

空间载荷BGO电磁量能器预研

中国科学院紫金山天文台
中国科技大学
高能物理所
兰州近代物理所

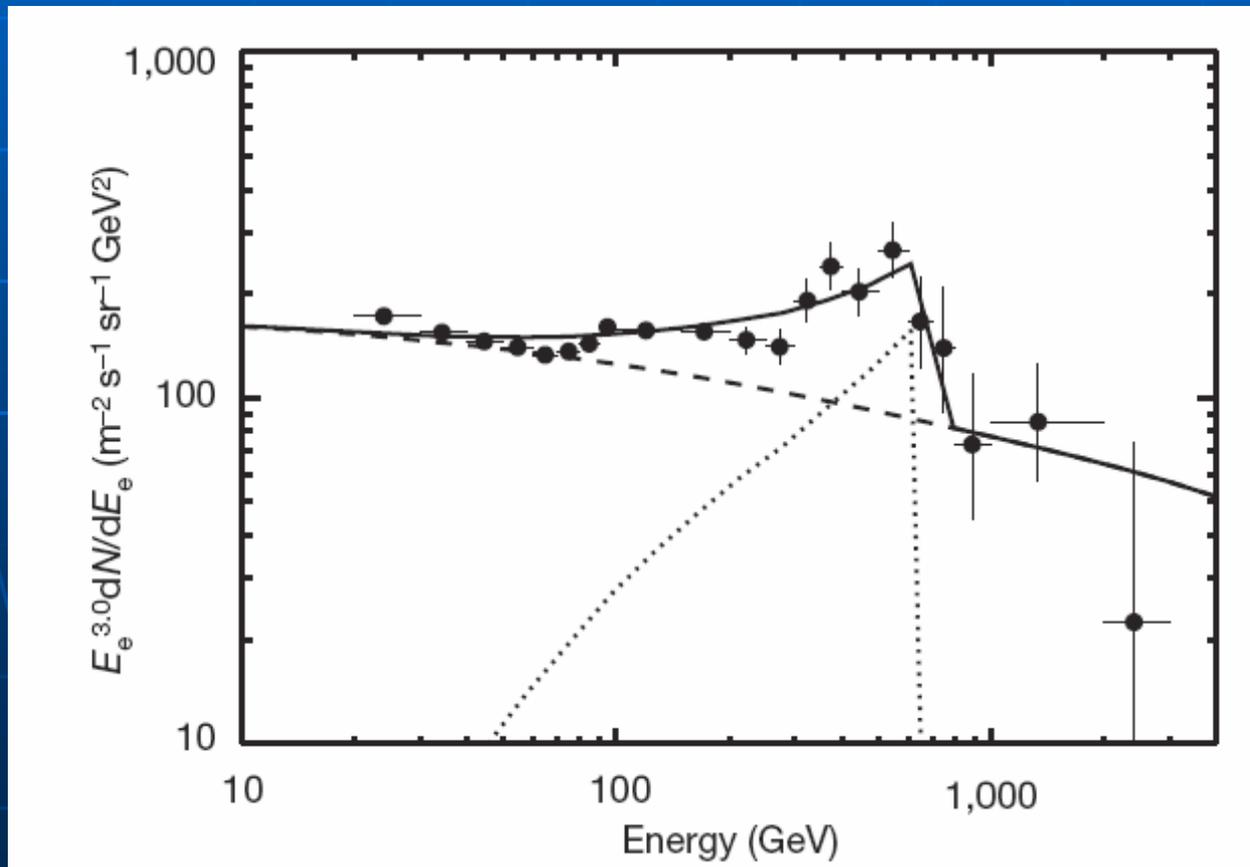
二〇一〇年三月十八日北京

- 1 引言
- 2 面临的挑战和几个技术关键
- 3 预研工作的主要任务和进展
- 4 下一步的研究计划

1 引言

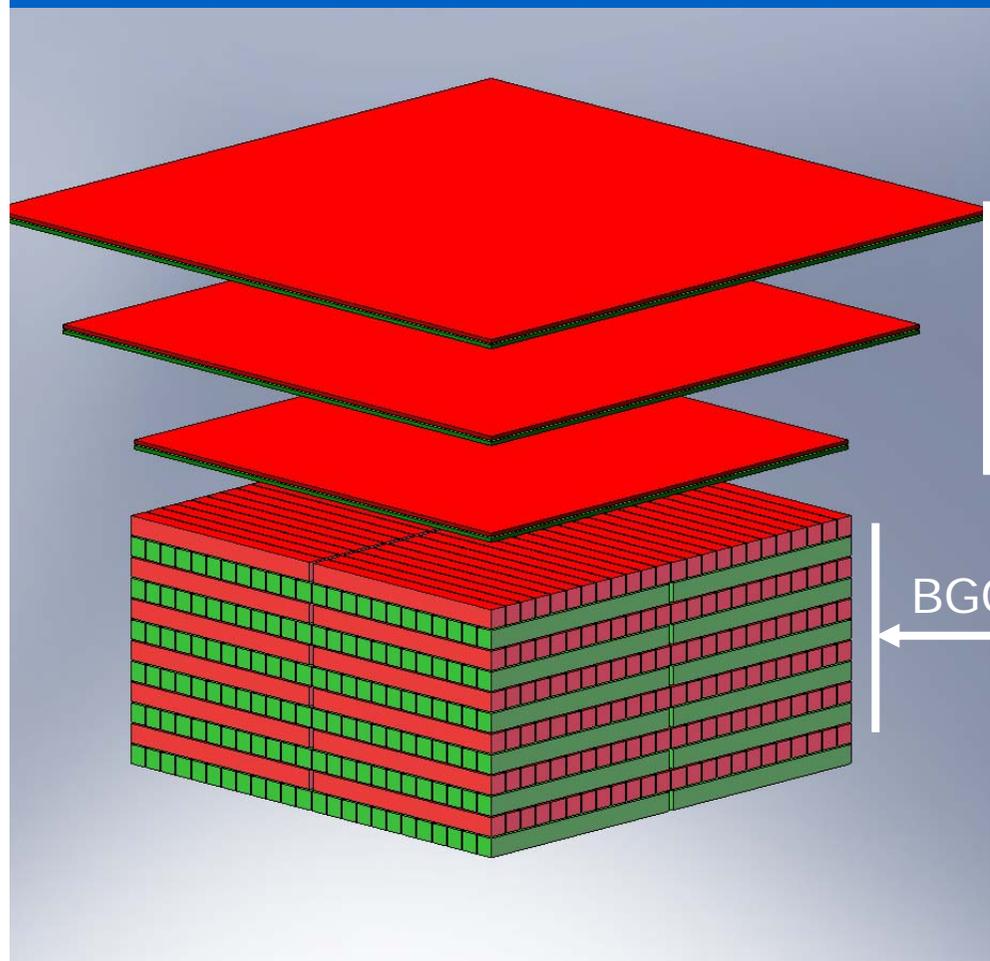
1.1 物理目标

证实、刷新ATIC的重要观测结果，寻找空间暗物质的湮灭产物 (e^+e^-)



ATIC的重要观测结果

1.2 总体方案



塑料闪烁望远镜

1 描出入射高能带电粒子的轨迹，配合重建的簇射分布轴线，确定系统的物理接受度。

2 区分电子和光子事件

BGO电磁量能器

1 记录高能电子、光子簇射能量沉积，从而测量入射高能电子、光子的能量。

2 记录簇射能量沉积的空间分布，以便鉴别删除空间中高能强子（主要是质子）的背景

1.3 量能器系统的设计指标

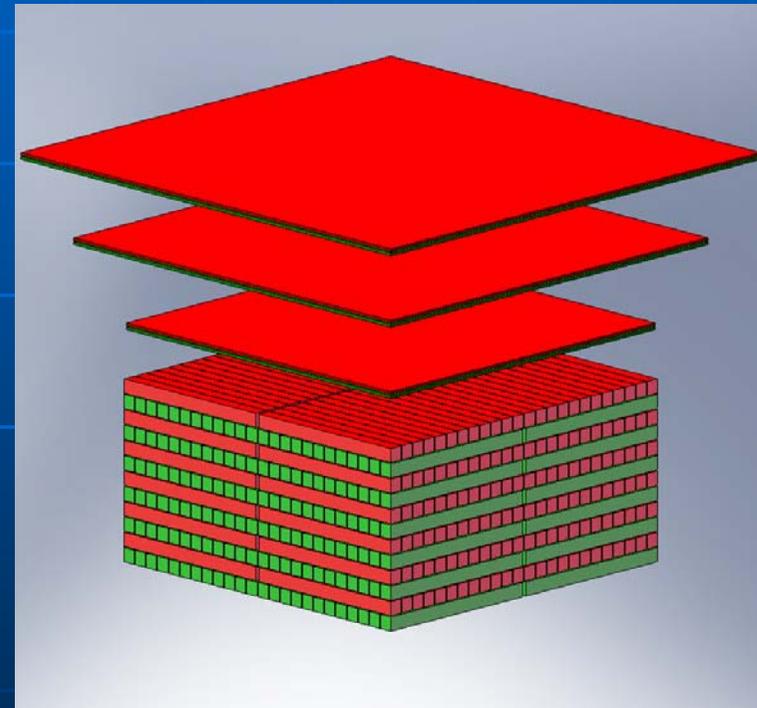
- 观测能段**10GeV-10TeV**
- 动态范围：**0.5MIPs到 10^5 MIPs**
- 探测粒子种类：**电子 伽玛射线**
- 能量分辨**(1.5%@800GeV)**
- 空间分辨**(0.5度@500GeV)**
- 本底水平 **(小于1%@800GeV)**
- 伽玛和电子的区分**优于1%**

几何和物理参数： BGO量能器由576根尺寸为 $2.5 \times 2.5 \times 30$ 厘米³的BGO晶体构成。如图所示组合成横向 60×60 厘米²深为30厘米的长方体。晶体条分12层相互正交排列，由各根晶体耦合的光电倍增管读出的簇射能量分布中心可以重建簇射的中轴。

BGO的物理参数

Density	7.13g/cm ³
Nuclear interaction length	22 cm
Radiation length	1.12cm
Moliere length	2.7 cm
Energy loss (for MIPs)	9.2 MeV/cm

读出通道 $3 \times 576 = 1728$ 通道



total: $26.8X_0$, 1.36NIL

2 面临的挑战和几个技术关键

- 极高能量。
- 极宽的动态范围
- 从高的质子背景事例中挑选稀有的高能电子、光子事例。
- 空间环境带来的特殊挑战（载荷和功耗的限制）

2.1 极高能量

现有的对撞机谱仪电磁量能器测量电子光子的最高能量在100GeV以下,现有的电磁量能器的理论和实践的研究也多数在此能量附近。我们的测量区间从10GeV到10000GeV。

实验可以借鉴的全吸收型晶体量能器是L3的BGO量能器,其能量测量上限为100GeV;还有正在运行的CMS的PWO晶体电磁量能器,设计测量能量上限为~100GeV。

<pdg data book > 也只给出能量在1GeV到100GeV的电磁簇射纵向分布的经验公式。

测量能量在100GeV以上的电磁量能器在理论和实验上需要认真研究和检验

2.2 荧光饱和问题。

高的初始入射电子（光子）簇射产生的末态次级粒子在BGO晶体中沉积能量应该等比例地产生荧光。按照半经验的Birks公式

$$\frac{dL}{dx} = L_0 \frac{dE/dx}{1 + k_B dE/dx}$$

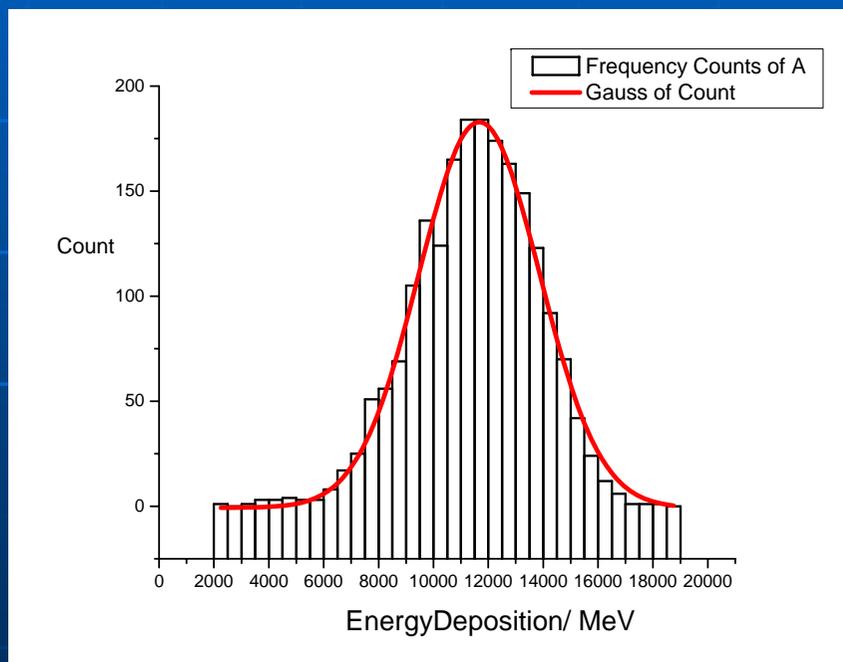
k_B 是描述闪烁荧光饱和特性的参数，一般来说对电子一类的轻带电粒子， $k_B=0$ 不存在荧光饱和问题，而且该公式是针对有机闪烁体提出的，虽然人们发现，在无机闪烁晶体也有类似的饱和效应，但也只是对高线电离密度粒子观测到。例如，文献[1]报道,用6~13MeV质子和6~19MeV的Alpha粒子研究BGO的荧光输出随不同能量的高线电离密度的响应，观测到Alpha比同样能量沉积的质子输出荧光小得多。他们认为线电离密度大于40keV/(mg/cm²)（相当于在BGO中28.5MeV/mm）时存在荧光饱和效应。

电子的线电离密度最大~15keV/(mg/cm²)

高能电子（光子）簇射产生的末态次级粒子基本上都是次级电子-正电子，一般来说不存在荧光饱和问题。用于L3-BGO电磁量能器的实践说明，至少当能量低于100GeV时不存在荧光饱和问题

[1], E.A. Bakkum et al. Response of BGO scintillation detector

高线电离密度引起荧光饱和， 线电离密度低而高体电离密度是否引起荧光饱和？ 高达**10TeV**的电子在**BGO**中能量沉积分布的模拟结果表明：
在簇射中心能量沉积的极大值处（~**17.8cm**深）的 的半径为**1mm**长度为**1mm**的圆柱内簇射沉积能量分布如下图， 给出能量沉积体密度为：
3.7GeVmm⁻³。



对低线能量密度， 高体能量密度的电子、正电子，**BGO**晶体的荧光响应是不是线性？ 会不会有荧光饱和发生？ 必须通过**R&D**来回答。

2.3 极宽的动态范围

根据物理要求，量能器必须能够测量 $E_0=10\text{GeV}-10\text{TeV}$ 的高能电子、光子的能谱。由于高能电子、光子在量能器中发生电磁簇射，原初能量 E_0 是分散地沉积在量能器的若干晶体条当中。为了以一定的精度测量簇射的能量沉积分布，以便分辨电子和质子。模拟表明：每根晶体及其耦合的PMT（或其他光电转换器件）以及读出电子学必须能正确读出的最小信号相当于**0.5MIPs**-的沉积能量，这里的1个MIPs指的是一个最小电离粒子穿过BGO条（2.5厘米厚度）沉积的能量（ $2.5 \times 9.2\text{MeV}/\text{MIPs} = 23\text{MeV}$ ）形成的荧光输出的电荷信号。最大信号对应的是10TeV电子、光子产生的簇射在簇射中心对应的晶体上沉积能量（模拟给出 $E_{\text{dmax}} \sim 1.7\text{TeV}$ ）。

