



Radiation Physics and Detection Technology

Department of Engineering Physics

# 基于 $dE/dx$ 的质子能量反演

牛莉博 黄孟 李玉兰  
清华大学工程物理系

2014.07.20

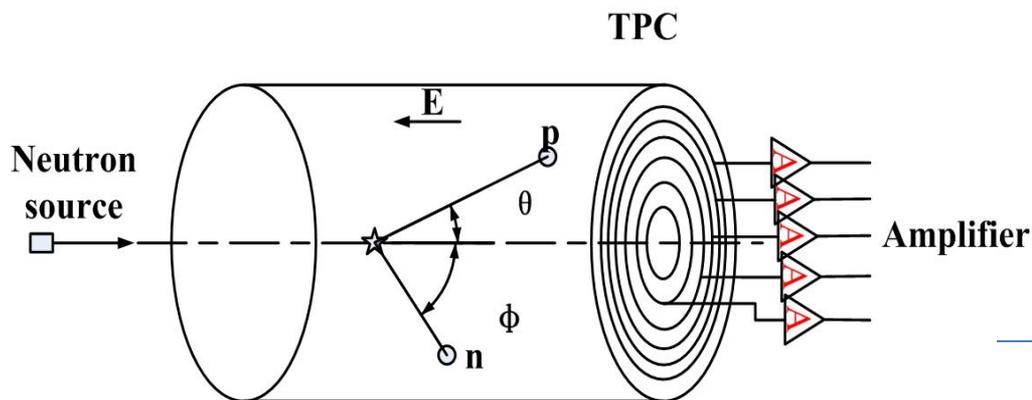


# 主要内容

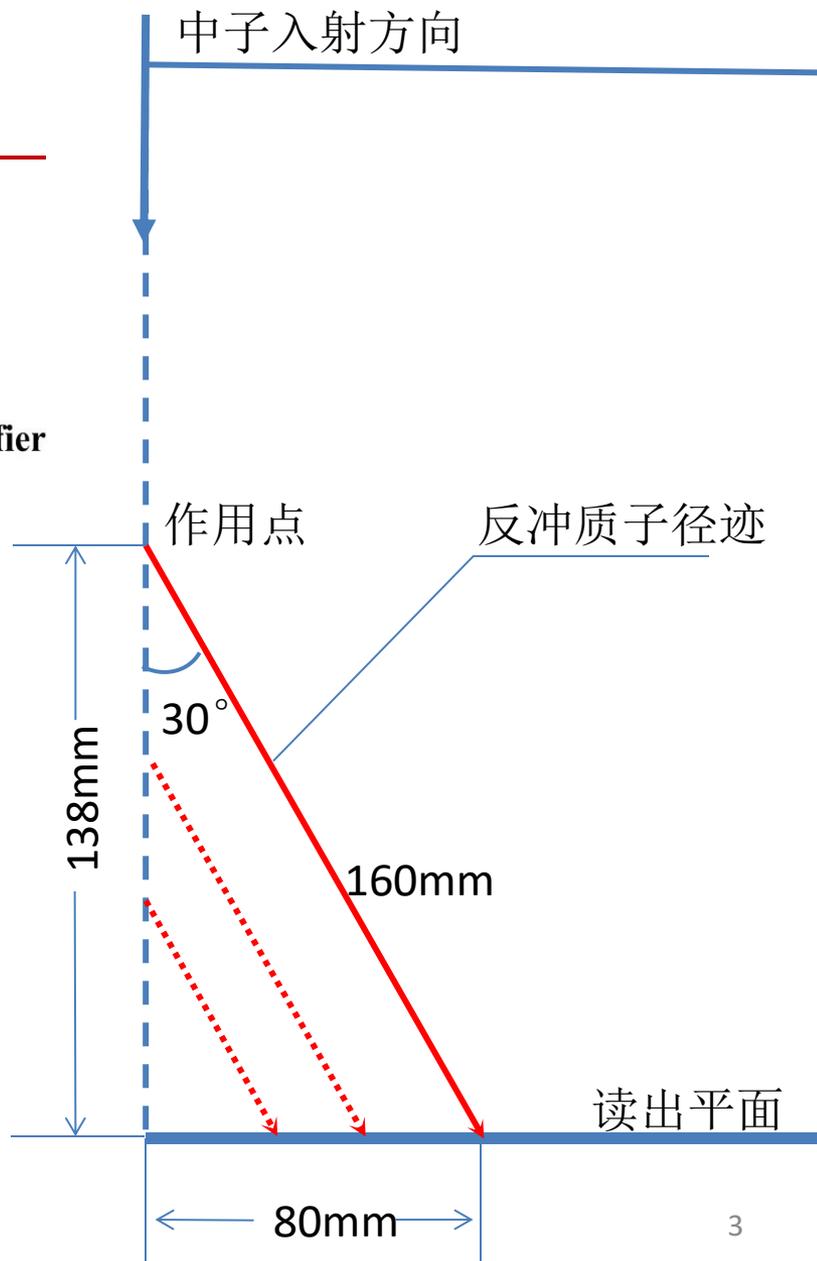
---

- 背景介绍
- 质子的电离能损及其**Bragg**曲线
- 质子 $dE/dx$ 与能量 $E$ 的关系
- 基于 $dE/dx$ 的质子能量反演
- 结论

# 1 背景介绍



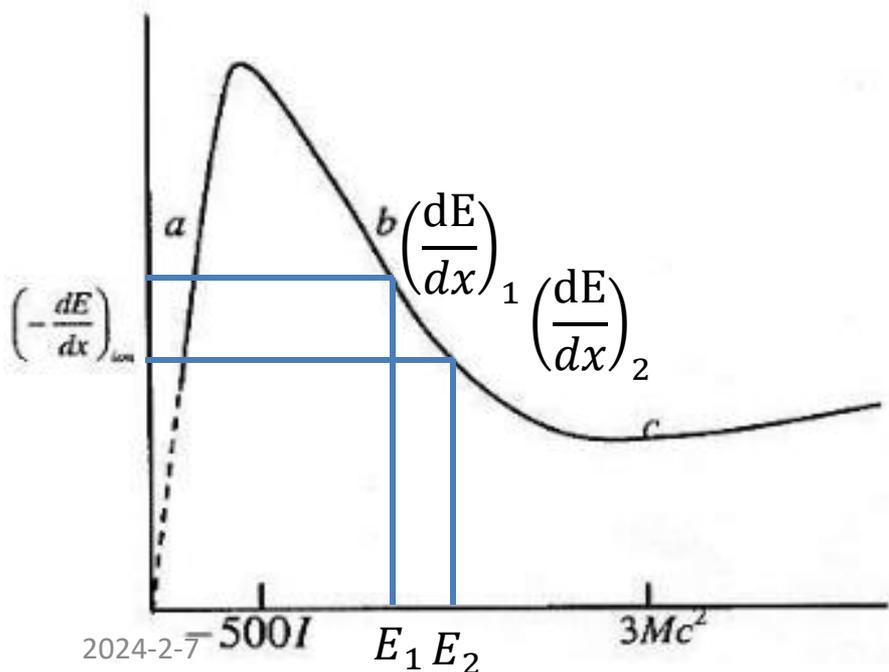
