MTPC 双端读出升级与锂核三体反应研究

BEAG 学术研讨会报告

白灿

2026 年 10 月 28 日



1. MTPC 双端读出升级
2. ^{7}Li 与中子的三体核反应调研
3. 基于 MTPC 测量 ^{7}Li 产氚反应

1 MTPC 双端读出升级
TPC 简介
TPC 在物理实验中的应用
多用途时间投影室 (MTPC)

2 ^{7}Li 与中子的三体核反应调研

3 基于 MTPC 测量 ^{7}Li 产氚反应

时间投影室 (TPC)

- 结构：漂移空间 + 增益结构 + 电场 (+ 磁场)
- 工作原理：电离 → 漂移 → 雪崩

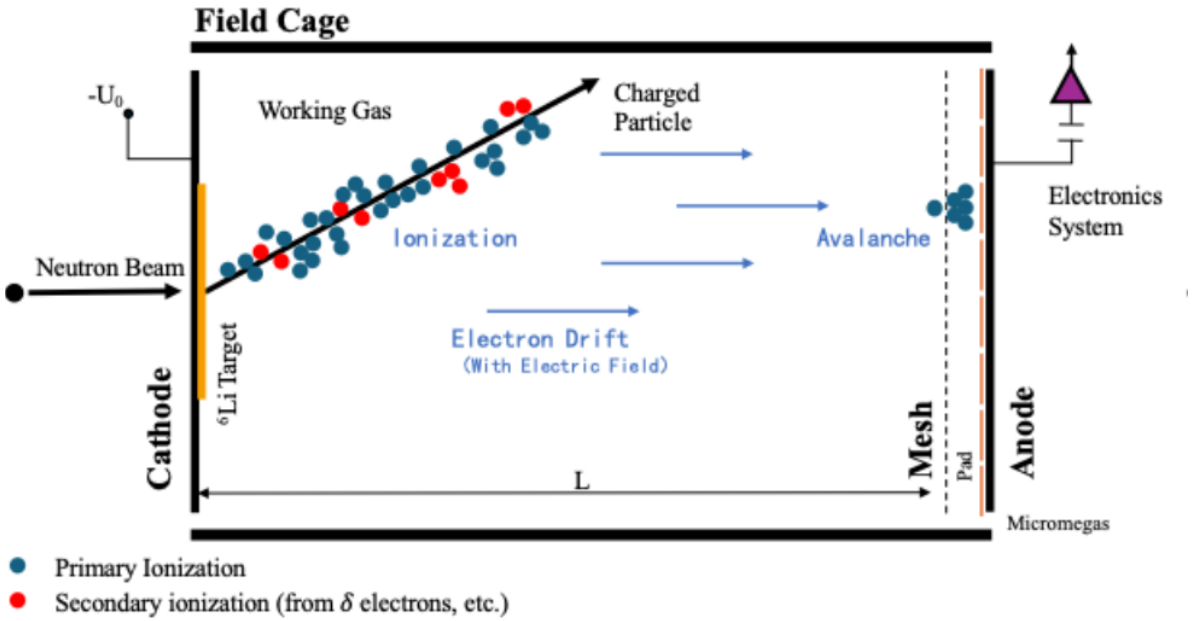


图 1: TPC 工作原理

高能物理实验中使用的 TPC

- TPC 形状为圆柱形，中间束流对撞
- 是整体谱仪的一部分，一般作为外径迹室

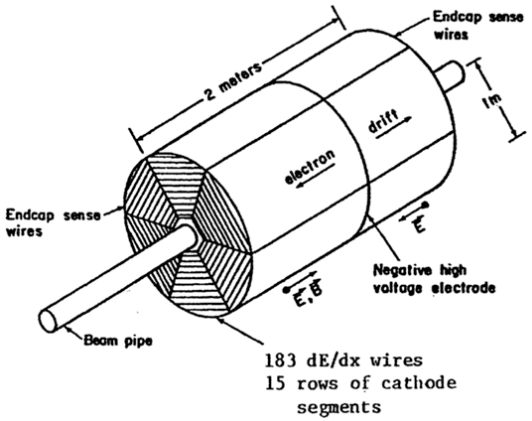


图 2: PEP-4 TPC [1]

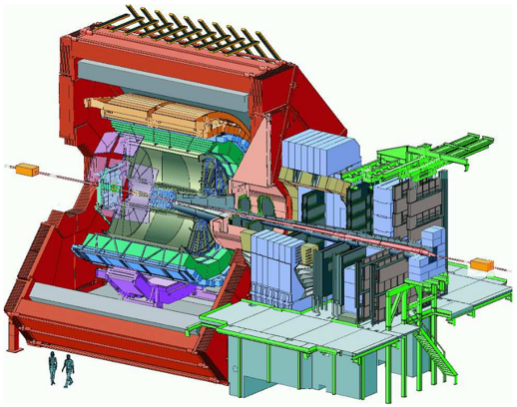


图 3: ALICE 装置 [2]