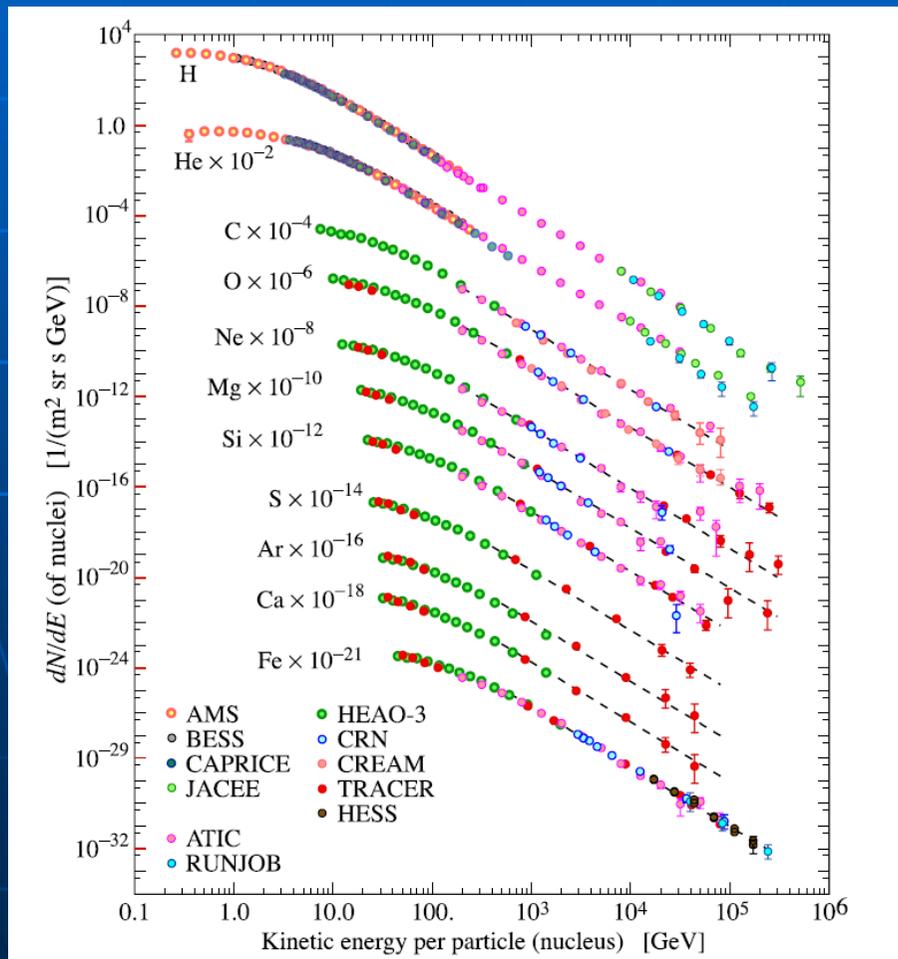
读出荧光信号的动态范围：

Min: (MeV)	MIPs
11.5	0.5
Max: 1.7×10^6	7.4×10^4

读出电荷量的动态范围跨**5**个量级，必须通过**R&D**选择光电转换器件；必须选择合适的电荷读出前端（电荷灵敏放大）的模拟电路和后端的数字电路。

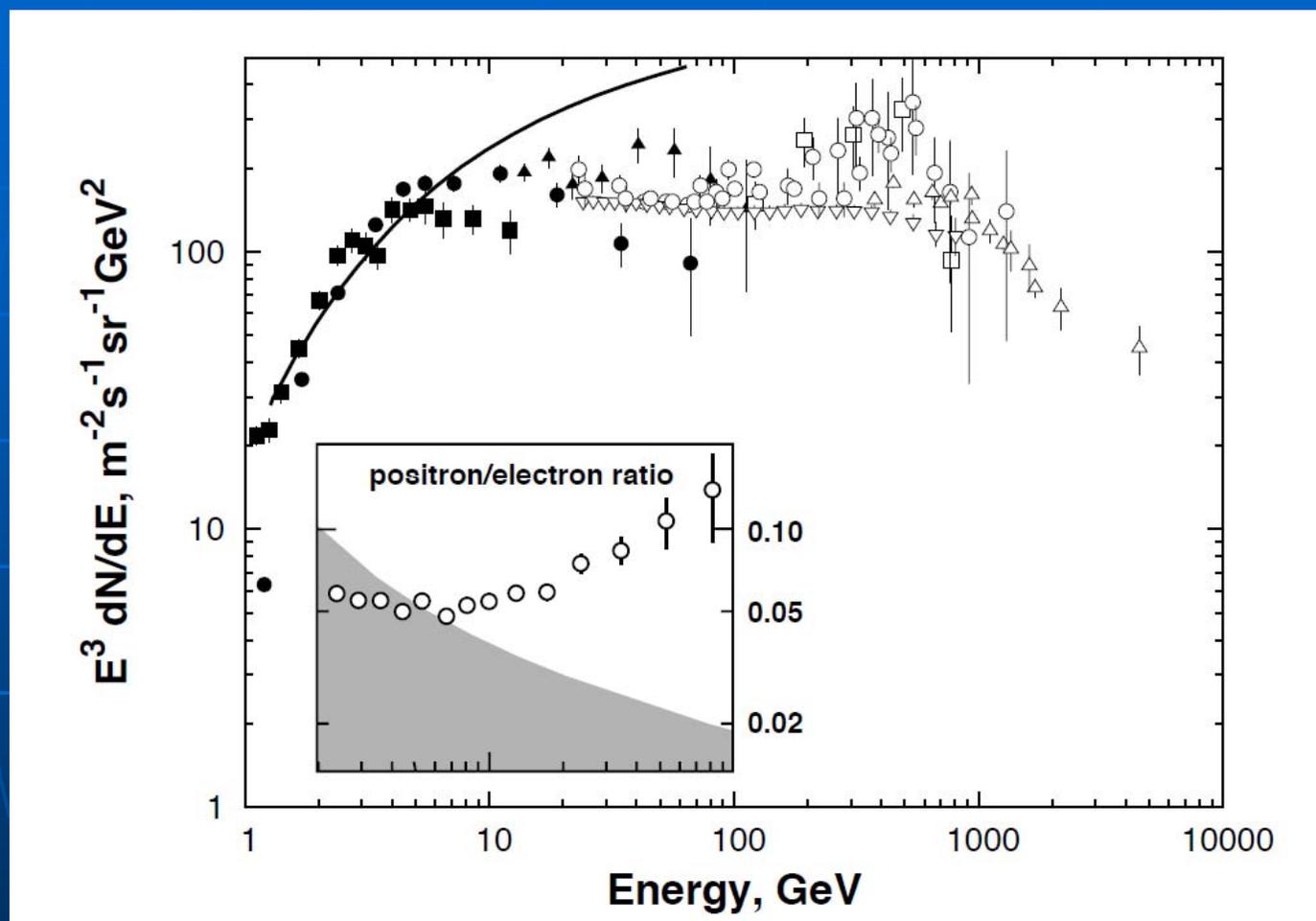
2.4 对高能质子背景的鉴别和排除

根据原初宇宙线的实验数据（下图），质子是原初宇宙线最丰富的成分。



0.5GeV to~600TeV的质子谱
有可靠的实验数据

宇宙线中的电子、正电子谱，插图给出正电子与电子通量比



实线描绘质子通量的千分之一。表明在5GeV以下，质子通量为电子通量的1000倍。100GeV及以上，质子通量比电子通量高出几千倍。

2.5 空间环境对空间探测器的限制

载荷和耗电功率的限制，
仪器的可靠性等

3 预研工作的主要任务和进展

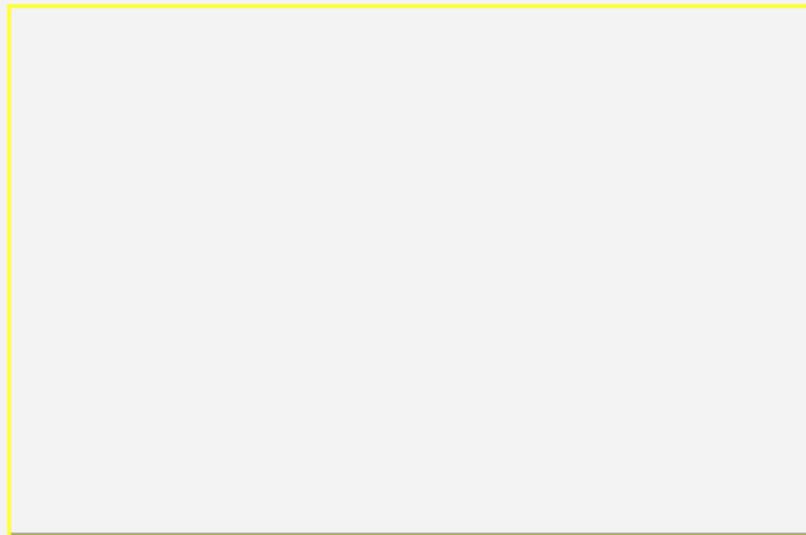
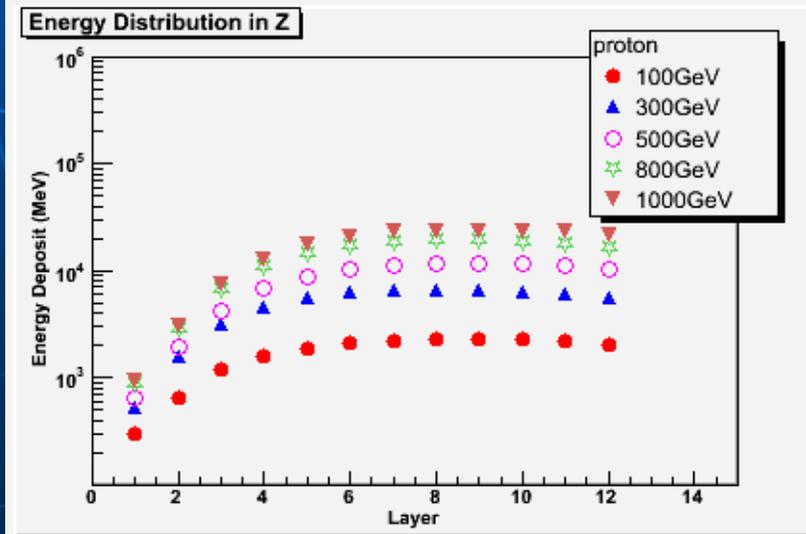
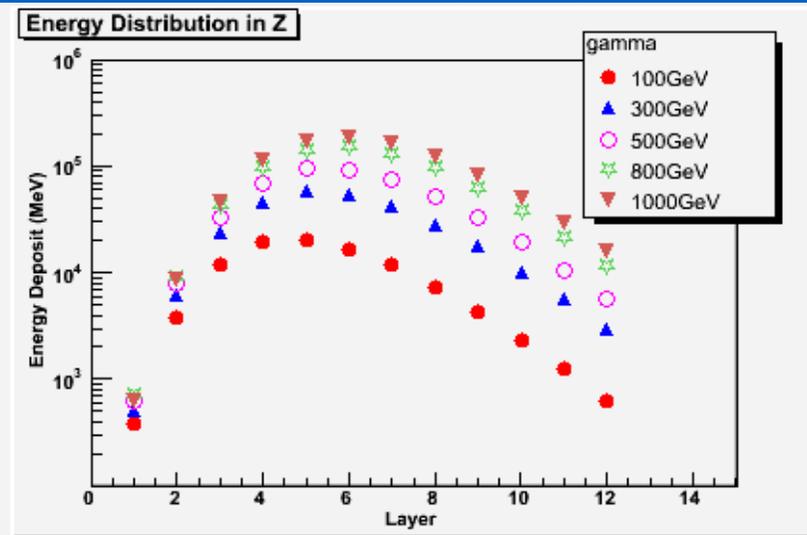
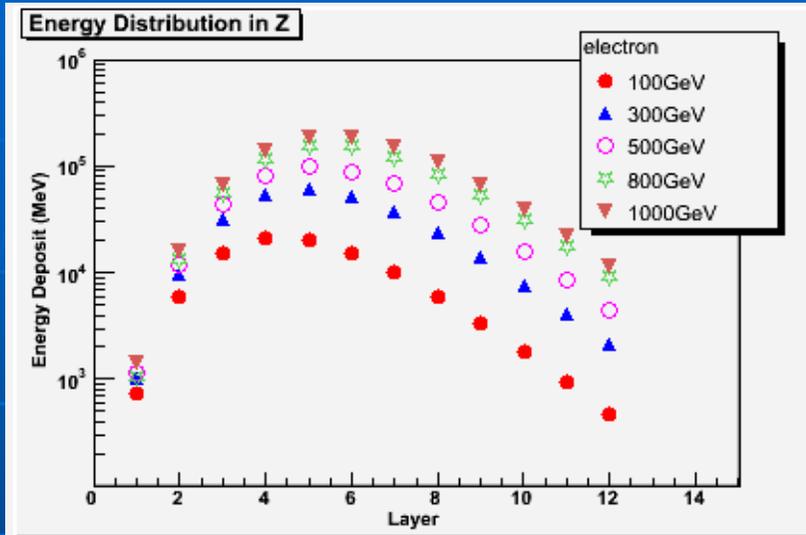
- 高能量
- 晶体荧光饱和问题?
- 荧光探测元件和相应读出电子学如何满足所要求的动态范围
- 背景排除，实验上和MC对簇射的的横向、纵向分布仔细研究和比较建立一套有效的对高能质子和高能电子鉴别的方法。

3.1 高能量对量能器尺度提出的要求

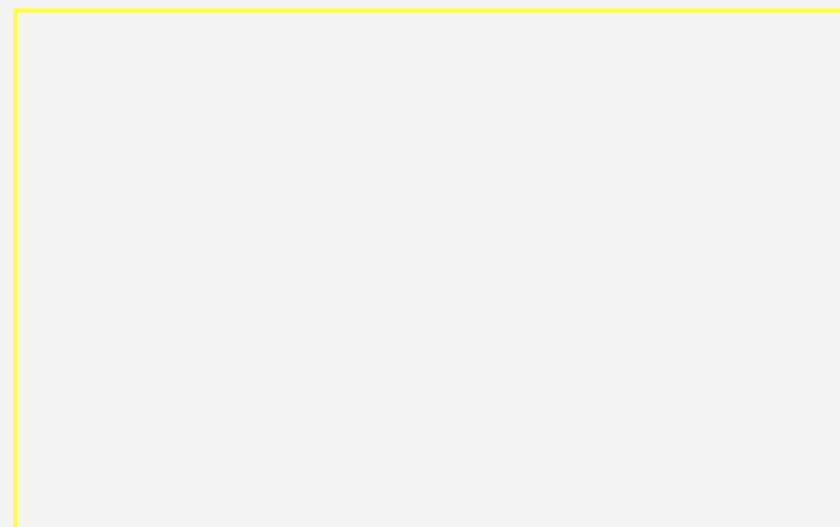
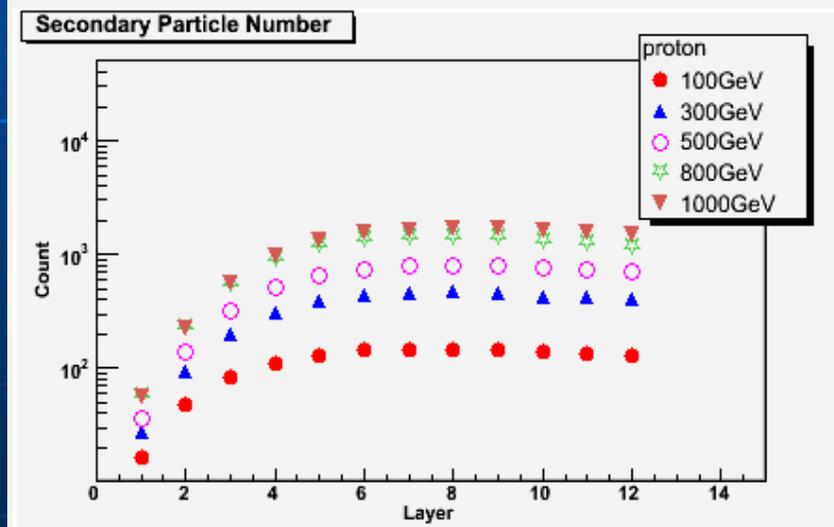
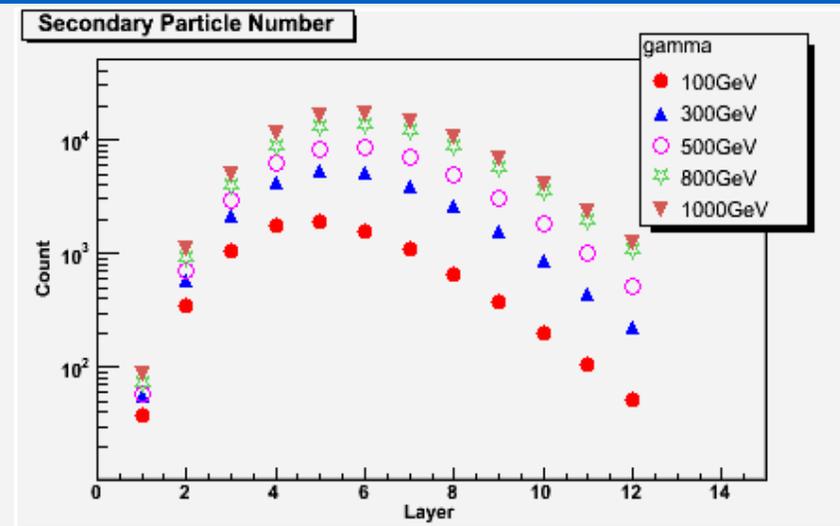
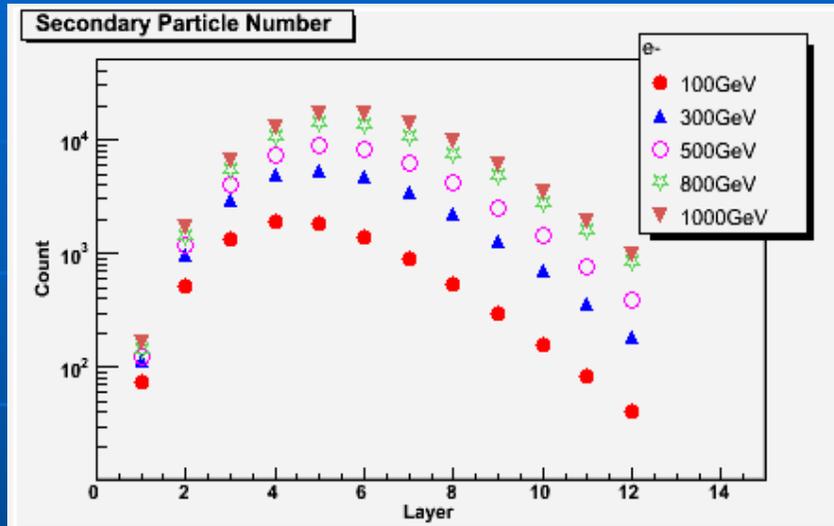
基于电磁簇射的理论，借助于现在广泛运用的电磁簇射的软件包，对构想的上述的**BGO**量能器在不同能量的电子、光子和质子的注入（垂直）下，簇射的能量沉积分布：

回答量能器的尺度是否足以包括簇射末态的绝大部分的次级粒子？

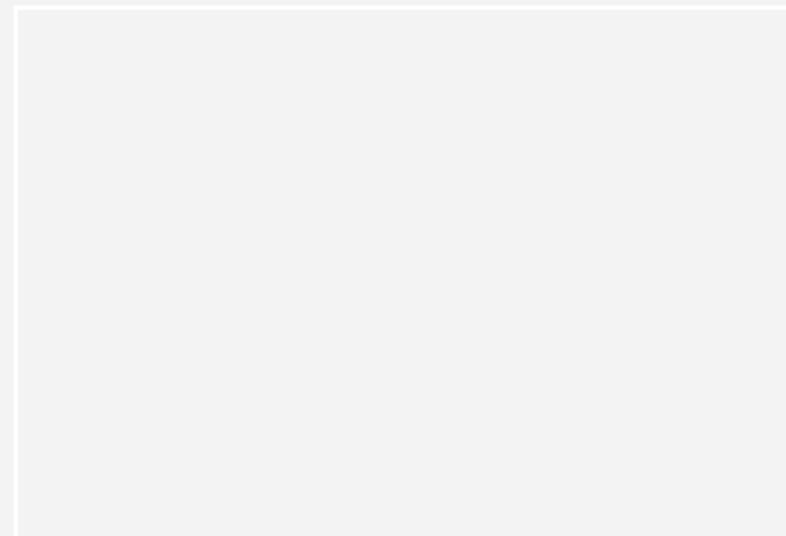
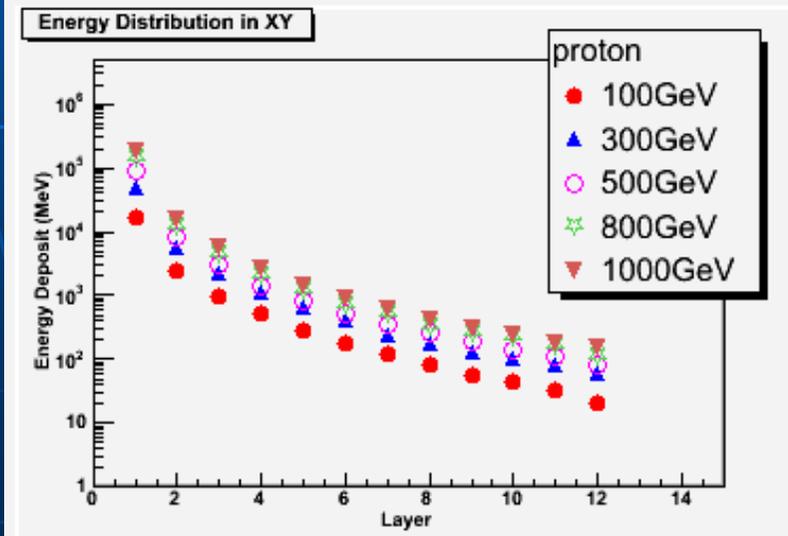
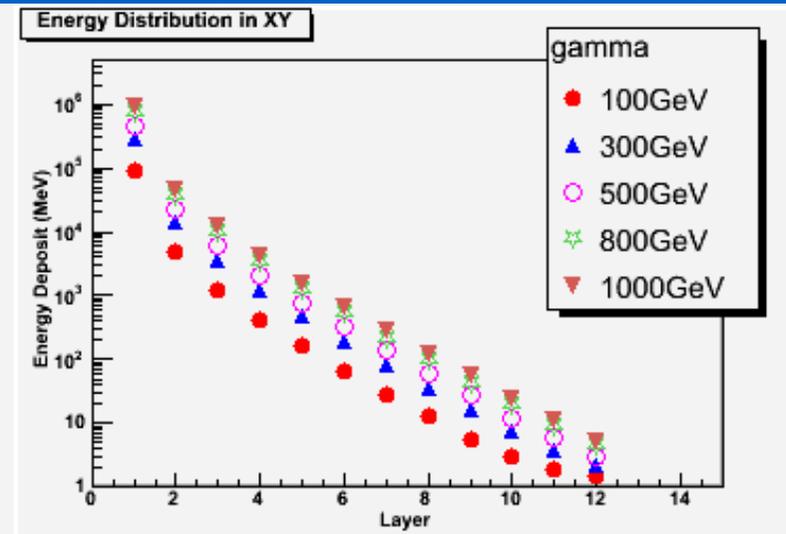
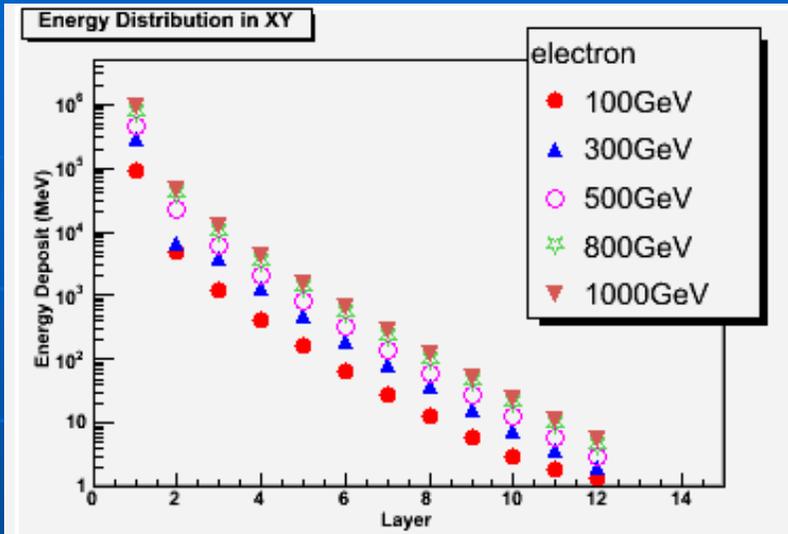
3.1.1 簇射次级粒子能量沉积的纵向分布



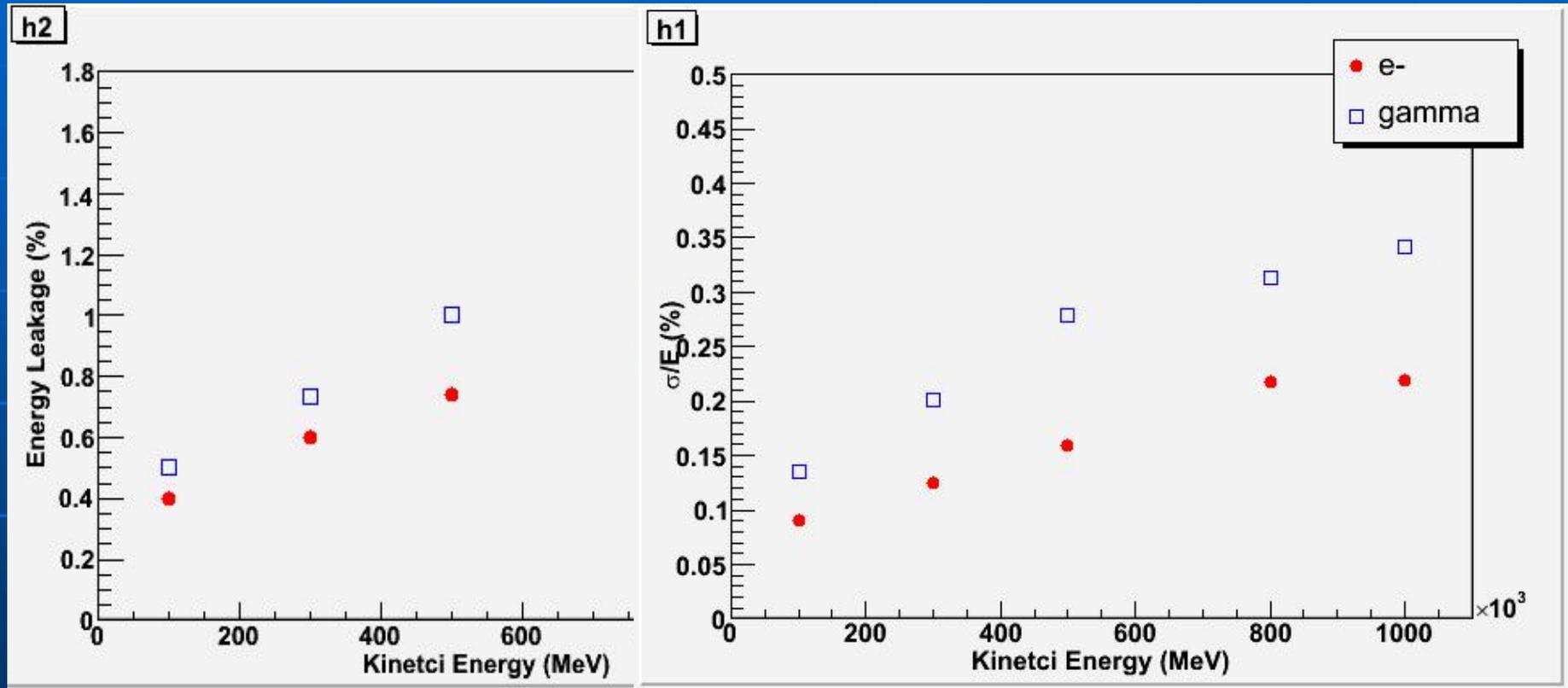
3.1.2 簇射次级粒子数的纵向分布



3.1.3 簇射能量沉积的横向分布



3.1.4 能量泄漏和能量本征分辨率



量能器的纵向深度（12层BGO，26.8r1）基本上可以满足能量分辨要求（1.5% at 800GeV）。能量分辨基本上受限于能量的泄漏。

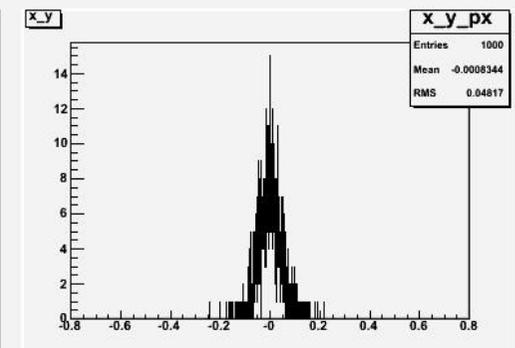
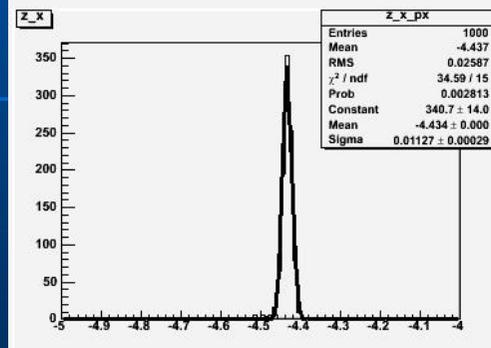
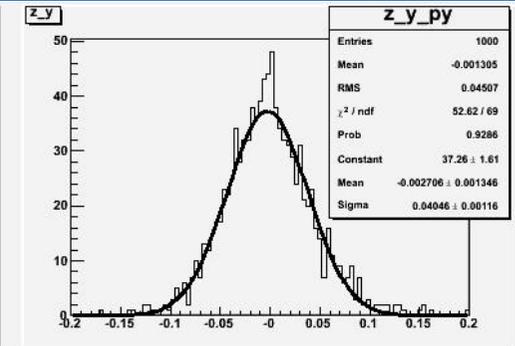
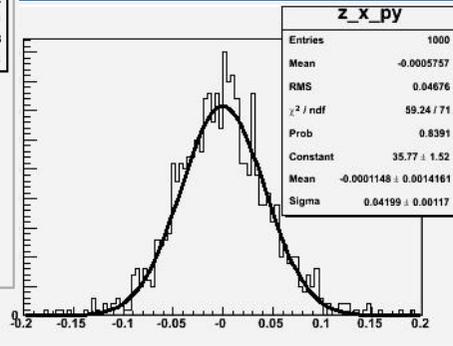
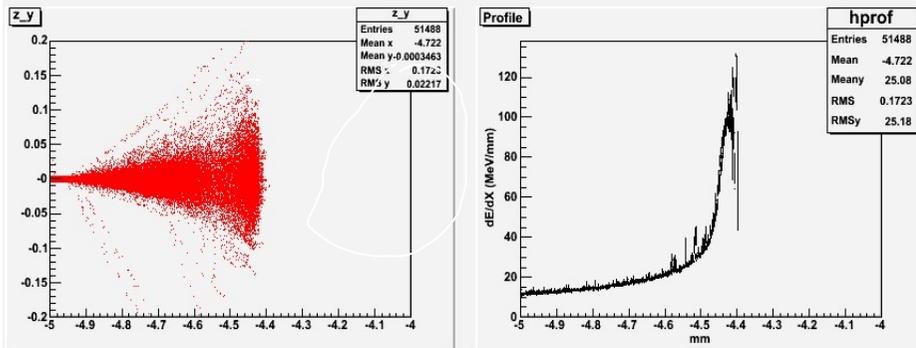
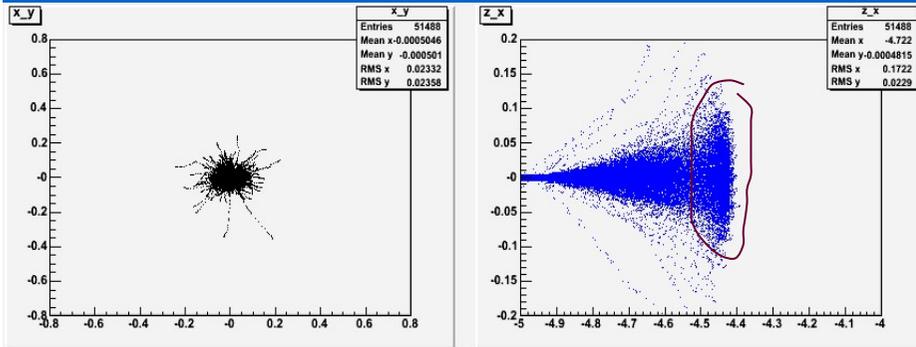
3.2 关于BGO晶体荧光饱和问题的预研