- 反冲质子法
- 质子飞行径迹
- 质子的能量沉积
- $\text{FWHM} < 5\% @ 5\text{MeV}$ ,  $\theta < 30^\circ$



## 2 质子的电离能损率及其Bragg曲线 (1)

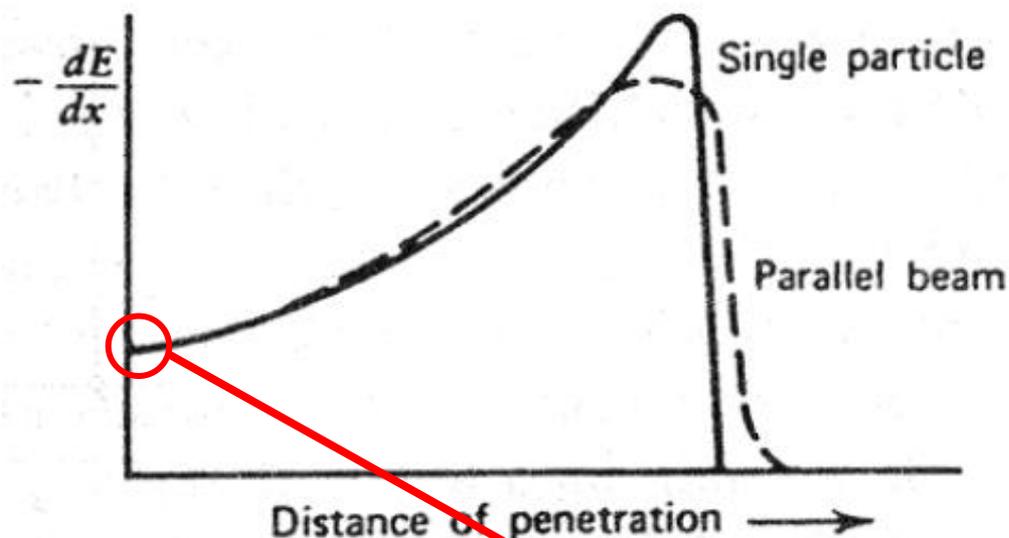
描写 $dE/dx$ 与带电粒子速度、电荷等关系的经典公式称为Bethe公式，其表达式为：

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2 NZ}{m_0 v^2} \left[ \ln \frac{2m_0 v^2}{I} - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right]$$