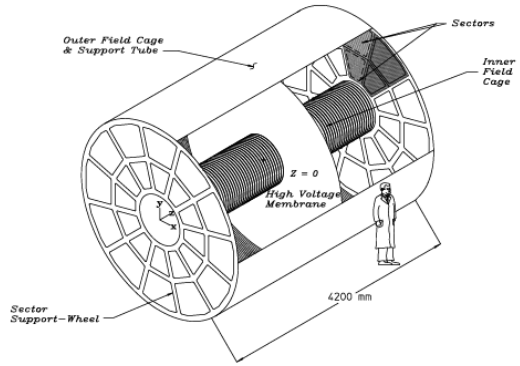


图 4: STAR TPC [3]

核物理实验中使用的 TPC

- 能量相对较低，使用固定靶或活性气体靶
- 由单个探测器或与其它少量探测器配合完成探测

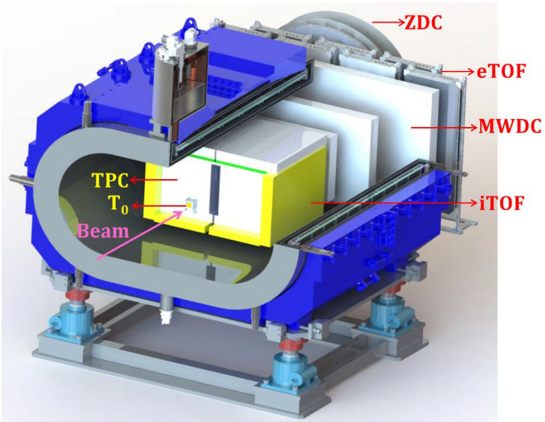


图 5: CEE 装置 [4]

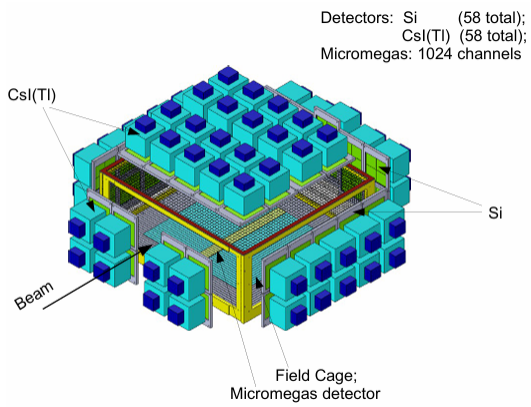


图 6: TexAT [5]

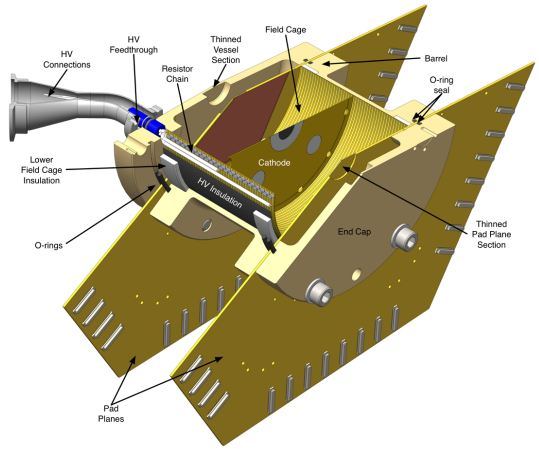


图 7: NIFFTE [6]

稀有事例探测使用的 TPC

- 使用液体介质或气-液两相介质，使用 PMT 放大读出信号
- 探测稀有事例，如中微子、暗物质等



图 8: ICARUS-T600 LArTPC [7]

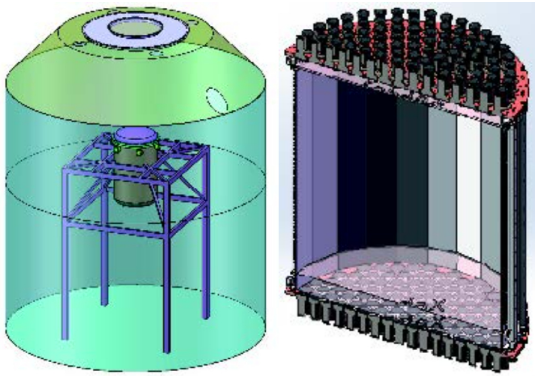


图 9: PANDAX-4T [8]

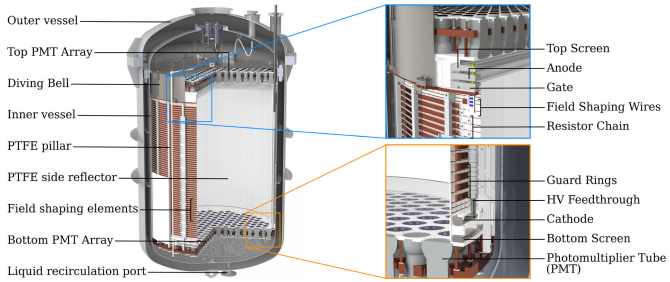


图 10: XENONnT LXeTPC [9]

多用途时间投影室 (MTPC)

- 高空间分辨、大立体角
- 用于中子核反应、核数据测量
  - 标准截面测量：$^6\mathrm{Li}(n,t)$、$^1\mathrm{H}(n,n')$ 等
  - 裂变截面测量：$^{235}\mathrm{U}(n,f)$、$^{232}\mathrm{Th}(n,f)$ 等
  - 重要核反应：$^7\mathrm{Li}(n,n't)$、$^{17}\mathrm{O}(n,\alpha)$ 等

