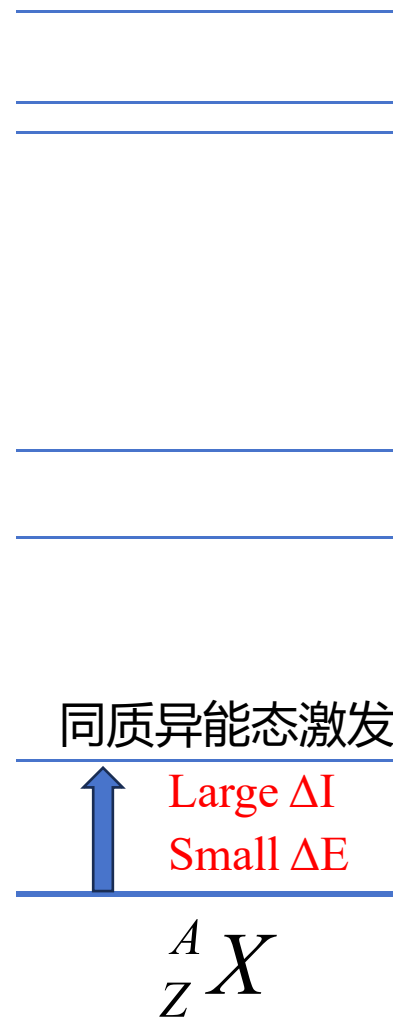
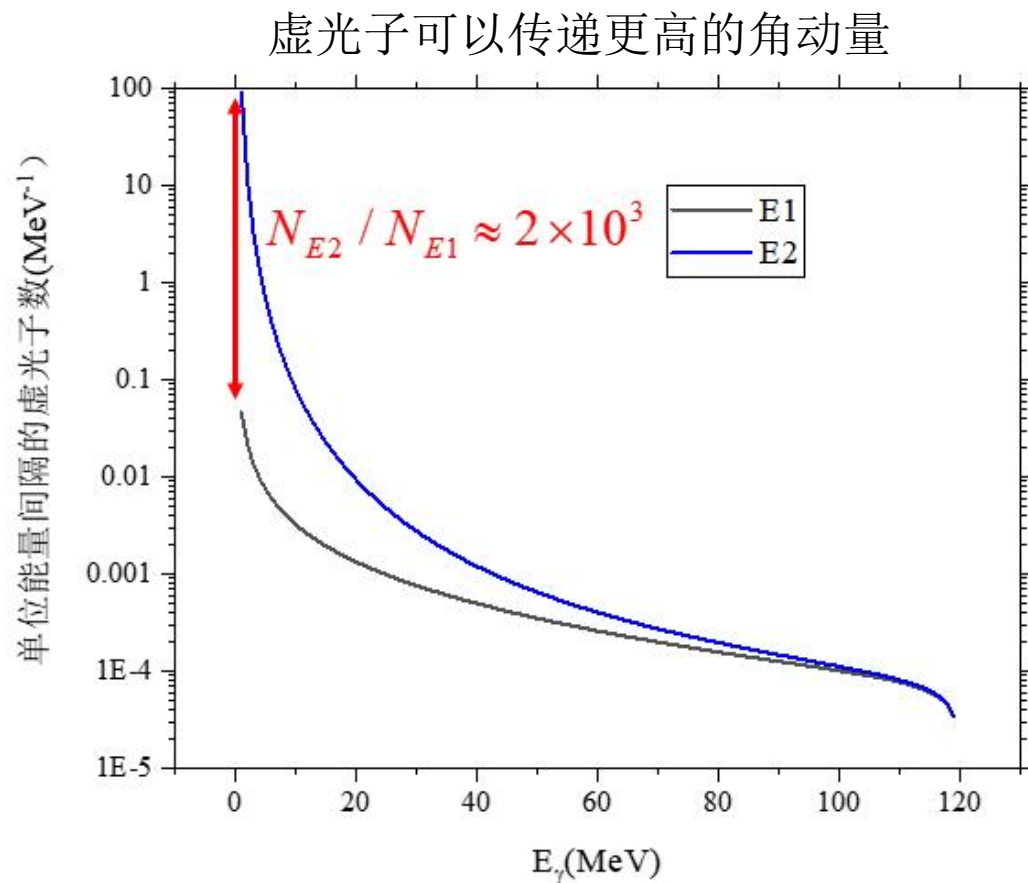
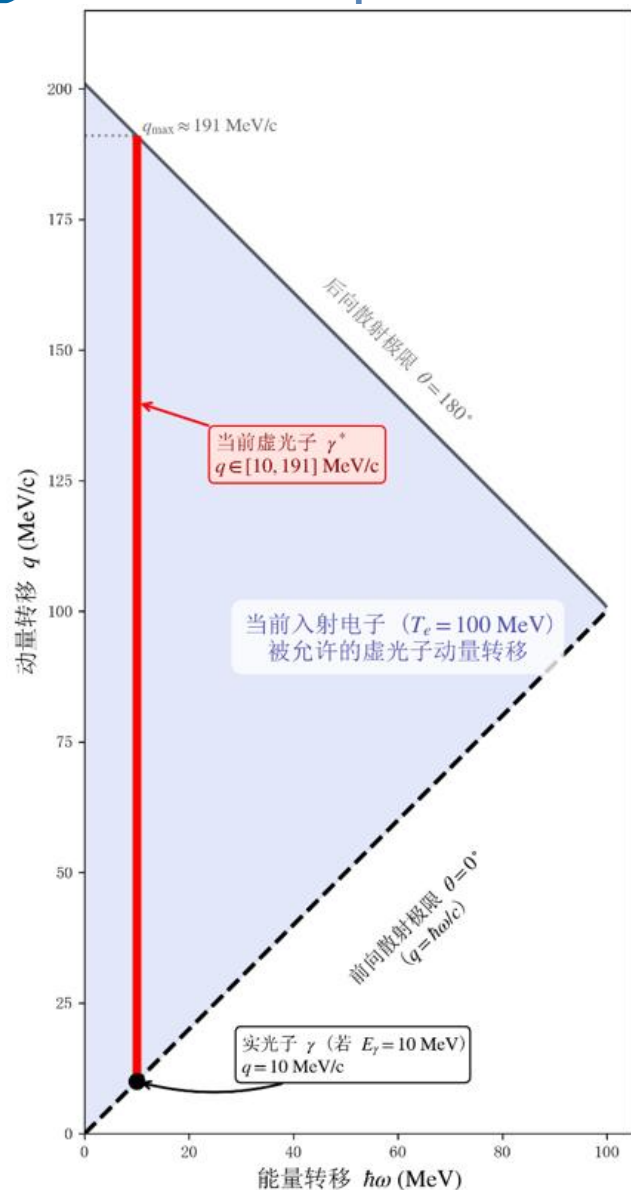
$$\begin{cases} E_x = E'_x = -\gamma qvt / 4\pi\epsilon_0 (b^2 + \gamma^2 v^2 t^2)^{3/2} \\ E_y = \gamma E'_y = \gamma qb / 4\pi\epsilon_0 (b^2 + \gamma^2 v^2 t^2)^{3/2} \\ E_z = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} B_x = 0 \\ B_y = 0 \\ B_z = \gamma (v / c^2) E'_y = (\beta / c) E_y \end{cases}$$