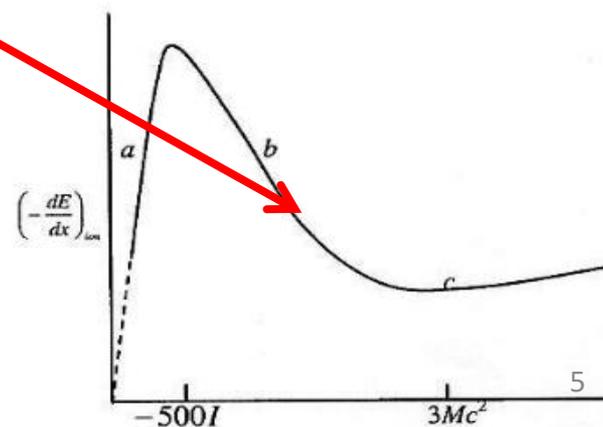


**问题：若能获得入射带电粒子径迹初始段的 $dE/dx$ 值，能否根据Bethe公式解谱获得入射带电粒子的能量？**

## 2 质子的电离能损率及其Bragg曲线 (2)

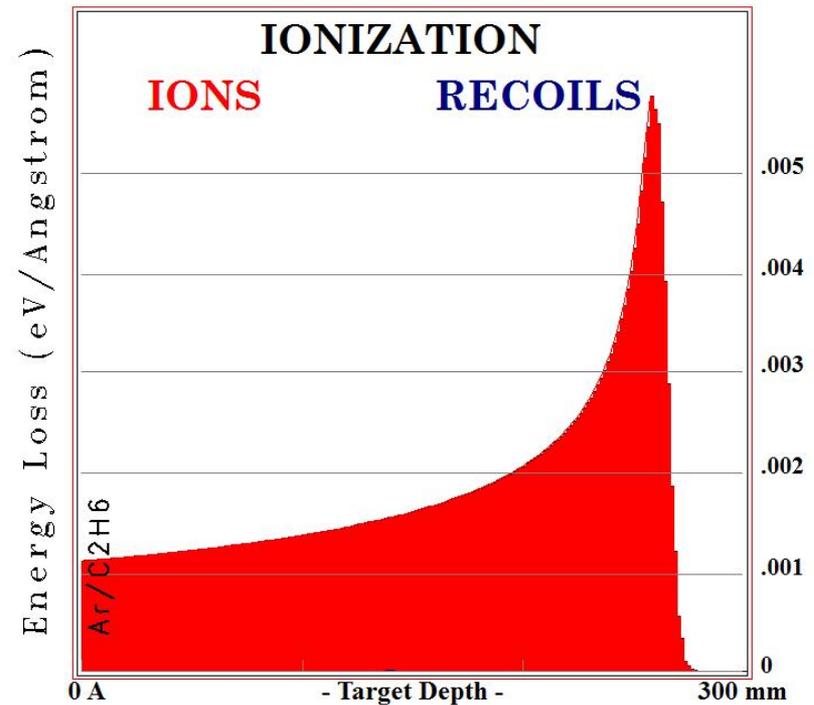
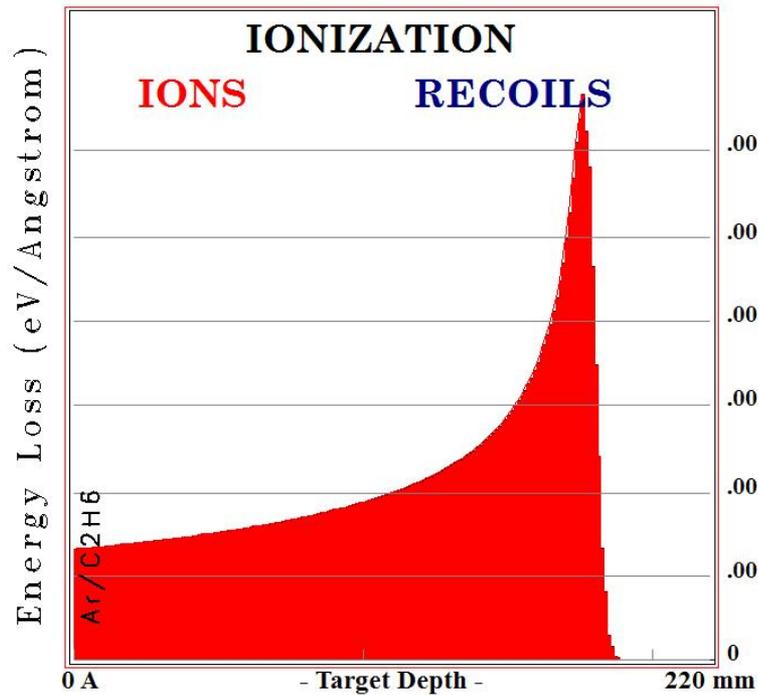


带电粒子的能量损失率沿其径迹的变化曲线称作**Bragg**曲线。在径迹的绝大部分中，带电粒子的能量损失率粗略的正比于 $1/E$ ，相应于右图中的**b**区，**Bragg**曲线随穿透距离增大而上升。接近径迹末端时，质子能量已经很低，**Bragg**曲线下降，直至零。