3.2.1 实验研究BGO晶体对数十MeV质子的响应

3.2.2 西北核技术研究所的实验借鉴

回答簇射能量沉积密度大于**4GeV/mm³**时,
BGO荧光输出是否线性

MC模拟



14MeV的质子入注BGO的能量沉积分布的模拟：上图右下角表明，Bragg峰前，线能量密度~12MeVmm⁻¹,Bragg峰区80~90MeVmm⁻¹。

Bragg Peak: 50MeVx0.1/(0.1)³~5GeVmm⁻³

14MeV 质子在Bragg峰处产生的体能量密度和10TeV电子簇射的“热点”体能量密度可比

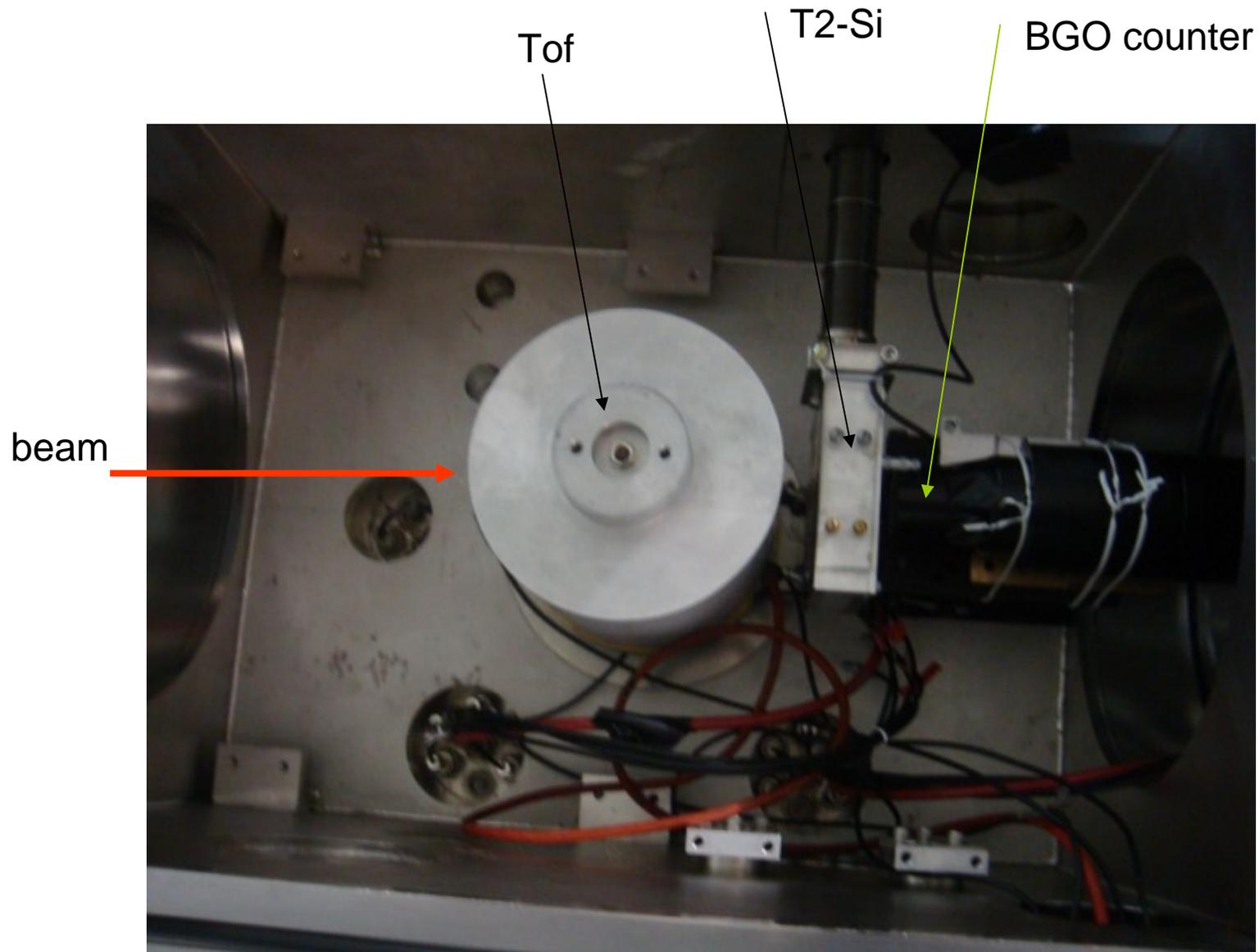
3.1.1 BGO 晶体对数十MeV质子的响应

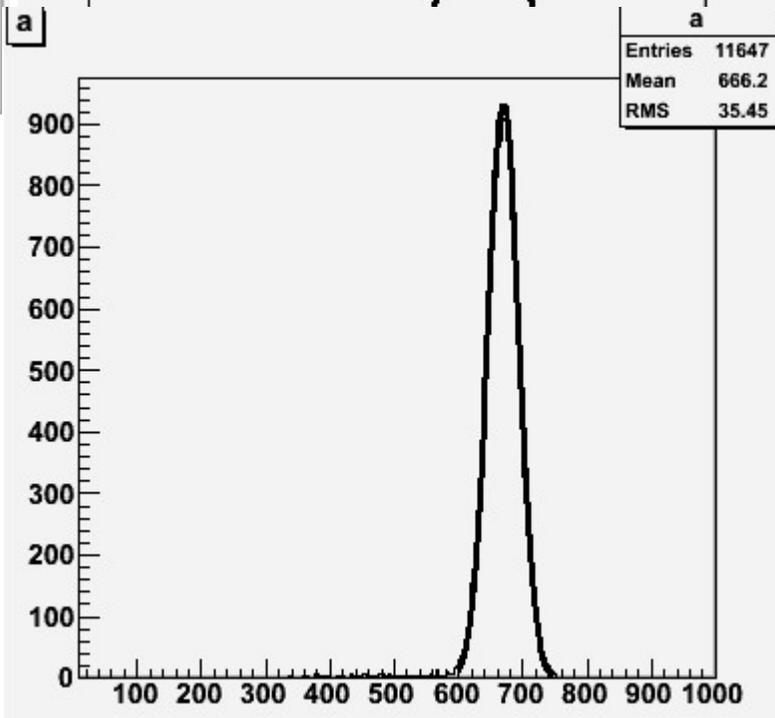
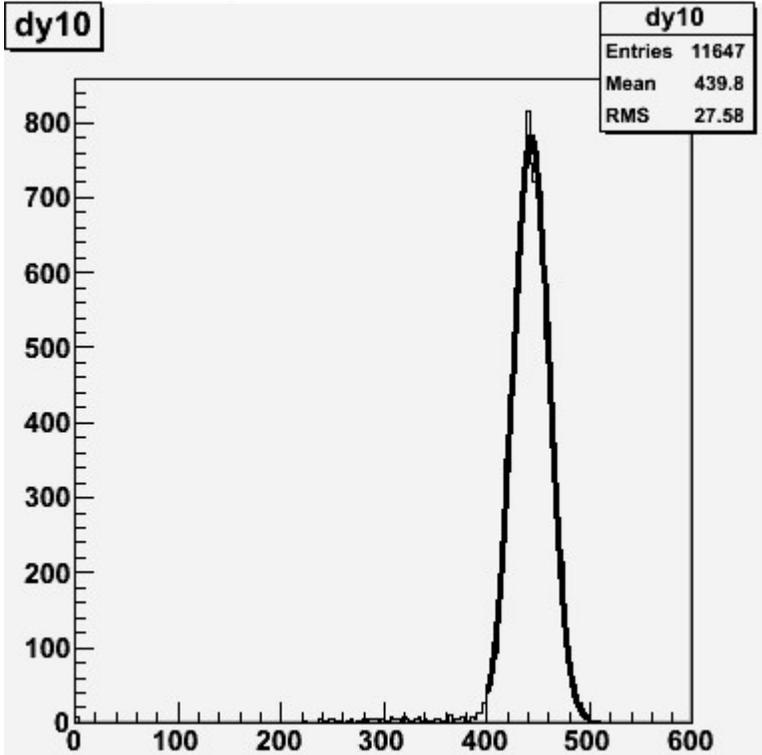
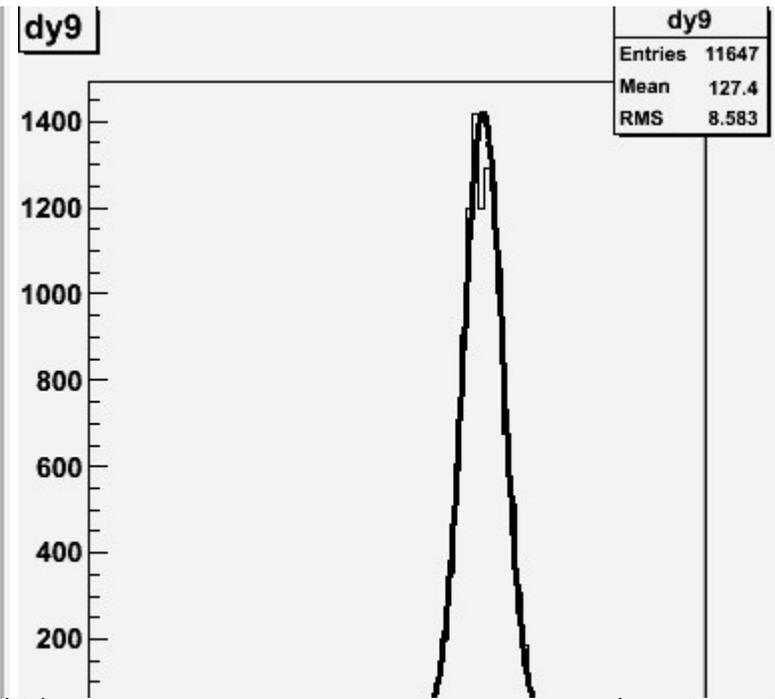
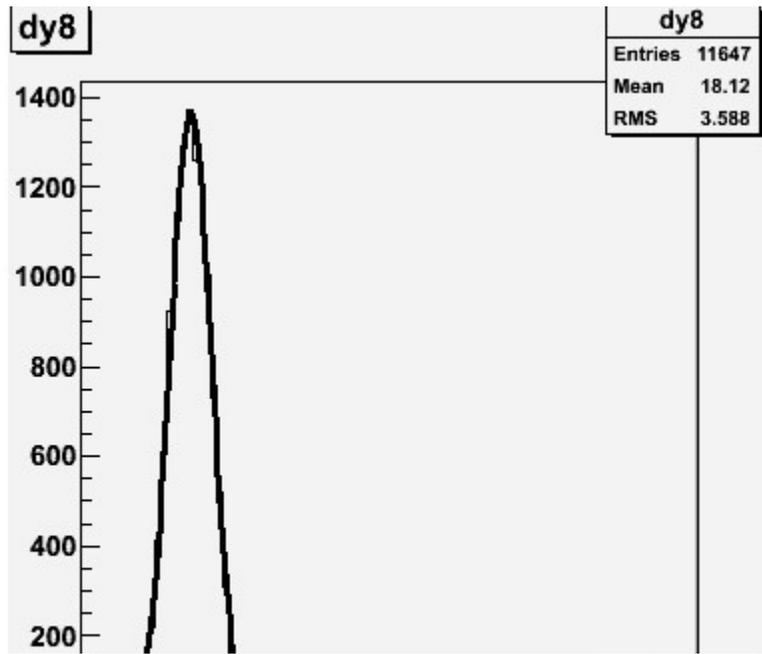
HIRFL上，BGO晶体对数十MeV质子的响应特性的检测



HIRFL上的放射性束线

The configuration of beam elements and test counter





Birk Law

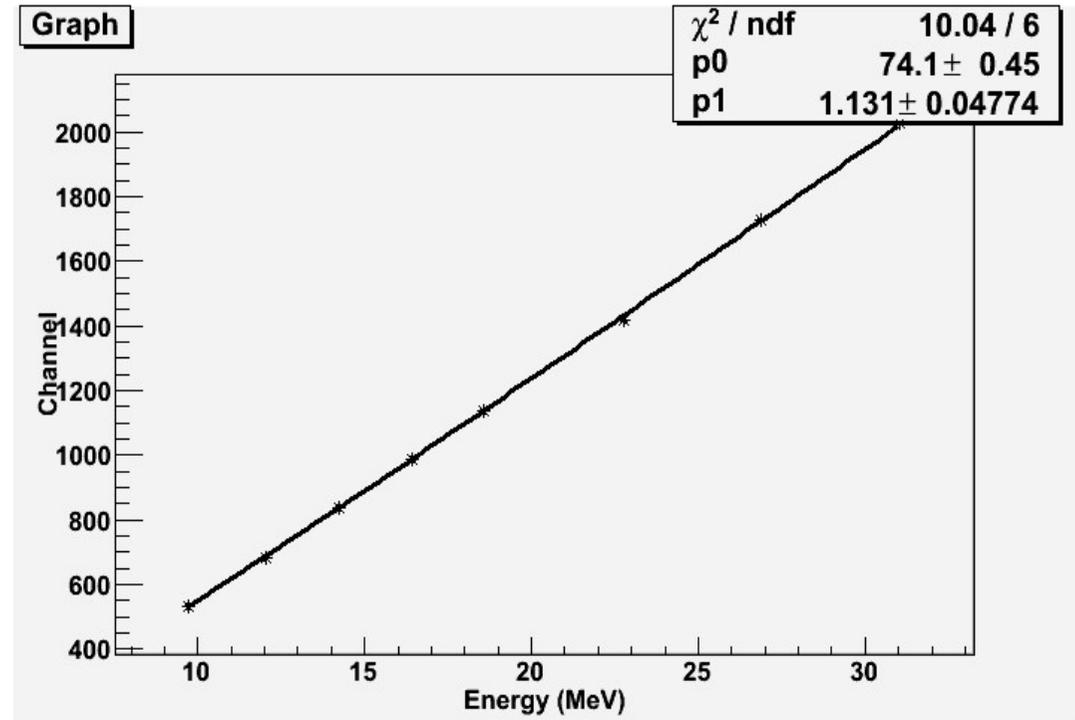
The response of crystal to ionizing particles is a nonlinear function of the particle energy.
 this nonlinear response is caused by quenching process governed by the stopping power, dE/dx , along the particle path.

$$dL/dx = \text{const.} \frac{dE/dx}{1 + kB dE/dx}$$

while $dE/dx \simeq c \frac{AZ^2}{E}$

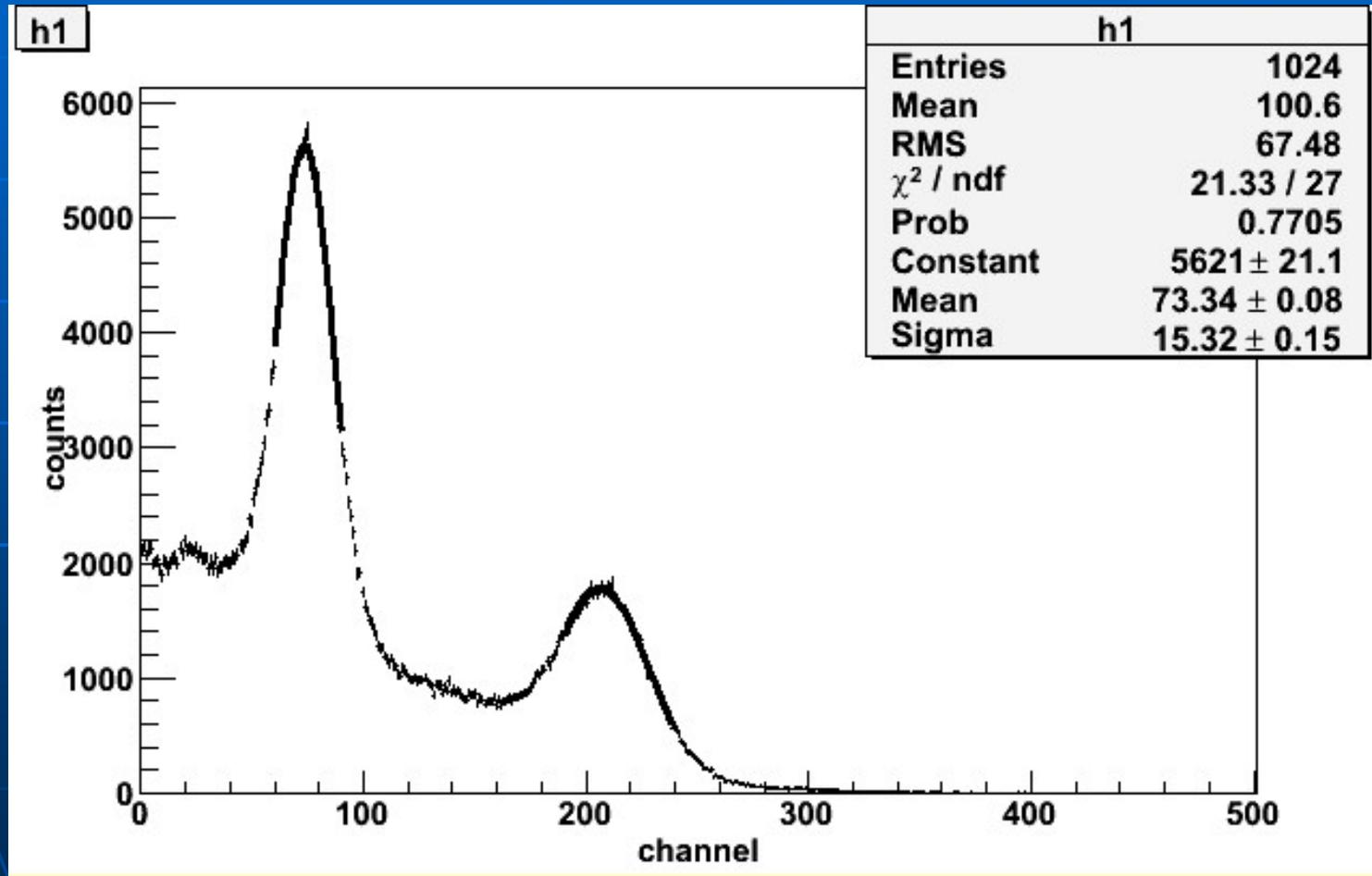
→ $L(E, A, Z) = a_1 \left(E - a_2 AZ^2 \ln \left| \frac{E + a_2 AZ^2}{a_2 AZ^2} \right| \right)$

V. Avdeichikov. Et al., Nucl. Instr. And Method., A493(2000) 158-166

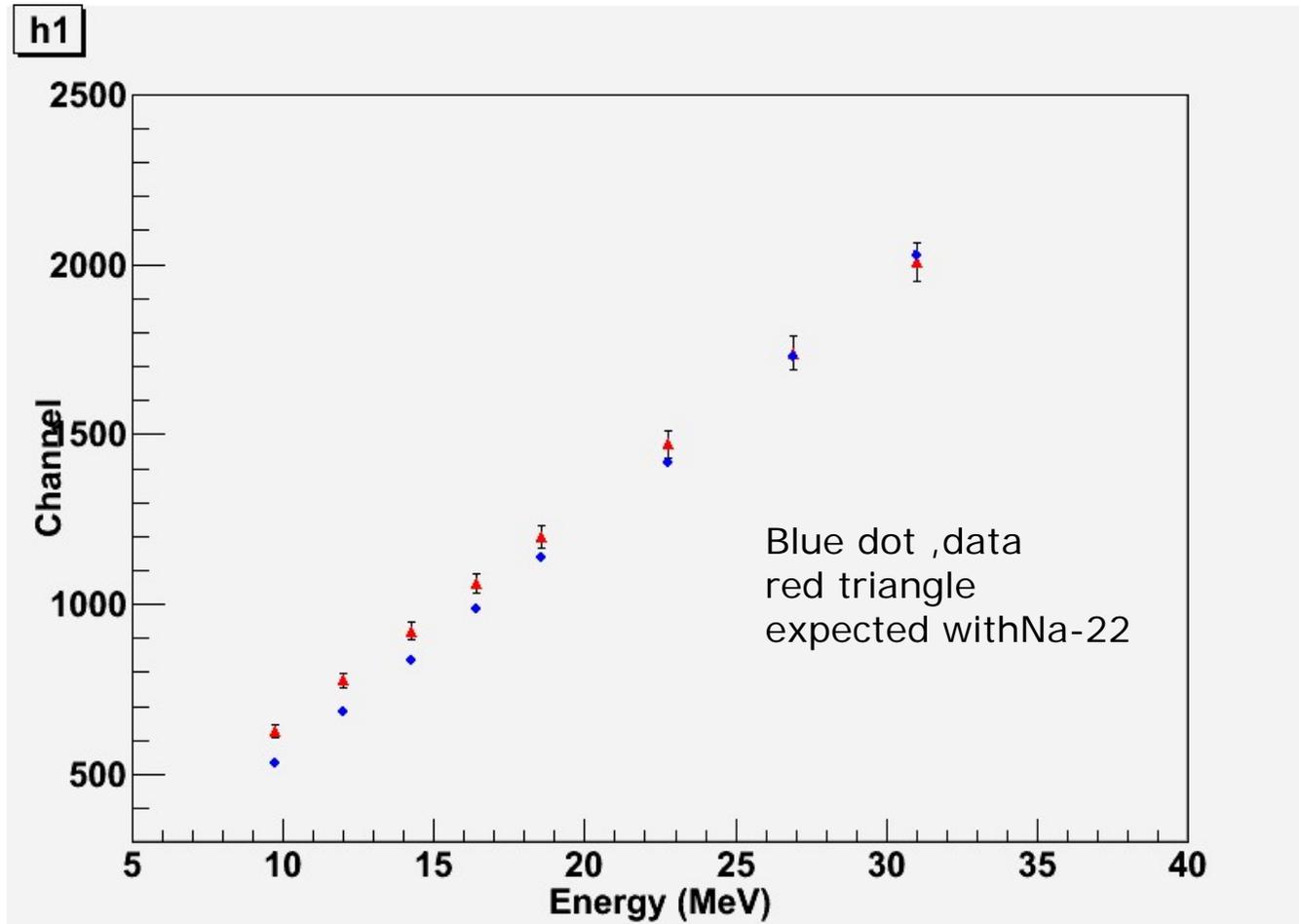


Energy (MeV)	9.719	12.02	14.24	16.41	18.54	22.75	26.89	31.02
Quenching rate (%)	26.3	23.12	20.7	18.89	17.42	15.16	13.5	12.2