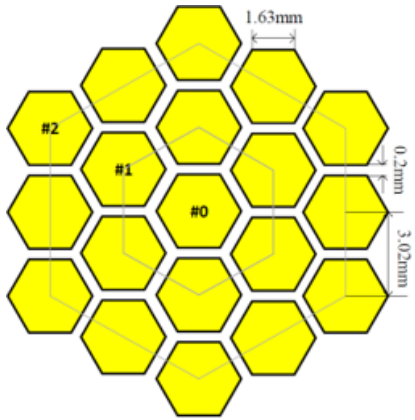


图 11: MTPC pad 阵列

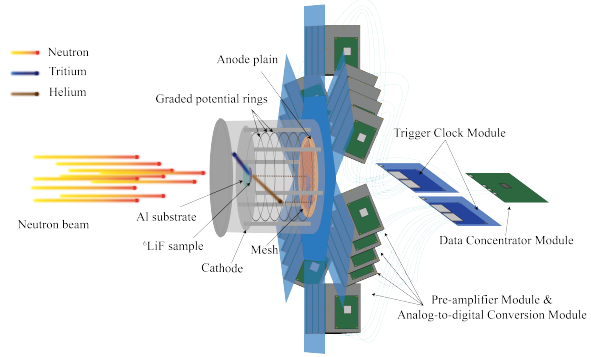


图 12: MTPC 结构图

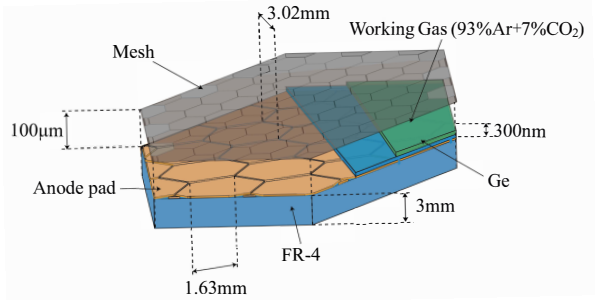
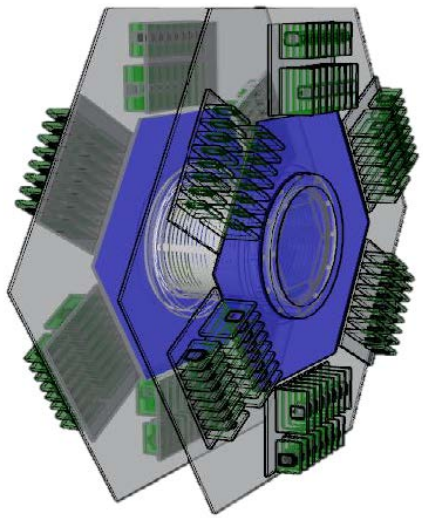


图 13: MTPC Micromegas

MTPC 双端读出升级

- 需求更高精度的测量
- 需求对核反应更完整的探测

	单端读出	双端读出
覆盖立体角	2π	4π
电子学通道数	1519+2	3038+3
漂移区长度	70-140 mm	2×70 mm



双端读出升级进展

- 上游阳极板会对中子束流产生影响
- 模拟阳极板对中子束流的散射
- 评估上游阳极板减薄的厚度

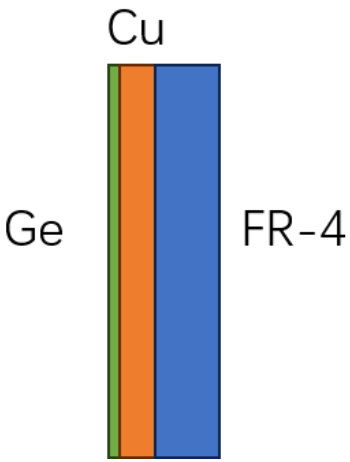


图 14: 阳极板结构

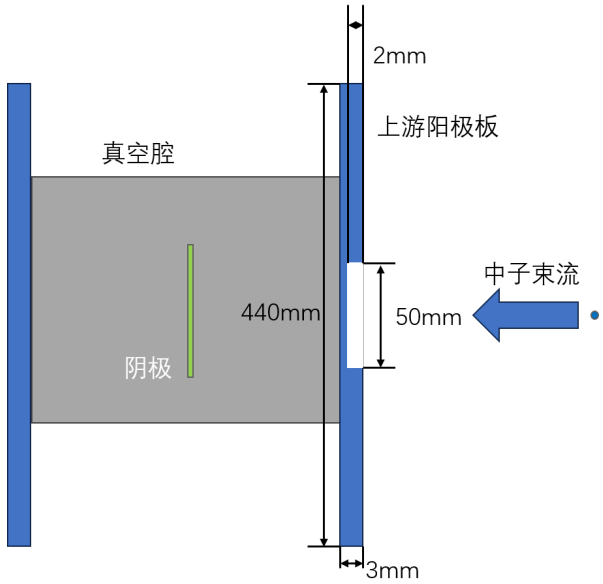


图 15: 模拟中子射入探测器

双端读出升级进展

- 调整 FR-4 与铜的厚度
- FR-4 厚度从100 μm 到500 μm
- FR-4 厚度为铜的约 5.5 倍
- 模拟中子能量范围1 eV 到20 MeV