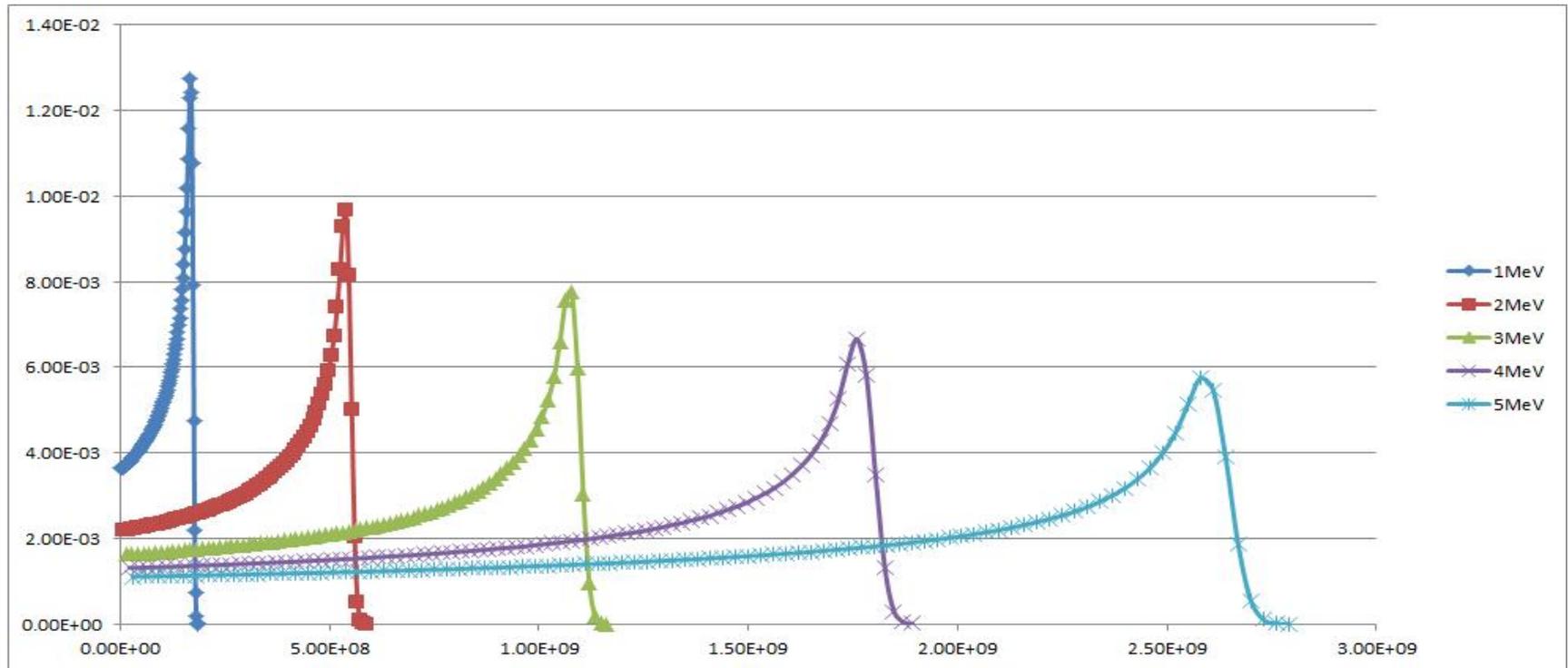


## 2 质子的电离能损率及其Bragg曲线 (3)

使用TRIM程序计算了不同单能质子在TPC工作气体Ar/C2H6 (50/50) 中的射程及其Bragg曲线。

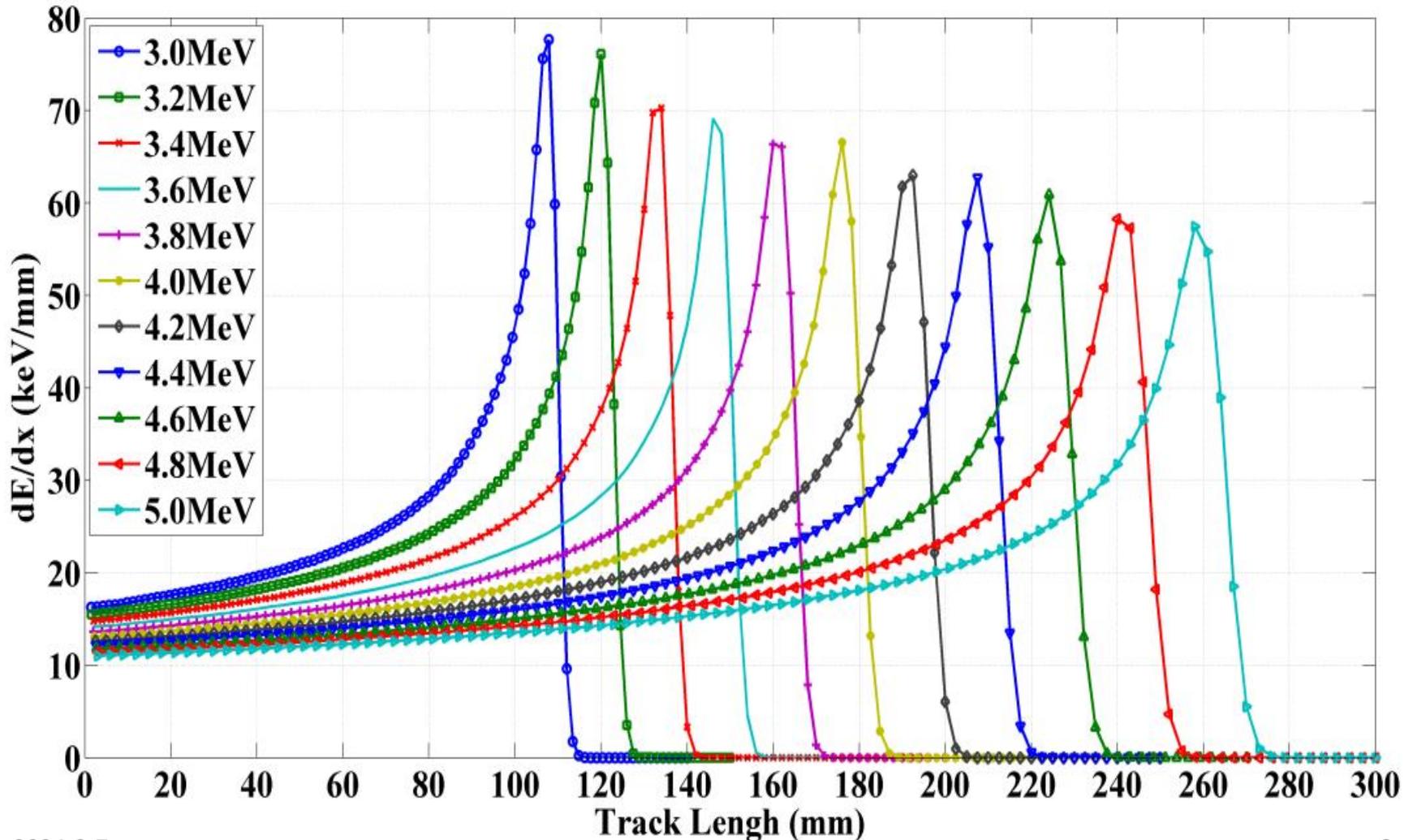


## 2 质子的电离能损率及其Bragg曲线 (4)

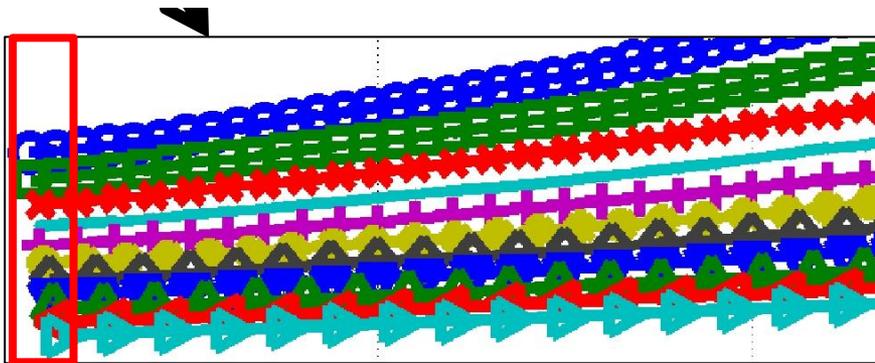
