
磁场扫描型裂变产物电子能谱 数据研究—一些考虑

章红宇（高能物理研究所）

马续波（华北电力大学）

祁辉荣（高能物理研究所）

2019.09.17

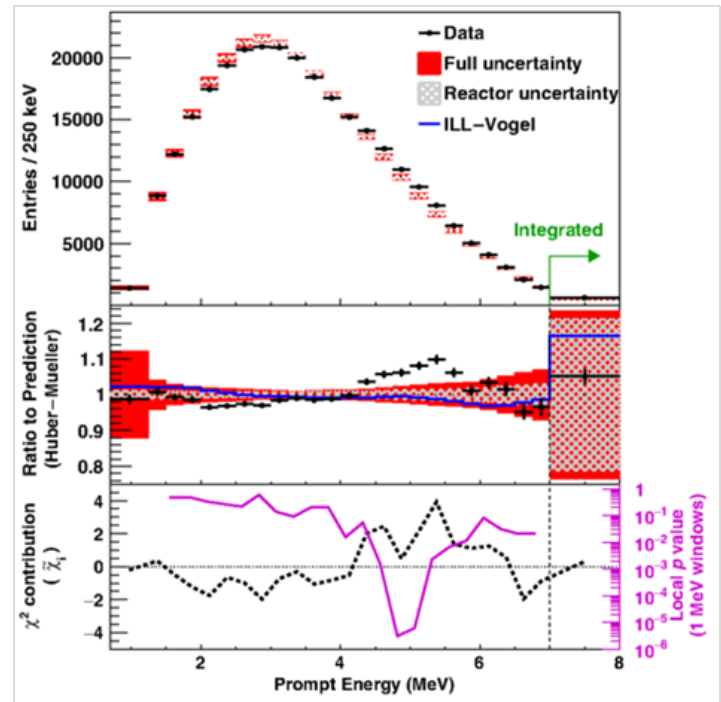
目录

- 立项依据
- 可能的研究方案
- 主要考虑的内容与方案
- 小结

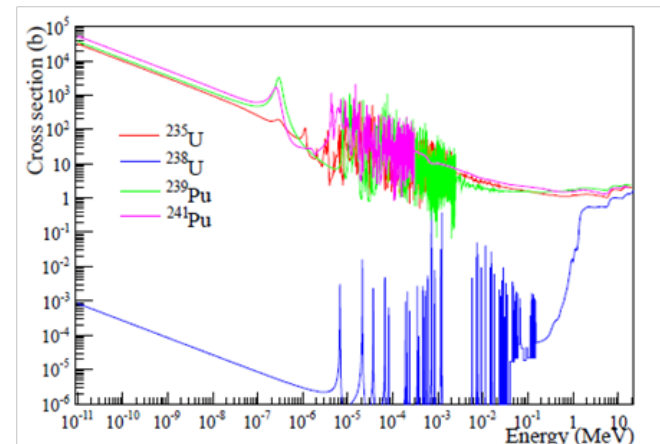
立项依据

■ 物理意义

- 在精确测量中微子味混合角的时候，发现测量的中微子能谱实验测量值与理论预期4~6MeV时存在有4.4倍 σ 的偏差，需要对中微子能谱有更为深入的理解和研究
- 模型预期错误还是在中微子震荡过程中产生了惰性中微子，或者是其它的可能性，目前都还没有明确的答案
- 测量中微子能谱，需要精确测量电子能谱
- 深入理解中微子能谱偏差，对江门中微子实验测量中微子质量顺序也具有重要意义



中微子快信号能谱和模型对比有明显超出

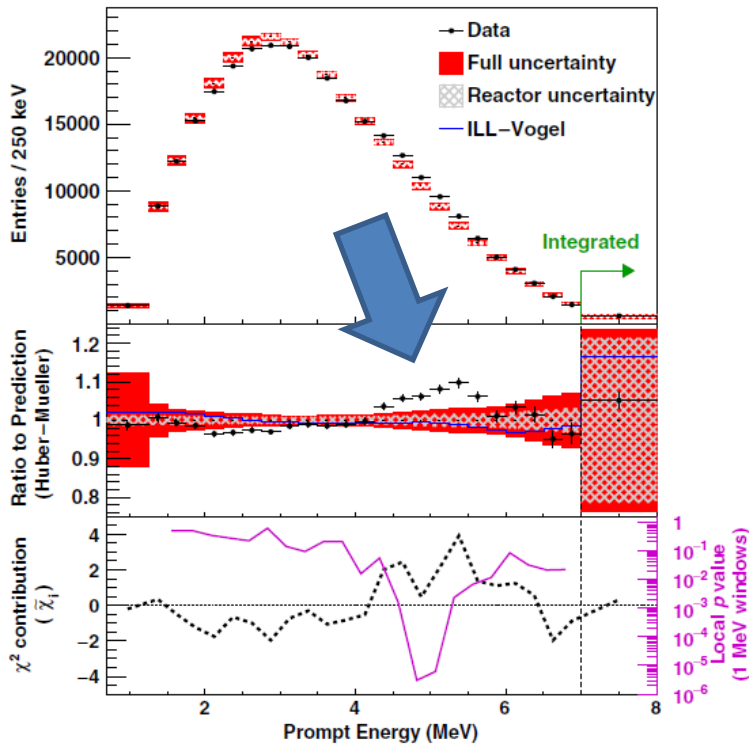


不同能量中子与靶物质相互作用的截面

测量反应堆中微子流强和能谱

发现与理论模型有差异，
对在建的江门实验意义重大

- ◆ 中微子总数低于理论预期6%
- ◆ 正电子能谱5MeV存在超出
- ◆ 反解中微子能谱



PRL(2016), CPC(2017), PRL(2017)

《科技日报》2016国内十大科技新闻

The collage features several science news articles and logos. At the top right is the 'symmetry' logo. Below it is a 'PHYSICS TODAY' article with the headline 'Daya Bay discovers a mismatch' and sub-headline 'The new case of missing antineutrinos'. To the right is a 'Science News' article with the headline 'Reactor data hint at existence of fourth neutrino'. Below that is a 'Science' article with the headline 'Being Wrong About Fundamental Physics Is Pretty Exciting Too'. At the bottom right is another 'Science' article with the headline 'Neutrinos continue run of odd behavior at Daya Bay'. The 'Science' logo is prominently displayed at the bottom center.

Weird sterile neutrinos may not exist, suggest new data from nuclear reactors

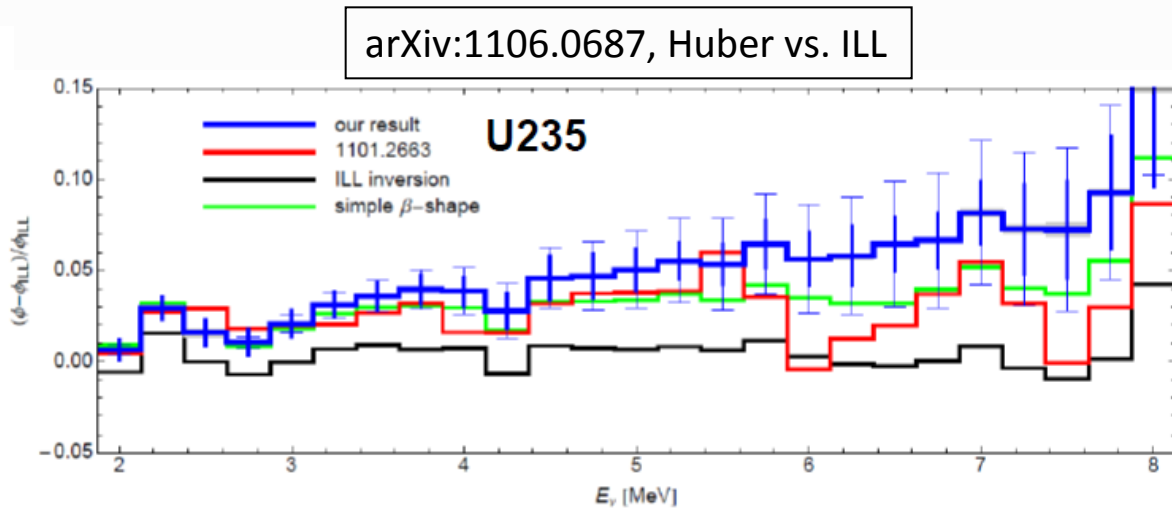
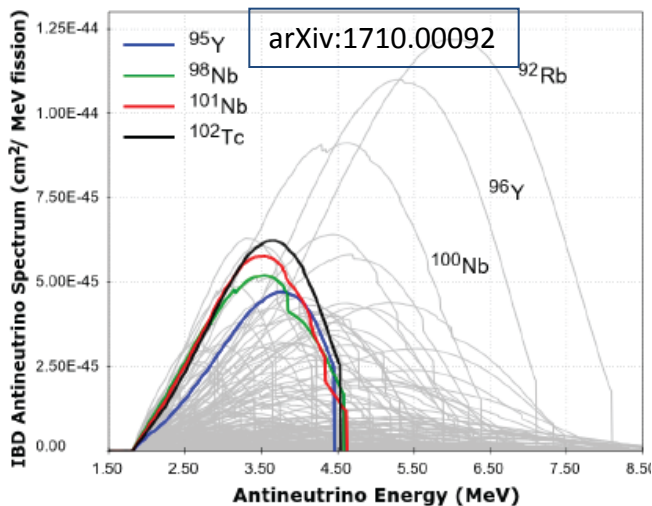
By Adrian Cho | Apr. 6, 2017, 5:30 PM