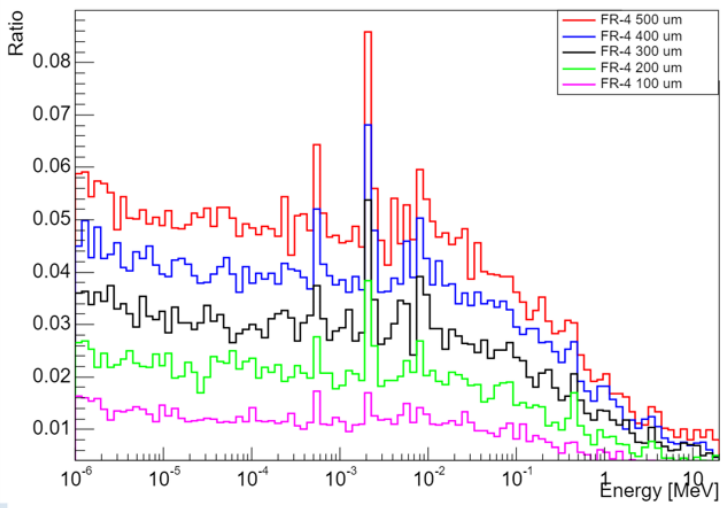


图 16: 中子散射比例随能量的变化

- 平衡制作工艺与散射的影响
- 阳极板保留约500 μm 厚度

FR-4 厚度	整体散射比例
100 μm	0.99%
200 μm	1.74%
300 μm	2.50%
400 μm	3.24%
500 μm	3.98%

1 MTPC 双端读出升级

2 ^{7}Li 与中子的三体核反应调研
- 研究背景
- 理论方法
- 实验测量

3 基于 MTPC 测量 ^{7}Li 产氚反应

^{7}Li 产氚反应

- 中子与 Li 核的反应是产氚的重要途径
  - 裂变堆、聚变堆
- 中子能量影响产氚的主导同位素
  - 低能 ^{6}Li、高能 ^{7}Li

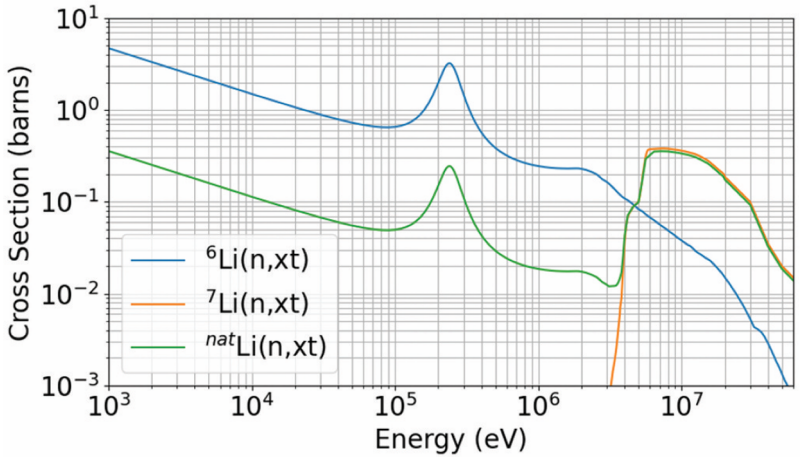


图 17: Li 核产氚反应截面 [10]