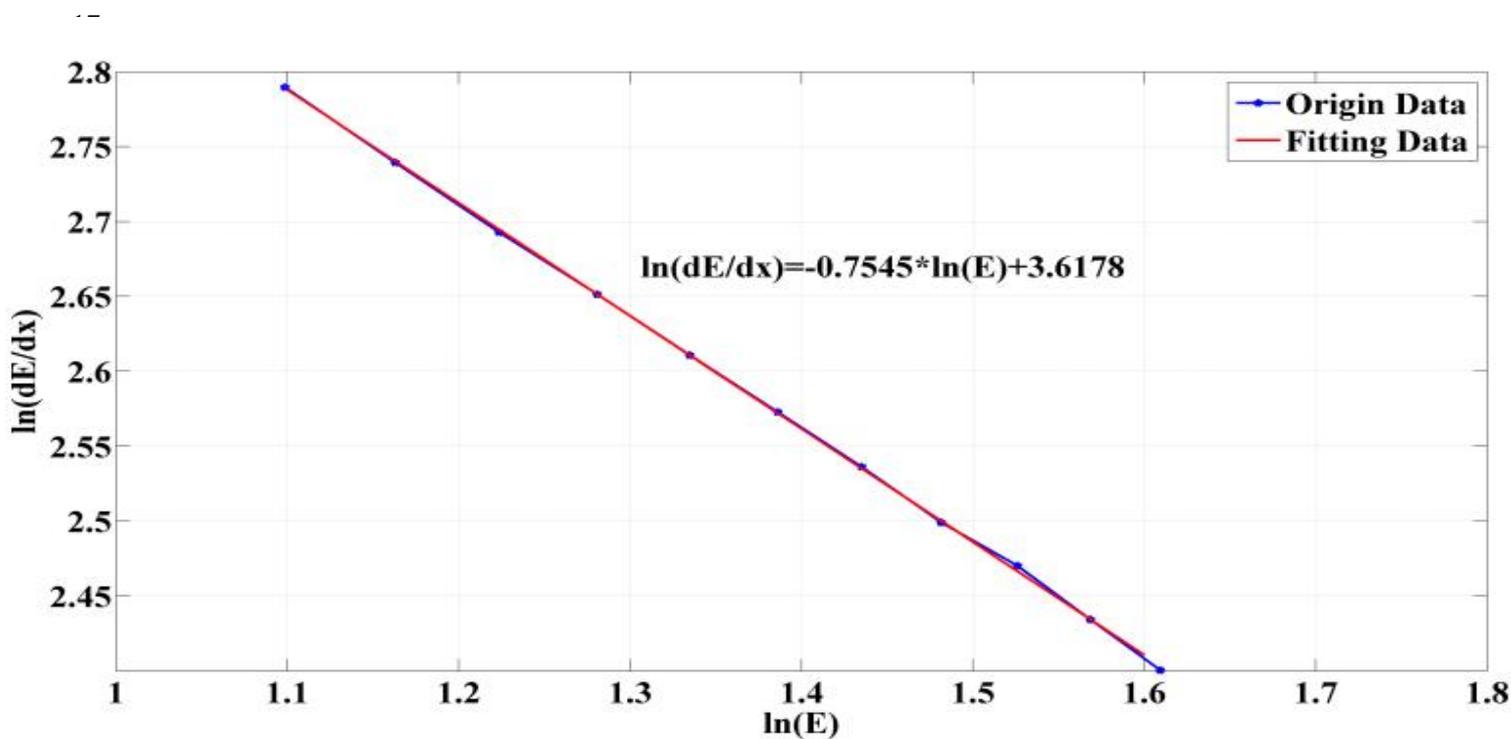


上图为不同单能（1MeV、2MeV、3MeV、4MeV、5MeV）入射质子在Ar/C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> (50/50)中的Bragg曲线，入射质子数为10,000个。对于1MeV及2MeV能量的入射质子尽管在其径迹的绝大部分上 $dE/dx$ 与能量 $E$ 存在反比关系，但由于其射程较短， $dE/dx$ 的精确测量存在难度。