核素中微子能谱

- 从头算(ab-initio)方法 (Vogel, Mueller, Fallot, ..)
 - 贝塔衰变理论: 贝塔谱 → 中微子谱
 - 1000种核素裂变产额数据, 6000多个贝塔衰变数据, 数据库不完备
 - 误差较大: 10%-20%

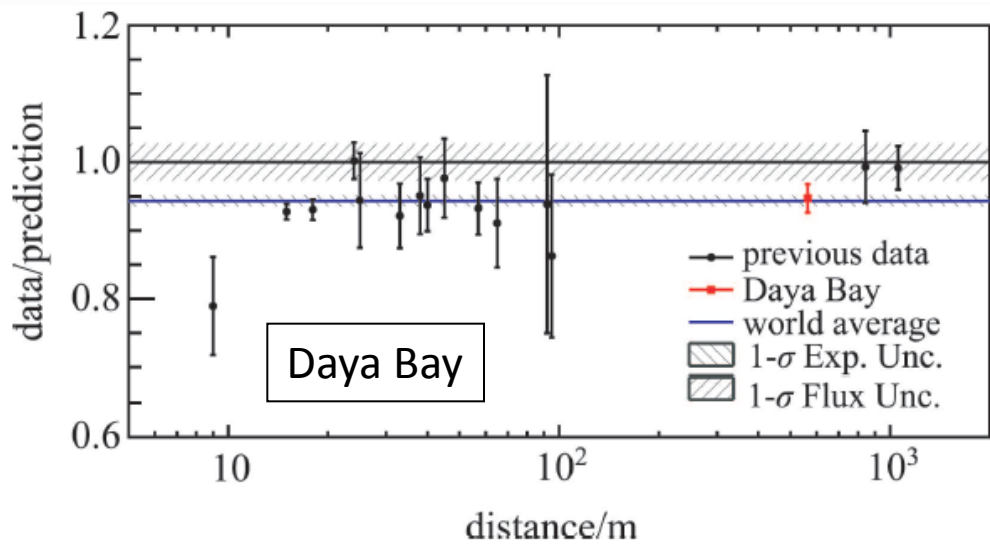
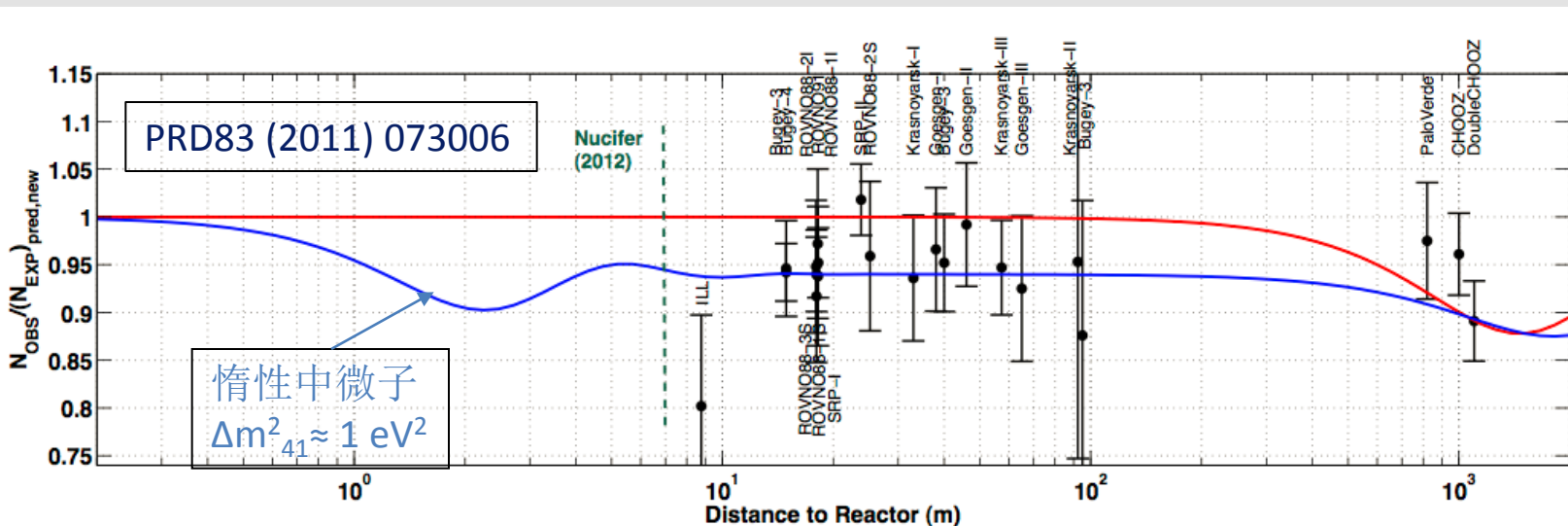
$$S_f^b(E_e, Z_f, A_f) = S_0(E_e)F(E_e, Z_f, A_f)C(E_e)(1 + \delta(E_e, Z_f, A_f)),$$

- 贝塔谱转化方法(ILL, Huber)
 - 法国ILL 80年代测量了三种核素贝塔谱: ^{235}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu
 - 2013年测量了 ^{238}U 贝塔谱
 - 总贝塔谱分解为几十个虚拟衰变分支, 分支贝塔谱 → 中微子谱