用Na-22的单能伽马射线定标



Quenching Rate



Energy (MeV)	9.714	12.02	14.24	16.41	18.54	22.75	26.89	31.02
Quenching rate (% \pm 2.8%)	15.2	12.12	9.14	7.13	5.06	2.53	0.68	—

检测结果表明：

表现出对数十MeV质子的荧光饱和效应，但不能认定是因为能量沉积体密度高达 5GeVmm^{-3} 引起的，因为其能量沉积的线密度远超出 30MeVmm^{-1} （在BGO中）。

西北核技术研究所的研究结果可以借鉴

第43卷第10期

原子能科学技术

Vol. 43 ,No. 10

2009年10月

Atomic Energy Science and Technology

Oct. 2009

硅酸镧闪烁体 γ 高剂量率脉冲线性响应上限测量

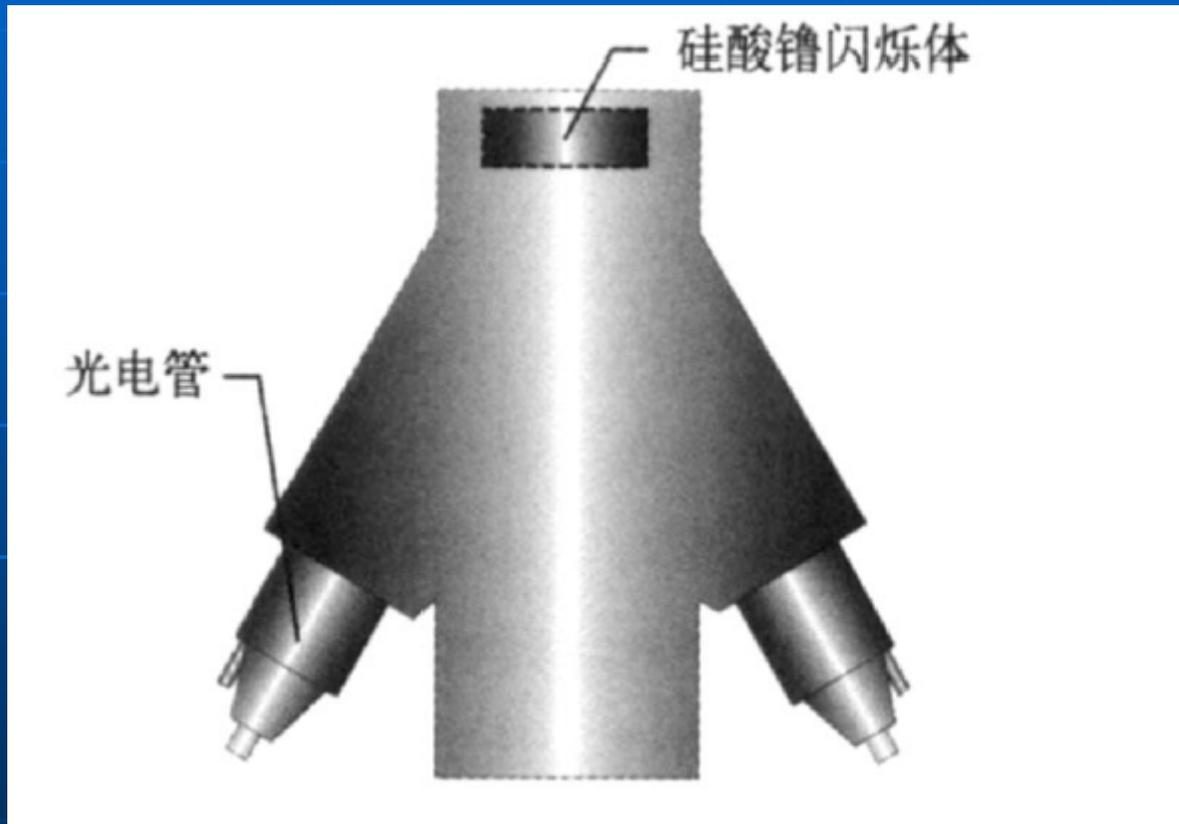
管兴胤,张子川,张文钰

(西北核技术研究所,陕西 西安 710024)

摘要:在“强光一号”高剂量率脉冲伽马装置上,使用李萨如图形法测量了硅酸镧闪烁体的 γ 高剂量率脉冲线性响应上限。实验结果表明:硅酸镧闪烁体在脉冲伽马能注量率小于 $1.9 \times 10^{19} \text{ MeV}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 时,光输出为线性;大于此限值时,出现非线性响应现象。

根据伽玛能量注入的实验数据,脉冲宽度,可以求得每个脉冲注入的能量,根据晶体的成分计算它的能量吸收系数。进而求出每立方毫米该晶体吸收能量的体密度高达 7000 TeVmm^{-3} 。比 10 TeV 电子在 BGO“热点”处的体能量密度 $\sim 4 \text{ GeVmm}^{-3}$ 要超出 2×10^6 倍

计划利用BGO样品替代硅酸镓晶体，利用西北核技术研究所的高注入量率的脉冲辐射场进一步确认，在注量率为 $\sim 2 \times 10^{13} \text{MeV/cm}^2 \text{ s}$ 下BGO不会有荧光饱和出现。



更换为BGO 闪烁体

辐射场注量率降低为原来的百万分之一。

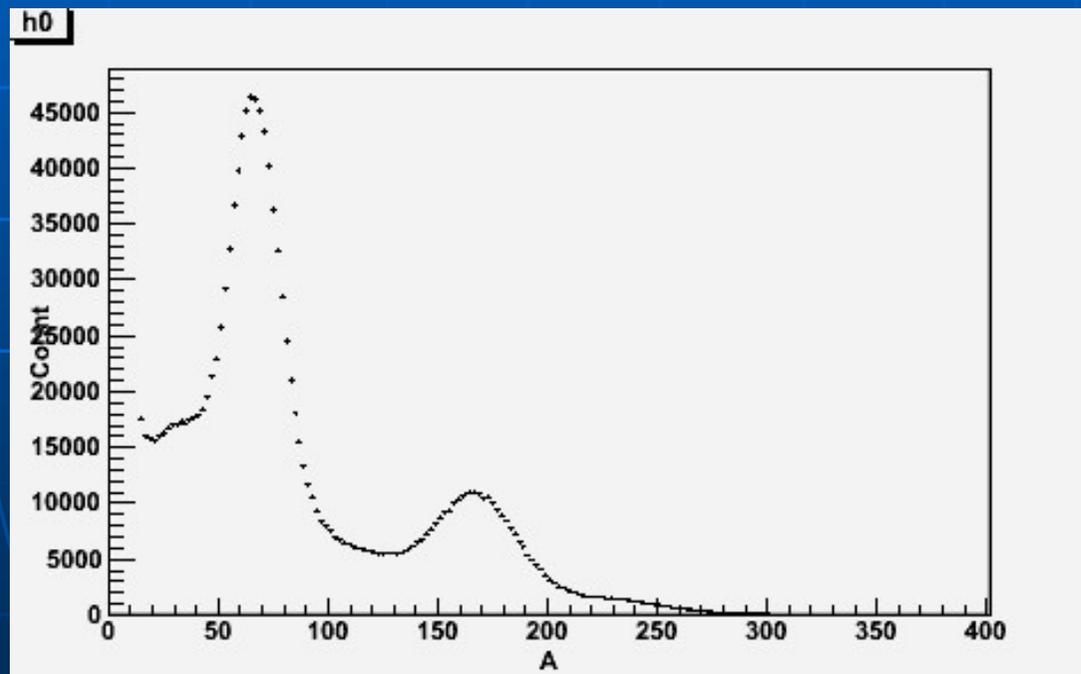
(0.5MIPs— 8×10^5 MIPs)

3.3 读出光电倍增管及其读出电子学的宽动态范围的实现

3.3.1 上海BGO晶体(2.5x2.5x28cm³)光产额的测量:

PMT: R5611, 1000V, PMT和晶体硅油耦合。

能谱 (Shaping Amp.+MCA)



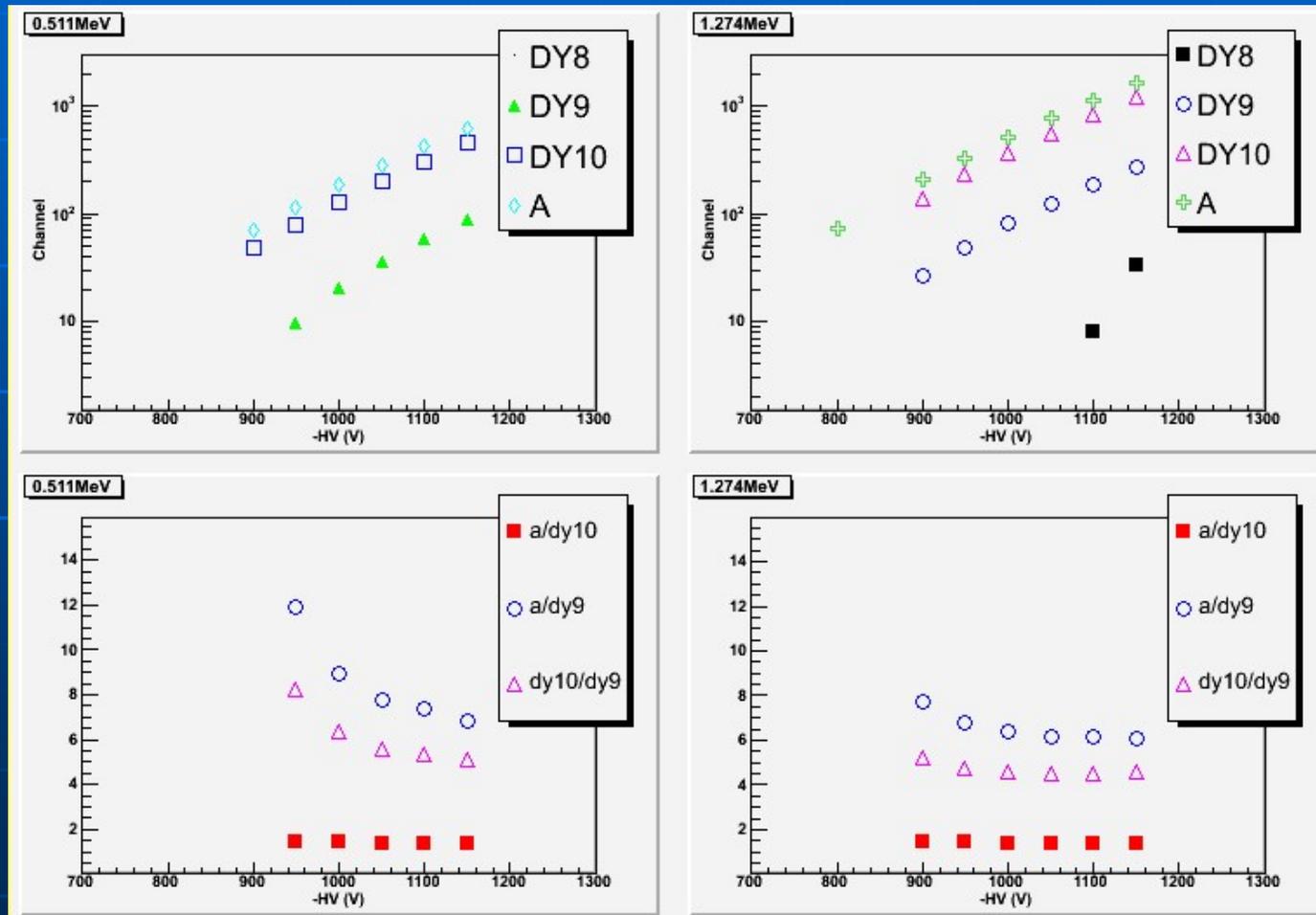
^{22}Na 在阳极的输出信号。

$$167.3 \times 0.2 / 1.274 = 26.3 \text{ pc/MeV}$$

动态范围2

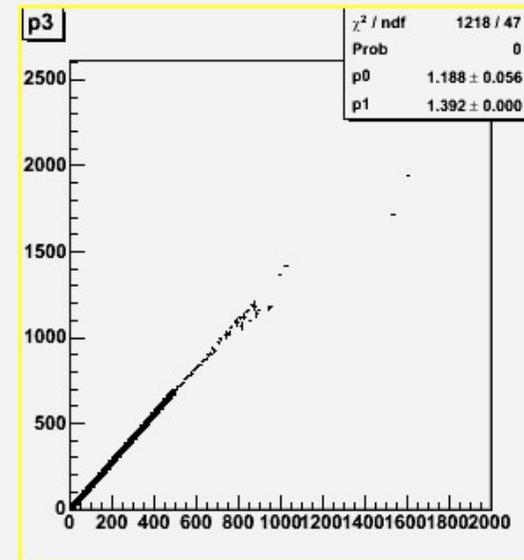
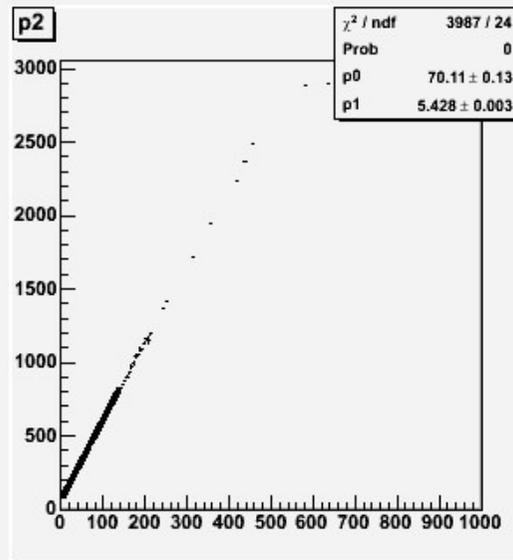
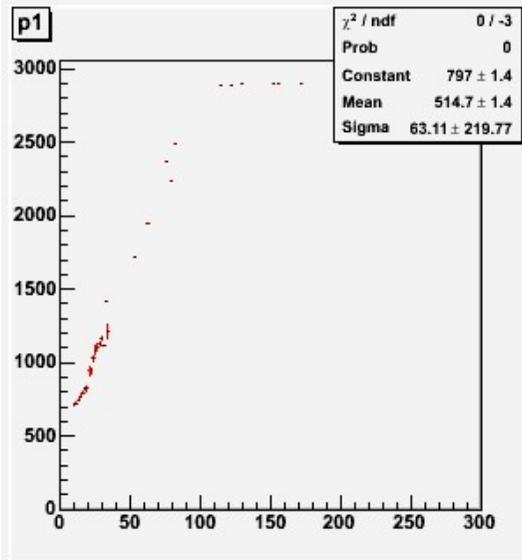
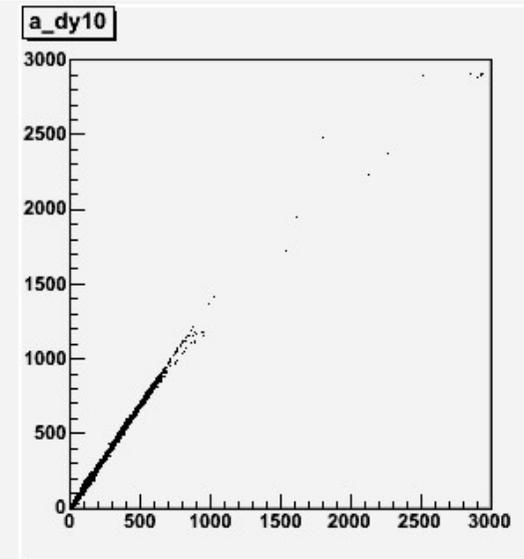
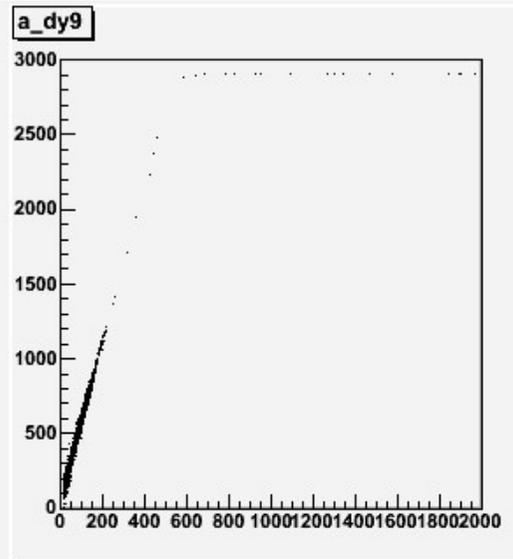
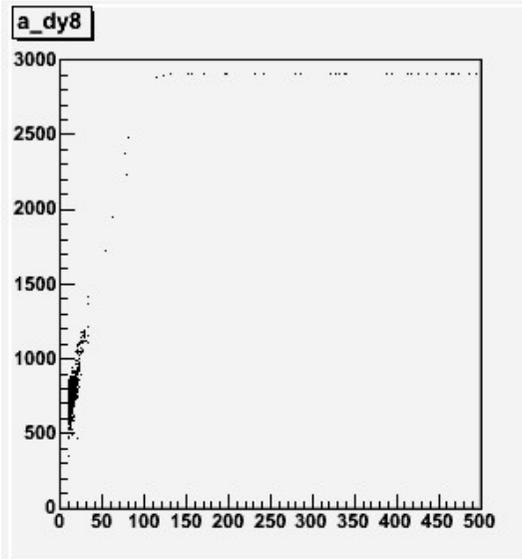
3.3.2 不同打拿极读出信号的增益关系

DY8、9、10和A



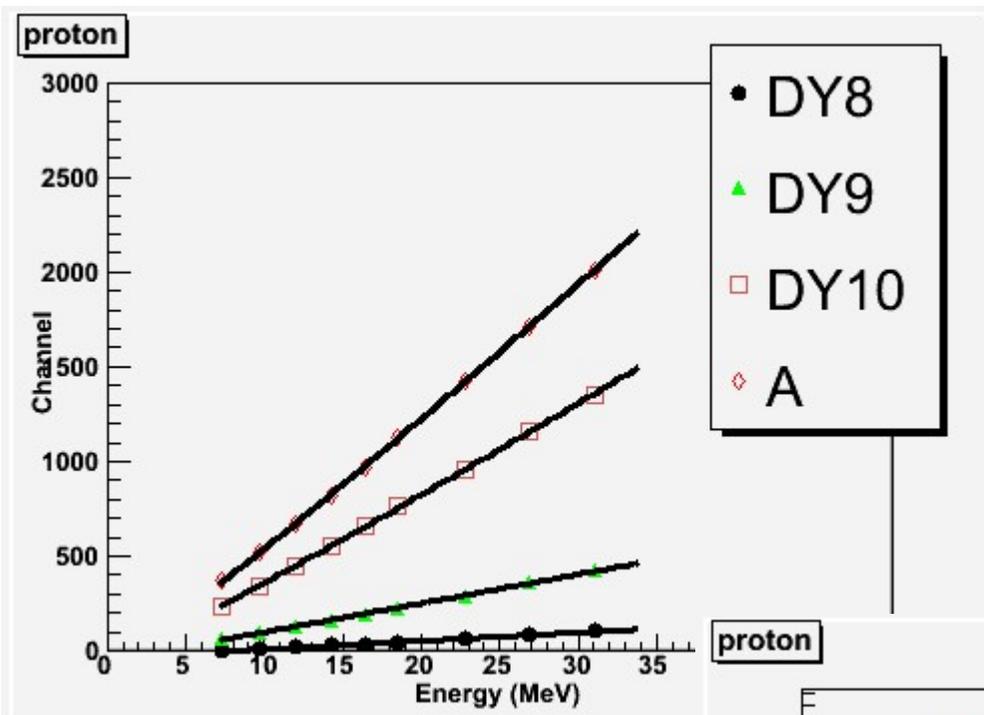
增益比 (A/DY)
的高压依赖和入
光量依赖!