## 2 质子的电离能损率及其Bragg曲线 (5)

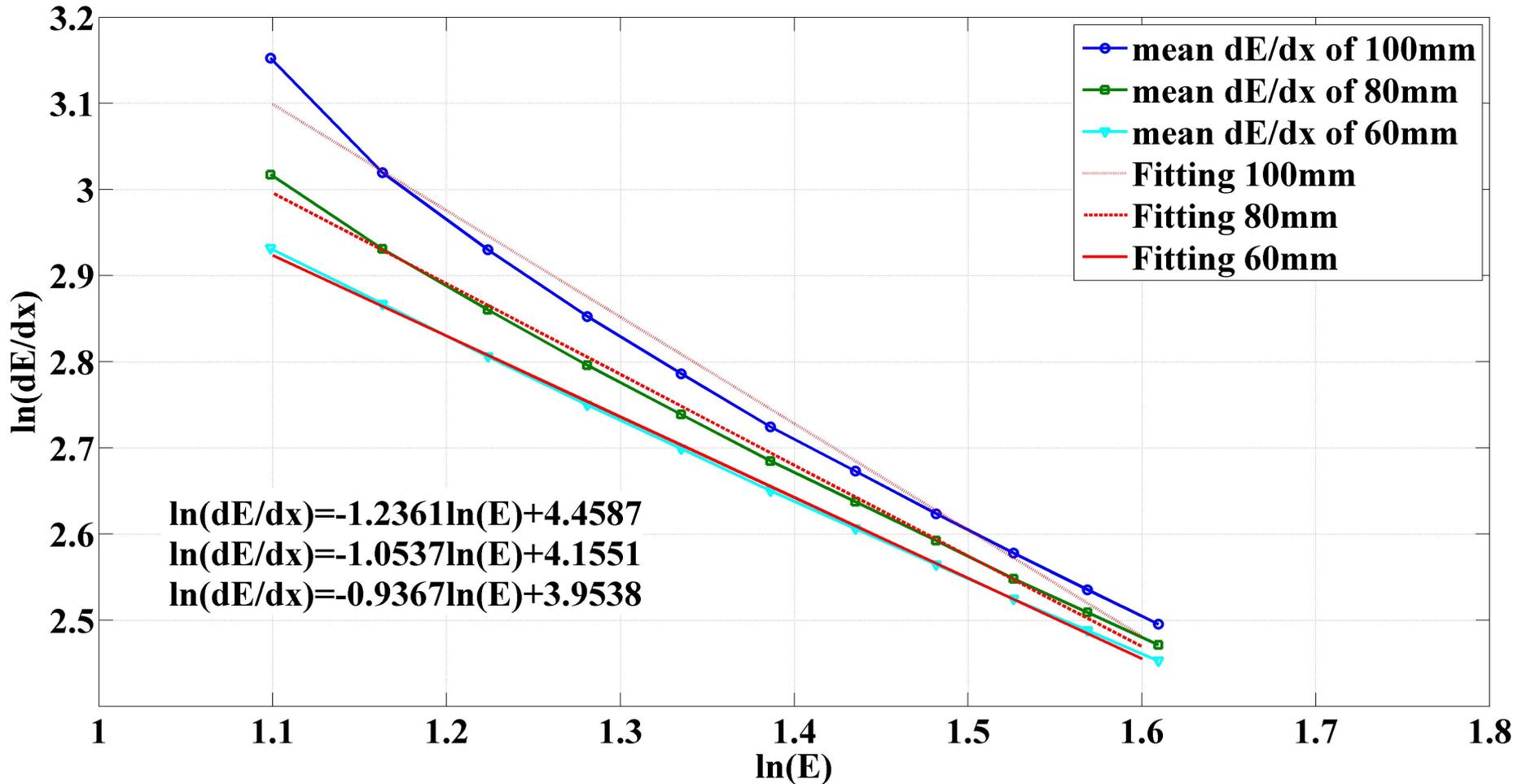


### 3 质子dE/dx与能量E的关系（1）



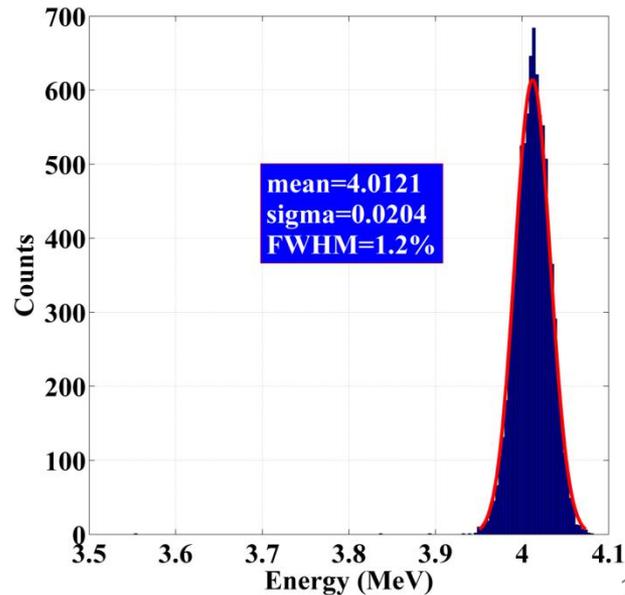
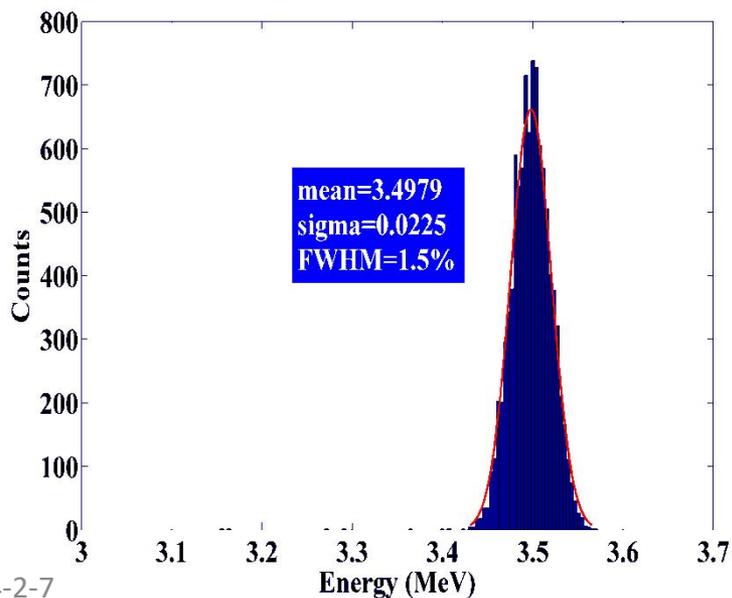
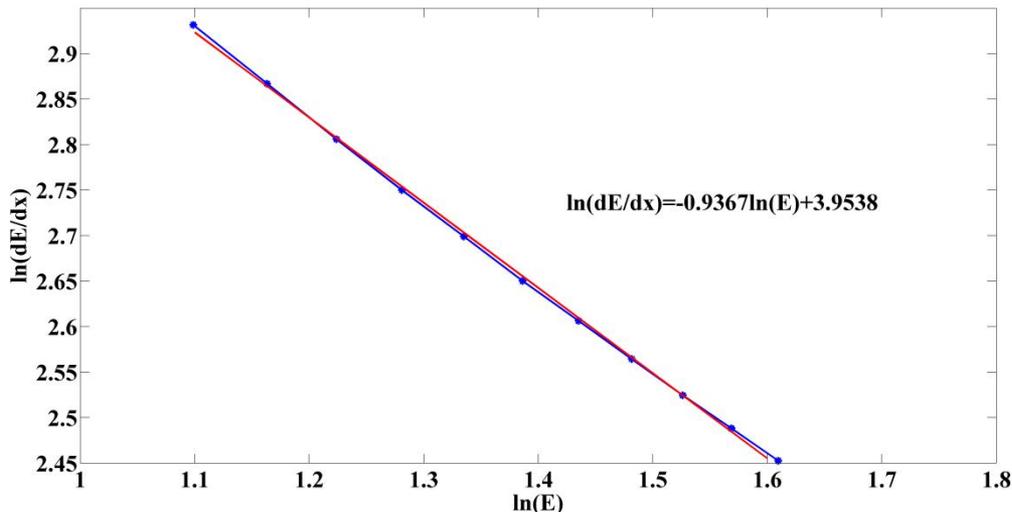
选取射程初始点（实际上是计算中的第一个点）处的dE/dx，观察该值与入射质子能量E的关系。