中微子事例率反常

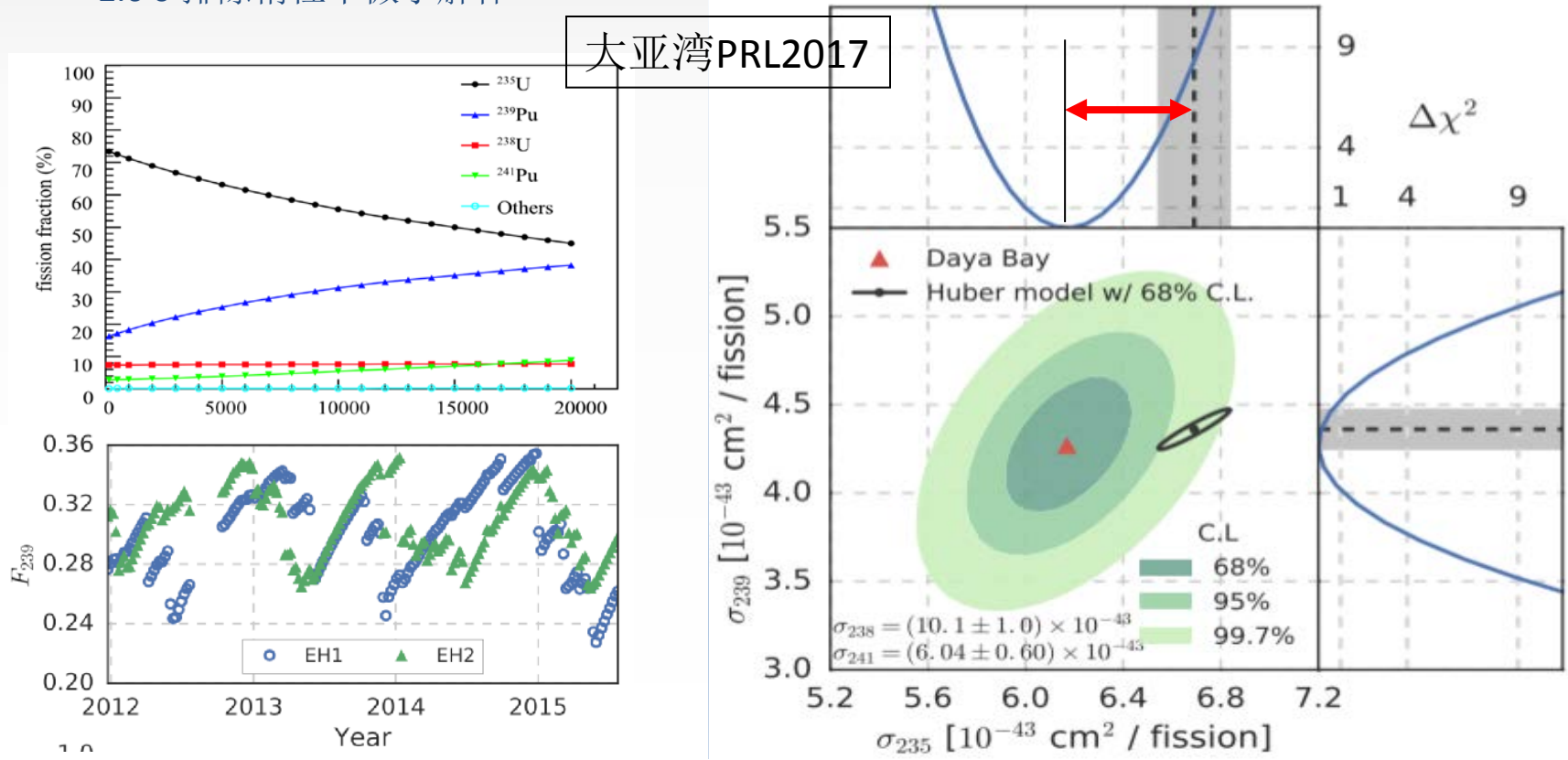
- 实测中微子事例率比模型预期(Huber+Mueller)低了约6%



- 大亚湾测量结果
测量/预期 = 0.946 ± 0.020
- 反常原因
 - 惰性(sterile)中微子?
 - 模型预期错误?

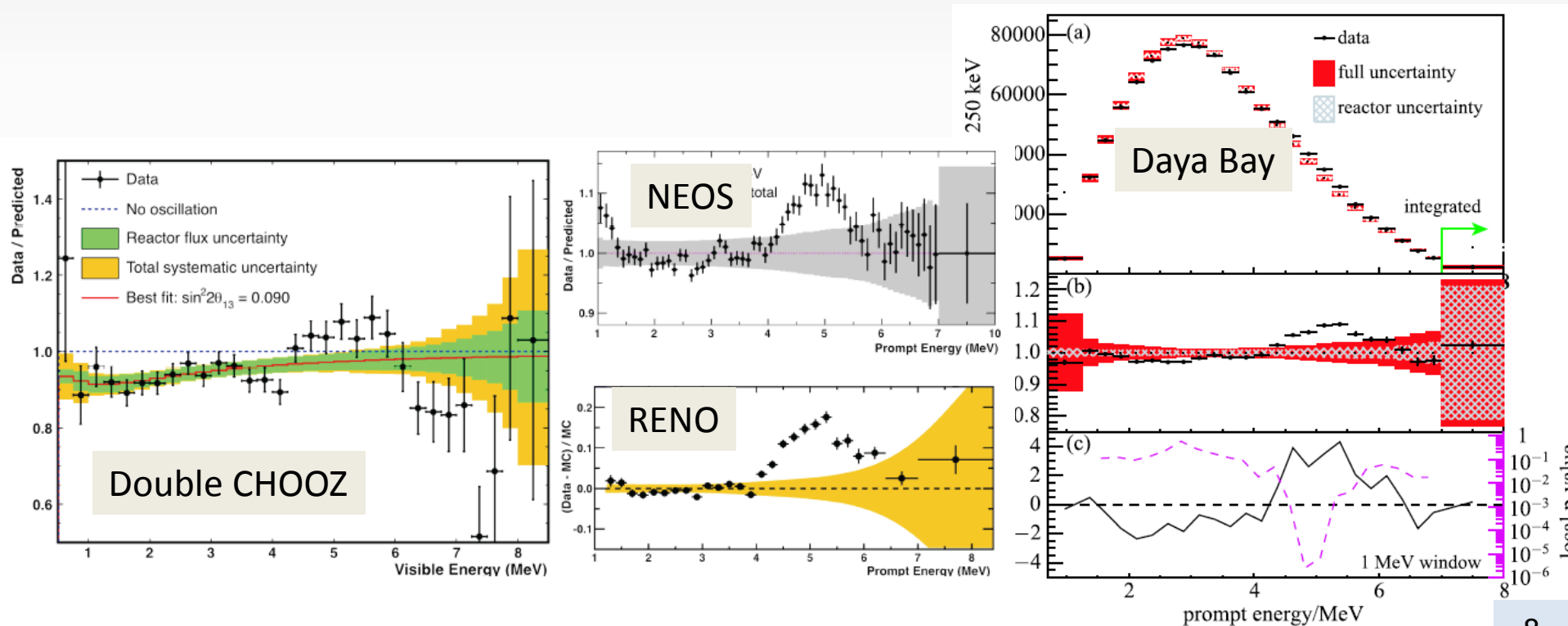
惰性中微子可能不是原因

- 反应堆中的裂变份额在变化，因此可以用利大数据量，分解出同位素各自的中微子产额。
- 大亚湾测量 ^{235}U 和 ^{239}Pu 各自产额，并与模型预期值比较
 - ^{235}U 比预期值低7.8%， ^{239}Pu 与预期值基本一致
- 如果惰性中微子导致中微子数反常，那么 ^{235}U 和 ^{239}Pu 减少幅度应该一样。
 - 2.6σ 排除惰性中微子解释



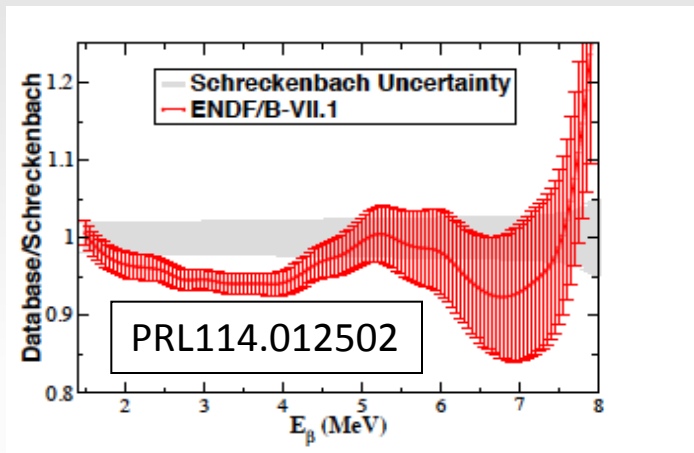
中微子能谱反常

- 除了中微子事例率反常，实验还发现能谱反常(4-6 MeV)
- 惰性中微子振荡无法引起4—6MeV凸起
- 基本排除探测器能标刻度不准，未知衰变等原因
- 最可能的原因：模型预期能谱不正确