Gain of Anode .vs. Dynode (-1000V)



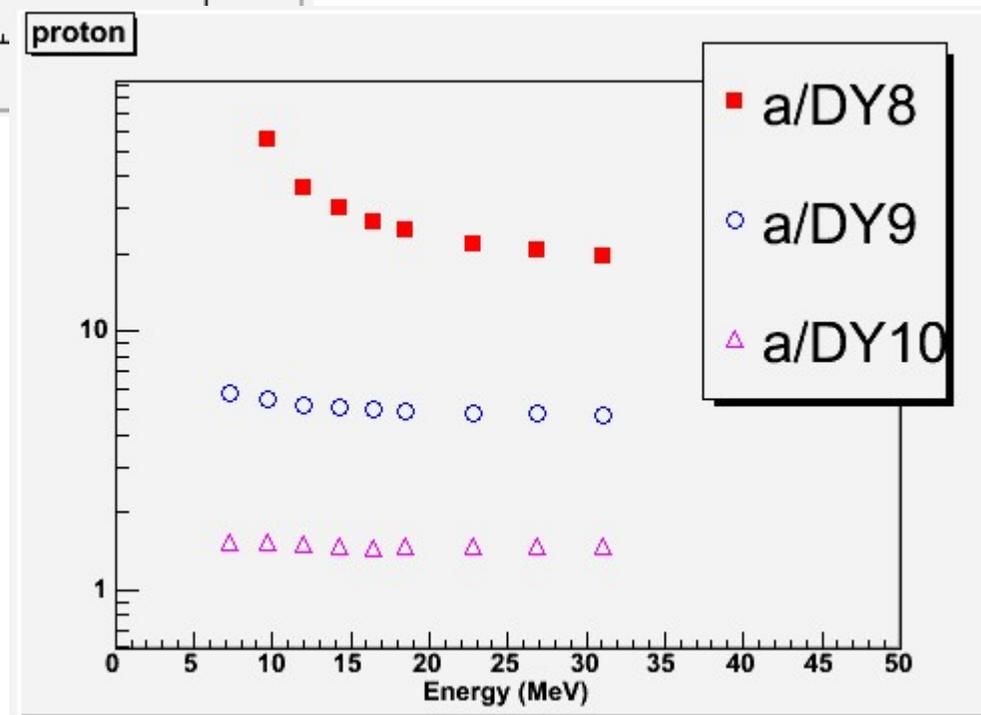
a/dy9 ~ 5.4

a/dy10 ~ 1.4



增益比随注入能量的变化。
在评价不同打拿极输出电荷量和晶体实际能量沉积是时要注意！！

数据在HIRFL束线上取得的



动态范围3

Dy8、7、4、1和 A 宇宙线的MIPs测试。分别用

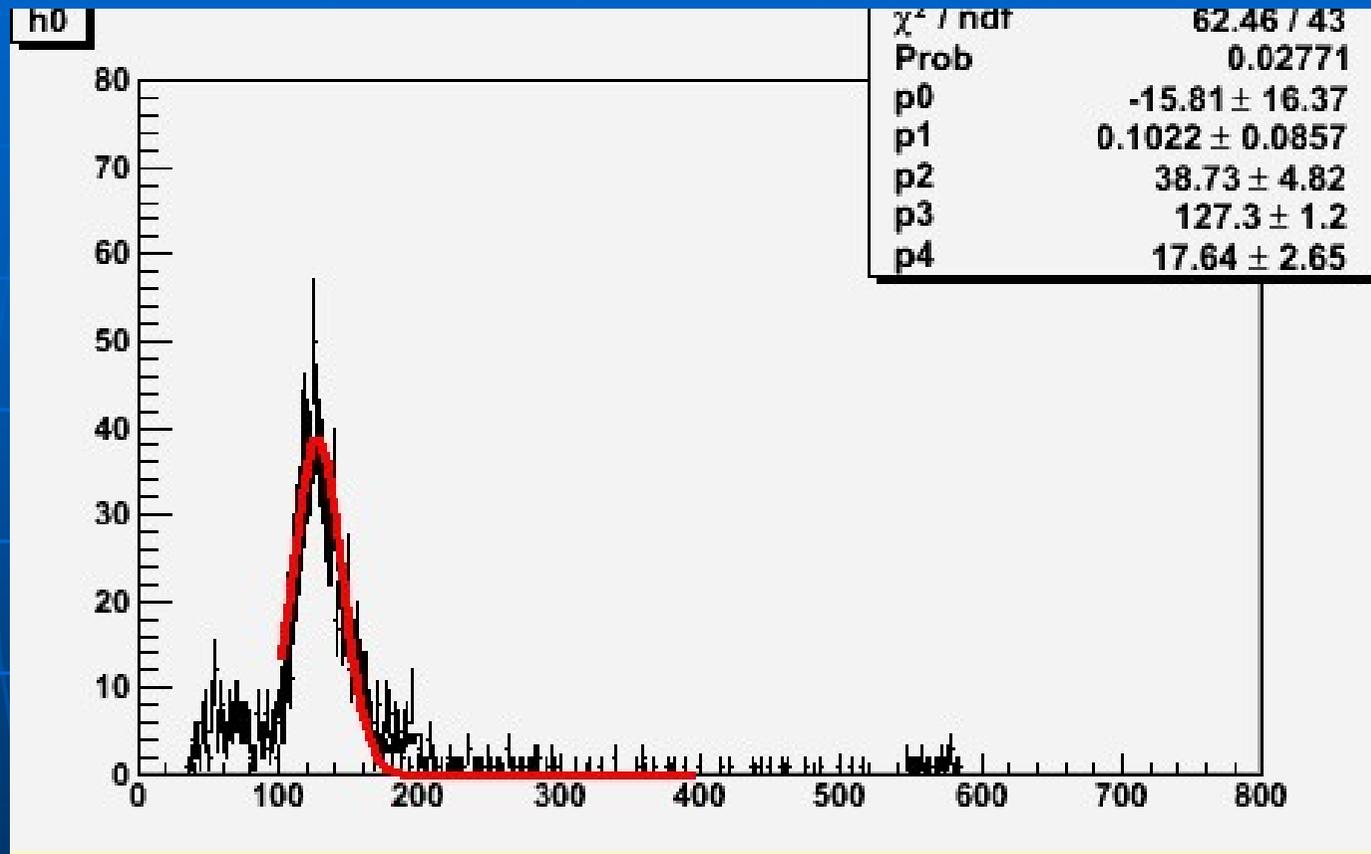
1 VME的QDC、

2 Shaping Amp +MCA

3紫台郭建华的VA32读出板

4USTC封长青的VA32读出板

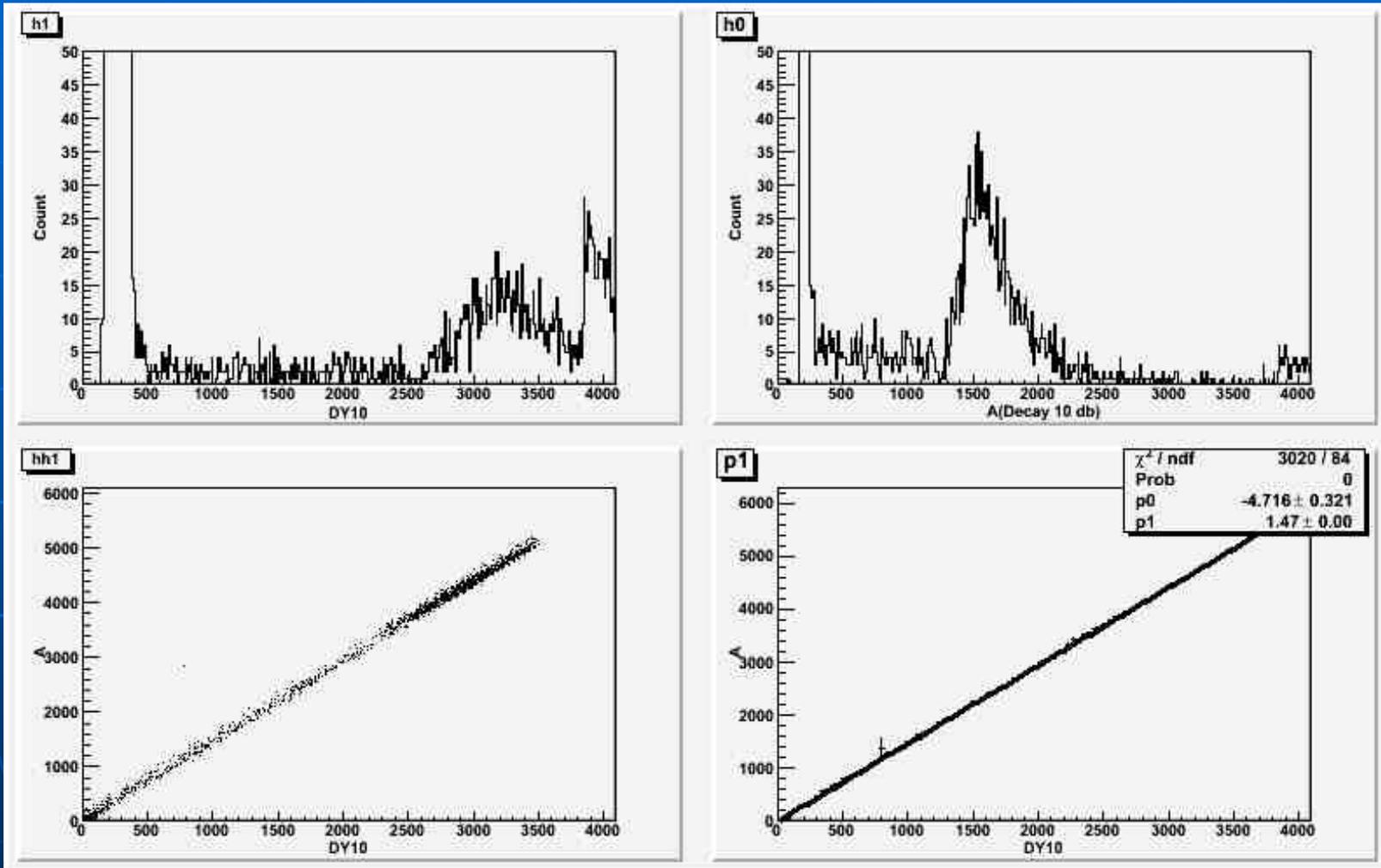
Shaping Ampl.+MCA triggered by the Hodoscope



Cosmic Ray 用望远镜准直的Dy8的信号。

$127.3 * 0.2 = 25.46 \text{ pc/MIPS.}$

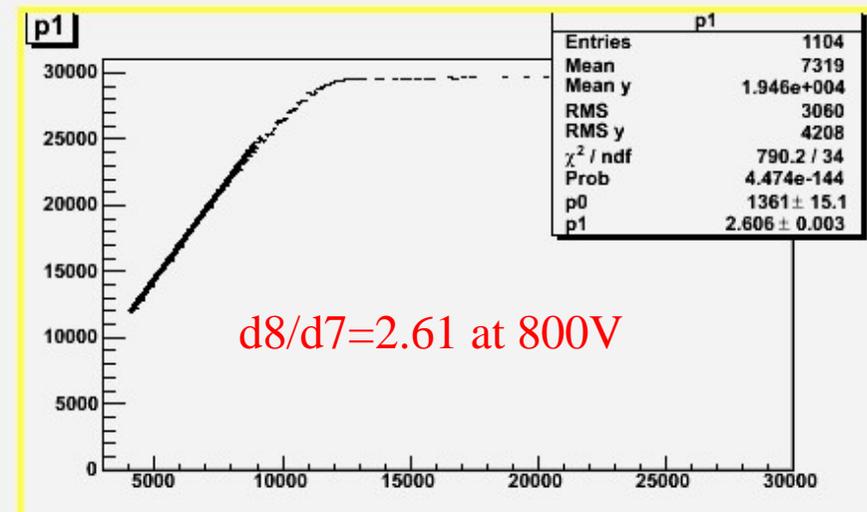
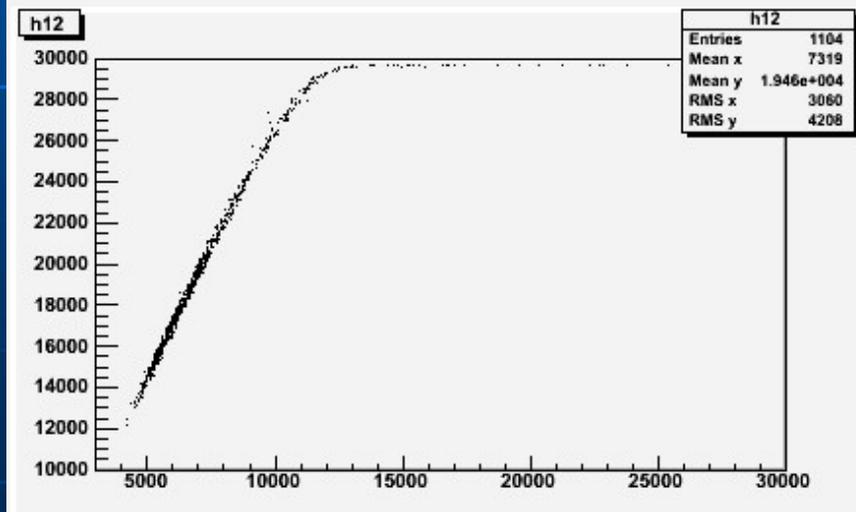
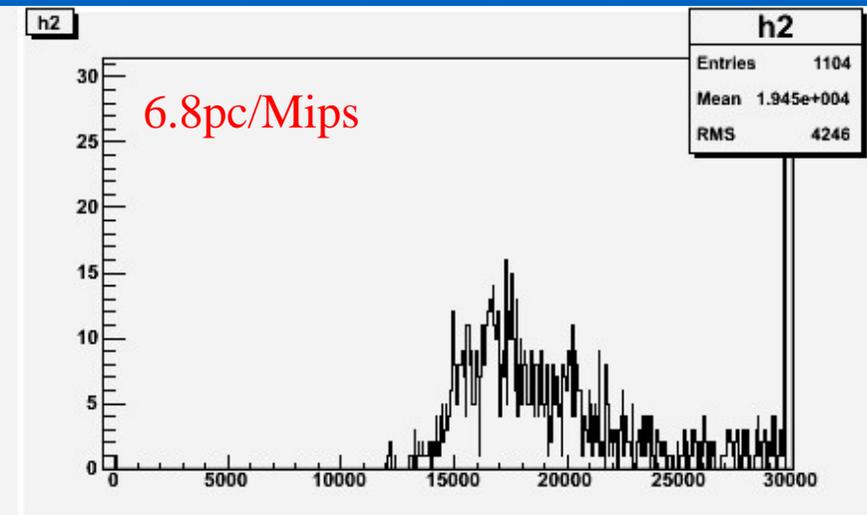
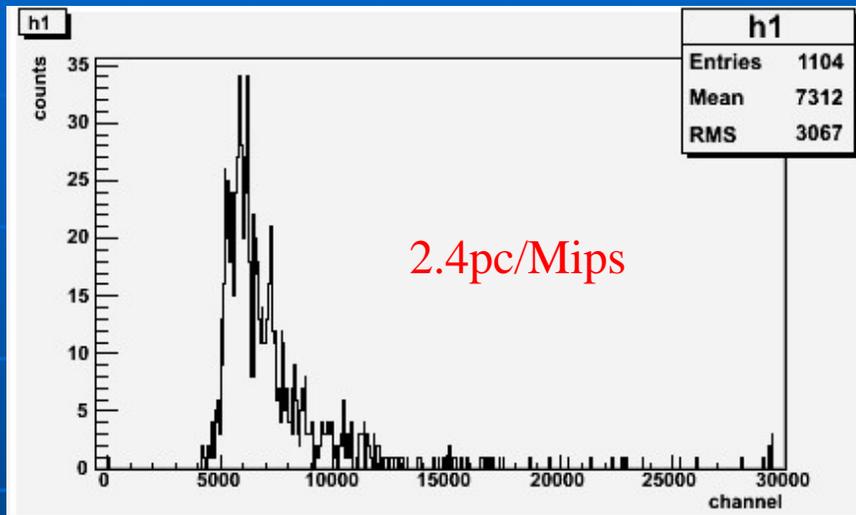
VME QDC triggered by the Hodoscope



1000V下DY10输出信号约为307pc/MIPS. 阳极输~451pc/MeV.

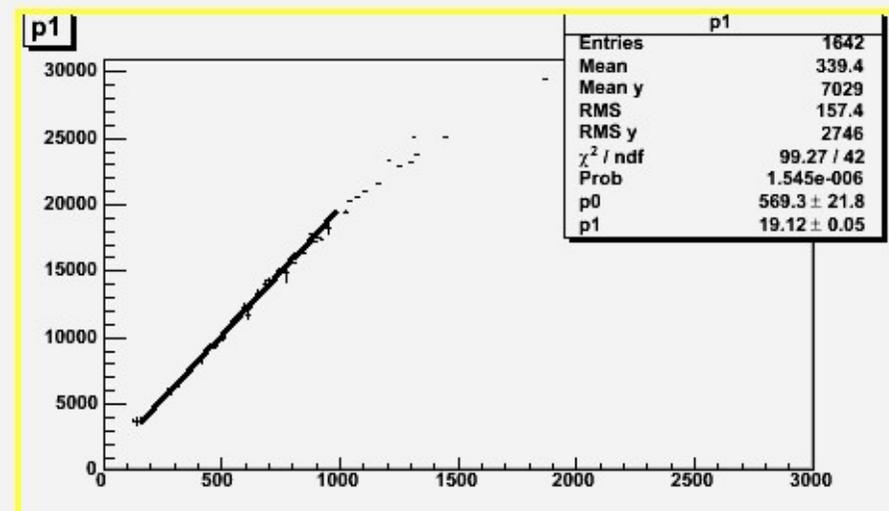
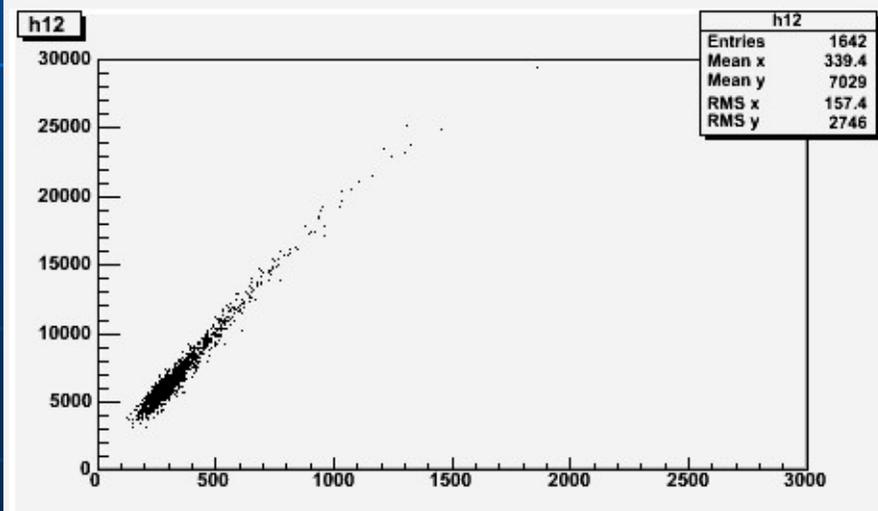
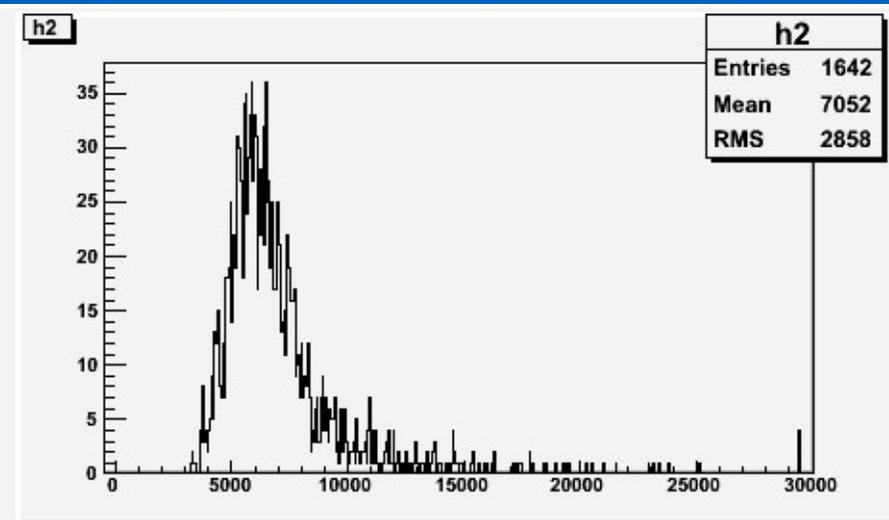
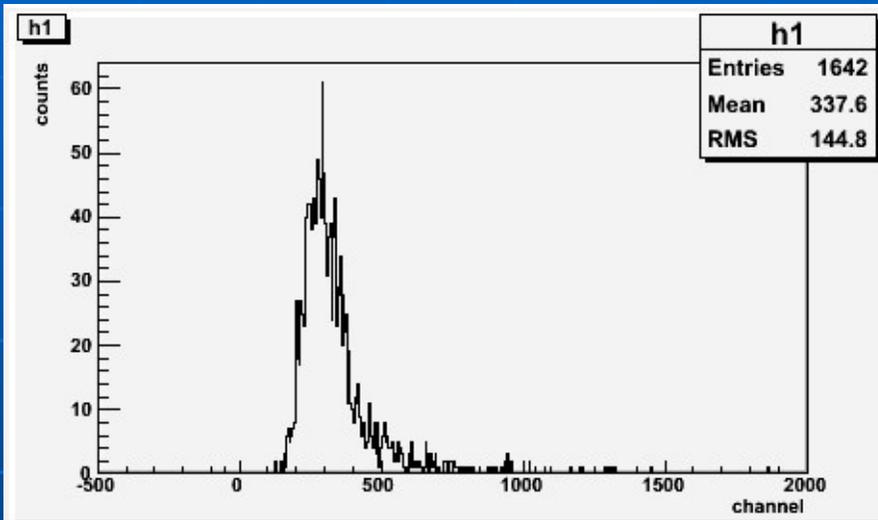
Base I 修改，把DY9换成DY7: 800V, readout by the FEE_PMO-GUO

Cosmic Ray: DY7 vs DY8。DY7电荷量约为2.4pc/MIP; DY8为6.8pc/MIP



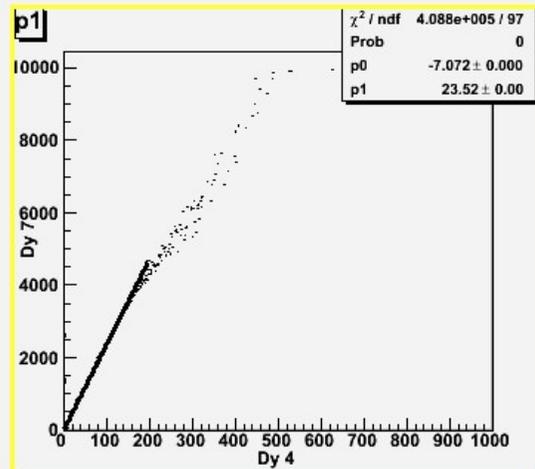
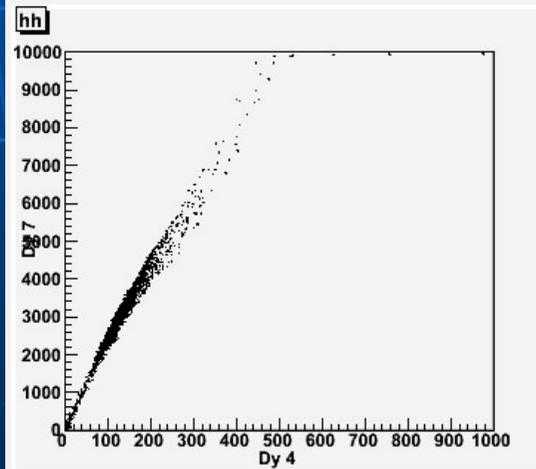
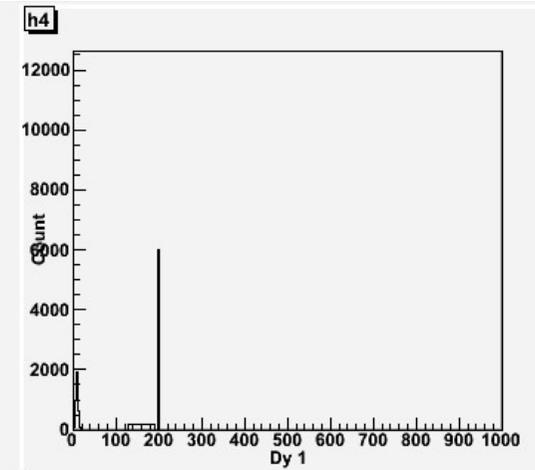
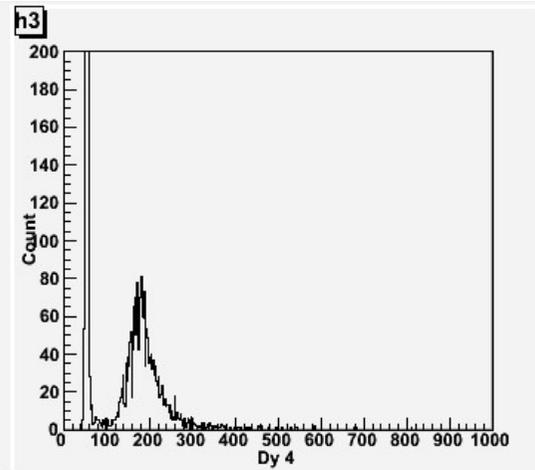
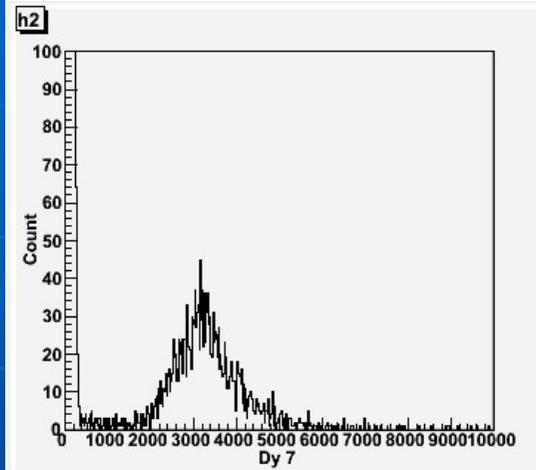
Base II, DY4 vs DY7 800V, readout by FEE_PMO-GUO