### 3 质子dE/dx与能量E的关系 (2)



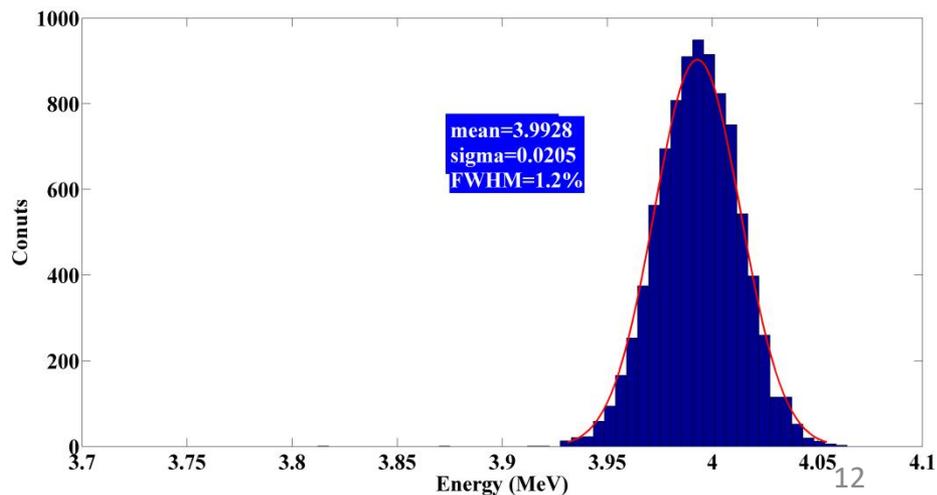
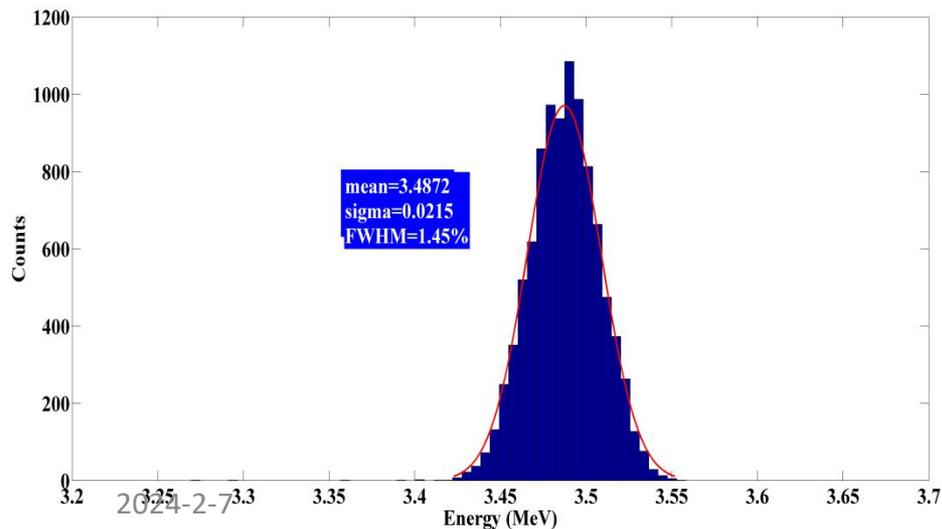
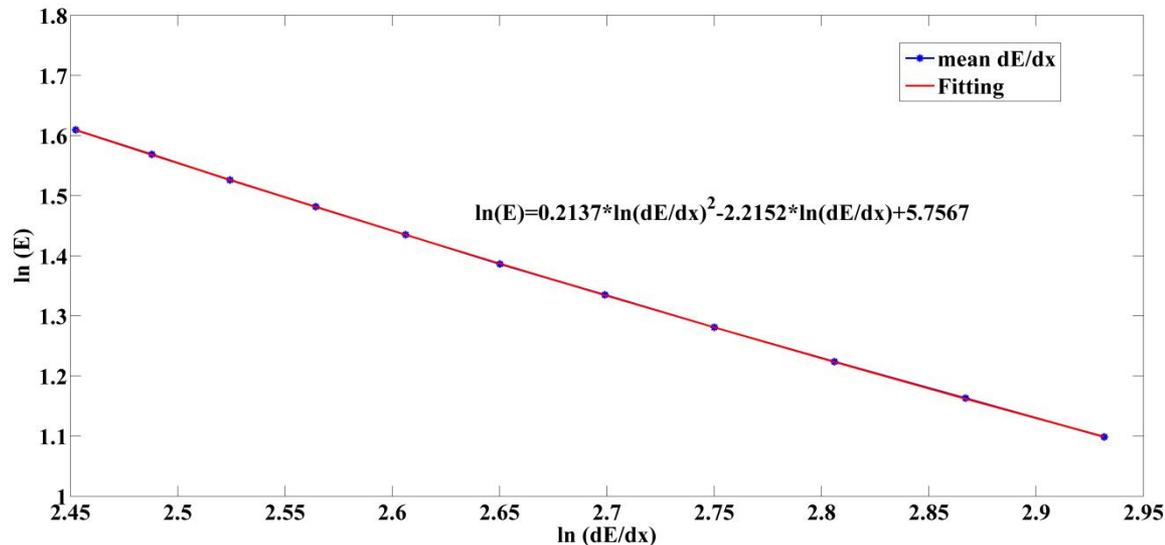
# 4 基于dE/dx的质子能量反演 (1)