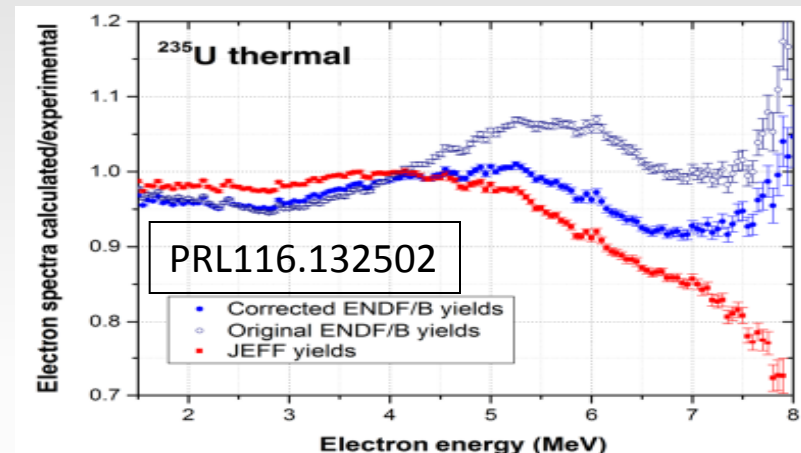


模型预期问题

- 目前所有模型还无法解释4—6 MeV凸起



考察发现有些核素会贡献4-6MeV凸起

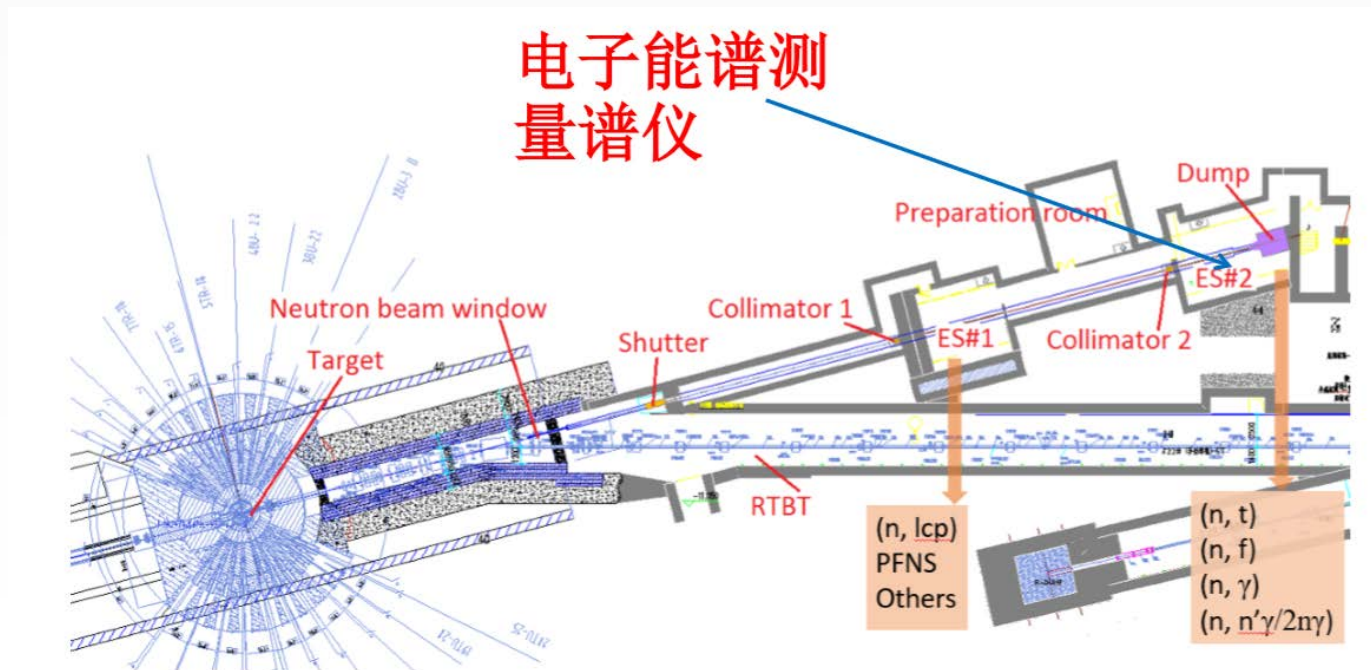


用JEFF数据库并没有凸起，ENDF数据库错误

- 推动一系列研究寻找可能原因
 - 引起裂变的中子能谱 ([PRD97.073007](#), [arXiv:1805.09973](#))
 - 核禁忌跃迁能谱修正 ([PRL119.112501](#), [PRL92.033015](#), [PRL112.202501](#))
 - 四种核素哪种核素可能贡献凸起 ([PRL118.042502](#), [PRC98.041303](#), [PRB765 \(2017\) 159-162](#))
 - 其他解释: [PRD92.033015](#), [PRC95.064313](#)

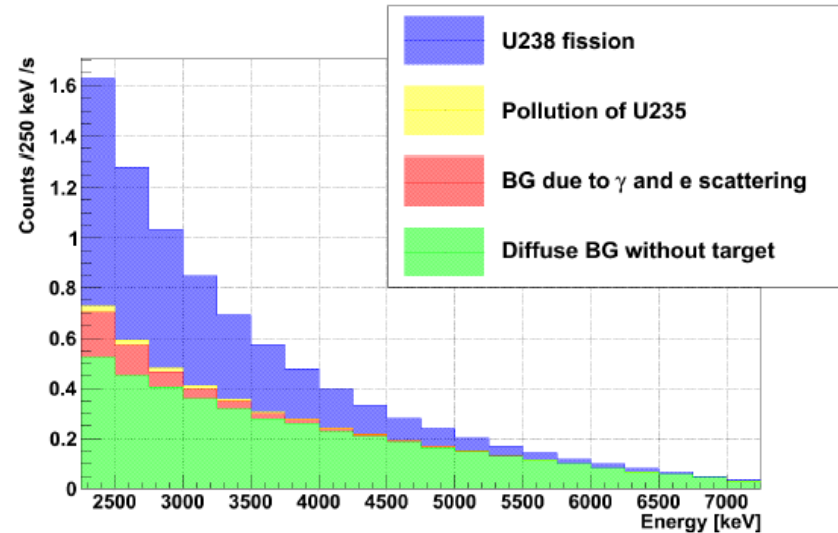
改进模型预期

- 现有模型与实验数据符合程度在10%
- 从头算方法改进
 - 数据库短期改进比较困难：裂变产额，贝塔谱，禁忌跃迁
- 贝塔谱转化方法改进
 - ^{235}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu 能谱：ILL是唯一的数据库
 - ^{238}U 能谱：误差很大10%
- 计划在中国散裂中子源重复ILL测量各同位素的贝塔谱

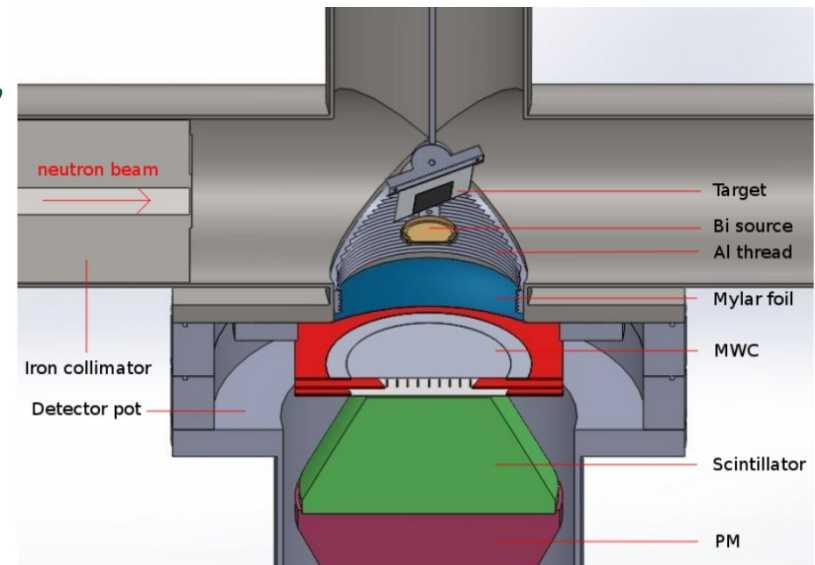


立项依据

- 中微子能谱测量国际现状
 - 反应堆中微子能谱的最好测量来自于 ILL 实验
 - ILL 实验采用高浓铀(^{235}U 富集度可达到90%), 测量了易裂变核素 $^{235}\text{U}/^{239}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}$ 的电子能谱, 然后把电子能谱转化为中微子能谱
 - 中子束流与 Pu/U 等靶物质相互作用后, 会产生不同的裂变产物
 - 测量 ^{238}U 中微子能谱的电子谱仪主要包括两个部分, 分别是多丝室和闪烁体探测器, 联合进行测量已鉴别电子。但存在不能满足动测量态范围的问题