DY4电荷量约为130fc/MIPS。 $dy7/dy4=19.12$ at 800V



Base II, DY7 vs DY4 800V readout by FEE_USTC-FENG

dy7 : 3.6pc/MIPs; dy4: 150fc/MIPs



R5611 的各个打拿极对MIPs的响应

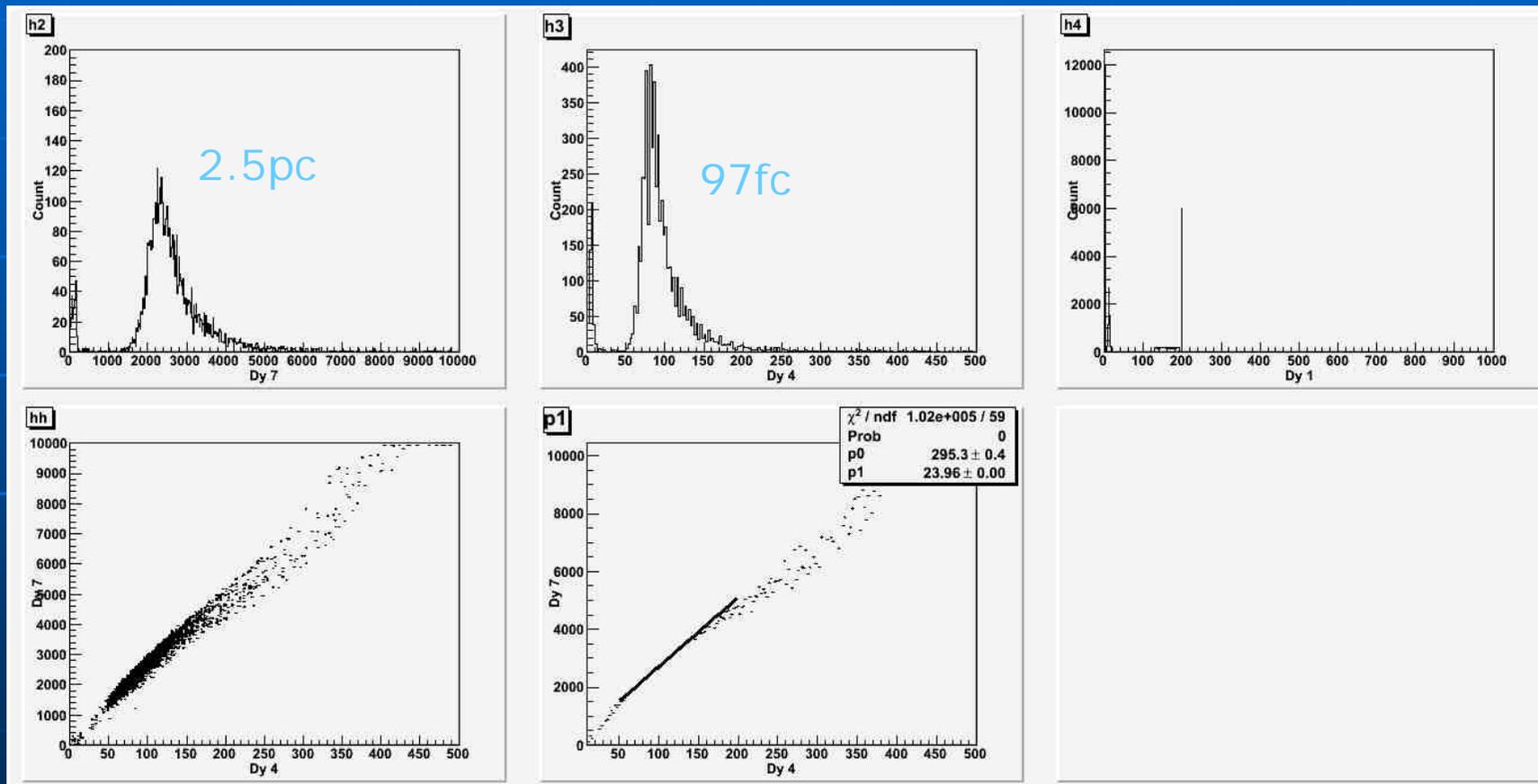
	a	d10	d9	d8	d7	d4
HV=1000V	451pc	307pc	~96 pc ^[1]			
HV=800V			~20pc	6.8pc	3pc	0.14

HV=800V , $dy_9/dy_8 \sim 2.9$;

$dy_8/dy_7 \sim 2.26$;

$dy_7/dy_4 \sim 16$

空气耦合光衰减的初步实验



空气耦/合全耦合=2.5/3.6~0.662

读出方案及可达到的动态范围

方案1

Dy	7	4	1	remarks
q/MIPs (pc)	3	0.14	0.009	Att.=1
FEE Rangs	1.5~12	0.42~12	0.72~12	
No.of MIPs	0.5~4	3~86	80~1333	0.5~1333

方案2

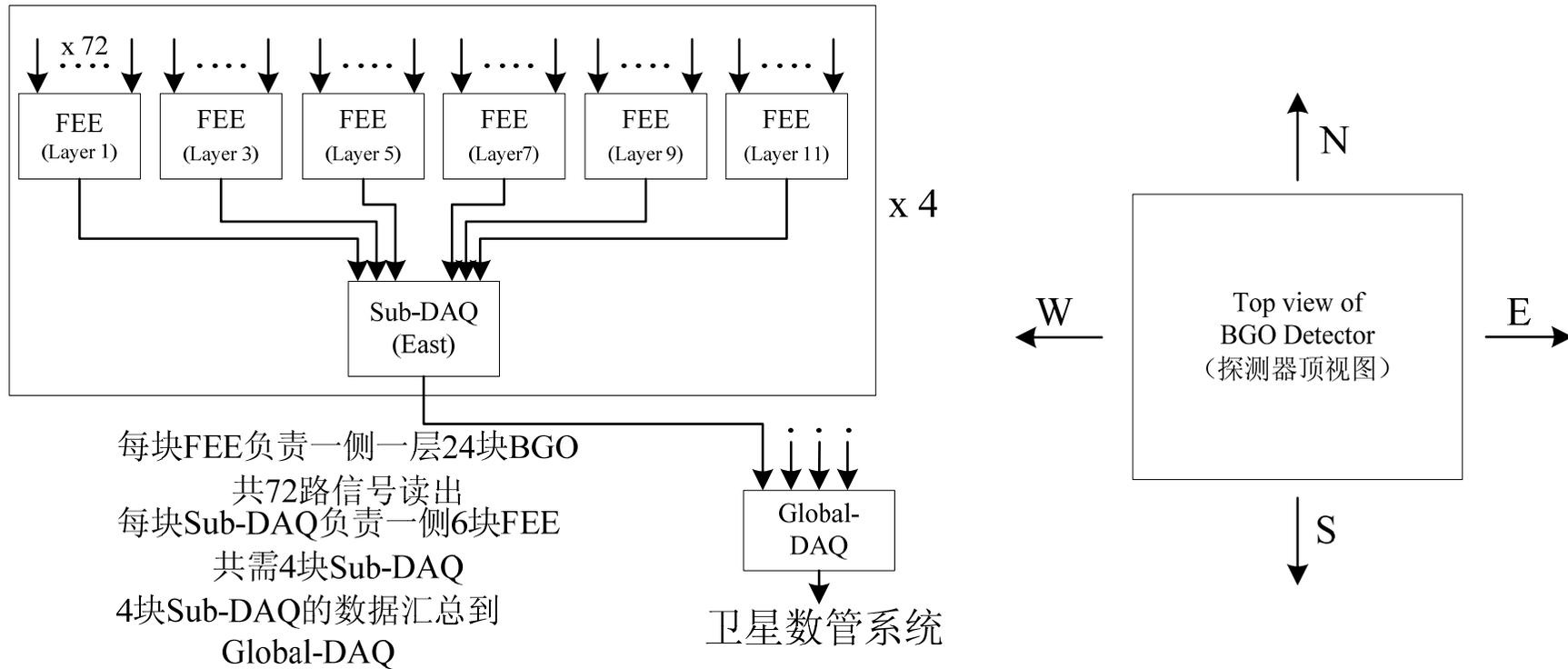
Dy	7	4	1	remarks
q/MIPs (pc)	0.15	0.007	0.00045	Att.=1/20
FEE Rangs	0.075~12	0.525 ~12	0.675 ~12	
No.of MIPs	0.5~80	75~1714	1500~26666	0.5~26666

方案3

↓
可行

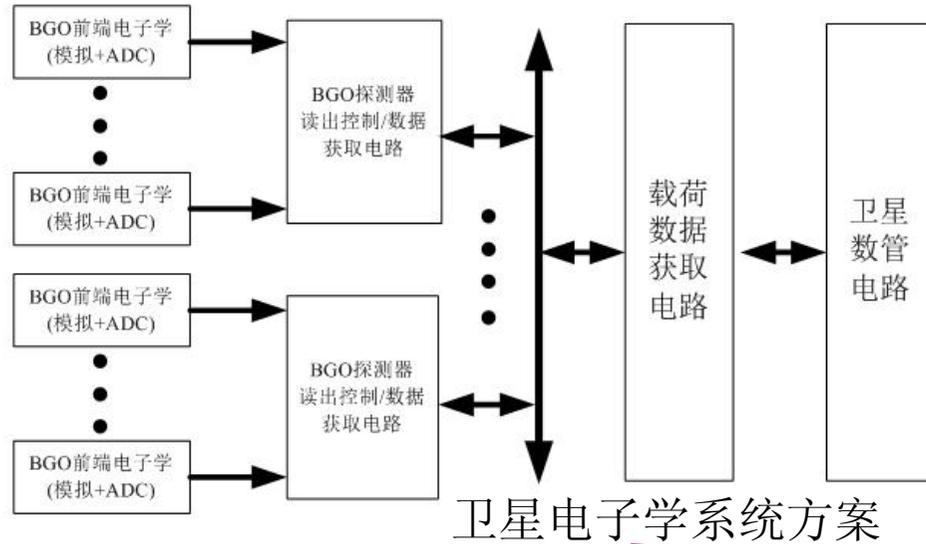
Dy	7	4	1	remarks
q/MIPs (pc)	0.05	0.0023	0.00015	Att.=1/60
FEE Rangs	0.025~12	0.46~12	0.675~12	
No.of MIPs	0.5~240	200~5000	4500~80000	0.5~80000

星上读出电子学的考虑



采用挪威Gamma Medica-Ideas
公司的VA32HDR14.2 芯片，每片
有32路电荷测量通道

预研电路设计方案

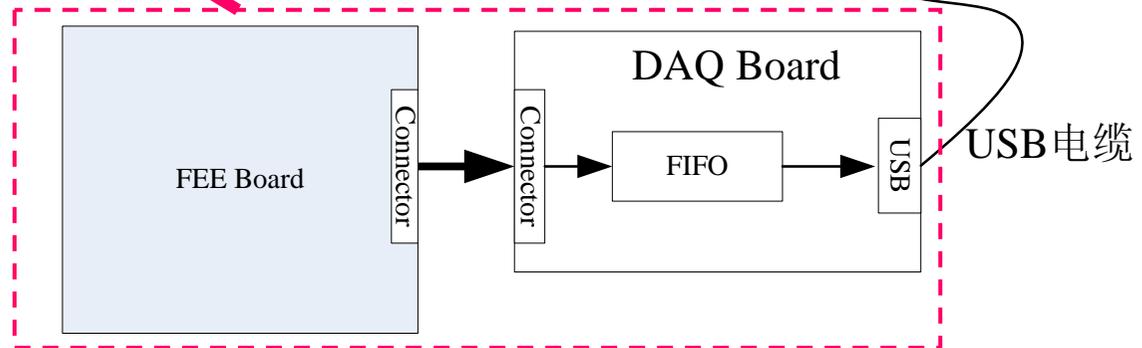


卫星电子学系统方案

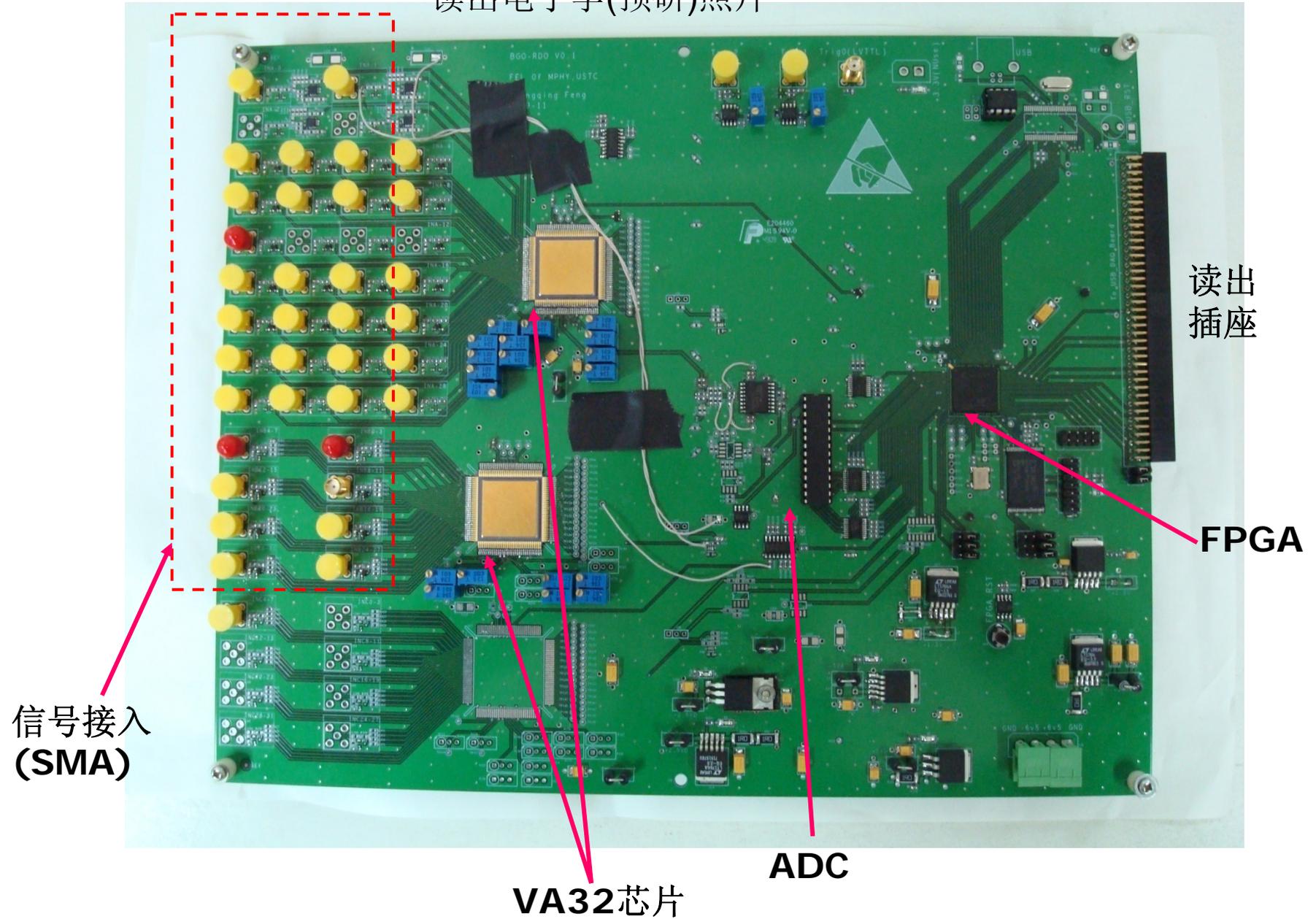
预研

目的:

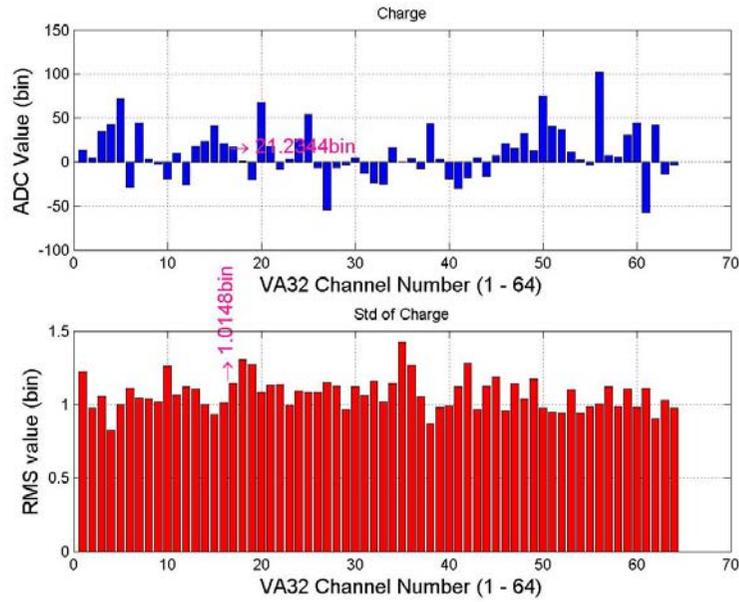
- 1) VA32读出方案预研
- 2) 兼顾BGO晶体测试



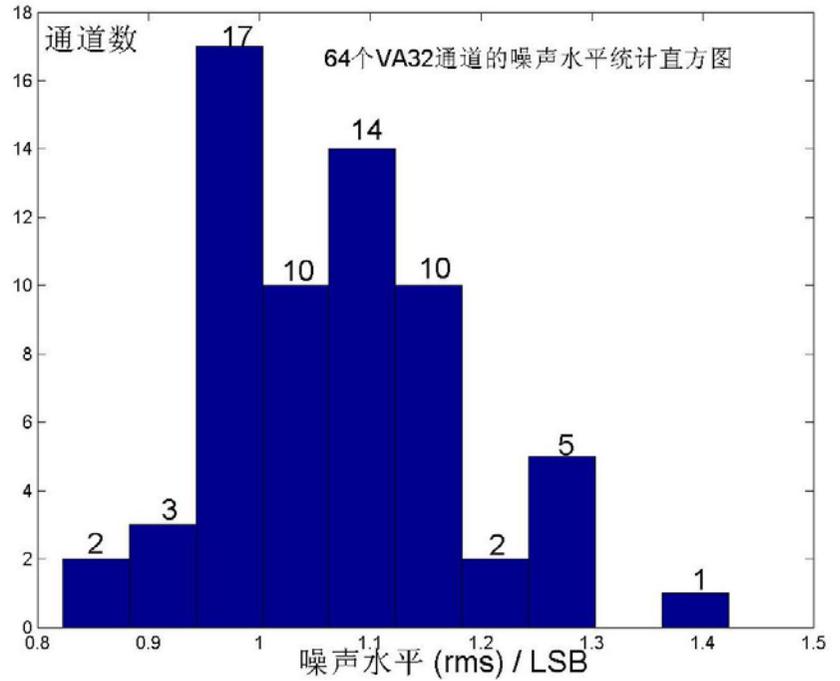
读出电子学(预研)照片



Pedestal(台阶)及噪声测试

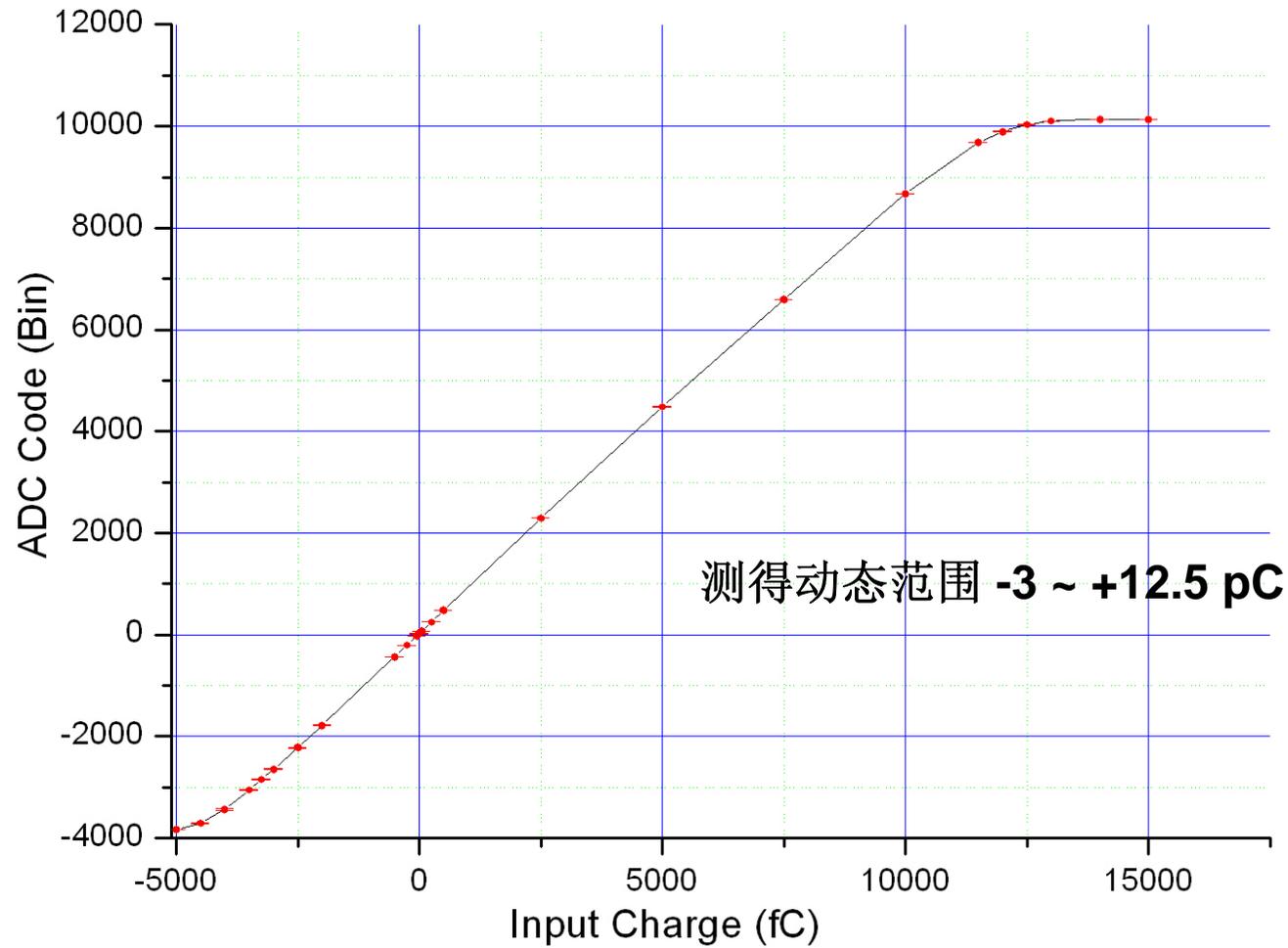


1 Bin (LSB) = 1.3 fC



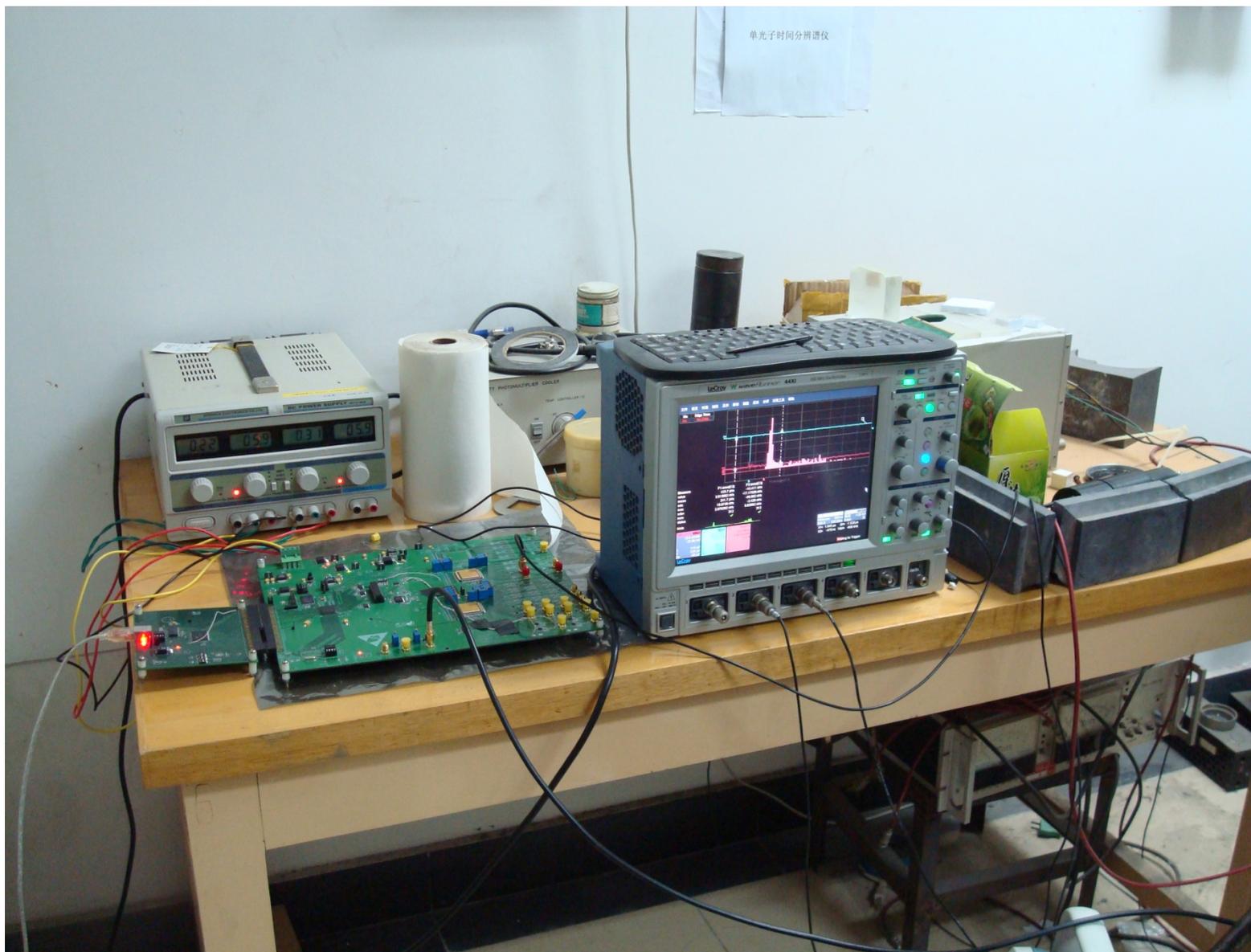
总电子学噪声(rms): 1.3-1.5 fC

电荷线性扫描



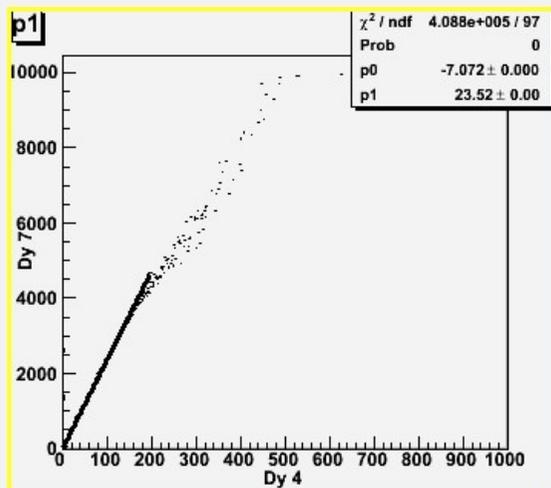
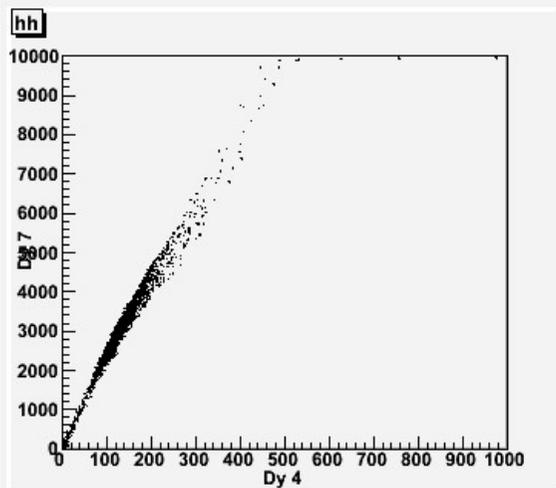
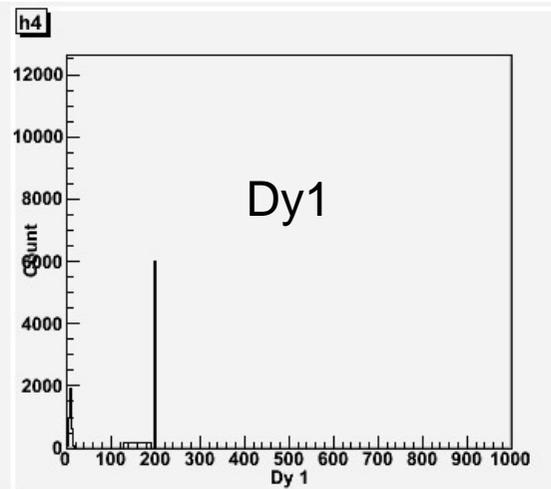
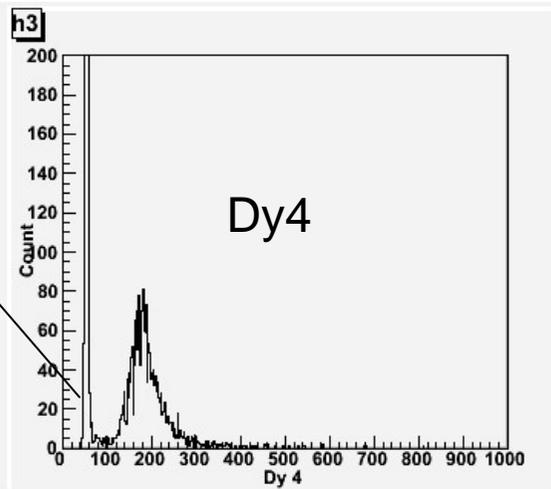
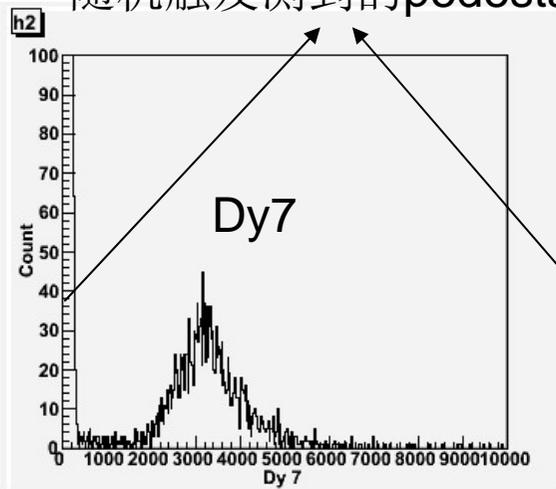
PMT 测试

测试
现场



单光子时间分辨谱仪

随机触发测到的pedestal



宇宙线+随机触发测试

- 1.已完成读出电子学预研
 - 电子学噪声小于1.5 fC
 - 动态范围-3pC ~ +12.5pC
 - PMT测试结果，表明电子学工作正常
- 2.计划
 - 开始宇宙线小系统读出电子学(FEE)与读出控制模块(Sub-DAQ)的设计
 - 进行辐照实验的电子学考虑
 - 触发的考虑
 - 继续配合探测器组进行PMT实验

3.4 对高能质子背景的排斥能力的MC模拟研究

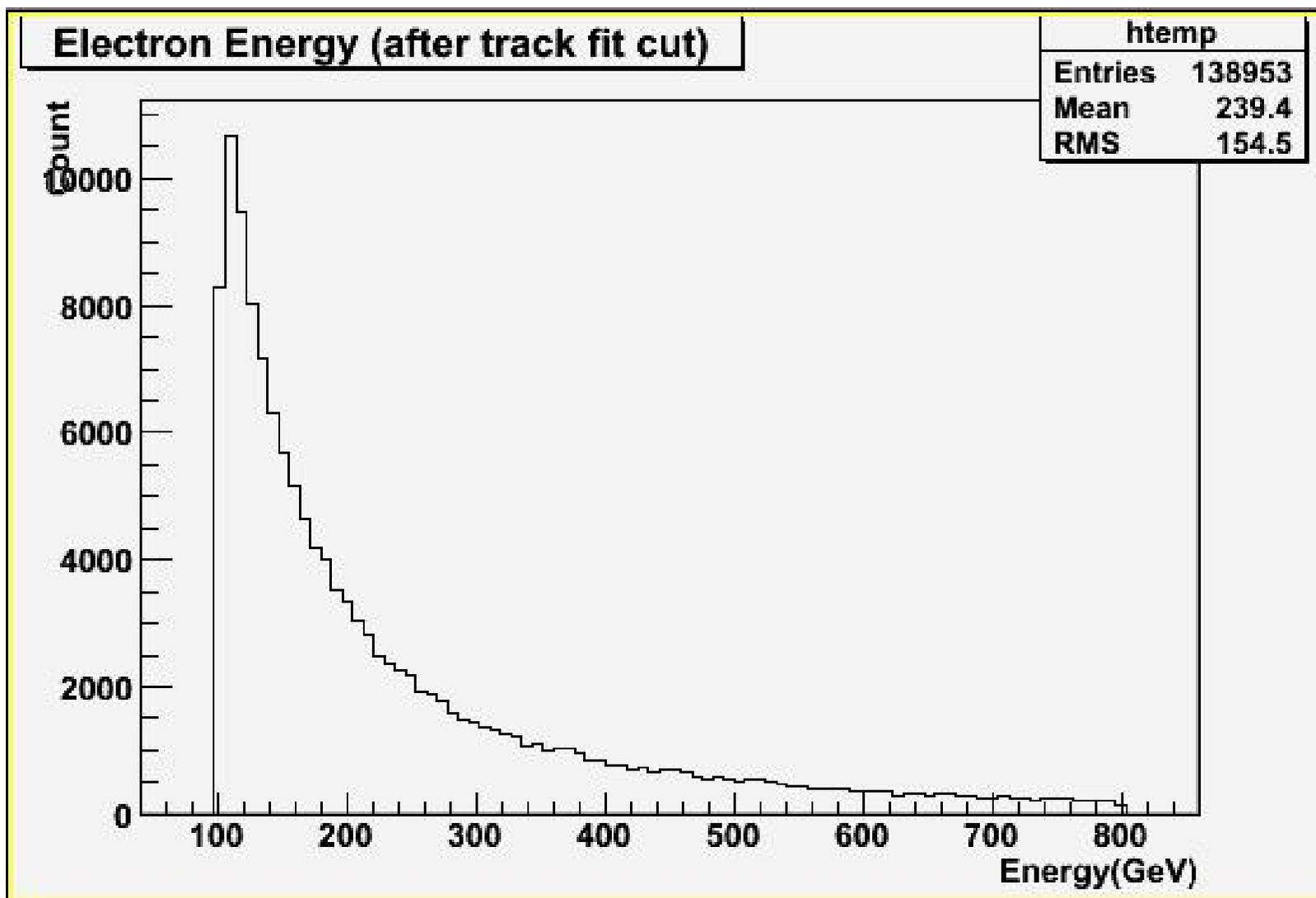
下面引用紫台伍健研究员的一些模拟结果

- 1 在能量较低的情况下(如100GeV及以下), 电子与质子的簇射如Fermi等实验, 可以通过比较探测器浅层簇射轮廓区分
- 2 在能量很高的情况下(~TeV能区), 上述方法则不再适用

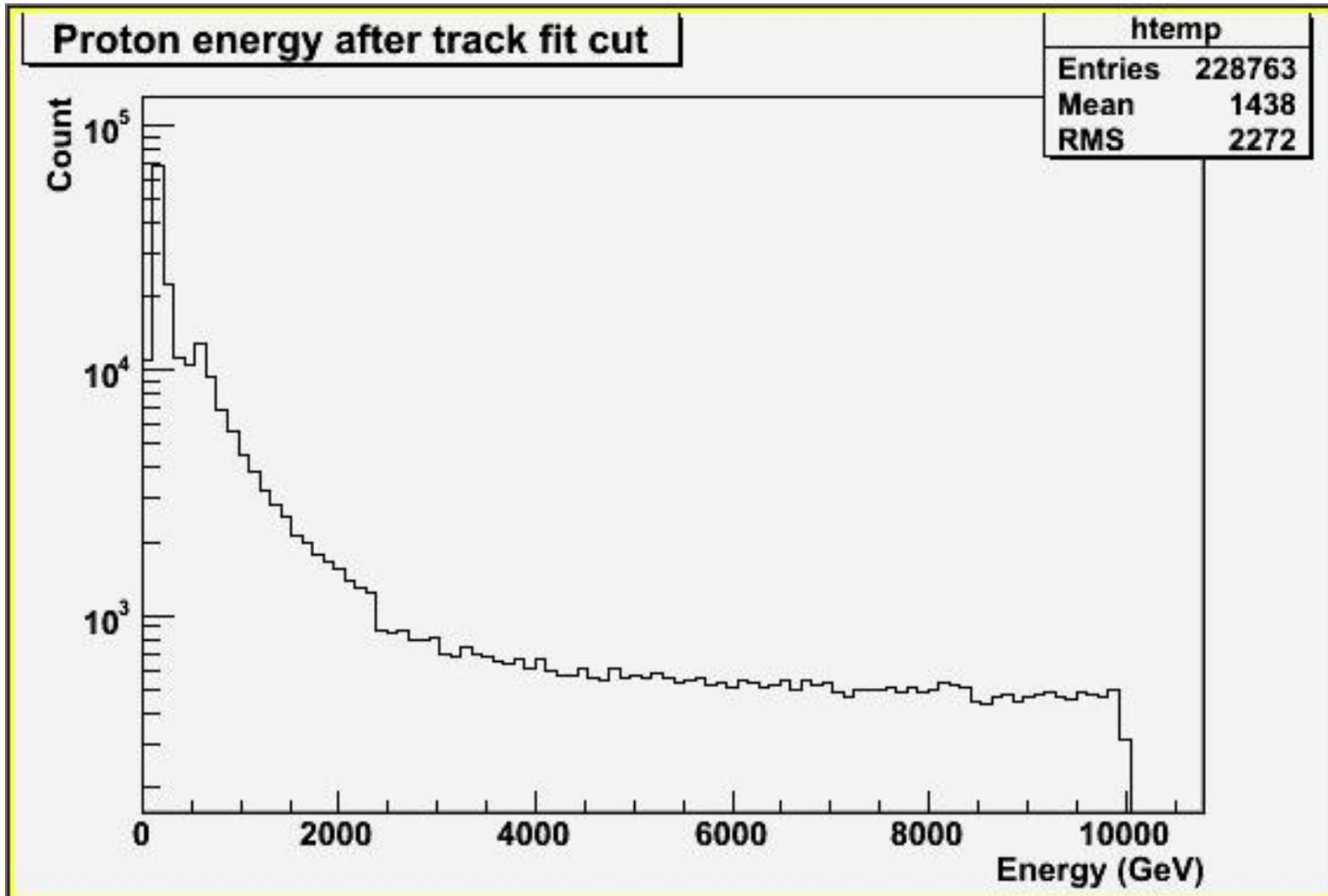
如何排斥几千倍于电子光子信号的质子背景?

数据样本

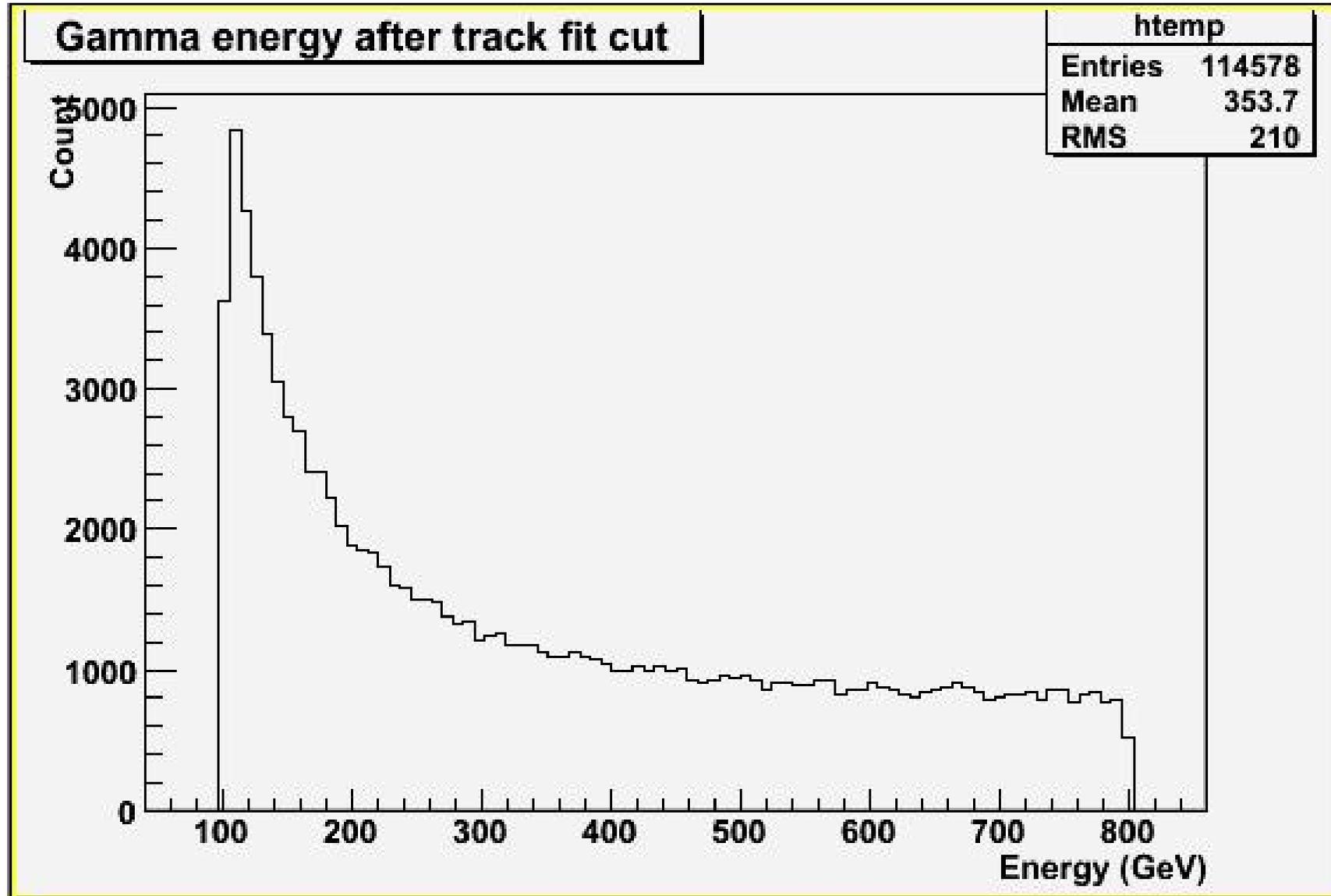
- Electron



- Proton



- Gamma

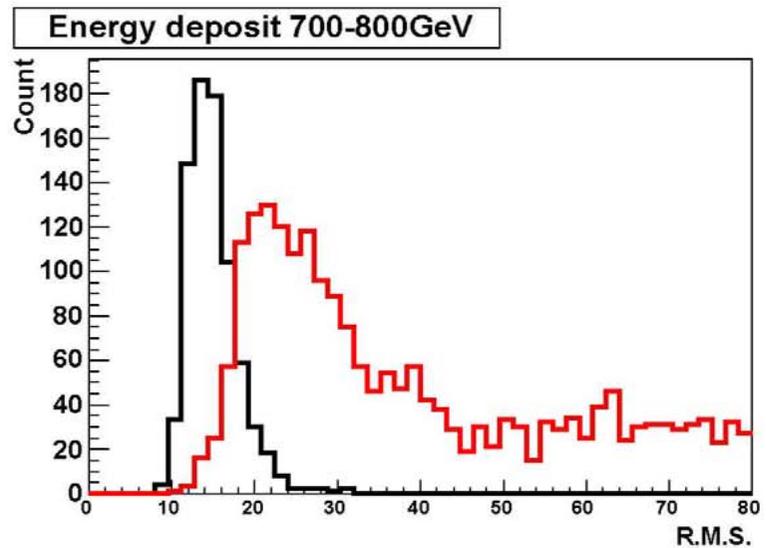
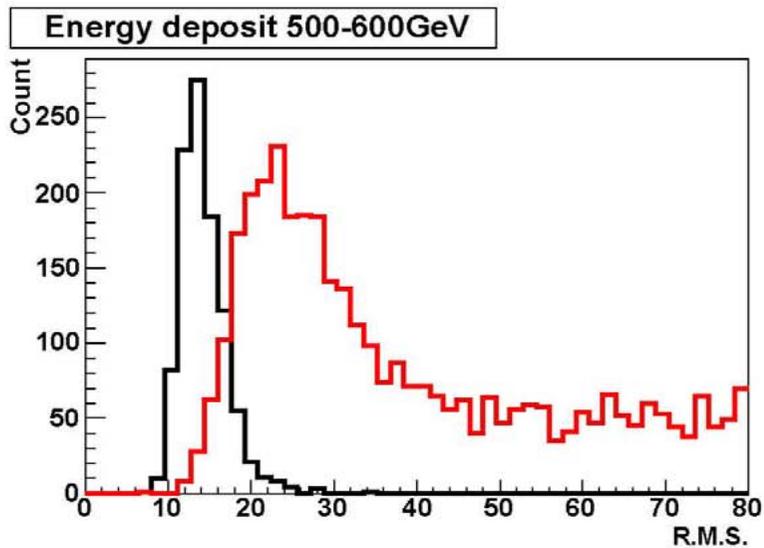
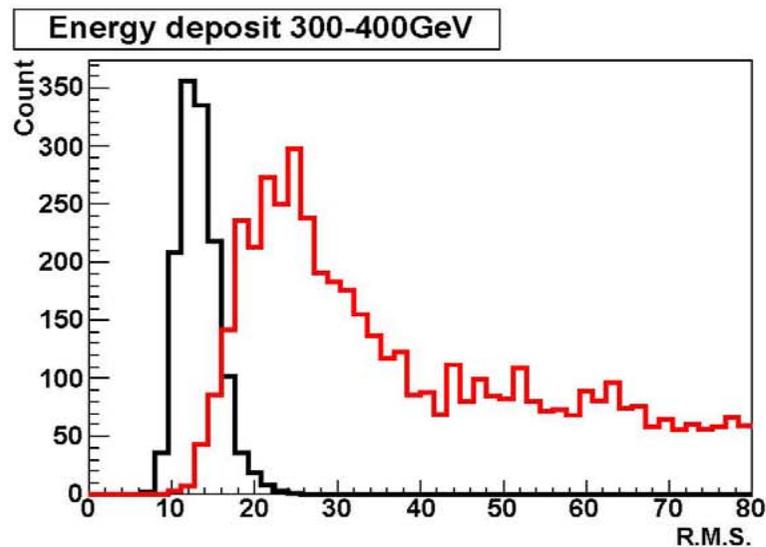
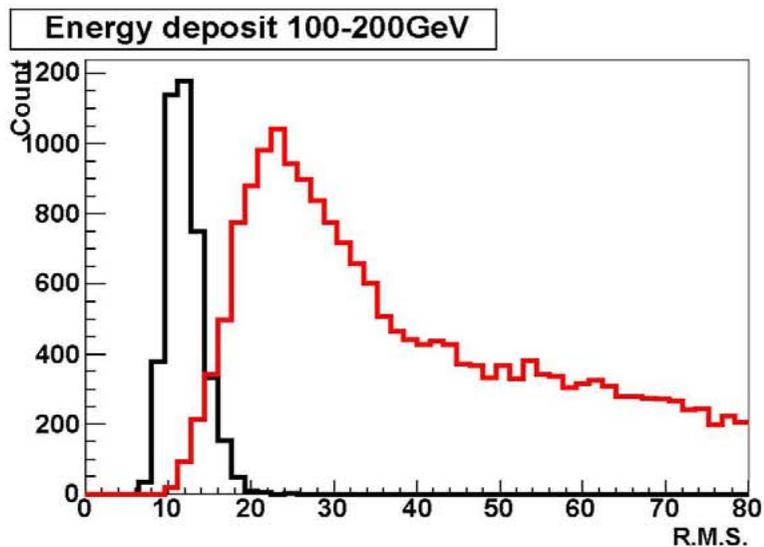