模拟计算10,000个单能质子事例（能量为3.5MeV和4MeV），记录射程前60mm内的dE/dx平均值，反演计算对应入射质子的能量，得到的能量分辨率（FWHM）分别为1.5% @ 3.5 MeV 和 1.2% @ 4.0 MeV。



# 4 基于dE/dx的质子能量反演（2）

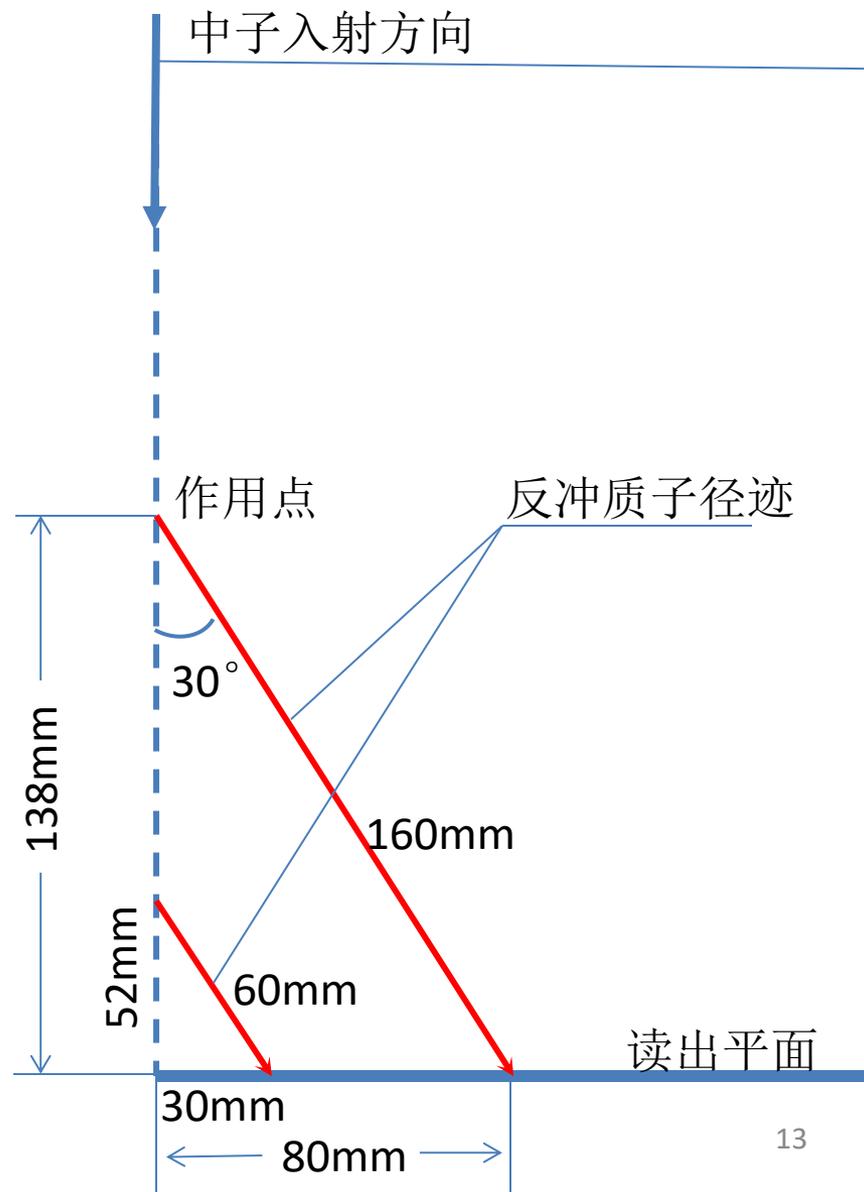
使用二次多项式进行拟合，并在此基础上对10,000个单能质子事例（能量为3.5MeV和4MeV）进行能量反演。计算得到的结果为：能量分辨率（FWHM）分别为1.45% @ 3.5 MeV 和 1.2% @ 4.0 MeV。



## 4 基于dE/dx的质子能量反演（3）

以反冲角 $30^\circ$ 为例，此时反冲质子的能量为3.75MeV，对应的射程约为160mm，若保证反冲质子的能量完全沉积在TPC中，则要求中子与质子的作用点距离读出平面至少138mm。而若采用解谱获得入射质子的能量则该距离可减少至52mm。

由此仅考虑入射深度的影响，探测效率可由 $362/500=72\%$ 提高至 $448/500=89.6\%$ 。



# 5 结论

---

- 使用 $dE/dx$ 来解谱入射质子能量的方法可行；
- 能量分辨率（FWHM）约为1.2%@4MeV；
- 应用于nTPC可提高探测效率；
- 反演模型及方法还有待进一步优化。

谢 谢