裂变产物及本底等对比



阻止型探测器测试示意图

主动型TPC方案1

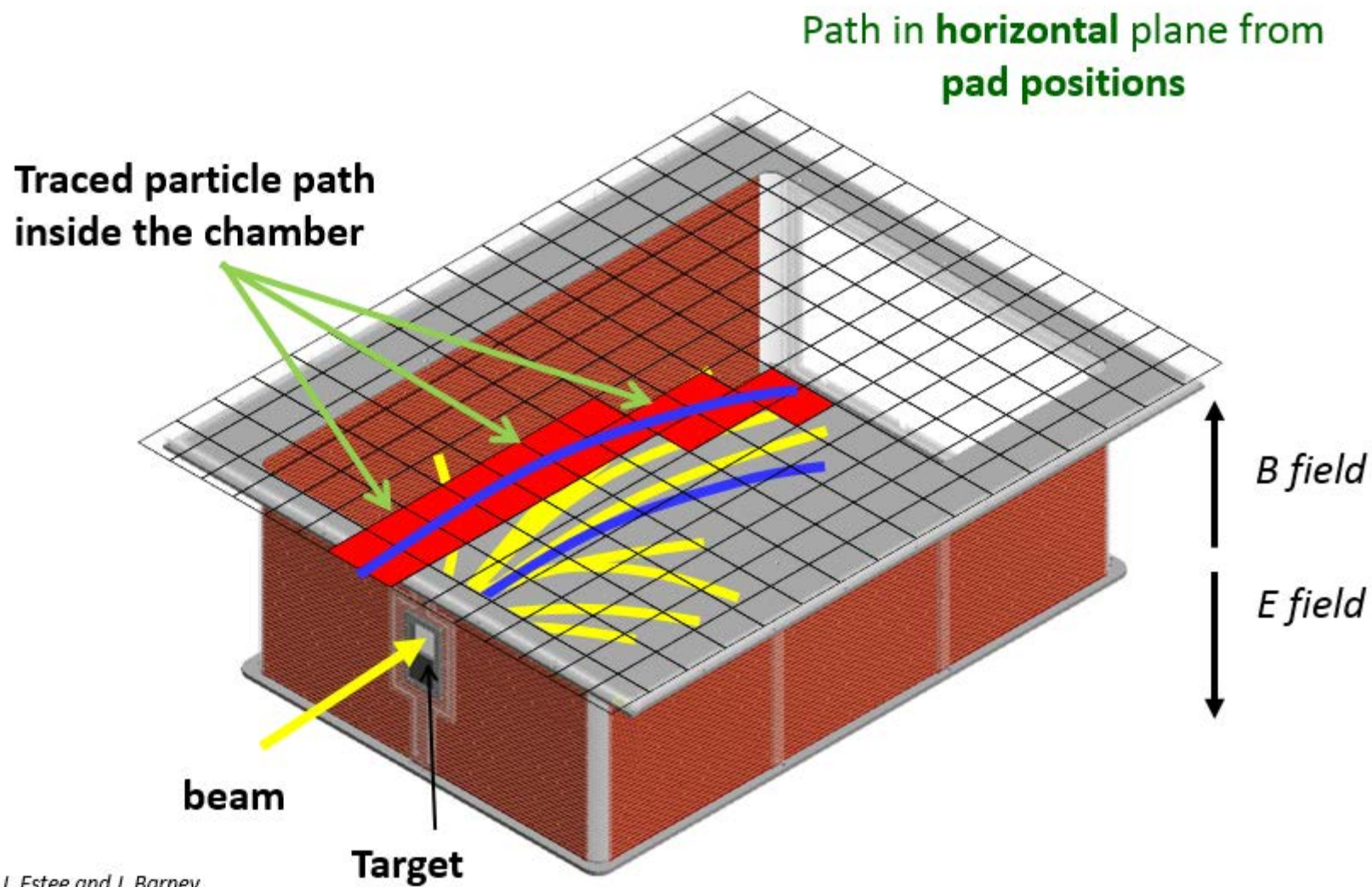
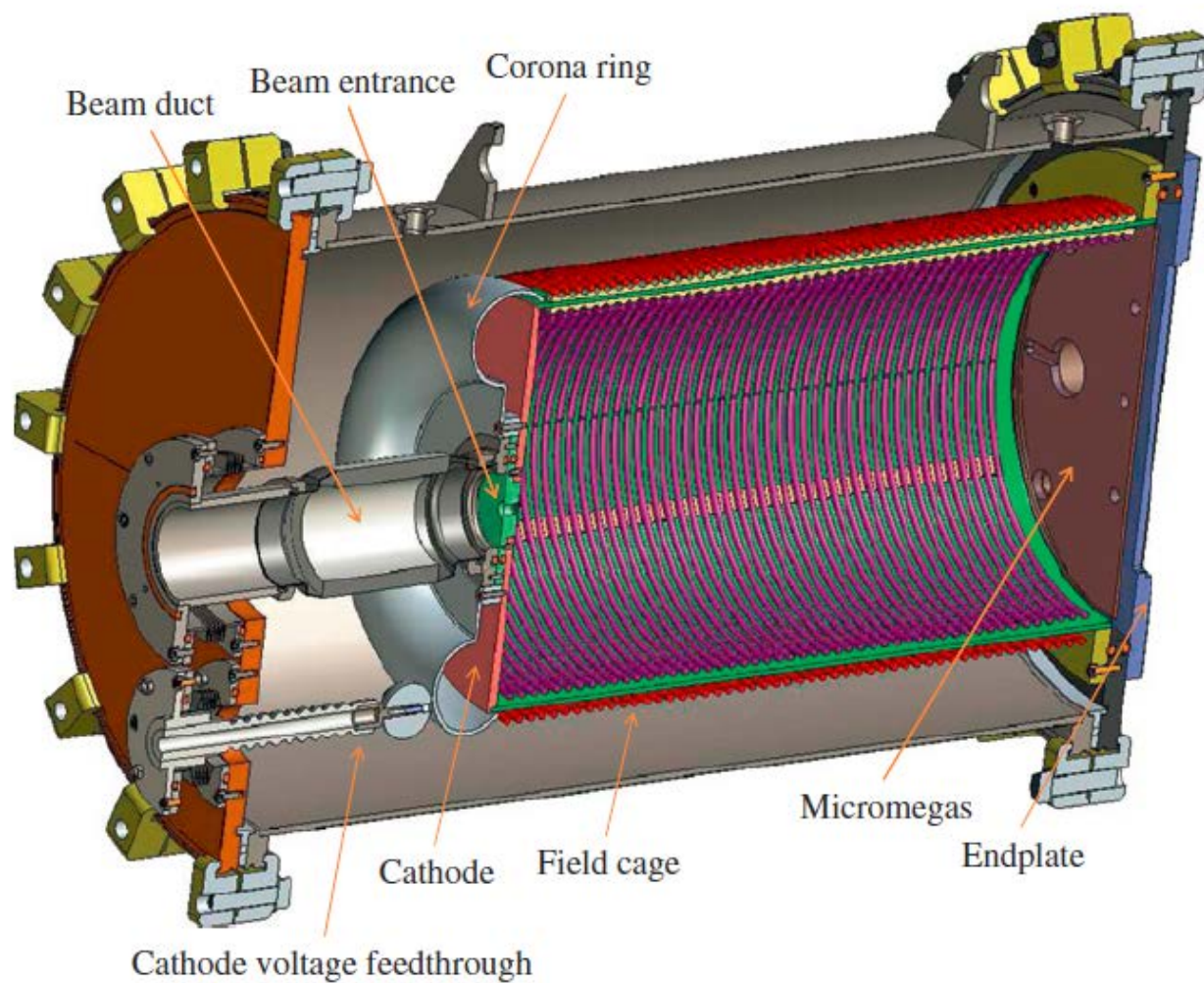


Figure by J. Estee and J. Barney

主动型TPC方案2



立项依据

■ 国内研究现状

- 核探测与核电子学国家重点实验室（中国科学院高能物理研究所+中国科学技术大学）已开展很多相关基础研究
- 时间投影室（**Time Projection Chamber, TPC**）作为径迹探测器，漂移区内部充满了工作气体并加有平行于**TPC**轴向的电场和磁场，**TPC**有能力实现对粒子的高性能测量
- 电子在电场的作用下向端盖漂移，并在读出探测器处得到雪崩放大，产生具有位置、电荷幅度和漂移时间等信息的输出。
- 磁场的作用一方面可以使带电粒子在**TPC**内发生偏转而测量其动量，同时还可抑制电子漂移过程中的横向扩散，提高位置分辨率，进而提高探测器的动量分辨率。
- 国内相关研究机构，在大动态范围电子谱测量方面均未开展深入的研究工作。