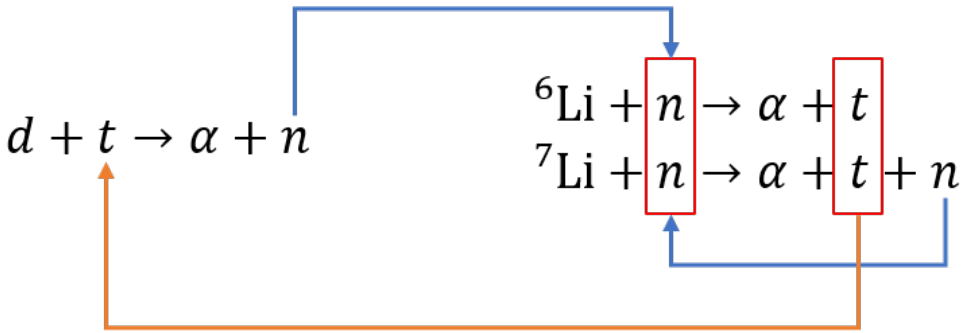


图 18: 反应堆中的氚循环

评价截面与测量截面

- 评价截面相较于实验测量截面偏高
- 10-14 MeV 的能区几乎没有测量

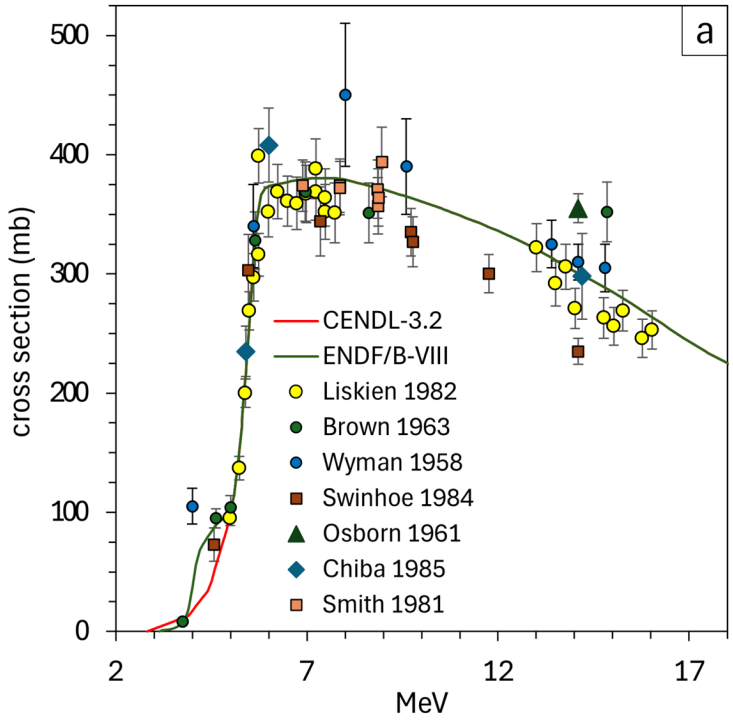
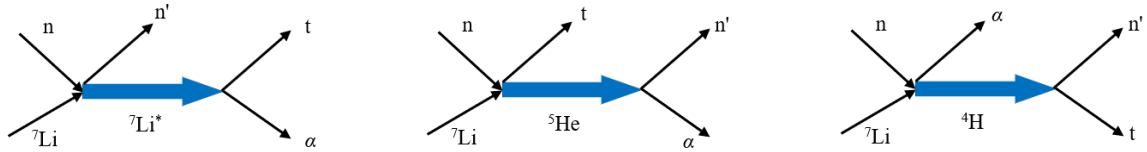


图 19: 评价截面与实验测量截面 [11]

^{7}Li 产氚反应物理过程

- 具有多种中间过程
- 重点在于中间的三体相互作用过程

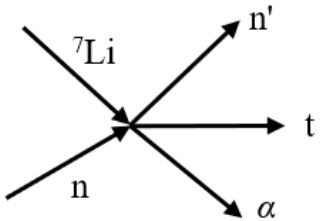
- 级联衰变



- 准弹性散射



- 直接三体破裂



CDCC 方法

- 连续态离散耦合道 (CDCC) 方法 [12]
- 三体系统
  - A、b+c 子系统
- 将连续态截断并离散化
  - 截断方法：动量截断、角动量截断
  - 离散化方法：赝态法
- 将无限维问题转化为有限个离散态的耦合道问题

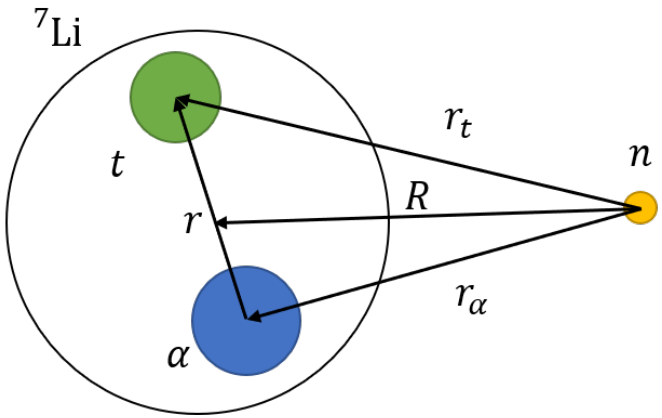


图 20: CDCC 方法下三体系统

$$\frac{d^3\sigma}{d\Omega_t dE_t d\Omega_\alpha} = \frac{2\pi}{\hbar}\frac{\mu}{P_0}\left|T_{fi}\right|^2\rho(E_t)$$

$$\frac{d^2\sigma}{dE_N^L\, d\Omega_N^L} = \sum_{l,I}\frac{1}{2I+1}\frac{\pi\mu_r}{\hbar^2 k P_0}\frac{m_N+M_{\mathrm{Li}}}{M_{\mathrm{Li}}}\sqrt{\frac{E_N^L}{E_N^C}}\sum_{m_{I0}m_I}\left|\sum_{L_0,L,J}\sqrt{2L+1}\,\langle I_0 m_{I0} L_0 0|Jm_{I0}\rangle\langle Im_I L(m_{I0}-m_I)|Jm_{I0}\rangle Y_{L,m_{I0}-m_I}(\Omega_N^C)\,S_{lIL}^J(k)\right|^2$$

FSI 方法

- 末态相互作用 (FSI) 方法
- 反应产生三个粒子
- 其中两个粒子存在短程强相互作用（特别是共振态）
- 第三个粒子的能谱会被这种相互作用影响

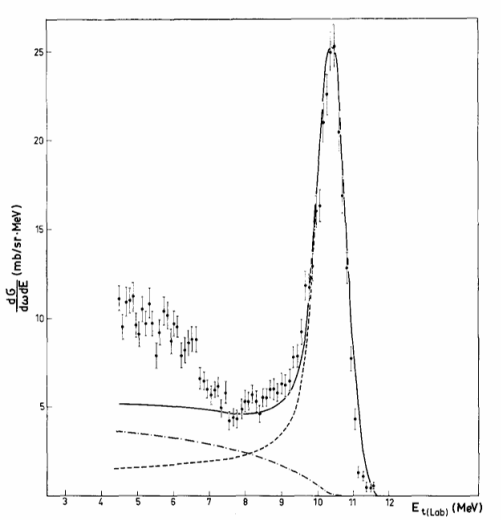


图 21: 氚的微分截面 ($\theta_{\mathrm{c.m.}} = 0, E_n = 14$ MeV) [13]

$$\left.\frac{d^2\sigma}{d\Omega_t dE_t}\right|_{\mathrm{FSI}} = N_F \sin^2\beta_l \frac{F_l^2(ka) + G_l^2(ka)}{(ka)^2} \rho_t(E_t)$$