表现簇射轮廓展宽的**R.M.S**值 定义

$$(r.m.s.)^2 = \frac{\sum_{i=1}^n E_i (x_i - x_c)^2}{\sum_{i=1}^n E_i}$$

第2层e/p的R.M.S值在不同能段的比较

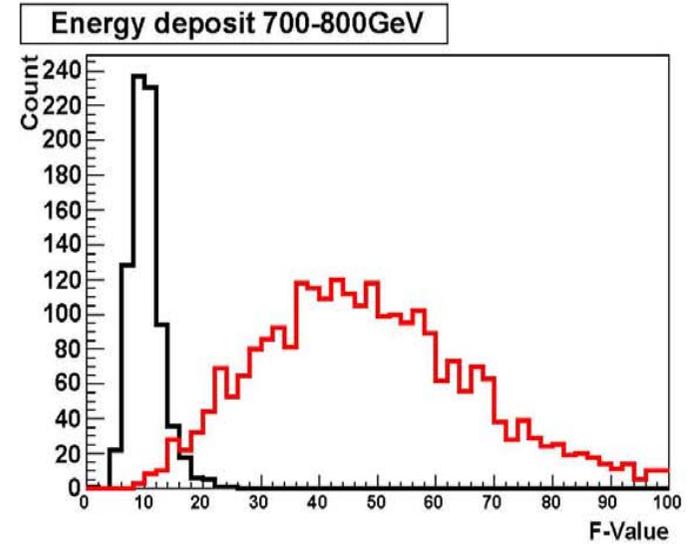
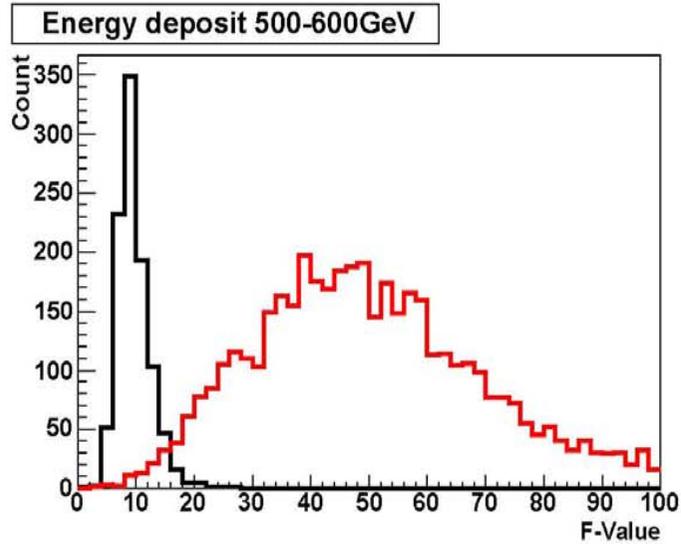
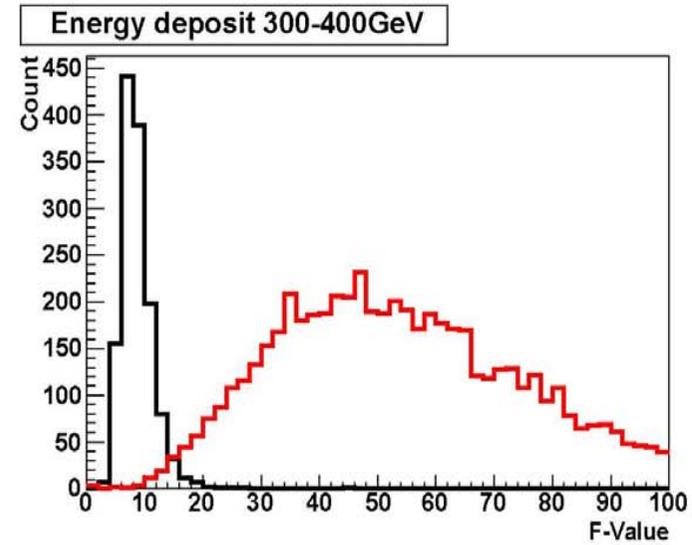
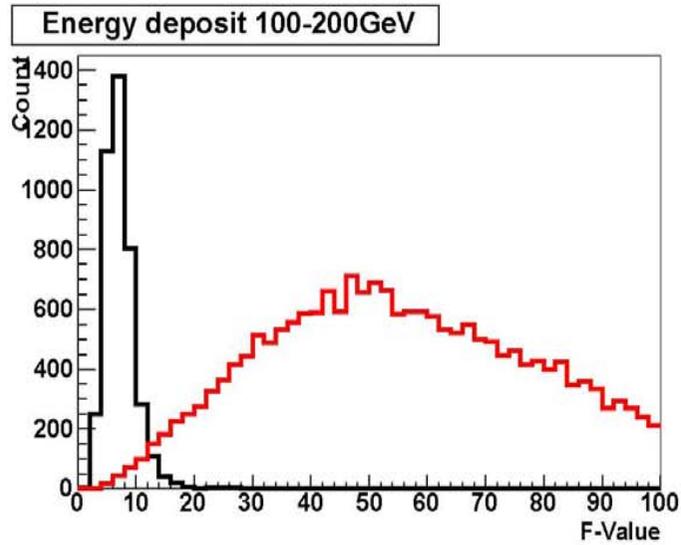
黑: 电子 红: 质子



F-Value(第12层, 即F12)

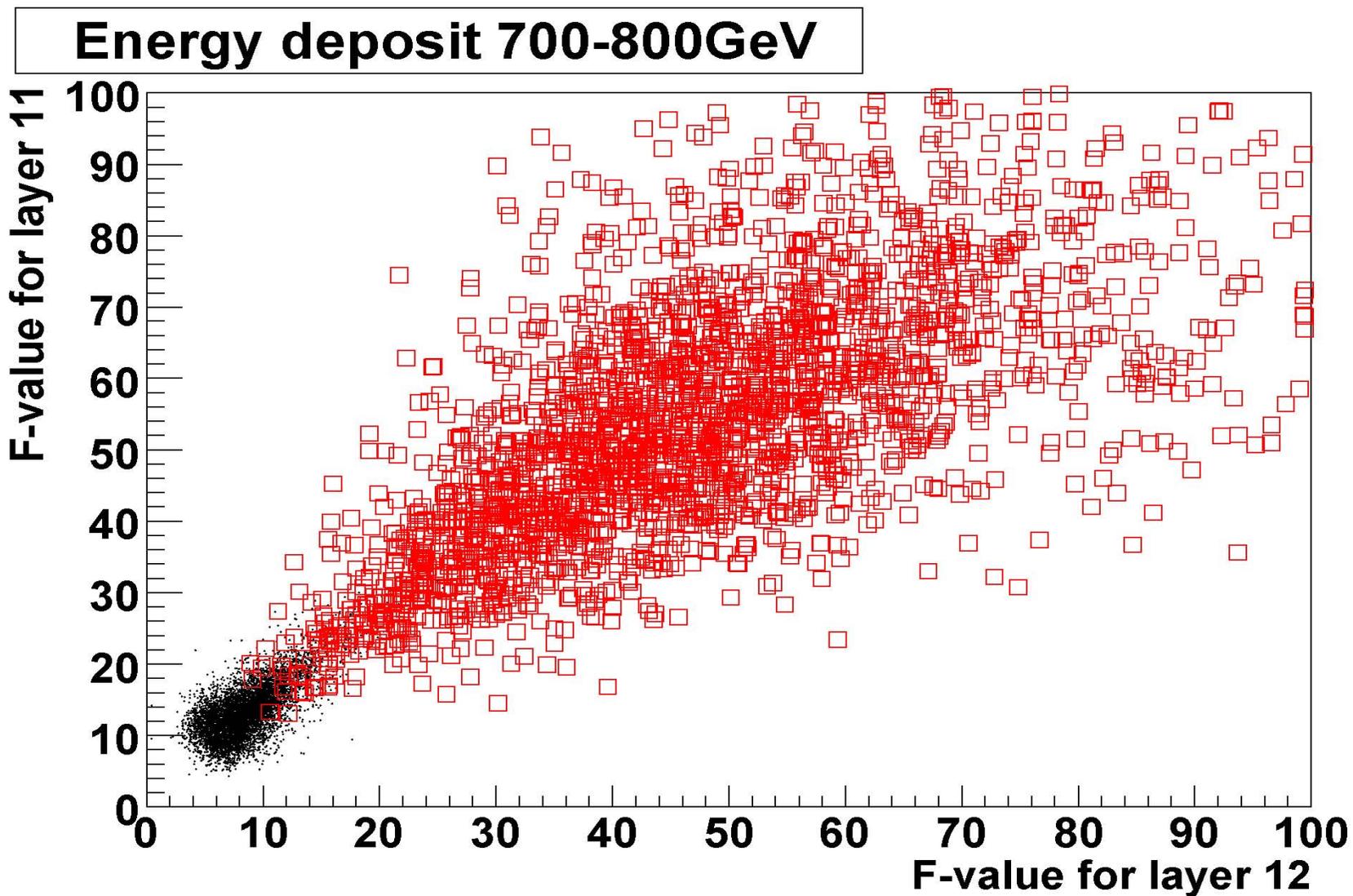
(=该层能量沉积分数 * R.M.S.的平方)

黑: 电子
红: 质子



F11 与 F12的关系

黑: 电子, 红: 质子

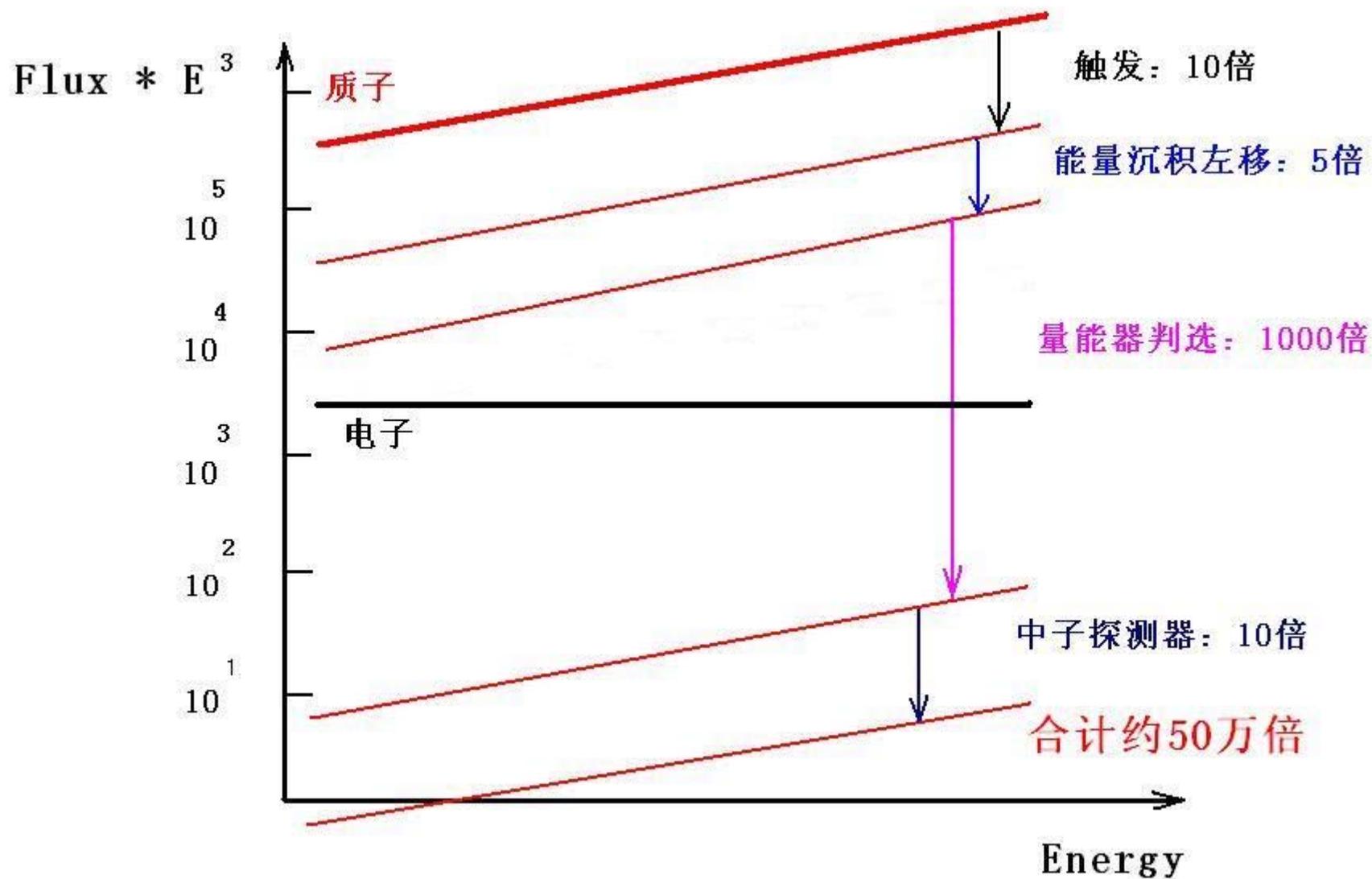


利用F-Value判选e/p的情况

不同 F-Value 值 e/p 判选情况-第 12 层

能段 (GeV)	F12<12		F12<11		F12<10	
	电子效率	质子混入	电子效率	质子混入	电子效率	质子混入
100-200	96.7%	1.1%	94.8%	0.9%	91.4%	0.7%
300-400	95.1%	0.5%	91.9%	0.4%	86.4%	0.3%
500-600	91.8%	0.7%	87.5%	0.5%	80.1%	0.4%
700-800	89.7%	0.4%	83.7%	0.2%	74.5%	0.1%

再结合其他条件所能达到的分辨效果



4 下一步的研究计划

前一段的研究工作重点在可行性研发阶段，下一步在继续完善可行性研究的同时，为工程实施积累数据。

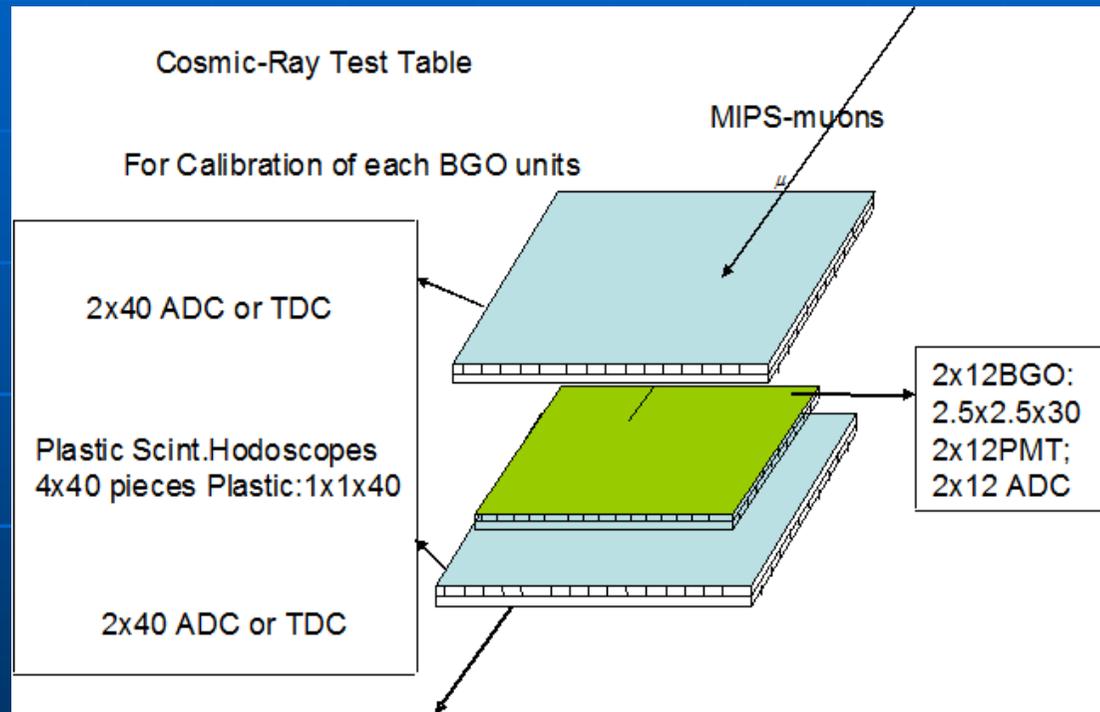
4.1 完善可行性研究，

- 1 打拿极1的灵敏度的实验测定：光源？高能粒子束？宇宙线MIPs？
- 2 选择合适可靠的荧光衰减方式：加吸光片？把BGO荧光衰减数十倍
- 3 BGO在强注量率的辐射场中荧光响应特性。荧光饱和问题。
- 4 R5611 dy1、4、7读出的分压系统的合理布局，压低噪声水平

4.2 逐一测试量能器各个器件，建立数据库。

- 1 PMT增益测量，逐一PMT登记收录数据入库，
- 2 晶体荧光产额和荧光输出均匀性测量，逐一晶体数据入库
- 3 宇宙线刻度实验，将量能器的每一通道dy4、dy7 MIPs谱登录进库

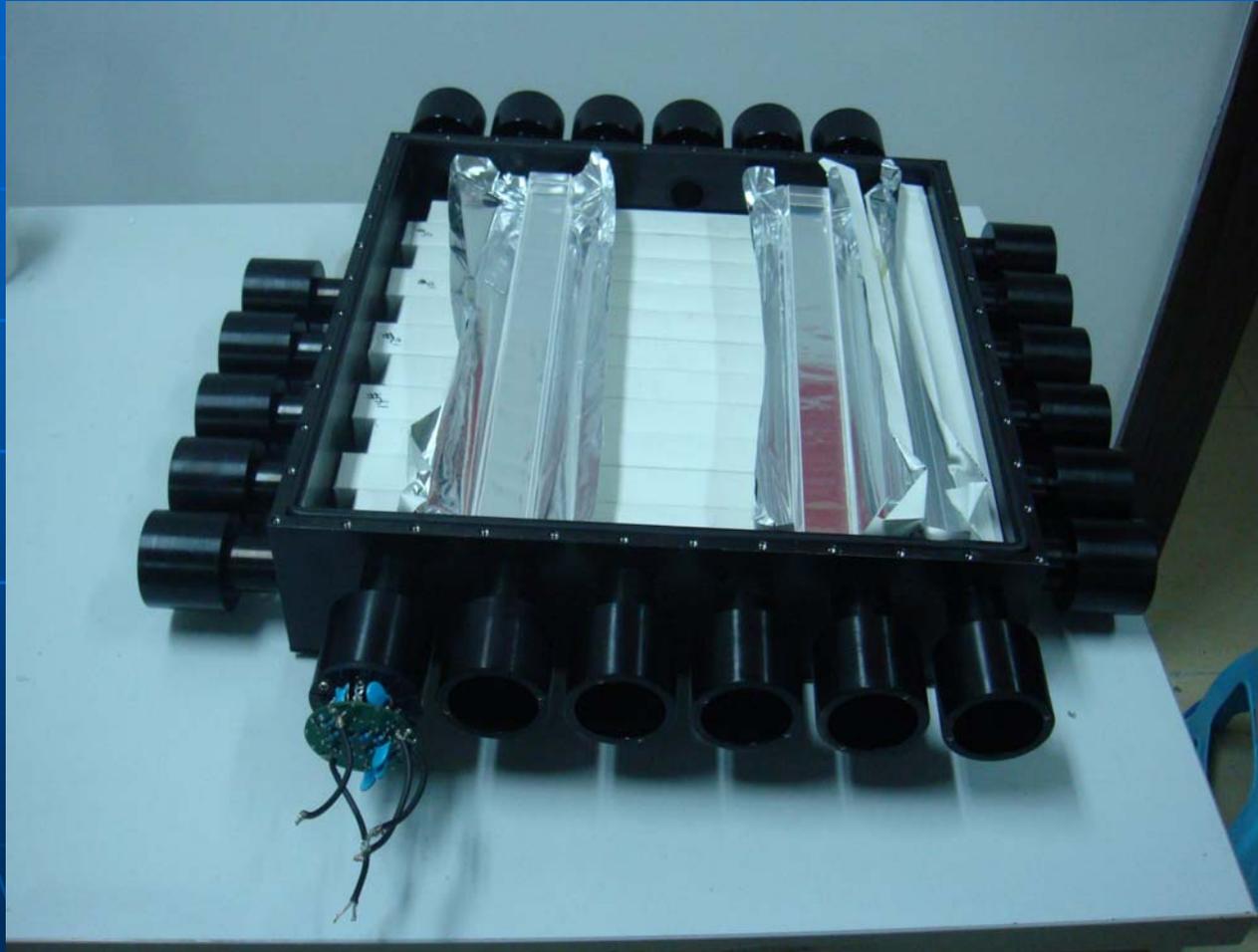
BGO晶体对MIPs粒子的响应特性



每一组BGO（X，Y坐标）的刻度结果建立相应的数据库。为太空运行BGO量能器的高能质子（punch through）实时刻度提供刻度参数；为系统的物理接收度的模拟计算和刻度提供重要参数

方案1 采用兰州所的塑料闪烁阵列描述仪原形，同时检验描述仪的描述性能。

24通道宇宙线检测样品盒



LED驱动的PMT增益刻度的暗箱



正在获取宇宙线MIPs的VA32 FEE+QDC板



谢谢！