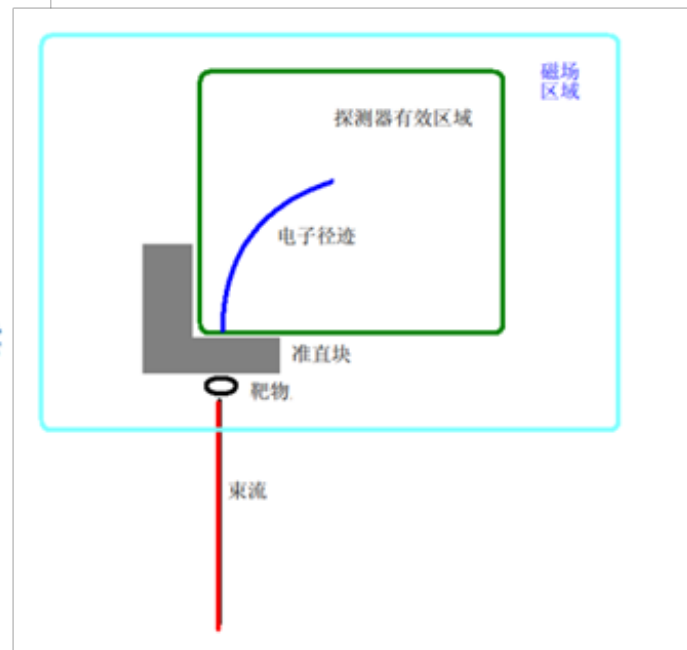
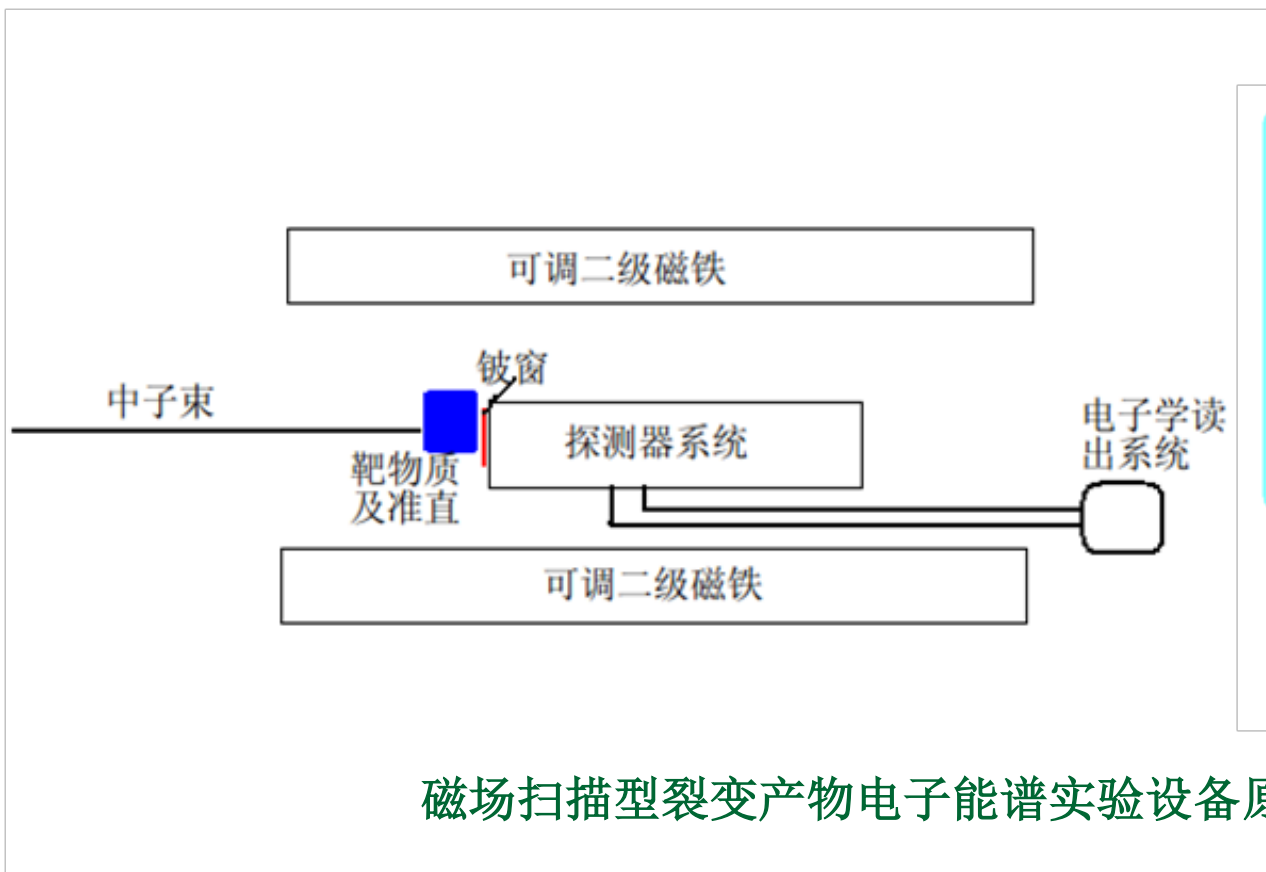
主要内容与方案

研制一套实验探测设备，满足大动态范围电子谱测量，采用微结构**GEM**探测器实现径迹测量及动量测量。

■ 研制目标

- 探测器部分：探测器主要由时间投影室构成，主要分为探测器腔体、**GEM**探测器、读出**Pad**电路板和读出电子学部分。其中**GEM**探测器测量级联的两级或者三级构成，有效探测面积为**100mm×100mm**，读出**Pad**大小沿径迹方向优化设计。探测器腔体外形尺寸约为**260mm**长，**260mm**宽，**100mm**高。探测器运行在**0.1tam~0.8atm**低气压。探测器的读出通道数~**1000**路。
- 磁场部分：采用常规的二级磁铁结构，可以提供**50G~0.2T**的均匀磁场，均匀磁场区域需要约**500mm**长，**500mm**宽，**250mm**高。**50G~0.2T**的均匀磁场可以进行**100G**步长的阶梯增长调节。
- 中子与靶物质部分：中子束流入射进入低气压时间投影室时，采用金属铍窗作为入射窗，尽可能低的降低中子束流损失。**235U**靶物质放置在探测器腔室内外部

主要内容与方案



磁场扫描型裂变产物电子能谱实验设备原理示意图

主要内容与方案-扫描磁铁

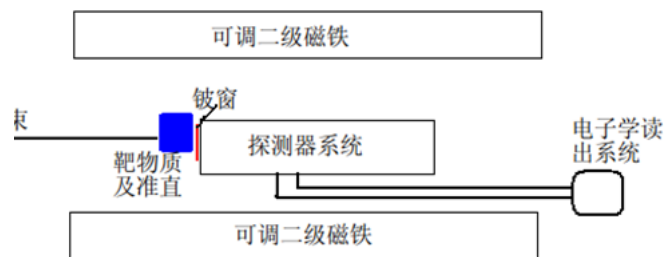
■ 扫描型二级磁铁的研制

- 目的：主要包括二级磁铁及可调励磁控制软件一套

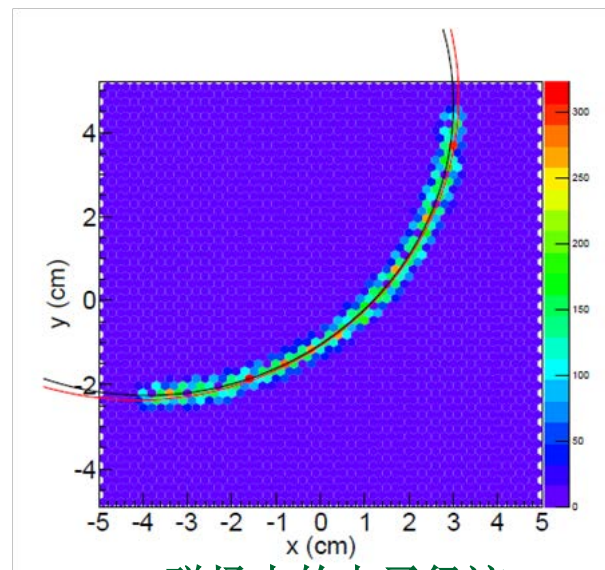
- 常规的二级磁铁结构
- 可以提供**50G~0.2T**的均匀磁场
- 均匀磁场区域需要约**500mm**长，**500mm**宽，**250mm**高
- **50G~0.2T**的均匀磁场可以进行**100G**步长的阶梯增长调节
- 磁场扫描的低磁场阶段实现精细步长变化

■ 设计的优势：

- 在单一探测器、单一读出电子学的条件下，实现大动态电子能谱测量
- 实现取样型测量，间接测量电子径迹实现动量测量
- 磁场扫描的范围和气体探测器的气压、灵敏探测器面积是非常重要的指标



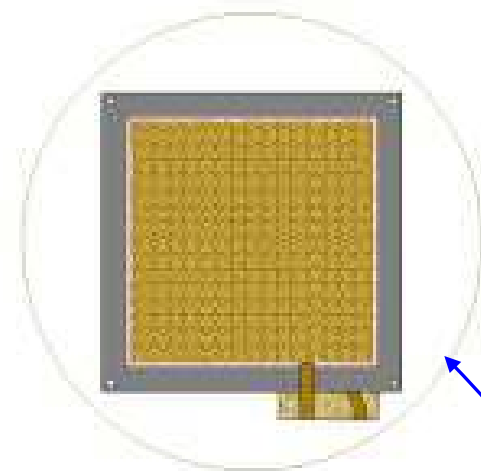
扫描二级磁铁示意图



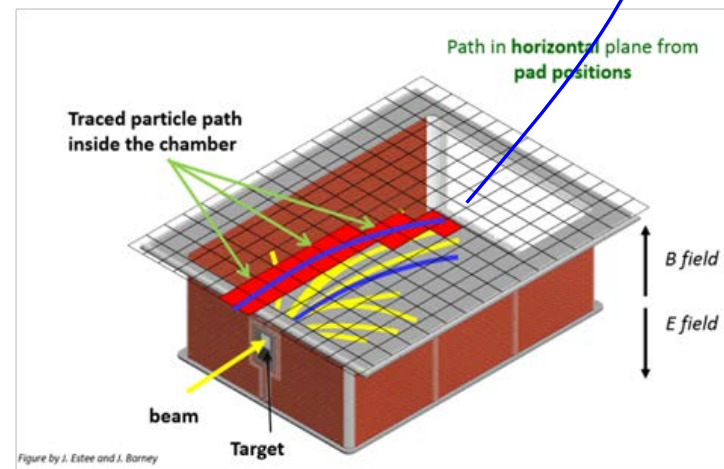
磁场内的电子径迹

主要内容与方案-径迹探测器

- 取样型气体径迹探测器的研制
 - 目的：主要包括读出探测器及低气压腔体
 - 有效读出面积为 $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的三层或者两层GEM 探测器
 - 微单元结构气体探测器+“Pad”读出方案
 - 探测器腔体外形尺寸约为 260mm 长， 260mm 宽， 100mm 高。漂移区 $\sim 20\text{mm}$
 - 探测器运行在 $0.1\text{tam} \sim 0.8\text{atm}$ 低气压
 - 中子束流入射进入低气压时间投影室时，采用金属铍窗作为入射窗，尽可能低的降低中子束流损失
 - 设计的优势：
 - 在有效的探测器体积内最大化的利用有效读出面积
 - 实现探测区域内有效径迹采样的最优采集
 - 配合磁场实现电子能谱的精细测量研究