SD 方法

- 顺序衰变 (SD) 方法
- 与 FSI 方法配合
- 描述三体相互作用后的衰变
- 得到出射中子谱

$$\frac{d^2\sigma}{d\Omega_{N'}\,dE_{N'}} = \frac{1}{2\pi}\int \frac{d^3\sigma_t^{\mathrm{FSI}}}{d\Omega_t dE_t d\Omega_\alpha} L_1\left[E_N \to E_{^5\mathrm{He}}\right] \times L_2\left[E_{^5\mathrm{He}} \to E_{N'}\right]\Lambda_{NN'}(\eta_{NN'})\,dE_{^5\mathrm{He}}$$

^{7}Li 产氚反应理论方法

- 严格求解：Faddeev 方程
- 唯象模型：CDCC + FSI + SD

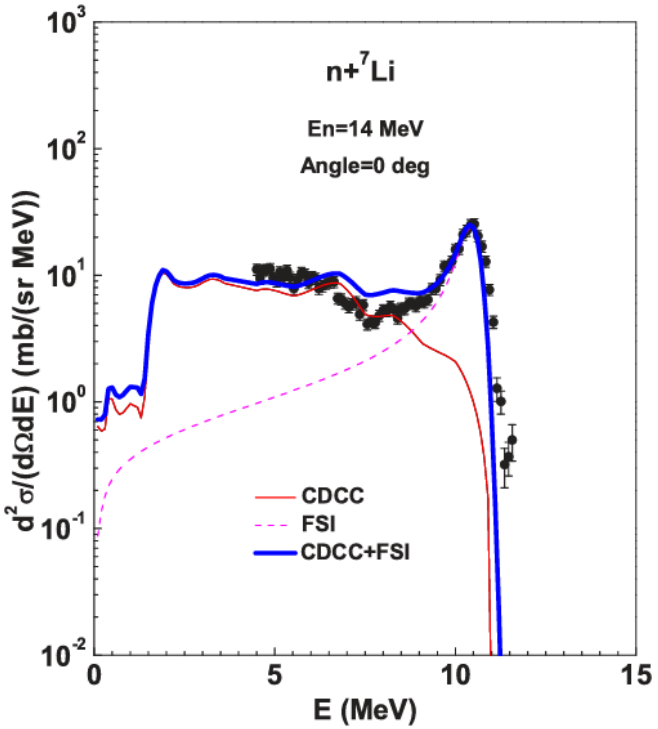


图 22: 唯象模型与实验截面

^{7}Li 产氚反应实验测量

- 针对不同的次级粒子采用不同的测量手段
- 得到相应的截面数据信息
- 样品：Li 的化合物，如 LiF、LiOH 等
- 中子源
  - (准) 单能中子
  - 宽能谱中子

活化法

- 用于测量积分截面
- 用准单能中子辐照样品
- 测量中子注量率
- 提取生成的氚，测量其 β 活度

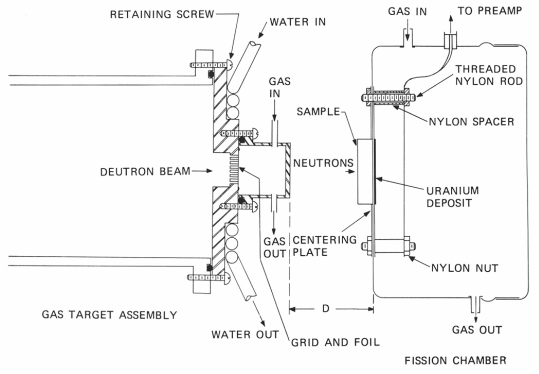


图 23: 氚产生与中子通量测量 [14]

- 方法成熟、容易实现
- 无法辨别具体机制

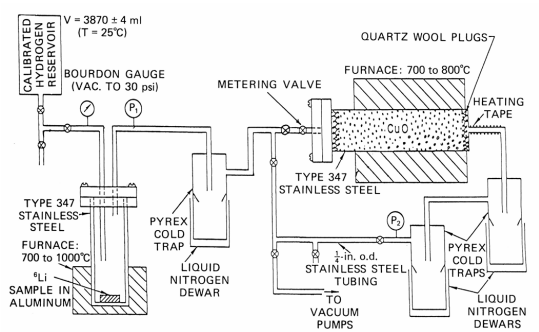


图 24: 氚活度测量 [14]

双微分中子发射截面测量

- 脉冲中子源 + 飞行时间 (TOF) 谱仪
- 测量出射中子的双微分截面 (DDX)