→ 相对论轻子的电磁场
仅由洛伦兹因子 γ 决定

- 利用轻子库仑激发的相似性，可以通过电子库仑激发中子过程（ $(e, e'xn)$ 反应）间接测量 μ 致中子产额



- 黑线：CJPL的宇宙线 μ 子能谱（平均能量340GeV）



➤ 虚光子诱发的核激发更有利于大角动量差异能级间的跃迁

Thank you for listening!

虚光子谱交互式计算器

入射轻子	e-	多极级次	E1
靶核 Z		质量数 A	
入射动能 Ti (MeV)	50	虚光子能量起点 (MeV)	1
虚光子能量终点 (MeV)	49	虚光子能量步长 (MeV)	2
KMAX	7	并行进程数	1
误差阈值 (%)	1	最大外区步数	80000

计算方法

☒ 点核PWBA ☒ 有限核PWBA ☒ 点核DWBA ☒ 有限核DWBA ☐ 图像纵轴对数

当前支持级次: E1、E2、E3、M1。非电子轻子属于质量参数推广, 请自行判断物理适用性。

若感兴趣, 可发送邮件至 yangyuqi@ihep.ac.cn

- ✓ 离线测量 → 复合核蒸发核子退激后的余核半衰期: hours~years, 最好是hour量级
- ✗ 在线测量

$$\int \sigma_{\gamma}(E_{\gamma})dE_{\gamma} = \frac{2\pi^2 e^2 \hbar}{Mc} \cdot \frac{NZ}{A}$$

➡ 应选用高Z靶材

光核反应截面随Z的增大而增大

- 靶材由稳定核素构成
- 同位素单一
- 可以被制为薄靶

靶材料	反应	余核半衰期	薄箔厚度
Ta (¹⁸¹ Ta的同位素丰度: 99.988%)	¹⁸¹ Ta(e, e'n) ¹⁸⁰ Ta	8.154±0.006 h	20 μm
	¹⁸¹ Ta(e, e'2n) ¹⁷⁹ Ta	1.82±0.03 y	
	¹⁸¹ Ta(e, e'3n) ¹⁷⁸ Ta	2.36±0.08 h	
	¹⁸¹ Ta(e, e'4n) ¹⁷⁷ Ta	56.36±0.13 h	
	¹⁸¹ Ta(e, e'5n) ¹⁷⁶ Ta	8.09±0.05 h	
	¹⁸¹ Ta(e, e'6n) ¹⁷⁵ Ta	10.5±0.2 h	
	¹⁸¹ Ta(e, e'7n) ¹⁷⁴ Ta	1.14±0.08 h	
	¹⁸¹ Ta(e, e'8n) ¹⁷³ Ta	3.14±0.13 h	