读出GEM探测器示意图



气体径迹探测器示意图

主要内容与方案-靶系统

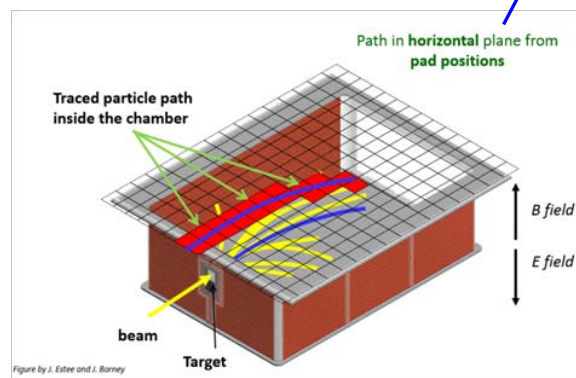
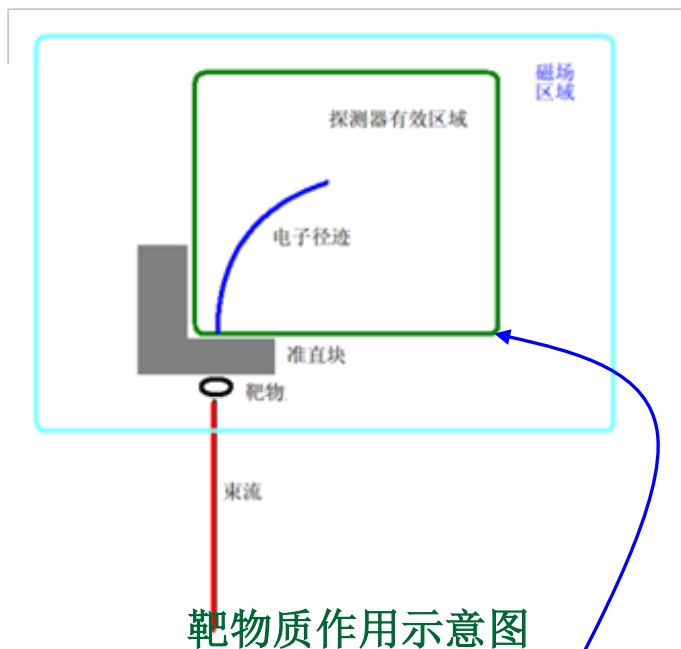
■ 取样型气体径迹探测器的研制

■ 目的：主要包括靶安装及准直系统

- 低气压气体径迹探测器与入射靶之间采用一套的入射屏蔽准直体和非对称探测入射点的设计
- 实现了裂变产物电子能谱入射范围的准直，避免了**180度**入射电子两个不同方面干扰的问题
- 实现了**1/4象限**测量裂变产物电子能谱测量

■ 设计的优势：

- 中子束流打靶后入射探测器为**180度**范围的裂变产物电子
- 本方案通过中子与靶物质部分安装一个准直装置，实现水平方向的入射电子。并且采用非对称设计实现**1/4象限**的电子径迹测量，尽可能的降低多事例干扰问题。



可行性及解决的关键技术问题

- 需要着重考虑以下几个方面的设计因素

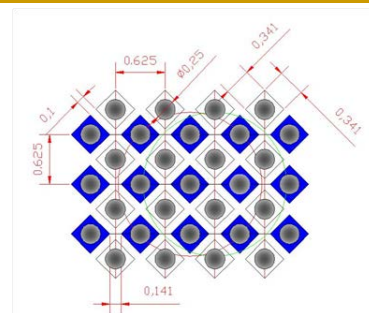
- 低气压径迹测量

- 在低气压的时间投影室内可以实现低能量电子径迹的测量
 - 磁场在**50G**时，能量为**50keV**的电子偏移半径~**4.6cm**，该能量的电子在**0.5atm**的工作气体中（**Ar/CO2=90/10**）的传输径迹长度为~**10cm**
 - 能量为**10MeV**的电子时，

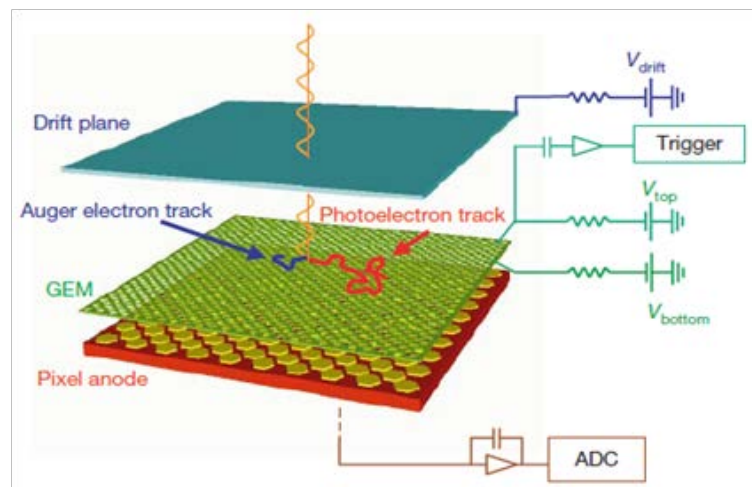
$$r_{\max} / r_{\min} = 40$$

其中 r_{\min} 为**50keV**的电子偏移半径， r_{\max} 为**10MeV**的电子偏移半径。

- 可以通过提高磁场到**>1000G**，实现在**100mm × 100mm**有效面积的内的探测。



一种读出分布设计示意图

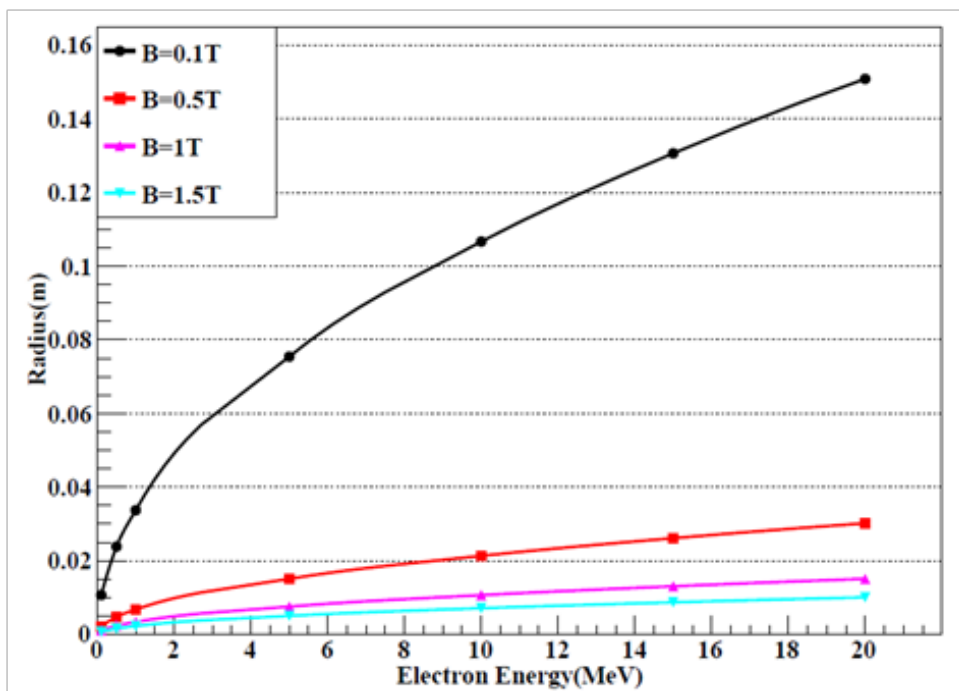


低气压径迹探测器的原理图
(图中示意图为eV量级的结果)