- 弹散 + 非弹 + 破裂
- 需要依赖理论模型

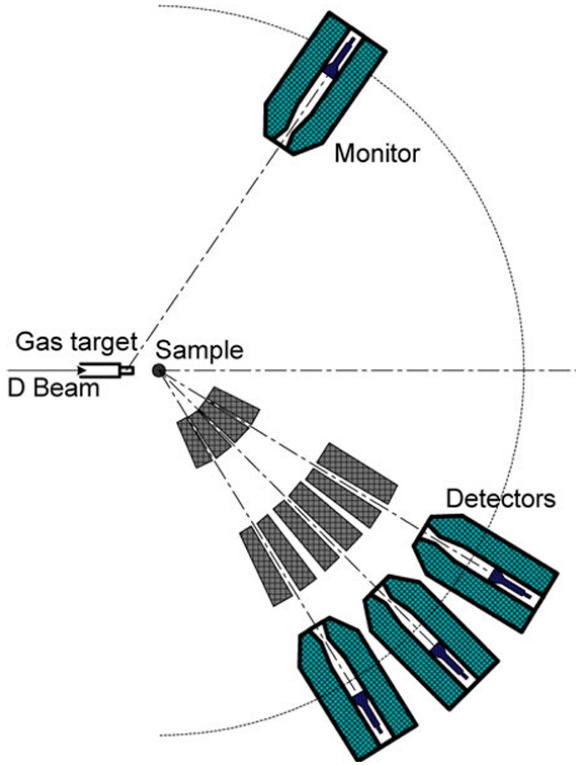


图 25: 快中子 TOF 谱仪 [15]

运动学测量

- 通过符合测量同时测量两个出射粒子
- 能动量守恒重建三体运动学

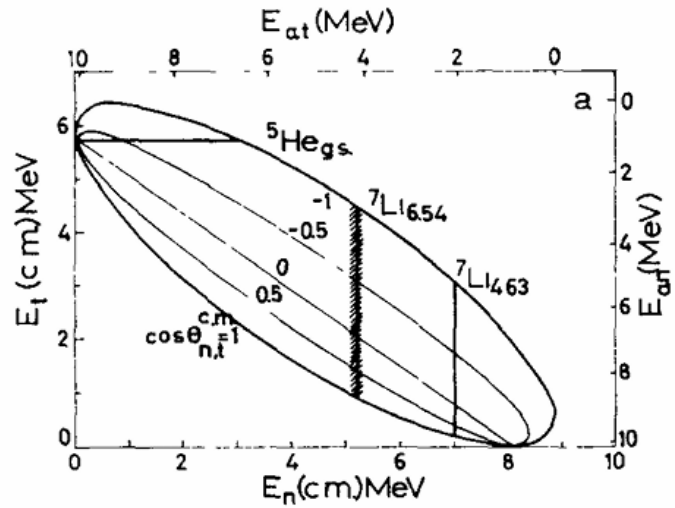


图 26: $^7\mathrm{Li}(n, n't)^4\mathrm{He}$ 反应 Dalitz 图 [16]

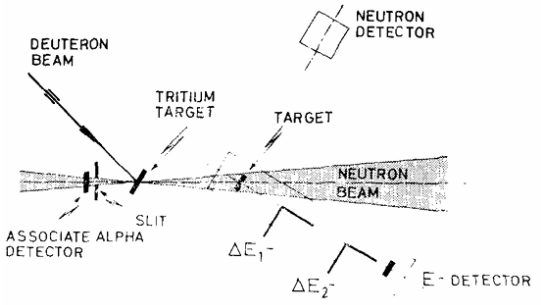


图 27: 符合测量系统 [17]

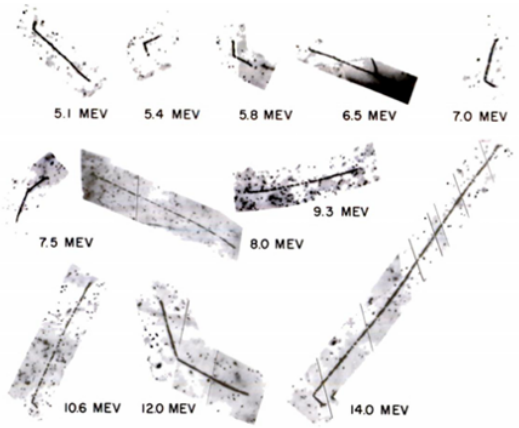


图 28: 核乳胶内的带电粒子径迹 [18]