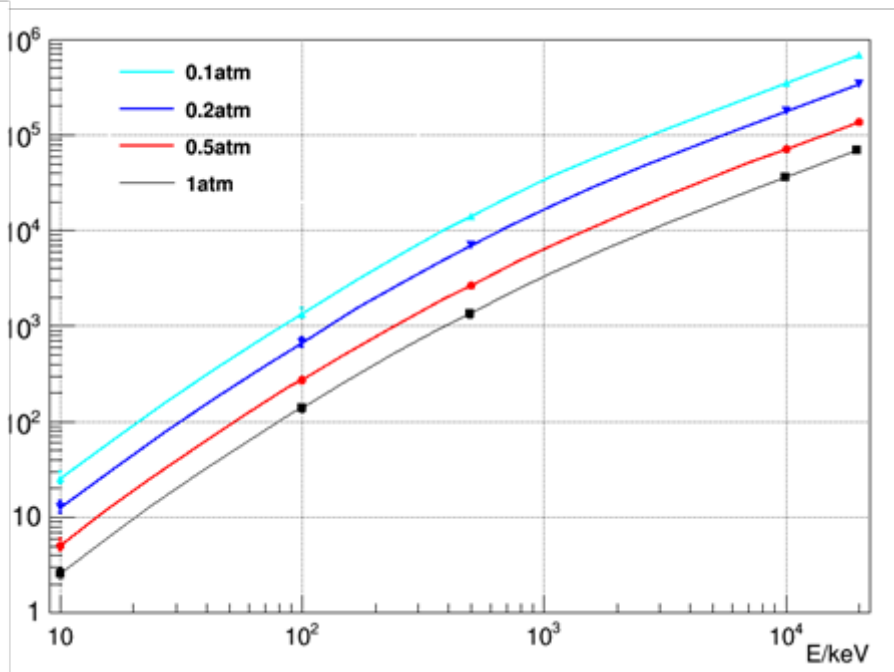
可行性及解决的关键技术问题

- 磁场配合及电子径迹长度关系
 - 不同能量电子与磁场偏转关系
 - 不同能量电子在不同气压的中径迹长度

低能量端磁场扫描的低磁场阶段需要进行较为精细步长变化的测量，在电子能量较高后，可以相应的提高磁场步长单位



不同能量电子与磁场偏转关系



不同能量电子在不同气压 (Ar/CO₂=90/10) 的中径迹长度

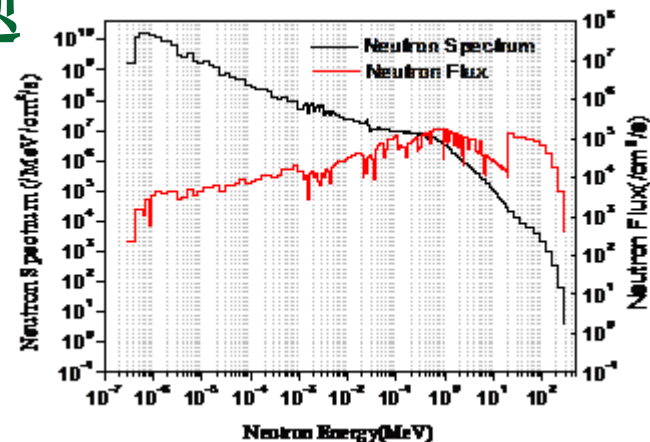
可行性及解决的关键技术问题

■ 事例率的可行性

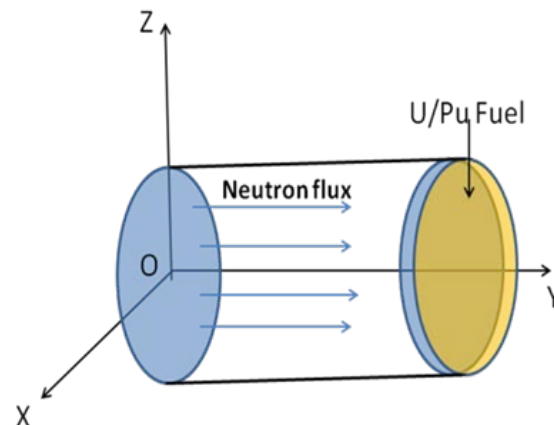
- 计算思路为：首先计算出样品的裂变次数，然后根据每次裂变释放的电子数，即可计算出每秒释放出的电子数。样品的裂变率的计算采用公式。

$$N_f = S \times m \times \int_E \phi(E) \sigma_f(E) dE$$

- **Φ48mm, 0.71%富集度U235, 7mg/cm²**
 - 裂变率：**50次/s**
 - 每次裂变释放6个电子，**300个/s**
- **Φ48mm, 93%富集度U235, 7mg/cm²**
 - 裂变率：**378次/s**
 - 每次裂变释放6个电子，**2268个/s**



中国散裂中子源反角白光中子源二号厅中子能谱



事例估算模型示意图

计算结果总结

	样品1	样品2
尺寸	φ48mm x 0.00638 mm	φ48mm x 0.00638 mm
密度	10.96 g/cm ³	10.96 g/cm ³
质量	0.1264 g	0.1264 g
面密度	7.0mg/cm ²	7.0mg/cm ²
富集度	0.73%	93% (ILL实验富集度)
U238	0.1103 g 2.792E-4	0.007777 g 1.96846E-05
U235	0.0008 g 2.05E-6	0.103323g 2.64863E-04
O16	0.0153 g 5.76E-4	0.0153 g 5.76E-4
中子源强S	1.31E7	1.31E7
裂变率 #/s	50	378
电子事例率 #/s	300	2268

可行性及解决的关键技术问题

■ 束流稳定性刻度问题

- 气体探测器对于不同能量段的电子束的测量是探测效率基本相当的，因此中子束流稳定性刻度可以通过磁场扫描范围内重叠扫描步长的方法实现多个扫描宽度的归一化，实现束流稳定性刻度。
- 也可以利用中子束流的亮度监测数据完成不同时间磁场扫描段测量的归一化刻度。

■ 电子能谱反解中微子能谱的可行性

- 电子能谱反解中微子能谱的思路是首先知道衰变道信息，由于对于同一个衰变道，不同能量的电子谱信息需要通过百微米位置分辨的**GEM**探测器测量得到
- 虚拟分支比的办法。对**235U**而言，归一化误差约为**1.7%~1.9%**，**239Pu**的归一化误差为**1.9%~2.8 %**，**241Pu**的归一化误差为**1.8%~2.0%**。

设备预算构成

合计：~360万（高能所260万+科大100万）

- 探测器及安装系统部分：无磁探测器部分及准直器，腔体等探测部分。探测器研制~25万，准直器研制~15万，磁场内固定可调支架部分~20万，高压系统及低压电源系统~15万，合计：~110万。（高能所）
- 电子学部分：含DAQ及获取软件部分，读出通道数~1000路，1200元/通道。合计：~100万。（科大）
- 磁场及控制部分：采用常规的二级磁铁结构，可以提供50G~0.2T的均匀磁场，均匀磁场区域需要约500mm长，500mm宽，250mm高。50G~0.2T的均匀磁场可以进行100G步长的阶梯增长调节。含控制软件部分，合计：100万。（高能所）
- 中子与靶物质部分：中子束流入射进入低气压时间投影室时，采用金属铍窗作为入射窗，尽可能低的降低中子束流损失。235U靶物质放置在探测器腔室内外，含运输安装费用，合计：~50万。（高能所）

研制基础与条件

该方案中提及的所有技术方案和路线，完整、可靠、可行，需要基金对于该项目的支持以展开该研究工作。

■ 已具备的条件

- 高能物理研究所与中国科学技术大学系依托重点实验，拥有大部分基础的测量条件
- 具有了**GEM**读出的**TPC**原型探测器的研制基础，特别在前端电子学方面，已有可进行放大 $\sim 5\text{mV/fC}$ 的低噪声电荷灵敏前置放大器原型实验板，信号输出宽度为 $\sim 300\text{ns}$ ，噪声水平峰峰值为 $< 25\text{mV}$
- 合作申请人所在的中国科学院“核探测与核电子学国家重点实验室”和高能物理研究所北京同步辐射实验站拥有本工作所需要的实验条件

■ 尚缺少的实验条件

- 自主设计扩展该获取系统的读出路数至少到**1000**路
- 实现可以同时采集电荷量**Q**与**T**的功能，以及可以进行取样型事例判选的指标优化测量
- 需研制探测器系统及扫描磁场系统

谢谢各位专家！