1 MTPC 双端读出升级

2 ^{7}Li 与中子的三体核反应调研

3 基于 MTPC 测量 ^{7}Li 产氚反应

- 同时测量 α 和氚
- 连续的大角度测量
- 更大的数据量，更好的数据处理能力

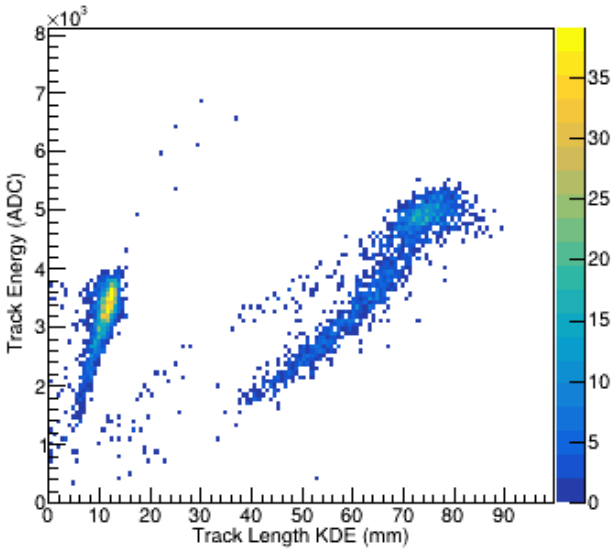


图 29: 带电粒子的 R-E 分布

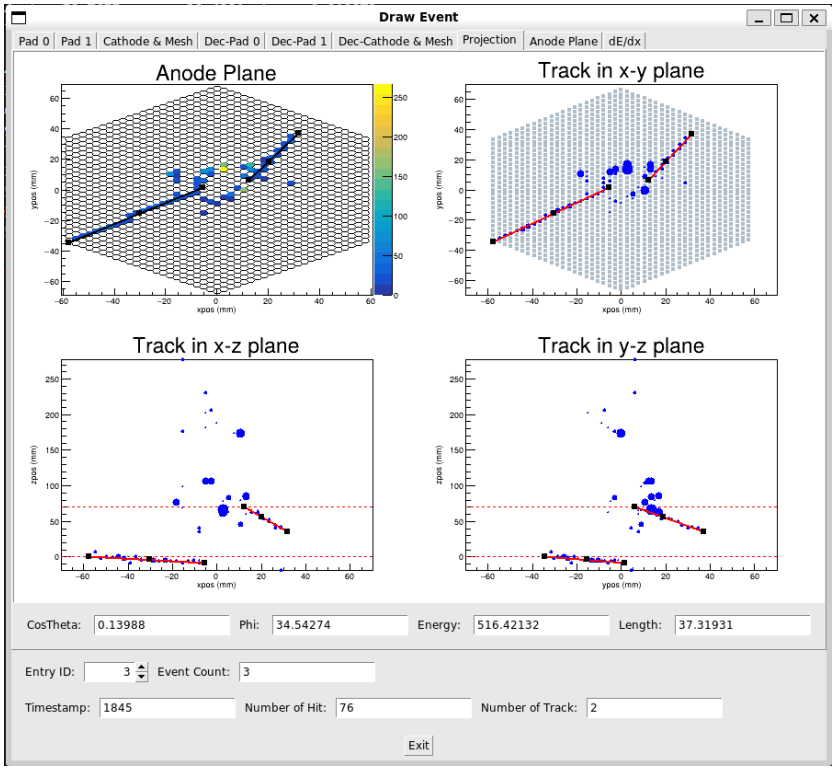


图 30: 带电粒子径迹重建

参考文献 I

[1] D. R. Nygren. Origin and development of the tpc idea[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018, 907: 22-30

[2] J. Alme, et al. The alice tpc, a large 3-dimensional tracking device with fast readout for ultra-high multiplicity events[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2010, 622(1): 316-367

[3] M. Anderson, et al. The star time projection chamber: a unique tool for studying high multiplicity events at rhic[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2003, 499(2): 659-678

[4] D. Guo, et al. Studies of nuclear equation of state with the hirfl-csr external-target experiment[J]. The European Physical Journal A, 2024, 60(2): 36

[5] E. Koshchiy, et al. Texas active target (texat) detector for experiments with rare isotope beams[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2020, 957: 163398

[6] D. Hensle, et al. Neutron-induced fission fragment angular distributions, anisotropy, and linear momentum transfer measured with the niffte fission time projection chamber[J]. Phys. Rev. C, 2020, 102: 014605

[7] P. Abratenko, et al. Icarus at the fermilab short-baseline neutrino program: initial operation[J]. The European Physical Journal C, 2023, 83(6): 467

[8] H. Zhang, et al. Dark matter direct search sensitivity of the pandax-4t experiment[J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2018, 62(3): 31011

[9] E. Aprile, et al. The xenonnt dark matter experiment[J]. The European Physical Journal C, 2024, 84(8): 784

[10] C. R. Bates, M. B. Chadwick. Lithium neutron cross sections during the manhattan project and the quest for the h-bomb[J]. Fusion Science and Technology, 2024, 80: S186-S191

参考文献 II

[11] G. Perfetto, et al. Measurement of the ^{7}Li(n,n't) and ^{9}Be(n,2n) cross sections for modelling tritium-breeding blankets[R]. CERN,

[12] H. Guo, et al. Analysis of nucleon and triton emissions from nucleon-^{7}Li collisions below 20 mev[J]. Physical Review C, 2019, 99: 034602

[13] V. Valković. Triton spectrum from the n+Li^{7} reaction[J]. Nuclear Physics, 1964, 60: 581-587

[14] D. L. Smith, et al. Measurement of the cross section for the ^{7}Li(n,n't)^{4}He reaction in the 7- to 9-mev energy range[J]. Nuclear Science and Engineering, 1981, 78: 359-369

[15] G. Chen, et al. Double-differential neutron emission cross-section measurements of ^{6}Li and ^{7}Li at incident neutron energies of 8.17 and 10.27 mev[J]. Nuclear Science and Engineering, 2009, 163: 272-284

[16] B. Antolković. The reaction mechanism of the ^{7}Li(n, tα)n reaction at $E_n = 14.4$ mev[J]. Nuclear Physics A, 1974, 219: 332-346

[17] V. Valković, et al. Neutron-charged particle coincidence measurements from 14.4 mev neutron induced reactions[J]. Nuclear Instruments and Methods, 1969, 76: 29-34

[18] 卢慧筠, 孙汉城. 快中子与 6li, 7li 的三体反应 [J]. 原子能科学技术, 1976, 10(2): 124-124

Thanks!